

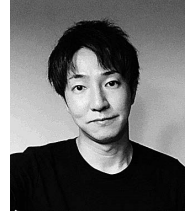
# TRAPPIST-1の惑星系と大気

堀 安 範

〈アストロバイオロジーセンター 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

〈国立天文台ハワイ観測所 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: yasunori.hori@nao.ac.jp



超低温度星 TRAPPIST-1 周りで7個の地球サイズの惑星発見が報告され、太陽系近傍の生命居住可能な惑星候補として耳目を集める。隣接する惑星同士は軌道共鳴の関係にあることから、低質量星周りの惑星形成そして軌道進化を探る上でもユニークな系となっている。惑星の質量-半径関係から、TRAPPIST-1の各惑星は岩石主体と予想されており、地球型惑星の多様性に迫る貴重な対象天体である。トランジット時の大気の透過光観測から、TRAPPIST-1の惑星はほとんど大気を持たない、あるいは希薄な二次大気を保持する可能性が高い。2021年打ち上げ予定のジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡では、TRAPPIST-1の惑星は太陽系外の地球型惑星大気の詳細な特徴付けに適した観測天体と有望視されている。そこで、本稿では脚光を浴びる TRAPPIST-1の惑星系および大気に関する現状の理解を概説する。

## 1. TRAPPIST-1 周りの惑星系

2017年、太陽系から約12.47 pc離れた場所<sup>\*1</sup>で、7個の地球サイズの惑星を持つ超低温度星 TRAPPIST-1 が発見された [1, 2]。TRAPPIST (TRAnsiting Planets and PlanestIsimals Small Telescope)<sup>\*2</sup> は、ベルギーのリエージュ大学が主導する近赤外 (z, I+z'-band) 測光観測プロジェクトで、モロッコとチリに設置された口径60 cm のロボット望遠鏡によって、北半球および南半球で惑星トランジット (恒星前面を惑星が通過する現象) のモニタリングを実施している。

TRAPPIST-1 は約0.089倍の太陽質量を持つ赤色矮星で、褐色矮星と赤色矮星の質量境界に近い天体である [3, 4]。TRAPPIST-1の年齢は、自転

表1 TRAPPIST-1の惑星系の物理量および軌道要素 [10].

天体名	質量 ( $M_{\oplus}$ )	半径 ( $R_{\oplus}$ )	軌道長半径 (au)
1b	$1.374 \pm 0.069$	$1.116^{+0.014}_{-0.012}$	0.01154
1c	$1.308 \pm 0.056$	$1.097^{+0.014}_{-0.012}$	0.01580
1d	$0.388 \pm 0.012$	$0.788^{+0.011}_{-0.010}$	0.02227
1e	$0.692 \pm 0.022$	$0.920^{+0.013}_{-0.012}$	0.02925
1f	$1.039 \pm 0.031$	$1.045^{+0.013}_{-0.012}$	0.03849
1g	$1.321 \pm 0.038$	$1.129^{+0.015}_{-0.013}$	0.04683
1h	$0.326 \pm 0.020$	$0.755^{+0.014}_{-0.014}$	0.06189

周期が約3.3日<sup>\*3</sup>にもかかわらず [5, 6]、金属量および固有運動から  $76 \pm 22$  億歳 [7] と推定されている。比較的年老いた惑星系には、7個の地球サイズの惑星が存在しており、そのうち3天体は生命居住可能な惑星候補として衆目を集める。複数トランジット惑星系では、惑星同士の重力相互

\*1 Gaia Early Data Release 3—<https://gea.esac.esa.int/archive/>

\*2 TRAPPIST project—<https://www.trappist.uliege.be/>

\*3 自転周期を指標にした星の年齢推定法は gyrochronology 法と呼ばれる。恒星風によって角運動量を失いながら、主系列星の自転速度は時間とともに遅くなる。一般に、自転周期が数日前後の星は年齢が若い可能性が高い。

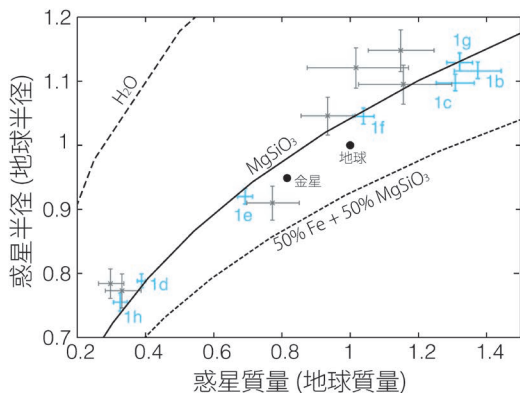


図1 TRAPPIST-1の各惑星の質量および半径。Grimm et al. (2018) [9]の質量推定(灰色), Agol et al. (2021) [10]の質量推定(青色), 惑星の質量-半径関係の理論モデル—H<sub>2</sub>O(破線: AQUA EoS) [16], MgSiO<sub>3</sub>(実線) および Fe: MgSiO<sub>3</sub>=1:1(点線) [17].

作用で生じるトランジット時刻の変動(Transit Timing Variation: TTV)を利用して, 惑星質量が推定される。このTTV解析から, TRAPPIST-1の各トランジット惑星の力学的質量は数倍の火星質量から地球質量程度と見積もられている [2, 8-10] (各惑星の物理量および軌道要素は表1を参照)。

TRAPPIST-1周りの惑星系はほぼ同一軌道面上に存在し, 隣接する惑星はそれぞれ平均運動共鳴に近い軌道配置<sup>\*4</sup>になっている。特に, 外側の3つの惑星はラプラス共鳴<sup>\*5</sup>の関係 [6] にあり, こうした特殊な軌道関係は太陽系ではガリレオ衛星, 太陽系外惑星でもGJ 876系 [11] (ひよっとするとHD 40307[12] およびHD 82943[13]も)と限定的である。隣接する惑星同士の尽数関係<sup>\*6</sup>は相互重力作用下での軌道間隔の変化に付随して成立することから, TRAPPIST-1の惑星系は過去に少なからず, 軌道移動を経験したのち, 平均運動

共鳴に捕獲された可能性が高い。TRAPPIST-1周りには, 0.01-0.06 auの領域に7個の惑星が軌道共鳴関係になり, かつ密に存在している。TRAPPIST-1のコンパクトな惑星系の軌道安定性については, 軌道移動を経て惑星が形成された場合, 中心星と惑星間の潮汐相互作用の効果によって, 系は長期間, 力学的に安定とされている [14, 15]。

## 2. TRAPPIST-1の惑星の内部組成および大気観測

惑星の全体組成は第0近似として, 平均密度から推定される。図1は惑星半径と質量の関係を表している。TRAPPIST-1の地球サイズの惑星はすべて, 地球に似た岩石主体の惑星と類推される。以前の惑星質量の推定値 [9] に基づいた内部構造モデルでは, 相当量の水を含む可能性が示唆されていた [18, 19]。惑星内部での豊富な水量の存在は雪線以遠での惑星形成あるいは雪線内側領域への氷物質の効率的な輸送および供給の証拠となる。原始惑星円盤ガスが中心星輻射に対して光学的に十分薄い状況下では, TRAPPIST-1のような赤色矮星周りの雪線は0.1 au付近に位置するため, 中心星近傍の短周期惑星でも形成段階で氷物質を取り込める可能性は想定され得る。しかし, 最新の惑星質量推定 [10] によると, 惑星のコア質量割合にもよるが, TRAPPIST-1の惑星(とりわけ内側の3つの惑星)に含まれる水量は少ないと予想されている。したがって, 現在のところ, TRAPPIST-1の7個の惑星は比較的乾燥した, 岩石主体である確率が高い。

トランジット惑星の大気組成の推定には, 透過光スペクトルが利用される。中心星からの光が惑星大気を通過する時, 一部の光は惑星大気中に存在する原子や分子に吸収される。惑星大気を透過

<sup>\*4</sup> TRAPPIST-1の隣接する惑星の公転周期比は, 1b:1c=5:8, 1c:1d=3:5, 1d:1e=2:3, 1e:1f=2:3, 1f:1g=3:4に近い尽数関係となっている。

<sup>\*5</sup> 1f:1g:1h=1:2:4の公転周期比。

<sup>\*6</sup> 複数の天体の公転周期が整数比の関係にある。

した光を観測することで、惑星の大気情報を間接的に抽出できる。ハッブル宇宙望遠鏡に搭載された広視野カメラ3 (WFC3) による近赤外測光観測では、内側6つの惑星大気の透過光は吸収特徴に乏しく、平坦なスペクトルを示していた [20-23]。中心星自身 (TRAPPIST-1) からの光の影響は小さいとされていることから [24-26]、TRAPPIST-1の惑星大気で見られる平坦な吸収スペクトルは以下の3つの可能性が想定される。(1) 惑星大気中に光を遮る雲や有機物もやが存在する、(2) 大気の厚みが非常に小さい (= 惑星大気平均分子量が高い)、そして (3) 惑星が大気を持たない。言い換えると、雲やもやが存在せず、平均分子量の低い大気組成 (例. 水素・ヘリウムに富む大気) の可能性は排除される。周囲の原始惑星系円盤ガスは水素・ヘリウムを主体とするため、TRAPPIST-1の惑星が現在、大気を保持する場合、円盤ガス降着で獲得した大気 (一次大気と呼ばれる) は消失した、あるいは十分に獲得できなかった可能性が高い。これまでに地上望遠鏡およびハッブル宇宙望遠鏡で取得された透過光スペクトルの結果から、TRAPPIST-1fを除いた6つの惑星は雲や有機物もやの無い、一次大気を持っている可能性は低い [21, 27, 28]。最近のすばる望遠鏡 (IRD<sup>\*7</sup>) を用いた近赤外分光観測でも、TRAPPIST-1b, 1e, 1fの惑星では有意なヘリウム検出は見られなかった [29]。最後に、水素・ヘリウム主体の大気では、透過光スペクトルに影響を及ぼす高度で雲や有機物もやの生成は実現されにくい点にも留意が必要である [30]。

### 3. TRAPPIST-1の惑星形成と大気進化

前述では、観測的側面から、TRAPPIST-1の惑星系の姿および大気組成を概観した。ここでは、惑星形成論の立場から、TRAPPIST-1の惑星系の形成そして大気進化に迫る。

TRAPPIST-1周りの惑星の総質量は主星質量の0.02%程度に相当する。これは太陽質量に対して、太陽系内の全惑星に含まれる固体コアの推定総質量の割合と同程度である。中心星近傍の狭い領域に7個もの惑星が密集して存在するTRAPPIST-1周りでは高効率な惑星集積 [31] (例. ペブル降着 [32]) が起きた、あるいは初期に惑星材料物質が豊富に存在したのかもしれない。太陽系では、地球型惑星形成の最終段階に巨大衝突イベントが発生し、火星サイズの原始惑星が衝突合体を繰り返し、地球質量まで成長したとされている。しかし、TRAPPIST-1の惑星たちは、軌道移動の段階で天体衝突を経験したのかもしれないが、現在の平均運動共鳴に近い軌道配置は移動終了時の状態を保持していると考えられる。実際、中心星近傍領域に7個の地球サイズの惑星が密集して存在する事実は、惑星が内向きの軌道移動を経験した [33] とする描像と整合的である。

次に、TRAPPIST-1周りの惑星の大気形成および進化を考察する。火星質量以上を持つTRAPPIST-1の各惑星は周囲の原始惑星系円盤ガスを重力的に捕獲できる。TRAPPIST-1周りの7個の地球サイズの惑星は過去に、円盤ガス由来の水素・ヘリウムに富む一次大気を獲得したと予想される。TRAPPIST-1の惑星が軌道移動しながら惑星形成段階で獲得可能な一次大気量は、惑星質量の0.01%から数%程度と見積もられている [34]。形成後、惑星は星からのX線や極端紫外線の照射による大気流失 (光蒸発と呼ばれ、大気の熱的散逸)、さらには恒星風やコロナ質量放出に伴う高エネルギー粒子による大気剥ぎ取り (大気非熱的散逸) を経験する。TRAPPIST-1では、頻発するフレアイベント [5] や強いX線および極端紫外線放射が観測されている [35]。また、ライマン $\alpha$ 線およびX線放射の観測から、TRAPPIST-1の彩層活動は比較的活発であると言われている

\*7 すばる望遠鏡用のレーザーコムを利用した近赤外線分光器IRD (InfraRed Doppler) については本特集の小谷隆氏・佐藤文衛氏の記事を参照。

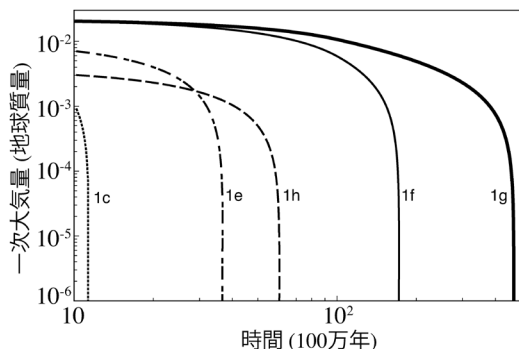


図2 星からのX線および極端紫外線照射下で、TRAPPIST-1c, 1d, 1e, 1f, 1gが形成段階で獲得した一次大気量の時間進化。星に最近接なTRAPPIST-1bの一次大気は1千万年以内にすべて消失 [34]。

[36]. 過去の研究では、TRAPPIST-1が水蒸気大気を持つとした時の光蒸発 [37, 38]、金星のような大気を持つとした時の恒星風によるイオンスパッタリングの影響 [39] については議論されている。

ここでは、TRAPPIST-1の惑星が円盤ガスから獲得した一次大気の散逸について考える。図2はTRAPPIST-1の惑星が獲得した一次大気は時間とともにどのように変化するか、すなわち一次大気の寿命を示している。TRAPPIST-1の惑星はすべて、数億年間にわたって星からのX線や紫外線に晒されることで、惑星形成段階に獲得した一次大気をすべて宇宙空間に散逸してしまうことがわかる。したがって、TRAPPIST-1周りの7個の地球サイズの惑星が現在も大気を保有しているとすれば、それは火山活動や脱ガス、彗星・隕石衝突 [40] などに伴う二次大気（例、二酸化炭素や水蒸気）である可能性が高いことになる。前章で述べたとおり、大気の透過光観測で示唆された、TRAPPIST-1の地球サイズ惑星は二次大気を持つあるいは大気を持たない可能性は惑星形成論の観

点からも支持される。中心星に近いTRAPPIST-1bと1cは潮汐加熱 [41] によって（電磁誘導加熱 [42] によっては他の惑星もひよっとすると）、マグマオーシャン状態の可能性があり、その場合の二次大気は岩石由来の脱ガス成分を反映しているだろう。また、TRAPPIST-1のような赤色矮星では雪線が0.1 au付近に位置するため、中心星近傍領域への氷物質の輸送による揮発性分子の供給が起きたかもしれない。

#### 4. まとめと展望

TRAPPIST-1周りの地球サイズ惑星は内部組成そして大気とともに、太陽系の地球型惑星に類似した特徴を示している。さらに、TRAPPIST-1dや1eは生命居住可能な惑星候補と目されている\*8。ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡の観測第一期（Cycle 1）では、TRAPPIST-1bや1c, 1hに対して、中間赤外線カメラ（MIRI）や近赤外分光（NIRSpec）を用いて大気の有無（例、CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>の存在の可否）および雲／もやの存在が確認される予定である\*9。これによって、TRAPPIST-1周りの地球サイズの惑星の詳細な大気情報は、太陽系外での生命居住可能な領域に位置する地球型惑星の大気に関する初めてのサンプルになると期待されている。

#### 謝辞

ハビタブル惑星の特集号に際して、本稿の執筆機会をくださった福井暁彦氏に感謝いたします。

#### 参考文献

- [1] Gillon, M., et al., 2016, Nature, 533, 221
- [2] Gillon, M., et al., 2017, Nature, 542, 456
- [3] Delrez, L., et al., 2018, MNRAS, 475, 3577
- [4] Van Grootel, V., et al., 2018, ApJ, 853, 30
- [5] Vida, K., et al., 2017, ApJ, 841, 124
- [6] Luger, R., et al., 2017, Nature Astron., 1, 0129

\*8 TRAPPIST-1惑星で実現し得る気候および生命居住可能性の詳細について、本特集の小玉貴則氏の記事を参照。

\*9 TRAPPIST-1惑星の大気観測の可能性については、本特集の藤井友香氏の記事を参照。

- [7] Burgasser, A. J., & Mamajek, E. E., 2017, *ApJ*, 845, 110
- [8] Wang, S., et al., 2017, *ApJ*, submitted (arXiv:1704.04290)
- [9] Grimm, S. L., et al., 2018, *A&A*, 613, A68
- [10] Agol, E., et al., 2021, *PSJ*, 2, 1
- [11] Rivera, E. J., et al., 2010, *ApJ*, 719, 890
- [12] Papaloizou, J. C. B., & Terquem, C., 2010, *MNRAS*, 405, 573
- [13] Beugé, C., et al., 2008, *MNRAS*, 385, 2151
- [14] Tamayo, D., et al., 2017, *ApJ*, 840, L19
- [15] Papaloizou, J. C. B., et al., 2018, *MNRAS*, 476, 5032
- [16] Haldemann, J., et al., 2020, *A&A*, 643, A105
- [17] Zeng, L., & Sasselov, D., 2013, *PASP*, 125, 227
- [18] Dorn, C., et al., 2018, *ApJ*, 865, 20
- [19] Unterborn, C. T., et al., 2018, *Nature Astron.*, 2, 297
- [20] de Wit, J., et al., 2016, *Nature*, 537, 69
- [21] de Wit, J., et al., 2018, *Nature Astron.*, 2, 214
- [22] Zhang, Z., et al., 2018, *AJ*, 156, 178
- [23] Burdanov, A. Y., et al., 2019, *MNRAS*, 487, 1634
- [24] Ducrot, E., et al., 2018, *AJ*, 156, 218
- [25] Morris, B. M., et al., 2018, *Res. Notes American Astron. Soc.*, 2, 10
- [26] Morris, B. M., et al., 2018, *ApJ*, 863, L32
- [27] Moran, S. E., et al., 2018, *AJ*, 156, 252
- [28] Wakeford, H. R., et al., 2019, *AJ*, 157, 11
- [29] Krishnamurthy, V., et al., 2021, *ApJ*, in press (arXiv:2106.11444)
- [30] Morley, C. V., et al., 2015, *ApJ*, 815, 110
- [31] Schoonenberg, D., et al., 2019, *A&A*, 627, A149
- [32] Lambrechts, M., & Johansen, A., 2012, *A&A*, 544, A32
- [33] Ormel, C. W., et al., 2017, *A&A*, 604, A1
- [34] Hori, Y., & Ogihara, M., 2020, *ApJ*, 889, 77
- [35] Wheatley, P. J., et al., 2017, *MNRAS*, 465, L74
- [36] Bourrier, V., et al., 2017, *A&A*, 599, L3
- [37] Bolmont, E., et al., 2017, *MNRAS*, 464, 3728
- [38] Bourrier, V., et al., 2017, *AJ*, 154, 121
- [39] Dong, C., et al., 2018, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 115, 260
- [40] Kral, Q., et al., 2018, *MNRAS*, 479, 2649
- [41] Barr, A. C., et al., 2018, *A&A*, 613, A37
- [42] Kislyakova, K. G., et al., 2017, *Nature Astron.*, 1, 878

## The Planetary System around TRAPPIST-1

Yasunori HORI

*Astrobiology Center, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

*Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: Seven Earth-sized planets orbiting an ultracool dwarf TRAPPIST-1, two or three of which are potentially habitable, were discovered in 2017. Adjacent pairs of planets around TRAPPIST-1 are locked into a (near-) mean-motion resonance. The mass-radius relation of TRAPPIST-1 planets suggests that they are likely to be rocky. Earth-sized planets around TRAPPIST-1 can be good sample for a better understanding of the orbital evolution and formation of terrestrial planets around a low-mass star. Also, transmission spectroscopy in the upper atmosphere of the TRAPPIST-1 planets reveals that they may have either no atmospheres or tenuous secondary atmospheres, such as volcanic gases. TRAPPIST-1 planets are promising follow-up objects for the James-Webb space telescope, which is scheduled for launch in 2021, toward atmospheric characterization of terrestrial planets outside the Solar System. In this article, I review our current understanding of the planetary system around TRAPPIST-1.