

衛星重力観測における地上検証について

On the Calibration/Validation of the Satellite Gravimetry Data from the Ground

佐藤忠弘、GGP-Japan グループ

T. Sato and GGP-Japan Group

国立天文台・水沢観測所，

Mizusawa Astrogeodynamics Observatory, National Astronomical Observatory of
Japan

E-mail: tsato@miz.nao.ac.jp

Abstract:

This short paper describes some results for the long-period gravity changes obtained from an international superconducting gravimeter network called GGP (Global Geodynamics Project). These results clearly indicate the importance of the ground measurement and its capability as a calibration/validation of the satellite gravimetry, especially to study each process of the gravity changes observed from the satellite, which are integrated over many factors of the gravity variations on the ground. Finally, an integrated observation system to study the gravity changes is proposed.

1. はじめに

衛星重力観測は、CHAMP、GRACEの打ち上げによりその幕が上がった。それは最近3-4年前であるが、早くも、従来の標準的なジオイドモデルであったEGM96の欠陥、即ち、EGM96での内挿/外挿部分でのジオイド高の不自然さを明にする等の成果を上げている。これら衛星重力観測で最も期待されている地球重力場の時間変動についても、世界の主要陸水変動地域での年周変動を綺麗に捉えるなど[1]、地球環境変動の問題に従来とは別の視点からの観測データを提供するという、初期の目的を実現する成果を上げている。しかし、予想されていたことではあるが、地球表面での大気・海洋の速い動きによるエイリアシングの影響は、衛星重力観測の誤差要因になっており、重力の時間変動場の高次の項については、今のところ期待される精度の実現にはいたっていない。多数の衛星の打ち上げ、更なる物理モデルの改良を必要としている。なお、これらの衛星ミッションの詳細については、CHAMP: <http://op.gfz-potsdam.de/champ/>、GRACE: <http://www.csr.utexas.edu/grace> を参照されたい。

本研究会の講演に見るように、日本でも衛星重力観測に向け、関係研究者によるフィージビリティ研究、また、ハードのプロトモデル、ソフト、物理モデル等の要素開発が盛んに行われている。一方、上記のエイリアシングの問題や、衛星重力で観測される積分された重力場の各要素の影響を分離すると言った問題を研究する上で、地上での重力観測は重要である。ここでは、超伝導重力計 (Superconducting Gravimeter, SG) 国際観測網GGP [2] で得られたデータの解析結果をもとに、地上観測で得られた最近の成果について、重力の年周変動、季節変動について紹介する。

2. GGP 国際観測ネットワーク

Fig. 1は、世界のGGP観測点の分布を示している。黄色が稼働中の観測点、赤が観測を中断している観測点、緑は観測を計画している観測点である。ちなみに、日本のグループは北から北極・ニーオルセン (NAO)、江刺 (NAO)、松代 (TK)、京都 (KY)、インドネシア・バンドン (KY)、オーストラリア・キャンベラ (NAO)、南極・昭和基地 (NIPR) の7箇所で観測を行っており、GGPの国際観測網で重要な働きをしている。ここで、NAO: 国立天文台、TK: 東京大学海洋研究所、KY: 京都大学、NIPR: 国立極地研究所を示す。図から、国際GGP活動における日本の貢献の大きさがわかる。

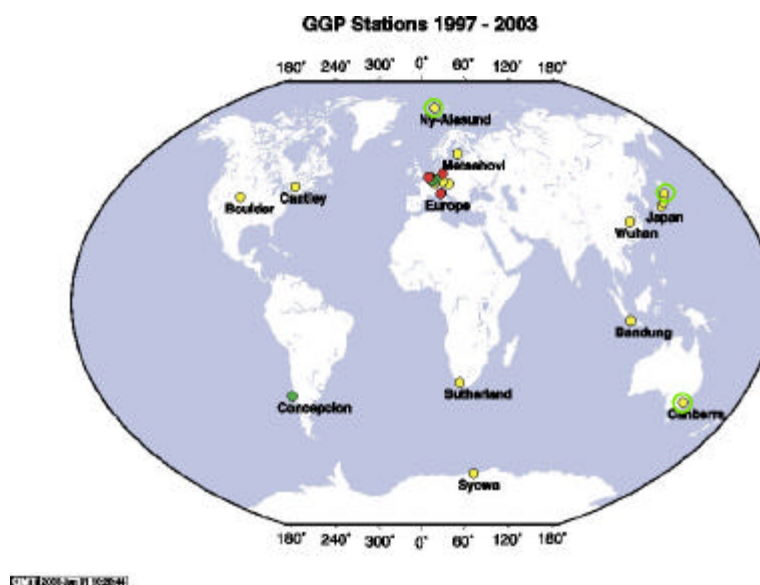


Fig.1. GGP 国際観測網. 注: GGP のホームページに掲載されている図に加筆。

3. 重力の年周変化

海洋質量の変動は地球上で起こる様々な地球物理学現象に大きな影響を与えており、地球回転のスピードや極運動、重力場、そして地球重心等もその影響を受けている。Sato et al. [3] は、GGP-Japan ネットワークの観測点3ヶ所 (江刺、キャンベラ、昭和基地) のSG データを使い、年周海面高度変動による重力変化を調べた。計算に使ったのは、米国 MIT グループが開発している大循環モデル POCM のモデルデータと TOPEX/Poseidon (T/P)人工衛星海面高度計の観測データである。重力観測値と計算結果との比較を Fig.2と Fig.3 に示す。これらの結果は、3 点で観測された重力の年周変化が海面高度変動を考慮することで良く説明できることを示している。モデルが T/P による実測値より重力観測値を良く説明しているように見えることが問題で、これは、海面高度変動に含まれる熱ステリック変化 (これは質量変化を伴わない変化で、重力に影響が無い) の係数の見積精度が解釈を大きく左右すること、T/P で観測された海面高度と質量変化 (海底圧力変化で代表できる) との関係を実測に基づいて調べる必要があることを示している。一方、重要な発見は、超伝導重力計の観測値が、海洋データから独立に推定した温度係数

0.006 m/deg を支持することで、これは、地上重力観測網が、衛星重力観測で得られるデータの地上での検証や検定に使える有用なデータを提供していることを示唆している。

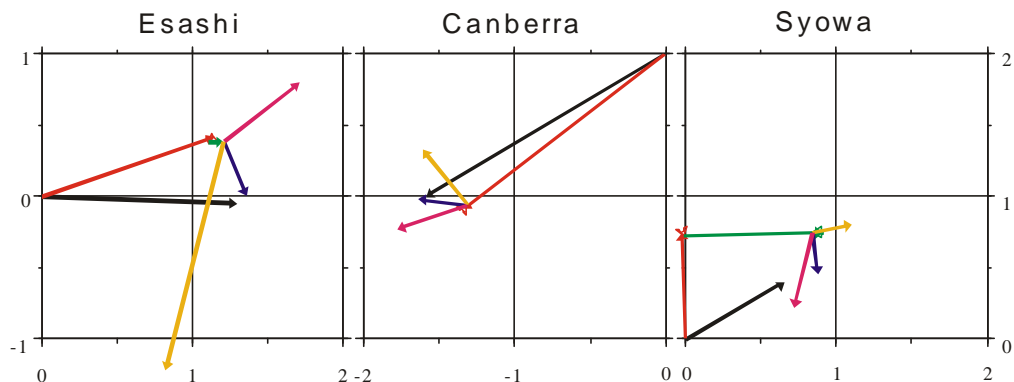


Fig. 2. ベクトルで表現された、観測された年周成分と予測値との比較。横軸は実数部、縦軸は虚数部を示している。単位はマイクロガル。観測値、極運動の影響、地球潮汐の影響が、それぞれ黒、赤、緑のベクトルで表されている。黄色、青、桃色のベクトルは、POCEM データを使って計算した、海面高度変動の影響の見積りに際しての熱ストレッチ係数の違いを示している。この順に、0.0 m/deg、0.006 m/deg、0.01 m/deg の値が使われている。係数 0.006 m/deg は海面高度と海面温度のデータから決めた値で、重力観測がこの値を支持していることは注目される。

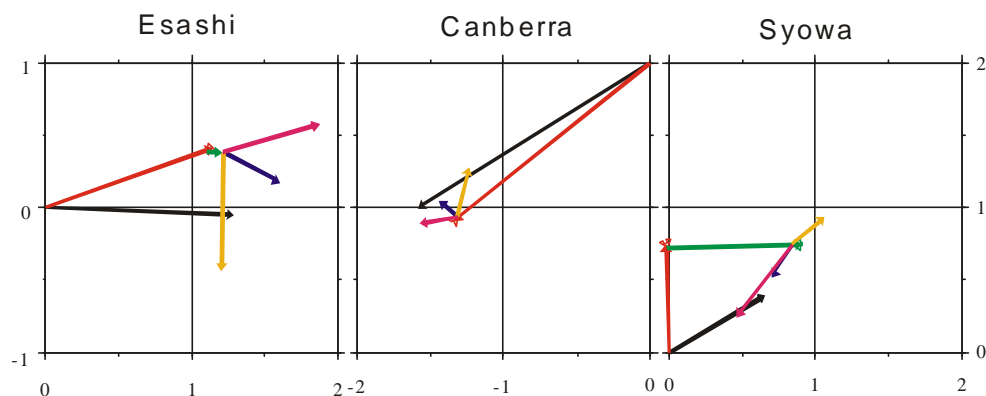


Fig. 3. 海面高度データとして、TOPEX/Poseidon データを使った比較結果。

4. 重力の季節変動

GGP-Japan 観測網の1つとして、北極スバルバード諸島のニーオルセン（北緯 79 度 Fig.1 参照）で、1999 年 9 月から SG 観測が行われている。Fig.4 は、そこで観測された重力の時間変動データから、固体潮汐、海洋潮汐、極運動、そして、年周海水面変動の影響を差し引いた重力残差と陸水モデルとを比較した図である。比較のため 2 つの陸水モデルがプロットされている（Fig.4、上）。1 つは Milly et al. [4](2002) のニーオルセンでの値（黒丸）、もう 1 つは中江川氏より提供された JMA モデルの値（赤丸）である。Fig.4 の下の図は、重力残差と Milly 等のモデルと荷重グリーン関数との全球渡ってコンボリューション積分により得られた陸水変動（降雨/積雪、土壌水）の影響とを比較したものである。

Fig.4 は、陸水モデルが北緯 79 度の高緯度の島でも結構良い予測値を与えること、また、近場の変化

が大勢を占めていることを示している。しかし、下のプロットを見て気づくのは、2004年の冬における観測値と予測値とのずれ、即ち、観測された振幅に比べ、予測値が小さすぎることである。一方、このことは上に示した Milly 等の値と JMA のそれとの比較から、予測に使った Milly 等の値が小さすぎる可能性を示唆している。これらのモデルは、積雪量と土壌水分量をモデル化したもので、両者の差は積雪量の見積りに顕著な差を示している。

Fig. 5は Milly 等のモデルとJMAモデルと重力残差との相関を示した図である。図で、直線は回帰直線で、図に見るように、-2 cm付近で、Milly 等のモデルと重力残差との対応が、平均的な傾向からはずれていることが分かる。得られた回帰係数は Milly 等のモデルは $0.144 \pm 0.08 \mu\text{Gal}/\text{cm}$ 、JMA が $0.201 \pm 0.03 \mu\text{Gal}/\text{cm}$ で、JMA の方の誤差が小さい。これに対応し、回帰残差の標準偏差は前者が $3.69 \mu\text{Gal}$ 、後者が $2.65 \mu\text{Gal}$ で、JMA モデルが観測された重力残差をより表現することが分かる。大気の影響と同様に、陸水変動も近場が効くことと、また、ニーオルセンについては観測値が使われている可能性がある(中江川私信)。これらを合わせ考えると、JMA モデルがより正しい値を与えていると考えられる。

ニーオルセンでの比較にも見るように、重力観測が陸水モデルの評価にも十分使えることを示しており、重力観測は、陸水モデルの改良のための有用な手段の一つと言える。特に、その測定に誤差が大きく、モデル化が難しい土壌水分量のモデル評価に使える可能性がある。モデルの改良を通し、衛星重力データの評価にも貢献することは間違いのないであろう。

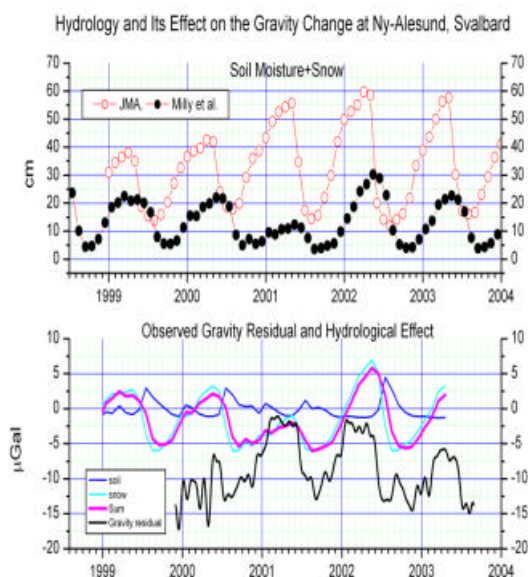


Fig.4. 北極スバルバード・ニーオルセンでの重力残差と陸水モデルによる予測値との比較。下がその比較。ここで、黒：重力残差、水色：積雪の影響、青：土壌水の影響、紫：両者の和。上はMilly et al. (2002) とJMAモデルのニーオルセンでの値の比較。積雪と土壌水の変動の和がプロットされている。

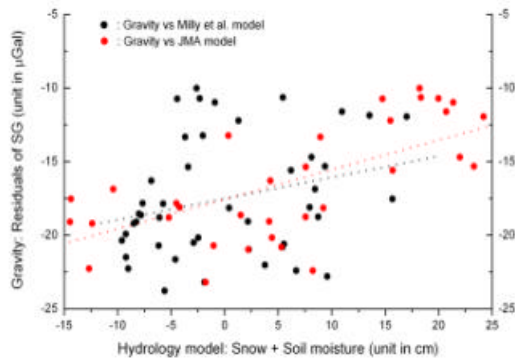


Fig.5. 重力残差とモデルの相関。黒丸：Milly et al. (2002), 赤丸：JMA。

5. まとめ

ここでは、地上観測の現状の一端を紹介した。これらの例、また、ここでは触れなかったが、重力絶対測定も含め、現在の地上観測は衛星重力観測の地上での検証・検定に十分に使える精度で観測が行われている。このこともあり、IUGG2003 札幌大会の期間中に開かれた IAG の会議で、GGP を IAG の特別研究グループとして登録することが決まった(Inter-Commission Project: Global Geodynamics Project (GGP) related to Commission 3 Earth Rotation and Geodynamics, http://www.astro.oma.be/IAG/I_C_P_GGP_NEW.htm)。

GRACE で決められる重力場は 120 次程度までと考えられている。それでも、地上距離に換算して 300 km 以上で、日本の領土の空間的な幅の関係で、国内でできる衛星重力観測の地上での検定/検証の項目に制約がある。しかし、一方で、日本では多くの観測インフラが揃っていることは有利な点と言える。3次元コロケーション観測による海洋変動と重力変化、陸水変動と重力変化の研究は、日本ができる魅力あるテーマではないかと思っている。そのイメージを表したのが次ページの Fig. 6 である。

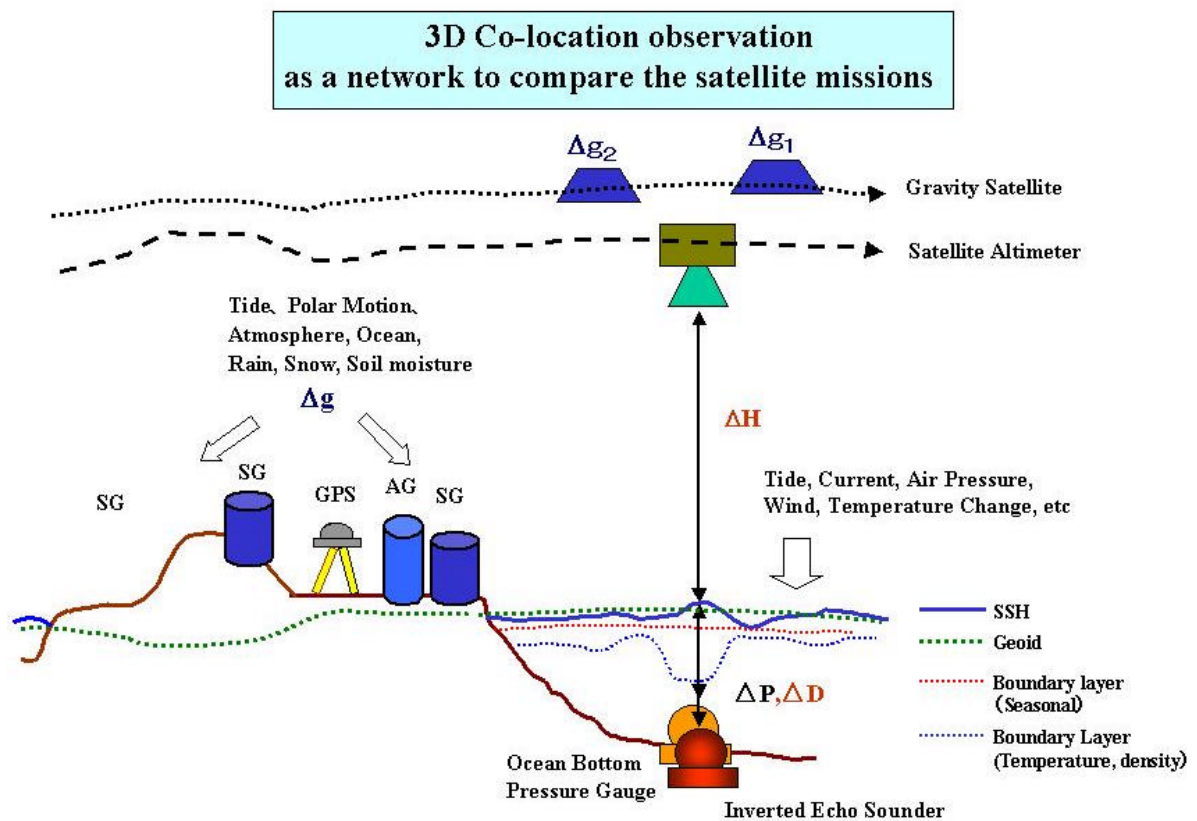


Fig. 6. 3次元コロケーション観測

参考文献：

- [1] Tapley, B.D., Bettadpur, S., Ries, J.C., Thompson, P.F., Watkins, M.M., "GRACE Measurements of Mass Variability in the Earth System", *Science*, 305, 5683/503-505, 2004.
- [2] Crossley et al., "Network of Superconducting Gravimeters Benefits a Number of Disciplines", *EOS, Transaction American Geophysical Union*, Vol.80, No. 11, 125-126, 1999.
- [3] Sato, T., Fukuda, Y., Aoyama, Y., McQueen, H., Shibuya, K., Tamura, Y., Asari, K., and Ooe, M., "On the observed gravity variation and the effect of sea surface height variations, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*", 123, 45-63, 2001.
- [4] Milly, P.C.D and Shmakin A.B., "Global Modeling of Land Water and Energy Balances. Part I: The Land Dynamics (LaD) Model, *J. Hydrology*, Vol. 3, 283-299, 2002.