

南極地域における国土地理院の重力測量—地球規模の重力場測定への貢献—
Gravity Measurements in Geospatial Information Authority of Japan at Antarctica
—Emerging Technology and Future Vision for Gravity Standard—

測地部 菅原安宏¹・宮原伐折羅¹・吉田賢司²・山本宏章³

Geodetic Department

Yasuhiro SUGAWARA, Basara MIYAHARA, Kenji YOSHIDA and Hiroaki YAMAMOTO

京都大学大学院理学研究科 福田洋一

Graduate school of Science, Kyoto University Yoichi FUKUDA

要 旨

日本の南極地域観測事業は、1957～1958年の国際地球観測年を契機に開始された。国土地理院は、1956年の第1次観測隊から毎次隊員を派遣し、基準点測量、地図作成、重力測量、地磁気測量などを実施して南極地域観測の基盤となる位置情報の整備に貢献している。

国土地理院は、南極地域の重力の基準を定め、維持するとともに、南極地域の重力場を把握することを目的として重力測量を実施している。南極地域における国土地理院の重力測量は、1956年に国際重力委員会の要請を受けて、第2次観測隊（1957）から計画された。第3次観測隊（1958）ではウォルドン重力計を用いて相対重力測定を開始し、第6次観測隊（1961）ではGSI型重力振子を用いて昭和基地に重力点を設けた。第33次観測隊（1991）では、投げ上げ式GA60絶対重力計を用いて絶対重力測定を開始し、第36次観測隊（1994）では落下式のFG5絶対重力計を導入して第56次観測隊（2014）まで測定を継続している。

本稿では、国土地理院が実施してきた重力測量の足跡をたどり、重力測量に基づいて定められた重力基準について解説するとともに、第56次観測隊の絶対重力測定について報告する。さらに、ほかの機関が南極地域で実施する超伝導重力計による連続観測、海上重力測定、航空重力測定などの概要を述べるとともに、今後の南極地域の重力測量について議論する。



写真-1 昭和基地の測地観測施設。GNSS観測施設（左手前）、VLBI観測施設（中央奥）、重力計室（右の建物で重力測定を実施）。（第56次観測隊撮影）

1. はじめに

日本は、1957～1958年に行われた国際地球観測年（IGY: International Geophysical Year）を契機に南極地域観測事業を開始した。国土地理院は、1956年の日本南極地域観測隊（Japanese Antarctic Research Expedition, 以下「JARE」という。）の第1次観測隊から毎次隊員を派遣して、基準点測量、地図作成、重力測量、地磁気測量など、南極地域観測の基盤として不可欠な位置情報の整備を実施することで南極地域観測に貢献している（国土地理院、2007）。

国土地理院は、南極地域の重力の基準を定め、維持するとともに、南極地域の重力場を把握することを目的として重力測量を実施している。南極地域における国土地理院の重力測量は、1956年に国際重力委員会（International Gravity Commission, 以下「IGC」という。）の要請を受けて、第2次観測隊（1957）の観測においてGSI型重力振子を用いた測定を計画したことで始まる。第2次観測隊では、南極観測船「宗谷」が海水に閉じ込められて昭和基地に到達できなかったために昭和基地で重力測量を実施できなかったが、第3次観測隊（1958）では、スプリング式のウォルドン重力計を用いて昭和基地で初となる重力測量を実施した。第6次観測隊（1961）では、GSI型重力振子を用いた重力測量を実施した。GSI型重力振子は、スプリング式と異なり、スプリングの伸びに起因するドリフト（時間の経過に伴うスプリングの短期的な伸び）やスケール誤差がないため、この測定をJAREの重力測定の基準値に用いることとした（Harada et al., 1963）。この値は、昭和基地で絶対重力測定を実施して絶対重力値を決定する1990年代までの間、JAREが行った全ての陸上及び海上重力測定の基準値に用いられた。

1987年に開催された第19回の国際測地学及び地球物理学連合（International Union of Geodesy and Geophysics, 以下「IUGG」という。）の総会では、国際測地学協会（International Association of Geodesy, 以下「IAG」という。）は、国際絶対重力基準点網（International Absolute Gravity Basestation Network, 以下「IAGBN」という。）に昭和基地の重力点をA

点として登録することを決議した (Boedecker and Fritzer, 1986). これを受けて, 第 32 次観測隊 (1990) が昭和基地に重力計室を建設し, 第 33, 34, 36 次観測隊 (1991, 1992, 1994) では, 異なる 4 種の絶対重力計を用いて絶対重力測定を実施した. これらの測定を総合的に評価した結果, 第 36 次観測隊が落下式の Micro-g LaCoste 社製 FG5 絶対重力計 (以下「FG5」という.) で測定した重力値が昭和基地の基準重力値となった (山本, 1996). これ以降, 第 56 次観測隊 (2014) までに FG5 を用いて IAGBN の A 点で 6 回の絶対重力測定を行って昭和基地の重力値の経年変化を把握している. また, 南極地域では, 海上保安庁, 国立天文台, 京都大学, 国立極地研究所が, 第 8 次観測隊 (1966) から開始した海上重力測定, 第 34 次観測隊から開始した超伝導重力計を用いた重力の連続観測, 第 47 次観測隊で実施した航空重力測定, 第 53 次観測隊 (2011) で実施した露岩域における A10 絶対重力計 (Micro-g LaCoste 社製, 以下「A10」という.) を用いた屋外での絶対重力測定など, 観測場所や要求精度に応じて様々な機器を用いた重力測定を行っている.

本稿では, 南極地域の重力場の把握並びに重力の基準の決定及び維持を目的に国土地理院が実施してきた重力測量の足跡をたどるとともに, 重力測量から定められた重力基準について解説する. さらに, 上記の各機関が南極地域で実施する超伝導重力計による連続観測, 海上重力測定, 航空重力測定などの概要を述べるとともに, 今後の南極地域の重力測量について議論する.

2. 南極地域の重力測定

日本は, 第 2 次観測隊 (1957) から南極地域の重力測定を開始した. 現在までに南極地域において, 地上では相対重力測定, 絶対重力測定及び超伝導重力計による連続観測, 海上では海上重力計による相対重力測定, 空中では航空機に搭載した重力計による重力測定を行ってきた. 本章では, 2.1 絶対重力測定以前の相対重力測定, 2.2 絶対重力測定, 2.3 第 56 次観測隊の絶対重力測定, 2.4 超伝導重力計を用いた相対重力測定, 2.5 海上重力測定, 2.6 航空重力測定の順に南極地域の重力測定の歴史を解説する.

2.1 絶対重力測定以前の相対重力測定

南極研究特別委員会 (Special Committee on Antarctic Research, 以下「SCAR」という.) (現南極研究科学委員会 (SCAR: Science Committee on Antarctic Research)) は, 1956 年, IGC と共同で, 昭和基地に近いプリンスハラルド湾で重力測定を行うことが世界の重力網の基盤に非常に重要であることを認めて, 日本が上陸した場所で少なくとも一つの

重力測定を行うことを強く要請する決議を採択した (国土地理院, 2007). この決議は, 当時世界で 3 種類しかなかった重力振子の一つ GSI 型重力振子を日本が所有していたこと, 1955 年に実施した日米間の重力の比較測定から日本の重力測定技術が高く評価されたことを受けて行われた (Okuda et al., 1957).

この決議を受けて, 第 2 次観測隊 (1957) では, GSI 型重力振子を用いて日本との間の比較測定で昭和基地の重力値を決定することが計画され, 日本の南極地域の重力測定が始まった. 測定の精度を確保するため, 昭和基地だけでなく南極観測船「宗谷」の寄港地のシンガポール及び南アフリカ共和国のケープタウンの国際 1 等重力点でも振子の周期の安定を確認するための測定が計画された (原田ほか, 1959). これらの寄港地は国際的に重要な重力点であったため, 当時構築中の国際重力基準網への貢献を目的としていた.

第 2 次観測隊では, 宗谷が海氷に閉じ込められたために昭和基地では重力測定を実施できなかったが, リュッツホルム湾の氷上でウォルドン重力計を用いた相対重力測定を実施した (写真-2). この測定から, 極域でも比較的容易にウォルドン重力計を用いて測定が可能で, 数 mGal の精度が期待できることが明らかになった. また, シンガポール及びケープタウンでは, GSI 型重力振子による測定を実施した (原田ほか, 1959).



写真-2 海氷上での相対重力測定 (国土地理院, 2007)

第 3 次観測隊 (1958) では, 第 2 次観測隊の成果を受けて, 昭和基地で初めてウォルドン重力計を用いた相対重力測定を実施した (原田ほか, 1960). 測定は, 天文測量の基準点である天測点で行い, 精度は, 数 mGal と推定されたが, 重力計の測定値を重力値に換算するための応答係数であるスケールファクターの精度が明らかではなかったため, 重力値の確からしさは示されなかった. 昭和基地で信頼性の高い重力値を決定するために, 第 4 次観測隊 (1959) では, 第 3 次観測隊と同様の方法でウォルドン重力計による測定を天測点で実施した (鈴木ほか, 1961).

測定から、第3, 4次観測隊で測定した重力値の差は2.6mGalと求められ、スケールファクターの絶対的な精度を別にすれば、第3次観測隊で測定した重力値の精度は2~3mGalと示された。この結果から、これ以上の精度を達成するには、GSI型重力振子による測定が必要であるとの結論に至った。

1960年にSCAR及びIUGGが行った、昭和基地で重力測定を行うという決議を受けて、第6次観測隊(1961)では、GSI型重力振子による重力測量を行った(Harada et al., 1963)。この測定では、当時東京都目黒区にあった国土地理院構内の値を基準に、ケープタウンのMowbrayと昭和基地の間で往復観測を行った。南極地域では、振子を用いた重力測定が少なかったため、今後の使用の便を図り、天測点の北側の基地建築物からさらに北に約20mの露岩上に重力基準点の金属標を設置した(写真-3)。この重力点(以下「重力振子測定点」という。)は、第20次観測隊(1978)が1979年に昭和基地の地学棟に重力基準点を設置するまで、JAREが実施した全ての重力測定の基準に利用された。重力振子測定点は、現在は重力の基準としては使用されていないが、南極地域の重力測定に果たした役割から、2013年に南極地域観測の歴史的記念物に登録された。

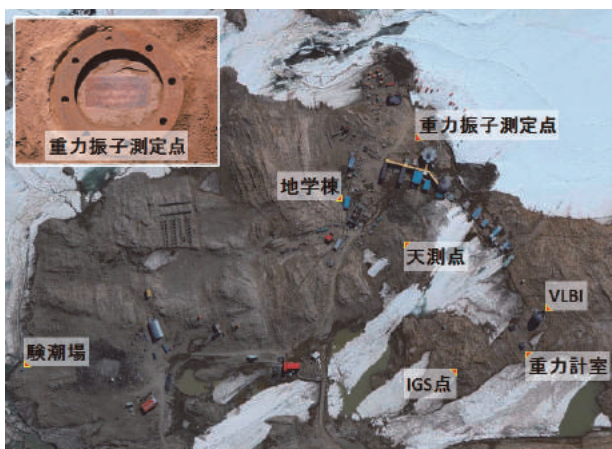


写真-3 昭和基地のオルソ画像(第54次観測隊撮影)

昭和基地に重力基準点が設置されて重力の基準が利用可能となったことで、南極地域における日本の重力測定が本格的に開始された。第9次観測隊(1967)では、昭和基地から南極点へ往復調査が行われ、そのルート上で4~8kmおきにラコスト重力計を用いて相対重力測定を実施した(Yanai and Kakinuma, 1971)。これは、沿岸から南極点を結ぶ最初の重力測量で、ルート上の重力値から南極大陸上の氷床の厚さを検討することを目的に測定を実施した。第10, 11次観測隊(1968, 1969)でも昭和基地からみずほ基地の測線でラコスト重力計を用いた相対重力測定を実施した(Yoshida and Yoshimura, 1972)。

第11~14次観測隊(1969~1972)では、氷の収支調査を目的に、昭和基地の南に広がるみずほ高原の測線で氷雪グループが重力測定を実施した。これらの測定と前述の南極点への往復調査の測定から、南極大陸全体の地下構造が初めて議論され、標高4000mのフリーエア異常値の変動に大陸地殻の厚さが反映されていること、東南極と西南極で地下構造のパターンが異なることが示された(Kaminuma and Mizoue, 1978)。

このほかに重力異常図の集成などを目的に、昭和基地周辺に設置された基準点で重力測定が数多く実施された。国土地理院は、第25次観測隊(1983)までに行った測定を「南極地域 重力・地磁気測量データ集録」として1986年3月に刊行した(国土地理院, 2001)。また、1984年には、日本の測定に加え、他国の公開データを収集して作成した南極大陸全体のフリーエア重力異常図が出版された(Segawa et al., 1984)。

1979年には、地学棟の屋内に重力基準点を設置した。この基準点では、第20, 22次観測隊(1978, 1980)にラコスト重力計を用いて重力振子測定点から取付観測が実施され、第33次観測隊(1991)がIAGBNのA点を設置するまでの間、昭和基地周辺の重力の基準に使用された。この重力基準点は、第19次観測隊(1977)の重力測定(神沼ほか, 1980)によって「日本重力基準網 1975 (JGSN75: Japan Gravity Standard Net 1975)」(国土地理院, 1976)に結合されているため、南極地域の重力測定は、JGSN75に準拠している。これ以前の測定は、ボツダム系(Borrass, 1911)に準拠していた。

2.2 絶対重力測定

1971年に第15回のIUGG総会で採択された国際重力基準網 1971 (IGSN71: International Gravity Standardization Net) (Morelli et al., 1974)は、世界全体で基準となる重力値を与える唯一の国際的な重力基準網で、その精度は0.1mGal程度とされているが、宇宙測地技術の進歩に伴い、科学分野からはより精度の高い重力基準への要請が高まり、絶対重力測定に準拠した精度の良い新しい重力基準網が必要とされるようになった。1987年、第19回IUGG総会において、IAGは、重力値の時間変化を監視するために新たな重力基準網 IAGBN の構築を決議した。決議は、(1)世界の重力の永年変動の監視、(2)相対重力計のスケールファクターの較正、(3)±0.01mGal精度を維持した重力基準網、(4)国際重力局(BGI: International Gravimetric Bureau)への重力データの提供からなり、重力基準点は、地理的分布が偏らず、地殻変動の大きなプレート境界に位置しない、安定した古い年代の地層の上に、宇宙測地技術とのコロ

ケーションが可能な場所で設置することが推奨された。IAGBN では、地殻変動が少なく安定した観測点は安定した重力の基準を与える A 点とされ、昭和基地は番号「IAGBN(A)#0417」で A 点に登録された (Boedecker and Fritzer, 1986)。

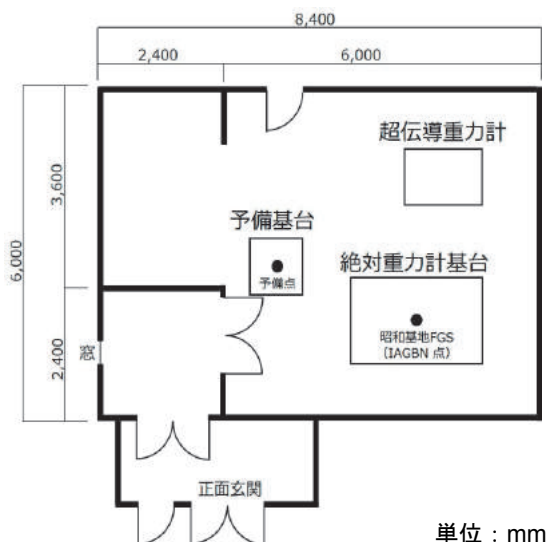


図-1 昭和基地の重力計室の平面図

昭和基地の IAGBN への登録を受けて、1990 年に重力測定のために重力計室が建設された。重力計室には、6m×6m の測定スペースに、岩盤へ直接コンクリートで繋がる 3 基の基台が設置された。絶対重力測定用の基台は各々 1.5m×2.5m で、第 33 次観測隊 (1991) では、基台に IAGBN の測定点の金属標を設置して、これを基準重力点「昭和基地」(以下「昭和基地 FGS」という。)と定めた (図-1)。同年、国際度量衡局 (Bureau International des Poids et Mesures, 以下「BIPM」という。) の佐久間晃彦が製作した投げ上げ式の GA60 絶対重力計 (Sakuma, 1971) を用いて (写真-4)、初めて絶対重力測定を実施した (藤原ほか, 1992)。15 日間の測定から、従来の振子で測定した絶対重力値と比べて 0.22mGal 小さい重力値が求められた (Fujiwara et al., 1993)。



写真-4 GA60 絶対重力計 (藤原ほか, 1992)

翌 1992 年には、第 34 次観測隊が国立天文台水沢の所有する国立天文台 2 号機 (NAOM2) と真空筒回転式 (AGRVP2) の 2 台の絶対重力計を用いて絶対重力測定を実施した (Tsubokawa et al., 1994; Hanada et al., 1994)。測定では、昭和基地 FGS の絶対重力値を求めたが、後に系統誤差や測定の問題が明らかとなり、これらの重力計は開発途上であったことが確認された (Kaminuma et al., 1997)。

第 36 次観測隊 (1994) では、国土地理院が所有する FG5 (#104) を用いて絶対重力測定を実施した (山本, 1996)。測定では、FG5 の最終調整で、地盤振動補償装置の主スプリングを釣るワイヤーを切断するトラブルが発生したが、ギター弦をワイヤーの代用に用いて 21 日間の測定を行った。当時の FG5 は、干渉縞をアナログからデジタル信号に変換するコンパレータ (AMD686) に干渉縞の強度に依存する時間遅延があったため (Niebauer et al., 1995), $-13.7\mu\text{Gal}$ を遅延量として補正した。補正後の昭和基地 FGS の重力値は表-1 となった (Kaminuma et al., 1997)。なお、昭和基地 FGS ではこの後 6 回の絶対重力測定を実施したが、測定値の間の整合性、国際的な FG5 の比較観測との整合性などから総合的に判断して、現在も第 36 次観測隊による測定値を採用している。

表-1 第 36 次観測隊による FG5 を用いた絶対重力測定

測定期間	1995/01/20 — 1995/01/29 1995/02/01 — 1995/02/11
測定機器	FG5 絶対重力計 (#104)
絶対重力値	982,524,327±15μGal
海洋潮汐	補正なし
有効データ数	45,386 個

第 42 次観測隊 (2000) では、国土地理院の FG5 (#203) を用いて第 2 回目の測定を約 1 か月間行った (木村, 2002)。重力計室の室温の変化が激しいために測定値が不安定になったが、最終観測結果は第 36 次観測隊の結果と 1μGal の差で一致した。

第 45 次観測隊 (2003) では、2 台の FG5 を用いて第 3 回目の測定を約 1 か月間行った (平岡ほか, 2005)。測定は、国土地理院の FG5 (#203) と京都大学の FG5 (#210) を用いて、昭和基地 FGS、予備点及び地震計室前室の 3 か所で行った。#203 の測定では、レーザーの周波数が安定しなかったため、40～50μGal のばらつきが見られたが、#210 の測定は非常に安定していた。#203 のレーザーのふらつきに起因した測定値のばらつきには、系統的な偏りは見られなかったため、最終的に求めた平均値にも系統的な誤差はなかったと推測されている。2 台の FG5

(#203, #210) の平均値の差は、4～5 μ Gal 程度であった。

第 51 次観測隊 (2009) では、国土地理院の 2 台の FG5 (#104, #203) を用いて第 4 回目の測定を行った (菅原, 2011)。測定は、昭和基地 FGS 及び予備点で、2 台の重力計を 2 回入れ替えて約 1 か月間行った。2 台とも非常に安定しており、器械間の重力値の差は 1 μ Gal 未満であった。

第 53 次観測隊 (2011) では、京都大学の FG5 (#210) を用いて第 5 回目の測定が行われた (東ほか, 2013)。また、野外観測用の絶対重力計である A10 を用いた測定も実施された。A10 を用いた測定は、昭和基地 FGS のほか、南極大陸にあるラングホブデの屋外で実施された (Kazama et al., 2013)。国土地理院は、第 41 次観測隊 (1999) からラングホブデにおいて GNSS の連続観測を開始し、GNSS 測位の日々の座標値の時系列からは、約 2.7mm/年の継続した隆起が推定された。A10 による測定は、GNSS 観測から上下変動場が把握された観測点において、東南極の重力場を精密に決定することで、氷床や海洋など周辺環境の変動及び氷河性地殻均衡 (Glacial Isostatic Adjustment, 以下「GIA」という。) に伴う重力変化を検出することを目的に、JARE が南極大陸上で初めて行った絶対重力測定である (土井ほか, 2015)。

2.3 第 56 次観測隊の絶対重力測定

第 56 次観測隊 (2014) では、国土地理院の FG5 (#203) 及び京都大学の FG5 (#210) を用いて、昭和基地 FGS 及び予備点で、2 台の重力計を 1 回入れ替えて約 1 か月間、通算 6 回目となる最新の測定を行った (写真-5)。測定を実施した日程を、表-2 及び表-3 に示す。落下槽の鉛直性やスーパースプリングの最適位置など機器の確認及び調整は、重力測定以外の作業の間に可能な限り、2～5 日ごとに行い、調整後には、機器を再度セットアップして測定を継続した。

表-2 昭和基地 FGS における絶対重力測定の実施状況

測定期間	作業内容
2015/1/1 – 1/4	FG5 の設置・調整
2015/1/5	試験観測
2015/1/6 – 1/11	本観測 118set (18,880drop)
2015/1/11 – 1/13	本観測 45set (7,200drop)
2015/1/13 – 1/16	本観測 71set (11,360drop)
2015/1/16 – 1/20	本観測 93set (14,880drop)
2015/1/20 – 1/24	本観測 95set (15,200drop)
2015/1/24 – 1/26	本観測 58set (9,280drop)
2015/2/10, 2/12	重力鉛直勾配測定

表-3 予備点における絶対重力測定の実施状況

測定期間	作業内容
2015/1/14	重力鉛直勾配測定
2015/1/26	FG5 の移動・再設置
2015/1/26 – 1/29	本観測 66set (10,560drop)
2015/1/29 – 2/2	本観測 95set (15,200drop)
2015/2/2 – 2/5	本観測 70set (11,200drop)



写真-5 昭和基地 FGS における FG5 絶対重力計 (#203) による測定風景 (第 56 次観測隊撮影)。

絶対重力測定の設定と各種補正パラメータ (大気圧補正, 潮汐補正など) は菅原 (2009) と同様に設定し、測定を実施した。最終的な測定結果を表-4 に示す。表-4 の絶対重力値は、金属標直上 0.0cm における値、1 セット (160 回の自由落下) 内の測定値は概ね $\pm 10\mu$ Gal, 1 セットごとの測定値のばらつきは概ね $\pm 4\mu$ Gal となった。図-2 に 1 セットの標準的な測定値の時系列を示す。

表-4 第 56 次観測隊による FG5 を用いた絶対重力測定

測定期間	2015/01/06 – 2015/01/26
測定機器	FG5 絶対重力計 (#203)
絶対重力値	982,524,326.6 $\pm$ 4 μ Gal
海洋潮汐	NAO.99b & NAO.99Jb/GOTIC2
有効データ数	75,343 個
器械高	130.86cm

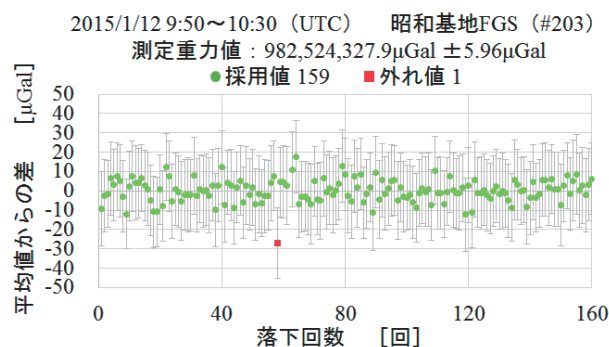


図-2 1 セット (160 回) の測定値の時系列の例。

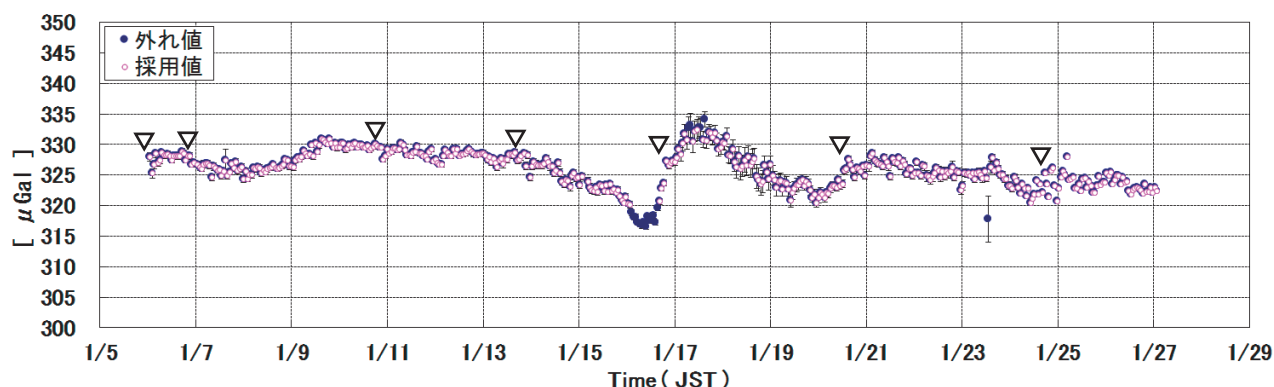


図-3 第56次観測隊の昭和基地 FGS における全期間（2015/1/8～1/26）の絶対重力測定の時系列（FG5#203）。

図中の左軸は+982,524,000 [μGal], ▽はセットアップ毎の測定開始時期。

FG5 の制御部への電源供給は、商用交流電源から障害波遮断変圧器（ノイズカットトランス：NCT-I4 型 500VA）と低周波数・低電圧供給装置（ノイズカット UPS：RI-N 型 500VA）を経由して行った。接地は、外気温の影響を最小限にするため室外の地面へ行うことは避け、3 芯の接地極付コンセントで代用した。

原子時計には GPS 時刻への同期機能が付いたルビジウム周波数標準器（以下「Rb 原子時計」という。）を使用した。時刻同期用の GPS アンテナは重力計室正面玄関先の前室にある北西側の窓に貼り付け固定した状態で設置した。昭和基地の重力計室内に設置された超伝導重力計 OSG#058 は冷却にヘリウムガスを使用しており、Rb 原子時計はヘリウムガスの混入で周波数変動を生じる可能性が報告されているが（Herbulock et al., 2003）、OSG#058 は冷凍機単体で dewar（真空状態のフラスコ）内のヘリウムの液化・凝縮が可能で、また、ポリウレタン製のダイアフラムはヘリウム透過率 1/1,000 であることから、ヘリウムガスの漏洩の可能性は低い。さらに、GPS 時刻との同期によって常時外部から基準となる 10MHz の信号が入力されているため、周波数変動を生じる可能性は低く、外的な要因がなければ超伝導重力計が正常に稼働している間は Rb 原子時計に影響を与える可能性はないと判断した。

図-3 に第 56 次観測隊に FG5（#203）で実施した全ての絶対重力測定の時系列を示す。1 月 13 日に超伝導重力計の冷凍機を交換する作業を実施した直後から 2 日間で 7μGal の一定した重力測定値の減少が確認された。ヘリウムガスの漏洩による Rb 原子時計の周波数変動に起因して重力測定値の変化が生じた可能性は否定できない。一方、1 月 16 日の夜半からは、最大瞬間風速 51m/s、平均風速 27.8m/s の C 級ブリザードが発生したため、ブリザード前後を含む 1 月 15～19 日の 5 日間は荒天が続き、その間、測定に ±20μGal 程度の急激な重力変化が生じた。天候

が回復した 1 月 21 日以降は、比較的安定した測定となった。重力測定値に減少が生じた 1 月 13 日以前の測定値とブリザード後に測定が安定した 1 月 21 日以降の測定値は 2μGal 程度で整合するため、ヘリウムガスの混入で変動した周波数が、GPS 時刻との同期によって再度安定したと考えられる。

昭和基地 FGS に対する予備点の地点差は 3.5μGal であり、2010 年の地点差（菅原，2011）と比較すると、2.2μGal 大きい。この地点差の変化の量が FG5 の公称精度（2μGal）と同程度であること、2010 年とは測定機器の台数及び測定回数が異なることから、重力計室内の重力水平勾配が実際に変化したとは現時点では言い切れない。安定した重力の基準値を与える観測が可能な場所であることを確認するため、今後も両観測点で測定し、監視していくことが重要である。

2.4 超伝導重力計を用いた相対重力測定

第 34 次観測隊は、1993 年 3 月、昭和基地で超伝導重力計を用いた重力の連続観測を開始した（佐藤，2001）。当時は、南極地域で超伝導重力計が設置されているのは昭和基地が唯一であり、これは世界に先駆けた測定であった。超伝導重力計を用いた連続観測は、2003 年、2009 年に 2 回の重力計の更新を経て、2016 年現在では、三代目の超伝導重力計 OSG#058（GWR Instruments 社）を用いて継続している。

超伝導重力計は、相対重力計であるが、センサーのニオブ球を浮かせるためにマイスナー効果を利用した磁気浮上力を用いることで、スプリング式の重力計と比べて非常に高い長期安定性を有し、極低温状態によるセンサー形状の安定性の高さ及び温度雑音の低さからほかの重力計よりも 100～1,000 倍高い感度で測定が可能である。OSG#058 では、2012 年 2 月に昭和基地で観測を開始してから 2 年間でステップ状の変化を含まないノイズ 0.1μGal 以下の連続データが取得されている（池田ほか，2013）。超伝導重

力計は、ニオブ球の位置を保つためにフィードバックコイルにかかる電圧変化を相対的な重力変化として測定しているため、検定を行って電圧変化を重力変化に換算する係数を求める必要がある。検定は、絶対重力計で測定した重力値を用いて行うため、一定期間の並行観測が必要となる。昭和基地では、FG5の測定を用いて超伝導重力計のキャリブレーションを行っている。

GGP (Global Geodynamics Project) (Crossley et al., 1999) は、1997年に地球深部ダイナミクスの解明を目的に開始された国際観測プロジェクトで、その第一フェーズ(1997~2003年)では、流体核共鳴、地球自由振動のコアモード、地球内核の併進運動に伴う重力変化など、振幅がnGalオーダーの現象の検出信頼度を上げるため、緯度方向に観測点の拡充が行われた。高緯度に位置する昭和基地も当初からプロジェクトに参加し、日本の超伝導重力計観測網(GGP-Japan ネットワーク)が緯度±70°の範囲まで拡充された。極域における超伝導重力計の観測では、地球の粘性と深いかかわりを持つ長周期潮汐の振幅が大きく観測されることや、海水や氷河の運動に伴う重力変化が検出されることが期待されていたが、その中で、昭和基地での観測による常時自由振動の発見(Nawa et al., 1998)は特筆に値する。

2003年に札幌で開催された第23回IUGG総会では、GGPは、将来的にIAGの恒久的なサービスに移行することを目指し、公式にIAGのプロジェクトに統合された。第二フェーズ(2007年~)では、南極地域などでの氷床融解による氷床質量の流出を把握するために、重力の時間変化の正確な把握が不可欠という認識や、GGPの行う重力の連続監視が重力衛星データの検証に必要な地上の正確な重力変化を与える意義に注目し、氷床変動や全球的な水循環などによる非潮汐性重力変動を監視し、重力の時間変動データをサービスとして提供することがその目的に追加された(佐藤ほか, 2013)。

GGPは、2015年プラハで開催された第26回IUGG総会で発展的に解消し、その活動は新しく始動したIGETS (International Geodynamics and Earth Tide Service) に引き継がれている。IGETSは全球統合測地観測システム(GGOS: Global Geodetic Observing System)のサービスの一翼を担うものであり、昭和基地は様々な宇宙測地技術の観測点であるとともに、南極地域唯一の超伝導重力計観測点として地球規模の測地観測ネットワークの強化に貢献している。

2.5 海上重力測定

日本の南極地域の海上重力測定は、1966年10月に、東京水産大学海鷹丸の南極周遊航海で初めて実施された。第8次観測隊では、同年12月に国土地理

院が開発したG.S.I型海上重力計(石井, 1970)を用いて南極海で海上重力測定を実施した。いずれの測定でも、日本が開発した弦振動型の重力計を用いている。G.S.I型海上重力計を用いた測定は、第9, 13, 15次観測隊(1967, 1971, 1973)で実施したが(写真-6)、船の動揺で観測機器が故障し有効なデータを取得できなかったため、第15次観測隊で測定を終了した(国土地理院, 2007)。

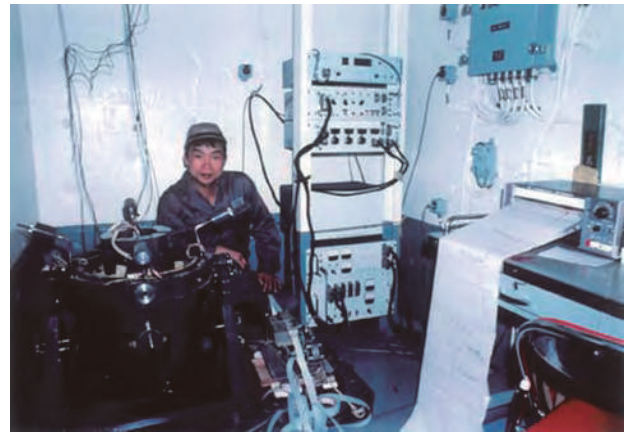


写真-6 第13次観測隊の海上重力測定(国土地理院, 2007)

第22次観測隊(1980)では、極地研究所と東京大学が共同で開発したNIPRORI-I型海上重力計を砕氷艦「ふじ」に搭載して測定を実施した。この重力計は、サーボ型加速度計を使用しており、センサーの感度が線型であること、頑強であること、鉛直ジャイロとプラットフォームが分離されていることに特徴がある(Segawa et al., 1981)。この重力計を用いて、東京から昭和基地の往復航路約33,000kmでデータを取得し、南極大陸縁辺では初めて有効なデータを取得した(Kasuga et al., 1982)。

海上重力測定は、実施しなかった隊もあるが、現在まで継続的に実施され、多くのデータが蓄積されている。なお、第29次観測隊(1987)からは改良型のNIPRORI-II型海上重力計を、第51次観測隊(2009)からはAir-Sea II相対重力計(Micro-g LaCoste社製)を用いて測定を行っている。こうした測定に対して統一した処理を行うことで、リュツォ・ホルム湾からアムンゼン湾沖にかけて地殻構造が推定されている(小西ほか, 2006; 松崎ほか, 2014)。

2.6 航空重力測定

南極地域では、人工衛星の軌道の制限のために衛星重力測定ができずに生じるデータの空白域、いわゆる“polar gap”の解消を目的に、各国において精力的に航空重力測定が行われている(例えば, Jordan et al., 2016)。

日本でも第47次観測隊(2005)とドイツの観測隊が共同で、ゴンドワナ大陸形成の一因となった地殻の進化の解明を目的に、2006年1月に昭和基地周辺の南緯67度~73度、東経35度~45度において、南北方向の測線、測線間隔約20kmでAir-Sea II 相対重力計を用いて航空重力測定を実施している(Nogi et al., 2013)。昭和基地を中心とする放射状の測線でも測定しており、測線が交差したところで残差が最小となるように3kmメッシュのデータを生成し、GPSの位置情報を用いてエトベス効果を後処理で補正してフリーエア重力異常を得ている。この結果、リュツォ・ホルム湾から南極大陸へ広がる大きな負の重力異常が検出され、この重力異常が白瀬氷河に対応する基盤地形の地域と一致することが判明している。

3. 南極地域の重力基準

FG5は、国際比較観測に基づいて国際標準との整合性が確認されている絶対重力計で、現在のところ、国際的に整合した重力の絶対値を与えるほぼ唯一の測定機器である。国土地理院は、京都大学と連携してこれまで昭和基地で6回の絶対重力測定を実施し、これらの測定に基づいて重力の基準を定めることで、日本の南極観測に重力の基準を与えている。これらの測定の結果を示すとともに、測定から定めた重力の基準の確からしさを議論する。

これまで昭和基地FGSにおいてFG5で測定された絶対重力値の公表値を表-5に示す。

表-5 昭和基地FGSの絶対重力測定の公表値

測定年	器械番号	重力点直上0.0cmにおける絶対重力値(μGal)
1995	#104	982,524,326.9
2001	#203	982,524,328.2
2004	#203	982,524,322.8
	#210	982,524,324.5
2010	#104	982,524,326.1
	#203	982,524,324.0
2012	#210	982,524,322.7
2015	#203	982,524,326.6

表-5に示した公表値の計算では、固体地球潮汐、海洋潮汐、地球回転、大気圧、重力鉛直勾配などの補正の化成処理に用いた補正パラメータが2010年、2015年を除いて全て異なる。

重力の基準の確からしさを議論するため、本稿では菅原(2011)の補正パラメータを使用して再計算を行った。ただし、2012年については、測定の生データが入手できなかったため、東(2013)で報告されている表-5の公表値に対して重力鉛直勾配の補正

を行った。この補正では、重力鉛直勾配の影響を最小限にするため、重力点直上0.0cmではなく、130cmに化成した。2012年に使用した#210の器械高が128.42cmであることから、130cmに化成することで、2012年とそのほかの測定年の重力鉛直勾配の値の違い0.001μGal/cmで生じる重力値の差は、約0.002μGalとほとんど影響がない範囲におさまる。このほか、菅原(2011)と東(2013)では固体地球潮汐及び海洋潮汐の補正に使用したモデルが異なる可能性があるが、数日以上連続測定を行うことで、潮汐補正モデルの違いによる誤差を無視できることがわかっている(例えば、東ほか、2002)ため、本稿では補正しないこととした。以上の補正を行った昭和基地FGSの絶対重力値を表-6及び図-4に示す。なお、図-4では、レーザーが不調であった2004年の#203の測定値は参考値とした。

表-6 再計算した昭和基地FGSの絶対重力測定の結果

測定年	器械番号	重力点直上130cmにおける絶対重力値(μGal)
1995	#104	982,523,891.2
2001	#203	982,523,893.2
2004	#203	982,523,888.6※
	#210	982,523,889.2
2010	#104	982,523,889.9
	#203	982,523,891.9
2012	#210	982,523,888.5
2015	#203	982,523,892.5

※参考値。

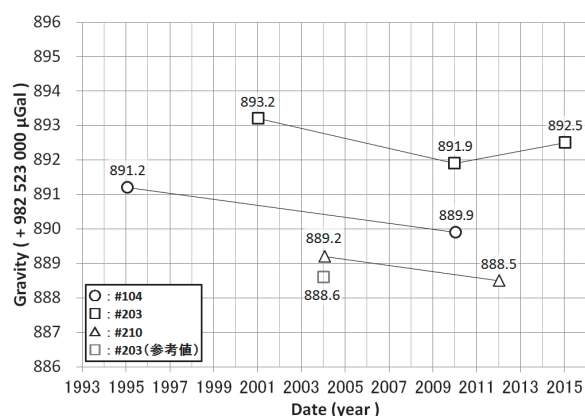


図-4 昭和基地FGSの21年間の絶対重力測定の結果。

重力点直上130cmにおける重力値。図中には、各重力値と器械番号を示した。

表-6及び図-4に示したようにこの21年間の昭和基地FGSで実施した全てのFG5による重力値は4.7μGalの範囲内にあり、BIPMが行うFG5の国際比

較観測 (Olivier, 2014) 及び国土地理院が国内機関と連携して行う国内比較観測の結果と整合することが確認された。また、器械毎では、#104 及び#203 は $1.3\mu\text{Gal}$ 以内、#210 は $0.7\mu\text{Gal}$ 以内で複数回の測定値が整合しており、FG5 の公称精度 $2\mu\text{Gal}$ を超える高い精度で観測が達成され、重力の基準を与える点として非常に安定していることが示された。

安定した絶対重力の基準を維持するためには、重力が安定している場であっても、重力値の時間変化の有無を確認するために、定期的に FG5 を用いて絶対重力測定を実施する必要がある。また、地球全体の重力場の把握に IGETS の観測点として求められる精度で貢献するためには、地球上のほかの重力連続観測と整合する測定を継続して行う必要があり、同じく定期的に FG5 を用いた超伝導重力計のキャリブレーションが必要である。IGETS では、絶対重力測定で校正された超伝導重力計の連続観測が推奨されているため、可能な限り頻繁に絶対重力測定を行うことが求められている。重力の基準の維持、重力場の監視のいずれの目的においても、継続的に絶対重力測定を行って重力の変化を監視することが不可欠となる。

4. 南極地域における重力測量の意義と役割

4.1 重力基準の意義と役割

昭和基地は、一番近いとされる南アフリカのケープタウンから約 $4,000\text{km}$ 離れた、ほかの大陸から隔絶した場所に位置し、周辺の海域には夏場でも定着氷が存在することから、到達するだけでも相当な日数を要するため、ドリフトが不可避な相対重力計で測定を実施していた時代には、正確な重力基準点を設置するために必要となる測定日数の確保は非常に困難であった。また、高緯度地帯に位置する昭和基地は日本と重力差が大きいため、スケールファクターの不確かさに起因する誤差が大きくなることも精密な測定を実施する際に障害となった。こうした誤差を軽減できる重力計は当時 GSI 型重力振子のみで、この重力計で設置された重力基準点は大変貴重で、絶対重力計が登場するまで、GSI 型重力振子で定めた重力基準点が JARE の全ての重力測量の基準値に利用されていた。このように、昭和基地のような正確な重力基準点の設置が困難な地域では、正確な重力基準は非常に重要であった。

重力基準点の意義は、絶対重力測定が登場しても変わらないが、重力基準への需要の拡大に伴ってその役割は拡充されている。1987 年に新しい国際重力基準網 IAGBN が勧告された目的は、全球に等しく重力の基準を与えるとともに、重力の時間変化を監視することで地球変動の解明に資することである。さらに、2015 年の IAG 決議では、(1) 絶対重力計

の国際比較に準拠する重力網のネットワークを構築し、これに基づく地球規模の精密な重力基準網を構築すること、(2) この重力基準網は、ほかの宇宙測地技術とのコロケーションによって、測地基準座標系とも結合することが求められた (IAG, 2015)。

昭和基地が位置する南半球は、北半球と比べて大陸の占める面積が小さく重力の測定点が少ないため、全球に等しく重力の基準を与え、重力の変化を監視する基準点として、昭和基地の責務は大きい。昭和基地の重力基準点は、JARE では観測の初期から重力測量に基準を与えてきたが、可搬が比較的容易な絶対重力計 FG5 の登場によって、南極地域でも数 μGal の精度で重力の基準を与えることが可能となった。FG5 を用いた絶対重力測定は、国際比較に準拠しており、昭和基地では継続して測定を実施していることから、2015 年の IAG 決議で示された新しい重力基準網の根幹の一つとなり得る。

一方で、FG5 の数 μGal の測定精度は、時間変化を監視することも可能となり、その役割は、地球規模の重力場の時間変化を監視するグローバルな基準点へと役割が広がることとなった。絶対重力測定で定めた重力の基準は、ローカルにも役割を広げ、昭和基地での超伝導重力計による連続観測の校正に用いられている。また、JARE-53 では、昭和基地だけでなく、南極大陸の露岩上でも絶対重力測定を実施し、航空重力測定や重力観測衛星で得たデータの校正にも基準として利用されることが期待されている (福田, 2012)。さらに、これらの重力基準に基づいた重力値から、昭和基地周辺の重力ジオイド・モデルが開発されている (Fukuda et al., 2016)、このように、重力基準点は、観測に重力の基準を与えるだけでなく、重力場に基づく高さの基準の構築に貢献している。

4.2 重力測定の意義と役割

重力測量は、重力の基準を定めるために行われるが、地球の形状と地下構造の把握も、重要な目的の一つである。南極地域でも内陸旅行などの際に、地下構造の把握を目的とした相対重力測定を実施している。南極大陸は、約 90% 以上が氷床に覆われているため、こうした重力測定は、アイスレーダーが登場する以前には、氷床の厚さの推定に貢献することで雪氷学的に有用な情報を与えていた (福田, 2001)。アイスレーダーの登場後は、レーダー測定と重力測定を組み合わせることで氷床下の基盤地形の推定に貢献している (Nagao et al., 1984)。

重力測定の重要な意義の一つである地球の形状の決定では、重力測定を VLBI や GNSS などのほかの宇宙測地技術と結合することで、それぞれの技術の長所を生かして正確な地球の形状と変化が把握でき

るため、重力基準点とほかの宇宙測地技術のコロケーション観測を行うことで技術同士の相互関係を明確にすることが重要である。これは 2015 年の IAG 決議でも求められていることであり、昭和基地は、VLBI, GNSS, DORIS を備えた根幹となるコロケーションサイトで、測地基準座標系との結合の根幹の一つとなり得る。さらに、正確な地球形状の把握には地球全体で均一な測地観測が必要であることを考慮すると、現状で根幹となる観測局が非常に少ない南半球かつ高緯度に位置する南極において、観測の不在を解消する観測を継続する意義は非常に大きい。ほかの宇宙測地技術と適切に結合することで、南極地域における重力測定は、地球の形状の把握にさらに大きく貢献できることが期待される。

重力測定は、地上で測定を行うことから測点数に応じた高い空間分解能を得ることができ、測定精度も良いが、移動に時間を要するため測定できる範囲が限られ、重力分布の面的な把握は困難である。さらに、南極地域では人間が到達できない場所が多く、広大な大陸全土の把握は非常に困難であったが、宇宙測地技術が導入されて重力観測衛星が面的な重力分布の把握を容易にしたことで、これらのデータを用いて南極地域のフリーエア異常図やジオイド・モデルが作成可能となった(例えば, Fukuda et al., 1990; Fukuda et al., 2016)。また、衛星だけではなく、昭和基地周辺で航空機を使用した航空重力測定も行われ、地域の重力異常図を一新して詳細な重力場を描き出している(Nogi et al., 2013)。こうした成果は、南極地域における地下構造の推定に資するだけでなく、簡便で効率的な標高の決定にも貢献が期待できる。

重力測定は、重力の空間分布の把握だけでなく、時間変化の把握においても重要度を増している。南極地域は、人間の活動度が低いため、直接的な環境汚染や人工ノイズが小さく、地球を理解するための良質な観測データを得ることができる貴重な観測フィールドの一つである。こうした場所で絶対重力測定を行って正確な重力値を決定し、繰り返し測定と連続測定でその時間変化を把握することで、地球ダイナミクスの解明、地球規模の環境変化の把握などへの貢献が期待できる。

5. まとめ

国土地理院は、JARE の初期から重力測量を実施し、日本の南極観測における全ての重力測定の基準となる重力値を定めてきた。1990 年代に FG5 を導入して絶対重力測定を開始してからは、繰り返し測定を行い、昭和基地の重力の変化を監視するとともに、南極観測に安定した重力の基準を与えている。昭和基地の絶対重力値は、21 年間、 $4.7\mu\text{Gal}$ の範囲

内にあり安定しているが、重力値の時間変化の有無を確認するために今後も継続的に絶対重力測定を実施する必要がある。また、IGETS では絶対重力測定で校正された超伝導重力計の連続観測が推奨されているため、可能な限り頻繁に絶対重力測定を実施することで、重力の基準の維持及び重力場の監視のいずれの目的も達成できると思われる。

1990 年代に宇宙測地技術の導入によって地球観測の精度が飛躍的に向上し、観測の条件が過酷な南極地域でも安定したデータの取得が可能となった。重力測量でも、地上や海上の測定だけでなく、航空機に重力計を搭載して重力測定が行われ、地上の重力測量でも、絶対重力計や超伝導重力計の高精度化及び安定化が行われて測定が継続されている。陸上の絶対重力測定では、1990 年代に開始された室内の繰り返し測定に加えて、2012 年には野外での測定が行われて測定の範囲が広がっている。こうした新しい技術を利用することで、重力測量は、安定した重力の基準を与えるという従来の役割を精度よく着実に果たすとともに、氷床変動、GIA のみならず、グローバルな地球ダイナミクスやテクトニクスの研究などにおいても重要な役割を果たしている。さらに、重力測定の重要な意義の一つである地球の形状や重力場の決定においては、VLBI や GNSS などの宇宙測地技術と結合することで、さらに貢献が期待できる。国土地理院では、昭和基地において VLBI, GNSS, DORIS に関して技術間の相互位置関係を明確にするコロケーション観測の実施に尽力してきたが、今後は重力基準点とほかの宇宙測地技術のコロケーション観測を継続することで異なる技術の正確な相互関係を把握にすることが強く望まれる。また、陸海空の全てにおいて重力測量が可能になったことから、今後はそれぞれの測定の特徴を生かして組み合わせることで、効率的な重力場の把握が期待される。こうした貢献には、安定した重力の基準の維持は不可欠であることから、今後も十分な頻度で絶対重力測定を実施し、ほかの宇宙測地技術との連携を進めていくことが重要である。

謝 辞

本稿の執筆にあたって、国立極地研究所の土井浩一郎准教授及び青山雄一助教には超伝導重力計及び航空重力計について様々な助言をいただきました。また、昭和基地での観測は各次の観測隊のサポートなしでは成し得ませんでした。ここに記して感謝いたします。

(公開日：平成 30 年 12 月 27 日)

参 考 文 献

- Boedecker G. and Fritzer T. (1986): International Absolute Gravity Basestation Network. IAG-SSG 3.87 Status Report March 1986, Veröff. Bayer. Komm. f. d. Int. Erdmessung d. Bayer. Akad. D. Wiss., Astron.-Geod. Arb., Nr. 47, München.
- Borrass E. (1911): Bericht über der relativen Messungen der Schwerkraft mit Pendelapparaten in der Zeit von 1808 bis 1909 und über ihre Darstellung im Potsdamer Schweresystem, Comptes rendus des séances de la seizième conférence générale de l'Association géodésique internationale, Rapport spécial sur les mesures relatives de la pesanteur, Spezialbericht über die relativen Schweremessungen.
- Crossley, D., Hinderer, J., Casula, G., Francis, O., Hsu, H.-T., Imanishi, Y., Jentzsch, G., Kaarianen, J., Merriam, J., Meuers, B., Neumeyer, J., Richter, B., Shibuya, K., Sato, T., vanDam, T. (1999): Network of superconducting gravimeters benefits a number of disciplines, EOS, Transaction, American Geophysical Union, 80(11), 125-126.
- 土井浩一郎, 東敏博, 早河秀章, 風間卓仁, 大藁伸吾, 青山雄一 (2015): 第53次日本南極地域観測隊で新設した重力基準点, 南極資料, 59(2), 229-239.
- 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.
- Fujiwara, S., Watanabe, K. and Fukuda, Y. (1993): Absolute gravity measurement at Syowa Station, Antarctica (abstract), Proc.NIPR Symp.Antarct.Geosci., 6, 137.
- 福田洋一 (2001): 南極および周辺海域での重力場研究, 月刊地球/号外, 35, 130-137.
- 福田洋一 (2012): 南極観測における重力測定の役割, 第3回極域科学シンポジウム/第32回極域地学シンポジウム講演要旨.
- Fukuda, Y., Nogi, Y., Matsuzaki, K. (2016): Precise gravity-field modeling in the area of the Japanese Antarctic station Syowa and evaluation of recent EGMs, Polar Science, 10, 101-109.
- Fukuda, Y., Segawa, J. and Kaminuma, K. (1990): Geoidal undulation and gravity anomaly around the Japanese Antarctic stations estimated from both satellite altimeter data and surface gravity data. Proc.NIPR Symp.Antarct.Geosci., 4, 108-118.
- Hanada, H., Tsubokawa, T. (1994): Absolute gravity measurements at Syowa Station — Results by the absolute gravimeter with a rotating vacuum pipe —, Proc.NIPR Symp.Antarct.Geosci., 7, 14-22.
- 原田美道, 鈴木弘道, 大橋伸一 (1959): 第2次南極地域観測隊重力部門報告, 南極資料, 6, 34-45.
- 原田美道, 鈴木弘道, 柿沼清一, 吉田新生 (1960): 第3次南極地域観測隊重力部門報告, 南極資料, 9, 43-51.
- Harada, Y., Kakinuma, S. and Murata, I. (1963): Pendulum determination of the gravity difference between Tokyo, Mowbray and Syowa Base, Antarctic Record, 17, 35-50.
- Herbulock, S., Klimcak, C., Presser, A., Milne, J. and Camparo, J. (2003): Investigations of Vapor-Cell Clock Equilibration Following Initial Activation: A Progress Report, 35th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting.
- 東敏博, 福田洋一, 小笠原志歩里, 竹本修三 (2002): 京都大学重力基準点 (京都 C) における絶対重力変化, 測地学会誌, 48, 149-152.
- 東敏博, 土井浩一郎, 早河秀章, 風間卓仁, 太田晴美, 大藁伸吾, 羽生朋子, 岩波俊介, 青山雄一, 澁谷和雄, 福田洋一 (2013): 南極昭和基地における絶対重力計 FG5 による重力測定と重力経年変化, 測地学会誌, 59, 37-43.
- 平岡喜文, 木村勲, 福田洋一, 土井浩一郎, 澁谷和雄 (2005): 可搬型絶対重力計 FG5 による南極における重力測定 (III), 国土地理院時報, 108, 21-27.
- 池田博, 福田洋一, 澁谷和雄 (2013): 昭和基地における超伝導重力計観測-3.CT 型, OSG 型への更新, 南極地球物理学ノート, 23, <http://polaris.nipr.ac.jp/~geophys-notes/Note/note23/index.html> (accessed at March 08, 2017).
- International Association for Geodesy (2015): IAG Resolution (No.2) for the establishment of a global absolute gravity reference system, http://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/IAG-docs/IAG_Resolutions_2015.pdf (accessed at March 24, 2016).
- 石井晴雄 (1970): 日本近海の海上重力測量, 測地学会誌, 15, 130-141.
- Jordan, T., Robinson, C., Olesen, Arne V., Forsberg, R. and Matsuoka, K. (2016): PolarGap 2015/16 Data Acquisition Report V, https://www.bas.ac.uk/wp-content/uploads/2015/10/polargap_data_acq_rep_v5.pdf (accessed at May 12, 2017).

- Kaminuma, K. and Mizoue, M. (1978): Modes of gravity anomaly distributions in relation to the crustal structure of the Antarctic continent, *Antar. Rec.*, 61, 32-39.
- 神沼克伊, 国見利夫, 大滝茂 (1980): 南極・竜宮岬と昭和基地付近での重力観測, 南極資料, 70, 149-157.
- Kaminuma, K., Tsukahara, K. and Takemoto, S. (1997): Absolute gravity value measured at Syowa Station, Antarctica, *Bulletin D'information*, 80, 26-29.
- Kasuga, T., Kaminuma, K. and Segawa, J. (1982): Gravity measurement on board the icebreaker 'Fuji' During the Japanese Antarctic Research Expedition, 1980-1981, *測地学会誌*, 28, 1-21.
- Kazama, T., Hayakawa, H., Higashi, T., Ohsono, S., Iwanami, S., Hanyu, T., Ohta, H., Doi, K., Aoyama, Y., Fukuda, Y., Nishijima, J. and Shibuya, K. (2013): Gravity measurements with a portable absolute gravimeter A10 in Syowa Station and Langhovde, East Antarctica, *Polar Science*, 7, 260-277.
- 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.
- 国土地理院 (1976): 日本重力基準網 1975 の設定, *測地学会誌*, 22, 65-76.
- 国土地理院 (2001): 南極地域 基準点・重力・地磁気・空中写真及び地図成果集録(2), 国土地理院技術資料, B1-No.32.
- 国土地理院 (2007): 国土地理院南極地域観測事業 50 年の変遷, 国土地理院時報, 111, 1-100.
- 小西康夫, 福田洋一, 野木義史 (2006): 南極観測船「しらせ」で得られた船上重力データの整備, 南極資料, 50(3), 251-262.
- 松崎和也, 福田洋一, 野木義史 (2014): 「しらせ」船上重力データの再処理, 南極資料, 58(3), 295-308.
- Morelli, C., Gantar, C., Honkasalo, T., McConnell, R.K., Tanner, J.G., Szabo, R., Uotila, U. and Whalen, C.T. (1974): The International Gravity Standardization Net 1971 (I.G.S.N.71), *Publ. Spec.*, 4, *Bull. Geod.*, 1-194.
- Nagao, T. and Kaminuma, K. (1984): Estimation of the crustal structure and the bedrock topography by the gravitational method around Syowa Station, *Mem. Natl. Inst. Polar Res.*, Spec. Issue, 33, 1-8.
- Nawa, K., N. Suda, Y. Fukao, T. Sato, Y. Aoyama and K. Shibuya (1998): Incessant excitation of the Earth's free oscillations, *Earth Planets Space*, 50, 3-8.
- Niebauer, T.M., Sasagawa, G.S., Faller, J.E., Hilt, R. and Klopping, F. (1995): A new generation of absolute gravimeters, *Metrologia*, 32, 159-180.
- Nogi, Y., Wilfried, J. Kitada, K., and Daniel, S. (2013): Geological structures inferred from airborne geophysical surveys around Lutzow-Holm Bay, East Antarctica, *Precambrian Research*, 234, 279-287.
- Okuda, T., Inoue, E. and Suzuki, H. (1957): Determination of the differences in gravity values at the Coast & Geodetic Survey (C&GS), the National Bureau of Standards (NBS), Washington, D.C., and the Geographical Survey Institute (GSI), Chiba, Japan., *Bulletin of Geographical Survey Institute*, Vol. V, parts 1-2, 1-12.
- Olivier, F., Henri, B and all participants (2014): CCM.G-K2 key comparison, *Metrologia*, 52, technical supplement.
- Sakuma A. (1971): Recent developments in the absolute measure of gravitational acceleration, *Nat. Bur. Stand. (U.S.)*, Spec. Publ., 343, 447-456.
- 佐藤忠弘 (2001): 超伝導重力計による観測研究, 月刊地球/号外, 35, 116-122.
- 佐藤忠弘, 澁谷和雄 (2013): 昭和基地における超伝導重力計観測-1.何故極地での観測が必要か?, 南極地球物理学ノート, No.21, <http://polaris.nipr.ac.jp/~geophys-notes/Note/note21/index.html> (accessed at March 08, 2017).
- Segawa, J., Kaminuma, K. and Kasuga, T. (1981): A New Surface Ship Gravity Meter "NIPRORI-1" with a Servo Accelerometer, *測地学会誌*, 27, 102-130.
- Segawa, J., Matsumoto, T. and Kaminuma, K. (1984): Free air gravity anomaly of Antarctic resion. *Spec. Map Ser. Natl Inst. Polar Res.*, 3.
- 菅原宏宏 (2011): 可搬型絶対重力計 FG5 による南極における重力測定 (IV), 国土地理院時報, 121, 9-19.
- 鈴木弘道, 大橋伸一, 柿沼清一 (1961): 第 4 次南極地域観測隊重力部門報告, 南極資料, 12, 38-44.
- Tsubokawa, T., Hanada, H. (1994): Absolute gravity measurements with a NAOM2 absolute gravimeter at syowa Station (abstract), *Proc.NIPR Symp.Antarct.Geosci.*, 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.
- Yanai, K. and Kakinuma, S. (1971): Measurement of gravity along the transverse route Syowa-South pole, *JARE Sci. Rep.*, Spec. Issue, 2, 131-150.
- Yoshida, M. and Yoshimura, A. (1972): Gravimetric survey in the Mizuho Plateau-West Enderby Land area, East

Antarctica, 1969-1971, JARE Data Rep., 17 (Glaciol.1) , 168-203.