オペレーティングシステムの機能を使ってみよう
第９章 プロセスの生成とプログラムの実行

spawn 方式と fork-exec 方式

新しいプログラムを実行する方式は次の二種類がある．

- *spawn* 方式（スポーン：卵を産む方式）
  Windows 等で使用されてきた．
  次の 3 ステップを一つのシステムコールで行う．
  1. プロセスを作る．
  2. プロセスを初期化する．
  3. プログラムを実行する．
- *fork-exec* 方式（分岐-実行方式）
  UNIX 系の OS で使用されてきた．
  次の 3 ステップを二つのシステムコールとプログラムで行う．
  1. プロセスを作る（fork システムコール）．
  2. プロセスを初期化する（ユーザプログラム）．
  3. プログラムを実行する（exec システムコール）．

spawn 方式

`posix_spawn` の例

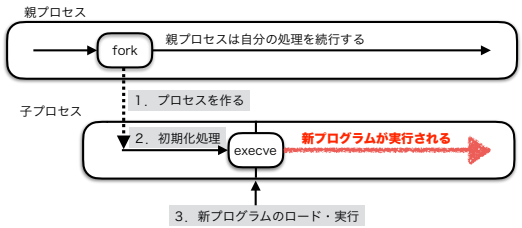
書式 次の通りである．

```
#include <spawn.h>
int posix_spawn(pid_t *pid, const char *path,
          const posix_spawn_file_actions_t *file_actions,
          const posix_spawnattr_t *attrp,
          char *const argv[], char *const envp[]);
```

解説 新しいプロセスを作り `path` で指定したプログラムを実行する．

引数 `pid` は新しいプロセスのプロセス番号を格納する変数を指すポインタ．`path` は実行するプログラムを格納したファイルのパスである．絶対パスでも相対パスでも良い．
`file_actions`，`attrp` はプロセスの初期化を指示するデータ構造へのポインタ．`argv`，`envp` は実行されるプログラムに渡すコマンド行引数と環境変数である．

fork-exec 方式（１）

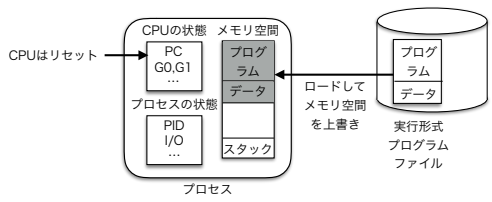


1. 新しいプロセス（子プロセス）を作る (*fork* システムコール)．
2. ユーザプログラムに従い子プロセスが自ら初期化処理を行う．
3. 新しいプログラムをロード・実行 (*execve* システムコール) する．

プログラムで初期化処理を行うので柔軟性が高い．

fork-exec 方式（２）

プログラムのロードと実行（*execve* システムコール）の概要



- プロセスのメモリ空間に新しいプログラムをロードする．
- execve システムコールを発行したプログラムは上書きされて消える．
- プロセスの仮想 CPU はリセットされプログラムの先頭から実行．
- プロセスが新しいプログラムに変身した．

fork-exec 方式（３）

execve システムコール

書式 execve システムコールの書式は次の通りである．

```
#include <unistd.h>
int execve(const char *path,
          char *const argv[], char *const envp[]);
```

解説 自プロセスで `path` で指定したプログラムを実行する．正常時には execve を実行したプログラムは新しいプログラムで上書きされ消える．execve システムコールが戻る (次の行が実行される) のはエラー発生時だけである．

引数 `path` は実行するプログラムを格納したファイルのパスである．絶対パスでも相対パスでも良い．`argv`，`envp` は新しいプログラムに渡すコマンド行引数と環境変数である．

fork-exec 方式（4）

execve システムコールの使用例 1

```
#include <stdio.h>          // perror のために必要
#include <unistd.h>         // execve のために必要
extern char **environ;
char *args[] = { "date", NULL };
char *execpath="/bin/date";
int main(int argc, char *argv[], char *envp[]) {
  execve(execpath, args, environ);   // /bin/dateを自分と同じ環境変数で実行
  perror(execpath);                  // ※ execveが戻ってきたらエラー！
  return 1;
}
/* 実行例（英語表示、日本時間で表示される）
% ./exectest1
Sun Apr  2 09:20:24 JST 2023
*/
```

- /bin/date プログラムをロード・実行する.
- date プログラムの argv 配列を準備して渡す.
- 環境変数は自身のものを渡す.
- execve が戻ってきたら無条件にエラー処理をする.

fork-exec 方式（5）

execve システムコールの使用例 2

```
#include <stdio.h>          // perror のために必要
#include <unistd.h>         // execve のために必要
#include <stdlib.h>         // putenv のために必要
extern char **environ;
char *args[] = { "date", NULL };
char *execpath="/bin/date";
int main(int argc, char *argv[], char *envp[]) {
  putenv("LC_TIME=ja_JP.UTF-8");     // 自分の環境変数を変更する
  execve(execpath, args, environ);   // /bin/dateを自分と同じ環境変数で実行
  perror(execpath);                  // execveが戻ってきたらエラー！
  return 1;
}
/* 実行例（日本語表示、日本時間で表示される）
% ./exectest3
2023年 4月 2日 日曜日 09時24分29秒 JST
*/
```

- （環境変数を変更＝初期化処理）をした上で execve する.
- putenv() 関数を用いて自身の環境変数を書き換え.
- execve に自身の環境変数を渡す.

fork-exec 方式（6）

execve システムコールの使用例 3

```
#include <stdio.h>          // perror のために必要
#include <unistd.h>         // execve のために必要
char *args[] = { "date", NULL };
char *envs[] = { "LC_TIME=ja_JP.UTF-8", "TZ=Cuba", NULL};
char *execpath="/bin/date";
int main(int argc, char *argv[], char *envp[]) {
  execve(execpath, args, envs);      // /bin/dateを上記の環境変数で実行
  perror(execpath);                  // execveが戻ってきたらエラー！
  return 1;
}
/* 実行例（日本語表示、キューバ時間で表示される）
% ./exectest2
2023年 4月 1日 土曜日 20時25分52秒 CDT
*/
```

- 全く新しい環境変数の一覧を渡す例.
- date プログラムが必要とする環境変数だけの配列を渡す.

fork-exec 方式（7）

execve システムコールの使用例 4

```
#include <stdio.h>          // perror のために必要
#include <unistd.h>         // execve のために必要
extern char **environ;
char *args[] = { "echo", "aaa", "bbb", NULL };  // "$ echo aaa bbb" に相当
char *execpath="/bin/echo";
int main(int argc, char *argv[], char *envp[]) {
  execve(execpath, args, environ);   // /bin/echoを自分と同じ環境変数で実行
  perror(execpath);                  // execveが戻ってきたらエラー！
  return 1;
}
/* 実行例
% ./exectest4
aaa bbb                <--- /bin/echo の出力
*/
```

- 複数のコマンド行引数をもつプログラム（echo）の実行例.
- argv[0] にプログラムの名前を入れ忘れないように.

fork-exec 方式（8）

execve システムコールのラッパー関数

- 関数の内部で execve システムコールを発行（wrapper）

書式 四つのラッパー関数の書式をまとめて掲載

```
#include <unistd.h>
int execv(const char *path, char *const argv[]);
int execvp(const char *file,  char *const argv[]);
int execl(const char *path,
          const char *argv0, ... , *argvn, NULL);
int execlp(const char *file,
          const char *argv0, ... , *argvn, NULL);
```

意味
```
execv("/bin/date", argv);
→ execve("/bin/date", argv, environ);
execvp("date", argv);
→ execve("/bin/date", argv, environ);
execl("/bin/echo", "echo", "aaa", "bbb", NULL);
execlp("echo", "echo", "aaa", "bbb", NULL);
```

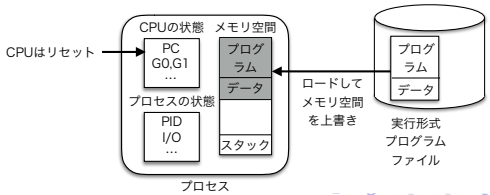

fork-exec 方式（9）

入出力のリダイレクト 1

- リダイレクトの復習

```
% echo aaa bbb
aaa bbb                        <--- echoの出力が表示される
% echo aaa bbb  > a.txt        <--- echoの出力が表示されない
% cat a.txt
aaa bbb                        <--- echoの出力がa.txtに格納されてた
```

- プログラムは標準入出力を自らオープンする必要が無かった.
- プロセスの状態が execve 前のプログラムから引き継がれるから.



fork-exec 方式（10）

入出力のリダイレクト 2

- リダイレクトはプログラムのロード・実行前にシェルが行う．
- シェルが標準入出力をファイルに接続してから execve している．
- 原理を表すプログラム例

```
#include <stdio.h>          // perror のために必要
#include <unistd.h>         // execl のために必要
#include <fcntl.h>          // open のために必要
char *execpath="/bin/echo";
char *outfile="aaa.txt";
int main(int argc, char *argv[], char *envp[]) {
  close(1);                                     // 標準出力をクローズする
  int fd = open(outfile,
                O_WRONLY|O_CREAT|O_TRUNC, 0644); // 標準出力をオープンしなおす
  if (fd!=1) {                                  // 標準出力以外になってる
    fprintf(stderr, "something is wrong\n");    //   原因が分からないが...
    return 1;                                   //   何か変なのでエラー終了
  }
  execl(execpath, "echo", "aaa", "bbb", NULL);  // /bin/echoを実行
  perror(execpath);                             // execlが戻ったらエラー！
  return 1;
}
```


課題 No.9

1. 前のページ（リスト 9.5）のプログラムを入力し実行してみる．
2. 入力のリダイレクトをするプログラム例を作る．
   ヒント：標準入力のファイルディスクリプタは 0 番である．
3. env コマンドのクローン myenv
   putenv() がエラーになるまでコマンド行引数を環境変数の設定と思って使う．残りが実行するコマンドを表している．下の実行例では

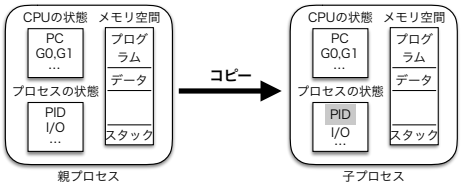
```
putenv(argv[1]);
putenv(argv[2]);
putenv(argv[3]);
execvp(argv[3], &argv[3]);
```

   (三回目の putenv() はエラーになる)
   が実行されるようにプログラムを作る．

```
% ./myenv LC_TIME=ja_JP.UTF-8 TZ=Cuba ls -l
```


fork-exec 方式（11）

新しいプロセスを作る（*fork* システムコール）1



- fork システムコールはプロセスのコピー分身を作る．
- もともとのプロセスが親プロセス，分身が子プロセス．
- 分身は PID 以外は同じ（*CPU* の *PC* も同じ）．
- 子プロセスは fork システムコールの途中から実行を開始する．

fork-exec 方式（12）

新しいプロセスを作る（*fork* システムコール）2

書式 fork の書式を示す．

```
#include <unistd.h>
int fork(void);
```

解説 fork システムコールが終了する際，親プロセスには子プロセスの PID が返され，子プロセスには 0 が返される．プログラムはこの値を目印に自分が親か子か判断できる．エラー時は，親プロセスに-1 が返され子プロセスは作られない．

```
int main() {
  int x = 10;
  int pid;
  pid = fork();                                 // この瞬間にプロセスがコピーされる
  if (pid<0) {
    fprintf(stderr, "forkでエラー発生\n");  // エラーの場合
    return 1;
  } else if (pid!=0)   {                        // 親プロセスだけが以下を実行する
    x = 20;                                     //   親プロセスの x を書き換える
```


fork-exec 方式（13）

新しいプロセスを作る（*fork* システムコール）3

使用例 親プロセスと子プロセスが並行実行される状態になる．

```
#include <stdio.h>          // printf, fprintf のために必要
#include <unistd.h>         // fork のために必要
int main() {
  int x = 10;
  int pid;
  pid = fork();                                 // この瞬間にプロセスがコピーされる
  if (pid<0) {
    fprintf(stderr, "forkでエラー発生\n");  // エラーの場合
    return 1;
  } else if (pid!=0)   {                        // 親プロセスだけが以下を実行する
    x = 20;                                     //   親プロセスの x を書き換える
    printf("親 pid=%d x=%d\n", pid, x);
  } else {                                      // 子プロセスだけが以下を実行する
    printf("子 pid=%d x=%d\n", pid, x);     //   子プロセスの x は初期値のまま
  }
  return 0;
}
```


fork-exec 方式（14）

プロセスの終了と待ち合わせ

例えば次のような手順で処理がされる．

- 親プロセスは子プロセスをいくつか作成し，
  それらに同時に並行して処理を行わせる．
- 子プロセスは処理を終えると終了する．
- 子プロセスが処理を終えると，親プロセスは
  子プロセスが正常に終了したかチェックする．

```
% ls -l | grep rwx  ←  二つのプロセスが並列実行される
```

- 子プロセスが処理結果と共に自身を終了する．
  → *exit* システムコール
- 親プロセスが子プロセスの終了を待つ．
  → *wait* システムコール

fork-exec 方式（15）

exit システムコール：自プロセスを終了する．

書式 exit システムコールの書式を示す．

```
#include <stdlib.h>
void exit(int status);
```

解説

- プロセスが終了するので exit は戻らない．
- status はプロセスの終了ステータスである．
  (0 <= status <= 255)
- 親プロセスは wait で終了ステータスを受け取る．
- C プログラムの main 関数は exit の引数で実行．
  exit(main(argc, argv, envp));
- 次の C プログラムは同じ結果になる．

```
int main() {
  ...
  exit(1);
  ...
}
```

＝

```
int main() {
  ...
  return 1;
  ...
}
```


fork-exec 方式（16）

wait システムコール：親プロセスが子プロセスの終了を待つ．

書式 wait システムコールの書式を示す．

```
#include <sys/wait.h>
pid_t wait(int *status);
WIFEXITED(status)   // 子プロセスがexitした(マクロ)
WIFSIGNALED(status) // 子プロセスがシグナルで終了した(マクロ)
WEXITSTATS(status)  // 子プロセスの終了ステータス(マクロ)
WTERMSIG(status)    // 子プロセスを終了させたシグナルの番号(マクロ)
```

解説

- 終了したプロセスの番号（PID：正の値）を返す．
- エラーが発生した場合に-1 を返す．
- status にプロセスの終了理由等が格納される．
  status の内容は上記のマクロで読み取る．

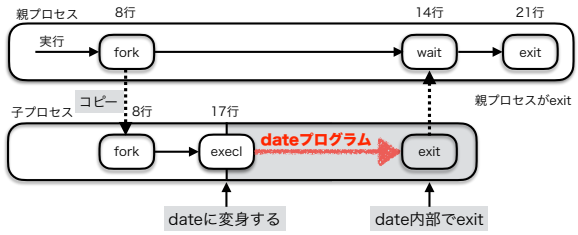
fork-exec 方式（17）

プログラム例

```
1  #include <stdio.h>                    // perror のために必要
2  #include <stdlib.h>                   // exit のために必要
3  #include <unistd.h>                   // fork, execve のために必要
4  #include <sys/wait.h>                 // wait のために必要
5  char *execpath="/bin/date";
6  int main(int argc, char *argv[], char *envp[]) {
7    int pid;
8    if ((pid=fork())<0) {               // 分身を作る
9      perror(argv[0]);                  // fork がエラーなら
10     exit(1);                          // 親プロセスをエラー終了
11   }
12   if (pid!=0) {                       // pid が 0 以外なら自分は親プロセス
13     int status;
14     while (wait(&status)!=pid)        //   子プロセスが終了するのを待つ
15       ;
16   } else {                            // pid が 0 なら自分は子プロセス
17     execl(execpath, "date", NULL);    //   date プログラムを実行（execlを使用してみ
18     perror(execpath);                 //   exec が戻ってくるならエラー
19     exit(1);                          //   エラー時はここで子プロセスを終了
20   }
21   exit(0);                            // 親プロセスを正常終了
22 }
```


fork-exec 方式（18）

プログラムの解説



fork-exec 方式（19）

```
5  char *execpath="/bin/date";
6  int main(int argc, char *argv[], char *envp[]) {
7    int pid;
8    for (int i=1; argv[i]!=NULL; i++) {
9      if ((pid=fork())<0) {             // 分身を作る
10       perror(argv[0]);                // fork がエラーなら
11       exit(1);                        // 親プロセスをエラー終了
12     }
13     if (pid!=0) {                     // pid が 0 以外なら自分は親プロセス
14       int status;
15       while (wait(&status)!=pid)      //   子プロセスが終了するのを待つ
16         ;
17     } else {                          // pid が 0 なら自分は子プロセス
18       putenv(argv[i]);                //   環境変数を変更する
19       execl(execpath, "date", NULL);  //   date プログラムをロード・実行
20       perror(execpath);               //   execl が戻ってくるならエラー
21       exit(1);                        //   エラー時はここで子プロセスを終了
22     }
23   }
24   exit(0);                            // 親プロセスを正常終了
25 }
26 /* 実行例
27 % ./forkexec2 LC_TIME=ja_JP.UTF-8 LC_TIME=ru_RU.UTF-8 TZ=Cuba
28 2023年 4月 2日 日曜日 10時47分31秒 JST
29 воскресенье, 2 апреля 2023 г. 10:47:31 (JST)
30 Sat Apr  1 21:47:31 CDT 2023
31 */
```


fork-exec 方式（20）

```
5  char *execpath="/bin/date";
6  int main(int argc, char *argv[], char *envp[]) {
7    int pid;
8    for (int i=1; argv[i]!=NULL; i++) {
9      putenv(argv[i]);                // 環境変数を変更する
10     if ((pid=fork())<0) {           // 分身を作る
11       perror(argv[0]);              // fork がエラーなら
12       exit(1);                      // 親プロセスをエラー終了
13     }
14     if (pid!=0) {                   // pid が 0 以外なら自分は親プロセス
15       int status;
16       while (wait(&status)!=pid)    //   子プロセスが終了するのを待つ
17         ;
18     } else {                        // pid が 0 なら自分は子プロセス
19       execl(execpath, "date", NULL); //   date プログラムを実行（execlを使用してみ
20       perror(execpath);             //   exec が戻ってくるならエラー
21       exit(1);                      //   エラー時はここで子プロセスを終了
22     }
23   }
24   exit(0);                          // 親プロセスを正常終了
25 }
26 /* 実行例
27 % ./forkexec3 LC_TIME=ja_JP.UTF-8 LC_TIME=ru_RU.UTF-8 TZ=Cuba
28 2023年 4月 2日 日曜日 10時49分17秒 JST
29 воскресенье, 2 апреля 2023 г. 10:49:17 (JST)
30 суббота, 1 апреля 2023 г. 21:49:17 (CDT)
31 */
```