

論 説

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

(Received November 2, 2015; Accepted February 23, 2016; published online on March 18, 2016)

Episodes of intermittent uplift over periods of one month to a year have been observed by the Global Navigation Satellite System in the northeastern part of Chiba Prefecture, Kanto district, Japan. Uplift in the vicinity of Choshi in 2000 was accompanied by the earthquake near Choshi in June 2000 (M 6.1). Uplift of the northeastern part of Chiba Prefecture in 2005 was accompanied by the earthquakes near Choshi in April 2005 (M 6.1) and near Chiba city in July 2005 (M 6.0). Although our estimates of the source parameters for these uplifts were well explained by slips on the faults of these earthquakes, the amounts of slip we estimated for the uplifts were several times larger than we expected from the earthquakes. We attribute the above mentioned intermittent uplift events to aseismic slips on the faults of these earthquakes.

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

§1. はじめに

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（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 (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、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.* (2012)], および一か月ほど前に [Kato *et al.* (2012); Ito *et al.* (2013)] SSEが観測されている。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供する可能性がある。

東北日本では1992年三陸はるか沖の地震 (M 6.9) [Kawasaki *et al.* (1995)], 1994年三陸はるか沖地震 (M 7.6) [Heki *et al.* (1997)] や2003年十勝沖地震 (M 8.0) [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) 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 (M 6.4) 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上面の地震につい

* 〒305-0052 つくば市長峰1-1

でも見られるのだろうか。

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(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5mm程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が指摘されている[廣瀬・他(2000)]。

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。

§2. GNSS および地震データ

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 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、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 [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 *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。年周補正はしていない。

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、上下変位にはその活動の影響はほとんど見られず、銚子付近に1.5cm程度の隆起が見られる。2006年1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1cm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1~1.5cmのまとまった隆起が見られる。江南(93005)に対する干潟(93021)、銚子(93022)、大網白里(93027)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、Fig. 3 でも2000年頃に銚子、干潟で1.5cmほどの相対的隆起、2005年頃に銚子、干潟、大網白里で1~1.5cmの相対的隆起が見られる。江南を他の観測点に変更しても Fig. 3 と同様の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。

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35~60km、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、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、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年間にM6以上の地震が5回(1989年3月6日M6.0、1990年6月1日M6.0、2000年6月3日M6.1、2005年4月11日M6.1、2011年4月21日M6.0)発生している。M6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数積算図からわかる。銚子西側の震源の深さは45~50kmであり、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いない。気象庁により発震機構解(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境界の地震であると考えられる。

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。太平洋プレート上面の深さを含む

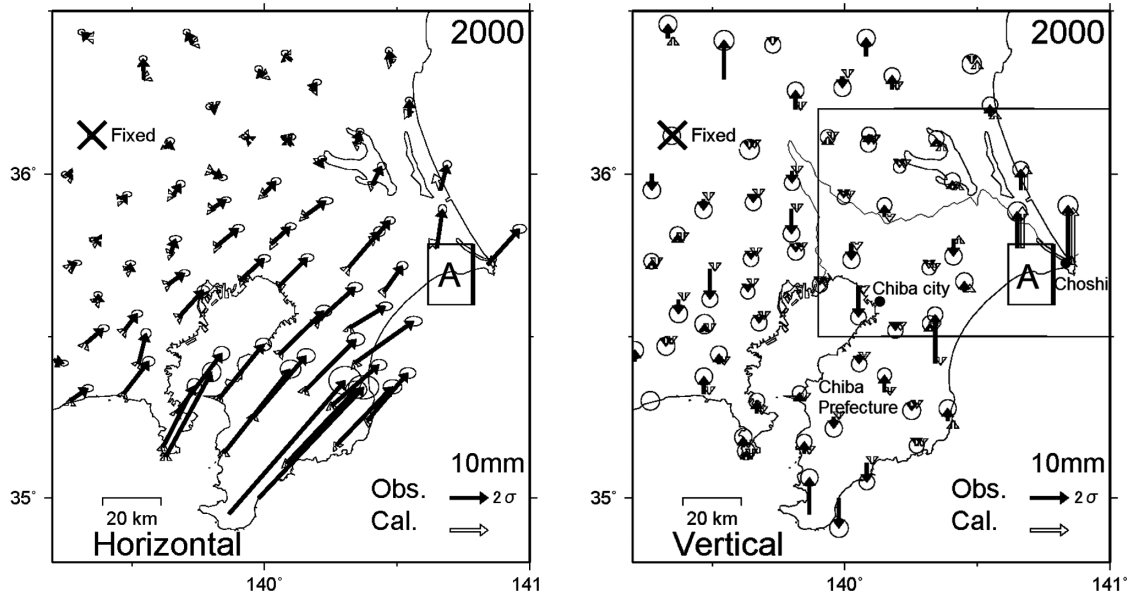


Fig. 1. Detrended observed displacements (black arrows) and theoretical displacements (white arrows) calculated for the slip on the rectangular fault plane A. Detrended horizontal and vertical displacements were measured between January 2000 and January 2001. Ellipses indicate the two standard deviations of the observed displacements. Displacement at the GNSS reference point (station 93005) has been subtracted from each data point. The thick line in each rectangle indicates the upper edge of the fault. Source parameters are shown in Table 1. The large rectangle in the right figure bounds the area within which displacements were used for inversion.

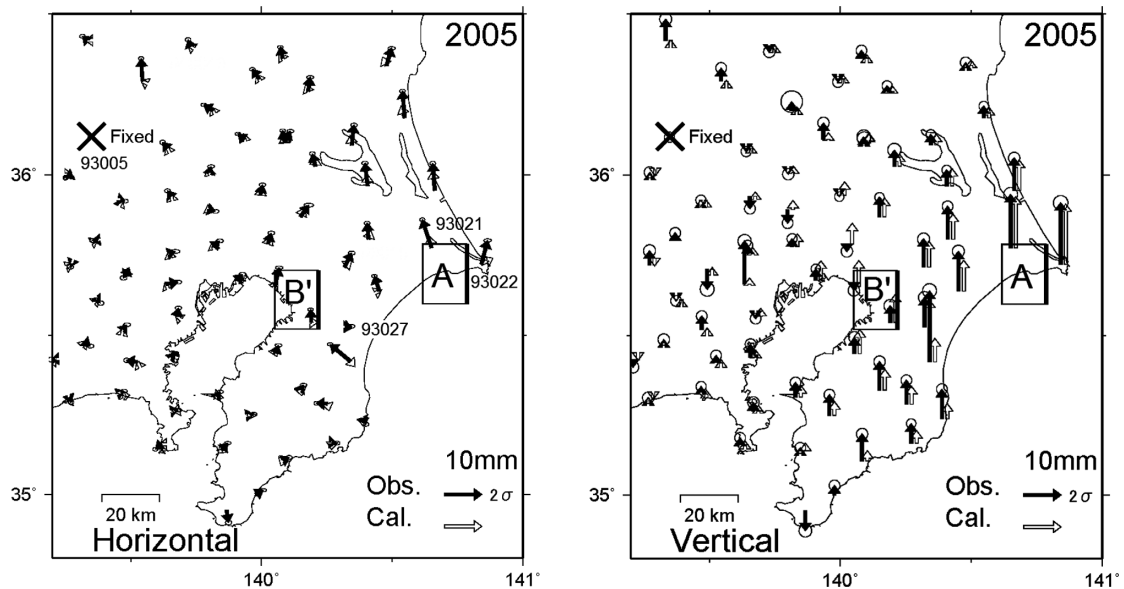


Fig. 2. Detrended observed displacements (black arrows) and theoretical displacements (white arrows) calculated for slips on the rectangular fault planes A and B'. Detrended horizontal and vertical displacements were measured between January 2005 and January 2006. Ellipses indicate the two standard deviations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

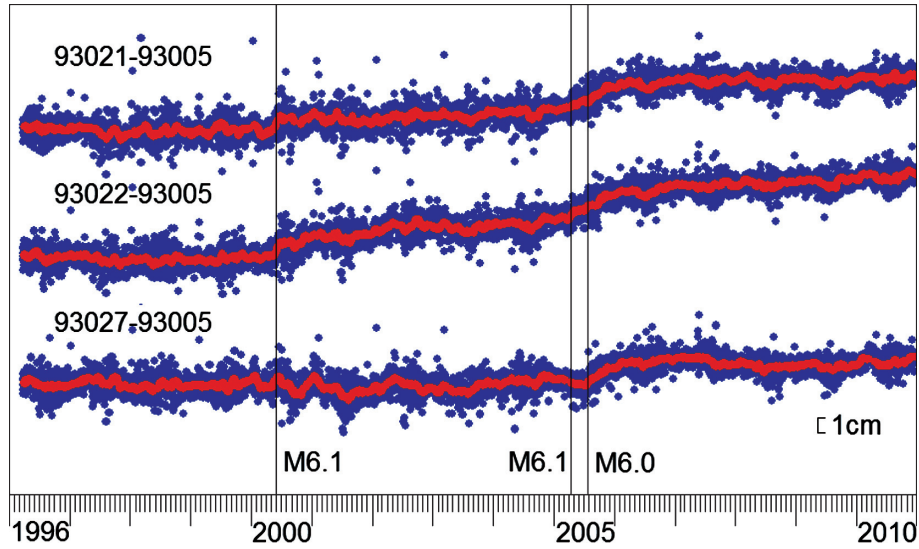


Fig. 3. Elevation changes at stations 93021, 93022, and 93027 (relative to station 93005) measured from 1996 to 2010.

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

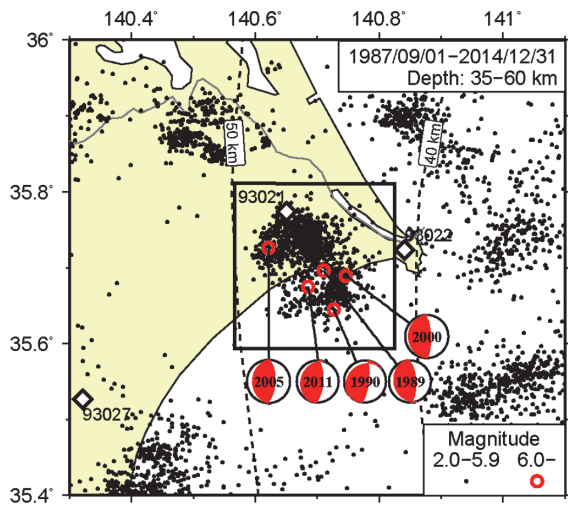


Fig. 4. Epicentral distribution near Choshi from September 1987 to December 2014.

Earthquakes of $M \geq 2.0$ at depths of 35–60 km are shown. Focal mechanisms of earthquakes of $M \geq 6.0$ are shown in lower hemisphere equal-area projection, with their years of occurrence. Numbered open diamonds are locations of GNSS stations. The rectangle marks from which the data for Fig. 5 were derived. Broken lines are isodepth contours at the top of the Pacific slab [Nakajima *et al.* (2009)].

深さ 60~90 km, マグニチュードは 2.0 以上とした。千葉市付近 (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) の比高変化を

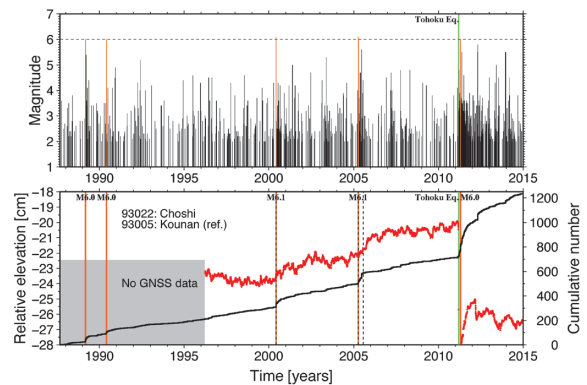


Fig. 5. M-T diagram (top) and cumulative number of earthquakes (bottom) near Choshi (in the rectangle in Fig. 4) from September 1987 to December 2014.

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

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 年 7 月 23 日 $M 6.0$) 発生している。

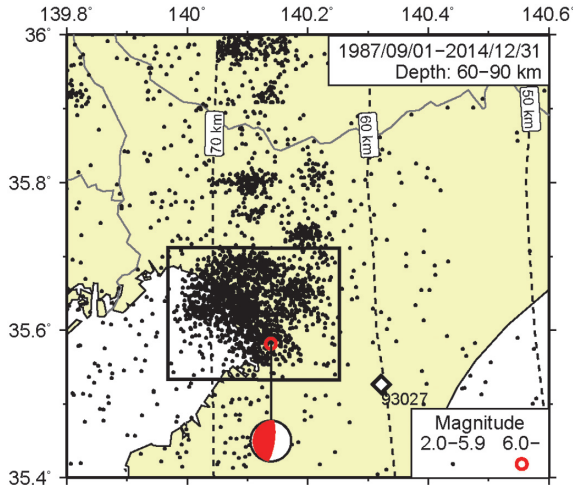


Fig. 6. Epicentral distribution near Chiba city for the period from September 1987 to December 2014.

Earthquakes of $M \geq 2.0$ at depths of 60–90 km are shown. The focal mechanism of the earthquake of $M \geq 6.0$ is shown in lower hemisphere equal-area projection. The numbered open diamond is the location of the GNSS station. The rectangle marks from which the data for Fig. 7 were derived. Broken lines are isodepth contours at the top of the Pacific slab [Nakajima *et al.* (2009)].

千葉市付近の震源の深さは60~75 kmであり, 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, プレート境界の地震であると考えられている [気象庁 (2005)].

§ 3. 変動源の推定と議論

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 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.

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, 半無限弾性体中の矩形断層による式 [Okada

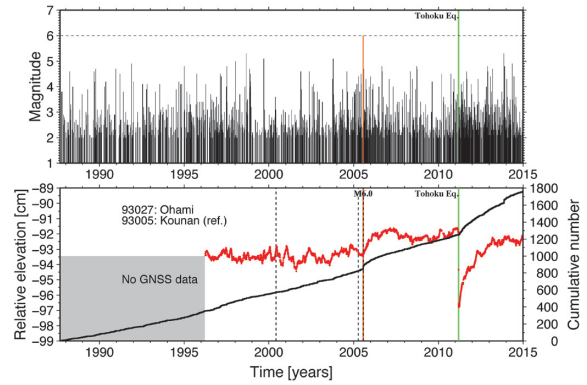


Fig. 7. M-T diagram (top) and cumulative number of earthquakes (bottom) near Chiba city (in the rectangle in Fig. 6) from September 1987 to December 2014.

Red dots indicate the 30-day moving median of the change of elevation (left axis) of station 93027 relative to station 93005. Theoretical offsets caused by the three earthquakes of vertical dotted lines are subtracted from the change of elevation. Green line indicates the occurrence time of the 2011 Tohoku-oki earthquake.

(1992)] により計算したものを Fig. 8a に示す. 走向, 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, 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. 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 3mm 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 4mm を超えることはなく, GNSS で観測された 1.5cm ほどの隆起 (Fig. 1) を地震のみで説明できない.

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. 上下成分の大きさは銚子付近で最大 4mm 程度である. 銚子付近の最大余震は6月20日の $M 5.6$, 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 5mm を超えることはなく, GNSS で観測された隆起量 1~1.5cm を説明できない.

地震活動から計算される上下変位量では観測された変

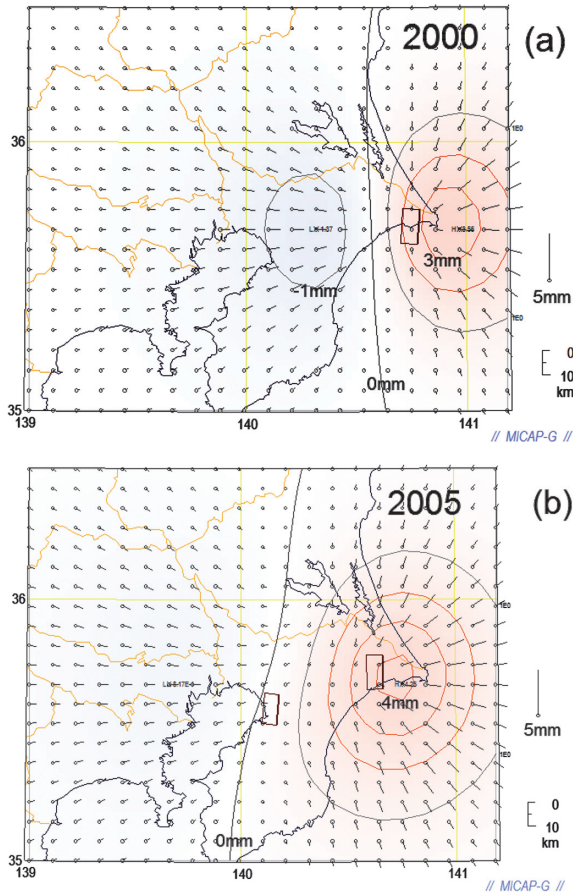


Fig. 8. Theoretical crustal deformation caused by earthquakes (a) near Choshi on 3 June, 2000 (M 6.1), and (b) near Choshi on 11 April, 2005 (M 6.1) and near Chiba city on 23 July, 2005 (M 6.0). Contours and vectors show vertical and horizontal displacements, respectively. Rectangles denote the assumed fault planes (thick lines indicate top of fault plane).

位量を説明できず、さらに比高変化の時系列 (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ことは言えない。

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。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 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, 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 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 M 6 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, すべりの規模 (M_w), および M 6 クラスの地震を除いたすべりの規模を Table 1 に示す。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。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)。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 度大きい (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地震ではないことも考えられる。

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、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層面 B' におけるすべりが発生したとしても説明

Table 1. Source parameters used and results of estimation of slip and magnitude for the 2000 and 2005 uplifts. For each earthquake, latitude, longitude, depth, length, width, and strike angle of the rectangular source were fixed.

Mw values without the M6 class earthquakes are also shown. The values of latitude, longitude, and depth show the location of a northern corner of an upper edge of a rectangular fault.

	Fault	Fixed						Estimated				
		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

できる。すべりの規模は、いずれも発生した 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 相当、2005 年の千葉市付近で Mw 6.5 相当である (Table 1)。

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。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を試みた。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 [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 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 6mm ほどで、観測値 (15mm) 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ったまま上下変位を大きくできなかったものと考えられる。このため、千葉市付近の変動源については、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についても検討し

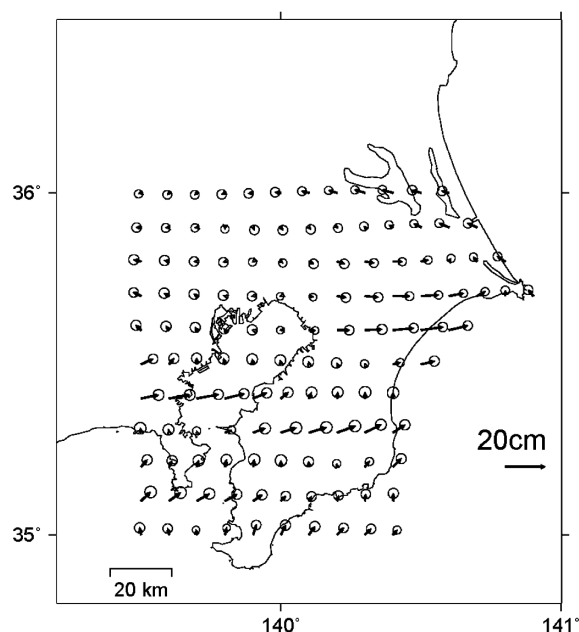


Fig. 9. Estimated slip distribution on the Pacific plate to explain crustal deformations observed during 2005.

Circles at the tips of arrows indicate the estimation errors.

たが、いずれの格子点でも誤差を上回る解が得られず、フィリピン海プレート上面のすべりの可能性は低いと考えられる。

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 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 月に発生した東北地方太平洋沖

地震の余効変動が大きいと、銚子付近の地震に関連した非定常変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、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は不明である。

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M5.3の地震が発生している。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。

銚子付近と千葉市付近の地震活動はともに、木村(2010)により太平洋プレート上面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頻度に目立った時間的变化がなく、M5.5以上の地震は2011年4月の茨城県南部M5.9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かった。

§4. まとめ

2000年6月の銚子付近の地震(M6.1)と同時期に、銚子付近を中心に1か月から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月の銚子付近の地震(M6.1)および2005年7月の千葉市付近の地震(千葉県中部, M6.0)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。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、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、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性すべりが観測されていた。

謝 辞

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、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、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 Smith (1998)] および MICAP-G [内藤・吉川 (1999); 山本 (2005)] を用いました。

以上、記して感謝します。

文 献

- 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, D108-007.
- Heki, K., S. Miyazaki, and H. Tsuji, 1997, Silent fault slip following an interplate thrust earthquake at the Japan Trench, *Nature*, **386**, 595-598.
- 弘瀬冬樹・中島淳一・長谷川 昭, 2008, Double-Difference Tomography 法による関東地方の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* **2**, **60**, 123-138.
- 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.
- 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 ?, 日本地震学会講演予稿集, P140.
- 広瀬一聖・川崎一朗・岡田義光・鷲谷 威・田村良明, 2000, 1989年12月東京湾サイレント・アースクエイクの可能性, *地震* **2**, **53**, 11-23.
- Ito, Y., R. Hino, M. Kido, H. Fujimoto, Y. Osada, D. Inazu, Y. Ohta, T. Iinuma, M. Ohzono, S. Miura, M. Mishina, K. Suzuki, T. Tsuji, and J. Ashi, 2013, Episodic slow slip events in the Japan subduction zone before the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Tectonophysics*, **600**, 14-26, doi:10.1016/j.tecto.2012.08.022.
- 岩下知真子・梅沢 武・川元智司・野神 憇・畑中雄樹・石倉信広, 2009, GPS 連続観測システム (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手法について, *国土地理院時報*, **118**, 23-30.
- Kaidzu, M., T. Nishimura, M. Murakami, S. Ozawa, T. Sagiya, H. Yarai, and T. Imakiire, 2000, Crustal deformation associated with crustal activities in the northern Izu-islands area during summer, 2000, *Earth Planets Space*, **52**, ix-xviii.
- Kato, A., K. Obara, T. Igarashi, H. Tsuruoka, S. Nakagawa, and N. Hirata, 2012, Propagation of slow slip leading up to the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake, *Science*, **335**, 705-708, doi:10.1126/science.1215141.
- Kawasaki, I., Y. Asai, Y. Tamura, T. Sagiya, N. Mikami, Y. Okada, M. Sakata, and M. Kasahara, 1995, The 1992

- Sanriku-oki, Japan, ultra-slow earthquake, *J. Phys. Earth*, **43**, 105-116.
- 木村尚紀, 2010, 関東地方の相似地震, 地震予知連絡学会会報, **83**, 596-608.
- 気象庁, 2005, 平成17年7月地震・火山月報(防災編), 69pp.
- 国土地理院corr30.dat<<http://mekira.gsi.go.jp/JAPANESE/corr30.dat>>, (参照2015-2-16).
- 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, *国土地理院時報*, **103**, 2-51.
- Matsu'ura, M. and Y. Hasegawa, 1987, A maximum likelihood approach to nonlinear inversion under constraint, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **47**, 179-187.
- Miyazaki, S., P. Segall, J. Fukuda, and T. Kato, 2004, Space time distribution of afterslip following the 2003 Tokachi-oki earthquake: Implications for variations in fault zone frictional properties, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L06623, doi:10.1029/2003GL019410.
- 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.
- 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*, **52**, 101-104.
- 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.
- 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年合同大会予稿集, Da-009.
- Nakajima, J., F. Hirose, and A. Hasegawa, 2009, Seismotectonics beneath the Tokyo metropolitan area, Japan: Effect of slab-slab contact and overlap on seismicity, *J. Geophys. Res.*, **114**, B08309, doi:10.1029/2008JB006101.
- Okada, Y., 1992, Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **82**, 1018-1040.
- 岡田義光, 2006, 2005/7/23 千葉市付近の地震 (M 6.0), 地震予知連絡学会会報, **75**, 228-232.
- Ozawa, S., 2014, Shortening of recurrence interval of Boso slow slip events in Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 2762-2768, doi:10.1002/2014GL060072.
- Ozawa, S., S. Miyazaki, Y. Hatanaka, T. Imakiire, M. Kaidzu, and M. Murakami, 2003, Characteristic silent earthquakes in the eastern part of the Boso peninsula, Central Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **30** (6), 1283, doi:10.1029/2002GL016665.
- Ozawa, S., T. Nishimura, H. Munekane, H. Suito, T. Kobayashi, M. Tobita, and T. Imakiire, 2012, Preceding, coseismic, and postseismic slips of the 2011 Tohoku earthquake Japan, *J. Geophys. Res.*, **117**, B07404, doi:10.1029/2011JB009120.
- Press, W. H., S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, 1993, *Numerical Recipes in C* [日本語版], 技術評論社, 685pp.
- Sato, T., K. Imanishi, N. Kato, and T. Sagiya, 2004, Detection of a slow slip event from small signal in GPS data, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L05606, doi:10.1029/2004GL019514.
- Suito, H., T. Nishimura, M. Tobita, T. Imakiire, and S. Ozawa, 2011, Interplate fault slip along the Japan Trench before the occurrence of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake as inferred from GPS data, *Earth Planets Space*, **63**, 615-619, doi:10.5047/eps.2011.06.053.
- 宇津徳治, 1987, 地震の事典, 朝倉書店, 243-244.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith, 1998, New, improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. AGU*, **79**, 579.
- Yabuki, T. and M. Matsu'ura, 1992, Geodetic data inversion using a Bayesian information criterion for spatial distribution of fault slip, *Geophys. J. Int.*, **109**, 363-375.
- 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.