

## 1 2 - 7 プレート境界における微動とスロースリップに関する産総研地下水等総合観測による最近の成果

### Recent results about tremors and episodic slow slips on the plate boundary obtained from the integrated groundwater observation of Geological Survey of Japan, AIST

産業技術総合研究所

Geological Survey of Japan, AIST

#### 1. はじめに

東南海・南海地震予測精度向上のために、産総研（産業技術総合研究所）は、2006年度から多機能の地下水等総合観測点の整備を開始し、2008年度末までに12点の整備を終え、さらに2点を構築中である（第1図）。過去の南海地震前に、深い地下水や浅い地下水の両方で水位等が低下したことと、1944年東南海地震前には掛川で異常な地殻変動があったとされること、それらが、前兆すべり（地震直前の本震域周辺におけるゆっくりすべり）による地殻変動である程度説明できることから、新規観測点では、1点毎に3深度の井戸を作成して地下水・地殻変動・地震の観測を行ない（第2図）、リアルタイムで産総研にデータを送っている。プレート境界のモニタリングのために、短期的スロースリップ（短期的SSE）および深部低周波微動の解析にも力をいれている。本稿では、鉛直地震計アレイを用いた深部低周波微動モニタリングの高度化、2009年2月の愛知県(TYE・TYS)での地殻歪変化と短期的SSEのモデル推定、紀伊半島における短期的SSE検出の3課題について報告する。

#### 2. 結果

##### 2-1. 鉛直地震計アレイを用いた深部低周波微動モニタリングの高度化

深部低周波微動による信号は微弱でS/Nが悪く、規模の小さな活動を捉えるのは一般に困難である。産総研新規観測点における鉛直地震計アレイ（第2図）でセンブランス解析を行うことにより、地上からのノイズ信号と地下からの信号の識別が可能となる。第3図の横軸は時間で、縦軸は速度（地中から地表の向きが正）を表わす。ここでのセンブランス解析に於いて、信号は真下からくるものと仮定している。第3-a図に示すように、観測点付近で微動活動があった際には、S波速度（本例では約2.6km/s）をもつ地中からの信号が明瞭に観測され、これは微動によるものと考えられる。一方、第3-b図に示すように地表からのノイズが大きくなると（本例では台風上陸時）、負の速度成分が顕著になり、微動による信号との識別が可能となる。また、第3-c図のように、観測点から離れた微動活動の際には、信号は斜め下方向から入射することになり、高速度成分まで分布する。これにより、観測点からの微動震源と距離を見積もることができる可能性がある。第4-a図は、エンベロープ相関法にて決定した深部低周波微動震央の時空間分布図である。本解析には、防災科研Hi-net、気象庁、東京大学、産総研の観測点のうちS/Nが比較的良いものを26点選んで使用したが、第4-a図では相関が取れたのが26観測点中8点以下（ただし産総研の観測点ICUを含む）だった場合のみをプロットしている。使用する観測点が少なくなるため、台風上陸時には、ノイズによる誤決定を多く含むことになる。第4-b図はICUのセンブランス値を使って、微動信号かノイズかの判別を行い、震源誤決定分を排除したものである。台風上陸時のみが綺麗に排除

されているのが分かる。

## 2-2. 2009年2月の愛知県(TYE・TYS)での地殻歪変化と短期的SSEのモデル推定

産総研の豊橋東観測点(TYE)と豊田下山観測点(TYS)(第1図)において、2009年2月5日から9日までの間に地殻歪変化が観測された(第5~10図)。同時期には、愛知県中央部で深部低周波地震活動が発生していた。

TYEでは、2009年2月6日から9日までの間、水平歪に変化が観測された(第8, 10図)。期間の前半(6日午前~7日昼頃)の主歪場は、北東-南西に伸び、北西-南東に縮みであった。期間の後半(7日昼頃~9日昼頃)の主歪場は、北東-南西に伸び、北西-南東に縮みで、前半よりも変化が大きく、少し時計回りに回転した方向を示す。

TYSでは、2009年2月5日から9日までの間、水平歪・鉛直歪に変化が観測された(第9, 10図)。期間の前半(5日午後~7日昼頃)の主歪場は、北-南に伸び、東-西に縮みであった。期間の後半(7日昼頃~9日昼頃)の主歪場は、全面的な伸びの場だった。鉛直歪は、前半・後半共に縮みだった。図の期間のデータから二次曲線トレンドを推定し、除去している。水平歪4成分の歪変化は完全には整合していないが、その原因の一部は設置直後の大きなトレンドの存在とその除去の不確かさにあると考えている。主歪場の計算にあたっては、水平歪4成分からの平均値を求めて使用している。

第1表の断層パラメータを持つ滑りモデルを仮定して、TYE・TYSでの地殻歪変化を計算し、観測された地殻歪変化と比較を行った(第11図)。前半(2/5-7)・後半(2/7-9)共に大きな矛盾の無い結果である。各研究機関の滑りモデルと低周波地震の位置関係は第12図に示す。第11-12図の断層モデルにおける矢印は下盤の動きを示す。

## 2-3. 紀伊半島における短期的SSE検出

紀伊半島の三重県中部では活発な深部低周波微動が年に数回発生し、微動に伴う短期的SSEの発生が確認されている<sup>1)</sup>。しかし、紀伊半島南部(奈良県南部~和歌山県中部)においては、活発な深部低周波微動が観測されているが、短期的SSEの発生は確認できていなかった<sup>1)</sup>。一方、産業技術総合研究所では、紀伊半島において、2007年よりICUおよびHGMの2点で、2008年よりITA, MYM, KSTの3点で歪や地下水等の観測を順次開始した(第1図)。ITAにはGTSM社製歪計が、その他4点には石井式歪計が600m孔(標準)に埋設されている。ICUおよびMYMにおける観測開始以降の歪・地下水観測結果を第13-14図に示す。第13図のA-Iは、紀伊半島における深部低周波微動活動を示す。

2009年に入ってから4月までの間に4回にわたって深部低周波微動が活発化した(第15図)。1月14日午後~18日には奈良県南部で活発な低周波微動が観測された。同期間の歪観測結果を第16-17図に示す。低周波微動の震央域のプレート形状モデル<sup>2)</sup>を参考にスロースリップイベント(SSE)の断層モデルを仮定し、各観測点で期待される主歪変化を計算した他、水平歪の観測結果から該当期間の主歪を計算した(第18図)。水平歪は4成分あるので、観測結果に支障のない限り、任意の3成分を使って4通りの主歪計算をしている。同様な解析を、2月5日~7日の和歌山県中部での活動、3月20-21日の奈良県南部での活動(トンガで発生した地震(Mw7.6)で誘発された可能性がある活動)、4月13-14日の奈良間南部での活動に対しても行なった。

結果を第19-21図に示す。4月13-14日の活動については、最もノイズレベルの低いICUにおける検出下限程度、すなわち現状の観測網での検出下限のすべりであったと考えられる。2009年に入ってからの一連の活動は、三重県中部でのすべりが小さい事、活動間隔が極めて短い事が特徴である。

2007年7月～2009年4月に紀伊半島で発生した深部低周波微動と短期的SSEについて同様な解析を行なって結果をまとめたものが第22図である。紀伊半島南西部（和歌山県中部）のモーメント解放量が、他地域に比べてやや小さいように思える。

## 謝辞

滑りモデルによる地殻歪変化の計算には、地殻変動解析支援プログラムMICAP-G<sup>3)</sup>及びOkada(1992)<sup>4)</sup>のFortranサブルーチンを使用しました。低周波地震の分布は、気象庁一元化震源リストを使用しました。低周波微動の解析には、産総研、防災科研Hi-net、気象庁、東京大学の観測点の地震計データを使用しました。また、紀伊半島における短期的SSEのモデル計算の歳には、広島大学の低周波微動自動モニタリングシステムの結果<sup>5)</sup>を参考にしました。ここに記して感謝致します。

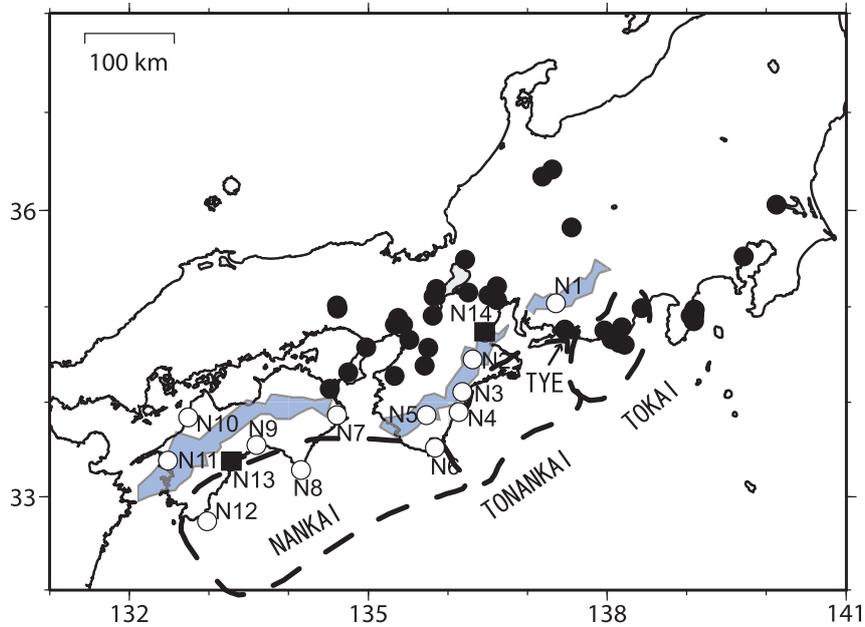
(板場智史・北川有一・武田直人・小泉尚嗣・松本則夫)

## 参考文献

- 1) Obara, K. and H. Hirose Tectonophysics, 417, 33-51, doi:10.1016/j.tecto.2005.04.013, 2006.
- 2) 弘瀬冬樹, 中島淳一, 長谷川昭, 地震2, 60, 1-20, 2007.
- 3) 内藤宏人・吉川澄夫, 地震2, 52, 101-103, 1999.
- 4) Okada, Y., Bull. Seismol. Soc. Am., 82,1018-1040, 1992.
- 5) 広島大学, 低周波微動自動モニタリングシステム (ATMOS),  
<http://tremor.geol.sci.hiroshima-u.ac.jp/>.
- 6) Tamura, Y., T. Sato, M. Ooe and M. Ishiguro, Geophys. J. Int., 104, 507-516, 1991.
- 7) 小林昭夫・山本剛靖・中村浩二・木村一洋, 地震2, 59, 19-27, 2006.
- 8) 気象庁, 地震防災対策強化地域判定会平成21年2月23日定例打合せ会資料, 2009
- 9) 防災科学技術研究所, 地震防災対策強化地域判定会平成21年2月23日定例打合せ会資料, 2009

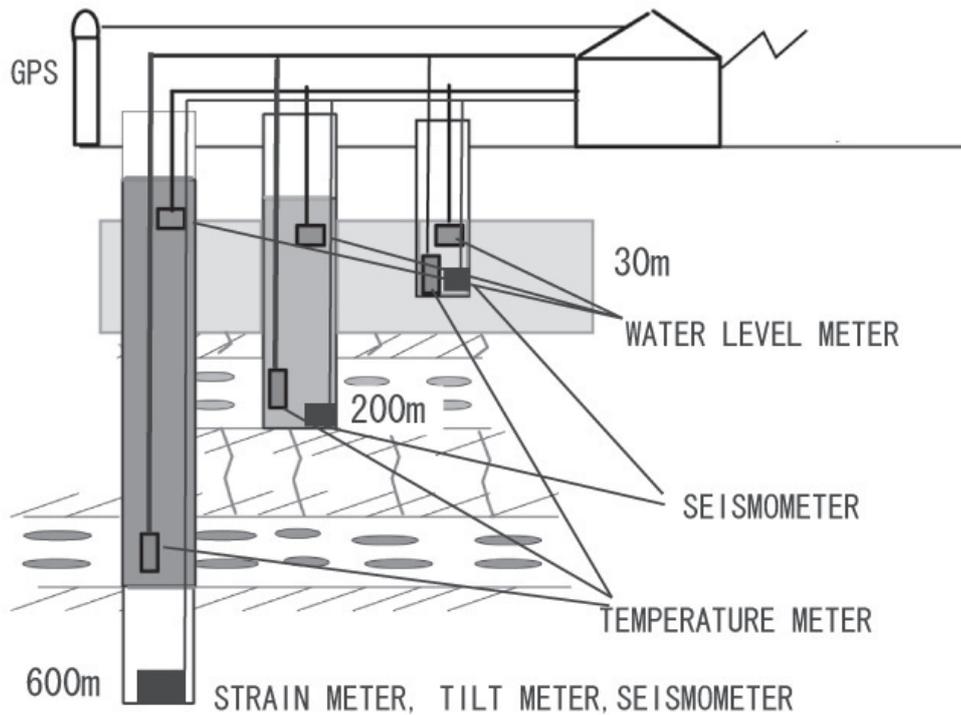
第1表

	Latitude (deg)	Longitude (deg)	Depth (km)	Strike (deg)	Dip (deg)	Rake (deg)	Length (km)	Width (km)	Slip (mm)	Mw
2009/2/5-7	34.9657	137.092	30	289	16	164	18	15	30	5.6
2009/2/7-9	34.912	137.282	30	289	16	164	18	15	40	5.7

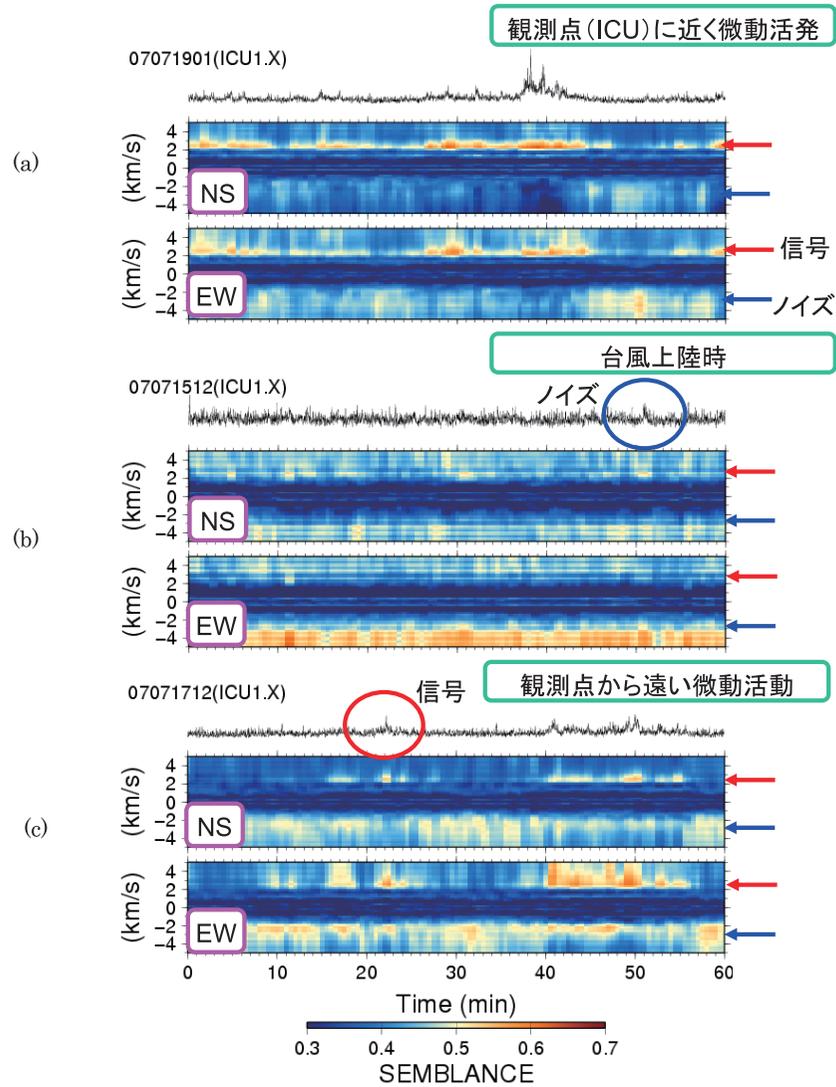


第1図 産総研の地下水等観測網。破線で囲まれた領域は東海・東南海・南海地震の想定震源域を示す。●:2000年以前に作られた観測点, ○ (N1-N12):2006年以降に作られた観測点, ■ (N13-N14): 現在整備を行なっている観測点。灰色の領域は、短期的SSEおよび深部低周波微動が定期的に発生していると考えられる地域。N1:TYE, N2:ITA, N3:MYM, N4:ICU, N5:HGM, N6:KST.

Fig.1 Groundwater observation network of Geological Survey of Japan, AIST. Areas enclosed with broken lines show the anticipated source regions for the Tokai, Tonankai and Nankai earthquakes. Shadow areas denote the places where the tremors and episodic slow slips occur. ●: Stations constructed before 2000. ○(N1-N12): Stations constructed after 2006. ■ (N13-14): Stations under construction. N1:TYE, N2:ITA, N3:MYM, N4:ICU, N5:HGM, N6:KST

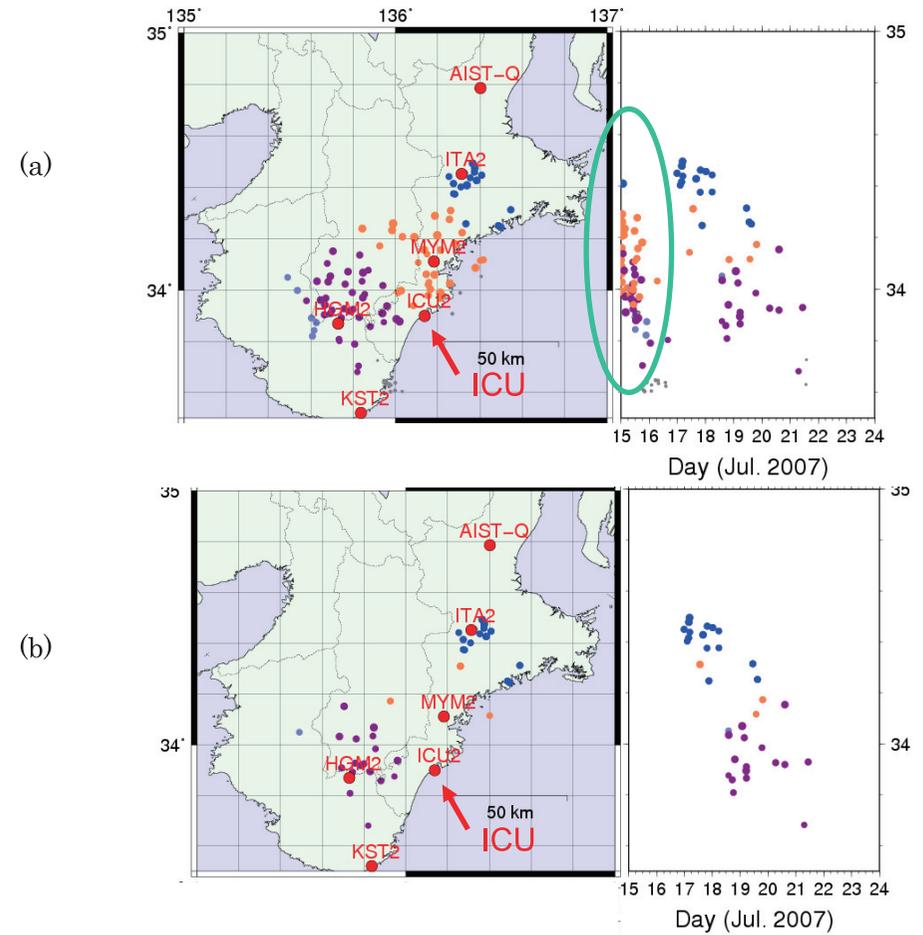


第2図 新規地下水等総合観測点 (N1-N14) における典型的な観測システム。  
Fig.2 Schematic figure of the typical observation system at N1-N14 stations.



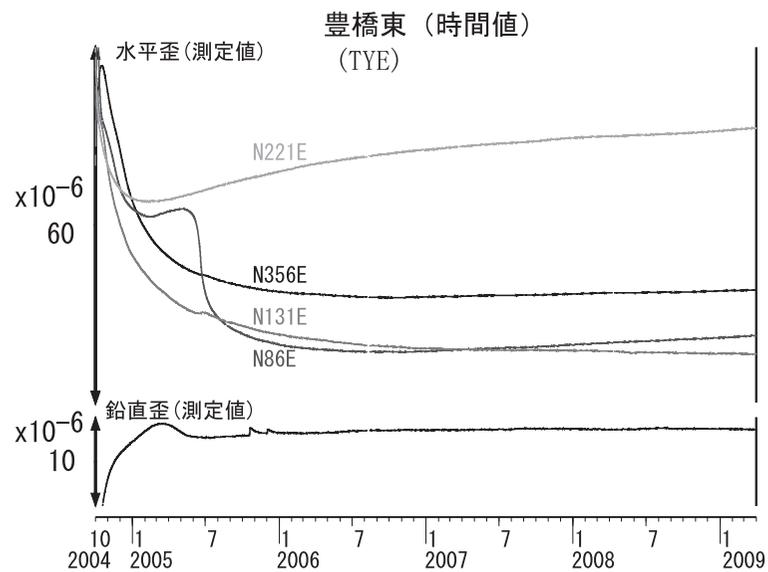
第3図 産総研観測点の鉛直地震計アレイで観測されたセンブランス値の変化。(a)真下で微動が起きている場合、(b)台風等によって地表付近から波がきている場合、(c)観測点から離れた場所で微動が起きている場合。

Fig.3 Examples of semblance analysis by using vertical seismic array. (a) In the case of hypocenter of non-volcanic low-frequency tremors distributed under the station. (b) In the case of some signals from a ground surface caused by a typhoon. (c) In the case of hypocenter of the tremors distributed far from the station.

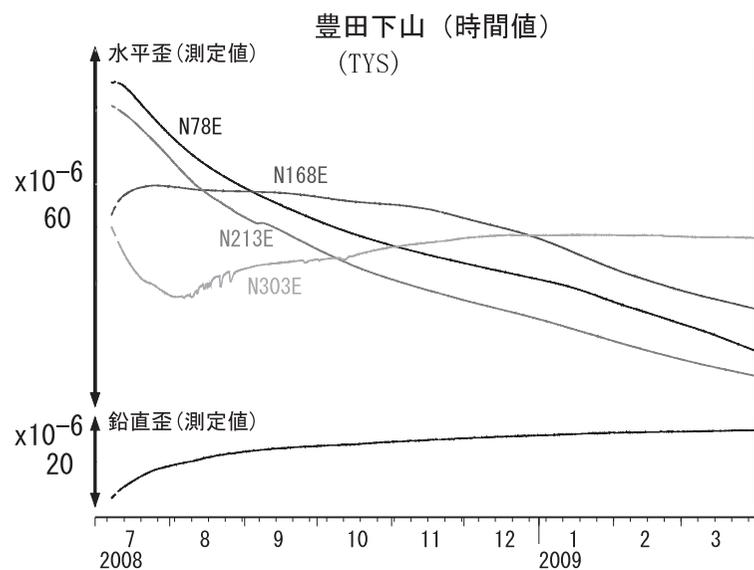


第4図 (a)エンベロープ相関法にて決定した深部低周波微動震央の時空間分布図。丸で囲んだところは、台風によって誤って決定された部分。(b) ICU のセンブランス値を使って、誤決定分を排除したもの。

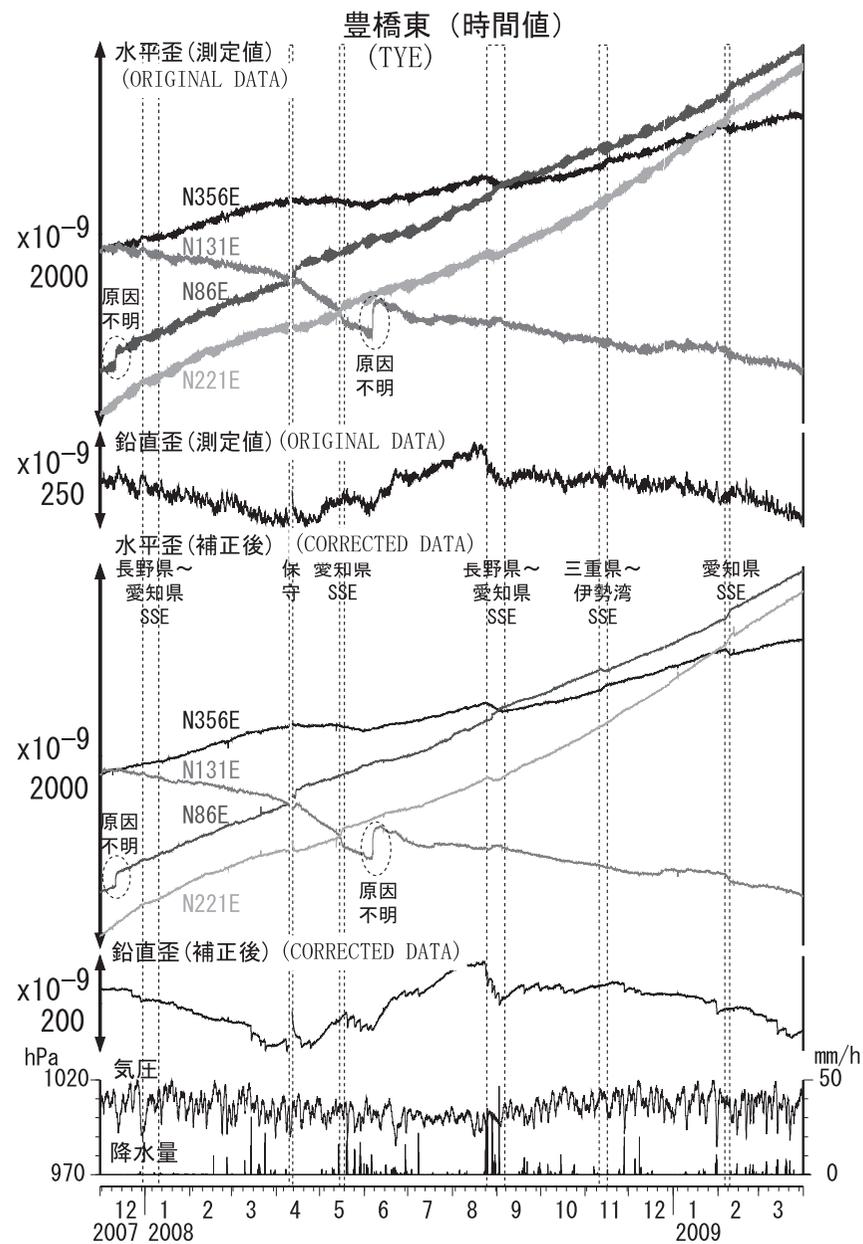
Fig.4 Application of semblance analysis to envelope correlation method. (a) Hypocenter distribution of the tremors determined by the envelope correlation method. The distribution in a green ellipse is a miss-determined result due to an increase of noise level by a typhoon. (b) An applied result of the semblance analysis to a discrimination of the tremor signals and noises.



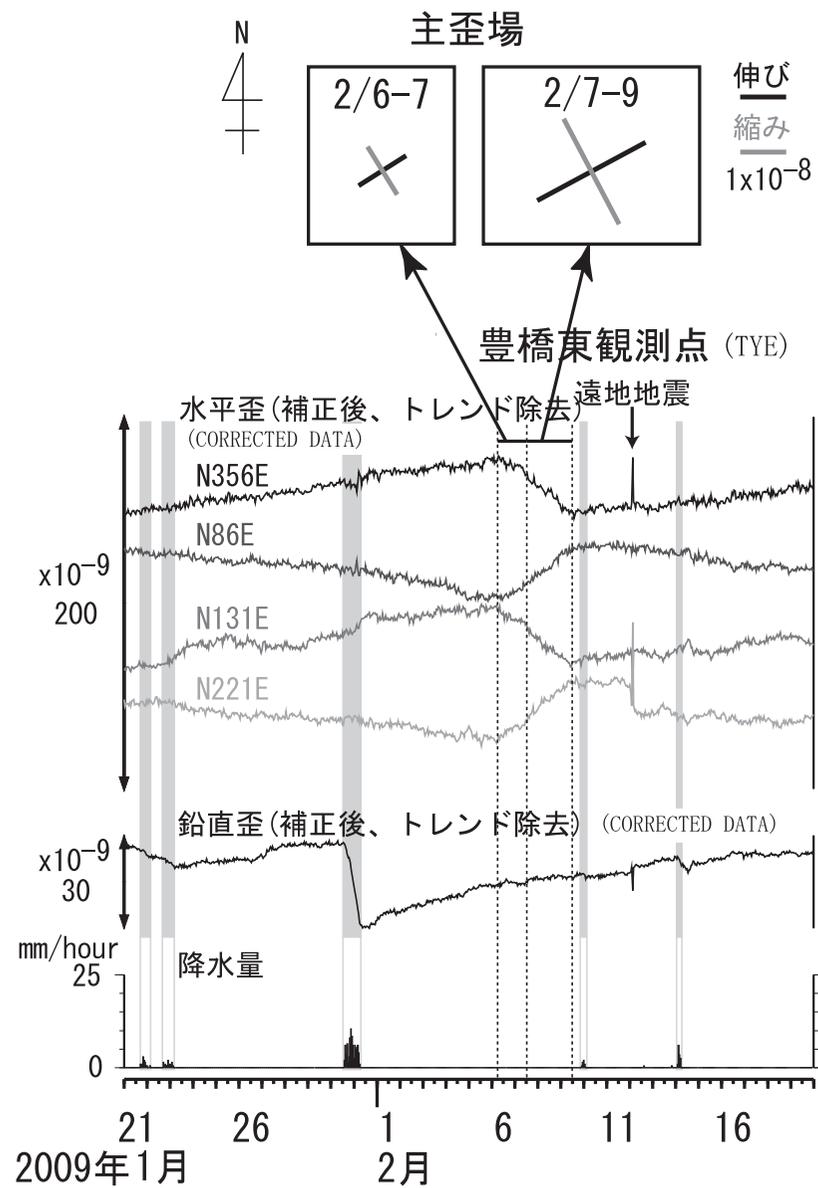
第5図 TYEの観測結果(2004年10月~2009年3月).  
Fig.5 Observational results at TYE from October 2004 to March 2009.



第6図 TYSの観測結果(2008年7月~2009年3月).  
Fig.6 Observational results at TYS from July 2008 to March 2009.

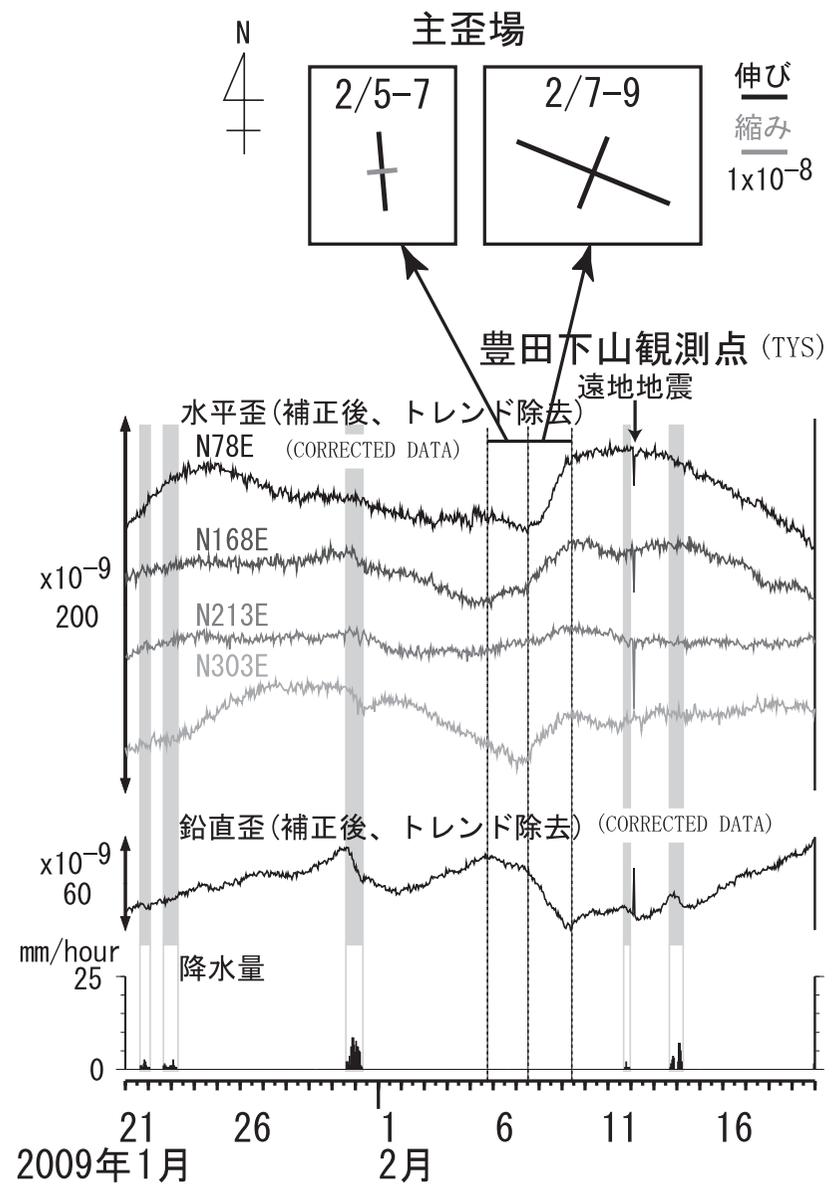


第7図 TYEの観測結果(2007年12月~2009年3月). 補正後とは、潮汐解析プログラム BAYTAP-G<sup>6)</sup>を用いて、潮汐成分と気圧応答成分を除去した結果である。  
Fig.7 Observational results at TYE from December 2007 to March 2009. In the corrected data tidal components and barometric responses are eliminated by use of BAYTAP-G<sup>6)</sup>.



第 8 図 TYE 観測点の観測結果(2009年1月21日~2009年2月19日)。補正後とは、潮汐解析プログラム BAYTAP-G を用いて、潮汐成分と気圧応答成分を除去した結果である。加えて、直線トレンドを除去している。

Fig.8 Observational results at TYE from January 21, 2009 to February 19, 2009. In the corrected data tidal components, barometric responses and linear trends are eliminated.

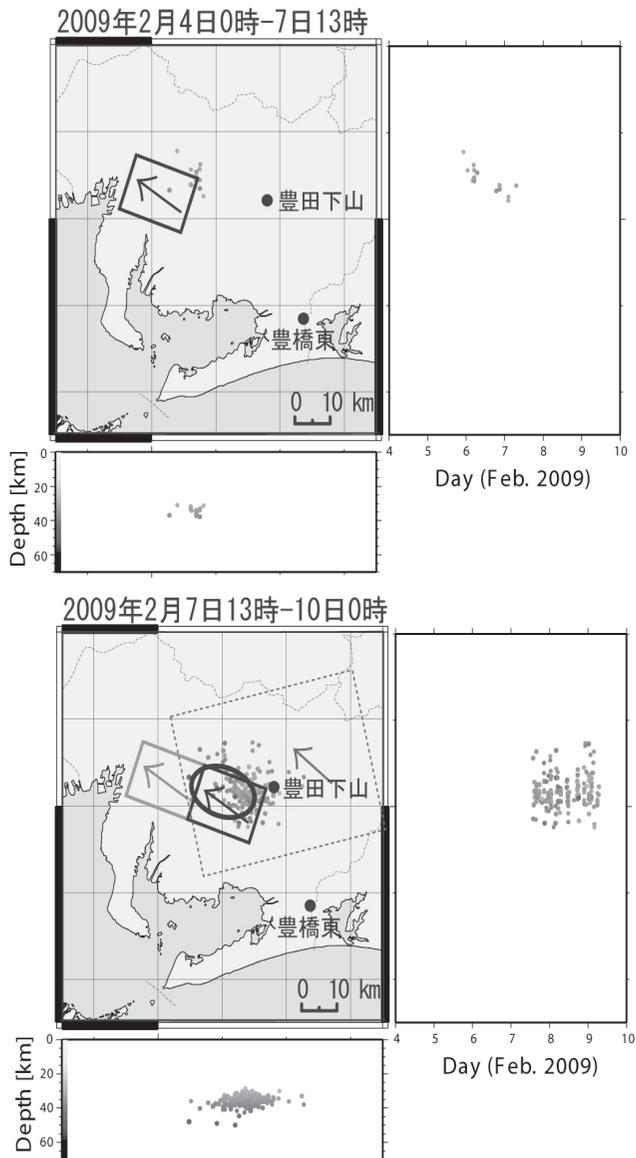


第 9 図 TYS の観測結果(2009年1月21日~2009年2月19日)。補正後とは、潮汐解析プログラム BAYTAP-G を用いて、潮汐成分と気圧応答成分を除去した結果である。加えて、2次曲線トレンドを除去している。

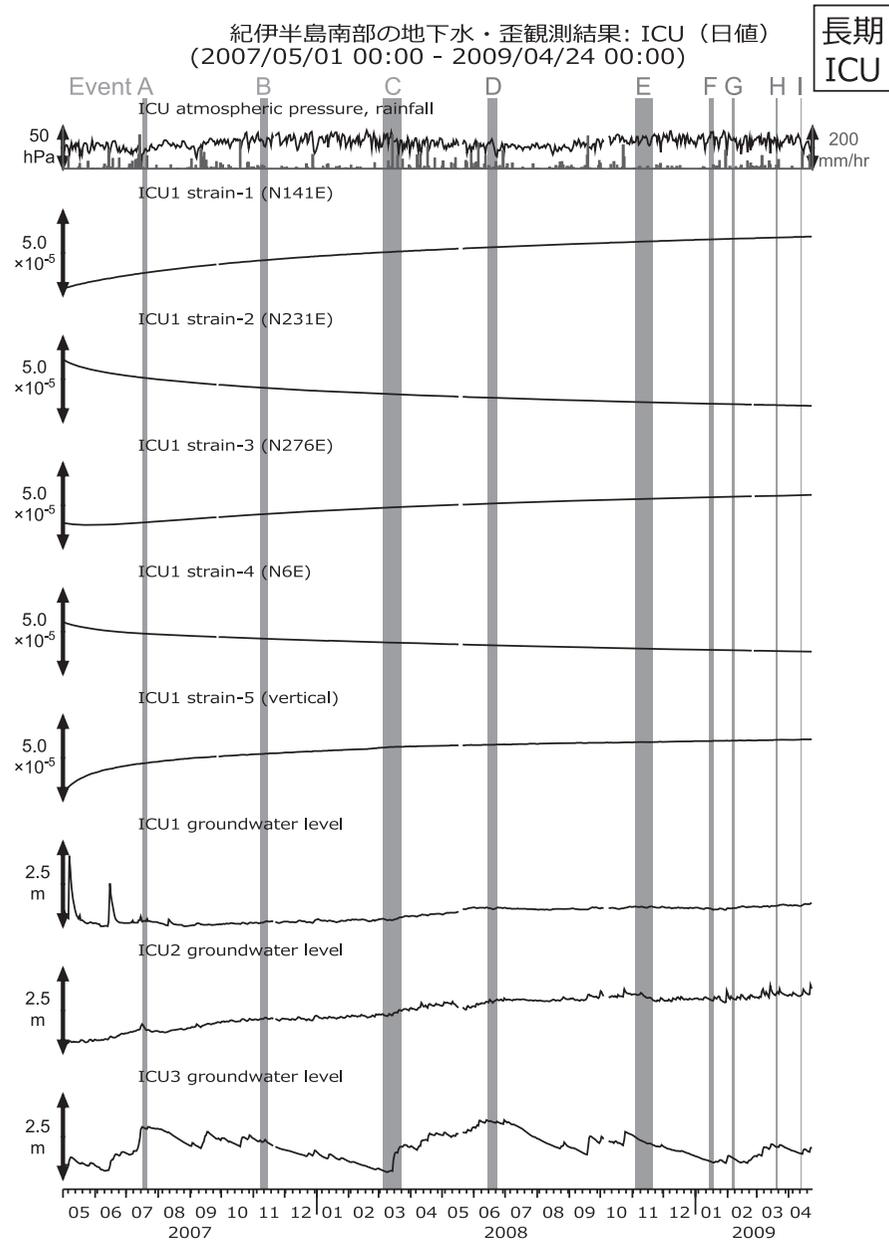
Fig.9 Observational results at TYS from January 21, 2009 to February 19, 2009. In the corrected data tidal components, barometric responses and quadratic curve trends are eliminated.



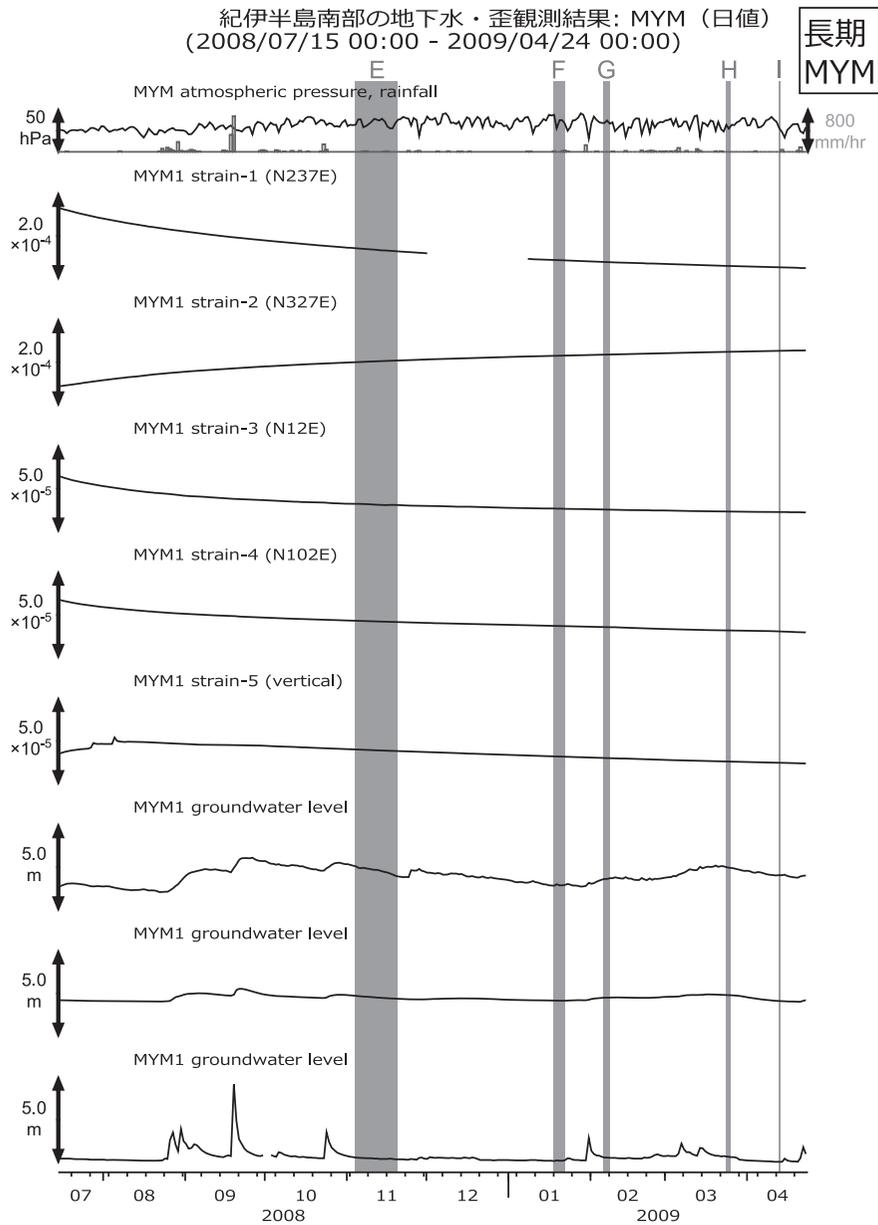
低周波地震の分布（気象庁の一元化震源リストによる）



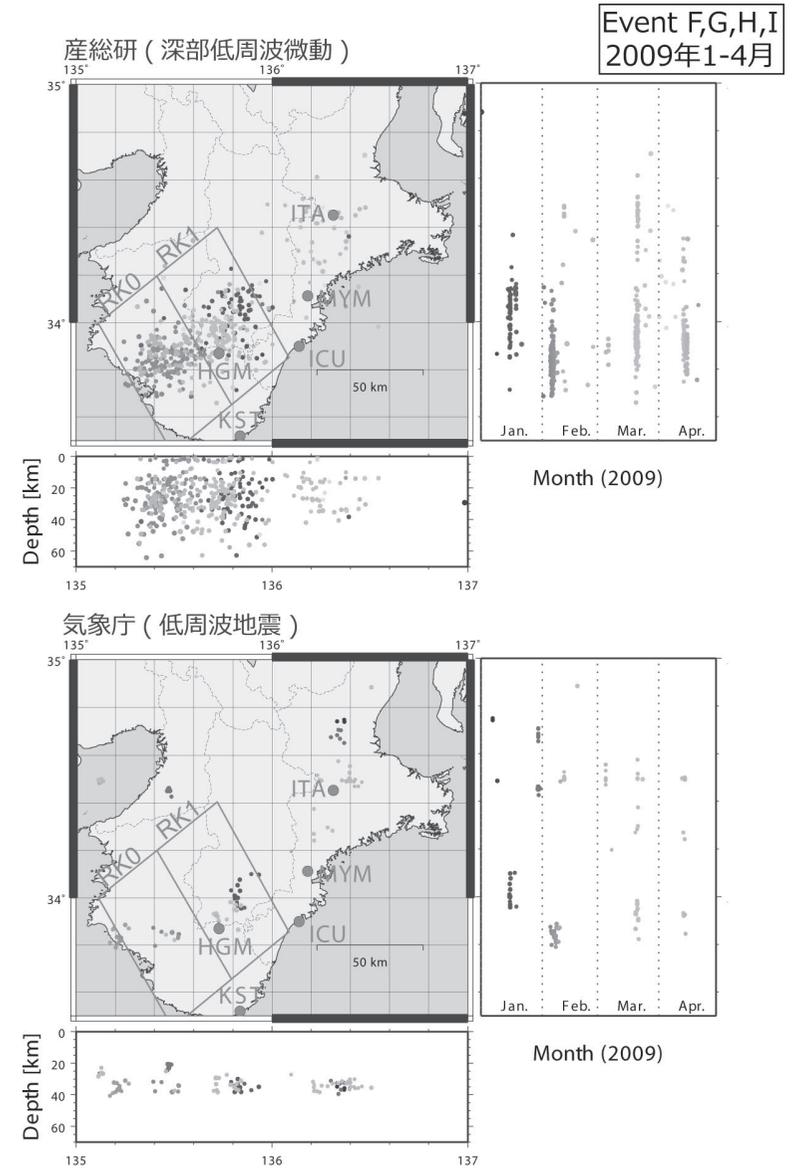
第 12 図 滑りモデルと低周波地震との位置関係。実線の矩形は、第 11 図の滑りモデル。楕円は、気象庁が気象庁の歪データから推定した滑り候補領域<sup>8)</sup>。点線の矩形は、防災科研が傾斜データから推定した滑りモデル<sup>9)</sup>。  
 Fig.12 Positional relationship between slip models and low-frequency earthquakes. The rectangles show the slip models in Fig.11. The ellipse shows the candidate region of slip estimated from crustal strain changes by JMA<sup>8)</sup>. The dotted lined rectangle shows the slip model estimated from tilt changes by NIED<sup>9)</sup>.



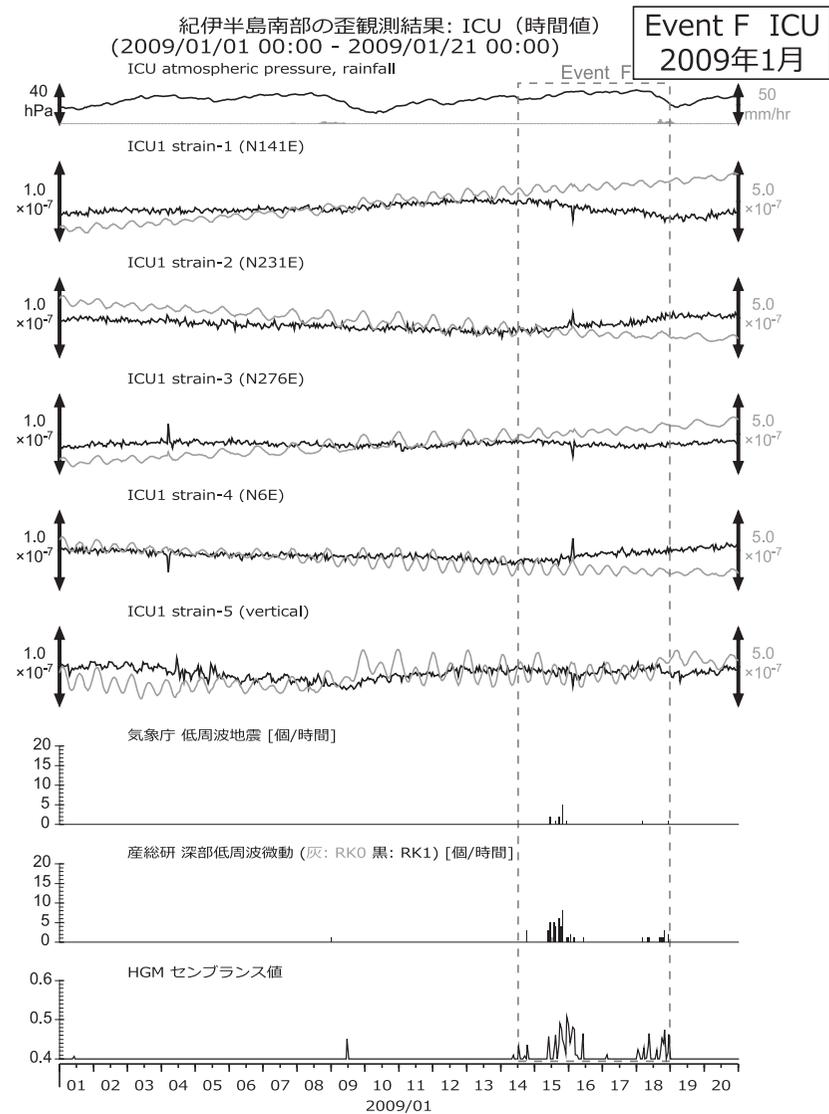
第 13 図 ICU の観測結果 (2007 年 5 月 ~ 2009 年 4 月)。  
 Fig.13 Observational results at ICU from May 2007 to April 2009.



第14図 MYMの観測結果(2008年7月~2009年4月).  
Fig.14 Observational results at MYM from August 2008 to April 2009.



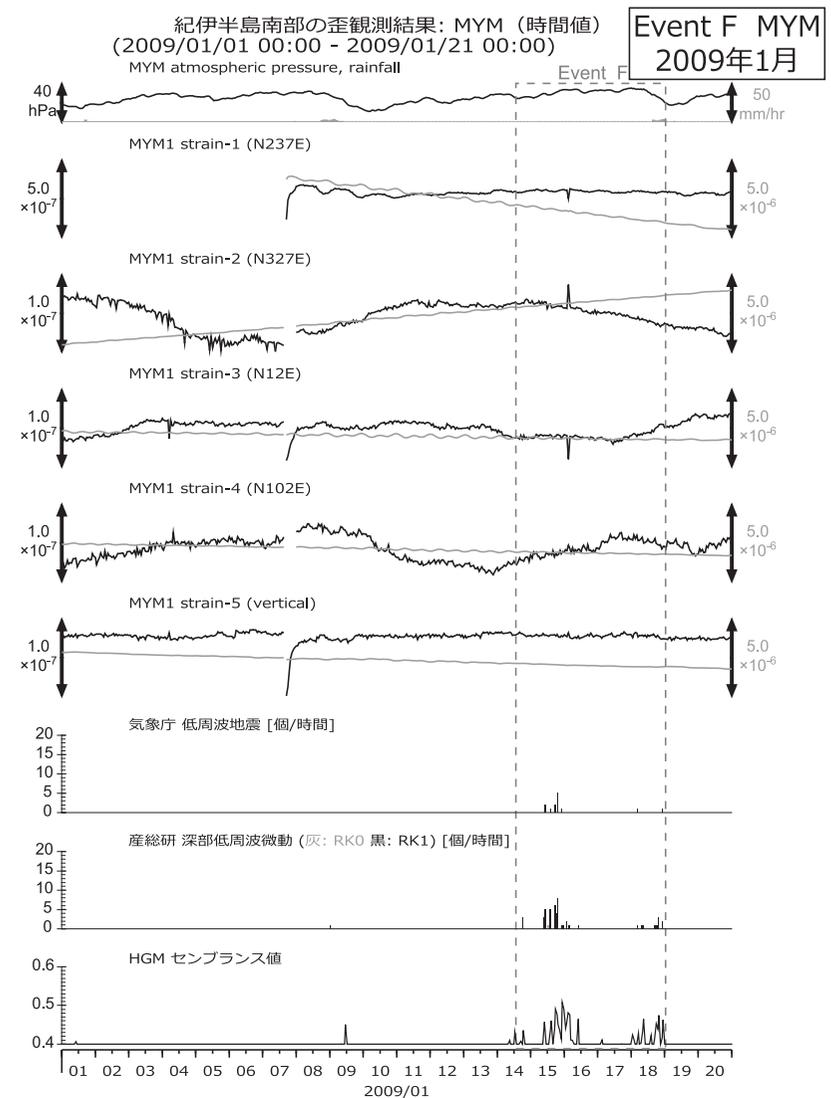
第15図 紀伊半島における深部低周波微動と低周波地震の時空間分布図(2009年1月~4月).  
(上段)エンベロープ相関法によって決定. (下段)気象庁一元化震源リストによる低周波地震.  
Fig.15 Space-Time distribution of the deep low-frequency tremor and the low frequency earthquakes from January to April 2009. Upper: Tremors estimated by envelope correlation method. Lower: Low frequency earthquakes from the JMA unified earthquake catalog.



灰色線は生データ(毎正時値)、黒色線は潮汐・大気圧応答成分、直線トレンド(歪のみ)を取り除いている。

第 16 図 ICU の観測結果 (2009 年 1 月 21 日 ~ 2009 年 2 月 19 日)。歪の灰色の線はオリジナルデータ、黒色の線は潮汐解析プログラム BAYTAP-G<sup>4)</sup> を用いて潮汐成分と気圧応答成分を除去し、加えて直線トレンドを除去している。HGM のセンプランスモニター値は地震計鉛直アレイを用いた結果。

Fig.16 Observational results at ICU from January 1 to 21, 2009. The gray line (strain) indicates original data. The black line indicates the corrected data where tidal components, barometric responses and linear trends are eliminated. Semblance monitor value is the result by use of vertical array of seismometers at HGM.



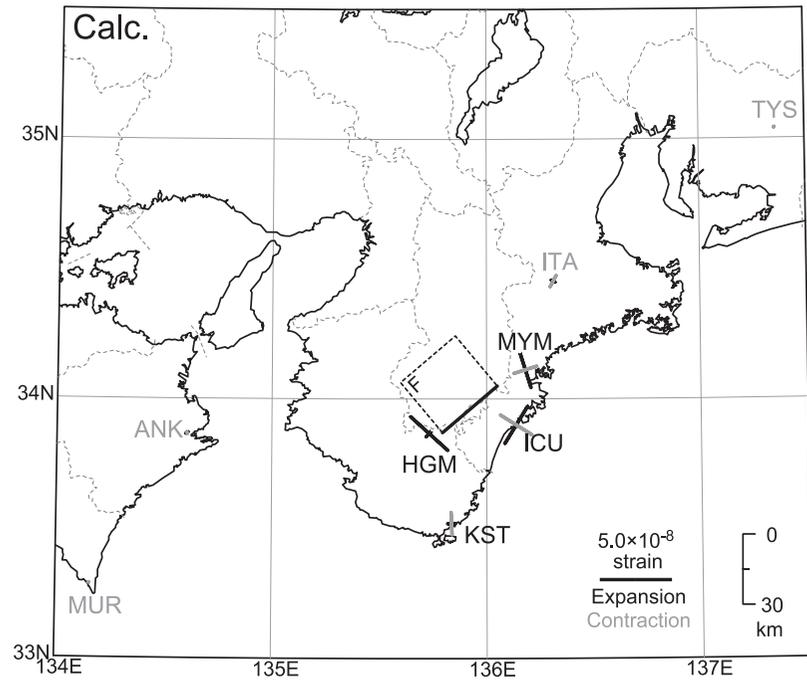
1/7に歪計の調整作業を行っている。灰色線は生データ(毎正時値)、黒色線は潮汐・大気圧応答成分、2次曲線トレンド(歪のみ)を取り除いている。

第 17 図 MYM の観測結果 (2009 年 1 月 21 日 ~ 2009 年 2 月 19 日)。歪の灰色の線はオリジナルデータ、黒色の線は潮汐解析プログラム BAYTAP-G<sup>4)</sup> を用いて潮汐成分と気圧応答成分を除去し、加えて 2 次曲線トレンドを除去している。HGM のセンプランスモニター値は地震計鉛直アレイを用いた結果。

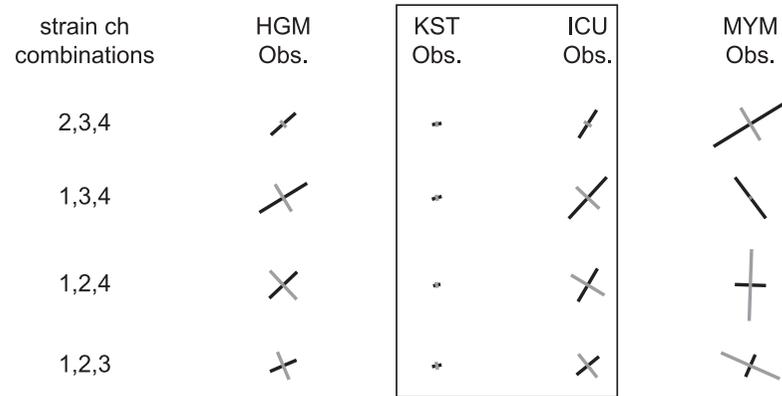
Fig.17 Observational results at MYM from January 1 to 21, 2009. The gray line (strain) indicate original data. The black line indicates the corrected data where tidal components barometric responses and quadratic curve trends are eliminated. Semblance monitor value is the result by use of vertical array of seismometers at HGM.

Event F 2009年1月 断層モデルと主歪

Event	Lat	Lon	Depth [km]	Strike [deg]	Length [km]	Width	Dip [deg]	Rake [deg]	Slip [mm]	Mw
F: Jan. 2009	34.05	136.05	30	230	30	30	25	95	20	5.8



断層モデルからの計算結果と調和的

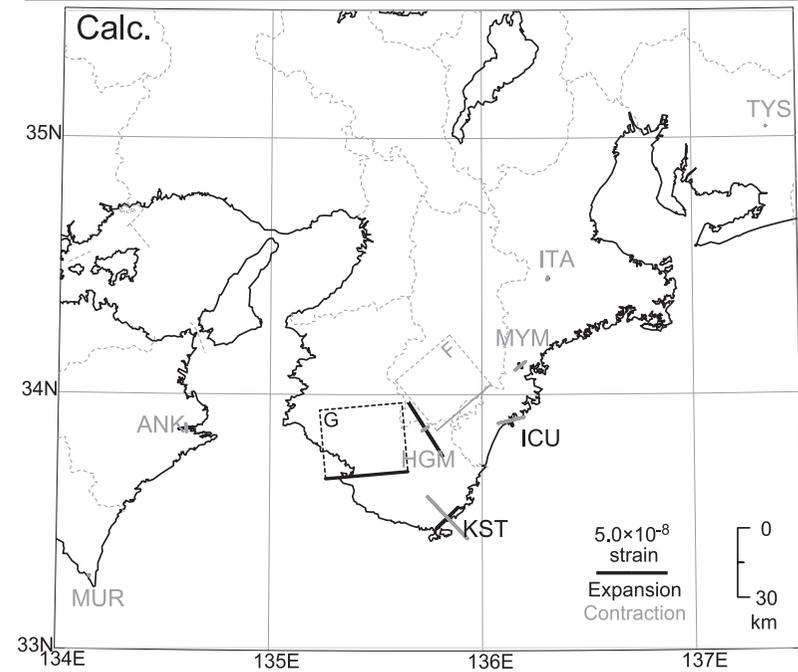


第 18 図 2009 年 1 月に発生した短期的 SSE の推定断層モデル(上), 断層モデルからの主歪計算値 (中), および観測された主歪変化 (下).

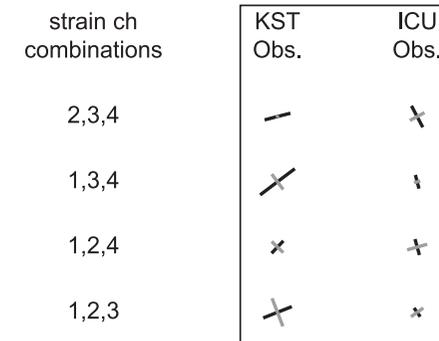
Fig. 18 From top to bottom, the estimated dislocation models of the short-term slow slip event which occurred in January, 2009 and calculated and observed principal strains.

Event G 2009年2月 断層モデルと主歪

Event	Lat	Lon	Depth [km]	Strike [deg]	Length [km]	Width	Dip [deg]	Rake [deg]	Slip [mm]	Mw
G: Feb. 2009	33.70	135.65	25	265	35	30	15	130	20	5.8
F: Jan. 2009	34.05	136.05	30	230	30	30	25	95	20	5.8



断層モデルからの計算結果と調和的

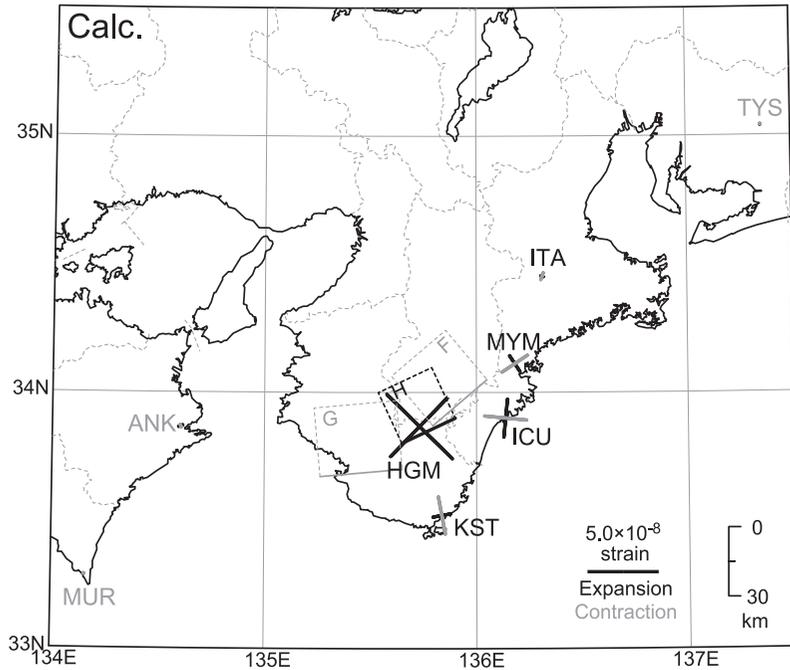


第 19 図 2009 年 2 月に発生した短期的 SSE の推定断層モデル(上), 断層モデルからの主歪計算値 (中), および観測された主歪変化 (下).

Fig. 19 The estimated dislocation models of the short-term slow slip event which occurred in February, 2009 and calculated and observed principal strains.

Event H 2009年3月 断層モデルと主歪

Event	Lat	Lon	Depth [km]	Strike [deg]	Length [km]	Width	Dip [deg]	Rake [deg]	Slip [mm]	Mw
H: Mar. 2009	33.90	135.90	30	245	25	25	20	110	30	5.8
G: Feb. 2009	33.70	135.65	25	265	35	30	15	130	20	5.8
F: Jan. 2009	34.05	136.05	30	230	30	30	25	95	20	5.8



断層モデルからの計算結果と調和的

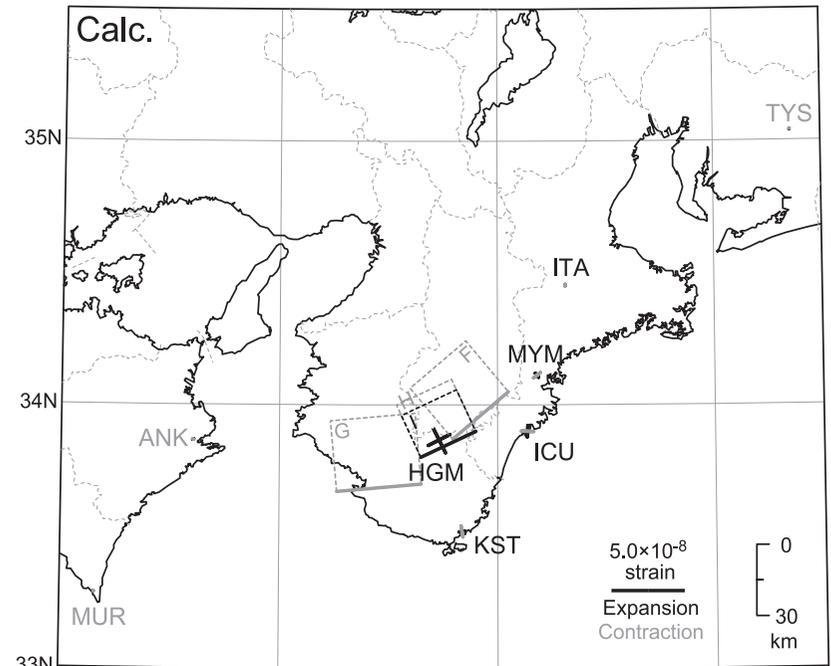
strain ch combinations	HGM	KST	ICU	MYM	ITA
	Obs.	Obs.	Obs.	Obs.	Obs.
2,3,4		+	+	-	+
1,3,4	-	+	+	-	+
1,2,4		+	+	-	+
1,2,3		+	+	-	+

第 20 図 2009 年 3 月に発生した短期的 SSE の推定断層モデル(上), 断層モデルからの主歪計算値 (中), および観測された主歪変化 (下).

Fig. 20 The estimated dislocation models of the short-term slow slip event which occurred in March, 2009 and calculated and observed principal strains.

Event I 2009年4月 断層モデルと主歪

Event	Lat	Lon	Depth [km]	Strike [deg]	Length [km]	Width	Dip [deg]	Rake [deg]	Slip [mm]	Mw
I: Apr. 2009	33.90	135.90	30	245	25	20	20	110	10	5.4
H: Mar. 2009	33.90	135.90	30	245	25	25	20	110	30	5.8
G: Feb. 2009	33.70	135.65	25	265	35	30	15	130	20	5.8
F: Jan. 2009	34.05	136.05	30	230	30	30	25	95	20	5.8

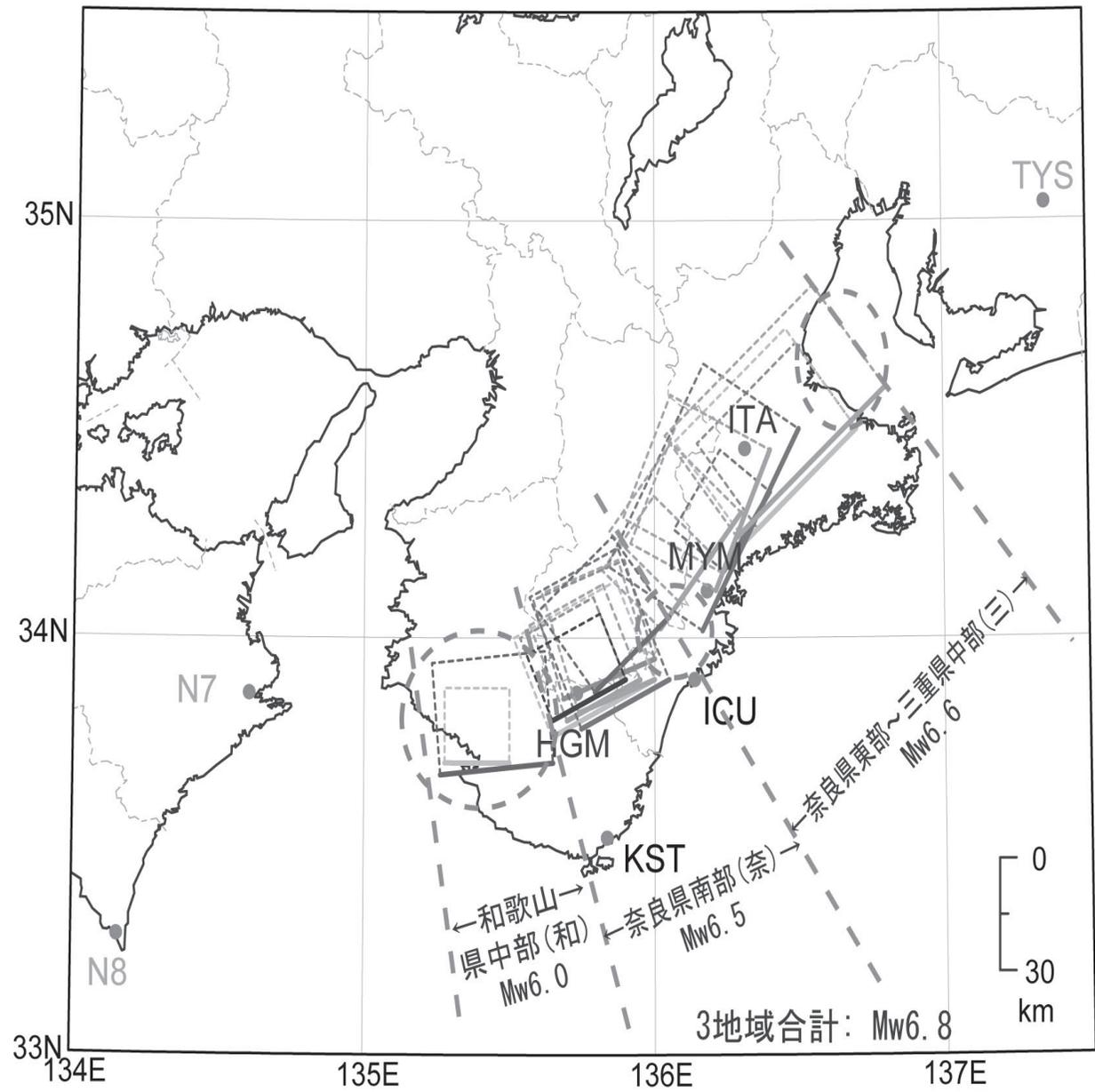


断層モデルからの計算結果と調和的

strain ch combinations	HGM	KST	ICU	MYM	ITA
	Obs.	Obs.	Obs.	Obs.	Obs.
2,3,4	-	.	+	.	.
1,3,4	-	.	+	.	.
1,2,4	-	.	+	.	.
1,2,3	-	.	+	.	.

第 21 図 2009 年 4 月に発生した短期的 SSE の推定断層モデル(上), 断層モデルからの主歪計算値 (中), および観測された主歪変化 (下).

Fig. 21 The estimated dislocation models of the short-term slow slip event which occurred in April, 2009 and calculated and observed principal strains.



第 22 図 2007 年 7 月～2009 年 4 月に紀伊半島で発生した短期的 SSE の推定断層モデル  
 Fig. 22 The estimated dislocation models of the short-term slow slip events which occurred from July, 2007 to April, 2009.