

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2023

課題番号：21K20376

研究課題名（和文）観測による高温星周辺のホットジュピターの軌道進化の解明

研究課題名（英文）Revealing Orbital Evolution of Hot Jupiters around Hot Stars by Observations

研究代表者

渡辺 紀治（Watanabe, Noriharu）

東京大学・大学院総合文化研究科・特任研究員

研究者番号：20909593

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：ホットジュピターの軌道進化解明のため、惑星食（トランジット）の分光・測光観測による惑星軌道歳差を検出から、高温星周辺のホットジュピターの惑星軌道傾斜角を測定した。そこで、高温星周辺のホットジュピター WASP-33b と TOI-1518b に対して、高分散分光器による分光データと、トランジット測光データを使用して、惑星軌道歳差の観測をしたところいずれも高離心率移動モデルによる軌道進化を示唆した。また、高温星周辺のホットジュピターの発見確認のため、高分散分光器を使った観測を実施したところ、極軌道の可能性を示したが、観測データはノイズが大きく発見確認が困難なため、より大型の望遠鏡による観測を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、実際においても惑星軌道傾斜角が傾いていた結果を示したことから、ホットジュピターの惑星軌道進化は円盤相互作用より、高離心率移動モデルを支持する形となった。この点において、ホットジュピターの軌道進化解明に一步踏み込んだと言える。また、惑星軌道歳差による惑星軌道傾斜角の測定例がしくないため、本研究の成果が、その測定法の基盤になりうると考えている。さらに、検出された惑星軌道歳差の数自体少なく、本研究で4例目まで増やすことができ、高温星周辺のホットジュピターにおいては、惑星軌道歳差によってトランジット観測が出来なくなる時期がいずれ訪れることを示した。

研究成果の概要（英文）：To clarify the orbital evolution of hot Jupiters, we measured the spin-orbit obliquity of hot Jupiters around hot stars from the detection of orbital nodal precession by spectroscopic and photometric observations of planetary eclipses (transits). Therefore, we observed the planetary orbital precession of hot Jupiters WASP-33b and TOI-1518b using spectroscopic data from the high-resolution spectrographs and transit photometric data, both of which suggest orbital evolution based on a high eccentricity transfer model. In addition, to confirm a hot Jupiter around a hot star, we used a high-dispersion spectrograph. This observation showed the possibility of polar orbits. However, the data were too noisy to confirm, so we proposed observations with a larger telescope.

研究分野：系外惑星

キーワード：軌道進化

1. 研究開始当初の背景

恒星近傍を公転する巨大ガス惑星(ホットジュピター)はその場所で形成できないため、巨大ガス惑星を内側に移動する様々な軌道進化モデルが提唱された。モデルによって、軌道進化直後の主星自転軸に対する惑星公転軸の傾き(惑星軌道傾斜角)が異なるため、その角度が軌道進化の手がかりとなる。しかし、太陽に似た性質の恒星(太陽型星)周辺のホットジュピターの軌道は、主星が潮汐力の影響で軌道進化直後の惑星軌道傾斜角の情報を失うため、観測による軌道進化の制約が困難であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、太陽よりも重く(1.5~3 太陽質量)表面温度の高い(7000K 以上)主系列星である高温星周辺のホットジュピターの惑星軌道傾斜角測定から、ホットジュピターの軌道進化を制約することである。高温星の場合、恒星表面層のほとんどを輻射層が占めており、潮汐力の影響をほぼ受けないため、軌道進化直後の惑星軌道傾斜角が保たれる。また、従来は天球面に投影された見かけの惑星軌道傾斜角しか測定されていなかった。しかし、軌道歳差(図1 参照)を起こしやすい高温星周辺のホットジュピターの場合、その現象を観測で捉えることで真の惑星軌道傾斜角を測定することができる。よって、高温星周辺のホットジュピターの観測で真の惑星軌道傾斜角の分布を作成すれば、軌道進化を正確に制約することが可能となる。

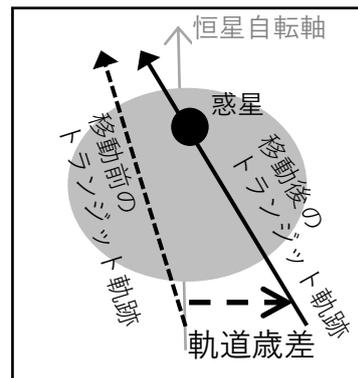


図1：惑星軌道歳差の概要図

3. 研究の方法

真の惑星軌道傾斜角を測定するためには、トランジット分光観測のデータから惑星の影を捉えるドップラー・トモグラフィ法での観測を行う。DT法は通常、見かけの惑星軌道傾斜角を測定できるが、1度の観測では真の惑星軌道傾斜角を測定できない。しかし、軌道歳差によってトランジット軌道の位置が変わるため、再びDT法で見かけの惑星軌道傾斜角とインパクトパラメーターの変化を捉えることで真の惑星軌道傾斜角を測定できる。また、インパクトパラメーターを測定できるという観点から、トランジット中の光度変化を捉えるトランジット測光観測でも軌道歳差を捉えることが可能である。

4. 研究成果

(1) 高温星周辺のホットジュピターWASP-33bの真の惑星軌道傾斜角、および、惑星軌道歳差調査のため、高分散分光器HDS(すばる望遠鏡)、TS23(HJST)、HARPS-N(TNG)、HIDES(岡山188cm望遠鏡)のトランジット分光データを使用してDT法で8夜分の観測点各々の見かけの惑星軌道傾斜角とインパクトパラメーターを算出した。また、インパクトパラメーター測定のため、多色測光カメラMuSCAT1/2のトランジット測光データも用いた。

11年間に及ぶ、見かけの惑星軌道傾斜角とインパクトパラメーターの変化(図2)から、真の惑星軌道傾斜角を求めた。その結果、実際の惑星軌道傾斜角においても、WASP-33bが極軌道であること(~108度)を示し、他の巨大惑星や伴星による高離心率移動モデルに沿った軌道進化を示唆した。研究結果が出た当時、真の惑星軌道傾斜角が測られた高温星周りのホットジュピターとしては6例目で、その中で軌道歳差での測定は2例目であった。また、惑星軌道歳差の周期が約709年であり、惑星軌道歳差によるトランジット軌道の移動により、現時点から約55年後にはWASP-33のトランジット観測が出来なくなること示した(図3)。

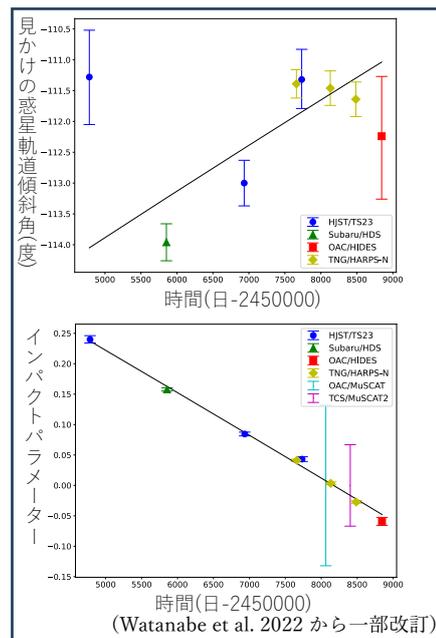


図2：見かけの惑星軌道傾斜角(左)とインパクトパラメーター(右)の11年間の変化

この研究結果について、国内会議で口頭発表を、国際会議でポスター発表と口頭発表を行った。さらに、科学論文雑誌 *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* で本研究が掲載された。

(2) TOI-1518b は高温星の端をトランジット通過するホットジュピターであり、上記の WASP-33b のように中心の恒星の自転速度が速く、見かけ上極軌道であるため、トランジット軌道がさらに端の方にずれてしまい、数十年後に TOI-1518b のトランジット観測が出来なくなる可能性があった。

そこで、数年間に及ぶ TOI-1518b 軌道歳差調査から、宇宙望遠鏡 TESS が捉えたトランジット測光データを使用して、各年のインパクトパラメーターを算出した。さらに、高分散分光器 EXPRES と CARMENES で捉えたトランジット分光データから、2 夜分の観測点各々の見かけの惑星軌道傾斜角とインパクトパラメーターを DT 法で算出した。高分散分光器による観測点の間隔が半年未満と短いため、長期の見かけの惑星軌道傾斜角を捉えることができず、精密な真の惑星軌道傾斜角を算出できなかったが、TOI-1518b の軌道と中心恒星のパラメーターから、真の惑星軌道傾斜角の範囲を制限し、極軌道と範囲を示した。この結果から、このホットジュピターも巨大惑星や伴星による高離心率移動モデルで軌道進化したと推測できる。

一方で、インパクトパラメーターの変化については、EXPRES、CARMENES のみでなく、TESS によるインパクトパラメーターの測定値があるため、3 年間のインパクトパラメーターの変化率を算出できた(図 4)。その結果、TOI-1518b のトランジット軌道は恒星面の中心に向かうことを解明し、約 170 年後にトランジット軌道が恒星面から外れること、および、トランジット観測が数十年後とすぐに終割らないことを示した。ここで、惑星軌道歳差が検出された例は非常に少なく、本研究での TOI-1518b の惑星軌道歳差の検出は 4 例目となる。

この研究結果について、国内会議で口頭発表とポスター発表を、国際会議でポスター発表を行った。さらに、科学論文雑誌 *Publications of the Astronomical Society of Japan* で本研究が掲載された。

(3) TESS が減光を確認した、とある高温星周辺のホットジュピター候補の発見確認を、口径 3.8m のせいめい望遠鏡の高分散分光器 GAOES-RV でトランジット分光観測を行った。しかし、トランジット中の恒星ラインプロファイルに現れる惑星の影が目立って現れなかったため、グリッドサーチで惑星軌道傾斜角を算出したところ、この惑星も極軌道に近い結果であり、重力散乱か伴星による軌道進化の可能性を示した。このホットジュピター候補の発見確認を確実なものにする、つまり、惑星の影を直接検出するために、口径 8m の GEMINI 望遠鏡の高分散分光器 MAROON-X と LCO2m 望遠鏡の多色撮像カメラ MuSCAT3 を使用した観測のプロポーザルを提出した。

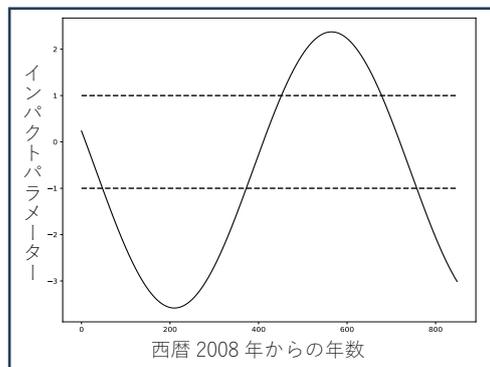


図 3 : WASP-33b のインパクトパラメーターの約 800 年間に渡る変化モデル。横破線は恒星面の端の位置を示し、2つの破線の間にある期間はトランジット観測ができる。

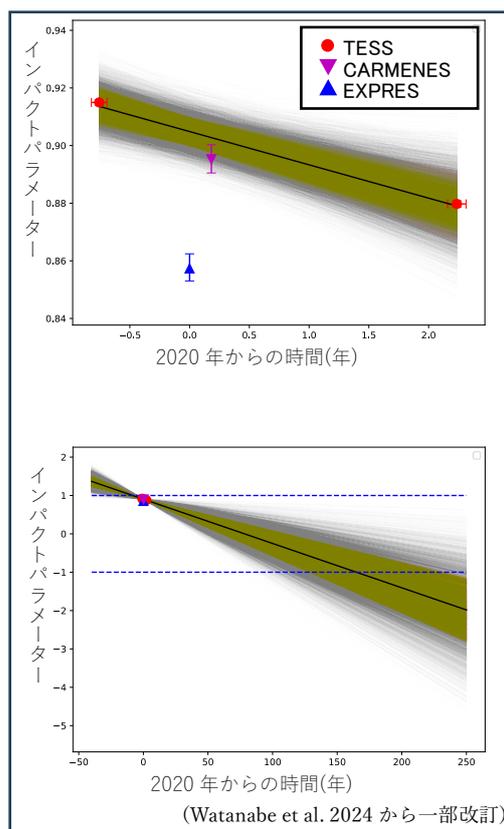


図 4 : TOI-1518b のインパクトパラメーターの変化。上図は短期間(約 3 年)の変化、下図は長期間(約 300 年)を表す。黒実線はベストフィットのモデル、下図の横破線は恒星面の端の位置を示し、2つの破線の間にある期間はトランジット観測ができる。

(Watanabe et al. 2024 から一部改訂)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Watanabe Noriharu, Narita Norio, Palte Enric, Fukui Akihiko, Kusakabe Nobuhiko, Parviainen Hannu, Murgas Felipe, Casasayas-Barris Nuria, Johnson Marshall C, Sato Bun 'ei, Livingston John H, de Leon Jerome P, Mori Mayuko, Nishiumi Taku, Terada Yuka, Esparza-Borges Emma, Kawauchi Kiyoe	4. 巻 512
2. 論文標題 Nodal precession of WASP-33b for 11 yr by Doppler tomographic and transit photometric observations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4404 ~ 4418
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac620	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Kawauchi K., Murgas F., Palte E., Narita N., Fukui A., Hirano T., Parviainen H., Ishikawa H. T., Watanabe N., et al.	4. 巻 666
2. 論文標題 Validation and atmospheric exploration of the sub-Neptune TOI-2136b around a nearby M3 dwarf	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A4 ~ A4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202243381	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Delrez L., Murray C. A., Pozuelos F. J., Narita N., Ducrot E., Timmermans M., Watanabe N., et al.	4. 巻 667
2. 論文標題 Two temperate super-Earths transiting a nearby late-type M dwarf	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A59 ~ A59
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202244041	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Kagetani Taiki, Narita Norio, Kimura Tadahiro, Hirano Teruyuki, Ikoma Masahiro, Ishikawa Hiroyuki, Takahashi Steven, Fukui Akihiko, Kodama Takanori, Gore Rebecca, Schroeder Ashley, Hori Yasunori, Kawauchi Kiyoe, Watanabe Noriharu, et al.	4. 巻 75
2. 論文標題 The mass of TOI-519 b: A close-in giant planet transiting a metal-rich mid-M dwarf	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 713 ~ 721
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psad031	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kawai Yugo, Narita Norio, Fukui Akihiko, Watanabe Noriharu, Inaba Satoshi	4. 巻 528
2. 論文標題 The flipped orbit of KELT-19Ab inferred from the symmetric TESS transit light curves	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 270 ~ 280
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stad3915	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hartman J. D., Bakos G. ?, Csabry Z., Howard A. W., Isaacson H., Giacalone S., Chontos A., Narita N., Fukui A., de Leon J. P., Watanabe N., Mori M., Kagitani T., Fukuda I., Kawai Y., Ikoma M., Palte E., Murgas F., Esparza-Borges E., Parviainen H., Bouma L. G., Cointepas M., Bonfils X., et al.	4. 巻 166
2. 論文標題 TOI 4201 b and TOI 5344 b: Discovery of Two Transiting Giant Planets around M-dwarf Stars and Revised Parameters for Three Others	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 163 ~ 163
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/acf56e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Mori Mayuko, Ikuta Kai, Fukui Akihiko, Narita Norio, de Leon Jerome P, Livingston John H, Ikoma Masahiro, Kawai Yugo, Kawauchi Kiyoe, Murgas Felipe, Palte Enric, Parviainen Hannu, Rodriguez Gareb Fernandez, Terada Yuka, Watanabe Noriharu, Tamura Motohide	4. 巻 530
2. 論文標題 Characterization of starspots on a young M-dwarf K2-25: multiband observations of stellar photometric variability and planetary transits	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 167 ~ 189
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stae841	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Watanabe Noriharu, Narita Norio, Hori Yasunori	4. 巻 -
2. 論文標題 Nodal precession of a hot Jupiter transiting the edge of a late A-type star TOI-1518	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psae019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 渡辺紀治、成田憲保、堀安範
2. 発表標題 A型星周辺のホットジュピターT01-1518bの惑星軌道歳差調査
3. 学会等名 新学術領域「星・惑星形成」2022年度大研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Watanabe Noriharu, Narita Norio, Yasunori Hori
2. 発表標題 Nodal Precession of a Hot Jupiter Transiting Edge of a Late A Type Star: T01-1518 b
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Watanabe Noriharu, Narita Norio, Palte Enric, Fukui Akihiko, Kusakabe Nobuhiko, Parviainen Hannu, Murgas Felipe, Casasayas-Barris Nuria, Johnson Marshall C, Sato Bun'ei, Livingston John H, de Leon Jerome P, Mori Mayuko, Nishiumi Taku, Terada Yuka, Esparza-Borges Emma, Kawauchi Kiyoe
2. 発表標題 Nodal Precession of WASP-33b for Eleven Years by Doppler Tomographic and Transit Photometric Observations
3. 学会等名 Subaru Users Meeting FY2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡辺紀治、成田憲保、福井暁彦、川内紀代恵、John Livingston、Jerome de Leon、森万由子、Marshall C. Johnson、日下部展彦、西海拓、Enric Palte
2. 発表標題 軌道歳差観測による WASP-33b の惑星軌道傾斜角測定
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡辺紀治、成田憲保、Palle Enric、福井暁彦、日下部展彦、Parviainen Hannu、Murgas Felipe、Casasayas-Barris Nuria、Johnson Marshall C、佐藤文衛、Livingston John H、de Leon Jerome P、森万由子、西海拓、寺田由佳、Esparza-Borges Emma、川内紀代恵
2. 発表標題 11年間にわたるホットジュピターWASP-33bの軌道歳差
3. 学会等名 新学術領域「星・惑星形成」2021年度大研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Watanabe, N., Narita, N., Hori, Y., E. Palle
2. 発表標題 Nodal Precession of a Hot Jupiter Transiting Edge of a Late A Type Star: T01-1518
3. 学会等名 Extreme Solar Systems V (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 渡辺紀治、成田憲保、堀安範
2. 発表標題 ホットジュピターT01-1518bの軌道歳差観測と主星構造パラメーターの測定
3. 学会等名 新学術「星・惑星形成」2023年度大研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡辺紀治、成田憲保、堀安範
2. 発表標題 高温星周辺のホットジュピターT01-1518bの軌道歳差観測
3. 学会等名 日本惑星科学会2023年秋季講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡辺紀治、成田憲保、堀安範
2. 発表標題 高温星周辺のホットジュピターT01-1518bの軌道歳差観測
3. 学会等名 日本天文学会2023年秋季年会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

高分散分光器HIDES/せいめい望遠鏡の系外惑星トランジット分光観測のための岡山出張(2023年) 多色装置カメラMuSCAT4のファーストライト、および、系外惑星トランジット観測のためのオーストラリア出張(2023年)

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関