

千葉県北部の地震活動と同期した非地震性すべり

気象庁気象研究所* 小林昭夫・弘瀬冬樹

Aseismic Slips Synchronized with Earthquakes in Northern Chiba Prefecture, Central Japan

Akio Kobayashi and Fuyuki Hirose

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

*〒305-0052 つくば市長峰 1-1

1 **Abstract**

2

3 Episodes of intermittent uplift over periods of one month to a year have been observed by the

4 Global Navigation Satellite System in the northeastern part of Chiba Prefecture, Kanto district,

5 Japan. Uplift in the vicinity of Choshi in 2000 was accompanied by the earthquake near Choshi

6 in June 2000 (M 6.1). Uplift of the northeastern part of Chiba Prefecture in 2005 was

7 accompanied by the earthquakes near Choshi in April 2005 (M 6.1) and near Chiba city in July

8 2005 (M 6.0). Although our estimates of the source parameters for these uplifts were well

9 explained by slips on the faults of these earthquakes, the amounts of slip we estimated for the

10 uplifts were several times larger than we expected from the earthquakes. We attribute the above

11 mentioned intermittent uplift events to aseismic slips on the faults of these earthquakes.

12

13

14 Key words: Vertical crustal deformation, Aseismic slip, Choshi, Chiba

15

16

1 §1. はじめに

2 関東地方の房総半島南東沖では継続期間数日から数週間のスロースリップイベント
3 (以下, SSE)が GNSS により数年ごとに観測されている [Ozawa *et al.* (2003); Ozawa
4 (2014)]. この SSE は陸側プレートの下に沈み込むフィリピン海プレート上面でのすべ
5 りによるものと考えられており, 活発な地震活動を伴う. Ozawa (2014) は, 2011 年
6 東北地方太平洋沖地震後に房総半島南東沖の SSE の発生間隔が短くなったことを報告
7 し, 2011 年東北地方太平洋沖地震およびその余効変動などによる応力変化との関連を
8 指摘した. フィリピン海プレートが沈み込む南海トラフ沿いでは短期的および長期的
9 SSE が複数の地域で観測されている. Hirose and Obara (2005) は, 6 か月間隔で発生
10 していた豊後水道の短期的 SSE が, 隣接領域で長期的 SSE が発生したときに約 3 か月
11 間隔と短くなったことを報告した. また, 太平洋プレートが沈み込む東北日本でも,
12 2011 年東北地方太平洋沖地震の数年前から [例えば Suito *et al.* (2011); Ozawa *et al.*
13 (2012)], および一か月ほど前に [Kato *et al.* (2012); Ito *et al.* (2013)] SSE が観測さ
14 れている. SSE はその場所における固着状態変化を表し, 応力変化に関する情報を提
15 供する可能性がある.

16 東北日本では 1992 年三陸はるか沖の地震 (M6.9) [Kawasaki *et al.* (1995)], 1994
17 年三陸はるか沖地震 (M7.6) [Heki *et al.* (1997)] や 2003 年十勝沖地震 (M8.0)
18 [Miyazaki *et al.* (2004)] 後に, 地震と同等や地震を上回る規模の非地震性の余効変動
19 が観測されている. より小さな地震としては, 2001 年 2 月 25 日福島県沖の地震 (M 5.8)
20 や 2002 年 11 月 3 日宮城県沖の地震 (M 6.1) で地震の規模を上回る余効すべりが推定
21 されている [三浦・他 (2005)]. Sato *et al.* (2004) は, 2001 年青森県東方沖の地震
22 (M6.4) について地震時の 3 倍のすべりが地震後に発生したことを報告し, この地域
23 では相対的に小規模な地震についても大きな余効変動を伴うことを示唆した. 同様の性
24 質は, これまで大きな余効変動が報告されていない関東地方に沈み込む太平洋プレート
25 上面の地震についても見られるのだろうか.

26 銚子付近ではこれまでにいくつか非定常な地殻変動が報告されている. 中川・他
27 (2000) は, 1999 年 2 月 27 日から約 10 日間にわたり, 銚子付近が東に最大 5 mm 程
28 度変位したことを報告し, 廣瀬・他 (2001) は 2000 年 2 月にも同じ現象が発生した可
29 能性があることを報告した. また縣・他 (2009) は, 2005 年 1 月 14 日から 18 日にか
30 けて銚子付近に数 mm の変位が見られるとした. いずれの場合も変動源は太平洋プレ

1 ート上面に推定され、その付近で同時期に顕著な地震は発生していない。また、フィリ
2 ピン海プレート上面ではあるが、1989年12月に東京湾で時定数約1日のSSEが指摘
3 されている [広瀬・他 (2000)]。

4 ここでは、銚子付近と千葉市付近の太平洋プレート上面の地震活動域周辺で、M6ク
5 ラスの地震と同じ時期に非地震性の地殻変動が観測されたこと、この地殻変動から推定
6 された非地震性すべりが本震の規模を上回ることを報告する。

7

8 § 2. GNSS および地震データ

9 GNSS データは、国土地理院 GEONET [国土地理院測地観測センター (2004)] の
10 日座標値 (F3 解) を用いた。日座標値は ITRF2005 (IGS05) に準拠して解析ソフト
11 ウェア Bernese バージョン 5.0 を用いて解析されている [中川・他 (2009)]。GEONET
12 観測点のアンテナ交換などに伴う人為的要因によるオフセット [岩下・他 (2009)] は、
13 国土地理院 Web ページで公開されているデータセット [国土地理院 corr30.dat] を用
14 いて補正した。ここではプレートの沈み込みに伴う定常的な成分を除去して、非定常な
15 変化に注目する。房総半島周辺については、定常的な変動をしていた期間を、1997年
16 6月1日から2000年6月1日とした。期間の選定には、関東地方の地殻変動に影響を
17 及ぼした現象として、1996年5月、2002年10月、2007年8月、2011年11月の房総
18 半島南東沖の SSE [Ozawa (2014)]、2000年7月の伊豆諸島北部の地震火山活動
19 [Kaidzu *et al.* (2000)]、2004年9月5日三重県南東沖の地震 (M 7.4)、2008年5月
20 8日茨城県沖の地震 (M 7.0)、2008年7月19日福島県沖の地震 (M 6.9)、2011年3
21 月11日東北地方太平洋沖地震 (M 9.0) とそれらの余効変動を考慮した。定常期間に
22 おいて、各地点座標 (緯度, 経度, 高さ) の直線トレンド係数を最小絶対偏差法 [Press
23 *et al.* (1993)] で求め、全期間からその係数を用いて定常成分を差し引いた。年周補正
24 はしていない。

25 定常的な変動を差し引いた後の、2001年1月の座標平均値から2000年1月の座標
26 平均値を差し引いた2000年1年間の非定常変位 (黒矢印) を Fig. 1 に示す。水平変位
27 には2000年伊豆諸島北部の活動に伴う顕著な変位が認められるが、上下変位にはその
28 活動の影響はほとんど見られず、銚子付近に1.5 cm 程度の隆起が見られる。2006年1
29 月の座標平均値から2005年1月の座標平均値を差し引いた2005年1年間の非定常変
30 位 (黒矢印) を Fig. 2 に示す。水平変位は千葉県北東部から茨城県東部に北向きの1 cm

1 ほどの変位が見られ、上下変位は千葉県北東部から中部にかけて 1~1.5 cm のまとまっ
2 た隆起が見られる。江南(93005)に対する干潟(93021)、銚子(93022)、大網白里(93027)
3 それぞれの比高変化を Fig. 3 に示す。Fig. 1, Fig. 2 のベクトル図と対応するように、
4 Fig. 3 でも 2000 年頃に銚子、干潟で 1.5 cm ほどの相対的隆起、2005 年頃に銚子、干
5 潟、大網白里で 1~1.5 cm の相対的な隆起が見られる。江南を他の観測点に変更しても
6 Fig. 3 と同様な変化が認められるため、これらの変化は江南側の変化によるものではな
7 い。また、これらの変化は地震による 1 日でのオフセット的な変化ではなく、2000 年
8 は 1 か月から数か月、2005 年は数か月から 1 年ほどかけて変化しているように見える。

9 震源データは気象庁一元化カタログを用いた。銚子付近の 1987 年 9 月から 2014 年
10 12 月の震央分布を Fig. 4 に示す。太平洋プレート上面の深さを含む深さ 35~60 km、
11 マグニチュードは 2.0 以上とした。銚子の西側 (Fig. 4 矩形内) の地震活動の M-T 図、
12 回数積算図と、銚子(93022)–江南(93005)の比高変化を Fig. 5 に示す。比高変化からは、
13 縦の点線で示した 3 つの地震の発震機構解 (気象庁による初動解) から、後述する方法
14 で理論的な変化を差し引いてある。銚子の西側には活発な地震活動域があり、過去 30
15 年間に M 6 以上の地震が 5 回 (1989 年 3 月 6 日 M 6.0, 1990 年 6 月 1 日 M 6.0, 2000
16 年 6 月 3 日 M 6.1, 2005 年 4 月 11 日 M 6.1, 2011 年 4 月 21 日 M 6.0) 発生している。
17 M 6 以上の地震の時期を縦線で示したが、それらの時期に地震が多発していることが回
18 数積算図からわかる。銚子西側の震源の深さは 45~50 km であり、Nakajima *et al.*
19 (2009) のプレート等深線から、この領域の地震はフィリピン海プレートの下に沈み込
20 む太平洋プレート上面に位置していることがわかる。矩形内に関しては、陸側プレー
21 トに沈み込むフィリピン海プレートとの境界で発生する地震は含まれていない。気象庁
22 により発震機構解 (初動解および CMT 解) が求められている M6 クラスの地震はいず
23 れも東西圧縮の逆断層型であり、それらの発震機構から太平洋プレート上面のプレート
24 境界の地震であると考えられる。

25 千葉市付近の 1987 年 9 月から 2014 年 12 月の震央分布を Fig. 6 に示す。太平洋プ
26 レート上面の深さを含む深さ 60~90 km、マグニチュードは 2.0 以上とした。千葉市付
27 近 (Fig. 6 矩形内) の地震活動の M-T 図、回数積算図と、大網白里(93027)–江南(93005)
28 の比高変化を Fig. 7 に示す。比高変化からは、縦の点線で示した 3 つの地震の発震機
29 構解 (気象庁による初動解) から、後述する方法で理論的な変化を差し引いてある。千
30 葉市付近には活発な地震活動域があり、過去 30 年間に M 6 以上の地震が 1 回 (2005

1 年 7 月 23 日 M 6.0) 発生している. 千葉市付近の震源の深さは 60~75 km であり,
2 Nakajima *et al.* (2009) のプレート等深線から, この領域の地震はフィリピン海プレー
3 トの下に沈み込む太平洋プレートの上面に位置していることがわかる. 矩形内に関して
4 は, 陸側プレートに沈み込むフィリピン海プレートとの境界で発生する地震は含まれて
5 いない. 2005 年 7 月の地震の発震機構は東西圧縮の逆断層型であり, プレート境界の
6 地震であると考えられている [気象庁 (2005)].

7

8 § 3. 変動源の推定と議論

9 前章では千葉県北東部で 2000 年と 2005 年に新たな非定常地殻変動が見られること
10 を指摘した. 一方, 第 1 章で述べた中川・他(2000), 廣瀬・他(2001), 縣・他(2009)に
11 より報告されている変化について我々が確認したところ, いずれも銚子付近の観測点と
12 他の観測点との比高変化にはそれらの時期に有意な変化は見られない. 今回指摘した
13 Fig. 1 および Fig. 2 の現象は, 既に報告されている 2000 年と 2005 年の非定常変化の
14 時期と近いが, 変化の継続期間が異なっていること, 今回の非定常変位は上下成分に見
15 られることから, 既に報告されているものとは別の現象と考えられる.

16 2000 年 6 月 3 日の銚子付近の地震 (M 6.1) による理論的な変位を, 半無限弾性体
17 中の矩形断層による式 [Okada (1992)] により計算したものを Fig. 8a に示す. 走向,
18 傾斜角, すべり角は気象庁による発震機構解 (初動解) を用い, 矩形断層の長さ, 幅,
19 すべり量は, 宇津 (1987) によるマグニチュードと各種パラメータの相似則から求めた.
20 CMT 解の位置は余震域から明らかに外れているため, CMT 解のパラメータは用いな
21 かった. この地震による銚子付近の変位は水平成分より上下成分の方がやや大きく 3
22 mm 程度である. 最大余震は 7 月 19 日の M 4.3 であり, 余震活動によるエネルギー積
23 算を考慮しても本震および余震活動に伴う変位として総隆起量が 4 mm を超えること
24 はなく, GNSS で観測された 1.5 cm ほどの隆起 (Fig. 1) を地震のみで説明できない.

25 次に, 2005 年 4 月 11 日の銚子付近の地震 (M 6.1) と 2005 年 7 月 23 日の千葉市付
26 近の地震 (M 6.0) による理論的な変位を Fig. 8b に示す. 各種断層パラメータの与え
27 方は, 前述と同様である. これらの地震による銚子付近の変位は水平成分より上下成分
28 の方がやや大きく, Fig. 2 で見られる非定常変位の特徴と一致している. 上下成分の大
29 きさは銚子付近で最大 4 mm 程度である. 銚子付近の最大余震は 6 月 20 日の M 5.6,
30 千葉市付近の最大余震は 8 月 7 日の M 4.7 であり, 余震活動によるエネルギー積算を

1 考慮しても本震および余震活動に伴う変位として総隆起量が 5 mm を超えることはな
2 く, GNSS で観測された隆起量 1~1.5 cm を説明できない.

3 地震活動から計算される上下変位量では観測された変位量を説明できず, さらに比高
4 変化の時系列 (Fig. 3 や地震時のオフセットを除いた Fig. 5 と Fig. 7) から変化は地震
5 時のオフセット的なものではない. このことから, 2000 年と 2005 年の主に上下成分
6 に見られる非定常変位は, 非地震性すべりによるものと考えられる. この非定常変位が
7 地震の発生前から始まっているのか, 地震後に始まっているのかについては, Fig. 3 に
8 示した組み合わせの他に多くの比高変化を確認したが, 変位量が小さいために断定的な
9 ことは言えない.

10 2000 年と 2005 年に主に上下成分に見られる非定常変位が, 地震活動と同じ場所で
11 のすべりによるものと仮定したときの断層パラメータについて検討する. 2000 年に関
12 しては伊豆諸島北部の地震火山活動による水平変動が大きいため, 変動源のパラメータ
13 推定には上下変位のみ (さらに解の安定のため Fig. 1 の大矩形内の観測点のみ) を用い
14 た. 2005 年については Fig. 2 すべての水平と上下変位を用い, 重みは同じとした.
15 MICAP-G [内藤・吉川 (1999); 山本 (2005)] を用い, 先験的情報に基づいた Matsu'ura
16 and Hasegawa (1987) の非線形インバージョン手法により変動源の傾斜角, すべり角,
17 すべり量の 3 パラメータを推定する. すべり領域の大きさと位置については地震活動領
18 域を参考に, 走向は Nakajima *et al.* (2009) の太平洋プレート上面の等深線を参考に
19 Table 1 の値に固定した. すべり角とすべり量の初期値はそれぞれの時期に発生した
20 M6 クラスの地震に応じて, 傾斜角は Nakajima *et al.* (2009) の太平洋プレート上面の
21 等深線から設定した. インバージョンにより推定された傾斜角, すべり角, すべり量,
22 すべりの規模 (M_w), および M6 クラスの地震を除いたすべりの規模を Table 1 に示す.
23 2000 年について推定されたすべりによる理論的な地殻変動を白矢印で Fig. 1 に示す.
24 2000 年の銚子付近に見られる上下変位は理論値でも良く表現されている (Fig. 1 右).
25 2000 年のすべり角は東向きで, 傾斜角はプレート形状 (約 22 度) に近い値となってい
26 る. 一方, 2005 年のすべり角は銚子, 千葉とも東向きだがやや両者に差があり, 傾斜
27 角はいずれも等深線から計算される角度 (銚子, 千葉とも約 22 度) より 15~18 度大
28 さい (Table 1 の Model 1). 1995 年以降に発生した M 5.0 以上の気象庁 CMT 解につ
29 いて見ると, 銚子付近の地震の傾斜角は 16~32 度 (類似の発震機構のみ) である. 一
30 方, 千葉市付近の地震の CMT 解の傾斜角は 35~38 度と, その場所のプレート境界の

1 傾斜角よりやや大きい。岡田 (2006) は 2005 年 7 月 23 日の地震が太平洋プレート内
2 部で発生した可能性を指摘しており、千葉市付近の地震はプレート境界における逆断層
3 地震ではないことも考えられる。

4 そこで、2005 年のすべりについて再検討を行う。まず、2000 年と 2005 年に銚子付
5 近で発生した地震の規模が同じで、ともにプレート境界の地震と考えられるため、2005
6 年についても 2000 年について推定されたものと同様のすべり (断層 A) が銚子付近の
7 地震に伴って発生していたと仮定する。その上で 2005 年の千葉市付近のすべりについ
8 てのみ傾斜角、すべり角、すべり量を推定した。結果を Table 1 (Model 2) に、理論
9 的な地殻変動を白矢印で Fig. 2 に示す。千葉市付近のすべりの傾斜角は約 37 度で、2005
10 年の千葉県北東部の上下変位の観測値は理論値とほぼ合っている。これらのことから、
11 2005 年については銚子付近では 2000 年と同様のほぼプレート境界に沿った断層 A の
12 すべりが生じ、千葉市付近ではその付近の地震と同様にプレート境界よりやや高角な断
13 層面 B' におけるすべりが発生したとしても説明できる。すべりの規模は、いずれも発
14 生した M6 クラスの地震の数倍であり、明らかに地震性より非地震性のすべりの方が大
15 きく、M6 クラスを除いたすべりの規模は銚子付近で 2000 年、2005 年とも Mw 6.3 相
16 当、2005 年の千葉市付近で Mw 6.5 相当である (Table 1)。

17 上述の通り、2005 年の千葉市付近の変動源については、プレート等深線から計算さ
18 れる傾斜角 (約 22 度) と推定されたすべりの傾斜角 (約 37 度) に大きな差がある。
19 これは断層面の位置を限定したことによる可能性がある。そこで次に、断層面を固定せ
20 ず、プレート境界面上の任意のすべりで観測された非定常変位が説明できるかどうか試
21 みた。フィリピン海プレートに沈み込む太平洋プレート境界面上に点震源を置いたとき
22 の、MICAP-G [内藤・吉川 (1999) ; 山本 (2005)] によるすべり分布インバージョン
23 [Yabuki and Matsu'ura (1992)] の結果を Fig. 9 に示す。太平洋プレートの形状は
24 Nakajima *et al.* (2009) を参照した。すべりを推定する点は図に示した通りで、推定が
25 不安定になる房総沖と鹿島灘には置かなかった。上下成分と水平成分の重みは同じとし
26 た。すべり分布は銚子と千葉の中間地域および東京湾南部から房総半島中部にかけての
27 地域に分かれている。これらのすべりによる銚子(93022)の理論上下変位は 6 mm ほど
28 で、観測値 (15 mm) の半分以下である。この地域の傾斜角では水平変位を小さく保
29 ったまま上下変位を大きくできなかつたものと考えられる。このため、千葉市付近の変
30 動源については、太平洋プレート上面に沿うすべりでは説明ができず、プレート傾斜角

1 よりやや高角な断層面におけるすべりと考えられる。ちなみに同じ格子点位置を用いて
2 弘瀬・他 (2008)のプレート形状を参照したフィリピン海プレート上面でのすべり分布
3 についても検討したが、いずれの格子点でも誤差を上回る解が得られず、フィリピン海
4 プレート上面のすべりの可能性は低いと考えられる。

5 これまで 2000 年と 2005 年の M6 クラスの地震に注目して述べてきたが、銚子付近
6 ではこの他に 1989 年 3 月 6 日, 1990 年 6 月 1 日, 2011 年 4 月 21 日にいずれも M 6.0
7 の地震が発生している (Figs. 4, 5)。このうち 2011 年の地震時は 2011 年 3 月に発生し
8 た東北地方太平洋沖地震の余効変動が大きいとため、銚子付近の地震に関連した非定常変
9 位が存在したかは不明である。また、1989 年と 1990 年には GNSS の観測値がなく、
10 水準測量の間隔は 10 年ほど空いているため、それらの時期に SSE が発生したかどうか
11 は不明である。

12 千葉市付近では 1987 年 4 月以降 2014 年までに発生した M6 クラスの地震は 2005
13 年のものだけだが、回数積算図および M-T 図 (Fig. 7)によれば 2011 年 3 月以降と 2013
14 年 11 月頃にやや地震活動が活発になり、2013 年 11 月 16 日には M 5.3 の地震が発生
15 している。しかし、GNSS 比高 (Fig. 7) では 2011 年 3 月以降は東北地方太平洋沖地
16 震の余効変動のため変化は不明で、2013 年 11 月には特に変化は見られない。

17 銚子付近と千葉市付近の地震活動とともに、木村 (2010) により太平洋プレート上面
18 の相似地震活動域とされている。そこで、他の相似地震活動域でも地震活動に対応した
19 非地震性地殻変動が見られないか確認した。木村 (2010) による太平洋プレート上面の
20 相似地震活動域は、銚子付近と千葉市付近の他に茨城県南部が 2 か所と茨城県北部にあ
21 る。GNSS データがある 1996 年 4 月以降に関しては、これらの地震活動域で地震発生
22 頻度に目立った時間的变化がなく、M 5.5 以上の地震は 2011 年 4 月の茨城県南部 M 5.9
23 のみである。東北地方太平洋沖地震の余効変動のためこのときの変化は不明であり、他
24 の関東地方の太平洋プレート上面の地震活動に関連した非地震性地殻変動は見られな
25 かった。

26

27 §4. まとめ

28 2000 年 6 月の銚子付近の地震 (M 6.1) と同時期に、銚子付近を中心に 1 か月から
29 数か月程度継続する非定常な隆起が GNSS により観測された。また、2005 年 4 月の銚
30 子付近の地震 (M 6.1) および 2005 年 7 月の千葉市付近の地震 (千葉県中部, M 6.0)

1 と同時期に、数か月から 1 年程度継続する非定常な隆起が GNSS により観測された。
2 観測された上下変動は、M6 クラスの地震が発生した太平洋プレート上面付近における、
3 地震時の数倍の規模の非地震性すべりにより説明できる。東北地方の太平洋沖と同様に、
4 関東地方に沈み込む太平洋プレート上面の地震についても、本震を上回る規模の非地震
5 性すべりが観測されていた。

6

7 謝辞

8 本調査には国土地理院 GEONET の座標値およびオフセット値を使用しました。また、
9 気象庁、および関係機関(国立研究開発法人防災科学技術研究所、北海道大学、弘前大
10 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、
11 国立研究開発法人産業技術総合研究所、国土地理院、青森県、東京都、静岡県、神奈川
12 県温泉地学研究所、横浜市、国立研究開発法人海洋研究開発機構、IRIS)の地震データ
13 を用いた気象庁一元化震源を使用しました。査読者の西村卓也氏と飯沼卓史氏には数々
14 のご助言をいただき、本稿の改善に大変有益でした。解析と作図には GMT [Wessel and
15 Smith (1998)] および MICAP-G [内藤・吉川 (1999) ; 山本 (2005)] を用いました。

16 以上、記して感謝します。

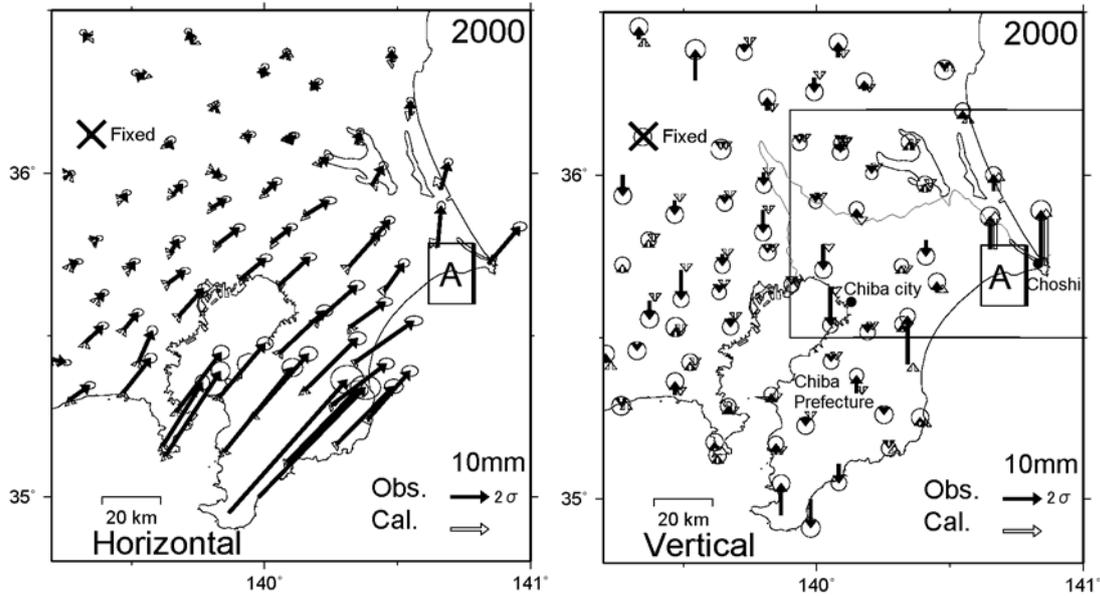
17

1 **文献**

- 2 縣 寿之・川崎一朗・加納靖之・大谷文夫・廣瀬 仁, 2009, 2005年1月銚子沖スロ
3 ー・スリップ・イベントの可能性, 日本地球惑星科学連合 2009年大会予稿集,
4 D108-007.
- 5 Heki, K., S. Miyazaki, and H. Tsuji, 1997, Silent fault slip following an interplate
6 thrust earthquake at the Japan Trench, *Nature*, **386**, 595-598.
- 7 弘瀬冬樹・中島淳一・長谷川 昭, 2008, Double-Difference Tomography 法による関
8 東地方の3次元地震波速度構造およびフィリピン海プレートの形状の推定, *地震*,
9 **60**, 123-138.
- 10 Hirose, H. and K. Obara, 2005, Repeating short- and long-term slow slip events
11 with deep tremor activity around the Bungo channel region, southwest Japan,
12 *Earth Planets Space*, **57**, 961-972.
- 13 廣瀬 仁・平原和朗・藤井直之, 2001, 繰り返し発生する房総半島沖 slow slip ?, 日
14 本地震学会講演予稿集, P140.
- 15 広瀬一聖・川崎一朗・岡田義光・鷲谷 威・田村良明, 2000, 1989年12月東京湾サ
16 イレント・アースクエイクの可能性, *地震*, **53**, 11-23.
- 17 Ito, Y., R. Hino, M. Kido, H. Fujimoto, Y. Osada, D. Inazu, Y. Ohta, T. Inuma, M.
18 Ohzono, S. Miura, M. Mishina, K. Suzuki, T. Tsuji, and J. Ashi, 2013, Episodic
19 slow slip events in the Japan subduction zone before the 2011 Tohoku-Oki
20 earthquake, *Tectonophysics*, **600**, 14–26, doi:10.1016/j.tecto.2012.08.022.
- 21 岩下知真子・梅沢 武・川元智司・野神 憩・畑中雄樹・石倉信広, 2009, GPS 連続
22 観測システム (GEONET) 解析結果に生じる人為的要因によるオフセットの補正
23 手法について, *国土地理院時報*, **118**, 23-30.
- 24 Kaidzu, M., T. Nishimura, M. Murakami, S. Ozawa, T. Sagiya, H. Yarai, and T.
25 Imakiire, 2000, Crustal deformation associated with crustal activities in the
26 northern Izu-islands area during summer, 2000, *Earth Planets Space*, **52**,
27 ix–xviii.
- 28 Kato, A., K. Obara, T. Igarashi, H. Tsuruoka, S. Nakagawa, and N. Hirata, 2012,
29 Propagation of slow slip leading up to the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake,
30 *Science*, **335**, 705–708, doi:10.1126/science.1215141.

- 1 Kawasaki, I., Y. Asai, Y. Tamura, T. Sagiya, N. Mikami, Y. Okada, M. Sakata, and M.
2 Kasahara, 1995, The 1992 Sanriku-oki, Japan, ultra-slow earthquake, *J. Phys.*
3 *Earth*, **43**, 105-116.
- 4 木村尚紀, 2010, 関東地方の相似地震, 地震予知連絡会会報, **83**, 596-608.
- 5 気象庁, 2005, 平成 17 年 7 月地震・火山月報 (防災編), 69pp.
- 6 国土地理院 corr30.dat <<http://mekira.gsi.go.jp/JAPANESE/corr30.dat>>, (参照
7 2015-2-16).
- 8 国土地理院測地観測センター, 2004, 電子基準点 1,200 点の全国整備について, 国土
9 地理院時報, **103**, 2-51.
- 10 Matsu'ura, M. and Y. Hasegawa, 1987, A maximum likelihood approach to
11 nonlinear inversion under constraint, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **47**, 179-187.
- 12 Miyazaki, S., P. Segall, J. Fukuda, and T. Kato, 2004, Space time distribution of
13 afterslip following the 2003 Tokachi-oki earthquake: Implications for variations
14 in fault zone frictional properties, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L06623,
15 doi:10.1029/2003GL019410.
- 16 三浦 哲・油井智史・長谷川 昭・佐藤俊也・立花憲司, 2005, 宮城県沖およびその
17 周辺における最近の地震活動と地殻変動, 月刊地球, **27**, 126-131.
- 18 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**,
19 **52**, 101-104.
- 20 中川弘之・豊福隆史・小谷京湖・宮原伐折羅・岩下知真子・川元智司・畑中雄樹・宗包
21 浩志・石本正芳・湯通堂 亨・石倉信広・菅原安広, 2009, GPS 連続観測システ
22 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
23 について, 国土地理院時報, **118**, 1-8.
- 24 中川靖浩・原田紗智子・川崎一朗・鷺谷 威, 2000, GEONET データから求められ
25 た 1999 年 2 月房総半島東方沖サイレント地震: 序報, 地球惑星科学関連学会 2000
26 年合同大会予稿集, Da-009.
- 27 Nakajima, J., F. Hirose, and A. Hasegawa, 2009, Seismotectonics beneath the Tokyo
28 metropolitan area, Japan: Effect of slab-slab contact and overlap on seismicity,
29 *J. Geophys. Res.*, **114**, B08309, doi:10.1029/2008JB006101.
- 30 Okada, Y., 1992, Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space,

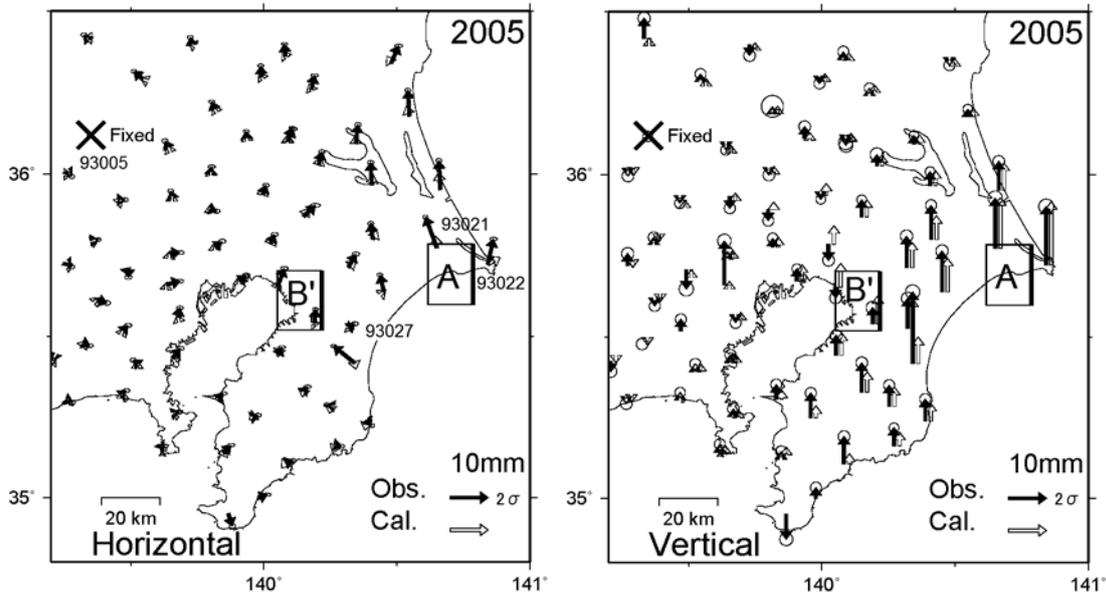
- 1 Bull . Seism. Soc. Am., **82**, 1018-1040.
- 2 岡田義光, 2006, 2005/7/23 千葉県付近の地震 (M6.0), 地震予知連絡会会報, **75**, 228-232.
- 3 Ozawa, S., 2014, Shortening of recurrence interval of Boso slow slip events in Japan,
4 Geophys. Res. Lett., **41**, 2762–2768, doi:10.1002/2014GL060072.
- 5 Ozawa, S., S. Miyazaki, Y. Hatanaka, T. Imakiire, M. Kaidzu, and M. Murakami,
6 2003, Characteristic silent earthquakes in the eastern part of the Boso
7 peninsula, Central Japan, Geophys. Res. Lett., **30**(6), 1283,
8 doi:10.1029/2002GL016665.
- 9 Ozawa, S., T. Nishimura, H. Munekane, H. Suito, T. Kobayashi, M. Tobita, and T.
10 Imakiire, 2012, Preceding, coseismic, and postseismic slips of the 2011 Tohoku
11 earthquake Japan, J. Geophys. Res., **117**, B07404, doi:10.1029/2011JB009120.
- 12 Press, W. H., S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, 1993, Numerical
13 Recipes in C [日本語版], 技術評論社, 685pp.
- 14 Sato, T., K. Imanishi, N. Kato, and T. Sagiya, 2004, Detection of a slow slip event
15 from small signal in GPS data, Geophys. Res. Lett., **31**, L05606,
16 doi:10.1029/2004GL019514.
- 17 Suito, H., T. Nishimura, M. Tobita, T. Imakiire, and S. Ozawa, 2011, Interplate fault
18 slip along the Japan Trench before the occurrence of the 2011 off the Pacific
19 coast of Tohoku earthquake as inferred from GPS data, Earth Planets Space,
20 **63**, 615–619, doi:10.5047/eps.2011.06.053.
- 21 宇津徳治, 1987, 地震の事典, 朝倉書店, 243-244.
- 22 Wessel, P. and W. H. F. Smith, 1998, New, improved version of the Generic Mapping
23 Tools released, EOS Trans. AGU, **79**, 579.
- 24 Yabuki, T. and M. Matsu'ura, 1992, Geodetic data inversion using a Bayesian
25 information criterion for spatial distribution of fault slip, Geophys. J. Int., **109**,
26 363-375.
- 27 山本剛靖, 2005, 地殻変動解析支援プログラムの開発, 気象研究所技術報告, **46**, 156-159.



1
 2 Fig. 1. Detrended observed displacements (black arrows) and theoretical
 3 displacements (white arrows) calculated for the slip on the rectangular fault plane
 4 A.

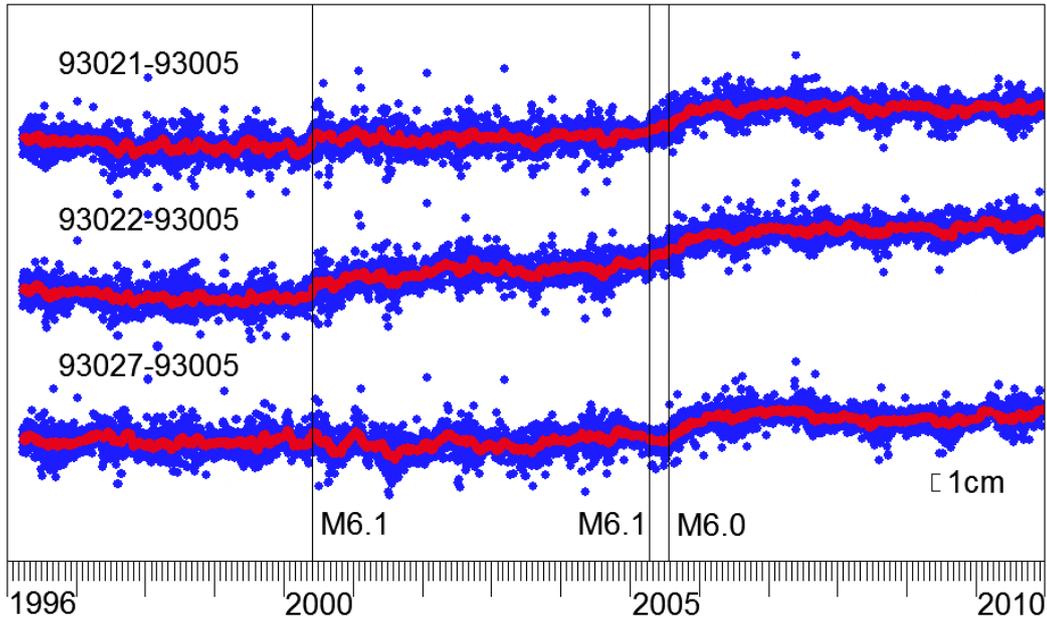
5 Detrended horizontal and vertical displacements were measured between
 6 January 2000 and January 2001. Ellipses indicate the two standard deviations of
 7 the observed displacements. Displacement at the GNSS reference point (station
 8 93005) has been subtracted from each data point. The thick line in each rectangle
 9 indicates the upper edge of the fault. Source parameters are shown in Table 1. The
 10 large rectangle in the right figure bounds the area within which displacements were
 11 used for inversion.

12
 13 2枚で横14cm程度 (2段幅よりやや小) (白黒)



1
 2 Fig. 2. Detrended observed displacements (black arrows) and theoretical
 3 displacements (white arrows) calculated for slips on the rectangular fault planes A
 4 and B'.
 5 Detrended horizontal and vertical displacements were measured between January
 6 2005 and January 2006. Ellipses indicate the two standard deviations of the
 7 observed displacements. Displacement at the GNSS reference point (station 93005)
 8 has been subtracted from each data point. The thick line in each rectangle indicates
 9 the upper edge of the fault. Source parameters are shown in Table 1 (Model 2).

10
 11 2枚で横14cm程度 (2段幅よりやや小) (白黒)



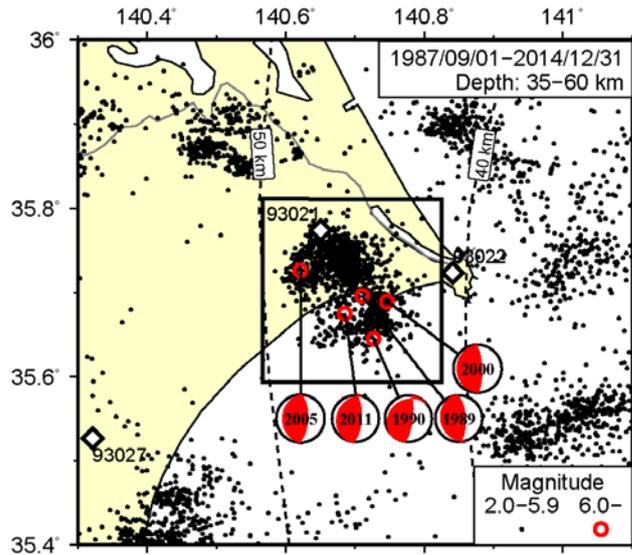
1

2 Fig. 3. Elevation changes at stations 93021, 93022, and 93027 (relative to station
3 93005) measured from 1996 to 2010.

4 Locations of stations are shown in Fig. 2. Blue and red dots denote daily elevation
5 changes and their 30-day moving median. Vertical lines denote earthquakes of
6 $M \geq 6.0$ in northern Chiba Prefecture.

7

8 横12cm程度 (カラー)



1

2 Fig. 4. Epicentral distribution near Choshi from September 1987 to December 2014.

3 Earthquakes of $M \geq 2.0$ at depths of 35–60 km are shown. Focal mechanisms of

4 earthquakes of $M \geq 6.0$ are shown in lower hemisphere equal-area projection, with

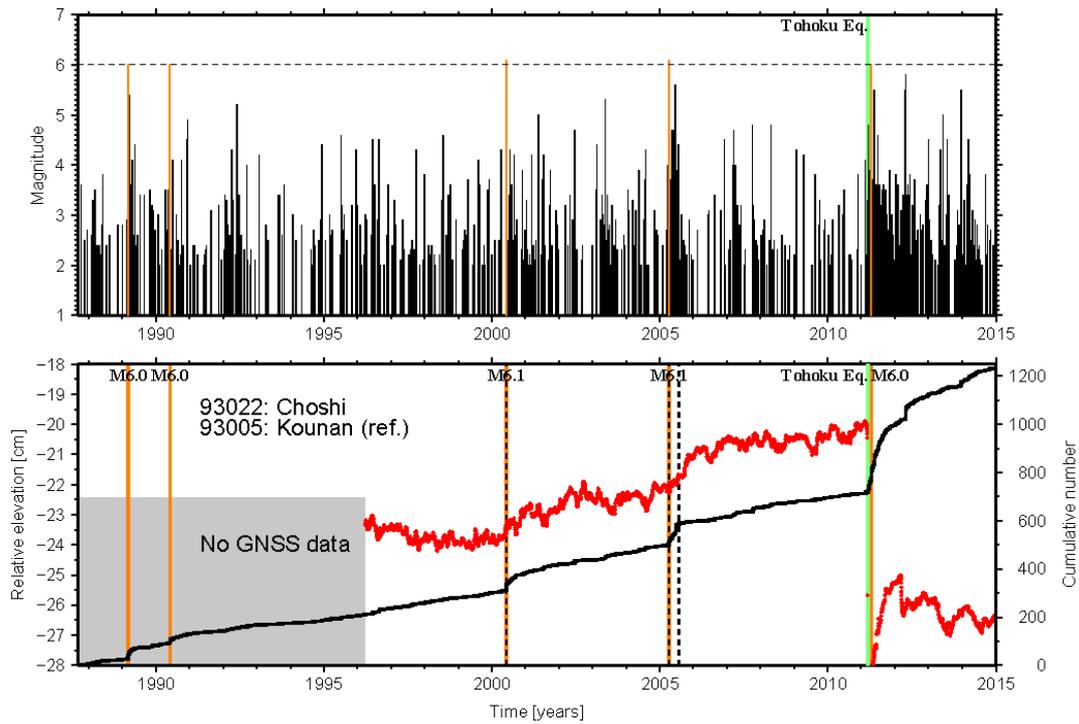
5 their years of occurrence. Numbered open diamonds are locations of GNSS stations.

6 The rectangle marks from which the data for Fig. 5 were derived. Broken lines are

7 isodepth contours at the top of the Pacific slab [Nakajima *et al.* (2009)].

8

9 Fig. 4と5を横に並べて入れば (カラー)



1

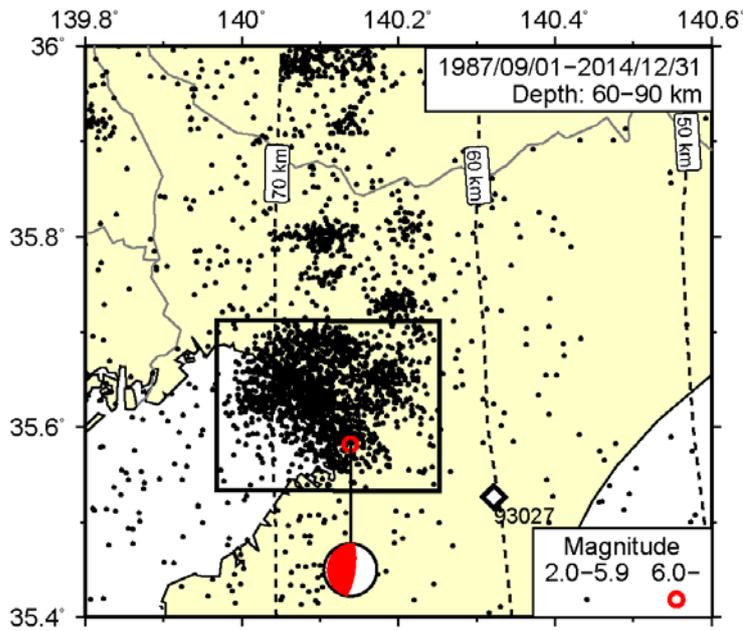
2 Fig. 5. M-T diagram (top) and cumulative number of earthquakes (bottom) near
 3 Choshi (in the rectangle in Fig. 4) from September 1987 to December 2014.

4 Red dots are the 30-day moving median of the change of elevation (left axis) of
 5 station 93022 relative to station 93005. Theoretical offsets caused by the three
 6 earthquakes of vertical dotted lines are subtracted from the change of elevation.
 7 The green line indicates the occurrence time of the 2011 Tohoku-oki earthquake.

8

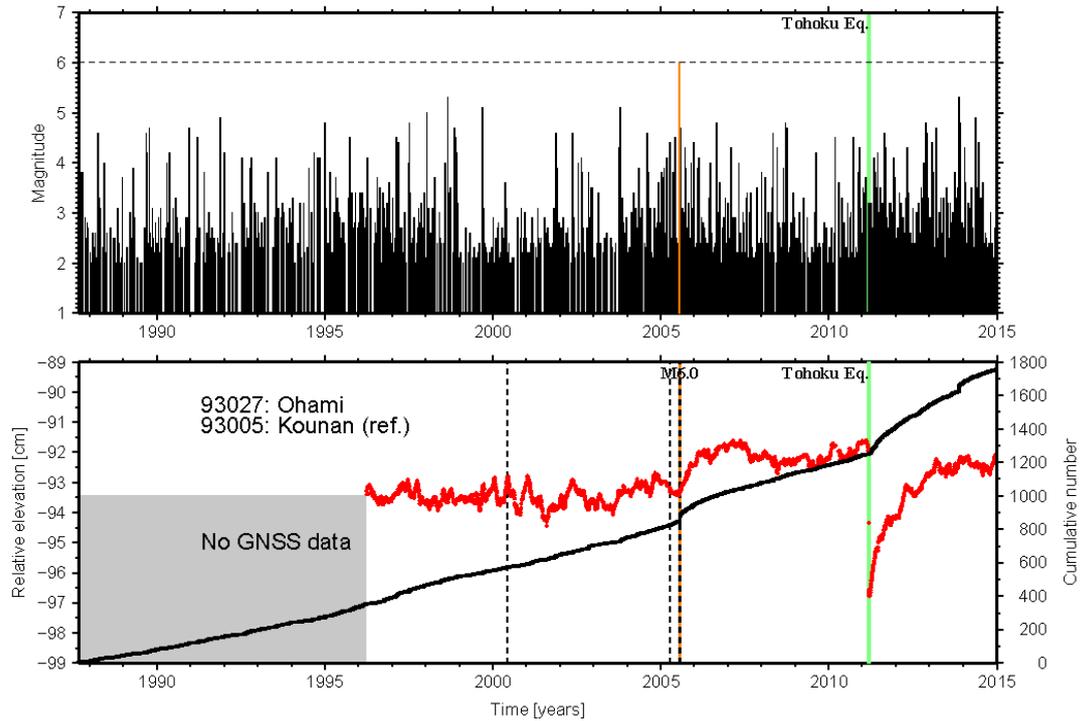
9 Fig. 4と5を横に並べて入れば (カラー)

10



1
 2 Fig. 6. Epicentral distribution near Chiba city for the period from September 1987
 3 to December 2014.
 4 Earthquakes of $M \geq 2.0$ at depths of 60–90 km are shown. The focal mechanism of
 5 the earthquake of $M \geq 6.0$ is shown in lower hemisphere equal-area projection. The
 6 numbered open diamond is the location of the GNSS station. The rectangle marks
 7 from which the data for Fig. 7 were derived. Broken lines are isodepth contours at
 8 the top of the Pacific slab [Nakajima *et al.* (2009)].

9
 10 Fig. 6と7を横に並べて入れば (カラー)



1

2 Fig. 7. M-T diagram (top) and cumulative number of earthquakes (bottom) near
 3 Chiba city (in the rectangle in Fig. 6) from September 1987 to December 2014.

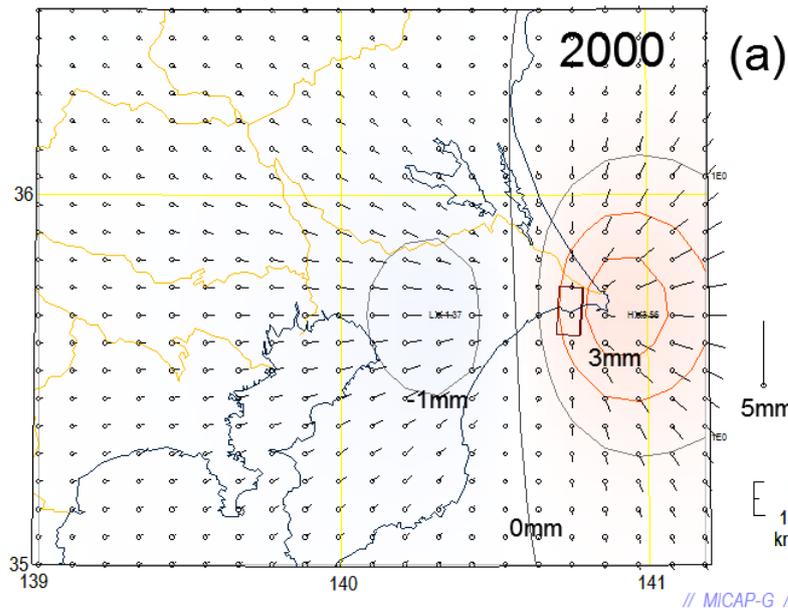
4 Red dots indicate the 30-day moving median of the change of elevation (left axis) of
 5 station 93027 relative to station 93005. Theoretical offsets caused by the three
 6 earthquakes of vertical dotted lines are subtracted from the change of elevation.

7 Green line indicates the occurrence time of the 2011 Tohoku-oki earthquake.

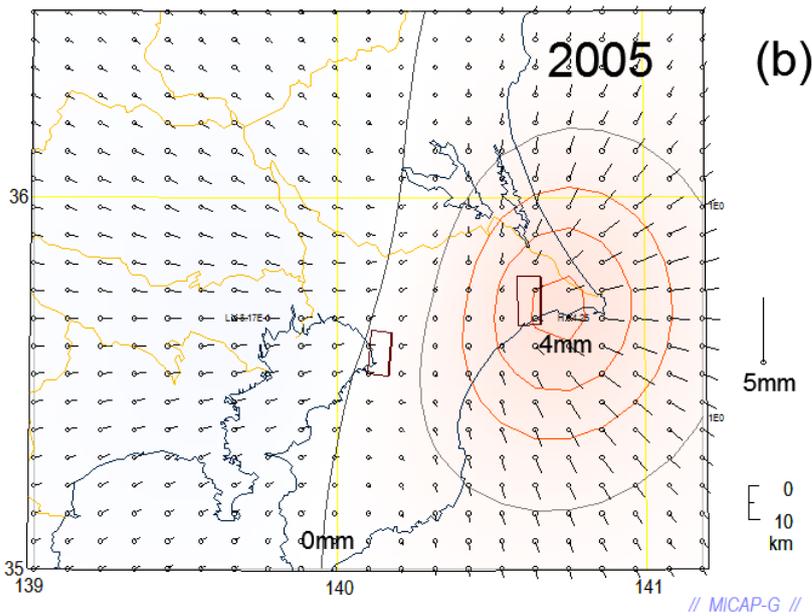
8

9 Fig. 6と7を横に並べて入れば (カラー)

10



1



2

3 Fig. 8. Theoretical crustal deformation caused by earthquakes (a) near Choshi on 3
 4 June, 2000 (M 6.1), and (b) near Choshi on 11 April, 2005 (M 6.1) and near Chiba
 5 city on 23 July, 2005 (M 6.0).

6 Contours and vectors show vertical and horizontal displacements, respectively.

7 Rectangles denote the assumed fault planes (thick lines indicate top of fault plane).

8

9 (a)(b)はそれぞれ1段幅 (縦並びでも横並びでも可能、カラー)

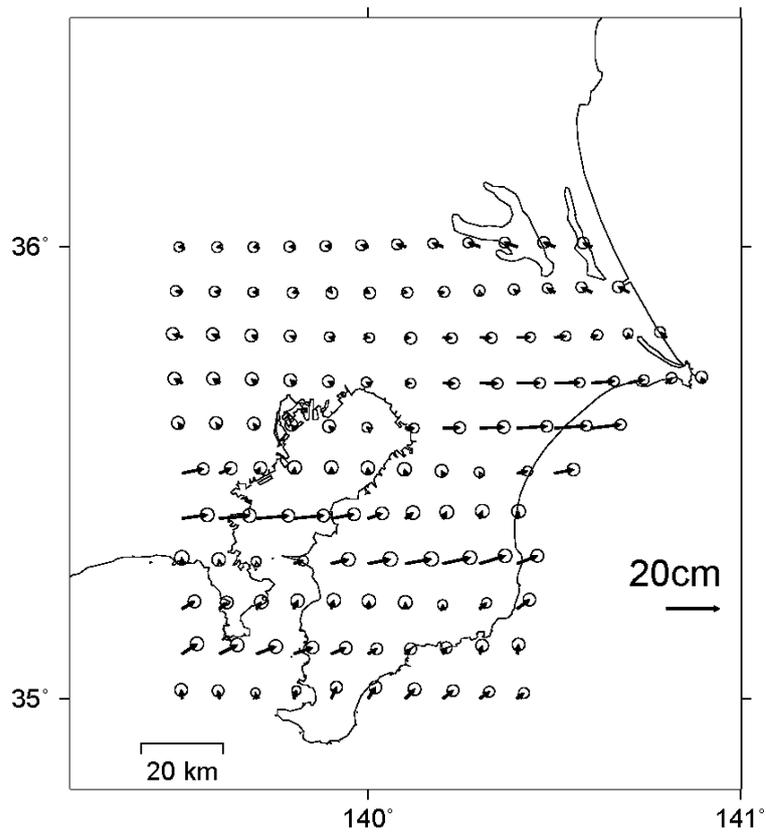
1 Table 1. Source parameters used and results of estimation of slip and magnitude for
 2 the 2000 and 2005 uplifts. For each earthquake, latitude, longitude, depth, length,
 3 width, and strike angle of the rectangular source were fixed.
 4 Mw values without the M6 class earthquakes are also shown. The values of
 5 latitude, longitude, and depth show the location of a northern corner of an upper
 6 edge of a rectangular fault.

		Fixed						Estimated				
	Fault	Lat. (deg)	Lon. (deg)	Dep. (km)	Len. (km)	Wid. (km)	Str. (deg)	Dip. (deg)	Rake (deg)	Slip (mm)	Mw	Mw- M6class
2000	A	35.785	140.787	41	20	17	180	27.2±1.4	81.9±4.4	408.4±23.1	6.43	6.31
2005	(Model 1)											
	A'	35.785	140.787	41	20	17	180	39.9±1.4	102.0±3.2	406.2±18.6	6.43	6.37
	B	35.703	140.217	63	20	20	180	36.5±1.8	72.8±3.9	338.1±19.1	6.42	6.35
	(Model 2)											
	A (fixed)											
	B'	35.703	140.217	63	20	20	180	36.9±1.1	92.4±2.5	436.8±13.8	6.50	6.45

7

8 横2段幅 (白黒)

9



1
 2 Fig. 9. Estimated slip distribution on the Pacific plate to explain crustal
 3 deformations observed during 2005.
 4 Circles at the tips of arrows indicate the estimation errors.
 5
 6 横1段幅 (白黒)