

# 南極プレート研究における重力データの利用とその可能性

## On the Application and the Applicability of the Gravity Data for the Studies of Antarctic Plate

福田洋一

京都大学大学院理学研究科

Yoichi Fukuda

Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto University

Kitashirakawa Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8502, Japan

E-mail : fukuda@kugi.kyoto-u.ac.jp

### *Abstract*

This report briefly describes the present status of the gravity data which are used for the studies of Antarctic plate. At present, there are mainly three kinds of gravity data, *i.e.*, surface gravity data including land, ship-borne, and air gravity surveys, gravity data derived from satellite altimetry, and global geopotential models. In this report, characteristics of each of these data are reviewed, and then, some problems associated with using those data are discussed. Finally, future satellite gravity missions and their potential applicability are introduced.

### 1. はじめに

南極域・南極海の重力データは、他の地球物理学的データと同じく、かつては地球上でもっともよくわからなかったものの一つである。ところが、1990年代初頭に、それまで米海軍によって機密扱いとされていた GOESAT の Geodetic Mission (GM) の衛星高度計データが、南極周辺海域に限って一般に解放されたことにより、一転して、南極周辺は地球上で重力異常がもっとも詳しくわかった海域となった。現在では、GOESAT の GM に加え、TOPEX/POSEIDON や ERS の高度計データが地球上全域で解放されており、その意味での南極周辺海域に限った利点は失われている。しかしながら、逆に、海洋の衛星重力データに限っては、南極海域といえども、他の海域と全く遜色のないデータがそろっているわけで、南極における他の地球物理学的データの取得状況を考えると、同海域での地球物理学的研究に占める重力データのウエイトは極めて大きいと言えるであろう。

ところで、このような海域重力データがどのように利用されているかを見ると、物理探査等で通常行われる、重力異常を用いた地下密度構造の推定といった目的よりは、むしろ、重力異常から推定される海底地形を用い、例えば、本集録の別稿にもあるように、フラクチャ・ゾ

ーンなどの構造を調べることによって過去のプレート運動やテクトニクスの研究を進めるという手法の方が主流となっているように思われる。海面高度計による重力異常は、このような目的の為に極めて有効であるが、地殻下部から上部マントル、あるいはそれよりやや深部までに及ぶような大規模な地下密度構造解析には、なお、精度的に不十分なのである。また、例えば、リッジ周辺の極めて微細な海底地殻構造を調べるような場合にも、分解能や精度の点で問題があり、こういう研究には、通常、他の地球物理学的観測も同時になされる船上観測の方が適しているであろう。

本稿では、まず、現在利用可能な重力データのそれぞれの特徴について簡単にレビューを行い、南極域の特殊事情を考慮しながら、特に高度計データの効率的な利用方法について考える。さらに、現在進行中の衛星重力観測計画についても簡単に触れ、南極域の今後の重力研究への意義と、その応用の可能性について述べたい。

## 2. 重力データ

現在、重力データとして実用的に利用できるものは、そのデータ・ソースから考えると、地上、陸上、航空機など地球表面での重力測定データ、海面における衛星高度計データ、衛星軌道追跡データを基にした長波長の重力場モデルの3種類にほぼ分類できる。ところで、実際の重力データはこれらのデータのコンビネーションとして作成されており、例えば、衛星高度計による重力異常データといっても、その長波長成分には球関数重力モデルが使用されており、さらに、球関数重力モデルも、衛星軌道解析データだけを用いて作成されているとは限らず、比較的高次のモデルについては、地球表面の重力測定データや、過去の衛星高度計データも取り込まれている。したがって、厳密な意味では、これらのデータの相互の関係はそれほど簡単なものではないが、大ざっぱには、空間波長の長い順に、おおよそ数100kmまでを衛星データ、数10kmまでを海面高度計、それより短波長を地表重力測定がカバーすると考えてよさそうである。また、その精度は、それぞれの波長帯で mgal から数 mgal (波長が短くなるほど精度は低下する)程度と考えられる。

重力データのユーザーの立場からは、以上の事情はあまり重要でないかもしれない。多くの場合、それよりはむしろ、研究の内容によってどの程度の精度が要求されるかを示す方が現実的であろう。Fig. 1 は、このような立場から、横軸に代表的な空間波長を、縦軸に重力データの精度をとり、静的な重力場の測定精度とそれに関連した研究テーマをまとめたものである。Fig. 1 を見ると、大洋底のテクトニクスに関する多くの問題が、空間波長にして10km ~ 数100kmの範囲にあり、さらに、そこで要求されている精度も mgal のオーダーであることがわかる。実は、海面高度計による重力データから期待される精度は、この領域とかなりよく合致しており、この図からも、同データがこの種の問題に大変有効であることが推察できる。

ところで、海面高度計データで大洋底のテクトニクスに関する領域をすべてカバーできるかという点、もちろんそのようなことはなく、もっとも有効と思われる応用分野は、Fig. 1 のフラクチャー・ゾーンや、海山、あるいはトレンチに関連する部分であり、これは、過去の多くの研究の証明

するところでもある(例えば, Tebbens and Cande, 1997; Nogi et al., 1996). 一方, 短波長でより精度の要求されるリッジ内の微細な構造の研究などには, 船上重力測定が有利であろうし, 実際, このような研究には重力データのみならず, 海底地形のマッピングや地震探査, 電磁気探査なども必要となるので, 船舶による観測が不可欠であろう. また, 波長数 100km 以上の長波長の領域については, 基本的には地球重力場の球面調和関数モデルの精度に依存しており, さらに長波長の領域は良いとして, 波長 1000km 程度までの領域で2~3mgal の精度を得ることは, 現在でも大変困難な問題である. この種の問題の根本的な解決のためには, 後述の衛星重力場測定ミッションの実現を待つ必要がある.

### 3. 南極地域における衛星高度計重力データの利用

先に述べた現状の重力データについての一般的な特徴は, 南極地域についても同様であるが, この地域の特殊性として, 陸上および海上での重力測定データが極めて限られていることや, 衛星高度計データによる重力異常についても, 後述する幾つかの不利な点のあることも確かである. 南極海における海上重力測定の問題点については, 福田(1995)にまとめられているが, 端的には, この海域へのアクセスが極めて限られていることに由来している. この問題は深刻であり, 他の海域と同じような研究形態を取る限り, 南極域は, データの収集において, 常に, 極めて大きなハンディキャップを負うことになる.

一方, 衛星観測では, 原則としてこのようなハンディキャップは存在しない. ただ, 南極域における海面高度計データでは, 海氷の影響を大きく受けたり, 陸域重力データがほとんど利用できないため海面高から重力異常への変換で沿岸域の重力異常の精度が悪くなる, あるいは, 海洋潮汐や南極周回流のような海洋変動の不確かさによる精度の低下があるなど, 他の海域に比べて, やや不利と思われる要因が存在することも確かである. しかしながら, 最終的な結果へのこれらの影響は比較的小さく, 實際上, 空間分解能, 精度ともに, ほぼ, 他の海域に遜色のない重力データが得られていると思われる(例えば, Sandwell and Smith, 1997).

南極海で重力場の研究に衛星高度計が用いられるようになったのかなり古くからであり, 1980年代のはじめには, SEASAT のデータを用いたジオイドや重力異常の研究などが既になされている(例えば, Segawa and Asaoka, 1982; Segawa et al., 1984). しかし, 実用的な意味でそのデータが本格的に用いられるようになったのは, 1980年代後半の GEOSAT 以降のことである(例えば, Fukuda et al., 1990). 特に, 南極海においては, 1990年代初頭に, それまで軍事的な理由で機密扱いとなっていた GEOSAT GM のデータが他の海域に先駆けて公開され(Fig. 2), この海域のテクトニクスの研究は一挙に進展したといってもよい. この時点で, 大げさに言えば, 南極海は, 他のいかなる海域よりも重力異常が詳しく判った海域になったと言えるであろう.

1990年代には, その後, ERS1/2, TOPEX/POSEIDON など, 高度計を搭載した衛星が相次いで打ち上げられたが, 重力場の改良と言う意味では, ERS-1 の GM の貢献は比較的大きいものの, 現在でも, GEOSAT GM の寄与がもっとも大きいと言えるであろう.

1990年代における衛星高度計データを用いた重力異常データセットの作成は、ヨーロッパやアメリカを中心に、主としてグローバル・ベースで進められており、特に、SandwellとSmithの一連のデータセットは(Sandwell and Smith, 1997)、現在、もっとも標準的に用いられているものである。彼らの最新のデータセットは、グローバルな1°x1°グリッドメッシュデータであり、同時に、重力異常から海底地形の推定も実施しており、そのデータセットも用意されている([http://topex.ucsd.edu/marine\\_grav/mar\\_grav.html](http://topex.ucsd.edu/marine_grav/mar_grav.html) を参照)。

以上の状況を考えると、もはや、衛星重力データに関しては、標準的なデータセットの利用だけで、ほとんど事が足りるようにも思われるが、南極海の特殊事情を考慮するとき、それに特化したデータ処理を施すことにより、より多くの情報を得る可能性は、依然、大いに残されている。例えば、ERS衛星は、軌道傾斜角の関係で、そのデータは、南緯81.5度と他の衛星に比べ、より高緯度までカバーしているが、その特徴を活かし、高度計のデータ処理で、衛星からのレーダー反射波形の処理に氷からの反射を考慮するといった通常は行わないような低レベルでの処理を施すことで、海氷域のデータの信頼性をあげるような試みもなされている (Sarrailh, et al., 1997)。

この他、現在の衛星重力データの使用方法を見ると、最初にも述べたように、物理量としての重力異常を用いるのではなく、むしろ、その空間的なパターンを重視する傾向にあるので、特にデータのS/N比が低下する南極域では、その点に特化したような処理も有効と考えられる。このような観点から、Terada and Fukuda(1997)は、GEOSAT GMを用いた重力異常の推定で、通常、重力異常としての信頼性をあげるために使用されるフィルタリング処理をできるかぎり施さないで処理をすることで、空間パターンとしての分解能をあげる試みを実施している (Fig. 3)。

現在、衛星高度計データは、CD-ROMの形で、だれでも容易に入手可能であるので、グローバルな標準的な処理データとは別に、オリジナルのデータから、南極域、あるいは、特定の海域に特化したデータ処理を施すことでより多くの情報を得る努力は、今後も重要であろう。

#### 4. 衛星重力測定計画

静的な重力場の研究において、Fig.1の数100kmより長波長の領域での重力測定精度の向上は、地球内部構造の研究に直接結びつくものであり、また、そのことは、衛星高度計重力の精度向上にもつながるものである。さらに、この波長帯で、重力場の時間的変化までも観測できるようになると、テクトニクスや固体地球物理の研究に留まらず、氷床変動や海水準変動の研究、その他、海洋学、気象学、陸水学など地球科学の広範な分野での応用が期待されている (National Research Council, 1997)。

衛星を用いたこのような重力場の測定計画としては、現在、その幾つかが進行中であるが、特に CHAMP(CHALLENGING Mini-Satellite Payload; <http://www.gfz-potsdam.de/pb1/CHAMP/welcome.htm> を参照)が1999年の後半に、また、GRACE(Gravity Recovery and

Climate Experiment ; <http://rogueweb.jpl.nasa.gov/RogueWeb/grace/grace.html> を参照)が 2001 年と、何れもその打ち上げを目前にしている。

CHAMP による重力場の測定では、いわゆる High-Low Satellite-to-Satellite Tracking (H-L SST)が用いられる。H-L SST は、高度約 300km 程度の低高度に打ち上げられた衛星に GPS 受信機を搭載し、その軌道位置を高高度の GPS 衛星を用いて、連続的に高精度に測定するというものである。この場合、測定データとしては衛星の精密位置が時間関数として得られるので、これを2階微分することにより衛星高度における重力加速度を求めることができる。精度的に見た場合、CHAMP ミッションは、その主な目的が、次期の高度計搭載衛星である JASON-1 の精密軌道予測のための重力場の改良にあり、期待できる精度は、次数 30 次程度までの球関数モデルで、現存する最良のモデル(EGM96)より半桁程度の改良に留まっている。しかし、衛星軌道から直接重力場を測定する試みは、CHAMP ミッションが歴史上初めてであり、また、HL-SST は次に述べる GRACE ミッションでも併用して使用されるため、その成否は今後の衛星重力測定計画に重大な影響をおよぼすものと考えられる。

一方、2001 年夏の打ち上げ予定の GRACE 計画では、全球的な重力の時間的変化を、約 100km の空間分解能、12-24 日の時間分解能で、かつ、 $\mu$  Gal オーダの精度で計測される予定である。GRACE による地球重力場の測定原理は、いわゆる Low-Low Satellite-to-Satellite Tracking (L-L SST)と呼ばれているものであり、比較的低高度(300-400km)の同一軌道に数 100km の間隔で2つの衛星を打ち上げ、衛星間の距離の変化をマイクロ波干渉計で精密に計測しようというものである。従って、これは衛星軌道における速度の測定に対応しており、その1階微分として重力加速度を求めることができる。GRACE で期待される重力場の測定精度は、現存する最良の地球重力場モデルと比較して2桁以上も高く、Fig. 1 にある長波長領域での多くの問題にその成果が期待されている。

GRACE ミッションに関連して成果の期待される研究課題としては、上記の静的な重力場に加え、大気質量変動に関する研究、海水準変動に関する研究、海洋における熱・質量輸送に関する研究、全球的な水収支に関する研究、氷床や氷河の進退に関する研究などがあげられており、特に、南極域では、今までほとんどわかっていなかった南極大陸での重力が、その時間的変化まで含めて明らかにされる可能性があり、今後、南極大陸や南極プレートの構造、さらには、そのダイナミクスの研究(例えば、本集録、中田ら参照)に大きな役割を果たすものと期待できる。

## 5. おわりに

主に衛星データの利用に焦点をあてながら、南極域における重力データの利用とその問題点、あるいは、今後の可能性について述べた。本文中にも述べたように、アクセスの便を考えると、南極域での研究における衛星利用の重要性は益々高まるものと思われる。しかし、衛星観測ですべてが解決するかというと決してそんなことはない。明らかに表面観測の方が有利な部分が

あり, これは, 決して切り捨てることのできない部分でもある. 最後に, アクセスが不便な地であるが故に, 再度, 表面観測の重要性を強調しておきたい.

#### 文献

- 福田洋一(1995): 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.
- 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.
- National Research Council (1997): Satellite gravity and the geosphere, National Academy Press Washington, D.C., 1-112.
- Nogi, Y., N. Seama, N. Isezaki and Y. Fukuda(1996): Magnetic anomaly lineations and fracture zones deduced from vector magnetic anomalies in the West Enderby Basin., Storey, B.C., King, E.C. and Livermore, R.A. (eds), Weddell Sea Tectonics and Gondwana Break-up, Geological Society Special Publication, Storey, **108**, 265-273.
- Sandwell, D. T. and W.H.F. Smith (1992): Global marine gravity from ERS-1, Geosat and Seasat reveals new tectonic fabric. EOS Transaction America Geophysical Union, **73**, 133.
- 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.
- Sarrailh, M., Balmino, G., and D. Doublet (1997): The Arctic and Antarctic oceans gravity field from ERS1 altimetric data, IAG Symposia **117**, Segawa et al. (eds.), GraGeoMar, Tokyo, Japan, Sep.30-Oct.5, 1996, Springer, 437-444.
- 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.
- Tebbens, S. F. and S.C. Cande (1997): Southeast Pacific tectonic evolution from early Oligocene to present. J. Geophys. Res., **102**, 12061-12084.
- Terada, K. and Y. Fukuda (1997): Applicability of 10 Hz Satellite Altimeter Data to the Antarctic Margin, Proc. NIPR Symp. Antarct. Geosci., **10**, 26-35.