

2005 年 7 月に東海地域で観測された短期的スロースリップに伴う歪変化とその監視

Short-term Slow Slip Events Detected by the Strainmeters in the Tokai Region and the Monitoring of it

木村 一洋¹・竹中 潤²・甲斐 玲子³

Kazuhiro KIMURA¹, Jun TAKENAKA² and Reiko KAI³

(Received Dec 1, 2006: Accepted July 3, 2007)

1 はじめに

気象庁では、東海地震の直前予知を目的として、1976 年より東海地域に埋め込み式体積歪計（末廣，1979）を順次整備，さらに 1997~2002 年にかけて石井式の多成分歪計（石井・他，1992）を整備し，観測データを 24 時間体制で監視している．最初の歪計の整備以降約 30 年が経過したが，幸いなことに東海地震は発生しておらず，これまでに前兆すべりを捉える機会は無かった．

2005 年 7 月 20~22 日にかけて，愛知県及び静岡県西部の複数の歪計において，短期的スロースリップイベントに伴う歪変化を初めて明瞭に観測した（気象庁・気象研究所，2006）．今回捉えられた歪変化は，東海地震の前兆すべりによるものではないが，プレート境界のすべり現象によるものと言う点では共通の現象である．このことは，気象庁が 30 年かけて構築してきた観測網及び現在までに整備してきた解析ツールで，東海地震の前兆すべりを捉えられる可能性を示しており，東海地震の予知業務における意義は大きい．ここでは，今回の歪変化の概要と過去事例の監視結果について報告する．

2 歪計で観測された変化

気象庁において監視に使用している東海地域の歪計の観測点の位置を図 1 に示す．これらの歪計のうち，佐久間，掛川，浜北，本川根，春野（本川根と春野は静岡県設置）の 5 観測点については石井式の多成分歪計であり，それぞれの観測点における水平

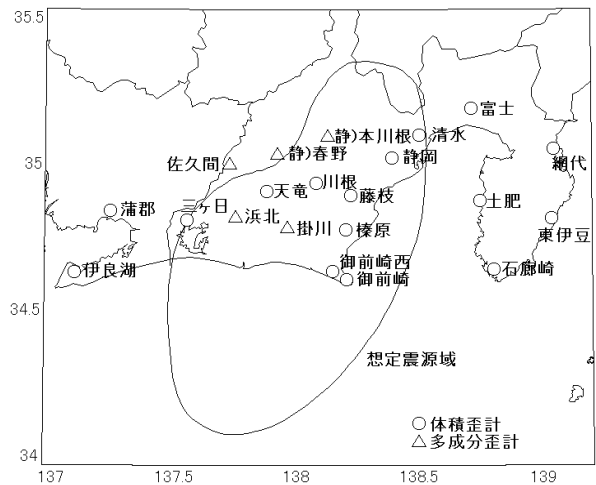


図 1 気象庁において監視に使用している東海地域の歪計の観測点の位置

面内の四方向の線歪を観測している．その他の 16 観測点は体積歪計である．

これら歪計の観測データの監視方法の概要についてまず述べる．歪計のデータには，潮汐（地球潮汐・海洋潮汐）などの周期的な変化の他，気圧や降雨などさまざまな要因による変化が含まれているため，潮汐，気圧，降水や磁気などの補正を施した上で，データに有意な変化が無いかを監視している．具体的には地震活動等総合監視システム EPOS（尾崎，2004）で，補正したデータの 60 分，180 分，24 時間（階差時間）の変化量（階差量）を計算し，その変化量が一定値以上になった場合に，何らかの有意な

1,3 地震火山部地震予知情報課， Earthquake Prediction Information Division, Seismological and Volcanological Department

2 横浜地方気象台， Yokohama Local Meteorological Observatory

3 現所属：火山課， Volcanological Division, Seismological and Volcanological Department

歪変化 (補正時間値)

2005/07/15 00:00 -- 2005/07/25 00:00

EXP. 1.0E-07 strain
10 count/Hour
30 mm/Hour

- 佐久間1 (135)
1.200000E-08/DAY
- 佐久間2 (045)
-1.200000E-08/DAY
- 佐久間3 (000)
-4.000000E-09/DAY
- 佐久間4 (090)
1.100000E-08/DAY
- 浜北1 (004)
1.600000E-08/DAY
- 浜北2 (094)
-8.000000E-09/DAY
- 浜北3 (229)
1.000000E-09/DAY
- 浜北4 (139)
1.200000E-08/DAY
- 掛川1 (177)
3.000000E-09/DAY
- 掛川2 (087)
-1.200000E-08/DAY
- 掛川3 (042)
-1.300000E-09/DAY
- 掛川4 (132)
-2.000000E-09/DAY
- 春野1 (004)
1.000000E-08/DAY
- 春野2 (094)
1.300000E-09/DAY
- 春野3 (229)
-2.200000E-08/DAY
- 春野4 (139)
3.000000E-08/DAY
- 本川根1 (004)
-1.100000E-09/DAY
- 本川根2 (094)
-1.000000E-09/DAY
- 本川根3 (229)
-2.000000E-09/DAY
- 本川根4 (139)
1.336400E-09/DAY
- 伊良湖
1.200000E-09/DAY
- 伊良湖雨
- 蒲郡
-2.000000E-09/DAY
- 蒲郡雨
- 天竜
4.000000E-09/DAY
- 天竜雨
- 川根
1.473880E-08/DAY
- 川根雨
- 榛原
-4.903380E-09/DAY
- 榛原雨
- 藤枝
1.000000E-09/DAY
- 藤枝雨
- 愛知低周波地震回数

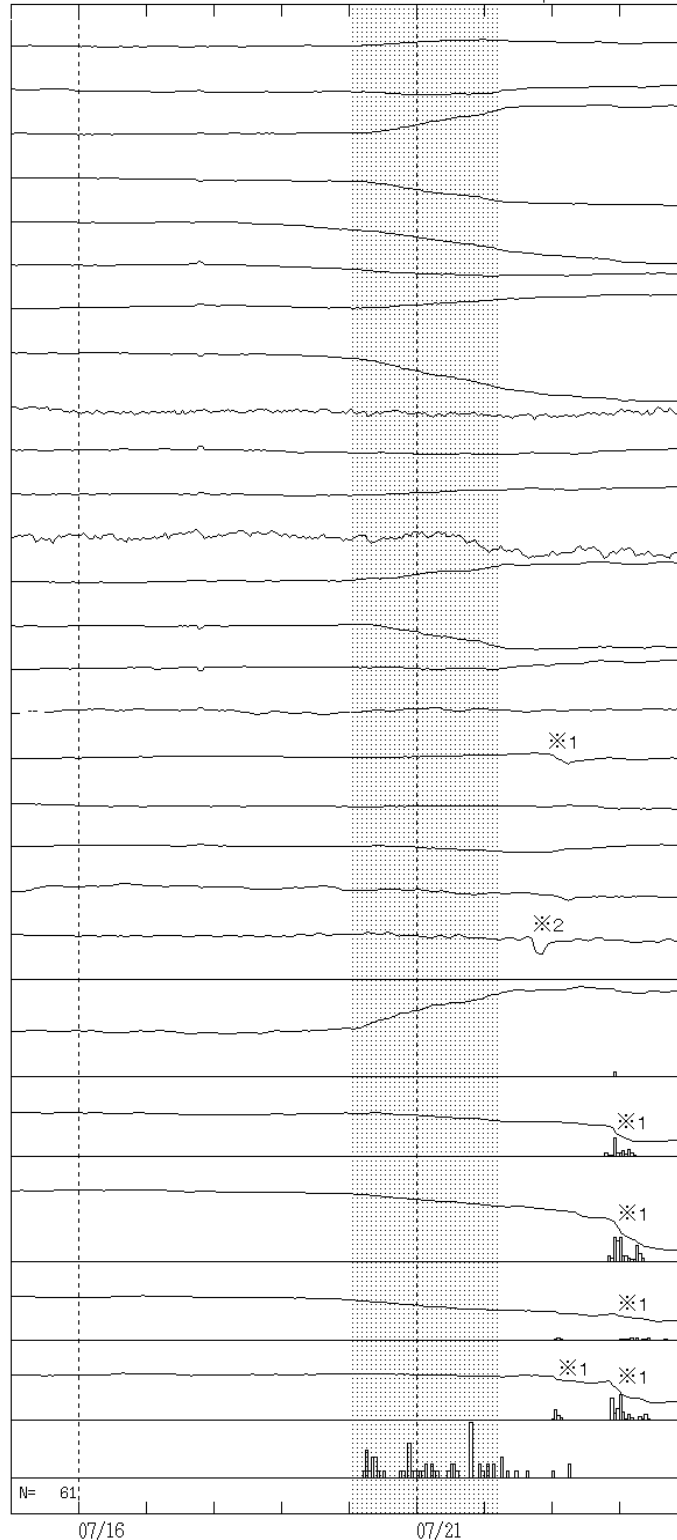


図 2 2005 年 7 月 20~22 日に観測された歪変化と愛知県の低周波地震回数

網掛けは歪変化があった時期, ※1 は雨による変化, ※2 は観測点近傍の局所的な変化を示す。
観測点名の右側の数字は多成分歪計の設置方位 (北から時計回り), 観測点名の下に数字はグラフ化する際に除去した各観測点のトレンドを示す。

変化が生じた可能性があるとしてアラーム報知が行われるようになってきている。監視の基準となる値は観測点ごとのノイズレベルに基づいて設定されている。ここでのノイズレベルは、過去のデータから階差量の頻度分布をそれぞれの観測点について求め、調査対象期間内に1回発生する現象を捉えられる最小の値として定義されている(小林・松森, 1999)。実際の業務においては、ノイズレベルの値をレベル1、ノイズレベルの1.2倍から1.8倍(階差時間による)をレベル2、ノイズレベルの2倍をレベル3として運用しており、それぞれの個別の観測点でレベル2以上になった場合、もしくは設定した2つの観測点において、それぞれが2点同時ノイズレベル以上となった場合(同時監視)に、有意な地殻変動を検出したことを示すアラーム報知が行われている。

図2に今回の歪変化の様子を示す。7月20日頃より蒲郡、佐久間、浜北、春野などの歪計において、通常とは異なる変化が同時に観測されはじめた。これらの変化はその後も加速することなく同じ変化傾向のまま継続し、7月22日前後に変化がほぼ収まった。これらの観測点のほかに、伊良湖、天竜、川根、藤枝、掛川、本川根にも変化量は $\pm 1e-8$ 程度以下と小さいながらも、同様の歪変化が観測された。また、愛知県及び静岡県西部に設置されている気象庁以外の複数の傾斜計や歪計にも同様な変化が観測されたことが報告されている[(防災科学技術研究所, 2006), (産業技術総合研究所, 2006)]。

気象庁における歪計の観測データの監視では、7月20日18時のデータで、三ヶ日と蒲郡で同時監視によるアラーム報知があった。三ヶ日については別の局所的な原因による歪変化であったが、他の観測点でも小さいながら蒲郡の変化と同様の歪変化が確認されており、そこで今回の広域な地殻変動を初めて認識した。なお、現象が収束するまで個別の観測点においてはいずれもレベル2に達することはなかった。

3 低周波地震の活動

気象庁の地震の一元化処理業務においては、1999年9月より波形から深部低周波地震とみられる震源のデータには便宜上「低周波地震」というフラグを付けている。今回、歪変化が観測された期間に、愛知県で深部低周波地震活動が活発化した。図3に

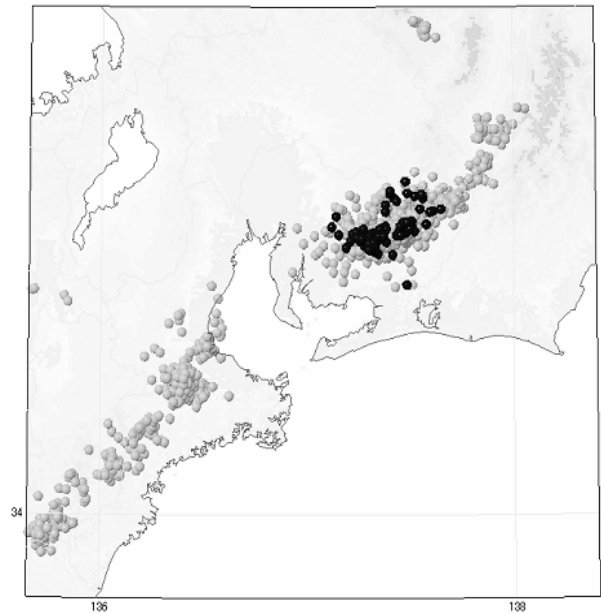


図3 2005年7月20日～22日の低周波地震の震央分布

黒色は2005年7月20日から22日までの期間の低周波地震を示す。灰色は2003年1月1日から2004年12月31日までの期間の低周波地震を示す。

2005年7月20～22日に観測された低周波地震の震央分布を示す。愛知県のプレート境界付近は従来から低周波地震活動が活発な地域であり(西出・他, 2000)、今回、歪変化と同期して低周波地震活動が活発化した場所も従来の活動域と重なる。図2には、歪計の変化と比較するために、愛知県の低周波地震の発生回数も示している。この図から、歪変化があった期間と、低周波地震活動の活発化した期間がほぼ一致していることが分かる。

4 すべり位置の推定

東海地方のプレート間すべり推定ツールで(中村・竹中, 2004)この歪変化の要因となるすべりの推定を行った。この解析ツールは、プレート境界面上に一定間隔の格子点を設定し、それぞれの格子点ですべり現象を仮定して理論地殻変動を計算し、各観測点で観測された歪変化と整合するか否かを調べ、すべりの候補点(歪変化の要因の可能性があるすべりの中心の格子点)と規模を推定するものである。各格子点での断層は地震の相似則(宇津・他, 2001)に準じて推定する規模に応じた矩形の形状が仮定さ

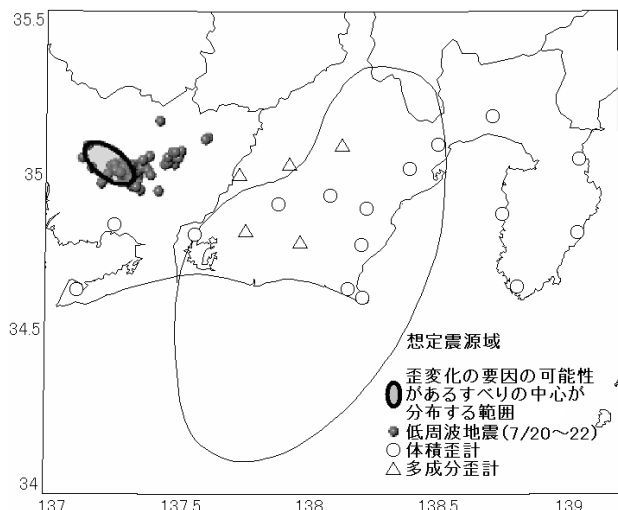


図4 歪変化の要因の可能性のあるすべりの中心が分布する範囲と低周波地震の震央分布

低周波地震はMが0.2より大きいものを示す。

楕円が歪変化の要因となるすべりそのものを示すわけではないことに注意が必要である。

れている。すべりのパラメータ（走向角，傾斜角，すべり角）は，原田・他（1998）によるフィリピン海スラブ上面の形状が用いられている。また，各観測点の歪変化量には広域の歪変化量に補正するためのキャリブレーション係数（気象研究所，1999）をかけた上で，各種のノイズが混入していることを想定して，変化量の半分から二倍までの範囲で整合するものを探索した。また，明瞭な歪変化量が無かった観測点については， $\pm 1e-8$ 以下と言う条件も付している。なお，ここで用いたキャリブレーション係数は，遠地地震もしくは地球潮汐による理論地殻変動と観測された歪変化を比較して算出されたもので，実際の東海監視にも使用されているものである。この解析ツールに用いられている手法は，歪変化がプレート境界面上のすべりで与えられると仮定してすべりの位置を探索するもので，想定されるあらゆるすべりの中でそこにしか合致する場所がないことを示すものではないことに注意が必要である。

その結果，図4のように愛知県のパレート境界面上の楕円で示す範囲の中にすべりの中心を仮定した場合に，観測データと適合することが分かった。推定したすべりの大きさは，モーメントマグニチュード (Mw) に換算すると5.7程度であり，相似則によると長さ11km，幅6kmの断層に相当する。図4に

は同じ期間に発生した低周波地震の震央分布も重ねて示してある。今回の現象は，すべりの中心が分布する範囲と，低周波地震の震央分布がほぼ重なっており，プレート境界面上のすべりを検出できたと言えよう。防災科学技術研究所(2006)も，傾斜計のデータを使って解析を行い，断層の形状やすべり量は異なるが，ほぼ同じ場所に Mw5.8 の規模のすべりを推定している。

従来から，愛知県から三重県にかけての一带や四国のような深部低周波微動の発生する領域では，同種のすべり現象である短期的スロースリップイベントが起きていることが Obara *et al.* (2004)によって見出されていた。今回の短期的スロースリップイベントは，気象庁が東海地域に展開している歪計の観測網から若干離れた所で発生したが，これによる歪変化を観測し，歪変化量からプレート境界面上のすべりの位置やモーメントを推定することができた。歪変化はすべりの速度に依存し，想定される東海地震の前兆すべりがどのような時間経過をたどるのかは不明である。しかし，現状の歪計観測網と解析ツールを用いてプレート境界面上で発生したすべりを検出できたことは，東海地震の前兆すべりを検出できる可能性を示しており，東海地震の予知業務における意義は大きい。

5 過去事例における監視結果

愛知県の短期的スロースリップイベントについて，詳細な過去調査の結果，小林・他（2006）によると，1999年以降少なくとも20回の短期的スロースリップイベントがあったことが確認されている。すなわち，過去20回近く地下で何らかのすべり現象があったにも関わらず，現在の監視方法ではこれまですべり現象に伴う歪変化を検知できなかった。そこで，小林・他（2006）で確認された事例について監視レベルとの対応を調査し，検知に向けた対策を検討する。表1に短期的スロースリップイベントの過去事例を示す。1999年以降に発生した短期的スロースリップイベントについて，いずれも単独観測点ではレベル2以上の基準には達しておらず，アラーム報知で知らせるほど大きな歪変化に達していなかったことがわかる。また，2003年5月と11月に蒲郡と佐久間で同時にレベル1に達しているが，2005年7月の時点まで同時監視に設定されていたのは隣接する

表1 短期的スロースリップイベントの過去事例

年	歪変化		低周波地震		変化のあった観測点 (○の数字はレベルに達したもの)	推定された マグニチュード
	開始	終了	開始	終了		
1999	9/3	9/9	9/9	9/10	蒲郡①・佐久間	5.5~5.6
2000	2/26	2/27	2/26	2/26	伊良湖・蒲郡・天竜・川根・藤枝・ 佐久間・本川根	5.5~5.6
2001	4/10	4/13	4/10	4/13	伊良湖・蒲郡・三ヶ日・佐久間①・ 本川根	5.6
	6/2	6/5	6/2	6/8	佐久間・本川根	5.7
	9/6	9/9	9/6	9/10	佐久間・本川根	5.3~5.6
2002	9/22	9/24	9/22	9/23	佐久間・本川根・浜北	5.3
	11/26	11/27	11/26	11/28	蒲郡①・掛川・佐久間・浜北	5.4~5.5
2003	2/14	2/16	2/13	2/16	掛川・佐久間①・本川根・浜北	5.4~5.6
	5/30	6/3	5/31	6/3	蒲郡①・掛川・春野・佐久間①・本 川根・浜北	5.9
	9/16	9/17	9/16	9/17	佐久間・浜北	5.3~5.5
	10/9	10/11	10/10	10/11	佐久間①・本川根・浜北	5.3~5.4
	11/6	11/8	11/7	11/8	蒲郡①・掛川・春野・佐久間①・本 川根・浜北	5.7
2004	1/1	1/3	12/31	1/4	春野・佐久間・本川根	5.5~5.6
	2/9	2/11	2/10	2/16	掛川・春野・佐久間・本川根	5.5~5.6
	2/13	2/17			蒲郡・掛川・春野・佐久間	5.6
	4/3	4/7	4/4	4/7	掛川・春野・佐久間	5.2~5.3
	6/26	7/2	6/25	7/1	蒲郡・掛川・佐久間・本川根・浜北	5.6~5.7
	11/21	11/23	11/20	11/23	佐久間・本川根	5.2~5.7
	12/17	12/19	12/18	12/21	伊良湖・蒲郡①・三ヶ日・春野・佐 久間・本川根・浜北	5.6
2005	5/28	5/30	5/28	6/1	佐久間・本川根	5.4
	7/20	7/22	7/20	7/23	伊良湖・蒲郡①・天竜・川根・藤枝・ 掛川・春野・佐久間①・本川根・浜 北	5.7

観測点の組み合わせのみで、佐久間と蒲郡の組み合わせによる同時監視を行う設定は無かった。もし、若干離れた佐久間と蒲郡の組み合わせで同時監視を行う設定があれば、もう少し早い段階において短期的スロースリップイベントを認識していた可能性がある。そこで気象庁では、2005年7月の短期的スロースリップイベント発生直後に同時監視のための観測点の組み合わせを大幅に増やし、歪計の観測デー

タの監視を強化した。なお、小林・松森（1999）による2点同時ノイズレベルには相当な調査時間を要するため、新たに設定した同時監視の基準値は簡易的にそれぞれの単独観測点のノイズレベルを設定している。

また表1より、体積歪計よりも多成分歪計の方が短期的スロースリップイベントに伴う歪変化を良く捉えていることもわかる。蒲郡以外の体積歪計に変

化が現れているのは、20例中わずか4例のみである。この理由として、多成分歪計は短期的スロースリップイベントが発生している領域に近い所に設置されていることや、埋設深度が深いため降水の影響を受けにくく、体積歪計よりもノイズレベルが低いことが挙げられる。また、多成分歪計は1成分だけでなく、複数成分から主歪の大きさや方向の情報を得ることができるため、すべりの推定に際しては非常に有効である。多成分歪計の導入が無ければ、ここまで明瞭に短期的スロースリップイベントによる歪変化を捉えられなかったかもしれない。

さらに、これらの過去事例について、今回と同様にすべり位置と規模の推定を行った。その結果、2005年7月の事例と同様、歪変化量から推定したすべりの中心が分布する範囲と、同じ時期に発生した低周波地震の震央分布がほぼ重なっていることが確認できた。過去事例の中には、明瞭な歪変化をした観測項目が少なかった事例も含まれており、これらについて明瞭な歪変化をした観測データのみですべりの中心を探索すると、低周波地震の発生した領域以外にもすべりの中心の範囲が大きく広がりやすい。しかし、明瞭な歪変化が無かった観測点については歪変化量が $\pm 1e-8$ 以下であったという条件を加えることによってすべりの中心の範囲が狭まり、それらの事例でも歪変化量から推定したすべりの中心が分布する範囲と低周波地震の発生した領域がほぼ重なっている事が確認できた。また、この解析ツールによるすべりの規模の推定では、2003年5月のMw5.9が最大で、Mw6.0以上のものは無かった。

6 おわりに

2005年7月に愛知県の短期的スロースリップイベントに伴う歪変化が発生した。歪変化の発生当初は、その発生原因について把握することができなかった。しかし、低周波地震の発生と時間的に一致していること、歪変化から推定したすべりの位置が低周波地震の震央分布と重なっている事が次々と明らかとなり、この歪変化が短期的スロースリップイベントによるものであることを把握することができた。短期的スロースリップイベントに伴う歪変化は個々の観測点についてはノイズレベル前後の大きさのため、気象庁では過去20回に渡ってすべり現象を検知することができなかった。しかし、プレート境界上に

おけるすべり現象をできるだけ小さい段階から把握しておく必要があるため、以下の対策を施した。

- ・低周波地震のうち愛知県周辺で発生した回数をカウントし、監視画面において歪の観測データと並べて表示させるようにした。
- ・歪の同時監視のための観測点の組み合わせを大幅に増やした。

このような対策によって、2006年1月及び8月にも短期的スロースリップイベントが発生したが、この現象の状況をリアルタイムに捕捉することができた。

今後は、気象庁以外の傾斜計や歪計についても同時監視に組み込めるよう、監視の高度化に取り組んでいく予定である。また、現在の監視はノイズレベルと同程度の現象まで把握することが期待されている。このためには、常に歪計のトレンド除去や潮汐や気圧といった各補正係数を適切に保っていく必要があるだろう。

短期的スロースリップイベントのリアルタイムでの監視及び解析で培った経験は、東海地震の想定震源域に前兆すべりが生じた場合でも活用されることが期待される。

謝辞

この解析には、国土地理院、北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学、独立行政法人防災科学技術研究所、独立行政法人産業技術総合研究所、独立行政法人海洋研究開発機構、青森県、東京都、静岡県、神奈川県温泉地学研究所、横浜市及び気象庁のデータを用いて、気象庁と文部科学省が協力して処理した一元化処理結果を使用した。ここに記して感謝する。また、気象研究所の小林昭夫氏には丁寧に査読をしていただき、本報の改善にあたり多数の適切な助言をいただいた。あわせてここに感謝の意を表する。

参考文献

- 石井紘・松本滋夫・平田安廣・山内常生・高橋辰利・鈴木喜吉・渡辺茂・若杉忠雄・加藤照之・中尾茂(1992): 新しい小型多成分ボアホール歪計の開発と観測, 地球惑星科学関連学会 1992年合同大会予稿集, C22-03.
宇津徳治他編(2001): 地震の事典(第2版), 朝倉書店,

676pp.

- 尾崎友亮 (2004) : 新 EPOS (Earthquake Phenomena Observation System : 地震活動等総合監視システム) の紹介, 駿震時報, **68**, 57-75.
- 気象研究所 (1999) : 今津観測点石井式3成分歪計で観測された3月16日滋賀県北部の地震のコサイスマックステップ, **62**, 428-431.
- 気象庁・気象研究所 (2006), 歪計により観測された東海地域の短期的スロースリップ, 地震予知連絡会会報, **75**, 431-437.
- 小林昭夫・松森敏幸 (1999) : 埋込式体積歪計のノイズレベル調査及び異常監視処理, 駿震時報, **62**, 17-41.
- 小林昭夫・山本剛靖・中村浩二・木村一洋 (2006), 歪計により観測された東海地域の短期的スロースリップ(1984~2005年), 地震第2輯, **59**, 19-27.
- 産業技術総合研究所 (2006) : 愛知県東部の低周波地震に関連した産総研豊橋・豊橋東観測点の歪変化, 地震予知連絡会会報, **75**, 410-417.
- 末廣重二 (観測部地震課) (1979) : 地殻変動連続観測と埋込式歪計 (I), 測候時報, **46**, 9-25.
- 中村浩二・竹中潤 (2004) : 東海地方のプレート間すべり推定ツールの開発, 駿震時報, **68**, 25-35.
- 西出則武・橋本徹夫・舟崎淳・中沢博志・岡正善・上野寛・山田尚幸・笹川巖・前田憲二・杉本和信・高嶋鉄也 (2000) : 地震データの一元的処理により把握された地殻下部の低周波地震活動, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, Sk-P002.
- 原田智史・吉田明夫・明田川保 (1998) : 東海地域に沈み込んだフィリピン海プレートの形状と地震活動, 地震研究所彙報, **73**, 291-304.
- 防災科学技術研究所 (2006) : 東海地域における短期的スロースリップイベントと深部低周波微動活動, 地震予知連絡会会報, **75**, 375-379.
- Obara, K., H. Hirose, F. Yamamizu, and K. Kasahara (2004) : Episodic slow slip events accompanied by non-volcanic tremors in southwest Japan subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, **31** (23), L23602, doi:10.1029/2004GL020848.