

神奈川県西部地震想定モデルに伴うコサイスマミックな地殻変動

棚田 俊收*

Coseismic crustal deformation for hypothetical source models of the Western Kanagawa Earthquake

by

Toshikazu TANADA *

1. はじめに

神奈川県は、近い将来発生が危惧されている「神奈川県西部地震」に対し、定量的な被害想定を公表している(神奈川県, 1993)。この被害想定をおこなうための想定断層モデルは、「神奈川県西部地震被害想定等調査委員会(平成3~4年度)」の地質・地盤分科会によって検討された。

地震学や地質学研究者から提唱されていた断層モデルは、その当時、複数存在したが、分科会は(1)人的・物的被害が最も大きくなることが予想される(2)過去の被害地震記録や津波記録との整合性が得られる(3)歴史地震資料から発生頻度が高く、発生の切迫性が指摘されているという観点から、図1のような高角逆断層モデルを想定断層モデルとして設定した(以後、県版想定断層モデルと呼ぶ)。

一方、岡田(1993)によって研究者達から提唱されていた複数の断層モデルや想定震源域のイメージに対し、レビューおよび分類整理がおこなわれた。そして、いくつかの具体的な断層モデルを設定し、断層モデルから期待されるコサイスマミックな地殻変動を算出し、その変動量やパターンについて考察された。このような試みは、岡

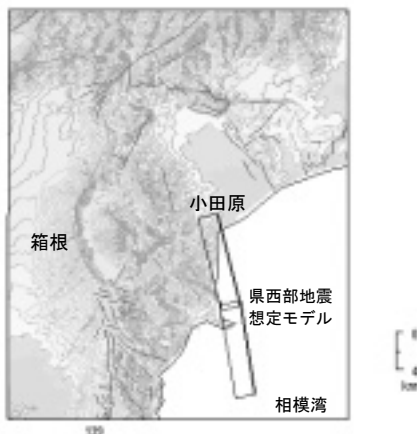


図1 県版想定断層モデル
断層は長さ20km×幅12km、傾斜角は80度の高角逆断層型である(表1)。

田(1993)が述べているようにプレスリップ的な前兆現象が検出された場合、その地殻変動量や方向性の組み合わせから断層モデルの適正を評価するのに役立つと思われる。

岡田(1993)の解析には、温泉地学研究所の駒ヶ岳や湖尻、小塚山の3傾斜観測点を含む関係機関24定常地殻変動観測点に対し、上下・水平変動や傾斜、面積歪等を計算している。しかし、1993年以降に設置された当所の光波やGPS測量、傾斜の増設点、地下水位観測(温泉地学研究所, 1999)に対しては計算がおこなわれていない。

そこで、本報告では岡田(1993)の方法に準じて、県版想定断層モデルに伴うコサイスマミックな地殻変動量を増設点も含めて再計算し、その変動量や方向などについてまとめた。なお、Appendixに岡田(1993)が設定した想定断層モデルに対する当所の地殻変動観測点でのコサイスマミックな地殻変動をまとめて掲載した。

2. 計算および表示方法

断層運動に伴う変形は、1960年以降、均質半無限弾性体での食い違い理論によるいくつかの解析例(例えば、Manshinha and Smylie, 1971)があるが、今日ではOkada(1992)の手法が多く研究者に用いられている。本報告でもOkada(1992)が公開しているFORTRANサブルーチンを用いて地殻変動量を計算した。

計算に用いた県版想定断層モデル(図1)における断層長等のパラメータを表1に示した。これらの諸パラメータは神奈川県(1993)に基づいている。また、県版想定断層モデルと温泉地学研究所の観測点分布を項目ごとに、図2(a)~(d)に示した。

県版想定断層モデルに対する計算項目は、観測点間の伸び縮みを測る光波やGPS測量に対しては水平と上下変位量(mm)、観測点の傾きを測る傾斜観測に対しては傾斜量(10^{-6} radian)、地下水位観測は地下の体積変化を反映しているとして体積歪量(10^{-6} strain)とした。なお、体積

* 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報告, 第34巻, 19 - 26, 2002.



図 2 a) 光波測量網と県版想定断層モデル
囲み文字は、箱根観測網の基準点(仙石原)と小田原観測網の基準点(城山)を示す。



図 2 c) 傾斜観測点と県版想定断層モデル

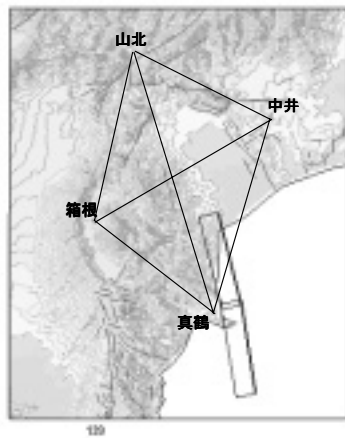


図 2 b) GPS 測量網と県版想定断層モデル

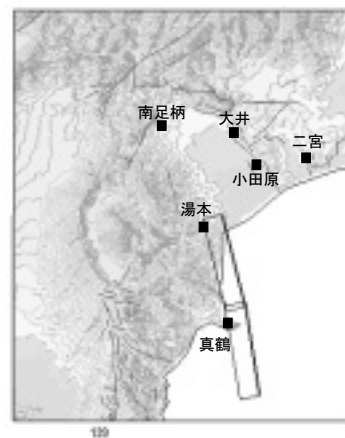


図 2 d) 地下水位観測点と県版想定断層モデル

表 1 県版想定断層パラメータ

主なパラメータ	
マグニチュード	7.0
断層の長さ	20 km
断層の幅	12 km
上端深さ	2 ~ 8 km
傾斜角	80 度
すべり量	3 m

歪量の単位は無次元であるが、本文では気象庁地震予知情報報課(2002)のグラフ表示方法に倣い strain と記した。

なお、地下水位変化と体積歪との応答関係は、地球潮汐の M2 分潮から推定した例がいくつかある(Roeloffs、1988 や川辺、1991)。それらの結果によると、被圧地下水に対する応答感度は $0.5 \sim 5 \text{ cm} / 10^{-8} \text{ strain}$ とされている。また、体積歪は、静水圧が p から $p + \Delta p$ へ増加したとき、体積 V が $V - \Delta V$ 減少したとすると $-\Delta V / V$ で表現

される。すなわち、体積歪が負のとき、水位変化は正すなわち上昇を示すことになる。例として、地球潮汐における地下水位の極大・極小は、地球の圧縮・引張変形に対応している(Melchior、1983)。

解析結果を地図に表示させるソフトウェアとしては、気象研究所の内藤、吉川(1999)が開発した地殻変動解析支援プログラム MICAP-G やアメリカ合衆国地質調査所などが中心となって開発した Coulomb (Toda *et al.*, 1998; 遠田ほか、2002) などが公開されている。これらのソフトウェアは FORTRAN コードを繰り返し編集・コンパイルすることなく、GUI (Graphical User Interface) 化された環境下で断層運動などに伴う変形を可視化できる便利な機能を携えている。しかも、一連の作業はパソコンで簡便に処理でき、モデルの妥当性を検討しながらパラメータ変更ができる。また、表示された図面等もグラフィックファイルとして保存でき、ドローソフトを用いれば簡単に追記できる。本報告では、Windows 上で動作する MICAP-G (内藤、吉川、1999) を用いて、地殻変動量を可視化した。

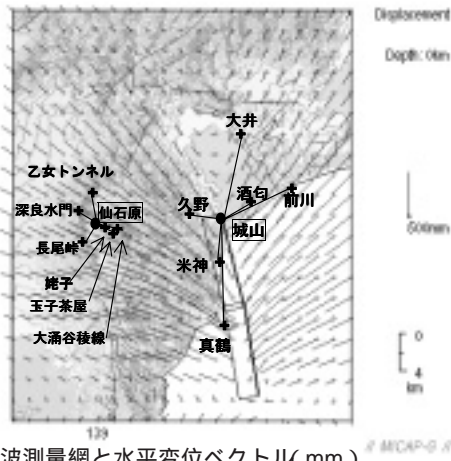


図3(a) 光波測量網と水平変位ベクトル(mm)

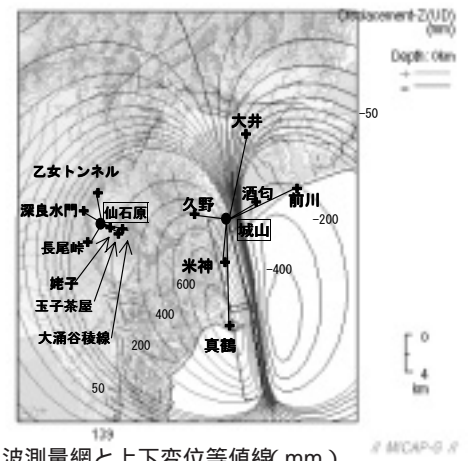


図3(b) 光波測量網と上下変位等値線(mm)

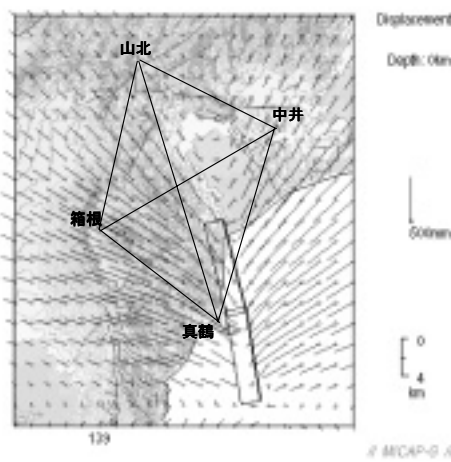


図4(a) GPS測量網と水平変位ベクトル(mm)

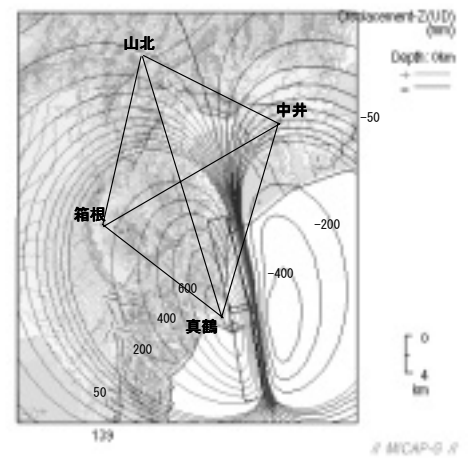


図4(b) GPS測量網と上下変位等値線(mm)

3. 計算結果

観測項目ごとの地殻変動量分布を図3～6に示した。また、各観測点におけるコサイスマミックな地殻変動量は表2に示した。以下に観測項目ごとに、表2のx値とy値から計算したおよその移動方向と地殻変動量について記述した。

(1) 光波測量地点の変位量

箱根光波測量網では、仙石原基準点に対して、大涌谷稜線と玉子茶屋、姥子反射点は34～79mm北西方向に、深良水門と長尾峠反射点は37～55mm南西方向に、乙女トンネル反射点は59mm東へ移動した。

小田原光波測量網では、城山基準点に対して、真鶴と米神、久野反射点は166～387mm北西方向へ、酒匂と前川反射点は341～414mm南西方向へ、大井反射点は204mm南方向へ移動した。

(2) GPS測量地点の変位量

中井観測点はおおよそ200mm南西方向へ、それ以外の3点は73～560mm北西方向へ移動した。一方、真鶴を基準点とする定常観測の解析(丹保ほか、2002)で

は、真鶴観測点に対し3点は653～995mm北西方向へ移動することがわかった。

(3) 傾斜観測の傾斜量

箱根の5観測点は、 $24 \sim 41 \times 10^{-6}$ radian北西方向へ傾く。岩倉観測点は 12×10^{-6} radian南方向へ、寄観測点は 5×10^{-6} radian北方向へ傾くことがわかった。

(4) 地下水位観測地点の体積歪量

地下水位変化と体積歪との応答関係は、 $0.5 \text{ cm} / 10^{-8}$ strainと設定した。その結果、想定震源直上にある真鶴や湯本観測点では、地下水位が数十m下がる。一方、足柄平野の大井や小田原、南足柄観測点は、体積歪が減少するので地下水位は数m程度上がる結果となった。なお、図6の等値線は、体積歪量(10^{-6} strain)で示した。

4. まとめ

県版想定断層モデルに伴うコサイスマミックな地殻変動量を計算し、観測項目ごとの地殻変動量分布をまとめた。その結果、距離変化などのコサイスマミックな変動量は、温泉地学研究所(1999)や棚田ほか(2001a, 2001b)などに

表2 県版想定断層モデルから計算される各観測点におけるコサイスマミック地殻変動量

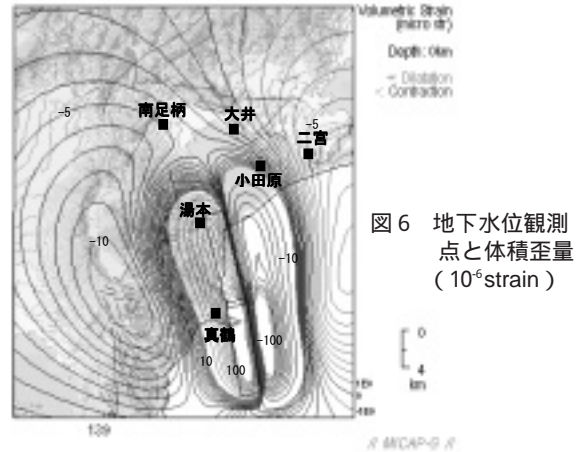
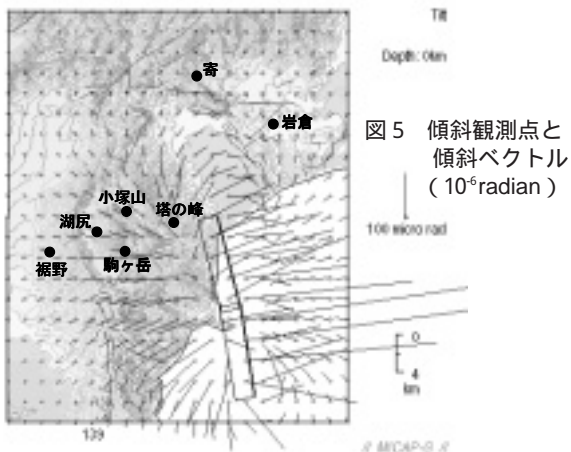
GPS測量	観測点名	水平変位		上下変位	基準点との相対変化		
		x(mm)	y(mm)	z(mm)	Δx (mm)	Δy (mm)	Δz (mm)
	中井	-92	-181	-72	385	-475	-874
	山北	-48	56	11	430	-238	-791
	真鶴	-477	294	802	0	0	0
	箱根	-312	170	160	165	-124	-642

光波測量	観測点名	水平変位		上下変位	基準点との相対変化		
		x(mm)	y(mm)	z(mm)	Δx (mm)	Δy (mm)	Δz (mm)
箱根	仙石原	-312	170	160	0	0	0
	大涌谷稜線	-378	214	240	-66	44	80
	玉子茶屋	-364	197	218	-52	27	58
	姥子	-341	188	192	-29	18	32
	深良水門	-297	136	143	15	-34	-17
	長尾峠	-261	148	114	51	-22	-46
	乙女トンネル	-253	174	118	59	4	-42
小田原	城山	-70	81	124	0	0	0
	真鶴	-411	266	820	-341	185	696
	米神	-163	219	467	-93	138	343
	久野	-284	308	392	-214	227	268
	酒匂	-160	-248	-231	-90	-329	-355
	前川	-231	-301	-193	-161	-382	-317
	大井	-59	-123	-57	11	-204	-181

傾斜	観測点名	傾斜(10^{-6} radian)	
		x	y
	湖尻	-23	7
	小塚山	-25	18
	駒ヶ岳	-33	5
	塔の峰	-12	40
	岩倉	3	-12
	寄	5	1
	裾野	-12	1

x: 東西方向を示し東側+
y: 南北方向を示し北側+
z: 垂直方向を示し隆起+

地下水位	観測点名	体積歪(10^{-6} strain)	換算地下水位(cm)
	大井	-2	93
	小田原	-7	328
	南足柄	-5	244
	真鶴	97	-4865
	二宮	5	-246
	湯本	54	-2690



記された各観測項目の分解能よりも十分に大きいことがわかった。

さらに、県版想定断層モデルを囲むように各観測点を配置しているため、コサイスマックな変動方向は一様ではないことがわかった。特に、GPS測量と光波測量とを組み合わせることで、より複雑なコサイスマックな水平変位が得られることが理論的予測からわかった。

もし、いくつかの観測点の観測項目で異常な変動が検出された場合、このような理論的予測が当てはまるとすれば、プレスリップ的前兆現象を検出するのに有効であろう。

謝辞

今回解析に用いた均質半無限弾性体内における地殻変動量を計算するFORTRANサブルーチンは独立行政法人防災科学技術研究所企画部長岡田義光博士のものを使用させていただいた。また、気象研究所地震火山部の内藤宏人博士および吉川澄夫博士には、地殻変動解析支援プログラムMICAP-Gの使用を了承していただいた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 神奈川県 (1993) 神奈川県西部地震被害想定調査報告書, p295 .
- 気象庁地震予知情報課 (2002) 東海・南関東地域における歪観測結果(2001年11月～2002年4月) 地震予知連絡会会報, 68, 341-349 .
- Manshinha, L. and Smylie, D. E. (1971) The displacement field of inclined faults, Bull. Seim. Soc. Am., 61, 1433-1440 .
- Melchior, P. (1983) The tides of the planet Earth(2nd ed.), Pergamon Press, Oxford, 641pp .
- 内藤宏人、吉川澄夫 (1999) 地殻変動解析支援プログラム MICAP-G の開発, 地震 2, 52, 101-103 .
- Okada (1992) Internal deformation due to shear and tensile fault in a half-space, Bull. Seism. Soc. Am., 82, 1018-1040 .
- 岡田義光 (1993) 「神奈川県西部地震」の諸モデルから期待される地殻変動, 地学雑誌, 102(4), 445-456 .
- 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, 3-41 .
- Roeloffs, E. A. (1988) Hydrologic precursors to earthquakes: A review, Pure Appl. Geophys., 177-209 .
- 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システムと

その精度について, 温地研報告, 34, 27-34 .

棚田俊收、伊東 博、代田 寧、板寺一洋 (2001a) 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, 25-31 .

棚田俊收、伊東 博、代田 寧、板寺一洋 (2001b) 神奈川県西部地域における光波測量結果とその特徴について, 温地研報告, 33, 31-42 .

Toda, S., R. S. Stein, P. A. Reasenber and J. H. Dieterich (1998) Stress transferred by the Mw=6.9 Kobe, Japan, shock: Effect on aftershocks and future earthquake probabilities, J. Geophys. Res., 103, 24543-24565 .

遠田晋次、Stein, R. S., King, G. C. P. (2002) ディスロケーションソフトウェア「Coulomb」の紹介, 活断層研究, 21, 25-32 .

Appendix

岡田(1993)は、これまでに提唱された神奈川県西部地震のモデルないしイメージを4カテゴリー12種類に分類した。そのカテゴリーに従い国府津-松田断層モデル(A)や新プレート上面モデル(B)、プレート断裂モデル(C1、C2、C3)、プレート内破壊モデル(D)の計6個の想定断層モデルを設定した。

このAppendixでは、本文中で計算した県版想定断層モデルと類似するC2を除く5個の想定断層モデルに対し、温泉地学研究所の地殻変動観測点のコサイスマックな地殻変動量をモデルごとに表Aとしてまとめた。

解析の結果、5個の想定断層モデルに対するコサイスマックな変動量は、各観測項目の分解能よりも大きいことがわかった。特に、本文に示した県版想定断層モデル同様に、GPS測量と光波測量とを組み合わせることで、より複雑なコサイスマックな水平変位が予想されることが理論予測値からわかった。

表A 1 岡田(1993)による想定断層モデルパラメータ

モデル	緯度 N(度)	経度 E(度)	深さ (km)	走向 (度)	傾斜角 (度)	L 1 (km)	L 2 (km)	W 1 (km)	W 2 (km)	U (cm)	Rake (度)
A	35.286	139.250	3.0	325	45	0	20	20	0	200	160
B	35.120	139.210	5.0	275	25	0	20	20	0	300	135
C 1	35.050	139.200	1.5	0	90	0	25	10	0	480	0
C 3	35.333	139.060	10.0	350	90	15	15	15	15	270	0
D	35.210	139.103	17.2	210	50	10	10	10	10	300	70

表A 2 岡田(1993)による想定断層モデル(A、B、C 1、C 3、D)から計算される各観測点におけるコサイスマック地殻変動量

モデルA	観測点名	水平変位		上下変位	基準点との相対変化		
		x(mm)	y(mm)	z(mm)	Δx (mm)	Δy (mm)	Δz (mm)
GPS測量	中井	125	-305	354	93	-398	354
	山北	-49	33	-27	-81	-60	-27
	真鶴	32	93	0	0	0	0
	箱根	24	60	-7	-8	-33	-7

光波測量	観測点名	水平変位		上下変位	基準点との相対変化		
		x(mm)	y(mm)	z(mm)	Δx (mm)	Δy (mm)	Δz (mm)
箱根	仙石原	24	60	-7	0	0	0
	大涌谷稜線	31	73	-8	7	13	-1
	玉子茶屋	30	70	-7	6	10	0
	姥子	28	66	-7	4	6	0
	深良水門	24	56	-5	0	-4	2
	長尾峠	18	51	-8	-6	-9	-1
	乙女トンネル	16	54	-10	-8	-6	-3
小田原	城山	46	129	-12	0	0	0
	真鶴	29	89	1	-17	-40	13
	米神	42	117	-6	-4	-12	6
	久野	44	116	-14	-2	-13	-2
	酒匂	35	113	-3	-11	-16	9
	前川	13	-94	163	-33	-223	175
大井	-22	14	47	-68	-115	59	

傾斜	観測点名	傾斜(10^{-6} radian)	
		x	y
	湖尻	0	1
	小塚山	0	1
	駒ヶ岳	0	1
	塔の峰	0	1
	岩倉	-64	-25
	寄	-27	-13
	裾野	0	1

x: 東西方向を示し東側+
y: 南北方向を示し北側+
z: 垂直方向を示し隆起+

地下水位	観測点名	体積歪(10^{-6} strain)	換算地下水位(cm)
	大井	-20	990
	小田原	-20	995
	南足柄	-2	83
	真鶴	2	-85
	二宮	31	-1535
	湯本	2	-88

モデルB	観測点名	水平変位		上下変位	基準点との相対変化		
		x(mm)	y(mm)	z(mm)	Δx (mm)	Δy (mm)	Δz (mm)
GPS測量	中井	74	-78	6	-417	264	-909
	山北	93	-318	-138	-398	24	-1053
	真鶴	491	-342	915	0	0	0
	箱根	265	-364	-211	-226	-22	-1126

光波測量	観測点名	水平変位		上下変位	基準点との相対変化		
		x(mm)	y(mm)	z(mm)	Δx (mm)	Δy (mm)	Δz (mm)
箱根	仙石原	265	-364	-211	0	0	0
	大涌谷稜線	254	-379	-78	-11	-15	133
	玉子茶屋	252	-376	-111	-13	-12	100
	姥子	256	-375	-160	-9	-11	51
	深良水門	260	-322	-209	-5	42	2
	長尾峠	290	-338	-261	25	26	-50
	乙女トンネル	278	-379	-268	13	-15	-57
小田原	城山	327	-198	355	0	0	0
	真鶴	468	-372	957	141	-174	602
	米神	439	-261	581	112	-63	226
	久野	290	290	176	-37	488	-179
	酒匂	281	-81	315	-46	117	-40
	前川	253	24	250	-74	222	-105
	大井	90	-157	-29	-237	41	-384

傾斜	観測点名	傾斜(10^{-6} radian)	
		x	y
	湖尻	-33	29
	小塚山	-42	36
	駒ヶ岳	-60	57
	塔の峰	-45	58
	岩倉	-14	19
	寄	-10	-6
	裾野	14	11

x: 東西方向を示し東側+
y: 南北方向を示し北側+
z: 垂直方向を示し隆起+

地下水位	観測点名	体積歪(10^{-6} strain)	換算地下水位(cm)
	大井	-7	363
	小田原	-2	105
	南足柄	-7	332
	真鶴	41	-2050
	二宮	-2	125
	湯本	11	-540

モデルC1	観測点名	水平変位		上下変位	基準点との相対変化		
		x(mm)	y(mm)	z(mm)	Δx (mm)	Δy (mm)	Δz (mm)
GPS測量	中井	171	94	24	209	1002	12
	山北	168	-199	5	206	709	-7
	真鶴	-38	-908	11	0	0	0
	箱根	200	-224	-7	238	684	-18

光波測量	観測点名	水平変位		上下変位	基準点との相対変化		
		x(mm)	y(mm)	z(mm)	Δx (mm)	Δy (mm)	Δz (mm)
箱根	仙石原	200	-224	-7	0	0	0
	大涌谷稜線	231	-283	-19	31	-59	-12
	玉子茶屋	214	-264	-15	14	-40	-7
	姥子	213	-248	-12	13	-24	-5
	深良水門	150	-199	-3	-50	25	4
	長尾峠	190	-192	-1	-10	32	6
	乙女トンネル	236	-220	-5	36	4	2
小田原	城山	361	-738	-152	0	0	0
	真鶴	-68	-965	21	-429	-227	173
	米神	164	-871	-54	-197	-133	98
	久野	411	-529	-111	50	209	41
	酒匂	325	-537	-195	-36	201	-43
	前川	527	599	319	166	1337	471
	大井	242	-291	-83	-119	447	69

傾斜	観測点名	傾斜(10^{-6} radian)	
		x	y
	湖尻	4	0
	小塚山	7	1
	駒ヶ岳	4	2
	塔の峰	12	8
	岩倉	-25	8
	寄	1	6
	裾野	1	-1

x: 東西方向を示し東側+
y: 南北方向を示し北側+
z: 垂直方向を示し隆起+

地下水位	観測点名	体積歪(10^{-6} strain)	換算地下水位(cm)
	大井	13	-640
	小田原	-25	1265
	南足柄	17	-850
	真鶴	-5	225
	二宮	-15	750
	湯本	17	-860

モデルC3	観測点名	水平変位		上下変位	基準点との相対変化		
		x(mm)	y(mm)	z(mm)	Δx (mm)	Δy (mm)	Δz (mm)
GPS測量	中井	-30	101	-9	32	48	41
	山北	22	10	3	84	-43	54
	真鶴	-62	53	-50	0	0	0
	箱根	-35	-107	59	27	-160	110

光波測量	観測点名	水平変位		上下変位	基準点との相対変化		
		x(mm)	y(mm)	z(mm)	Δx (mm)	Δy (mm)	Δz (mm)
箱根	仙石原	-35	-107	59	0	0	0
	大涌谷稜線	-29	-81	51	6	26	-9
	玉子茶屋	-32	-91	57	3	16	-3
	姥子	-32	-97	57	3	10	-2
	深良水門	-51	-117	73	-16	-10	14
	長尾峠	-32	-115	52	3	-8	-7
	乙女トンネル	-13	-106	35	22	1	-24
小田原	城山	-74	82	-69	0	0	0
	真鶴	-65	60	-52	9	-22	17
	米神	-76	71	-75	-2	-11	-6
	久野	-41	46	-34	33	-36	35
	酒匂	-88	96	-67	-14	14	1
	前川	-90	91	-54	-15	9	15
	大井	-34	109	-14	40	27	55

傾斜	観測点名	傾斜(10^{-6} radian)	
		x	y
	湖尻	3	8
	小塚山	6	7
	駒ヶ岳	8	7
	塔の峰	12	0
	岩倉	1	-7
	寄	-1	-8
	裾野	-3	4

x: 東西方向を示し東側+
y: 南北方向を示し北側+
z: 垂直方向を示し隆起+

地下水位	観測点名	体積歪(10^{-6} strain)	換算地下水位(cm)
	大井	0	25
	小田原	-1	74
	南足柄	0	0
	真鶴	-3	144
	二宮	0	20
	湯本	-4	204

モデルD	観測点名	水平変位		上下変位	基準点との相対変化		
		x(mm)	y(mm)	z(mm)	Δx (mm)	Δy (mm)	Δz (mm)
GPS測量	中井	76	142	173	-19	262	-432
	山北	10	42	22	-85	162	-583
	真鶴	95	-120	605	0	0	0
	箱根	-136	35	324	-231	155	-281

光波測量	観測点名	水平変位		上下変位	基準点との相対変化		
		x(mm)	y(mm)	z(mm)	Δx (mm)	Δy (mm)	Δz (mm)
箱根	仙石原	-136	35	324	0	0	0
	大涌谷稜線	-159	34	503	-23	-1	179
	玉子茶屋	-160	28	457	-24	-7	133
	姥子	-152	35	401	-16	0	77
	深良水門	-132	6	293	4	-29	-31
	長尾峠	-87	37	200	49	3	-124
	乙女トンネル	-84	64	210	52	30	-114
小田原	城山	133	115	619	0	0	0
	真鶴	104	-134	513	-29	-249	-106
	米神	125	33	688	-8	-82	69
	久野	33	119	711	-100	4	92
	酒匂	148	132	431	15	17	-188
	前川	115	108	247	-18	-7	-372
	大井	80	181	259	-53	66	-360

傾斜	観測点名	傾斜(10^{-6} radian)	
		x	y
	湖尻	-49	17
	小塚山	-54	28
	駒ヶ岳	-44	7
	塔の峰	-9	21
	岩倉	14	20
	寄	-4	20
	裾野	-29	10

x: 東西方向を示し東側+
y: 南北方向を示し北側+
z: 垂直方向を示し隆起+

地下水位	観測点名	体積歪(10^{-6} strain)	換算地下水位(cm)
	大井	2	-81
	小田原	4	-199
	南足柄	-1	70
	真鶴	20	-975
	二宮	-2	110
	湯本	37	-1825