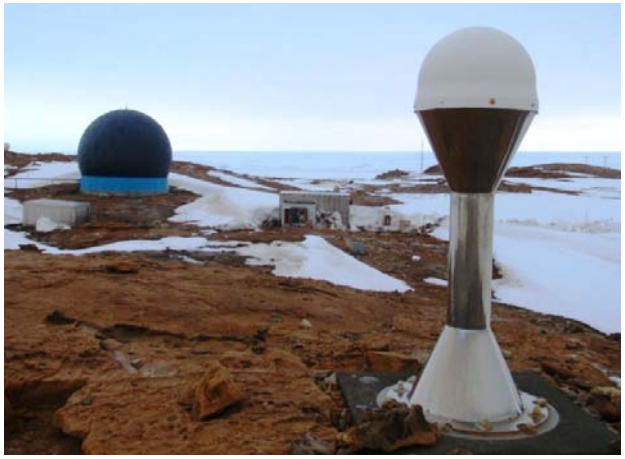
可搬型絶対重力計 FG5 による南極における重力測定（Ⅳ）
Gravity Measurements with the Portable Absolute Gravimeter FG5 at Antarctica (Ⅳ)

測地部　菅原安宏[1]
Geodetic Department　Yasuhiro SUGAWARA

要　旨

2009 年 11 月から 2010 年３月までの間，第 51 次日本南極地域観測隊（The 51st Japanese Antarctica Research Expedition：JARE-51）の夏隊に参加し，昭和基地において通算で６回目の絶対重力測定を実施した．測定に使用した機器は可搬型絶対重力計 FG5（#203,#104）２台で，FG5 を用いた測定は６年前の JARE-45 に続き４回目である．測定は，2009 年 12 月末から 2010 年１月末までの約１ヶ月間，昭和基地重力計室に設置してある基準重力点「昭和基地」とその予備点の２点において，２台同時連続観測を行った．今回の測定を含む過去４回の測定の結果，全測定値が FG5 の拡張不確かさ（測定の信頼性を表すための尺度）の範囲内にあるものの，過去 16 年間でわずかな重力の減少傾向が検出された．

昭和基地周辺において，２万年前から６千年前までの氷床融解に伴う地殻の隆起現象（Post Glacial Rebound：PGR）と，最近の地球温暖化に伴う氷床融解による地殻の隆起現象が同時に発生していると考えると，各現象の隆起量は，重力と地殻変動のデータを用いて分離できることが報告されている（中田・奥野，2001）．試算の結果，PGR は 5.3±2.7mm/yr の速度で発生しており，地形学的データから推定されている隆起速度と調和した傾向を示した．



写真－１　昭和基地の測地観測施設（2009 年 12 月 19 日撮影）．右手前の白いレドームがあるピラーでは GPS 連続観測，左奥の黒いドーム内では VLBI 観測，その間にある銀色の重力計室では重力測定が行われている．

１．はじめに

昭和基地では，絶対重力測定をはじめ，VLBI 観測，GPS 連続観測，DORIS 連続観測，超伝導重力計による重力連続観測，海洋潮汐観測等の多種多様な測地観測を長期にわたって継続的に実施している．このように昭和基地は，他国の南極基地の追随を許さない第一級の南極測地・地球物理観測基地である．特に，近年，測地観測に宇宙技術が導入されてからその観測精度は飛躍的に向上し，また科学技術の進歩により安定したデータ取得が極域でも可能となった．

絶対重力測定においても，この 20 年の間に測定精度は格段に向上し，現在，FG5 の公称精度は２μGal（１μGal（＝10^{-8} m/s^2）は地表重力 980Gal の 10 億分１）で，重力の時間変化を議論できるまでに至っている．昭和基地は，国際絶対重力基準点網（International Absolute Gravity Basestation Network：IAGBN）の重力点に登録され，数年ごとに測定することが，国際的に要請されている重要な観測点の一つである．これまで，FG5 による絶対重力測定は３回行われ，重力の減少傾向が検出された．昭和基地周辺では，地殻変動のモデル計算等から PGR が予測され，実際に VLBI や GPS 等の観測で検出されている．重力測定の結果は，ほかの測地観測の結果と調和した傾向にあったが，その変動量は小さく，３回の測定では誤差が大きいため，さらなる測定の継続が求められていた（平岡ほか，2005）．

そこで，本稿では JARE-51 で行った４回目の絶対重力測定の概要を述べるとともに，昭和基地の重力の経年変化，PGR 及び最近の氷床融解による地殻の隆起現象について，重力測定と地殻変動観測の結果を用いて考察したので報告する．

２．昭和基地における絶対重力測定の目的

南極大陸は地球上に存在する二つの極の内の一つで，平均標高が約 2,290ｍと六大陸中で最も高く，ほかの大陸から隔絶された場所にある．南極大陸から最も近い南アメリカ大陸南端まで約 1,000km あり，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から約 4,000km 離れている．また，南極大陸全土の 90％以上が氷床に覆われ，沿岸部では最終氷期の最寒冷期である２万年前から６千年前までの氷床融解により荷重が取り除かれ，地殻が継続的に隆起している．

現所属：[1]企画部

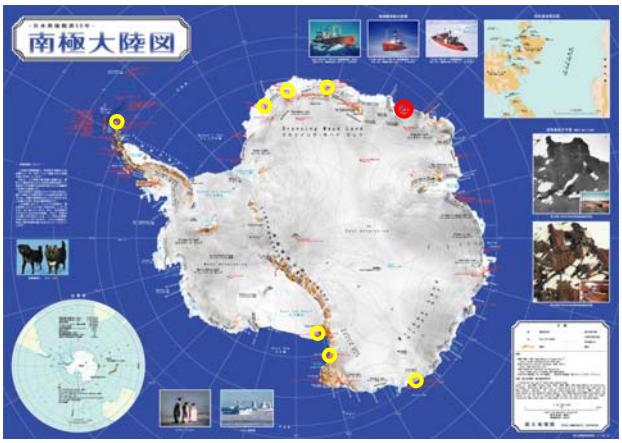
重力は地球の引力と遠心力の合力であり，重力測定は地球の形状や性質，状態を理解するための一つの観測手段である．極域である南極地域は遠心力が小さいために，重力が大きい特徴がある．また，南極大陸がある南半球は北半球と比べ，大陸の占める面積が小さく，重力の測定点が少ない．さらに，南極地域は人間の活動度が低いため，直接的な環境汚染や人工的なノイズが小さい．これらのことから，南極地域は，地球を理解するための貴重な観測フィールドの一つであり，正確な重力値を決定すること自体に意義がある．また，孤立している南極大陸に人類が到達してからまだ200年程度であり，広大な南極大陸の形状、地下の密度構造の把握及びダイナミクス解明のためには，大陸や沿岸部の露岩上で多数の精密な重力測定を行う必要がある．

重力測定には，絶対測定と相対測定の二種類の方法がある．このうち相対測定は，重力計が可搬性に優れ，測定自体も簡便である等の理由から，日本国内をはじめ南極地域の重力測定においても古くから行われてきた．しかし，相対測定は，重力値が既知の点からの重力差を測定することで求点の重力値を求める方法であり，使用されるスプリング式の重力計は,既知点と求点の測定時間の間隔が大きいほど，スプリングのクリープ現象により測定精度は落ちる．そのため，南極地域で正確な重力を測定するには，相対測定は不向きであり，絶対測定により独立に重力値を求める必要がある．

1987年，第19回IUGG／IAG（国際測地学及び地球物理学連合／国際測地学協会）総会において，昭和基地はIAGBNのＡ点に登録された．IAGBNは，地球上に絶対測定を行う点を配置して，数年ごとに10μGal以上の精度を有する正確な絶対重力測定を行うネットワークである．その目的は，重力の基準値を全地球上に与えるとともに，重力の時間変化を監視し，地球変動現象の解明に役立てるものである．Ａ点は,地殻の安定した静穏な場所にしか設置されず，日本では昭和基地が唯一の点である．また，南極大陸には昭和基地のほかにアメリカのマクマード基地にしかないため，昭和基地の意義は非常に大きい．なお，近年，Ａ点ではないものの，テラノバベイ基地（イタリア），デュモン・デュルビル基地（フランス）等でも絶対重力測定が行われている（Makinen et al.，2007）が，南極大陸における絶対重力測定点の配点密度，測定環境及びデータの品質を考えると，昭和基地の重要性は依然として揺るがない．

昭和基地周辺では，地形学的データや地殻変動のモデル計算により地殻が隆起していることが予測され,実際にVLBIやGPS等の地殻変動観測により検出されている．絶対重力測定においても地殻の隆起現象の検出が期待されている.この地殻の隆起現象は，PGRの粘性変形と最近の地球温暖化に伴う氷床融解による弾性変形を考慮する必要があり，それぞれの隆起量は，重力と地殻変動のデータを用いることで分離できることが報告されている(中田・奥田,2001)．したがって，昭和基地で行われている多様な測地観測の結果は，地球温暖化現象の基礎資料でもあり，また，マントルの粘性構造を推定できる可能性も指摘されている（Wahr et al.，1995）．このように，重力変化を監視する意義は高まっている．

このほか，昭和基地での絶対重力測定は，超伝導重力計による相対重力連続観測の定期的な感度検定にも利用されており，今後も定期的な測定が求められている．



図－１　国土地理院発行の南極大陸図．赤色の丸印は，昭和基地．黄色の丸印は，絶対重力測定が行われている他国の基地．

３．昭和基地における重力測定の歴史

３．１　FG5登場前の重力測定の歴史

昭和基地における陸上での最初の重力測定は，JARE-３によってウォルドン重力計により天測点で実施された（原田ほか，1960）．天測点では，引き続きJARE-４，JARE-５によって，ウォルドン重力計による繰り返し測定が実施された．

JARE-６では,国土地理院が所有するGSI型重力振子による重力測定が行われた(Harada et al.,1963)．この測定では，ケープタウンと昭和基地の間の往復観測が行われ，昭和基地での観測場所は，天測点の北側の基地建築物からさらに北に約20m離れた露岩上であった．得られた重力値は次のとおりで，当時は貴重な重力基準点であり，多くの重力測定で利用された．

使用機器：GSI型重力振子
重力値　：982,539.9mGal
測定精度：数百μGal

1987 年に昭和基地が IAGBN のＡ点に登録された後，JARE-32 によって重力測定を行うための重力計室が建設された．重力計室内の測定スペースは６ｍ×６ｍで，岩盤に直接コンクリートで繋がる基台が３基用意された．絶対重力測定用の基台は 1.5ｍ×2.5ｍで，JARE-33 によって IAGBN のＡ点の金属標が埋め込まれ，基準重力点「昭和基地」（略称：昭和基地 FGS）が設置された．

重力計室が完成した翌年，JARE-33 によって初めて絶対重力測定が実施された（藤原ほか，1992）．観測に使用した機器は，国土地理院所有の佐久間式絶対重力計（JAEGER GA60）で，フランスの国際度量衡局の佐久間晃彦博士によって開発された重力計である．測定は 15 日間行われ，厳密な補正計算により，次のとおり絶対重力値が得られた(Fujiwara et al.，1993)．従来の振子による重力値と比較すると，0.22mGal 小さいことがこの観測で判明した．

測定期間　：1992/01/04 － 1992/01/28
使用機器　：佐久間式絶対重力計（JAEGER GA60）
絶対重力値：982,524,252±1μGal
有効データ：834 個

翌年には JARE-34 によって，国立天文台水沢が所有する国立天文台２号機（NAOM2）と真空筒回転式（AGRVP2）の２台を用いて絶対重力測定が実施された(Tsubokawa et al.，1994)(Hanada et al.，1994)．測定結果は，次のとおりである．

測定期間　：1992/12/27 － 1993/01/26
使用機器　：国立天文台２号機（NAOM2）
絶対重力値：982,524,152±2μGal
有効データ：276 個

測定期間　：1993/01/03 － 1993/01/10
　　1993/02/04 － 1993/02/05
使用機器　：真空筒回転式（AGRVP2）
絶対重力値：982,524,113±6μGal
有効データ：43 個

３．２　FG5 による重力測定の歴史

FG5 による絶対重力測定は，JARE-36 が最初である．この時は国土地理院が所有する FG5（#104）が用いられた（山本，1996）．測定では最終調整過程において，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．ワイヤーの代替としてギターの弦を用いて修復し，21 日間の測定に成功した．当時の FG5 には，干渉縞のアナログ信号をデジタル信号に変換するコンパレター（AMD686）に干渉縞強度に依存した時間遅延があり（Niebauer et al.，1995），その補正量は-13.7μGal であった．最終的には，昭和基地 FGS の重力値は次のとおりとなった（Kaminuma et al.，1997）．

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

FG5 による第２回目の測定は，JARE-42 によって行われた（木村，2002）．使用した機器は，国土地理院が所有する FG5（#203）であった．重力計室の室温の変化が激しく，測定値が乱れることがしばしばあったものの，約１ヶ月間の測定に成功した．最終的に，次の重力値を得た．

測定期間　：2000/12/29 － 2001/01/26
使用機器　：FG5 可搬型絶対重力計（#203）
絶対重力値：982,524,328.2±0.1μGal
海洋潮汐　：補正済（NAO.99Jb，NAO.99L）
有効データ：84,802 個

FG5 による第３回目の測定は，JARE-45 によって行われた（平岡ほか，2005）．このときの観測は，昭和基地では初めて，２台の FG5 を使用した同時観測であった．使用機器は，国土地理院所有の FG5（#203）と京都大学所有の FG5（#210）であった．測定は，重力計室の昭和基地 FGS，同室の予備点及び地震計室前室の３ヶ所で行われた．FG5（#203）の測定は，レーザーの周波数のふらつきにより重力値が 40-50 μGal ばらついていたが，FG5（#210）の測定は極めて安定しており，約１ヶ月間の測定に成功した．なお，レーザーの周波数のふらつきは偶然に発生するので，測定値を平均化することにより最終成果値には系統的な誤差がなかったものと推察されている．最終的に，２台の平均重力値を次のとおり得た．

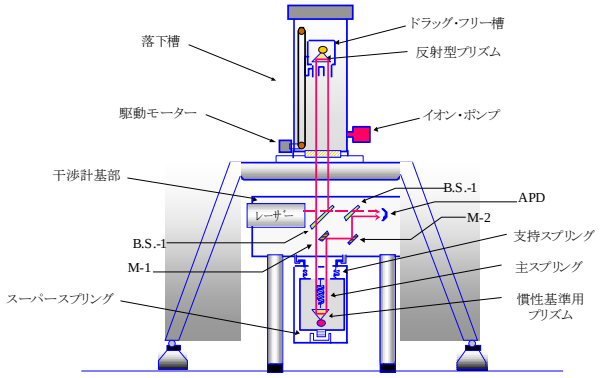
測定期間　：2003/12/28 － 2004/01/17（#203）
　　2004/01/17 － 2004/02/01（#210）
使用機器　：FG5 可搬型絶対重力計（#203，#210）
絶対重力値：982,524,323.7±0.1μGal
海洋潮汐　：補正済（CSR3.0）
有効データ：67,208 個（#203），54,775 個（#210）

現在，IAGBN のＡ点である昭和基地 FGS の重力値は，測定結果及び国際的な FG5 の信頼性等から総合的に判断して，JARE-36 による測定結果が採用されている（Kaminuma et al.，1997）．

４．FG5 の測定原理

可搬型絶対重力計 FG5 は，米国 Micro-g LaCoste 社製で，測定方式は自由落下方式のドラッグフリーチャンバー方式を採用している．なお，自由落下方式にはこのほか，投げ上げ自由落下方式と単純自由落下方式がある．

自由落下方式の基本原理は，長さ標準となるレーザーを光源とする干渉計を使用して，試験落体（コーナーキューブ）を真空中で自由落下させ，発生する干渉縞の信号を時間標準となる原子時計からのクロック信号で処理して，時々刻々の落下距離と落下時間の対応付けを絶対値で求めることで，重力加速度を求めるものである．



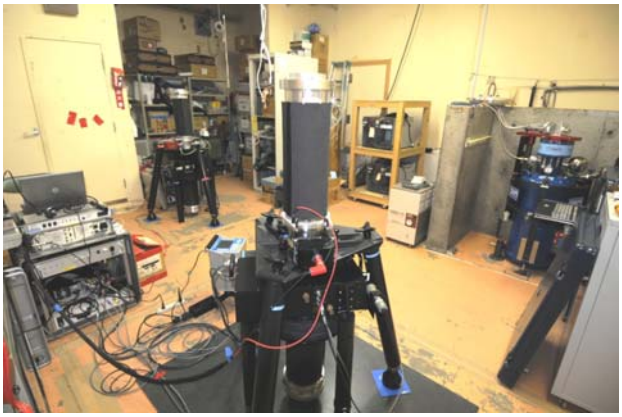
図－２　FG5 絶対重力計の模式図．FG5 は，落下槽（上部），干渉計（中部），スーパースプリング（下部）の３つの主要部で構成される．

FG5 では，光源にヨウ素安定化 He-Ne レーザーを，干渉計にマイケルソン型干渉計を，原子時計にルビジウム原子時計を使用している．１回の自由落下は，真空にした高さ約 60cm の落下槽内で約 0.2 秒の間に行われる．FG5 の大きな特徴は，落下槽内の僅かな残留気体の影響を極力除去するため，試験落体がドラッグフリーチャンバー（試験落体を納めた一種のエレベータ）の中に入っていることである．この方法により，落下槽内の真空度が 10^{-4}Pa 程度に達すれば測定を開始することができ，可搬性を高めるのに貢献している．また，FG5 では多数回の連続落下測定を容易に行うことが可能で（最新の FG5 では最短２秒に１回の落下測定），統計的に非常に高い精度の重力値が得られる．このほか，スーパースプリングと呼ばれる地盤振動を軽減する装置が FG5 の下部に組み込まれている．１台の FG5 は，分解して６パッケージに納めて運搬できる．梱包済みの総重量は約 300kg，本体の重量は約 200kg である．測定はプログラム制御されており，重力計の調整が終了すればほとんど自動的に測定できる．なお，FG5 を含むこれまでの絶対重力計については，坪川（2004）で詳説されているので，参照されたい．

現在，FG5 は世界のデファクトスタンダード機となっている．製造元によれば FG5 の正確度（Accuracy）は２μGal といわれている．一方，絶対重力計の国際比較観測によれば，測定に参加した各機関が推定した FG5 の不確かさ（uncertainty）は，機器に依存するものと場所に依存するものがあり，その合計の拡張不確かさは 95％信頼区間で 4.8－5.6μGal と推定されている（Vitushkin et al., 2010）．なお，不確かさとは，測定の信頼性を表す尺度であり，その定義は，「測定の結果に附随した，合理的に測定量に結び付けられ得る値のばらつきを特徴づけるパラメータ」である（ISO, 1995）．

５．JARE-51 による絶対重力測定の概要

FG5 による４回目の絶対重力測定は，JARE-51 によって行われた．観測に使用した機器は，国土地理院所有の２台の FG5（#203, #104）で，測定場所は昭和基地重力計室内に設置されている昭和基地 FGS とその予備点の２点である．測定は，2009 年 12 月 22 日から 2010 年２月８日までの約１ヶ月間に，観測機器の場所を３回入れ替え，合計４セッション実施した．２台の FG5 による同時測定の風景を写真－２に示す．



写真－２　昭和基地重力計室内の測定風景（JARE-51 池田隊員撮影）．左奥が予備点上で測定中の FG5（#104），中央が昭和基地 FGS 上で測定中の FG5（#203），右の青色の機器は JARE-51 で設置された最新の超伝導重力計（CT#058）．

２台の FG5 は大井埠頭から新しい３代目砕氷艦「しらせ」（南極観測船としては４代目）によって昭和基地に慎重に輸送され，現地において落下槽の真空引き作業を行った．電源は，商用交流電源からノイズカットトランスと低周波数・低電圧供給装置（UPS）を経由して，FG5 の制御部へ供給した．接地については，南極の地面は岩盤であるため，屋外の雪中に銅板を埋設し接地した．

通常の測定では，ルビジウム原子時計を使用するが，大気中のヘリウムガスがこの原子時計内に入り込むと周波数変動を引き起こす恐れがあることが報告されている（Herbulock et al.，2003）．本作業では，同時期に超伝導重力計のヘリウムガス液化作業が重力計室内で実施されていたため，ルビジウム原子時計の換わりにセシウム原子時計を使用した．

重力計室内の気温調節は，室内の２台の換気扇と前室のドアの開閉で行った．12 月下旬から１月中旬にかけては，換気扇２台稼動，前室ドアを閉じることで 16－21℃に維持でき，１月中旬から２月上旬にかけては，換気扇１台稼動，前室ドアを開けることで 17－22℃に維持できた．しかし，気温の日変化やブリザード時の急激な温度変化には対応できず，レーザーの動作保証温度である 15－25℃に入らないこともあった．

絶対重力測定では，高さ約 1.3mの地点で測定する重力値を金属標直上 0.0mに化成するため，基準重力点上の重力鉛直勾配を測定する必要がある．今回は，Ｇ型ラコスト重力計１台（G-583）と CG-5 シントレックス重力計１台（No.300200049）を使用して，重力の鉛直勾配を測定した．器械ごとに１測点につき１視準１読定を３回実施し，読定値の較差は８μGal 以内とした．金属標直上 0.0mと 1.2mの２測点の観測を１対回として，計６対回の観測を器械ごとに２回実施した．

絶対重力測定の設定と各種補正パラメータを表－１に示す．測定は，落下間隔を 15 秒，160 回の落下を１セットに設定した．また，セット間隔を 60 分に設定し，40 分測定，20 分小休止を繰り返す測定とした．なお，本稿では，１回の自由落下で求まる重力値をドロップ値，１セットのドロップ値を単純平均した重力値をセット値，１セッションのセット値を重量平均した重力値をセッション値と定義する．

表－１　測定の設定と各種補正パラメータ

昭和基地 FGS の緯度，経度，標高	69° 00′ 24.245″ S,　39° 35′ 8.491″ E,　21.492m （経緯度は ITRF2000 及び測地基準系 1980 に基づく測量成果，予備点も同位置とした）	
測定の設定	落下間隔 15 秒，１セットの落下回数 160 回，セット間隔 60 分 （40 分測定，20 分休止を繰り返す）	
器械高 [1]	昭和基地 FGS	①130.62cm（#203），②130.35cm（#104） ③130.72cm（#203），④130.25cm（#104）
	予備点	①129.45cm（#104），②129.82cm（#203） ③129.55cm（#104）
器械高の化成	重力値は金属標直上 0.0mの値に化成	
重力鉛直勾配	-3.339μGal/cm （JARE-33，36，42，45，51 による測定結果の重量平均値，重量は標準偏差）	
大気圧補正	標準大気圧 984.08hPa （1998 年から過去 30 年間の昭和基地平均海面気圧から算出）	
	大気アドミッタンス 0.32μGal/hPa （小川ほか（1991）の推定値）	
極運動補正	IERS Bulletin B を使用，δファクター1.164	
固体潮汐補正	ETGTAB （δファクターは処理ソフト既定値，永久潮汐については 1.0）	
海洋潮汐補正	ソフトウェア	GOTIC2（Version2004.10.25）（Matsumoto et al.，(2001)）
	短周期モデル	NAO.99Jb（16 分潮使用）（Matsumoto et al.，(2000)）
	長周期モデル	NAO.99L（５分潮使用）（Takanezawa et al.，(2001)）
	GREEN 関数	1066 地球モデル
	計算メッシュ	４次メッシュ（50m×50m）（小林ほか，(2004)）
外れ値判定	セット内	３σ範囲を超える値を外れ値として除外
	セッション内	絶対標準偏差の３倍を超える値を外れ値として除外
平均処理	セット内	セット内外れ値棄却後，単純平均
	セッション内	セッション内外れ値棄却後，重量平均 （重量はセット値の標準偏差）
処理ソフト	Micro-g LaCoste 社　g ver.7.07307	

[1] 器械高の欄に記載している①～④は第１～４セッションを意味する．

第１セッションは昭和基地 FGS にて FG5（#203）を，予備点にて FG5（#104）を設置して約２週間の測定を行った．第２セッションは器械を入れ替えた後，再度約２週間の測定を行った．第３セッションでは，再び器械を入れ替えて測定を開始したが，途中で FG5（#203）の落下槽内のドラッグフリーチャンバーを移動させる銅板製のベルトに亀裂が入ったため，２台の同時測定はこの時点で終了した．第４セッションは，昭和基地 FGS において FG5（#104）単独の測定となり，このセッションをもって昭和基地における全測定を終えた．なお，本作業では，第１，２セッションを本観測とし，第３，４セッションは点検観測とした．

測定中の唯一の問題は，FG5（#203）の第２セッションの測定から，ドロップ値が Gal 単位で変わる現象がしばしば発生したことである．この現象の頻度が増すことで，セット値に影響を及ぼすこともあった．なお，このセット値はセッション内で棄却した．干渉計内のミラー角度，試験落体の鉛直性・位置・速度等の点検及び調整を実施したが，この現象が改善することはなかった．この現象の原因の可能性として，落下槽内のベルトの張りが変わり，試験落体がうまく自由落下できなかったことが考えられる．

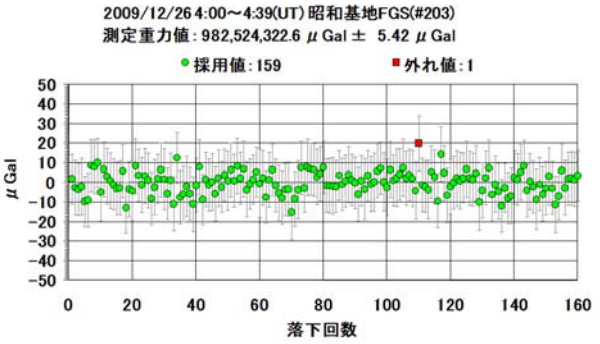
６．JARE-51 による絶対重力測定の結果

全測定結果を表－２に示す．また，図－３に１セットの測定結果の例を，図－４に第１－４セッションの測定値の時間変化を観測点ごとに示す．

測定期間中の昭和基地の季節は夏で，越冬に向けて各所で土木作業等が行われていたが，地盤が強固なため，振動は小さく，セット内の測定値は概ね±10μGal，１セットごとの測定値は概ね±４μGal の範囲内でのばらつきであり，良好な結果を得ることができた．また，測定期間中，ブリザードが３回発生したが，その影響はほとんどなかった．なお，図－４で採用値から 10μGal 以上乖離している外れ値は，地球上で発生したマグニチュード６以上の地震の影響によるものであると思われる．

表－２の測定結果に注目すると，第１－４セッションと時間が経つにつれ，重力値が減少する結果となった．その変化量は，昭和基地 FGS では-3.6μGal，予備点では-2.2μGal の重力減少である．観測点２点において調和した傾向にあり，有効落下数も多いことから，この変化は有意である可能性が高い．この重力変化が環境的要因なのか，器械的要因なのか，現在のところ不明である．

表－２の本観測の結果から，昭和基地 FGS に対する予備点の地点差は 1.3μGal，FG5（#203）に対する FG5（#104）の器差は-0.9μGal，第１セッションに対する第２セッションの差は-1.1μGal であった．観測点間の距離は約３ｍであり，重力計室内の重力水平勾配は非常に小さく，重力場として安定した場所である．また，本測定において器差はほとんどないと評価してよい．

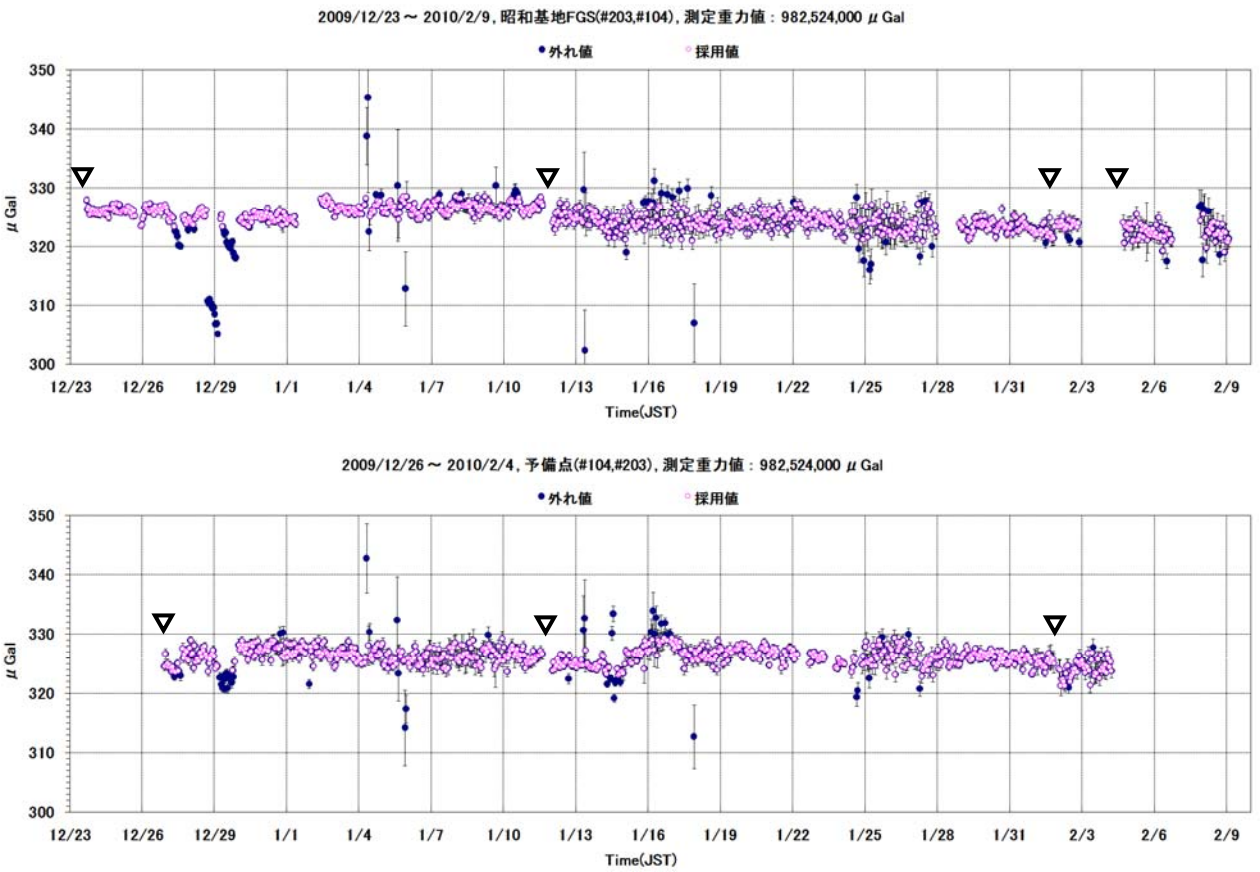


図－３　１セット（160 回の自由落下）の測定結果の例．昭和基地 FGS における FG5（#203）による測定．ドロップ値をプロットしており，緑丸は採用値，赤色の四角は外れ値を表している．

表－２　測定結果[1]

測点名	使用機器	重力値[2] ［μGal］	標準偏差[3] ［μGal］	有効落下数 ［回］	測定期間
昭和基地 FGS	FG5（#203）	982,524,326.0±0.1	2.0	60,411	2009/12/23 － 2010/01/11
	FG5（#104）	982,524,324.0±0.1	1.3	69,873	2010/01/12 － 2010/02/01
	FG5（#203）	982,524,323.8±0.1	0.7	2,823	2010/02/01 － 2010/02/02
	FG5（#104）	982,524,322.4±0.2	1.0	11,401	2010/02/04 － 2010/02/09
予備点	FG5（#104）	982,524,326.4±0.1	1.6	53,182	2009/12/26 － 2010/01/11
	FG5（#203）	982,524,326.1±0.1	1.7	65,133	2010/01/12 － 2010/02/01
	FG5（#104）	982,524,324.2±0.2	1.2	8,038	2010/02/02 － 2010/02/04

[1] 表中の結果は，各行上から下に向かって，第１－４セッションの結果を表す．
[2] 重力値は，セッション値を表している．
[3] 標準偏差は，重量１のセット値の標準偏差．



図－４　第１－４セッションの絶対重力測定結果．上図は昭和基地 FGS の結果，下図は予備点の結果．図中の▽は，各セッションの測定開始時期を表している．

７．絶対重力測定のトレーサビリティ

南極出発前及び日本帰国後に，国土地理院重力測定棟の筑波 FGS，筑波Ａ及び筑波Ｂにおいて，絶対重力測定を実施した．筑波Ａは筑波 FGS の東側約 1.5 mに，筑波Ｂは筑波 FGS の西側約 1.5mに位置する点検観測用の基準重力点である．測定は，国土地理院所有の３台の FG5 でほぼ同時期に行った．この測定結果を表－３に示す．なお，FG5（#203）については，昭和基地で落下槽ベルトに亀裂が入ったため，帰国後の測定では予備の落下槽に交換して測定を実施している．

FG5（#201，#203）は，出発前と帰国後の測定でいずれも重力値の差が１μGal 未満であることから，FG5（#203）は FG5（#201）にトレーサブルである．

FG5（#104）は，出発前後で重力値の差が約 11μGal 異なる．一方，表－３の参考値では，出発前後の差は３μGal となる．筑波Ａの重力値は，国内作業において 979,951,221.7μGal が得られているため，後者の結果の方が信頼性は高い．FG5（#104）の測定確度の悪さの原因は，FG5（#104）のスーパースプリングの性能（国土地理院所有の３台の中で最も悪い）と重力測定棟の地盤の弱さにある可能性が大きい．筑波Ａにおける測定結果は良好ではなかったが，昭和基地では FG5（#203）とほぼ同じ値を得ていたことを考慮して，FG5（#104）も FG5（#201，#203）にトレーサブルであると判断したい．

ところで，FG5（#201）は，毎年，筑波山中腹の国民宿舎つくばねで実施している FG5 の国内比較観測に参加している．この比較観測には，産業技術総合研究所（計測標準研究部門）の FG5（#213）も参加している．この比較観測の結果は，参加したほとんどの器械が，FG5 の拡張不確かさの範囲内で観測結果を得ており，国際比較観測に参加した FG5（#213）を日本の国家標準と仮定すれば，日本国内の FG5 は，FG5（#213）にトレーサブルであるといえる．

また，FG5（#213）は，2005 年にフランスで行われた国際比較観測に参加しており，その観測も国内の比較観測と同様の結果を得ている（Vitushkin et al.，2010）．したがって，FG5（#213）は国際標準にトレーサブルであり，最終的に FG5（#203，#104）の信頼性は確保されているといえる．

このほか，帰国後，絶対重力測定に使用したセシウム原子時計を，国土地理院 VLBI 観測局舎内にある水素メーザを基準器として周波数検定を実施し，周波数 10.0000MHz の信号が正常に出力されていることを確認した．

表－３　南極出発前及び日本帰国後の絶対重力測定結果

使用機器	測点名	南極出発前	日本帰国後
FG5（#201）	筑波 FGS	979,951,215.7±0.3μGal 有効落下数 12,265 回 2009/09/11 － 2009/09/15	979,951,215.4±0.3μGal 有効落下数 9,651 回 2010/04/23 － 2010/04/26
FG5（#203） 南極で使用	筑波 B	979,951,225.2±0.1μGal 有効落下数 8,666 回 2009/09/11 － 2009/09/14	979,951,226.0±0.6μGal 有効落下数 6,511 回 2010/04/27 － 2010/04/29
FG5（#104） 南極で使用	筑波 A	979,951,228.2±0.4μGal 有効落下数 8,377 回 2009/09/11 － 2009/09/15	979,951,217.1±0.2μGal 有効落下数 22,683 回 2010/04/23 － 2010/05/04
※参考値 FG5（#104） 南極で使用	筑波 A	979,951,224.2±0.7μGal 有効落下数 7,000 回 2009/09/18 － 2009/09/20	979,951,221.2±0.3μGal 有効落下数 11,636 回 2010/08/06 － 2010/08/10

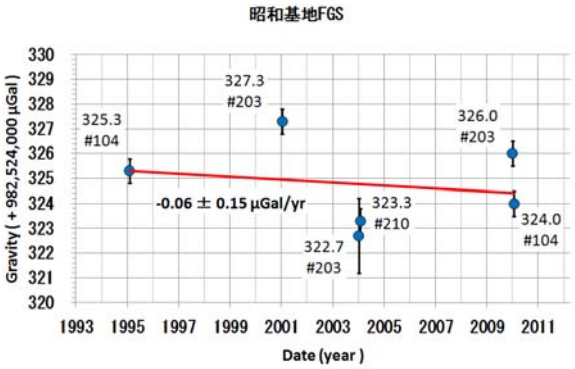
８．考察

８．１　昭和基地における重力変化

本節では，昭和基地の重力の経年変化について考察する．なお，第１－３回の測定では，補正計算の設定が統一されていなかったため，本研究では表－１に示した補正パラメータを使用して，再計算を行った．図－５に昭和基地 FGS における重力の経年変化のグラフを示す．

過去４回の重力の変化は一様ではなく，またその変化量も小さい．全測定の重力値は，FG5 の拡張不確かさ 4.8－5.6μGal の範囲内にあり，FG5 の性能限界を超えた重力の変化は検出されなかった．参考までに，最小二乗法により線形近似すると，重力変化の割合は-0.06±0.15μGal/yr であり，フリーエア勾配-0.3339μGal/mm を仮定して地殻の隆起速度を計算すると，0.2±0.4mm/yr の地殻隆起となる．

これまでに昭和基地周辺では PGR に関して，表－４のような様々な知見が得られている．なお，これらの知見については，一部を除き神沼（2008）に詳説されているので，参照されたい．表－４に示した隆起量を比較すると，重力測定の結果だけが，ほかの知見と比べ１桁程度小さい．この事実は，重力測定がほかの測地観測と比べて特異であることを示唆している．重力測定は，上下方向の高さの変動だけでなく，観測点の周辺の質量変動，または地下の密度構造の変化にも敏感であり，今回の結果は，それらを反映していると考えられる．



図－５　昭和基地 FGS の重力の経年変化．金属標直上 0.0ｍの重力値．図中のエラーバーは，実際の値の５倍に誇張して表示した．また，図中には各重力値と器械番号，最小二乗法により線形近似した直線と重力変化の割合を示した．

表－４　昭和基地周辺における PGR に関しての知見

地形学的データ	３－４mm/yr の地殻隆起（Yoshida and Moriwaki, 1979）
地殻変動のモデル計算	1.5mm/yr の地殻隆起（Nakada et al., 2000）
海洋潮汐データ	1975－92 年（1977－80 年を除く），4.5mm/yr の海面低下（道田ほか，1995）
	1981－87 年，9.5mm/yr の海面低下（Odamaki et al., 1991） 世界の海面は１－２mm/yr の海面上昇（Warrik, 1993）
VLBI 観測	4.6±2.2mm/yr の地殻隆起（Fukuzaki et al., 2005）
GPS 連続観測	1998－2004 年，1.4±0.2mm/yr の地殻隆起（Ohzono et al., 2006） 1996－2009 年，1.7±0.5mm/yr の地殻隆起（宗包，私信）
DORIS 連続観測	1993－2004 年，3.6±0.2mm/yr の地殻隆起（Amalvict et al., 2007）
水準測量	オングル島の傾斜活動は認められない（神沼・木村，1997）

８．２　重力測定と GPS 連続観測の融合の試み

PGR を考える場合，最近の氷床融解による弾性変形の効果を考慮する必要がある．中田・奥野（2001）によれば，重力と地殻変動の時間変化から，PGR の粘性変形と最近の氷床融解による弾性変形の各変動量を分離できることが報告されている．本節では，地殻変動観測のうち，GPS 連続観測のデータを用いて，中田・奥野（2001）で提案された方法で各成分の変動量を試算する．

PGR の粘性変形については，地殻の隆起に伴うフリーエア補正-0.3339μGal/mm と隆起した部分へのマントル物質の流入によるブーゲー補正+0.154μGal/mm（Wahr et al.，1995）から，重力の時間変化 dg_v/dt と地殻変動の時間変化 dh_v/dt の関係は次式で表現できる．なお，これ以降の数式上の添え字は，粘性 viscous，弾性 elastic を表す．

$$\frac{dg_v}{dt} = -0.3339\frac{dh_v}{dt} + 0.154\frac{dh_v}{dt}$$

$$= -0.1799\frac{dh_v}{dt} \qquad (1)$$

また，最近の氷床融解による弾性変形については，次のように表現できる．

$$\frac{dg_e}{dt} = -0.25\frac{dh_e}{dt} \qquad (2)$$

昭和基地において，粘性変形と弾性変形が同時に発生していると仮定すると，重力測定の観測量 g_{obs}，GPS 連続観測による地殻変動量 h_{obs} は，関係式（１），（２）を用いて，以下の関係式（３），（４）のように表される．

$$\frac{dg_{obs}}{dt} = \frac{dg_v}{dt} + \frac{dg_e}{dt}$$

$$= -0.1799\frac{dh_v}{dt} - 0.25\frac{dh_e}{dt} \qquad (3)$$

$$\frac{dh_{obs}}{dt} = \frac{dh_v}{dt} + \frac{dh_e}{dt} \qquad (4)$$

関係式（３），（４）に実際に観測された重力変化 -0.06±0.15μGal/yr（1995－2010 年）と GPS 連続観測の上下変動 1.7±0.5mm/yr（1996－2009 年）を代入して，各成分の変動量を試算すると，次の結果を得る．

PGR の粘性変形：5.3±2.7mm/yr
最近の氷床融解による弾性変形：-3.6±2.8mm/yr

この試算には，過去 14－16 年間の観測データを線形近似した結果を用いているため，この試算結果は大まかな傾向を示しているに過ぎない．このような特徴をもった知見は，このほかに地形学的データから得られた結果がある．表－４に記載した地形学的データは，最も高い隆起汀線 20m付近の海息動物の化石生息年代が，６千年前であったという事実である．この事実から，３－４mm/yr の地殻隆起が推測された（Yoshida and Moriwaki，1979）．この推測と試算結果を比較すると，試算結果は誤差が大きいものの，この地形学的データから推測された地殻隆起速度と調和した傾向を示している．

９．まとめ

昭和基地重力計室において，FG5 による４回目の絶対重力測定を実施した．今回の測定を含む過去４回の測定の結果，全重力値が FG5 の拡張不確かさの範囲内にあるものの，16 年間でわずかな重力の減少傾向が検出された．この結果は，これまでに得られている様々な知見と，地殻隆起という点では調和した傾向だが，隆起速度は１桁程度小さかった．重力は，上下方向の高さの変動だけでなく，観測点の周辺の質量変動，または地下の密度構造の変化にも敏感な物理量であり，今回の結果は，それらを反映していると考えられる．このほか，重力測定と GPS 連続観測の結果を融合して，PGR と最近の氷床融解による地殻の隆起現象の隆起量を分離することを試みた．試算の結果，PGR については，地形学的データから推測された地殻隆起速度と調和した傾向を示した．

今回の測定では大きなトラブルに見舞われることはなかったが，小さなトラブルは発生した．昭和基地は，夕方から夜にかけて，次第にカタバ風が強くなり，雲母が舞い散る．FG5 のような精密機器をこのような環境下で調整や修理することは不可能ではないが，困難を極める．JARE-45，51 に続き，次回の測定も２台体制で測定に臨むべきである．

謝　辞

昭和基地の作業では，池田博隊員（筑波大学），竹本哲也隊員（(株)阪神コンサルタント）をはじめ，JARE-51 並びに JARE-50 の皆様に数多くのサポートを頂きました．また，国土地理院測地部物理測地課（当時）の本田昌樹氏，植田勲氏には，観測物資の準備や輸送に多大なご支援を頂きました．海洋潮汐補正では，松本晃治博士（国立天文台・水沢 VLBI 観測所）が開発されたソフトウェアを使用しました．このほか，多くの方々にご協力，ご助言を頂きました．ここに記して謝意を表します．

参 考 文 献

中田正夫，奥野淳一（2001)：Glacial Reboundと重力・地殻変動の時間変化： 南極とグリーンランド氷床の最近のマスバランスの推定方法について，ジョイントシンポジウム論文集「衛星重力観測と衛星アルティメトリーの新時代」，66-71.

平岡善文，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.

Makinen, J., Amalvict, M., Shibuya, K. and Fukuda, Y. (2007)：Absolute gravimetry in Antarctica：Status and prospects, Journal of Geodynamics, 43, 339-357.

Wahr, J., DaZhong, H. and Trupin, A. (1995)：Predictions of vertical uplift caused by changing polar ice volumes on a viscoelastic earth, Geophys.Res.Left., 22, 977-980.

原田美道，鈴木弘道，柿沼精一，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９，43-54.

Harada, Y., Kakinuma, S. and Murata, I. (1963)：Pendulum determination of the gravity difference between Tokyo, Mowbray and Syowa Base, Antar.Rec., 17, 35-50.

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.

Tsubokawa, T., Hanada, H. (1994)：Absolute gravity measurements with a NAOM2 absolute gravimeter at syowa Station (abstract), Proc.NIPR Symp.Antarct.Geosci., 7, 176.

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.

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.

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.

Kaminuma, K., Tsukahara, K. and Takemoto, S. (1997)：Absolute gravity value measured at Syowa Station, Antarctica, Bulletin D' information, 80, 26-29.

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.

坪川恒也（2004)：絶対重力計開発の経緯と現状ー佐久間晃彦先生を偲んでー，測地学会誌，50，281-294.

Vitushkin, L., et al. (2010)：Results of the Seventh International Comparison of Absolute Gravimeters ICAG-2005 at the Bureau International des Poids et Mesures, Sevres, Gravity, Geoid and Earth Observation IAG Symposia, 135, 47-53.

ISO (1995)：International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology, 2nd ed.

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.

小川文雄，福田洋一，赤松順平，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，37，13-30.

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

Matsumoto, K., Takanezawa, T. and Ooe, M. (2000)：Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model：A Global Model and a Regional Model around Japan, Journal of Oceanography, 56, 567-581.

Takanezawa, T., Matsumoto, K., Ooe, M. and Naito, I. (2001)：Effects of the Long-period Ocean Tide on Earth Rotation, Gravity and Crustal Deformation Predicted by Global Barotropic Model -periods from Mtm to Sa-, J.Geod.Soc.Japan, 47, 545-550.

小林祐樹，岩野祥子，福田洋一（2004)：昭和基地周辺の詳細海岸線データの作成および海洋荷重潮汐の計算，測地学会誌，50，17-26.

Yoshida, Y. and Moriwaki, K. (1979)：Some consideration on elevated coastal features and their dates around Syowa Stations, Antarctica, Mem.Natl.Inst.Polar Res., Spec.Issue 13, 220-226.

Nakada, M., Kimura, R., Okuno, J., Moriwaki, K., Miura, H. and Maemoku, H. (2000): Late Pleistocene and Holocene Melting history of the Antarctic ice sheet derived from sea-level variations, Marine Geology, 167, 85-103.

道田豊，並木正治，岩永義幸（1995）：南極昭和基地における最近 20 年間の平均水位の変化，第 15 回南極地学シンポジウム講演要旨，極地研，10-12.

Odamaki, M., Mochida, Y., Noguchi, I., Iwanaga, Y., Ikeda, S. and Iwamoto, K. (1991): Mean sea-level observed at Syowa Station, East Antarctica, Proc. NIPR Symp. Antarct. Geosci., 5, 20-28.

Warrik, R.A. (1993): Climate and sea-level change: Observation, Projection and Implications, ed. by Warrik et al., Cambridge Univ. Press, Cambridge, 3-12.

Fukuzaki, K., Shibuya, K., Doi, K., Ozawa, T., Nothnagel, A., Jike, T., Iwano, S., Jauncy, D.L., Nicolson, G.D. and McCulloch, P.M. (2005): Results of the VLBI experiments conducted with Syowa Station, Antarctica, J. Geod., 79, 379-388.

Ohzono, M., Tabei, T., Doi, K., Shibuya, K. and Sagiya, T. (2006): Crustal movement of Antarctica and Syowa Station based on GPS measurements, Earth Planets Space, 58, 795-804.

Amalvict, M., Willis, P. and Shibuya, K. (2007): Status of DORIS stations in Antarctica for precise geodesy, IAG Symposia 130, Tegoning, P. and Rizos, C. (eds.), 94-102.

神沼克伊，木村勲（1997）：南極・昭和基地の水準測量とその解釈，測地学会誌，43，23-26.

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.