

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年～  
2005年)

気象庁気象研究所\* 小林昭夫・山本剛靖

気象庁地震火山部\*\* 中村浩二・木村一洋

Short-term slow slip events detected by the strainmeters in Tokai region in the period  
from 1984 to 2005

Akio KOBAYASHI and Takeyasu YAMAMOTO

Meteorological Research Institute, 1-1 Nagamine, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-0052,  
Japan

Koji NAKAMURA and Kazuhiro KIMURA

Seismological and Volcanological Department, Japan Meteorological Agency, 1-3-4  
Otemachi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8122, Japan

---

\* 〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1

\*\* 〒100-8122 東京都千代田区大手町 1-3-4

## Abstract

A short-term slow slip event (SSE) synchronizing with an activity of low frequency earthquakes occurred in Aichi prefecture on July 20-22, 2005. Characteristic strain changes caused by the short-term SSE were recorded by the strainmeters of Japan Meteorological Agency. We examined in detail whether or not strain changes were observed in the data of the Tokai area since July, 1984. As a result, eleven strain changes were detected in about fifteen years from July, 1984 to August, 1999, during which only the data of volumetric strainmeters were available. Twenty strain changes were detected in six years from September, 1999 to August, 2005, during which the data of multi-component strainmeters and information of low frequency earthquakes were also available. Those strain changes thus detected were classified into three types. The three types were corresponding to different active areas of low frequency earthquakes. The three patterns of the observed strain changes were explained by assuming rectangular faults in the active areas of low frequency earthquakes. It was found that the short-term SSE occurred more frequently in the periods of 1987-1989 and 2003-2004. These active periods roughly agree with that of the long-term SSE in the Tokai region.

Key words: Slow slip, Low-frequency earthquake, Strainmeter, Tokai earthquake

## § 1. はじめに

近年の高密度な地震観測網の整備により、非火山性の深部低周波地震・微動（以下単に低周波地震と呼ぶ）の存在が指摘されるようになった [西出・他(2000), Obara(2002)]. Dragert *et al.*(2001)は、北米大陸西海岸のカスケード地方における GPS 観測の結果から、プレート境界で短期的なスロースリップイベント（以下 SSE）が発生していることを報告し、Rogers and Dragert(2003)は、繰り返し発生している短期的 SSE が低周波微動を伴っていることを明らかにした。日本でも四国西部や紀伊半島北部・愛知県の低周波微動に伴う短期的 SSE の発生が傾斜計の観測結果から報告されている [Obara *et al.*(2004), 廣瀬・小原(2005)].

2005 年 7 月 20~22 日にかけて、愛知県を震央とする低周波地震が発生した際、気象庁の歪計で SSE によるものと考えられる歪変化が観測され、2000 年以降について調査した結果、同種の歪変化がこれまでも発生していたことが明らかになった [中村・他(2005)].

本論文では、気象庁の歪計に記録された短期的 SSE による歪変化について、体積歪計による観測を開始した 1980 年代までさかのぼって歪変化の有無を調べるとともに、多成分歪計による観測を開始した 1999 年以降の歪変化を詳しく調査し、低周波地震の発生地域との対応関係を明らかにする。また、2000 年秋から始まった浜名湖直下付近の長期的 SSE [Ozawa *et al.* (2002)] と愛知県下の短期的 SSE との関係を考察する。

## § 2. 短期的 SSE による歪変化

### 2.1 データと調査期間

気象庁では想定される東海地震の前兆現象を捉えるため、愛知県から静岡県にかけて 19 点の歪計を設置し、静岡県が設置した 2 点の歪計と合わせて 24 時間体制でデータを監視している。Fig. 1 にこれらの歪計の配置を示す。掛川、佐久間、浜北は気象庁の、春野、本川根は静岡県の石井式多成分歪計 [石井・他(1992)] で、他は体積歪計 [末廣(1979)] である。このうち愛知県から静岡県西部にかけての蒲郡、佐久間、浜北などで 2005 年 7 月に歪変化が観測された [中村・他(2005)].

歪変化の過去調査に際して、どれだけ過去までさかのぼった調査が行えるかについてまず述べる。歪観測点のうち体積歪計は 1980 年代初めに観測を開始しているものの、明瞭な変化が見られた佐久間の多成分歪計が設置されたのは 1999 年である。また、気象庁において定常の震源決定作業の際、深さ 10km 以深で発生した低周波地震・微動とみられる震源データに低周波地震のフラグを付けるようになったのは 1999 年 9 月以降である [鎌谷・勝間田(2004)].

そこで、利用できるデータに応じて、調査期間を 2 つの期間 I と II に分けた。期間 I は、蒲郡の歪記録が安定し気圧計も設置された 1984 年 7 月以降 1999 年 8 月までの約 15 年間である。蒲郡において 2005 年 7 月と同じような伸びの歪変化が見られるかに注目して調査を行ったが、1 観測点のデータだけでは信頼性が劣るため、2005 年 7 月にわずかながら縮みの歪変化が現れた伊良湖の歪変化の有無を合わせて確認した。期間 II は現在とほぼ同じ条件で調査が可能な 1999 年 9 月から 2005 年 8 月までの 6 年間である。この期間については低周波地震フラグが利用できるため、低周波地震回数を参照しながら各観測点で歪変化が見られるか記録の確認を行った。対象とした観測点は、蒲郡、佐久間、浜北、春野、本

川根の 5 点である。

調査にはいずれの期間についても、潮汐・気圧補正された歪記録の 1 時間値を用いた。1 ヶ月ごとにその期間内の直線トレンドを除去し、気象庁の異常監視で使用している 24 時間あたりのノイズレベル値 [小林・松森(1999)] 以上、もしくはその値に近い変化を示す事例を抽出した。ただし、埋設深度の浅い歪計には、降水時に縮み、その後緩やかな伸びの歪変化が見られるので、降水による変化の疑いがある事例は除外した。

調査の結果検出された歪変化の開始日と終了日、蒲郡における伸びの体積歪変化量と伊良湖における体積歪変化の有無を、Table 1 に示す。歪変化の発生回数は、利用できる歪観測データ数に伴う検出能力の違いに応じて、期間 I の 15 年間に 11 回、期間 II の 6 年間に 20 回であった。

## 2.2 短期的 SSE の発生領域

調査の結果から、歪変化が見られる観測点や観測成分、及びその伸縮方向の違いによって、歪変化は主に 3 つのタイプに分類できる。Table 1 に分類可能な 1999 年以降のイベントについて歪変化のタイプを示す。Fig. 2 上段にそれぞれの歪変化の例（時系列、および多成分歪計の全成分から求めた主歪）を示し、Table 2 に歪変化の特徴をまとめた。どのタイプでも複数の観測点で歪変化が見られるが、多成分歪計についてはいずれのタイプでも全成分に変化が見られた佐久間を中心に図示した。タイプ A (Fig. 2(a)) は 2005 年 7 月に観測されたものと同じタイプで、蒲郡の体積歪が伸び、佐久間の N0E 成分が伸び、N90E 成分が縮みとなって伸びの主歪の方向が北から北北西を向くものである。この他に浜北では伸びの主歪の方向が北北東から北東を向き、春野では南北方向の成分に伸びが現れる。タイプ B (Fig. 2(b)) は、蒲郡ではほとんど変化が見られないが、佐久間の N0E 成分と N45E 成分が伸びとなって伸びの主歪の方向が北北東を向くものである。この他に浜北では伸びの主歪の方向が北東から東北東を向く。タイプ C (Fig. 2(c)) も蒲郡では変化が見られず、佐久間の N45E 成分が伸びとなって伸びの主歪の方向が北東から東北東を向き、本川根でも N1E 成分が伸び、N91E 成分が縮みとなるような歪変化が現れる。

Fig. 2 下段に低周波地震の震央分布を、全期間のものを白抜き記号で、各図で歪変化の期間に発生したものを黒記号で示す。この地域で発生する低周波地震は 3 つのクラスターに分かれるように見え、ここでは西から順に領域 A、B および C と呼ぶことにする。Fig. 2 からわかるように、タイプ A の歪変化の時期には、低周波地震は主に領域 A で発生している。タイプ B の歪変化の時期には、低周波地震は領域 B で発生している。そして、タイプ C の歪変化の時期には、低周波地震は領域 C を中心に発生している。このように、歪変化のタイプと低周波地震の活動領域との間に対応関係が見られることは、両者の発生要因に何らかの関係があることを示している。

両者の関係を説明するため、低周波地震の各活動領域のプレート境界上に置いた断層面ですべりが発生したとして、Okada(1992)の計算式を用いて地表付近の歪変化を求めた。Table 3 に領域ごとに設定した断層パラメータを示す。また、Fig. 3(a)~(c)に領域 A~C に置いた断層の位置をそれぞれ示す。断層面の水平位置、幅及び長さは低周波地震の震央分布と概ね一致するよう仮定した。断層面の深さ、走向及び傾斜角は、野口(1996)などによるプレート等深線や、温度構造から固着域を推定した Hyndman *et al.* (1997)を参考にした中央防災会議(2001)のプレートモデルのパラメータを用いた。すべり方向については Heki

and Miyazaki(2001)による N55W を採用した。

計算の結果得られた体積歪の分布と多成分歪観測点における主歪を Fig.3 に示す。なお、ここでは歪変化のパターンだけを示すため、いずれの断層についてもすべり量を 100 mm とした。領域 A に置いた断層面のすべりによって生じる歪変化は、蒲郡の体積歪が伸びになり、佐久間では伸びの主歪の方向がほぼ北を向き、直交する縮みの主歪の大きさが伸びと同程度となる。領域 B に置いた場合、蒲郡の体積歪が伸びと縮みの間でかなり小さな値になり、佐久間では伸びの主歪の方向が北北東を向き、縮みの主歪の大きさは伸びよりだいぶ小さくなる。領域 C に置いた場合、蒲郡の体積歪は縮みの領域ではあるが値は小さくなり、佐久間では伸びの主歪の方向が北東から東北東を向き、直交する方向の主歪も小さな伸びとなる。領域 C に置いた場合には本川根でも値が大きくなり、伸びの主歪の方向が北北東を向き、縮みの主歪の大きさは伸びと同程度である。このように領域 A, B および C に置いた断層すべりから計算された歪場の特徴は、観測されたタイプ A, B および C の歪変化の特徴をほぼ満足させており、短期的 SSE として観測された歪変化が低周波地震の震央付近で発生したプレート境界上のすべりによって説明できることを示している。

短期的 SSE において一度にすべる範囲がいくつかの領域に分かれていることは、四国西部について Hirose and Obara(2005)も報告している。愛知県においても同じ現象が見られるということは、低周波地震の発生領域は帯状に分布していても、短期的 SSE はそれぞれのクラスターに対応した比較的狭い領域を単位に発生するものと考えられる。また、四国西部の短期的 SSE については、すべりの領域が移動する現象がしばしば観測されている [Obara *et al.* (2004)]. 愛知県の短期的 SSE の場合、すべり領域の移動が見られたのは Table 1 に示したように 2004 年 2 月に一例あったのみで、それぞれの領域が単独ですべることが多かった。この一例の歪変化と低周波地震の発生状況を Fig. 4 に示す。佐久間では、伸びの主軸が東北東（前半）から北北西（後半）に変化した。本川根では、前半伸びの主軸が北東を向いていた。低周波地震は領域 C から発生し、後半には主に領域 A で発生している。領域 B でも一時発生しているが、継続時間が短いためか、これに対応したタイプ B の歪変化は認められない。

### 2.3 短期的 SSE の発生頻度

2.1 節で検出された歪変化の回数は、期間 I の約 15 年間に 11 回、期間 II の 6 年間に 20 回と、期間 I における回数が期間の長さの割に少ない。これは、期間 I には蒲郡と伊良湖のデータしか利用できないためである。すなわち、両観測点で歪変化が見られるのが短期的 SSE のうち領域 A で発生した場合のみで領域 B および C で発生した場合は検出できないこと、蒲郡で歪変化が見られても伊良湖で有意な歪変化が見られない場合は採用しなかったことによる。短期的 SSE の発生頻度を調べるにあたってはこのことを考慮して、それぞれの期間に分けて検討する。

1999 年 9 月から 2005 年 8 月まで（期間 II）の 6 年間における低周波地震の時空間分布を Fig. 5 に示す。同図には、短期 SSE による歪変化が認められた時期を赤い縦線で示している。短期的 SSE による歪変化が認められた時期には必ず低周波地震が発生している。一方、低周波地震が多く発生しているにも関わらず対応する歪変化が認められない場合があるが、同図に青い縦線で示した時期については降水などの原因による大きな歪変化が起きていて、低周波地震に対応する歪変化が隠されている可能性がある。しかし、それ以外で

は、降水などによる歪変化がないにも関わらず低周波地震に対応する歪変化が見られない。逆に、低周波地震の発生していない時期に同様な歪変化が認められないか慎重に調査したが、有意と判断できる変化は確認できなかった。この図から、降水などによる歪変化によって隠されている恐れを考慮しても、短期的 SSE の発生が、2003 年から 2004 年の前半にかけての期間に活発であったことがわかる。

短期的 SSE の発生間隔だけではなく、その規模で活動度を評価するため、個々の短期的 SSE ごとにすべり量を推定し、地震モーメントを算出した。すべり量以外の断層パラメータは Table 3 に示したもので固定し、期間を通して同じ条件として相対的な推移を見るため、すべてのイベントで変化が見られた佐久間の二つの主歪に合うようにすべり量を求めた。

歪計によって観測される歪変化は、一般に管体と周囲の岩盤との弾性定数の違いや坑による応力集中によって広域の歪とは異なっている [坂田(1983), 上垣内(1994)]。気象庁の歪計については、遠地地震や地球潮汐を入力として増幅率が求められており [上垣内(1994)], 佐久間の多成分歪計については、面積歪の増幅率が 0.82, せん断歪の増幅率が 1.68~1.82 である。ここでは佐久間の線歪の増幅率を 1.75 としてすべり量を求めた。Table 1 に計算の結果得られたすべり量を示し、Fig. 6 に積算した地震モーメントを示す。この図から、地震モーメントで見た場合でも 2003 年から 2004 年前半にかけての期間に短期的 SSE が活発化していたことがわかる。

より長期間の発生頻度を見るため、1984 年 7 月から 2005 年 8 月までの約 21 年間について、蒲郡において観測された歪変化の積算値を Fig. 7 に示す。蒲郡の歪変化が短期的 SSE のタイプ A のみに対応して同じ場所がすべっているとする、蒲郡の歪変化量により領域 A における短期的 SSE 活動の相対的な推移を把握することができる。この図では、蒲郡と同時に伊良湖でも歪変化が認められる場合だけを取り出し、データの一貫性を保つため 1999 年 9 月以降についても同じ基準でイベントを抽出しているため Fig. 6 とは細かな所で違いが存在する。Fig. 7 から、1999 年 9 月以降だけではなく、少なくとも調査期間である 1984 年 7 月以降に短期的 SSE が繰り返し発生していたこと、1987 年から 1989 年にかけての期間にも発生頻度が増加していたことがわかる。

### § 3. 議論

#### 3.1 すべり量の評価

前節では、佐久間で観測された歪変化量に基づいてプレート境界上に置いた断層面のすべり量を求めた。2000 年以降の約 5 年半の期間について、求められたすべり量を合計すると領域 A では約 27 cm, 領域 B では約 21 cm, 領域 C では約 4 cm となる。1 年あたりのすべり量にすると領域 A で約 4.9 cm, 領域 B で約 3.9 cm となり、この地域の 1 年あたりの平均的なプレート収束速度 3 cm 強 [Heki and Miyazaki(2001)] より大きくなっている。長期的に見た場合、プレート間相対運動で蓄積された以上の歪を短期的 SSE によって解放することは考えにくい。このため、少なくとも短期的 SSE によるすべり量はプレート収束速度を超えない必要がある。2000 年以降の 5 年半の期間をとった場合に短期的 SSE によるすべり量がプレート収束速度より大きくなったのは、2000 年以降の期間における短期的 SSE による平均的なすべり量が 1984 年以降の全期間の平均的なすべり量と比べてやや大きかったことが原因の一つとして考えられるが、それだけでは説明できない。他の原因と



して、歪計の増幅率を求める際に使用した現象の周期帯と、短期的 SSE の周期帯が異なっているために、佐久間の歪計の増幅率が過小評価されていた可能性、仮定したすべり領域の面積が実際より小さい可能性などが考えられる。

また、求められたすべり量の合計は、北東に位置する領域 C で最も小さく、より南西に位置する領域 B、領域 A の順に大きくなっている。同じ期間における低周波地震の回数も領域 A で 801 個、領域 B で 436 個、領域 C で 272 個となり、南西側の領域ほど多い。このことは、東海地域におけるプレート収束速度が駿河湾側で小さく、遠州灘側で大きいこと [Sagiya(1999)] や、低周波地震の震源が東側ほど深いこと、この地域のプレート等深線が曲がっていることなどに関係している可能性があるが、その原因についてはさらなる検討が必要である。

### 3.2 長期的スロースリップとの関係

Hirose and Obara (2005)は、約 6 ヶ月間隔で発生している四国西部の短期的 SSE が、隣接する豊後水道において長期的 SSE が発生した際、発生間隔が短くなったことを報告している。本稿で述べた愛知県の短期的 SSE 領域のすぐ南東側にあたる浜名湖直下付近では、2000 年秋以降、長期的 SSE が発生し継続している [Ozawa *et al.* (2002)]. そこで、両者の活動に関係が見られるかどうか検討する。

先に示したように、1984 年以降、短期的 SSE の発生は 1987~1989 年及び 2003~2004 年に活発化した。長期的 SSE については、2000 年秋からのイベントの他に、1980~1982 年、1988~1990 年の期間にも発生していた可能性が指摘されている [Kimata *et al.* (2001), 小林・吉田(2004)]. 両者の盛衰を照らし合わせると、厳密に時期が一致してはいないものの、長期的 SSE の発生時期とほぼ同じ時期に短期的 SSE も活発化しており、両者の間に何らかの関係があることを示唆している。

次に、長期的 SSE が進行している期間中の盛衰について調べる。国土地理院(2005)は、2000 年秋からの長期的 SSE のモーメント解放が 2002 年に緩やかになった後、2003 年からは元の水準に回復していたと報告している。一方、Fig. 6 に示した短期的 SSE のモーメント積算量では、2003 年から 2004 年前半にかけて活発になっているものの、2002 年以前は 2001 年も含め 2003 年より不活発であり、長期的 SSE が進行している期間中の盛衰については明瞭な関係は見られない。

## § 4. まとめ

愛知県の低周波地震活動と同期した短期的 SSE が、2005 年 7 月 20~22 日に気象庁の歪計で観測された。同様の歪変化がそれ以前にも発生していたかどうかについて、データが整っている 1984 年 7 月までさかのぼって調査した。その結果、体積歪計のみの観測だったため検出能力の劣る 1984 年 7 月から 1999 年 8 月までの約 15 年間に 11 回、多成分歪計による観測と低周波地震のフラグ付けデータが使用できる 1999 年 9 月から 2005 年 8 月までの 6 年間に 20 回、短期的 SSE によるとみられる歪変化が検出された。短期的 SSE による歪変化が見られた時期には必ず愛知県から長野県南部にかけての領域で低周波地震が発生していた。変化の現れる観測点や多成分歪計の成分の違いによって、歪変化が 3 つのタイプに分類された。これら 3 つの歪変化タイプの発生時期における低周波地震の活動領域が異なっていたことから、それぞれの活動領域付近のプレート境界に置いた矩形断層上のす

べりによる地表歪変化を計算したところ、3つの歪変化タイプの特徴をおおむね説明できた。これらのことは歪変化を引き起こした短期的 SSE と低周波地震活動との間に密接な関係があることを示している。

佐久間観測点の多成分歪計で観測された歪変化量から求めたすべり量の累積量をこの地域のプレート収束速度と比較したところ、求めたすべり量の方が大きくなった。求めたすべり量が過大である可能性があり、歪計データからのすべり量の評価には、断層パラメータの決定方法や歪計増幅率の妥当性など解決しなければならない課題が残されている。

愛知県の短期的 SSE の発生頻度は、1987~1989年、および2003~2004年の期間に多かった。隣接する浜名湖直下付近で生じる長期的 SSE も、1988~1990年、および2000年秋から続くイベントが発生しており、因果関係は明らかではないが、これら2種類の SSE の間には何らかの関係があるのかもしれない。

## 謝辞

査読者の木股文昭氏と廣瀬 仁氏には、本稿の改善に大いに役立つ多くの有益なコメントをいただきました。地震震源データは、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、防災科学技術研究所、海洋開発研究機構、産業技術総合研究所、青森県、東京都、静岡県、神奈川県温泉地学研究所、横浜市、および気象庁の観測データを気象庁・文部科学省が協力して処理した、気象庁一元化震源カタログを用いました。以上、記して感謝します。

## 文献

- 中央防災会議，2001，東海地震に関する専門調査会報告。
- Dragert, H., K. Wang and T. S. James, 2001, A Silent slip event on the deeper Cascadia Subduction Interface, *Science*, **292**, 1525-1528, doi10.1126/science.1060152.
- 上垣内 修，1994，長周期地震計としての気象庁体積歪計の特性，日本地震学会講演予稿集，A12。
- Kimata, F., K. Hirahara, N. Fujii and H. Hirose, 2001, Repeated Occurrence of Slow Slip Events on the Subducting Plate Interface in the Tokai Region, Central Japan, the Focal Region of the Anticipated Tokai Earthquake (M=8), *EOS Trans. Am. Geophys. Union, Fall Meeting Suppl.*, **82**(47), F266.
- 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，*験震時報*，**62**，17-41。
- 小林昭夫・吉田明夫，2004，舞阪の潮位変化から推定される東海スロースリップの繰り返し発生，*測地学会誌*，**50**，209-212。
- 国土地理院，2005，東海地方の地殻変動，*地震予知連絡会会報*，**74**，227-283。
- Heki, K. and S. Miyazaki, 2001, Plate convergence and long-term crustal deformation in Central Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 12, 2313-2316.
- 廣瀬 仁・小原一成，2005，西南日本の短期的スロースリップイベントと低周波微動（2004年11-12月 紀伊半島北部・愛知・四国西部），*地球惑星科学関連学会 2005年合同大会*，D007-012。



- Hirose, H. and K. Obara, 2005, Repeating short- and long-term slow slip events with deep tremor activity around the Bungo channel region, southwest Japan, *Earth Planets Space*, **57**, 961-972.
- Hyndman, R.D., Yamano, M., and Oleskevich, D.A., 1997, The seismogenic zone of subduction thrust faults, *Island Arc*, **6**, 244-260.
- 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.
- 鎌谷紀子・勝間田明男, 2004, 火山から離れた地域で発生している深部低周波微動・地震, *地震*, **2**, **57**, 11-28.
- 内藤宏人・吉川澄夫, 1999, 地殻変動解析支援プログラム MICAP-G の開発, *地震*, **2**, **52**, 101-103.
- 中村浩二・吉川澄夫・橋本徹夫・竹中 潤・木村一洋・青木玲子・露木貴裕・菅沼一成・高野 淳・小林昭夫・山本剛靖, 2005, 2005 年 7 月東海地域で観測された短期的スロースリップ, 日本地震学会講演予稿集, P019.
- 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处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 2000 年合同大会予稿集, Sk-P002.
- 野口伸一, 1996, 東海地域のフィリピン海スラブ形状と収束テクトニクス, *地震*, **2**, **49**, 295-325.
- Obara, K., 2002, Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan, *Science*, **296**, 1679-1681.
- 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**, L23602, doi:10.1029/2004GL020848.
- Okada, Y., 1992, Internal Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **82**, 2, 1018-1040.
- Ozawa, S., M. Murakami, M. Kaidzu, T. Tada, T. Sagiya, H. Hatanaka, H. Yarai and T. Nishimura, 2002, Detection and monitoring of ongoing aseismic slip in the Tokai region, central Japan, *Science*, **298**, 1009-1012, doi10.1126/science.1076780.
- Rogers, G. and H. Dragert, 2003, Episodic tremor and slip on the Cascadia subduction zone: The chatter of silent slip, *Science*, **300**, 1942-1943, doi10.1126/science.1084783.
- Sagiya, T., 1999, Interplate Coupling in the Tokai District, Central Japan, Deduced from Continuous GPS Data, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 15, 2315-2318.
- 坂田正治, 1983, 埋込式ひずみ計による見かけの体積ひずみ増幅率, *地震*, **2**, **36**, 262-265.
- 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.

## 図表の説明

Fig. 1. The locations of strainmeters in the Tokai area. Open circles and open triangles denote volumetric strainmeters and multi-component strainmeters, respectively. The area enclosed in the center represents the expected source region of the anticipated Tokai earthquake [Central Disaster Management Council, 2001].

Fig. 2a. (Top) Type A strain changes in July 2005. It shows strain changes observed at Gamagori and Sakuma, change of atmospheric pressure, hourly precipitation and daily number of low frequency earthquakes. Horizontal principal strain calculated at the Sakuma is also shown in right side of the figure. A horizontal arrowed bar indicates a period of short-term slow slip. (Bottom) Distribution of the low frequency earthquakes. Gray marks denote epicenters in the period of January 2000 to July 2005 and black marks denote epicenters in the period of July 20 to 23 when the strain change was observed. The line X-Y denotes a projection line of time-space distribution shown in Fig. 5. Regions A, B and C correspond to the clusters of the low frequency earthquakes.

Fig. 2b. (Top) Type B strain change in February 2003. (Bottom) Distribution of low frequency earthquakes. Black marks denote epicenters in the period of February 13 to 16.

Fig. 2c. (Top) Type C strain change in June 2001. Strain changes and horizontal principal strain observed at Honkawane are also shown. (Bottom) Distribution of low frequency earthquakes. Black marks denote epicenters in the period of June 2 to 8.

Fig. 3. Theoretical strain changes by slips on the plate interface. (a), (b) and (c) denote strain changes of type A, B and C, respectively. The squares show fault planes. Fault parameters are shown in Table 3. Locations of these faults correspond to the active areas of low frequency earthquakes in Figs. 2. Color contour shows volumetric strain change and orthogonal bar with arrow in both ends shows principal strain change. MICAP-G [Naito and Yoshikawa (1999)] was used when this figure were drawn.

Fig. 4. Strain changes observed at Gamagori, Sakuma and Honkawane in February 2004. Change of atmospheric pressure, hourly precipitation and daily number of low frequency earthquakes in each region are also shown. Horizontal arrowed bars indicate periods of short-term slow slip.

Fig. 5. Time-space distribution of low frequency earthquakes and the times of strain changes. Red lines and blue ones denote times of strain changes caused by short-term slow slips and by rainfalls, respectively. Regions A, B and C correspond to those of

Figure 2.

Fig. 6. Cumulative curve of seismic moment of the short-term slow slip from data at Sakuma.

Fig. 7. Cumulative curve of episodic changes of volumetric strain observed at Gamagori.

Table 1. Summary of short-term slow slip events detected by the strainmeters installed by JMA in the Tokai region. Start and end dates of an event, amount of estimated slip, type of strain change, amount of strain change at Gamagori, and existence or non-existence of strain change at Irako are shown. Symbols  $\circ$  and  $\times$  denote existence and non-existence of significant strain change, respectively. C $\rightarrow$ A shows a change of strain type from C to A.

Table 2. Characteristic of strain change observed at Gamagori, Sakuma and Honkawane when a short-term slow slip occurs. Volumetric strain is observed at Gamagori while multi-component strain is measured at Sakuma and Honkawane. Direction of maximum principal strain is shown for Sakuma and Honkawane.

Table 3. Fault parameters assumed to explain a type of strain changes.

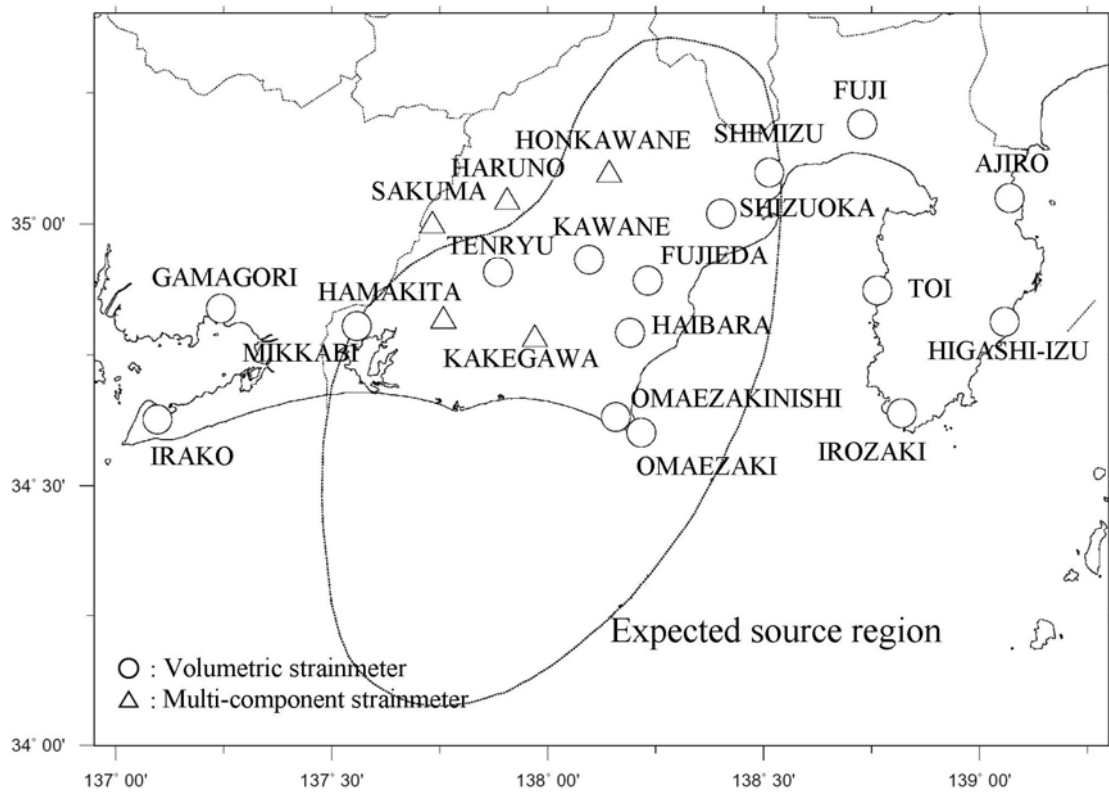


Fig. 1. The locations of strainmeters in the Tokai area. Open circles and open triangles denote volumetric strainmeters and multi-component strainmeters, respectively. The area enclosed in the center represents the expected source region of the anticipated Tokai earthquake [Central Disaster Management Council, 2001].

(半幅)

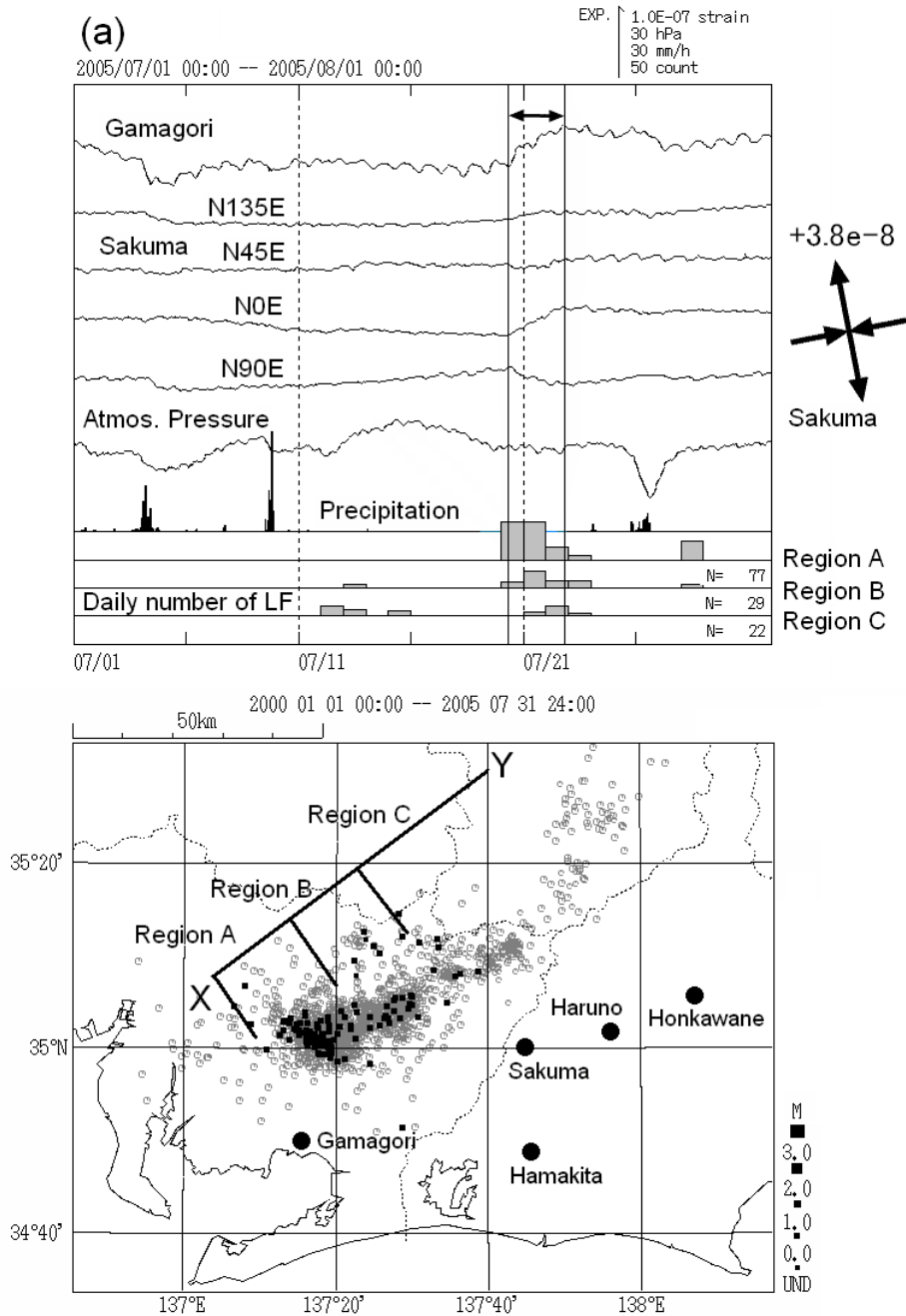


Fig. 2a. (Top) Type A strain changes in July 2005. It shows strain changes observed at Gamagori and Sakuma, change of atmospheric pressure, hourly precipitation and daily number of low frequency earthquakes. Horizontal principal strain calculated at the Sakuma is also shown in right side of the figure. A horizontal arrowed bar indicates a period of short-term slow slip. (Bottom) Distribution of the low frequency earthquakes. Gray marks denote epicenters in the period of January 2000 to July 2005 and black marks denote epicenters in the period of July 20 to 23 when the strain change was observed. The line X-Y denotes a projection line of time-space distribution shown in Fig. 5. Regions A, B and C correspond to the clusters of the low frequency earthquakes.

(半幅)

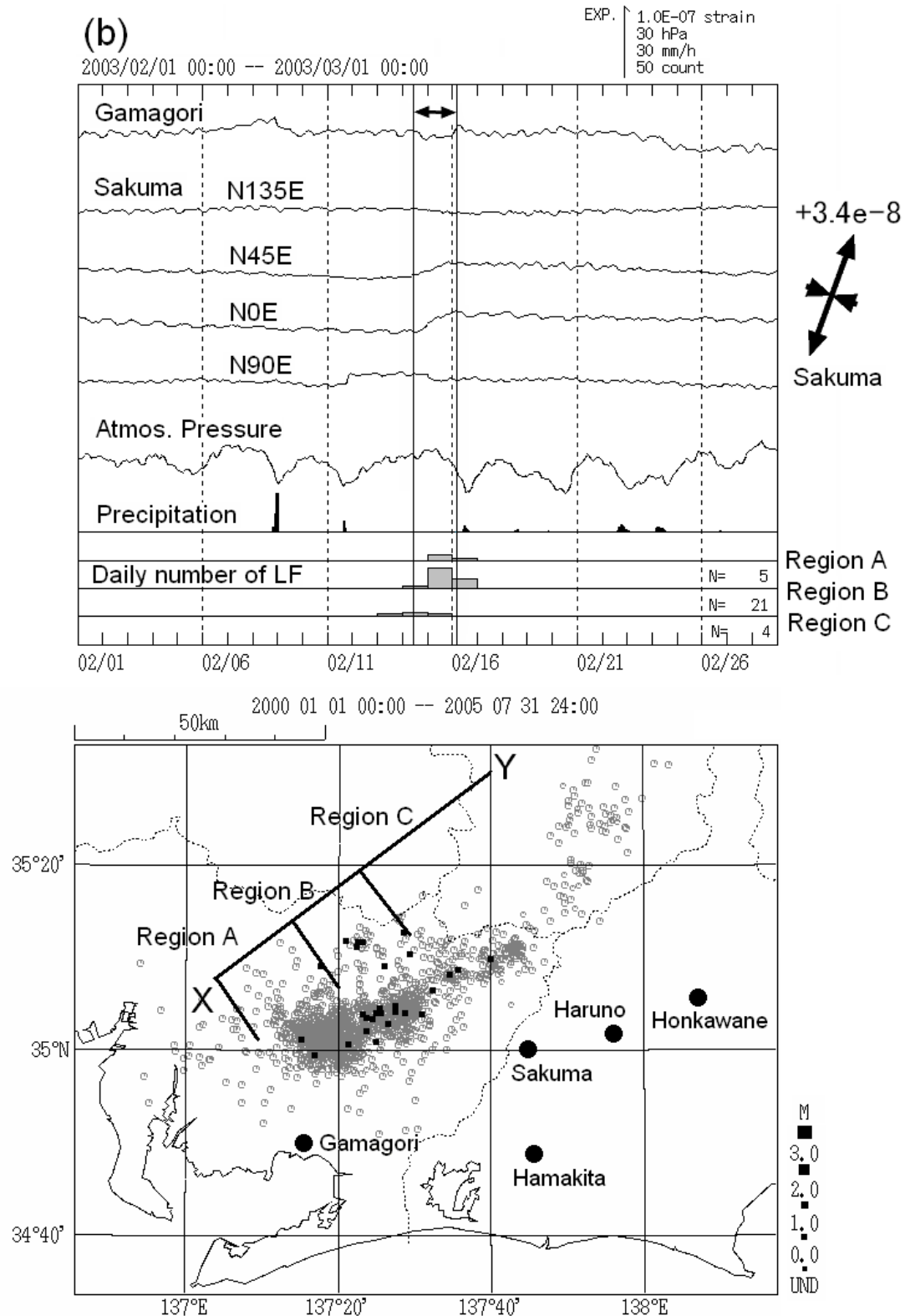


Fig. 2b. (Top) Type B strain change in February 2003. (Bottom) Distribution of low frequency earthquakes. Black marks denote epicenters in the period of February 13 to 16.

(半幅)



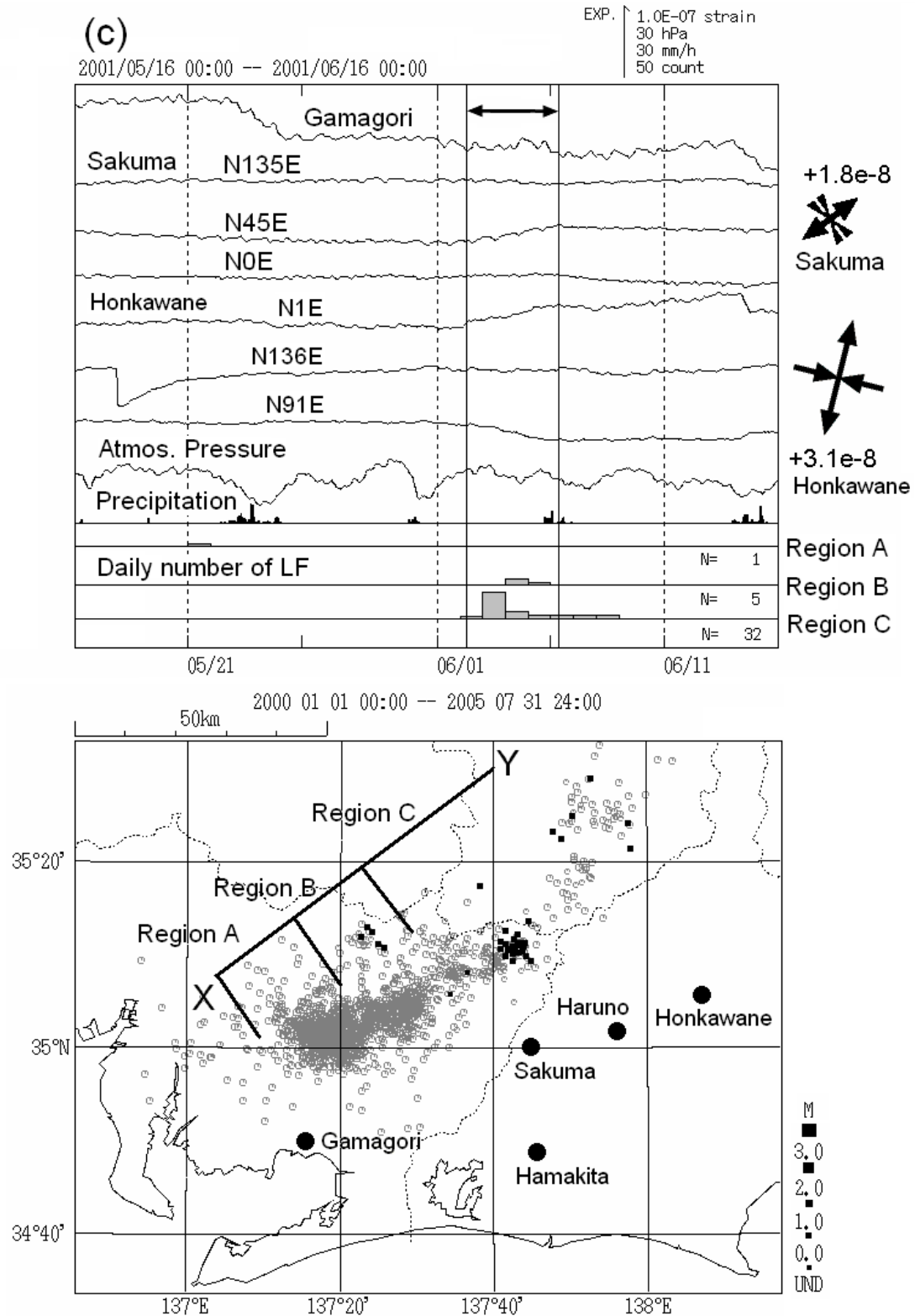


Fig. 2c. (Top) Type C strain change in June 2001. Strain changes and horizontal principal strain observed at Honkawane are also shown. (Bottom) Distribution of low frequency earthquakes. Black marks denote epicenters in the period of June 2 to 8.

(半幅)

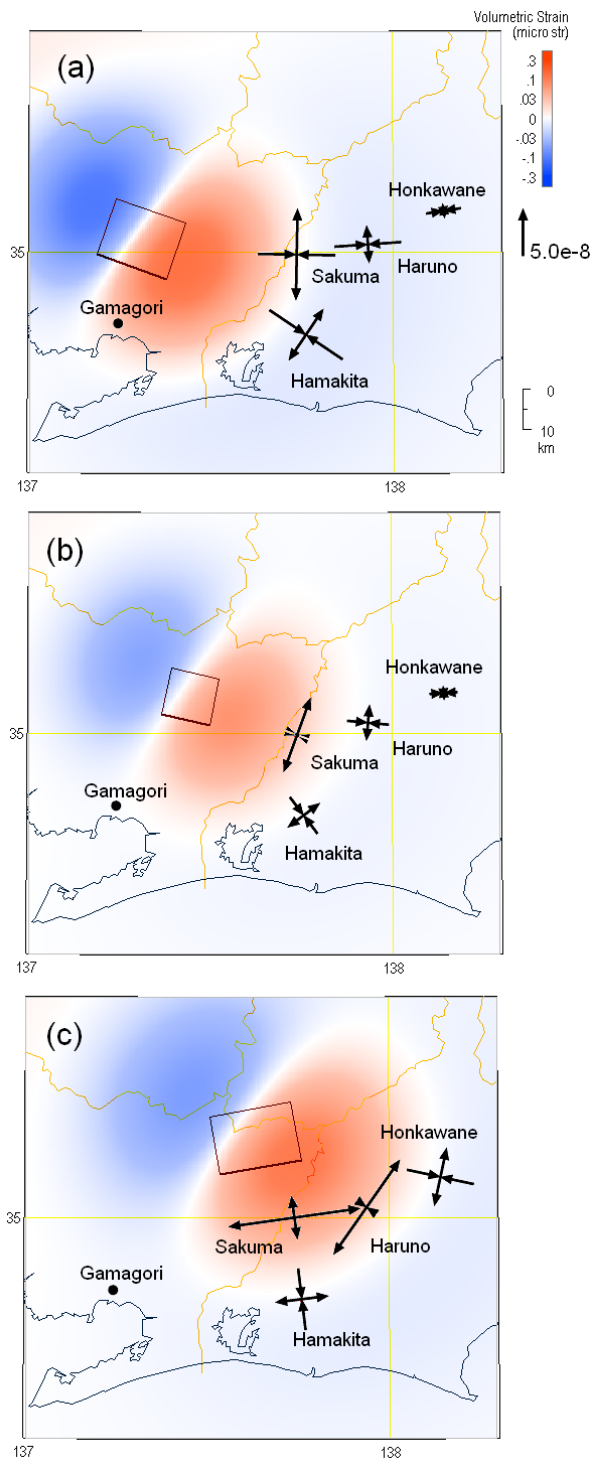


Fig. 3. Theoretical strain changes by slips on the plate interface. (a), (b) and (c) denote strain changes of type A, B and C, respectively. The squares show fault planes. Fault parameters are shown in Table 3. Locations of these faults correspond to the active areas of low frequency earthquakes in Figs. 2. Color contour shows volumetric strain change and orthogonal bar with arrow in both ends shows principal strain change. MICAP-G [Naito and Yoshikawa (1999)] was used when this figure were drawn.

(半幅)

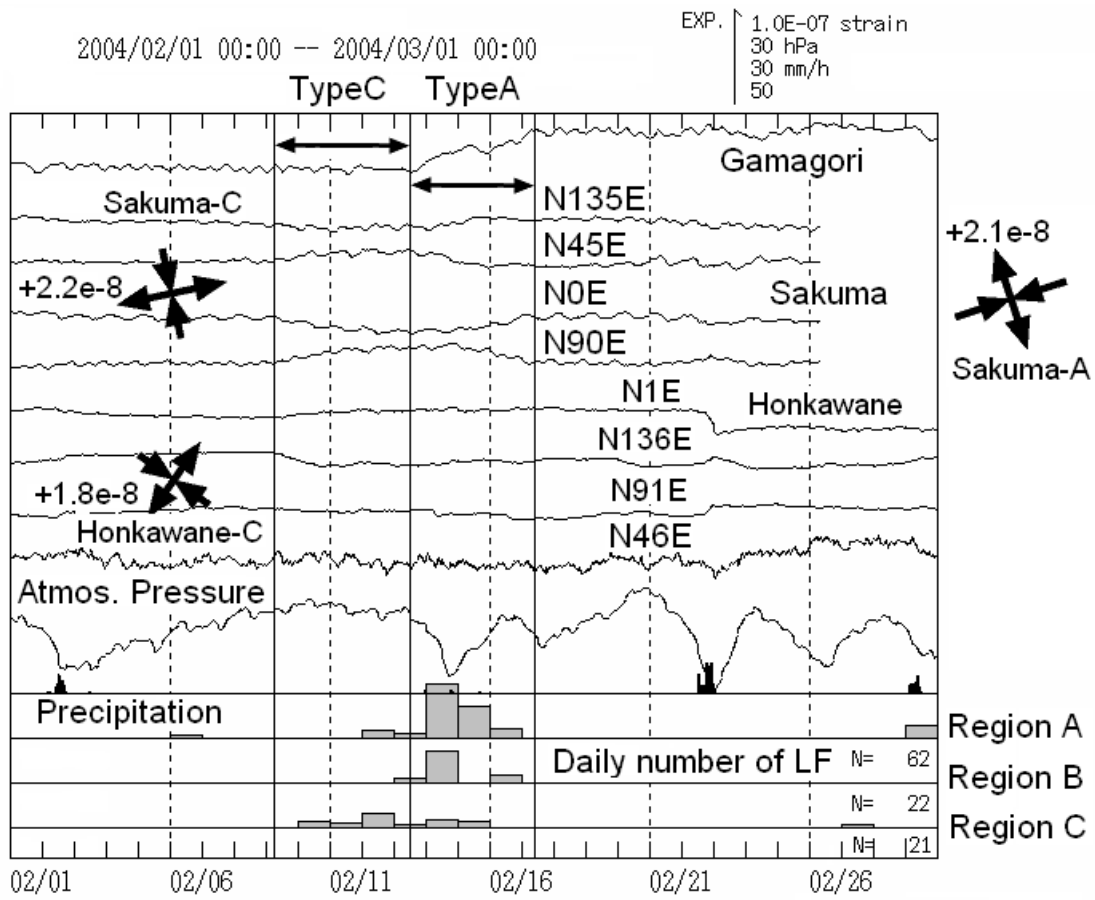


Fig. 4. Strain changes observed at Gamagori, Sakuma and Honkawane in February 2004. Change of atmospheric pressure, hourly precipitation and daily number of low frequency earthquakes in each region are also shown. Horizontal arrowed bars indicate periods of short-term slow slip.

(半幅)

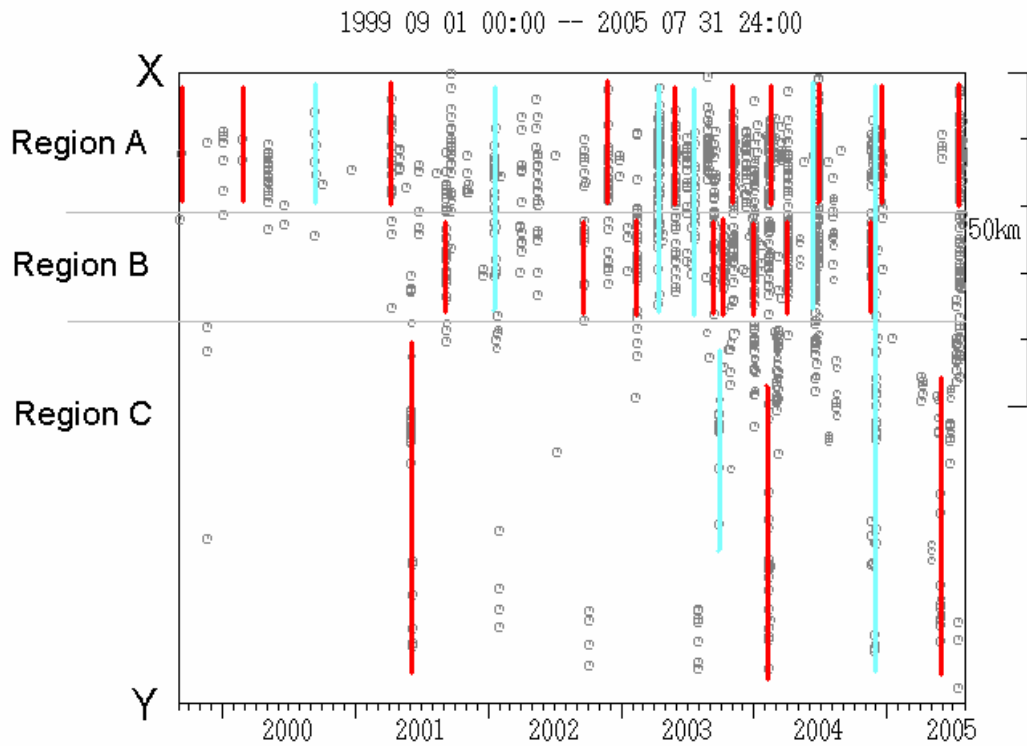


Fig. 5. Time-space distribution of low frequency earthquakes and the times of strain changes. Red lines and blue ones denote times of strain changes caused by short-term slow slips and by rainfalls, respectively. Regions A, B and C correspond to those of Figure 2.

(半幅)

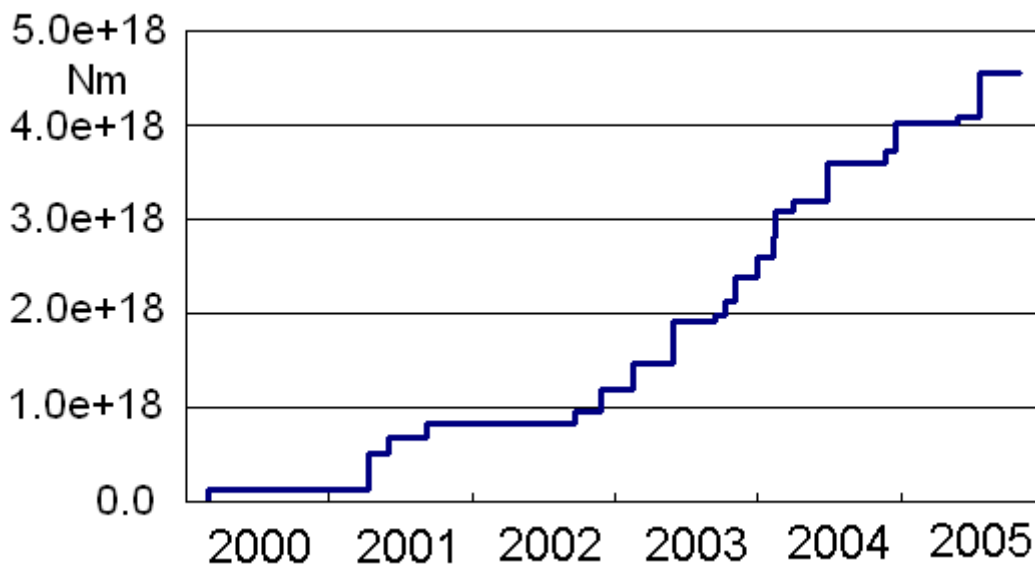


Fig. 6. Cumulative curve of seismic moment of the short-term slow slip from data at Sakuma.

(半幅)

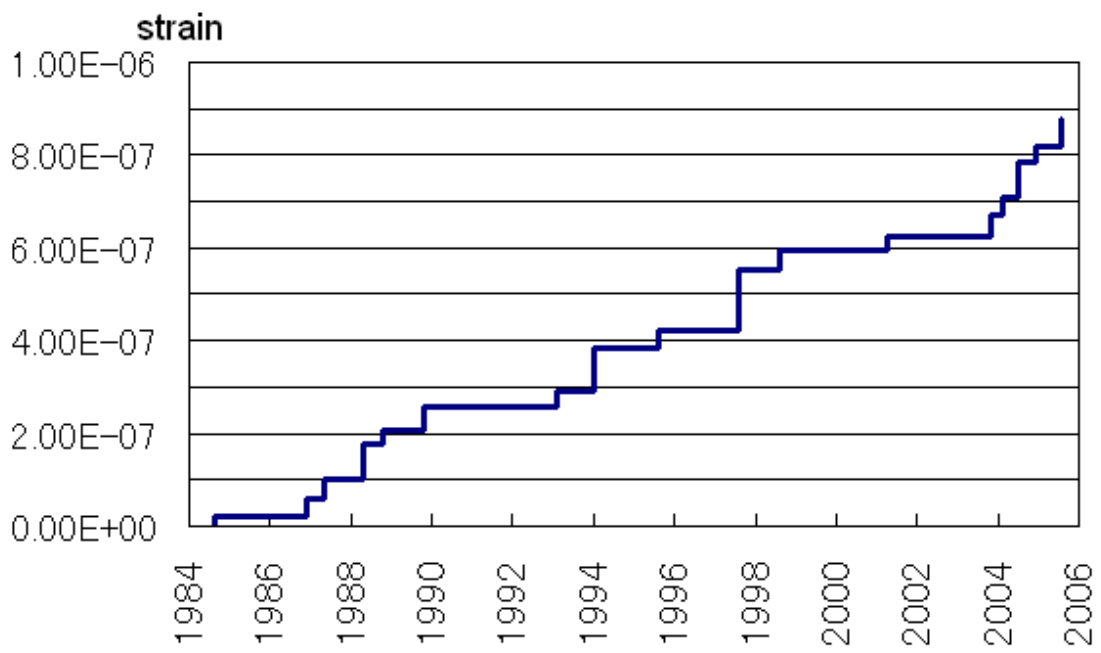


Fig. 7. Cumulative curve of episodic changes of volumetric strain observed at Gamagori.  
 (半幅)

Table 1. Summary of short-term slow slip events detected by the strainmeters installed by JMA in the Tokai region. Start and end dates of an event, amount of estimated slip, type of strain change, amount of strain change at Gamagori, and existence or non-existence of strain change at Irako are shown. Symbols  $\circ$  and  $\times$  denote existence and non-existence of significant strain change, respectively. C $\rightarrow$ A shows a change of strain type from C to A.

(半幅)

	Start	End	Slip (mm)	Type	Gamagori	Irako
1984	8/13	8/14			2.3e-8	$\circ$
1986	12/ 3	12/5			3.8e-8	$\circ$
1987	5/ 8	5/12			4.0e-8	$\circ$
1988	4/26	4/29			7.8e-8	$\circ$
1988	10/21	10/24			2.9e-8	$\circ$
1989	10/18	10/21			5.0e-8	$\circ$
1993	2/ 3	2/ 5			3.4e-8	$\circ$
1994	1/10	1/18			9.1e-8	$\circ$
1995	8/16	8/21			4.1e-8	$\circ$
1997	8/ 8	8/16			12.8e-8	$\circ$
1998	8/ 7	8/ 9			4.3e-8	$\circ$
1999	9/ 7	9/ 9	---	A	4.7e-8	$\times$
2000	2/26	2/27	12	A	2.6e-8	$\times$
2001	4/10	4/13	35	A	3.1e-8	$\circ$
2001	6/ 2	6/ 5	14	C	$\times$	$\times$
2001	9/ 6	9/ 9	26	B	$\times$	$\times$
2002	9/22	9/24	23	B	$\times$	$\times$
2002	11/26	11/27	22	A	3.9e-8	$\times$
2003	2/14	2/16	47	B	$\times$	$\times$
2003	5/30	6/ 3	41	A	4.7e-8	$\times$
2003	9/16	9/17	14	B	$\times$	$\times$
2003	10/ 9	10/11	25	B	$\times$	$\times$
2003	11/ 6	11/ 8	23	A	4.3e-8	$\circ$
2004	1/ 1	1/ 3	38	B	$\times$	$\times$
2004	2/13	2/17	18 $\rightarrow$ 25	C $\rightarrow$ A	3.9e-8	$\circ$
2004	4/ 3	4/ 7	19	B	$\times$	$\times$
2004	6/26	7/ 2	38	A	7.7e-8	$\circ$
2004	11/21	11/26	19	B	$\times$	$\times$
2004	12/17	12/19	27	A	3.2e-8	$\circ$
2005	5/28	5/30	6	C	$\times$	$\times$
2005	7/20	7/22	45	A	6.0e-8	$\circ$



Table 2. Characteristic of strain change observed at Gamagori, Sakuma and Honkawane when a short-term slow slip occurs. Volumetric strain is observed at Gamagori while multi-component strain is measured at Sakuma and Honkawane. Direction of maximum principal strain is shown for Sakuma and Honkawane.

(半幅)

Type of strain change	Gamagori	Sakuma	Honkawane
A	expansion	N~NNW	---
B	---	NNE	---
C	---	NE~ENE	NNE~NE

Table 3. Fault parameters assumed to explain a type of strain changes.

(全幅)

Type of strain change	Latitude (deg)	Longitude (deg)	Depth (km)	Strike (deg)	Dip (deg)	Rake (deg)	Length (km)	Width (km)
A	34.94	137.38	30	289	16	164	18	15
B	35.02	137.50	32	282	16	157	12	12
C	35.13	137.76	36	260	16	135	20	15