

衛星重力ミッションの概要

福田洋一

京都大学大学院理学研究科

Impacts of Satellite Gravity Missions on the Earth Sciences

Yoichi Fukuda

Graduate School of Science, Kyoto University

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

1. はじめに

2000年7月15日に打ち上げられた CHAMP (CHALLENGING Mini-Satellite Payload) は、H-L SST(High-Low Sattelite to Sattelite Tracking) による重力場測定センサーを搭載した歴史上初の衛星である。CHAMP ミッションを皮切りに、2001年秋には、NASA と GFZ(GeoForschungsZentrum)の共同で本格的な重力場測定ミッションである GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment)が、また、2004年には、ESA による、主に静的な重力場の改良を目指した GOCE (Gravity field and Ocean Circulation Explorer) の打ち上げが決まっている。さらに、GRACE の後続として、2006年の打ちあげを目指して SSI(Sattelite to Sattelite Interferometry) による重力場変動モニタリングを目的としたミッション計画も進められようとしている。

このように、21世紀の地球重力場研究は衛星重力ミッションで明けようとしているが、今後の研究の方向を考える上で重要なことは、これらの衛星重力ミッションが、従来の測地学や海洋学、あるいは、重力場の研究、海洋ジオイドの研究などといったある単一の目的、枠組みでは捉えられなくなって来ていることである。1980年代～1990年代に計画されていた衛星重力ミッションは、静的な重力場の精度向上により、主に測地学や固体地球物理学の研究に寄与するとともに、衛星高度計

との組み合わせによる力学的海面高度の検出によって海洋学への寄与がたいへん大きいと考えられていた。本研究集会在衛星アルティメトリー - と衛星重力ミッションという2つのキーワードを冠していることの一つの理由もここにある。しかしながら、現在計画されている衛星重力ミッションでは、さらに、重力場の時間的変化の検出が一つの重要な目的となっており、測地学、固体地球物理学、海洋学はもとより、その応用範囲は、陸水学、氷床・雪氷学、気象学と極めて多岐にわたっている。地球重力場の時間変動成分を考えると、地球の固体部分よりは地球表層部に存在する流体（大気、海洋、陸水、雪氷等）の影響がはるかに大きく、衛星重力ミッションの主要な目的もこれらの変動の研究にあるといえよう。

本研究集会でも、このような観点から、測地、海洋にとどまらない幅広い研究分野の研究者に参加いただき、個々の衛星重力ミッションでの測定原理や特徴についての詳細、地球上での表面観測（地表重力観測、海洋観測、海底観測等）との関係、それぞれの研究分野での応用など、関連する話題の提供をお願いした。これらの詳細については、話題を提供いただいた方々の稿をご覧ください。本稿では、他稿のイントロダクションも兼ねながら、現在予定されている重力ミッションの概要と、その地球科学研究へのインパクトについて簡単にまとめることにする。

2. 衛星重力ミッション

2-1. CHAMP

先に述べた CHAMP (詳細は青山、本集録、参照) は、H-L SST による歴史上初の衛星重力ミッションで、その目的の一つに、次期のアルティメーター衛星である Jason-1 の軌道決定のための重力モデルの改良がある。Jason-1 では倉賀野 (本集録) の報告にあるように、最終的な海面高度として 2.5cm の精度を目指しているが、これを実現するためには CHAMP のデータを取り込んだ新しい重力モデルによる高精度な軌道決定が不可欠である。

CHAMP で用いられる H-L SST とは、簡単には衛星に搭載した GPS 受信機で衛星の位置を高精度で連続的に決定し、重力場の空間変化に伴う軌道位置の変化から重力場を測定しようというものである。このように高高度の (GPS) 衛星から低高度の衛星軌道追跡を行うことが H-L SST の名前の由来である。

H-L SST による測定では、重力場の低次 (長波長) の球関数係数が求められるだけであり、重力場決定における直接的な寄与は比較的小さいが、次に述べる GRACE の L-L (Low-Low) SST や GOCE の Gradiometer (重力偏差計) でも H-L SST は低次重力場の決定のため併用されるほか、CHAMP では、非重力場加速度成分の検出のための加速度計の実地検証など、今後の重力ミッション全体のコンセプト検証の意味で大変重要である。

2-2. GRACE

GRACE は、H-L および L-L SST による重力場測定衛星で (本集録、古屋、参照) 当初、2001 年の初夏に打ち上げ予定であったが、最新の情報では予定が若干遅れており、2001 年の 10-11 月頃打ち上げられる模様である。L-L SST とは低高度 (GRACE の場合、400-500km) の同一軌道に 2 つの衛星を 100 ~ 数 100 km の間隔で打ち上げ、互いの距離の時間変化 (range rate)、すなわち速度の測定を行い、その揺らぎから重力場を求めようというものである。Range rate の測定には マイクロ波のレ

ーダー・リンクを用い、 $\mu\text{m/s}$ より良い測定精度が得られる見込みであり、GRACE のこの精度は、1 ヶ月程度の時間分解能 (積分時間 1 ヶ月) 空間スケール数 1000km で、地上での水厚変化に換算して mm オーダーの変化が検出できると言われている。この意味するところは、GRACE のデータが、グローバルな水循環、氷床変動、海水準変動、ポスト・グレースハリバウンドなど、従来の常識では衛星重力が利用できるとは全く予想もされていなかった新しい応用分野を切り開くということであり、その成果は、今後の地球変動モニターあるいは地球計測の切り札的な役割を果たすものと期待されている。

2-3. GOCE

GOCE は、H-L SST と重力偏差計 (本集録、徐、参照) による静的な重力場の改良に重点を置いた重力ミッションであり、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、長らく実現が遅れていた 1980 年代からの重力偏差計衛星の正統な後継に位置するものである。GOCE によって期待される具体的な成果としては、衛星アルティメトリィとの組み合わせによる力学的海面形状の決定であり、多くの海洋学的目的に十分な精度があると考えられている。また、陸上では、高精度なジオイド決定により、現在、各国で独自に設定されている高さ基準を統一し、新たなグローバルな基準 (たとえば、過去にさかのぼって検潮データから海水順変動を検出しようとする、このことは本質的に重要である) を設定することにも大きく寄与するものと思われる。さらに、従来、地上重力、海上重力、あるいは航空重力測定では困難であった空間波長 100 km 程度より長波長領域での重力異常精度の著しく向上させることにより、当然のことではあるが、大陸の地殻構造、地球内部の密度構造の研究など、固体地球物理的への寄与は計り知れないものがある。

2-4. GRACE Follow-on

GRACE の衛星間距離測定がマイクロ波レーダーを用いていたのに対して、GRACE の後続ミッションでは、レーザー干渉計を用いた衛星間距離測定の利用が予定されている。現在、NASA では、2006 年の打ち上げを目指して、2003 年中にミッション計画をスタートさせたい模様である。基本的な設計としては、高度約 600km の極軌道、衛星の間隔 50 - 200km で、10 pico-meter オーダーの測定精度を得るようで、寿命は、最低 5 年を想定しているようである。この計画は、技術的には衛星による重力波検出計画 LISA(2010 年)と共通する部分(高安定レーザー、イナーシャ・システム、ドラッグフリーコントロール等)を多く持っており、これらのシステムの検証の意味も果たすようである。

この計画が実現した際には、空間波長数 10km で水の厚さにして 1cm 程度の変動が重力変化として検出可能になると言われており、地球環境モニターリングの一つの柱となることが予想される。

3 . 衛星重力ミッションと地球科学

2010 年までの今後の 10 年間には、CHAMP、GRACE、GOCE、あるいは GRACE-FO による衛星重力ミッションのデータが広く利用できるようになると予想される。ここでは、一部繰り返しになるが、これらのデータが、地球科学研究でどのように利用できるか、幾つかの例を示すとともに、関連研究分野の方向性や今後の問題点等について考えることにする。

まず、GOCE のデータが利用できるようになると、波長 100 km 程度の空間スケールで mgal より良い精度の重力異常、cm レベルでのジオイド高が得られることになる。これは、衛星高度計データとの組み合わせによる海域での力学的海面形状の決定(本集録、市川、参照)や、測地学的目的でのジオイド高の決定(本集録、黒石、参照)に大きく寄与するものである。

一方、地下構造の推定に関連しては、上記の精度は、地殻の厚さにして 0.1km 程度、あるいは南

極などの氷床下の基盤地形に換算すると数 10m の精度に対応する。従って、例えば一つの応用として、ICESAT などのレーザー高度計や InSAR などによる氷床地形のマッピング(本集録、小澤・青木、参照)と組み合わせることにより、南極大陸の地下構造の研究は急速に進展するものと期待できる。

重力場の時間変動に関しては、GRACE、あるいは GRACE Follow-on の利用で最も大きな期待が寄せられているのは、1月～年周スケールでのグローバルな質量移動のモニターである。このような変動は、具体的には大気運動とグローバルな水循環に対応しており、特に、水資源と関連した陸水のモニターに多くの期待が寄せられている(本集録、仲江川、参照)。また、海洋においては、高度計データと組み合わせることで海面高変動の steric 成分が分離できる可能性もある。

衛星重力ミッションでは、重力変化(質量移動)を生じさせるさまざまな変動の積分値を観測するため、観測データから変動の原因となっている現象を分離するためには、それ以外の現象による影響を何らかの形で除去する必要がある。現在のシナリオでは、地球表層流体のうち大気の挙動は、客観解析データを利用することで、ある程度既知として扱われているが、例えば、南極の気象データが十分であるか、エイリアジングの影響がないか、海洋の応答として IB(Inverted Barometer)仮定が妥当であるかなど、やはり検討の必要な課題も少なくない。また、海洋についても、データの解釈には大循環モデルの利用が不可欠であろうが、やはり考慮すべき問題点は多く残されている(本集録、北村、参照)。逆に、衛星重力データが、これらの問題に対してどのような拘束条件を与えらるのか、あるいは、例えばデータのモデル同化を考えたとき、具体的にどのような方法が可能であるかなど、衛星重力という新しいデータの利用方法を探ることも今後の重要な研究課題であろう。

次に、年周以上の経年的重力場変動を考えた場合、最も興味あるものの一つは、ポストグレーション・リバウンドによるものであろう(本集録、

奥野、参照)。ポストグレースナル・リバウンドによる地殻変動や重力場変動のデータは、地球内部の粘性係数などを知る数少ない情報源の一つであり、その意味で大変貴重なものである。

さらに、ポストグレースナル・リバウンドそのもの、あるいは、地球内部の粘性係数の見積もりは、長期的な海水準変動のモニターにとっても大変重要な意味をもっており、その精度如何によっては、将来の地球変動シナリオも大幅に書き換えられる可能性さえある。関連した研究として、例えば、GISS(Goddard Institute for Space Studies)で開発されている地球環境予測モデルの良し悪しが判定するために、氷床変動、海水準変動を考慮した上で GRACE による経年的重力場変動のトレンド検出精度が十分であるかのシミュレーション研究 (Leuliette et al., 2000)などにも着手されている。この種の研究は、長期的な地球変動モニターの新しい観測手段を探る意味で、今後、ますます重要になる部分であろう。

4. おわりに

衛星重力ミッションと幾つかの応用分野について概観した。位置と重力場は地球計測の基本であり、従来からも位置の情報には VLBI、SLR や GPS などの宇宙測地技術に依存する部分が多かった。今後、重力場についても、衛星重力データの重要性が大きくなっていくことであろう。しかしながら、衛星データが万能というわけではなく、例えば、静的な重力場に関しても空間波長 100km より短波長の領域については、依然、地表観測が不可欠であり、多くの応用研究においてはこの領域でのデータが決定的に重要である。さらに、時間変動成分についても、より短いサンプリング間隔が要求される現象も少なくない。これらのことを考えあわせると、今後、衛星観測と地上観測の役割分担を明確にし、それぞれの特徴を活かしながら、どのように連携させていくかも重要な検討課題である。このような観点からも、海洋観測(今脇)、超伝導重力観測(佐藤)、絶対重力観測(古屋・大久

保)などの地表観測の現状や今後の展望、さらに最近の研究成果について、それぞれの稿を是非ご覧いただきたい。さらに、我が国での衛星重力ミッションがどのように進むべきかも重要な問題でこの点については内藤(本集録)を参照された。

衛星重力ミッションを視野に入れた研究会は、我が国では、今回が初めてであろう。残念ながら、我が国は、この方面の研究ではかなり遅れをとってしまったように思われる。今後、この研究会をきっかけとして、この方面の研究が少しでも進展することを望むものである。

参考文献

- 福田洋一(2000): 衛星アルティメトリーと衛星重力ミッション, 測地学会誌, 46, 53-67.
- Leuliette, E.W., Nerem R.S. and G. L. Russell: Observing Mass Redistribution Due to Climate Change Using GRACE, Abstract presented at GGG2000, Banff, Canada, 2000.
- National Research Council (1997): Satellite gravity and the geosphere, National Academy Press Washington, D.C., 1-112.

関連サイト URL :

CHAMP:

http://op.gfz-potsdam.de/champ/index_CHAMP.html

GRACE:

<http://www.csr.utexas.edu/grace/>

GOCE:

<http://www.sron.nl/divisions/eos/gocemain.html>

<http://www.cis.tu-graz.ac.at/mggi/goce/>