

OpenSWPC:

An Open-source

Seismic Wave Propagation Code

User's Guide

Version 3.6-J (2017-04-14)

Takuto Maeda

目次

第 1 章	準備	3
1.1	動作環境	3
1.2	ディレクトリ構成	3
1.3	コンパイルと実行	4
1.3.1	make	4
1.3.2	makefile の指定変数	4
1.3.3	NetCDF の利用	5
1.3.4	データセットの準備	5
1.3.5	埋め込みパラメータの調整	7
1.3.6	並列計算の実行例	7
第 2 章	シミュレーションの実行とパラメタ設定	9
2.1	パラメタファイルの記法	9
2.2	パラメタファイル	9
2.3	動作環境の制御	13
2.4	座標系と並列計算	14
2.4.1	スタガードグリッド	15
2.5	粘弾性体	17
2.6	出力ファイルの設定	19
2.6.1	出力ファイル形式	19
2.6.2	スナップショット出力	21
2.6.3	地震波形出力	22
2.6.4	出力ファイル名	24
2.7	速度構造の指定	24
2.7.1	構造モデルの選択	24
2.7.2	ランダム媒質の重畠	26
2.8	震源の指定	29
2.8.1	モーメント時間関数	29
2.8.2	モーメントテンソル震源	30
2.8.3	実体力モード	31
2.8.4	平面波モード	32
2.9	吸収境界条件	33
2.10	チェックポイント・リストア	35
2.11	相反定理モード	35
2.12	2 次元コードについて	38

2.13	その他のパラメタ	38
第3章	周辺ツール	39
3.1	スナップショット	39
3.1.1	<code>read.snp.x</code>	39
3.1.2	<code>diff.snp.x</code>	40
3.2	パラメタ作成補助	40
3.2.1	<code>fdmcond.x</code>	40
3.2.2	<code>mapregion.x</code>	41
3.2.3	<code>mapregion.gmt4, mapregion.gmt5</code>	42
3.3	構造モデルの確認	42
3.3.1	<code>qmodel_tau.x</code>	42
3.3.2	<code>grdsnp.x</code>	42
3.4	ランダム媒質の生成	42
3.4.1	<code>gen_rmed3d.x</code>	42
3.4.2	<code>gen_rmed2d.x</code>	43
3.5	その他のツール	43
3.5.1	<code>timvis</code> ツール	43
3.5.2	地理座標変換	44
第4章	その他	45
4.1	計算モデル設定のヒント	45
4.2	コード改造のヒント	45
4.2.1	速度構造の変更	45
4.2.2	震源時間関数の追加	46
4.2.3	追加パラメタの読み込みかた	46
謝辞		48
主な改版履歴		49
Copyright & License		50

第 1 章

準備

1.1 動作環境

OpenSWPC を動作させるには、Fortran 2003 を（少なくとも部分的に）解することのできる Fortran コンパイラならびに MPI ライブラリが必要である。本コードは単独 CPU（あるいは CPU コア）で動作させることもできるが、その場合においても MPI ライブラリがコンパイル・実行時に必要である。また、入出力に NetCDF フォーマットを利用する場合には、OpenSWPC をコンパイルする Fortran コンパイラで作成した NetCDF ライブラリが必要である。

Fortran の記法のほとんどは Fortran2003 の標準規格に沿っている。例外として、Unix システムコールサブルーチン `system()` を一部で用いているが、これは既存の多くのコンパイラ環境で動作することが確認されている。OpenSWPC は、Fortran2003 の言語仕様のうちストリーム入出力を用いている。この機能は古いコンパイラ（たとえば `gfortran` のバージョン 4 以前など）では実装されていないので、注意が必要である。

開発ならびに動作確認は以下の環境で行っている。

- Apple OSX El Capitan
- GNU `gfortran` 6.1.0
- OpenMPI 1.10.2

その他、以下のアーキテクチャでの動作を確認している。

- EIC computer, ERI/UTokyo (ver. 2015; SGI Altix; intel fortran)
- JAMSTEC Earth Simulator (NEC SX-ACE; NEC compiler)
- AICS K computer (Fujitsu compiler)
- Nagoya University (FX10/Fx100; Fujitsu compiler)
- Linux Cent OS 6.6 (`gfortran` 4.9.2 & mpich)
- Linux Ubuntu 16.04LTS (`gfortran` 5.4 & OpenMPI)

1.2 ディレクトリ構成

—— doc	: ドキュメント
—— bin	: 実行バイナリ
—— dataset	: データセットおよびデータ生成スクリプト
—— example	: 入力ファイルサンプル

表 1.1 make の arch オプション一覧.

arch オプション名	対象	NetCDF の場所
mac-intel	Mac OSX + Intel Compiler + Open MPI	<code> \${HOME}/local</code>
mac-gfortran	Mac OSX + gfortran + Open MPI	<code>/usr/local</code>
eic	EIC2015 環境下の Intel Compiler	<code> \${HOME}/local</code>
fx	富士通 FX10, FX100 および京コンピュータ	<code> \${HOME}/xlocal</code>
es3	地球シミュレータ	システム提供
ubuntu-gfortran	Ubuntu 16.04LTS + gfortran + Open MPI	apt によるインストール

```

└── src      : ソースコード
    ├── swpc_3d  : 3 次元問題
    ├── swpc_psv : 2 次元 P-SV 問題
    ├── swpc_sh  : 2 次元 SH 問題
    ├── tools     : 可視化等ツール群
    └── shared    : 共通モジュール

```

1.3 コンパイルと実行

1.3.1 make

`src/swpc_3d`, `src/swpc_psv`, `src/swpc_sh`, `src/tools` の下に `makefile` がある。 `src/shared` には各プログラムから共通に呼び出されるモジュールコードが格納されている。各ソースコードディレクトリ (`src/swpc_**`)において `make` することで `bin` 以下に実行バイナリが生成される。

1.3.2 makefile の指定変数

`makefile` では以下の変数を指定する必要がある。

FC コンパイラ
FFLAGS コンパイルオプション
NCFLAG NetCDF 利用スイッチ
NCLIB NetCDF ライブラリ格納ディレクトリ
NCINC NetCDF include ディレクトリ
NETCDF NetCDF ライブラリのリンク

`NCFLAG = -D_NETCDF` が指定されることにより、NetCDF モジュールを利用したコンパイルが行われる。

さまざまな計算機環境でコンパイルするため、arch オプション（表??）により分岐させている。たとえば表1.1の `mac-gfortran` では、

1 `make arch=mac-gfortran`

とすることで、環境に適したコンパイルオプションが自動的に選択される。また、幾つかの環境では、

1 `make arch=eic debug=true`

のように `debug=true` オプションを付けると、コンパイルオプション `FFLAGS` がデバッグに適したものに変更されるようになっている。これらの変数は `src/shared/makefile.arch` と `src/shared/makefile-tools.arch` に定義されている。新たな環境を追加するには、これらのファイルにオプションを追記するのが簡単であろう。

1.3.3 NetCDF の利用

本コードの速度構造入力の一部には NetCDF 形式を採用しており、ライブラリとモジュール情報ファイルが必要である。具体的には、

- `libnetcdf.*` NetCDF ライブラリファイル
- `libnetcdff.*` NetCDF Fortran 用ライブラリファイル (NetCDF ver.4 以降)
- `netcdf.mod` Fortran モジュール情報ファイル

がコンパイル時に必要となる。ライブラリの拡張子は`*.a` (static) の場合と`*.so` (dynamic) の場合がある。また、Fortran90 の仕様により、`NetCDF.mod` は OpenSWPC のコンパイルと同じコンパイラにより作成されなければならない。特に Linux 環境等において、`yum`, `apt`, `brew` 等のパッケージ管理システムにより導入した NetCDF では、`gfortran` 以外のコンパイラを用いることができない。そのような場合は、別の場所に OpenSWPC 用の NetCDF を自力でコンパイルする必要がある。

1.3.4 データセットの準備

地下構造モデル

地表海底、あるいは速度不連続面を表す複数の NetCDF ファイルによって 3 次元的な不均質構造を表現する(第2.7節)。その一例として、地震調査研究推進本部と [Koketsu et al. \(2012\)](#) による日本の全国 1 次地下構造モデル (Japan Integrated Velocity Structure Model; JIVSM) およびそれをより広い領域に拡張した extended JIVSM (eJIVSM) モデル (図1.1) の生成スクリプトが同梱されている。これらのモデルは、地表・海底地形から、日本列島に沈み込むプレートの海洋性モホ面までを含むモデルである。このモデル生成スクリプトを動作させるには GMT がインストールされている必要がある。これらのモデルを使うのでなければ、本節の作業は必要ない。

まず、`dataset/vmodel` ディレクトリに、`gen_JIVSM.sh` ファイル内のコメントに従い、地震調査研究推進本部から構造モデルファイル `lp2012nankai-e.str.zip` および `lp2012nankai-w.str.zip` をダウンロードする。また、JIVSM 構造モデル作成後に、モデルに含まれていない南東・北西矩形領域を補外によって埋めて利用しやすくした eJIVSM モデルを作成する。eJIVSM では、元データが存在しない領域の地球内部不連続面は補外によって、地表面および海底面は別の地形モデルによって置き換える。そこで、カレントディレクトリに地形データファイルを配置し、`params.sh` にそのファイル名を指定する。デフォルトでは ETOPO1 が指定されている。これも NOAA から別途ダウンロードして `grd` ファイルをカレントディレクトリに配置する。また、補外プログラムのコンパイルに用いる Fortran コンパイラ名を FC に指定する。グリッド間隔 `dlon`, `dlat` は JIVSM ファイル作成時から変更してはならない。

その後、必要に応じて `param.sh` の緯度・経度グリッド間隔 `dlon`, `dlat` (単位は度) を修正する。なお、このグリッド間隔は差分法の離散化間隔とは直接は関係しない。シミュレーション時にはこの NetCDF データからさらに空間補完により不連続面の深さが推定される。

これらの準備のもと、

1 `./gen_JIVSM.sh`

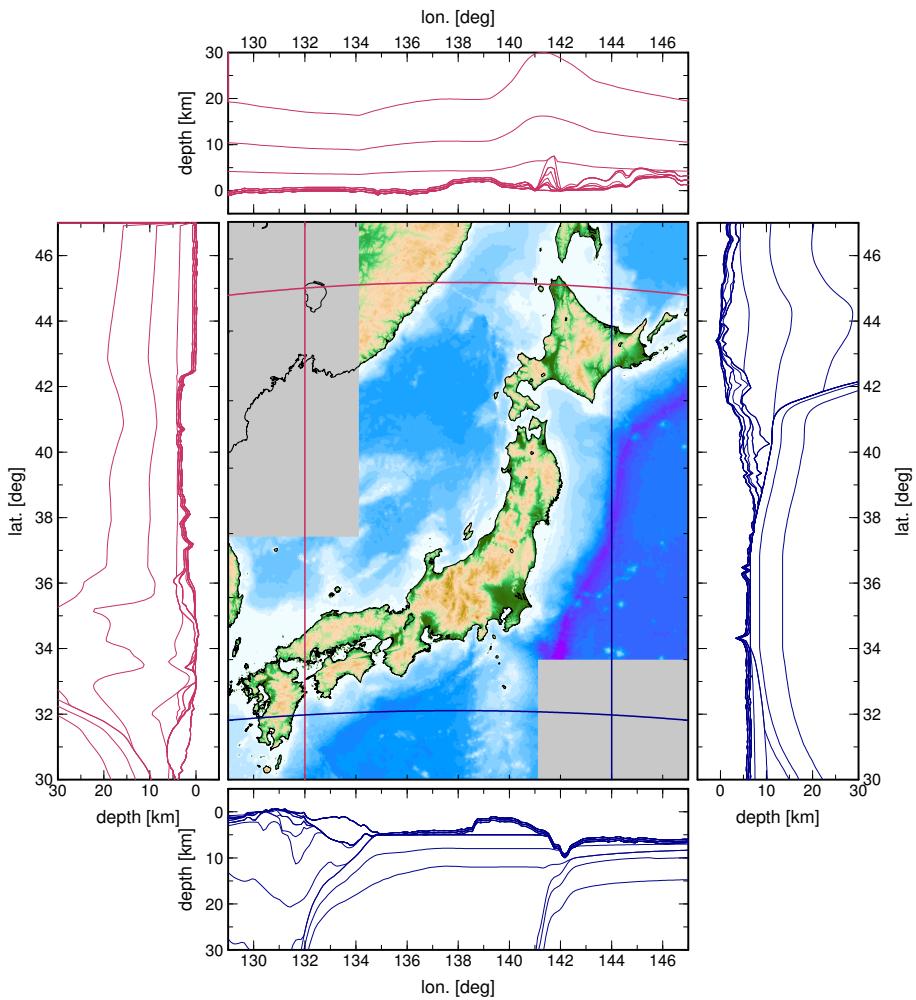


図 1.1 JIVSM モデルと eJIVSM モデル. 中央地図で標高値による色が塗られた部分が JIVSM で構造が定義されている領域, 灰色部分が eJIVSM モデルによって拡張される未定義領域である. 地図上の青・赤線に沿った構造モデル不連続面の深さ断面を上下左右にそれぞれ示す.

を実行すると, ディレクトリ `JIVSM` と `eJIVSM` 以下にそれぞれ 23 個の NetCDF ファイルが生成される. これらは GMT の `grd` ファイルでもあり, GMT の `grdimage`, `grdcontour` 等で直接扱うことができる. ファイル名には連番のほか 5 つの数字が埋め込まれており, それぞれ左から密度 (kg/m^3) , P 波速度 (m/s) , S 波速度 (m/s) , Q_P , Q_S に対応する. これらの物性値はそのファイルで規定される不連続面の下の構造を表している. また, 本コードの入力に用いる構造モデルリストファイル `jivsm.lst`, `ejivsm.lst` が作成される.

観測点リスト

`dataset/station` ディレクトリに防災科学技術研究所 Hi-net により配布されている観測点一覧から OpenSWPC 用の入力ファイルを作成するスクリプト `gen_stlst_hinet.sh` がある. スクリプト実行のために, 観測点一覧をあらかじめダウンロードし, 同ディレクトリに配置しておく必要がある.

観測点リストは主として緯度経度からなる単純なテキストファイルである(次章参照)ので, 必ずしもこのスクリプトによって作成する必要はない.

1.3.5 埋め込みパラメータの調整

OpenSWPC の挙動は原則としてパラメータファイルで制御されるが、計算速度の向上のため、幾つかの変更頻度の低いと期待されるパラメタがソースコードに埋め込まれている。これらはいずれも `m_global.F90` で定義されている。以下の値を修正した場合には、コード全体の再コンパイル (`make clean; make`) が必要である。

UC = 1E-15 (2 次元計算コードでは 1E-12)

計算に用いる混合座標系（距離 km, 密度 g/cm³, 地震波速度 km/s などの慣用単位）での結果を SI 単位に換算する定数。計算の単位系を変更する場合には調整が必要となる。

MP = DP

混合精度差分法の精度。DP の場合、必要な変数については倍精度で、それ以外の変数を单精度でそれぞれ計算する。これを SP に変更すると、計算すべてを单精度で実行するようになる。单精度計算では特に震源周辺で桁あふれに伴う不安定が起こる場合があるが、必要となるメモリ量は約 2/3 に小さくなり、計算も速い。

NM = 3

メモリ変数を用いて計算する一般化 Zener 粘弾性体の並列数。1 より大きな値の場合には、パラメタ `fq_*` に応じて指定された周波数範囲において周波数一定の Q 値を取るように最適化される。第2.5節も参照のこと。一方、0 の場合には完全弾性体の問題となり、内部減衰は考慮されない。特に 3 次元計算においては、計算に必要な時間やメモリ量がこのパラメタによって大きく変動する。

1.3.6 並列計算の実行例

シミュレーションの実行には、MPI 実行環境を用いて、

```
1 > mpirun -np ${NP} ./bin/swpc_3d.x -i ${input}
```

のようにする。ここで \${NP} は実行プロセス数、\${input} は入力ファイル名である。ただし、実行環境によって `mpirun` コマンドやそのオプションの与え方が異なる場合がある。

プログラムが正常に実行されると、以下のような画面出力が現れる。出力結果はコードの種別 (3D/PSV/SH) や動作モードによって多少異なる。

```
1 -----
2   SWPC_3D (benchmark mode)
3 -----
4
5   Grid Size          :      384 x  384 x  384
6   MPI Partitioning  :      4 x    6
7   Total Memory Size :      12.705 [GiB]
8   Node Memory Size  :      0.529 [GiB]
9   Stability Condition c :      0.980 (c<1)
10  Wavelength Condition r :      7.000 (r>5-10)
11  Minimum velocity     :      3.500 [km/s]
12  Maximum velocity     :      6.062 [km/s]
13  Maximum frequency    :      1.000 [Hz]
14
15 -----
16 -----
```

```

17  it=0000050, 1.877 s/loop, eta 000:29:43, ( 5.00E-05 5.00E-05 4.96E-05 )
18  it=0000100, 1.887 s/loop, eta 000:28:18, ( 1.75E-05 1.75E-05 1.05E-05 )
19  it=0000150, 1.932 s/loop, eta 000:27:22, ( 1.02E-05 1.02E-05 5.41E-06 )
20  it=0000200, 1.943 s/loop, eta 000:25:54, ( 6.59E-06 6.59E-06 4.35E-06 )
21
22  .
23  .
24  .
25
26  it=0000950, 1.986 s/loop, eta 000:01:39, ( 4.89E-07 4.89E-07 1.81E-06 )
27  it=0001000, 1.982 s/loop, eta 000:00:00, ( 1.65E-07 1.65E-07 1.54E-07 )
28
29 -----
30
31 Total time : 1982.348 s
32
33 -----

```

実行開始時にはメモリ使用量や安定条件（CFL 条件から取りうる最大の時間刻みと利用した時間刻みとの比）や波長条件（最小波長と空間刻みとの比）などを表示する。安定条件は $c < 1$ が必須であり、かつ波長条件 $r > 5 - 10$ が推奨される。特に、安定条件が満たされない場合には、計算は実行されず異常終了する。計算の実行中は、パラメタファイルで指定したタイミングで、定期的に 1 ステップあたりの計算所要時間・予想残り計算時間・現時点での最大速度振幅をそれぞれ表示する。

第 2 章

シミュレーションの実行とパラメタ設定

本コードの挙動は原則として一つの入力パラメタファイルで制御される。本章では主として 3 次元コードの入力を説明するが、2 次元 P-SV, SH コードについても、一部変数が不要なだけで同じパラメータで動作する。

2.1 パラメタファイルの記法

1 行に 1 変数を

1 (変数名) = (変数の値)

の形式で記述する。変数値の表現には Fortran の記法を用いる。たとえば論理型は `.true.` や `.false.` で記述される。原則として自由書式であり、上記変数行以外には何を書いてあってもよいが、特に!と#で始まる行は明示的にコメント行として読みとばされる。コメントは変数と同じ行にあっても良い。たとえば

1 nx = 1024 ! number of grids

のような記述が可能である。

変数の順番は問わず、どの変数がどの行に書かれても良い。ただし、指定されていない変数がある場合には、プログラム動作の支障の具合に応じて、デフォルト値が使われる場合と動作を停止する場合がある。前者の場合、利用されたデフォルト値が標準エラー出力に表示される。もし同じ変数の記述が複数回ある場合には、最初に読み込まれたものが採用される。変数指定の等号の両側には空白があって良い。ただし、整数もしくは実数のパラメタが負の値の場合、マイナス記号と数字の間に空白を置くことは許されない。ディレクトリの区切り記号を含む文字列変数は、シングルもしくはダブルクォーテーションで括って与える必要がある。

2.2 パラメタファイル

以下にサンプルパラメタを示す。以降の各節で、機能ごとに挙動とパラメタの解説を行う。

1 !! ----- !!
2 !! ----- !!
3 !!
4 !! SWPC input file
5 !!
6 !! ----- !!
7 !!
8 !!
9 !! ----- !!
10 !! Control

```

11  !!
12
13  title          = 'swpc'           !! exe title: used for output filenames
14  odir           = './out'          !! output directory
15  ntdec_r        = 50              !! screen report timing (1/cycle)
16
17
18  !! -----
19  !! Model/Grid Size and Area
20  !!
21
22  nproc_x         = 4               !! parallelization in x-dir
23  nproc_y         = 6               !! parallelization in x-dir
24  nx              = 384             !! total grid number in x-dir
25  ny              = 384             !! total grid number in y-dir
26  nz              = 384             !! total grid number in z-dir
27  nt              = 1000            !! time step number
28
29  dx              = 0.5             !! grid width in x-dir
30  dy              = 0.5             !! grid width in y-dir
31  dz              = 0.5             !! grid width in z-dir
32  dt              = 0.02            !! time step width
33
34  vcut            = 1.5             !! minimum velocity
35  !! smaller velocities will be increased
36
37  xbeg            = -96.0           !! minimum in x-dir
38  ybeg            = -96.0           !! minimum in y-dir
39  zbeg            = -10.0            !! minimum in z-dir
40  tbeg            = 0.0              !! start time
41
42  clon            = 139.7604        !! center longitude
43  clat            = 35.7182         !! center latitude
44  phi              = 0.0              !! horizontal coordinate rotation
45  !! measured clockwise from the north
46
47  fq_min          = 0.02            !! minimum freq. for Q-constant model
48  fq_max          = 2.00            !! maximum freq. for Q-constant model
49  fq_ref          = 1.0              !! ref. freq. for physical dispersion
50
51  !! -----
52  !! Snapshot Output
53  !!
54
55 .snp_format      = 'netcdf'        !! snapshot format (native or netcdf)
56
57  xy_ps%sw        = .false.          !! P&S amp. for xy section
58  xz_ps%sw        = .true.           !! P&S amp. for xz section
59  yz_ps%sw        = .false.          !! P&S amp. for yz section
60  fs_ps%sw        = .false.          !! P&S amp. for free surface
61  ob_ps%sw        = .true.           !! P&S amp. for ocean bottom
62

```

```

63  xy_v%sw      = .false.          !! 3-comp. velocity for xy section
64  xz_v%sw      = .true.           !! 3-comp. velocity for xz section
65  yz_v%sw      = .false.           !! 3-comp. velocity for yz section
66  fs_v%sw      = .false.           !! 3-comp. velocity for free surface
67  ob_v%sw      = .true.            !! 3-comp. velocity for ocean bottom
68
69  xy_u%sw      = .false.           !! 3-comp. disp. for xy section
70  xz_u%sw      = .true.            !! 3-comp. disp. for xz section
71  yz_u%sw      = .false.           !! 3-comp. disp. for yz section
72  fs_u%sw      = .false.           !! 3-comp. disp. for free surface
73  ob_u%sw      = .true.            !! 3-comp. disp. for ocean bottom
74
75
76  z0_xy        = 7.0              !! depth for xy cross section
77  x0_yz        = 0.0              !! x-value for yz cross section
78  y0_xz        = 0.0              !! y-value for xz cross section
79
80  ntdec_s      = 5                !! time decimation of snapshot
81  !- (specify 1 for no decimation)
82
83  idec         = 2                !! x-decimation for snapshot
84  jdec         = 2                !! y-decimation for snapshot
85  kdec         = 2                !! z-decimation for snapshot
86
87  !!
88  !! Waveform Output
89  !!
90
91  sw_wav_v      = .true.           !! velocity trace output at stations
92  sw_wav_u      = .false.          !! displacement trace output at stations
93  ntdec_w       = 5                !! time decimation of waveform output
94  st_format     = 'xy'             !! station format: 'xy' or 'll'
95  fn_stloc      = './example/stloc.xy' !! station location file
96  wav_format    = 'sac'             !! 'sac' or 'csf'
97
98  !!
99  !! Earthquake Source
100 !!
101
102 !! Moment tensor source format:
103 !! xymoij / xym0dc / llm0ij / llm0dc / xymwij / xymwdc / llmwij / llmwdc
104 !! Body force source format:
105 !! xy or ll
106 stf_format     = 'xym0ij'
107
108 !! Basis source time function
109 !! 'boxcar' / 'triangle' / 'herrmann' / 'kupper' / 'cosine' / 'texp'
110 stftype        = 'kupper'
111
112 fn_stf        = "./example/source.dat" !! Source grid file name
113
114 !! source depth correction

```

```

115 !! 'asis':use z value, 'bd{i}': i-th boundary (i=0...9)
116 sdep_fit      = 'asis'
117
118 !! -----
119 !! Body force source mode
120 !!
121 bf_mode       = .false.
122
123
124 !! -----
125 !! Plane wave source mode
126 !!
127 pw_mode        = .false.    !! plane wave input; neglects fn_stf
128 pw_ztop        = 100.      !! top z-coordinate of the initial plane wave
129 pw_zlen        = 30.       !! wavelength of the initial plane wave
130 pw_ps          = 'p'        !! 'p' P-wave 's' S-wave
131 pw_strike      = 0.0       !! strike direction of plane wave (deg.)
132 pw_dip         = 0.0       !! dip of plane wave (deg.)
133 pw_rake        = 0.0       !! rake of plane S-wave polarization (deg.)
134
135 !! -----
136 !! Absorbing Boundary Condition
137 !!
138
139 abc_type        = 'pml'      !! 'pml' or 'cerjan'
140 na              = 20         !! absorbing layer thickness
141 stabilize_pml   = .true.     !! avoid low-v layer in PML region
142
143 !! -----
144 !! Velocity model
145 !!
146
147 vmodel_type     = 'lhm'      !! velocity model type 'uni'/'grd'/'lhm'
148 is_ocean         = .true.     !! topography z<0 is covered by ocean
149 is_flatten       = .false.    !! Force topography variation to zero
150
151 !!
152 !! For uniform velocity model 'uni'
153 !!
154 vp0              = 5.0       !! P-wave velocity [km/s]
155 vs0              = 3.0       !! S-wave velocity [km/s]
156 rho0             = 2.7       !! mass density [g/cm^3]
157 qp0              = 200       !! Qp
158 qs0              = 200       !! Qs
159 topo0            = 0          !! topography location
160
161 !!
162 !! For GMT grid file input 'grd' (requires netcdf library)
163 !!
164 dir_grd          = '${DATASET}/vmodel/ejivsm'    !! directory for grd file
165 fn_grdlst        = './example/grd.lst'           !! grd file list
166 node_grd         = 0                      !! input MPI node

```

```

167      !! -----
168      !! For layered homogeneous medium model ('lhm')
169      !!
170      fn_lhm          = 'example/lhm.dat'    !! 1D velocity structure
171
172      !! -----
173      !! For random medium models
174      !!
175      !!
176      dir_rmed        = './in/'           !! location of random medium file
177      fn_grdlst_rmed = './example/grd.lst' !! grd file list
178      rhomin          = 1.0              !! minimum density threshold
179
180      !! -----
181      !! Checkpoint/Restart
182      !!
183      is_ckpt         = .false.          !! perform checkpoint/restart
184      ckpdir          = './out/ckp'       !! output directory
185      ckp_interval     = 1000000          !! interval for checkpoint (1/cycle)
186      ckp_time         = 1000000.         !! checkpoint time
187      ckp_seq          = .true.          !! sequential output mode
188
189      !! -----
190      !! Reciprocity Green's Function Mode
191      !!
192      green_mode       = .false.          !! reciprocity Green's function mode
193      green_stnm       = 'st01'           !! virtual station name from fn_stlst
194      green_cmp         = 'z'              !! virtual source direction 'x', 'y', 'z'
195      green_trise       = 1.0              !! rise time
196      green_bforce      = .false.          !! also calc. body force Green's function
197      green_maxdist     = 550.             !! horizontal limit of source grid
198      green_fmt         = 'llz'            !! list file format: 'xyz' or 'llz'
199      fn_glst          = 'example/green.lst' !! Green's function grid point list
200
201      !! -----
202      !! MISC
203      !!
204
205      stopwatch_mode   = .true.          !! measure computation time at routines
206      benchmark_mode   = .true.          !! benchmark mode
207
208      ipad             = 0                !! memory padding size for tuning
209      jpad             = 0                !! memory padding size for tuning
210      kpad             = 0                !! memory padding size for tuning

```

2.3 動作環境の制御

title
計算のタイトル。出力ファイル名に利用される。
odir

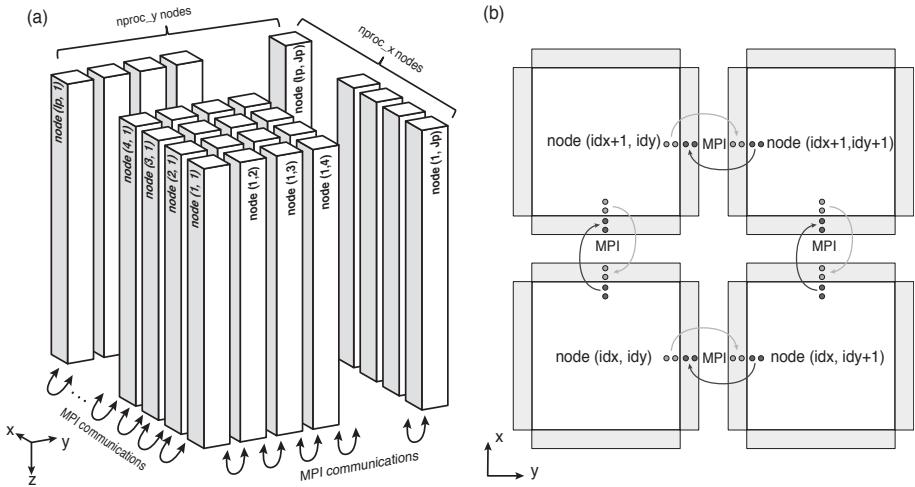


図 2.1 3 次元計算における並列分割 (modified from [Maeda et al., 2013](#))

出力ディレクトリ名。プログラム実行時の場所からの相対ディレクトリ。このディレクトリが存在しない場合には、実行時に自動的に作成される。

ntdec_r

計算の経過を画面出力する際の間引き間隔。`ntdec_r` 計算ステップ毎に、途中経過として、1ステップあたりにかかる計算時間と計算終了までの所要時間見込み、そして3成分地震波速度計算値の最大値を出力する。本パラメタは主に正常動作の確認と計算時間の評価のために用いるもので、計算結果には影響しない、ただし、あまりにも表示頻度が高い（`ntdec_r` が小さい）と、計算実行時間の増大を招く可能性がある。

2.4 座標系と並列計算

`OpenSWPC` は 3 次元計算の場合は水平 2 次元分割を、2 次元計算の場合には水平 1 次元分割を用いて並列計算を行う。3 次元計算の場合の空間 MPI 分割の様子を図2.1に示す。2 次元計算の場合には、 x - z (i - k) 断面が利用される。

本コードは、`xbeg`-`xend`, `ybeg`-`yend`, `zbeg`-`zend` の領域を、空間刻み `dx`, `dy`, `dz` で各方向 `nx`, `ny`, `nz` 個のグリッドに離散化する。 z 方向は下が正の座標系を取る。水面が $z = 0$ であることが想定されているため、地表境界条件を満たすため `zbeg` は負の値から始めることが推奨される。実空間モデルでの計算の場合には、中心緯度 `clon`, `clat` を基準点として Gauss-Krüger 投影 ([Kawase, 2011](#)) により計算座標系（デカルト座標系）の xy 面を地理座標系に関連づける（図2.2）。具体的には以下の手順により地理座標を取得する。

1. 回転角 `phi` と x , y のパラメタから、デカルト座標系における等間隔グリッド位置を生成する。
2. 1. で生成したグリッド一つ一つの位置を、`clon`, `clat` を中心位置とした Gauss-Krüger 変換によって緯度経度に変換する。
3. 各グリッド位置の緯度経度における標高ないしは境界面深さを、入力速度構造データから双3次補間によって推定する。

領域の指定範囲が入力構造ファイルの外にはみ出してしまった場合には、構造ファイルの最外側グリッドでの値が補外される。

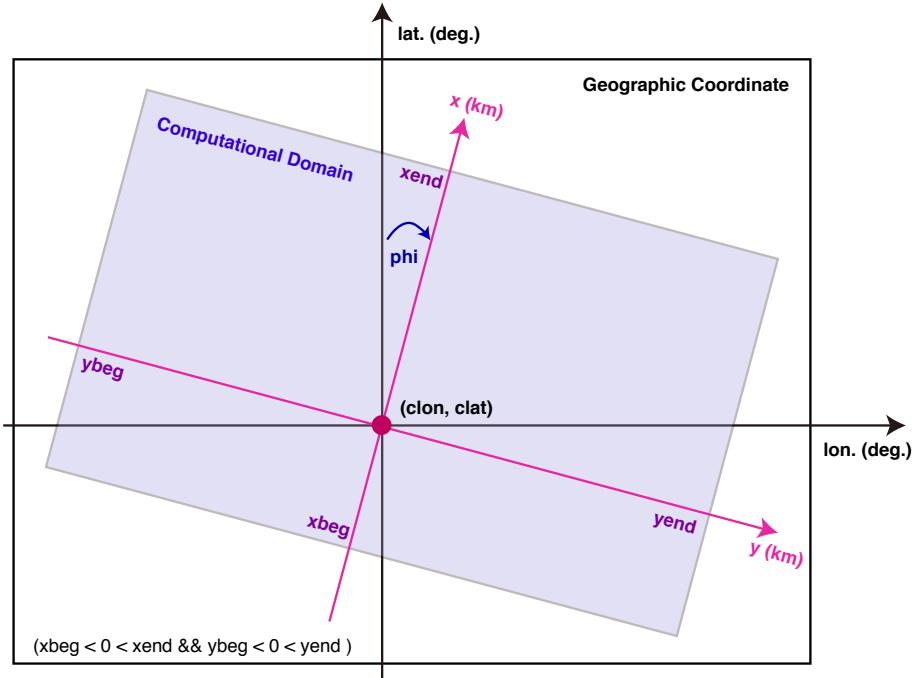


図 2.2 地理座標系と計算座標系（水平断面）の関係

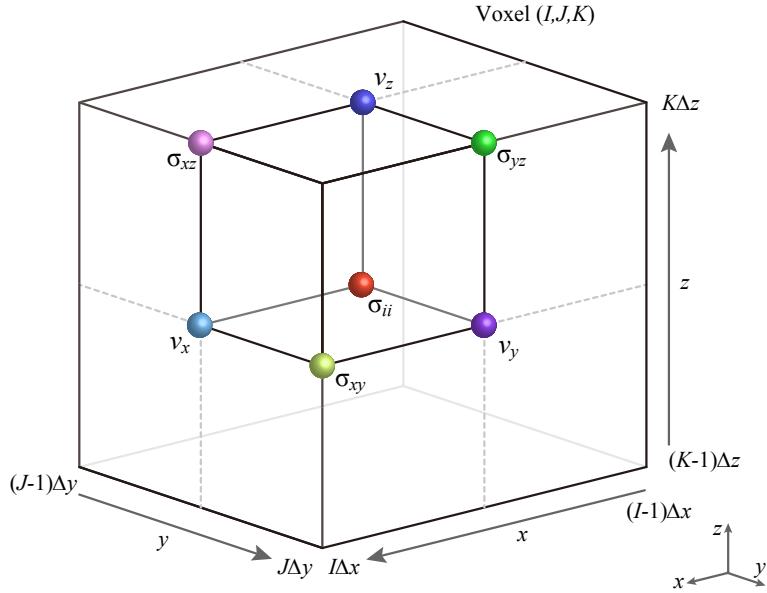


図 2.3 3 次元のスタガードグリッド配置。 $xbeg=ybeg=zbeg=0$ の場合。

2.4.1 スタガードグリッド

直交座標系 $O(xyz)$ と離散化グリッドとの間は図2.3のように関係付けられる。図2.3に含まれるグリッドが、プログラム上では同一の配列インデックス (I, J, K) をもつ。この単位 4 面体をボクセル、と呼ぶ。ある x が属するボクセル位置は

$$I = \left\lceil \frac{x - x_{\text{beg}}}{\Delta x} \right\rceil, \quad (2.1)$$

で、逆にボクセル位置 I が与えられたときのボクセル中心の座標位置は

$$x = x_{\text{beg}} + \left(I - \frac{1}{2}\right) \Delta x \quad (2.2)$$

でそれぞれ与えられる。ただし $\lceil \cdot \rceil$ は天井関数、 x_{beg} は座標系のとる最小値であり、 $x = x_{\text{beg}}$ はボクセル $I = 1$ に属するようにとられている。範囲

$$\begin{aligned} x_{\text{beg}} + (I-1)\Delta x &< x \leq x_{\text{beg}} + I\Delta x, \\ y_{\text{beg}} + (J-1)\Delta y &< y \leq y_{\text{beg}} + J\Delta y, \\ z_{\text{beg}} + (K-1)\Delta z &< z \leq z_{\text{beg}} + K\Delta z \end{aligned} \quad (2.3)$$

で定義されるボクセルの中心に法線応力成分が、辺上に剪断応力成分が、そしてボクセル面上に速度成分がそれぞれ配置される（図2.3）。密度・速度などの媒質定数はすべてボクセル中心

$$\begin{aligned} x_{\text{beg}} + (I-1/2)\Delta x, \\ y_{\text{beg}} + (J-1/2)\Delta y, \\ z_{\text{beg}} + (K-1/2)\Delta z \end{aligned} \quad (2.4)$$

の位置で与える。計算中に適宜平均化操作が行われ、それぞれのグリッドでの媒質パラメタが評価される。

空間グリッドサイズ $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ と時間ステップ間隔 Δt は、差分法の安定条件を満たさなければいけない。 N_D 次元空間の、空間差分次数 P 次の安定条件は

$$\Delta t < \frac{1}{V_{\max}} \left(\sum_{i=1}^{N_D} \frac{1}{\Delta x_i^2} \right)^{-1/2} \left(\sum_{p=1}^{P/2} C_p \right)^{-1} \quad (2.5)$$

のように与えられる。ここで V_{\max} は媒質中もっとも速い地震波速度、 C_p は差分演算の係数、 Δx_i は i 方向の空間グリッドサイズである。空間4次の差分公式の場合、係数 C_p は $C_1 = 9/8, C_2 = 1/24$ である。たとえば、3次元空間4次の差分法で、空間グリッドサイズが等方的 ($\Delta x = \Delta y = \Delta z = h$) の場合、この安定条件は

$$\Delta t < \frac{6}{7} \frac{1}{V_{\max} \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2}}} = \frac{6h}{7\sqrt{3}V_{\max}} \simeq 0.495 \frac{h}{V_{\max}}. \quad (2.6)$$

のように簡略化される。物理的には、『1時間ステップに地震波が伝播する距離は、空間グリッド間隔よりも（充分に）小さい』ことが要請されている。この条件が満たされないと、差分法による時間発展計算そのものが不安定になり、すぐさま発散してしまう。

安定条件に加え、地震波の波長よりも空間グリッドサイズが充分に小さい（1波長あたり5–10グリッド）ことも要求される。こちらの波長条件はたとえ満たされなくとも計算そのものは実行可能であるが、波長あたりのグリッド数が足りない場合には、地震波速度が波長（あるいは周波数）に依存する数値分散現象が起こる。数値分散の結果、差分法によって計算される地震波の速度は常に仮定した速度より遅くなるため、この人工的な分散による後続波が現れてしまう。数値分散を避けるためには空間グリッドサイズを小さくする必要があるが、同時に、安定条件を満たすために時間ステップ間隔も小さくしなければならない。

これら安定条件と波長条件は、差分法プログラム実行開始時に標準エラー出力にパラメタ `Stability Condition c` および `Wavelength Condition r` として表示される。それぞれ、安定条件と時間刻みの比および構造中の最小波長と空間グリッドサイズの比を意味している。

`nproc_x, nproc_y`

x, y 方向の MPI 分割数（図2.1）。全並列数は `nproc_x × nproc_y` になる。この全並列数が実行時に `mpirun` 等で指定されるプロセス数と一致している必要がある。分割数は1でも良い。どちらも1の場合には事実上の非並列計算になる。

`nx, ny, nz`

空間次元各方向のグリッド数。なお、水平方向のグリッド数 `nx, ny` は必ずしも `nproc_x, nproc_y` の倍数でなくとも良い。余りが発生する場合には、端を担当するノードのグリッド数で自動的に調節される。

`dx, dy, dz`

空間グリッド間隔 [km]。全空間サイズは `nx × dx` などとなる。各方向のグリッドサイズは等しくなくとも良い。

`nt`

時間グリッド数。

`dt`

時間グリッド間隔 [s]。全時間長は `nt × dt` である。

`xbeg, ybeg, zbeg`

各空間方向の最小値。地図投影法上は、基準緯度経度が中心になるような値となっているのが最も歪みが少ない。`xbeg` と `ybeg` が省略された場合には、`xbeg=-nx×dx/2, ybeg=-ny×dy/2` と自動設定される。`zbeg` が省略された場合には、`K=30` が地表面となるように自動設定される。

`tbeg`

時間の最小値。通常は 0 で良いが、特定の時刻から始める事もできる。

`clon, clat`

座標系中心経度・中心緯度 (度)。本座標位置を中心とした Gauss-Krüger 変換によって座標投影が行われる。

`phi`

地理座標系に対する計算座標系の回転角度 (図2.2)。`phi=0` の場合は x 軸が北、 y 軸が東を向いている。通常はゼロで良いが、斜めの座標系を用いる事もできる。ただし、`phi≠0` の場合には、出力波形やスナップショットの x, y 成分も角度が `phi` だけ傾いているので注意が必要である。

2.5 粘弾性体

OpenSWPC では粘弾性体モデルとして Generalized Zener Body (GZB) を採用し、複数の異なる緩和時間をもつ粘弾性体要素を並列に繋ぐことで、広い周波数帯域において一定の Q 値を持つモデルを実現している。このことにより、実体波速度は物理分散性を持つことになる (e.g., [Aki and Richards, 2002](#))。そのため、構造モデルがどの周波数における値なのかを指定するための基準周波数をパラメタとして与える必要がある。

この粘弾性体は、弾性係数 $\pi \equiv \lambda + \mu$ と μ それぞれに対応する緩和関数

$$\begin{aligned}\psi_{\pi}(t) &= \pi_R \left(1 - \frac{1}{N_M} \sum_{m=1}^{N_M} \left(1 - \frac{\tau_m^{\varepsilon P}}{\tau_m^{\sigma}} \right) e^{-t/\tau_m^{\sigma}} \right) H(t) \\ \psi_{\mu}(t) &= \mu_R \left(1 - \frac{1}{N_M} \sum_{m=1}^{N_M} \left(1 - \frac{\tau_m^{\varepsilon S}}{\tau_m^{\sigma}} \right) e^{-t/\tau_m^{\sigma}} \right) H(t)\end{aligned}\tag{2.7}$$

を持つ。ただしここで、 $\pi_R \equiv \lambda_R + 2\mu_R$ は P 波の relaxed modulus, μ_R は S 波の relaxed modulus である。また、 $\tau_m^{\varepsilon P}$ と $\tau_m^{\varepsilon S}$ はそれぞれ P 波と S 波のクリープ時間、 τ_m^{σ} は緩和時間と呼ばれる。GZB は Zener 粘弾性体を N_M 個並列に接続したモデルである (図2.4)。異なる緩和時間をもつ粘弾性体モデルを多数並列させることにより、広い周波数帯で現実的な減衰をもつ媒質を表現することができる。また、クリープ時間を P 波と S

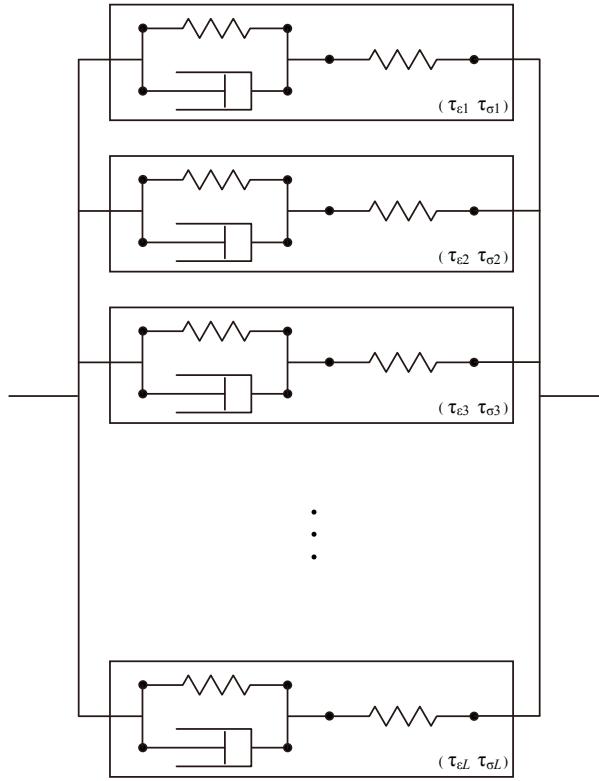


図 2.4 一般化 Zener 粘弾性体

波で独立に選ぶことにより、独立な内部減衰 Q_P, Q_S を指定することができる。このモデルの構成方程式は

$$\begin{aligned}\dot{\sigma}_{ii}(t) &= (\dot{\psi}_\pi(t) - 2\dot{\psi}_\mu(t)) * \partial_k v_k(t) + 2\dot{\psi}_\mu(t) * \partial_i v_i(t) \quad (i \text{ は和をとらない}) \\ \dot{\sigma}_{ij}(t) &= \dot{\psi}_\mu(t) * (\partial_i v_j(t) + \partial_j v_i(t))\end{aligned}\quad (2.8)$$

となる。構成方程式に畳み込みが現れるが、メモリ変数法 (Robertsson et al., 1994) を用いることでこれを複数の 1 階の微分方程式の組に帰着させて数値計算を行う。また、Blanch et al. (1994) の τ -method により、以下に述べる最小限のパラメタから、指定周波数範囲で Q 値がもっとも平坦になるようなモデルを選択する。

fq_min

粘弾性体 Q 一定値モデルの最小周波数

fq_max

粘弾性体 Q 一定値モデルの最大周波数

fq_ref

粘弾性体 Q 一定値モデルにおいて速度値が定義される基準周波数

図2.5に示すように、パラメタ **fq_min** と **fq_max** の間の周波数帯で、 Q 値がほぼ一定の値をとる。その外側では、周波数の 2 次で減衰が小さくなる。この Q モデルは複数の粘弾性体（図中点線）の重ね合わせで実現される。そのため、より広帯域で Q を維持するためには、メモリ変数の数（埋め込みパラメタ NM）を増やす必要がある。しかし、これは計算量とメモリ使用量の大幅な増大を招く。設定したパラメタ下での Q 値の周波数依存性は、プログラム **qmodel_tau.x** で調べることができる（第3.3.1節）。

広帯域で平坦な減衰モデルを採用すると、物理分散性により実体波の速度が周波数に依存するようになる。そこで基準周波数 **fq_ref** を定義し、構造モデルで入力された速度は $f=fq_ref$ での速度であることが仮定さ

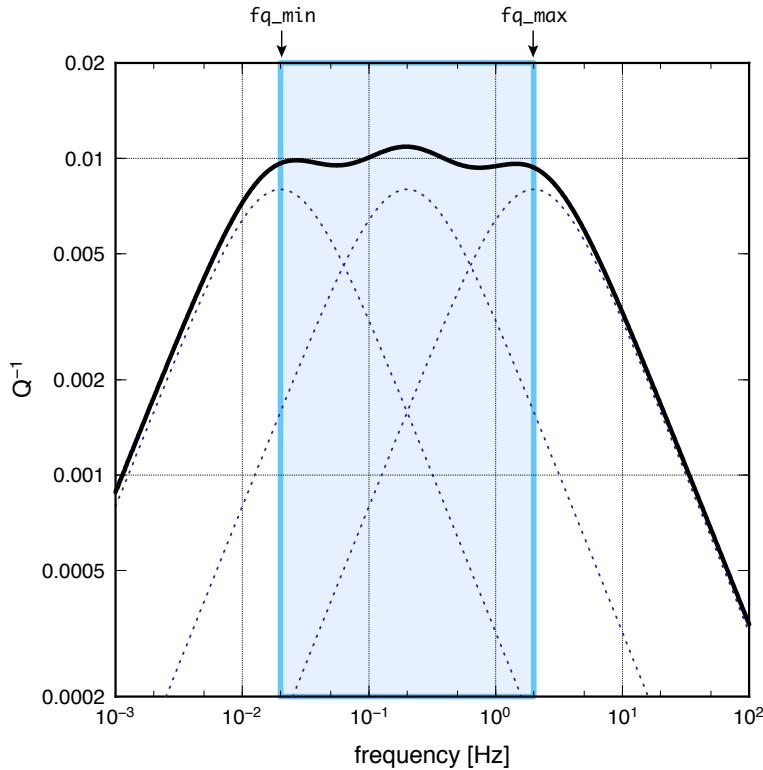


図 2.5 Q^{-1} の周波数依存性の例。 $nm=3$ の場合の各粘弾性体構成要素の周波数依存性（破線）と合計された全体の Q^{-1} モデル（実線）の周波数特性を示す。青色の領域が fq_min （左青線）と fq_max （右青線）で指定された Q 値一定の周波数範囲。

れる。

2.6 出力ファイルの設定

2.6.1 出力ファイル形式

スナップショットファイル出力には、Fortran の stream I/O 機能を用いた独自形式のバイナリデータもしくは NetCDF 形式のデータを選択できる。波形出力は SAC 形式で行われる。出力に際して明示的なエンディアン変換は行わないため、生成されるファイルは実行環境のエンディアンに依存する。しかし、SAC および NetCDF のライブラリはエンディアンに依存せずファイルを読むことができるため、これらのフォーマットを使っている限り、エンディアンについて意識する必要はほとんど無い。

独自形式のスナップショットは、開発の都合でフォーマットに微細な変更がなされることがあるが、後方互換性は確保されている。そのため、同じバージョンのコードに同梱されているプログラム経由でデータを読むのが確実である。波形出力の SAC ファイルには、SAC で必須とされる標準的なヘッダの他、表2.1のヘッダが付加される。波形記録の単位は、SAC フォーマットの標準に従い、速度は nm/s、変位は nm が採用されている。

Fortran stream I/O 形式（以下 native 形式）のスナップショットファイルには、ヘッダ情報、構造（地表であれば地形、断面であれば速度構造）、空間スナップショットの順にデータが格納される。

スナップショットとして NetCDF 形式を用いた場合も、表2.2に相当する global attribute が設定される。そ

表 2.1 OpenSWPC で利用される SAC ヘッダ

header name	description
kevnm	title
evlo, evla, evdp	震源リストの 1 行目の震源位置。xy で与えられた場合には緯度経度変換する。
o	震源リスト 1 行目の震源破壊開始時間。
kzdate, kztime	プログラム実行開始日時
b	tbeg
delta	ntdec_w × dt
mag	震源モーメントから換算される M_W
user0,...,user5	震源リスト 1 行目の $m_{xx}, m_{yy}, m_{zz}, m_{yz}, m_{xz}, m_{xy}$
user6,user7,user8	clon, clat, phi
kstnm	stnm
stlo,stla,stdp	観測点位置。観測点が xy で与えられた場合には緯度経度に変換の上出力される。
kcmpnm	速度 Vx, Vy, Vz, 变位 Ux, Uy, Uz
cmpinc,cmpaz	x, y の方向に応じた観測点極性方向
idep	SAC フォーマットに従い、速度波形では 7, 变位では 6 が格納される

表 2.2 スナップショットファイルのヘッダ項目

var	type	description
bintype	character(8)	"STREAMIO" に固定
codetype	character(8)	"SWPC_3D" or "SWPC_PV" or "SWPC_SH"
hdrver	integer	ヘッダバージョン。バージョンによりヘッダ内容が異なる可能性あり。
title	character(80)	実行名。
exedate	integer	実行日時。POSIX TIME で与える。
coordinate	character(2)	断面成分。'xy', 'xz', 'fs', 'ob' など。
datatype	character(2)	データ種別。'ps' or 'v2' or 'v3'
ns1,ns2	integer	スナップショット各辺のデータ数
beg1,beg2	real	各辺の始点座標値
ds1,ds2	real	グリッド間隔
dt	real	スナップショットの時間間隔
na1,na2	real	吸収境界領域のスナップショットグリッド数
nmed	integer	媒質データの個数
nsnp	integer	1 時間ステップあたりのスナップショット枚数
clon,clat	real	座標中心緯度経度
v1,v2,v3	real	予備。本コードでは利用しない。

のほかは NetCDF の COARDS 規約^{*1} および一部 CF 拡張^{*2} に従う。

なお、波形・スナップショットとも水平成分の方向は計算座標系の x,y,z に準ずる。phi=0 であればそれ北・東であるが、計算座標系を回転している場合には注意が必要である。この座標系の回転角は出力 SAC ファイルヘッダの cmpaz に格納されているため、SAC 上で容易に北・東を正にする方向に変換することがで

^{*1} http://ferret.wrc.noaa.gov/noaa_coop/coop_cdf_profile.html

^{*2} <http://cfconventions.org>

表 2.3 スナップショット出力担当ノード番号。小ノード数で担当ノード番号が存在しない場合には mod によって折り返した番号が利用される。

section	type	node
yz	PS	0
xz	PS	mod(1, nproc)
xy	PS	mod(2, nproc)
fs	PS	mod(3, nproc)
ob	PS	mod(4, nproc)
yz	V	mod(5, nproc)
xz	V	mod(6, nproc)
xy	V	mod(7, nproc)
fs	V	mod(8, nproc)
ob	V	mod(9, nproc)
yz	U	mod(10, nproc)
xz	U	mod(11, nproc)
xy	U	mod(12, nproc)
fs	U	mod(13, nproc)
ob	U	mod(14, nproc)

きる。また、波形出力の鉛直成分については、慣例に従い上が正になるように反転されている。一方、スナップショットの速度出力の z 成分は計算座標系（鉛直下方が正）のままである。

2.6.2 スナップショット出力

3 次元空間のうち、xy, yz, xz それぞれの方向の水平断面と地表面 (fs)・海底面 (ob) に沿った面の波動場スナップショットを出力することができる。出力可能なのは速度振幅 (v), 変位振幅 (u) および速度振幅の発散と回転 (ps) の 3 種類である。すべての時間ステップにすべてのデータを出力するのはデータ容量と入出力時間から現実的ではないため、時間と空間の両方に間引き要素を導入している。時間については積分開始時間を始点として、ntdec_s ステップ毎に出力をを行う。空間については、指定された x, y, z 方向の間引き間隔 idec, jdec, kdec により間引きが行われる (図2.6)。このとき、各 MPI ノード内で出力されるグリッド点数は一定とは限らない (一定となるように出力間隔やグリッドサイズを調整する必要は無い)。データはすべて特定のノードに集約されて、snp_format パラメタの値により、独自形式 (native) もしくは NetCDF 形式のバイナリファイルとして出力される。データ出力に伴う負荷を分散するため、出力を行うノードは表2.3のようにスナップショット種別毎に異なっている。

入力パラメータでは各スナップショット断面の出力の有無や間引き要素を制御する。なお、2 次元 SH 計算では 1 成分しかないので P 波 S 波出力は生成されない。

snp_format

スナップショットファイルの出力フォーマット。"native" (Fortran 独自フォーマット, デフォルト) もしくは"netcdf" (NetCDF 形式) のいずれかを指定する。NetCDF ファイルはさまざまな環境やソフ

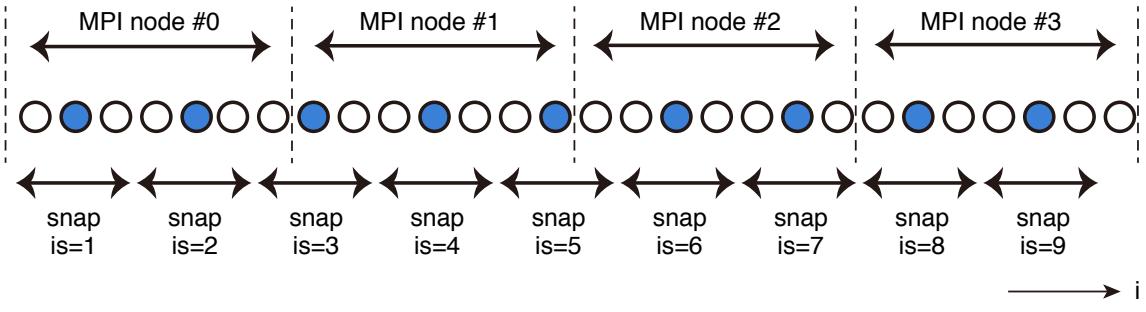


図 2.6 スナップショット間引きの模式図。丸印が i 方向の座標グリッドで、点線が MPI のドメイン境界を示す。間引き要素は $\text{idec}=3$ の場合を示している。青色に塗りつぶされたグリッドからのデータがスナップショットとして出力される。

トウェアで直接読むことができるが、環境によって数 % の計算実行時間増を招くことがある。

`xy_ps%sw, xz_ps%sw, yz_ps%sw, fs_ps%sw, ob_ps%sw`

各断面での P/S 振幅 ($|\text{div}(\mathbf{v})|, |\text{rot}(\mathbf{v})|$) の出力スイッチ。

`xy_v3%sw, xz_v3%sw, yz_v3%sw, fs_v3%sw, ob_v3%sw`

各断面での 3 成分速度スナップショットの出力スイッチ。

`xy_u3%sw, xz_u3%sw, yz_u3%sw, fs_u3%sw, ob_u3%sw`

各断面での 3 成分変位スナップショットの出力スイッチ。

`z0_xy`

xy 断面を出力する深さ (km)

`x0_yz`

yz 断面を出力する x 座標位置 (km)

`y0_xz`

xz 断面を出力する y 座標位置 (km)

`ntdec_s`

スナップショット出力の時間間引き要素。計算時間ステップ `ntdec_s` 回に 1 度出力される。

`idec, jdec, kdec`

スナップショット出力の x, y, z 方向の空間間引き要素。

2.6.3 地震波形出力

波形出力オプションが `sw_wav_v=.true.` もしくは `sw_wav_u=.true.` の場合、観測点における速度や変位の時系列を SAC フォーマットの波形として出力する。変位計算のための時間積分は出力時の時間間引きを行う前に実行されるため、時間間引き後の速度波形を積分するよりも高精度である。計算中は地震波形はメモリ上に保持され、計算終了時にまとめて出力される。計算を中断した場合には波形を得ることができない。

観測点位置は計算座標系 (xy) か地理座標系 (ll) かいずれかのフォーマットで与える (表2.4)。記号#から始まる行はコメント行と見なされる。

観測点の深さは、入力 `zsw` によって表2.5のように変化させることができる。地表や海底の形状はグリッドに沿った階段状に離散化されるため、観測点の深さから直接変換する (`zsw='dep'`) と、観測点が意図せずに空中に飛び出し、意図した結果が得られない場合がある。海底の観測点の場合には、波形出力の位置が海底の固体側にあるか海中側にあるかによって、その水平動振幅が大きく異なる。そこで、`zsw` の値の指定により、海面上の観測点や海底、ならびに海底の底の観測点をそれぞれ模擬することができる。特段の事情が無い限

表 2.4 観測点位置ファイルフォーマット

種類	書式				
'xy'	x	y	z	name	zsw
'll'	lon	lat	z	name	zsw

り, `zsw = 'obb'` としておくのが良い。

複数の観測点における出力が必要な場合は、観測点位置ファイルに改行区切り観測点を加えていけばよい。ただし、'xy' と 'll' のフォーマットを混ぜることはできない。観測点数は自動的にカウントされ、そのうち計算モデル内にある観測点のみが output される。`[$DATASET]/stations/`以下にサンプルとして防災科学技術研究所 Hi-net および F-net の観測点位置のファイルが格納されている。これらを指定すれば、すべての観測点のうち計算領域内にある観測点だけが自動的に出力される。

表 2.5 観測点深さ

zsw	観測点深さ
'dep'	与えられた zst から計算
'fsb'	地表・海面グリッドの一つ下
'obb'	地表・海底グリッドの一つ下
'oba'	地表・海面グリッドの一つ上
'pac'	太平洋プレート境界
'phs'	フィリピン海プレート境界

`sw_wav_v, sw_wav_u`

速度 (v)・変位 (u) 波形の出力スイッチ。

`ntdec_w`

波形出力の時間間引き間隔。1 で全時間ステップの記録を出力する。

`st_format`

観測点位置ファイルのフォーマット。'xy' なら計算座標, 'll' なら地理座標モード。

`fn_stloc`

観測点ファイル名。

`wav_format`

波形ファイルフォーマット。通常は 'sac'

`csf フォーマット`

波形出力は原則として SAC 形式であるが、システムがあまりにも大量の波形ファイルを出力することに耐えられないケースがある。また、大量の小サイズファイルはネットワークを通じたデータの転送にも不向きである。そこで、Version 3.0 以降ではパラメタ `wav_format = 'csf'` が指定されると、SAC ファイルを複数観測点・成分について单一ファイルに結合した csf ファイル（独自形式）の出力を選択することもできる。

csf フォーマットは、SAC 形式のバイナリファイルを単純結合したものの先頭に 3 つの 4 バイト実数をヘッダとして付加しただけの単純なフォーマットである。ヘッダは以下の構成要素からなる。

nvhdr
フォーマットバージョン番号。常に 0 が入る。

ntrace
ファイル内に格納されている波形の数

npts
一つ一つの波形の時間サンプル数

ファイルに含まれる波形のサンプル数はすべて等しいことが仮定されている。csf 出力が選択された場合、並列計算のノード毎に、そのノードに含まれる観測点の同じ成分の波形が一つのファイルにまとめられて出力される。

2.6.4 出力ファイル名

計算結果は以下のようなファイル名で出力される。

- スナップショット `(odir)/(title).(section).(type).snp`
- 波形 `(odir)/wav/(title).(stnm).(component).sac`
- 計算時間 `(odir)/wav/(title).tim`

ここで、`(section)` は出力断面を表す 2 文字で、特定位置の断面であれば `xy`, `yz` などと表す。地表面と海底はそれぞれ `fs` (Free Surface) ならびに `ob` (Ocean Bottom) で表される。`(type)` は速度振幅か P 波・S 波 (`div, rot` の絶対値) かによって `v` もしくは `ps` を取る。`(component)` は速度か変位かに応じて `Vx, Vy, Vz` あるいは `Ux, Uy, Uz` を取る。

2.7 速度構造の指定

2.7.1 構造モデルの選択

OpenSWPC の入力速度構造は層構造モデルを基本としている。一つ一つの層は、深さ（もしくは高さ）の変化を持つ x - y （もしくは緯度経度）の面であり、これを地震波速度・密度ならびに内部減衰の等値面として取り扱う。変数 `vmodel_type` の設定によって一様構造、水平成層構造、あるいは NetCDF バイナリ入力種別を選択できる。

`vmodel_type`

速度構造モデルタイプの指定。以下のいずれかを選択する。

`'uni'` 一様均質構造。以下のパラメタも指定すること。

`vp0` 一様構造の P 波速度

`vs0` 一様構造の S 波速度

`rho0` 一様構造の質量密度

`qp0` 一様構造の Q_P

`qs0` 一様構造の Q_S

`topo0` 一様構造の地表面深さ。0 以上の場合には $z = 0$ から `topo0` まで海水が満たされる。

`'lhm'`

水平成層構造 (Layered Homogeneous Medium)。境界面深さと物性値のテーブルを別途指定する。

`fn_lhm` 成層構造指定ファイル。1 行に層の深さ・密度・P 波速度・S 波速度・ Q_P ・ Q_S を空白区切

りで記入する。#はコメント行として扱われる。指定された深さ以深の構造がその行の物性値で満たされる。以下の例を参照のこと。

	# depth	rho(g/cm^3)	vp(km/s)	vs(km/s)	Qp	Qs
2	# -----					
3	0	2.300	5.50	3.14	600	300
4	3	2.400	6.00	3.55	600	300
5	18	2.800	6.70	3.83	600	300
6	33	3.200	7.80	4.46	600	300
7	100	3.300	8.00	4.57	600	300
8	225	3.400	8.40	4.80	600	300
9	325	3.500	8.60	4.91	600	300
10	425	3.700	9.30	5.31	600	300

'grd'

NetCDF (*.grd) による構造入力。コンパイル時にプリプロセッサオプション_NETCDF の指定が必要である。以下のパラメタも指定すること。

dir_grd grd ファイル格納ディレクトリ。

fn_grdlst grd ファイル名と物性値のリストファイル。以下の例を参照。各層毎に、物性値（密度・地震波速度・Q 値）を指定する。また、sw で特定の境界面の grd ファイルを指定することができます。この sw 震源の深さをプレート境界に一致させる（オプション sdep_fit）際に用いられる。最上面は地表面として取り扱われる。それより上層については、z <= 0 は海水層、それ以外は空気として扱われる。

	# grd filename	rho	vp	vs	QP	QS	sw
2	# -----						
3	'eJIVSM_01_TAB_.grd'	1.80	1.70	0.35	119	70	0
4	'eJIVSM_02_BSM_.grd'	1.95	1.80	0.50	170	100	0
5	'eJIVSM_03_BSM_.grd'	2.00	2.00	0.60	204	120	0
6	'eJIVSM_04_BSM_.grd'	2.05	2.10	0.70	238	140	0
7	'eJIVSM_05_BSM_.grd'	2.07	2.20	0.80	272	160	0
8	'eJIVSM_06_BSM_.grd'	2.10	2.30	0.90	306	180	0
9	'eJIVSM_07_BSM_.grd'	2.15	2.40	1.00	340	200	0
10	'eJIVSM_08_BSM_.grd'	2.20	2.70	1.30	442	260	0
11	'eJIVSM_09_BSM_.grd'	2.25	3.00	1.50	510	300	0
12	'eJIVSM_10_BSM_.grd'	2.30	3.20	1.70	578	340	0
13	'eJIVSM_11_BSM_.grd'	2.35	3.50	2.00	680	400	0
14	'eJIVSM_12_BSM_.grd'	2.45	4.20	2.40	680	400	0
15	'eJIVSM_13_BSM_.grd'	2.60	5.00	2.90	680	400	0
16	'eJIVSM_14_BSM_.grd'	2.65	5.50	3.20	680	400	0
17	'eJIVSM_15_UPC_.grd'	2.70	5.80	3.40	680	400	0
18	'eJIVSM_16_LWC_.grd'	2.80	6.40	3.80	680	400	0
19	'eJIVSM_17_CTM_.grd'	3.20	7.50	4.50	850	500	0
20	'eJIVSM_18_PH2_.grd'	2.40	5.00	2.90	340	200	1
21	'eJIVSM_19_PH3_.grd'	2.90	6.80	4.00	510	300	0
22	'eJIVSM_20_PHM_.grd'	3.20	8.00	4.70	850	500	0
23	'eJIVSM_21_PA2_.grd'	2.60	5.40	2.80	340	200	2
24	'eJIVSM_22_PA3_.grd'	2.80	6.50	3.50	510	300	0
25	'eJIVSM_23_PAM_.grd'	3.40	8.10	4.60	850	500	0

`node_grd` データ読み込み担当ノード。すべての層構造ファイルはここで指定されたノードから読み込まれ、MPI によって全ノードにデータ転送される。

`is_ocean`

海水モード。`.true.`（デフォルト）の場合 $z = 0$ より地表面までは海水で満たされる。

`.false.` の場合には海底面の上はすべて空気となり、自由表面として取り扱われる。

`'user'`

`src/swpc_*/m_vmodel_user.F90` 内のサブルーチンでユーザーが定義する速度構造が読み込まれる。この F90 ファイルを修正した場合には再コンパイルが必要となる。サブルーチンの引数についてはファイル内コメントを参照のこと。

`vcut`

カットオフ速度。`'lhm'` ならびに`'grd'` 構造で、この値よりも小さな速度値が与えられた場合には、それを強制的に `vcut` に置き換える。低速度域を排除して波長とグリッドサイズの比を一定以上に保つために用いられる。この値が 0 の場合には置き換えは実施されない。また、海水層 ($\mu = 0$) の速度には適用されない。

空気および海水層の取り扱い

OpenSWPC では、空気層は密度 $\rho = 0.001 \text{ [g/cm}^3]$ 、地震波速度 $V_P = V_S = 0 \text{ [km/s]}$ 、内部減衰 $Q_P = Q_S = 10^{10}$ を、海水層では $\rho = 1.0 \text{ [g/cm}^3]$, $V_P = 1.5 \text{ [km/s]}$, $V_S = 0.0 \text{ [km/s]}$, $Q_P = Q_S = 10^6$ をそれぞれ仮定している。空気層は事実上真空として扱えるほどに小さな密度を持ち、かつ地震波速度が 0 であるため、空中音波は伝播しない。従って空気層中の Q 値は結果に影響しない。ただし、計算コード中に密度の逆数を求める演算があるため、密度はゼロにしてはならない。海水層については平均的な海中音波一定速度を P 波速度として利用している。海中音波の減衰は非常に小さいことが知られており、事実上無減衰になるような Q 値を導入している。

地表ならびに海底面では、差分式を 2 次精度変更する境界条件が適用される ([Okamoto and Takenaka, 2005](#); [Maeda and Furumura, 2013](#))。海底ならびに地表の境界は、 μ と λ が有限の値から 0 になる、という条件を用いて自動的に抽出される。

2.7.2 ランダム媒質の重畳

速度構造`'uni'`, `'lhm'`, `'grd'` それぞれに対して、平均速度を成層構造であたえ、それに別途生成したランダムな短波長速度ゆらぎを重畳させることができる。ランダムな速度ゆらぎ ξ を事前に生成しておき、別途定義される平均的速度構造 V_{P0}, V_{S0}, ρ_0 に対して、

$$\begin{aligned} V_P &= V_{P0} (1 + \xi) \\ V_S &= V_{S0} (1 + \xi) \\ \rho &= \rho_0 (1 + \nu \xi) \end{aligned} \tag{2.9}$$

のようにゆらぎを与える。ただし、ここでは $\nu = 0.8$ とする Birch 則を採用している ([Sato et al., 2012](#))。

速度構造の指定法は、背景となる平均速度モデルに応じて、`vmodel_type='uni_rmed'`, `'lhm_rmed'`, `'grd_rmed'` の 3 種類が提供されている。また、ランダム媒質の生成のために別ツールが提供される。詳しくは第3.4.1節を参照のこと。

以下で解説する 3 モデルに共通のパラメタとして、

`dir_rmed`

ランダム媒質データ格納ディレクトリ

を用いる。

ランダム媒質は 3 次元もしくは 2 次元の NetCDF ファイルとして与えられ、グリッド毎の速度ゆらぎ率 $\xi(I, J, K)$ が定義されている。並列計算のためにファイルを分割する必要は無く、計算の各ノードが、自ノードの計算担当領域の (i, j, k) 範囲に相当するデータを自動的に抽出する。計算サイズ N_x, N_y, N_z がランダム媒質ファイルの次元長よりも大きい場合には、周期的境界条件によって同じランダム媒質を繰り返してモデル領域全体を埋める。実行プログラムは、ランダム媒質の空間グリッドサイズとシミュレーションのグリッドサイズが一致しているかどうか確認しない。計算の空間格子サイズを変更した場合、ランダム媒質も作成し直す必要がある。なお、2 次元計算のコードに 3 次元のランダム媒質バイナリを用いることは可能である（その場合 $k=1$ の断面が利用される）が、その逆は許されない。

uni_rmed

vmodel='uni' のパラメタに加えて、以下を用いる。

fn_rmed0

ランダム媒質ファイル名

平均速度に fn_rmed0 で与えられたゆらぎを重畠させる。ファイルが存在しない場合にはゆらぎが 0 であると見なす。

lhm_rmed

vmodel='lhm' の成層構造の各層にランダム媒質を重畠させる。その際、各層に異なるランダム媒質を重畠させることも可能である。このモデルでは、fn_lhm のかわりに

fn_lhm_rmed

構造リスト

を用いる。

構造リストは fn_lhm に準じたフォーマットを取るが、その最右欄に、各層のランダム媒質ファイル名を記載する：

#	depth	rho(g/cm^3)	vp(km/s)	vs(km/s)	Qp	Qs	fn_rmed
2	#						
3	0	2.300	5.50	3.14	600	300	rmedia1.nc
4	3	2.400	6.00	3.55	600	300	rmedia1.nc
5	18	2.800	6.70	3.83	600	300	rmedia2.nc
6	33	3.200	7.80	4.46	600	300	rmedia2.nc
7	100	3.300	8.00	4.57	600	300	-
8	225	3.400	8.40	4.80	600	300	-
9	325	3.500	8.60	4.91	600	300	-
10	425	3.700	9.30	5.31	600	300	-

この例では、0 km と 3 km の層に rmedia1.nc, 18 km と 33 km の層に rmedia2.nc を配置する。それより深い部分についてはダミー文字 “-” が書かれている。該当する名前のファイルが存在しなければ、これらの領域には速度ゆらぎは重畠されない。ランダム媒質ファイルは dir_rmed から探される。パラメタ dir_rmed を用いずに fn_lhm の欄に直接ディレクトリ名を書いてもかまわないが、その場合はかならずファイル名全体をクオーテーションで括ること。ゆらぎ与えない場合にも、ランダム媒質ファイルの欄には何らかの文字が書か

れていなければならない。ファイル名の欄が空白だとエラーになる。

grd_rmed

`vmodel='grd'` の成層構造の各層にランダム媒質を重畠させる。各層に異なるランダム媒質を重畠させることも可能であり、かつランダム媒質の k (鉛直) 方向の基準位置を任意の層境界に設定することが可能である。このモデルでは、`fn_grd` のかわりに

fn_grdlst_rmed

構造リスト

を用いる。

構造リストは `fn_grdlst` に準じたフォーマットを取るが、右欄にランダム媒質ファイル名と基準層の番号を記述する：

1	#	grd filename	rho	vp	vs	QP	QS	sw	fn_rmed	ref
2	#									
3	'eJIVSM_01_TAB_.grd'	1.80	1.70	0.35	119	70	0	'rmed3d_1.nc'	0	
4	'eJIVSM_02_BSM_.grd'	1.95	1.80	0.50	170	100	0	'rmed3d_1.nc'	0	
5	'eJIVSM_03_BSM_.grd'	2.00	2.00	0.60	204	120	0	'rmed3d_1.nc'	0	
6	'eJIVSM_04_BSM_.grd'	2.05	2.10	0.70	238	140	0	'rmed3d_1.nc'	0	
7	'eJIVSM_05_BSM_.grd'	2.07	2.20	0.80	272	160	0	'rmed3d_1.nc'	0	
8	'eJIVSM_06_BSM_.grd'	2.10	2.30	0.90	306	180	0	'rmed3d_1.nc'	0	
9	'eJIVSM_07_BSM_.grd'	2.15	2.40	1.00	340	200	0	'rmed3d_1.nc'	0	
10	'eJIVSM_08_BSM_.grd'	2.20	2.70	1.30	442	260	0	'rmed3d_1.nc'	0	
11	'eJIVSM_09_BSM_.grd'	2.25	3.00	1.50	510	300	0	'rmed3d_1.nc'	0	
12	'eJIVSM_10_BSM_.grd'	2.30	3.20	1.70	578	340	0	'rmed3d_1.nc'	0	
13	'eJIVSM_11_BSM_.grd'	2.35	3.50	2.00	680	400	0	'rmed3d_1.nc'	0	
14	'eJIVSM_12_BSM_.grd'	2.45	4.20	2.40	680	400	0	'rmed3d_1.nc'	0	
15	'eJIVSM_13_BSM_.grd'	2.60	5.00	2.90	680	400	0	'rmed3d_1.nc'	0	
16	'eJIVSM_14_BSM_.grd'	2.65	5.50	3.20	680	400	0	'rmed3d_1.nc'	0	
17	'eJIVSM_15_UPC_.grd'	2.70	5.80	3.40	680	400	0	'rmed3d_1.nc'	0	
18	'eJIVSM_16_LWC_.grd'	2.80	6.40	3.80	680	400	0	'rmed3d_3.nc'	0	
19	'eJIVSM_17_CTM_.grd'	3.20	7.50	4.50	850	500	0	'rmed3d_3.nc'	0	
20	'eJIVSM_18_PH2_.grd'	2.40	5.00	2.90	340	200	1	'rmed3d_2.nc'	18	
21	'eJIVSM_19_PH3_.grd'	2.90	6.80	4.00	510	300	0	'rmed3d_2.nc'	18	
22	'eJIVSM_20_PHM_.grd'	3.20	8.00	4.70	850	500	0	'rmed3d_3.nc'	18	
23	'eJIVSM_21_PA2_.grd'	2.60	5.40	2.80	340	200	2	'rmed3d_2.nc'	21	
24	'eJIVSM_22_PA3_.grd'	2.80	6.50	3.50	510	300	0	'rmed3d_2.nc'	21	
25	'eJIVSM_23_PAM_.grd'	3.40	8.10	4.60	850	500	0	'rmed3d_3.nc'	21	

ランダム媒質ファイル名の記載方法については `lhm_rmed` の場合と同様である。

最右欄の数字でランダム媒質層の鉛直方向の基準となる面を指定する。この値が 0 であれば、`uni_rmed` や `lhm_rmed` などと同様にモデルの鉛直方向のグリッド位置のランダム媒質がそのまま用いられる。ここに非ゼロの値 `NR` が指定されると、`NR` 番目の層の上面位置からの相対グリッド位置のランダム媒質が用いられるようになる。たとえば上記の例では、第 18 層から 20 層までは 18 層目が、21 から 23 層は 21 層のそれぞれプレート上面が基準値になっている。これにより、プレート内の不均質構造は水平面ではなく、プレート正面に沿った斜めのゆらぎ構造を導入することができる。

ランダムな速度ゆらぎの打ち切り

速度ゆらぎのパラメタ ξ が大きくなると、局所的に非常に地震波速度が大きくあるいは小さくなり、以下の3ケースで計算が不可能になることがある。

1. $\xi > 0$ の場合に $V = (1 + \xi)V_0$ が差分法の安定条件から許容される最大速度を超える。
2. $\xi < -1.0$ の場合、地震波速度が物理的にありえない負の値を取る。
3. $\xi < -1.25$ の場合、密度が物理的にありえない負の値を取る。

そこで、ランダム媒質を頂上させた結果の速度を、 $\text{vcut} \leq v \leq 0.95 \times v_{\max}$ に制限する。ここで vcut は低速度打ち切りのための入力パラメタ、 v_{\max} は安定条件から許容される最大速度（自動的に計算）である。さらにパラメタ

`rhomin`

最低密度（デフォルトは 1.0 g/cm^3 ）

を指定することで、密度が負になることを防止している。

2.8 震源の指定

2.8.1 モーメント時間関数

ここでは本コードで利用可能なモーメント時間関数 $\dot{M}(t)$ とそのスペクトルを整理する。以下のモーメント時間関数は、すべて継続時間（もしくは特徴的時間） T_R をもち、総モーメントが 1 に規格化されている。OpenSWPC では、パラメタ `stftype` の選択により、以下の震源時間関数が選択できる。

$$\text{Box-car function (boxcar)} \quad \dot{m}^R(t) = \frac{1}{T_R} \quad (0 \leq t \leq T_R) \quad (2.10)$$

$$\text{Triangle function (triangle)} \quad \dot{m}_R^T(t) = \begin{cases} 4t/T_R^2 & (0 \leq t \leq T_R/2) \\ -4(t - T_R)/T_R^2 & (T_R/2 < t \leq T_R) \end{cases} \quad (2.11)$$

$$\text{Herrmann function (herrmann)} \quad \dot{m}^H(t) = \begin{cases} 16t^2/T_R^3 & (0 \leq t \leq T_R/4) \\ -2(8t^2 - 8tT_R + T_R^2)/T_R^3 & (T_R/4 < t \leq 3T_R/4) \\ 16(t - T_R)^2/T_R^3 & (3T_R/4 < t \leq T_R) \end{cases} \quad (2.12)$$

$$\text{Cosine function (cosine)} \quad \dot{m}^C(t) = \frac{1}{T_R} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi t}{T_R}\right) \right] \quad (0 \leq t \leq T_R) \quad (2.13)$$

$$\text{Küpper Wavelet (kupper)} \quad \dot{m}^K(t) = \frac{3\pi}{4T_R} \sin^3\left(\frac{\pi t}{T_R}\right) \quad (0 \leq t \leq T_R) \quad (2.14)$$

$$t - \exp \text{ type (texp)} \quad \dot{m}^E(t) = \frac{(2\pi)^2 t}{T_R^2} \exp\left[-\frac{2\pi t}{T_R}\right] \quad (t \geq 0) \quad (2.15)$$

それぞれの震源時間関数形状とその振幅スペクトルを図2.7に示す。モーメント時間関数のスペクトルは、 $f \gg 1/T_R$ の条件下で、それぞれ f^{-1} から f^{-4} のロールオフを持つ。シミュレーションが数値分散を起こさないためには、対象周波数帯の上限で充分に震源のスペクトルが小さくなっている必要がある。そのような条件を満たす最大周波数として、ここでは $f_{\max} = 2/T_R$ （図2.7中赤点線）を採用する。この f_{\max} 以下の周波数では分散を起こさないようにモデルパラメタが設定されなければよい。一方、スペクトルの応答がほぼ一定になる、つまり震源時間関数がデルタ関数と見なせるのは概ね $f \leq 1/(2T_R)$ （図2.7中青点線）である。

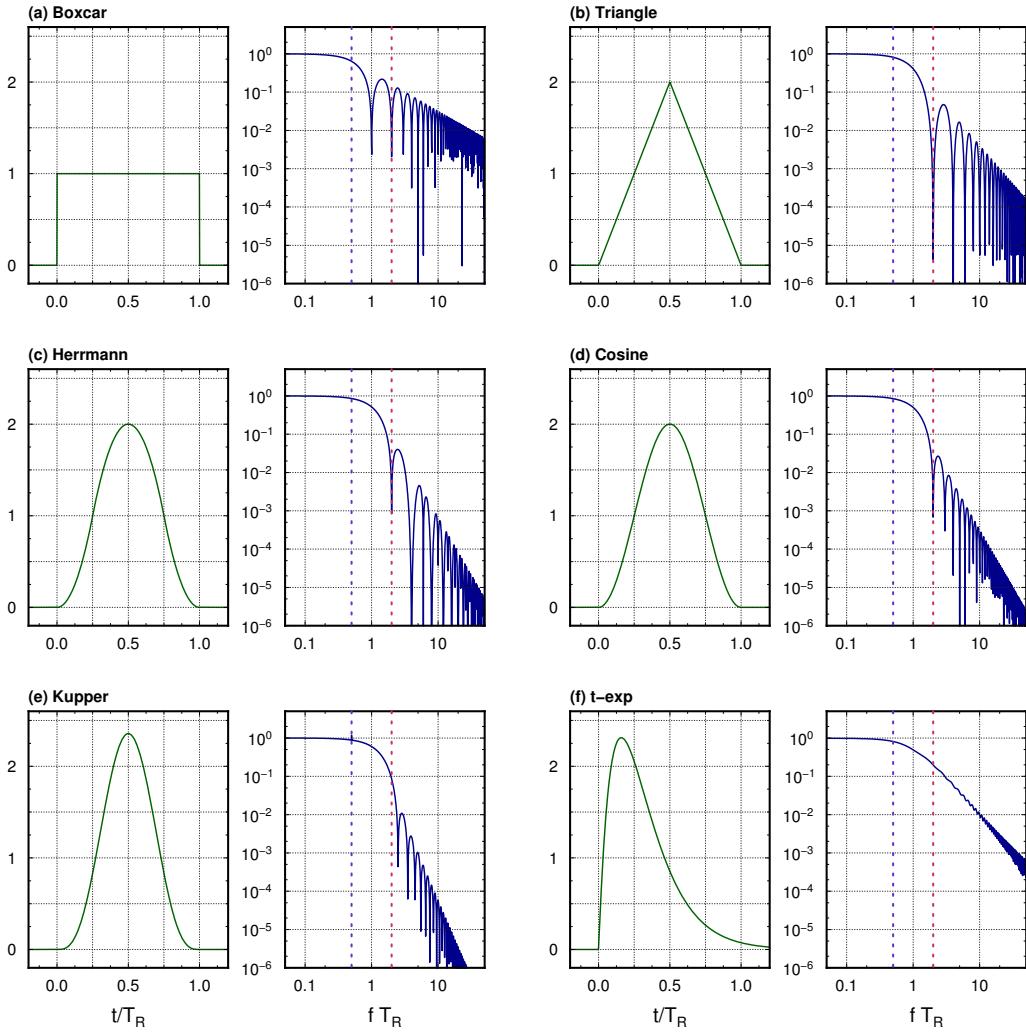


図 2.7 震源における要素モーメント時間関数 $m(t)$ (左) とそのスペクトル (右).

2.8.2 モーメントテンソル震源

震源メカニズムは 6 成分のモーメントテンソル, もしくはダブルカップル震源を特徴付ける `strike`, `dip`, `rake` の 3 つの角度で与えられる。また, 震源位置を計算座標系もしくは地理座標系でも与えられるので, あわせて 8 種類の震源メカニズムフォーマットがある (表2.6)。震源はモーメント時間関数を用いて応力降下として与えられる。要素モーメント時間関数は上述の 6 種類から選び, 関数名をパラメタとして与える。どの関数であっても, 震源の破壊開始時間 T_0 と継続時間 T_R , ならびに全モーメント (モーメント時間関数の時間積分値) M_0 がパラメタとして与えられる。

OpenSWPC は複数の点震源を用いることができる。震源ファイルに複数行の震源要素があれば, それらすべての要素 (のうち計算モデル領域内にある点) から地震動を放射させる。震源位置と破壊開始時刻等を少しづつずらすことにより, 擬似的に有限断層面からの破壊を再現することも可能である。なお, 震源ファイルは, そのフォーマットに関わらずすべて#から始まる行はコメント行と見なされる。

特殊な条件として、パラメタ `sdep_fit` により、震源位置を速度構造モデルのプレート境界上に置くことが可能である。この場合は、震源ファイルの深さ指定は無視される。この場合、構造モデルの指定で該当する番号の層が指定されていることが必要である。

`stf_format`

震源ファイルのフォーマット。表2.6参照。

`stftype`

要素震源時間関数（モーメント時間関数）の種類。`'boxcar'`（箱形関数）、`'triangle'`（三角形）、`'herrmann'`（Herrmann 関数）/ `'kupper'`（Kupper wavelet）/ `'cosine'`（cos 関数）/ `'texp'`（ $t \exp$ 関数）から選択する。個々の要素関数の形状は図2.7を参照のこと。

`fn_stf`

震源情報ファイル。

`sdep_fit`

震源の深さを強制的に境界に合わせるかどうかの指定。`'asis'`: なにもしない（デフォルト）`'bd{i}'`($i=1,2,\dots,9$): i 番目の境界に合わせる。

表 2.6 震源ファイルフォーマット

種別	書式											
<code>'xym0ij'</code>	x	y	z	T_0	T_R	M_0	m_{xx}	m_{yy}	m_{zz}	m_{yz}	m_{xz}	m_{xy}
<code>'xym0dc'</code>	x	y	z	T_0	T_R	M_0	strike	dip	rake			
<code>'llm0ij'</code>	lon	lat	z	T_0	T_R	M_0	m_{xx}	m_{yy}	m_{zz}	m_{yz}	m_{xz}	m_{xy}
<code>'llm0dc'</code>	lon	lat	z	T_0	T_R	M_0	strike	dip	rake			
<code>'xymwij'</code>	x	y	z	T_0	T_R	M_W	m_{xx}	m_{yy}	m_{zz}	m_{yz}	m_{xz}	m_{xy}
<code>'xymwdc'</code>	x	y	z	T_0	T_R	M_W	strike	dip	rake			
<code>'llmwij'</code>	lon	lat	z	T_0	T_R	M_W	m_{xx}	m_{yy}	m_{zz}	m_{yz}	m_{xz}	m_{xy}
<code>'llmwdc'</code>	lon	lat	z	T_0	T_R	M_W	strike	dip	rake			

2.8.3 実体力モード

モーメントテンソル震源に代わり、実体力を震源とすることもできる。この場合、 m_{ij} のかわりに f_x, f_y, f_z の力源を直接指定する。実体力はモーメントテンソル震源と同様のベル型の震源時間関数を用いて計算される。任意個の点震源を記述することができるが、モーメントテンソルによる震源と実体力による震源からの同時輻射は、一度の実行では計算できない。

`bf_mode`

実体波モードの ON/OFF を設定する。`.true.` で ON になる。

`stf_format`

震源ファイルのフォーマット。表2.7参照。モーメントテンソル震源とは記法が異なるので注意。

`stftype`

要素震源時間関数（モーメント時間関数）の種類。指定法はモーメントテンソル震源に同じ。

`fn_stf`

震源情報ファイル。モーメントテンソルとは記法が異なるので注意。

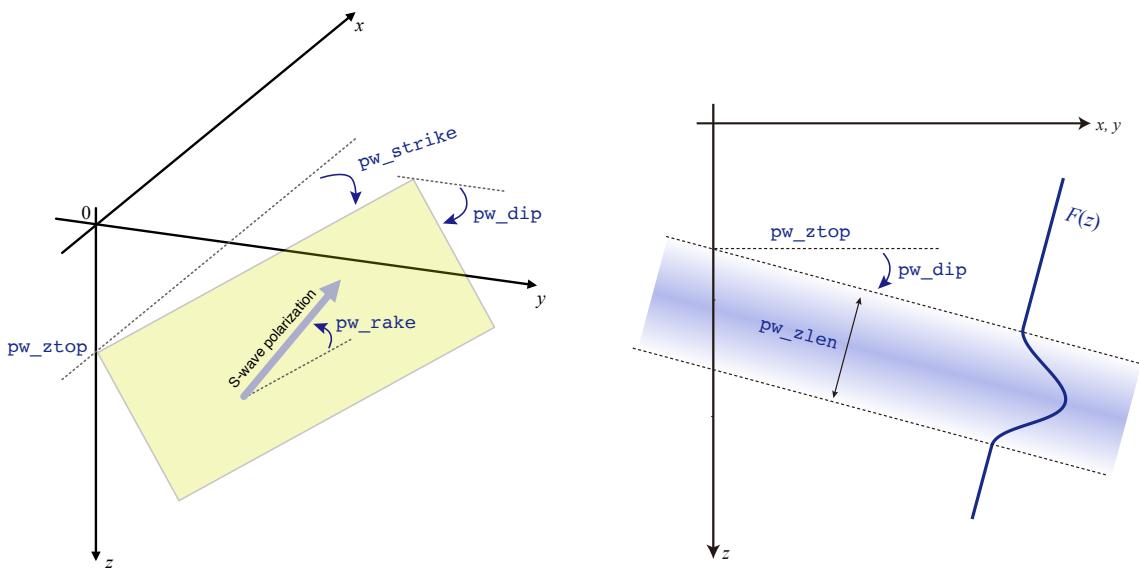


図 2.8 平面波モードの座標系指定. (左) 平面波最上面位置の指定. (右) 深さ断面における初期条件指定.

sdep_fit

震源の深さを強制的に境界に合わせるかどうかの指定. 'asis': なにもしない (デフォルト)
'bd{i}'(i=1,2,⋯9): i 番目の境界に合わせる.

表 2.7 実体力震源ファイルフォーマット

種別	書式							
'xy'	x	y	z	T_0	T_R	f_x	f_y	f_z
'll'	lon	lat	z	T_0	T_R	f_x	f_y	f_z

2.8.4 平面波モード

震源からの輻射の代わりに、下方から平面波を入射させることができる。平面波入射は、モデル深部にあらかじめ上方に向かう波動方程式の解を初期条件として設定することで実現する。初期条件は座標原点における初期深さ (pw_ztop)、平面波初期条件の特徴的長さ (pw_zlen) と、初期条件の最上端の平面形状を指定する角度パラメタ (pw_strike , pw_dip) および、S 波の場合には平面内の振動極性方向パラメタ (pw_rake) を要する。これらの角度パラメタは、[Aki and Richards \(2002\)](#) による断層面指定の strike, dip, rake の角度定義に準ずる。3 次元の場合、 $pw_strike=0$ で y 軸（通常は東）に角度 pw_dip で傾き下がるような平面となる。 $pw_rake=0^\circ$ もしくは $pw_rake=180^\circ$ の場合、S 波の振動極性の方向が水平面と一致する SH 波になる。

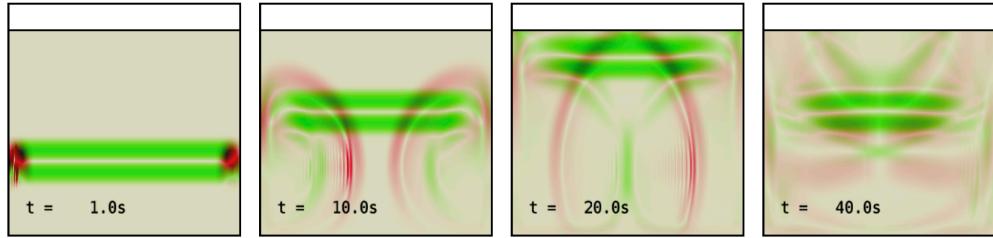
原点における深さ $z = pw_ztop$ の位置から、幅 pw_zlen (km) の区間に、平面波形状関数として、パラメタ `stftype` で定めたモーメント時間関数の形状を利用する (図2.8)。モーメント時間関数の定義により、その伝播方向に沿った空間積分が 1 になるように規格化されている。

pw_mode

平面波モード ON/OFF を定める。`.true.` のときには平面波モードとなり、点震源のリストは無視される。

pw_ztop

(a) Cerjan



(b) PML

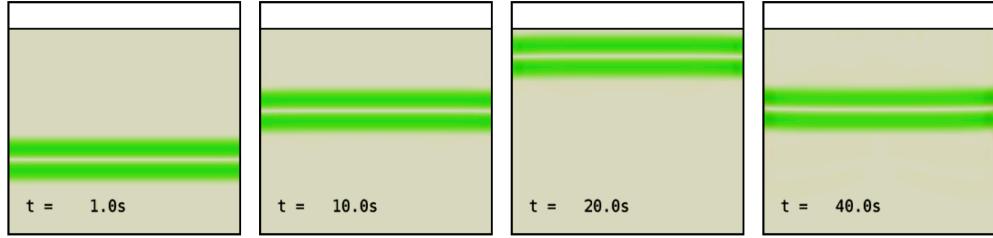


図 2.9 S 波平面波入射深さ断面スナップショットの例. 緑色が S 波 (rot), 赤色が P 波 (div) 振幅をそれぞれ表す. 境界条件が (a) Cerjan の場合と (b) PML の場合.

初期条件の原点 $x = y = 0$ における平面波上端の z 座標値

pw_zlen

初期条件の平面波波長スケール. モーメント時間関数の幅 (ライズタイム) に相当する.

pw_ps

平面波種別. 'p' もしくは's'.

pw_strike

平面波初期条件の方位角. x 軸から時計回りに角度単位で与える.

pw_dip

平面波初期条件の傾斜角 (度). 0 度で水平入射である.

pw_rake

S 波の場合の平面内振動方向 (度). 水平面方向から反時計回りに測った角度で記述する.

stftype

要素震源時間関数 (モーメント時間関数) の種類. 指定法はモーメントテンソル震源に同じ.

なお, 平面波モードの場合には, 吸収境界条件 (第2.9節) としてかならず `abc_type='pml'` を用いるべきである. 簡易版の境界条件 `abc_type='cerjan'` では, 水平方向の端から非常に強い人工反射波が生じてしまう (図2.9). また, PML を用いたとしても, 傾斜角がゼロではない平面波入射は, かならず境界からの汚染を伴う. 人工反射波の振幅が小さくなることを確認するか, 汚染をさけるため領域を充分広く取るなどの対策が必要となる.

2.9 吸収境界条件

OpenSWPC では, 主たる吸収境界条件として Auxiliary Differential Equation, Complex Frequency-Shifted Perfectly Matched Layer (ADE CFS-PML; [Zhang and Shen \(2010\)](#)) を採用している.

PML とは, 媒質の端点から数十グリッドを吸収 (スポンジ) 領域とし, 微分方向に依存した減衰性媒質の

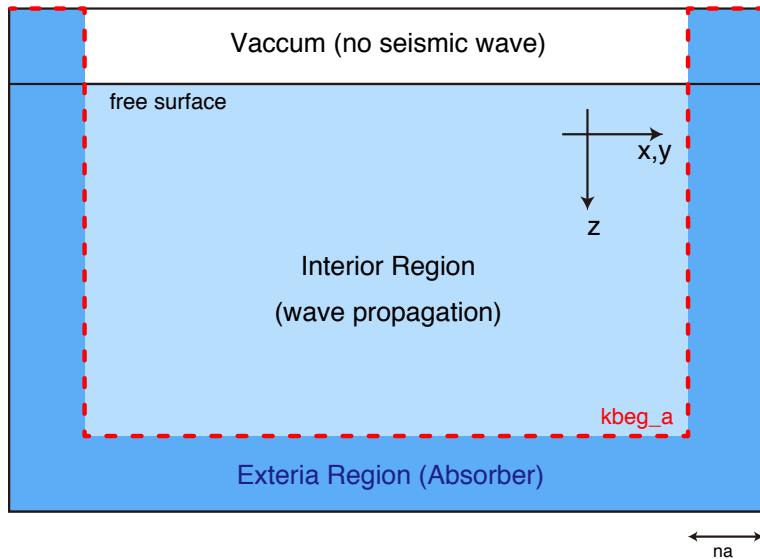


図 2.10 吸収境界条件の定義領域の模式図. 赤点線が $\text{kbeg_a}(I, J)$ の位置を表す.

時間発展方程式を解くことで効果的に人工反射を押さえる手法である. より単純かつ伝統的な Cerjan によるスponジ条件 (Cerjan et al., 1985) も利用できる. 境界条件の種類は入力パラメタによって切り替える.

全モデル空間は吸収境界の厚さグリッド数 na の指定によってのように内部領域と外部領域に分けられる (図2.10). 吸収境界はモデルの端面を覆う必要がある. しかし, 本コードにおいては地表面がある媒質での計算を前提としており, かつ空中音波は無視する (仮想的な真空状態) ため, 上面の吸収条件は必要ない. そこで, 深さグリッド位置 kbeg_a より深い部分のみ, 吸収境界条件を適用する.

簡単のため, OpenSWPC では PML 領域は粘弾性を解かず, 弹性体の構成方程式と PML 吸収条件を組み合わせる. このことにより計算メモリを節約できる上, 吸収境界と内部領域との間での計算負荷のバランスを改善することができる. しかし, Q 値が極端に小さな媒質の場合, 内部領域での物理分散による速度低下が無視できなくなる. この場合, 吸収境界内と内部領域とで物理分散の有無に伴う速度コントラストが発生し, それに伴う人工反射波が生ずることがある. 速度均質媒質のシミュレーションスナップショットなどから反射波生成の度合いを確認し, それが許容範囲であるかあらかじめ調査することが望ましい.

Cerjan による吸収境界条件については, Cerjan et al. (1985) で提案されたパラメタが埋め込まれている. ただし, スポンジ境界の厚さによって吸収係数はスケーリングされる.

PML は多くの場合について非常に高性能な吸収境界条件であるが, コントラストの大きな速度構造不連続や低速度層の存在などによって, 数値不安定を起こすことがある. OpenSWPC で採用した ADE CFS-PML はそのような不安定が起こりにくくとされているが, 万一数値計算の不安定が発生した場合には, 計算領域を少し平行移動してみる, 極端な低速度層を `stabilize_pml` オプションを `.true.` にすることで排除してみる, あるいは震源でのライズタイムを長くして高周波を抑える, などの工夫により改善する場合がある. Cerjan による吸収境界条件は常に安定であるが, PML と比べると境界における吸収性能は低くなる.

`abc_type`

吸収境界条件の種類. '`pml`' もしくは'`cerjan`' のどちらかを指定.

`na`

吸収境界領域のグリッド厚. 通常 10 から 20 程度の値が用いられる.

`stabilize_pml`

`.true.` のとき, 低速度層を排除して PML の安定化を試みる.

2.10 チェックポイント・リスタート

大型計算機のバッチシステムでは、一度のジョブで計算できる継続時間に限りがあるため、一定の経過時間（チェックポイント）でメモリの内容をすべて一時ファイルに出力し、別のジョブでそのファイルを読み込んで途中から計算を再開する（リスタート）ことが行われる。

OpenSWPC では、動作時間が `ckp_time` (秒) を超えるとチェックポイントを通過したと見なされ、すべての計算途中配列イメージをファイルに吐き出して終了する。同じ環境下で同じ実行タイトル (`title`) の計算が実行されると、OpenSWPC はまずディレクトリ `cdir` を確認し、そこにチェックポイントファイルがあるようであれば途中から計算を再開する。チェックポイントファイルもしくはディレクトリが存在しなければ、ゼロから計算を開始する。また、全計算が終了した後には、チェックポイントファイルの中身はほぼすべて削除するが、整数値の認識コードが格納された小ファイルを残す。これは、リスタート時の時間ステップ調査時に計算が既に終了していることを検知し、同じ計算を繰り返すことを防ぐためのものである。

`is_ckp`

チェックポイント・リスタートモードの ON/OFF

`cdir`

チェックポイントファイル出力先。リスタートの場合はこのディレクトリ以下にファイルが存在するか確認する。

`ckp_time`

チェックポイント時間。この時間を経過するとチェックポイントファイルを出力して終了する。

`ckp_interval`

`ckp_interval` 時間ステップ毎に経過時間が `ckp_time` を超えたか判定する。

`ckp_seq`

シーケンシャルモード：`.true.` のとき MPI ノード 0 番から順番に読み書きを行う。多数の計算ノードで共有されたファイルシステムにおいてチェックポイントファイル作成に極端に長い時間がかかる場合、`ckp_seq = .true.` にすると性能が改善することがある。

2.11 相反定理モード

観測点から点震源による地震波を励起し、複数の震源位置を仮想観測点とした波形を計算する。これらは、相反定理によって、各震源位置から観測点までの計算波形に相当する。これらは、震源時間関数が充分に短ければ Green 関数として扱うことができる。

本モードで計算されるのは、震源位置 ξ から観測点位置 r への Green テンソルを $G_{ij}(r, t; \xi)$ に、計算時に

仮定する震源時間関数を $s(t)$ がたたみこまれた

$$\begin{aligned}
 G_i^{M1}(\mathbf{r}, t; \xi) &\equiv \frac{\partial G_{ix}(\mathbf{r}, t; \xi)}{\partial \xi_x} * s(t) = \frac{\partial G_{ix}(\xi, t; \mathbf{r})}{\partial \xi_x} * s(t) \\
 G_i^{M2}(\mathbf{r}, t; \xi) &\equiv \frac{\partial G_{iy}(\mathbf{r}, t; \xi)}{\partial \xi_y} * s(t) = \frac{\partial G_{iy}(\xi, t; \mathbf{r})}{\partial \xi_y} * s(t) \\
 G_i^{M3}(\mathbf{r}, t; \xi) &\equiv \frac{\partial G_{iz}(\mathbf{r}, t; \xi)}{\partial \xi_z} * s(t) = \frac{\partial G_{iz}(\xi, t; \mathbf{r})}{\partial \xi_z} * s(t) \\
 G_i^{M4}(\mathbf{r}, t; \xi) &\equiv \left(\frac{\partial G_{iy}(\mathbf{r}, t; \xi)}{\partial \xi_z} + \frac{\partial G_{iz}(\mathbf{r}, t; \xi)}{\partial \xi_y} \right) * s(t) = \left(\frac{\partial G_{iy}(\xi, t; \mathbf{r})}{\partial \xi_z} + \frac{\partial G_{iz}(\xi, t; \mathbf{r})}{\partial \xi_y} \right) * s(t) \\
 G_i^{M5}(\mathbf{r}, t; \xi) &\equiv \left(\frac{\partial G_{ix}(\mathbf{r}, t; \xi)}{\partial \xi_z} + \frac{\partial G_{iz}(\mathbf{r}, t; \xi)}{\partial \xi_x} \right) * s(t) = \left(\frac{\partial G_{ix}(\xi, t; \mathbf{r})}{\partial \xi_z} + \frac{\partial G_{iz}(\xi, t; \mathbf{r})}{\partial \xi_x} \right) * s(t) \\
 G_i^{M6}(\mathbf{r}, t; \xi) &\equiv \left(\frac{\partial G_{ix}(\mathbf{r}, t; \xi)}{\partial \xi_y} + \frac{\partial G_{iy}(\xi, t; \mathbf{r})}{\partial \xi_x} \right) * s(t) = \left(\frac{\partial G_{ix}(\mathbf{r}, t; \xi)}{\partial \xi_y} + \frac{\partial G_{iy}(\xi, t; \mathbf{r})}{\partial \xi_x} \right) * s(t)
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

である。また、オプションで実体波 Green 計算

$$\begin{aligned}
 G_i^{B1}(\mathbf{r}, t; \xi) &\equiv G_{ix}(\mathbf{r}, t; \xi) * s(t) = G_{ix}(\xi, t; \mathbf{r}) * s(t) \\
 G_i^{B2}(\mathbf{r}, t; \xi) &\equiv G_{iy}(\mathbf{r}, t; \xi) * s(t) = G_{iy}(\xi, t; \mathbf{r}) * s(t) \\
 G_i^{B3}(\mathbf{r}, t; \xi) &\equiv G_{iz}(\mathbf{r}, t; \xi) * s(t) = G_{iz}(\xi, t; \mathbf{r}) * s(t)
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

も計算される。

パラメタファイルで指定された観測点 `green_stnm` から、`green_cmp` 成分の実体力による地震波を、時間長さ `green_trise` の震源時間関数で励起する。そのため、全グリーンテンソルを求めるには、`green_cmp='x'`, '`y`', '`z`' の 3 種類の計算を行う必要がある。震源要素はデカルト座標系もしくは緯度経度および深さで指定し、それぞれの震源要素に対して整数の `gid` を付与する。結果は、`(odir)/green/(gid)` ディレクトリに、`(title)_-(green_cmp)_-mij_-.sac` あるいは `(title)_-(green_cmp)_-fi_-.sac` というファイル名の SAC ファイルとして格納される。なお、`gid` は必ずしも連番である必要はない。なお、SAC の規約波形と直接比較するため、出力波形には 10^9 が乗じられている。また、`z` は下が正になる座標系を取っているが、Green 関数として出力される波形は、多くの場合の観測に準じ、上が正になるように変換されている。しかし、モーメントテンソル応答の計算の深さ方向微分は計算座標系の下が正の定義のまま行われている。

`green_mode`

Green 関数モードの ON/OFF を設定する。`.true.` で ON になり、通常の震源に関する指定は無視される。

`green_stnm`

受信観測点名。この観測点が別途与える観測点リストに含まれている必要がある。

`green_cmp`

Green 関数を計算する成分。受信点における観測成分に相当する。`'x'`, `'y'`, `'z'` のいずれかを指定。

`green_trise`

Green 関数にたたみ込まれる震源時間関数のライズタイム

`green_bforce`

`.true.` のとき実体波の Green 関数も計算する。デフォルトは`.false.`

`green_fmt`

Green 関数の震源要素位置ファイルリストのフォーマット。`'xyz'`（デカルト座標；デフォルト）か`'llz'`（緯度・経度・深さ）のどちらかを指定する。

`green_maxdist`

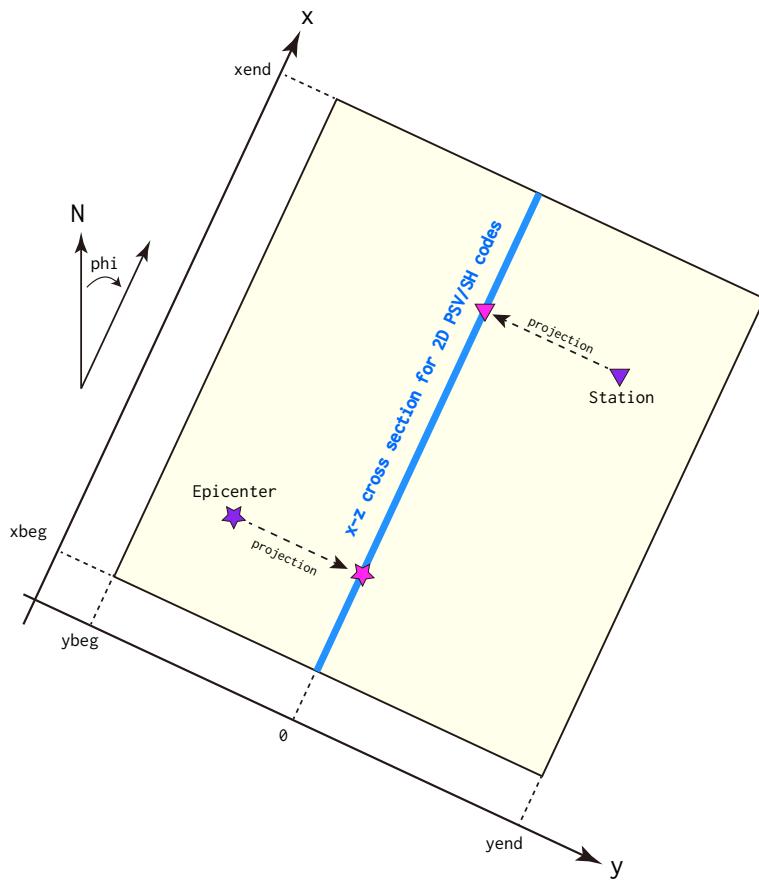


図 2.11 水平 x - y 面における 2 次元コードの計算位置.

震源要素位置と観測点の間の震央距離がこの指定パラメタ (km 単位) 以内の場合にのみ Green 関数を計算する。デフォルトでは常に計算する。

fn_glst

Green 関数震源要素位置ファイル名。フォーマットは表2.8の通り。

stftype

震源時間関数種別。指定法はモーメントテンソル震源と同じ。

ntdec_w

Green 関数波形出力の時間間引き間隔。通常計算の波形出力時の指定と同じ。

表 2.8 Green 関数震源要素位置ファイルフォーマット

種別	書式
'xyz'	x y z gid
'llz'	lon lat z gid

2.12 2次元コードについて

OpenSWPCには、2次元断面におけるP-SV (`swpc_psv`) とSH (`swpc_sh`) のコードも同梱されている。2次元コードはすべて3次元コードのxz断面 ($y = 0$; 図2.11) における x, z 成分 (P-SV) もしくは y 成分 (SH) を計算するコードとして動作し、3次元版と同じ入力ファイル群で動作する。震源位置も $x - z$ 断面 ($y = 0$) に投影される。ただし、それぞれの成分で利用しないパラメタ（たとえば観測点位置の y 方向成分や震源におけるモーメントテンソルの非利用成分）は無視される。観測点や震源位置の投影の際、その y 軸方向の座標は考慮されない。投影軸から遠い観測点の記録も出力されてしまうため、リストの指定には注意が必要である。平面波入射にも対応しているが、`pw_strike`, `pw_rake`は2次元断面内での振動を満たすように固定される。傾斜角 `pw_dip`だけが指定できる。

2.13 その他のパラメタ

`stopwatch_mode`

各サブルーチンでの計算時間を独自に計測し、その結果を `(odir)/(title).tim` というファイルに出力する。主としてベンチマーク・チューニング用途に用いる。この結果は `tools/timvis.gmt` によって可視化することができる。

`benchmark_mode`

`.true.`の場合、入力パラメータに関わらず固定の構造・グリッド間隔で動作させる。正常動作と計算速度確認のためのオプションである。

`ipad, jpad, kpad`

x, y, z 各方向の配列確保の水増しサイズ。計算機によっては、実際の計算領域よりも配列のメモリ確保領域を微妙に増やすことで、計算速度が改善することがある。ただしこれらはあくまでもメモリ確保上の水増しであり、計算結果には影響しない。

第3章

周辺ツール

3.1 スナップショット

3.1.1 read_snp.x

スナップショットは独自形式もしくはNetCDF形式のバイナリファイルであるが、いずれもプログラムread_snp.xによって可視化もしくは振幅データの抽出ができる。

利用法は以下のとおり：

```
1  read_snp.x -i snapfile [-h] [-ppm|-bmp] [-pall] [-mul var | -mul1 var -mul2 var ...] [-bin] [-ass]
```

-h

スナップショットファイルに内包されているヘッダ情報を出力する。計算を実施した日時・計算タイトル・コード種別(3D/PSV/SH)・グリッド間隔・座標系などの情報が出力される。

```
1  > ./bin/read_snp.x -i swpc_3d.xz.ps.snp -h
2
3  [binary type]    : STREAMIO
4  [code type]      : SWPC_3D
5  [header version]:          3
6  [title]          : swpc_3d
7  [date generated]: 1408015126
8          2014-08-14T11-18-46
9  [coordinate]    : xz
10 [data type]     : ps
11 [ns1]           :        256
12 [ns2]           :        256
13 [beg1]          : -63.87500
14 [beg2]          : -9.87500
15 [ds1]           : 0.25000
16 [ds2]           : 0.25000
17 [dt]            : 0.05000
18 [na1]           : 20
19 [na2]           : 20
20 [nmed]          : 3
21 [nsnp]          : 2
22 [clon]          : 143.50000
23 [clat]          : 42.00000
```

-ppm/-bmp

それぞれ ppm もしくは bmp 形式の画像を出力する。結果はそれぞれ ppm/bmp ディレクトリ（自動生成）に連番ファイルとして格納される。可視化対象が速度あるいは変位であれば、上下動と水平動をそれぞれ赤と緑で、P 波・S 波 (div, rot) であればそれぞれの成分の絶対値を赤と緑で色分けして表示する。ただし、絶対値オプションが付加された場合には GMT のカラーパレット hot 相当の色で絶対値を可視化する。

-pall

吸収境界領域まで含めて可視化を行う（デフォルトでは切り落とす）

-mul var|-mul1 var -mul2 var ...

可視化する際に出力振幅を var 倍する。色の強さの調整をここで行う。-mul1, -mul2 などを用いると、成分ごとの振幅の重みを個別に与えることができる。これにより、たとえば P 波だけあるいは上下動だけというように、特定成分だけを切り出すことができる。

-abs

速度スナップショットに対してその絶対値を可視化する。P 波・S 波のスナップショットはもともとそれぞれの絶対値が出力されているので動作しない。

-bin|asc

各時間ステップのスナップショットを単精度バイナリもしくはアスキーデータとして bin もしくは asc ディレクトリに出力する。バイナリデータは GMT(xyz2grd など) から-bis オプションで直接読み込むことができる。

-skip n

最初の n スナップショットをスキップする。

3.1.2 diff_snp.x

ふたつのスナップショットファイルの差を取り、同じフォーマットのスナップショットファイルに出力する。

```
1 > diff_snp.x snap1 snap2 diffile
```

わずかに条件を変えたシミュレーションの残差波動場を計算するためのプログラムである。出力ファイルのフォーマット (NetCDF もしくは独自バイナリ) は入力ファイルのフォーマットに依存する。

3.2 パラメタ作成補助

3.2.1 fdmcond.x

差分法の空間・時間グリッド間隔は、主として CFL 安定条件に律速される。また、震源で輻射される地震動の特徴的周波数の上限は波長条件（地震波の波長が 5~10 グリッドより大きくなくてはならない）によって制限される。前者が満たされないと計算は安定に実行されず発散し、後者の場合には発散こそしないものの数値分散にともなう誤差が大きくなる。

fdmcond.x はこれらのパラメタを対話的に求めるツールである。空間・時間のグリッド間隔、最大周波数 fmax、震源におけるライズタイム Tr、地震波速度の最小最大値 vmin, vmax などの幾つかの組み合わせを与えると、残りのパラメタの条件を提示してくれる。

```
1
2 > ./fdmcond.x
```

```

3
4 -----
5          FDM CONDITION
6 -----
7
8
9 Model Dimension ? --> 3
10    2) 2D
11    3) 3D
12
13
14 Source Type ? --> 3
15    1) Triangle
16    2) Herrmann
17    3) Kupper
18
19
20 Parameter Combination ? --> 5
21    1) dh   (space grid), fmax (max freq.), vmax (max vel.)
22    2) dh   (space grid), Tr   (rise time),  vmax (max vel.)
23    3) dh   (space grid), fmax (max freq.), dt  (time grid)
24    4) dh   (space grid), Tr   (rise time), dt  (time grid)
25    5) dh   (space grid), vmin (min vel.),  vmax (max vel.)
26    6) dh   (space grid), vmin (min vel.), dt  (time grid)
27    7) fmax (max freq.) , vmax (max vel.), dt  (time grid)
28    8) Tr   (rise time) , vmax (max vel.), dt  (time grid)
29    9) vmin (min vel.) , vmax (max vel.), dt  (time grid)
30
31
32 Assumed Parameters:
33   dx     = 0.25
34   dy     = 0.25
35   dz     = 0.25
36   vmin   = 0.3
37   vmax   = 8.0
38
39 Derivaaed Parameters:
40   dt     <= 0.01546
41   fmax  <= 0.17143
42   Tr     >= 13.41667

```

3.2.2 mapregion.x

計算領域は clon, clat, phi, xbeg, ybeg, nx, ny, dx, dy などのパラメタによって自動的に決定される。mapregion.x は、OpenSWPC の入力パラメタファイルを読みこみ、対応する地図領域範囲を出力するプログラムである。xbeg, ybeg, xend, yend で定義される領域の外側線の緯度経度位置を出力する。

```
1 > mapregion.x -i input.inf -o region.dat
```

-o オプションが与えられない場合には標準出力に出力を行う。また、本コードは $N_m = 3$ を仮定した場合の予想メモリ利用量をターミナルに出力する。

3.2.3 mapregion.gmt4, mapregion.gmt5

`mapregion.x` を呼び出して地図領域を描画する GMT スクリプト。GMT バージョンに応じて 2 種類のスクリプトが提供される。

3.3 構造モデルの確認

3.3.1 qmodel_tau.x

OpenSWPC の入力パラメタファイルを元に, Q^{-1} 値と実体波の分散性の周波数依存性を計算する。

```
1 > qmodel_tau.x -nm [nm] -i [prm_file] -f0 [min_freq] -f1 [max_freq] -nf [ngrid]
```

周波数 `min_freq` から `max_freq` までの区間を対数等間隔に `ngrid` に分割し, $Q^{-1}(f)$ と実体波速度の分散性を出力する。地震波速度は基準周波数で 1 に規格化されている。粘弾性体に関わるパラメタは OpenSWPC の入力 `prm_file` から読み込むが, OpenSWPC コードの埋め込みパラメタである `NM` は別途オプションで与える必要がある。

3.3.2 grdsnp.x

構造モデル `grd` ファイルから, OpenSWPC の入力パラメタに基づいた座標変換により, 計算座標系の (x, y , 深さ) をアスキーで標準出力に出力する。計算モデル領域の切り出しの確認や, それを GMT 等で可視化する際に用いる。

```
1 > grdsnp.x -i [prm_file] -g [grd_file]
```

3.4 ランダム媒質の生成

3.4.1 gen_rmed3d.x

3 次元ランダム媒質を作成する。

```
1 gen_rmed3d.x [-o outfile] [-nx nx] [-ny ny] [-nz nz] [-epsil epsilon] [-kappa kappa] [-dx dx] [-dy dy] [-dz dz] [-ax ax] [-ay ay] [-az az] [-ptype ptype] {-seed seed_number}
```

`-o outfile`

出力ファイル名

`-nx nx -ny ny -nz nz`

グリッドサイズ。2 のべき乗であること。

`epsil epsilon`

ランダム媒質のゆらぎ RMS ϵ

`-ax ax -ay ay -az az`

ランダム媒質の各方向の特徴的スケール。

`-dx dx -dy dy -dz dz`

空間グリッド間隔

`-ptype ptype`

PSDF の種別。1:Gaussian, 2:Exponential, 3:von Kármán

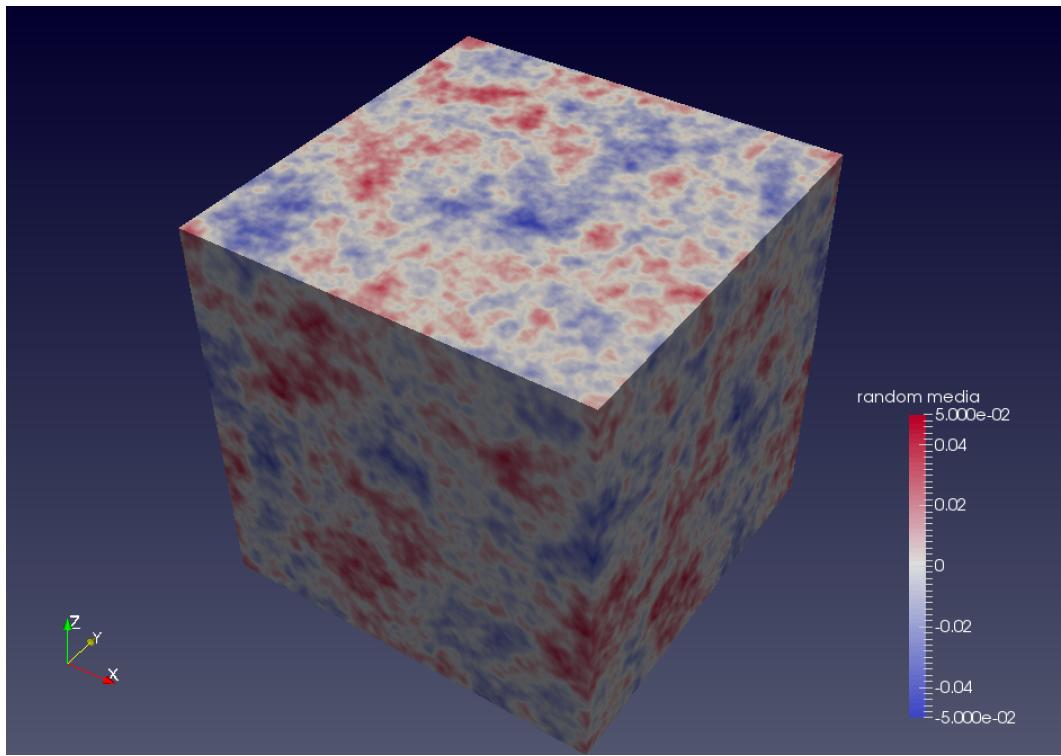


図 3.1 ParaView による 3 次元ランダム媒質の可視化の例.

-kappa kappa

von Kármán 型のパラメータ κ

-seed seed_number

(オプション) 亂数のシードを固定. 整数値で与える. 省略された場合は日付時刻に基づき自動生成される.

ランダム媒質は 3 次元の NetCDF フォーマットで作成される. 一般的な可視化ソフト (たとえば ParaView^{*1}) や NetCDF 専用の可視化ソフト (たとえば Panoply^{*2}) などで可視化したり内容を確認することができる (図3.1).

3.4.2 gen_rmed2d.x

2 次元ランダム媒質を作成する. 使い方は `gen_rmed3d.x` とほぼ同じであり, y 軸方向の入力が無視される.

3.5 その他のツール

3.5.1 timvis ツール

`timvis.gmt4`, `/timvis.gmt5`, `timvis.abs.gmt4`, `/timvis.abs.gmt5` の 4 つのスクリプトがある. これらは `stopwatch_mode = .true.` の際に出力される経過時間ファイルを解析し, 各計算ノードでサブルーチン毎の計算負荷のバランスを可視化する. GMT バージョン 4 用と 5 用の 2 セットが用意されている.

^{*1} <http://www.paraview.org>

^{*2} <http://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/>

3.5.2 地理座標変換

`ll2xy.x` と `xy2ll.x` は、OpenSWPC で採用されているガウス・クリューゲル変換によって緯度経度とデカルト座標系の相互変換を行うツールである。

第 4 章

その他

4.1 計算モデル設定のヒント

特に 3 次元計算では、計算規模はメモリサイズによって制限される。本コードが必要とするメモリ量の概算値は、混合精度かつ $NM=3$ の場合、

$$m_{MP} = 116 + 24NM = 188 \quad (NM = 3) \text{ byte} \quad (4.1)$$

である。ただし、これは 3 次元以上の配列の容量の総和を取ったもので、かつ吸収境界条件部分は考慮していない。これに $n_x \times n_y \times n_z$ を乗ずれば必要とする合計メモリ量の概算値が得られる。あとは各計算ノードでの要求メモリ量が利用可能な資源量を超えないように設定すれば良い。

計算時間は、1 秒あたりに 1CPU コアが処理できる時間・空間グリッド数 (n_G) から推定できる。表4.1にいくつかのマシンでの推定結果を示す。全体の計算時間は、

$$t_{comp} = \frac{nx \times ny \times nz}{n_G \times nproc} \times nt \quad [s] \quad (4.2)$$

により概算できる。計算時間がシステムの制限値を超えるようであれば、モデルサイズを変更するか、あるいはチェックポイントリストア機能を利用する必要がある。

4.2 コード改造のヒント

4.2.1 速度構造の変更

速度構造は、モジュール `m_medium` から呼ばれるサブルーチン `vmodel_*` によって定義される。これらの `vmodel` サブルーチンは、速度構造の種類によらず、表4.2のような入出力変数をもつ。位置座標配列 `xc`, `yc`, `zc` の位置での構造 `rho`, `lam`, `mu`, `qp`, `qs` を与えるようなサブルーチンを自作することで、任意の速度構造に帯するシミュレーションが実現できる。ただし、`xc`, `yc`, `zc` は MPI で分割される領域内よりもやや広い範囲が用いられる。これは、通信による値の交換や、震源ならびに地表海底境界条件に必要となるためである。

表 4.1 マシン固有の単位時間あたり計算可能グリッド数 n_G 。原則として CPU コアあたりの数に規格化されている。

マシン名	CPU	Core 数	n_G
Mac Pro 2010	Intel Xeon X5670 2.93GHz	6	6.7×10^6
EIC2015	Intel Xeon E5-2680 v3 2.5 GHz	12	7.0×10^6
地球シミュレータ 3	NEC SX-ACE	4	57×10^6

表 4.2 速度構造定義サブルーチンの入出力

変数名	in/out	type	説明
io prm	in	integer	入力パラメタファイルの装置番号
i0,i1	in	integer	x 方向インデックスの始値と終値
j0,j1	in	integer	y 方向インデックスの始値と終値
k0,k1	in	integer	z 方向インデックスの始値と終値
xc(i0:i1)	in	real	x 座標値配列
yc(i0:i1)	in	real	y 座標値配列
zc(i0:i1)	in	real	z 座標値配列
vcut	in	real	カットオフ速度
rho(k0:k1,i0:i1,j0:j1)	out	real	密度 [g/cm ³]
lam(k0:k1,i0:i1,j0:j1)	out	real	Lame の係数 λ [g/cm ³]
mu(k0:k1,i0:i1,j0:j1)	out	real	Lame の係数 μ [g/cm ³]
qp(k0:k1,i0:i1,j0:j1)	out	real	内部減衰 Q_P
qs(k0:k1,i0:i1,j0:j1)	out	real	内部減衰 Q_S
bddep(i0:i1,j0:j1,0:NBD)	out	real	不連続面深さ [km]

地表境界や海底境界面は `m_medium` 内で自動判定される。それぞれ `lam` および `mu` が初めて非ゼロになるグリッド位置が境界面であると判定される。

変数 `bddep(:, :, 0)` は地表であることが仮定され、スナップショットの可視化に用いられる。その他 `bddep(:, :, 1:NBD)` は震源や観測点を境界面の位置に強制的に設定する際に用いられる。

4.2.2 震源時間関数の追加

震源時間関数の種別は、パラメタ `stftype` の選択に応じて、関数 `source_momentrate` で呼び出される。各要素震源時間関数の関数定義は `share/m_fdtool.F90` に格納されている。予め定義されている以外の震源時間関数形状を使いたければ、ここに関数を付け加えるのが簡単であろう。

また、OpenSWPC で利用されている震源時間関数はすべて破壊開始時間 `tbeg` とライズタイム `trise` をパラメタとして取っている。これらは配列変数 `srcprm(:)` に格納されている。もし震源時間関数が 3 つ以上のパラメタを必要とする場合には、この配列のサイズ (`n_stfprm`) を拡大すればよい。

4.2.3 追加パラメタの読み込みかた

多くのモジュールでは `(modulename)_setup` なるサブルーチンが計算開始時に呼ばれ、入力ファイルからパラメタを取得する。追加パラメタを同じようにファイルから読み込むには、`subroutine readini` を用いる。実装は `src/shared/m_readini.F90` にある。

参考文献

- Aki, K., and P. G. Richards (2002), *Quantitative Seismology: Theory and Methods*, 2nd edition ed., University Science Books.
- Blanch, J. O., J. O. Robertsson, and W. W. Symes (1994), Modeling of a constant Q: methodology and algorithm for an efficient and optimally inexpensive viscoelastic technique, *Geophysics*, 60, 176–184, doi:10.1111/j.1365-246X.2004.02300.x.
- Cerjan, C., D. Kosloff, R. Kosloff, and M. Reshef (1985), A nonreflecting boundary condition for discrete acoustic and elastic wave equations, *Geophysics*, 50(4), 705–708.
- Kawase, K. (2011), A general formula for calculating meridian arc length and its application to coordinate conversion in the Gauss-Krüger projection, *Bulletin of the Geospatial Information Authority of Japan*, 59, 1–13.
- Koketsu, K., H. Miyake, and H. Suzuki (2012), Japan Integrated Velocity Structure Model Version 1, *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, p. Paper No.1773.
- Maeda, T., and T. Furumura (2013), FDM Simulation of Seismic Waves, Ocean Acoustic Waves, and Tsunamis Based on Tsunami-Coupled Equations of Motion, *PAGEOPH*, 170(1-2), 109–127, doi:10.1007/s00024-011-0430-z.
- Maeda, T., T. Furumura, S. Noguchi, S. Takemura, S. Sakai, M. Shinohara, K. Iwai, and S.-J. Lee (2013), Seismic- and tsunami-wave propagation of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake as inferred from the tsunami-coupled finite-difference simulation, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(2B), 1456–1472.
- Okamoto, T., and H. Takenaka (2005), Fluid-solid boundary implementation in the velocity-stress finite-difference method, *Zisin*, 57, 355–364.
- Robertsson, J. O., J. O. Blanch, and W. W. Symes (1994), Viscoelastic finite-difference modeling, *Geophysics*, 59(9), 1444–1456, doi:10.1190/1.1443701.
- Sato, H., M. C. Fehler, and T. Maeda (2012), *Seismic Wave Propagation and Scattering in the Heterogeneous Earth: Second Edition*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, doi:10.1007/978-3-642-23029-5.
- Zhang, W., and Y. Shen (2010), Unsplit complex frequency-shifted PML implementation using auxiliary differential equations for seismic wave modeling, *Geophysics*, 75(4), T141–T154, doi:10.1190/1.3463431.

謝辞

本コードの開発ならびに公開にあたっては、東京大学地震研究所共同利用特定共同研究(B)『地震波形解剖学の計算科学的新展開』(課題番号 2015-B-01)ならびに東京大学地震研究所・京都大学防災研究所拠点間連携共同研究(課題番号 2016-K-06)の支援をいただいた。本コードは以下の方々との共同研究等に基づいて開発されたものである(敬称略・順不同):古村孝志・武村俊介・等々力賢・森太志・吉光奈奈・熊谷博之・森岡英恵・加藤愛太郎・土井一生・金谷希美・一瀬建日。

主な改版履歴

2015-06-04 地震研共同利用プログラム『地震波形解剖学の計算科学的新展開』公開初版
2015-06-10 地球シミュレータ3 対応情報を追加
2015-06-29 ランダム媒質機能の実装および説明を追加
2015-07-14 MPI/OpenMP のハイブリッド並列計算に対応
2015-12-04 誤植修正
2016-01-14 実体力・Green 関数モードの記載追加
2016-01-19 理論編を分離
2016-02-03 netcdf 形式の出力について追記
2016-05-05 (v1.0) オープンソース公開版
2016-06-19 (v2.0) 2次元コードの OpenMP 対応
2016-08-20 (v3.0) 相反定理モードの改善. 地理座標計算ツール追加. csf 波形フォーマット追加

Copyright & License

本ソフトウェアは MIT ライセンスのもと提供されます。

Copyright (c) 2013-2017 Takuto Maeda

THE SOFTWARE IS PROVIDED "AS IS", WITHOUT WARRANTY OF ANY KIND, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO THE WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE AND NONINFRINGEMENT. IN NO EVENT SHALL THE AUTHORS OR COPYRIGHT HOLDERS BE LIABLE FOR ANY CLAIM, DAMAGES OR OTHER LIABILITY, WHETHER IN AN ACTION OF CONTRACT, TORT OR OTHERWISE, ARISING FROM, OUT OF OR IN CONNECTION WITH THE SOFTWARE OR THE USE OR OTHER DEALINGS IN THE SOFTWARE.

また、このソフトウェアを利用した成果を公表する場合には、以下の一連の関連論文の中から適切なものを引用していただくようお願ひいたします（ただし、これはライセンス上の義務ではありません）。

1. Maeda, T., S. Takemura, and T. Furumura (2017), OpenSWPC: An open-source integrated parallel simulation code for modeling seismic wave propagation in 3D heterogeneous viscoelastic media, submitted to *Earth Planets, and Space*.
2. Furumura, T. and L. Chen (2004), Large scale parallel simulation and visualization of 3D seismic wavefield using the Earth Simulator, *Computer Modeling of Engineering and Sciences*, 6(2), 153-168.
(初代地球シミュレータによる大規模地震動並列計算)
3. Furumura, T. and L. Chen (2005), Parallel simulation of strong ground motions during recent and historical damaging earthquakes in Tokyo, Japan, *Parallel Computing*, 31, 149-165.
(地震動シミュレーションの歴史地震への応用)
4. Furumura, T. Hayakawa, M. Nakamura, K. Koketsu, and T. Baba (2008), Development of long-period ground motions from the Nankai Trough, Japan, earthquakes: Observations and computer simulation of the 1944 Tonankai (Mw8.1) and the 2004 SE Off-Kii Peninsula (Mw7) Earthquakes, *Pure Appl. Geophys.*, 165, 585-607.
(長周期地震動シミュレーション)
5. Furumura, T. and T. Saito (2009), An integrated simulation of ground motion and tsunami for the 1944 Tonankai earthquake using high-performance super computers, *Journal of Disaster Research*, 4(2), 118-126.
(地震動と津波の弱連成)
6. Maeda, T., and T. Furumura (2013), FDM simulation of seismic waves, ocean acoustic waves, and tsunamis based on tsunami-coupled equations of motion, *Pure Appl. Geophys.*, 170(1-2), 109-127,

doi:10.1007/s00024-011-0430-z.

(地震津波同時計算)

7. Noguchi, S., T. Maeda, and T. Furumura (2013), FDM simulation of an anomalous later phase from the Japan Trench subduction zone earthquakes, *Pure Appl. Geophys.*, 170(1-2), 95-108, doi:10.1007/s00024-011-0412-1.
(海水による長周期地震波のトラップ)
8. Maeda, T., T. Furumura, S. Noguchi, S. Takemura, S. Sakai, M. Shinohara, K. Iwai, S. J. Lee (2013), Seismic and tsunami wave propagation of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake as inferred from the tsunami-coupled finite difference simulation, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 103(2b), 1456-1472, doi:10.1785/0120120118.
(東北地方太平洋地震の再現シミュレーション)
9. Maeda, T., T. Furumura, and K. Obara (2014), Scattering of teleseismic P-waves by the Japan Trench: A significant effect of reverberation in the seawater column, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 397(1), 101-110, doi:10.1016/j.epsl.2014.04.037.
(海水による地震波の共鳴散乱)
10. Noguchi, S., T. Maeda, and T. Furumura (2016), Ocean-influenced Rayleigh waves from outer-rise earthquakes and their effects on durations of long-period ground motion, *Geophys. J. Int.*, 205(2), 1099-1107, doi:10.1093/gji/ggw074.
(アウターライズ地震の長周期地震動に対する海水の効果)