2024年度
並列プログラミング入門Ⅱ
（MPI）

2024年　10 月　7 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ＮＥＣが共同で作成しました.

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

MPIプログラミング編

MPIプログラミング編・目次

演習問題の構成

- 演習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/MPI/

|-- [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] / practice_6	**演習問題6**
|-- [F,C] / sample	**テキスト内のsampleX.fとして掲載しているプログラム**
|-- [F,C] / etc	**その他，テキスト内のetcX.fとして掲載しているプログラム**

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

1．MPI概要

- 分散メモリ並列処理におけるメッセージパッシングの標準規格
  - 複数のプロセス間でのデータをやり取りするために用いるメッセージ通信操作の仕様標準
- FORTRAN，Cから呼び出すサブプログラムのライブラリ
- ポータビリティに優れている
  - 標準化されたライブラリインターフェースによって，様々なMPI実装環境で同じソースをコンパイル・実行できる
- プログラマの負担が比較的大きい
  - プログラムを分析して，データ・処理を分割し，通信の内容とタイミングをユーザが自ら記述する必要がある
- 大容量のメモリ空間を利用可能
  - 複数ノードを利用するプログラムの実行により，大きなメモリ空間を利用可能になる

    (サイバーサイエンスセンターのSX-Aurora TSUBASAでは，AOBA-Aは12TByte，AOBA-Sは192TByteまで利用可能)

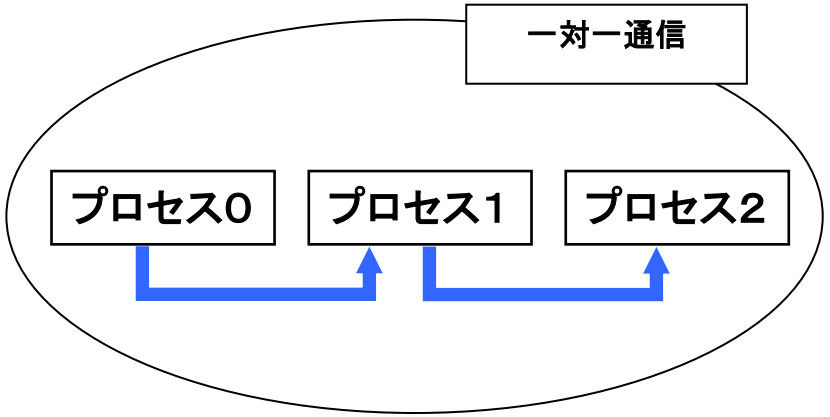
MPIの主な機能

プロセス管理

- MPIプログラムの初期化や終了処理などを行う

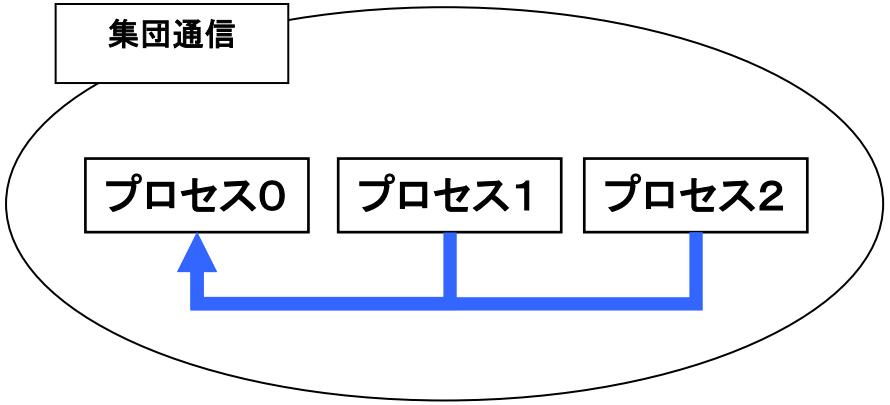
一対一通信

- 一対一で行う通信



集団通信

- グループ内のプロセス全体が関わる通信操作



MPIプログラムの基本構造

a.outのイメージ(Fortran)

```
PROGRAM MAIN
CALL MPI_INIT(IERR)
```

MPI並列の対象

```
CALL MPI_FINALIZE(IERR)
STOP
END
```

a.outのイメージ(C/C++)

```
int main(int argc, char **argv){
MPI_Init(&argc, &argv);
```

MPI並列の対象

```
MPI_Finalize();
return 0;
}
```

実行例

```
$ mpirun -np 4 ./a.out
```

- MPI_INITとMPI_FINALIZEの呼び出しを行う区間がMPI並列の対象
- MPI_INITの呼び出しを行った時点でプロセスが生成される(mpirunコマンドで指定するプロセス数．下の例ではプロセス数は「4」)
- メインプログラム・メイン関数の最初の実行文MPI_INITを呼び出す
- プログラムの終了直前にMPI_FINALIZEを呼び出す

MPI_INITは付録1.1.4参照

MPI_FINALIZEは付録1.1.5参照

MPIプログラムの基本構造

プログラム実行時のプロセス数を得る

Fortran	CALL MPI_COMM_SIZE(MPI_COMM_WORLD,NPROCS,IERR)
C	MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD,NPROCS);

- mpirunコマンドで指定するプロセス数がNPROCSに返る
- ループの分割数を決める場合などに使用
- MPI_COMM_WORLDは「コミュニケータ」と呼ばれ，同じ通信の集まりを識別するフラグ
- 集団通信は同じコミュニケータを持つ集団間で行う

プロセス番号を得る(プロセス番号は0から始まって，プロセス数-1まで)

Fortran	CALL MPI_COMM_RANK(MPI_COMM_WORLD,MYRANK,IERR)
C	MPI_Comm_rank (MPI_COMM_WORLD,MYRANK);

- 自プロセス番号がMYRANKに返る
- プロセス番号は「ランク」とも呼ばれる
- 特定のプロセスでのみ処理を実行する場合などに使用

MPI_COMM_SIZEは付録1.1.7参照

MPI_COMM_RANKは付録1.1.8参照

コンパイル・実行コマンド

MPIプログラムのコンパイル

```
mpinfort [オプション] ソースファイル名
```

※オプションはnfortと同様.

```
mpincc [オプション] ソースファイル名
```

※オプションはnccと同様.

MPIプログラムの実行

```
mpirun -np [総MPIプロセス数] ロードモジュール名
```

実行スクリプト例

32mpi 16smpのジョブを32ノード(32VE)で実行する際のスクリプト例

```
#!/bin/bash

#PBS -q sxs
#PBS --venode 32
#PBS -l elapstim_req=20:00:00
#PBS –N Test_Job

export VE_OMP_NUM_THREADS=16
cd $PBS_O_WORKDIR

mpirun -np 32 ./a.out
```

NQSVオプション(#PBSで指定)

-q　　キュー名を指定（必須）
--venode　使用VE数を指定（必須）
-l　　経過時間(hh:mm:ss)の申告（強く推奨）
-N　　ジョブ名を指定（任意）
-v (実行する全てのノードに対して)環境変数を設定する

実行時のプロセスあたりのスレッド数を設定する
AOBA-Aの最大は8.
AOBA-Sの最大は16.

$PBS_O_WORKDIR：ジョブスクリプトをqsubしたディレクトリ

詳細は https://www.ss.cc.tohoku.ac.jp/sscc/wp-content/uploads/pdf/サブシステムAOBA-Sの利用法.pdf　を参照

SX-Aurora TSUBASAのジョブクラス

- SX-Aurora TSUBASAのジョブクラス

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

※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.

詳細は https://www.ss.cc.tohoku.ac.jp/sscc/wp-content/uploads/pdf/サブシステムAOBA-Sの利用法.pdf　を参照

MPIプログラム例(Hello World)

逐次プログラム

sample1.f

```
program sample1
write(6,*) "Hello World"
stop
end
```

sample1.c

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

MPIプログラム

sample2.f

```
program sample2
include ‘mpif.h‘•••①
integer ierr,myrank,nprocs
call MPI_INIT(ierr)•••②
call MPI_COMM_SIZE(MPI_COMM_WORLD,nprocs,ierr)
call MPI_COMM_RANK(MPI_COMM_WORLD,myrank,ierr)
write(6,*) “Hello World   My rank=”,myrank,“(”,nprocs,“processes)”
call MPI_FINALIZE(ierr)•••③
stop
end
```

sample2.c

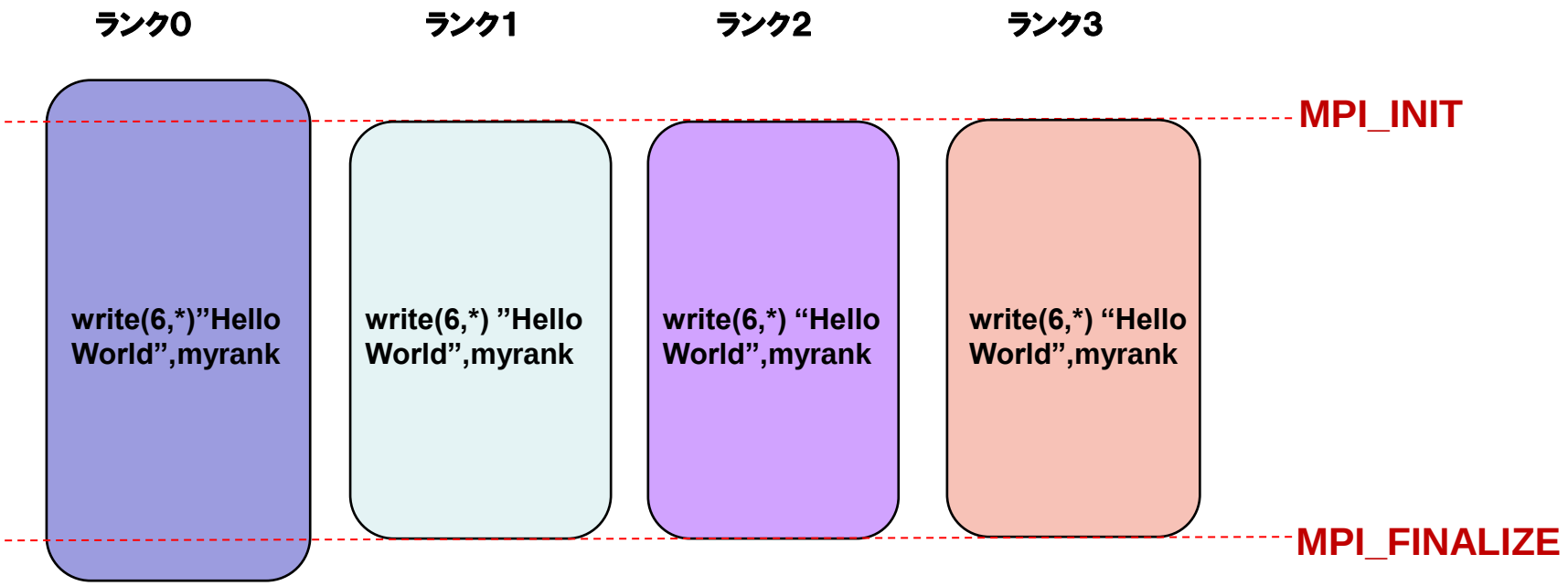
```
#include <stdio.h>
#include <mpi.h>•••①
int main(int argc, char **argv){
    int ierr,myrank,nprocs;
    ierr = MPI_Init(&argc, &argv);•••②
    ierr = MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD,&nprocs);
    ierr = MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD,&myrank);
    printf("Hello World   My rank=%d,( %d processes)¥n",
        myrank,nprocs);
    ierr = MPI_Finalize();•••③
    return 0;
}
```

MPIプログラムの実行

```
$ mpirun -np 4 ./a.out•••④
 Hello World   My rank=      3 (      4 processes)
 Hello World   My rank=      2 (      4 processes)
 Hello World   My rank=      0 (      4 processes)
 Hello World   My rank=      1 (      4 processes)
```

①MPIのインクルードファイルを指定する
②MPIの初期化(MPI_INIT)
③MPIの終了化(MPI_FINALIZE)
④4プロセスで実行
　「Hello World」とランク番号,プロセス数が4回出力

MPIプログラムの動作



① mpirunコマンドを実行(-npサブオプションのプロセス数は4)
② ランク0のプロセスが生成
③ MPI_INITをcallする時点でランク1,2,3のプロセスが生成
④ 各ランクで「write(6,*)“Hello World”,myrank」が実行
⑤ 出力する順番はタイミングで決まる(ランク番号順ではない)

２．演習問題1

- (1-1)P.14 のプログラム(sample2.fもしくはsample2.c)をコンパイル，実行してください

- (1-2)P.14 のMPIプログラム「Hello World」の結果をランク0のみが出力するように書き換えてください

演習問題1-1　（practice_1）

- P.14のソースファイル(sample2.f/sample2.c)をコピーし，コンパイル・実行してください

項目	対象		備考
	Fortan	C	
作業ディレクトリ	F/practice_1	C/practice_1	
使用ソースファイル	practice1.f （sample2.fをコピー）	practice1.c （sample2.cをコピー）	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，ファイルをコピーしてください.

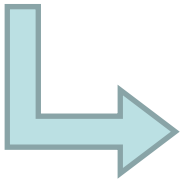
  $ cd　MPI/[F] or [C]/practice_1
  [F]の場合 : $ cp　../sample/sample2.f　practice1.f
  [C]の場合 : $ cp　../sample/sample2.c　practice1.c

- 手順②：コンパイルしてください.

  [F]の場合 : $ mpinfort　practice1.f
  [C]の場合 : $ mpincc　practice1.c

演習問題1-1　（practice_1)つづき

- 手順③：実行スクリプトを確認します.
  $ cat run.sh



```
#!/bin/bash
#PBS -q sxs
#PBS --venode 1
#PBS -N practice_p1
cd $PBS_O_WORKDIR
mpirun  -np 16 ./a.out
```

VEノード数：1
MPIプロセス数：16
ジョブクラス：sxs
ジョブ名：practice_p1
実行ディレクトリ：カレントディレクトリ

- 手順④：ジョブを投入します.
  $ qsub run.sh

- 手順⑤：実行結果を確認します．結果はpractice_p1.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 practice_p1.oXXXX

演習問題1-2　（practice_1）

演習問題1-1で使ったMPIプログラム「Hello World」の結果をランク0のみが出力するように書き換えてください

項目	対象		備考
	Fortan	C	
作業ディレクトリ	F/practice_1	C/practice_1	
使用ソースファイル	practice1-2.f	practice1-2.c	編集　必要
ジョブファイル	run.sh		そのまま投入

- 手順①：エディタでソースファイルを編集してください.

  [F]の場合：$ vi　practice1-2.f

  [C]の場合：$ vi　practice1-2.c

(vi以外のエディタでも構いません)

※次ページにプログラム編集のヒントがあります.

演習問題1-2　（practice_1）

ヒント

以下の [　　] の部分を埋めてください.
（P.13を参考にしてください）

Fortran演習プログラム：

```
program sample1_2
[　　]
integer ierr,myrank,nprocs
[　　]
[　　]
[　　]
if([　　]) write(6,*) "Hello World",myrank
[　　]
stop
end
```

- MPIのインクルードファイルを指定
- MPIの初期化
- プログラム実行時のプロセス数の取得
- プロセス番号の取得
- IF文で，自分自身がランク0である場合に出力を行うようにします.
- MPIの終了

演習問題1-2　（practice_1) つづき

- 手順②：コンパイルを実行します.
  [F]の場合 : $ mpinfort practice1-2.f
  [C]の場合 : $ mpincc practice1-2.c

- 手順③：ジョブを投入します.
  $ qsub run.sh

- 手順④：実行結果を確認します．結果はpractice_p1.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 practice_p1.oXXXX

総和プログラムのMPI化

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 isum
      isum=0
      do i=1,n
        isum=isum+i
      enddo
      write(6,*) "Total = ",isum
      stop
      end
```

総和計算

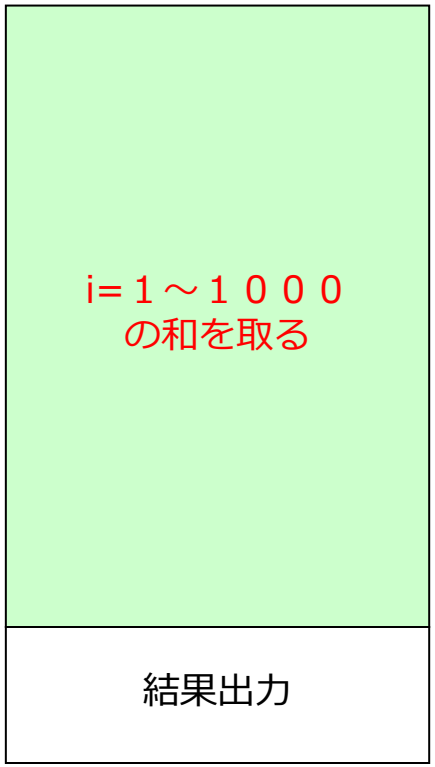
結果出力

sample3.c

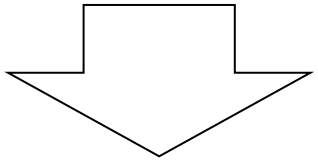
```
#include <stdio.h>
int main()
{
  int n=1000;
  int isum;
  isum=0;
  for(int i=1 ; i<=n ; ++i){
    isum+=i;
  }
  printf("Total = %d¥n",isum);
  return 0;
}
```

総和プログラムのMPI化

逐次プログラム処理イメージ



- 総和計算部分は，DOループもしくはforループ
- 結果出力は，write文もしくはprintf文
  - 最後の１回だけ



- 処理時間が一番大きいDOループもしくはforループが並列処理のターゲット

総和プログラムのMPI化

4分割の処理イメージ

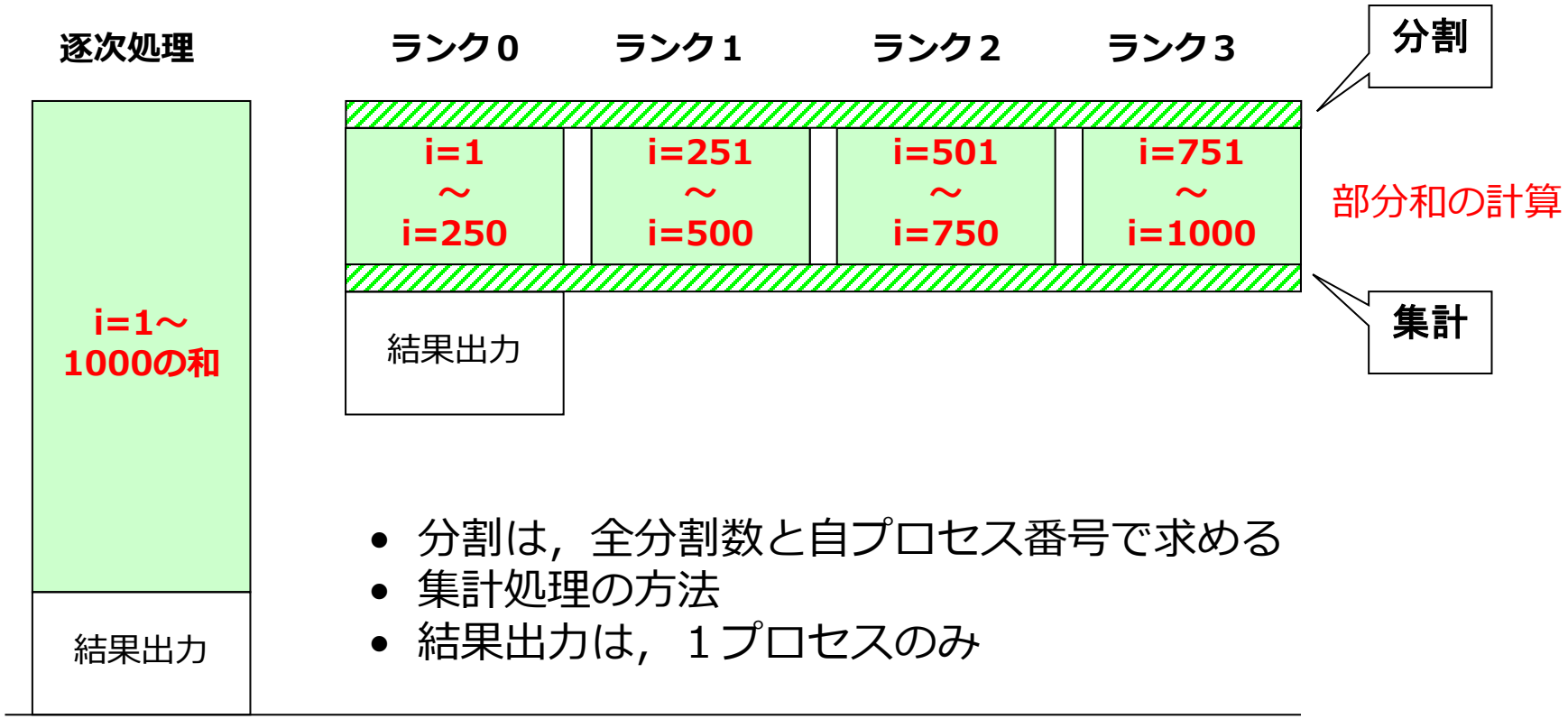
i=1,1000までの和を取る処理は,

i= 1, 250までの和を取る処理
i=251, 500までの和を取る処理
i=501, 750までの和を取る処理
i=751,1000までの和を取る処理

に分割することができる.
しかも順不同.

総和プログラムのMPI化

並列処理のイメージ(4分割)



- 分割は，全分割数と自プロセス番号で求める
- 集計処理の方法
- 結果出力は，１プロセスのみ

総和プログラムのMPI化

分割の方法 (n=1000の場合)

- **始点の求め方**
  - **((n-1)/nprocs+1)* myrank+1**
- **終点の求め方**
  - **((n-1)/nprocs+1)*(myrank+1)**

但し，全分割数はnprocs,自プロセス番号はmyrank
本例は，ｎがプロセス数で割り切れることを前提としている

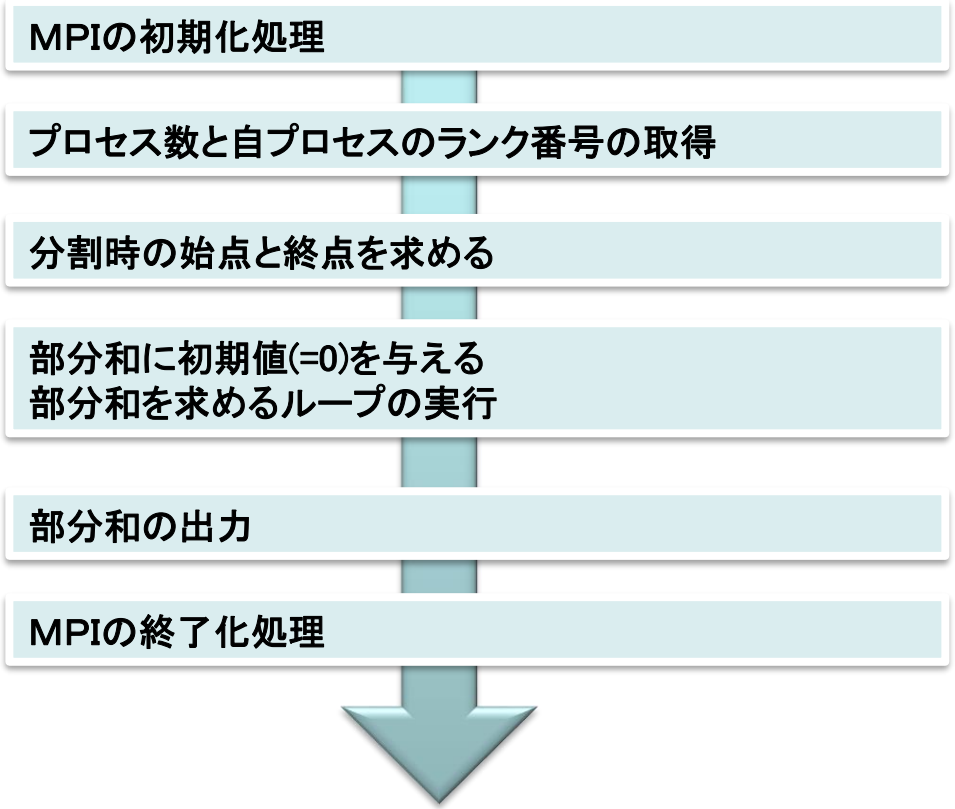
数値例

nprocs=4	始点	終点
myrank=0	1	250
myrank=1	251	500
myrank=2	501	750
myrank=3	751	1000

3．演習問題2 (practice_2)

1から1000の総和を8分割してMPI並列で実行し，部分和を各ランクから出力してください

- ヒント：プログラムの流れは下記のとおり



演習問題2 (practice_2)つづき

項目	対象		備考
	Fortan	C	
作業ディレクトリ	F/practice_2	C/practice_2	
使用ソースファイル	practice2.f	practice2.c	編集 必要
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 MPI/[F] or [C]/practice_2

- 手順②：エディタでソースファイルを編集してください．ソースファイルは ディレクトリ practice_2/ に用意しています.

  [F]の場合 : $ vi practice2.f

  [C]の場合 : $ vi practice2.c

※次ページにプログラム編集のヒントがあります.

演習問題2 (practice_2)つづき

ヒント

以下の [　　] の部分を埋めてください.

Fortran演習プログラム：

```
      program sample2
      include 'mpif.h'
      integer ierr,myrank,nprocs,ist,ied
      parameter(n=1000)
      integer isum
      call MPI_INIT(ierr)
      call MPI_COMM_SIZE(MPI_COMM_WORLD,nprocs,ierr)
      call MPI_COMM_RANK(MPI_COMM_WORLD,myrank,ierr)
      ist=
      ied=
      isum=0
      do i=ist,ied
        isum=isum+i
     enddo
     write(6,6000) myrank,isum
6000 format("Total of Rank:",i2,i10)
     call MPI_FINALIZE(ierr)
     stop
     end
```

- 始点の計算式を入れてください
- 終点の計算式を入れてください

演習問題2 (practice_2)つづき

- 手順③：コンパイルを実行します.
  [F]の場合 : $ mpinfort practice2.f
  [C]の場合 : $ mpincc practice2.c

- 手順④：ジョブを投入します.
  $ qsub run.sh

- 手順⑤：実行結果を確認します．結果はpractice_p2.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 practice_p2.oXXXX

MPIデータ転送

各プロセスは独立したプログラムと考える

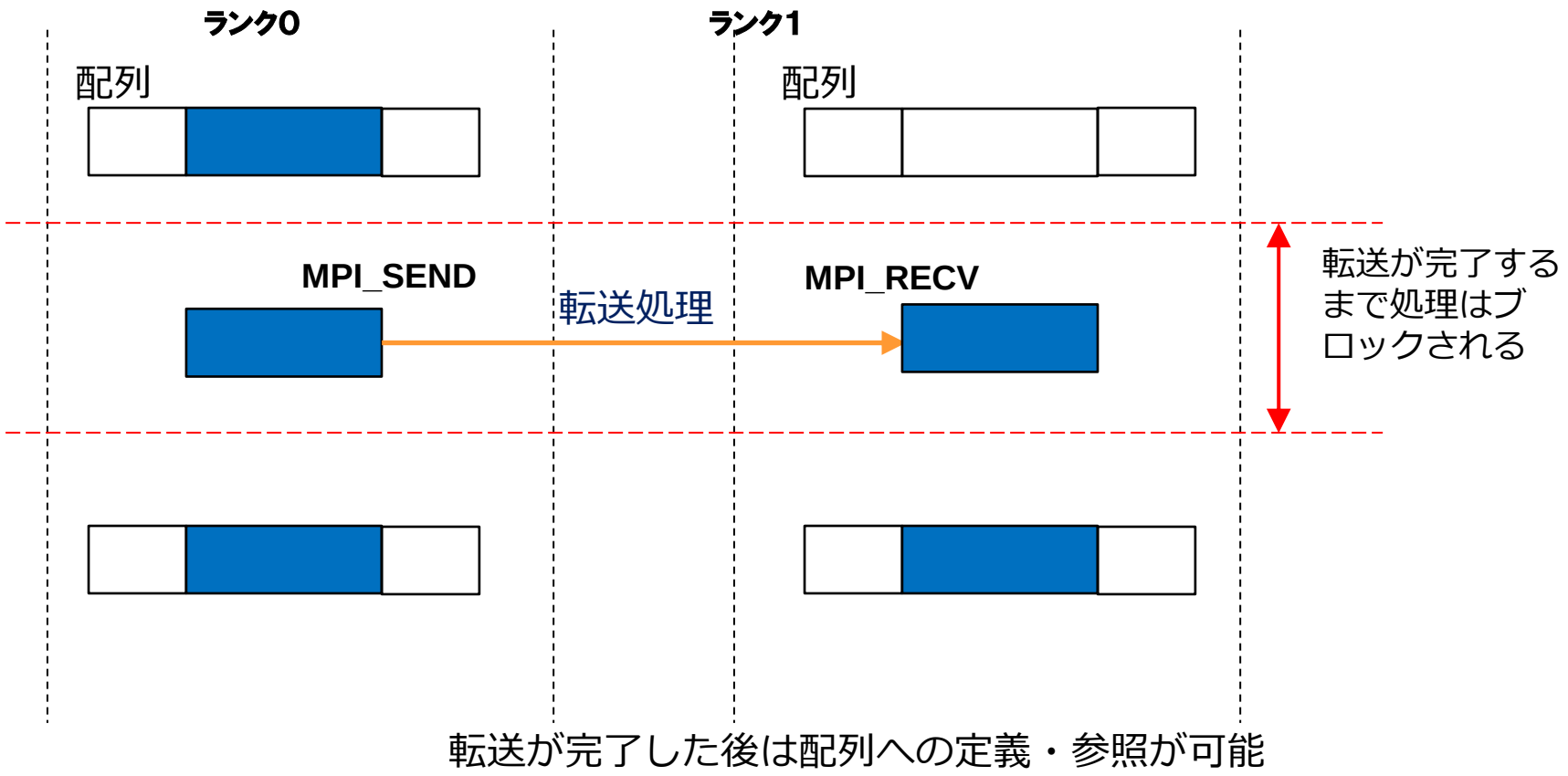
- 各プロセスは独立したメモリ空間を有する
- 他のプロセスのデータを直接アクセスすることは不可
- データ転送により他のプロセスのデータをアクセスすることが可能

MPI_SEND/MPI_RECV

- 同期型の1対1通信
- 特定のプロセス間でデータの送受信を行う．データ転送が完了するまで処理は中断

MPI_SEND/MPI_RECV

ランク０の配列の一部部分をランク１へ転送



MPI_SEND/MPI_RECV

sample4.f

```
program sample4
    include 'mpif.h'
    integer nprocs,myrank,itag,ierr
    integer status(MPI_STATUS_SIZE)
    real work(10)
    call MPI_INIT(ierr)
    call MPI_COMM_SIZE(MPI_COMM_WORLD,nprocs,ierr)
    call MPI_COMM_RANK(MPI_COMM_WORLD,myrank,ierr)
    itag=1
    work=0.0
    if(myrank.eq.0) then
      do i=1,10
        work(i)=float(i)
      enddo
      call MPI_SEND
     &      (work(4),3,MPI_REAL,1,itag,MPI_COMM_WORLD,ierr)
    else if(myrank.eq.1) then
      call MPI_RECV
     &      (work(4),3,MPI_REAL,0,itag,MPI_COMM_WORLD,
     +              status,ierr)
      write(6,*) work
    endif
    call MPI_FINALIZE(ierr)
    stop
    end
```

sample4.c

```
#include <stdio.h>
#include <mpi.h>
int main(int argc, char **argv){
      int ierr,myrank,nprocs,itag;
      MPI_Status status;
      float work[10];
      ierr = MPI_Init(&argc, &argv);
      ierr = MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD,&nprocs);
      ierr = MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD,&myrank);
      itag=1;
      for(int i=0;i<10;++i) work[i]=(float)0;
      if(myrank==0){
        for(int i=1;i<=10;++i){
          work[i-1]=(float)i;
        }
        MPI_Send
        (&work[3],3,MPI_FLOAT,1,itag,MPI_COMM_WORLD);
      }else if(myrank==1){
        MPI_Recv
        (&work[3],3,MPI_FLOAT,0,itag,MPI_COMM_WORLD,&status);
        for(int i=0;i<10;++i) printf("%f ",work[i]);
        printf("¥n");
      }
      ierr = MPI_Finalize();
      return 0;
}
```

MPI_SENDの詳細は付録1.2.4

MPI_RECVの詳細は付録1.2.7

４．演習問題3 (practice_3)

演習問題2のプログラムの各ランクの部分和をランク0に集めて，総和を計算し出力してください

- ヒント：転送処理は以下

ランク1,2,3(0以外)

Fortran：

```
      call MPI_SEND(isum,1,MPI_INTEGER,0,
     &              itag,MPI_COMM_WORLD,ierr)
```

C：

```
MPI_Send
(&isum,1,MPI_INT,0,itag,MPI_COMM_WORLD);
```

ランク0

Fortran：

```
      call MPI_RECV(isum2,1,MPI_INTEGER,1,
     &              itag,MPI_COMM_WORLD,status,ierr)
      call MPI_RECV(isum2,1,MPI_INTEGER,2,
     &              itag,MPI_COMM_WORLD,status,ierr)
      call MPI_RECV(isum2,1,MPI_INTEGER,3,
     &              itag,MPI_COMM_WORLD,status,ierr)
```

C：

```
MPI_Recv
(&isum2,1,MPI_INT,1,itag,MPI_COMM_WORLD,&status);
MPI_Recv
(&isum2,1,MPI_INT,2,itag,MPI_COMM_WORLD,&status);
MPI_Recv
(&isum2,1,MPI_INT,3,itag,MPI_COMM_WORLD,&status);
```

※isumで受信するとランク0の部分和が上書きされてしまう

4．演習問題3 (practice_3)つづき

項目	対象		備考
	Fortan	C	
作業ディレクトリ	F/practice_3	C/practice_3	
使用ソースファイル	practice3.f	practice3.c	編集　必要
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 MPI/[F] or [C]/practice_3

- 手順②：エディタでソースファイルを編集してください．演習問題の回答例としてソースファイルを用意しています．ご自身が作成された演習問題2の回答を使用したい場合は，practice_2/からソースファイルをコピーして使用してください.

  [F]の場合：　$ vi practice3.f

  [C]の場合：　$ vi practice3.c

※次ページにプログラム編集のヒントがあります.

4．演習問題3 (practice_3)つづき

ヒント

以下の [　　] の部分を埋めてください．（P34を参考にしてください）

Fortran演習プログラム：

```
      program example3
      include 'mpif.h'
      integer ierr,myrank,nprocs,ist,ied,itag
      integer status(MPI_STATUS_SIZE)
      parameter(n=1000)
      integer isum,isum2
      call MPI_INIT(ierr)
      call MPI_COMM_SIZE(MPI_COMM_WORLD,nprocs,ierr)
      call MPI_COMM_RANK(MPI_COMM_WORLD,myrank,ierr)
      ist=((n-1)/nprocs+1)*myrank+1
      ied=((n-1)/nprocs+1)*(myrank+1)
      isum=0
      do i=ist,ied
        isum=isum+i
      enddo
        itag=1
      if(          ) then
        call          (                    ,
     &                                     )
      else
        call          (                    )
     &                                      )
        isum=isum+isum2
        call          (                    )
     &                                      )
        isum=isum+isum2
        call          (                    )
     &                                      )
        isum=isum+isum2
        write(6,6000)
 6000   format("Total Sum = ",i10)
      endif
      call MPI_FINALIZE(ierr)
      stop
      end
```

- ランク0以外であれば，ランク0に送信します．
- ランク0は，ランク1～3からデータを受信します．
- 総和を出力します．

4．演習問題3 (practice_3)つづき

- 手順③：コンパイルを実行します．
  [F]の場合： $ mpinfort practice3.f
  [C]の場合： $ mpincc practice3.c

- 手順④：ジョブを投入します．
  $ qsub run.sh

- 手順⑤：実行結果を確認します．結果はpractice_p3.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 practice_p3.oXXXX

MPI集団通信

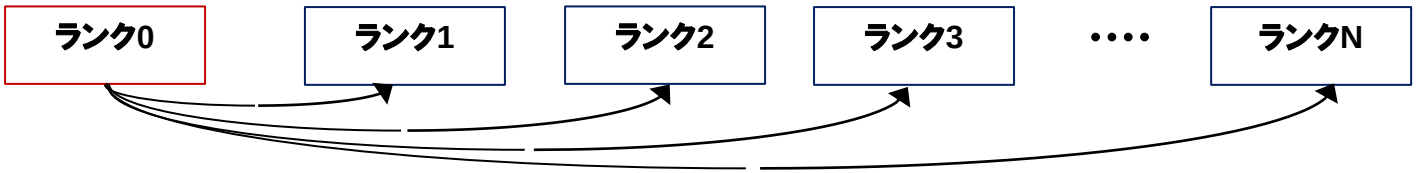
- あるプロセスから同じコミュニケータを持つ全プロセスに対して同時に通信を行う
- または同じコミュニケータを持つプロセス間でデータを共有する

(例)代表プロセスのデータを同じコミュニケータを持つ全プロセスへ送信する

Fortran	CALL MPI_BCAST(DATA,N,MPI_REAL,0,MPI_COMM_WORLD,IERR)
C	MPI_Bcast(DATA,N,MPI_FLOAT,0,MPI_COMM_WORLD);

- N個の実数型データを格納するDATAをランク0 から送信
- コミュニケータMPI_COMM_WORLDを持つ全プロセスに送信される
- MPI_BCASTによる通信処理が開始される前に同期処理が発生(通信に参加する全プロセスの足並みを揃える)

MPI_BCAST詳細は付録1.3.6



MPI_REDUCE

- 同じコミュニケータを持つプロセス間で総和，最大，最少などの演算を行い，結果を代表プロセスに返す

sample5.f

```
      program sample5
      include 'mpif.h'
      integer myrank,nprocs,isum,ierr
      call MPI_INIT(ierr)
      call MPI_COMM_SIZE(MPI_COMM_WORLD,nprocs,ierr)
      call MPI_COMM_RANK(MPI_COMM_WORLD,myrank,ierr)
      call MPI_REDUCE(myrank,isum,1,MPI_INTEGER,MPI_SUM,0,
     +                MPI_COMM_WORLD,ierr)
      if(myrank.eq.0) write(6,*)"Result = ",isum
      call MPI_FINALIZE(ierr)
      stop
      end
```

sample5.c

```
#include <stdio.h>
#include <mpi.h>
int main(int argc, char **argv){
      int ierr,myrank,nprocs,isum;
      ierr = MPI_Init(&argc, &argv);
      ierr = MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD,&nprocs);
      ierr = MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD,&myrank);
      MPI_Reduce (&myrank,&isum,1,MPI_INT,MPI_SUM
                        ,0,MPI_COMM_WORLD);
      if(myrank==0) printf("Result = %d¥n",isum);
      ierr = MPI_Finalize();
      return 0;
}
```

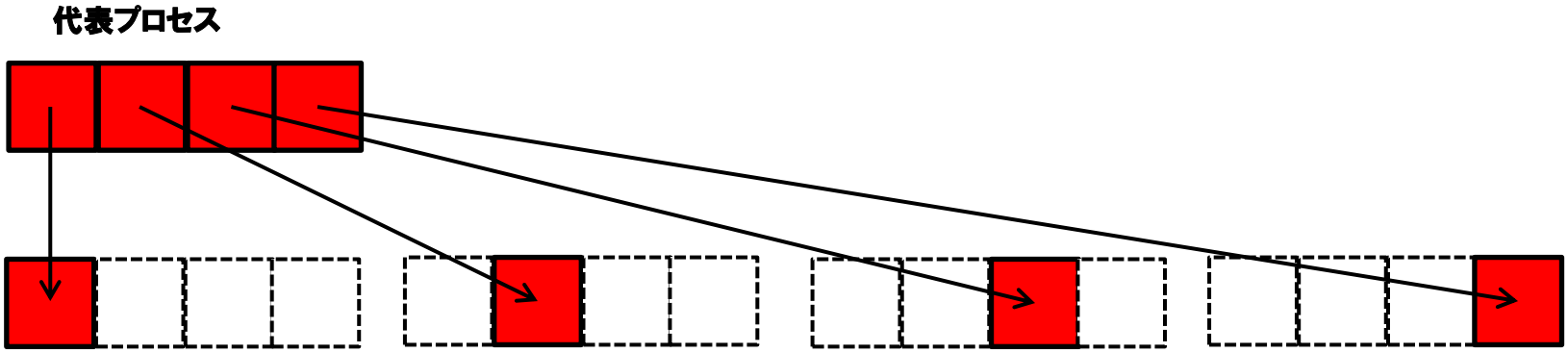
コミュニケータMPI_COMM_WORLDを持つプロセスのランク番号の合計をランク0に集計して出力する

```
$ mpirun -np 4 ./a.out
 Result =           6
```

MPI_REDUCEの詳細は付録1.3.3

MPI_SCATTER

- 同じコミュニケータを持つプロセス内の代表プロセスの送信バッファから，全プロセスの受信バッファにメッセージを送信する.
- 各プロセスへのメッセージ長は一定である.



Fortran

```
call MPI_SCATTER(senddata,icount,MPI_INTEGER,
&                recvdata(icount*myrank+1),icount,MPI_INTEGER,
&                0,MPI_COMM_WORLD,ierr)
```

C

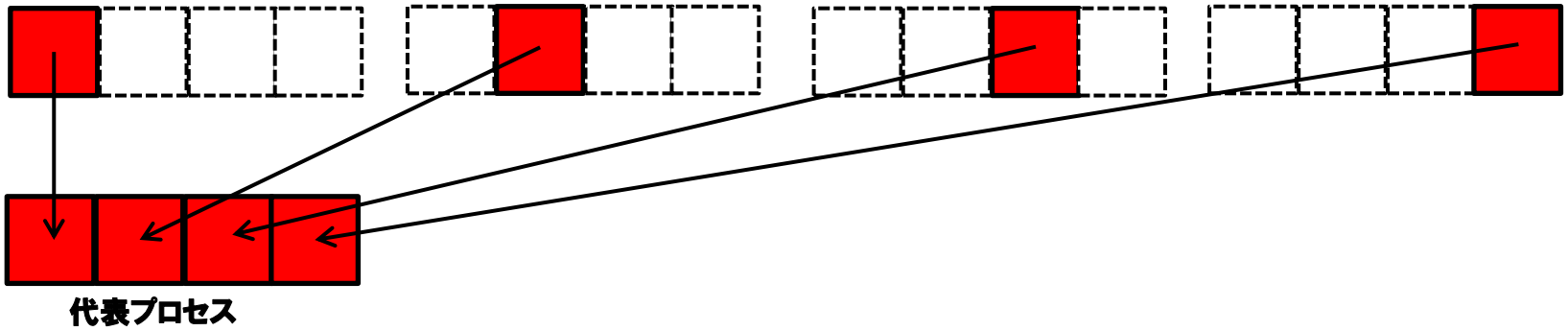
```
MPI_Scatter(senddata,icount,MPI_INT,
            recvdata[icount*myrank],icount,MPI_INT,0,MPI_COMM_WORLD);
```

- 送信バッファと受信バッファはメモリ上の重なりがあってはならない(MPI1.0仕様)
- 各プロセスへのメッセージ長が一定でない場合はMPI_SCATTERVを使用する.

MPI_SCATTERの詳細は付録1.3.13　　MPI_SCATTERVの詳細は付録1.3.14

MPI_GATHER

- 同じコミュニケータを持つ全プロセスの送信バッファから，代表プロセスの受信バッファにメッセージを送信する．
- 各プロセスからのメッセージ長は一定である．



Fortran

```
call MPI_GATHER(senddata(icount*myrank+1),icount,MPI_INTEGER,
&               recvdata,icount,MPI_INTEGER,
&               0,MPI_COMM_WORLD,ierr)
```

C

```
MPI_Gather(senddata[icount*myrank],icount,MPI_INT,
           recvdata,icount,MPI_INT,0,MPI_COMM_WORLD);
```

- 送信バッファと受信バッファはメモリ上の重なりがあってはならない(MPI1.0仕様)
- 各プロセスへのメッセージ長が一定でない場合はMPI_GATHERVを使用する．

MPI_GATHERの詳細は付録1.3.8

MPI_GATHERVの詳細は付録1.3.9

5．演習問題4 (practice_4)

演習問題3のプログラムで，各ランクの部分和をMPI_REDUCEを使用してランク0に集計して，ランク0から結果を出力してください

項目	対象		備考
	Fortan	C	
作業ディレクトリ	F/practice_4	C/practice_4	
使用ソースファイル	practice4.f	practice4.c	編集 必要
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 MPI/[F] or [C]/practice_4

- 手順②：エディタでソースファイルを編集してください．演習問題3の回答例としてソースファイルを用意しています．ご自身が作成された演習問題3の回答を使用したい場合は，practice_3/からソースファイルをコピーして使用してください．

  [F]の場合： $ vi practice4.f

  [C]の場合： $ vi practice4.c

※次ページにプログラム編集のヒントがあります．

5．演習問題4 (practice_4) つづき

ヒント

以下の [　　] の部分を埋めてください.

Fortran演習プログラム：

```
      program example4
      include 'mpif.h'
      integer ierr,myrank,nprocs,ist,ied
      parameter(n=1000)
      integer isum,isum2
      call MPI_INIT(ierr)
      call MPI_COMM_SIZE(MPI_COMM_WORLD,nprocs,ierr)
      call MPI_COMM_RANK(MPI_COMM_WORLD,myrank,ierr)
      ist=((n-1)/nprocs+1)*myrank+1
      ied=((n-1)/nprocs+1)*(myrank+1)
      isum=0
      do i=ist,ied
        isum=isum+i
      enddo
        call MPI_REDUCE([　　],[　　],[　],MPI_INTEGER,[　　　　],[　],
     &                  MPI_COMM_WORLD,ierr)
      if([　　　　　]) write(6,6000) isum2
 6000 format("Total Sum = ",i10)
      call MPI_FINALIZE(ierr)
      stop
      end
```

- 送信データのアドレス
- 受信データのアドレス
- 送信データの要素数
- リダクション演算の機能コード
- rootプロセスのランク
- ランク0が集計結果を出力させるようにします.

5．演習問題4 (practice_4) つづき

- 手順③：コンパイルを実行します．
  [F]の場合 : $ mpinfort practice4.f
  [C]の場合 : $ mpincc practice4.c

- 手順④：ジョブを投入します．
  $ qsub run.sh

- 手順⑤：実行結果を確認します．結果はpractice_p4.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 practice_p4.oXXXX

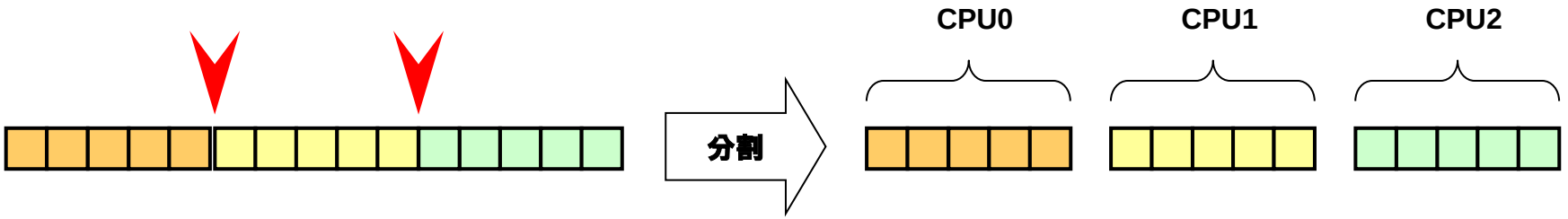
6．MPIプログラミング

- 通信の発生
- デッドロック
- 配列の縮小
- ファイルの入出力
- MPI＋OpenMPのハイブリッド実行

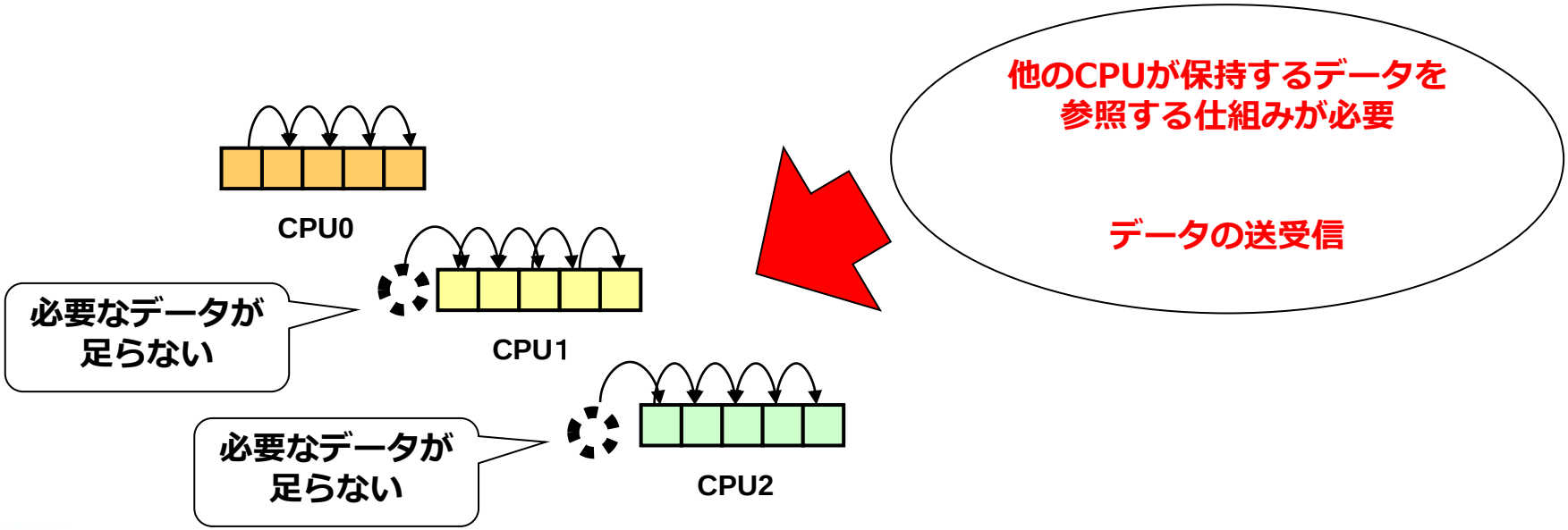
通信の発生

袖領域

配列を3つの配列に分割すると，



しかし，



境界を跨ぐ例

- 対象のループ文に含まれる配列の添え字がi+1やi-1の場合，ループを分割した時にできる境界を跨ぐ

逐次版

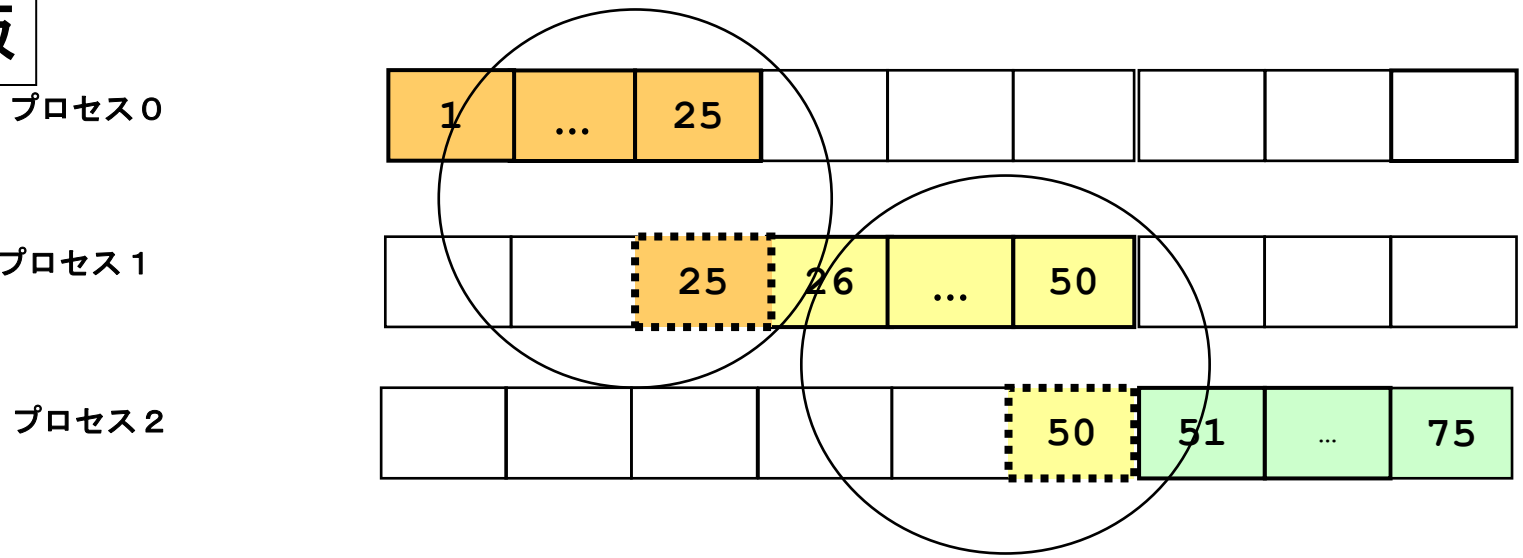
Fortran：

```
do i=1, 100
   b(i)=a(i)-a(i-1)
enddo
```

C：

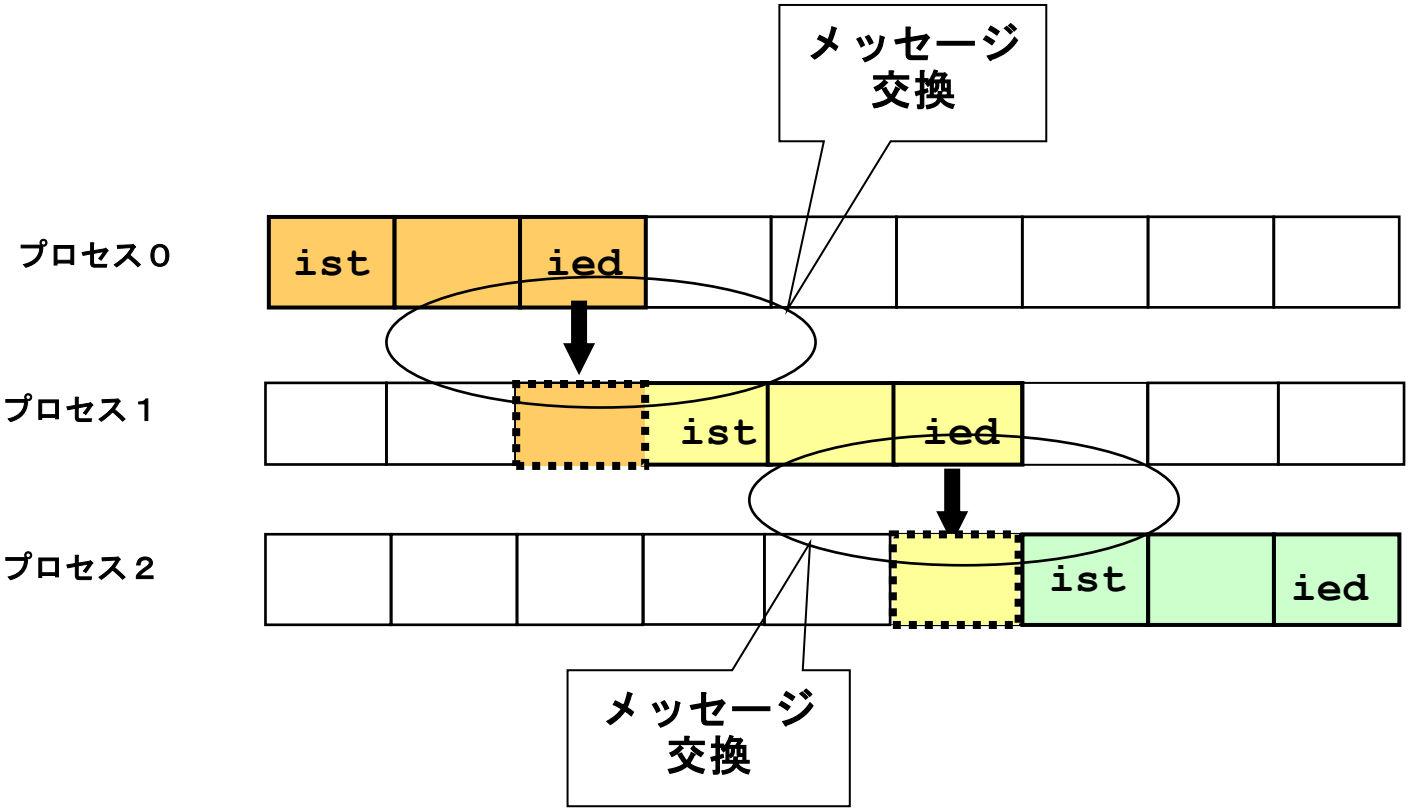
```
for(i=1;i<=100;++i){
   b[i]=a[i]-a[i-1];
}
```

並列版



不足データの送受信

- 分割境界におけるデータを補うには，メッセージ交換によるデータの送受信が必要



領域分割時のメッセージ交換

MPI版

Fortran：

```
              :
ist = ((n-1)/nprocs+1)*myrank+1
ied = ((n-1)/nprocs+1)*(myrank+1)
iLF = myrank-1
iRT = myrank+1
if (myrank.ne.0) then
  call mpi_recv(a(ist-1),1,MPI_REAL8,iLF,1, &
                MPI_COMM_WORLD,status,ierr)
endif
do i= ist, ied
     b(i) = a(i) – a(i-1)
  enddo
if (myrank.ne.nprocs-1) then
   call mpi_send(a(ied),1,MPI_REAL8,iRT,1, &
                 MPI_COMM_WORLD,ierr)
endif
              :
```

担当領域の算出

送受信相手の特定

C：

```
              :
ist=(int)((n-1)/nprocs+1)*myrank+1;
ied=(int)((n-1)/nprocs+1)*(myrank+1);
iLF = myrank-1;
iRT = myrank+1;
if (myrank!=0) {
  MPI_Recv(a[ist-1],1,MPI_DOUBLE,iLF,1, &
           MPI_COMM_WORLD,status)
}
for(int i=ist;i<=ied;++i){
     b[i] = a[i] – a[i-1]
}
if (myrank!=nprocs-1) {
   MPI_Send (a[ied],1,MPI_DOUBLE,iRT,1, &
             MPI_COMM_WORLD)
}
              :
```

デッドロック

Fortran：

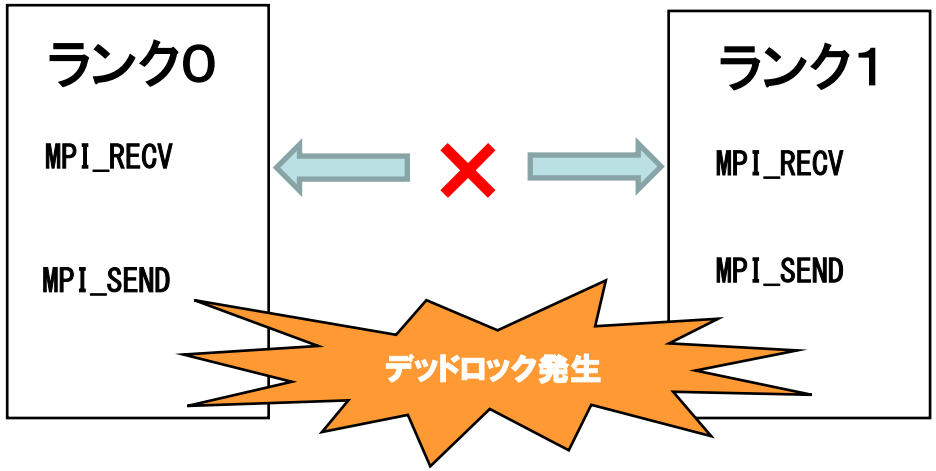
```
      if(myrank.eq.0) then
       call MPI_Recv(rdata,1,MPI_REAL,1,
     +               itag,MPI_COMM_WORLD,status,ierr)
      else if(myrank.eq.1) then
       call MPI_Recv(rdata,1,MPI_REAL,0,
     +               itag,MPI_COMM_WORLD,status,ierr)
      endif
      if(myrank.eq.0) then
       call MPI_Send(sdata,1,MPI_REAL,1,
     +               itag,MPI_COMM_WORLD,ierr)
      else if(myrank.eq.1) then
       call MPI_Send(sdata,1,MPI_REAL,0,
     +               itag,MPI_COMM_WORLD,ierr)
      endif
```

C：

```
    if(myrank==0) {
      MPI_Recv(rdata,1,MPI_FLOAT,1,
               itag,MPI_COMM_WORLD,status);
    }else if(myrank==1) {
     MPI_Recv(rdata,1,MPI_FLOAT,0,
               itag,MPI_COMM_WORLD,status);
    }
    if(myrank==0) {
     MPI_Send(sdata,1,MPI_FLOAT,1,
                itag,MPI_COMM_WORLD);
    }else if(myrank==1) {
     MPI_Send(sdata,1,MPI_REAL,0,
                itag,MPI_COMM_WORLD);
    }
```

- ランク0とランク1が同時にMPI_RECV(同期型1対1通信)を行うと，送受信が完了せず，待ち状態となる.
- このような待ち状態をデッドロックという.

デッドロック

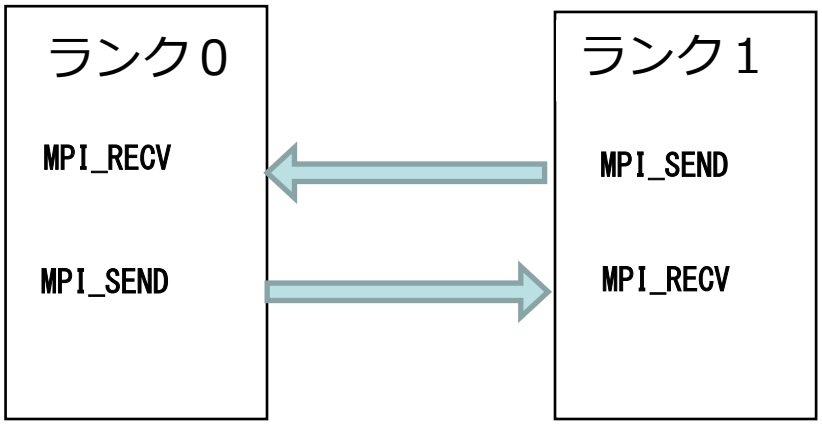


※ランク０とランク１から同時にMPI_RECVを実行するとデータが送信されるのを待つ状態で止まってしまう.

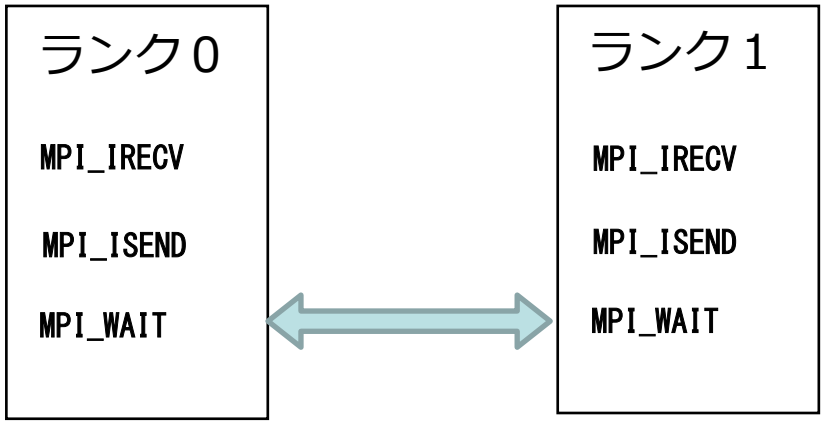
- デッドロックの回避方法としては，以下が挙げられる

① MPI_RECVとMPI_SENDの正しい呼び出し順序に修正
② 非同期型にMPI_IRECVとMPI_ISENDに置き換える

①



②



デッドロックの回避①

Fortran：

```
      if(myrank.eq.0) then
       call MPI_Recv(rdata,1,MPI_REAL,1,
     +               itag,MPI_COMM_WORLD,status,ierr)
      else if(myrank.eq.1) then
       call MPI_Send(sdata,1,MPI_REAL,0,
     +               itag,MPI_COMM_WORLD,ierr)
      endif
      if(myrank.eq.0) then
       call MPI_Send(sdata,1,MPI_REAL,1,
     +               itag,MPI_COMM_WORLD,ierr)
      else if(myrank.eq.1) then
       call MPI_Recv(rdata,1,MPI_REAL,0,
     +               itag,MPI_COMM_WORLD,status,ierr)
      endif
```

C：

```
    if(myrank==0) {
      MPI_Recv(rdata,1,MPI_FLOAT,1,
               itag,MPI_COMM_WORLD,status);
    }else if(myrank==1) {
      MPI_Send(sdata,1,MPI_FLOAT,0,
               itag,MPI_COMM_WORLD);
    }
    if(myrank==0) {
      MPI_Send(sdata,1,MPI_FLOAT,1,
               itag,MPI_COMM_WORLD);
    }else if(myrank==1) {
      MPI_Recv(rdata,1,MPI_FLOAT,0,
               itag,MPI_COMM_WORLD,status);
    }
```

- MPI_SENDとMPI_RECVが対になるように呼び出し順序を変更

デッドロックの回避②

Fortran：

```
      if(myrank.eq.0) then
       call MPI_IRecv(rdata,1,MPI_REAL,1,
     +           itag,MPI_COMM_WORLD,ireq1,ierr)
      else if(myrank.eq.1) then
       call MPI_IRecv(rdata,1,MPI_REAL,0,
     +           itag,MPI_COMM_WORLD,ireq1,ierr)
      endif
      if(myrank.eq.0) then
       call MPI_ISend(sdata,1,MPI_REAL,1,
     +           itag,MPI_COMM_WORLD,ireq2,ierr)
      else if(myrank.eq.1) then
       call MPI_ISend(sdata,1,MPI_REAL,0,
     +           itag,MPI_COMM_WORLD,ireq2,ierr)
      endif
      call MPI_WAIT(ireq1,status,ierr)
      call MPI_WAIT(ireq2,status,ierr)
```

C：

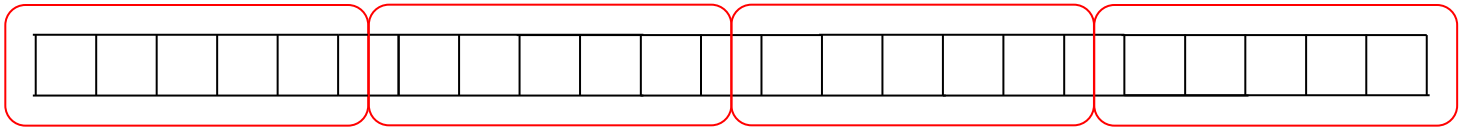
```
    if(myrank==0) {
      MPI_Irecv(rdata,1,MPI_FLOAT,1,
              itag,MPI_COMM_WORLD,ireq1);
    }else if(myrank==1) {
      MPI_Irecv(rdata,1,MPI_FLOAT,0,
              itag,MPI_COMM_WORLD,ireq1);
    }
    if(myrank==0) {
      MPI_Isend(sdata,1,MPI_FLOAT,1,
              itag,MPI_COMM_WORLD,ireq2);
    }else if(myrank==1) {
      MPI_Isend(sdata,1,MPI_FLOAT,0,
              itag,MPI_COMM_WORLD,ireq2);
    }
    MPI_Wait(ireq1,status)
    MPI_Wait(ireq2,status)
```

- 非同期型のMPI_ISENDとMPI_IRECVに置き換える

MPI_ISENDの詳細は付録1.2.9　MPI_IRECVの詳細は付録1.2.10　MPI_WAITの詳細は付録1.2.12

配列の縮小

配列a(100)



… 各プロセスが担当する領域

各プロセスは，

全体の配列を持つ必要がない

メモリ領域の節約ができる

縮小イメージ（内積）

Fortran：

プロセス0

```
real(8)::a(100)
do i=1,25
  c=c+a(i)*b(i)
enddo
```

```
real(8)::a(25)
do i=1,25
  c=c+a(i)*b(i)
enddo
```

プロセス1

```
real(8)::a(100)
do i=26,50
  c=c+a(i)*b(i)
enddo
```

```
real(8)::a(25)
do i=1,25
  c=c+a(i)*b(i)
enddo
```

プロセス2

```
real(8)::a(100)
do i=51,75
  c=c+a(i)*b(i)
enddo
```

```
real(8)::a(25)
do i=1,25
  c=c+a(i)*b(i)
enddo
```

プロセス3

```
real(8)::a(100)
do i=76,100
  c=c+a(i)*b(i)
enddo
```

```
real(8)::a(25)
do i=1,25
  c=c*a(i)*b(i)
enddo
```

C：

プロセス0

```
double a[100]
for(i=0;i<25;++i){
  c=c+a[i]*b[i]
}
```

```
double a[25]
for(i=0;i<25;++i){
  c=c+a[i]*b[i]
}
```

プロセス1

```
double a[100]
for(i=25;i<50;++i){
  c=c+a[i]*b[i]
}
```

```
double a[25]
for(i=0;i<25;++i){
  c=c+a[i]*b[i]
}
```

プロセス2

```
double a[100]
for(i=50;i<75;++i){
  c=c+a[i]*b[i]
}
```

```
double a[25]
for(i=0;i<25;++i){
  c=c+a[i]*b[i]
}
```

プロセス3

```
double a[100]
for(i=75;i<100;++i){
  c=c+a[i]*b[i]
}
```

```
double a[25]
for(i=0;i<25;++i){
  c=c+a[i]*b[i]
}
```

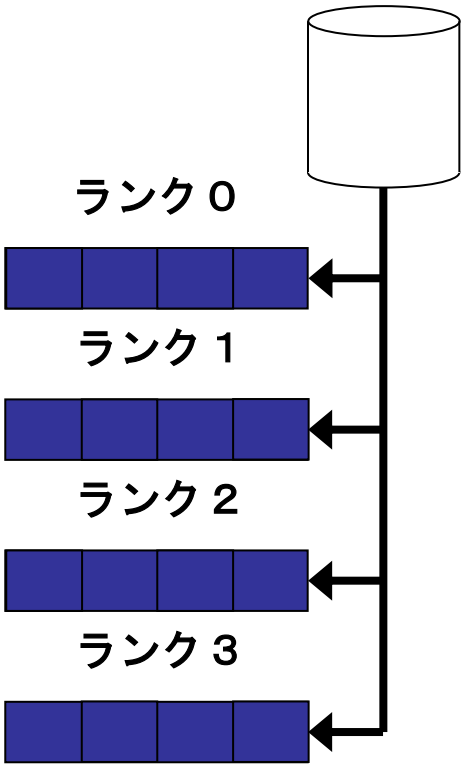
ファイル入出力

MPIによって並列化されたプログラムのファイル入出力には幾つかのパターンがあり，それぞれに特徴があるため，実際のプログラム例を記載する.

1. ファイル入力
   - ① 全プロセス同一ファイル入力
     - 逐次プログラムから移行し易い
   - ② 代表プロセス入力
     - メモリの削減が可能
   - ③ 分散ファイル入力
     - メモリ削減に加え，Ｉ／Ｏ時間の削減が可能

2. ファイル出力
   - ① 代表プロセス出力
     - ファイルを１つにまとめる
   - ② 分散ファイル出力
     - Ｉ／Ｏ時間の削減が可能

全プロセス同一ファイル入力(Fortran)

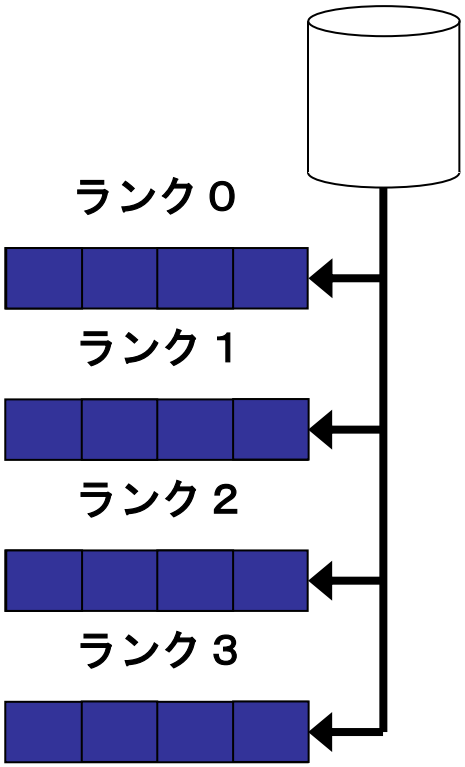


：I/O

etc1.f

```
include 'mpif.h'
integer,parameter::numdat=100
integer::idat(numdat)
integer::myrank,nprocs,ist,ied,isum,ierr
call MPI_INIT(ierr)
call MPI_COMM_SIZE(MPI_COMM_WORLD,nprocs,ierr)
call MPI_COMM_RANK(MPI_COMM_WORLD,myrank,ierr)
ist=((numdat-1)/nprocs+1)*myrank+1
ied=((numdat-1)/nprocs+1)*(myrank+1)
open(10,file='fort.10')
read(10,*) idat
isum=0
do i=ist,ied
  isum=isum+idat(i)
enddo
write(6,*) myrank,':partial sum=',isum
call MPI_FINALIZE(ierr)
stop
end
```

全プロセス同一ファイル入力(C)

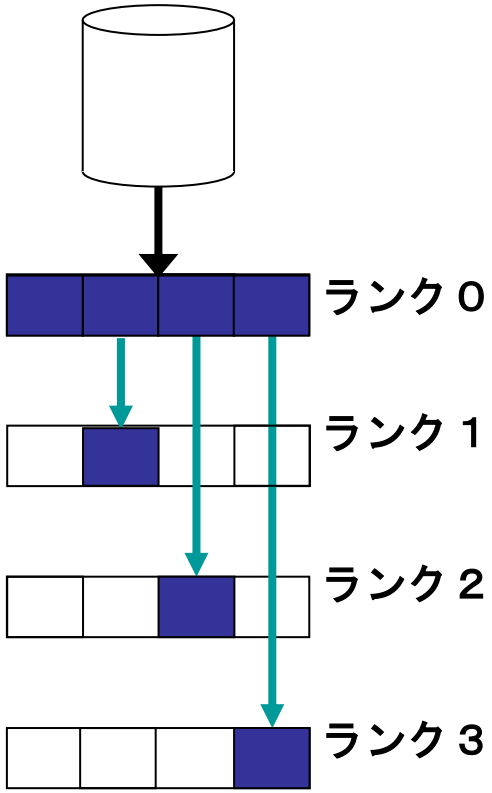


etc1.c

```
#include <stdio.h>
#include <mpi.h>
int main(int argc, char **argv){
  int numdat=100;
  int idat[numdat];
  int ierr,myrank,nprocs,ist,ied;
  ierr = MPI_Init(&argc, &argv);
  ierr = MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD,&nprocs);
  ierr = MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD,&myrank);
  ist=(int)((numdat-1)/nprocs+1)*myrank+1;
  ied=(int)((numdat-1)/nprocs+1)*(myrank+1);
  FILE* fp = fopen("fort.10","r");
  for(int i=0;i<numdat;++i) fscanf(fp,"%d",&idat[i]);
  fclose(fp);
  int isum=0;
  for(int i=ist;i<=ied;++i) isum+=idat[i-1];
  printf("%d;partial sum=%d¥n",myrank,isum);
  ierr = MPI_Finalize();
  return 0;
}
```

：I/O

代表プロセス入力(Fortran)



：MPI通信

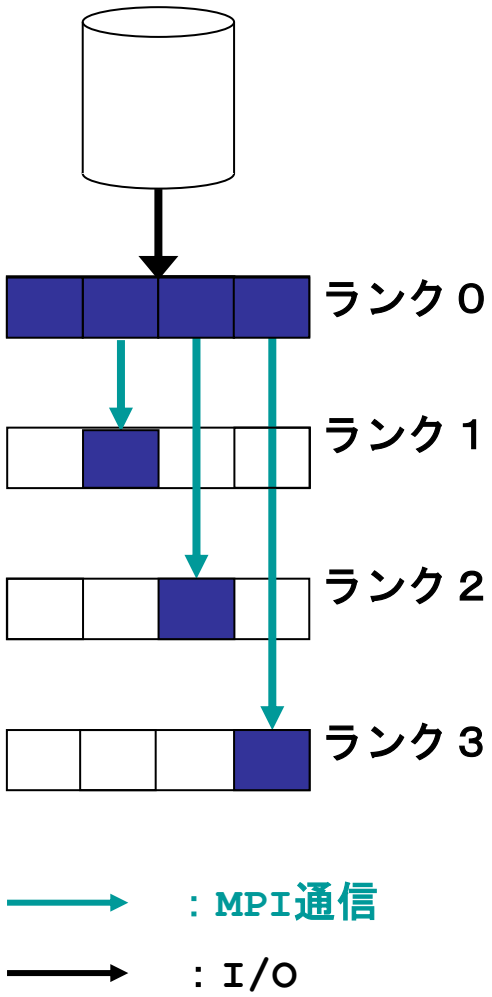
：I/O

etc2.f

```
include 'mpif.h'
integer,parameter :: numdat=100
integer::senddata(numdat),recvdata(numdat)
integer::myrank,nprocs,icount,isum,ierr
call MPI_INIT(ierr)
call MPI_COMM_SIZE(MPI_COMM_WORLD,nprocs,ierr)
call MPI_COMM_RANK(MPI_COMM_WORLD,myrank,ierr)
if(myrank.eq.0)then
   open(10,file='fort.10')
   read(10,*) senddata
endif
icount=(numdat-1)/nprocs+1
call MPI_SCATTER(senddata,icount,MPI_INTEGER,
&         recvdata(icount*myrank+1),icount,
&         MPI_INTEGER,0,MPI_COMM_WORLD,ierr)
isum=0
do i=1,icount
   isum=isum+recvdata(icount*myrank+i)
enddo
write(6,*)myrank,':partial sum=',isum
call MPI_FINALIZE(ierr)
stop
end
```

MPI_SCATTERの詳細は付録1.3.13

代表プロセス入力(C)

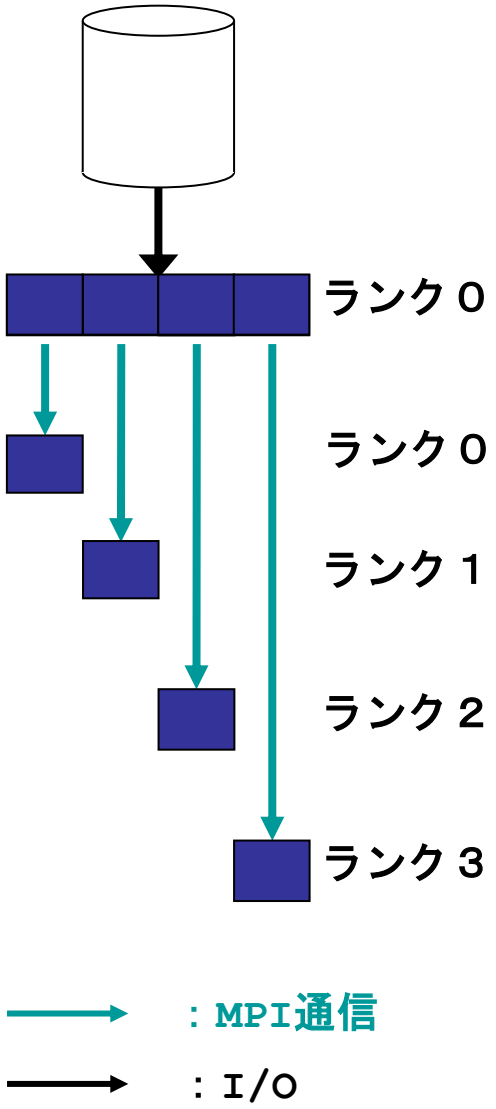


etc2.c

```
#include <stdio.h>
#include <mpi.h>
int main(int argc, char **argv){
  int numdat=100;
  int senddata[numdat],recvdata[numdat];
  int ierr,myrank,nprocs,ist,ied;
  ierr = MPI_Init(&argc, &argv);
  ierr = MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD,&nprocs);
  ierr = MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD,&myrank);
  ist=(int)((numdat-1)/nprocs+1)*myrank+1;
  ied=(int)((numdat-1)/nprocs+1)*(myrank+1);
  if(myrank==0){
    FILE* fp = fopen("fort.10","r");
    for(int i=0;i<numdat;++i) fscanf(fp,"%d",&senddata[i]);
    fclose(fp);
  }
  int icount=(int)((numdat-1)/nprocs+1);
  MPI_Scatter(&senddata[0],icount,MPI_INT,
              &recvdata[icount*myrank],icount,MPI_INT,
              0,MPI_COMM_WORLD);
  int isum=0;
  for(int i=0;i<icount;++i) isum+=recvdata[icount*myrank+i];
  printf(" %d;partial sum=%d¥n",myrank,isum);
  ierr = MPI_Finalize();
  return 0;
}
```

MPI_SCATTERの詳細は付録1.3.13

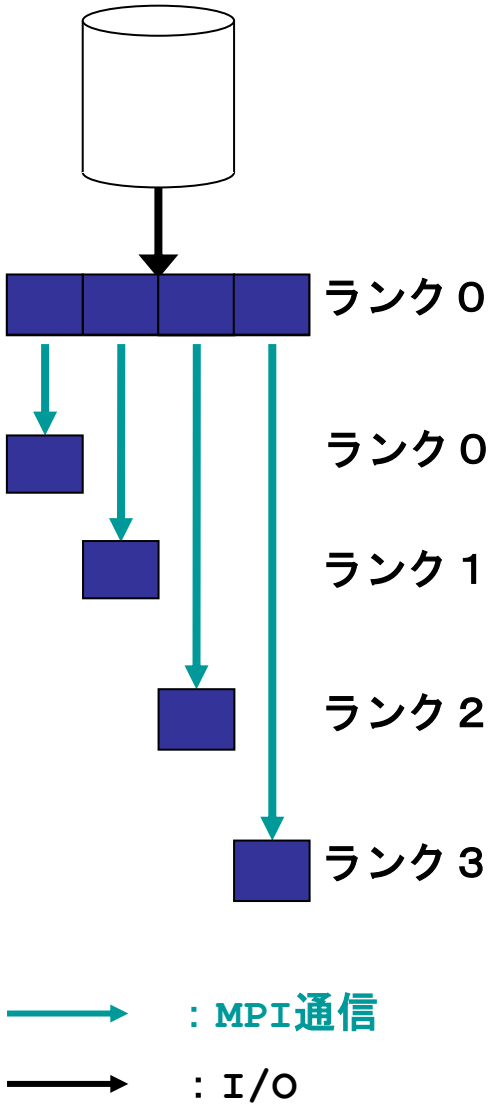
代表プロセス入力＋メモリ削減(Fortran)



etc2_2.f

```
include 'mpif.h'
integer,parameter :: numdat=100
integer,allocatable :: idat(:),work(:)
integer :: nprocs,myrank,ierr
integer :: ist,ied,isum
call MPI_INIT(ierr)
call MPI_COMM_SIZE(MPI_COMM_WORLD,nprocs,ierr)
call MPI_COMM_RANK(MPI_COMM_WORLD,myrank,ierr)
ist = ((numdat-1)/nprocs+1)*myrank+1
ied = ((numdat-1)/nprocs+1)*(myrank+1)
allocate(idat(ist:ied))
if(myrank.eq.0) then
  allocate(work(numdat))
  open(10,file='fort.10')
  read(10,*) work
endif
call MPI_SCATTER(work,ied-ist+1,MPI_INTEGER,
+                idat(ist),ied-ist+1,MPI_INTEGER,0,
+                MPI_COMM_WORLD,ierr)
if(myrank.eq.0) deallocate(work)
isum=0
do i=ist,ied
  isum = isum + idat(i)
enddo
write(6,*) myrank,';partial sum=',isum
deallocate(idat)
call MPI_FINALIZE(ierr)
stop
end
```

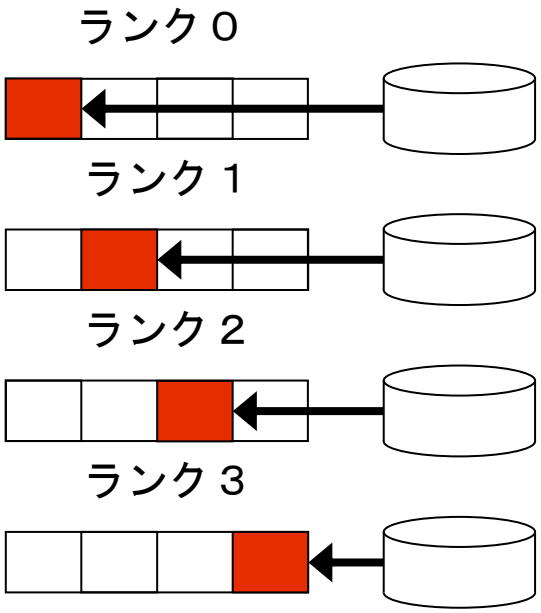
代表プロセス入力＋メモリ削減(C)



etc2_2.c

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <mpi.h>
int main(int argc, char **argv){
  int numdat=100;
  int *idat, *work;
  int ierr,myrank,nprocs,ist,ied;
  ierr = MPI_Init(&argc, &argv);
  ierr = MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD,&nprocs);
  ierr = MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD,&myrank);
  ist=(int)((numdat-1)/nprocs+1)*myrank+1;
  ied=(int)((numdat-1)/nprocs+1)*(myrank+1);
  idat = (int*)malloc(sizeof(int)*(ied-ist+1));
  if(myrank==0){
    work = (int*)malloc(sizeof(int)*numdat);
    FILE* fp = fopen("fort.10","r");
    for(int i=0;i<numdat;++i) fscanf(fp,"%d",&work[i]);
    fclose(fp);
  }
  MPI_Scatter(work,ied-ist+1,MPI_INT,
              idat,ied-ist+1,MPI_INT,
              0,MPI_COMM_WORLD);
  if(myrank==0) free(work);
  int isum=0;
  for(int i=0;i<ied-ist+1;++i) isum+=idat[i];
  printf(" %d;partial sum=%d¥n",myrank,isum);
  free(idat);
  ierr = MPI_Finalize();
  return 0;
}
```

分散ファイル入力(Fortran)

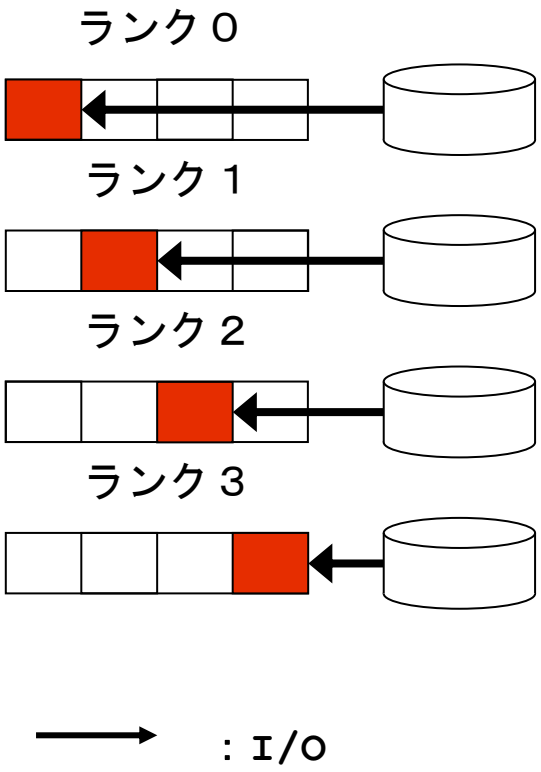


：I/O

etc3.f

```
      include 'mpif.h'
      integer,parameter :: numdat=100
      integer::buf(numdat)
      integer :: myrank,nprocs,ist,ied,isum,ierr
c
      call MPI_INIT(ierr)
      call MPI_COMM_SIZE(MPI_COMM_WORLD,nprocs,ierr)
      call MPI_COMM_RANK(MPI_COMM_WORLD,myrank,ierr)
c
      ist=((numdat-1)/nprocs+1)*myrank+1
      ied=((numdat-1)/nprocs+1)*(myrank+1)
      read(10+myrank,*) (buf(i),i=ist,ied)
c
      isum=0
      do i=ist,ied
        isum = isum + buf(i)
      enddo
c
      write(6,*) myrank,';partial sum=',isum
      call MPI_FINALIZE(ierr)
      stop
      end
```

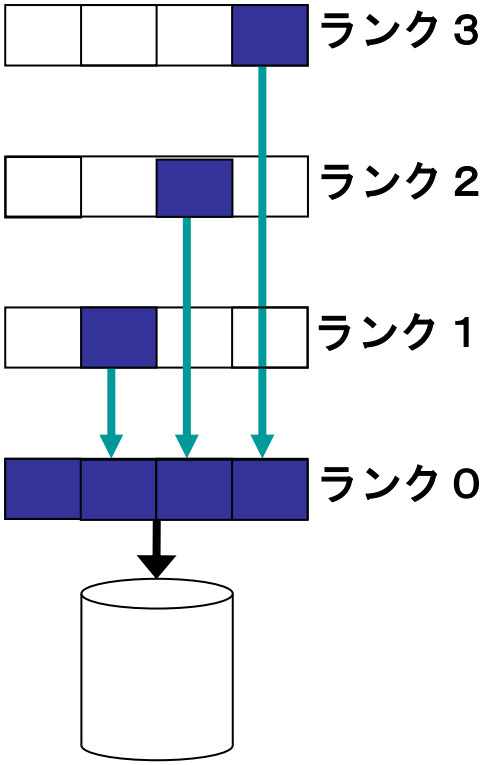
分散ファイル入力(C)



etc3.c

```
#include <stdio.h>
#include <mpi.h>
int main(int argc, char **argv){
  int numdat=100;
  int buf[numdat];
  int ierr,myrank,nprocs,ist,ied;
  ierr = MPI_Init(&argc, &argv);
  ierr = MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD,&nprocs);
  ierr = MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD,&myrank);
  ist=(int)((numdat-1)/nprocs+1)*myrank+1;
  ied=(int)((numdat-1)/nprocs+1)*(myrank+1);
  char filename[8]="fort.";
  sprintf(filename,"%s%d",filename,10+myrank);
  FILE* fp = fopen(filename,"r");
  for(int i=ist;i<=ied;++i) fscanf(fp,"%d",&buf[i]);
  fclose(fp);
  int isum=0;
  for(int i=ist;i<=ied;++i) isum+=buf[i];
  printf(" %d;partial sum=%d¥n",myrank,isum);
  ierr = MPI_Finalize();
  return 0;
}
```

代表プロセス出力(Fortran)



etc4.f

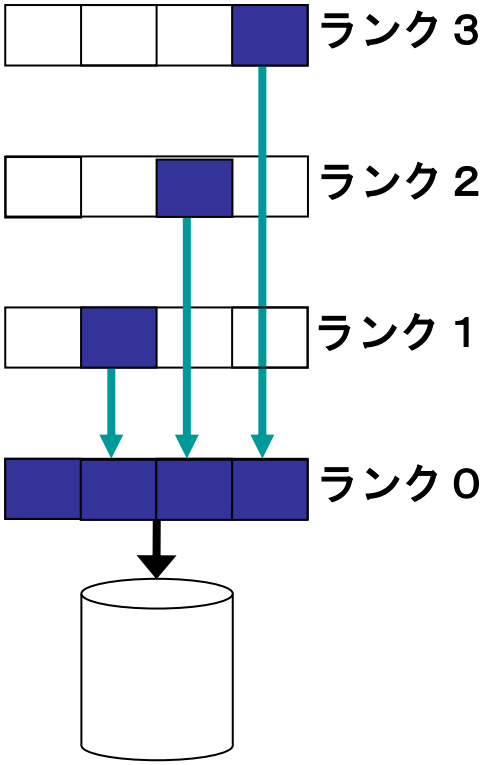
```
include 'mpif.h'
parameter (numdat=100)
integer senddata(numdat),recvdata(numdat)
integer myrank,nprocs,icount,ierr
call MPI_INIT(ierr)
call MPI_COMM_SIZE(MPI_COMM_WORLD,nprocs,ierr)
call MPI_COMM_RANK(MPI_COMM_WORLD,myrank,ierr)
icount=(numdat-1)/nprocs+1
do i=1,icount
  senddata(icount*myrank+i)=icount*myrank+i
enddo
call MPI_GATHER(senddata(icount*myrank+1),
&       icount,MPI_INTEGER,recvdata,
&       icount,MPI_INTEGER,0,MPI_COMM_WORLD,
&       ierr)
if(myrank.eq.0)then
  open(60,file='fort.60')
  write(60,'(10I8)') recvdata
endif
call MPI_FINALIZE(ierr)
stop
end
```

：MPI通信

：I/O

MPI_GATHERの詳細は付録1.3.8

代表プロセス出力(C)



：MPI通信

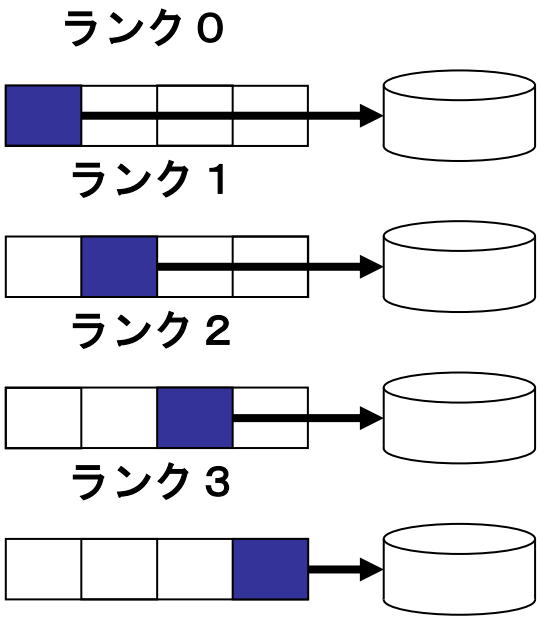
：I/O

etc4.c

```
#include <stdio.h>
#include <mpi.h>
#define MIN(i,j) (((i)<(j)) ? (i):(j))
int main(int argc, char **argv){
  int numdat=100;
  int senddata[numdat],recvdata[numdat];
  int ierr,myrank,nprocs;
  ierr = MPI_Init(&argc, &argv);
  ierr = MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD,&nprocs);
  ierr = MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD,&myrank);
  int icount=(int)((numdat-1)/nprocs+1);
  for(int i=0;i<icount;++i)
    senddata[icount*myrank+i]=icount*myrank+i+1;
  MPI_Gather(&senddata[icount*myrank],icount,MPI_INT,
             &recvdata[0],icount,MPI_INT,
             0,MPI_COMM_WORLD);
  if(myrank==0){
    FILE* fp = fopen("fort.60","w");
    for(int i=0;i<numdat;i+=10) {
      for(int j=i;j<MIN(i+10,numdat);j++){
        fprintf(fp,"%8d",recvdata[j]); }
      fprintf(fp,"¥n"); }
    fclose(fp);
  }
  ierr = MPI_Finalize();
  return 0;
}
```

MPI_GATHERの詳細は付録1.3.8

分散ファイル出力(Fortran)

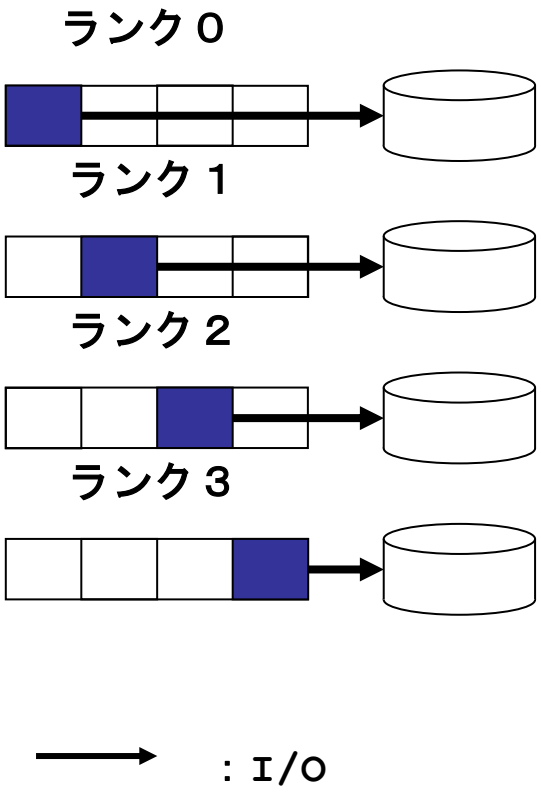


：I/O

etc5.f

```
include 'mpif.h'
integer,parameter :: numdat=100
integer :: buf(numdat)
integer :: myrank,nprocs,ist,ied,ierr
call MPI_INIT(ierr)
call MPI_COMM_SIZE(MPI_COMM_WORLD,nprocs,ierr)
call MPI_COMM_RANK(MPI_COMM_WORLD,myrank,ierr)
ist=((numdat-1)/nprocs+1)*myrank+1
ied=((numdat-1)/nprocs+1)*(myrank+1)
do i=ist,ied
  buf(i)=i
enddo
write(60+myrank,'(10I8)') (buf(i),i=ist,ied)
call MPI_FINALIZE(ierr)
stop
end
```

分散ファイル出力(C)



etc5.c

```
#include <stdio.h>
#include <mpi.h>
#define MIN(i,j) (((i)<(j)) ? (i):(j))
int main(int argc, char **argv){
  int numdat=100;
  int buf[numdat];
  int ierr,myrank,nprocs,ist,ied;
  ierr = MPI_Init(&argc, &argv);
  ierr = MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD,&nprocs);
  ierr = MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD,&myrank);
  ist=(int)((numdat-1)/nprocs+1)*myrank+1;
  ied=(int)((numdat-1)/nprocs+1)*(myrank+1);
  for(int i=ist;i<=ied;++i) buf[i-1]=i;
  char filename[8]="fort.";
  sprintf(filename,"%s%d",filename,60+myrank);
  FILE* fp = fopen(filename,"w");
  for(int i=ist-1;i<ied;i+=10) {
    for(int j=i;j<MIN(i+10,ied);j++){
      fprintf(fp,"%8d",buf[j]); }
    fprintf(fp,"¥n"); }
  fclose(fp);
  ierr = MPI_Finalize();
  return 0;
}
```

7．演習問題 5

- P.65のetc4.fもしくはP.66のetc4.cをP.61,P.62の「代表プロセス入力＋メモリ削減」の例のように，各プロセスに必要な領域だけ確保するように修正してください.

7．演習問題5 (practice_5) つづき

項目	対象		備考
	Fortan	C	
作業ディレクトリ	F/practice_5	C/practice_5	
使用ソースファイル	practice5.f	practice5.c	編集　必要
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 MPI/[F] or [C]/practice_5

- 手順②：エディタでソースファイルを編集してください．ソースファイルを用意しています.

  [F]の場合：$ vi practice5.f

  [C]の場合：$ vi practice5.c

※次ページにプログラム編集のヒントがあります.

7．演習問題5 (practice_5) つづき

ヒント

以下の [　　] の部分を埋めてください.

Fortran演習プログラム：

```
include 'mpif.h'
integer,parameter :: numdat=100
integer,allocatable :: senddata(:), [　　　　]
 integer :: myrank,nprocs,icount,ierr
call MPI_INIT(ierr)
call MPI_COMM_RANK(MPI_COMM_WORLD,myrank,ierr)
call MPI_COMM_SIZE(MPI_COMM_WORLD,nprocs,ierr)
ist = ((numdat-1)/nprocs+1)*myrank+1
ied = ((numdat-1)/nprocs+1)*(myrank+1)
allocate([　　　　](ist:ied))
if(myrank.eq.0) allocate(recvdata(numdat))
icount=(numdat-1)/nprocs+1
do i=1,icount
  senddata(icount*myrank+i)=icount*myrank+i
enddo
```

- 必要な分だけallocateします.

次ページへつづく.

7．演習問題5 (practice_5) つづき

Fortran演習プログラム：

```
      call MPI_GATHER(
     &                ,MPI_INTEGER,
     &                ,MPI_INTEGER,0,MPI_COMM_WORLD,
     &                 ierr)
      if(myrank.eq.0) then
        open(60,file='fort.60')
        write(60,'(10I8)') recvdata
        deallocate(          )
      endif
      deallocate(          )
      call MPI_FINALIZE(ierr)
      stop
      end
```

- 送信データの開始アドレス
- 送信データの要素数
- 受信領域の開始アドレス
- 個々のプロセスから受信する要素数
- 最後にdeallocateします．

7．演習問題5 (practice_5) つづき

- 手順③：コンパイルを実行します.

  [F]の場合 : $ mpinfort practice5.f

  [C]の場合 : $ mpincc practice5.c

- 手順④：ジョブを投入します.

  $ qsub run.sh

- 手順⑤：実行結果を確認します．結果はpractice_p5.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 practice_p5.oXXXX

MPI＋OpenMPのハイブリッド実行 (1/2)

- MPI(Message Passing Interface)とOpenMPを組み合わせることにより，複数ノード(複数VE)のSX-Aurora TSUBASAが利用可能

- VE間をMPI並列，VE内をOpenMP並列
  - AOBA-Aの場合は最大256VE、VE内は最大8スレッドの利用が可能
  - AOBA-Sの場合は最大2,048VE、VE内は最大16スレッドの利用が可能

- ハイブリッド実行のメリットは以下
  ① 並列数の増加による処理時間の短縮
  ② MPI転送ネックのプログラムにおいて，転送回数の削減(コードによっては転送量の削減も)

MPI＋OpenMPのハイブリッド実行 (2/2)

MPIプログラムのコンパイルコマンドを利用

mpinfort -fopenmp　[オプション]　ソースファイル名

mpincc -fopenmp　[オプション]　ソースファイル名

ハイブリッド実行のスクリプトの例

```
#!/bin/bash
#PBS  -q ①
#PBS  --venode ②
#PBS  -l  elapstim_req=③

export VE_OMP_NUM_THREADS=④
cd  $PBS_O_WORKDIR
mpirun  -np ⑤ ./a.out
```

① キュー名を指定（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．（強く推奨）
④ スレッド数を指定．（共有並列の場合必須）
⑤ 総MPIプロセス数を指定．
（VE内がすべて共有メモリ並列の場合は，②=⑤）

※詳細は「AOBA-S 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-Sプログラム開発・実行環境利用手順書.pdf

8．演習問題6　(practice_6)

行列積プログラムをMPIで並列化してください

- 下記に記載する行列積を行うプログラムをMPI化して16プロセスで実行してください．出力はプロセス０で行ってください．

sample6.f

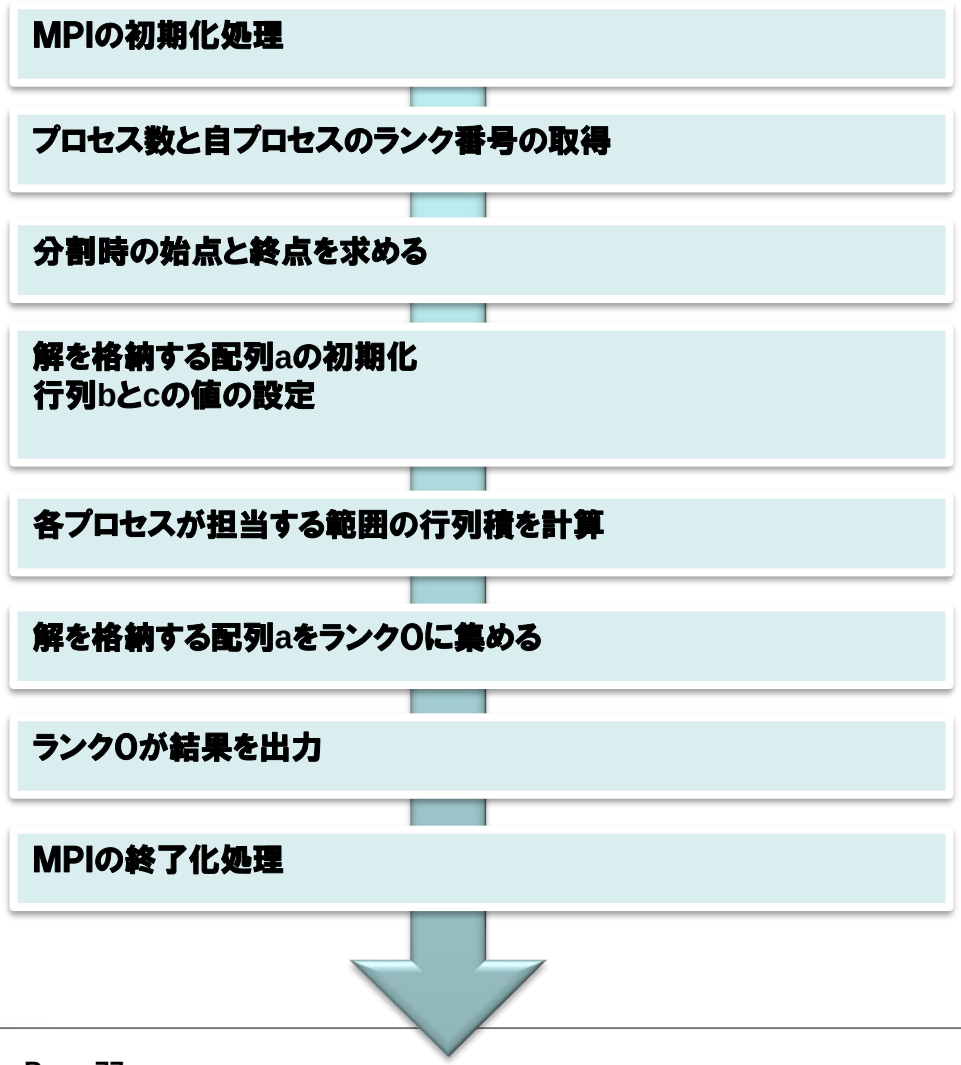
```
      implicit real(8)(a-h,o-z)
      parameter ( n=12000 )
      real(8) a(n,n),b(n,n),c(n,n)
      real(4) etime,cp1(2),cp2(2),t1,t2,t3
      do j = 1,n
        do i = 1,n
          a(i,j) = 0.0d0
          b(i,j) = n+1-max(i,j)
          c(i,j) = n+1-max(i,j)
        enddo
      enddo
      write(6,50) ' Matrix Size = ',n
   50 format(1x,a,i5)
      t1=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
      t2=etime(cp2)
      t3=cp2(1)-cp1(1)
      write(6,60) ' Execution Time = ',t2,' sec',' A(n,n) = ',a(n,n)
   60 format(1x,a,f10.3,a,1x,a,d24.15)
      stop
      end
```

sample6.c

```
#include <stdio.h>
#include <time.h>
#define MAX(i,j) (((i)>(j)) ? (i) : (j))
int main()
{
  int n=12000;
  double a[n][n],b[n][n],c[n][n];
  for(int j=0;j<n;j++){
    for(int i=0;i<n;i++){
      a[j][i] = (double)0;
      b[j][i] = (double)n+1-MAX(i,j);
      c[j][i] = (double)n+1-MAX(i,j);
    }
  }
  printf(" Matrix Size = %5d¥n",n);
  double t1 = (double) clock()/CLOCKS_PER_SEC;
  for(int j=0;j<n;j++){
    for(int k=0;k<n;k++){
      for(int i=0;i<n;i++){
        a[j][i] = a[j][i]+b[k][i]*c[j][k];
      }
    }
  }
  double t2 = (double) clock()/CLOCKS_PER_SEC;
  printf(" Execution Time = %lf sec, A[n][n] = %f24¥n"
         ,t2-t1,a[n-1][n-1]);
  return 0;
}
```

8．演習問題6　(practice_6)つづき

◆ ヒント：プログラムの流れは下記のとおり



◆ 時間計測はMPI_Wtimeを使用する

①時間を格納する変数は倍精度実数型で定義する
　real*8 t1,t2 もしくは double t1,t2

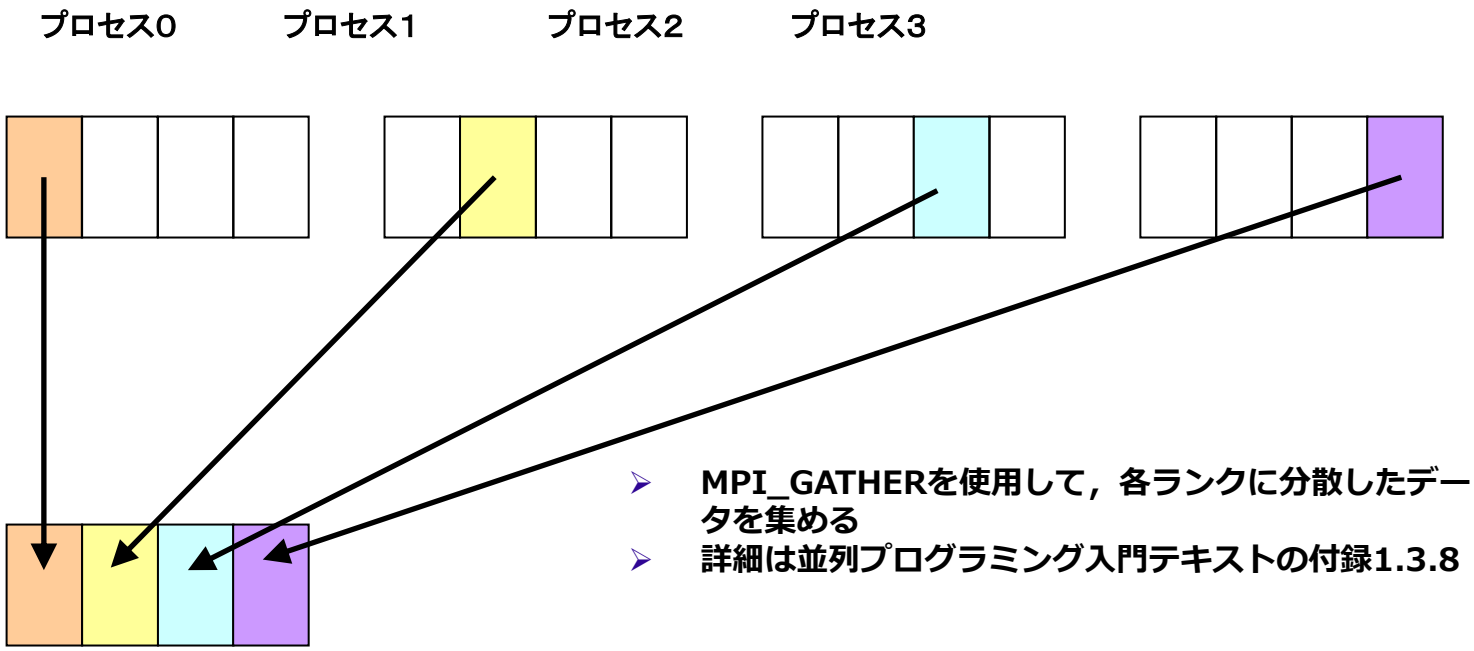
②測定する区間の始まりと終わりの時間を計測する

```
MPI_Barrierによる同期処理
 t1=MPI_Wtime ()
    [測定区間]
MPI_Barrierによる同期処理
 t2=MPI_WTime()
```

③t2-t1が計測区間の時間となる

8．演習問題6　(practice_6)つづき

- データの転送方法（行列－ベクトル積）
  - プロセス0はプロセス1,2,3から計算結果を格納した配列 x を受け取る（下図）



- **MPI_GATHERを使用して，各ランクに分散したデータを集める**
- **詳細は並列プログラミング入門テキストの付録1.3.8**

8．演習問題6 (practice_6) つづき

項目	対象		備考
	Fortan	C	
作業ディレクトリ	F/practice_6	C/practice_6	
使用ソースファイル	practice6.f	practice6.c	編集　必要
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 MPI/[F] or [C]/practice_6

- 手順②：エディタでソースファイルを編集してください．逐次版の行列積プログラムのソースファイルは sample/ に用意しています．

  [F]の場合：$ vi practice6.f

  [C]の場合：$ vi practice6.c

※次ページにプログラム編集のヒントがあります．

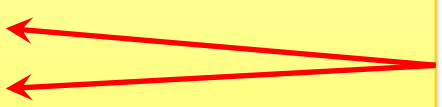
8．演習問題6 (practice_6) つづき

ヒント

以下の [　　] の部分を埋めてください.

Fortran演習プログラム：

```
program example6
implicit real(8)(a-h,o-z)
include 'mpif.h'
integer ierr,myrank,nprocs,ist,ied
parameter ( n=12000 )
real(8) a(n,n),b(n,n),c(n,n)
real(8) d(n,n)
real(8) t1,t2
call MPI_INIT(ierr)
call MPI_COMM_SIZE(MPI_COMM_WORLD,nprocs,ierr)
call MPI_COMM_RANK(MPI_COMM_WORLD,myrank,ierr)
ist=
ied=
n2=n/nprocs
```



- 分割点の始点と終点を決めます.

次ページへつづく.

8．演習問題6 (practice_6) つづき

Fortran演習プログラム：

```
      do j = 1,n
       do i = 1,n
         a(i,j) = 0.0d0
         b(i,j) = n+1-max(i,j)
         c(i,j) = n+1-max(i,j)
       enddo
     enddo
     if(myrank.eq.0) then
     write(6,50) ' Matrix Size = ',n
     endif
50 format(1x,a,i5)
     [                                        ]
     t1=[          ]
```

- バリア処理
- 時間計測区間の開始

次ページへつづく．

8．演習問題6 (practice_6) つづき

Fortran演習プログラム：

```
      do j=
       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 MPI_GATHER(a(1,ist),      ,MPI_REAL8,d,
     &                ,MPI_REAL8,0,MPI_COMM_WORLD, ierr)
      t2=
      if(myrank.eq.0) then
      write(6,60) ' Execution Time = ',t2-t1,' sec',' A(n,n) = ',d(n,n)
      endif
   60 format(1x,a,f10.3,a,1x,a,d24.15)
      call MPI_FINALIZE(ierr)
      stop
      end
```

- 各プロセスが担当する区間の計算を実施.
- 計算結果をランク0に集めます.
- 各プロセスから転送する配列のサイズ
- バリア処理
- 時間計測区間の終了.

8．演習問題6 (practice_6) つづき

- 手順③：コンパイルを実行します.

  [F]の場合 : $ mpinfort practice6.f

  [C]の場合 : $ mpincc practice6.c

- 手順④：ジョブを投入します.

  $ qsub run.sh

- 手順⑤：実行結果を確認します．結果はpractice_p6.oXXXX(XXXXにはジョブIDが入ります)として格納されます.

  $ cat practice_p6.oXXXX

付　録

付録１．主な手続き
付録２．参考文献，Webサイト

付録１．主な手続き

付録１.１　プロセス管理
付録１.２　一対一通信
付録１.３　集団通信
付録１.４　その他の手続き
付録１.５　プログラミング作法

※本テキストでは，コミュニケータ（comm）は，MPI_COMM_WORLDとする.

付録１.１　プロセス管理

付録１.１.１　プロセス管理とは

MPI環境の初期化・終了処理や環境の問い合わせを行う

付録１．１．２　プログラム例（FORTRAN）

etc6.f

```
include 'mpif.h‘
integer :: myrank,nprocs,ist,ied,ierr,isum1
parameter(numdat=100)
call MPI_INIT(ierr)
call MPI_COMM_SIZE(MPI_COMM_WORLD, nprocs, ierr)
call MPI_COMM_RANK(MPI_COMM_WORLD, myrank, ierr)
ist=((numdat-1)/nprocs+1)*myrank+1
ied=((numdat-1)/nprocs+1)*(myrank+1)
isum1=0
do i=ist,ied
   isum1=isum1+i
enddo
call MPI_REDUCE(isum1,isum,1,MPI_INTEGER,MPI_SUM,
&                0,MPI_COMM_WORLD,ierr)
if (myrank.eq.0) write(6,*)'sum=',isum
call MPI_FINALIZE(ierr)
stop
end
```

付録１．１．２　プログラム例（C）

etc7.c

```
#include <stdio.h>
#include "mpi.h"
int main( int argc, char* argv[] )
 {
    int numdat=100;
    int myrank, nprocs;
    int i,ist,ied,isum1,isum;
    MPI_Init( &argc, &argv );
    MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD, &nprocs);
    MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &myrank);
    ist=((numdat-1)/nprocs+1)*myrank+1;
    ied=((numdat-1)/nprocs+1)*(myrank+1);
    isum1=0;
    for(i=ist;i<ied+1;i++) isum1 += i;
    MPI_Reduce(&isum1,&isum,1,MPI_INT,MPI_SUM,
               0,MPI_COMM_WORLD);
    if(myrank==0) printf("isum=%d¥n",isum);
    MPI_Finalize();
 }
```

付録１.１.３　インクルードファイル

書式

```
include 'mpif.h'                    …FORTRAN
```

```
#include "mpi.h"                    …C
```

メモ

- MPI手続きを使うサブルーチン・関数では，必ずインクルードしなければならない
- MPIで使用する MPI_xxx といった定数を定義している
- ユーザは，このファイルの中身まで知る必要はない

mpif.h

```
      :
INTEGER MPI_LOR, MPI_BOR, MPI_LXOR, MPI_BXOR,
INTEGER MPI_MAXLOC, MPI_REPLACE
PARAMETER (MPI_MAX    = 100)
PARAMETER (MPI_MIN    = 101)
PARAMETER (MPI_SUM    = 102)
      :
```

付録１.１.４　MPI_INIT　MPI環境の初期化

機能概要

- MPI環境の初期化処理を行う
- 引数は返却コード ierr のみ（ FORTRANの場合）

書式

```
integer ierr
CALL MPI_INIT (ierr)
```

```
int MPI_Init (int *argc, char ***argv)
```

メモ

- 他のMPIルーチンより前に１度だけ呼び出されなければならない
- 返却コードは，コールしたMPIルーチンが正常に終了すれば，MPI_SUCCESSを返す（他のMPIルーチンでも同じ）
- 当該手続きを呼び出す前に設定した変数・配列は，他のプロセスには引き継がれない（引き継ぐには通信が必要）

P9に戻る

付録１.１.５　MPI_FINALIZE　MPI環境の終了

機能概要

- MPI環境の終了処理を行う
- 引数は返却コード ierr のみ（FORTRANの場合）

書式

```
integer ierr
CALL MPI_FINALIZE(ierr)
```

```
int MPI_Finalize (void)
```

メモ

- プログラムが終了する前に，必ず１度実行する必要がある
  - 異常終了処理には，MPI_ABORTを用いる
- この手続きが呼び出された後は，いかなるMPIルーチンも呼び出してはならない

P9に戻る

付録１.１.６　MPI_ABORT　MPI環境の中断

機能概要

- MPI環境の異常終了処理を行う

書式

```
integer comm, errcode, ierr
CALL MPI_ABORT(comm, errcode, ierr)
```

```
int MPI_Abort (MPI_Comm comm, int errcode)
```

引数

引数	値	入出力	
comm	handle	IN	コミュニケータ
errcode	整数	IN	エラーコード

メモ

- すべてのプロセスを即時に異常終了しようとする
- 引数にコミュニケータを必要とするが MPI_COMM_WORLDを想定

付録１.１.７ MPI_COMM_SIZE MPIプロセス数の取得

機能概要

- 指定したコミュニケータにおける全プロセス数を取得する

書式

```
integer comm, nprocs, ierr
CALL MPI_COMM_SIZE (comm, nprocs, ierr)
```

```
int MPI_Comm_size (MPI_Comm comm, int *nprocs)
```

引数

引数	値	入出力	
comm	handle	IN	コミュニケータ
nprocs	整数	OUT	コミュニケータ内の総プロセス数

メモ

- commがMPI_COMM_WORLDの場合，利用可能なプロセスの総数を返す

P10に戻る

付録１.１.８　MPI_COMM_RANK ランク番号の取得

機能概要

- 指定したコミュニケータにおける自プロセスのランク番号を取得する

書式

```
integer comm, myrank, ierr
CALL MPI_COMM_RANK(comm, myrank, ierr)
```

```
int MPI_Comm_rank(MPI_Comm comm, int *myrank)
```

引数

引数	値	入出力	
comm	handle	IN	コミュニケータ
myrank	整数	OUT	コミュニケータ中のランク番号

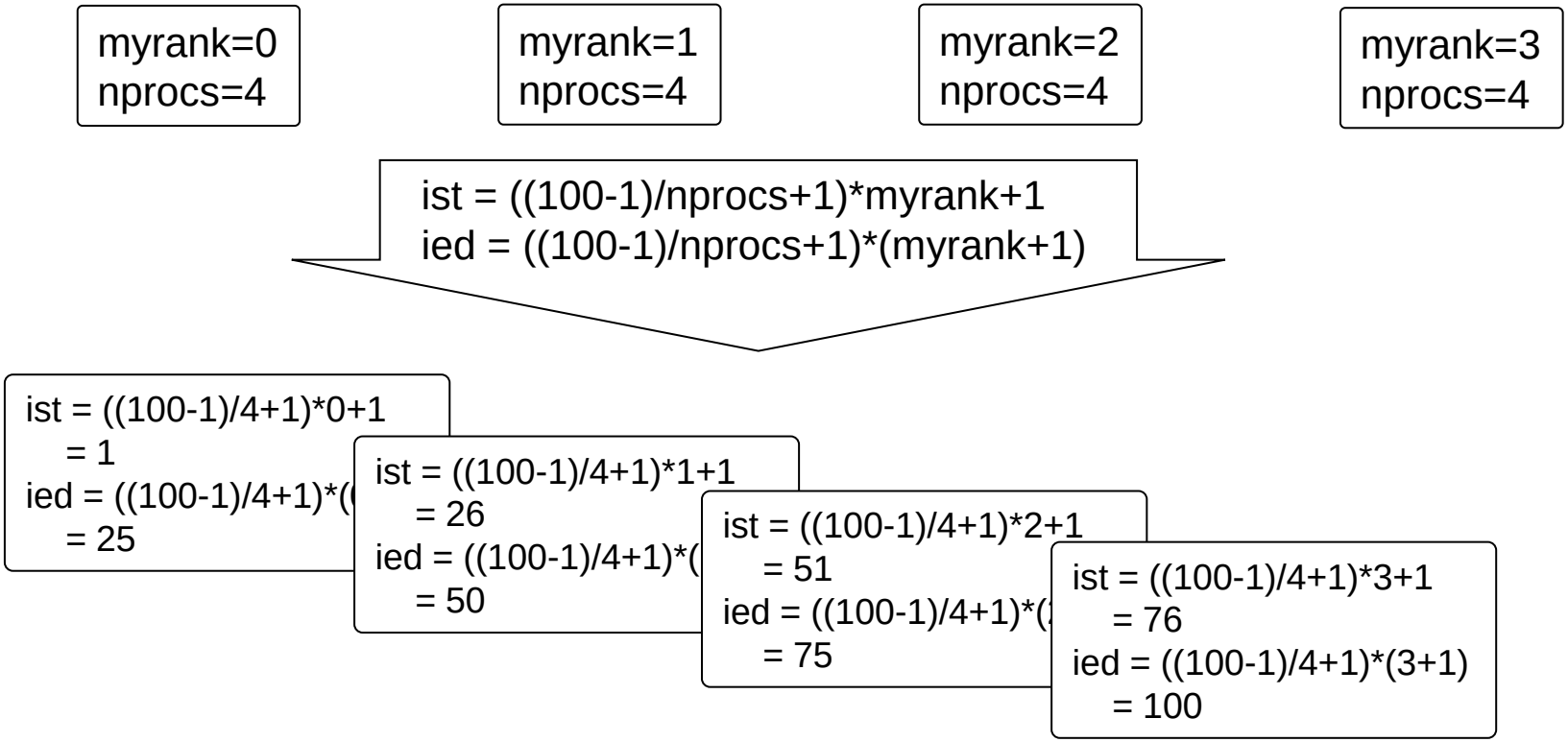
メモ

- 自プロセスと他プロセスの区別，認識に用いる
- 0からnproc-1までの範囲で 呼び出したプロセスのランクを返す（nprocsはMPI_COMM_SIZEの返却値）

P10に戻る

付録１.１.９ ランク番号と総プロセス数を使った処理の分割

1から100までをnprocで分割



付録１.２　一対一通信

付録１.２.１　一対一通信とは

- 一組の送信プロセスと受信プロセスが行うメッセージ交換
- メッセージの交換は，データを送受信することで行われる
- 一対一通信は，送信処理と受信処理に分かれている
- ブロッキング型通信と非ブロッキング型通信がある

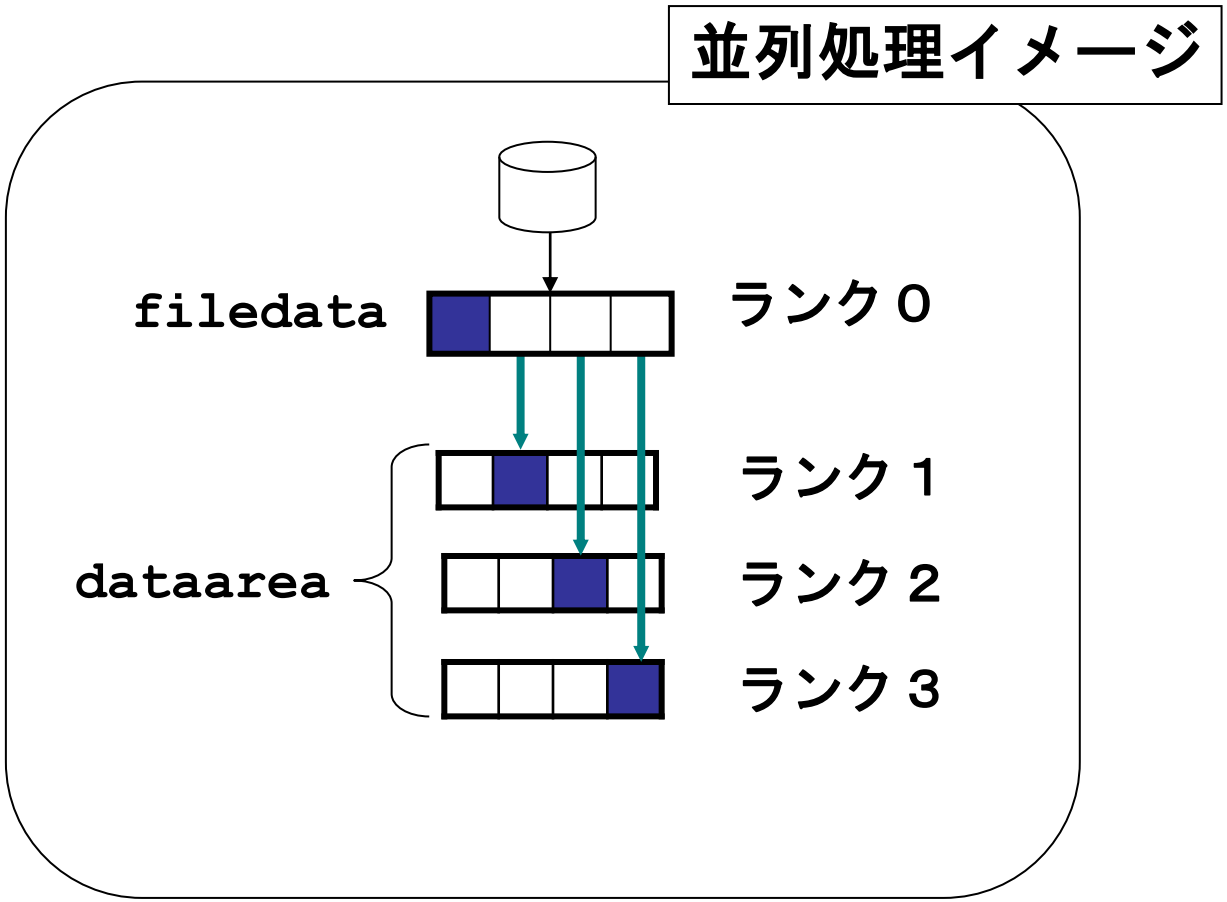
付録１.２.２　プログラム例

- 1から100までをnprocで分割

逐次版(etc8.f)

```
integer a(100),isum
open(10,file='fort.10')
read(10,*) a
isum=0
do i=1,100
   isum=isum+a(i)
enddo
write(6,*)‘SUM=',isum
stop
end
```

付録１.２.２　処理イメージ



付録１.２.３　プログラム例（MPI版）

etc9.f

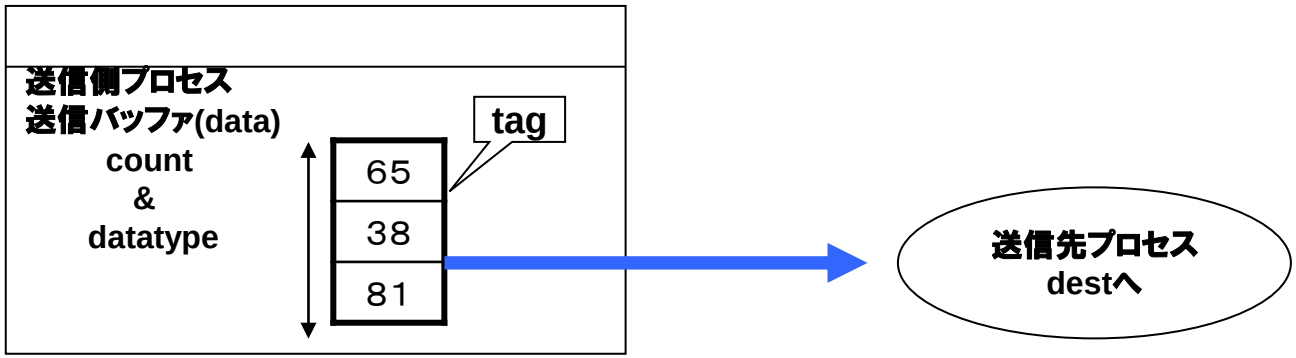
```
 include 'mpif.h'
 parameter(numdat=100)
 integer status(MPI_STATUS_SIZE),senddata(numdat),recvdata(numdat)
 integer source,dest,tag
 integer myrank,nprocs,icount,ierr,isum
 call MPI_INIT(ierr)
 call MPI_COMM_SIZE(MPI_COMM_WORLD,nprocs,ierr)
 call MPI_COMM_RANK(MPI_COMM_WORLD,myrank,ierr)
 icount=(numdat-1)/nprocs+1
 if(myrank.eq.0)then
   open(10,file='fort.10')
   read(10,*) senddata
   do i=1,nprocs-1
     dest=i
     tag=myrank
     call MPI_SEND(senddata(icount*i+1),icount,MPI_INTEGER,
&                  dest,tag,MPI_COMM_WORLD,ierr)
   enddo
   recvdata=senddata
 else
   source=0
   tag=source
   call MPI_RECV(recvdata(icount*myrank+1),icount,MPI_INTEGER,
&                source,tag,MPI_COMM_WORLD,status,ierr)
 endif
 isum=0
 do i=1,icount
   isum=isum+recvdata(icount*myrank+i)
 enddo
     call MPI_FINALIZE(ierr)
 write(6,*) myrank,':SUM= ',isum
 stop    ;   end
```

付録１.２.４　MPI_SEND　ブロッキング型送信

機能概要

- 送信バッファ(data)内のデータ型がdatatypeで連続したcount個のタグ(tag)付き要素をコミュニケータcomm内のランクdestなるプロセスに送信する

処理イメージ



付録１.２.４　MPI_SEND　ブロッキング型送信

書式

```
任意の型 data(*)
integer count,datatype,dest,tag,comm,ierr
CALL MPI_SEND (data,count,datatype,dest,tag,comm,ierr)
```

```
int MPI_Send (void* data,int count,MPI_Datatype datatype,
              int dest,int tag,MPI_Comm comm)
```

引数

引数	値	入出力	
data	任意	IN	送信データの開始アドレス
count	整数	IN	送信データの要素数(0以上の整数)
datatype	handle	IN	送信データのタイプ
dest	整数	IN	通信相手のランク
tag	整数	IN	メッセージタグ
comm	handle	IN	コミュニケータ

付録１.２.４ MPI_SENDブロッキング型送信（続き）

メモ

- メッセージの大きさはバイト数ではなく，要素の個数(count)で表す
- datatypeは次ページ以降に一覧を示す
- タグはメッセージを区別するために使用する
- 本ルーチン呼び出し後，転送処理が完了するまで処理を待ち合せる
- MPI_SENDで送信したデータは，MPI_IRECV，MPI_RECVのどちらで受信してもよい

P33に戻る

付録１.２.５ MPIで定義された変数の型（FORTRAN）

MPIのデータタイプ	FORTRAN言語の対応する型
MPI_INTEGER	INTEGER
MPI_INTEGER2	INTEGER*2
MPI_INTEGER4	INTEGER*4
MPI_REAL	REAL
MPI_REAL4	REAL*4
MPI_REAL8	REAL*8
MPI_DOUBLE_PRECISION	DOUBLE PRECISION
MPI_REAL16	REAL*16
MPI_QUADRUPLE_PRECISION	QUADRUPLE PRECISION
MPI_COMPLEX	COMPLEX
MPI_COMPLEX8	COMPLEX*8
MPI_COMPLEX16	COMPLEX*16
MPI_DOUBLE_COMPLEX	DOUBLE COMPLEX
MPI_COMPLEX32	COMPLEX*32
MPI_LOGICAL	LOGICAL
MPI_LOGICAL1	LOGICAL*1
MPI_LOGICAL4	LOGICAL*4
MPI_CHARACTER	CHARACTER

など

付録1.2.6　MPIで定義された変数の型（C）

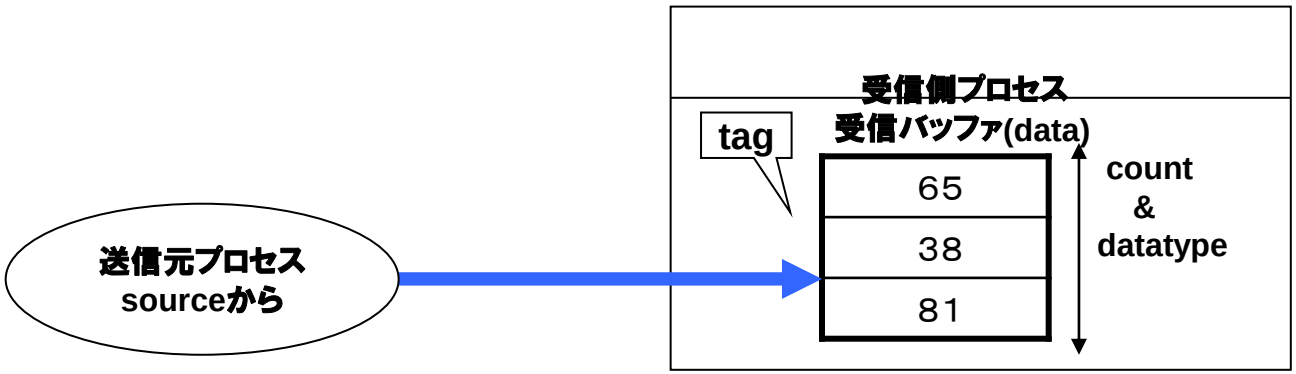
MPI データタイプ	C言語 対応する型	
MPI_CHAR	char	
MPI_SHORT	short	
MPI_INT	int	
MPI_LONG	long	
MPI_LONG_LONG	long long	
MPI_LONG_LONG_INT	long long	
MPI_UNSIGNED_CHAR	unsigned char	
MPI_UNSIGNED_SHORT	unsigned short	
MPI_UNSIGNED_INT	unsigned int	
MPI_UNSIGNED_LONG	unsigned long	
MPI_FLOAT	float	
MPI_DOUBLE	double	
MPI_LONG_DOUBLE	long double	など

付録１.２.７　MPI_RECV　ブロッキング型受信

機能概要

- コミュニケータcomm内のランクsourceなるプロセスから送信されたデータ型がdatatypeで連続したcount個のタグ(tag)付き要素を受信バッファ(data)に同期受信する

処理イメージ



付録１.２.７ MPI_RECV ブロッキング型受信（続き）

書式

```
任意の型 data(*)
integer count, datatype, source, tag, comm,
        status(MPI_STATUS_SIZE), ierr
CALL MPI_RECV(data,count,datatype,source,tag,
              comm,status,ierr)
```

```
int MPI_Recv (void* data, int count, MPI_Datatype
       datatype, int source, int tag, MPI_Comm comm,
       MPI_Status *status)
```

引数

引数	値	入出力	
data	任意	OUT	受信データの開始アドレス
count	整数	IN	受信データの要素の数（0以上の値）
datatype	handle	IN	受信データのタイプ
source	整数	IN	通信相手のランク
tag	整数	IN	メッセージタグ
comm	handle	IN	コミュニケータ
status	status	OUT	メッセージ情報

付録１.２.７ MPI_RECV ブロッキング型受信（続き）

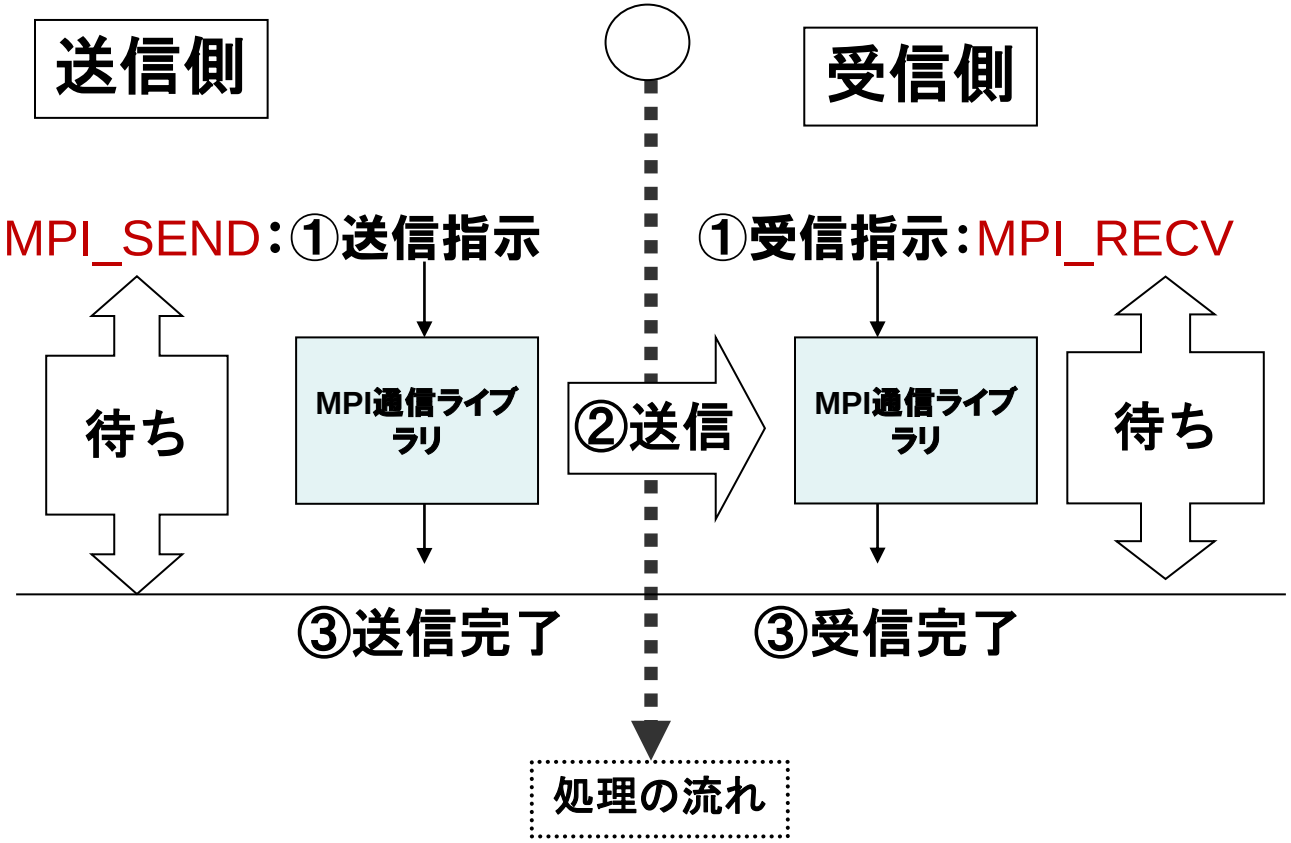
メモ

- 転送処理が完了するまで処理を待ち合せる
- 引数statusは通信の完了状況が格納される
  - FORTRANでは大きさがMPI_STATUS_SIZEの整数配列
  - CではMPI_Statusという型の構造体で，送信元やタグ，エラーコードなどが格納される

P33に戻る

付録１.２.８　ブロッキング型通信の動作

MPI_SEND,MPI_RECV

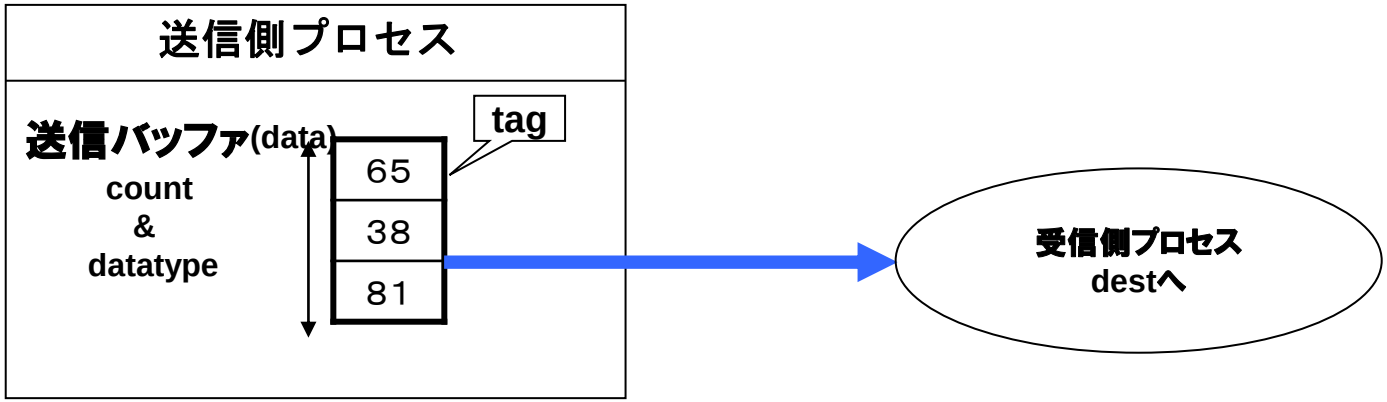


付録１.２.９　MPI_ISEND　非ブロッキング型送信

機能概要

- 送信バッファ(data)内のデータ型がdatatypeで連続したcount個のタグ(tag)付き要素をコミュニケータcomm内のランクdestなるプロセスに送信する

処理イメージ



付録１.２.９ MPI_ISEND 非ブロッキング型送信（続き）

書式

```
任意の型 data(*)
integer count,datatype,dest,tag,comm,request,ierr
CALL MPI_ISEND(data,count,datatype,dest,tag,
                comm,request,ierr)
```

```
int MPI_Isend (void* data, int count,
          MPI_Datatype datatype, int dest, int tag,
          MPI_Comm comm, MPI_Request *request)
```

引数

引数	値	入出力	
data	任意	IN	送信データの開始アドレス
count	整数	IN	送信データの要素の数（0以上の値）
datatype	handle	IN	送信データのタイプ
dest	整数	IN	通信相手のランク
tag	整数	IN	メッセージタグ
comm	handle	IN	コミュニケータ
request	handle	OUT	通信識別子

付録１.２.９　MPI_ISEND 非ブロッキング型送信（続き）

メモ

- メッセージの大きさはバイト数ではなく，要素の個数(count)で表す
- datatypeはMPI_SENDの項を参照
- タグはメッセージを区別するために使用する
- requestには要求した通信の識別子が戻され，MPI_WAIT等で通信の完了を確認する際に使用する
- 本ルーチンコール後，受信処理の完了を待たずにプログラムの処理を続行する
- MPI_WAITまたはMPI_WAITALLで処理の完了を確認するまでは，dataの内容を更新してはならない
- MPI_ISENDで送信したデータは，MPI_IRECV，MPI_RECVのどちらで受信してもよい
- 通信の完了もMPI_WAIT，MPI_WAITALLのどちらを使用してもよい

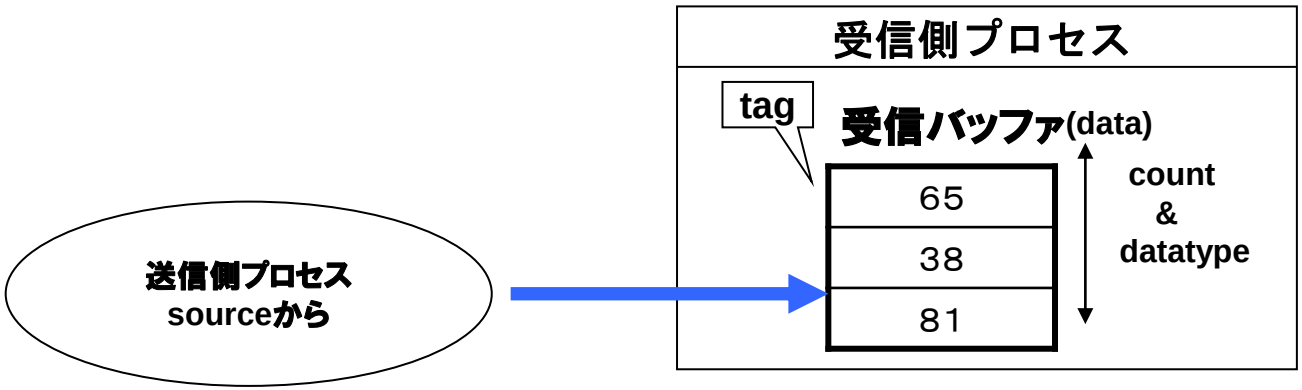
P53に戻る

付録１.２.10　MPI_IRECV 非ブロッキング型受信

機能概要

- コミュニケータcomm内のランクsourceなるプロセスから送信されたデータ型がdatatypeで連続したcount個のタグ(tag)付き要素を受信バッファ(data)に受信する

処理イメージ



付録１.２.10 MPI_IRECV 非ブロッキング型受信（続き）

書式

```
任意の型 data(*)
integer count,datatype,source,tag,comm,request,ierr
CALL MPI_IRECV(data,count,datatype,source,tag,
                  comm,request,ierr)
```

```
int MPI_Irecv (void* data, int count, MPI_Datatype
       datatype, int source, int tag, MPI_Comm comm,
       MPI_Request *request)
```

引数

引数	値	入出力	
data	任意	OUT	受信データの開始アドレス
count	整数	IN	受信データの要素の数(0以上の値)
datatype	handle	IN	受信データのタイプ
source	整数	IN	通信相手のランク
tag	整数	IN	メッセージタグ
comm	handle	IN	コミュニケータ
request	status	OUT	メッセージ情報

付録１.２.10 MPI_IRECV 非ブロッキング型受信（続き）

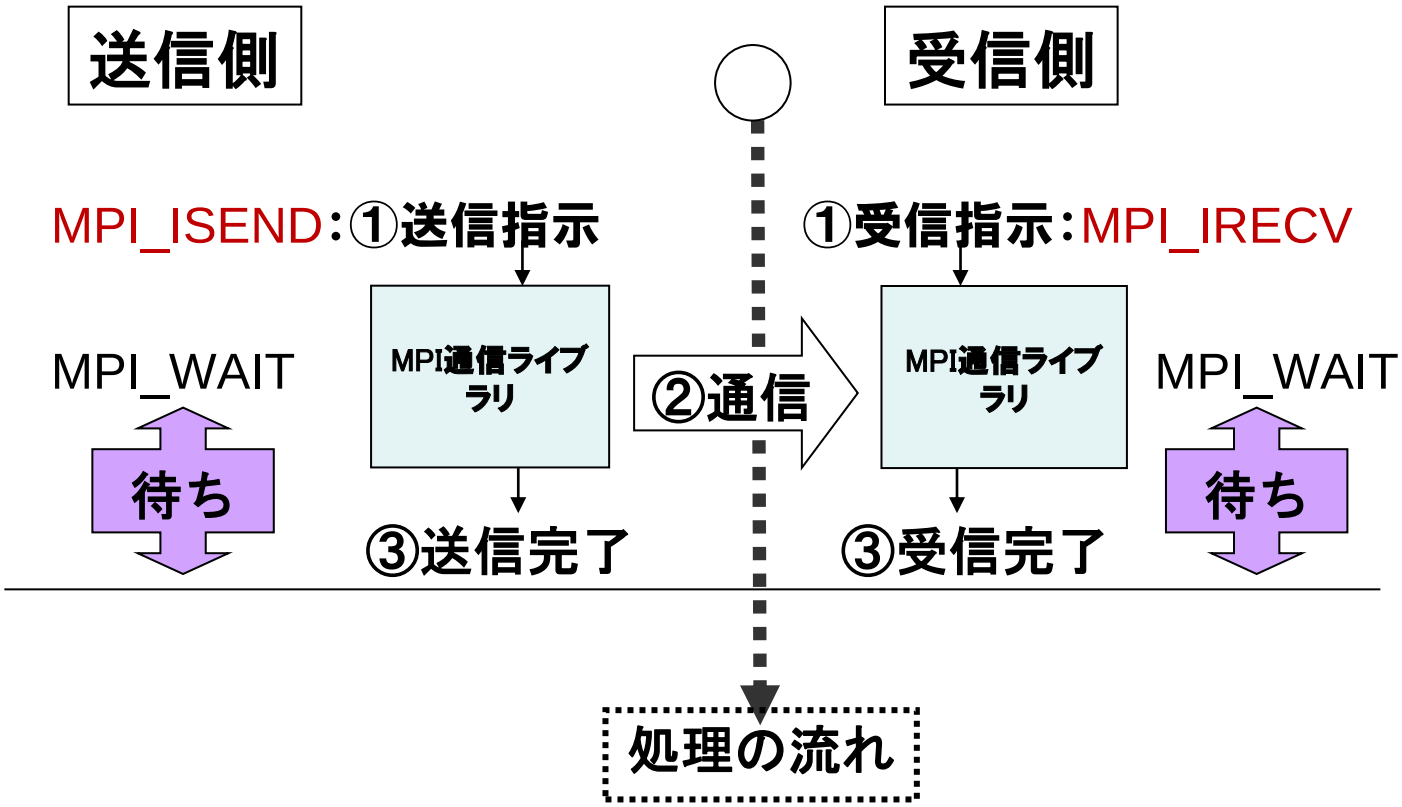
メモ

- メッセージの大きさは要素の個数(count)で表す
- datatypeはMPI_SENDの項を参照
- タグは送信側で付けられた値もしくは，MPI_ANY_TAGを指定する
- requestは要求した通信の識別子が戻され，MPI_WAIT等で通信の完了を確認する際に使用する
- 本ルーチンコール後，処理の完了を待たずにプログラムの処理を続行する
- MPI_WAITまたはMPI_WAITALLで処理の完了を確認するまでは，dataの内容を使用してはならない
- MPI_ISEND，MPI_SENDのどちらで送信したデータもMPI_IRECVで受信してよい
- 通信の完了もMPI_WAIT，MPI_WAITALLのどちらを使用してもよい

P53に戻る

付録１.２.11　非ブロッキング型通信の動作

MPI_ISEND,MPI_IRECVの動作



付録１.２.12　MPI_WAIT　通信完了の待ち合わせ

機能概要

- 非同期通信処理が完了するまで待ち合わせる

書式

```
integer request, status(MPI_STATUS_SIZE), ierr
CALL MPI_WAIT(request, status, ierr)
```

```
int MPI_Wait(MPI_Request *request, MPI_Status *status)
```

引数

引数	値	入出力	
request	handle	INOUT	通信識別子
status	status	out	メッセージ情報

メモ

- requestには，MPI_ISEND，MPI_IRECVをコールして返されたメッセージ情報requestを指定する
- statusには，FORTRANではMPI_STATUS_SIZEの整数配列，CではMPI_Status型の構造体を指定する

P53に戻る

付録１.２.13　MPI_WAITALL　通信完了の待合わせ

機能概要

- 1つ以上の非同期通信全ての完了を待ち合わせる

書式

```
integer count, array_of_requests(count),
        array_of_status(MPI_STATUS_SIZE,*), ierr
call MPI_WAITALL(count,array_of_requests,
                 array_of_status,ierr)
```

```
int MPI_Waitall(int count,
                MPI_Request *array_of_requests,
                MPI_Status *array_of_status)
```

引数

引数	値	入出力	
count	整数	IN	待ち合わせる通信の数
array_of_requests	handle	INOUT	通信識別子の配列 大きさは(count)
array_of_status	status	OUT	メッセージ情報の配列 大きさは(count)

付録１.２.13 MPI_WAITALL 通信完了の待合わせ（続き）

メモ

- array_of_statusは，Fortranでは整数配列で大きさは(count,MPI_STATUS_SIZE)

  CではMPI_Statusの構造体の配列で，大きさは(count)
- array_of_statusには，array_of_requestsに指定されたrequestと同じ順番で，そのrequestに対応する通信の完了状態が格納される

付録１.２.14　一対一通信まとめ

	送信	受信	待ち合せ
同期通信	MPI_SEND	MPI_RECV	
非同期通信	MPI_ISEND	MPI_IRECV	MPI_WAIT(ALL)

- MPI_SEND,MPI_ISENDのどちらで送信した場合でも，MPI_RECV,MPI_IRECVのどちらで受信してもよい
  (“I”は immediate の頭文字)
- MPI_ISEND，MPI_IRECVは，MPI_WAITで個別に待ち合わせてもMPI_WAITALLでまとめて待ち合わせても良い

付録１.３　集団通信

付録１.３.１　集団通信とは

- コミュニケータ内の全プロセスで行う同期的通信
  - 総和計算などのリダクション演算
  - 入力データの配布などに用いられるブロードキャスト
  - FFTで良く用いられる転置
  - その他ギャザ／スキャッタなど

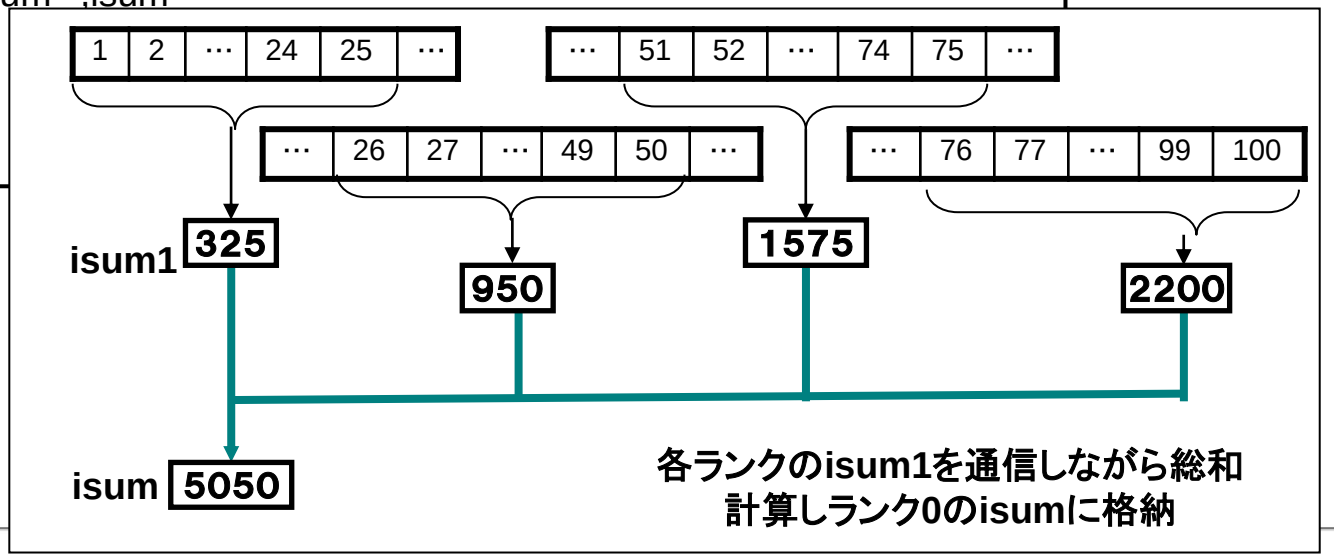
付録１.３.２　プログラム例

etc10.f

```
include 'mpif.h'
parameter(numdat=100)
integer :: myrank,nprocs,ist,ied,ierr,isum1,isum
call MPI_INIT(ierr)
call MPI_COMM_SIZE(MPI_COMM_WORLD,nprocs,ierr)
call MPI_COMM_RANK(MPI_COMM_WORLD,myrank,ierr)
ist=((numdat-1)/nprocs+1)*myrank+1
ied=((numdat-1)/nprocs+1)*(myrank+1)
isum1=0
  do i=ist,ied
    isum1=isum1+i
enddo
call MPI_REDUCE(isum1,isum,1,MPI_INTEGER,MPI_SUM,
&               0,MPI_COMM_WORLD,ierr)
if(myrank.eq.0)write(6,*)'isum=',isum
call MPI_FINALIZE(ierr)
stop
end
```

プロセス毎の小計しかわからない

各プロセスの小計を集計する

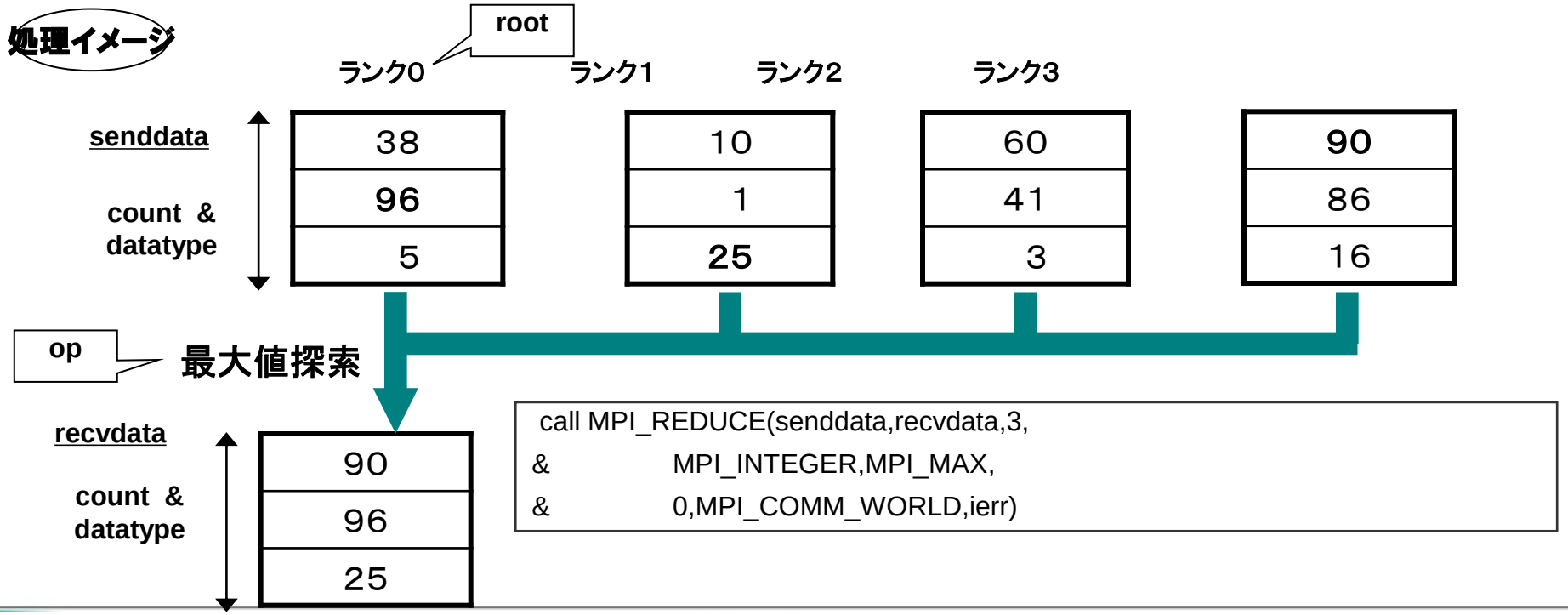


付録１.３.３　MPI_REDUCE　リダクション演算

機能概要

- コミュニケータcomm内の全プロセスが，送信バッファのデータ(senddata)を通信しながら，opで指定された演算を行い，結果を宛先(root)プロセスの受信バッファ(recvdata)に格納する
- 送信データが配列の場合は，要素毎に演算を行う

処理イメージ



付録１.３.３ MPI_REDUCE リダクション演算（続き）

書式

```
任意の型 senddata(*), recvdata(*)
integer count, datatype, op, root, comm, ierr
call MPI_REDUCE(senddata, recvdata, count, datatype, op,
                root, comm, ierr)
```

```
int MPI_Reduce(void* senddata, void* recvdata, int count,
        MPI_Datatype datatype, MPI_Op op, int root,
        MPI_Comm comm)
```

引数

引数	値	入出力	
senddata	任意	IN	送信データのアドレス
recvdata	任意	OUT	受信データのアドレス (rootプロセスだけ意味を持つ)
count	整数	IN	送信データの要素の数
datatype	handle	IN	送信データのタイプ
op	handle	IN	リダクション演算の機能コード
root	整数	IN	rootプロセスのランク
comm	handle	IN	コミュニケータ

付録１.３.３ MPI_REDUCE リダクション演算（続き）

MPI_REDUCEで使える演算

機能名	機能
MPI_MAX	最大値
MPI_MIN	最小値
MPI_SUM	総和
MPI_PROD	累積
MPI_MAXLOC	最大値と対応情報取得
MPI_MINLOC	最小値と対応情報取得
MPI_BAND	ビット積
MPI_BOR	ビット和
MPI_BXOR	排他的ビット和
MPI_LAND	論理積
MPI_LOR	論理和
MPI_LXOR	排他的論理和

付録１.３.４　総和計算の丸め誤差

総和計算において，逐次処理と並列処理とで結果が異なる場合がある
↓
並列処理に限らず，部分和をとってから総和を算出する等，加算順序の変更により結果が異なっている可能性がある

例：（有効桁数を小数点以下4桁として）
配列aに右の数値が入っていたとする

1E+5	7	4	8	6	1E+5

逐次処理

dsum=a(1)+a(2)=1E5+0.00007E5
有効桁数以下切捨てで
=1.0000E+5
同様に a(3),a(4),a(5)**まで足し込んだ**dsum**は** 1.0000E+5
dsum=dsum+a(6)
=1.0000E+5 + 1.0000E+5
=2.0000E+5

2並列

dsum1=a(1)+a(2)=1E5+0.00007E5=1.0000E+5
dsum1+a(3)=1E5+0.00004E5=1.0000E+5
dsum2=a(4)+a(5)=8+6=14=0.0001E5
dsum2+a(6)=0.0001E5+1E5=1.0001E+5
dsum=dsum1+dsum2
=1.0000E+5 + 1.0001E+5
=2.0001E+5

加算順序の違いで異なる結果になった

付録１.３.４　注意事項

- 通信に参加する全プロセスが，同じ集団通信手続きをコールしなければならない
- 送信バッファと受信バッファの実際に使用する部分は，メモリ上で重なってはならない

  （MPI-2では，MPI_IN_PLACEを用いることで可能になります）
- 基本的に集団通信処理の直前や直後での同期処理は不要

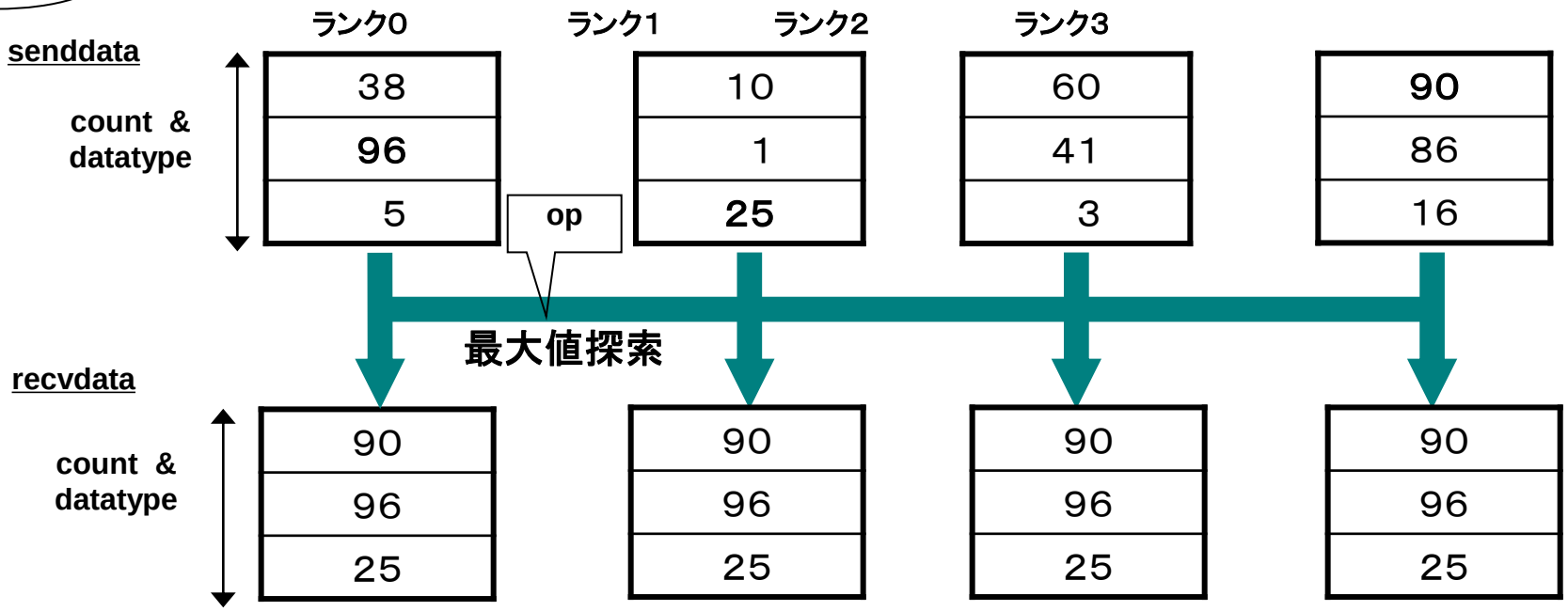
P39に戻る

付録１.３.５　MPI_ALLREDUCE　リダクション演算

機能概要

- コミュニケータcomm内の全プロセスが，送信バッファのデータ(senddata)を通信しながら，opで指定された演算を行い，結果を全プロセスの受信バッファ(recvdata)に格納する

処理イメージ




```
call MPI_ALLREDUCE(senddata,recvdata,3,MPI_INTEGER,MPI_MAX,
&                  MPI_COMM_WORLD,ierr)
```

付録１.３.５ MPI_ALLREDUCE リダクション演算（続き）

書式

```
任意の型 senddata(*), recvdata(*)
integer  count, datatype, op, comm, ierr
call MPI_ALLREDUCE(senddata, recvdata, count, datatype, op,
                   comm, ierr)
```

```
int MPI_Allreduce(void* senddata, void* recvdata, int count,
     MPI_Datatype datatype, MPI_Op op, MPI_Comm comm)
```

引数

引数	値	入出力	
senddata	任意	IN	送信データのアドレス
recvdata	任意	OUT	受信データのアドレス
count	整数	IN	送信データの要素の数
datatype	handle	IN	送信データのタイプ
op	handle	IN	リダクション演算の機能コード
comm	handle	IN	コミュニケータ

メモ

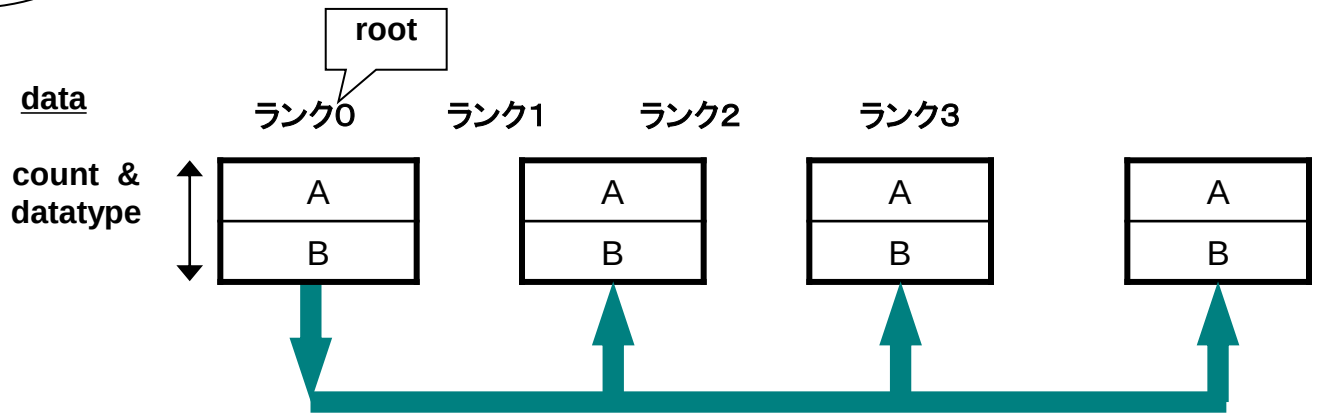
- MPI_REDUCEの計算結果を全プロセスに送信するのと機能的に同じ

付録１.３.６　MPI_BCAST　ブロードキャスト

機能概要

- １つの送信元プロセス(root)の送信バッファ(data)のデータをコミュニケータcomm内全てのプロセスの受信バッファ(data)に送信する

処理イメージ



付録１.３.６　MPI_BCAST ブロードキャスト（続き）

書式

```
任意の型 data(*)
integer count,datatype,root,comm,ierr
call MPI_BCAST(data,count,datatype,root,comm,ierr)
```

```
int MPI_Bcast(void* data, int count, MPI_Datatype
              datatype, int root, MPI_Comm comm)
```

引数

引数	値	入出力	
data	任意	INOUT	データの開始アドレス
count	整数	IN	データの要素の数
datatype	handle	IN	データのタイプ
root	整数	IN	ブロードキャスト送信プロセスのランク
comm	handle	IN	コミュニケータ

メモ

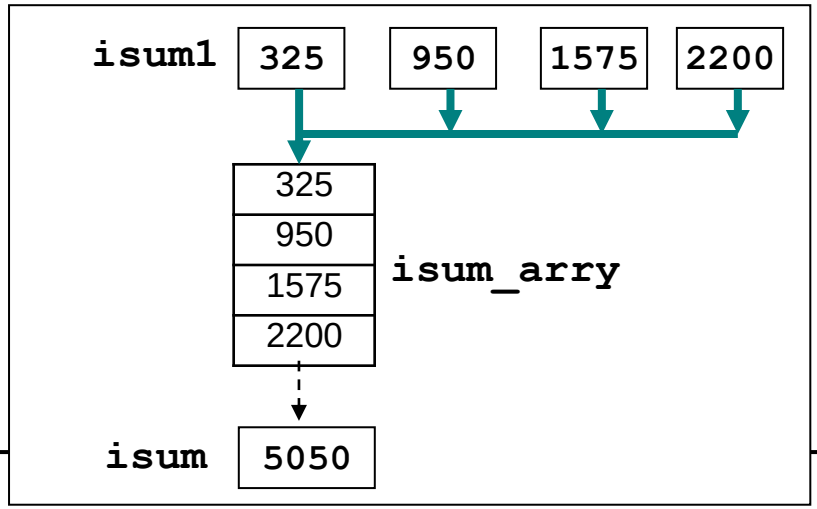
- dataはrootプロセスでは送信データ，その他のプロセスでは受信データになる

P38に戻る

付録１.３.７　プログラム例（総和計算）

etc11.f

```
      include 'mpif.h'
      parameter(numdat=100)
      integer isum_arry(10)
      integer myrank,nprocs,ist,ied,ierr,isum,isum1
      call MPI_INIT(ierr)
      call MPI_COMM_SIZE(MPI_COMM_WORLD,nprocs,ierr)
      call MPI_COMM_RANK(MPI_COMM_WORLD,myrank,ierr)
      ist=((numdat-1)/nprocs+1)*myrank+1
      ied=((numdat-1)/nprocs+1)*(myrank+1)
      isum1=0
      do i=ist,ied
        isum1=isum1+i
      enddo
      call MPI_GATHER(isum1, 1, MPI_INTEGER, isum_arry, 1,
     &                MPI_INTEGER, 0, MPI_COMM_WORLD, ierr)
      if(myrank.eq.0) then
        isum=0
        do i=1,nprocs
          isum=isum+isum_arry(i)
        enddo
        write(6,*)'isum=',isum
      endif
      call MPI_FINALIZE(ierr)
      stop
      end
```

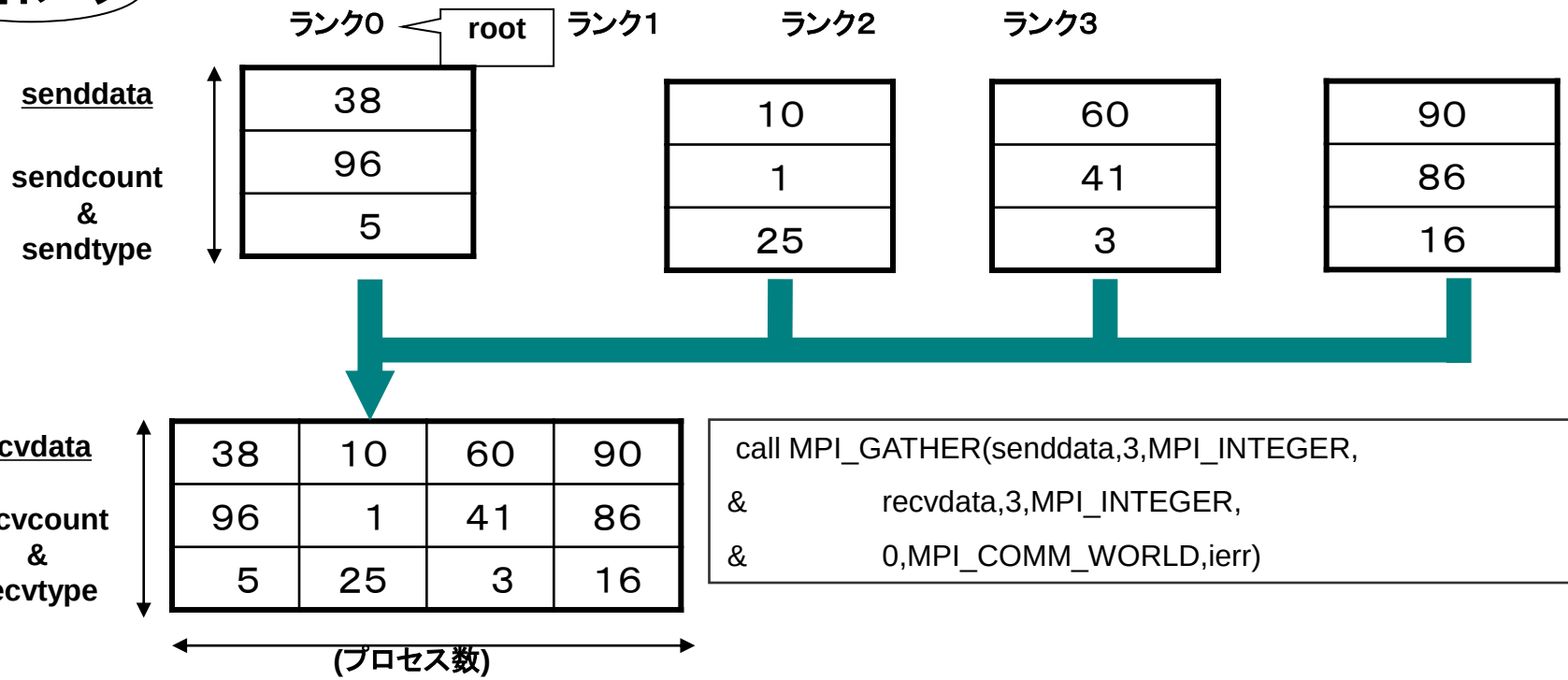


付録１.３.８　MPI_GATHER　データの集積

機能概要

- コミュニケータcomm内の全プロセスの送信バッファ(senddata)から，　１つのプロセス(root)の受信バッファ(recvdata)へメッセージを送信する
- メッセージの長さは一定で，送信元プロセスのランクが小さい順に受信バッファに格納される

処理イメージ




```
call MPI_GATHER(senddata,3,MPI_INTEGER,
&               recvdata,3,MPI_INTEGER,
&               0,MPI_COMM_WORLD,ierr)
```

付録1.3.8　MPI_GATHER　データの集積（続き）

書式

```
任意の型  senddata(*), recvdata(*)
integer sendcount, sendtype, recvcount, recvtype,
        root, comm, ierr
call MPI_GATHER(senddata, sendcount, sendtype,
                recvdata, recvcount, recvtype,
                root, comm, ierr)
```

```
int MPI_Gather(void* senddata, int sendcount,
        MPI_Datatype sendtype, void* recvarea,
        int recvcount, MPI_Datatype recvtype,
        int root, MPI_Comm comm)
```

付録１.３.８　MPI_GATHER　データの集積（続き）

引数

引数	値	入出力	
senddata	任意	IN	送信データの開始アドレス
sendcount	整数	IN	送信データの要素の数
sendtype	handle	IN	送信データのタイプ
recvdata	任意	OUT	受信領域の開始アドレス ☆
recvcount	整数	IN	個々のプロセスから受信する要素数 ☆
recvtype	handle	IN	受信領域のデータタイプ ☆
root	整数	IN	rootプロセスのランク
comm	handle	IN	コミュニケータ

☆…rootプロセスだけ意味を持つ

メモ

- メッセージの長さは一定で，送信元プロセスのランクが小さい順に受信バッファに格納される

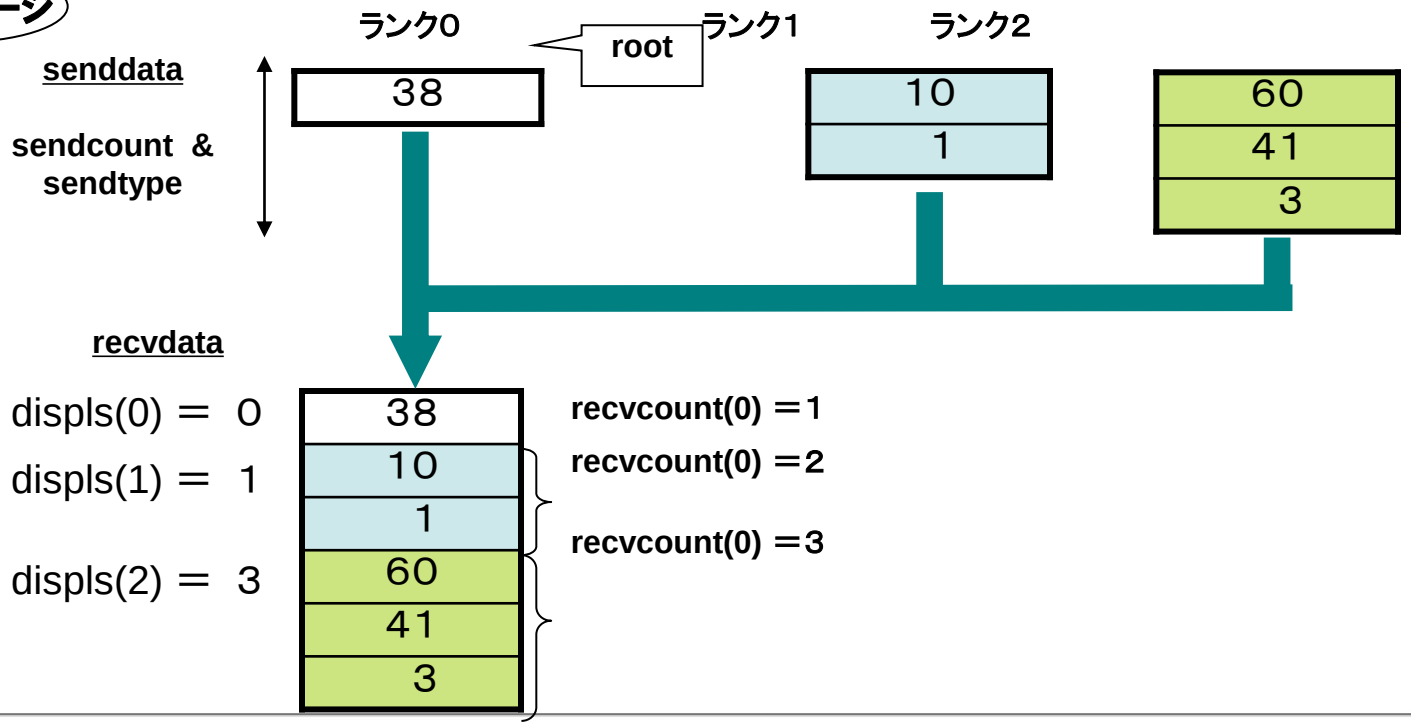
P41に戻る
P65に戻る

付録１.３.９　MPI_GATHERV　データの集積

機能概要

- コミュニケータcomm内の全プロセスの送信バッファ(senddata)から，１つのプロセス(root)の受信バッファ(recvdata)へメッセージを送信する
- 送信元毎に受信データ長(recvcnt)と受信バッファ内の位置(displs)を変えることができる

処理イメージ



付録1.3.9　MPI_GATHERV　データの集積（続き）

書式

```
任意の型 senddata(*),recvdata(*)
integer sendcount, sendtype, recvcount(*),
      displs(*), recvtype,root, comm, ierr
call MPI_GATHERV(senddata, sendcount, sendtype,
                 recvdata, recvcount, displs,
                 recvtype, root, comm, ierr)
```

```
int MPI_Gatherv(void* senddata, int sendcount,
         MPI_Datatype sendtype, void* recvdata,
         int *recvcount, int *displs,
         MPI_Datatype recvtype, int root,
         MPI_Comm comm)
```

付録１.３.９　MPI_GATHERV　データの集積（続き）

引数	値	入出力	
senddata	任意	IN	送信データの開始アドレス
sendcount	整数	IN	送信データの要素の
sendtype	handle	IN	送信データのタイプ
recvdata	任意	OUT	受信領域の開始アドレス　☆
recvcount	整数	IN	個々のプロセスから受信する 要素数の配列　☆
displs	整数	IN	受信データを置き始めるrecvdataからの 相対位置の配列　☆
recvtype	handle	IN	受信領域のデータタイプ　☆
root	整数	IN	rootプロセスのランク
comm	handle	IN	コミュニケータ

☆ …rootプロセスだけが意味を持つ

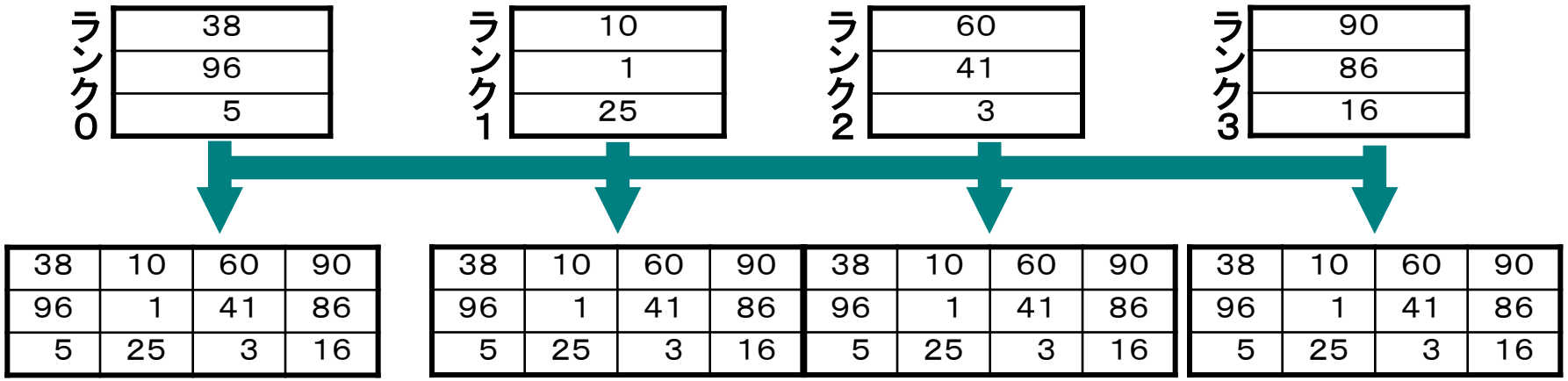
P41に戻る

付録１.３.10　MPI_ALLGATHER　全プロセスでデータ集積

機能概要

- コミュニケータ(comm)内の全プロセスの送信バッファ(senddata)から，全プロセスの受信バッファ(recvdata)へ互いにメッセージを送信する
- メッセージの長さは一定で，送信元プロセスのランクが小さい順に受信バッファに格納される

処理イメージ




```
 call MPI_ALLGATHER(senddata,3,MPI_INTEGER,
&                   recvdata,3,MPI_INTEGER,
&                   0,MPI_COMM_WORLD,ierr)
```

付録1.3.10 MPI_ALLGATHER 全プロセスでデータ集積(続き)

書式

```
任意の型 senddata(*), recvdata(*)
integer sendcount, sendtype, recvcount, recvtype,
        comm, ierr
call MPI_ALLGATHER(senddata, sendcount, sendtype,
                   recvdata, recvcount, recvtype,
                   comm, ierr)
```

```
int MPI_Allgather(void* senddata, int sendcount,
          MPI_Datatype sendtype, void* recvdata,
          int recvcount, MPI_Datatype recvtype,
          MPI_Comm comm)
```

付録1.3.10 MPI_ALLGATHER 全プロセスでデータ集積(続き)

引数

引数	値	入出力	
senddata	任意	IN	送信領域の開始アドレス
sendcount	整数	IN	送信データの要素の数
sendtype	handle	IN	送信データのタイプ
recvdata	任意	OUT	受信領域の開始アドレス
recvcount	整数	IN	個々のプロセスから受信する要素の数
recvtype	handle	IN	受信データのタイプ
comm	handle	IN	コミュニケータ

メモ

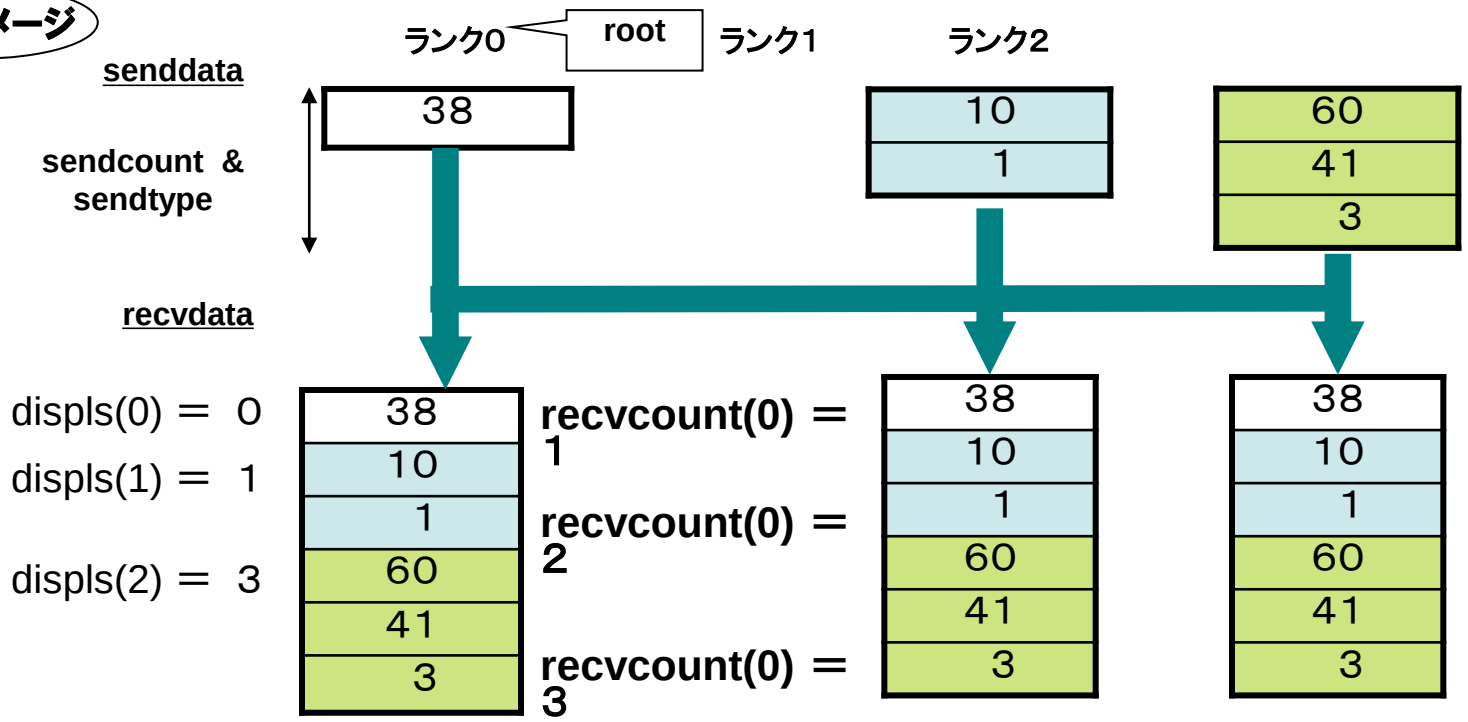
- MPI_GATHERの結果を全プロセスに送信するのと機能的に同じ

付録１.３.11　MPI_ALLGATHERV　全プロセスでデータ集積

機能概要

- コミュニケータcomm内の全プロセスの送信バッファ(senddata)から，全プロセスの受信バッファ(recvdata)へメッセージを送信する
- 送信元毎に受信データ長(recvcount)と受信バッファ内の位置(displs)を変えることができる

処理イメージ



付録1.3.11　MPI_ALLGATHERV　全プロセスでデータ集積(続き)

書式

```
任意の型 senddata(*), recvdata(*)
integer sendcount, sendtype, recvcount(*), displs(*),
        recvtype, comm, ierr
call MPI_ALLGATHERV(senddata, sendcount, sendtype,
                    recvdata, recvcount, displs,
                    recvtype, comm, ierr)
```

```
int MPI_Allgatherv(void* senddata, int sendcount,
            MPI_Datatype sendtype, void* recvdata,
            int *recvcount, int *displs,
            MPI_Datatype recvtype, MPI_Comm comm)
```

付録１.３.11　MPI_ALLGATHERV　全プロセスでデータ集積(続き)

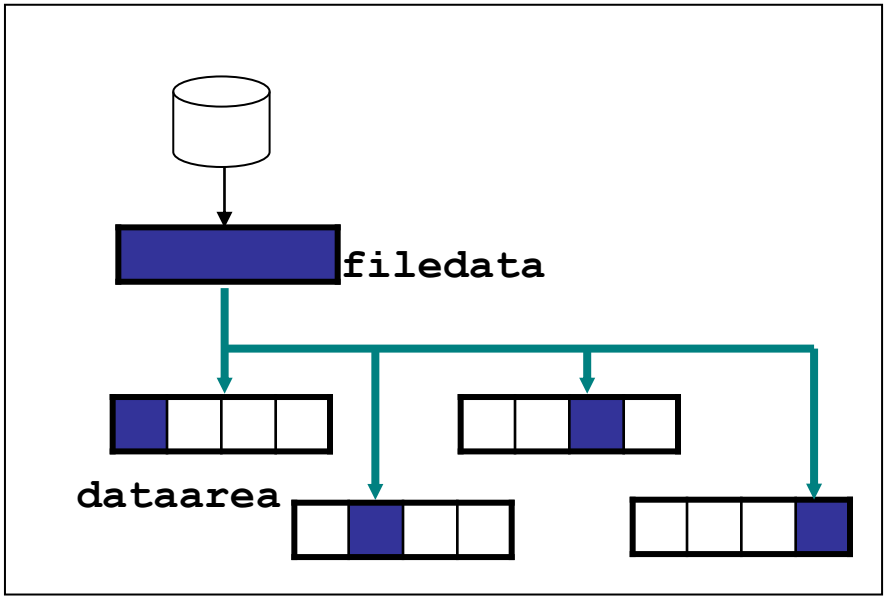
引数

引数	値	入出力	
senddata	任意	IN	送信領域の開始アドレス
sendcount	整数	IN	送信データの要素の数
sendtype	handle	IN	送信データのタイプ
recvdata	任意	OUT	受信領域の開始アドレス
recvcount	整数	OUT	受信データの要素の数
displs	整数	IN	受信データを置くrecvdataからの相対位置(プロセス毎)
recvtype	handle	IN	受信データのタイプ
comm	handle	IN	コミュニケータ

付録１.３.12　プログラム例(代表プロセスによるファイル入力)

etc12.f

```
 include 'mpif.h'
 integer filedata(100),dataarea(100)
 integer :: myrank,nprocs,ist,ied,ierr,isum1,isum
 call MPI_INIT(ierr)
 call MPI_COMM_SIZE(MPI_COMM_WORLD,nprocs,ierr)
 call MPI_COMM_RANK(MPI_COMM_WORLD,myrank,ierr)
 icount=(100-1)/nprocs+1
 if(myrank==0)then
    open(10,file='fort.10')
    read(10,*)filedata
 end if
 call MPI_SCATTER(filedata, icount, MPI_INTEGER,
&     dataarea(icount*myrank+1), icount, MPI_INTEGER,
&     0, MPI_COMM_WORLD,ierr)
 isum1=0
 ist=icount*myrank+1
 ied=icount*(myrank+1)
 do i=ist,ied
    isum1=isum1+dataarea(i)
 enddo
 call MPI_REDUCE(isum1, isum, 1,
&   MPI_INTEGER, MPI_SUM,
&   0, MPI_COMM_WORLD, ierr)
 if(myrank==0)
& write(6,*)'sum=',isum
 call MPI_FINALIZE(ierr)
 stop
 end
```

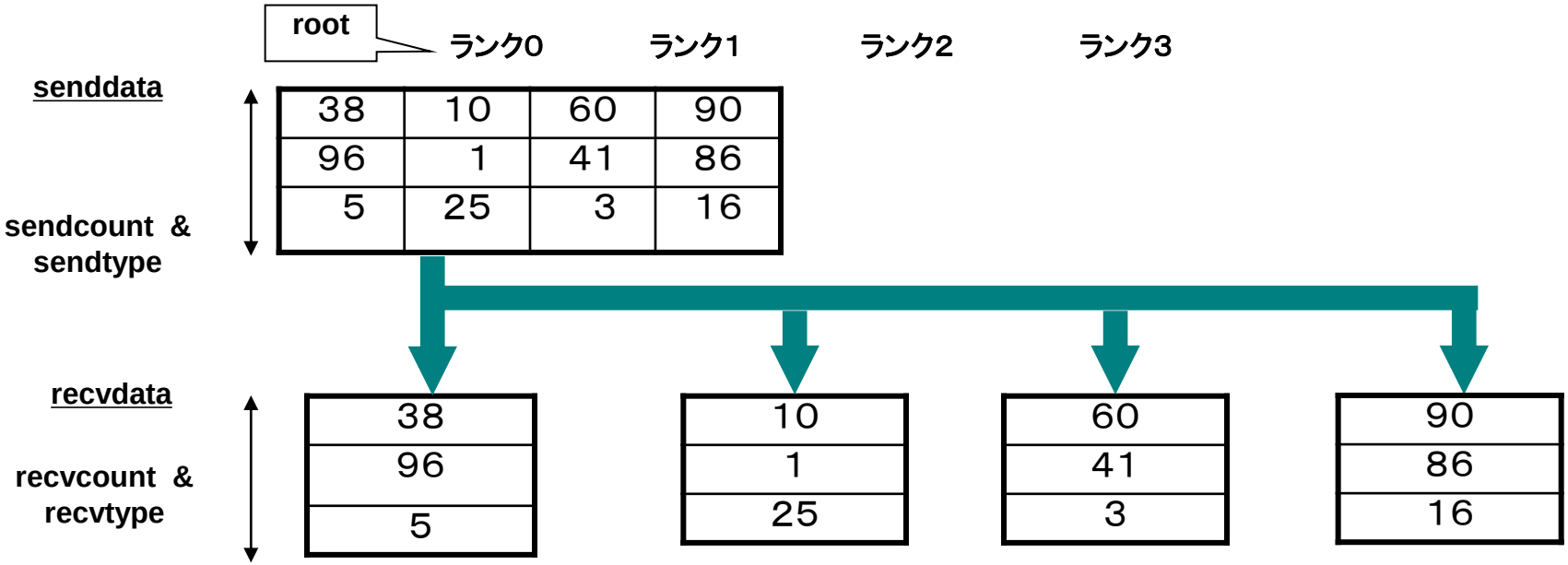


付録１.３.13　MPI_SCATTER　データの分配

機能概要

- 一つの送信元プロセス(root)の送信バッファ(senddata)から，コミュニケータcomm内の全てのプロセスの受信バッファ(recvdata)にデータを送信する
- 各プロセスへのメッセージ長は一定である

処理イメージ



付録1.3.13　MPI_SCATTER　データの分配（続き）

書式

```
任意の型 senddata(*), recvdata(*),
integer sendcount, sendtype, recvcount, recvtype,
      root, comm, ierr
call MPI_SCATTER (senddata, sendcount, sendtype,
                  recvdata, recvcount, recvtype,
                  root, comm, ierr)
```

```
int MPI_Scatter(void* senddata, int sendcount,
          MPI_Datatype sendtype, void* recvdata,
          int recvcount, MPI_Datatype recvtype,
          int root, MPI_Comm comm)
```

付録１.３.13　MPI_SCATTER　データの分配（続き）

引数

引数	値	入出力	
senddata	任意	IN	送信領域のアドレス　☆
sendcount	整数	IN	各プロセスへ送信する要素数　☆
sendtype	handle	IN	送信領域の要素のデータタイプ　☆
recvdata	任意	OUT	受信データのアドレス
recvcount	整数	IN	受信データの要素の数
recvtype	handle	IN	受信データのタイプ
root	整数	IN	rootプロセスのランク
comm	handle	IN	コミュニケータ

☆…　rootプロセスだけ意味を持つ

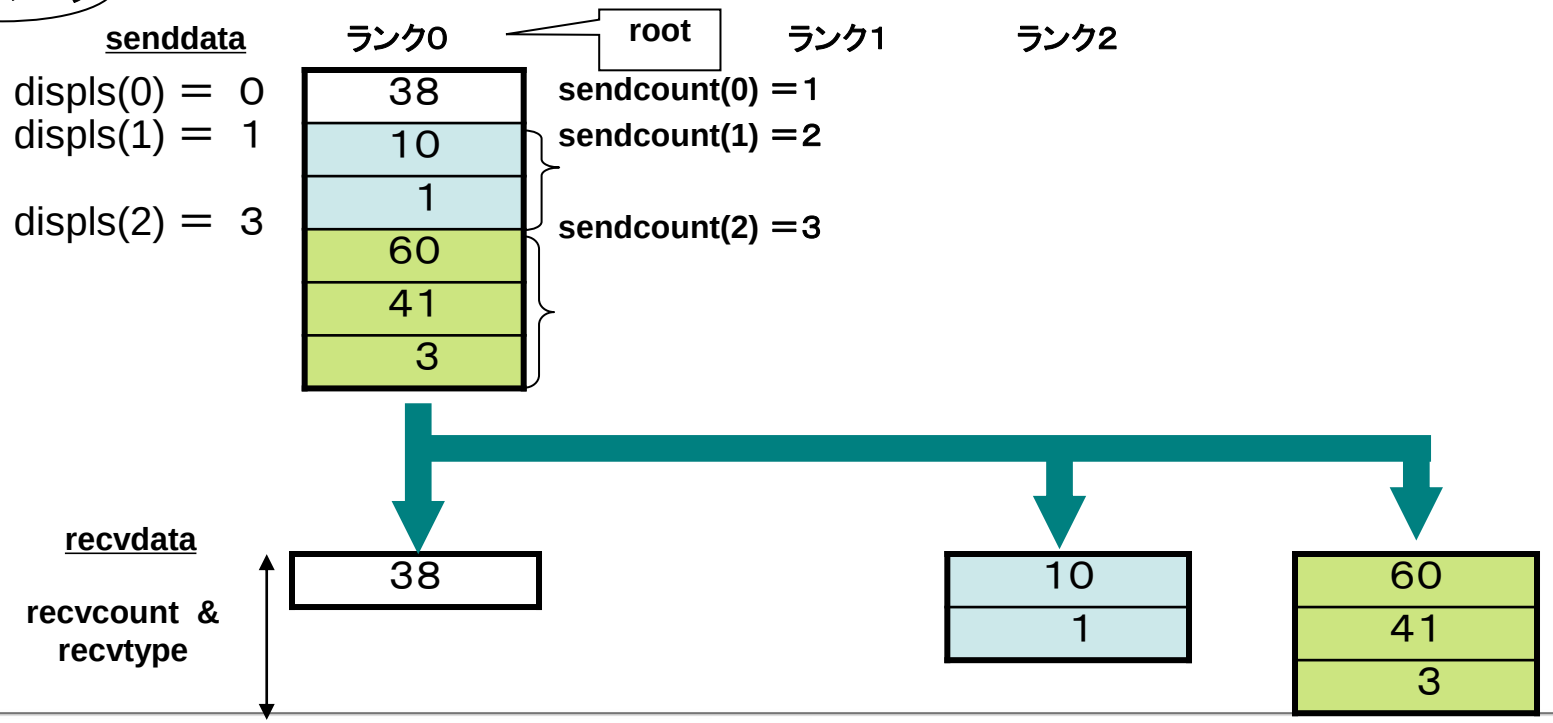
P40に戻る
P59に戻る

付録１.３.14　MPI_SCATTERV　データの分配

機能概要

- 一つの送信元プロセス(root)の送信バッファ(senddata)から，コミュニケータcomm内の全てのプロセスの受信バッファ(recvdata)にデータを送信する
- 送信先毎に送信データ長(sendcount)とバッファ内の位置(displs)を変えることができる

処理イメージ



付録１.３.14　MPI_SCATTERV データの分配（続き）

書式

```
任意の型 senddata(*), recvdata(*)
integer sendcount(*), displs(*), sendtype, recvcount,
        recvtype, root, comm, ierr
call MPI_SCATTERV(senddata, sendcount, displs, sendtype,
                  recvdata, recvcount, recvtype, root,
                  comm, ierr)
```

```
int MPI_Scatterv(void* senddata, int *sendcount,
                 int *displs, MPI_Datatype sendtype,
                 void* recvdata, int recvcount,
                 MPI_Datatype recvtype, int root,
                 MPI_Comm comm)
```

付録１.３.14　MPI_SCATTERV データの分配（続き）

引数

引数	値	入出力	
senddata	任意	IN	送信領域のアドレス ☆
sendcount	整数	IN	各プロセスへ送信する要素数 ☆
displs	整数	IN	プロセス毎の送信データの始まるsenddataからの相対位置 ☆
sendtype	handle	IN	送信データのタイプ ☆
recvdata	任意	OUT	受信データのアドレス
recvcount	整数	IN	受信データの要素の数
recvtype	handle	IN	受信データのタイプ
root	整数	IN	rootプロセスのランク
comm	handle	IN	コミュニケータ

☆…　rootプロセスだけ意味を持つ

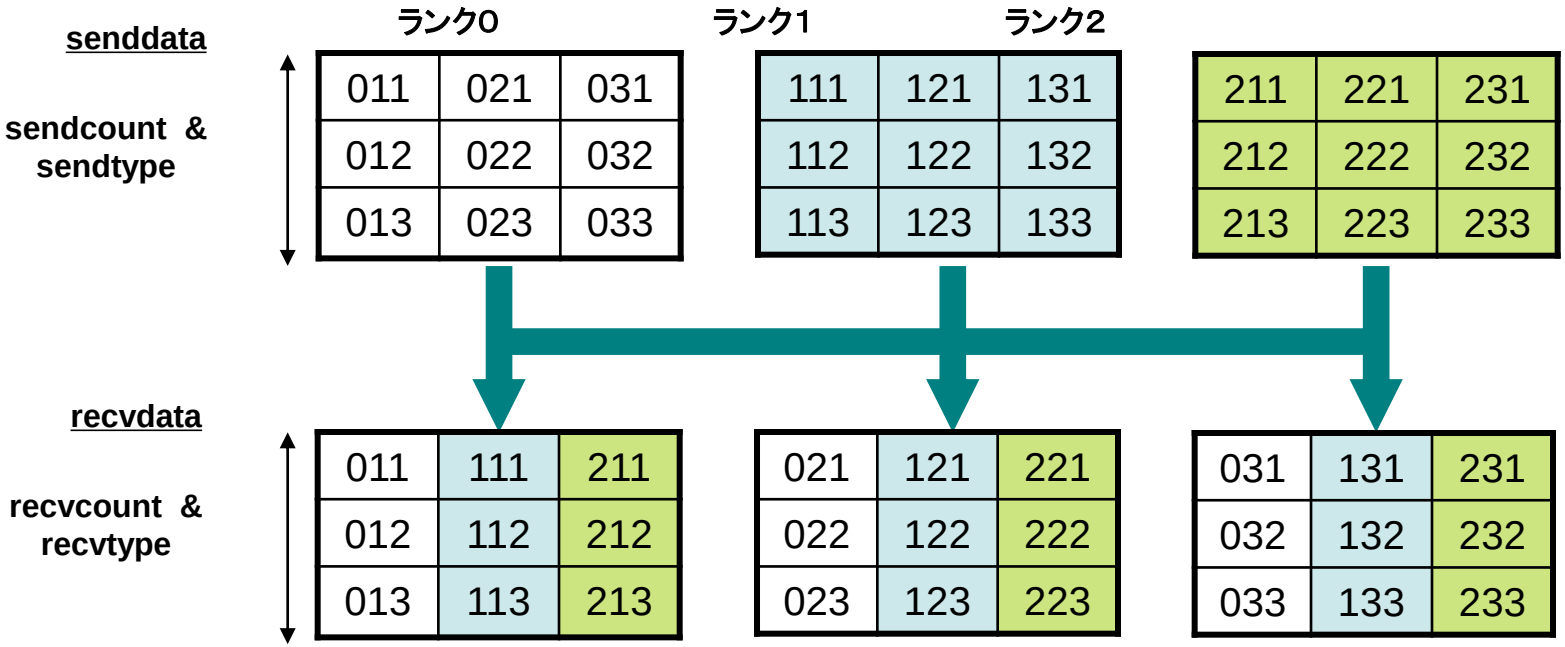
P40に戻る

付録１.３.15　MPI_ALLTOALL　データ配置

機能概要

- コミュニケータcomm内の全プロセスが，それぞれの送信バッファ(senddata)から，他の全てのプロセスの受信バッファ(recvdata)にデータを分配する
- 各プロセスへのメッセージ長は一定である

処理イメージ



付録1.3.15　MPI_ALLTOALL　データ配置（続き）

書式

```
任意の型 senddata(*), recvdata(*)
integer sendcount, sendtype, recvcount, recvtype,
        comm, ierr
call MPI_ALLTOALL(senddata, sendcount, sendtype,
                  recvdata, recvcount, recvtype,
                  comm, ierr)
```

```
int MPI_Alltoall(void* senddata, int sendcount,
        MPI_Datatype sendtype, void* recvdata,
        int recvcount, MPI_Datatype recvtype,
        MPI_Comm comm)
```

付録１.３.15　MPI_ALLTOALL　データ配置（続き）

引数

引数	値	入出力	
senddata	任意	IN	送信領域の開始アドレス
sendcount	整数	IN	各プロセスへ送信する要素の数
sendtype	handle	IN	送信データのタイプ
recvdata	任意	OUT	受信領域の開始アドレス
recvcount	整数	IN	各プロセスから受信する要素の数
recvtype	handle	IN	受信データのタイプ
comm	handle	IN	コミュニケータ

メモ

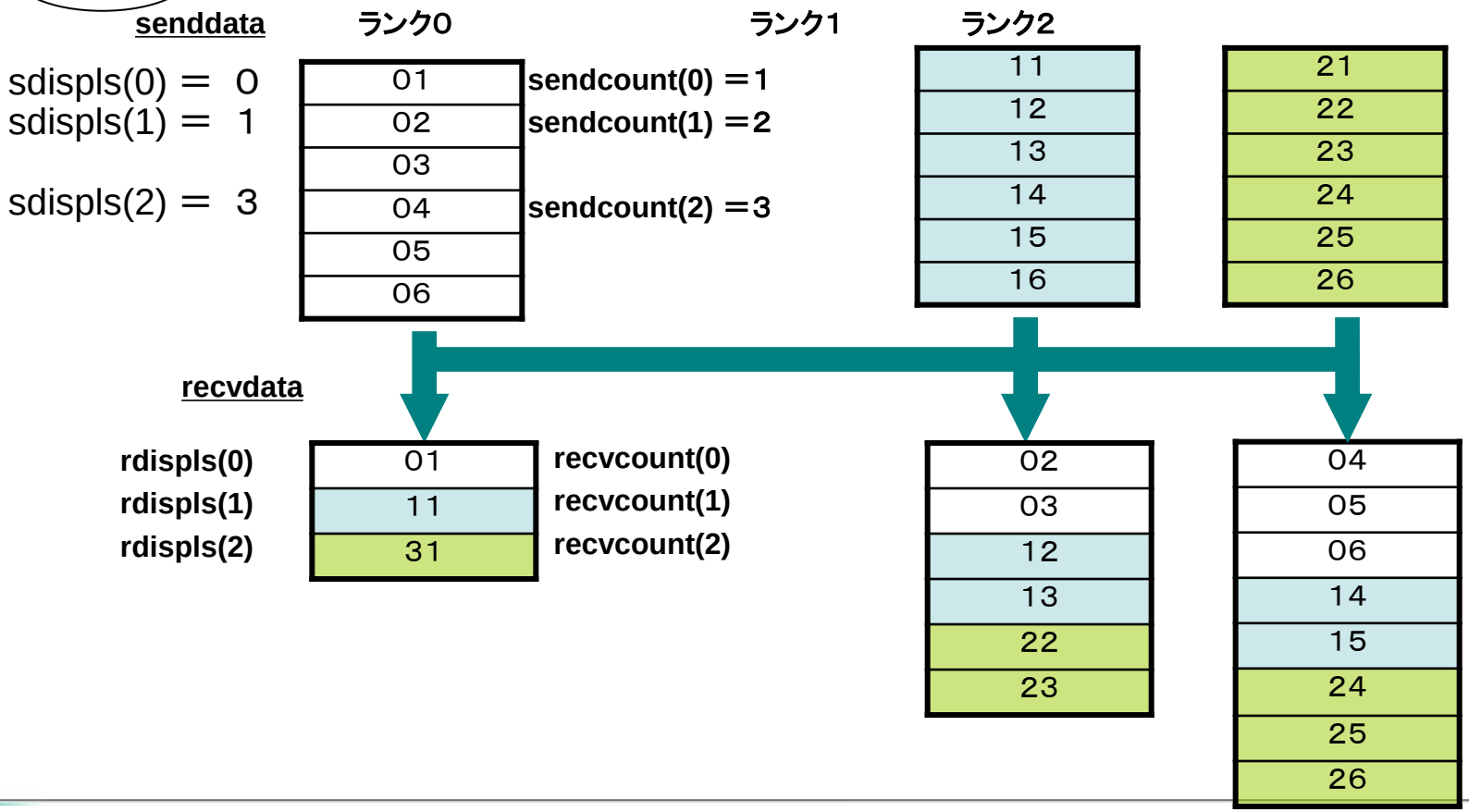
- 全対全スキャッタ／ギャザ，または全交換とも呼ばれる

付録１.３.16　MPI_ALLTOALLV　データ配置

機能概要

- コミュニケータcomm内の全プロセスが，それぞれの送信バッファ(senddata)から他の全てのプロセスの受信バッファ(recvdata)にデータを分配する
- 送信元毎にメッセージ長を変えることができる

処理イメージ



付録1.3.16　MPI_ALLTOALLV　データ配置

書式

```
任意の型 senddata(*), recvdata(*)
integer  sendcount(*),sdispls(*), sendtype,
         recvcount(*),rdispls(*), recvtype,
         comm, ierr
call MPI_ALLTOALLV(senddata, sendcount, sdispls, sendtype,
                   recvdata, recvcount, rdispls, recvtype,
                   comm, ierr)
```

```
int MPI_Alltoallv(void* senddata, int *sendcount,
          int *sdispls, MPI_Datatype sendtype,
          void* recvdata, int *recvcount,
          int *rdispls, MPI_Datatype recvtype,
          MPI_Comm comm)
```

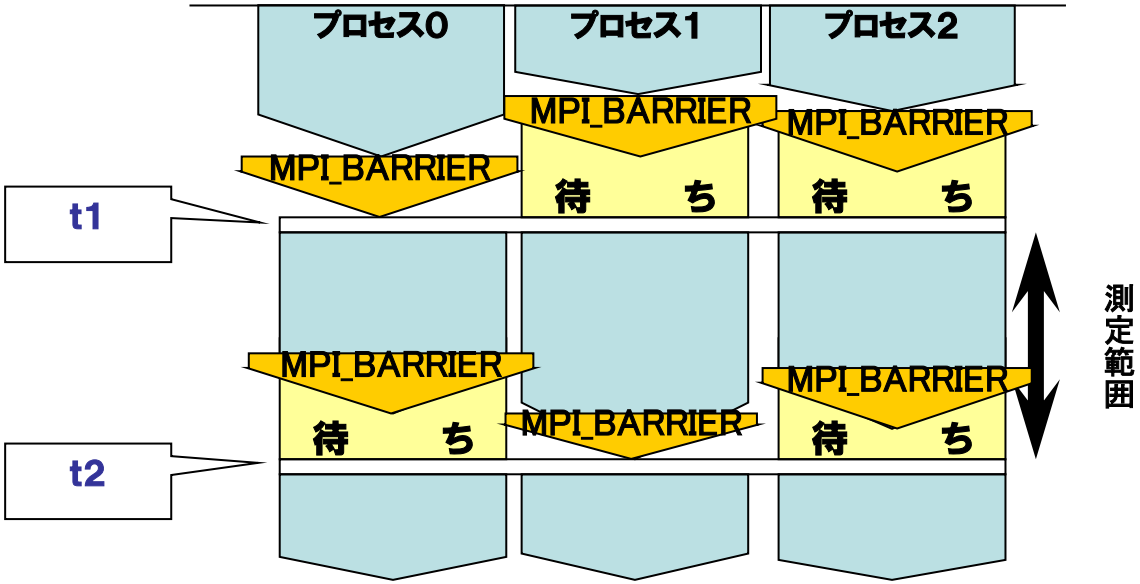
付録１.３.16　MPI_ALLTOALLV　データ配置

引数

引数	値	入出力	
senddata	任意	IN	送信領域の開始アドレス
sendcount	整数	IN	送信する要素の数(プロセス毎)
sdispls	整数	IN	送信データの始まるsenddataからの相対位置(プロセス毎)
sendtype	handle	IN	送信データのデータタイプ
recvdata	任意	OUT	受信領域の開始アドレス
recvcount	整数	IN	受信する要素の数(プロセス毎)
rdispls	整数	IN	受信データを置き始めるrecvdataからの相対位置(プロセス毎)
recvtype	handle	IN	受信バッファの要素のデータタイプ
comm	handle	IN	コミュニケータ

付録１.４　その他の手続き

付録１.４.１　計時（イメージ）



（測定時間）＝ｔ２－ｔ１

付録１.４.１　計時（プログラム例）

etc13.f

```
 include 'mpif.h'
 parameter(numdat=100)
 integer myrank,nprocs,ist,ied,ierr,isum1,isum
 real*8 t1,t2,tt
 call MPI_INIT(ierr)
 call MPI_COMM_SIZE(MPI_COMM_WORLD,nprocs,ierr)
 call MPI_COMM_RANK(MPI_COMM_WORLD,myrank,ierr)
 ist=((numdat-1)/nprocs+1)*myrank+1
 ied=((numdat-1)/nprocs+1)*(myrank+1)
 call MPI_BARRIER(MPI_COMM_WORLD,ierr)
 t1=MPI_WTIME()
 isum=0
 do i=ist,ied
    isum=isum+i
 enddo
 call MPI_REDUCE(isum,isum0,1,MPI_INTEGER,
&                MPI_SUM,0,MPI_COMM_WORLD,ierr)
 call MPI_BARRIER(MPI_COMM_WORLD,ierr)
 t2=MPI_WTIME()
 tt=t2-t1
 if(myrank.eq.0)write(6,*)'sum=',isum0,',time=',tt
 call MPI_FINALIZE(ierr)
 stop
 end
```

付録１.４.２　MPI_WTIME　経過時間の測定

機能概要

- 過去のある時刻からの経過時間（秒数）を倍精度実数で返す

書式

```
DOUBLE PRECESION MPI_WTIME ( )
```

```
double MPI_Wtime (void)
```

メモ

- 引数はない
- この関数を実行したプロセスのみの時間を取得できる
  - プログラム全体の経過時間を知るには同期を取る必要がある
- 得られる値は経過時間であり，システムによる中断があればその時間も含まれる

付録１.４.３　MPI_BARRIER　バリア同期

機能概要

- コミュニケータ(comm)内の全てのプロセスで同期をとる

書式

```
integer comm,ierr
call MPI_BARRIER (comm, ierr)
```

```
int MPI_Barrier (MPI_Comm comm)
```

引数

引数	値	入出力	
comm	handle	IN	コミュニケータ

メモ

- MPI_BARRIERをコールすると，commに含まれる全てのプロセスが　MPI_BARRIERをコールするまで待ち状態に入る

付録１.５　プログラミング作法

1. FORTRAN

① ほとんどのMPI手続きはサブルーチンであり，引数の最後に整数型の返却コード（本書ではierr）を必要とする

② 関数は引数に返却コードを持たない

2. C

① 接頭辞MPI_とそれに続く1文字は大文字，以降の文字は小文字

② 但し，定数はすべて大文字

③ ほとんどの関数は戻り値として返却コードを返すため，引数に返却コードは必要ない

3. 共通

① 引数説明にある「handle」は，FORTRANでは整数型，Cでは書式説明に記載した型を指定する

② 引数説明にある「status」は，FORTRANではMPI_STATUS_SIZEの整数配列，CではMPI_Status型の構造体を指定する

③ 接頭辞MPI_で始まる変数や関数は宣言しない方が良い

④ 成功した場合の返却コードはMPI_SUCCESSとなる

付録２．参考文献，Webサイト

- MPI並列プログラミング，Peter S. Pacheco著，秋葉　博訳

出版社: 培風館 (2001/07)
ISBN-10: 456301544X
ISBN-13: 978-4563015442

- 「並列プログラミング入門　ＭＰＩ版」

https://i.riken.jp/wp-content/uploads/2015/06/secure_4467_parallel-programming_main.pdf

- 「並列プログラミング虎の巻MPI版」

https://www.hpci-office.jp/documents/HPC_Programming_Seminar/mpi-all_20160801_20181206.pdf

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1-2 （practice_1）解答例

```
program example1
include 'mpif.h'
integer ierr,myrank
call MPI_INIT(ierr)
call MPI_COMM_RANK(MPI_COMM_WORLD,myrank,ierr)
if(myrank.eq.0) write(6,*) "Hello World",myrank
call MPI_FINALIZE(ierr)
stop
end
```

演習問題2 （practice_2) 解答例

```
      program example2
      include 'mpif.h'
      integer ierr,myrank,nprocs,ist,ied
      parameter(n=1000)
      integer isum
      call MPI_INIT(ierr)
      call MPI_COMM_SIZE(MPI_COMM_WORLD,nprocs,ierr)
      call MPI_COMM_RANK(MPI_COMM_WORLD,myrank,ierr)
      ist=((n-1)/nprocs+1)* myrank+1
      ied=((n-1)/nprocs+1)*(myrank+1)
      isum=0
      do i=ist,ied
        isum=isum+i
      enddo
      write(6,6000) myrank,isum
6000 format("Total of Rank:",i2,i10)
      call MPI_FINALIZE(ierr)
      stop
      end
```

演習問題3 （practice_3）解答例

```
      program example3
      include 'mpif.h'
      integer ierr,myrank,nprocs,ist,ied,itag
      integer status(MPI_STATUS_SIZE)
      parameter(n=1000)
      integer isum,isum2
      call MPI_INIT(ierr)
      call MPI_COMM_SIZE(MPI_COMM_WORLD,nprocs,ierr)
      call MPI_COMM_RANK(MPI_COMM_WORLD,myrank,ierr)
      ist=((n-1)/nprocs+1)*myrank+1
      ied=((n-1)/nprocs+1)*(myrank+1)
      isum=0
      do i=ist,ied
        isum=isum+i
      enddo
         itag=1
      if(myrank.ne.0) then
        call MPI_SEND(isum,1,MPI_INTEGER,0,
     &              itag,MPI_COMM_WORLD,ierr)
      else
        call MPI_RECV(isum2,1,MPI_INTEGER,1,
     &              itag,MPI_COMM_WORLD,status,ierr)
        isum=isum+isum2
        call MPI_RECV(isum2,1,MPI_INTEGER,2,
     &              itag,MPI_COMM_WORLD,status,ierr)
        isum=isum+isum2
        call MPI_RECV(isum2,1,MPI_INTEGER,3,
     &              itag,MPI_COMM_WORLD,status,ierr)
        isum=isum+isum2
        write(6,6000) isum
6000   format("Total Sum = ",i10)
       endif
       call MPI_FINALIZE(ierr)
       stop
       end
```

演習問題4 （practice_4）解答例

```
      program example4
      include 'mpif.h'
      integer ierr,myrank,nprocs,ist,ied
      parameter(n=1000)
      integer isum,isum2
      call MPI_INIT(ierr)
      call MPI_COMM_SIZE(MPI_COMM_WORLD,nprocs,ierr)
      call MPI_COMM_RANK(MPI_COMM_WORLD,myrank,ierr)
      ist=((n-1)/nprocs+1)*myrank+1
      ied=((n-1)/nprocs+1)*(myrank+1)
      isum=0
      do i=ist,ied
        isum=isum+i
      enddo
        call MPI_REDUCE(isum,isum2,1,MPI_INTEGER,MPI_SUM,0,
     &                  MPI_COMM_WORLD,ierr)
       if(myrank.eq.0) write(6,6000) isum2
6000 format("Total Sum = ",i10)
      call MPI_FINALIZE(ierr)
      stop
      end
```

※　**MPI_REDUCEでは送信するデータと受信するデータの領域に重なりがあってはならない．isumとisum2に分けて使用．**

演習問題5 （practice_5）解答例

```
include 'mpif.h'
integer,parameter :: numdat=100
integer,allocatable :: senddata(:),recvdata(:)
call MPI_INIT(ierr)
call MPI_COMM_RANK(MPI_COMM_WORLD,myrank,ierr)
call MPI_COMM_SIZE(MPI_COMM_WORLD,nprocs,ierr)
ist = ((numdat-1)/nprocs+1)*myrank+1
ied = ((numdat-1)/nprocs+1)*(myrank+1)
allocate(senddata(ist:ied))
if(myrank.eq.0) allocate(recvdata(numdat))
icount=(numdat-1)/nprocs+1
do i=1,icount
  senddata(icount*myrank+i)=icount*myrank+i
enddo
```

演習問題5 （practice_5) 解答例（つづき）

```
 call MPI_GATHER(senddata(icount*myrank+1),
&                icount,MPI_INTEGER,recvdata,
&                icount,MPI_INTEGER,0,MPI_COMM_WORLD,
&                ierr)
 if(myrank.eq.0) then
   open(60,file='fort.60')
   write(60,'(10I8)') recvdata
   deallocate(recvdata)
 endif
 deallocate(senddata)
 call MPI_FINALIZE(ierr)
 stop
 end
```

演習問題6 （practice_6）解答例

```
program example6
implicit real(8)(a-h,o-z)
include 'mpif.h'
integer ierr,myrank,nprocs,ist,ied
parameter ( n=12000 )
real(8) a(n,n),b(n,n),c(n,n)
real(8) d(n,n)
real(8) t1,t2
call MPI_INIT(ierr)
call MPI_COMM_SIZE(MPI_COMM_WORLD,nprocs,ierr)
call MPI_COMM_RANK(MPI_COMM_WORLD,myrank,ierr)
ist=((n-1)/nprocs+1)*myrank+1
ied=((n-1)/nprocs+1)*(myrank+1)
n2=n/nprocs
```

演習問題6 （practice_6) 解答例（つづき）

```
      do j = 1,n
        do i = 1,n
          a(i,j) = 0.0d0
          b(i,j) = n+1-max(i,j)
          c(i,j) = n+1-max(i,j)
        enddo
      enddo
      if(myrank.eq.0) then
      write(6,50) ' Matrix Size = ',n
      endif
   50 format(1x,a,i5)
```

演習問題6　(practice_6) 解答例（つづき）

```
      call MPI_BARRIER(MPI_COMM_WORLD,ierr)
      t1=MPI_WTIME()
      do j=ist,ied
        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 MPI_GATHER(a(1,ist),n*n2,MPI_REAL8,d,n*n2
     &                ,MPI_REAL8,0,MPI_COMM_WORLD, ierr)
      call MPI_BARRIER(MPI_COMM_WORLD,ierr)
      t2=MPI_WTIME()
      if(myrank.eq.0) then
      write(6,60) ' Execution Time = ',t2-t1,' sec',' A(n,n) = ',d(n,n)
      endif
   60 format(1x,a,f10.3,a,1x,a,d24.15)
      call MPI_FINALIZE(ierr)
      stop
      end
```