

TRAPPIST-1 Habitable Atmosphere Intercomparison (THAI): motivations and protocol version 1.0

Thomas J. Fauchez et al. 2020, 訳: 人見祥磨

2021 年 1 月 4 日

概要

ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST)、欧州超大型望遠鏡 (E-ELT)、30 メートル望遠鏡 (TMT)、巨大マゼラン望遠鏡 (GMT) などの望遠鏡^{*1}は、近くの M 型赤色矮星を周回する岩石からなる系外惑星の大気を透過・発光・反射分光法を用いて特徴づけることができるようになるかもしれない。最も有望な候補のひとつは、後期 M 型赤色矮星系の TRAPPIST-1 であり、7 つの既知の惑星があり、それらが地球型惑星であり、揮発成分が濃縮されている可能性をトランジット法 (TTV) が示した。これら 7 つの惑星の中で、TRAPPIST-1e には、地球に入射する放射の約 66% が入射していて、地表の液体水が存在するために地表温度を上昇させるためには、わずかな温室効果ガスが必要であることから、ハビタブルな地表条件を持つ可能性が最も高いと考えられている。したがって、TRAPPIST-1e は、大気を特長づけるため JWST による主要な観測対象のひとつである。このような観点から、TRAPPIST-1e の潜在的な大気をモデル化することは、観測に先立って必要なステップである。全球気候モデル (GCM) を用いることで惑星大気を最も詳細にシミュレートすることができる。しかし、GCM の間には異なる気候予測を導くような本質的な違いが存在していて、それゆえ雲やガスの透過スペクトルや熱放射スペクトルの観測可能性にも違いを生む可能性がある。このような違いは、観測に先立って知っておくべきである。この論文では、惑星 GCM を相互比較するためのプロトコルを紹介する。TRAPPIST-1e については 4 つのテストケースを検討したが、この方法は他のハビタブルな地球型系外惑星についても適用することができる。この 4 つのテストケースには、現代地球と同じ大気組成と、純 CO₂ の組成を持つ大気の、2 つの陸惑星、およびそれぞれ同じ大気組成の 2 つの水惑星が含まれている。現在、4 つのモデル (LMDG, ROCKE-3D, ExoCAM, UM) が参加しているが、このプロトコルは他のチームも参加できるようにすることを目的としている。

*1 ここで挙げた望遠鏡については、付録 A で紹介する。

目次

1	イントロダクション	2
2	TRAPPIST-1e の気候シミュレーションと動機	4
2.1	惑星 GCM を相互比較する動機	4
2.2	TRAPPIST-1e のベンチマーク	5
3	THAI プロトコル	5
3.1	大気構成	5
3.2	惑星表面	7
4	アウトプット	7
5	要約	7
	付録 A 望遠鏡について	8
A.1	ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST)	8
A.2	欧州超大型望遠鏡 (E-ELT)	8
A.3	30 メートル望遠鏡 (TMT)	8
A.4	巨大マゼラン望遠鏡 (GMT)	8

1 イントロダクション

M 型赤色矮星は銀河系の中で最も普遍的なタイプの恒星であり、M 型赤色矮星を周回する地球型系外惑星は、ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡のような今後の天文学的な施設にて最初に観測される可能性が高いと考えられている。超低温矮星 ($T < 2700\text{ K}$) は晩期の M 型赤色矮星のサブクラス (substellar class) であり、太陽近傍の天体のうち、約 15 % を占めている (Cantrell et al., 2013)。他のタイプの恒星に比べてサイズが小さいので、閉じた軌道にある地球型惑星の発見が容易で、その可能性は TRAPPIST-1 が最近発見されたことによって認知された (Gillon et al., 2016, 2017)。地球から 12 パーセクの距離にある TRAPPIST-1 は 7 つの惑星が知られており、そのなかのひとつの惑星は岩石惑星系の中でも特にトランジット信号の深さが深く、フォローアップ観測の可能性が最も高い惑星のひとつである (Gillon et al., 2017; Luger et al., 2017)。TRAPPIST-1 をトランジット法で観測した結果、揮発性物質の組成が地球に類似していることをがわかり、水が存在する可能性についてもわかった (Grimm et al., 2018)。さらに、e, f, g みっつの惑星がハビタブルゾーン (HZ; Kopparapu et al., 2013) にあること、すなわち地表面に液体の水が存在できるような気温であることがわかった (Gillon et al., 2017; Wolf, 2017, 2018; Turbet et al., 2018)。

TRAPPIST-1 は活発な M 型赤色矮星で (O'Malley-James and Kaltenegger, 2017; Wheatley et al., 2017; Vida and Roettenbacher, 2018)、惑星大気が存続することが非常に厳しい環境となっている。しかしながら、Bolmont et al. (2017) と Bourrier et al. (2017) は、惑星が初期に水をどの程度持っていたかによって、TRAPPIST-1 の惑星が現在まである程度水を保持しうると主張している。そし

て、この水が十分に残っていると仮定すると、TRAPPIST-1 は非常に大きな大気による調整によって、全球的あるいは局所的にハビタブルな状況を維持できると考えられている (Wolf, 2017; Turbet et al., 2018; Grootel et al., 2018, and references therein)。これらの惑星を分光透過法で特徴づける最初の試みは、de Wit et al. (2016, 2018) がハッブル宇宙望遠鏡 (HST) を用いて、6 つの中心に近い惑星に対して行ったものである。その結果、TRAPPIST-1 の惑星には、雲やヘイズのない H_2 が支配的な大気が存在せず、 N_2 , O_2 , H_2O , CO_2 , CH_4 といった平均分子量が大きい成分が支配的な大気が存在する可能性がわかった。実験室での測定値とモデルの結果から、雲やヘイズを伴う H_2 が支配的な大気も除外できるとわかっている (Moran et al. 2018)。これらの HST を用いた観測の不確かさは、百万分の一 (ppm) のオーダーと非常に大きく、水素より重い大気の性質を決定するためには、JWST (Barstow and Irwin, 2016; Morley et al., 2017) のような将来の施設を用いた更なる調査が必要である。

将来、JWST が TRAPPIST-1e を特長づけることの上流では、観測の指針となる大気の制約条件を導き出すことが重要である。この目的のためには、3 次元の全球気候モデル (GCM) が最も先進的なツールである (Wolf et al., 2019)。しかし、GCM は非常に複雑なモデルであり、様々な理由によって、モデルごとに出力が違うことがある。GCM の比較は、地球化学の分野では広く行われてきた。例えば、1995 年に開始され、現在のバージョンが 6 である Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) (Eyring et al., 2016) は、人為的な気候変動の要因に対する GCM の応答の違いに焦点を当てている。系外惑星は気候モデルの研究者からかなり注目されており、地球に似た大気を持つ系外惑星のデータがすぐに発表されるかもしれないが、惑星 GCM の相互比較はひとつしか発表されていない (Yang et al., 2019)。この相互比較は、M 型赤色矮星周辺の惑星を対象としたモデル間で、大気の力学及び雲と放射の輸送の違いによって、全球の地表面温度に大きな違いがあることを発見した。しかし、Yang et al. (2019) はハビタブルゾーンの内縁にある惑星に関心をもち、高度に理想化された惑星構成に焦点を当てている。別のモデルの相互比較が系外惑星コミュニティのために実行されていることに注意せよ: the Palaeoclimate and Terrestrial Exoplanet Radiative Transfer Model Intercomparison Project (PALAEOTRIP)^{*2}。この実験のプロトコルは Goldblatt et al. (2017) に記載されており、その目的は古気候や系外惑星の科学に使用されている様々な放射に関するコードを比較し、各モデルが正確な結果を出すことができる境界条件を特定することが目的である。TRAPPIST Habitable Atmosphere Intercomparison (THAI) の目的は、近い将来 JWST や地上の施設を用いて特徴づけられる可能性のある確認済みの系外惑星 TRAPPIST-1e の GCM シミュレーションの違いを明らかにし、その違いが観測データから大気のプロパティを解釈することにどのような影響を与えるかを評価することである。また、本論文で紹介した GCM に限定されない、他の GCM が相互比較に参加できるような明確なプロトコルを提供することも目的である。相互比較の結果については次の論文で発表する予定である。この論文では、TRAPPIST-1e と GCM の紹介を含めた動機を 2 節で述べる。3 節では GCM で設定する全てのパラメーターを記述した THAI プロトコルを紹介する。4 節では与えられたモデルが他の GCM シミュレーションと比較できるようにす

^{*2} <http://www.palaeotrip.org/>

2020 年 2 月 8 日にはアクセスできたようだが 2020 年 11 月 17 日現在ではアクセス不可。

るために必要なモデルパラメーターを列挙する。要約は 5 節で述べる。

2 TRAPPIST-1e の気候シミュレーションと動機

2.1 惑星 GCM を相互比較する動機

全球気候モデル (GCM) は惑星大気や表面の物理過程を表現するために設計された 3 次元数値モデルである。GCM は実在惑星の大気や海洋をモデル化する最も洗練された方法である。GCM は力学コア^{*3}を介して接続された 1 次元の時間進行気候モデルの複雑なネットワークとして見ることができる (以下を参照のこと)。それぞれの 1 次元列には、放射移動、対流、境界層の過程、雲のマクロスケールとミクロスケールの物理学、エアロゾル、降水、地表の雪や海水による氷床、その他の複雑度の異なるプロセスの物理的パラメタライゼーションが含まれている。

この実験プロトコルの背景にある動機は、分光透過法と熱位相曲線^{*4}を用いて、モデル間の違いが惑星のハビタビリティとその観測値の評価にどのような影響を与えるかを、JWST のような今後の観測点で評価することである。相互比較プロトコルは、以下に列挙された、モデル間の違いを生み出しうる原因を評価するように設計されている。

力学コア 力学コアは、(回転する) 惑星表面上の流体力学の方程式の数値解を求める方法である。

大気中の気体、雲、エアロゾル粒子、潜熱・顕熱及び運動量を大気のカラム間で輸送する風について計算する。

放射輸送 それぞれのモデルは独自の放射輸送を仮定しており、違うスペクトルのデータベースや、同じスペクトルのデータベースでも違うバージョンを用いていることがある (例えば、HITRAN)。collision-induced absorption (CIA)、ライン-バイ-ラインと相関 k 分布法 (Lacis and Oinas, 1991)、ラインカットオフ、スペクトル分解能など。

水の物理学 水の熱力学的なすべての段階での扱いは、ハビタブルな惑星のシミュレーションをする上で重要である。特に、雲と対流過程は気候モデル間の違いの重要な原因であり、これらの違いは M 型赤色矮星を公転する系外惑星をモデリングするに際して、しばしば悪化する。

モデル間での雲の性質の違いに重点を置くことに注意してほしい。なぜならば、それらは現在の放射輸送スキームでシミュレーションされたスペクトルの強度におおきな影響を与える可能性があるからである (Fauchez et al., 2019)。しかし、観測者に現実的な観測の制約を与えるためには、3 次元の雲の場を十分に理解する必要がある。したがって、これらの GCM 間の潜在的な違いに対処することが重要である。

以下の 4 つの GCM (の惑星版) が THAI に最初から含まれている。

- Laboratoire de Météorologie Dynamique – Generic model (LMDG)^{*5}

^{*3} dynamical core

^{*4} thermal phase curves

^{*5} Wordsworth et al., 2011, a review paper on the model is currently under preparation

表 1 TRAPPIST-1 の恒星スペクトルと TRAPPIST-1e の惑星パラメーター (Grimm et al. 2018)

恒星とスペクトル	2600 K BT-Settl with Fe/H = 0
惑星	TRAPPIST-1e
太陽定数	900 W m ⁻²
自転周期	6.1 d
公転周期	6.1 d
質量 (M_{\oplus})	0.772
半径 (R_{\oplus})	0.910
密度 (ρ_{\oplus})	1.024
重力 (g_{\oplus})	0.930

- Resolving Orbital and Climate Keys of Earth and Extraterrestrial Environments with Dynamics (ROCKE-3D)*6
- Exoplanet Community Atmospheric Model (ExoCAM) *7
- Met Office Unified Model (UM) *8

相互比較の作業に先立ってプロトコルを公開することで、他のチームもこのプロトコルを用いて自身の GCM と本研究の 4 つの GCM を比較することができるようになることを期待している。

2.2 TRAPPIST-1e のベンチマーク

TRAPPIST-1e は、JWST によって分光透過法による大気の特徴づけを今まで行ってきた、ハビタブルな惑星の候補の中で、最も優れているもののひとつである。そのため、GCM 相互比較のための実験プロトコルに用いる惑星の候補となることは明らかである。表 1 に Grimm et al. による TRAPPIST-1e のパラメーターをまとめる。

3 THAI プロトコル

3.1 大気構成

THAI では複雑さを増した惑星大気組成の 4 つのセットを選択した。N₂ と CO₂ が支配的な大気を持つ乾燥陸惑星のベンチマークケースから始める。これにより、大気の力学に加えて境界層プロセスや CO₂ の放射輸送の違いを評価することが可能になる。次に、N₂ と CO₂ が支配的な大気をもつ水惑星シミュレーションを行い、それぞれ寒冷・温暖なハビタブルな特徴を TRAPPIST-1e が示していることを明らかにした。シミュレーションの複雑度を徐々に上げていくことで、大気力学

*6 Planet 1.0 version derived from the NASA GISS Model E; Way et al., 2017

*7 available on GitHub: <https://github.com/storyofthewolf/ExoCAM>, available from the National Center for Atmospheric Research (NCAR): <http://www.cesm.ucar.edu/models/cesm1.2/>, derived from the CAM4 NCAR model; Neale, 2010

*8 Mayne et al., 2014; Boutle et al., 2017

と境界層、放射輸送、水の物理過程の間にある意味のある違いを解明していきたいと考えている。以下、各ベンチマークケースの動機を説明する。

ベンチマークケース 1 (Ben 1) このケースは、1 bar の N_2 と 400 ppm の CO_2 からなる大気で構成され、その目的は、惑星大気境界層 (PBL) スキーム^{*9}・力学コア・及びそれに伴う熱の再分布が、異なるモデル間でどのように違うのかをテストすることである。 N_2-N_2 CIA^{*10}が含まれていることに注意せよ。

ベンチマークケース 2 (Ben 2) このケースは 1 bar の CO_2 大気で構成され、PBL スキームと力学コアの違い、及び CO_2 の放射輸送の違いを試験する。

ハビタブルケース 1 (Hab 1) このケースは現在の地球によく似た大気組成、すなわち 1 bar の N_2 と 400 ppm の CO_2 からなる大気で構成され、力学コア・雲・大気過程と一緒にテストする。また、ハビタブル惑星に関する文献 (Barstow and Irwin, 2016; Morley et al., 2017; Lincowski et al., 2018) の中で最も広く使われているベンチマークでもある。

ハビタブルケース 2 (Hab 2) このケースは 1 bar の CO_2 大気で構成されており、力学コア・ CO_2 の放射輸送の推測・雲と大気の過程をテストする。このケースは原始地球 (冥王代)、原始金星、及び溪谷ネットワークと湖が形成された頃の原始火星の典型的な大気組成に類似している (Haberle et al., 2017; Kite, 2019)。

したがって、2つの陸惑星に関するベンチマーク (Ben 1, Ben 2) と2つの水惑星に関するベンチマークケース (Hab 1, Hab 2) を持つこととなる。Ben 1 と Hab 1 は 1 bar の N_2 と 400 ppm の CO_2 という同じ大気組成であり、Ben 2 と Hab 2 についても 1 bar の CO_2 という同じ大気組成を共有していることに注意すること。したがって、このプロトコルは、陸の惑星と水の惑星との間の大気組成に関して対称的である。

いずれのケースにおいても、同じ初期条件からシミュレーションを開始することが重要である。最も簡単な方法は、等温大気から開始することだ。THAI では、初期の地表面温度と大気温度を 300 K に固定している。2つのベンチマークケース (乾燥陸惑星) と2つのハビタブルなケースで用いた大気のプロパティを表 2 の上部に示す。Ben 2 の初期結果は、いくつかのモデルでは夜間のコールドトラップの温度が 1 気圧における CO_2 の凝結点をわずかに下回ることに注意せよ。しかしながら、全てのモデルに CO_2 が凝結することが含まれているわけではないので、それを許容するモデルでは CO_2 の凝結を無効にしなければならない。このように、Ben 2 は研究のために理想化されたケースであるとするべきである。初期結果から、Hab 1 は冷涼で大きな氷床で覆われているが、サブ星域 (substellar region) に液体の水が存在する代表的な天体であることを示している。Hab 2 は強い CO_2 の温室効果と水蒸気による温室効果のフィードバックにより、Hab 1 よりもかなり温暖で、典型的な穏やかなハビタブルな惑星である。Hab 1 と比べてより難しい比較をすることで、雲の量や変動性、大気プロセスの強さを改良しなければならない。

図 3.1 に 4 種の GCM (UM, LMDG, ROCKE-3D, ExoCAM) を用いて計算した Hab 1 の予備シミュ

*9 何か不明。

*10 何か不明。

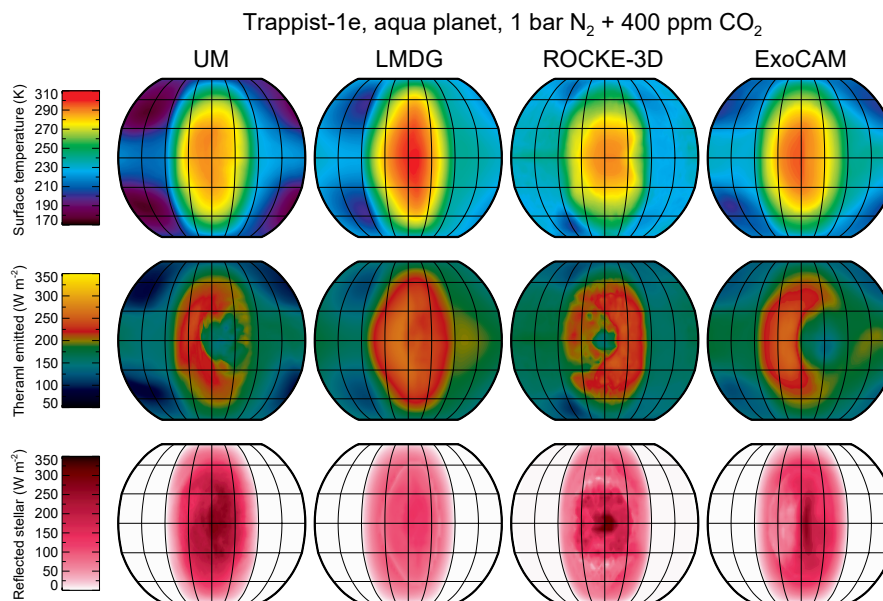


図 1 Hab 1 の表面温度、大気上端 (TOA) での熱放射、および大気上端 (TOA) での恒星放射の反射を 4 つの GCM (UM, LMDG, ROCKE-3D, ExoCAM) でシミュレートした結果の、等高線図。

レーションの結果を示す。地表面温度、大気上端 (TOA) での熱放射、および大気上端 (TOA) での恒星放射の反射の等高線図である。モデル間でこれらのパラメータの最大値、最小値、平均値に有意な差が見られる。しかしながら、大気上端での熱放射と、恒星放射の反射のフラックスは、それぞれのモデルが作り出す雲のパターンに強く影響を受けていることは明らかである。ここでは、説明した実験の実現可能性を実証するための予備的なアウトプットを示した。これらのシミュレーションの詳細な議論については、準備中の次の論文で説明する。

3.2 惑星表面

4 アウトプット

5 要約

THAI は新しいハビタブルな惑星の候補である TRAPPIST-1e に焦点をあてた惑星 GCM の相互比較プロトコルである。M 型の赤色矮星の近くにあるハビタブルゾーンに存在する地球型の系外惑星は、将来の観測で最初の地球サイズの系外惑星となる可能性が高いので、TRAPPIST-1e は現在では惑星 GCM の能力を比較するための最良のベンチマークである。この最初の論文では、すでに 4 つの GCM (LMDG, ROCKE-3D, ExoCAM, UM) が参加している実験で使われている GCM パラメー

*11 momentum roughness length

*12 heat roughness length

表 2 THAI で実験に利用したプロトコル。

ケース	Ben 1	Ben 2	Hab 1	Hab 2
大気				
組成	1 bar N ₂ + 400 ppm CO ₂	1 bar CO ₂	1 bar N ₂ + 400 ppm CO ₂	1 bar CO ₂
乾燥空気の分子量 (g mol ⁻¹)	27	44	27	44
初期状態	300 K		300 K	
地表面				
タイプ	陸のみ		海が存在	
組成	砂		スラブオーシャン	
アルベド	0.3		液体の水 0.06 氷雪 0.25	
熱容量 (J m ⁻³ K ⁻¹)	2 × 10 ⁶		4 × 10 ⁶	
熱慣性 (J m ⁻² K ⁻¹ s ⁻²)	2000		12000	
運動量粗度係数 ^{*11} (m)	0.01		0.01	
熱粗度係数 ^{*12} (m)	0.001		0.001	
地殻や海の深さ (m)	> 3		100	
注意:	グリッドより小さい重力波と CO ₂ の凝結は考慮していない			

ターと、惑星について提示した。しかし、もっと多くの GCM がこのプロジェクトに参加することを望んでいる。4 つのモデルを比較した結果は 2 つめの論文で発表され、THAI ワークショップが 2020 年の秋に開催される予定である。

付録 A 望遠鏡について

A.1 ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST)

A.2 欧州超大型望遠鏡 (E-ELT)

A.3 30 メートル望遠鏡 (TMT)

A.4 巨大マゼラン望遠鏡 (GMT)