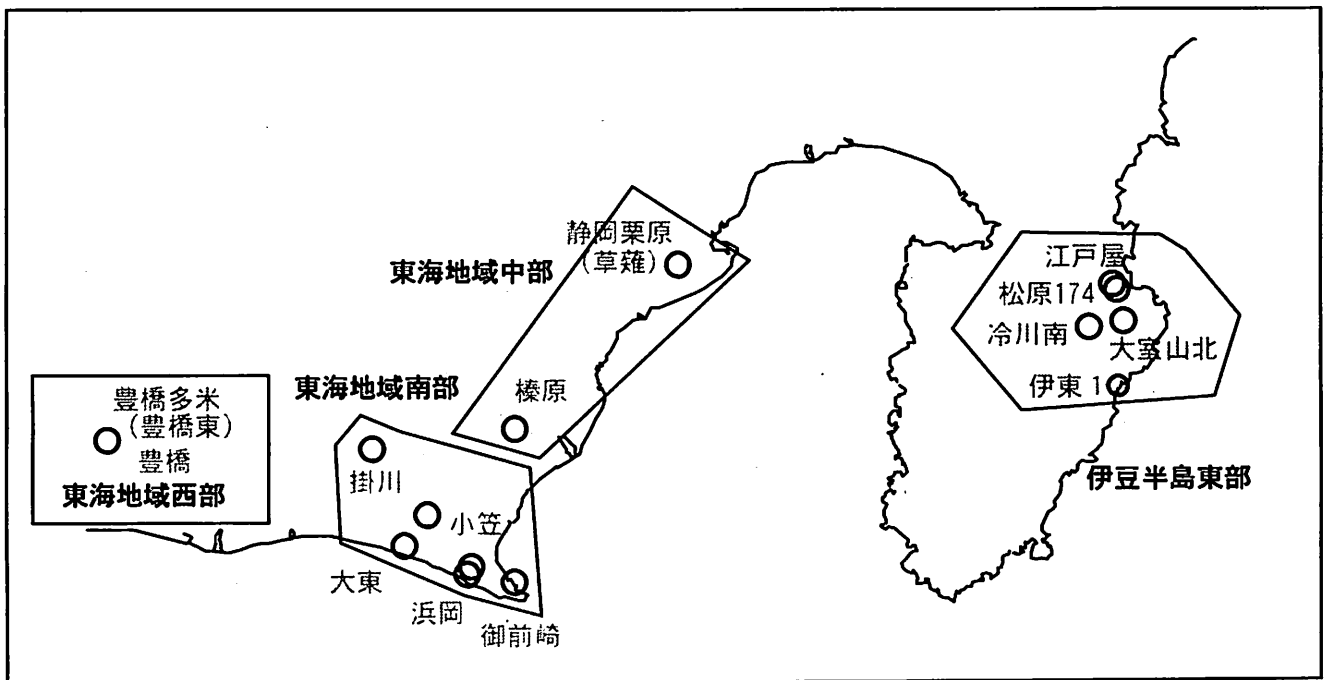


# 第334回 地震防災対策強化地域判定会

産業技術総合研究所

## 地質調査総合センター資料

産総研地質調査総合センター地下水観測井配置図  
(伊豆・東海地域テレメータ連続観測)



平成26年2月24日

# 【資料目次】

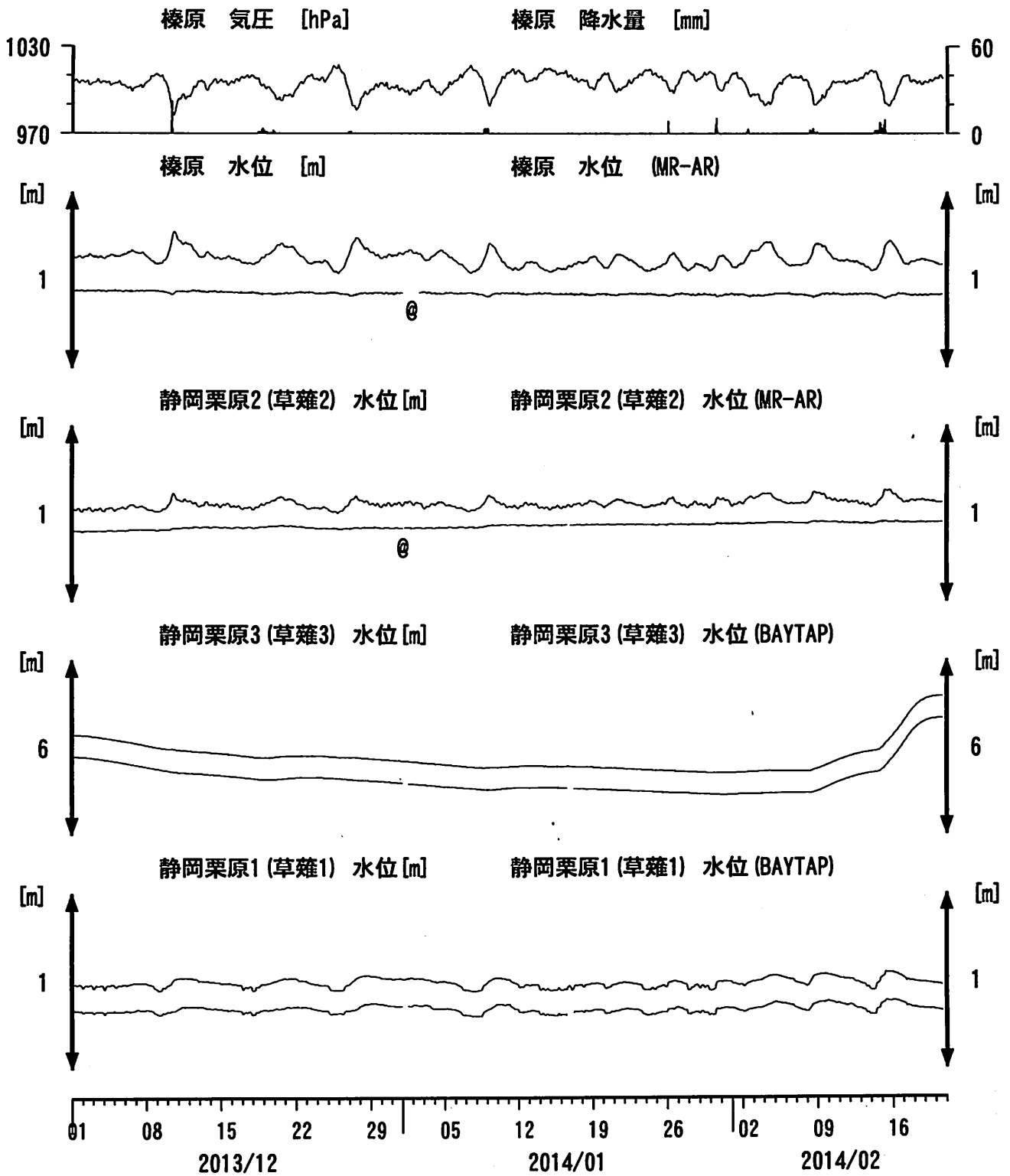
## 表紙

1. 東海地域中部 [榛原, 静岡栗原(草薙)] 地下水; 中期
2. 東海地域中部 [榛原, 静岡栗原(草薙)] 地下水; 長期
3. 東海地域南部 [大東, 小笠, 浜岡, 御前崎] 地下水; 中期
4. 東海地域南部 [大東, 小笠, 浜岡, 御前崎] 地下水; 長期
- 4-b. 東海地域南部 [浜岡] 地下水・沈下; 長期
- 4-c. 東海地域南部 [掛川] 地下水・沈下; 長期
5. 東海地域西部 [豊橋, 豊橋多米(豊橋東)] 地下水・歪・傾斜; 中期
- 5-b. 東海地域西部 [豊橋多米(豊橋東)] 歪等; 中期
6. 東海地域西部 [豊橋・豊橋多米(豊橋東)] 地下水・歪・傾斜; 長期
- 6-b. 東海地域西部 [豊橋多米(豊橋東)] 歪等; 長期
7. 伊豆半島東部 [松原174, 江戸屋, 大室山北, 冷川南, 伊東1] 地下水; 中期
8. 伊豆半島東部 [松原174, 江戸屋, 大室山北, 冷川南, 伊東1] 地下水; 長期

## 別紙

- ・榛原・浜岡の降雨グラフ
- ・豊橋多米の地殻歪の長期変化
- ・紀伊半島～愛知県の地下水・歪等観測結果

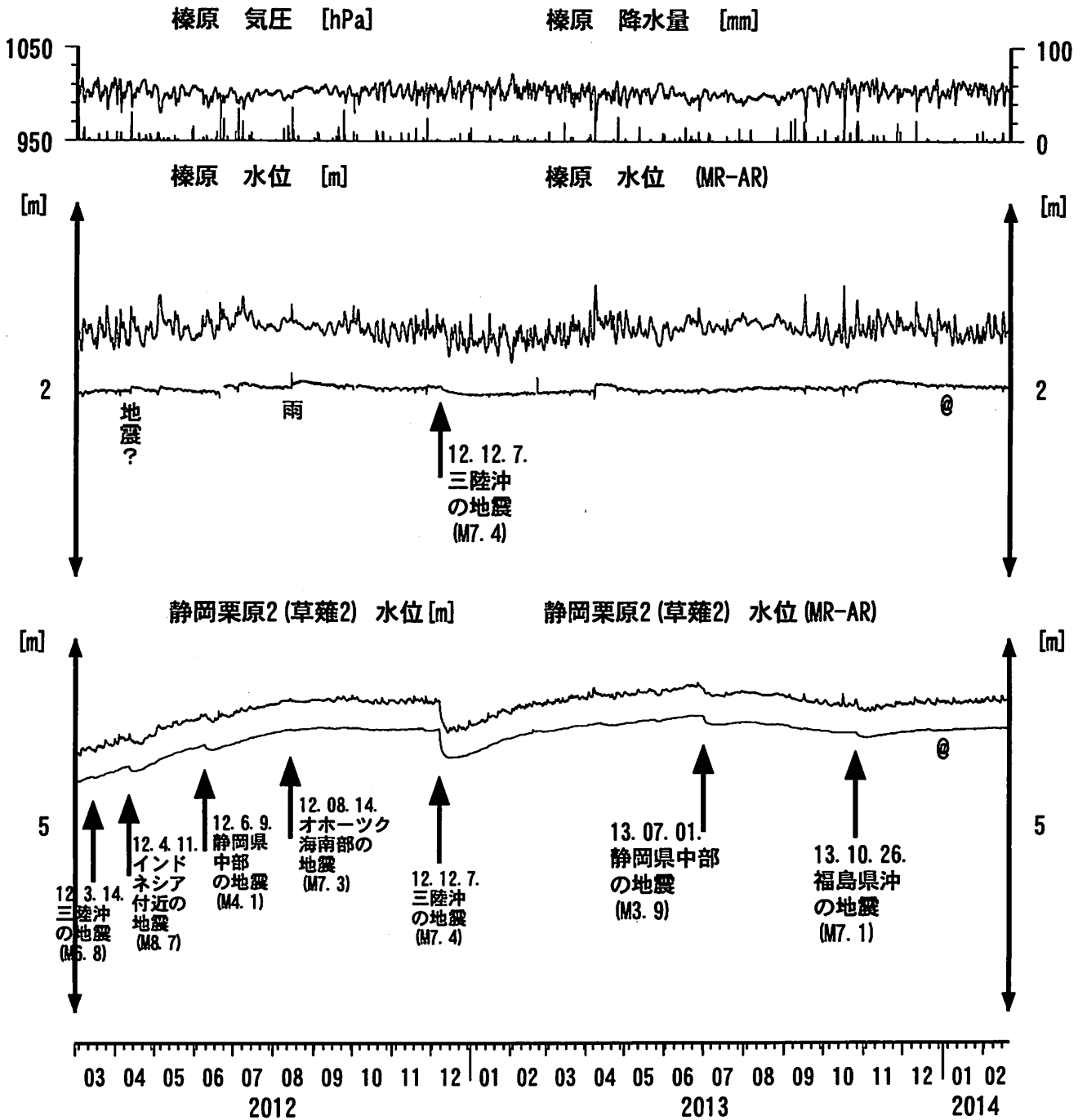
東海地域中部 (榛原・草薙) 中期 (時間値)  
 (2013/12/01 00:00 - 2014/02/21 00:00 (JST))



コメント：\*;雨量補正不十分。\$;保守。  
 @;月初めの補正値のギャップは、  
 解析プログラムの見かけ上のものである。



東海地域中部 (榛原・草薙) 長期 (時間値)  
 (2012/03/01 00:00 - 2014/02/21 00:00 (JST))

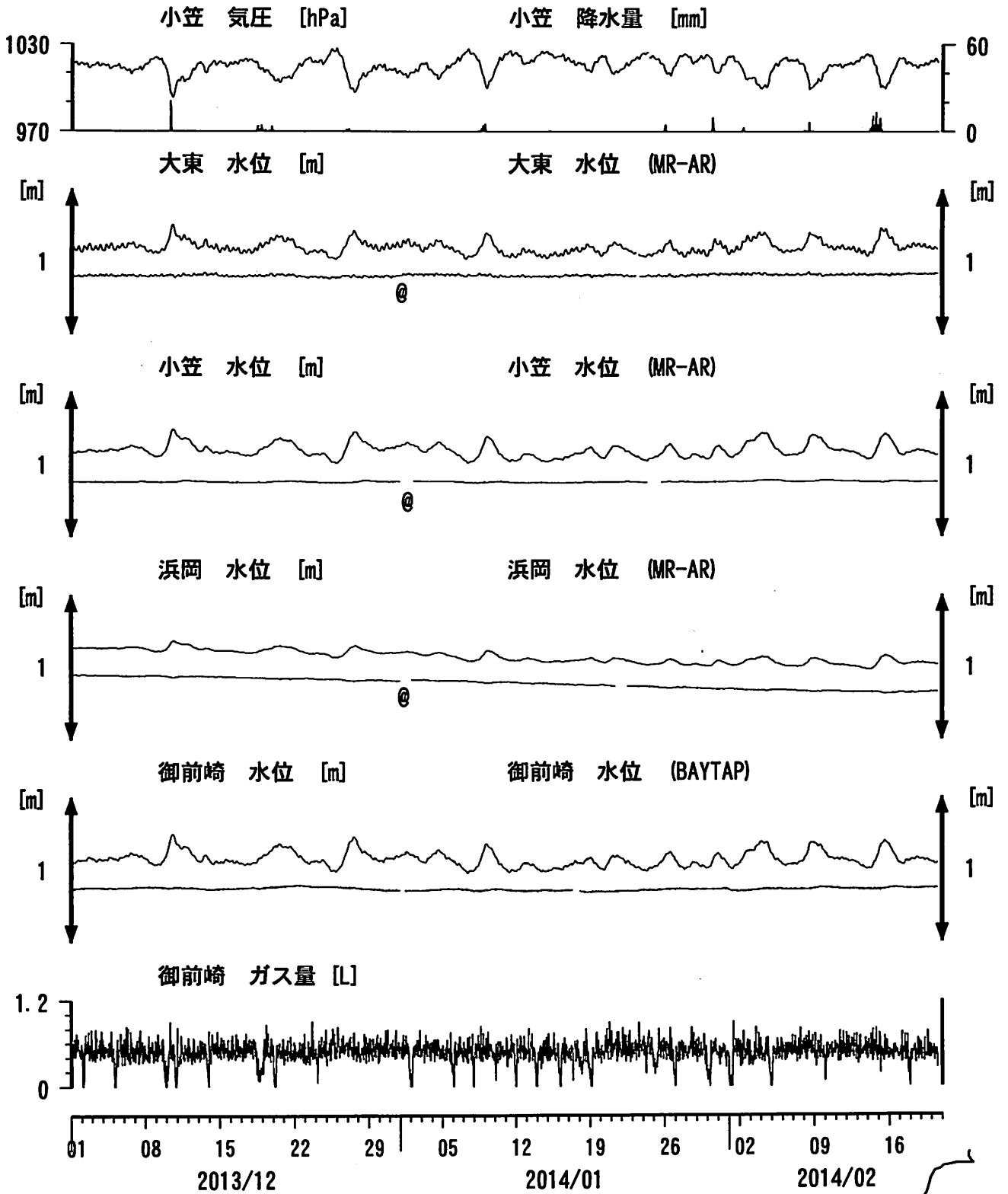


コメント：\*;雨量補正不十分。?;原因不明。



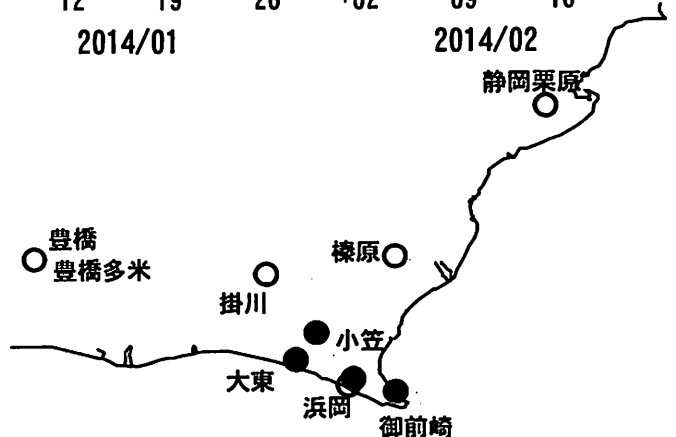


東海地域南部 地下水観測結果 中期 (時間値)  
 (2013/12/01 00:00 - 2014/02/21 00:00 (JST))

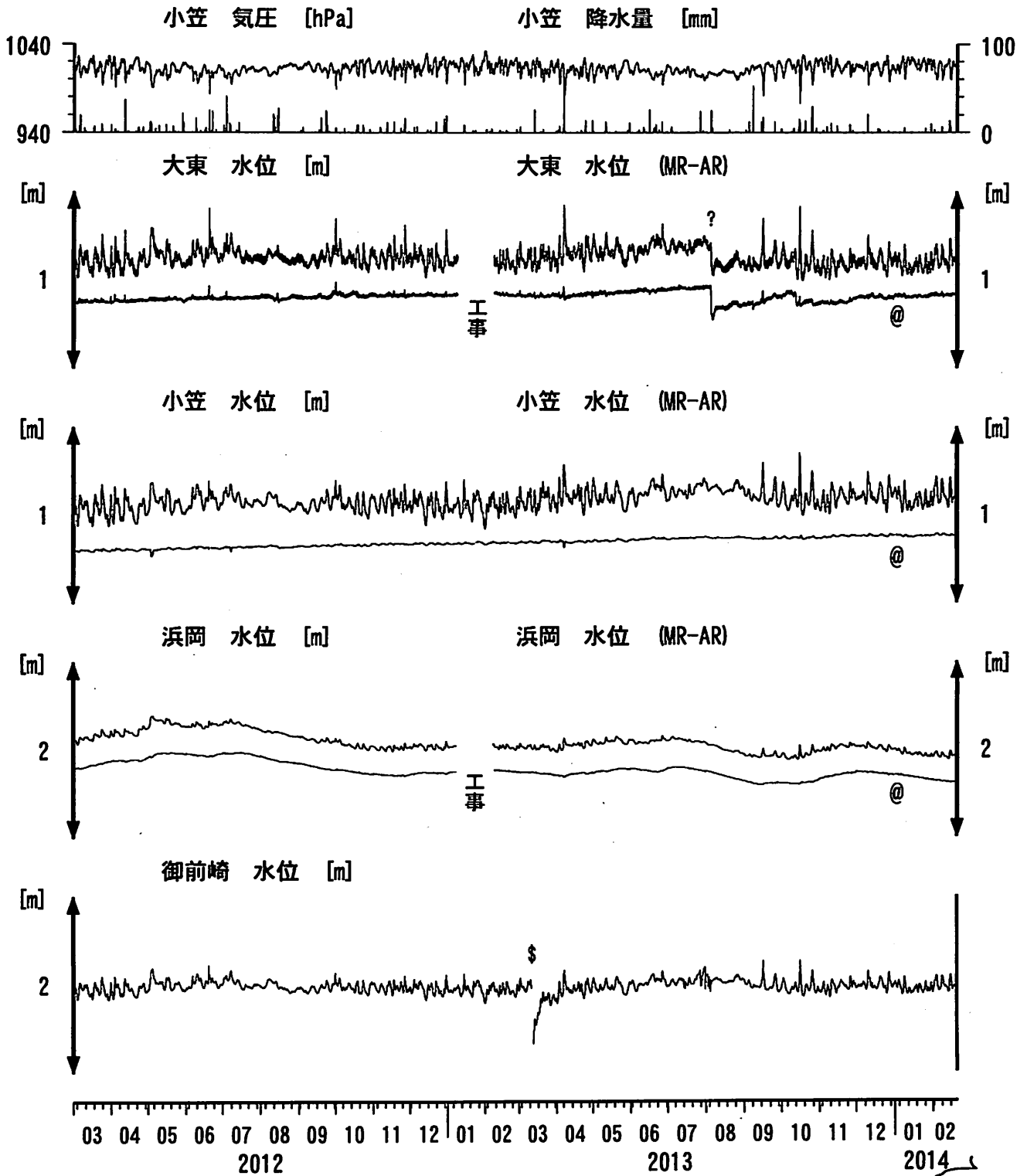


コメント:

\*;雨量補正不十分, \$:保守. ?;不明.  
 @;月初めの補正值のギャップは,  
 解析プログラムの見かけ上のものである.  
 2013年7月6日に御前崎のガス流量計が故障.

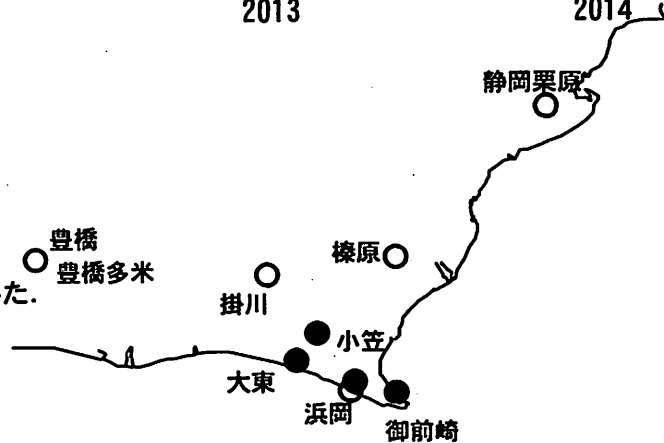


東海地域南部 地下水観測結果 長期 (時間値)  
 (2012/03/01 00:00 - 2014/02/21 00:00 (JST))



コメント:

\*;雨量補正不十分. \$;保守.  
 @;月初めの補正値のギャップは、  
 解析プログラムの見かけ上のものである。  
 2011年9月21日に大東・小笠の井戸口の管を延長した。  
 2013年1月8日～2月9日の大東と浜岡は、  
 観測小屋老朽化のため建替工事で欠測。



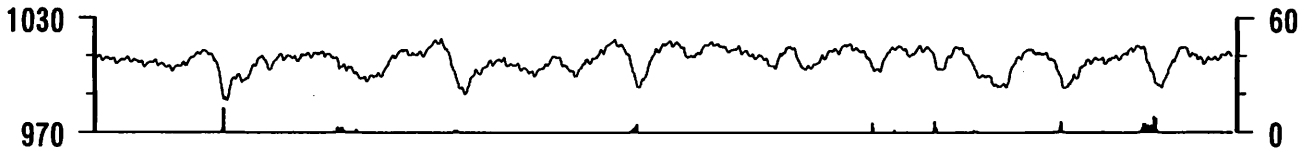




東海地域西部 (豊橋・豊橋多米) 中期 (時間値)  
 (2013/12/01 00:00 - 2014/02/21 00:00 (JST))

豊橋 気圧 [hPa]

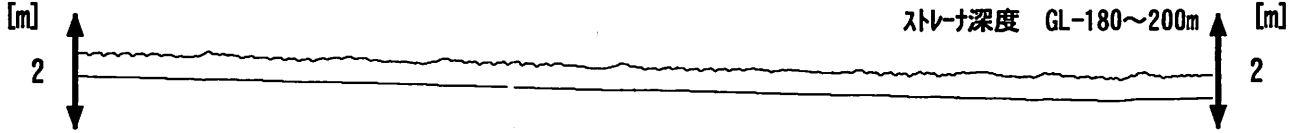
豊橋 雨量 [mm]



豊橋1 水位 [m]

豊橋1 水位 (BAYTAP)

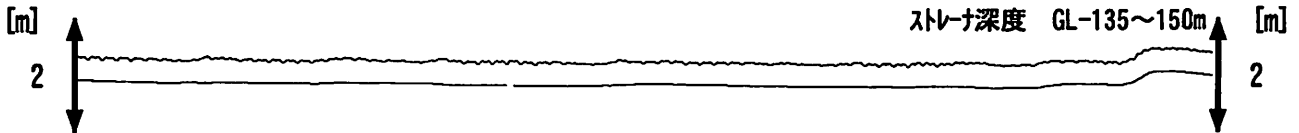
ストレーナ深度 GL-180~200m



豊橋2 水位 [m]

豊橋2 水位 (BAYTAP)

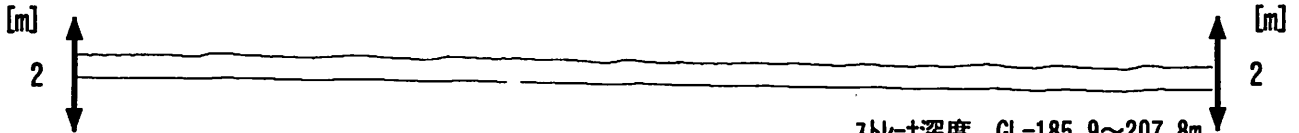
ストレーナ深度 GL-135~150m



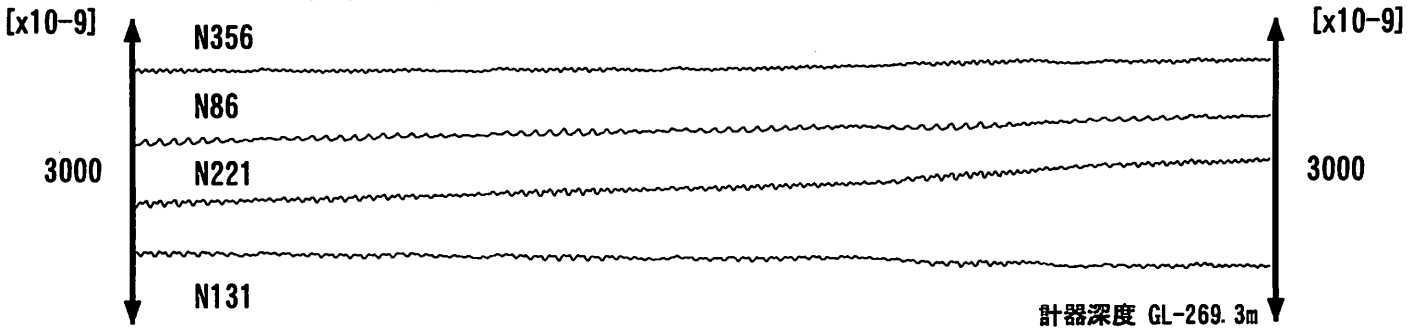
豊橋多米 (豊橋東) 水位 [m]

豊橋多米 (豊橋東) 水位 (BAYTAP)

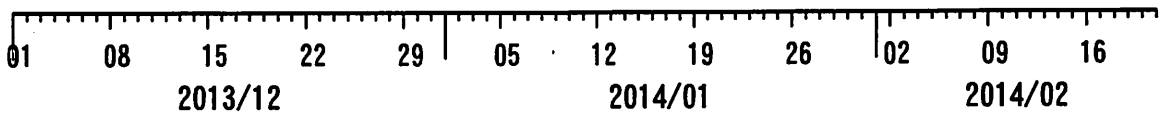
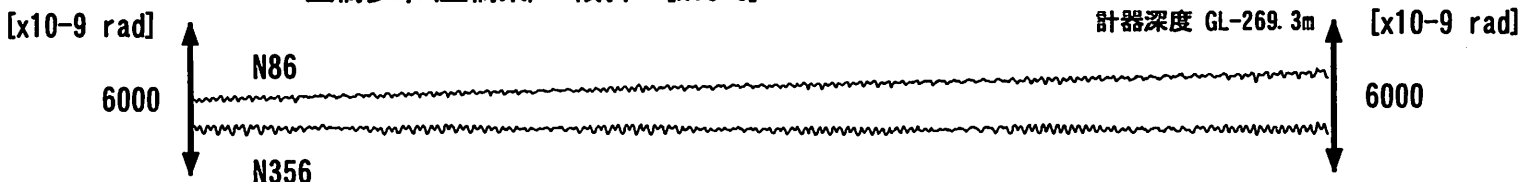
ストレーナ深度 GL-185.9~207.8m



豊橋多米 (豊橋東) 歪 [x10<sup>-9</sup>]



豊橋多米 (豊橋東) 傾斜 [x10<sup>-9</sup> rad]

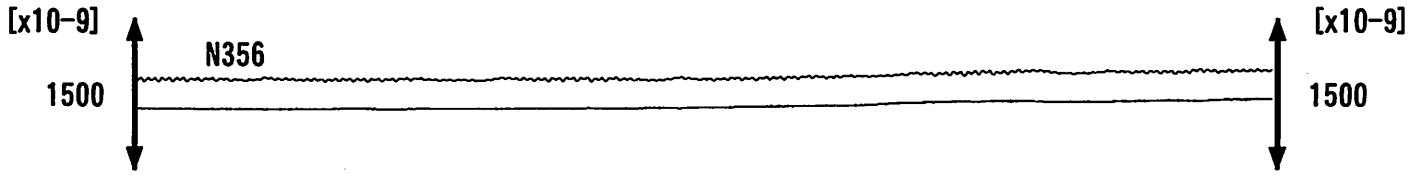


コメント: \$;保守. ?;原因不明.

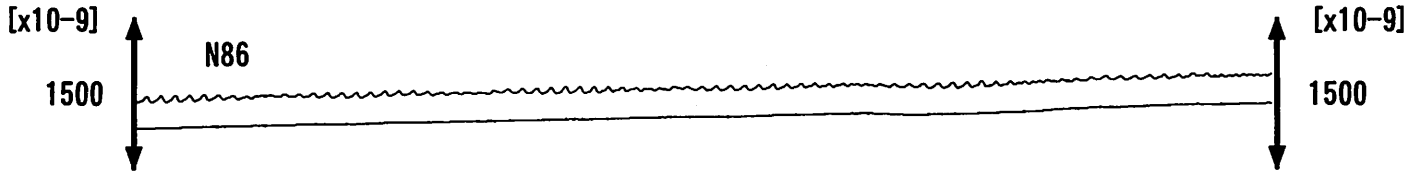


東海地域西部（豊橋多米 歪）中期（時間値）  
 (2013/12/01 00:00 - 2014/02/21 00:00 (JST))

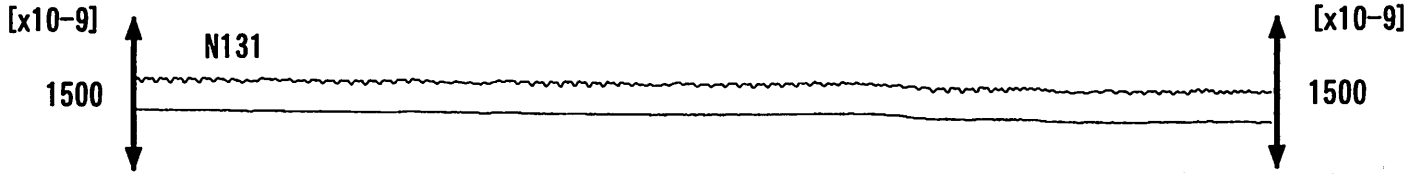
豊橋多米 (豊橋東) 歪N356E [x10<sup>-9</sup>] 豊橋多米 (豊橋東) 歪N356E (BAYTAP)



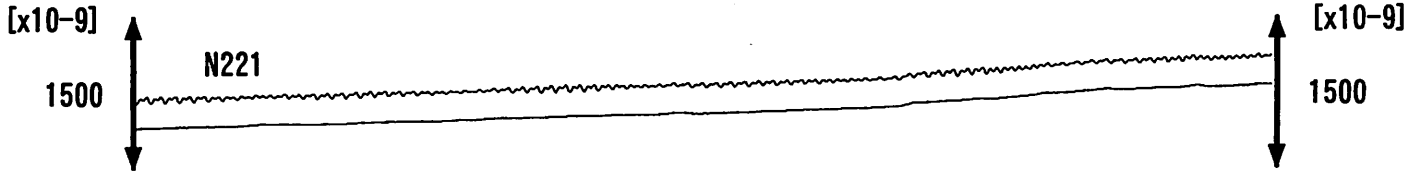
豊橋多米 (豊橋東) 歪N86E [x10<sup>-9</sup>] 豊橋多米 (豊橋東) 歪N86E (BAYTAP)



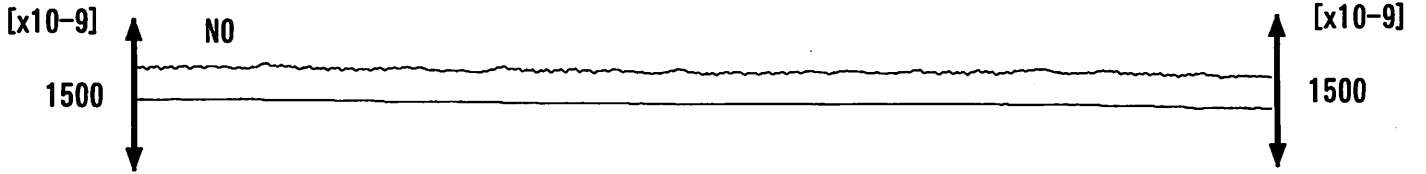
豊橋多米 (豊橋東) 歪N131E [x10<sup>-9</sup>] 豊橋多米 (豊橋東) 歪N131E (BAYTAP)



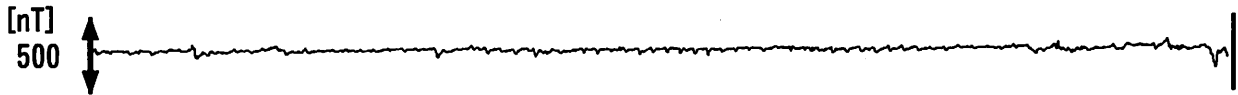
豊橋多米 (豊橋東) 歪N221E [x10<sup>-9</sup>] 豊橋多米 (豊橋東) 歪N221E (BAYTAP)



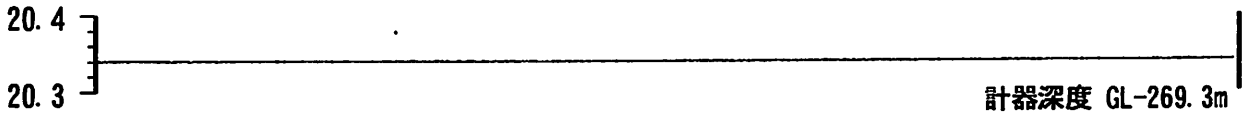
豊橋多米 (豊橋東) 歪鉛直 [x10<sup>-9</sup>] 豊橋多米 (豊橋東) 歪鉛直 (BAYTAP)



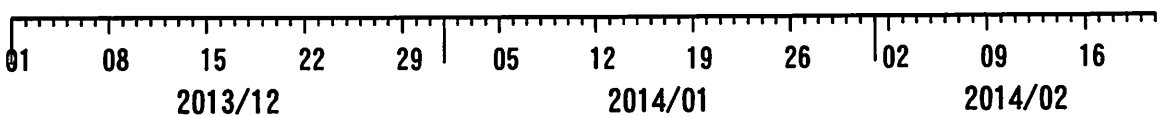
豊橋多米 (豊橋東) 磁力 N356E [nT]



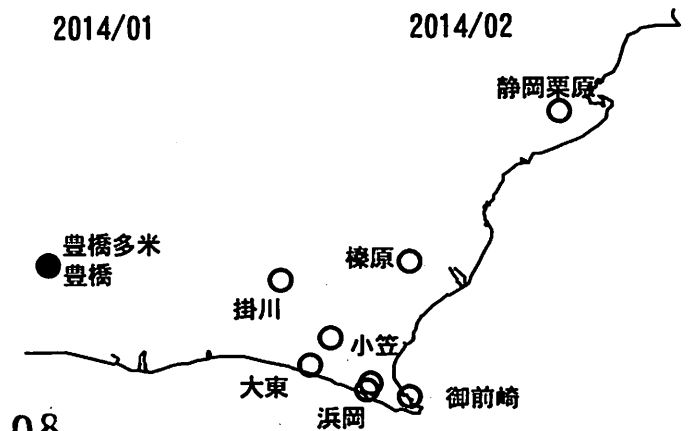
豊橋多米 (豊橋東) 歪計温度 (水晶式) [deg. C]



計器深度 GL-269. 3m



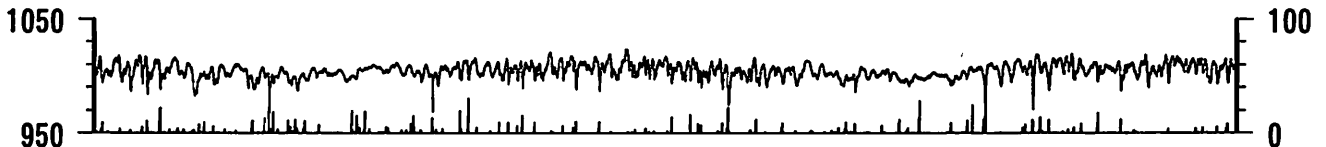
コメント：\$;保守. ?;原因不明.



東海地域西部 (豊橋・豊橋多米) 長期 (時間値)  
 (2012/03/01 00:00 - 2014/02/21 00:00 (JST))

豊橋 気圧 [hPa]

豊橋 雨量 [mm]



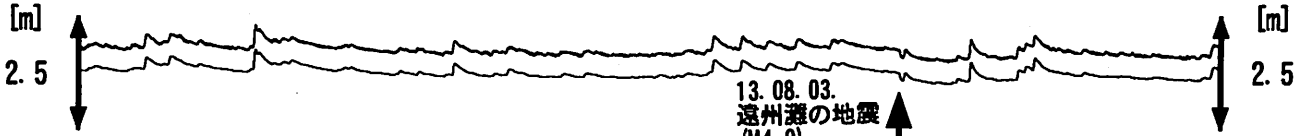
豊橋1 水位 [m]

豊橋1 水位 (BAYTAP)



豊橋2 水位 [m]

豊橋2 水位 (BAYTAP)

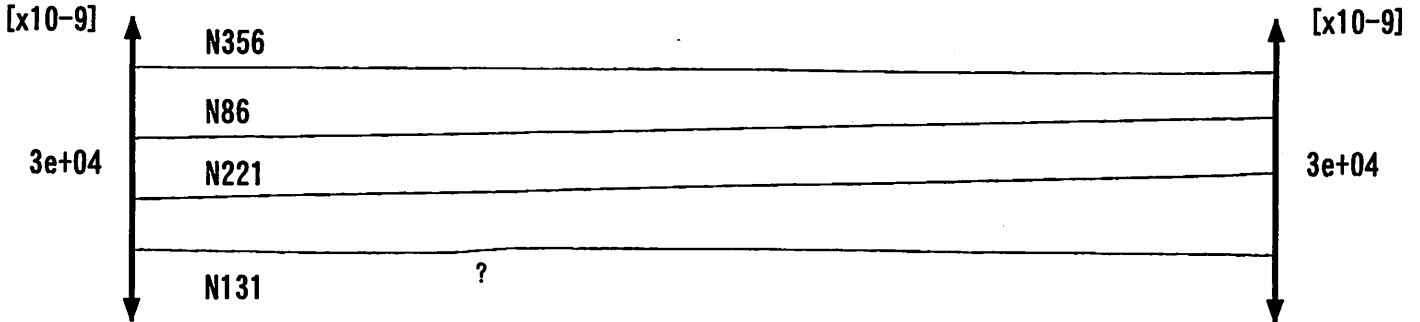


豊橋多米 (豊橋東) 水位 [m]

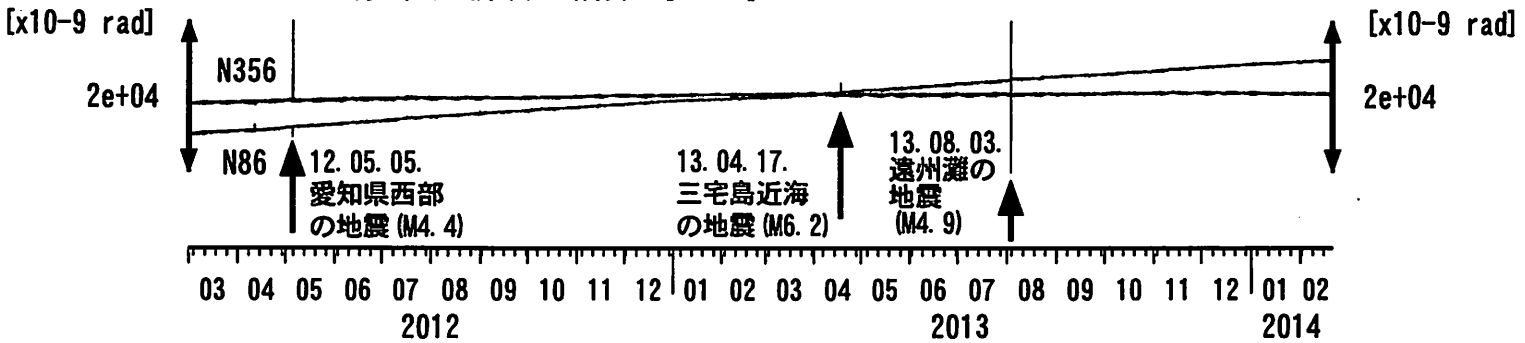
豊橋多米 (豊橋東) 水位 (BAYTAP)



豊橋多米 (豊橋東) 歪 [x10<sup>-9</sup>]



豊橋多米 (豊橋東) 傾斜 [x10<sup>-9</sup> rad]



コメント: \$;保守. ?;原因不明.



東海地域西部 (豊橋多米 歪) 長期 (時間値)  
 (2012/03/01 00:00 - 2014/02/21 00:00 (JST))

豊橋多米 (豊橋東) 歪 N356E [x10<sup>-9</sup>]



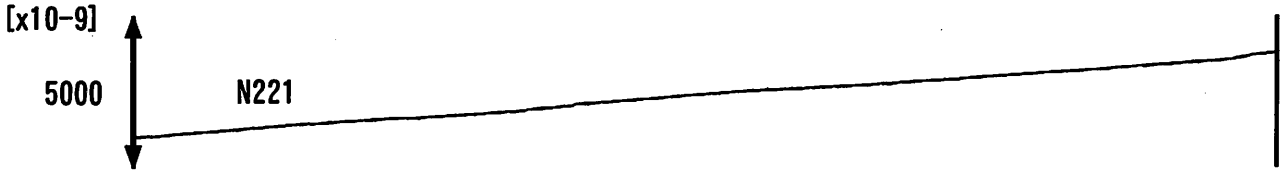
豊橋多米 (豊橋東) 歪 N86E [x10<sup>-9</sup>]



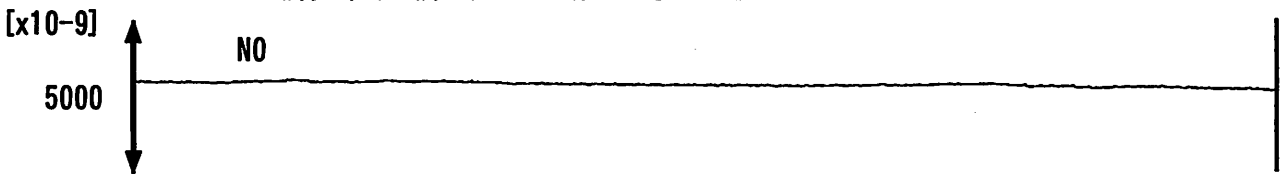
豊橋多米 (豊橋東) 歪 N131E [x10<sup>-9</sup>]



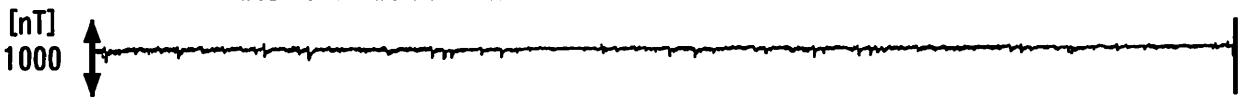
豊橋多米 (豊橋東) 歪 N221E [x10<sup>-9</sup>]



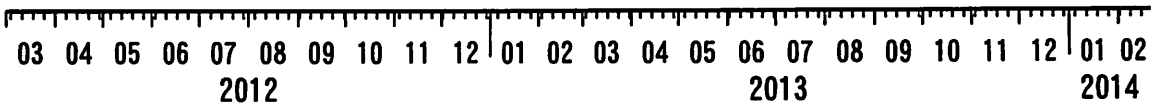
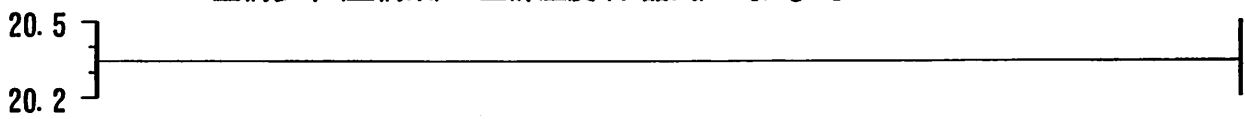
豊橋多米 (豊橋東) 歪 鉛直 [x10<sup>-9</sup>]



豊橋多米 (豊橋東) 磁力 N356E [nT]



豊橋多米 (豊橋東) 歪計温度 (水晶式) [deg. C]

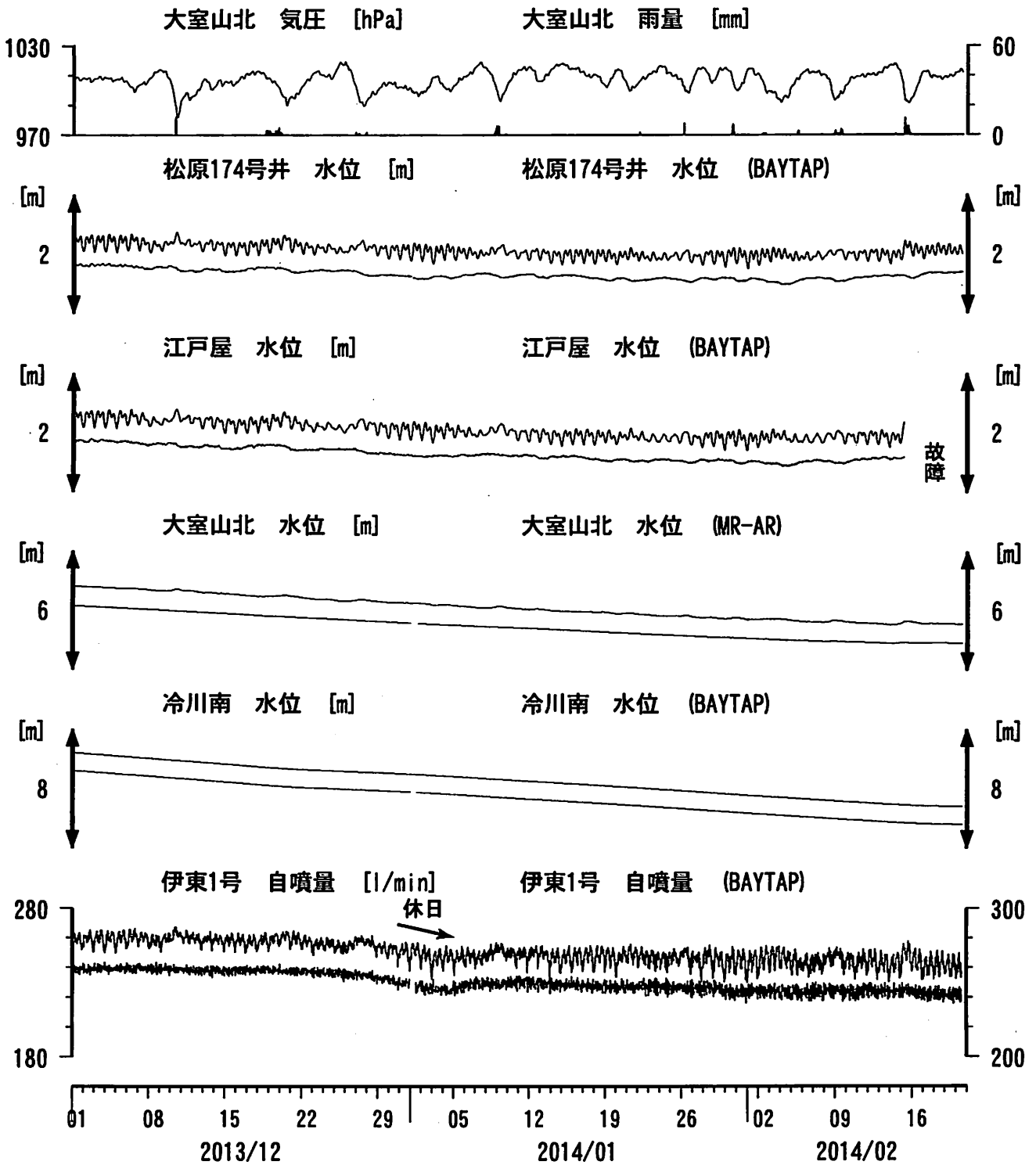


コメント: \$; 保守. ?; 原因不明.





伊豆半島東部 地下水位・自噴量 中期 (時間値)  
 (2013/12/01 00:00 - 2014/02/21 00:00 (JST))

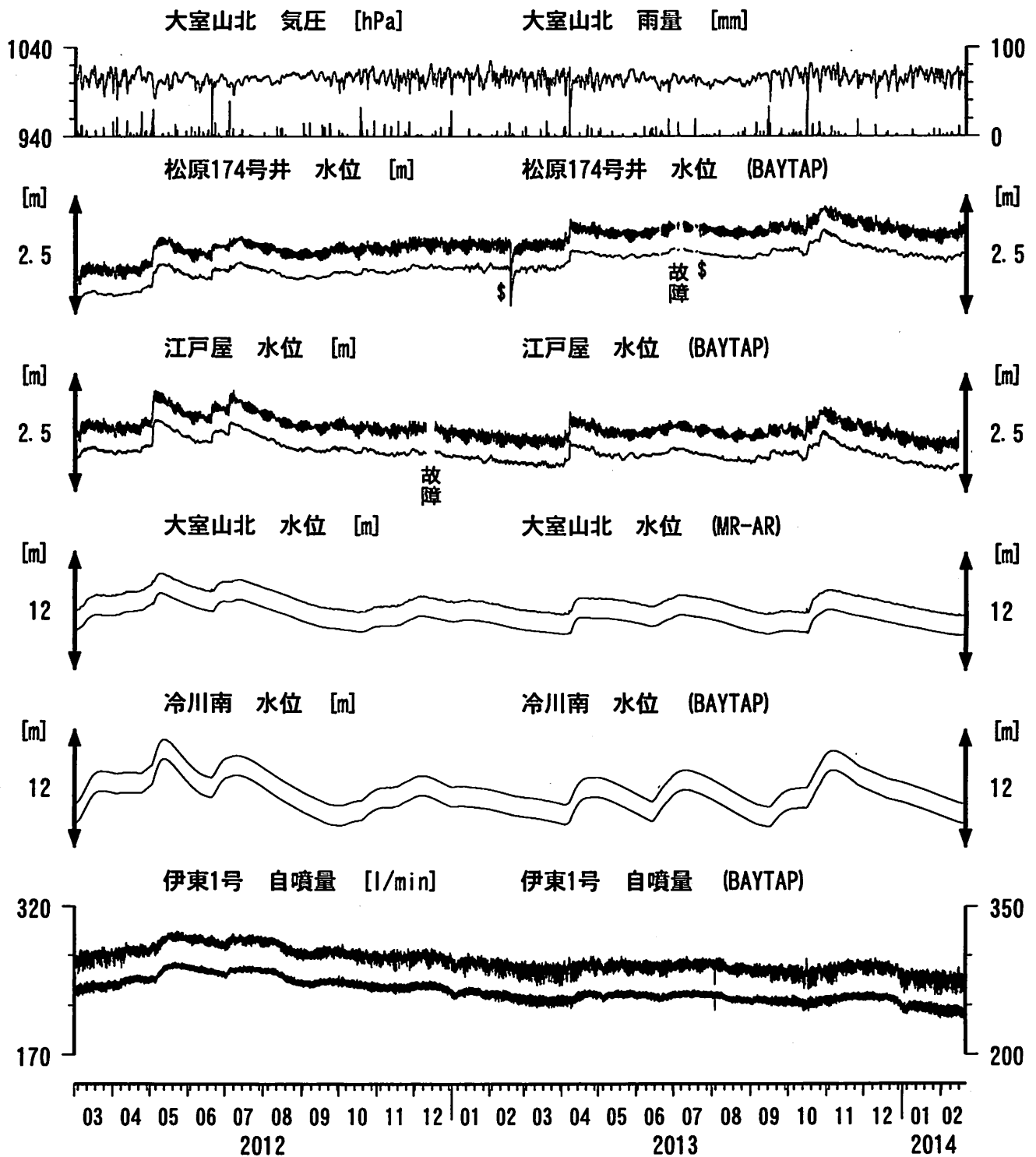


コメント: \$;保守. ?;原因不明.  
 松原174号井は静岡県による観測.  
 伊東1は, 休日・年末年始に周囲の  
 温泉使用量が増加するため, 自噴量が減少する.  
 伊東1の自噴量は, 量が少なくなると  
 配管構造のため, 見かけ上, 値がばらつく.



# 伊豆半島東部 地下水位・自噴量 長期 (時間値)

## (2012/03/01 00:00 - 2014/02/21 00:00 (JST))



コメント：\$;保守. ?;原因不明.

松原174号井は静岡県による観測.

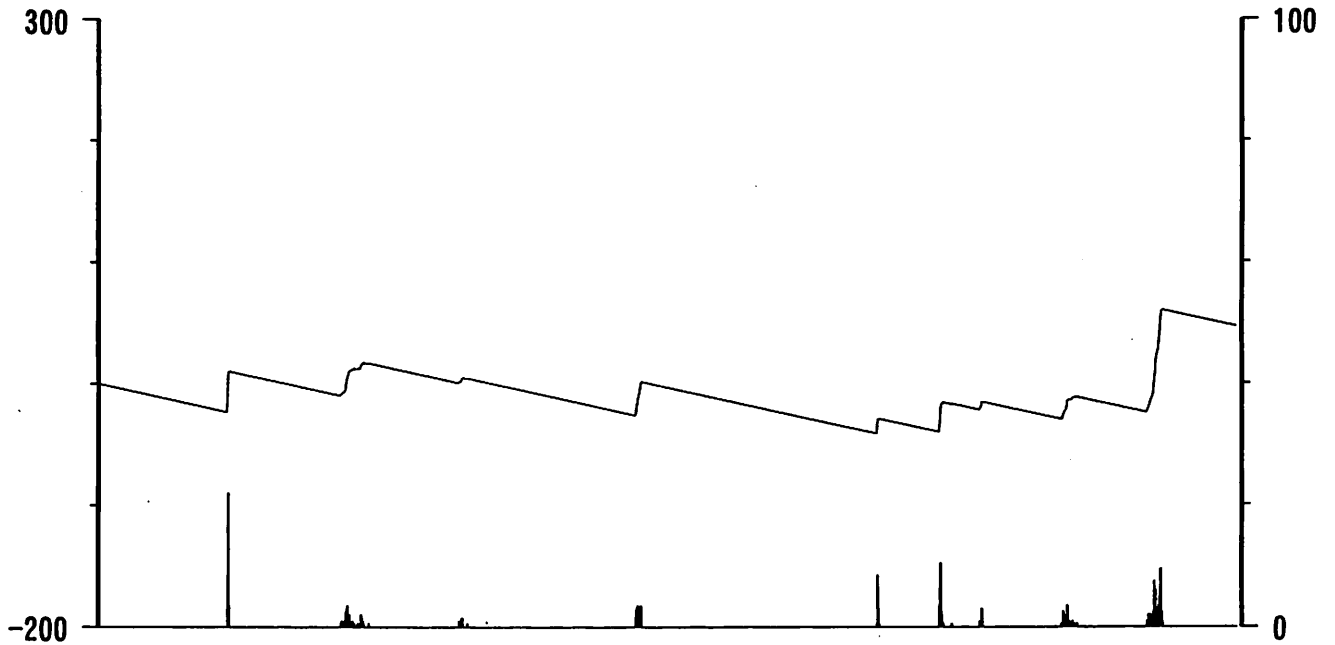
伊東1は、休日・年末年始に周囲の温泉使用量が増加するため、自噴量が減少する.

伊東1の自噴量は、量が少なくなると配管構造のため、見かけ上、値がばらつく.

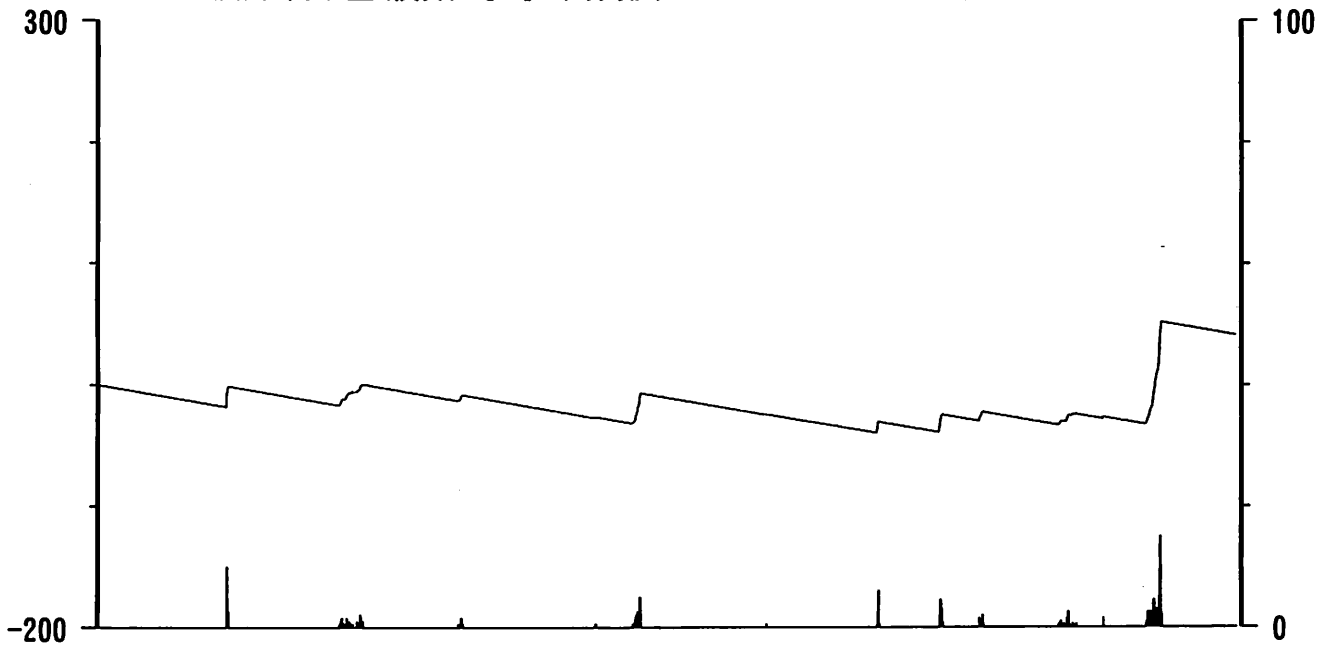


榛原・浜岡観測井 直近3ヶ月の積算降雨量トレンド除去グラフ [mm]  
 (2013/12/01 00:00 - 2014/02/21 00:00 (JST))

榛原 降水量(積算) [mm] (時間値)



浜岡 降水量(積算) [mm] (時間値)



01 08 15 22 29 05 12 19 26 02 09 16  
 2013/12 2014/01 2014/02

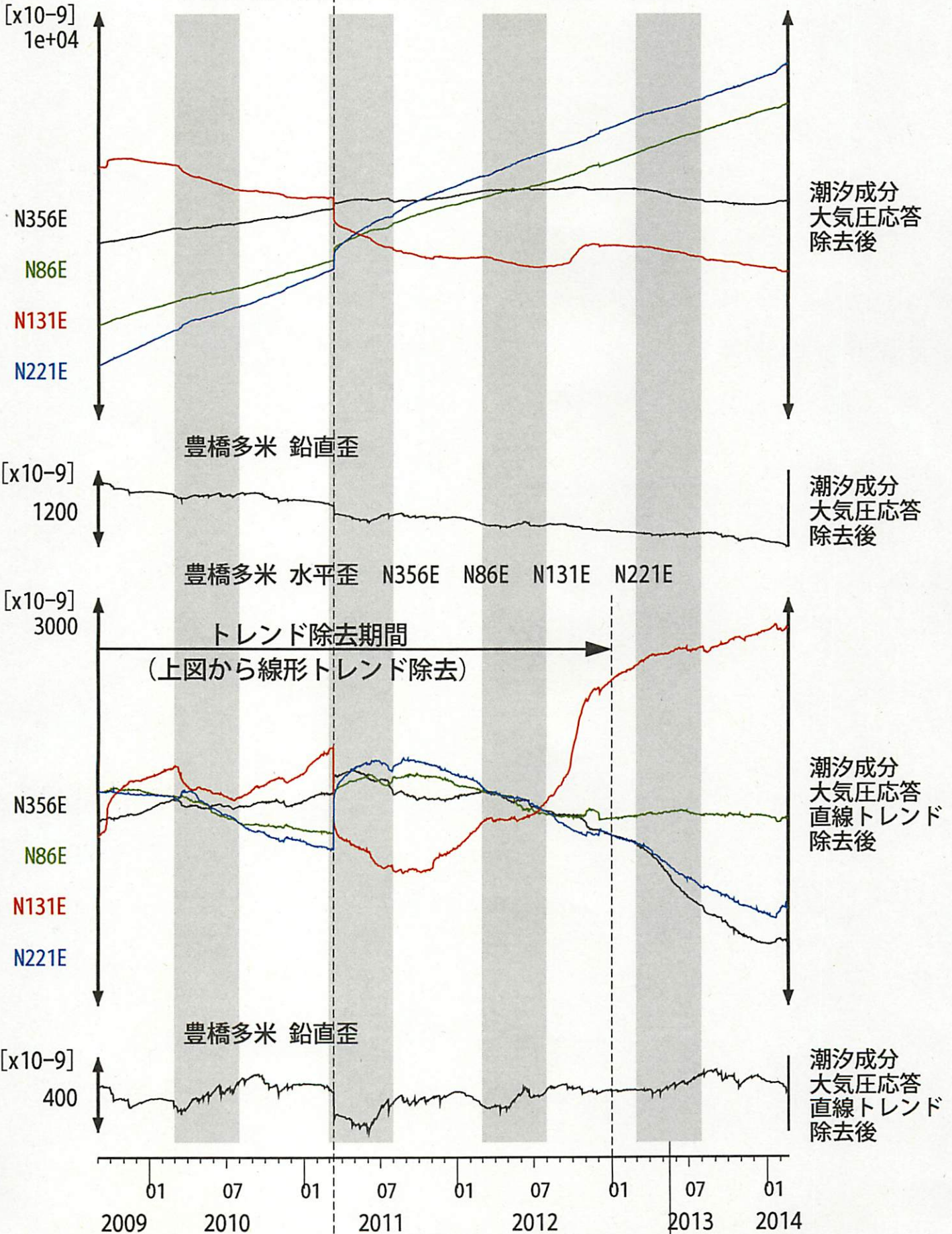
コメント：トレンドは、グラフに示している期間で求めている。



# 豊橋多米の地殻歪の長期変化 (日値)

(2009/09/01 00:00 - 2014/02/21 00:00)

豊橋多米 水平歪 N356E N86E N131E N221E



11.03.11.  
東北地方太平洋沖  
地震 (Mw9.0)

季節変化?

## 紀伊半島～愛知県における歪・傾斜・地下水観測結果（2013年12月～2014年2月）

産業技術総合研究所

産業技術総合研究所(産総研)の紀伊半島～愛知県の10観測点(図1)における2013年12月1日から2014年2月20日までの歪・傾斜・地下水および気象観測結果を図2～19に示す。また、産総研がエンベロープ相関法を用いて決定した、深部低周波微動の震源時空間分布および個数を図20-21に示す。

2014年1月23日～28日頃にかけて、三重県中部～伊勢湾～愛知県西部付近において、2月3日～7日頃にかけて、愛知県中部付近において、それぞれ活発な深部低周波微動活動が観測され(図22)、三重県、愛知県、静岡県および長野県における、産総研の多成分歪4観測点、傾斜2観測点、地下水1観測点(2井戸)、気象庁および静岡県の多成分歪6観測点、体積歪2観測点、防災科研Hi-net高感度加速度計(傾斜)7観測点において変化が観測された(図23)。期間を3つに分けて断層面の推定を行った結果を図24-26に示す。推定されたMwはそれぞれ5.8, 5.8, 5.7であった。

期間Aの活動領域を含む三重県中部～伊勢湾付近では、135日前の2013年9月8～10日にかけてMw5.8の、期間Bの活動領域を含む愛知県西部付近では、206日前の2013年6月28日～7月3日にかけてMw5.7の、機関Cの活動領域を含む愛知県中部付近では、175日前の2013年8月3日午後～12日午前にかけてMw5.7の短期的SSEが、それぞれ発生したと推定されている(それぞれ図24-26の灰色矩形4, 2および3)。

2014年2月15日午後～18日頃にかけて、奈良県南部付近において活発な深部低周波微動活動が観測され(図27)、奈良県および三重県における、産総研の多成分歪2観測点、地下水1観測点、防災科研Hi-net高感度加速度計(傾斜)1観測点において変化が観測された(図28)。断層面の推定を行った結果を図29に示す。推定されたMwは5.3であった。

この領域では、111日前の2013年10月26日～27日にかけてMw5.5の短期的SSEが発生したと推定されている(図29の灰色矩形1)。なお、Itaba and Ando [2011]によると、同領域の平均的な活動間隔は $120 \pm 20$ 日である。

### 解析方法

短期的SSEの断層面推定には、それぞれの観測点の水平歪4成分、体積歪、地下水圧、若しくは傾斜2成分の記録を用いる。地下水圧は、O1およびM2分潮の振幅をBAYTAP-G [Tamura et al., 1991]により計算し、GOTIC2 [Matsumoto et al., 2001]により推定した地球固体潮汐および海洋荷重潮汐(O1およびM2分潮)との振幅比を用いて、体積歪に変換する。歪・地下水・傾斜ともに、観測波形からBAYTAP-Gにより、気圧応答成分、潮汐成分およびホワイトノイズ成分を取り除く。また、イベント直前の期間を用いて1次トレンドも取り除く。微動活動も参考にして、数時間～半日単位で活動開始・終了時期を判断し、その期間の変化量を短期的SSEによる変化量とする。その際、歪についてはMatsumoto et al. [2010]の手法で理論潮汐歪を用いてキャリブレーションを行っている。

断層面の推定は、計算時間の短縮と、推定された結果の一意性を確認するために2段階で行う。断層面推定は板場ほか[2012]の手法を用いた。フィリピン海プレート境界面上[弘瀬ほか, 2007]に多数の断層面を仮定してグリッドサーチにより推定する。仮定した断層面上のすべりによって各観測点で期待される歪変化の計

算にはOkada [1992]のプログラムを用いる。1段階目には、断層面のサイズは固定(幅・長さ共に20km)、断層面の位置(0.1° 間隔)およびすべり量(1~100mmの間で1mm間隔)のみ可変として広範囲で計算を行う。1段階目の結果を示す図では、それぞれの断層面において最適なすべり量を与えたときの、観測値と計算値(期待値)との残差分布を示している。これにより、短期的SSEが生じている可能性が高い領域を絞り込むとともに、推定された結果の任意性を確認することが出来る。2段階目には、1段階目で絞り込んだ領域(=残差が小さい領域)付近で、位置及びすべり量に加えて、断層面の長さを10~80km、幅を10~50km、それぞれ1km間隔で可変として計算を行なう。その結果、観測値との残差が最小となる断層面が1つ計算されるが、計算に使用している観測点数が少ない場合や、断層面と観測点配置の関係によっては任意性が高くなるので注意が必要である。なお、異種観測値を統合して解析するため、観測点ごとに残差をノイズレベルによって規格化している。ノイズレベルは、気圧応答、潮汐成分およびホワイトノイズ成分を取り除いた後(微動活動が活発な期間および周辺の日雨量50mmを超える時期を除く)の24時間階差の $2\sigma$ とした。

深部低周波微動の検出・震源決定には、エンベロープ相関法を用いている。

## 謝辞

短期的SSEの断層モデル推定には、防災科研Hi-net高感度加速度計(傾斜計)および気象庁の多成分歪計および体積歪計の記録とキャリブレーション係数を使用しました。微動の解析には、防災科研Hi-net、気象庁、東京大学、京都大学、名古屋大学、高知大学、九州大学の地震波形記録を使用しました。低周波地震の震央位置表示には、気象庁の一元化カタログを使用しました。ここに記して感謝します。

## 参考文献

- 弘瀬冬樹, 中島淳一, 長谷川昭 (2007), Double-Difference Tomography法による西南日本の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*, **60**, 1-20.
- Itaba, S., and R. Ando, A slow slip event triggered by teleseismic surface waves, *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L21306, doi:10.1029/2011GL049593, 2011.
- 板場智史, 松本則夫, 北川有一, 小泉尚嗣, 松澤孝紀, 歪・傾斜・地下水統合解析による短期的スロースリップイベントのモニタリング, *日本地球惑星連合2012年大会*, 千葉, 5月, 2012.
- Matsumoto, K., T. Sato, T. Takanezawa, and M. Ooe, GOTIC2: A Program for Computation of Oceanic Tidal Loading Effect, *J. Geod. Soc. Japan*, **47**, 243-248, 2001.
- Matsumoto, N., O. Kamigaichi, Y. Kitagawa, S. Itaba, and N. Koizumi (2010), In-situ Calibration of Borehole Strainmeter Using Green's Functions for Surface Point Load at a Depth of Deployment, *Eos, Trans. AGU*, Abstract G11A-0626.
- Okada, Y. (1992), Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **82**, 1018-1040.
- Tamura, Y., T. Sato, M. Ooe and M. Ishiguro (1991), A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion, *Geophys. J. Int.*, **104**, 507-516.



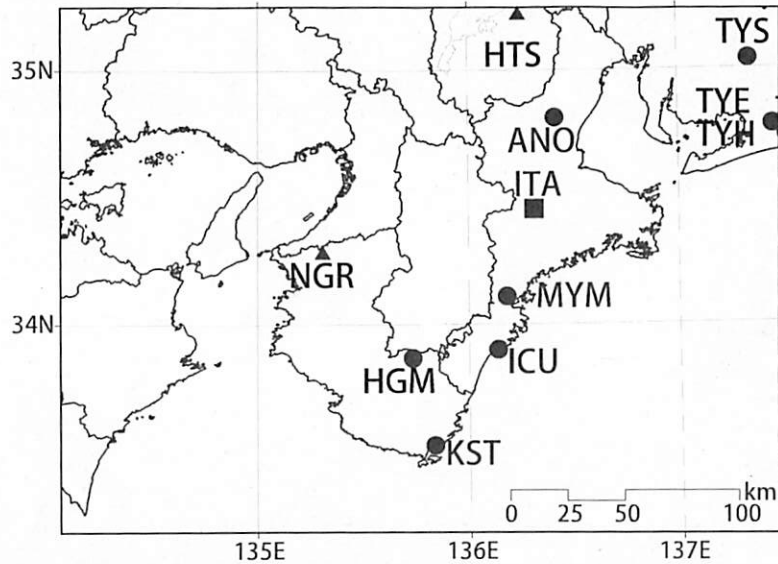
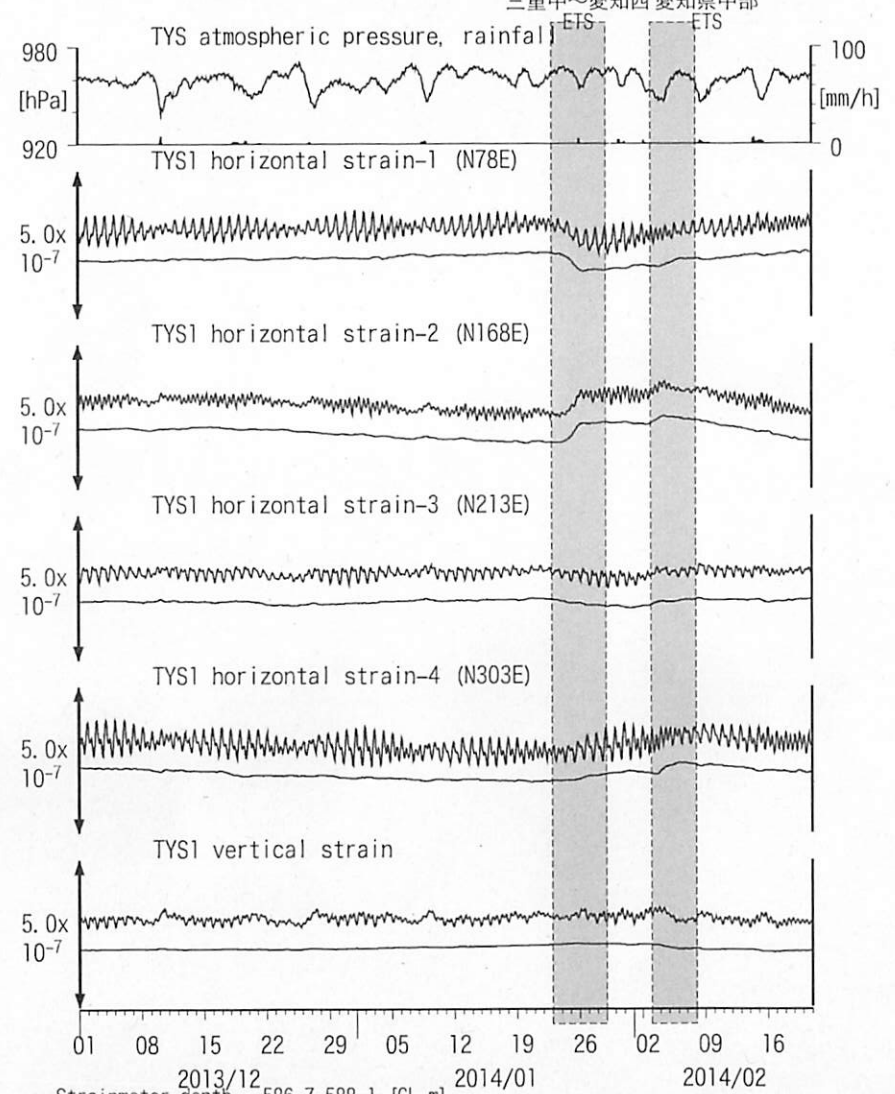


図1: 紀伊半島～愛知県における地下水等総合観測施設の分布図(●・■・▲)。●はデジタル方式の石井式歪計・傾斜計を併設している観測点、■は Gladwin 式歪計・ミットヨ式傾斜計を併設している観測点、▲はアナログ方式の石井式歪計を併設している観測点を示す。

表1: 産総研観測点の新名称。平成23年1月17日から「市町村名」+「町・字名等」を基本とする名称に変更している。なお、3文字コードは変更していない。

3文字コード (変更無し)	旧名称	新名称	新名称 ふりがな	市区町村	図
TYS	豊田下山	豊田神殿	とよたかんの	愛知県豊田市	2,3
TYE	豊橋東	豊橋多米	とよはしため	愛知県豊橋市	4,5
HTS	秦荘	愛荘香之庄	あいしょうこのしょう	滋賀県愛知郡愛荘町	6
ANO	安濃	津安濃	つあのおう	三重県津市	7,8
ITA	飯高赤桶	松阪飯高	まつさかいいたか	三重県松阪市	9,10
MYM	海山	紀北海山	きほくみやま	三重県北牟婁郡紀北町	11,12
ICU	井内浦	熊野磯崎	くまのいそざき	三重県熊野市	13,14
HGM	本宮三越	田辺本宮	たなべほんぐう	和歌山県田辺市	15,16
KST	串本津荷	串本津荷	くしもとつが	和歌山県東牟婁郡串本町	17,18
NGR	根来	岩出東坂本	いわでひがしさがもと	和歌山県岩出市	19

図2: Crustal strains changes at TYS 豊田神殿 (時間値)  
(2013/12/01 00:00 - 2014/02/21 00:00 (JST))



Strainmeter depth = 586.7-588.1 [GL-m]

上: 1次トレンドを除去

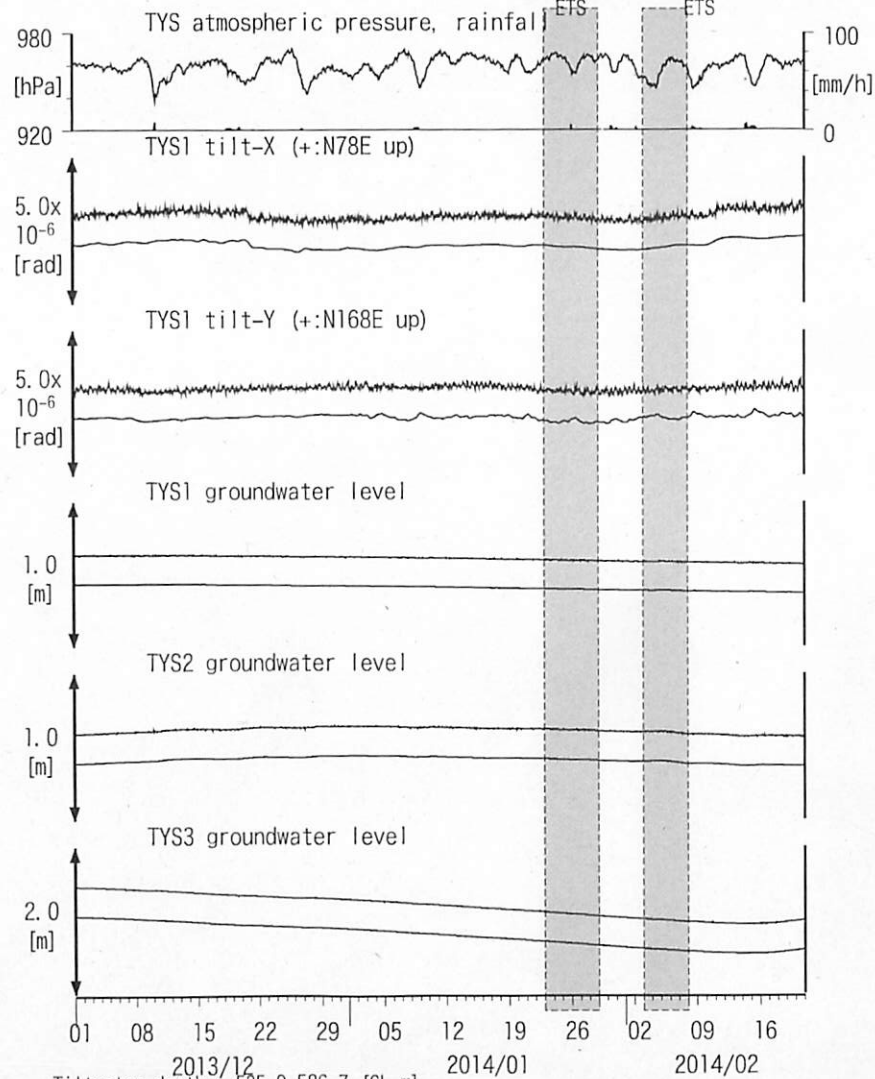
下: BAYTAP-Gにより潮汐・気圧応答・ノイズ成分を除去後、1次トレンドも除去



図3: Tilt and groundwater level changes at TYS 豊田神殿 (時間値)

(2013/12/01 00:00 - 2014/02/21 00:00 (JST))

三重中～愛知西 愛知県中部



Tiltmeter depth = 585.9-586.7 [GL-m]

TYS1 : Screen depth = 404.8-426.7 [GL-m]

TYS2 : Screen depth = 148.8-154.3 [GL-m]

TYS3 : Screen depth = 26.8-32.3 [GL-m]

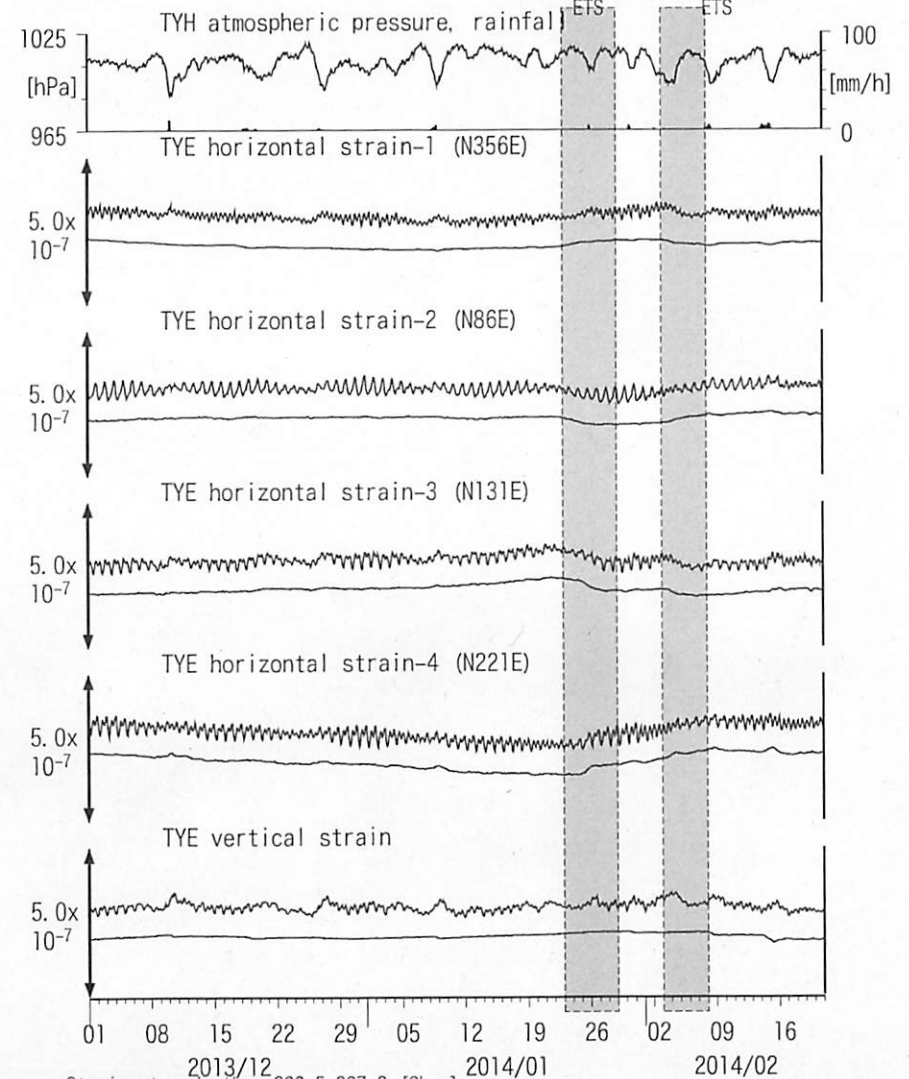
上: tiltは1次トレンド除去

下: BAYTAP-Gにより潮汐・気圧応答成分除去、tiltは1次トレンドも除去

図4: Crustal strain changes at TYE 豊橋多米 (時間値)

(2013/12/01 00:00 - 2014/02/21 00:00 (JST))

三重中～愛知西 愛知県中部

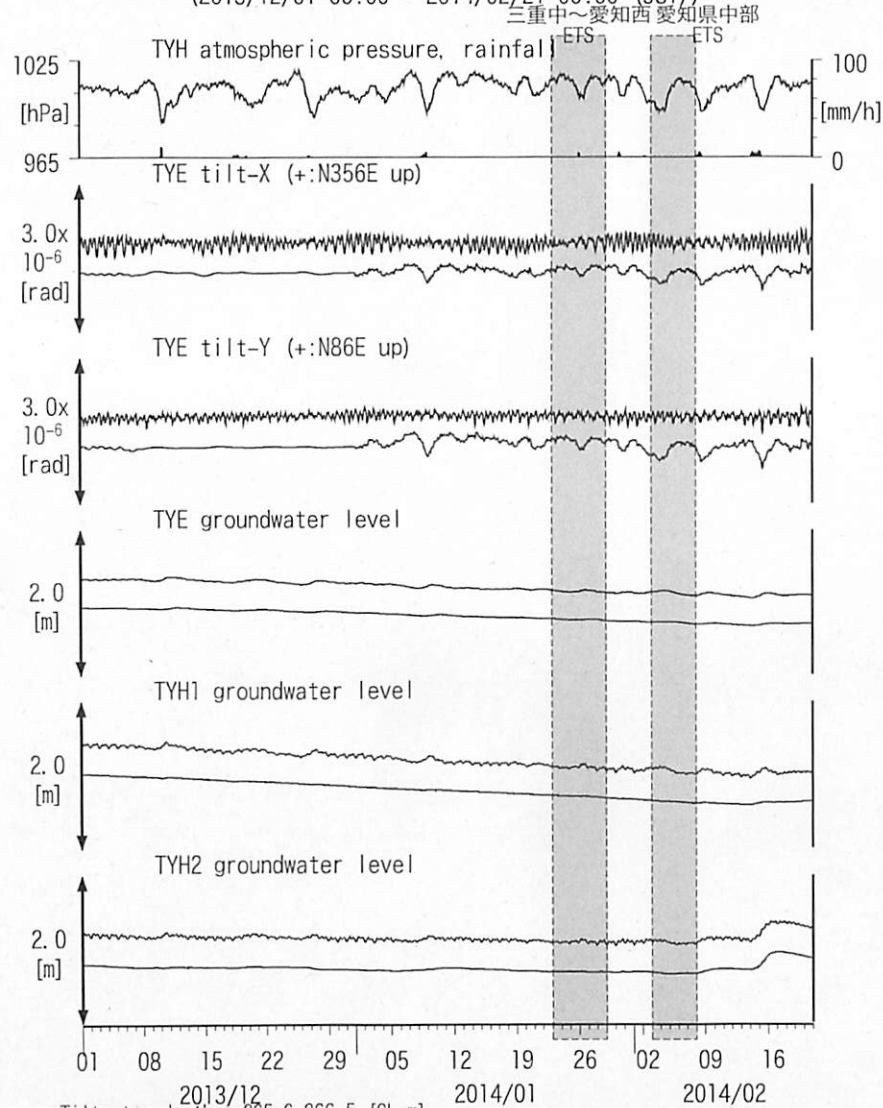


Strainmeter depth = 266.5-267.9 [GL-m]

上: 1次トレンドを除去

下: BAYTAP-Gにより潮汐・気圧応答・ノイズ成分を除去後、1次トレンドも除去

図5: Tilt and groundwater level changes at TYE and TYH 豊橋多米・豊橋  
(2013/12/01 00:00 - 2014/02/21 00:00 (JST))



Tiltmeter depth = 265.6-266.5 [GL-m]

TYE : Screen depth = 185.9-207.8 [GL-m]

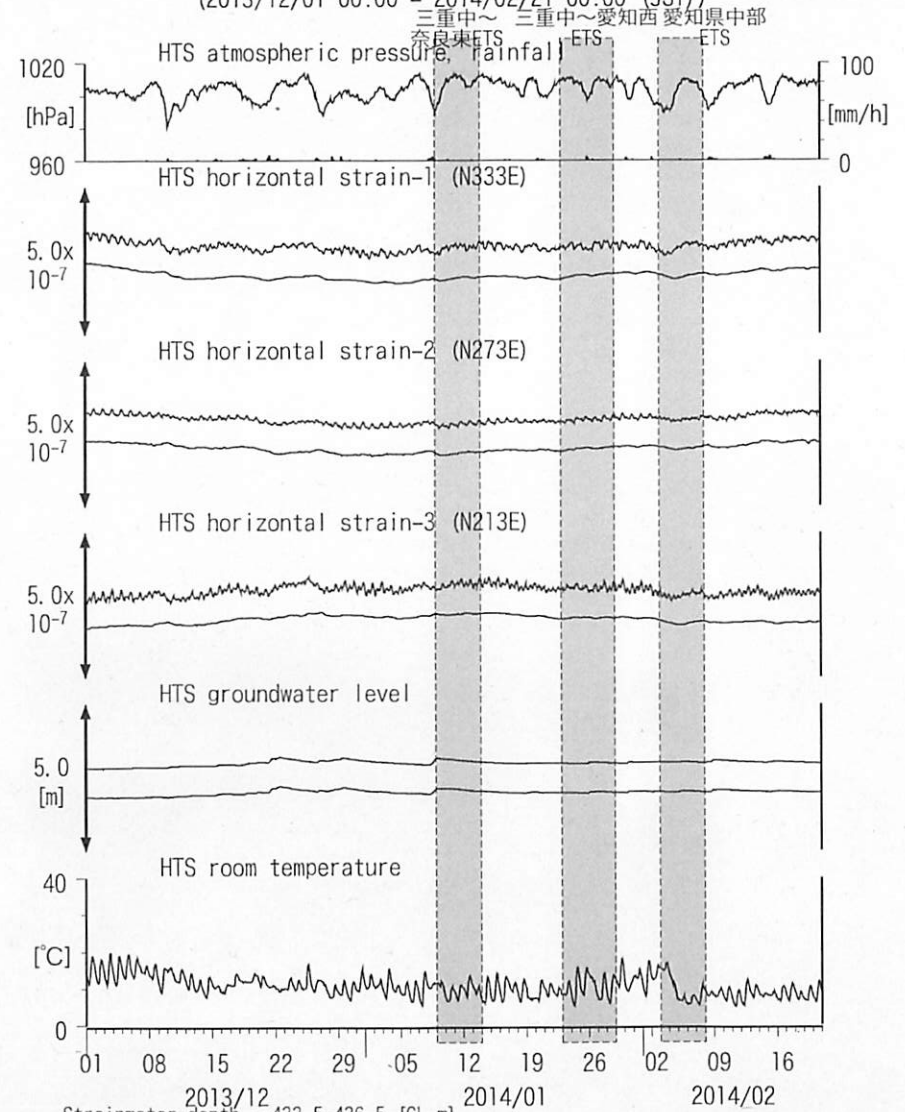
TYH1 : Screen depth = 178.6-200.4 [GL-m]

TYH2 : Screen depth = 133.7-150.0 [GL-m]

上: tiltは1次トレンドを除去

下: BAYTAP-Gにより潮汐・気圧応答・ノイズ成分を除去、tiltは1次トレンドも除去

図6: Crustal strain and groundwater level changes at HTS 愛荘香之庄  
(2013/12/01 00:00 - 2014/02/21 00:00 (JST))



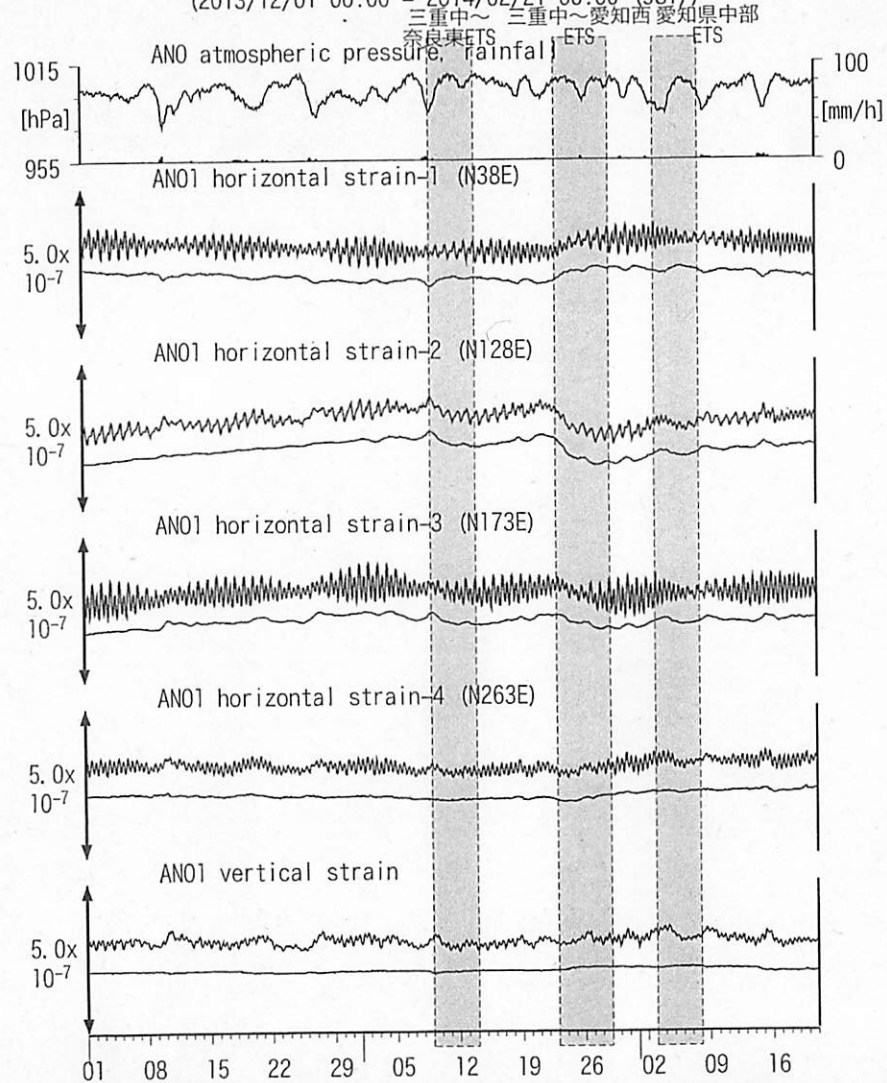
Strainmeter depth = 433.5-436.5 [GL-m]

Screen depth = 338.3-360.1 [GL-m]

上: strainは1次トレンドを除去

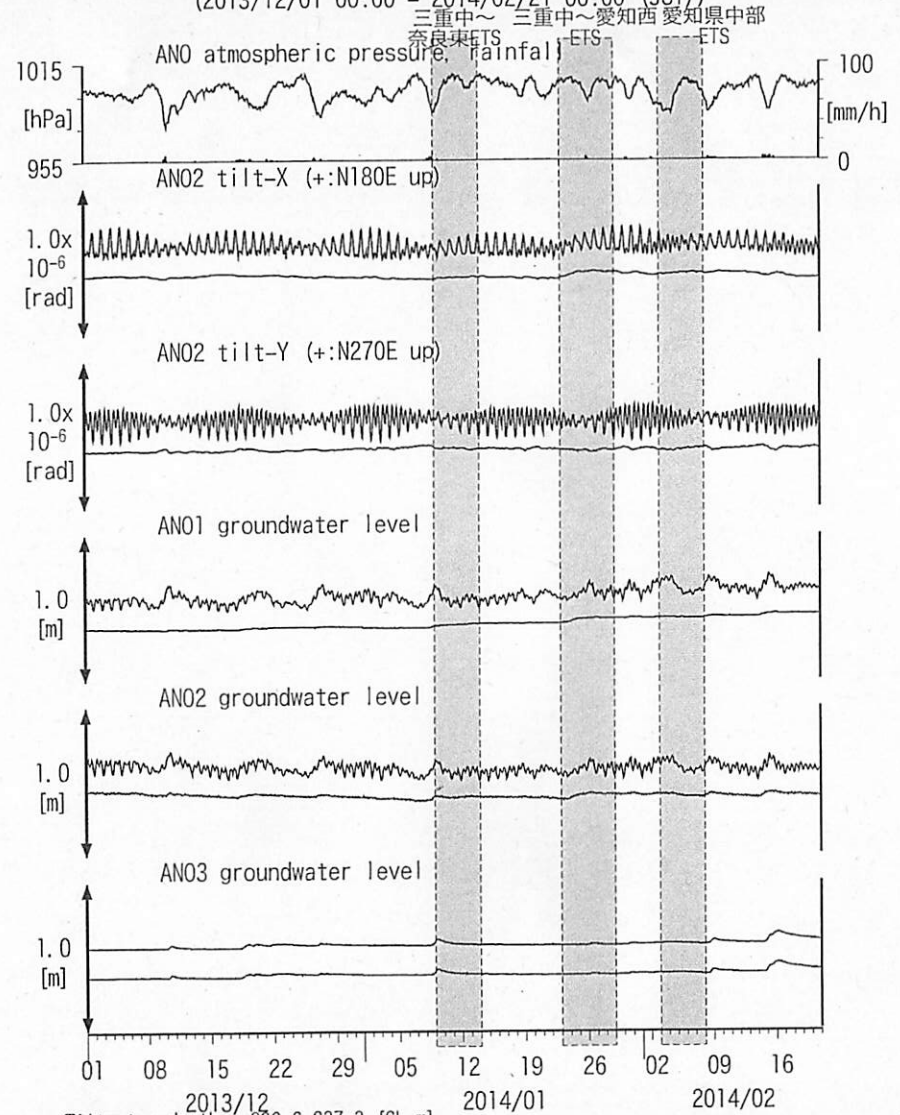
下: BAYTAP-Gにより潮汐・気圧応答・ノイズ成分を除去、strainは1次トレンドも除去

図7: Crustal strains changes at ANO 津安濃 (時間値)  
 (2013/12/01 00:00 - 2014/02/21 00:00 (JST))



Strainmeter depth = 588.9-590.3 [GL-m]  
 上: 1次トレンドを除去  
 下: BAYTAP-Gにより潮汐・気圧応答・ノイズ成分を除去後、1次トレンドも除去

図8: Tilt and groundwater level changes at ANO 津安濃 (時間値)  
 (2013/12/01 00:00 - 2014/02/21 00:00 (JST))

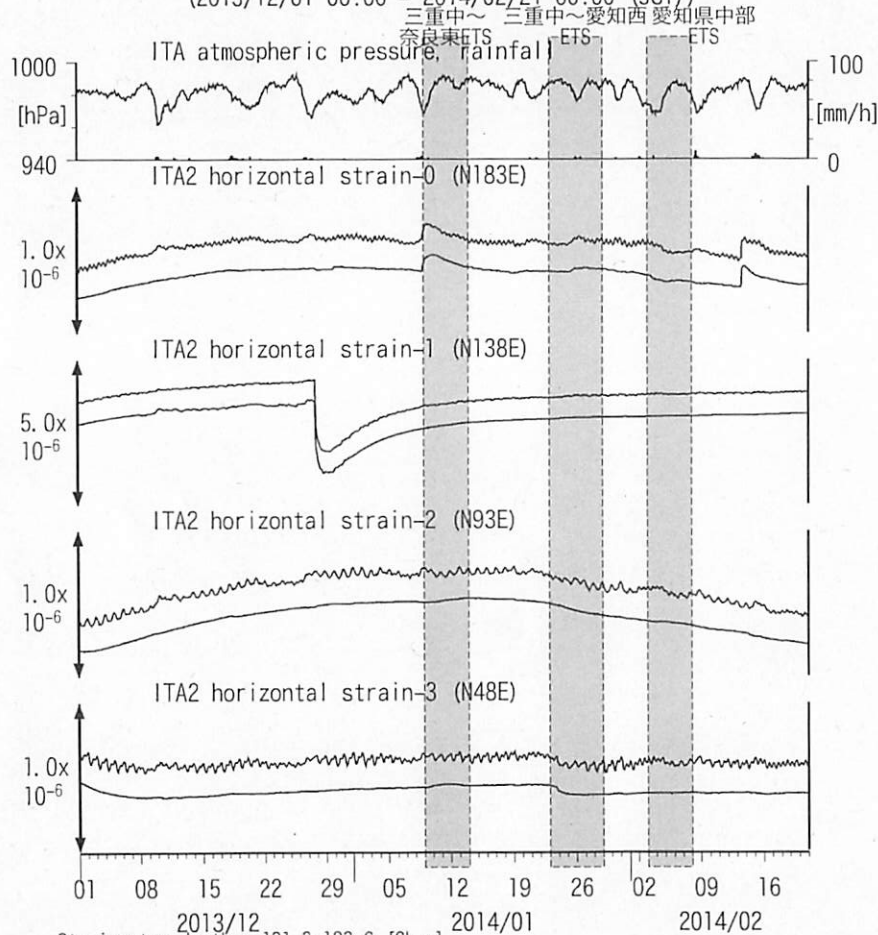


Tiltmeter depth = 236.6-237.3 [GL-m]  
 ANO1 : Screen depth = 502.7-513.6 [GL-m]  
 ANO2 : Screen depth = 197.5-208.5 [GL-m]  
 ANO3 : Screen depth = 12.0-22.9 [GL-m]  
 上: tiltは1次トレンド除去  
 下: BAYTAP-Gにより潮汐・気圧応答・ノイズ成分除去、tiltは1次トレンドも除去

21



図9: Crustal strain changes at ITA 松阪飯高 (時間値)  
(2013/12/01 00:00 - 2014/02/21 00:00 (JST))

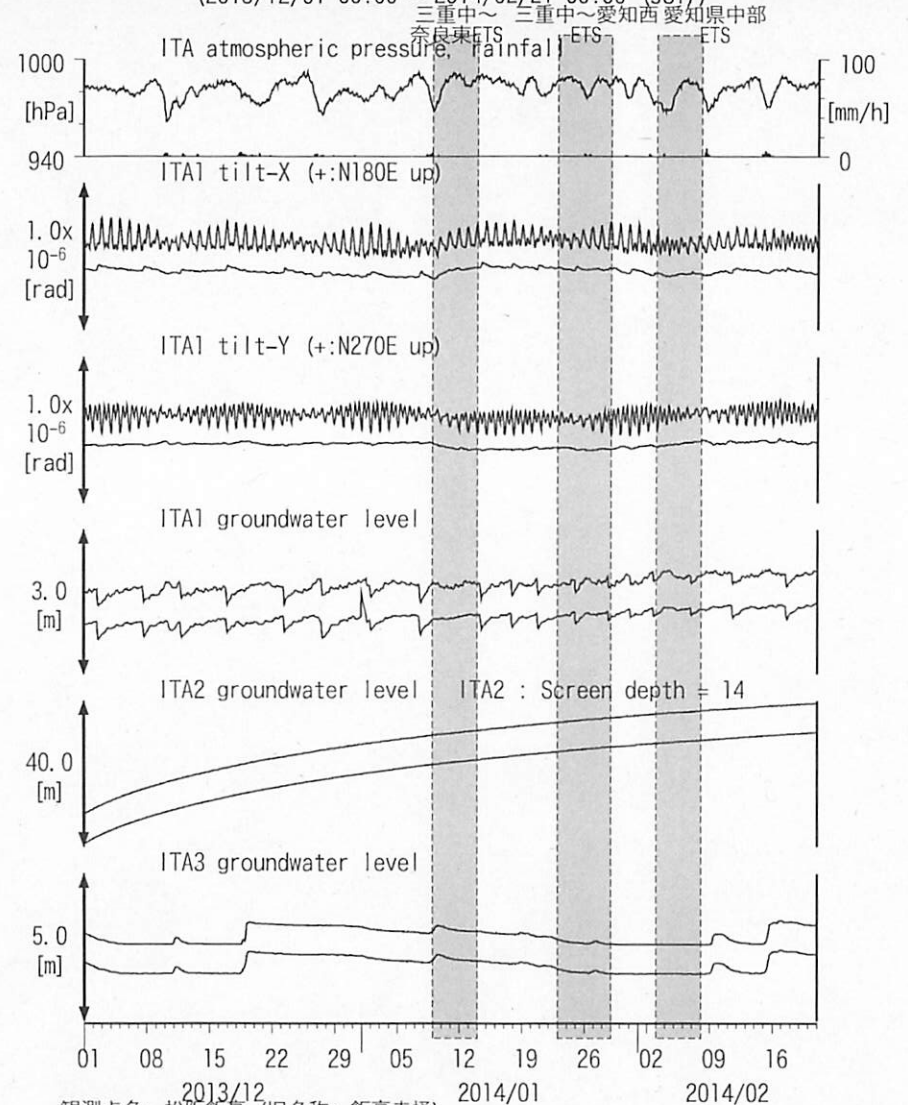


Strainmeter depth = 181.3-183.6 [GL-m]

上: 1次トレンド除去

下: BAYTAP-Gにより潮汐・気圧応答・ノイズ成分除去後に1次トレンド除去

図10: Tilt and groundwater level changes at ITA 松阪飯高 (時間値)  
(2013/12/01 00:00 - 2014/02/21 00:00 (JST))



観測点名: 松阪飯高 (旧名称: 飯高赤桶)

Tiltmeter depth = 596.7-597.3 [GL-m]

ITA1: Screen depth = 547.6-558.5 [GL-m]

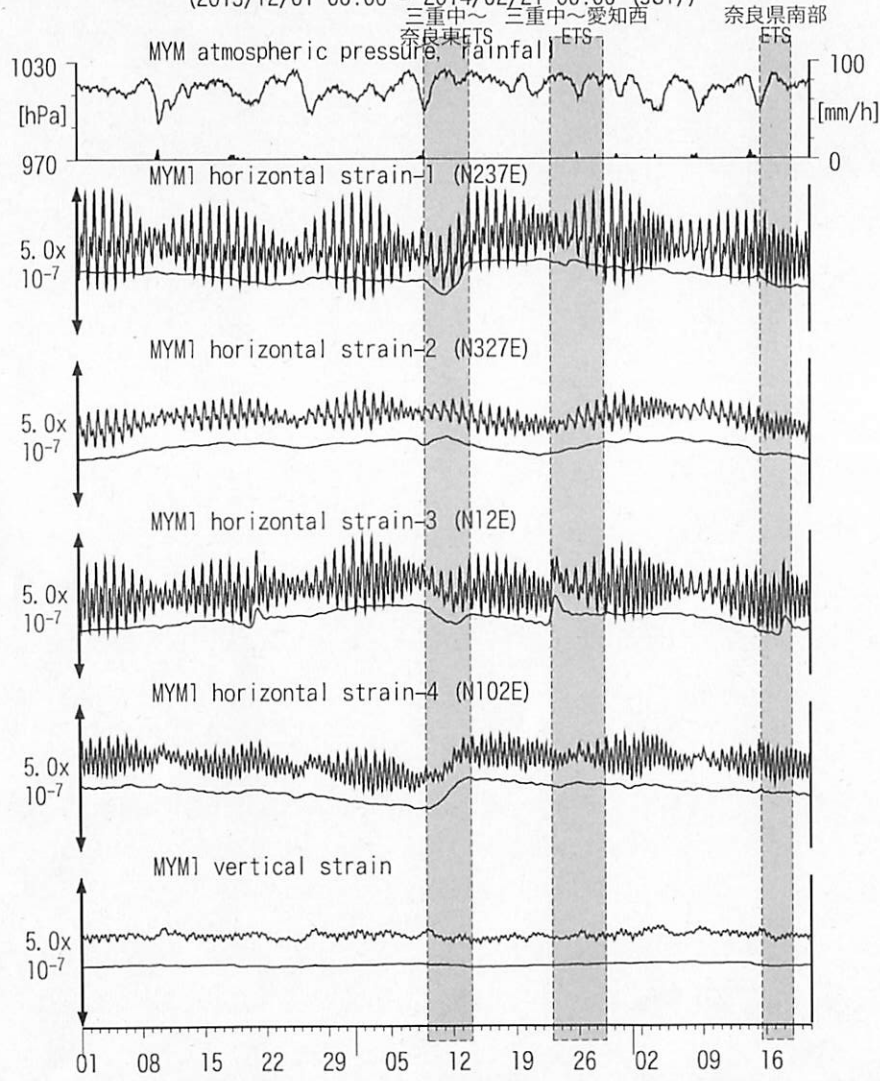
ITA2: Screen depth = 145.5-156.4 [GL-m]

ITA3: Screen depth = 10.8-16.3 [GL-m]

上: tiltは1次トレンド除去

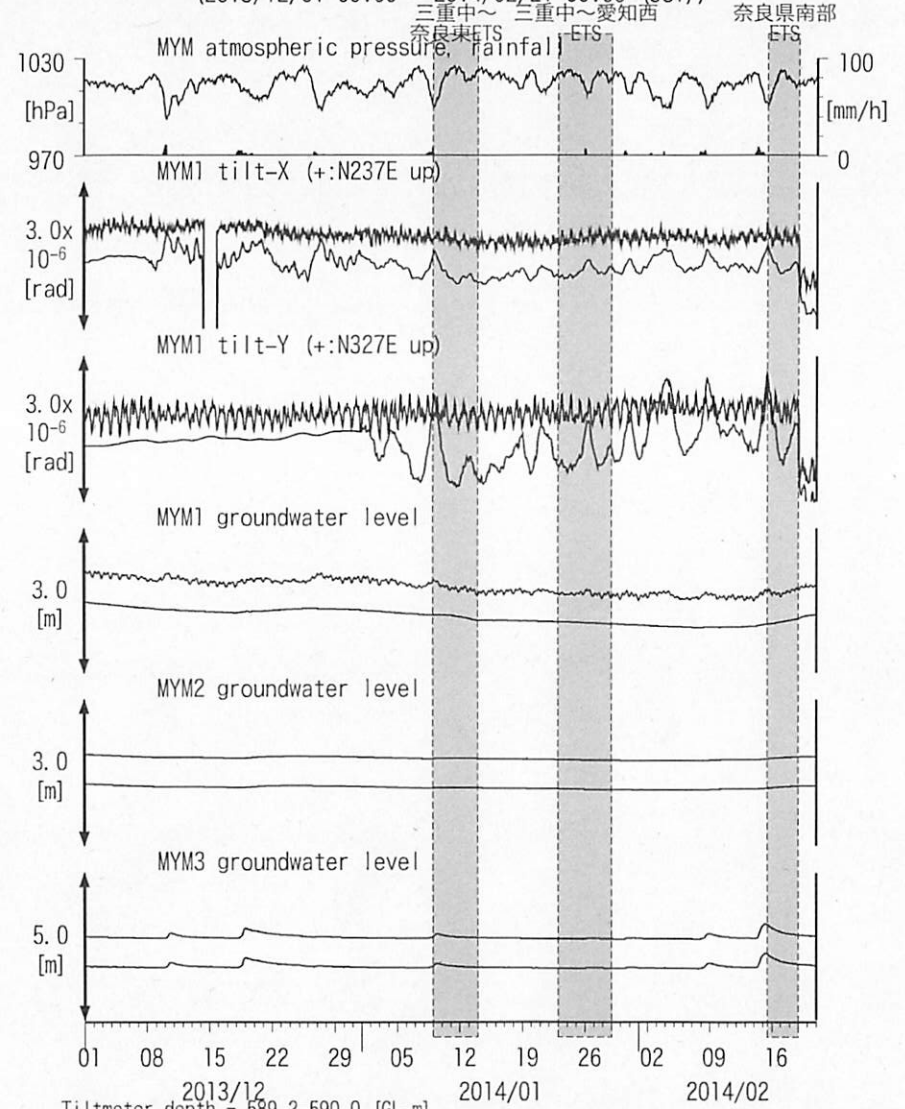
下: BAYTAP-Gにより潮汐・気圧応答・ノイズ成分除去、tiltは1次トレンドも除去  
ITA2は2013/11/26に孔口を密閉した

図11: Crustal strain changes at MYM 紀北海山 (時間値)  
(2013/12/01 00:00 - 2014/02/21 00:00 (JST))



Strainmeter depth = 590.0-591.4 [GL-m]  
上: 1次トレンド除去  
下: BAYTAP-Gにより潮汐・気圧応答・ノイズ成分除去後に1次トレンド除去

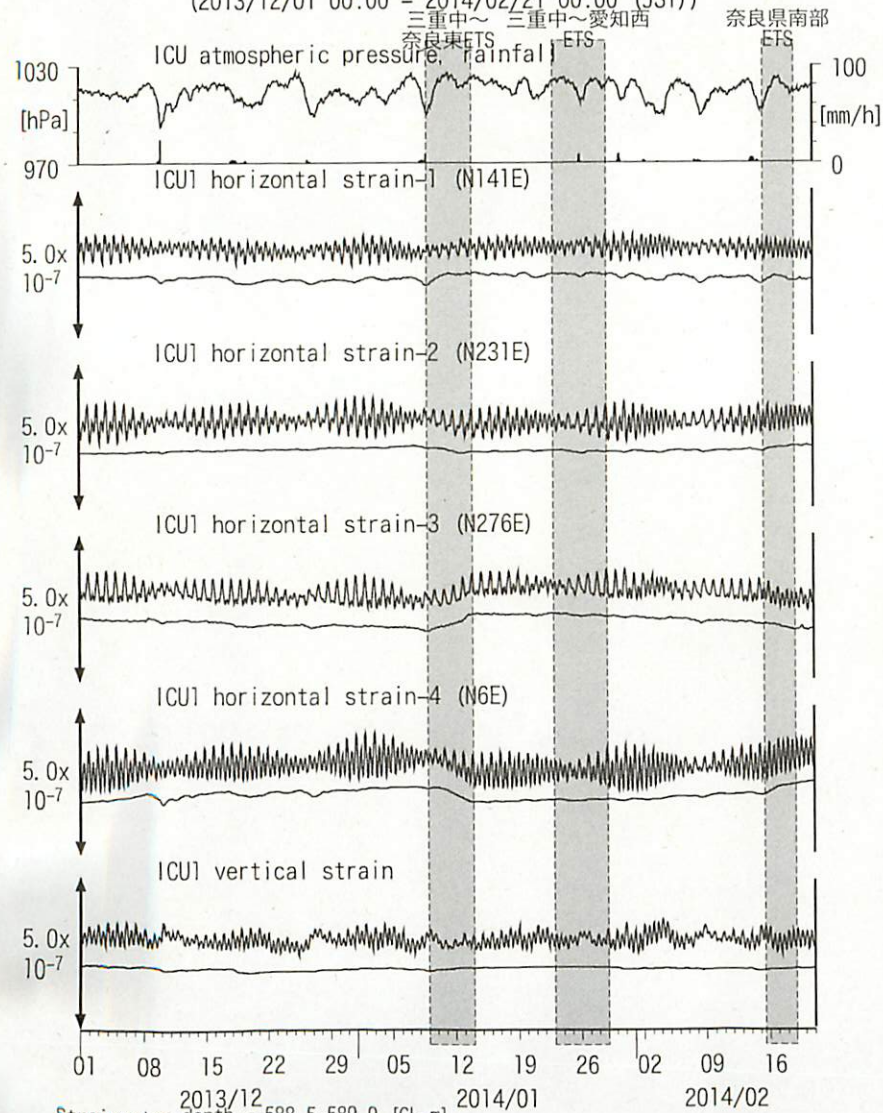
図12: Tilt and groundwater level changes at MYM 紀北海山 (時間値)  
(2013/12/01 00:00 - 2014/02/21 00:00 (JST))



Tiltmeter depth = 589.2-590.0 [GL-m]  
MYM1 : Screen depth = 418.9-429.8 [GL-m]  
MYM2 : Screen depth = 140.3-151.1 [GL-m]  
MYM3 : Screen depth = 19.9-25.3 [GL-m]  
上: tiltは1次トレンド除去  
下: BAYTAP-Gにより潮汐・気圧応答・ノイズ成分除去、tiltは1次トレンドも除去



図13: Crustal strain changes at ICU 熊野磯崎 (時間値)  
(2013/12/01 00:00 - 2014/02/21 00:00 (JST))

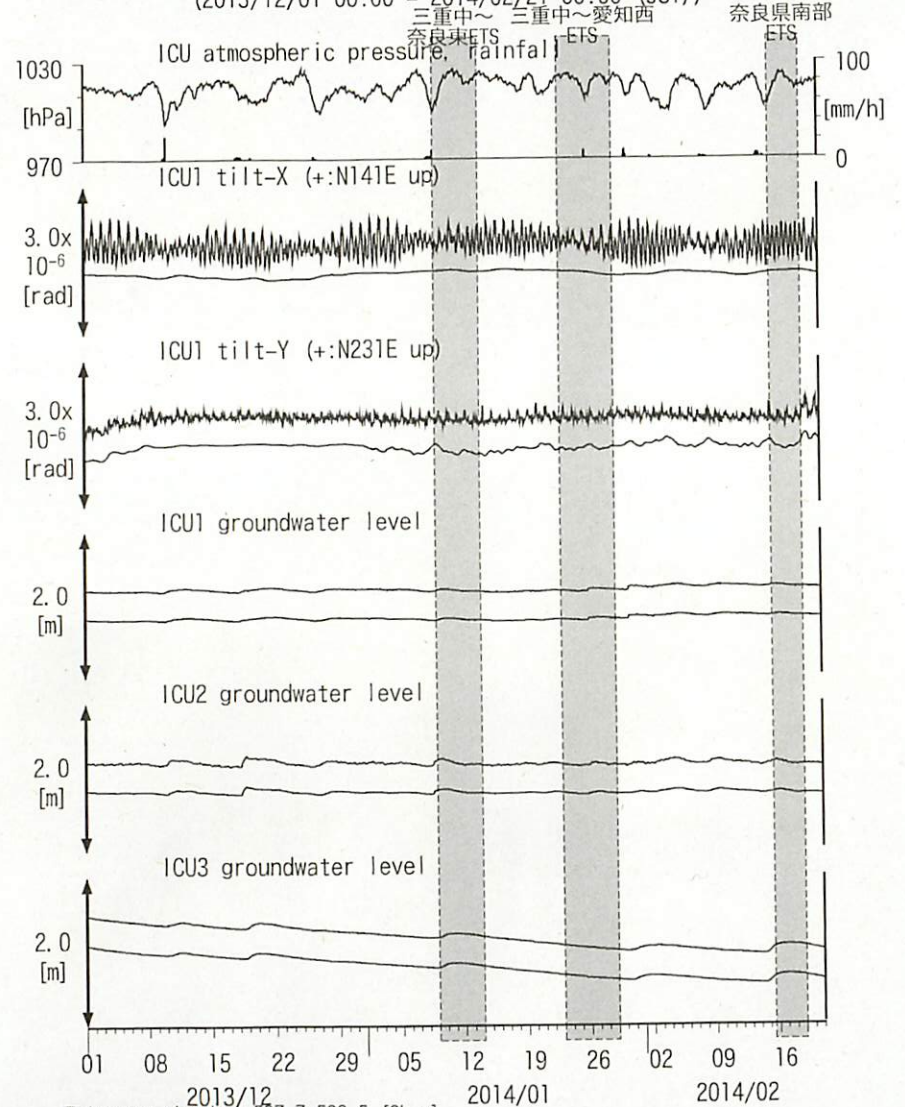


Strainmeter depth = 588.5-589.9 [GL-m]

上: 1次トレンド除去

下: BAYTAP-Gにより潮汐・気圧応答・ノイズ成分除去後に1次トレンド除去

図14: Tilt and groundwater level changes at ICU 熊野磯崎 (時間値)  
(2013/12/01 00:00 - 2014/02/21 00:00 (JST))



Tiltmeter depth = 587.7-588.5 [GL-m]

ICU1 : Screen depth = 522.5-533.4 [GL-m]

ICU2 : Screen depth = 95.7-106.6 [GL-m]

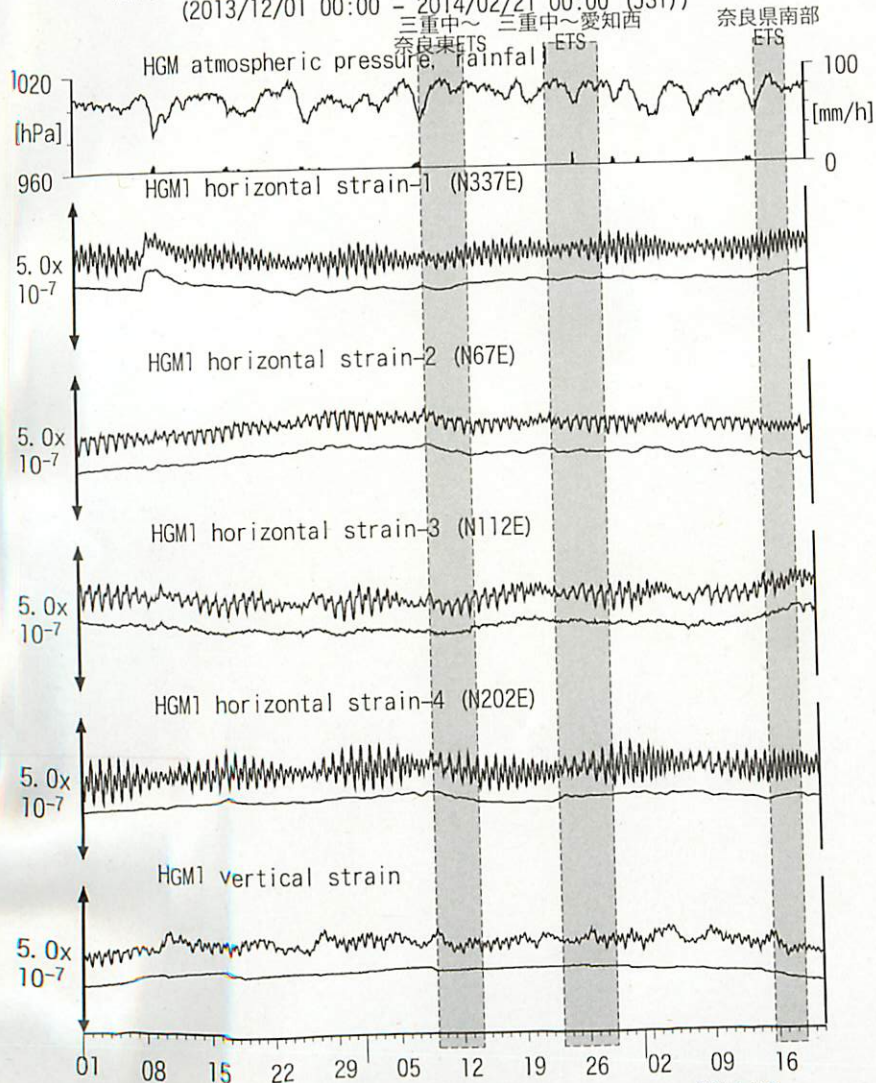
ICU3 : Screen depth = 13.4-18.8 [GL-m]

上: tiltは1次トレンド除去

下: BAYTAP-Gにより潮汐・気圧応答・ノイズ成分除去、tiltは1次トレンドも除去



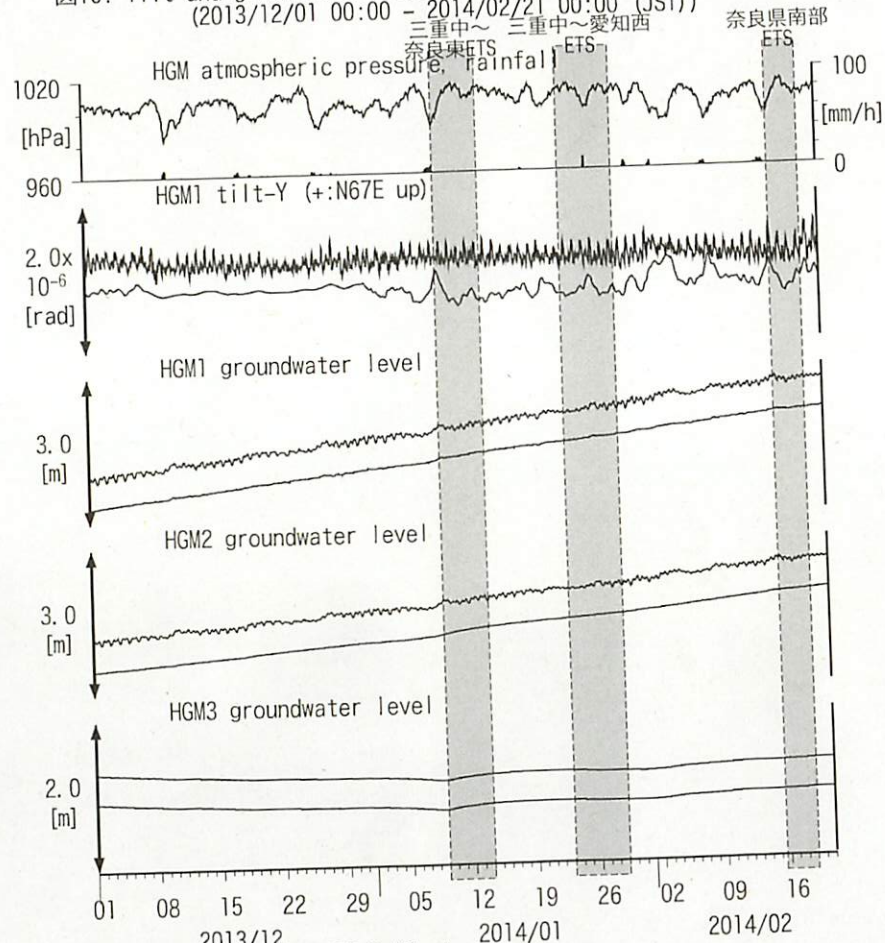
図15: Crustal strains changes at HGM 田辺本宮 (時間値)  
 (2013/12/01 00:00 - 2014/02/21 00:00 (JST))



Strainmeter depth = 372.7-374.1 [GL-m]

上: 1次トレンド除去

図16: Tilt and groundwater level changes at HGM 田辺本宮 (時間値)  
 (2013/12/01 00:00 - 2014/02/21 00:00 (JST))



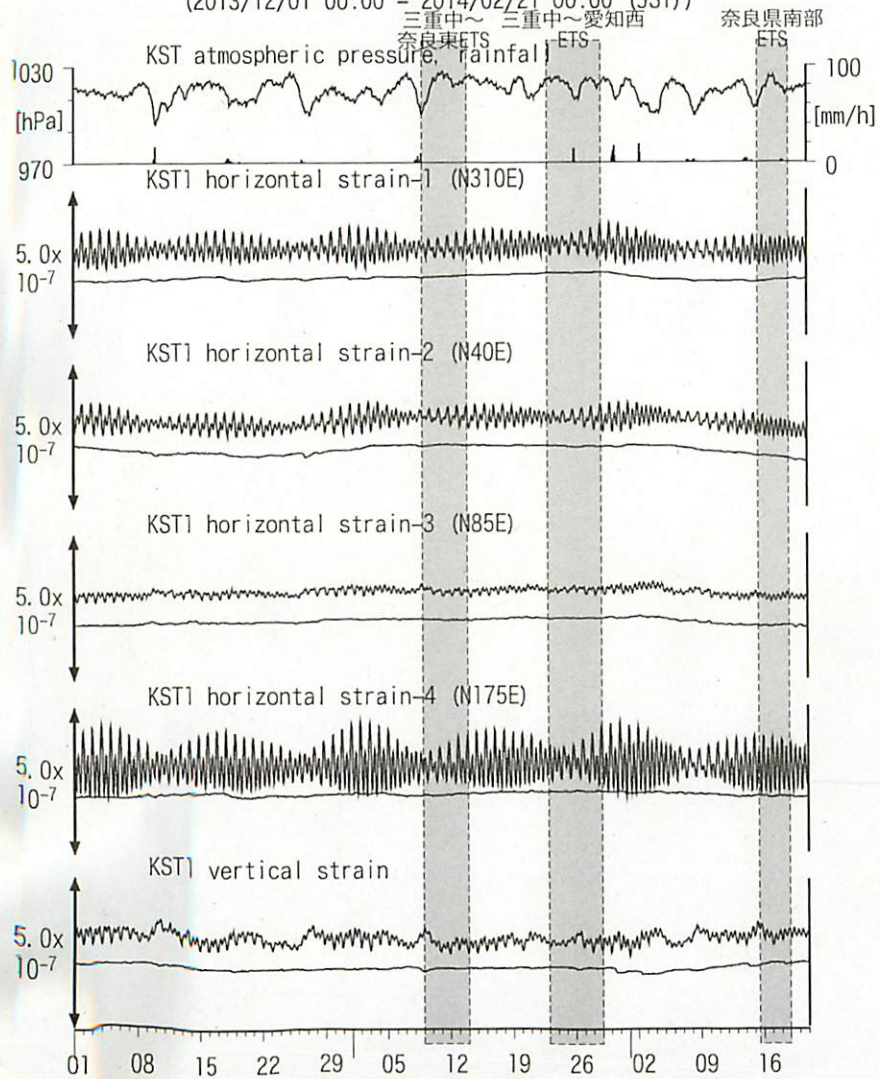
Tiltmeter depth = 371.9-372.7 [GL-m]  
 HGM1 : Screen depth = 320.4-331.3 [GL-m]  
 HGM2 : Screen depth = 180.9-191.8 [GL-m]  
 HGM3 : Screen depth = 24.3-29.8 [GL-m]

上: tiltは1次トレンド除去

下: BAYTAP-Gにより潮汐・気圧応答・ノイズ成分除去、tiltは1次トレンドも除去  
 tilt-Xは振り切れにより欠測  
 HGM1は2013/10/12に孔口を密閉した

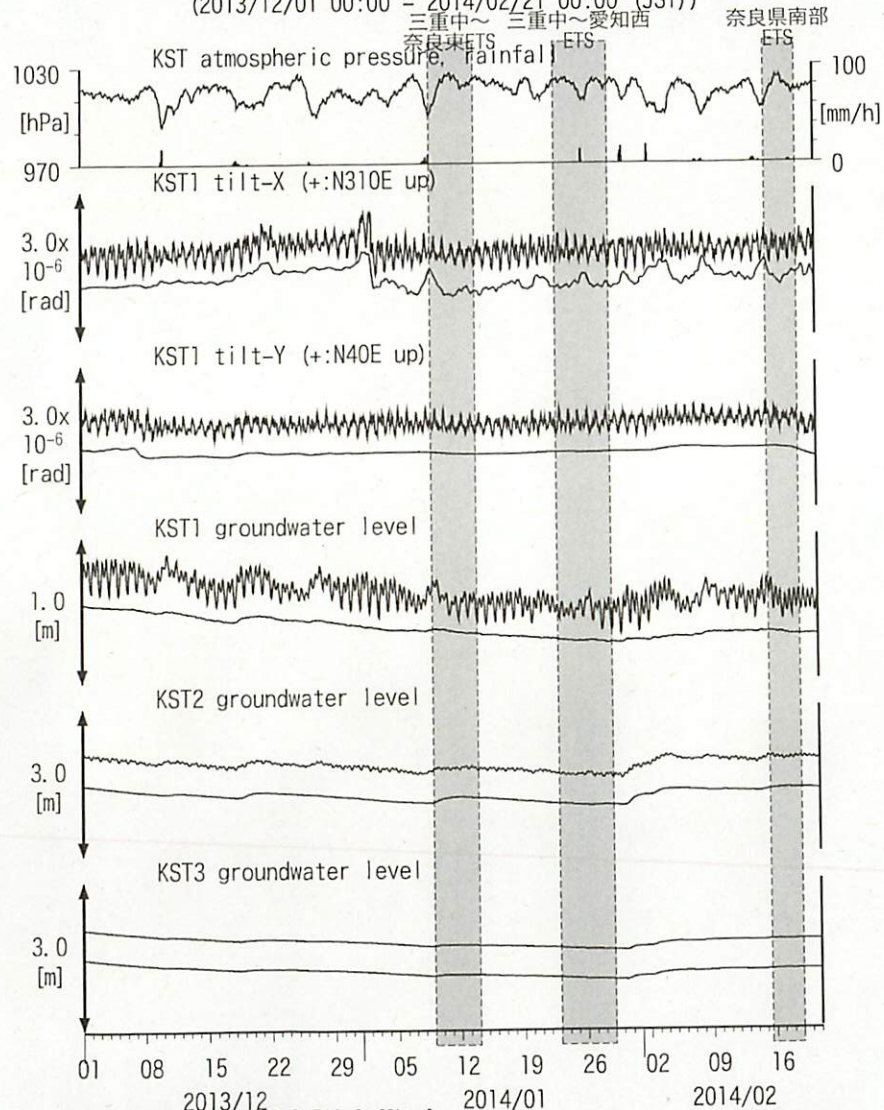


図17: Crustal strain changes at KST 串本津荷 (時間値)  
(2013/12/01 00:00 - 2014/02/21 00:00 (JST))



Strainmeter depth = 589.8-591.2 [GL-m]  
上: 1次トレンド除去  
下: BAYTAP-Gにより潮汐・気圧応答・ノイズ成分除去後に1次トレンド除去

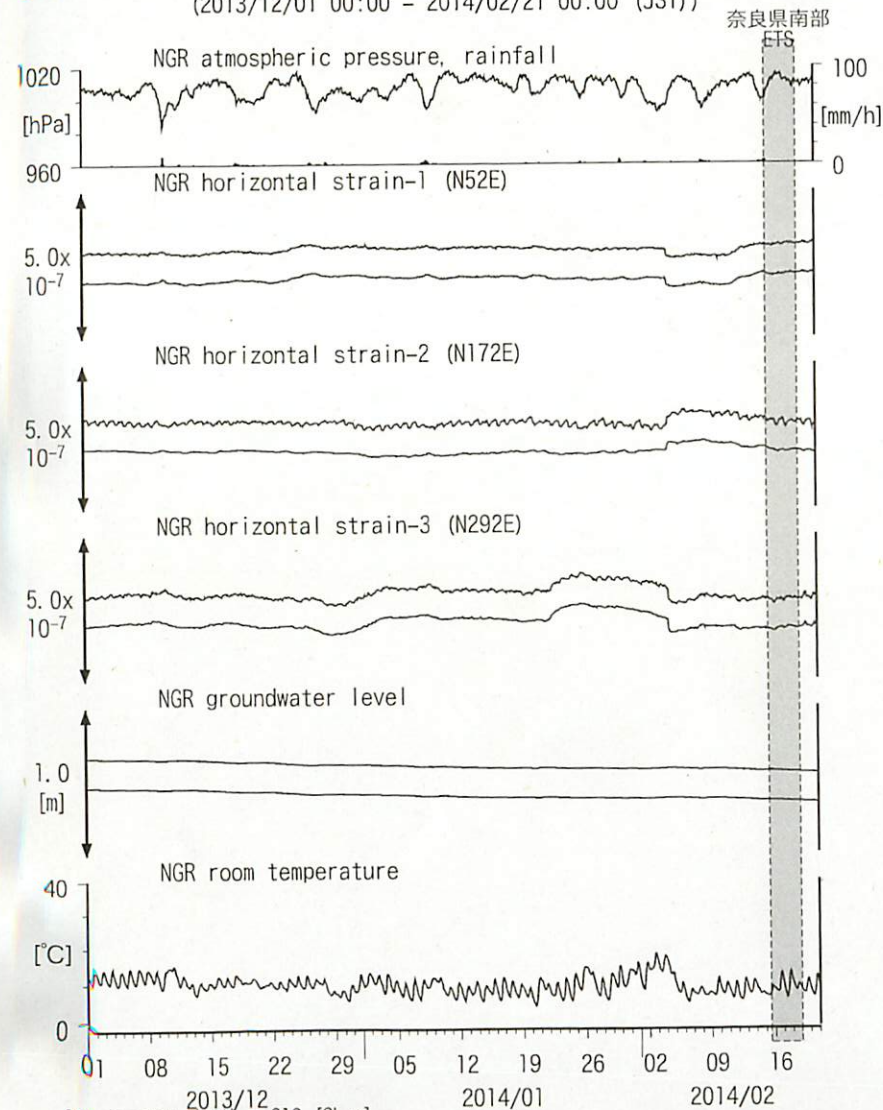
図18: Tilt and groundwater level changes at KST 串本津荷 (時間値)  
(2013/12/01 00:00 - 2014/02/21 00:00 (JST))



Tiltmeter depth = 589.0-589.8 [GL-m]  
KST1 : Screen depth = 509.2-520.2 [GL-m]  
KST2 : Screen depth = 132.9-143.9 [GL-m]  
KST3 : Screen depth = 20.4-30.6 [GL-m]  
上: tiltは1次トレンド除去  
下: BAYTAP-Gにより潮汐・気圧応答・ノイズ成分除去、tiltは1次トレンドも除去

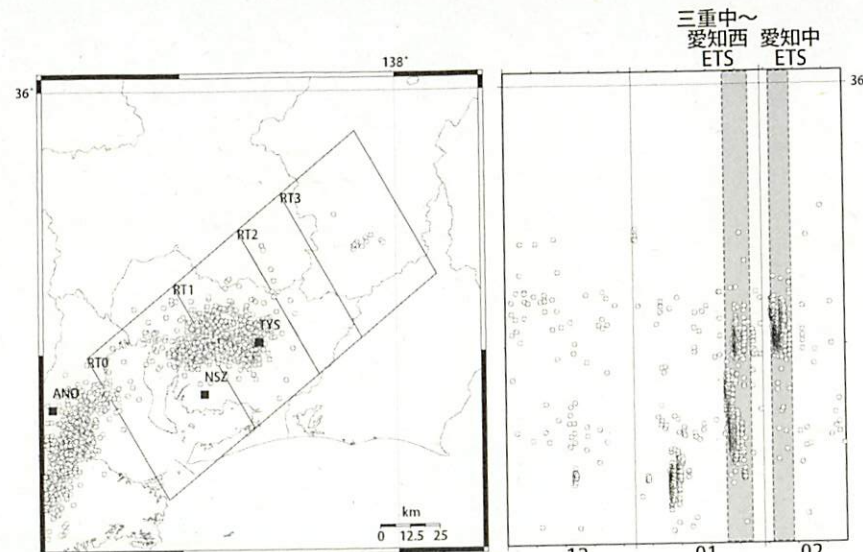


図19: Crustal strain and groundwater level changes at 岩出東坂本 (時間値)  
(2013/12/01 00:00 - 2014/02/21 00:00 (JST))



Strainmeter depth = 616 [GL-m]  
Screen depth = 408.9-446.5 [GL-m]

上: strainは1次トレンドを除去  
下: BAYTAP-Gにより潮汐・気圧応答・ノイズ成分を除去、strainは1次トレンドも除去



2013/12/01 00:00:00  
- 2014/02/21 00:00:00  
Total = 1826

Deep low-frequency tremors in Tokai (日値)  
(2013/12/01 00:00 - 2014/02/21 00:00 (JST))

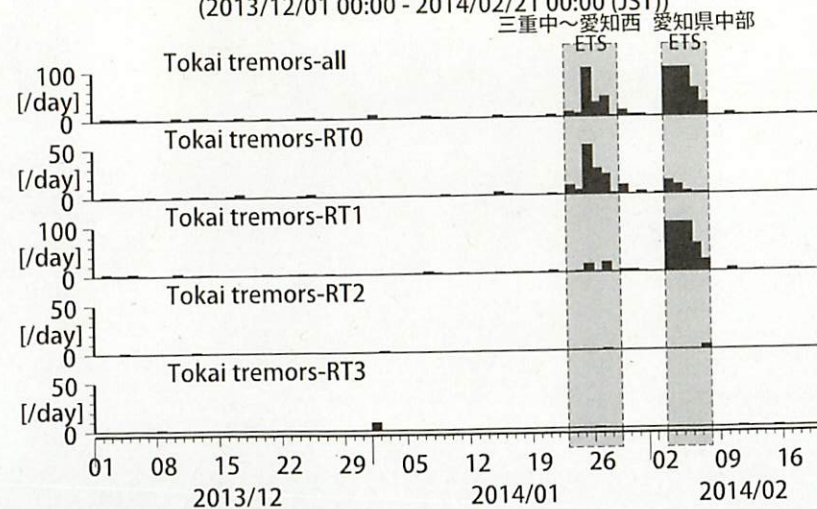
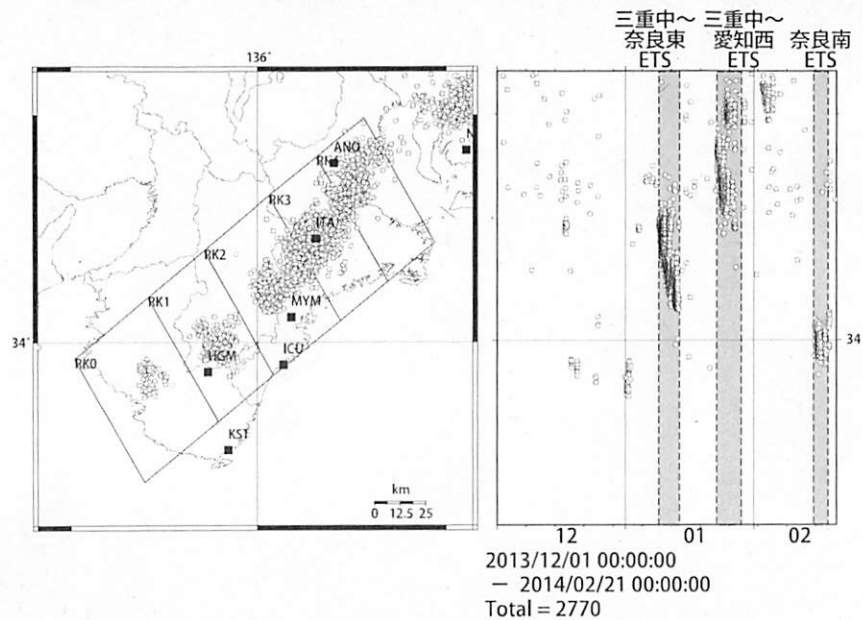


図 20: 愛知県およびその周辺における深部低周波微動の時空間分布 (上段)、各領域における発生頻度 (日値)。



Deep low-frequency tremor activities in Kii Peninsula (日値)  
 (2013/12/01 00:00 - 2014/02/21 00:00 (JST))

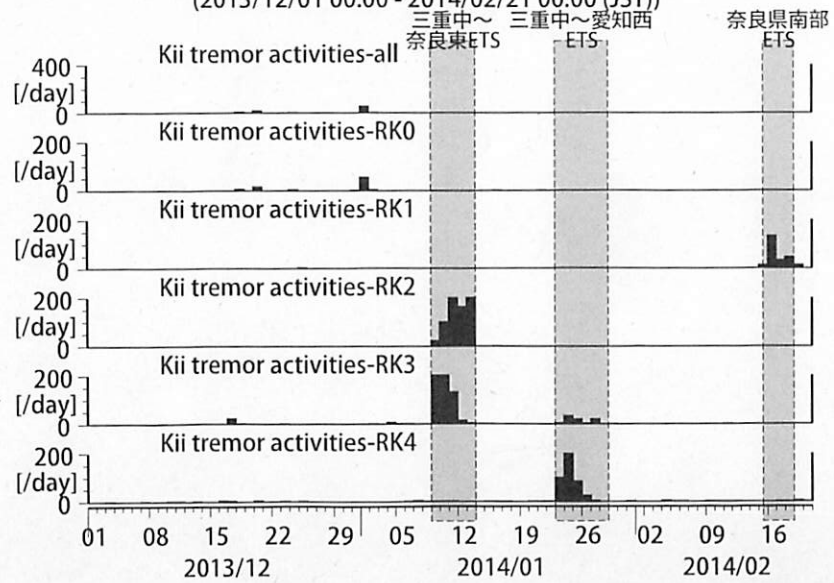


図 21: 紀伊半島における深部低周波微動の時空間分布 (上段)、各領域における発生頻度 (日値)。



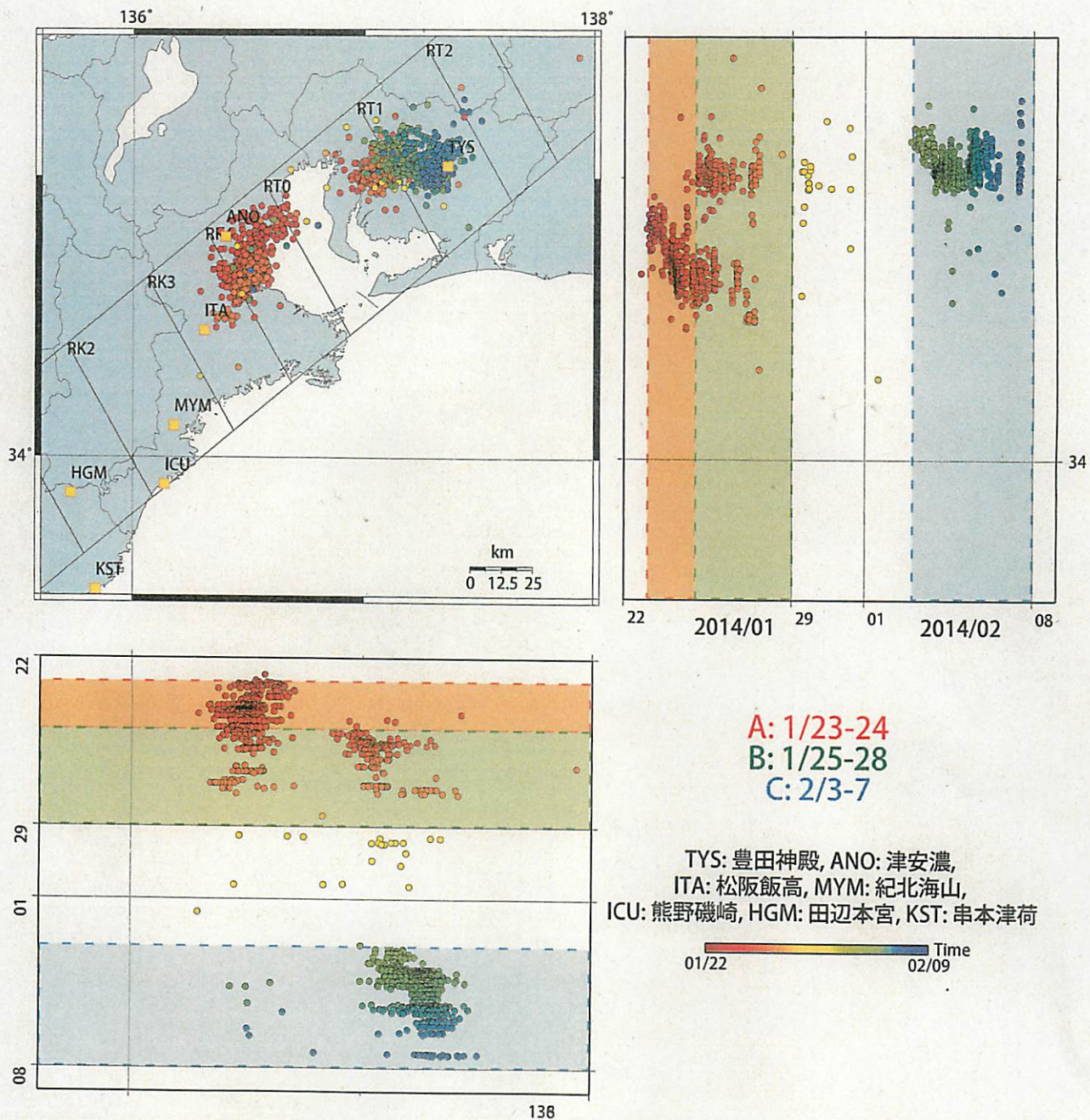
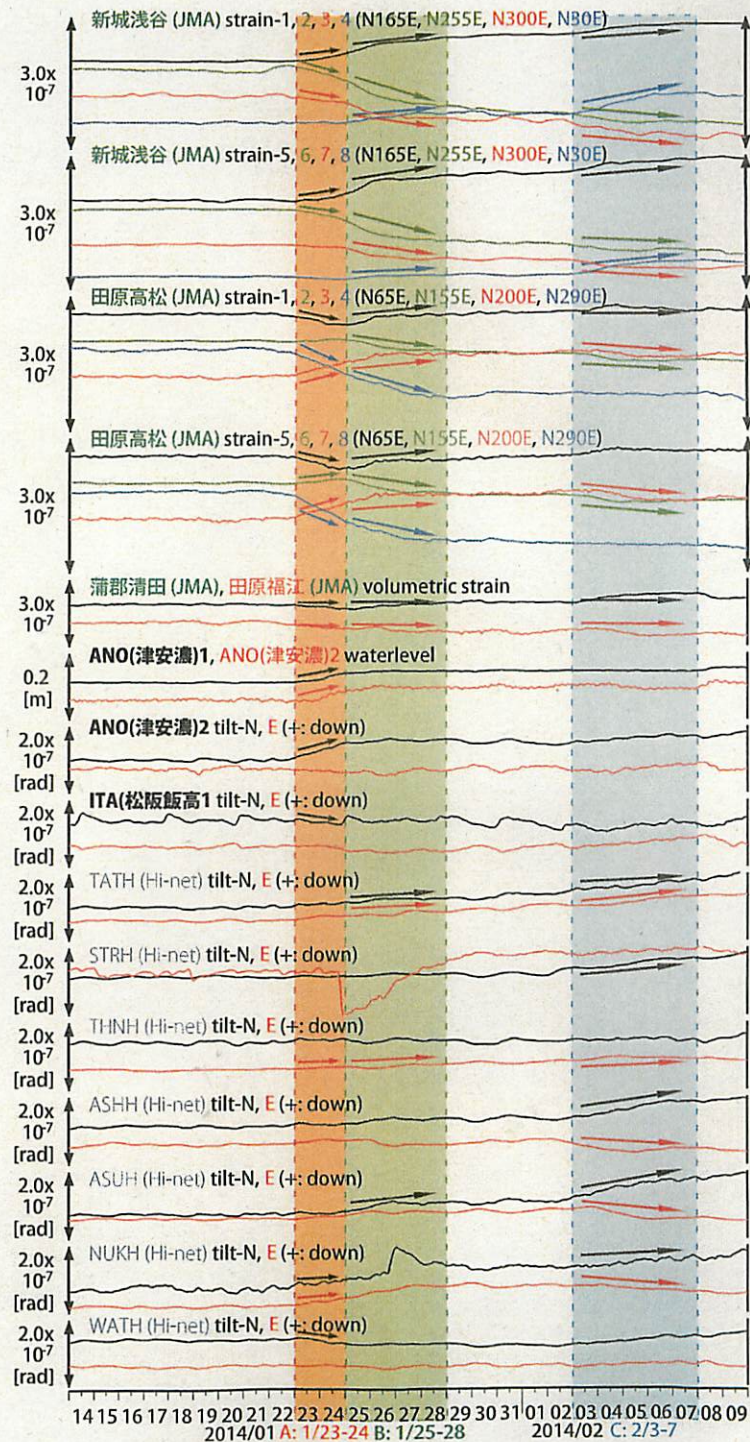
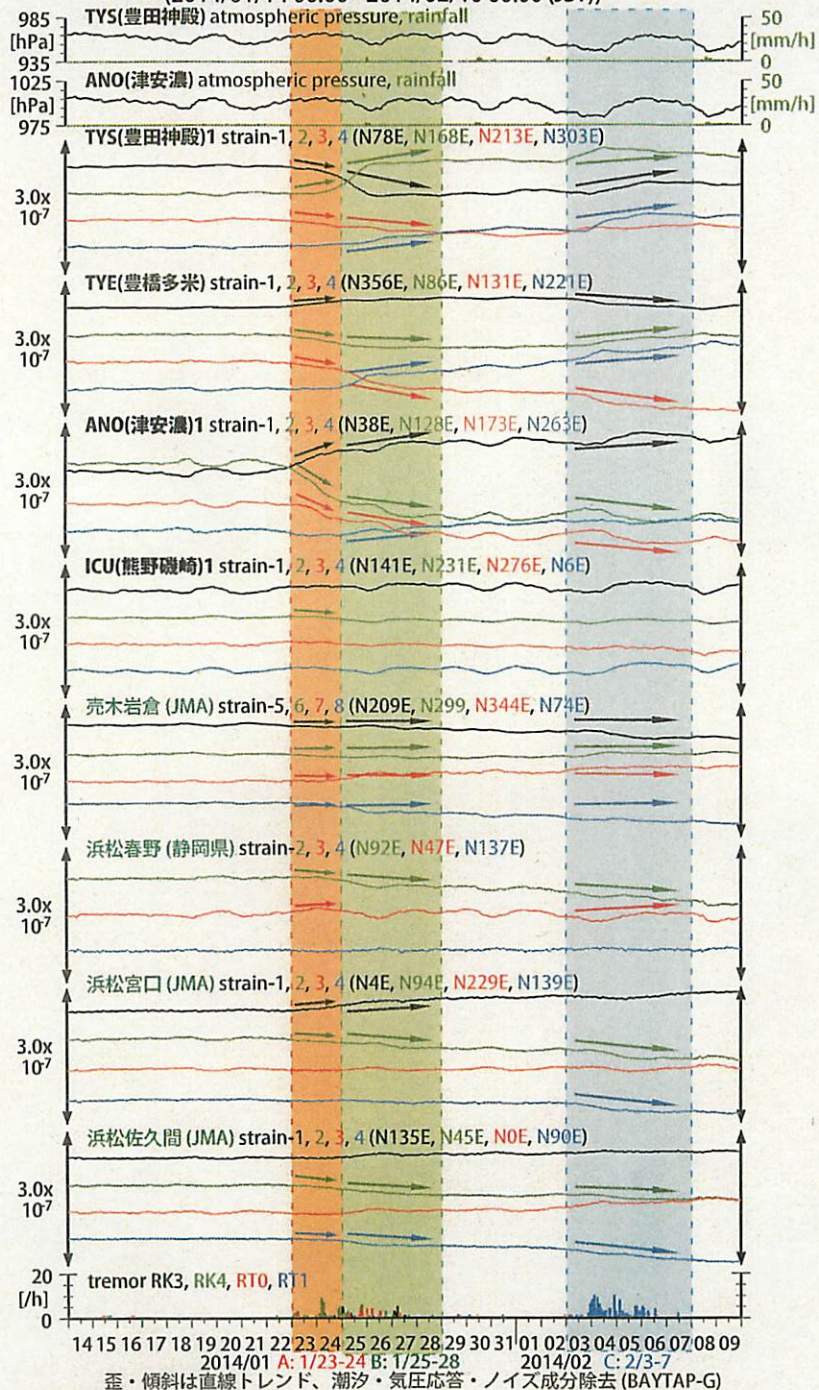


図5: 2014/1/22 0:00 - 2/9 0:00 における紀伊半島東部～愛知県周辺の深部低周波微動の時空間分布図。エンベロープ相関法により決定。



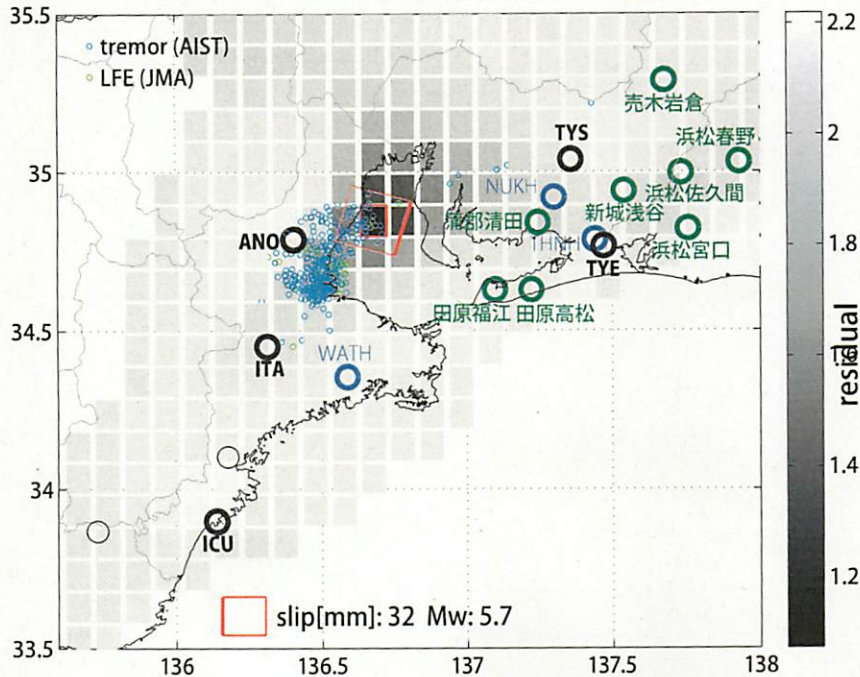
図23: 東海地方における歪・地下水・傾斜観測結果(時間値)  
(2014/01/14 00:00 - 2014/02/10 00:00 (JST))



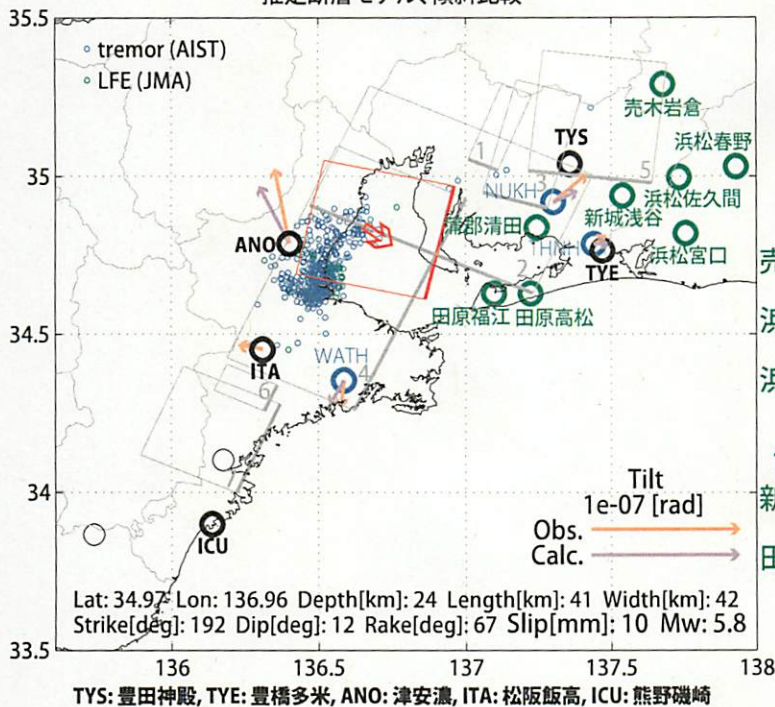


A: 2014/1/23-25

断層サイズを固定した場合の断層モデル、残差分布



推定断層モデル、傾斜比較



多成分歪計 主歪比較

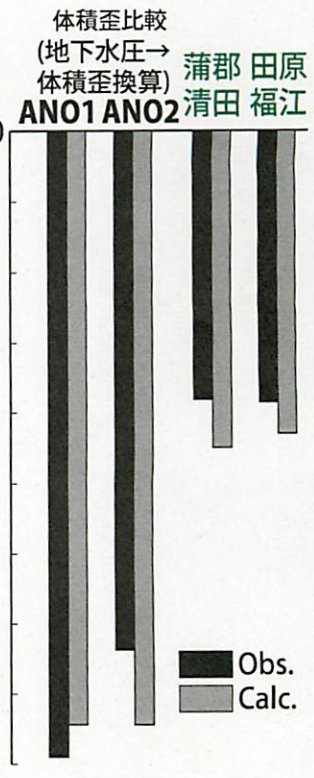
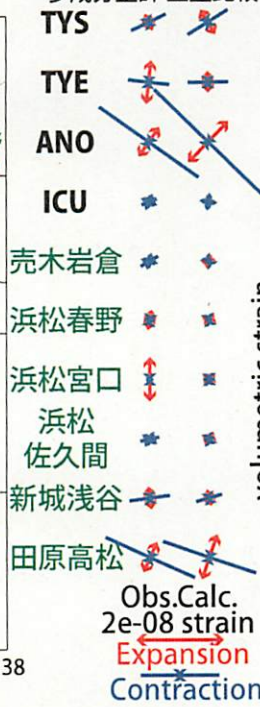


図24: (上段)プレート境界面上のパッチ(断層面)をすべらせた際の、歪・傾斜の観測値と計算値の残差分布図。断層面サイズは固定(20x20km)。赤色矩形は最小残差の断層面を表す。このパッチのすべり量、Mwを下部に示している。

(下段)断層面推定結果(赤色矩形)。灰色の矩形は、最近周辺で発生した短期的SSEの推定断層面を示す。  
 1: 2013年6月11-12日(Mw5.3), 2: 同月28日-7月3日(Mw5.7), 3: 同年8月3日午後-12日午前(Mw5.7)  
 4: 同年9月8-10日(Mw5.8), 5: 同月29日-10月6日(Mw5.9), 6: 2014年1月9-11日午前(Mw5.6),  
 7: 同月11日午後-13日(Mw5.6)

傾斜の観測値・モデルからの計算値との比較を地図内に、主歪および、体積歪(地下水圧は体積歪変換)の歪観測値・モデルからの計算値との比較を右側に示す。

(共通)小さい青色丸印は産総研による深部低周波微動、緑色丸印は気象庁一元化カタログによる低周波イベントの震央位置を示す。黒色は産総研の、青色は防災科研Hi-netの観測点を、緑色は気象庁の観測点名を示す。



B: 2014/1/25-28

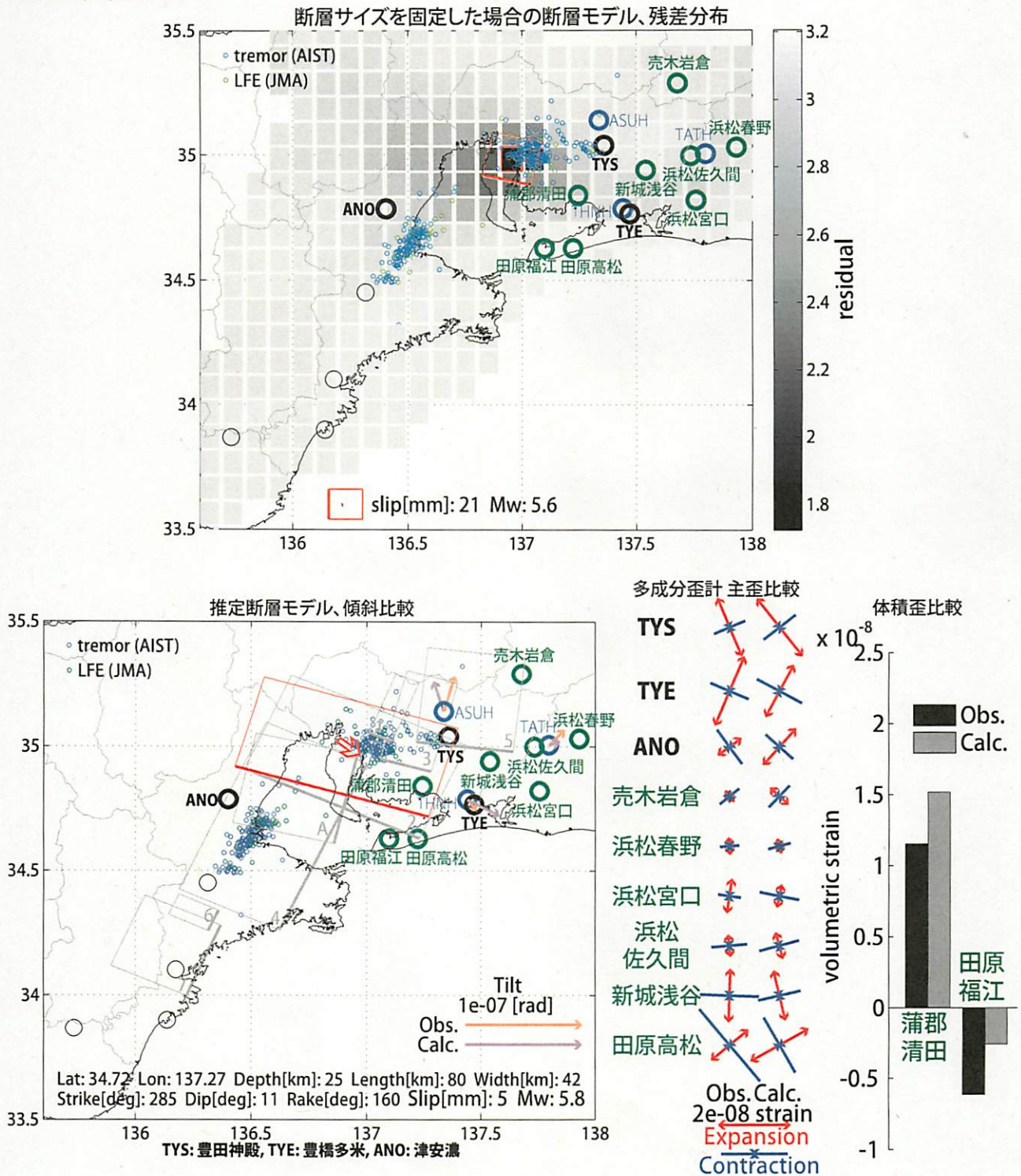


図25: (上段)プレート境界面上のパッチ(断層面)をすべらせた際の、歪・傾斜の観測値と計算値の残差分布図。断層面サイズは固定(20x20km)。赤色矩形は最小残差の断層面を表す。このパッチのすべり量、Mwを下部に示している。

(下段)断層面推定結果(赤色矩形)。灰色の矩形は、最近周辺で発生した短期的SSEの推定断層面を示す。  
 1: 2013年6月11-12日(Mw5.3), 2: 同月28日-7月3日(Mw5.7), 3: 同年8月3日午後-12日午前(Mw5.7)  
 4: 同年9月8-10日(Mw5.8), 5: 同月29日-10月6日(Mw5.9), 6: 2014年1月9-11日午前(Mw5.6),  
 7: 同月11日午後-13日(Mw5.6), A: 同月23-25日(Mw5.8)

傾斜の観測値・モデルからの計算値との比較を地図内に、主歪および、体積歪の歪観測値・モデルからの計算値との比較を右側に示す。

(共通)小さい青色丸印は産総研による深部低周波微動、緑色丸印は気象庁一元化カタログによる低周波イベントの震央位置を示す。黒色は産総研の、青色は防災科研Hi-netの観測点を、緑色は気象庁の観測点名を示す。



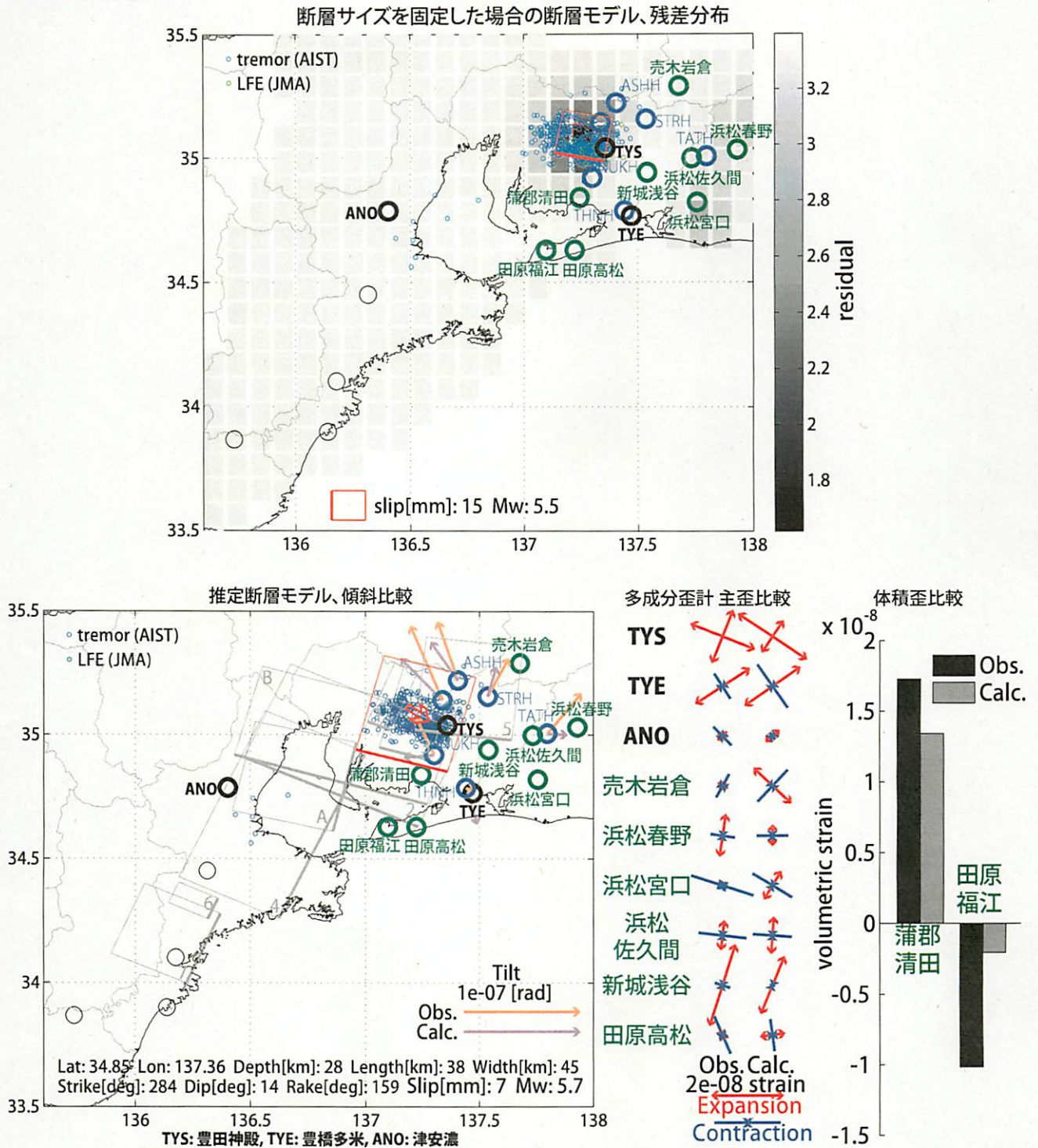


図26: (上段)プレート境界面上のパッチ(断層面)をすべらせた際の、歪・傾斜の観測値と計算値の残差分布図。断層面サイズは固定(20x20km)。赤色矩形は最小残差の断層面を表す。このパッチのすべり量、Mwを下部に示している。

(下段)断層面推定結果(赤色矩形)。灰色の矩形は、最近周辺で発生した短期的SSEの推定断層面を示す。  
 1: 2013年6月11-12日(Mw5.3), 2: 同月28日-7月3日(Mw5.7), 3: 同年8月3日午後-12日午前(Mw5.7)  
 4: 同年9月8-10日(Mw5.8), 5: 同月29日-10月6日(Mw5.9), 6: 2014年1月9-11日午前(Mw5.6),  
 7: 同月11日午後-13日(Mw5.6), A: 同月23-25日(Mw5.8)

傾斜の観測値・モデルからの計算値との比較を地図内に、主歪および、体積歪の歪観測値・モデルからの計算値との比較を右側に示す。

(共通)小さい青色丸印は産総研による深部低周波微動、緑色丸印は気象庁一元化カタログによる低周波イベントの震央位置を示す。黒色は産総研の、青色は防災科研Hi-netの観測点を、緑色は気象庁の観測点名を示す。



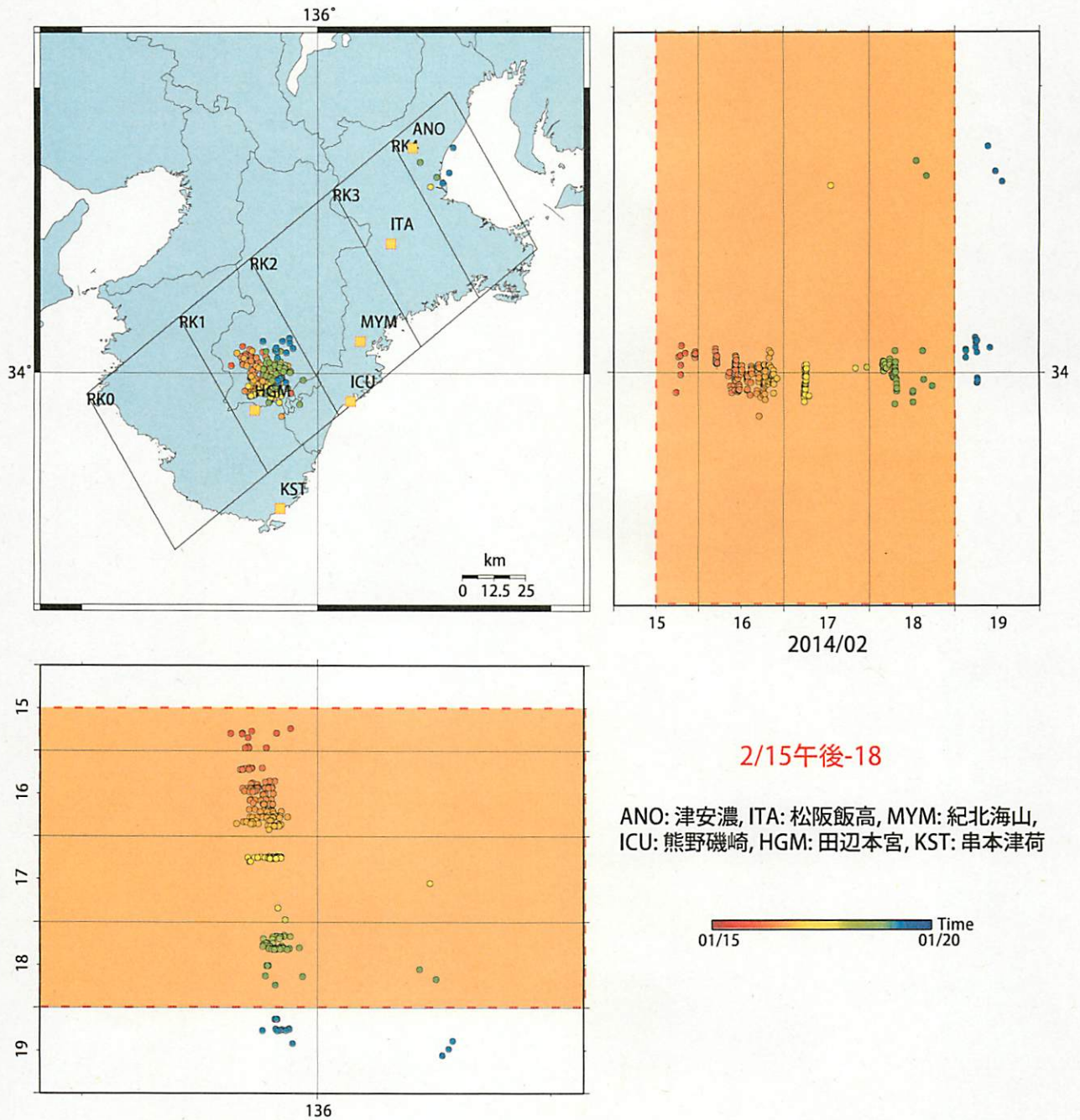
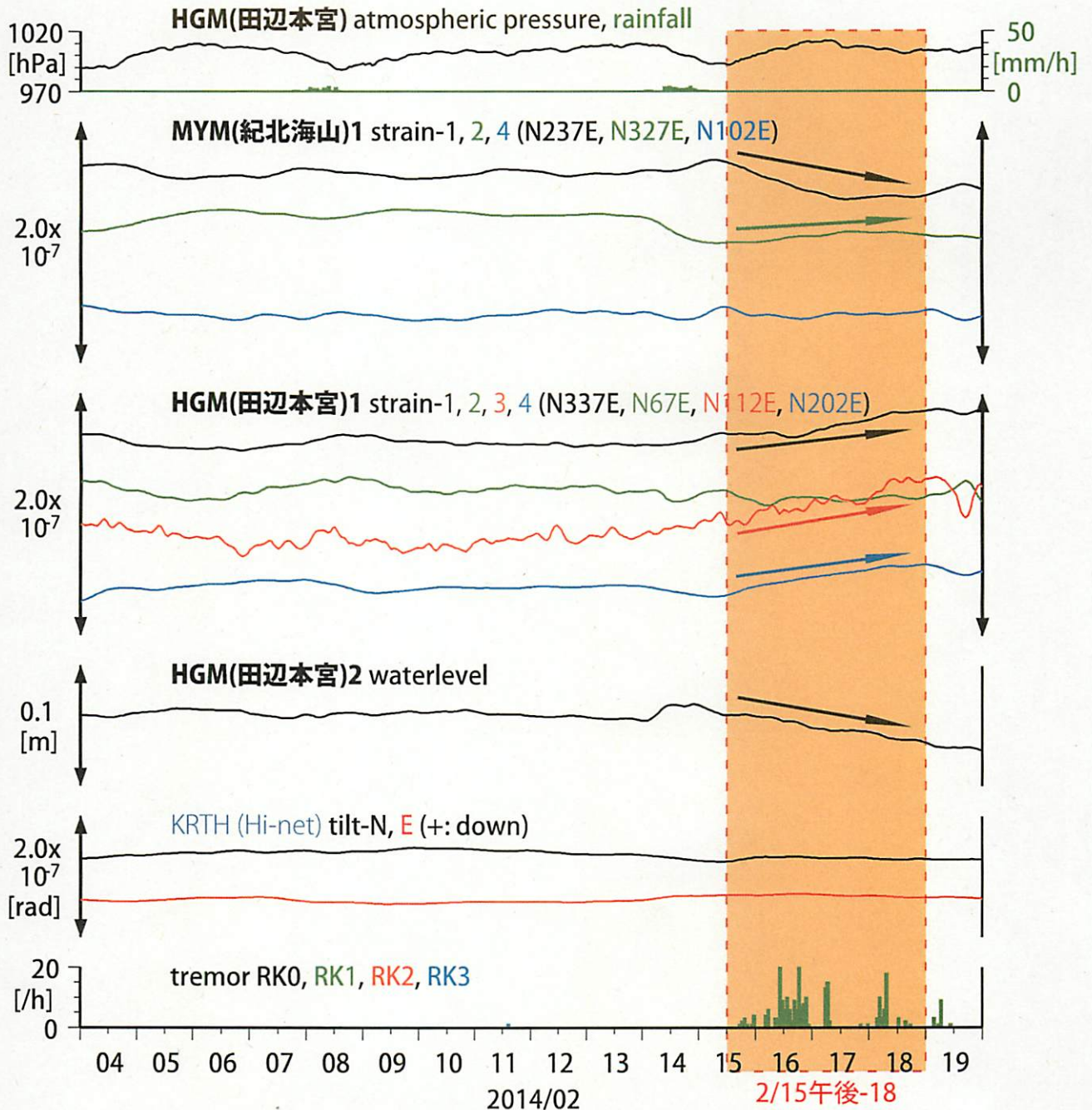


図27: 2014/1/15 0:00 - 1/20 0:00 における紀伊半島の深部低周波微動の時空間分布図。エンベロープ相関法により決定。



図28: 紀伊半島における歪・地下水・傾斜観測結果  
(2014/02/04 00:00 - 2014/02/20 00:00 (JST))

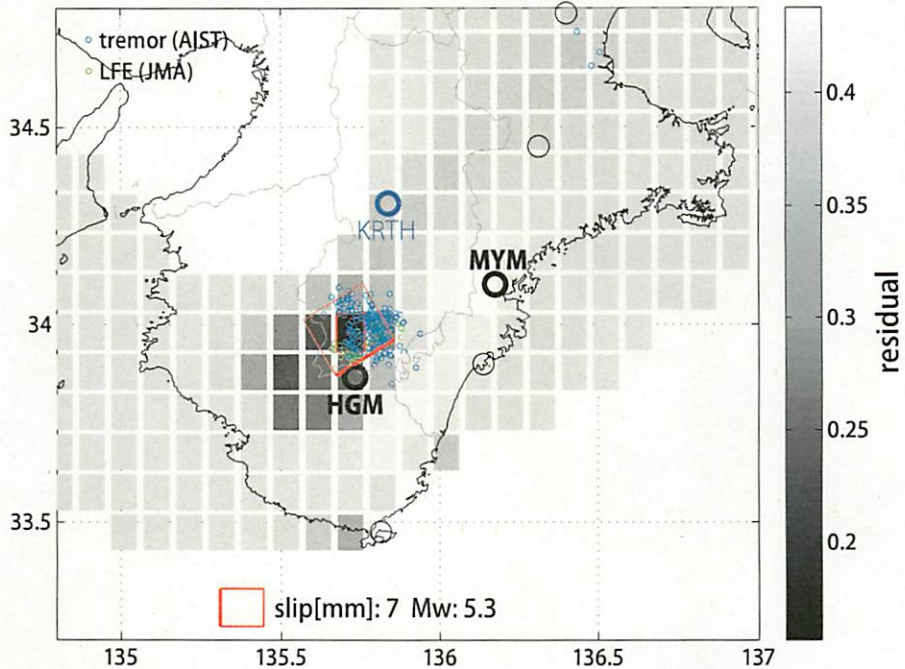


歪・傾斜は直線トレンド、潮汐・気圧応答・ノイズ成分除去 (BAYTAP-G)

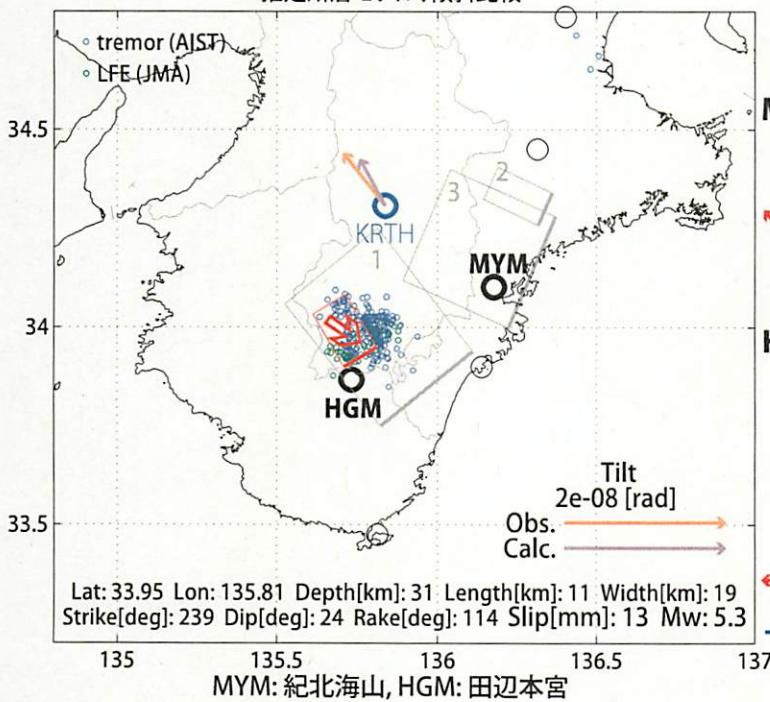


2014/2/15午後-18

断層サイズを固定した場合の断層モデル、残差分布



推定断層モデル、傾斜比較



多成分歪計 主歪比較

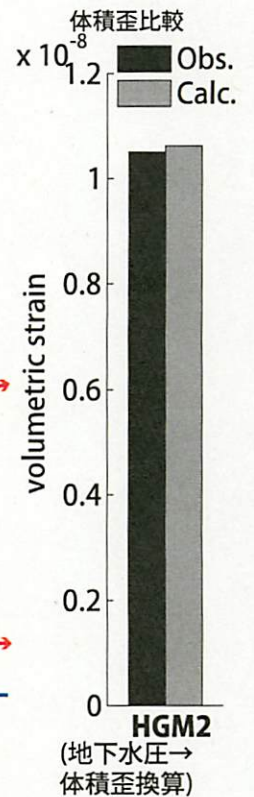
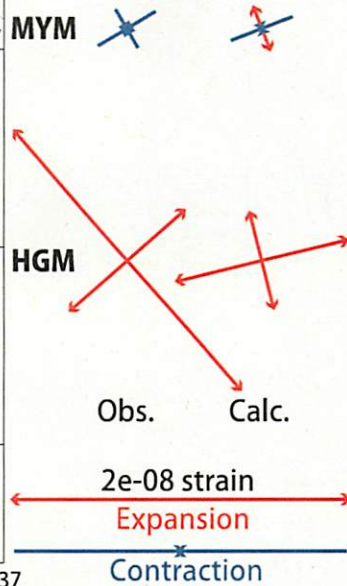


図29: (上段)プレート境界面上のパッチ(断層面)をすべらせた際の、歪・傾斜の観測値と計算値の残差分布図。断層面サイズは固定(20x20km)。赤色矩形は最小残差の断層面を表す。このパッチのすべり量、Mwを下部に示している。

(下段)断層面推定結果(赤色矩形)。灰色の矩形は、最近周辺で発生した短期的SSEの推定断層面を示す。1: 2013年10月26-27日(Mw5.5), 2: 2014年1月9-11日午前(Mw5.6), 3: 同月11日午後-13日(Mw5.6) 傾斜の観測値・モデルからの計算値との比較を地図内に、主歪および、体積歪(地下水圧は体積歪変換)の歪観測値・モデルからの計算値との比較を右側に示す。

(共通)小さい青色丸印は産総研による深部低周波微動、緑色丸印は気象庁一元化カタログによる低周波イベントの震央位置を示す。黒色は産総研の、青色は防災科研Hi-netの観測点を示す。

## Detection of short-term slow slip events along the Nankai Trough via groundwater observations

Yuichi Kitagawa<sup>1</sup> and Naoji Koizumi<sup>1</sup>

Received 13 October 2013; revised 21 November 2013; accepted 21 November 2013; published 10 December 2013.

[1] In order to develop new tools or techniques to detect short-term slow slip events (S-SSEs) along subduction zones, we attempted to detect S-SSEs by conducting groundwater pressure observations. At ANO station, which is a groundwater observation station operated by the Geological Survey of Japan, the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, for earthquake prediction research, groundwater pressures changed due to six S-SSEs that occurred near ANO from June 2011 to April in 2013. The fault models of these S-SSEs, which were estimated mainly by observing the crustal strains and tilts, explained the changes in the groundwater pressures. If the strain sensitivity of the observed groundwater pressure or level is larger than 1 mm/nstrain and the noise level is smaller than 50 mm/day, it is possible to detect S-SSEs that occur in southwest Japan by conducting groundwater pressure or level observations. Citation: Kitagawa, Y., and N. Koizumi (2013), Detection of short-term slow slip events along the Nankai Trough via groundwater observations, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 6079–6083, doi:10.1002/2013GL058322.

[3] S-SSEs are generally detected using a strainmeter or a tilt meter [e.g., Kobayashi *et al.*, 2006; Sekine *et al.*, 2010], and large S-SSEs also can be detected via Global Navigation Satellite System observations [Dragert *et al.*, 2001; Nishimura *et al.*, 2013]. However, the observation tools that are used to monitor crustal deformation are generally expensive. Therefore, they are not always popular in the areas and countries near the subduction zones. In contrast, groundwater observations are more popular in such areas and countries. If S-SSEs can be detected via groundwater observations, more knowledge will be obtained regarding plate boundary information. According to poroelastic theory [e.g., Roeloffs, 1996; Wang, 2000], the groundwater pressure or level is coupled with strain. It is known that groundwater pressure change is proportional to volumetric strain change under the undrained condition. In other words, we can estimate volumetric strain changes by observing the groundwater pressure or level. In this paper, we will show that groundwater pressure or level can be used to detect S-SSEs. We will also discuss the conditions for detecting S-SSEs when conducting groundwater pressure or level observations.

### 1. Introduction

[2] Nonvolcanic deep low-frequency (DLF) tremors are detected on plate boundaries along many subduction zones around the world [Obara, 2002; Ide, 2012]. Short-term slow slip events (S-SSEs), which cause small crustal deformation with no usual seismic waves, are also detected in subduction zones [Rogers and Dragert, 2003; Schwartz and Rokosky, 2007; Beroza and Ide, 2011]. There is a close spatial and temporal correlation between DLF tremors and S-SSEs. However, S-SSEs do not always occur in areas where DLF tremors occur and vice versa [Schwartz and Rokosky, 2007; Sekine *et al.*, 2010]. Therefore, it is important to clarify detailed spatial and temporal correlations in order to know what occurs on the plate boundaries along subduction zones. This clarification will also contribute to forecasting large earthquakes in the subduction zones. In general, detecting S-SSEs via crustal deformation is more difficult than with DLF tremors when using a seismograph. One major reason for this is that the decay of crustal deformation by distance is much larger than that of seismic waves. Therefore, it is necessary to develop new tools or techniques to detect S-SSEs.

### 2. Observations

[4] The Geological Survey of Japan (GSJ), the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), has a network composed of approximately 50 groundwater observation stations in and around the Tokai, Kinki, and Shikoku regions of Japan for earthquake prediction research (Figure 1) [Matsumoto *et al.*, 2007; Koizumi, 2013]. At these stations, groundwater levels or pressures are continuously monitored. Seventeen of these stations (N1–N16 and TYE in Figure 1), which are located in the areas facing the Nankai trough, are also equipped with borehole strainmeters. We have been monitoring S-SSEs using borehole strainmeter data since 2007 [Itaba *et al.*, 2010; Itaba and Ando, 2011]. Observations at ANO station (N14 in Figure 1) started in February 2010.

[5] In the following analysis, we mainly examined and analyzed the observation data at ANO, which has three observation wells (Figure 2 and Table 1). All of the three boreholes are cased. Two of them (borehole-1 and borehole-2) are artesian wells and the heads of the waters are higher than the surface. Therefore, we sealed the two wells and monitor the groundwater pressures in the wells. Borehole-1 is equipped with a borehole strainmeter at the depth of 590 m.

### 3. Results

#### 3.1. Noise Level of the Groundwater Pressure Observations at ANO Station

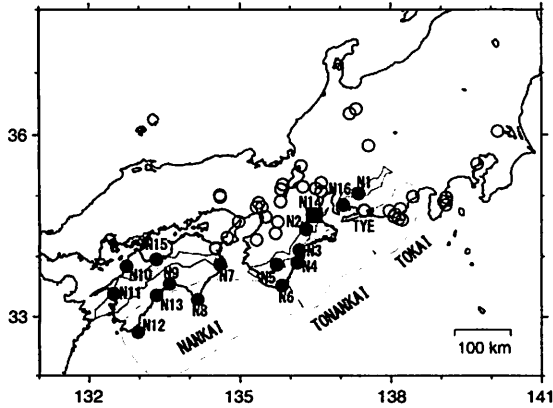
[6] Figure 3 shows the observation results from February 2010 to August 2013. First, the groundwater pressures at borehole-1 and borehole-2 gradually increased since both

Additional supporting information may be found in the online version of this article.

<sup>1</sup>Geological Survey of Japan, AIST, Tsukuba, Japan.

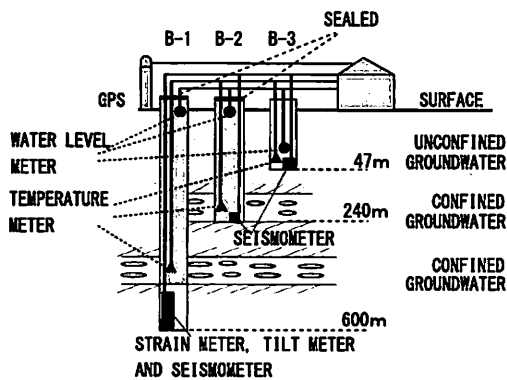
Corresponding author: N. Koizumi, Geological Survey of Japan, AIST, Site C-7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305–8567, Japan. (koizumi-n@aist.go.jp)

©2013. American Geophysical Union. All Rights Reserved. 0094-8276/13/10.1002/2013GL058322



**Figure 1.** Assumed focal regions (dashed lines) of the Tokai, Tonankai, and Nankai earthquakes along the Nankai trough and the GSJ groundwater observation network. Open circles denote the observation stations constructed before FY 2004. A solid square (N14, ANO) and solid circles denote the new observation stations (N1–N16) constructed after FY 2006. N1–N16 and TYE are equipped with a borehole strainmeter. The grey areas show the regions where the S-SSEs or DLF tremors occurred regularly [Obara and Hirose, 2006].

boreholes were sealed when the observations started. In July 2010, the pressures became almost stable. It should be noted that we sometimes opened borehole-1 between January and March 2011 to check and repair the temperature meters and strainmeters. Therefore, the pressure during this period was not stable. Borehole-3 was observed to have shallow unconfined groundwater. Therefore, the groundwater level at borehole-3 was greatly affected by rainfall. During the first month of observations, the strain data were not stable due to maintenance to the borehole strainmeters. After the first month, the strain data changed exponentially following the installation of the strainmeter in borehole-1. As a result, the groundwater pressure/level data and strain data have been usable for detailed analyses since June 2011.



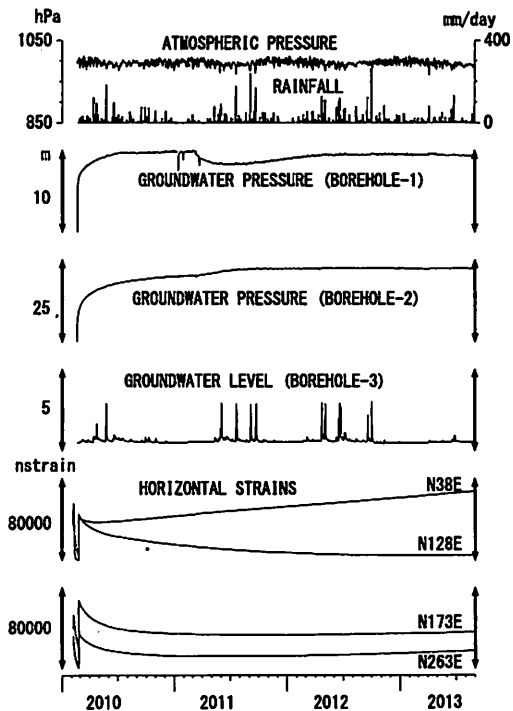
**Figure 2.** Schematic figure of the observation system at ANO. B-1, B-2, and B3 indicate borehole-1, borehole-2, and borehole-3, respectively. This is a typical observation system that is used at stations N1–N16, with the exception of the sealed borehole-1 and borehole-2.

**Table 1.** Information of Three Boreholes of ANO

Borehole	Depth (m)	Depth of Screen (m)	Depth of WLM <sup>a</sup> (m)	Radius of Casing (mm)
1	600	499–514	0.3	75
2	240	196–209	0.3	75
3	47	11–24	15	75

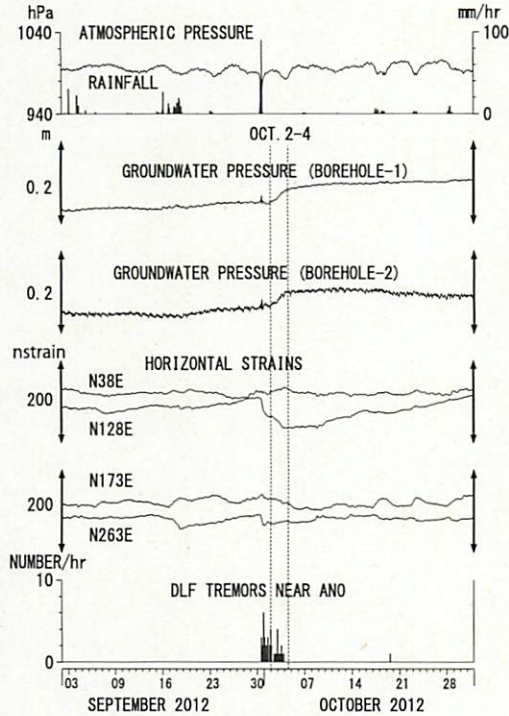
<sup>a</sup>WLM, Water level meter or pressure gauge.

[7] The groundwater pressures at borehole-1 and borehole-2 show clear tidal changes caused by Earth tides, which indicates that they are sensitive to volumetric strain changes [e.g. Roeloffs, 1996; Wang, 2000]. There are almost no phase differences between the pressure changes and volumetric strain changes caused by the Earth tides [Kitagawa et al., 2011]. It means that groundwater pressure observation at borehole-1 and borehole-2 are under the undrained condition. The strain sensitivities of the groundwater pressures, which were estimated from the tidal groundwater pressure changes and theoretical volumetric strain changes caused by the Earth tides, are 3.1 mm/nstrain at borehole-1 and 3.7 mm/nstrain at borehole-2, where “nstrain” represents  $10^{-9}$  strain. The effects of rainfall on groundwater pressure at borehole-1 and borehole-2 were eliminated using the program created by Matsumoto [1992]. As a result, the noise level of the groundwater pressure observations is very low at ANO station. The standard deviations of the 24 h difference of the groundwater pressure in 2012 are 2.9 mm/day at borehole-1 and 3.8 mm/day at borehole-2. If we regard twice the standard deviation as the noise level of the groundwater pressure observation at ANO, the noise levels are 5.8 mm/day at borehole-1 and 7.6 mm/day at borehole-2. Using the strain



**Figure 3.** Observation results for the period from February 2010 to August 2013. The daily values are shown. The groundwater pressure data are expressed as water levels.





**Figure 4.** Groundwater pressures and crustal strains observed at ANO from September 2012 to October 2012. The DLF tremors that occurred near ANO are also shown. GSJ, AIST detected the tremors by using the envelope correlation method [Obara, 2002]. The tidal changes and barometric effects were eliminated from the groundwater pressures and strains. The linear trends were also eliminated from the strains. The effects of rainfall were also eliminated from the groundwater pressures. A heavy rainfall and large changes in atmospheric pressure on 30 September 2012, which were caused by a typhoon, had some effects on the groundwater pressures and strains at ANO.

sensitivities mentioned above, the strain-converted noise level was estimated to be 2 nstrain/day at borehole-1 and borehole-2 at ANO station.

### 3.2. Groundwater Pressure Changes Related to S-SSEs

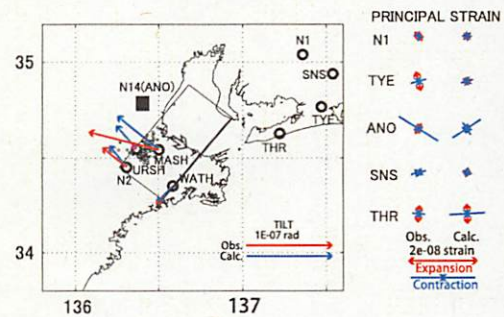
[8] Active DLF tremors occurred near ANO on 30 September 2012 and lasted for several days (Figures 4 and 5). The crustal strains and groundwater pressures changed at ANO from 2 October to 4 October in 2012 (Figure 4). During this same period, strains and tilts also changed at the stations near ANO. The fault model for the S-SSE (Table 2) was estimated from the strain and tilt changes at ANO and the surrounding observation stations (Figure 5) [Itaba *et al.*, 2013a]. Using the fault model, we calculated the volumetric strain change on the surface at ANO by a program of MICAP-G [Naito and Yoshikawa, 1999], which can estimate deformation due to faults in a homogeneous elastic half space using a program of Okada [1992]. The calculated volumetric strain change is  $-10.8$  nstrain at ANO, in which a negative value indicates that a contraction occurred. On the other hand, the volumetric strain changes calculated from the observed groundwater pressures at borehole-1 and borehole-2 for clarifying the observed value are  $-11.1$  nstrain and  $-8.5$  nstrain,

respectively (Table 3). Therefore, the fault model explained 79–103 % of the volumetric strain changes estimated from the groundwater pressures at ANO.

[9] From June 2011 to April 2013, 12 S-SSEs were detected near ANO (Table 2) [Itaba *et al.*, 2011, 2012, 2013a, 2013b; Kitagawa *et al.*, 2012] and the groundwater pressure data for ANO were analyzed when the S-SSEs occurred. The results are shown in Table 2. In Table 2 “Start” means the time when change in strain and groundwater pressure at ANO started and “End” means the time when it ended. Actually these Start and End were not always clearly recognized. Therefore, there can be a difference of a few hours. The model for no.6 and no.12 (12’) were estimated from groundwater pressure data at ANO as well as the data of tilts and strains at ANO and its neighboring stations. The other models were estimated only from the data of strains and tilts. The fault models for six of the 12 S-SSEs (Nos. 1, 3, 5, 6, 10 and 12 (12’) in Table 3) explained the volumetric strain changes that were converted from the observed groundwater pressures at borehole-1 and borehole-2 in ANO (Table 3). However, the remaining six models do not explain the converted volumetric strain changes. For these cases, the average daily volumetric strain changes (V/P in Table 3) were almost equal to or smaller than 2 nstrain/day, which was the noise level mentioned above. Therefore, it is possible that the estimated groundwater pressure changes during the S-SSEs are not accurate. In other words, the groundwater pressure at ANO can be used to detect S-SSEs if S-SSEs are large enough or close enough to ANO to cause volumetric strain changes that are larger than the noise level at ANO.

## 4. Discussion

[10] The volumetric strain changes caused by the S-SSEs in southwest Japan were 10–20 nstrain/day at most (Table 3) [Kobayashi *et al.*, 2006]. Therefore, the strain-



**Figure 5.** The fault model of the S-SSE estimated from the strain and tilt changes at ANO and its neighboring observation stations. The rectangle indicates the projection of the fault model. The bold side of the rectangle indicates the shallower side of the model (see Table 2 for the parameters of the fault model). The small and large circles denote the DLF tremors and observation stations, respectively. ANO, TYE, N1, and N2 are observation stations operated by GSJ, AIST. SNS and THR are stations operated by Japan Meteorological Agency. URSH, MASH, and WATH are stations operated by the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention. “Obs.” and “Calc.” refer to the observation results and calculated values from the fault model, respectively. This figure was modified from Itaba *et al.* [2013a].

KITAGAWA AND KOIZUMI: DETECTION OF S-SSEs VIA GROUNDWATER

**Table 2.** Fault Models of the S-SSEs That Occurred Near ANO From June 2011 to April 2013

No.	Period		Latitude <sup>c</sup> Degree	Longitude <sup>c</sup> Degree	Depth <sup>c</sup> (km)	Length (km)	Width (km)	Strike Degree	Dip Degree	Rake Degree	Slip (mm)	Mw <sup>d</sup>	Reference for the Fault Model
	Start <sup>a</sup>	End <sup>b</sup>											
1	6/28/11 0:00	6/30/11 0:00	34.82	136.82	29	80	20	220	13	85	6	5.7	<i>Itaba et al. [2011]</i>
2	9/12/11 0:00	9/15/11 12:00	34.52	136.48	24	67	40	200	19	65	5	5.8	<i>Itaba et al. [2012]</i>
3	12/19/11 0:00	12/20/11 0:00	34.79	136.78	29	70	20	220	13	95	4	5.5	<i>Kitagawa et al. [2012]</i>
4	2/9/12 12:00	2/10/12 12:00	34.58	136.41	27	55	35	201	19	76	5	5.7	<i>Kitagawa et al. [2012]</i>
5	4/14/12 12:00	4/16/12 12:00	34.69	136.72	27	65	40	216	14	91	3	5.6	<i>Kitagawa et al. [2012]</i>
<sup>e</sup> 6	5/15/12 0:00	5/17/12 0:00	34.90	136.78	28	47	21	201	12	76	17	5.8	<i>Itaba et al. [2013a]</i>
7	5/17/12 0:00	5/21/12 0:00	34.95	137.08	22	43	43	195	12	70	6	5.7	<i>Itaba et al. [2013a]</i>
8	5/21/12 0:00	5/23/12 0:00	34.78	137.24	21	49	48	244	13	119	2	5.5	<i>Itaba et al. [2013a]</i>
9	8/12/12 0:00	8/14/12 12:00	34.48	136.39	29	23	17	210	15	85	24	5.7	<i>Itaba et al. [2013a]</i>
10	10/2/12 0:00	10/4/12 12:00	34.71	136.94	25	61	31	218	12	93	5	5.7	<i>Itaba et al. [2013a]</i>
11	11/21/12 0:00	11/27/12 0:00	34.81	136.93	25	14	41	285	11	160	13	5.6	<i>Itaba et al. [2013b]</i>
<sup>f</sup> 11'	11/22/12 0:00	11/24/12 0:00	34.83	137.05	26	40	37	275	11	150	4	5.5	<i>Itaba et al. [2013b]</i>
<sup>g</sup> 12	4/7/13 0:00	4/10/13 0:00	34.96	136.94	26	83	39	204	13	79	8	6.0	<i>Itaba et al. [2013b]</i>
<sup>e</sup> 12'	4/8/13 0:00	4/10/13 0:00	34.90	136.85	27	64	34	204	13	79	5	5.7	<i>Itaba et al. [2013b]</i>

<sup>a</sup>Time when changes in strain and groundwater pressure at ANO started.  
<sup>b</sup>Time when changes in strain and groundwater pressure at ANO ended.  
<sup>c</sup>Position of the eastern top of the fault model.  
<sup>d</sup>Mw, Moment magnitude.  
<sup>e</sup>This model was estimated from the data of strains, tilts and groundwater pressure.  
<sup>f</sup>11' and 12' are different models for the same S-SSEs of 11 and 12, respectively.

converted noise level should be 5 nstrain/day or smaller to detect the S-SSEs via groundwater observations. Strain sensitivity of the groundwater level or pressure is usually smaller than 10 mm/nstrain [Roeloffs, 1988, 1996; Itaba et al., 2008]. Thus, the noise level of the groundwater pressure/level observations should be smaller than 50 mm/day for the 24 h differences of the data used to detect the S-SSEs. On the other hand, the noise level of the groundwater pressure/level was usually larger than 5 mm/day for the 24 h differences. Therefore, the strain sensitivity should be larger than 1 mm/nstrain. The noise level and strain sensitivities at borehole-1 and borehole-2 in ANO satisfy these conditions even though they are generally difficult conditions to satisfy for groundwater pressure/level observations.

[11] Appropriate observation of the strain by borehole strainmeter in soft rock and sediment is usually difficult because borehole strainmeter is made of metal and harder

than the soft rock and sediment. It means that the borehole strainmeter can hardly detect the strains of deformed soft rock and sediment. However, by observing the groundwater pressure or level, we can easily estimate volumetric strain changes in soft rock and sediment. Large areas of the land and ocean floor are covered with soft rock and sediment. Therefore, investigating the ability to detect S-SSEs via groundwater pressure/level observations is also important to magnify the observable strain area for detecting and analyzing S-SSEs throughout the world. Taking the conditions mentioned above into consideration, we will investigate other wells to detect S-SSEs in future studies.

**5. Conclusion**

[12] At the ANO observation station, the groundwater pressure changed due to the six S-SSEs that occurred near

**Table 3.** S-SSE-Related Groundwater Pressure Changes at ANO (See Table 2 for the Fault Parameters)

No.	P <sup>a</sup> days	Op1 <sup>b</sup> (mm)	Op2 <sup>c</sup> (mm)	Vp1 <sup>d</sup> (nstrain)	Vp2 <sup>e</sup> (nstrain)	V <sup>f</sup> (nstrain)	Vp1/V	Vp2/V	V/P (nstrain/day)
1	2.0	31	32	-10.1	-8.8	-17.6	0.57	0.50	-8.8
2	3.5	-1	7	0.3	-1.9	-1.9	-0.17	1.01	-0.5
3	1.0	24	28	-7.8	-7.7	-10	0.78	0.77	-10.0
4	1.0	1	0	-0.3	0.0	-2.2	0.15	0.00	-2.2
5	2.0	14	7	-4.6	-1.9	-2.4	1.90	0.80	-1.2
6	2.0	53	58	-17.3	-15.9	-43.3	0.40	0.37	-21.7
7	4.0	3	-3	-1.0	0.8	-8.7	0.11	-0.09	-2.2
8	2.0	-4	3	1.3	-0.8	-0.5	-2.61	1.64	-0.3
9	2.5	22	17	-7.2	-4.7	-2.8	2.56	1.66	-1.1
10	2.5	34	31	-11.1	-8.5	-10.8	1.03	0.79	-4.3
11	6.0	-15	-4	4.9	1.1	1.4	3.49	0.78	0.2
11'	2.0	-5	-3	1.6	0.8	-0.1	-16.29	-8.21	-0.1
12	3.0	55	60	-17.9	-16.4	-20.9	0.86	0.79	-7.0
12'	2.0	38	42	-12.4	-11.5	-12.6	0.98	0.91	-6.3

<sup>a</sup>It was calculated from Start and End in Table 2.  
<sup>b</sup>Op1, Observed groundwater pressure changes at borehole-1.  
<sup>c</sup>Op2, Observed groundwater pressure changes at borehole-2.  
<sup>d</sup>Vp1, Volumetric strain changes calculated from Op1.  
<sup>e</sup>Vp2, Volumetric strain changes calculated from Op2.  
<sup>f</sup>V, Volumetric strain changes calculated from the fault model of the S-SSE.



ANO from June 2011 to April 2013. The fault models of those S-SSEs, which were estimated mainly by observing the crustal strains and tilts, explained the changes in groundwater pressure. If the strain sensitivity of the observed groundwater pressure or level is larger than 1 mm/nstrain and the noise level is smaller than 50 mm/day, it is possible to detect S-SSEs in southwest Japan by conducting groundwater pressure/level observations.

[13] **Acknowledgments.** We thank S. Itaba for providing the fault models and figures of the S-SSEs and giving insightful suggestions.

[14] The Editor thanks Hitoshi Hirose and an anonymous reviewer for their assistance in evaluating this paper.

## References

- Beroza, G. C., and S. Ide (2011), Slow earthquakes and nonvolcanic tremor, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **39**, 271–296, doi:10.1146/annurev-earth-040809-152531.
- Dragert, H., K. Wang, and T. S. James (2001), A silent slip event on the deeper Cascadia subduction interface, *Science*, **292**, 1525–1528, doi:10.1126/science.1060152.
- Ide, S. (2012), Variety and spatial heterogeneity of tectonic tremor worldwide, *J. Geophys. Res.*, **117**, B03302, doi:10.1029/2011JB008840.
- Itaba, S., and R. Ando (2011), A slow slip event triggered by teleseismic surface waves, *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L21306, doi:10.1029/2011GL049593.
- Itaba, S., N. Koizumi, T. Toyoshima, M. Kaneko, K. Sekiya, and K. Ozawa (2008), Groundwater changes associated with the 2004 Niigata-Chuetsu and 2007 Chuetsu-oki earthquakes, *Earth Planets Space*, **60**, 1161–1168.
- Itaba, S., N. Koizumi, N. Matsumoto, and R. Ohtani (2010), Continuous observation of groundwater and crustal deformation for forecasting Tonankai and Nankai earthquakes in Japan, *Pure Appl. Geophys.*, **167**, 1105–1114.
- Itaba, S., N. Matsumoto, Y. Kitagawa, N. Koizumi, T. Kimura, H. Kimura, H. Hirose, and Y. Haryu (2011), The estimation of the short-term SSE fault model by joint analysis of crustal strain and tilt changes, Programme and Abstracts, the Seismological Society of Japan, 2011, Fall meeting, C31-05 (in Japanese).
- Itaba, S., Y. Kitagawa, N. Koizumi, M. Takahashi, N. Matsumoto, and N. Takeda (2012), The variation of the strain, tilt and groundwater level in the Shikoku District and Kii Peninsula, Japan (from May to October 2011), *Rep. Coord. Comm. Earthq. Pred.*, **87**, 399–418 (in Japanese).
- Itaba, S., Y. Kitagawa, N. Koizumi, M. Takahashi, N. Matsumoto, N. Takeda, H. Kimura, T. Kimura, T. Matsuzawa, and K. Shiomi (2013a), Short-term slow slip events in the Tokai area, the Kii Peninsula and the Shikoku District, Japan (from May to October 2012), *Rep. Coord. Comm. Earthq. Pred.*, **89**, 226–238 (in Japanese).
- Itaba, S., Y. Kitagawa, N. Koizumi, M. Takahashi, N. Matsumoto, N. Takeda, H. Kimura, T. Kimura, T. Matsuzawa, and K. Shiomi (2013b), Short-term slow slip events in the Tokai area, the Kii Peninsula and the Shikoku District, Japan (from November 2012 to April 2013), *Rep. Coord. Comm. Earthq. Pred.*, **90**, 254–269 (in Japanese).
- Kitagawa, Y., S. Itaba, N. Matsumoto, and N. Koizumi (2011), Frequency characteristics of the response of water pressure in a closed well to volumetric strain in the high frequency domain, *J. Geophys. Res.*, **116**, B08301, doi:10.1029/2010JB007794.
- Kitagawa, Y., S. Itaba, N. Koizumi, M. Takahashi, N. Matsumoto, N. Takeda, H. Kimura, T. Kimura, T. Matsuzawa, and K. Shiomi (2012), Short-term slow slip events in the Tokai area, the Kii Peninsula and the Shikoku District, Japan (from November 2011 to April 2012), *Rep. Coord. Comm. Earthq. Pred.*, **88**, 303–311 (in Japanese).
- Kobayashi, A., T. Yamamoto, K. Nakamura, and K. Kimura (2006), Short-term slow slip events detected by the strainmeters in Tokai region in the period from 1984 to 2005, *Zisin J. Seismol. Soc. Jpn.*, **59**, 19–27 (in Japanese).
- Koizumi, N. (2013), Earthquake prediction research based on observation of groundwater-Earthquake forecasting based on crustal deformation estimated from groundwater level change, *Synthesiology-Eng. Ed.*, **6**, 1, 27–37.
- Matsumoto, N. (1992), Regression analysis for anomalous changes of groundwater level due to earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, **19**, 1193–1196.
- Matsumoto, N., Y. Kitagawa, and N. Koizumi (2007), Groundwater-level anomalies associated with a hypothetical preslip prior to the anticipated Tokai earthquake: Detectability using the groundwater observation network of the Geological Survey of Japan, AIST, *Pure Appl. Geophys.*, **164**, 2377–2396.
- Naito, H., and S. Yoshikawa (1999), A program to assist crustal deformation analysis, *Zisin J. Seismol. Soc. Jpn.*, **52**, 101–103 (in Japanese).
- Nishimura, T., T. Matsuzawa, and K. Obara (2013), Detection of short-term slow slip events along the Nankai Trough, southwest Japan, using GNSS data, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **118**, 3112–3125, doi:10.1002/jgrb.50222.
- Obara, K. (2002), Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan, *Science*, **296**, 1679–1681.
- Obara, K., and H. Hirose (2006), Non-volcanic deep low-frequency tremors accompanying slow slips in the southwest Japan subduction zone, *Tectonophysics*, **417**, 33–51.
- Okada, Y. (1992), Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **82**, 1018–1040.
- Roeloffs, E. A. (1988), Hydrologic precursors, *Pure Appl. Geophys.*, **126**, 177–209.
- Roeloffs, E. A. (1996), Poroelastic techniques in the study of earthquake-related hydrologic phenomena, *Adv. Geophys.*, **37**, 135–195.
- Rogers, G., and H. Dragert (2003), Episodic tremor and slip on the Cascadia subduction zone: The chatter of silent slip, *Science*, **300**, 1942–1943.
- Schwartz, S. Y., and J. M. Rokosky (2007), Slow slip events and seismic tremor at circum-Pacific subduction zones, *Rev. Geophys.*, **45**, RG3004, doi:10.1029/2006RG000208.
- Sekine, S., H. Hirose, and K. Obara (2010), Along strike variations in short-term slow slip events in the southwest Japan subduction zone, *J. Geophys. Res.*, **115**, B00A27, doi:10.1029/2008JB006059.
- Wang, H. F. (2000), *Theory of Linear Poroelasticity With Applications to Geomechanics and Hydrogeology*, Princeton Univ. Press, Princeton, N. J.