

平成 30 年 5 月 15 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2017

課題番号：24340035

研究課題名(和文)トランジット惑星を用いた精密惑星進化論の構築

研究課題名(英文)Towards precision planet evolution model from transiting planets

研究代表者

須藤 靖 (Suto, Yasushi)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授

研究者番号：90183053

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円

研究成果の概要(和文)：1) 複数トランジット惑星系K01-94に対するロシターマクローリン効果を観測し、自転公転角がほぼゼロであることを発見した。さらにこの系は惑星同士の食を起こしている初めての系であることを発見した。
 2) 星震学を用いれば観測者の視線方向に沿った星の自転傾斜角を推定できるため、トランジット惑星系に対しては実際の自転公転角を決定できる。我々はKepler-25とHAT-P-7に対して、初めてこの真の自転公転角の決定に成功した。
 3) ケプラートランジット惑星系に対して系統的なリング探査を初めて行った。長周期惑星に対してはリング候補を、短周期惑星候補についてはその存在確率の制限を得た。

研究成果の概要(英文)：1) We detected the Rossiter-McLaughlin effect for the transiting multi-planetary system K01-94 for the first time, and found that its spin and orbital axes are well aligned. Furthermore we discover that it is the first example to exhibit planet-planet eclipse.
 2) The Rossiter-McLaughlin effect measures the spin-orbit angle projected on the sky. The asteroseismology complementary measures the spin inclination along the line of sight of the observer. We estimated the spin inclinations of Kepler-25 and HAT-P-7 from asteroseismology, and reproduced the true spin-orbits angles for the systems.
 3) We performed systematic surveys of exo-rings around Kepler candidates of transiting planets. We found an interesting candidate for a long-period planet, and obtained statistical upper limits on the size and occurrence rate of exo-rings for short-period planets.

研究分野：太陽系外惑星

キーワード：トランジット惑星 星震学 ロシターマクローリン効果 自転公転角 惑星リング 太陽系外惑星 ケプラー探査機

1. 研究開始当初の背景

1995年の発見以来、太陽系外惑星研究は今や天文学における最も重要なテーマの一つとして確立し、さらに飛躍的な増大が確実である観測データを用いて目指すべき科学の方向性を明示することがますます重要となっていた。

トランジット惑星は、太陽系外惑星の単なる発見にとどまらず、その半径と密度、公転軸と主星自転軸のずれ、分光に基づく惑星大気組成、赤外線光度曲線を通じた表面温度、など系外惑星に対して本質的な基礎データの宝庫である。実際、現在稼働中のケプラー探査機や今後の地上大口径望遠鏡を用いた観測データが飛躍的に増大することは自明である。

このような状況を鑑みて、本研究は、1) 主星の自転軸と惑星公転軸のなす3次元角度の推定、2) 惑星系の角運動量ベクトルの進化、3) トランジット惑星のリングと衛星の測光分光学的検出法の提案、4) 反射光の精密測光による惑星表面地図の推定、を4つの主テーマに設定し、トランジット惑星を用いた精密惑星進化論の構築を目指した。

2. 研究の目的

以下、その4つについて、具体的にその目的を説明する。

1) 主星の自転軸と惑星公転軸のなす3次元角度の推定

トランジット惑星はトランジット中に主星表面の手前を直線的に運動する。この際に、主星の自転速度の異なる領域を隠すために、主星の吸収線の中心波長がシフトする。これは一種のトモグラフィーであり、主星の自転軸と惑星公転軸が天球上でなす2次元(射影)角度を推定することができる。これは食連星に対して1924年に用いられた手法で、Rossiter-McLaughlin(RM)効果と呼ばれている。系外惑星系に対してはQueloz et

al.(2000)で初めて検出された。我々のグループは、系外惑星系のRM効果に対する解析的公式を初めて導出し(Ohta et al. 2005)、さらにこの2次元角度の精密測定に成功(Winn et al. 2005)した。この2つの論文は、国際的にトランジット惑星に対するRM効果観測の重要性を定着させた(ちなみにこの2次元角度に対して という記法が標準となっているがこれはOhta et al.が導入したものである)。その結果、すでに約30の惑星系の が測定されており、そのうち約3分の1が45度以上のずれを示し、5個程度は逆行(自転軸と公転軸が反平行)している可能性が指摘されている。

この結果は、惑星がどこで形成されどのような力学的進化を経て現在の配置になっているかという大問題に対する重要な基礎データである。しかし はあくまで天球上に射影された2次元角度であることも事実であり、それらの3次元的になす角度 を推定する方法論が待たれている。

2) 惑星系の角運動量ベクトルの進化

RM効果に対する観測データの向上に比して、その理論的な理解はまだ進んでいない。したがって上述の推定法と並行して、天体力学的数値計算を用いて惑星系の角運動量ベクトルの進化を理解する理論的な研究を遂行することは重要である。従来は、惑星の公転軌道進化に注目されているが、特に角運動量ベクトルの振幅だけに注目すれば、上記のずれは、主星の自転軸の進化に起因している可能性もある。それも含めた統一的な理論モデルの構築が望まれている。

3) トランジット惑星のリングと衛星の測光分光学的検出法の提案

太陽系内惑星においてリングや衛星の存在は普遍的であるが、系外惑星では未だ発見されていない。数年間にわたるケプラー探査

機のトランジット惑星モニターは、これらの初発見に有力なデータベースを提供する。我々は Ohta et al. (2009) においてリングの検出法を提案しており、さらに衛星の検出法を提案するとともに、実際のデータを用いてその実現可能性を検証する。

4) 反射光の精密測光による惑星表面地図構築

主星からの光を完全にブロックし惑星からの光だけを長時間モニターする探査機は近未来必ずや実現するであろう。我々はその測光データから惑星大気、雲、海、陸地、さらには植生の存在をどこまで知りうるかを検討してきた (Fujii et al. 2010, 2011, Kawahara and Fujii 2010, 2011)。この研究は極めて先駆的である一方、未だ地球のデータをもととしたパイロット的な結果であり、実際の系外惑星が持っている多様性を系統的に取り込んだものにはなっていない。今後は、地球物理、気象、生物などの学際的な研究者らと共同で、より現実的なモデルを構築しその観測可能性を検証する方向に進むべきである。

3. 研究の方法

1) 主星の自転軸と惑星公転軸のなす 3 次元角度の推定

主星の自転軸と惑星公転軸がなす角 θ は、我々の視線方向に対する主星自転軸の傾斜角 i_s 、惑星公転軸の傾斜角 i_o 、および上述の RM 効果を通じて測定される 2 次元 (射影) 角度 α を用いて、 $\cos \theta = \sin i_s \cos \alpha + \cos i_s \cos i_o$ という関係にある (Ohta et al. 2005)。トランジット惑星の場合、 i_o は別途推定できるので、 θ の推定は i_s の推定に帰着する。

すでに提案されている一つの方法は、主星の測光モニターにより (例えば黒点の運動に伴う) 自転周期を推定し、観測されている吸収線のドップラー幅と比較して統計的に i_s を推定する可能性である。ただしこの方法は、星ごとのばらつきが大きく、高い精度を得ることは容易ではない。我々は、星の微分回転がその緯度の関数として与えられること

を利用して i_s を推定する方法を考案した (Hirano et al. 2011)。

今後はすでに存在する RM 観測データにこの方法を適用して i_s を推定するとともに、上述の自転速度から推定する方法との比較検討を行い、 θ を推定する方法論を構築する。

2) 惑星系の角運動量ベクトルの進化

主星の自転軸と惑星公転軸のなす角度を推定する新たな方法論を開拓し、実際にそれを観測データに適用するという上述の研究と並行して、惑星系の角運動量ベクトルの進化を理解する理論モデルの構築も行っていく。Nagasawa et al. (2008) はその方向の先駆的な研究の一つであるが、主星の自転角運動量の進化は無視していること、考えているパラメータ領域がかなり限定されていること、など数多くの検討すべき点が残されている。

我々は、Marzari and Weidenschilling (2002) を基礎として、さらに主星の自転ベクトルの力学進化を取り込んだ定式化を行い、1) の観測データの理論的解明を行う。

3) トランジット惑星のリングと衛星の測光分光学的検出法の提案

太陽系内惑星においてリングや衛星の存在は普遍的であるが、系外惑星では未だ発見されていない。すでに 1000 個を超える太陽系外惑星候補が検出されている現在、それらがリングや衛星を持っているかどうかを探り、さらには、それらを初検出することは、科学的に大きなインパクトを持つ。すでに我々は Ohta et al. (2009) において、トランジット惑星の測光データおよび分光データの時系列を解析することで、リングを検出する方法を提案している。

衛星については、リングに比べてさらに位相の不定性があり、それが時系列データにさらなる時間依存性をもたらすという困難が存在する。しかしながら、これらは長期的なモニターの継続によって原理的には解決できるものであり、現在観測を行っているケプラー探査機はまさにそのための理想的なデータを提供する。我々はリングの検出方法をさらに発展させて、衛星の検出法を提案するとともに、実際のデータを用いてその実現可能性を検証する。正直、実際の発見に至る可能性は高いとはいえないが、現時点でもっとも強い制限を得ると共に、将来の検出につながるような方法論の確立をめざす。

リングや衛星の存在は、惑星の自転角運動量ベクトルに関する情報を与えてくれる。上述の 1) 2) のプロジェクトと組み合わせることで、主星の自転、惑星の自転、惑星の公転という、惑星系を支配する 3 つの角運動

量に関する情報が得られれば、系外惑星システムの進化に対する極めて重要なデータとなる。実際、系外惑星の研究は、数多くの予想外の観測的発見に主導されてきた。いまやそれらをまとめて統一的な理解を与えてくれる理論モデルの構築に向かうべき段階にある。そのような俯瞰的立場からの理論研究を進めていく。

4) 反射光の精密測光による惑星表面地図の構築

系外惑星系の研究は、惑星系の形成と進化という天文学・地球物理学の視点にとどまらず、宇宙における生物の誕生と進化というさらに大きな科学的な基本的命題にアプローチする可能性をも秘めている。そのためには、我々の太陽系外にいかんして生物の存在の兆候(バイオマーカー)を見出すか、という方法論の開拓が必須である。標準的なバイオマーカーとしては、水、酸素、メタンなど、生物の存在と密接に関係すると思われる成分が議論されており、これらは地球型居住可能惑星の大気分光を通じて検出することが提案されている。

一方、我々は、主星からの光を完全にブロックし惑星からの光だけを長時間モニターする探査機を想定して、惑星の自転に伴う反射光の多色測光データの時間変化を通じて、雲、海、陸地、さらには植物の存在を推定する方法論を開拓してきた(Fujii et al. 2010, 2011)。さらに最近、惑星の公転の効果を考慮することで惑星表面の地図を構築する、惑星表面トモグラフィーの方法を提案した(Kawahara and Fujii 2010, 2011)。

これらの一連の研究は我々のグループが世界に先駆けて行っているものであるが、むしろ数多くの改良、検討の余地がある。特に現時点では、実際の地球の表面地図を用いた観測可能性の議論にとどまっているが、過去の地球史を考慮したときそれらの異なる時代を区別できるか、より一般に予想される多様な惑星表面情報に対して何がどこまで結論できるか、といった重要課題に取り組む。

4. 研究成果

複数トランジット惑星系 K01-94 に対するロシターマクローリン効果を観測し、自転公転角がほぼゼロであることを発見した。さらにこの系は惑星同士の食を起こしている初めての系であることを発見した。

主星と惑星が潮汐相互作用を起こす際に、その軌道長半径と自転公転角はほぼ同じ時間スケールで減衰する。これは自転公転角をほぼ0とするホットジュピターの形成は困難で、主星に落下せざるを得ないことを意味する。そこで惑星移動に関する永年摂動計算

を行い、どのようなパラメータが平行あるいは反平行の自転公転角をもつホット・ジュピターを形成するかを明らかにした。

従来のロシターマクローリン効果は、自転公転角のうち、観測者の視線方向と直交した成分しか計測できない。しかし、星震学を用いれば観測者の視線方向に沿った星の自転傾斜角を推定できるため、トランジット惑星系に対しては実際の自転公転角を決定できる。我々は Kepler-25 と Hat-P7 に対して、初めてこの真の自転公転角の決定に成功した。

ケプラートランジット惑星系に対して系統的なリング探査を初めて行った。長周期惑星に対してはリング候補を、短周期惑星候補についてはその存在確率の制限を得た。前者については、すばる望遠鏡の追観測によってその正否を検証する予定である。

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11件)(すべて査読有り)

1. *Systematic Search for Rings around Kepler Planet Candidates: Constraints on Ring Size and Occurrence Rate*, Masataka Aizawa, Kento Masuda, Hajime Kawahara, and Yasushi Suto, *The Astronomical Journal*, 155, 206 (18pp) (2018)
2. *Towards detection of exoplanetary rings via transit photometry: methodology and a possible candidate*, Masataka Aizawa, Sho Uehara, Kento Masuda, Hajime Kawahara, and Yasushi Suto, *The Astronomical Journal*, 153, 193 (19pp) (2017)
3. *Possible outcomes of coplanar high-eccentricity migration: hot Jupiters, close-in super Earths, and counter-orbiting planets*, Yuxin Xue, Kento Masuda, and Yasushi Suto, *The Astrophysical Journal*, 853, 204 (21pp) (2017)
4. *Difficulty in Formation of Counter-orbiting Hot Jupiters from Near-coplanar Hierarchical Triple Systems: A Sub-stellar Perturber*, Yuxin Xue and Yasushi Suto, *The Astrophysical Journal*, 820, 55(17pp) (2016)
5. *Transiting planets as a precision clock to constrain the time-variation of the gravitational constant*, Kento Masuda and Yasushi Suto, *Publication of Astronomical Society of Japan*, 68, L5(1-5) (2016)

6. *Revisiting a gravity-darkened and precessing planetary system PTF0 8-8695: spin-orbit non-synchronous case*, Shoya Kamiaka, Kento Masuda, Yuxin Xue, Yasushi Suto, Tsubasa Nishioka, Risa Murakami, Koichiro Inayama, Madoka Saitoh, Michisuke Tanaka, and Atsunori Yonehara, Publication of Astronomical Society of Japan, 67, 94(1-10) (2015)
7. *Determination of three-dimensional spin-orbit angle with joint analysis of asteroseismology, transit lightcurve, and the Rossiter-McLaughlin effect: cases for HAT-P-7 and Kepler-25*, Othman Benomar, Kento Masuda, Hiromoto Shibahashi, and Yasushi Suto, Publication of Astronomical Society of Japan, 66, 9421(2014)
8. *Tidal evolution of the spin-orbit angle in exoplanetary systems*, Yuxin Xue, Yasushi Suto, Atsushi Taruya, Teruyuki Hirano, Yuka Fujii, and Kento Masuda, The Astrophysical Journal, 784, 66(9pp) (2014)
9. *Characterization of KOI-94 system with transiting timing variation analysis: implication for the planet-planet eclipse*, Kento Masuda, Teruyuki Hirano, Atsushi Taruya, Mikiko Nagasawa, and Yasushi Suto, The Astrophysical Journal, 778, 185(16pp) (2014)
10. *Variability of Water and Oxygen Absorption Lines in the Disk-Integrated Spectra of the Earth and Earth-like Exoplanets*, Yuka Fujii, Edwin L. Turner, and Yasushi Suto, The Astrophysical Journal, 765, 76(9pp) (2013)
11. *Planet-Planet Eclipse and the Rossiter-McLaughlin Effect of a Multiple Transiting System: Joint Analysis of the Subaru Spectroscopy and the Kepler Photometry*, Teruyuki Hirano, Norio Narita, Bun'ei Sato, Yasuhiro H. Takahashi, Kento Masuda, Yoichi Takeda, Wako Aoki, Motohide Tamura, and Yasushi Suto, The Astrophysical Journal, 759, L36-L40 (2012)

〔学会発表〕(計 20件)

1. Yasushi Suto: "Reliability of the asteroseismic measurement of the stellar obliquity"; invited talk at NAOJ workshop "Asteroseismology and its impact

on other branches of astronomy", March 19- 20, 2018, University of Tokyo

2. 須藤靖: "ベイルブルドットを超えて", 生命科学系学会合同年次大会 特別セッション「アストロバイオロジー:地球と宇宙での生命探査」, 神戸ポートピアホテル(2017年12月7日)
3. Yasushi Suto: "Colors of a Second Earth: A Future Path Towards Astrobiology From Space": invited talk at 2016 Inter-Academy Seoul Science Forum (Seoul, November 2016)

他17件は省略

〔図書〕(計4件)

1. 須藤靖: 『宇宙人の見る地球』 (毎日新聞社、2014) 1-198頁
2. 須藤靖・伊勢田哲治: 『科学を語るとはということか』(河出書房新社、2013) 1-301頁
3. 須藤靖: 『主役はダーク』 (毎日新聞社、2013) 1-293頁
4. 須藤靖: 『三日月とクロワッサン』 (毎日新聞社、2012) 1-217頁

〔産業財産権〕
該当なし

〔その他〕
ホームページ等
<http://www.utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/>

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
須藤 靖 (Suto, Yasushi)
東京大学・大学院理学系研究科・教授
研究者番号: 90183053
- (2) 研究分担者
樽家 篤史 (Taruya, Atsushi)
京都大学・基礎物理学研究所・准教授
研究者番号: 40334239
- (3) 連携研究者 該当なし
- (4) 研究協力者 該当なし