

神奈川県西部地域における2004(平成16)年の GPS・光波測量結果

丹保俊哉*、棚田俊收*、原田昌武*、伊東 博*

1. はじめに

温泉地学研究所(以下、当所)では、神奈川県西部地震の予知研究の一環として、また箱根山の火山活動をモニタリングするため、県西部地域に光波と GPS(汎地球測位システム)による測地測量の施設を設置しています。GPS 測量は 1992(平成4)年から県西部地域を囲む4地点(箱根、山北、中井、真鶴)でおこなっています(図1)。また光波測量は、箱根地域で1992(平成4)年から仙石原を基点とした6基線、そして小田原地域で1995(平成7)年から城山を基点とした6基線、計12基線でおこなっています(図1)。これらの測量項目は、2点間の距離の変化に注目し、地震や火山活動に関連した地殻変動を、捉えることを目的としています。なお、それぞれの測量システムについては、棚田ほか(1995)、温泉地学研究所(1999)、丹保ほか(2002)に詳細が報告されています。

これまでの GPS 測量では、フィリピン海プレートのプレート運動に基づく定常的な基線長の伸縮が捉えられています(棚田、2002)。光波測量では、2001(平成13)年に箱根で発生した群発地震活動に伴う地殻変動を検出しました(丹保、棚田、2002)。この地殻変動が、箱根山の山体膨張によるものであることが、国土地理院の GPS 測量網(GEONET)、当所の傾斜計、気象庁の歪計の観測結果から明らかになっています(国土地理院、2001、西村ほか、2001、代田ほか、2002、吉川ほか、2001)。また、歪計(吉川ほか、2001)と、光波測量データの再解析(丹保ほか、2005)によって、群発地震活動の後半に体積収縮が示唆される変化があったと報告されています。その後、2003(平成15)年までの観測では県西部地域において目立った地殻変動は捉えられて

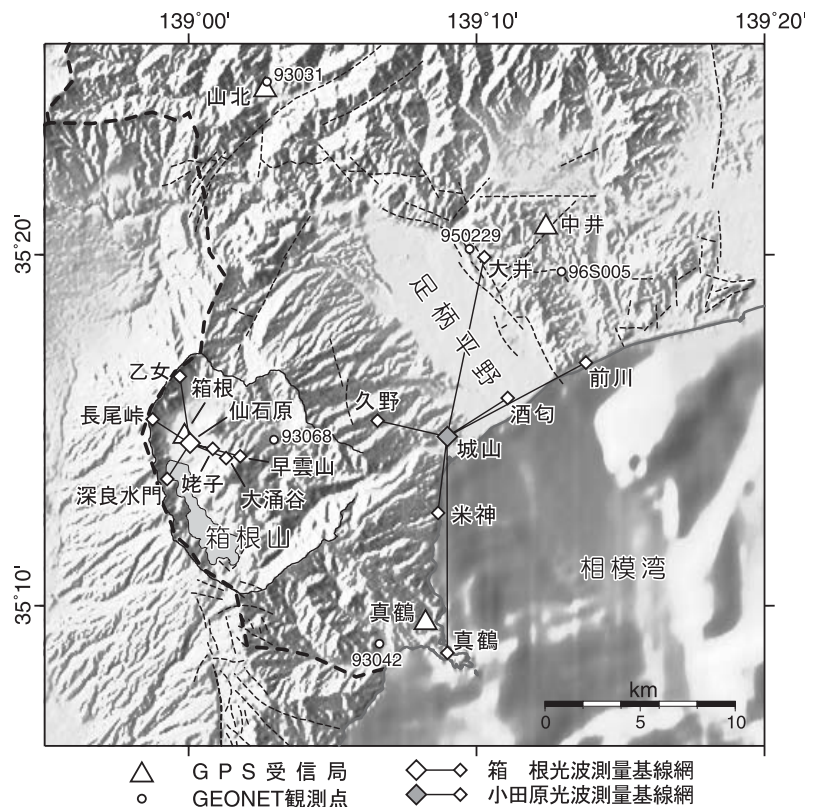


図1 GPS 受信局 (△：温地研、○：国土地理院) と光波測量基線網 (ひし形と実線) の分布。

* 神奈川県温泉地学研究所 〒250-0031 神奈川県小田原市入生田 586
報告, 神奈川県温泉地学研究所観測だより, 通巻第55号, 11-18, 2005.

いません(代田ほか、2003、原田ほか、2004、棚田ほか、2004)。

本稿では、2004(平成 16)年における GPS・光波測量の結果について報告します。

2. 測量結果

2.1 GPS 測量

GPS は米国国防省により開発された衛星による測位システムです。地上約 20,200km 上空の、6つの円軌道にそれぞれ4個の衛星が配備されており、各衛星は約12時間で地球を1周しています。衛星からは常に時刻のデータと衛星自身の位置データが送信されています。GPS による測量方法には幾つかの種類があって、当所は相対測位という方法を適用しています。相対測位では、地上の別々の観測点で4個以上の共通のGPS衛星から電波を受信します。同じGPS衛星から同時に受信した複数の受信機の観測値の差を用いることで、各種の誤差要因が消去され数 mm～数 cm 程度の相対精度で2点間の相対的な位置を求めることができます。

図2は2004(平成16)年の1年間におけるGPS測量結果で、4箇所のGPS測量点同士の距離(基線長)の時間変化(12時間平均値)を表しています。図中の破線bは2004(平成16)年に発生した県西部地域における最大地震(11月9日; M4.1; 丹沢山地)の時期を、破線aは箱根における最大の群発地震活動(2月4、5日)の時期を表しています(伊東ほか、

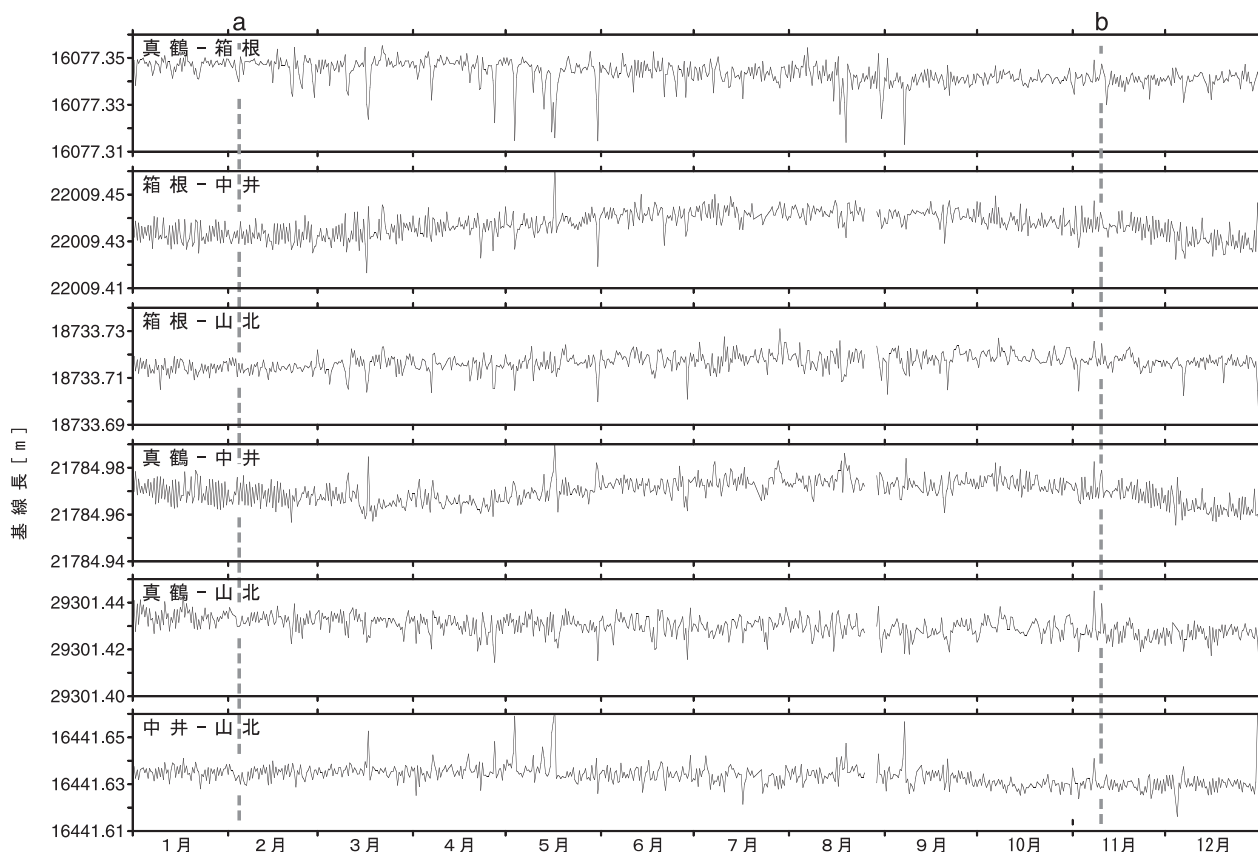


図2 2004(平成16)年のGPS測量結果。縦軸は一目盛り1 cm、横軸は1ヶ月で示す。破線aは箱根における最大の群発地震活動(2月4、5日; 最大地震 M3.0)の時期を、破線bは丹沢山地で発生した県西部地域の最大地震(11月9日01時48分ごろ; M4.1)の時期を示す。

表1 GPS基線長(当初および県西部地域のGEONET)にみられる2005)。それぞれの地震活動の前後における、各基線長に関連付けられる変化は認められません。図上では各基線で最大3 cmの変化に対応するデータが確認されませんが、これらは気象の影響やGPS衛星の配置のアンバランス、電波障害による受信不良などに起因しており、実際に地殻変動を捉えているわけではありません。また、

温 研			GEONET		
基 線 名	'98~'00 cm/yr	'02~'04 cm/yr	基 線 名	'98~'00 cm/yr	'02~'04 cm/yr
真 鶴 - 箱 根	-0.6	-0.6	93042 - 93068	-0.3	-0.2
箱 根 - 中 井	0.0	+0.3	93068 - 96S005	+0.1	0.0
箱 根 - 山 北	+0.1	+0.2	93068 - 93031	-0.1	0.0
真 鶴 - 中 井	-0.2	+0.1	93042 - 96S005	+0.1	+0.4
真 鶴 - 山 北	-0.6	-0.5	93042 - 93031	-0.4	-0.4
中 井 - 山 北	-0.5	-0.3	96S005 - 93031	-0.6	-0.7

これ以外の測量誤差はほぼ1 ppm以下に収まっています。

各基線における経年変化量を1998(平成10)年からの3年間(前期)と、2002(平成14)年からの3年間(後期)の基線長変化を基にそれぞれ最小二乗法で直線近似し、年単位の変化量として表1にまとめました。また、参考に当所の各GPS観測点に近傍したGEONET観測点(図1)における基線長の経年変化量を同様に計算し、同記しました。なお、誤差の大きい値やアンテナ交換によると思われるオフセットがあった場合は、これを計算から除外するようにしています。県西部地域において、この基線長の経年変化は、南西方向からのフィリピン海プレートの衝突を反映した定常的地殻変動によると考えられます(棚田、2002)。すなわち、プレートの運動方向におおむね平行な基線(真鶴-箱根基線)では圧縮、直交な基線(箱根-中井基線)ではわずかな伸張の変化傾向を捉えています。また、経年変化量は歪の蓄積速度を表しているといえます。地下の歪が飽和に近づくと、歪の蓄積速度は鈍化してくることが考えられるので、この変化は注意深く見守っていく必要があります。前期と後期の経年変化量を比較すると、箱根-中井や真鶴-中井の基線で大きく変わっていることが判ります。特に真鶴-中井基線の変化は2000(平成12)年に短縮から伸張に傾向が反転したことを棚田(2002)は報告しています。上記2基線は中井の観測点が共通なことから、中井観測点に変化の原因があるのかもしれませんが、基線長の経年変化は観測点を軟弱地盤に設置することによって生じる場合があるからです。そこで、真鶴-中井基線に近いGEONETの93042-96S005基線の経年変化量と比較して、この傾向が正しく地殻変動を反映しているのかを調べました。93042-96S005基線は表1の前後どちらの期間も伸張傾向にあります。しかし、前後の期間の変化量の差をみると、当所のGPSとGEONETは+0.3cm/yrと同じであることが判ります。観測点の位置や解析手法に違いがあることを考慮しても、この一致は有意なものと言えるかもしれず、今後もこの変化に注視していかなければなりません。なお、当所のGPSとGEONETの測量結果は、山北と93031を除いて位置に比較的大きな開きがありますが、変化傾向としておおむね調和的であると考えます。

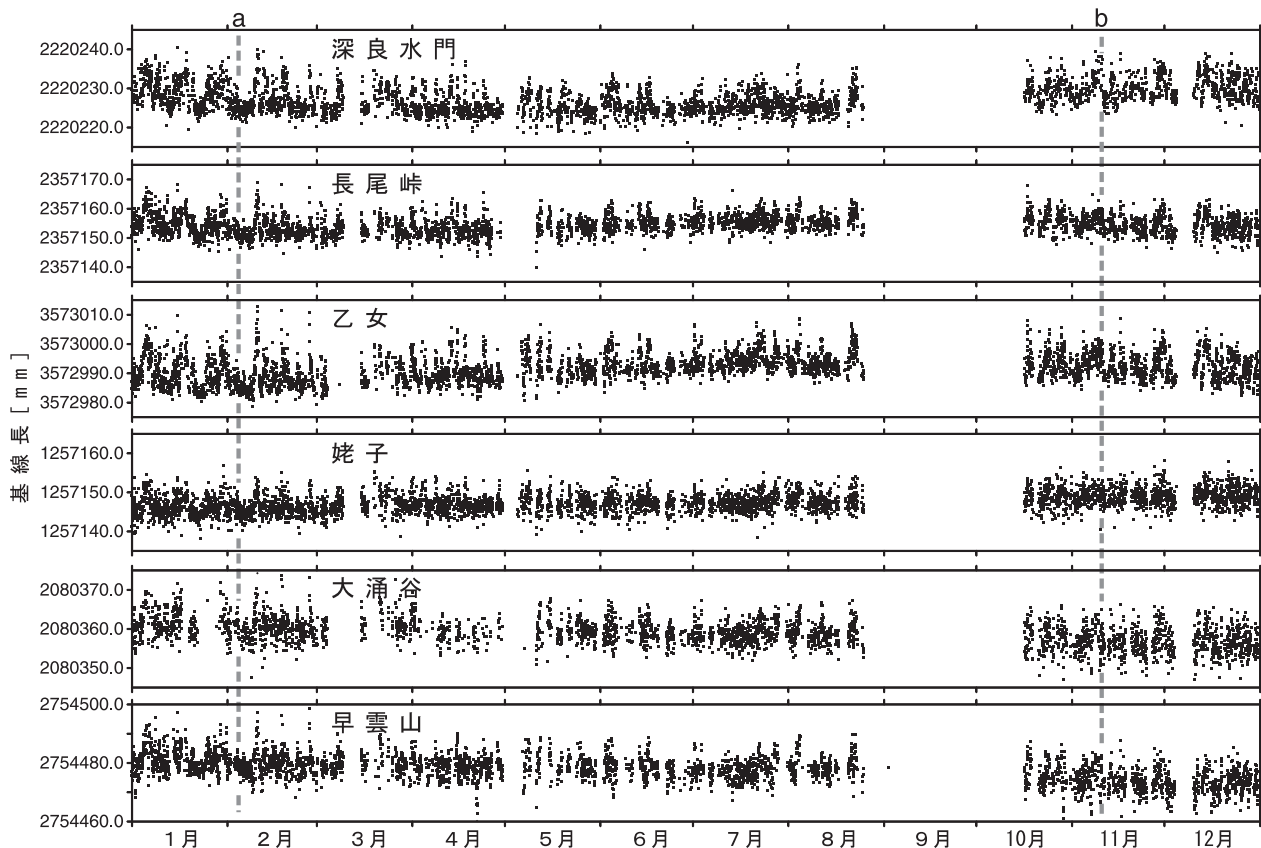


図3 - 1 2004(平成16)年の箱根光波測量基線網における測量結果。縦軸は一目盛り10.0mm、横軸1ヶ月で示す。破線aは箱根における最大の群発地震活動(2月4、5日;最大地震 M3.0)の時期を、破線bは丹沢山地で発生した県西部地域の最大地震(11月9日01時48分ごろ;M4.1)の時期を示す。

2.2 光波測量

図3 - 1、2は2004(平成16)年の1年間における光波測量結果で、それぞれ箱根と小田原の光波測量基線網毎の時間変化(1時間値)を表しています。図中、データが欠落している部分は雨や霧によって測量できなかったことや測量機器の故障による欠測です。特に、8月下旬から10月中旬にかけた長期の欠測は、観測機器の電源供給ユニットの故障によるものでした。光波測量はレーザーが測距儀と反射器の2点間を往復する時間(正確には位相差)をもとに距離を計算します。そのとき気象の影響を受けて光は屈折し、光路長が変化するため、実際の幾何学的な2点間の距離よりも長くなり、日変化や季節変化も観測されます。その変化量は5～8 ppm になります。

図中の破線bは2004(平成16)年に発生した県西部地域における最大地震(11月9日; M4.1; 丹沢山地)の時期を、破線aは箱根における最大の群発地震活動(2月4、5日)の時期を表しています(伊東ほか、2005)。それぞれの地震活動の前後において、各基線長に関連付けられる変化は認められません。2001(平成13)年の箱根群発地震活動の際に光波測量基線網で捉えられた各基線長変化はいずれも1 cm 未満というわずかなものでした(丹保ほか、2005)。この変化量は最大でも4 ppm 未満で、日変化や季節変化よりも小さいため、直接的に観測データからそれを認識することは大変難しいといえます。丹保ほか

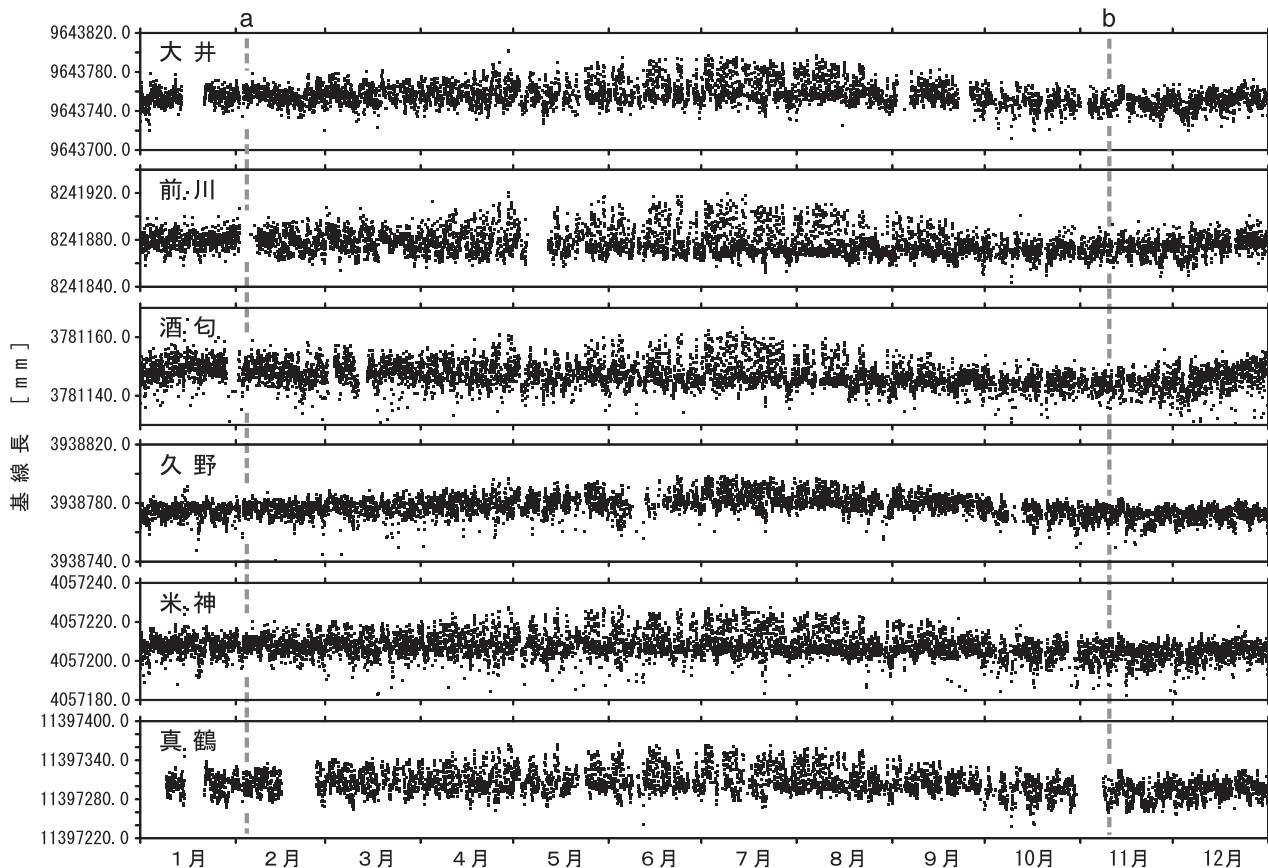


図3-2 2004(平成16)年の小田原光波測量基線網における測量結果。縦軸は一目盛り20.0mm、横軸は1ヶ月で示す。破線aは箱根における最大の群発地震活動(2月4、5日;最大地震M3.0)の時期を、破線bは丹沢山地で発生した県西部地域の最大地震(11月9日01時48分ごろ;M4.1)の時期を示す。

(2005)は、気象による周期的な変化や経年変化を原データから差し引くことで、箱根群発地震活動に伴う変化を明らかにしています。

各基線における経年変化量を1998(平成10)年からの3年間(前期)と、2002(平成14)年からの3年間(後期)の基線長変化を基にそれぞれ最小二乗法で直線近似し、年単位の変化量として表2にまとめました。なお、誤差の大きい値は、これを計算から除外するようにしています。GPS測量の場合と同じく、これらの経年変化はプレート運動による定常的地殻変動を捉えていると考えられます。ただし、箱根光波測量基線網の経年変化の大部分は、中央火口丘や外輪山の山腹

表2 光波測量およびGEONET(93042-950229)にみられる経年変化量の推移。城山-久野基線は反射器の移設があり、2000年6月から測量を再開。

基線名	'98~'00 mm/yr	'02~'04 mm/yr
大井	-0.6	-2.9
前川	-0.7	-0.6
酒匂	+0.1	-0.8
久野	---	-1.5
米神	-0.6	-0.2
真鶴	-2.3	-1.9
深良水門	-3.2	+0.7
長尾峠	-3.7	-1.5
乙女	-0.3	+0.4
姥子	+2.0	+2.7
大涌谷	-1.9	-5.3
早雲山	-5.2	-9.4
93042 - 950229	+0.5	+1.9

に設置されている各反射器が、表層のもろい火山性堆積物の緩慢な変形によって土台ごと移動していることによるものと思われます。GPS 測量と光波測量が同じ定常的地殻変動を捉えているとすると、位置的に近似するそれぞれの基線長変化は調和的であることが考えられます。ここで、GPS 測量による真鶴 - 中井基線の経年変化量(表 1)と、光波測量による城山 - 真鶴基線と城山 - 大井基線の経年変化量(表 2)の和(擬似的な真鶴 - 大井基線)を比較してみると、前者は前期が-0.2cm/yr で後期が +0.1cm/yr、後者は前期が-2.9mm/yr で後期が-4.8mm/yr となっていて、互いの経年変化の傾向は逆パターンであることが分かります。GEONET の 93042-950229 基線の経年変化(表 2)も調べましたが、やはり光波測量とは傾向が逆パターンとなっています。この原因については、今後調査・検討する必要があります。

箱根光波測量網の経年変化量は表 2 の前期と後期で大きな差があります。仙石原 - 深良水門、乙女基線にみられる短縮傾向から伸張への反転や仙石原 - 大涌谷、早雲山基線にみられる短縮量の増大など、これらの変化は 2001(平成 13)年箱根群発地震活動の後から生じています(図 4)。このことは、箱根における地震活動がカルデラ内部の地すべりを促進し

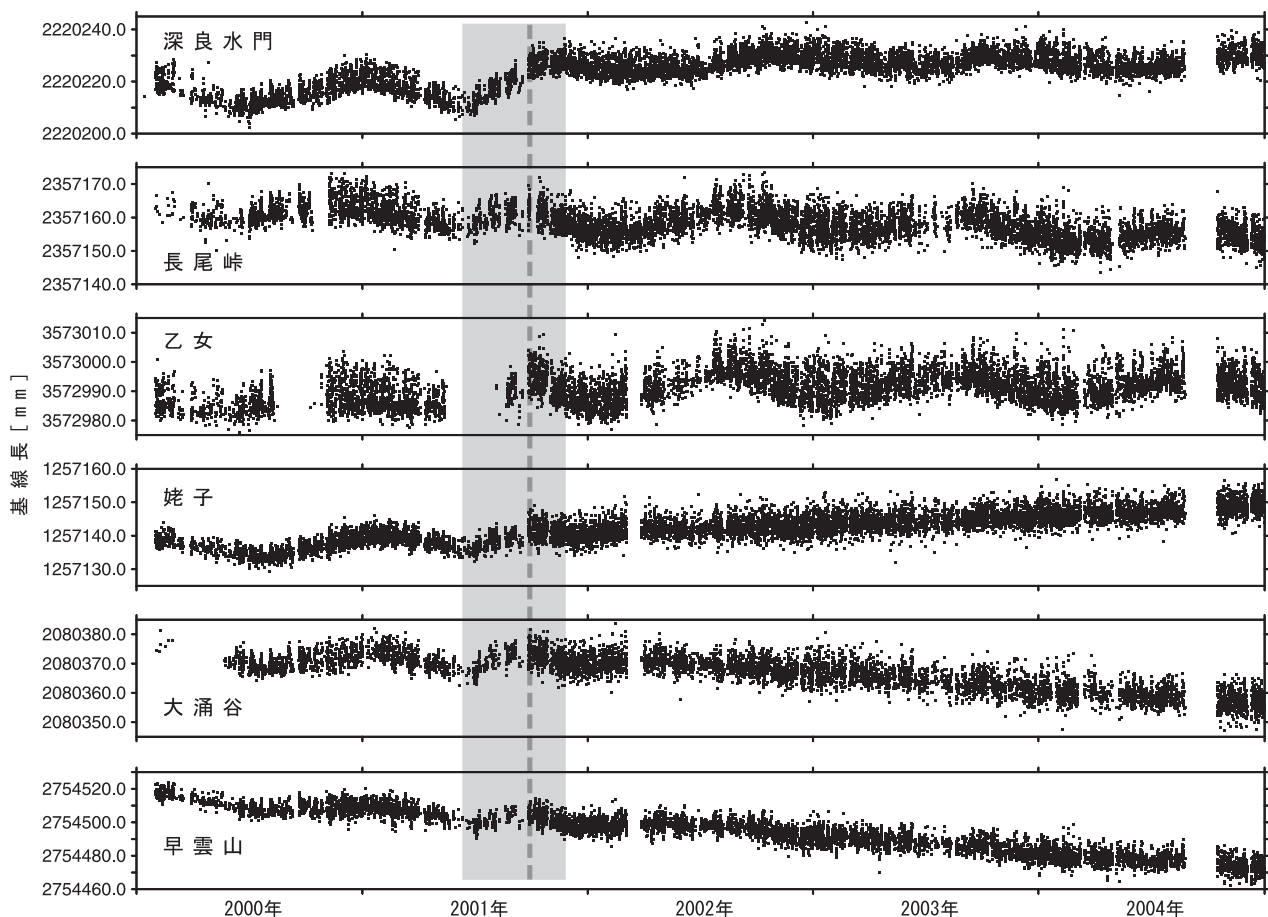


図 4 最近 5 年間の箱根光波測量基線網における測量結果。縦軸は一目盛り 10.0mm、横軸は 1 年で示す。破線は箱根光波測量基線網における測量システムの更新時期を、グレーのトーンがかかった期間は 2001(平成 13)年箱根群発地震活動の時期を示す。

ていることを示している可能性があります。光波測量基線網の基線長変化は 2001(平成 13)年箱根群発地震活動の後、経年変化だけでなく、年周変化と日変化のパターンも変化しています。このパターンの変化が生じた時期を詳しく調べると、2001(平成 13)年 10 月の測量システムの更新を境に生じているようです。つまりこのパターンの変化は測量システムを更新したときの機械特性の差異によって生じている可能性が高く、また上記の、前期と後期における経年変化量の差はこのことに起因する可能性もあり、2001(平成 13)年 10 月を境とした長期間のデータの取り扱いには注意する必要があるかもしれません。

3. まとめ

2004(平成 16)年における GPS および光波測量ではノイズレベルを越えるような、異常な地殻変動は認められませんでした。最近 3 年間の定常的地殻変動では、2000(平成 12)年に短縮傾向から反転した真鶴 - 中井 GPS 基線の伸張が、まだ継続していることが分かりました。光波測量の経年変化が GPS 測量と比較して調和性が認められないこと、そして箱根光波測量基線網における 2001(平成 13)年の群発地震以降の経年変化量の増大については、今後も継続した調査が必要です。それには光波測量の測距儀と反射器の設置点における 3 次元的地殻変動を調べるために GPS による定期的な測量が重要であると考えています。

噴火や巨大地震に関連する前駆的地殻変動は、その直前に急激に大きさを増して現れる可能性があり、GPS、光波測量によって明瞭に捉えることが出来ると考えています。しかし、前駆的な地殻変動が地震のどのくらい前から発生するかについて、研究はまだ発展途上の段階です。そのため、地殻変動の観測は安定した長期の連続性をもっておこなわれるべきで、正確な定常的地殻変動の把握が不可欠です。それらは地震の準備段階における歪蓄積状況を知る重要なデータとなるからです。今後も、注意深い観測を継続し、観測精度を向上させていくことが責務と考えています。

謝辞

GPS、光波測量を継続するにあたって、企業庁利水局酒匂川水系ダム管理事務所管理課、真鶴町管理課、中井町総務部庶務課、箱根町パレスホテル、アジアセンター小田原をはじめとする多くの方々にご協力を頂いています。本報告をまとめるにさしあたっては、国土地理院の GEONET による観測データを使用させて頂きました。ここに感謝の意を記します。

参考文献

- 代田 寧、棚田俊收、伊東 博(2002) 2001(平成 13)年箱根群発地震活動に関連した地殻傾斜変動、温地研報告, **34**, 35-44.
- 代田 寧、棚田俊收、伊東 博(2003) 神奈川県西部地域における 2002(平成 14)年の GPS・光波測量結果、温地研観測だより, **53**, 37-42.
- 原田昌武、棚田俊收、丹保俊哉、伊東 博(2004) 神奈川県西部地域における 2003(平成 15)年の GPS 測量結果、温地研観測だより, **54**, 11-14.
- 伊東 博、棚田俊收、原田昌武、丹保俊哉(2005) 神奈川県西部地域における 2004(平成 16)年の地震活動、温地研観測だより, **55**, 1-6.
- 国土地理院(2001) 第 90 回火山噴火予知連絡会資料.

- 西村卓也・村上亮・棚田俊收(2001) 2001年6月-8月の箱根火山の地殻変動, 日本測地学会第96回講演会要旨, 121-122.
- 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**(1, 2), 3-40.
- 棚田俊收、伊東 博、八巻和幸、小鷹滋朗、平野富雄(1995) 神奈川県温泉地学研究所のGPS連続自動観測システム, 温地研報告, **26(1, 2)**, 37-48.
- 棚田俊收、伊東 博、代田 寧、板寺一洋(2002) 神奈川県西部地域におけるGPS観測結果とその特徴について, 温地研報告, **33**, 31-42.
- 棚田俊收、代田 寧、伊東 博、丹保俊哉、原田昌武(2004) 神奈川県西部地域における2003(平成15)年の光波測量結果, 温地研観測だより, **54**, 15-16.
- 丹保俊哉、棚田俊收(2002) 2001(平成13)年箱根群発地震活動に伴う光波・GPSの変化, 温地研観測だより, **52**, 5-12.
- 丹保俊哉、棚田俊收、代田 寧、伊東 博(2002) 神奈川県温泉地学研究所における新しいGPS測量システムとその精度について, 温地研報告, **34**, 27-34.
- 丹保俊哉、棚田俊收、伊東 博、代田 寧(2005) 光波測量基線網で捉えられた2001年箱根火山の群発地震活動に伴う地殻変動, 測地学会誌, **51**(1). (印刷中)
- 吉川澄夫・小林昭夫・山本剛靖(2001) 2001年6月からの箱根の地震活動と周辺観測点の歪・地下水変化, 日本地震学会2001年秋季大会講演予稿集, C20.