

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：12608

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25887024

研究課題名(和文)系外固体惑星の多様性と測光・分光特性

研究課題名(英文)Photometric and Spectroscopic Properties of Extrasolar Solid Planets

研究代表者

藤井 友香(FUJII, YUKA)

東京工業大学・地球生命研究所・特任助教

研究者番号：20713944

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：直接撮像によって地球型惑星の表層環境を同定することは、将来の天文観測の究極的な目標である。将来観測による多様な系外惑星の特徴付けの可能性を探るため、実際の姿を知る唯一のサンプルとして、太陽系内固体惑星・衛星の点源としての測光・分光特性を最新のデータにもとづいて再構築し、スペクトルや時間変動のパターンと、表面の地質学的性質との関係をまとめた。

また、太陽系内には多くの惑星が見られるが、直接撮像において惑星と衛星の光は分離できないため、惑星の大気組成の解釈を誤りうる。これは、大気の不均衡を議論する際に問題となることを、惑星+衛星の系のスペクトルをシミュレーションすることによって指摘した。

研究成果の概要(英文)：Future direct imaging observations of Earth-size exoplanets will play an essential role in exploring their detailed properties including surface geology and habitability. In order to provide a useful bridge between the rich insights into the Solar system planets and future exoplanet research, we quantitatively surveyed point-source photometry in UV/visible/near IR of major Solar System solid bodies with minor atmospheres based on recent mapping products as well as observed light curves, and discussed the implications for surface characteristics at global scale. We show a 5-50% peak-to-trough variation amplitude in one spin rotation associated with various geological processes including heterogeneous surface compositions due to igneous activities, interaction with surrounding energetic particles, and distribution of grained materials. Some indications of these processes are provided by the amplitude and wavelength dependence of variation in combinations of the time-averaged spectra.

研究分野：系外惑星

キーワード：系外惑星 天文学

1. 研究開始当初の背景

視線速度観測やトランジット観測により、地球程度に小さく岩石が主成分と考えられる惑星が宇宙に豊富に存在することが示唆されている。また、惑星表面に液体の水が存在しうる軌道の領域（ハビタブルゾーン）内の惑星も検出されており、地球外生命への期待が高まっている。今後数年で、HARPSやMEarth、IR dopplerなどの惑星探査プロジェクトによって、さらに多くの地球サイズの系外惑星が確認されていくだろう。ただし、これらの観測で分かるのは主に惑星のサイズと軌道要素のみであり、個々の惑星の地質、大気組成や厚み、気候、さらには生命活動の有無といったより高次の情報を得ることが次の課題となる。

そのための鍵は惑星光の直接検出（直接撮像）であり、目下、今後10年程度のタイムスケールでの実現を目指す様々な直接撮像計画が提案されている。惑星光の中でも特に反射光の成分は、表層にある物質の反射スペクトルを反映するので、表面組成や大気の詳細のプローブとなる。それらの表層環境の情報は、その惑星の形成・進化過程を知るための手がかりとして重要なものもちろん、我々のような生命が存在可能かを吟味するためにも必須である。また、多くの系外惑星についてそれらを調べることができれば、個数やパラメータ領域の広さでは系内惑星を圧倒しうる系外惑星のサンプルによって、惑星形成・進化・気候の体系的な理解が進むことが期待できる。

しかしながら、惑星を特徴づける物理量の多さ、系の複雑さに対して、直接撮像観測で得られるのは点源としてのスペクトルとその時間変化のみであり、何をどのように観測すれば惑星表層がどこまで再現できるのかは決して自明でない。

2. 研究の目的

将来の直接観測の試金石として、これまでに、地球の点源としての測光・分光特性がシミュレーションや地球照の観測によって調べられてきた。しかし、系外地球型惑星に地球と全く同一の環境を期待するのは非現実的で、実際には、質量・組成・大気量などさまざまな物理量について幅広い多様性が想定される。そのため、より幅広い惑星の可能性をふまえた、より一般的な惑星光の解釈の枠組みが必要である。

そこで本研究では、地球だけでなく火星や金星、あるいは衛星などのさまざまな太陽系内固体惑星のデータやモデルを最大限活用して固体惑星のさまざまなバリエーション

を設定し、測光・分光特性を系統的に調べる。その上で、点源としての惑星光から系外固体惑星の表層環境や各種物理パラメータを推定するための一般的な枠組みを開拓する。実際、太陽系内天体のデータは(比較的)豊富にあり、その形成・進化の過程については詳細な議論がなされている。これらの知見を、実地調査ができない系外惑星の解釈に最大限利用できるよう、橋渡しをするというのがこの研究の大きな目的である。

3. 研究の方法

太陽系内には、火星・水星・金星・月などの岩石惑星・衛星、木星や土星の周りの氷衛星など、地球サイズからそれ以下の天体だけを見ても実に多彩な天体があり、地上観測・宇宙探査機からの観測・実地探査によって詳細なデータが取得されている。ただし、それらの観測は幾何や時間が限られているため、将来の系外惑星を模擬するものとして、実際の観測データを取り込んだシミュレーションによって様々な角度で観た太陽系内惑星の点源としての測光・分光特性を調べる。また表面組成などその惑星の地質学的な特徴のうちのどれが点源としての惑星光からも推測かのうかを明らかにする。

また、地球のように液体の水を表面に保持する惑星（これをハビタブル惑星とする）のバリエーションを考察する。ハビタブル惑星の検出・液体の水の定量的な評価は、(a)系外地球型惑星上の水の存在量や頻度から地球の水の起源について示唆を与えられる可能性がある、(b)系外生命探査の足がかりとなる、という二点から特に興味深い。ハビタブル惑星の反射光には、雲分布・雪分布・表層の水分布がきいてくるが、これらのパラメータのパターンは、自転速度や赤道傾斜角を変えたいくつかの場合において大気大循環モデル(GCM)で調べられているので、これらの観測的な兆候を調べる。

4. 研究成果

(1) 太陽系内固体惑星・衛星の多様性にもとづいた、固体惑星の表層の状態と惑星光の対応付け

まず、実際の姿を知ることができる唯一のサンプルとして太陽系内固体惑星・衛星の地質を見直し、惑星表面の色や反射の方向依存性にあらわれる特徴とその成因を概観した。その上で、宇宙探査機によって得られた最新のデータ(表面の各部分の反射特性のデータ)を用いて、さまざまな固体天体の点源としての反射光の波長依存性・時間依存性をシミュレーションした。そのシミュレーションの正当性は、遠方からの惑星光の観測によって確認

した。シミュレーションの結果、大気の影響が少ない固体惑星（火星・水星）や大きな固体衛星（月・イオ・エウロパ・ガニメデ・カリスト）については、天体が1自転する間に紫外～近赤外の領域における反射光が5～50%の変動が見られることが示された。この変動は、大陸と海の共存、火成活動(火山)による表面組成の非一様性、力学的風化による粒子サイズの非一様性、外部のプラズマとの非対称的な相互作用、など、さまざまな地質学的特徴に起因しており、波長依存性を調べることである程度成因への制約が得られる。また、変動の振幅によっても、表面が頻繁に更新されている活動度の高い天体か、早い段階で地質学的活動が止まり宇宙からの物質の衝突による mixing などで表面の均質化が進んだ天体か、などについて示唆が得られる。このように、惑星表面の反射特性は、単に今の組成や状態を示すだけでなくそれらの天体の形成・進化の過程にも紐付いていることをふまえて、観測可能な測光・分光学的特徴とそこから推測される惑星像をまとめた。

(2) 多様な惑星・衛星の存在が バイオマーカーとしての “非平衡な大気” に及ぼす影響

太陽系内にはさまざまな固体惑星が見られる。同様のものが系外にありそれらを直接撮像で調べることを考えると、そのような観測において惑星は衛星と分離して観測できない。そのため、衛星の存在が惑星光スペクトルの解釈を誤らせる可能性がある。特に、土星の衛星タイタンのような大気を纏う衛星が存在する場合、衛星の大気分子に起因する吸収線が惑星スペクトルに混入してしまう。この場合の特殊な例としては、バイオマーカーの一つと長年考えられてきた非平衡の大気の兆候と思われるスペクトルが、実際には非平衡の大気でなく、共に非平衡でない(生命のいない)惑星の衛星の光がまざったものであるということも起こりうる。この可能性について、惑星のみのスペクトルと惑星+衛星のスペクトルをシミュレーションし、それらの間の縮退と区別法を議論した。

(3) ハビタブル惑星の多様性

最終年度後半では、固体惑星の地質にも惑星のスペクトルにも重大な影響を与える大気と水の循環が惑星の大きさ・大気の厚み・自転速度・主星からの距離などの物理量によってどう変化するかを調べるため、米国のゴダード宇宙科学研究所を訪問し、彼らが開発した全球気候モデルで数値実験を行った。また、そのような全球気候モデルで得られたデータを取り込んで惑星のトランジット・スペクトルをシミュレーションするコードを開発した。

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 2 件)

[1] Y. Fujii, J. Kimura, J. Dohm, M. Ohtake, *Astrobiology*, *Astrobiology*, Volume 14, pp. 753-768 (2014) "Geology and Photometric Variation of Solar System Bodies with Minor Atmospheres: Implications for Solid Exoplanets" (査読有り)
DOI: 10.1089/ast.2014.1165

[2] H. Rein, Y. Fujii, D. S. Spiegel, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, article id. 24778224 (2014) "Some inconvenient truths about biosignatures involving two chemical species on Earth-like exoplanets" (査読有り)
DOI: 10.1073/pnas.1401816111

〔学会発表〕(計 6 件)

[1] Y. Fujii et al., "Color Variation of Planets"
3rd ELSI symposium, Jan 13-15, 2015, 東京工業大学大岡山キャンパス (東京都目黒区)

[2] Y. Fujii et al., "Geology and Photometric Properties of Solar System Bodies: Implication for Characterization of Small Exoplanets"
Origins 2014, Jul 6-11, 2014, 奈良県新公会堂 (奈良県奈良市)

[3] Y. Fujii et al., "Solar System Bodies as Single Dots"
2nd ELSI International Symposium, Mar 24-26, 2014, 一ツ橋ホール (東京都千代田区)

[4] Y. Fujii et al., "Exoplanets"
Gordon Research Conference, Jan 12-17, 2014, Galveston, TX, USA

[5] Y. Fujii, et al. "Photometric Variability of Solar System Solid Bodies: Implications for Rocky/Icy Exoplanets"
Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity, Dec 8-12, 2013, Kona, HI, USA

[6] Y. Fujii et al. "Toward Characterization of Exoplanetary Surface Environment"
International Astrobiology Workshop, Nov 28-30, 2013, 宇宙航空研究開発機構相模原キャンパス (神奈川県相模原市)

6 . 研究組織

(1)研究代表者

藤井 友香 (FUJII, Yuka)

東京工業大学・地球生命研究所・特任助教

研究者番号：20713944