

(2-3) 東海スロースリップイベントを原因とする中部・近畿地方の歪速度及び地震活動の変化

小林知勝（京都大学防災研究所）

tkoba@rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp

橋本学（京都大学防災研究所）

hasimoto@rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp

(a) 業務の要約

平成 16 年度の成果報告において我々は、2000 年後半から琵琶湖以東の領域で圧縮性的変形が著しく緩和し、主圧縮軸の向きも大きく変化していることを報告した。本年度は、この歪速度の変化が何に起因しているものかを定量的に説明すること、かつこの歪速度の変化に伴い地震活動に何らかの変化が起こったのかを調べることを目的に研究を進めた。その結果、インバージョン解析により、琵琶湖東部における歪速度場の変化が東海スロースリップによって引き起こされていることを示すことができた。さらに地震活動の時間的推移を調べた結果、養老断層周辺において、2000 年後半から地震発生率がほぼ半減していることを見つけ、その地震活動低下を東海スロースリップ起因の静的応力変化により説明できることを示した。

(b) 業務の実施方法

平成 16 年度の成果より、琵琶湖以東の領域における歪速度場の変化の開始時期が、浜名湖周辺を中心として観測されるスロースリップの発生開始の時期とほぼ同じであることがわかっている。そこで我々は、2000 年後半より始まった東海スロースリップ (Ozawa et al. 2002¹⁾) のすべり分布を推定し、そのすべりが 2000 年後半以降の琵琶湖東部の歪速度場の変化を説明し得るかを確かめた。まず、東海スロースリップイベントのすべり分布を得るため、次のような解析を行った。東海地方直下のユーラシアプレート・フィリピン海プレートの境界面上 (136.8~138.4° E及び 34.6~35.4° Nの範囲) に 0.2° 間隔で点震源を設置し、地表の非定常変位とプレート境界面上のすべりを結びつける観測方程式を最小二乗法により解くことで境界面上の非定常すべりを推定した。本研究ではIshida (1992)²⁾ によるプレート形状を参考にして 45 枚の矩形断層面を設定した。パラメータの増加によりインバージョンによる解が不安定になることを避けるため、すべりが境界面上で滑らかになるように、ラプラシアンオペレータを用いて拘束を課した。最終的に次のような目的関数を最小化することにより、各断層面のすべりを求めた。

$$\mathbf{O} = (\mathbf{d}-\mathbf{Gm})^T(\mathbf{d}-\mathbf{Gm})+K^2\mathbf{m}^T\mathbf{Wm} \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{m} 、 \mathbf{d} 、 \mathbf{G} はそれぞれ、各断層面上のすべりベクトル、観測データベクトル、Okada(1985)³⁾を基にしたグリーン関数マトリクスである。 \mathbf{W} はラプラシアンオペレータを基にして構成される、断層面上のすべりを平滑化するためのマトリクスである。 K は拘束の重みである。 K を決定するために、我々はABICを用いた(Akaike, 1980⁴⁾)。本研究において、ABICは次のように定義される。

$$\text{ABIC} = M\log\mathbf{O}(K)-M\log K^2+\log|\mathbf{G}^T\mathbf{G}+K^2\mathbf{W}|+C \quad (2)$$

ここで N と M はそれぞれデータ及びモデルパラメータの数である。 C は K に独立な定数

である。解析的に K を一意に決定することはできないので、数値的な繰り返し計算により ABIC が最小となる K を最適な値とした。

東海地方におけるスローイベントは 2000 年後半から観測されるが、その非定常な変動速度は一定ではない (Ozawa et al. 2002¹⁾)。そこで本研究では、1997 年から 2004 年 8 月までを、Prd I: 1997 年 1 月～2000 年 5 月、Prd II: 2000 年 10 月～2001 年 9 月、Prd III: 2001 年 10 月～2002 年 12 月、Prd IV: 2003 年 1 月～2004 年 8 月、と 4 つの期間に分割し、Prd I の期間を定常的な地殻変動場とみなして各期間の非定常なすべり分布を求めた。ただし、2000 年夏の伊豆諸島でのマグマ貫入イベント及び 2004 年 9 月の紀伊半島南東沖地震の影響を避けるため、2000 年 6～9 月及び 2004 年 9 月以降のデータは解析に用いなかった。

インヴァージョンには、歪速度が減少している地域を含むように 136.3～138.4° E 及び 34.3～35.8° N の範囲にある GEONET 観測点を用いた。各 GEONET 観測点の水平速度は、 n 番目の GEONET 観測局の成分 i の日座標値 $x(t)$ を次のようにモデル化することにより推定した。

$$x_n^i(t) = a_n^i + b_n^i t + \sum_{k=1}^m c_n^i H(t - t_0^k) + d_n^i \sin(2\pi t/365.25 + \phi_n) \quad (3)$$

ここで、 a は定数項、 b は直線トレンドの係数、 c はアンテナ交換による人為的ステップ量、 d 及び ϕ は年周変動の振幅と位相、 $H(t)$ はヘビサイド関数である。上記で設定した期間に、解析に影響を与えるような地震は起きなかったことから、本研究では地震によるコサインミックな変動は補正しなかった。全観測点の各成分に対して (3) 式をあてはめ、最小二乗法により各係数を推定して、 b を定常的な速度として求めた。ただし、インヴァージョン解析には大渦固定に変換したものをを用いた。これらの推定には、国土地理院より公表されている GEONET の最終解析解 F2 を用いた。

最終的に、得られたすべり分布から計算される各 GEONET 観測点の水平速度を、Prd I の期間の水平速度に加えることにより歪速度を計算し、定常状態から東海スロースリップの影響によって変化した歪速度場を求めた。ここで、歪速度の計算には Shen et al. (1996)⁵⁾ による方法を応用した。用いたパラメータなどは昨年度の成果報告書 (小林・橋本、2005)⁶⁾ に詳しい。

(c) 業務の成果

得られた非定常すべり分布を図 1 に示す。黒の矢印は推定された各断層面上のすべり速度を示す。灰色及び白の矢印はそれぞれ各 GPS 観測点の水平速度の計算値と観測値である。Prd II の非定常なすべり速度は、主として浜名湖直下に求まる。その最大値は 7.6cm/yr となる。すべりの方向は他の期間とほぼ同じで、プレートの沈み込み方向と反対になる。Prd III では、すべり速度は Prd II と比べ減少し、そのすべり領域はやや北にシフトする。最大のすべりは浜名湖直下に求まり、その値は 5.2cm/yr と見積もられる。Prd IV では、依然として最大のすべり速度は浜名湖直下にあるものの、すべり全体の領域は更に北方向、すなわち深部に伸びる。すべり速度は再び増加し、最大値は 8.5cm/yr となる。このように、すべりの中心が浜名湖直下に推定されることやすべり速度の時空間変化の諸特徴は、先行研

究（例えば、Ozawa et al. 2002¹⁾; Yoshikawa 2003⁷⁾）で指摘された特徴と調和的である。解放されたモーメント量は各期間それぞれ $1.5, 1.1, 1.5 \times 10^{19}$ Nm となる。剛性率を 30 GPa と仮定すると、それぞれ $M_w = 6.7, 6.6, 6.7$ に相当する。Prd II から IV までの期間において解放されたモーメントの総量は、 $M_w = 7.0$ と推定され、Ozawa et al. (2005)⁸⁾ で推定されるモーメント解放量 $M_w \approx 7.1$ とほぼ同じになる。図 2、3 にそれぞれ中部・近畿地方の各期間の面積歪速度及び主歪速度の観測値と計算値を示す。推定されたすべり分布から計算される歪速度は、琵琶湖東部における歪速度変化をよく説明することがわかる。例えば養老断層の南部 (136.7° E, 35.1° N) において、面積歪速度とその最大主圧縮軸の azimuth の観測値は、Prd II : $+1.2 \times 10^{-3}$ ppm/yr, 53 deg, Prd III : -8.0×10^{-1} ppm/yr, 134 deg, Prd IV : -7.7×10^{-1} ppm/yr, 173 deg と推定される一方、その計算値はそれぞれ Prd II : -2.9×10^{-1} ppm/yr, 56 deg, Prd III : -8.3×10^{-1} ppm/yr, 142 deg, Prd IV : -7.7×10^{-1} ppm/yr, 172 deg と推定される。Prd II においては、伊豆諸島でのマグマ貫入イベントの影響が若干残っているためか再現性がやや落ちるが、Prd III や IV においては、我々の東海スローリップモデルが観測値を極めてよく再現していることがわかる。

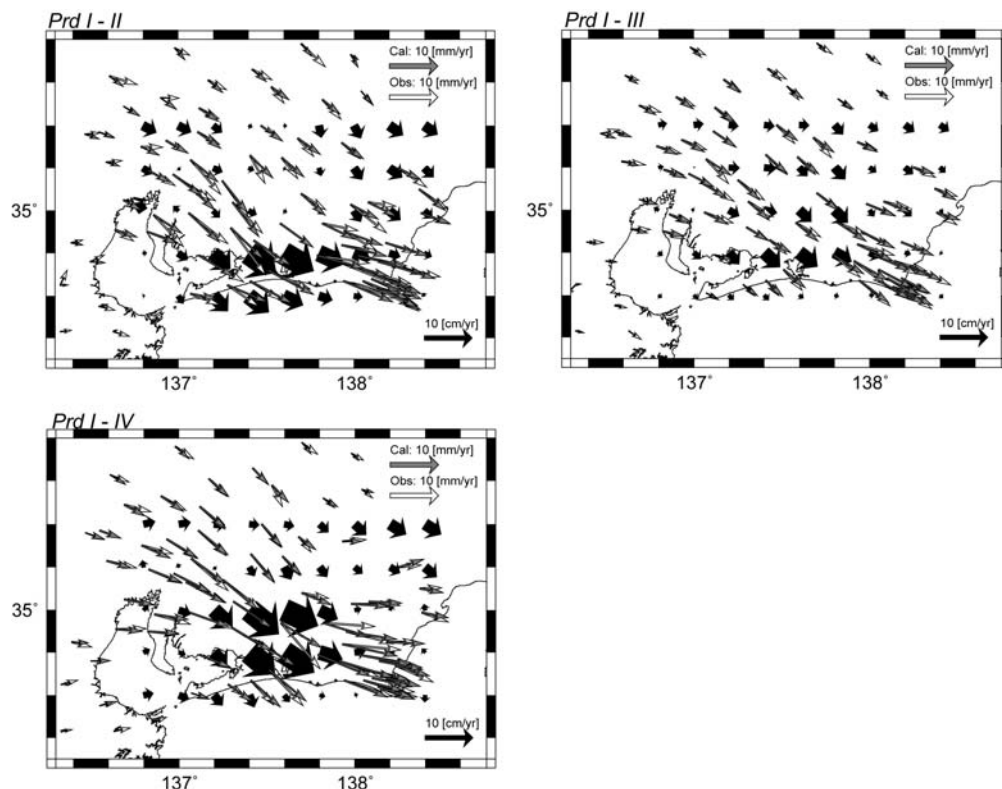


図 1 推定された東海スローイベントのすべり分布。黒の矢印は断層面上のすべり速度を示す。灰色及び白の矢印はそれぞれ各 GPS 観測点の水平速度の計算値と観測値である。

このように、2000 年後半以降、琵琶湖東部を中心に見られた歪速度の変化は、東海スローリップを原因として発生していることが示唆される。このことは海溝域でのすべりが、そのすべり領域の周辺のみならず 200 km 近く離れた地域にも大きな地殻変動を引き起こしたことを示す。そこで、この地殻変動に伴って内陸の地震活動に変化がないかを調べた。気象庁一元化震源リストを用いて、歪速度の変化が大きい琵琶湖東部における 1996 年 1 月から 2004 年 8 月までの微小地震の発生積算数を調べた。まず初めに、図 4(a) の左上に

ある震源分布図の太枠線内（領域 1）から、20 km以浅で発生する地震のみを抽出した。本解析では、余震活動や群発地震の影響を取り除いて定常的な地震活動を評価するために、Reasenber (1985)⁹⁾の手法を用いてデクラスタリング処理を施すことにより、琵琶湖東部における地震発生率の時間的推移を調べた。領域 1 の地震発生積算数を図 4(a)の細線で示す。黒及び灰色の線はそれぞれマグニチュード 2.0 以上、1.5 以上の地震を抽出した際の

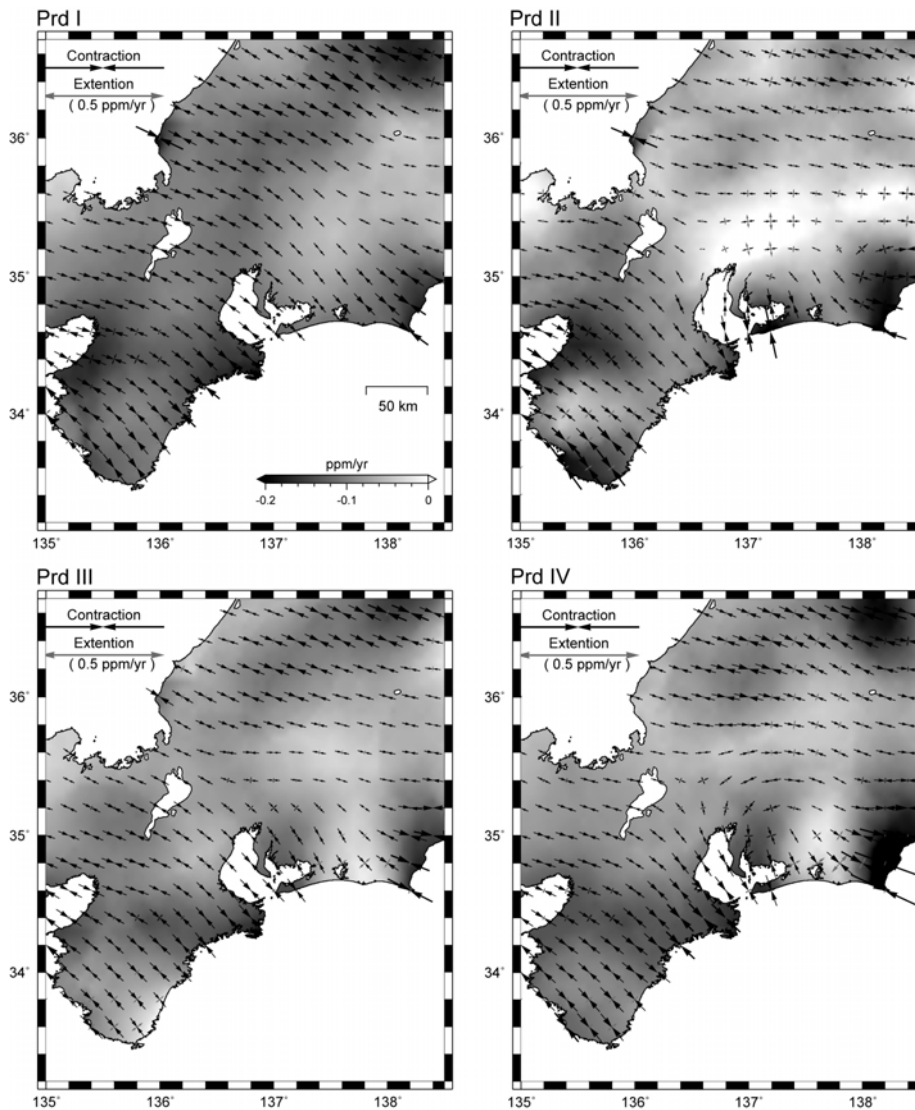


図2 Prd I、 II、 III、 IVにおける中部・近畿地方の面積歪速度及び主歪速度。黒及び灰色の矢印はそれぞれ主歪速度の圧縮及び膨張成分を示す。

積算数を示す。図 4(a)に見られるように、地震の発生率が 2000 年の夏を境に減少していることがわかる。例えば、 $M>2.0$ における発生率を比較すると、2000 年 5 月までの平均発生率が 2.60 ± 0.02 /月であるのに対して、2000 年 10 月以降は 2.08 ± 0.02 /月となる。この 2 期間での地震発生率の変化の度合いを空間的に知るために、我々は $M>1.5$ の地震に対して Z 値を計算した (Habermann, 1983¹⁰⁾)。水平面内に 0.05° 間隔に格子点を配置し、各格子点から 50 km 以内の地震を抽出して Z 値を計算した。ただし、地震数が 50 未満の場合は計算していない。図 4(b)はその結果を図示したもので、暗色ほど Z 値が大きい。Z 値が大きいほど、地震発生率の減少の度合いが大きいことを示す。図 4(b)から、特に養老断層

周辺で発生する地震活動が、周囲に比べて顕著に低下していることがわかる。そこで養老断層周辺で発生する地震のみを抽出し(領域 2)、再びその積算数を図 4(a)に太線で示した。2000 年夏を境にして、地震活動が低下することが明瞭に確認できる。M>2.0 における発生率を比較すると、2000 年 5 月までの平均発生率が 1.70 ± 0.02 /月であるのに対して、2000 年 10 月以降は 0.79 ± 0.01 /月となり、その減少率は 54%となる。

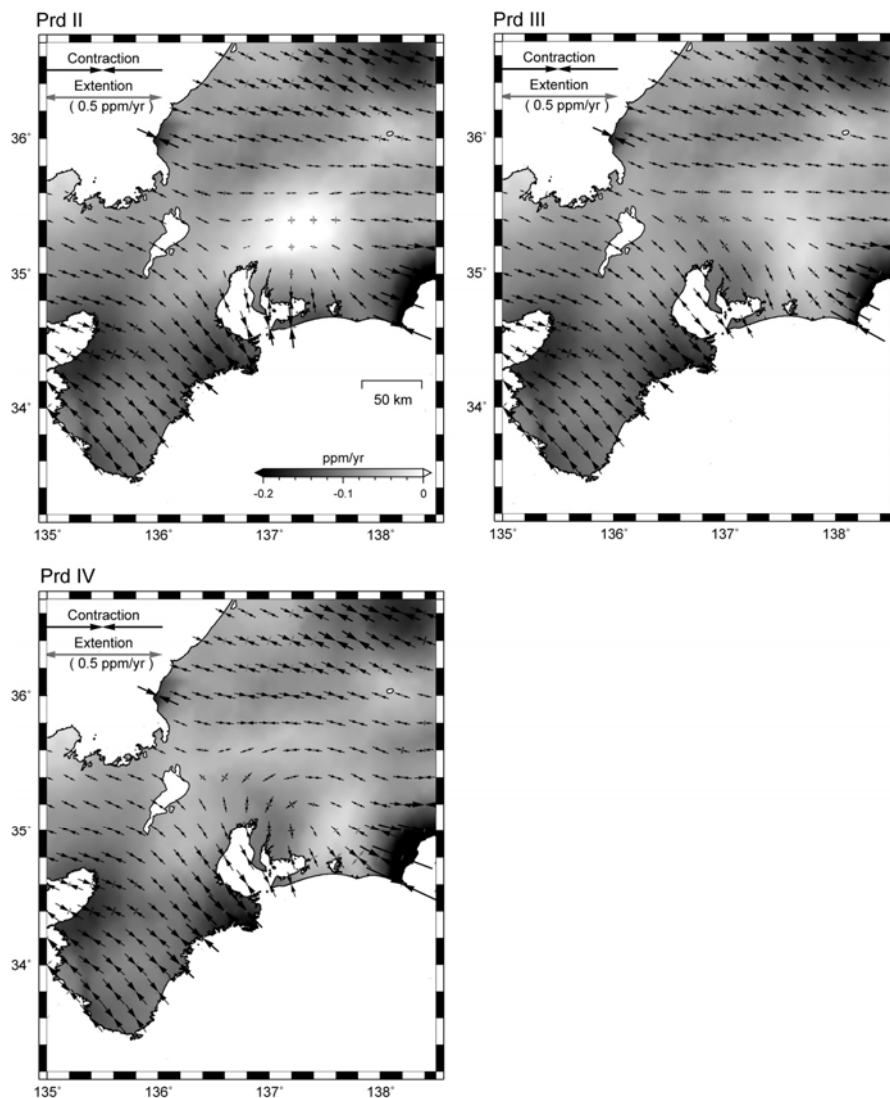


図 3 インバージョン解析により求められた東海スロースリップモデルを用いて推定された Prd II、III、IV の中部・近畿地方の面積歪速度及び主歪速度。黒及び灰色の矢印はそれぞれ主歪速度の圧縮及び膨張成分を示す。スケールは図 2 と同じである。

地震発生率の減少の開始は、歪速度の変化と同様に 2000 年の夏頃であり、その歪変化の主要因と考えられる東海地方でのスローイベントの開始時期と調和的である。そこで東海スロースリップによる静的応力変化との関係を調べるため、次のような式で定義されるクーロン破壊関数の変化 (ΔCFF) を計算した。

$$\Delta CFF = \Delta \tau - \mu' \Delta \sigma_n \quad (4)$$

ここで $\Delta \tau$ 、 $\Delta \sigma_n$ 、 μ' はそれぞれ、断層面上でのすべりに対する剪断応力変化、法線応力

変化、内部摩擦係数である。本計算では、剛性率を 40 GPa、 μ' をStein et al. (1994)¹¹⁾に倣い 0.4 と仮定した。養老断層周辺の微小地震のメカニズムは詳細に知られていないことから、本研究では養老断層を参考に、走向、傾斜角、すべり角をそれぞれ 150°、45°、90° と仮定して半無限弾性体中の深さ 10 kmにおける応力変化を計算した。計算には、Prd IIからIVまでの期間で推定された東海地方の非定常すべりの 4 年間の総量を用いた。図 5 は上記の断層パラメータに対して計算された ΔCFF である。暗色ほど小さい値を示す。

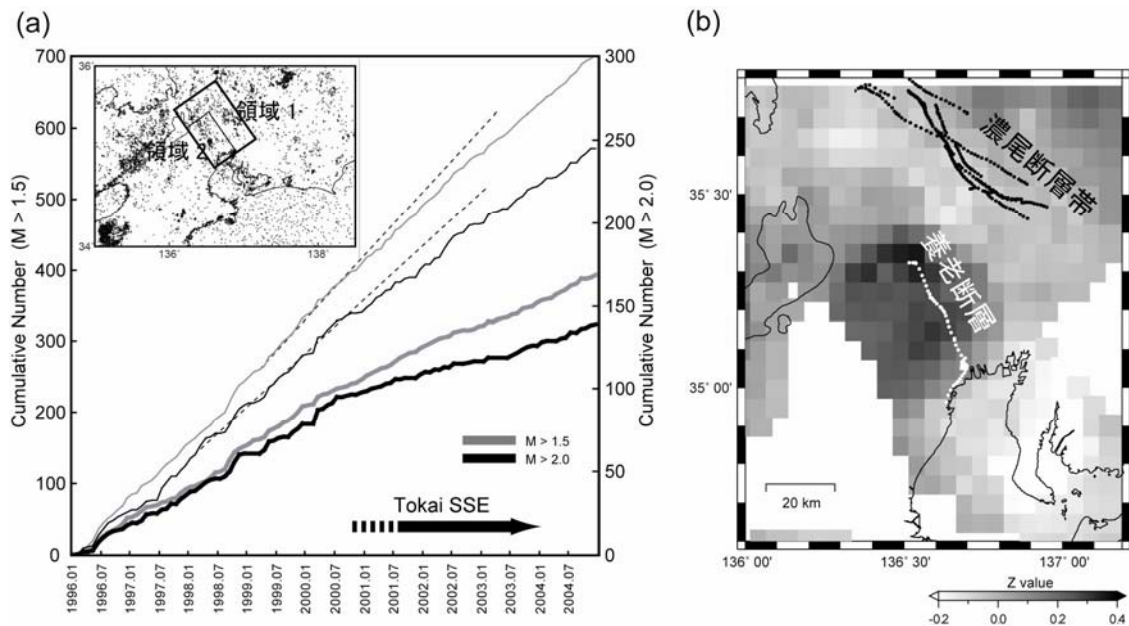


図 4 (a)琵琶湖東部における 1996 年 1 月から 2000 年 8 月までの地震発生積算回数。20km 以浅で発生した地震のみを抽出した。黒及び灰色はそれぞれ $M > 2.0$ 及び $M > 1.5$ の地震に対する積算回数。細線、太線はそれぞれ領域 1、領域 2 における地震発生数。震源分布図内 (左上) の太枠線は領域 1、細枠線は領域 2 を示す。(b)養老断層及び濃尾断層帯周辺で発生する $M > 1.5$ の地震に対する Z 値。比較される 2 期間は 1996 年 1 月～2000 年 5 月と 2000 年 10 月～2004 年 8 月である。

CFF の変化は養老断層付近で負の値を示し、地震活動の低下を示唆する。地震に伴う応力変化と周囲の地震活動の変化に関する先行研究によれば、一般的に 10 kPa 以上の静的応力変化で地震活動に変化が見られるといわれている。しかし本事例においては、4 年間で -5~11 kPa という小さな変化しかみられない。速度及び状態依存摩擦構成則 (Dieterich, 1994¹²⁾) による定式化では、すべりが一定速度で継続する場合、定常的な地震発生率は、震源断層面上にかかる剪断応力速度の変化に比例して増加/減少するとされる。東海地方でのスローイベントが開始したのと同時にその地震活動も変化したことを考えると、本件の場合も断層面上にかかる剪断応力の速度変化に反応したと考えるのが妥当なのかもしれない。今後、東海スローイベント終了後の養老断層付近の地震活動も含めた応力変化の定量的評価が、地震発生論の見地からも重要な課題となってくるであろう。

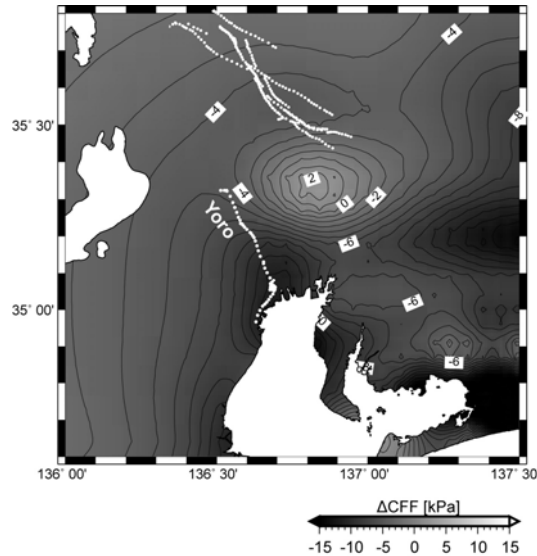


図5 東海スロースリップモデルにより計算される養老断層に対する CFF 変化。単位は kPa。計算対象とされる断層面は、走向、傾斜角、すべり角がそれぞれ 150° 、 45° 、 90° 。剛性率および内部摩擦係数はそれぞれ 40 GPa および 0.4 と仮定。

(d) 結論ならびに今後の課題

中部及び近畿地方の GEONET データを用いたインバージョン解析を行うことにより、2000 年後半からみられた琵琶湖以東の領域における歪速度場の変化が、東海スロースリップイベントにより引き起こされていることを示すことができた。さらに琵琶湖東部における地震活動度の時間的推移を調べた結果、養老断層周辺において、2000 年後半から地震発生率がほぼ半減していることを見つけた。推定された東海スロースリップモデルを用いて計算された静的応力変化により、養老断層周辺の地震活動の低下を説明できることを示し、海溝域でのすべりが 150km も離れた内陸の地震活動に影響を与えた可能性を示した。今後は、東海スロースリップイベント終了後の養老断層周辺の地震活動を調べ、地震発生領域の応力変化と地震活動の関係をより定量的に評価することが重要な課題となる。

謝辞：本解析にあたり、国土地理院の GEONET データ及び気象庁一元化震源データを使用させて頂きました。記して感謝いたします。

(e) 引用文献

- 1) Ozawa, S., Murakami, M., Kaidzu, M., Tada, T., Sagiya, T., Hatanaka, Y., Yarai, H. and Nishimura, T.: Detection and monitoring of ongoing aseismic slip in the Tokai region, central Japan, *Science*, Vol.298, pp.1009-1012, 2002.
- 2) Ishida, M.: Geometry and relative motion of the Philippine sea plate and Pacific plate beneath the Kanto-Tokai district, Japan, *J. Geophys. Res.*, Vol.97, pp.489-513, 1992.
- 3) Okada, Y.: Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull.*

Seism. Soc. Am., Vol.75, pp.1135-1154, 1985.

- 4) Akaike, H.: Likelihood and bayes procedure, in *Baiesian Statistics*, edited by Bernardo, J. M., DeGroot, M. H., Lindley, D. V. and Smith, A. F. M. University Press, Valencia, Spain, 143-166 pp, 1980.
- 5) Shen, Z., Jackson, D .D. and Ge, B. X.: Crustal Deformation Across and Beyond the Los Angels Basin from Geodetic Measurements, *J. Geophys. Res.*, Vol.101, pp.27951-27980, 1996.
- 6) 小林知勝, 橋本学: GEONET データより推定される 1996 年から 2004 年までの近畿地方の歪速度場の変化, 大都市圏大震災軽減化特別プロジェクト I 地震動 (強い揺れ) の予測「大都市圏地殻構造調査研究」平成 16 年度成果報告書, pp.227-233, 2005.
- 7) Yoshikawa, S.: Space and time variation of strain promoted by the slow slip event in the Tokai area revealed by GPS data, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, Vol.78, pp.255-267, 2003.
- 8) Ozawa, S., Murakami, M., Kaidzu, M. and Hatanaka, Y.: Transient crustal deformation in Tokai region, central Japan, until May 2004, *Earth Planets Space*, Vol.57, pp.909-915, 2005.
- 9) Reasengerg, P.: Second-order moment of Central California seismicity, 1969-1982, *J. Geophys. Res.*, Vol.90, pp.5479-5495, 1985.
- 10) Habermann, R. E.: Teleseismic detection in the Aleutian Island Arc, *J. Geophys. Res.*, Vol.88, pp.5056-5064, 1983.
- 11) Stein, R. S., King, G. C. and Lin, P. J.: Stress triggering of the 1994 M=6.7 Northridge, California earthquake by its predecessors, *Science*, Vol.265, pp.1432-1435, 1994.
- 12) Dieterich, J.: A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering, *J. Geophys. Res.*, Vol.99, pp.2601-2618, 1994.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
小林知勝, 橋本学	GEONET データより推定される 1996 年から 2004 年までの近畿地方の歪速度場の変化	地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会	2005 年 5 月 22 日
Tomokazu Kobayashi, Manabu Hashimoto	Change of strain rate in the Kinki and Tokai districts induced by the Tokai slow slip event	Association of Pacific Rim Universities (APRU) / Association of East Asian Research Universities (AEARU)	2005 年 8 月 31 日
小林知勝, 橋本学	東海スロースリップイベントを原因とする東海・近畿地方の歪速度変化	2005 年日本地震学会	2005 年 10 月 19 日

小林知勝, 橋本学	東海スロースリップイベントを原因とする東海・近畿地方の歪速度変化	2005年日本測地学会	2005年 10月27日
Tomokazu Kobayashi, Manabu Hashimoto	Change of strain rate in the Kinki and Tokai districts, Japan, induced by the Tokai slow slip event	American Geophysical Union 2005 Fall Meeting	2005年 12月9日
小林知勝, 橋本学	東海スロースリップを原因とする中部及び近畿地方の歪速度と地震活動の変化	平成17年度京都大学防災研究所研究発表講演会	2006年 2月22日

(g) 特許出願, ソフトウェア開発, 仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

名称	機能
なし	

3) 仕様・標準等の策定

なし