FUJITSU

shaping tomorrow with you

XcalableMPワークショップ

COARRAYの便利な使い方

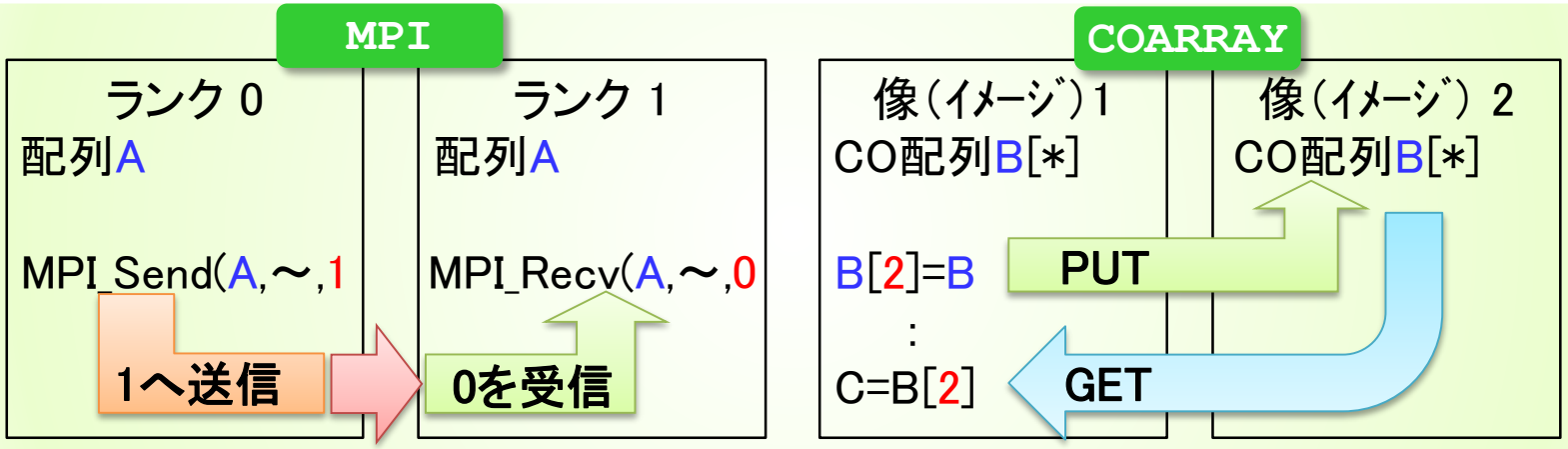
2017年10月31日

富士通株式会社 ）次世代TC開発本部
原口正寿

COARRAY仕様

FUJITSU

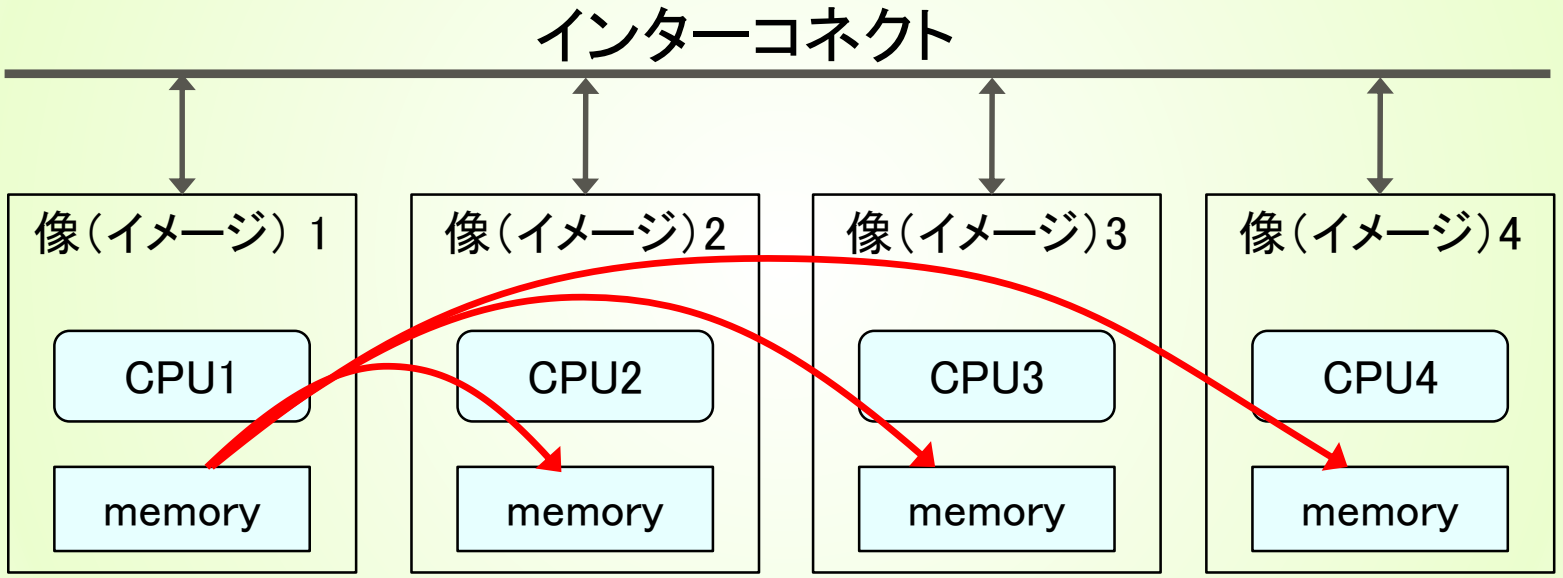
- Fortran 2008に組み込まれた分散並列機能
  - 指示文とサービスサブルーチンではなく、文法として組み込まれた
  - “[“, “]” (角括弧)によるプロセス間通信と、同期のための文、アトミックサブルーチンなど組込み手続
- SPMDモデル(Single Program Multi Data)
- 明示的なデータ分散、計算分散、片側通信、同期
  - COARRAYは通信相手の状態に関係無く他像のデータをアクセスする片側通信



COARRAYプログラム

FUJITSU

【像1から像2～4にデータを渡したい】



⇒ COARRAYでどう書くの？・・・ 任意の像(イメージ)上の動作をコーディング

```
real(kind=8),dimension(:),codimension[*],allocatable :: array
     :
id = this_image()
     :
if (id /= 1) then
  array(1:100) = array(1:100)[1]
endif
```

[特徴的な角括弧]

数字は像番号

COARRAYの配列
いかなる像からも直接参照または定義できる配列またはスカラ変数

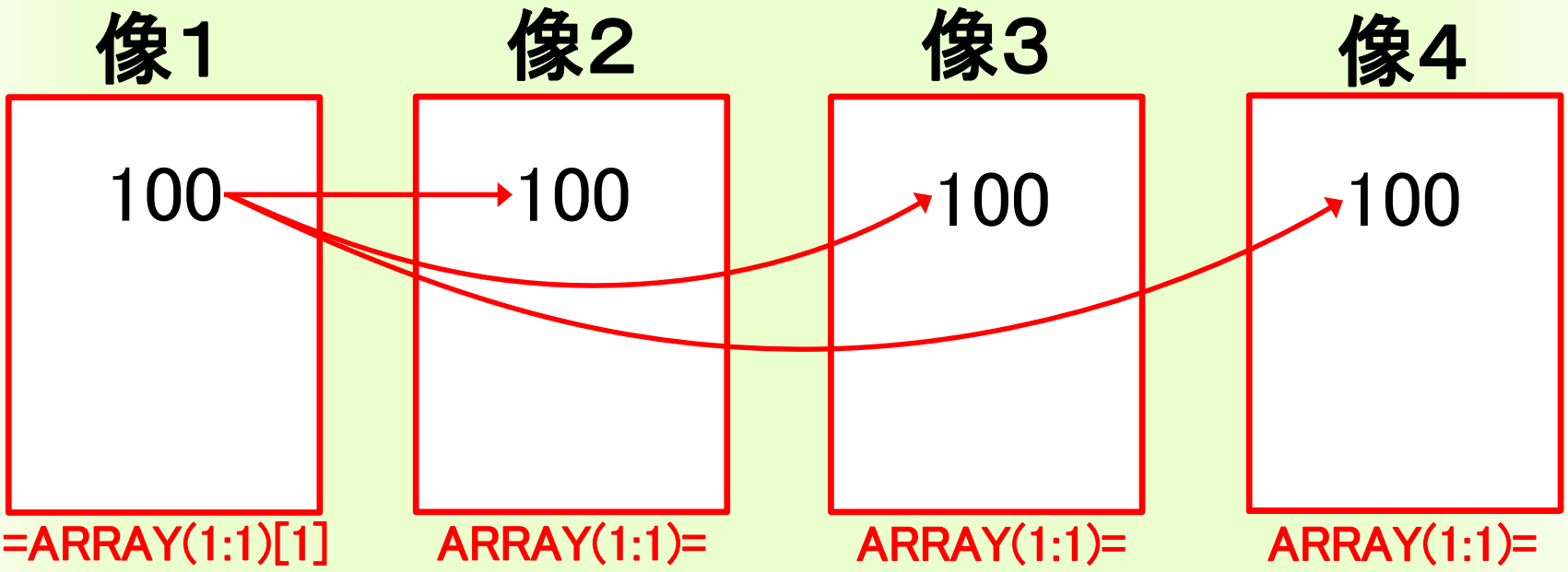
プログラムの記述性について

- シンプル過ぎるCOARRAY仕様
  - お客様の声
    - 使い方がイメージできない
    - 書きたいことが書けるのか？

- 集団通信や並列入出力の事例を紹介
  - 主な集団通信
    - ブロードキャスト
    - ギャザー／スキャッター
    - 全対全通信
    - リダクション演算
  - 並列I／O
    - ローカルファイルの読み書き
    - 共有ファイルの読み書き

集団通信:ブロードキャスト(1)

FUJITSU



集団通信:ブロードキャスト(2)

FUJITSU

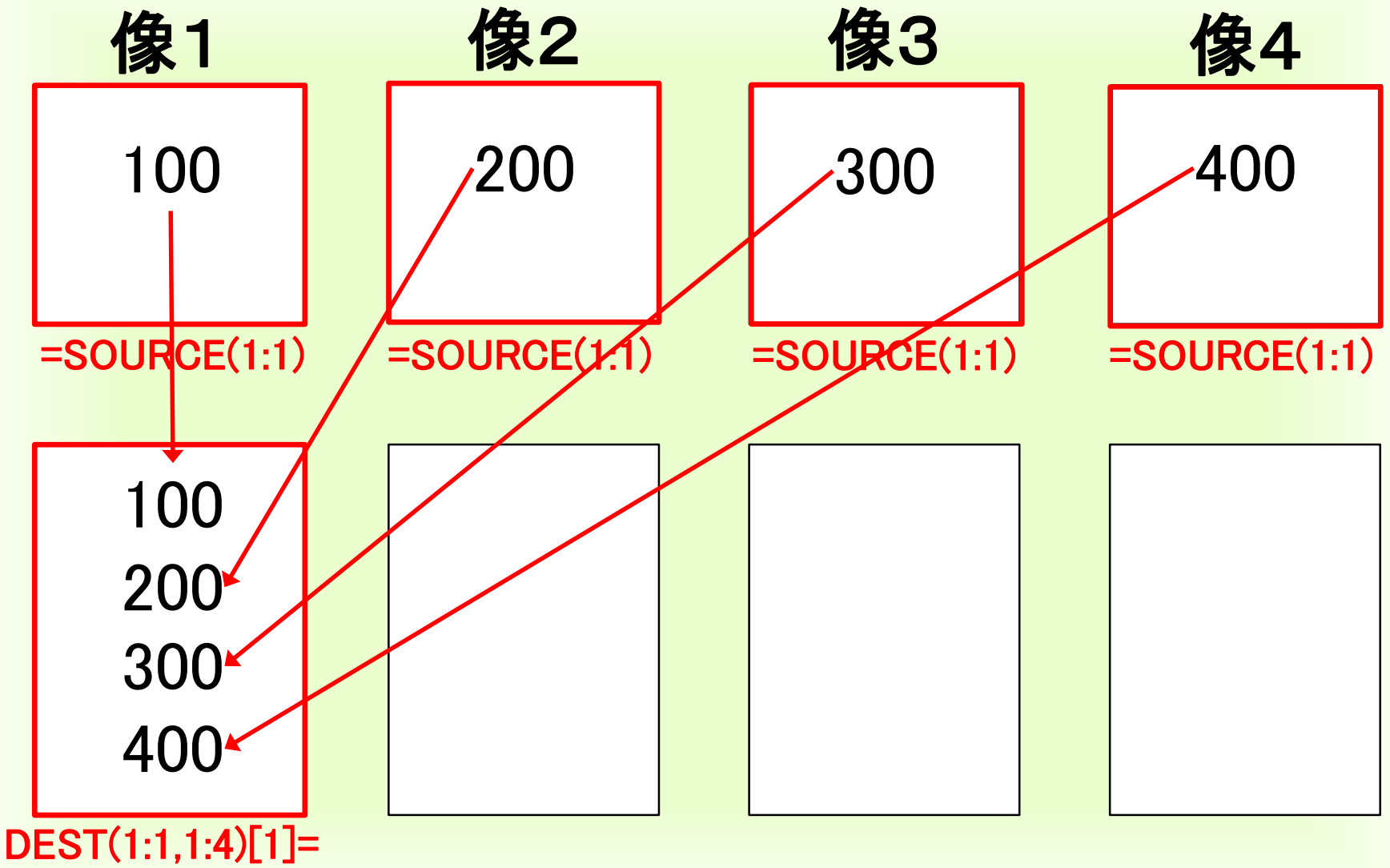
MPI

```
REAL(8),DIMENSION(:),ALLOCATABLE :: ARRAY                    ! 配列ARRAYの宣言
  ...
CALL MPI_COMM_SIZE(MPI_COMM_WORLD,NIMG,IERR)                 ! ランク数の取得
CALL MPI_COMM_RANK(MPI_COMM_WORLD,ID,IERR)                   ! ランク番号の取得
  ...
! ルートランクのARRAY配列をMSGSIZE要素分、全ランクにブロードキャスト
CALL MPI_BCAST(ARRAY, MSGSIZE, MPI_REAL8, 0, MPI_COMM_WORLD,IERR)
```

COARRAY

```
REAL(8),DIMENSION(:),CODIMENSION[:],ALLOCATABLE :: ARRAY     ! COARRAY配列ARRAYの宣言
  ...
NIMG= NUM_IMAGES()                                           ! 像数の取得
ID= THIS_IMAGE()                                             ! 像番号の取得
  ...
SYNC ALL                                                     ! 全イメージで同期
! 像1のCOARRAY配列ARRAYを自像のCOARRAY配列に代入(=ブロードキャスト)
IF(ID /= 1) THEN
  ARRAY(1:MSGSIZE) = ARRAY(1:MSGSIZE)[1]
END IF
SYNC ALL                                                     ! 全イメージで同期
```

集団通信:ギャザー(1)



集団通信:ギャザー(2)

FUJITSU

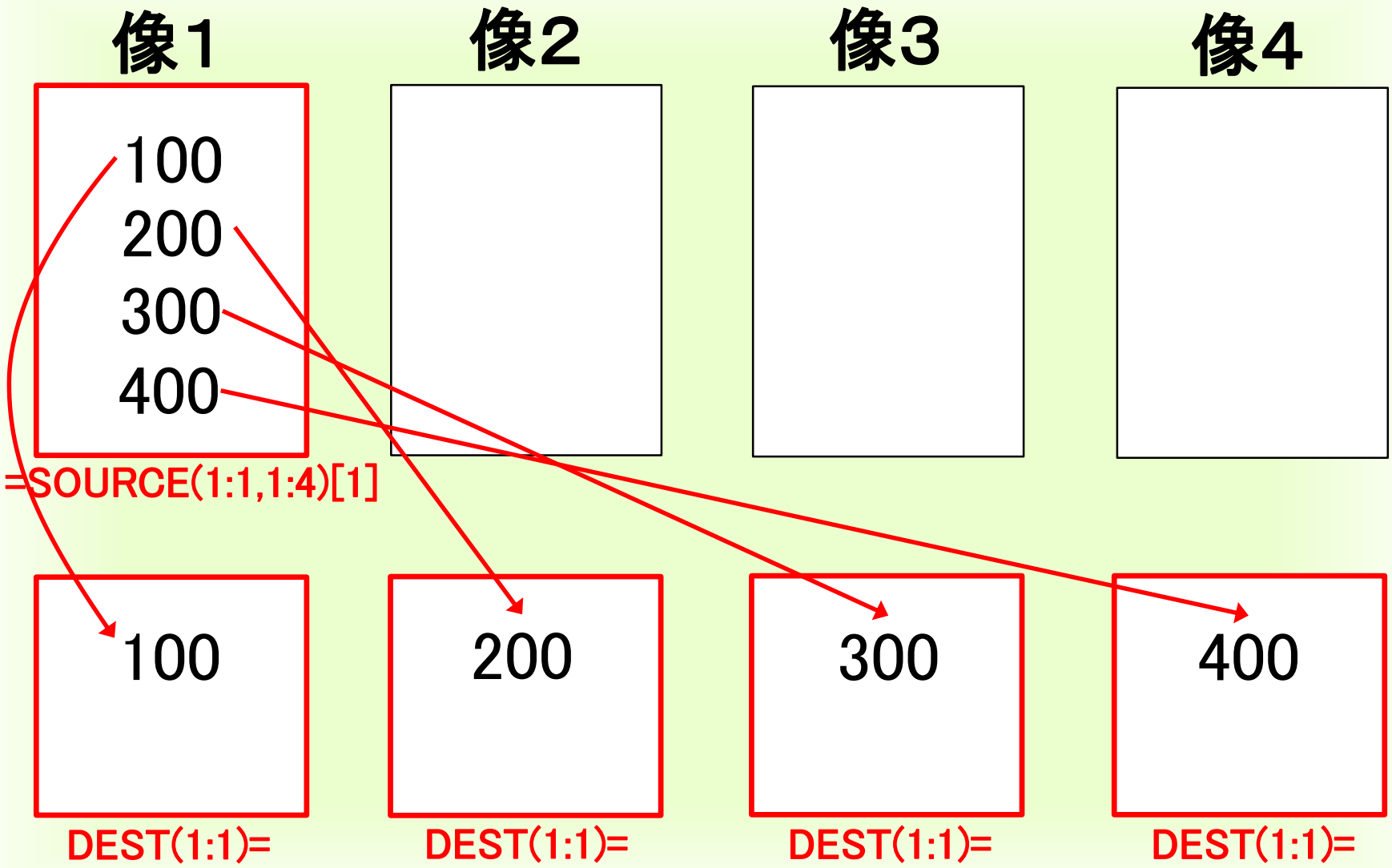
MPI

```
REAL(8),DIMENSION(:,:),ALLOCATABLE :: DEST          ! 配列DESTの宣言
REAL(8),DIMENSION(:),ALLOCATABLE :: SOURCE          ! 配列SOURCEの宣言
  ...
CALL MPI_COMM_SIZE(MPI_COMM_WORLD,NIMG,IERR)        ! ランク数の取得
CALL MPI_COMM_RANK(MPI_COMM_WORLD,ID,IERR)          ! ランク番号の取得
  ...
! 配列SOURCEをMSGSIZE要素分送信し、受信ランク0の配列DESTで受信
CALL MPI_GATHER(SOURCE, MSGSIZE, MPI_REAL8, DEST, MSGSIZE,
                MPI_REAL8, 0, MPI_COMM_WORLD,IERR)
```

COARRAY

```
REAL(8),DIMENSION(:,:),CODIMENSION[:],ALLOCATABLE :: DEST   ! COARRAY配列DESTの宣言
REAL(8),DIMENSION(:),ALLOCATABLE :: SOURCE          ! 配列SOURCEの宣言
  ...
NIMG= NUM_IMAGES()                                  ! 像数の取得
ID= THIS_IMAGE()                                    ! 像番号の取得
  ...
SYNC ALL                                            ! 全像で同期
! 全像において、自像の配列SOURCEを像1の配列DESTの自像番号位置に代入(=ギャザー)
DEST(1:MSGSIZE, ID)[1] = SOURCE(1:MSGSIZE)
SYNC ALL                                            ! 全像で同期
```

集団通信:スキャッター(1)



集団通信:スキャッター(2)

FUJITSU

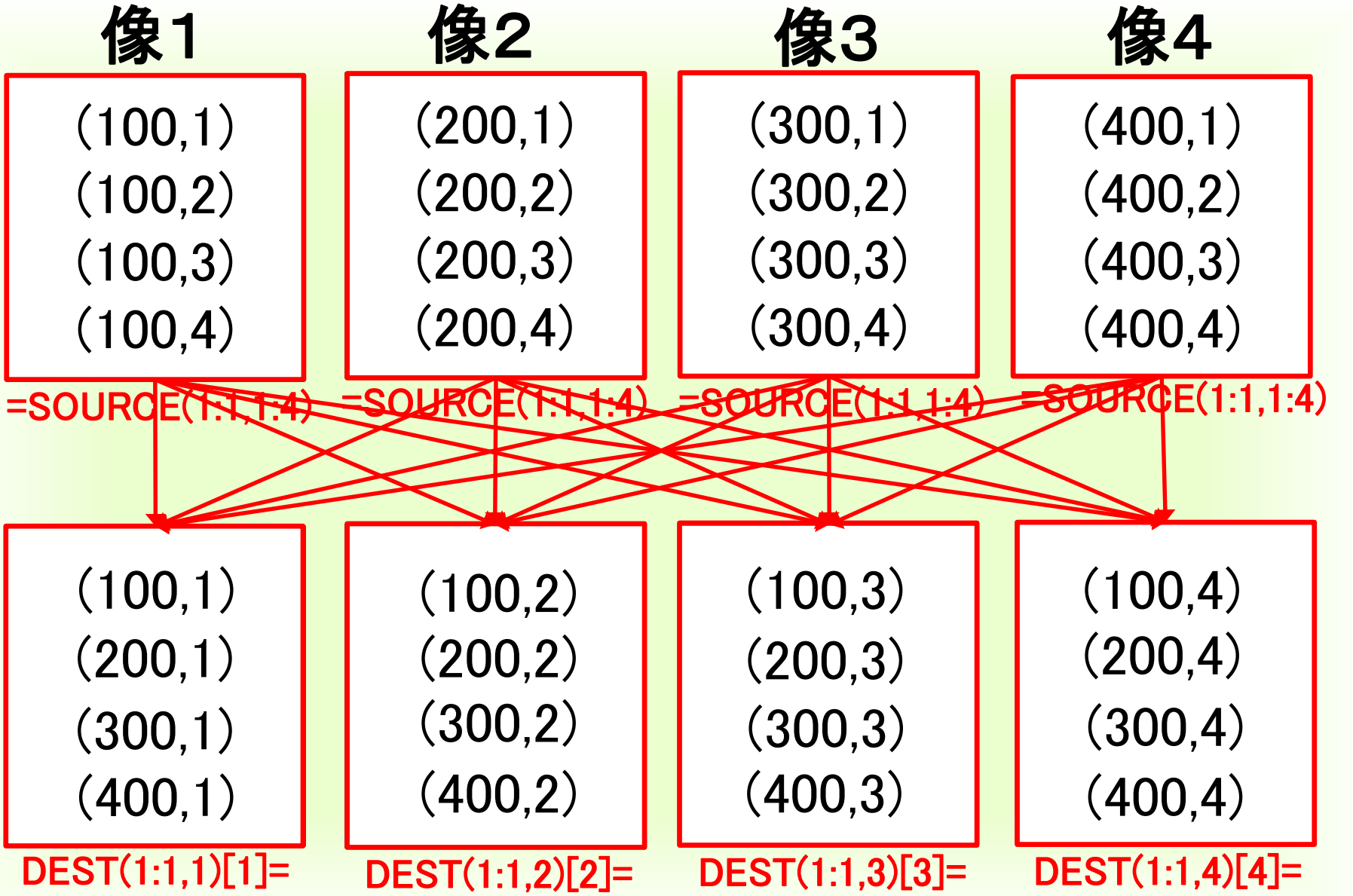
MPI

```
REAL(8),DIMENSION(:,:),ALLOCATABLE :: DEST          ! 配列DESTの宣言
REAL(8),DIMENSION(:),ALLOCATABLE :: SOURCE          ! 配列SOURCEの宣言
  ...
CALL MPI_COMM_SIZE(MPI_COMM_WORLD,NIMG,IERR)        ! ランク数の取得
CALL MPI_COMM_RANK(MPI_COMM_WORLD,ID,IERR)          ! ランク番号の取得
  ...
! ルートランクが送信する配列SOURCEのMSGSIZE要素分を各ランクの配列DESTで受信
CALL MPI_SCATTER(SOURCE, MSGSIZE, MPI_REAL8, DEST, MSGSIZE,
                 MPI_REAL_8, 0, MPI_COMM_WORLD,IERR)
```

COARRAY

```
REAL(8),DIMENSION(:,:),CODIMENSION[:],ALLOCATABLE :: SOURCE   ! COARRAY配列DESTの宣言
REAL(8),DIMENSION(:),ALLOCATABLE :: DEST            ! 配列SOURCEの宣言
  ...
NIMG= NUM_IMAGES()                                  ! 像数の取得
ID= THIS_IMAGE()                                    ! 像番号の取得
  ...
SYNC ALL                                            ! 全像で同期
! 全像において、像1のCOARRAY配列SOURCEにある自像向けの要素を
! ローカル配列DESTに代入(=スキャッター)
DEST(1:MSGSIZE) = SOURCE(1:MSGSIZE,ID)[1]
SYNC ALL                                            ! 全像で同期
```

集団通信:全対全通信(1)



集団通信:全対全通信(2)

FUJITSU

MPI

```
REAL(8),DIMENSION(:,:),ALLOCATABLE :: DEST,SOURCE
  ...
CALL MPI_COMM_SIZE(MPI_COMM_WORLD,NIMG,IERR)
CALL MPI_COMM_RANK(MPI_COMM_WORLD,ID,IERR)
  ...
```

！配列DSEST,SOURCEの宣言

！ランク数の取得

！ランク番号の取得

```
！各ランクの配列SOURCEのMSGSIZE要素分をランク0から順に送信し、各ランクの配列DESTで受信
！全ランクが全ランクに対してスキャッターしたのと同じ
CALL MPI_ALLTOALL(SOURCE, MSGSIZE, MPI_REAL8, DEST, MSGSIZE,
                  MPI_REAL_8, MPI_COMM_WORLD, IERR)
```

COARRAY

```
REAL(8),DIMENSION(:,:),CODIMENSION[:],ALLOCATABLE :: DEST
REAL(8),DIMENSION(:,:),ALLOCATABLE :: SOURCE
  ...
NIMG= NUM_IMAGES()
ID= THIS_IMAGE()
  ... SYNC ALL
```

！COARRAY配列DESTの宣言

！配列SOURCEの宣言

！像数の取得

！像番号の取得

！全像で同期

```
！全像において、自像の配列SOURCEの各像向けデータを、COARRAY配列DESTの
！自像番号位置に代入(＝全対全通信)
DO I=1,NIMG
  DEST(1:MSGSIZE,ID)[I] = SOURCE(1:MSGSIZE,I)
ENDDO
SYNC ALL
```

！全像で同期

通信の衝突

集団通信:全対全通信(通信の衝突回避)

FUJITSU

COARRAY

```
INTEGER::NIMG,ID,I,ISHIFT,MSGSIZE
REAL(8),DIMENSION(:,:),CODIMENSION[:],ALLOCATABLE::DEST
REAL(8),DIMENSION(:,:),ALLOCATABLE::SOURCE
 ...
NIMG=NUM_IMAGES()
ID=THIS_IMAGE()
 ...
ALLOCATE(DEST(MSGSIZE,NIMG)[*])
ALLOCATE(SOURCE(MSGSIZE,NIMG))
 ...
SYNC ALL
```

! COARRAY配列DESTの宣言

! 配列SOURCEの宣言

! 像数の取得

! 像番号の取得

! 全像で同期

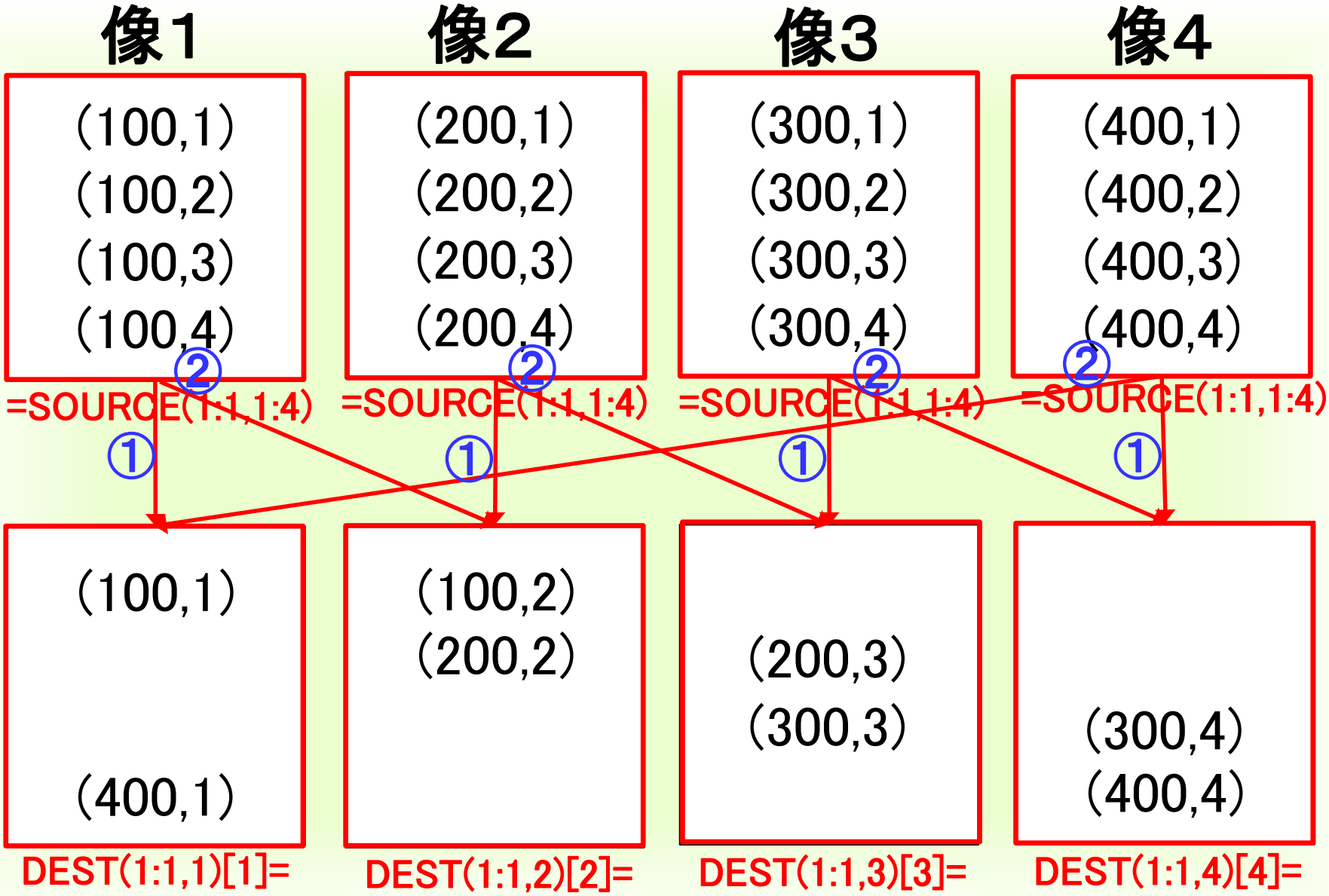
! 通信相手をずらして通信の衝突を避けると、前例より高速実行が期待できる

高速化

```
ISHIFT=ID
DO I=1,NIMG
  DEST(1:MSGSIZE,ID)[ISHIFT]=SOURCE(1:MSGSIZE,ISHIFT)
  ISHIFT=ISHIFT+1
  IF(ISHIFT>NIMG)THEN
    ISHIFT=1
  END IF
END DO
SYNC ALL
 ...
```

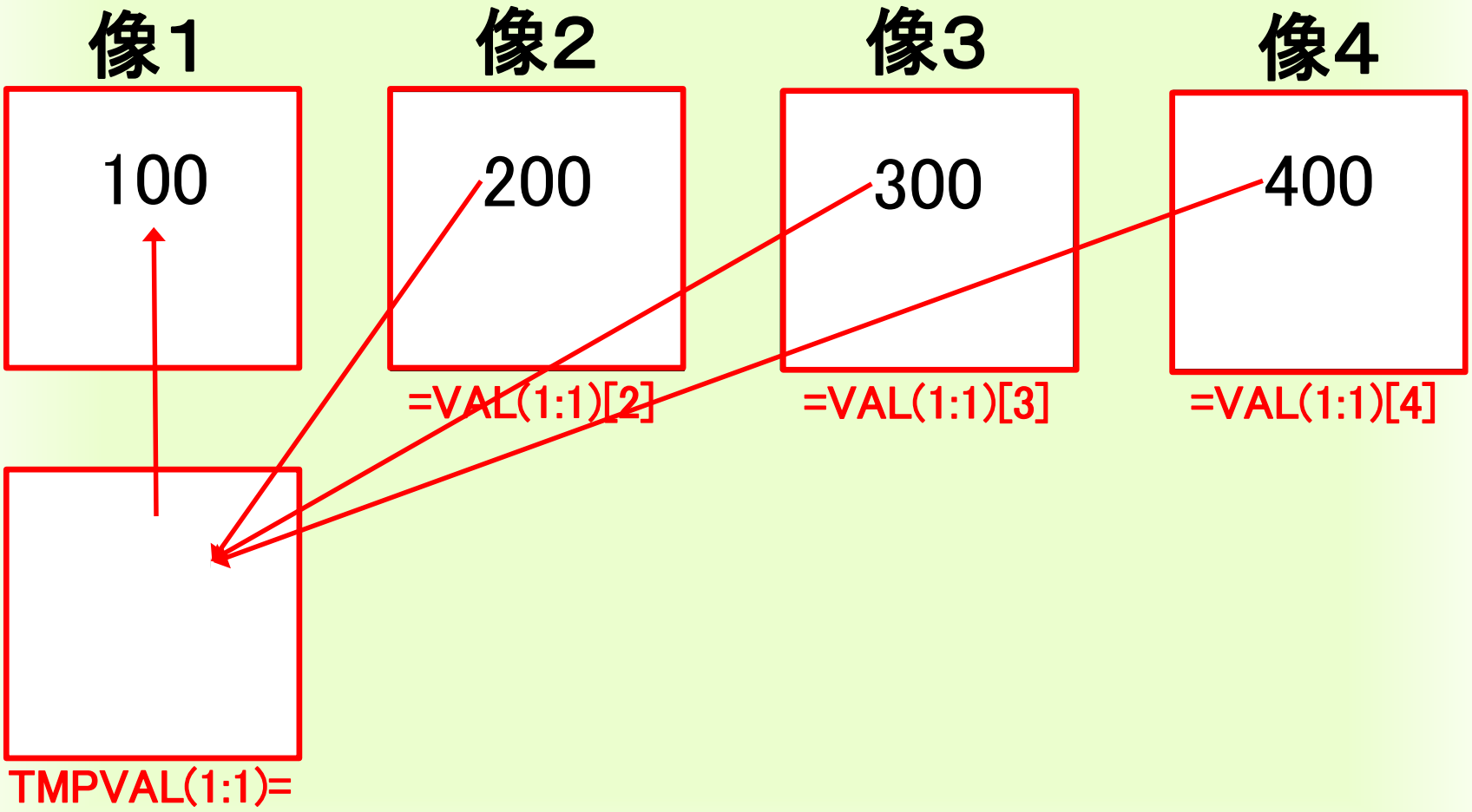
! 全像で同期

通信の衝突回避の結果



集団通信:リダクション演算(1)

FUJITSU



集団通信:リダクション演算(2)

FUJITSU

MPI

```
REAL(8),DIMENSION(:),ALLOCATABLE :: ORGVAL,VAL   ! 配列ORGVAL,VAL の宣言
  ...
CALL MPI_COMM_SIZE(MPI_COMM_WORLD,NIMG,IERR)     ! ランク数の取得
CALL MPI_COMM_RANK(MPI_COMM_WORLD,ID,IERR)       ! ランク番号の取得
  ...
! ORGVALの配列のMSGSIZE要素分だけ、総和演算して、その結果をルートランクのVAL配列に設定
CALL MPI_REDUCE(ORGVAL, VAL, MSGSIZE, MPI_REAL8,
                MPI_SUM, 0, MPI_COMM_WORLD,IERR)
```

COARRAY

```
REAL(8),DIMENSION(:),CODIMENSION[:],ALLOCATABLE :: VAL   ! COARRAY配列VALの宣言
REAL(8),DIMENSION(:),ALLOCATABLE :: TMPVAL ...           ! 配列TMPVALの宣言
NIMG= NUM_IMAGES()                                       ! 像数の取得
ID= THIS_IMAGE()   ...                                   ! 像番号の取得
SYNC ALL                                                 ! 全像で同期
! 像1で、各像のCOARRAY配列をローカル配列に転送
! ローカル配列と自像のCOARRAY配列で要素毎に総和演算
IF (ID == 1) THEN
  DO I=2,NIMG
    TMPVAL(1:MSGSIZE) = VAL(1:MSGSIZE)[I]
    VAL(1:MSGSIZE) = VAL(1:MSGSIZE) + TMPVAL(1:MSGSIZE)
  ENDDO
ENDIF
SYNC ALL                                                 ! 全像で同期
```

並列I／O：ローカルファイルの読み書き（1）

FUJITSU

複数の像が各像のローカルファイルを作成して並列実行

COARRAY

```
INTEGER,PARAMETER::NMAX=1000
INTEGER::ID,NIMG
CHARACTER(100)::FNAME_W,FNAME_R
REAL(4),SAVE::A(NMAX)[*],B(NMAX)[*]
  ...
NIMG=NUM_IMAGES()
ID=THIS_IMAGE()
  ...
```

！COARRAY配列A,Bの宣言

！「A{像番号}.DAT」というファイルをオープンし、COARRAY配列Aの内容を書き込む

```
WRITE(FNAME_W,'("A", I4.4, ".DAT")')ID
OPEN(10,FILE=FNAME_W,FORM='UNFORMATTED')
WRITE(10) A
CLOSE(10)
  ...
```

書き込み処理

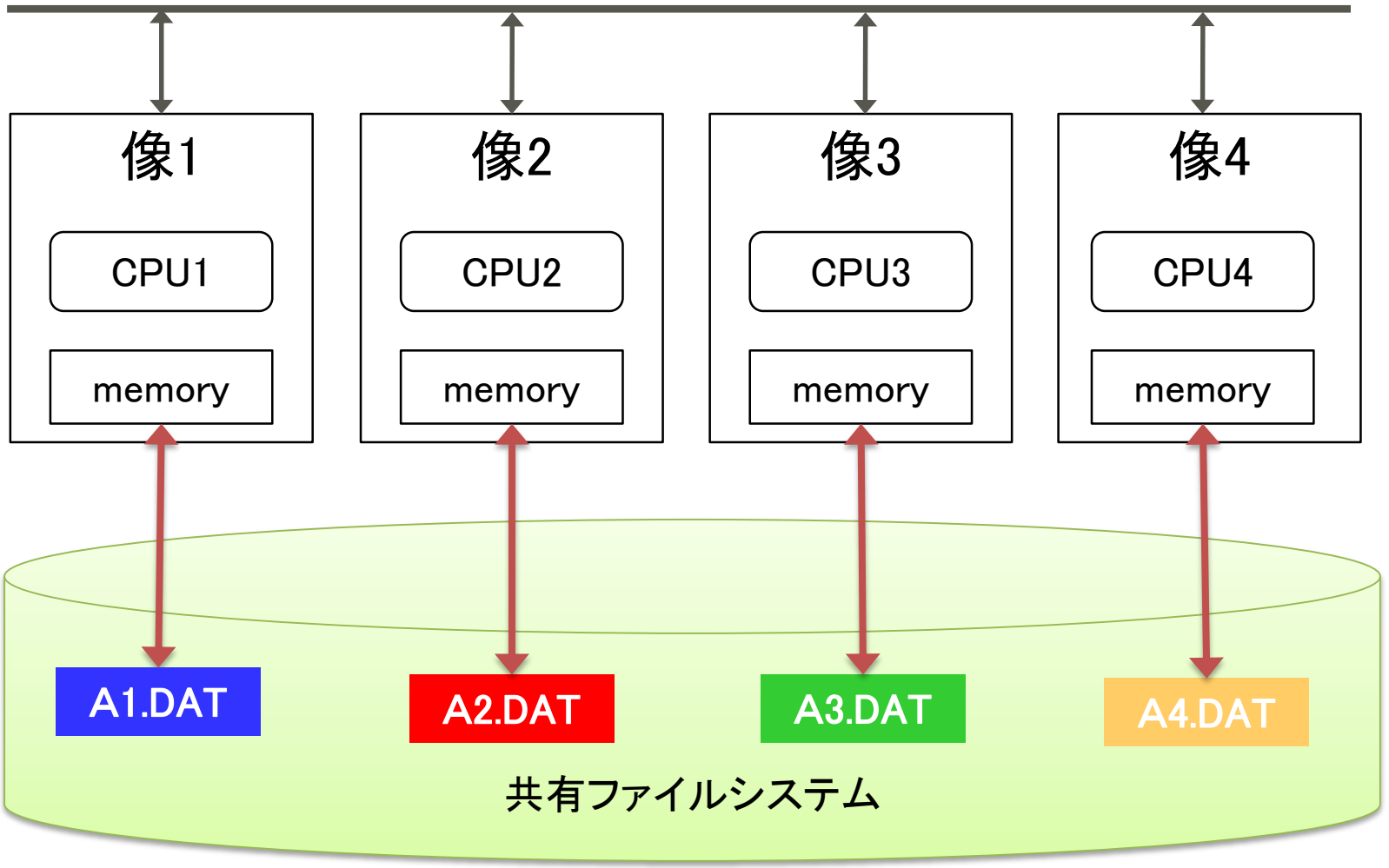
！「A{像番号}.DAT」というファイルをオープンし、COARRAY配列Bに読み込む

```
WRITE(FNAME_R,'("A", I4.4, ".DAT")')ID
OPEN(20,FILE=FNAME_R,FORM=UNFORMATTED')
READ(20) B
CLOSE(20)
```

読み込み処理

並列I／O：ローカルファイルの読み書き（2）

FUJITSU



並列I／O：共有ファイルの読み書き（1）

FUJITSU

複数の像が1つの共有ファイルを並列にアクセス

COARRAY

```
INTEGER,PARAMETER::NMAX=1000
INTEGER::ID,NIMG
REAL(4),SAVE::A(NMAX)[*]
REAL(4),DIMENSION(:,:),ALLOCATABLE::D
NIMG=NUM_IMAGES()
ID=THIS_IMAGE()
SYNC ALL
```

！COARRAY配列Aの宣言

レコード長を各像の出力サイズに

！自像のCOARRAY配列Aの大きさを1レコードとし、像番号を記録番号として出力

```
OPEN(30,FILE='A.DAT',ACCESS='DIRECT',FORM='UNFORMATTED',RECL=NMAX*4)
WRITE(30,REC=ID) A
CLOSE(30,STATUS='FSYNC')      ！ FSYNCでファイルの内容を同期
 ...
SYNC ALL
```

書き込み処理

像番号でレコード位置を指定

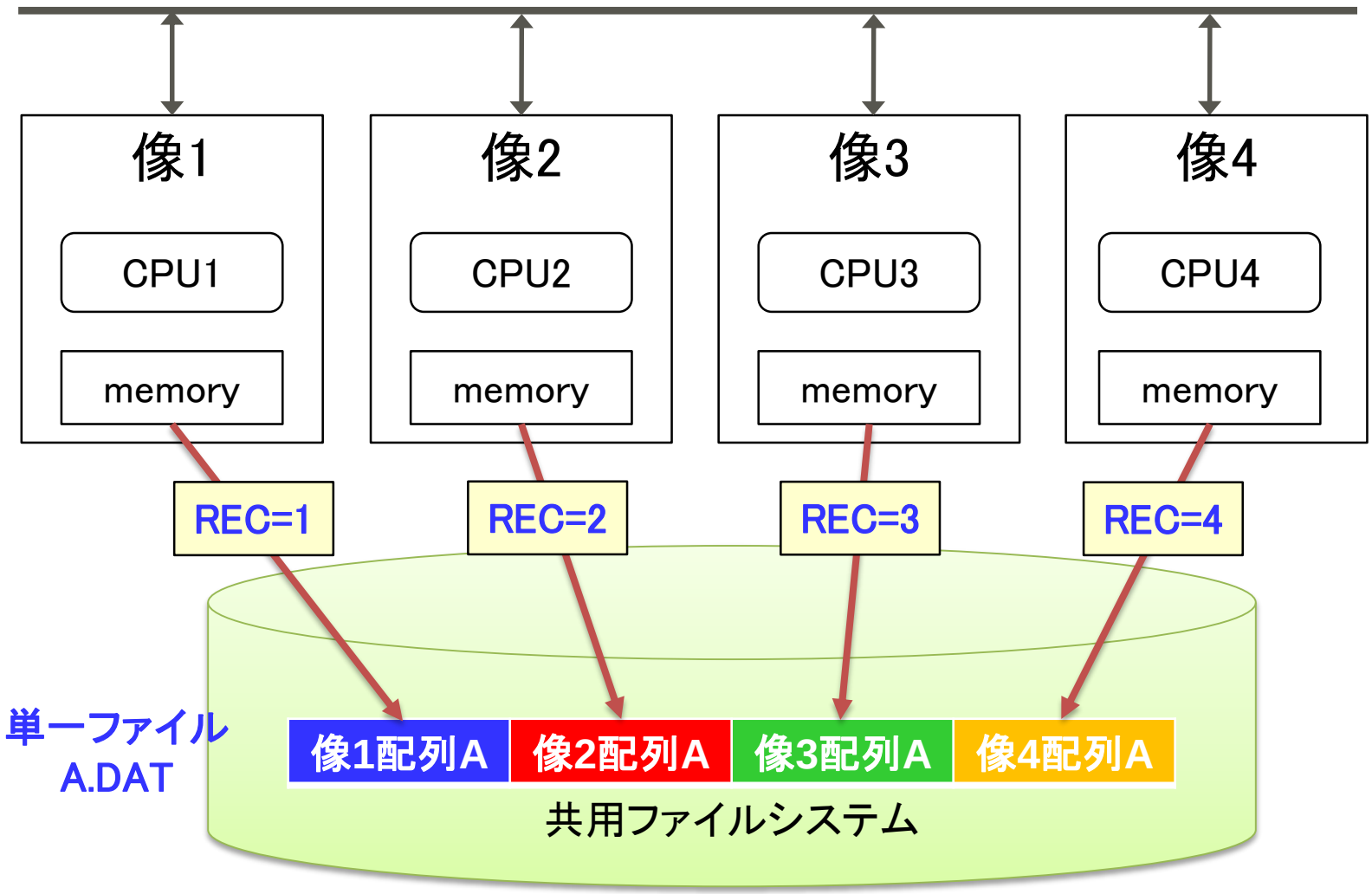
！像1が代表してファイルに出力した全像の配列Aを動的配列Dに読み込む

```
IF(ID==1)THEN
  ALLOCATE(D(NMAX,NIMG))
  OPEN(40,FILE='A.DAT',FORM='BINARY')
  READ(40)D
  CLOSE(40)
END IF
```

読み込み処理

並列I／O：共有ファイルへの書き込み

FUJITSU



FUJITSU

デバッグについて

- 対デッドロック性

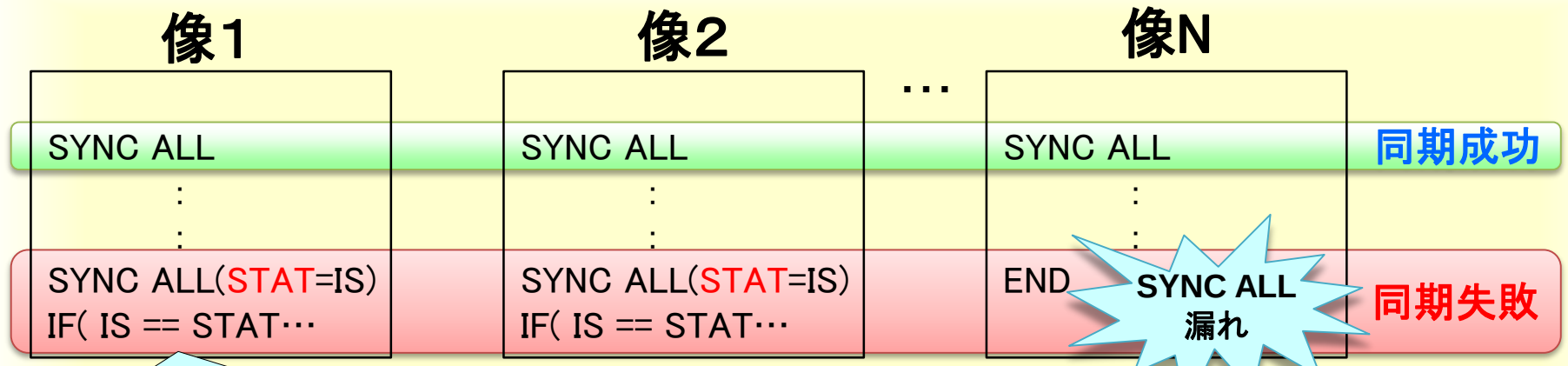
耐デッドロック性

FUJITSU

【言語仕様のサポート】

同期文や集団サブルーチンには、STAT指定子を指定可能
　⇒ 誤り状態を認識でき、MPIに比べデッドロックし難い
STAT指定子には、ISO_FORTRAN_ENV で定義された名前付き定数値が設定される。

値	意味
STAT_STOPPED_IMAGEなど	実行を終えた像との同期が必要になったことを示す




```
SYNC ALL(STAT=IS)
IF (IS == STAT_STOPPED_IMAGE)  THEN
  PRINT *, 'IMAGE=',ID,' stopped image'
ENDIF
```

ISに「STAT_STOPPED_IMAGE」が設定され
SYNC ALL漏れの像の存在を認識可能

※　MPIの場合は、MPI_BARRIER漏れするとデッドロックする。

FUJITSU

富士通のCOARRAY

- サポート言語規格
- COARRAY機能とMPIとの親和性
- デバッグ支援

富士通のCOARRAY実装の特徴

FUJITSU

サポート言語規格

- Fortran 2008のCOARRAY仕様をサポート
- Fortran 2015のCOARRAY仕様も一部サポート（次頁で紹介）
  co_sum, co_max, co_min

COARRAY機能とMPIとの親和性

- MPIと共通の基盤を使用しているため、同一関数内でも混在が可能（次々頁で紹介）
- COARRAYで書いて一部をMPI化することも可能
- mpiexecで実行バイナリが実行可能

集団通信:リダクション演算co_sum

FUJITSU

Fortran 2015の先取り(co_sum,co_max,co_min)

Fortran 2008 (前例のリダクション演算のカーネル部分)

```
 ...
IF (ID == 1) THEN        ! Fortran 2008レベルのプログラミング
  DO I=2,NIMG
    TMPVAL(1:MSGSIZE) = VAL(1:MSGSIZE)[I]
    VAL(1:MSGSIZE) = VAL(1:MSGSIZE) + TMPVAL(1:MSGSIZE)
  ENDDO
ENDIF
 ...
```

Fortran 2015

```
REAL(8),DIMENSION(:),CODIMENSION[:],ALLOCATABLE  ! COARRAY配列VALの宣言
 ...
NIMG= NUM_IMAGES()                               ! 像数の取得
ID= THIS_IMAGE()                                 ! 像番号の取得
 ...
SYNC ALL                                         ! 全像で同期

! COARRAY配列VALの全像で総和し、結果を「RESULT_IMAGE=」で指定した像1のVALに設定
CALL CO_SUM(VAL(1:MSGSIZE), RESULT_IMAGE=1)
SYNC ALL                                         ! 全像で同期
```

富士通COARRAY機能とMPIとの親和性

FUJITSU

COARRAYで書いて一部MPI化したサンプル

COARRAY + MPI

```
INCLUDE 'mpif.h'                                   ! MPIヘッダファイルのインクルード  MPI
REAL(8)::M_VAL,R_VAL
REAL(8),SAVE::VAL[*]                               ! COARRAY配列VALの宣言  COARRAY
  ...
NIMG=NUM_IMAGES()
ID=THIS_IMAGE()
NID=ID+1; IF(NID > NIMG) NID=1                     ! NIDに次の像番号を設定
  ...
VAL[NID]=DBLE(ID)                                  ! 次像のCOARRAY配列VALに値設定(PUT)  COARRAY
SYNC ALL
// 全像からVAL[1]のチェック
IF(VAL[1] /= DBLE(NIMG))THEN                       ! 像1のCOARRAY配列VALの値参照(GET)  COARRAY
  // エラー処理
ENDIF
```

! COARRAY配列VALを全ランク積(MPI_PROD)し結果をランク0のM_VALに設定 MPI

```
CALL MPI_REDUCE(VAL,M_VAL,1,MPI_REAL8,MPI_PROD,0,MPI_COMM_WORLD,IERR)
...
IF(ID == 1)THEN
   PRINT *,M_VAL
ENDIF
```

デバッグ支援

FUJITSU

【MPIと同様のデバッグの難しさ】

プログラムの不具合発生 → 大量のエラーメッセージ → 不具合の根本的な原因特定が難しい

時間軸を頼りにエラー発生の根本原因を探ることが多い

タイムスタンプおよび像番号と実行文を特定しやすいエラーメッセージをサポート

タイムスタンプ[像番号/像数:プロセスID]エラーメッセージ

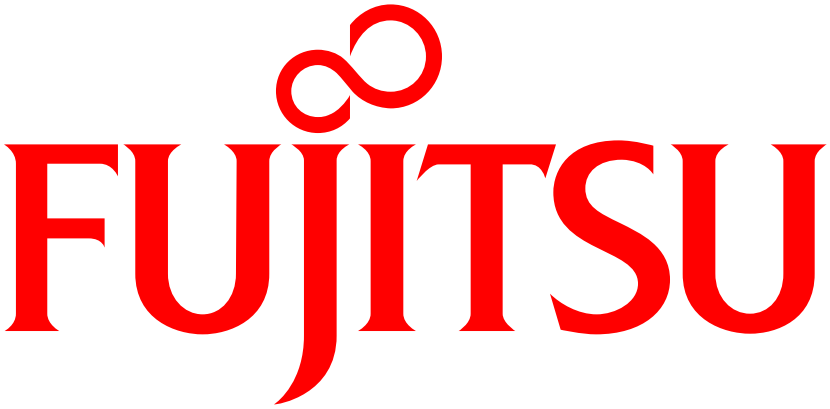
```
1507791882.059731[ 2/16:6177] jwe1731i-s line 12 The SYNC ALL statement was …
1507791882.059731[ 1/16:6176] jwe1731i-s line 12 The SYNC ALL statement was …
1507791882.432477[ 2/16:6177]  error occurs at MAIN__   line 12 loc 000000000400b…
1507791882.432492[ 2/16:6177]  MAIN__       at loc 0000000000400ad0 called from o.s.
1507791882.432504[ 2/16:6177] jwe0903i-u Error number 1731 was detected. Maxi…
1507791882.432546[ 1/16:6176]  error occurs at MAIN__   line 12 loc 000000000400b…
1507791882.432556[ 1/16:6176]  MAIN__       at loc 0000000000400ad0 called from o.s.
1507791882.432567[ 1/16:6176] jwe0903i-u Error number 1731 was detected. Maxi…
```

まとめ

FUJITSU

- COARRAYは、Fortran 2008で正式文法として採用
- COARRAYの登場で、ちょっとした文法を覚えるだけで、MPIを使わなくても分散並列プログラムが記述できる
- 複雑な通信や入出力も簡単に記述できる

皆さんもCOARRAYを試してみてください



shaping tomorrow with you