THE UNIVERSITY OF TOKYO

差分法による
弾性波動並列シミュレーション

東京大学　情報学環 / 地震研究所　　森　太志

f-mori@eri.u-tokyo.ac.jp

東京大学　情報学環 / 地震研究所　古村　孝志

本日の目次

- はじめに
  - 有限差分法（FDM)による弾性波動計算の概要
  - ppOpen-APPL/FDM の概要
  - FX10によるパフォーマンステスト
  - 応用例：大規模連成計算

- ppOpen-APPL/FDMの演習
  - 利用方法
  - 演習

FDMによる弾性波動計算

- 構成方程式
  - 弾性体の釣り合いの式（運動方程式）

$$\rho\ddot{u} = \frac{\partial \sigma_{xp}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yp}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zp}}{\partial z} + f_p, (p = x, y, z) \quad (1)$$

$\ddot{u}$: 加速度、σ: 応力、ρ: 密度、f: 外力

  - 等方完全弾性体の応力

$$\sigma_{pq} = \lambda(e_{xx} + e_{yy} + e_{zz})\delta_{pq} + 2\mu e_{pq}, (p, q = x, y, z) \quad (2)$$

λ, μ : Lame定数、δ: クロネッカのデルタ

    - 歪みは変位の空間微分で求められる

$$e_{pq} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_p}{\partial q} + \frac{\partial u_q}{\partial p}\right), \quad (p, q = x, y, z) \quad (3)$$

e: 歪み

弾性波動の陽的計算

- 時間発展により波動伝播を進めるために、式(1)の速度変数を中間変数とする

$$\dot{u}_p^{\,n+\frac{1}{2}} = \dot{u}_p^{\,n-\frac{1}{2}} + \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \sigma_{xp}^n}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yp}^n}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zp}^n}{\partial z} + f_p^{\,n} \right) \Delta t, \ (p = x, y, z) \qquad (4)$$

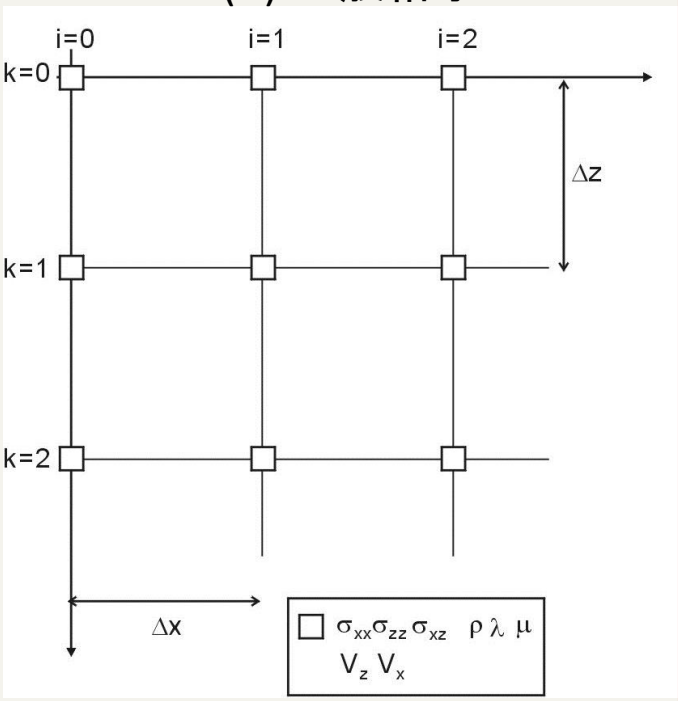
$\dot{u}^{n+1/2}{}_p$ 粒子速度

- 式(2)と式(3)を結合した式(5)を用いて中央差分に基づく時間積分

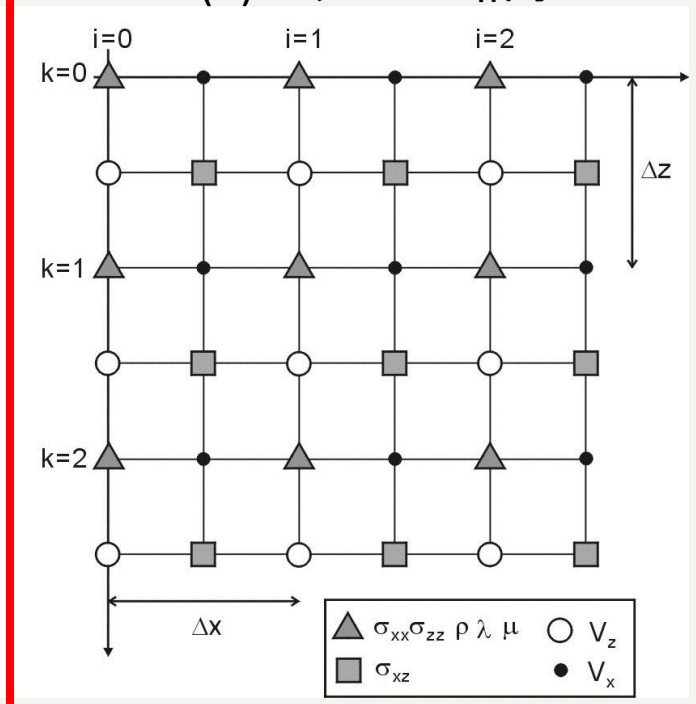
$$\sigma_{pq}^{n+1} = \sigma_{pq}^n + \left[\lambda \left(\frac{\partial \dot{u}_x^{\,n+\frac{1}{2}}}{\partial x} + \frac{\partial \dot{u}_y^{\,n+\frac{1}{2}}}{\partial y} + \frac{\partial \dot{u}_z^{\,n+\frac{1}{2}}}{\partial z} \right) \delta_{pq} + \mu \left(\frac{\partial \dot{u}_p^{\,n+\frac{1}{2}}}{\partial q} + \frac{\partial \dot{u}_q^{\,n+\frac{1}{2}}}{\partial p} \right) \right] \Delta t, \ (p,q) = (x,y,z) \qquad (5)$$

格子モデル

(A) 一般格子



(B) スタガード格子



A) 変位や応力、物性値など全ての変数を同一格子点上に配置する一般格子

B) 変位を半格子ずれた位置に定義するスタガード格子

- 変数の微分が定義される位置に関連の変数が位置するため計算精度が良い

FDMによる弾性波動計算

- FDMによる式(4)と(5)の空間微分
  - 中心差分による計算(2次精度、4次精度、8次精度)

(2次精度)
$$\frac{d}{dx}\sigma_{pq}(x,y,z) \simeq \frac{1}{\Delta x}\left[\sigma_{pq}\left(x+\frac{\Delta x}{2},y,z\right)-\sigma_{pq}\left(x-\frac{\Delta x}{2},y,z\right)\right]$$

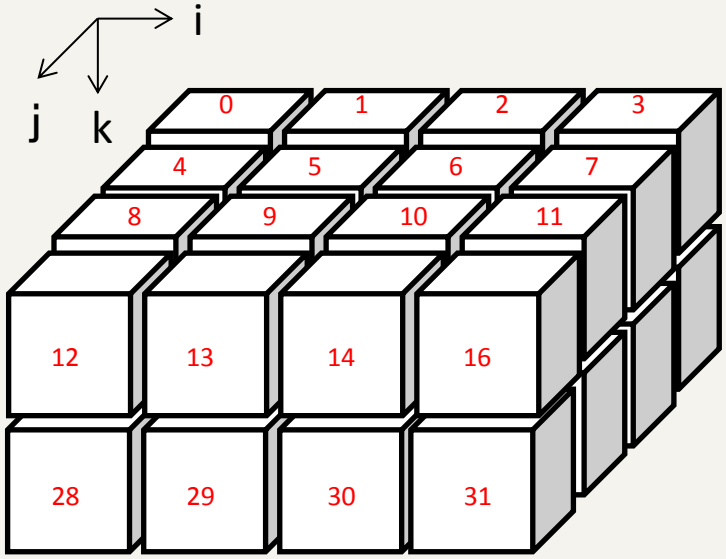
(4次精度)
$$\frac{d}{dx}\sigma_{pq}(x,y,z) \simeq \frac{1}{\Delta x}\left[\frac{9}{8}\left\{\sigma_{pq}\left(x+\frac{\Delta x}{2},y,z\right)-\sigma_{pq}\left(x-\frac{\Delta x}{2},y,z\right)\right\} -\frac{1}{24}\left\{\sigma_{pq}\left(x+\frac{3\Delta x}{2},y,z\right)-\sigma_{pq}\left(x-\frac{3\Delta x}{2},y,z\right)\right\}\right]$$

(8次精度)
$$\frac{d}{dx}\sigma_{pq}(x,y,z) \simeq \frac{1}{\Delta x}\left[\frac{1225}{1024}\left\{\sigma_{pq}\left(x+\frac{\Delta x}{2},y,z\right)-\sigma_{pq}\left(x-\frac{\Delta x}{2},y,z\right)\right\} -\frac{245}{3072}\left\{\sigma_{pq}\left(x+\frac{3\Delta x}{2},y,z\right)-\sigma_{pq}\left(x-\frac{3\Delta x}{2},y,z\right)\right\} +\frac{49}{5120}\left\{\sigma_{pq}\left(x+\frac{5\Delta x}{2},y,z\right)-\sigma_{pq}\left(x-\frac{5\Delta x}{2},y,z\right)\right\} -\frac{5}{7168}\left\{\sigma_{pq}\left(x+\frac{7\Delta x}{2},y,z\right)-\sigma_{pq}\left(x-\frac{7\Delta x}{2},y,z\right)\right\}\right]$$

ppOpen-APPL/FDM の概要

ppOpen-APPL/FDM　概要

1. 弾性波動並列シミュレーション(地震）
   - Staggered グリッド、陽解法
   - 3次元/2次元モデル
   - 等間隔格子
   - 微分：2次、4次、8次精度
   - MPI並列は3次元領域分割
   - MPI/OpenMPハイブリッド並列

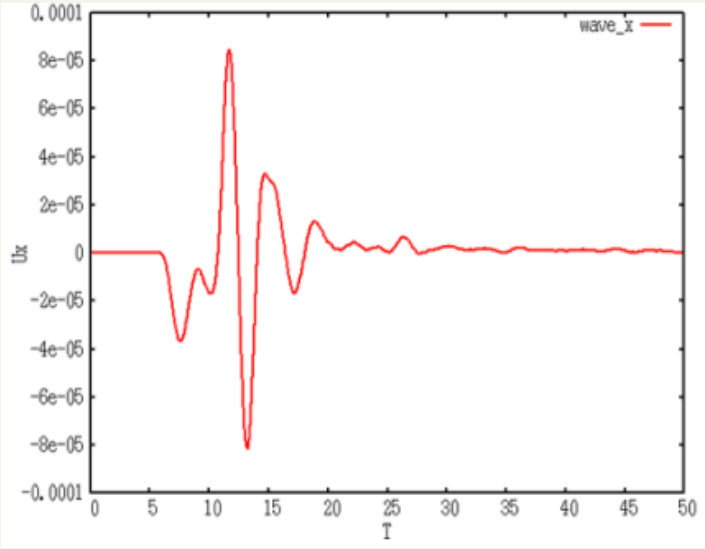


3次元領域分割
（赤文字：MPIランク）

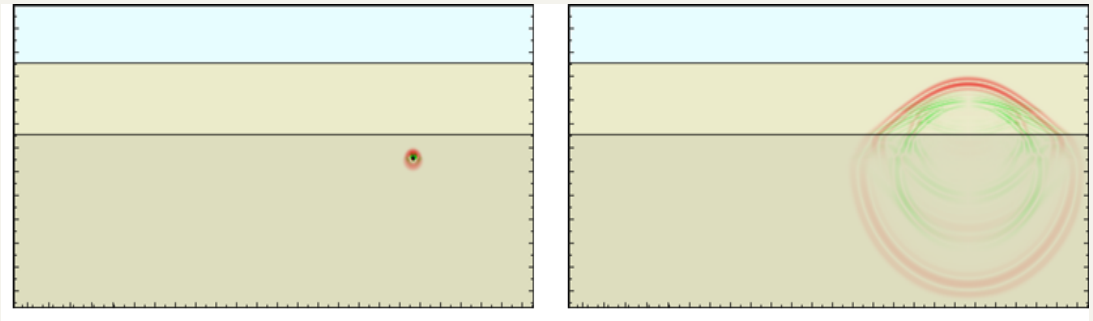
ppOpen-APPL/FDM　概要 (cont.)

2. サンプルプログラムとインターフェイス

- 観測点の波形
- 波動場のスナップショット



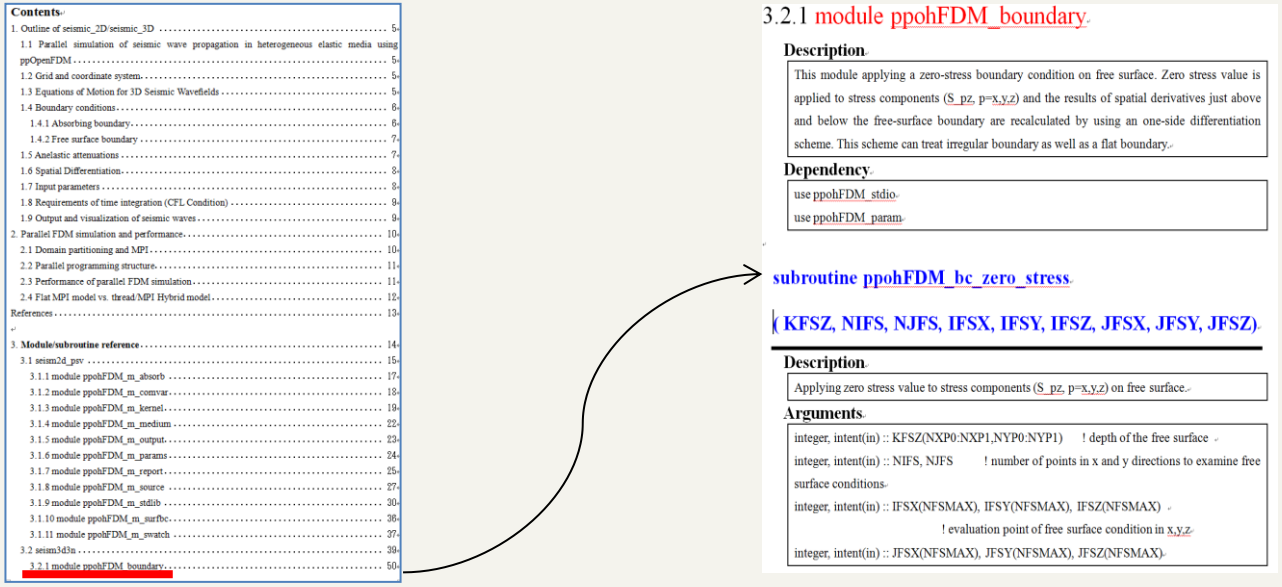
観測点の波形



波動場のスナップショット

ppOpen-APPL/FDM概要 (cont.)

- ドキュメント
  - ppOpen-APPL/FDMの使い方：ユーザマニュアル
  - コード内のモジュール説明



Contents

3.2.1 module ppohFDM_boundary

Description

This module applying a zero-stress boundary condition on free surface. Zero stress value is applied to stress components (S_pz, p=x,y,z) and the results of spatial derivatives just above and below the free-surface boundary are recalculated by using an one-side differentiation scheme. This scheme can treat irregular boundary as well as a flat boundary.

Dependency

use ppohFDM_stdio
use ppohFDM_param

subroutine ppohFDM_bc_zero_stress

(KFSZ, NIFS, NJFS, IFSX, IFSY, IFSZ, JFSX, JFSY, JFSZ)

Description

Applying zero stress value to stress components (S_pz, p=x,y,z) on free surface.

Arguments

integer, intent(in) :: KFSZ(NXP0:NXP1,NYP0:NYP1) ! depth of the free surface
integer, intent(in) :: NIFS, NJFS ! number of points in x and y directions to examine free surface conditions
integer, intent(in) :: IFSX(NFSMAX), IFSY(NFSMAX), IFSZ(NFSMAX)
! evaluation point of free surface condition in x,y,z
integer, intent(in) :: JFSX(NFSMAX), JFSY(NFSMAX), JFSZ(NFSMAX)

- MITライセンス
  - 公開されているコードはユーザが自由に手を加えることができる

ppOpen-APPL/FDM　計算手順

入力
- 計算パラメータの設定
- ソース、観測点、層構造の設定

計算

出力&可視化
- 観測点における波形
- 波動場

1. 入力パラメータの例（計算パラメータ）

1. 計算パラメータ (m_param.f90)

モデルサイズ: 128*128*128
格子サイズ: 0.5
時間間隔 : 0.025
MPI領域分割: 2*2*2

```
!-- << Model Size and Grid Width >>
  integer,  parameter :: NX     = 128
  integer,  parameter :: NY     = 128
  integer,  parameter :: NZ     = 128
  integer,  parameter :: KFS    = 25
  integer,  parameter :: NX1    = NX+1
  integer,  parameter :: NY1    = NY+1
  integer,  parameter :: NZ1    = NZ+1
  integer,  parameter :: NTMAX  = 2000
  integer,  parameter :: NWRITE = 10
  real(PN), parameter :: DX     = 0.5_PN
  real(PN), parameter :: DY     = 0.5_PN
  real(PN), parameter :: DZ     = 0.5_PN
  real(PN), parameter :: DT     = 0.025_PN
  integer,  parameter :: NDUMP  = 5

  !-<< Parallel >>
  integer, parameter :: IP    = 2
  integer, parameter :: JP    = 2
  integer, parameter :: KP    = 2
  integer, parameter :: NP    = IP*JP*KP ! Number of process
  integer, parameter :: NL    = 4     ! Order of the fd scheme
```

モデルサイズ

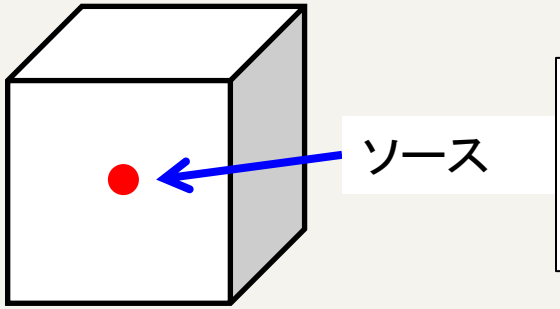
格子間隔

時間間隔

MPI領域分割

1. 入力パラメータの例 (ソースの設定、地下構造の設定)

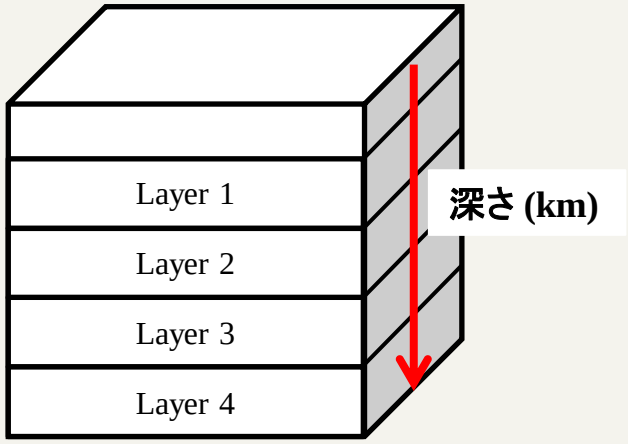
ソースの設定
（source.dat）



source.dat

```
16.0 16.0 16.0      # ソースの位置: X(km), Y(km), Z(km)
0.0 45.0 90.0       # 断層パラメータ
0.5 1.0             # ソース時間: at, t0 (s)
```

地下構造の設定
medium.dat

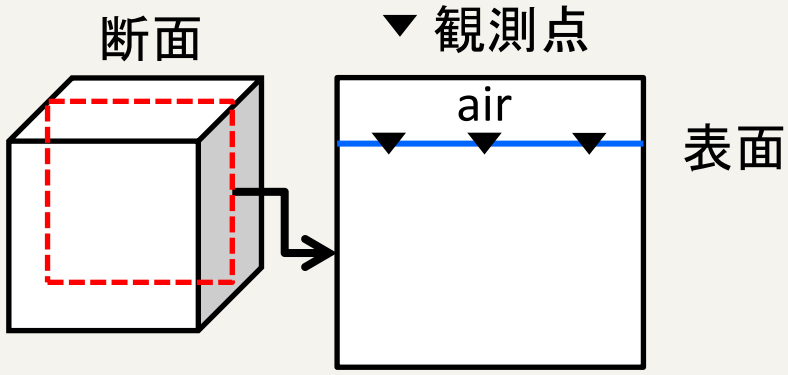


medium.dat

```
4                   # 地下構造の層の数
20 2.3 3.0 1.7      # 深さ(km), 密度 (t/m3),
                    P波速度(km/s), S波速度 (km/s)
30 2.3 3.3 2.3
40 2.7 5.0 3.3
50 2.7 6.0 4.0
```

1. 入力パラメータの例 (観測点の設定)

観測点の設定
（station.dat）



station.dat

```
4                   # ステーション数
10.0 10.0 0.0       # ステーション1: X, Y, Z(km)
                      の設定
40.0 10.0 0.0
10.0 40.0 0.0
40.0 40.0 0.0
```

（注意）./examples/seismic_3D-exampleにパラメータファイルが用意されています。
./src/seismic_3D/1.pureMPI-ppohVIS or 2.pure-MPIにCOPY

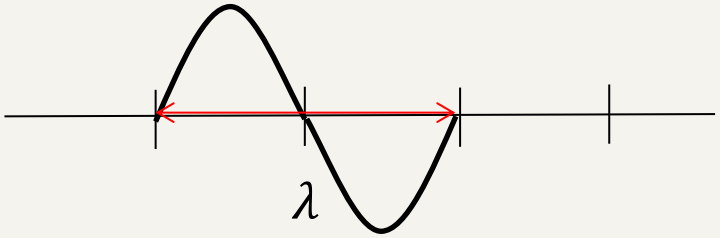
最大周波数と安定条件

(1)最大周波数の決め方

$$\frac{\lambda^{min}}{\Delta x} = 6$$

4次精度の場合6-8個
(経験的に)

$$\lambda^{min} = 6\Delta x = 6 \times 0.5 = \mathbf{3.0}$$



$$V_s{}^{min} = fm^{ax} \times \lambda^{min}$$

(伝わる速度)　(周波数)　(波長)

$$1.7 = fm^{ax} \times \mathbf{3.0}$$

$$f^{max} = \mathbf{0.6}(Hz)$$

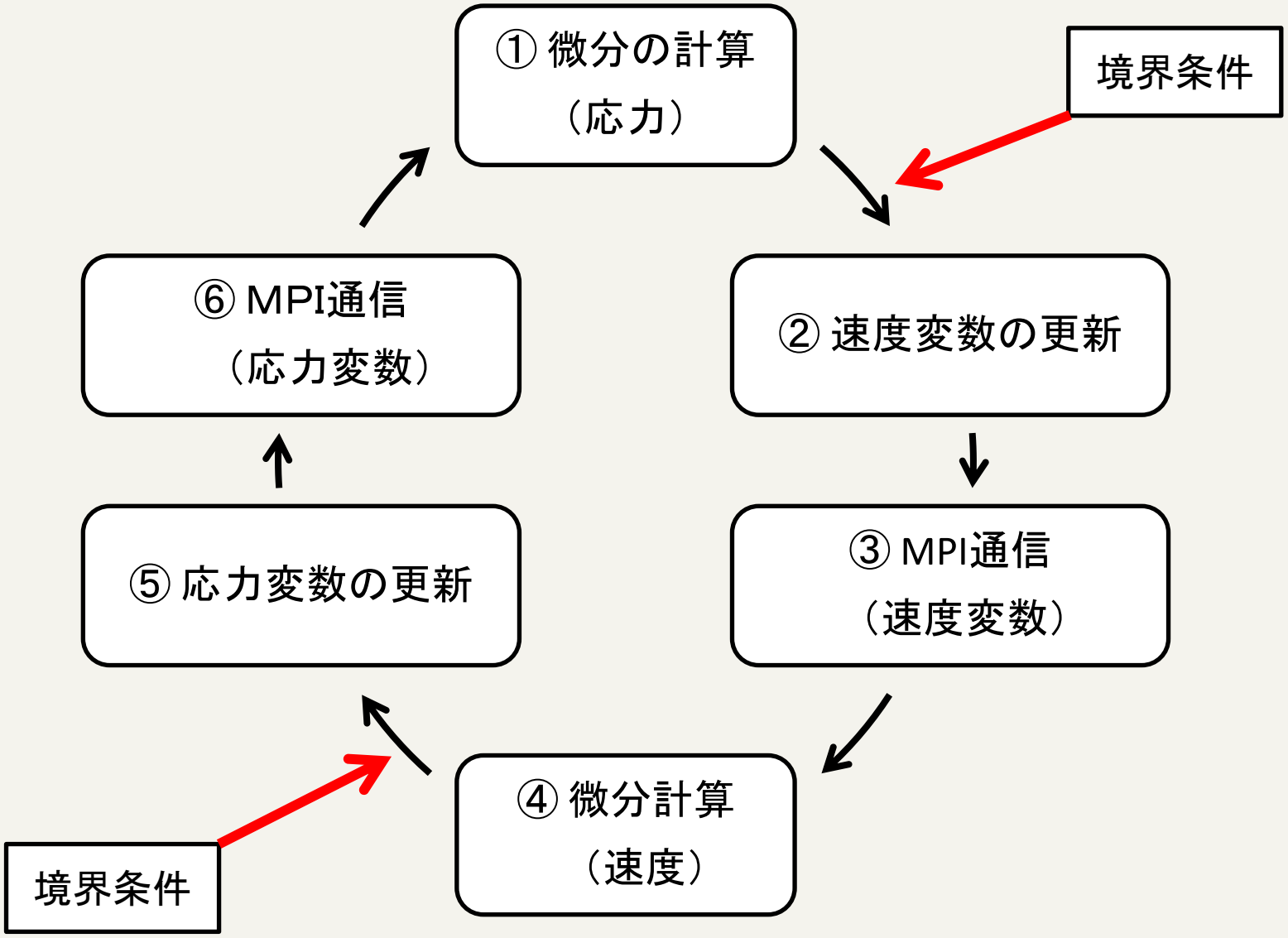
(2) Δtの決め方

$$\Delta t < 0.2\frac{\Delta x}{V_{max}}$$

$$\Delta t < 0.2\frac{0.5}{4.0} = \mathbf{0.025}$$

青: 未知数
黒: 既知数

2. 計算手順


① 微分の計算
（応力）
境界条件
② 速度変数の更新
③ MPI通信
（速度変数）
④ 微分計算
（速度）
境界条件
⑤ 応力変数の更新
⑥ MPI通信
（応力変数）

3. 出力および可視化

- 出力データ
  - 各MPIランクで出力されている

```
SEISM3D3.prm                SEISM3D3.SUR.000.001.000  SEISM3D3.XY.001.001.000
SEISM3D3.SPS.000.000.000    SEISM3D3.SUR.000.001.001  SEISM3D3.XZ.000.000.000
SEISM3D3.SPS.000.000.001    SEISM3D3.SUR.001.000.000  SEISM3D3.XZ.000.000.001
SEISM3D3.SPS.000.001.000    SEISM3D3.SUR.001.000.001  SEISM3D3.XZ.001.000.000
SEISM3D3.SPS.000.001.001    SEISM3D3.SUR.001.001.000  SEISM3D3.XZ.001.000.001
SEISM3D3.SPS.001.000.000    SEISM3D3.SUR.001.001.001  SEISM3D3.YZ.000.000.000
SEISM3D3.SPS.001.000.001    SEISM3D3.WAV.000.000.000  SEISM3D3.YZ.000.000.001
SEISM3D3.SPS.001.001.000    SEISM3D3.WAV.000.000.001  SEISM3D3.YZ.000.001.000
SEISM3D3.SPS.001.001.001    SEISM3D3.XY.000.000.000   SEISM3D3.YZ.000.001.001
SEISM3D3.SUR.000.000.000    SEISM3D3.XY.000.001.000
SEISM3D3.SUR.000.000.001    SEISM3D3.XY.001.000.000
```

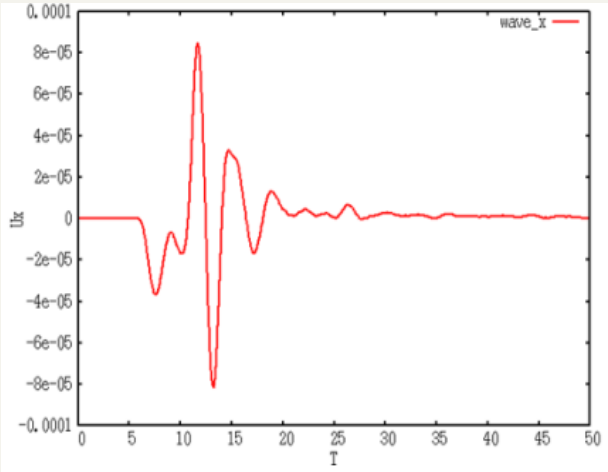
SEISM3D3.prm	計算パラメータ
SEISM3D3.WAV.***	観測点における波形
SEISM3D3.SPS.***	P波とS波の波動場
SEISM3D3.SUR.***	表面上での波動場
SEISM3D3.XY(XZ, YZ).***	各断面での波動場

3. 出力および可視化 (cont.)

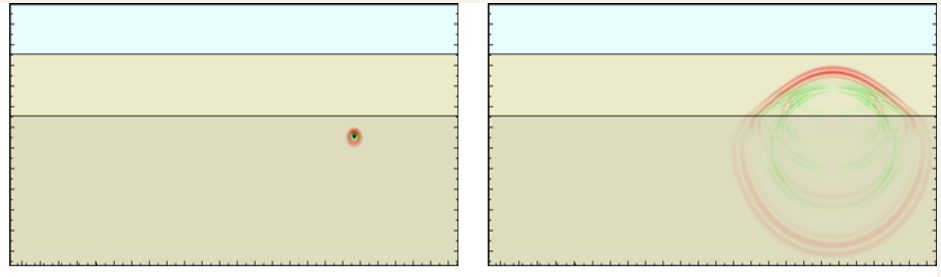
- ./tools/seismic_3D-toolsにおいてmakeすると4つ実行ファイル（catsnap, catwav, ppmxy3d3,rwav3d）が生成される

- % catsnap SEISM3D3.prm → 分割されたファイルが結合される（波動場）
- % catwav SEISM3D3.prm → 分割されたファイル　が結合される（波形）

- % ppmxy3d3　→ 波動場のスナップショット (xvやimagemagickで可視化）
- % rwav3d　　→ 観測点の波形　（gnuplotで可視化）



観測点の波形

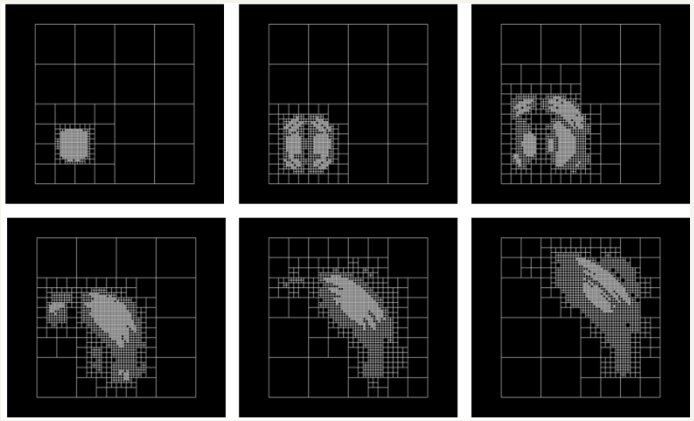


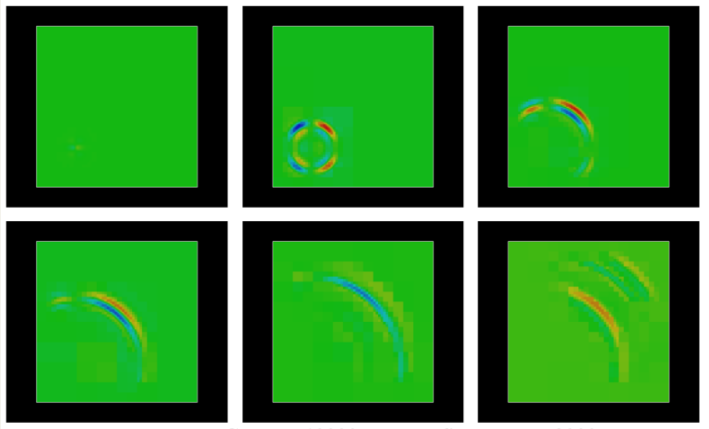
波動場のスナップショット
（P波：赤、S波: 緑）

可視化 ppOpen-MATH/VIS

- プロジェクト内で公開している大規模データのための可視化ライブラリppOpen-MATH/VIS

- ppOpen-APPL/FDM ver0.2.0に実装済み
  - ./src/seismic_3D/1.pureMPI-ppohVIS
  - 出力ファイルは ./src/seismic_3D/1.pureMPI-ppohVIS
  - control.datのMaxVoxelCountやMaxRefineLevelの値を大きくすると細かくなる (./examples/seismic_3D-example)
  - AVSやParaviewで可視化することができる



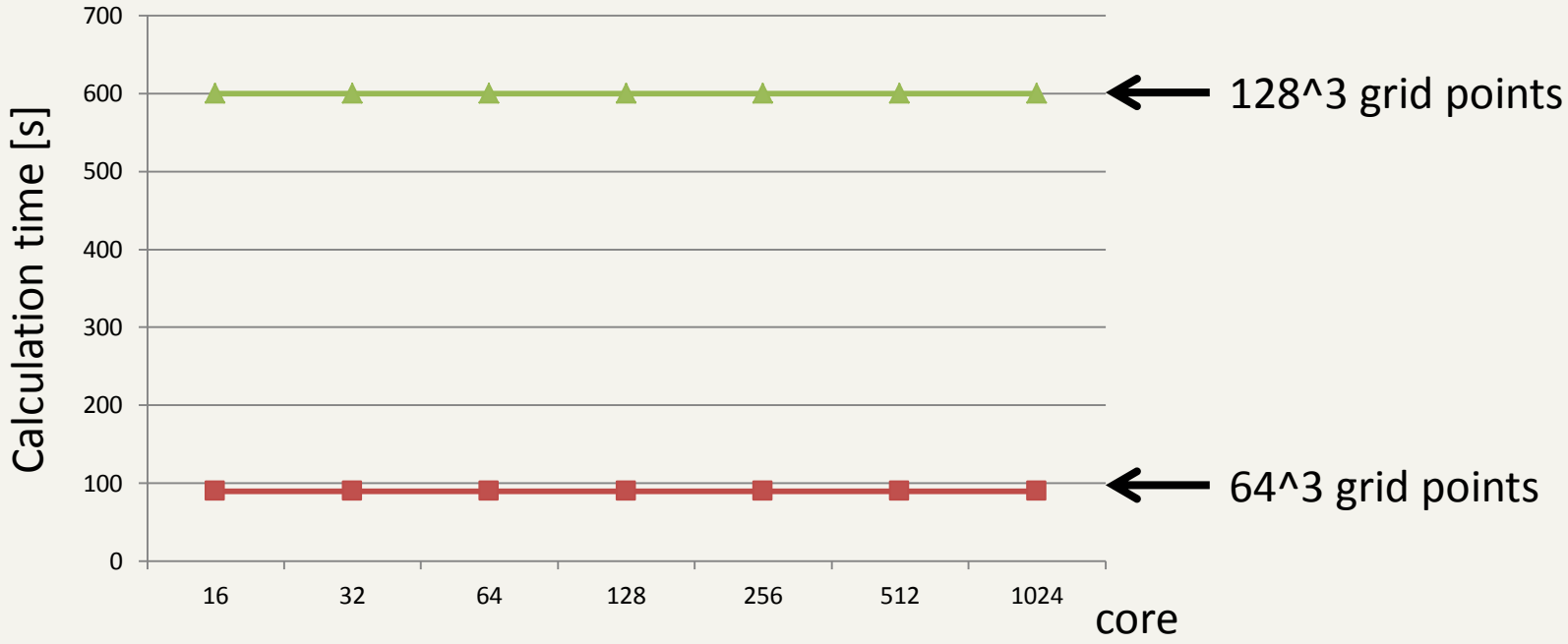


VXの速度場

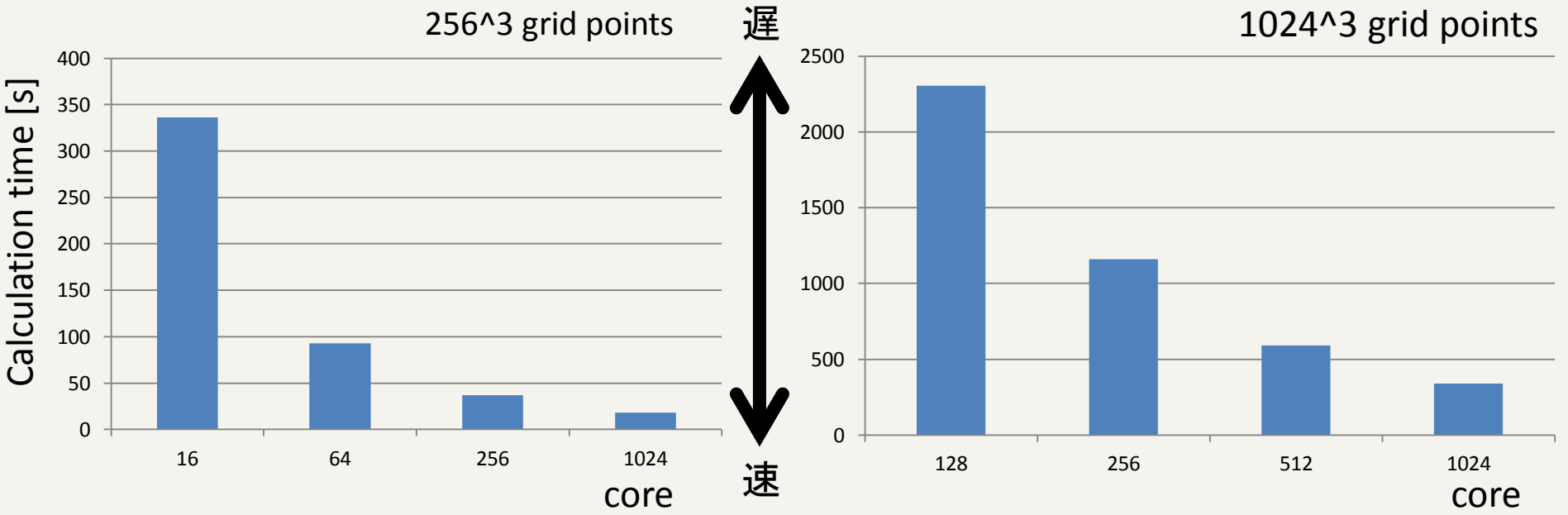
ppOpen-APPL/FDM Performance in FX10

Weak scaling test in flat MPI

- モデルサイズ：64^3 , 128^3 grid points
- 並列数：16～1024 コア
- 3D domain partitioning of MPI



Strong scaling test in the flat MPI

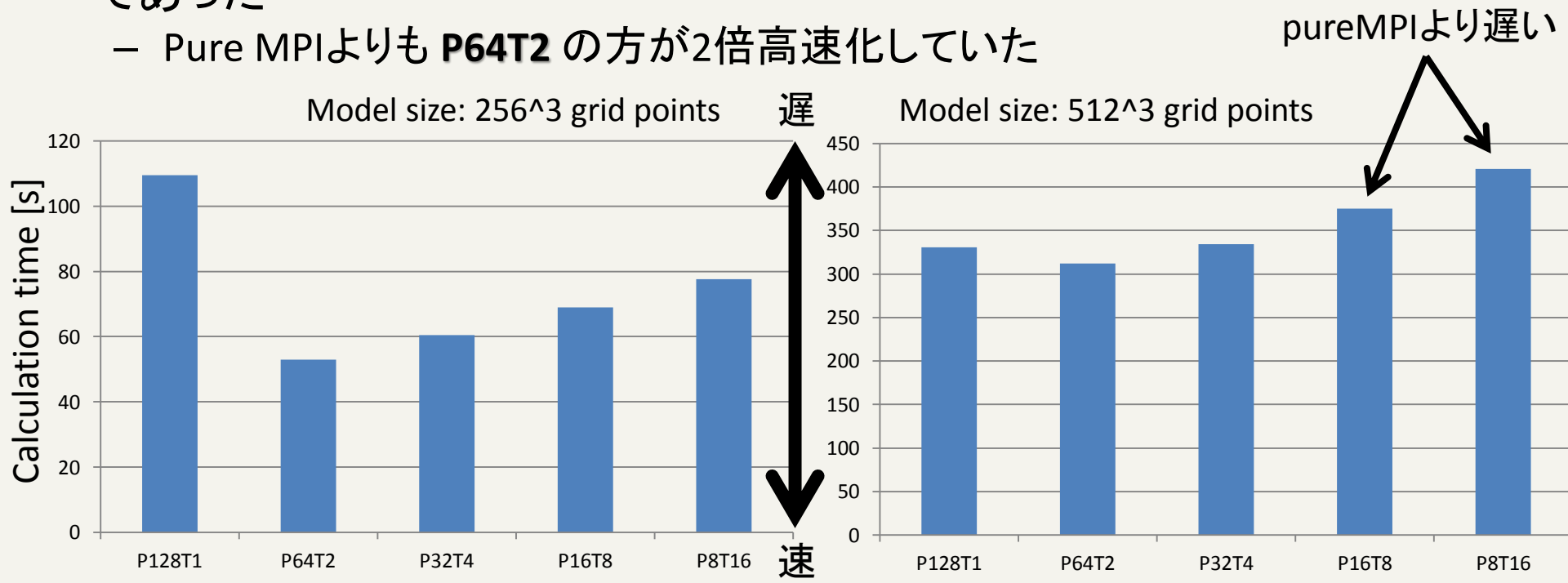


- 計算時間はコア数が増加することで低減している
  - 256^3 grid points
    - 1024コアでの計算時間は、16コアの計算時間よりも18倍速くなっていた
  - 1024^3 grid points
    - 1024コアでの計算時間は、128コアの計算時間よりも7倍速くなっていた

Storing scaling test in the MPI/OpenMP hybrid parallel computing on FX10

- パフォーマンステストは8ノード（128コア, 16コア/ノード）を使って評価
  - P128T1, P64T2, P32T4, P16T8, P8T16 (Pはプロセス、Tはスレッド)
- モデルサイズ
  - 256^3, 512^3グリッドポイント

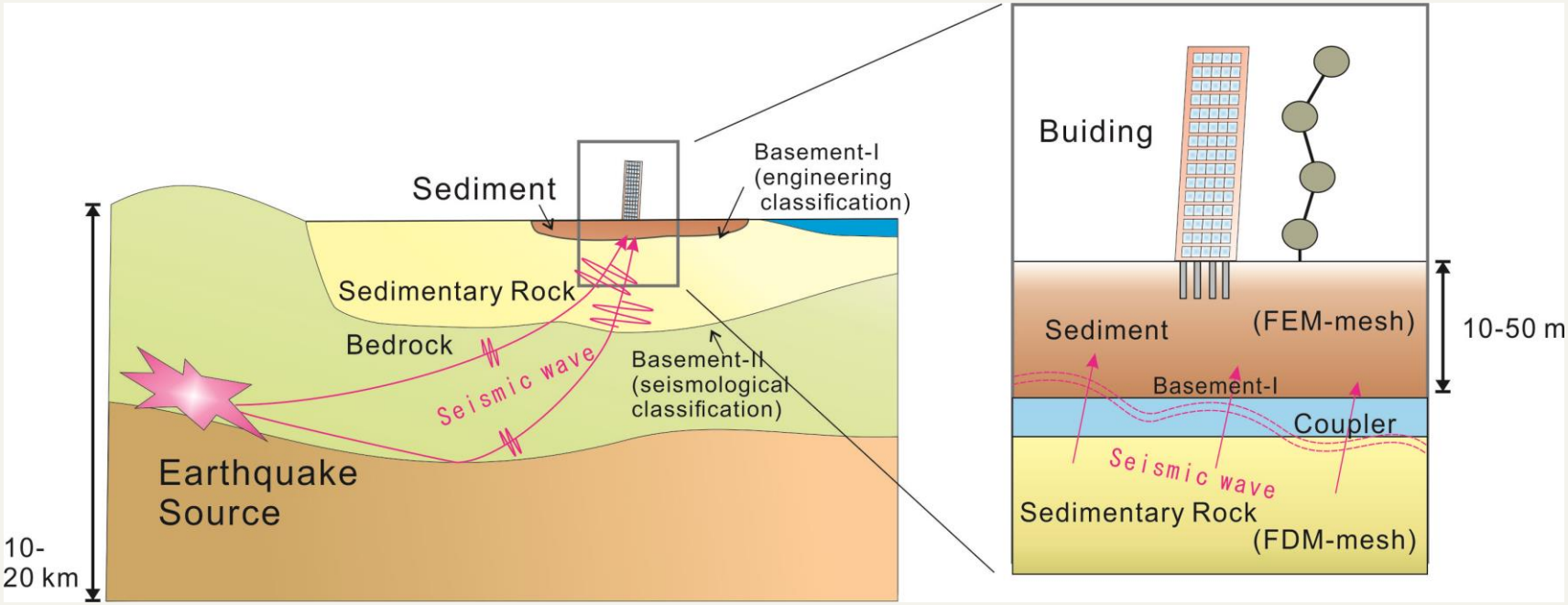
- すべてのモデルにおいて、最小の計算時間は、P64T2 による並列のときであった
  - Pure MPIよりも **P64T2** の方が2倍高速化していた



ppOpen-APPL/FDMの実例
大規模連成計算
（地震動）

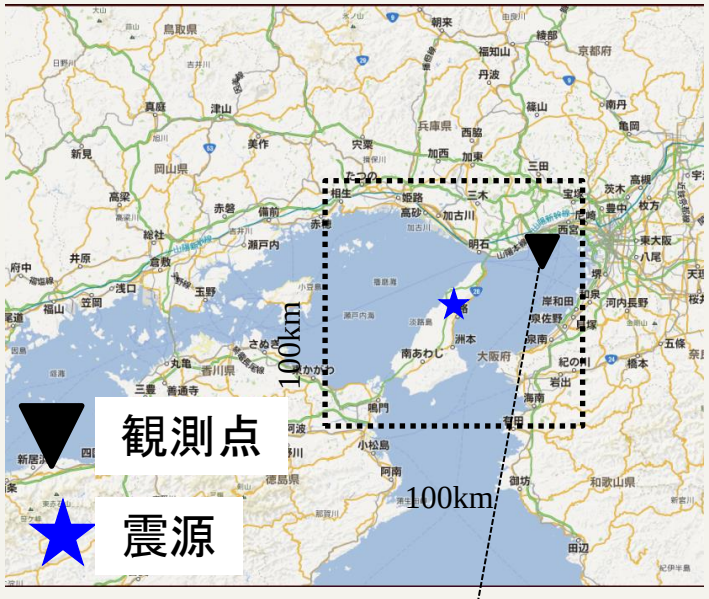
大規模連成計算の取り組み

- ppOpen-HPCプロジェクト内で開発されているppOpen-MATH/MP　couplerを用いて差分法（地震動→ ppOpen-APPL/FDM）と有限要素法（構造解析→ ppOpen-APPL/FEM）を連成し、大規模連成計算をおこなっている



FDM: Seismic Wave Propagation → ppOpen-MATH/MP → FEM: Building Response

地震動計算



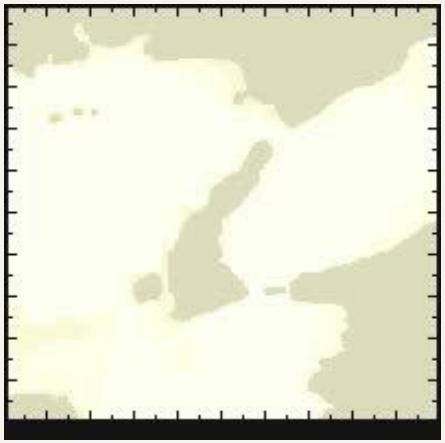
Google mapから引用

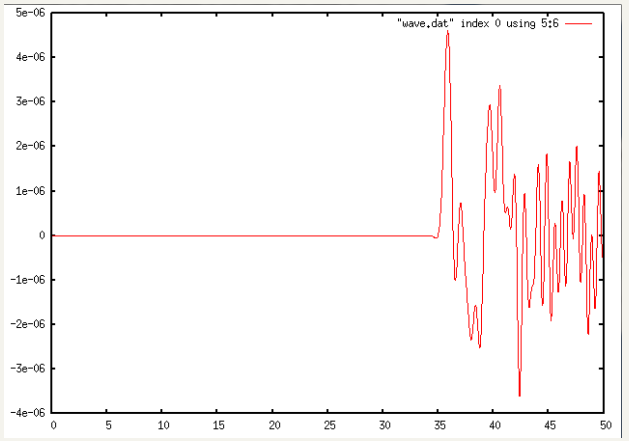
淡路を震源とした地震を想定し、ポートアイランドにある**計算科学研究機構　京コンピュータの建屋**への影響をシミュレーションをおこなう

計算領域（黒点線）: 100km × 100km × 30km
計算格子間隔: Δx = Δy = 40 m, Δz = 20 m
計算ステップ:　36万ステップ（Δt=0.001, 360s)
計算グリッド:　2500 × 2500 × 1500

計算メモリ: 1.2TB

計算科学研究機構 (AICS)
京コンピュータ建屋





ppOpen-APPL/FDM
利用方法と実習

はじめに

- ppOpen-HPC project (URL: http://ppopenhpc.cc.u-tokyo.ac.jp/wordpress/) からppOpen-APPL/FDM ver0.2.0をダウンロード
- Paraviewをダウンロード、インストール

- FX10の利用支援ポータルサイトからFUJITSU Software Development Tools をダウンロード、インストール

ファイルの解凍

- ダウンロードしたら解凍する

  % tar zxvf ppohFDM_0.2.0.tar.gz

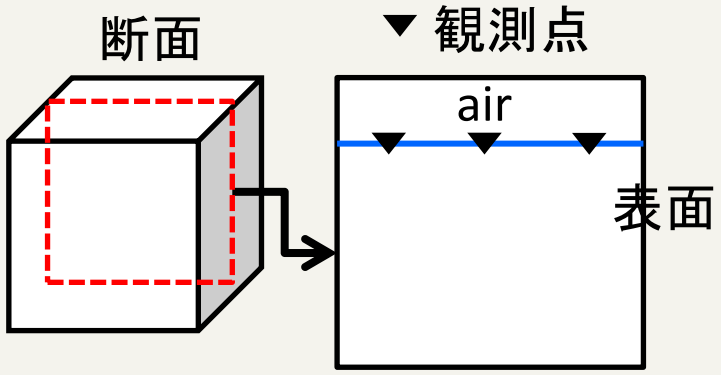
```
[c31003@oakleaf-fx-4 ppohFDM_0.2.0]$ ls
doc                 INSTALL_ppohAPPL-FDM    Makefile       ppohMATH-VIS-install  src
etc                 LICENSE_ppohAPPL-FDM    Makefile.in    ppohMATH-VIS-lib      tools
Examples            LICENSE_ppohMATH-VIS    README_ppoh-APPL-FDM
```

- 以下このディレクトリをルートディレクトリ(/)として説明する
- サンプルのパラメータファイルは、以下においてあります

  ./src/example/seismic_3D-example

入力パラメータ設定(1)

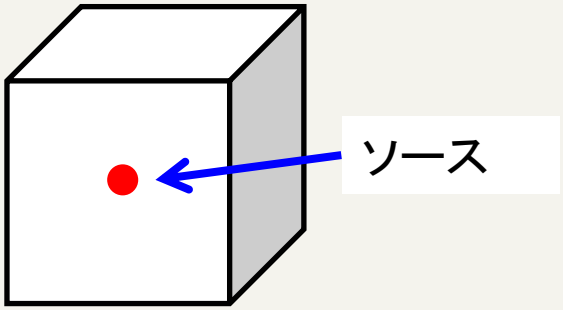
- 入力パラメータファイル（3つ）
  1. 観測点（X, Y, Z (km))の設定



station.dat

```
4                   # ステーション数
10.0 10.0 0.0       # ステーション1: X, Y, Z(km)を設定
40.0 10.0 0.0
10.0 40.0 0.0
40.0 40.0 0.0
```

  2. ソースパラメータを設定



source.dat

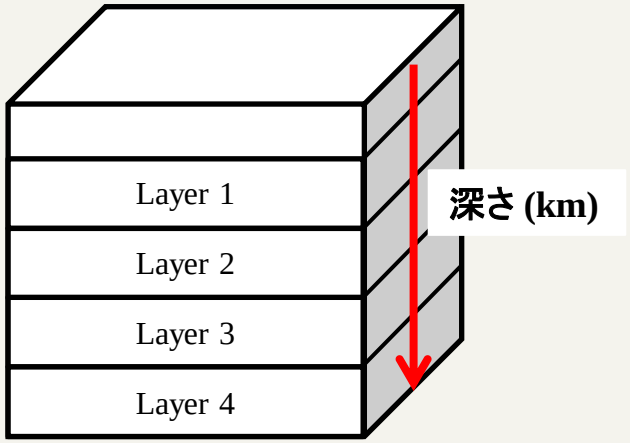
```
16.0 16.0 16.0      # ソースの位置: X(km), Y(km), Z(km)
0.0 45.0 90.0       # 断層パラメータ
0.5 1.0             # ソース時間: at, t0 (s)
```

入力パラメータ設定(2)

3. 地下構造モデル（深さ(depth), 密度(R0), P波の速度(VP), S波の速度(VS))を設定
   - medium.dat

medium.dat

```
4                    # 地下構造の層の数
20 2.3 3.0 1.7       # 深さ(km), 密度 (t/m3),
                     P波速度(km/s), S波速度 (km/s)
30 2.3 3.3 2.3
40 2.7 5.0 3.3
50 2.7 6.0 4.0
```



計算パラメータ設定

計算パラメータ (m_param.f90)

(計算モデルとタイムステップ)

- モデルサイズ:NX, NY, NZ
- 格子間隔 : DX, DY, DZ
- タイムステップ : NTMAX
- 時間間隔 : DT

(MPI: 3次元分割)

- 分割 : IP, JP, KP
- プロセス数 : NP

```
!-- << Model Size and Grid Width >>
  integer,  parameter :: NX     = 128
  integer,  parameter :: NY     = 128
  integer,  parameter :: NZ     = 128
  integer,  parameter :: KFS    = 25
  integer,  parameter :: NX1    = NX+1
  integer,  parameter :: NY1    = NY+1
  integer,  parameter :: NZ1    = NZ+1
  integer,  parameter :: NTMAX  = 2000
  integer,  parameter :: NWRITE = 10
  real(PN), parameter :: DX     = 0.5_PN
  real(PN), parameter :: DY     = 0.5_PN
  real(PN), parameter :: DZ     = 0.5_PN
  real(PN), parameter :: DT     = 0.025_PN
  integer,  parameter :: NDUMP  = 5

 !-<< Parallel >>
  integer, parameter :: IP    = 2
  integer, parameter :: JP    = 2
  integer, parameter :: KP    = 2
  integer, parameter :: NP    = IP*JP*KP ! Number of process
```

モデルサイズ

タイムステップ

格子間隔

時間間隔

MPI領域分割

（注意）./examples/seismic_3D-exampleにパラメータファイルが用意されています。
./src/seimic_3D/2.pureMPIにコピーしてください

コンパイル
pureMPIとハイブリッド並列

- コンパイル
  - ./src/seism_3D/2.pureMPIや./src/seism_3D/3.hybrid にあるMakefile.optionをIntel Compiler 用→ FX10用にコメントアウトする
  - % ./make seism3d-mpi, %./make seism3d-hybrid
    - 実行ファイル**seism3d3n**が生成されていることを確認

実行
pureMPIとハイブリッド並列

- バッチ実行
  - % pjsub job
  - % pjstat
    - 実行されているか確認

job file in the hybrid parallel

```
#!/bin/sh

#PJM -L "rscgrp=short"
#PJM -L "node=4"
#PJM -L "elapse=00:30:00"
#PJM -g **
#PJM --mpi "proc=64"

export OMP_NUM_THREADS=16

mpiexec ./seism3d3n
```

job file in the pure MPI

```
#!/bin/sh

#PJM -L "rscgrp=short"
#PJM -L "node=1"
#PJM -L "elapse=0:30:00"
#PJM -g **
#PJM --mpi "proc=16"

mpiexec ./seism3d3n
```

m_param.f90で設定したNPとproc数を同じにする

コンパイルと実行 with ppOpen-MATH/VIS

- コインパイル
  1. % ./make
  2. % ./make install
  3. % ./make seism3d-ppohVIS
  4. % ./make install

  ./src/seismic_3D/1.pureMPI-ppohVISに実行ファイル**seism3d3n**が生成されていることを確認

- Makefile.inにMATH/VISライブラリのコンパイル先が書かれている。各ユーザはディレクトリを場所を絶対パスで書く
  - デフォルトは /usr/local/ppoh-HPCになっている

- ジョブ投入は、puerMPIと同様

演習(1)

1. 媒質の物理値を変化させ、波動場と波形の観測せよ。パラメータは以下の通り
   - 計算パラメータの設定(m_param.f90)
     - モデルサイズ(NX*NY*NZ):128*128*128
   - 媒質の設定(medium.dat)

```
4
20  2.3 3.0 1.7
30 2.3 3.3 2.3
40 2.7 5.0 3.3
50 2.7 6.0 4.0
```

デフォルト

```
5
10 2.3 2.8 1.2
20 2.3 3.0 1.7
30 2.3 3.3 2.3
40 2.7 5.0 3.3
50 2.7 6.0 4.0
```

   - ソースの設定(source.dat)

```
16.0 16.0 16.0
0.0 45.0 90.0
1.0 2.0
```

デフォルト

```
16.0 16.0 10.0
0.0 45.0 90.0
1.0 2.0
```

演習（1）(cont.)

– 観測点の設定（station.dat）

```
4
10.0 10.0 0.0
40.0 10.0 0.0
10.0 40.0 0.0
40.0 40.0 0.0
```

- 上記のパラメータとデフォルトパラメータとの違いを確認せよ
  1. 媒質のパラメータを変更したときの違い
  2. ソースのパラメータを変更したときの違い
  3. 両方（媒質+ソース）のパラメータを変更したときの違い

演習（1）(cont.)

- コンパイル
  - % ./make seism3d-mpi
- 実行
  - % cd ./src/seimic_3D/2.pureMPI/
  - %pjsub job

```
#!/bin/sh

#PJM -L "rscgrp=**"
#PJM -L "node=**"
#PJM -L "elapse=**:**:**"
#PJM -g **
#PJM --mpi "proc=**"

mpiexec lpgparm -p 256MB -d 256MB -h 256MB -s 256MB -t 256MB ./seism3d3n
```

**はユーザがパラメータに応じて変更

演習（1）(cont.)

- ローカルPCで可視化
  - ./tools/seismic_3D-toolsにおいてmakeすると4つ実行ファイル（catsnap, catwav, ppmxy3d3,rwav3d）が生成される
- 波動場の確認
  - % catsnap SEISM3D3.prm
  - % ppmxy3d3 –f SEISM3D3.prm –tim –tick –pall –pmul 1e3 –smul 1e3 –ptype SPS
  - % xv *.ppm
- 波形の確認
  - % catwav SEISM3D3.prm
  - % rwav3d SEISM3D3.WAV > wave.dat
  - % gnuplot
  - plot “wave.dat” index0 using 4:5 with lines lw 2

演習（1a）

1. 媒質の物理値を変化させ、波動場の観測せよ。パラメータは以下の通り
   - 計算パラメータの設定（m_param.f90）
     - モデルサイズ(NX*NY*NZ)：128*128*128
   - 媒質の設定（medium.dat）

```
4
20  2.3 3.0 1.7
30 2.3 3.3 2.3
40 2.7 5.0 3.3
50 2.7 6.0 4.0
```

デフォルト

```
5
10 2.3 2.8 1.2
20 2.3 3.0 1.7
30 2.3 3.3 2.3
40 2.7 5.0 3.3
50 2.7 6.0 4.0
```

   - ソースの設定（source.dat）

```
16.0 16.0 16.0
0.0 45.0 90.0
1.0 2.0
```

デフォルト

```
16.0 16.0 10.0
0.0 45.0 90.0
1.0 2.0
```

演習（1a）(cont.)

- 観測点の設定（station.dat）

```
4
10.0 10.0 0.0
40.0 10.0 0.0
10.0 40.0 0.0
40.0 40.0 0.0
```

- control.dat

```
[Refine]
AvailableMemory = 32.0
MaxVoxelCount = 5000
MaxRefineLevel = 1000
```

- 可視化したい物理値はseism3d3n.f90のL107において設定する

- 上記のパラメータとデフォルトパラメータとの違いを確認せよ
  1. 媒質のパラメータを変更したときの違い
  2. ソースのパラメータを変更したときの違い
  3. control.datの**MaxVoxelCount**と**MaxRefineLevel**の値を変更したときの違い確認せよ

演習（1a）(cont.)

- コンパイル
  1. % ./make
  2. % ./make install
  3. % ./make seism3d-ppohVIS
  4. % ./make install

- 実行
  - % cd ./src/seimic_3D/1.pureMPI-ppohVIS
  - %pjsub job

```
#!/bin/sh

#PJM -L "rscgrp=**"
#PJM -L "node=**"
#PJM -L "elapse=**:**:**"
#PJM -g **
#PJM --mpi "proc=**"

mpiexec lpgparm -p 256MB -d 256MB -h 256MB -s 256MB -t 256MB ./seism3d3n
```

**はユーザがパラメータに応じて変更

演習(1a)

- ppOpen-MATH/VISで出力されたinpファイルをparaviewを使って可視化
  - ./src/seismic_3D/1.pureMPI-ppohVIS/ppohVISにデータが出力されていることを確認

- Paraviewを使って可視化する

演習（2） pureMPI

1. 並列数とモデルサイズを変更して計算時間の変化を計測せよ
   - m_param.f90
     - モデルサイズ: 256*256*256 grid points
     - NP: 8, 16, 32, 64,・・・
   - プロファイル情報を取得するために、計測した部分にcall fapp_start, call fapp_stopで挟む
     - seism3d3n.f90に書き込む（デフォルトでコメントアウトされている）

```
!! Velocity Update
call fapp_start("region2",1,1)
call ppohFDM_update_vel      ( 1, NXP, 1, NYP, 1, NZP )
call fapp_stop("region2",1,1)
```

演習（2） pureMPI

- Job ファイル

```
#!/bin/sh

#PJM -L "rscgrp=**"
#PJM -L "node=**"
#PJM -L "elapse=**:**:**"
#PJM -g **
#PJM --mpi "proc=**"

fapp -C -d prof -L 1 -Ihwm -Hevent=Statistics mpiexec lpgparm -p 256MB -d 256MB -h 256MB -s 256MB
-t 256MB ./seism3d3n
```

**はユーザがパラメータに応じて変更

- プロファイルを保存するディレクトリが必要
  - ./src/seismic_3D/2.pureMPI/prof

（注意）
計測にあたりseism3d3n.f90のL316にあるcall ppohFDM_io_write()をコメントアウトする

演習（3）Hybrid parallel computing

1. 並列数とモデルサイズを変更して計算時間の変化を計測せよ
   - m_param.f90
     - モデルサイズ: 256*256*256 grid points
     - 使用するノード数: 8ノード（128コア） or 4ノード（64コア）に固定
       - IP, JP, KPの値を変化させる(プロセス数）
       - Job文のexport OMP_NUM_THREADSの値を変化させる
   - Jobファイル

```
#!/bin/sh

#PJM -L "rscgrp=***"
#PJM -L "node=**"
#PJM -L "elapse=**:**:**"
#PJM -g **
#PJM --mpi "proc=**"

export OMP_NUM_THREADS=**

fapp -C -d prof -L 1 -Ihwm -Hevent=Statistics mpiexec lpgparm -p 256MB -d 256MB -h 256MB -s 256MB -t
256MB ./seism3d3n
```

**はユーザがパラメータに応じて変更

参照文献

- 古村孝志, 地震波伝播と強震動の大規模並列FDMシミュレーション, 東京大学情報基盤センタースーパーコンピューティングニュース, Vol11, pp.35-63, 2009.
- ppOpen-APPL/FDM ver0.2.0 user guide
- ppOpen-APPL/FDM ver0.2.0 reference guide