HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	SCINTREX CG5相対重力計S/N130141025の検定（その１）： 道内重力点での検定測定
Author(s)	高橋, 浩晃; 重藤, 迪子; 山口, 照寛 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 77, 15-23
Issue Date	2014-03-19
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.77.15
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/55264
Type	departmental bulletin paper
File Information	77_03_P15-23.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学地球物理学研究報告
Geophysical Bulletin of Hokkaido University, Sapporo, Japan
No. 77, March 2014, pp. 15－23

論説

SCINTREX CG5 相対重力計 S/N130141025 の検定（その１）：道内重力点での検定測定

高橋　浩晃・重藤　迪子・山口　照寛
北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター
岡崎　紀俊
地方独立行政法人北海道立総合研究機構本部

（2013 年 1 月 17 日受理）

Calibration of SCINTREX CG5 Gravimeter S/N130141025 (No.1): Gravity Measurements for Calibration in Hokkaido

Hiroaki TAKAHASHI, Michiko SHIGEFUJI and Teruhiro YAMAGUCHI
Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science,
Hokkaido University
Noritoshi OKAZAKI
Hokkaido Research Organization

(Received January 17, 2014)

Relative gravity measurements with SCINTREX CG5 gravimeter S/N130141025 for instrument calibration were carried out at fundamental, first order gravity benchmarks, and triangulation point in Hokkaido. Observed relative gravity value between ObihiroFGS and ShintotsukawaFGS by CG5 was 76 mGal, which is same as that of value determined by Geospatial Information Authority of Japan in the order of 10^{-4}. Estimated correction coefficient was 1.00020. Simultaneous measurement by three gravimeters at Teine triangulation point showed 231 mGal relative gravity value from MinamiShinkawa benchmark within 0.120 mGal difference between instruments. This suggested that estimation of correction coefficients for several hundreds to a thousand mGal difference should be conducted for precise calibration. Drift rate fluctuation shown in continuous measurement data also should be evaluated in future.

Ⅰ．は　じ　め　に

地震火山研究観測センターでは 2013 年度に SCINTREX　CG5 相対重力計　S/N130141025 を整備した．CG5 相対重力計は，錘を吊るした溶融水晶で作られたゼロ長ばねの重力変化による伸びに対し，サーボ回路でフィードバックをかけ錘の位置を常に一定とする際に印加する電圧値を重力変化として検出するものである（応用地質株式会社，2010）．電圧値に重力計定数（スケール係数，スケール定数，SCINTREX では Gravity　constant　GCAL1 と表示）をかけることにより重力変化量が算出される．

重力計定数は，ゼロ長ばね―錘システムの重力変化による変位を重力値に換算する根幹的な役割を果たすものである．ばねや錘，電子回路を構成するパーツ等は，同じ規格とはいえわずかながら個体差があり，これが重力計定数の違いを生じさせる．このため，重力計定数は S/N ごとに異なる．

メーカーが提供している重力計定数は，カナダのトロントにある長さ 70 km 重力差 119 mGal の検定基線での測定により算出されたものである（応用地質株式会社，2010）．メーカーの校正基線の重力差（119 mGal）を超えるような大きな重力差をもつ測定を行った場合は，メーカーが提供する重力計定数を外挿して適用していることになる．しかし，その線形性は保証されているものではない（鵜川ほか，2006）．また，ゼロ長ばねの弾性性質や電気回路特性は経年変化するため，それに伴って重力計係数も経年変化する．このため，重力値には製造からの経過時間に相関する系統的なドリフトが加わってくることが予想される．重力計定数の経年変化による影響を補正するため，定期的な検定で重力計定数の時間的変化を把握し，測定日時に応じた適当な補正係数を与えることが望ましい（中川ほか，1977，里村ほか，2005，鵜川ほか，2006，楠本ほか，2008）．

高精度の重力測定値を得るためには，絶対重力測定点間や，重力差が大きな基線，高度差が大きな基線での検定測定を定期的に実施し，重力計定数の時空間的特性を把握して補正係数を求めておくことが望ましい．今回，これらの検定を目的とする重力測定を道内で実施したので，その結果を報告する．

Ⅱ．重力測定と補正係数

CG5 は 6 Hz サンプリングの生データから 1 秒ごとに 1 サンプルの測定値を算出している．今回の測定では，60 サンプル（60 秒）または 120 サンプル（120 秒）の平均値から得られる測定値と標準偏差を 1 回分の測定値とした．各重力点で複数回（2－3 回）の測定を行いその平均値を重力値とした．長時間の測定を行った場合には，機器が安定していると思われる最後 3 回分の平均値をもって測定値とした．傾斜と温度は重力計内部で自動的に補正される．器高補正はフリーエア補正値（0.3086 mGal/m）とし，固体地球潮汐の補正には中井（1979）を，海洋潮汐の補正

には NAO99b+NAO99Jb モデル（Matsumoto et al., 2000）と GOTIC2（Matsumoto et al., 2001）を用いた．GOTIC2 の README_GOTIC2_041025_Jp ファイルには GOTIC2 の固体潮汐予測は十分の精度が確保できてないとの説明があるため，GOTIC2 では海洋潮汐の予測のみを実施した．今回利用した重力点は内陸部にあるため，海洋潮汐の影響は概して小さく数マイクロ Gal 以下であった．また，気圧補正は実施していない．測定は札幌 GS または南新川を起点とする往復測定とし，起点での重力値は測定前後で同じとして線形回帰係数を求め，各点の測定時刻に乗じた補正値を測定値に加えることでドリフト補正を行った．

１．基準・一等重力点との結合

北海道大学総合博物館にある札幌 GS 一等重力点と基準重力点・一等重力点を結ぶ測定を実施した．国土地理院により，基準重力点である新十津川 FGS と帯広 FGS 点で絶対重力測定が実施されている．また，一等重力点である帯広・札幌 GS の重力値は，直近の観測データから近傍の基準重力点を固定した網平均計算により与えられている（Table 1）．絶対重力測定値がある基準重力点間で相対重力値を求めることにより，メーカーより与えられている重力計定数の検定を行うことが可能である（中川ほか，1977，里村ほか，2005，鵜川ほか，2006，楠本ほか，2008）．

測定は 2013 年 6 月 18-19 日で実施した．札幌 GS を起点として重力点を結びその日のうちに再び札幌 GS に戻り測定を実施した．ドリフトの補正係数はそれぞれの日で別々に推定した．Table 2 に潮汐補正を行った測定値とドリフト補正加えた重力値を示す．また，Table 3 には国土地理院による各重力点での重力値と重力差，および今回の測定による重力差を示した．

国土地理院による新十津川 FGS と帯広 FGS の重力値は絶対重力計で測定されたものであるので，ここではこれらの値は正しいものであると仮定する．絶対重力測定による重力差と CG5 に

Table 1. Gravity point and absolute gravity value by GSI

	Latitude (deg)	Longitude (deg)	Altitude (m)	Gravity value by GSI (mGal)	Measurement date by GSI	Remarks
SapporoGS (札幌 GS)	43.0733	141.3400	15	980 477.533		Estimated by net adjustment
MinamiShinkawa (南新川地震観測点)	43.0873	141.3305	10			
TeineSankakuten (手稲山頂三角点)	43.0768	141.1926	1023			
ObihiroGS (帯広 GS)	42.9225	143.2130	39	980 418.149		Estimated by net adjustment
ObihiroFGS (帯広 FGS)	42.8735	143.1713	77	980 419.0772	2007/7/1	FS5#203
ShintotsukawaFGS (新十津川 FGS)	43.5288	141.8446	83	980 495.564	2007/8/1	FG5#203

*GSI：Geospatial Information Authority

Table 2. Gravity values with tidal and drift correction in June 2013 measured by CG5

Observation name	Gravity point	Date/Time(JST)	Gravity value with tidal correction	SD	Gravity value with tidal and drift correction	Gravity value relative to SapporoGS
Obihiro (帯広測線)	SapporoGS (札幌GS)	2013/6/18 7:08	4626.521	0.090	4626.521	
	MinamiShinkawa (南新川地震観測点)	2013/6/18 7:40	4628.356	0.121	4628.349	1.828
	ObihiroGS (帯広GS)	2013/6/18 11:39	4567.184	0.053	4567.129	-59.393
	ObihiroFGS (帯広FGS)	2013/6/18 13:46	4568.144	0.044	4568.062	-58.459
	MinamiShinkawa (南新川地震観測点)	2013/6/18 16:35	4628.455	0.081	4628.339	1.818
	SapporoGS (札幌GS)	2013/6/18 17:12	4626.645	0.045	4626.521	
Shintotsukawa (新十津川測線)	SapporoGS (札幌GS)	2013/6/19 8:30	4626.917	0.052	4626.917	
	MinamiShinkawa (南新川地震観測点)	2013/6/19 8:53	4628.736	0.081	4628.733	1.816
	ShintotsukawaFGS (新十津川FGS)	2013/6/19 13:00	4644.975	0.027	4644.930	18.013
	MinamiShinkawa (南新川地震観測点)	2013/6/19 15:35	4628.799	0.115	4628.728	1.812
	SapporoGS (札幌GS)	2013/6/19 16:22	4626.996	0.069	4626.917	
Teine (手稲山頂測線)	SapporoGS (札幌GS)	2013/6/17 8:45	4626.189	0.122	4626.189	
	MinamiShinkawa (南新川地震観測点)	2013/6/17 9:25	4628.002	0.167	4627.997	1.808
	TeineSankakuten (手稲山頂三角点)	2013/6/17 10:48	4415.434	0.038	4415.420	-210.769
	MinamiShinkawa (南新川地震観測点)	2013/6/17 12:42	4628.028	0.116	4628.002	1.813
	SapporoGS (札幌GS)	2013/6/17 13:21	4626.219	0.105	4626.189	

unit: mGal

よる差の違いは 0.015 mGal であり，メーカーによる重力計定数に対する補正係数は 1.00020 と 10^{-4} オーダーとなる（Table 3）．つまり，CG-5 で測定された重力差にこの補正係数を掛けることで，絶対重力計測定による重力差と同じ値が得られる．この補正係数は，里村他（2005）により推定された LaCoste ＆ Romberg G 型重力計 4 台の補正係数（0.99918 から 1.00027）と同じオー

Table 3. Gravity difference between benchmarks. Gray cells indicate absolute gravity measured and estimated by GSI

	Model/Method	ShintotsukawaFGS（新十津川 FGS）	ObihiroFGS（帯広 FGS）	ObihiroGS（帯広 GS）	SapporoGS（札幌 GS）
Shintotsukawa FGS（新十津川 FGS）	FG-5 CG-5	980495.564			
ObihiroFGS（帯広 FGS）	FG-5	76.487			unit：mGal
	CG-5	76.472	980419.077		
	Difference	0.015			
	Correction coefficient	1.00019			
ObihiroGS（帯広 GS）	Net adjustment	77.415	0.928		
	CG-5	77.404	0.934	980418.149	
	Difference	0.011	-0.006		
	Correction coefficient	1.00014	0.99379		
SapporoGS（札幌 GS）	Net adjustment	18.031	-58.456	-59.384	
	CG-5	18.013	-58.459	-59.393	980477.533
	Difference	0.018	0.003	0.009	
	Correction coefficient	1.00100	0.99995	0.99985	

FG5：Absolute gravimeter FG5
CG5：Relative gravimeter CG5
Net adjustment：Estimated by net adjuestment using nearby absolute gravity value
GSI：Geospatial Information Authority
Correction coefficient is dimensionless

ダーであり，楠本他（2007）による Zero Length Spring BurrisB-19 重力計（1.02309）より 2 桁小さい．今回 CG5 で測定された重力差は，国土地理院が網平均で求められた札幌 GS や帯広 GS の重力値を含めた比較でもすべてが 0.020mGal 以内，補正係数も帯広 GS と帯広 FGS 間と札幌 GS と新十津川 FGS 間を除き 10^{-4} オーダーであった（Table 3）．

今回実施した重力点間の差は最大で 76mGal とメーカーの検定基線の重力差の範囲内であるため，10^{-4} オーダーという比較的良好な補正係数が推定された可能性がある．しかし，この結果は大きな重力差測定での精度を保証するものではない．今後，より大きな重力差をもつ検定測線での補正係数の検討が必要である．

２．手稲山三角点での測定

手稲山三角点の標高は 1023.1 m で札幌 GS との標高差が 1008 m あり，フリーエア勾配（0.3086 mGal/m）による重力差は 311 mGal になる．このため，短基線で大きな重力差をもつ検定基線として設定し，北大所有の CG5 S/N130141025 に加え地方独立行政法人北海道総合研究機構地質研究所所有の CG5 S/N090640552 と CG3M S/N9601331 による往復測定を 2013 年 6 月 17 日に実施した．

Table 4. Gravity values using linear drift correctoin refering to MinamiShinkawa

	CG5 S/N130141025 (Hokkaido Univ.)		CG5 S/N090640553 (GSH)		CG3M S/N9601332 (GSH)	
Gravity point	Date/Time (JST)	Gravity (mGal)	Date/Time (JST)	Gravity (mGal)	Date/Time (JST)	Gravity (mGal)
SapporoGS (札幌 GS)	2013/6/17 8:45	4626.190				
MinamiShinkawa (南新川地震観測点)	2013/6/17 9:25	4627.997	2013/6/17 9:37	4599.384	2013/6/17 9:44	7018.967
TeineSankakuten (手稲山頂三角点)	2013/6/17 10:48	4415.418	2013/6/17 10:57	4386.682	2013/6/17 11:09	6806.352
MinamiShinkawa (南新川地震観測点)	2013/6/17 12:42	4627.997	2013/6/17 12:51	4599.384	2013/6/17 12:58	7018.967
SapporoGS (札幌 GS)	2013/6/17 13:21	4626.183				

Tidal and drift corections were processed.
GSH: Geological Survey of Hokkaido

測定結果を Table 4 に示す．ドリフト補正は 3 つの重力計の比較ができる南新川を起点として線形近似で行った．手稲山三角点との重力差は標高差を反映して南新川 GS とでは −213 mGal，札幌 GS とでは −211 mGal となった．これは，メーカーが重力計定数の算定に用いた検定基線を 100 mGal 上回る重力差である．

Table 5. Relative gravity values between Minami-Shinkawa and TeineSankakuten

CG-5 S/N130141025 Hokkaido Univ	−212.579
CG5 S/N090640553 GSH	−212.702
CG-3M S/N9601332 GSH	−212.615

unit: mGal
*GSH: Geological Survey of Hokkaido

重力計ごとの差を見ると，北大 CG5 − 地質研 CG5 が最大で 0.123 mGal，北大 CG5 − 地質研 CG3M が 0.036 mGal，地質研 CG5 − 地質研 CG3M が 0.087 mGal で，1 mGal の重力差あたり 0.00056（10^{-4}）の差異が生じていることを示す（Table 5）．一方，基準重力点間測定で求められた北大 CG-5 の補正係数（1.00020）からは 213 mGal の重力差で 0.043 mGal の誤差が生じる可能性が推定され，北大 CG5 − 地質研 CG3M の差（0.036 mGal）はこの範囲内に入っている．この補正係数は 76 mGal の重力差から求められたもので，200 mGal を超える重力差をもつ本基線にそのまま適用してよいかは検討されるべきである．また，このような重力差をもつ基線で 0.01 mGal の精度を達成するためには，10^{-5} オーダーの補正係数が必要であり，より大きな重力差をもつ検定基線での補正係数の検討が必要である．

Ⅲ．短期間連続測定に見られるドリフト特性

帯広 GS，帯広 FGS，新十津川 FGS では数 10 分から 2 時間程度の連続測定を行った．Figure 1 に潮汐補正ありドリフト補正なしの重力値の時系列を示す．これから得られる線形近似式と相関係数も示した．

ドリフトは帯広 GS が最も大きく，時間とともにその傾きが小さくなるようにも見える．測定開始から時間が経つとドリフトレートが小さくなる傾向は新十津川 GS でも見られるが，全体的なドリフトレートは帯広 GS の半分以下である．帯広 FGS では測定値に「とび」のようなアウトライヤーが見られる．

帯広 GS は帯広測候所の地震計台に設置されているため，重力計設置条件は非常に良いが，都市中心部にあるため車両などのノイズの影響が大きい．帯広 FGS は帯広畜産大学土木工学実験室恒温恒湿室内にあるが，同じ建屋内で実習などが行われていてノイズとなった可能性がある．帯広は厚い堆積層が存在することが知られ（Matsushima and Okada, 1990），常時微動や表面波の増幅などの影響で定常的にノイズレベルが高い可能性がある．一方，新十津川 FGS は比較的良好な地盤である段丘面上に建設された国土地理院宇宙測地観測場にあり，安定した器台に加え周辺部は静寂な山林で測定環境は非常に良好である．このような周辺環境の違いが測定に大きな

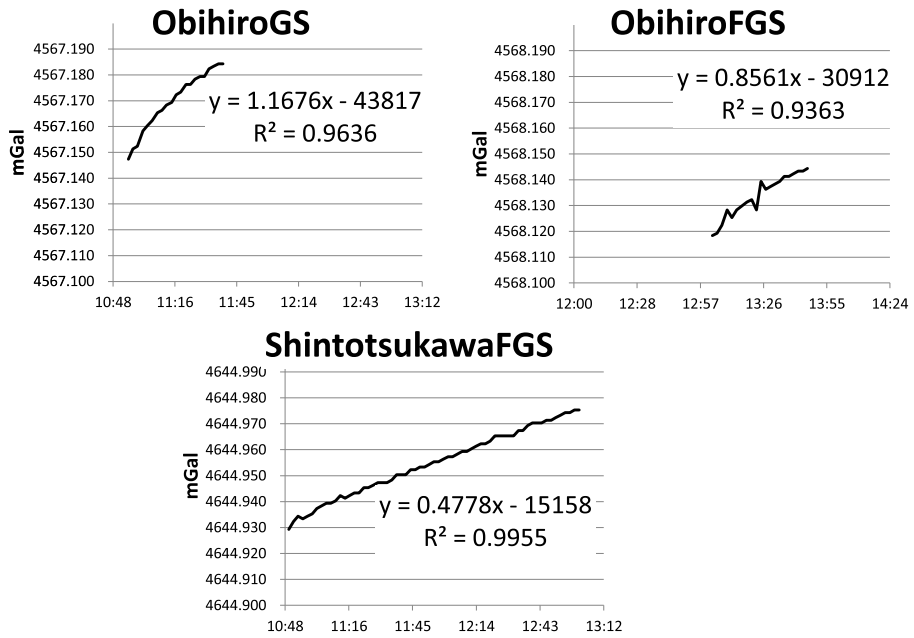

Fig. 1. Continuous measurements by CG5 and linear regression with tidal correction.

影響を与えていることは十分に考えられる．

通常，ドリフト補正は一定のレートを仮定して行っているが，連続測定の結果はドリフトレートが時空間変化している可能性を示唆している．現時点では，ドリフトレートの減衰を引き起こす機構については不明であるが，高精度のドリフト補正のためには様々な外的内的パラメーターとの関係について検討することが必要である．

Ⅳ．ま と め

SCINTREX CG-5 相対重力計 S/N130141025 の特性を検討するため，道内の基準・一等重力点および標高差のある手稲山での検定測定を実施した．重力差 76 mGal の基線においての比較では 0.015 mGal で絶対重力測定結果との一致が見られ，メーカーから与えられている重力計定数による重力差に対する精度は 10^{-4} オーダーが確保されていることが確認された．ただし，これは 76 mGal という限られた重力差における結果であることに注意が必要である．短距離で大きな重力差をもつ基線として手稲山三角点で 3 台の重力計による検定測を実施し，南新川との間で 213 mGal の重力差が検出されたほか，利用した重力計間で最大で 0.124 mGal の差が検出された．今後，数 100-1000 mGal 程度までの重力差を持つ基線において重力計定数の検定を行って幅広い帯域での補正係数を求めるとともに，その時間変化を管理することが必要である．数時間程度の連続観測から，ドリフトレートに非線形の時間変化がある可能性が見出された．高精度なドリフト補正のために，ドリフトレートを支配する内的外的要因の検討が望まれる．

謝辞　基準重力点および一等重力点での測定にあたっては，国土地理院測地部物理測地課重力係吉田賢司氏，国土地理院新十津川宇宙測地観測場看守小林喜代治氏，気象庁帯広測候所，帯広畜産大学辻修教授にお世話になりました．東濃地震科学研究所本多了博士から測定値の扱いについてご教授を受けました．北海道総合研究機構地質研究所田村慎研究主任には重力計の情報を提供して頂きました．記して感謝の意を表します．

文　献

Matsumoto, K., T. Takanezawa and M. Ooe, 2010. Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: A global model and a regional model around Japan, J. Ocean., 56, 567-581.

Matsumoto, K., T. Sato, T. Takanezawa and M. Ooe, 2001. GOTIC2: A Program for Computation of Oceanic Tidal Loading Effect, J. Geod. Soc. Japan, 47, 243-248.

Matsushima T., and H. Okada, 1990. Determination of Deep Geological Structures under Urban Areas Using Long-Period Microtremors, Geophysical Exploration, 43, 1, 21-33.

中川一郎・里村幹夫・福田洋一・中井新二・瀬戸孝夫・大島和雄・井上登・萩原幸男・田島広一・井筒屋貞勝・柳沢道夫・花田英夫・友田好文・藤本博巳・古田俊夫・大川史郎，1977．ラコステ重力計 G 型の定数検定，測地学会誌，23，63-73．

中井新二，1979．実用的な起潮力プログラム，1979．緯度観測所彙報，18，124-135．

日本測地学会，現代測地学，1994．611pp．
応用地質株式会社，2010．自動重力計 CG-5 取扱説明書 18991-0655Rev. 1．
里村幹夫・渡辺みのり・大久保修平・楠本茂寿・植木貞人，2005．富士山周辺の精密重力測定，静岡大学地球科学研究報告，32，1-12．
鵜川元雄・藤田英輔・上田英樹・野崎京三・岩本鋼司，2006．Scintrex CG-3M 型重力計で測定された小笠原硫黄島の重力変化，測地学会誌，52，37-50．