

系外惑星「遠い世界の物語」その11 ～深紫外線と系外惑星大気～

亀田 真吾¹

(要旨) 系外惑星が数多く発見され、ハビタブルゾーンにある地球型惑星も見つかり始めている。それらの惑星大気の観測も検討されているが、現行の計画で対応する可視近赤外域では観測が困難である。低温度星のハビタブルゾーンでは深紫外線輻射が強く、それによって高層大気が広がっている可能性がある。高層大気の観測には深紫外線領域での観測が有効であり、主星輻射強度も同時に観測することができる。本稿では、系外惑星大気と深紫外線輻射に関する解説を行い、現在検討中の観測計画について紹介する。

1. 低温度星系の地球型惑星

既に多数の系外惑星が検出されており、地球と同程度の大きさのものも少なくない。2016年には最も太陽系に近い恒星であるプロキシマケンタウリに地球サイズの惑星プロキシマbがあることも確認された[1]。さらにこの惑星が恒星から受ける熱輻射は地球と同程度であるため、惑星表面に液体の水が存在している可能性がある。惑星系において、惑星表面に液体の水を保持することが可能となる熱輻射を受ける領域はハビタブルゾーンと呼ばれている(本連載の「系外惑星「遠い世界の物語」その10」(小玉・門屋)で詳しく議論されている)。

プロキシマbは、軌道長半径約0.05 AU、公転周期11日で主星であるプロキシマケンタウリを周回している[1]。地球に比べて主星に非常に近い軌道であるが、主星の温度が3000 Kと低温であるため、プロキシマbが受ける熱輻射は、地球の65 %程度と考えられている。この他に、低温度星であるTRAPPIST-1の周りにも地球程度の大きさの複数の惑星がハビタブルゾーンにあることが分かっている[2]。これらの惑星は地球のように海洋を有している可能性があり、さらには生命が存在することも期待される非常に魅力的な惑星であ

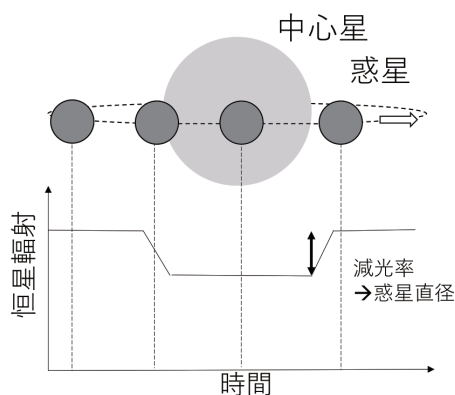


図1：トランジット法.

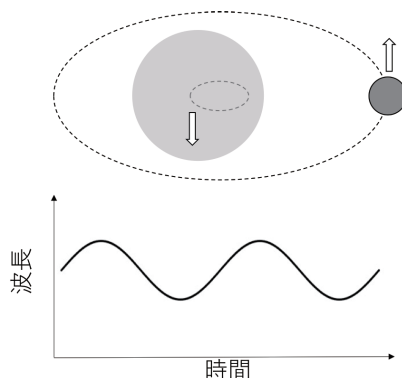


図2：ドップラー法.

1. 立教大学理学部
kameda@rikkyo.ac.jp

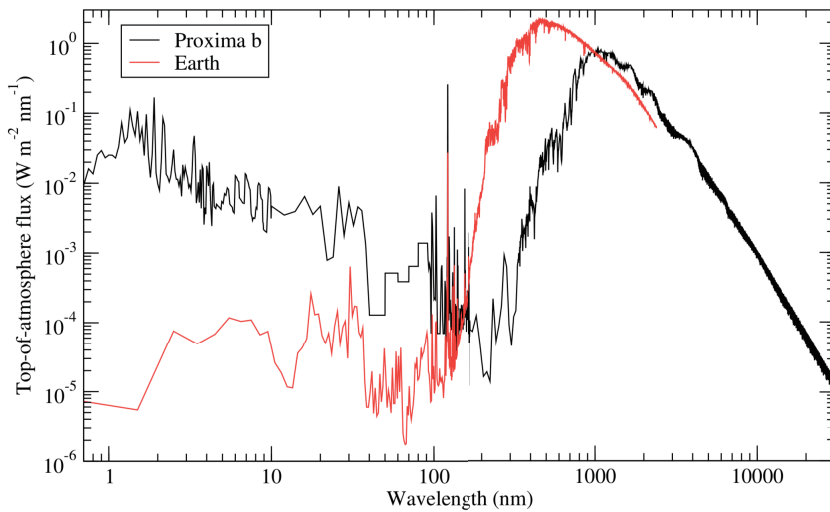


図3：プロキシマbが受ける放射分光スペクトル(赤)と、地球が受ける放射分光スペクトル(黒)[3].

り、精力的に研究が進められている。

これまでに発見された系外惑星の多くは、トランジット法かドップラー法で検出されている。トランジット法は主星の前を惑星が通過した際の減光の検出により惑星の存在を確認する手法である(図1)。ドップラー法は惑星の周回に伴い、主星中心が共通重心を回る時に生じる主星光のドップラーシフトを捉えて惑星の存在を確認する手法である(図2)。太陽に対して地球は非常に小さく、軽いため、これらの手法で小さな地球型惑星を検出するためには高い観測精度が求められるが、低温度星は太陽に比べて小さく軽いため、低温度星周りの地球型惑星の検出に対する要求精度が緩和される。さらには太陽系近傍の大半が低温度星であるため、今後も多くの地球型惑星が発見されることが期待される。ハビタブルゾーン内にも少なくない数の惑星が発見されるであろう。ここ10年程度で系外惑星の観測は急速に進んでおり、「生命を保有する惑星の検出」は、もはや夢物語ではなく、科学研究の範疇にある。

2. 低温度星系の深紫外線輻射

それでは、プロキシマbやTRAPPIST-1にある地球型惑星は、地球と同様の環境を持つのだろうか？主星から受ける輻射の総量は同程度であるものの、実際にはその分光スペクトルは大きく異なっている。図3に

プロキシマbが受ける輻射の分光スペクトルと、地球が受ける輻射のスペクトルを示す[3]。地球が受ける輻射のピーク波長が約500 nmであるのに対し、プロキシマbが受ける輻射のピーク波長は、主星の温度が低いために約1 μm となっている。太陽に比べて赤く小さい星であり、赤色矮星と呼ばれる恒星の1つである。一方、短波長側に目を向けてみると、200-400 nmの近紫外領域ではプロキシマbが受ける輻射は、地球が受ける輻射に対して2-3桁程度弱いですが、それより短い10-200 nmの領域に入ると輻射量は逆転し、プロキシマbが受ける輻射は地球が受ける輻射に対し1-2桁程度強くなる。この波長域は深紫外領域あるいは真空紫外量域と呼ばれ、分子や原子の解離や電離を引き起こすエネルギーを持つ光の波長域である。この波長域の光は大気中で吸収され、高層大気的主要な加熱源となる。しかし、深紫外線輻射量が測定されている恒星の数は非常に少なく、惑星を持つ恒星の大半で未計測となっている。今後進められる系外惑星大気観測結果の解釈を大きく左右する物理量であるが、現在測定可能な装置は、想定寿命を10年以上超えているハッブル宇宙望遠鏡だけであり、後継のジェームスウェッブ宇宙望遠鏡は紫外線領域の観測には対応しない。大気を通さない波長域であるため、地上望遠鏡では観測は不可能である。その他、現在欧米で採択されている宇宙望遠鏡計画でも紫外線領域は非対応であり、ロシアが開発中の口径1.7 mの紫外線宇宙望遠鏡World

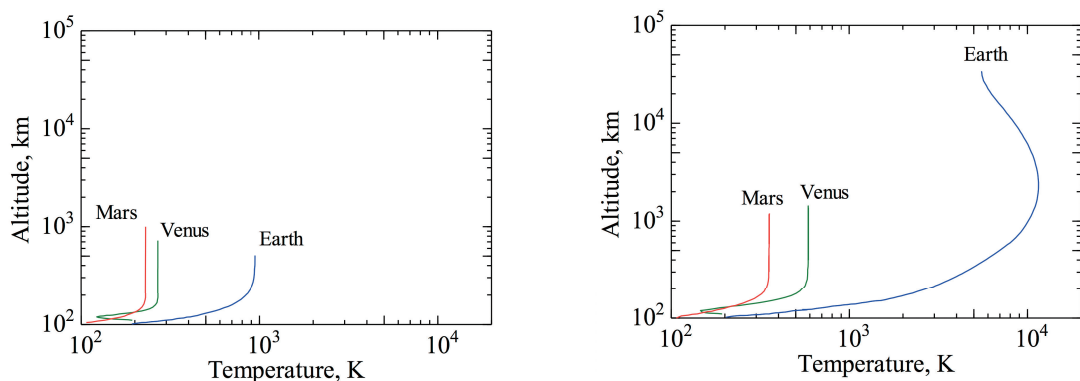


図4：(左)現在の太陽系内地球型惑星高層大気の温度分布[4,5]。(右)深紫外線輻射強度を現在の10倍にした場合に想定される温度分布[4,5]。

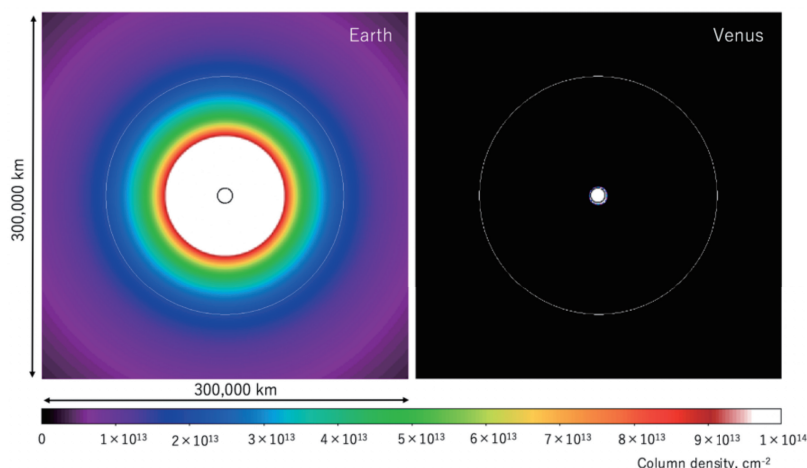


図5：(左)地球が受ける深紫外線輻射強度を現在の10倍にした場合に想定される酸素原子コラム密度分布。黒円は惑星の大きさを表し、白円はプロキシマケンタウリの大きさを表す。

Space Observatory-UVが唯一の手段となるものの、開発総額の予算獲得には至っていない状況である。

3. 地球型惑星の超高層大気(酸素原子)

大気の加熱源となる波長域の輻射が地球に比べて非常に強い場合には、高層大気が高温化し大きく広がると考えられる。太陽系初期の深紫外線輻射が強かった時期における高層大気分布のモデル計算が行われている[4, 5]。図4にこれらの研究によって推定された高層大気の温度分布を示す。地球の高層大気(> ~400 km)の温度は1000 K程度であるが、深紫外線輻射強度が現在の10倍になると、高層大気の温度は10000 K

にまで達し、数惑星半径程度まで高層大気が広がる。酸素原子は130–131 nmに3重線を持ち、そのうちの2つは星間吸収を免れるため、太陽系近傍からでも観測が可能である。プロキシマbはドップラー法で検出されており、トランジットは確認されていないが、仮に、地球と同様の大気を持つ惑星が10倍の深紫外線輻射を受け、主星の前を通過するとした場合、恒星の酸素原子輝線発光が惑星大気によって遮蔽され、24%程度減光されることになる[6]。

一方、金星や火星の高層大気の温度は低く300 K程度であり、深紫外線輻射が10倍程度となった場合でも600 K程度までしか温度は上がらない。これは金星や火星の大気の主成分が二酸化炭素であることに起因

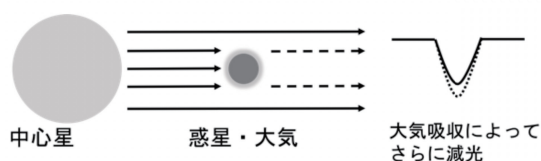


図6: トランジット分光法。

する[5]。二酸化炭素は温室効果ガスとして知られており、大気を持つエネルギーを効率よく赤外線領域で放射する性質を持つ。このために地表付近に熱が伝えられ、地表温度が上昇する一方で、これによって大気の温度は下がり、大気にとっては冷却剤として働く。そのために、高層大気が広がらない、ということが起きる。一方、地球大気の二酸化炭素混合比は低いいため、高層大気が効率よく加熱され遠方まで大気が広がることになる。

地球の二酸化炭素混合比は、炭素循環によって抑制されていると考えられている。海洋に二酸化炭素が溶け込み炭酸塩を形成することで、大気中の二酸化炭素混合比が下げられている。一方で、金星ではこの炭素循環が働かず二酸化炭素混合比96 %の大気が維持されている。以上より、海洋のある地球では、大気中の二酸化炭素混合比が低く、高層大気が遠方まで広がり、海洋の無い金星では、大気中の二酸化炭素混合比が高く、高層大気が遠方まで広がらない、ということが分かる。

4. 太陽系外地球型惑星大気の観測

系外惑星の大気観測には主に可視・近赤外トランジット分光法が用いられている。トランジットの際に大気原子・分子の吸収線付近の分光観測を行い、線ごとの吸収量の差から大気組成を決定するという手法がトランジット分光法である(図6)。地球より数倍大きい惑星では既にトランジット分光により大気組成が推定されつつあるが、6.5 mという大口径の宇宙望遠鏡JWSTを持ってしても、地球程度の小さい惑星の持つ薄い大気(～100 km)を検出することは非常に困難である。地球程度の惑星による減光量が1-2 %程度であり、その検出自体もまだ困難である中で、さらにその100分の1程度の遮蔽量となる大気を検出しなければ

ならない。例えば地球と金星は同程度の大きさであり、互いに大きく異なる大気を有しているが、現行の技術ではこのように小さな地球型惑星の大気観測は難しく、表層環境が大きく異なる地球と金星を見分けることすら困難である。

しかし、深紫外線領域にある酸素原子輝線の観測によってこの問題が解決される可能性がある。特に、低温度星ハビタブルゾーンに存在する地球型惑星が、地球と同じ大気組成を持つ場合、その高層大気の広がりによる減光率は24 %にまで達する[6]。可視近赤外領域での低層大気観測では非常に高い感度安定度が求められるが、高層大気の大きな遮蔽を検出することは相対的にかなり容易となる。ただし、深紫外線領域の光量自体が大きくないため1 m級の深紫外線宇宙望遠鏡が必要であるが、1 m級であってもJWSTより短期間で地球と同じ大気組成を持つ惑星が20 pc以内にあった場合に検出することが可能となる。より大口径の望遠鏡があれば、より遠方まで同様の観測を行うことができ、生命保有惑星候補の検出が期待出来る。

5. 深紫外線による高層大気観測・PROCYON/LAICAの成果

2014年12月に打ち上げられた小惑星探査機「はやぶさ2」とともに、その相乗り機として、超小型深宇宙探査機PROCYONが打ち上げられた。主目的は(リュウグウとは別の)小惑星のフライバイ撮像であったが、小惑星到着前に理学成果を獲得するために、水素ライマン α 線撮像装置Lyman Alpha Imaging Camera (LAICA) (図7)を追加搭載することになった。JAXAから予算承認を受けたのは2013年9月末のこと

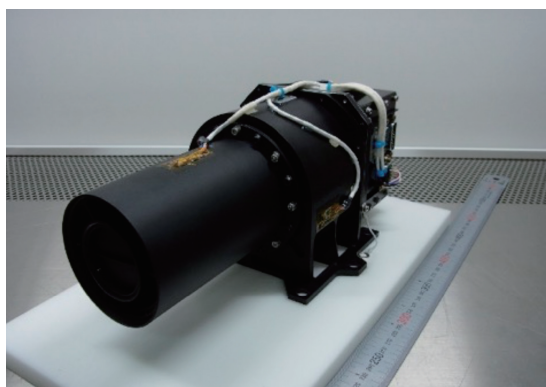


図7: LAICAフライトモデル。

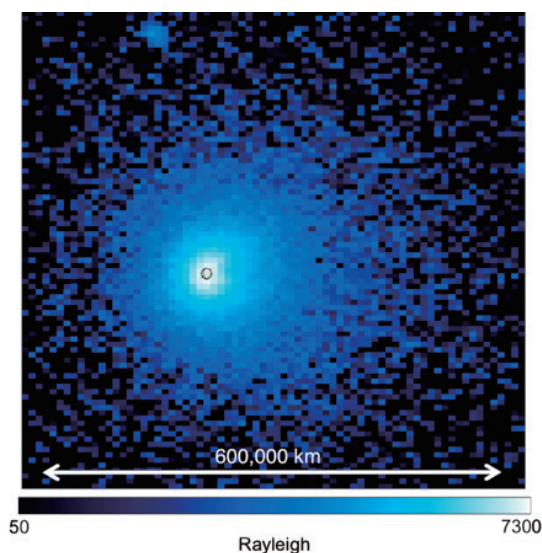


図8：地球水素発光分布[7].

である。太陽系探査計画に関わった経験のある方は、目を疑われるかもしれないが、この記述に誤字は無く打ち上げまで1年少しという時点での承認である。検出器には、水星探査計画ベピコロンボで実績のある製品を採用したものの、反射望遠鏡で構成される光学部は完全に新規設計である。筆者はこの装置のPIを担当した。この時期は、同時に「はやぶさ2」搭載カメラの開発を並行して進めており、どちらもスケジュールが厳しい状況であったが、当時在籍していた学生達の奮闘により、どちらの装置もなんとか完成させることが出来た。彼らの尽力なしには、どちらの装置もうまくは動かなかったであろうし、うまく動作したとしても十分な性能は発揮できなかっただろう。本稿では苦勞話で紙面を割くことは避け、以降、得られた成果を紹介させて頂く。

LAICAの主目的は地球高層の水素大気の観測である。水素大気の観測は50年以上前から実施されており、15地球半径以上まで広がっていることが観測で確認されていた。40年程前にアポロ16号に乗った宇宙飛行士によって地球水素発光分布の写真が得られた後、40年に渡って地球水素大気の外から2次元分布を捉える撮像観測は行われていなかった。そこで、深宇宙に出る機会を利用して、この水素発光を捉える、ということがこの計画の目的である。結果として、地球距離0.1 AUの地点から地球水素発光の観測に初めて成功

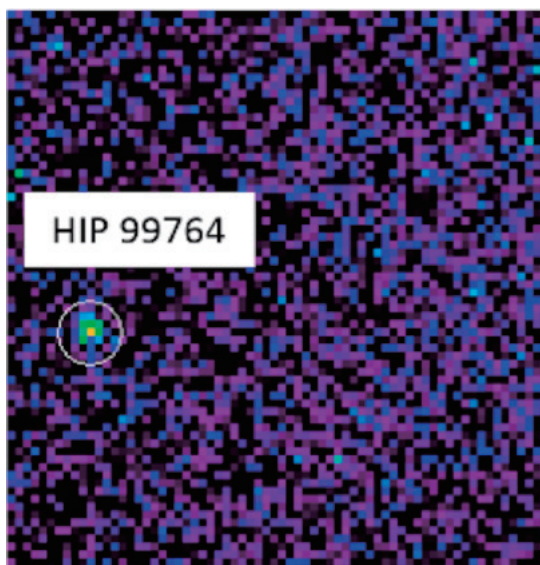


図9：低温度星のライマン α 線発光.

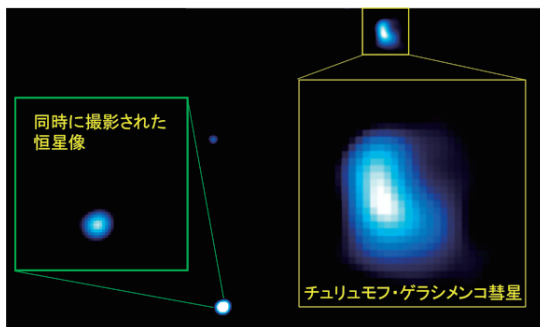


図10：チュリュモフ=ゲラシメンコ彗星の水素発光(立教大学Web).

し、38地球半径以上まで水素大気が広がっていることを確認することが出来た(図8) [7]. さらに、低温度星の深紫外線輻射量計測(図9)、チュルモフ=ゲラシメンコ彗星が放出する水分子起源の水素の発光を捉えることにも成功した(図10). この結果から彗星の水分子放出量の推定にも成功している [8].

6. 国際共同研究・共同計画への参加

地球高層大気が遠方まで広がっており、その大気分布モデルを刷新したことにより、その結果を紹介した系外の地球型惑星大気の観測検討を進めている海外の研究グループと共同研究を開始し、現在論文投稿中の状況である。また、低開発費用、短期間での開発実績

が評価され、先述のWSO-UV計画からも系外惑星科学を目的とした装置提供の打診を受け、望遠鏡システム内での配置まで設計が進み、論文として成果報告を行った[6]。また、可視近赤外領域での系外惑星大気観測を目的とした欧州の系外惑星専用宇宙望遠鏡ARIELプロジェクトチームとも協議を進めた結果、深紫外線輻射計測の重要性が認識され、日本から提供する測定装置の追加も検討されている。その他にも、彗星観測や地球磁気圏撮像計画等の装置提供の打診を受けている状況となっている。地球観測に加えて、彗星・恒星の試験観測を行ったことで、様々な研究分野における国際共同計画への展開が見えてきている。

さらに、国内で進めてきた技術開発によって、長年ほとんど向上できていなかった深紫外線検出器の効率を向上することに成功しており、現在論文投稿準備中である。2030年代の打ち上げを目指して検討されている超大型宇宙望遠鏡LUVOIR計画などのチームからも情報提供の依頼を受けており、情報交換を進めながら国際大型計画への参加の道を探っている。

7. 超小型衛星による系外惑星系深紫外線輻射観測

太陽系外の地球型惑星大気の観測を実現するためには、大型計画の推進が必要となるが、系外惑星を持つ恒星の深紫外線輻射観測はPROCYONのような超小型衛星でも充分実現できる。2018年4月に打ち上げられたTransiting Exoplanet Survey Satellite (TESS)によって、ここ2年のうちに大量の系外惑星を発見することが期待され、それらの惑星大気観測が地上・宇宙望遠鏡によって精力的に進められることになるだろう。しかし、それらの惑星系のうちの多くで、深紫外線輻射量が未知のままである。現時点ではハッブル宇宙望遠鏡を向ける他に手段がないが、汎用の宇宙望遠鏡であり、多数の恒星の観測を実施することは難しいと考えられる。

超小型衛星に搭載可能な小口径の望遠鏡で、深紫外線輻射量を測定するためには、その代表値であり、最も強度が高い、水素ライマン α 線の観測を行う必要がある。そのためには、地球水素の発光を避けるため超小型衛星を高高度まで輸送する必要がある。しかし、PROCYONのように深宇宙に超小型衛星を投入する機会は非常に限られている。この問題を解決するため、

筆者を含む系外惑星紫外分光WGチームは、超小型衛星開発チームや、超小型衛星を高高度に輸送する推進系(キックモータ)開発チームと共同で検討を進めており、静止衛星軌道への投入に用いられる静止遷移軌道への打ち上げ機会に、相乗りで超小型衛星を打ち上げ、自前のキックモータにより深宇宙に到達することが実現可能であるという見込みが得られている。深宇宙探査の機会が10年に1度程度に留まっているのに対し、静止遷移軌道への打ち上げは年に数回程度行われている。この手法を用いることによって、早期に、低開発費用で、系外惑星系の深紫外線輻射量の測定を開始することが可能となる。また、LUVOIRに代表される国際共同大型計画では宇宙での実績がない装置が搭載されることはまず有り得ない状況であり、早期に宇宙での技術実証を進めておくことは、国際共同計画への参加に際して必須の条件となっている。

さらにPROCYON/LAICA同様に同じ装置で彗星の水放出量の測定も可能となるだけでなく、静止遷移軌道から深宇宙に到達する超小型衛星システムの宇宙技術実証を完了することにより、深宇宙探査の機会が劇的に増えることになる。様々な場合が考えられるが一例として、10年のうちに性質の異なる10個の小天体探査も可能となり、10機の衛星を打ち上げる総開発費用は従来の科学衛星一基の開発費用の数分の1に収まることになる。超小型衛星に搭載できる理学装置には大きな制約が課せられるため、回数の単純な比較は適当ではないが、太陽系探査において日本独自の新たな手段の1つとなるだろう。

8. まとめ

系外惑星の観測技術は急速な進歩を続けており、生命を保有する惑星は空想の産物ではなく、科学的な議論に値する状況に達している。しかし、可視赤外領域を中心に進められてきた系外惑星大気の観測計画では、依然として地球型惑星大気の観測は困難であり、地球と金星の判別をつけることも難しい。一方、低温度星のハビタブルゾーンでは、地球に比べて深紫外線輻射が遙かに強いことを考慮すると、高層大気の観測が有効であると考えられる。超小型衛星に搭載された深紫外線観測器によって、地球の高層大気が遠方まで到達することが確認され、太陽系外の地球型惑星高層大気

の観測検討が進められている。その結果として、1 m 級の紫外線宇宙望遠鏡によって地球型惑星大気が検出可能であることが示されている。また、大気の加熱源として重要な深紫外線輻射量は、系外惑星を持つ恒星の多くで未計測となっており、今後の可視近赤外分光による惑星大気観測に向けて、超小型衛星による深紫外線輻射測定を行う必要がある。将来の国際共同大型望遠鏡計画への参加の道を開くためにも、超小型衛星による宇宙での観測技術実証が重要である。

謝 辞

本稿で紹介した内容は、系外惑星紫外分光 WG の活動で進められた検討内容に基づいています。WG メンバー他、議論に参加して頂いた全ての方に感謝致します。また特に本稿の執筆機会を頂いた成田憲保氏に感謝致します。

参考文献

- [1] Anglada-Escude, G. et al., 2017, *Nature* 536, 437.
- [2] Gillon, M. et al., 2017, *Nature* 542, 456.
- [3] Ribas, I. et al., 2017, *A&A* 603, A58.
- [4] Tian, F. et al., 2008, *JGR* 113, E05008.
- [5] Kulikov, Y. N. et al., 2017, *Space Sci Rev* 129, 207.
- [6] Tavrov, A. et al., 2018, *JATIS* 4, 044001.
- [7] Kameda, S. et al., 2017, *GRL* 44, 11706.
- [8] Shinnaka, Y. et al., 2017, *AJ* 153, 76.