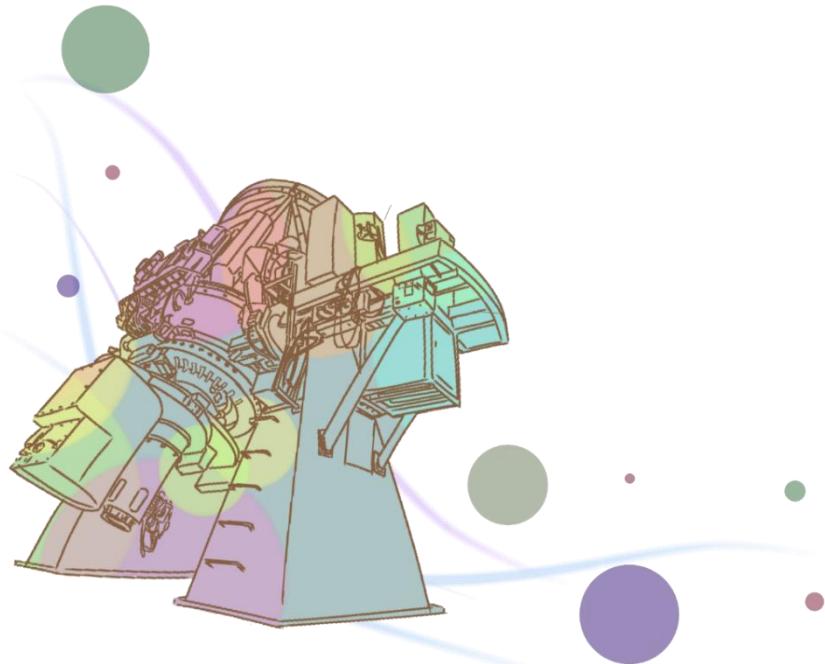


太陽系外惑星Qatar-1 bとTrES-3 bの複数波長トランジット観測による天気の変動の調査

平野 佑弥 伊藤 洋一（兵庫県立大学）



credit: NASA / CXC / M. Weiss.

トランジット法

太陽系外惑星を観測するために、
様々な方法が試みられている。

トランジット法は惑星が主星の前を通過
する際の主星の一時的な減光を利用して、
惑星を発見する方法。

$$\frac{\Delta F}{F} = \left(\frac{R_p}{R_*} \right)^2$$

- ΔF : 変化した明るさ
- R_p : 惑星の半径
- F : 主星の明るさ
- R_* : 主星の半径

惑星に大気が存在する場合、特定の波長の
光は大気によって吸収される。

減光率の波長依存性から惑星の天気と、
晴れている場合には大気組成を推定する
ことができる。

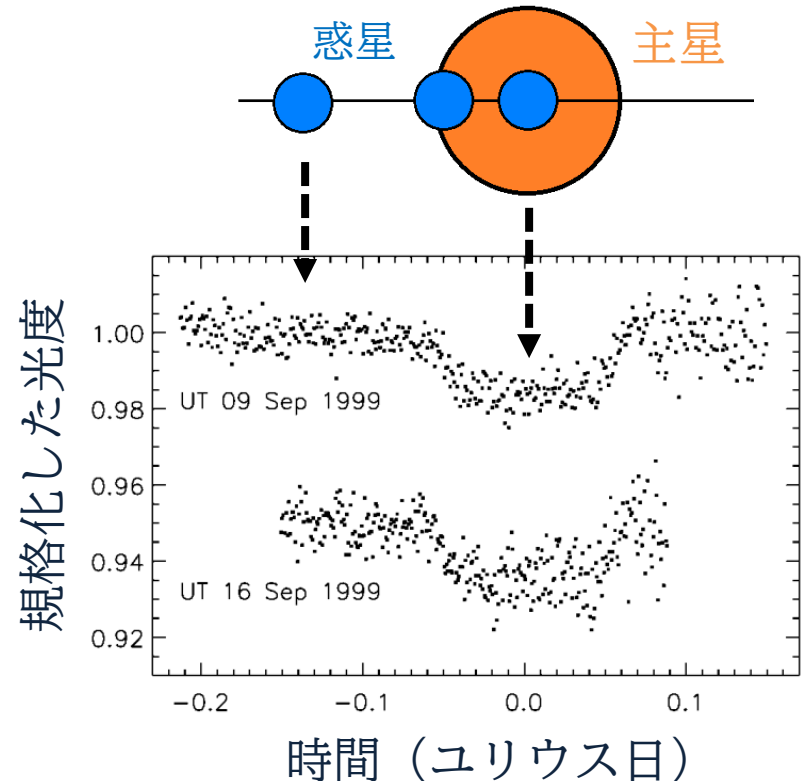


図1 HD209458 bのRバンド(0.66 μm)での
トランジット観測 (Charboneau et al. 2000)

晴れた大気

惑星が晴れた大気を持つ場合、
近赤外線波長で分子の吸収の特徴
が見られる。

Tinetti et al. (2010)は
ハッブル宇宙望遠鏡(HST)を用いて
ホットジュピターXO-1 bの近赤外線
トランジット観測を行った。

観測値と紫のスペクトルが最も合い、
 H_2O 、 CH_4 、 CO_2 を持つと推定した。

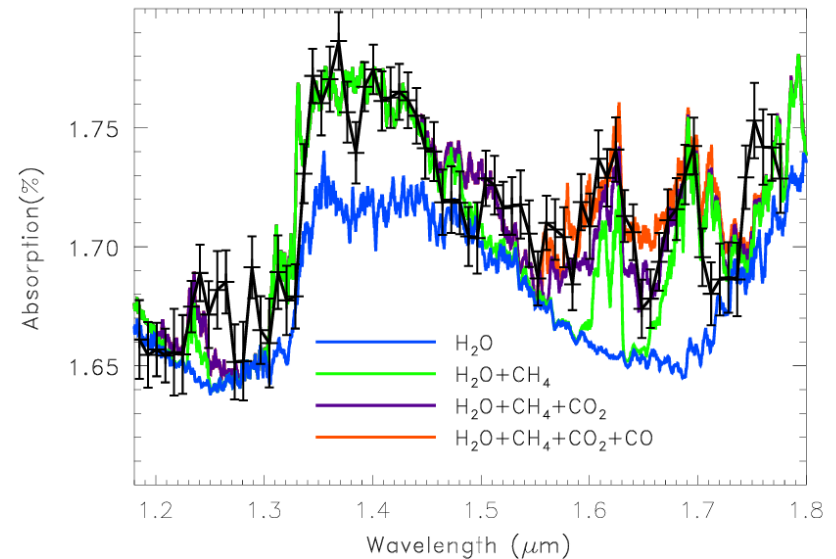


図2 XO-1 bの近赤外透過スペクトル
黒の点：HSTによる観測点
紫のスペクトル： H_2O 、 CH_4 、 CO_2 を含む
大気モデル
(Tinetti et al. 2010)

曇った大気

惑星大気中に雲やヘイズ(微粒子)が存在し曇った大気を持つ場合、原子や分子の吸収の特徴が隠されてしまい、平坦なスペクトルが観測される。

晴れた惑星や曇った惑星は発見されているが、**天気の変化するような惑星は見つかっていない。**

天気の変化を直接検出するには、同じ惑星に対する複数波長での継続的なトランジット観測が必要とされる。

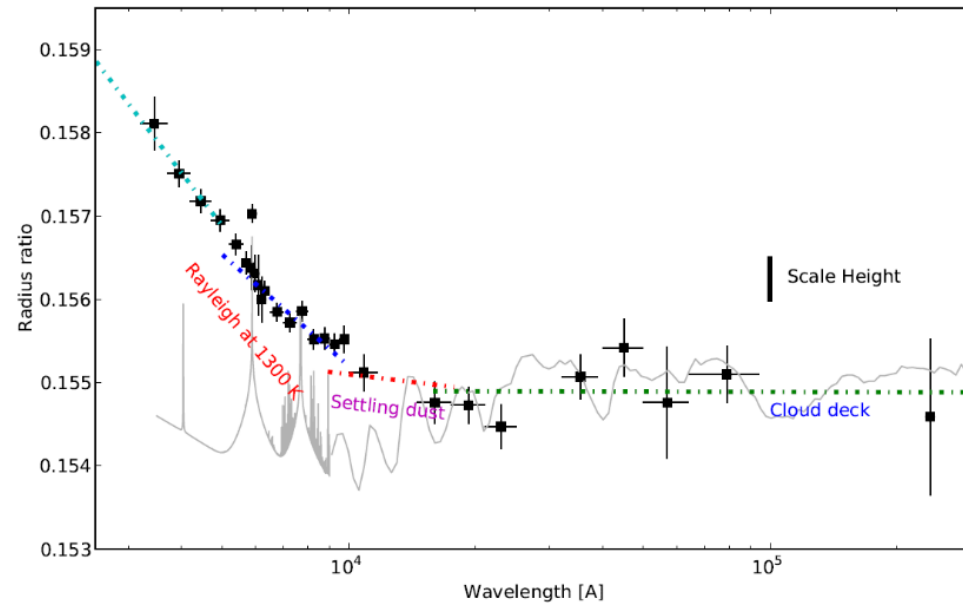


図3 HD189733 bの可視近赤外透過スペクトル
黒の点:HSTとSpitzer宇宙望遠鏡による観測点
灰色のスペクトル:ダスト・雲なしモデル
点線:雲とヘイズを考慮したモデル

可視光領域ではヘイズ、近赤外領域では雲により分子の吸収の特徴が隠された可能性がある (Pont et al. 2013)。

研究の目的

惑星の大気中に存在する雲やヘイズが観測時期によって変動する場合、透過スペクトルの形状も変化する可能性がある。

西はりま天文台のなゆた望遠鏡と60 cm望遠鏡を用いて、太陽系外惑星を可視光領域と近赤外線領域で同時に長期間観測することで、雲やヘイズの有無による主星と惑星の半径比の変動を捉え、太陽系外惑星の天気を観測する。

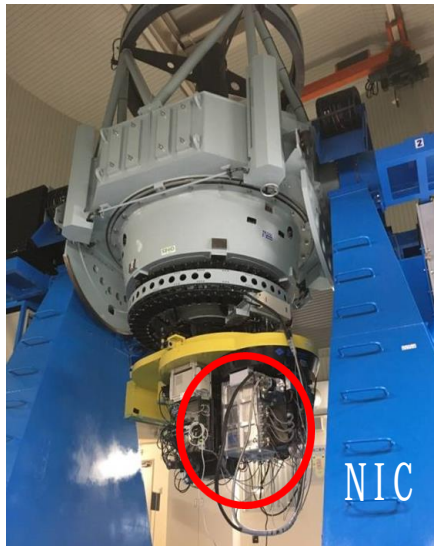


図4 なゆた望遠鏡と近赤外撮像装置NIC



図5 60 cm望遠鏡とSTL

太陽系外惑星 Qatar-1 b

Qatar-1 bは地球から約190 pc離れた
ホットジュピターである。

Qatar-1

- ・有効温度 4860 ± 130 K
- ・ 0.82 ± 0.03 太陽半径
- ・ 0.85 ± 0.03 太陽質量
- ・ V mag 12.843 ± 0.137 (TASS4)

Qatar-1 b (ホットジュピター)

- ・ 1.16 ± 0.05 木星半径
- ・ 1.09 ± 0.08 木星質量
- ・ 周期 約1.42 日

(Alsubai et al. 2011)

Qatar-1 bの観測では、同じ波長帯であっても
観測日ごとに異なる主星と惑星の半径比を
示すことがあった(Maciejewski et al. 2015,
Su et al. 2021)。

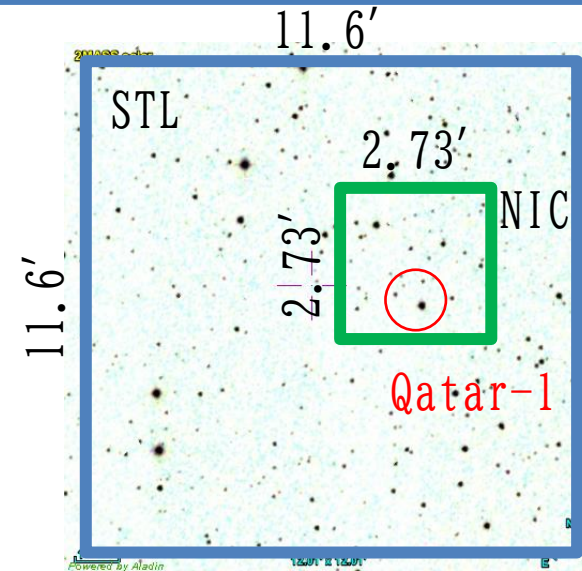


図6 Qatar-1星図

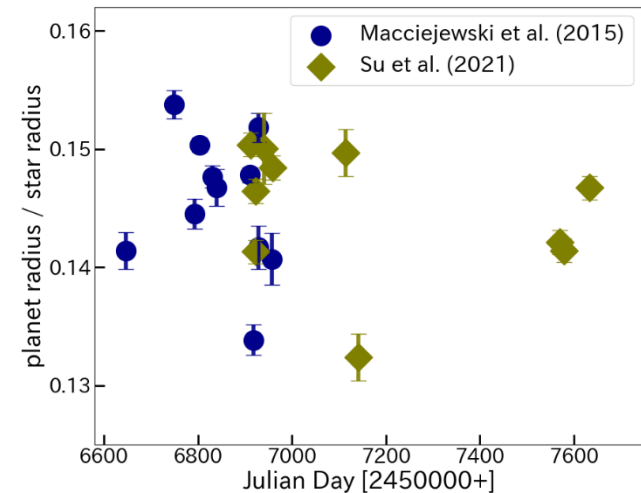


図7 観測日ごとの可視光Rバンドでの主星と惑星の半径比
0.13から0.16の範囲で異なる半径比が観測された。

太陽系外惑星 TrES-3 b

TrES-3 bは地球から約240 pc離れた
ホットジュピターである。

TrES-3

- ・有効温度 5720 ± 150 K
- ・ 0.90 ± 0.15 太陽半径
- ・ 0.80 ± 0.05 太陽質量
- ・V mag 12.402 ± 0.006

TrES-3 b (ホットジュピター)

- ・ 1.30 ± 0.08 木星半径
 - ・ 1.92 ± 0.23 木星質量
 - ・周期 約1.31 日
- (O' Donovan et al. 2007)

Parviainen et al. (2016)は可視光分光観測を
行い、短波長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)はデータ
の再解析と追観測を行った結果、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。

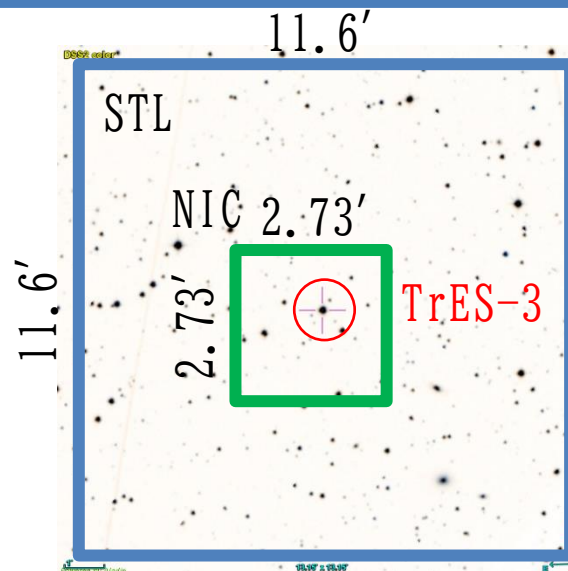


図8 TrES-3星図

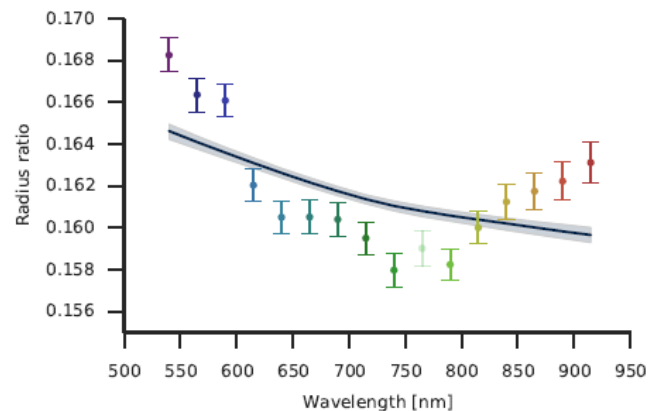


図9 TrES-3 bの可視光透過スペクトル
実線はレイリー散乱による半径比の変化
(Parviainen et al. 2016)

観測

観測天体：Qatar-1 b (Qatar-1)

:TrES-3 b (TrES-3)

観測期間：2021/9/15 - 2023/10/12
(20夜)

:2023/3/19 - 2024/8/7
(7夜)

観測装置：なゆた望遠鏡(200 cm)

近赤外撮像装置NIC

Jバンド (1.25 μm), Hバンド (1.63 μm), Ksバンド (2.15 μm)

3バンド同時観測

: 60 cm 望遠鏡

SBIG STL-1001 Vバンド (0.55 μm)

露出時間：30 - 120 秒

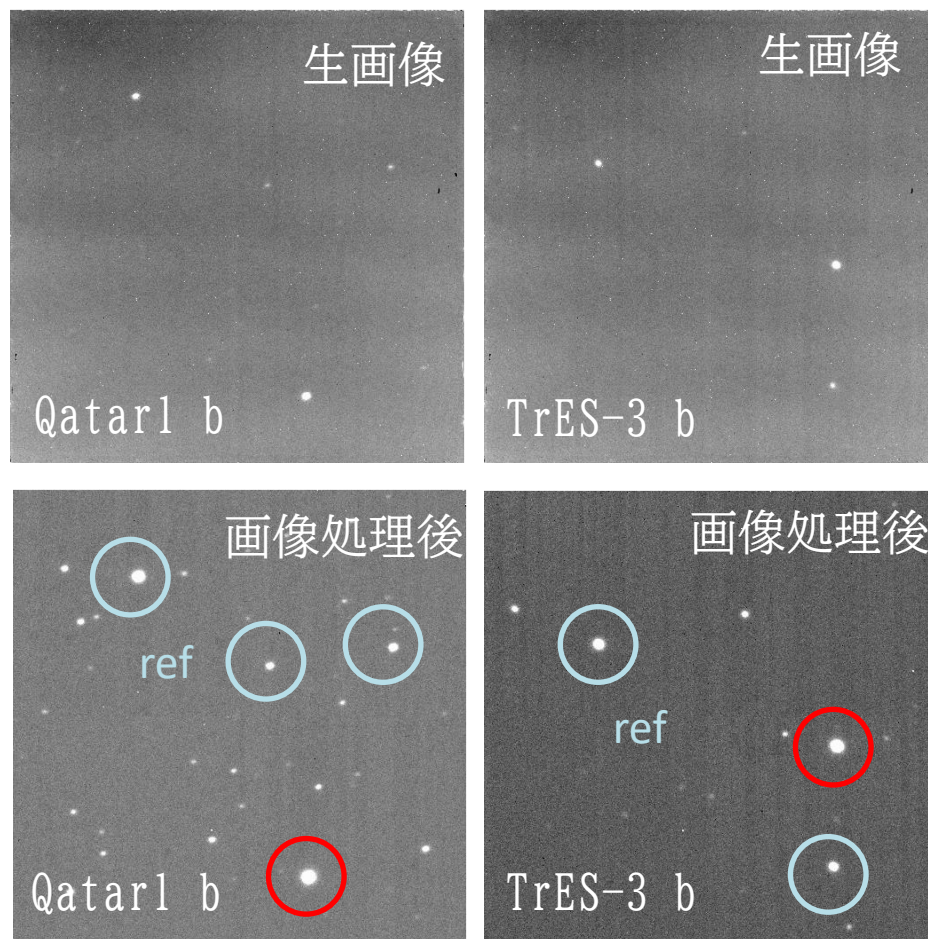
トランジットとトランジット前後1時間の約4時間観測を行った。
観測には星の位置を少しずつ変えるディザリング観測を用いた
(半径10" で10か所)。

解析方法

解析は以下の通りに行った。

- ①暗電流の除去
- ②感度ムラの補正
- ③バッドピクセル補正
- ④スカイパターン除去 **NICのみ**
- ⑤縦縞パターン除去 **NICのみ**
- ⑥宇宙線除去

- ⑦アパーチャー測光
- ⑧相対フラックスを求める
- ⑨規格化
- ⑩ディザリング位置補正
- ⑪ 2σ 以上の外れ値を除去



対象星のフラックス(光子のカウント数)を標準星のフラックスで割ったものを相対フラックスとした。

図10 生画像と画像処理後の画像(NIC, Hバンド)

結果 光度曲線

光度曲線フィッティングは以下の手順で行った。

1. ベースラインの評価(BIC)
2. 周縁減光モデルの評価(BIC)
3. 主星と惑星の半径比の計算
4. 赤色ノイズの評価(β ファクター法)
5. 最終的な半径比の推定(MCMC法)

○Qatar-1 b

20夜の観測のうち4バンドで
5夜トランジットが検出できた。

○TrES-3 b

7夜の観測のうち4バンドで
2夜トランジットが検出できた。

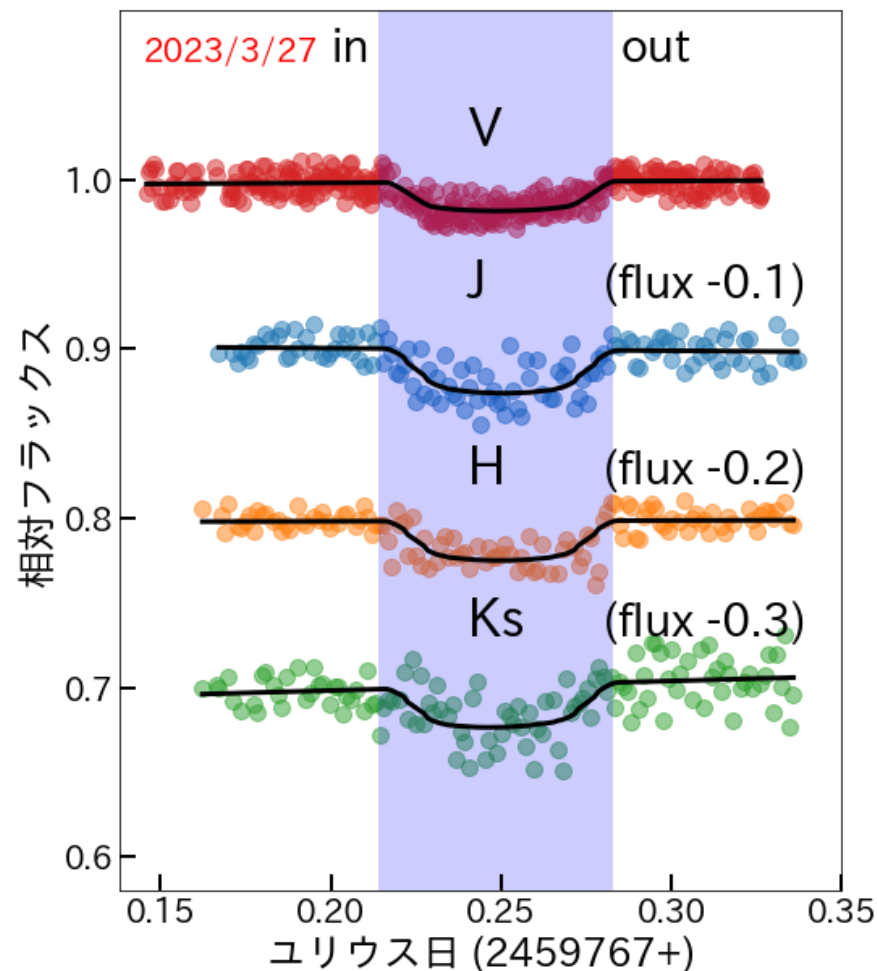


図11 2023年3月27日のV, J, H, K_sバンドでのQatar1-bの相対フラックスと光度曲線

結果 惑星半径比の比較

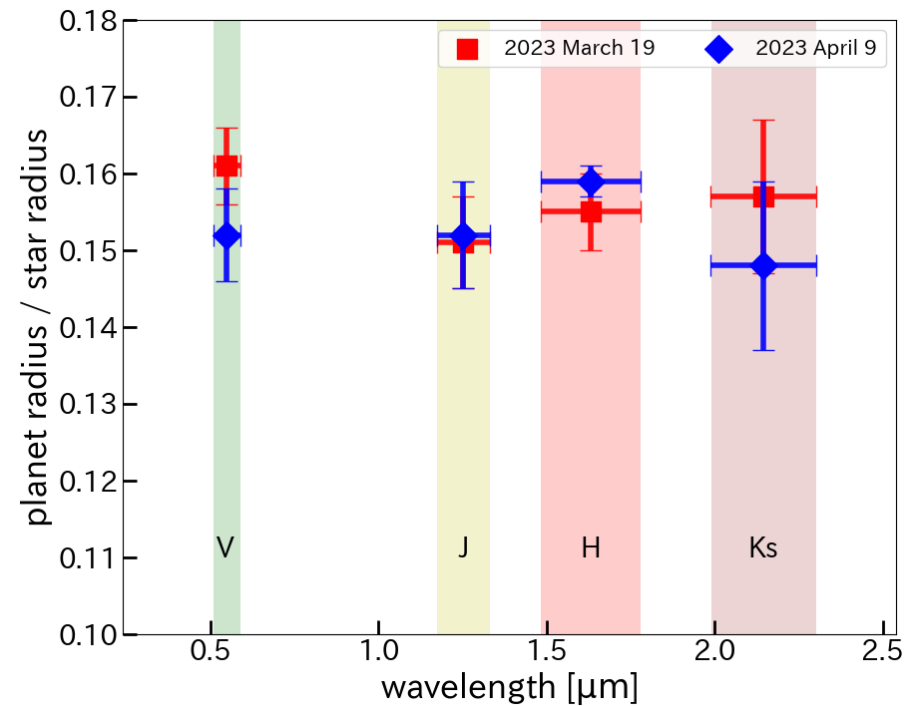
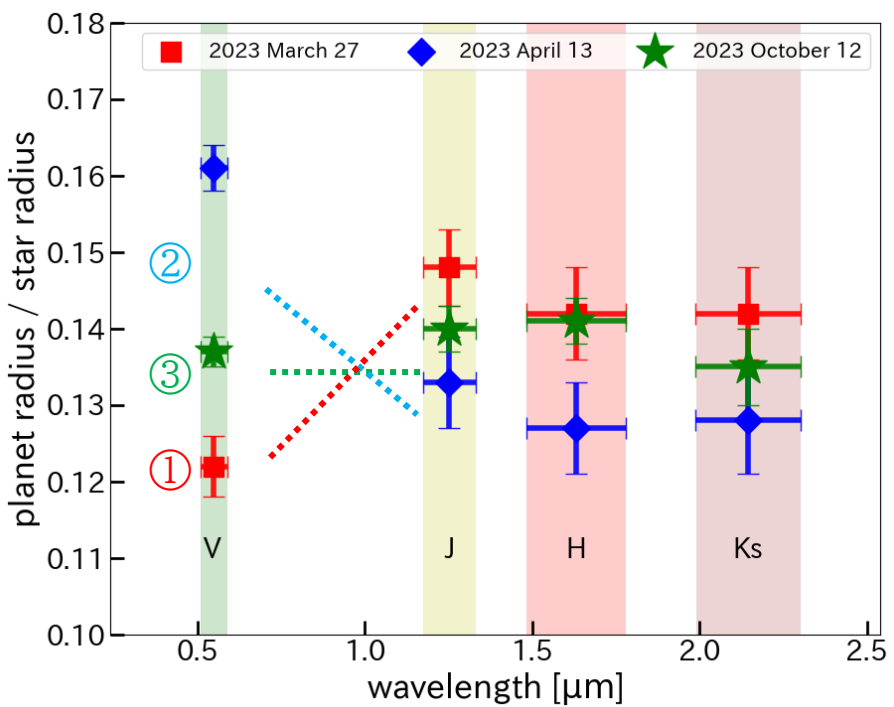


図12 Qatar-1 bの主星と惑星の半径比

図13 TrES-3 bの主星と惑星の半径比

Qatar-1 bでは、
 ①可視光 小 近赤外 大 ↑
 ②可視光 大 近赤外 小 ↓
 ③可視光 近赤外 一定 →

の3つのパターンが見られ、半径比が複数波長で時間変動する結果が得られた。

一方で、TrES-3 bでは可視光と近赤外で半径比はほぼ一定だった。

考察 Qatar-1 bの天気

大気モデルの作成にはPlanetary Spectrum Generator (PSG)を用いた (Villanueva et al. 2018)。

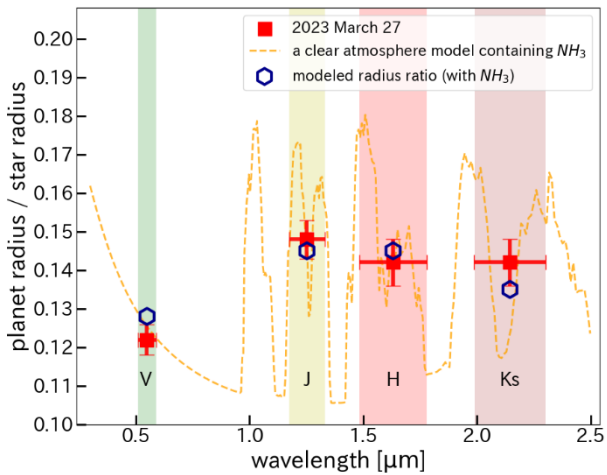


図14 Qatar-1 bの晴れた大気モデル

3月27日の半径比から、
 大気組成 : H₂ 99%, NH₃ 1%
 惑星直径 : 130,400 km
 膨張係数 : $b_s=10$
 と推定し、4月13日、10月12日
 にも反映した。

$$H' = \frac{kT}{\mu g} \times b_s$$

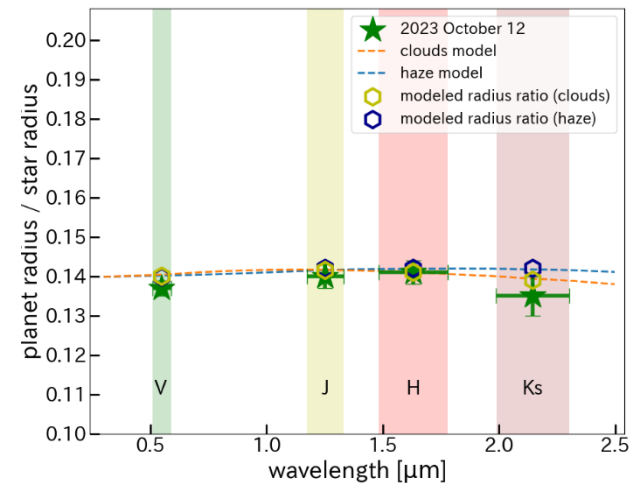
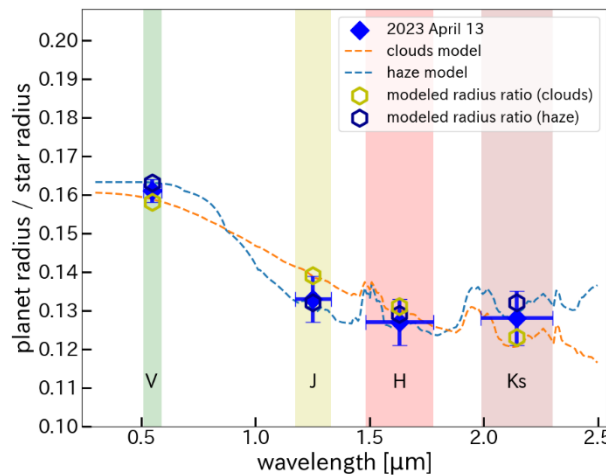


図15 Qatar-1 bの雲モデル(Bohren & Huffman 1983)とヘイズモデル(Khare et al. 1984)

Qatar-1 b	モデル	圧力 (bar)	粒子直径 (μm)	粒子の存在量 (%)
3月27日↑	晴れ	5.0×10^{-1}	-	-
4月13日↓	雲	4.0×10^{-4}	0.1	0.1
	ヘイズ	5.0×10^{-5}	0.01	1.0
10月12日→	雲	1.0×10^{-5}	1.0	1.0
	ヘイズ	2.0×10^{-5}	1.0	1.0

考察 TrES-3 bの天気

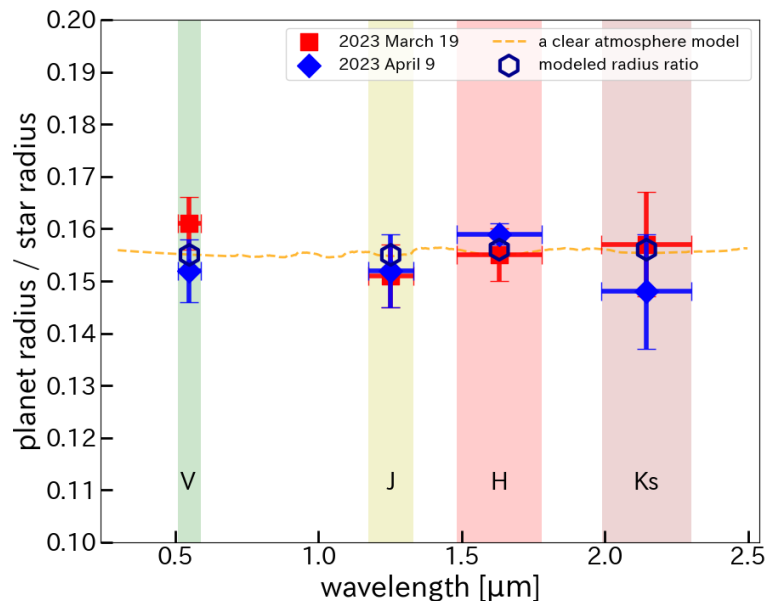


図16 TrES-3 bの晴れた大気モデル

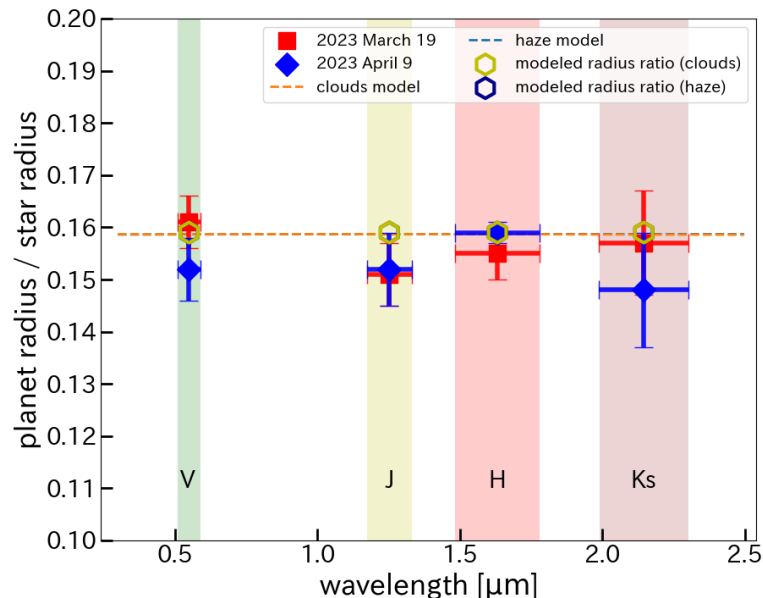


図17 TrES-3 bの雲モデル(Bohren & Huffman 1983)とヘイズモデル(Khare et al. 1984)

半径比に目立った特徴が見られないため、大気組成は H_2 , He, CO, CH_4 , H_2O , CO_2 を設定した。

惑星直径 : 178,200 km
 膨張係数 : $b_s=1-3$
 で再現できた。

TrES-3 b	モデル	圧力 (bar)	粒子直径 (μm)	粒子の存在量 (%)
3月19日	晴れ	1.0×10^0	-	-
4月9日	雲	1.0×10^0	1.0	0.1
	ヘイズ	1.0×10^0	1.0	0.1

考察 Qatar-1 bとTrES-3 bの天気

Qatar-1 bで主星と惑星の半径比が複数波長で時間変動する結果が初めて得られた。

これは雲・ヘイズの有無、粒子の成長、雲やヘイズの高度変化で説明できる。

Qatar-1 b	モデル	圧力 (bar)	粒子直径 (μm)	粒子の存在量 (%)
3月27日↑	晴れ	5.0×10^{-1}	-	-
4月13日↓	雲	4.0×10^{-4}	0.1	0.1
	ヘイズ	5.0×10^{-5}	0.01	1.0
10月12日→	雲	1.0×10^{-5}	1.0	1.0
	ヘイズ	2.0×10^{-5}	1.0	1.0

TrES-3 bでは主星と惑星の半径比の時間変動は見られなかった。

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。

TrES-3 b	モデル	圧力 (bar)	粒子直径 (μm)	粒子の存在量 (%)
3月19日	晴れ	1.0×10^0	-	-
4月9日	雲	1.0×10^0	1.0	0.1
	ヘイズ	1.0×10^0	1.0	0.1

まとめ

- ・ 2021年9月-2024年8月の期間にV, J, H, K_s バンドの4バンドすべてを使用して Qatar-1で20夜、TrES-3で7夜観測を行った。

Qatar1 b

- ・ 得られた主星と惑星の半径比は
 - ①可視光で小さく近赤外で大きい↑、
 - ②可視光で大きく近赤外で小さい↓、
 - ③可視光と近赤外で一定→ の3つのパターンが得られた。
- ・ Qatar-1 bでは半径比の時間変動が見られた。
この変動は①晴れ ②くもり ③くもり(粒子の成長)で説明できる。
- ・ 雲・ヘイズの有無、粒子の成長、雲やヘイズの高度変化で説明できる。

TrES-3 b

- ・ TrES-3 bでは主星と惑星の半径比の時間変動は見られなかった。
- ・ 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。

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。また埼玉大学には曇天にもかかわらず観測にご協力いただき感謝申し上げます。

考察 晴れの日 (Qatar-1 b)

大気モデルの作成にはPlanetary Spectrum Generator (PSG)を用いた
(Villanueva et al. 2018)。

はじめに晴れた場合の大気モデルを作成した。

惑星の大気組成は H_2 99%と仮定し、
残りの1%を CH_4 や NH_3 などの分子を設定した。

パラメータは以下の範囲で調べた。

- 惑星直径 81,500 km - 163,000 km - 244,500 km
(0.1倍刻み)
- 膨張係数 b 1 - 10 (1刻み)
- 圧力 $1.0 \times 10^0 - 1.0 \times 10^{-6}$ bar (指数表記で1.0刻み)

3月27日↑ : H_2 99%, NH_3 1%, 惑星直径130,400 km,
膨張係数 $b=10$, 圧力 5.0×10^{-1} barで再現できる。

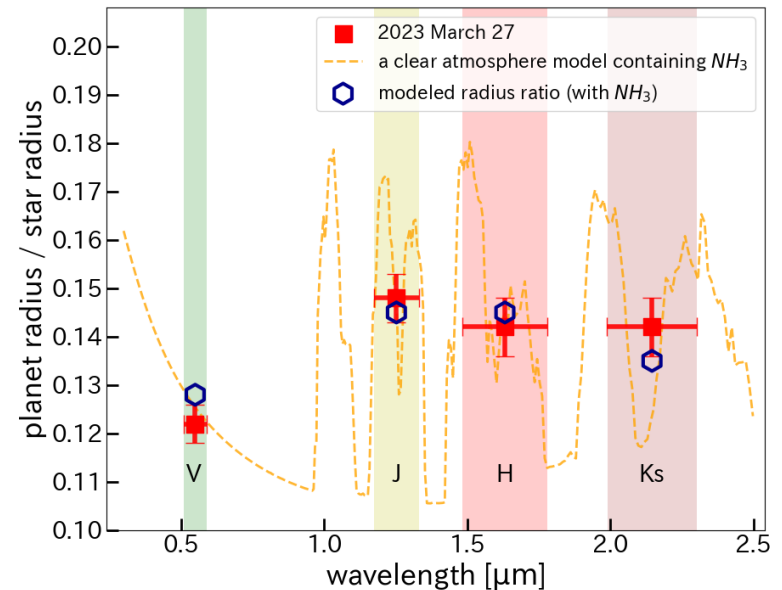


図18 Qatar-1 bの晴れた大気モデル
スペクトル

膨張を考慮したスケールハイト

$$H' = \frac{kT}{\mu g} \times b_s$$

考察 くもりの日 (Qatar-1 b)

雲とヘイズによる変動を考えた。

- ・ 大気組成 H_2 99% NH_3 1%
- ・ 惑星直径 130,400 km
- ・ 膨張係数 $b=10$ を晴れの日と同様に仮定し、雲モデル(Bohren & Huffman 1983)とヘイズモデル(Khare et al. 1984)を挿入した。

雲やヘイズのパラメータは以下の範囲で調べた。

- ・ **粒子直径** $0.01 \mu\text{m} - 1.0 \mu\text{m}$ (0.1倍刻み)
- ・ **存在比** $0.0001\% - 1.0\%$ (0.1倍刻み)
- ・ **圧力** $1.0 \times 10^0 - 1.0 \times 10^{-6} \text{ bar}$ (1.0刻み)

4月13日↓：粒子直径 $0.1 \mu\text{m}$ ，存在比 0.1% ，圧力 $4.0 \times 10^{-4} \text{ bar}$ の雲モデルと粒子直径 $0.01 \mu\text{m}$ ，存在比 1.0% ，圧力 $8.0 \times 10^{-4} \text{ bar}$ のヘイズモデルで再現できる。

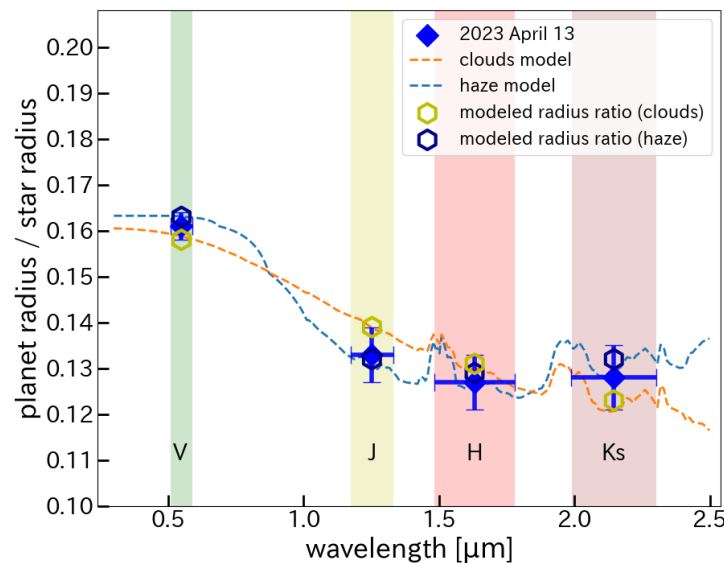


図19 雲およびヘイズモデルの比較

考察 くもりの日(粒子の成長) (Qatar-1 b)¹⁸

10月12日→の観測では可視光近赤外では主星と惑星の半径比は一定だった。

10月12日→の半径比は、
粒子直径1.0 μm , 存在比1.0%,
圧力 1.0×10^{-5} barの雲モデルと
粒子直径1.0 μm , 存在比1.0%,
圧力 2.0×10^{-5} barのヘイズモデルで再現できる

4月13日↑と10月12日→では粒子が成長したことで、粒子直径が変わった可能性がある。

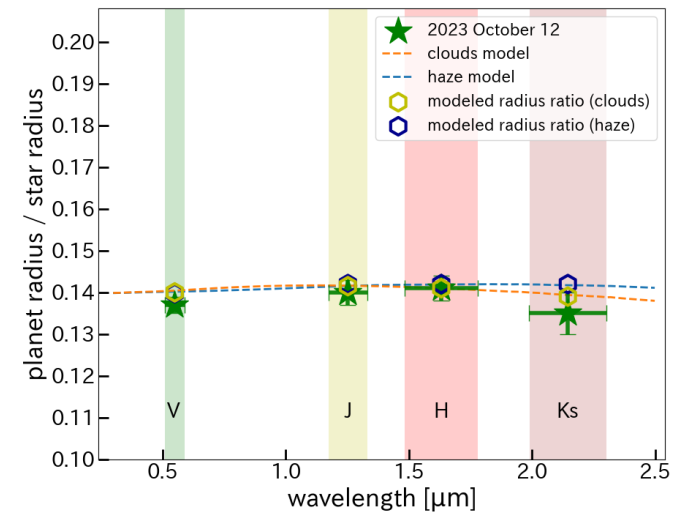


図20 粒子直径1.0 μm の雲およびヘイズモデルの比較

考察 晴れの日 (TrES-3 b)

はじめに晴れた場合の大気モデルを作成した。

主星と惑星の半径比に目立った特徴が見られないため、太陽系外惑星によくみられる主要なガス分子を設定した(H_2 83.694%, He 16.139%, CO 16.139%, CH_4 21.468 ppm, H_2O 4.492 ppm, CO_2 0.001562 ppm)。

パラメータは以下の範囲で調べた。

- ・ **惑星直径** 168,800 km - 187,600 km - 206,400 km (0.01倍刻み)
- ・ **膨張係数b** 1 - 10 (1刻み)
- ・ **圧力** $1.0 \times 10^0 - 1.0 \times 10^{-6}$ bar (指数表記で1.0刻み)

惑星直径178,200 km, 膨張係数b=1, 圧力1.0 bar
で再現できる。

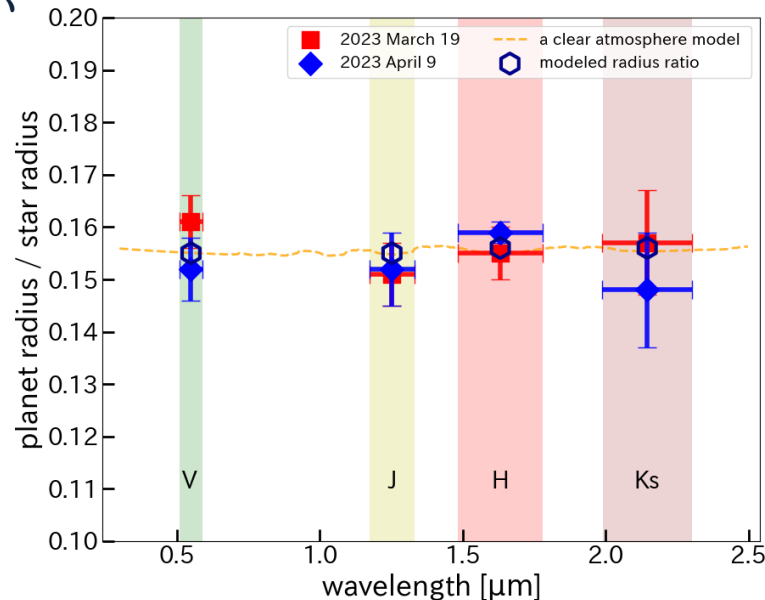


図21 TrES-3 bの晴れた大気モデル
スペクトル

考察 くもりの日 (TrES-3 b)

雲とヘイズによる変動を考えた。

- ・ 大気組成
- ・ 惑星直径 178,200 km
- ・ 膨張係数 $b=1$ を晴れの日と同様に仮定し、雲モデル(Bohren & Huffman 1983)とヘイズモデル(Khare et al. 1984)を挿入した。

雲やヘイズのパラメータは以下の範囲で調べた。

- ・ **粒子直径** 0.01 μm - 1.0 μm (0.1倍刻み)
- ・ **存在比** 0.0001% - 1.0% (0.1倍刻み)
- ・ **圧力** 1.0×10^0 - 1.0×10^{-6} bar (1.0刻み)

惑星直径178,200 km, 膨張係数 $b=1$, 圧力1.0 bar
粒子直径1.0 μm , 存在比0.1%で再現できる。

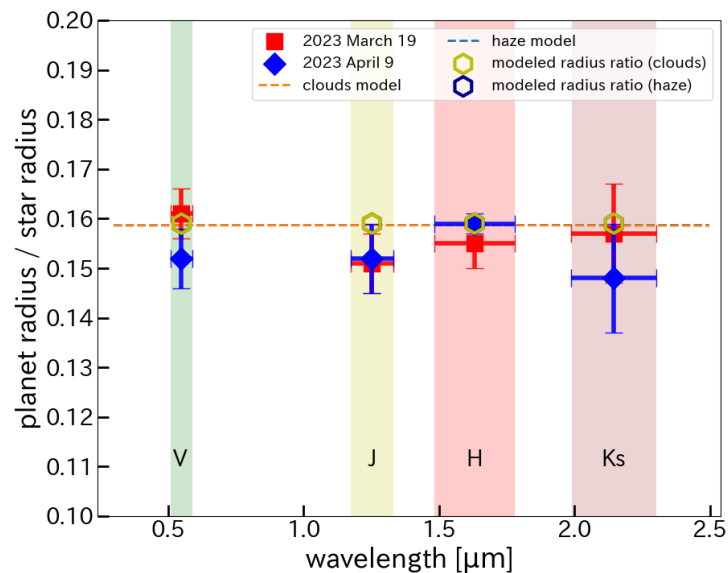


図22 雲およびヘイズモデルの比較