

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 27 日現在

機関番号：12613

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2012

課題番号：21740325

研究課題名（和文） 軌道の異なる「姉妹衛星」による高精度地球基準座標系構築法の確立

研究課題名（英文） Sister-satellite constellation for high-precision terrestrial reference frames

研究代表者

大坪 俊通（OTSUBO TOSHIMICHI）

一橋大学・大学院社会学研究科・教授

研究者番号：70358943

研究成果の概要（和文）：衛星へのレーザ測距による地球の形状的スケール・力学的スケールの高精度化を試みた。地球重力場の0次項(GM)，地球基準座標系のスケール，そしてレンジバイアス，この3者が絡み合う高い相関が，現状の衛星組み合わせにおいて，決定精度の足かせになっていることを明らかにした。できるだけ高度の異なるものを組み合わせることが，3者の相関を下げる効果があることを数値シミュレーションによって示した。

研究成果の概要（英文）：Geometrical and dynamical scales of the Earth are determined from satellite laser ranging. The gravitational constant GM, the scale of a terrestrial reference frame and a range bias are highly correlated, which has degraded the determination of the scale parameters. As a result of a numerical simulation, the combination of multiple satellites at various attitudes is found to be the key to solve the problem.

交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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：宇宙測地学，精密軌道決定，衛星レーザ測距，逆反射鏡

### 1. 研究開始当初の背景

地球基準座標系は，地球上の点あるいは地球周回の人工衛星の位置や速度を表現するために必須であり，地球上の陸・海・氷の動きを表現するときに基盤となるものである。限定された地域内では，現代宇宙測地技術はわずか数ミリメートルという高い測位精度を達成しているが，汎地球規模となると現状ではそこまで至っていない。

地球の大きさ，すなわち地球基準座標系のスケール，を決める手段として有力なのが，衛星レーザ測距技術である。これは光を用いた技術で

あり，そのほかのマイクロ波技術に比べ，伝搬遅延による誤差が低く抑えられる利点がある。現在，性能の高い観測局では，この計測精度が数十ピコ秒，すなわち1センチメートルを切って数ミリメートルの精度に到達しており，さらに1ミリメートルの測距精度を目指し世界各所で技術開発が精力的に進められている。

しかしながら，21世紀に入ってからのレーザ測距システムの計測精度向上は，地球基準座標系の精度向上に必ずしも直結していない。現在，地球基準座標系の構築に主に使われている双子のLAGEOS-1衛星およびLAGEOS-2衛

星は、その構造上、反射波が時間的に広がってしまい、1センチメートル程度の系統誤差が避けられない。したがって、測距装置側で仮に1ミリメートルの計測精度を達成できたとしても、現存する衛星構成に頼っているのは、地球基準座標系の、なかでもスケールの不確かさは残念ながら1センチメートル程度で頭打ちになってしまう。

最先端の測距システムにおいてはランダム誤差1ミリメートルは達成されつつあるものの、系統誤差が同じレベルである保証は全くない。

このように、レーザ測距が本来備え持つ精度が十分に発揮できていない状況であると認識されつつあった。

## 2. 研究の目的

汎地球規模での位置情報の最高精度が「センチメートルからミリメートルへ」飛躍的に向上するための方策を探る。近年、精度がやや頭打ちになっている国際地球基準座標系 ITRF (International Terrestrial Reference Frame) に及ぼすインパクトも大きい。

汎地球規模でミリメートル精度の地球基準座標系を構築することは、将来の地球環境計測に欠かせない基礎技術であり、国際的な必要度・緊急度も大きい。一つの実例を挙げるならば、地球温暖化の一つの指標とされる海面上昇の計測である。人工衛星からのアルチメータ観測により、ここ10年程度の海水準上昇率は平均して1~2ミリメートル/年程度と導き出されている。ところが、アルチメータ衛星には寿命があり、あるいは故障の可能性もあるため、衛星の入れ替えが避けられない。このとき発生する観測データの不連続が大きな懸念材料になっている。10年以上の長期にわたって信頼度の高い観測を続けるには、それぞれのアルチメータ衛星を地上から高精度に測距し、同時に数多くの地上局の位置を精度の高い地球基準座標系に結び付けておく必要がある。ここで、本研究で得られる知見が必ず必要になってくる。

宇宙測地技術の基盤・要素技術を提供してきたのは、これまで主にアメリカやヨーロッパ諸国であった。本研究で提案される軌道の組み合わせで実際のミッションが実現すれば、日本発の大きなブレークスルーとなりうる。寿命の非常に長いミッションであるので、LAGEOS衛星に代わり、世界のレーザ測距の標準衛星として将来数十年にわたり用いられることが期待される。

## 3. 研究の方法

地球の形状的スケールは、すべての局の鉛直成分を通して、地球基準座標系のスケールとして表現される。そして、地球の力学的スケールは、重力定数と地球質量の積(GM)として表現され、地球重力場の0次の項と称されることもある。

この2つのスケールパラメータに対して、衛星レーザ測距技術が、本来の能力を発揮できるようにするための衛星の組み合わせを考えることを研究目標に設定した。

問題の解決には、GM・局位置鉛直成分・レンジバイアスがうまく分離して推定できることが不可欠である。このようなミッションを実現へと進めるにあたり、本研究では理論的な側面から、

(1) 衛星軌道の組み合わせは、いかなるものが望ましいか？

(2) 衛星の形状や搭載する反射鏡は、いかなるものが望ましいか？

の2つの問いに対して、主に計算機シミュレーションを通して、一定の答えを提供することを目指した。

(1) については、シミュレーションデータを作った上で、解析条件を変えながら軌道決定試験を行い、GMや局位置鉛直成分などの推定状況を精査した。軌道要素を変化させ、多数のデータセットを作り、軌道決定実験を数多く行うことで、最適かつ現実的な組み合わせ解を導いた。数値解析のために、一橋大学が情報通信研究機構と共同で開発している軌道決定のためのソフトウェア“c5++”の開発を推進し、実在しない衛星への模擬測距データの解析も可能にした。当初の予定には含めていなかった新たな副産物として、2次以降4次までの地球重力場係数の時間変化を推定することも試みることにした。

(2) については、既存の衛星の光学応答から調査を始め、実際の観測データとの照合を行うこととした。衛星の大きさが小さく、これまで形状による誤差が無視されてきた STARLETTE 衛星・LARES 衛星について、特に注目して解析を行った。また、発展形として、月面搭載反射鏡のシミュレーションも行った。ここで用いる光学応答計算用ソフトウェアおよび支援ツールは、すべて新規に研究代表者により開発したものである。なお、当課題研究期間中に2つの新しいレーザ測距用測地衛星、つまり2009年のBLITS衛星および2012年のLARES衛星、が打ち上げられ観測データが産出され始めたため、この問題への取り組み方については当初予定よりもやや実データを重視する方向に移行させた。

## 4. 研究成果

(1) ① 新たな衛星を打ち上げたときに、どの程度の量の測距データがどのようなパターンで得られるか、について見積もりを行った。レーザ測距技術は光技術であるゆえに観測の可否が天候などに大きく左右される。そこで、世界の主要20局からの既存の衛星に対する測距観測の密度を、昼夜の別・衛星の可視状況・仰角の別に算出した。これをもとに、一定の軌道パラメータの範囲で、可観測性を見積もり、つまり測距シミュレーションデータの作成が可能になった。

② 将来の衛星構想の実現性調査のための軌道決定ソフトウェアの開発を推進した。C++ 言語で開発することとし、レーザ測距データのほか、異種のデータが混合する場合の解析も可能な設計にしている。本ソフトウェア“c5++”は、すでに VLBI・衛星レーザ測距・GNSS データの解析が可能となっており、特筆すべきは、国土地理院における地球回転パラメータ UT1 の速報解導出に定常的に利用されている。あわせて、解析の高精度化のためには、最新の物理モデルを取り込むことが不可欠であり、平成 22 年年末に公開された IERS Conventions 2010 に対応すべく、衛星加速度モデル・地球回転モデル・局位置変動モデル・大気遅延モデルなどについて開発を進めた。その妥当性と精度の向上は、他機関と比較したり、衛星レーザ測距実データに適用したりして、確認することができた。さらには、最新の複数の重力場モデルも同様な方法で評価することができた。また、衛星軌道決定精度向上に有用な衛星の姿勢パラメータの導出を、既存の AJISAI 衛星を用いて実施した。

③ 地球重力場の0次項(GM), 地球基準座標系のスケール, そしてレンジバイアス, この3者が絡み合う高い相関が、現状の衛星組み合わせにおいて、決定精度の足かせになっていることを明らかにした。将来の衛星軌道配置を考える上では、まず円軌道を仮定するならば、レンジバイアスは共通化できることを前提としたうえで、できるだけ高度の異なるものを複数組み合わせることにより、3者の相関を下げる効果があることを数値シミュレーションによって示した。図1は、一方の衛星が高度 3000 km にあるとき、もう一方の衛星の軌道高度によって、上記3者の相関がどのように変化するかを示したものである。3000 km から離れるほど、相関係数が1もしくは-1から遠ざかる、すなわち3つの変数がうまく分離して解けることがわかる。さらに、軌道傾斜角の差はほとんど改善に寄与しないことも明らかにした。1つめの衛星の高度は 1000 km から 6000 km まで変化させて、同様な解析を行い、やはり同様な結果を得た。加えて、円軌道を採用するという制約を取り外して考えるならば、2つの組み合わせでなく、1つの衛星を楕円軌道に配置することでも、程度はやや小さいものの、相関を下げる効果があることが示された。

④ 高機能化の面では、地球の重力定数 GM と同時に、地球重力場の2次以下の係数 (Cnm, Snm) の時間変化も推定可能なようにソフトウェア“c5++”に機能を追加した。既存の5衛星 LAGEOS-1・LAGEOS-2・AJISAI・STARLETTE・STELLA に、新しい LARES 衛星も追加し、計 20年間の測距データの解析を行った。4x4 次までの地球重力場を導出することに成功した。GRACE 衛星による解との一致度も高く、C20 項に関してはそれを凌いでいると結論付けた。図

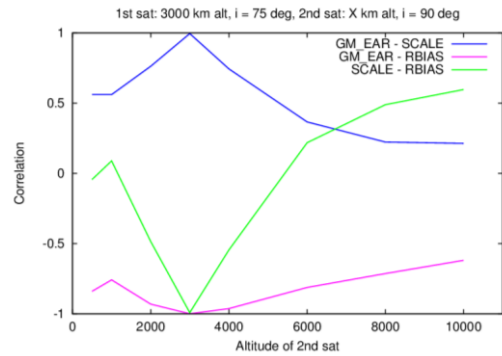


図1: 姉妹衛星の軌道高度による GM・地球基準座標系スケール・レンジバイアス間の相関係数。1つめの衛星の高度は 3000 km とし、もう1つの衛星の高度を変化させて計算した。

2は、2つの LAGEOS 衛星へのレーザ測距によるもの、上記3~6衛星へのレーザ測距を統合解析したもの、そしてテキサス大学による GRACE 衛星解析解を図示したものである。平成24年度中に発表したこの成果が注目を集め、地球上特にグリーンランドの氷の減少を扱っている北海道大学との共同研究に発展した。2000年台にグリーンランドの氷の減少があることはすでに知られているが、1990年台には目立った氷の増減がなかったことを示すことができた。

(2) ① 光学的な設計の検討のため、まずイギリスの Herstmonceux 宇宙測地局を訪ね、試験データ取得のため、測距実験を実施した。Herstmonceux 局では、オーストリアの Graz 局に次いで、繰り返し率 2 kHz、パルス幅 10 ps という世界最先端の新レーザシステムを導入している。測距観測データの残差プロファイルにより、衛星に搭載されている逆反射鏡の詳細な光学応答を取り出すことができる。

② 並行して、光学応答を計算機上でシミュレートするためのソフトウェア開発を行った。単一の

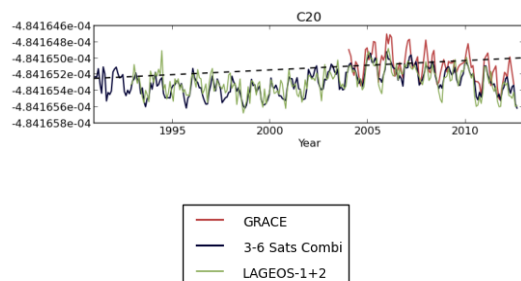


図2: 衛星レーザ測距と GRACE 衛星によって決定された地球重力場 C20 項の時間変化。

逆反射鏡の作る遠方界回折パターンを計算することに成功し、その自前の結果がアメリカやイタリアの研究者のものと高い精度で一致することを確認した。逆反射鏡の裏面直交度が不均一な場合の解析を可能とした。衛星・地上局の光行差を考慮するうえで、3つの裏面直交度をあえてそろえないように設定することの有効性を探るためのツールができたことになる。実験室で実測する遠方界回折パターンと、計算機上でシミュレートする遠方界回折パターンの比較を1研究機関内で行うことは世界でも稀な例である。この研究は、日本の将来の月探査機 SELENE-2で検討されているレーザ測距用再帰反射鏡のデザインへと応用されている。

③ 平成24年2月に打ち上げられた LARES 衛星の光学応答に関する研究も実施した。打ち上げ前に一定の仮定をおいて計算を行った。われわれが提供した値とドイツ GFZ による値とが参照される形で、現在 ILRS (International Laser Ranging Service) から当衛星の重心補正值として、代表値 133 mm が示されている。

④ 実データを使った、より精密な解析も行った。AJISAI, LAGEOS や ETALON 衛星については、反射鏡の奥行き方向の並びによる反射波形の広がりや顕著であり、それぞれ 5 cm および 1 cm ほどの重心補正值システム依存性があることが知られている。近年の測距精度の高まりと繰り返し率の高まりのため、小型の衛星についてもその効果が無視しえなくなっている。実測値を使って光学応答関数を求めるため、上項目①の要領で取得したイギリス Herstmonceux 局のデータを用いた。その結果、LARES 衛星は 128~135 mm, STARLETTE 衛星は 75~82 mm の幅で、重心補正值が観測システムによって変わりうることを明らかにした。特に STARLETTE 衛星の値は、現在標準値として採用されている 75 mm が一般に小さすぎることを示しており、地球基準座標系のスケールにはおよそ 0.5 ppb, 地球重力場0次項 (GM) の決定にはおよそ 2 ppb に及ぶ影響を与えることが解明された。

#### 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 10 件)

① D. Kucharski, S. Schillak, H. C. Lim, T. Otsubo, Spectral analysis of Borowiec SLR data for spin determination of geodetic satellite EGP, Artificial Satellites, 査読有, 48, 1, 15-23, doi:10.2478/arsa-2013-0002, 2013.

② D. Kucharski, T. Otsubo, G. Kirchner, H.-C. Lim, Spectral response of Experimental Geodetic Satellite determined from high repetition rate SLR data, Advances in Space Research, 査読有, 51, 1, 162-167, doi:10.1016/j.asr.2012.09.018,

2013.

③ D. Kucharski, T. Otsubo, G. Kirchner, G. Bianchi, Spin rate and spin axis orientation of LARES spectrally determined from Satellite Laser Ranging data, Advances in Space Research, 査読有, 50, 1473-1477, doi:10.1016/j.asr.2012.07.018, 2012.

④ 橋本 英一, 中村 信一, 白井 宏樹, 仙石 新, 藤田 雅之, 佐藤 まりこ, 國森 裕生, 大坪 俊通, 測地衛星「あじさい」の開発と観測による測地学への貢献, 測地学会誌, 査読有, 58, 1, 9-25, 2012.

⑤ T. Otsubo, H. Kunimori, H. Noda, H. Hanada, H. Araki, M. Katayama, Asymmetric dihedral angle offsets for large-size lunar laser ranging retroreflectors, Earth Planets and Space, E-Letter, 査読有, 63, 8, e13-e16, doi:10.5047/eps.2011.11.00, 2011.

⑥ T. Hobiger, T. Otsubo, M. Sekido, T. Gotoh, T. Kubooka, H. Takiguchi, Fully automated VLBI analysis with c5++ for ultra-rapid determination of UT1, Earth Planets Space, 62, 査読有, 933-937, 2011.

⑦ D. Kucharski, T. Otsubo, G. Kirchner, F. Koidl, Spin axis orientation of Ajisai determined from Graz 2 kHz SLR data, Advances in Space Research, 査読有, 46, 3, 251-256, doi:10.1016/j.asr.2010.03.029, 2010.

⑧ T. Otsubo, H. Kunimori, H. Noda, H. Hanada, Simulation of optical response of retroreflectors for future lunar laser ranging, Advances in Space Research, 査読有, 45, 6, 733-740, doi:10.1016/j.asr.2009.12.003, 2010.

⑨ D. Kucharski, G. Kirchner, T. Otsubo, F. Koidl, The impact of solar irradiance on AJISAI's spin period measured by the Graz 2-kHz SLR system, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 査読有, 48, 3, 1629-1633, doi: 10.1109/TGRS.2009.2031229, 2010.

⑩ D. Kucharski, G. Kirchner, T. Otsubo, F. Koidl, 22 years of AJISAI spin period determination from standard SLR and kHz SLR data, Advances in Space Research, 査読有, 44, 5, 621-626, doi:10.1016/j.asr.2009.05.007, 2009.

[学会発表](計 19 件)

① 大坪 俊通, 松尾 功二, ホビガー トーマス, 関戸 衛, 久保岡 俊宏, 衛星レーザ測距軌道決定による地球重力場変動の検出, 第 56 回宇宙科学技術連合講演会, 別府国際コンベンションセンター, 2012.11.20.

② T. Otsubo, R. A. Sherwood, and G. M. Appleby, Introductory talk: Target signatures of existing sub-cm targets and prospects for future SLR constellations, International Technical Laser Workshop 2012, INFN-LNF Frascati (イ

タリア), 2012.11.6.

③ 大坪 俊通, 中村 信一, 佐藤 まりこ, 國森 裕生, “SLR と測地学の関係: 世界と日本,” 第 118 回日本測地学会講演会, 仙台市福祉プラザ, 招待講演, 2012.11.1.

④ 大坪 俊通, ホビガー トーマス, 関戸 衛, 松尾 功二, “SLR 衛星の組み合わせと地球スケールパラメータ・地球重力場低次項の関係,” 第 118 回日本測地学会講演会, 仙台市福祉プラザ, 2012.10.31.

⑤ 大坪 俊通, 関戸 衛, ホビガー トーマス, 後藤 忠広, 久保岡 俊宏, 衛星レーザ測距による地球重力場低次項の決定, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 幕張メッセ, 2012.5.25.

⑥ T. Otsubo, H. Kunimori, H. Noda, H. Hanada, H. Araki, M. Katayama, Optical design for next-generation single-reflector LLR targets, 2011 AGU Fall Meeting, San Francisco Moscone Center (アメリカ), 2011.12.9.

⑦ 大坪 俊通, 國森 裕生, 野田 寛大, 花田 英夫, 荒木 博志, 片山 真人, 光行差の偏りを考慮した次世代月レーザ測距用逆反射鏡の光学設計, 第 55 回宇宙科学技術連合講演会, 愛媛県民文化会館, 2011.12.1.

⑧ 大坪 俊通, ホビガー トーマス, 後藤 忠広, 関戸 衛, 久保岡 俊宏, 瀧口 博士, 竹内 央, 宇宙測地技術解析ソフトウェア c5++ の開発 その 3, 第 116 回日本測地学会講演会, 高山市文化会館, 2011.10.26.

⑨ 大坪 俊通, ホビガー トーマス, 後藤 忠広, 久保岡 俊宏, 関戸 衛, 瀧口 博士, 宇宙測地技術解析ソフトウェア c5++ の開発 その 2, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 幕張メッセ, 2011.5.23.

⑩ 大坪 俊通, ホビガー トーマス, 後藤 忠広, 久保岡 俊宏, 関戸 衛, 瀧口 博士, 竹内 央, 宇宙測地技術統合解析をめざすソフトウェア c5++ の開発, 第 10 回 IVS 技術開発センターシンポジウム, NICT 鹿島宇宙センター, 2011.2.23.

⑪ 大坪 俊通, ホビガー トーマス, 後藤 忠広, 久保岡 俊宏, 関戸 衛, 瀧口 博士, 宇宙測地技術解析ソフトウェア c5++ の開発, 第 54 回宇宙科学技術連合講演会, 静岡グランシップ, 2010.11.17.

⑫ 大坪 俊通, ホビガー トーマス, 後藤 忠広, 久保岡 俊宏, 関戸 衛, 瀧口 博士, 竹内 央, 宇宙測地技術解析ソフトウェア c5++ の開発, 第 114 回日本測地学会講演会, 京都大学宇治キャンパス, 2010.11.8.

⑬ 大坪 俊通, 國森 裕生, 野田 寛大, 花田 英夫, 荒木 博志, 月光検討会, 次期月探査計画 SELENE-2 に向けたレトロリフレクタ光学応答シミュレーション その 2: 二面角の非対称化, 第 114 回日本測地学会講演会, 京都大学宇治キャンパス, 2010.11.8.

⑭ 大坪 俊通, ミリメートル軌道決定に向けて,

京都大学 地球惑星科学専攻 地球科学観測部特別講演会, 京都大学吉田キャンパス, 2010.8.27.

⑮ 大坪 俊通, 地球のスケールパラメータ高精度化のための SLR 姉妹衛星案, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 幕張メッセ, 2010.5.28.

⑯ 大坪 俊通, 國森 裕生, 野田 寛大, 花田 英夫, SELENE-2 LLR 光学応答シミュレーション, RISE 研究会, 国立天文台三鷹キャンパス, 2010.2.20.

⑰ 大坪 俊通, 國森 裕生, 野田 寛大, 花田 英夫, 次期月探査計画 SELENE2 に向けたレトロリフレクタ光学応答シミュレーション, 第 112 回日本測地学会講演会, 産業技術総合研究所共用講堂, 2009.11.6.

⑱ T. Otsubo, P. Gibbs, G. M. Appleby, Target Signature Effects on Laser Ranging Accuracy for the GIOVE Satellites, International Workshop on SLR Tracking of GNSS Constellations, Metsovon Conference Center (ギリシャ), 2009.9.15.

⑲ 大坪 俊通, P. Gibbs, G. M. Appleby, キロヘルツ型衛星レーザ測距データによる衛星光学応答解析, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 幕張メッセ, 2009.5.16.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大坪 俊通 (OTSUBO TOSHIMICHI)

一橋大学・大学院社会学研究科・教授

研究者番号: 70358943