

図2 2015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)～(e)は地震に伴う傾斜変動(本文参照)、(i)～(ii)は降雨による影響(本文参照)、灰色矢印は傾斜計自体の機械的な変化や装置の一時的な不具合を表す。

動が活発化した4月下旬ごろから、箱根火山周辺の観測点、つまり駒ヶ岳、湖尻、小塚山、裾野、塔の峰観測点においてそれまでのトレンドとは異なった火山性の傾斜変動が観測

されています(図2の(a))。これらの変化は、火山活動の活発化に伴う山体膨張を反映していると考えられます。その傾斜変動は5月末ぐら

いまでは確認できますが、その後は、地震によるステップや降雨の影響があり明瞭にはわかりません。箱根火山における群発地震活動の際に火山性の傾斜変動が明瞭に観測されたのは、2001年と2013年の群発地震

活動に次いで今回が3回目のことです。これらの変化については、今後詳しく検討していくつもりです。

## (2) 地震による傾斜変化

傾斜計では、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が生じます。2015（平成27）年5月から6月にかけては、箱根を震源とする地震により幾度となくステップが生じています。その他については、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。

(b) 05月25日 14:28 埼玉県北部の地震（M5.5, 深さ56km）

(c) 05月30日 20:23 小笠原諸島西方沖の地震（M8.1, 深さ682km）

(d) 06月29日～30日 箱根火山における地震活動

(e) 09月12日 05:49 東京湾の地震（M5.2, 深さ57km）

(b)と(e)の地震は、岩倉観測点の東西成分にステップを生じさせています。また、(c)の地震は、小笠原諸島西方沖で発生しましたが震源の位置が非常に深く、二宮町で震度5弱が観測されたほか、横浜市や川崎市、東京都などでも震度3～4が観測されています。つまり、震源付近よりも遠方で大きく揺れる“異常震域”が観測された地震です。これにより塔の峰観測点や裾野観測点において傾斜ステップが生じ、その他の観測点でも一時的なデータの飛びが見られています。(d)は、箱根火山で水蒸気噴火が発生した前後で、地震活動の活発化により、複数のステップが生じています。このように地震時には傾斜ステップや一時的な飛びが発生していますが、それらの地震に先行するような異常な傾斜変動はありませんでした。

## (3) 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。2015（平成27）年については、次の降雨による影響が見られます。

(i) 平成27年台風第11号（07月16～17日頃）

(ii) 平成27年台風第18号（09月08～09日頃）

(i)の台風は、南の海上から四国地方に上陸し日本海側に抜けていきました。この時、箱根町芦ノ湯では253mm（07月16日）、71mm（07月17日）の日降水量を観測しています。(ii)の台風は、南の海上から東海地方に上陸し日本海側に抜けていきました。この時の箱根町芦ノ湯では91mm（09月08日）、220mm（09月09日）の日降水量を観測しています。これらの降雨による影響が、各観測点にあらわれています。

## 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★）。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チョーキングアンテナ）に更新しました。さらに、現在は臨時観測を4ヶ所（温地研、酒匂、根府川、小山）で行っています。このうち、温地研観測点については、受信機の故障の影響で、2013（平成25）年12月17日か

ら2014（平成26）年02月03日まで、Topcon社製LEGACY-E受信機を用いて観測を行っていました。修理完了後の2014（平成26）年02月04日からは、他の観測点同様、同社製NET-G3受信機に戻っています。また、小山観測点については、落雷によるアンテナの故障により、2014（平成26）年10月1日から、観測機器をTopcon社製LEGACY-E受信機および同社製PG-A1アンテナに切り替え、観測を継続しています。なお、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。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。また、データの解析手法の詳細については、道家ほか（2013）をご覧ください。

図3に2015（平成27）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、05月08日～05月15日にかけて、通信トラブルによりデータが欠測しています。また、06月24日～28日にかけては、停電によりデータが欠測しています。11月末～12月にかけては、度々、通信のトラブルによるデータの欠測があります。このトラブルは、通信機器を交換修理することにより改善が見込まれます。その他の観測点については、データの取得遅延などはありましたが、ほぼ欠測なくデータを取得できました。

2015（平成27）年のGPS測量結果では、4月下旬からの箱根火山での群発地震活動に対応する地殻変動が観測されました。真鶴観測点を固定とした図3では、いくつかの

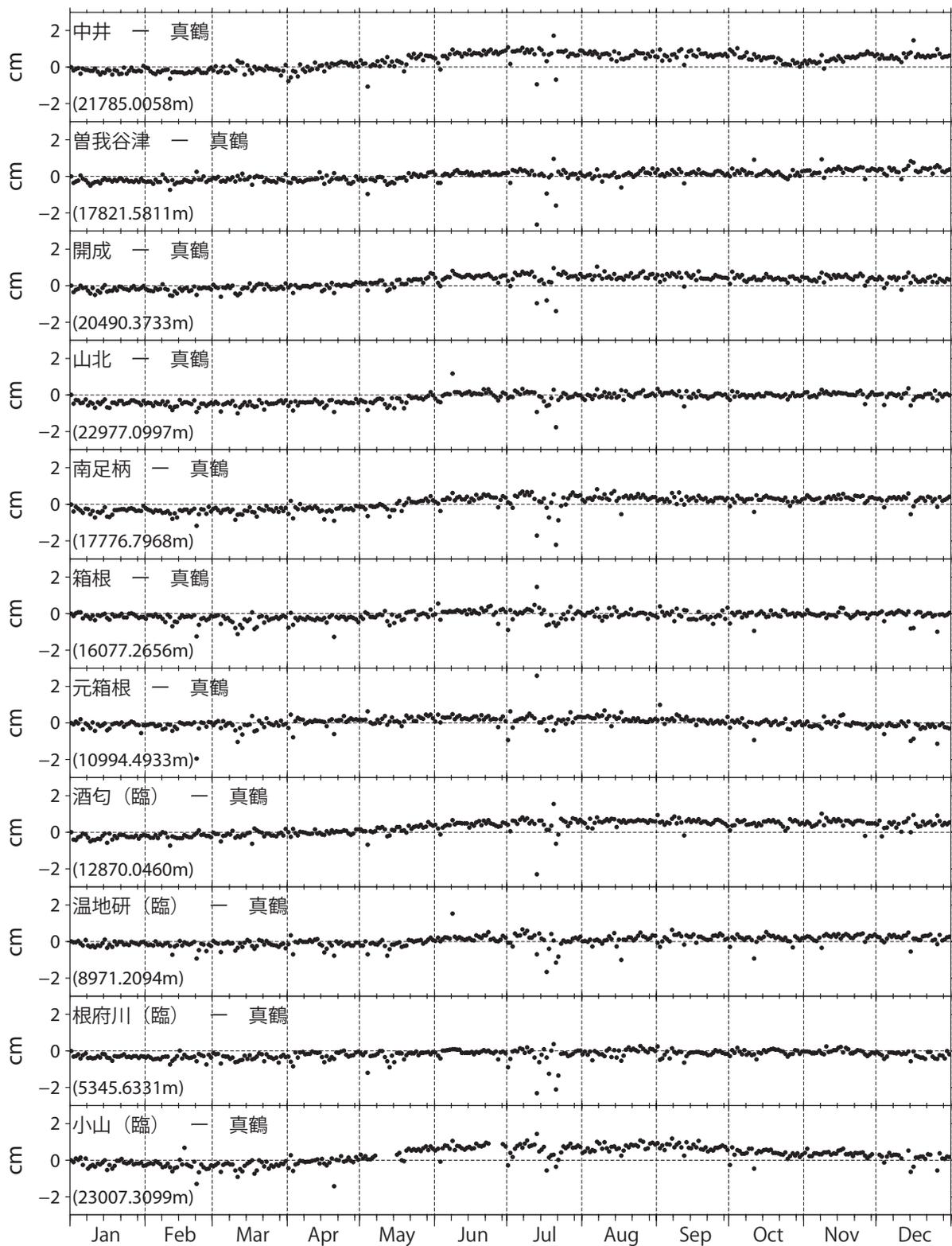


図3 2015年のGPS測量結果(基線長成分)。真鶴観測点を基点とした各観測点の基線長変化を示す。縦軸はデータの最初の日を基準にして、その相対変化量(cm)で示している。また、数値は基準となる距離を示している。小山(臨時)観測点は、(独)防災科学技術研究所との共同研究による観測点である。

観測点において、4月中旬～7月までにかけて、基線の伸びを示す変動が認められます。GPSの観測では、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えるのが一般的ですが、昨年や一昨年の観測結果(道家ほか, 2014; 原田ほか, 2015)と見比べてみても、年周変

化の範囲を超えて変動が起きていることがわかります。真鶴観測点を固定とした場合には、小山観測点や南足柄観測点で顕著な変動を見ること

が出来ます。

また、一年間の解析結果を通してみると7月に値のバラつきが大きくなっていることが分かります。このようなバラつきは、昨年の7～8月にも認められています(原田ほか, 2015)。データのバラつきの原因は様々で、数は少ないものの夏季以外も年間を通して認められます。夏季にバラつきが多くなる原因としては、気温が高く、大気中の水蒸気が増加したことが考えられます。これらは実際の地面の動きを見ていく訳ではないので、誤差として扱われます。GPSのデータを解釈する際には、そのことを十分に理解する必要があります。

なお、2015(平成27)年の12

月下旬には、大涌谷に新たなGPS観測点を設置しました。これは、箱根火山の活動の観測を強化する目的で設置されたものです。次回以降は、新たな観測点での観測結果についてご報告できるかと思います。

### 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◇)。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、2015)をご覧ください。

図4に2015(平成27)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。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。乙女トンネル観測点では周辺の樹木が成長し、測距儀からのレーザー光が遮られてしまったため、欠測やバラツキが多い期間があります。また、小田原観測網は測量機器の不具合により、07月03日から08月07日の期間、欠測しています。

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

早雲山観測点は例年、1年間でそれぞれ約1cm程度基線長が縮んで

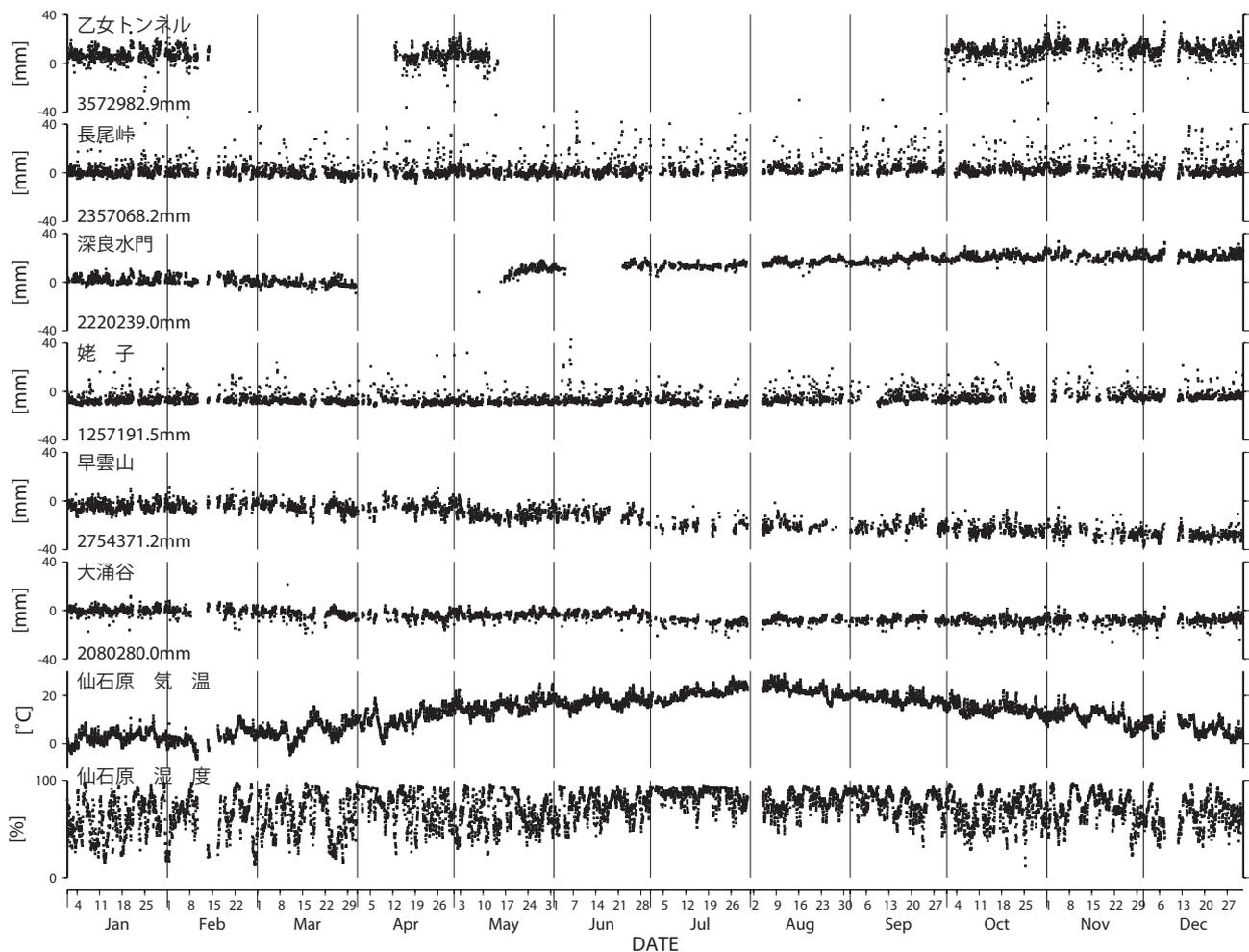


図4.1 2015年の光波測量結果(箱根観測網)。縦軸は1月1日を基準にして、その相対変化量(mm)で示している。また、数値は基準となる距離(0mmにおける絶対値)を示している。

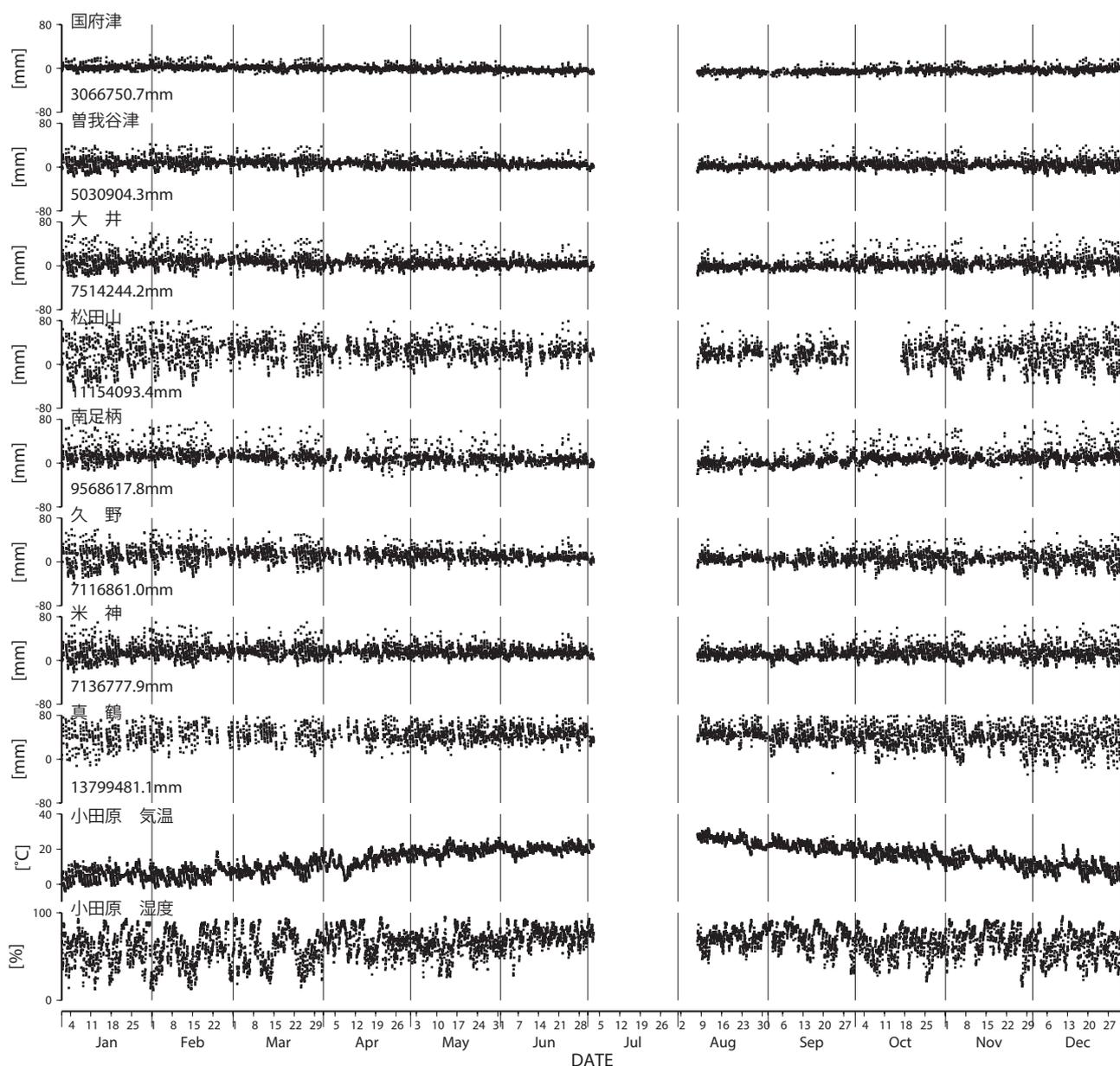


図 4.2 2015 年の光波測量結果（小田原観測網）。縦軸は 1 月 1 日を基準にして、その相対変化量（mm）で示している。また、数値は基準となる距離（0mm における絶対値）を示している。

います（原田ほか, 2015）。しかし、2015（平成 27）年は約 3cm 程度の短縮が見られます。よく見ると、4 月上旬に一時的に伸び、5 月上旬に縮んだ後しばらく停滞し、6 月末頃に再度、縮んでいるような変化をしています。また、大涌谷観測点も 7 月上旬に縮みが観測されており、これらは、箱根火山の活動に伴う変化であると考えられます。年周変化や日周変化は見られるため、詳しくは、今後解析していきたいと思いません。一方、深良水門観測点は、残念

ながら 4 月から 5 月中旬にかけて欠測していますが、5 月中旬以降には伸びの変化が観測されています。これが何を意味しているのか、今のところよくわかっていません。長尾峠観測点や姥子観測点には、火山活動に伴う明瞭な変化は観測されていません。

#### (2) 小田原地域

2015（平成 27）年の光波測量結果では、日周変化や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や曾我谷津観測点を除いた各基線では、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。

期間中の小田原観測網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。観測点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。2015(平成27)年は、湯本において、落雷の影響により8月下旬および9月中～下旬にかけて欠測となりましたが、これを除けば、年間を通して順調に観測を行うことができました。

2015(平成27)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で示してあります。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、二宮、真鶴観測点の地下水位は、気圧の増減や日量

数十mmを超えるような雨に対応してわずかに上下しながらも、年間を通してほぼ一定だったことがわかります。その他の観測点については、7月と9月に観測された大雨の影響による水位の変動が目立ちます。特に、南足柄観測点と湯本観測点では、これら2回の多雨に伴い、ともに大きく地下水位が上昇し、その影響が2カ月程度継続しているように見えます。

もう少し詳しく見ると、湯本観測点の地下水位は、降雨の数日後に

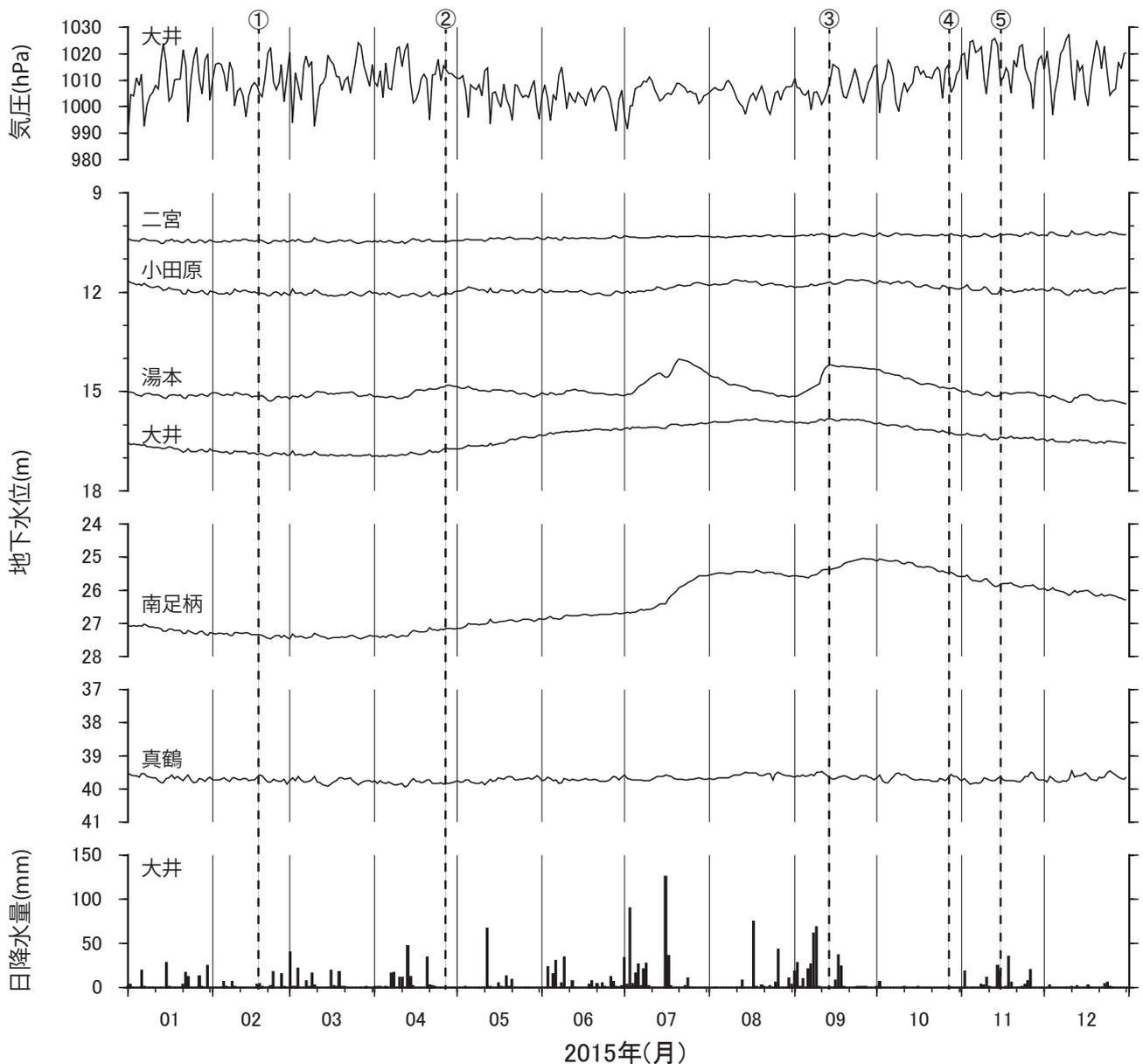


図5 2015年の地下水位観測結果。地下水位は地表面からの深さで表示している。図上の数字は、表1に掲げた番号の地震発生日時を示す。

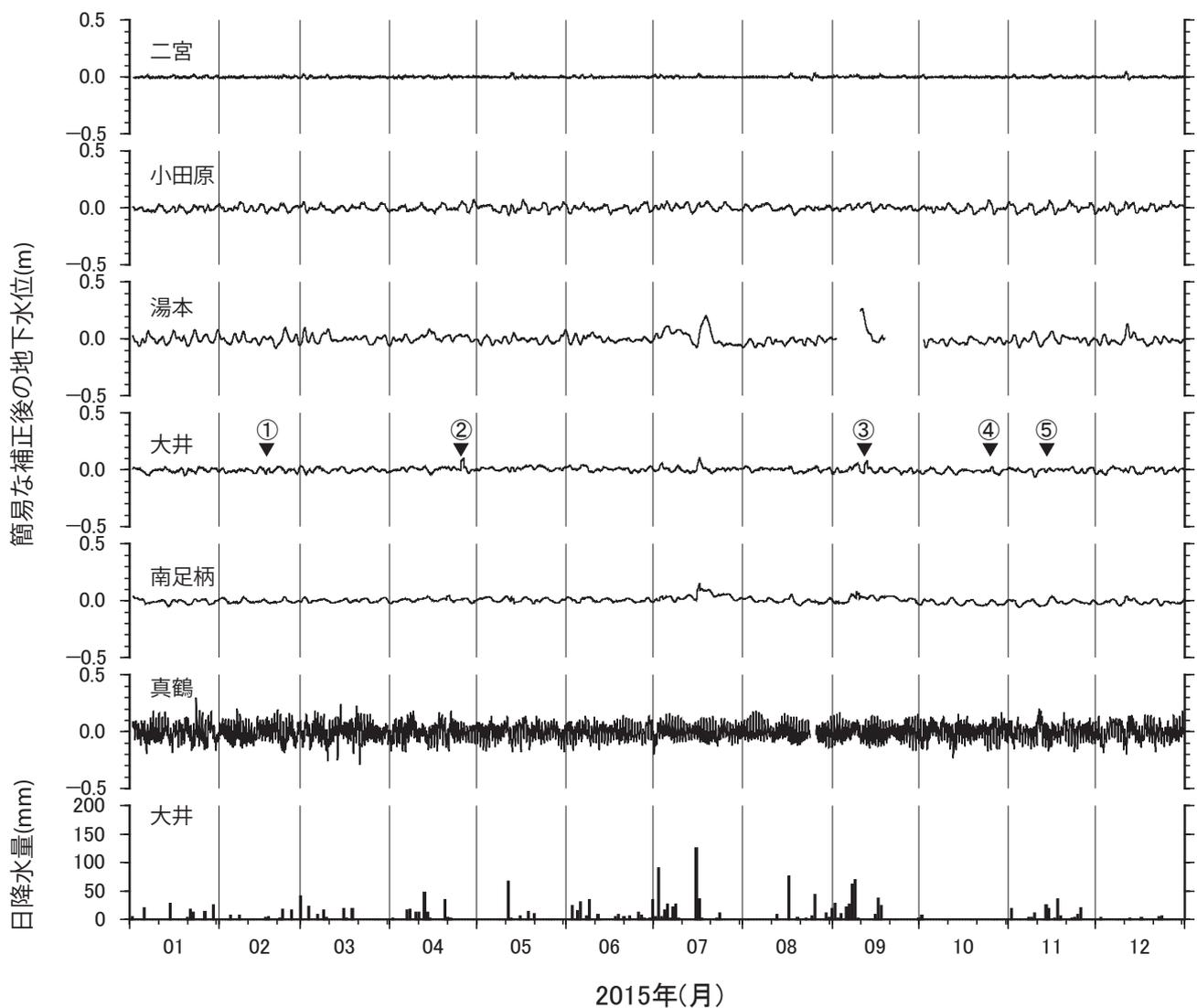


図6 簡易な気圧・潮汐補正後の地下水位変化(2015年1月1日0時の水位を基準とする)。

ピークに達し、その後半月から一月程度かけて、もとの傾向に戻っているのに対して、南足柄の地下水位は、半月程度かけゆっくりと上昇するものの、その後の低下は明瞭ではなく、年変化の傾向との区別が難しくなっています。

大井観測点の地下水位は、概ね3月に最低、8月に最高となるような緩やかな年変化を示しています。小田原観測点の地下水位には、近隣事業所の多くが休業すると見られる大型連休や、夏季休業、年末年始などの時期に顕著に上昇するという特徴があり(横山ほか、1995; 板寺、1999)、2015(平成27)年の観測結果では、2014(平成26)年末の

水位上昇に続く年始の水位低下が顕著であるほか、5月上旬や8月中旬に、わずかに水位上昇していることがわかります。

図6は、各観測点における2015年の観測データ(時間値)について、板寺(2003)による簡易的な補正を行った結果を示しています。地下水位に主に影響を及ぼす要因や、その影響の度合いは、観測点によって異なっている(板寺、1999)ため、うまく補正できているところ(二宮)と、そうでないところ(湯本や真鶴)があることがわかります。しかしながら、年間を通して眺めてみると、大雨の影響を受けたと考えられる7月上~中旬と9月上旬を除くと、

日常のばらつきを超えるような特異な変動は認められません。こうした検討により、地震発生に先行するような異常な地下水位の変化は観測されなかったと判断しました。また、2015(平成27)年の4月から11月にかけては、大涌谷付近を中心とする箱根火山の地震・火山活動が活発化しましたが、それに関連するような地下水位の異常も認められませんでした。

一方、地震の発生後に、その影響を受けたと見られる水位変化は表1に示した5回の地震の際に観測されました。水位変化が観測されたのはいずれも大井観測点であり、図6に示した水位の補正結果でも、これ

らの地震の際に、大井観測点でわずかな水位の上下変動を認めることができます。

図7および図8は、表1に掲げた地震のうち②のネパールと⑤の薩摩半島西方沖を震源とする地震が発生した日の大井における地下水位の変化を1分ごとの観測データをもとに示しており、いずれも、点線で示した地震発生時刻から1～数分程度遅れて水位が上昇していること

がわかります。これら2つの地震の震源から水位観測点までの震央距離は約5200km、約1100kmと離れていることから、地震発生と水位上昇開始までの時間差は、震源域から観測点まで地震波が伝わってくる時間に相当するものと見られます。同様の地下水位の変化は、コサイスマックなものも含めて過去にも数多く観測されてきましたが、なぜそうした変化が起こるのかについては、

説明が進んでいません。今後は、地下水位の分データや秒データにまで掘り下げて、詳細な変動について検討をする必要があると考えています。

## おわりに

2015（平成27）年は、箱根火山で観測史上最大の群発地震活動、また観測史上初めての水蒸気噴火を経験しました。地殻変動観測の結果から、これらの活動に伴う変化を検出することが出来ました。2015（平成27）年の活動に際しては、活動の初期段階から、これらのデータを活用し、地下で生じている現象の理解に努めてきました。特に、GPS測量では、群発地震活動よりもやや先行して変動が生じていたこと、傾斜観測では、過去の活動に比べ大きな速度で地殻変動が進行していたことが、初期段階における迅速な防災対応に繋がったと考えられます（板寺、2016）。

一方で、2015（平成27）年に発生したような小規模な水蒸気噴火に伴う地殻変動を捉えることの難しさも明らかとなりました。今回の活動では、傾斜観測で、それに伴うと考えられる地殻変動が捉えられました。しかし、活動の初期段階にGPS測量および傾斜計で観測された地殻変動がその後どのように推移していくのか、またそれが水蒸気噴火に至るのかのどうかを判断するためには、2015（平成27）年の活動の際、

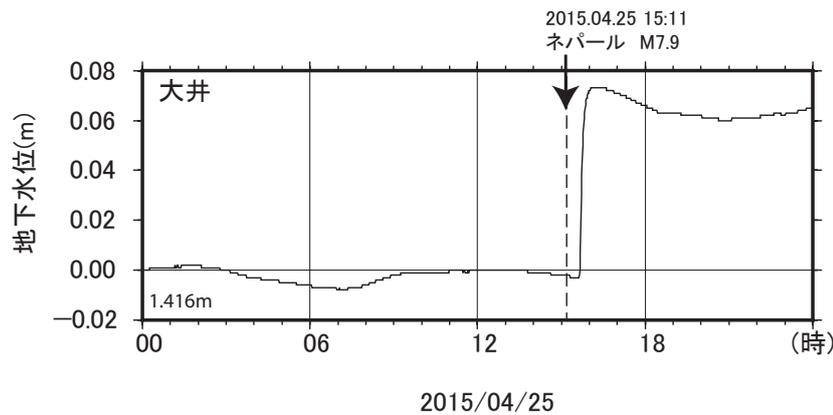


図7 ネパール地震（2015年4月25日 M7.9）の影響とみられる地下水位の変化（大井）。

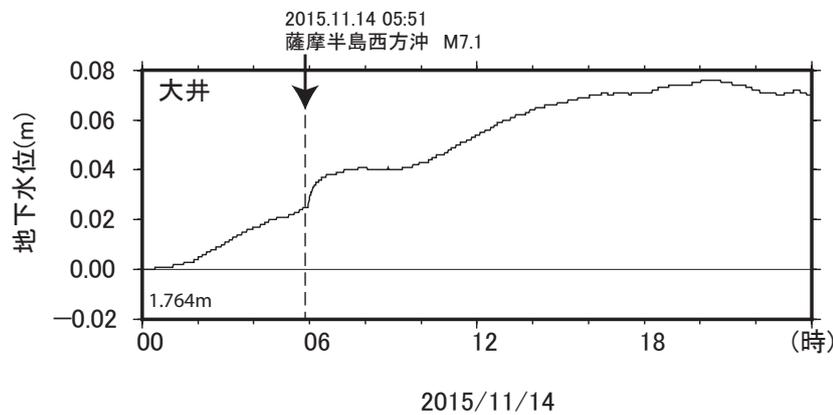


図8 薩摩半島西方沖地震（2015年11月14日 M7.1）の影響とみられる地下水位の変化（大井）。

表1 2015年に観測された地震発生後に影響を受けたと見られる地下水位変化。

地震発生日	時刻	震央地名	深さ (km)	M	コサイスマックな地下水位変化(cm)		
					大井	その他の観測点	
①	2015/02/17	08:06	三陸沖	13	6.9	2.5 ↑	—
②	2015/04/25	15:11	ネパール	15	7.9	7.5 ↑	—
③	2015/09/12	06:49	東京湾	57	5.2	6.0 ↑	—
④	2015/10/25	17:15	山梨県東部・富士五湖	21	4.3	1.0 ↑	—
⑤	2015/11/14	05:51	薩摩半島西方沖	17	7.1	1.0 ↑	—

M: マグニチュード、↑: 水位の上昇、—: 変化が認められない

地下で起きた現象を解析し、検証していく必要があります。また、箱根の火山活動の観測強化のために、緊急的に新たな観測機器が整備されました（原田ほか、2016）。今後、これらを含めて、統合的に現象を理解していく必要があります。

## 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

道家涼介・原田昌武・宮岡一樹・里村幹夫（2013）神奈川県を対象とした Bernese による GPS 統合解析表示システムの構築，*温地研報告*，45，63-70。  
道家涼介・板寺一洋・原田昌武（2014）神奈川県西部地域における 2013（平成 25）年の地殻変動観測結果，*温地研観測だより*，64，35-44。  
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（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・道家涼介（2015）神奈川県西部地域における 2014（平成 26）年の地殻変動観測結果，*温地研観測だより*，65，55-62。

原田昌武・板寺一洋・本多 亮・行竹洋平・道家涼介（2015）2015 年箱根火山活動に伴う地震活動と地殻変動の特徴（速報），*温地研報告*，47，1-10。

原田昌武・板寺一洋・伊藤正規・湯尾康成（2016）緊急的な火山観測施設の整備について～2015 年箱根火山活動への対応録～，*温地研観測だより*，66，

29-38。

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（2016）2015 年箱根群発活動を振り返る 特に活動前半にあった出来事について，*温地研観測だより*，66，61-66。

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。

行竹洋平・本多 亮（2016）神奈川県内およびその周辺における 2015（平成 27）年の地震活動，*温地研観測だより*，66，85-92。