

太陽系外惑星TrES-3 bの可視光近赤外線トランジット観測

平野 佑弥[†], 伊藤 洋一^{1,†}

¹兵庫県立大学 天文科学センター 西はりま天文台

Optical and Near-Infrared Transit Observations of the Exoplanet TrES-3 b

Yuya HIRANO[†], Yoichi ITOH^{1,†}

¹Nishi-Harima Astronomical Observatory, Center for Astronomy, University of Hyogo,
407-2 Nishigaichi, Sayo-cho, Hyogo 679-5313, Japan

[†]hirano@nhao.jp, yitoh@nhao.jp

(Received 2024 October 31; accepted 2024 December 6)

概要

2023年3月19日から2024年8月7日にかけて、太陽系外惑星TrES-3 bのトランジット観測を可視光および近赤外線の複数波長で同時に実施した。観測には、西はりま天文台の2mなゆた望遠鏡に搭載された西はりま赤外線カメラ (NIC) および60cm望遠鏡を使用した。観測された主星と惑星の半径比は、Vバンドで0.152から0.161、Jバンドで0.151から0.162、Hバンドで0.155から0.159、K_sバンドで0.134から0.157までの範囲であった。観測期間中、トランジットに顕著な波長依存性の変化は見られず、全波長で均一の半径比が示唆された。TrES-3 bの大気は膨張しておらず、晴れた大気または雲の存在によるモデルで説明できる。またTrES-3 bの大気に顕著なレイリー散乱が見られなかったことが確認され、Mackebrandt et al. (2017)の観測結果を支持するものとなった。

Abstract

We conducted simultaneous transit observations of the exoplanet TrES-3 b in multiple optical and near-infrared wavelengths from March 19, 2023 to August 7, 2024. Observations were carried out using the 2 m Nayuta telescope equipped with the Nishiharima Infrared Camera (NIC) and a 60 cm telescope at the Nishi-Harima Astronomical Observatory. The observed planet-to-star radius ratios ranged from 0.152 to 0.161 in the V band, 0.151 to 0.162 in the J band, 0.155 to 0.159 in the H band, and 0.134 to 0.157 in the K_s band. Throughout the observation period, no significant wavelength-dependent variations were detected in the radius ratio, suggesting uniformity in the radius ratio across all wavelengths. This indicates that the atmosphere of TrES-3 b is not significantly expanded and can be explained by both clear and cloudy atmospheric models. Additionally, no prominent Rayleigh scattering feature was detected, supporting the findings of Mackebrandt et al. (2017).

Key words: planets and satellites: atmospheres — techniques: photometric — astrochemistry

1. Introduction

トランジット法とは、惑星が主星の前を通過する際に主星の光が減少する現象を捉えることで、太陽系外惑星を発見する手法である。Charbonneau et al. (1999)とHenry et al. (1999)により、トランジット法でHD 209458の近傍を短時間で周回する木星サイズのガス惑星HD 209458 bが初めて観測された。この惑星はホットジュピターとして分類された。トランジット法の発展により、これまでに5000個以上の太陽系外惑星が発見されている。また、トランジット法は惑星の公転周期だけでなく、惑星の半径を推定することも可能である。

太陽系外惑星の大気存在は、トランジット観測によって特定の波長域での光の吸収を観測することで確認される。ホットジュピターはH₂を主成分とする大気を持ち、これまでにH₂O、CH₄、CO₂、COなどの分子が検出されている。これらの分子は、近赤外線領域で振動遷移により大きな吸収を示す。一方で惑星の大気に雲やヘイズがある場合には、分子吸収のない特有の透過スペクトルが見られると予測される。これまでにHD 189733 bでは、Hubble

Space TelescopeやSpitzer Space Telescopeの観測により、雲やヘイズが原因で分子吸収の特徴がない透過スペクトルが得られている(Pont et al. 2013)。

TrES-3は地球から約240 pc離れた恒星であり、ヘラクレス座に位置する。TrES-3はスペクトルタイプがG型の恒星であり、有効温度は5720 ± 150 Kである。この恒星は太陽よりわずかに小さく、質量は0.90 ± 0.15太陽質量、半径は0.802 ± 0.046太陽半径と推定されている(O'Donovan et al. 2007)。

TrES-3 bは、2007年にTrans-atlantic Exoplanet Survey (TrES)の一環として発見された太陽系外惑星である。カリフォルニア州のPalomar ObservatoryにあるSleuth望遠鏡およびアリゾナ州のLowell ObservatoryにあるPlanet Search Survey Telescopeによって検出された。これらの望遠鏡を使用して、7回の完全なトランジットと3回の部分的なトランジットが観測された。TrES-3 bは、太陽に似た主星の周りを非常に短い周期で公転するホットジュピターであり、公転周期は1.30619 ± 0.00001日である。軌道傾斜角は82.15 ± 0.21度と測定されている。また、惑星の半径は1.295 ± 0.081木星半径であり、その質量は1.92 ± 0.23木

星質量と推定されている(O'Donovan et al. 2007)。

TrES-3 bの大気の大気レイリー散乱については、異なる研究で相反する結果が報告されている。Parviainen et al. (2016)は、短波長での主星と惑星の半径比の増加が観測されたことから、短波長域でレイリー散乱の特徴が見られると示した。一方でMackebrandt et al. (2017)は、Parviainen et al. (2016)の観測データを再解析と追観測を行った結果、レイリー散乱の特徴がTrES-3 bの大気に起因するものではなく、観測誤差や他の要因によるものであると結論づけている。Mackebrandt et al. (2017)は、Parviainen et al. (2016)で示された短波長での半径比の増加は大気ではなく観測誤差や別の要因であると指摘している。これまでの研究では、可視光領域における議論が中心であった。本研究では、可視光領域と近赤外領域の両方で同時観測を実施し、主星と惑星の半径比の変動を調査した。その結果、太陽系外惑星TrES-3 bの半径比は、可視光および近赤外線領域でほぼ一定であることが観測された。

第2章では、2mなゆた望遠鏡および60cm望遠鏡を使用した可視光および近赤外線でのトランジット観測手法について説明する。第3章では、取得したデータの解析手順について詳細に述べる。第4章では、光度曲線フィッティングに関する手法を紹介する。第5章では、本研究の主な結果を提示し、最後に第6章では、主星と惑星の半径比の波長ごとの変動および時間変動についての考察を行う。

2. Observations

TrES-3のトランジット観測は、2023年3月19日から2024年8月7日までの7夜にわたって実施した。観測には、西はりま天文台にある2mなゆた望遠鏡と60cm望遠鏡を使用した。なゆた望遠鏡では近赤外線観測用の西はりま赤外線カメラ(NIC)を、60cm望遠鏡では可視光観測用のSBIG STL-1001Eカメラを使用した。NICには1024 × 1024ピクセルの3つのHgCdTe検出器が搭載されており、近赤外線のJバンド(1.25 μm)、Hバンド(1.63 μm)、K_sバンド(2.15 μm)で同時に観測することが可能である。STL-1001Eは、1024 × 1024ピクセルのCCDセンサーを搭載している。TrES-3の観測には、Johnson Vバンドを使用した。

NICの視野は2'.73 × 2'.73、STL-1001Eの視野は11'.6 × 11'.6である。可視光CCDに比べて近赤外線検出器ではバッドピクセルが多いため、その影響を軽減するために、NICの観測では半径10秒角で10か所のディザリングパターンを適用した。観測は、TESS Transit Finder (Jensen 2013)が提供する予測トランジット時刻に基づいてスケジュールした。観測はトランジット開始の1時間前から始まり、終了後1時間まで続けられ、総観測時間は約4時間であった。天候条件によっては、トランジット前後の観測期間を延長することもあった。露光時間はNICで60秒、STL-1001Eで30秒に設定した。観測後にダークフレームおよびドームフラットフレームを取得した。NICで取得した画像のフラットフィールドの補正には、以前に取得されたマスタートワイライトフラットフレームを使用した。

3. Data Reduction

データ処理にはImage Reduction and Analysis Facility (IRAF) ソフトウェアを用いた。最初にダーク引き、フラット補正、バッドピクセルの補正を行った。近赤外線カメラ(NIC)で取得した画像に対しては、OH夜光と熱放射

を補正するためにスカイ引きを実施した。10枚の画像を中央値で合成することでスカイパターンを作成し、そのパターンを各画像から差し引いた。スカイ引き後、NICには読み出し時の電圧変動によって生じる縦縞パターンが見られた。この縦縞は、星が写っていない領域を使用して抽出し、補正した。さらに宇宙線によって影響を受けたピクセルは、周囲のピクセル値を用いて補間して補正した(figure 1)。

測光は開口測光で行った。相対フラックスは対象星のフラックスを基準星のフラックスで割ることによって算出した。測光精度を向上させるために、複数の基準星を使用した。これらの基準星は、TrES-3から10分角以内の距離にあり、観測期間中に少なくとも100,000 e⁻のカウントを持つものを選んだ。基準星の明るさが安定していることは、1つの基準星と他の基準星のフラックスを比較することで確認した。本研究で使用した基準星をtable 1に示す。

測光は、ポイントスプレッド関数(PSF)の半値全幅(FWHM)の1.0倍、1.5倍、2.0倍のアパーチャ半径を用いて行い、トランジット外での相対フラックスの標準偏差が最小となるようにFWHMの1.5倍のアパーチャ半径を選んだ。アパーチャ半径は1.5秒角から4.0秒角の範囲で変動した。続いて、トランジット外の相対フラックスに直線をフィットし、これらの値を1に正規化した。また、NICの画像にはディザリング観測に起因する相対フラックスの位置依存性がある。これはフラットフィールド補正の不完全さによる可能性がある。Tabata and Itoh (2020)が指摘している。各ディザリング位置でトランジット外の相対フラックスの平均を算出し、同じ位置の対応する画像の相対フラックスをその平均で割って位置依存性を除去した。最後に、相対フラックスの標準偏差σ_iを、予想されるトランジット時間を基準に、トランジット前、トランジット中、およびトランジット後のそれぞれで計算した。σ_iは、トランジット前、中、後の各区間内で同じ値とした。2σを超える外れ値は除外した。

4. Light Curve Fitting

トランジットフィッティングツールであるBASIC TRANSIT MODEL CALCULATOR (batman) (Kreidberg 2015)を用いてトランジットモデルフィッティングを行い、主星と惑星の半径比を求めた。トランジット観測で得られた時刻、相対フラックス、相対フラックスの標準偏差を観測データとして入力した。トランジット中心時刻、公転周期、軌道長半径、軌道傾斜角、離心率、近点引数をモデルパラメータとして固定した。求めるパラメータは、主星と惑星の半径比、ベースラインフィットの次数、周縁減光モデルである。解析は半径比を0.08から0.18まで0.01刻みで変化させることから始めた。ベースラインフィットには一次関数と二次関数を使用した。周縁減光モデルについては、linearモデル、quadraticモデル、square-rootモデル、logarithmicモデルを評価した。各観測バンドの周縁減光係数はClaret, Hauschildt, and Witte (2012)に基づき、table 2の通りに設定した。

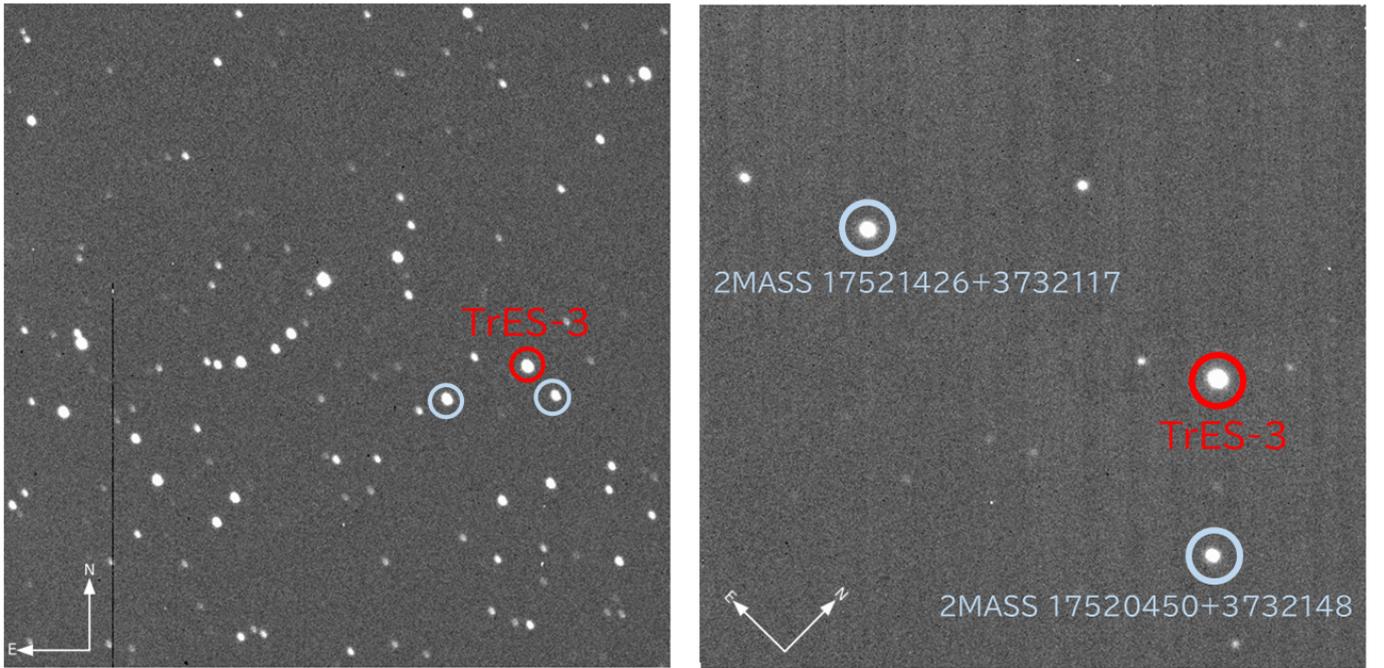
フィッティングの評価にはBayesian Information Criterion (BIC)を用いた。BICはモデルの適合度と複雑さを同時に評価する指標である。BICは以下の式で定義される。

$$BIC = \chi^2 + k \ln(n). \quad (1)$$

ここで、 k はモデルの自由度、 n はデータ点数を表す

Table 1. TrES-3 and Photometric reference stars

Star ID	RA (J2000)	Dec (J2000)	J Mag
2MASS 17520702+3732461 (TrES-3)	17 ^h 52 ^m 07 ^s	+37°32'46"	11.015 ± 0.022
2MASS 17521426+3732117	17 ^h 52 ^m 14 ^s	+37°32'12"	11.842 ± 0.021
2MASS 17520450+3732148	17 ^h 52 ^m 05 ^s	+37°32'15"	12.741 ± 0.022

**Fig. 1.** Left: V -band image of TrES-3 obtained with the 60 cm telescope and STL-1001E camera. Right: H -band image of TrES-3 obtained with the 2 m Nayuta Telescope and Nishiharima Infrared Camera (NIC). TrES-3 and reference stars are marked in red and blue, respectively.**Table 2.** Limb darkening coefficients for each observational band (Claret et al. 2012)

Band	Linear (u)	Quadratic (a, b)	Square-root (c, d)	Logarithmic (e, f)
V	0.7698	0.7300, 0.0591	0.6577, 0.1726	0.8028, 0.0634
J	0.4269	0.2872, 0.2077	0.0295, 0.6116	0.5435, 0.2242
H	0.3535	0.1462, 0.3082	-0.2416, 0.9160	0.5276, 0.3347
K_s	0.2967	0.1307, 0.2467	-0.1806, 0.7345	0.4362, 0.2682

(Raftery 1995)。 χ^2 は観測データとモデル予測値とのずれを評価するための指標であり、次の式で定義される。

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(f_{i,obs} - f_{i,model})^2}{\sigma_i^2}. \quad (2)$$

$f_{i,obs}$ は*i*番目に観測されたフラックス、 $f_{i,model}$ はモデルフラックスであり、 σ_i は観測された相対フラックスの標準偏差を表す。BICは、モデルがデータに適合する程度を示す χ^2 に加え、モデルの複雑さをペナルティとして考慮する第2項を含む。この第2項により、過剰に複雑なモデルが選択されるのを防ぐ役割を果たす。したがって、本研究では単に χ^2 が最小のモデルを選択するのではなく、BIC値が最小となるモデルを最適なものとして判断した。最適なモデルは、ベースラインフィットと周縁減光モデルの組み合わせの中で最小のBIC値を持つものとして選択した。この手法により、主星と惑星の半径比の初期推定値を得た。BICは106.6–443.9だった(table 3)。全てのトランジットにおいて、ベースラインのフィッティングには一次関数、周縁減光モデルにはlinearモデルを用いた組み合わせが最適であった。

地上観測では、大気透過率の時間変化に起因する時間相関ノイズ（赤色ノイズ）が存在する。この赤色ノイズの評価には、時間平均法(Winn et al. 2007)を使用した。まず、相対フラックスとモデルの残差を計算し、全データの標準偏差 σ_A を求めた。その後、データを10フレームずつ*M*個のビンに分割した。各ビンの残差の標準偏差を $\sigma_{N,obs}$ とした。赤色ノイズがない場合のデータの標準偏差 $\sigma_{N,calc}$ は以下の式で計算した。

$$\sigma_{N,calc} = \frac{\sigma_A}{\sqrt{10}} \times \sqrt{\frac{M}{M-1}}. \quad (3)$$

ここで $\sqrt{M/M-1}$ の項は統計学的補正項であり、ビンの数が少ない場合に必要である(Winn et al. 2008)。*M*が増加すると、この補正係数は1に近づく。観測では、*M*は8から38の範囲であった。ノイズが完全にランダムで時間相関がない場合、標準偏差は各ビンのデータ数の平方根に反比例して減少する。しかし、実際の観測では赤色ノイズが存在し、 $\sigma_{N,obs}$ は通常 $\sigma_{N,calc}$ より大きくなる。この差を補正するために、ベータファクター β を用いた。 β は次の式で計算した。

$$\beta = \frac{\sigma_{N,obs}}{\sigma_{N,calc}}. \quad (4)$$

すべての β_i の中央値を求め、この値を最終的な β とした。 β が1未満の場合、赤色ノイズの補正が過小評価されるのを防ぐため、 β を1.00に固定した。 β の値は1.00から1.72の範囲であった(table 3)。観測された相対フラックスの標準偏差 σ_i に β を乗じて補正後の標準偏差を得て、データを再フィットした。

赤色ノイズを考慮した主星と惑星の半径比とそのエラーは、マルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC)を用いて求めた。初期値として、事前解析で決定した半径比を使用した。MCMC解析では50個のウォーカーとウォーカーごとに10,000ステップで実施した。最適モデルとして、一次関数ベースラインフィットとlinear周縁減光モデルの組み合わせを採用した。10,000ステップの計算で半径比の変動が1%以内に収束した時点で、半径比が決定されたと見なした。これにより、各トランジットにおける半径比およびそのエラーが得られた。

5. Result

TrES-3のトランジットイベントは、*V*、*J*、*H*、*K_s*バンドで6夜、*J*、*H*、*K_s*バンドで1夜にわたって観測された。7夜の観測のうち、3夜でトランジットの検出に成功した。観測された主星と惑星の半径比は、*V*バンドで0.152から0.161、*J*バンドで0.151から0.162、*H*バンドで0.155から0.159、*K_s*バンドで0.134から0.157までの範囲であった(table 3)。半径比は可視光から近赤外線までほぼ一定の値を示した(figure 2)。

6. Discussion

2023年3月19日から2024年8月7日までに実施した観測では、可視光と近赤外線の異なる波長間で主星と惑星の半径比に大きな違いが見られなかった。この結果は、Parviainen et al. (2016)が報告したTrES-3 bにおけるレイリー散乱の特徴とは異なっている。彼らの観測では、Gran Telescopio Canarias (GTC)のOSIRISを用いた分光観測により、短波長に向かって半径比が増加するレイリー散乱の波長依存性が見られた。しかし、我々の観測ではそのような波長依存性は確認されなかった。第1章で述べたようにMackebrandt et al. (2017)はParviainen et al. (2016)の結果を再検討しており、TrES-3 bにおける顕著なレイリー散乱が確認されなかったことから、我々の観測結果はMackebrandtらの結果を支持するものである。

次に、ホットジュピターの大気モデルを検討する。ホットジュピターの大気では、レイリー散乱やミー散乱が起こることが多い。例えば、我々が2021年9月15日から2023年10月12日までに実施したQatar-1 bのトランジット観測では、*V*バンドで0.122から0.161、*J*バンドで0.107から0.148、*H*バンドで0.125から0.143、*K_s*バンドで0.092から0.142の主星と惑星の半径比が得られた(Hirano & Itoh submitted)。可視光*V*バンドで最大30%の半径比の変動が観測された。近赤外線でのトランジット観測結果と合わせると、Qatar-1 bには、晴れの大气、粒子径が小さい(0.01–0.1 μm)雲やヘイズを持つ大气、粒子径が大きい(1.0 μm)雲やヘイズを持つ大气の3つのパターンが存在する可能性がある。晴れた大气では近赤外線で強い吸収特徴が見られ、一方で雲やヘイズが存在する場合はそれらが吸収特徴を隠すことが考えられる。

そこで我々は、Planetary Spectrum Generator (PSG)を用いて大気モデルスペクトルを作成し、観測結果と比較した。PSGは、大気の温度プロファイルや分子種の分布を反映して大気モデルを生成するオンラインの放射伝達コードである(Villanueva et al. 2018)。大気の温度プロファイルはParmentier and Guillot (2014)の非灰色解析モデルを用いて決定した。このモデルは、Fortney et al. (2008)によって最初に導出された放射伝達方程式の数値解を簡略化したものである。PSGでは、大気中の分子種やエアロゾルの種類を選択することができる。大気モデルスペクトルを作成するために必要な惑星の直径、表面重力、軌道長半径、主星のスペクトル型、および温度などのパラメータは、NASAのExoplanet Archiveから取得した。

初めに晴れた大気モデルを作成した。大気中の分子種は、主星と惑星の半径比に目立った特徴が見られないため、太陽系外惑星の大気によく見られる主要なガス分子を設定した(H_2 83.694%, He 16.139%, CO 687.413 ppm, CH_4 21.468 ppm, H_2O 4.492 ppm, CO_2 0.001562 ppm)。平均

Table 3. Observed planet-to-star radius ratios of TrES-3 b in various bands

Date	Obs-Time (UTC)	Band	BIC	β	radius ratios
19 March 2023	16:15–20:03	<i>V</i>	173.2	1.32	0.161 ± 0.005
	16:36–20:02	<i>J</i>	133.7	1.16	0.151 ± 0.006
		<i>H</i>	108.6	1.72	0.155 ± 0.005
		<i>K_s</i>	124.6	1.30	0.157 ± 0.010
9 April 2023	13:40–17:32	<i>V</i>	338.8	1.54	0.152 ± 0.006
	14:05–17:31	<i>J</i>	154.9	1.18	0.152 ± 0.007
		<i>H</i>	443.9	1.55	0.159 ± 0.002
		<i>K_s</i>	183.7	1.37	0.148 ± 0.011
7 August 2024	12:11–15:28	<i>J</i>	123.6	1.48	0.162 ± 0.004
		<i>H</i>	120.1	1.41	0.156 ± 0.004
		<i>K_s</i>	106.6	1.00	0.134 ± 0.018

分子量は 2.36 g mol^{-1} とした。観測結果に合うように惑星直径 $187,600 \text{ km}$ を0.9倍から1.0倍まで0.01倍刻みに変更してパラメータを調整した。分子成分が強く吸収する波長では、大気が数スケールハイトにわたって不透明になることがある(Deming et al. 2018)。Yelle (2004)と Koskinen et al. (2013)は、恒星のXUV放射がホットジュピターの熱圏を加熱することを示した。この強い加熱により、惑星の上層大気が大幅に膨張し、実質的なスケールハイトが大きくなる。この膨張を考慮するため、大気モデルに膨張係数 b_s を導入した。膨張した大気は、近赤外線深い分子吸収帯を示す。このスケール係数はスケールハイト H を以下の式に基づいて修正する。

$$H' = \frac{kT}{\mu g} \times b_s, \quad (5)$$

ここで、 k はボルツマン定数、 T は大気の温度、 μ は平均分子量、 g は惑星の表面重力を表す。膨張係数 b_s を用いることで、膨張の程度をパラメータ化している。本研究では、 b_s を1から10まで1ずつ増加させて調整した。また可視光波長で光学的厚み τ が1に達する圧力を、対数ステップで指数的に変化させることで、複数の惑星大気モデルスペクトルを作成した。圧力は1から 10^{-6} bar まで、対数ステップ1.0で調整した。さらに例えば、 $1.0 \times 10^{-2} \text{ bar}$ が適切と判断された場合、必要に応じて $1.0 \times 10^{-2} \text{ bar}$ ずつ増加させ $9.0 \times 10^{-2} \text{ bar}$ まで調整した。モデルスペクトルの半径比は、大気モデルスペクトルに V 、 J 、 H 、 K_s バンドのフィルター透過率を掛け合わせて計算した。作成した惑星大気モデルのうち、惑星直径は0.97倍の $182,000 \text{ km}$ 、膨張係数 b_s は1、圧力 1.0 bar の大気モデルで、観測で得られた半径比を再現できた(figure 3)。Qatar-1 bでは膨張係数 b_s は10としたため、TrES-3 bはQatar-1 bより惑星大気は膨張していないと考えられる。

次に、惑星が雲やヘイズを含む大気モデルのスペクトルについて考察する。雲のモデルにはSimple-GSFC cloud model (Bohren & Huffman 1983)を、ヘイズのモデルにはKhare-Titan-Tholin-HRI model (Khare et al. 1984)を用いた。惑星直径、膨張係数 b_s 、圧力は晴れた大気モデルと同様に調整させた。レイリー散乱の特徴は見られない

め、粒子の直径はミー散乱が起こりやすい、観測波長に近い $1.0 \mu\text{m}$ とした。大気全体に対する雲の質量比(1%、0.1%、0.01%、0.001%、0.0001%)を変化させ、異なるモデルスペクトルを生成した。作成した惑星大気モデルのうち、惑星直径は0.97倍の $182,000 \text{ km}$ 、膨張係数 $b_s = 1-3$ 、圧力 1.0 bar 、大気全体に対する雲の質量比0.1%の大気モデルで、観測で得られた主星と惑星の半径比を再現できた。さらにヘイズモデルにおいても同じパラメータ設定で観測結果を再現することができた(figure 4)。

半径比に時間変動が見られなかったことから、大気が常に晴れている、常に曇っている、または晴れたり曇ったりする可能性のいずれも否定できない。惑星が潮汐ロック状態であれば、観測される面が晴れた面または曇った面に限定されている可能性がある。一方で、晴れた大気モデルと曇りやヘイズを含む大気モデルの間で半径比の波長依存性に大きな違いが見られなかったことから、観測中に大気の状態が晴れから曇りに変化した場合でも、観測結果と矛盾しない可能性がある。さらに、膨張係数 b_s に注目すると、観測結果は $b_s = 1-3$ で再現可能であり、 $b_s = 10$ と推定したQatar-1 bと比べて大気が大きく膨張していないことが示唆される。

7. Conclusion

本研究では、TrES-3 bを可視光および近赤外線の複数波長で同時に観測し、主星と惑星の半径比の波長依存性について評価した。観測期間中に得られたデータからは、全波長で半径比がほぼ一定であり、顕著な波長依存性は観測されなかった。この結果は、Parviainen et al. (2016)が示したレイリー散乱の特徴と異なり、Mackebrandt et al. (2017)の結果を支持するものであった。

PSGを用いたモデルスペクトルとの比較から、TrES-3 bの大気は膨張係数 $b_s = 1-3$ で再現可能であり、大きく膨張していない可能性が示唆される。また、半径比に時間変動が見られなかったため、大気が常に晴れている、常に曇っている、あるいは晴れたり曇ったりしている可能性がある。

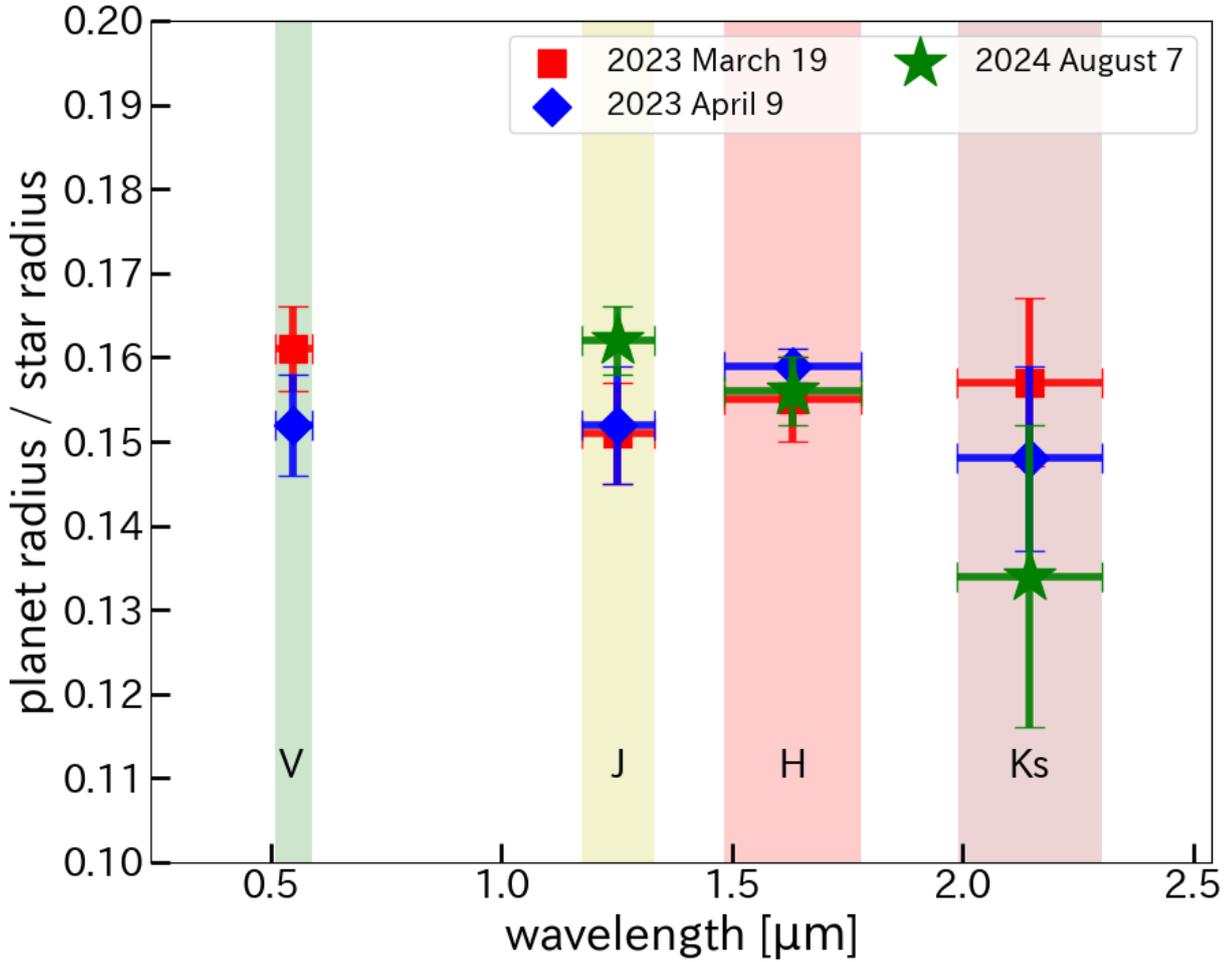


Fig. 2. The planet-to-star radius ratios for the V , J , H , and K_s bands. Red squares, blue diamonds, and green stars show the radius ratios on 19 March 2023, 9 April 2023, and 7 August 2024, respectively. The shaded regions indicate wavelength ranges of the V , J , H , and K_s bands. The vertical bars represent the uncertainties in the measurements.

Acknowledgments

本研究は、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2175 の支援を受けたものです。

Appendix A. TrES-3 b Transit Light Curves in Various Bands

このAppendixでは、2023年から2024年にかけて V 、 J 、 H 、 K_s バンドで観測したTrES-3 bのトランジット光度曲線を示す。観測された相対フラックスデータはモデルフラックスとともにプロットされ、残差 (O - C) も表示されている (figure 5)。

References

- Bohren, C. F., & Huffman, D. R. 1983, *Absorption and Scattering of Light by Small Particles* (New York: Wiley)
- Charbonneau, D., Brown, T. M., Latham, D. W., & Mayor, M. 1999, *ApJ*, 529, L45
- Claret, A., Hauschildt, P. H., & Witte, S. 2012, *A&A*, 546, A14
- Deming, D., Louie, D., & Sheets, H. 2018, *PASP*, 131, 013001
- Fortney, J. J., Lodders, K., Marley, M. S., & Freedman, R. S. 2008, *ApJ*, 678, 1419
- Henry, G. W., Marcy, G. W., Butler, R. P., & Vogt, S. S. 1999, *ApJ*, 529, L41
- Hirano, Y., & Itoh, Y. *PASJ*, submitted
- Jensen, E. 2013, *ascl:1306.007*
- Khare, B. N., Sagan, C., Arakawa, E. T., Suits, F., Callcott, T. A., & Williams, M. W. 1984, *Icarus*, 60, 127
- Koskinen, T. T., Harris, M. J., Yelle, R. V., & Lavvas, P. 2013, *Icarus*, 226, 1678
- Kreidberg, L. 2015, *PASP*, 127, 1161
- Mackebrandt, F., et al. 2017, *A&A*, 608, A26
- O'Donovan, F. T., et al. 2007, *ApJ*, 663, L37
- Parmentier, V., & Guillot, T. 2014, *A&A*, 562, A133
- Parviainen, H., Pallé, E., Nortmann, L., Nowak, G., Iro, N., Murgas, F., & Aigrain, S. 2016, *A&A*, 585, A114

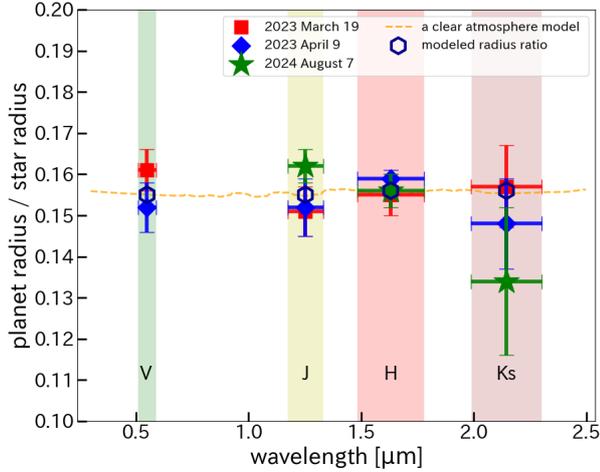


Fig. 3. Observed planet-to-star radius ratios of TrES-3 b on 19 March 2023, 9 April 2023, and 7 August 2024 compared to the clear atmospheric model spectrum. The red squares indicate the radius ratios observed on 19 March 2023. The blue diamonds represent the radius ratios observed on 9 April 2023. The green stars show the radius ratios observed on 7 August 2024. The blue dashed line represents a clear atmospheric model spectrum with H_2 83.694%, He 16.139%, CO 687.413 ppm, CH_4 21.468 ppm, H_2O 4.492 ppm, CO_2 0.001562 ppm, a mean molecular weight of 2.36 g mol^{-1} , planetary diameter of 182,000 km (0.97 times the original), an expansion factor $b_s = 1$, and the pressure of 1.0 bar. The open hexagons show the radius ratios of the atmospheric model corrected for the filter transmittance in each band.

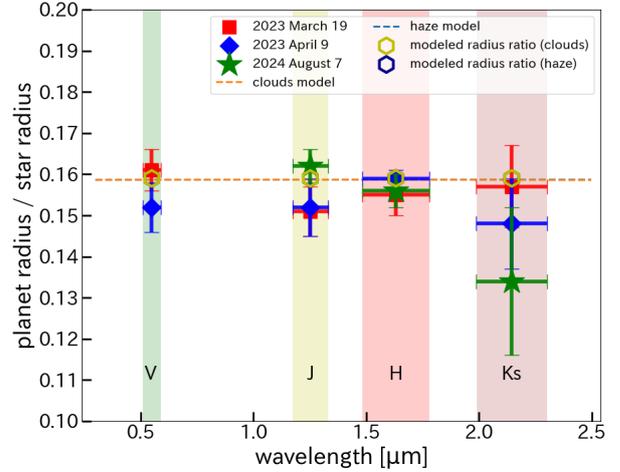


Fig. 4. Observed planet-to-star radius ratios of TrES-3 b on 19 March 2023, 9 April 2023, and 7 August 2024 compared to the cloudy atmospheric model and the haze atmospheric model spectra. The red squares indicate the radius ratios observed on 19 March 2023. The blue diamonds represent the radius ratios observed on 9 April 2023. The green stars show the radius ratios observed on 7 August 2024. The orange dashed line represents a cloudy atmospheric model spectrum with H_2 83.694%, He 16.139%, CO 687.413 ppm, CH_4 21.468 ppm, H_2O 4.492 ppm, CO_2 0.001562 ppm, a mean molecular weight of 2.36 g mol^{-1} , planetary diameter of 182,000 km (0.97 times the original), an expansion factor $b_s = 1$, the cloud particle diameter of $1.0 \mu\text{m}$, the mass abundance of cloud relative to the entire atmosphere of 0.1%, and the pressure of 1.0 bar. The blue dashed line represents the haze model, which uses the same parameters as the cloudy atmospheric model. The open triangles and open hexagons show the radius ratios of the atmospheric models, corrected for the filter transmittance in each band.

- Pont, F., Sing, D. K., Gibson, N. P., Aigrain, S., Henry, G., & Husnoo, N. 2013, *MNRAS*, 432, 2917
- Rafferty, A. E. 1995, *Sociological methodology*, 25, 111
- Tabata, H., & Itoh, Y. 2020, *Int. J. Astron. Astrophys.*, 10, 89
- Villanueva, G. L., Smith, M. D., Protopapa, S., Faggi, S., & Mandell, A. M. 2018, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 217, 86
- Winn, J. N., et al. 2007, *AJ*, 134, 1707
- Winn, J. N., et al. 2008, *ApJ*, 683, 1076
- Yelle, R. V., 2004, *Icarus*, 170, 167

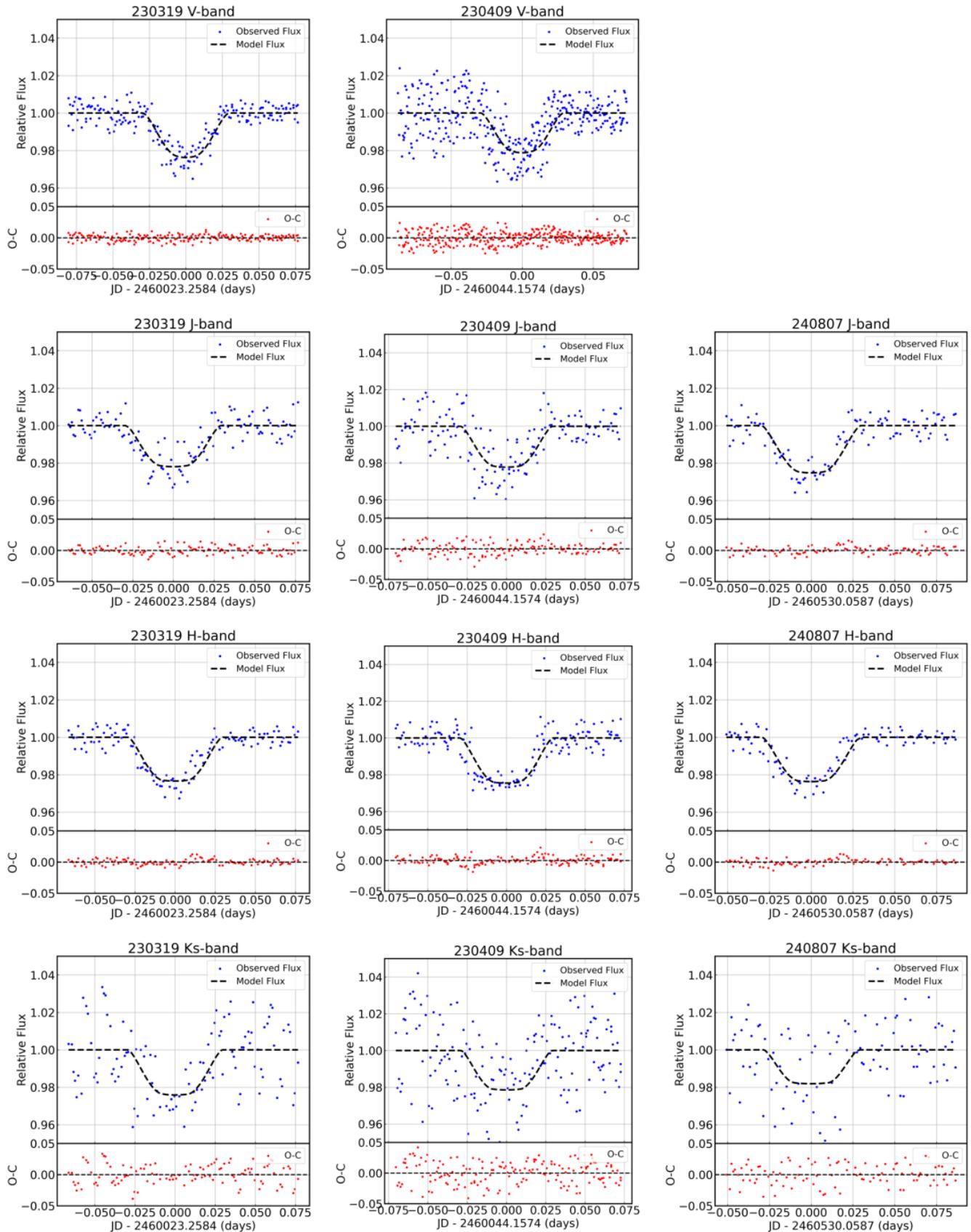


Fig. 5. The transit light curves of TrES-3 b observed from 19 March 2023 to 7 August 2024 are shown in various bands (V , J , H , K_s). The blue points represent the observed relative flux, while the black line indicates the model flux. The bottom panels show the residuals ($O - C$) between the observed and model fluxes for each band.