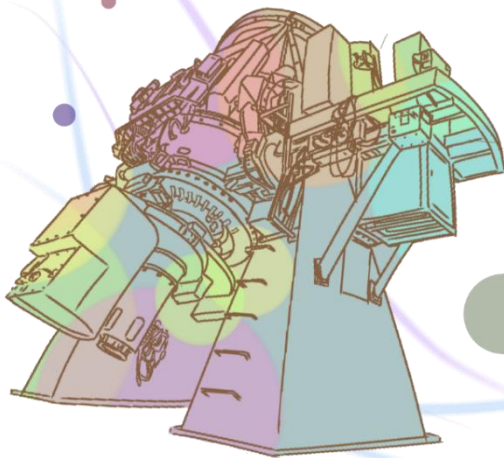


# 可視光近赤外トランジット観測による太陽系外惑星の天気の研究

平野佑弥、伊藤洋一(兵庫県立大学)



# 多波長トランジット観測

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。

太陽系外惑星のトランジットの減光率の波長依存性を調べることで惑星の大気組成を推定することができる。

ホットジュピターは $\text{H}_2$ を主成分とする大気を持つ。また $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ などが検出されている。これらの分子は近赤外領域で振動遷移により大きな吸収を示す。

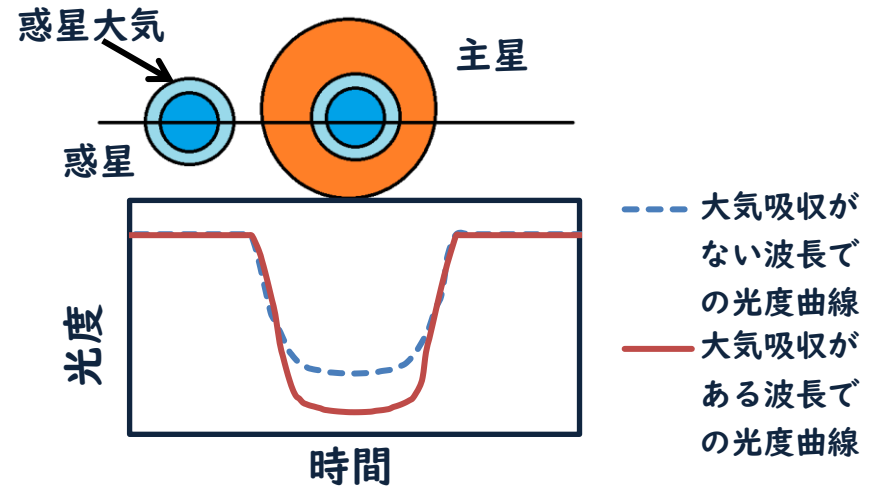


図1 大気吸収がない波長と大気吸収がある波長の減光率の違い

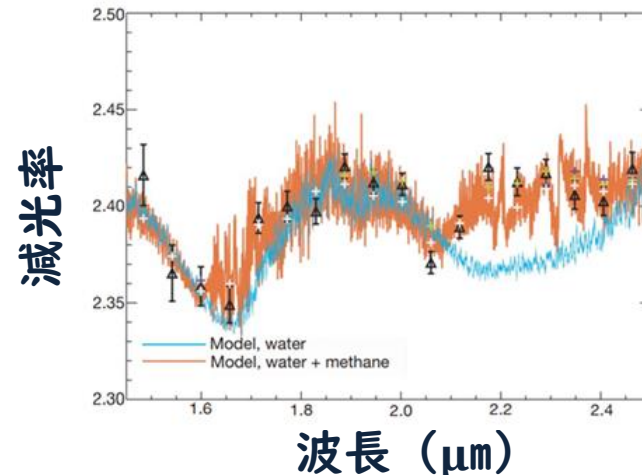


図2 HD189733 b大気モデル。 $\text{H}_2$ が99%の大気に $\text{H}_2\text{O}$ (青),  $\text{H}_2\text{O}+\text{CH}_4$ (オレンジ)を加えたモデル。黒の点はHSTによる観測値(Swain et al. 2008)

# 可視光領域の大気モデルとの不一致

2021年9月15日に行ったQatar-1 bの近赤外線トランジット観測では、大気モデルと比較することでCO<sub>2</sub>を含む晴れた大気を持つ可能性を示した。

しかしCovino et al. (2013)の可視光領域Rバンドの観測では近赤外領域の観測で得られた半径比から作成した大気モデルより約30%大きな惑星半径を示した。

本研究では観測時期によって大気中の雲やヘイズ粒子(微粒子)の状態が変わったことにより大気モデルとの不一致が引き起こされたと考えた。

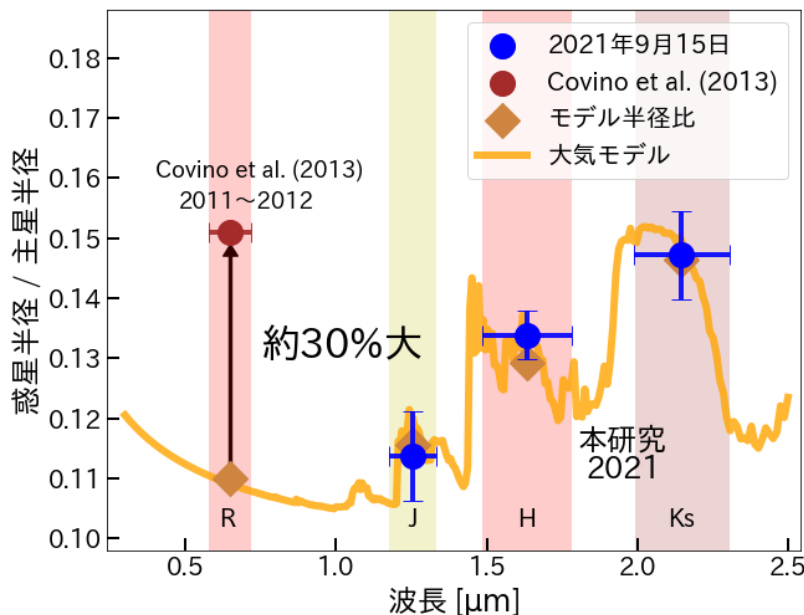


図3 可視光Rバンドでの大気モデルとの不一致

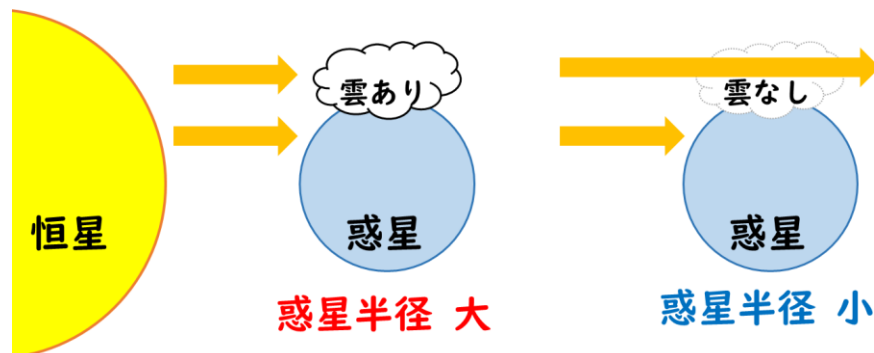


図4 雲の有無による惑星半径変動の模式図

# 研究の目的

長期的な観測を行うことにより、数日から数か月のタイムスケールで惑星半径の変動が観測できれば、その変動から惑星の天気を調べることができる可能性がある。

西はりま天文台のなゆた望遠鏡と60 cm望遠鏡を用いて、同じ太陽系外惑星を**長期間**かつ**高頻度**に**可視光領域**と**近赤外領域**で観測することで、微粒子や雲による惑星半径の変動を捉え、太陽系外惑星の天気を観測する。

本研究により、太陽系外惑星の天気という新たな特徴を推定することが可能となり、惑星天気の基礎研究として重要な役割を果たすと考えられる。

# 観測

観測天体：Qatar-1 b (Qatar-1)

観測期間：2021年9月15日 - 2023年5月10日 (計19夜)

観測装置：西はりま天文台なゆた望遠鏡 (200 cm)  
近赤外撮像装置NIC (J, H, Ksバンド同時)  
：西はりま天文台60 cm 望遠鏡  
SBIG STL-1001 (Vバンド)

露出時間：30 - 120 秒

トランジットとトランジット前後1時間の観測を行った。

解析は以下の手順で行った。

- ①ダーク引き
- ②フラット補正
- 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



図5 なゆた望遠鏡と近赤外撮像装置NIC



図6 60 cm望遠鏡とSTL

# 観測天体 Qatar-1 b

Qatar-1は約600 光年離れた恒星であり、Qatar-1 bは2011年にNew Mexico Skies ObservatoryのQatar Exoplanet Surveyによって可視光で発見された。

## Qatar-1 (主星)

- ・有効温度  $4860 \pm 130$  K
- ・ $0.82 \pm 0.03$  太陽半径
- ・ $0.85 \pm 0.03$  太陽質量

## Qatar-1 b (太陽系外惑星)

- ・ $1.16 \pm 0.05$  木星半径
- ・ $1.09 \pm 0.08$  木星質量
- ・表面重力 約 $20 \text{ m/s}^2$
- ・周期 約1.42 日

(Alsubai et al. 2011)

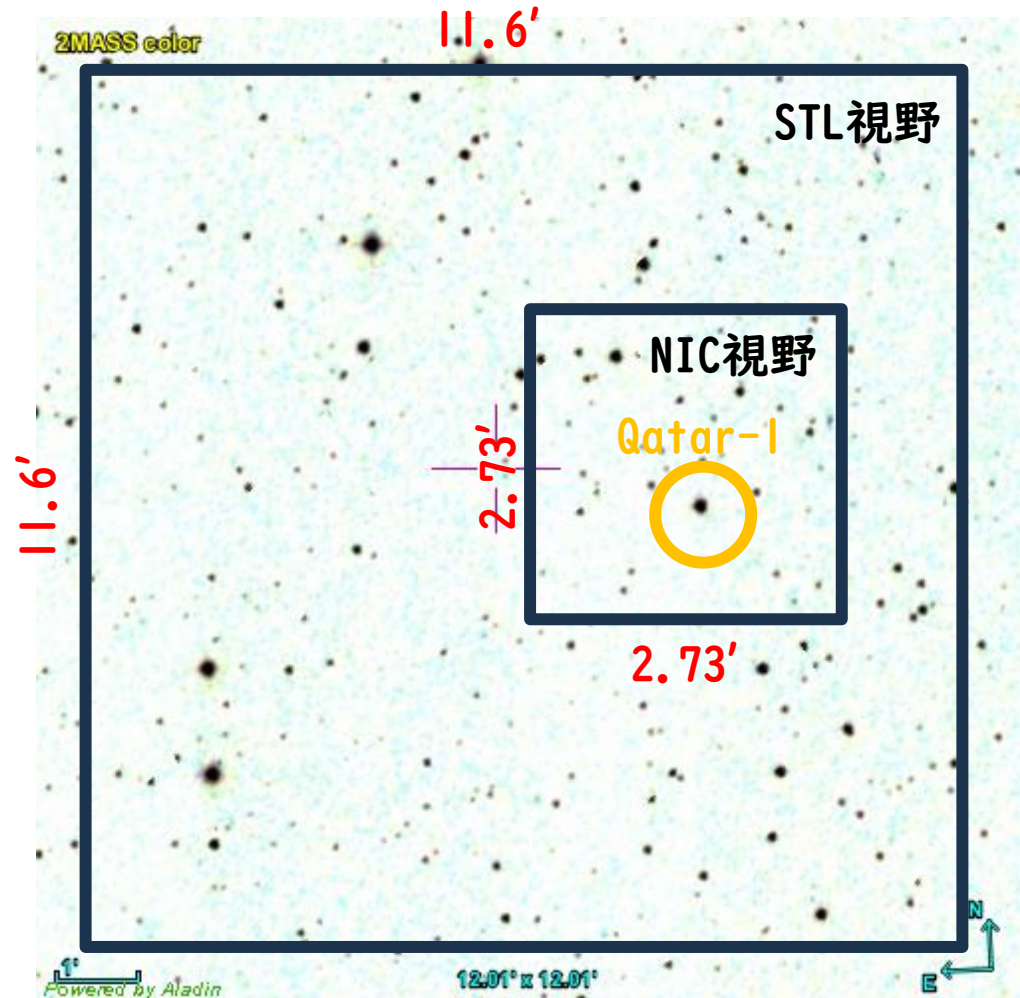


図7 Qatar-1 星図

# 結果(光度曲線)

2021年9月-2023年5月の期間に

- ・ V, J, H, K<sub>s</sub>バンド 10回
- ・ Vバンドのみ 7回
- ・ J, H, K<sub>s</sub>バンド 2回

観測を行った。

光度曲線の作成には[ETD - Exoplanet Transit Database \(var2.astro.cz\)](http://var2.astro.cz)を用いた。ETDは光度曲線とトランジットの深さを求めるツールである。

測光で得られた相対フラックス、時刻、光度曲線の標準偏差、トランジット中央時刻、トランジット期間を入力した。

19夜の観測の内、10夜でトランジットが検出できた。

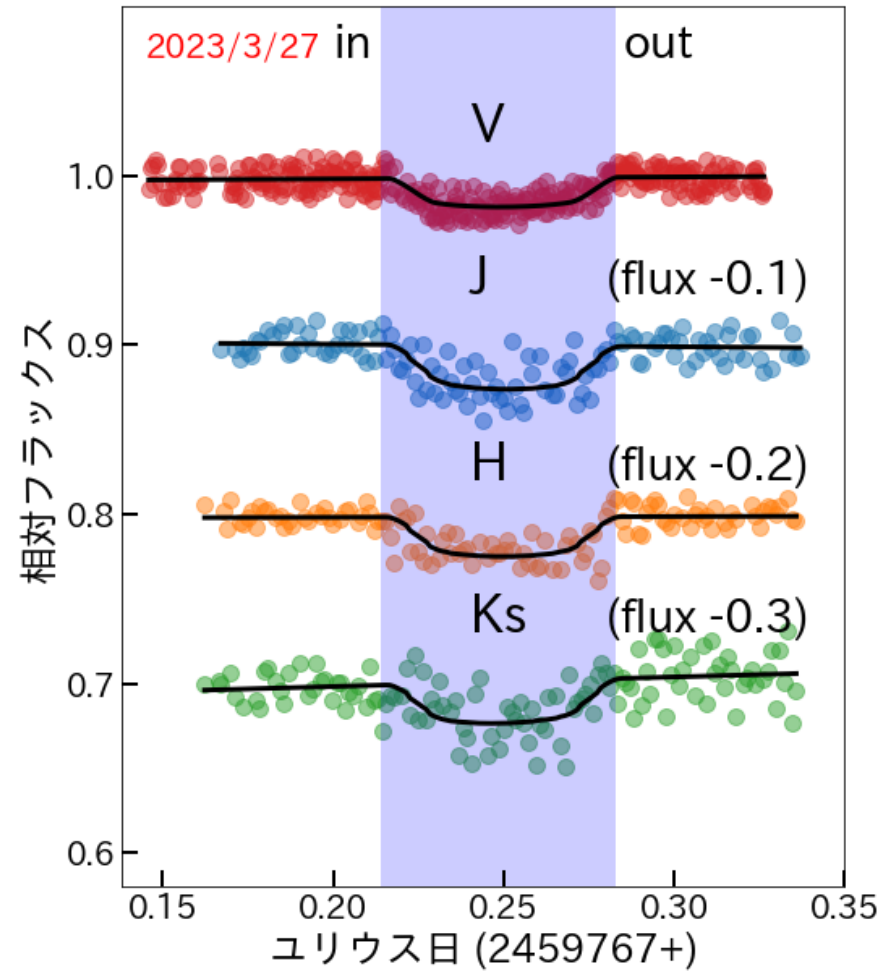


図8 V, J, H, K<sub>s</sub>バンドの相対フラックスと光度曲線(2023年3月27日)

# 結果(主星と惑星の半径比)

平野修士論文 (2022)では2021年9月15日のJ, H, Ksバンドにおける右肩上がりの特徴からCO<sub>2</sub>を含む晴れた大気も持つと推定した。

しかし新たに行った近赤外領域での観測では、半径比に右肩上がりの特徴は見られなかった。

VバンドとJバンドの半径比は、H, Ksバンドと比較して大きなばらつきが見られた。

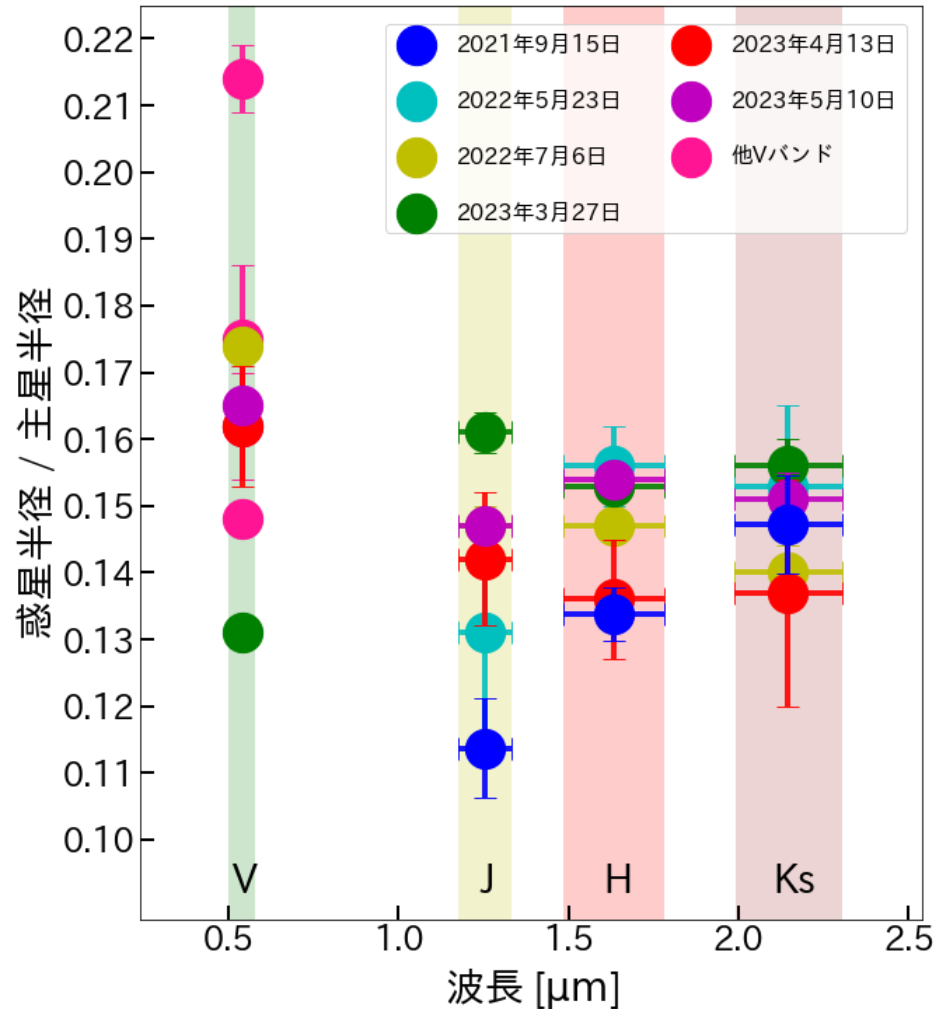


図9 2021年9月から2023年5月までに得られた各バンドの惑星半径



# 観測結果と先行研究との比較

得られた惑星半径と先行研究によるQatar-1 bの半径比を比較した。

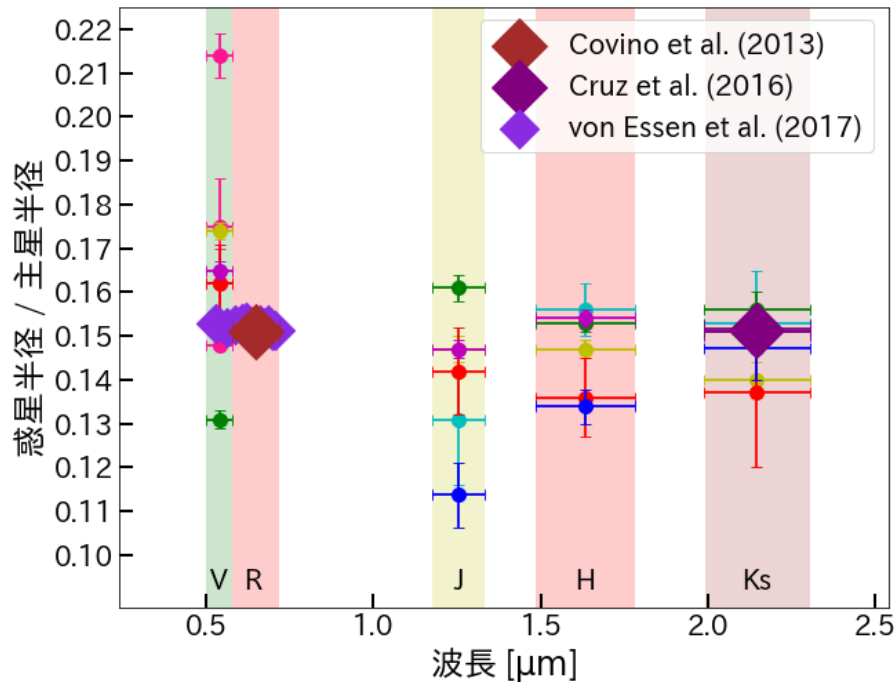


図10 先行研究によるQatar-1 bの半径比

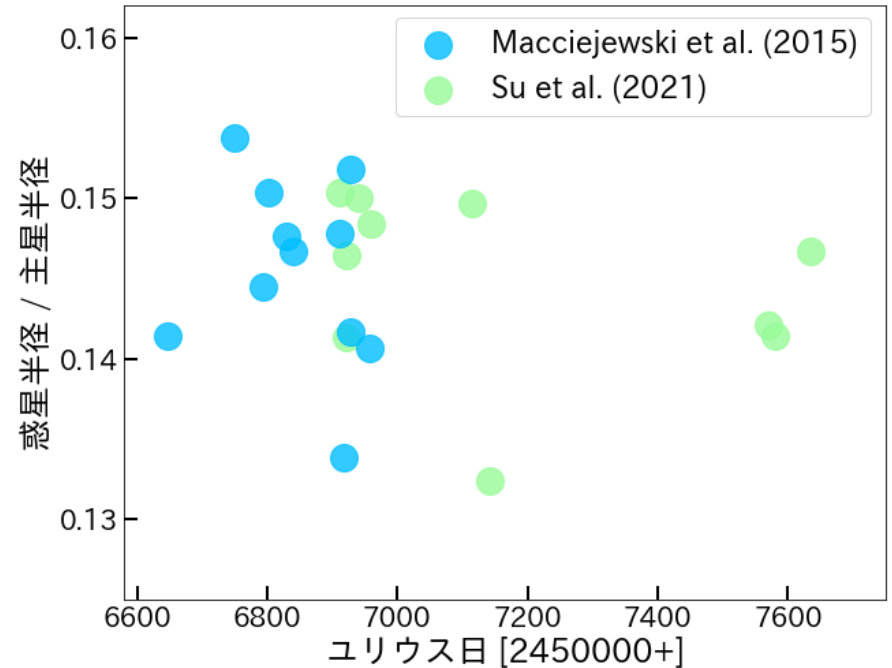


図11 可視光Rバンドでの半径比

図10の先行研究の半径比はどの波長帯でも0.15程度であるのに対し、図11の先行研究ではRバンドの半径比が0.13から0.16の範囲で大きなばらつきが見られた。

# 4つの波長帯における半径比の変動

19夜のうち4夜で可視光領域Vバンドと近赤外領域の J, H, Ksバンドの4つの波長帯で惑星半径が取得できた。  
2023年3月27日はVバンドで他の日より20%以上小さな半径比が得られた。  
一方で近赤外領域では他の日より半径比が大きく、半径比の逆転を示した。

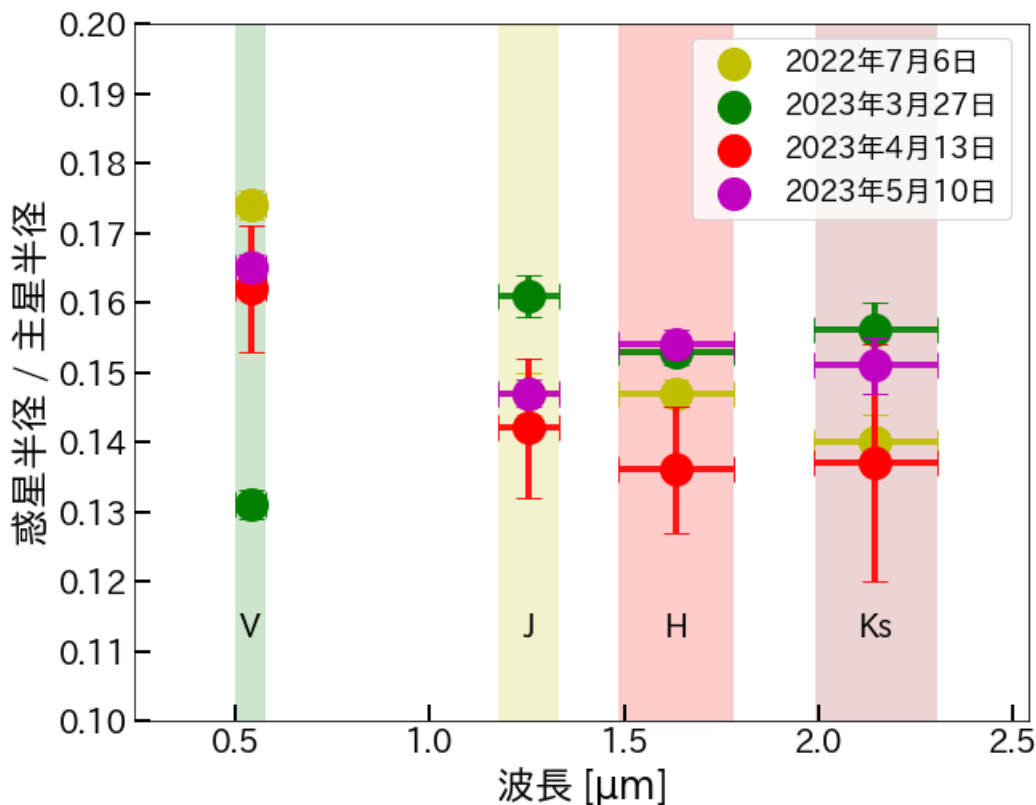


図12 4バンド同時取得した半径比

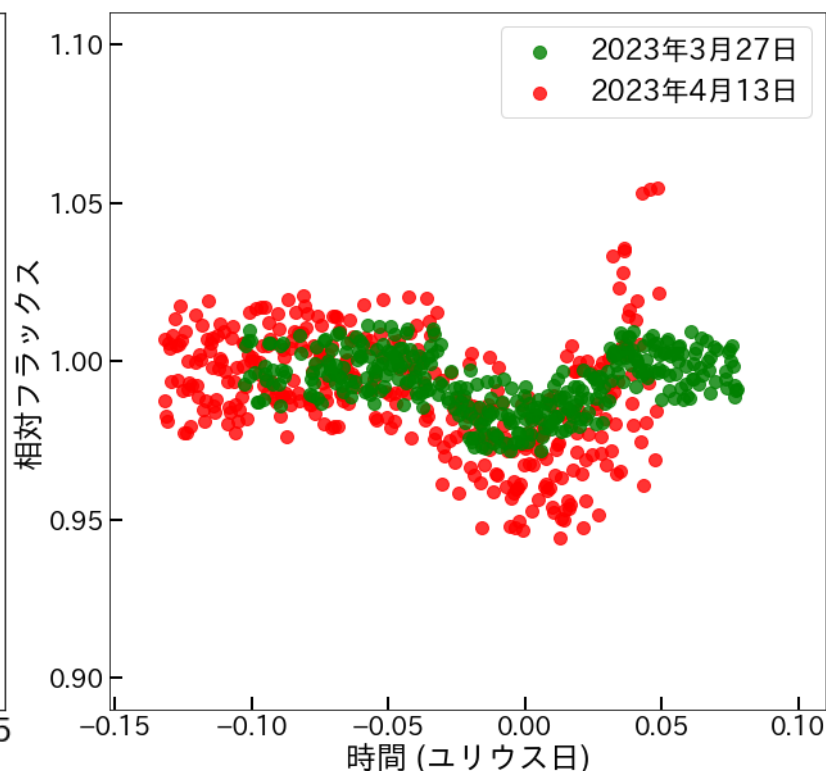


図13 Vバンドの半径の比較

# ヘイズモデルによる半径変動の考察

ヘイズモデルを用いて2023年3月27日と4月13日の惑星半径の変動を調査した。

ヘイズモデルの作成にはPSGを用いた。

- 表面重力  $2.0 \text{ m/s}^2$  (初期値  $20.0 \text{ m/s}^2$ )
- 惑星半径  $65,200 \text{ km}$  (初期値  $81,500 \text{ km}$ )
- ヘイズ粒子  $0.1 \mu\text{m}$
- $\text{H}_2$  99%  $\text{NH}_3$  1% は固定値とした。

○ 表面圧力  $10^{-5} \text{ bar} - 1 \text{ bar}$

○ ヘイズ粒子の存在量  $0.001\% - 1\%$   
に変えモデルを作成した。

表面圧力  $3.0 \times 10^{-5} \text{ bar}$ , ヘイズの存在量  $0.1\%$ のヘイズモデルと、表面圧力  $1.0 \times 10^{-1} \text{ bar}$ のヘイズなしモデルで半径比の逆転を再現できた。

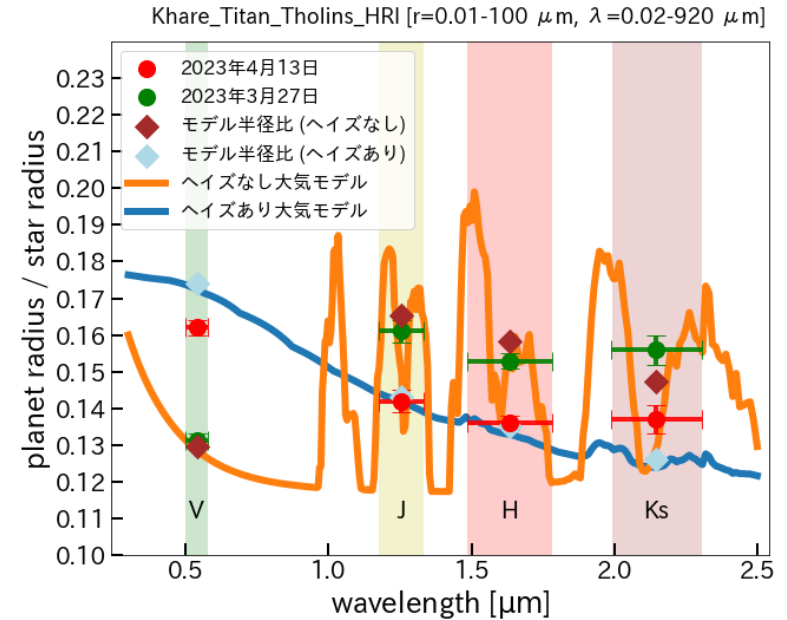


図14 ヘイズを考慮した惑星大気モデル (Planetary Spectrum Generatorを使用)

2021年9月から2023年5月の期間に可視光近赤外線トランジット観測を行い、惑星半径の変動を観測することができた。この変動は大気中に存在するヘイズ粒子の有無による可能性がある。

# 観測波長の拡大

これまでの観測では可視光領域Vバンドと近赤外領域の J, H, Ksバンドの4つの波長帯で惑星半径の変動を調査してきた。

今後可視光領域と近赤外領域の半径比のふるまいを詳しく調べるためには、**観測波長を拡大する必要がある。**

そのためベトナムのクイニョン天文台の60 cm望遠鏡を使用し、3つの望遠鏡を同時に操作して、新たな波長帯Rバンドを含めた5つのバンドで観測を行う。

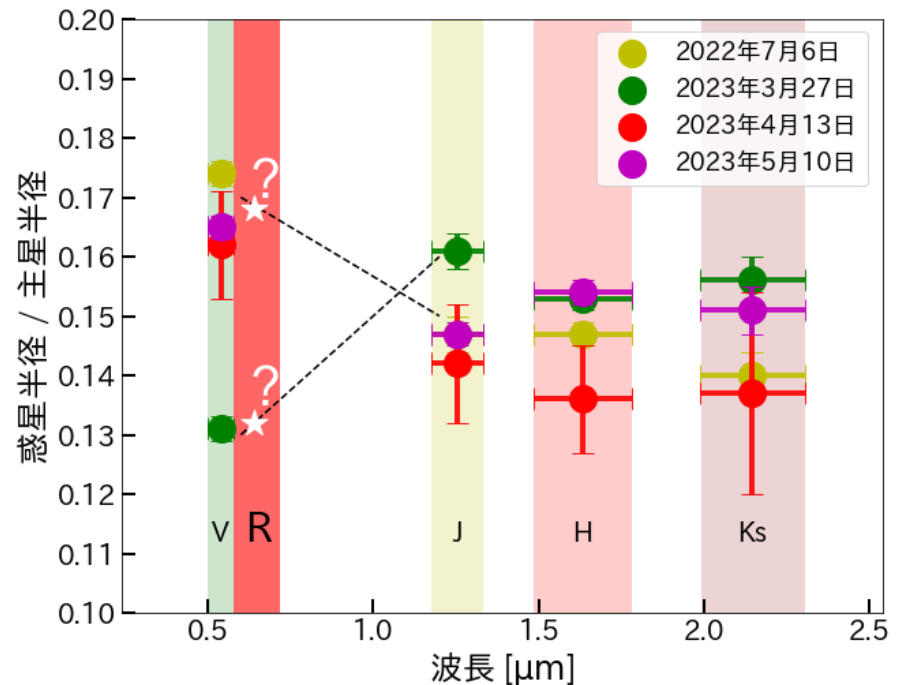


図15 観測波長の拡大の必要性

# クイニョン天文台との同時観測

2023年8月からクイニョン天文台と連携して、同時観測を開始した。  
クイニョン天文台はRバンドで観測。

現在までに計4夜観測を行い、  
8月19日の観測でトランジットを検出することができた。

今後も連携して観測を行う予定。

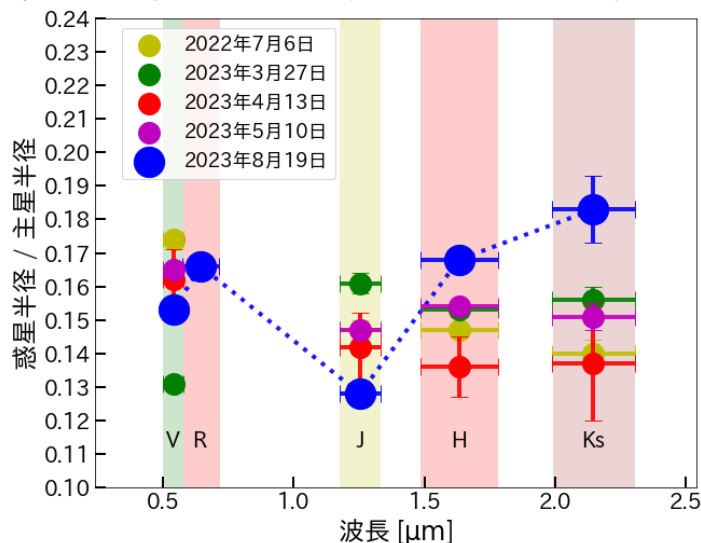


図17 2023年8月19日の半径比

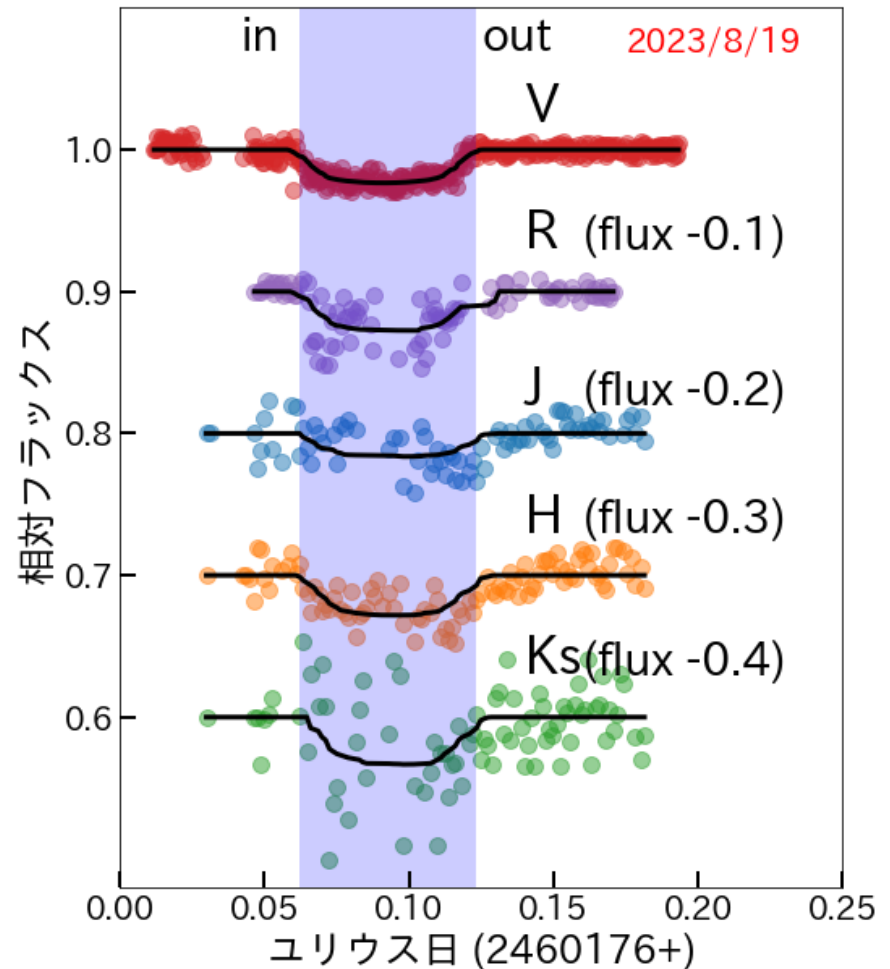


図16 V, R, J, H, K<sub>s</sub>バンドの相対フラックスと光度曲線(2023年8月19日)

# まとめ

・ 2021年9月15日－2023年5月10日の期間になゆた望遠鏡NICと60 cm望遠鏡STLを用いてQatar-1 bの可視光近赤外トランジット観測を行った。

・ 19回の観測の内10回でトランジットが検出でき、VバンドとJバンドの半径比で大きなばらつきが見られた。

・ 2022年3月27日のVバンドの半径比は2022年7月6日，2023年4月13日，5月10日の半径比より20%以上小さい一方で、近赤外領域では大きな半径比を示しており可視光領域と近赤外領域で半径比の逆転が見られた。

・ ヘイズモデルを用いて2023年3月27日と4月13日の惑星半径の変動を調査し、表面圧力 $3.0 \times 10^{-5}$  bar，ヘイズの存在量0.1% のモデルによって半径比の逆転を再現できた。

・ 今後は観測波長を拡大し、Qatar-1 bと同様にTrES-3 b，WASP-12 b，WASP-43 bの観測を行い、これらの惑星でも惑星半径の変動が起こるか検証する。

# 太陽系外惑星発見の歴史

1995：初の太陽系外惑星51 Peg bを視線速度法によって発見 (Mayor & Queloz 1995)

1999：HD209458で惑星が主星の前を通過する  
**トランジット**を初めて観測  
(Charboneau et al. 2000, Henry et al. 2000)

2001：太陽系外惑星で初めて大気が検出される  
(Vidal-Madjar et al. 2003)

2009：ケプラー宇宙望遠鏡運用開始  
(約2500天体発見)

2018：太陽系外惑星探査衛星TESS運用開始

2019：Mayor & Queloz ノーベル物理学賞受賞

2022：ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡(JWST)  
運用開始

ホットジュピター

- ・主星の近傍を短周期で周回する巨大ガス惑星。
- ・木星と同程度の質量を持つ。
- ・主星からの加熱によって高温の表面を持つ。

51 Peg b

- ・半径 1.9 木星半径
- ・質量 0.5 木星質量
- ・軌道半径 0.05 AU (水星 0.38 AU)
- ・公転周期 4 日 (木星 12 年)
- ・温度 1200 K (木星 130 K)

現在5000個以上の太陽系外惑星が発見されている。

# トランジット法

トランジット法とは惑星が恒星の前を通過する際の減光を捉え、太陽系外惑星を発見する手法である。減光率はホットジュピターで1%程度、地球型惑星で0.01%程度。

Charboneau et al. (2000)とHenry et al. (2000)によりトランジット法で初めて太陽系外惑星が発見された。

主星の明るさの変化と主星の半径から惑星の半径がわかる。

$$\Delta F/F = (R_2/R_1)^2$$

$\Delta F$  : 変化した明るさ       $R_1$  : 主星の半径  
 $F$  : 主星の明るさ       $R_2$  : 惑星の半径

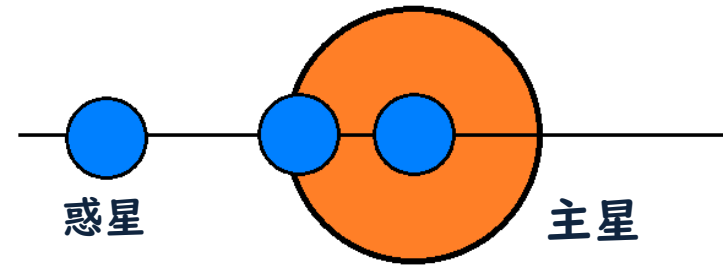


図1 トランジットの概略図

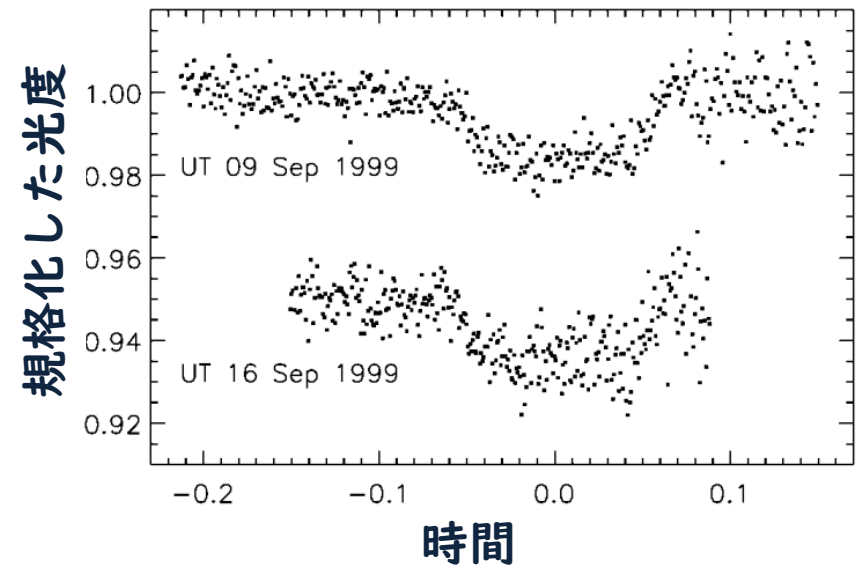


図2 HD209458 bのトランジット観測  
Rバンド(0.66  $\mu\text{m}$ )  
(Charboneau et al. 2000)



# 惑星大気推定の先行研究

Swain et al. (2008)はハッブル宇宙望遠鏡を用いてHD189733 bの近赤外トランジット観測を行った。

$H_2$  ( $\geq 99\%$ ),  $H_2O$  (0.05%),  $CH_4$  (0.005%)の大気モデルを作成した。

大気モデルと観測した減光率から $CH_4$ の吸収特性を持つと推定した。

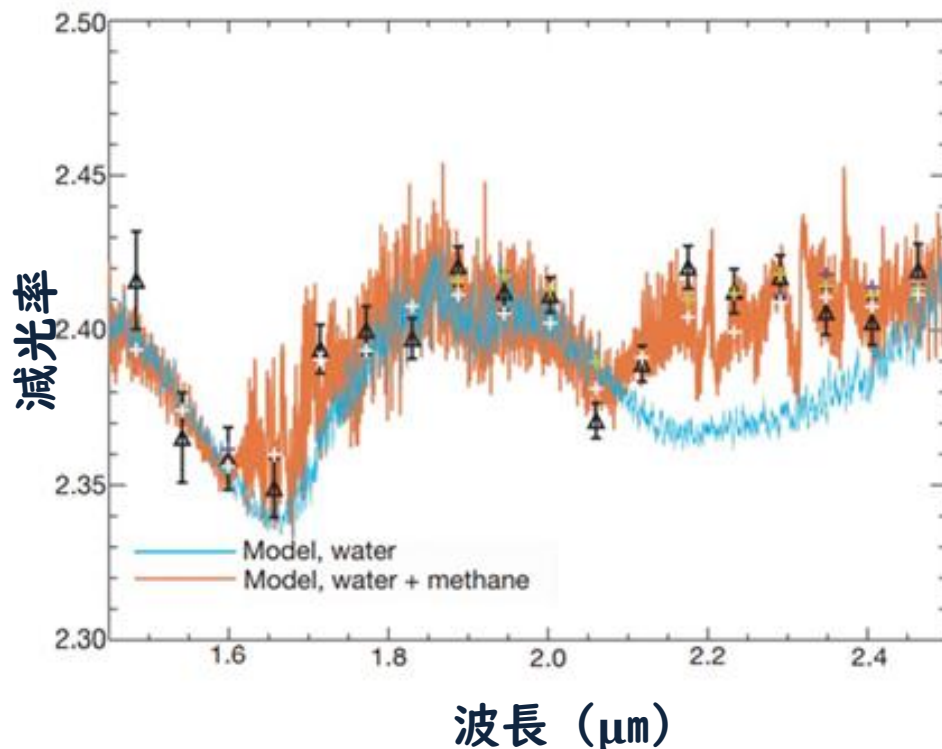


図5 HD189733 b大気スペクトル  
青のスペクトルが $H_2O$ を含む大気モデル、  
オレンジのスペクトルが $H_2O$ と $CH_4$ を含む  
大気モデル、黒の点が観測した減光率  
(Swain et al. 2008)

# 雲・ヘイズ粒子による散乱

大気中に微小な粒子が存在する場合、光はその粒子によって散乱される。

レイリー散乱は光の波長よりも小さい粒子による散乱。短波長の光ほど強く散乱されるため、短波長で大きな惑星半径が観測される。

ミー散乱は光の波長と同程度の大きさの粒子による散乱。波長に依存せず均等に散乱されるため、惑星半径は波長によらず一定となる。

しかし長波長側では雲が光学的に薄くなるため、大気分子による吸収の特徴が観測される。

雲はミー散乱、ヘイズ粒子はレイリー散乱を引き起こす。

惑星大気中に雲やヘイズ粒子の存在があれば、光の散乱によって分子の吸収の特徴を隠してしまうことがある。

$$a = \frac{\pi d}{\lambda}$$

$a$ : サイズパラメータ

$d$ : 粒子の直径

$\lambda$ : 波長

$$a \ll 1 \quad \text{レイリー散乱}$$

$$a \approx 1 \quad \text{ミー散乱}$$

$$a \gg 1 \quad \text{幾何光学散乱}$$

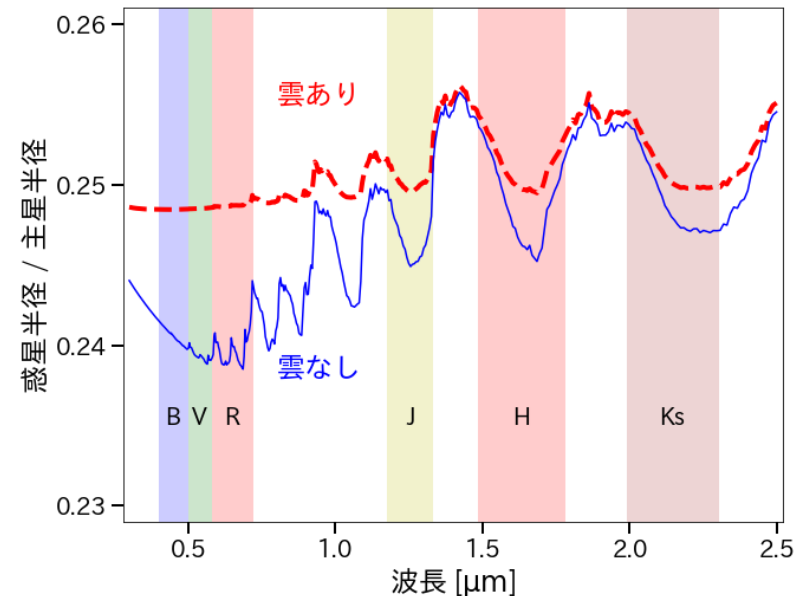


図8 雲の有無による大気スペクトルの変化

# 天気の変化による惑星半径の変動<sup>19</sup>

超低質量天体である褐色矮星の有効温度は2000 K程度またはそれ以下であり、ホットジュピターの平衡温度に近い。そのため、雲や微粒子の形成過程において共通性がある可能性が示唆されている。

褐色矮星に存在する微粒子は**数時間から数年**のタイムスケールで拡散が起これると理論的に予測されている(Helling & Casewell 2014)。

分厚い雲で覆われていると考えられていた惑星でも晴れた大気が観測され、惑星半径の変動が観測される可能性がある。

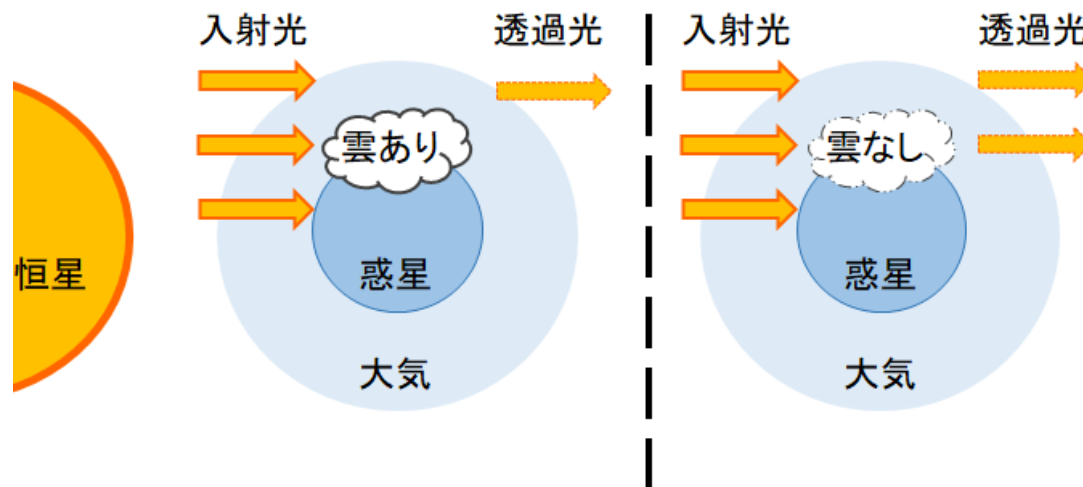


図9 雲の有無による惑星半径変動の模式図

# 解析方法(画像処理)

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

NICで取得した画像のみ10枚を重ね合わせてスカイパターンを取得してスカイの補正を行った。その後、星のない領域から縦縞パターンを作成し縦縞を除去した。

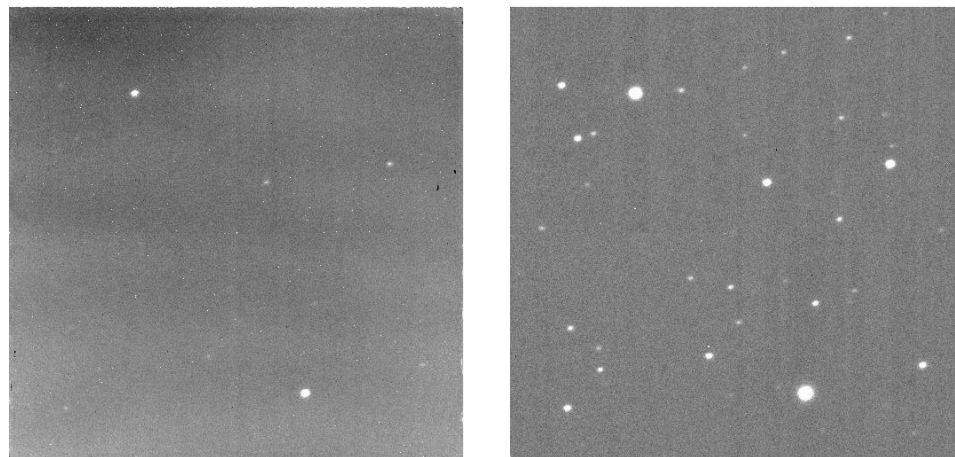


図13 生画像と画像処理後の画像(NIC)。

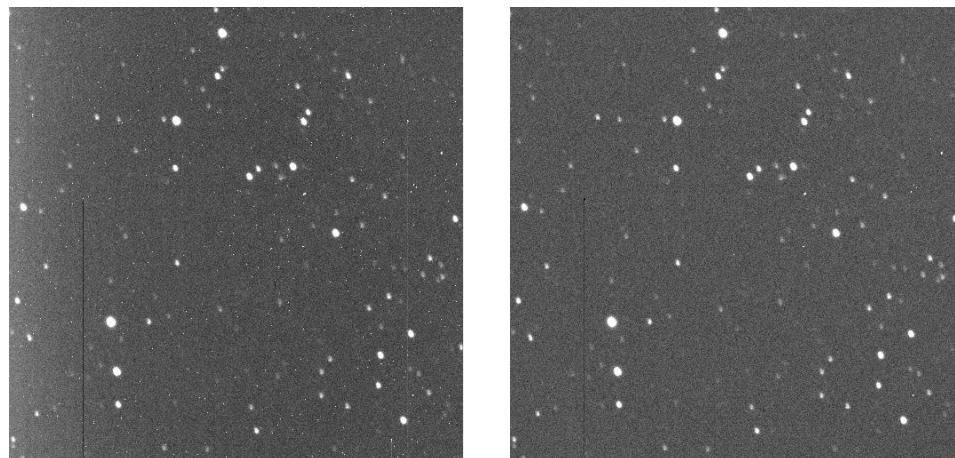


図14 生画像と画像処理後の画像(STL)。

# 解析方法 (測光)

測光は開口測光を用いた。  
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。

トランジット外の相対フラックスを  
用いて回帰直線を求めた。  
回帰直線の値を1として規格化を行った。

多葉田修士論文 (2017)ではディザリング  
観測において、位置ごとに系統誤差が観  
測されるという指摘がある。

トランジット外の相対フラックスをディ  
ザリング位置ごとに平均値を求め、対応  
する同じ位置の相対フラックスを平均値  
で割った。

2σ以上の外れ値は取り除いた。

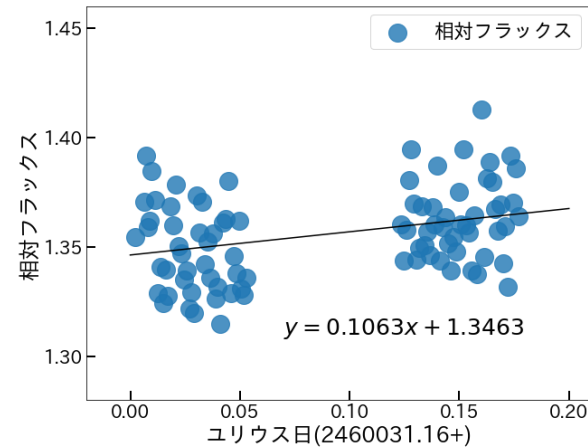


図15 回帰直線による規格化

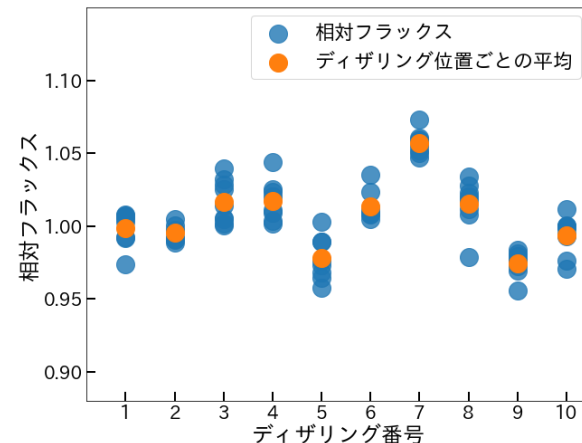


図16 ディザリング位置ごとの相対フラックス

# 今後の観測予定

Qatar-1 bでは惑星半径の変動の可能性を示すことができた。

本研究ではQatar-1 b(1400 K)に加えて、惑星の平衡温度が異なるTrES-3 b(1550 K), WASP-12 b(2300 K), WASP-43 b(1300 K)の観測も行い、これらの惑星でも惑星半径の変動が起こるかどうか調査を行う。

またQatar-1 bの惑星半径の変動が固有の特徴であるかどうかを検証する。

表1: 年間観測予定

2022年5月-2023年5月の期間に

天体	月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
WASP-12 b		×	×	×	×	×	×	△	○	○	○	△	×
WASP-43 b		○	△	×	×	×	×	×	△	○	○	○	○
TrES-3 b		○	○	○	○	○	△	×	×	×	×	△	○
Qatar-1 b		○	○	○	○	○	○	△	×	×	×	×	△

・ TrES-3 b 14回

・ WASP-12 b 13回

・ WASP-43 b 10回

観測を行った。

Qatar-1 bも含めて引き続き観測を行い、惑星半径の変動を調べる。

# 参考文献

Bean et al. 2010, *Nature*, 468, 669–672

Berta et al. 2011, *ApJ*, 736, 12

Carter et al. 2011, *ApJ*, 730, 82

Charbonneau et al. 2009, *Nature*, 462, 891–894

Croll et al. 2011, *ApJ*, 736, 78

de Mooij et al. 2012, *A&A*, 538, A46

D´esert et al. 2011b, *ApJL*, 731, L40

Mayor and Queloz 1995, *Nature*, 378, 355–359

Narita et al. 2013, *ApJ*, 773, 144

Torres et al. 2008, *AJ*, 677, 1324–1342

Vidal-Madjar, A., et al. 2003, *Nature*, 422, 143–146