

神奈川県西部地域における 2011（平成 23）年の地殻変動観測結果

原田昌武・板寺一洋（神奈川県温泉地学研究所）

はじめに

温泉地学研究所では神奈川県西部地震に対する調査研究の一環として、また箱根火山の火山活動をモニタリングするため、県西部地域に地震・地殻変動観測網を展開しています。地殻変動観測については、傾斜観測（7 観測点）・GPS 測量（8 観測点、臨時観測 4 観測点）・光波測量（2 観測網・14 基線）・地下水位観測（6 観測点）の連続観測を行っています（図 1）。ここでは、2011（平成 23）年に観測されたこれらの地殻変動観測結果について報告します。地震活動については本多(2012)をご覧ください。

傾斜観測結果

傾斜観測は箱根カルデラ内にある駒ヶ岳、小塚山、湖尻をはじめ、塔の峰、裾野、岩倉、寄と県西部地域の広範囲に設置しています（図 1 の□印）。各観測点では、深度約 100m の観測井内に傾斜計を設置し、南北方向および東西方向の傾斜変化を観測しています。観測計器類の仕様やテレメータ手法など、観測方法の詳細については既報（神奈川県温泉地学研究所、1999 など）のとおりです。また、これまでの傾斜観測の結果や傾斜のデータの見方については、原田ほか（2005）や本多ほか（2006）をご覧ください。

図 2 に 2011（平成 23）年 1 月から 12 月における傾斜観測結果を示します。これらのグラフは、毎時

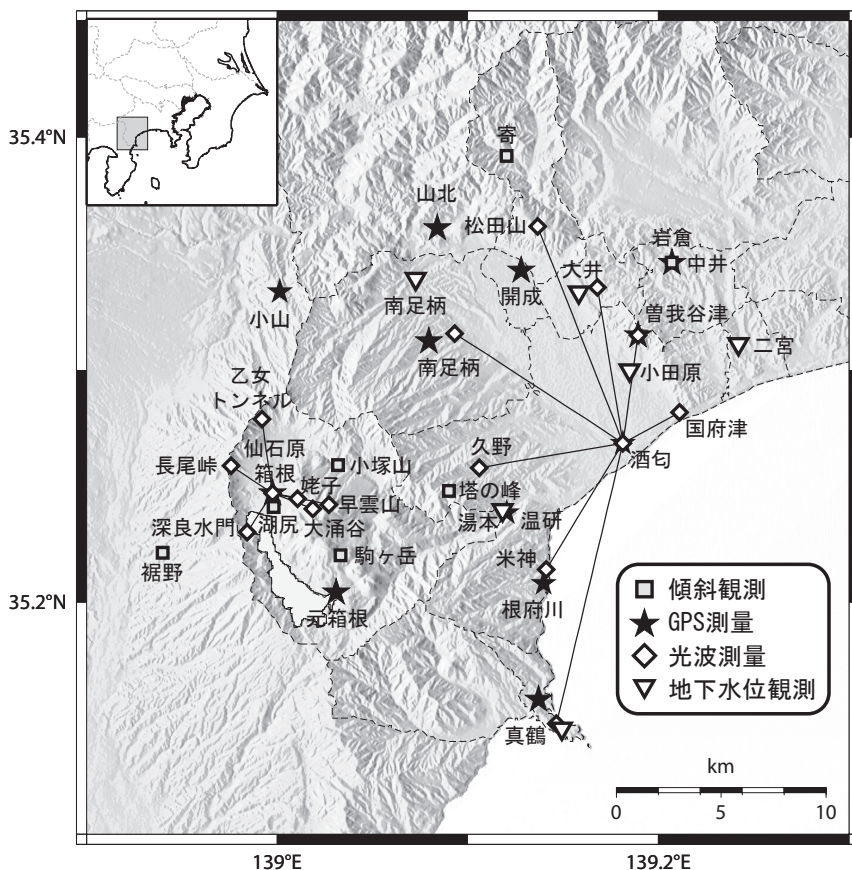


図 1 地殻変動観測点分布図。

0 分から 59 分までのデータを平均した 1 時間値のデータを用いて作成したものです。また、傾斜の南北成分の変化、東西成分の変化を示すとともに、箱根町芦ノ湯（気象庁によるアメダス観測点）における日降水量を示してあります。傾斜の方向は、図中の下向きの変化が南北成分では地盤の南下がり、東西成分では地盤の西下がりを示します。

当所では平成 20 年度より地震・地殻変動観測施設の強化・更新を進めています（伊東、2009）。平成

20 年度には湖尻観測点、駒ヶ岳観測点、岩倉観測点の観測施設の更新をしました。また、平成 22 年度は小塚山観測点、塔の峰観測点、寄観測点のテレメータシステムのみを、データ伝送系（テレメータシステム）を従来の NTT 専用回線から常時伝送方式（イーサネット）に変更しました。これに伴い、温泉地学研究所内の地震・傾斜観測データ処理システムやデータベースサーバ（データ収録装置）も更新したのですが、若干安定していないため、所々ヒゲの

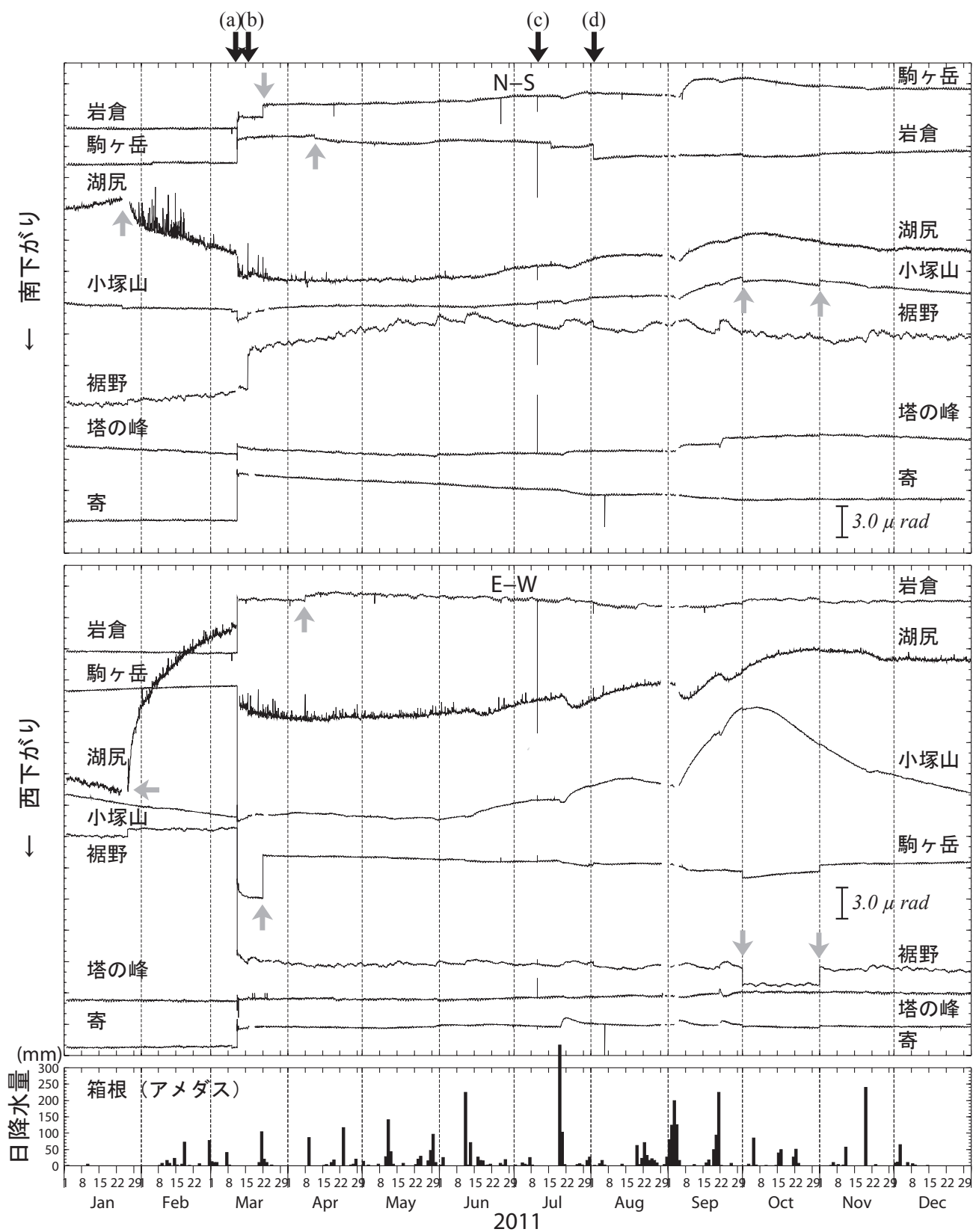


図2 2011年の傾斜観測結果。図は上から南北成分、東西成分、箱根（気象庁アメダス観測点）における日降水量を示す。(a)～(d)の黒色矢印は地震に伴う傾斜変動（本文参照）、灰色矢印は傾斜計自体の機械的な変化を表す。なお、ステップ状の変化については、一部の变化量を調整している。

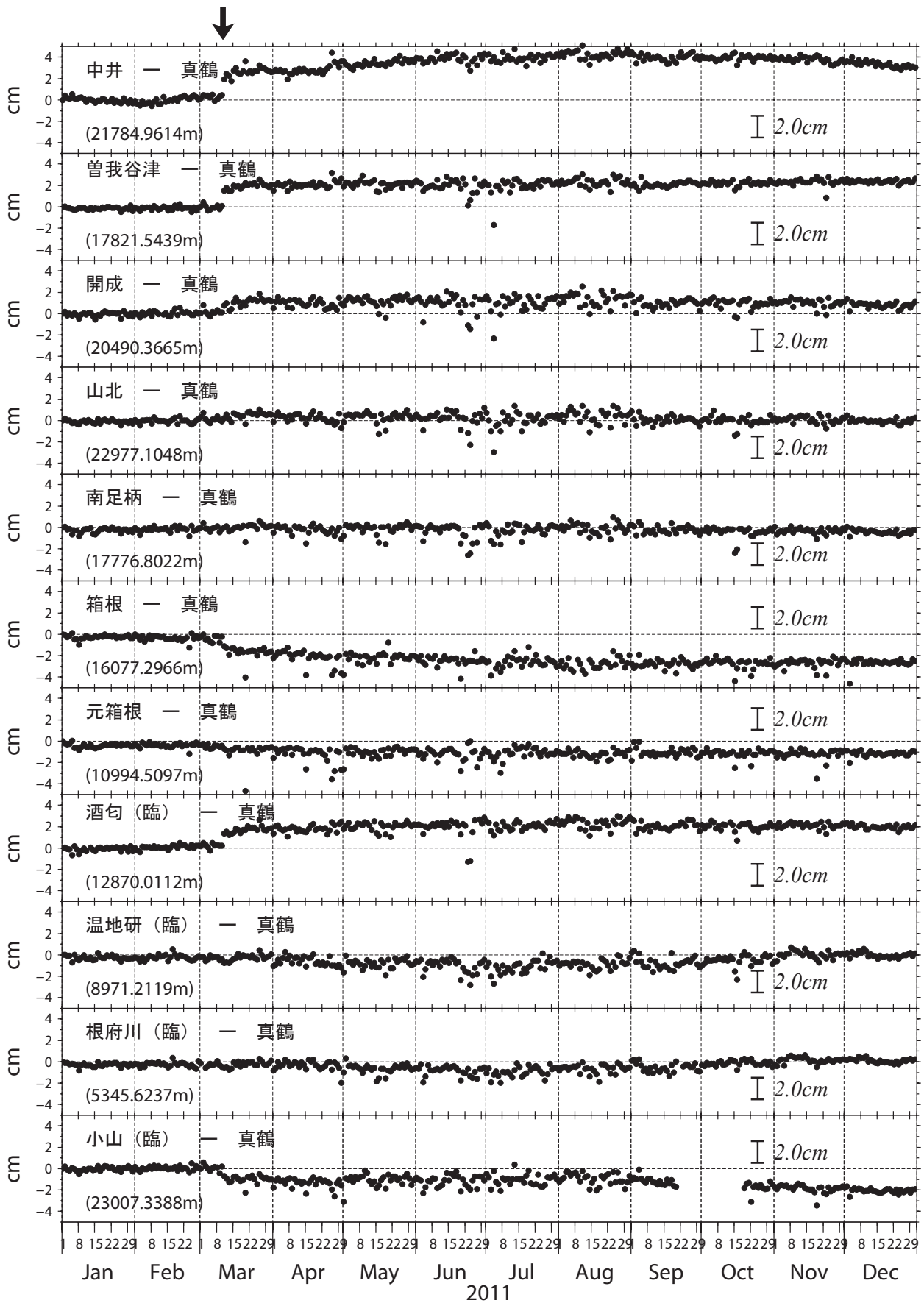


図3 2011年のGPS測量結果(基線長成分)。真鶴観測点を基点とした各観測点の基線長変化を示す。縦軸はデータの最初の日を基準にして、その相対変化量(cm)で示している。また、数値は基準となる距離を示している。黒色矢印は地震に伴う変動(本文参照)。小山(臨時)観測点は、(独)防災科学技術研究所との共同研究による観測点である。

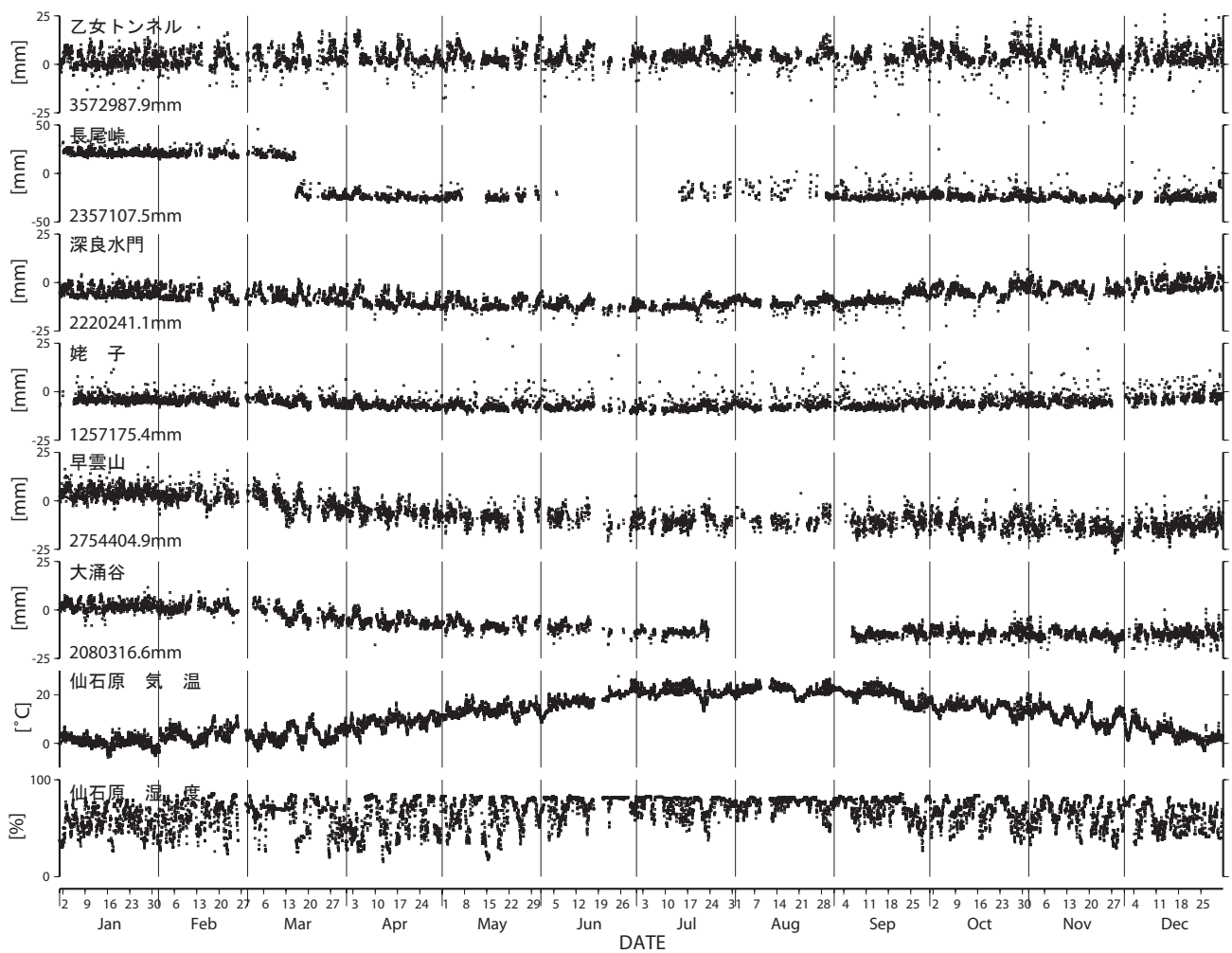


図 4.1 2011 年の光波測量結果（箱根観測網）。縦軸は 1 月 1 日を基準にして、その相対変化量（mm）で示している。また、数値は基準となる距離（0mm における絶対値）を示している。

ような一時的な異常値や階段状のステップが発生しています。これらについては、今後データベースを見直し、随時修正していく予定です。

湖尻観測点では 2009（平成 21）年 7 月中旬から数時間程度の不規則な変動が見られるようになりました（原田・板寺，2010）。2011（平成 23）年 1 月下旬に傾斜計センサーの入れ替えを行い復旧を試みたのですが、現在もこれらの不規則な変動は続いています。原因については調査中で、未だに明らかになっていません。ただし、1 年間を通した経年的な変化（長期的なトレンド）については、概ね安定した観測が継続していると思われます。

2011（平成 23）年の傾斜観測結

果からは以下の特徴がみられます。

(1) 地震による傾斜変化
傾斜計は有感地震や遠地での規模の大きな地震によって影響を受け、ステップや一時的なデータの飛びを生じます。2011（平成 23）年は次の地震によりコサイスマックな傾斜変動が観測されました。

- (a) 3 月 11 日 14:46 東北地方太平洋沖地震（M9.0, 深さ 24km）
- (b) 3 月 15 日 22:31 静岡県東部の地震（M6.4, 深さ 14km）
- (c) 7 月 10 日 09:57 三陸沖の地震（M7.3, 深さ 34km）
- (d) 8 月 01 日 23:58 駿河湾の地

震（M6.2, 深さ 23km）

これらの地震うち (a) と (c) は、当所の傾斜観測網からは震源距離が遠いのですが、地震の規模が大きく、その揺れが各傾斜観測点に影響を及ぼしています。このように地震時には傾斜ステップや飛びが発生していますが、それらに先行するような異常な傾斜変動はありませんでした。

(2) 降雨などによる影響

傾斜計は高感度かつ高精度であるため、降雨や気圧などの気象条件にも影響を受けます。2007（平成 19）年は台風 9 号による傾斜変化が顕著に現れていました（原田ほか，2008）。2011（平成 23）年につい

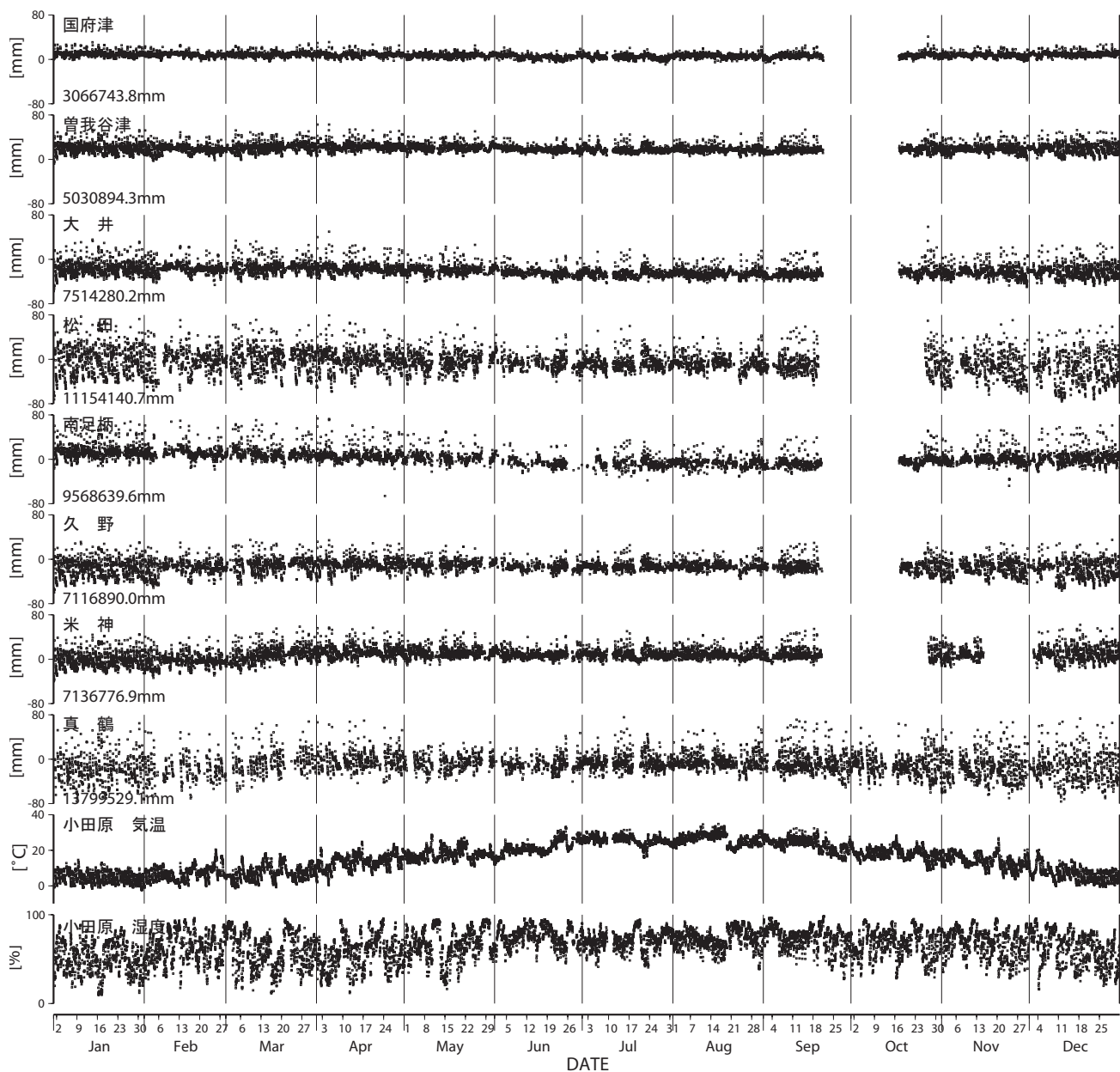


図 4.2 2011 年の光波測量結果（小田原観測網）。縦軸は 1 月 1 日を基準にして、その相対変化量（mm）で示している。また、数値は基準となる距離（0mm における絶対値）を示している。

ては、次の 3 回の台風による影響が顕著です。

- (i) 平成 23 年台風第 6 号（7 月 19～21 日頃）
- (ii) 平成 23 年台風第 12 号（8 月 30～9 月 05 日頃）
- (iii) 平成 23 年台風第 15 号（9 月 19～22 日頃）

(i) の台風は、南の海上から四国から紀伊半島付近を通過し、その後南東の海上に進みましたが、短期間に多くの雨をもたらし、傾斜変動を

引き起こしています。(ii) の台風は、南の海上から四国・中国地方を縦断し日本海に抜けていきましたが、台風が大型で動きが遅かったため特に紀伊半島周辺で大きな被害をもたらしました。また (iii) の台風は、東海地域から上陸し、神奈川県西部地域周辺を通過して東北地方から太平洋に進みました。これらの台風によって、特に小塚山・湖尻観測点で大きく変動しています。

GPS 測量結果

GPS 測量の観測点は神奈川県西部地震の想定震源域を取り囲むように考慮し、1993（平成 5）年から真鶴、箱根、山北、中井において観測を行っています（図 1 ☆印）。2008（平成 20）年 10 月からは曾我谷津（小田原市）、開成、南足柄、元箱根の 4ヶ所に新たに GPS 測量機器を設置し、計 8 観測点による観測を開始しました。また、2009（平成 21）年 10 月からは既存の 4

観測点（真鶴、箱根、山北、中井）のGPS受信機も平成20年に新設したGPS測量機器と同じ機種（Topcon社製NET-G3受信機、同社製CR-4チョークリングアンテナ）に更新しました。さらに、現在は臨時観測を4ヶ所（温研、酒匂、根府川、小山）で行っています。臨時観測点のうち、小山臨時観測点については、独立行政法人防災科学技術研究所との共同研究による観測点です。なお、観測方法の詳細やこれまでの観測結果については、神奈川県温泉地学研究所（1999）や原田ほか（2007）をご覧ください。

図3に2011（平成23）年1月から12月におけるGPS測量結果を示します。これらは、真鶴観測点を基点とした各観測点（臨時観測点を含めて11測線）の基線長を1日毎に解析し表示しています。小山観測点では、9月21日から10月17日まで欠測になっています。これは、東海地方上陸し東日本を縦断した平成23年台風第15号の通過時に電気系統のトラブルが発生したためです。

2011（平成23）年のGPS測量結果で顕著なのは、3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震によるコサイスマミックなステップです。この地震によって日本列島は大きくその震源域（神奈川県から見て東北東の方向）に引っ張られています。そのため、真鶴観測点から見て東方向に離れている観測点（中井、曾我谷津、酒匂）では伸びの方向に、また、西の方向にある観測点（小山、箱根）では縮みの方向に、最大で2cm程度のステップが生じています。さらに、中井、曾我谷津、開成、箱根、元箱根、酒匂、小山観測点では、東北地方太平洋沖地震の後から3月末にかけて、ステップした方向に、さらにゆっくりとした変動が見えま

す。これは、この地震による余効変動（地震によって不安定になった地殻の状態が安定状態に戻るための変動）であると考えられます。

中井観測点や根府川観測点では、1年間のスケールで基線長が伸びたり縮んだりする年周変化が見られます。また、小山観測点では欠測になる前後の9月、10月ごろから12月にかけて約1cm程度縮んでいることが観測されています。この変動がフィリピン海プレートの北北西進に伴う定常的な地殻変動であるのか、年周変化の一部を見ているのかは、今のところ分かりません。そのため、今後の観測データに注意する必要があります。

その他の観測点については、夏にややばらつきが大きくなりますが、基線長に特段の変化はありません。

光波測量結果

光波測量は、仙石原（箱根町）を基点とした箱根地域（6基線）と酒匂（小田原市）を基点とした小田原地域（8基線）で行っています（図1◇印）。観測方法の詳細やこれまでの観測結果については、神奈川県温泉地学研究所（1999）や原田ほか（2007）、原田・板寺（2011）をご覧ください。

図4に2011（平成23）年1月から12月における箱根地域および小田原地域の光波測量結果を示します。この1年間の測量結果をまとめると、次のとおりです。

（1）箱根地域

全ての基線で数日程度の欠測が発生しています。これらについては、雨や曇りなどの天候によって光波測距儀からのレーザー光が遮られて測量ができなかったためです。長尾峠観測点では反射器が故障し、5月31日から8月29日までの間、欠測及び不安定な測量結果になってい

ます。大涌谷観測点については、何らかの原因で測距儀に設定している方位角がずれてしまったため、7月23日から9月6日まで欠測になっています。

1年間を通して見ると、深良水門、姥子観測点ではほぼ元の基線長の長さに戻っており年周変化や日周変化は見られるものの、箱根火山活動に伴う異常な基線長変化はありませんでした。また、早雲山、大涌谷観測点はこれまでの傾向と同様に、1年間でそれぞれ約1cm程度、基線長が縮んでいます。これらの観測点は経年的に縮む傾向がありますが（例えば、原田・板寺，2011参照）、この変化は特に3月から4月にかけて起こっており、東北地方太平洋沖地震による影響、ないしは、それに伴った箱根群発地震活動（Yukutake et al., 2011；原田ほか，2011）の影響かもしれません。

長尾峠については、3月15日に発生した静岡県東部地震（M6.4）により約4cm程度のステップ状の縮みが生じています。これは、地震によるごく局所的な地滑りです。

（2）小田原地域

2011（平成23）年9月21日から約1ヶ月間、真鶴観測点を除く全観測点で欠測になっています。これは、足柄平野付近にも大きな影響を与えた平成23年台風第15号の強風によって、測距儀を設置している基台が若干傾いてしまい、反射器の方位角がずれて自動計測ができなくなったためです。これについては、10月17日に基台の修理を行い、その後、観測は順調に継続しています。

2011（平成23）年の光波測量結果では、ごくわずかな年周変化が見られるものの、1年間を通して安定した記録が得られています。また、基線長の短い国府津観測点を除いた

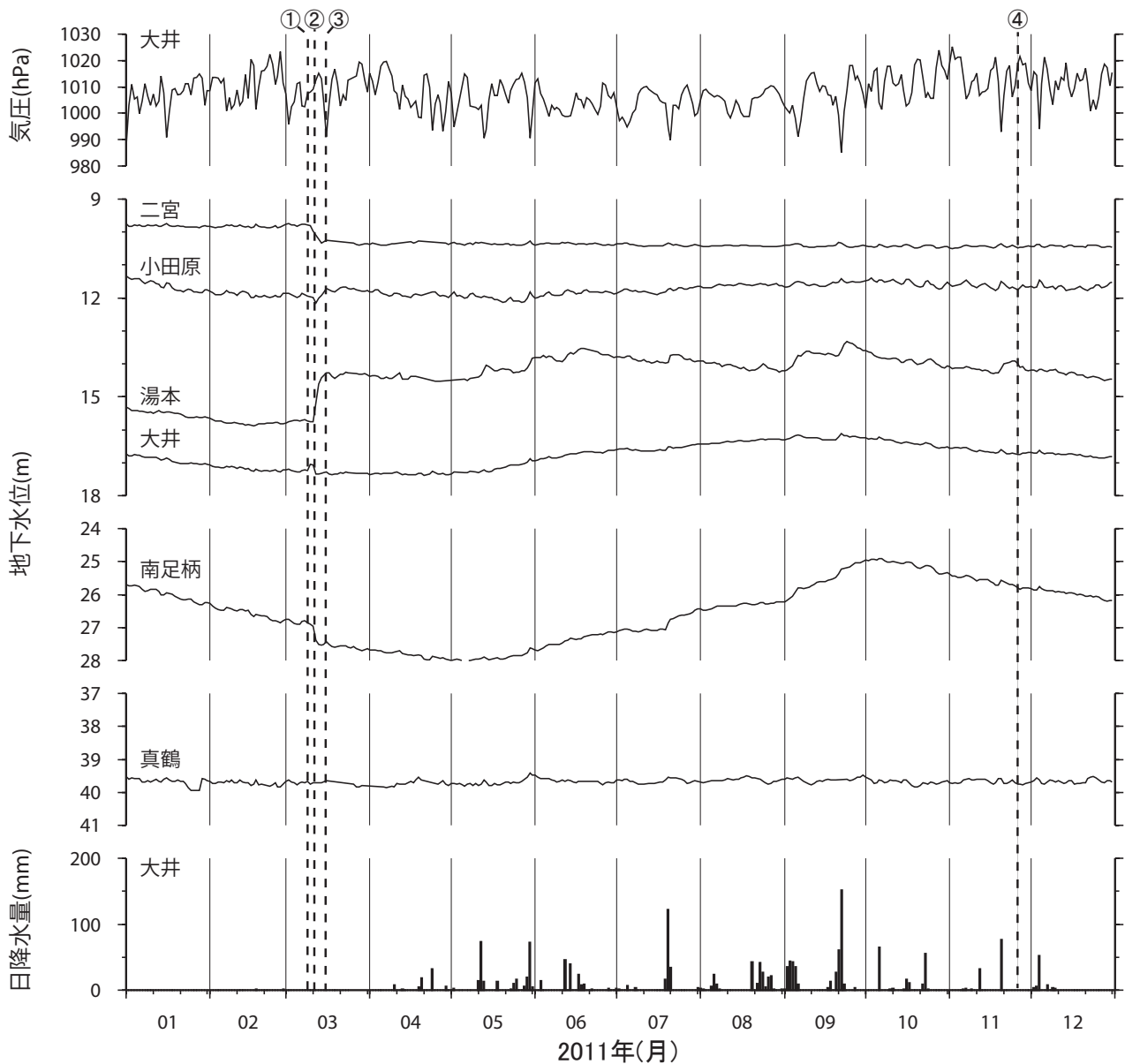


図5 2011年の地下水位観測結果。2011年の地下水位観測結果。地下水位は地表面からの深さで表示している。図上の数字は、表1に掲げた番号の地震発生日を示す。

各基線では、冬の時期の基線長のバラつきが大きくなっています。光波測量による基線長の測定に影響を及ぼす気温・湿度のデータを見ると、特に冬場の湿度のバラつきも大きいため、これらの影響かもしれません。期間中の光波測量結果では、地震活動に伴う異常な基線長変化はありませんでした。

地下水位観測結果

地下水位観測は、図1(▽)に示した6ヶ所で行っています。観測施

設の位置や観測方法の詳細については横山ほか(1995)を参照してください。

地下水位の観測システムについては、2010(平成22)年9月に通信およびデータ収集・登録に関わる機器等の更新を行いました(原田・板寺, 2011)。それ以降、データベースのデータ登録上の不具合等により欠測があったものの、2011(平成23)年は概ね順調にデータが収集されました。

2011(平成23)年の地下水位観

測結果を図5に示します。地下水位は、潮汐の影響が強く現れる真鶴観測点と二宮観測点については日平均値、それ以外の施設については毎日0時の観測結果をもとに、地表面を基準とした水面の深さを求めて示してあります。この図上で上に推移する場合は水位の上昇を、下に推移する場合は水位の低下を示します。気圧、雨量については、大井観測点における毎日0時の気圧、日雨量を用いて作図しました。

図5によれば、3月11日に発生

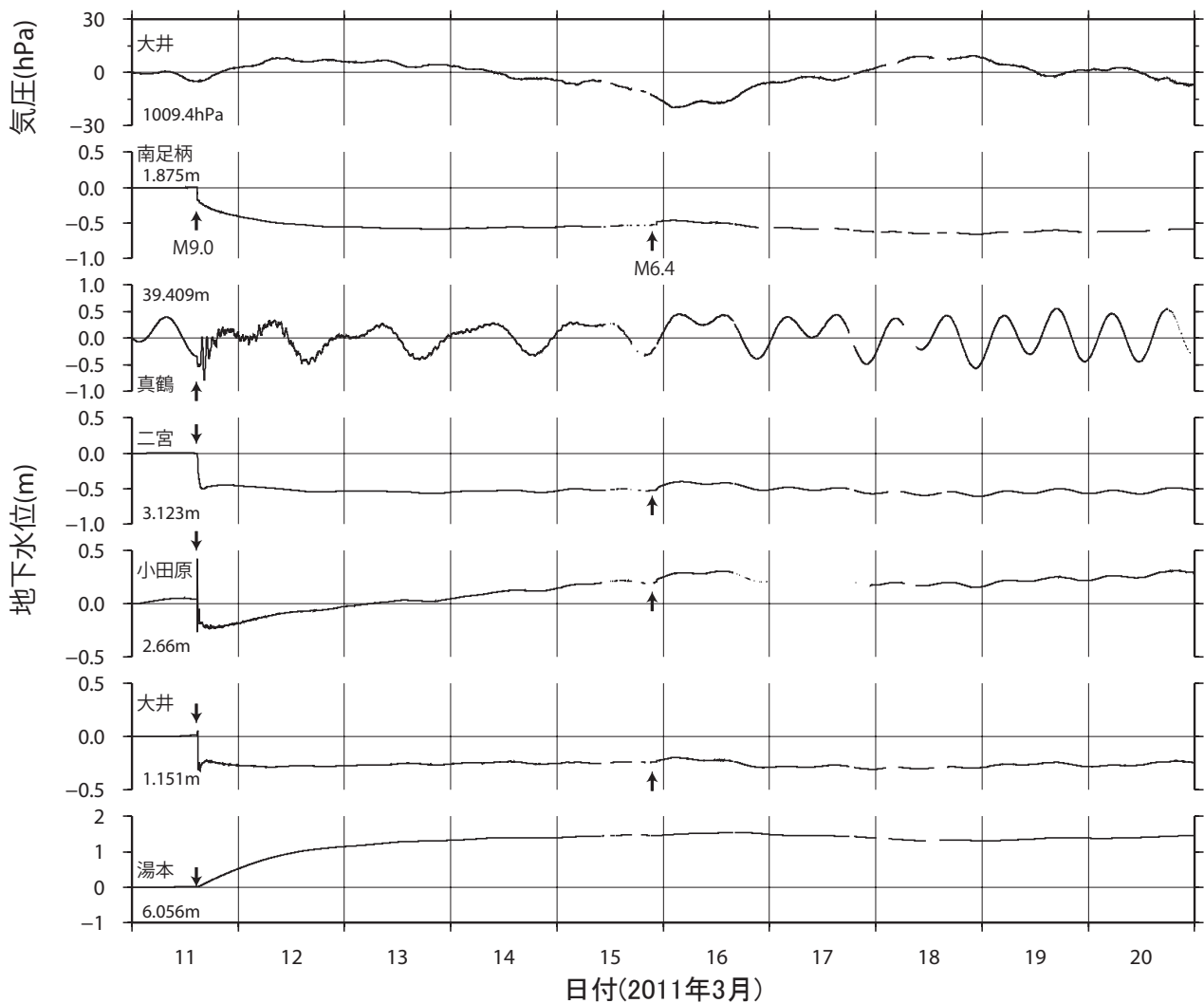


図6 2011年3月11日～20日の地下水位変化。

した東北地方太平洋沖地震の影響による水位の変化が顕著です。これについては後段で報告することとしますが、それ以外の期間についてみると、二宮、真鶴では、年間を通して地下水位がほぼ一定だったことがわかります。

一方、例年、年変化が見られる大井、南足柄、湯本の各観測点では、

4月下旬から5月上昇に、それまで下がり傾向であった水位が上昇傾向に転じています。この水位上昇の時期は、平野部の水田への灌漑の影響によるものと考えられ(たとえば板寺、1999)、2010年の結果(原田・板寺、2011)と比べると2カ月程度遅れていますが、ほぼ例年通りでした。

近隣事業所による揚水の影響を強く受ける小田原では、例年、大型連休や、夏季休業、年末年始など、多くの事業所が休業となる4月下旬、8月、12月下旬に顕著な水位上昇が観測される(板寺、1999)のに対して、2011年の結果では、そのような変化は明瞭ではありません。東日本大震災を契機とした電力不足対

表1 2011年に観測されたコサイスマミックな地下水位変化。

地震発生日	時刻	震央地名	深さ(km)	M	コサイスマミックな地下水位変化(cm)						
					大井	小田原	南足柄	湯本	真鶴	二宮	
①	2010/03/09	11:45	三陸沖	8	7.3	20↑					
②	2011/03/11	14:46	三陸沖	24	9.0	25↓	20↓	40↓	150↑	↑↓	50↓
③	2011/03/15	22:31	静岡県東部	14	6.4	1↑	2↑	4↑	○		○
④	2011/11/24	04:24	福島県沖	45	6.1	4↑					

M: マグニチュード、↑: 水位の上昇、↑↓: 水位の上下動、↓: 水位の低下、○: 影響が認められる

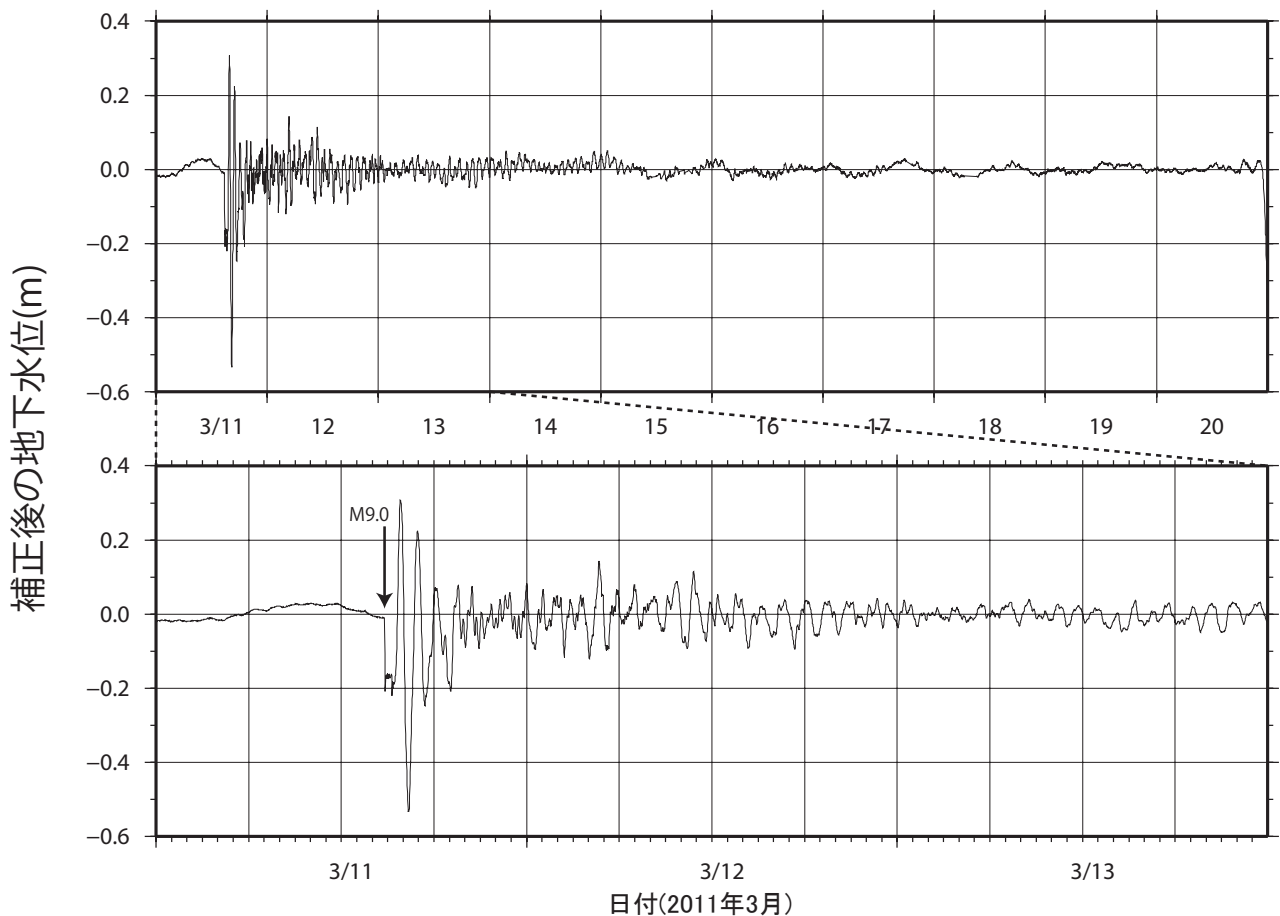


図7 BAYTAP-Gによる補正処理後の真鶴観測点の地下水位変化(2011/03/11-03/20)。

策のため、付近の事業所の操業が特定の期間に集中せず分散化された影響による可能性が考えられます。

2011年の地下水位観測結果について、気圧・潮汐補正等の処理(板寺、2003)を行うなどして、異常変化の有無について検討した結果、地震発生に先行するような異常な地下水位の変化は認められませんでした。一方、コサイスマックな水位変化等は4回の地震の際に観測されました(表1)。

図6に、東北地方太平洋沖地震(M9.0)の発生した3月11日から10日間の水位変化の状況を示しました。3月11日14時46分の地震発生時(矢印)以降、南足柄、二宮、小田原、大井では水位が低下、湯本では水位が上昇するコサイスマックな変化が観測されています。また3月15日22時30分ごろ、静岡県

東部(富士山付近)において発生した地震(M6.4)の際にも、南足柄、小田原、大井において僅かに水位が上昇したほか、湯本、二宮で水位に影響が認められました。

東北地方太平洋沖地震にともなうコサイスマックな水位変化は大井と二宮では地震後数時間程度で収まっているのに対し、南足柄と湯本では安定までに一日から数日の時間を要しています。また、南足柄、二宮、大井、湯本では、地震前のレベルに戻っていないのに対し、小田原では一旦低下した水位が、地震の二日後には地震前のレベルまで戻っています。

湯本では、地震の影響による同様の水位上昇が、2007年10月1日の神奈川県西部の地震(M4.9)にともなって約40cm、また、2009年8月11日の駿河湾の地震(M6.5)

にともなって約20cm、それぞれ観測されています(原田・板寺、2008;原田・板寺、2010)。それらと比較すると、今回の水位変化は1オーダー程度大きなものでした。

真鶴では津波の影響による水位の上下動が、地震発生から4日後の3月15日ごろまで観測されています。図6に示した結果には、一日2回のピークを持つ潮汐変化の影響などが含まれており、津波によって、地下水位が実際にどれだけの影響を受けたかを見極めるのは難しくなっています。そこで、潮汐などの影響を取り除いた水位変化の状況を図7に示しました。潮汐等の影響を取り除く方法については、板寺(2011)を参照してください。

図7によれば、真鶴では、水位が地震発生直後に急低下し、その状態が30分ほど続いた後、急に上昇

に転じ、それ以降は1時間ほどの周期で上下している様子を認める事が出来ます。この上下動の最大振幅は約0.6mで、2011(平成22)年2月27日に発生したチリ中部沿岸地震(M8.6)による津波の影響約0.1m(板寺, 2011)と比較しても、著しく大きかったことがわかります。

おわりに

2011(平成23)年の地殻変動観測結果では、3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の影響により、傾斜観測やGPS測量、地下水位観測でコサイスミックな変化が観測されました。しかしながら、短期的にノイズレベルを超えるような異常な地殻変動は認められませんでした。一般的にマグニチュード7以上の地震発生の直前には通常的地殻変動とは異なる急激な(先行するような)変化が起こると考えられています。そのような変化は、定常的地殻変動とは違った変動として捉えられる可能性があります。このような変動を判断するためには、複数の観測点における観測データを参照するとともに、傾斜観測・GPS測量・光波測量・地下水位観測を総合的に解析する必要があります。神奈川県西部地域ではM7クラスの地震の発生が懸念されていますので(例えば、石橋, 2003)、地震発生に至る過程を解明するためにも、非地震時の長期間安定した地殻変動観測が必要不可欠です。

謝辞

観測装置を設置させていただいている関係各所、また、温泉地学研究所の伊東博さん、本多亮さん、行竹洋平さんをはじめ地震・地殻変動観測網の維持・運営に携わる全ての方々に感謝します。

参考文献

- 原田昌武・棚田俊收・伊東博・代田寧(2005)神奈川県西部地域における2004(平成16)年の傾斜観測結果, 温地研観測だより, 55, 7-10.
- 原田昌武・行竹洋平・棚田俊收・伊東博・本多亮(2007)神奈川県西部地域における2006(平成18)年のGPS・光波測量結果, 温地研観測だより, 57, 13-18.
- 原田昌武・板寺一洋・伊東博(2008)神奈川県西部地域における2007(平成19)年の地殻変動観測結果, 温地研観測だより, 58, 41-48.
- 原田昌武・板寺一洋(2009)神奈川県西部地域における2008(平成20)年の地殻変動観測結果, 温地研観測だより, 59, 55-62.
- 原田昌武・板寺一洋(2010)神奈川県西部地域における2009(平成21)年の地殻変動観測結果, 温地研観測だより, 60, 41-48.
- 原田昌武・板寺一洋(2011)神奈川県西部地域における2010(平成22)年の地殻変動観測結果, 観測だより, 61, 43-50.
- 原田昌武・明田川保・伊東博・本多亮・行竹洋平・板寺一洋・吉田明夫(2011)2011年東北地方太平洋沖地震後の箱根火山における群発地震活動の特徴, 日本火山学会講演予稿集, 133.
- 本多亮・棚田俊收・原田昌武・伊東博(2006)神奈川県西部地域における2005(平成17)年の傾斜観測結果, 温地研観測だより, 56, 7-10.
- 本多亮(2012)神奈川県内およびその周辺における2011(平成23)年の地震活動, 温地研観測だより, 62, 63-74.
- 石橋克彦(2003)小田原地震は起こるのか?, 地震ジャーナル, 36, 8-13.

- 板寺一洋(1999)温泉地学研究所の観測井における地下水位変化の特徴とその補正について, 温地研報告, 29, 57-64.
- 板寺一洋(2003)地下水位データの簡易な補正法と異常判定の基準について, 温地研報告, 35, 47-52.
- 板寺一洋(2011)地下水位に検知されたチリ中部沿岸地震(M8.6)の地震動および津波, 観測だより, 61, 13-16.
- 伊東博(2009)温泉地学研究所における地震・地殻変動観測施設の整備について, 温地研観測だより, 59, 9-12.
- 神奈川県温泉地学研究所(1999)温泉地学研究所における「神奈川県西部地震」の取り組み, 温地研報告, 29, 3-40.
- 横山尚秀・小鷹滋郎・板寺一洋・長瀬和雄・杉山茂夫(1995)神奈川県西部地震予知研究のための地下水位観測施設と地下水位解析, 温地研報告, 26, 1・2合併号, 21-36.
- Yukutake, Y., R. Honda, M. Harada, T. Aketagawa, H. Ito, and A. Yoshida(2011) Remotely-triggered seismicity in the Hakone volcano following the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Earth Planets Space, 63, 737-740.