

可搬型絶対重力計 FG5 による南極における重力測定 (Ⅲ) Gravity Measurements with the Portable Absolute Gravimeter FG5 at Antarctica (Ⅲ)

測地部 平岡喜文¹・木村 勲

Geodetic Department Yoshifumi HIRAOKA and Isao KIMURA

京都大学大学院理学研究科 福田洋一¹

Graduate school of Science, Kyoto University Yoichi FUKUDA

国立極地研究所 土井浩一郎¹・澁谷和雄

National Institute of Polar Research Koichiro DOI and Kazuo SHIBUYA

要 旨

第 45 次日本南極地域観測隊(JARE-45)は, 2003 年 12 月末から約 1 ヶ月間にわたり, 可搬型絶対重力計 FG5 (以下, FG5) を用いて, 昭和基地において絶対重力測定を行った. これは, FG5 を用いた昭和基地における測定としては 1994-95 年の JARE-36, 2000-01 年の JARE-42 に続き 3 回目となる測定である. その結果, 過去 10 年間で重力値の減少傾向が検出された.

昭和基地では写真-1 に示す施設において, VLBI や GPS による地殻変動観測が定常的に行われている. それらによると, 昭和基地では地盤の隆起傾向が検出されており, 重力値の減少傾向は地盤の上下変動と調和した傾向である.



写真-1 昭和基地の測地観測施設

右の銀色の建物が重力計室, 中央の黒いドーム内に VLBI 観測にも利用されている多目的アンテナ, 多目的アンテナの左下に見える銀色の屋根が地震計室, 左のピラーが国際 GNSS 事業 (IGS) に登録されている GPS のアンテナ.

1. はじめに

昭和基地における測地観測は, 近年の測定機器の精度向上により測定の意味が変化してきている. 位置を求めるための測量を例にとると, 昭和基地開設

当初は天文測量や三角測量であったが, その後人工衛星を利用した NNSS が開発され, さらに現在は GPS や VLBI 等に移行している. 測定機器の変遷とともに測定精度も大きく向上し, 現在の GPS や VLBI はミリメートルの精度にまで達している. ミリメートルの精度が達せられると, 測定の目的はもはや正しい位置座標を追い求めることだけではなく, 位置座標の時間変化を追うことに発展している.

重力測定も例外ではない. 昭和基地開設当初に使用していた重力振子は, 測定精度がおおよそ数百 μ Gal [1μ Gal = 1×10^{-8} m/s²] であったが, 現在, 絶対重力測定で使用している FG5 は測定精度がおおよそ 2μ Gal である. 2μ Gal の重力変化はフリーエア勾配を仮定すると, 1 cm 弱の上下変動に相当し, たとえば地盤の上下変動に伴う重力変化を追うことも可能になった.

2003-04 年の JARE-45 では, 昭和基地における FG5 を用いた測定としては 3 回目となる絶対重力測定を行った. 本稿では JARE-45 による測定の紹介と, これまでの測定結果から得られた重力値の経年変化について考察する.

2. 昭和基地における重力測定の歴史

昭和基地における最初の本格的な測定は, 1961-62 年の JARE-6 により, 国土地理院が所有する国土地理院型重力振子を用いて行われた (Harada et al., 1963). 当時, 天測点の北側にあった基地建物の「富士見の間」と呼ばれる部屋から北に約 20m 離れた地点 (現在の居住棟付近) の露岩上において測定が行われ, 東京 (目黒) を基準とした重力値が決定された. 測定地点には金属標が設置され, その後に行われた多くの重力測定で基準点として利用された.

1987 年に行われた国際測地学協会 (IAG) の総会で, 国際絶対重力基準点網 (IAGBN) の設置が提案され, 36 点から構成されるサブセット A の 1 つに昭和基地が選択された. それを受けて, 1991 年には JARE-32 により, 重力測定を行うための専用の施設である「重力計室」が建設された. 翌 1991-92 年には JARE-33

¹ 第 45 次日本南極地域観測隊

¹ The 45th Japanese Antarctic Research Expedition

により, 昭和基地では初めてとなる絶対重力測定を, 国土地理院が所有する佐久間式絶対重力計 (JAEGER GA60) を用いて行われた (藤原他, 1992). 翌 1992-93 年には JARE-34 により, 国立天文台水沢が所有する国立天文台 2 号機 (NAOM2) と真空筒回転式 (AGRPV2) の 2 台を用いて絶対重力測定が行われた (Tsubokawa et al., 1994) (Hanada et al., 1994).

FG5 を用いた最初の測定は, 1994-95 年の JARE-36 により, 国土地理院が所有する FG5 (#104) を用いて行われた (山本, 1996). 測定では最終調整過程において, 地盤振動補償装置 (スーパースプリング) の主スプリングを釣るワイヤーを切断するトラブルに見舞われたが, ギターの弦を代替品として用いることで修復に成功し, 21 日間の測定に成功している.

当時の FG5 には, 干渉縞のアナログ信号をデジタル信号に変換するコンパレーター (AMD686) に干渉縞の強度に依存した時間遅延があった (Niebauer et al., 1995). 干渉縞の強度から重力値に換算すると $-12.7 \mu\text{Gal}$ の補正が必要であり, この補正を加えた値を最終結果としている (Kaminuma et al., 1997).

第 2 回目の測定は, 2000-01 年に JARE-42 により, 国土地理院所有の FG5 (#203) を用いて行われた (木村, 2002). 測定は 12 月下旬から開始されたが, 重力計室では同時期に超伝導重力計に必要となるヘリウムガスの液化作業も行われた. このため室温の変化が激しく, 換気扇により温度調節を行ったが調節が難しく, 室温が 30°C を超えることもあり, また逆に 14°C まで下がることもあった. FG5 の光源に用いているヨウ素安定化ヘリウム・ネオンレーザーは, ヨウ素の飽和吸収を利用して, レーザーの波長を特定波長にロックさせる. ヨウ素安定化ヘリウム・ネオンレーザーは使用温度範囲が 15°C から 25°C であり, 室温がこの範囲を超えたためか, しばしば測定中にロックがはずれて値が乱れることがあった. しかし, その他には大きなトラブルはなく, 約 1 ヶ月間の測定に成功している.

3. JARE-45 における測定

3. 1 地震計室における調整及び試験測定

JARE-36, JARE-42 の測定では, 1 台の FG5 で測定を行っているが, JARE-45 の測定では, 国土地理院所有の FG5 (#203) と, 京都大学所有の FG5 (#210) の 2 台を用いた.

測定器械は 2003 年 12 月 18 日に南極観測船「しらせ」から昭和基地にヘリコプターにて搬送した. 12 月中旬は重力計室において超伝導重力計の移設作業, ヘリウムガスの液化作業が行われていたことから, この間は重力計室の北西約 30m にある地震計室を利用して測定器械の調整にあたった.

昭和基地到着後, 地震計室の前室を利用して落下

槽の真空引きや器械の調整を行い, FG5 (#210) は 12 月 21 日から 23 日までの間, また FG5 (#203) は 12 月 24 日から 28 日までの間, 試験測定を行った. 図-1 に 160 回の落下を 1 セットとして算出した平均値の時間変化を示す. FG5 (#210) は極めて安定したデータを取得することができたが, FG5 (#203) は測定値の標準偏差がおおよそ $50 \mu\text{Gal}$ と地盤振動の少ない南極での測定としては大きく, また, 周期がおおよそ 1 日, 振幅がおおよそ $40 \mu\text{Gal}$ の揺らぎが見られた. これは日本を出発する前には見られなかった症状であった.

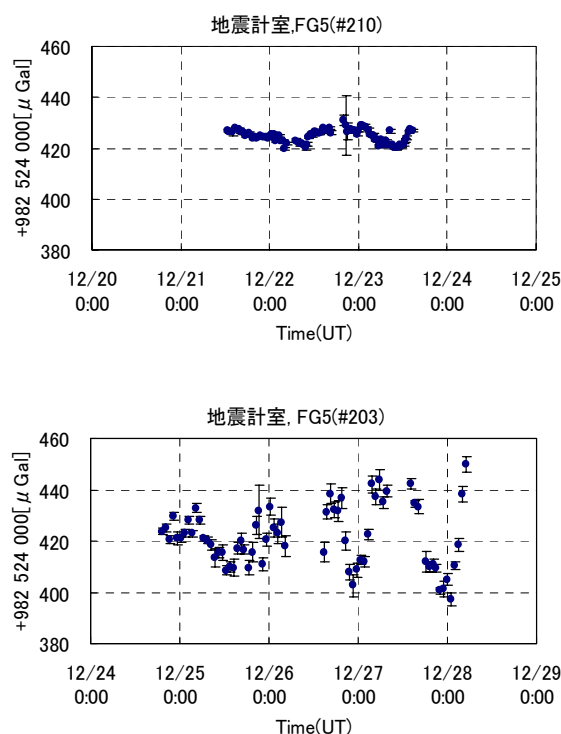
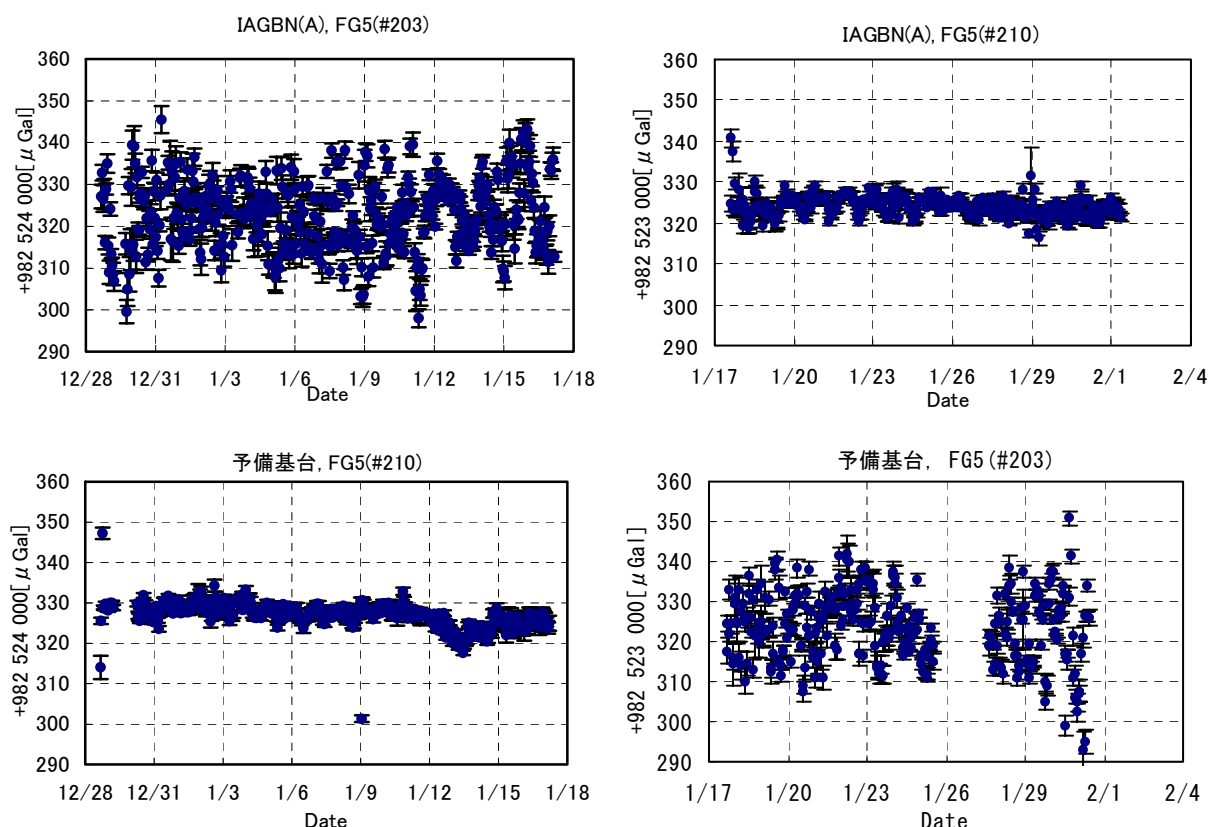


図-1 地震計室における測定値の時間変化

FG5 (#203) は値がばらつく問題があったものの, 平均値と比較すると 2 台の差はおおよそ $2 \mu\text{Gal}$ であった. 日本を出発する前の 2003 年 9 月に, 筑波山山麓において比較測定を行ったところ 2 台の値の差は $3 \sim 4 \mu\text{Gal}$ 以内であり, 地震計室で見られた差は出発前の比較測定結果と同程度であったといえる.

FG5 (#203) の値のばらつきについては器械に問題が考えられた. しかし, 問題箇所をつきとめることができず, また, その他の原因として測定場所の電源事情の問題も考えられたので, 超伝導重力計の移設とヘリウムガスの液化作業が終わった 12 月 28 日に測定器械を重力計室へ移動した.

なお, 試験測定を行った場所には, 新たに金属標を設置した. 設置場所を図-2 に示す. また, 1 月 11 日には重力鉛直勾配の測定を行い, ZLS 重力計 D-183 を用いて金属標直上と 1.20m 上の 2 箇所を繰



図－3 重力計室における測定値の時間変化

3. 3 帰国後に行った FG5 (#203) の問題の原因調査

帰国後の4月に筑波山山麓において FG5 (#203) の問題の原因の調査を行った。原因調査の風景を写真－3に示す。はじめに、昭和基地での測定と同じ FG5 (#203) 単体での組み合わせで測定を行ったところ、昭和基地での測定と同様、値が大きくばらついた。このことから、FG5 (#203) の問題は、昭和基地特有の問題ではなかったといえる。次に、FG5 (#203) と同じタイプの国土地理院が所有する FG5 (#104) 及び FG5 (#201) を用い、落下槽、スーパースプリング、制御用 PC、コントローラーを交換して測定を行ってみたが、症状は改善されなかった。この結果、問題箇所として考えられるのはレーザーか干渉計のどちらかまで絞り込むことができたが、それ以降の調査は FG5 の製造元である Micro-g Solutions 社に委ねることにし、米国へ送った。

Micro-g Solutions 社では試験測定を行ったところ、レーザーのロックがしばしばはずれ、また、昭和基地や帰国後の筑波山山麓での測定と同様、値が大きくばらつく症状が見られた。そこでレーザーについて集中的に調査が行われ、レーザーチューブの劣化とレーザー電源装置の老朽化により、発信されるレーザー光の周波数が不安定であることが判明した。

調査の結果、FG5 (#203) の値のばらつきは、レーザー光の周波数が不安定であることが原因であると判明した。

しかし、レーザー光の周波数のふらつきは無作為に起きるので、昭和基地で測定された重力値の平均値には系統的な誤差はなかったものと思われる。

昭和基地における測定では、レーザーのロックがはずれることは無かったのでレーザーには問題ないと判断したが、これまで経験のないトラブルであり予想もしなかった結末となった。昭和基地には予備のレーザーも持ち込んでおり交換が可能であったことから、現地で原因を究明できなかったことが非常に悔やまれる。



写真－3 筑波山山麓における FG5 (#203) の問題の原因調査
右が FG5 (#203)、左が FG5 (#201)。2 つは同じタイプの絶対重力計である。

表－1 測定結果

測点名	測器	重力値 [μGal]	標準偏差 [μGal]	有効落下数 [回]	測定期間
地震計室 (45G1)	FG5(#203)	982 524 422.7 $\pm$ 0.5	51.0	10,402	2003/12/24 - 2003/12/28
	FG5(#210)	982 524 424.8 $\pm$ 0.2	14.2	8,895	2003/12/21 - 2003/12/23
	較差	-2.1			
IAGBN (A)	FG5(#203)	982 524 322.8 $\pm$ 0.1	31.0	67,208	2003/12/28 - 2004/01/17
	FG5(#210)	982 524 324.5 $\pm$ 0.1	14.2	54,775	2004/01/17 - 2004/02/01
	較差	-1.3			
予備基台 (45G2)	FG5(#203)	982 524 323.6 $\pm$ 0.1	31.0	43,075	2004/01/17 - 2004/01/31
	FG5(#210)	982 524 327.0 $\pm$ 0.0	12.5	69,226	2003/12/28 - 2004/01/17
	較差	-3.4			

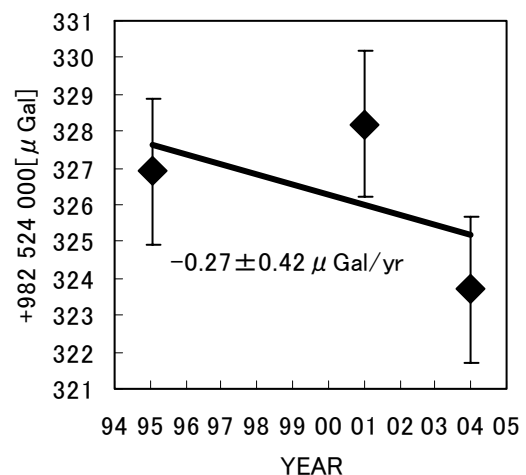
表－2 各種補正情報

緯度，経度，標高	地震計室(45G2)	69.0064° S, 39.5853° E, 20.882m (緯度経度は世界測地系)
	IAGBN(A)	69.0067° S, 39.5856° E, 21.492m (")
	予備基台(45G1)	69.0067° S, 39.5856° E, 21.492m (")
器械高の化成	重力値は金属標直上の値に化成	
重力鉛直勾配	地震計室(45G2)	-3.12 $\mu\text{Gal}/\text{cm}$ (JARE-45 による測定結果)
	IAGBN(A)	-3.34 $\mu\text{Gal}/\text{cm}$ (JARE-33 による測定結果)
	予備基台(45G1)	-3.34 $\mu\text{Gal}/\text{cm}$ (JARE-33 による IAGBN(A) 上の測定結果)
大気圧補正	標準大気圧 984.08hPa (1998 年から過去 30 年間の昭和基地平均海面気圧から算出)	
	大気圧ミックス 0.32 $\mu\text{Gal}/\text{hPa}$ (小川ほか, 1991 の実測値)	
極潮汐補正	IERS Bulletin B を使用, δ ファクター = 1.164	
固体潮汐補正	ETGTAB	
固体潮汐 δ ファクター	処理ソフト既定値 (永久潮汐については 1.0)	
海洋潮汐補正	CSR 4.0	
処理ソフト	g Ver. 3	

4. 重力値の経年変化

昭和基地における絶対重力測定は、これまで佐久間式、国立天文台 2 号機、真空回転式及び FG5 の 4 種類の絶対重力計によって行われてきたが、FG5 に比べ他の器械は測定精度が劣る。そこで、重力値の経年変化は FG5 による測定結果のみから見ることにする。

2003-04 年における測定結果を表－1 に、各種補正情報を表－2 にまとめる。2003-04 年における重力値は FG5 (#203) と FG5 (#210) の平均値とし、1994-95 年および 2000-01 年のデータと合わせて求められた IAGBN(A) における重力値の経年変化を図－4 に示す。測定値の誤差は、いずれにおいても統計的には $0.1 \mu\text{Gal}$ 以下であるが、FG5 の測定誤差は経験的に $2 \mu\text{Gal}$ 程度と考えられており、昭和基地における測定においても $2 \mu\text{Gal}$ を誤差として見込む。測定回数が 3 回と少なく、また、測定値の誤差が重力変化に比べて無視できない量であるが、最小自乗



図－4 IAGBN(A)における重力値の経年変化

法により直線近似し、1年あたりの重力変化の割合を計算すると $0.27 \pm 0.42 \mu\text{Gal/yr}$ の減少になり、仮にフリーエア勾配を仮定すると $0.8 \pm 1.3\text{mm/yr}$ の隆起となる。

昭和基地周辺はポストグレースシャルリバウンドにより地盤が隆起していると考えられている。ポストグレースシャルリバウンドによる地殻変動のモデル(Nakada et al., 2000)によると、昭和基地周辺における地殻変動は 1.5mm/yr 前後の速さでの隆起と予測されている。

一方、昭和基地では測地観測が盛んに行われており、実測による地殻変動の検出としては、VLBI 観測により得られた結果(福崎他, 2005)として、 $2.1 \pm 1.4\text{mm/yr}$ の隆起が検出されている。また、GPS 観測により得られた結果(大園他, 2005)として $1.4 \sim 2.6\text{mm/yr}$ の隆起が検出されている。

モデルによる予測や VLBI, GPS 観測で得られた結果と、FG5 による絶対重力測定で得られた結果は、重力値の経年変化についてはまだ誤差が大きいものの、地盤の隆起を示すという点ではよく一致している。

5. まとめ

JARE-45 では、2003 年 12 月末から約 1 ヶ月にわたり、昭和基地において 2 台の FG5 を用いて絶対重力測定を行

った。昭和基地における重力値の経年変化について、これまでに行われた FG5 による測定の結果から、過去 10 年間で重力値の減少傾向が検出された。これはモデルによる予測や、VLBI, GPS による観測結果と地盤の隆起を示すという点では調和した傾向である。しかし、重力測定値にはまだ誤差が大きいため、今後も測定を継続してその傾向をより正確に把握する必要がある。

FG5 は非常に精密な器械であるため、いったんトラブルが起きると修理や調整が困難である。今回、FG5(#210)は順調にデータを取得することができたが、FG5(#203)はレーザーのトラブルに見舞われ、昭和基地滞在中に修復することができなかった。今回のように、複数台を用いることにより、器差の検証ばかりではなく測定精度の向上も期待できることから、次回の測定も複数台で臨むべきである。

謝 辞

物理測地課重力係員(当時)の檜山洋平氏には、出発前の準備と帰国後に行った FG5(#203)の問題の原因調査に多大なご支援をいただいた。また、物理測地課の皆様をはじめ多くの方々にサポートをいただいた。ここに記して謝意を表する。

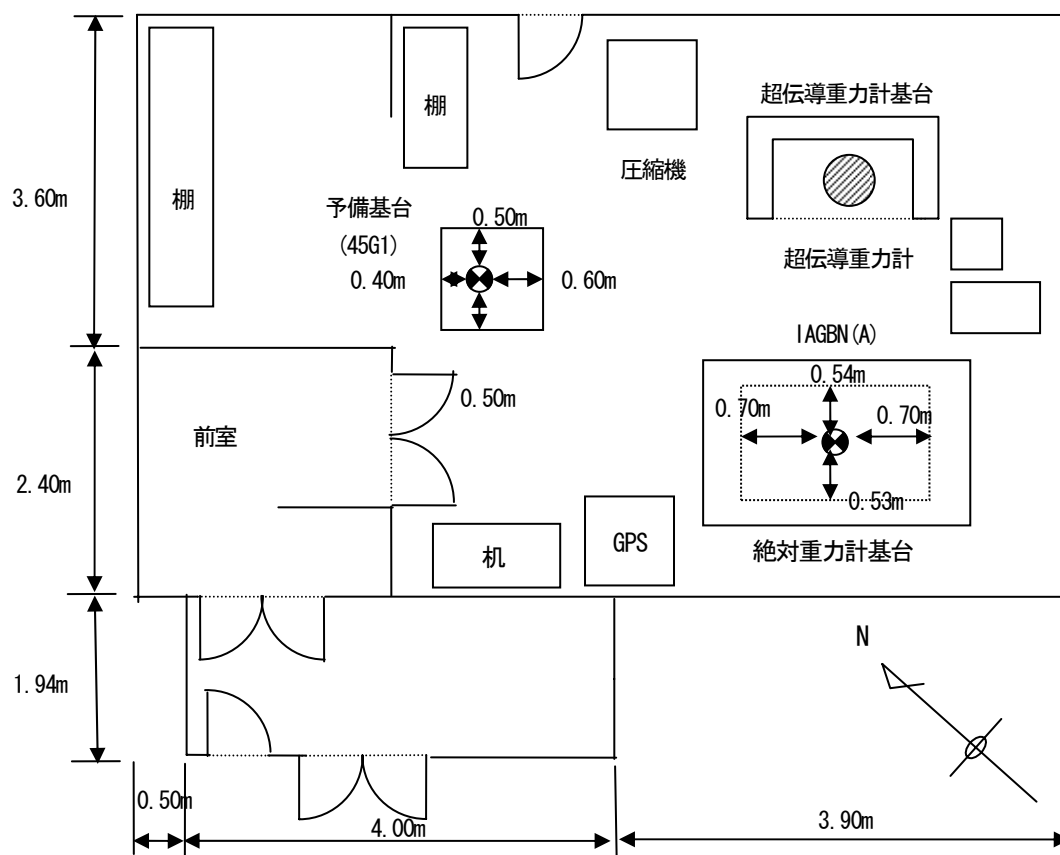


図-5 重力計室における測定点の見取り図

参 考 文 献

- 藤原 智, 渡邊和夫 (1992) : 南極・昭和基地における絶対重力測定, 国土地理院時報, 76, 1-6.
- Fukuda, Y., Higashi, T., Takemoto, S., Iwano, S., Doi, K., Shibuya, K., Hiraoka, Y., Kimura, I., McQueen, H., Govind, R. (2004) : Absolute Gravity Measurements in Australia and Syowa Station, Antarctica, IAG International Symposium, Gravity, Geoid and Space Mission GGSM2004, C. Jekili, L. Bastos, J. Fernandes (Eds.), IAG Symposia, 129, Springer, 280-285.
- 福崎順洋, 澁谷和雄, 土井浩一郎, 寺家孝明 (2005) : 昭和基地で行われた南極 VLBI 実験の解析 (その 3), 地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会予稿集.
- Harada, H., Tsubokawa, T. (1994) : Absolute gravity measurements at Syowa Station - Results by the absolute gravimeter with a rotating vacuum pipe -, Proceedings of the NIPR Symposium on Antarctic Geosciences No. 7, 14-22.
- Harada, Y., Kakinuma, S., Murata, I. (1963) : Pendulum Determination of the Gravity Differences between Tokyo, Mowbray and Syowa Base, 南極資料 No. 17, 35-50.
- Kaminuma, K., Tsukahara, K., Takemoto, S. (1997) : Absolute Gravity Value Measured at Syowa Station, Antarctica, Bureau Gravimetrique International Bulletin D' Information N80, 26-29 .
- 木村 勲 (2002) : 可搬型絶対重力計 FG5 による南極における重力測定 (Ⅱ), 国土地理院時報, 97, 17-23.
- Nakada, M., Kimura, R., Okuno, J., Moriwaki, K., Miura, H., Maemoku, H. (2000) : Late Pleistocene and Holocene Melting history of the Antarctic ice sheet derived from sea-level variations, Marine Geology 167, 85-103.
- Niebauer, T. M., Sasagawa, G. S., Faller, J. E., Hilt, R., Klotting, F. (1995) : A new generation of absolute gravimeters, Metrologia, 32, 159-180.
- 小川文雄, 福田洋一, 赤松順平, 澁谷和雄 (1991) : 南極・昭和基地およびあすか基地における重力潮汐観測データの解析, 測地学会誌, 第 37 巻, 第 1 号, 13-30.
- 大園真子, 田部井隆雄, 土井浩一郎, 澁谷和雄 (2005) : GPS 観測に基づく南極大陸の地殻変動, 地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会予稿集.
- Tsubokawa, T., Hanada, H. (1994) : Absolute gravity measurements with a NAOM2 absolute gravimeter at Syowa Station (Abstract), Proceedings of the NIPR Symposium on Antarctic Geosciences No. 7, 176.
- 山本宏章 (1996) : 可搬型絶対重力計 FG5 による南極における重力測定, 国土地理院時報, 85, 18-22.