

南極および周辺海域での重力場研究

福田洋一 (ふくだよういち)

京都大学大学院理学研究科

日本の南極地域観測隊によって実施された南極および周辺海域での重力測定, これまでの重力場研究の成果について概観し, その問題点や課題について考えとともに, 今後主流となるであろう航空機や衛星による重力場測定を念頭に置きながら, 特に, 重力場の空間的变化に関連した研究の方向性や展望について述べる.

1. JARE による重力測定

南極で重力を測ることの意義は色々考えられるが, グローバルな視点からは南半球の高緯度地域で重力値を決めること自体が重要な目的の一つである. このことは, 我が国の南極観測においても早くから認識されており, 日本の南極地域観測隊 (以下, JARE; Japanese Antarctic Research Expedition と呼ぶ) でも, すでに第 2 次隊 (1957~58) において重力振子による測定が計画されていた. このときは, 残念ながら海氷の状態が悪く, 設営上の問題で, 測定は実施されなかったものの, その後, 第 3 次隊のウォルドン重力計による測定の試みを経て, 第 6 次隊 (1964 年) では, 重力振子を用い, 我が国初の南極での重力測定に成功している (Harada *et al.*, 1963). 重力基準点網の歴史については本特集号の松村の稿を参照していただくとして, ここでは, 第 6 次隊によって実施された昭和基地での重力測定値が, 測地基準系等の変換処理は施されてはいるものの, その後, 1990 年代に昭和基地での絶対重力測定が実施されるまでの約 30 年間の長期にわたり, JARE が実施したすべての陸上および船上重力測定の基準値を与えていたことに注意を喚起しておきたい. 重力測定に限らず, 測地的な基準値あるいは基準測量の重要性は, まさにこういう点にあると言えよう.

さて, 重力基準点網の確立とは別に, 南極に限らず重力測定を実施する主要な目的の一つは, 地下の密度構造を知ることにある. このような目的での重力測定は, 通常, 重力探査と呼ばれ, 地震探査や地磁気探査とならび, 地下構造を知る上で大変簡便かつ有用な方法である. また, 氷床に覆われた南極大陸では, 重力探査の結果は, 氷床の厚さの推定など雪氷学的にも有用な情報を与えることも重要な点である. 実際, アイスレーダーが用いられるようになる以前は, 氷厚の測定そのものが人工地震探査や重力探査の主要な目的の一つであった. このため, JARE でも, 内陸旅行などの際には, 可能な限り重力測定も実施するように配慮されており, すでに第 5 次隊 (1963 年) ではウォルドン重力計を用いた測定が実施されている. さらに, 第 8 次隊 (1966 年) 以降は, 現在でも第一線で活躍しているラコスト重力計 G 型が測定に用いられるようになり, 特筆すべきは, 第 9 次隊 (1967 年) での南極極点旅行の際には, すでに極点までの重力測定が実施されていることである (Yanai and Kakinuma, 1971).

[表1](#)は、JARE で得られている重力測定データの出典となる文献をあげたものである。これ以外にも、最近の未整理のデータや臨時的測定データなどリストからの漏れもあるので、[表1](#)が完全に網羅的というわけではないことをお断りしておく。また、これらのデータを利用した研究論文は他にも多くあり、その成果の一部については後に触れることにする。当然のことではあるが、[表1](#)にはそれぞれの時期における JARE の研究対象地域の変遷がよく表れており大変興味深い。ところで、[表1](#)に含まれる過去約 30 年間に測定された重力点の総数は 2 千数百点程度である。この数は、諸外国の測定に比べても決して少ない訳ではないし、それを多いと感じるか少ないと感じるかは、それぞれの立場によって異なるかもしれない。しかしながら、広大な南極大陸を覆う測定点数としてまったく不足していることは確かであろう。あるいは、南極大陸での重力測定が如何に困難であるかを示した数字とも言えよう。

南極海での船上重力測定は、陸上での重力測定にも増して困難を極めたものである。[表2](#)は、JARE での船上重力測定の実施状況をまとめたものであり、[図1](#)に、デジタルデータが得られるようになって以降の航跡を示す。[表2](#)に示すとおり、JARE での船上重力測定そのものの試みは古くからなされており、最初の試みは砕氷船「ふじ」が就航して間もない第 8 次隊によってなされている。しかし、実際に南極海での船上重力測定に初めて成功したのは「ふじ」の時代も終わりに近い第 2 次隊（1980 年）のことである(Kasuga *et al.*, 1983)。現在、JARE による南極海での重力測定は、人員や物資輸送を主要な目的とする砕氷艦「しらせ」の往復航路に沿って実施されており、また、しらせの船上では他の海洋観測も実施されるので、重力探査専用にしらせの運行時間を割くことはほとんど不可能な状況である。この間の事情や、JARE での船上重力測定の詳細については福田（1995a）を参照いただくとして、[図1](#)の航跡の状況は、このような JARE での海洋観測の実施体制を象徴的に反映した一例と言えるであろう。

2. 重力場研究の変遷

先にも述べたように、氷床で覆われた南極大陸での重力データは、第一義的には密度コントラストの最も大きい氷床下の基盤地形を表すこととなる。従って、より深部の地殻構造の研究のためには、基盤地形を知る必要があるが、南極のすべての点で基盤地形が知られている訳ではなく、むしろ、殆どわかっていないと言う方が正しいであろう。このため、逆に、重力データは基盤地形を知るための大変有力な情報源の一つとしても利用されている。

重力データから基盤地形を知るためには、通常フリーエア異常やブーゲー異常ではなく、氷床上のある一定の高さまでがすべて氷で覆われていると仮定し、その面での重力異常を求めることが有効である。Kaminuma and Mizoue(1978)は、先に紹介した南極極点旅行での重力測定データや、その他、いわゆる Grushinsky カタログ(Grushinsky *et al.*, 1972)と呼ばれているデータセットを用い、氷床の最高高度より上空の高度 4 0 0 0 m までの空間がすべて氷で埋まった状態を考え、この面での重力異常（高レベル重力異常）を計算した。このようにして得られた高レベル重力異常の短波長成分は、ほぼ、基盤地形を与えるものと考えられるが、さらに長波長成分は地殻の厚さなどに関連したより深部の密度構造変化を反映していると推察される。このようなアイデアに基づき、Kaminuma and Mizoue(*ibid.*)では、平均的なものではあるが、西南極の地殻の厚さが東南極のそれより薄いこと、東南極でアイソスタシーが成立していそうであることを指摘した。

1980年代になり、人工地震による地殻構造探査が実施され、また、アイスレーダーによる基盤地形データなども利用できるようになると、これらのデータと重力データを組み合わせることにより、地下構造についてのより詳細な議論が可能となってきた。Nagao and Kaminuma(1984)は、それまでに得られたこれらのデータを整理しなおし、やまと山脈下でのモホ面の深さや、昭和基地 - みずほ基地間の基盤地形およびその精度について議論している。さらに、1990年代にはいると、ドームふじでのボーリング計画が実施されるに伴い、昭和基地からのドームふじにいたるルート上での重力測定が繰り返し実施されるようになり、2次元的なものではあるが地下構造モデルの推定も行われた(Kanao *et al.*, 1994)。なお、この頃になると、GPSの利用で地上の位置決定精度は大きく向上するとともに、新たにシントレックス重力計も利用されるようになり、より手軽に重力測定が実施されるようになってきた。しかしながら、南極大陸氷床域での重力測定に関しては、通常の国内での測定に比べ、依然、幾つかの特殊性や困難が伴うものであり、今後求められるであろう精度の高い測定を実施するためには、それなりの注意が必要である。この点については重力測定の問題点として後述することにする。

南極大陸での重力探査では、大部分が調査旅行の側線に沿っての1次元的な測定がなされているだけであり、面的な測定はほとんど不可能な状態である。このため、南極大陸での2次元的な重力異常図を作成することは至難のことであった。さらに、南極海の重力データに至ってはなおさらで、1980年代初頭に発表された Groushinsky and Sazhina(1982)のマップでは、海域も含めた重力異常図が作成されてはいるものの、そこには多くのデータ空白域が残されていた。

このような状況の中、Segawa *et al.*(1984)は、当時ようやく利用できるようになった、GEOS-3 および SEASAT の衛星高度計データを用い、それまでに得られていた船上、陸上の重力データをコンパイルし直し、南極および周辺海域でのフリーエア異常図を完成させた。衛星高度計を用いた衛星アルティメトリーとは、簡単には、マイクロ波レーダーを用い海面の凸凹を正確に測る手法のことであるが、海面の凸凹は、ほぼジオイドの形と考えることができるので、適当なデータ処理を施すことで海域の重力異常を推定することが可能である(福田, 1995b)。衛星アルティメトリーは、それまでの極めて非能率的な船上での測定と比べるとまったく画期的なことであった。特に、1985年に打ち上げられた GEOSAT 衛星は、その後の海域での重力場研究に決定的な役割を果たした。

GEOSAT は、アメリカの海軍によって打ち上げられた衛星で、海域重力場の改良を主な目的とした最初の18ヶ月の Geodetic Mission(GM)と、海洋のダイナミクスの研究を主目的としたその後の Exact Repeat Mission(ERM)の2つの phase から成り立っている。このうち、GMのデータについては、当初、その軍事的な価値から機密扱いとされ、1990年代に入るまで一般には公表されていなかった。それでも、GEOSAT が打ち上げられるまでの南極海の衛星高度計データは、SEASAT のわずか3ヶ月間の海氷に覆われた冬場のデータに限られており、GEOSAT のデータは、空間分解能の劣る ERM のものでさえ大変貴重なものであった。そこで、Fukuda *et al.*(1990)は、GEOSAT のデータを最大限に利用し、さらに船上重力測定や陸域の重力測定データも加え、最小2乗コリネーション法と呼ばれる重力場の調整手法を用い、昭和基地周辺地域のフリーエア異常図ならびにジオイド高図を作成した。

南極におけるジオイド高図については、すでに海域のそれは、SEASAT の衛星高度計データを用い、Segawa and Asaoka(1982)により求められていたが、昭和基地周辺地域に限られるものの、陸

域も含めた詳細なジオイド図が作成されたのはこれが初めてのことであり、GPSをはじめとし SAR やレーザー高度計など、今後、南極域での衛星測地技術の利用はますますその重要性を増すものと思われる。ところで、これらの手法で得られる高さは、幾何学的な測定に基づく楕円体高であり、重力の等ポテンシャル面であるジオイド面からの高さ、即ち正標高とは異なる。通常的位置決めの問題であれば楕円体高を用いるだけでも差し支えないが、例えば氷床の流動のシミュレーションのような問題では、力学的な高度を与える正標高を用いる必要があり、楕円体高と正標高の差であるジオイド高を用いた換算が必要となる。これは、陸域でジオイド高図が必要となる一つの例である。

一方、フリーエア異常図についても、精度の見積もりを含めた海域から大陸域にかけての詳細な2次元図が作成されたのは Fukuda *et al.* (*ibid.*) が初めてのことであった。特に、海域については、GEOSAT データの利用でその信頼性が大きく向上しており、この結果を元に、フリーエア異常に広域的な地質境界と関連すると思われる帯域状の高低の分布が見られることを指摘した。このことは、この地域のテクトニクスを論じる上でも大変重要なことであり、後述するように今後の大陸での航空機重力などの成果に期待が寄せられる点である。

1990年代に入り、GEOSAT GM のデータが公開されるに至り、南極海に限らず、今や海域での重力異常は地球物理学的データのうちで最も良く解明されているものの一つとなっている。現在、Sandwell and Smith(1997)、あるいは彼らの一連の研究成果として、全世界の海域において、1' x 1' 格子上での重力異常データが公表されており、南極周辺海域においても、海底地形、フラクチャーゾーン、テクトニクスの研究などに広く利用されている。さらに、Terada *et al.* (2001) は、海底の微細構造の抽出に焦点を絞り、南極海域での GEOSAT GM のデータを独自に解析するとともに画像処理の手法を適用することにより、空間スケールとして数 km 以下の微細な海底地形構造も検出可能であることを示している。衛星アルティメトリーは、もはやほぼ確立した技術であり、その価値とともに、ある意味ではその限界もみえていくように思われる。次に述べるように、今後、さまざまな重力測定データの出現が予想されるなか、船上重力測定とともにその役割分担を考えることも重要であろう。

3. 衛星および航空重力の利用

重力場研究の歴史は、基本的には、重力測定の歴史そのものと言ってもよい。これは、地球科学の研究としてまったく当然のことであり、これからの重力場研究の展望を考える上でも、まず、今後、どのような重力測定データが得られるようになるかを考えることが先決であろう。従来、衛星アルティメトリーを除き、重力場研究は基本的に地上あるいは船上での重力測定データに頼らざるを得なかった。しかしながら、それらの測定が如何に非効率的であるかは既に述べたとおりである。例えば、南極氷床の広域的な地下密度構造の推定をしようとした場合でも、少なくとも広域的な重力マッピングに関しては、今後、衛星や航空機の利用を考えることが現実的であろう。

衛星による重力測定は、アイデアそのものはかなり古くからあったものの、現実には、2000年の7月に打ち上げられて CHAMP の High-Low Satellite to Satellite Tracking (H-L SST) によるものが歴史上初のものである。今後、2001年秋に Low-Low SST による GRACE が、また、2005年には、重力偏差計を搭載し、重力異常の研究に適した GOCE の打ち上げが予定されている(福田、

2000). GOCE は、H-L SST と重力偏差計による静的な重力場の改良に重点を置いたミッションであり、空間スケール 100km (~80km) で、重力異常にして 1mgal、ジオイド高にして 1 cm の精度を目指している。これは、具体的には、氷床下の基盤地形に換算すると数 10m の精度、地殻の厚さにして 0.1km 程度の精度に対応する。さらに、2006 年には GRACE の後続としてレーザー干渉計による SSI (Satellite to Satellite Interferometer) を用いた衛星も計画されており、この衛星の主要な目的は重力場の時間変化の検出による地球環境モニタリングにあるが、もしそれが実現した場合には、静的な重力場の研究においても、GOCE 以上の空間分解能ならびに精度が得られるものと期待されている。

一方、航空機による極域の重力測定は、南極でも 1990 年台初頭より部分的に実際されており、その後、北極域に関しては、NRL/NIMA の Arctic Gravity Project として、現在、ほぼマッピングを終了している。それらの報告によると、航空機の航跡の間隔約 18km (10')、航跡に沿っての分解能 (これは飛行高度やフィルタリングの特性に依存する) 22-30km 程度で、1.8~3mGal の精度が得られているとのことである。また、Bell *et al.* (1999) は、5 シーズンにわたる西南極での航空重力測定の結果を発表しているが、そこに示されているフリーエア異常図は、従来の陸上測定で得られたそれとはまったく次元の違う詳細さであり、これは、GEOSAT GM のデータを用いた海域の重力異常図が発表されたときと同様の驚きである。Bell *et al.* (*ibid.*) によると航空重力測定の適用が有効な空間スケールは 5.5 km ~ 400 km 程度であり、これより短波長の領域についてはより低速なヘリコプターなどの利用 (本特集号、瀬川の稿参照) が、また、長波長の領域については衛星重力の利用が有効と述べている。

4. 陸上重力測定の問題点と課題

このように、衛星や航空重力データが利用できるようになることを前提とすると、地表重力測定の利点、あるいはそれを実施することの意義は、その空間分解能の高さと潜在的な測定精度の良さということに絞られてくる。ここで潜在的と断ったのは、従来の南極観測で得られている重力データを見る限り、例えば日本国内での測定などと比べ、重力測定が本来持っている精度を十分に出し得ているようには思われなからである。JARE における船上重力測定の問題点等については福田 (1995a) に述べられているので、ここでは、陸上の重力測定の問題点について簡単にふれ、今後の課題について考えてみる。

南極で重力探査を実施する際、例えば日本国内の測定と比べて幾つかの特殊事情が存在し、それが最終的な測定精度に影響していることは確かである。これらの要因の内、まず、重力計の特性に関連するものについて考えてみよう。JARE では、重力測定にラコスト重力計あるいはシントレックス重力計を用いているが、これらのバネ式の相対重力計では、その機械的な特性として、程度の差こそあれ、ドリフト (バネのクリープ等、重力計そのものに起因する測定値の緩やかな時間変化)、テア (重力計に起因する測定値の跳び)、重力計定数 (測定値を重力値に換算するための換算係数) の不確かさなどの問題を避けることができない。これらは、南極に限ったことではなく、日本国内の重力探査の場合でも同様であるが、国内の探査では、測定方法の工夫などで実際上それほど大きな問題とはならない。重力計定数に関しては、ごく特殊な場合を除き南極においてもまず問題となることはないと思われるが、ドリフトとテアは、南極では深刻な問題であり、過去の JARE の重力測定データをみても、重力値の精度を決定しているのはほぼこれら 2

つの要因によるものと思われる。

ドリフト、テアの影響を小さくするためには、重力計に出来る限り衝撃を与えないように取り扱いに十分な注意を払うとともに、データの後処理でそれらが補正できるように、環閉合の時間を短くしたり往復測定を行うなど、測定上の工夫が重要である。例えば、国内の探査では、通常、数時間以内には同じ測定点に戻って環を閉じるように配慮されているし、より精度が要求される場合には、往復測定を実施することにより、ドリフトに関しては 0.1mgal より十分に良い精度で補正することが可能である。また、テアが起こった場合にも、往復測定であればその位置と量を推定することも可能であるし、環閉合測定の場合でも、その環のデータだけを再測すればよい。しかしながら、南極氷床での測定を考えた場合、現在、実質的に機動力として利用できるのは雪上車のみであり、また、行動日程の制約等から、環閉合に 1 週間以上かかることもめずらしくない。さらに、雪上車での移動中の振動は想像を越えるものであり、もちろん徐振対策には注意が払われているものの、不規則なドリフトやテアを生む大きな原因となっている。

氷床での測定条件を考えた場合、理想的には、毎日の測定毎に幾つかの閉合環をつくりながら、尺取虫的に測定点を増やし、基準点のみの測定を別途実施する（この際可能であればヘリコプターや航空機を利用することが望ましい）ような方法が考えられる。しかし、これは、現在の JARE での観測体制を考えると極めて困難か、あるいは、實際上ほとんど不可能なことのようと思われる。しかしながら、その場合でも、この原則に従い、可能な限り時間を隔てた同一測定点での測定回数を増やし、ドリフトやテアの補正が出来るように配慮をすべきである。

南極氷床上での重力測定の特長事情として、測定点位置決定の問題がある。氷床上では氷の流動に伴い、測定点は常に動いており、厳密には位置そのものも時間的に変化することになる。しかしながら、このような問題とは別に、GPS が広く利用されるようになる 1990 年代以前の測定では、氷床上での位置そのものの決定精度が大変悪く、それが最終的な重力異常の精度に大きく影響していた。GPS 測量が使われるようになった現在、重力探査の通常の目的には十分な位置精度が得られるようになっている。さらに、GPS 測量と雪尺の測定、重力測定を組み合わせることにより、氷床の流動に関する情報さえも得られる可能性があり、むしろこのような異種データの利用、あるいはそれが得られること自体が地表観測の一つの利点でもある。

以上の議論は、地上の重力測定としては相対重力計の利用を前提としていたが、最近、ポータブルな絶対重力計（例えば A10 型）が市販されるようになってきている。重力絶対測定では、相対重力計の欠点であるドリフトやテアの問題がまったく存在しない上に、その精度から、重力異常ばかりでなく、GRACE との連携を念頭においた重力の時間変化の研究（本特集号、佐藤の稿参照）にも利用出来る可能性がある。氷床上での重力絶対測定には、實際上、多くの困難が予想されるものの、今後、地上測定に求められるのは、衛星や航空重力のグラウンド・ツールズ、さまざまな解析の基準場としての精度の高さであり、その場合、適当な間隔で絶対重力測定が実施されていることの意義は極めて大きいと思われる。

5. 今後の展望

今後 10 年ほどの間には、GRACE、GOCE や GRACE-FO などの衛星データの出現、また、それを眺みながら、国際的な協力のもと、南極大陸での航空機による重力測定も実施されることであろう。また、ICESAT などのレーザー高度計による氷床地形マッピングデータも利用できるようになれば、

陸域の広域的な重力マッピングに関しては、これらのデータの利用が主流となることであろう。このことは、これまでの海域における衛星アルティメトリと船上重力データ利用の推移からも容易に推測できることである。今後、これらのデータが利用できるようになった場合、それぞれの測定データの役割分担を大雑把に空間波長で分類すると、100km より長波長の領域を衛星重力データが、5km~100km の領域を航空重力あるいは衛星アルティメトリが、それより短波長の領域を船上を含む地表測定が受け持つということになる。

当面、衛星重力で予想される重力異常の精度は、波長 100km で 1mgal、航空重力のそれは波長 5~10km で 1~2 mgal といったところである。従って、これらのデータのグラウンド・ツールズとして地表重力測定に要求される精度は、1mgal よりも十分に良くなければならない。従来の南極大陸での重力測定は、先に述べた測定上の問題などにより、その測定精度は決して高いものではなかった。しかし、よく計画された測定を実施すれば、1mgal より良い精度のデータを得ることは決して困難なことではない。また、2次元的な探査は困難なものの、1次元であれば空間分解能をあげることもそれほど困難なことではない。地震探査測線に沿って、高精度な重力、氷床地形、基盤地形(氷厚)、地震波構造のデータセットが得られるようになれば、それをキー測線として衛星・航空重力データをもとに空間的に構造を2次元に拡張し、広域の地下構造を推定することも可能であろう。

以上のことは、海域の重力探査についても同様であり、もはや広域の重力場測定をすべて船上重力でカバーするのは現実的なこととは思えない。船上観測においても、探査海域を限定し、海底地形探査や地震探査、地磁気探査と同時に高精度の重力測定を実施することは、衛星や航空重力データが利用できるようになったとしても、依然、重要なことである。

衛星重力、航空重力、衛星アルティメトリ、それに地表重力データを加えることにより、今後10年間の内には大陸から海域に至る広範な領域で、極めて高品質の重力データが揃うことになろう。そのような状況と比べると、現在の南極の重力場に関する知識は限りなく無に近いものである。新しいデータの出現により、今後どのような発見があるのか大きく期待が膨らむとともに、しばらくは重力場の研究に目が離せない状態である。

文献

- Abe, Y. (1975): Gravity data, JARE Data Rep., 28, 114-119. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, 7, 37-43.
- Bell, R. E., V. A. Childers, R.A. Arko, D. D. Blankenship and J. M. Brozena(1999): Airborne gravity and precise positioning for geologic applications, J. Geophys., Res., **104**, 15281-15292.
- 福田洋一(1986):あすか観測拠点と昭和基地間の重力結合およびルンドボークスヘッタにおける重力測量,南極資料, **30**, 164-174.
- 福田洋一(1995a): 南極海の重力測定の現状とその問題点, 月刊海洋, 27, 海洋出版, 351-355.
- 福田洋一(1995b):人工衛星アルティメトリ, 月刊地球, 号外, 第II号, 海洋出版, 86-91.
- 福田洋一(2000):衛星アルティメトリと衛星重力ミッション, 測地学会誌, **46**, 53-67.
- Fukuda, Y., J. Segawa and K. Kaminuma (1990): Geoidal undulation and gravity anomaly around the Japanese Antarctic stations estimated from both satellite altimeter data and surface gravity data, Proc. NIPR Symp. Antarct. Geosci., **4**, 108-118.

- Grushinsky, N. P., E. D. Koryakin, P. A. Stroev, G. E. Lazarev, D. V. Sidorov, and N. F. Virskaya(1972): The catalogue of the gravity stations in Antarctica, *Tr. Gos. Astron. Inst.*, **42**, 115-311.
- Groushinsky, N. P. and N. B. Sazhina (1982): Some features of Antarctic crustal structure. Antarctic Geoscience, ed. by C. Craddock. Madison, Univ. Wisconsin Press, 907-911.
- Harada, Y., S. Kakinuma, and I. Murata (1963): Pendulum determination of the gravity differences between Tokyo, Mowbray and Syowa Base, *The Antarctic Record*, **19**, 35-50.
- Higashi T., M. Kanao, H. Motoyama and T. Yamanouchi (2001): Gravity observations along the traverse routes from Syowa station to Dome Fuji station, East Antarctica, *Polar Geosci.*, **14**, 226-234.
- Kaminuma, K. and M. Mizoue (1978): Modes of gravity anomaly distributions in relations to the crustal structure of the Antarctic continent, *Antarct. Rec.*, **61**. 32-39.
- 神沼克伊・国見利夫・大滝 茂(1980):南極・竜宮岬と昭和基地付近での重力観測 ,南極資料 ,**70** , 149-157 .
- Kaminuma,K. and T. Nagao (1984): Gravity survey in Lutzow-Holm Bay and the Mizuho Plateau, East Antarctica, 1981. JARE Data Rep., **89**, 59-87.
- 神山孝吉・金尾政紀・前野英生・古川昌雄(1994): 1992 年に実施したドーム F 周辺部の重力測定 , 南極資料 , **38** , 41 - 53 .
- Kanao, M., K. Kamiyama and I. Ito (1994): Crustal density structure of the Mizuho Plateau, East Antarctica from gravity survey in 1992. Proc. NIPR Symp. Antarct Geosci., **7**, 23-36.
- 金尾政紀・東 敏博(1999): 第 38 次南極地域観測隊地学部門の野外観測における地球物理学的研究(1996-1998) , 南極資料 , **43** , 375-405.
- Kasuga, T., S. Fuchinoue, K. Kaminuma, and J. Segawa, Sea gravity measurements in the Antarctic regions during the 22nd and 23rd Japanese Antarctic Research Expeditions, *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **28**, 81-92, 1983.
- Nagao, T. and K. Kaminuma (1984): Estimation of the crustal structure and the bedrock topography by the gravitational method around Syowa Station, *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **33**, 1-8.
- Nagao, T. and K. Kaminuma (1988): Gravity survey in the Mizuho Plateau, JARE Data Rep., 132, 1-32.
- Sandwell, D. T. and W.H.F. Smith (1997): Marine gravity anomaly from Geosat and ERS-1 satellite altimetry. *J. Geophys. Res.*, **102**, 10039-10054.
- Segawa, J., and T. Asaoka (1982): Reevaluation of Geoid based on the SEASAT altimeter data - Geoid around Antarctica -, *J. Geod. Soc. Jpn*, **28**, 162-171.
- Segawa, J., Matsumoto, T. and K. Kaminuma (1984): Free air gravity anomaly of Antarctic region, *Spec. Map Ser. Natl. Inst. Polar Res.*, No. 3.
- Shibuya, K. and Y. Fukuda(1999):Gravity survey along the L- and AB-routes, East Dronning Maud Land, Antarctica,JARE DATA Rep.,**237**,16-30
- Terada, K., Y. Fukuda and Y. Nogi (2001): Detection of sea floor structures off the Gunnerus ridge,Polar Geosci., **14**, 235-243.
- Yanai, K. and S. Kakinuma (1971): Measurement of gravity along the traverse route Syowa-South Pole. Report of the Japanese traverse Syowa-South Pole 1968-1969, JARE Sci. Rep., Spec. Issue, **2**, 131-150.

Yoshida, M. and A. Yoshimura (1972): Gravity survey in the Mizuho Plateau –West Enderby Land area, East Antarctica, 1969-1971, JARE Data Rep., **17**, 168-203.

表1 . JARE による陸上重力測定およびデータ

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

表 2 . JARE による船上重力測定の実施状況

JARE	砕氷艦	重力計	備考
8 (1966)	ふじ	GSI type	
9 (1967)	ふじ	GSI type	
13 (1971)	ふじ	GSI type	
15 (1973)	ふじ	GSI type	
21 (1979)	ふじ	NIPRORI-I	
22 (1980)	ふじ	NIPRORI-I	*
23 (1981)	ふじ	NIPRORI-I	*
25 (1983)	しらせ	NIPRORI-I	
27 (1985)	しらせ	NIPRORI-I	*
28 (1986)	しらせ	NIPRORI-I	*
29 (1987)	しらせ	NIPRORI-II	*
30 (1988)	しらせ	NIPRORI-II	*
32 (1990)	しらせ	NIPRORI-II	*
33 (1991)	しらせ	NIPRORI-II	*
34 (1992)	しらせ	NIPRORI-II	フリーマントルー昭和
37 (1995)	しらせ	NIPRORI-II	*
38 (1996)	しらせ	NIPRORI-II	*
39 (1997)	しらせ	NIPRORI-II	*
40 (1998)	しらせ	NIPRORI-II	*
41 (1999)	しらせ	NIPRORI-II	*
42 (2000)	しらせ	NIPRORI-II	*

*Digital data are available

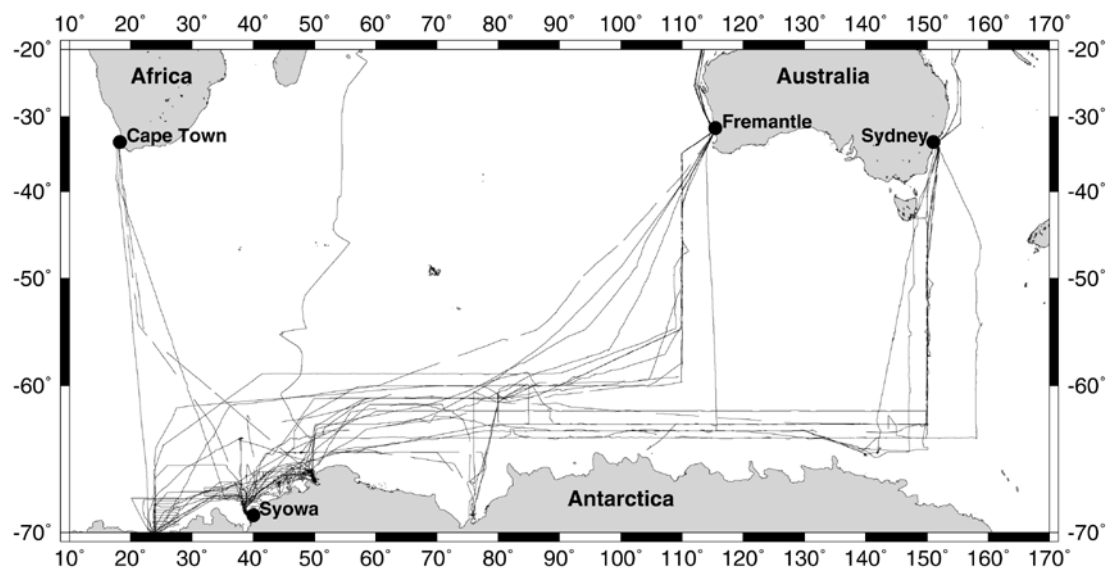


図1 . JARE による船上重力測定航跡 .