

最近の衛星重力研究の動向

Current Movement of Satellite Gravity Mission Studies

福田洋一

京都大学大学院理学研究科

Yoichi Fukuda

Graduate School of Sciences, Kyoto University

Email: fukuda@kugi.kyoto-u.ac.jp

Abstract:

Referring to the resent papers mainly presented at GGSM2004 (Gravity, Geoid Space Missions 2004) held in Port, Aug. 2004, we briefly reviewed the current movement of satellite gravity mission studies. First, we reported the present status of new global gravity field models based on the satellite missions and surface gravity data. A new global mode ($n=m=2160$), EGM05 is under developing by using CHAMP, GRACE and surface gravity data. It is expected to be released in December 2005. Second, we reported some GRACE results regarding the time varying gravity fields. Remarkable results are the hydrological ones which clearly show seasonal variations of land water in major river basins in the world. Third, regarding CAL/VAL or ground truth of the satellite data, we reported some studies by means of superconducting gravity measurements, absolute gravity measurements, and sea bottom pressure gages. Superconducting gravity records in Europe show good agreements with the gravity changes obtained by GRACE. Finally, we briefly refer some topics toward future satellite missions.

1. はじめに

2000 年 7 月の CHAMP (CHAllenging Mini-Satellite Payload), 2002 年 3 月の GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) と, 21 世紀はまさに衛星重力の時代と言われていたものの, 幾つかの理由で GRACE のデータ公開が遅れていたこともあり, 具体的な成果として, その実感はなかなかつかみづらいものであった. しかし, 本年(2004年)7月に GRACE のデータ(正確には, Level-1B と Level-2 データ)が一般に公開され, また, 同時期に Tapley ら[1]のアマゾン流域での陸水の変動に伴う季節的な重力変化を検出した論文が発表され, GRACE のデータ利用が一気に注目されるようになっている. その後, 8月末にはポルトガルのポルトで, IAG 主催のシンポジウム GGSM2004 が開催され, 衛星重力に関連した多くの研究報告がなされている. 小論では, 最近の衛星重力に関連した研究の動向を概観することを目的として, GGSM2004で発表された論文を主なよりどころに, 12月の AGU Fall Meeting での情報も加え, 簡単なレビューを試みる.

2. 静的な重力場の決定 - グローバル重力モデル

衛星重力ミッションに期待される最も確実な成果の一つは、長波長のグローバル球関数重力モデルの改良である。この点に関しては、すでに、EIGEN-1Sを始めとする CHAMP のデータを用いた一連のモデル (EIGEN-2, 3p, CHAMP03S) に加え、GRACE データを用いた GGM01, GGM02 モデルが公表されている。これらのモデルでは、従来の標準モデルである EGM96 に比べ、長波長域 (次数 30 次程度) での精度は 2 桁程度改善しており、次数 120 次程度までの波長域で、EGM96 の精度を上回っている。

これらの衛星重力データによる長波長モデルと、地上での重力データを組み合わせることにより、EGM96 の後継となる新しいグローバル重力モデル EGM05 の開発が進められている。EGM05 は、衛星重力データを取り入れることで、上述のとおり、EGM96 に比べて長波長域での精度は 100 倍以上向上することが見込まれている。一方、単波長域に関しては、EGM96 では、地上重力データベースとしては 30×30 格子のデータを利用することで、次数、位数とも 360 次までの球関数計数が与えられていたのに対し、EGM05 では、地上データとして新たに作成される 5×5 格子の重力データベースを利用することで、次数、位数とも 2160 次までと EGM96 に比べ 6 倍の高分解能なモデルが開発される。EGM05 の基となる重力データベースの作成も順調に進められており、現在利用可能なデータを基にした 2159 次のテストモデル (PGM2004A) の計算も完了している。EGM05 の最終バージョンは 2005 年 12 月の公開が予定されており、その際には、最新の衛星重力データに加え、その時点で利用可能な出来るだけ高精度な地表重力測定データ、海面高度計データ、さらに SRTM や ICESAT による地形データ (DEM) が用いられる予定である (Kenyon and Pavlis [2])。

EGM05 のように 2160 次と極めて高次の球関数モデルの開発においては、係数を決めるための計算方法も重要な研究課題となっている。具体的には、2160 次すべての係数を full matrix として解くことはせず、衛星データの寄与がある 140 次程度の次数を超える部分については、数値積分を併用した、行列の対角化手法がとられている。PGM2004A の計算にもこのような手法が用いられており、良好な結果が得られている (Pavlis N.K. et al. [3])。

EGM05 で予想されるジオイド高精度は、全球の RMS で 15 cm であり、このうち、GRACE の衛星データによる次数 100 次までの長波長成分の誤差が 5cm、次数 2160 以上の切断誤差が 3cm、残りの次数 101 から 2160 の地上重力データベースの精度に依存する誤差が 14cm と見積もられている。従って、最終的な精度の改善は、地上データベースの精度を如何に向上させるかに掛かっており、現在、 $5' \times 5'$ 格子の地上重力データベースの誤差が大きい、南米、アフリカ、南極大陸での航空重力測定など、新しいデータの追加に大きな期待が寄せられている。

3. 重力の時間変化

衛星重力データを用いた地球重力場の時間変化の研究としては、データ期間としては長い CHAMP のデータを用いたごく低次の係数変化の研究もあるが、やはりその中心は GRACE データを利用した研究である。現在、GRACE ミッションは Validation Phase から Observational Phase に移行し、2004 年 7 月以降、Range Rate や精密軌道情報、その他、地球物理学的補正量などを含む沿軌道データとしての Level-1B

データと、1月毎の120次までの重力場の球面調和関数係数解である Level-2 データが一般に公開されている。

GRACE のデータを用いた重力場の時間変化の研究としては、主に、Level-2 の球関数係数の時系列データが使われる。しかしながら、120 次までの係数をそのまま合成した重力場データは誤差が大きくなるため、必要な信号を抽出するためにさまざまなフィルタリング手法が用いられている。代表的なものとしては、対象とするエリアの情報だけを抜き出すために適当な空間スケール(例えば半径 500km 程度)のノーマルフィルターを用いるもの、FFT を利用して最適フィルターの設計を行うもの、ウェーブレットを用いるものなどがあげられる。

このようにして得られている重力場の変動シグナルとしては、Tapley ら[1]に代表されるアマゾン川流域を含め、陸水の季節変動に伴うものがその主要なものであり、地球上の代表的な河川流域において、いくつかの陸水変動モデルとの比較が行われている (Famiglietti et al. [4])。これらの結果を見ると、GRACE による変動場と陸水モデルとは概ね良い一致を見せており、今後、GRACE データが、陸水モデルの検証に有効に利用できることを示唆している。

陸水変動以外のシグナルとしては、海洋変動、氷床変動などがあげられる。このうち、グリーンランド氷床の季節変動について、その最小値の季節的なズレをもとに融水の流動の時間的なずれの議論などもされている (Wahr et al. [5])。一方、海洋については、陸水や氷床のような明解な境界を区切ったフィルタリング処理が難しく、その変動を明瞭に捕まえることは困難なようである。しかし、例えば南極周回流のような大きなシグナルが予想される海域で、広域の海域での平均的な時間変化や、海域間での質量の平均値差を調べるなどの方法で、実際に海水の質量移動が起こっていることを捕まえた結果なども示されている。今後、データ処理の工夫が期待される分野である。

以上は、Level-2 の球関数係数時系列を用いた研究であるが、さらに空間的、時間的分解能を向上させるため、Level-1B のデータを直接用いる研究も行われている。その代表的な例は、対象とする領域に多数の仮想的な点質量異常(マスコン)を仮定し、Level-1 の Range Rate データのインバージョンでマスコンの時間変化を求めようとするもので(Lemoine et al. [6])、アマゾン流域での重力変化の解析で、単純なフィルタリング処理より空間的に高分解能な結果が得られている。今後、Level-1 データを如何に利用するかは、重要な研究課題の一つと思われる。

4. 地上検証

GRACE による時間変動重力場の、地表観測による直接的な検証手段としては、超伝導重力、絶対重力など地上での精密重力測定と、海底圧力測定が考えられている。このうち、超伝導重力データについては、ドイツの Wettzell とイタリアの Medicina での比較結果が報告されており (Andersen et al. [7])、Wettzell の比較では GRACE による振幅がやや小さいものの、いずれも良い一致を見せている。特に、これらの結果では、2002 年と 2003 年での季節変動の振幅の違いまで議論されており、2003 年のヨーロッパでの熱波の影響を表した結果であるとされている。従来、空間スケールの違いから地上での重力測定と衛星重力測定とを直接比較することは容易ではないと思われていた感もあるが、超伝導重力計では、十分比較可能なシグナルが取得できることを示した結果である。逆に、広域の陸水変動シグナルは精密重力測定にとってはノイズとなることが多いので、その補正に衛星重力データを用いることも、今後の重要な研究課

題であろう。

絶対重力測定に関して、現時点で GRACE データと直接比較を行ったという結果は示されていない。しかし、将来、ポストグレースナル・リバウンドに伴うシグナルの検証に向けて、スカンジナビアでの絶対重力測定網の計画 (Muller et al. [8]) などが発表された。また、南極大陸での絶対重力測定点網の充実も今後の重要な課題である。

海底圧力計観測は、もう一つの直接的な検証手段として注目されている。海洋学的に、相対的な渦度の変化や海底地形などの影響により大きな海底圧力変化が予想される海域が幾つか知られている。Fu ら[9]は、このうち特異な海底地形から大きなシグナルが予想される南米アルゼンチン沖の海域での2点の海底圧力観測結果について報告した。それによると、これらの観測は、steric 補正をした Jason-1 による海面高観測と大変良い一致をしめているが、GRACE との直接比較は空間スケールの点でなお困難なようである。今後、海面高度計のデータを仲介として、海底圧力 海面高 - GRACE といった間接的な比較方法の開発も必要となるかもしれない。なお、海底圧力観測としては、南極海での観測が重要と考えられており、Kuo ら[10]は、南極での CAL/VAL の一環として、我が国の南極観測で実施する今年から来年にかけての昭和基地沖での海底圧力観測について紹介を行っている。

5. おわりに - 将来計画

衛星重力ミッションが長波長の重力場決定精度を格段に向上させたことは確かであるし、重力場の時間変動の観測をとおして、地球科学のさまざまな研究分野で全く新しい手法を提供しつつあることも事実である。しかし、現在の CHAMP、GRACE、さらにすでに打ち上げが決まっている GOCE を含めたとしても、これらの衛星でカバーしきれない多くの研究課題が残っていることも確かである。GGSM2004 でも、このような見地から、将来の衛星重力ミッションについて、幾つかの発表が行われた。例えば、Sneeuw and Schaub [11]は、複数の衛星ミッションの組み合わせによりどのような観測が可能であるか論じていし、特に、Haagmans and Rummel [12]による初日の基調講演は示唆に富むものである。将来計画については、さまざまの見地からの議論が必要であり、すぐに結論の出るものではないであろうが、それを考える際の指針として、Haagmans and Rummel [12]による次の問題提起を挙げ、本稿のまとめとする。

1. What room is left for further improvement ?
 - At very long wavelengths
 - At short wavelengths
 - For monitoring of temporal variations
2. What are the science issues ?
 - From the deep Earth interior to the atmosphere
3. What future mission scenarios do we see ?
 - Altitude, type of differentiation, precision
 - Sampling space and time
4. What complementary models/missions are required
 - in terms of products and “de-aliasing”

参考文献

- [1] Tapley, B. et al.: GRACE Measurements of Mass Variability in the Earth System, Science, Vol. 305, 23, July 2004, 503-505, 2004.
- [2] Kenyon, S. and N. Pavlis: Status and Plans for Geopotential Model EGM05, presented at GGSM2004, Port, Aug., 2004.
- [3] Pavlis N.K. et al.: Gravitational Potential Expansions to Degree 2159, Proc. GGSM2004, Port, Aug. 2004.
- [4] Famiglietti, J. et al.: Terrestrial Water Storage Variations from GRACE, presented at GGSM2004, Port, Aug., 2004.
- [5] Wahr, J., S. Swenson and I. Velicogna: Water Balance Estimates from GRACE Measurements of Time-Variable Gravity, Poster presented at 2004 AGU Fall Meeting, San-Francisco, 2004.
- [6] Lemoine F. G. et al.: Time Variable Gravity from Local Mascon Analysis of GRACE Data, Presented at 2004 AGU Fall Meeting, San-Francisco, 2004.
- [7] Andersen, O. B. et al.: GRACE Observed the 2003 European Heat Wave, Poster presented at 2004 AGU Fall Meeting, San-Francisco, 2004.
- [8] Muller et al.: Gravity Changes in the Fennoscandian Land Uplift Area to be Observed by GRACE and Absolute Gravimetry, presented at GGSM2004, Port, Aug., 2004.
- [9] Fu, L. L. and C.W. Hughes: On the Scales of Ocean Bottom Pressure Signals and Comparison to Altimetry Observations, presented at GGSM2004, Port, Aug., 2004.
- [10] Kuo, C. Y., et al.: Southern Ocean Sea Level Studies Using Steric, GRACE Oceanic Mass Variation and Ocean Model Data, presented at GGSM2004, Port, Aug., 2004.
- [11] Sneeuw N. and H. Schaub : Satellite Clusters for Future Gravity Field Missions, Presented at GGSM2004, Port, Aug., 2004.
- [12] Haagmans, R. and R. Rummel: The Future of Geopotential Missions, Presented at GGSM2004, Port, Aug., 2004.

注：上記以外にも，GGSM2004 では多くの関連発表があり，その内容（プレゼンテーションで使用された PP ファイルおよびポスター）の多くは，pdf ファイルの形で CD-ROM に集録され配布される予定である．