

## P9. GNSS データから算出した山陰地域のひずみ分布

### Calculate of distortion strain rate of the San-in area by GNSS data

○水戸川司・小暮哲也（島根大学）

#### 1. はじめに

GNSS 連続観測システム (GEONET)は、1996 年から運用が始まり、全国約 1300 ケ所の電子基準点 (観測点)と GEONET 中央局 (茨城県つくば市)からなる。高密度かつ高精度な測量網の構築と広域の地殻変動の監視を目的とした国土地理院によるシステムである。全国の電子基準点で取得された観測データをもとに、地震や火山の活動に起因する地殻変動を把握することで、そのメカニズムを明らかにしている。

Sagiya (2004)<sup>1)</sup>では、Fig. 1 のように、関東中心部、中部南部、九州北部、そして中国地方ではひずみが小さいとされる。しかし、山陰地域は微小地震が日本海に沿って帯状に分布していることで知られる (西田, 2007)<sup>2)</sup>。19 世紀後半から 20 世紀にかけては多くの被害地震も発生しており、1872 年浜田地震 (M7.1) や 2000 年鳥取県西部地震 (M7.3) などがあつた。この矛盾は、ひずみの算出方法に由来すると考えられる。Sagiya (2004)<sup>1)</sup>では、Shen et al. (1996)<sup>3)</sup>の手法が用いられている。この手法では、距離減衰定数 (D)

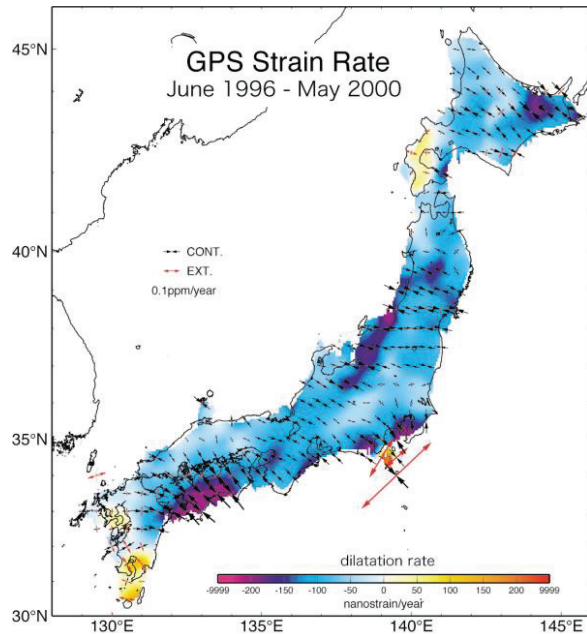


Fig. 1 Sagiya (2004)における面積ひずみ

と呼ばれる距離に関する重みを規定するパラメータを設定しなければならない。これによって、任意の格子点から 2D 以内の範囲の観測点のデータをすべて用いて最小二乗法による計算を行う。Sagiya (2004)<sup>1)</sup>では、当時の観測網が今ほど高密度でなかったこともあり、 $D=35\text{km}$  とされているため 70km 以内の全ての観測点を用いられている。そのため、局所的な変動が見逃されている可能性が考えられる。もし山陰地域での地震活動が、局所的変動によって発生しているなら、より高い分解能でひずみ分布を算出する必要がある。

Shen et al. (1996)<sup>3)</sup>の手法以外にひずみを求める方法として、観測点での変位速度を GMT (Generic Mapping Tools)(Wessel and Smith,1991)<sup>4)</sup>を用いてデータを等間隔のグリッドデータに補間してから空間微分をとる方法が提案されている。データ補間のコマンドは、triangulate, surface, nearneighbor の 3 つがある。本稿では、観測点密度と同程度の解像度が得られることや、データが線形に補間されることから triangulate コマンドを使用し、山陰地域の高解像度なひずみ分布の算出を試みる。

#### 2. GNSS データに基づく地殻変動の解析

データは、国土地理院から公開されている GEONET 観測点の「日々の座標値 (F3 解)」

(中川ほか, 2009)<sup>5)</sup>を使用した。「日々の座標値 (F3 解)」では, GPS 衛星の軌道情報を IGS 最終精密暦として, 精密基線解析ソフトウェア Bernese Ver.5.0 を用いた基線解析が行われ, ITRF (International Terrestrial Reference Frame) 2005 (Altamimi et al., 2005)<sup>6)</sup>で定義される座標系で表される。これは地球の重心を原点とした三次元直交座標 ( $X, Y, Z$ ) で表されるため, 任意の点 (参照点) を原点とする局所測地座標系 ( $n, e, u$ ) に座標変換する。座標変換することで, 観測点の南北, 東西, 上下の各成分の時系列が算出される。参照点には三隅(950388)を設定し, 2005年~2014年までの10年間について日々の座標値を変換した。

1年ごとの変位速度を次のように求めた。観測点における変位の時系列には, 季節変動成分 (年周, 半年周成分) や地震に伴う変動及びアンテナ交換等による疑似的なステップ変動が含まれる。これらを考慮して, 常盤・杉本 (2012)<sup>7)</sup>を参考に下記のような関数の組み合わせで最小二乗法を用いて近似した。

$$x(t) = at + b + c \sin \frac{2\pi t}{T} + d \cos \frac{2\pi t}{T} + e \sin \frac{4\pi t}{T} + f \cos \frac{4\pi t}{T} + \sum_{n=1}^N g_n H(t - t_n)$$

第1, 2項は1次トレンド成分, 第3, 4項は年周成分, 第5, 6項は半年周成分, 第7項は地震およびアンテナ交換等によるステップを表している。 $t$ は日付,  $T$ は1年の日数,  $t_n$ は近似を行う期間における  $n$  回目の地震およびアンテナ交換等の日付,  $N$  は関数を当てはめる期間における地震およびアンテナ交換等の回数,  $H$ はステップ関数を表す。各観測点の, 南北, 東西において, それぞれ近似し,  $a-g$ を求めて, その1次トレンドの傾き ( $a$ の値) を変位速度とした。データを1年ごとに区切って近似したのは, 毎年の季節変動成分が異なると考えたからである。

次に面積ひずみ速度を水平変位速度から算出した。ひずみは変位の空間微分であることから, ひずみ速度は変位速度を空間微分することで求められる。井潤・石橋 (2003)<sup>8)</sup>と同様に, Shewchuk (1996)<sup>9)</sup>の手法を用いて各観測点を頂点とする Delaunay 三角形を生成し, 南北, 東西方向の変位速度を各三角形の中で線形補間を行い, 0.1度間隔の格子点上での変位速度を求めた。ここまでの手順は, GMT に実装されている triangulate コマンドを用いて計算できる。任意の点での面積ひずみを算出するには, まず X 軸方向のひずみ  $e_{xx}$ , Y 軸方向のひずみ  $e_{yy}$  を求める必要があり, それらの和が面積ひずみ  $e_d$  として定義される。

データ補間の際にフィルタリングをせず, 線形補間するため異常観測点の影響が出やすい。そこで井潤・石橋 (2003)<sup>8)</sup>と同様に, ある観測点の両側で面積ひずみ速度が  $2\sim 3 \times 10^{-7}/\text{year}$  を超えるような正と負の対照的な分布を示す場合, その観測点を異常観測点とみなし, 解析から除外する。異常観測点がなくなるまで, この作業を繰り返した。これらの方法で2005年から2014年までの1年ごとに, 軸ひずみを求めた。さらに, 1年ごとの軸ひずみの10年平均を求め, 面積ひずみを算出した。

### 3. 山陰地域のひずみ分布

地震発生時の累積ひずみは、地殻弾性変形の限界平均ひずみ(critical mean crustal-strain,  $\gamma_c$ )と呼ばれ、 $\gamma_c = 1 \times 10^{-4}$ とされている。一方、平均して 1000 年に 1 m 以上の変位を生ずる断層は、A 級活断層 (Active fault)と呼ばれる (加藤, 1995)<sup>10)</sup>。その断層の、平均変位速度 ( $V_{\text{fault}}$ ) は  $V_{\text{fault}} \geq 1 \times 10^{-3} \text{m/year}$  である。したがって、断層の平均変位速度の概念にならい、1000 年に 1 度の大地震が発生すると仮定して、平均地殻ひずみ速度というものを考えると  $1 \times 10^{-7}/\text{year}$  である。南雲 (1995)<sup>11)</sup>は、この  $1 \times 10^{-7}/\text{year}$  を臨界平均地殻ひずみ速度 (Critical mean crustal-strain-rate,  $\dot{\gamma}_c$ ) と定義した。そのため臨界平均地殻ひずみ速度 ( $\dot{\gamma}_c$ ) と面積ひずみ ( $e_d$ ) の関係が、 $e_d \geq |\dot{\gamma}_c|$  であるような地域では、大地震発生の可能性があると言える。

2005 年から 2014 年までの 1 年ごとの軸ひずみの 10 年平均から求めた面積ひずみを Fig. 2(a) に示した。さらに、Fig. 2(a) に同期間に観測された震央の分布をプロットしたものが Fig. 2(b) である。Fig. 2(a) では、三瓶山の周辺で 100 nanostrain/year 以上の面積ひずみが見られる。Fig. 2(b) から、正の面積ひずみが大きい地域のほとんどでは、震央が密に存在していることが分かる。しかし、震央が密に存在している 2000 年鳥取西部地震の余震域では、大きなひずみは見られなかった。これは、2000 年鳥取西部地震以降の地殻変動が、変化したことによる可能性や、この地域でのひずみ集中がより広域的な変動によるものである可能性が指摘される。

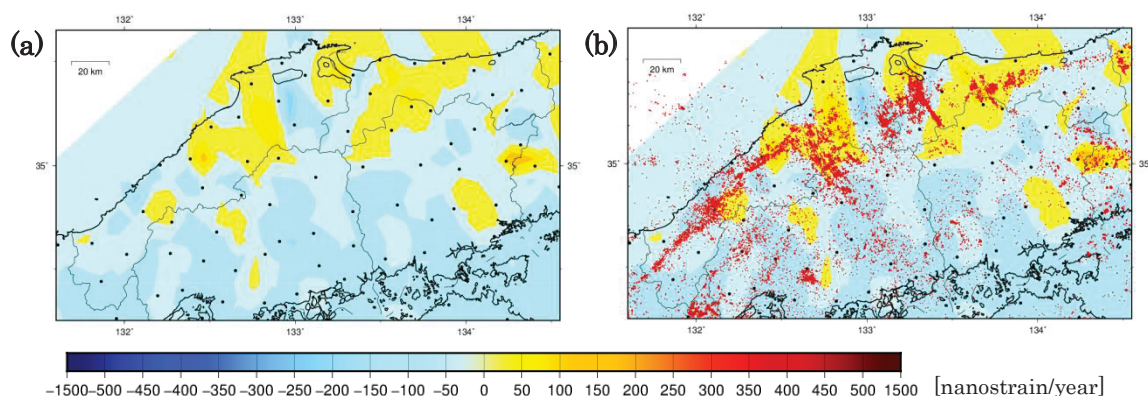


Fig. 2 軸ひずみの 10 年平均から求めた面積ひずみ

### 4. 結論

山陰地域は局所的な変動によって地震を引き起こしている可能性があるため、国土地理院の GNSS 連続観測網 (GEONET) の 2005 年から 2014 年の「日々の座標値 F3 解」のデータを用いて、より高解像度な山陰地域の面積ひずみ分布を算出することを目的とした。井潤・石橋 (2003)<sup>8)</sup>と同様に、各観測点の変位速度を GMT の triangulate コマンドを用いて、0.1 度の格子点上に線形補間したものを、空間微分した。このようにして面積ひずみ分布を求めることで、Shen et al. (1996)<sup>3)</sup>の手法を用いた、Sagiya (2004)<sup>1)</sup>の面積ひずみ分布に比べて、より分解能の高いひずみ分布を算出することができた。2005 年から 2014 年の 10 年間の軸ひずみの平均から求めた面積ひずみでは、南雲 (1995)<sup>11)</sup>によって定義された臨界平均地殻ひずみ速度 ( $\dot{\gamma}_c = 100 \text{ nanostrain/year}$ ) を超える面積ひずみが、三瓶山の周辺で

見られた。しかし、2000年鳥取県西部地震の余震域では、大きな面積ひずみが見られなかった。今後は、2000年の鳥取県西部地震以前のデータも含めて解析することや、より広域的な変動を捉えると考えられる手法でも面積ひずみを算出する必要がある。

## 参考文献

- 1) Sagiya, T. (2004) A decade of GEONET: 1994–2003 –The continuous GPS observation in Japan and its impact on earthquake studies–, *Earth Planets Space*, 56, xxix–xli.
- 2) 西田良平 (2007) 山陰地域の地震活動, 鳥取大学工学部研究報告, 38, 25-39.
- 3) Shen, Z., Jackson, D.D. and Ge, B.X. (1996) Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements, *J. Geophys. Res.*, 101, 27957-27980.
- 4) Wessel, P. and Smith, W.H.F. (1998) New, improved version of the Generic Mapping Tools Released, *EOS Trans. AGU*, 79, 579.
- 5) 中川弘川・豊福隆史・小谷京湖・宮原伐折羅・岩下知真子・川元智司 (2009) GPS 連続観測システム (GEONET) の新しい解析戦略 (第4版) による ルーチン解析システムの構築について, *国土地理院時報*, 118, 1-8.
- 6) Altamimi, Z., X. Collilieux, J. Legrand, B. Garayt, and C. Boucher (2005) ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters, *J. Geophys. Res.*, 112, B09401, doi:10.1029/2007JB004949.
- 7) 常盤 哲也・杉本 慎吾 (2012) 北海道北部における GPS 観測データを用いた地殻変動解析, *JAEA-Data/Code* 2012-024.
- 8) 井澗陽平・石橋克彦 (2003) GEONE データから求めた伊豆半島～富士山付近の地殻水平歪とテクトニックな考察, *地震* 2, 56, 231-243.
- 9) Shewchuk, J. R. (1996) Triangle: Engineering a 2D quality mesh generator and Delaunay triangulator, in *First Workshop on Applied Computational Geometry*, Philadelphia, PA, Assoc. for Computing, Machinery, 124-133.
- 10) 加藤碩一 (1995) 地震と活断層の科学, 朝倉書店, 280pp.
- 11) 南雲昭三郎 (1995) 臨界平均地殻ひずみ速度と活断層帯, *地震* 2, 48, 479-481.