

平成 22 年 5 月 20 日現在

研究種目：基盤研究 (B)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19340129
 研究課題名 (和文) 次世代の全球衛星重力場へ向けての数理的フロンティア研究
 研究課題名 (英文) Frontier mathematical models for the next generation of global satellite gravity fields
 研究代表者
 徐 培亮 (XU PEILIANG)
 京都大学・防災研究所・助教
 研究者番号：10293961

研究成果の概要 (和文)：

本研究課題の主な研究結果は以下の通りである：「1」今までの地球重力場の決定手法は宇宙測地観測システムから得た観測データの前例のない革命的な高精度と連続性を完全に使えない。我々は新しい衛星位置と速度摂動モデルを導き出して、衛星重力の数学的モデルと観測データの最大の矛盾を解消した。この研究結果は次世代の全球衛星重力場へ向けての基本モデルになる。「2」逆問題としての全球衛星重力場を解く為に、沢山の異種類データ同化理論を作った。「3」衛星精密軌道を得る不可欠な GPS の混合整数値線形モデルを構築した。

研究成果の概要 (英文)：

This research project is to investigate frontier mathematical problems for the next generation of global satellite gravity models. The most important results we obtained are summarized as follows: [1] We have successfully developed a new perturbation theory for positions and velocities, which can automatically incorporate data of any type and at unprecedented high accuracy and continuity and easily modified to meet data requirement in the future. [2] We have developed a new theory for combining different types of data for inverse satellite gravity mapping; [3] We have built and deepened our research on mixed integer linear models for use in GPS.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2008年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2009年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
年度			
年度			
総計	13,500,000	4,050,000	17,550,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：衛星重力、物理測地学、宇宙測地学、GPS、逆問題、混合整数値線形モデル

- | | |
|-----------------------------------|---|
| 1. 研究開始当初の背景
全球重力場モデルは理論的には陸上重 | カデータを使って決定できるが、限られた地上重力データのみから決定された重力モデ |
|-----------------------------------|---|

ルは、精度、分解能とも全く不十分である。1957年の人工衛星の打ち上げ後、この半世紀の間に衛星測地学は急速な発展を遂げ、アメリカの NASA Goddard Space Flight Center やヨーロッパの地球科学研究機構などにより、人工衛星の追跡データを用いた幾つかの高精度の全球重力場モデルが開発された。だが、海洋学など、測地学以外の分野への応用には、なお精度が十分でないことはよく認識されていた。

地球基準面であるジオイドの精度ならびに分解能を向上させ、全球重力場モデルを固体地球物理学のみならず海洋学や、さらに地球環境監視の手段として実用化する為に、高精度な重力場決定を目的とした人工衛星重力ミッション CHAMP が 2000 年に、また、GRACE が 2002 年に打ち上げられた。

衛星重力ミッション、あるいは将来の衛星重力ミッションによる観測データは、衛星軌道、衛星の加速度、衛星間の距離とその時間変化である。これらの観測データは、従来、全く想像できなかったほど、極めて高い精度と連続性を持つ。例えば、CHAMP や GRACE の衛星軌道は 1 - 2 cm の精度で決定されており、GRACE の 2 基の衛星間の距離測定精度は μm のオーダー、距離の時間変化は $0.1\mu\text{m}/\text{sec}$ と極めて高精度である。さらに、次世代の Laser 観測技術を応用した衛星間距離とその時間変化の測定精度は、GRACE より 2 ~ 3 桁向上すると言われている。

宇宙測地観測技術の革新的な進歩に比べ、この半世紀間の重力場決定に関する数学的手法には大きな変化はなく、衛星重力場の数学的モデルは 1960 年代以降、ほとんど発展していない。現在用いられている代表的な衛星重力場決定手法は、(1) 1961 年の Kaula による線形摂動理論に基づく手法、(2) 1960 年~1985 年頃までに開発された数値積分による手法、(3) 衛星軌道エネルギーに基づく代替観測モデル、の 3 つである。このうち、Kaula の線形摂動理論では、(1) 衛星軌道要素の時間変化率を仮定する、(2) critical inclination と resonance により観測方程式が使えない、(3) 時間によって線形近似が効かなくなる、(4) 観測方程式が非常に不安定である、などの欠点のため、CHAMP や GRACE のデータ解析には用いられていない。一方、1969 年に Wolff により提唱された衛星軌道エネルギーに基づく代替観測モデルは、Jekeli (1999) の研究により CHAMP や GRACE の精度に比べ良くないことが判明し、Jekeli はモデルの改善を行ったが、この新しいモデルでも GRACE の観測精度を生かしきれないこ

とがわかっている。

このため、CHAMP と GRACE のデータ処理を担っているドイツの Potsdam 地球科学研究センター (GFZ) やアメリカのテキサス大学宇宙研究センター (CSR) では、観測データに数値積分法を用いて全球重力場モデルを決定している。これらの結果は、固体地球物理学をはじめ、海洋学、水文学、雪氷学や、地球環境監視などへの応用にも利用されるようになってきている。このような衛星測地学研究の現状を一言で纏めると、宇宙測地観測技術レベルが従来の想像を遥かに超えるほど高くなっているなかで、それに完全に対応できる全球重力場決定の数学的手法が存在しないと云える。

2. 研究の目的

全球重力場モデルは理論的には陸上重力データを使って決定できるが、限られた地上重力データのみから決定された重力モデルは、精度、分解能とも全く不十分である。CHAMP や GRACE、あるいは将来の GOCE や GRACE Follow-on など、衛星重力ミッションによって得られる観測データは、衛星軌道、衛星の加速度、衛星間の距離とその時間変化である。これらの観測データは、従来、全く想像できなかったほど、極めて高い精度と連続性を持つ。このような宇宙測地観測技術の革新的な進歩に比べ、この半世紀間の重力場決定に関する数学的手法には大きな変化はなく、衛星重力場の数学的モデルは 1960 年代以降、ほとんど発展していない。

現在用いられている代表的な衛星重力場決定手法は、(1) 1961 年の Kaula による線形摂動理論に基づく手法、(2) 1960 年~1985 年頃までに開発された数値積分による手法、(3) 衛星軌道エネルギーに基づく代替観測モデル、の 3 つである。これらのモデルでは、高精度な宇宙測地観測技術のレベルと比べ精度が不十分であり、現在、従来の予想を遥かに超えた高精度の観測データに対応できる全球重力場決定の数学的手法は存在しないと云える。このため、現在、あるいは近い将来に予想される宇宙測地観測技術レベルに十分対応できる全球重力場決定の数学的モデルを開発することは、火急の課題となっている。

本研究の最大の目的は、このような現状を打破すべく、次世代の全球衛星重力場決定に向けた宇宙測地学数理的フロンティア研究を推進することである。

3. 研究の方法

研究課題を円滑に進めるため、研究代表者は、主に CHAMP と GRACE の衛星重力ミッションから得た高い精度の観測データ、例えば、

精密軌道、衛星の速度、2基の衛星間の距離とその時間変化量等を扱う新しい数学的モデルを作るとともに、次世代の全球衛星重力場へ向けて、関連する新しい数値的問題の研究をおこなった。また、研究分担者は研究代表者と協力し、主に、衛星重力データの応用や、大気モデリングなど、地球物理学的補正とその影響について研究を行った。

主な研究手順、課題等は次ぎのとおりである。

- (1) 数値積分法に代わる、次世代の全球衛星重力場へ向けての完全に新しい数学的手法の開発をした。具体的には、人工衛星運動の微分方程式にGPS観測に基づくVolterraの積分方程式を変換した新しい観測モデルを構築した。このモデルに基づくアルゴリズムならびにそれをもとにしたプログラムを作成し、シミュレーションテストを実施した。重力衛星軌道が常に連続的得られるとは限らないので、断続データのための数学的モデルの構築とそのアルゴリズム開発を開始した。開発したアルゴリズムを実際のデータに適用し、全球衛星重力場を試算した。
- (2) 次世代の全球衛星重力場へ向けて、関連する新しい数値的問題については逆問題としての衛星重力場を解く為に、沢山の異種類データを同化することを重点課題として研究をおこなった。
- (3) GPSによる重力衛星の軌道決定の研究を実施した。GPS精密測位の基本的な方程式は研究代表者が1994年に提唱した混合整数値線形モデルである。研究代表者は混合整数値線形モデルについての仮説テストに関する研究を2006年のIEEE Transactions on Information Theoryに発表した。これは、Bayesian推定を用いたもので、得た確率境界はShannonの確率境界よりもっと良いことがわかっている。これらの結果はGPS測位の品質管理および品質改良において基礎となるものである。この研究を拡張し、混合整数関数における統計推定と様々な条件および制約下での混合整数値線形モデルについて研究を行った。

4. 研究成果

本研究課題は研究期間中に得た研究成果は以下の通りである。

- (1) 新しい衛星位置と速度摂動を導き出し。摂動精度は準線形、線形や二次近似である。この新しい摂動モデルは今までの3つの基本的な地球の重力場のマッピング

手法よりも、宇宙測地観測システムから得た観測データの前例のない高精度と連続性を完全に使えた。そのため、次世代の全球衛星重力場へ向けての最大の問題点としての革命的な高観測精度とその匹敵できない数学的モデルの矛盾を解消した。本研究プロジェクトの最重要な研究課題として、次世代の全球衛星重力場へ向けての完全に新しい数学的モデルを構築した。構築した衛星位置と速度摂動を使用して各種の衛星観測データの観測方程式を導き出した。この成果は2008年に国際学術誌 (Celest Mech Dynam Astron) で公表された。また、研究代表者はこの成果は2008年度のヨーロッパの地球科学総会で招待講演として研究発表した。

- (2) 従来の軌道摂動手法は摂動関数の平均値の付近だけで有効になったが、新しい座標と速度摂動の数学的モデルは任意の長さの軌道アークでも全体として有効になった。それで、新しい全球衛星重力場数学的モデルは今迄出来ない小さい重力場シグナルの検出も出来るようになった。これらの研究成果は測地学をはじめ、固体地球物理学、海洋学、水文学、雪氷学や、地球環境監視などへの応用にももっと良い高精度と高分解能の全球衛星重力場を提供することが出来るようになってくると思う。
- (3) 従来の軌道摂動手法は軌道共振と臨界軌道傾斜角の問題もあったが、新しい座標と速度摂動の数学的モデルはそんな問題を完全に解消した。従来の衛星軌道の共振と臨界傾斜角は実の軌道物理現象ではなく不適当な数学からの人工物とも言える。
- (4) 衛星軌道は全球重力場のモデルを決定する為に通常用いられたが、衛星軌道の偏導関数の初期値をゼロにセットすることが条件としている。我々は二つの簡単な微分方程式を例として解いて、軌道偏導関数の初期値をゼロにセットすることが数学的に誤っていることを説明した。また、この仮定条件は物理的にも禁止されることを証明した。
- (5) 重力衛星の軌道は普通GPSデータを統計的に独立しているという仮定に基づいて決定される。我々の研究はGPS観測データの強い時間相関があることを示した。ま

た、各タイプのGPS観測データの間にも強い統計的相関があることを明らかにした。GPS精密測位（精密軌道）にGPS衛星の高度角だけに依存する統計的モデルは不十分である。GPS統計数学の最新研究結果は2008年7月にドイツのKaiserslautern工科大学で行った国際ワークショップ「Geomathematics 2008」で一時間の招待講演で研究発表を行った。また、これらの研究成果もオーストラリアのクイーンズランド工科大学とニューサウスウェールズ大学、中国の武漢大学、同濟大学などで招待講演として研究発表した。

- (6) 衛星で測られる重力勾配は、地上の重力異常を得るのに用いられる。全ての5つの衛星重力勾配関数を使う為に、我々はストークスカーネルの二次偏導関数と重力勾配関数の方程式を導いた。特定の重力勾配関数によってその逆問題の安定性は異なることを明らかにした。衛星重力ミッションGOCEに基づいてシミュレーションして、理論的結果を検証した。「4」研究員は我々が開発した数学的モデルのアルゴリズムを作って、テストした。
- (7) 全球衛星重力場は重要な地球物理学的逆問題として、沢山の異種類データを同化することによって、しばしば解決されました。そんな統計的なモデルは、いくつかの異なる未知標本分散関数を含みます。これらの分散関数は地球物理学的の不適切な問題にかなり影響を及ぼすことが示されたが、その関数は地球物理学の中に経験的に選ばれました。地球物理学的逆問題へ向けて異種類データを同化する為に、しっかりした統計基礎理論はまた無い。我々は、正則化パラメータを決定するために、GCV方法を広げる。開発した手法は基本的に、二つの要素を構成する。一つめの要素にはGCV方法を用いて正則化パラメータを決定する。二つめの要素には正則化パラメータを固定することによって異種類データの未知標本分散関数を解く。2つのシミュレーションされた例に基づいて、我々は広範囲によく使われる既存のGCV方法と比較する。そして、我々の方法が正しく未知分散関数を回復して、正則化パラメータを決定するためによく機能することを示しました。この研究成果はGeophys J Intの編集者から高い評価をもらった。

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 8 件)

- ① Xu P.L., Mixed integer linear models, in: Handbook of Geomathematics, W. Freeden, Z. Nashed and T. Sonar (eds), 査読有、Springer (accepted and to appear in summer), 2010
- ② Xu P.L., Iterative generalized cross validation for fusing heteroscedastic data of inverse ill-posed problems, Geophysical Journal International, 査読有、2009、179、182-200
- ③ Xu P.L., Zero initial partial derivatives of satellite orbits with respect to force parameters violate the physics of motion of celestial bodies, Science in China Ser. D - Earth Science, 査読有、2009、52、562-566
- ④ Janak J., Fukuda Y., Xu P., Application of GOCE data for regional gravity field modelling, Earth Planets Space, 査読有、2009、61、835-843
- ⑤ Xu P.L., Position and velocity perturbations for the determination of geopotential from space geodetic measurements, Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 査読有、2008、100、231-249
- ⑥ Li B., Shen Y., Xu P.L., Assessment of stochastic models for GPS measurements with different types of receivers, Chinese Science Bulletin, 査読有、2008、53、3219-3225
- ⑦ Xu P.L., Liu Y.M., Shen Y.Z., Fukuda Y., Estimability analysis of variance and covariance components, Journal of Geodesy, 査読有、2007、81、593-602
- ⑧ Xu P.L., Shen Y.Z., Fukuda Y., Liu Y.M., Reply to the comments by K.-R. Koch and J. Kusche, Journal of Geodesy, 査読有、2007、81、633-635

[学会発表] (計 16 件)

- ① Xu P.L., 次世代の全地球衛星重力場：数理理論とその環境への応用、平成21年度京都大学防災研究所研究発表講演会、京都大学防災研究所、2010年2月23日～24日
- ② Yamamoto K., Y. Fukuda, T. Nakaegawa, M. Taniguchi, Study of landwater variation over Chao Phraya river basin using GRACE, satellite altimetry and in situ data, 2009 AGU Fall Meeting、

- Moscone Center, San Francisco, 2009年12月14日～18日
- ③ 徐培亮、世代の全地球衛星重力場への数理Modelling、「重力観測・理論、その応用—陸上・海底から衛星観測まで」の研究集会、東京大学地震研究所、2009年12月3日～4日
- ④ Hasegawa T., Y. Fukuda, F. Gangyu, S. Wenke, Y. Tanaka, M. Hashimoto, K. Yamamoto, Gravity changes associated with the 2004 Sumatra-Andaman earthquake: an interpretation of the postseismic gravity changes by SNRVEI model, IAG2009 Geodesy for Planet Earth, Buenos Aires, Argentina, 2009年8月31日～9月4日
- ⑤ Hasegawa T., Y. Fukuda, G. Fu, W. Sun, J. Okuno, K. Yamamoto, Coseismic and postseismic gravity changes associated with the 2004 Sumatra Earthquake: Comparison between GRACE and SNREI model, 2008 AGU Fall Meeting, Moscone Center, San Francisco, 2008年12月15日～19日
- ⑥ Yamamoto K., Y. Fukuda, M. Taniguchi, Study of sub-basin scale groundwater variations in Asia using GRACE, satellite altimetry and in-situ data, 2008 AGU Fall Meeting, Moscone Center, San Francisco, 2008年12月15日～19日
- ⑦ 徐培亮、Zero initial derivatives with respect to force parameters violates the physics of motion of the artificial satellites, 日本測地学会第110回講演会、函館市民会館、2008年10月22日～24日
- ⑧ Xu P.L., Mathematical modelling of precise space geodetic measurements for the next generation of global gravity models, Western Pacific Geophys. Meeting, Cairns Convention Center, 2008年7月29日～8月1日
- ⑨ Hasegawa T., Y. Fukuda, K. Yamamoto, T. Nakaegawa and Y. Tamura, 2006 Australian drought detected by GRACE, Gravity, Geoid and Earth Observation (GGEO) 2008, Crete, Greece, 2008年6月23日～27日
- ⑩ Hasegawa T., Y. Fukuda, K. Yamamoto, W. Sun, Gravity Changes Associated with the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake: Comparison between GRACE data and SNREI Models, European Geosciences Union General Assembly 2008, Austria Center Vienna, 2008年4月13日～18日
- ⑪ Janak, J., P.L. Xu, Y. Fukuda, Stability investigation of gradiometric inverse problems for anomalous gravity tensor components, European Geosciences Union General Assembly 2008, Austria Center Vienna, 2008年4月13日～18日
- ⑫ Xu P.L., Position and velocity perturbations for the determination of the Earth's gravity field, European Geosciences Union General Assembly 2008, Austria Center Vienna, 2008年4月13日～18日
- ⑬ Fukuda Y., Space geodesy: a new technology to monitor climate variations, The 10th Kyoto University Int Symp. "Active Geosphere Science", Bandung, Indonesia, 2007年7月26日～28日
- ⑭ Fukuda Y., K. Yamamoto, T. Hasegawa, K. Doi, K. Shibuya and H. Motoyama, Ice sheet mass balance in Enderby Land, East Antarctica, inferred from GRACE, ICESat and in-situ measurements, IUGG XXIV General Assembly, Perugia, Italy, 2007年7月2日～13日
- ⑮ 福田 洋一、山本 圭香、長谷川 崇、GRACE衛星重力データと地上重力測定データ、日本地球惑星科学連合2007年大会、幕張メッセ国際会議場、2007年5月19日～24日
- ⑯ 徐培亮、Coordinate and velocity perturbations for the determination of geopotential from space geodetic measurements, 日本地球惑星科学連合2007年大会、幕張メッセ国際会議場、2007年5月19日～24日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

徐培亮 (XU PEILIANG)
 京都大学・防災研究所・助教
 研究者番号：10293961

(2) 研究分担者

福田 洋一 (FUKUDA YOUICHI)
 京都大学・理学研究科・教授
 研究者番号：30133854