

1996年11月から2012年2月までの東海地方における絶対重力観測結果

田中愛幸^{1)*}・張新林²⁾・付広裕²⁾・菅野貴之¹⁾・松本滋夫³⁾・古屋正人⁴⁾・孫文科⁵⁾・大久保修平¹⁾

¹⁾ 東京大学地震研究所・²⁾ 中国地震局・³⁾ 住鋳コンサルタント(株)・⁴⁾ 北海道大学理学部・⁵⁾ 中国科学院研究生院

Results of Absolute Gravity Measurements in the Tokai Area from November 1996 to February 2012

Yoshiyuki Tanaka^{1)*}, Xinlin Zhang²⁾, Guangyu Fu²⁾, Takayuki Sugano¹⁾, Shigeo Matsumoto³⁾, Masato Furuya⁴⁾, Wenke Sun⁵⁾ and Shuhei Okubo⁶⁾

¹⁾ Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, ²⁾ China Earthquake Administration, ³⁾ Sumiko Consultants CO., LTD, ⁴⁾ Department of Natural History Sciences, Hokkaido University, ⁵⁾ Graduate University, Chinese Academy of Sciences

Abstract

Gravity changes observed with FG5 absolute gravimeters during the period 1996-2012 in the Tokai area are reported. There are three observation sites in the area, where gravity changes were measured once or twice a year. In Omaezaki, located at the cusp of the Peninsula, gravity increased 10 microGals over 16 years. In Kikugawa, at the center of the Peninsula, gravity increased 5 microGals from 2008 to 2012. In Toyohashi, located to the west of lake Hamana-ko, where the long-term slow slip began in 2000, gravity decreased 6 microGals from 2004 to 2012. The rates of these gravity changes do not agree completely with those inferred from crustal uplift/subsidence observed by GPS, implying the possibility that mass redistributions are occurring underground. Monitoring and modeling those mass redistributions are important to understand inter-seismic crustal activities including slow slips, and to reveal stress accumulation processes in a subduction zone.

Keywords: gravity, crustal movement, Tokai, subduction zone, geodetic observation

1. はじめに

東海地方における地殻活動モニタリングの高度化のため、地震研究所重力チームでは御前崎、菊川、豊橋の3観測点において年1-2回の絶対重力観測を実施している。重力変化は地殻の上下変動とそれ以外による質量分布の変化に感度がある。そのため、絶対重力観測の目的として、以下の2つが挙げられる。1) GPSによる地殻上下変動の測定精度(日々の座標値で10-30mm)よりも高精度(1 microGal=約5mmに相当)に上下変動を監視すること、2) 地殻の上下変動のみで説明できない地下の質量移動を捉えること。これらから、未知の現象も含めてプレート沈み込み帯の大地震の準備・発生過程を明らかにすることが求められている。実際、約15年間

にわたる御前崎における絶対重力観測や、同様の絶対重力観測を行っているカナダのCascadiaのプレート沈み込み帯においては、地殻変動だけでは説明できない重力変化が観測されている(国土地理院・東京大学地震研究所(2012), Mazzotti *et al.* (2007))。両地域とも大地震の震源域に位置し、スロースリップも観測されている。そこで、そのような変化をスロースリップによる地殻流体の移動に関連付ける試みも始まっている(Tanaka *et al.*, 2010)。本稿では、3観測点それぞれにおいて絶対測定を開始してから2012年2月までの観測結果を報告する。

2. 観測方法の概要

Micro-G社製FG5絶対重力計は、真空中を自由落下す

* e-mail: y-tanaka@eri.u-tokyo.ac.jp (〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1)

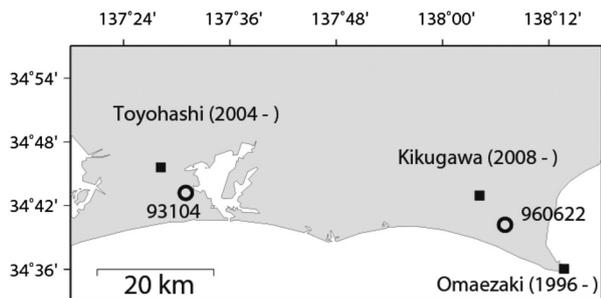


Fig. 1. The locations of the Omaezaki, Toyohashi and Kikugawa absolute gravity observation stations. The continuous GPS observation stations of 93104 and 960622 are also shown.

るコーナーキューブの軌跡を原子時計及びレーザー干渉技術を用いて高精度に計測することで、1-2microGal (= 10^{-8}ms^{-2}) の確度で重力加速度を求める装置である (Okubo *et al.* (1997)). この絶対重力計を分解して運搬し、現地で再び組み上げて2-3日程度の観測を行う。

図1に3観測点の場所を示す。御前崎での観測は、国土地理院の御前崎観測局舎内で行っている。図2(上)がその観測風景である。豊橋、菊川での観測は、菊川市立内田小学校及び豊橋市多米町にある名古屋大学地殻変動観測局内で行っている(図2(中)(下))。表1に観測点の緯度・経度・標高を示す。重力チームでは2012年7月現在3台の絶対重力計を所有しており、それぞれの観測で使用した絶対重力計のシリアルナンバーと観測年、通算日(開始日, 終了日)を表2に示している。落体は10秒間隔で1回落下させ、100ドロップを1セットとする。セット間隔は30分とし、潮汐の影響を打ち消すために通常24時間以上(合計48セット, 4800ドロップ以上)の連続データを取得する。表2のNは、重力値の算出に用いた総ドロップ数を示す。地震による振動、レーザー電圧、除振装置などの不安定、天候不良による明らかにばらつきの大きいデータは取り除いている。gは採用したドロップの全てを平均して求めた重力値で、errorはその標準誤差、s.d.はドロップ毎の重力値に対する標準偏差を意味する。表には、機械の故障によりやむを得ず24時間分のドロップ数を確保できなかった場合の観測結果も参考として示している(2012年2月、ドライブベルトの異常のため正常なデータのみを用いて重力値を算出した)。表2から、標準誤差は、ほとんどの場合1microGal未満であり、良好なデータが得られていることが分かる。

解析ソフトウェアはFG5付属の“g8”を用いた。各種補正に用いたパラメータは、次のとおりである。潮汐補



Fig. 2. (Upper) FG5#241 in the Omezaki observation station. (Middle) FG5#109 in the Toyohashi crustal movement observation station. (Bottom) Kikugawa crustal movement observation station.

正には Schwiderski のモデルを用いた。気圧の変化はFG5内臓の気圧計で測定した値に0.3microGal/hPaのアドミッタンスを乗じて補正し、表1に示した各観測点の標準大気圧における重力値に換算した。極運動はIERSのBulletin Aに掲載されたパラメータを用いて補

Table 1. A description of the observation sites.

Site	Longitude (deg)	Latitude (deg)	Elevation (m)	Pressure (mBar)	dg/dz (microGal/cm)
Omaezaki	138.22890	34.60060	6.00	1012.53	-2.545
Toyohashi	137.47000	34.76000	76.00	1004.15	-2.699
Kikugawa	138.07428	34.72667	66.00	1005.35	-3.145

正した。これらの補正モデルの誤差と設置誤差、機械の持つ系統誤差は上に述べた標準誤差には含めていない。これらを加えると、重力値の確度は大体 1-2 microGal となる。

3. 観測結果

図 3 は表 2 の重力値を時系列にプロットしたものである。絶対重力値は、表 1 の重力勾配を用いて基準標から 130 cm の高さにおける値に直してある。エラーバーは表 2 の標準誤差に対応している。

時系列重力データの経年変化を最小二乗法で求める。表 3 の一番右の列にトレンドと標準誤差を示す。御前崎では、年間約 0.5 microGal の増加が見られる。図の直線はこの変化率と対応している。重力が増加していることはプレート沈み込みに伴う沈降と調和的である。しかし、御前崎験潮所の長期の記録から求めた沈降速度は 7.8 mm/yr であり、ブーゲー勾配を地殻の平均密度を 2.67 g/cm³ として求めた重力の経年変化率は、-2 microGal/cm を乗じて 1.6 microGal/yr となる（国土地理院・東京大学地震研究所（2012））。これは、地下での質量欠損が年間 1.1 microGal 分だけ蓄積していることを意味する。国土地理院でも同じ観測点で FG5 による観測を実施しており、地震研と国土地理院の両者の観測値を合わせて求めたトレンドは 1 microGal/yr となる（国土地理院・東京大学地震研究所（2012））。いずれの場合でも、実測された重力の経年変化は、誤差を考慮してもなお沈降から期待される重力増加率より小さい。なお、上下変動は連続観測されているので、経年変化の誤差は平均をとると無視できるほど小さくなるので表 3 には示していない。ただし、重力変化に換算する際は地殻密度の不均質が最大 10% あったとして誤差を示している。以下の GPS の場合も同じである。

豊橋では重力値は観測開始から現在までの全データを平均すると、年間 0.9 microGal の割合で減少している。豊橋付近では、2000 年から浜名湖周辺で始まったスロースリップによる隆起が GPS により観測されている。そこで、隆起速度の大きかった 2006 年までとそれ以降と

に分けて重力の変化速度を求めると、最確値はそれぞれ -2.8, -0.29 microGal/yr となり、後者の速度が 10 分の 1 となる。図 3 の折れ線はそれぞれの傾きと対応している（より期間の長い 2006 年以降の直線を先に求めて接続したために、2006 年までの直線はやや上の方に位置しているが、ここでは変化率に着目しているので重要ではない）。表 3 の右から 2 番目の列に、それぞれの期間に対して湖西の電子基準点 94104 の上下変動のデータから同じブーゲー勾配を仮定して求めた重力変化速度を示す。観測された重力変化速度の誤差を考慮すると、2006 年までの重力減少はこの隆起により説明できることが分かる。しかし、2006 年以降では、観測された重力の減少の割合が地殻変動から期待されるよりやや小さく、質量の増加が起きた可能性があるが、原因は明らかになっていない。2011 年 2 月の観測の直後には 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震が発生している。コサイスマミックな変化を調べるために 3 月末に観測を行ったが、その差は 0.1 microGal であり、変化は小さかったことが分かる（表 2）。

菊川では御前崎と同様、重力は増加しており、沈降による重力増加と調和的である。小笠の電子基準点 960622 の日々の標高変化から求めた重力変化の割合を表 3 に示す。菊川では御前崎と異なり、実測した重力増加率は最確値を見ると沈降によるものよりも大きく、地下で質量増加が起きている可能性もある。ただしデータがまだ少なくばらつきが大きいため、経年変化の見積もりにはデータのさらなる蓄積が必要である。

4. まとめと今後の課題

東海地方における絶対重力変化について、観測方法と結果について報告した。御前崎、菊川ではプレート沈みこみによる沈降と調和的な重力変化が観測されているが、定量的には御前崎では質量の欠損、菊川では過剰が蓄積している可能性がある。豊橋の重力変化は減少が続いており、2006 年までのデータは隆起により説明できるが、2006 年以降の重力変化については観測点の隆起だけで説明できない質量の増加が生じている可能性がある。地殻変動から推定される変化からのずれを明らかにする

Table 2. Absolute gravity changes observed in the Tokai area (microgalGal).

Site	Year	DOY		sn#	N (drops)	g	error	s.d.	remark
Omaezaki	1996	327	330	109	6,467	979752083.0	0.6	45.1	
	1997	193	196	109	15,937	979752086.5	0.5	68.4	
	1997	335	337	109	5,585	979752086.2	1.0	73.3	
	1998	272	274	109	7,564	979752088.7	0.8	66.7	
	1999	61	63	109	6,813	979752084.8	0.3	25.5	
	1999	270	273	109	8,318	979752086.3	0.3	23.2	
	2000	29	32	109	11,468	979752085.5	0.2	25.6	
	2000	80	82	109	6,809	979752086.3	0.4	34.0	
	2004	59	61	109	11,263	979752090.3	0.2	23.2	
	2004	261	263	212	11,892	979752086.0	0.1	12.2	
	2005	51	54	109	11,455	979752087.6	0.0	21.4	
	2005	185	188	109	10,072	979752085.0	0.0	40.1	
	2006	228	230	109	10,563	979752086.3	0.0	41.1	
	2009	299	302	212	13,363	979752090.1	0.2	27.7	
	2010	278	279	241	7,367	979752094.2	0.2	14.6	
	2011	85	87	241	9,121	979752091.2	0.3	25.8	
	2011	269	271	241	9,957	979752097.5	0.3	30.9	
Toyohashi	2004	62	64	109	11,752	979729151.7	0.1	7.6	
	2004	264	266	212	9,516	979729152.3	0.1	5.9	
	2005	54	56	109	9,658	979729147.3	0.2	14.7	
	2005	188	188	109	2,990	979729150.1	0.4	19.7	
	2006	27	29	109	11,634	979729146.4	0.1	15.1	
	2006	231	233	109	8,651	979729146.7	0.1	9.3	
	2007	36	38	109	9,519	979729141.3	0.2	18.5	
	2008	45	47	109	8,845	979729147.8	0.2	19.8	
	2008	318	320	212	9,197	979729142.8	0.2	18.2	
	2010	35	37	241	6,879	979729145.1	0.2	14.9	
	2011	31	33	109	4,452	979729144.4	0.3	17.3	
	2011	82	84	241	8,923	979729144.5	0.2	17.9	
	2012	62	63	109	394	979729143.1	1.3	26.3	Drive belt
Kikugawa	2008	42	45	109	12,042	979734353.3	0.2	23.0	
	2008	321	323	212	9,520	979734357.0	0.2	17.6	
	2010	32	34	241	12,616	979734349.6	0.4	39.3	
	2010	280	281	241	8,591	979734358.9	0.3	27.8	
	2011	272	274	241	9,411	979734360.4	0.4	34.9	
	2012	58	59	109	1,039	979734358.6	0.6	17.7	Drive belt

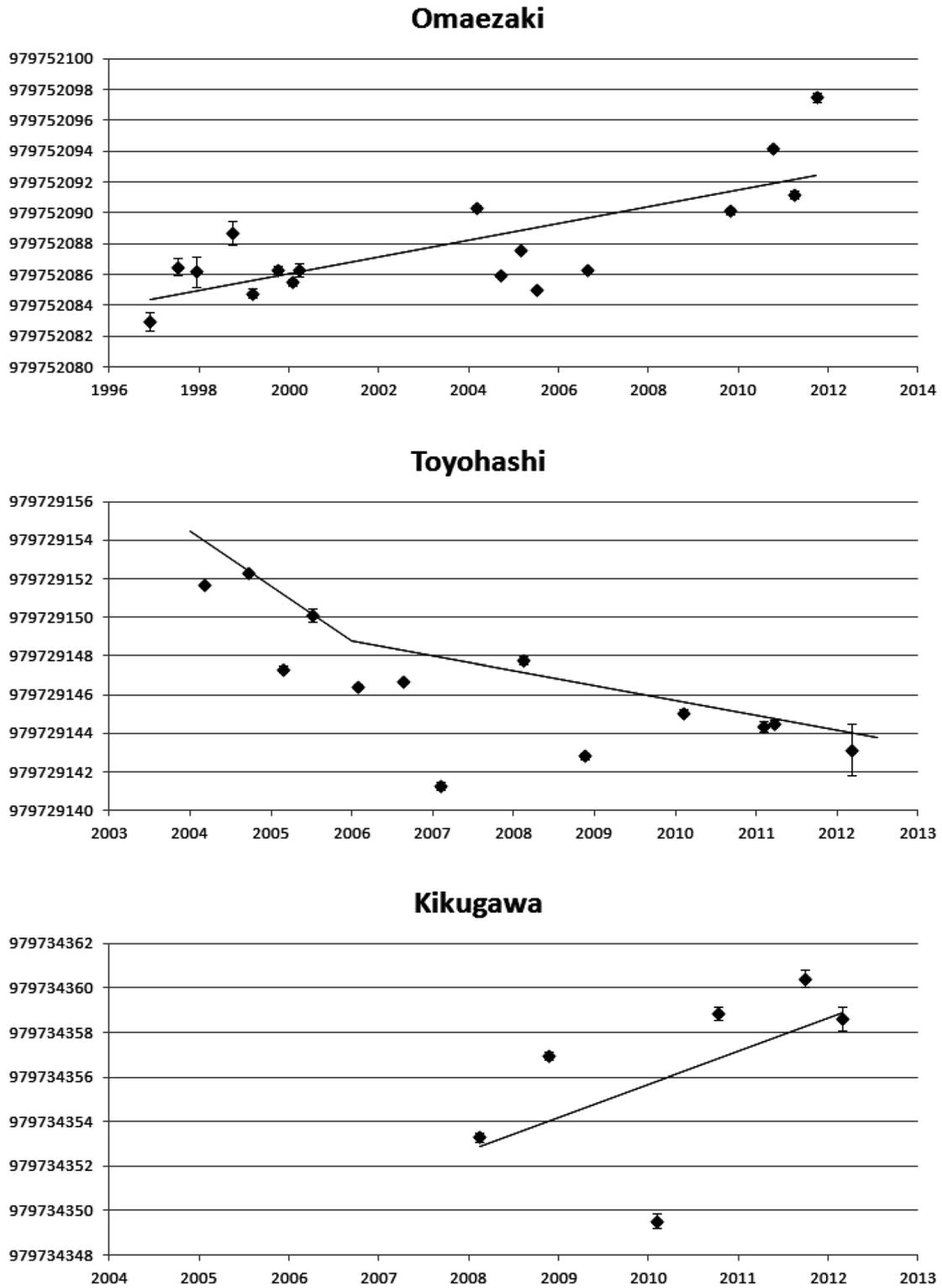


Fig. 3. The observed absolute gravity changes. The unit is microGal.

ためには、ノイズとなる地下水による重力変化の観測及び補正が重要であり、従来の経験的手法に加え、物理モデリングによる地下水補正 (Kazama and Okubo (2009)) に取り組んでいく予定である。スロースリップによる流

体移動のモデリングもさらに高度化していく予定である。モデルを高度化するためには、東海地方以外のスロースリップとの比較観測が有効であり、現在、八重山地方のスロースリップを対象とした観測研究も開始して

Table 3. Secular trends in crustal uplift/subsidence and gravity change.

site	GPS/tidal gauge (cm/yr)	GPS/tidal gauge (microGal/yr)	FG5 (microGal/yr)
Omaezaki 1996–2012	-0.78	+1.6±0.2	+0.54±0.12
Toyohashi 2004–2006	+1.7	-3.4±0.3	-2.8±1.3
Toyohashi 2006–2012	+0.42	-0.84±0.1	-0.29±0.33
Kikugawa 2008–2012	-0.25	+0.5±0.1	+1.5±1.1

いる。東北地方太平洋沖地震の余効変動による重力変化の評価と除去も、東海地方の重力変化のうちプレート境界に起因する変動を抽出するために必要である。以上のような課題を解決し、沈み込み帯で起きる物理過程を明らかにし、モニタリングのさらなる強化につなげていきたいと考えている。

謝 辞

観測局舎及び GEONET の GPS データの使用にあたり名古屋大学及び国土地理院に感謝の意を表します。

文 献

Kazama, T. and S. Okubo (2009): Hydrological modeling of groundwater disturbances to observed gravity: Theory and application to Asama Volcano, Central Japan. *J. Geophys. Res.*, **114**, B08402, doi:10.1029/2009JB006391.

国土地理院・東京大学地震研究所, 御前崎における絶対重力変化, 地震予知連絡会報, **87**, 322–322, 2012.

Mazzotti, S., A. Lambert, N. Courtier, L. Nykolaishen, and H. Dragert (2007), Crustal uplift and sea level rise in northern Cascadia from GPS, absolute gravity, and tide gauge data, *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L15306, doi:10.1029/2007GL030283.

Okubo, S., S. Yoshida, T. Sato, Y. Tamura, and Y. Imanishi, Verifying the precision of a new generation absolute gravimeter FG5-Comparison with superconducting gravimeters and detection of oceanic loading tide, *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 489–492, 1997.

Tanaka, Y., A. Kato, T. Sugano, G. Fu, X., Zhang, M. Furuya, W. Sun, S. Okubo, S. Matsumoto, M. Honda, Y. Sugawara, I. Ueda, M. Kusaka and M. Ishihara, Gravity changes observed between 2004 and 2009 near the Tokai slow-slip area and prospects for detecting fluid flow during future slow-slip events, *Earth Planets Space*, **62**, 905–913, 2010.

(Received January 16, 2013)

(Accepted February 28, 2013)