

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

測地部 木村 勲  
Geodetic Department Isao KIMURA

## 要 旨

2000年11月より2002年3月までの第42次日本南極地域観測隊(JARE42)の夏隊に参加し、南極・昭和基地において通算で4回目の重力絶対測定をおこなった。測定に使用したのは可搬型絶対重力計FG5(#203)で、FG5を用いた測定は6年前の第36次日本南極地域観測隊(JARE36)に続き2回目の観測である。測定は昭和基地重力計室で、2000年12月29日より2001年1月25日まで約1ヶ月間の連続測定をおこなった。今回の観測でも前回に続き、海洋潮汐荷重が重力に及ぼす微小な影響量を捉えることができたため、その補正に国立天文台で構築した新しい海洋潮汐モデルを用いて、解析をおこなった。



写真-1 昭和基地重力計室

## 1. はじめに

昭和基地の測地学の観測は、ここ10年間で大きな変遷をたどったといえる。VLBI, GPS, DORIS, 重力絶対測定, 超伝導重力計観測, 海洋潮汐観測など南極の他国の基地と較べても、これほど種々の観測を長期に実施している基地は昭和基地しかなく、南極測地・地球物理観測所といえる。しかし、南極は重力をはじめ種々の観測が地球上でもっとも困難な場所であることも事実である。重力は地球の形状や性質にかかわる最も基本的な物理量の一つであり、地球上でその値を正確に測定することは地球科学分野の重要なテーマである。今回の昭和基地における重力絶対測定は、「総合的測地・固体地球物理観測による地球変動現象の解明」の一環として観測を実施し

たが、正確な重力値を決定すること自体が重要な事業である。

重力の測定方法には絶対測定と相対測定がある。絶対測定は文字通りある場所の重力値を直接絶対的に求めるもので、他の観測値を参照しない。高精度な絶対測定を行うには大規模な観測器機が必要であり、18世紀末のボルダの単振子による測定以来、重力の絶対測定の精度は、常にその時代の技術水準の程度を表していた。現在の可搬型絶対重力計FG5が開発される前は移動しての測定は大変困難であった。

相対測定は、ある地点の重力値と別の地点の重力値との差を測定することを意味する。相対測定によって求められるのは重力差であるが、相対測定の出発点となる点の基準重力値が既知であれば、相対測定により任意の点の重力値を求めることができる。南極地域は、隣接の基準となる重力値がわかっている地点とは隔離されており、特に昭和基地は、一番近いとされる南アフリカのケープタウンと較べて、距離が遠く、絶対重力値が大きいという特徴がある。二点間の重力差が大きい、または基準となる観測点との距離が、測定時間の間隔が大きいほど重力値を決定することは困難になる。特に相対重力計はバネ式の重力計であるため、ドリフト(バネのクリープ)、テア(相対重力計に起因する測定値の跳び)、重力計定数の不確かさなどの問題があるからだ。そのため、昭和基地の基準重力値を高精度に求めることは、これまで大変困難な事業であったとともに、昭和基地周辺の重力測定を実施する上で非常に重要な課題でもある。

なお、南極・昭和基地基準重力点は、IAGBNのA点となっているが、A点は南極大陸ではマクマード基地と昭和基地2点しかない。マクマードでもFG5での測定は行われており、それ以外A点ではないが、テラノバ基地(イタリア)、デュモンデュルビル基地(フランス)でも絶対測定は行われている。

## 2. 前回までの観測

昭和基地は、1986年にはInternational Absolute Gravity Basestation Network (IAGBN)のA点に登録されていたが、重力計室(写真-1)の建設を経て、第1回目の測定がおこなわれたのは1991年の第33次日本南極地域観測隊(JARE33)である。

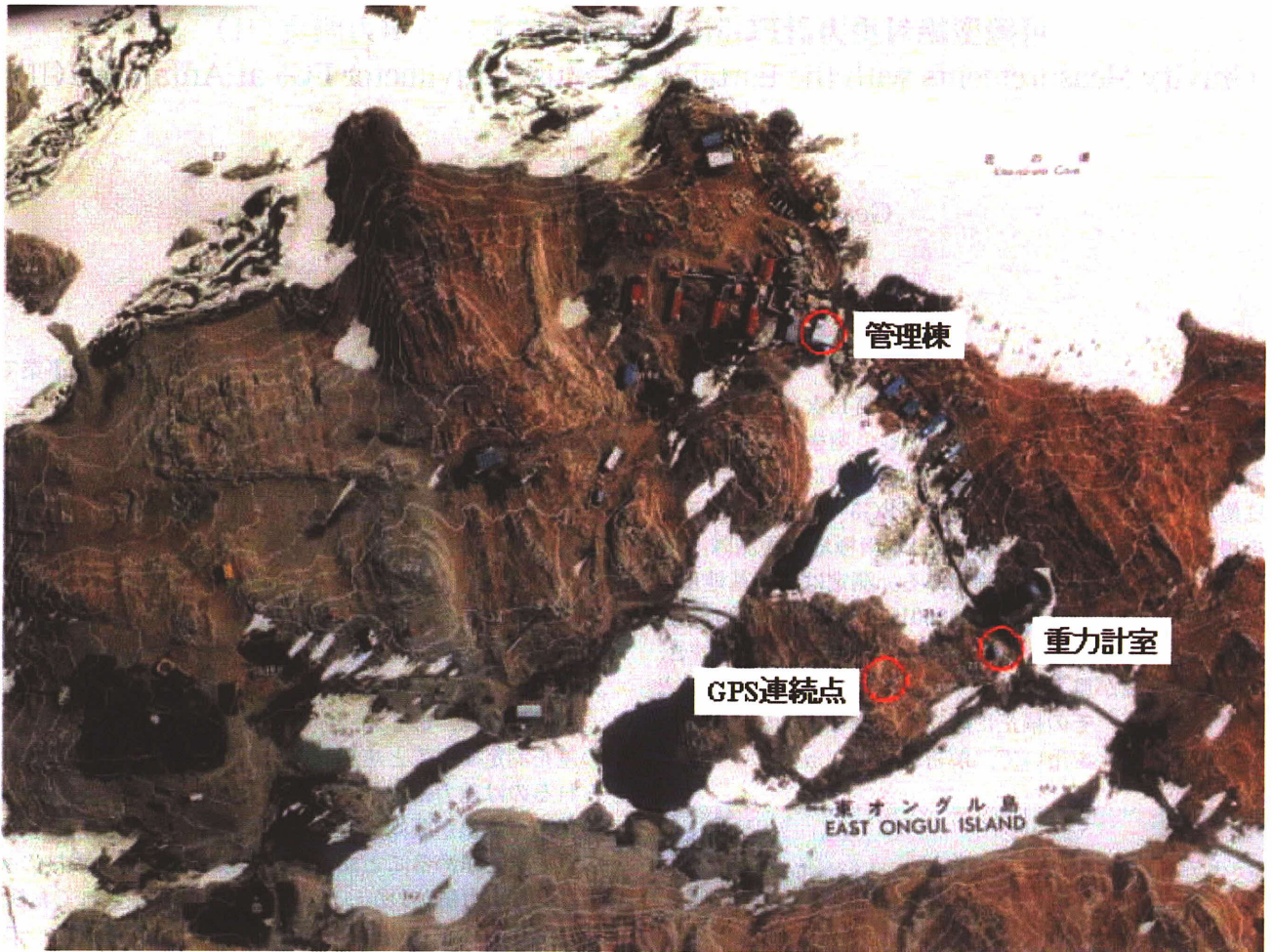


写真-2 昭和基地のカラー写真図

その後、JARE34 (1992)、JARE36 (1994) と、計3回の絶対測定を実施しているが、第2回目のJARE34だけ国立天文台地球回転研究系・水沢観測センターの器械で測定しているが、それ以外は国土地理院の器械で測定を実施している。

第1回目と第2回目で得られたデータの隔たりが大きく、重力基準値の確立には至っていない時期、可搬型絶対重力計の開発競争が盛んにおこなわれていた。そのため、標準装置と呼べるものが存在しなかったが、その後国際キャンペーンを経て、FG5を採用する機関が増え、現在は商用ベースの絶対重力計としてはスタンダード機となった。そしてJARE36で、国土地理院に導入して間もなかったが、南極・昭和基地に持ち込んで極域では初の重力の連続絶対測定を成功させた。

しかし、この時、地盤振動補償装置であるスーパースプリングのトラブルが起き、応急措置をおこなって測定を実施しているほか、干渉縞信号のアナログからデジタルへの変換に使われているコンパレータの特性が後日判明し、重力補正量を推定して、最終結果に補正している。さらにIAGBNのProcessing Standardsによれば、

Honkasalo 補正項の扱いについては、地球潮汐の永年項の $\delta$ ファクターを1.0として潮汐補正すること（つまりHonkasalo補正を施さない）が、現在の標準とされているので、その補正も必要となった。それら推定も含め、後処理をおこなって最終重力値が決定されているため、補正量について評価がされていない。

その後FG5のハード・ソフト両面で改善され、現在は、測定の際に、ほとんど補正がおこなわれ、後処理は、海洋潮汐補正と統計処理だけとなっている。

1996年1月22日に国立極地研究所で「南極・昭和基地での重力絶対測定に関する研究小集会」が開催され、これまでの成果のまとめと今後の計画が検討され、その際昭和基地の重力値として当分の間JARE36による測定結果を採用することが確認され、現在もその値が使用されている。前回の観測から6年経過しており、重力の時間変化やポストグレーシャルリバウンドの検出、また併設してある超伝導重力計 (SG) の感度検定など、定期的な重力の絶対測定が強く望まれていたことにより、今回の測定となった。



写真-3 重力計室内



写真-4 絶対測定の様子

### 3. 絶対測定の概要

FG5器材一式は、南極への唯一の交通手段である砕氷艦「しらせ」より2000年12月25日に昭和基地に搬入した。搬入後直ちに観測させるためには、落下槽内の真空引きにかかる日数を節約する必要があった。そのため、日本で観測可能な真空状態にした後、イオンポンプを作動させ、輸送中も常時真空を維持したまま重力計室内に搬入した。重力計室内は、以前に比べ、超伝導重力計、GPS連続観測システムなど、観測機器であふれていたが、前次隊員の協力により絶対重力用基台のスペースを確保し、(写真-3, 4)、無事搬入できた。

測定は、FG5組立後、29日から試験観測を開始した。重力値は地球の形状と遠心力の関係から両極域は、中緯度の日本に比べて大きくなる。そのため、装置のひとつである地盤振動補償装置のスーパースプリングが、前回の観測で重力値の大きさから調整中に主スプリングをつり上げているワイヤーが切れるトラブルがあった。今回出発前に改良が加えられ、国内での事前チェックはおこなっていたが、極域での重力値の大きな仮想状態にすることはできないため、いきなり重力値が大きな状態で、調整ができるかどうか、観測が始まるまで不安であった。

結果的には観測開始前のゼロ位置調整では、前回同様の症状がでたが、その後、スーパースプリングの特性を掴むことで、調整が可能となり、その後は今回の観測期間中にスーパースプリングのトラブルは一切起きることはなかった。帰国後、日本の中緯度地域での重力値に戻すときにも特性の検証をおこない、調整に間違いのないことを確認した。今後は、重力値の小さい低緯度での観測も含め、スーパースプリングの調整に大きな問題は起きないものと考えられる。

スーパースプリングの調整後、ヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーの微調整を繰り返し行い、観測データ取得を連日開始した。観測期間中、野外観測のオペレーションもあるため、昭和基地を不在にすることがあったが、その間は地学部門の越冬隊員に器械点検およびパラメータ入力をお願いした。

重力計室は超伝導重力計もあり、室温が高い場合、30度近くなることもある。特に、超伝導重力計では液体ヘリウムを使用するが、南極に液化したヘリウムを大量に持ち込むことは無理なため、ヘリウムガスからの液化作業(トランスファー)が夏季期間に1度は、おこなわれる。その間は、室温が30度を超えることもあり、温度管理が難しく、しかも夜中は換気扇の使用次第では、急激に温度が下がる(室温で14度まで下がったことがあった)ため、換気扇しかない重力計室は、どうしても温度変化が大きくなってしまふ。干渉計に使用しているヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーの測定可能範囲は15度から25度であり、温度変化の許容範囲は、 $\pm 2.5$ 度以下であることからみても厳しい測定環境である。

さらにノイズ要因に想定される電源(100V, 50Hz)については、重力計室が約300m離れた管理棟(写真-2)の発電機からケーブルで引っ張っているため、電圧は、94Vまで減衰していた。そのため、日本より持ち込んだ定周波定電圧電源、およびノイズカットトランスも使用してFG5に安定した電源を供給するようにした。

また、南極は非常に乾燥している地域で、しかも昭和基地は年中、塵や埃、雲母等が舞っている。重力計室への出入りが頻繁におこなわれると、それだけ精密機器への支障となるため、器械に覆いを架けての対策も施した。

12月29日からの観測期間中トラブルとしては、併設の超伝導重力計のトランスファー作業中、原因不明の定周波定電圧電源のダウンがあり、2月19日観測が中断されることはあったが、ほぼ順調に連続観測ができた。その後23日から復旧したが、26日からは、システムコントローラーの異常による観測中断とともに、解析コンピュータが異常をおこしたため、結局今隊次での観測を全て終了した。結果的には電源トラブルがあり、数日の欠測はあったものの、ほぼ1ヶ月の連続観測を成功させることができた。その後、野外観測にでかけ、再び昭和基地に2月9日に戻り、FG5を解体梱包し、11日「しらせ」に持ち帰った。

#### 4. 測定結果

測定は、短期間でデータ数を数多く取得するために、国内では15秒間隔で落下を行っている運転設定を10秒間隔で落下させ、120個のdropを1セットとして、drop数およびセット数を稼ぐことにした。昭和基地がある東オングル島は、堆積層がなく地下水効果もない地盤の安定した雑振動の少ない場所であるので、安定したデータが国内以上に得られるものと期待した。

しかし、1ヶ月の観測期間中、干渉計のヨウ素安定化ヘリウムネオンレーザーのロックが度々外れることがあった。この原因は、室温変化によるもの、特に高温になった場合これまでもロックしないことがあったため、この事が原因と考えたが、室温が安定している時間帯でもロックが外れることが頻繁に起きたセットもあり、他の要因も考えることにした。特に、超伝導重力計のコンプレッサーが常時動いているため、その振動等が要因とも考え、これについては、1日停めてみて観測をおこなったが、大きな変化はみられなかった。他の電氣的ノイズがあるのかについては、昭和基地では、オーロラ観測の機器をはじめ、衛星受信施設など様々な観測機器とともに大型アンテナなど各種多数あり、「アンテナ基地」ともいえる。それらの観測時間との関連性も考えた。また、アースは接地しているものの、ノイズを拾うことも十分考えられたが、結局はっきりとした原因を突き止めることはできなかった。

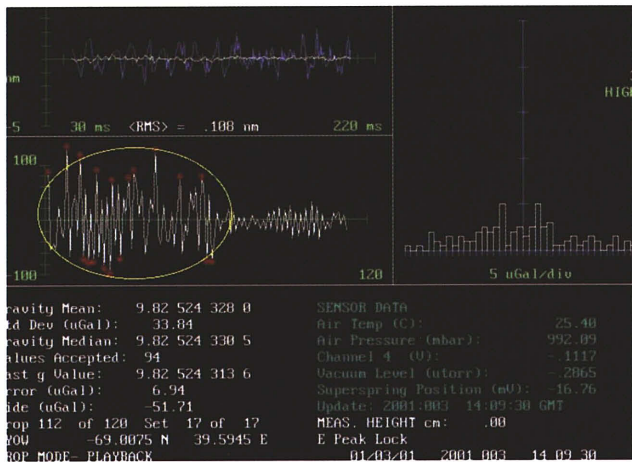


図-1 dropデータの出力例

レーザーのロックが度々外れるため、外れたあとのdropは、どうしても値が乱れており、そのセットのSDは、大きくなる。

1セットの観測例として、コントローラーのPCに出力される画面が図-1であるが、このセットの時系列グラフでは、後半は安定しているものの前半黄色い丸で囲んだdropでは、ばらつきが大きいことが見られる。この時も原因不明の1dropの度にロックが外れたが、その結果このような現象が起きていた。

図-2は、オリジナルの全セットの時間変化グラフである。特に赤丸付近からは、電源ダウンのトラブルや併設の超伝導重力計のヘリウム液化作業がおこなわれて、室温の上昇と人の出入りによるノイズを多く含んでいる。

そこで、多数の観測データから最終結果を得るため、120dropの1セットから、異常値除去として、セット内の平均値を決め、平均値から一定以上外れた値を除去した。さらに再び平均値を決めて、平均値から $3\sigma$ 以上離れた異常値を除去し、セットデータの値を決める外れ値および異常値を除去する作業をおこなった。その結果109,790dropから約22%の不良データを棄却した。

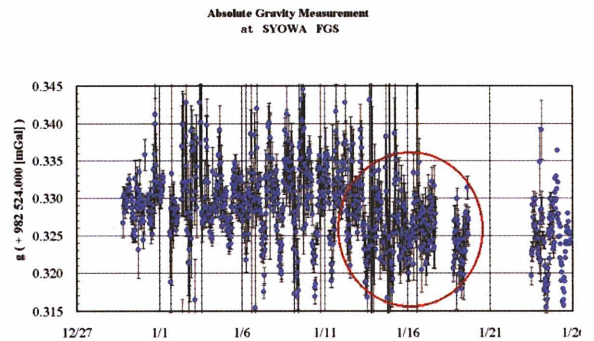


図-2 全データの時間変化 (異常値・外れ値含む)

有効データのヒストグラムは、図-3である。横軸は0.005mGal ( $5\mu\text{Gal}$ ) 間隔で、最終的に有効データ量は前回FG5で観測したJARE33のほぼ2倍、84,802dropを採用した。

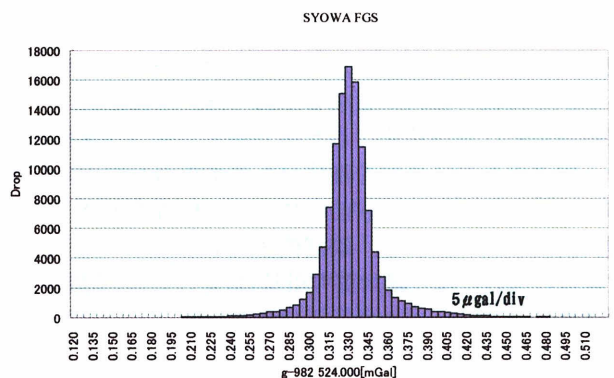


図-3 重力測定値のヒストグラム

#### 5. 重力の時間変化

今回のように、絶対測定を1ヶ月という連続で観測することにより、重力の時間変化をとらえることができる。特に微少な海洋潮汐荷重による重力変化については、前回の観測でも検出している。山本(1996)では、モデルにSchwiderskiの汎地球的モデルを使って観測値と比較し

ているが、今回の理論海洋潮汐の計算には、TOPEX/POSEIDON 海面高度計データに基づいた新しい海洋潮汐モデルNAO99bに対応したソフトウェアGOTIC2 (Version1999.06.09)を用いて、補正することを試みた。

NAO99bは、国立天文台地球回転研究系・水沢観測センターで開発し、公開されている短周期海洋潮汐モデルで、扱う分潮は、短周期主要16分潮および長周期5分潮である。このモデルは、約5年分の海面高度計データTOPEX/POSEIDONを潮汐解析し、流体力学数値モデルに同化して構築されている。GOTIC2 は、陸上の点について、固体地球潮汐および海洋潮汐の影響量を計算するNAO.99bモデルに基づいて海洋潮汐効果による重力への影響量を計算するソフトウェアである。FG5に付属しているSchwidderkiの短周期主要8分潮およびMf分潮に基づいたものに較べて高精度な重力補正ができる。

GOTIC2は、大きさの異なる4種類の海陸分布を現すメッシュを用いて海洋潮汐の影響量を計算する。メッシュサイズは、1次メッシュサイズが0.5°、2次メッシュが5′、3次メッシュが30″、4次メッシュが、7.5″である。昭和基地は大陸から4km離れた島に位置し、海に近いため、海洋潮汐の影響量も大きく、そのため、海岸地形を表現する細かな地形データが必要である。国立天文台では、昭和基地付近の3次メッシュ、4次メッシュを公開しているため、このデータを利用して影響量を計算した。ただし、昭和基地はTOPEX/POSEIDONのカバーする観測領域(±66°)の外側(昭和基地は南緯69°0′)にあること、昭和基地周辺の領域モデルがないこと、などから日本国内の場合より精度は悪くなると指摘されている。

で一致しており(図-6)、極めて再現性の高い観測値が得られた。一方、昭和基地におけるFG5絶対重力計の検出限界を超えるような重力の時間変化が検出できなかったともいえる。昭和基地の検潮儀では、氷床後退後による陸地の隆起とおもわれる時間変化が年約0.95cmの低下と観測されている。これは重力値の減少で0.003mGalに相当しており、6年の累積ならば、上下変動の絶対値の検出として絶対重力計の信頼度からも検出できるものと予想されたが、結果は違っていた。

Absolute Gravity Measurement at SYOWA FGS

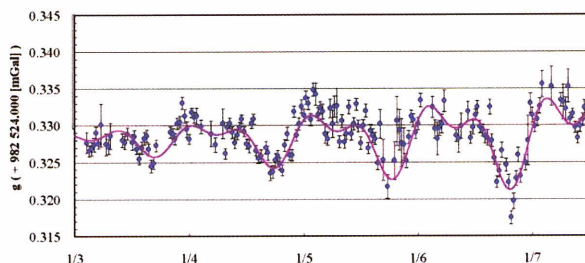
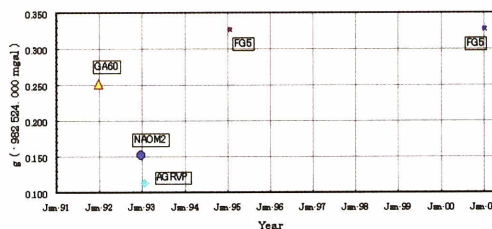


図-5 重力値の時間変化(抜粋)

今後は、超伝導重力計と絶対重力計による長期間にわたる測定データを取得して地球深部起源のシグナルや氷床変動、海面変動に伴う重力変化を検出することが課題となるだろう。

Gravity Value at SYOWA FGS



Gravimeter	Mean Value (mgal)	Data Number	S.D (mgal)	Measurement Period
GA60	982 524 2520	834	0.030	Jan,1992
NAOM2	1520	276	0.040	Dec,Jan,1993
AGRVP2	1130	43	0.040	Jan,Feb,1993
FG5	3269	45,386	0.0144	Jan,Feb,1995
FG5	3282	84,802	0.0167	Jan,2001

- \* GA60 国土地理院 佐久間式
- \* NAOM2 国立天文台水沢 国立天文台2号機
- \* AGRVP2 国立天文台水沢 真空筒回転式

図-6 過去の重力値との比較

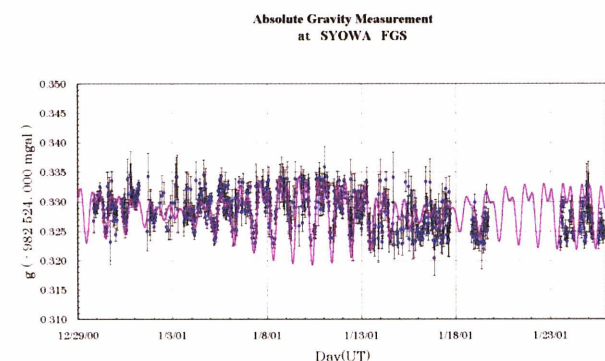


図-4 重力値の時間変化

図-4は、重力測定値と理論海洋潮汐荷重値を比較したものである。桃色の実線が理論海洋潮汐荷重値である。1月11日以降は、ノイズが大きく位相、振幅ともフィッティングしていないが、図-5のように前半では、理論値とよく一致している。

最終観測結果は、前回値と比較して0.001mGalの差

海洋潮汐補正後(図-7)の最終観測値は以下のとおりである。なお、海洋潮汐補正については、補正前と補正後で、比較したが、最終観測値に変わりはない。各種補正のパラメータ等については表-1、2を参照されたい。なお、IAGBN(A)点の位置について、新しい

基準座標系ITRF2000 (GRS80楕円体)に基づき、今後下記の値になる。

有効データ数 84,802個 (737set)  
 絶対重力値 982 524.328  $\pm$  0.0001 mgal  
 単測定標準偏差. 0.0167 mgal  
 B= 69° 00′ 24.245″ S  
 L= 39° 35′ 08.491″ E  
 H= 21.492 m

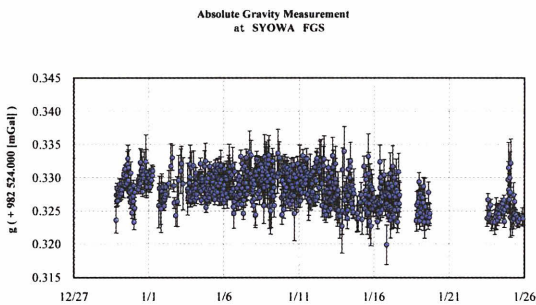


図-7 海洋潮汐補正後の時間変化

## 6. おわりに

前回の南極での観測は、FG5絶対重力計を導入して間もない頃で、予想もしていないトラブルを当時の観測隊員の様々な知恵から対処した事に較べると、今回の観測はトラブルがまったくなかったとも言える。さらに、トラブル時の日本との連絡も前回はFAXしかなかったが、現在は昭和基地・日本間は、2時間毎にメールの送受信が行われているため、重力計室にパソコンを持ち込み、ほぼリアルタイムで連絡が取れたことも心強かった。しかし、無難に観測できた一番の要因は、前回の観測でのノウハウがあったことと、その後の国土地理院重力係に携わった方々の数多くの努力の積み重ねによる経験の蓄えがあったことである。FG5はここ数年、各研究機関および大学でも導入し、国内各地で観測を実施しているが、

どの器械もトラブルが絶えず、年間通してフル稼働した器械はない。初心者がボタンひとつ押しただけで観測できる状態には、残念ながらなっておらず、経験等がある程度なければトラブル時に対処できていないことも事実である。

今後、昭和基地の超伝導重力計が2002年出発の観測隊で新しい型に交換されることが決まっており、そうなるに近々には感度検定のための絶対測定が必要となるはずである。さらに、これまで4回の絶対測定すべて夏季期間の短い間に観測を実施してきたが、これは観測者にとって「必ず成功させなければ」という、プレッシャーであったとともに、夏季期間は越冬隊の引継や、ノイズが増えるトランスファー作業も重なり、非常に慌ただしく過ぎてしまう。しかもGPS連続観測施設も増え、それらのメンテナンスも含め、野外観測作業も重なるため、どうしても昭和基地から離れなければならない期間がある。これらを考慮すると次回の観測は、ぜひ越冬隊員で参加すべきで、落ち着いた越冬期間に観測できる環境づくりが必要と思える。年間通しての観測が実現できれば、積雪などによる季節変動を捉えることも十分可能かと考える。

## 謝 辞

昭和基地でのデータ取得には、土井浩一郎隊員 (国立極地研究所)、岩野祥子隊員 (京都大学) はじめJARE41、JARE42に数多くのサポートを受けた。さらに、町田守人氏、平岡喜文氏に出発前の準備およびトラブル時のアドバイスに多大な支援を戴いた。これら各氏に深く感謝する。

表-1 観測及び再計算時の各種補正パラメータ

緯度・経度・標高	$\psi = S69.0075 \text{deg}$ , $\lambda = E39.5945 \text{deg}$ , $H = 21.492 \text{m}$ (測地基準系1967)
固体潮汐 $\delta$ ファクター	1.164 (永久潮汐については1.0)
鉛直勾配補正	重力値はIAGBN (A) 点の金属標識上に整約した値 $dg/dh = -0.334 \text{mGal/m}$
大気圧補正	標準大気圧 = 984.08 hPa (1998年から過去30年の昭和基地平均海面気圧から算出) 気圧アドミッタンス = 0.0032 mGal/hPa (小川ほか, 1991) の実測値)
極運動補正	IERS Bulletin B $\delta$ ファクター = 1.164
海洋潮汐補正	GOTIC2による補正 GOTIC2 (Version 1999.06.09)
処理ソフト	Olivia Ver. 2.21/Replay Ver. 2.2

表-2 運転設定

落下感覚	10 [秒]
落下回数	120 [drop/セット]
観測時間帯	1セット20分間の観測をおこない、10分間の小休止をおく
器械高	①IAGBN(A)点の金属標識からスーパースプリング支持環までの高さ49.40cm ②干渉計とトリポットの間隔0.20cm 計 49.60cm

参 考 文 献

小川文雄・福田洋一・赤松純平・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, No. 37, 13-30

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, No. 76, 1-6

Satoshi FUJIWARA, Kazuo WATANABE and Yoichi FUKUDA (1994):Measurement of Absolute Gravity at Syowa Station, Antarctica, BULLETIN OF THE GEOGRAPHICAL SURVEY INSTITUTE, Vol. 40, 1-6

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, No. 85, 18-22

Working Group for Syowa Station Absolute Gravimetry (1994):Absolute Gravity Measurements at Syowa Station during the Japanese Antarctic Research Expedition, Bull. D' Inform, BGI, 75, 41-56

神沼克伊・石原正男・坪川恒也・竹本修三(1996):南極・昭和基地の重力値について, 研究小集会, 1996. 1. 22

Matsumoto, K., T. Sato, T. Takanezawa, and M. Ooe, GOTIC2:A Program for Computation of Oceanic Tidal Loading Effect, J. Geod. Soc. Japan, 47, 243-248, 2001.

木村勲・土井浩一郎・岩野祥子(2001):FG5絶対重力計による昭和基地の絶対重力測定, 第21回南極地学シンポジウム プログラム・講演要旨, 64

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 総特集・新しい南極地球科学-半世紀の進展と展望-, 号外No. 35, 102-108

澁谷和雄 (2001):昭和基地を中心とした南極測地学の変遷, 月刊地球 総特集・新しい南極地球科学-半世紀の進展と展望-, 号外No. 35, 88-98

木村勲(2001):昭和基地における絶対重力観測, 新しい衛星ミッションと地上観測による南極測地に関する研究小集会, 2001. 12. 19

