

可搬型絶対重力計FG 5 による南極における重力測定

Gravity Measurements with the Portable Absolute Gravimeter FG 5 at Antarctica

測地部 山本宏章

Geodetic Department Hiroaki YAMAMOTO

要旨

1994年11月に日本を出発した第36次日本南極地域観測隊に参加し、南極・昭和基地において第3回目となる絶対重力測定を行った。測定に使用したのは国土地理院の絶対重力計の一つである、FG 5 絶対重力計 (FG 5 # 104/GSI 1994.09) である。測定は昭和基地にある重力計室内で、1995年1月20日から2月11日の間に実施した。ハードウェアに大きなトラブルが発生したが、修理のうえ429時間の連続測定に成功した。昭和基地は地盤の振動が少なく、数多くの良質のデータを取得して、 10^{-9} の精度で重力値を決定することができた。同時に、振幅 ± 0.005 mgal ($1 \text{ mgal} = 10^{-5} \text{ m/s}^2$) の、海洋潮汐による荷重変化に対応すると考えられる重力の時間変化を検出することに成功した。これらは極地域では初めての絶対重力連続測定である。

1. はじめに

日本の南極観測の拠点となる昭和基地における重力基準値は、第6次日本南極地域観測隊(1962年)によって、GSI型振子を使用して測定された値が近年まで使用されてきた。この重力値の精度は 10^{-6} から 10^{-7} ほどであり、現在の世界的な重力値の精度と比べるとかなり劣っている。しかしながらGSI型振子は、ラコスト重力計と同じ相対重力計であり、当時、日本から遠く離れた南極までの移動時間と距離、輸送の困難性を考慮すれば、この精度で重力値を決定したことは賞賛に値するものであった。

昭和基地は1987年、世界36点で構成される国際絶対重力基準網 (International Absolute Gravity Basestation Network ; IAGBN) の本点であるA点の一つに採用された。これを受けて、国立極地研究所は第IV期五カ年計画 (地学研究計画) の中で、昭和基地での絶対重力測定計画を盛り込み、観測が実施された。まず第33次日本南極地域観測隊 (1991年) によって、国土地理院の投げ上げ式絶対重力計 (JAEGER GA60) を用いて、最初の絶対重力測定が実施された。翌年には国立天文台水沢のグループが、2台の絶対重力計を用いて測定を行っている。今回は3回目の実施であり、この測定をもっ

て第IV期五カ年計画の中での絶対重力測定が終了した。

2. 絶対重力測定の目的

地球上の重力値は決して一様ではなく、場所によって異なり、時間の経過につれて変化している。重力は地球の大きさ、形状そして内部の物質の密度分布の影響を受けている。従って重力の測定は、地下構造を推定したり、地球の形状を知るための重要な手段の一つとなっている。また最近では、精密なジオイドを求めるデータとして再び脚光を浴びつつある。一方、地面の高さや地球内部の構造が時間と共に変化すれば、重力は時間変化を引き起こす。同じ測定点で重力値の測定を繰り返して、重力の時間変化が検出されれば、地殻の上下変動をはじめ、重力の大きさを決めている様々な要因が変化したことがわかる。この様な手法で繰り返し重力測定を行うことによって、地殻変動やグローバルな変動を監視することが可能となる。

重力の大きさは、重力に伴って生じる加速度のことであるから、重力は、基本的には重力に従って時間とともに変化する物体の高さの変化の様子を調べることによって測定が可能ならずであり、絶対重力測定は、この理屈に忠実に従った測定方法である。絶対重力測定では、その地点だけの測定で重力値を決定することができる。

相対重力測定では、重力値が既知の点を基準にして、これとの重力差を測定し、未地点の重力値を決定していく方法で、絶対重力測定によって決められた重力基準点を使用して求点の重力値を決定しなければならない。相対重力測定で使用される器械は、現在まで使用されているラコスト重力計や、近年ではシントレックス重力計などがある。これらの重力計は、1回の観測が数分ですむ利便性を持っており、取り扱いも容易で小型、軽量である。この重力計には精密なバネが使用されており、バネの伸縮で重力差を求める方法が用いられている。精密なバネとはいっても、時間と共にドリフトが発生し、またショックに弱く、移動に時間がかかる時には精度よく測定ができないという欠点も持っている。このため重力基準点から離れるに従って精度は悪化し、南極のように到達するのに時間がかかる場所では、精度よく相対重力計

で測定するのは困難である。このようなことから、南極においても絶対重力測定を行い、重力の変化を測定することが、南極における測地観測の大きな課題となっていた。

昭和基地での絶対重力測定は国際的にも大きな意義を有している。前述のとおり、昭和基地はIAGBNのA点に採用された。IAGBNとは、全地球に絶対重力測定点を配置して、重力測定の基準となるネットワークを形成しようとするものである。目的は重力の基準値を与えるとともに、重力の時間変化を監視し、測地学や地球物理学をはじめとする研究に役立てようとするものである。IAGBN点は、大陸などの地殻の安定した場所におくA点、地殻変動が予想される場所におくB点と二種類が存在する。日本国内では、筑波、江刺及び京都の三カ所がIAGBN点に採用されているが、いずれもB点である。従って日本が担当する唯一のA点が昭和基地である。また、南半球の高緯度地域として南極地域では昭和基地と米国のマクマード基地の2点だけであり、重力は地理的な緯度により異なるので、昭和基地のIAGBN点の意義は非常に大きい。

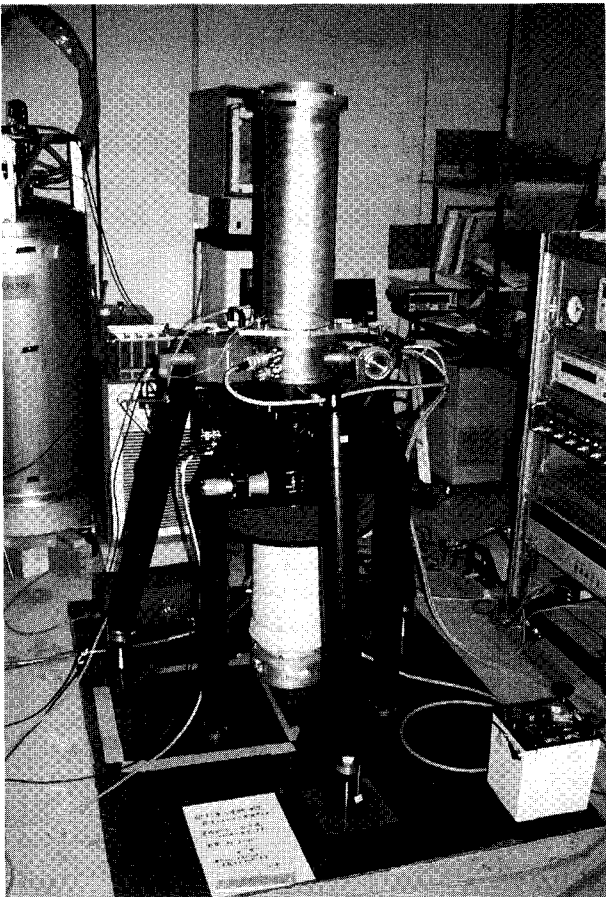


写真-1 昭和基地IAGBN点に設置したFG 5絶対重力計
重力計室には超伝導重力計もあり室内は煩雑としている。

3. FG 5 絶対重力計の測定原理

今回昭和基地で測定したFG 5絶対重力計（以下FG 5）は（写真-1）、国土地理院が1992年に米国AXIS社（現在Micro-g社）から購入したものである。絶対重力の測定方法として落下式を採用している。一方、最初に昭和基地で絶対重力測定が実施された際に使用したGA60は、投げ上げ式を採用している。FG 5の測定原理を図-1に示した。真空中で試験質量（コーナーキューブ）を自由落下させ、その位置変化をレーザー干渉計で逐次測定し、その加速度（重力加速度）を求めるものである。また、試験槽の残留気体の影響を極力除去するため、試験質量はドラッグフリー槽（試験質量を納めた容器）の中に入っているのが大きな特徴である。この方法を採用することにより、試験槽の真空度が 2×10^{-6} torr程度（1 torr = 1 mmHg）に達すれば測定を開始することが可能となっており、可搬性を高めるのに貢献している。

また、FG 5は多数回の連続落下測定を容易に行うことが可能で（最短10秒毎に1回の落下測定）、統計的に非常に高い精度が得られる装置である。測定はプログラムで制御されており、調整が終了すればほとんど自動的に測定を行うことが可能である。設計もコンパクトな設計になっており、移動観測も従前に比べ負担が軽減されている。

FG 5が1992年に導入された後、国土地理院構内にある重力測定棟における試験観測のほか、1994年にはフランスで開催された絶対重力計の国際比較観測にも参加し、絶対値の再現性も ± 0.015 mgalで一致していることが確認されている。世界的にも同機種が10数台稼動しており、その再現性は極めて高いことが確認されている。

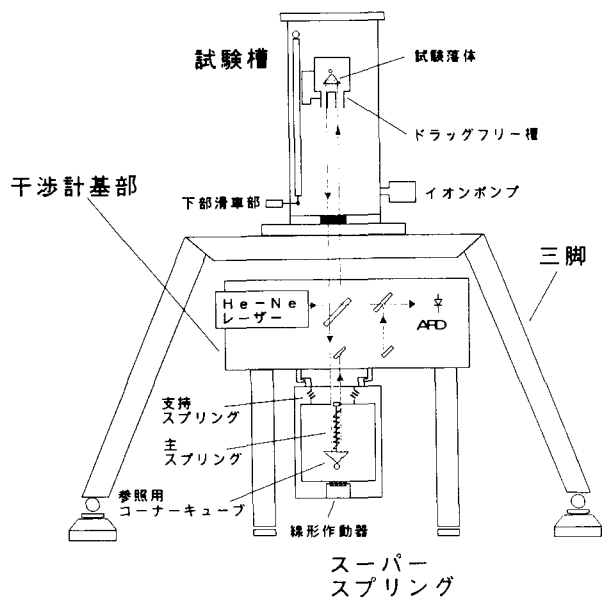


図-1 FG 5絶対重力計の装置主要部とレーザー光路

4. 測定経過

南極・昭和基地に観測隊員や器材を輸送するのは海上自衛隊が担当しており、砕氷艦「しらせ」による海路で輸送される。昭和基地での重力値の信頼性を確認するため、器材積み込みの直前の1994年10月21日から3日間、重力測定棟C点で絶対重力測定を実施し、その後「しらせ」にFG5と器材一式を積み込んだ。

例年通り11月14日晴海埠頭を出航し、昭和基地に12月24日接岸した。接岸と同時に、ヘリコプターの空輸によってFG5とともに昭和基地に初めて足を踏み入れた。この後器材の開封を行い、重力計室内にFG5を搬入した。同時にラコスト重力計による重力の鉛直勾配を求めた。そしてFG5を組み立て、調整に入った。長期間試験層を放置しておいたため、24時間かけて試験槽の排気を行った。輸送による影響を受けやすいレーザーも順調に点火することを確認した。

数々の準備を施し、連続観測を目前にした12月28日、最終調整過程で、地盤振動補償装置のスーパープリング部の、参照用コーナーキューブと主スプリングをつり上げている直径0.17ミリのワイヤーが切断する事故に遭遇した(写真-2)。その結果、バネとコーナーキューブは筒の下に落下し、測定不能状態に陥った。この部分のワイヤーが切断するのは初めてで、予備品の用意が無く、日本にその事情を説明するFAXを送信した。その後、日本とメーカーとの間で頻りにFAXによる連絡を取りながら慎重に修復を試みた。最終的にワイヤーを張り替えることを決断したが、その代替品は36次隊員の発案によるギター用の弦が最も適していることがわかった。これをヤスリで削り、代替品として使用することがようやく可能となった。修復は非常に繊細な作業の連続であったため、正月も返上して作業を続けたものの、日数を費やし1995年1月20日からようやく測定するところまで回復させることができた。

絶対重力測定は2月11日まで間、21日間実施し、途中の調整や若干のトラブルはあったものの、ほぼ連続的

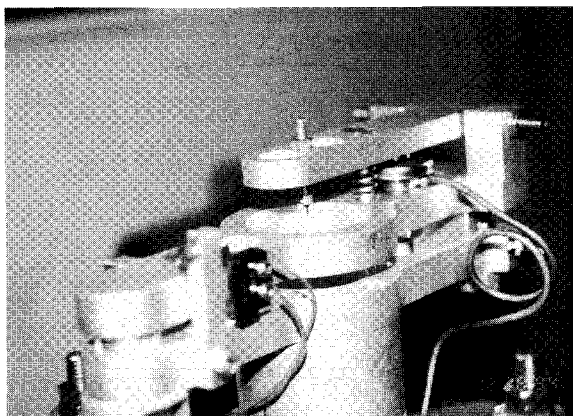


写真-2 切断したワイヤー部分
バネと参照用コーナーキューブが筒の下部に落下した。

にデータを取得することに成功した。今回の測定は、15秒間隔で落下測定を行い、150回から160回の落下測定を1セットとして実施した。

5. 重力値の補正計算と得られた成果

絶対重力測定の精度は 10^{-9} をめぐしているために、厳密な重力値の補正が必要である。このため以下の補正を行った。

(1) 地球潮汐補正

月と太陽から生じる潮汐力による重力値への影響を取り去るために、1回の落下毎に潮汐補正を計算した。計算はFG5プログラムソフトを使用した。このプログラムは第33次日本南極地域観測隊で使用され、その後も国内観測において使用されているプログラムと同じ結果を出力することを確認済みである。

(2) 気圧補正

気圧変化によって生じる、大気による引力や荷重の変化の影響を取り去るものである。標準気圧、標高補正、気圧アドミタンス値は、いずれも第33次日本南極地域観測隊と同値を使用し、1回の落下毎に気圧データを自動測定し、1セット毎に計算を行った。

(3) 極運動補正

地球の自転軸のふらつきにより地心位置が変化する影響を取り除くものである。一日毎に計算を行った。地球回転パラメータはIERS (International Earth Rotation Service ; IERS) による値を使用した。

(4) 重力鉛直勾配

高さによって重力値が異なる影響を取り除くものである。落下測定は金属標上約1メートルで行われるので、重力値を金属標の表面に引き直すのに使用する。今回は

データ個数

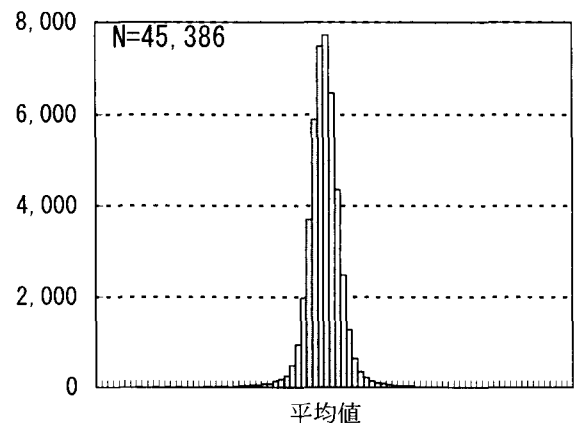


図-2 重力測定値のヒストグラム 1つのコラム幅は0.005mgal

ラコスト重力計2台 (G-554, D-183) を使用し、金属標直上と1.2メートル上の2カ所を繰り返し測定し鉛直勾配を決定した。

(5) 光速度補正

測定に使用するレーザーはヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーを使用している。この光速度を補正するものである。1セット毎に補正を行った。

以上の補正計算を行い、つぎの絶対重力値を得た。また、重力値のヒストグラムを図-2に示した。

有効データ数 : 45,386個 (336セット)
 絶対重力値 : 982 524.3329 ± 0.0038mgal
 単観測の標準偏差 : 0.0144mgal
 重力鉛直勾配 : 0.3339 ± 0.0008mgal/m
 測定期間 : 1995年1月20日～1月29日 (200時間)
 1995年2月1日～2月11日 (229時間)

有効データ数が非常に多かったことと、地盤の振動が小さかったことにより、今までにない高精度の測定結果を得ることができた。

6. 昭和基地で求められた絶対重力値の比較

過去南極・昭和基地で測定された絶対重力値を表-1に示す。今回の測定結果はいずれと比較しても大きくなった。FG5の信頼性を確認するため、南極・昭和基地に出発する前と帰国後筑波C点において測定を実施した結果を表-2に示す。ここでは帰国後が0.0149mgal大きく測定されている。なお、単観測の標準偏差も帰国後が約2倍になっている。この原因は、故障したスーパースプリングのワイヤーの影響で、地盤動の補償機能が十分でなかったことが考えられる。また、筑波における振

表-1 昭和基地で測定された絶対重力値

絶対重力計	絶対重力値 (mgal)	有効データ数	標準偏差 (mgal)	測定年月日
GA60 *1	982.524.252	834	0.030	1992.1.4-28
NAOM2 *2	982.524.152	276	0.040	1992.12.27-1993.01-26
AGRVP *3	982.524.113	43	0.040	1993.01.3-10 2.4-5
FG5 *4	982.524.3329	45,386	0.0144	1995.1.20-29 2.1-2.11

*1: JAEGER GA60 (国土地理院) *2: 国立天文台2号機 (国立天文台)
 *3: 真空筒回転式 (国立天文台) *4: FG5絶対重力計 (国土地理院)

表-2 南極出発前と帰国後の重力値 (筑波C点)

	絶対重力値 (mgal)	有効データ数	標準偏差 (mgal)	測定年月日
出発前	979.951.2131	4,800	0.0567	1994.10.21-23
帰国後	979.951.2280	4,160	0.1308	1995.4.19-23

動の季節変化の影響も考える必要がある。しかし、標準偏差が大きくなることは直接絶対値を変化させるものではない。これらの点を考慮すれば出発前と帰国後は、測定誤差の範囲内で十分一致していると考えられ、今回の昭和基地での測定結果の信頼性は非常に高いと考えられる。

7. 重力の時間変化の検出

今回の絶対重力測定では、高精度の連続測定が実施できたため、±0.005mgalの微小な海洋潮汐による重力変化を検出することに成功した。この成功は極地域では世界初となった。その抜粋グラフを図-3に示した。横軸に経過時間、縦軸に重力値、エラーバーのプロットが今回測定された絶対重力値、実線が海洋潮汐の期待値(モデル: Schwiderski)を現している。今回の測定値が、ほぼ実線に沿って変化していくのが明瞭に確認できる。また、重力値の変化の振幅が海洋潮汐の振幅に比べやや大きいこともわかる。絶対重力測定で海洋潮汐が重力に及ぼす微小な変化を捉えることは、GA60では不可能であり、FG5になって初めて可能となったものである。このことから、今回のFG5による測定の信頼性が高かったことが確認できる。

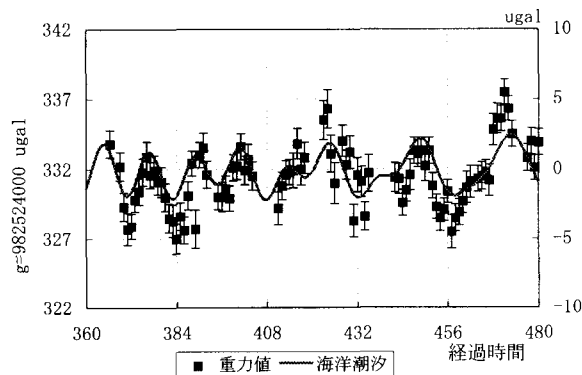


図-3 重力値の時間変化 (抜粋)
 1995年2月3日～7日 (120時間)

8. 昭和基地の絶対重力値

1996年1月22日、極地研究所において「南極・昭和基地での絶対重力測定に関する研究小集会」が、関係機関の代表が参加して開催された。この会の目的は、これまで昭和基地で測定された絶対重力値を総合的に評価し、合意のもとで最終値を確定して、昭和基地の絶対重力値として公表することである。さらに今後の実施計画も議論された。

研究小集会の内容は後日極地研究所から示されるのでここでは詳細は省略するが、活発な討論の末、最終的に今回FG5で測定した絶対値を昭和基地の絶対重力値とすることが参加者全員の合意により決定された。FG5

の値が採用された理由は、今回の観測の信頼性が十分に確認されていること、世界的にもFG 5で実施された絶対重力値が安定していることが大きな理由である。また、逐次昭和基地で絶対重力測定を観測する事は、測地学、地球物理学上大きな意義を持ち、今後も是非継続させるべきであるということが確認された。

9. おわりに

昭和基地での絶対重力測定を終え、1995年2月14日、今次行動最終便のヘリコプターで昭和基地を後にした。昭和基地での絶対重力測定は、南極という厳しい条件の元であらゆる困難にも対処しなければならず、出発の一年以上前から入念な準備と試験観測を行ってきた。準備段階で特に気を使ったのが絶対重力計の輸送と調整である。これまでFG 5の輸送は一度フランスへの往復があるだけで、十分なノウハウが蓄積されておらず、今までの経験者の話を聞いて梱包を入念に行った。また輸送の各段階で、常に絶対重力計に付き添い注意を払った。調整については考えられる事項をリストアップし、それに対する処置を国内で行った。それでも今回予想しなかったトラブルに遭遇し、何度か挫折しそうにもなったが、36次観測隊員の援助や助言、日本国内からのFAXや励ましによって、これを乗り越えて無事データを持って帰国できたのが、今となっては本当に良かったと思っている。

準備から測定に至るまでには、実に多くの方々の助言を得ることができた。測地部測地第一課の方々には、トラブルに対処するため年末年始にも関わらずFAXの返答を瞬時にしていただき、多くの便宜を図っていただいた。また、36次日本南極地域観測隊の方々には、輸送の配慮や数多くのデータを取得するため、私を最終日の最後まで昭和基地に滞在させていただき便宜を図っていただいた。こうした結果、今回の昭和基地の測定では困難

を乗り越えて、満足できる高精度の結果を得ることができた。これらの協力を頂いた方々にお礼申し上げます。

謝辞

本報告を作成するにあたり、海洋潮汐期待値のデータ提供を国立天文台佐藤忠弘助教授より受けた。同氏に深く感謝する。

追記

本稿執筆後、FG 5で使用している「AMD686」と呼ばれるコンパレータの特性により、フリッジ信号の出力電圧の変化によって絶対重力値が変化するため、その補正が必要なが判明した。このためここで示した絶対重力値は、今後の補正によって変わる可能性が高いことを付け加える。

引用および参考文献

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

山口和典(1994)；アースタイド補正量計算プログラム(GRAVITIDE/TIDE G)の比較について、技術報告

Working Group for Syowa Station Absolute Gravimetry (1994)：Ichiro NAKAGAWA, Kazuo SHIBUYA, Katsutada KAMINUMA, Satoshi FUJIWARA, Kazuo WATANABE, Makoto MURAKAMI, Masao ISHIHARA, Tsuneya TSUBOKAWA, Hideo HANADA, and Koichi YOKOYAMA；Absolute Gravity Measurements at Syowa Station during the Japanese Antarctic Research Expedition, Bureau Gravimetrique International Bulletin D' information, n°74, 41-56