

マルチスレッドプログラミングの基礎

－ スレッド制御のための基礎 －

2014 年 1 月 20 日 初版

板垣 衛

■ 改訂履歴

版	リリース	担当	改訂内容
初版	2014 年 1 月 20 日	板垣 衛	(初版)

■ 目次

■ 概略	1
■ 目的	1
■ スレッドの仕組み	1
▼ マルチタスク	1
● ノンプリエンプティブなマルチタスク	2
● プリエンプティブなマルチタスク	3
● タイムスライス	3
● 並行と並列	4
▼ OS とカーネル	4
● モノリシックカーネル	5
● マイクロカーネル	6
● ハイブリッドカーネル	6
● カーネルモードとユーザーモード	7
● BIOS	7
▼ プロセスとスレッド	8
● プロセス	8
● スレッド	9
● メモリ空間の保護	9
● プロセスの終了時のリソースの解放	9
● サービス／デーモン	10
■ スレッドとハードウェア	10
▼ CPU	10
● CISC と RISC	11
▼ シングルプロセッサ／シングルコア	11
▼ マルチプロセッサ／マルチコア／論理プロセッサ	12
▼ ハイパースレッディング	13
▼ コプロセッサ	13
▼ 浮動小数点演算装置（FPU）／SIMD	13
● SIMD／MIMD／SISD／MISD	14
▼ GPU	14
▼ メインメモリ	14
▼ RAM と ROM	14

▼ キャッシュメモリ	15
▼ レジスタ	15
▼ GPU メモリ／ユニファイドメモリ	16
▼ DMAC	16
▼ Cell 16	
▼ サーバー	17
■ マルチスレッドの意義	17
▼ マルチプロセス	17
▼ マルチスレッドの意義①：同時実行	18
▼ マルチスレッドの意義②：同時接続	18
▼ マルチスレッドの意義③：高速化	18
▼ ゲームの並行処理	19
▼ ゲームでのスレッド活用	19
■ プログラムの動作原理	20
▼ メモリ構造	20
▼ 機械語／アセンブラ／プログラムカウンタ	24
▼ スタック領域	25
▼ スレッドとコンテキストスイッチ	27
▼ スレッドスケジューリング	28
▼ スレッド優先度	28
■ 様々なスレッド	28
▼ fork (Unix 系)	28
▼ Posix スレッドライブラリ (Unix 系)	32
▼ Windows スレッド (Windows 系)	37
▼ OpenMP	42
▼ ファイバースレッド／コルーチン	47
▼ SPURS／GPGPU／DirectCompute／CUDA／ATI Stream／OpenCL	51
▼ クライアント・サーバー／クラウド／グリッド／RPC／ORB／Hadoop	52
▼ 割り込み／システムコール	54
● 割り込みの具体例：垂直同期割り込み	54
● 割り込みとコンテキストスイッチ、スタック領域の配慮	55
● 割り込みハンドラ／割り込みサブルーチン (ISR)	55
● 割り込みハンドラの処理	56
● 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	56

● シグナル	57
● タイマー割り込み	57
● システムコール	57
■ マルチスレッドで起こり得る問題①	58
▼ 不完全な不可分操作によるデータ破損	58
▼ スレッド間の情報共有の失敗	58
■ スレッドの同期	58
▼ ビジーウェイト	58
▼ スリープウェイト	58
▼ スリープ/Yield	59
■ 様々な同期手法	59
▼ Volatile 型変数	59
▼ スピンロック	59
▼ ミューテックス	59
▼ 軽量ミューテックス	59
▼ 名前付きミューテックス	59
▼ クリティカルセクション	59
▼ インターロック操作	59
▼ セマフォ/名前付きセマフォ	60
▼ モニター	60
● 条件変数	60
● イベント/名前付きイベント	60
▼ シグナル	60
■ マルチスレッドで起こり得る問題②	60
▼ デッドロック	60
● 相互ロック	60
● 自己ロック	60
▼ 低速化	60
▼ モニターのタイミングずれ	61
▼ ゾンビスレッド	61
■ 様々なデータ共有手法	61
▼ グローバル変数/スタティック変数	61
▼ スレッドローカルストレージ (TLS)	61

▼ 共有メモリ.....	61
▼ メモリマップトファイル.....	61
▼ メッセージ.....	61
▼ メッセージキュー	61
▼ パイプ.....	62
▼ 名前付きパイプ.....	62
▼ ソケット	62
<hr/>	
■ その他のスレッド制御.....	62
▼ スレッド優先度.....	62
▼ イールド (Yield)	62
▼ Map Reduce 理論	62

■ 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を解説する。

かなり広範囲な解説を記述しているのは、そのところどころにスレッドの理解につながる要素があるためである。周辺知識を一まとめに解説する。

■ 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、最適なマルチスレッドプログラミングを行えるようにすることを目的とする。

■ スレッドの仕組み

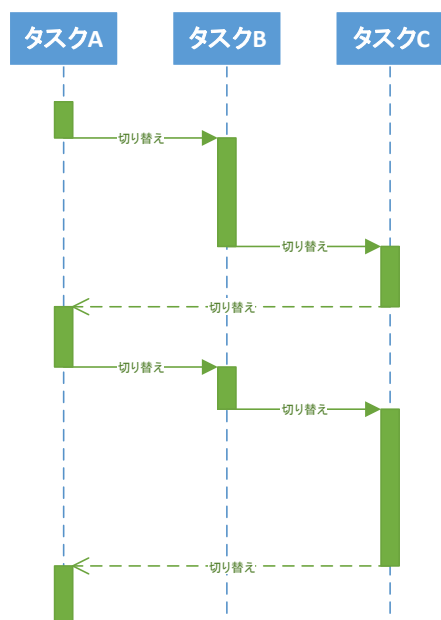
▼ マルチタスク

「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。



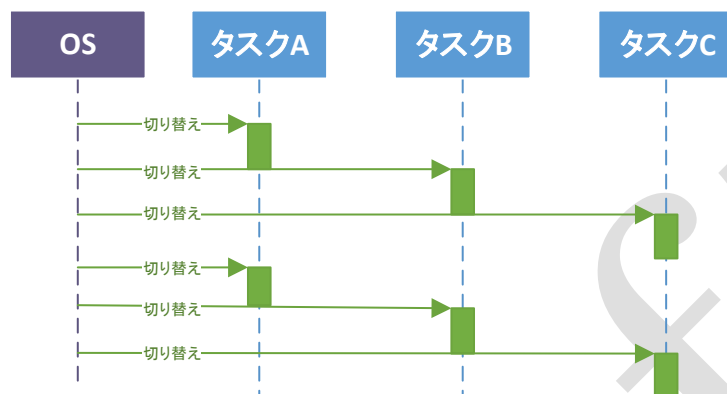
Windows95 より前の Windows3.1 はこの方式。例えば「`while(1){ }`」と書いたプログラムを実行すると、同時に起動している「メモ帳」や「電卓」などのアプリケーションも動作できずに止まってしまう。

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。

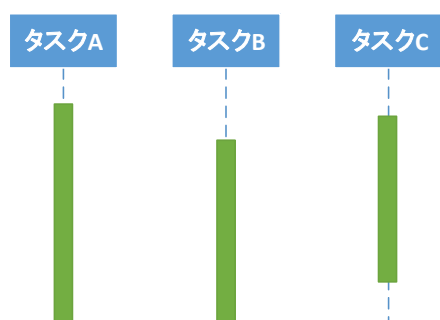
● タイムスライス

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。



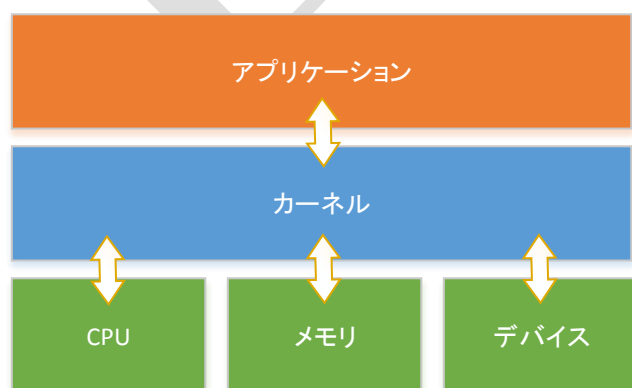
なお、厳密な用語の定義としては、「平行」は「並列」を包含する。「複数のタスク」を「複数の演算装置」が実行することもまた「平行」である。

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

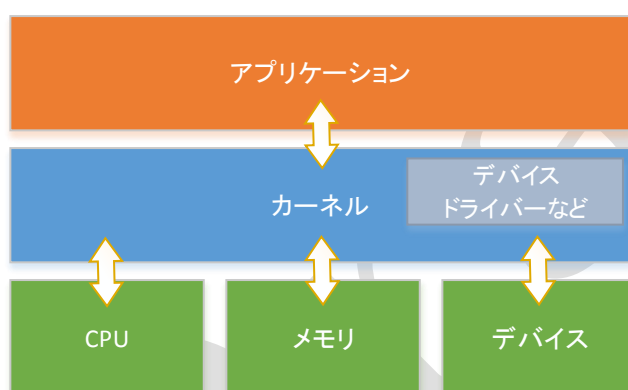
してデバイスにアクセスし、OS の制御のもとで CPU の割り当てやメモリの確保が行われる。

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。



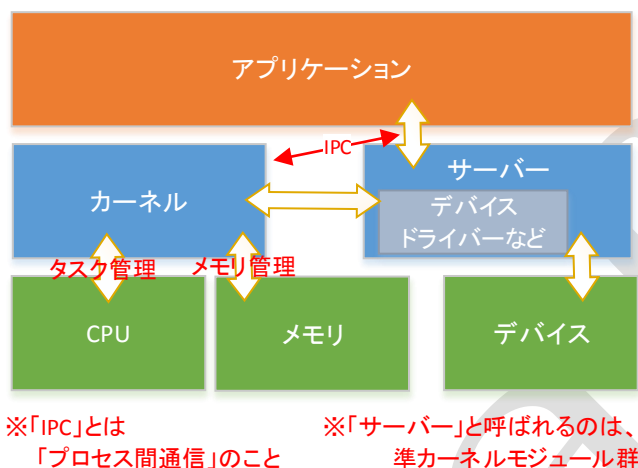
単純には、デバイスドライバがカーネルに一体化しているような状態。そのため、多くの機能を取り込んだカーネルは肥大化する。また、デバイスドライバに深刻な問題があると、OS 全体が停止するような事態も招く。

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「ロードブルモジュール」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。

マルチスレッド制御の観点で言えば、より高度な機能が提供されていると言える。例えば、後述する「名前付きパイプ」では、高度な通信の抽象化が実現できている。「名前付きパイプ」は、OS に対してユーザーがインストールした通信プロトコル（TCP/IP や NetBUEI、IPX/SPX など）を意識することなく、全く同じ手続きでプロセス間通信もネットワーク通信も可能な通信手段である。

● 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。

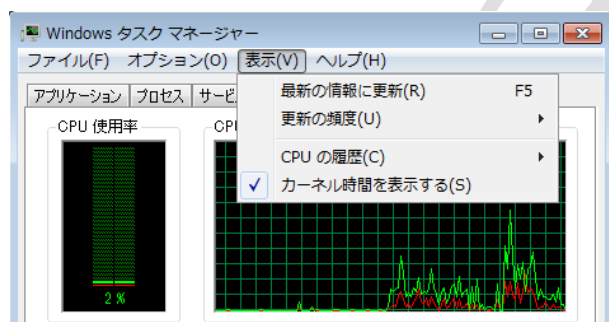
● カーネルモードとユーザーモード

マルチスレッドプログラミングでカーネルの方式を意識する必要はあまりないが、OS が使用するメモリ量や CPU は意識したいところ。PS3 の開発では、システムバージョンアップの際に所用メモリ量が削減されることを切実に願うことがあった。

また、パフォーマンスチューニングの際、ユーザーモード側（ゲーム側）の処理負荷が高いのか、カーネルモード側の処理負荷が高いのかは、可能な限り意識したい。

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。全体の CPU 使用率のうち、カーネルが占めている割合を示す。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

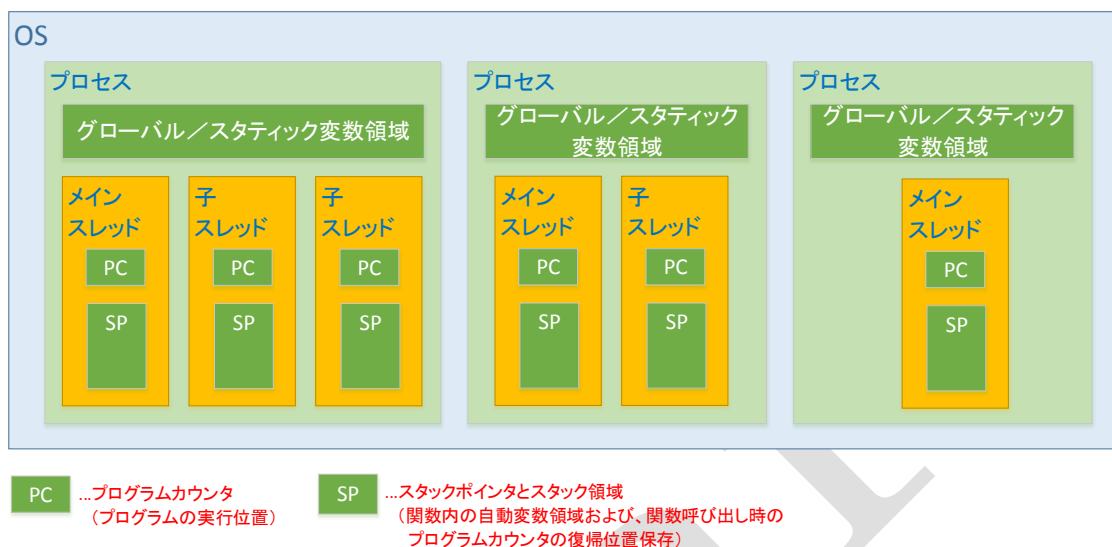
コンピュータ起動時に最初に行われるプログラムは、OS ではなく、ROM に組み込まれている「BIOS」（バイオス＝Basic Input/Output System）である。

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、複数のスレッドを並行で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できない。

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保護されるメモリ領域を扱うこともできる。これは「TLS=Thread Local Storage」（スレッドローカルストレージ）と呼ばれる仕組みで、ゲームプログラミングでもかなり利用価値が高い。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、長時間のゲームプレイではやがてメモリ不足などの問題を引き起こすので、きちんと明示的に全ての解放を行うべき。

【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。

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スリープして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ロードの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。

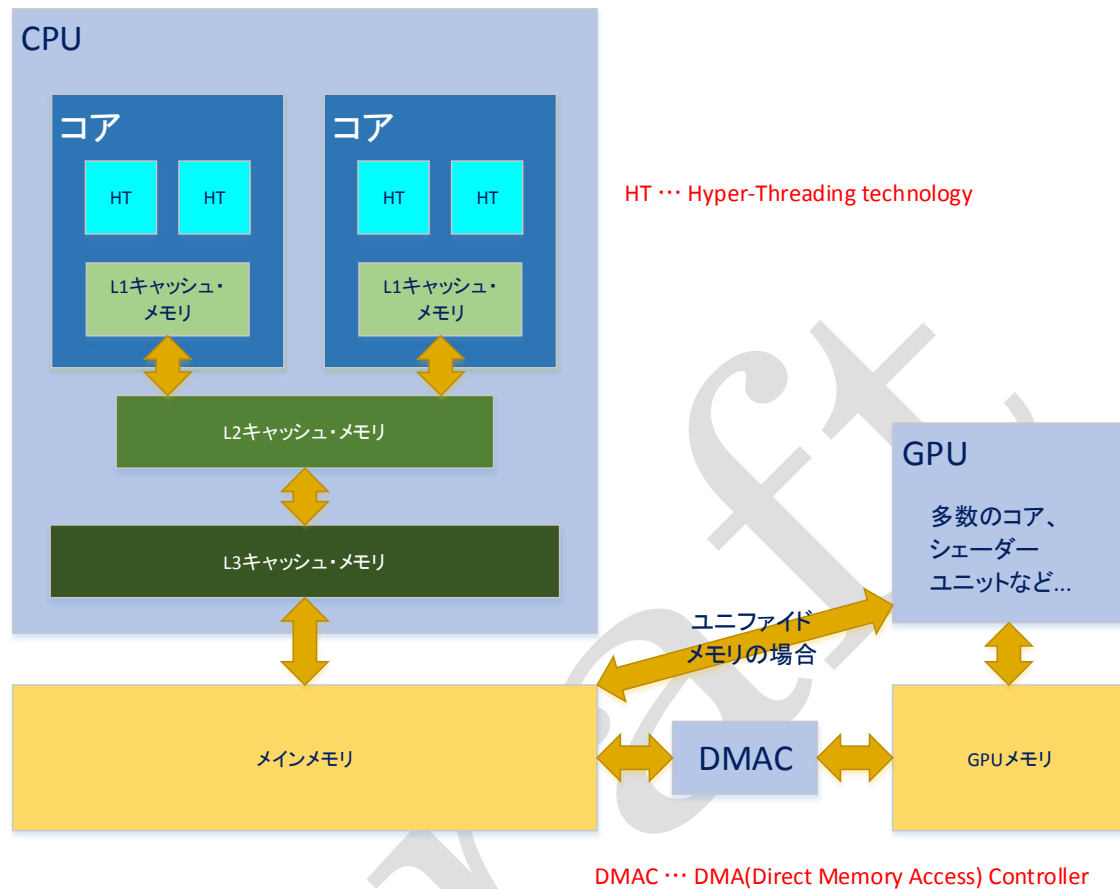
▼ シングルプロセッサ/シングルコア

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。

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。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

一つの演算装置上で二つの処理をスケジューリングすることで二つ以上の「論理プロセッサ」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。

元々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。

▼ 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-processor, 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 Instruction, 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つである。

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」(Random 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。

ゲームプロでは、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)。

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。

実際の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であるが、C 言語などのように自由な変数が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だり書き戻したりすることで処理する。(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。

▼ 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。「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」(Synergistic Processor 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。

Windows 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ですが、わざわざ同時に実行するのは、「(多少レスポンスが悪くなくても) 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やすい。

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：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）の扱いにとっ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,%s\n",
        global_without_value,
        global_with_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         00000014c 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/ccg1iY0V.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/ccg1iY0V.o
	0x00000000004007a0	_ZN19auto_run_test_classC2Ev
	0x00000000004007a0	_ZN19auto_run_test_classC1Ev
.text._ZN19auto_run_test_classD2Ev		
	0x00000000004007b8	0x18 /tmp/ccg1iY0V.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、機械語コード「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。

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    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「自己書き換えコード」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、一つの関数を使用する範囲を「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するか、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-usage` 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ーも含まれる。

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（「クオンタム」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。

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。

■ 様々なスレッド

▼ fork (Unix 系)

まずは fork（フォーク）。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。

関数をスレッド化する通常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スレッドに比べて所用メモリ量が大きく、メモリ空間の共有もで

きない。

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%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 -
PO( 5348, 12044) -> [0] CREATED:C1( 6464, 5348)
START: C1( 6464, 5348)
C1( 6464, 5348) -> [1] CREATED:C2( 6752, 6464)
START: C2( 6752, 6464)
PO( 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
PO( 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
[PO( 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)
[PO( 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)
[PO( 5348, 12044)] ... Wait( 6464) End status=0
[PO( 5348, 12044)] ... Wait(11556) ...
[PO( 5348, 12044)] ... Wait(11556) End status=0
[PO( 5348, 12044)] ... Wait( 8972) ...
[PO( 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      5348      12044  ptty0    07:48:54 /cygdrive/c/Work/test/Program/C++/Thread/fork/fork
user      1760      6752    ptty0    07:48:56 /cygdrive/c/Work/test/Program/C++/Thread/fork/fork
user     11556      5348    ptty0    07:48:56 /cygdrive/c/Work/test/Program/C++/Thread/fork/fork
user     12152      6464    ptty0    07:48:57 /cygdrive/c/Work/test/Program/C++/Thread/fork/fork
user      8972      5348    ptty0    07:48:58 /cygdrive/c/Work/test/Program/C++/Thread/fork/fork
user      6752      6464    ptty0    07:48:55 /cygdrive/c/Work/test/Program/C++/Thread/fork/fork
user      6464      5348    ptty0    07:48:54 /cygdrive/c/Work/test/Program/C++/Thread/fork/fork
user     10372     11556    ptty0    07:48:57 /cygdrive/c/Work/test/Program/C++/Thread/fork/fork

```

▼ Posix スレッドライブラリ (Unix 系)

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

fork 版と同じ挙動のサンプル。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。

malloc() で獲得したメモリは、子スレッドに受け渡すとすぐに不要になるが、元のスレッドで free() しないとハングする。

ついでに TLS (スレッドローカルストレージ) の動作もテスト。C++11 仕様の指定方法はエラー (GCC 4.8)。

Posix スレッドライブラリのサンプル :

```

#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; //C 版 TLS 指定
//thread_local pthread_t tls_pth = 0; //C++11 仕様版

//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:%d(%010p,%010p)%n", thread_name, i, tinfo.level + 1, pth_tmp,
tinfo.parent_pth);
else
    printf("%s -> [%d] CREATED:%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(),
    //parent_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
- Start Thread Test -
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      8140    11912  ptY0      11:38:07 /cygdrive/e/Work/test/Program/C++/Thread/pthread/pthread

```

▼ Windows スレッド (Windows 系)

Windows 版のスレッド。

fork 版、Posix スレッドライブラリ版と同じ挙動のサンプル。スレッド生成関数、終了待ち関数、Sleep()関数の扱いが Posix スレッド版と異なることに注目。

Windows 版の TLS (スレッドローカルストレージ) の動作もテスト。C++11 仕様の指定方法はエラー (Visual C++ 2013)。

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。

Windows 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)テスト
_declspec(thread) unsigned int tls_tid = 0;//Visual C++固有版 TLS 指定

```

```

//thread_local unsigned int 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
    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)-1 || 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);

        //子プロセス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
 ※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

```

- Start Thread Test -
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)

```

```

[PO(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) ...
[PO(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)
[PO(14168, 0)] ... Wait(13368) End
[PO(14168, 0)] ... Wait(11400) ...
[PO(14168, 0)] ... Wait(11400) End
[PO(14168, 0)] ... Wait(11304) ...
[PO(14168, 0)] ... Wait(11304) End
- End Thread Test -

```

▼ OpenMP

圧倒的に簡単にマルチスレッドの記述が可能。マルチコアを活用した並列処理が書きやすい。

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 `#pragma` でスレッドを制御する。幾つかサンプルコードを示す。

OpenMP 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

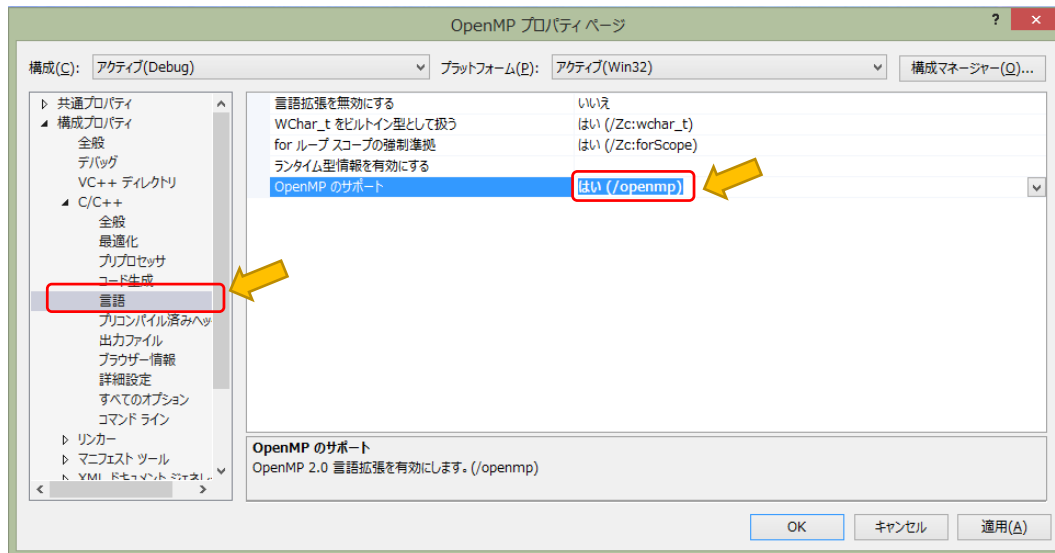
```

[BEGIN]
Hello, OpenMP!
[END]

```


下記のプロジェクト設定を変更し、OpenMP 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

※ 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

```
[BEGIN]
Hello, OpenMP!
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。

OpenMP 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)

[illegible]

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>
#ifdef

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、処理に制約も多く、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。

▼ 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。

OS のコンテキストスイッチに頼らず、自分で明示的にタスクの切り替えを行う必要がある。当然並列処理は不可能だが、OS の負担が軽い分、軽量なスレッド管理手法である。

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独自にスタック領域を持つので、ライフサイクルの長いプログラムを平行動作させることができる。明示的なスレッドの解放を行わないと、(同一スレッド上の)他のタスクをブロックしてしまうので注意が必要。

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 Squirrel などの汎用スクリプト言語や、C#などで採用している仕組みで、ファイバースレッドと同じく独自のスタック領域を持ったノンプリエンプティブなマルチタスクである。

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、キャラクターの意思決定処理 (AI) をコルーチン化することで、シーンに登場するキャラクターそれぞれに意思決定処理のインスタンスを持たせることができる。

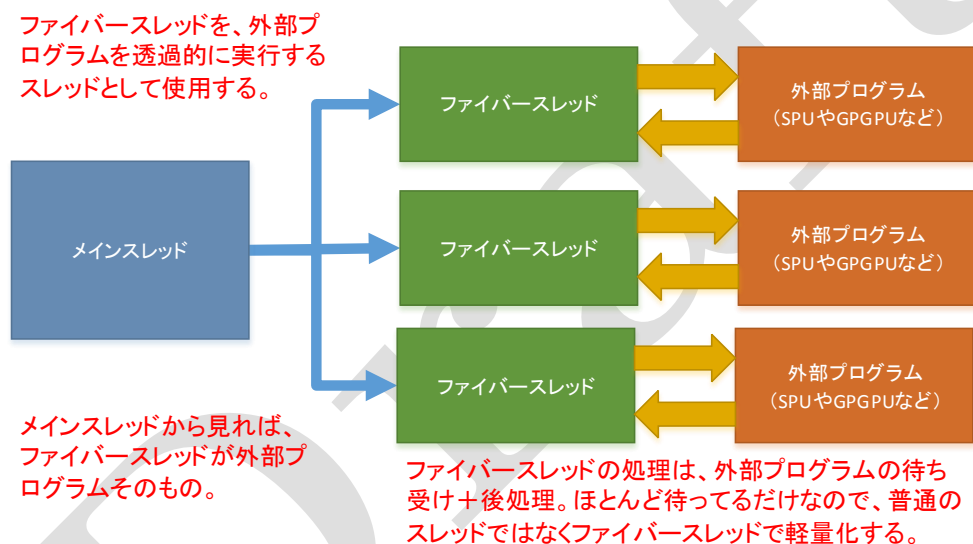
ファイバースレッドの使いどころとしては、「並列処理の待ち受け」という方法がある。外部プロセッサで全く別のプログラムを動作させる場合に、その完了をファイバースレッドで待ち受ける手法である。

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：



Windows 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。

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_pFiber[FIBER_MAX] = {}; //ファイバースレッドのインスタンスのポインター
_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(LPVOID_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(); //自身を削除したらず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](<id>%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_pFiber[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 -
Fiber thread No.1 is switched.
fiberFunc(): [太郎] (0)
Fiber thread No.2 is switched.
fiberFunc(): [次郎] (0)

```

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.0 is switched.
- loop -
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 -
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 -
Fiber thread No.1 is switched.
Fiber thread No.1 was removed.
Fiber thread No.1 is switched.
Fiber thread No.1 was removed.
Fiber thread No.0 is switched.
- loop -
- loop: end -
Fiber thread No.0 was removed.
- Fiber Thread Test: END -

```

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

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

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

←ファイバースレッド終了

←ファイバースレッド終了

←fiberMain 終了

▼ 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ため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 Graphics 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タ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 Device 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。

▼ 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。
 - ・ 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。
 - ・ 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

最後に、原初に立ち戻り、「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解説する。

「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、そしてこれからもまず間違いなく利用され続ける。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

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え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。

「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ない。

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。

割り込みのコンテキスト（CPU のレジスタなど）の退避は、その時のスタックに記録されるのが普通である。

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」は、「どのような割り込み処理が実装されているか」に注意する必要がある。

また、「絶対に割り込みを受け付けできない」スレッドが必要なら、割り込み処理側と何らかの同期手法を確立する必要がある。

● 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、「割り込みサブルーチン」や「割り込みハンドラ」と呼ぶ。「ISR」（Interrupt Service Routine）という略語も用いられる。

以降、「割り込みハンドラ」で統一する。

OS に対して、特定の割り込み条件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」ととどめ、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」、プロセスに対する終了命令などもソフトウェア割り込みである。

割り込みに対して割り込みハンドラを登録して実行することには変わりがないが、ハードウェア割り込みのような厳密な即時性はない。割り込みを登録したスレッドの動作時に反応するので、スタック領域の不安は少ない。

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。

スレッドごとに任意のシグナルに対するイベントハンドラを登録することができるため、スレッド間の通信に用いることもできる。

なお、シグナルの発行を行うコマンドや関数は「kill」である。プロセスに終了要求を送るのが主な用途のためであるが、様々なシグナルに対応する。

Windows では、シグナルと同様に、プロセスの外から何らかの要求を行う際は、ウィ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ソフトウェア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。

OS は、タスク管理（ソフトウェア割り込みを含む）、メモリ管理、ファイルシステムなどを管理しており、OS はこれらの機能を使うために「システムコール」と呼ばれる関数を提供している。

SDK の関数リファレンスで、システムコールとして紹介されているものや、内部でシステムコールを使用していると説明されているものは、OS の機能を使用するものであることを示している。

例えば、`fopen()` や `malloc()` などは内部でシステムコールを使用している。

■ 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。

▼ 不完全な不可分操作によるデータ破損

▼ スレッド間の情報共有の失敗

■ スレッドの同期

▼ ビジーウェイト

▼ スリープウェイト

▼ スリープ／Yield

■ 様々な同期手法

▼ Volatile 型変数

▼ スピンロック

▼ ミューテックス

▼ 軽量ミューテックス

▼ 名前付きミューテックス

▼ クリティカルセクション

▼ インターロック操作

▼ セマフォ／名前付きセマフォ

▼ モニター

- 条件変数

- イベント／名前付きイベント

▼ シグナル

■ マルチスレッドで起こり得る問題②

▼ デッドロック

- 相互ロック

- 自己ロック

▼ 低速化

▼ モニターのタイミングずれ

▼ ゾンビスレッド

■ 様々なデータ共有手法

▼ グローバル変数／スタティック変数

▼ スレッドローカルストレージ (TLS)

▼ 共有メモリ

▼ メモリマップトファイル

▼ メッセージ

▼ メッセージキュー

▼ パイプ

▼ 名前付きパイプ

▼ ソケット

■ その他のスレッド制御

▼ スレッド優先度

▼ イールド (Yield)

▼ Map Reduce 理論

■■以上■■

■ 索引

索引項目が見つかりません。

マルチスレッドプログラミングの基礎

以 上