マルチスレッドプログラミングの基礎

– 最適なマルチスレッドプログラミングのために –

2014 年 2 月 18 日　初稿

板垣 衛

■ 改訂履歴

稿	改訂日	改訂者	改訂内容
初稿	2014 年 2 月 18 日	板垣 衛	（初稿）

■ 目次

■ 概略.....1

■ 目的.....1

■ サンプルプログラムについて.....1

▼ サンプルプログラムのビルド・実行環境.....1

▼ サンプルプログラム記載の方針について.....2

■ スレッドの仕組み.....2

▼ マルチタスク.....3

● ノンプリエンプティブなマルチタスク.....3

● プリエンプティブなマルチタスク.....4

● タイムスライス.....4

● 並行と並列.....5

▼ OS とカーネル.....5

● モノリシックカーネル.....6

● マイクロカーネル.....7

● ハイブリッドカーネル.....7

● カーネルモードとユーザーモード.....7

● BIOS.....9

▼ プロセスとスレッド.....10

● プロセス.....10

● スレッド.....11

● メモリ空間の保護.....11

● プロセスの終了時のリソースの解放.....11

● サービス／デーモン.....12

■ スレッドとハードウェア.....12

▼ CPU.....12

● CISC と RISC.....13

▼ シングルプロセッサ／シングルコア.....13

▼ マルチプロセッサ／マルチコア／論理プロセッサ.....14

▼ ハイパースレッディング・テクノロジー.....15

▼ コプロセッサ.....16

▼ 浮動小数点演算装置（FPU）／SIMD.....16

- SIMD／MIMD／SISD／MISD 16

▼ GPU 17
▼ メインメモリ 17
▼ RAM と ROM 17
▼ キャッシュメモリ 18
▼ レジスタ 18
▼ GPU メモリ／ユニファイドメモリ 19
▼ DMAC 19
▼ Cell 19
▼ サーバー 20

■ マルチスレッドの意義 20
▼ マルチプロセス 20
▼ マルチスレッドの意義①：同時実行 21
▼ マルチスレッドの意義②：同時接続 21
▼ マルチスレッドの意義③：分散・高速化 21
▼ ゲームの並行処理 22
▼ ゲームでのスレッド活用 22

■ プログラムの動作原理 23
▼ メモリ構造 23
▼ 機械語／アセンブラ／プログラムカウンタ 27
▼ スタック領域 28
▼ スレッドとコンテキストスイッチ 30
▼ スレッドスケジューリング 31
▼ スレッド優先度 31

■ 様々なスレッド 33
▼ fork 33
▼ POSIX スレッドライブラリ版スレッド 37
▼ Win32API 版スレッド 42
▼ C++11 版スレッド 47
▼ OpenMP 52
▼ C++11 版非同期関数 57
▼ ファイバースレッド／コルーチン 61
▼ SPURS／GPGPU／DirectCompute／CUDA／ATI Stream／OpenCL 65
▼ クライアント・サーバー／クラウド／グリッド／RPC／ORB／Hadoop 66

▼ 割り込み／システムコール 68
- 割り込みの具体例：垂直同期割り込み（V-SYNC 割り込み） 68
- 割り込みとコンテキストスイッチ、スタック領域の配慮 69
- 割り込みハンドラ／割り込みサブルーチン（ISR） 69
- 割り込みハンドラの処理 70
- ハードウェア割り込みとソフトウェア割り込み／イベントコールバック 70
- シグナル 71
- タイマー割り込み 71
- システムコール 71

■ マルチスレッドで起こり得る問題① 71

▼ データ破損（不完全なアトミック操作） 72
- 解決策 72
- 同期処理 73

▼ スレッド間の情報共有の失敗①：コンパイラの最適化による問題 73
- 解決策 76

▼ スレッド間の情報共有の失敗②：CPU の最適化による問題 77
- 問題点 77
- アウト・オブ・オーダー実行 77
- メモリ操作命令：ロード／ストア 78
- メモリバリア 78
- 解決策① 78
- 別の解決策：ロックフリー 78
- 解決策② 79

▼ 困難なマルチスレッドプログラミング 80

■ スレッドの同期 80

▼ ビジーウェイト 81

▼ スリープ 81

▼ スリープと Yield 82

■ 様々な同期手法 83

▼ 排他制御（ロック） 84

▼ 排他制御：通常変数でロック（誤ったロック） 84
- Win32API 版 84

▼ 排他制御：ミューテックス 87
- POSIX スレッドライブラリ版 87

- Win32API 版（名前なし）……90
- Win32API 版（名前付き）……92
- C++11 版……95

▼ 排他制御：スピンロック……98
- POSIX スレッドライブラリ版……98

▼ 排他制御：クリティカルセクション……100
- Win32API 版……101

▼ 変数操作による排他制御……103

▼ 変数操作による排他制御：volatile 型修飾子（誤ったロック）……103
- Win32API 版……103

▼ 変数操作による排他制御：インラインアセンブラ……106
- Win32API 版……106

▼ 変数操作による排他制御：アトミック操作（インターロック操作）……109
- Win32API 版：インターロック操作……109
- C++11 版：アトミック操作……111
- C++11 版：アトミック操作（フラグ型）……113

▼ 特殊な排他制御：リード・ライトロック……114
- POSIX スレッドライブラリ版……114
- Windows SDK for Windows Vista 版……119

▼ 有限共有リソース使用権獲得……120

▼ 有限共有リソース使用権獲得：セマフォ……120
- SystemV 版……120
- POSIX スレッドライブラリ版（名前なし）……124
- POSIX スレッドライブラリ版（名前付き）……128
- Win32API 版（名前なし）……131
- Win32API 版（名前付き）……135

▼ モニター……138

▼ モニター：条件変数……139
- POSIX スレッドライブラリ版……139
- C++11 版……145
- Windows SDK for Windows Vista 版……150

▼ モニター：バリア……150
- POSIX スレッドライブラリ版……151

▼ モニター：イベント……158
- Win32API 版（名前なし）……158
- Win32API 版（名前付き）……163

▼ モニター：アトミック操作（インターロック操作）によるビジーなモニター.....169
- 【用語解説】コンペア・アンド・スワップ（CAS）操作 169
- Win32API 版：インターロック操作 170
- C++11 版：アトミック操作 175
- C++11 版：アトミック操作のメモリオーダー指定 179

▼ Call Once 183
- POSIX スレッドライブラリ版..... 183
- C++11 版..... 184
- Windows SDK for Windows Vista 版 185

▼ 先物（promise と future） 186
- C++11 版..... 186

▼ 割り込み：シグナル.....187
- POSIX 版..... 188
- 【用語解説】リエントラント 194

■ マルチスレッドで起こり得る問題②.....195

▼ デッドロック 195
- 【問題】相互ロック..... 196
- 【解決策】相互ロック 196
- 【問題】再帰ロック..... 198
- 【解決策】再帰ロック 198

▼ 【モニターの問題】通知の取りこぼし 199
- 解決策 199

▼ 低速化.....200
- 解決策 200

▼ メモリ不足.....201

▼ ゾンビスレッド（リソースの枯渇） 201

■ 様々なデータ共有手法.....202

▼ volatile 型修飾子、アトミック型の使いどころ.....202
- volatile 型修飾子の使いどころ..... 203
- アトミック型の使いどころ..... 204

▼ スレッドローカルストレージ（TLS） 205
- スレッドローカルストレージの使い方 205
- スレッドローカルストレージの使いどころ..... 206
- スレッドローカルストレージの注意点① 206
- スレッドローカルストレージの注意点② 207

▼ プロセス間のデータ共有①：共有メモリ 207
- SystemV 共有メモリ 208
- メモリマップトファイル 208

▼ プロセス間のデータ共有②：プロセス間通信 208
- シグナル 208
- ウインドウメッセージ 208
- パイプ 209
- 名前付きパイプ（Uninx） 209

▼ プロセス間のデータ共有③：ネットワーク通信 210
- 名前付きパイプ（Windows） 210
- ソケット通信 210
- メッセージキューサービス 211

■ 並列処理の活用 211

▼ MapReduce 211
- 耐障害性／スケールアウト 213

■ 概略

マルチスレッドプログラミングを行う上で、基礎となる用語や仕組み、技術を解説する。

適切なマルチスレッドプログラミングを行うためには、プログラムが動作するハードウェア環境、OS、プログラムの動作原理を意識する必要がある。マルチスレッドを解説する多くのドキュメントも、そうした背景知識を前提にしていることが多い。

本書は、マルチスレッドのプログラミング技法を説明する前に、こうした周辺知識・関連知識の説明を、広範囲に、順を追って説明する。

■ 目的

本書は、マルチスレッドプログラミングに対する理解を深め、環境と目的に合わせた「最適な」マルチスレッドプログラム構造の設計に導くことを目的とする。

本書ではマルチスレッドプログラミングに関係する要素を広範囲に取り上げているが、一つ一つの要素はあまり深く掘り下げていない。そのため、実際のプログラミングの際は専門のドキュメントを参照することになるが、それらはとかく専門用語にあふれている。本書は、そのようなドキュメントを読む解くための手がかりとして、専門用語の説明書・手引き書となることも目的とする。

■ サンプルプログラムについて

本書には多数のサンプルプログラムを、その実行結果とともに記載している。

▼ サンプルプログラムのビルド・実行環境

実行結果には、コンパイラのバージョンはもとより、並列処理の性能はハードウェアの影響を強く受けるため、サンプルプログラムのビルド・動作環境を提示しておく。

【Windows 系】

・ OS：Microsft Windos8.1, 64bit
・ CPU：Intel® Core™ i7-3770K VPU @ 3.5GHz Core×4, HT 有効化, Socket×1
　⇒ 論理プロセッサ×8
・ Compiler：Microsoft Visual Studio 2013 Professional
　⇒標準の Release ビルド設定でビルドしたプログラムを実行

【Unix 系】

・ OS：CentOS 6.4, 64bit
・ CPU：仮想プロセッサ×4 ※上記 Windows の Hyper-V 仮想マシンとして実行
・ Compiler：GCC 4.4.7
　⇒最適化レベル -03 オプションを付けてビルドしたプログラムを実行

※一部 Cygwin6.3,64bit + GCC 4.8.2 で実行したものもあり。

▼ サンプルプログラム記載の方針について

本書に記載するサンプルプログラムは、関数リファレンス的な性質のものではなく、なるべく各技術の性質を把握するための具体的な用例として示している。

そのため、やや長めのコードとなっているが、各技術のポイントとなる箇所には着色して分かり易いようにしている。また、各技術の機能を網羅的に紹介するものではないが、少しでも広範囲にポイントを抑えたものになるようにしている。

各サンプルプログラムは、同系統技術の比較のために、大部分が同じコードになっているものも多い。しかし、ドキュメントが全体的に長いこともあり、差分での記載とせず、それぞれ完全に動作する状態のサンプルを示す方針としている。これにより、部分的にドキュメントを参照したい時に、広範囲に読み返さなくても良いものとしている。

■ スレッドの仕組み

まず、「スレッドとはなにか？」を解説する。
主に、スレッドの挙動とスレッドがなににによって管理されるのかを説明する。

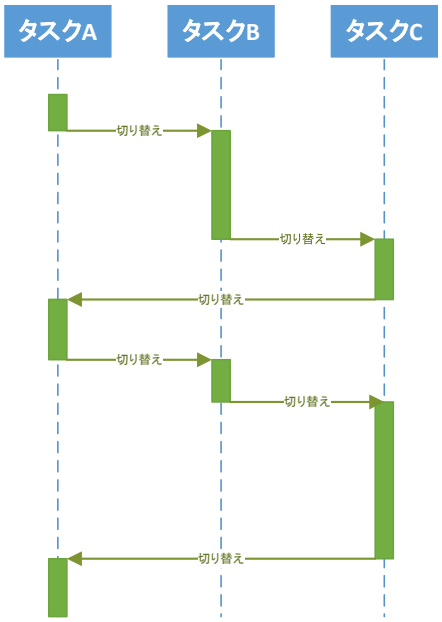
▼ マルチタスク

「スレッド」とは、「マルチタスク」の実装手段の一つである。

「マルチタスク」には大きく分けて二つの方式があり、どの方式が使われるかは OS に依存する。

● ノンプリエンプティブなマルチタスク

OS が関与する部分が少なく、タスク自身が自発的に CPU を解放しないと他のタスクに制御が移らない方式。



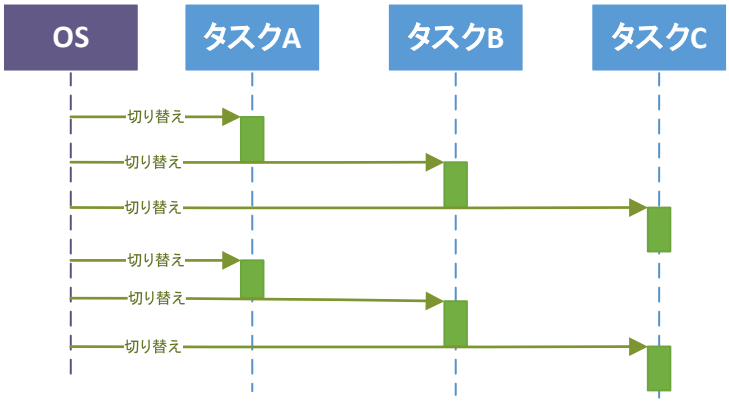
Windows95 より前の Windows3.1 はこの方式。例えば「`while(1){}`」と書いたプログラムを実行すると、同時に起動している「メモ帳」や「電卓」などのアプリケーションも動作できずに止まってしまう。

この方式は OS の負担が非常に軽いため、現在でも部分的に利用されている。「ファイバースレッド」の節で後述する。

● プリエンプティブなマルチタスク

OS の制御により、短い時間で区切って複数のタスクを順に実行する方式。

非常に短い間隔で素早く切り替え続けることで、複数のタスクが同時に実行されているように見せる。



今時のゲーム機向けのプログラミングも、通常のスレッドはこの方式で扱われるものと思って良い。

なお、少し古いゲーム機では OS そのものが無いため、「ノンプリエンプティブ」な方式で扱うか、スレッドを使うこと自体がほとんどなかった。

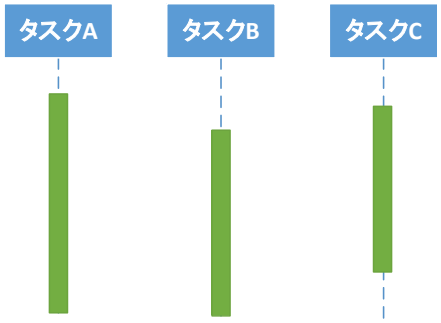
● タイムスライス

タスクの実行を時間で区切ることを指して「タイムスライス」と呼ぶ。

● 並行と並列

ここまでの説明は、「複数のタスク」を「一つの演算装置」が「平行」（Concurrent）に実行する手法のことである。一人の人が複数の仕事を受け持っている状態である。

マルチプロセッサ、マルチコア、SPU、GPGPU など、「複数の演算装置」を活用した処理では、「並列」（Parallel）のタスクが実現できる。複数の人が分担して仕事を行う状態である。



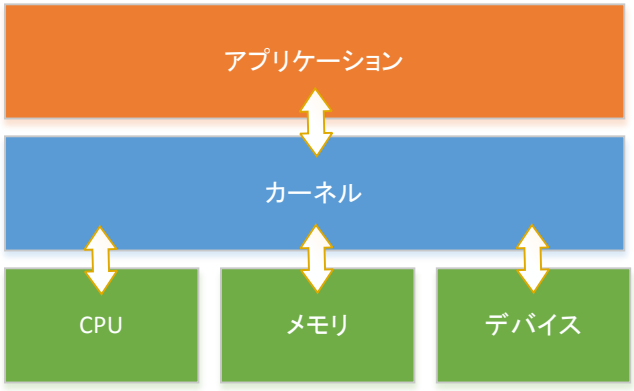
なお、厳密な用語の定義としては、「平行」は「並列」を包含する。「複数のタスク」を「複数の演算装置」が実行することもまた「平行」である。

あまり神経質に用語を使い分ける必要はないが、本書においては上記の通りの使い分けをしている。

▼ OS とカーネル

「マルチタスク」の制御は「OS」が行う。

「OS」とは「Operating System」の略語である。前述のタスクの制御や、メモリ管理、入出力装置（デバイス）の制御、ファイル操作などを行う基本プログラムを意味する。



「ゲーム」を含め、ユーザーが作成するアプリケーションプログラムは、この OS を通

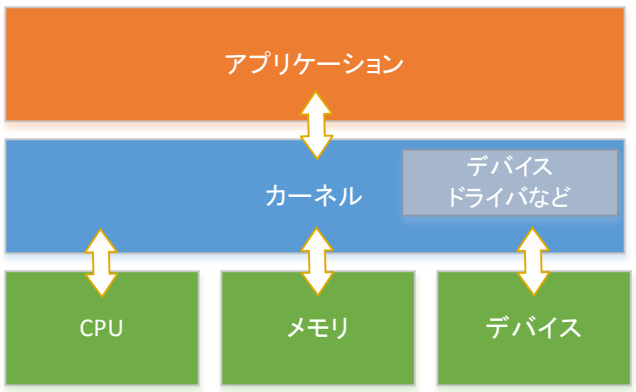
してデバイスにアクセスし、OS の制御のもとで CPU の割り当てやメモリの確保が行われる。

OS は多数のプログラムで構成されている。各種デバイスを制御する個々のプログラムを「デバイスドライバ」と呼び、タスク制御やメモリ管理を行う OS の中核プログラムを「カーネル」と呼ぶ。

スレッドの制御を行うのは「カーネル」である。カーネルには、大きく分けると 2 種類の方式がある。

● モノリシックカーネル

Wikipedia の説明を引用すれば、「『入出力機能やネットワーク機能、デバイスのサポートなど OS の一般的な機能』をカーネルと同一のメモリ空間に実装・実行する手法を言う」との事。



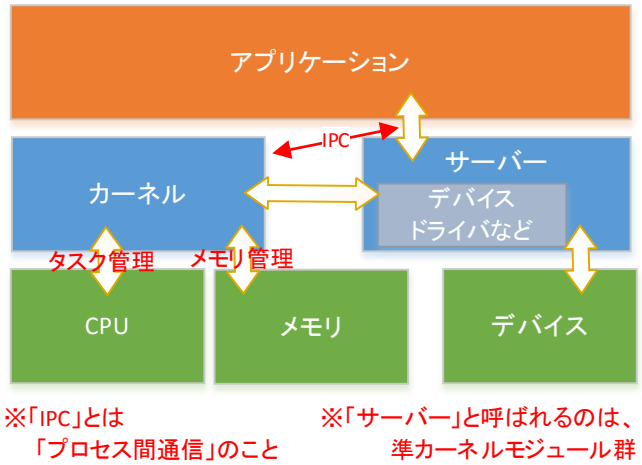
単純には、デバイスドライバがカーネルに一体化しているような状態。そのため、多くの機能を取り込んだカーネルは肥大化する。また、デバイスドライバに深刻な問題があると、OS 全体が停止するような事態も招く。

もう一つの「マイクロカーネル」と比べると古い方式で、「時代遅れ」とされることもあったものの、比較的仕組みが単純なこともあり、オーバーヘッドが少ないため、今なお Linux を含む多くの Unix 系 OS などで採用されている。Linux などでは、デバイスドライバを OS 起動後に読み込む「ローダブルモジュール」にも対応している。

語源は「一枚岩」を意味する「モノリス」から。（映画「2001 年宇宙の旅」に登場する物体）

● マイクロカーネル

Wikipedia の説明を引用すれば、「OS が担う各種機能のうち、必要最小限のみをカーネル空間に残し、残りをユーザーレベルに移すことで全体の設計が簡素化でき、結果的に性能も向上できるという考え方。カーネル本体が小規模な機能に限定されるので『マイクロカーネル』と呼ばれるが、必ずしも小さな OS を構成するとは限らない。」との事。



旧来のモノリシックカーネルの大規模な改善を意図して設計された OS。

カーネル自体は必要最小限にとどめ、デバイスドライバなどの他の「準カーネル」機能を切り離して構成している。そのため、OS の機能拡張や OS 全体を止めずに一部の機能をアップデートすることなどが可能。反面、機能間の相互通信が多く、オーバーヘッドが大きく、メモリ使用量も大きい。

マイクロカーネルは WindowsNT 以降の Microsoft 系 OS で採用されているが、グラフィックスドライバーなどのオーバーヘッドが大きかったことから、カーネルから直接アクセスできるデバイスも設けられており、純粋なマイクロカーネルではない。

● ハイブリッドカーネル

「モノリシックカーネル」と「マイクロカーネル」のハイブリッド。

前述の通り、Microsoft の WindowsNT 以降の OS はこの類に入る。

また、Apple の OS X は FreeBSD のモノリシックカーネルをベースにしたハイブリッドカーネル。

● カーネルモードとユーザーモード

OS の制御により、プログラムの実行は「カーネルモード」と「ユーザーモード」と

いう二つの「動作モード」に切り分けて扱われる。

アプリケーションのパフォーマンスをより最適なものにするためには、これらの動作モードを（多少は）意識したほうがよい。

ユーザーモード

「ユーザーモード」はアプリケーション側の処理モードのことである。

他のアプリケーションのメモリに干渉することや、ファイルシステム、デバイスを破損させるといったことがないように保護された動作モードである。

ユーザーモードで動作するプログラムは、処理に問題があっても OS 全体がクラッシュするようなことにはならない。

カーネルモード

「カーネルモード」は OS 側の処理である。

ユーザーモード側で行われるメモリ確保やファイルアクセス、デバイス操作といった処理は、カーネルモード側の処理が呼び出されて実行される。

直接メモリやファイル、デバイスを操作する特権モードであり、この処理に問題があると、OS 全体がクラッシュすることがある。

デバイスドライバ

「デバイスドライバ」の動作モードは、通常カーネルモードである。

しかし、マイクロカーネルの場合はユーザーモードで動作し、デバイスドライバから OS が保護される。

Windows では、パフォーマンスのために純粋なマイクロカーネルをやめて、グラフィックカードなどのデバイスドライバはカーネルモードで動作するようにしているが、一部のデバイスドライバはユーザーモードで動作する。

アプリケーション

OS 上で実行させるプログラムを「アプリケーション」と呼ぶ。

アプリケーションはユーザーモードで実行される。

システムコールとコンテキストスイッチ

ユーザーモードからカーネルモードのプログラムを呼び出す際は、「システムコール」を使用する。

システムコールとは、OS 側の処理の呼び出しのことである。システムコールが呼び出されると、「コンテキストスイッチ」という処理が発生し、動作モードをカーネルモードに切り替える。

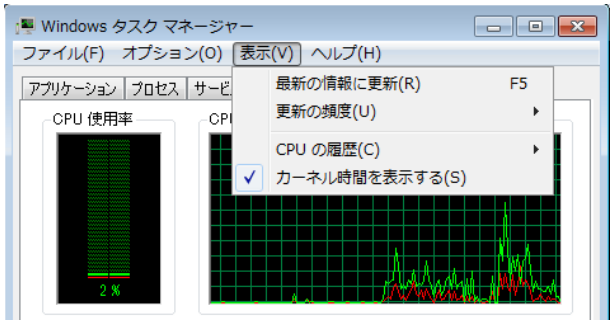
コンテキストスイッチには多少の（微少な）処理負荷かかるので、パフォーマンスのためにも、システムコールは多用しすぎないほうがよい。

システムコールをアプリケーション側のプログラムで直接使用することはあまりないが、API の中でシステムコールを使用しているものは多い。例えば、malloc() 関数や fopen 関数は内部でシステムコールを使用している。システムコールを使用しているかどうかは、SDK のマニュアルに明記されていることもある。

なお、「コンテキストスイッチ」とはプログラムの切り替え処理のことであり、タスク（スレッド）の切り替えの際も発生する。この説明については改めて後述する。

カーネル時間

Windows では CPU 使用率を表示する際に「カーネル時間を表示する」というオプションを指定できる。



この「カーネル時間」が「カーネルモード」の処理負荷を意味する。

カーネル時間が高まるのは、デバイスへのアクセスやグラフィックス、ネットワーク通信などが込み合った時である。

● BIOS

コンピュータ起動時に最初に実行されるプログラムは、OS ではなく、ROM に組み込まれている「BIOS」（バイオス＝Basic Input/Output System）である。

BIOS が HDD や CD などから OS をロードして実行している。

その昔は、BIOS から OS を介さず、直接 FD や CD、カートリッジのゲームを起動していた。

▼ プロセスとスレッド

「マルチタスク」の実行単位は「スレッド」であり、スレッドは「プロセス」によって管理される。プロセスの管理とタスクの制御は「OS」が行う。

● プロセス

OS に対して「メモ帳」や「Excel」などの「プログラム」（.exe ファイルや.elf ファイルなど）の実行が呼び出されると、OS はまず「プロセス」を生成し、プロセスに対してプログラムをロードし、実行のためのメモリを割り当てる。

基本的に各プロセスは独立しており、互いに干渉することなく動作する。
同じプログラムを複数実行した場合（例えばメモ帳を二つも三つも起ち上げた状態）、それぞれ別のプロセスとして動作し、互いに干渉しない。

なお、ゲーム機の場合、「プロセスの概念そのものがない」か、「実行できるプロセスは一つだけ」というのが普通。

子プロセス

プロセスは「子プロセス」というプロセスを生成できる。
両者はメモリ空間を共有できないが、Unix 系 OS では多数のメモリ状態やオブジェクトがコピーされ、オープンしているファイルディスクリプタなどの共用ができ、Windows 系 OS ではパイプによる入出力ハンドルの共有などができる。
親プロセスは子プロセスの終了を待ったり、子プロセスを終了させたりといった制御が可能。

● スレッド

プロセスが起動する際、「メインスレッド」を生成し、「スタック領域」を確保して、プログラムの実行を開始する。

一つのプロセス内には、メインスレッドのほか、複数のスレッドを動作させることができる。

スレッドの生成は、関数を呼び出す際に行う。スレッド生成用 API に対して関数とスタック領域を指定すると、OS がその関数をスレッドとして実行し、マルチタスクのスケジューリングの対象に加えて制御する。

● メモリ空間の保護

プロセス内の全スレッドはメモリ空間を共有できる。

しかし、別プロセスのメモリ空間にはアクセスできない。プロセスのメモリ空間は、OS が制御する「仮想メモリ空間（仮想アドレス）」によって保護されるため、メモリアドレスを直接指定しても、他のプロセスに干渉することはない。

なお、プロセス間で情報を共有する手段は幾つも用意されている。どのような手段があるかは後述する。

逆にスレッド内だけで（スコープが）保護されたメモリ領域を扱うこともできる。これは「TLS＝Thread Local Strage」（スレッドローカルストレージ）と呼ばれる仕組みである。詳しくは後述する。

● プロセスの終了時のリソースの解放

メインスレッドが終了すると、プロセスが終了する。

この時、「未解放のメモリ」（メモリリーク）、「クローズしていないファイルディスクリプタ（FILE*など）」、「終了していないスレッド」、「クローズしていない同期オブジェクトなどの各種ハンドル」など全ての未解放リソースに対して、終了処理が行われる。

ただし、きちんと終了できずに「ゾンビプロセス」という形で残ってしまうケースもある。何より、メモリリーク等を見過ごしていると、長時間のアプリケーション実行でメモリ不足などの深刻な障害をもたらす。終了処理に頼らず、逐一きちんとリソースの解放を行うのがプログラミングの作法である。

【補足】fork による子プロセスを生成した時、親プロセスが子プロセスの終了を wait しないと子プロセスがゾンビ化する。

● サービス／デーモン

Windows の「サービス」、Unix 系 OS の「デーモン」は、バックグラウンドで常時稼働する「プロセス」のことである。

GUI を持った「フロントエンド（プロセス）」に対して、姿の見えない「バックエンド（プロセス）」といった呼び方もする。

サービス／デーモンは、ログインしなくても OS 起動と同時に実行するように OS が管理する。

Web サーバーなどのサーバー系のシステムに多く用いられる形態。何らかのリクエストが来るまで待ち続けるような処理が多い。

なお、「デーモン」は「demon」（悪魔）ではなく「daemon」（守護神）。

■ スレッドとハードウェア

マルチスレッドプログラミングでは、対象となるハードウェアを意識しなければならない。

使用するハードウェア／OS に応じた判断要件がある。

例えば、「同期にスピンロックを使うべきか？（別コアにスレッドを分散させる必要あり）」、「SPU や GPU（GPGPU）のような副プロセッサを利用するべきか？（プロセッサ専用のプログラムが必要）」、「多数の副プロセッサがあるなら、一部のプロセッサは特定の処理に専門化して、専用プログラムを読み込む手間をなくようにすべきか？（SPU でよく使われる手法）」 など。

また、スレッドの扱い方や同期の方法など、プログラミング手法が OS によって異なる。

▼ CPU

「Central Processing Unit」（中央処理装置）のこと。コンピュータで最もメインとなる演算装置を指して「CPU」と呼ぶ。

微妙に意味の違う同義語があるので以下に幾つか列挙する。

- MPU ..... 「Micro-Processing Unit」。中央処理装置を一個の半導体チップに集積したもの。元来の「CPU」は複数の半導体チップの連携で演算処理を行う集合体のことを指していたが、もはや MPU と CPU は同義となっている。
- PPE ..... 「Power PC Processor Element」。PS3 に採用された

「Cell」プロセッサの中のメインプロセッサコア。

・ APU ..... AMD が開発した、CPU と GPU を合成したプロセッサ。

● CISC と RISC

CPU は、その命令セットアーキテクチャによって大きく二つに分類される。

CISC（Complex Instruction Set Computer: シスク）と、RISC（Reduced Instruction Set Computer : リスク）である。

CPU の発展に伴って、その命令セットが複雑化してきたことを背景に、単純な命令を指向して RISC が考案された。複雑なことを１命令でこなせるように命令セットがふくれあがった CISC に対して、命令セットを減らして回路を単純化することで高速化を図ったのが RISC。

なお、CISC という言葉は RISC の誕生に伴って、対義語的に用いられるようになったものである。

RISC の登場は CISC の淘汰には至らず、現状はどちらも主流である。Intel 系は CISC で、ARM 系や PowerPC 系は RISC である。どちらもゲーム機に採用されている。

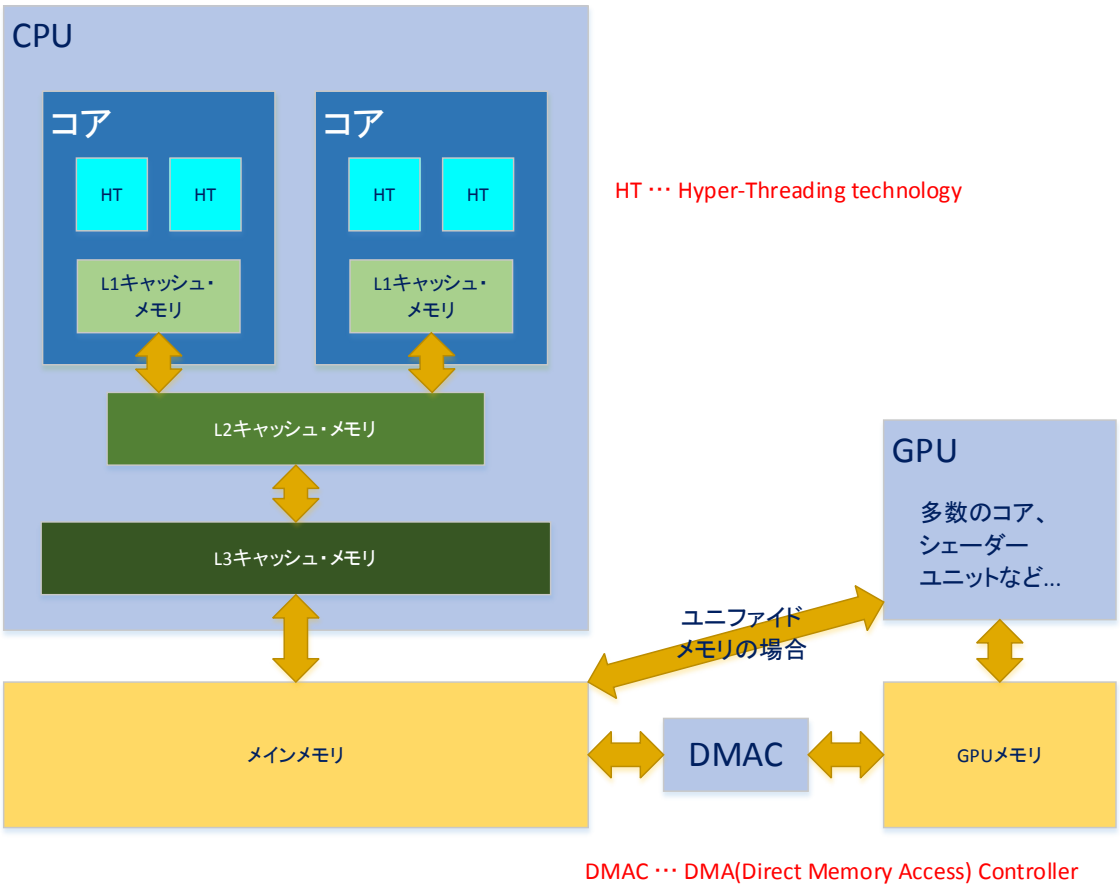
▼ シングルプロセッサ／シングルコア

まず、「プロセッサ」と「プロセス」は言葉が似ているが全く別物なので注意。

「プロセス」は先に説明した通り論理的なプログラムのインスタンスであるが、「プロセッサ」は物理的な演算装置のことを意味する。

「シングルプロセッサ」は「コンピュータの中に一個のプロセッサ（物理的な演算装置パッケージ）が搭載された状態」のことで、「シングルコア」は「一個のプロセッサの中に一個のコア（演算装置の演算部）が搭載された状態」のことである。

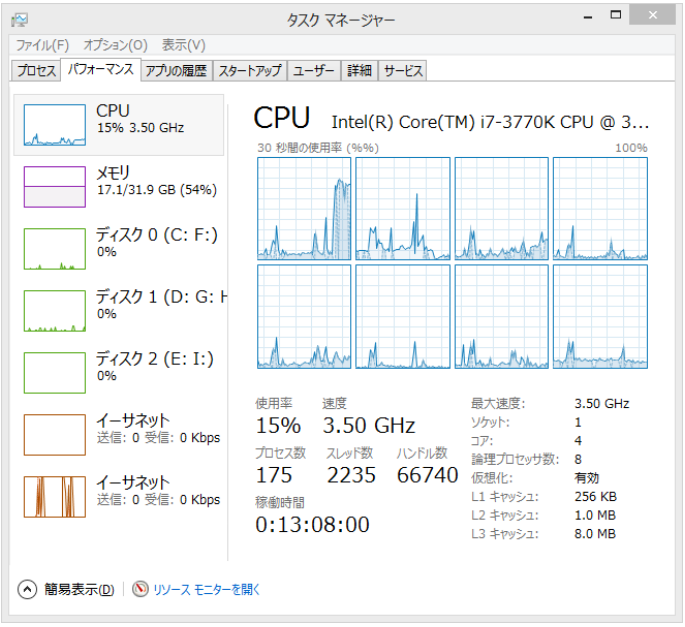
▼ マルチプロセッサ／マルチコア／論理プロセッサ



この図は、「一つの CPU」に「二つのコア」が搭載されている「マルチコア」プロセッサの例である。Intel の CPU では、さらに「HT = Hyper-Threading technology」（ハイパースレッディング・テクノロジー）によって、一つのコアで「二つのスレッド」の平行処理に対応する。これを OS から見ると、四つの CPU があるように見えるため、「四つの論理プロセッサ」と呼ぶ。

Windows8 から見た、4 コア 8 論理プロセッサの CPU の例を示す。L1～L3 キャッシュメモリのサイズも表示されている。

Windows8 のタスクマネージャの例：



同様の「プロセッサ」が複数ある状態が「マルチプロセッサ」である。上記の「タスクマネージャ」では「ソケット」と表記されている。

GPU もプロセッサの一つではあるが、メインのプロセッサではないので、通常マルチプロセッサに数えない。

マルチプロセッサは、複数の CPU ソケットを持った基板（マザーボード）に、全く同じスペックの CPU を複数装着して動作させるのが通常である。サーバー系によく用いられる。

かつては複数の演算装置で並列処理をするにはマルチプロセッサにするしかなかったが、マルチコアの登場により、安価で低消費電力な並列演算装置が一般化し、それに伴ってマルチスレッド処理も並列化の意識が高まっているのが現状である。

余談になるが、一つの CPU に同種のコアのみを搭載しているものを「ホモジニアスマルチコア」と呼び、異種のコアを搭載しているモノを「ヘテロジニアスマルチコア」と呼ぶ。後者の代表例には、PS3 に採用されている「Cell」（PPE コア×1＋SPE コア×8）、AMD 社の「APU」（CPU + GPU）がある。

▼ ハイパースレッディング・テクノロジー

一つの物理的な演算装置（コア）上で二つの処理をスケジューリングすることで二つの「論理プロセッサ」（論理コア）に見せる技術である。

「整数処理」と「浮動小数点処理」のように、命令パイプラインの異なる処理の同時実行に特に有効とのこと。とはいえ、複数の処理系のコードが同時にキャッシュメモリに乗っていないと並列処理できないので、必ずしも最適化できるわけではない。

もともと CPU の稼働率を向上させるための技術であるため、単純に２倍の性能が得られるわけではない。

なお、「ハイパースレッディング」の呼称はインテルの商標であるが、同技術は他社の演算装置にも用いられており、サーバー用途に 4, 8 論理コアの製品もある。

▼ コプロセッサ

メインの CPU 以外の演算装置を「コプロセッサ」（co-prosessor, 副処理装置）と呼ぶ。コプロセッサには FPU や GPU などがある。

▼ 浮動小数点演算装置（FPU）／SIMD

本来の CPU は整数しか演算できないため、浮動小数点の演算は独自に実装する必要があった。詳細は省略するが、浮動小数点データの指数部に基づいて仮数部をビットシフトしてから演算するといった手間がかかる。

この手間のかかる演算を高速化するために、専用の演算装置が用いられる。それが「浮動小数点演算装置」（FPU = Floating Point Unit）である。

FPU の形態は、CPU と一体化しているものもあれば、独立した演算装置のものもある。例えば、PS2 に搭載されていた VU（Vector Unit: ベクトル演算ユニット）は独立した FPU の一種。

現在の CPU では、浮動小数点演算演算装置は CPU に統合され、CPU の命令セットが浮動小数点演算用に拡張されている。

さらには、複数の浮動小数点演算をまとめて行うための「SIMD」命令が拡張搭載されている。主な SIMD 演算命令セットには「MMX」（MultiMedia eXtensions）、「SSE」（Streaming Simd Extensions）などがある。また、GPU の演算装置は基本的に SIMD である。

● SIMD／MIMD／SISD／MISD

「SIMD」（Single Instructoin, Multi Data stream：シムド）は、一回の命令で複数の演算をまとめて行うものである。この SIMD の活用は、ゲームプログラミングではとても意識する必要がある。

128bit（レジスタ）の SIMD 演算の場合、4 つの 32bit 値をまとめて処理できる。256bit なら 8 つである。レジスタ長が固定されるので、演算する値の数も固定される。3 つの値を演算したい時も、一つはダミーとして、4 つの値を演算することになる。

SIMD 演算は、ベクトルや行列の演算に多用される。

SIMD は複数の値（＝値セット）に対して一つの命令をまとめて実行する。この値セットに対して、同時に二つの命令を実行するのが「MIMD」（Multiple Instruction, Multiple Data streams：ミムド）である。MIMD では、一つの値セットを複数のプロセッサやコアに振り分けて、それぞれで別個の演算を行う。

他、単独の値に対する演算は、「SISD」（Single Instruction, Single Data Stream）「MISD」（Multiple Instruction, Single Data Stream）と呼ばれる。

▼ GPU

「GPU」（Graphics Processing Unit：グラフィックス演算装置）は、グラフィックス描画専用の演算装置である。多数のコアやシェーダーユニットなどで構成される。

グラフィックス描画以外の演算にも GPU を応用する技術が「GPGPU」（General-Purpose computing on GPU）。

▼ メインメモリ

プログラムの本体と各種データはメインメモリに置かれる。プログラムも突き詰めればデータの一種である。

CPU はプログラムとデータを逐次メインメモリから読み出して実行する。

▼ RAM と ROM

通常「メモリ」と言えば「RAM」（Randam Access Memory：ラム）のことである。読み書き可能なメモリのこと。

それに対して、「ROM」（Read Only Memory：ロム）というのは、読み取り専用で書き込むことができないメモリのことである。BIOS プログラムの保存領域や、物理的に書き込みできない CD-ROM／ゲームカードなどに使われる言葉。

なお、ROM の中には「フラッシュ ROM」などの、書き換え可能な ROM もある。

ゲームでは、データを ROM から RAM に読み込んで処理するのが普通。

▼ キャッシュメモリ

CPU が読み出したメインメモリのデータは、CPU 上の「キャッシュメモリ」に蓄えられる。

L1 キャッシュ（Layer-1 キャッシュ＝一次キャッシュ）→L2 キャッシュ→L3 キャッシュ→メインメモリの順に、アクセスが高速（L1 キャッシュが一番速い）。L3 キャッシュを搭載しているのは比較的最近の CPU。

CPU は、高速に動作するために、必要が生じるまでメインメモリに極力アクセスせず、キャッシュメモリを優先的に扱う。

キャッシュによる効率化は、C 言語などの高級言語でプログラミングする際も多少は意識したほうが良い。

例えば、一般にインライン展開はプログラムサイズと引き替えに高速化されるものであるが、ループ処理の中で同じ関数を何度も呼んでいるような処理の場合、全てインライン展開されると長い処理となり、キャッシュに全部乗らなくなってしまうと、むしろ関数呼び出しの方がキャッシュの読み替えが起こらず、高速に動作する、といったことがある。

実際どの程度のサイズが妥当かは見極めが難しいが、何にしても、繰り返し実行されるような処理は短くまとめておくと、効率的になる。

ほかには、遅延評価が可能な演算に対しては（求めた計算結果をすぐに使って次の演算を行う必要がない場合）、命令と値をプールして、後でまとめて演算するような効率化手法もある。

長い計算がある場合、なるべく一本の計算式にまとめているほうが最適化されやすい（可読性は落ちるが）。

▼ レジスタ

CPU は演算に使う値を「レジスタ」という領域に保存して扱う。

レジスタは変数の一種のようなものであるが、C 言語などのように自由な変数を使えるわけではなく、CPU によって扱えるレジスタの種類と数が固定されている。

C 言語などが扱う多数の変数はメモリ上で扱われ、都度レジスタに読み込んで演算して書き戻すことで処理する。（メモリからレジスタへの読み込みを「ロード」と呼び、レジスタからメモリへの書き戻しを「ストア」と呼ぶ）

メモリアクセス（キャッシュメモリへのアクセスを含む）は、CPU の処理としては比較的遅いので、一度レジスタに取り込んだ変数は極力メモリに書き戻さないで処理する。

コンパイラはそのような処理になるように最適化を行う。特にライフサイクルの短い変

数の場合、メモリに置くことすらせず、レジスタに直接値を与えて完結するようなプログラムにする。

変数の少ないプログラムは、このような事情から高速になる。

このような処理の最適化がコンパイラによって行われることは、マルチスレッドプログラミングでは非常に意識する必要がある。

レジスタだけで処理が完結してメモリに書き戻されない変数は、他のスレッドから見えず、値の変化をキャッチすることができないといった問題が生じるためである。

この問題については詳しく後述する。

▼ GPU メモリ／ユニファイドメモリ

GPU はグラフィック描画のための専用のメモリを持つ。VRM（Video RAM）とも呼ばれる。シェーダープログラムも GPU メモリ上に置かれる。

GPU メモリはメインメモリから独立したメモリであるため、CPU が直接アクセスすることができない。そのため、「DMAC」などの他のメモリコントローラーを使用してアクセスする。

GPU が専用メモリを持たず、CPU とメインメモリを共有するのが「ユニファイドメモリ」である。

AMD は、「APU」（Accelerated Processing Unit／AMD Fusion プロセッサ）で CPU と GPU を統合し、さらに、「hUMA」（heterogeneous Unified Memory Access：ヘテロジニアス・ユニファイドメモリアクセス）という名称のユニファイドメモリ技術により、メモリ空間の統合も図っている。

▼ DMAC

「DMAC」（Direct Memory Access Controller）は、メモリを転送する装置である。単に「DMA」とも呼ぶ。

CPU とは独立して動作し、メインメモリと GPU メモリの間のデータ転送や、メインメモリ内での大きなデータの転送などに用いられる。

▼ Cell

「Cell」（Cell Broadband Engine：セル）を構成する中で「制御」を担当する汎用プロセッサコアが「PPE」（Power PC Processor Element）。1 個の PPE に対して 8 個の「SPE」（Synergistic Processor Element）が演算を担当する。計 9 個のプロセッサコアで一つの

プロセッサを構成している。

「SPU」（Synertistic Prosessor Unit）は、「SPE」の中の演算装置コア本体のこと。SPU は自身が持つ 256KB のローカルメモリ（LS = Local Store）にしかアクセスできず、かつ、PPU 向けのプログラムとは別の SPU 専用プログラムしか実行できない。

そのため、一部の関数をスレッド化するような用法は使えず、専用プログラムと演算対象のデータをメインメモリから SPU に転送して処理し、演算結果をまたメインメモリに転送する。

このような構造のため、細かい演算を頻繁に実行させるような用法には向いておらず、ある程度まとまったデータを一括処理させるような使い方をする。

なお、メインメモリと LS との通信には、SPE の DMA ユニットが用いられる。

▼ サーバー

コンピュータの物理的な垣根を越えて、ネットワーク通信を使って別のコンピュータに演算を行わせる手法がある。

この演算の要求を受け付けるコンピュータが「サーバー」である。

「グリッド・コンピューティング」では、CPU や GPU のみならず、サーバーも含めて「演算リソース」として抽象化し、処理を分散して並列処理を行う。

■ マルチスレッドの意義

マルチスレッドをゲームプログラミングに適用する意義を考察する。

▼ マルチプロセス

まず、複数の処理を同時に実行するマルチタスクの意義について考えると、分かり易い所で「マルチプロセス」がある。（「マルチプロセッサ」とは別物なので注意）

マルチプロセスは、その名の通り複数のプロセスを同時に実行することである。一台のコンピュータ上で複数のアプリケーションを実行し、一台のコンピュータを複数のユーザーが同時に操作することを可能とする。

Widnows ユーザーにはイメージしにくいかもしれないが、その昔のコンピュータの使い方は、一つのホスト（サーバー）に、多数の端末（クライアント／ユーザー）が接続して同時に操作をしていた。

高価なコンピュータを何台も購入せずに、複数のユーザー、複数のアプリケーションを動作させることがマルチプロセスの意義である。

また、シングルプロセッサ、シングルコアの古いコンピュータでもマルチプロセスが実現できていたのは、一つのアプリケーション／ユーザーが、ミリ秒単位でコンピュータを占有しているわけではないため、それぞれの空き時間で十分に共有が行えたためである。

ユーザーがキーボードを連打する時のごく短い間隔であっても、コンピュータにとっては CPU を明け渡すのに十分な時間である。

▼ マルチスレッドの意義①：同時実行

「マルチスレッド」とは、一つのプロセスの中で複数の処理を同時に行うことである。

利用例としては、ユーザーがアプリケーションを操作し続ける裏で長く時間のかかる計算を実行するといったものがある。

ここで重視しているのは、操作と計算を「同時に」実行することである。

ユーザーの操作を禁止して計算に専念した方が処理は早いが、わざわざ同時に実行するのは、「（多少レスポンスが悪くなっても）ユーザーが操作できない時間を極力作らない」という意義があるからである。また、「計算を途中キャンセルできる」といった処理中の操作を受け付けたい場合もスレッドを活用したほうがよい。

▼ マルチスレッドの意義②：同時接続

「マルチスレッド」には「マルチプロセス」と同じ意義もある。

サーバー系の処理に多く、一つのアプリケーションが多数の PC（クライアント）に同時に接続して並行して処理するものである。Web サーバーやチャットサーバーなどがイメージし易い。

一つのクライアントに対して一つのスレッドで処理し、多数のクライアントが接続されればその分スレッドが増えていく方式である。（マルチプロセスで処理するサーバーもある）

これも一つ一つの接続が 100%コンピュータを占有するわけではないので、シングルプロセッサ、シングルコアであっても共有を実現できる。

▼ マルチスレッドの意義③：分散・高速化

ここまで説明してきたとおり、そもそものスレッドの意義は、並行化の実現であって、複数の処理を同時に実行してもパフォーマンスが向上するようなものではない。

しかし、「メニーコア時代」と呼ばれ、安価なマルチコアプロセッサーが一般化した現在は、スレッドを高速化に利用する意義が生じている。

例えば、大量データのソートや集計は、データを分割して複数の演算装置で同時に演算したほうが高速に処理できる。なお、シングルコア環境ではスレッドを増やしたところで早くはならず、むしろスレッドの管理コスト分遅くなる。

▼ ゲームの並行処理

ゲームプログラミングはもともと並行処理の塊である。

多数のキャラを同時に動かし、それと同時にカメラを動かし、同時にメニューを動かし、同時にファイルを読み込んでいる。しかし、これらの処理をそれぞれスレッド化するようなことはあまりない。

ゲームプログラミングは、並行処理を自前で行うのが通常である。
ほとんどの並行処理要素は 1 フレームごとの処理単位を意識し、一コマ分ずつ一つずつ処理を進める。実際には直列処理である。
むやみにスレッド化すると、膨大な量のスレッドが出来上がり、メモリや処理に無駄が生じる（各スレッドはそれぞれスタック領域を持ち、スレッドを切り替えることにも処理コストはかかる）。スレッド間の処理の動機も難しくなる。

▼ ゲームでのスレッド活用

以上を踏まえ、ゲームでスレッドを活用する意義は、主に下記のような用途と考察する。

- 描画スレッド（GPU 処理と並列化）
- 処理落ちの影響を受けてはいけない常時稼働処理（サウンドなど）
- 並列実行が可能な演算（アニメーション、物理演算、圧縮展開など）
- 演算結果が数フレーム後になっても良いもの（AI など）
- 普段は待機状態で、要求に応じてウェイクアップするバックエンド処理（通信など）
- メインループよりも頻繁に状態を監視・確認したいもの（入力デバイス制御、ファイル読み込みなど）
    - 注：ファイル読み込みに関しては通常非同期読み込みを OS レベルでサポートしているので、必ずしもスレッド化の必要はない。スレッドで管理したほうが良いのは、読み込み要求をキューイングしているようなケース。ファイルディスクリプタの制限から同時実行できない読み込み要求をバックエンドで逐次処理するような場合にスレッド化。

マルチスレッドは、スレッド間の同期や共有リソース（メモリなど）の扱いにとても神

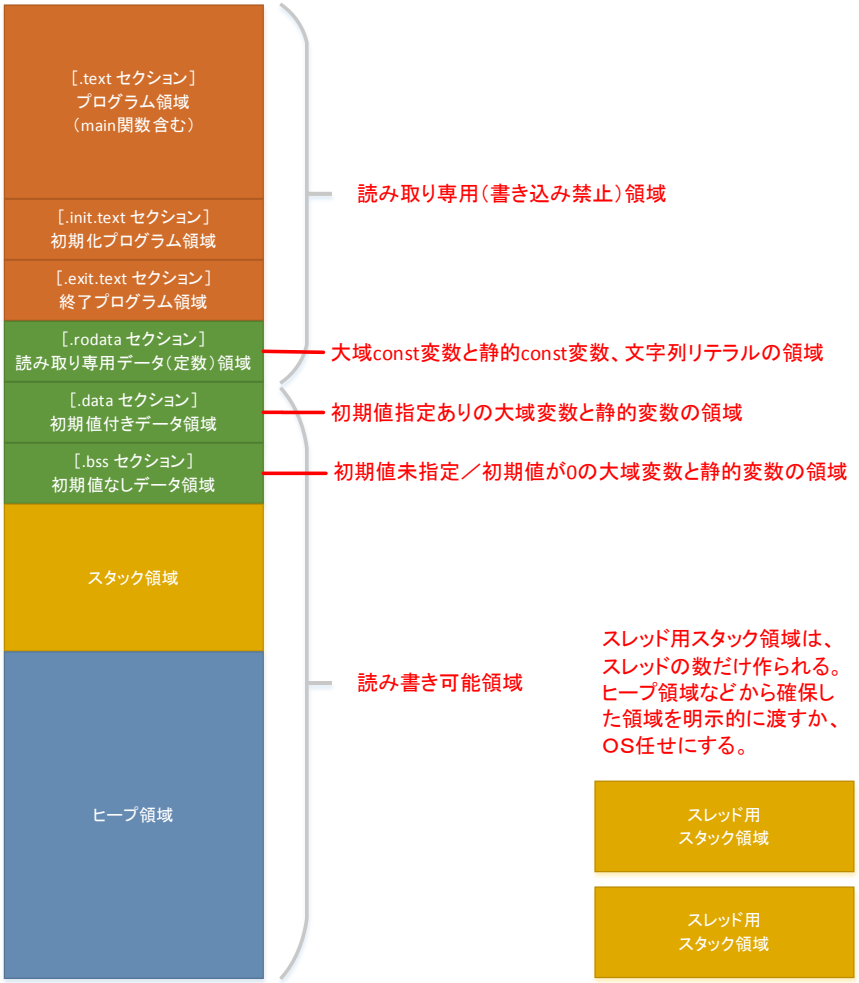
経質にならなければならない。同期やリソースアクセスには厳格なルールを設けて扱う。

■ プログラムの動作原理

基本的なプログラムの動作原理を理解していないままスレッドを扱うのは危険である。特にスタック領域がどのように使われるかは把握しておく必要がある。

▼ メモリ構造

まず、プログラムのメモリ構造は下記の通りとなっている。セクション名などは、GCC でビルドした場合の構成だが、Windows でも大きな違いはない。



実際にはもっと細かいセクションに分かれていたり、読み取り専用領域やヒープ領域が不連続な配置になっていたりする。

また、図では省略しているが、「.data」セクションのデータ（初期値）は最初に読み取り専用領域に配置され、読み書き専用領域を確保した後にコピーされる。

「.bss」セクションはゼロクリアされることが保証されている。なお、「bss」とは「Block Started by Symbol」（シンボル名でアドレスが示されているメモリブロック）のこと。

以下、実際のプログラムをサンプルに、各要素のセクションとの対応と、メモリ情報の確認結果を示す。

各種変数を定義したプログラムのサンプル：

```
#include <stdio.h>

int global_without_value;           //[.bss]初期値なし大域変数
int global_with_value = 1;          //[.data]初期値付き大域変数
const int global_const_value = 2;   //[.rodata]大域 const 変数（定数）

//[.text]main() 関数
int main(const int argc, const char* argv[])
{
     printf("main():begin¥n");

     static int static_without_value;           //[.bss]初期値なし局所静的変数
     static int static_with_value = 3;          //[.data]初期値付き局所静的変数
     static const int static_const_value = 4;   //[.rodata]局所静的 const 変数（定数）
     int auto_without_value;                    //[スタック]初期値なしローカル変数
     int auto_with_value = 5;                   //[スタック]初期値付きローカル変数　※初期値はプログラムコード化
     const int auto_const_value = 6;            //[スタック]ローカル const 変数（定数）　※初期値はプログラムコード化
     const char* auto_str = "STRING";           //[スタック]初期値付きローカル変数　※[.rodata]文字列リテラル

     global_without_value = 101;
     global_with_value = 102;
     static_without_value = 103;
     static_with_value = 104;
     auto_without_value = 105;
     auto_with_value = 106;
     printf("%d,%d,%d,%d,%d,%d,%d,%d,%d,¥"%s¥"¥n",
            global_without_value,
            global_with_value,
            global_const_value,
            static_without_value,
            global_const_value,
            static_without_value,
            static_with_value,
            static_const_value,
            auto_without_value,
            auto_with_value,
            auto_const_value,
            auto_str
      );

     printf("main():end¥n");

     return 0;
}

//[.text]クラス
class auto_run_test_class
{
public:
        auto_run_test_class()
```

```
        {
                printf("auto_run_test_class::constructor()¥n");
        }
        ~auto_run_test_class()
        {
                printf("auto_run_test_class::destructor()¥n");
        }
};

//大域変数に直接インスタンスを生成したクラス
//[.init.text]コンストラクタ呼び出しは main() 関数より先に実行
//[.exit.text]デストラクタ呼び出しは main() 関数よの後に実行
auto_run_test_class auto_run_test_obj;

//[.init.text]初期化関数テスト１：main() 関数より先に実行
//※このアトリビュートは GCC の方言
__attribute__((constructor))
void auto_run_test_func_constructor_1()
{
        printf("auto_run_test_fun_constructor_1()¥n");
}

//[.init.text]初期化関数テスト２：main() 関数より先に実行
//※このアトリビュートは GCC の方言
__attribute__((constructor))
void auto_run_test_func_constructor_2()
{
        printf("auto_run_test_fun_constructor_2()¥n");
}

//[.exit.text]終了関数テスト１：main() 関数の後に実行
//※このアトリビュートは GCC の方言
__attribute__((destructor))
void auto_run_test_func_destructor_1()
{
        printf("auto_run_test_fun_destructor_1()¥n");
}

//[.exit.text]終了関数テスト２：main() 関数の後に実行
//※このアトリビュートは GCC の方言
__attribute__((destructor))
void auto_run_test_func_destructor_2()
{
        printf("auto_run_test_fun_destructor_2()¥n");
}
```

↓（実行結果）

```
auto_run_test_class::constructor()
auto_run_test_fun_constructor_2()
auto_run_test_fun_constructor_1()
main():begin
101,102,2,103,104,4,105,106,6,"STRING"
main():end
auto_run_test_class::destructor()
auto_run_test_fun_destructor_1()
auto_run_test_fun_destructor_2()
```

size コマンドによるサイズ確認例： ※GCC 系のみ

```
$ size a.out
   text    data     bss     dec     hex filename
   2562     612      32    3206     c86 a.out      ←*.text + .rodata サイズ, .data サイズ, .bss サイズ, 合計サイズ
```

objdump コマンドによるサイズ確認例： ※GCC 系のみ

```
$ objdump -h a.out
```

```
a.out:     file format elf64-x86-64

Sections:
Idx Name          Size      VMA               LMA               File off  Algn
  0 .interp       0000001c  0000000000400200  0000000000400200  00000200  2**0
                  CONTENTS, ALLOC, LOAD, READONLY, DATA
  1 .note.ABI-tag 00000020  000000000040021c  000000000040021c  0000021c  2**2
                  CONTENTS, ALLOC, LOAD, READONLY, DATA
  2 .note.gnu.build-id 00000024  000000000040023c  000000000040023c  0000023c  2**2
                  CONTENTS, ALLOC, LOAD, READONLY, DATA
  3 .gnu.hash     00000024  0000000000400260  0000000000400260  00000260  2**3
                  CONTENTS, ALLOC, LOAD, READONLY, DATA
  4 .dynsym       000000c0  0000000000400288  0000000000400288  00000288  2**3
                  CONTENTS, ALLOC, LOAD, READONLY, DATA
  5 .dynstr       000000ac  0000000000400348  0000000000400348  00000348  2**0
                  CONTENTS, ALLOC, LOAD, READONLY, DATA
  6 .gnu.version  00000010  00000000004003f4  00000000004003f4  000003f4  2**1
                  CONTENTS, ALLOC, LOAD, READONLY, DATA
  7 .gnu.version_r 00000040  0000000000400408  0000000000400408  00000408  2**3
                  CONTENTS, ALLOC, LOAD, READONLY, DATA
  8 .rela.dyn     00000018  0000000000400448  0000000000400448  00000448  2**3
                  CONTENTS, ALLOC, LOAD, READONLY, DATA
  9 .rela.plt     00000078  0000000000400460  0000000000400460  00000460  2**3
                  CONTENTS, ALLOC, LOAD, READONLY, DATA
 10 .init         00000018  00000000004004d8  00000000004004d8  000004d8  2**2
                  CONTENTS, ALLOC, LOAD, READONLY, CODE
 11 .plt          00000060  00000000004004f0  00000000004004f0  000004f0  2**2
                  CONTENTS, ALLOC, LOAD, READONLY, CODE
 12 .text         00000358  0000000000400550  0000000000400550  00000550  2**4
                  CONTENTS, ALLOC, LOAD, READONLY, CODE
 13 .fini         0000000e  00000000004008a8  00000000004008a8  000008a8  2**2
                  CONTENTS, ALLOC, LOAD, READONLY, CODE
 14 .rodata       0000014c  00000000004008b8  00000000004008b8  000008b8  2**3
                  CONTENTS, ALLOC, LOAD, READONLY, DATA
 15 .eh_frame_hdr 00000064  0000000000400a04  0000000000400a04  00000a04  2**2
                  CONTENTS, ALLOC, LOAD, READONLY, DATA
 16 .eh_frame     000001a4  0000000000400a68  0000000000400a68  00000a68  2**3
                  CONTENTS, ALLOC, LOAD, READONLY, DATA
 17 .ctors        00000028  0000000000600c10  0000000000600c10  00000c10  2**3
                  CONTENTS, ALLOC, LOAD, DATA
 18 .dtors        00000020  0000000000600c38  0000000000600c38  00000c38  2**3
                  CONTENTS, ALLOC, LOAD, DATA
 19 .jcr          00000008  0000000000600c58  0000000000600c58  00000c58  2**3
                  CONTENTS, ALLOC, LOAD, DATA
 20 .dynamic      000001c0  0000000000600c60  0000000000600c60  00000c60  2**3
                  CONTENTS, ALLOC, LOAD, DATA
 21 .got          00000008  0000000000600e20  0000000000600e20  00000e20  2**3
                  CONTENTS, ALLOC, LOAD, DATA
 22 .got.plt      00000040  0000000000600e28  0000000000600e28  00000e28  2**3
                  CONTENTS, ALLOC, LOAD, DATA
 23 .data         0000000c  0000000000600e68  0000000000600e68  00000e68  2**2
                  CONTENTS, ALLOC, LOAD, DATA
 24 .bss          00000020  0000000000600e78  0000000000600e78  00000e74  2**3
                  ALLOC
 25 .comment      00000058  0000000000000000  0000000000000000  00000e74  2**0
                  CONTENTS, READONLY
```

MAP ファイル出力例： ※GCC 系のコンパイル結果の一部抜粋

```
.text          0x0000000000400634      0x16b /tmp/ccg1iYOV.o
                0x0000000000400634              main
                0x000000000040070a              _Z32auto_run_test_func_constructor_1v
                0x000000000040071a              _Z32auto_run_test_func_constructor_2v
                0x000000000040072a              _Z31auto_run_test_func_destructor_1v
```

```
                0x000000000040073a                _Z31auto_run_test_func_destructor_2v
 *fill*         0x000000000040079f        0x1 90909090
.text._ZN19auto_run_test_classC2Ev
                0x00000000004007a0        0x18 /tmp/ccg1iYOV.o
                0x00000000004007a0                _ZN19auto_run_test_classC2Ev
                0x00000000004007a0                _ZN19auto_run_test_classC1Ev
.text._ZN19auto_run_test_classD2Ev
                0x00000000004007b8        0x18 /tmp/ccg1iYOV.o
                0x00000000004007b8                _ZN19auto_run_test_classD1Ev
                0x00000000004007b8                _ZN19auto_run_test_classD2Ev
.text           0x00000000004007d0        0x99 /usr/lib64/libc_nonshared.a(elf-init.oS)
                0x00000000004007d0                __libc_csu_fini
                0x00000000004007e0                __libc_csu_init
```

▼ 機械語／アセンブラ／プログラムカウンタ

「プログラム」もメモリに展開されている「データ」の一種である。

「機械語」（「マシン後」）のコードは 16 進数（というか 2 進数）のコードである。メモリから機械語コードを一つずつ読み出して、命令コードとして実行していく。

例えば、0xB8 というコードは「mov eax, ****」という命令コードと解釈し、「続く 4 バイトの値を eax レジスタに格納する」という処理を行う。

上記の「mov eax, ****」は、機械語コー「0xB8」を、人が見て分かり易い表記に置き換えたものである。この表記法のことを「ニーモニック」と呼び、ニーモニック表記で書かれた機械語プログラムを「アセンブラ」と呼ぶ。

CPU は「現在どのメモリのプログラムを実行しているのか？」という情報を「プログラムカウンタ」という専用のレジスタで管理している。実行中のプログラムのメモリアドレスが格納されるレジスタである。

以下、機械語とアセンブラのサンプルを示す。（Visual C++ 2013）

アセンブラのサンプル：※左側の数字がアドレス（プログラムカウンタはこの値を保持）

```
int main(const int argc, const char* argv[])
{
00051520 55                   push        ebp
00051521 8B EC                mov         ebp,esp
00051523 81 EC 00 01 00 00    sub         esp,100h
00051529 53                   push        ebx
0005152A 56                   push        esi
0005152B 57                   push        edi
0005152C 8D BD 00 FF FF FF    lea         edi,[ebp-100h]
00051532 B9 40 00 00 00       mov         ecx,40h
00051537 B8 CC CC CC CC       mov         eax,0CCCCCCCCh
0005153C F3 AB                rep stos    dword ptr es:[edi]
0005153E A1 00 80 05 00       mov         eax,dword ptr ds:[00058000h]
00051543 33 C5                xor         eax,ebp
00051545 89 45 FC             mov         dword ptr [ebp-4],eax
    printf("main():begin¥n");
00051548 8B F4                mov         esi,esp
0005154A 68 E0 58 05 00       push        558E0h
```

```
0005154F FF 15 D8 90 05 00    call        dword ptr ds:[590D8h]
00051555 83 C4 04             add         esp,4
00051558 3B F4                cmp         esi,esp
0005155A E8 09 FC FF FF       call        __RTC_CheckEsp (051168h)

     static int static_without_value;           //[.bss]初期値なし局所静的変数
     static int static_with_value = 3;          //[.data]初期値付き局所静的変数
     static const int static_const_value = 4;   //[.rodata]局所静的 const 変数（定数）
     int auto_without_value;                    //[スタック]初期値なしローカル変数
     int auto_with_value = 5;                   //[スタック]初期値付きローカル変数　※初期値はプログラムコード化
0005155F C7 45 E8 05 00 00 00 mov         dword ptr [auto_with_value],5
     const int auto_const_value = 6;            //[スタック]ローカル const 変数（定数）　※初期値はプログラムコード化
00051566 C7 45 DC 06 00 00 00 mov         dword ptr [auto_const_value],6
     const char* auto_str = "STRING";           //[スタック]初期値付きローカル変数　※[.rodata]文字列リテラル
0005156D C7 45 D0 74 58 05 00 mov         dword ptr [auto_str],55874h
```

スレッドごとにプログラムカウンタを記録しており、スレッドを切り替える時にプログラムカウンタ（とスタックポインタ）を切り替えることで、スレッドの挙動を実現する。

余談だが、かつてメモリ量が 64KB にも満たない PC で動作していたプログラムは、少ないメモリをやりくりするために「自己書き変えコード」を積極的に活用していた。上記の「move eax, ****」の「****」に該当するコードを直接書き換えたり、条件分岐のジャンプ先アドレスを直接書き換えたりといったことを、プログラム実行中に行う手法である。

今はプログラム領域が読み取り専用に保護されているので、このような手法はそうそう使えない。

▼ スタック領域

スタック領域とは、関数内のローカル変数と、関数呼び出しからの復帰のために使用されるメモリ領域のこと。

スタック領域を説明するために、まずはプログラムのサンプルを示す。

スタック領域確認のためのプログラムのサンプル：

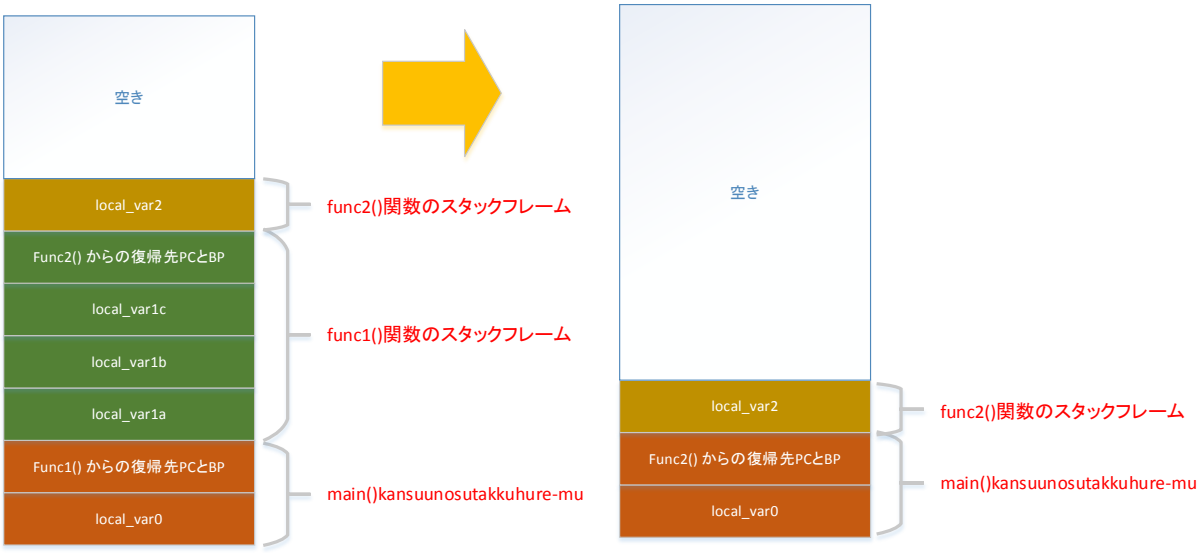
```
//関数２
void func2()
{
     printf("func2()¥n");
     int local_var2 = 0;
     printf("&local_var2 =%p¥n", &local_var2);
}

//関数１
void func1()
{
     printf("func1()¥n");
     int local_var1a = 0;
     int local_var1b = 0;
     int local_var1c = 0;
     printf("&local_var1a=%p¥n", &local_var1a);
     printf("&local_var1b=%p¥n", &local_var1b);
     printf("&local_var1c=%p¥n", &local_var1c);
     func2();
}
```

```
//メイン
int main(const int argc, const char* argv[])
{
	printf("main()¥n");
	int local_var0 = 0;
	printf("&local_var0 =%p¥n", &local_var0);
	func1();
	func2();
	return 0;
}
```

↓（実行結果）

```
main()
&local_var0 =010EF7F8
func1()
&local_var1a=010EF708   ←関数の呼び出しによってリターンアドレスがスタックに積まれ、SP が上に移動している
&local_var1b=010EF6FC   ←ローカル変数がスタックに積まれ、SP が上に移動している
&local_var1c=010EF6F0   ←（同上）
func2()
&local_var2 =010EF60C   ←func1 から呼び出されたので、さらに SP が上に移動している
func2()
&local_var2 =010EF708   ←main に戻って（スタックを戻して）から再度呼び出したので、同じ関数でも SP が変わっている
```

この時、スタック領域は下記のように使用される。スタックは領域の最下層から順に積まれていき、一つの関数が使用する範囲を「スタックフレーム」と呼ぶ。



PC … プログラムカウンタ(プログラムの実行アドレス） ※関数から return する際、スタックから取り出して、前の位置の次の位置に戻す

SP … スタックポインタ(現在使用中のスタック領域のトップアドレス） ※関数から return する際、関数の呼び出し前の位置に戻す

BP … スタックのベースアドレス(関数ごとのスタック領域の基底のアドレス） ※関数から return する際、スタックから取り出して前の位置に戻す

スタック領域は、スレッドごとにそれぞれ個別に割り当てられる。

スレッドに割り当てるスタックは、OS に任せて既定の領域を確保さるか、自分でサイズを指定して OS に領域を確保させるか、自分で確保した領域を渡すかする。

スタックサイズを超える関数呼び出しや変数確保が行われると、「スタックオーバーフロー」が起こり、プログラム全体が停止する。

スタックオーバーフローのサンプル①：変数が大きすぎる

```
//関数１
void func1()
{
	printf("func1()¥n");
	int local_var[16 * 1024 * 1024] = {};	//←【問題の箇所】
}

//メイン
int main(const int argc, const char* argv[])
{
	printf("main()¥n");
	func1();
	return 0;
}
```

↓（実行結果）※Windows の場合

```
main()
ハンドルされない例外が 0x00C11777 (test.exe) で発生しました: 0xC00000FD: Stack overflow (パラメーター: 0x00000000, 0x000E2000)。
```

↓（実行結果）※Linux の場合

```
main()
セグメンテーション違反です（コアダンプ）
```

スタックオーバーフローのサンプル②：無限再帰

```
//関数１
void func1()
{
	func1();	//←【問題の箇所】
}

//メイン
int main(const int argc, const char* argv[])
{
	printf("main()¥n");
	func1();
	return 0;
}
```

※実行結果はサンプル①と同じ

GCC 4.6 以降のコンパイラを使用している場合、 -fstack-usege というオプションを付けてコンパイルすると、関数ごとのスタック所要量を確認できる。上記オーバーフローのサンプル①のコードの確認結果を示す。

スタック所要量の確認例：

```
$ g++ --version
g++ (GCC) 4.8.2
$ g++ -fstack-usage a.cpp
$ a.su
a.cpp:14:6:void func1() 67108896	static
a.cpp:27:5:int main(int, const char**)	32	static
```

▼ スレッドとコンテキストスイッチ

アクティブなタスクが切り替わることを「コンテキストスイッチ」と呼ぶ。

「コンテキスト」とは、タスクを実行中の CPU の状態のことで、スイッチする際に全てのレジスタの情報を退避・復元する。レジスタの中にはプログラムカウンタとスタックポインタも含まれる。

スレッドの挙動としては、スレッドがタイムスライスの所要時間（「クォンタム」とも言う）を使い切った時か、スレッドが待機状態（スリープ）に入った時にコンテキストスイッチが発生する。

なお、コンテキストスイッチはスレッドの切り替えだけではなく、OS のカーネルモードとユーザーモードが切り替わる時や、割り込み処理が発生した際にも行われる。

▼ スレッドスケジューリング

スレッドの切り替えは OS が管理する。スレッドの実行順序は OS にスケジューリングされる。スレッドは順番にタイムスライスで区切りながらローテーションで実行されていく。

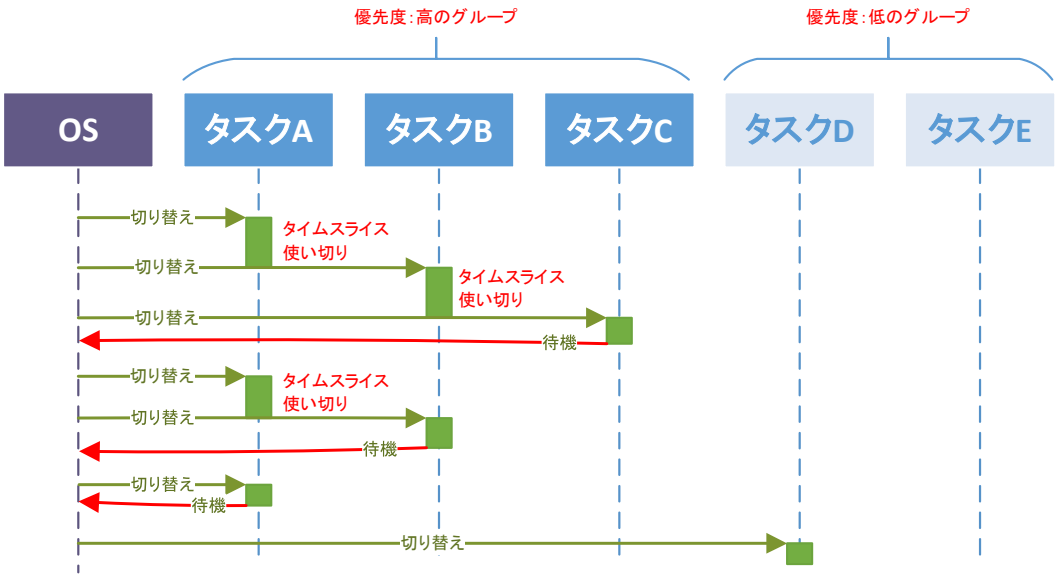
▼ スレッド優先度

スレッドには優先度がある。

スレッドスケジューリングは優先度の高いスレッドを先に実行し、それらが全て待機状態にならない限り、低いスレッドに実行を移さない。優先度の同じスレッドはタイムスライスで順次実行する。

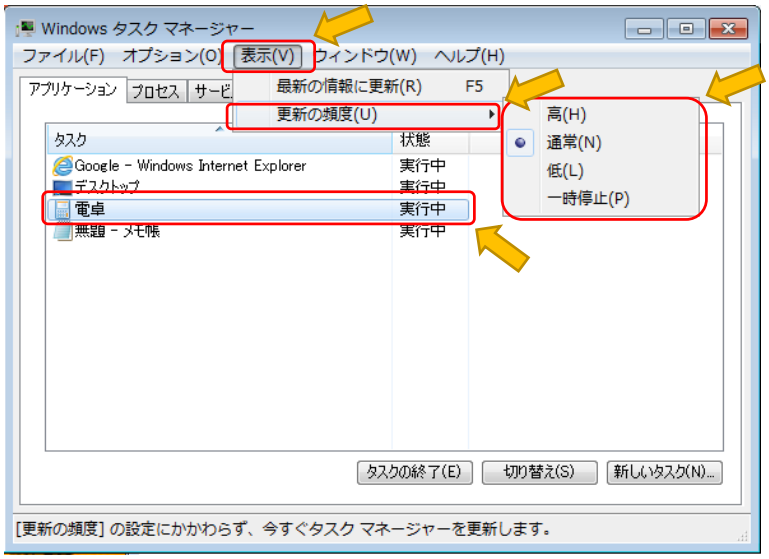
要するに、待ち状態に入らずにタイムスライスを使い切ってばかりの重いスレッドがあると、それより優先度の低いスレッドに処理が移らなくなる。

スレッド優先度のイメージ：



なお、スレッド優先度は、スレッド生成時、もしくは実行中に切り替えることができる。

Windows では、プロセスの優先度をタスクマネージャから切り替えることもできる。これは、プロセス内のスレッドの優先度に影響する。



余談になるが、Windows8.1 の環境で試してみたところ、無限ループを行う処理を優先度最高で実行しても（プログラム内で最高レベルに強制変更しても）、（論理プロセッサの一つが）100%になるようなことにはならなかったので、ある程度処理が続いたら強制的に待機状態になっているようである。ただし、この挙動は OS によって異なると思われる。

■ 様々なスレッド

幾つかのマルチスレッドプログラミング技法の説明とサンプルプログラムを示す。

ゲームプログラミングにおけるスレッドは、スタック領域のサイズやスレッド優先度に対して特に神経質になったほうがよい。できれば C++11 のスタイルで汎用性の高いプログラミングを行いたいところだが、今のところ、そうした細かい調整には対応できていないようである。ゲームプログラミングでは、ゲーム用 SDK に基づいて細かく制御した方が良い。

▼ fork

まずは「fork」（フォーク）を説明する。

マルチスレッドプログラミングを学習すると、同じ言葉で意味の異なる「fork-join モデル」という言葉もあり、混乱を招きかねないので、あえて旧来からの fork を説明する。なお、「fork-join モデル」は、分散・並列処理の処理モデルのこと。

fork は、Unix 系 OS で伝統的なマルチタスクプログラミングの手法。マルチスレッドではなく、マルチプロセスである。マルチスレッドの原点的な技術。

関数をスレッド化する普通のマルチスレッドプログラミングを先に学習していると奇妙に見えるコードである。マルチスレッドよりもコードを短くまとめることができる。

マルチプロセスなのでメモリ空間の共有ができず、また、スレッドに比べて所用メモリ量が大きい。

fork のサンプル：

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <errno.h>
#include <sys/types.h>

#include <unistd.h>
#include <sys/wait.h>

//fork テスト
int main(const int argc, const char* argv[])
{
	//プログラム実行開始
	printf("- Start Fork Test -¥n");
	fflush(stdout);

	//テスト用変数
	const char* test_text = "TEST";
	int test_value = 1000;
	int test_loop_max = 1;

	//プロセス名を作成
```

```
// P + 子プロセスのレベル + ( 自プロセス ID , 親プロセス ID )
char process_name[32];
sprintf(process_name, "P0(%5d,%5d)", getpid(), getppid());
int level = 0;

//大元のプロセス判定用フラグ（初期値は true）
bool is_root_process = true;

//子プロセス生成ループ
const int CHILD_THREAD_NUM = 3;
pid_t pid[CHILD_THREAD_NUM];//生成した子プロセスのプロセス ID
for(int i = 0; i < CHILD_THREAD_NUM; ++i)
{
	//子プロセス生成
	pid_t pid_tmp = fork();
	//※fork()が実行された瞬間に子プロセスが生成される。
	//※子プロセスは、親プロセスの静的変数やスタック（ローカル変数）、実行位置（プログラムカウンタ）、
	//  および、オープン中のファイルディスクリプタをコピーして、新しいプロセスを作る。
	//※実行位置もコピーされるため、子プロセスはこの位置からスタートする。
	//  すべての変数の値も引き継がられるが、メモリを共有するわけではない。
	//  あくまでもその時点の内容がコピーされるだけ。

	//生成結果確認
	switch(pid_tmp)
	{
	//fork 成功：自プロセスが「生成された子プロセス」の場合
	case 0:
		//大元のプロセス判定用フラグを OFF
		is_root_process = false;

		//プロセス名を作成
		++ level;
		sprintf(process_name, "C%d(%5d,%5d)", level, getpid(), getppid());
		// C + 子プロセスのレベル + ( 自プロセス ID , 親プロセス ID )

		//子プロセス開始メッセージ
		printf("START: %s¥n", process_name);
		fflush(stdout);

		//テスト用変数を更新
		++test_value;
		++test_loop_max;

		//親プロセスが生成した子プロセスの ID のコピーされてしまっているのでクリアする
		for(int ii = 0; ii <= i; ++ ii)
			pid[ii] = -1;

		//1 秒スリープ
		sleep(1);

		break;

	//fork 失敗
	case -1:
		//エラーメッセージ
		if(is_root_process)
			fprintf(stderr, "%s -> [%d] FAILED (errno=%d)¥n", process_name, i, errno);
		else
			fprintf(stderr, "%s -> [%d] FAILED (errno=%d)¥n", process_name, i, errno);
		fflush(stderr);

		//1 秒スリープ
		sleep(1);

		break;
```

```
            //fork 成功：子プロセスの生成に成功し、子プロセスのプロセス ID を取得
            default:
                  //子プロセスのプロセス ID を記録（最後の終了待ち用）
                  pid[i] = pid_tmp;

                  //子プロセス生成メッセージ
                  if(is_root_process)
                        printf("%s -> [%d] CREATED:C%d(%5d,%5d)¥n", process_name, i, level + 1, pid_tmp, getpid());
                  else
                        printf("%s -> [%d] CREATED:C%d(%5d,%5d)¥n", process_name, i, level + 1, pid_tmp, getpid());
                  fflush(stdout);

                  //2 秒スリープ
                  sleep(2);

                  break;
            }
      }

      //ダミー処理
      for(int i = 0; i < test_loop_max; ++i)
      {
            //ダミーメッセージ表示
            printf("[%s] ... Process(%d/%d): text=¥"%s¥",value=%d¥n", process_name, i + 1, test_loop_max, test_text,
test_value);
            fflush(stdout);
            test_value += 10;

            //1 秒スリープ
            sleep(1);
      }

      //子プロセスの終了待ち
      for(int i = 0; i < CHILD_THREAD_NUM; ++i)
      {
            pid_t pid_tmp = pid[i];
            if(pid_tmp > 0)
            {
                  //ウェイト開始メッセージ
                  printf("[%s] ... Wait(%5d) ...¥n", process_name, pid_tmp);
                  fflush(stdout);

                  //ウェイト：子プロセス終了待ち
                  int status = -1;
                  waitpid(pid_tmp, &status, WUNTRACED);

                  //ウェイト完了メッセージ
                  printf("[%s] ... Wait(%5d) End status=%d¥n", process_name, pid_tmp, status);
                  fflush(stdout);
            }
      }

      //自プロセスが子プロセスならこの時点で実行終了
      if(!is_root_process)
      {
            //子プロセス終了メッセージ
            printf("END: %s¥n", process_name);
            fflush(stdout);

            //プロセス終了
            exit(0);
      }

      //プログラム実行終了
```

```
    printf("- End Fork Test -¥n");
    fflush(stdout);
    return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果）

```
$ ./fork.exe                    ※プロセスの親子関係が分かるように着色している
- Start Fork Test -
P0( 5348,12044) -> [0] CREATED:C1( 6464, 5348)
START: C1( 6464, 5348)
C1( 6464, 5348) -> [1] CREATED:C2( 6752, 6464)
START: C2( 6752, 6464)
P0( 5348,12044) -> [1] CREATED:C1(11556, 5348)
START: C1(11556, 5348)
C2( 6752, 6464) -> [2] CREATED:C3( 1760, 6752)
START: C3( 1760, 6752)
[C3( 1760, 6752)] ... Process(1/4): text="TEST",value=1003
C1( 6464, 5348) -> [2] CREATED:C2(12152, 6464)
START: C2(12152, 6464)
C1(11556, 5348) -> [2] CREATED:C2(10372,11556)
START: C2(10372,11556)
[C2( 6752, 6464)] ... Process(1/3): text="TEST",value=1002
[C3( 1760, 6752)] ... Process(2/4): text="TEST",value=1013
P0( 5348,12044) -> [2] CREATED:C1( 8972, 5348)
START: C1( 8972, 5348)
[C2(12152, 6464)] ... Process(1/3): text="TEST",value=1002
[C2(10372,11556)] ... Process(1/3): text="TEST",value=1002
[C2( 6752, 6464)] ... Process(2/3): text="TEST",value=1012
[C3( 1760, 6752)] ... Process(3/4): text="TEST",value=1023
[C1( 8972, 5348)] ... Process(1/2): text="TEST",value=1001
[C2(12152, 6464)] ... Process(2/3): text="TEST",value=1012
[C1( 6464, 5348)] ... Process(1/2): text="TEST",value=1001
[C1(11556, 5348)] ... Process(1/2): text="TEST",value=1001
[C2(10372,11556)] ... Process(2/3): text="TEST",value=1012
[C2( 6752, 6464)] ... Process(3/3): text="TEST",value=1022
[C3( 1760, 6752)] ... Process(4/4): text="TEST",value=1033
[P0( 5348,12044)] ... Process(1/1): text="TEST",value=1000
[C1( 8972, 5348)] ... Process(2/2): text="TEST",value=1011
[C1( 6464, 5348)] ... Process(2/2): text="TEST",value=1011
[C2(12152, 6464)] ... Process(3/3): text="TEST",value=1022
[C2(10372,11556)] ... Process(3/3): text="TEST",value=1022
[C1(11556, 5348)] ... Process(2/2): text="TEST",value=1011
END: C3( 1760, 6752)
[C2( 6752, 6464)] ... Wait( 1760) ...
[C2( 6752, 6464)] ... Wait( 1760) End status=0
END: C2( 6752, 6464)
END: C1( 8972, 5348)
[P0( 5348,12044)] ... Wait( 6464) ...
END: C2(12152, 6464)
[C1( 6464, 5348)] ... Wait( 6752) ...
END: C2(10372,11556)
[C1(11556, 5348)] ... Wait(10372) ...
[C1( 6464, 5348)] ... Wait( 6752) End status=0
[C1( 6464, 5348)] ... Wait(12152) ...
[C1( 6464, 5348)] ... Wait(12152) End status=0
END: C1( 6464, 5348)
[C1(11556, 5348)] ... Wait(10372) End status=0
END: C1(11556, 5348)
[P0( 5348,12044)] ... Wait( 6464) End status=0
[P0( 5348,12044)] ... Wait(11556) ...
[P0( 5348,12044)] ... Wait(11556) End status=0
[P0( 5348,12044)] ... Wait( 8972) ...
[P0( 5348,12044)] ... Wait( 8972) End status=0
- End Fork Test -
```

↓（実行中のプロセスの状態）

```
$ ps -ef | grep fork          ※多数のプロセスが生成されていることがわかる
     user_name    5348   12044 pty0     07:48:54 /cygdrive/c/Work/test/Program/C++/Thread/fork/fork
     user_name    1760    6752 pty0     07:48:56 /cygdrive/c/Work/test/Program/C++/Thread/fork/fork
     user_name   11556    5348 pty0     07:48:56 /cygdrive/c/Work/test/Program/C++/Thread/fork/fork
     user_name   12152    6464 pty0     07:48:57 /cygdrive/c/Work/test/Program/C++/Thread/fork/fork
     user_name    8972    5348 pty0     07:48:58 /cygdrive/c/Work/test/Program/C++/Thread/fork/fork
     user_name    6752    6464 pty0     07:48:55 /cygdrive/c/Work/test/Program/C++/Thread/fork/fork
     user_name    6464    5348 pty0     07:48:54 /cygdrive/c/Work/test/Program/C++/Thread/fork/fork
     user_name   10372   11556 pty0     07:48:57 /cygdrive/c/Work/test/Program/C++/Thread/fork/fork
```

▼ POSIX スレッドライブラリ版スレッド

POSIX スレッドライブラリは、Unix 系 OS で標準的なライブラリ。

前述の fork 版と同じ挙動のサンプルを示す。

関数の切り分けと変数の受け渡しを明示的に行う必要がある都合から、fork と同じ挙動にしようとすると、少し複雑になることが分かる。

fork 版との比較用に用意したサンプルだが、スレッドのサンプルとしては少し複雑すぎる。後述する同期処理のサンプルがもっとシンプルで分かり易い。

このサンプルプログラムでは、malloc() で確保したメモリを子スレッドに受け渡している。子スレッド側では受け取ってすぐに不要になメモリだが、すぐに free() していない。malloc() 時と同じスレッドで free() しないとハングするのでそのままにしている。

あわせて TLS（スレッドローカルストレージ）の動作もテスト。

サンプルには示していないが、スレッド生成時の属性指定により、スタック領域のサイズやスレッド優先度などを設定することが可能。

POSIX スレッドライブラリ版スレッドのサンプル：

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <errno.h>
#include <sys/types.h>

#include <pthread.h>
#include <unistd.h>

//スレッドローカルストレージ(TLS)テスト
__thread pthread_t tls_pth = 0; //POSIX スレッドライブラリ版 TLS 指定

//テスト用情報
struct TEST_INFO
{
     const char* text;//文字列
     int value;       //数値
     int loop_max;    //テストループ回数
     int start_i;     //スレッド生成ループ開始値
};

//スレッド情報
```

```
struct THREAD_INFO
{
	int level;			//子スレッドレベル
	pthread_t parent_pth;//親スレッド_t
	bool is_root_thread; //大元のスレッド判定用フラグ
};

//スレッド受け渡し情報
struct THREAD_PARAM
{
	TEST_INFO test;	//テスト用情報
	THREAD_INFO thread;//スレッド情報
};

//子スレッドの生成と終了待ち
extern void createChildThreads(const char* thread_name, TEST_INFO& test, THREAD_INFO& tinfo);

//スレッド関数
void* threadFunc(void* param_p)
{
	//パラメータ受け取り
	TEST_INFO test;
	THREAD_INFO tinfo;
	{
		THREAD_PARAM* param = (THREAD_PARAM*)param_p;
		memcpy(&test, &param->test, sizeof(TEST_INFO));
		memcpy(&tinfo, &param->thread, sizeof(THREAD_INFO));
	//	free(param_p);	//この時点で受け取ったメモリは不要だが、元のスレッドで free しないとハングする
	}

	//スレッド情報
	pthread_t pth_tmp = pthread_self();

	//スレッドローカルストレージ(TLS)テスト
	tls_pth = pth_tmp;

	//大元のスレッド判定用フラグを OFF
	tinfo.is_root_thread = false;

	//スレッド名を作成
	++ tinfo.level;
	char thread_name[32];
	sprintf(thread_name, "C%d(%010p,%010p)", tinfo.level, pth_tmp, tinfo.parent_pth);
	// C + 子スレッドのレベル + ( 自スレッド_t , 親スレッド_t )

	//子スレッド開始メッセージ
	printf("START: %s¥n", thread_name);
	fflush(stdout);

	//テスト用変数を更新
	++ test.value;
	++ test.loop_max;

	//親スレッド_t を格納
	tinfo.parent_pth = pth_tmp;

	//1 秒スリープ
	sleep(1);

	//子スレッドの生成と終了待ち
	createChildThreads(thread_name, test, tinfo);

	//子スレッド終了メッセージ
	printf("END: %s¥n", thread_name);
	fflush(stdout);
```

```
	return NULL;
}

//子スレッドの生成と終了待ち
void createChildThreads(const char* thread_name, TEST_INFO& test, THREAD_INFO& tinfo)
{
	//子スレッド生成ループ
	const int CHILD_THREAD_NUM = 3;
	pthread_t pth[CHILD_THREAD_NUM];	//生成した子スレッドのスレッド_t
	THREAD_PARAM* param[CHILD_THREAD_NUM];//スレッド受け渡し用データ
	for(int i = 0; i < test.start_i; ++i)
	{
		pth[i] = 0;
		param[i] = NULL;
	}
	for(int i = test.start_i; i < CHILD_THREAD_NUM; ++i)
	{
		//子スレッド用パラメータ作成
		param[i] = (THREAD_PARAM*)malloc(sizeof(THREAD_PARAM));
		memcpy(&param[i]->test, &test, sizeof(TEST_INFO));
		memcpy(&param[i]->thread, &tinfo, sizeof(THREAD_INFO));
		param[i]->test.start_i = i + 1;

		//子スレッド生成
		pthread_t pth_tmp = 0;
		int ret = pthread_create((pthread_t*)&pth_tmp, NULL, threadFunc, (void*)(param[i]));
		if(ret != 0)
		{
			//子スレッド生成失敗
			free(param[i]);
			param[i] = NULL;

			//エラーメッセージ
			if(tinfo.is_root_thread)
				fprintf(stderr, "%s -> [%d] FAILED (errno=%d)¥n", thread_name, i, ret, errno);
			else
				fprintf(stderr, "%s -> [%d] FAILED (errno=%d)¥n", thread_name, i, ret, errno);
			fflush(stderr);

			//1秒スリープ
			sleep(1);
		}
		else
		{
			//子スレッド生成成功

			//子スレッドのスレッド_tを記録（最後の終了待ち用）
			pth[i] = pth_tmp;

			//子スレッド生成メッセージ
			if(tinfo.is_root_thread)
				printf("%s -> [%d] CREATED:C%d(%010p,%010p)¥n", thread_name, i, tinfo.level + 1, pth_tmp,
tinfo.parent_pth);
			else
				printf("%s -> [%d] CREATED:C%d(%010p,%010p)¥n", thread_name, i, tinfo.level + 1, pth_tmp,
tinfo.parent_pth);
			fflush(stdout);

			//2秒スリープ
			sleep(2);
		}
	}

	//ダミー処理
```

```
	for(int i = 0; i < test.loop_max; ++i)
	{
		//ダミーメッセージ表示
		printf("[%s] ... Process(%d/%d): text=¥"%s¥",value=%d (tls_tid=%010p)¥n", thread_name, i + 1, test.loop_max,
test.text, test.value, tls_pth);
		fflush(stdout);
		test.value += 10;

		//1秒スリープ
		sleep(1);
	}

	//子スレッドの終了待ち
	for(int i = 0; i < CHILD_THREAD_NUM; ++i)
	{
		pthread_t pth_tmp = pth[i];
		if(pth_tmp > 0)
		{
			//ウェイト開始メッセージ
			printf("[%s] ... Wait(%010p) ...¥n", thread_name, pth_tmp);
			fflush(stdout);

			//ウェイト：子スレッド終了待ち
			pthread_join((pthread_t)pth_tmp, NULL);

			//メモリ解放
			free(param[i]);
			param[i] = NULL;

			//ウェイト完了メッセージ
			printf("[%s] ... Wait(%010p) End¥n", thread_name, pth_tmp);
			fflush(stdout);
		}
	}
}

//posix thread テスト
int main(const int argc, const char* argv[])
{
	//プログラム実行開始
	printf("- Start Thread Test -¥n");
	fflush(stdout);

	//テスト用変数
	TEST_INFO test =
	{
		"TEST",	//text
		1000,	//value
		1,		//loop_max
		0,		//start_i
	};

	//スレッド情報
	THREAD_INFO tinfo =
	{
		0,	//level
		pthread_self(),
			//pareant_pth
		true,//is_root_thread
	};

	//スレッドローカルストレージ(TLS)テスト
	tls_pth = tinfo.parent_pth;

	//スレッド名を作成
```

```
    // P + 子スレッドのレベル + ( 自スレッド_t , 親スレッド_t )
    char thread_name[32];
    sprintf(thread_name, "P0(%010p,%010p)", tinfo.parent_pth, 0);

    //子スレッドの生成と終了待ち
    createChildThreads(thread_name, test, tinfo);

    //プログラム実行終了
    printf("- End Thread Test -¥n");
    fflush(stdout);
    return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果）

```
$ ./pthread.exe                ※スレッドの親子関係は fork 版と同じなので着色は省略
- Start Thread Test -          ※TLS 属性のついたグローバル変数 tls_pth が、スレッド毎に異なる値になっている点に注目
P0(0x80000038,0x00000000) -> [0] CREATED:C1(0x800203d0,0x80000038)
START: C1(0x800203d0,0x80000038)
C1(0x800203d0,0x80000038) -> [1] CREATED:C2(0x80020520,0x800203d0)
START: C2(0x80020520,0x800203d0)
P0(0x80000038,0x00000000) -> [1] CREATED:C1(0x80020720,0x80000038)
START: C1(0x80020720,0x80000038)
C2(0x80020520,0x800203d0) -> [2] CREATED:C3(0x80020690,0x80020520)
START: C3(0x80020690,0x80020520)
[C3(0x80020690,0x80020520)] ... Process(1/4): text="TEST",value=1003 (tls_tid=0x80020690)
C1(0x800203d0,0x80000038) -> [2] CREATED:C2(0x80020930,0x800203d0)
START: C2(0x80020930,0x800203d0)
C1(0x80020720,0x80000038) -> [2] CREATED:C2(0x800209c0,0x80020720)
START: C2(0x800209c0,0x80020720)
[C2(0x800209c0,0x80020720)] ... Process(1/3): text="TEST",value=1002 (tls_tid=0x800209c0)
[C3(0x80020690,0x80020520)] ... Process(2/4): text="TEST",value=1013 (tls_tid=0x80020690)
[C2(0x80020930,0x800203d0)] ... Process(1/3): text="TEST",value=1002 (tls_tid=0x80020930)
[C2(0x80020520,0x800203d0)] ... Process(1/3): text="TEST",value=1002 (tls_tid=0x80020520)
P0(0x80000038,0x00000000) -> [2] CREATED:C1(0x80020bb0,0x80000038)
START: C1(0x80020bb0,0x80000038)
[C2(0x80020520,0x800203d0)] ... Process(2/3): text="TEST",value=1012 (tls_tid=0x80020520)
[C2(0x800209c0,0x80020720)] ... Process(2/3): text="TEST",value=1012 (tls_tid=0x800209c0)
[C2(0x80020930,0x800203d0)] ... Process(2/3): text="TEST",value=1012 (tls_tid=0x80020930)
[C3(0x80020690,0x80020520)] ... Process(3/4): text="TEST",value=1023 (tls_tid=0x80020690)
[C1(0x80020720,0x80000038)] ... Process(1/2): text="TEST",value=1001 (tls_tid=0x80020720)
[C1(0x800203d0,0x80000038)] ... Process(1/2): text="TEST",value=1001 (tls_tid=0x800203d0)
[C1(0x80020bb0,0x80000038)] ... Process(1/2): text="TEST",value=1001 (tls_tid=0x80020bb0)
[C1(0x80020720,0x80000038)] ... Process(2/2): text="TEST",value=1011 (tls_tid=0x80020720)
[C2(0x80020930,0x800203d0)] ... Process(3/3): text="TEST",value=1022 (tls_tid=0x80020930)
[P0(0x80000038,0x00000000)] ... Process(1/1): text="TEST",value=1000 (tls_tid=0x80000038)
[C1(0x800203d0,0x80000038)] ... Process(2/2): text="TEST",value=1011 (tls_tid=0x800203d0)
[C3(0x80020690,0x80020520)] ... Process(4/4): text="TEST",value=1033 (tls_tid=0x80020690)
[C1(0x80020bb0,0x80000038)] ... Process(2/2): text="TEST",value=1011 (tls_tid=0x80020bb0)
[C2(0x80020520,0x800203d0)] ... Process(3/3): text="TEST",value=1022 (tls_tid=0x80020520)
[C2(0x800209c0,0x80020720)] ... Process(3/3): text="TEST",value=1022 (tls_tid=0x800209c0)
END: C1(0x80020bb0,0x80000038)
END: C2(0x80020930,0x800203d0)
END: C3(0x80020690,0x80020520)
END: C2(0x800209c0,0x80020720)
[P0(0x80000038,0x00000000)] ... Wait(0x800203d0) ...
[C1(0x800203d0,0x80000038)] ... Wait(0x80020520) ...
[C2(0x80020520,0x800203d0)] ... Wait(0x80020690) ...
[C1(0x80020720,0x80000038)] ... Wait(0x800209c0) ...
[C2(0x80020520,0x800203d0)] ... Wait(0x80020690) End
END: C2(0x80020520,0x800203d0)
[C1(0x80020720,0x80000038)] ... Wait(0x800209c0) End
END: C1(0x80020720,0x80000038)
[C1(0x800203d0,0x80000038)] ... Wait(0x80020520) End
[C1(0x800203d0,0x80000038)] ... Wait(0x80020930) ...
[C1(0x800203d0,0x80000038)] ... Wait(0x80020930) End
```

```
END: C1(0x800203d0,0x80000038)
[P0(0x80000038,0x00000000)] ... Wait(0x800203d0) End
[P0(0x80000038,0x00000000)] ... Wait(0x80020720) ...
[P0(0x80000038,0x00000000)] ... Wait(0x80020720) End
[P0(0x80000038,0x00000000)] ... Wait(0x80020bb0) ...
[P0(0x80000038,0x00000000)] ... Wait(0x80020bb0) End
- End Thread Test -
```

↓（実行中のプロセスの状態）

```
$ ps -ef | grep pthread        ※プロセスが一つしか生成されていることがわかる
     user_name     8140    11912 pty0      11:38:07 /cygdrive/e/Work/test/Program/C++/Thread/pthread/pthread
```

▼ Win32API 版スレッド

前述の fork 版、POSIX スレッドライブラリ版スレッドと同じ挙動のサンプルを示す。

比較用に用意したサンプルだが、スレッドのサンプルとしては少し複雑すぎる。後述する同期処理のサンプルがもっとシンプルで分かり易い。

スレッド生成関数、終了待ち関数、Sleep()関数の扱いが POSIX スレッドライブラリ版と異なる。

あわせて、Windows 版の TLS（スレッドローカルストレージ）の動作もテスト。

サンプルには示していないが、スレッド生成時にスタック領域（のサイズ）やスレッド優先度などを設定することが可能。

Windows のスレッド生成用関数には、CreateThread() 関数、_beginthread() 関数、_beginthreadex() 関数がある。

CreateThread() 関数で呼び出したスレッド関数の中では C ランタイムライブラリが使えず、また自身のスレッドハンドルをクローズできないという問題があるため、基本的に使用しないこと。

_beginthread() 関数と_beginthreadex() 関数の違いは、スレッド生成時に細かい制御ができるかどうかという点。

なお、fork と同様のコピープロセスを生成する仕組みは Windows にはないが、実行ファイル（.exe）を指定してプロセス／子プロセスを作成する仕組みは用意されている。（サンプルは割愛）

Win32API 版スレッドのサンプル：

```c
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include <windows.h>
#include <process.h>

//スレッドローカルストレージ(TLS)テスト
__declspec(thread) unsigned int tls_tid = 0;//Visual C++固有版 TLS 指定

//テスト用情報
```

```
struct TEST_INFO
{
	const char* text;//文字列
	int value;		//数値
	int loop_max;	//テストループ回数
	int start_i;	//スレッド生成ループ開始値
};

//スレッド情報
struct THREAD_INFO
{
	int level;			//子スレッドレベル
	unsigned int parent_tid;//親スレッド ID
	bool is_root_thread;	//大元のスレッド判定用フラグ
};

//スレッド受け渡し情報
struct THREAD_PARAM
{
	TEST_INFO test;	//テスト用情報
	THREAD_INFO thread;//スレッド情報
};

//子スレッドの生成と終了待ち
extern void createChildThreads(const char* thread_name, TEST_INFO& test, THREAD_INFO& tinfo);

//スレッド関数
unsigned int WINAPI threadFunc(void* param_p)
{
	//パラメータ受け取り
	TEST_INFO test;
	THREAD_INFO tinfo;
	{
		THREAD_PARAM* param = (THREAD_PARAM*)param_p;
		memcpy(&test, &param->test, sizeof(TEST_INFO));
		memcpy(&tinfo, &param->thread, sizeof(THREAD_INFO));
	}

	//スレッド情報
	unsigned int tid_tmp = GetCurrentThreadId();

	//スレッドローカルストレージ(TLS)テスト
	tls_tid = tid_tmp;

	//大元のスレッド判定用フラグを OFF
	tinfo.is_root_thread = false;

	//スレッド名を作成
	++tinfo.level;
	char thread_name[32];
	sprintf_s(thread_name, sizeof(thread_name), "C%d(%5d,%5d)", tinfo.level, tid_tmp, tinfo.parent_tid);
	// C + 子スレッドのレベル + ( 自スレッド ID , 親スレッド ID )

	//子スレッド開始メッセージ
	printf("START: %s¥n", thread_name);
	fflush(stdout);

	//テスト用変数を更新
	++test.value;
	++test.loop_max;

	//親スレッド ID を格納
	tinfo.parent_tid = tid_tmp;

	//1 秒スリープ
```

```
	Sleep(1000);

	//子スレッドの生成と終了待ち
	createChildThreads(thread_name, test, tinfo);

	//子スレッド終了メッセージ
	printf("END: %s¥n", thread_name);
	fflush(stdout);

	//スレッド終了
	_endthreadex(0);  //これを呼ぶ場合、呼び出し元で CloseHandle() してはダメ
			  //また、ローカル変数オブジェクトのデストラクタが呼び出されないので注意！
			  //呼ばない場合は、呼び出し元で CloseHandle() すること
	return 0;
}

//子スレッドの生成と終了待ち
void createChildThreads(const char* thread_name, TEST_INFO& test, THREAD_INFO& tinfo)
{
	//子スレッド生成ループ
	const int CHILD_THREAD_NUM = 3;
	HANDLE hthread[CHILD_THREAD_NUM];     //生成した子スレッドのスレッドハンドル
	unsigned int tid[CHILD_THREAD_NUM];   //生成した子スレッドのスレッド ID
	THREAD_PARAM* param[CHILD_THREAD_NUM];//スレッド受け渡し用データ
	for (int i = 0; i < test.start_i; ++i)
	{
		hthread[i] = INVALID_HANDLE_VALUE;
		tid[i] = 0;
		param[i] = NULL;
	}
	for (int i = test.start_i; i < CHILD_THREAD_NUM; ++i)
	{
		//子スレッド用パラメータ作成
		param[i] = (THREAD_PARAM*)malloc(sizeof(THREAD_PARAM));
		memcpy(&param[i]->test, &test, sizeof(TEST_INFO));
		memcpy(&param[i]->thread, &tinfo, sizeof(THREAD_INFO));
		param[i]->test.start_i = i + 1;

		//子スレッド生成
		unsigned int tid_tmp = 0;
		HANDLE hthread_tmp = (HANDLE)_beginthreadex(NULL, 0, threadFunc, (void*)(param[i]), 0, &tid_tmp);
		if (hthread_tmp == (HANDLE)1L || hthread_tmp == INVALID_HANDLE_VALUE)
		{
			//子スレッド生成失敗
			free(param[i]);
			param[i] = NULL;

			//エラーメッセージ
			if (tinfo.is_root_thread)
				fprintf(stderr, "%s -> [%d] FAILED (errno=%d)¥n", thread_name, i, errno);
			else
				fprintf(stderr, "%s -> [%d] FAILED (errno=%d)¥n", thread_name, i, errno);
			fflush(stderr);

			//1 秒スリープ
			Sleep(1000);
		}
		else
		{
			//子スレッド生成成功

			//子スレッドのスレッドハンドルと ID を記録（最後の終了待ち用）
			hthread[i] = hthread_tmp;
			tid[i] = tid_tmp;
```

```
                //子スレッド生成メッセージ
                if (tinfo.is_root_thread)
                    printf("%s -> [%d] CREATED:C%d(%5d,%5d)¥n", thread_name, i, tinfo.level + 1, tid_tmp,
tinfo.parent_tid);
                else
                    printf("%s -> [%d] CREATED:C%d(%5d,%5d)¥n", thread_name, i, tinfo.level + 1, tid_tmp,
tinfo.parent_tid);
                fflush(stdout);

                //2秒スリープ
                Sleep(2000);
            }
        }

        //ダミー処理
        for (int i = 0; i < test.loop_max; ++i)
        {
            //ダミーメッセージ表示
            printf("[%s] ... Process(%d/%d): text=¥"%s¥",value=%d (tls_tid=%d)¥n", thread_name, i + 1, test.loop_max,
test.text, test.value, tls_tid);
            fflush(stdout);
            test.value += 10;

            //1秒スリープ
            Sleep(1000);
        }

        //子スレッドの終了待ち
        for (int i = 0; i < CHILD_THREAD_NUM; ++i)
        {
            HANDLE hthread_tmp = hthread[i];
            unsigned int tid_tmp = tid[i];
            if (hthread_tmp != (HANDLE)1L && hthread_tmp != INVALID_HANDLE_VALUE)
            {
                //ウェイト開始メッセージ
                printf("[%s] ... Wait(%5d) ...¥n", thread_name, tid_tmp);
                fflush(stdout);

                //ウェイト：子スレッド終了待ち
                WaitForSingleObject(hthread_tmp, INFINITE);

                //子スレッドのハンドルをクローズ
            //  CloseHandle(hthread_tmp);//スレッド終了時に _endthreadex() を呼んでいるなら CloseHandle() 不要

                //メモリ解放
                free(param[i]);
                param[i] = NULL;

                //ウェイト完了メッセージ
                printf("[%s] ... Wait(%5d) End¥n", thread_name, tid_tmp);
                fflush(stdout);
            }
        }
}

//Windows thread テスト
int main(const int argc, const char* argv[])
{
    //プログラム実行開始
    printf("- Start Thread Test -¥n");
    fflush(stdout);

    //テスト用変数
    TEST_INFO test =
    {
```

```
            "TEST",    //text
            1000,      //value
            1,         //loop_max
            0,         //start_i
    };

    //スレッド情報
    THREAD_INFO tinfo =
    {
          0,    //level
          GetCurrentThreadId(),
               //parent_tid
          true,//is_root_thread
    };

    //スレッドローカルストレージ(TLS)テスト
    tls_tid = tinfo.parent_tid;

    //スレッド名を作成
    // P + 子スレッドのレベル + ( 自スレッド ID , 親スレッド ID )
    char thread_name[32];
    sprintf_s(thread_name, sizeof(thread_name), "P0(%5d,%5d)", tinfo.parent_tid, 0);

    //子スレッドの生成と終了待ち
    createChildThreads(thread_name, test, tinfo);

    //プログラム実行終了
    printf("- End Thread Test -¥n");
    fflush(stdout);
    return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果）

```
                              ※スレッドの親子関係は fork 版と同じなので着色は省略
- Start Thread Test -         ※TLS 属性のついたグローバル変数 tls_pth が、スレッド毎に異なる値になっている点に注目
P0(14168,     0) -> [0] CREATED:C1(13368,14168)
START: C1(13368,14168)
C1(13368,14168) -> [1] CREATED:C2(  472,13368)
START: C2(  472,13368)
P0(14168,     0) -> [1] CREATED:C1(11400,14168)
START: C1(11400,14168)
C2(  472,13368) -> [2] CREATED:C3(  336,  472)
START: C3(  336,  472)
C1(13368,14168) -> [2] CREATED:C2(12888,13368)
START: C2(12888,13368)
C1(11400,14168) -> [2] CREATED:C2(14400,11400)
START: C2(14400,11400)
[C3(  336,  472)] ... Process(1/4): text="TEST",value=1003 (tls_tid=336)
[C2(12888,13368)] ... Process(1/3): text="TEST",value=1002 (tls_tid=12888)
P0(14168,     0) -> [2] CREATED:C1(11304,14168)
START: C1(11304,14168)
[C2(  472,13368)] ... Process(1/3): text="TEST",value=1002 (tls_tid=472)
[C3(  336,  472)] ... Process(2/4): text="TEST",value=1013 (tls_tid=336)
[C2(14400,11400)] ... Process(1/3): text="TEST",value=1002 (tls_tid=14400)
[C1(13368,14168)] ... Process(1/2): text="TEST",value=1001 (tls_tid=13368)
[C2(12888,13368)] ... Process(2/3): text="TEST",value=1012 (tls_tid=12888)
[C1(11304,14168)] ... Process(1/2): text="TEST",value=1001 (tls_tid=11304)
[C1(11400,14168)] ... Process(1/2): text="TEST",value=1001 (tls_tid=11400)
[C2(  472,13368)] ... Process(2/3): text="TEST",value=1012 (tls_tid=472)
[C3(  336,  472)] ... Process(3/4): text="TEST",value=1023 (tls_tid=336)
[C2(14400,11400)] ... Process(2/3): text="TEST",value=1012 (tls_tid=14400)
[C1(13368,14168)] ... Process(2/2): text="TEST",value=1011 (tls_tid=13368)
[P0(14168,     0)] ... Process(1/1): text="TEST",value=1000 (tls_tid=14168)
[C1(11304,14168)] ... Process(2/2): text="TEST",value=1011 (tls_tid=11304)
[C2(12888,13368)] ... Process(3/3): text="TEST",value=1022 (tls_tid=12888)
```

```
[C1(11400,14168)] ... Process(2/2): text="TEST",value=1011 (tls_tid=11400)
[C2(  472,13368)] ... Process(3/3): text="TEST",value=1022 (tls_tid=472)
[C3(  336,  472)] ... Process(4/4): text="TEST",value=1033 (tls_tid=336)
[C2(14400,11400)] ... Process(3/3): text="TEST",value=1022 (tls_tid=14400)
[C1(13368,14168)] ... Wait(  472) ...
[P0(14168,    0)] ... Wait(13368) ...
END: C1(11304,14168)
END: C2(12888,13368)
[C1(11400,14168)] ... Wait(14400) ...
[C2(  472,13368)] ... Wait(  336) ...
END: C3(  336,  472)
[C2(  472,13368)] ... Wait(  336) End
END: C2(  472,13368)
END: C2(14400,11400)
[C1(13368,14168)] ... Wait(  472) End
[C1(13368,14168)] ... Wait(12888) ...
[C1(11400,14168)] ... Wait(14400) End
END: C1(11400,14168)
[C1(13368,14168)] ... Wait(12888) End
END: C1(13368,14168)
[P0(14168,    0)] ... Wait(13368) End
[P0(14168,    0)] ... Wait(11400) ...
[P0(14168,    0)] ... Wait(11400) End
[P0(14168,    0)] ... Wait(11304) ...
[P0(14168,    0)] ... Wait(11304) End
- End Thread Test -
```

▼ C++11 版スレッド

前述の Win32API 版スレッドをベースに C++11 版にしたサンプルを示す。

比較用に用意したサンプルだが、スレッドのサンプルとしては少し複雑すぎる。後述する同期処理のサンプルがもっとシンプルで分かり易い。

スレッド生成時にテンプレートで柔軟なパラメータを渡せるのが特徴。全体的にクラスベースの操作でシンプルなコードにできる。

TLS（スレッドローカルストレージ）は、Visual C++ 2013 では C++11 版が使えないので、Windows 版を使用。

なお、本書作成時点で、スタック領域サイズの指定方法とスレッド生成失敗時の判定方法を確認しきれず。スレッドクラスに .native_handle() というメンバー関数があるので、それを使用して環境依存の調整を行う必要がありそうである。

C++11 版スレッドのサンプル：

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include <thread>

//スレッドローカルストレージ(TLS)テスト
__declspec(thread) std::size_t tls_tid = 0;//Visual C++固有版 TLS 指定
//thread_local std::size_t tls_tid = 0;//C++11 仕様版 TLS 指定：Visual C++ 2013 では未対応

//テスト用情報
struct TEST_INFO
```

```
{
	const char* text;//文字列
	int value;		//数値
	int loop_max;	//テストループ回数
	int start_i;	//スレッド生成ループ開始値
};

//スレッド情報
struct THREAD_INFO
{
	int level;				//子スレッドレベル
	std::thread::id parent_tid;//親スレッド ID
	bool is_root_thread;		//大元のスレッド判定用フラグ
};

//スレッド受け渡し情報
struct THREAD_PARAM
{
	TEST_INFO test;	//テスト用情報
	THREAD_INFO thread;//スレッド情報
};

//子スレッドの生成と終了待ち
extern void createChildThreads(const char* thread_name, TEST_INFO& test, THREAD_INFO& tinfo);

//スレッド関数
void threadFunc(THREAD_PARAM param)
{
	//パラメータ受け取り
	TEST_INFO test;
	THREAD_INFO tinfo;
	{
		memcpy(&test, &param.test, sizeof(TEST_INFO));
		memcpy(&tinfo, &param.thread, sizeof(THREAD_INFO));
	}

	//スレッド情報
	std::thread::id tid_tmp = std::this_thread::get_id();

	//スレッドローカルストレージ(TLS)テスト
	tls_tid = tid_tmp.hash();

	//大元のスレッド判定用フラグを OFF
	tinfo.is_root_thread = false;

	//スレッド名を作成
	++tinfo.level;
	char thread_name[32];
	sprintf_s(thread_name,	sizeof(thread_name),	"C%d(0x%08x,0x%08x)",	tinfo.level,	tid_tmp.hash(),
tinfo.parent_tid.hash());
	// C + 子スレッドのレベル + ( 自スレッド ID , 親スレッド ID )

	//子スレッド開始メッセージ
	printf("START: %s¥n", thread_name);
	fflush(stdout);

	//テスト用変数を更新
	++test.value;
	++test.loop_max;

	//親スレッド ID を格納
	tinfo.parent_tid = tid_tmp;

	//1 秒スリープ
	std::this_thread::sleep_for(std::chrono::milliseconds(1000));
```

```
	//子スレッドの生成と終了待ち
	createChildThreads(thread_name, test, tinfo);

	//子スレッド終了メッセージ
	printf("END: %s¥n", thread_name);
	fflush(stdout);
}

//子スレッドの生成と終了待ち
void createChildThreads(const char* thread_name, TEST_INFO& test, THREAD_INFO& tinfo)
{
	//子スレッド生成ループ
	const int CHILD_THREAD_NUM = 3;
	std::thread* thread[CHILD_THREAD_NUM];//生成した子スレッドのスレッドハンドル
	std::thread::id tid[CHILD_THREAD_NUM];//生成した子スレッドのスレッド ID
	THREAD_PARAM* param[CHILD_THREAD_NUM];//スレッド受け渡し用データ
	for (int i = 0; i < test.start_i; ++i)
	{
		thread[i] = nullptr;
		tid[i] = std::thread::id();
		param[i] = NULL;
	}
	for (int i = test.start_i; i < CHILD_THREAD_NUM; ++i)
	{
		//子スレッド用パラメータ作成
		param[i] = (THREAD_PARAM*)malloc(sizeof(THREAD_PARAM));
		memcpy(&param[i]->test, &test, sizeof(TEST_INFO));
		memcpy(&param[i]->thread, &tinfo, sizeof(THREAD_INFO));
		param[i]->test.start_i = i + 1;

		//子スレッド生成
		std::thread::id tid_tmp;
		std::thread* thread_tmp = new std::thread(threadFunc, *param[i]);
		if (thread_tmp == nullptr)
		{
			//子スレッド生成失敗
			free(param[i]);
			param[i] = NULL;

			//エラーメッセージ
			if (tinfo.is_root_thread)
				fprintf(stderr, "%s -> [%d] FAILED (errno=%d)¥n", thread_name, i, errno);
			else
				fprintf(stderr, "%s -> [%d] FAILED (errno=%d)¥n", thread_name, i, errno);
			fflush(stderr);

			//1 秒スリープ
			std::this_thread::sleep_for(std::chrono::milliseconds(1000));
		}
		else
		{
			//子スレッド生成成功

			//子スレッドのスレッドオブジェクトと ID を記録（最後の終了待ち用）
			thread[i] = thread_tmp;
			tid_tmp = thread_tmp->get_id();
			tid[i] = tid_tmp;

			//子スレッド生成メッセージ
			if (tinfo.is_root_thread)
				printf("%s -> [%d] CREATED:C%d(0x%08x,0x%08x)¥n", thread_name, i, tinfo.level + 1,
tid_tmp.hash(), tinfo.parent_tid.hash());
			else
				printf("%s -> [%d] CREATED:C%d(0x%08x,0x%08x)¥n", thread_name, i, tinfo.level + 1,
```

```
tid_tmp.hash(), tinfo.parent_tid.hash());
                fflush(stdout);

                //2秒スリープ
                std::this_thread::sleep_for(std::chrono::milliseconds(2000));
            }
        }

        //ダミー処理
        for (int i = 0; i < test.loop_max; ++i)
        {
            //ダミーメッセージ表示
            printf("[%s]  ...  Process(%d/%d):  text=¥"%s¥",value=%d  (tls_tid=0x%08x)¥n",  thread_name,  i  +  1,
test.loop_max, test.text, test.value, tls_tid);
            fflush(stdout);
            test.value += 10;

            //1秒スリープ
            std::this_thread::sleep_for(std::chrono::milliseconds(1000));
        }

        //子スレッドの終了待ち
        for (int i = 0; i < CHILD_THREAD_NUM; ++i)
        {
            std::thread* thread_tmp = thread[i];
            std::thread::id tid_tmp = tid[i];
            if (thread_tmp)
            {
                //ウェイト開始メッセージ
                printf("[%s] ... Wait(0x%08x) ...¥n", thread_name, tid_tmp.hash());
                fflush(stdout);

                //ウェイト
                thread_tmp->join();

                //子スレッドのオブジェクトを削除
                delete thread_tmp;
                thread[i] = nullptr;

                //メモリ解放
                free(param[i]);
                param[i] = NULL;

                //ウェイト完了メッセージ
                printf("[%s] ... Wait(0x%08x) End¥n", thread_name, tid_tmp.hash());
                fflush(stdout);
            }
        }
}

//C++11 thread テスト
int main(const int argc, const char* argv[])
{
        //プログラム実行開始
        printf("- Start Thread Test -¥n");
        fflush(stdout);

        //テスト用変数
        TEST_INFO test =
        {
            "TEST",    //text
            1000,      //value
            1,         //loop_max
            0,         //start_i
        };
```

```
    //スレッド情報
    THREAD_INFO tinfo =
    {
        0,    //level
        std::this_thread::get_id(),
            //parent_tid
        true,//is_root_thread
    };

    //スレッドローカルストレージ(TLS)テスト
    tls_tid = tinfo.parent_tid.hash();

    //スレッド名を作成
    // P + 子スレッドのレベル + ( 自スレッド ID , 親スレッド ID )
    char thread_name[32];
    sprintf_s(thread_name, sizeof(thread_name), "P0(0x%08x,0x%08x)", tinfo.parent_tid.hash(), 0);

    //子スレッドの生成と終了待ち
    createChildThreads(thread_name, test, tinfo);

    //プログラム実行終了
    printf("- End Thread Test -¥n");
    fflush(stdout);
    return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果）

※スレッドの親子関係は fork 版と同じなので着色は省略

```
- Start Thread Test -
START: C1(0xe7088d04,0x792b3321)     ←Windows 版と比較して、スレッドがすぐに開始していることがわかる
P0(0x792b3321,0x00000000) -> [0] CREATED:C1(0xe7088d04,0x792b3321)
START: C2(0x089c1d60,0xe7088d04)
C1(0xe7088d04,0x792b3321) -> [1] CREATED:C2(0x089c1d60,0xe7088d04)
START: C1(0xf8c2e2b0,0x792b3321)
P0(0x792b3321,0x00000000) -> [1] CREATED:C1(0xf8c2e2b0,0x792b3321)
START: C3(0xec799d21,0x089c1d60)
C2(0x089c1d60,0xe7088d04) -> [2] CREATED:C3(0xec799d21,0x089c1d60)
[C3(0xec799d21,0x089c1d60)] ... Process(1/4): text="TEST",value=1003 (tls_tid=0xec799d21)
START: C2(0x19c48b6a,0xf8c2e2b0)
C1(0xf8c2e2b0,0x792b3321) -> [2] CREATED:C2(0x19c48b6a,0xf8c2e2b0)
START: C2(0xa2ce3a4e,0xe7088d04)
C1(0xe7088d04,0x792b3321) -> [2] CREATED:C2(0xa2ce3a4e,0xe7088d04)
START: C1(0x781ab907,0x792b3321)
[C3(0xec799d21,0x089c1d60)] ... Process(2/4): text="TEST",value=1013 (tls_tid=0xec799d21)
[C2(0x089c1d60,0xe7088d04)] ... Process(1/3): text="TEST",value=1002 (tls_tid=0x089c1d60)
P0(0x792b3321,0x00000000) -> [2] CREATED:C1(0x781ab907,0x792b3321)
[C2(0x19c48b6a,0xf8c2e2b0)] ... Process(1/3): text="TEST",value=1002 (tls_tid=0x19c48b6a)
[C2(0xa2ce3a4e,0xe7088d04)] ... Process(1/3): text="TEST",value=1002 (tls_tid=0xa2ce3a4e)
[C3(0xec799d21,0x089c1d60)] ... Process(3/4): text="TEST",value=1023 (tls_tid=0xec799d21)
[C2(0x089c1d60,0xe7088d04)] ... Process(2/3): text="TEST",value=1012 (tls_tid=0x089c1d60)
[C1(0x781ab907,0x792b3321)] ... Process(1/2): text="TEST",value=1001 (tls_tid=0x781ab907)
[C2(0x19c48b6a,0xf8c2e2b0)] ... Process(2/3): text="TEST",value=1012 (tls_tid=0x19c48b6a)
[C1(0xf8c2e2b0,0x792b3321)] ... Process(1/2): text="TEST",value=1001 (tls_tid=0xf8c2e2b0)
[C1(0xe7088d04,0x792b3321)] ... Process(1/2): text="TEST",value=1001 (tls_tid=0xe7088d04)
[C2(0xa2ce3a4e,0xe7088d04)] ... Process(2/3): text="TEST",value=1012 (tls_tid=0xa2ce3a4e)
[C3(0xec799d21,0x089c1d60)] ... Process(4/4): text="TEST",value=1033 (tls_tid=0xec799d21)
[P0(0x792b3321,0x00000000)] ... Process(1/1): text="TEST",value=1000 (tls_tid=0x792b3321)
[C2(0x089c1d60,0xe7088d04)] ... Process(3/3): text="TEST",value=1022 (tls_tid=0x089c1d60)
[C1(0x781ab907,0x792b3321)] ... Process(2/2): text="TEST",value=1011 (tls_tid=0x781ab907)
[C2(0x19c48b6a,0xf8c2e2b0)] ... Process(3/3): text="TEST",value=1022 (tls_tid=0x19c48b6a)
[C1(0xf8c2e2b0,0x792b3321)] ... Process(2/2): text="TEST",value=1011 (tls_tid=0xf8c2e2b0)
[C1(0xe7088d04,0x792b3321)] ... Process(2/2): text="TEST",value=1011 (tls_tid=0xe7088d04)
[C2(0xa2ce3a4e,0xe7088d04)] ... Process(3/3): text="TEST",value=1022 (tls_tid=0xa2ce3a4e)
END: C3(0xec799d21,0x089c1d60)
```

```
[P0(0x792b3321,0x00000000)] ... Wait(0xe7088d04) ...
[C2(0x089c1d60,0xe7088d04)] ... Wait(0xec799d21) ...
[C2(0x089c1d60,0xe7088d04)] ... Wait(0xec799d21) End
END: C2(0x089c1d60,0xe7088d04)
END: C1(0x781ab907,0x792b3321)
END: C2(0x19c48b6a,0xf8c2e2b0)
[C1(0xf8c2e2b0,0x792b3321)] ... Wait(0x19c48b6a) ...
[C1(0xf8c2e2b0,0x792b3321)] ... Wait(0x19c48b6a) End
END: C1(0xf8c2e2b0,0x792b3321)
END: C2(0xa2ce3a4e,0xe7088d04)
[C1(0xe7088d04,0x792b3321)] ... Wait(0x089c1d60) ...
[C1(0xe7088d04,0x792b3321)] ... Wait(0x089c1d60) End
[C1(0xe7088d04,0x792b3321)] ... Wait(0xa2ce3a4e) ...
[C1(0xe7088d04,0x792b3321)] ... Wait(0xa2ce3a4e) End
END: C1(0xe7088d04,0x792b3321)
[P0(0x792b3321,0x00000000)] ... Wait(0xe7088d04) End
[P0(0x792b3321,0x00000000)] ... Wait(0xf8c2e2b0) ...
[P0(0x792b3321,0x00000000)] ... Wait(0xf8c2e2b0) End
[P0(0x792b3321,0x00000000)] ... Wait(0x781ab907) ...
[P0(0x792b3321,0x00000000)] ... Wait(0x781ab907) End
- End Thread Test -
```

▼ OpenMP

OpenMP は、圧倒的に簡単にマルチスレッドの記述が可能である。マルチコアを活用した並列処理が書き易い。

常駐スレッドのようなスレッドを作るのにはあまり向いておらず、部分的な処理を分散処理で効率化することに向いている。

OpenMP は基本的に #pragam でスレッドを制御する。幾つかサンプルコードを示す。

OpneMP のサンプル①： Hello, World

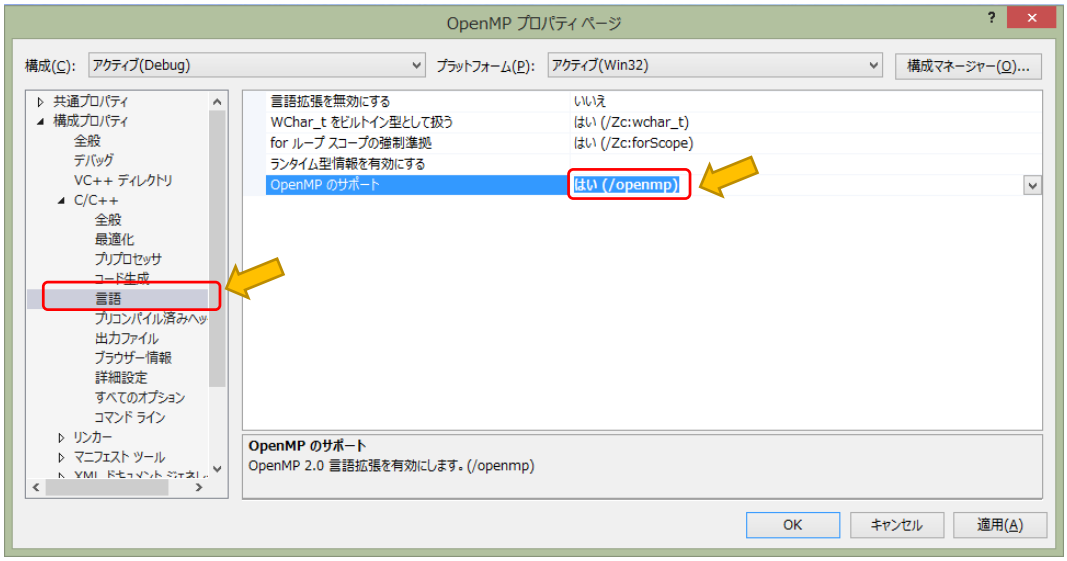
```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

int main(const int argc, const char* argv[])
{
    printf("[BEGIN]¥n");
#pragma omp parallel
    printf("Hello, OpenMP!¥n");
    printf("[END]¥n");
    return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果） ※OpenMP 有効化前

```
[BEGIN]
Hello, OpenMP!
[END]
```

下記のプロジェクト設定を変更し、OpneMP を有効化する。

Visual C++ 2013 の OpenMP 有効化設定：



↓（実行結果） ※OpenMP 有効化後

```
[BEGIN]          ※１プロセッサ、４コア、HT 有効 = ８論理プロセッサの PC で実行した結果
Hello, OpenMP!
Hello, OpenMP!
Hello, OpenMP!
Hello, OpenMP!
Hello, OpenMP!
Hello, OpenMP!
Hello, OpenMP!
Hello, OpenMP!
[END]
```

OpenMP が無効の環境では、#pragma が無視されるだけなのでコンパイルエラーにはならない。

OpneMP のサンプル②： 論理プロセッサより少ないスレッド数を指定

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

int main(const int argc, const char* argv[])
{
    printf("[BEGIN]¥n");
#pragma omp parallel num_threads(3)
    printf("Hello, OpenMP!¥n");
    printf("[END]¥n");
    return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果）

```
[BEGIN]
Hello, OpenMP!
Hello, OpenMP!
Hello, OpenMP!
[END]
```

OpneMP のサンプル③： 論理プロセッサより多いスレッド数を指定

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

int main(const int argc, const char* argv[])
{
     printf("[BEGIN]¥n");
#pragma omp parallel num_threads(15)
     printf("Hello, OpenMP!¥n");
     printf("[END]¥n");
     return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果）

```
[BEGIN]
Hello, OpenMP!
Hello, OpenMP!
Hello, OpenMP!
Hello, OpenMP!
Hello, OpenMP!
Hello, OpenMP!
Hello, OpenMP!
Hello, OpenMP!
Hello, OpenMP!
Hello, OpenMP!
Hello, OpenMP!
Hello, OpenMP!
Hello, OpenMP!
Hello, OpenMP!
Hello, OpenMP!
[END]
```

OpneMP のサンプル④：処理ブロックを指定

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

int main(const int argc, const char* argv[])
{
#pragma omp parallel num_threads(3)
     {
          printf("[BEGIN]¥n");
          printf("Hello, OpenMP!¥n");
          printf("[END]¥n");
     }
     return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果）

```
[BEGIN]
Hello, OpenMP!
[END]
[BEGIN]
Hello, OpenMP!
[END]
[BEGIN]
Hello, OpenMP!
[END]
```

OpneMP のサンプル⑤：OpenMP の関数を使用

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#ifdef _OPENMP
```

```
#include <omp.h>
#endif

int main(const int argc, const char* argv[])
{
#ifdef _OPENMP
	printf("omp_get_num_procs()=%d¥n", omp_get_num_procs());
	printf("omp_get_max_threads()=%d¥n", omp_get_max_threads());
#endif
	return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果）

```
omp_get_num_procs()=8
omp_get_max_threads()=8
```

OpneMP のサンプル⑥： ワークシェアリング

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <Windows.h>

#ifdef _OPENMP
#include <omp.h>
#endif

//素数判定
bool isPrime(const int n)
{
	if (n < 2)
		return false;
	else if (n == 2)
		return true;
	else if (n % 2 == 0)
		return false;
	for (int i = 3; i <= n / i; i += 2)
	{
		if (n % i == 0)
			return false;
	}
	return true;
}

//メイン関数
int main(const int argc, const char* argv[])
{
	//CPU スペック表示
#ifdef _OPENMP
	printf("omp_get_num_procs()=%d¥n", omp_get_num_procs());
	printf("omp_get_max_threads()=%d¥n", omp_get_max_threads());
#endif

	//処理時間計測準備
	LARGE_INTEGER freq;
	QueryPerformanceFrequency(&freq);

	//処理時間計測（開始）
	LARGE_INTEGER begin;
	QueryPerformanceCounter(&begin);

	//集計
	int prime_num= 0;
	long long prime_total = 0;
	long long sum = 0;
	{
```

```
            int i, j, k;

            //三重ループで集計
#pragma omp parallel for reduction(+:sum) private(j, k)
            for (i = 0; i < 2000; ++i)
            {
                  sum += i;
                  for (j = 0; j < 2000; ++j)
                  {
                        sum += j;
                        for (k = 0; k < 2000; ++k)
                        {
                              sum += k;
                        }
                  }
            }

            //素数を数える
#pragma omp parallel
            {
                  static const int PRIME_MAX = 200000;
                  static const int PRIME_NUM_MAX = 20000;
#pragma omp for
                  for (i = 0; i < PRIME_MAX; ++i)
                  {
                        if (prime_num < PRIME_NUM_MAX && isPrime(i))
                        {
#pragma omp atomic
                              ++prime_num;
#pragma omp atomic
                              prime_total += i;
                        }
                  }
            }
      }

      //処理時間計測（終了）
      LARGE_INTEGER end;
      QueryPerformanceCounter(&end);
      float time = static_cast<float>(static_cast<double>(end.QuadPart - begin.QuadPart)
                  / static_cast<double>(freq.QuadPart));

      //結果表示
      printf("prime_num=%d, prime_total=%lld, sum=%lld, time=%.6f sec¥n", prime_num, prime_total, sum, time);

      return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果）※OpneMP 無効化時

```
prime_num=17984, prime_total=1709600813, sum=7999999999000, time=7.192203 sec
```

↓（実行結果）※OpneMP 有効化時

```
omp_get_num_procs()=8
omp_get_max_threads()=8
prime_num=17984, prime_total=1709600813, sum=7999999999000, time=1.870132 sec
```

細かい解説は省略するが、処理によって効果が大きいことは確認できる。しかし、制約も多く、思い通りの制御は難しい。

慣れないと正確な指定がしにくい。例えば、「#pragma omp parallel for」の「for」が抜けても動作するが、誤った計算結果になる。ほか、「#pragma omp parallel private(var)」の「private(var)」でブロック内のローカル変数を指定しないと正しく変数の値が扱われな

い、といった面倒が多い。

OpenMP 有効化時と無効化時を切り替えて検算し、ロジックに誤りがないことを確認することが必須となる。

スレッドの制御は通常のスレッドと同様に、OS によってスケジューリングされる。スタックサイズは直接指定できず、環境変数によって設定する。

ほか、ロック機構なども用意されている。

▼ C++11 版非同期関数

OpenMP のような分散処理の手法が、C++11 にも用意されている。

OpenMP に比べて、明示的な手続きで分散するので、処理の把握がし易い。

C++11 の非同期関数のサンプルコードを示す。

ややコードが長めになるが、応用事例もサンプルに含める。1 千万件のデータのソートのサンプルである。ラムダ式を用いてコードをコンパクトにできる点も C++11 の特徴。

C++11 非同期関数のサンプル：

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include <future>//非同期関数用

#include <thread>//スリープ用
#include <chrono>//時間計測用

#include <vector>//テスト計算用
#include <algorithm>//テスト計算用

//計算用関数 A
int calcSubA()
{
	//時間のかかる処理代わりのスリープ
	std::this_thread::sleep_for(std::chrono::milliseconds(10));
	return 1;
}

//計算用関数 B
int calcSubB()
{
	//時間のかかる処理代わりのスリープ
	std::this_thread::sleep_for(std::chrono::milliseconds(10));
	return 2;
}

//計算用関数 C
int calcSubC()
{
	//時間のかかる処理代わりのスリープ
	std::this_thread::sleep_for(std::chrono::milliseconds(10));
	return 3;
}
```

```
//通常関数処理
void testNormalCalc()
{
	//時間計測開始
	auto begin = std::chrono::high_resolution_clock::now();

	//処理
	int result = 0;
	static const int TEST_TIMES = 100;
	for (int i = 0; i < TEST_TIMES; ++i)
	{
		result += (calcSubA() + calcSubB() + calcSubC());
	}

	//時間計測終了
	auto end = std::chrono::high_resolution_clock::now();
	auto duration = static_cast<float>(static_cast<double>(std::chrono::duration_cast<std::chrono::microseconds>(end
- begin).count()) / 1000000.);

	//結果表示
	printf("----------------------------------------¥n");
	printf("subNormalCalc: result = %d (%.6f sec)¥n", result, duration);
}

//非同期関数処理
void testAsyncCalc()
{
	//時間計測開始
	auto begin = std::chrono::high_resolution_clock::now();

	//処理
	int result = 0;
	static const int TEST_TIMES = 100;
	for (int i = 0; i < TEST_TIMES; ++i)
	{
		//未来(future)に結果が返る関数を非同期で実行
		std::future<int> r1 = std::async(calcSubA),
				 r2 = std::async(calcSubB),
				 r3 = std::async(calcSubC);

		//.get()メソッドは、処理の完了を待って結果を返す
		result += (r1.get() + r2.get() + r3.get());
	}

	//時間計測終了
	auto end = std::chrono::high_resolution_clock::now();
	auto duration = static_cast<float>(static_cast<double>(std::chrono::duration_cast<std::chrono::microseconds>(end
- begin).count()) / 1000000.);

	//結果表示
	printf("----------------------------------------¥n");
	printf("subAsyncCalc: result = %d (%.6f sec)¥n", result, duration);
}

//非同期関数【応用】
void testAsyncCalcEx()
{
	//リスト作成
	static const int LIST_MAX = 10000000;
	std::vector<int> list_org;
	list_org.reserve(LIST_MAX);
	for (int i = 0; i < LIST_MAX; ++i)
	{
		list_org.push_back(i);
	}
```

```
	//リストシャッフル
	std::random_shuffle(list_org.begin(), list_org.end());

	//この時点のリストを表示
	printf("----------------------------------------¥n");
	printf("subAsyncCalcEx: before¥n");
	printf("list =");
	std::for_each(list_org.begin(), list_org.begin() + 10, [](int val){printf(" %d", val); });
	printf(" ... ");
	std::for_each(list_org.end() - 10, list_org.end(), [](int val){printf(" %d", val); });
	printf("¥n");

	//通常ソート
	{
		//時間計測開始
		auto begin = std::chrono::high_resolution_clock::now();

		//処理準備：シャッフル済みリストをコピー
		std::vector<int> list = list_org;

		//クイックソート
		std::sort(list.begin(), list.end());

		//時間計測終了
		auto end = std::chrono::high_resolution_clock::now();
		auto duration =
static_cast<float>(static_cast<double>(std::chrono::duration_cast<std::chrono::microseconds>(end - begin).count()) /
1000000.);

		//結果表示
		printf("----------------------------------------¥n");
		printf("subAsyncCalcEx: normal-sort: result (%.6f sec):¥n", duration);
		printf("list =");
		std::for_each(list.begin(), list.begin() + 10, [](int val){printf(" %d", val);});
		printf(" ... ");
		std::for_each(list.end() - 10, list.end(), [](int val){printf(" %d", val); });
		printf("¥n");
	}

	//非同期関数でソート
	//※大量にバッファを消費する。また、アルゴリズムを高速化できてもバッファコピーに時間がかかる。
	{
		//時間計測開始
		auto begin = std::chrono::high_resolution_clock::now();

		//処理準備：シャッフル済みリストをコピー
		std::vector<int> list = list_org;
		const int list_size = list.size();

		//4分割で並列クイックソート
		std::future<void> r_a[4];
		{
			//非同期処理には、関数ポインタ以外にも、関数オブジェクトやラムダ式を渡すことができる
			auto sort_lambda = [&list](const int index, const int list_begin, const int list_end)
			{
				std::vector<int>::iterator ite_begin = list.begin() + list_begin;
				std::vector<int>::iterator ite_end = list.begin() + list_end;
				std::sort(ite_begin, ite_end);
			};
			r_a[0] = std::async(sort_lambda, 0, list_size / 4 * 0, list_size / 4 * 1);
			r_a[1] = std::async(sort_lambda, 1, list_size / 4 * 1, list_size / 4 * 2);
			r_a[2] = std::async(sort_lambda, 2, list_size / 4 * 2, list_size / 4 * 3);
			r_a[3] = std::async(sort_lambda, 3, list_size / 4 * 3, list_size);
		}
```

```
		//2 分割で並列マージソート
		std::future<void> r_b[2];
		{
			//非同期処理には、関数ポインタ以外にも、関数オブジェクトやラムダ式を渡すことができる
			auto merge_sort_lambda = [&r_a, &list](const int index, const int list_begin, const int list_mid,
const int list_end)
			{
				r_a[index * 2 + 0].wait();
				r_a[index * 2 + 1].wait();
				std::vector<int>::iterator ite_begin = list.begin() + list_begin;
				std::vector<int>::iterator ite_mid = list.begin() + list_mid;
				std::vector<int>::iterator ite_end = list.begin() + list_end;
				std::inplace_merge(ite_begin, ite_mid, ite_end);//※二つのリストからマージソート
														//  する場合には std::merge() が使える
			};
			r_b[0] = std::async(merge_sort_lambda, 0, list_size / 2 * 0, list_size / 2 * 0 + list_size / 4,
														list_size / 2 * 1);
			r_b[1] = std::async(merge_sort_lambda, 1, list_size / 2 * 1, list_size / 2 * 1 + list_size / 4,
														list_size);
		}

		//マージソート（完了）
		{
			r_b[0].wait();
			r_b[1].wait();
			std::vector<int>::iterator ite_begin = list.begin();
			std::vector<int>::iterator ite_mid = list.begin() + list_size / 2;
			std::vector<int>::iterator ite_end = list.end();
			std::inplace_merge(ite_begin, ite_mid, ite_end);//※二つのリストからマージソート
													//  する場合には std::merge() が使える
		}

		//時間計測終了
		auto end = std::chrono::high_resolution_clock::now();
		auto duration =
static_cast<float>(static_cast<double>(std::chrono::duration_cast<std::chrono::microseconds>(end - begin).count()) /
1000000.);

		//結果表示
		printf("----------------------------------------¥n");
		printf("subAsyncCalcEx: async-sort: result (%.6f sec):¥n", duration);
		printf("list =");
		std::for_each(list.begin(), list.begin() + 10, [](int val){printf(" %d", val); });
		printf(" ... ");
		std::for_each(list.end() - 10, list.end(), [](int val){printf(" %d", val); });
		printf("¥n");
	}
}

//テスト
int main(const int argc, const char* argv[])
{
	//通常関数処理
	testNormalCalc();

	//非同期関数処理
	testAsyncCalc();

	//非同期関数応用
	testAsyncCalcEx();

	//終了
	return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果）

```
----------------------------------------
subNormalCalc: result = 600 (3.300186 sec)
----------------------------------------
subAsyncCalc: result = 600 (1.005057 sec)
----------------------------------------
subAsyncCalcEx: before
list = 5288787 5235665 796859 1253125 4931978 5458993 4375385 5810937 5295160 844757 ...  7573541 8996297 9161292
7190808 1950095 9319072 7664002 7360610 8990105 2669525
----------------------------------------
subAsyncCalcEx: normal-sort: result (1.193068 sec):
list = 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 ...  9999990 9999991 9999992 9999993 9999994 9999995 9999996 9999997 9999998 9999999
----------------------------------------
subAsyncCalcEx: async-sort: result (0.431025 sec):
list = 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 ...  9999990 9999991 9999992 9999993 9999994 9999995 9999996 9999997 9999998 9999999
```

なお、このサンプルプログラムに含めた並列ソート処理は、MapReduce というプログラミングモデルを参考にしている。MapReduce については、本書の最後に簡単な説明を添えている。

▼ ファイバースレッド／コルーチン

「ファイバースレッド」はノンプリエンプティブなマルチタスクの仕組みである。

複数のファイバースレッドを同時に稼働させることができるが、アクティブなスレッドの切り替えは明示的に行う必要がある。並列処理は不可能。OS の負担がほとんどかからず軽量なので、使いどころによっては効率的。通常のスレッドと同様に、それぞれのファイバースレッドがスタック領域を持つ。

ファイバースレッドは「コルーチン」とも言われる。

コルーチンは、Lua や Sqirrel などの汎用スクリプト言語や、C#などに実装されている。

汎用スクリプト言語のコルーチンは、ゲームでもよく用いられる。例えば、キャラクターの AI をコルーチン化することで、シーンに登場するキャラーそれぞれが並行して AI 処理を実行する。処理の途中でサスペンドすることで処理を中断し、次のフレームでサスペンドした位置から再開する。この「サスペンド」によって、他のコルーチンやメインループに制御を切り替える。

ファイバースレッドの使いどころとして、「並列処理の待ち受け」というものがある。

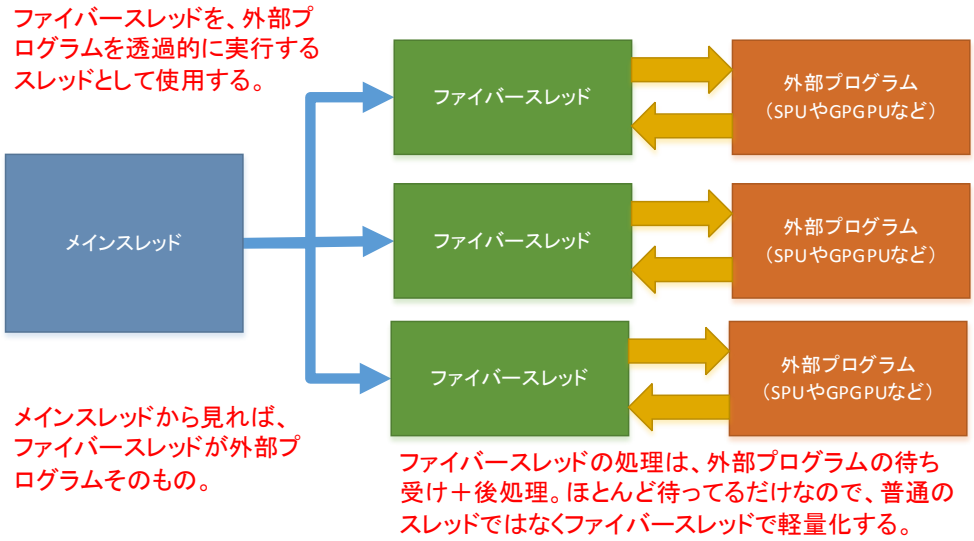
外部プロセッサでプログラムを動作させた際に、その完了をファイバースレッドで待ち受ける手法である。

これにより、外部プログラムを透過的に自身のスレッドに見立てることができる。外部プログラム完了後の処理を行うが、ほとんどは単なる待ち受けであるため、普通のスレッドではなくファイバースレッドを用いることで、OS やリソース消費の負担を軽減する。

スタック領域の割り当てなど、多少のリソース消費は生じるが、コールバック処理にするよりも安全で、一括処理にするよりも局所化された柔軟なプログラム構造にできる。

この手法は、PS3 の SPU の処理待ちによく用いられている。ほか、GPGPU やグリッド・コンピューティングなどへの利用が考えられる。

ファイバースレッドの活用例：



WIN32API によるファイバースレッドのサンプルプログラムを示す。

WIN32API 版ファイバースレッドのサンプル：

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include <Windows.h>
#include <Process.h>

//スレッドローカルストレージ(TLS)
#define   _TLS __declspec(thread)//Visual C++固有版 TLS 指定
//#define _TLS thread_local      //C++11 仕様版 TLS 指定：Visual C++ 2013 では未対応

//ファイバースレッド管理情報
static const int FIBER_MAX = 3;      //ファイバースレッドの最大数
_TLS LPVOID s_pFiler[FIBER_MAX] = {};//ファイバースレッドのインスタンスのポインタ
_TLS int s_fiberNum = 0;             //稼働中のファイバースレッド数
_TLS int s_fiberNow = 0;             //現在のファイバースレッド

//ファイバースレッドが存在するか？
```

```
//※管理用のスレッドは数に含めない
bool isExistFiberThread()
{
	return s_fiberNum > 1;
}

//ファイバースレッド切り替え
void switchNextFiber()
{
	if (s_fiberNum == 0)
	{
		fprintf(stdout, "Fiber thread is nothing.¥n");
		return;
	}
	s_fiberNow = (s_fiberNow + 1) % s_fiberNum;
	fprintf(stdout, "Fiber thread No.%d is switched.¥n", s_fiberNow);
	SwitchToFiber(s_pFiler[s_fiberNow]);
}

//ファイバースレッドを追加
template<typename T>
bool addFiber(LPFIBER_START_ROUTINE func, const size_t stack_size, T param_p)
{
	if (s_fiberNum >= FIBER_MAX)
	{
		fprintf(stderr, "Fiber thread was not more added.¥n");
		return false;
	}
	fprintf(stdout, "Fiber thread No.%d was added.¥n", s_fiberNum);
	s_pFiler[s_fiberNum++] = CreateFiber(stack_size, func, (LPVOID)param_p);
	return true;
}

//現在のファイバースレッドを削除
void removeCurrentFiber()
{
	for (int i = s_fiberNow; i < s_fiberNum - 1; ++i)
	{
		s_pFiler[i] = s_pFiler[i + 1];
	}
	--s_fiberNum;
	fprintf(stdout, "Fiber thread No.%d was removed.¥n", s_fiberNow);
	if (s_fiberNum == 0)
	{
		s_fiberNow = 0;
	}
	else
	{
		s_fiberNow = (s_fiberNum + s_fiberNow - 1) % s_fiberNum;
		switchNextFiber();//自身を削除したらすぐに次のファイバースレッドを実行する
	}
}

//ファイバースレッド関数
void WINAPI fiberFunc(LPVOID param_p)
{
	//パラメータ受け取り
	const char* fiber_name = reinterpret_cast<const char*>(param_p);

	//テスト処理
	for (int i = 0; i < 3; ++i)
	{
		printf("fiberFunc(): [%s](%d)¥n", fiber_name, i);

		switchNextFiber();//次のスレッドに制御を移す
```

```
	}

	//最後に自身を削除する（同時に次のスレッドに制御を移す）
	removeCurrentFiber();

	//※関数を return すると、その時点でスレッド（fiberMain）が
	//  終了するので注意！
	//  （ファイバースレッドの切り替えは、関数呼び出しと違って
	//  単純なプログラムカウンタの切り替えなので、return すると、
	//  fiberMain() の return とみなされてしまう）
}

//ファイバースレッド管理用スレッド　※必須
unsigned int WINAPI fiberMain(void* param_p)
{
	//スレッドをファイバースレッドとして登録
	//※他のファイバースレッドと処理を切り替える必要があるため
	//  管理スレッドもファイバースレッドの一つにする。
	//※main() から見たら、普通のスレッドであることに変わりはない。
	s_pFiler[s_fiberNum++] = ConvertThreadToFiber(NULL);

	//ファイバースレッドを追加
	addFiber(fiberFunc, 1024, "太郎");
	addFiber(fiberFunc, 1024, "次郎");

	//ファイバースレッドを切り替えながら、全て完了するのを待つ
	while (isExistFiberThread())
	{
		switchNextFiber();//ファイバースレッドの切り替え
		fprintf(stdout, "- loop -¥n");
		Sleep(0);//他のスレッドに切り替え
	}

	//ファイバースレッドを削除
	removeCurrentFiber();

	return 0;
}

//メイン
int main(const int argc, const char* argv[])
{
	fprintf(stdout, "- Fiber Thread Test: BEGIN -¥n");

	//ファイバースレッド管理用のスレッドを生成
	unsigned int tid = 0;
	HANDLE hThread = (HANDLE)_beginthreadex(NULL, 0, fiberMain, nullptr, 0, &tid);

	//ファイバースレッド管理スレッド終了待ち
	WaitForSingleObject(hThread, INFINITE);

	fprintf(stdout, "- Fiber Thread Test: END -¥n");

	return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果）

```
- Fiber Thread Test: BEGIN -
Fiber thread No.1 was added.
Fiber thread No.2 was added.
- loop: start -                    fiberMain でファイバースレッドを切り替えると、連鎖的に全てに切り替わる
Fiber thread No.1 is switched.
fiberFunc(): [太郎](0)
Fiber thread No.2 is switched.
fiberFunc(): [次郎](0)
```

```
Fiber thread No.0 is switched.
- loop -                          fiberMain でファイバースレッドを切り替えると、連鎖的に全てに切り替わる
Fiber thread No.1 is switched.
fiberFunc(): [太郎](1)
Fiber thread No.2 is switched.
fiberFunc(): [次郎](1)
Fiber thread No.0 is switched.
- loop -                          fiberMain でファイバースレッドを切り替えると、連鎖的に全てに切り替わる
Fiber thread No.1 is switched.
fiberFunc(): [太郎](2)
Fiber thread No.2 is switched.
fiberFunc(): [次郎](2)
Fiber thread No.0 is switched.
- loop -                          fiberMain でファイバースレッドを切り替えると、連鎖的に全てに切り替わる
Fiber thread No.1 is switched.
Fiber thread No.1 was removed.   ←ファイバースレッド終了
Fiber thread No.1 is switched.
Fiber thread No.1 was removed.   ←ファイバースレッド終了
Fiber thread No.0 is switched.
- loop -
- loop: end -
Fiber thread No.0 was removed.   ←fiberMain 終了
- Fiber Thread Test: END -
```

▼ SPURS／GPGPU／DirectCompute／CUDA／ATI Stream／OpenCL

より大規模な並列処理技術を簡単に解説する。

標題に記したのは、いずれもメインプロセッサ（コア）以外のプロセッサを使用して並列処理を行う為のフレームワークである。プロセッサ独自の処理コードが必要なため、「プログラム中の一部の関数をスレッド化する」といったことはできない。メモリもメインメモリから独立しているものが多く、専用のメモリ管理が必要になる。

- SPURS ..... PS3 用の SDK で提供されている SPU のジョブタスクスケジューラ。稼働中のタスクだけではなく、予約待機状態のタスクも管理する。個々のタスクを「ジョブ」と呼ぶ。「Spurs Engine」と呼ばれる演算装置とは別物。SPU は独自のメモリ領域を持ち、専用のプログラムを必要とする。SPURS はプログラムとデータの転送、プログラムの実行をまかなう。
  ちなみに、「Spurs Engine」は SPE を 4 基とエンコーダー／デコーダー処理チップ搭載して PPE は搭載しないコプロセッサ。
- GPGPU ..... 「General-Processing computing on Graphincs Processing Unit：GPU による汎目的演算」のこと。描画用の処理装置を他の演算に活用する。浮動小数点演算に強く、プログラミングにはコンピュートシェーダーを用いる。なお、「GPGPU」自体は技術的概念を指す言葉

であって、特定のフレームワークではない。

・ DirectCompute ..... Microsoft による GPGPU 対応 API。DirectX11 以降に含まれる。

・ CUDA ..... NVIDIA による GPU 向けの C 言語の統合開発環境。NVIDIA 製の GPU に特化した GPGPU のためのフレームワークである。「CUDA」は「Compute Unified Devide Architecture」の略。「クーダ」と読む。

・ ATI Stream ..... AMD による GPGPU 技術。開発フレームワークには「OpenCL」を用いる。合併前の社名の「ATI」がその名に残る。

・ OpenCL ..... 汎用的な並列コンピューティングの開発フレームワーク。GPGPU、Cell（SPU）、CPU（マルチプロセッサ／マルチコア）などの異種演算装置をひとまとめに扱う。

「SPURS」「DirectCompute」「CUDA」「OpenCL」が競合技術。

なお、「CUDA」「OpenCL」のサンプルプログラムを記載したいところだったが、本書作成時点で間に合わず。

▼ クライアント・サーバー／クラウド／グリッド／RPC／ORB／Hadoop

さらに大規模な並列処理技術を簡単に解説する。

標題に記したのは、いずれもネットワークを介して他のコンピュータを使用することで並列処理を行うための技術・概念・フレームワークである。

・ クライアント・サーバー ... 通信処理モデルの一形態のこと。1 台のサーバーに複数のクライアントが接続して、情報の共有を行うためのシステム。
クライアント側では、サーバーのレスポンスを待たずに画面操作を受け付けるなど、並列処理を行う。
データベースサーバーや Web サーバーなど、「サーバー」と呼ばれるものの多くはこの形態。なお、ソフトウェア的な概念なので、（主に開発中に）同一 PC 上でサーバーとクライアントの両方を動かしてもよい。
余談になるが、「クライアント・サーバー通信」に対して、情報を一か所に集めず、各機器同士が直接情報を渡し合うのを「ピア・ツー・ピア通信」と呼ぶ。また、ゲーム

機でおなじみの「アドホック通信」はもっとローレベルな通信のことで、互いの機器を認識して直接の通信を確立するための技術を指す。「アドホック通信」では周囲の機器としか通信できないため、必然的に「ピア・ツー・ピア通信」を行うことになる。

・ クラウド ..... クラウド・コンピューティング。
インターネットを介して特定のサーバーシステムを提供するサービスの一形態。
オンラインストレージやグループウェア、ブログ、サーバーレンタルなどの広範囲なサービスを含む抽象的な用語。オンラインゲームもクラウドの一種と言える。
「クラウド」という用語は、これらのシステムの技術や形態を表すのではなく、これらのシステムをサービスとして広範囲に提供する業務形態を意味する。
細かくサービスを分類すると、ASP、SaaS、PaaS、IaaS などがある。（説明は省略）

・ グリッド ..... グリッド・コンピューティング。
他の機器の演算装置（演算資源）を利用して、大規模な並列処理を行う技術的概念。

・ RPC ..... Remote Procedure Call（リモート・プロシージャ・コール）。
プログラミングの技術的概念の一つで、他の PC 上の関数を呼び出す手法である。クラウド・サービスには、ユーザーが使える API を提供しているものも多い。会社のファイヤーウォールを超えて API を利用できるように、「SOAP」などの http 通信ベースの RPC 技術が確立されている。

・ ORB ..... Object Request Broker（オブジェクト・リクエスト・ブローカー）。
オブジェクトベースの RPC。サーバー側とクライアント側のそれぞれに透過的に一対のオブジェクトを配置して通信する技術。CORBA（コルバ）や JaveEE の EJB が有名。（説明は省略）

・ Hadoop ..... Apache Hadoop（アパッチ・ハドゥープ）。
大規模分散処理のための Java フレームワーク。グリッド・コンピューティングのための汎用フレームワークと

して特に有名。

このような分散技術は、ゲームプログラマーにとっても身近なところで活用されている。分散コンパイルや分散レンダリングなどは、グリッド・コンピューティングの一種である。

また、「Cell コンピューティング」の構想のもと、世界中の PS3 を使ってタンパク質解析などの演算を行う「Life with Playstation」という、グリッド・コンピューティング的な取り組みもあった。現在終了しているとのこと。

▼ 割り込み／システムコール

原点に立ち戻り、「マルチスレッド」や「マルチプロセス」以前の並行処理について説明する。

「割り込み」は、昔からゲームプログラマーにもなじみ深いものであり、今でも利用されている。そのため、「使われている割り込み処理」と、「割り込み処理の中でどんなことが行われているか」は、マルチスレッドプログラミングを行う上でも、注意しなければならない。

まず、具体的な割り込みの例を説明する。

● 割り込みの具体例：垂直同期割り込み（V-SYNC 割り込み）

テレビに画像を表示する際、左上から順に一点ずつ高速に点を打っていき、右下まで打ち終わったらまだ左上に戻る。

この「戻る時」が「垂直同期」と呼ばれる描画が行われないタイミングである。

この時、ゲーム機はハードウェア的に反応して「垂直同期割り込み」と呼ばれる割り込みを発生させる。（垂直同期は「V-SYNC」とも呼ばれる）

「割り込み」が発生すると、あらかじめ登録されたアドレスのプログラムを呼び出す。この割り込み処理で画面のフリップを行うことで、ゲームはティアリングの起こらない映像描画を実現する。

このタイミング以外でフリップすると、「画面の上部が前のフレームの画像で下部が次のフレームの画像」という二つの画像が混ざった「ティアリング」という現象が起こる。

【余談】垂直同期割り込みの失敗 ～ 処理落ちとティアリング対策

余談になるが、処理落ちした時は、割り込み処理でフリップを実行せず、処理が完了したタイミングでフリップするためティアリングが起こる。

まるまる 1 フレームフリップを遅らせればティアリングは防げるが、その完了を待つため、処理が大きく遅れてしまう。

この処理落ちの対策として「トリプルバッファ」を用いる。

「ダブルバッファ」の場合、「現在表示中の画像」と「現在処理中（描画中）の画像」の二つを用いて交互にフリップする。

トリプルバッファでは、その二つの画像の間に「フリップ待ちの画像」を入れる。これにより、「垂直同期割り込み」に処理が間に合わなかった場合でも、フリップ待ちの画像として予約さえしておけば、すぐに次の処理（描画）を進めることができる。また、処理が間に合っている限りは、ダブルバッファと同様に即座にフリップしていけば、描画が常時遅延するようなことにもならい。

トリプルバッファの問題点としては、より多くのグラフィックメモリを必要とすることである。しかし、ティアリングはかなり見苦しいので、グラフィックメモリに余裕があるならトリプルバッファは検討した方がよい。

● 割り込みとコンテキストスイッチ、スタック領域の配慮

割り込みはとても乱暴な処理である。

メインスレッドや他のスレッドがどんな状態であっても、最優先で有無をいわさず処理が実行される。

むしろ、それぐらい乱暴でなければ、フリップ処理のような「タイミングが命」の処理を信頼して実行することができない。

割り込み時の「コンテキストスイッチ」では、コンテキスト（CPU のレジスタなど）の退避を、その時割り込んだスレッドのスタック領域に行う。

そのため、スレッドを設計する際は、そのスレッドの稼働中に割り込みが発生しても問題が起こらないように、スタック領域のサイズに余裕を持たせるなどの配慮が必要になる。これは、ファイバースレッドに対しても同様である。

「どの程度の余裕が必要か？」については、「どのような割り込み処理が実装されているか」による。どの割り込み処理が起こっても十分なスタック領域の余裕が必要である。

また、スレッドによっては割り込み禁止処理なども用いる必要がある。

● 割り込みハンドラ／割り込みサブルーチン（ISR）

割り込みで実行される処理は、「割り込みハンドラ」や「割り込みサブルーチン」と呼ぶ。割り込みサブルーチンの略語として「ISR」（Interrupt Service Routine）とい

う用語もよく用いられる。
　本書では、以降「割り込みハンドラ」で統一する。

　OS に対して、特定の割り込みに対する割り込みハンドラを登録しておくと、その後条件が揃った時に割り込みハンドラが実行されるようになる。

　実際には、「OS に登録を要求する」というより、「割り込みベクタ」と呼ばれるコールバックテーブルに処理のアドレスを登録しておくだけである。

● 割り込みハンドラの処理

　割り込みハンドラの処理は、スレッドセーフではないことに留意しなければならない。
　大きなローカル変数の使用やメモリ確保などは行ってはならず、printf などの出力も避け、関数呼び出しのようなスタックを消費する要素もできるだけ排除すべきである。また、極めて短時間で処理を復帰させる必要がある。

　割り込み処理は本当に必要に迫られたときにだけ使用し、どうしても使う場合は、「フラグを立ててタイミングを通知するだけ」にとどめ、他のスレッドが（若干遅延するが）そのフラグを見て処理を行うといった設計にしたほうがよい。
　画面フリップのような、タイミングが重要な処理はそのまま割り込み処理内で実行する。

　なお、割り込み処理中に同じ割り込みの条件が揃っても、割り込みは発生せずに無視される。

● ハードウェア割り込みとソフトウェア割り込み／イベントコールバック

　ここまで、割り込み処理に対する厳しい制約を示したが、基本的には「ハードウェア割り込み」と呼ばれる割り込みのことを示している。ハードウェア割り込みは、特に神経質に扱う必要がある。

　ハードウェア割り込みに対して「ソフトウェア割り込み」（SWI = SoftWare Interrupt）というものもある。

　ソフトウェア割り込みは基本的にプロセスで保護されるため、安全性が高い。「例外」の発生や「ブレークポイント」、［Ctrl］＋［C］キーでプロセスに終了命令を出すのもソフトウェア割り込みである。

　なお、VB や C#、MFC など、多くの開発ツールでは、ボタンクリックやキー入力

などに応じた「イベントコールバック」を定義できる。

これも割り込みの一種のようなものであるが、基本的に各アプリケーションで制御され、特にコンテキストの切り替えを行うこともなく、逐次処理される。

● シグナル

OS が用意するプロセス管理のためのソフトウェア割り込みが「シグナル」である。

Unix 系 OS に搭載されている仕組みである。シグナルについてはサンプルプログラムを含めたもう少し詳しい説明を後述する。

なお、Windows では、シグナルのように、プロセスの外から何らかの要求を行う際は、ウインドウメッセージを用いる。

● タイマー割り込み

タイマー割り込みは一定時間ごとにイベントハンドラを呼び出す割り込みである。

OS はハードウェアタイマー割り込みを使うことで、タスクのタイムスライスを実現している。

Unix 系 OS では、一定間隔で「アラーム」というシグナルを発行するタイマー割り込みを用意している。

また、多くの開発ツールでは、イベントコールバックの形でソフトウェアタイマー割り込みに対応している。

● システムコール

「シグナル」のようなソフトウェア割り込みは OS が管理しているため、イベントハンドラの登録には、前述の「システムコール」を用いる。

■ マルチスレッドで起こり得る問題①

マルチスレッドプログラミングは難しい。

安易な制御では結果が破損し、結果を保護しようとすればパフォーマンスが劣化する。

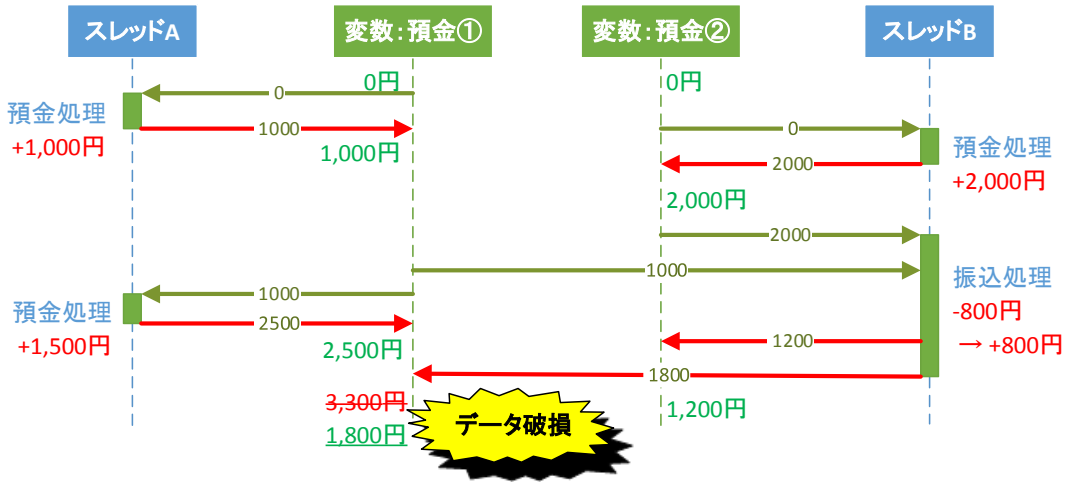
スレッドを作ること自体はとても簡単ではあるが、各スレッドが情報をどのように保護し、共有し、かつ、最大限のパフォーマンスを引き出すか、という点を適切に設計するのは難しい。

以降、マルチスレッドプログラミングで実際に起こりえる問題とその対策を説明していく。

▼ データ破損（不完全なアトミック操作）

スレッドの処理が、データを読み込んでから書き込むまでの間に他のスレッドの処理が入り込むと、データ破損が起こる。

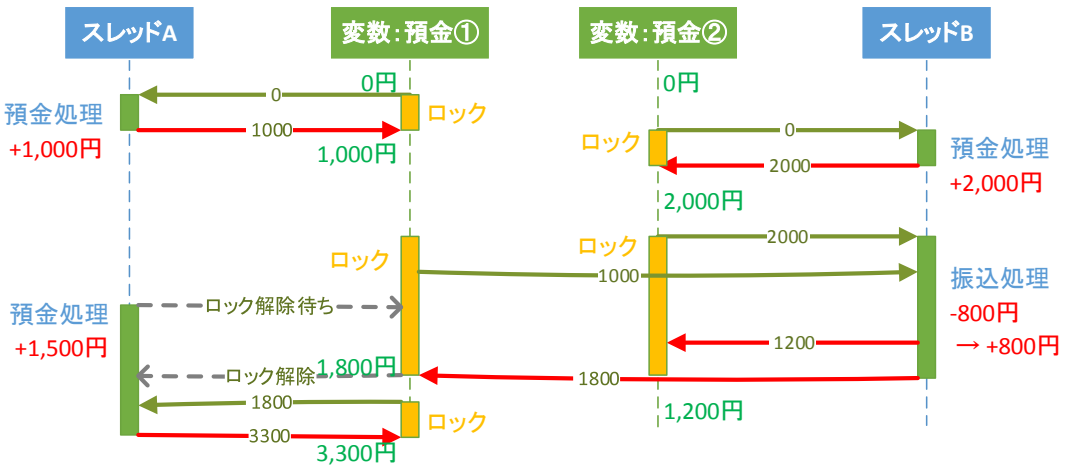
データ破損の例：



● 解決策

この問題は、一方が処理を始めた時点で、他のスレッドが処理できないように「ロック」することで解消できる。

データ破損の改善例：



このように、読み込み～書き込みの過程で割り込まれては困る一続きの操作（処理）を、「アトミック操作」もしくは「不可分操作」と呼ぶ。

一旦読み出して書き戻すような操作ではなく、「a += 10」のような一回の式で済ませればロックする必要がないかと思えばそうでもない。「a += 10」のような処理では、機械語レベルでは「レジスタ = a → レジスタ += 10 → a = レジスタ」という処理に展開されるので、途中で割り込まれる事は十分に起こり得る。

こうした問題はタイミングによって生じる問題である。
シングルコア環境では中途半端なタイミングでコンテキスト切り替えが発生しない限りは問題が表面化しないため、潜在的な問題が埋もれている可能性がある。
マルチコア環境ではあらゆるタイミングで並列動作するので、長らく大丈夫だったはずの処理でも問題を起こす可能性がある。

● 同期処理

データ破損を防ぐ「同期」処理には様々な方法がある。
アトミック操作を保証するための「排他制御」（ロック）や、一方の準備ができるまで監視しながら待機する「モニター」など、様々な種類とそれぞれの問題がある。詳しくは後述する。

▼ スレッド間の情報共有の失敗①：コンパイラの最適化による問題

マルチスレッドプログラミングでは、他のスレッドが更新した情報を確実に扱えるように気にかける必要があるが、「そうしているつもりなのにうまくいかない」という問題が起こることがある。具体的な事例を示す。

スレッド間の情報共有に失敗するサンプル：

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include <Windows.h>
#include <Process.h>

//処理終了フラグ
bool s_isFinished = false;

//スレッド１
unsigned int WINAPI func1(void* param_p)
{
	//開始
	printf("- func1(): start -¥n");
	fflush(stdout);

	//処理...
	printf("func1(): process ...¥n");
```

```
	fflush(stdout);
	Sleep(1000);

	//処理終了通知
	s_isFinished = true;

	//終了
	printf("- func1(): end -¥n");
	fflush(stdout);
	return 0;
}

//スレッド２
unsigned int WINAPI func2(void* param_p)
{
	//開始
	printf("- func2(): start -¥n");
	fflush(stdout);

	//処理終了待ち
	printf("func2(): wait ...¥n");
	fflush(stdout);
	while (!s_isFinished){}
	printf("func2(): ok!¥n");
	fflush(stdout);

	//処理...
	printf("func2(): process ...¥n");
	fflush(stdout);
	Sleep(1000);

	//終了
	printf("- func2(): end -¥n");
	fflush(stdout);
	return 0;
}

//テスト
int main(const int argc, const char* argv[])
{
	//開始
	printf("- main(): start -¥n");
	fflush(stdout);

	//スレッド開始
	HANDLE hThread[2] =
	{
		(HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 0, func1, nullptr, 0, nullptr),
		(HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 0, func2, nullptr, 0, nullptr)
	};

	//スレッド終了待ち
	WaitForMultipleObjects(2, hThread, true, INFINITE);


	//終了
	printf("- main(): end -¥n");
	fflush(stdout);
	return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果） ※Debug ビルド

```
- main(): start -
- func1(): start -
func1(): process ...
```

```
- func2(): start -
func2(): wait ...
- func1(): end -
func2(): ok!
func2(): process ...
- func2(): end -
- main(): end -
```

これは正常に動作した結果である。

Debug ビルドで正常動作を確認できたので、Release ビルドでも動作を確認してみる。

↓（実行結果） ※Release ビルド

```
- main(): start -
- func1(): start -
func1(): process ...
- func2(): start -
func2(): wait ...
- func1(): end -
※ここから先に進まない（エラーは出ない）
```

なぜ挙動が変わったのか？それは、Release ビルドの最適化処理の影響である。

説明のために、Debug ビルド時と Releas ビルド時のアセンブラコードを示す。（Visual C++ 2013 で調査）

Debug ビルド時のアセンブラコード： ※一部抜粋

```
... (略) ...

    21:
    22:     //処理終了通知
    23:     s_isFinished = true;
00F84018 C6 05 30 81 F8 00 01 mov         byte ptr ds:[00F88130h],1      ← s_isFinished のメモリに 1 をセット

... (略) ...

    41:     while (!s_isFinished){}                                      【ループ処理：ここから】
00F84124 0F B6 05 30 81 F8 00 movzx       eax,byte ptr ds:[00F88130h]    ← s_isFinished のメモリを読み込み
00F8412B 85 C0                test        eax,eax                       ← 値が 0 かチェック
00F8412D 75 02                jne         func2+0B1h (00F84131h)        ← 0 以外なら 00F84131 にジャンプ
00F8412F EB F3                jmp         func2+0A4h (00F84124h)        ← (0 だったので) 00F84124 にジャンプ
    42:     printf("func2(): ok!¥n");                                    【ループ処理：ここまで】
00F84131 8B F4                mov         esi,esp

... (略) ...
```

Release ビルド時のアセンブラコード： ※一部抜粋

```
... (略) ...

    22:     //処理終了通知
    23:     s_isFinished = true;
    24:
    25:     //終了
    26:     printf("- func1(): end -¥n");
00BD1041 68 3C 21 BD 00       push        0BD213Ch
00BD1046 C6 05 68 33 BD 00 01 mov         byte ptr ds:[00BD3368h],1      ← s_isFinished のメモリに 1 をセット

... (略) ...

00BD10A3 A0 68 33 BD 00       mov         al,byte ptr ds:[00BD3368h]     ← s_isFinished のメモリを読み込み
00BD10A8 83 C4 10             add         esp,10h
00BD10AB EB 03                jmp         func2+40h (0BD10B0h)
```

```
00BD10AD 8D 49 00             lea         ecx,[ecx]
    41:     while (!s_isFinished){}                                 【ループ処理：ここから】
00BD10B0 84 C0                test        al,al                     ← 値が 0 かチェック
00BD10B2 74 FC                je          func2+40h (0BD10B0h)      ← 0 なら 00BD10B0 にジャンプ
                                                                    【ループ処理：ここまで】
... (略) ...
```

前述の「レジスタ」の説明で、コンパイラが最適化によって変数の参照を極力減らすことを解説した。この結果は、その影響を受けたものである。

Release ビルドのアセンブラコードを見ると（最適化によって C++言語のコードとアセンブラの対応付けがきちんとできない状態になっているが）、「s_isFinished」という変数をメモリから読み出しているのがループの外だと分かる。これでは他で変数の値が書き換わってもループ処理中に検出できない。そのため、ループが終了しなくなってしまったのである。

● 解決策

このような問題に対して、C++言語は言語仕様として解決策を用意している。

「volatile 型修飾子」である。

この修飾子が付いた変数は、コンパイラが最適化せずに、常にメモリを参照するようになる。

なお、volatile 型修飾子は、「揮発性型修飾子」と訳されたりもするが、「volatile = 変わりやすい、気まぐれ」の意味で捉えたほうが理解しやすい。

修正を加えたプログラムを示す。

スレッド間の情報共有に失敗するサンプル：※修正版の一部抜粋

```
…（略）…

//処理終了フラグ
volatile bool s_isFinished = false;

…（略）…
```

Release ビルド時のアセンブラコード：　※修正版の一部抜粋

```
... (略) ...

    22:     //処理終了通知
    23:     s_isFinished = true;
    24:
    25:     //終了
    26:     printf("- func1(): end -¥n");
00BD1041 68 3C 21 BD 00       push        0BD213Ch
00BD1046 C6 05 68 33 BD 00 01 mov         byte ptr ds:[0BD3368h],1      ← s_isFinished のメモリに 1 をセット

... (略) ...

    41:     while (!s_isFinished){}                                 【ループ処理：ここから】
00B810A6 80 3D 68 33 B8 00 00 cmp         byte ptr ds:[0B83368h],0      ← s_isFinished のメモリが 0 かチェック
00B810AD 74 F7                je          func2+36h (0B810A6h)          ← 0 なら 00B810A6 にジャンプ
                                                                    【ループ処理：ここまで】
... (略) ...
```

↓（実行結果） ※Release ビルド（修正版）

```
- main(): start -
- func1(): start -
func1(): process ...
- func2(): start -
func2(): wait ...
- func1(): end -
func2(): ok!
func2(): process ...
- func2(): end -
- main(): end -
```

▼ スレッド間の情報共有の失敗②：CPU の最適化による問題

後述する「ミューテックス」のような「安全だが低速な同期手法」に頼らず、高速化のためにと、自前で同期の制御を行おうとすると、一見して CPU の不具合とも思えるような不可思議な問題に直面することがある。

● 問題点

例えば、下記のような処理があるとする。

[グローバル変数]

```
volatile bool flg = false;
volatile int val = 0;
```

[スレッド A]

```
val = 123;  //先に値をセットしてから、
flg = true; //フラグを更新
```

[スレッド B]

```
if(flg) //フラグの更新状態をチェック
      std::cout << "val=" << val << std::endl; //値を表示
```

[処理結果]※タイミングによって起こり得る問題

```
val=0       ←普通に考えて確実に 123 となるはずが、そうならない場合がある
```

スレッド A は、変数 val に値をセットした上で flg を更新することで、スレッド B に値の更新を通知している。

スレッド B はフラグの更新を確認してから、変数 val を表示している。

val を先に更新してから flg を更新しているので、flg の更新が確認できれば val には確実に値が格納されているはずである。しかし、そうならないことがある。

● アウト・オブ・オーダー実行

CPU は、必ずしもプログラム（機械語・アセンブラ）の順序通りに実行するとは限らない。

CPU は、命令の実行効率を上げるために、「アウト・オブ・オーダー」（順序を守らない実行）という、最適化を実行時に行う。

CPU の内部では、機械語の命令コードを逐次処理していくのだが、この時、可能な

限り複数の命令を同時に実行しようとする。これは、「スーパースカラー」（もしくは「スーパースケーラ」）と呼ばれる、命令パイプラインを並列に処理する技術である。

これにより、実行順序が逆転することが起こり得る。

本来はプログラムの整合性を損なわない範囲でこのような最適化を行っているのだが、マルチスレッドや割り込みによって途中に処理が割り込まれると、問題として表面化することが起こり得る。

なお、「アウト・オブ・オーダー実行」に対して、順序どおりに命令を実行することを「イン・オーダー実行」と呼ぶ。

● メモリ操作命令：ロード／ストア

このような問題は、CPU のメモリ操作命令の順序が損なわれると起こる。

CPU は、メモリ上のデータを操作する際、「ロード」命令によってメモリからレジスタ（CPU 内の変数）に読み出し、値を更新した後、「ストア」命令によってレジスタからメモリに書き戻す。

x86 系 CPU における一般的なロード命令は「MOV reg, [mem]」で、ストア命令は「MOV [mem], reg」というものである。命令はどちらも「MOV」であるが、その操作が「レジスタ←メモリ」（ロード）か「メモリ←レジスタ」（ストア）で呼び分ける。ほか、ロードとストアをいっぺんに行う「XCHG」という命令もある。

● メモリバリア

このような問題の解決策は、CPU の命令レベルで用意されている。

CPU に対して、メモリ操作命令の順序性を保証するように働きかける命令があり、そのような命令を「メモリバリア」（もしくは「メモリフェンス」）と呼ぶ。

● 解決策①

このような問題は、前述の「データ破損」で示した解決策を用いることで対処できる。

開発言語や SDK によって用意されている「排他制御」（ロック）の仕組みを利用することで、メモリバリアの確実性も保証される。

● 別の解決策：ロックフリー

ちょっとした値の更新で逐一ロックを行うのは処理コストが高い。

ロックを用いずにデータ共有を保証することができれば、ロックを使わないで済む

場面もある。

ロックを用いずに確実なデータ共有を保証する手法（アルゴリズム）を「ロックフリー」（Lock-Free）と呼ぶ。また、スレッドの処理全体がロックフリーな処理になっていることを「ウェイトフリー」（Wait-Free）と呼ぶ。

処理のパフォーマンスを追求するなら、このようなロックフリーの処理構造を追求しなければならない。

● 解決策②

ロックフリーな処理を実現するには、CPU のメモリバリア命令を使用することである。

C++11 では、「アトミック型」と呼ばれるクラスが用意されており、これを使用すれば、コンパイラが CPU のメモリバリア命令を使用するようにコード生成する。

「アトミック型」は、ロックフリーでデータを共有する手段となる。これを用いた場合、前述の問題のコードはこのように修正する。

[グローバル変数]

```
std::atmic<bool> flg = false;
volatile int val = 0;
```

[スレッド A]

```
val = 123;  //先に値をセットしてから、
flg.store(true);  //フラグを更新
```

[スレッド B]

```
if(flg.load()) //フラグの更新状態をチェック
      std::cout << "val=" << val << std::endl; //値を表示
```

[処理結果]

```
val=123      ←確実に 123 という結果が得られる
```

「アトミック型」にはメモリ操作方法を指定するオプションがあり、それを使うと、逆に「メモリバリアを使わない」という指定もできる。これにより、余計な命令が発行されなくなるため、わずかにパフォーマンスが向上する。厳密なパフォーマンスチューニングを行う場合に活用できる。

参考までに、メモリ操作方法を指定したコードは下記のようになる。

[スレッド A]

```
val = 123;  //先に値をセットしてから、
flg.store(true, std::memory_order_release);//フラグを更新：ストア専用のメモリバリアを指定
```

[スレッド B]

```
if(flg.load(std::memory_order_relaxed)) //フラグの更新状態をチェック：メモリバリアなし
      std::cout << "val=" << val << std::endl; //値を表示
```

「アトミック型」のデフォルトは、ロード／ストア共にメモリバリアすることである。

以上のように、C++11 のアトミック型は、一見して単なるクラスライブラリだが、volatle 型と同様に、コンパイラにコード生成の方法を指定するためのものであり、言

語仕様に密着している。

このメモリ操作指定に関する説明は割愛するが、後述する「モニター：アトミック操作によるビジーウェイト」のサンプルプログラムに、コメントとして説明を記載している。

▼ 困難なマルチスレッドプログラミング

以上の例からも、マルチスレッドのプログラミングは非常に繊細であることがわかる。また、こうした問題について理解していないと、問題発生時に原因を探り当てることが非常に困難となり、闇雲にハードウェアやコンパイラの不具合を疑いだすことにもなりかねない。

そのため、面倒でも、マルチスレッドプログラミングは十分に理解を深めてから取り組むべきである。

マルチスレッドプログラミングでは、デバッガも有効に使えないことがあったり、デバッグ用の変数操作一つで挙動が変わったりする。後者は、メモリ操作が増えて、思いがけずメモリバリアの役割を果たし、問題が再現しなくなるといったことがある。

繰り返しになるが、このような十分な知識と理解がないと、マルチスレッドの問題を自力で解決することができない。

■ スレッドの同期

スレッドの同期について解説する。

「同期」とは、先の「データ破損の問題」で示したように、複数のスレッドがタイミングを取り合うことである。

同期が必要なのは、「確実な情報の共有」や「共有リソースの排他的なアクセス」を行うためである。一方のスレッドが情報を作ったり更新したりしている間に、他方のスレッドはその完了を「待つ」ことになる。

この「待つ」という処理を適切に行わないと、大きくパフォーマンスを劣化させてしまうことになりかねないので注意が必要である。

具体的な同期の手法を説明する前に、まず、この「待つ」手法について説明する。

大きくは 2 種類の待ち方がある。

▼ ビジーウェイト

「ビジーウェイト」は、その名の通り「忙しく待つ」ことである。

ループ処理でフラグを監視するような処理が該当する。
また、「スピンロック」など、ライブラリが提供する機能にもビジーウェイトを扱うものがある。

ビジーウェイトは非常に軽量で、待機の必要がない状況ではほとんど無駄な処理をせずに素通りする。しかし、待機が発生すると、激しく状態を監視し続け、CPU を占有する。そのため、並列処理ができない環境（シングルプロセッサ／シングルコア）でビジーウェイト状態に入ると、必ずタイムスライスを使い切ることになり、非効率となる。

ビジーウェイトの使いどころは、並列処理環境（マルチプロセッサ／マルチコア）にある。
並列処理環境であれば、ビジーウェイト中にも他のスレッドが状態を更新できる。しかし、それでも CPU（コア）の一つは占有されるので、長時間の待機に用いるとやはり非効率となる。

このように、ビジーウェイトには何かと制約が多いので、大抵の場合は「スリープ」を用いるものと考えたほうが良い。
ビジーウェイトを用いるケースをまとめると、下記の条件が揃った時である。

- 並列処理環境にある
- 待機時間がごく短い（タイムスライスを超えるような長い待機にならない）
- 【できるだけ】排他関係にあるスレッドの並列稼働（別コアへの振り分け）をスケジューリングできる

▼ スリープ

「スリープ」とは、スレッドが一時的に稼働を停止することである。
スリープ中のスレッドは、OS のタスクスケジューリングから外れて、アクティブにならなくなる。

スレッドをスリープさせ、フラグ更新などの待機終了の条件が揃った時に自動的に OS に起こしてもらうことができる。

スレッドが稼働を停止するため、他のスレッドが効率的に稼働できる。
基本的には、スレッドの同期にはこのスリープを用いるのが普通。ただし、マルチプロセッサ／コア環境では、前述の通り、「ビジーウェイト」の方が効率的となる場面もあるた

め、環境に合わせて使い分けること。

▼ スリープと Yield

「スリープ」を行うのは、「同期」が必要な時だけではない。

前述の「スレッド優先度」でも説明した通り、優先度の高いスレッドがタイムスライスを使い切ってばかりいると、優先度の低いスレッドが動作できなくなる。

そのため、スレッドの処理では、同期の必要がなくても、定期的にスリープを行うのが作法である。

この場合のスリープは「待機」目的ではなく、他のスレッドに制御を明け渡すことが目的である。そのような場合、時間指定なしのスリープ「Sleep(0)」を呼び出すとよい。

また、制御を明け渡すだけであれば、「Yiled」（イールド）という手法もある。ただし、Yiled の扱いには注意が必要。

Yield は、「待機状態にならずに」優先度の同じ他のスレッドに制御を明け渡す。つまり、同じ優先度の他のスレッドの処理が済んだらまた自分のスレッドに制御が戻ってきて、下位の優先度のスレッドには制御が移らない。

POSIX スレッドライブラリの sched_yield() はこの挙動である。

また、Win32API の Yield は「廃止予定」であり、使用しないように勧められている。代わりは Sleep(0) である。

ほかにも、Win32API には SwitchToThread() という関数が用意されており、こちらは「再スケジューリングは、呼び出し側スレッドの優先順位と実行可能な他のスレッドの状態によって決定します」と説明されている。

C++11 の std::this_thread::yield() は OS に依存するようである。

他のゲーム用 SDK や Java,C#などにも Yield があるが、挙動が違う場合もあるので、リファレンスマニュアルをよく確認したほうがよい。

■ 様々な同期手法

まず、様々な同期手法を列挙する。

ライブラリ／環境	同期方法	OS管理	ロック速度(sec)	待機方法	ロック取得順序保証	再帰ロック	デッドロック検出	プロセス間同期	備考
kaiki									
POSIX	スピンロック	−	0.188224	B	×	×−D	×	× △*	Cygwin環境では、挙動はWin32クリティカルセクションと同じ。
POSIX	ミューテックス	−	0.579944	S	(?)	X−D R*	× ○*	× △*	Cygwin環境では、プロセス間同期を除くオプションは使用不可、かつ、挙動はWin32ミューテックスと同じ。
(PS3 SDK)	軽量ミューテックス	(?)	(?)	S	×	(?)	(?)	(?)	ロック解除時の順序性の保証をしない代わりに軽量化を図ったミューテックス。こうしたミューテックスのバリエーションが用意されたSDKもある。
Win32	クリティカルセクション	−	0.197762	S B+S*	(?)	R	×?	×	マルチプロセッサ環境では、オプションにより、指定回数のビジーウェイト後にスリープ。
Win32	(名前なし)ミューテックス	H	4.880666	S	(?)	T	×?	× △*	
Win32	名前付きミューテックス	H	4.903843	S	(?)	T	×?	○	
C++11	ミューテックス	(依)?	0.650037	S?	(?)	×−E R	(?)	×	再帰ロックしたい場合は、専用のミューテックスクラスを用いる。
排他制御(変数操作)									
C++	通常変数操作	−	0.006544	B	×	×−D	×	×	ロック不可。速度の比較用に表記。
C++	volatile型変数	−	0.008377	B	×	×−D	×	×	ロック不可。volatile型を使うだけでは不十分。
C++	インラインアセンブラ	−	0.126005	B	×	×−D	×	×	インラインアセンブラで変数のアトミック操作を実現。
Win32	インターロック操作	−	0.127556	B	×	×−D	×	×	
C++11	アトミック操作	−	0.124007	B	×	×−D	×	×	
排他制御(特殊操作:リードロック時＝多重リードロック許可、ライトロックはブロック／ライトロック時＝全てのロックをブロック)									
POSIX	リード・ライトロック	−	0.914415	S?	(?)	×−F	×	× △*	プロセス間同期はオプションで可。デフォルトは無効。 Writeロックを同一スレッド上で多重ロックするとスレッドが強制終了。
有限リソース使用権獲得									
SystemV	セマフォ	IPC	8.186604	S?	(?)	×−D	×?	○?	Unixで古典的なセマフォの手法。 Cygwin環境利用不可。
POSIX	(名前なし)セマフォ	−	0.607549	S?	(?)	×−D	×?	× ○*	
POSIX	名前付きセマフォ	H	0.568886	S?	(?)	×−D	×?	○	
Win32	(名前なし)セマフォ	H	4.636328	S	(?)	×−D	×?	× △*	
Win32	名前付きセマフォ	H	4.787152	S	(?)	×−D	×?	○	
モニター									
POSIX	条件変数	−	0.944458	S?	(?)	−	×?	?	
POSIX	バリア		−	S?	(?)	−	×?	× △*	Cygwin環境利用不可。
Win32	(名前なし)イベント	H	2.102039	S	(?)	−	×?	× △*	
Win32	名前付きイベント	H	2.079530	S	(?)	−	×?	○	
C++11	条件変数	(依)?	0.758042	S?	(?)	−	×?	?	
Call Once									
POSIX	Call Once	−	−	(?)	−	−	−	−	
C++11	Call Once	−	−	(?)	−	−	−	−	マルチスレッド専用の仕組みではない。広範囲に活用できる。
先物									
C++11	promise と future	−	−	(?)	−	−	−	−	
割り込み									
POSIX	シグナル	SQ	−	I Q	−	−	−	○	

・OS管理 … H:ハンドル管理、IPC:IPCリソース管理、SQ:シグナルキュー管理
・ロック速度 … (他がロックしていない状況で)ロック／解放にかかる時間
　環境＝「※Intel Core i7−3770K,3.5GHz,CoreX4,HT／Win8.1,64bit／HyperV+CentOS6.4,64bit／テストプログラムは最適化ビルド」にて、
　ロック取得 10,000,000 回実行時の処理時間　※POSIX, SytemVの計測はやや不利な状況
・待機方法 … B:ビジーウェイト、S:スリープ、B+S:一定回数ビジーウェイト後にスリープ, I:割り込み, Q:キューイング
・ロック取得順序保証 … 先に待機した順にロック取得することを保証するか？
・再帰ロック … 同一スレッド上で多重ロックしたときの挙動
　T:スレッド保証(1回解放すればOK)、R:再帰保証(ロックした数だけ解放すればOK)
　×−D:デッドロック、X−F:スレッド強制終了、X−E:例外発生(プログラム終了)
・プロセス間同期 … プロセス間の同期に用いることができるか？(△ … 親子プロセス間でのみ可)
・* 付き:オプションによる挙動
・? 付き:確証を得ていない
・(依):OS依存
・(?):調査不完全につき不明
・赤字:注目すべきポイント

以上に列挙したものは、とりわけ代表的なものである。これらの知識があれば、ゲーム用 SDK にも応用が利く。

他には、OpenMP（ミューテックスなどの同期処理もある）や、Boost C++、.Net

Framework、Java、さらに、Visual C++ 2010 で追加された「同時実行ランタイム」ライブラリなど、枚挙にいとまがない。

前述の「様々なスレッド」では、ゲームプログラミングでにおけるスレッド作成には C++11 が向いていないと説明したが、同期オブジェクトに関しては、C++11 を優先的な選択肢と見た方が望ましい。後発なだけに、様々な機能に対応している上、汎用性の高いコーディングが行える。Visual C++ も C++11 の対応が進んでおり、Win32API よりも高機能な面がある。

以降、各同期処理の説明とサンプルプログラムを示す。

▼ 排他制御（ロック）

前述の「データ破損」の問題で示したように、共有する情報に対して「不可分操作」（アトミック操作）を保証するために用いる制御手法。
様々なバリエーションがあるため、動作環境や処理に合わせて適切な技術を用いる。

ロックを多用することでデータ破損を免れることができても、過剰なロックはパフォーマンス低下やデッドロックなどの問題にもつながることに注意が必要。

▼ 排他制御：通常変数でロック（誤ったロック）

まず、他の処理との比較用に、開発言語や SDK で提供された機能を用いず、通常変数だけでロックを実装した場合のサンプルを示す。
これは誤ったプログラミングのサンプルである。
最も高速ではあるが、同期が成立していない。

● Win32API 版

スレッド作成と処理時間計測に Win32API を用いる。ロック制御はスタティック変数によるフラグで行う。

（Win32API 版）通常変数によるロック制御のサンプル：

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include <Windows.h>
#include <Process.h>

//ロック取得用変数
static int s_lock = 0;
```

```
//共有データ
static int s_commonData = 0;

//スレッド固有データ
__declspec(thread) int s_tlsData = 0;

//スレッド
unsigned int WINAPI threadFunc(void* param_p)
{
	//パラメータ受け取り
	const char* name = static_cast<const char*>(param_p);

	//開始
	printf("- begin:%s -¥n", name);
	fflush(stdout);

	//処理
	for (int i = 0; i < 3; ++i)
	{
		//ロック取得用変数でロック取得待ち
		while (s_lock != 0){} s_lock = 1;

		//データ表示（前）
		printf("%s: [BEFORE] commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
		fflush(stdout);

		//データ取得
		int common_data = s_commonData;
		int tls_data = s_tlsData;

		//データ更新
		++common_data;
		++tls_data;

		//若干ランダムでスリープ（0～4 msec）
		Sleep(rand() % 5);

		//データ書き戻し
		s_commonData = common_data;
		s_tlsData = tls_data;

		//データ表示（後）
		printf("%s: [AFTER]  commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
		fflush(stdout);

		//ロック取得用変数でロック解除
		s_lock = 0;

		//スレッド切り替えのためのスリープ
		Sleep(0);
	//	//スレッド切り替え
	//	SwitchToThread();//OSに任せて再スケジューリング
	//	Yield();//廃止
	}

	//終了
	printf("- end:%s -¥n", name);
	fflush(stdout);
	return 0;
}

//テスト
int main(const int argc, const char* argv[])
{
	//スレッド作成
```

```
	static const int THREAD_NUM = 3;
	unsigned int tid[THREAD_NUM] = {};
	HANDLE hThread[THREAD_NUM] =
	{
		(HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 1024, threadFunc, "太郎", 0, &tid[0]),
		(HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 1024, threadFunc, "次郎", 0, &tid[1]),
		(HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 1024, threadFunc, "三郎", 0, &tid[2])
	};

	//スレッド終了待ち
	WaitForMultipleObjects(THREAD_NUM, hThread, true, INFINITE);

	//スレッドハンドルクローズ
	for (int i = 0; i < THREAD_NUM; ++i)
	{
		CloseHandle(hThread[i]);
	}

	//比較用に空ループで時間を計測
	{
		LARGE_INTEGER freq;
		QueryPerformanceFrequency(&freq);
		LARGE_INTEGER begin;
		QueryPerformanceCounter(&begin);
		static const int TEST_TIMES = 10000000;
		for (int i = 0; i < TEST_TIMES; ++i)
		{
			while (s_lock != 0){} s_lock = 1;
			s_lock = 0;
		}
		LARGE_INTEGER end;
		QueryPerformanceCounter(&end);
		float duration = static_cast<float>(static_cast<double>(end.QuadPart - begin.QuadPart) /
static_cast<double>(freq.QuadPart));
		printf("Loop * %d = %.6f sec¥n", TEST_TIMES, duration);
	}

	return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果）

```
- begin:太郎 -
太郎: [BEFORE] commonData=0, tlsData=0
- begin:次郎 -
- begin:三郎 -
太郎: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
次郎: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
三郎: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0    ←ロックが失敗している
次郎: [AFTER]  commonData=2, tlsData=1
三郎: [AFTER]  commonData=2, tlsData=1
太郎: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1
次郎: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1    ←ロックが失敗している
次郎: [AFTER]  commonData=3, tlsData=2
太郎: [AFTER]  commonData=3, tlsData=2
三郎: [BEFORE] commonData=3, tlsData=1
三郎: [AFTER]  commonData=4, tlsData=2
太郎: [BEFORE] commonData=4, tlsData=2
次郎: [BEFORE] commonData=4, tlsData=2    ←ロックが失敗している
次郎: [AFTER]  commonData=5, tlsData=3
太郎: [AFTER]  commonData=5, tlsData=3
- end:次郎 -
三郎: [BEFORE] commonData=5, tlsData=2
- end:太郎 -
三郎: [AFTER]  commonData=6, tlsData=3    ←3 回ロックに失敗したので、正しい処理結果になっていない
- end:三郎 -
```

```
Loop * 10000000 = 0.006544 sec          ←1 千万回ループによる処理時間計測
```

▼ 排他制御：ミューテックス

「ミューテックス」は、最も代表的なロック手法。

スリープ方式の代名詞的な手法。なお、これに対して、ビジーウェイト方式の代表格は「スピンロック」。

● POSIX スレッドライブラリ版

Linux などの Unix 系 OS や、GCC ベースのゲーム系 SDK で一般的なスタイル。

ミューテックス生成時の属性により、再帰ロックやデッドロック検出に対応しているのが特徴。デフォルトではどちらも無効。また、Cygwin 環境ではこれらの属性が使用できないなど、環境依存の機能。

再帰ロックとは、同一スレッドが何度もロックを取得できること。取得した数と同じ数だけ解放する必要がある。再帰ロック無効時は二度目のロックでデッドロックを起こす。(「デッドロック」については後述)

POSIX スレッドライブラリ版ミューテックスのサンプル：

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include <pthread.h>
#include <unistd.h>

#include <sys/time.h> //時間計測用

//Cygwin の GCC ではこの拡張定数が使えない
//#define PTHREAD_MUTEX_FAST_NP       (0)
//#define PTHREAD_MUTEX_RECURSIVE_NP  (1)
//#define PTHREAD_MUTEX_ERRORCHECK_NP (2)

//ミューテックス
static pthread_mutex_t s_mutex = PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER;

//共有データ
static int s_commonData = 0;

//スレッド固有データ
__thread int s_tlsData = 0;

//スレッド
void* threadFunc(void* param_p)
{
	//パラメータ受け取り
	const char* name = static_cast<const char*>(param_p);

	//開始
	printf("- begin:%s -¥n", name);
	fflush(stdout);

	//処理
```

```
	for (int i = 0; i < 3; ++i)
	{
		//ミューテックス取得
		pthread_mutex_lock(&s_mutex);
	//	pthread_mutex_trylock(&s_mutex);//ロックを取得できない時に他の処理を行いたい場合は
	//					//pthread_mutex_trylock() を使用する

		//データ表示（前）
		printf("%s: [BEFORE] commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
		fflush(stdout);

		//データ取得
		int common_data = s_commonData;
		int tls_data = s_tlsData;

		//データ更新
		++common_data;
		++tls_data;

		//若干ランダムでスリープ（0～4 msec）
		usleep((rand() % 5) * 1000);

		//データ書き戻し
		s_commonData = common_data;
		s_tlsData = tls_data;

		//データ表示（後）
		printf("%s: [AFTER]  commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
		fflush(stdout);

		//ミューテックス解放
		pthread_mutex_unlock(&s_mutex);

		//スレッド切り替えのためのスリープ
		usleep(0);
	//	//スレッド切り替え
	//	sched_yield();//同じ優先度の他のスレッドに切り替え
	}

	//終了
	printf("- end:%s -¥n", name);
	fflush(stdout);
	return 0;
}

//テスト
int main(const int argc, const char* argv[])
{
	//ミューテックス生成
	//※PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER で初期化している場合は不要
	{
	//	pthread_mutexattr_t attr;
	//	pthread_mutexattr_init(&attr);
	//	pthread_mutexattr_setpshared(&attr, PTHREAD_PROCESS_PRIVATE);//単独プロセス専用　※デフォルト
	//	pthread_mutexattr_setpshared(&attr, PTHREAD_PROCESS_SHARED);//プロセス間で共有
	//	pthread_mutexattr_settype(&attr, PTHREAD_MUTEX_FAST_NP);//高速（Fast）ミューテックス属性　※デフォルト
	//	pthread_mutexattr_settype(&attr, PTHREAD_MUTEX_RECURSIVE_NP);//再帰的な（recursive）ミューテックス属性
	//	                                                             //※多重ロックに対して多重開放が必要
	//	pthread_mutexattr_settype(&attr, PTHREAD_MUTEX_ERRORCHECK_NP);//エラー検査を行う（error checking）
	//	                                                              //ミューテックス属性
	//	                                                              //※デッドロック検出（pthread_mutex_lock()
	//	                                                              //  がエラーコード EDEADLK を返す）
	//	pthread_mutex_init(&s_mutex, &attr);
	}
```

```
	//スレッド作成
	static const int THREAD_NUM = 3;
	pthread_t pth[THREAD_NUM];
	{
		pthread_attr_t attr;
		pthread_attr_init(&attr);
		pthread_attr_setstacksize(&attr, 1024);//スタックサイズ指定
		pthread_create(&pth[0], &attr, threadFunc, (void*)"太郎");
		pthread_create(&pth[1], &attr, threadFunc, (void*)"次郎");
		pthread_create(&pth[2], &attr, threadFunc, (void*)"三郎");
	}

	//スレッド終了待ち
	for(int i = 0; i < THREAD_NUM; ++i)
	{
		pthread_join(pth[i], NULL);
	}

	//ミューテックスの取得と解放を大量に実行して時間を計測
	{
		struct timeval begin;
		gettimeofday(&begin, NULL);
		static const int TEST_TIMES = 10000000;
		for (int i = 0; i < TEST_TIMES; ++i)
		{
			pthread_mutex_lock(&s_mutex);
			pthread_mutex_unlock(&s_mutex);
		}
		struct timeval end;
		gettimeofday(&end, NULL);
		struct timeval duration;
		if( end.tv_usec >= begin.tv_usec)
		{
			duration.tv_sec = end.tv_sec - begin.tv_sec;
			duration.tv_usec = end.tv_usec - begin.tv_usec;
		}
		else
		{
			duration.tv_sec = end.tv_sec - begin.tv_sec - 1;
			duration.tv_usec = 1000000 - begin.tv_usec + end.tv_usec;
		}
		printf("Mutex * %d = %d.%06d sec¥n", TEST_TIMES, duration.tv_sec, duration.tv_usec);
	}

	//ミューテックス破棄
	//※PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER で初期化している場合は不要
	{
	//	pthread_mutex_destroy(&s_mutex);
	}

	return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果）

```
- begin:三郎 -
三郎: [BEFORE] commonData=0, tlsData=0
三郎: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
三郎: [BEFORE] commonData=1, tlsData=1
- begin:太郎 -
三郎: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
太郎: [BEFORE] commonData=2, tlsData=0
- begin:次郎 -
太郎: [AFTER]  commonData=3, tlsData=1
三郎: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2
三郎: [AFTER]  commonData=4, tlsData=3
```

```
次郎: [BEFORE] commonData=4, tlsData=0
- end:三郎 -
次郎: [AFTER]  commonData=5, tlsData=1
太郎: [BEFORE] commonData=5, tlsData=1
太郎: [AFTER]  commonData=6, tlsData=2
次郎: [BEFORE] commonData=6, tlsData=1
次郎: [AFTER]  commonData=7, tlsData=2
太郎: [BEFORE] commonData=7, tlsData=2
太郎: [AFTER]  commonData=8, tlsData=3
次郎: [BEFORE] commonData=8, tlsData=2
- end:太郎 -
次郎: [AFTER]  commonData=9, tlsData=3     ←全て正常にロックされたので、正しい処理結果になっている
- end:次郎 -
Mutex * 10000000 = 0.579944 sec           ←1 千万回ループによる処理時間計測
```

● Win32API 版（名前なし）

Win32API 版のミューテックス。

同一スレッドが何度もロックを取得してもデッドロックを起こさず、また、一回の解放で済む点が特徴。これに対して、クリティカルセクションや POSIX スレッドライブラリ版ミューテックスは再帰ロックであり、取得した数だけ解放する必要がある。

Win32API 版ミューテックスのサンプル：

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include <Windows.h>
#include <Process.h>

//ミューテックスハンドル
static HANDLE s_hMutex = INVALID_HANDLE_VALUE;

//共有データ
static int s_commonData = 0;

//スレッド固有データ
__declspec(thread) int s_tlsData = 0;

//スレッド
unsigned int WINAPI threadFunc(void* param_p)
{
	//パラメータ受け取り
	const char* name = static_cast<const char*>(param_p);

	//開始
	printf("- begin:%s -¥n", name);
	fflush(stdout);

	//処理
	for (int i = 0; i < 3; ++i)
	{
		//ミューテックス取得
		WaitForSingleObject(s_hMutex, INFINITE);//ロックを取得できない時に他の処理を行いたい場合は
                                                //タイムアウト値を指定する

		//データ表示（前）
		printf("%s: [BEFORE] commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
		fflush(stdout);
```

```
            //データ取得
            int common_data = s_commonData;
            int tls_data = s_tlsData;

            //データ更新
            ++common_data;
            ++tls_data;

            //若干ランダムでスリープ（0～4 msec）
            Sleep(rand() % 5);

            //データ書き戻し
            s_commonData = common_data;
            s_tlsData = tls_data;

            //データ表示（後）
            printf("%s: [AFTER]  commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
            fflush(stdout);

            //ミューテックス解放
            ReleaseMutex(s_hMutex);

            //スレッド切り替えのためのスリープ
            Sleep(0);
      //    //スレッド切り替え
      //    SwitchToThread();//OSに任せて再スケジューリング
      //    Yield();//廃止
      }

      //終了
      printf("- end:%s -¥n", name);
      fflush(stdout);
      return 0;
}

//テスト
int main(const int argc, const char* argv[])
{
      //ミューテックス生成
      {
            s_hMutex = CreateMutex(nullptr, false, nullptr);

      //    //属性を指定して生成する場合
      //    SECURITY_ATTRIBUTES attr = { sizeof(SECURITY_ATTRIBUTES), nullptr, true };//子プロセスにハンドルを継承する
      //    SECURITY_ATTRIBUTES attr = { sizeof(SECURITY_ATTRIBUTES), nullptr, false };//子プロセスにハンドルを
      //                                                                              //継承しない　※デフォルト
      //    s_hMutex = CreateMutex(&attr, false, nullptr);
      }

      //スレッド作成
      static const int THREAD_NUM = 3;
      unsigned int tid[THREAD_NUM] = {};
      HANDLE hThread[THREAD_NUM] =
      {
            (HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 1024, threadFunc, "太郎", 0, &tid[0]),
            (HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 1024, threadFunc, "次郎", 0, &tid[1]),
            (HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 1024, threadFunc, "三郎", 0, &tid[2])
      };

      //スレッド終了待ち
      WaitForMultipleObjects(THREAD_NUM, hThread, true, INFINITE);

      //スレッドハンドルクローズ
      for (int i = 0; i < THREAD_NUM; ++i)
      {
```

```
            CloseHandle(hThread[i]);
      }

      //ミューテックスの取得と解放を大量に実行して時間を計測
      {
            LARGE_INTEGER freq;
            QueryPerformanceFrequency(&freq);
            LARGE_INTEGER begin;
            QueryPerformanceCounter(&begin);
            static const int TEST_TIMES = 10000000;
            for (int i = 0; i < TEST_TIMES; ++i)
            {
                  WaitForSingleObject(s_hMutex, INFINITE);
                  ReleaseMutex(s_hMutex);
            }
            LARGE_INTEGER end;
            QueryPerformanceCounter(&end);
            float duration = static_cast<float>(static_cast<double>(end.QuadPart - begin.QuadPart)
                                                                        / static_cast<double>(freq.QuadPart));
            printf("Mutex * %d = %.6f sec¥n", TEST_TIMES, duration);
      }

      //ミューテックス破棄
      CloseHandle(s_hMutex);
      s_hMutex = INVALID_HANDLE_VALUE;

      return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果）

```
- begin:太郎 -
- begin:次郎 -
太郎: [BEFORE] commonData=0, tlsData=0
- begin:三郎 -
太郎: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
次郎: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
次郎: [AFTER]  commonData=2, tlsData=1
三郎: [BEFORE] commonData=2, tlsData=0
三郎: [AFTER]  commonData=3, tlsData=1
太郎: [BEFORE] commonData=3, tlsData=1
太郎: [AFTER]  commonData=4, tlsData=2
次郎: [BEFORE] commonData=4, tlsData=1
次郎: [AFTER]  commonData=5, tlsData=2
三郎: [BEFORE] commonData=5, tlsData=1
三郎: [AFTER]  commonData=6, tlsData=2
太郎: [BEFORE] commonData=6, tlsData=2
太郎: [AFTER]  commonData=7, tlsData=3
- end:太郎 -
次郎: [BEFORE] commonData=7, tlsData=2
次郎: [AFTER]  commonData=8, tlsData=3
- end:次郎 -
三郎: [BEFORE] commonData=8, tlsData=2
三郎: [AFTER]  commonData=9, tlsData=3     ←全て正常にロックされたので、正しい処理結果になっている
- end:三郎 -
Mutex * 10000000 = 4.880666 sec            ←1 千万回ループによる処理時間計測
```

● Win32API 版（名前付き）

Win32 版の名前付きミューテックス。

基本的には名前無しミューテックスと変わらないが、プロセス間での排他制御や、スレッドごとにミューテックスのアクセス権を変えたい場合に使用する。

Win32API 版名前付きミューテックスのサンプル：

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include <Windows.h>
#include <Process.h>

//共有ミューテックス名
static const char* COMMON_MUTEX_NAME = "Common Mutex";

//共有データ
static int s_commonData = 0;

//スレッド固有データ
__declspec(thread) int s_tlsData = 0;

//スレッド
unsigned int WINAPI threadFunc(void* param_p)
{
	//パラメータ受け取り
	const char* name = static_cast<const char*>(param_p);

	//開始
	printf("- begin:%s -¥n", name);
	fflush(stdout);

	//名前付きミューテックスオープン
	HANDLE hMutex = OpenMutex(SYNCHRONIZE, false, COMMON_MUTEX_NAME);

	//処理
	for (int i = 0; i < 3; ++i)
	{
		//ミューテックス取得
		WaitForSingleObject(hMutex, INFINITE);//ロックを取得できない時に他の処理を行いたい場合はタイムアウト値を
                                              //指定する

		//データ表示（前）
		printf("%s: [BEFORE] commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
		fflush(stdout);

		//データ取得
		int common_data = s_commonData;
		int tls_data = s_tlsData;

		//データ更新
		++common_data;
		++tls_data;

		//若干ランダムでスリープ（0～4 msec）
		Sleep(rand() % 5);

		//データ書き戻し
		s_commonData = common_data;
		s_tlsData = tls_data;

		//データ表示（後）
		printf("%s: [AFTER]  commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
		fflush(stdout);

		//ミューテックス解放
		ReleaseMutex(hMutex);

		//スレッド切り替えのためのスリープ
		Sleep(0);
```

```
	//	//スレッド切り替え
	//	SwitchToThread();//OSに任せて再スケジューリング
	//	Yield();//廃止
	}

	//名前付きミューテックスクローズ
	CloseHandle(hMutex);

	//終了
	printf("- end:%s -¥n", name);
	fflush(stdout);
	return 0;
}

//テスト
int main(const int argc, const char* argv[])
{
	//ミューテックスハンドル
	HANDLE hMutex = INVALID_HANDLE_VALUE;

	//名前付きミューテックス生成
	{
		hMutex = CreateMutex(nullptr, false, COMMON_MUTEX_NAME);

	//	//属性を指定して生成する場合
	//	SECURITY_ATTRIBUTES attr = { sizeof(SECURITY_ATTRIBUTES), nullptr, true };//子プロセスにハンドルを継承する
	//	SECURITY_ATTRIBUTES attr = { sizeof(SECURITY_ATTRIBUTES), nullptr, false };//子プロセスにハンドルを
	//	                                                                           //継承しない　※デフォルト
	//	hMutex = CreateMutex(&attr, false, COMMON_MUTEX_NAME);
	}

	//スレッド作成
	static const int THREAD_NUM = 3;
	unsigned int tid[THREAD_NUM] = {};
	HANDLE hThread[THREAD_NUM] =
	{
		(HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 1024, threadFunc, "太郎", 0, &tid[0]),
		(HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 1024, threadFunc, "次郎", 0, &tid[1]),
		(HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 1024, threadFunc, "三郎", 0, &tid[2])
	};

	//スレッド終了待ち
	WaitForMultipleObjects(THREAD_NUM, hThread, true, INFINITE);

	//スレッドハンドルクローズ
	for (int i = 0; i < THREAD_NUM; ++i)
	{
		CloseHandle(hThread[i]);
	}

	//ミューテックスの取得と解放を大量に実行して時間を計測
	{
		LARGE_INTEGER freq;
		QueryPerformanceFrequency(&freq);
		LARGE_INTEGER begin;
		QueryPerformanceCounter(&begin);
		static const int TEST_TIMES = 10000000;
		for (int i = 0; i < TEST_TIMES; ++i)
		{
			WaitForSingleObject(hMutex, INFINITE);
			ReleaseMutex(hMutex);
		}
		LARGE_INTEGER end;
		QueryPerformanceCounter(&end);
		float duration = static_cast<float>(static_cast<double>(end.QuadPart - begin.QuadPart)
```

```
                                                                    / static_cast<double>(freq.QuadPart));
            printf("Named Mutex * %d = %.6f sec¥n", TEST_TIMES, duration);
    }

    //名前付きミューテックス破棄
    CloseHandle(hMutex);

    return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果）

```
- begin:太郎 -
- begin:次郎 -
- begin:三郎 -
太郎: [BEFORE] commonData=0, tlsData=0
太郎: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
次郎: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
次郎: [AFTER]  commonData=2, tlsData=1
三郎: [BEFORE] commonData=2, tlsData=0
三郎: [AFTER]  commonData=3, tlsData=1
太郎: [BEFORE] commonData=3, tlsData=1
太郎: [AFTER]  commonData=4, tlsData=2
次郎: [BEFORE] commonData=4, tlsData=1
次郎: [AFTER]  commonData=5, tlsData=2
三郎: [BEFORE] commonData=5, tlsData=1
三郎: [AFTER]  commonData=6, tlsData=2
太郎: [BEFORE] commonData=6, tlsData=2
太郎: [AFTER]  commonData=7, tlsData=3
- end:太郎 -
次郎: [BEFORE] commonData=7, tlsData=2
次郎: [AFTER]  commonData=8, tlsData=3
- end:次郎 -
三郎: [BEFORE] commonData=8, tlsData=2
三郎: [AFTER]  commonData=9, tlsData=3     ←全て正常にロックされたので、正しい処理結果になっている
- end:三郎 -
Named Mutex * 10000000 = 4.903843 sec      ←1 千万回ループによる処理時間計測
```

● C++11 版

C++11 版の名前付きミューテックス。

言語の標準機能として用意されたミューテックス。

言語標準なのでコードの汎用性が高いことが大きな特徴。クラスオブジェクトとして操作できる点も扱い易い。

また、lock_guard クラスなどの C++11 の他のクラスと組み合わせて便利に扱うことができる点も強み。(lock_guard クラスは、いわゆる「Scoped Lock Pattern」を提供するクラスで、処理ブロックを抜けるときに自動的にロックを解放する。)

タイムアウトを行うための「std::timed_mutex」、再帰ロックを行うための「std::recursive_mutex」、その両方を組み合わせた「std::recursive_timed_mutex」という亜種もある。

以下のサンプルは、スレッド生成、スリープ、処理時間計測も含めて、すべて C++11 のライブラリのみで扱っている。

C++11 版ミューテックスのサンプル：

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include <thread>
#include <mutex>

#include <chrono> //時間計測用
#include <random> //乱数生成用

//ミューテックスオブジェクト
static std::mutex s_mutex;

//共有データ
static int s_commonData = 0;

//スレッド固有データ
__declspec(thread) int s_tlsData = 0;
//thread_local int s_tlsData = 0;//Visual C++ 2013 では thread_local キーワードが使えない

//スレッド
void threadFunc(const char* name)
{
	//開始
	printf("- begin:%s -¥n", name);
	fflush(stdout);

	//乱数
	std::random_device seed_gen;
	std::mt19937 rnd(seed_gen());
	std::uniform_int_distribution<int> sleep_time(0, 4);

	//処理
	for (int i = 0; i < 3; ++i)
	{
		//ミューテックス取得
		s_mutex.lock();
	//	s_mutex.try_lock();//ロックを取得できない時に他の処理を行いたい場合は try_lock() を使用する
				//タイムアウトしたい場合は timed_mutex クラスを使用する
				//再帰ロックしたい場合は recursive_mutex クラスを使用する

		//データ表示（前）
		printf("%s: [BEFORE] commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
		fflush(stdout);

		//データ取得
		int common_data = s_commonData;
		int tls_data = s_tlsData;

		//データ更新
		++common_data;
		++tls_data;

		//若干ランダムでスリープ（0～4 msec）
		std::this_thread::sleep_for(std::chrono::milliseconds(sleep_time(rnd)));

		//データ書き戻し
		s_commonData = common_data;
		s_tlsData = tls_data;

		//データ表示（後）
		printf("%s: [AFTER]  commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
		fflush(stdout);
```

```
            //ミューテックス解放
            s_mutex.unlock();

            //スレッド切り替えのためのスリープ
            std::this_thread::sleep_for(std::chrono::milliseconds(0));
      //    //スレッド切り替え
      //    std::this_thread::yield();//OSに任せて再スケジューリング
      }

      //終了
      printf("- end:%s -¥n", name);
      fflush(stdout);
}

//テスト
int main(const int argc, const char* argv[])
{
      //スレッド作成
      //※スタックサイズ指定方法不明
      std::thread thread_obj1 = std::thread(threadFunc, "太郎");
      std::thread thread_obj2 = std::thread(threadFunc, "次郎");
      std::thread thread_obj3 = std::thread(threadFunc, "三郎");

      //スレッド終了待ち
      thread_obj1.join();
      thread_obj2.join();
      thread_obj3.join();

      //ミューテックスの取得と解放を大量に実行して時間を計測
      {
            auto begin = std::chrono::high_resolution_clock::now();
            static const int TEST_TIMES = 10000000;
            for (int i = 0; i < TEST_TIMES; ++i)
            {
                  s_mutex.lock();
                  s_mutex.unlock();
            }
            auto end = std::chrono::high_resolution_clock::now();
            auto duration = static_cast<float>(static_cast<double>(
                              std::chrono::duration_cast<std::chrono::microseconds>(end - begin).count()) / 1000000.);
            printf("Mutex * %d = %.6f sec¥n", TEST_TIMES, duration);
      }

      return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果）

```
- begin:太郎 -
太郎: [BEFORE] commonData=0, tlsData=0
- begin:次郎 -
- begin:三郎 -
太郎: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
次郎: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
次郎: [AFTER]  commonData=2, tlsData=1
三郎: [BEFORE] commonData=2, tlsData=0
三郎: [AFTER]  commonData=3, tlsData=1
太郎: [BEFORE] commonData=3, tlsData=1
太郎: [AFTER]  commonData=4, tlsData=2
次郎: [BEFORE] commonData=4, tlsData=1
次郎: [AFTER]  commonData=5, tlsData=2
三郎: [BEFORE] commonData=5, tlsData=1
三郎: [AFTER]  commonData=6, tlsData=2
太郎: [BEFORE] commonData=6, tlsData=2
太郎: [AFTER]  commonData=7, tlsData=3
- end:太郎 -
```

```
次郎: [BEFORE] commonData=7, tlsData=2
次郎: [AFTER]  commonData=8, tlsData=3
- end:次郎 -
三郎: [BEFORE] commonData=8, tlsData=2
三郎: [AFTER]  commonData=9, tlsData=3     ←全て正常にロックされたので、正しい処理結果になっている
- end:三郎 -
Mutex * 10000000 = 0.650037 sec            ←1 千万回ループによる処理時間計測
```

▼ 排他制御：スピンロック

「スピンロック」は古典的なロック手法。

ビジーウェイト方式の代名詞的な手法。

ミューテックスと異なり OS に依存する部分が少ないため、軽量かつ高速。

前述の「ビジーウェイト」で説明しているとおり、並列処理環境でない場合や長時間の排他処理では非効率になるので注意。

● POSIX スレッドライブラリ版

POSIX スレッドライブラリ版のスピンロック。

POSIX スレッドライブラリ版スピンロックのサンプル：

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include <pthread.h>
#include <unistd.h>

#include <sys/time.h> //時間計測用

//スピンロック
static pthread_spinlock_t s_lock;

//共有データ
static int s_commonData = 0;

//スレッド固有データ
__thread int s_tlsData = 0;

//スレッド
void* threadFunc(void* param_p)
{
	//パラメータ受け取り
	const char* name = static_cast<const char*>(param_p);

	//開始
	printf("- begin:%s -¥n", name);
	fflush(stdout);

	//処理
	for (int i = 0; i < 3; ++i)
	{
		//スピンロック取得
		pthread_spin_lock(&s_lock);
	//	pthread_spin_trylock(&s_lock);//ロックを取得できない時に他の処理を行いたい場合は
	//                                //pthread_spin_trylock() を使用する
```

```
            //データ表示（前）
            printf("%s: [BEFORE] commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
            fflush(stdout);

            //データ取得
            int common_data = s_commonData;
            int tls_data = s_tlsData;

            //データ更新
            ++common_data;
            ++tls_data;

            //若干ランダムでスリープ（0～4 msec）
            usleep((rand() % 5) * 1000);

            //データ書き戻し
            s_commonData = common_data;
            s_tlsData = tls_data;

            //データ表示（後）
            printf("%s: [AFTER]  commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
            fflush(stdout);

            //スピンロック解放
            pthread_spin_unlock(&s_lock);

            //スレッド切り替えのためのスリープ
            usleep(0);
      //    //スレッド切り替え
      //    sched_yield();//同じ優先度の他のスレッドに切り替え
      }

      //終了
      printf("- end:%s -¥n", name);
      fflush(stdout);
      return 0;
}

//テスト
int main(const int argc, const char* argv[])
{
      //スピンロック生成
      pthread_spin_init(&s_lock, PTHREAD_PROCESS_PRIVATE);//単独プロセス専用
//    pthread_spin_init(&s_lock, PTHREAD_PROCESS_SHARED);//プロセス間で共有

      //スレッド作成
      static const int THREAD_NUM = 3;
      pthread_t pth[THREAD_NUM];
      {
            pthread_attr_t attr;
            pthread_attr_init(&attr);
            pthread_attr_setstacksize(&attr, 1024);//スタックサイズ指定
            pthread_create(&pth[0], &attr, threadFunc, (void*)"太郎");
            pthread_create(&pth[1], &attr, threadFunc, (void*)"次郎");
            pthread_create(&pth[2], &attr, threadFunc, (void*)"三郎");
      }

      //スレッド終了待ち
      for(int i = 0; i < THREAD_NUM; ++i)
      {
            pthread_join(pth[i], NULL);
      }

      //スピンロックの取得と解放を大量に実行して時間を計測
```

```
    {
        struct timeval begin;
        gettimeofday(&begin, NULL);
        static const int TEST_TIMES = 10000000;
        for (int i = 0; i < TEST_TIMES; ++i)
        {
            pthread_spin_lock(&s_lock);
            pthread_spin_unlock(&s_lock);
        }
        struct timeval end;
        gettimeofday(&end, NULL);
        struct timeval duration;
        if( end.tv_usec >= begin.tv_usec)
        {
            duration.tv_sec = end.tv_sec - begin.tv_sec;
            duration.tv_usec = end.tv_usec - begin.tv_usec;
        }
        else
        {
            duration.tv_sec = end.tv_sec - begin.tv_sec - 1;
            duration.tv_usec = 1000000 - begin.tv_usec + end.tv_usec;
        }
        printf("Spinlock * %d = %d.%06d sec¥n", TEST_TIMES, duration.tv_sec, duration.tv_usec);
    }

    //スピンロック破棄
    pthread_spin_destroy(&s_lock);

    return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果）

```
- begin:三郎 -
三郎: [BEFORE] commonData=0, tlsData=0
三郎: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
- begin:次郎 -
次郎: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
- begin:太郎 -
次郎: [AFTER]  commonData=2, tlsData=1
太郎: [BEFORE] commonData=2, tlsData=0
太郎: [AFTER]  commonData=3, tlsData=1
次郎: [BEFORE] commonData=3, tlsData=1
次郎: [AFTER]  commonData=4, tlsData=2
三郎: [BEFORE] commonData=4, tlsData=1
三郎: [AFTER]  commonData=5, tlsData=2
次郎: [BEFORE] commonData=5, tlsData=2
次郎: [AFTER]  commonData=6, tlsData=3
太郎: [BEFORE] commonData=6, tlsData=1
- end:次郎 -
太郎: [AFTER]  commonData=7, tlsData=2
三郎: [BEFORE] commonData=7, tlsData=2
三郎: [AFTER]  commonData=8, tlsData=3
太郎: [BEFORE] commonData=8, tlsData=2
- end:三郎 -
太郎: [AFTER]  commonData=9, tlsData=3     ←全て正常にロックされたので、正しい処理結果になっている
- end:太郎 -
Spinlock * 10000000 = 0.188224 sec         ←1 千万回ループによる処理時間計測
```

▼ 排他制御：クリティカルセクション

「クリティカルセクション」という用語自体は、その名の通り「重大な処理部分」のこ

とであり、アトミック操作が必要な処理のことを指す。

- **Win32API 版**

Win32API 版のクリティカルセクション。
Windows の軽量ミューテックス的存在。OS がハンドルを管理しない。
ビジーウェイトとスリープのハイブリッドで扱える点が大きな特徴。

Win32API 版クリティカルセクションのサンプル：

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include <Windows.h>
#include <Process.h>

//クリティカルセクション
static CRITICAL_SECTION s_criticalSection;

//共有データ
static int s_commonData = 0;

//スレッド固有データ
__declspec(thread) int s_tlsData = 0;

//スレッド
unsigned int WINAPI threadFunc(void* param_p)
{
	//パラメータ受け取り
	const char* name = static_cast<const char*>(param_p);

	//開始
	printf("- begin:%s -¥n", name);
	fflush(stdout);

	//処理
	for (int i = 0; i < 3; ++i)
	{
		//クリティカルセクション取得
		EnterCriticalSection(&s_criticalSection);
	//	TryEnterCriticalSection(&s_criticalSection);//ロックを取得できない時に他の処理を行いたい場合は
	//                                              //TryEnterCriticalSection() を使用する

		//データ表示（前）
		printf("%s: [BEFORE] commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
		fflush(stdout);

		//データ取得
		int common_data = s_commonData;
		int tls_data = s_tlsData;

		//データ更新
		++common_data;
		++tls_data;

		//若干ランダムでスリープ（0～4 msec）
		Sleep(rand() % 5);

		//データ書き戻し
		s_commonData = common_data;
		s_tlsData = tls_data;
```

```
            //データ表示（後）
            printf("%s: [AFTER]  commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
            fflush(stdout);

            //クリティカルセクション解放
            LeaveCriticalSection(&s_criticalSection);

            //スレッド切り替えのためのスリープ
            Sleep(0);
      //    //スレッド切り替え
      //    SwitchToThread();//OSに任せて再スケジューリング
      //    Yield();//廃止
      }

      //終了
      printf("- end:%s -¥n", name);
      fflush(stdout);
      return 0;
}

//テスト
int main(const int argc, const char* argv[])
{
      //クリティカルセクション初期化
      InitializeCriticalSection(&s_criticalSection);
//    InitializeCriticalSectionAndSpinCount(&s_criticalSection, 1000);//スピンロックカウント数を指定する場合
//                                                                    //（スピンロック後に待機する）:
//                                                                    //マルチプロセッサシステム専用

      //スレッド作成
      static const int THREAD_NUM = 3;
      unsigned int tid[THREAD_NUM] = {};
      HANDLE hThread[THREAD_NUM] =
      {
            (HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 1024, threadFunc, "太郎", 0, &tid[0]),
            (HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 1024, threadFunc, "次郎", 0, &tid[1]),
            (HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 1024, threadFunc, "三郎", 0, &tid[2])
      };

      //スレッド終了待ち
      WaitForMultipleObjects(THREAD_NUM, hThread, true, INFINITE);

      //スレッドハンドルクローズ
      for (int i = 0; i < THREAD_NUM; ++i)
      {
            CloseHandle(hThread[i]);
      }

      //クリティカルセクションの取得と解放を大量に実行して時間を計測
      {
            LARGE_INTEGER freq;
            QueryPerformanceFrequency(&freq);
            LARGE_INTEGER begin;
            QueryPerformanceCounter(&begin);
            static const int TEST_TIMES = 10000000;
            for (int i = 0; i < TEST_TIMES; ++i)
            {
                  EnterCriticalSection(&s_criticalSection);
                  LeaveCriticalSection(&s_criticalSection);
            }
            LARGE_INTEGER end;
            QueryPerformanceCounter(&end);
            float duration = static_cast<float>(static_cast<double>(end.QuadPart - begin.QuadPart)
                                                                  / static_cast<double>(freq.QuadPart));
```

```
            printf("Critical Section * %d = %.6f sec¥n", TEST_TIMES, duration);
        }

        //クリティカルセクション破棄
        DeleteCriticalSection(&s_criticalSection);

        return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果）

```
- begin:太郎 -
太郎: [BEFORE] commonData=0, tlsData=0
- begin:次郎 -
- begin:三郎 -
太郎: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
太郎: [BEFORE] commonData=1, tlsData=1
太郎: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
太郎: [BEFORE] commonData=2, tlsData=2
太郎: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
- end:太郎 -
次郎: [BEFORE] commonData=3, tlsData=0
次郎: [AFTER]  commonData=4, tlsData=1
次郎: [BEFORE] commonData=4, tlsData=1
次郎: [AFTER]  commonData=5, tlsData=2
次郎: [BEFORE] commonData=5, tlsData=2
次郎: [AFTER]  commonData=6, tlsData=3
- end:次郎 -
三郎: [BEFORE] commonData=6, tlsData=0
三郎: [AFTER]  commonData=7, tlsData=1
三郎: [BEFORE] commonData=7, tlsData=1
三郎: [AFTER]  commonData=8, tlsData=2
三郎: [BEFORE] commonData=8, tlsData=2
三郎: [AFTER]  commonData=9, tlsData=3          ←全て正常にロックされたので、正しい処理結果になっている
- end:三郎 -
Critical Section * 10000000 = 0.197762 sec      ←1 千万回ループによる処理時間計測
```

▼ 変数操作による排他制御

最初に誤ったサンプルとして普通の変数によるロック制御の方法を示した。
この誤りを正して、自前の変数操作で排他制御を行うことを再考する。

▼ 変数操作による排他制御：volatile 型修飾子（誤ったロック）

前述の「スレッド間の変数操作の失敗」で説明している通り、volatile 型修飾子は、コンパイラによる変数操作の最適化を禁止し、スレッド間で変数の状態を確実に共有できるようにする。

しかし、volatile 型修飾子はあくまでもコンパイルの仕方の指定である。アトミック操作を保証するものではないため、結局うまくいかない。

● Win32API 版

スレッド作成と処理時間計測に Win32API を用いる。ロック制御はスタティック変

数によるフラグで行う。最初のサンプルとの違いは、変数「s_lock」の型宣言のみである。

（Win32API 版）volatile 型修飾子付き変数によるロック制御のサンプル：

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include <Windows.h>
#include <Process.h>

//ロック取得用 volatile 型修飾子付き変数
static volatile int s_lock = 0;

//共有データ
static int s_commonData = 0;

//スレッド固有データ
__declspec(thread) int s_tlsData = 0;

//スレッド
unsigned int WINAPI threadFunc(void* param_p)
{
	//パラメータ受け取り
	const char* name = static_cast<const char*>(param_p);

	//開始
	printf("- begin:%s -¥n", name);
	fflush(stdout);

	//処理
	for (int i = 0; i < 3; ++i)
	{
		//ロック取得用変数でロック取得待ち
		while (s_lock != 0){} s_lock = 1;

		//データ表示（前）
		printf("%s: [BEFORE] commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
		fflush(stdout);

		//データ取得
		int common_data = s_commonData;
		int tls_data = s_tlsData;

		//データ更新
		++common_data;
		++tls_data;

		//若干ランダムでスリープ（0～4 msec）
		Sleep(rand() % 5);

		//データ書き戻し
		s_commonData = common_data;
		s_tlsData = tls_data;

		//データ表示（後）
		printf("%s: [AFTER]  commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
		fflush(stdout);

		//ロック取得用変数でロック解除
		s_lock = 0;

		//スレッド切り替えのためのスリープ
		Sleep(0);
```

```
            //    //スレッド切り替え
            //    SwitchToThread();//OSに任せて再スケジューリング
            //    Yield();//廃止
      }

      //終了
      printf("- end:%s -¥n", name);
      fflush(stdout);
      return 0;
}

//テスト
int main(const int argc, const char* argv[])
{
      //スレッド作成
      static const int THREAD_NUM = 3;
      unsigned int tid[THREAD_NUM] = {};
      HANDLE hThread[THREAD_NUM] =
      {
            (HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 1024, threadFunc, "太郎", 0, &tid[0]),
            (HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 1024, threadFunc, "次郎", 0, &tid[1]),
            (HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 1024, threadFunc, "三郎", 0, &tid[2])
      };

      //スレッド終了待ち
      WaitForMultipleObjects(THREAD_NUM, hThread, true, INFINITE);

      //スレッドハンドルクローズ
      for (int i = 0; i < THREAD_NUM; ++i)
      {
            CloseHandle(hThread[i]);
      }

      //比較用に空ループで時間を計測
      {
            LARGE_INTEGER freq;
            QueryPerformanceFrequency(&freq);
            LARGE_INTEGER begin;
            QueryPerformanceCounter(&begin);
            static const int TEST_TIMES = 10000000;
            for (int i = 0; i < TEST_TIMES; ++i)
            {
                  while (s_lock != 0){} s_lock = 1;
                  s_lock = 0;
            }
            LARGE_INTEGER end;
            QueryPerformanceCounter(&end);
            float duration = static_cast<float>(static_cast<double>(end.QuadPart - begin.QuadPart)
                                                                  / static_cast<double>(freq.QuadPart));
            printf("Loop * %d = %.6f sec¥n", TEST_TIMES, duration);
      }

      return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果）

```
- begin:太郎 -
太郎: [BEFORE] commonData=0, tlsData=0
- begin:次郎 -
- begin:三郎 -
太郎: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
三郎: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
次郎: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0    ←ロックが失敗している
三郎: [AFTER]  commonData=2, tlsData=1
次郎: [AFTER]  commonData=2, tlsData=1
```

```
太郎: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1
三郎: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1     ←ロックが失敗している
太郎: [AFTER]  commonData=3, tlsData=2
三郎: [AFTER]  commonData=3, tlsData=2
次郎: [BEFORE] commonData=3, tlsData=1
三郎: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2     ←ロックが失敗している
次郎: [AFTER]  commonData=4, tlsData=2
太郎: [BEFORE] commonData=4, tlsData=2
三郎: [AFTER]  commonData=4, tlsData=3
次郎: [BEFORE] commonData=4, tlsData=2     ←ロックが失敗している
- end:三郎 -
太郎: [AFTER]  commonData=5, tlsData=3
- end:太郎 -
次郎: [AFTER]  commonData=5, tlsData=3     ←4 回ロックに失敗したので、正しい処理結果になっていない
- end:次郎 -
Loop * 10000000 = 0.008377 sec             ←1 千万回ループによる処理時間計測
```

▼ 変数操作による排他制御：インラインアセンブラ

変数操作でロックを行うには、「変数の値を確認する」「変数のフラグを更新する」という二つの操作をアトミック操作（不可分操作）として実現する必要がある。このごくわずかな二つの処理の間に割り込まれると、ロックが成立しなくなる。

この対応には、1 サイクル（CPU の実行の最小単位）でメモリ上の変数の確認と更新を同時に行う必要がある。C/C++言語の演算子では対応できないので、インラインアセンブラを使用する。

● Win32API 版

スレッド作成と処理時間計測に Win32API を用いる。なお、このロックの手法は、Wikipedia の「スピンロック」の解説を参考にしている。

（Win32API 版）インラインアセンブラによるロック制御のサンプル：

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include <Windows.h>
#include <Process.h>

//ロック取得用変数
static int s_lock = 0;

//共有データ
static int s_commonData = 0;

//スレッド固有データ
__declspec(thread) int s_tlsData = 0;

//スレッド
unsigned int WINAPI threadFunc(void* param_p)
{
	//パラメータ受け取り
	const char* name = static_cast<const char*>(param_p);

	//開始
```

```
	printf("- begin:%s -¥n", name);
	fflush(stdout);

	//処理
	for (int i = 0; i < 3; ++i)
	{
		//ロック取得
		//※xchg のような命令を用いないとロックが不確実。
		//  C 言語の演算子だけでは不十分。
		__asm                                //ロック取得用インラインアセンブラ（x86 系）
		{
			mov		eax, 1		//フラグ更新準備
		lock_loop:                           //ループ用ラベル
			xchg		eax, [s_lock]	//変数とレジスタの値を交換
			test		eax, eax	//レジスタの値をチェック
			jnz		lock_loop	//レジスタの値が 0 以外ならジャンプ
		}

		//データ表示（前）
		printf("%s: [BEFORE] commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
		fflush(stdout);

		//データ取得
		int common_data = s_commonData;
		int tls_data = s_tlsData;

		//データ更新
		++common_data;
		++tls_data;

		//若干ランダムでスリープ（0～4 msec）
		Sleep(rand() % 5);

		//データ書き戻し
		s_commonData = common_data;
		s_tlsData = tls_data;

		//データ表示（後）
		printf("%s: [AFTER]  commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
		fflush(stdout);

		//ロック解放
		__asm                                //ロック解放用インラインアセンブラ（x86 系）
		{
			mov		eax, 0		//フラグ更新準備
			xchg		eax, [s_lock]	//変数とレジスタの値を交換
		}

		//スレッド切り替えのためのスリープ
		Sleep(0);
	//	//スレッド切り替え
	//	SwitchToThread();//OS に任せて再スケジューリング
	//	Yield();//廃止
	}

	//終了
	printf("- end:%s -¥n", name);
	fflush(stdout);
	return 0;
}

//テスト
int main(const int argc, const char* argv[])
{
	//スレッド作成
```

```
	static const int THREAD_NUM = 3;
	unsigned int tid[THREAD_NUM] = {};
	HANDLE hThread[THREAD_NUM] =
	{
		(HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 1024, threadFunc, "太郎", 0, &tid[0]),
		(HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 1024, threadFunc, "次郎", 0, &tid[1]),
		(HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 1024, threadFunc, "三郎", 0, &tid[2])
	};

	//スレッド終了待ち
	WaitForMultipleObjects(THREAD_NUM, hThread, true, INFINITE);

	//スレッドハンドルクローズ
	for (int i = 0; i < THREAD_NUM; ++i)
	{
		CloseHandle(hThread[i]);
	}

	//インラインアセンブラでロックの取得と解放を大量に実行して時間を計測
	{
		LARGE_INTEGER freq;
		QueryPerformanceFrequency(&freq);
		LARGE_INTEGER begin;
		QueryPerformanceCounter(&begin);
		static const int TEST_TIMES = 10000000;
		for (int i = 0; i < TEST_TIMES; ++i)
		{
			__asm                               //ロック取得用インラインアセンブラ（x86系）
			{
				mov		eax, 1		//フラグ更新準備
			lock_loop:                          //ループ用ラベル
				xchg		eax, [s_lock]	//変数とレジスタの値を交換
				test		eax, eax	//レジスタの値をチェック
				jnz		lock_loop	//レジスタの値が 0 以外ならジャンプ
			}
			__asm                               //ロック解放用インラインアセンブラ（x86系）
			{
				mov		eax, 0		//フラグ更新準備
				xchg		eax, [s_lock]	//変数とレジスタの値を交換
			}
		}
		LARGE_INTEGER end;
		QueryPerformanceCounter(&end);
		float duration = static_cast<float>(static_cast<double>(end.QuadPart - begin.QuadPart)
                                                                / static_cast<double>(freq.QuadPart));
		printf("Volatile * %d = %.6f sec¥n", TEST_TIMES, duration);
	}

	return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果）

```
- begin:太郎 -
- begin:次郎 -
- begin:三郎 -
次郎: [BEFORE] commonData=0, tlsData=0
次郎: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
三郎: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
三郎: [AFTER]  commonData=2, tlsData=1
太郎: [BEFORE] commonData=2, tlsData=0
太郎: [AFTER]  commonData=3, tlsData=1
三郎: [BEFORE] commonData=3, tlsData=1
三郎: [AFTER]  commonData=4, tlsData=2
太郎: [BEFORE] commonData=4, tlsData=1
太郎: [AFTER]  commonData=5, tlsData=2
```

```
三郎: [BEFORE] commonData=5, tlsData=2
三郎: [AFTER]  commonData=6, tlsData=3
太郎: [BEFORE] commonData=6, tlsData=2
- end:三郎 -
太郎: [AFTER]  commonData=7, tlsData=3
次郎: [BEFORE] commonData=7, tlsData=1
- end:太郎 -
次郎: [AFTER]  commonData=8, tlsData=2
次郎: [BEFORE] commonData=8, tlsData=2
次郎: [AFTER]  commonData=9, tlsData=3     ←全て正常にロックされたので、正しい処理結果になっている
- end:次郎 -
Assembler * 10000000 = 0.126005 sec        ←1 千万回ループによる処理時間計測
```

▼ 変数操作による排他制御：アトミック操作（インターロック操作）

インラインアセンブラを用いた方法では、プログラムコードの汎用性に問題がある。

開発言語や SDK が提供する機能には、変数操作のアトミック操作を保証するものがある。

● Win32API 版：インターロック操作

Win32API にはインターロック操作の API が用意されている。

Win32API 版インターロック操作によるロック制御のサンプル：

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include <Windows.h>
#include <Process.h>

//インターロック操作用変数
static LONG s_lock = 0;

//共有データ
static int s_commonData = 0;

//スレッド固有データ
__declspec(thread) int s_tlsData = 0;

//スレッド
unsigned int WINAPI threadFunc(void* param_p)
{
	//パラメータ受け取り
	const char* name = static_cast<const char*>(param_p);

	//開始
	printf("- begin:%s -¥n", name);
	fflush(stdout);

	//処理
	for (int i = 0; i < 3; ++i)
	{
		//インターロック操作でロック取得待ち
		while (InterlockedExchange(&s_lock, 1) == 1){}

		//データ表示（前）
		printf("%s: [BEFORE] commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
```

```
            fflush(stdout);

            //データ取得
            int common_data = s_commonData;
            int tls_data = s_tlsData;

            //データ更新
            ++common_data;
            ++tls_data;

            //若干ランダムでスリープ（0～4 msec）
            Sleep(rand() % 5);

            //データ書き戻し
            s_commonData = common_data;
            s_tlsData = tls_data;

            //データ表示（後）
            printf("%s: [AFTER]  commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
            fflush(stdout);

            //インターロック操作でロック解放
            InterlockedExchange(&s_lock, 0);

            //スレッド切り替えのためのスリープ
            Sleep(0);
      //    //スレッド切り替え
      //    SwitchToThread();//OSに任せて再スケジューリング
      //    Yield();//廃止
      }

      //終了
      printf("- end:%s -¥n", name);
      fflush(stdout);
      return 0;
}

//テスト
int main(const int argc, const char* argv[])
{
      //スレッド作成
      static const int THREAD_NUM = 3;
      unsigned int tid[THREAD_NUM] = {};
      HANDLE hThread[THREAD_NUM] =
      {
            (HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 0, threadFunc, "太郎", 0, &tid[0]),
            (HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 0, threadFunc, "次郎", 0, &tid[1]),
            (HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 0, threadFunc, "三郎", 0, &tid[2])
      };

      //スレッド終了待ち
      WaitForMultipleObjects(THREAD_NUM, hThread, true, INFINITE);

      //スレッドハンドルクローズ
      for (int i = 0; i < THREAD_NUM; ++i)
      {
            CloseHandle(hThread[i]);
      }

      //インターロック操作でロックの取得と解放を大量に実行して時間を計測
      {
            LARGE_INTEGER freq;
            QueryPerformanceFrequency(&freq);
            LARGE_INTEGER begin;
            QueryPerformanceCounter(&begin);
```

```
            static const int TEST_TIMES = 10000000;
            for (int i = 0; i < TEST_TIMES; ++i)
            {
                  while (InterlockedExchange(&s_lock, 1) == 1) {}
                  InterlockedExchange(&s_lock, 0);
            }
            LARGE_INTEGER end;
            QueryPerformanceCounter(&end);
            float duration = static_cast<float>(static_cast<double>(end.QuadPart - begin.QuadPart)
                                                                  / static_cast<double>(freq.QuadPart));
            printf("Interlocked * %d = %.6f sec¥n", TEST_TIMES, duration);
      }

      return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果）

```
- begin:太郎 -
太郎: [BEFORE] commonData=0, tlsData=0
- begin:次郎 -
- begin:三郎 -
太郎: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
次郎: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
次郎: [AFTER]  commonData=2, tlsData=1
三郎: [BEFORE] commonData=2, tlsData=0
三郎: [AFTER]  commonData=3, tlsData=1
太郎: [BEFORE] commonData=3, tlsData=1
太郎: [AFTER]  commonData=4, tlsData=2
次郎: [BEFORE] commonData=4, tlsData=1
次郎: [AFTER]  commonData=5, tlsData=2
太郎: [BEFORE] commonData=5, tlsData=2
太郎: [AFTER]  commonData=6, tlsData=3
次郎: [BEFORE] commonData=6, tlsData=2
- end:太郎 -
次郎: [AFTER]  commonData=7, tlsData=3
- end:次郎 -
三郎: [BEFORE] commonData=7, tlsData=1
三郎: [AFTER]  commonData=8, tlsData=2
三郎: [BEFORE] commonData=8, tlsData=2
三郎: [AFTER]  commonData=9, tlsData=3     ←全て正常にロックされたので、正しい処理結果になっている
- end:三郎 -
Interlocked * 10000000 = 0.127556 sec      ←1 千万回ループによる処理時間計測
```

● C++11 版：アトミック操作

C++11 にはアトミック操作のテンプレートクラスが用意されている。

Win32API 版のインターロック操作に比べると、データ型の制約が少ないことや、サポートされている操作（演算）が多い点などが特徴。

C++11 版アトミック操作によるロック制御のサンプル：

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include <thread>
#include <atomic>

#include <chrono> //時間計測用
#include <random> //乱数生成用

//アトミック操作用変数
```

```
static std::atomic<int> s_lock = 0;

//共有データ
static int s_commonData = 0;

//スレッド固有データ
__declspec(thread) int s_tlsData = 0;
//thread_local int s_tlsData = 0;//Visual C++ 2013 では thread_local キーワードが使えない

//スレッド
void threadFunc(const char* name)
{
	//開始
	printf("- begin:%s -¥n", name);
	fflush(stdout);

	//乱数
	std::random_device seed_gen;
	std::mt19937 rnd(seed_gen());
	std::uniform_int_distribution<int> sleep_time(0, 4);

	//処理
	for (int i = 0; i < 3; ++i)
	{
		//アトミック操作でロック取得待ち
		while (s_lock.exchange(1) == 1) {}

		//データ表示（前）
		printf("%s: [BEFORE] commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
		fflush(stdout);

		//データ取得
		int common_data = s_commonData;
		int tls_data = s_tlsData;

		//データ更新
		++common_data;
		++tls_data;

		//若干ランダムでスリープ（0～4 msec）
		std::this_thread::sleep_for(std::chrono::milliseconds(sleep_time(rnd)));

		//データ書き戻し
		s_commonData = common_data;
		s_tlsData = tls_data;

		//データ表示（後）
		printf("%s: [AFTER]  commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
		fflush(stdout);

		//アトミック操作でロック解放
		s_lock.exchange(0);

		//スレッド切り替えのためのスリープ
		std::this_thread::sleep_for(std::chrono::milliseconds(0));
	//	//スレッド切り替え
	//	std::this_thread::yield();//OSに任せて再スケジューリング
	}

	//終了
	printf("- end:%s -¥n", name);
	fflush(stdout);
}

//テスト
```

```
int main(const int argc, const char* argv[])
{
	//スレッド作成
	std::thread thread_obj1 = std::thread(threadFunc, "太郎");
	std::thread thread_obj2 = std::thread(threadFunc, "次郎");
	std::thread thread_obj3 = std::thread(threadFunc, "三郎");

	//スレッド終了待ち
	thread_obj1.join();
	thread_obj2.join();
	thread_obj3.join();

	//アトミック操作でロックの取得と解放を大量に実行して時間を計測
	{
		auto begin = std::chrono::high_resolution_clock::now();
		static const int TEST_TIMES = 10000000;
		for (int i = 0; i < TEST_TIMES; ++i)
		{
			while (s_lock.exchange(1) == 1){}
			s_lock.exchange(0);
		}
		auto end = std::chrono::high_resolution_clock::now();
		auto duration = static_cast<float>(static_cast<double>(
				std::chrono::duration_cast<std::chrono::microseconds>(end - begin).count()) / 1000000.);
		printf("Atomic * %d = %.6f sec¥n", TEST_TIMES, duration);
	}

	return EXIT_SUCCESS;
}

// End of file
```

↓（実行結果）

```
- begin:太郎 -
太郎: [BEFORE] commonData=0, tlsData=0
- begin:次郎 -
- begin:三郎 -
太郎: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
三郎: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
三郎: [AFTER]  commonData=2, tlsData=1
次郎: [BEFORE] commonData=2, tlsData=0
次郎: [AFTER]  commonData=3, tlsData=1
太郎: [BEFORE] commonData=3, tlsData=1
太郎: [AFTER]  commonData=4, tlsData=2
三郎: [BEFORE] commonData=4, tlsData=1
三郎: [AFTER]  commonData=5, tlsData=2
太郎: [BEFORE] commonData=5, tlsData=2
太郎: [AFTER]  commonData=6, tlsData=3
次郎: [BEFORE] commonData=6, tlsData=1
- end:太郎 -
次郎: [AFTER]  commonData=7, tlsData=2
三郎: [BEFORE] commonData=7, tlsData=2
三郎: [AFTER]  commonData=8, tlsData=3
次郎: [BEFORE] commonData=8, tlsData=2
- end:三郎 -
次郎: [AFTER]  commonData=9, tlsData=3     ←全て正常にロックされたので、正しい処理結果になっている
- end:次郎 -
Atomic * 10000000 = 0.124007 sec           ←1 千万回ループによる処理時間計測
```

● C++11 版：アトミック操作（フラグ型）

アトミック型はテンプレートのため、任意の型の変数を扱えるが、単なるフラグ操

作の場合は、あらかじめ用意されているフラグ型を使用するとさらに効率的である。
なお、前述の「atd::atomic<int>」型と比べて、処理時間はほとんど変わらない。

C++11 版アトミック操作（フラグ型使用）によるロック制御のサンプル（一部抜粋）：

```
…（略）…
//アトミック操作用変数
static std::atomic_flag s_lock = ATOMIC_FLAG_INIT;
…（略）…
            //アトミック操作でロック取得待ち
            while (s_lock.test_and_set()){}
…（略）…
            //アトミック操作でロック解放
            s_lock.clear();
…（略）…
      //アトミック操作用変数初期化
      s_lock.clear();
…（略）…
```

▼ 特殊な排他制御：リード・ライトロック

比較的新しいロック手法。
リードロックとライトロックを使い分けてロックする。
リードロック中は、他のリードロックは許可され、ライトロックはブロックされる。
ライトロック中は、他の全てのロックがブロックされる。
特殊な制御ゆえに、ミューテックスよりもパフォーマンスが落ちる。

使いどころとしては、共有データを作成・更新するスレッドが一つに対して、多数のスレッドがその情報を読み込むような場合に非常に有効。
並列処理環境では、分散処理が活用されるため、有効な場面が多い。
ゲームプログラミングにおいては、例えば、メインループと描画スレッドでリソースを排他制御するのに有効である。

● POSIX スレッドライブラリ版

POSIX スレッドライブラリ版のリード・ライトロック。

POSIX スレッドライブラリ版リード・ライトロックのサンプル：

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include <pthread.h>
#include <unistd.h>

#include <sys/time.h> //時間計測用

//リード／ライトロック
static pthread_rwlock_t s_lock = PTHREAD_RWLOCK_INITIALIZER;

//共有データ
```

```
static int s_commonData = 0;

//スレッド固有データ
__thread int s_tlsData = 0;

//書き込みスレッド
void* threadFuncW(void* param_p)
{
	//パラメータ受け取り
	const char* name = static_cast<const char*>(param_p);

	//開始
	printf("- begin:(W)%s -¥n", name);
	fflush(stdout);

	//若干ランダムでスリープ（0～499 msec）
	usleep((rand() % 500) * 1000);

	//処理
	for (int i = 0; i < 3; ++i)
	{
		//ライトロック取得
		pthread_rwlock_wrlock(&s_lock);
	//	pthread_rwlock_trywrlock(&s_lock);//ロックを取得できない時に他の処理を行いたい場合は
	//                                    //pthread_rwlock_trywrlock() を使用する

		//データ表示（前）
		printf("(W)%s: [BEFORE] commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
		fflush(stdout);

		//データ取得
		int common_data = s_commonData;
		int tls_data = s_tlsData;

		//データ更新
		++common_data;
		++tls_data;

		//若干ランダムでスリープ（0～499 msec）
		usleep((rand() % 500) * 1000);

		//データ書き戻し
		s_commonData = common_data;
		s_tlsData = tls_data;

		//データ表示（後）
		printf("(W)%s: [AFTER]  commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
		fflush(stdout);

		//ライトロック解放
		pthread_rwlock_unlock(&s_lock);

		//若干ランダムでスリープ（0～499 msec）
		usleep((rand() % 500) * 1000);
	}

	//終了
	printf("- end:(W)%s -¥n", name);
	fflush(stdout);
	return 0;
}

//読み込みスレッド
void* threadFuncR(void* param_p)
{
```

```
	//パラメータ受け取り
	const char* name = static_cast<const char*>(param_p);

	//開始
	printf("- begin:(R)%s -¥n", name);
	fflush(stdout);

	//若干ランダムでスリープ（0～499 msec）
	usleep((rand() % 500) * 1000);

	//処理
	for (int i = 0; i < 3; ++i)
	{
		//リードロック取得
		pthread_rwlock_rdlock(&s_lock);
	//	pthread_rwlock_tryrdlock(&s_lock);//ロックが取得できない時に他の処理を行いたい場合は
	//	                                  //pthread_rwlock_tryrdlock() を使用する
	//	pthread_rwlock_wrlock(&s_lock);//【パフォーマンス検証用】ライトロックの場合

		//データ表示（前）
		printf("(R)%s: [BEFORE] commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
		fflush(stdout);

		//若干ランダムでスリープ（0～499 msec）
		usleep((rand() % 500) * 1000);

		//データ表示（後）
		printf("(R)%s: [AFTER]  commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
		fflush(stdout);

		//リードロック解放
		pthread_rwlock_unlock(&s_lock);

		//若干ランダムでスリープ（0～499 msec）
		usleep((rand() % 500) * 1000);
	}

	//終了
	printf("- end:(R)%s -¥n", name);
	fflush(stdout);
	return 0;
}

//テスト
int main(const int argc, const char* argv[])
{
	//リード／ライトロック生成
	//※PTHREAD_RWLOCK_INITIALIZER で初期化している場合は不要
	{
	//	pthread_rwlockattr_t attr;
	//	pthread_rwlockattr_init(&attr);
	//	pthread_rwlockattr_setpshared(&attr, PTHREAD_PROCESS_PRIVATE);//単独プロセス専用　※デフォルト
	//	pthread_rwlockattr_setpshared(&attr, PTHREAD_PROCESS_SHARED);//プロセス間で共有
	//	pthread_rwlock_init(&s_lock, &attr);
	}

	//スレッド作成
	static const int THREAD_NUM = 6;
	pthread_t pth[THREAD_NUM];
	{
		pthread_attr_t attr;
		pthread_attr_init(&attr);
		pthread_attr_setstacksize(&attr, 1024);//スタックサイズ指定
		pthread_create(&pth[0], &attr, threadFuncR, (void*)"太郎");
		pthread_create(&pth[1], &attr, threadFuncR, (void*)"次郎");
```

```
		pthread_create(&pth[2], &attr, threadFuncR, (void*)"三郎");
		usleep(1);
		pthread_create(&pth[3], &attr, threadFuncW, (void*)"松子");
		pthread_create(&pth[4], &attr, threadFuncW, (void*)"竹子");
		pthread_create(&pth[5], &attr, threadFuncW, (void*)"梅子");
	}

	//スレッド終了待ち
	{
		struct timeval begin;
		gettimeofday(&begin, NULL);

		for(int i = 0; i < THREAD_NUM; ++i)
		{
			pthread_join(pth[i], NULL);
		}

		struct timeval end;
		gettimeofday(&end, NULL);
		struct timeval duration;
		if( end.tv_usec >= begin.tv_usec)
		{
			duration.tv_sec = end.tv_sec - begin.tv_sec;
			duration.tv_usec = end.tv_usec - begin.tv_usec;
		}
		else
		{
			duration.tv_sec = end.tv_sec - begin.tv_sec - 1;
			duration.tv_usec = 1000000 - begin.tv_usec + end.tv_usec;
		}
		printf("Time = %d.%06d sec¥n", duration.tv_sec, duration.tv_usec);
	}

	//リード／ライトロックの取得と解放を大量に実行して時間を計測
	{
		struct timeval begin;
		gettimeofday(&begin, NULL);
		static const int TEST_TIMES = 10000000;
		for (int i = 0; i < TEST_TIMES; ++i)
		{
			pthread_rwlock_wrlock(&s_lock);
			pthread_rwlock_unlock(&s_lock);
		}
		struct timeval end;
		gettimeofday(&end, NULL);
		struct timeval duration;
		if( end.tv_usec >= begin.tv_usec)
		{
			duration.tv_sec = end.tv_sec - begin.tv_sec;
			duration.tv_usec = end.tv_usec - begin.tv_usec;
		}
		else
		{
			duration.tv_sec = end.tv_sec - begin.tv_sec - 1;
			duration.tv_usec = 1000000 - begin.tv_usec + end.tv_usec;
		}
		printf("Read-WriteLock * %d = %d.%06d sec¥n", TEST_TIMES, duration.tv_sec, duration.tv_usec);
	}

	//リード／ライトロック破棄
	//※PTHREAD_RWLOCK_INITIALIZER で初期化している場合は不要
	{
	//	pthread_rwlock_destroy(&s_lock);
	}
```

```
    return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果）

```
- begin:(R)三郎 -
- begin:(W)梅子 -
- begin:(R)次郎 -
- begin:(W)竹子 -
- begin:(R)太郎 -
- begin:(W)松子 -
(R)次郎: [BEFORE] commonData=0, tlsData=0
(R)太郎: [BEFORE] commonData=0, tlsData=0 ←リードロックは同時取得可
(R)三郎: [BEFORE] commonData=0, tlsData=0 ←リードロックは同時取得可
(R)三郎: [AFTER]  commonData=0, tlsData=0
(R)次郎: [AFTER]  commonData=0, tlsData=0
(R)太郎: [AFTER]  commonData=0, tlsData=0 ←リードロック中はライトロックをブロック
(W)松子: [BEFORE] commonData=0, tlsData=0
(W)松子: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1 ←ライトロック中は完全に排他（完了）
(W)梅子: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
(W)梅子: [AFTER]  commonData=2, tlsData=1 ←ライトロック中は完全に排他（完了）
(W)竹子: [BEFORE] commonData=2, tlsData=0
(W)竹子: [AFTER]  commonData=3, tlsData=1 ←ライトロック中は完全に排他（完了）
(W)松子: [BEFORE] commonData=3, tlsData=1
(W)松子: [AFTER]  commonData=4, tlsData=2 ←ライトロック中は完全に排他（完了）
(R)太郎: [BEFORE] commonData=4, tlsData=0
(R)次郎: [BEFORE] commonData=4, tlsData=0 ←リードロックは同時取得可
(R)三郎: [BEFORE] commonData=4, tlsData=0 ←リードロックは同時取得可
(R)三郎: [AFTER]  commonData=4, tlsData=0
(R)太郎: [AFTER]  commonData=4, tlsData=0
(R)次郎: [AFTER]  commonData=4, tlsData=0 ←リードロック中はライトロックをブロック（完了）
(W)梅子: [BEFORE] commonData=4, tlsData=1
(W)梅子: [AFTER]  commonData=5, tlsData=2 ←ライトロック中は完全に排他（完了）
(W)松子: [BEFORE] commonData=5, tlsData=2
(W)松子: [AFTER]  commonData=6, tlsData=3 ←ライトロック中は完全に排他（完了）
(W)竹子: [BEFORE] commonData=6, tlsData=1
- end:(W)松子 -
(W)竹子: [AFTER]  commonData=7, tlsData=2 ←ライトロック中は完全に排他（完了）
(W)梅子: [BEFORE] commonData=7, tlsData=2
(W)梅子: [AFTER]  commonData=8, tlsData=3 ←ライトロック中は完全に排他（完了）
(R)次郎: [BEFORE] commonData=8, tlsData=0
(R)太郎: [BEFORE] commonData=8, tlsData=0 ←リードロックは同時取得可
(R)三郎: [BEFORE] commonData=8, tlsData=0 ←リードロックは同時取得可
- end:(W)梅子 -
(R)次郎: [AFTER]  commonData=8, tlsData=0
(R)太郎: [AFTER]  commonData=8, tlsData=0
- end:(R)太郎 -
(R)三郎: [AFTER]  commonData=8, tlsData=0 ←リードロック中はライトロックをブロック（完了）
(W)竹子: [BEFORE] commonData=8, tlsData=2
- end:(R)三郎 -
- end:(R)次郎 -
(W)竹子: [AFTER]  commonData=9, tlsData=3 ←全てのライトロックが正常にロックされたので、正しい処理結果になっている
- end:(W)竹子 -
Time = 3.720456 sec                       ←処理時間
Read-WriteLock * 10000000 = 0.995709 sec  ←1千万回ループによる処理時間計測
```

※リードロックをライトロックに変えて、普通のミューテックスのような排他制御を行った場合の実行結果

↓

```
- begin:(R)三郎 -
(R)三郎: [BEFORE] commonData=0, tlsData=0
- begin:(R)太郎 -
- begin:(W)松子 -
- begin:(W)梅子 -
```

```
- begin:(R)次郎 -
- begin:(W)竹子 -
(R)三郎: [AFTER]  commonData=0, tlsData=0 ←完全に排他（完了）
(R)太郎: [BEFORE] commonData=0, tlsData=0
(R)太郎: [AFTER]  commonData=0, tlsData=0 ←完全に排他（完了）
(W)松子: [BEFORE] commonData=0, tlsData=0
(W)松子: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1 ←完全に排他（完了）
(W)梅子: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
(W)梅子: [AFTER]  commonData=2, tlsData=1 ←完全に排他（完了）
(R)次郎: [BEFORE] commonData=2, tlsData=0
(R)次郎: [AFTER]  commonData=2, tlsData=0 ←完全に排他（完了）
(W)竹子: [BEFORE] commonData=2, tlsData=0
(W)竹子: [AFTER]  commonData=3, tlsData=1 ←完全に排他（完了）
(R)三郎: [BEFORE] commonData=3, tlsData=0
(R)三郎: [AFTER]  commonData=3, tlsData=0 ←完全に排他（完了）
(R)太郎: [BEFORE] commonData=3, tlsData=0
(R)太郎: [AFTER]  commonData=3, tlsData=0 ←完全に排他（完了）
(W)松子: [BEFORE] commonData=3, tlsData=1
(W)松子: [AFTER]  commonData=4, tlsData=2 ←完全に排他（完了）
(W)梅子: [BEFORE] commonData=4, tlsData=1
(W)梅子: [AFTER]  commonData=5, tlsData=2 ←完全に排他（完了）
(R)次郎: [BEFORE] commonData=5, tlsData=0
(R)次郎: [AFTER]  commonData=5, tlsData=0 ←完全に排他（完了）
(W)竹子: [BEFORE] commonData=5, tlsData=1
(W)竹子: [AFTER]  commonData=6, tlsData=2 ←完全に排他（完了）
(R)三郎: [BEFORE] commonData=6, tlsData=0
(R)三郎: [AFTER]  commonData=6, tlsData=0 ←完全に排他（完了）
(R)太郎: [BEFORE] commonData=6, tlsData=0
- end:(R)三郎 -
(R)太郎: [AFTER]  commonData=6, tlsData=0 ←完全に排他（完了）
(W)松子: [BEFORE] commonData=6, tlsData=2
- end:(R)太郎 -
(W)松子: [AFTER]  commonData=7, tlsData=3 ←完全に排他（完了）
(W)梅子: [BEFORE] commonData=7, tlsData=2
- end:(W)松子 -
(W)梅子: [AFTER]  commonData=8, tlsData=3 ←完全に排他（完了）
(R)次郎: [BEFORE] commonData=8, tlsData=0
- end:(W)梅子 -
(R)次郎: [AFTER]  commonData=8, tlsData=0 ←完全に排他（完了）
(W)竹子: [BEFORE] commonData=8, tlsData=2
- end:(R)次郎 -
(W)竹子: [AFTER]  commonData=9, tlsData=3
- end:(W)竹子 -
Time = 5.350463 sec                       ←処理時間　※リード処理が並行動作しなくなった分遅くなっている
                                            （各処理のウェイトがランダムとはいえ、はっきり結果が違う）
Read-WriteLock * 10000000 = 0.895791 sec   ←1千万回ループによる処理時間計測
※並行処理ができず、非効率になって処理時間がかかっていることがわかる
```

● Windows SDK for Windows Vista 版

Windows Vista 以降には、「slim reader/write ロック」というリード・ライトロックの仕組みが追加されている。

API はクリティカルセクションに近く、ハンドルではなく専用の変数で管理する。

「InitializeSRWLock()」関数や、「AcquireSRWLockExclusive()」関数、「ReleaseSRWLockExclusive()」関数、「AcquireSRWLockShared()」関数、「ReleaseSRWLockShared()」関数が追加されている。

サンプルプログラムは省略。

▼ 有限共有リソース使用権獲得

「ミューテックス」や「スピンロック」は、一つのスレッドだけが相互排他的に動作するためのものであった。

これから説明する「セマフォ」は、二つ以上の共有リソースに対して、それ以上のスレッドが排他的にアクセスするような場面で用いる。

具体的な用途としては、例えば、「多数のクライアントとの通信セッションを一つ一つのスレッドで確立したた状態」において、「負荷を抑えるために、三つまでしか並行で動作しないようにする」といったことが考えられる。

▼ 有限共有リソース使用権獲得：セマフォ

セマフォを扱う上での注意点として、ミューテックスのようなスレッド保護の観点はないため、再帰ロックには対応しない。

一つのスレッドが二つ以上のセマフォを獲得するようなプログラミングを行うと、簡単にデッドロックを起こすので要注意。

● SystemV 版

古典的な SystemV 系 Unix（Linux 含む）のセマフォ。プロセス間の排他制御に多く用いられる。

OS が管理するため、他のプロセスと重複しないキーを指定してセマフォを生成しなければならない。その為、自身のプログラム専用の何らかのファイルのキー（ファイルシステムによって付けられたユニーク ID）を用いるのが慣例となっている。

なお、プログラム中でセマフォを生成すると、端末から ipcs コマンドでそれを確認することができる。

SystemV 版セマフォのサンプル：

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include <pthread.h>
#include <unistd.h>
#include <sys/sem.h>
#include <fcntl.h>

#include <sys/time.h> //時間計測用

//セマフォ
static int s_semaphore;

//ミューテックス
static pthread_mutex_t s_mutex = PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER;
```

```
//共有リソース
static const int COMMON_RESOURCE_NUM = 2;
static int s_commonResource[COMMON_RESOURCE_NUM]       = {};//複数の共有リソース
static bool s_usingCommonResource[COMMON_RESOURCE_NUM] = {};//共有リソース使用中フラグ

//スレッド固有データ
__thread int s_tlsData = 0;

//スレッド
void* threadFunc(void* param_p)
{
      //パラメータ受け取り
      const char* name = static_cast<const char*>(param_p);

      //開始
      printf("- begin:%s -¥n", name);
      fflush(stdout);

      //処理
      for (int i = 0; i < 3; ++i)
      {
            //セマフォ取得
            {
                  struct sembuf sb[1] = {{0, -1, 0}};//インデックス 0 番のセマフォのカウンタを -1 する
                  semop(s_semaphore, sb, 1);         //この時カウンタが 0 ならブロックされる
                                                     //セマフォ操作データ sembuf の要素数は一つ
                                                     //取得失敗時にエラー終了させたい場合は
                                                     //sembuf::sem_flag に IPC_NOWAIT を指定する
                                                     //タイムアウトしたい場合は semtimedop() を使用する
            }

            //共有リソースを獲得
            int index = 0;
            pthread_mutex_lock(&s_mutex);
            for (; index < COMMON_RESOURCE_NUM; ++index)
            {
                  if (!s_usingCommonResource[index])
                        break;
            }
            s_usingCommonResource[index] = true;
            pthread_mutex_unlock(&s_mutex);

            //データ表示（前）
            printf("%s: [BEFORE] commonResource[%d]=%d, tlsData=%d¥n", name, index, s_commonResource[index], s_tlsData);
            fflush(stdout);

            //データ取得
            int common_data = s_commonResource[index];
            int tls_data = s_tlsData;

            //データ更新
            ++common_data;
            ++tls_data;

            //若干ランダムでスリープ（0～4 msec）
            usleep((rand() % 5) * 1000);

            //データ書き戻し
            s_commonResource[index] = common_data;
            s_tlsData = tls_data;

            //データ表示（後）
            printf("%s: [AFTER]  commonResource[%d]=%d, tlsData=%d¥n",
                                                      name, index, s_commonResource[index], s_tlsData);
            fflush(stdout);
```

```
            //共有リソースを解放
            s_usingCommonResource[index] = false;

            //セマフォ解放
            {
                  struct sembuf sb[1] = {{0, 1, 0}};//インデックス 0 番のセマフォのカウンタを +1 する
                  semop(s_semaphore, sb, 1);        //セマフォ操作データ sembuf の要素数は一つ
            }

            //スレッド切り替えのためのスリープ
            usleep(0);
      //    //スレッド切り替え
      //    sched_yield();//同じ優先度の他のスレッドに切り替え
      }

      //終了
      printf("- end:%s -¥n", name);
      fflush(stdout);
      return 0;
}

//テスト
int main(const int argc, const char* argv[])
{
      //セマフォ生成
      {
            key_t key = ftok("share.cpp", 'S');//セマフォを一意に識別するためのキーとして、
                                               //実在するファイルのユニーク ID を利用
            s_semaphore = semget(key, 1, S_IRWXU|IPC_CREAT);//セマフォを一つ生成、全ユーザー＆グループ読み書き許可
            semctl(s_semaphore, 0, SETVAL, 0);//インデックス 0 番のセマフォの値を 0 にする（取得できない状態）
      //    //セマフォの初期値を設定する場合は、semctl() に SETVAL と初期値を渡して呼び出す
      //    union semun arg;
      //    arg.val = COMMON_RESOURCE_NUM;
      //    semctl(s_semaphore, 0, SETVAL, arg); //インデックス 0 番のセマフォの値を COMMON_RESOURCE_NUM にする
      }

      //スレッド作成
      static const int THREAD_NUM = 4;
      pthread_t pth[THREAD_NUM];
      {
            pthread_attr_t attr;
            pthread_attr_init(&attr);
            pthread_attr_setstacksize(&attr, 1024);//スタックサイズ指定
            pthread_create(&pth[0], &attr, threadFunc, (void*)"太郎");
            pthread_create(&pth[1], &attr, threadFunc, (void*)"次郎");
            pthread_create(&pth[2], &attr, threadFunc, (void*)"三郎");
            pthread_create(&pth[3], &attr, threadFunc, (void*)"四朗");
      }

      //若干スリープ
      usleep(10 * 1000);

      //共有リソース初期化
      for (int i = 0; i < COMMON_RESOURCE_NUM; ++i)
      {
            s_commonResource[i] = 1000 * (i + 1);
      }

      //若干スリープ
      usleep(10 * 1000);

      //共有リソースの使用を許可（全セマフォ解放）
      {
            for (int i = 0; i < COMMON_RESOURCE_NUM; ++i)
```

```
            {
                  struct sembuf sb[1] = {{0, 1, 0}};//インデックス０番のセマフォのカウンタを +1 する
                  semop(s_semaphore, sb, 1);        //セマフォ操作データ sembuf の要素数は一つ
            }
            printf("Common-resources have been prepared. (num=%d)¥n", COMMON_RESOURCE_NUM);
            fflush(stdout);
      }

      //スレッド終了待ち
      for (int i = 0; i < THREAD_NUM; ++i)
      {
            pthread_join(pth[i], NULL);
      }

      //セマフォの取得と解放を大量に実行して時間を計測
      {
            struct timeval begin;
            gettimeofday(&begin, NULL);
            static const int TEST_TIMES = 10000000;
            for (int i = 0; i < TEST_TIMES; ++i)
            {
                  {
                        struct sembuf sb = {0, -1, 0};
                        semop(s_semaphore, &sb, 1);
                  }
                  {
                        struct sembuf sb = {0, 1, 0};
                        semop(s_semaphore, &sb, 1);
                  }
            }
            struct timeval end;
            gettimeofday(&end, NULL);
            struct timeval duration;
            if( end.tv_usec >= begin.tv_usec)
            {
                  duration.tv_sec = end.tv_sec - begin.tv_sec;
                  duration.tv_usec = end.tv_usec - begin.tv_usec;
            }
            else
            {
                  duration.tv_sec = end.tv_sec - begin.tv_sec - 1;
                  duration.tv_usec = 1000000 - begin.tv_usec + end.tv_usec;
            }
            printf("Semaphore * %d = %d.%06d sec¥n", TEST_TIMES, duration.tv_sec, duration.tv_usec);
      }

      //セマフォ破棄
      {
            semctl(s_semaphore, 0, IPC_RMID, 0);//インデックス０番のセマフォを破棄
      }

      return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果）

```
- begin:三郎 -
- begin:太郎 -
- begin:次郎 -
- begin:四朗 -
Common-resources have been prepared. (num=2)          ←セマフォが解放されるまで全てのスレッドがブロック
太郎: [BEFORE] commonResource[1]=2000, tlsData=0
三郎: [BEFORE] commonResource[0]=1000, tlsData=0      ←4 つスレッドのうち、2 つだけが稼働
三郎: [AFTER]  commonResource[0]=1001, tlsData=1
次郎: [BEFORE] commonResource[0]=1001, tlsData=0      ←1 つスレッドが終了すると、次のスレッドが動く
太郎: [AFTER]  commonResource[1]=2001, tlsData=1        （常に同時に 2 つまで）
```

```
四朗: [BEFORE] commonResource[1]=2001, tlsData=0
四朗: [AFTER]  commonResource[1]=2002, tlsData=1
三郎: [BEFORE] commonResource[1]=2002, tlsData=1
次郎: [AFTER]  commonResource[0]=1002, tlsData=1
太郎: [BEFORE] commonResource[0]=1002, tlsData=1
太郎: [AFTER]  commonResource[0]=1003, tlsData=2
四朗: [BEFORE] commonResource[0]=1003, tlsData=1
三郎: [AFTER]  commonResource[1]=2003, tlsData=2
次郎: [BEFORE] commonResource[1]=2003, tlsData=1
四朗: [AFTER]  commonResource[0]=1004, tlsData=2
太郎: [BEFORE] commonResource[0]=1004, tlsData=2
次郎: [AFTER]  commonResource[1]=2004, tlsData=2
四朗: [BEFORE] commonResource[1]=2004, tlsData=2
太郎: [AFTER]  commonResource[0]=1005, tlsData=3
三郎: [BEFORE] commonResource[0]=1005, tlsData=2
四朗: [AFTER]  commonResource[1]=2005, tlsData=3
次郎: [BEFORE] commonResource[1]=2005, tlsData=2
- end:四朗 -
- end:太郎 -
次郎: [AFTER]  commonResource[1]=2006, tlsData=3      ←全て正常にロックされたので、正しい処理結果になっている
三郎: [AFTER]  commonResource[0]=1006, tlsData=3        （commonResource[0] と [1] が計 12 進行している）
- end:三郎 -
- end:次郎 -
Semaphore * 10000000 = 8.186604 sec                   ←1 千万回ループによる処理時間計測
```

↓※ipcs コマンド実行結果

```
$ ipcs

------ 共有メモリセグメント --------
キー      shmid      所有者  権限     バイト  nattch     状態

------ セマフォ配列 --------
キー      semid      所有者  権限     nsems
0x5302020a 851973     user_name  700        1          ←生成されているセマフォが確認できる

------ メッセージキュー --------
キー      msqid      所有者  権限     使用バイト数 メッセージ
```

● POSIX スレッドライブラリ版（名前なし）

POSIX スレッドライブラリ版のセマフォ。

POSIX スレッドライブラリ版セマフォのサンプル：

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include <pthread.h>
#include <unistd.h>
#include <semaphore.h>

#include <sys/time.h> //時間計測用

//セマフォ
static sem_t s_semaphore;

//ミューテックス
static pthread_mutex_t s_mutex = PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER;

//共有リソース
static const int COMMON_RESOURCE_NUM = 2;
static int s_commonResource[COMMON_RESOURCE_NUM]       = {};//複数の共有リソース
static bool s_usingCommonResource[COMMON_RESOURCE_NUM] = {};//共有リソース使用中フラグ
```

```
//スレッド固有データ
__thread int s_tlsData = 0;

//スレッド
void* threadFunc(void* param_p)
{
	//パラメータ受け取り
	const char* name = static_cast<const char*>(param_p);

	//開始
	printf("- begin:%s -¥n", name);
	fflush(stdout);

	//処理
	for (int i = 0; i < 3; ++i)
	{
		//セマフォ取得
		sem_wait(&s_semaphore);
	//	sem_trywait(&s_semaphore);//ロックを取得できない時に他の処理を行いたい場合は
	//				//sem_trywait() もしくは  sem_timedwait() を使用する

		//共有リソースを獲得
		int index = 0;
		pthread_mutex_lock(&s_mutex);
		for (; index < COMMON_RESOURCE_NUM; ++index)
		{
			if (!s_usingCommonResource[index])
				break;
		}
		s_usingCommonResource[index] = true;
		pthread_mutex_unlock(&s_mutex);

		//データ表示（前）
		printf("%s: [BEFORE] commonResource[%d]=%d, tlsData=%d¥n", name, index, s_commonResource[index], s_tlsData);
		fflush(stdout);

		//データ取得
		int common_data = s_commonResource[index];
		int tls_data = s_tlsData;

		//データ更新
		++common_data;
		++tls_data;

		//若干ランダムでスリープ（0～4 msec）
		usleep((rand() % 5) * 1000);

		//データ書き戻し
		s_commonResource[index] = common_data;
		s_tlsData = tls_data;

		//データ表示（後）
		printf("%s: [AFTER]  commonResource[%d]=%d, tlsData=%d¥n",
							name, index, s_commonResource[index], s_tlsData);
		fflush(stdout);

		//共有リソースを解放
		s_usingCommonResource[index] = false;

		//セマフォ解放
		sem_post(&s_semaphore);

		//スレッド切り替えのためのスリープ
		usleep(0);
```

```
	//	//スレッド切り替え
	//	sched_yield();//同じ優先度の他のスレッドに切り替え
	}

	//終了
	printf("- end:%s -¥n", name);
	fflush(stdout);
	return 0;
}

//テスト
int main(const int argc, const char* argv[])
{
	//セマフォ生成
	{
		sem_init(&s_semaphore, 0, 0);//プロセス間で共有しないセマフォ
					//セマフォの初期値を 0にする（取得できない状態）
	}

	//スレッド作成
	static const int THREAD_NUM = 4;
	pthread_t pth[THREAD_NUM];
	{
		pthread_attr_t attr;
		pthread_attr_init(&attr);
		pthread_attr_setstacksize(&attr, 1024);//スタックサイズ指定
		pthread_create(&pth[0], &attr, threadFunc, (void*)"太郎");
		pthread_create(&pth[1], &attr, threadFunc, (void*)"次郎");
		pthread_create(&pth[2], &attr, threadFunc, (void*)"三郎");
		pthread_create(&pth[3], &attr, threadFunc, (void*)"四朗 ");
	}

	//若干スリープ
	usleep(10 * 1000);

	//共有リソース初期化
	for (int i = 0; i < COMMON_RESOURCE_NUM; ++i)
	{
		s_commonResource[i] = 1000 * (i + 1);
	}

	//若干スリープ
	usleep(10 * 1000);

	//共有リソースの使用を許可（全セマフォ解放）
	{
		for (int i = 0; i < COMMON_RESOURCE_NUM; ++i)
		{
			sem_post(&s_semaphore);
		}
		printf("Common-resources have been prepared. (num=%d)¥n", COMMON_RESOURCE_NUM);
		fflush(stdout);
	}

	//スレッド終了待ち
	for (int i = 0; i < THREAD_NUM; ++i)
	{
		pthread_join(pth[i], NULL);
	}

	//セマフォの取得と解放を大量に実行して時間を計測
	{
		struct timeval begin;
		gettimeofday(&begin, NULL);
		static const int TEST_TIMES = 10000000;
```

```
            for (int i = 0; i < TEST_TIMES; ++i)
            {
                  sem_wait(&s_semaphore);
                  sem_post(&s_semaphore);
            }
            struct timeval end;
            gettimeofday(&end, NULL);
            struct timeval duration;
            if( end.tv_usec >= begin.tv_usec)
            {
                  duration.tv_sec = end.tv_sec - begin.tv_sec;
                  duration.tv_usec = end.tv_usec - begin.tv_usec;
            }
            else
            {
                  duration.tv_sec = end.tv_sec - begin.tv_sec - 1;
                  duration.tv_usec = 1000000 - begin.tv_usec + end.tv_usec;
            }
            printf("Semaphore * %d = %d.%06d sec¥n", TEST_TIMES, duration.tv_sec, duration.tv_usec);
      }

      //セマフォ破棄
      {
            sem_destroy(&s_semaphore);
      }

      return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果）

```
- begin:四朗  -
- begin:三郎 -
- begin:太郎 -
- begin:次郎 -
Common-resources have been prepared. (num=2)          ←セマフォが解放されるまで全てのスレッドがブロック
三郎: [BEFORE] commonResource[1]=2000, tlsData=0
四朗: [BEFORE] commonResource[0]=1000, tlsData=0      ←4 つスレッドのうち、2 つだけが稼働
四朗: [AFTER]  commonResource[0]=1001, tlsData=1
太郎: [BEFORE] commonResource[0]=1001, tlsData=0      ←1 つスレッドが終了すると、次のスレッドが動く
三郎: [AFTER]  commonResource[1]=2001, tlsData=1        （常に同時に 2 つまで）
次郎: [BEFORE] commonResource[1]=2001, tlsData=0
太郎: [AFTER]  commonResource[0]=1002, tlsData=1
四朗: [BEFORE] commonResource[0]=1002, tlsData=1
次郎: [AFTER]  commonResource[1]=2002, tlsData=1
太郎: [BEFORE] commonResource[1]=2002, tlsData=1
太郎: [AFTER]  commonResource[1]=2003, tlsData=2
三郎: [BEFORE] commonResource[1]=2003, tlsData=1
四朗: [AFTER]  commonResource[0]=1003, tlsData=2
次郎: [BEFORE] commonResource[0]=1003, tlsData=1
三郎: [AFTER]  commonResource[1]=2004, tlsData=2
太郎: [BEFORE] commonResource[1]=2004, tlsData=2
次郎: [AFTER]  commonResource[0]=1004, tlsData=2
四朗: [BEFORE] commonResource[0]=1004, tlsData=2
四朗: [AFTER]  commonResource[0]=1005, tlsData=3
三郎: [BEFORE] commonResource[0]=1005, tlsData=2
太郎: [AFTER]  commonResource[1]=2005, tlsData=3
次郎: [BEFORE] commonResource[1]=2005, tlsData=2
- end:四朗  -
- end:太郎 -
三郎: [AFTER]  commonResource[0]=1006, tlsData=3      ←全て正常にロックされたので、正しい処理結果になっている
次郎: [AFTER]  commonResource[1]=2006, tlsData=3        （commonResource[0] と [1] が計 12 進行している）
- end:次郎 -
- end:三郎 -
Semaphore * 10000000 = 0.607549 sec                   ←1 千万回ループによる処理時間計測
```

● POSIX スレッドライブラリ版（名前付き）

POSIX スレッドライブラリ版の名前付きセマフォ。

基本的には名前無しセマフォと変わらないが、プロセス間での排他制御で場合に使用する。セマフォ生成時に、ファイルと同様のアクセス権を設定できる。

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include <pthread.h>
#include <unistd.h>
#include <semaphore.h>
#include <fcntl.h>

#include <sys/time.h> //時間計測用

//共有セマフォ名
static const char* COMMON_SEMAPHORE_NAME = "Common Semaphore";

//ミューテックス
static pthread_mutex_t s_mutex = PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER;

//共有リソース
static const int COMMON_RESOURCE_NUM = 2;
static int s_commonResource[COMMON_RESOURCE_NUM]       = {};//複数の共有リソース
static bool s_usingCommonResource[COMMON_RESOURCE_NUM] = {};//共有リソース使用中フラグ

//スレッド固有データ
__thread int s_tlsData = 0;

//スレッド
void* threadFunc(void* param_p)
{
      //パラメータ受け取り
      const char* name = static_cast<const char*>(param_p);

      //開始
      printf("- begin:%s -¥n", name);
      fflush(stdout);

      //名前付きセマフォオープン
      sem_t* semaphore = sem_open(COMMON_SEMAPHORE_NAME, 0);//すでに存在しているセマフォをオープン

      //処理
      for (int i = 0; i < 3; ++i)
      {
            //セマフォ取得
            sem_wait(semaphore);
      //    sem_trywait(&s_mutex);//取得できない時に他の処理を行いたい場合は
      //                          //sem_trywait() もしくは  sem_timedwait() を使用する

            //共有リソースを獲得
            int index = 0;
            pthread_mutex_lock(&s_mutex);
            for (; index < COMMON_RESOURCE_NUM; ++index)
            {
                  if (!s_usingCommonResource[index])
                        break;
            }
            s_usingCommonResource[index] = true;
            pthread_mutex_unlock(&s_mutex);

            //データ表示（前）
```

```
            printf("%s: [BEFORE] commonResource[%d]=%d, tlsData=%d¥n", name, index, s_commonResource[index], s_tlsData);
            fflush(stdout);

            //データ取得
            int common_data = s_commonResource[index];
            int tls_data = s_tlsData;

            //データ更新
            ++common_data;
            ++tls_data;

            //若干ランダムでスリープ（0～4 msec）
            usleep((rand() % 5) * 1000);

            //データ書き戻し
            s_commonResource[index] = common_data;
            s_tlsData = tls_data;

            //データ表示（後）
            printf("%s: [AFTER]  commonResource[%d]=%d, tlsData=%d¥n",
                                                    name, index, s_commonResource[index], s_tlsData);
            fflush(stdout);

            //共有リソースを解放
            s_usingCommonResource[index] = false;

            //セマフォ解放
            sem_post(semaphore);

            //スレッド切り替えのためのスリープ
            usleep(0);
      //    //スレッド切り替え
      //    sched_yield();//同じ優先度の他のスレッドに切り替え
      }

      //セマフォクローズ
      sem_close(semaphore);

      //終了
      printf("- end:%s -¥n", name);
      fflush(stdout);
      return 0;
}

//テスト
int main(const int argc, const char* argv[])
{
      //名前付きセマフォ生成
      sem_t* semaphore = NULL;
      {
            semaphore = sem_open(COMMON_SEMAPHORE_NAME, O_CREAT, S_IRWXU, 0);//全ユーザー＆グループ読み書き許可の
                                                                              //セマフォを生成
                                                                              //セマフォの初期値を 0 にする
                                                                              //（取得できない状態）
      }

      //スレッド作成
      static const int THREAD_NUM = 4;
      pthread_t pth[THREAD_NUM];
      {
            pthread_attr_t attr;
            pthread_attr_init(&attr);
            pthread_attr_setstacksize(&attr, 1024);//スタックサイズ指定
            pthread_create(&pth[0], &attr, threadFunc, (void*)"太郎");
            pthread_create(&pth[1], &attr, threadFunc, (void*)"次郎");
```

```
		pthread_create(&pth[2], &attr, threadFunc, (void*)"三郎");
		pthread_create(&pth[3], &attr, threadFunc, (void*)"四朗");
	}

	//若干スリープ
	usleep(10 * 1000);

	//共有リソース初期化
	for (int i = 0; i < COMMON_RESOURCE_NUM; ++i)
	{
		s_commonResource[i] = 1000 * (i + 1);
	}

	//若干スリープ
	usleep(10 * 1000);

	//共有リソースの使用を許可（全セマフォ解放）
	{
		for (int i = 0; i < COMMON_RESOURCE_NUM; ++i)
		{
			sem_post(semaphore);
		}
		printf("Common-resources have been prepared. (num=%d)¥n", COMMON_RESOURCE_NUM);
		fflush(stdout);
	}

	//スレッド終了待ち
	for (int i = 0; i < THREAD_NUM; ++i)
	{
		pthread_join(pth[i], NULL);
	}

	//セマフォの取得と解放を大量に実行して時間を計測
	{
		struct timeval begin;
		gettimeofday(&begin, NULL);
		static const int TEST_TIMES = 10000000;
		for (int i = 0; i < TEST_TIMES; ++i)
		{
			sem_wait(semaphore);
			sem_post(semaphore);
		}
		struct timeval end;
		gettimeofday(&end, NULL);
		struct timeval duration;
		if( end.tv_usec >= begin.tv_usec)
		{
			duration.tv_sec = end.tv_sec - begin.tv_sec;
			duration.tv_usec = end.tv_usec - begin.tv_usec;
		}
		else
		{
			duration.tv_sec = end.tv_sec - begin.tv_sec - 1;
			duration.tv_usec = 1000000 - begin.tv_usec + end.tv_usec;
		}
		printf("Semaphore * %d = %d.%06d sec¥n", TEST_TIMES, duration.tv_sec, duration.tv_usec);
	}

	//セマフォ破棄
	{
		sem_close(semaphore);//クローズ
		sem_unlink(COMMON_SEMAPHORE_NAME);//破棄（きちんと破棄しないとプロセス終了後も残るので注意）
	}

	return EXIT_SUCCESS;
```

```
}
```

↓（実行結果）

```
- begin:四朗 -
- begin:太郎 -
- begin:三郎 -
- begin:次郎 -
Common-resources have been prepared. (num=2)          ←セマフォが解放されるまで全てのスレッドがブロック
四朗: [BEFORE] commonResource[0]=1000, tlsData=0
太郎: [BEFORE] commonResource[1]=2000, tlsData=0      ←4 つスレッドのうち、2 つだけが稼働
太郎: [AFTER]  commonResource[1]=2001, tlsData=1
三郎: [BEFORE] commonResource[1]=2001, tlsData=0      ←1 つスレッドが終了すると、次のスレッドが動く
四朗: [AFTER]  commonResource[0]=1001, tlsData=1        （常に同時に 2 つまで）
四朗: [BEFORE] commonResource[0]=1001, tlsData=1
三郎: [AFTER]  commonResource[1]=2002, tlsData=1
太郎: [BEFORE] commonResource[1]=2002, tlsData=1
四朗: [AFTER]  commonResource[0]=1002, tlsData=2
次郎: [BEFORE] commonResource[0]=1002, tlsData=0
次郎: [AFTER]  commonResource[0]=1003, tlsData=1
三郎: [BEFORE] commonResource[0]=1003, tlsData=1
太郎: [AFTER]  commonResource[1]=2003, tlsData=2
四朗: [BEFORE] commonResource[1]=2003, tlsData=2
三郎: [AFTER]  commonResource[0]=1004, tlsData=2
太郎: [BEFORE] commonResource[0]=1004, tlsData=2
四朗: [AFTER]  commonResource[1]=2004, tlsData=3
三郎: [BEFORE] commonResource[1]=2004, tlsData=2
- end:四朗 -
三郎: [AFTER]  commonResource[1]=2005, tlsData=3
次郎: [BEFORE] commonResource[1]=2005, tlsData=1
太郎: [AFTER]  commonResource[0]=1005, tlsData=3
- end:三郎 -
- end:太郎 -
次郎: [AFTER]  commonResource[1]=2006, tlsData=2      ←全て正常にロックされたので、正しい処理結果になっている
次郎: [BEFORE] commonResource[0]=1005, tlsData=2        （commonResource[0] と [1] が計 12 進行している）
次郎: [AFTER]  commonResource[0]=1006, tlsData=3
- end:次郎 -
Semaphore * 10000000 = 0.568886 sec                   ←処理時間
```

● Win32API 版（名前なし）

Win32API 版のセマフォ。

Win32API 版セマフォのサンプル：

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include <Windows.h>
#include <Process.h>

//セマフォハンドル
static HANDLE s_hSemaphore = INVALID_HANDLE_VALUE;

//クリティカルセクション
static CRITICAL_SECTION s_lock;

//共有リソース
static const int COMMON_RESOURCE_NUM = 2;
static int s_commonResource[COMMON_RESOURCE_NUM]       = {};//複数の共有リソース
static bool s_usingCommonResource[COMMON_RESOURCE_NUM] = {};//共有リソース使用中フラグ

//スレッド固有データ
__declspec(thread) int s_tlsData = 0;
```

```
//スレッド
unsigned int WINAPI threadFunc(void* param_p)
{
	//パラメータ受け取り
	const char* name = static_cast<const char*>(param_p);

	//開始
	printf("- begin:%s -¥n", name);
	fflush(stdout);

	//処理
	for (int i = 0; i < 3; ++i)
	{
		//セマフォ取得
		WaitForSingleObject(s_hSemaphore, INFINITE);//取得できない時に他の処理を行いたい場合はタイムアウト値を
                                                    //指定する

		//共有リソースを獲得
		int index = 0;
		EnterCriticalSection(&s_lock);//クリティカルセクション取得
		for (; index < COMMON_RESOURCE_NUM; ++index)
		{
			if (!s_usingCommonResource[index])
				break;
		}
		s_usingCommonResource[index] = true;
		LeaveCriticalSection(&s_lock);//クリティカルセクション解放

		//データ表示（前）
		printf("%s: [BEFORE] commonResource[%d]=%d, tlsData=%d¥n", name, index, s_commonResource[index], s_tlsData);
		fflush(stdout);

		//データ取得
		int common_data = s_commonResource[index];
		int tls_data = s_tlsData;

		//データ更新
		++common_data;
		++tls_data;

		//若干ランダムでスリープ（0～4 msec）
		Sleep(rand() % 5);

		//データ書き戻し
		s_commonResource[index] = common_data;
		s_tlsData = tls_data;

		//データ表示（後）
		printf("%s: [AFTER]  commonResource[%d]=%d, tlsData=%d¥n",
                                                    name, index, s_commonResource[index], s_tlsData);
		fflush(stdout);

		//共有リソースを解放
		s_usingCommonResource[index] = false;

		//セマフォ解放
		LONG prev_count;
		ReleaseSemaphore(s_hSemaphore, 1, &prev_count);

		//スレッド切り替えのためのスリープ
		Sleep(0);
	//	//スレッド切り替え
	//	SwitchToThread();//OSに任せて再スケジューリング
	//	Yield();//廃止
```

```
	}

	//終了
	printf("- end:%s -¥n", name);
	fflush(stdout);
	return 0;
}

//テスト
int main(const int argc, const char* argv[])
{
	//セマフォ生成
	{
		s_hSemaphore = CreateSemaphore(nullptr, 0, COMMON_RESOURCE_NUM, nullptr);//初期状態はセマフォを全て
	                                                                             //使用中にする

	//	//属性を指定して生成する場合
	//	SECURITY_ATTRIBUTES attr = { sizeof(SECURITY_ATTRIBUTES), nullptr, true };//子プロセスにハンドルを継承する
	//	SECURITY_ATTRIBUTES attr = { sizeof(SECURITY_ATTRIBUTES), nullptr, false };//子プロセスにハンドルを
	//	                                                                           //継承しない　※デフォルト
	//	s_hSemaphore = CreateSemaphore(&attr, 0, COMMON_RESOURCE_NUM, nullptr);//初期状態はセマフォを全て
	//	                                                                       //使用中にする
	}

	//クリティカルセクション生成
	InitializeCriticalSectionAndSpinCount(&s_lock, 100);

	//スレッド作成
	static const int THREAD_NUM = 4;
	unsigned int tid[THREAD_NUM] = {};
	HANDLE hThread[THREAD_NUM] =
	{
		(HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 1024, threadFunc, "太郎", 0, &tid[0]),
		(HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 1024, threadFunc, "次郎", 0, &tid[1]),
		(HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 1024, threadFunc, "三郎", 0, &tid[2]),
		(HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 1024, threadFunc, "四郎", 0, &tid[3])
	};

	//若干スリープ
	Sleep(10);

	//共有リソース初期化
	for (int i = 0; i < COMMON_RESOURCE_NUM; ++i)
	{
		s_commonResource[i] = 1000 * (i + 1);
	}

	//若干スリープ
	Sleep(10);

	//共有リソースの使用を許可（全セマフォ解放）
	{
		LONG prev_count;
		ReleaseSemaphore(s_hSemaphore, COMMON_RESOURCE_NUM, &prev_count);
		printf("Common-resources have been prepared. (num=%d -> %d)¥n", prev_count, COMMON_RESOURCE_NUM);
		fflush(stdout);
	}

	//スレッド終了待ち
	WaitForMultipleObjects(THREAD_NUM, hThread, true, INFINITE);

	//スレッドハンドルクローズ
	for (int i = 0; i < THREAD_NUM; ++i)
	{
		CloseHandle(hThread[i]);
```

```
	}

	//セマフォの取得と解放を大量に実行して時間を計測
	{
		LARGE_INTEGER freq;
		QueryPerformanceFrequency(&freq);
		LARGE_INTEGER begin;
		QueryPerformanceCounter(&begin);
		static const int TEST_TIMES = 10000000;
		for (int i = 0; i < TEST_TIMES; ++i)
		{
			WaitForSingleObject(s_hSemaphore, INFINITE);
			ReleaseSemaphore(s_hSemaphore, 1, nullptr);
		}
		LARGE_INTEGER end;
		QueryPerformanceCounter(&end);
		float duration = static_cast<float>(static_cast<double>(end.QuadPart - begin.QuadPart)
		                                                        / static_cast<double>(freq.QuadPart));
		printf("Semaphore * %d = %.6f sec¥n", TEST_TIMES, duration);
	}

	//クリティカルセクション破棄
	DeleteCriticalSection(&s_lock);

	//セマフォ破棄
	CloseHandle(s_hSemaphore);
	s_hSemaphore = INVALID_HANDLE_VALUE;

	return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果）

```
- begin:太郎 -
- begin:次郎 -
- begin:三郎 -
- begin:四郎 -
Common-resources have been prepared. (num=0 -> 2)     ←セマフォが解放されるまで全てのスレッドがブロック
次郎: [BEFORE] commonResource[0]=1000, tlsData=0
太郎: [BEFORE] commonResource[1]=2000, tlsData=0      ←4 つスレッドのうち、2 つだけが稼働
次郎: [AFTER]  commonResource[0]=1001, tlsData=1
太郎: [AFTER]  commonResource[1]=2001, tlsData=1
三郎: [BEFORE] commonResource[0]=1001, tlsData=0      ←1 つスレッドが終了すると、次のスレッドが動く
四郎: [BEFORE] commonResource[1]=2001, tlsData=0        （常に同時に 2 つまで）
四郎: [AFTER]  commonResource[1]=2002, tlsData=1
三郎: [AFTER]  commonResource[0]=1002, tlsData=1
太郎: [BEFORE] commonResource[0]=1002, tlsData=1
次郎: [BEFORE] commonResource[1]=2002, tlsData=1
太郎: [AFTER]  commonResource[0]=1003, tlsData=2
次郎: [AFTER]  commonResource[1]=2003, tlsData=2
四郎: [BEFORE] commonResource[0]=1003, tlsData=1
三郎: [BEFORE] commonResource[1]=2003, tlsData=1
三郎: [AFTER]  commonResource[1]=2004, tlsData=2
四郎: [AFTER]  commonResource[0]=1004, tlsData=2
太郎: [BEFORE] commonResource[0]=1004, tlsData=2
次郎: [BEFORE] commonResource[1]=2004, tlsData=2
次郎: [AFTER]  commonResource[1]=2005, tlsData=3
太郎: [AFTER]  commonResource[0]=1005, tlsData=3
- end:太郎 -
- end:次郎 -
三郎: [BEFORE] commonResource[0]=1005, tlsData=2
四郎: [BEFORE] commonResource[1]=2005, tlsData=2
四郎: [AFTER]  commonResource[1]=2006, tlsData=3      ←全て正常にロックされたので、正しい処理結果になっている
三郎: [AFTER]  commonResource[0]=1006, tlsData=3        （commonResource[0] と [1] が計 12 進行している）
- end:四郎 -
- end:三郎 -
```

```
Semaphore * 10000000 = 4.636328 sec                    ←1 千万回ループによる処理時間計測
```

● Win32API 版（名前付き）

Win32 版の名前付きセマフォ。

基本的には名前無しセマフォと変わらないが、プロセス間での排他制御や、スレッドごとにセマフォのアクセス権を変えたい場合に使用する。

Win32API 版名前付きセマフォのサンプル：

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include <Windows.h>
#include <Process.h>

//共有セマフォ名
static const char* COMMON_SEMAPHORE_NAME = "Common Semaphore";

//共有ミューテックス名
static const char* COMMON_MUTEX_NAME = "Common Mutex";

//共有リソース
static const int COMMON_RESOURCE_NUM = 2;
static int s_commonResource[COMMON_RESOURCE_NUM]       = {};//複数の共有リソース
static bool s_usingCommonResource[COMMON_RESOURCE_NUM] = {};//共有リソース使用中フラグ

//スレッド固有データ
__declspec(thread) int s_tlsData = 0;

//スレッド
unsigned int WINAPI threadFunc(void* param_p)
{
	//パラメータ受け取り
	const char* name = static_cast<const char*>(param_p);

	//開始
	printf("- begin:%s -¥n", name);
	fflush(stdout);

	//名前付きセマフォオープン
	HANDLE hSemaphore = OpenSemaphore(SEMAPHORE_ALL_ACCESS, false, COMMON_SEMAPHORE_NAME);
                                    //SEMAPHORE_ALL_ACCESS 権限が必要（セマフォの獲得とリリースを行うため）

	//名前付きミューテックスオープン
	HANDLE hMutex = OpenMutex(SYNCHRONIZE, false, COMMON_MUTEX_NAME);

	//処理
	for (int i = 0; i < 3; ++i)
	{
		//セマフォ取得
		WaitForSingleObject(hSemaphore, INFINITE);//取得できない時に他の処理を行いたい場合はタイムアウト値を
                                                  //指定する

		//共有リソースを獲得
		int index = 0;
		WaitForSingleObject(hMutex, INFINITE);//ミューテックス取得
		for (; index < COMMON_RESOURCE_NUM; ++index)
		{
			if (!s_usingCommonResource[index])
				break;
```

```
            }
            s_usingCommonResource[index] = true;
            ReleaseMutex(hMutex);//ミューテックス解放

            //データ表示（前）
            printf("%s: [BEFORE] commonResource[%d]=%d, tlsData=%d¥n", name, index, s_commonResource[index], s_tlsData);
            fflush(stdout);

            //データ取得
            int common_data = s_commonResource[index];
            int tls_data = s_tlsData;

            //データ更新
            ++common_data;
            ++tls_data;

            //若干ランダムでスリープ（0～4 msec）
            Sleep(rand() % 5);

            //データ書き戻し
            s_commonResource[index] = common_data;
            s_tlsData = tls_data;

            //データ表示（後）
            printf("%s: [AFTER]  commonResource[%d]=%d, tlsData=%d¥n",
                                                    name, index, s_commonResource[index], s_tlsData);
            fflush(stdout);

            //共有リソースを解放
            s_usingCommonResource[index] = false;

            //セマフォ解放
            LONG prev_count;
            ReleaseSemaphore(hSemaphore, 1, &prev_count);

            //スレッド切り替えのためのスリープ
            Sleep(0);
        //    //スレッド切り替え
        //    SwitchToThread();//OSに任せて再スケジューリング
        //    Yield();//廃止
        }

        //名前付きミューテックスクローズ
        CloseHandle(hMutex);

        //名前付きセマフォクローズ
        CloseHandle(hSemaphore);

        //終了
        printf("- end:%s -¥n", name);
        fflush(stdout);
        return 0;
}

//テスト
int main(const int argc, const char* argv[])
{
        //セマフォハンドル
        HANDLE hSemaphore = INVALID_HANDLE_VALUE;

        //ミューテックスハンドル
        HANDLE hMutex = INVALID_HANDLE_VALUE;

        //名前付きセマフォ生成
        {
```

```
		hSemaphore = CreateSemaphore(nullptr, 0, COMMON_RESOURCE_NUM, COMMON_SEMAPHORE_NAME);
                                                                        //初期状態はセマフォを全て使用中にする

//	//属性を指定して生成する場合
//	SECURITY_ATTRIBUTES attr = { sizeof(SECURITY_ATTRIBUTES), nullptr, true };//子プロセスにハンドルを継承する
//	SECURITY_ATTRIBUTES attr = { sizeof(SECURITY_ATTRIBUTES), nullptr, false };//子プロセスにハンドルを
//                                                                              //継承しない　※デフォルト
//	hSemaphore = CreateSemaphore(&attr, 0, COMMON_RESOURCE_NUM, COMMON_SEMAPHORE_NAME);//初期状態はセマフォを
//                                                                                  //全て使用中にする
}

//名前付きミューテックス生成
{
	hMutex = CreateMutex(nullptr, false, COMMON_MUTEX_NAME);
}

//スレッド作成
static const int THREAD_NUM = 4;
unsigned int tid[THREAD_NUM] = {};
HANDLE hThread[THREAD_NUM] =
{
	(HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 1024, threadFunc, "太郎", 0, &tid[0]),
	(HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 1024, threadFunc, "次郎", 0, &tid[1]),
	(HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 1024, threadFunc, "三郎", 0, &tid[2]),
	(HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 1024, threadFunc, "四郎", 0, &tid[3])
};

//若干スリープ
Sleep(10);

//共有リソース初期化
for (int i = 0; i < COMMON_RESOURCE_NUM; ++i)
{
	s_commonResource[i] = 1000 * (i + 1);
}

//若干スリープ
Sleep(10);

//共有リソースの使用を許可（全セマフォ解放）
{
	LONG prev_count;
	ReleaseSemaphore(hSemaphore, COMMON_RESOURCE_NUM, &prev_count);
	printf("Common-resources have been prepared. (num=%d -> %d)¥n", prev_count, COMMON_RESOURCE_NUM);
	fflush(stdout);
}

//スレッド終了待ち
WaitForMultipleObjects(THREAD_NUM, hThread, true, INFINITE);

//スレッドハンドルクローズ
for (int i = 0; i < THREAD_NUM; ++i)
{
	CloseHandle(hThread[i]);
}

//セマフォの取得と解放を大量に実行して時間を計測
{
	LARGE_INTEGER freq;
	QueryPerformanceFrequency(&freq);
	LARGE_INTEGER begin;
	QueryPerformanceCounter(&begin);
	static const int TEST_TIMES = 10000000;
	for (int i = 0; i < TEST_TIMES; ++i)
	{
```

```
                WaitForSingleObject(hSemaphore, INFINITE);
                ReleaseSemaphore(hSemaphore, 1, nullptr);
            }
            LARGE_INTEGER end;
            QueryPerformanceCounter(&end);
            float time = static_cast<float>(static_cast<double>(end.QuadPart - begin.QuadPart)
                                                                / static_cast<double>(freq.QuadPart));
            printf("Semaphore * %d = %.6f sec¥n", TEST_TIMES, time);
        }

        //名前付きミューテックス破棄
        CloseHandle(hMutex);

        //名前付きセマフォ破棄
        CloseHandle(hSemaphore);

        return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果）

```
- begin:太郎 -
- begin:次郎 -
- begin:三郎 -
- begin:四郎 -
Common-resources have been prepared. (num=0 -> 2)     ←セマフォが解放されるまで全てのスレッドがブロック
次郎: [BEFORE] commonResource[0]=1000, tlsData=0
太郎: [BEFORE] commonResource[1]=2000, tlsData=0      ←4 つスレッドのうち、2 つだけが稼働
太郎: [AFTER]  commonResource[1]=2001, tlsData=1
次郎: [AFTER]  commonResource[0]=1001, tlsData=1
三郎: [BEFORE] commonResource[1]=2001, tlsData=0      ←1 つスレッドが終了すると、次のスレッドが動く
四郎: [BEFORE] commonResource[0]=1001, tlsData=0        （常に同時に 2 つまで）
三郎: [AFTER]  commonResource[1]=2002, tlsData=1
四郎: [AFTER]  commonResource[0]=1002, tlsData=1
太郎: [BEFORE] commonResource[1]=2002, tlsData=1
次郎: [BEFORE] commonResource[0]=1002, tlsData=1
次郎: [AFTER]  commonResource[0]=1003, tlsData=2
太郎: [AFTER]  commonResource[1]=2003, tlsData=2
三郎: [BEFORE] commonResource[0]=1003, tlsData=1
四郎: [BEFORE] commonResource[1]=2003, tlsData=1
四郎: [AFTER]  commonResource[1]=2004, tlsData=2
三郎: [AFTER]  commonResource[0]=1004, tlsData=2
次郎: [BEFORE] commonResource[1]=2004, tlsData=2
太郎: [BEFORE] commonResource[0]=1004, tlsData=2
次郎: [AFTER]  commonResource[1]=2005, tlsData=3
太郎: [AFTER]  commonResource[0]=1005, tlsData=3
- end:次郎 -
四郎: [BEFORE] commonResource[0]=1005, tlsData=2
三郎: [BEFORE] commonResource[1]=2005, tlsData=2
- end:太郎 -
三郎: [AFTER]  commonResource[1]=2006, tlsData=3      ←全て正常にロックされたので、正しい処理結果になっている
四郎: [AFTER]  commonResource[0]=1006, tlsData=3
- end:四郎 -
- end:三郎 -
Semaphore * 10000000 = 4.787152 sec                   ←1 千万回ループによる処理時間計測
```

▼ モニター

状態の変化を監視し、それまでスレッドをスリープして待機する手法を「モニター」と呼ぶ。

大きな括りとしては排他制御と同様だが、順序性のある処理をリレーするような時に使

える。

例えば、メインループで描画用のデータを構築した後、描画スレッドに処理を受け渡すような場面で使える。描画スレッドは、データ構築完了の通知が来るまでスリープする。

▼ モニター：条件変数

最も一般的なモニターの手法は「条件変数」を用いる事である。

条件変数は、「通知があるまで待機する」仕組み。ミューテックスと、状態確認のための変数と組み合わせて使用するのが一般的であり、若干使用方法が難しい。

通知のタイミングで必ず待機している必要があることにも注意。

例えば、スレッドＡの通知を待ってスレッドＢが処理を開始したい場合、スレッドＢが待機状態に入る前にスレッドＡが通知を行ってしまうと、スレッドＢが待機に入っても通知を確認することができない。このため、既に通知が行われていたら待機処理を実行しないように、気を付けてプログラミングしなければならない。

● POSIX スレッドライブラリ版

POSIX スレッドライブラリ版の条件変数。

POSIX スレッドライブラリ版条件変数のサンプル：

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include <pthread.h>
#include <unistd.h>

#include <sys/time.h> //時間計測用

//スレッド情報
static const int FOLLOW_THREAD_MAX = 10;          //後続スレッド最大数
static volatile int s_followThreadNum = 0;        //後続スレッド数
static volatile int s_followThreadNo = 0;         //後続スレッド番号発番用
static volatile bool s_IsQuirProiorThread = false;//先行スレッド終了フラグ
static pthread_mutex_t s_followThreadMutex = PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER;//後続スレッド番号発番用ミューテックス

//条件変数
//※条件変数は、必ず条件変数＋ミューテックス＋変数のセットで扱う
static pthread_cond_t s_followCond[FOLLOW_THREAD_MAX];      //後続スレッド処理完了条件変数
static pthread_mutex_t s_followCondMutex[FOLLOW_THREAD_MAX];//後続スレッド処理完了条件変数ミューテックス
static volatile bool s_followFinished[FOLLOW_THREAD_MAX];   //後続スレッド処理完了フラグ

//共有データ
static int s_commonData = 0;

//スレッド固有データ
__thread int s_tlsData = 0;

//【処理説明】
//先行スレッドが共有データを作成し、それが完了したら
//複数の後続スレッドがスタート。
```

```
//後続スレッドは共有データを読み込むだけのため、並列で動作。
//後続スレッドの処理が全て完了したら、また先行スレッドが稼働。
//以上を何度か繰り返し、先行スレッドが終了したら全スレッド終了。
//※メインループ⇒描画スレッドのようなリレー処理への応用を想定。

//先行スレッド
void* priorThreadFunc(void* param_p)
{
	//パラメータ受け取り
	const char* name = static_cast<const char*>(param_p);

	//開始
	printf("- begin:(P)%s -¥n", name);
	fflush(stdout);

	//初期化
	s_IsQuirProiorThread = false;//先行処理終了フラグ

	//処理
	static const int LOOP_COUNT_MAX = 3;
	int loop_counter = 0;
	while (1)
	{
		//全後続スレッド処理完了待ち
		for (int i = 0; i < s_followThreadNum; ++i)
		{
			pthread_mutex_lock(&s_followCondMutex[i]);//ロック取得
			while (!s_followFinished[i])//待機終了条件を満たしていない場合
				pthread_cond_wait(&s_followCond[i], &s_followCondMutex[i]);
												//待機（ロック開放→待機→待機終了→ロック取得が行われる）
			pthread_mutex_unlock(&s_followCondMutex[i]);//ロック解放
			//※待機をタイムアウトさせたい場合は pthread_cond_timedwait() 関数を用いる。
		}

		//ループカウンタ進行＆終了判定
		if (loop_counter++ == LOOP_COUNT_MAX)
		{
			//処理終了
			printf("(P)%s: [QUIT]¥n", name);
			fflush(stdout);

			//先行スレッド終了フラグ
			s_IsQuirProiorThread = true;

			//先行スレッド処理完了：全待機スレッドを起床
			for (int i = 0; i < s_followThreadNum; ++i)
			{
				pthread_mutex_lock(&s_followCondMutex[i]);//ロック取得
				s_followFinished[i] = false;//後続スレッドの処理完了状態を解除
				pthread_cond_signal(&s_followCond[i]);//解除待ちしているスレッドに通知
				pthread_mutex_unlock(&s_followCondMutex[i]);//ロック解放
			}

			break;
		}

		//データ表示（前）
		printf("(P)%s: [BEFORE] commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
		fflush(stdout);

		//データ取得
		int common_data = s_commonData;
		int tls_data = s_tlsData;

		//データ更新
```

```
            ++common_data;
            ++tls_data;

            //若干ランダムでスリープ（0～499 msec）
            usleep((rand() % 500) * 1000);

            //データ書き戻し
            s_commonData = common_data;
            s_tlsData = tls_data;

            //データ表示（後）
            printf("(P)%s: [AFTER]  commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
            fflush(stdout);

            //先行スレッド処理完了：全待機スレッドを起床
            for (int i = 0; i < s_followThreadNum; ++i)
            {
                  pthread_mutex_lock(&s_followCondMutex[i]);//ロック取得
                  s_followFinished[i] = false;//後続スレッドの処理完了状態を解除
                  pthread_cond_signal(&s_followCond[i]);//解除待ちしているスレッドに通知
                  pthread_mutex_unlock(&s_followCondMutex[i]);//ロック解放
                  //※一つの条件変数で多数のスレッドを待機させている場合は、
                  //  pthread_cond_broadcast() 関数も使える。
            }

            //スレッド切り替えのためのスリープ
            usleep(0);
      //    //スレッド切り替え
      //    sched_yield();//同じ優先度の他のスレッドに切り替え
      }

      //終了
      printf("- end:(P)%s -¥n", name);
      fflush(stdout);
      return 0;
}

//後続スレッド
void* followThreadFunc(void* param_p)
{
      //パラメータ受け取り
      const char* name = static_cast<const char*>(param_p);

      //後続スレッド数カウントアップ
      pthread_mutex_lock(&s_followThreadMutex);
      int thread_no = s_followThreadNo++;
      pthread_mutex_unlock(&s_followThreadMutex);

      //開始
      printf("- begin:(F)[%d]%s -¥n", thread_no, name);
      fflush(stdout);

      //後続スレッド処理完了：待機スレッドを起床
      {
            pthread_mutex_lock(&s_followCondMutex[thread_no]);//ロック取得
            s_followFinished[thread_no] = true;//後続スレッドの処理完了状態を ON
            pthread_cond_signal(&s_followCond[thread_no]);//解除待ちしているスレッドに通知
            pthread_mutex_unlock(&s_followCondMutex[thread_no]);//ロック解放
      }

      //処理
      while (1)
      {
            //先行スレッド処理完了待ち
            {
```

```
            pthread_mutex_lock(&s_followCondMutex[thread_no]);//ロック取得
            while (s_followFinished[thread_no])//待機終了条件を満たしていない場合
                  pthread_cond_wait(&s_followCond[thread_no], &s_followCondMutex[thread_no]);
                                                      //待機（ロック開放→待機→待機終了→ロック取得が行われる）
            pthread_mutex_unlock(&s_followCondMutex[thread_no]);//ロック解放
            //※待機をタイムアウトさせたい場合は pthread_cond_timedwait() 関数を用いる。
      }

      //終了確認
      if (s_IsQuirProiorThread)
      {
            //処理終了
            printf("(F)[%d]%s: [QUIT]¥n", thread_no, name);
            fflush(stdout);

            //後続スレッド処理完了：待機スレッドを起床
            {
                  pthread_mutex_lock(&s_followCondMutex[thread_no]);//ロック取得
                  s_followFinished[thread_no] = true;//後続スレッドの処理完了状態を ON
                  pthread_cond_signal(&s_followCond[thread_no]);//解除待ちしているスレッドに通知
                  pthread_mutex_unlock(&s_followCondMutex[thread_no]);//ロック解放
            }

            break;
      }

      //データ表示（前）
      printf("(F)[%d]%s: [BEFORE] commonData=%d, tlsData=%d¥n", thread_no, name, s_commonData, s_tlsData);
      fflush(stdout);

      //データ取得
      int common_data = s_commonData;
      int tls_data = s_tlsData;

      //データ更新
      ++tls_data;

      //若干ランダムでスリープ（0～500 msec）
      usleep((rand() % 500) * 1000);

      //データ書き戻し
      s_tlsData = tls_data;

      //データ表示（後）
      printf("(F)[%d]%s: [AFTER]  commonData=%d, tlsData=%d¥n", thread_no, name, s_commonData, s_tlsData);
      fflush(stdout);

      //後続スレッド処理完了：待機スレッドを起床
      {
            pthread_mutex_lock(&s_followCondMutex[thread_no]);//ロック取得
            s_followFinished[thread_no] = true;//後続スレッドの処理完了状態を ON
            pthread_cond_signal(&s_followCond[thread_no]);//解除待ちしているスレッドに通知
            pthread_mutex_unlock(&s_followCondMutex[thread_no]);//ロック取得
            //※一つの条件変数で多数のスレッドを待機させている場合は、
            //  pthread_cond_broadcast() 関数も使える。
      }

      //スレッド切り替えのためのスリープ
      usleep(0);
//    //スレッド切り替え
//    sched_yield();//同じ優先度の他のスレッドに切り替え
}

//終了
printf("- end:(F)[%d]%s -¥n", thread_no, name);
```

```
	fflush(stdout);
	return 0;
}


//テスト
int main(const int argc, const char* argv[])
{
	//条件変数＆ミューテックス生成
	//※PTHREAD_COND_INITIALIZER, PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER で初期化している場合は不要
	{
		for(int i = 0; i < FOLLOW_THREAD_MAX; ++i)
		{
			pthread_cond_init(&s_followCond[i], NULL);
			pthread_mutex_init(&s_followCondMutex[i], NULL);
		}
	}

	//スレッド作成
	static const int FOLLOW_THREAD_NUM = 5;
	static const int THREAD_NUM = 1 + FOLLOW_THREAD_NUM;
	//static_assert(FOLLOW_THREAD_NUM <= FOLLOW_THREAD_MAX, "FOLLOW_THREAD_NUM is over.");
	s_followThreadNum = FOLLOW_THREAD_NUM;
	for (int i = 0; i < THREAD_NUM - 1; ++i)
		s_followFinished[i] = true;
	pthread_t pth[THREAD_NUM];
	{
		pthread_attr_t attr;
		pthread_attr_init(&attr);
		pthread_attr_setstacksize(&attr, 1024);//スタックサイズ指定
		pthread_create(&pth[0], &attr, priorThreadFunc, (void*)"先行");
		pthread_create(&pth[1], &attr, followThreadFunc, (void*)"後続01");
		pthread_create(&pth[2], &attr, followThreadFunc, (void*)"後続02");
		pthread_create(&pth[3], &attr, followThreadFunc, (void*)"後続03");
		pthread_create(&pth[4], &attr, followThreadFunc, (void*)"後続04");
		pthread_create(&pth[5], &attr, followThreadFunc, (void*)"後続05");
	}

	//スレッド終了待ち
	for(int i = 0; i < THREAD_NUM; ++i)
	{
		pthread_join(pth[i], NULL);
	}

	//条件変数の取得と解放を大量に実行して時間を計測
	{
		struct timeval begin;
		gettimeofday(&begin, NULL);
		static const int TEST_TIMES = 10000000;
		for (int i = 0; i < TEST_TIMES; ++i)
		{
			pthread_mutex_lock(&s_followCondMutex[0]);
			s_followFinished[0] = true;
			pthread_cond_signal(&s_followCond[0]);
			pthread_mutex_unlock(&s_followCondMutex[0]);
		}
		struct timeval end;
		gettimeofday(&end, NULL);
		struct timeval duration;
		if( end.tv_usec >= begin.tv_usec)
		{
			duration.tv_sec = end.tv_sec - begin.tv_sec;
			duration.tv_usec = end.tv_usec - begin.tv_usec;
		}
		else
```

```
            {
                duration.tv_sec = end.tv_sec - begin.tv_sec - 1;
                duration.tv_usec = 1000000 - begin.tv_usec + end.tv_usec;
            }
            printf("Cond-Sginal * %d = %d.%06d sec¥n", TEST_TIMES, duration.tv_sec, duration.tv_usec);
        }

        //条件変数＆ミューテックス破棄
        //※PTHREAD_COND_INITIALIZER, PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER で初期化している場合は不要
        {
            for(int i = 0; i < FOLLOW_THREAD_MAX; ++i)
            {
                pthread_cond_destroy(&s_followCond[i]);
                pthread_mutex_destroy(&s_followCondMutex[i]);
            }
        }

        return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果）

```
- begin:(F)[0]後続 04 -
- begin:(F)[1]後続 03 -
- begin:(P)先行 -
(P)先行: [BEFORE] commonData=0, tlsData=0       ←先行スレッドが処理を開始
- begin:(F)[2]後続 02 -                           （後続スレッドは、スレッド開始時から先行スレッドの処理終了を待機）
- begin:(F)[3]後続 05 -
- begin:(F)[4]後続 01 -
(P)先行: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(F)[0]後続 04: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0 ←先行スレッドの処理が終了すると、後続スレッドが一斉スタート
(F)[1]後続 03: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
(F)[3]後続 05: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
(F)[4]後続 01: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
(F)[2]後続 02: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
(F)[1]後続 03: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(F)[4]後続 01: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(F)[2]後続 02: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(F)[0]後続 04: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(F)[3]後続 05: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(P)先行: [BEFORE] commonData=1, tlsData=1       ←後続スレッドの処理が全て終了すると、また先行スレッドがスタート
(P)先行: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(F)[0]後続 04: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1 ←先行スレッドの処理が終了すると、また後続スレッドが一斉スタート
(F)[1]後続 03: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1
(F)[3]後続 05: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1
(F)[4]後続 01: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1
(F)[2]後続 02: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1
(F)[2]後続 02: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(F)[1]後続 03: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(F)[4]後続 01: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(F)[3]後続 05: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(F)[0]後続 04: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(P)先行: [BEFORE] commonData=2, tlsData=2       ←後続スレッドの処理が全て終了すると、また先行スレッドがスタート
(P)先行: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(F)[0]後続 04: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2 ←先行スレッドの処理が終了すると、また後続スレッドが一斉スタート
(F)[3]後続 05: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2
(F)[1]後続 03: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2
(F)[4]後続 01: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2
(F)[2]後続 02: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2
(F)[4]後続 01: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(F)[0]後続 04: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(F)[3]後続 05: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(F)[1]後続 03: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(F)[2]後続 02: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(P)先行: [QUIT]                                 ←先行スレッド終了
- end:(P)先行 -
```

```
(F)[3]後続05: [QUIT]                    ←先行スレッドの終了に反応して後続スレッドも終了
- end:(F)[3]後続05 -
(F)[0]後続04: [QUIT]
- end:(F)[0]後続04 -
(F)[4]後続01: [QUIT]
- end:(F)[4]後続01 -
(F)[1]後続03: [QUIT]
- end:(F)[1]後続03 -
(F)[2]後続02: [QUIT]
- end:(F)[2]後続02 -
Cond-Sginal * 10000000 = 0.944458 sec    ←1千万回ループによる処理時間計測
```

● C++11 版

C++11 版の条件変数。ミューテックスと変数を別途用意して組み合わせて使うのは、POSIX スレッドライブラリ版と同じ。

C++11 版条件変数のサンプル：

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include <thread>
#include <mutex>
#include <condition_variable>
#include <atomic>

#include <chrono> //時間計測用
#include <random> //乱数生成用

//スレッド情報
static const int FOLLOW_THREAD_MAX = 10;          //後続スレッド最大数
static volatile int s_followThreadNum = 0;        //後続スレッド数
static std::atomic<int> s_followThreadNo = 0;     //後続スレッド番号発番用
static volatile bool s_IsQuirProiorThread = false;//先行スレッド終了フラグ

//条件変数
//※条件変数は、必ず条件変数＋ミューテックス＋変数のセットで扱う
static std::condition_variable s_followCond[FOLLOW_THREAD_MAX];//後続スレッド処理完了条件変数
static std::mutex s_followCondMutex[FOLLOW_THREAD_MAX];       //後続スレッド処理完了条件変数ミューテックス
static volatile bool s_followFinished[FOLLOW_THREAD_MAX];     //後続スレッド処理完了フラグ

//共有データ
static int s_commonData = 0;

//スレッド固有データ
__declspec(thread) int s_tlsData = 0;
//thread_local int s_tlsData = 0;//Visual C++ 2013 では thread_local キーワードが使えない

//【処理説明】
//先行スレッドが共有データを作成し、それが完了したら
//複数の後続スレッドがスタート。
//後続スレッドは共有データを読み込むだけのため、並列で動作。
//後続スレッドの処理が全て完了したら、また先行スレッドが稼働。
//以上を何度か繰り返し、先行スレッドが終了したら全スレッド終了。
//※メインループ⇒描画スレッドのようなリレー処理への応用を想定。

//先行スレッド
void priorThreadFunc(const char* name)
{
    //開始
    printf("- begin:(P)%s -¥n", name);
```

```
	fflush(stdout);

	//乱数
	std::random_device seed_gen;
	std::mt19937 rnd(seed_gen());
	std::uniform_int_distribution<int> sleep_time(0, 499);

	//初期化
	s_IsQuirProiorThread = false;//先行処理終了フラグ

	//処理
	static const int LOOP_COUNT_MAX = 3;
	int loop_counter = 0;
	while (1)
	{
		//全後続スレッド処理完了待ち
		for (int i = 0; i < s_followThreadNum; ++i)
		{
			{
				std::unique_lock<std::mutex> lock(s_followCondMutex[i]);//ロック取得
				                                                        //（ブロックから抜ける時に自動解放）
				while (!s_followFinished[i])//待機終了条件を満たしていない場合
					s_followCond[i].wait(lock);//待機（ロック開放→待機→待機終了→ロック取得が行われる）
				//※待機をタイムアウトさせたい場合は .wait_for() メソッドを用いる。
			}
		}

		//ループカウンタ進行＆終了判定
		if (loop_counter++ == LOOP_COUNT_MAX)
		{
			//処理終了
			printf("(P)%s: [QUIT]¥n", name);
			fflush(stdout);

			//先行スレッド終了フラグ
			s_IsQuirProiorThread = true;

			//先行スレッド処理完了：全待機スレッドを起床
			for (int i = 0; i < s_followThreadNum; ++i)
			{
				{
					std::unique_lock<std::mutex> lock(s_followCondMutex[i]);//ロック取得（ブロックから
					                                                        //抜ける時に自動解放）
					s_followFinished[i] = false;//後続スレッドの処理完了状態を解除
					s_followCond[i].notify_one();//解除待ちしているスレッドに通知
				}
			}

			break;
		}

		//データ表示（前）
		printf("(P)%s: [BEFORE] commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
		fflush(stdout);

		//データ取得
		int common_data = s_commonData;
		int tls_data = s_tlsData;

		//データ更新
		++common_data;
		++tls_data;

		//若干ランダムでスリープ（0～499 msec）
		std::this_thread::sleep_for(std::chrono::milliseconds(sleep_time(rnd)));
```

```
            //データ書き戻し
            s_commonData = common_data;
            s_tlsData = tls_data;

            //データ表示（後）
            printf("(P)%s: [AFTER]  commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
            fflush(stdout);

            //先行スレッド処理完了：全待機スレッドを起床
            for (int i = 0; i < s_followThreadNum; ++i)
            {
                  {
                        std::unique_lock<std::mutex> lock(s_followCondMutex[i]);//ロック取得（ブロックから
                                                                                //抜ける時に自動解放）
                        s_followFinished[i] = false;//後続スレッドの処理完了状態を解除
                        s_followCond[i].notify_one();//解除待ちしているスレッドに通知
                        //※一つの条件変数で多数のスレッドを待機させている場合は、
                        //  .notify_all() メソッドも使える。
                  }
            }

            //スレッド切り替えのためのスリープ
            std::this_thread::sleep_for(std::chrono::milliseconds(0));
      //    //スレッド切り替え
      //    std::this_thread::yield();//OSに任せて再スケジューリング
      }

      //終了
      printf("- end:(P)%s -¥n", name);
      fflush(stdout);
}

//後続スレッド
void followThreadFunc(const char* name)
{
      //後続スレッド数カウントアップ
      const int thread_no = s_followThreadNo++;

      //開始
      printf("- begin:(F)[%d]%s -¥n", thread_no, name);
      fflush(stdout);

      //乱数
      std::random_device seed_gen;
      std::mt19937 rnd(seed_gen());
      std::uniform_int_distribution<int> sleep_time(0, 499);

      //後続スレッド処理完了：待機スレッドを起床
      {
            std::unique_lock<std::mutex> lock(s_followCondMutex[thread_no]);//ロック取得（ブロックから
                                                                           //抜ける時に自動解放）
            s_followFinished[thread_no] = true;//後続スレッドの処理完了状態を ON
            s_followCond[thread_no].notify_one();//解除待ちしているスレッドに通知
      }

      //処理
      while (1)
      {
            //先行スレッド処理完了待ち
            {
                  std::unique_lock<std::mutex> lock(s_followCondMutex[thread_no]);//ロック取得（ブロックから
                                                                                 //抜ける時に自動解放）
                  while (s_followFinished[thread_no])//待機終了条件を満たしていない場合
                        s_followCond[thread_no].wait(lock);//待機（ロック開放→待機→待機終了→ロック取得が行われる）
```

```
                //※待機をタイムアウトさせたい場合は .wait_for() メソッドを用いる。
            }

            //終了確認
            if (s_IsQuirProiorThread)
            {
                //処理終了
                printf("(F)[%d]%s: [QUIT]¥n", thread_no, name);
                fflush(stdout);

                //後続スレッド処理完了：待機スレッドを起床
                {
                    std::unique_lock<std::mutex> lock(s_followCondMutex[thread_no]);//ロック取得（ブロックから
                                                                                   //抜ける時に自動解放）
                    s_followFinished[thread_no] = true;//後続スレッドの処理完了状態を ON
                    s_followCond[thread_no].notify_one();//解除待ちしているスレッドに通知
                }

                break;
            }

            //データ表示（前）
            printf("(F)[%d]%s: [BEFORE] commonData=%d, tlsData=%d¥n", thread_no, name, s_commonData, s_tlsData);
            fflush(stdout);

            //データ取得
            int common_data = s_commonData;
            int tls_data = s_tlsData;

            //データ更新
            ++tls_data;

            //若干ランダムでスリープ（0～500 msec）
            std::this_thread::sleep_for(std::chrono::milliseconds(sleep_time(rnd)));

            //データ書き戻し
            s_tlsData = tls_data;

            //データ表示（後）
            printf("(F)[%d]%s: [AFTER]  commonData=%d, tlsData=%d¥n", thread_no, name, s_commonData, s_tlsData);
            fflush(stdout);

            //後続スレッド処理完了：待機スレッドを起床
            {
                std::unique_lock<std::mutex> lock(s_followCondMutex[thread_no]);//ロック取得（ブロックから
                                                                               //抜ける時に自動解放）
                s_followFinished[thread_no] = true;//後続スレッドの処理完了状態を ON
                s_followCond[thread_no].notify_one();//解除待ちしているスレッドに通知
                //※一つの条件変数で多数のスレッドを待機させている場合は、
                //  .notify_all() メソッドも使える。
            }

            //スレッド切り替えのためのスリープ
            std::this_thread::sleep_for(std::chrono::milliseconds(0));
        //    //スレッド切り替え
        //    std::this_thread::yield();//OS に任せて再スケジューリング
        }

        //終了
        printf("- end:(F)[%d]%s -¥n", thread_no, name);
        fflush(stdout);
}

//テスト
int main(const int argc, const char* argv[])
```

```
{
	//スレッド作成
	static const int FOLLOW_THREAD_NUM = 5;
	static const int THREAD_NUM = 1 + FOLLOW_THREAD_NUM;
	static_assert(FOLLOW_THREAD_NUM <= FOLLOW_THREAD_MAX, "FOLLOW_THREAD_NUM is over.");
	s_followThreadNum = FOLLOW_THREAD_NUM;
	for (int i = 0; i < THREAD_NUM - 1; ++i)
		s_followFinished[i] = true;
	std::thread thread_obj00 = std::thread(priorThreadFunc, "先行");
	std::thread thread_obj01 = std::thread(followThreadFunc, "後続01");
	std::thread thread_obj02 = std::thread(followThreadFunc, "後続02");
	std::thread thread_obj03 = std::thread(followThreadFunc, "後続03");
	std::thread thread_obj04 = std::thread(followThreadFunc, "後続04");
	std::thread thread_obj05 = std::thread(followThreadFunc, "後続05");

	//スレッド終了待ち
	thread_obj00.join();
	thread_obj01.join();
	thread_obj02.join();
	thread_obj03.join();
	thread_obj04.join();
	thread_obj05.join();

	//条件変数の取得と解放を大量に実行して時間を計測
	{
		auto begin = std::chrono::high_resolution_clock::now();
		static const int TEST_TIMES = 10000000;
		for (int i = 0; i < TEST_TIMES; ++i)
		{
			{
				std::unique_lock<std::mutex> lock(s_followCondMutex[0]);
				s_followFinished[0] = true;
				s_followCond[0].notify_one();
			}
		}
		auto end = std::chrono::high_resolution_clock::now();
		auto duration = static_cast<float>(static_cast<double>(
				std::chrono::duration_cast<std::chrono::microseconds>(end - begin).count()) / 1000000.);
		printf("Cond-Sginal * %d = %.6f sec¥n", TEST_TIMES, duration);
	}

	return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果）

```
- begin:(P)先行 -
(P)先行: [BEFORE] commonData=0, tlsData=0       ←先行スレッドが処理を開始
- begin:(F)[0]後続01 -
- begin:(F)[1]後続02 -
- begin:(F)[2]後続03 -
- begin:(F)[3]後続04 -
- begin:(F)[4]後続05 -
(P)先行: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1       ←先行スレッドの処理が終了すると、後続スレッドが一斉スタート
(F)[0]後続01: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0    （後続スレッドは、スレッド開始時から先行スレッドの処理終了を待機）
(F)[1]後続02: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
(F)[2]後続03: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
(F)[3]後続04: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
(F)[4]後続05: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
(F)[0]後続01: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(F)[4]後続05: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(F)[2]後続03: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(F)[3]後続04: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(F)[1]後続02: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(P)先行: [BEFORE] commonData=1, tlsData=1       ←後続スレッドの処理が全て終了すると、また先行スレッドがスタート
(P)先行: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
```

```
(F)[0]後続 01: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1  ←先行スレッドの処理が終了すると、また後続スレッドが一斉スタート
(F)[4]後続 05: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1
(F)[3]後続 04: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1
(F)[1]後続 02: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1
(F)[2]後続 03: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1
(F)[0]後続 01: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(F)[3]後続 04: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(F)[1]後続 02: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(F)[4]後続 05: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(F)[2]後続 03: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(P)先行: [BEFORE] commonData=2, tlsData=2        ←後続スレッドの処理が全て終了すると、また先行スレッドがスタート
(P)先行: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(F)[0]後続 01: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2  ←先行スレッドの処理が終了すると、また後続スレッドが一斉スタート
(F)[1]後続 02: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2
(F)[2]後続 03: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2
(F)[3]後続 04: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2
(F)[4]後続 05: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2
(F)[1]後続 02: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(F)[2]後続 03: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(F)[3]後続 04: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(F)[0]後続 01: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(F)[4]後続 05: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(P)先行: [QUIT]                                  ←先行スレッド終了
(F)[0]後続 01: [QUIT]                            ←先行スレッドの終了に反応して後続スレッドも終了
(F)[1]後続 02: [QUIT]
(F)[4]後続 05: [QUIT]
(F)[3]後続 04: [QUIT]
- end:(F)[1]後続 02 -
- end:(F)[0]後続 01 -
- end:(F)[4]後続 05 -
- end:(P)先行 -
- end:(F)[3]後続 04 -
(F)[2]後続 03: [QUIT]
- end:(F)[2]後続 03 -
Cond-Sginal * 10000000 = 0.758042 sec            ←1 千万回ループによる処理時間計測
```

● Windows SDK for Windows Vista 版

Windows Vista 以降には、条件変数の仕組みが追加されている。

ミューテックスではなく、クリティカルセクションと組み合わせて使用する「SleepConditionVariableCS()」関数や、リード・ライトロックと組み合わせて使用する「SleepConditionVariableSRW()」関数が追加されている。ほか、通知のための「WakeConditionVarialbe()」関数、「WakeAllConditionVariable()」関数が追加されている。

サンプルプログラムは省略。

▼ モニター：バリア

手軽なモニターの手法として、「バリア」というものがある。

スレッドの処理中にバリアを設定することにより、規定数のスレッドがバリアに到達するまで待機させることができる。

● POSIX スレッドライブラリ版

POSIX スレッドライブラリ版のバリア。

「条件変数」のサンプルを元に、バリア処理を追加している。「【バリア処理追加】」と書かれた箇所以外は元のプログラムと同じ。

POSIX スレッドライブラリ版バリアのサンプル：

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include <pthread.h>
#include <unistd.h>

#include <sys/time.h> //時間計測用

//スレッド情報
static const int FOLLOW_THREAD_MAX = 10;          //後続スレッド最大数
static volatile int s_followThreadNum = 0;        //後続スレッド数
static volatile int s_followThreadNo = 0;         //後続スレッド番号発番用
static volatile bool s_IsQuirProiorThread = false;//先行スレッド終了フラグ
static pthread_mutex_t s_followThreadMutex = PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER;//後続スレッド番号発番用ミューテックス

//条件変数
//※条件変数は、必ず条件変数＋ミューテックス＋変数のセットで扱う
static pthread_cond_t s_followCond[FOLLOW_THREAD_MAX];      //後続スレッド処理完了条件変数
static pthread_mutex_t s_followCondMutex[FOLLOW_THREAD_MAX];//後続スレッド処理完了条件変数ミューテックス
static volatile bool s_followFinished[FOLLOW_THREAD_MAX];   //後続スレッド処理完了フラグ

//【バリア処理追加】バリア
static pthread_barrier_t s_barrier;

//共有データ
static int s_commonData = 0;

//スレッド固有データ
__thread int s_tlsData = 0;

//【処理説明】
//先行スレッドが共有データを作成し、それが完了したら
//複数の後続スレッドがスタート。
//後続スレッドは共有データを読み込むだけのため、並列で動作。
//後続スレッドの処理が全て完了したら、また先行スレッドが稼働。
//【バリア処理追加】後続スレッドの処理完了時は、バリアで足並みを揃える。
//以上を何度か繰り返し、先行スレッドが終了したら全スレッド終了。
//※メインループ⇒描画スレッドのようなリレー処理への応用を想定。

//先行スレッド
void* priorThreadFunc(void* param_p)
{
	//パラメータ受け取り
	const char* name = static_cast<const char*>(param_p);

	//開始
	printf("- begin:(P)%s -¥n", name);
	fflush(stdout);

	//初期化
	s_IsQuirProiorThread = false;//先行処理終了フラグ

	//処理
	static const int LOOP_COUNT_MAX = 3;
```

```
	int loop_counter = 0;
	while (1)
	{
		//全後続スレッド処理完了待ち
		for (int i = 0; i < s_followThreadNum; ++i)
		{
			pthread_mutex_lock(&s_followCondMutex[i]);//ロック取得
			while (!s_followFinished[i])//待機終了条件を満たしていない場合
				pthread_cond_wait(&s_followCond[i], &s_followCondMutex[i]);
											//待機（ロック開放→待機→待機終了→ロック取得が行われる）
			pthread_mutex_unlock(&s_followCondMutex[i]);//ロック解放
			//※待機をタイムアウトさせたい場合は pthread_cond_timedwait() 関数を用いる。
		}

		//ループカウンタ進行＆終了判定
		if (loop_counter++ == LOOP_COUNT_MAX)
		{
			//処理終了
			printf("(P)%s: [QUIT]¥n", name);
			fflush(stdout);

			//先行スレッド終了フラグ
			s_IsQuirProiorThread = true;

			//先行スレッド処理完了：全待機スレッドを起床
			for (int i = 0; i < s_followThreadNum; ++i)
			{
				pthread_mutex_lock(&s_followCondMutex[i]);//ロック取得
				s_followFinished[i] = false;//後続スレッドの処理完了状態を解除
				pthread_cond_signal(&s_followCond[i]);//解除待ちしているスレッドに通知
				pthread_mutex_unlock(&s_followCondMutex[i]);//ロック解放
			}

			break;
		}

		//データ表示（前）
		printf("(P)%s: [BEFORE] commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
		fflush(stdout);

		//データ取得
		int common_data = s_commonData;
		int tls_data = s_tlsData;

		//データ更新
		++common_data;
		++tls_data;

		//若干ランダムでスリープ（0～499 msec）
		usleep((rand() % 500) * 1000);

		//データ書き戻し
		s_commonData = common_data;
		s_tlsData = tls_data;

		//データ表示（後）
		printf("(P)%s: [AFTER]  commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
		fflush(stdout);

		//先行スレッド処理完了：全待機スレッドを起床
		for (int i = 0; i < s_followThreadNum; ++i)
		{
			pthread_mutex_lock(&s_followCondMutex[i]);//ロック取得
			s_followFinished[i] = false;//後続スレッドの処理完了状態を解除
			pthread_cond_signal(&s_followCond[i]);//解除待ちしているスレッドに通知
```

```
                pthread_mutex_unlock(&s_followCondMutex[i]);//ロック解放
                //※一つの条件変数で多数のスレッドを待機させている場合は、
                //  pthread_cond_broadcast() 関数も使える。
            }

            //スレッド切り替えのためのスリープ
            usleep(0);
        //    //スレッド切り替え
        //    sched_yield();//同じ優先度の他のスレッドに切り替え
        }

        //終了
        printf("- end:(P)%s -¥n", name);
        fflush(stdout);
        return 0;
}

//後続スレッド
void* followThreadFunc(void* param_p)
{
        //パラメータ受け取り
        const char* name = static_cast<const char*>(param_p);

        //後続スレッド数カウントアップ
        pthread_mutex_lock(&s_followThreadMutex);
        int thread_no = s_followThreadNo++;
        pthread_mutex_unlock(&s_followThreadMutex);

        //開始
        printf("- begin:(F)[%d]%s -¥n", thread_no, name);
        fflush(stdout);

        //後続スレッド処理完了：待機スレッドを起床
        {
            pthread_mutex_lock(&s_followCondMutex[thread_no]);//ロック取得
            s_followFinished[thread_no] = true;//後続スレッドの処理完了状態を ON
            pthread_cond_signal(&s_followCond[thread_no]);//解除待ちしているスレッドに通知
            pthread_mutex_unlock(&s_followCondMutex[thread_no]);//ロック解放
        }

        //処理
        while (1)
        {
            //先行スレッド処理完了待ち
            {
                pthread_mutex_lock(&s_followCondMutex[thread_no]);//ロック取得
                while (s_followFinished[thread_no])//待機終了条件を満たしていない場合
                    pthread_cond_wait(&s_followCond[thread_no], &s_followCondMutex[thread_no]);
                                                    //待機（ロック開放→待機→待機終了→ロック取得が行われる）
                pthread_mutex_unlock(&s_followCondMutex[thread_no]);//ロック解放
                //※待機をタイムアウトさせたい場合は pthread_cond_timedwait() 関数を用いる。
            }

            //終了確認
            if (s_IsQuirProiorThread)
            {
                //処理終了
                printf("(F)[%d]%s: [QUIT]¥n", thread_no, name);
                fflush(stdout);

                //後続スレッド処理完了：待機スレッドを起床
                {
                    pthread_mutex_lock(&s_followCondMutex[thread_no]);//ロック取得
                    s_followFinished[thread_no] = true;//後続スレッドの処理完了状態を ON
                    pthread_cond_signal(&s_followCond[thread_no]);//解除待ちしているスレッドに通知
```

```
                pthread_mutex_unlock(&s_followCondMutex[thread_no]);//ロック解放
        }

        break;
    }

    //【バリア処理追加】若干ランダムでスリープ（0～500 msec）
    //バリア処理の効果を確認するために追加した処理
    //各スレッドの処理タイミングがバラバラになるように
    usleep((rand() % 500) * 1000);

    //データ表示（前）
    printf("(F)[%d]%s: [BEFORE] commonData=%d, tlsData=%d¥n", thread_no, name, s_commonData, s_tlsData);
    fflush(stdout);

    //データ取得
    int common_data = s_commonData;
    int tls_data = s_tlsData;

    //データ更新
    ++tls_data;

    //若干ランダムでスリープ（0～500 msec）
    usleep((rand() % 500) * 1000);

    //【バリア処理追加】以降、バリア処理の効果を確認するために追加した処理
    //各スレッドの処理タイミングがバラバラになるようにしている

    //中間表示 1（後）
    printf("(F)[%d]%s: [STEP1] commonData=%d, tlsData=%d¥n", thread_no, name, s_commonData, s_tlsData);
    fflush(stdout);

    //若干ランダムでスリープ（0～500 msec）
    usleep((rand() % 500) * 1000);

    //中間表示 2（後）
    printf("(F)[%d]%s: [STEP2] commonData=%d, tlsData=%d¥n", thread_no, name, s_commonData, s_tlsData);
    fflush(stdout);

    //若干ランダムでスリープ（0～500 msec）
    usleep((rand() % 500) * 1000);

    //中間表示 3（後）
    printf("(F)[%d]%s: [STEP3] commonData=%d, tlsData=%d¥n", thread_no, name, s_commonData, s_tlsData);
    fflush(stdout);

    //若干ランダムでスリープ（0～500 msec）
    usleep((rand() % 500) * 1000);

    //【バリア処理追加】バリア処理の効果を確認するために追加した処理は、ここまで

    //データ書き戻し
    s_tlsData = tls_data;

    //【バリア処理追加】バリアにより、全後続スレッドの処理タイミングを揃える
    pthread_barrier_wait(&s_barrier);

    //データ表示（後）
    printf("(F)[%d]%s: [AFTER]  commonData=%d, tlsData=%d¥n", thread_no, name, s_commonData, s_tlsData);
    fflush(stdout);

    //後続スレッド処理完了：待機スレッドを起床
    {
        pthread_mutex_lock(&s_followCondMutex[thread_no]);//ロック取得
        s_followFinished[thread_no] = true;//後続スレッドの処理完了状態を ON
```

```
                pthread_cond_signal(&s_followCond[thread_no]);//解除待ちしているスレッドに通知
                pthread_mutex_unlock(&s_followCondMutex[thread_no]);//ロック取得
                //※一つの条件変数で多数のスレッドを待機させている場合は、
                //  pthread_cond_broadcast() 関数も使える。
            }

            //スレッド切り替えのためのスリープ
            usleep(0);
        //    //スレッド切り替え
        //    sched_yield();//同じ優先度の他のスレッドに切り替え
        }

        //終了
        printf("- end:(F)[%d]%s -¥n", thread_no, name);
        fflush(stdout);
        return 0;
}


//テスト
int main(const int argc, const char* argv[])
{
        //条件変数＆ミューテックス生成
        //※PTHREAD_COND_INITIALIZER, PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER で初期化している場合は不要
        {
            for(int i = 0; i < FOLLOW_THREAD_MAX; ++i)
            {
                pthread_cond_init(&s_followCond[i], NULL);
                pthread_mutex_init(&s_followCondMutex[i], NULL);
            }
        }

        //スレッド作成
        static const int FOLLOW_THREAD_NUM = 5;
        static const int THREAD_NUM = 1 + FOLLOW_THREAD_NUM;
        //static_assert(FOLLOW_THREAD_NUM <= FOLLOW_THREAD_MAX, "FOLLOW_THREAD_NUM is over.");
        s_followThreadNum = FOLLOW_THREAD_NUM;
        pthread_barrier_init(&s_barrier, 0, s_followThreadNum);//【バリア処理追加】バリア初期化
        for (int i = 0; i < THREAD_NUM - 1; ++i)
            s_followFinished[i] = true;
        pthread_t pth[THREAD_NUM];
        {
            pthread_attr_t attr;
            pthread_attr_init(&attr);
            pthread_attr_setstacksize(&attr, 1024);//スタックサイズ指定
            pthread_create(&pth[0], &attr, priorThreadFunc, (void*)"先行");
            pthread_create(&pth[1], &attr, followThreadFunc, (void*)"後続 01");
            pthread_create(&pth[2], &attr, followThreadFunc, (void*)"後続 02");
            pthread_create(&pth[3], &attr, followThreadFunc, (void*)"後続 03");
            pthread_create(&pth[4], &attr, followThreadFunc, (void*)"後続 04");
            pthread_create(&pth[5], &attr, followThreadFunc, (void*)"後続 05");
        }

        //スレッド終了待ち
        for(int i = 0; i < THREAD_NUM; ++i)
        {
            pthread_join(pth[i], NULL);
        }

        //条件変数の取得と解放を大量に実行して時間を計測
        {
            struct timeval begin;
            gettimeofday(&begin, NULL);
            static const int TEST_TIMES = 10000000;
            for (int i = 0; i < TEST_TIMES; ++i)
```

```
            {
                  pthread_mutex_lock(&s_followCondMutex[0]);
                  s_followFinished[0] = true;
                  pthread_cond_signal(&s_followCond[0]);
                  pthread_mutex_unlock(&s_followCondMutex[0]);
            }
            struct timeval end;
            gettimeofday(&end, NULL);
            struct timeval duration;
            if( end.tv_usec >= begin.tv_usec)
            {
                  duration.tv_sec = end.tv_sec - begin.tv_sec;
                  duration.tv_usec = end.tv_usec - begin.tv_usec;
            }
            else
            {
                  duration.tv_sec = end.tv_sec - begin.tv_sec - 1;
                  duration.tv_usec = 1000000 - begin.tv_usec + end.tv_usec;
            }
            printf("Cond-Sginal * %d = %d.%06d sec¥n", TEST_TIMES, duration.tv_sec, duration.tv_usec);
      }

      //【バリア処理追加】バリア破棄
      pthread_barrier_destroy(&s_barrier);

      //条件変数＆ミューテックス破棄
      //※PTHREAD_COND_INITIALIZER, PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER で初期化している場合は不要
      {
            for(int i = 0; i < FOLLOW_THREAD_MAX; ++i)
            {
                  pthread_cond_destroy(&s_followCond[i]);
                  pthread_mutex_destroy(&s_followCondMutex[i]);
            }
      }

      return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果）

```
- begin:(F)[0]後続 03 -
- begin:(P)先行 -
(P)先行: [BEFORE] commonData=0, tlsData=0
- begin:(F)[1]後続 02 -
- begin:(F)[2]後続 05 -
- begin:(F)[3]後続 04 -
- begin:(F)[4]後続 01 -
(P)先行: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(F)[1]後続 02: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
(F)[4]後続 01: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
(F)[0]後続 03: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
(F)[2]後続 05: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
(F)[3]後続 04: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
(F)[0]後続 03: [STEP1] commonData=1, tlsData=0
(F)[0]後続 03: [STEP2] commonData=1, tlsData=0
(F)[1]後続 02: [STEP1] commonData=1, tlsData=0   ←各後続スレッドの進行が入り乱れている状態
(F)[0]後続 03: [STEP3] commonData=1, tlsData=0
(F)[1]後続 02: [STEP2] commonData=1, tlsData=0
(F)[3]後続 04: [STEP1] commonData=1, tlsData=0
(F)[4]後続 01: [STEP1] commonData=1, tlsData=0
(F)[2]後続 05: [STEP1] commonData=1, tlsData=0
(F)[3]後続 04: [STEP2] commonData=1, tlsData=0
(F)[2]後続 05: [STEP2] commonData=1, tlsData=0
(F)[3]後続 04: [STEP3] commonData=1, tlsData=0
(F)[1]後続 02: [STEP3] commonData=1, tlsData=0
(F)[2]後続 05: [STEP3] commonData=1, tlsData=0
```

```
(F)[4]後続01: [STEP2] commonData=1, tlsData=0
(F)[4]後続01: [STEP3] commonData=1, tlsData=0
(F)[0]後続03: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1 ←[AFTER]の前にバリアがあるので、このタイミングで足並みが揃う
(F)[3]後続04: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(F)[2]後続05: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(F)[1]後続02: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(F)[4]後続01: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(P)先行: [BEFORE] commonData=1, tlsData=1
(P)先行: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(F)[2]後続05: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1
(F)[2]後続05: [STEP1] commonData=2, tlsData=1
(F)[1]後続02: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1 ←各後続スレッドの進行が入り乱れている状態（2回目）
(F)[3]後続04: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1
(F)[2]後続05: [STEP2] commonData=2, tlsData=1
(F)[1]後続02: [STEP1] commonData=2, tlsData=1
(F)[0]後続03: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1
(F)[3]後続04: [STEP1] commonData=2, tlsData=1
(F)[0]後続03: [STEP1] commonData=2, tlsData=1
(F)[3]後続04: [STEP2] commonData=2, tlsData=1
(F)[4]後続01: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1
(F)[0]後続03: [STEP2] commonData=2, tlsData=1
(F)[2]後続05: [STEP3] commonData=2, tlsData=1
(F)[1]後続02: [STEP2] commonData=2, tlsData=1
(F)[1]後続02: [STEP3] commonData=2, tlsData=1
(F)[3]後続04: [STEP3] commonData=2, tlsData=1
(F)[4]後続01: [STEP1] commonData=2, tlsData=1
(F)[0]後続03: [STEP3] commonData=2, tlsData=1
(F)[4]後続01: [STEP2] commonData=2, tlsData=1
(F)[4]後続01: [STEP3] commonData=2, tlsData=1
(F)[2]後続05: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2 ←[AFTER]の前にバリアがあるので、このタイミングで足並みが揃う(2回目)
(F)[4]後続01: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(F)[3]後続04: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(F)[0]後続03: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(F)[1]後続02: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(P)先行: [BEFORE] commonData=2, tlsData=2
(P)先行: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(F)[0]後続03: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2
(F)[4]後続01: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2
(F)[3]後続04: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2
(F)[2]後続05: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2
(F)[1]後続02: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2
(F)[1]後続02: [STEP1] commonData=3, tlsData=2
(F)[4]後続01: [STEP1] commonData=3, tlsData=2
(F)[0]後続03: [STEP1] commonData=3, tlsData=2
(F)[0]後続03: [STEP2] commonData=3, tlsData=2
(F)[3]後続04: [STEP1] commonData=3, tlsData=2  ←各後続スレッドの進行が入り乱れている状態（3回目）
(F)[2]後続05: [STEP1] commonData=3, tlsData=2
(F)[1]後続02: [STEP2] commonData=3, tlsData=2
(F)[3]後続04: [STEP2] commonData=3, tlsData=2
(F)[4]後続01: [STEP2] commonData=3, tlsData=2
(F)[0]後続03: [STEP3] commonData=3, tlsData=2
(F)[3]後続04: [STEP3] commonData=3, tlsData=2
(F)[2]後続05: [STEP2] commonData=3, tlsData=2
(F)[1]後続02: [STEP3] commonData=3, tlsData=2
(F)[4]後続01: [STEP3] commonData=3, tlsData=2
(F)[2]後続05: [STEP3] commonData=3, tlsData=2
(F)[3]後続04: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3 ←[AFTER]の前にバリアがあるので、このタイミングで足並みが揃う(3回目)
(F)[2]後続05: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(F)[4]後続01: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(F)[1]後続02: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(F)[0]後続03: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(P)先行: [QUIT]
- end:(P)先行 -
(F)[1]後続02: [QUIT]
- end:(F)[1]後続02 -
```

```
(F)[4]後続01: [QUIT]
- end:(F)[4]後続01 -
(F)[3]後続04: [QUIT]
- end:(F)[3]後続04 -
(F)[0]後続03: [QUIT]
- end:(F)[0]後続03 -
(F)[2]後続05: [QUIT]
- end:(F)[2]後続05 -
Cond-Sginal * 10000000 = 0.937633 sec
```

▼ モニター：イベント

Win32API でモニターを行うには、「イベント」を使用する。

イベントは条件変数に比べてシンプルに使用することができるが、単なる通知（「シグナル状態」と呼ぶ）しかできないので、スレッド間で相互に通知しあうような場合はそれぞれのイベントを設ける必要がある。（条件変数は任意の変数で状態を管理するので共用できる）

● Win32API 版（名前なし）

Win32API 版のイベント。

Win32API 版イベントのサンプル：

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include <Windows.h>
#include <Process.h>

//スレッド情報
static const int FOLLOW_THREAD_MAX = 10;          //後続スレッド最大数
static volatile LONG s_followThreadNum = 0;       //後続スレッド数
static volatile LONG s_followThreadNo = 0;        //後続スレッド番号発番用
static volatile bool s_IsQuirProiorThread = false;//先行スレッド終了フラグ

//イベントハンドル
static HANDLE s_hPriorEvent[FOLLOW_THREAD_MAX]; //先行スレッド処理完了イベント
static HANDLE s_hFollowEvent[FOLLOW_THREAD_MAX];//後続スレッド処理完了イベント

//共有データ
static int s_commonData = 0;

//スレッド固有データ
__declspec(thread) int s_tlsData = 0;

//【処理説明】
//先行スレッドが共有データを作成し、それが完了したら
//複数の後続スレッドがスタート。
//後続スレッドは共有データを読み込むだけのため、並列で動作。
//後続スレッドの処理が全て完了したら、また先行スレッドが稼働。
//以上を何度か繰り返し、先行スレッドが終了したら全スレッド終了。
//※メインループ⇒描画スレッドのようなリレー処理への応用を想定。

//先行スレッド
unsigned int WINAPI priorThreadFunc(void* param_p)
{
    //パラメータ受け取り
```

```
	const char* name = static_cast<const char*>(param_p);

	//開始
	printf("- begin:(P)%s -¥n", name);
	fflush(stdout);

	//初期化
	s_IsQuirProiorThread = false;//先行処理終了フラグ

	//処理
	static const int LOOP_COUNT_MAX = 3;
	int loop_counter = 0;
	while (1)
	{
		//全後続スレッド処理完了待ち
		WaitForMultipleObjects(s_followThreadNum, s_hFollowEvent, true, INFINITE);
                                        //待機が完了しない時に他の処理を行いたい場合はタイムアウト値を指定する

		//ループカウンタ進行＆終了判定
		if (loop_counter++ == LOOP_COUNT_MAX)
		{
			//処理終了
			printf("(P)%s: [QUIT]¥n", name);
			fflush(stdout);

			//先行スレッド終了フラグ
			s_IsQuirProiorThread = true;

			//先行スレッド処理完了イベントセット
			for (int i = 0; i < s_followThreadNum; ++i)
				SetEvent(s_hPriorEvent[i]);

			break;
		}

		//データ表示（前）
		printf("(P)%s: [BEFORE] commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
		fflush(stdout);

		//データ取得
		int common_data = s_commonData;
		int tls_data = s_tlsData;

		//データ更新
		++common_data;
		++tls_data;

		//若干ランダムでスリープ（0～499 msec）
		Sleep(rand() % 500);

		//データ書き戻し
		s_commonData = common_data;
		s_tlsData = tls_data;

		//データ表示（後）
		printf("(P)%s: [AFTER]  commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
		fflush(stdout);

		//先行スレッド処理完了イベントセット
		for (int i = 0; i < s_followThreadNum; ++i)
		{
			SetEvent(s_hPriorEvent[i]);
		}
		//※PulseEvent() は SetEvent() のように、先行してシグナル状態を作るようなことができず、
		//  PulseEvent() 実行のタイミングで待機しているものを開放するだけしかできない。
```

```
            //  なので、PulseEvent() を使用せず、子の数分のイベントを使用する。

            //スレッド切り替えのためのスリープ
            Sleep(0);
      //    //スレッド切り替え
      //    SwitchToThread();//OSに任せて再スケジューリング
      //    Yield();//廃止
      }

      //終了
      printf("- end:(P)%s -¥n", name);
      fflush(stdout);
      return 0;
}

//後続スレッド
unsigned int WINAPI followThreadFunc(void* param_p)
{
      //パラメータ受け取り
      const char* name = static_cast<const char*>(param_p);

      //後続スレッド数カウントアップ
      LONG thread_no = InterlockedIncrement(&s_followThreadNo) - 1;

      //開始
      printf("- begin:(F)[%d]%s -¥n", thread_no, name);
      fflush(stdout);

      //後続スレッド処理完了イベントセット
      SetEvent(s_hFollowEvent[thread_no]);

      //処理
      while (1)
      {
            //先行スレッド処理完了イベント待ち
            WaitForSingleObject(s_hPriorEvent[thread_no], INFINITE);
                                          //待機が完了しない時に他の処理を行いたい場合はタイムアウト値を指定する

            //終了確認
            if (s_IsQuirProiorThread)
            {
                  //処理終了
                  printf("(F)[%d]%s: [QUIT]¥n", thread_no, name);
                  fflush(stdout);

                  break;
            }

            //データ表示（前）
            printf("(F)[%d]%s: [BEFORE] commonData=%d, tlsData=%d¥n", thread_no, name, s_commonData, s_tlsData);
            fflush(stdout);

            //データ取得
            int common_data = s_commonData;
            int tls_data = s_tlsData;

            //データ更新
            ++tls_data;

            //若干ランダムでスリープ（0～500 msec）
            Sleep(rand() % 500);

            //データ書き戻し
            s_tlsData = tls_data;
```

```
            //データ表示（後）
            printf("(F)[%d]%s: [AFTER]  commonData=%d, tlsData=%d¥n", thread_no, name, s_commonData, s_tlsData);
            fflush(stdout);

            //後続スレッド処理完了イベントセット
            SetEvent(s_hFollowEvent[thread_no]);

            //スレッド切り替えのためのスリープ
            Sleep(0);
      //    //スレッド切り替え
      //    SwitchToThread();//OSに任せて再スケジューリング
      //    Yield();//廃止
      }

      //終了
      printf("- end:(F)[%d]%s -¥n", thread_no, name);
      fflush(stdout);
      return 0;
}

//テスト
int main(const int argc, const char* argv[])
{
      //イベント生成
      {
            for (int i = 0; i < FOLLOW_THREAD_MAX; ++i)
            {
                  //先行スレッド→後続スレッド通知用イベント（PulseEventが信頼できないので、後続スレッド数分作成）
                  s_hPriorEvent[i] = CreateEvent(nullptr, false, false, nullptr);
                                          //手動リセット=false（自動リセット）, 初期状態=false（リセット状態）
                  //後続スレッド→先行スレッド通知用イベント
                  s_hFollowEvent[i] = CreateEvent(nullptr, false, false, nullptr);
                                          //手動リセット=false（自動リセット）, 初期状態=false（リセット状態）
            }

      //    //属性を指定して生成する場合
      //    SECURITY_ATTRIBUTES attr = { sizeof(SECURITY_ATTRIBUTES), nullptr, true };//子プロセスにハンドルを継承する
      //    SECURITY_ATTRIBUTES attr = { sizeof(SECURITY_ATTRIBUTES), nullptr, false };//子プロセスにハンドルを
      //                                                                              //継承しない　※デフォルト
      //    for (int i = 0; i < FOLLOW_THREAD_MAX; ++i)
      //    {
      //          //先行スレッド→後続スレッド通知用イベント（PulseEventが信頼できないので、後続スレッド数分作成）
      //          s_hPriorEvent[i] = CreateEvent(&attr, true, false, nullptr);
      //          //後続スレッド→先行スレッド通知用イベント
      //          s_hFollowEvent[i] = CreateEvent(&attr, false, false, nullptr);
      //    }
      }

      //スレッド作成
      static const int FOLLOW_THREAD_NUM = 5;
      static const int THREAD_NUM = 1 + FOLLOW_THREAD_NUM;
      static_assert(FOLLOW_THREAD_NUM <= FOLLOW_THREAD_MAX, "FOLLOW_THREAD_NUM is over.");
      s_followThreadNum = FOLLOW_THREAD_NUM;
      unsigned int tid[THREAD_NUM] = {};
      HANDLE hThread[THREAD_NUM] =
      {
            (HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 1024, priorThreadFunc, "先行", 0, &tid[0]),
            (HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 1024, followThreadFunc, "後続01", 0, &tid[1]),
            (HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 1024, followThreadFunc, "後続02", 0, &tid[1]),
            (HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 1024, followThreadFunc, "後続03", 0, &tid[1]),
            (HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 1024, followThreadFunc, "後続04", 0, &tid[1]),
            (HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 1024, followThreadFunc, "後続05", 0, &tid[1]),
      };

      //スレッド終了待ち
```

```
	WaitForMultipleObjects(THREAD_NUM, hThread, true, INFINITE);

	//スレッドハンドルクローズ
	for (int i = 0; i < THREAD_NUM; ++i)
	{
		CloseHandle(hThread[i]);
	}

	//イベントの取得と解放を大量に実行して時間を計測
	{
		LARGE_INTEGER freq;
		QueryPerformanceFrequency(&freq);
		LARGE_INTEGER begin;
		QueryPerformanceCounter(&begin);
		static const int TEST_TIMES = 10000000;
		for (int i = 0; i < TEST_TIMES; ++i)
		{
			SetEvent(s_hPriorEvent[0]);
		//	WaitForSingleObject(s_hPriorEvent[0], INFINITE);
		//	ResetEvent(s_hPriorEvent[0]);
		}
		LARGE_INTEGER end;
		QueryPerformanceCounter(&end);
		float duration = static_cast<float>(static_cast<double>(end.QuadPart - begin.QuadPart)
		                                                        / static_cast<double>(freq.QuadPart));
		printf("Event * %d = %.6f sec¥n", TEST_TIMES, duration);
	}

	//イベント破棄
	for (int i = 0; i < FOLLOW_THREAD_MAX; ++i)
	{
		CloseHandle(s_hPriorEvent[i]);
		s_hPriorEvent[i] = INVALID_HANDLE_VALUE;
		CloseHandle(s_hFollowEvent[i]);
		s_hFollowEvent[i] = INVALID_HANDLE_VALUE;
	}

	return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果）

```
- begin:(P)先行 -
- begin:(F)[2]後続 03 -
- begin:(F)[1]後続 02 -
- begin:(F)[0]後続 01 -
- begin:(F)[3]後続 04 -
- begin:(F)[4]後続 05 -
(P)先行: [BEFORE] commonData=0, tlsData=0       ←先行スレッドが処理を開始
(P)先行: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1          （後続スレッドは、スレッド開始時から先行スレッドの処理終了を待機）
(F)[0]後続 01: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0 ←先行スレッドの処理が終了すると、後続スレッドが一斉スタート
(F)[1]後続 02: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
(F)[2]後続 03: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
(F)[3]後続 04: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
(F)[4]後続 05: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
(F)[1]後続 02: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(F)[2]後続 03: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(F)[4]後続 05: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(F)[3]後続 04: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(F)[0]後続 01: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(P)先行: [BEFORE] commonData=1, tlsData=1       ←後続スレッドの処理が全て終了すると、また先行スレッドがスタート
(P)先行: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(F)[0]後続 01: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1 ←先行スレッドの処理が終了すると、また後続スレッドが一斉スタート
(F)[2]後続 03: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1
(F)[3]後続 04: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1
(F)[1]後続 02: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1
```

```
(F)[4]後続 05: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1
(F)[4]後続 05: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(F)[1]後続 02: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(F)[3]後続 04: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(F)[0]後続 01: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(F)[2]後続 03: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(P)先行: [BEFORE] commonData=2, tlsData=2       ←後続スレッドの処理が全て終了すると、また先行スレッドがスタート
(P)先行: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(F)[1]後続 02: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2 ←先行スレッドの処理が終了すると、また後続スレッドが一斉スタート
(F)[0]後続 01: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2
(F)[4]後続 05: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2
(F)[3]後続 04: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2
(F)[2]後続 03: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2
(F)[2]後続 03: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(F)[4]後続 05: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(F)[0]後続 01: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(F)[1]後続 02: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(F)[3]後続 04: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(P)先行: [QUIT]                                 ←先行スレッド終了
(F)[1]後続 02: [QUIT]                           ←先行スレッドの終了に反応して後続スレッドも終了
(F)[2]後続 03: [QUIT]
- end:(P)先行 -
- end:(F)[2]後続 03 -
(F)[4]後続 05: [QUIT]
(F)[0]後続 01: [QUIT]
(F)[3]後続 04: [QUIT]
- end:(F)[0]後続 01 -
- end:(F)[3]後続 04 -
- end:(F)[4]後続 05 -
- end:(F)[1]後続 02 -
Event * 10000000 = 2.102039 sec                 ←1 千万回ループによる処理時間計測（SetEvent のみの処理時間）
```

● Win32API 版（名前付き）

Win32 版の名前付きイベント。

基本的には名前無しイベントと変わらないが、プロセス間での排他制御や、スレッドごとにイベントのアクセス権を変えたい場合に使用する。これにより、待ち受け専用のスレッドが誤って通知（シグナル状態化）することを防ぐことができる。

Win32API 版名前付きイベントのサンプル：

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include <Windows.h>
#include <Process.h>

//スレッド情報
static const int FOLLOW_THREAD_MAX = 10;          //後続スレッド最大数
static volatile LONG s_followThreadNum = 0;       //後続スレッド数
static volatile LONG s_followThreadNo = 0;        //後続スレッド番号発番用
static volatile bool s_IsQuirProiorThread = false;//先行スレッド終了フラグ

//イベント名
static const char* PRIOR_EVENT_NAME[FOLLOW_THREAD_MAX] =  //先行スレッド処理完了イベント
{
      "Prior Event 01",
      "Prior Event 02",
      "Prior Event 03",
      "Prior Event 04",
```

```
	"Prior Event 05",
	"Prior Event 06",
	"Prior Event 07",
	"Prior Event 08",
	"Prior Event 09",
	"Prior Event 10",
};
static const char* FOLLOW_EVENT_NAME[FOLLOW_THREAD_MAX] =//後続スレッド処理完了イベント
{
	"Follow Event 01",
	"Follow Event 02",
	"Follow Event 03",
	"Follow Event 04",
	"Follow Event 05",
	"Follow Event 06",
	"Follow Event 07",
	"Follow Event 08",
	"Follow Event 09",
	"Follow Event 10",
};

//共有データ
static int s_commonData = 0;

//スレッド固有データ
__declspec(thread) int s_tlsData = 0;

//【処理説明】
//先行スレッドが共有データを作成し、それが完了したら
//複数の後続スレッドがスタート。
//後続スレッドは共有データを読み込むだけのため、並列で動作。
//後続スレッドの処理が全て完了したら、また先行スレッドが稼働。
//以上を何度か繰り返し、先行スレッドが終了したら全スレッド終了。
//※メインループ⇒描画スレッドのようなリレー処理への応用を想定。

//先行スレッド
unsigned int WINAPI priorThreadFunc(void* param_p)
{
	//パラメータ受け取り
	const char* name = static_cast<const char*>(param_p);

	//開始
	printf("- begin:(P)%s -¥n", name);
	fflush(stdout);

	//名前付きイベントオープン
	HANDLE hPriorEvent[FOLLOW_THREAD_MAX];
	HANDLE hFollowEvent[FOLLOW_THREAD_MAX];
	for (int i = 0; i < FOLLOW_THREAD_MAX; ++i)
	{
		hPriorEvent[i] = OpenEvent(EVENT_MODIFY_STATE, false, PRIOR_EVENT_NAME[i]);
							//先行スレッド処理完了イベント：SetEvetn, ResetEvent 許可
		hFollowEvent[i] = OpenEvent(SYNCHRONIZE, false, FOLLOW_EVENT_NAME[i]);
							//後続スレッド処理完了イベント：Wait 許可
	}

	//初期化
	s_IsQuirProiorThread = false;//先行処理終了フラグ

	//処理
	static const int LOOP_COUNT_MAX = 3;
	int loop_counter = 0;
	while (1)
	{
		//全後続スレッド処理完了待ち
```

```
        WaitForMultipleObjects(s_followThreadNum, hFollowEvent, true, INFINITE);
                                    //待機が完了しない時に他の処理を行いたい場合はタイムアウト値を指定する

        //ループカウンタ進行＆終了判定
        if (loop_counter++ == LOOP_COUNT_MAX)
        {
            //処理終了
            printf("(P)%s: [QUIT]¥n", name);
            fflush(stdout);

            //先行スレッド終了フラグ
            s_IsQuirProiorThread = true;

            //先行スレッド処理完了イベントセット
            for (int i = 0; i < s_followThreadNum; ++i)
                SetEvent(hPriorEvent[i]);

            break;
        }

        //データ表示（前）
        printf("(P)%s: [BEFORE] commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
        fflush(stdout);

        //データ取得
        int common_data = s_commonData;
        int tls_data = s_tlsData;

        //データ更新
        ++common_data;
        ++tls_data;

        //若干ランダムでスリープ（0～499 msec）
        Sleep(rand() % 500);

        //データ書き戻し
        s_commonData = common_data;
        s_tlsData = tls_data;

        //データ表示（後）
        printf("(P)%s: [AFTER]  commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
        fflush(stdout);

        //先行スレッド処理完了イベントセット
        for (int i = 0; i < s_followThreadNum; ++i)
        {
            SetEvent(hPriorEvent[i]);
        }
        //※PulseEvent() は SetEvent() のように、先行してシグナル状態を作るようなことができず、
        //  PulseEvent() 実行のタイミングで待機しているものを開放するだけしかできない。
        //  なので、PulseEvent() を使用せず、子の数分のイベントを使用する。

        //スレッド切り替えのためのスリープ
        Sleep(0);
//      //スレッド切り替え
//      SwitchToThread();//OSに任せて再スケジューリング
//      Yield();//廃止
    }

    //名前付きイベントクローズ
    for (int i = 0; i < FOLLOW_THREAD_MAX; ++i)
    {
        CloseHandle(hPriorEvent[i]);
        CloseHandle(hFollowEvent[i]);
    }
```

```
	//終了
	printf("- end:(P)%s -¥n", name);
	fflush(stdout);
	return 0;
}

//後続スレッド
unsigned int WINAPI followThreadFunc(void* param_p)
{
	//パラメータ受け取り
	const char* name = static_cast<const char*>(param_p);

	//後続スレッド数カウントアップ
	LONG thread_no = InterlockedIncrement(&s_followThreadNo) - 1;

	//開始
	printf("- begin:(F)[%d]%s -¥n", thread_no, name);
	fflush(stdout);

	//名前付きイベントオープン
	HANDLE hPriorEvent[FOLLOW_THREAD_MAX];
	HANDLE hFollowEvent[FOLLOW_THREAD_MAX];
	for (int i = 0; i < FOLLOW_THREAD_MAX; ++i)
	{
		hPriorEvent[i] = OpenEvent(SYNCHRONIZE, false, PRIOR_EVENT_NAME[i]);
													//先行スレッド処理完了イベント：Wait 許可
		hFollowEvent[i] = OpenEvent(EVENT_MODIFY_STATE, false, FOLLOW_EVENT_NAME[i]);
													//後続スレッド処理完了イベント：SetEvetn, ResetEvent 許可
	}

	//後続スレッド処理完了イベントセット
	SetEvent(hFollowEvent[thread_no]);

	//処理
	while (1)
	{
		//先行スレッド処理完了イベント待ち
		WaitForSingleObject(hPriorEvent[thread_no], INFINITE);
									//待機が完了しない時に他の処理を行いたい場合はタイムアウト値を指定する

		//終了確認
		if (s_IsQuirProiorThread)
		{
			//処理終了
			printf("(F)[%d]%s: [QUIT]¥n", thread_no, name);
			fflush(stdout);

			break;
		}

		//データ表示（前）
		printf("(F)[%d]%s: [BEFORE] commonData=%d, tlsData=%d¥n", thread_no, name, s_commonData, s_tlsData);
		fflush(stdout);

		//データ取得
		int common_data = s_commonData;
		int tls_data = s_tlsData;

		//データ更新
		++tls_data;

		//若干ランダムでスリープ（0～500 msec）
		Sleep(rand() % 500);
```

```
            //データ書き戻し
            s_tlsData = tls_data;

            //データ表示（後）
            printf("(F)[%d]%s: [AFTER]  commonData=%d, tlsData=%d¥n", thread_no, name, s_commonData, s_tlsData);
            fflush(stdout);

            //後続スレッド処理完了イベントセット
            SetEvent(hFollowEvent[thread_no]);

            //スレッド切り替えのためのスリープ
            Sleep(0);
      //    //スレッド切り替え
      //    SwitchToThread();//OSに任せて再スケジューリング
      //    Yield();//廃止
      }

      //名前付きイベントクローズ
      for (int i = 0; i < FOLLOW_THREAD_MAX; ++i)
      {
            CloseHandle(hPriorEvent[i]);
            CloseHandle(hFollowEvent[i]);
      }

      //終了
      printf("- end:(F)[%d]%s -¥n", thread_no, name);
      fflush(stdout);
      return 0;
}

//テスト
int main(const int argc, const char* argv[])
{
      //イベント生成
      HANDLE hPriorEvent[FOLLOW_THREAD_MAX];
      HANDLE hFollowEvent[FOLLOW_THREAD_MAX];
      {
            //名前付きイベント
            for (int i = 0; i < FOLLOW_THREAD_MAX; ++i)
            {
                  //先行スレッド→後続スレッド通知用イベント（PulseEventが信頼できないので、後続スレッド数分作成）
                  hPriorEvent[i] = CreateEvent(nullptr, false, false, PRIOR_EVENT_NAME[i]);
                                          //手動リセット=false（自動リセット）, 初期状態=false（リセット状態）
                  //後続スレッド→先行スレッド通知用イベント
                  hFollowEvent[i] = CreateEvent(nullptr, false, false, FOLLOW_EVENT_NAME[i]);
                                          //手動リセット=false（自動リセット）, 初期状態=false（リセット状態）
            }

      //    //属性を指定して生成する場合
      //    SECURITY_ATTRIBUTES attr = { sizeof(SECURITY_ATTRIBUTES), nullptr, true };//子プロセスにハンドルを継承する
      //    SECURITY_ATTRIBUTES attr = { sizeof(SECURITY_ATTRIBUTES), nullptr, false };//子プロセスにハンドルを
      //                                                                              //継承しない　※デフォルト
      //    for (int i = 0; i < FOLLOW_THREAD_MAX; ++i)
      //    {
      //          //先行スレッド→後続スレッド通知用イベント（PulseEventが信頼できないので、後続スレッド数分作成）
      //          hPriorEvent[i] = CreateEvent(&attr, false, false, PRIOR_EVENT_NAME[i]);
      //                                  //手動リセット=false（自動リセット）, 初期状態=false（リセット状態）
      //          //後続スレッド→先行スレッド通知用イベント
      //          hFollowEvent[i] = CreateEvent(&attr, false, false, FOLLOW_EVENT_NAME[i]);
      //                                  //手動リセット=false（自動リセット）, 初期状態=false（リセット状態）
      //    }
      }

      //スレッド作成
      static const int FOLLOW_THREAD_NUM = 5;
```

```
	static const int THREAD_NUM = 1 + FOLLOW_THREAD_NUM;
	static_assert(FOLLOW_THREAD_NUM <= FOLLOW_THREAD_MAX, "FOLLOW_THREAD_NUM is over.");
	s_followThreadNum = FOLLOW_THREAD_NUM;
	unsigned int tid[THREAD_NUM] = {};
	HANDLE hThread[THREAD_NUM] =
	{
		(HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 0, priorThreadFunc, "先行", 0, &tid[0]),
		(HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 0, followThreadFunc, "後続01", 0, &tid[1]),
		(HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 0, followThreadFunc, "後続02", 0, &tid[1]),
		(HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 0, followThreadFunc, "後続03", 0, &tid[1]),
		(HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 0, followThreadFunc, "後続04", 0, &tid[1]),
		(HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 0, followThreadFunc, "後続05", 0, &tid[1]),
	};

	//スレッド終了待ち
	WaitForMultipleObjects(THREAD_NUM, hThread, true, INFINITE);

	//スレッドハンドルクローズ
	for (int i = 0; i < THREAD_NUM; ++i)
	{
		CloseHandle(hThread[i]);
	}

	//イベントの取得と解放を大量に実行して時間を計測
	{
		LARGE_INTEGER freq;
		QueryPerformanceFrequency(&freq);
		LARGE_INTEGER begin;
		QueryPerformanceCounter(&begin);
		static const int TEST_TIMES = 10000000;
		for (int i = 0; i < TEST_TIMES; ++i)
		{
			SetEvent(hPriorEvent[0]);
		//	WaitForSingleObject(hPriorEvent[0], INFINITE);
		//	ResetEvent(hPriorEvent[0]);
		}
		LARGE_INTEGER end;
		QueryPerformanceCounter(&end);
		float duration = static_cast<float>(static_cast<double>(end.QuadPart - begin.QuadPart)
		                                    / static_cast<double>(freq.QuadPart));
		printf("Event * %d = %.6f sec¥n", TEST_TIMES, duration);
	}

	//名前付きイベントクローズ
	for (int i = 0; i < FOLLOW_THREAD_MAX; ++i)
	{
		CloseHandle(hPriorEvent[i]);
		CloseHandle(hFollowEvent[i]);
	}

	return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果）

```
- begin:(P)先行 -
- begin:(F)[0]後続01 -
- begin:(F)[1]後続02 -
- begin:(F)[2]後続03 -
- begin:(F)[3]後続04 -
- begin:(F)[4]後続05 -
(P)先行: [BEFORE] commonData=0, tlsData=0       ←先行スレッドが処理を開始
(P)先行: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1          （後続スレッドは、スレッド開始時から先行スレッドの処理終了を待機）
(F)[0]後続01: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0  ←先行スレッドの処理が終了すると、後続スレッドが一斉スタート
(F)[1]後続02: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
(F)[3]後続04: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
```

```
(F)[4]後続 05: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
(F)[2]後続 03: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
(F)[4]後続 05: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(F)[0]後続 01: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(F)[3]後続 04: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(F)[1]後続 02: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(F)[2]後続 03: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(P)先行: [BEFORE] commonData=1, tlsData=1       ←後続スレッドの処理が全て終了すると、また先行スレッドがスタート
(P)先行: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(F)[0]後続 01: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1 ←先行スレッドの処理が終了すると、また後続スレッドが一斉スタート
(F)[2]後続 03: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1
(F)[3]後続 04: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1
(F)[1]後続 02: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1
(F)[4]後続 05: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1
(F)[4]後続 05: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(F)[3]後続 04: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(F)[2]後続 03: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(F)[1]後続 02: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(F)[0]後続 01: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(P)先行: [BEFORE] commonData=2, tlsData=2       ←後続スレッドの処理が全て終了すると、また先行スレッドがスタート
(P)先行: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(F)[0]後続 01: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2 ←先行スレッドの処理が終了すると、また後続スレッドが一斉スタート
(F)[2]後続 03: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2
(F)[4]後続 05: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2
(F)[3]後続 04: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2
(F)[1]後続 02: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2
(F)[1]後続 02: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(F)[3]後続 04: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(F)[4]後続 05: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(F)[0]後続 01: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(F)[2]後続 03: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(P)先行: [QUIT]                                 ←先行スレッド終了
(F)[0]後続 01: [QUIT]                           ←先行スレッドの終了に反応して後続スレッドも終了
(F)[2]後続 03: [QUIT]
- end:(P)先行 -
(F)[4]後続 05: [QUIT]
(F)[3]後続 04: [QUIT]
(F)[1]後続 02: [QUIT]
- end:(F)[0]後続 01 -
- end:(F)[2]後続 03 -
- end:(F)[4]後続 05 -
- end:(F)[3]後続 04 -
- end:(F)[1]後続 02 -
Event * 10000000 = 2.079530 sec                 ←1 千万回ループによる処理時間計測（SetEvent のみの処理時間）
```

▼ モニター：アトミック操作（インターロック操作）によるビジーなモニター

ごく短い処理をリレーするような場合、ビジーウェイトでモニターするのも有効である。この場合、アトミック操作（インターロック操作）を活用する。

● 【用語解説】コンペア・アンド・スワップ（CAS）操作

ここで用いるのは、「コンペア・アンド・スワップ」（Compare-And-Swap＝CAS）と呼ばれる手法で、ロックフリーなシステムの常套手段である。

ある変数の値をチェックし、それが指定の値であれば、新しい値に置換する。

CPU の命令レベルで対応しており、割り込まれることなく一瞬でその操作が完了す

る。

この仕組みを C++言語から利用する手段が提供されている。

なお、前述の「変数操作による排他制御：インラインアセンブラ」では、インラインアセンブラで XCHG 命令を使用している。これは比較を行わない単純な交換命令。

● Win32API 版：インターロック操作

Win32API では、InterlockedCompareExchange() を使用する。

Win32API 版インターロック操作によるモニターのサンプル：

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include <Windows.h>
#include <Process.h>

//スレッド情報
static const int FOLLOW_THREAD_MAX = 10;          //後続スレッド最大数
static volatile LONG s_followThreadNum = 0;       //後続スレッド数
static volatile LONG s_followThreadNo = 0;        //後続スレッド番号発番用
static volatile bool s_IsQuirProiorThread = false;//先行スレッド終了フラグ

//モニター用変数
enum E_PROCESS
{
      PRIOR_RUNNING, //先行処理実行中
      PRIOR_IDLE,    //先行処理アイドル状態
      FOLLOW_RUNNING,//後続処理実行中
      FOLLOW_IDLE,   //後続処理アイドル状態
};
static LONG s_followFinished[FOLLOW_THREAD_MAX];//後続スレッド処理完了フラグ

//共有データ
static int s_commonData = 0;

//スレッド固有データ
__declspec(thread) int s_tlsData = 0;

//【処理説明】
//先行スレッドが共有データを作成し、それが完了したら
//複数の後続スレッドがスタート。
//後続スレッドは共有データを読み込むだけのため、並列で動作。
//後続スレッドの処理が全て完了したら、また先行スレッドが稼働。
//以上を何度か繰り返し、先行スレッドが終了したら全スレッド終了。
//※メインループ⇒描画スレッドのようなリレー処理への応用を想定。

//先行スレッド
unsigned int WINAPI priorThreadFunc(void* param_p)
{
      //パラメータ受け取り
      const char* name = static_cast<const char*>(param_p);

      //開始
      printf("- begin:(P)%s -¥n", name);
      fflush(stdout);

      //初期化
      s_IsQuirProiorThread = false;//先行処理終了フラグ
```

```
//処理
static const int LOOP_COUNT_MAX = 3;
int loop_counter = 0;
while (1)
{
	//全後続スレッド処理完了待ち
	for (int i = 0; i < s_followThreadNum; ++i)
	{
		E_PROCESS prev = E_PROCESS::FOLLOW_IDLE;
		while (InterlockedCompareExchange(&s_followFinished[i], E_PROCESS::PRIOR_RUNNING,
							E_PROCESS::FOLLOW_IDLE) != E_PROCESS::FOLLOW_IDLE){}
	}

	//ループカウンタ進行＆終了判定
	if (loop_counter++ == LOOP_COUNT_MAX)
	{
		//処理終了
		printf("(P)%s: [QUIT]¥n", name);
		fflush(stdout);

		//先行スレッド終了フラグ
		s_IsQuirProiorThread = true;

		//先行スレッド処理完了：全待機スレッドを起床
		for (int i = 0; i < s_followThreadNum; ++i)
		{
			s_followFinished[i] = E_PROCESS::PRIOR_IDLE;
		}

		break;
	}

	//データ表示（前）
	printf("(P)%s: [BEFORE] commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
	fflush(stdout);

	//データ取得
	int common_data = s_commonData;
	int tls_data = s_tlsData;

	//データ更新
	++common_data;
	++tls_data;

	//若干ランダムでスリープ（0～499 msec）
	Sleep(rand() % 500);

	//データ書き戻し
	s_commonData = common_data;
	s_tlsData = tls_data;

	//データ表示（後）
	printf("(P)%s: [AFTER]  commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
	fflush(stdout);

	//先行スレッド処理完了：全待機スレッドを起床
	for (int i = 0; i < s_followThreadNum; ++i)
	{
		s_followFinished[i] = E_PROCESS::PRIOR_IDLE;
	}

	//スレッド切り替えのためのスリープ
	Sleep(0);
//	//スレッド切り替え
```

```
	//	SwitchToThread();//OSに任せて再スケジューリング
	//	Yield();//廃止
	}

	//終了
	printf("- end:(P)%s -¥n", name);
	fflush(stdout);
	return 0;
}

//後続スレッド
unsigned int WINAPI followThreadFunc(void* param_p)
{
	//パラメータ受け取り
	const char* name = static_cast<const char*>(param_p);

	//後続スレッド数カウントアップ
	LONG thread_no = InterlockedIncrement(&s_followThreadNo) - 1;

	//開始
	printf("- begin:(F)[%d]%s -¥n", thread_no, name);
	fflush(stdout);

	//後続スレッド処理完了：待機スレッドを起床
	s_followFinished[thread_no] = E_PROCESS::FOLLOW_IDLE;

	//処理
	while (1)
	{
		//先行スレッド処理完了待ち
		while (InterlockedCompareExchange(&s_followFinished[thread_no], E_PROCESS::FOLLOW_RUNNING,
			E_PROCESS::PRIOR_IDLE) != E_PROCESS::PRIOR_IDLE){}

		//終了確認
		if (s_IsQuirProiorThread)
		{
			//処理終了
			printf("(F)[%d]%s: [QUIT]¥n", thread_no, name);
			fflush(stdout);

			break;
		}

		//データ表示（前）
		printf("(F)[%d]%s: [BEFORE] commonData=%d, tlsData=%d¥n", thread_no, name, s_commonData, s_tlsData);
		fflush(stdout);

		//データ取得
		int common_data = s_commonData;
		int tls_data = s_tlsData;

		//データ更新
		++tls_data;

		//若干ランダムでスリープ（0～500 msec）
		Sleep(rand() % 500);

		//データ書き戻し
		s_tlsData = tls_data;

		//データ表示（後）
		printf("(F)[%d]%s: [AFTER]  commonData=%d, tlsData=%d¥n", thread_no, name, s_commonData, s_tlsData);
		fflush(stdout);

		//後続スレッド処理完了：待機スレッドを起床
```

```
            s_followFinished[thread_no] = E_PROCESS::FOLLOW_IDLE;

            //スレッド切り替えのためのスリープ
            Sleep(0);
      //    //スレッド切り替え
      //    SwitchToThread();//OSに任せて再スケジューリング
      //    Yield();//廃止
      }

      //終了
      printf("- end:(F)[%d]%s -¥n", thread_no, name);
      fflush(stdout);
      return 0;
}

//テスト
int main(const int argc, const char* argv[])
{
      //初期化
      for (int i = 0; i < s_followThreadNum; ++i)
            s_followFinished[i] = E_PROCESS::FOLLOW_IDLE;

      //スレッド作成
      static const int FOLLOW_THREAD_NUM = 5;
      static const int THREAD_NUM = 1 + FOLLOW_THREAD_NUM;
      static_assert(FOLLOW_THREAD_NUM <= FOLLOW_THREAD_MAX, "FOLLOW_THREAD_NUM is over.");
      s_followThreadNum = FOLLOW_THREAD_NUM;
      unsigned int tid[THREAD_NUM] = {};
      HANDLE hThread[THREAD_NUM] =
      {
            (HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 0, priorThreadFunc, "先行", 0, &tid[0]),
            (HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 0, followThreadFunc, "後続01", 0, &tid[1]),
            (HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 0, followThreadFunc, "後続02", 0, &tid[1]),
            (HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 0, followThreadFunc, "後続03", 0, &tid[1]),
            (HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 0, followThreadFunc, "後続04", 0, &tid[1]),
            (HANDLE)_beginthreadex(nullptr, 0, followThreadFunc, "後続05", 0, &tid[1]),
      };

      //スレッド終了待ち
      WaitForMultipleObjects(THREAD_NUM, hThread, true, INFINITE);

      //スレッドハンドルクローズ
      for (int i = 0; i < THREAD_NUM; ++i)
      {
            CloseHandle(hThread[i]);
      }

      //インターロック操作を大量に実行して時間を計測
      {
            LARGE_INTEGER freq;
            QueryPerformanceFrequency(&freq);
            LARGE_INTEGER begin;
            QueryPerformanceCounter(&begin);
            static const int TEST_TIMES = 10000000;
            s_followFinished[0] = E_PROCESS::FOLLOW_IDLE;
            for (int i = 0; i < TEST_TIMES; ++i)
            {
                  while (InterlockedCompareExchange(&s_followFinished[0], E_PROCESS::PRIOR_RUNNING,
                                                    E_PROCESS::FOLLOW_IDLE) != E_PROCESS::FOLLOW_IDLE){}
                  while (InterlockedCompareExchange(&s_followFinished[0], E_PROCESS::PRIOR_IDLE,
                                                    E_PROCESS::PRIOR_RUNNING) != E_PROCESS::PRIOR_RUNNING){}
                  while (InterlockedCompareExchange(&s_followFinished[0], E_PROCESS::FOLLOW_RUNNING,
                                                    E_PROCESS::PRIOR_IDLE) != E_PROCESS::PRIOR_IDLE){}
                  while (InterlockedCompareExchange(&s_followFinished[0], E_PROCESS::FOLLOW_IDLE,
                                                    E_PROCESS::FOLLOW_RUNNING) != E_PROCESS::FOLLOW_RUNNING){}
```

```
            }
            LARGE_INTEGER end;
            QueryPerformanceCounter(&end);
            float duration = static_cast<float>(static_cast<double>(end.QuadPart - begin.QuadPart)
                                                                    / static_cast<double>(freq.QuadPart));
            printf("Event * %d = %.6f sec¥n", TEST_TIMES, duration);
        }

        return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果）

```
- begin:(P)先行 -
- begin:(F)[1]後続02 -
- begin:(F)[0]後続01 -
- begin:(F)[2]後続03 -
- begin:(F)[3]後続04 -
- begin:(F)[4]後続05 -
(P)先行: [BEFORE] commonData=0, tlsData=0       ←先行スレッドが処理を開始
(P)先行: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1          （後続スレッドは、スレッド開始時から先行スレッドの処理終了を待機）
(F)[3]後続04: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0 ←先行スレッドの処理が終了すると、後続スレッドが一斉スタート
(F)[1]後続02: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
(F)[2]後続03: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
(F)[4]後続05: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
(F)[0]後続01: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
(F)[1]後続02: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(F)[0]後続01: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(F)[4]後続05: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(F)[2]後続03: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(F)[3]後続04: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(P)先行: [BEFORE] commonData=1, tlsData=1       ←後続スレッドの処理が全て終了すると、また先行スレッドがスタート
(P)先行: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(F)[2]後続03: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1 ←先行スレッドの処理が終了すると、また後続スレッドが一斉スタート
(F)[1]後続02: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1
(F)[4]後続05: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1
(F)[3]後続04: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1
(F)[0]後続01: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1
(F)[4]後続05: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(F)[3]後続04: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(F)[2]後続03: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(F)[1]後続02: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(F)[0]後続01: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(P)先行: [BEFORE] commonData=2, tlsData=2       ←後続スレッドの処理が全て終了すると、また先行スレッドがスタート
(P)先行: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(F)[3]後続04: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2 ←先行スレッドの処理が終了すると、また後続スレッドが一斉スタート
(F)[1]後続02: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2
(F)[0]後続01: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2
(F)[4]後続05: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2
(F)[2]後続03: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2
(F)[4]後続05: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(F)[0]後続01: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(F)[1]後続02: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(F)[2]後続03: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(F)[3]後続04: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(P)先行: [QUIT]                                 ←先行スレッド終了
- end:(P)先行 -
(F)[2]後続03: [QUIT]                            ←先行スレッドの終了に反応して後続スレッドも終了
(F)[3]後続04: [QUIT]
- end:(F)[2]後続03 -
- end:(F)[3]後続04 -
(F)[1]後続02: [QUIT]
(F)[0]後続01: [QUIT]
(F)[4]後続05: [QUIT]
- end:(F)[0]後続01 -
- end:(F)[4]後続05 -
```

```
- end:(F)[1]後続 02 -
Event * 10000000 = 0.247101 sec                ←1 千万回ループによる処理時間計測（4 回のステート更新）
```

● C++11 版：アトミック操作

C++11 のアトミック操作によるモニター。

かなり細かい操作が可能。メモリオーダー指定を使用したパフォーマンスチューニングの方法も後述する。

C++11 版のアトミック操作によるモニターのサンプル：

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include <thread>
#include <atomic>

#include <chrono> //時間計測用
#include <random> //乱数生成用

//スレッド情報
static const int FOLLOW_THREAD_MAX = 10;          //後続スレッド最大数
static volatile int s_followThreadNum = 0;        //後続スレッド数
static std::atomic<int> s_followThreadNo = 0;     //後続スレッド番号発番用
static volatile bool s_IsQuirProiorThread = false;//先行スレッド終了フラグ

//モニター用変数
enum E_PROCESS
{
      PRIOR_RUNNING, //先行処理実行中
      PRIOR_IDLE,    //先行処理アイドル状態
      FOLLOW_RUNNING,//後続処理実行中
      FOLLOW_IDLE,   //後続処理アイドル状態
};
static std::atomic<E_PROCESS> s_followFinished[FOLLOW_THREAD_MAX];//後続スレッド処理完了フラグ

//共有データ
static int s_commonData = 0;

//スレッド固有データ
__declspec(thread) int s_tlsData = 0;
//thread_local int s_tlsData = 0;//Visual C++ 2013 では thread_local キーワードが使えない

//【処理説明】
//先行スレッドが共有データを作成し、それが完了したら
//複数の後続スレッドがスタート。
//後続スレッドは共有データを読み込むだけのため、並列で動作。
//後続スレッドの処理が全て完了したら、また先行スレッドが稼働。
//以上を何度か繰り返し、先行スレッドが終了したら全スレッド終了。
//※メインループ⇒描画スレッドのようなリレー処理への応用を想定。

//先行スレッド
void priorThreadFunc(const char* name)
{
      //開始
      printf("- begin:(P)%s -¥n", name);
      fflush(stdout);

      //乱数
      std::random_device seed_gen;
      std::mt19937 rnd(seed_gen());
```

```
	std::uniform_int_distribution<int> sleep_time(0, 499);

	//初期化
	s_IsQuirProiorThread = false;//先行処理終了フラグ

	//処理
	static const int LOOP_COUNT_MAX = 3;
	int loop_counter = 0;
	while (1)
	{
		//全後続スレッド処理完了待ち
		for (int i = 0; i < s_followThreadNum; ++i)
		{
			E_PROCESS prev = E_PROCESS::FOLLOW_IDLE;
			while (!s_followFinished[i].compare_exchange_weak(prev, E_PROCESS::PRIOR_RUNNING))
			{ prev = E_PROCESS::FOLLOW_IDLE; }
		}

		//ループカウンタ進行＆終了判定
		if (loop_counter++ == LOOP_COUNT_MAX)
		{
			//処理終了
			printf("(P)%s: [QUIT]¥n", name);
			fflush(stdout);

			//先行スレッド終了フラグ
			s_IsQuirProiorThread = true;

			//先行スレッド処理完了：全待機スレッドを起床
			for (int i = 0; i < s_followThreadNum; ++i)
			{
				s_followFinished[i].store(E_PROCESS::PRIOR_IDLE);
			}

			break;
		}

		//データ表示（前）
		printf("(P)%s: [BEFORE] commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
		fflush(stdout);

		//データ取得
		int common_data = s_commonData;
		int tls_data = s_tlsData;

		//データ更新
		++common_data;
		++tls_data;

		//若干ランダムでスリープ（0～499 msec）
		std::this_thread::sleep_for(std::chrono::milliseconds(sleep_time(rnd)));

		//データ書き戻し
		s_commonData = common_data;
		s_tlsData = tls_data;

		//データ表示（後）
		printf("(P)%s: [AFTER]  commonData=%d, tlsData=%d¥n", name, s_commonData, s_tlsData);
		fflush(stdout);

		//先行スレッド処理完了：全待機スレッドを起床
		for (int i = 0; i < s_followThreadNum; ++i)
		{
			s_followFinished[i].stre(E_PROCESS::PRIOR_IDLE);
		}
```

```
            //スレッド切り替えのためのスリープ
            std::this_thread::sleep_for(std::chrono::milliseconds(0));
      //    //スレッド切り替え
      //    std::this_thread::yield();//OSに任せて再スケジューリング
      }

      //終了
      printf("- end:(P)%s -¥n", name);
      fflush(stdout);
}

//後続スレッド
void followThreadFunc(const char* name)
{
      //後続スレッド数カウントアップ
      const int thread_no = s_followThreadNo++;

      //開始
      printf("- begin:(F)[%d]%s -¥n", thread_no, name);
      fflush(stdout);

      //乱数
      std::random_device seed_gen;
      std::mt19937 rnd(seed_gen());
      std::uniform_int_distribution<int> sleep_time(0, 499);

      //後続スレッド処理完了：待機スレッドを起床
      s_followFinished[thread_no].store(E_PROCESS::FOLLOW_IDLE);

      //処理
      while (1)
      {
            //先行スレッド処理完了待ち
            E_PROCESS prev = E_PROCESS::PRIOR_IDLE;
            while (!s_followFinished[thread_no].compare_exchange_weak(prev, E_PROCESS::FOLLOW_RUNNING))
            { prev = E_PROCESS::PRIOR_IDLE; }

            //終了確認
            if (s_IsQuirProiorThread)
            {
                  //処理終了
                  printf("(F)[%d]%s: [QUIT]¥n", thread_no, name);
                  fflush(stdout);

                  break;
            }

            //データ表示（前）
            printf("(F)[%d]%s: [BEFORE] commonData=%d, tlsData=%d¥n", thread_no, name, s_commonData, s_tlsData);
            fflush(stdout);

            //データ取得
            int common_data = s_commonData;
            int tls_data = s_tlsData;

            //データ更新
            ++tls_data;

            //若干ランダムでスリープ（0～500 msec）
            std::this_thread::sleep_for(std::chrono::milliseconds(sleep_time(rnd)));

            //データ書き戻し
            s_tlsData = tls_data;
```

```
            //データ表示（後）
            printf("(F)[%d]%s: [AFTER]  commonData=%d, tlsData=%d¥n", thread_no, name, s_commonData, s_tlsData);
            fflush(stdout);

            //後続スレッド処理完了：待機スレッドを起床
            s_followFinished[thread_no].store(E_PROCESS::FOLLOW_IDLE);

            //スレッド切り替えのためのスリープ
            std::this_thread::sleep_for(std::chrono::milliseconds(0));
      //    //スレッド切り替え
      //    std::this_thread::yield();//OSに任せて再スケジューリング
      }

      //終了
      printf("- end:(F)[%d]%s -¥n", thread_no, name);
      fflush(stdout);
}

//テスト
int main(const int argc, const char* argv[])
{
      //スレッド作成
      static const int FOLLOW_THREAD_NUM = 5;
      static const int THREAD_NUM = 1 + FOLLOW_THREAD_NUM;
      static_assert(FOLLOW_THREAD_NUM <= FOLLOW_THREAD_MAX, "FOLLOW_THREAD_NUM is over.");
      s_followThreadNum = FOLLOW_THREAD_NUM;
      for (int i = 0; i < THREAD_NUM - 1; ++i)
            s_followFinished[i].store(E_PROCESS::FOLLOW_IDLE);
      std::thread thread_obj00 = std::thread(priorThreadFunc, "先行");
      std::thread thread_obj01 = std::thread(followThreadFunc, "後続01");
      std::thread thread_obj02 = std::thread(followThreadFunc, "後続02");
      std::thread thread_obj03 = std::thread(followThreadFunc, "後続03");
      std::thread thread_obj04 = std::thread(followThreadFunc, "後続04");
      std::thread thread_obj05 = std::thread(followThreadFunc, "後続05");

      //スレッド終了待ち
      thread_obj00.join();
      thread_obj01.join();
      thread_obj02.join();
      thread_obj03.join();
      thread_obj04.join();
      thread_obj05.join();

      //アトミック操作を大量に実行して時間を計測
      {
            auto begin = std::chrono::high_resolution_clock::now();
            static const int TEST_TIMES = 10000000;
            s_followFinished[0] = E_PROCESS::FOLLOW_IDLE;
            E_PROCESS prev = E_PROCESS::FOLLOW_IDLE;
            for (int i = 0; i < TEST_TIMES; ++i)
            {
                  while (!s_followFinished[0].compare_exchange_weak(prev, E_PROCESS::PRIOR_RUNNING)){}
                  while (!s_followFinished[0].compare_exchange_weak(prev, E_PROCESS::PRIOR_IDLE)){}
                  while (!s_followFinished[0].compare_exchange_weak(prev, E_PROCESS::FOLLOW_RUNNING)){}
                  while (!s_followFinished[0].compare_exchange_weak(prev, E_PROCESS::FOLLOW_IDLE)){}
            }
            auto end = std::chrono::high_resolution_clock::now();
            auto duration = static_cast<float>(static_cast<double>(
                        std::chrono::duration_cast<std::chrono::microseconds>(end - begin).count()) / 1000000.);
            printf("Watch-atomic * %d = %.6f sec¥n", TEST_TIMES, duration);
      }

      return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果）

```
- begin:(P)先行 -
(P)先行: [BEFORE] commonData=0, tlsData=0        ←先行スレッドが処理を開始
- begin:(F)[0]後続 01 -                            （後続スレッドは、スレッド開始時から先行スレッドの処理終了を待機）
- begin:(F)[1]後続 02 -
- begin:(F)[2]後続 03 -
- begin:(F)[3]後続 04 -
- begin:(F)[4]後続 05 -
(P)先行: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(F)[0]後続 01: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0  ←先行スレッドの処理が終了すると、後続スレッドが一斉スタート
(F)[2]後続 03: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
(F)[1]後続 02: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
(F)[4]後続 05: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
(F)[3]後続 04: [BEFORE] commonData=1, tlsData=0
(F)[1]後続 02: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(F)[0]後続 01: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(F)[4]後続 05: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(F)[3]後続 04: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(F)[2]後続 03: [AFTER]  commonData=1, tlsData=1
(P)先行: [BEFORE] commonData=1, tlsData=1        ←後続スレッドの処理が全て終了すると、また先行スレッドがスタート
(P)先行: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(F)[0]後続 01: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1  ←先行スレッドの処理が終了すると、また後続スレッドが一斉スタート
(F)[1]後続 02: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1
(F)[4]後続 05: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1
(F)[3]後続 04: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1
(F)[2]後続 03: [BEFORE] commonData=2, tlsData=1
(F)[1]後続 02: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(F)[4]後続 05: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(F)[2]後続 03: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(F)[3]後続 04: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(F)[0]後続 01: [AFTER]  commonData=2, tlsData=2
(P)先行: [BEFORE] commonData=2, tlsData=2        ←後続スレッドの処理が全て終了すると、また先行スレッドがスタート
(P)先行: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(F)[1]後続 02: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2  ←先行スレッドの処理が終了すると、また後続スレッドが一斉スタート
(F)[3]後続 04: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2
(F)[4]後続 05: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2
(F)[2]後続 03: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2
(F)[0]後続 01: [BEFORE] commonData=3, tlsData=2
(F)[3]後続 04: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(F)[4]後続 05: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(F)[1]後続 02: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(F)[2]後続 03: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(F)[0]後続 01: [AFTER]  commonData=3, tlsData=3
(P)先行: [QUIT]                                  ←先行スレッド終了
(F)[0]後続 01: [QUIT]                            ←先行スレッドの終了に反応して後続スレッドも終了
(F)[2]後続 03: [QUIT]
- end:(F)[0]後続 01 -
(F)[1]後続 02: [QUIT]
- end:(F)[2]後続 03 -
(F)[3]後続 04: [QUIT]
- end:(P)先行 -
(F)[4]後続 05: [QUIT]
- end:(F)[3]後続 04 -
- end:(F)[1]後続 02 -
- end:(F)[4]後続 05 -
Watch-atomic * 10000000 = 0.499029 sec           ←1 千万回ループによる処理時間計測（4 回のステート更新）
```

● C++11 版：アトミック操作のメモリオーダー指定

アトミック操作時にメモリオーダーを指定し、メモリバリアを明示的に使い分けた場合のサンプルを示す。

「アトミック操作を大量に実行して時間を計測」の一部だけ書き換える。

実はこれはパフォーマンスの差がほとんど得られなかったので、比較用に前述の「変数操作による排他制御：アトミック型」のサンプルに対してメモリオーダーを指定した場合の結果も示す。

C++11 版のアトミック操作によるモニターのサンプル（一部抜粋）：メモリオーダー追加

```
…（略）…
    while (!s_followFinished[0].compare_exchange_weak(prev, E_PROCESS::PRIOR_RUNNING)) {}
    while (!s_followFinished[0].compare_exchange_weak(prev, E_PROCESS::PRIOR_IDLE)) {}
    while (!s_followFinished[0].compare_exchange_weak(prev, E_PROCESS::FOLLOW_RUNNING)) {}
    while (!s_followFinished[0].compare_exchange_weak(prev, E_PROCESS::FOLLOW_IDLE)) {}
…（略）…
          ↓（メモリオーダー指定追加）
…（略）…
    while (!s_followFinished[0].compare_exchange_weak(prev, E_PROCESS::PRIOR_RUNNING, std::memory_order_relaxed,
                                                                                    std::memory_order_relaxed)) {}
    while (!s_followFinished[0].compare_exchange_weak(prev, E_PROCESS::PRIOR_IDLE, std::memory_order_relaxed,
                                                                                    std::memory_order_relaxed)) {}
    while (!s_followFinished[0].compare_exchange_weak(prev, E_PROCESS::FOLLOW_RUNNING, std::memory_order_relaxed,
                                                                                    std::memory_order_relaxed)) {}
    while (!s_followFinished[0].compare_exchange_weak(prev, E_PROCESS::FOLLOW_IDLE, std::memory_order_relaxed,
                                                                                    std::memory_order_relaxed)) {}
…（略）…
```

↓（実行結果）

```
Watch-atomic * 10000000 = 0.499029 sec
Watch-atomic * 10000000 (memory barrier free) = 0.489027 sec      ←メモリオーダー追加版（ほとんど効果なし）
```

C++11 版のアトミック操作によるロックのサンプル（一部抜粋）：

```
…（略）…
    while (s_lock.test_and_set()) {}
          s_lock.clear();
…（略）…
          ↓（メモリオーダー指定追加）
…（略）…
    while (s_lock.test_and_set(std::memory_order_seq_cst)) {}
          s_lock.clear(std::memory_order_release);
…（略）…
```

↓（実行結果）

```
Atomic * 10000000 = 0.126008 sec
Atomic * 10000000 (memolry barrier free) = 0.080004 sec     ←メモリオーダー追加版（効果あり）
```

↓（メモリオーダーの説明） ※サンプルプログラムに書いたコメントからの抜粋

```
//http://www.justsoftwaresolutions.co.uk/threading/intel-memory-ordering-and-c++-memory-model.html
//【メモリオーダーの意味】（x86 命令相当の場合）
//Memory Ordering,            Store,          Load
//--------------------------- --------------- ---------------
//std::memory_order_relaxed   MOV[mem],reg    MOV reg,[mem]
//                                                          ←メモリバリアなし：メモリ更新と読み込みの順序性を
//                                                            保証しない
//std::memory_order_consume   (n/a)           MOV reg,[mem]  (Data-Dependency Ordering)
//                                                          ←読み込み専用のメモリバリア（少し弱い）
//                                                            ※ストア処理で使うとエラー（交換可）
//std::memory_order_acquire   (n/a)           MOV reg,[mem]
//                                                          ←読み込み専用のメモリバリア
//                                                            ※ストア処理で使うとエラー（交換可）
//std::memory_order_release   MOV[mem],reg    (n/a)
//                                                          ←書き込み専用のメモリバリア
//                                                            ※ロード処理で使うとエラー（交換可）
```

```
//std::memory_order_acq_rel  MOV[mem],reg   MOV reg,[mem] (acquire & release)
//                                                        ←交換専用のメモリバリア
//                                                          ※ロード／ストア処理で使うとエラー
//std::memory_order_seq_cst  XCHG[mem],reg  MOV reg,[mem] (Sequential consistency)
//                                                        ←読み書きメモリバリア（強力）
//                                                          ※デフォルト（必ずしも低速というわけでではない）
//・Load  ... レジスタ ← メモリ
//・Store ... レジスタ → メモリ

//【処理サンプル】
//std::atomic<int> o(1);
//int v = 0;
//v = o.load(std::memory_order_relaxed);//OK
//v = o.load(std::memory_order_consume);//OK
//v = o.load(std::memory_order_acquire);//OK
////v = o.load(std::memory_order_release);//例外：Invalid Memory Order
////v = o.load(std::memory_order_acq_rel);//例外：Invalid Memory Order
//v = o.load(std::memory_order_seq_cst);//OK
//o.store(v, std::memory_order_relaxed);//OK
////o.store(v, std::memory_order_consume);//例外：Invalid Memory Order
////o.store(v, std::memory_order_acquire);//例外：Invalid Memory Order
//o.store(v, std::memory_order_release);//OK
////o.store(v, std::memory_order_acq_rel);//例外：Invalid Memory Order
//o.store(v, std::memory_order_seq_cst);//OK
//o.exchange(2, std::memory_order_relaxed);//OK
//o.exchange(3, std::memory_order_consume);//OK
//o.exchange(4, std::memory_order_acquire);//OK
//o.exchange(5, std::memory_order_release);//OK
//o.exchange(6, std::memory_order_acq_rel);//OK
//o.exchange(7, std::memory_order_seq_cst);//OK
//v = 7;
//v = o.compare_exchange_weak(v, 7, std::memory_order_relaxed, std::memory_order_relaxed);//条件成立時：OK
//v = o.compare_exchange_weak(v, 7, std::memory_order_consume, std::memory_order_consume);//条件成立時：OK
//v = o.compare_exchange_weak(v, 7, std::memory_order_acquire, std::memory_order_acquire);//条件成立時：OK
////v = o.compare_exchange_weak(v, 7, std::memory_order_release, std::memory_order_release);
//                                                  //条件成立時：Assertion failed! _Order2 != memory_order_release
////v = o.compare_exchange_weak(v, 7, std::memory_order_acq_rel, std::memory_order_acq_rel);
//                                                  //条件成立時：Assertion failed! _Order2 != memory_order_acq_rel
//v = o.compare_exchange_weak(v, 7, std::memory_order_seq_cst, std::memory_order_seq_cst);//条件成立時：OK
//v = o.compare_exchange_weak(v, 8, std::memory_order_relaxed, std::memory_order_relaxed);//条件不成立時：OK
//v = o.compare_exchange_weak(v, 8, std::memory_order_consume, std::memory_order_consume);//条件不成立時：OK
//v = o.compare_exchange_weak(v, 8, std::memory_order_acquire, std::memory_order_acquire);//条件不成立時：OK
////v = o.compare_exchange_weak(v, 8, std::memory_order_release, std::memory_order_release);
//                                                  //条件不成立時：Assertion failed! _Order2 != memory_order_release
////v = o.compare_exchange_weak(v, 8, std::memory_order_acq_rel, std::memory_order_acq_rel);
//                                                  //条件不成立時：Assertion failed! _Order2 != memory_order_acq_rel
//v = o.compare_exchange_weak(v, 8, std::memory_order_seq_cst, std::memory_order_seq_cst);//条件不成立時：OK

//【メモリ更新と読み込みの順序性保証】
//CPUのメモリバリアを使うかどうか？
//（例）下記のような処理で、スレッドBは変数 b をチェックしているにもか関わらず、
//      先に更新されたはずの変数 a の値が 12 と表示されないようなことが起こりえる。
//      これは、CPUにメモリバリア命令が出されて順序性を保証しないと、CPUの最適化により、
//      更新の順序が入れ替わることがあるため。（「アウト・オブ・オーダー実行」と呼ばれる最適化）
//[グローバル変数]
//volatile bool flg_a;
//volatile bool flg_b;
//volatile int val_a;
//volatile int val_b;
//[スレッドA]
//val_a = 123;
//flg_a = true;
//if(flg_b)
//    std::cout << val_b;
//[スレッドB]
```

```
//val_b = 789;
//flg_b = true;
//if(flg_a)
//    std::cout << val_a;
//※この問題は、必要な箇所で必要なメモリバリアを明示することで対処できる
//[グローバル変数]
//std::atmic<bool> flg_a;
//std::atmic<bool> flg_b;
//volatile int val_a;
//volatile int val_b;
//[スレッドA]
//val_a = 123;
//flg_a.store(true, std::memory_order_release);
//if(flg_b.load(std::memory_order_acquire))
//    std::cout << val_b;
//[スレッドB]
//val_b = 789;
//flg_b.store(true, std::memory_order_release );
//if(flg_a.load(std::memory_order_acquire))
//    std::cout << val_a;

//http://msdn.microsoft.com/ja-jp/library/hh874684.aspx
//template<class Ty>
//bool std::atomic::compare_exchange_***(Ty& Expected, Ty NewValue, std::memory_order SuccessOrder, std::memory_order
FailureOrder) _NOEXCEPT;
//・std::atomic::compare_exchange_weak()   ... *this  で弱いアトミックの比較および交換操作を実行します。
//・std::atomic::compare_exchange_strong() ... *this  に対してアトミックの比較および交換の操作を実行します。
//【共通】
//    このアトミックの比較および交換の操作では、*this に格納されている値と Expected を比較します。
//    値が等しい場合、操作は read-modify-write 操作を使用して、
//    SuccessOrder によって指定されたメモリ順序制約を適用して、
//    *this に格納された値を NewValue と置き換えます。
//    値が等しくない場合、操作は *this に格納されている値を使用して Expected を置き換え、
//    FailureOrder によって指定されたメモリ順序制約を適用します。
//
//    2 番目の memory_order がないオーバーロードは、SuccessOrder の値に基づく暗黙の FailureOrder を使用します。
//    SuccessOrder が memory_order_acq_rel の場合、FailureOrder は memory_order_acquire です。
//    SuccessOrder が memory_order_release の場合、FailureOrder は memory_order_relaxed です。
//    他のすべての場合、FailureOrder は SuccessOrder と等しくなります。
//
//    2 つの memory_order パラメーターを受け取るオーバーロードの場合、
//    FailureOrder の値は memory_order_release または memory_order_acq_rel ではない必要があり、
//    かつ SuccessOrder の値よりも強い値ではない必要があります。
//
//【compare_exchange_weak() のみの解説】
//    比較された値が同一の場合、弱いアトミック比較および交換操作は交換を実行します。
//    値が同じでない場合、操作による交換の実行は保証されません。
//
//【メソッドの使い分け】  http://d.hatena.ne.jp/yohhoy/20120725/p1
//・アルゴリズム上、CAS 操作をループで括る必要があれば compare_exchange_weak を利用する。
//  （例：一般的な Lock-Free アルゴリズム実装など）
//・アルゴリズム上の制約が無く、かつ spurious failure を許容しない場合は compare_exchange_strong を利用する。
//  （例：pthread spinlock 相当の trylock 操作実装 * 2）
//【メソッドの使い分け要約】
//・ループ処理は compare_exchange_weak で OK。
//・ループ処理以外の（交換の取りこぼしがあってはならない）場面では compare_exchange_strong を使用。
//【SuccessOrder と FailureOrder の使い分け要約】
//・SuccessOrder は、条件成立時の *this ← NewValue に用いられる。「読み書き可能」なメモリオーダーである必要がある。
//・FailureOrder は、条件不成立時の Expected ← *this に用いられる。「書き込み可能」なメモリオーダーである必要がある。
```

▼ Call Once

「Call Once」（コール・ワンス）により、多数のスレッドを実行した際に、最初の 1 回だけ実行したい処理を設定することができる。

初期化処理に有用であるため、いつインスタンス化されるかわからない「シングルトンパターン」に応用されたりしている。

CallOnce を活用したスレッドセーフなシングルトンパターンについては、別紙の「効率化と安全性のためのロック制御」にて詳述する。

● POSIX スレッドライブラリ版

POSIX スレッドライブラリ版の CallOnce。

POSIX スレッドライブラリ版の CallOnce のサンプル：

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include <pthread.h>
#include <unistd.h>

//CallOnce 制御用変数
pthread_once_t s_onceFlag = PTHREAD_ONCE_INIT;

//CallOnce 処理関数
void callOnceFunc()
{
	//CallOnce 処理開始
	printf("CallOnce 処理：初期化中...¥n");
	fflush(stdout);

	//1 秒スリープ
	sleep(1);

	//CallOnce 処理終了
	printf("CallOnce 処理：終了¥n");
	fflush(stdout);
}

//スレッド
void* threadFunc(void* param_p)
{
	//パラメータ受け取り
	const char* name = static_cast<const char*>(param_p);

	//開始
	printf("- begin:%s -¥n", name);
	fflush(stdout);

	//CallOnce 処理
	pthread_once(&s_onceFlag, callOnceFunc);

	//終了
	printf("- end:%s -¥n", name);
	fflush(stdout);
	return 0;
}
```

```
//テスト
int main(const int argc, const char* argv[])
{
	//スレッド作成
	static const int THREAD_NUM = 3;
	pthread_t pth[THREAD_NUM];
	{
		pthread_attr_t attr;
		pthread_attr_init(&attr);
		pthread_attr_setstacksize(&attr, 1024);//スタックサイズ指定
		pthread_create(&pth[0], &attr, threadFunc, (void*)"太郎");
		pthread_create(&pth[1], &attr, threadFunc, (void*)"次郎");
		pthread_create(&pth[2], &attr, threadFunc, (void*)"三郎");
	}

	//スレッド終了待ち
	for(int i = 0; i < THREAD_NUM; ++i)
	{
		pthread_join(pth[i], NULL);
	}

	return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果）

```
- begin:太郎 -
CallOnce 処理：初期化中...	←3 つスレッドを起動したが、CallOnce 関数は最初のスレッドだけが実行している
- begin:次郎 -
- begin:三郎 -
CallOnce 処理：終了		←CallOnce 関数完了まで、全てのスレッドがブロックされており、
- end:太郎 -			  完了後は一斉に動き出している
- end:次郎 -
- end:三郎 -
```

● C++11 版

C++11 版の CallOnce。内部的にはミューテックスで排他制御している。

通常関数の呼び出しだけではなく、関数オブジェクトやラムダ式にも使えるため、関数スコープの static 変数の初期化などにも安全に活用できる。

C++11 版の CallOnce のサンプル：

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include <thread>
#include <mutex>

#include <chrono> //時間計測用

//スレッド
void threadFunc(const char* name)
{
	//開始
	printf("- begin:%s -¥n", name);
	fflush(stdout);

	//CallOnce 制御用変数
	static std::once_flag s_onceFlag;
```

```
	//CallOnce 処理
	std::call_once(s_onceFlag, [&name]()
		{
			//ラムダ式で直接記述

			//CallOnce 処理開始
			printf("CallOnce 処理：初期化中(by %s)...¥n", name);
			fflush(stdout);

			//1 秒スリープ
			std::this_thread::sleep_for(std::chrono::seconds(1));

			//CallOnce 処理終了
			printf("CallOnce 処理：終了¥n");
			fflush(stdout);
		}
	);

	//終了
	printf("- end:%s -¥n", name);
	fflush(stdout);
}

//テスト
int main(const int argc, const char* argv[])
{
	//スレッド作成
	std::thread thread_obj1 = std::thread(threadFunc, "太郎");
	std::thread thread_obj2 = std::thread(threadFunc, "次郎");
	std::thread thread_obj3 = std::thread(threadFunc, "三郎");

	//スレッド終了待ち
	thread_obj1.join();
	thread_obj2.join();
	thread_obj3.join();

	return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果）

```
- begin:太郎 -
CallOnce 処理：初期化中(by 太郎)...   ←3 つスレッドを起動したが、CallOnce 関数は最初のスレッドだけが実行している
- begin:次郎 -                          ※POSIX 版と異なり、CallOnce 処理にパラメータを渡すことができている
- begin:三郎 -
CallOnce 処理：終了
- end:太郎 -                           ←CallOnce 関数完了まで、全てのスレッドがブロックされており、
- end:三郎 -                             完了後は一斉に動き出している
- end:次郎 -
```

● Windows SDK for Windows Vista 版

Windows Vista 以降には、「one-time initialization」という Call Once の仕組みが追加されている。

「InitOnceInitialize()」関数、「InitOnceExecuteOnce()」関数、「InitOnceCallback()」関数が追加されている。

サンプルプログラムは省略。

▼ 先物（promise と future）

結果を格納する予定の変数を先に別スレッドに渡し、結果が出た時点でそのスレッド側でも参照可能になる変数を扱う事ができる。

● C++11 版

C++11 版の先物。
前述の「C++11 の非同期関数」で紹介した「std::future<>」を用いる。
モニター処理の一種として活用できる。

C++11 版の先物のサンプル：

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include <future>
#include <thread>

#include <chrono> //時間計測用

//結果表示スレッド
void threadFunc(const char* name, std::shared_future<int> value)
{
	printf("%s: [BEFORE]¥n", name);
	fflush(stdout);

	printf("%s: [AFTER] value=%d¥n", name, value.get());//future::get() は、結果が格納されるまで処理がブロックされる
	fflush(stdout);
}

//テスト
int main(const int argc, const char* argv)
{
	//処理開始
	printf("main: [START]¥n");
	fflush(stdout);

	//先物変数の用意
	//※後で値を格納する変数
	std::promise<int> p_val;

	//結果待機オブジェクトを用意
	//※先物変数や非同期関数の結果を待機するオブジェクト。
	//※結果を受け取る側がスレッドの場合、shared_future クラスを使用。
	std::shared_future<int> f_val = p_val.get_future().share();

	//スレッド生成
	static const char* names[] = { "太郎", "次郎", "三郎" };
	for(auto name : names)
	{
		//スレッド生成
		std::thread th = std::thread(threadFunc, name, f_val);

		//スレッドの完了を待たないので、切り離しておく
		th.detach();
	}

	//1 秒スリープ
```

```
    printf("main: [sleep ...]¥n");
    fflush(stdout);
    std::this_thread::sleep_for(std::chrono::seconds(1));

    //値を格納
    //※この時、スレッド側の future::get() が反応する
    printf("main: [set_value()]¥n");
    fflush(stdout);
    p_val.set_value(123);

    //1 ミリ秒スリープ
    std::this_thread::sleep_for(std::chrono::milliseconds(1));

    //処理終了
    printf("main: [END]¥n");
    fflush(stdout);

    return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（実行結果）

```
main: [START]
太郎: [BEFORE]
次郎: [BEFORE]
三郎: [BEFORE]
main: [sleep ...]        ←メインループで 1 秒のスリープ（この間スレッドは 3 つともブロックされた状態）
main: [set_value()]
三郎: [AFTER] value=123 ←メインループで先物変数に値を格納すると、スレッドが一斉に動き出す
次郎: [AFTER] value=123
太郎: [AFTER] value=123
main: [END]
```

▼ 割り込み：シグナル

最後に Unix 特有の「シグナル」を説明する。

シグナルは基本的に割り込み処理である。例えば、[Ctrl]+[C]キーを押すと、プロセスに対して割り込みシグナル（SIGINT）が発行され、プログラムが中断される。

この時、プログラム中に SIGINT の割り込みハンドラ（関数）が設定されていると、割り込み発生時にハンドラ関数が呼び出され、中断を回避して独自の処理を行うことができる。

この仕組みを利用して、プログラム中で任意のタイミングでシグナルを発行し、ハンドラ関数に処理をリレーするプログラミング手法を使うことができる。

割り込み発生時は、スレッドの切り替えと同様のコンテキストスイッチが発生するが、専用のスレッドではなく、あくまでも割り込みであるため、その時動作中のスレッドのスタックが使用される。

割り込み処理中は、 malloc や printf などの「非割り込みセーフな関数」を使えないといった制約もある。

シグナルは、割り込みだけではなく、Windows のウインドウメッセージのような通知に用いることもできる。

「同期シグナル」と呼ばれる手法で、スレッドにシグナルをキューイングして、ループ処理で一つずつ処理することができる。この場合、「非割り込みセーフな関数」の制約は受けない。

この仕組みをスレッド間の通知処理に利用して同期を取ることができる。

シグナルハンドラにせよ、同期シグナルにせよ、本来 OS がプロセスの制御のために使用している仕組みなので、OS の影響を強く受け、自由度が少ないことには注意が必要。

● POSIX 版

POSIX 版のシグナル。
シグナルハンドラと、スレッドを用いた同期シグナルの両方のサンプルとしている。
アラームシグナルを利用し、1 秒ごとに定期起動する割り込み処理も実装している。
なお、Linux と Cygwin で大きく挙動が異なったため、両方の結果を記載しておく。

POSIX 版のシグナルのサンプル：

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <memory.h>

#include <pthread.h>
#include <unistd.h>

#include <signal.h>

#include <sys/time.h> //時間計測用

//共有データ
static int s_commonData = 0;

//スレッド固有データ
__thread int s_tlsData = 0;

//スレッド情報
pthread_t s_threadWathc;
pthread_t s_threadSyncSignal;

//受信シグナルバッファ（シグナルハンドラ内処理用）
//※シグナルハンドラ内では「非同期安全な関数」以外使用できない。malloc や prnitf も NG。
//  そのため、シグナルハンドラで受信したシグナルをプールし、
//  専用の処理スレッドに受け渡すようにする。
//※サンプルとしてややこしく見えるが、「受信シグナルバッファ」は、
//  あくまでも受信したシグナルを画面に表示するために作った仕組みであり、
//  シグナルハンドラーや同期シグナルを扱うために必須の処理ではない
struct SIG_INFO
{
      int sig;
      pthread_t pth;
      int tls;
      SIG_INFO& operator =(const SIG_INFO& o)
      {
            memcpy(this, &o, sizeof(*this));
            return *this;
      }
};
```

```
static const int SIGNAL_RCV_MAX = 5;       //最大受信シグナル数
static volatile int s_sigBuffCnt = 0;      //受信シグナル数
static SIG_INFO s_sigBuff[SIGNAL_RCV_MAX];//受信シグナルバッファ
static pthread_cond_t s_sigBuffC = PTHREAD_COND_INITIALIZER;  //受信シグナルバッファ用条件変数
static pthread_mutex_t s_sigBuffM = PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER;//受信シグナルバッファ用ミューテックス

//同期シグナル用のシグナルマスク
static sigset_t s_sigSet;

//シグナル受信バッファ登録
bool pushSigBuff(SIG_INFO& info)
{
      bool result = false;
      pthread_mutex_lock(&s_sigBuffM);
      if(s_sigBuffCnt < SIGNAL_RCV_MAX)
      {
            s_sigBuff[s_sigBuffCnt++] = info;
            pthread_cond_signal(&s_sigBuffC);
            result = true;
      }
      pthread_mutex_unlock(&s_sigBuffM);
      return result;
}
//シグナル受信バッファ取り出し
SIG_INFO popSigBuff(bool is_lock = true)
{
      SIG_INFO info = {-1, 0, 0};
      if(is_lock)
            pthread_mutex_lock(&s_sigBuffM);
      if(s_sigBuffCnt > 0)
      {
            info = s_sigBuff[0];
            --s_sigBuffCnt;
            for(int i = 0; i < s_sigBuffCnt; ++i)
            {
                  s_sigBuff[i] = s_sigBuff[i + 1];
            }
      }
      if(is_lock)
            pthread_mutex_unlock(&s_sigBuffM);
      return info;
}
//シグナル受信待ち受け
SIG_INFO watchSigBuff()
{
      //シグナル受信バッファへの登録待ち
      pthread_mutex_lock(&s_sigBuffM);
      while (s_sigBuffCnt == 0)
            pthread_cond_wait(&s_sigBuffC, &s_sigBuffM);
      SIG_INFO info = popSigBuff(false);
      pthread_mutex_unlock(&s_sigBuffM);
      return info;
}

//シグナル名取得
const char* getSigName(int sig)
{
#define CASE_TO_STR(x) case x: return #x; break
      switch(sig)
      {
      CASE_TO_STR(SIGINT);
      CASE_TO_STR(SIGTSTP);
      CASE_TO_STR(SIGCONT);
      CASE_TO_STR(SIGQUIT);
      CASE_TO_STR(SIGTRAP);
```

```
	CASE_TO_STR(SIGUSR1);
	CASE_TO_STR(SIGUSR2);
	CASE_TO_STR(SIGALRM);
	}
#undef	CASE_TO_STR
	static char unknown[32];
	sprintf(unknown, "(unknown:%d)", sig);
	return unknown;
}

//シグナル情報作成
SIG_INFO makeSigInfo(int sig)
{
	SIG_INFO info = {sig, pthread_self(), s_tlsData};
	return info;
}

//シグナル情報表示
void printSigInfo(SIG_INFO& info)
{
	printf("[%s] (thread=%x) tls=%d¥n", getSigName(info.sig), info.pth, info.tls);
	fflush(stdout);
}
void printSigInfo(int sig)
{
	SIG_INFO info = makeSigInfo(sig);
	printSigInfo(info);
}

//汎用シグナルハンドラ関数（スレッドではない）
//※シグナルハンドラは「プロセス」に対するシグナルをハンドリングする関数
void signalHandler(int sig)
{
	SIG_INFO info = makeSigInfo(sig);
	pushSigBuff(info);
}

//アラーム用シグナルハンドラ関数
void alarmFunc(int sig)
{
	if(s_tlsData++ < 10)
	{
		//汎用シグナルハンドラにシグナルを送る
		signalHandler(sig);

		//1秒後に再アラーム
		alarm(1);
	}
	else
	{
		//規定回数アラームを発行したら終了する（再アラームしない）

		//汎用シグナルハンドラにSIGINT（割り込み：CTRL + C）を送る
		signalHandler(SIGINT);
	}
}

//同期シグナルを送信
void sendSyncSignal(int sig)
{
	//同期シグナルスレッドが受け付け可能なシグナルを送信
	if(sigismember(&s_sigSet, sig))
	{
		printf("sendSyncSignal:[%s] (thread=%x) tls=%d¥n", getSigName(sig), pthread_self(), s_tlsData);
		fflush(stdout);
```

```
            //スレッドにシグナルを送信
            pthread_kill(s_threadSyncSignal, sig);
      }
}

//非同期シグナル受信バッファ監視スレッド
void* threadFuncWatch(void* param_p)
{
      //開始
      printf("- begin:threadFuncWatch(%x) -¥n", pthread_self());
      fflush(stdout);

      //非同期シグナルバッファ受信処理
      while(1)
      {
            //受信バッファが溜まるまで待機
            SIG_INFO info = watchSigBuff();

            //受信したシグナルを表示
            printSigInfo(info);

            //シグナルをリレーする
            sendSyncSignal(info.sig);

            //シグナルがSIGINTなら終了
            if(info.sig == SIGINT)
            {
                  //同期シグナルに SIGTRAP を送って終了をうながす
                  sendSyncSignal(SIGTRAP);
                  break;
            }
      }

      //若干スリープ
      sleep(1);

      //終了
      printf("- end:threadFuncWatch(%x) -¥n", pthread_self());
      fflush(stdout);
      return 0;
}

//同期シグナルスレッド
void* threadFuncSyncSignal(void* param_p)
{
      //開始
      printf("- begin:threadFuncSyncSignal(%x) -¥n", pthread_self());
      fflush(stdout);

      //joinせずにスレッドを終了させるために、スレッドをデタッチする
      //※スレッド生成時に最初からデタッチ状態の属性を与えることも可能。
      pthread_detach(pthread_self());

      //シグナルマスクをセット
      pthread_sigmask(SIG_BLOCK, &s_sigSet, NULL);
      //※これにより、ここで設定したシグナルは、このスレッドに
      //  キューイングされるようになり、sigwait() で取り出せるようになる。
      //【Linuxの挙動】
      //※プロセスに対するシグナルには反応しない。
      //【Cygwinの挙動】
      //※プロセスに対するシグナルに反応する。
      //  先に同じシグナルに対するシグナルハンドラが設定されていても、
      //  こちらが優先される。(両方は反応しない)
```

```
	//同期シグナル処理
	while(1)
	{
		//シグナル受信待ち
		//【Linux の挙動】
		//※マスク対象シグナル以外のシグナルが直接送られてくると
		//  普通に受信するものの、キューから削除されず復帰できない。
		//【Cygwin の挙動】
		//※マスク対象シグナル以外のシグナルが直接送られてくると
		//  sigwait() がエラーを返す。
		//  キューから削除されないので、復帰できない。
		int sig;
		if(sigwait(&s_sigSet, &sig) != 0)
		{
			fprintf(stderr, "sigwait() failed.¥n");
			fflush(stderr);
			break;
		}

		//カウンターを進める
		++s_tlsData;

		//シグナル表示
		printSigInfo(sig);

		//シグナルが SIGINT もしくは SIGTRAP なら終了
		if(sig == SIGINT || sig == SIGTRAP)
			break;
	}

	//終了
	printf("- end:threadFuncSyncSignal(%x) -¥n", pthread_self());
	fflush(stdout);
	return 0;
}

//テスト
int main(const int argc, const char* argv[])
{
	//開始
	printf("- begin:main(%x) -¥n", pthread_self());
	fflush(stdout);

	//同期シグナル（スレッド）用のシグナルマスク作成
	sigemptyset(&s_sigSet);
//	sigaddset(&s_sigSet, SIGINT); //割り込み（CTRL + C)
	sigaddset(&s_sigSet, SIGQUIT);//終了とコアダンプ（CTRL + ¥)
	sigaddset(&s_sigSet, SIGCONT);//停止していれば再開
	sigaddset(&s_sigSet, SIGTSTP);//端末からの中断シグナル（CTRL + Z)
	sigaddset(&s_sigSet, SIGTRAP);//トレース/ブレークポイントによるトラップ
//	sigaddset(&s_sigSet, SIGUSR1);//ユーザー定義シグナル 1
	sigaddset(&s_sigSet, SIGUSR2);//ユーザー定義シグナル 2

	//スレッド作成
	static const int THREAD_NUM = 1;
	pthread_t pth[THREAD_NUM];
	{
		pthread_attr_t attr;
		pthread_attr_init(&attr);
		pthread_attr_setstacksize(&attr, 1024);//スタックサイズ指定
		pthread_create(&s_threadSyncSignal, &attr, threadFuncSyncSignal, NULL);//同期シグナルスレッド
		pthread_create(&s_threadWathc, &attr, threadFuncWatch, NULL);  //非同期シグナル受信バッファ監視スレッド
	}

	//シグナルハンドラを登録　※非同期シグナル処理
```

```
	signal(SIGINT,  signalHandler);//割り込み (CTRL + C)
	signal(SIGQUIT, signalHandler);//終了とコアダンプ (CTRL + ¥)
	signal(SIGCONT, signalHandler);//停止していれば再開
	signal(SIGTSTP, signalHandler);//端末からの中断シグナル (CTRL + Z)
//	signal(SIGTRAP, signalHandler);//トレース/ブレークポイントによるトラップ
	signal(SIGUSR1, signalHandler);//ユーザー定義シグナル 1
//	signal(SIGUSR2, signalHandler);//ユーザー定義シグナル 2

	//アラーム用のシグナルハンドラを登録　※非同期シグナル処理
	signal(SIGALRM, alarmFunc);

	//1 秒後にアラーム
	//※アラームとスリープを同時に使用すると、sleep が効かないので注意！
	alarm(1);

	//スレッド終了待ち
	pthread_join(s_threadWathc, NULL);
	//※同期シグナルスレッドはデタッチしているので終了待ちしない

	//終了
	printf("- end:main(%x) -¥n", pthread_self());
	fflush(stdout);
	return EXIT_SUCCESS;
}
```

実行用のシェルスクリプト：※外部からのシグナル発行

```
./signal &		←プログラムを実行（プロセスを生成）
sleep 1
kill -USR1 %1	←1 秒後に SIGUSR1 シグナルをプロセスに送信
#この処理を Linux で実行するとプログラムが停止する
#sleep 1
#kill -USR2 %1	←1 秒後に SIGUSR2 シグナルをプロセスに送信
sleep 1
kill -TSTP %1	←1 秒後に SIGTSTP シグナルをプロセスに送信
sleep 1
kill -CONT %1	←1 秒後に SIGCONT シグナルをプロセスに送信
sleep 1
kill -QUIT %1	←1 秒後に SIGQUIT シグナルをプロセスに送信
#この処理を Linux で実行するとプログラムが停止する
#Cygwin で実行すると同期シグナルハンドラスレッドのみが停止する
#sleep 1
#kill -TRAP %1	←1 秒後に SIGTRAP シグナルをプロセスに送信
sleep 1
kill -INT %1	←1 秒後に SIGUINT シグナルをプロセスに送信
```

↓（実行結果：Linux）

```
- begin:main(2dce1720) -                          ←メインスレッド開始
- begin:threadFuncSyncSignal(2dcdf700) -          ←同期シグナルスレッド開始
- begin:threadFuncWatch(2d2de700) -               ←シグナル受信バッファ監視スレッド開始
[SIGUSR1] (thread=2dce1720) tls=0                 ←メインスレッドでシグナルハンドラが起動：SIGUSR1 受信
                                                    （同期シグナルスレッドが対応しないシグナル）
[SIGALRM] (thread=2dce1720) tls=1                 ←メインスレッドでアラームが起動
[SIGALRM] (thread=2dce1720) tls=2                 ←メインスレッドでアラームが起動
[SIGTSTP] (thread=2dce1720) tls=2                 ←メインスレッドでシグナルハンドラが起動：SIGTSTP 受信
sendSyncSignal:[SIGTSTP] (thread=2d2de700) tls=0  ←シグナル受信バッファ監視スレッドから、
[SIGTSTP] (thread=2dcdf700) tls=1                 ←　同期シグナルスレッドに SIGTSTP をリレー
[SIGALRM] (thread=2dce1720) tls=3                 ←メインスレッドでアラームが起動
[SIGCONT] (thread=2d2de700) tls=0                 ←シグナル受信バッファ監視スレッドでシグナルハンドラが起動：
                                                                                    SIGCONT 受信
sendSyncSignal:[SIGCONT] (thread=2d2de700) tls=0  ←シグナル受信バッファ監視スレッドから、
[SIGCONT] (thread=2dcdf700) tls=2                 ←　同期シグナルスレッドに SIGCONT をリレー
[SIGALRM] (thread=2dce1720) tls=4                 ←メインスレッドでアラームが起動
[SIGQUIT] (thread=2dce1720) tls=4                 ←メインスレッドでシグナルハンドラが起動：SIGQUIT 受信
sendSyncSignal:[SIGQUIT] (thread=2d2de700) tls=0  ←シグナル受信バッファ監視スレッドから、
```

```
[SIGQUIT] (thread=2dcdf700) tls=3                ←　同期シグナルスレッドに SIGQUIT をリレー
[SIGALRM] (thread=2dce1720) tls=5                ←メインスレッドでアラームが起動
[SIGINT] (thread=2dce1720) tls=5                 ←メインスレッドでシグナルハンドラが起動：SIGINT 受信
sendSyncSignal:[SIGTRAP] (thread=2d2de700) tls=0 ←シグナル受信バッファ監視スレッドから、
[SIGTRAP] (thread=2dcdf700) tls=4                ←　同期シグナルスレッドに SIGTRAP としてをリレー
- end:threadFuncSyncSignal(2dcdf700) -           ←同期シグナルスレッド終了
- end:threadFuncWatch(2d2de700) -                ←シグナル受信バッファ監視スレッド終了
- end:main(2dce1720) -                           ←メインスレッド終了
```

↓（実行結果：Cygwin）

```
- begin:main(80000038) -                         ←メインスレッド開始
- begin:threadFuncSyncSignal(80048308) -         ←同期シグナルスレッド開始
- begin:threadFuncWatch(80048398) -              ←シグナル受信バッファ監視スレッド終了
[SIGALRM] (thread=80000038) tls=1                ←メインスレッドでアラームが起動
[SIGUSR1] (thread=80000038) tls=1                ←メインスレッドでシグナルハンドラが起動：SIGUSR1 受信
                                                   （同期シグナルスレッドが対応しないシグナル）
[SIGALRM] (thread=80000038) tls=2                ←メインスレッドでアラームが起動
[SIGUSR2] (thread=80048308) tls=1                ←同期シグナルスレッドでシグナルを直接受信：SIGUSR2
                                                   （シグナルハンドラが対応しないシグナル）
[SIGALRM] (thread=80000038) tls=3                ←メインスレッドでアラームが起動
[SIGTSTP] (thread=80048308) tls=2                ←同期シグナルスレッドでシグナルを直接受信：SIGUSR2
                                                   （シグナルハンドラも登録されていたが、同期シグナル優先で
                                                    反応していないか、先にスレッドが処理してしまった）
[SIGALRM] (thread=80000038) tls=4                ←メインスレッドでアラームが起動
[SIGCONT] (thread=80048308) tls=3                ←同期シグナルスレッドでシグナルを直接受信：SIGCONT
                                                   （シグナルハンドラも登録されていたが、同期シグナル優先で
                                                    反応していないか、先にスレッドが処理してしまった）
 [SIGALRM] (thread=80000038) tls=5               ←メインスレッドでアラームが起動
[SIGQUIT] (thread=80048308) tls=4                ←同期シグナルスレッドでシグナルを直接受信：SIGQUIT
                                                   （シグナルハンドラも登録されていたが、同期シグナル優先で
                                                    反応していないか、先にスレッドが処理してしまった）
 [SIGALRM] (thread=80000038) tls=6               ←メインスレッドでアラームが起動
[SIGINT] (thread=80000038) tls=6                 ←メインスレッドでシグナルハンドラが起動：SIGINT 受信
sendSyncSignal:[SIGTRAP] (thread=80048398) tls=0 ←シグナル受信バッファ監視スレッドから、
[SIGTRAP] (thread=80048308) tls=5                ←　同期シグナルスレッドに SIGTRAP としてをリレー
- end:threadFuncSyncSignal(80048308) -           ←同期シグナルスレッド終了
- end:threadFuncWatch(80048398) -                ←シグナル受信バッファ監視スレッド終了
- end:main(80000038) -                           ←メインスレッド終了
```

● 【用語解説】リエントラント

「リエントラント」（reentrant）とは「再入可能」という意味である。

割り込み処理後に元の処理に戻っても問題を起こさない「割り込みセーフ」なプログラムの意味である。

マルチスレッド環境下で、メインスレッド以外のスレッドで実行しても問題のないプログラムのことを「スレッドセーフ」と呼ぶ。それに対して、割り込み処理で実行しても問題のないプログラムのことを「リエントラント」と呼ぶ。

メモリ確保やファイルアクセスなどの「非割り込みセーフ」な処理や、他の処理が使用するグローバル変数を更新するような処理があると「リエントラント」な処理ではなくなる。

なお、「リエントラント」の定義は、シングルスレッドプログラミング環境が起源である。

処理中にロックを行うスレッドセーフな処理も、リエントラントにはならないので注意が必要である。

ロック中のスレッドで割り込みが発生して、その割り込み処理の中でスレッドセーフな処理を呼び出し、またロックを取得しようとするとデッドロックが起きてしまう。スレッドセーフでかつリエントラントな処理とするには、ロックの前後でさらに割り込みの禁止／許可を行う必要もある。

割り込みは旧来からの技術ではあるが、非常に扱いにくい。OS の内部などでは頻繁に活用されているものの、よほど効果的な場面でもない限りは安易に用いないほうが良い。マルチスレッドが最適な状態になるように注力するためにも、リエントラントな処理は不要な状態が望ましい。

■ マルチスレッドで起こり得る問題②

ここまでは、同期の不備によって起こる問題と、それを解決する同期の手法を説明した。ここからは、その同期によって起こる問題を説明する。

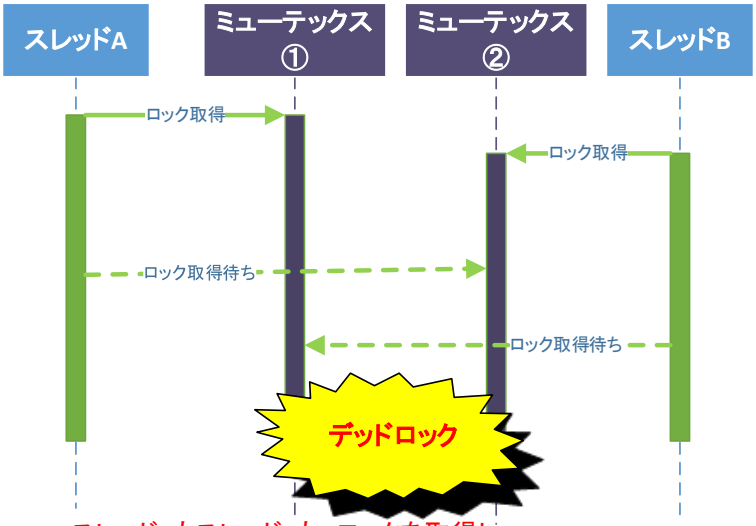
▼ デッドロック

「デッドロック」とは、その名の通り「死んだロック」のこと。解放される見込みがないロックのことである。

デッドロックはマルチスレッドプログラミングで最も典型的な問題の一つ。

● 【問題】相互ロック

二つのロックを用いてスレッドが互いにロックを取得し合うことで、スレッドが動かなくなってしまう問題である。



スレッドAもスレッドBも、ロックを取得したまま別のロックを取得しようとして、互いに待機状態になってしまった

● 【解決策】相互ロック

上記の例ではっきりとした問題なのは、ロック取得の順序が二つの処理で異なっていることである。

- スレッドA ..... ①のロック取得 → ②のロックを取得 の処理順序
- スレッドB ..... ②のロック取得 → ①のロックを取得 の処理順序

このように、ロック取得の順序が異なる処理が混在するのが典型的なデッドロックのパターンである。

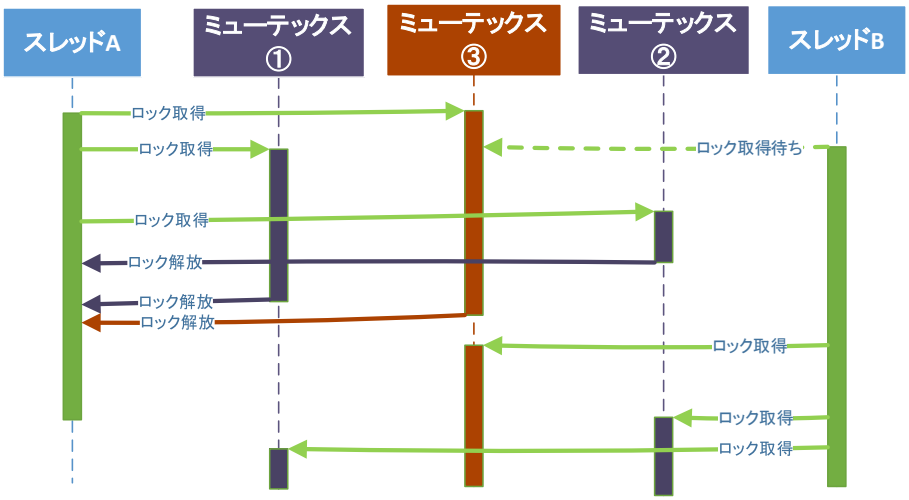
主な解決策は下記の通り。

- 【原則】ロック取得の順序を全ての処理で統一する。
- 【可能なら】複数のロック取得を同時に行わない。（それが可能かよく検討する）
- 【可能なら】ロックオブジェクトを一つに統一する。（それが可能かよく検討する）
- 【望ましくない解決策】ロック取得のタイムアウトやトライロック処理をつかってエラー処理する。（その後のつじつまあわせに要注意）

- 【最悪のケース：共通処理を利用する都合などから、どうしても順不同で複数のロック取得が必要な場合】

  必要なアトミック操作の範囲をよく考え直し、処理全体を包括する大きなロックをさらに追加する。（パフォーマンスの劣化も招くため、望ましくない解決策）

  - 上記の例の場合、さらに「ミューテックス③」を追加し、スレッド A もスレッド B も、一連の処理全体をミューテックス③でロックする。

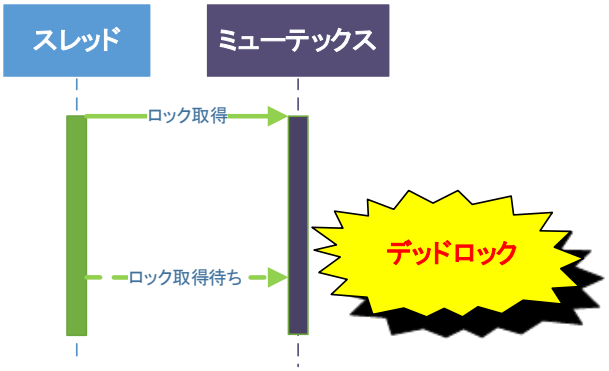


- 【POSIX スレッドライブラリ版】デッドロック検出属性付きのミューテックスを使用する。ただし、これは動作の重いデバッグ用。

● 【問題】再帰ロック

一つのスレッドが 2 回ロックを取得しようとすることで、スレッドが動かなくなってしまう問題である。

再帰ロックに対しては、各同期処理で挙動が異なっている。前述の「様々な同期手法」の一覧には、それぞれがどのような再帰ロックの挙動となっているかをまとめている。



同じミューテックスから2回ロックを取得しようとして、誰も終わらせられない待機状態になってしまった

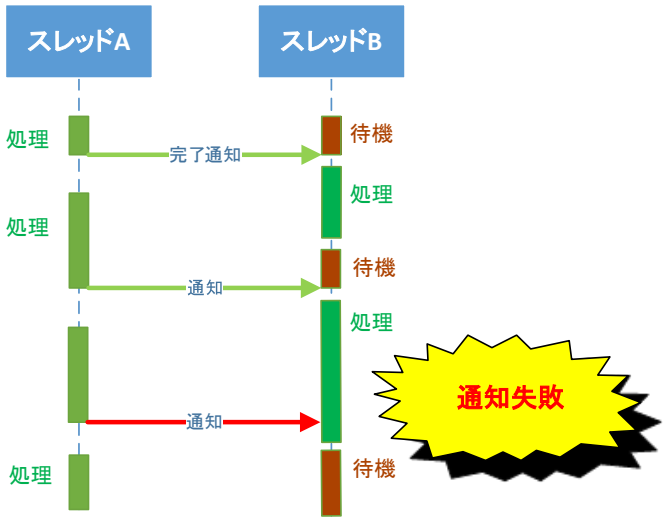
● 【解決策】再帰ロック

主な解決策は下記の通り。

- 【原則】再帰的なロック取得をしないようにする。
- 【望ましくない解決策】ロック取得のタイムアウトやトライロック処理をつかってエラー処理する。
  - その後のつじつまあわせに要注意。例えば、「トライロックでロックを取得できなかった場合は再帰ロックとみなして処理を行えるものとする」とした場合、その内側の処理でロックを解放した時点で、外側の処理が残っていてもロックが解放されてしまう。特に、Windows 版のミューテックスは再帰ロックを無視するので、デフォルトでこのような挙動となることに要注意。
- 【よく考えて用いるべき解決策】再帰ロック有効なロック手法を用いる。
  - POSIX スレッドライブラリ版ミューテックス＋再帰属性、Win32API のクリティカルセクション、C++11 版の再帰ミューテックスなどが対応している。

▼ 【モニターの問題】通知の取りこぼし

条件変数やイベントなどの「モニター」を使用する場合、適切に使用しないと、通知を取りこぼしてデッドロックと同じ状態に陥ることがある。



スレッドBは、待機前に来た通知に気が付かず、待機し続ける。
スレッドAがそれを気にせずに処理を続行するなら、次の通知を受け取ることができるが、その前に、スレッドBの処理完了を待つようなことがあると、デッドロックになる。

● 解決策

主な解決策は下記の通り。

- 【原則】条件変数を適切に使用し、待機前に通知があったと判断したら、待機処理を行わない。
- 【Windows の場合】Win32API の「イベント」は、待機前に通知（「シグナル状態」と呼ぶ）があったら、シグナル状態が継続して、その後の待機が即座に完了するのでこの問題は起こらない。ただし、Windows イベントには注意点も多い。
  - 「シグナル状態」（通知状態）と「非シグナル状態」（リセット状態）という単純なフラグしか扱えないので、かなり融通が利かない。モニター処理では、２ステップ以上のステートを扱いたいことも多いが、イベントで扱えるのは１ステップの状態通知のみ。
  - Windows イベントは、シグナル状態（通知）に反応して待機が解除されると、自動的に非シグナル状態（リセット）になる。この動作を自動で行わせず、手動操作にするオプションがあるが、通知側の処理間隔が十分長い場合以外はかなり危険。通知を受けてから手動リセットまでの間に次の通知が来ると、それを取り下げることになってしまう。手動リセットは使用禁止にすべき。
  - 待機中のスレッド全てにシグナル状態を通知する「PulseEvent」というメソッドを用いた場

合、条件変数と同じくその時待機中のスレッドしか反応しないので要注意。「PulseEvent」は使用禁止にした方が賢明。

- 【代替策】アトミック操作（インターロック操作）を使用してモニターする。
  - 待機時間が長いと分かっている処理なら、モニター処理ループ中に毎ループスリープを入れる。あまり長めのスリープにすると、通知に対して反応が遅れるので要注意。
  - 特にマルチコア環境で、かつ、モニターする処理時間が極めて短いとわかっている時は（例えば 0.1 ミリ秒未満）、条件変数よりも効果的な選択となる。

▼ 低速化

マルチスレッドプログラミングにおいて、深く考えずにコーディングしていると深刻な低速化を招く。主な問題の事例を示す。

- 【問題】多すぎるスレッド
  - 大量のスレッドを作っても高速化するわけではない。
  - むしろ、コンテキストスイッチの機会が増えて低速化する。
  - スレッドの生成自体も多少時間がかかる。
- 【問題】過剰なロック
  - データの不整合を恐れて、とにかくロックしすぎる。
  - 待機なしでロックを取得するだけでも、それなりの処理時間がかかる。
- 【問題】過剰な volatile 型修飾子、アトミック型
  - volatile 型修飾子、アトミック型を使いすぎて、コンパイラ・CPU の最適化が働かずに処理効率が悪い。

● 解決策

主な解決策は下記の通り。

- 【解決策】多すぎるスレッド
  - 並行処理の必要がないものまでスレッド化しない。
  - SPURS のようなジョブキューイング方式のシステムを作成し、並行処理の要求を待機させることが出来るようにし、対象ハードウェアに合わせて並行処理の数を制限する。
  - 【あまりよくない案】スレッドはとりあえず大量に作り、同時稼働数をセマフォで制限する。スレッドを大量生成することによるメモリの問題はあるが、手っ取り早い解決策には使える。
- 【解決策】過剰なロック
  - 可能な限りロックフリーな処理にする。

- ロックフリーな処理のためには、メモリバリアの考慮が不可欠なので、volatile 型修飾子やアトミック型を適切に利用する。
- スレッド間で共有するデータを完全に把握する。
- 配列処理可能なハードウェアか、待機処理が長いかなどを考慮し、ミューテックス、クリティカルセクション、スピンロック、リードライトロックを使い分ける。

➢ 【解決策】過剰な volatile 型修飾子、アトミック型

- volatile 型修飾子、アトミック型は、必要最小限に留める。
- 処理が長い場合、volatile 型修飾子やアトミック型の変数をそのまま演算せず、一旦ローカル変数にコピーして処理し、最後に書き戻す。これにより、最適化の恩恵を受けつつ、不整合をなくす。

▼ メモリ不足

スレッドや同期オブジェクトが多いと、それだけメモリも多く消費し、あまりに大すぎるとメモリ不足も引き起こす。

特にスレッドは一つ当たり数 KB～数 MB のメモリをスタック領域として使用するため、注意が必要。

※ 【正確性に欠ける情報】スレッドのスタック領域のサイズは、必要に応じて自動拡張される仕組みのものもある。これは恐らく 1MB などの割と大きな単位で行われるものと思われる。仮想メモリアドレスの仕組みを利用すると動的なメモリ拡張が可能になるが、それは割と大きなさいずでしかできないはず。ゲームプログラミングで使用するスタックは、全て明示的にサイズを指定した方が無難。4KB もあれば十分な処理も多い。

スレッド生成時の指定により、スレッドに応じてスタック領域のサイズが異なるため、大きなローカル変数を使用する関数を呼び出すとハングする可能性がある。

開発プロジェクト内で、「非スレッドセーフな共通関数」を明確にしておくことが重要。

▼ ゾンビスレッド（リソースの枯渇）

スレッドは適切な終了処理が必要である。それを行わないと、終了したはずのスレッドが残り続けてリソースの枯渇を招く。

【スレッドの終了を待つ場合】

➢ Windows ..... _beginthread()もしくは_beginthreadex()から返されたハンドルを使用して、 WaitForSingleObject() もしくは WaitForMultipleObjects() 関数で待ち、その後、

CloseHandle() でハンドルをクローズする。CreateThread() でスレッドを生成した場合も同様。

- POSIX ..... pthread_create() から返されたスレッド識別子を使用して、pthread_join() で待機する。
- C++11 ..... std::thread クラスのインスタンス生成でスレッドを生成し、.join() メソッドで待機する。

【スレッドの終了を待たない場合】

- Windows ..... スレッド側の処理で、処理終了時に _endthread() もしくは、_endthreadex() を実行する。スレッドを生成した側では CloseHandle() しない。なお、この場合も WaoitFor***() で待機可能。
- POSIX ..... pthread_create() から返されたスレッド識別子を使用して、pthread_detach() で待機（join）しないことを表明する。
- C++11 ..... std::thread クラスのインスタンス生成でスレッドを生成し、.detach() メソッドで待機（join）しないことを表明する。

■ 様々なデータ共有手法

スレッド間でのデータ共有の手法について説明する。

▼ volatile 型修飾子、アトミック型の使いどころ

ここまでに何度か説明してきたように、スレッド間で情報の共有を確実にするには、volatile 型修飾子付き変数やアトミック型を使うのが確実である。

しかし、これによってコンパイラの最適化や CPU の最適化の恩恵を受けることができず、パフォーマンスが劣化する。そのため、できる限り使わないようにした方が良い。

では、何をもってその使いどころとするのか？以下にその条件をまとめる。

なお、以下に示す内容は、本書でこれまでに各所で説明した内容と重複する。重要な内容であるため、改めてここにまとめ直す。

以下はあくまでもまとめ直しであるため、前述の内容のほうが、詳しい解説となっており、用語の解説も省いている。

● volatile 型修飾子の使いどころ

・ パフォーマンスを犠牲にしてでも安全性を保証したい箇所に用いる。
・ 一つの関数の処理の途中で、別スレッドによる値の変更が期待されるもの。

```
volatile int global_a; //グローバル変数

//関数
void func()
{
      …(処理)…
      if(global_x == 0)          ←参照①
      {
            …(処理)…
      }
      …(処理)…
      if(global_x == 1)          ←参照②
      {
            …(処理)…
            global_x = 2;        ←更新①
      }
      …(処理)…
      while(global_x == 2){}     ←参照③
      …(処理)…
      global_x ++;               ←更新②
      …(処理)…
}
```

- 「参照①」と「参照②」の間で、他のスレッドがグローバル変数 global_x を更新する可能性が期待されるなら、global_s に volatile 型修飾子を付けるべき。
- その可能性がない、もしくは、それを無視して良いのであれば、volatile 型修飾子は不要である。
- 「参照③」については、見た目には一つの処理だが、ループ処理中の変化が期待されるので、このような処理がある場合は、volatile 型修飾子を必要とする。
- 「更新①」については volatile 型修飾子の有無に依らず、値が更新されるので気にする必要はない。
- 「更新②」は参照を含んだ更新処理なので、やはり直近の参照処理との間に他のスレッドが値を更新することが期待されるなら、volatile 型修飾子が必要。
- 要するに、コンパイラの最適化によって、メモリの再参照が省略される可能性があることが問題なので、関数の途中で変数の値が変化することがない、もしくは、それが問題にならない限りは、volatiile 型修飾子は必要ない。

・ 使いどころのポイントは以上が全て。
・ volatile 型修飾子の回避策としては、グローバル変数の値が更新される前の処理と、更新された後の処理で、関数を切り分けるなら、なるべくそうしたほうがよい。その場合、（その一連の処理に関しては）volatile 型修飾子は必要ない。

- コードの可読性の観点からも、そのような構造化は望ましい。
- inline 関数の場合は最適化される可能性があるので、その限りではない。

● アトミック型の使いどころ

・ 基本的には、ミューテックスなどのロック機構を用いずに、アトミック操作（不可分操作）を保証し、良好なパフォーマンスを得たい場合に使用する。

- 当然、アトミック操作は、値をチェックして交換するだけなどのような、一回の操作で完結するものに限られる。
- 二つ以上の計算を要するような処理のアトミック性を保証するには、ミューテックスなどのロック機構を用いなければならない。

```
std::atomic<int> global_a; //グローバル変数

//関数
void func()
{
	int prev = 1;
	if(global_a.compare_exchange_weak(prev, 2)) ←比較＆交換処理
	{
		…(処理)…
```

- この「比較＆交換処理」は、「値が 1 なら 2 に更新して if 文の処理ブロックに入る」という処理。その途中で他のスレッドに割り込まれることがないことを保証する。
- 仮にこの「比較＆交換処理」がアトミック操作を保証しない場合（かつ、この処理が複数のスレッドで同時に稼働している場合）、複数のスレッドが同時に if 文のブロックに入り込む可能性がある。アトミック操作を保証している場合、そのようなことは起こらない。
- このような処理は、ロックを用いずにスレッド間の同期を保証するため、「ロックフリー」な処理と呼ばれ、マルチスレッド環境で良好なパフォーマンスを得ることができる。

・ 別スレッドによる変数の更新を監視し、同時に更新された他の変数の値も間違いなく参照したい場合。（ミューテックスなどを用いず、ロックフリーな処理として実現したい場合）

```
std::atomic<bool> global_a; //グローバル変数
int global_b; //グローバル変数

//スレッド①
	…(処理)…
	global_b = 123;
	global_a = true;
	…(処理)…

//スレッド②
	…(処理)…
	if(global_a.load() == true) ←アトミック型参照
	{
		int b = global_b; ←アトミック型の前に更新された値の参照
		…(処理)…
```

- global_a がアトミック型でなかった場合、CPU の「アウト・オブ・オーダー実行」という最適化により、global_a が true であっても、global_b がプログラムの順序通り、123 に更新されているとは限らない、という現象が起こり得る。
- この問題は、volatile 型修飾子や関数の切り分けによって回避可能な問題とは全く別であり、CPU 内の最適化によって起こる問題である。

- アトミック型は、CPU に対するメモリバリアを保証し、メモリ操作の順序性を保証する。
- この例の場合、global_a は一連の更新処理の最後に更新され、その変化を監視する処理となっているため、global_a に対するメモリバリアが指定されれば、その前の更新が保証される。
- 確実にこの問題を回避したい場合は、ミューテックスなどのロック機構を使用して変化を検出することである。ただし、それではパフォーマンスを損ねるため、ロックフリーを実現して高速な処理を行うために、厳密なメモリバリアをコントロールする。

▼ スレッドローカルストレージ（TLS）

スレットローカルストレージ（TLS）は、メモリ共有とは逆に、スレッド専用のデータを扱うために用いる。

● スレッドローカルストレージの使い方

まずはサンプルを示す。（C++11 のサンプル）

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#include <thread>

#define thread_local __declspec(thread)//C++11 の TLS 修飾子 Visual C++2013 でまだ使えないので偽装する

static volatile int s_data = 0;//通常変数
static thread_local int s_tlsData = 0;//TLS 変数

//スレッド関数
void threadFunc(const char* name)
{
	++s_data;
	++s_tlsData;
	printf("[%s] s_data=%d, s_tlsData=%d¥n", name, s_data, s_tlsData);
}

//C++11 thread テスト
int main(const int argc, const char* argv[])
{
	std::thread th1(threadFunc, "スレッド 1");
	std::thread th2(threadFunc, "スレッド 2");
	std::thread th3(threadFunc, "スレッド 3");
	th1.join();
	th2.join();
	th3.join();
	return EXIT_SUCCESS;
}
```

↓（処理結果）

```
[スレッド 1] s_data=1, s_tlsData=1
[スレッド 2] s_data=2, s_tlsData=1
[スレッド 3] s_data=3, s_tlsData=1
```

普通のグローバル変数である s_data は、その更新が他のスレッドにも反映されているのに対して、s_tlsData は、スレッドごとに個別の値を保持していることがわか

る。

このように、スレッドローカルストレージは、一件同じグローバル／静的変数ではあるものの、スレッド固有の値を扱うものとなる。

● スレッドローカルストレージの使いどころ

例えば、標準ライブラリの関数には、関数を実行した結果失敗した場合、詳しいエラー内容をグローバル変数 errno に格納するものがある。errno が完全なグローバル変数だと、他のスレッドの処理結果が影響してしまい、変数の値を信頼することができない。errno がスレッド毎に値を保証するなら、他のスレッドの動作状況を気にせず、errno に基づく処理を行うことができる。

このように、他のスレッドの処理が干渉しては困るが、どのスレッドからも実行可能な共通処理に、スレッドローカルストレージを使用することができる。

● スレッドローカルストレージの注意点①

スレッドの数だけ使用メモリが増大する点に注意が必要。

【補足】TLS のメモリがどこから取られるかは調査しきれなかった。各スレッドのスタック領域の上部から取られるような挙動を期待したが、Windows の TLSAlloc() という TLS 領域を手動で確保する関数の説明を確認する限り、（Windows に関しては）「TLS 記憶領域」というプロセス内の共通領域からスレッドに随時割り当てられるようである。（余談だが、あるゲーム機の処理では、ローダブルモジュール（DLL）を読み込んだ際のプログラム領域として、スタックの上部の領域が使用される仕組みとなっていた…と記憶している。）

Windows の TLS 領域は、LPVOID 型のデータ（つまり 32bit 値 or 64bit 値のデータ）が、最低でも TLS_MINIMUM_AVAILABLE 個（64 個）の配列（？）として構成される。配列要素の一つ一つを「スロット」と呼び、スレッドが作られるたびに空いているスロットをスレッドに割り当ててスレッド固有の変数として扱う。TLS_MINIMUM_AVAILABLE 個のスロットを超えたら、（おそらく）グローバルヒープ（もしくはメモリページ）などからメモリを確保して TLS 領域を拡張する。

ゲームプログラミングで TLS を使用する場合、グローバルヒープを極限まで削ってゲーム用に予約する可能性があるので、SDK のマニュアルをよく確認して挙動を確認したほうがよい。

● スレッドローカルストレージの注意点②

TLS 領域にアクセスする処理はひと手間かかるので、通常のグローバル変数に比べてアクセスが遅い点にも注意が必要である。

他のスレッドが干渉することがないため、volatile 型修飾子やアトミック型は不要だが、一旦ローカル変数に値をコピーして、演算後に書き戻すようにしたほうが良好なパフォーマンスが期待できる。

以下、通常変数と TLS でどれだけ処理に差が出るかを、逆アセンブルコードで示す。（あえて Debug ビルドのコードで示す。最適化されていない。）

元の処理コード：

```
void threadFunc(const char* name)
{
	++s_data;//通常変数
	++s_tlsData;//TLS 変数
```

逆アセンブルコード：通常変数の処理

```
    14:     ++s_data;//通常変数
001A34BE A1 C8 C2 1A 00       mov         eax,dword ptr ds:[001AC2C8h]  ←メモリから変数の値を読み出し
001A34C3 83 C0 01             add         eax,1                         ←インクリメント
001A34C6 A3 C8 C2 1A 00       mov         dword ptr ds:[001AC2C8h],eax  ←メモリに値を書き戻し
```

逆アセンブルコード：TLS 変数の処理

```
    15:     ++s_tlsData;//TLS 変数
001A34CB A1 D4 C2 1A 00       mov         eax,dword ptr ds:[001AC2D4h]  ←TLS 領域のインデックスを取得（？）
001A34D0 64 8B 0D 2C 00 00 00 mov         ecx,dword ptr fs:[2Ch]        ←現在のスレッド用の
                                                                            TLS 領域のオフセット取得（？）
001A34D7 8B 14 81             mov         edx,dword ptr [ecx+eax*4]     ←実際の TLS 領域のアドレスを取得（？）
001A34DA 8B 82 04 01 00 00    mov         eax,dword ptr [edx+104h]      ←TLS 領域から値を読み出し
001A34E0 83 C0 01             add         eax,1                         ←インクリメント
001A34E3 8B 0D D4 C2 1A 00    mov         ecx,dword ptr ds:[1AC2D4h]    ←（上記と同じ TLS 領域アドレス計算）
001A34E9 64 8B 15 2C 00 00 00 mov         edx,dword ptr fs:[2Ch]        ←（同上）
001A34F0 8B 0C 8A             mov         ecx,dword ptr [edx+ecx*4]     ←（同上）
001A34F3 89 81 04 01 00 00    mov         dword ptr [ecx+104h],eax      ←メモリに値を書き戻し
```

C++言語の処理コードは同じ一行でも、実際の処理コードにはかなりの差があることがわかる。

TLS の使いどころは厳選すべきである。

▼ プロセス間のデータ共有①：共有メモリ

スレッドどうしは直接メモリ空間を共有できるため、以上のような変数ベースのデータ共有で十分である。

プロセス間でデータ共有する場合、普通はメモリ空間を共有できないので、「共有メモリ」という特殊なメモリ操作を行う。

プロセス間通信は、ゲームプログラミングで必要となることはそうそうなさそうだが、

デバッグツールなどの使い道も考えられるので、簡単な技術紹介だけしておく。

● SystemV 共有メモリ

Unix で一般的な共有メモリの手法。

SystemV セマフォと同様に OS が管理し、使用状況を ipcs コマンドで確認することができる。

SystemV セマフォと同様に、特定のキー（ユニーク ID）を指定してメモリ空間を割り当てることにより、複数のプロセスで同じメモリへの読み書きを可能とする。

● メモリマップトファイル

Windows で一般的な共有メモリの手法。

本来は、ファイルをメモリのアドレス空間にマッピングして、ファイル操作系の API を使わずにファイルにアクセスする手法。メモリ（ポインタ変数）への直接アクセスがファイルの読み書きとなる仕組み。

ファイルを指定せずにメモリマップトファイルを使用すると、ファイルがないまま、メモリ空間へのアクセスが可能となる。

名前付きミューテックスなどと同様に、名前を付けて管理することができるため、他のプロセスが同じ名前でメモリマップトファイルをオープンすると、メモリ空間を共有できる。

▼ プロセス間のデータ共有②：プロセス間通信

プロセス間は、直接データを送り合うことでデータを共有する方法がある。
これも簡単な技術紹介だけしておく。

● シグナル

Unix でもっとも一般的なプロセス間通信の手法。

先に説明しているとおり、OS によるプロセス制御に用いられる。

● ウインドウメッセージ

Windows でもっとも手軽なプロセス間通信の手法。

Unix のシグナルと同様に、OS によるプロセス制御に用いられるが、割り込み方式ではなく、キューイングされたメッセージを逐一処理する。

マウスクリックやキー入力、アプリケーションのアクティブ化といった非常に多数オンイベントがメッセージとして扱われる。任意のメッセージや不定長のデータを送信することができる。

通信相手のプロセスのウインドウハンドルさえわかれば、どんなプロセス（ウインドウ）に対しても、メッセージを送ることが可能。

● パイプ

Unix でも Windows（MS-DOS）でも標準的なプロセス間通信の手法。

基本的には､親プロセスと子プロセスの二つのプロセス間で通信するための仕組み。

親プロセスの標準出力が子プロセスの標準入力に送られる。基本的に親プロセスから子プロセスへのシーケンシャルなデータ通信である。

Windows では､親プロセスが子プロセスを生成する際に､パイプによる連結を指定することができる。

このプロセス間通信はコマンドプロンプト上でも簡単に扱うことができる。

以下、Unix 系のコマンドを使ったパイプによるプロセス間通信の例を示す。

パイプを使う前：(cat コマンドの実行)

```
$ cat test.txt
すずき      ←ファイルの内容が、cat コマンドの標準出力（画面）に出力。
いしい
さとう
たなか
やまもと
なかむら
こばやし
いとう
やまだ
よしだ
```

パイプを使用：(cat コマンドと sort コマンドを連結)

```
$ cat test.txt | sort   ←「|」がパイプ
いしい      ←パイプ「|」により、
いとう        cat コマンドがファイルの内容を標準出力に出力すると、
こばやし      それが sort コマンドの標準入力に送られる。
さとう        sort コマンドは標準入力を処理して、その結果を
すずき        標準出力（画面）に出力。
たなか
なかむら
やまだ
やまもと
よしだ
```

● 名前付きパイプ（Uninx）

Unix の名前付きパイプ。Windows の同名技術とは全く別もの。

パイプ「|」の代わりに mkfifo コマンドで作成したファイル(例えば /tmp/test_pipe といったファイルを作る）にリダイレクトすることで､パイプと同様のシーケンシャル

な通信を行う。

名前付きパイプを使用：（cat コマンドと sort コマンドを連結）

```
$ mkfifo /tmp/test_pipe              ←名前付きパイプを作成
$ cat test.txt > /tmp/test_pipe &    ←「>」が標準出力へのリダイレクト    「&」はプロセスの終了を待たずに
                                                                        バックグラウンド実行させる指定
$ sort < /tmp/test_pipe              ←「<」が標準入力へのリダイレクト
いしい
いとう
こばやし
さとう
すずき
たなか
なかむら
やまだ
やまもと
よしだ
$ rm /tmp/test_pipe                  ←名前付きパイプを削除
```

▼ プロセス間のデータ共有③：ネットワーク通信

ネットワーク通信もまたプロセス間通信の手法となりえる。
これも簡単な技術紹介だけしておく。

● 名前付きパイプ（Windows）

Windows 用のプロセス間通信およびネットワーク通信の手法。

「パイプ」と名がつくものの、パイプとは別物であり、Unix の名前付きパイプとも全く異なる。

性質としては、ソケット通信に近い。

「¥¥.¥（パイプ名）」といったファイルパスのような形式で名前を付けて、パイプと同様のシーケンシャルなデータ通信を行う。パイプと異なり、双方向通信が可能である。

「¥¥（コンピュータ名）¥（パイプ名）」という UNC（Universal Naming Convention = ネットワークパス）を用いることで、ネットワーク通信を介したデータ通信が可能。

通信プロトコルを完全に隠ぺいし、かつ、プロセス間通信もネットワーク通信も全く同じ手続きで行える、きわめて抽象度の高い通信手法。

● ソケット通信

ソケット通信。

TCP/IP 環境で一般的なネットワーク通信手段。

ローカルアドレス（127.0.0.1）を使ってプロセス間通信に使用しても問題ない。

● メッセージキューサービス

MSMQ などのメッセージキューサービスアプリケーション（バックグラウンドプロセス）を介して、ネットワーク越しのプロセス間通信を行う手法。

メッセージキューアプリケーションがメッセージの永続化（ハードディスクへの保存）を行うので、PC を再起動しても未処理のメッセージが失われず、過去の通信状態も確認できる。

大掛かりな仕組みのため、あまり気軽に用いられるものではない。また、あまりに頻繁なメッセージには対応しきれない。需要なメッセージを確実に送受信しなければならないクリティカルな業務に使用する。

■ 並列処理の活用

最後に、大規模な並列処理を紹介する。

近年「ビッグデータ」という言葉がはやっているように、各所に膨大なデータがある。

この膨大なデータを効率よく処理するには並列処理が欠かせない。

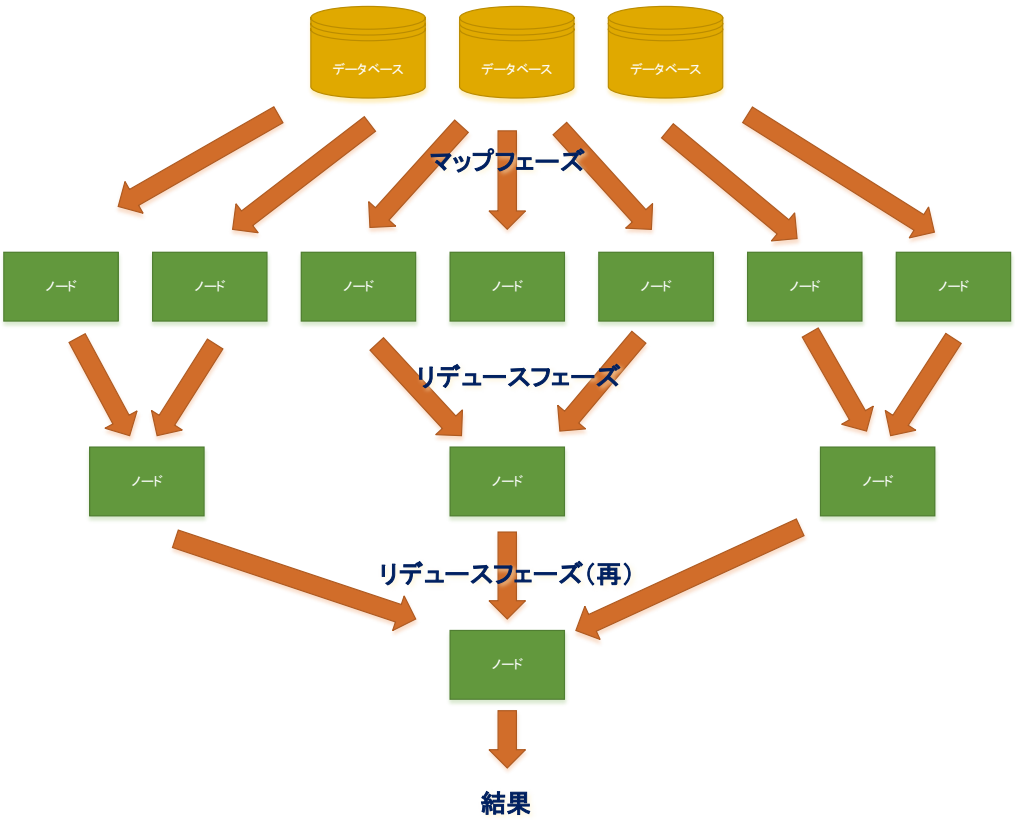
ゲーム制作でもまったく無縁の話ではないため、参考までに簡単な技術的説明を記載しておく。

▼ MapReduce

MapReduce（マップ・リデュース）は、Google によって導入された、分散コンピューティングのプログラミングモデルである。

単純なイメージとして、「Map フェーズ」で大量のノード（PC もしくは演算装置）に分散し、「Reduce フェーズ」で段階的にデータを集約して結果を得る手法である。

MapReduce の大雑把なイメージ：



※かなり大雑把なイメージであり、実際の処理モデルのイメージとしては適切なものではない。

もう少し具体的な処理のイメージを説明する。

同様の処理モデルを適用したサンプルプログラムを、本書中の「C++11 版非同期関数」で示しており、その中のソート処理に適用している。

STL の<algorithm>が実装する std::sort() 関数はクイックソートである。クイックソートの処理時間は　平均＝O(n log n)、最悪=O(n^2)　と言われていることから、件数が多ければ多いほど、処理時間は指数関数的に増大する。

この計算を高速化するために、「マップフェーズ」として、データを 4 分割してそれぞれクイックソートした後、次に「リデュースフェーズ」としてマージソート（std::inplace_merge）を使用して 2 段階に分けて集約している。

件数が多いため、このような回りくどい処理が効果を出していることが確認できる。

このような処理モデルは、大量の演算装置を持つ GPGPU を効果的に活用する上でも効果的なのではないかと考える。

● 耐障害性／スケールアウト

余談になるが、MapReduce には、高速化以外の重要な考え方がある。

それは、「耐障害性」である。

一部の処理ノード（コンピュータ）が障害（故障や電源切断など）によって計算結果を出せなかった場合、別のノードに再スケジューリングすることで処理を完了させることができる。

また、単純にノードを増やせば性能を向上させることができる構造のため、簡単に「スケールアウト」することができる。

「スケールアウト」とは、コンピュータ（主にサーバー）を増やす事で性能を向上させることを意味する用語である。

「スケールアウト」するには、あらかじめそのように設計されたシステムでなければならず、そうでないものは性能向上のために「スケールアップ」を行う事になる。

「スケールアップ」とは、メモリの増強や高性能なコンピュータへの入れ替えで性能を向上させることを意味する用語である。

■■以上■■

■ 索引

A

APU 13, 19
ATI Stream 66

B

BIOS 9

C

C# 61
CallOnce 183
  C++11 版 184
  POSIX スレッドライブラリ版 183
CAS 169
Cell 19
  PPE 12, 19
  SPE 19
Concurrent 5
CPU 12
  CISC 13
  RISC 13
  ソケット 15
CUDA 66

D

DirectCompute 66
DMAC 19

F

fork 33
fork-join モデル 33
FPU 16

G

GCC
  --fstack-usage オプション 30
GPGPU 65
GPU 17
GPU メモリ 19

H

Hadoop 67
HT 15

I

ipcs コマンド 120, 208
ISR 69

L

Life with Playstation 68
Lua 61

M

MapReduce 61, 211
MAP ファイル 26

MIMD 16
MISD 16
MMX 16
MPU 12

O

objdump コマンド 25
OpenCL 66
OpenMP 52
ORB 67
OS 5

P

Parallel 5

R

RAM 17
ROM 17
RPC 67

S

SIMD 16
SISD 16
size コマンド 25
SPU 20
  LS 20
SPURS 65
Squirrel 61
SSE 16

T

TLS 205

V

volatile 型修飾子 76, 103, 203
VRAM 19
VU 16

Y

Yield 82

あ

アウト・オブ・オーダー実行 77
アセンブラ 27
アトミック型 79, 204
アトミック操作 73, 109
  C++11 版 111, 113
アプリケーション 8

い

イベント 158
  WIN32API 版 158
  WIN32API 版名前付きイベント 163
イベントコールバック 70
イン・オーダー実行 78
インターロック操作 109
  WIN32API 版 109
インラインアセンブラ 106

う

ウインドウメッセージ 208
ウェイトフリー 79

え

演算装置 13

か

カーネル時間 9
カーネル 5
　ハイブリッドカーネル 7
　マイクロカーネル 7
　モノリシックカーネル 6

き

機械語 27
キャッシュメモリ 18
共有メモリ 207

く

クライアント・サーバー 66
クラウド 67
ぐりっど 67
グリッド・コンピューティング 20
クリティカルセクション 100
　WIN32API 版 101

こ

コア 13
コプロセッサ 16
コルーチン 61
コンテキスト 31
コンテキストスイッチ 9, 30, 69
コンペア・アンド・スワップ 169
　C++11 版アトミック操作 175
　WIN32API 版インターロック操作 170

さ

サーバー 20
サービス 12
再帰ロック 198
先物 186
　C++11 版 186
サスペンド 61
サンプルプログラム 1

し

シグナル 187, 208
　POSIX 版 188
シグナル
　同期シグナル 188
システムコール 8, 68, 71
条件変数 139
　C++11 版 119, 145, 150, 185
　POSIX スレッドライブラリ版 139
シングルコア 13
シングルプロセッサ 13

す

スケールアウト 213
スケールアップ 213
スタックオーバーフロー 29
スタックフレーム 29
スタックポインタ 29
スタック領域 28
スピンロック 98
　POSIX ライブラリ版 98
スリープ 81, 82
スレッド 2, 11
　C++11 版 47
　POSIX スレッドライブラリ版 37
　WIN32API 版 42
　スケジューリング 31
　優先度 31

スレッドローカルストレージ 205

せ

セマフォ 120
POSIX スレッドライブラリ版..... 124
POSIX 版名前付きセマフォ 128
SystemV 版..... 120
WIN32API 版 131
WIN32API 版名前付きセマフォ 135

そ

ソケット通信 210

た

耐障害性 213
タイムスライス..... 4
クォンタム..... 31

て

デーモン 12
デッドロック 195
デバイスドライバ..... 6, 8

と

同期..... 73
動作モード..... 8
カーネルモード..... 8
ユーザーモード..... 8

な

名前付きパイプ(Unix) 209
名前付きパイプ(Windows) 210

に

ニーモニック 27

ね

ネットワーク通信.....210

は

バイオス 9
排他制御 84
ハイパースレッディング・テクノロジー 15
パイプ.....209
バリア.....150
POSIX スレッドライブラリ版 151

ひ

ビジーウェイト 81
非同期関数
C++11 版 57

ふ

ファイバースレッド 61
不可分操作 73
浮動所数点演算装置 16
プログラム 27
プログラムカウンタ 27
プロセス 10
子プロセス 10
バックエンド.....12
フロントエンド 12
マルチプロセス 20
プロセス間通信 208
プロセッサ 13

へ

平行 5
並列 5

ま

マシン語 27
マルチコア 14
　ヘテロジニアスマルチコア 15
　ホモジニアスマルチコア 15
マルチタスク 3
　ノンプリエンプティブ 3, 61
　プリエンプティブ 4
マルチプロセッサ 14

み

ミューテックス 87
　C++11 版 95
　POSIX スレッドライブラリ版 87
　WIN32API 版 90
　WIN32API 版名前付きミューテックス 92

め

メインメモリ 17
メッセージキューサービス 211
メニーコア時代 22
メモリオーダー 179
メモリ空間 11
メモリ構造 23
メモリ操作命令 78
　ストア 78
　メモリバリア 78
　メモリフェンス 78
　ロード 78
メモリマップトファイル 208

も

モニター 138

ゆ

ユニファイドメモリ 19

ら

ラムダ式 57

り

リード・ライトロック 114
　POSIX スレッド版 114
リエントラント 194

れ

レジスタ 18

ろ

ローカル変数 28
ロック 72, 84
ロックフリー 78
論理プロセッサ 14

わ

割り込み 68
　SWI 70
　V-SYNC 割り込み 68
　シグナル 71
　垂直同期割り込み 68

ソフトウェア割り込み 70
タイマー割り込み 71
ハードウェア割り込み 70
割り込みサブルーチン..... 69
割り込みハンドラ..... 69

マルチスレッドプログラミングの基礎

以　上