

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月4日現在

機関番号：62616

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2018

課題番号：15K13565

研究課題名（和文）時間変動重力場観測による金星・火星大気のリモニタリング

研究課題名（英文）Monitoring of Venus and Mars atmosphere by time varying gravity field observation

研究代表者

山本 圭香（Yamamoto, Keiko）

国立天文台・RISE月惑星探査検討室・特任研究員

研究者番号：40452263

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、惑星大気のリ循環を、重力測定衛星による時間変動重力場観測によってとらえることを目的とした。地球周回衛星軌道および地球重力場の精密推定のために作成されたソフトウェアを改良し、新たに惑星大気のリ検出のための軌道シミュレーションに対応できるようにした。火星大気に焦点を絞リ、約9年分の大気循環モデルを解析し、大気表面気圧、ドライアイス、水氷、ダストの年周、半年周、季節変動成分を抽出し、重力測定衛星からの観測量に変換した。重力場の測定方式、衛星の軌道、期間等の各種パラメータを変えた観測のシミュレーションを実施し、より効率的な検出にはどのようなチューニングが必要であるかについて調査した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で実施されたシミュレーションの結果に基づき、実際に惑星大気のリ観測が実現された場合の、その学術的な意義は次の通りである。火星をはじめとする大気を持った惑星において、大気のリ循環を観測し、その運動を正しく理解することは、惑星表層の熱輸送メカニズム、気象・気候メカニズムを解明する上で重要であり、本研究で検出の対象とした質量の時間変化としての大気変動は、このメカニズムに対し、定量面での規定を与えるという役割を持つ。これは従来の気象観測では直接に得ることのできない新しい観測量であり、既存の観測、大気モデルとは独立であることから、既存の惑星大気循環モデルの検証にも役立つと予想される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aimed to monitor circulation of planetary atmosphere as time-varying gravity field by satellite gravimetry. We improved the software, which was originally developed for precise estimation of the Earth-rotating satellite orbit and the earth's gravity field, so that it can be used for the orbit simulation to monitor temporal gravity field change accompanying planetary atmosphere variation. We focused on Mars atmosphere, analyzed the atmospheric circulation model for about 9 years, and extracted atmospheric surface pressure, dry ice, water ice, dust, annual, semi-annual, seasonal fluctuation components. Then these components are converted to the observed value from gravity measurement satellites. Using these data sets, we conducted simulation of the gravity field observation. Some parameters, such as measurement method, satellite's orbit and observation period, were changed and optimized in the simulation for more efficient observation.

研究分野：測地学

キーワード：衛星重力観測 時間変動重力場 火星大気変動モニタリング

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 地球および多くの惑星において、大気はその惑星の表層環境を規定する上で重要な役割を果たしている。金星、地球、火星は、大気を持った岩石質の惑星であり、総質量に対して、大気の割合が微量であるという地球と共通した特徴を持つが、その表層環境は大きく異なっている。表層環境の違いは、主として大気の厚さ、組成だけでなく、その循環の違いからも生じている。大気の循環を観測し、その運動を正しく理解することは、惑星表層の熱輸送メカニズム、気象・気候メカニズムを解明する上で重要である。

(2) 惑星大気の観測は従来の望遠鏡による観測のほか、近年では、惑星探査機による観測（多層の水平方向の大気のカメラによる撮像や電波的手法による大気密度構造の取得）もおこなわれている。一方で、大気の循環理解のためには、全球で大気の総量が保存されていると考え、その空間的、時間的な再分配の過程を知るというアプローチも有用であると考えられるが、そのような観測はこれまでにおこなわれていない。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、惑星における大気循環を、表層における質量の移動として考え、重力測定衛星による時間変動重力場観測によってとらえることを考え、その研究の初期段階として、地球の場合とは異なる特徴を持つ火星の大気循環に特に焦点を当て、それを重力観測によって観測するための衛星重力ミッションの設計について検討した。

(2) 大気変動を質量の移動として考えることにより、グローバルな大気循環を定量的に扱うことが可能となる。これは従来の気象観測では直接に得ることのできない新しい観測量であり、カメラや電波的手法による観測データと併せて使用することで、大気モデルの改良に役立つと期待できる。

3. 研究の方法

(1) 軌道ソフトウェアの開発

これまでの研究において作成、発展させてきた地球周回衛星軌道および地球重力場の精密推定のためのプログラム（山本ほか、2014）の一部を改良し、本研究でおこなう数値シミュレーションに利用できるよう対応させた。可変な重力場測定感度、観測期間、軌道、衛星数等の条件に対して重力場観測・復元のシミュレーションができるよう仕様を改良した。

(2) シミュレーション用データの作成

金星、火星双方の大気、モデルの利用可能性について調査、検討をおこなった結果、より現実に近いグローバル大気大循環モデルが利用可能であること、重力によるシグナル検出の際に重要となる天体の固体部分の性質が比較的よく分かっていることから、火星の大気を対象としたシミュレーションに焦点を絞ることにした。

火星大気の循環モデルとしては、Mars Climate Database version 5.3 (MCD5.3) (Millour et al., 2017) を用いた。MCD5.3 では異なるダスト条件、太陽条件下でのいくつかのシナリオが提供されているが、本研究ではそのうちの日変動する極端紫外線を考慮したシナリオから計算されたモデルデータを使用した。約9年分のモデルデータを解析し、そこから特に注目すべき成分であり、シグナルも比較的大きな、表面気圧、ドライアイス、水氷、ダストの年周、半年周、季節変動成分を抽出した。

これらを、現在得られている火星の固体部分の知見に基づいた荷重ラプ数 (Metivier et al., 2008) を用いて、Genova et al. (2016) の手法に基づき、重力測定衛星からの観測量に対応する火星表面の質量の時間変化データに変換した。

(3) 重力場観測のシミュレーション

重力測定衛星としては、マイクロ波を用いた Low-Low Satellite-to-Satellite Tracking (L-L SST) 型、レーザーを用いた L-L SST 型、Satellite Gravity Gradiometry (SGG) 型の3つの重力測定方式を仮定した。各方式の測定誤差については、National Research Council (1997) に基づく値を与えた。これらの仮定の下、衛星重力観測から(2)で抽出した火星表面の質量変動の各成分を検出可能であるかのシミュレーションをおこなった。

4. 研究成果

(1) 図1に、火星大気の年周、半年周、季節変動成分の振幅の大きさを火星表面における面密度（表面気圧）で表した図を示す。年周変動が卓越しており、変動の大きさの空間分布は主に地形に依存している。

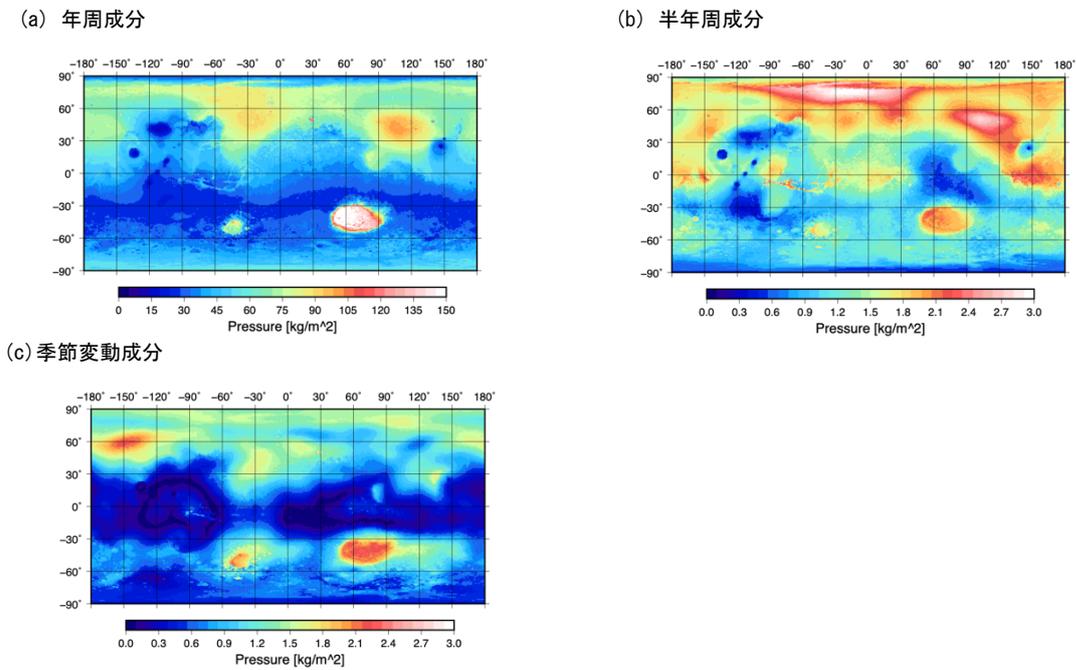


図1 火星大気の時空間変動成分の振幅

図2は、図1の火星大気質量変動の空間分布を球面調和関数展開したものから求められたジオイドおよび重力異常の degree amplitude を、3つの重力測定方式における誤差と比較した結果である。

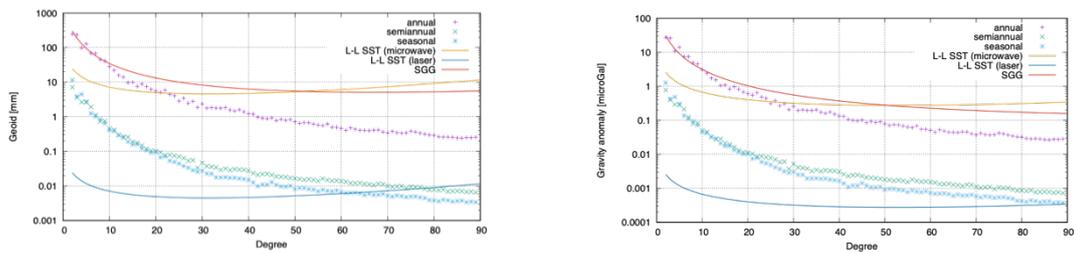


図2 大気質量変動と重力測定観測誤差の degree amplitude。ジオイド (右図)、重力異常 (左図)。

重力測定衛星は30日周期で回帰する高度100 kmの極軌道を仮定し、L-L SSTについては、2衛星間角距離2度、測定誤差 $1\mu\text{m/s}$ (マイクロ波 L-L SST)、 $0.001\mu\text{m/s}$ (レーザー L-L SST) を、SGGについては測定誤差 0.001Etövös を仮定している。図2から、これらのパラメータ条件においては、L-L SST方式(レーザー)であれば、年周、半年周、季節変動成分とも短波長まで検出可能であること、年周変動に限れば、それよりも感度の低いマイクロ波による L-L SSTでも20次程度まで検出可能であることがわかる。また、SGG方式では観測誤差がシグナルの大きさを上回り観測が困難であり、検出精度を上げる、あるいは衛星高度を下げるなどの対策が必要であることがわかる。

(2) 同様の手法を用いて、ドライアイス、水氷、ダストについても、その重力観測による検出の可能性を調べた。水氷、ダストについては、質量変動の振幅が小さく、レーザー方式の L-L SST を使用しても長波長域のみしか検出できないと考えられる。一方、ドライアイスについては、変動成分は十分に大きく、検出は容易であると思われるが、変動が極域に限られているため、衛星の軌道が極軌道であることは必須である。

ドライアイスの変動と、火星大気(成分の95.3%は二酸化炭素)の双方を分離検出することができれば、火星の二酸化炭素サイクルのモニタリングにつながり、これは現行の二酸化炭素サイクルの知識の改善に寄与すると思われる。ドライアイスと大気は異なる時間、空間変動特性を示すこと、シグナルの大きさが大きく異なることを考慮すると、分離には、1)得られた重力値を周波数解析する、2)検出感度や軌道傾斜角の異なる複数の重力測定衛星を組み合わせるなどの方法が有効であると考えられる。

<引用文献>

- ① 山本圭香, オリバー・パウア, 大坪俊通: 軌道・重力場推定のためのソフトウェアの開発, 日本測地学会第122回講演会要旨集, 2014, P-8.

- ② Millour, E., et al.: 19th EGU General Assembly, EGU2017, proceedings from the conference held 23-28 April, 2017 in Vienna, Austria., 2017, p.12247.
- ③ Metivier, L., Karatekin, Ö., Dehant, V.: The effect of the inertial structure of Mars on its seasonal loading deformations, Icarus 194, 2008, 476-486.
- ④ Genova, A., Goossens, S., Lemoine, F.G., Mazarico, E., Neumann, G.A., Smith, D.E., Zuber, M.T.: Seasonal and static gravity field of Mars from MGS, Mars Odyssey and MRO radio science, Icarus 272, 2016, 228-245.
- ⑤ National Research Council, Satellite gravity and the geosphere, National Academy Press, Washington, D.C., 112pp., 1997.

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 1 件)

- ① Yamamoto, K.: Simulation Study to Monitor Planetary Atmospheric Circulation by Satellite Gravimetry. G51D-0766, 2018 AGU Fall Meeting, December 10-14 2018, Washington, D.C.

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。