

南極での重力・GPS測定

福田洋一 (1977 年卒)

1. はじめに

日本の南極地域観測隊 (以下、JARE: Japanese Antarctic Research Expedition と略す) による重力測定には色々な目的があるが、第一には基準点測量と同様に昭和基地での重力基準点を構築することである。これは主に国土地理院が担当しており、国土地理院 (2007) に詳細な記載がある。また、やや古くなるが、月刊地球号外 35 「新しい南極地球科学—半世紀の進展と展望」には、南極での固体地球科学に関連した多くのレビューがあり、重力に関連しては、重力基準点網・絶対重力測定 (松村, 2001)、超伝導重力計観測 (佐藤, 2001)、海域・陸域重力測定 (福田, 2001) などの記載がある。一方、GPS についても国土地理院 (2007) に詳細な記載があるほか、Shibuya (1993)、Shibuya *et al.*, (2003)、また神沼(2008)には、最近の JARE での測地観測全般についてのレビューがある。

このように、南極での重力・GPS 測定に関連しては既に多くの文献が存在するので、史料として新たに書き加えるべきことはそれほど残っていないように思われる。そこで、大変偏った記載になることは承知で、本稿では私自身が関わった測定・観測を中心に、重力・GPS にまつわる幾つかのエピソードを紹介したい。それぞれの詳しい内容や成果等については、参考文献や、そこに記されている文献等を参照されたい。私が JARE に参加したのは、JARE-27 (1985-1986)、-28(1986-1987)、-33(1991-1992)、-45(2003-2004) であるので、JARE の 50 余年の歴史の内その後半部分の記載が主となる。この時代の重力・GPS 測定に関連した南極観測の雰囲気但至少でも伝われば幸いである。なお、本文中での人物の敬称はすべて省略させていただいた。

2. 船上重力測定

JARE による船上重力測定は、ふじが就航した 8 次から始まるが、南極海でまともにデータがとれるようになったのはふじも退役間近な 23 次になってからである (福田, 1995)。このときに用いられていた船上重力計は、東京大学海洋研究所の瀬川爾朗による NIPRORI-I 型と呼ばれるもので、この重力計が新しく就航したしらせ (JARE-25 で就航した旧しらせの意) でも使用された。私は、当時、弘前大学の助手であったが、1984 年の初めに瀬川から突然電話があり、その年(JARE-26)の夏隊で、船上重力担当として南極に行かないかとの打診であった。結局、JARE-26 では隊員枠の関係で船上重力測定は実施されなかったが、私は、JARE-27、-28 と 2 年続けて船上重力担当として観測隊に参加することとなった。

JARE-29 からは船上重力計は改良型の NIPRORI-II に置き換えられ、JARE-31 では休止したものの、JARE-29 には藤浩明 (当時: 東大海洋研院生、現: 地磁気世界資料解析センター)、JARE-30 には野木義史 (当時: 神戸大院生、現: 極地研究所)、JARE-32 には島伸和 (当時: 東大海洋研院生、現: 神戸大学) が、船上重力担当の夏隊員として (もちろん船上重力だけを担当した訳ではない) として参加した。いずれも海洋・海底観測に係わっていた 20 代半ばの大学院生であり、これらの人材を得たことは、この間の船上重力観測の大きな成果かもしれない。

JARE-33 では、それまで使用していたミニコンによるデータ収録をパソコンに切り替える大幅な変更が行われた。ちなみに、船上重力測定では、船の動揺を補正するためリアルタイムでの高速なデジタル・フィルタリング処理が必要で、NIPRORI-I では NOVA のミニコンが、また、NIPRORI-II では、その後続の 32 ビットスーパーミニコンが使用されていた。これらは、広い設置スペースが必要でしらせ後部の観測室を占有していたし、その操作にはある程度の専門知識を必要とした。このため、データ収録部分を、当時進歩の著しかったパソコンを用いたものに切り替えることが重要な課題でもあった。東大海洋研に移っていた私は、パソコンによる収録ソフト開発の一部を担当していたため 3 度目の南極観測に参加することとなった。この変更により、以後、船上重力計専任の隊員は不要となり、NIPRORI-II は JARE-49 の旧しらせ最後の航海まで使用されているが、観測は、地学担当の越冬隊員が往路、復路を別々に担当するだけで済むようになった。このため、船上重力担当の夏隊員枠 1 名は減ったが、その分は後に述べる超伝導重力計担当隊員枠に振り替えられており、京大関係者にも多い JARE-35 次以降の地学関係越冬隊員も、多くはこの枠を使用したものである。

3. 地上重力測定

初めて観測隊に参加した JARE-27 では、メインの仕事はしらせの往路・復路での船上重力であったので、南極滞在中、何をすれば良いのか右も左もわからないというのが実情であった。そのような状況を見越してか、極地研の神沼克伊は、南極滞在中の仕事として、セールロンダーネと昭和基地の重力結合や、昭和基地周辺の大陸沿岸での重力測定の仕事を観測計画に含めるよう、アドバイスを与えてくれた。おかげで、ラコスト重力計を携え、さまざまな貴重な経験をさせてもらった。

2年目の JARE-28 では、夏の滞在期間中にどのようなことができるかおよそ様子も分かっていたので、幾つか、独自の夏観測計画を立てることができた。その一つが昭和基地での重力潮汐観測であった。昭和基地での重力潮汐の観測は、JARE-9 でラコスト重力計の目視直読(Nakagawa *et al.*, 1969)、JARE-21、22 で電気出力の打点プリンターによる観測が行われていたが、これらは当時のレベルからみても精度的には不十分なものであった。JARE-28 では、ラコスト重力計に Harrison and Sato (1984)による改良を施し、フィードバックアンプとデジタルカセットを用いた当時としては最も進んだ測定方法を採用した。このとき、国立天文台の佐藤忠弘には、重力計の改良からフィードバックアンプの製作指導まで（これらはすべて手作りであった）、大変お世話になった。この時の重力潮汐観測が、後の昭和基地での超伝導重力計観測への縁でもあった。

当初、昭和基地に滞在中の約 1 カ月の観測を行うことで計画をしていたが、JARE-28 では極地研の渋谷和雄がセールロンダーネで越冬することになっており、セールロンダーネの越冬中も同様の観測をやるうということになった。それなら、ということで昭和基地で越冬する赤松純平に保守を托し、通年観測を行ってもらった。ただ、昭和基地での重力計の状況は必ずしも良くなく、実際に解析に使用できたデータの期間は 2 カ月程度であった。これは、フィードバックアンプなどの温度対策が不十分であったためではないかと思っているが、問題のあった装置の保守をしてもらった赤松には申し訳ない思いである。それでもこの時に得られた潮汐定数は、後に超伝導重力観測が実施されるまでは、最も信頼できるものであった。

4. 超伝導重力観測

JARE-33 では、重力に関係した 2 つの重要なオペレーション（JARE では「オペレーション」という言葉が日常的に使われる）が計画されていた。その一つが超伝導重力計観測である。南極での超伝導重力計観測は、佐藤忠弘が中心に計画を進め、佐藤は JARE-33 で越冬し観測を行う予定であった。超伝導重力計は、液体ヘリウム温度で超伝導コイルを流れる永久電流が作る磁場による磁気浮上力（マイスナー効果）を利用した極めて高感度な相対重力計であり、その運用には液体ヘリウムが必要なことから、JARE-33 では超伝導重力計と共にヘリウム液化装置も昭和基地に持ち込まれた。もちろん、超伝導重力計もヘリウム液化装置も南極での運転は世界で初めてのことである。この時は、当時京大の院生であった金尾政紀にも手伝ってもらい、ヘリウムの液化、超伝導重力計の設置もほぼ順調に終了したが、仕上げの液体ヘリウム注入中に問題が発覚した。真空容器のマイクロクラックと呼ばれるわずかなひび割れのため、JARE-33 での超伝導重力計の立ち上げは断念せざるを得なかった。佐藤は、その執念で翌年 JARE-34 での再立ち上げにチャレンジし、見事に観測開始に漕ぎつけている。この間の事情は、佐藤 (2006) 自身に述べられている。先に述べたように、昭和基地での超伝導重力計観測の開始により従来の地学関係の越冬隊員枠が 1 名から 2 名に増え、京都大学からも多くの地学系隊員（南極観測隊：京大関係参加者リスト、参照）が越冬し、観測に貢献した。

JARE-34 から観測を開始した超伝導重力計は TT-70 型(#016)と呼ばれるものであるが、JARE-44 まで使用され、その年に新たに持ち込まれた 4K の冷凍機を備えた CT 型 (#043) との並行観測の後、その使命を終えた。JARE-44 では、このため低温工学の専門家である筑波大学の池田博が越冬して作業にあたった。私は JARE-45 の夏隊として 4 度目の南極観測に参加したが、その際、JARE-45 で越冬した土井浩一郎と共に、CT 型の最終的な設置と調整に参加することができた。また、TT-70 や、CT 型では不要となったヘリウム液化装置の解体も行ったが、12 年間の時間を経てこれらに立ち会うことができたことは幸運なことであった。昭和基地の TT-70 には後日談があり、解体され持ち帰った TT-70 は、その後整備され、現在、神岡鉱山の観測室内で現役として超伝導重力観測を続けている。南極で液化機を運転することはもう限界となっていたが、液体ヘリウムが手に入る国内では、昭和基地引退後も、まだ現役として十分使えるのである。

昭和基地の超伝導重力計は、その後、JARE-51 で最新の OSG 型 (#058) に置き換えられている。OSG 型はさらに小型で高性能になった 4K 冷凍機を備え、コンピューター制御による調整が可能になっている。OSG 型の設置のため再度 JARE-51 に参加した池田博によると、OSG 型では、設置後もほとんど無調整で良好なデータが取得できており、また、すべてのモニターがインターネット越しに国内で行えるということで、もはや超伝導重力計枠の隊員も必要なくなったようである。これはもちろん研究面では都合の良いことに違いはないが、後継者育成や教育面という意味で良いことなのかどうか、やや疑問に感じるところでもある。

5. 絶対重力測定

JARE-33 での重力に関連したもう一つの重要なオペレーションは、昭和基地での絶対重力測定であった。昭和基地の重力基準点は、国際絶対重力基準点網 (IAGBN) の A 点 (大陸などの地殻の安定な地域に設定) に登録された我が国唯一の点であり、IAGBN に登録されたことについては、中川一郎の尽力が大きい。JARE-33 では、国土地理院から藤原智と渡辺和夫の 2 名が参加し、SAKUMA 式の絶対重力計 (GA60) を持ち込み測定を行った。国土地理院からは測地担当として夏隊 1 名の参加が通例であるので、藤原は絶対重力測定枠 (担当は地学系) での参加ということになる。GA60 は、フランスの国際度量衡局で活躍された佐久間晃彦が開発した投げ上げ式の絶対重力計で、その測定には 3 名のオペレーターを必要としたことから、私は 3 番目のオペレーターとして実際に絶対重力測定に参加することができた。私は、後に FG-5 や A10 と呼ばれる絶対重力計を使うようになるが、このときに投げ上げ式の絶対重力計で実際に測定を行ったことは、大変貴重な経験であった。このとき、20 数日の測定で、834 個の有効な測定データを得ているが、この一発一発の測定には、落体 (コーナーキューブ) を投げ上げる職人的なテクニックが必要であった。FG-5 や A10 では、測定は機械まかせで多数のデータを自動的に得ることができるが、絶対重力測定あるいはこの種の精密計測について、地面の揺れを地震計モニターで確認しながら、揺れの静かな時を見計らって手で打ち上げる GA60 の測定から学んだことは大変多かったように思う。

昭和基地での絶対重力測定は、JARE-34 で国立天文台のグループが実施した後、JARE-36、-42 と、国土地理院が、現在、世界的に標準の絶対重力計となっている FG-5 を用いて実施している。さらに、JARE-45 では、地理院から参加した平岡喜文と協力し、地理院と京都大学の 2 台の FG5 で測定を実施した。この時、約 1 カ月間に 10 万個以上の測定値を得ることができたが、これは JARE-33 での GA60 の 100 倍以上のデータ数である。また、2 台の重力計の測定値の差は、重力計の公称精度である $2 \mu\text{gal}$ より小さく、信頼性の高いものである。

昭和基地で予想される重力変化はそれほど大きなものではないが、このような高精度の絶対重力測定を繰り返し実施することにより、氷床変動、ポストグレイシャーリバウンドなどによる重力変化も検出可能と思われ、これらの研究に重要な拘束を与えるものと期待できる。このような観点から、第 VIII 期 (平成 22 年度～27 年度) 南極観測から公募されるようになった一般研究観測として、今後、土井浩一郎が提案した昭和基地や大陸沿岸での絶対重力測定の実施が計画されており、その成果が期待される。

6. GPS 観測

私が初めて南極で GPS 観測に関わったのは、JARE-28 (1986-87) の時である。南極に限らず GPS が実際に利用できるようになったのは 1980 年代中頃以降のことであるので、これはかなり早い時期ということができる。もっとも、GPS 観測は、JARE-28 であすか基地に越冬した渋谷和雄が計画したもので、私はその一部のお手伝いをしただけである。私が関わったのは、ブライド湾での標高の決定 (ジオイド高の取り付け) で、渋谷が L0 地点と呼ばれるブライド湾近くの棚氷上で、私がしらせ船上で、計 2 台の受信機を使つての干渉測位を行った。渋谷 (2006) も述べているように、当時は GPS 受信機そのものがまだ容易に手に入るものではなく、ソニーが試験用に開発したものを借り受けての観測であった。観測にあたり GPS アンテナを臨時にしらせ後部甲板のクレーンの先に取り付けることになったが、GPS そのものあまり知られていない時代で、しらせの航空科に GPS アンテナがヘリの離発着の邪魔にならないことを説明し、取り付けの許可をもらったように覚えている。しらせ船上では、道田豊 (当時: 海上保安庁水路部、現: 東京大学大気海洋研究所) が臨時に数日間の潮汐観測を行い、その平均海面をもとに (厳密ではないが) L0 地点の標高を決めるというものであった。かなり乱暴な測定のようにも思えるが、私の知る限り、それ以後ブライド湾での同種の測定は行われていないので、実測値としては、現在でもこの測定が唯一の

ものであると思う。

それからわずか5年後、JARE-33 (1991-92)に参加した時には、GPSはもうそれほど珍しいものではなく、ハンディGPSが野外調査にも使い始められるようになっていた。しらせ船上でも船上重力や地磁気観測用にGPSが用いられるようになっていたが、しかし、しらせそのものにはまだGPSは装備されておらず、航海情報はNNSSに頼っていた。我々はブリッジの下の観測室でGPSによる位置情報を取得していたので、しらせの当直員がときどきその値を写しに来て、その精度が良いのに感心していた。しらせの航海記録としての正式な位置情報はNNSSによるものであるが、その横に、参考としてGPSの値が記されていたように記憶する。

JARE-33では、SCARのキャンペーン観測として、夏期間に昭和基地でのGPS連続観測が行われている。これは、国土地理院の渡辺和夫と藤原智によるもので、絶対重力測定を実施しながらの観測ということもあり(もちろんそれ以外の理由の方が重要であろうが)、測定点は受信機が設置された重力計室からアンテナケーブルが届く範囲に選定された。その後、JARE-36からはレドームで覆われた恒久的なGPS基準点が設置され、IGS点(SYOG)に登録されているが、SYOGも重力計室の近くに設置されている。

現在、ナビゲーション用のGPSは雪上車で日常的に用いられているばかりでなく、GPSロガーは氷河流動などの研究分野でも利用されている。また、GPSによる精密測位では、IGS点での連続観測から、昭和基地での隆起速度が求められており、さらに、これらの観測は、昭和基地周辺の沿岸地域や大陸氷床上でも行われるようになってきている。精密測位の応用例として、JARE-47では、野木義史が中心となり昭和基地周辺での航空重力測定が行われているが、これが実現したのはGPSによるキネマティック測定が可能になったからである。GPSは、もはや南極観測に欠かせないものとなっている。

7. おわりに

「京大地球物理学研究の百年」の原稿ではあるが、ここまで、あえて京大関係者だけを抜き出した記事にはしなかった。ただし、私が直接関係しなかったという理由だけで、人工地震探査と関連した重力探査の記事が抜けているのは明らかにアンフェアである。これらに関しては、伊藤潔、金尾政紀、戸田茂らの貢献が大変大きい。また、内陸旅行中の重力測定についても、神山孝吉、金尾政紀、東敏博、岩野祥子など、大勢の隊員が貢献している。

南極観測では、個別の観測がそれだけで完結するということはあり得ないことである。本稿で紹介したような観測が実現できたのも、直接、観測に関わった隊員だけでなく、その他すべての隊員、またその隊員を送り出した国内でのサポートがあつてのことである。これらすべての方にお礼を申し上げたい。

参考文献：

- 福田洋一 (1995) : 南極海の重力測定の現状とその問題点, 月刊海洋, 27, 351-355.
- 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.
- Harrison, J.C. and T. Sato (1984): Implementation of electrostatic feedback with a LaCoste-Romberg Model G gravity meter, *J. Geophys. Res.*, 89, 7957-7961.
- 神沼克伊 (2008) : 南極大陸のダイナミクス—測地学的研究の幕開けとしての1990年代の貢献, 測地学会誌, 54, 15-30.
- 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集, 1-100.
- 松村正一 (2001) : 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.
- Nakagawa, I., S. Kakinuma, K. Yanai and Y. Endo (1969): Observation of tidal variation of gravity in Syowa Station, *Antarctica, Nankyoku Shiryo*, 36, 59-64.
- 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 (2006) : 南極・超伝導重力計観測事始め, 南極観測隊—南極に情熱を燃やした若者たちの記録—, 南極OB会編集, 技術堂出版, 426-429.
- Shibuya, K. (1993): Syowa Station: observatory for global geodesy in Antarctica (a review). *Proc. NIPR Symp. Antarct. Geosci.*, 6, 26-36.
- Shibuya, K., K. Doi and S. Aoki (2003): Ten years' progress of Syowa Station, Antarctica, as a global geodesy network site. *Polar Geosci.*, 16, 29-52.
- 渋谷和雄 (2006) : GPS観測, 南極観測隊—南極に情熱を燃やした若者たちの記録—, 南極OB会編集, 技術堂出版, 254-257.