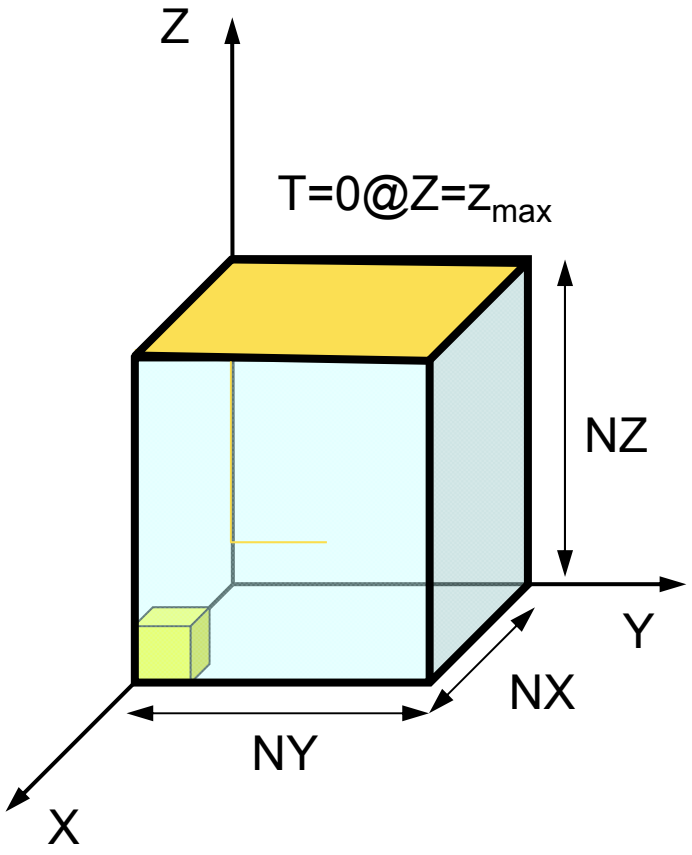
並列有限要素法による
三次元定常熱伝導解析プログラム
（2/2）C言語編

中島 研吾
東京大学情報基盤センター

対象とする問題：三次元定常熱伝導

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\dot{Q}(x,y,z)=0$$



- 定常熱伝導＋発熱
- 一様な熱伝導率 λ
- 直方体
  - 一辺長さ1の立方体（六面体）要素
  - 各方向にNX・NY・NZ個
- 境界条件
  - T=0@Z=z_{max}
- 体積当たり発熱量は位置（メッシュの中心の座標 x_c,y_c）に依存
  - $\dot{Q}(x,y,z)=QVOL|x_C+y_C|$

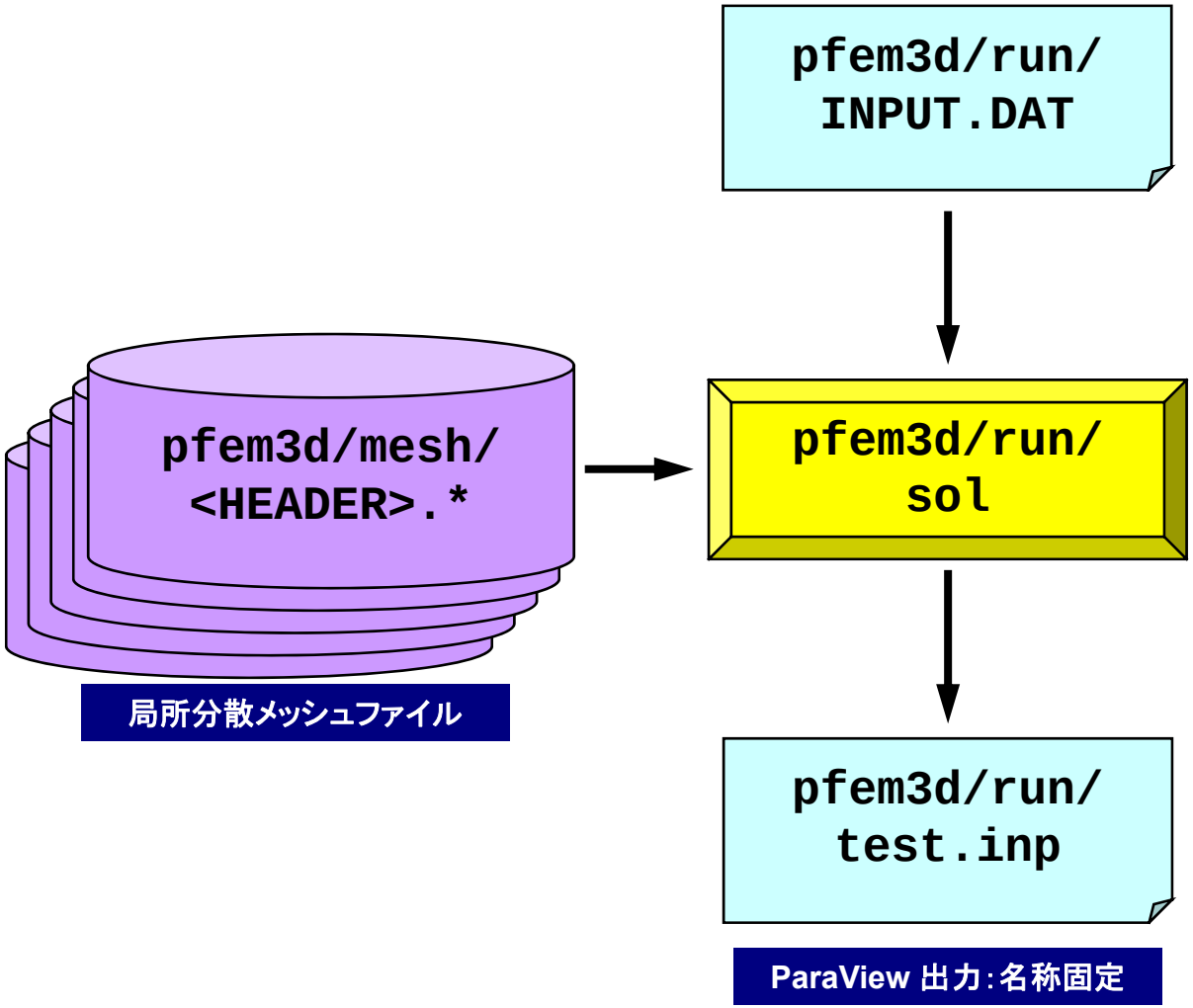
有限要素法の処理

- 支配方程式
- ガラーキン法：弱形式
- 要素単位の積分
  - 要素マトリクス生成
- 全体マトリクス生成
- 境界条件適用
- 連立一次方程式

並列有限要素法の処理：プログラム

- 初期化
  - 制御変数読み込み
  - 座標読み込み⇒要素生成（N:節点数，NE：要素数）
  - 配列初期化（全体マトリクス，要素マトリクス）
  - 要素⇒全体マトリクスマッピング（Index，Item）
- マトリクス生成
  - 要素単位の処理（do icel= 1, NE）
    - 要素マトリクス計算
    - 全体マトリクスへの重ね合わせ
  - 境界条件の処理
- 連立一次方程式
  - 共役勾配法（CG）

並列有限要素法の手順（並列計算実行）



制御ファイル：INPUT.DAT

```
../mesh/aaa  HEADER
2000         ITER
1.0 1.0      COND, QVOL
1.0e-08      RESID
```

- HEADER：　局所分散ファイルヘッダ名
  <HEADER>.my_rank
- ITER：　反復回数上限
- COND：　熱伝導率
- QVOL：　体積当たり発熱量係数
- RESID：　反復法の収束判定値

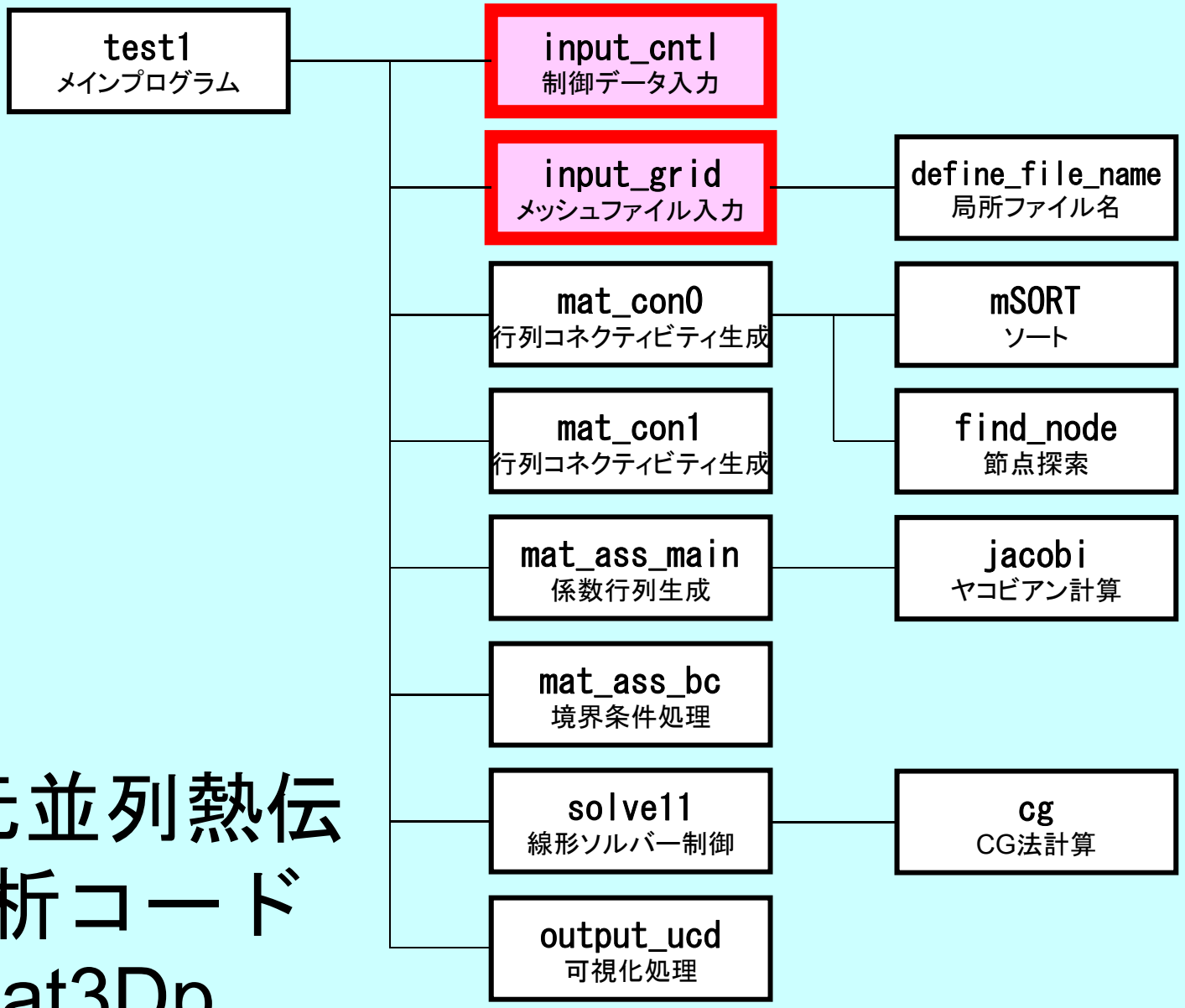
$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\dot{Q}(x,y,z)=0$$

$$\dot{Q}(x,y,z)=QVOL\left|x_C+y_C\right|$$

~/pFEM/pfem3d/run/go.sh

```
#!/bin/sh
#PJM -L “node=1“                ノード数（≦12）
#PJM -L “elapse=00:10:00“       実行時間（≦15分）
#PJM -L “rscgrp=school“         実行キュー名
#PJM -
#PJM -o “test.lst“              標準出力
#PJM --mpi “proc=8“             MPIプロセス数（≦192）

mpiexec ./sol
```

8分割	16分割	32分割	64分割	192分割
“node=1“ “proc=8”	“node=1“ “proc=16”	“node=2“ “proc=32”	“node=4“ “proc=64”	“node=12“ “proc=192”



三次元並列熱伝導解析コード heat3Dp

全体処理

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
FILE* fp_log;
#define GLOBAL_VALUE_DEFINE
#include "pfem_util.h"
extern void PFEM_INIT(int,char**);
extern void INPUT_CNTL();
extern void INPUT_GRID();
extern void MAT_CON0();
extern void MAT_CON1();
extern void MAT_ASS_MAIN();
extern void MAT_ASS_BC();
extern void SOLVE11();
extern void OUTPUT_UCD();
extern void PFEM_FINALIZE();
int main(int argc,char* argv[])
{
  double START_TIME,END_TIME;

  PFEM_INIT(argc,argv);

  INPUT_CNTL();
  INPUT_GRID();

  MAT_CON0();
  MAT_CON1();

  MAT_ASS_MAIN();
  MAT_ASS_BC()  ;

  SOLVE11();

  OUTPUT_UCD()    ;
  PFEM_FINALIZE() ;
}
```

Global変数表：pfem_util.h（1/4）

変数名	種別	サイズ	I/O	内　容
fname	C	[80]	I	メッシュファイル名
N,NP	I		I	節点数（N：内点，NP：内点＋外点）
ICELTOT	I		I	要素数
NODGRPtot	I		I	節点グループ数
XYZ	R	[NP][3]	I	節点座標
ICELNOD	I	[ICELTOT][8]	I	要素コネクティビティ
NODGRP_INDEX	I	[NODGRPtot+1]	I	各節点グループに含まれる節点数（累積）
NODGRP_ITEM	I	[NODGRP_INDEX[NODGRPTOT+1]]	I	節点グループに含まれる節点
NODGRP_NAME	C80	[NODGRP_INDEX[NODGRPTOT+1]]	I	節点グループ名
NLU	I		O	各節点非対角成分数
NPLU	I		O	非対角成分総数
D	R	[NP]	O	全体行列：対角ブロック
B,X	R	[NP]	O	右辺ベクトル，未知数ベクトル

Global変数表：pfem_util.h（2/4）

変数名	種別	サイズ	I/O	内　容
AMAT	R	[NP]	O	全体行列：非零非対角成分
indexLU	I	[NP+1]	O	全体行列：非零非対角成分数
itemLU	I	[NPLU]	O	全体行列：非零非対角成分（列番号）
INLU	I	[NP]	O	各節点の非零非対角成分数
IALU	I	[NP][NLU]	O	各節点の非零非対角成分数（列番号）
IWKX	I	[NP][2]	O	ワーク用配列
ITER, ITERactual	I		I	反復回数の上限，実際の反復回数
RESID	R		I	打ち切り誤差（1.e-8に設定）

Global変数表：pfem_util.h（3/4）

変数名	種別	サイズ	I/O	内　容
O8th	R		I	=0.125
PNQ, PNE, PNT	R	[2][2][8]	O	各ガウス積分点における $\frac{\partial N_i}{\partial \xi}, \frac{\partial N_i}{\partial \eta}, \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} (i=1\sim 8)$
POS, WEI	R	[2]	O	各ガウス積分点の座標，重み係数
NCOL1, NCOL2	I	[100]	O	ソート用ワーク配列
SHAPE	R	[2][2][2][8]	O	各ガウス積分点における形状関数 N_i（i=1~8）
PNX, PNY, PNZ	R	[2][2][2][8]	O	各ガウス積分点における $\frac{\partial N_i}{\partial x}, \frac{\partial N_i}{\partial y}, \frac{\partial N_i}{\partial z} (i=1\sim 8)$
DETJ	R	[2][2][2]	O	各ガウス積分点におけるヤコビアン行列式
COND, QVOL	R		I	熱伝導率，体積当たり発熱量係数

Global変数表：pfem_util.h（4/4）

変数名	種別	サイズ	I/O	内　容
PETOT	I		O	領域数（MPIプロセス数）
my_rank	I		O	MPIプロセス番号
errno	I		O	エラーフラグ
NEIBPETOT	I		I	隣接領域数
NEIBPE	I	[NEIBPETOT]	I	隣接領域番号
IMPORT_INDEX EXPORT_INEDX	I	[NEIBPETOT+1]	I	送信，受信テーブルのサイズ（一次元圧縮配列）
IMPORT_ITEM	I	[NPimport]	I	受信テーブル（外点） （NPimport=IMPORT_INDEX[NEIBPETOT]））
EXPORT_ITEM	I	[NPexport]	I	送信テーブル（境界点） （NPexport=EXPORT_INDEX[NEIBPETOT]））
ICELTOT_INT	I		I	領域所属要素数
intELEM_list	I	[ICELTOT_INT]	I	領域所属要素のリスト:　可視化に使用

開始，終了：MPI_Init/Finalize

```
#include "pfem_util.h"
void PFEM_INIT(int argc, char* argv[])
{
        int i;
        MPI_Init(&argc,&argv);
        MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD,&PETOT);
        MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD,&my_rank);

        for(i=0;i<100;i++)  pfemRarray[i]=0.0;
        for(i=0;i<100;i++)  pfemIarray[i]=0;
}
```

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include "pfem_util.h"

void  PFEM_FINALIZE()
{
      MPI_Finalize ();

          if( my_rank == 0 ){
                  fprintf(stdout,"* normal terminatio¥n");
                  exit(0);
          }
}
```

制御ファイル入力：INPUT_CNTL

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include "pfem_util.h"
/** **/
void INPUT_CNTL()
{
 FILE *fp;

  if( my_rank == 0 ){
    if( (fp=fopen("INPUT.DAT","r")) == NULL){
      fprintf(stdout,"input file cannot be opened!¥n");
      exit(1);
    }

    fscanf(fp,"%s",HEADER);
    fscanf(fp,"%d",&ITER);
    fscanf(fp, "%lf %lf", &COND, &QVOL);
    fscanf(fp, "%lf",     &RESID);
    fclose(fp);
  }

  MPI_Bcast(HEADER ,80,MPI_CHAR,0,MPI_COMM_WORLD);
  MPI_Bcast(&ITER   , 1,MPI_INTEGER,0,MPI_COMM_WORLD);
  MPI_Bcast(&COND   , 1,MPI_DOUBLE,0,MPI_COMM_WORLD);
  MPI_Bcast(&QVOL   , 1,MPI_DOUBLE,0,MPI_COMM_WORLD);
  MPI_Bcast(&RESID  , 1,MPI_DOUBLE,0,MPI_COMM_WORLD);

  pfemRarray[0]= RESID;
  pfemIarray[0]= ITER;
}
```

メッシュ入力：INPUT_GRID（1/3）

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include "pfem_util.h"
#include "allocate.h"
/*** external functions **/
extern void ERROR_EXIT (int, int);
extern void DEFINE_FILE_NAME(char*,char*,int);
/** **/
void INPUT_GRID()
{
        FILE *fp;
        int i,j,k,ii,kk,kkk,nn,icel,iS,iE,ic0;
        int NTYPE,IMAT;
        int idummy;

        DEFINE_FILE_NAME(HEADER, fname, my_rank);
        if( (fp=fopen(fname,"r")) == NULL){
                fprintf(stdout,"input file cannot be opened!¥n");
                exit(1);}
/**
        NEIB-PE
**/
        fscanf(fp,"%d",&kkk);
        fscanf(fp,"%d",&NEIBPETOT);

        NEIBPE=(int*)allocate_vector(sizeof(int),NEIBPETOT);
        for(i=0;i<NEIBPETOT;i++) fscanf(fp,"%d",&NEIBPE[i]);

        for(i=0;i<NEIBPETOT;i++){
                if( NEIBPE[i] > PETOT-1 ){
                        ERROR_EXIT (202,my_rank);}
        }
```

分散メッシュファイル名：DEFINE_FILE_NAME HEADER+ランク番号

```
#include <stdio.h>
#include <string.h>
void DEFINE_FILE_NAME (char HEADERo[], char filename[],int my_rank)
{
        char string[80];
        sprintf(string,".%-d",my_rank);
        strcpy(filename,HEADERo);
        strcat(filename,string);
}
```

allocate, deallocate関数

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
void* allocate_vector(int size,int m)
{
  void *a;
  if ( ( a=(void * )malloc( m * size ) ) == NULL ) {
     fprintf(stdout,"Error:Memory does not enough! in vector ¥n");
     exit(1);
  }
  return a;
}

void deallocate_vector(void *a)
{
  free( a );
}

void** allocate_matrix(int size,int m,int n)
{
  void **aa;
  int i;
  if ( ( aa=(void ** )malloc( m * sizeof(void*) ) ) == NULL ) {
     fprintf(stdout,"Error:Memory does not enough! aa in matrix ¥n");
     exit(1);
  }
  if ( ( aa[0]=(void * )malloc( m * n * size ) ) == NULL ) {
     fprintf(stdout,"Error:Memory does not enough! in matrix ¥n");
     exit(1);
  }
        for(i=1;i<m;i++) aa[i]=(char*)aa[i-1]+size*n;
  return aa;
}

void deallocate_matrix(void **aa)
{
        free( aa );
}
```

allocateをFORTRAN並みに簡単にやるための関数

メッシュ入力：INPUT_GRID（2/3）

```
/**
        NODE
**/
        fscanf(fp,"%d %d",&NP,&N);

        XYZ    =(KREAL**)allocate_matrix(sizeof(KREAL),NP,3);
        NODE_ID=(KINT **)allocate_matrix(sizeof(KINT ),NP,2);

        for(i=0;i<NP;i++){
                for(j=0;j<3;j++){
                        XYZ[i][j]=0.0;
                }
        }

        for(i=0;i<NP;i++){

          fscanf(fp,"%d %d %lf %lf %lf",&NODE_ID[i][0],&NODE_ID[i][1],&XYZ[i][0],&XYZ[i][1],&XYZ[i][2]);
        }
/**
        ELEMENT
**/
        fscanf(fp,"%d %d",&ICELTOT,&ICELTOT_INT);

        ICELNOD=(KINT**)allocate_matrix(sizeof(KINT),ICELTOT,8);
        intELEM_list=(KINT*)allocate_vector(sizeof(KINT),ICELTOT);
        ELEM_ID=(KINT**)allocate_matrix(sizeof(KINT),ICELTOT,2);

        for(i=0;i<ICELTOT;i++) fscanf(fp,"%d",&NTYPE);

        for(icel=0;icel<ICELTOT;icel++){
                fscanf(fp,"%d %d %d %d %d %d %d %d %d %d %d",
                &ELEM_ID[icel][0],&ELEM_ID[icel][1],
                &IMAT,
                &ICELNOD[icel][0],&ICELNOD[icel][1],&ICELNOD[icel][2],&ICELNOD[icel][3],
                &ICELNOD[icel][4],&ICELNOD[icel][5],&ICELNOD[icel][6],&ICELNOD[icel][7]);
        }

        for(ic0=0;ic0<ICELTOT_INT;ic0++) fscanf(fp,"%d",&intELEM_list[ic0]);
```

メッシュ入力：INPUT_GRID（3/3）

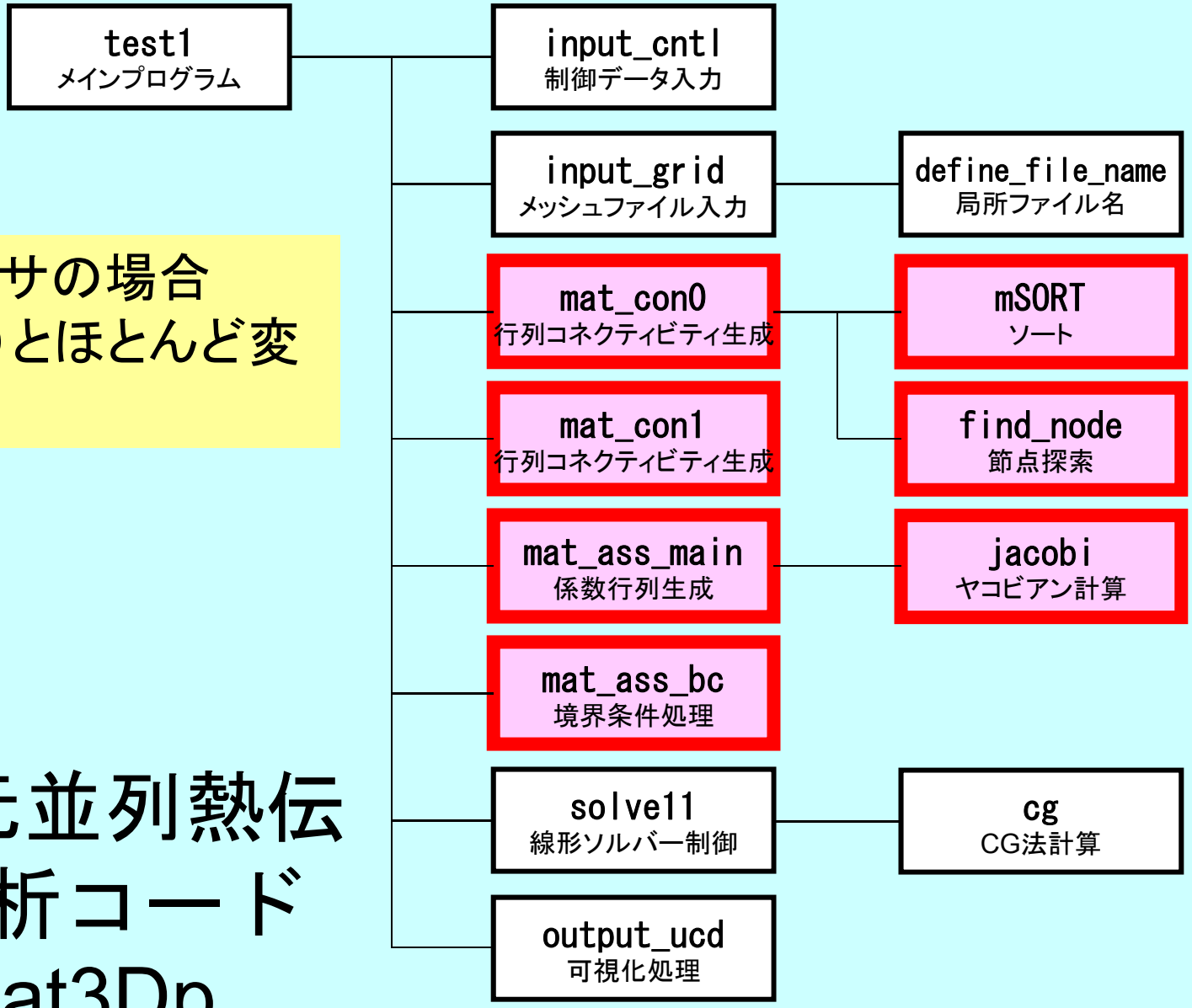
```
/**
        COMMUNICATION table
**/
        IMPORT_INDEX=(int*)allocate_vector(sizeof(int),NEIBPETOT+1);
        EXPORT_INDEX=(int*)allocate_vector(sizeof(int),NEIBPETOT+1);

        for(i=0;i<NEIBPETOT+1;++i) IMPORT_INDEX[i]=0;
        for(i=0;i<NEIBPETOT+1;++i) EXPORT_INDEX[i]=0;

        if( PETOT != 1 ) {
                for(i=1;i<=NEIBPETOT;i++) fscanf(fp,"%d",&IMPORT_INDEX[i]);
                nn=IMPORT_INDEX[NEIBPETOT];
                if( nn > 0 ) IMPORT_ITEM=(int*)allocate_vector(sizeof(int),nn);
                for(i=0;i<nn;i++) fscanf(fp,"%d %d",&IMPORT_ITEM[i],&idummy);

                for(i=1;i<=NEIBPETOT;i++) fscanf(fp,"%d",&EXPORT_INDEX[i]);
                nn=EXPORT_INDEX[NEIBPETOT];
                if( nn > 0 ) EXPORT_ITEM=(int*)allocate_vector(sizeof(int),nn);
                for(i=0;i<nn;i++) fscanf(fp,"%d",&EXPORT_ITEM[i]);}
/**
        NODE grp.  info.
**/
        fscanf(fp,"%d",&NODGRPtot);

        NODGRP_INDEX=(KINT*  )allocate_vector(sizeof(KINT),NODGRPtot+1);
        NODGRP_NAME =(CHAR80*)allocate_vector(sizeof(CHAR80),NODGRPtot);
        for(i=0;i<NODGRPtot+1;i++) NODGRP_INDEX[i]=0;

        for(i=0;i<NODGRPtot;i++) fscanf(fp,"%d",&NODGRP_INDEX[i+1]);
        nn=NODGRP_INDEX[NODGRPtot];
        NODGRP_ITEM=(KINT*)allocate_vector(sizeof(KINT),nn);

        for(k=0;k<NODGRPtot;k++){
                iS= NODGRP_INDEX[k];
                iE= NODGRP_INDEX[k+1];
                fscanf(fp,"%s",NODGRP_NAME[k].name);
                nn= iE - iS;
                if( nn != 0 ){
                        for(kk=iS;kk<iE;kk++) fscanf(fp,"%d",&NODGRP_ITEM[kk]);}
        }
```

並列有限要素法の処理：プログラム

- 初期化
  - 制御変数読み込み
  - 座標読み込み⇒要素生成（N:節点数，NE：要素数）
  - **配列初期化（全体マトリクス，要素マトリクス）**
  - **要素⇒全体マトリクスマッピング（Index，Item）**
- **マトリクス生成**
  - **要素単位の処理（do icel= 1, NE）**
    - **要素マトリクス計算**
    - **全体マトリクスへの重ね合わせ**
  - **境界条件の処理**
- 連立一次方程式
  - 共役勾配法（CG）

1プロセッサの場合（heat3D）とほとんど変わらない

三次元並列熱伝導解析コード heat3Dp



マトリクス生成まで

- 一次元のときは，index，itemに関連した情報を簡単に作ることができた
  - 非ゼロ非対角成分の数は2
  - 番号が自分に対して：+1と-1

- 三次元の場合はもっと複雑
  - 非ゼロ非対角ブロックの数は7～26（現在の形状）
  - 実際はもっと複雑
  - 前以て，非ゼロ非対角ブロックの数はわからない

マトリクス生成まで

- 一次元のときは，index，itemに関連した情報を簡単に作ることができた
  - 非ゼロ非対角成分の数は2
  - 番号が自分に対して：+1と-1
- 三次元の場合はもっと複雑
  - 非ゼロ非対角ブロックの数は7～26（現在の形状）
  - 実際はもっと複雑
  - 前以て，非ゼロ非対角ブロックの数はわからない
- INLU[NP]，IALU[NP][NLU] を使って非ゼロ非対角成分数を予備的に勘定する

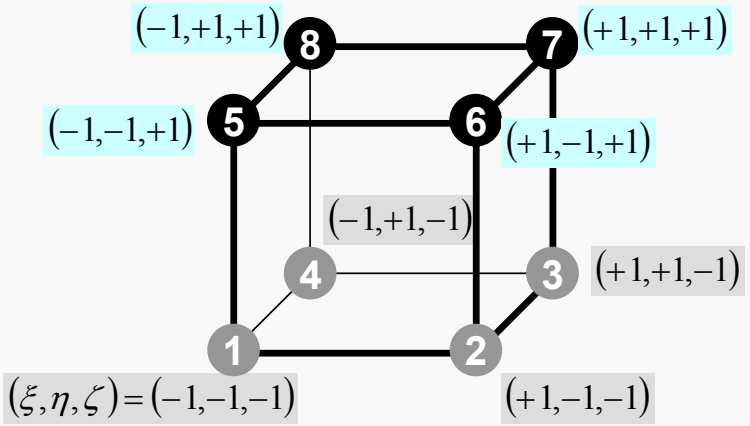
全体処理

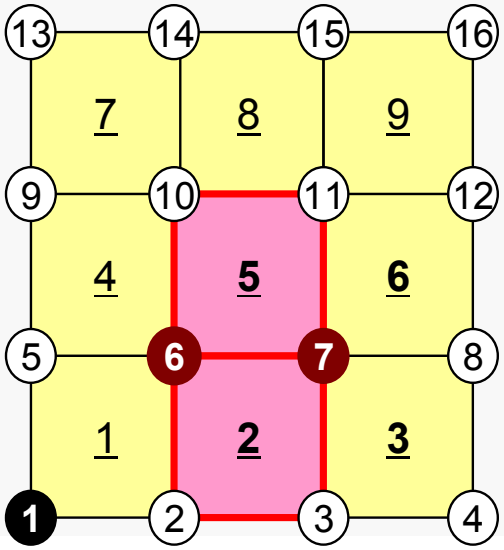
```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
FILE* fp_log;
#define GLOBAL_VALUE_DEFINE
#include "pfem_util.h"
extern void PFEM_INIT(int,char**);
extern void INPUT_CNTL();
extern void INPUT_GRID();
extern void MAT_CON0();
extern void MAT_CON1();
extern void MAT_ASS_MAIN();
extern void MAT_ASS_BC();
extern void SOLVE11();
extern void OUTPUT_UCD();
extern void PFEM_FINALIZE();
int main(int argc,char* argv[])
{
  double START_TIME,END_TIME;

  PFEM_INIT(argc,argv);

  INPUT_CNTL();
  INPUT_GRID();

  MAT_CON0();
  MAT_CON1();

  MAT_ASS_MAIN();
  MAT_ASS_BC()  ;

  SOLVE11();

  OUTPUT_UCD()    ;
  PFEM_FINALIZE() ;
}
```

MAT_CON0: INLU, IALU生成
MAT_CON1: indexLU, itemLU生成

MAT_CON0：全体構成

```
do icel= 1, ICELTOT
  8節点相互の関係から,
  INL, INU, IAL, IAUを生成
  (FIND_NODE)
enddo
```





行列コネクティビティ生成：MAT_CON0（1/4）

```
/**
 ** MAT_CON0
 **/

#include <stdio.h>
#include "pfem_util.h"
#include "allocate.h "

extern FILE *fp_log;
/*** external functions ***/
extern void mSORT(int*, int*, int);
/*** static functuons ***/
static void FIND_TS_NODE (int,int);

void MAT_CON0()
{
  int i,j,k,icel,in;
  int in1,in2,in3,in4,in5,in6,in7,in8;
  int NN;

  NLU= 26;

  INLU=(KINT* )allocate_vector(sizeof(KINT),NP);
  IALU=(KINT**)allocate_matrix(sizeof(KINT),NP,NLU);

  for(i=0;i<NP;i++) INLU[i]=0;
  for(i=0;i<NP;i++) for(j=0;j<NLU;j++) IALU[i][j]=0;
```

NLU:
各節点における
非ゼロ非対角成分
の最大数
（接続する節点数）

今の問題の場合は
わかっているので，
このようにできる

不明の場合の実装：
⇒レポート課題

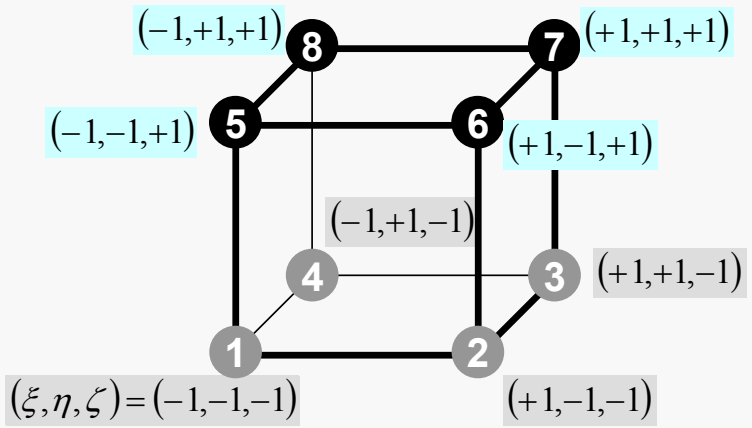
行列コネクティビティ生成：MAT_CON0（1/4）

```
/**
 ** MAT_CON0
 **/

#include <stdio.h>
#include "pfem_util.h"
#include "allocate.h "

extern FILE *fp_log;
/*** external functions ***/
extern void mSORT(int*, int*, int);
/*** static functuons ***/
static void FIND_TS_NODE (int,int);

void MAT_CON0()
{
  int i,j,k,icel,in;
  int in1,in2,in3,in4,in5,in6,in7,in8;
  int NN;

  NLU= 26;

  INLU=(KINT* )allocate_vector(sizeof(KINT),NP);
  IALU=(KINT**)allocate_matrix(sizeof(KINT),NP,NLU);

  for(i=0;i<NP;i++) INLU[i]=0;
  for(i=0;i<NP;i++) for(j=0;j<NLU;j++) IALU[i][j]=0;
```

変数名	サイズ	内　容
INLU	[NP]	各節点の非零非対角成分数
IALU	[NP]{[NLU]	各節点の非零非対角成分（列番号）

行列コネクティビティ生成：MAT_CON0（2/4）

```
for( icel=0;icel< ICELTOT;icel++){
    in1=ICELNOD[icel][0];
    in2=ICELNOD[icel][1];
    in3=ICELNOD[icel][2];
    in4=ICELNOD[icel][3];
    in5=ICELNOD[icel][4];
    in6=ICELNOD[icel][5];
    in7=ICELNOD[icel][6];
    in8=ICELNOD[icel][7];

    FIND_TS_NODE (in1,in2);
    FIND_TS_NODE (in1,in3);
    FIND_TS_NODE (in1,in4);
    FIND_TS_NODE (in1,in5);
    FIND_TS_NODE (in1,in6);
    FIND_TS_NODE (in1,in7);
    FIND_TS_NODE (in1,in8);

    FIND_TS_NODE (in2,in1);
    FIND_TS_NODE (in2,in3);
    FIND_TS_NODE (in2,in4);
    FIND_TS_NODE (in2,in5);
    FIND_TS_NODE (in2,in6);
    FIND_TS_NODE (in2,in7);
    FIND_TS_NODE (in2,in8);

    FIND_TS_NODE (in3,in1);
    FIND_TS_NODE (in3,in2);
    FIND_TS_NODE (in3,in4);
    FIND_TS_NODE (in3,in5);
    FIND_TS_NODE (in3,in6);
    FIND_TS_NODE (in3,in7);
    FIND_TS_NODE (in3,in8);
```



節点探索：FIND_TS_NODE

INL,INU,IAL,IAU探索：一次元ではこの部分は手動

```
/***
 *** FIND_TS_NODE
 **/

static void FIND_TS_NODE (int ip1,int ip2)
{
  int kk,icou;

  for(kk=1;kk<=INLU[ip1-1];kk++){
    if(ip2 == IALU[ip1-1][kk-1]) return;
  }

  icou=INLU[ip1-1]+1;
  IALU[ip1-1][icou-1]=ip2;
  INLU[ip1-1]=icou;

  return;
}
```

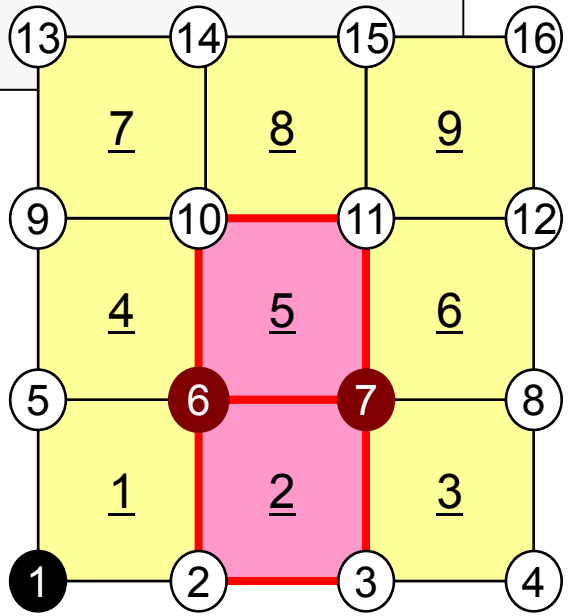
変数名	サイズ	内　容
INLU	[N]	各節点の非零非対角成分数
IALU	[N]{[NLU]	各節点の非零非対角成分（列番号）

節点探索：FIND_TS_NODE

一次元ではこの部分は手動

```
/***
 *** FIND_TS_NODE
 **/

static void FIND_TS_NODE (int ip1,int ip2)
{
  int kk,icou;

  for(kk=1;kk<=INLU[ip1-1];kk++){
    if(ip2 == IALU[ip1-1][kk-1]) return;
  }

  icou=INLU[ip1-1]+1;
  IALU[ip1-1][icou-1]=ip2;
  INLU[ip1-1]=icou;

  return;
}
```

既にIALUに含まれている場合は，次のペアへ

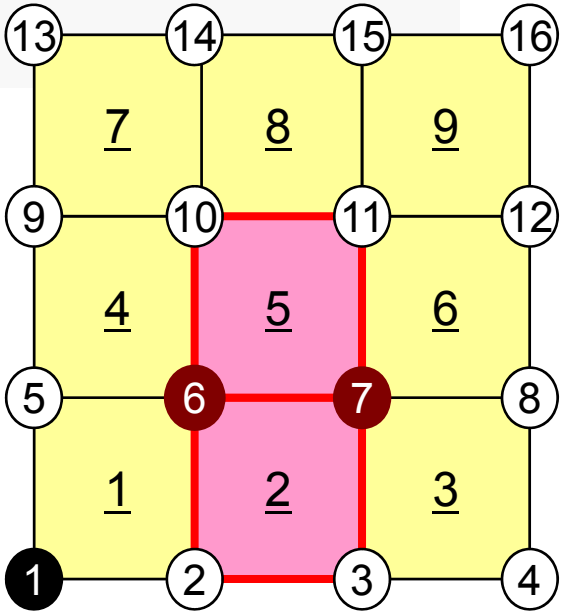


節点探索：FIND_TS_NODE

一次元ではこの部分は手動

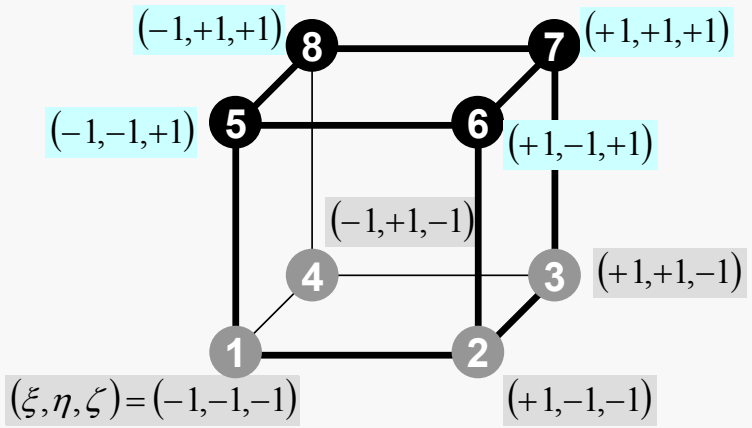
```
/***
 *** FIND_TS_NODE
 **/

static void FIND_TS_NODE (int ip1,int ip2)
{
  int kk,icou;

  for(kk=1;kk<=INLU[ip1-1];kk++){
    if(ip2 == IALU[ip1-1][kk-1]) return;
  }

  icou=INLU[ip1-1]+1;
  IALU[ip1-1][icou-1]=ip2;
  INLU[ip1-1]=icou;

  return;
}
```

IALUに含まれていない場合は，INLUに1を加えてIALUに格納



行列コネクティビティ生成：MAT_CON0（3/4）

```
      FIND_TS_NODE (in4,in1);
      FIND_TS_NODE (in4,in2);
      FIND_TS_NODE (in4,in3);
      FIND_TS_NODE (in4,in5);
      FIND_TS_NODE (in4,in6);
      FIND_TS_NODE (in4,in7);
      FIND_TS_NODE (in4,in8);

      FIND_TS_NODE (in5,in1);
      FIND_TS_NODE (in5,in2);
      FIND_TS_NODE (in5,in3);
      FIND_TS_NODE (in5,in4);
      FIND_TS_NODE (in5,in6);
      FIND_TS_NODE (in5,in7);
      FIND_TS_NODE (in5,in8);

      FIND_TS_NODE (in6,in1);
      FIND_TS_NODE (in6,in2);
      FIND_TS_NODE (in6,in3);
      FIND_TS_NODE (in6,in4);
      FIND_TS_NODE (in6,in5);
      FIND_TS_NODE (in6,in7);
      FIND_TS_NODE (in6,in8);

      FIND_TS_NODE (in7,in1);
      FIND_TS_NODE (in7,in2);
      FIND_TS_NODE (in7,in3);
      FIND_TS_NODE (in7,in4);
      FIND_TS_NODE (in7,in5);
      FIND_TS_NODE (in7,in6);
      FIND_TS_NODE (in7,in8);
```



行列コネクティビティ生成：MAT_CON0（4/4）

```
    FIND_TS_NODE (in8,in1);
    FIND_TS_NODE (in8,in2);
    FIND_TS_NODE (in8,in3);
    FIND_TS_NODE (in8,in4);
    FIND_TS_NODE (in8,in5);
    FIND_TS_NODE (in8,in6);
    FIND_TS_NODE (in8,in7);
  }

  for(in=0;in<N;in++){

    NN=INLU[in];
    for (k=0;k<NN;k++){
      NCOL1[k]=IALU[in][k];
    }

    mSORT(NCOL1,NCOL2,NN);

    for(k=NN;k>0;k--){
      IALU[in][NN-k]= NCOL1[NCOL2[k-1]-1];
    }
  }
```

各節点において，IALU[i][k]が
小さい番号から大きい番号に
並ぶようにソート（単純なバブルソート）
せいぜい100程度のものをソートする

CRS形式への変換：MAT_CON1

```
#include <stdio.h>
#include "pfem_util.h"
#include "allocate.h"
extern FILE* fp_log;
void MAT_CON1()
{
  int i,k,kk;

  indexLU=(KINT*)allocate_vector(sizeof(KINT),NP+1);
  for(i=0;i<NP+1;i++) indexLU[i]=0;

  for(i=0;i<NP;i++){
    indexLU[i+1]=indexLU[i]+INLU[i];
  }

  NPLU=indexLU[NP];

  itemLU=(KINT*)allocate_vector(sizeof(KINT),NPLU);

  for(i=0;i<NP;i++){
    for(k=0;k<INLU[i];k++){
      kk=k+indexLU[i];
      itemLU[kk]=IALU[i][k]-1;
    }
  }


  deallocate_vector(INLU);
  deallocate_vector(IALU);
}
```

C

$$\mathrm{index}[i+1]=\sum_{k=0}^{i}\mathrm{INLU}[k]$$

$$\mathrm{index}[0]=0$$

FORTRAN

$$\mathrm{index}(i)=\sum_{k=1}^{i}\mathrm{INLU}(k)$$

$$\mathrm{index}(0)=0$$

CRS形式への変換：MAT_CON1

```
#include <stdio.h>
#include "pfem_util.h"
#include "allocate.h"
extern FILE* fp_log;
void MAT_CON1()
{
  int i,k,kk;

  indexLU=(KINT*)allocate_vector(sizeof(KINT),N+1);
  for(i=0;i<N+1;i++) indexLU[i]=0;

  for(i=0;i<NP;i++){
    indexLU[i+1]=indexLU[i]+INLU[i];
  }

  NPLU=indexLU[NP];

  itemLU=(KINT*)allocate_vector(sizeof(KINT),NPLU);

  for(i=0;i<NP;i++){
    for(k=0;k<INLU[i];k++){
      kk=k+indexLU[i];
      itemLU[kk]=IALU[i][k]-1;
    }
  }


  deallocate_vector(INLU);
  deallocate_vector(IALU);
}
```

NPLU=index[NP]
itemのサイズ
非ゼロ非対角成分総数

CRS形式への変換：MAT_CON1

```
#include <stdio.h>
#include "pfem_util.h"
#include "allocate.h"
extern FILE* fp_log;
void MAT_CON1()
{
  int i,k,kk;

  indexLU=(KINT*)allocate_vector(sizeof(KINT),NP+1);
  for(i=0;i<NP+1;i++) indexLU[i]=0;

  for(i=0;i<NP;i++){
    indexLU[i+1]=indexLU[i]+INLU[i];
  }

  NPLU=indexLU[NP];

  itemLU=(KINT*)allocate_vector(sizeof(KINT),NPLU);

  for(i=0;i<NP;i++){
    for(k=0;k<INLU[i];k++){
      kk=k+indexLU[i];
      itemLU[kk]=IALU[i][k]-1;
    }
  }


  deallocate_vector(INLU);
  deallocate_vector(IALU);
}
```

itemに「0」から始まる節点番号を記憶

CRS形式への変換：MAT_CON1

```
#include <stdio.h>
#include "pfem_util.h"
#include "allocate.h"
extern FILE* fp_log;
void MAT_CON1()
{
  int i,k,kk;

  indexLU=(KINT*)allocate_vector(sizeof(KINT),NP+1);
  for(i=0;i<NP+1;i++) indexLU[i]=0;

  for(i=0;i<NP;i++){
    indexLU[i+1]=indexLU[i]+INLU[i];
  }

  NPLU=indexLU[NP];

  itemLU=(KINT*)allocate_vector(sizeof(KINT),NPLU);

  for(i=0;i<NP;i++){
    for(k=0;k<INLU[i];k++){
      kk=k+indexLU[i];
      itemLU[kk]=IALU[i][k]-1;
    }
  }


  deallocate_vector(INLU);
  deallocate_vector(IALU);
}
```

これらはもはや不要

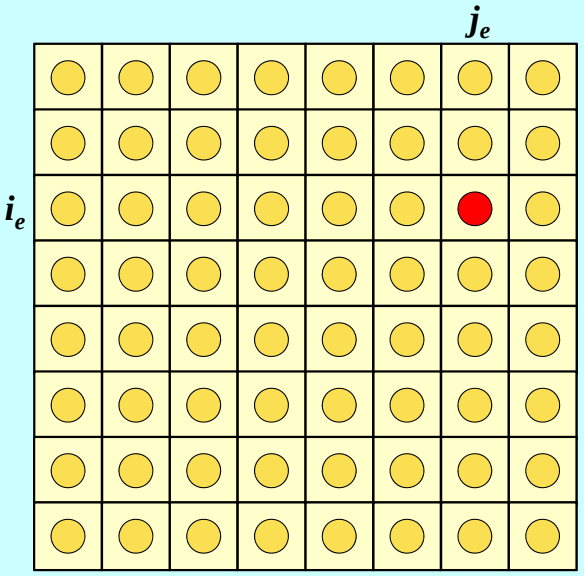
全体処理

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
FILE* fp_log;
#define GLOBAL_VALUE_DEFINE
#include "pfem_util.h"
extern void PFEM_INIT(int,char**);
extern void INPUT_CNTL();
extern void INPUT_GRID();
extern void MAT_CON0();
extern void MAT_CON1();
extern void MAT_ASS_MAIN();
extern void MAT_ASS_BC();
extern void SOLVE11();
extern void OUTPUT_UCD();
extern void PFEM_FINALIZE();
int main(int argc,char* argv[])
{
  double START_TIME,END_TIME;

  PFEM_INIT(argc,argv);

  INPUT_CNTL();
  INPUT_GRID();

  MAT_CON0();
  MAT_CON1();

  MAT_ASS_MAIN();
  MAT_ASS_BC()  ;

  SOLVE11();

  OUTPUT_UCD()    ;
  PFEM_FINALIZE() ;
}
```

MAT_ASS_MAIN：全体構成

```
do kpn= 1, 2          ガウス積分点番号（ζ方向）
  do jpn= 1, 2        ガウス積分点番号（η方向）
    do ipn= 1, 2      ガウス積分点番号（ξ方向）
      ガウス積分点（8個）における形状関数,
      およびその「自然座標系」における微分の算出
    enddo
  enddo
enddo
```

```
do icel= 1, ICELTOT    要素ループ
  8節点の座標から，ガウス積分点における，形状関数の「全体座標系」における微分，
  およびヤコビアンを算出（JACOBI）

  do ie= 1, 8          局所節点番号
    do je= 1, 8        局所節点番号
      全体節点番号：ip, jp
      A_ip,jp のitemLUにおけるアドレス：kk

      do kpn= 1, 2       ガウス積分点番号（ζ方向）
        do jpn= 1, 2     ガウス積分点番号（η方向）
          do ipn= 1, 2   ガウス積分点番号（ξ方向）
            要素積分⇒要素行列成分計算，全体行列への足しこみ
          enddo
        enddo
      enddo
    enddo
  enddo
enddo
```



係数行列：MAT_ASS_MAIN（1/6）

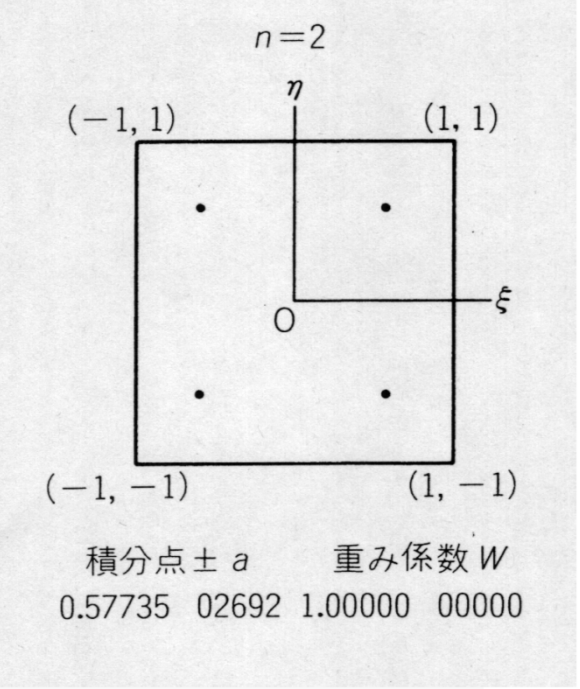
```
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include "pfem_util.h"
#include "allocate.h"
extern FILE *fp_log;
extern void JACOBI();
void MAT_ASS_MAIN()
{
  int i,k,kk;
  int ip,jp,kp;
  int ipn,jpn,kpn;
  int icel;
  int ie,je;
  int iiS,iiE;
  int in1,in2,in3,in4,in5,in6,in7,in8;
  double SHi;
  double QP1,QM1,EP1,EM1,TP1,TM1;
  double X1,X2,X3,X4,X5,X6,X7,X8;
  double Y1,Y2,Y3,Y4,Y5,Y6,Y7,Y8;
  double Z1,Z2,Z3,Z4,Z5,Z6,Z7,Z8;
  double PNXi,PNYi,PNZi,PNXj,PNYj,PNZj;
  double CONDO, QVO, QVC, COEFij;
  double coef;

  KINT nodLOCAL[8];

  AMAT=(KREAL*) allocate_vector(sizeof(KREAL),NPLU);
  B =(KREAL*) allocate_vector(sizeof(KREAL),NP );
  D =(KREAL*) allocate_vector(sizeof(KREAL),NP);
  X =(KREAL*) allocate_vector(sizeof(KREAL),NP);

  for(i=0;i<NPLU;i++) AMAT[i]=0.0;
  for(i=0;i<N ;i++) B[i]=0.0;
  for(i=0;i<N ;i++) D[i]=0.0;
  for(i=0;i<N ;i++) X[i]=0.0;

  WEI[0]= 1.0000000000e0;
  WEI[1]= 1.0000000000e0;
  POS[0]= -0.5773502692e0;
  POS[1]=  0.5773502692e0;
```

係数行列（非零非対角成分）
右辺ベクトル
解ベクトル
係数行列（対角成分）

係数行列：MAT_ASS_MAIN（1/6）

```
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include "pfem_util.h"
#include "allocate.h"
extern FILE *fp_log;
extern void JACOBI();
void MAT_ASS_MAIN()
{
  int i,k,kk;
  int ip,jp,kp;
  int ipn,jpn,kpn;
  int icel;
  int ie,je;
  int iiS,iiE;
  int in1,in2,in3,in4,in5,in6,in7,in8;
  double SHi;
  double QP1,QM1,EP1,EM1,TP1,TM1;
  double X1,X2,X3,X4,X5,X6,X7,X8;
  double Y1,Y2,Y3,Y4,Y5,Y6,Y7,Y8;
  double Z1,Z2,Z3,Z4,Z5,Z6,Z7,Z8;
  double PNXi,PNYi,PNZi,PNXj,PNYj,PNZj;
  double CONDO, QVO, QVC, COEFij;
  double coef;

  KINT nodLOCAL[8];

  AMAT=(KREAL*) allocate_vector(sizeof(KREAL),NPLU);
  B =(KREAL*) allocate_vector(sizeof(KREAL),NP);
  D =(KREAL*) allocate_vector(sizeof(KREAL),NP);
  X =(KREAL*) allocate_vector(sizeof(KREAL),NP);

  for(i=0;i<NPLU;i++) AMAT[i]=0.0;
  for(i=0;i<N ;i++) B[i]=0.0;
  for(i=0;i<N ;i++) D[i]=0.0;
  for(i=0;i<N ;i++) X[i]=0.0;

  WEI[0]= 1.0000000000e0;
  WEI[1]= 1.0000000000e0;
  POS[0]= -0.5773502692e0;
  POS[1]=  0.5773502692e0;
```

POS: 積分点座標
WEI: 重み係数



係数行列：MAT_ASS_MAIN（2/6）

```
/***
    INIT.
    PNQ   - 1st-order derivative of shape function by QSI
    PNE   - 1st-order derivative of shape function by ETA
    PNT   - 1st-order derivative of shape function by ZET
***/

  for(ip=0;ip<2;ip++){
    for(jp=0;jp<2;jp++){
      for(kp=0;kp<2;kp++){

        QP1= 1.e0 + POS[ip];
        QM1= 1.e0 - POS[ip];
        EP1= 1.e0 + POS[jp];
        EM1= 1.e0 - POS[jp];
        TP1= 1.e0 + POS[kp];
        TM1= 1.e0 - POS[kp];

        SHAPE[ip][jp][kp][0]= 0.8th * QM1 * EM1 * TM1;
        SHAPE[ip][jp][kp][1]= 0.8th * QP1 * EM1 * TM1;
        SHAPE[ip][jp][kp][2]= 0.8th * QP1 * EP1 * TM1;
        SHAPE[ip][jp][kp][3]= 0.8th * QM1 * EP1 * TM1;
        SHAPE[ip][jp][kp][4]= 0.8th * QM1 * EM1 * TP1;
        SHAPE[ip][jp][kp][5]= 0.8th * QP1 * EM1 * TP1;
        SHAPE[ip][jp][kp][6]= 0.8th * QP1 * EP1 * TP1;
        SHAPE[ip][jp][kp][7]= 0.8th * QM1 * EP1 * TP1;
```

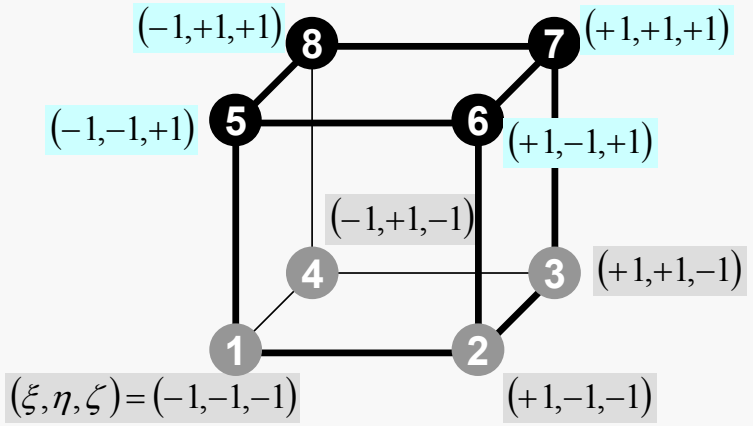
係数行列：MAT_ASS_MAIN（2/6）

```
/***
    INIT.
    PNQ   - 1st-order derivative of shape function by QSI
    PNE   - 1st-order derivative of shape function by ETA
    PNT   - 1st-order derivative of shape function by ZET
***/

  for(ip=0;ip<2;ip++){
    for(jp=0;jp<2;jp++){
      for(kp=0;kp<2;kp++){

        QP1= 1.e0 + POS[ip];
        QM1= 1.e0 - POS[ip];
        EP1= 1.e0 + POS[jp];
        EM1= 1.e0 - POS[jp];
        TP1= 1.e0 + POS[kp];
        TM1= 1.e0 - POS[kp];

        SHAPE[ip][jp][kp][0]= 08th * QM1 * EM1 * TM1;
        SHAPE[ip][jp][kp][1]= 08th * QP1 * EM1 * TM1;
        SHAPE[ip][jp][kp][2]= 08th * QP1 * EP1 * TM1;
        SHAPE[ip][jp][kp][3]= 08th * QM1 * EP1 * TM1;
        SHAPE[ip][jp][kp][4]= 08th * QM1 * EM1 * TP1;
        SHAPE[ip][jp][kp][5]= 08th * QP1 * EM1 * TP1;
        SHAPE[ip][jp][kp][6]= 08th * QP1 * EP1 * TP1;
        SHAPE[ip][jp][kp][7]= 08th * QM1 * EP1 * TP1;
```

$$\mathrm{QP1(i)} = (1+\xi_i), \quad \mathrm{QM1(i)} = (1-\xi_i)$$
$$\mathrm{EP1(j)} = (1+\eta_j), \quad \mathrm{EM1(j)} = (1-\eta_i)$$
$$\mathrm{TP1(k)} = (1+\zeta_k), \quad \mathrm{TM1(k)} = (1-\zeta_k)$$

係数行列：MAT_ASS_MAIN（2/6）

```
/***
    INIT.
    PNQ   - 1st-order derivative of shape function by QSI
    PNE   - 1st-order derivative of shape function by ETA
    PNT   - 1st-order derivative of shape function by ZET
***/

  for(ip=0;ip<2;ip++){
    for(jp=0;jp<2;jp++){
      for(kp=0;kp<2;kp++){

        QP1= 1.e0 + POS[ip];
        QM1= 1.e0 - POS[ip];
        EP1= 1.e0 + POS[jp];
        EM1= 1.e0 - POS[jp];
        TP1= 1.e0 + POS[kp];
        TM1= 1.e0 - POS[kp];

        SHAPE[ip][jp][kp][0]= 08th * QM1 * EM1 * TM1;
        SHAPE[ip][jp][kp][1]= 08th * QP1 * EM1 * TM1;
        SHAPE[ip][jp][kp][2]= 08th * QP1 * EP1 * TM1;
        SHAPE[ip][jp][kp][3]= 08th * QM1 * EP1 * TM1;
        SHAPE[ip][jp][kp][4]= 08th * QM1 * EM1 * TP1;
        SHAPE[ip][jp][kp][5]= 08th * QP1 * EM1 * TP1;
        SHAPE[ip][jp][kp][6]= 08th * QP1 * EP1 * TP1;
        SHAPE[ip][jp][kp][7]= 08th * QM1 * EP1 * TP1;
```



係数行列：MAT_ASS_MAIN（2/6）

```
/***
    INIT.
    PNQ   - 1st-order derivative of shape function by QSI
    PNE   - 1st-order derivative of shape function by ETA
    PNT   - 1st-order derivative of shape function by ZET
***/

  for(ip=0;ip<2;ip++){
    for(jp=0;jp<2;jp++){
      for(kp=0;kp<2;kp++){

        QP1= 1.e0 + POS[ip];
        QM1= 1.e0 - POS[ip];
        EP1= 1.e0 + POS[jp];
        EM1= 1.e0 - POS[jp];
        TP1= 1.e0 + POS[kp];
        TM1= 1.e0 - POS[kp];

        SHAPE[ip][jp][kp][0]= 08th * QM1 * EM1 * TM1;
        SHAPE[ip][jp][kp][1]= 08th * QP1 * EM1 * TM1;
        SHAPE[ip][jp][kp][2]= 08th * QP1 * EP1 * TM1;
        SHAPE[ip][jp][kp][3]= 08th * QM1 * EP1 * TM1;
        SHAPE[ip][jp][kp][4]= 08th * QM1 * EM1 * TP1;
        SHAPE[ip][jp][kp][5]= 08th * QP1 * EM1 * TP1;
        SHAPE[ip][jp][kp][6]= 08th * QP1 * EP1 * TP1;
        SHAPE[ip][jp][kp][7]= 08th * QM1 * EP1 * TP1;
```

$$N_1(\xi,\eta,\zeta)=\frac{1}{8}(1-\xi)(1-\eta)(1-\zeta)$$

$$N_2(\xi,\eta,\zeta)=\frac{1}{8}(1+\xi)(1-\eta)(1-\zeta)$$

$$N_3(\xi,\eta,\zeta)=\frac{1}{8}(1+\xi)(1+\eta)(1-\zeta)$$

$$N_4(\xi,\eta,\zeta)=\frac{1}{8}(1-\xi)(1+\eta)(1-\zeta)$$

$$N_5(\xi,\eta,\zeta)=\frac{1}{8}(1-\xi)(1-\eta)(1+\zeta)$$

$$N_6(\xi,\eta,\zeta)=\frac{1}{8}(1+\xi)(1-\eta)(1+\zeta)$$

$$N_7(\xi,\eta,\zeta)=\frac{1}{8}(1+\xi)(1+\eta)(1+\zeta)$$

$$N_8(\xi,\eta,\zeta)=\frac{1}{8}(1-\xi)(1+\eta)(1+\zeta)$$

係数行列：MAT_ASS_MAIN（3/6）

```
        PNQ[jp][kp][0]= - 08th * EM1 * TM1;
        PNQ[jp][kp][1]= + 08th * EM1 * TM1;
        PNQ[jp][kp][2]= + 08th * EP1 * TM1;
        PNQ[jp][kp][3]= - 08th * EP1 * TM1;
        PNQ[jp][kp][4]= - 08th * EM1 * TP1;
        PNQ[jp][kp][5]= + 08th * EM1 * TP1;
        PNQ[jp][kp][6]= + 08th * EP1 * TP1;
        PNQ[jp][kp][7]= - 08th * EP1 * TP1;

        PNE[ip][kp][0]= - 08th * QM1 * TM1;
        PNE[ip][kp][1]= - 08th * QP1 * TM1;
        PNE[ip][kp][2]= + 08th * QP1 * TM1;
        PNE[ip][kp][3]= + 08th * QM1 * TM1;
        PNE[ip][kp][4]= - 08th * QM1 * TP1;
        PNE[ip][kp][5]= - 08th * QP1 * TP1;
        PNE[ip][kp][6]= + 08th * QP1 * TP1;
        PNE[ip][kp][7]= + 08th * QM1 * TP1;

        PNT[ip][jp][0]= - 08th * QM1 * EM1;
        PNT[ip][jp][1]= - 08th * QP1 * EM1;
        PNT[ip][jp][2]= - 08th * QP1 * EP1;
        PNT[ip][jp][3]= - 08th * QM1 * EP1;
        PNT[ip][jp][4]= + 08th * QM1 * EM1;
        PNT[ip][jp][5]= + 08th * QP1 * EM1;
        PNT[ip][jp][6]= + 08th * QP1 * EP1;
        PNT[ip][jp][7]= + 08th * QM1 * EP1;
      }
    }
  }

  for( icel=0;icel< ICELTOT;icel++){
    CONDO= COND;

    in1=ICELNOD[icel][0];
    in2=ICELNOD[icel][1];
    in3=ICELNOD[icel][2];
    in4=ICELNOD[icel][3];
    in5=ICELNOD[icel][4];
    in6=ICELNOD[icel][5];
    in7=ICELNOD[icel][6];
    in8=ICELNOD[icel][7];
```

$$PNQ(j,k)=\frac{\partial N_l}{\partial \xi}(\xi=\xi_i,\eta=\eta_j,\zeta=\zeta_k)$$

$$PNE(i,k)=\frac{\partial N_l}{\partial \eta}(\xi=\xi_i,\eta=\eta_j,\zeta=\zeta_k)$$

$$PNT(i,j)=\frac{\partial N_l}{\partial \zeta}(\xi=\xi_i,\eta=\eta_j,\zeta=\zeta_k)$$

$$\frac{\partial N_1}{\partial \xi}(\xi_i,\eta_j,\zeta_k)=-\frac{1}{8}(1-\eta_j)(1-\zeta_k)$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial \xi}(\xi_i,\eta_j,\zeta_k)=+\frac{1}{8}(1-\eta_j)(1-\zeta_k)$$

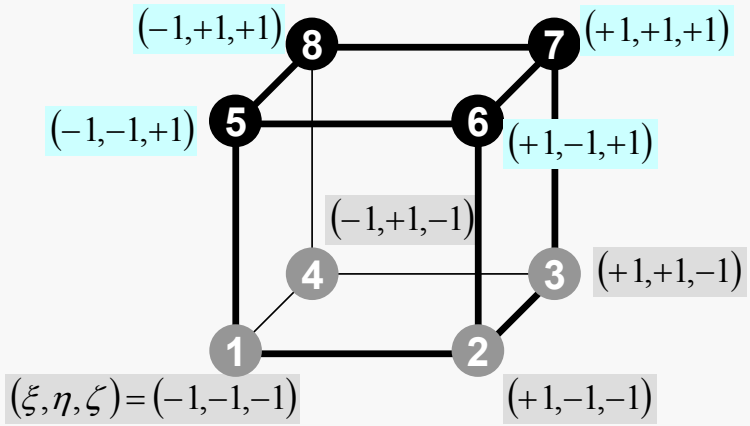
$$\frac{\partial N_3}{\partial \xi}(\xi_i,\eta_j,\zeta_k)=+\frac{1}{8}(1+\eta_j)(1-\zeta_k)$$

$$\frac{\partial N_3}{\partial \xi}(\xi_i,\eta_j,\zeta_k)=-\frac{1}{8}(1+\eta_j)(1-\zeta_k)$$

(ξ_i,η_j,ζ_k) における形状関数の一階微分

係数行列：MAT_ASS_MAIN（3/6）

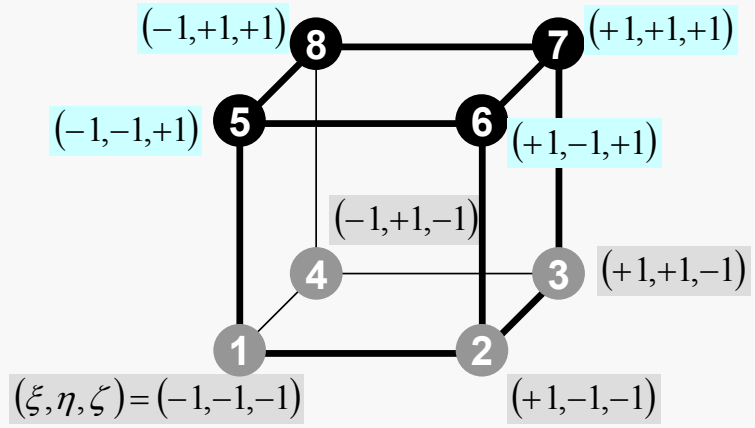
```
        PNQ[jp][kp][0]= - 08th * EM1 * TM1;
        PNQ[jp][kp][1]= + 08th * EM1 * TM1;
        PNQ[jp][kp][2]= + 08th * EP1 * TM1;
        PNQ[jp][kp][3]= - 08th * EP1 * TM1;
        PNQ[jp][kp][4]= - 08th * EM1 * TP1;
        PNQ[jp][kp][5]= + 08th * EM1 * TP1;
        PNQ[jp][kp][6]= + 08th * EP1 * TP1;
        PNQ[jp][kp][7]= - 08th * EP1 * TP1;

        PNE[ip][kp][0]= - 08th * QM1 * TM1;
        PNE[ip][kp][1]= - 08th * QP1 * TM1;
        PNE[ip][kp][2]= + 08th * QP1 * TM1;
        PNE[ip][kp][3]= + 08th * QM1 * TM1;
        PNE[ip][kp][4]= - 08th * QM1 * TP1;
        PNE[ip][kp][5]= - 08th * QP1 * TP1;
        PNE[ip][kp][6]= + 08th * QP1 * TP1;
        PNE[ip][kp][7]= + 08th * QM1 * TP1;

        PNT[ip][jp][0]= - 08th * QM1 * EM1;
        PNT[ip][jp][1]= - 08th * QP1 * EM1;
        PNT[ip][jp][2]= - 08th * QP1 * EP1;
        PNT[ip][jp][3]= - 08th * QM1 * EP1;
        PNT[ip][jp][4]= + 08th * QM1 * EM1;
        PNT[ip][jp][5]= + 08th * QP1 * EM1;
        PNT[ip][jp][6]= + 08th * QP1 * EP1;
        PNT[ip][jp][7]= + 08th * QM1 * EP1;
      }
    }
  }

  for( icel=0;icel< ICELTOT;icel++){
    CONDO= COND;

    in1=ICELNOD[icel][0];
    in2=ICELNOD[icel][1];
    in3=ICELNOD[icel][2];
    in4=ICELNOD[icel][3];
    in5=ICELNOD[icel][4];
    in6=ICELNOD[icel][5];
    in7=ICELNOD[icel][6];
    in8=ICELNOD[icel][7];
```



係数行列：MAT_ASS_MAIN（4/6）

```
nodLOCAL[0]= in1;
nodLOCAL[1]= in2;
nodLOCAL[2]= in3;
nodLOCAL[3]= in4;
nodLOCAL[4]= in5;
nodLOCAL[5]= in6;
nodLOCAL[6]= in7;
nodLOCAL[7]= in8;

X1=XYZ[in1-1][0];
X2=XYZ[in2-1][0];
X3=XYZ[in3-1][0];
X4=XYZ[in4-1][0];
X5=XYZ[in5-1][0];
X6=XYZ[in6-1][0];
X7=XYZ[in7-1][0];
X8=XYZ[in8-1][0];

Y1=XYZ[in1-1][1];
Y2=XYZ[in2-1][1];
Y3=XYZ[in3-1][1];
Y4=XYZ[in4-1][1];
Y5=XYZ[in5-1][1];
Y6=XYZ[in6-1][1];
Y7=XYZ[in7-1][1];
Y8=XYZ[in8-1][1];

QVC= O8th*(X1+X2+X3+X4+X5+X6+X7+X8+Y1+Y2+Y3+Y4+Y5+Y6+Y7+Y8);

Z1=XYZ[in1-1][2];
Z2=XYZ[in2-1][2];
Z3=XYZ[in3-1][2];
Z4=XYZ[in4-1][2];
Z5=XYZ[in5-1][2];
Z6=XYZ[in6-1][2];
Z7=XYZ[in7-1][2];
Z8=XYZ[in8-1][2];

JACOBI(DETJ, PNQ, PNE, PNT, PNX, PNY, PNZ,
       X1, X2, X3, X4, X5, X6, X7, X8,
       Y1, Y2, Y3, Y4, Y5, Y6, Y7, Y8, Z1, Z2, Z3, Z4, Z5, Z6, Z7, Z8);
```

8節点の節点番号



係数行列：MAT_ASS_MAIN（4/6）

```
nodLOCAL[0]= in1;
nodLOCAL[1]= in2;
nodLOCAL[2]= in3;
nodLOCAL[3]= in4;
nodLOCAL[4]= in5;
nodLOCAL[5]= in6;
nodLOCAL[6]= in7;
nodLOCAL[7]= in8;

X1=XYZ[in1-1][0];
X2=XYZ[in2-1][0];
X3=XYZ[in3-1][0];
X4=XYZ[in4-1][0];
X5=XYZ[in5-1][0];
X6=XYZ[in6-1][0];
X7=XYZ[in7-1][0];
X8=XYZ[in8-1][0];
```

8節点のX座標

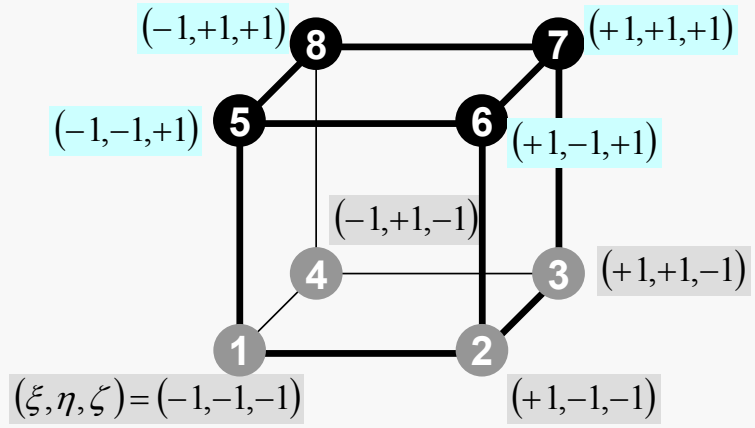
```
Y1=XYZ[in1-1][1];
Y2=XYZ[in2-1][1];
Y3=XYZ[in3-1][1];
Y4=XYZ[in4-1][1];
Y5=XYZ[in5-1][1];
Y6=XYZ[in6-1][1];
Y7=XYZ[in7-1][1];
Y8=XYZ[in8-1][1];
```

8節点のY座標

```
QVC= O8th*(X1+X2+X3+X4+X5+X6+X7+X8+Y1+Y2+Y3+Y4+Y5+Y6+Y7+Y8);

Z1=XYZ[in1-1][2];
Z2=XYZ[in2-1][2];
Z3=XYZ[in3-1][2];
Z4=XYZ[in4-1][2];
Z5=XYZ[in5-1][2];
Z6=XYZ[in6-1][2];
Z7=XYZ[in7-1][2];
Z8=XYZ[in8-1][2];
```

8節点のZ座標

```
JACOBI(DETJ, PNQ, PNE, PNT, PNX, PNY, PNZ,
       X1, X2, X3, X4, X5, X6, X7, X8,
       Y1, Y2, Y3, Y4, Y5, Y6, Y7, Y8, Z1, Z2, Z3, Z4, Z5, Z6, Z7, Z8);
```



座標値：
節点番号から1引く

係数行列：MAT_ASS_MAIN（4/6）

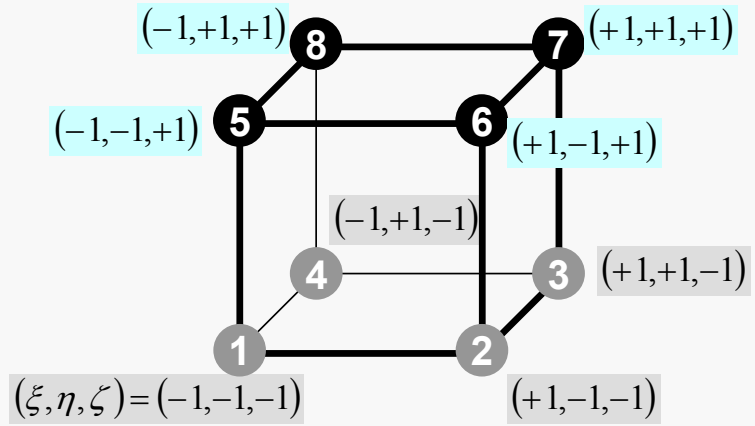
```
nodLOCAL[0]= in1;
nodLOCAL[1]= in2;
nodLOCAL[2]= in3;
nodLOCAL[3]= in4;
nodLOCAL[4]= in5;
nodLOCAL[5]= in6;
nodLOCAL[6]= in7;
nodLOCAL[7]= in8;

X1=XYZ[in1-1][0];
X2=XYZ[in2-1][0];
X3=XYZ[in3-1][0];
X4=XYZ[in4-1][0];
X5=XYZ[in5-1][0];
X6=XYZ[in6-1][0];
X7=XYZ[in7-1][0];
X8=XYZ[in8-1][0];
```

8節点のX座標

```
Y1=XYZ[in1-1][1];
Y2=XYZ[in2-1][1];
Y3=XYZ[in3-1][1];
Y4=XYZ[in4-1][1];
Y5=XYZ[in5-1][1];
Y6=XYZ[in6-1][1];
Y7=XYZ[in7-1][1];
Y8=XYZ[in8-1][1];
```

8節点のY座標

```
QVC= 08th*(X1+X2+X3+X4+X5+X6+X7+X8+Y1+Y2+Y3+Y4+Y5+Y6+Y7+Y8);

Z1=XYZ[in1-1][2];
Z2=XYZ[in2-1][2];
Z3=XYZ[in3-1][2];
Z4=XYZ[in4-1][2];
Z5=XYZ[in5-1][2];
Z6=XYZ[in6-1][2];
Z7=XYZ[in7-1][2];
Z8=XYZ[in8-1][2];

JACOBI(DETJ, PNQ, PNE, PNT, PNX, PNY, PNZ,
       X1, X2, X3, X4, X5, X6, X7, X8,
       Y1, Y2, Y3, Y4, Y5, Y6, Y7, Y8, Z1, Z2, Z3, Z4, Z5, Z6, Z7, Z8);
```



座標値：
節点番号から1引く

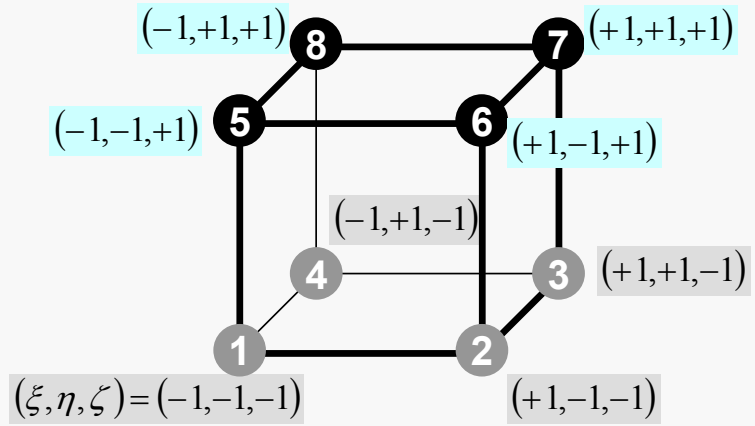
$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\dot{Q}(x,y,z)=0$$

$$\dot{Q}(x,y,z)=QVOL\left|x_C+y_C\right|$$

体積当たり発熱量は位置（メッシュの中心の座標 x_c,y_c）に依存

係数行列：MAT_ASS_MAIN（4/6）

```
nodLOCAL[0]= in1;
nodLOCAL[1]= in2;
nodLOCAL[2]= in3;
nodLOCAL[3]= in4;
nodLOCAL[4]= in5;
nodLOCAL[5]= in6;
nodLOCAL[6]= in7;
nodLOCAL[7]= in8;

X1=XYZ[in1-1][0];
X2=XYZ[in2-1][0];
X3=XYZ[in3-1][0];
X4=XYZ[in4-1][0];
X5=XYZ[in5-1][0];
X6=XYZ[in6-1][0];
X7=XYZ[in7-1][0];
X8=XYZ[in8-1][0];

Y1=XYZ[in1-1][1];
Y2=XYZ[in2-1][1];
Y3=XYZ[in3-1][1];
Y4=XYZ[in4-1][1];
Y5=XYZ[in5-1][1];
Y6=XYZ[in6-1][1];
Y7=XYZ[in7-1][1];
Y8=XYZ[in8-1][1];

QVC= 08th*(X1+X2+X3+X4+X5+X6+X7+X8+Y1+Y2+Y3+Y4+Y5+Y6+Y7+Y8);

Z1=XYZ[in1-1][2];
Z2=XYZ[in2-1][2];
Z3=XYZ[in3-1][2];
Z4=XYZ[in4-1][2];
Z5=XYZ[in5-1][2];
Z6=XYZ[in6-1][2];
Z7=XYZ[in7-1][2];
Z8=XYZ[in8-1][2];

JACOBI(DETJ, PNQ, PNE, PNT, PNX, PNY, PNZ,
       X1, X2, X3, X4, X5, X6, X7, X8,
       Y1, Y2, Y3, Y4, Y5, Y6, Y7, Y8, Z1, Z2, Z3, Z4, Z5, Z6, Z7, Z8);
```



座標値：
節点番号から1引く

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\dot{Q}(x,y,z)=0$$

$$\dot{Q}(x,y,z)=QVOL\left|x_C+y_C\right|$$

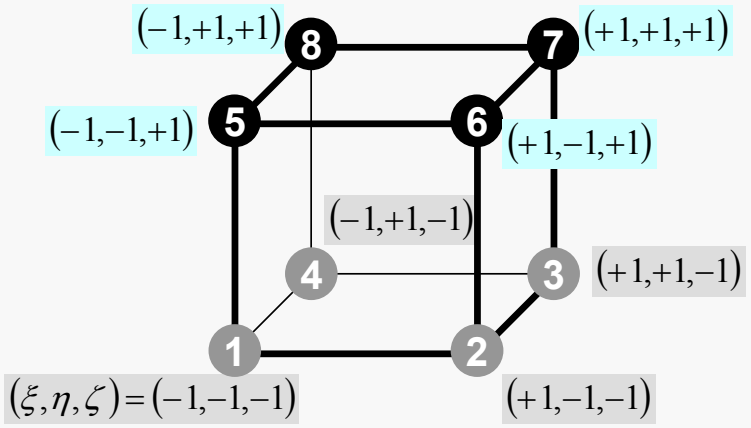
$$QVC=\left|x_C+y_C\right|$$

係数行列：MAT_ASS_MAIN（4/6）

```
      nodLOCAL[0]= in1;
      nodLOCAL[1]= in2;
      nodLOCAL[2]= in3;
      nodLOCAL[3]= in4;
      nodLOCAL[4]= in5;
      nodLOCAL[5]= in6;
      nodLOCAL[6]= in7;
      nodLOCAL[7]= in8;

      X1=XYZ[in1-1][0];
      X2=XYZ[in2-1][0];
      X3=XYZ[in3-1][0];
      X4=XYZ[in4-1][0];
      X5=XYZ[in5-1][0];
      X6=XYZ[in6-1][0];
      X7=XYZ[in7-1][0];
      X8=XYZ[in8-1][0];

      Y1=XYZ[in1-1][1];
      Y2=XYZ[in2-1][1];
      Y3=XYZ[in3-1][1];
      Y4=XYZ[in4-1][1];
      Y5=XYZ[in5-1][1];
      Y6=XYZ[in6-1][1];
      Y7=XYZ[in7-1][1];
      Y8=XYZ[in8-1][1];

      QVC= O8th*(X1+X2+X3+X4+X5+X6+X7+X8+Y1+Y2+Y3+Y4+Y5+Y6+Y7+Y8);

      Z1=XYZ[in1-1][2];
      Z2=XYZ[in2-1][2];
      Z3=XYZ[in3-1][2];
      Z4=XYZ[in4-1][2];
      Z5=XYZ[in5-1][2];
      Z6=XYZ[in6-1][2];
      Z7=XYZ[in7-1][2];
      Z8=XYZ[in8-1][2];

      JACOBI(DETJ, PNQ, PNE, PNT, PNX, PNY, PNZ,
             X1, X2, X3, X4, X5, X6, X7, X8,
             Y1, Y2, Y3, Y4, Y5, Y6, Y7, Y8, Z1, Z2, Z3, Z4, Z5, Z6, Z7, Z8);
```

係数行列：MAT_ASS_MAIN（5/6）

```
/**
   CONSTRUCT the GLOBAL MATRIX
**/

    for(ie=0;ie<8;ie++){
      ip=nodLOCAL[ie];

      for(je=0;je<8;je++){
        jp=nodLOCAL[je];

        kk=-1;
        if( jp != ip ){
          iiS=indexLU[ip-1];
          iiE=indexLU[ip  ];
          for( k=iiS;k<iiE;k++){
            if( itemLU[k] == jp-1 ){
              kk=k;
              break;
            }
          }
        }
```



全体行列の非対角成分

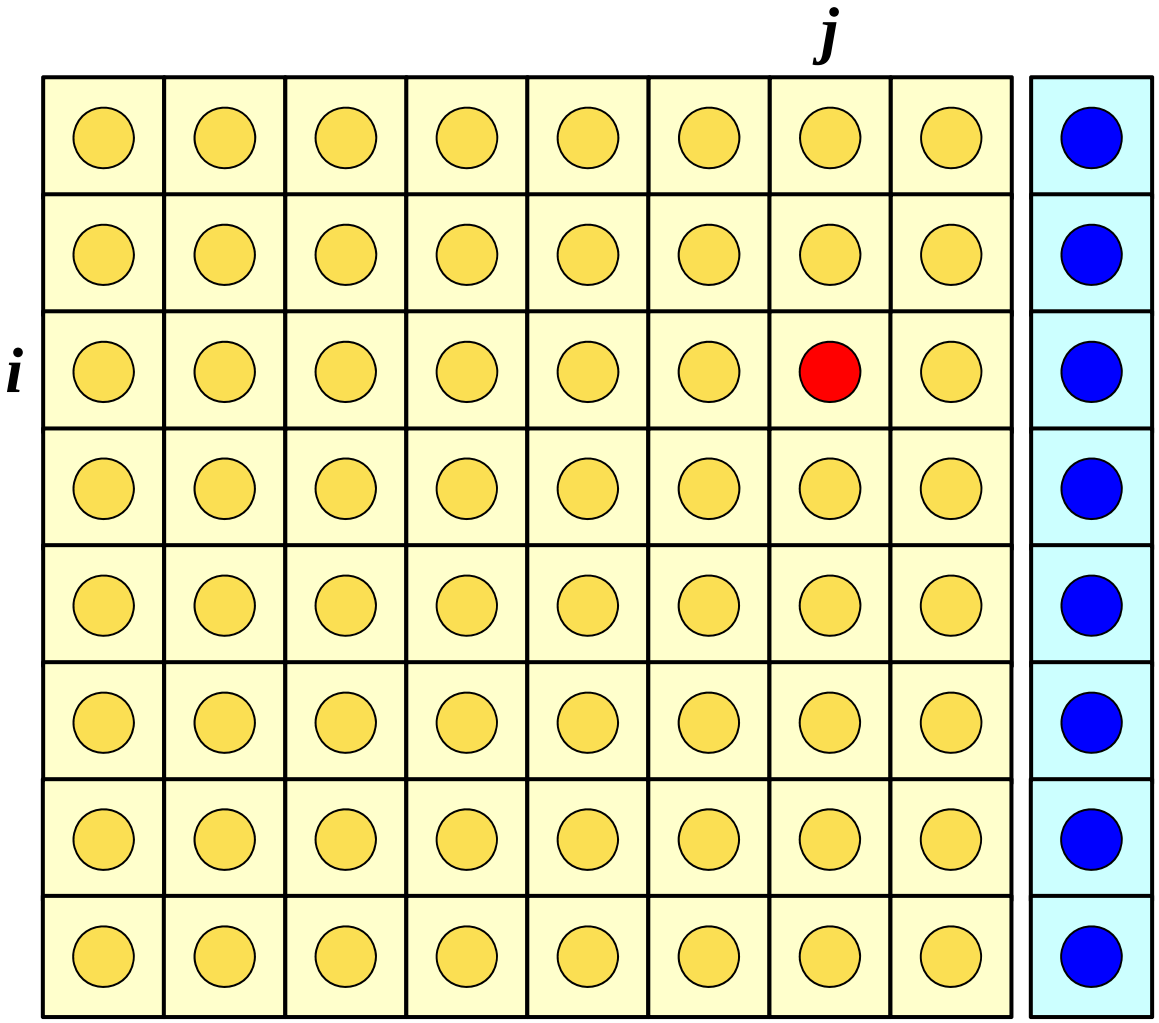
$A_{ip,jp}$

kk：itemLUにおけるアドレス

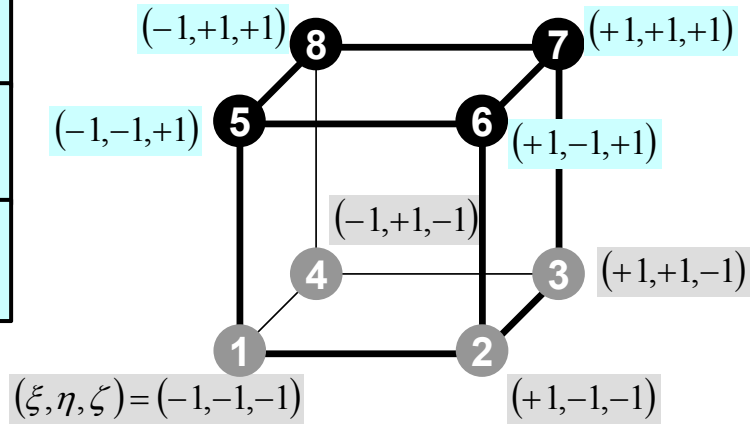
ip= nodLOCAL[ie]
jp= nodLOCAL[je]

1から始まる節点番号

要素マトリクス：8×8行列



$$\lfloor k_{ij} \rfloor \quad (i, j = 1 \ldots 8)$$

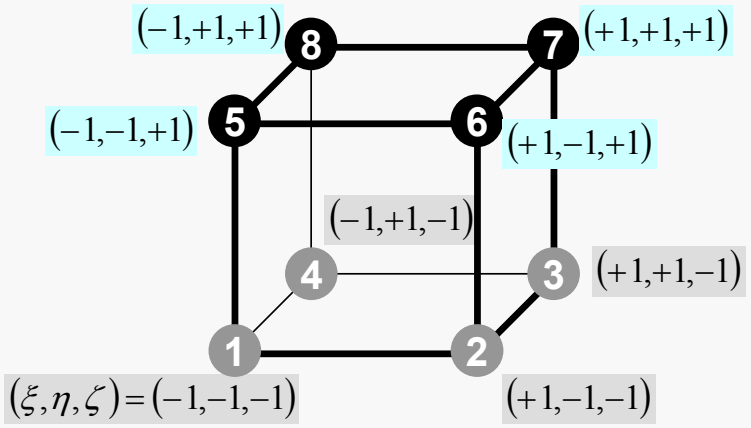


係数行列：MAT_ASS_MAIN（5/6）

```
/**
   CONSTRUCT the GLOBAL MATRIX
**/

    for(ie=0;ie<8;ie++){
      ip=nodLOCAL[ie];

      for(je=0;je<8;je++){
        jp=nodLOCAL[je];

        kk=-1;
        if( jp != ip ){
          iiS=indexLU[ip-1];
          iiE=indexLU[ip  ];
          for( k=iiS;k<iiE;k++){
            if( itemLU[k] == jp-1 ){
              kk=k;
              break;
            }
          }
        }
```

要素マトリクス（i_e~j_e）
全体マトリクス（i_p~j_p）の関係

kk：itemLUにおけるアドレス



係数行列：MAT_ASS_MAIN（6/6）

```
          QV0= 0.e0;
          COEFij= 0.e0;

          for(kpn=0;kpn<2;kpn++){
            for(jpn=0;jpn<2;jpn++){
              for(ipn=0;ipn<2;ipn++){
                coef= fabs(DETJ[ipn][jpn][kpn])*WEI[ipn]*WEI[jpn]*WEI[kpn];

                PNXi= PNX[ipn][jpn][kpn][ie];
                PNYi= PNY[ipn][jpn][kpn][ie];
                PNZi= PNZ[ipn][jpn][kpn][ie];

                PNXj= PNX[ipn][jpn][kpn][je];
                PNYj= PNY[ipn][jpn][kpn][je];
                PNZj= PNZ[ipn][jpn][kpn][je];

                COEFij+= coef*CONDO*(PNXi*PNXj+PNYi*PNYj+PNZi*PNZj);

                SHi= SHAPE[ipn][jpn][kpn][ie];
                QV0+= SHi * QVOL * coef;

              }
            }
          }

          if (jp==ip) {
            D[ip-1]+= COEFij;
            B[ip-1]+= QV0*QVC;
          }
          if (jp != ip) {
            AMAT[kk]+= COE
          }

        }
      }
    }
  }
}
```

$$-\int_{-1}^{+1}\int_{-1}^{+1}\int_{-1}^{+1}\left\{\lambda\frac{\partial N_i}{\partial x}\frac{\partial N_j}{\partial x}+\lambda\frac{\partial N_i}{\partial y}\frac{\partial N_j}{\partial y}+\lambda\frac{\partial N_i}{\partial z}\frac{\partial N_j}{\partial z}\right\}\det|J|\,d\xi d\eta d\zeta$$

係数行列：MAT_ASS_MAIN（6/6）

```
          QV0= 0.e0;
          COEFij= 0.e0;

          for(kpn=0;kpn<2;kpn++){
            for(jpn=0;jpn<2;jpn++){
              for(ipn=0;ipn<2;ipn++){
                coef= fabs(DETJ[ipn][jpn][kpn])*WEI[ipn]*WEI[jpn]*WEI[kpn];

                PNXi= PNX[ipn][jpn][kpn][ie];
                PNYi= PNY[ipn][jpn][kpn][ie];
                PNZi= PNZ[ipn][jpn][kpn][ie];

                PNXj= PNX[ipn][jpn][kpn][je];
                PNYj= PNY[ipn][jpn][kpn][je];
                PNZj= PNZ[ipn][jpn][kpn][je];

                COEFij+= coef*CONDO*(PNXi*PNXj+PNYi*PNYj+PNZi*PNZj);

                SHi= SHAPE[ipn][jpn][kpn][ie];
                QV0+= SHi * QVOL * coef;

              }
            }
          }

          if (jp==ip) {
            D[ip-1]+= COEFij;
            B[ip-1]+= QV0*QVC;
          }
          if (jp != ip) {
            AMAT[kk]+= COE
          }

        }
      }
    }
  }
```

$$I=\int_{-1}^{+1}\int_{-1}^{+1}\int_{-1}^{+1} f(\xi,\eta,\zeta)\,d\xi d\eta d\zeta$$

$$=\sum_{i=1}^{L}\sum_{j=1}^{M}\sum_{k=1}^{N} W_i\cdot W_j\cdot W_k\cdot f(\xi_i,\eta_j,\zeta_k)$$

$$-\int_{-1}^{+1}\int_{-1}^{+1}\int_{-1}^{+1}\left\{\lambda\frac{\partial N_i}{\partial x}\frac{\partial N_j}{\partial x}+\lambda\frac{\partial N_i}{\partial y}\frac{\partial N_j}{\partial y}+\lambda\frac{\partial N_i}{\partial z}\frac{\partial N_j}{\partial z}\right\}\det|J|\,d\xi d\eta d\zeta$$

係数行列：MAT_ASS_MAIN（6/6）

```
        QV0= 0.e0;
        COEFij= 0.e0;

        for(kpn=0;kpn<2;kpn++){
          for(jpn=0;jpn<2;jpn++){
            for(ipn=0;ipn<2;ipn++){
              coef= fabs(DETJ[ipn][jpn][kpn])*WEI[ipn]*WEI[jpn]*WEI[kpn];

              PNXi= PNX[ipn][jpn][kpn][ie];
              PNYi= PNY[ipn][jpn][kpn][ie];
              PNZi= PNZ[ipn][jpn][kpn][ie];

              PNXj= PNX[ipn][jpn][kpn][je];
              PNYj= PNY[ipn][jpn][kpn][je];
              PNZj= PNZ[ipn][jpn][kpn][je];

              COEFij+= coef*CONDO*(PNXi*PNXj+PNYi*PNYj+PNZi*PNZj);

              SHi= SHAPE[ipn][jpn][kpn][ie];
              QV0+= SHi * QVOL * coef;

            }
          }
        }

        if (jp==ip) {
          D[ip-1]+= COEFij;
          B[ip-1]+= QV0*QVC;
        }
        if (jp != ip) {
          AMAT[kk]+= COE
        }

      }
    }
  }
}
```

$$\mathrm{coef} = W_i \cdot W_j \cdot W_k \cdot \det\left|J\left(\xi_i, \eta_j, \zeta_k\right)\right|$$

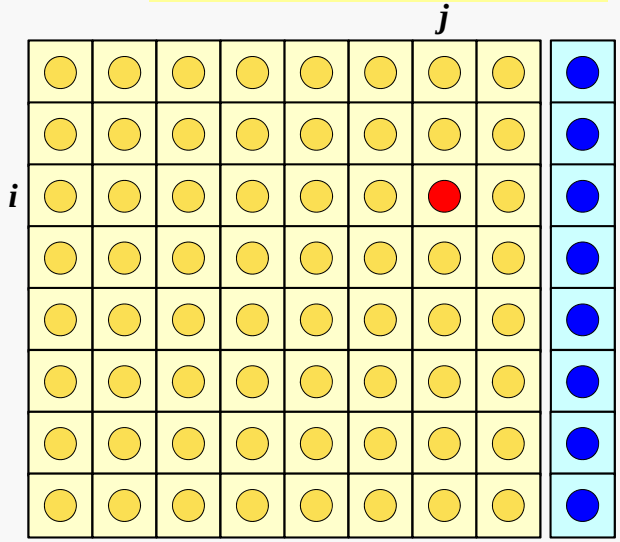
$$I = \int_{-1}^{+1}\int_{-1}^{+1}\int_{-1}^{+1} f(\xi,\eta,\zeta)\, d\xi d\eta d\zeta = \sum_{i=1}^{L}\sum_{j=1}^{M}\sum_{k=1}^{N} W_i \cdot W_j \cdot W_k \cdot f(\xi_i, \eta_j, \zeta_k)$$

$$-\int_{-1}^{+1}\int_{-1}^{+1}\int_{-1}^{+1}\left\{\lambda\frac{\partial N_i}{\partial x}\frac{\partial N_j}{\partial x}+\lambda\frac{\partial N_i}{\partial y}\frac{\partial N_j}{\partial y}+\lambda\frac{\partial N_i}{\partial z}\frac{\partial N_j}{\partial z}\right\}\det\left|J\right| d\xi d\eta d\zeta$$

係数行列：MAT_ASS_MAIN（6/6）

```
          QV0= 0.e0;
          COEFij= 0.e0;

          for(kpn=0;kpn<2;kpn++){
            for(jpn=0;jpn<2;jpn++){
              for(ipn=0;ipn<2;ipn++){
                coef= fabs(DETJ[ipn][jpn][kpn])*WEI[ipn]*WEI[jpn]*WEI[kpn];

                PNXi= PNX[ipn][jpn][kpn][ie];
                PNYi= PNY[ipn][jpn][kpn][ie];
                PNZi= PNZ[ipn][jpn][kpn][ie];

                PNXj= PNX[ipn][jpn][kpn][je];
                PNYj= PNY[ipn][jpn][kpn][je];
                PNZj= PNZ[ipn][jpn][kpn][je];

                COEFij+= coef*CONDO*(PNXi*PNXj+PNYi*PNYj+PNZi*PNZj);

                SHi= SHAPE[ipn][jpn][kpn][ie];
                QV0+= SHi * QVOL * coef;

              }
            }
          }

          if (jp==ip) {
            D[ip-1]+= COEFij;
            B[ip-1]+= QV0*QVC;
          }
          if (jp != ip) {
            AMAT[kk]+= COEFij;
          }

        }
      }
    }
  }
}
```

$$\left[k_{ij}\right] \quad (i,j=1\ldots8)$$



係数行列：MAT_ASS_MAIN（6/6）

```
          QV0= 0.e0;
          COEFij= 0.e0;

          for(kpn=0;kpn<2;kpn++){
            for(jpn=0;jpn<2;jpn++){
              for(ipn=0;ipn<2;ipn++){
                coef= fabs(DETJ[ipn][jpn][kpn])*WEI[ipn]*WEI[jpn]*WEI[kpn];

                PNXi= PNX[ipn][jpn][kpn][ie];
                PNYi= PNY[ipn][jpn][kpn][ie];
                PNZi= PNZ[ipn][jpn][kpn][ie];

                PNXj= PNX[ipn][jpn][kpn][je];
                PNYj= PNY[ipn][jpn][kpn][je];
                PNZj= PNZ[ipn][jpn][kpn][je];

                COEFij+= coef*CONDO*(PNXi*PNXj+PNYi*PNYj+PNZi*PNZj);

                SHi= SHAPE[ipn][jpn][kpn][ie];
                QV0+= SHi * QVOL * coef;

              }
            }
          }

          if (jp==ip) {
            D[ip-1]+= COEFij;
            B[ip-1]+= QV0*QVC;
          }
          if (jp != ip) {
            AMAT[kk]+= COEFij;
          }

        }
      }
    }
  }
```

$$[k]^{(e)}\{\phi\}^{(e)} = \{f\}^{(e)}$$

$$[f]^{(e)} = \int_V \dot{Q}[N]^T dV$$

$$\dot{Q}(x,y,z) = QVOL\left|x_C + y_C\right|$$

$$QVC = \left|x_C + y_C\right|$$

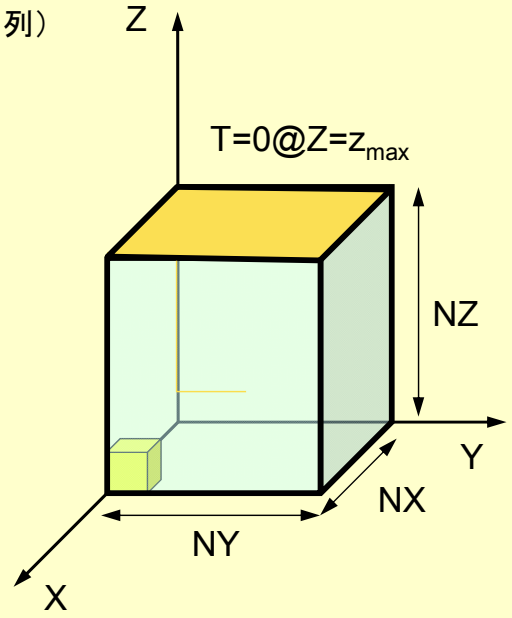
$$QV0 = \int_V QVOL[N]^T dV$$

$$[f]^{(e)} = QV0 \cdot QVC$$

MAT_ASS_BC：全体構成

```
do i= 1, NP    節点ループ
   （ディリクレ）境界条件を設定する節点をマーク（IWKX）
enddo
```

```
do i= 1, NP    節点ループ
  if (IWKX(i,1).eq.1) then   マークされた節点だったら
    対応する右辺ベクトル（B）の成分，対角成分（D）の成分の修正（行・列）
    do k= index(i-1)+1, index(i)
      対応する非零非対角成分（AMAT）の成分の修正（行）
    enddo
  endif
enddo

do i= 1, NP 節点ループ
  do k= index (i-1)+1, index (i)
    if (IWKX(item (k),1).eq.1) then   対応する非零非対角成分の
                                      節点がマークされていたら
      対応する右辺ベクトル，非零非対角成分（AMAT）の成分の修正（列）
    endif
  enddo
enddo
```



境界条件：MAT_ASS_BC（1/2）

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include "pfem_util.h"
#include "allocate.h"
extern FILE *fp_log;
void MAT_ASS_BC()
{
  int i,j,k,in,ib,ib0,icel;
  int in1,in2,in3,in4,in5,in6,in7,in8;
  int iq1,iq2,iq3,iq4,iq5,iq6,iq7,iq8;
  int iS,iE;
  double STRESS,VAL;

  IWKX=(KINT**) allocate_matrix(sizeof(KINT),N,2);
  for(i=0;i<N;i++) for(j=0;j<2;j++) IWKX[i][j]=0;

/**
   Z=Zmax
**/

  for(in=0;in<NP;in++) IWKX[in][0]=0;

  ib0=-1;

  for( ib0=0;ib0<NODGRPtot;ib0++){
    if( strcmp(NODGRP_NAME[ib0].name,"Zmax") == 0 ) break;
  }

  for( ib=NODGRP_INDEX[ib0];ib<NODGRP_INDEX[ib0+1];ib++){
    in=NODGRP_ITEM[ib];
    IWKX[in-1][0]=1;
  }
```

節点グループ名が「Zmax」である節点in（1から始まる）において：

IWKX[in-1][0]= 1

とする

境界条件：MAT_ASS_BC（2/2）

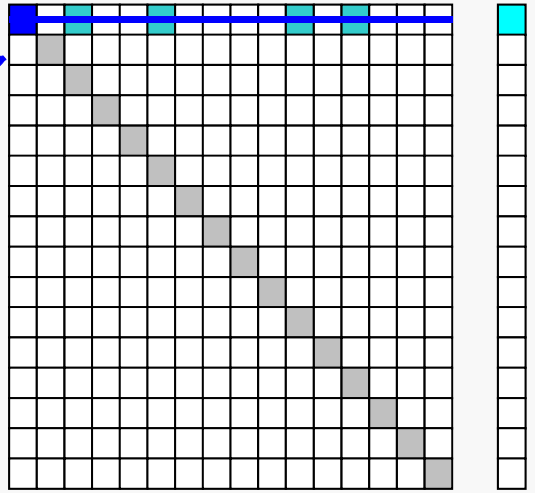
```
 for(in=0;in<NP;in++){
    if( IWKX[in][0] == 1 ){
      B[in]= 0.e0;
      D[in]= 1.e0;
      for(k=indexLU[in];k<indexLU[in+1];k++){
        AMAT[k]= 0.e0;
      }
    }
  }

  for(in=0;in<NP;in++){
    for(k=indexLU[in];k<indexLU[in+1];k++){
      if (IWKX[itemLU[k]][0] == 1 ) {
        AMAT[k]= 0.e0;
      }
    }
  }
}
```

境界条件：MAT_ASS_BC（2/2）

```
 for(in=0;in<NP;in++){
    if( IWKX[in][0] == 1 ){
      B[in]= 0.e0;
      D[in]= 1.e0;
      for(k=indexLU[in];k<indexLU[in+1];k++){
        AMAT[k]= 0.e0;
      }
    }
  }

  for(in=0;in<NP;in++){
    for(k=indexLU[in];k<indexLU[in+1];k++){
      if (IWKX[itemLU[k]][0] == 1 ) {
        AMAT[k]= 0.e0;
      }
    }
  }
}
```

IWKX[in-1][0]=1となる節点に対して
対角成分=1，右辺=0，非零対角成分=0

ゼロクリア

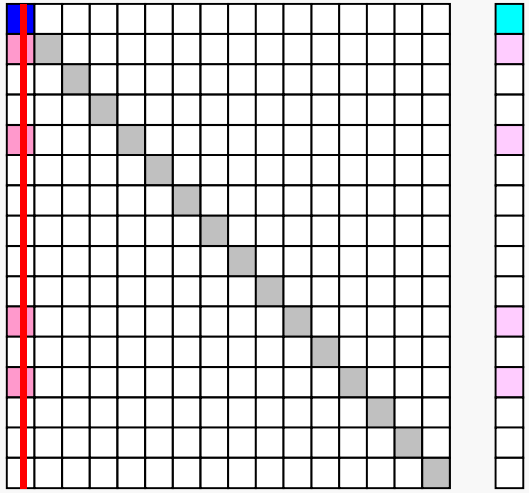


ここでやっていることも1CPUの時と全く変わらない

境界条件：MAT_ASS_BC（2/2）

```
 for(in=0;in<NP;in++){
    if( IWKX[in][0] == 1 ){
      B[in]= 0.e0;
      D[in]= 1.e0;
      for(k=indexLU[in];k<indexLU[in+1];k++){
        AMAT[k]= 0.e0;
      }
    }
  }

  for(in=0;in<NP;in++){
    for(k=indexLU[in];k<indexLU[in+1];k++){
      if (IWKX[itemLU[k]][0] == 1 ) {
        AMAT[k]= 0.e0;
      }
    }
  }
}
```

IWKX[in-1][0]=1となる節点を非零非対角成分として有している節点に対して，右辺へ移項，当該非零非対角成分=0

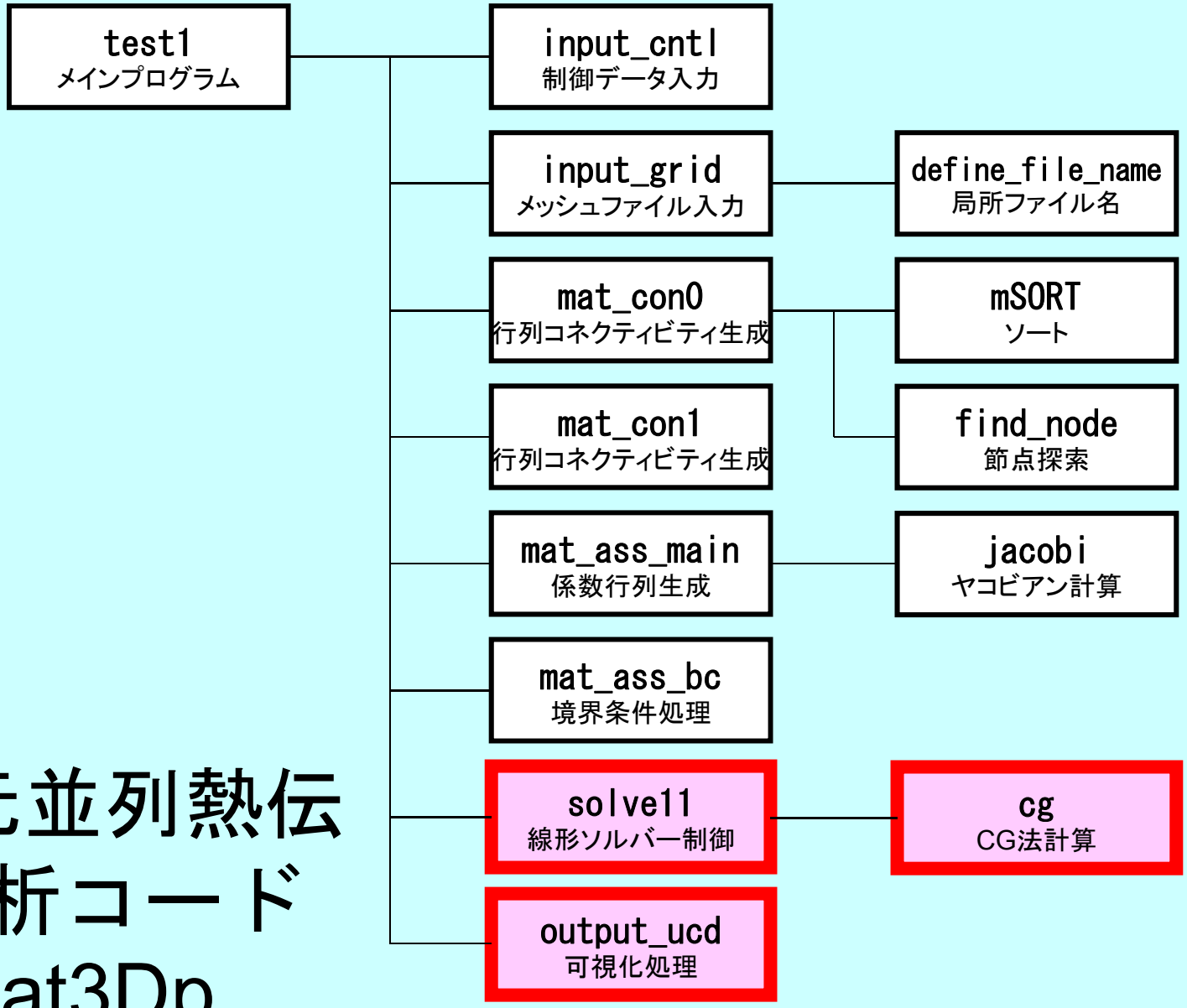


消去，ゼロクリア

ここでやっていることも1CPUの時と全く変わらない

並列有限要素法の処理：プログラム

- 初期化
  - 制御変数読み込み
  - 座標読み込み⇒要素生成（N:節点数，NE：要素数）
  - 配列初期化（全体マトリクス，要素マトリクス）
  - 要素⇒全体マトリクスマッピング（Index，Item）
- マトリクス生成
  - 要素単位の処理（do icel= 1, NE）
    - 要素マトリクス計算
    - 全体マトリクスへの重ね合わせ
  - 境界条件の処理
- **連立一次方程式**
  - **共役勾配法（CG）**



三次元並列熱伝導解析コード heat3Dp

全体処理

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
FILE* fp_log;
#define GLOBAL_VALUE_DEFINE
#include "pfem_util.h"
extern void PFEM_INIT(int,char**);
extern void INPUT_CNTL();
extern void INPUT_GRID();
extern void MAT_CON0();
extern void MAT_CON1();
extern void MAT_ASS_MAIN();
extern void MAT_ASS_BC();
extern void SOLVE11();
extern void OUTPUT_UCD();
extern void PFEM_FINALIZE();
int main(int argc,char* argv[])
{
  double START_TIME,END_TIME;

  PFEM_INIT(argc,argv);

  INPUT_CNTL();
  INPUT_GRID();

  MAT_CON0();
  MAT_CON1();

  MAT_ASS_MAIN();
  MAT_ASS_BC()  ;

  SOLVE11();

  OUTPUT_UCD()    ;
  PFEM_FINALIZE() ;
}
```

SOLVE11

```
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <math.h>
#include "pfem_util.h"
#include "allocate.h"
extern FILE *fp_log;
extern void CG();
void SOLVE11()
{
  int i,j,k,ii,L;

  int  ERROR, ICFLAG=0;
  CHAR_LENGTH BUF;

/**
   +------------+
   | PARAMETERs |
   +------------+
**/
  ITER      = pfemIarray[0];        CG法の最大反復回数
  RESID     = pfemRarray[0];        CG法の収束判定値

/**
   +------------------+
   | ITERATIVE solver |
   +------------------+
**/
   CG  ( N, NP, NPLU, D, AMAT, indexLU, itemLU,
         B, X,  RESID, ITER, &ERROR, my_rank,
         NEIBPETOT,NEIBPE,IMPORT_INDEX,IMPORT_ITEM,
         EXPORT_INDEX,EXPORT_ITEM);}
```

前処理付き共役勾配法
Preconditioned Conjugate Gradient Method （CG）

```
Compute r(0)= b-[A]x(0)
for i= 1, 2, …
    solve [M]z(i-1)= r(i-1)
    ρi-1= r(i-1) z(i-1)
    if i=1
      p(1)= z(0)
     else
      βi-1= ρi-1/ρi-2
      p(i)= z(i-1) + βi-1 p(i-1)
    endif
    q(i)= [A]p(i)
    αi  = ρi-1/p(i)q(i)
    x(i)= x(i-1) + αip(i)
    r(i)= r(i-1) - αiq(i)
    check convergence |r|
end
```

前処理：対角スケーリング

対角スケーリング，点ヤコビ前処理

- 前処理行列として，もとの行列の対角成分のみを取り出した行列を前処理行列 [M] とする。
  - 対角スケーリング，点ヤコビ（point-Jacobi）前処理

$$[M]=\begin{bmatrix} D_1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & D_2 & & 0 & 0 \\ \cdots & & \cdots & & \cdots \\ 0 & 0 & & D_{N-1} & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & D_N \end{bmatrix}$$

- `solve [M]z(i-1)= r(i-1)`という場合に逆行列を簡単に求めることができる。

CG法（1/6）

```
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include "mpi.h"
#include "precision.h"
#include "allocate.h "

extern FILE *fp_log;

extern void SOLVER_SEND_RECV ();

/***
    CG solves the linear system Ax = b using the Conjugate Gradient
    iterative method with the following preconditioners
***/

void  CG  (
           KINT N,KINT NP,KINT NPLU, KREAL D[],
           KREAL AMAT[],KINT indexLU[], KINT itemLU[],
           KREAL B[],KREAL X[],KREAL RESID,KINT ITER, KINT *ERROR,int my_rank,
           int NEIBPETOT,int NEIBPE[],
           int IMPORT_INDEX[], int IMPORT_ITEM[],
           int EXPORT_INDEX[], int EXPORT_ITEM[])
{
  int i,j,k;
  int ieL,isL,ieU,isU;
  double WVAL;
  double BNRM20,BNRM2,DNRM20,DNRM2;
  double S1_TIME,E1_TIME;
  double ALPHA,BETA;
  double C1,C10,RHO,RHO0,RHO1;
  int    iterPRE;
  KREAL *WS,*WR;                  送信バッファ，受信バッファ
  KREAL **WW;

  KINT R=0,Z=1,Q=1,P=2,DD=3;
  KINT MAXIT;
  KREAL TOL;

  double COMPtime,COMMtime,R1;
  double START_TIME,END_TIME;
```

CG法（2/6）

```
  ERROR= 0;

  WW=(KREAL**) allocate_matrix(sizeof(KREAL),4,NP);
  WS=(KREAL* ) allocate_vector(sizeof(KREAL),  NP);
  WR=(KREAL* ) allocate_vector(sizeof(KREAL),  NP);

  MAXIT  = ITER;
  TOL    = RESID;

  for(i=0;i<NP;i++) X [i]=0.0;
  for(i=0;i<NP;i++) for(j=0;j<4;j++) WW[j][i]=0.0;
  for(i=0;i<NP;i++) WS[i]=0.0;
  for(i=0;i<NP;i++) WR[i]=0.0;

/**
   +----------------------+
   | {r0}= {b} - [A]{xini} |
   +----------------------+
**/

  SOLVER_SEND_RECV
    ( NP, NEIBPETOT, NEIBPE, IMPORT_INDEX, IMPORT_ITEM,
      EXPORT_INDEX, EXPORT_ITEM, WS, WR, X , my_rank);

  for(j=0;j<N;j++){
    WW[DD][j]= 1.0/D[j];
    WVAL= B[j] - D[j]*X[j];

    for( k=indexLU[j];k<indexLU[j+1];k++){
      i= itemLU[k];
      WVAL+=  -AMAT[k]*X[i];
    }
    WW[R][j]= WVAL;
  }

  BNRM20= 0.e0;
  for(i=0;i<N;i++){
    BNRM20+= B[i]*B[i];}

  MPI_Allreduce (&BNRM20, &BNRM2, 1, MPI_DOUBLE,MPI_SUM, MPI_COMM_WORLD);
```

Compute $r^{(0)}= b-[A]x^{(0)}$
for i= 1, 2, …
- solve $[M]z^{(i-1)}= r^{(i-1)}$
- $\rho_{i-1}= r^{(i-1)}\ z^{(i-1)}$
- if i=1
  - $p^{(1)}= z^{(0)}$
- else
  - $\beta_{i-1}= \rho_{i-1}/\rho_{i-2}$
  - $p^{(i)}= z^{(i-1)} + \beta_{i-1}\ p^{(i-1)}$
- endif
- $q^{(i)}= [A]p^{(i)}$
- $\alpha_i\ = \rho_{i-1}/p^{(i)}q^{(i)}$
- $x^{(i)}= x^{(i-1)} + \alpha_i p^{(i)}$
- $r^{(i)}= r^{(i-1)} - \alpha_i q^{(i)}$
- check convergence |r|

end

SOLVER_SEND_RECV (1/2)

```
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include "mpi.h"
#include "precision.h"
#include "allocate.h"
static MPI_Status  *sta1,*sta2;
static MPI_Request *req1,*req2;
static KINT NFLAG=0;
extern FILE *fp_log;
void SOLVER_SEND_RECV( int N, int NEIBPETOT,
        int NEIBPE[], int IMPORT_INDEX[], int IMPORT_ITEM[],
        int EXPORT_INDEX[], int EXPORT_ITEM[],
        KREAL WS[], KREAL WR[], KREAL X[], int my_rank)
{
        int  ii,k,neib,istart,inum;
/***
        INIT.
***/
        if( NFLAG == 0 ){
                sta1=(MPI_Status*)allocate_vector(sizeof(MPI_Status),NEIBPETOT);
                sta2=(MPI_Status*)allocate_vector(sizeof(MPI_Status),NEIBPETOT);
                req1=(MPI_Request*)allocate_vector(sizeof(MPI_Request),NEIBPETOT);
                req2=(MPI_Request*)allocate_vector(sizeof(MPI_Request),NEIBPETOT);
                NFLAG=1;}
/***
        SEND
***/

 for( neib=1;neib<=NEIBPETOT;neib++){
    istart=EXPORT_INDEX[neib-1];
    inum  =EXPORT_INDEX[neib]-istart;
    for( k=istart;k<istart+inum;k++){
      ii= EXPORT_ITEM[k];
      WS[k]= X[ii-1];
    }

    MPI_Isend(&WS[istart],inum,MPI_DOUBLE,
              NEIBPE[neib-1],0,MPI_COMM_WORLD,&req1[neib-1]);
 }
```

SOLVER_SEND_RECV （2/2）

```
/***
        RECEIVE
***/

 for( neib=1;neib<=NEIBPETOT;neib++){
    istart=IMPORT_INDEX[neib-1];
    inum  =IMPORT_INDEX[neib]-istart;
    MPI_Irecv(&WR[istart],inum,MPI_DOUBLE,
              NEIBPE[neib-1],0,MPI_COMM_WORLD,&req2[neib-1]);
  }

  MPI_Waitall (NEIBPETOT, req2, sta2);

  for( neib=1;neib<=NEIBPETOT;neib++){
    istart=IMPORT_INDEX[neib-1];
    inum  =IMPORT_INDEX[neib]-istart;
    for( k=istart;k<istart+inum;k++){
      ii   = IMPORT_ITEM[k];
      X[ii-1]= WR[k];
    }
  }

  MPI_Waitall (NEIBPETOT, req1, sta1);

}
```

CG法（3/6）

```
 for( ITER=1;ITER<= MAXIT;ITER++){

/**
   +-----------------+
   | {z}= [Minv]{r}  |
   +-----------------+
**/
    for(i=0;i<N;i++){
      WW[Z][i]= WW[DD][i]*WW[R][i];
    }

/**
   +---------------+
   | {RHO}= {r}{z} |
   +---------------+
**/
    RHO0= 0.e0;

    for(i=0;i<N;i++){
      RHO0+= WW[R][i]*WW[Z][i];
    }
    MPI_Allreduce (&RHO0, &RHO, 1, MPI_DOUBLE,MPI_SUM,
                   MPI_COMM_WORLD);

/**
   +-----------------------------+
   | {p} = {z} if      ITER=1    |
   | BETA= RHO / RHO1  otherwise |
   +-----------------------------+
**/
    if( ITER == 1 ){
      for(i=0;i<N;i++){
        WW[P][i]=WW[Z][i];
      }
    }else{
      BETA= RHO / RHO1;
      for(i=0;i<N;i++){
        WW[P][i]=WW[Z][i] + BETA*WW[P][i];
      }
    }
```

Compute $r^{(0)}= b-[A]x^{(0)}$
for i= 1, 2, …
  solve $[M]z^{(i-1)}= r^{(i-1)}$
  $\rho_{i-1}= r^{(i-1)}\ z^{(i-1)}$
  if i=1
    $p^{(1)}= z^{(0)}$
  else
    $\beta_{i-1}= \rho_{i-1}/\rho_{i-2}$
    $p^{(i)}= z^{(i-1)} + \beta_{i-1}\ p^{(i-1)}$
  endif
  $q^{(i)}= [A]p^{(i)}$
  $\alpha_i = \rho_{i-1}/p^{(i)}q^{(i)}$
  $x^{(i)}= x^{(i-1)} + \alpha_i p^{(i)}$
  $r^{(i)}= r^{(i-1)} - \alpha_i q^{(i)}$
  check convergence |r|
end

CG法（4/6）

```
/**
   +-------------+
   | {q}= [A]{p} |
   +-------------+
**/

    SOLVER_SEND_RECV
      ( NP, NEIBPETOT, NEIBPE, IMPORT_INDEX, IMPORT_ITEM,
        EXPORT_INDEX, EXPORT_ITEM, WS, WR, WW[P], my_rank);

    for( j=0;j<N;j++){
      WVAL= D[j] * WW[P][j];
      for(k=indexLU[j];k<indexLU[j+1];k++){
        i=itemLU[k];
        WVAL+= AMAT[k] * WW[P][i];
      }
      WW[Q][j]=WVAL;
    }

/**
   +---------------------+
   | ALPHA= RHO / {p}{q} |
   +---------------------+
**/
    C10= 0.e0;
    for(i=0;i<N;i++){
      C10+=WW[P][i]*WW[Q][i];
    }

    MPI_Allreduce (&C10,&C1, 1, MPI_DOUBLE,MPI_SUM,
                   MPI_COMM_WORLD);

    ALPHA= RHO / C1;
```

Compute $r^{(0)}= b-[A]x^{(0)}$
for i= 1, 2, …
  solve $[M]z^{(i-1)}= r^{(i-1)}$
  $\rho_{i-1}= r^{(i-1)}\ z^{(i-1)}$
  if i=1
    $p^{(1)}= z^{(0)}$
  else
    $\beta_{i-1}= \rho_{i-1}/\rho_{i-2}$
    $p^{(i)}= z^{(i-1)} + \beta_{i-1}\ p^{(i-1)}$
  endif
  $q^{(i)}= [A]p^{(i)}$
  $\alpha_i = \rho_{i-1}/p^{(i)}q^{(i)}$
  $x^{(i)}= x^{(i-1)} + \alpha_i p^{(i)}$
  $r^{(i)}= r^{(i-1)} - \alpha_i q^{(i)}$
  check convergence |r|
end

CG法（5/6）

```
/**
   +----------------------+
   | {x}= {x} + ALPHA*{p} |
   | {r}= {r} - ALPHA*{q} |
   +----------------------+
**/
    for(i=0;i<N;i++){
      X [i]    +=  ALPHA *WW[P][i];
      WW[R][i]+= -ALPHA *WW[Q][i];
    }

    DNRM20= 0.e0;
    for(i=0;i<N;i++){
      DNRM20+=WW[R][i]*WW[R][i];
    }
    MPI_Allreduce (&DNRM20,&DNRM2, 1, MPI_DOUBLE,MPI_SUM,
                   MPI_COMM_WORLD);

    RESID= sqrt(DNRM2/BNRM2);

    if ( RESID <= TOL   ) break;
    if ( ITER  == MAXIT ) *ERROR= -300;

    RHO1 = RHO ;
}


  SOLVER_SEND_RECV
    ( NP, NEIBPETOT, NEIBPE, IMPORT_INDEX, IMPORT_ITEM,
      EXPORT_INDEX, EXPORT_ITEM, WS, WR, X, my_rank);

  free ( (KREAL**)WW);
  deallocate_vector ( (KREAL**)WR);
  deallocate_vector( (KREAL**)WS);
}
```

Compute $r^{(0)}= b-[A]x^{(0)}$

for i= 1, 2, …

- solve $[M]z^{(i-1)}= r^{(i-1)}$
- $\rho_{i-1}= r^{(i-1)}\ z^{(i-1)}$
- if i=1
  - $p^{(1)}= z^{(0)}$
- else
  - $\beta_{i-1}= \rho_{i-1}/\rho_{i-2}$
  - $p^{(i)}= z^{(i-1)} + \beta_{i-1}\ p^{(i-1)}$
- endif
- $q^{(i)}= [A]p^{(i)}$
- $\alpha_i\ = \rho_{i-1}/p^{(i)}q^{(i)}$
- **$x^{(i)}= x^{(i-1)} + \alpha_i p^{(i)}$**
- **$r^{(i)}= r^{(i-1)} - \alpha_i q^{(i)}$**
- **check convergence |r|**

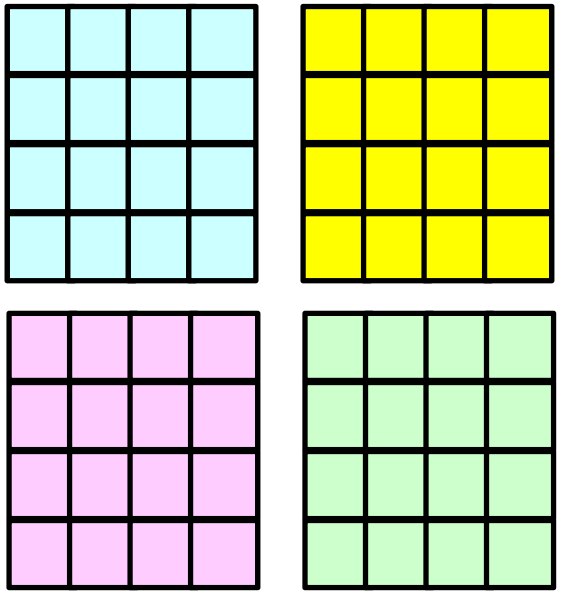
end

CG法（6/6）

```
/**
    +----------------------+
    | {x}= {x} + ALPHA*{p} |
    | {r}= {r} - ALPHA*{q} |
    +----------------------+
**/
    for(i=0;i<N;i++){
      X [i]    +=  ALPHA *WW[P][i];
      WW[R][i]+= -ALPHA *WW[Q][i];
    }

    DNRM20= 0.e0;
    for(i=0;i<N;i++){
      DNRM20+=WW[R][i]*WW[R][i];
    }
    MPI_Allreduce (&DNRM20,&DNRM2, 1, MPI_DOUBLE,MPI_SUM,
                   MPI_COMM_WORLD);

    RESID= sqrt(DNRM2/BNRM2);

    if ( RESID <= TOL    ) break;
    if ( ITER  == MAXIT ) *ERROR= -300;

    RHO1 = RHO ;
}


  SOLVER_SEND_RECV                                          外点に最新の値（温度）を入れる
    ( NP, NEIBPETOT, NEIBPE, IMPORT_INDEX, IMPORT_ITEM,
      EXPORT_INDEX, EXPORT_ITEM, WS, WR, X, my_rank);

  free ( (KREAL**)WW);
  deallocate_vector ( (KREAL**)WR);
  deallocate_vector( (KREAL**)WS);
}
```

OUTPUT_UCD

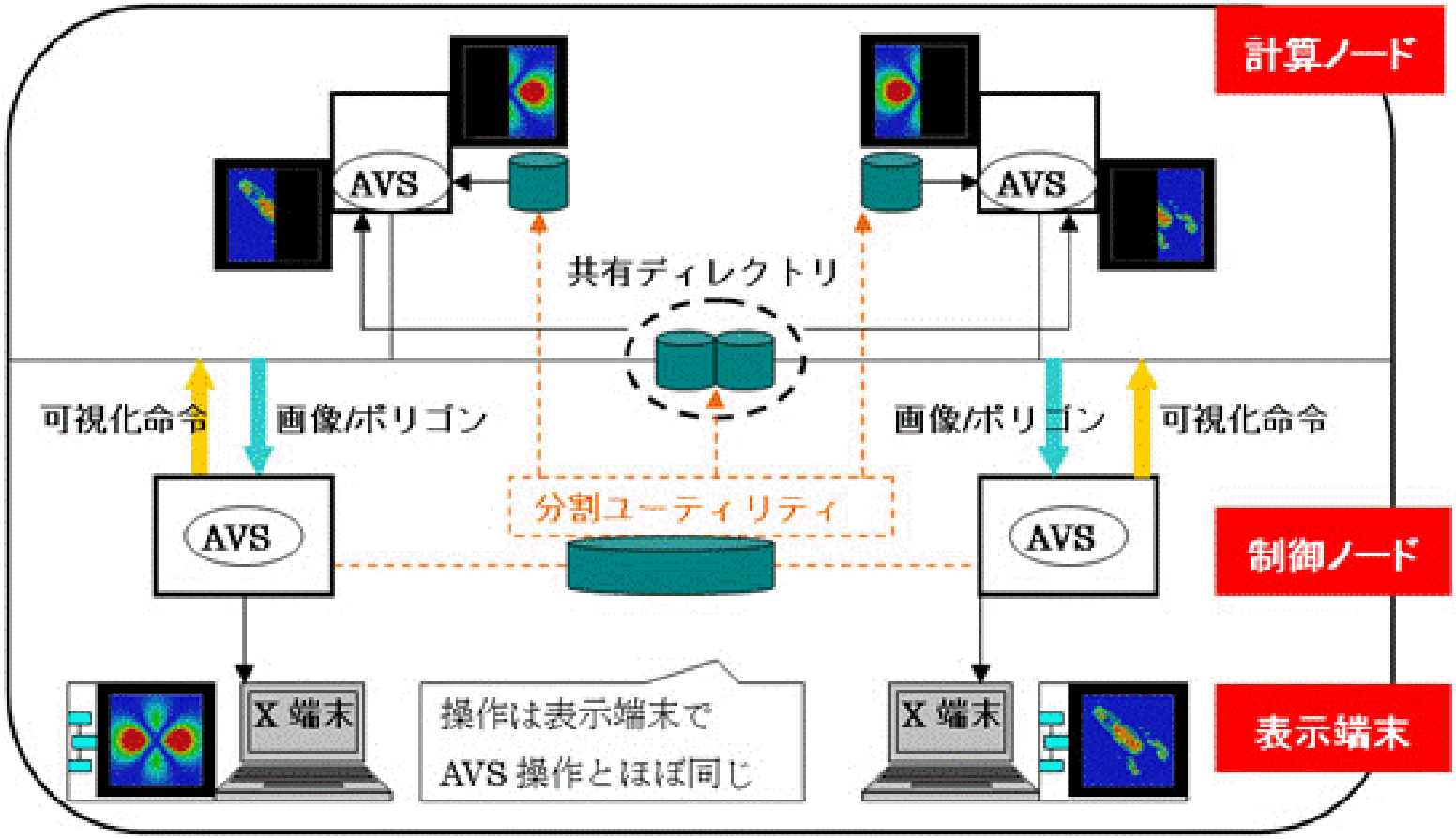
- 各領域からintELEM_listに所属する要素の情報を集める
  - intELEM_list: 各節点の属する領域番号のうち最も若い番号の領域に所属する・・・と見なす
- MPI_Allgathervを使って以下の情報を一箇所に集める
  - 節点:節点座標，温度
  - 要素:要素コネクティビティ(要素を構成する節点)
- 節点の情報は一部重複
- 問題規模が大きくなると困難
  - あまり賢いやり方ではない
  - 並列可視化



AVS/Express PCE Parallel Cluster Edition

- http://www.cybernet.co.jp/avs/products/pce/
- AVS/Express PCEでは，クラスタ化された複数のLinuxマシンで，各計算ノードが持つ部分領域のみを可視化し，最終的な可視化結果のみ制御ノード上で表示するという構成になっている。
- 並列計算の結果，出力される大規模データを可視化する場合でも，高い精度を保ったまま，可視化処理を実現することが可能。
- 並列計算機上で対話処理可能
  - Windowsより制御可能

AVS/Express PCE Parallel Cluster Edition

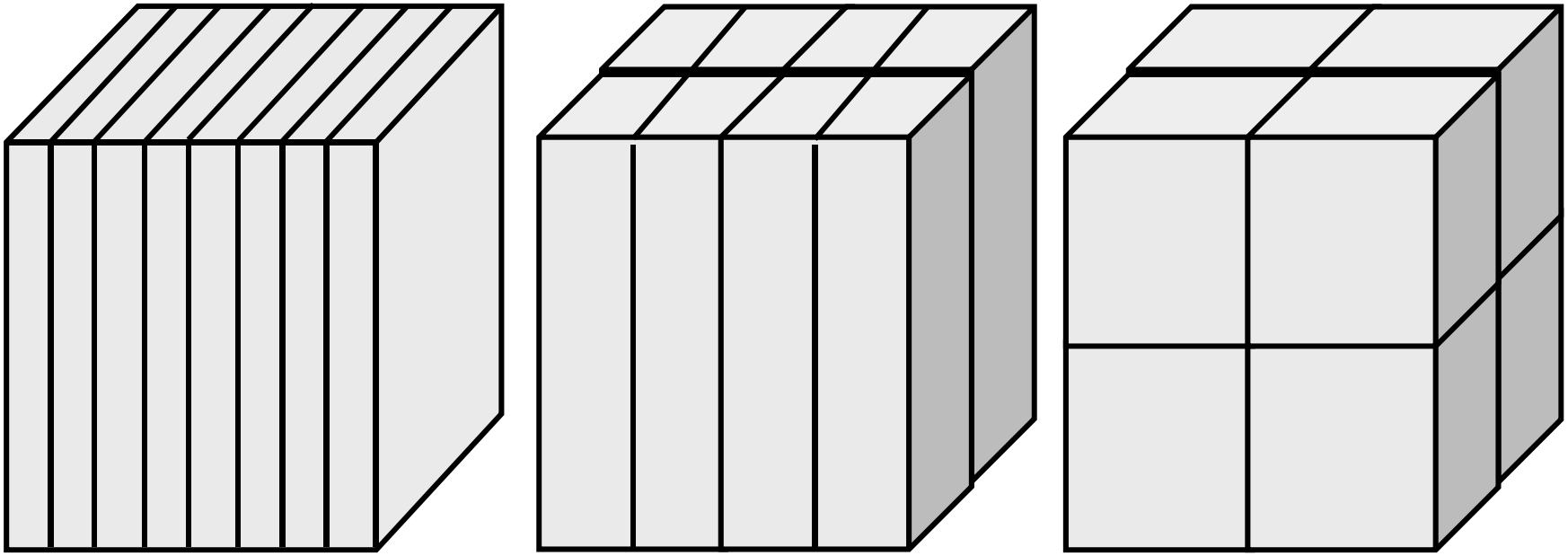


課題(1/2)

- 自分で問題設定を行い，「sol」の挙動を分析してみよ
- 例
  - Strong Scaling
    - 問題サイズを固定，PE数を変化させて時間(全体，各部分)を測定。
  - Weak Scaling
    - PEあたりの問題サイズを固定，1反復あたりの計算時間を求める。
  - 考慮すべき項目
    - 問題サイズ
    - 領域分割手法(RCB，K-METIS，P-METIS，1D～3D)の影響。
  - メッシュ生成，領域分割におけるFX10の性能低い
    - 128^3くらいが限界(領域分割に15分以上かかる)
- 「*.inp」の出力に時間がかかる場合がある。
  - OUTPUT_UCDの呼び出しのコメントアウト
  - src，part

1D～3D分割

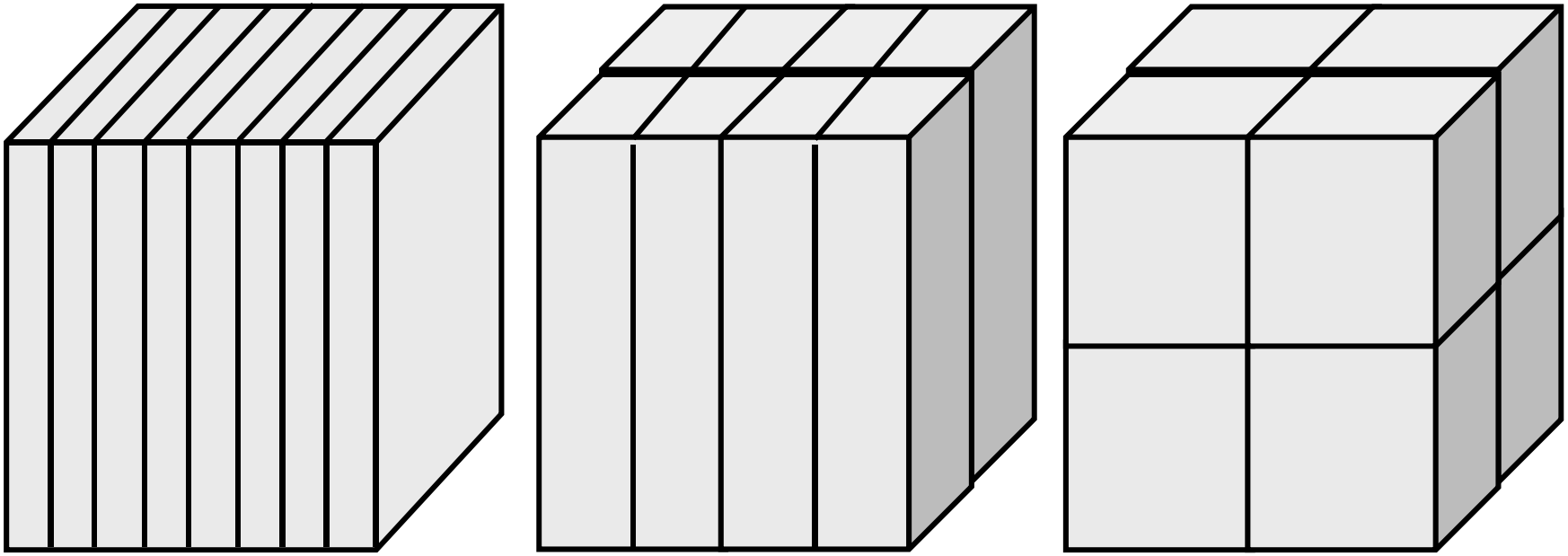
どの方法が良いか考えて見よ



1D型　2D型　3D型

1D～3D分割

通信量の総和（各辺4N，8領域とする）



1D型　　2D型　　3D型

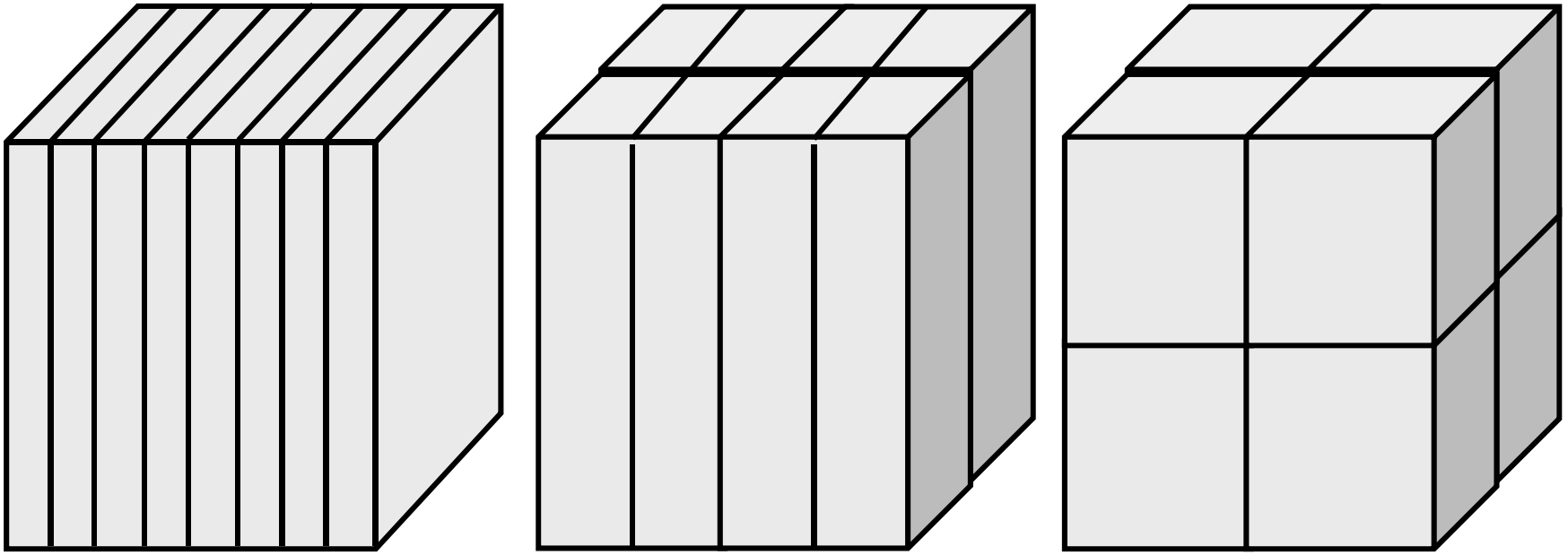
16 N^2 x 7 = 112 N^2

16 N^2 x 4 = 64 N^2

16 N^2 x 3 = 48 N^2

1D～3D分割

mesh.inp



1D型

```
64  64  64
 8   1   1
pcube
```

2D型

```
64  64  64
 4   2   1
pcube
```

3D型

```
64  64  64
 2   2   2
pcube
```

課題(2/2)

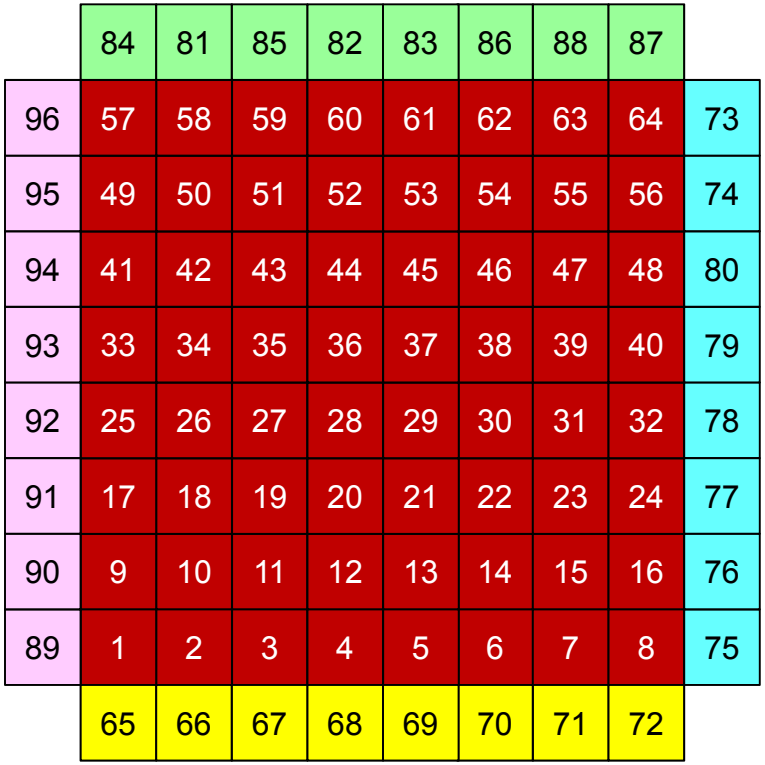
- 領域間通信(solver_SR)の性能改善ができないかどうか考えてみよ。
  - Recv. Bufferへのコピーを効率的に実施できないか?

```
for (neib=0; neib<NeibPETot; neib++){
   tag= 0;
   iS_i= import_index[neib];
   iE_i= import_index[neib+1];
   BUFlength_i= iE_i - iS_i

   ierr= MPI_Irecv
         (&RecvBuf[iS_i], BUFlength_i, MPI_DOUBLE, NeibPE[neib], 0,
          MPI_COMM_WORLD, &ReqRecv[neib])
}

MPI_Waitall(NeibPETot, ReqRecv, StatRecv);

for (neib=0; neib<NeibPETot;neib++){
    for (k=import_index[neib];k<import_index[neib+1];k++){
       kk= import_item[k];
       VAL[kk]= RecvBuf[k];
    }
}
```

SEND/RECV (Original)

```
sta1=(MPI_Status*)allocate_vector(sizeof(MPI_Status),NEIBPETOT);
sta2=(MPI_Status*)allocate_vector(sizeof(MPI_Status),NEIBPETOT);
req1=(MPI_Request*)allocate_vector(sizeof(MPI_Request),NEIBPETOT);
req2=(MPI_Request*)allocate_vector(sizeof(MPI_Request),NEIBPETOT);

for( neib=1;neib<=NEIBPETOT;neib++){
      istart=EXPORT_INDEX[neib-1];
      inum  =EXPORT_INDEX[neib]-istart;
      for( k=istart;k<istart+inum;k++){
                ii= EXPORT_ITEM[k];
               WS[k]= X[ii-1];}

      MPI_Isend(&WS[istart],inum,MPI_DOUBLE,
          NEIBPE[neib-1],0,MPI_COMM_WORLD,&req1[neib-1]);}


for( neib=1;neib<=NEIBPETOT;neib++){
      istart=IMPORT_INDEX[neib-1];
      inum  =IMPORT_INDEX[neib]-istart;
      MPI_Irecv(&WR[istart],inum,MPI_DOUBLE,
          NEIBPE[neib-1],0,MPI_COMM_WORLD,&req2[neib-1]);}

MPI_Waitall (NEIBPETOT, req2, sta2);

for( neib=1;neib<=NEIBPETOT;neib++){
      istart=IMPORT_INDEX[neib-1];
      inum  =IMPORT_INDEX[neib]-istart;
      for( k=istart;k<istart+inum;k++){
                ii   = IMPORT_ITEM[k];
               X[ii-1]= WR[k];}
}


MPI_Waitall (NEIBPETOT, req1, sta1);
```

If numbering of external nodes is continuous in each neighboring process ...



SEND/RECV (NEW:1)

```
sta1=(MPI_Status*)allocate_vector(sizeof(MPI_Status),2*NEIBPETOT);
req1=(MPI_Request*)allocate_vector(sizeof(MPI_Request),2*NEIBPETOT);

for( neib=1;neib<=NEIBPETOT;neib++){
      istart=EXPORT_INDEX[neib-1];
      inum  =EXPORT_INDEX[neib]-istart;
      for( k=istart;k<istart+inum;k++){
                ii= EXPORT_ITEM[k];
               WS[k]= X[ii-1];}

      MPI_Isend(&WS[istart],inum,MPI_DOUBLE,
         NEIBPE[neib-1],0,MPI_COMM_WORLD,&req1[neib-1]);}


for( neib=1;neib<=NEIBPETOT;neib++){
      istart=IMPORT_INDEX[neib-1];
      inum  =NOD_IMPORT[IMPORT_INDEX[neib-1]];
      MPI_Irecv(&X[istart],inum,MPI_DOUBLE,
         NEIBPE[neib-1],0,MPI_COMM_WORLD,&req2[neib-1]);}


MPI_Waitall (2*NEIBPETOT, req1, sta1);
```

SEND/RECV (NEW:2), N0: int. node

```
sta1=(MPI_Status*)allocate_vector(sizeof(MPI_Status),2*NEIBPETOT);
req1=(MPI_Request*)allocate_vector(sizeof(MPI_Request),2*NEIBPETOT);

for( neib=1;neib<=NEIBPETOT;neib++){
      istart=EXPORT_INDEX[neib-1];
      inum  =EXPORT_INDEX[neib]-istart;
      for( k=istart;k<istart+inum;k++){
                ii= EXPORT_ITEM[k];
               WS[k]= X[ii-1];}

      MPI_Isend(&WS[istart],inum,MPI_DOUBLE,
         NEIBPE[neib-1],0,MPI_COMM_WORLD,&req1[neib-1]);}


for( neib=1;neib<=NEIBPETOT;neib++){
      istart=IMPORT_INDEX[neib-1];
      inum  =IMPORT_INDEX[neib-1] + N0;
      MPI_Irecv(&X[istart],inum,MPI_DOUBLE,
         NEIBPE[neib-1],0,MPI_COMM_WORLD,&req2[neib-1]);}


MPI_Waitall (2*NEIBPETOT, req1, sta1);
```

N0: 内点総数

NEW2に基づく例

go.shの「sol」を「sol0」に変えて実行してみよ

```
>$ cd ~/pFEM/pfem3d/src0
>$ make
>$ ls ../run/sol0
     sol0
```

計算例(通信最適化済)@東大 Strong Scaling

- 192×192×128節点(4,718,592節点，4,633,087要素)
- 16～192コア
- Solver計算時間

core #	sec. (speed-up)
16（4x2x2）	16.6（16.0）
32（4x4x2）	8.69（30.5）
64（4x4x4）	4.55（59.6）
96（6x4x4）	3.54（74.7）
128（8x4x4）	2.69（98.4）
192（8x6x4）	1.84（144.）