

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23540494

研究課題名(和文) GOCE衛星重力データを用いた南極昭和基地周辺の重力場決定とその応用

研究課題名(英文) Determination of the precise gravity fields around the Japanese Antarctic station, Syowa, using GOCE satellite gravity data

研究代表者

福田 洋一 (Fukuda, Yoichi)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30133854

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：GOCEの衛星重力データを用いた重力場モデル(EGM)を長波長重力場の基準として、日本の南極観測で得られている昭和基地周辺の陸上・海洋・航空重力データを、LSC (Least Squares Collocation)法を用いて統合することで、高精度な重力場決定を行った。得られた重力異常の精度は、数mgal (10^{-5} m/s²)、同じくジオイド高は10cmより良いと見積もられた。さらに、昭和基地のGPS - 水準と験潮データによるジオイド高との比較による力学的海面高度の決定などの応用研究を行うとともに、地上重力データを用いたGOCE EGMの検証を行い、地上データの重要性を示した。

研究成果の概要(英文)：Using the in-situ gravity data obtained by JARE (the Japanese Antarctic Research Expedition) and GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer) EGMs (Earth Gravity Models), the precise gravity fields around the Japanese Antarctic station, Syowa, have been newly determined. The in-situ data sets employed were the land gravity data since 1967, the surface ship data since 1985 and the airborne gravity data in 2006. Combining these data sets by means of LSC (Least Squares Collocation), the gravity anomalies and the geoid heights have been estimated with the formal errors of a few mGals and a few cm, respectively. A locally determined geoid height at the GPS point in Syowa was compared with the obtained geoid to estimate the sea surface dynamic height. Moreover, GOCE EGMs were evaluated using the airborne gravity data, and the importance of reliable in-situ data has been demonstrated for the purposes.

研究分野：測地学

キーワード：GOCE 衛星重力 航空重力 重力異常 重力ジオイド 南極昭和基地 重力偏差計 LSC法

1 . 研究開始当初の背景

南極昭和基地周辺での重力測定は、我が国での南極観測の歴史でもかなり早い時期から行われていたが、海・陸のデータを含め、昭和基地周辺での統一的な重力場決定がなされたのは、Fukuda et al.(1990)が最初のことである。その後、海域の重力場については高密度な衛星高度計データの利用で格段に改善がなされてはいるが、陸域については、若干の測定データの追加はあったものの本質的な改善は無いままの状態が長く続いていた(福田, 2001)。

このような状況の中、2005年から2006年にかけて、ドイツ(AWI: Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research)との協力のもと、昭和基地周辺の海域・大陸を含むおよそ400 km×900 kmで航空重力測定が実施された(白石, 2007)。また、船上重力データについても過去のデータの再解析・整備が進み(小西・他, 2006)、さらに重力の基準値を与える絶対重力測定も昭和基地で定期的になされるようになってきた(Makinen et al., 2007)。

一方、2000年以降、このような現場重力測定データに加え、地球重力場の研究に衛星重力データが利用できるようになり、特に2002年に打ち上げられたGRACE(Gravity Recovery And Climate Experiment)は、南極での重力場研究でも多くの成果を挙げている。GRACEは長波長重力場の時間的変化の研究には大変威力があるものの、短波長(数100 km以下)での精度は急激に落ちるため、静的な重力場の決定には必ずしも適していなかったが、2009年3月にESA(European Space Agency)が打ち上げたGOCE(Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer)は、本来、静的重力場の改善を目的とした衛星で、低い軌道高度に加え、短波長で感度が高い6成分の重力偏差計(Gradiometer)を備えることで、最終的な精度として、空間スケール(半波長)100 kmで、重力異常にして1 mgal、ジオイド高にして1 cmの精度が見込まれた。

本研究立案の段階では、GOCEミッションは開始した直後で、利用できるデータも限られていたが、その利用は、南極での重力場決定に大変有用で、GOCEデータと地上データを利用した昭和基地周辺の重力場決定に関する研究は、まさに時期に合った研究テーマと考え、本研究の提案に至った。

2 . 研究の目的

本研究では、(1)GOCEデータを利用したリージョナルな重力場の推定方法の確立、(2)南極昭和基地周辺での既存の重力測定データの整理ならびに長波長領域にGOCEデータを用いた高精度な重力異常・ジオイド高のマッピング、(3)得られた重力場データの応用研究、を主要な研究目的とした。

この内(2)について、地表(航空機・船

船を含む)での重力測定では、空間スケールが大きくなると、様々な要因による精度の低下が顕著となることが知られており、現実の重力データでは、良質な地上重力データが存在するごく一部の地域を除き、100 km程度の空間スケールで1 mgalの精度を達成することは、特に、地上基準点がほとんどない南極ではほとんど不可能なことと考えられた。

そこで、本研究の最大の目的として、このような長波長領域にGOCEのデータを利用することで、様々な応用に耐えうる高精度な重力場を推定することとした。

3 . 研究の方法

以上の目的を達成するため、本研究での主要な課題として、当初、1)GOCEデータ処理、2)GOCEデータを用いた地表重力データの補正・統合処理、3)重力・ジオイドマッピング、4)応用研究、の4つの課題を設定した。

GOCEは、HL-SST(High-Low Satellite to Satellite Tracking: GPSによる軌道追跡)と、重力偏差計による重力ポテンシャルの6個の2階微分成分の計測から重力場を決めるように設計されており、Level 1Bデータには、衛星座標系での重力偏差、SST、およびStar Trackerによる衛星姿勢データ等が含まれる。一方、Level 2データでは、Level 1Bデータの処理結果として、地表座標系での重力偏差、衛星の精密軌道位置、また、球面調和関数係数としての重力場データ(EGM: Earth Gravity Model)が提供される。Level 1Bデータの利用は、高度な処理技術を要する上、一般的な応用ではその必要性は低いと考えられるので、本研究でも、Level 2データを利用することとした。

GOCEは2009年3月の打ち上げ後、約半年のCAL/VAL期間を経た後、本格的な測定モードに入り、2010年5月に初期のLevel 1Bデータが、また、2010年7月にはLevel 2データが、それぞれテスト的に公開されていた。Level 2データの内、球面調和関数係数の利用は比較的容易であるが、リージョナル重力場の改良においては、当初、軌道に沿っての重力偏差データを直接利用することが有利であると考え、初年度、その利用方法について検討を行った。その結果、軌道に沿っての重力偏差データは、公開されているEGMに比べ、より多くの情報を含んでいることは確かであるが、その差は実用的にはほとんどなく、順次公開されるEGMを利用することが得策と判断した。

一方、地上のデータの検証を行ったところ、航空重力データについては、均質な高精度のデータが得られているのに対して、船上重力データや地上データは測定時期の違いなどから精度等が不均質であり、あらかじめそれらの補正が必要と思われた。特に、船上重力データについては、その不均質性が大きく、その補正処理については、研究協力者(院生)の補助を得ながら、全面的に見直すこととし

た。

このようにして得られた地表データを用い、GOCE EGM を長波長の重力場として、2)、3) については、LSC (Least Squares Collocation) 法を用い、現在考えられる最も高精度な重力場決定を行った。

なお、GOCE は、当初の予定をはるかに越え、2013 年 10 月まで運用が延期され、GOCE のすべてのデータを利用した EGM は 2014 年 7 月に公開された。このため、本研究でも、GOCE の全期間のデータを利用するため、研究期間を 1 年延長して、最終的に公開された EGM (Release 5) を用いた処理を行った。

4. 研究成果

(1) 昭和基地周辺の重力場

図 1 は、得られた昭和基地周辺の重力異常を、また、図 2 はジオイド高をそれぞれ示す。

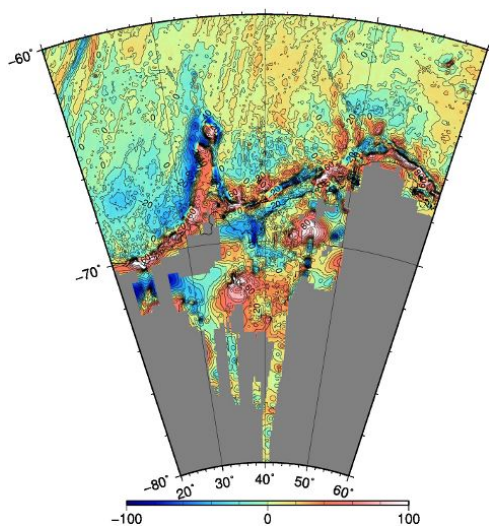


図 1 . 重力異常 (mgal)

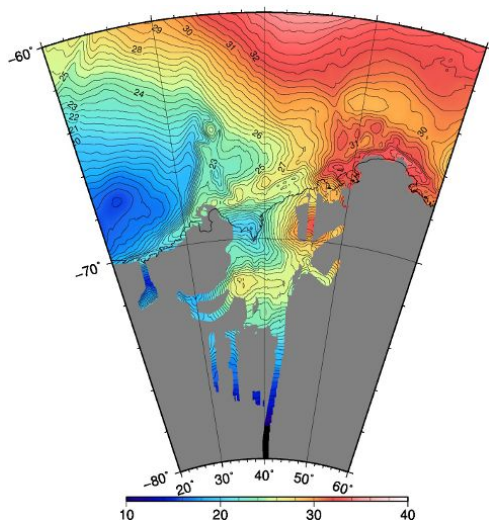


図 2 . ジオイド高(meter)

LSC では、それぞれの重力場推定値に対して、統計的な意味での推定誤差を計算できるが、それらの結果をみると、地上データの十分密な地域では、重力異常で数 mgal、ジオイド高にして 10 cm より良い精度が達成されている。さらに重要なことは、これらの結果は長波長重力場として GOCE の EGM を用いていることから、重力場のオフセットやトレンドの誤差は十分に小さく、例えば、本研究で得られたジオイド高を基準とした高さは、グローバルな高さ比較として 10 cm より良い精度が得られるということである。なお、図 1、図 2 では、それぞれの誤差が 15 mgal および 20 cm より小さい領域のみがプロットされている。

今回得られた重力場データは、極地研究所を通じ一般に公開され、今後、この地域での標準的なデータとして利用されるものと期待している。

(2) 昭和基地の海面高度

地上でのジオイド高は、GPS など得られる楕円体高と水準測量によって得られる標高との差として求めることができる。さらに、標高の基準として潮位観測によるローカルな平均海面が用いられていれば、GPS/水準測量によって得られたジオイド高と、今回のように純粋に重力データから計算されたジオイド高の差から、標高の基準とした海面での力学的な海面高度が得られる。これは重力ジオイドの一つの応用である。

昭和基地では、GPS 点と験潮点の間を水準測量で結合し、さらに、験潮点での海面高をモデルで与えることにより GPS 点のジオイド高が計算されている (Shibuya et al., 1999)。そこで、今回得られてジオイドデータの検証の意味も含め、GPS 点でのジオイドとの比較を行った。その結果、今回得られたジオイド高 (22.65 m) は、Shibuya et al. (1999) の値 22.37 m より、28 cm 高いことが判明した。GPS および水準測量の精度は cm より良い精度が得られると考えてよいので、この差は、主に力学的な海面高度の誤差によるものと考えられる。また、今回の結果は、最近の海面高度モデルと整合的である。一般に極域で海面高度を正確に見積もることは大変困難であり、高精度なジオイド高の応用は、このような海面高度の拘束条件を与えるということでも重要である。

(3) GOCE EGM の検証

本研究の最大の目的は GOCE データを利用し昭和基地周辺の重力場を精密に決定することであったが、一方、今回使用した航空重力データは、EGM との比較から、データの範囲は限られているものの高精度な均質なデータセットが得られていることが判明した。GOCE の EGM は、処理方法の違いにより 3 種類のモデルが存在し、さらにそれぞれ公開時期の違いから複数のモデルが存在する。さらに、現在では、GOCE 以外の他の衛星データなども

含めたモデルなど、多くの EGM が公開されており、これらの EGM の地上データによる検証は、一つの重要な研究課題となっている。特に、極域でこのような検証に耐え得る地上データは大変限られており、本研究の一つの応用として、地上データとの比較による EGM の比較検証を実施した。

これらの結果、一般的な傾向として、新しいデータを含むモデルが良い結果を示すことが確認され、最大次数 300 次まで与えられている GOCE DIR REL 5 モデルがもっとも航空重力データに適合することが判明した。以上の結果を受け、本研究の最終的な成果は、このモデルを使用して得たものである。

さらに、重力異常の絶対値の比較から、これらのモデルでは数 100 km の空間スケールで、0.1 mgal 程度の精度が得られていることも判明した。今回使用した航空重力データの絶対値は、昭和基地の絶対重力点を基準とし、相対重力計による測定で校正されているが、氷床上での測定環境等を考慮すると、その精度は 0.1 mgal より悪いと推定される。このことは、今後、高精度な重力モデルの検定には、極地においても氷床上での直接的な絶対重力測定が必要であることを示している。

なお、以上の結果の詳細については、Fukuda et al. (Polar Science 投稿中) に述べられている。

<引用文献>

- 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.
- 福田洋一(2001): 南極および周辺海域での重力場研究, 月刊地球, 号外 35, 海洋出版, 130-137.
- 小西康夫, 福田洋一, 野木義史(2006): 南極観測船「しらせ」で得られた船上重力データの整備, 南極資料, 50, 251-262.
- Makinen J., M. Amalvict, K. Shibuya and Y. Fukuda (2007): Absolute gravimetry in Antarctica: Status and prospects, J. Geodynamics, 43, 339-357.
- Shibuya, K., Doi, K., Aoki, S. (1999): Precise determination of geoid height and free-air gravity anomaly at Syowa Station, Antarctica. Earth Planets Space, 51, 159-168.
- 白石和行(2007): 第 47 次南極地域観測隊夏期行動報告 2005-2006, 南極資料, 51, 95-127.

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

松崎和也, 福田洋一, 野木義史(2014): 「しらせ」船上重力データの再処理, 南極資料 58(3), 295-308. (査読あり)

[学会発表](計 12 件)

Fukuda, Y., Y. Nogi, K. Matsuzaki, Redetermination of the precise gravity fields around the Japanese Antarctic Station, Syowa, and evaluation of GOCE EGMs, 2014 AGU Fall Meeting, 14-19 December 2014, Moscone Center, San Francisco, USA.

福田洋一, 野木義史, 松崎和也, GOCE EGM を用いた南極昭和基地周辺の精密重力場決定, 日本測地学会第 122 回講演会, 2014 年 11 月 5 日, つくばサイエンス・インフォメーションセンター, つくば市.

Fukuda, Y., Y. Nogi, K. Matsuzaki, Precise gravity field determination around the Japanese Antarctic Station, Syowa, by combining satellite and in-situ gravity data, IAG Scientific Assembly, Potsdam, Germany, Sep. 3, 2013.

福田洋一, 野木義史, 松崎和也, 衛星および地表重力データの結合による南極昭和基地周辺の重力場の精密決定, 第 4 回極域科学シンポジウム, 2013 年 11 月 14 日, 立川市統計数理研究所 3 階セミナー室.

松崎和也, 福田洋一, 野木義史, しらせ船上重力データの再処理, 第 4 回極域科学シンポジウム, 立川市国立極地研究所, 2013 年 11 月 14 日.

福田洋一, 野木義史, 松崎和也, 衛星および地表重力データの結合による南極昭和基地周辺の重力場の精密決定, 地球惑星科学連合 2013 年大会, 千葉県千葉市幕張メッセ国際会議場, 2013 年 5 月 22 日.

Fukuda, Y., Y. Nogi and K. Matsuzaki, Combining GOCE and in-situ gravity data for precise gravity field determination and geophysical applications around the Japanese Antarctic station, Syowa, in Antarctica, 2012 AGU Fall Meeting, 3-7 December 2012, Moscone Center, San Francisco, USA, December 5, 2012.

福田洋一, 野木義史, 松崎和也, GOCE と地表重力データによる昭和基地周辺の重力場決定, 第 32 回極域地学シンポジウム, 2012 年 11 月 29 日.

Fukuda, Y., Y. Nogi and K. Matsuzaki, Gravity field determination around the Japanese Antarctic station, Syowa, by combining GOCE and in-situ gravity data, GGHS 2012, San Servolo, Venice, Italy, October 9-12, 2012.

福田洋一, 野木義史, 松崎和也, GOCE と地表重力データによる南極昭和基地周辺の重力場, 地球惑星科学連合 2012 年大会, 千葉県千葉市, 幕張メッセ国際会議場, 2012 年 5 月 25 日.

Fukuda, Y. and Y. Nogi, Gravity field determination around the Japanese Antarctic stations by combining GOCE and in-situ gravity data, EGU General Assembly 2012, Vienna, Austria, April 27, 2012.

福田洋一, 野木義史, GOCE 衛星重力データによる南極重力場の推定とその応用, 第2回極域科学シンポジウム, 国立極地研究所, 2011年11月16日.

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福田 洋一 (FUKUDA, Yoichi)
京都大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：30133854

(2) 研究分担者

野木 義史 (NOGI, Yoshifumi)
国立極地研究所・研究教育系・教授
研究者番号：90280536

(3) 連携研究者

()

研究者番号：