



TOHOKU
UNIVERSITY



Cyberscience
Center

NEC \Orchestrating a brighter world

2024 年度 並列プログラミング入門 I (OpenMP)

2024年 10月 3日
東北大学サイバーサイエンスセンター
日本電気株式会社

本資料は、東北大学サイバーサイエンスセンターと
N E Cが共同で作成しました。
無断転載等は、ご遠慮下さい。

-
- 並列化概要
 - OpenMPプログラミング編
 - MPIプログラミング編

OpenMPプログラミング編

OpenMPプログラミング編・目次

1. OpenMP概要
2. 演習問題1
3. OpenMP指示文(指示行)の書き方
4. 演習問題2
5. OpenMPの記述法
6. 演習問題3
7. 演習問題4
8. 演習問題5
9. 参考

演習問題の構成

- 本講義の演習問題は、原則 AOBA-Sを使用します。
- AOBA-S のフロントエンドサーバ(sfront)で演算問題の環境を自分のホームディレクトリ配下にコピーします。

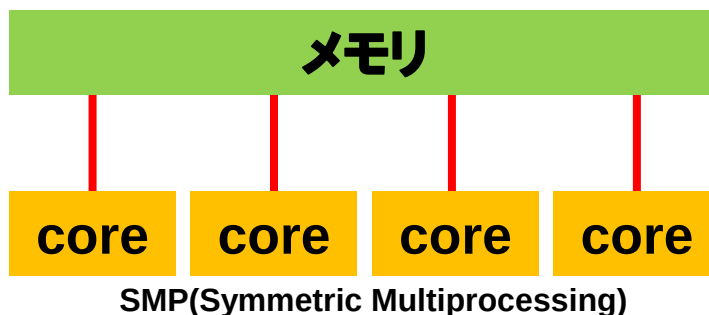
/mnt/lustre/ap/lecture/OpenMP/

 -- [F,C] / practice_1	演習問題1
 -- [F,C] / practice_2	演習問題2
 -- [F,C] / practice_3	演習問題3
 -- [F,C] / practice_4	演習問題4
 -- [F,C] / practice_5	演習問題5
 -- [F,C] / sample	

```
$ cd <環境をコピーしたいディレクトリ>  
$ cp -r /mnt/lustre/ap/lecture/OpenMP/ .
```

1. OpenMP概要

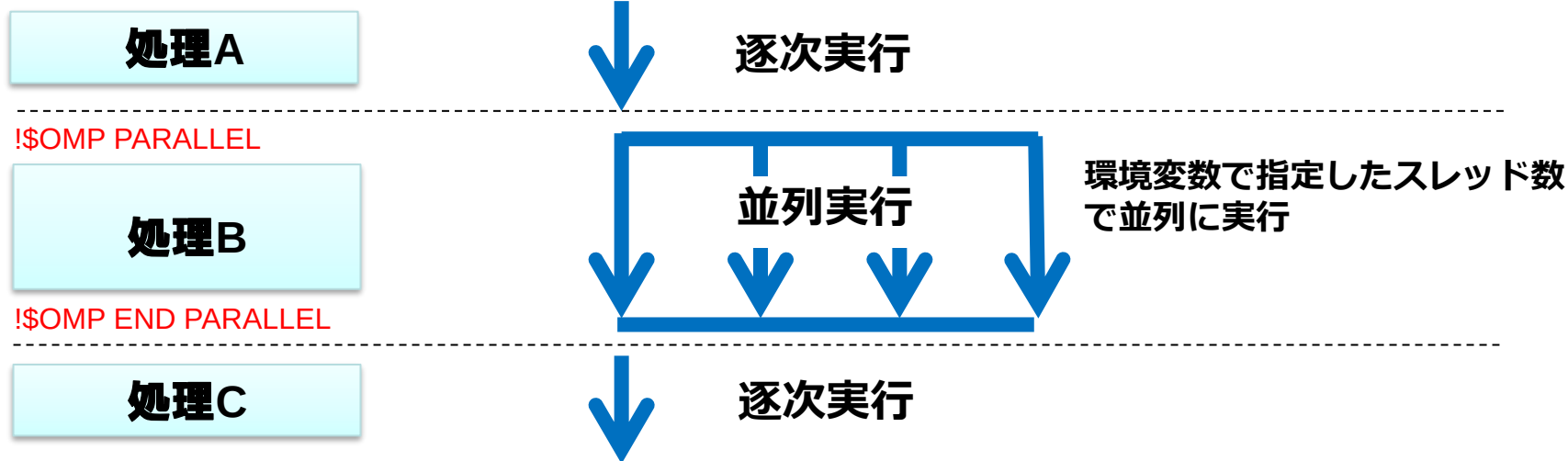
- 複数のコアを利用する並列処理により実行時間(経過時間)の短縮を図る.
- 共有メモリマシン環境においてスレッド並列を行うためのコンパイラに対する指示文(指示行), 関数やサブルーチン, 実行時の環境変数等に関する仕様.
- FortranやC/C++言語で使用可能.
- OpenMPをサポートしないコンパイラ, あるいはOpenMPによるスレッド並列を使用しない場合は, 指示文はコメント行とみなす.
- OpenMP Architecture Review Board (ARB) によって規定されている業界標準規格であり, ポータビリティに優れている.



OpenMP並列の基本構造

- OpenMP並列指示文で指定された処理を複数のスレッドで実行する.
- スレッド数は実行時の環境変数で指定する.

Fortran の例 :



OpenMPプログラム例 (Hello World)

逐次プログラム

sample1.f

```
program sample1
  print *, "Hello World"
  stop
end
```

sample1.c

```
#include <stdio.h>
int main(){
    printf("Hello World¥n");
    return 0;
}
```

OpenMPプログラム

sample2.f

```
program sample2
  !$OMP parallel
    print *, "Hello World"
  !$OMP end parallel
  stop
end
```

●以下の処理を複数のスレッドで並列に実行することを指示

●複数のスレッドで並列実行することを終了することを指示

sample2.c

```
#include <stdio.h>
int main(){
  #pragma omp parallel
  {
    printf("Hello World¥n");
  }
  return 0;
}
```

コンパイル・実行スクリプト

■ AOBA-A/AOBA-Sの場合

● OpenMPプログラムのコンパイル

FORTRAN :

```
nfort -fopenmp [オプション] ソースファイル名
```

C/C++ :

```
ncc -fopenmp [オプション] ソースファイル名 ...Cプログラムのコンパイル  
nc++ -fopenmp [オプション] ソースファイル名 ...C++プログラムのコンパイル
```

※OpenMPを利用する場合は-fopenmpオプションが必須

※自動並列化-mparallelオプションとの併用が可能

● OpenMPプログラムの実行のスクリプト例

```
#!/bin/bash  
#PBS -q ①  
#PBS --venode ②  
#PBS -l elapstim_req=③  
  
export VE_OMP_NUM_THREADS= ④  
cd $PBS_O_WORKDIR  
./a.out (実行文)
```

- ① AOBA-AもしくはAOBA-S用のキューを指定.
※占有利用の方は別途お知らせします. (必須)
- ② 使用VE数を指定. (必須)
- ③ 使用計算時間(経過時間)を設定.
「hh:mm:ss」のように指定.
例えば1時間半の場合には
#PBS -l elapstim_req=01:30:00
と指定. (設定を強く推奨)
- ④ スレッド数を指定. (共有並列の場合必須)
AOBA-Aの最大は8.
AOBA-Sの最大は16.

コンパイル・実行スクリプト

● ジョブクラス

利用形態	サブシステム	キュー名	VE数	実行形態(※)	最大経過時間 既定値/最大値	メモリサイズ
無料	AOBA-A	sxf	1	1VE	1時間/1時間	48GB
	AOBA-S	sxsf	1	1VE	1時間/1時間	96GB
共有	AOBA-A	sx	1	1VE	72時間/720時間	48GB*VE数
			2~256	8VE単位で確保		
	AOBA-S	sxs	1~2,048	8VE単位で確保		96GB*VE数

- ・ OpenMPのみの並列ではSX-Aurora TSUBASAの複数VEは利用できません
- ・ MPIとのハイブリッド実行については[MPIプログラミング編](#)参照

※実行形態について

8VE単位で確保：8VE単位で計算資源が確保されるため、他のリクエストとVHを共用しないで実行されるため、演算時間のばらつきが少ない。

1VE：1VE単位で計算資源が確保される。

2. 演習問題 1 (practice_1)

■ テキストP.9のサンプルプログラムをコンパイルして、実行してください。

項目	対象		備考
作業ディレクトリ	F/practice_1	C/practice_1	
使用ソースファイル	sample2.f	sample2.c	編集 不要

- 手順①：作業ディレクトリを移動してください。
\$ cd OpenMP/[F] or [C]/practice_1
- 手順②：コンパイルしてください。
[F]の場合：\$ nfort -fopenmp sample2.f
[C]の場合：\$ ncc -fopenmp sample2.c
- 手順③：プログラムを実行してください。
\$ qsub run.sh
- 手順④：結果を確認します。結果はp1-practice.oXXXX(XXXXにはリクエストIDが入ります)として格納されます。
\$ cat p1-practice.oXXXX

演習問題 1 (practice_1)

■ 以下のように結果が表示されます.

```
Hello World
Hello World
Hello World
Hello World
Hello World
Hello World
Hello World
Hello World
Hello World
Hello World
Hello World
Hello World
Hello World
Hello World
Hello World
Hello World
Hello World
Hello World
```

3. OpenMP指示文(指示行)の書き方

- Fortranプログラムの場合

「**!\$OMP [指示文]**」を1カラム目から指定する。DO文を並列化する場合はDO文の前に「**parallel do**」を指示し、ENDDO文の後ろに「**end parallel do**」を指示する。

(例)

```
!$OMP parallel do
  do k=1,nz
    do j=1,ny
      :
    enddo
  enddo
!$OMP end parallel do
```

- Cプログラムの場合

「**#pragma omp [指示文]**」で指定する。for文を並列化する場合は「**parallel for**」と指示する。

(例)

```
#pragma omp parallel for
for(i=0;i<100;i++){
  :
}
```

総和計算プログラムのOpenMP化 (1/3)

- 1から1000の総和を求める(逐次実行プログラム)

sample3.f

```
program sample3
parameter(n=1000)
integer sum
sum=0
do i=1,n
  sum=sum+i
enddo
print *, "Total = ",sum
stop
end
```

sample3.c

```
#include <stdio.h>
int main()
{
  int n=1000;
  int sum;
  sum=0;
  for(int i=1 ; i<=n ; ++i){
    sum+=i;
  }
  printf("Total = %d¥n",sum);
  return 0;
}
```

- 並列化の対象はDOループ(Fortran),forループ(C/C++)
 - ✓ sample3では1から1000の総和を計算するループが対象.
 - ✓ ループ内の変数sumは総和演算を行っており, 各スレッドが個々に変数sumの内容を更新すると正しい結果が得られない.

総和計算プログラムのOpenMP化 (2/3)

- ループ文の並列化は、指示文でスレッド並列化を指示

Fortran DOループ:parallel do ~ end parallel do

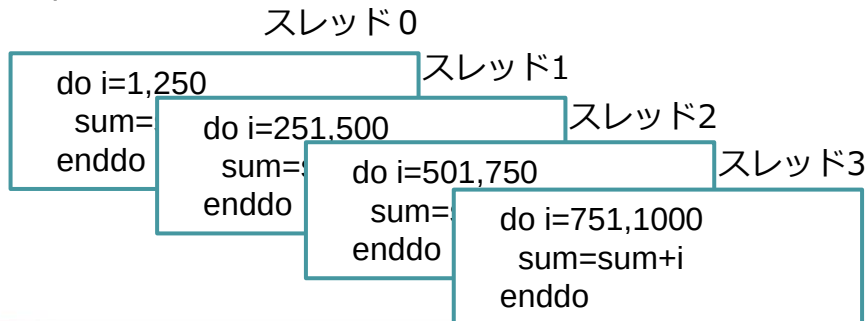
C forループ:parallel for

以下の例では、4スレッドで実行する場合、ループは1~250, 251~500, 501~750, 751~1000とスレッドに割り当てられる

Fortranの例 :

```
!$OMP parallel do
  do i=1,n
    sum=sum+i
  enddo
!$OMP end parallel do
```

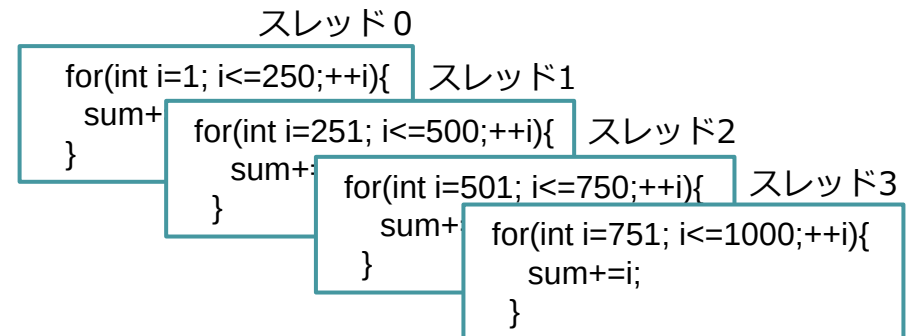
- !\$OMP parallel do~!\$OMP end parallel doで囲んだDOループはスレッド数で分割され並列に実行される



C/C++の例 :

```
#pragma omp parallel for
for(int i=1 ; i<=n ; ++i){
  sum+=i;
}
```

- #pragma omp parallel forの次のfor文はスレッド数で分割され並列に実行される



総和計算プログラムのOpenMP化 (3/3)

- 各スレッドの計算結果は変数`sum`に格納するが、全スレッドが同じ領域の値を更新すると正しい結果は得られない。
- スレッドごとに部分和を格納する領域を用意し、各スレッドの計算結果の部分和を変数`sum`に足し込む必要がある。
- このような演算を「リダクション演算」と呼ぶ。
- 変数`sum`に対する演算はリダクション演算であることを明示する。

Fortranの例 :

```
!$OMP parallel do reduction(+:sum)
  do i=1,n
    sum=sum+i
  enddo
!$OMP end parallel do
```

C/C++の例 :

```
#pragma omp parallel for reduction(+:sum)
for(int i=1 ; i<=n ; ++i){
  sum+=i;
}
```

- `reduction(オペレータ:変数名リスト)` オプションを記述する。オペレータの種類として和(+), 差(-), 積(*)のほかにも最大・最小値を求めるMAX, MINやビット操作を行うIAND, IOR, IEO, 論理演算のAND., .OR., .EQV., .NEQV.を使用することができる。
- 複数の変数を指定する場合は、変数名リストをカンマ(,)で区切って記述する。

4. 演習問題 2 (practice_2)

● 行列積を計算するプログラムのOpenMP化

Fortran演習プログラム：

```
program sample5
implicit real(8)(a-h,o-z)
parameter ( n=4096 )
real(8) a(n,n),b(n,n),c(n,n),t1
double precision cp1,cp2
a=0.0d0
call random_number(b)
call random_number(c)
write(6,50) ' Matrix Size = ',n
50 format(1x,a,i5)
call ETIME(cp1)
[ ]
do j=1,n
do k=1,n
do i=1,n
a(i,j)=a(i,j)+b(i,k)*c(k,j)
end do
end do
end do
[ ]
call ETIME(cp2)
t1=cp2-cp1
write(6,60) ' Execution Time = ',t1,' sec',' A(n,n) = ',a(n,n)
60 format(1x,a,f10.3,a,1x,a,d24.15)
stop
end
```

- コストが集中しているはこの部分
- OpenMP指示文を挿入し、ループの並列実行を行う。
- 左の [] にOpenMP指示文を入れてください。

4. 演習問題 2 (practice_2)

■ 行列積を計算するプログラムのOpenMP化

項目	対象		備考
	Fortran	C	
作業ディレクトリ	F/practice_2	C/practice_2	
使用ソースファイル	sample5.f	sample5.c	編集 必要
コンパイルスクリプト	comp.sh		編集 不要
ジョブファイル	run.sh		そのまま投入

- 手順①：作業ディレクトリを移動してください。
\$ cd OpenMP/[F] or [C]/practice_2
- 手順②：エディタでファイルを編集し，並列化を実施してください。

4. 演習問題 2 (practice_2)

- 手順③：コンパイルを実行します.
\$./comp.sh
- 手順④：ジョブを投入します.
\$ qsub run.sh
- 手順⑤：結果を確認します. 結果はp2-practice.oXXXX(XXXXにはリクエストIDが入ります)として格納されます.
\$ cat p2-practice.oXXXX

5. OpenMPの記述法

スレッドごとに独立した変数が必要になる場合には注意が必要

● PRIVATE指定

スレッドごとに独立した変数が必要な場合には、**PRIVATE句**が必要である。

①ループ中で作業配列・変数として使用されている

②並列化の対象となるループ変数の次元を持たない配列

Fortranの例 :

```
do k=1,nz
  do j=1,ny
    do i=1,nx
      a(i,j) = b(i,j,k)*c(i,k)
      d(i,j,k) = d(i,j,k) + a(i,j)*e(j,k)
    :
  :
:
```

!\$OMP parallel do **private(a)**

```
do k=1,nz
  do j=1,ny
    do i=1,nx
      :
    :
  :
:
```

C/C++の例 :

```
for(int k=0 ; k<nz ; ++k){
  for(int j=0 ; j<ny ; ++j){
    for(int i=0 ; i<nx ; ++i){
      a[j][i] = b[k][j][i]*c[k][i];
      d[k][j][i] = d[k][j][i] + a[j][i]*e[k][j];
    }
  }
}
```

#pragma omp parallel for **private(a)**

```
for(int k=0 ; k<nz ; ++k){
  for(int j=0 ; j<ny ; ++j){
    for(int i=0 ; i<nx ; ++i){
      :
    }
  }
}
```

- 配列aはi,jの次元しか持たず、ループ中で定義・参照されている。
- このような配列はスレッドごとに領域を確保しなければ、正しい結果を得ることができない。
- 配列aに対して指示文でprivate指定を行うことにより、配列aはスレッドごとに独立した領域に確保される。
- private(a,b,c)のように複数の配列、変数を指定することが可能。

5. OpenMPの記述法

● ループ文の並列化

- ✓ 連続する複数のループが並列化の対象となる場合、並列領域を設定してループ文の並列化を指定する.

Fortranの例 :

```
!$OMP parallel  
!$OMP do
```

並列化対象のループ

```
!$OMP end do  
!$OMP do
```

並列化対象のループ

```
!$OMP end do  
!$OMP end parallel
```

C/C++の例 :

```
#pragma omp parallel  
#pragma omp for
```

並列化対象のループ

```
#pragma omp for
```

並列化対象のループ

- ✓ 並列領域の範囲を広げることにより、OpenMPによるオーバーヘッドを軽減することが可能になる.

5. OpenMPの記述法

● 逐次実行

- ✓ 並列領域内に非並列で処理(単一のスレッドが実行)する部分がある場合, single指示文を指定する.

Fortranの例 :

```
!$OMP parallel  
!$OMP do
```

並列化対象のループ

```
!$OMP end do  
!$OMP single
```

非並列処理の部分

```
!$OMP end single  
!$OMP do
```

並列化対象のループ

```
!$OMP end do  
!$OMP end parallel
```

C/C++の例 :

```
#pragma omp parallel  
#pragma omp for
```

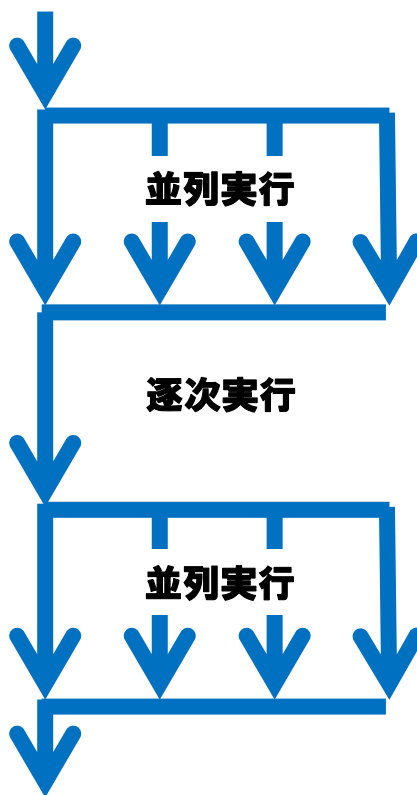
並列化対象のループ

```
#pragma omp single
```

非並列処理の部分

```
#pragma omp for
```

並列化対象のループ

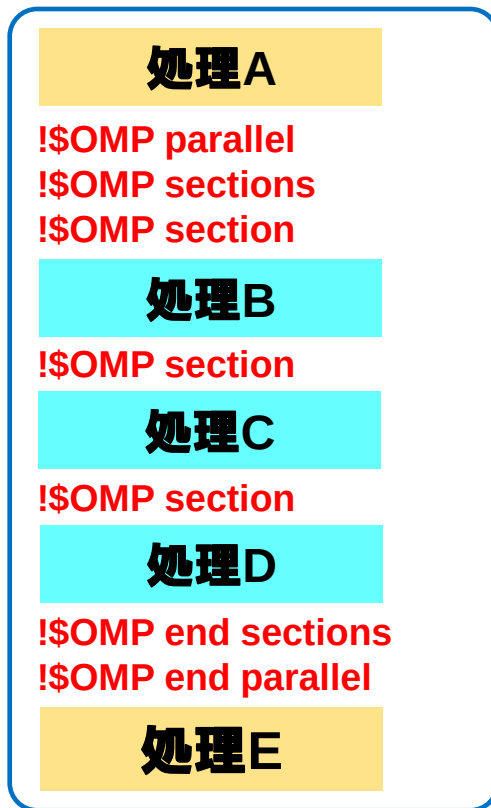


5. OpenMPの記述法

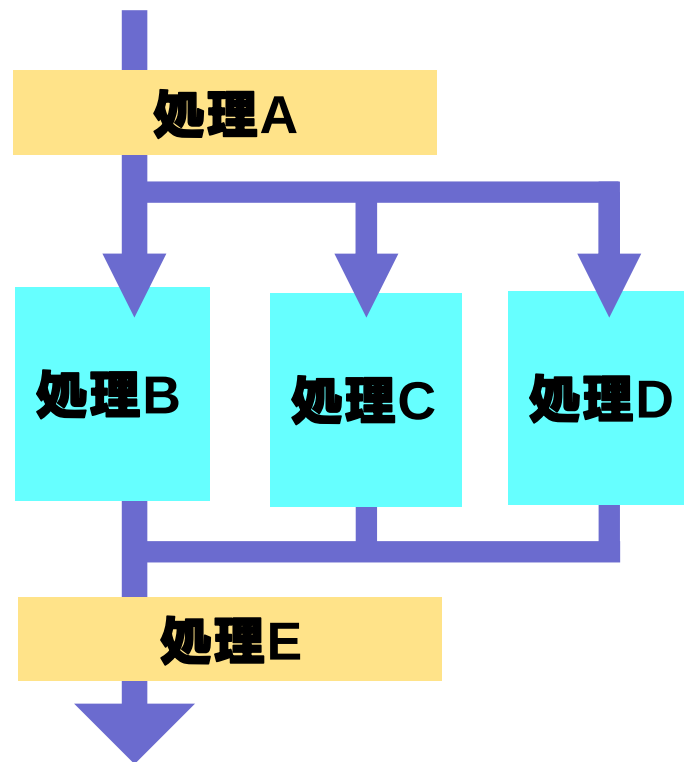
● 処理の並列化

- ✓ ユーザ関数や処理の纏まりに並列性がある場合、処理の纏まりをスレッドに分散して実行する。
 - 処理B,C,Dの処理順序が入れ替わっても結果に差異が生じない場合のみ可能.

Fortranの例 :



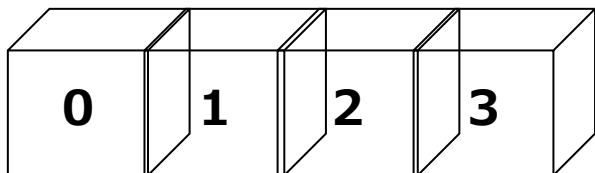
C/C++の例 :



5. OpenMPの記述法

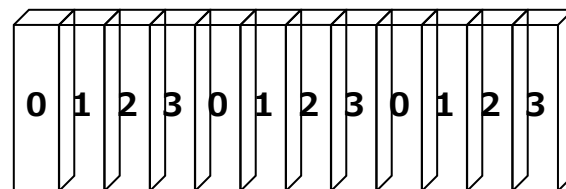
- ループ文はなるべく均等にスレッドに割当てられる.
- しかしながらループ中の処理量に偏りが生じる場合, スレッドに割当てられる処理が均等でなくなるため, 高い並列効果が得られない.
- `schedule`オプションでスレッドへの割当て方法を変更する.

※何も指定しない, あるいは`schedule(static)`の場合



- 領域(並列化対象のループ長)をスレッド数で分割する
- ブロック分割と呼ばれる手法

※`schedule(dynamic,1)`の場合



- 領域(並列化対象のループ長)を帯状に細分し, 巡回的にスレッドに動的に割当て(終了したスレッド毎に割当てるので上記のように順番に割当てられるとは限らない)
- サイクリック分割と呼ばれる手法
- `(dynamic,N)`のNは帯幅(チャンクサイズ)を指定する

- チャンクサイズを小さくサイクリックに分割するとオーバーヘッドが大きくなるので, 処理量の不均衡な状態を見ながら適切なチャンクサイズを指定する.

5. OpenMPの記述法

- scheduleオプションで指定可能な主な分割方法は以下の通り.

指定方法	動作
<code>schedule(static)</code>	領域(ループ長)をスレッド数で分割する. scheduleを指定しない場合もこの分割方法が採用される(規定値).
<code>schedule(dynamic,N)</code>	最初にN分の反復回数が各スレッドに割当てられ, ラウンドロビン方式で各スレッドに割付ける. N を省略した場合N=1となる.

- 指定方法は以下の通り.

Fortranの例 :

```
!$OMP parallel do schedule(dynamic,1)  
:  
!$OMP end parallel do
```

C/C++の例 :

```
#pragma omp parallel for schedule (dynamic,1)
```

5. OpenMPの記述法

- 実行時の総スレッド数や自スレッド番号は関数呼出しで取得可能.

`omp_get_num_threads( )`:総スレッド数の取得

`omp_get_thread_num( )`:自スレッド番号の取得

- スレッド番号で処理を制御する際に使用.

- OpenMP実行時関数を使用する場合は,

Fortran: moduleのomp_lib

C: ヘッダのomp.h

を使用することを宣言する.

Fortranの例 :

```
program sample2
  use omp_lib
  !$OMP parallel
    print *, "Hello World", &
      omp_get_num_threads(), omp_get_thread_num()
  !$OMP end parallel
  stop
end
```



```
# setenv OMP_NUM_THREADS 4
# ./a.out
Hello World      4      0
Hello World      4      1
Hello World      4      2
Hello World      4      3
```

C/C++の例 :

```
#include <stdio.h>
#include <omp.h>
int main()
{
  #pragma omp parallel
  printf("Hello World %d %d\n",
    omp_get_num_threads(), omp_get_thread_num());
  return 0;
}
```



```
# setenv OMP_NUM_THREADS 4
# ./a.out
Hello World 4 0
Hello World 4 3
Hello World 4 2
Hello World 4 1
```

6. 演習問題 3 (practice_3)

- 姫野ベンチマークコード(himenoBMTsp_s)をOpenMPで並列化する.
 - ✓ 姫野ベンチマーク：ポアッソン方程式解法をヤコビの反復法で解く場合に主要なループの処理速度を計るもの(<https://i.riken.jp/supercom/documents/himenobmt/>).
 - ✓ 本演習では上記Webページからダウンロードしたソースコードの一部修正したものを用いる.
- 演習問題は穴埋め形式になっており, コードの一部 (タイマー処理部分) についてはOpenMP用に修正済み※

※逐次版のタイマーはCPU時間を計測するもので, 並列プログラムではCPU時間は短縮されないなので, 並列化の効果を検証できない.
(P38参照)

6. 演習問題 3 (practice_3) つづき

- 時間計測は以下のように修正済み. (テキストのP36参照)

Fortran演習プログラム :

```
38 C -----
39 C "use portlib" statement on the next line is for Visual fortran
40 C to use UNIX libraries. Please remove it if your system is UNIX.
41 C -----
42 !   use portlib
43 use omp_lib
44 IMPLICIT REAL*4(a-h,o-z)
45 real*8 t1,t2

      (省略)

79 !   cpu0=ctime(time0)
80 t1=omp_get_wtime( )
81 C
82 C Jacobi iteration
83   call jacobi(nn,gosa)
84 C
85 !   cpu1= ctime(time1)
86 t2=omp_get_wtime( )
87 !   cpu = cpu1
88 cpu = t2-t1
89   flop=real(kmax-2)*real(jmax-2)*real(imax-2)*34.0*real(nn)
```

行追加

修正(一つ上の行と置換)



6. 演習問題3 (practice_3) つづき

- サブルーチンinitmtの以下の の部分を埋めてください。

Fortran演習プログラム：

```
143 
144 
145   do k=1,mkmax
146     do j=1,mjmax
147       do i=1,mimax
148         a(i,j,k,1)=0.0
149         a(i,j,k,2)=0.0
150         a(i,j,k,3)=0.0
151         a(i,j,k,4)=0.0
152         b(i,j,k,1)=0.0
153         b(i,j,k,2)=0.0
154         b(i,j,k,3)=0.0
155         c(i,j,k,1)=0.0
156         c(i,j,k,2)=0.0
157         c(i,j,k,3)=0.0
158         p(i,j,k) =0.0
159         wrk1(i,j,k)=0.0
160         bnd(i,j,k)=0.0
161       enddo
162     enddo
163   enddo
164 
```

145行目から163
行目のループが
並列化可能か検
討します。

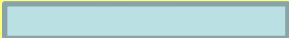
```
166 
167   do k=1,kmax
168     do j=1,jmax
169       do i=1,imax
170         a(i,j,k,1)=1.0
171         a(i,j,k,2)=1.0
172         a(i,j,k,3)=1.0
173         a(i,j,k,4)=1.0/6.0
174         b(i,j,k,1)=0.0
175         b(i,j,k,2)=0.0
176         b(i,j,k,3)=0.0
177         c(i,j,k,1)=1.0
178         c(i,j,k,2)=1.0
179         c(i,j,k,3)=1.0
180         p(i,j,k) =float((k-1)*(k-1))/float((kmax-1)*(kmax-1))
181         wrk1(i,j,k)=0.0
182         bnd(i,j,k)=1.0
183       enddo
184     enddo
185   enddo
186 
187 
```

167行目から185行目までの
ループも並列化可能であれば、
2つのループ全体（143行目
～187行目）でOpenMP指示
行による並列化を行います。

6. 演習問題 3 (practice_3) つづき

- サブルーチン jacobi の以下の  の部分を埋めてください。

Fortran演習プログラム：

```
213 DO loop=1,nn
214   gosa=0.0
215   
216   
217   DO K=2,kmax-1
218     DO J=2,jmax-1
219       DO I=2,imax-1
220         S0=a(I,J,K,1)*p(I+1,J,K)+a(I,J,K,2)*p(I,J+1,K)
221         1      +a(I,J,K,3)*p(I,J,K+1)
222         2      +b(I,J,K,1)*(p(I+1,J+1,K)-p(I+1,J-1,K)
223         3      -p(I-1,J+1,K)+p(I-1,J-1,K))
224         4      +b(I,J,K,2)*(p(I,J+1,K+1)-p(I,J-1,K+1)
225         5      -p(I,J+1,K-1)+p(I,J-1,K-1))
226         6      +b(I,J,K,3)*(p(I+1,J,K+1)-p(I-1,J,K+1)
227         7      -p(I+1,J,K-1)+p(I-1,J,K-1))
228         8      +c(I,J,K,1)*p(I-1,J,K)+c(I,J,K,2)*p(I,J-1,K)
229         9      +c(I,J,K,3)*p(I,J,K-1)+wrk1(I,J,K)
230         SS=(S0*a(I,J,K,4)-p(I,J,K))*bnd(I,J,K)
231         GOSA=GOSA+SS*SS
232         wrk2(I,J,K)=p(I,J,K)+OMEGA *SS
233       enddo
234     enddo
235   enddo
236   
```

217行目から235行目のDO
ループを並列化するため
は、プライベート指定とリ
ダクション演算が必要です。

```
238 
239   DO K=2,kmax-1
240     DO J=2,jmax-1
241       DO I=2,imax-1
242         p(I,J,K)=wrk2(I,J,K)
243       enddo
244     enddo
245   enddo
246   
247   
248 C
249   enddo
```

217行目から245行目までの
ループ全体が並列化可能であ
れば、ループ全体でOpenMP
指示行による並列化を行います。

6. 演習問題3 (practice_3) つづき

■ 姫野ベンチマークコード(himenoBMTsp_s)をOpenMPで並列化.

項目	対象		備考
	Fortran	C	
作業ディレクトリ	F/practice_3	C/practice_3	
使用ソースファイル	sample6.f	sample6.c	編集 必要
オリジナルソースファイル	sample6.f.org	sample6.c.org	参考情報
コンパイルスクリプト	comp.sh		編集 不要
ジョブファイル	run.sh		そのまま投入

- 手順①：作業ディレクトリを移動してください.
\$ cd OpenMP/[F] or [C]/practice_3
- 手順②：エディタでソースファイルを編集し, OpenMP並列化を実施してください.

6. 演習問題 3 (practice_3) つづき

- 手順③：コンパイルを実行します.

\$./comp.sh

- 手順④：ジョブを投入します.

\$ qsub run.sh

- 手順⑤：結果を確認します. 結果はp3-practice.oXXXX(XXXXにはジョブIDが入ります)として格納されます.

\$ cat p3-practice.oXXXX

7. 演習問題4 (practice_4)

■ 姫野ベンチマークコード(himenoBMTsp_s)をOpenMPで並列化.
(AOBA-SのVHのCPUで実行)

項目	対象		備考
	Fortran	C	
作業ディレクトリ	F/practice_4	C/practice_4	
使用ソースファイル	sample6.f	sample6.c	編集 不要
コンパイルスクリプト	comp.sh		編集 不要
ジョブファイル	run.sh		そのまま投入

- 手順①：作業ディレクトリを移動してください.
\$ cd OpenMP/[F] or [C]/practice_4
- 手順②：演習問題3で使したソースコードをコピーしてください.
[F]の場合：\$ cp ../practice_3/sample6.f .
[C]の場合：\$ cp ../practice_3/sample6.c .

7. 演習問題4 (practice_4) つづき

- 手順③：コンパイルを実行します.

\$./comp.sh

- 手順④：ジョブを投入します.

\$ qsub run.sh

- 手順⑤：結果を確認します. 結果はp4-practice.oXXXX(XXXXにはジョブIDが入ります)として格納されます.

\$ cat p4-practice.oXXXX

8. 演習問題5 (practice_5)

- 姫野ベンチマークコード(himenoBMTsp_s)をOpenMPで並列化.
(並列数を変えて実行)

項目	対象		備考
	Fortran	C	
作業ディレクトリ	F/practice_5	C/practice_5	
使用ソースファイル	演習3,4の環境を使用		編集 不要
コンパイルスクリプト	演習3,4の環境を使用		編集 不要
ジョブファイル	run.sh		修正 必要

- 手順①：作業ディレクトリを移動してください.
\$ cd OpenMP/[F] or [C]/practice_5
- 手順②：演習問題3, 演習問題4で使した環境をコピーしてください.
\$ cp -r ../practice_3 .
\$ cp -r ../practice_4 .

8. 演習問題5 (practice_5) つづき

- 手順③：実行コア数を修正します.

\$ cd ./practice_3 もしくは % cd ./practice_4

\$ vi run.sh

※practice_3の場合

環境変数 VE_OMP_NUM_THREADS の数値を変更します.

※practice_4の場合

環境変数 OMP_NUM_THREADS の数値を変更します.

- 手順④：ジョブを投入します.

\$ qsub run.sh

- 手順⑤：結果を確認します. 結果はp3-practice.oXXXXもしくはp4-practice.oXXXX(XXXXにはジョブIDが入ります)として格納されます.

\$ cat p3-practice.oXXXX もしくは p4-practice.oXXXX

9. 参考(時間計測)

- OpenMPでは時間計測の関数`omp_get_wtime`を提供している.
- OpenMP実行時関数を使用する場合は,
Fortran: moduleの`omp_lib`
C: ヘッダの`omp.h`
を使用することを宣言する.
- 時間を格納する変数は倍精度整数で宣言する.

Fortranの例 :

```
use omp_lib
real*8 t1,t2
num=0
t1=omp_get_wtime()
!$OMP parallel do reduction(+:num)
do i=1,1000
    num=num+i
enddo
!$OMP end parallel do
t2=omp_get_wtime()
print *,num,t2-t1
stop
end
```

C/C++の例 :

```
#include <stdio.h>
#include <omp.h>
int main()
{
    int n=1000;
    int num;
    num=0;
    double t1, t2;
    t1=omp_get_wtime();
    #pragma omp parallel for reduction(+:num)
    for(int i=1 ; i<=n ; ++i){
        num+=i;
    }
    t2=omp_get_wtime();
    printf("%d %f\n",num,t2-t1);
    return 0;
}
```

9. 参考(AOBA-B(LX 406Rz-2)の利用方法)

- サイバーサイエンスセンターのLX 406Rz-2でもOpenMPの使用は可能.
- OpenMPの使い方はSX-Aurora TSUBASAと同じ.
- フロントエンドサーバ上で, 以下のようにコンパイルする.

•AOCCコンパイラ

flang -fopenmp [オプション] ソースファイル名

•GCCコンパイラ

gfortran -fopenmp [オプション] ソースファイル

•Intelコンパイラ

ifort -qopenmp [オプション] ソースファイル名

※オプションは「AOBA-B プログラム開発・実行環境 利用手順書」を参照

<https://www.ss.cc.tohoku.ac.jp/sscc/wp-content/uploads/pdf/AOBA-Bプログラム開発・実行環境利用手順書.pdf>

● AOBA-Bのジョブクラス

利用形態	キュー名	ノード数	最大経過時間 既定値/最大値	メモリサイズ
共有	lx	1~16	72時間/720時間	256GB×ノード数

※OpenMPのみの並列では複数のノードを利用した実行はできません.

9. 参考(参考文献)

- OpenMPの仕様は<http://www.openmp.org/>で公開されている。
- 現在日本語で出版されている参考書籍は「OpenMPによる並列プログラミングと数値計算法」(牛島省著,丸善株式会社)や「OpenMP並列プログラミング」(菅原清文著, 株式会社カットシステム)などがある。



演習問題解答例

各演習問題の解答例は、演習問題のディレクトリ配下のanswer ディレクトリに格納されています。

演習問題 2 回答例 (Fortran演習プログラム)

```
program sample5
implicit real(8)(a-h,o-z)
parameter ( n=4096 )
real(8) a(n,n),b(n,n),c(n,n)
real(8) t1,t2
double precision cp1,cp2
a=0.0d0
call random_number(b)
call random_number(c)
write(6,50) ' Matrix Size = ',n
50 format(1x,a,i5)
call ETIME(cp1)
!$OMP parallel do
do j=1,n
do k=1,n
do i=1,n
a(i,j)=a(i,j)+b(i,k)*c(k,j)
end do
end do
end do
!$OMP end parallel do
call ETIME(cp2)
t1=cp2-cp1
write(6,60) ' Execution Time = ',t1,' sec', ' A(n,n) = ',a(n,n)
60 format(1x,a,f10.3,a,1x,a,d24.15)
stop
end
```

演習問題3 回答例 (Fortran演習プログラム)

```
C*****
C
C (省略)
C -----
C   ! use portlib
C   use omp_lib
C   IMPLICIT REAL*4(a-h,o-z)
C   real*8 t1,t2
C
C   PARAMETER (mimax=513,mjmax=257,mkmax=257)
C   PARAMETER (mimax=257,mjmax=129,mkmax=129)
C   PARAMETER (mimax=129,mjmax=65,mkmax=65)
C   PARAMETER (mimax=65,mjmax=33,mkmax=33)
C
C   ttargt specifys the measuring period in sec
C   PARAMETER (ttargt=60.0)
CC Arrey
C   common /pres/ p(mimax,mjmax,mkmax)
C   common /mtrx/ a(mimax,mjmax,mkmax,4),
C   + b(mimax,mjmax,mkmax,3),c(mimax,mjmax,mkmax,3)
C   common /bound/ bnd(mimax,mjmax,mkmax)
C   common /work/ wrk1(mimax,mjmax,mkmax),wrk2(mimax,mjmax,mkmax)
CC Other constants
C   common /others/ imax,jmax,kmax,omega
C
C   dimension time0(2),time1(2)
```

演習問題3 回答例 (Fortran演習プログラム) つづき

```
C
  omega=0.8
  imax=mimax-1
  jmax=mjmax-1
  kmax=mkmax-1
CC Initializing matrixes
  call initmt
  write(*,*) ' mimax=',mimax,' mjmax=',mjmax,' mkmax=',mkmax
  write(*,*) ' imax=',imax,' jmax=',jmax,' kmax=',kmax
CC Start measuring
C
  nn=10000
  write(*,*) ' Start rehearsal measurement process.'
  write(*,*) ' Measure the performance in 10000 times.'
C
!   cpu0=dtime(time0)
  t1=omp_get_wtime()
C
C Jacobi iteration
  call jacobi(nn,gosa)
C
!   cpu1= dtime(time1)
  t2=omp_get_wtime()
!   cpu = cpu1
  cpu = t2-t1
  flop=real(kmax-2)*real(jmax-2)*real(imax-2)*34.0*real(nn)
  xmflops2=flop/cpu*1.0e-6
  write(*,*) ' MFLOPS:',xmflops2,' time(s):',cpu,gosa
```

演習問題3 回答例 (Fortran演習プログラム) つづき

```
C
C   end the test loop
!   nn=ifix(tttarget/(cpu/3.0))
!   write(*,*) 'Now, start the actual measurement process.'
!   write(*,*) 'The loop will be excuted in',nn,' times.'
!   write(*,*) 'This will take about one minute.'
!   write(*,*) 'Wait for a while.'
C
C   Jacobi iteration
!   cpu0=dtime(time0)
!   call jacobi(nn,goosa)
C
!   cpu1= dtime(time1)
!   cpu = cpu1
!   flop=real(kmax-2)*real(jmax-2)*real(imax-2)*34.0*real(nn)
!   xmflops2=flop*1.0e-6/cpu
C
CCC   xmflops2=nflop/cpu*1.0e-6*float(nn)
C
!   write(*,*) ' Loop executed for ',nn,' times'
!   write(*,*) ' Gosa :',goosa
!   write(*,*) ' MFLOPS:',xmflops2, ' time(s):',cpu
!   score=xmflops2/82.84
!   write(*,*) ' Score based on Pentium III 600MHz :',score
C
!   pause
!   stop
!   END
```

演習問題3 回答例 (Fortran演習プログラム) つづき

```
C
C
C*****
  subroutine initmt
C*****
    IMPLICIT REAL*4(a-h,o-z)
C
C    PARAMETER (mimax=513,mjmax=257,mkmax=257)
C    PARAMETER (mimax=257,mjmax=129,mkmax=129)
C    PARAMETER (mimax=129,mjmax=65,mkmax=65)
C    PARAMETER (mimax=65,mjmax=33,mkmax=33)
C
C
CC Arrey
    common /pres/ p(mimax,mjmax,mkmax)
    common /mtrx/ a(mimax,mjmax,mkmax,4),
+   b(mimax,mjmax,mkmax,3),c(mimax,mjmax,mkmax,3)
    common /bound/ bnd(mimax,mjmax,mkmax)
    common /work/ wrk1(mimax,mjmax,mkmax),wrk2(mimax,mjmax,mkmax)
CC other constants
    common /others/ imax,jmax,kmax,omega
C
!$OMP parallel
!$OMP do
    do k=1,mkmax
        do j=1,mjmax
            do i=1,mimax
                a(i,j,k,1)=0.0
                a(i,j,k,2)=0.0
```

演習問題3 回答例 (Fortran演習プログラム) つづき

```
        a(i,j,k,3)=0.0
        a(i,j,k,4)=0.0
        b(i,j,k,1)=0.0
        b(i,j,k,2)=0.0
        b(i,j,k,3)=0.0
        c(i,j,k,1)=0.0
        c(i,j,k,2)=0.0
        c(i,j,k,3)=0.0
        p(i,j,k) =0.0
        wrk1(i,j,k)=0.0
        bnd(i,j,k)=0.0
    enddo
enddo
enddo
!$OMP end do
C
!$OMP do
do k=1,kmax
do j=1,jmax
do i=1,imax
    a(i,j,k,1)=1.0
    a(i,j,k,2)=1.0
    a(i,j,k,3)=1.0
    a(i,j,k,4)=1.0/6.0
    b(i,j,k,1)=0.0
    b(i,j,k,2)=0.0
    b(i,j,k,3)=0.0
    c(i,j,k,1)=1.0
    c(i,j,k,2)=1.0
```

演習問題3 回答例 (Fortran演習プログラム) つづき

```
        c(i,j,k,3)=1.0
        p(i,j,k) =float((k-1)*(k-1))/float((kmax-1)*(kmax-1))
        wrk1(i,j,k)=0.0
        bnd(i,j,k)=1.0
    enddo
enddo
enddo
!$OMP end do
!$OMP end parallel
C
    return
end
C
C*****
    subroutine jacobi(nn,gosa)
C*****
    IMPLICIT REAL*4(a-h,o-z)
C
C    PARAMETER (mimax=513,mjmax=257,mkmax=257)
C    PARAMETER (mimax=257,mjmax=129,mkmax=129)
    PARAMETER (mimax=129,mjmax=65,mkmax=65)
C    PARAMETER (mimax=65,mjmax=33,mkmax=33)
C
CC Arrey
    common /pres/ p(mimax,mjmax,mkmax)
    common /mtrx/ a(mimax,mjmax,mkmax,4),
+    b(mimax,mjmax,mkmax,3),c(mimax,mjmax,mkmax,3)
    common /bound/ bnd(mimax,mjmax,mkmax)
    common /work/ wrk1(mimax,mjmax,mkmax),wrk2(mimax,mjmax,mkmax)
```


演習問題3 回答例 (Fortran演習プログラム) つづき

```
CC other constants
      common /others/ imax,jmax,kmax,omega
C
C
      DO loop=1,nn
        gosa=0.0
!$OMP parallel
!$OMP do private(S0,SS) reduction(+:GOSA)
          DO K=2,kmax-1
            DO J=2,jmax-1
              DO I=2,imax-1
                S0=a(I,J,K,1)*p(I+1,J,K)+a(I,J,K,2)*p(I,J+1,K)
1                 +a(I,J,K,3)*p(I,J,K+1)
2                 +b(I,J,K,1)*(p(I+1,J+1,K)-p(I+1,J-1,K)
3                 -p(I-1,J+1,K)+p(I-1,J-1,K))
4                 +b(I,J,K,2)*(p(I,J+1,K+1)-p(I,J-1,K+1)
5                 -p(I,J+1,K-1)+p(I,J-1,K-1))
6                 +b(I,J,K,3)*(p(I+1,J,K+1)-p(I-1,J,K+1)
7                 -p(I+1,J,K-1)+p(I-1,J,K-1))
8                 +c(I,J,K,1)*p(I-1,J,K)+c(I,J,K,2)*p(I,J-1,K)
9                 +c(I,J,K,3)*p(I,J,K-1)+wrk1(I,J,K)
                SS=(S0*a(I,J,K,4)-p(I,J,K))*bnd(I,J,K)
                GOSA=GOSA+SS*SS
                wrk2(I,J,K)=p(I,J,K)+OMEGA *SS
              enddo
            enddo
          enddo
!$OMP end do
```

演習問題3 回答例 (Fortran演習プログラム) つづき

```
C
!$OMP do
    DO K=2,kmax-1
        DO J=2,jmax-1
            DO I=2,imax-1
                p(I,J,K)=wrk2(I,J,K)
            enddo
        enddo
    enddo
!$OMP end do
!$OMP end parallel
C
    enddo
CC End of iteration
return
end
```