

大陸氷床域での重力探査

京都大学大学院理学研究科・福田洋一
(fukuda@kugi.kyoto-u.ac.jp)

1. はじめに

地下構造の推定手段として、重力探査は地震探査とならび最も有効な方法の一つである。それは、重力測定が簡便でノイズに強いこと、得られたデータの物理的な意味が（解釈はともかく地下の密度異常を与えるという意味で）明白なことなど、幾つかの理由による。また、重力探査は、地震探査による地震波速度構造とは異なり、地下の密度構造を決めるものであり、両者は互いに相補的な関係にあることも重要である。このような理由で、通常、重力探査は地震探査と同時に、あるいは地震探査に先立ち探査地域の概査として実施されることが多い。しかしながら、南極大陸の氷床域では、重力探査でさえ多くの困難を伴う。小論では、南極氷床域での重力探査を実施する上での幾つかの問題点について述べるとともに、今後予定されている衛星重力ミッションや航空重力測定などに関連し、南極での重力探査はどのように進めるべきであるかについて考える。

2. 重力測定に関する問題点

南極大陸氷床で重力探査を実施する際の問題点として、まず、重力計の特性に由来するものについて考えてみよう。南極での重力測定に、JARE ではラコスト重力計あるいはシントレックス重力計が用いられている。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（同じく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、實際上、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、精密重力測定以外、南極においてもまず問題となることはないが、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、往復測定を行ったり、閉合する環をつくって測定を実施するなど、測定上の工夫が重要である。例えば、国内の探査では、数時間で同じ測定点に戻って環を閉じたり、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などにより、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、もちろん徐震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のように思われる。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、テアの補正が可能な配慮をすべきである。

また、重力のマッピングに際しては、長年蓄積されたデータを利用することになるので、異なる隊次での重力測定データ間の整合性を保つことが重要である。相対重力測定では、何れの測定点も、最終的には絶対重力基準点（昭和基地）からの重力差をもとに重力値が計算されることになるが、隊次毎のドリフトやテアによる影響を少なくするためには、基準点以外の測定点においても、出来る限り同じ測定点での測定を実施することが重要である。その際、測定場所についても、その再現性を確保するように努めるべきである。氷床上では、測定点そのものが常に動いており、厳密には位置そのものの再現性は保たれていないが、見かけ上でも測定点の再現性が保たれておれば、それらの測定データは、GPS測量や雪尺による測定と併合することにより、十分に有用な情報を与えてくれるものと思われる。

以上のような配慮は、普段、重力測定に携わっているものにとっては当然のことであるが、南極観測では、重力測定の経験が十分でない隊員が担当することも多く、国内で測定計画をたてる際に、測定点の選びかた、測定の順序等について、十分に打ち合わせを行っておくことが重要であろう。

3. 重力データ処理に関する問題

重力探査で地下の密度構造を推定する場合、重力測定データからフリーエア異常やブーゲー異常などを計算する必要がある。そのためには、重力測定点の位置ならびに高さが必要である。さらに、氷床域の重力異常にまず現れるのは氷床下の基盤地形であり、大陸地殻の密度構造を推定するためには、氷床の厚さに関する情報も必要である。逆にこれらの情報が十分でないと、重力探査のデータとしての価値が大きく下がることになる。

現在、位置ならびに高さの決定に関しては、GPSを利用することで、ほぼ十分な精度が達成できると思われる。従って、重力測定とGPS測定は、位置情報が明らかな場合を

除き、原則としてペアで実施することが必要である。このことは、先に述べた測定点の再現性の点でも重要である。一方、氷の厚さや氷床地形については、別途、アイスレーダー等による測定が不可欠であるが、後述するように、衛星や航空機による重力データが利用できるようなことを考えると、今後地上での測定は、さまざまな測定結果が高精度で得られていることが重要と思われるので、地震探査側線にそって、これらの測定を集中的に実施することが肝要であろう。

4．将来の展望と課題

南極氷床の場合、地上の重力測定データだけから広域的な地下密度構造を推定することはほとんど不可能であるし、得策とは思えない。少なくとも広域的な重力マッピングに関しては、衛星や航空機の利用を考える方が現実的であろう。

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、2004 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。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。

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、これらの精度は、初期の測定も含んだものであり、現在の測定精度は、これより若干向上している模様である。今後、GOCE の打ち上げをにらみながら、南極大陸での航空機による重力測定も計画的に実施されていくようであり、ICESAT による氷床地形のマッピングなどと合わせ、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有望と思われる。

このような情勢のもと、今後の地上での重力測定としては、衛星や航空機による重力測定データが利用できることを前提とした計画が必須であろう。衛星や航空重力データが利用できるようになった場合の地上重力測定の利点は、空間分解能と潜在的な測定精度の高さにある。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が、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、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。

なお、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 FG5-L 型）が市販されるようになってきている。絶対重力測定では、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にも利用出来る可能性がある。氷床上での絶対重力測定には、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ンドツルース、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。今後の南極観測において、その実現に向けて検討する価値は十分にあるものと思われる。

5 . おわりに

南極氷床での重力探査の問題点と今後の展望について概観した。厳しい自然条件の中、限られた人員、装備、時間内で実施される測定に多くの制約があることはやむを得ないことである。しかしながら、そのような条件においても、測定計画の立案や実際の測定にあたり、重力計の特性や測定データがどのように利用されるかを理解しておくことは、意味のあるデータを取得する上で最も重要なことである。過去の測定データを見ると、残念ながら、測定計画上あるいは測定上のわずかな配慮が欠けているために、折角のデータが十分に生かされない場合も見受けられる。小論が今後の重力探査やその測定計画立案などに際しての助となれば幸いである。