

第215回

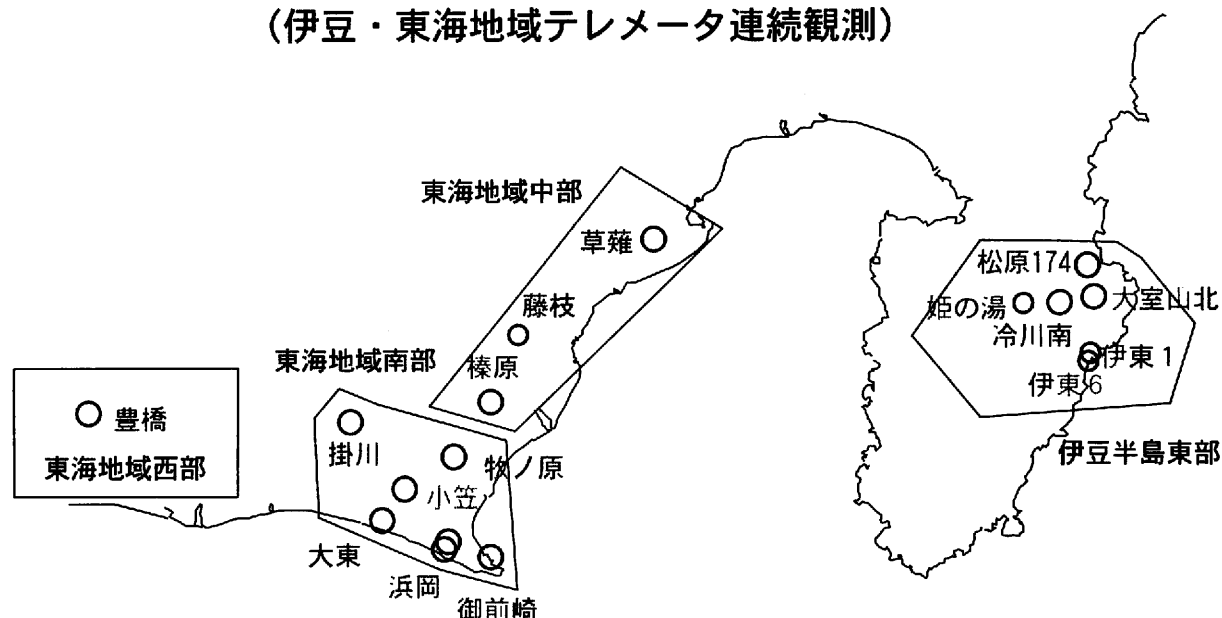
地震防災対策強化地域判定会

委員打合せ会

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)



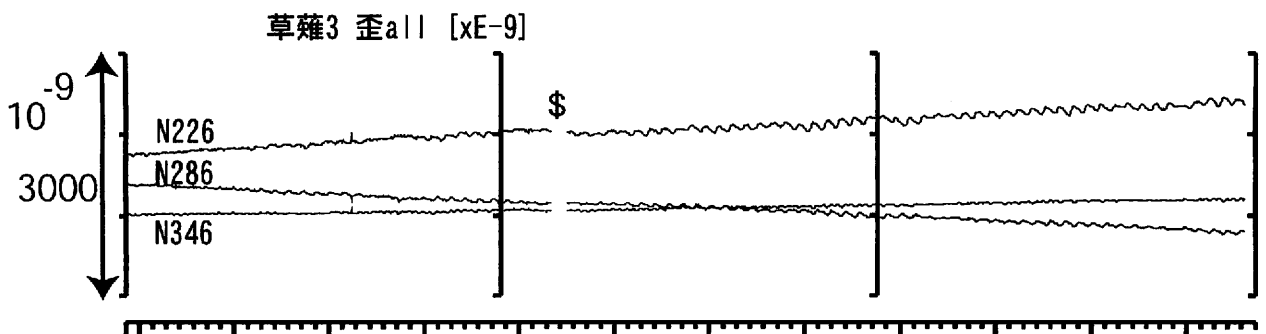
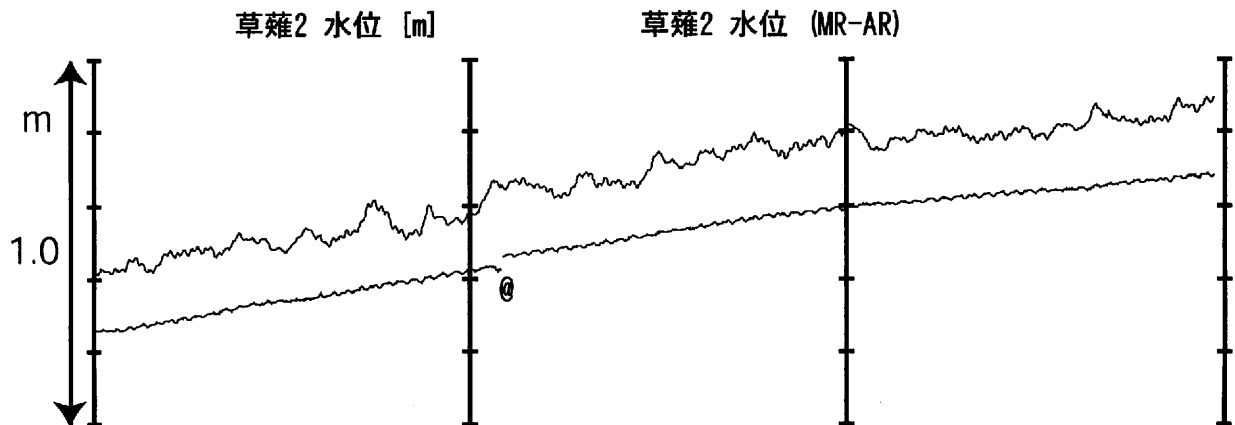
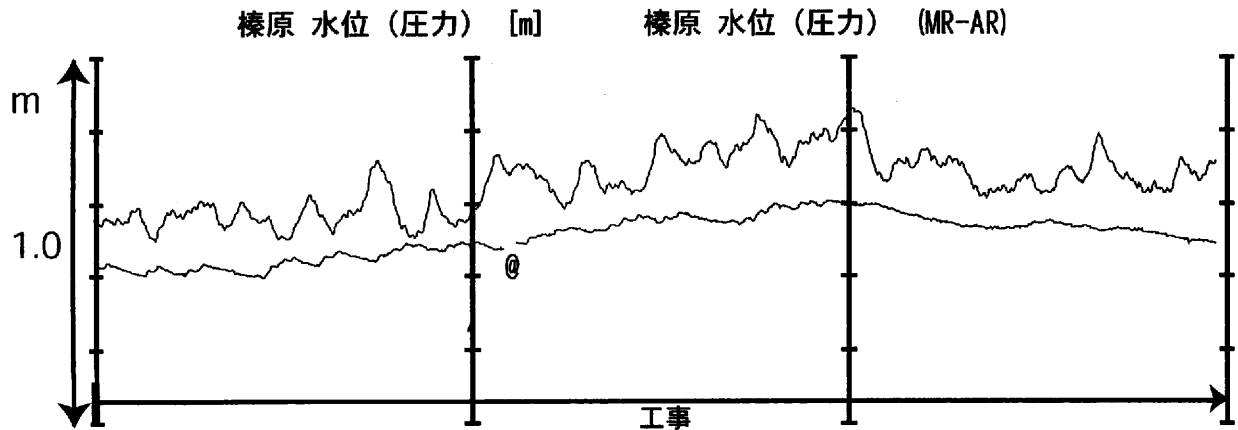
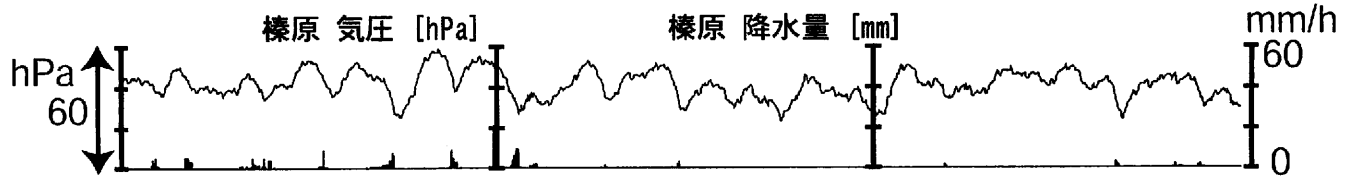
資料目次

1. 東海地域中部 (榛原, 草薙) 地下水 3成分歪; 中期
- 1-b. 東海地域中部 (草薙) 3成分歪; 中期
2. 東海地域中部 (榛原, 草薙) 地下水 3成分歪; 長期
- 2-b. 東海地域中部 (草薙) 主歪解析; 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) 地下水 3成分歪・傾斜; 中期
- 5-b. 東海地域西部 (豊橋) 3成分歪・傾斜; 中期
6. 東海地域西部 (豊橋) 地下水 3成分歪 傾斜; 長期
- 6-b. 東海地域西部 (豊橋) 豊橋1: 主歪解析
- 6-c. 東海地域西部 (豊橋) 豊橋1: 主歪の時間変化
7. 伊豆半島東部 (松原174, 大室山北, 冷川南, 伊東1, 伊東6) 地下水; 中期
8. 伊豆半島東部 (松原174, 大室山北, 冷川南, 伊東1, 伊東6) 地下水; 長期

平成16年1月26日

東海地域中部（榛原・草薙）中期（時間値）

（ 2003/11/01 00:00 - 2004/01/23 00:00 ）



11/1 11/9 11/16 11/23 11/30 12/7 12/14 12/21 12/28 1/4 1/11 1/18

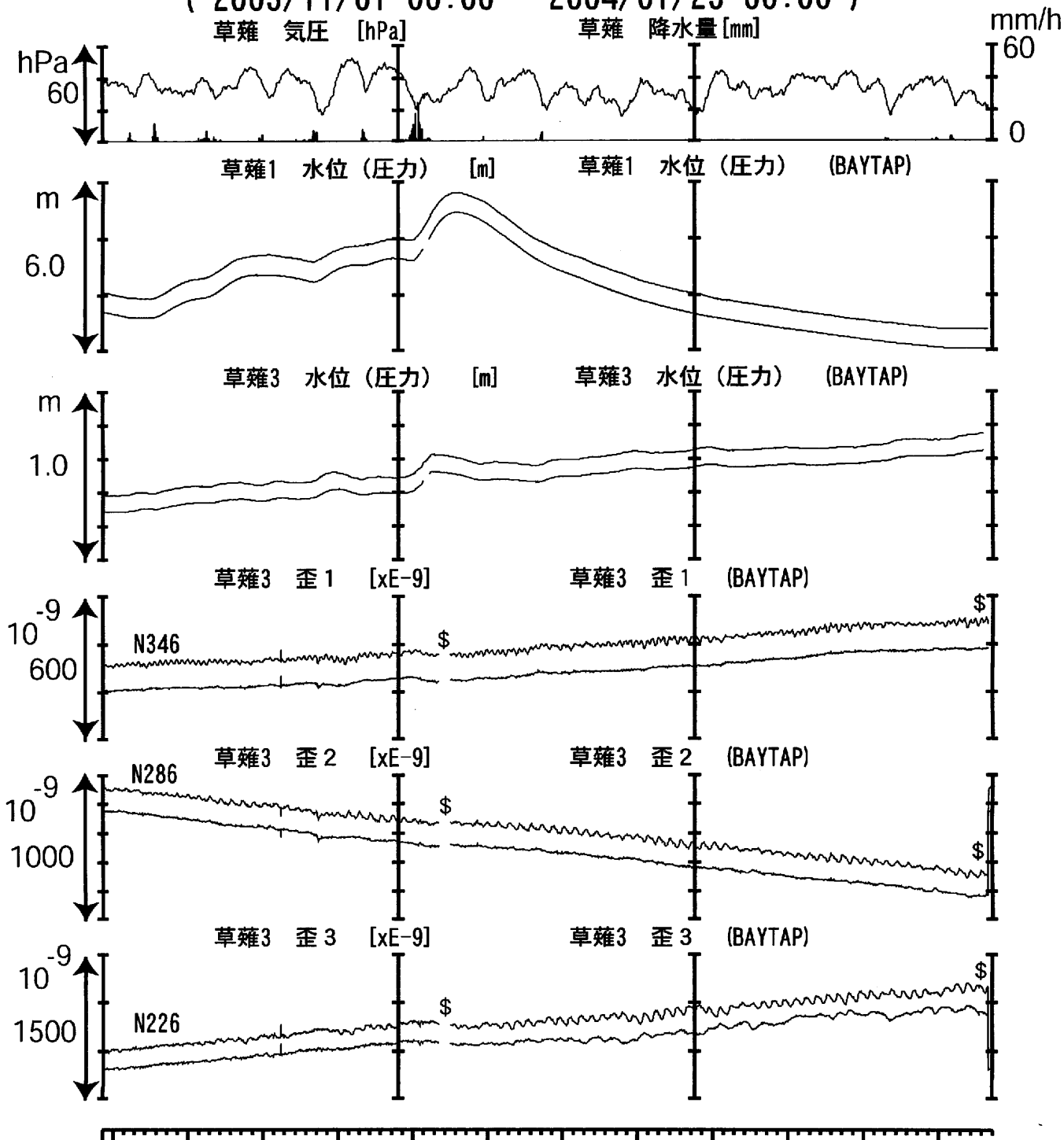
コメント：\$;保守,

@;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。
榛原の長期的な水位上昇、および、
短期的な変化は空港工事に伴う
土砂の除去および盛土作業による。



東海地域中部（草薙・歪）中期（時間値）

（ 2003/11/01 00:00 - 2004/01/23 00:00 ）



11/1 11/9 11/16 11/23 11/30 12/7 12/14 12/21 12/28 1/4 1/11 1/18

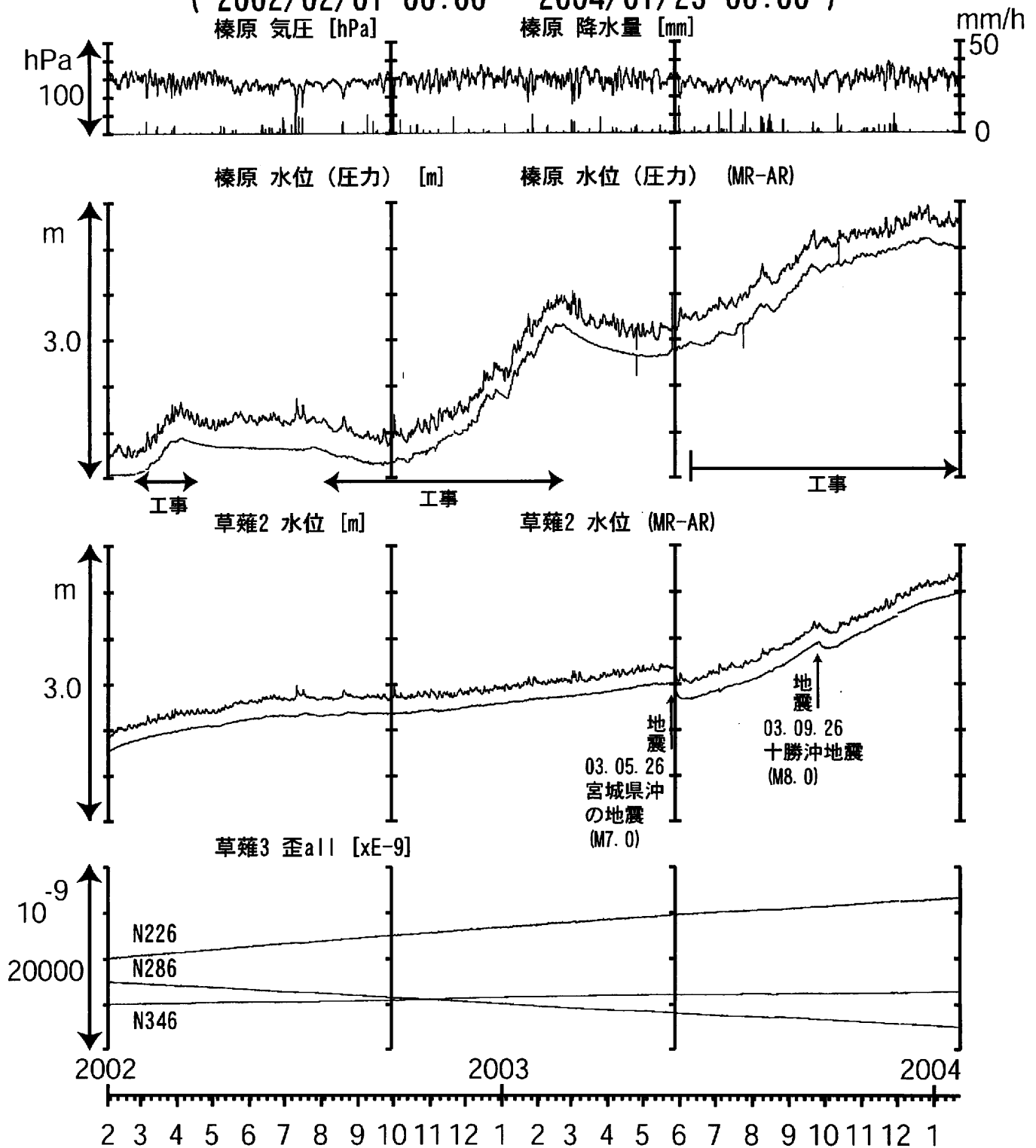
コメント：\$；保守

草薙3は、降雨毎に水位が
変動するようになっていたが、
2003年9月9日の工事により改善した。



東海地域中部（榛原・草薙）長期（時間値）

（ 2002/02/01 00:00 - 2004/01/23 00:00 ）



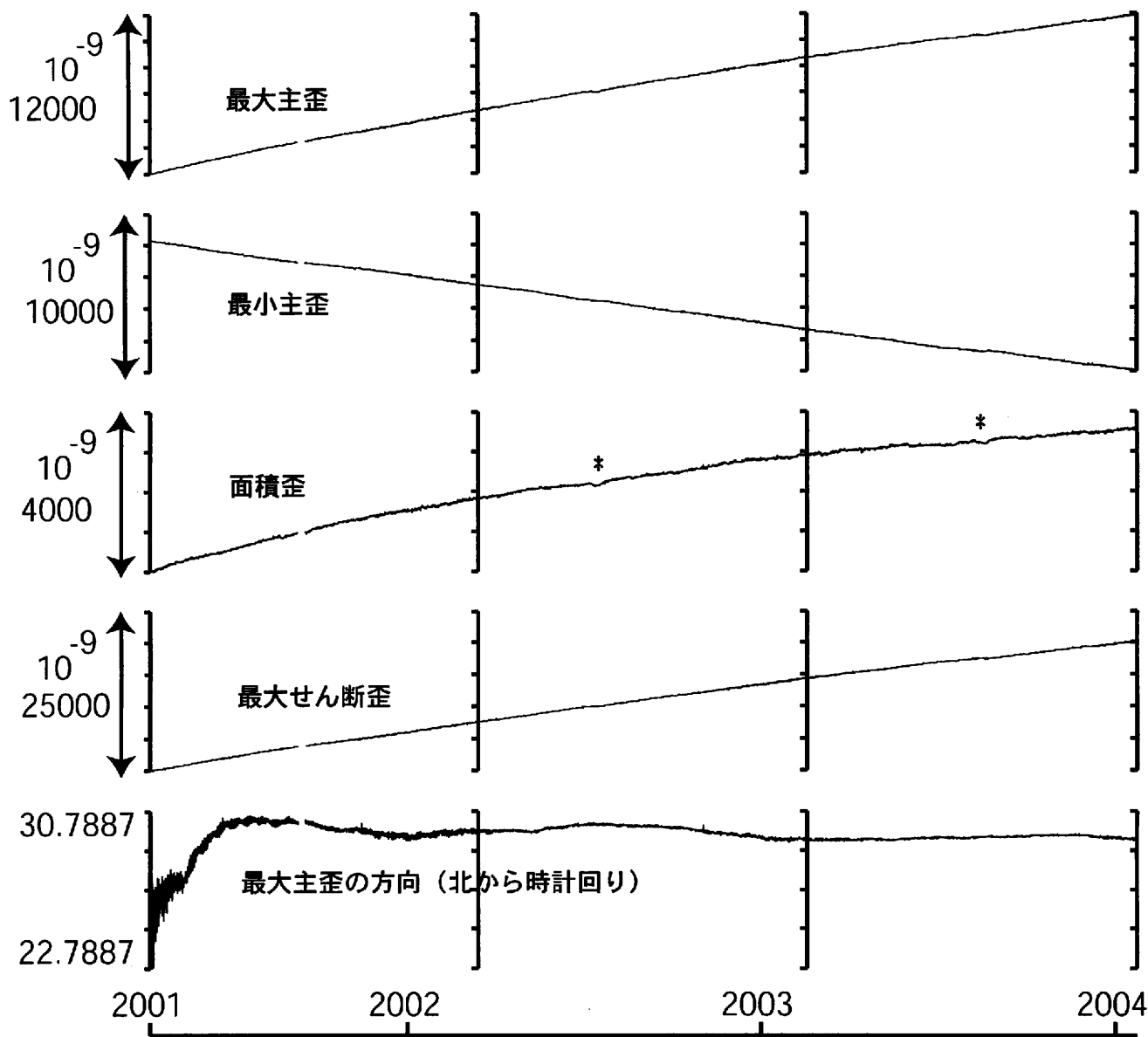
コメント:

2002年2月以降の榛原の水位上昇・低下は、
静岡空港建設工事による盛土・土砂除去工事
(工事期間2002年2月～4月，7月～2003年2月，
2003年5月～継続中)の影響による。
各工事期間終了後は、水位は徐々に
低下している。



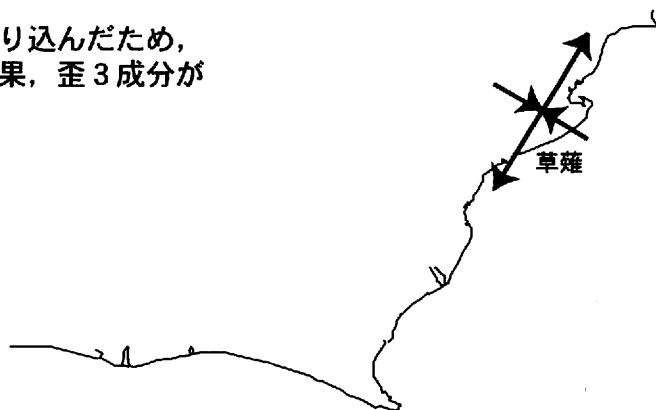
草薙長期：主歪解析

(2001/04/10 00:00 - 2004/01/23 00:00)



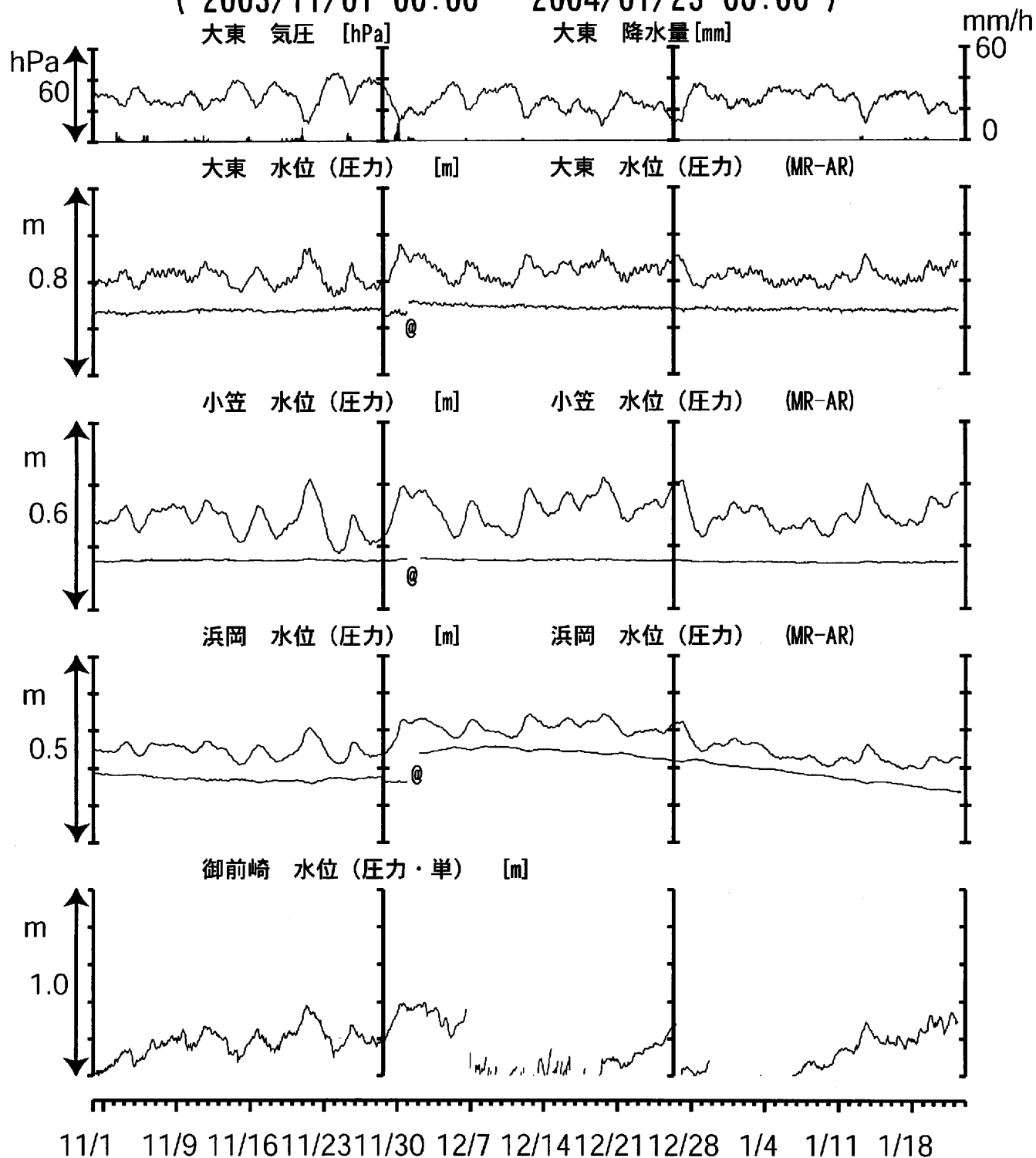
コメント：主歪解析の起点は2001年4月5日

* 草薙1（浅井戸）からあふれた水が入り込んだため、草薙3の水位が大幅に上昇した。その結果、歪3成分が縮んだための変化。



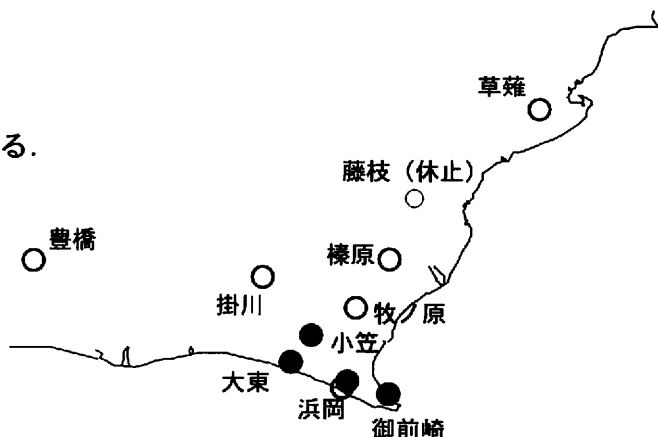
東海地域南部 地下水観測結果 中期 (時間値)

(2003/11/01 00:00 - 2004/01/23 00:00)



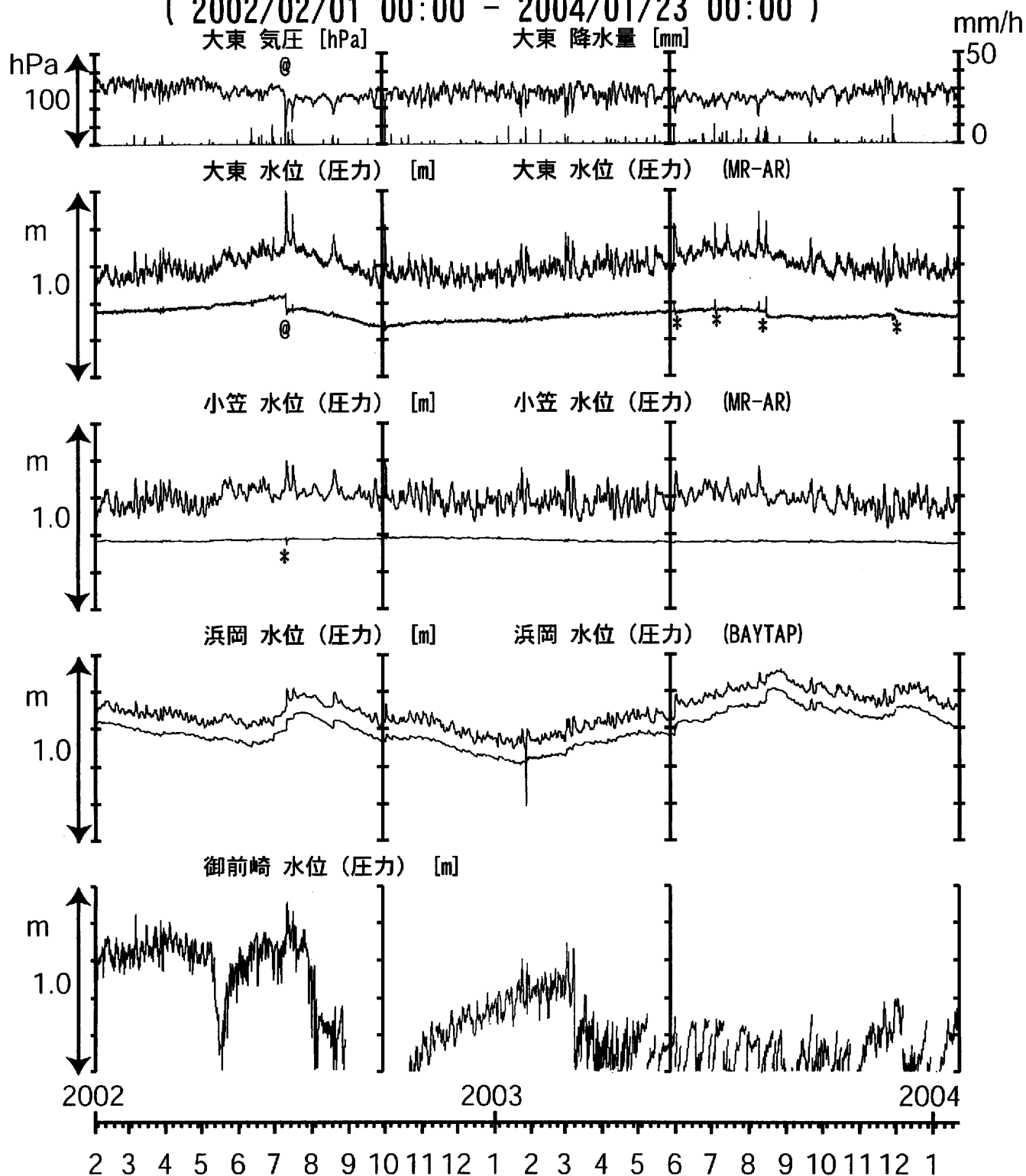
コメント:

@: 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。
御前崎の水位異常は、配管からの
圧力漏れによるもので
現在は、実質的に欠測状態にある。
根本的な修理が必要で、
現在準備中である。



東海地域南部 地下水観測結果 長期（時間値）

(2002/02/01 00:00 - 2004/01/23 00:00)



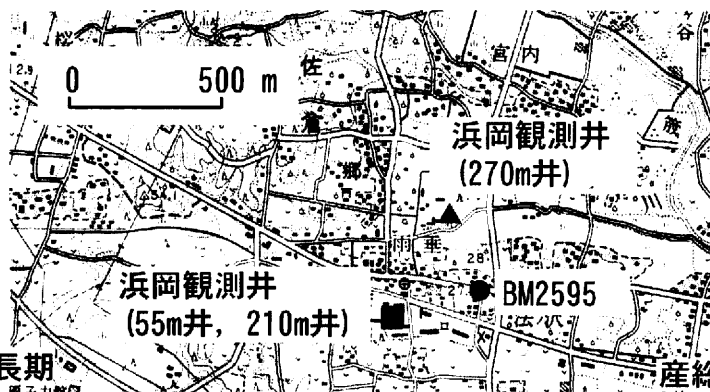
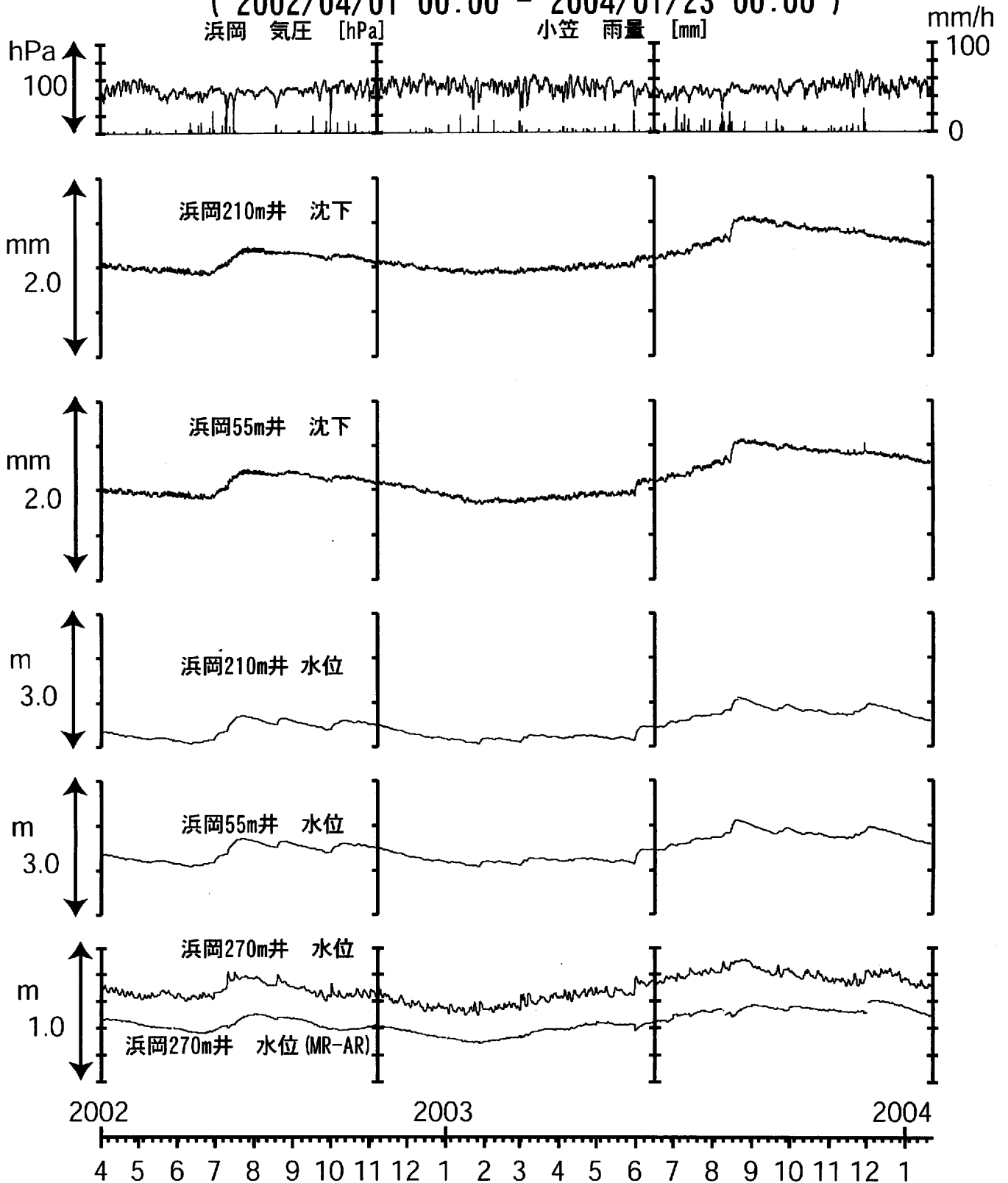
コメント：

*;雨量補正不十分.
 @;気圧計レンジ変更による見かけ上の変化
 2002年5月初めからの御前崎の水位異常は、
 配管からの圧力漏れによるもので
 現在は、実質的に欠測状態にある。
 根本的な修理が必要で、
 現在準備中である。



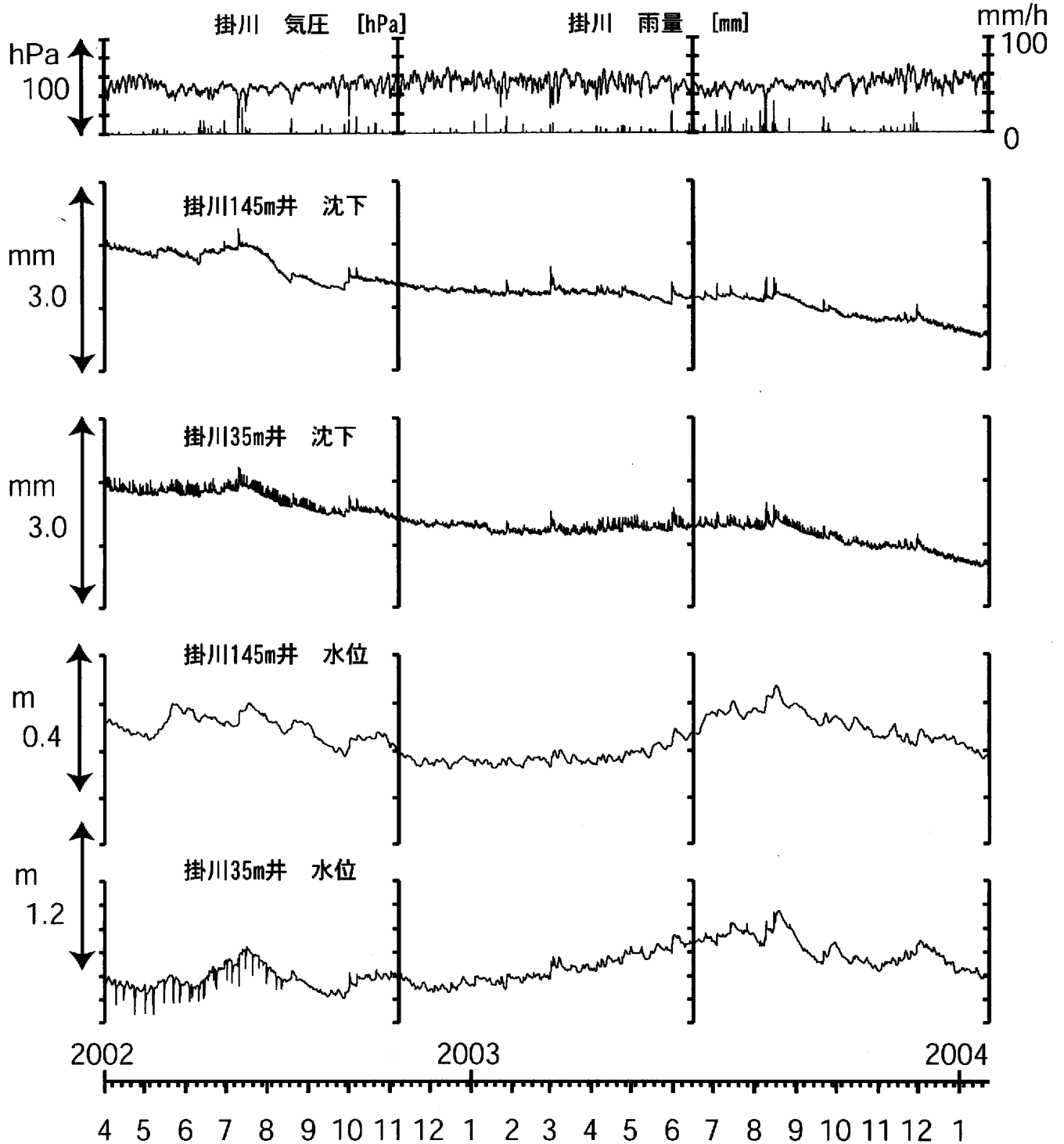
浜岡沈下（時間値）

(2002/04/01 00:00 - 2004/01/23 00:00)



沈下・水位（時間値）

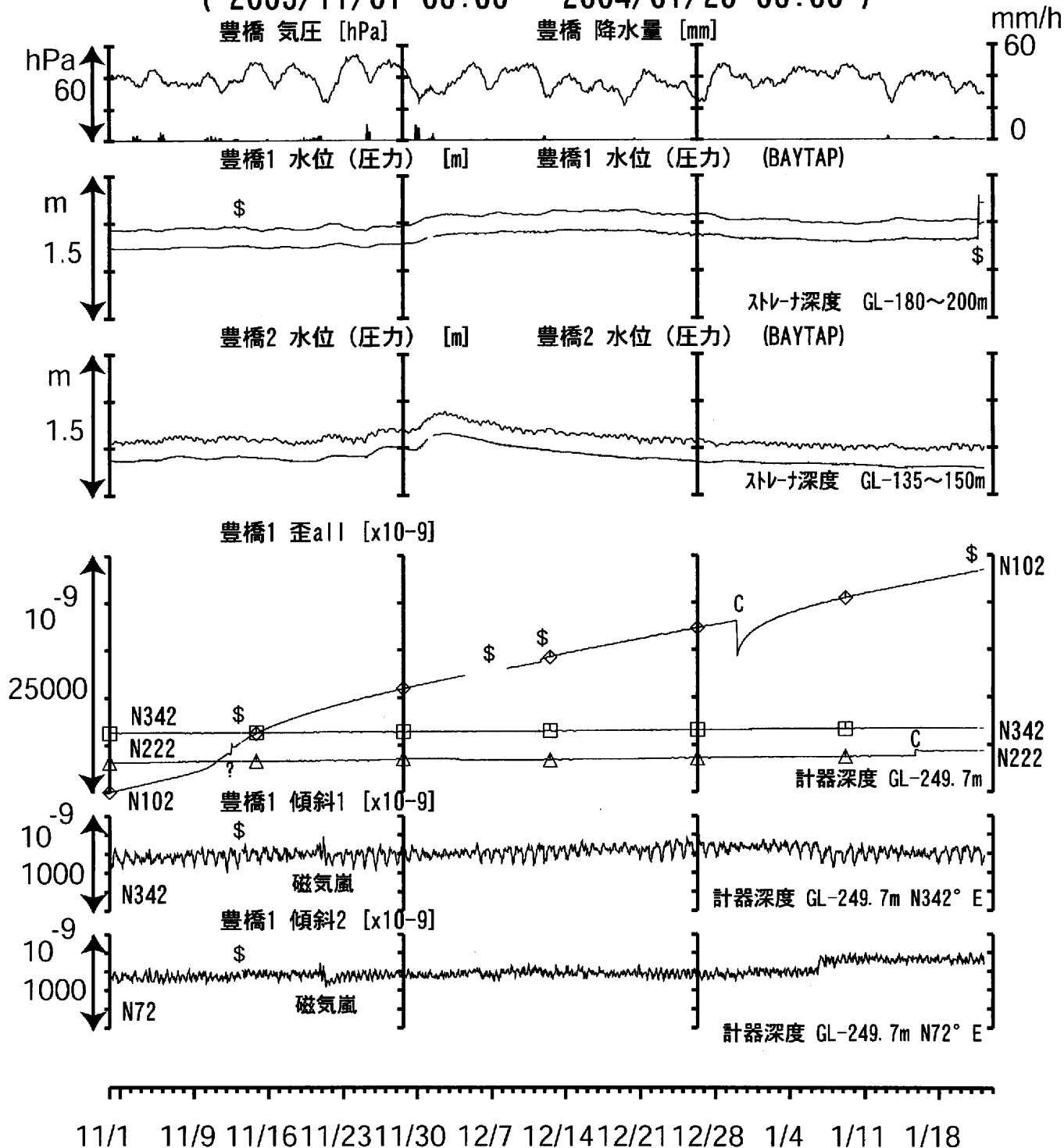
（ 2002/04/01 00:00 - 2004/01/23 00:00 ）



0 500 m

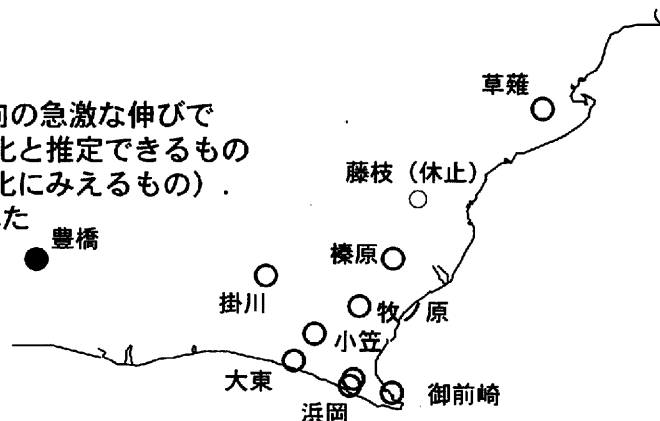


東海地域西部（豊橋）中期（時間値） (2003/11/01 00:00 - 2004/01/23 00:00)



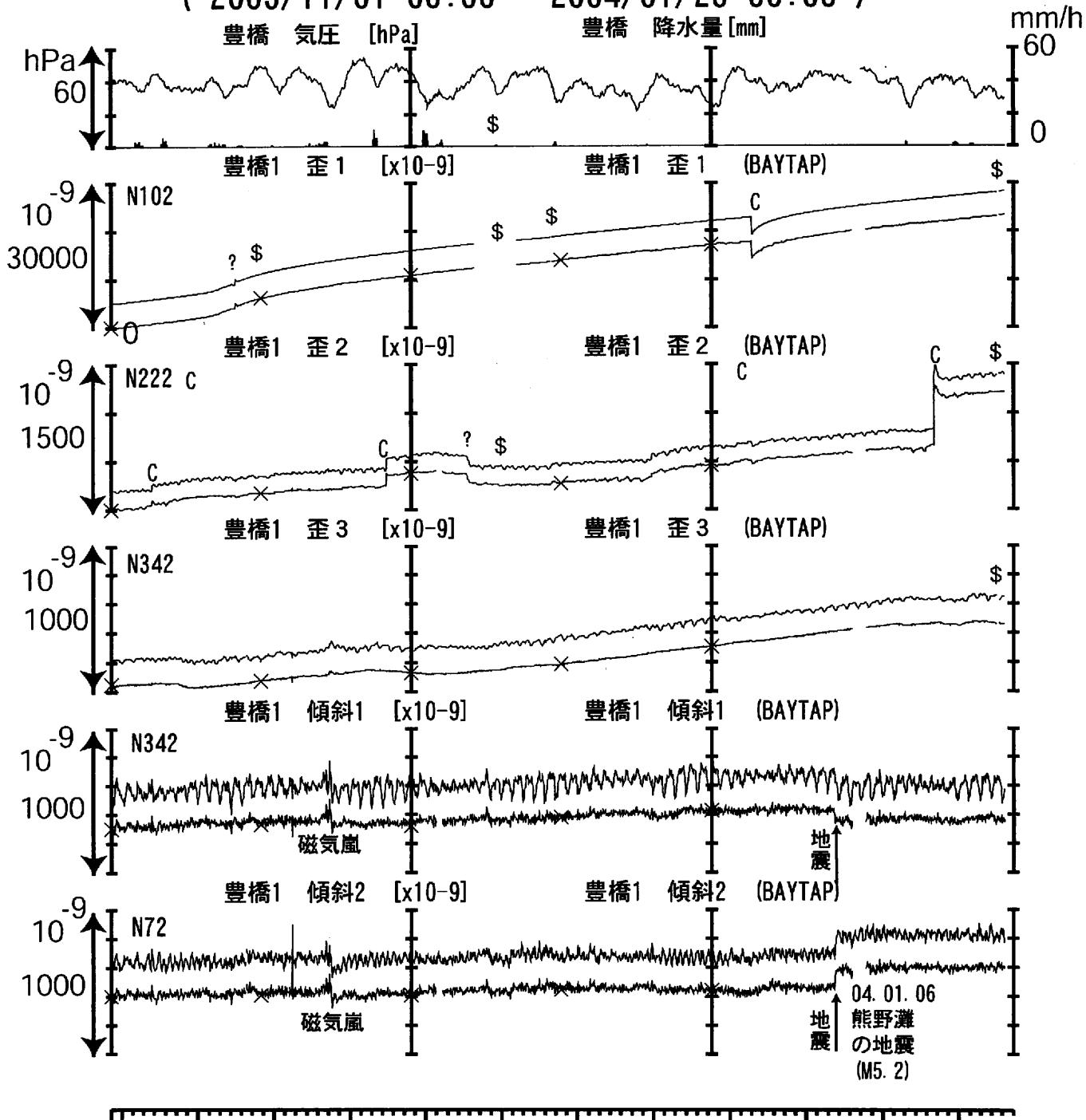
コメント：？；原因不明，\$；保守

C: トンネル工事が原因と考えられるN102方向の急激な伸びで歪計近傍で微小破壊が生じることによる変化と推定できるもの（主歪解析結果と逆センスのステップ状変化にみえるもの）。
2002年6月末から観測点から西に約200M離れた場所でトンネル工事が継続中である。



東海地域西部（豊橋・歪）中期（時間値）

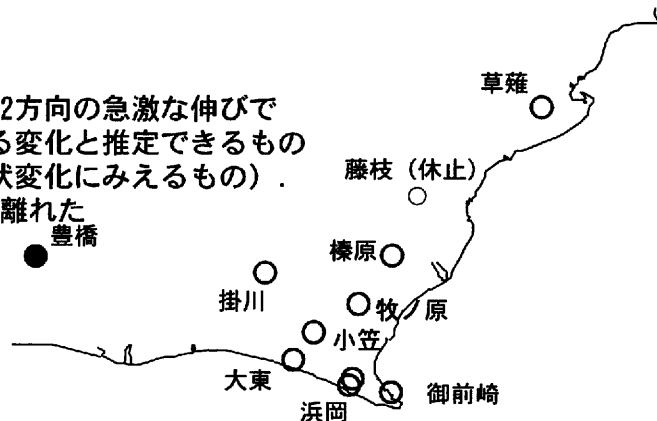
（ 2003/11/01 00:00 - 2004/01/23 00:00 ）



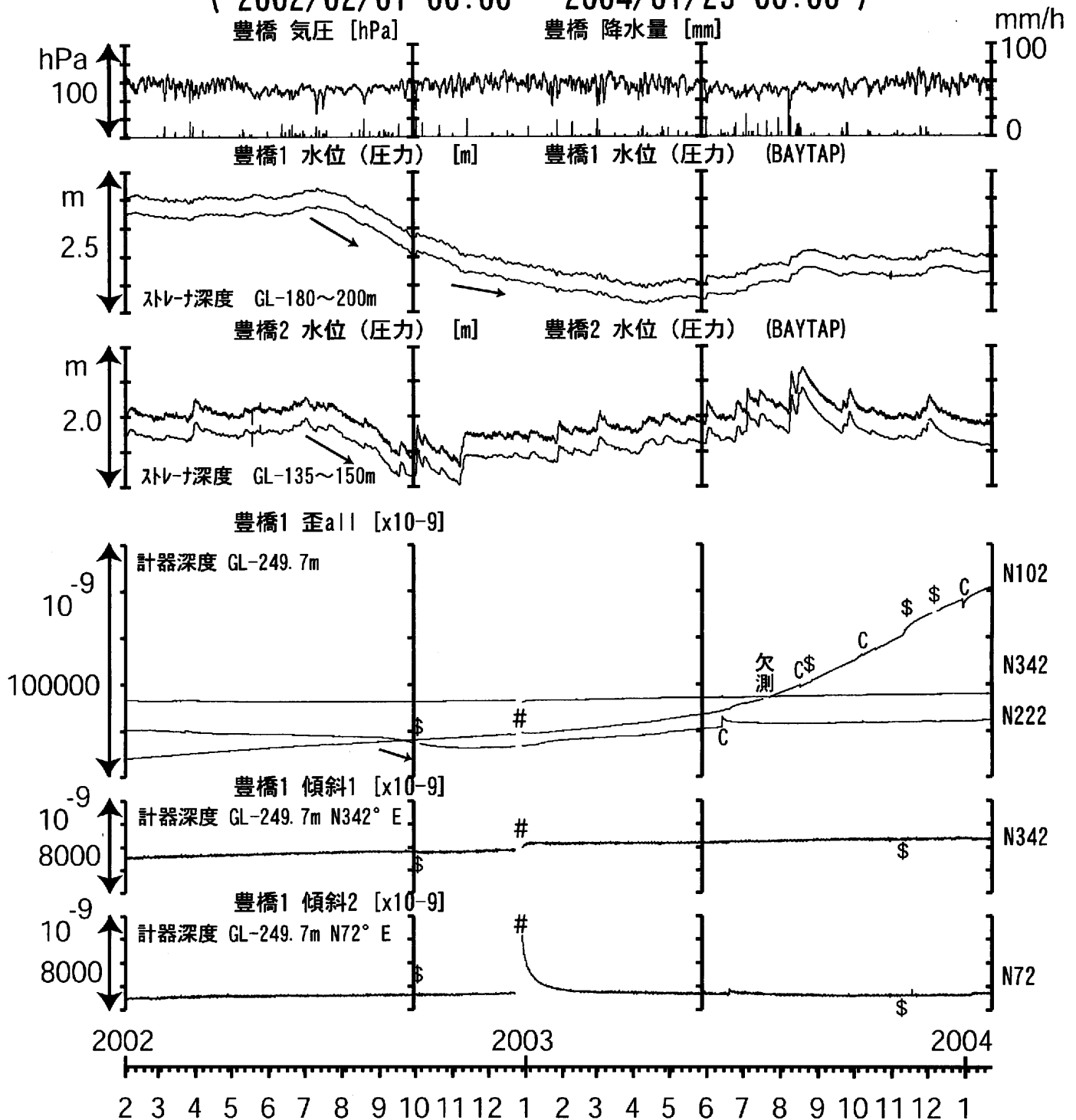
11/1 11/9 11/16 11/23 11/30 12/7 12/14 12/21 12/28 1/4 1/11 1/18

コメント：？；原因不明．\$；保守

C: トンネル工事が原因と考えられるN102方向の急激な伸びで歪計近傍で微小破壊が生じることによる変化と推定できるもの（主歪解析結果と逆センスのステップ状変化にみえるもの）．
2002年6月末から観測点から西に約200M離れた場所でトンネル工事が継続中である．



東海地域西部（豊橋）長期（時間値） （2002/02/01 00:00 - 2004/01/23 00:00）



コメント：#；充電器故障によるバッテリー消耗。

\$；保守。？；原因不明。

C：トンネル工事が原因と考えられるN102方向の急激な伸びで歪計近傍で微小破壊が生じることによる変化と推定できるもの（主歪解析結果と逆センスのステップ状変化にみえるもの）。

2002年7月～2003年4月に豊橋1の水位が低下した。

2002年7月～11月に豊橋2の水位が低下した。

歪2（N222）が2002年9月初めから減少していたが、2002年11月後半から上昇している。

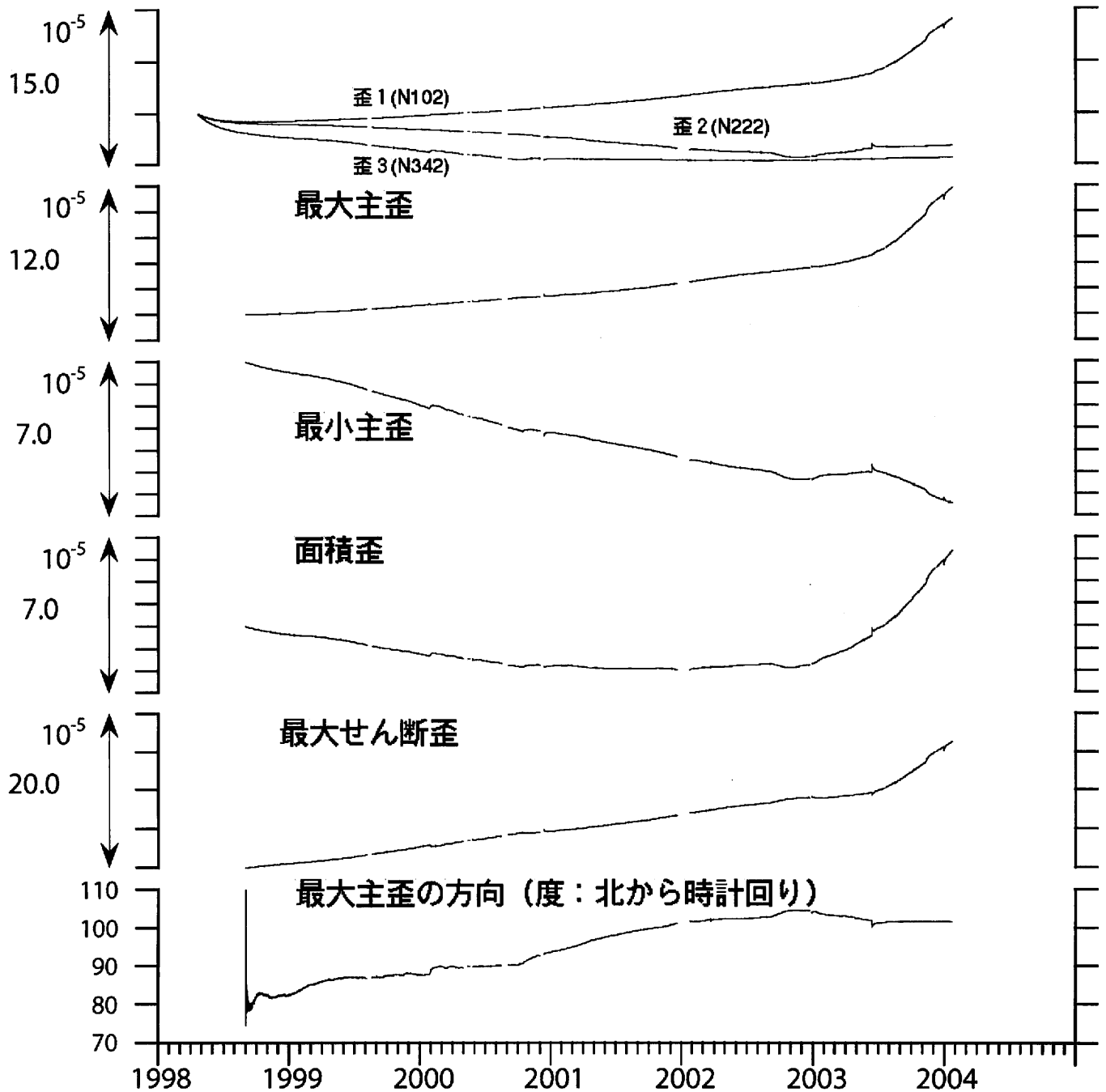
歪1（N102）の上昇が、2003年4月頃から加速している。

以上、2002年6月末からのトンネル工事の影響と思われる。

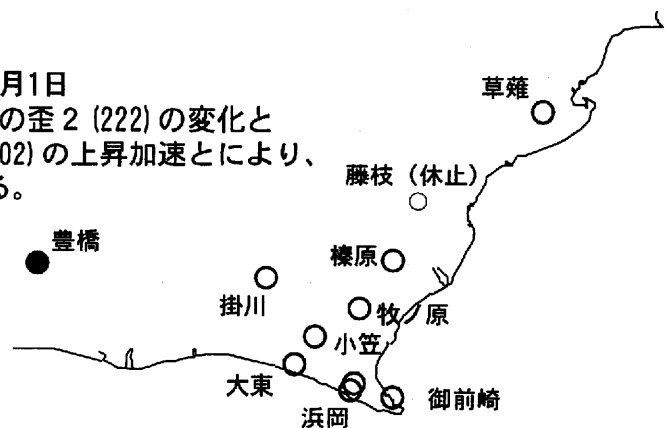


豊橋1:主歪解析

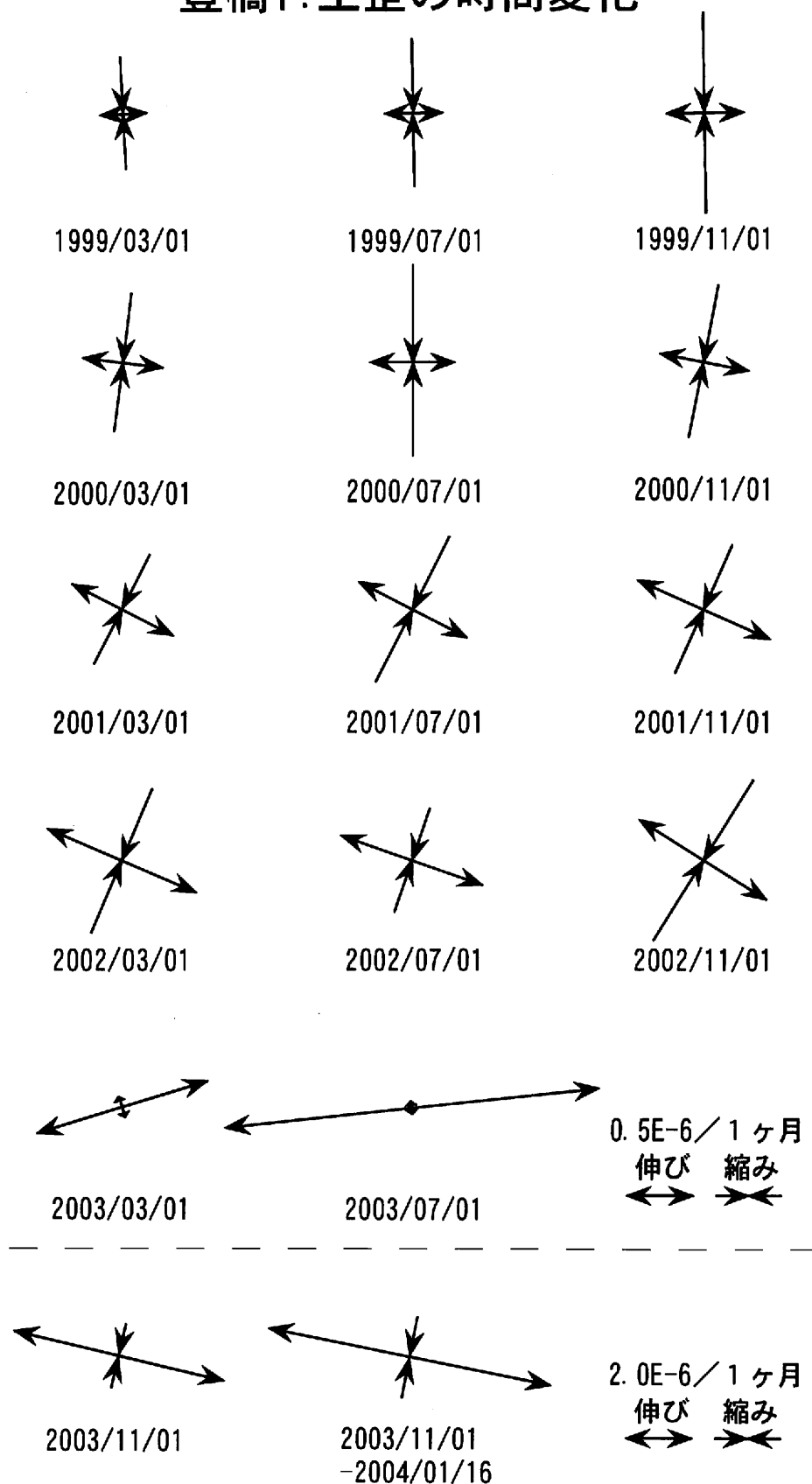
(1998/09/01 00:00 - 2004/01/22 05:00)



コメント: 主歪解析の起点は1998年9月1日
主に、2002年9月初めからの歪 2 (222) の変化と
2003年4月頃からの歪 1 (102) の上昇加速とにより、
解析結果に影響が出ている。



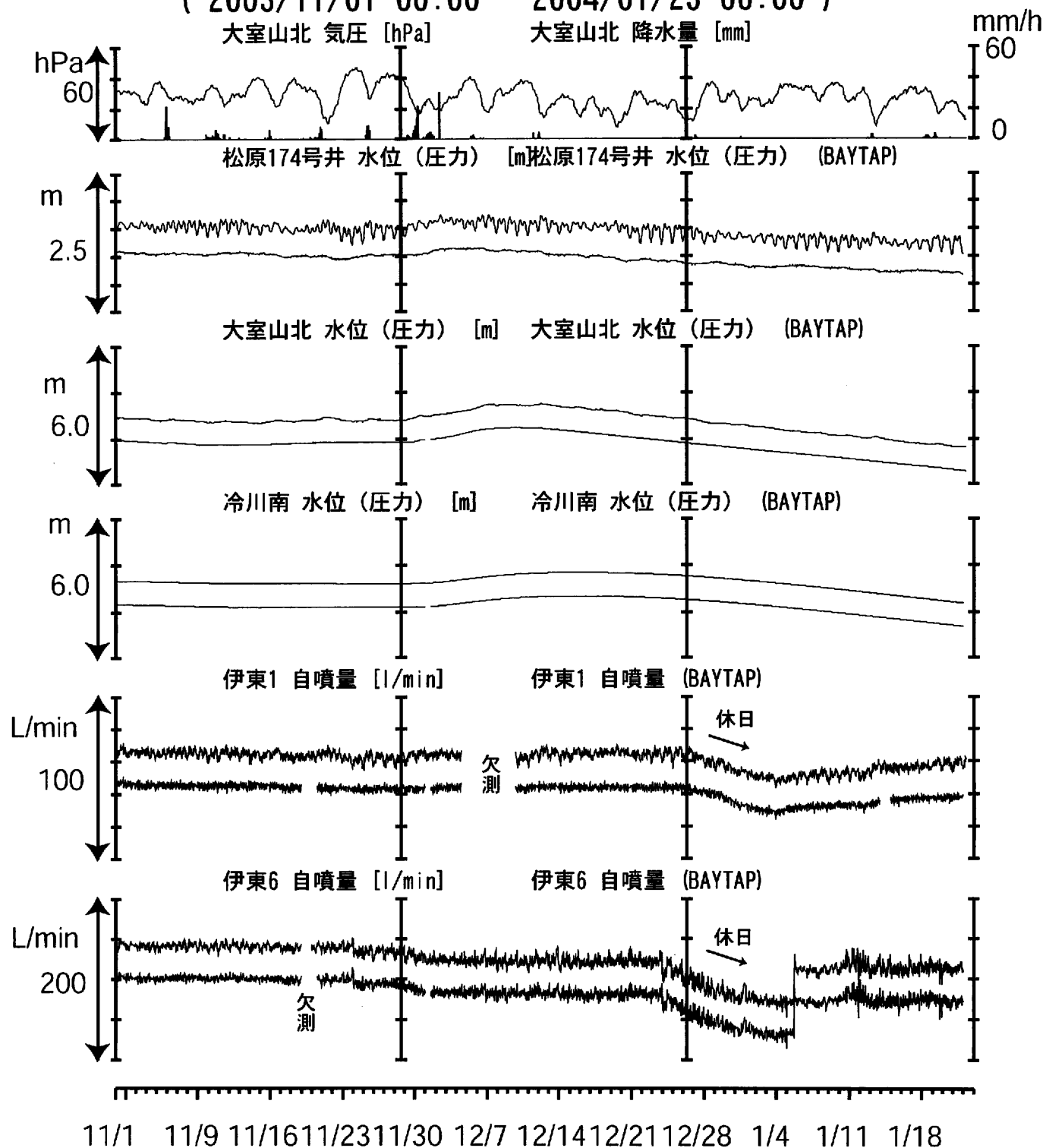
豊橋1:主歪の時間変化



コメント：最新の分を除いて各々4ヶ月前を起点として主歪解析を行った。
主に、2002年9月初めからの歪2 (222) の変化と
2003年4月頃からの歪1 (102) の上昇加速とにより、
解析結果に影響が出ている。

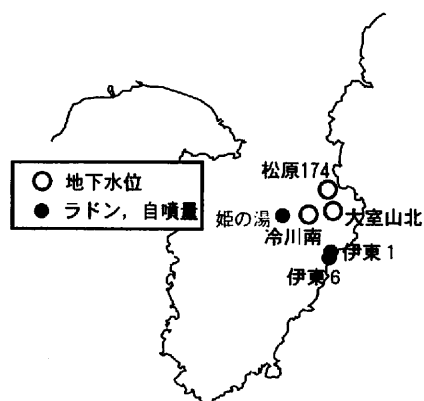
伊豆半島東部:地下水位・自噴量 中期 (時間値)

(2003/11/01 00:00 - 2004/01/23 00:00)



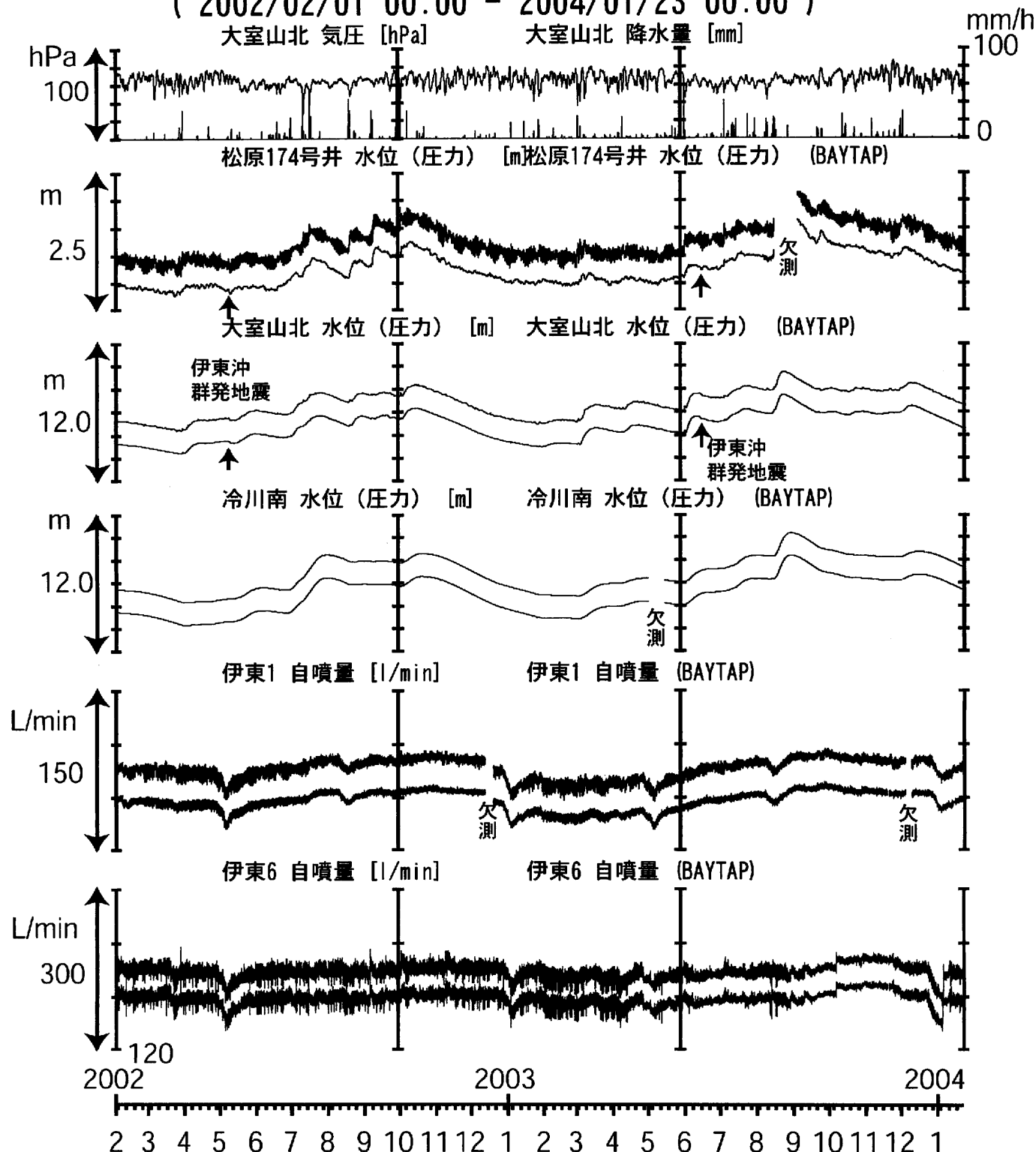
コメント:

松原174号井は静岡県による観測。
伊東6のばらつきは配管の問題に
よると思われる。



伊豆半島東部:地下水位・自噴量 長期 (時間値)

(2002/02/01 00:00 - 2004/01/23 00:00)



コメント：松原174号井は静岡県による観測。

松原水位は、8月中旬の大雨により、水位が上昇して井戸口から溢れたため、欠測となっている。

伊東1・6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6のばらつきは配管の問題によると思われる。

伊東1自噴量の2002年12月中旬における欠測は、停電による機器不具合のためである。

機器再設定後、自噴量の絶対値が小さくなっているが、見かけ上のものである可能性が高い。



解 説

地殻変動センサーとしての 地下水の能力

産業技術総合研究所地球科学情報研究部門

地震地下水研究グループ

小泉尚嗣・高橋 誠・松本則夫・

佐藤 努・大谷 竜・北川有一

1. はじめに

地震予知は、種々の手法を戦略的に組み合わせ、相互に情報交換しつつ探求していかななくては達成できない困難な課題である。地震予知研究の手法において地下水観測を用いた手法は「後発」であり、地震発生と結びつける理論面で弱点がある以上（小泉, 1997; 小泉, 1998）、他の手法に対して比較優位性のある分野の課題を優先的に探求する一方で、得られたデータを、他手法によるそれとの比較可能な情報に換算して提供することが重要であろう。そのような観点にたつと、地震予知研究における地下水の観測・研究の役割は下記の5点が考えられる。

(1) 地下水観測・研究から換算される地殻変動（主に体積歪変化や比高変化等）データの提供。短期・直前予測および長期予測への貢献が考えられる（松本・他, 2003; 小泉・他, 2003a; 2003b）。

(2) 断層層周辺における Permeability (Permeability の日本語訳については若干の混乱があるので、ここではあえて訳さない) 等の時間変化に関する情報の提供。地震発生サイクルの理解につながり長期予測に貢献できる（Kitagawa et al. 2002; Sato et al. 2000）。

(3) 地下水変化に伴う地表変位情報の提供。GPS 等測地測量の高精度化および解釈の厳密化につながる中で中～長期予測に貢献できる。非テクトニックな要因による浅部地下水変化の比高変化に対する寄与の定量的な評価については、松本 (1996)・松本・他 (2001)・Ohtani et al. (2000) の先駆的な研究があるが、最近では国土地理院でも取り組みが始まったようである（宗包・他, 2003; 飛田・他, 2003）。地

震後の余効地殻変動に対する間隙水圧の寄与についての近年の研究発展も興味深い（Jonsson et al., 2003）。

(4) 地下深部における間隙水圧変化に関する情報の提供。通常深さ 1km 程度までの地下水観測に対し、地震発生域の深さは数 km 以深なので、観測結果から地震発生域における間隙水圧に対して何らかの境界条件を与える試みは進んでいない。浅発地震活動が活発な一方、深部地下水の情報取得が期待できる熱水地域における観測・研究が、この課題に対する回答をもたらしてくれるかもしれない（Roeloffs et al., 2003）。

(5) 地震に伴う物質移動に関する情報の提供。地震前に物質移動するメカニズムの定量化が困難な状況が続いている。また、地震発生域付近からの物質の移動が、地震活動の推移とともに観測で確認されたのは松代地震（1965–1967）のみであると考えられ（Yoshioka et al. (1970), 大竹 (1976)), 現在なお研究段階といえよう。

現時点で、観測量を地震予知と結び付けて定量的な議論ができ、東海地震予知に代表される実用的な地震予知に適用できるのは上記(1)のみであるので、本稿では主に(1)について議論をおこなう。

2. 議 論

2.1 地下水位データの地殻変動データ（体積歪変化・比高変化）への換算

被圧地下水の水位は、水で飽和した（空隙のある）弾性体の理論（poro-elastic theory）を根拠とした「体積歪計」として扱える。主に地球潮汐による体積歪の潮汐変化（両振幅で 10^{-7} のオーダー）による地下水位変化を利用して、地下水位の体積歪変化に対する感度を求めることができる。ごく条件のよい観測井戸であれば、10 cm 程度の振幅の潮汐変化が観測でき、我々が通常用いる高感度の水晶発信式水位計の分解能が 0.2 mm 程度であるので、 2×10^{-10} 程度の体積歪変化の検出が期待できる（図 1）。ただし、(1)降雨の長期的な（水位変化への）寄与の除去が難しいこと、(2)数日以上の周期をこえる体積歪変化に対して一般に水位変化の感度が落ちること、(3)数日以内の変化に限っても、通常はノイズレベルが数 mm 程度以上はあるといった理由により、条件

不圧（自由）地下水の場合は、被圧地下水と違って、体積歪変化に対しては感度は悪い。ただし、海岸付近の浅い不圧地下水の場合、海水面と圧力的につりあった状況にあることから、海水面に対する相対的な地面の昇降に応じて水位が変化する。すなわち、比高の変化が、（符号を逆にして）海岸付近の不圧地下水の水位変化になりうる（図3）。ただし、その場合、平衡状態に達して圧力がつりあった状態ならば、水位変化量は比高変化量以下となる。

下記の4点が考えられる.

- (1) 帯水層の広がりに対応する範囲の空間平均値を測定できる。
- (2) 地殻変動観測機器とは独立な観測量であることから、通常の地殻変動観測機器と比較・検討することで観測データの信頼性が増す。
- (3) 既存の地下水データ・地下水観測設備の利用により、近代的観測（機器）のない場所・時代での地殻変動データが提供できるので、時空間的に広い範囲のデータ提供ができる。
- (4) 観測機器が地殻変動連続観測機器に比べて安価である。

3.1 想定東海地震におけるプレスリップ検知能力

上述のように、被圧地下水であって地球潮汐によ

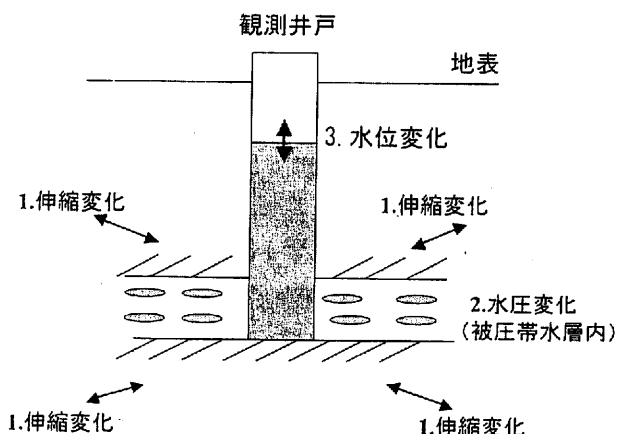


図 1 体積歪変化と被圧地下水位変化との関係を示すモデル

る潮汐変化を確認できる観測井戸の水位データは、気象庁の体積歪計データとまったく同様に扱えるので、気象庁と同様の手順で、地下水位データを扱って相互に比較することができる。その結果、東海地方における産総研の地下水観測点の中で条件のよいものは、気象庁体積歪計に匹敵するプレスリップ検知能力をもつことがわかった（第2 松本・他，2003）。東海地震の想定震源域周辺で体積歪計のないところに、予算・人員の許される範囲で地下水観測点を設けることも、今後の展開としては考えられる。

過去 1300 年間に 9 回の発生が古文書等で確認されている南海地震では、四国や紀伊半島の温泉でくまへし自噴量や水位の低下があったことが知られている。特に、1946 年南海地震においては、地震時温泉水の自噴量・水位の低下に加え、地震の数日から、紀伊半島～四国の太平洋岸の浅い地下水の水位が、推定で数十 cm 以上低下したことが知られている。地震時の温泉水の自噴量・水位の低下については、本震の断層モデルから計算される体積歪変（増大：膨張）で定性的かつ定量的に説明できる。震前の浅い地下水の水位低下も、南海地震本震の源域周辺でプレスリップがあったとすれば、紀伊半島～四国の太平洋岸で陸地が隆起することで、1 で示した考えに基づき定性的に説明できるが、

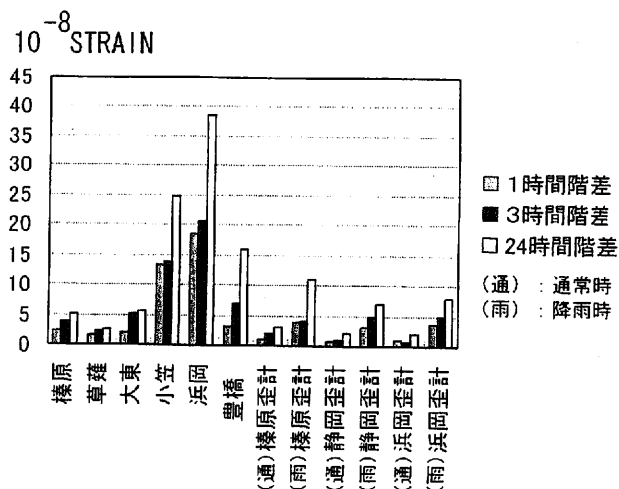


図 2 歪換算後の水位のノイズレベルと、気象庁
体積歪計のノイズレベル(小林・松森,
1999)との比較

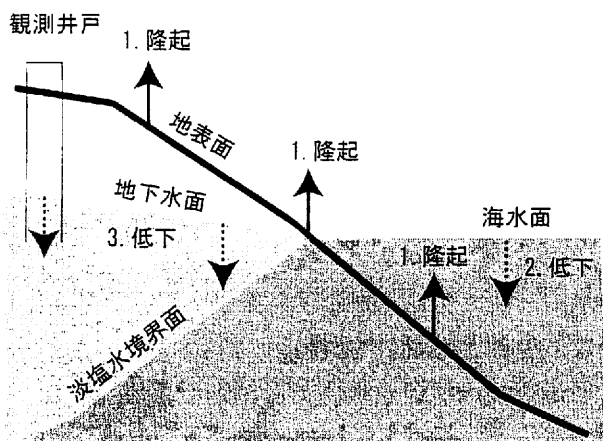


図 3 地盤の隆起と海岸付近の地下水位の低下との関係を示した模式図。

その量は数 cm 程度にとどまり、上述の数十 cm 以上といった振幅は説明できない。何らかの増幅機構があるはずでそれを解明することが課題である。いずれにしても、当時の地下水変化を地殻変動と結びつけて評価することで、1946 年南海地震の発生モデルを本震発生前の過程も含めて議論・評価でき、これは次期南海地震発生予測精度向上に貢献できる（京大防災研，2003 a，2003 b；小泉・他，2003 b）。

4. 課題

4.1 地下水変化を地殻変動データに換算する際の周波数依存性の評価

体積歪変化や比高変化によって地下水位が変化する場合、実際には周波数依存性（長周期側にも短周期側にも感度が低下する）がある。気圧変化等に対する地下水位変化を解析して、周波数依存変化も考慮した換算をしていくことが必要である（北川・他，2003）。

4.2 地震時に地下水変化をもたらす他の要因による寄与の評価

地震時には、体積歪変化や比高変化だけではなく、液状化や Permeability 等の変化によっても地下水は変化する。通常時の変化に加えて、過去の地震時の変化を適切におこなうことで、地震前の異常変化が適切に評価できるので、地震時の変化について要因別に分類・評価できるようにしておく必要がある。液状化や Permeability 変化は、地質状況や地震動（特に加速度）に左右されると考えられるので、今後、比較検討していく必要がある。台湾で発

生した 1999 年集集地震（Mw 7.6）後に、地質状況がよく把握された数百の地下水観測点（台湾）で詳細な地下水変化が捉えられていて、地震動加速度最大値等と比較可能なので、このデータの詳細な解析が一つの回答を与えてくれる可能性がある（Wang et al, 2001；Lai et al, 2003）。

4.3 反映している地殻変動の空間的な把握

2.2 の(1)で帯水層の広がりに対応する範囲の（地殻変動の）空間平均値を示すとしているが、実際の程度の範囲を代表しているかは不明である。他の地殻変動観測機器との相互比較や、狭い範囲に観測点を集中させて、潮汐や気圧変化・長周期地震動に対するレスポンスを比較検討するといった案が考えられる。

5. まとめ

地下水変化を地殻変動に換算することで、地震に関連した地下水変化を、地震の理論やシミュレーションと結び付けて定量的評価ができる。上述したように、体積歪変化に対して敏感な井戸ならば、近代的な機械観測がされているところで 10^{-8} 程度の体積歪変化が検出できる。また、地下水位変化の検出が目視にすぎない場合でも、数十 cm 程度の水位変化が意味する $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 程度の体積歪変化を検出している可能性がある。海岸部の地下水位変化の比高変化への換算等も考慮すると、近代的観測（機器）のない場所・時代での地震地殻変動に関する情報提供を既存の地下水記録から期待することができ、これは逆に地震のモデルやシミュレーションの高度化に大きく貢献すると考えられる。

文献

- Jonsson et al. (2003), Nature, 424, 179-183.
- 北川・他 (2003), 日本地震学会講演予稿集, P 130.
- Kitagawa et al. (2002), Geophys. Res. Lett., 29, 10, 121-1-121-4.
- 京大防災研 (2003 a), 地震予知連絡会会報, 70, 402-403.
- 京大防災研 (2003 b), 地震予知連絡会会報, 70, 423-428.
- 小泉 (1997), 自然災害科学, 16-1, 41-60.
- 小泉 (1998), 地震学会ニューズレター 10, 1, 15-17.

- 小泉・他 (2003 a), 月刊地球, 号外 41 号, 48-54.
- 小泉・他 (2003 b), 日本地震学会講演予稿集, A037.
- 小林昭夫・松森敏幸 (1999), 駿震時報, 62, 17-41.
- Lai et al. (2003), 地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会, S049-P002.
- 松本 (1996), 月刊地球, 号外 14 号, 33-41.
- 松本・他 (2001), 日本地震学会講演予稿集, C21.
- 松本・他 (2003), 日本地震学会講演予稿集, P 129.
- 宗包・他 (2003), 測地学会講演予稿集, 65-66.
- Ohtani et al. (2000), Earth Planets Space, 52, 663-668.
- Roeloffs et al. (2003), J. Volc. Geotherm. Res., 127, 269-303.
- Sato et al. (2000) Geophys. Res. Lett., 27, 8, 1219-1222.
- 飛田・他 (2003) 測地学会講演予稿集, 67-68.
- Wang et al.(2001) Geology, 29, 9, 831-834.
- Yoshioka et al. (1970), Geochem. J., 4, 61-74.