

南極での重力測定

福田洋一

京都大学大学院理学研究科

1. はじめに

私は、1977年京都大学理学部を卒業、1979年地球物理学専攻修士課程修了、1980年に博士課程中退し弘前大学助手となり、その後、東京大学海洋研究所、京都大学理学部附属地球物理学研究施設(別府)を経て、1996年に地球物理学教室に着任、本年(2020年)3月、定年退職予定である。この間、1985-1986年の第27次日本南極地域観測隊(JARE-27)夏隊に参加以来、JARE-28, 33, 45, 55に参加したほか、昨年(2019年)11-12月には南極の韓国基地ならびにイタリア基地を訪問し、主に重力測定に関連した研究に従事してきた。このように、南極での重力測定は、私の40年の在職期間を通じて、一つの重要なテーマであったことから、本講演ではその役割や意義について紹介したい。

2. 重力測定の役割

地球の重力を測定することの意味は、大きく二つに分けられる。一つは地球上の異なる位置での重力の空間的な分布を調べることと、もう一つは同じ位置での重力の時間的な変化を調べることである。前者は「静的な重力(static gravity)」、後者は「時間変化する重力(time variable gravity)」と呼ぶこともある。

重力の空間的な分布を決めているのは、地球内部の密度分布であり、重力の空間分布から求められる重力異常は、地下の密度構造を知る重要な手がかりとなる。このことは、歴史的にみても、油田や鉱物資源などの探査を目的とし重力探査がきっかけとなり、バネ式の簡便な重力計が開発され、その結果、重力測定が盛んになったことにも表れている。

一方、地球の形は、近似の程度でその表し方が異なるが、例えば、回転楕円体で近似すると、その長軸半径と扁平率で表現できる。また、ジオイドを地球の形の近似と考えると、それは理想的に静止した海水面と考えられ、重力の等ポテンシャル面の一つとなる。このとき、静的な重力の空間分布がジオイドの形を決めている。近年、世界的な高さ基準の統一が重要な課題となっており、それをどのように実現するかを定めた ITRS (International Height Reference System) では、高さは

重力ポテンシャル数の差で表すとされており、高さの基準としても重力の空間分布を知ることの意義は益々高まっている。

重力の空間的な変化を表す重力異常は、通常、mgal (ミリガル: 10^{-5} m/s^2)の単位を用いて表すのに対し、時間的な変化には $\mu \text{ gal}$ (マイクロガル: 10^{-8} m/s^2)が用いられる。これは、重力の時間的な変化の信号は空間的な変化に比べ3桁程度小さいことを意味し、重力の時間的な変化の研究には高い測定精度が要求される。このため、従来、重力の時間的な変化の研究は、重力の連続記録を用いた地球潮汐の観測や、重力の繰り返し測定による火山や地熱貯留槽の研究などに、その応用範囲は限られていた。1990年代以降、ngal (ナノガル: 10^{-11} m/s^2)の感度で重力の連続観測が可能な超伝導重力計や $\mu \text{ gal}$ の精度で重力の絶対値が測定できる絶対重力計が商用ベースで供給されるようになり、さらに2000年代になり、GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) による衛星重力測定が実現すると、この状況は大きく変わってきた。今や重力の時間的な変化は、陸水変動、海洋変動、また、極域では氷床変動やGIA (Glacial Isostatic Adjustment)の研究など、その応用範囲が広がり、特に、GRACEのデータはこれらの研究に欠かせないものとなっている。今でも静的な重力場研究の重要性に変わりはなく、例えばGOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer)の衛星重力は、高精度な静的重力場決定を主目的としたものである。しかし、地上、衛星を問わず、現在の精密重力測定による重力の時間的な変化の研究は、従来の地球潮汐、火山といった固体地球に関連した問題ばかりでなく、氷床変動や海水準変動、その他、広い意味での地球環境変動のモニタリング手法としても大きな役割を果たすようになっている。

3. JAREでの重力測定

3.1 陸上重力測定

JAREでの重力測定の歴史は古く、重力異常を用いた氷床下の基盤地形や地下密度構造の推定などを主な目的とし、早い時期からバネ式の相対重力計を用いた重力測定が実施されている。相対重力測定では、重力基準点の重力値を決める必要があるが、そのため、すでに2次隊では昭和基地での重力振子による重力基準点測定が計画され、6次隊で初の測定に成功している。また、特筆すべきは9次隊の極点旅行に際して、昭和基地の重力基準点を基準として大陸沿岸から極点までのルートに沿ってラコスト重力計での測定が実施されたことで、このデータは今でも大変貴重なものである。その後現在に至るまで、折に触れ、大陸や昭和基地周辺での重力測定が実施されておりデータの蓄積が行われている(例えば、国土地理院, 2007; 福田, 2001)。表1は、必ずしも網

羅的ではないが、JARE での陸上重力測定をまとめたもので、これらは静的な重力場の決定に用いられている。

表 1. JAREによる陸上重力測定

JARE	出典	備考
9次	Yanai and Kakinuma (1971)	南極極点旅行
10次, 11次	Yoshida and Yoshimura (1972)	みずほ, 西エンダービーランド
14次	Abe(1975)	みずほ
19次	神沼・他(1980)	昭和基地周辺
22次	Kaminuma and Nagao (1984)	リュッツホルム湾, みずほ
23, 24, 26次	Nagao and Kaminuma (1988)	みずほ
27次	福田(1986)	セールロンダーネ, ルンドボークスヘッダ
28次	Shibuya and Fukuda (1999)	セールロンダーネ
33次	神山・他 (1994)	ドーム F
38次	Higashi <i>et al.</i> (2001)	ドーム F
41, 43次	Toda <i>et al.</i> (2012)	みずほ (地震探査測線上)

3. 2 船上・航空重力測定

JAREでの船上重力測定は、ふじが就航した8次隊から始まるが、南極海でデータが取得できたのは23次になってからである(福田, 1995)。このときの船上重力計はNIPRORI-I型と呼ばれるもので、この重力計は旧しらせで、25, 27, 28次で使用され、NIPRORI-II型に置き換えられた。その後、幾度かの休止はあるものの、データ集録装置等のアップグレードを重ねながら49次での旧しらせの最後の航海まで使用された。現在は、新しらせの就航に伴い重力計も一新して観測が続けられており、新たに導入されたマルチビーム測深儀とともに、海洋での地球物理学的研究に大いに貢献している。表2に、JAREによる船上重力測定の状態をまとめる。

表2. JARE による船上重力測定

JARE	砕氷艦	重力計
8(1966)、9(1967)、13(1971)、15(1973)	ふじ	GSI type
21(1979)、22(1980)、23(1981)	ふじ	NIPRORI-I
25(1983)、27(1985)、28(1986)	旧しらせ	NIPRORI-I
29(1987)、30(1988)、32(1990)	旧しらせ	NIPRORI-II
33(1991)、34(1992)、37(1995)~49(2004)	旧しらせ	NIPRORI-II(収録変更)
51(2009)~	新しらせ	Micro-G LaCoste

これら、地上や船上での重力測定に加え、近年、より重要性が増しているのが航空機を利用した重力測定である。JARE での航空重力測定は、ドイツとの共同研究として 47 次(2005～2006 年)夏隊で初めて実施された。

図1は、GOCE の衛星重力データと、上述の陸上・船上・航空重力データを用いて計算した昭和基地周辺のジオイドとフリーエア異常である (Fukuda *et al.*, 2016). 過去のものに比べ、図1の昭和基地周辺でのフリーエア異常の精度が一新されているが、これは航空重力測定の寄与によるもので、その重要性を如実に示したものである。特に、雪上車のルート上に沿ってしか存在しなかった大陸上や、海域でもデータの空白域であった海岸沿いのフリーエア異常が、わずか1シーズンの夏の観測で詳細に描かれているのを見ると、今後、航空機による測定を拡張することの意義・重要性は明白である。

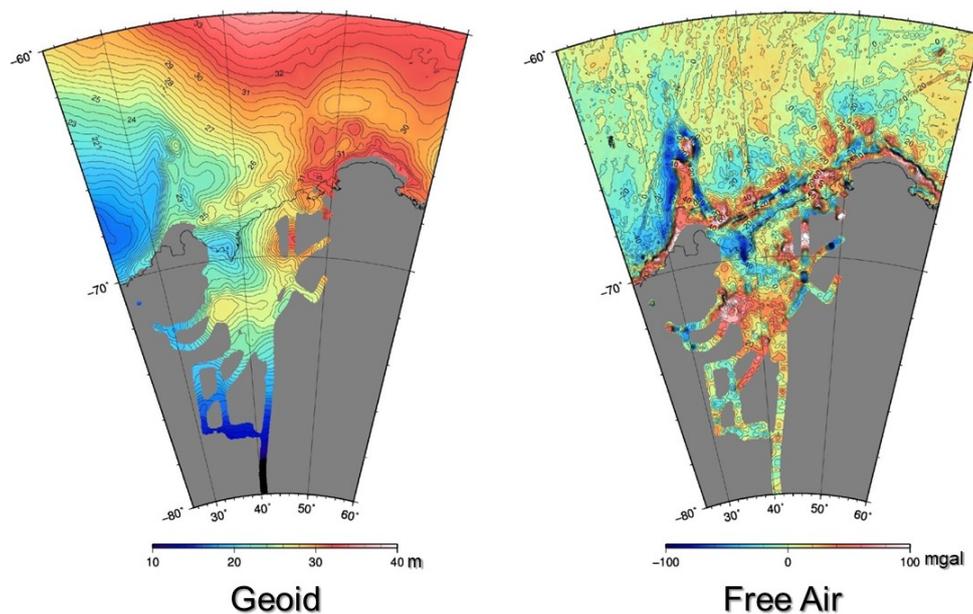


図1. 陸上・船上・航空重力から求めた昭和基地周辺のジオイドならびにフリーエア異常

3.3 絶対重力測定

JARE での絶対重力測定は、国土地理院が SAKUMA 式の絶対重力計(GA60)を用い 33 次隊で初めて実施した(松村, 2001). 続いて 34 次隊で国立天文台のグループが測定を行い、その後、36, 42, 45, 51, 53, 56, 59 次と、世界標準となっている MGL (Micro-g LaCoste)社製の FG-5 絶

対重力計を用いた測定が繰り返し実施されている。また、53, 59次では、野外用絶対重力計 A10 を用い、昭和基地周辺の野外露岸地域での絶対重力測定も行われている。

昭和基地は、南極の観測点としてもっとも頻繁に絶対重力の繰り返し測定が実施されており、そのデータから、重力の経年変化勾配も計算されている(例えば、東ほか, 2013)。得られた勾配は、昭和基地での高さ変化と整合的で一義的には GIA の影響によるものと考えられるが、さらに近年、昭和基地での降雪量増加の影響も反映している可能性が指摘されている。このように、絶対重力測定データは、相対重力測定の基準としてだけでなく、GIA や氷床変動などによる重力の経年的な変化の検出も重要な目的となっている。

3. 4 超伝導重力測定

ラコスト重力計を用いた地球潮汐の観測は、9 次隊での目視直読観測、21, 22 次隊での打点プリンターを用いた連続観測、28 次隊でのフィードバック型に改造したラコスト重力計でのデジタル記録による観測などがあるが、現在に通用する高精度な観測として昭和基地での超伝導重力計観測は、GWR 社製の TT-70(#016)を用い 34 次隊で開始された(佐藤, 2001)。当初、超伝導重力観測の主要な目的は、当時、進められていた超伝導重力計のグローバル観測網 GGP(Global Geodynamic Project)の一環として、スリッター・モードに代表される地球中心核のダイナミクスに起因する重力な微小シグナルを検出することであった。このため、地球を緯度方向に縦断する観測網が計画され、GGP-Japan と呼ばれた日本の観測網は、南半球のオーストラリア・キャンベラ、赤道域のインドネシア・バンドン、北極圏のニーオルセンと超伝導重力網を展開していったが、そのきっかけとなったのが、南極・昭和基地での TT-70 による観測であった。

TT-70 での観測は、その後約 10 年間続き、この間、地球常時自由振動の発見(Nawa *et al.*, 1998)や長周期潮汐の非弾性応答の研究(Iwano *et al.*, 2005)など、超伝導重力計観測ならではの成果を挙げている。しかしながら、当初の目的であったスリッター・モードの検出などには至らず、その最大の理由の一つは、主に地球表層流体、すなわち、大気・海洋・陸水変動の影響が超伝導重力観測のノイズとして大きく影響し、それらを十分に除去できなかったためによると考えている。

従来からも地球表層流体の運動が重力観測に影響することは知られてはいたが、高感度な超伝導重力計で実際に観測を行ってみると、その影響は予想以上に大きく、その除去は大変困難であった。一方、このことは、超伝導重力計、あるいは、一般に高精度な重力観測は、このような地球表層流体の質量移動を調べる手段として利用できることを示しており、そのことを明白に実証したのが GRACEによる衛星重力観測である。絶対重力、超伝導、衛星重力による高精度な重力測定は、

もはや固体地球のダイナミクスを知る手段としてだけでなく、重力変化、質量変動を通して、地球上で起こるすべての現象をモニターする手段となりえることを示している。

TT70 は、その後、44 次隊で小型のヘリウム液化装置を備えた CT(#043)に、また、51 次隊で更に小型で高性能となった最新の OSG (#058)に置き換えられ、現在に至っている。特に OSG はドリフトも非常に小さく、ほぼメンテナンス・フリーで長期の良質なデータが得られていることから、長期的な重力変化の連続記録として、GRACE のデータとも比較され、昭和基地周辺での積雪の重力への影響なども調べられるようになっている(Aoyama *et al.*, 2016)。

4. 新学術領域研究

近年、南極氷床融解やそれに伴う海面上昇は、地球環境変動と直結する大きな問題として社会的にも関心が集中している。このような問題の解決を目的として、2017 年度に科研費の新学術領域研究「熱－水－物質の巨大リザーバ:全球環境変動を駆動する南大洋・南極氷床」(領域代表:川村賢二, <http://grantarctic.jp/index.html>)が発足し、現在も継続中である。これは、南極研究に関連した初の新学術領域研究で、図2に示すように7つの計画研究からなり、昭和基地の位置する東南極をターゲットに、氷床・海洋・固体地球・生態系の観測研究を集中的に実施し、様々なモデル研究とリンクすることで、南大洋と南極氷床の全球変動における役割を解明することを目指したものである。

南極氷床変動は、従来からも地形学的・地質学的調査、測地観測や衛星データを利用した研究が進められているが、そこでの大きな誤差要因の一つが氷床荷重に対する固体地球の粘弾性応答である GIA の不確かさである。そのため、計画研究 A02-2「固体地球と氷床の相互作用」では、GIA をキーワードとし、GIA モデルの高精度化を目指し現場観測データが不足している東南極で、地形・地質調査や絶対重力測定・測地観測などを重点的に実施している。

絶対重力測定に関しては、本領域研究開始後、2017 年度には昭和基地および周辺地域、2018 年度はノルウェーおよびインド基地、2019 年度は韓国およびイタリア基地と、外国基地も含め、可能な限り多くの測定が実施できるように努めている。南極で絶対重力測定を実施することはまだまだ大変困難なことであるが、これらの測定が将来の基準となることを願っている。

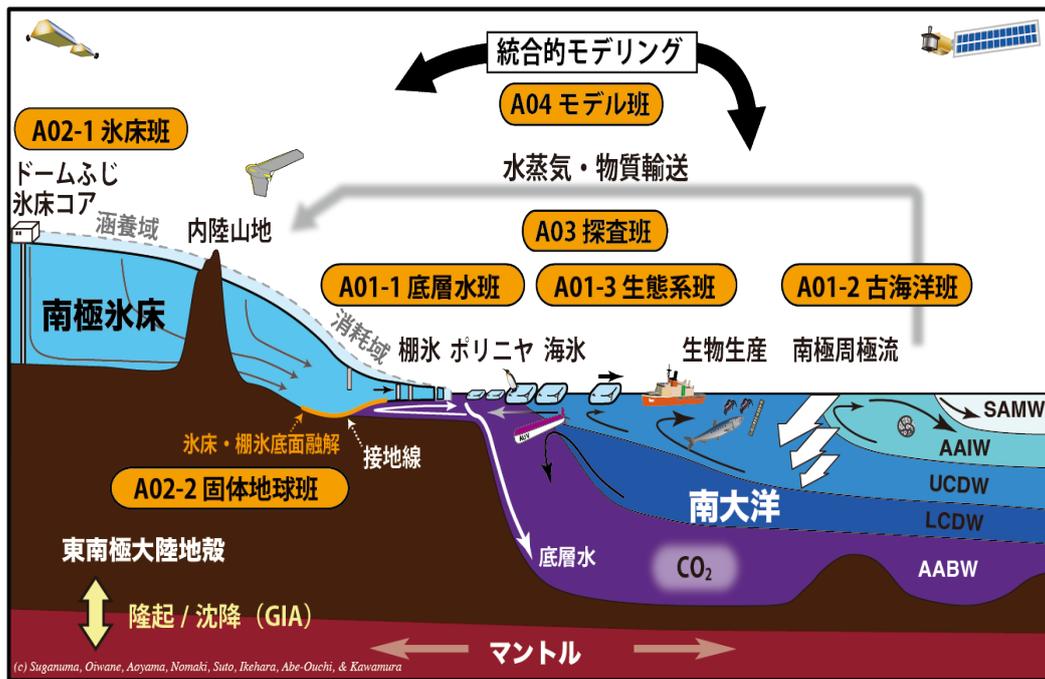


図2. 南大洋・南極氷床と全球環境とのつながりを表した模式図

(<http://grantarctic.jp/pages/intro.html> より引用)

5. おわりに

JARE での重力測定の実績も踏まえ、私に関わった過去約 35 年の重力測定の実況を振り返った。この間、ジオイド決定や地下構造推定を目的とした重力測定の実績や意義は、今でも全く変わっていない。しかし、従来の陸上・船上重力測定だけでなく、航空重力や衛星重力データが利用できるようになった現在、これらの重要性が益々高まっており、今後、これに呼応して陸上・船上重力の高密度・高精度化が望まれる。

重力の時間的変化の研究は、1990 年代に昭和基地での絶対重力測定や超伝導重力観測が実現し、それ以降、本格的になっていった。特に GRACE の衛星重力の出現は、重力の応用研究に明らかなパラダイムシフトをもたらした。今や重力の時間的変化に関連した研究は、固体地球の研究に留まらず、質量変化を伴う地球システム内のすべての現象の研究に応用できると考えられるようになってきている。学際的な研究を目指す新学術領域の計画研究の一部として絶対重力測定が積極的に実施しているのも、まさにこのような背景によると考えている。

このような変革の時代に研究生活を送ることができ、私にとって大変幸せなことであった。最後に、それを支えて下さったすべての方々に深く感謝の意を表したい。

文献

- Aoyama, Y, K. Doi, H. Ikeda, H. Hayakawa, K. Shibuya, Five years' gravity observation with the superconducting gravimeter OSG#058 at Syowa Station, East Antarctica: gravitational effects of accumulated snow mass, *Geophys. J. Int.*, **205**, 1290-1304, 2016.
- 東 敏博, 土井浩一郎, 早河秀章, 風間卓仁, 太田晴美, 大藪伸吾, 羽入朋子, 岩波俊介, 青山雄一, 渋谷和雄, 福田洋一, 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, 2013.
- 福田洋一, 南極海の重力測定の現状とその問題点, *月刊海洋*, **27**, 351-355, 1995.
- 福田洋一, 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, 2001.
- Fukuda, Y., Y. Nogi, K. Matsuzaka, Precise gravity-field modeling in the area of the Japanese Antarctic station Syowa and evaluation of recent EGMs, *Polar Science*, **10**, 101-109, doi:10.1016/j.polar.2016.01.002., 2016.
- Iwano, S., Y. Fukuda, T. Sato, Y. Tamura, K. Matsumoto and K. Shibuya, Long-period tidal factors at Antarctica Syowa Station determined from 10 years of superconducting gravimeter data, *Journal of Geophysical Research*, **110**, B10403, doi: 10.1029/2004JB003551, 2005.
- 国土地理院, 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, 2007.
- 松村正一, 重力基準点網の歴史と重力絶対測定, *月刊地球号外*, **35**, 102-108, 2001.
- Nawa, K., N. Suda, Y. Fukao, T. Sato, Y. Aoyama, K. Shibuya, Incessant excitation of the Earth's free oscillations, *Earth, Planets and Space*, **50**, 3-8, 1998.
- 佐藤忠弘, 超伝導重力計による観測研究, *月刊地球号外*, **35**, 116-122, 2001.