

球対称地球における地震時変形の計算プログラム Sun_SNREI について

京都大学 大学院 理学研究科 地球惑星科学専攻
地球物理学教室 測地学研究室

西上 直志 (にしうえ ただし)

nishiue.tadashi.56m@st.kyoto-u.ac.jp

(2023年5月12日初版公開)

1. はじめに

付属の ZIP ファイルには球対称地球での地震時変形を計算するためのプログラム群が格納されています。各プログラムは本稿の筆者である西上が、西上・風間 (2023) の研究において Fortran 言語でコード化したものです。理論の詳細は Sun and Okubo (1993), Sun et al. (2006, 2009) を参照してください。ZIP ファイルの中身は以下のような構造になっています。

```
Sun_SNREI
├── RadFunc.f90
├── displacement.f90
├── displacement_Green.f90
├── gravity.f90
├── strain.f90
├── sample
│   ├── fault.csv
│   └── obspoint_sample1.csv
├── sample_single
│   ├── fault.csv
│   └── obspoint_sample2.csv
└── earlier
```

計算のためには、まず RadFunc.f90 を実行し、断層に対応した動径関数 (radial function) の値を得る必要があります。その後目的に合わせて displacement.f90, displacement_Green.f90, gravity.f90, strain.f90 のいずれかを実行するという流れになります。この際、実行プログラムがあるディレクトリ直下にディレクトリ (上記の場合 sample や sample_single がこれに該当する) を作成し、断層の情報が入ったファイル fault.csv や観測点の情報が入ったファイル (名前は任意で、ファイルが複数あってもよい) を置いてください。なお、上記の例では観測点情報のファイルの名前を obspoint_sample1.csv や obspoint_sample2.csv にしています。

これらの計算プログラムにおいては、物性パラメータとして PREM (Dziewonski and Anderson, 1981) を用いています。ただし、最も浅い層 (ocean) のパラメータは、その下の層 (crust) と同じものを用いています。

2. RadFunc.f90

- ファイル入力: `fault.csv`
- ターミナル入力: `fault.csv` が格納されているディレクトリの名前
- ファイル出力: `ys1.csv`, `ys3.csv`, `ys5.csv`, `yt1.csv`

断層の深さに対応する動径関数 (radial function) の値を、Sun and Okubo (1993) に従って計算します。`fault.csv` の内容のうち、必要な情報は断層の深さのみですので、この時点では他の情報はダミーデータでも構いません。また、複数の深さの断層に対しての計算も一度に行うことができますが、断層の深さが昇順 (浅→深) になるようにファイル内に並べてください (以降のプログラムも同様で、同じ深さの断層があっても OK です)。

3. displacement.f90

- ファイル入力: `fault.csv`, `ys1.csv`, `ys3.csv`, `yt1.csv`, 観測点の情報
- ターミナル入力: 上記ファイルが存在するディレクトリ名、観測点の情報が入ったファイル名
- ファイル出力: 観測点の情報が入ったファイル名 + `_displace.csv`
(例) `obspoint_sample1.csv` → `obspoint_sample1_displace.csv`

断層のすべりによって起こる地表の変位を、Sun et al. (2009) に従って計算します。 dx , dy , dz はそれぞれ東向き変位、北向き変位、鉛直上向き変位で、単位は m です。

4. displacement_Green.f90

- ファイル入力: `fault.csv`, `ys1.csv`, `ys3.csv`, `yt1.csv`, 観測点の情報
- ターミナル入力: 上記ファイルが存在するディレクトリ名、観測点の情報が入ったファイル名
- ファイル出力: 観測点の情報が入ったファイル名 + `_dispGreen.csv`
(例) `obspoint_sample1.csv` → `obspoint_sample1_dispGreen.csv`

断層の形状に対応した地表の変位の Green 関数を、Sun et al. (2009) に従って計算します。断層のすべり量 (slip) とすべり角 (rake) の情報は使いませんので、ダミーデータでも構いません。観測点が N 個、断層が M 個の時、Green 関数は以下のような $3N \times 2M$ の行列 A となります。

$$\begin{pmatrix} dx_1 \\ \vdots \\ dx_N \\ dy_1 \\ \vdots \\ dy_N \\ dz_1 \\ \vdots \\ dz_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{1,1} & \cdots & A_{1,2M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{3N,1} & \cdots & A_{3N,2M} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1^{thrust} \\ \vdots \\ u_M^{thrust} \\ u_1^{strike} \\ \vdots \\ u_M^{strike} \end{pmatrix} \quad (1)$$

ただし、 dx_n, dy_n, dz_n は n 番目の観測点のそれぞれ東向き変位、北向き変位、鉛直上向き変位、 u_m^{thrust} , u_m^{strike} は m 番目の断層のすべり量のそれぞれ逆断層成分、左横ずれ断層成分です。 dx_n, dy_n, dz_n の単位は、 u_m^{thrust} , u_m^{strike} の単位と同じになります。

5. gravity.f90

- ファイル入力： `fault.csv`, `ys1.csv`, `ys5.csv`, 観測点の情報
- ターミナル入力： 上記ファイルが存在するディレクトリ名、観測点の情報が入ったファイル名
- ファイル出力： 観測点の情報が入ったファイル名 + `_gravity.csv`
(例) `obspoint_sample1.csv` → `obspoint_sample1_gravity.csv`

断層すべりによって起こる地表での鉛直変位と重力変化を、Sun and Okubo (1993) に従って計算します。 dz は鉛直上向き変位 (単位は m)、 dg_s, dg はそれぞれ空間固定点および自由表面 (地表) 固定点での重力変化 (鉛直下向き、単位は m/s^2) です。フリーエア重力勾配を γ (ただし $\gamma > 0$ で、単位は $m/s^2/m$) とすると、 dg_s と dg の関係は以下の通りになります。

$$dg = dg_s - \gamma dz \quad (2)$$

プログラム中では $\gamma = 0.3086 \times 10^{-5} m/s^2/m$ を用いています。地上に置かれた重力計で観測される重力変化に対応するのは dg です。

6. strain.f90

- ファイル入力： `fault.csv`, `ys1.csv`, `ys3.csv`, `yt1.csv`, 観測点の情報
- ターミナル入力： 上記ファイルが存在するディレクトリ名、観測点の情報が入ったファイル名
- ファイル出力： 観測点の情報が入ったファイル名 + `_strain.csv`
(例) `obspoint_sample1.csv` → `obspoint_sample1_strain.csv`

断層のすべりによって起こる地表での歪みを、Sun et al. (2006) に従って計算します。 x, y, z をそれぞれ東向き、北向き、鉛直上向きとして、出力は以下のようになります ($e_{xz} = e_{zx}, e_{yz} = e_{zy}$ は自由表面の条件から 0 になります)。

$$e_{xx} = \frac{\partial(dx)}{\partial x} \quad (3)$$

$$e_{xy} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial(dx)}{\partial y} + \frac{\partial(dy)}{\partial x} \right] = e_{yx} \quad (4)$$

$$e_{yy} = \frac{\partial(dy)}{\partial y} \quad (5)$$

$$e_{zz} = \frac{\partial(dz)}{\partial z} \quad (6)$$

謝辞

各プログラム内のサブルーチン `spline`, `splint`, `euler_trans` は、Numerical Recipes in FORTRAN 77 (Press et al., 1992) を参考に作成しました。国土地理院の松尾功二氏、東京大学地震研究所の西山竜一氏、および京都大学の風間卓仁氏には、本プログラムを作成するうえで有益な助言をいただきました。さらに京都大学の風間卓仁氏には、本解説文を LaTeX 化および PDF 化していただきました。以上、ここに記して感謝いたします。

参考文献

- Dziewonski, A.M. and D.L. Anderson (1981): Preliminary reference Earth model. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **25**, 297–356.
- Press, W.H., S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling and B.P. Flannery (1992): Numerical Recipes in FORTRAN 77: The Art of Scientific Computing (2nd ed.). Cambridge University Press, London. [see pp. 107–110 and pp. 159–163]
- Sun, W. and S. Okubo (1993): Surface potential and gravity changes due to internal dislocations in a spherical Earth—I. Theory for a point dislocation. *Geophys. J. Int.*, **114**, 569–592.
- Sun, W., S. Okubo and G. Fu (2006): Green’s Function of Co-seismic Strain Changes and Investigation of Effects of Earth’s Curvature and Radial Heterogeneity. *Geophys. J. Int.*, **167**, 1273–1291.
- Sun, W., S. Okubo, G. Fu and A. Araya (2009): General formulations of global co-seismic deformations caused by an arbitrary dislocation in a spherically symmetric earth model—applicable to deformed earth surface and space-fixed point. *Geophys. J. Int.*, **177**, 817–833.
- 西上直志・風間卓仁 (2023): 地震時変形の数値計算における球対称モデルと半無限モデルの比較. 日本地球惑星科学連合 2023 年大会, **SGD02-P18**, 千葉県千葉市.

更新履歴

2023年5月12日（初版）

- 本稿（PDF ファイル）およびプログラム（ZIP ファイル）を京都大学学術情報リポジトリ (KURENAI) 上で公開した。
- 各プログラム *.f90 のバージョンは 1.0 として定義している。

2023年6月5日（第2版）

- 各プログラム *.f90 のヘッダーやコメント文等を微修正し、各プログラムのバージョンを 1.1 とした。
- 多くのプログラム (ver. 1.0) やパラメーターファイル `fault.csv` ではパラメーター `slip` の入力単位に `m` を仮定していたが、`strain.f90` (ver. 1.0) では `slip` の入力単位に `cm` を仮定していた。この影響で、`strain.f90` (ver. 1.0) の計算結果が 2 桁小さくなる問題が生じていた。このバグを解消するため、`strain.f90` (ver. 1.1) では他のプログラムと同様に、パラメーター `slip` の入力単位が `m` となるようにコードを修正した。
- プログラムの修正に伴い、ZIP ファイルを更新し、本稿 PDF の記載内容を修正した。なお、古いプログラムは ZIP ファイル内の `earlier` フォルダ内に残しており、ファイル名にバージョン番号を付与している（例えば、`strain.f90` の ver. 1.0 であれば `earlier/strain_10.f90` と命名する）。