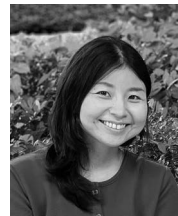


# 温暖な地球型惑星の大気観測と生命探査

藤井友香

〈国立天文台科学研究部 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: yuka.fujii@nao.ac.jp



地球と同程度の質量あるいは半径を持ちハビタブルゾーン付近を公転する太陽系外惑星が次々に検出されてきており、生命の可能性の調査が大きな課題になっている。本稿では、これらの系外惑星における生命の可能性をどう調べるかについて議論する。そのためには、生命のサインと考えられる分子の痕跡の検出とともに、惑星の表層環境の理解が欠かせないことを議論し、それを制限するための将来観測について紹介する。その中で、中間赤外線領域において主星と惑星を空間的に分離せずに惑星光の情報を得る方法について述べる。

## 1. はじめに

太陽系外惑星における生命探査において最初のターゲットと考えられているのは、いわゆるハビタブルゾーン付近にあり、分厚い大気を纏っていないと考えられる10地球質量以下かつ2地球半径以下程度の惑星である。このような性質を持つ惑星を、本稿では便宜上「ハビタブル惑星候補」と呼ぶことにする。

10数年前、筆者が大学院で太陽系外地球型惑星についての研究を始めたころは、このタイプの惑星かもしれない候補が一つ見つかったかどうかというところで、共同研究者らと、このタイプの惑星は実際宇宙にどれくらいあるだろうと話していた。そのうち一人が、恒星の10-20%くらいに付随するとしよう、と言ったとき、当時の自分は何の根拠もなく「楽観的だなあ」と思ったのを覚えている。その後ほどなくして、Kepler衛星や視線速度サーベイなどのデータの統計的な解析から、その予想があながち間違いでもないということが見えてきた。また、この数年で、詳細観測に適した太陽系近傍のハビタブル惑星候補も次々と報告されてきている。

目下の重要課題は、生命探査の意味で興味深いこれらの惑星が、どのような表層環境を持つのか、実際に生命が存在するのか、を明らかにすることである。本稿では、この課題へのアプローチを議論する。まず、[1]や同シリーズのレビュー論文（まどめは[2]）を踏まえて、ハビタブル惑星における生命探査の現段階での方向性を述べたのち、観測的展望を議論し、中間赤外線領域におけるハビタブル惑星の大気観測の可能性の最近の検討[3]を紹介する。

## 2. 生命の惑星の見分け方

### 2.1 生命のサイン？

ハビタブル惑星候補が生命探査のターゲットとして興味深いといっても、天文学的距離にあり赴いて实地調査することが極めて困難な系外惑星において、望遠鏡による観測のみで生命の証拠を探ることは、当然、単純ではない。観測できる特徴は限られている。その一つが分光特性であり、まず考えられるのが大気分子による吸収線で調べることである。

地球上の生物圏は、たくさんの種類の特有の分子を大気中に放出している。その代表格が、主に

光合成によって発生し現在大気の約20%を占めている  $O_2$  である。また、 $O_2$  の光化学反応で生成する  $O_3$  も、間接的に生命由来と言える。現在 1.7 parts-per-million (ppm; 百万分の1) の混合比を持つ  $CH_4$  や、0.3 ppm 程度の  $N_2O$  もそのほとんどが生物由来である。これらの分子は、現在の地球大気中の存在量で惑星光あるいは透過光の中にその吸収線があらわれ、宇宙空間からも観測できる生命のサインの代表例として考えられている。

このほかにも、生物圏はさまざまな非生物的には生成しづらい気体分子を放出している（最近のレビューとしては、[4] などがある）。たとえば、イソプレン ( $C_5H_8$ ) はメタンと同程度のフラックスを持ち、イソプレンを構成単位としたテルペン類も含めて生物由来（ほとんどは陸上植物によるもの）である。また、ジメチルスルフィド (DMS) などの有機硫黄化合物やクロロメタン ( $CH_3Cl$ ) といった分子も、生物圏から放出される特徴的な揮発性物質である。これらは、現在の酸化的な大気の中ではすぐに酸化され、1 parts-per-billion (10億分の1) 程度以下の存在量しかない。しかし、地表フラックスや惑星大気の組成によっては、分光特性が観測可能になる可能性がある。

## 2.2 偽陽性の可能性

しかし、上に挙げた分子を生成する非生物的過程がないわけではない。生命のサインと考えられている分子が非生物的に大気中に蓄積し観測可能になるシナリオは、偽陽性のシナリオとして研究が進められている。たとえば、 $H_2O$  の光解離、そしてそれに続く H の散逸は、非生物的な  $O_2$  の生成源の一つである。現在の地球大気においてその影響は相対的に小さいが、水蒸気以外の大気成分の量が少なかったり大気上層の温度が高い場合は、水が上層に運ばれやすくなり、このプロセスが効率的に起こる可能性がある。また、 $O_2$  は、 $CO_2$  の光解離からも生じる。 $CO_2$  は遠紫外線

(117–175 nm) の光によって光解離し、Oを生じる ( $CO_2+h\nu\rightarrow CO+O$ ) が、この逆反応は効率良く起こらず、COが $CO_2$ に戻るには他の物質が媒介となる必要がある。たとえばOHなどがその役目を果たすが、媒介が少なればOは $O_2$ として蓄積してしまう。この状況は、M型星周りでより起こりやすい傾向にある。というのも、M型星のハビタブルゾーンにおける近紫外線のフラックスは太陽型星周りに比べて弱く、 $HO_2$  や  $H_2O_2$  などの光解離によるOHの生成が抑制されるからである [5]。たとえば、TRAPPIST-1系の惑星でも、0.1 bar 程度以上の  $CO_2$  があればこのプロセスで  $O_2$  が十分蓄積する可能性があると思われられている [6]。

他の惑星の生命がどのようなしくみを持っているのか分からない以上、バイオシグネチャ候補が発見されたときにまず疑うのは非生物的過程である。すべての既知の非生物的過程で説明できないときに、生命の可能性が浮かび上がるのである。系外惑星について得られる情報の少なさを考えると、惑星表層のシステムを完全に掌握することは極めて難しいが、多角的な情報を総合して非生物的過程の可能性を制限することが必要だ。たとえば、上に例として挙げた非生物的な  $O_2$  生成過程を制限するには、大気圧や大気中の  $CO_2$  量やそれ以外の大気組成、そして主星の紫外線スペクトルを知ることが重要である。

## 2.3 生命という解釈の妥当性

生命のサインが疑われる物質が検出された場合は、偽陽性シナリオの可能性を吟味すると同時に、その物質が生命起源であるという解釈を支持する他の特徴を探することも重要である。たとえば、今のところ生命の発生に液体の水が必要と考えられているため（だからこそハビタブルゾーンに注目するわけだ）、実際に表層に水があることが確認できれば、生命という解釈の説得力が増す。一方で、純水と炭素があるだけでは生命は産まれないだろう。生命活動にはさまざまな栄養素

(窒素, リンなど)が必要である。栄養塩の供給源として、大陸地殻が露出していることも生命の発生・発展に重要だとも考えられており<sup>\*1</sup>、表層の反射特性などを利用してその存在を調べることも期待される (e.g., [7])。また、生命の発生や気候の安定には火山活動が必要とする考えから、その有無を大気組成や表層の反射特性などから探るといことも考えられる。さらに、「植生のレッドエッジ」[8]など、生命の存在を示唆する他のサインの共存も、生命という解釈の尤もらしさを押し上げるだろう。

#### 2.4 表層環境の包括的な理解へ

生命のサインと考えられる特定の分子の検出は、今後の系外惑星観測の重要な目標であるが、上で見てきたようにそれだけでは生命の惑星探しは完結せず、惑星表層のシステムの包括的な理解が求められる。そのためには、惑星進化や大気化学の理解を深めるとともに、観測によって多角的な状況証拠を集めることが必要である<sup>\*2</sup>。

このような生命のサインの検証プロセスの実例として興味深かったのは、去年の金星大気におけるPH<sub>3</sub>検出の報告と生物起源の可能性の議論[9]、そしてそれに続くさまざまな検証である。一連の議論では、(1) データ解析・解釈の妥当性、(2) 非生物的にPH<sub>3</sub>が発生した可能性、(3) 生物由来であるという解釈と整合的な状況証拠、といった観点からさまざまな研究者が検討しているので、興味のある読者の方にはお勧めしたい。

### 3. 観測的な展望

ハビタブル惑星候補の表層環境についてのさまざまな情報を集めることが重要だと書いたが、実際にそのような観測をするのは非常に難しい。こ

こからは、将来の観測への期待について述べる。

系外惑星を観測する方法は、大雑把にいて、(i) 主星と惑星を空間的に分離して恒星光の影響を落とすことで惑星光を検出する方法と、(ii) 空間的には分離せず主星と惑星をそのまま合計した光の中から時間変化やスペクトル形状などを利用して惑星のシグナルを探す方法がある<sup>\*3</sup>。いずれの場合でも、系外惑星の大気観測の難しさは、主星の光に対して惑星のシグナルが桁も小さいということである。現在の分光器では、ノイズフロア (観測時間をあげても減少しない系統誤差の成分) が $10^{-5}$ 程度以上あるため、主星光に対する惑星シグナルがそれより小さい場合は、時間をかけても観測が難しいと考えられる。また、それよりシグナルが大きくても、光子ノイズを落とすために長時間の観測が必要になる。

#### 3.1 トランジット透過分光

(ii) の一つの例は、惑星のトランジット前後の恒星スペクトルの違いから惑星大気成分を調べるトランジット透過分光である。この方法による惑星大気由来のシグナルの主星光に対する比は、スケールハイトを $H$ 、惑星半径を $R_p$ 、恒星半径を $R_*$ としておおよそ $2HR_p/R_*^2$ の数倍程度である。水素に富む大気ではスケールハイトが大きいため観測が比較的容易で、実際、ハビタブルゾーンのスーパーアースで水素大気中の水蒸気が検出されており[12]、TRAPPIST-1系の惑星については雲のない水素大気「ではない」ということが分かっている[13]。一方、地球大気のように比較的分子量の大きい分子が大気の主成分である地球サイズの惑星のシグナルは、TRAPPIST-1惑星の周りでも最大 $10^{-4}$ 程度である (太陽-地球の系ではおおよそ $10^{-6}$ となるので、観測は今のところ

<sup>\*1</sup> 大陸の存在は、風化の効率や惑星の反射率、水蒸気分布、海洋循環などに影響するため、惑星気候の理解にとっても重要である (詳しくは本号の小玉貴則氏の記事を参照されたい)。

<sup>\*2</sup> 今回は生命の存在に着目して書いているが、生命の有無までいなくても、地球のような環境がどれだけ普遍的かを知る意味でも大変興味深い。

<sup>\*3</sup> 組み合わせるアプローチもある (e.g., [10, 11]) が、ここでは詳しく触れない。

絶望的だ)。その中でCO<sub>2</sub>の吸収線は比較的強く、TRAPPIST-1系のハビタブル惑星候補においては、James Webb Space Telescope (JWST) による10回程度以下のトランジット前後の観測での検出も期待されている。一方、地球大気と同様の大気構造の場合、CH<sub>4</sub>、O<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>Oなどの検出には、数10-100回程度のトランジット観測が必要と見積もられている。

トランジット透過分光は、TRAPPIST-1系のような晩期M型星周りのハビタブル惑星候補の観測の有望な観測手段であるが、その惑星がトランジットする場合にしか使えないという厳しい制限があり、今のところ、JWSTで期待できる候補はTRAPPIST-1系の惑星のみである(ただし、同様のハビタブル惑星候補の探査は今後も行われ、ターゲットが増えることが期待される)。

### 3.2 惑星光分光

一方、太陽近傍にはトランジットが確認されていないハビタブル惑星候補がいくつも見つまっている。これらの大気を知るには、惑星自身が放つ光を分光する必要がある。

惑星光は主に、反射光の成分と熱輻射の成分からなる。反射光が優勢な波長域では、恒星光に対する惑星光の割合は、軌道長半径を $a$ 、アルベドを $\alpha$ として、 $\alpha (R_p/a)^2$ に比例し、太陽-地球では $10^{-10}$ 程度、ハビタブルゾーンが主星により近い晩期M型星のハビタブル惑星でも $10^{-6}$ 程度である。主星光に対する惑星光シグナルの割合がこれほど小さい場合、(ii)の方法は難しく、(i)、つまり主星と惑星を空間的に分離し主星光の影響を落とすことが必要になる。

主星光に対する惑星光の相対的な大きさという意味ではM型星周りのハビタブル惑星の方が(太陽型星周りに比べて)観測的に有利だが、恒星と惑星の離角が近いため、望遠鏡には高い空間分解能が要求される。そのため、低質量星周りの惑星の反射光の成分は、Thirty Meter Telescope (TMT)をはじめとする次世代地上大型望遠鏡で

狙い、太陽型星周りの反射光は、観測が安定して主星光を落としやすい宇宙望遠鏡で狙うというのが、現在の方向性だ。可視光から近赤外線領域で狙う分子としては、H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>などがある。

一方、熱輻射が優勢な波長帯では、熱輻射の分、恒星光に対する惑星光の割合が大きい。特に、熱輻射がピークを迎える波長帯(300 K程度のハビタブル惑星を考えると $\sim 10 \mu\text{m}$ 程度)より長波長で急激にフラックス比が緩和され、レイリー-ジーンズ領域のフラックス比である(半径比)<sup>2</sup>×(温度比)に漸近してゆく。この極限値は、太陽-地球の系では $10^{-5}$ 程度、晩期M型星周りになると最大 $10^{-3}$ までになる(図1)。シグナルの割合がこの程度になると、ノイズフロアに打ち勝ち、(ii)の方法が現実的になってくる。

次章では、こちらの方法について検討する。

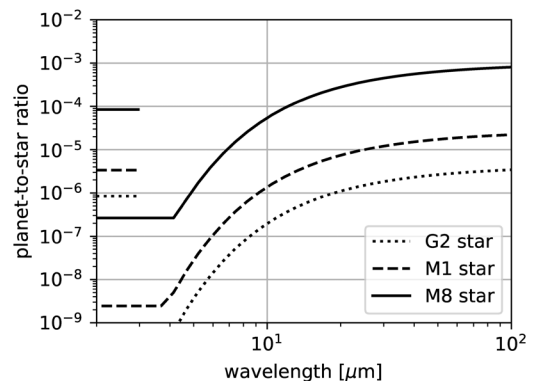


図1 主星光に対するハビタブル惑星の光の比の波長依存性模式図。スペクトルの主星も惑星も黒体輻射のスペクトルで近似している。M1型星は半径0.5太陽半径で有効温度3,600 Kのものを、M8型星は半径0.1太陽半径で有効温度が2,500 Kのものを仮定した。左の短い水平線は、それぞれの主星の場合の、トランジット透過分光におけるシグナルの比の目安。ただし、トランジット透過光のシグナルは地球大気を仮定したもので、水素に富む大気などスケールハイトが大きくなればその分シグナルも大きくなる。

## 4. 晩期M型星周りのハビタブル惑星候補の熱輻射観測

### 4.1 フェーズカーブや分光特性の利用

(ii) で惑星の熱輻射を調べる方法のうち、トランジットしていない惑星にも適用可能なものの一つは、公転に同期した惑星光の時間変化を検出するという方法である [14]. M型星周りのハビタブルゾーンは主星に近いので、潮汐力により自転と公転が同期していると考えられ、昼面と夜面で大きな温度差が存在しうる。主星光が時間的に一定だとすると、公転=自転に伴う時間変化は惑星の光球面の水平方向の非一様性に焼き直される。ここから、原理的には、惑星表層の熱輸送や雲の存在が制限できる。このような手法による、太陽系のごく近傍の晩期M型星周りのハビタブル惑星の観測は、JWSTでも期待される観測方法の一つである。

また、 $O_2$ 、 $O_3$ 、 $CO_2$ など分光特性を利用することも考えられる。惑星大気には、主星の大気中にはほとんど存在しないと考えられる分子が存在しうる。そこで、主星+惑星の合計スペクトルの中に僅かに含まれる惑星大気由来の分光特性を探すのである (e.g., [15]). しかし、恒星自身のスペクトルもさまざまな吸収線で複雑な形状をしており、その中で4桁程度以上も小さい惑星光由来のスペクトルを同定するのは簡単ではない。

そこで、高分散分光を利用することで、吸収帯の詳細な構造を分解するとともに、惑星の公転運動由来の視線速度変動による惑星光スペクトルのドップラーシフトを同定することが有用である。そのような高分散分光を用いた惑星光の分光特性の同定は、ホットジュピター ( $\geq 1,000$  K) においては地上観測で成功しているが (e.g. [16]), ハビタブル惑星候補に対しては中間赤外線領域で同様の観測が期待できる。

晩期M型星周りのハビタブルゾーンの惑星の公転速度は  $50\text{--}70$  km s<sup>-1</sup>程度であり、軌道傾斜

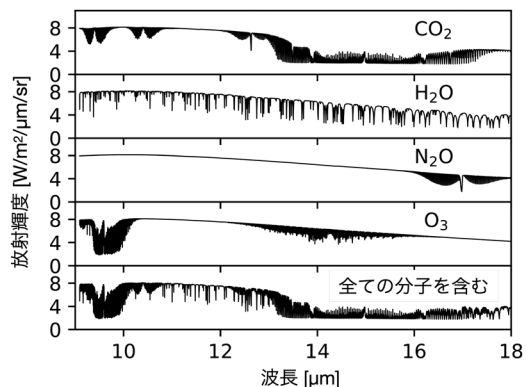


図2 地球大気のプロファイルを仮定した場合の高分散熱輻射スペクトルのモデル。上の二つはそれぞれの分子のみが存在した場合のスペクトルで、一番下がすべての分子を含んだ場合。ただし、雲の影響は考慮していない。

角が  $i$  である場合、視線速度の最大値と最小値の差は  $\sim 100 \sin i$  km s<sup>-1</sup>程度となる。これは波長分解能  $R \sim 3,000$  に対応し、赤外線宇宙望遠鏡 SPICA への搭載が検討されていたような  $R \sim 30,000$  の高分散分光器で分解できる。また、この程度の波長分解能があれば、典型的な大気分子の吸収帯の構造も十分分解できる。

### 4.2 ハビタブル惑星の熱輻射高分散スペクトル

図2は、 $R=30,000$ のときの地球型惑星の高分散分光スペクトルモデルの例を示している。惑星の熱輻射は、大気の組成や温度構造に依存するが、ここでは簡単のため地球の標準的な大気構造を仮定しており、雲の影響は含まれていない。熱輻射がピークを迎えるこの波長域では、 $CO_2$ の  $15 \mu\text{m}$ 帯、 $O_3$ の  $9.7 \mu\text{m}$ 帯の他、全体にわたって  $H_2O$ の吸収線が存在する。また、僅かながら、 $17 \mu\text{m}$ 付近の  $N_2O$ の吸収も見られる。地球大気の場合は  $CO_2$ の吸収帯に覆われてほとんど見えないが、 $O_3$ は  $14.5 \mu\text{m}$ 付近にも吸収を持っている。これらの分子の存在やその存在量は、ハビタブル惑星候補の表層環境を知り生命の可能性を議論する上で重要な情報となる。さらに、その吸収線の広がりは大気圧の情報を含む。また、熱輻射スペク

トルは温度構造のトレーサーでもあり、惑星環境をより直接的に検証できる（ただし、これらがどこまで制限できるかは、観測の精度や雲の存在などに依存する）。

現在の地球大気にはほとんど含まれていないがこの波長帯で吸収線を持つものとしては、たとえば、 $\text{NH}_3$ 、 $\text{PH}_3$ 、 $\text{SO}_2$ などがある。これらの分子も、生命のサインあるいは火山活動のトレーサーとして有用である。

図3は、図2のスペクトルの拡大図（ $\text{CO}_2$ ）で、公転による惑星の視線速度の絶対値が最大となる二つの公転フェーズにおけるスペクトルを表している（この二つの公転フェーズは、主星と惑星の離角が最大になるときに対応し、トランジットのフェーズとちょうど対照的である）。この異なるフェーズでのスペクトルの違いが主星光と惑星光を区別する鍵であり、時間平均からのズレが惑星スペクトルのシグナルとして分離できる。ただし、ドップラーシフトの幅に比べて、惑星大気の吸収線がかなり広くなりうる。この傾向は、エネルギーが低く、吸収線が深くなりやすい中間赤外線領域において、可視光や近赤外線領域より顕著である。このため、時間平均からのズレを惑星由来の成分として取り出すことを考える場合、視線

速度が最大になる二つのフェーズで観測しても、惑星大気の分光特性の一部は自己相殺してしまい、その分惑星光のシグナルが低くなる（図3）。

#### 4.3 熱輻射高分散スペクトルの検出可能性

このようなハビタブル惑星の高分散分光スペクトルの特徴は、将来の望遠鏡によって実際に検出可能だろうか。我々は、現在検討されている赤外線宇宙望遠鏡を念頭においた模擬観測によっていくつかの場合で調べた。観測波長域としては、SPICAで予定されていた12-18  $\mu\text{m}$ を考え、模擬観測のノイズとしては、主星光によるフォトンノイズとともに、黄道光の影響も考慮した。ただし、望遠鏡や光学系、検出器は極低温に冷却されているとし、装置由来の熱雑音は無視している。

仮定した観測は、視線速度が最大になる二つのフェーズ（図3の実線と点線）での観測を繰り返し、時間平均からのズレ（図3の下）をモデルでフィットするというものである。本来ならば惑星大気のパラメータ（温度や分子の3次元的なプロファイル）は推定すべきフィッティングパラメータであるが、今回は検討の第一歩としてこれらを固定し、惑星のコントラストと軌道傾斜角のみフィッティングパラメータとした。

図4は、Origins Space Telescopeで想定されるような口径6.5 mの望遠鏡で、5 pcの距離にあるM8型星（半径 $0.10R_{\odot}$ 、有効温度2,500 K）周りの惑星を観測した場合に得られる、主星光に対する惑星光のフラックス比と軌道傾斜角に対する制限である。ただし、図4の左に示したスペクトルを仮定している。この設定では、晩期M型星周りの $\text{CO}_2$ が、合計一週間程度の積分で、その存在が示唆されることになる。これは、太陽系近傍のハビタブル惑星候補の一つであるTeegarden's star b (3.8 pc) に大雑把にスケールすると、3-5日程度の観測時間に対応する。雲の影響を無視した場合、 $\text{H}_2\text{O}$ の吸収線も同程度に検出できるが、雲の被覆率によっては観測が難しい。この模擬観測には系統誤差の影響は入れていないが、このと

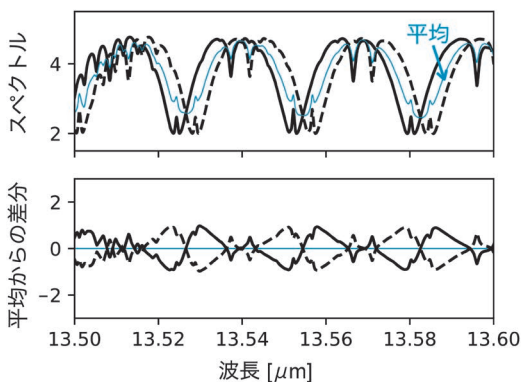


図3 視線速度が最大になる二つのフェーズにおける惑星スペクトルの拡大図（上の黒線）と各スペクトルの平均スペクトルからの差分（下の黒線）。

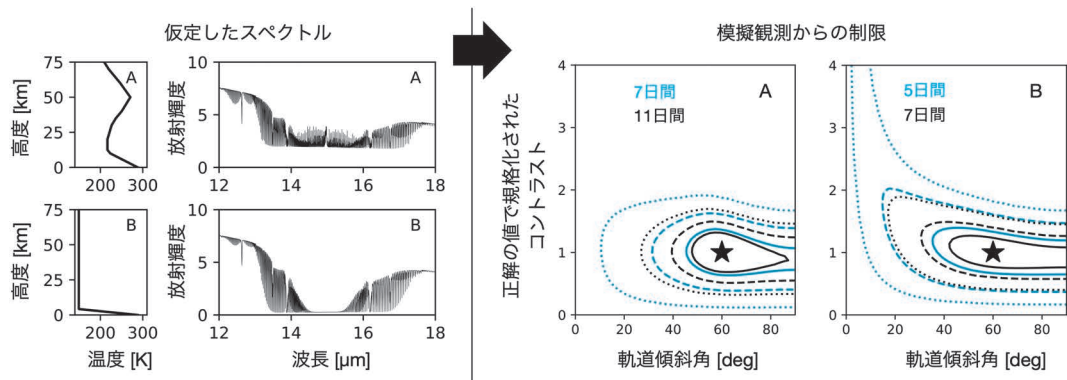


図4 左：二つの大気プロファイルのパターンと、それに対応したCO<sub>2</sub>の高分散スペクトル。右は、それぞれのスペクトルを口径6.5 mの中間赤外線宇宙望遠鏡で太陽系から5 pcの距離にあるM8型星（0.10R<sub>⊙</sub>、2,500 K）周りのハビタブル惑星候補を模擬観測したときに得られる、惑星のコントラストと軌道傾斜角への制限。実線、破線、点線は1σ, 2σ, 3σの制限を示す。

きの光子雑音は $2 \times 10^{-4}$ 程度であり、系統誤差はこれより低ければ良いことになる。ただし、軌道傾斜角や惑星光の絶対値を有意に制限するには、より長時間の観測が必要になる。

一方、現在の地球の大気中の存在量を仮定した場合、O<sub>3</sub>やN<sub>2</sub>Oの検出は難しいことが分かった。地球の表面温度ではO<sub>3</sub>の9.7 μmの吸収帯は主星光に対する惑星光の比が小さすぎ（図1）、O<sub>3</sub>の15 μmの吸収帯はCO<sub>2</sub>の吸収帯に隠されてしまうからである。また、N<sub>2</sub>Oも存在量が少なく吸収線が弱すぎる。ただし、表面温度がより高い惑星や、大気分子のプロファイルによっては、これらも観測目標になるかもしれない。

このような観測が現実的になるハビタブル惑星候補は、太陽系のごく近傍の晩期M型星であるが、ターゲットの一部は、TMTなどの次世代地上大型望遠鏡による反射光の観測のターゲットと重なると考えられる。反射光と熱輻射の両方で観測することができれば、大気温度構造や組成について、より強い制限が得られると期待される。

## 5. 終わりに

本稿では、ハビタブル惑星候補に生命を探るための現時点での方向性と、そのために必要な表層

環境の情報を観測的に制限する方法について述べ、その中で中間赤外線領域の高分散分光の可能性について議論した。系外惑星の中でもハビタブル惑星候補は（ホットジュピターなどに比べて）そもそも大気観測が難しく、所望の情報を得るには新しい装置や観測の工夫が必要である。今後も、装置開発や解析手法の検討、大気多様性の理論などさまざまな角度で進展が期待される。

ハビタブル惑星候補の大気観測は、晩期M型星から始まっていくと考えられるが、それらの惑星に生命が期待できるような環境が実際にあるのだろうか。主星の進化や活動性を考えると、そもそも大気を保持していない可能性もある（e.g., [17]）。しかし、これまでの系外惑星の発見が驚きに満ちていたことを考えると、幅広い可能性を予期しておく必要がある。「地球に似た」ハビタブル惑星候補の表層環境、そして生命の可能性を知ることが、私たちの惑星がどれほど特殊なのかという、我々の世界観に直結する問題であり、その世界観が観測によって深化していくのが楽しみだ。

## 謝辞

まず、本稿のベースである [1-3] などの共同研究者の皆様に深く感謝します。特に、松尾太郎さ

んには、観測機器の詳細をはじめさまざまな観点から助言をいただきました。また、平野照幸さんをはじめSPICA科学検討惑星班の皆様にもお世話になりました。そして、そもそも系外惑星の研究に導いてくださった指導教官の須藤靖先生や樽家篤史さんをはじめ、これまで系外地球型惑星の特徴付けに関して議論してくださった方々に御礼申し上げます。

### 参考文献

- [1] Fujii, Y., et al., 2018, *Astrobiology*, 18, 739  
 [2] Kiang, N. Y., et al., 2018, *Astrobiology*, 18, 619  
 [3] Fujii, Y., & Matsuo, T., 2021, *AJ*, 161, 180  
 [4] Schwieterman, E. W., et al., 2018, *Astrobiology*, 18, 663  
 [5] Tian, F., et al., 2014, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 385, 22  
 [6] Hu, R., et al., 2020, *ApJ*, 888, 122  
 [7] Fujii, Y., et al., 2010, *ApJ*, 715, 866  
 [8] Seager, S., et al., 2005, *Astrobiology*, 5, 372  
 [9] Greaves, J. S., et al., 2021, *Nature Astron.*, 5, 655  
 [10] Snellen, I., et al., 2015, *A&A*, 576, A59  
 [11] Kawahara, H., & Hirano, T., 2014, *ApJ*, Submitted, (arXiv:1409.5740)  
 [12] Benneke, B., et al., 2019, *ApJ*, 887, L14  
 [13] de Wit, J., et al., 2018, *Nature Astron.*, 2, 214  
 [14] Knutson, H. A., et al., 2007, *Nature*, 447, 183  
 [15] Snellen, I. A. G., et al., 2017, *AJ*, 154, 77  
 [16] Brogi, M., et al., 2012, *Nature*, 486, 502  
 [17] Airapetian, V. S., et al., 2017, *ApJ*, 836, L3

### Future Atmospheric Observations of Temperate Terrestrial Planets in Search of Inhabited Worlds

Yuka FUJII

*National Astronomical Observatory of Japan, Division of Theoretical Astronomy, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: Exoplanet surveys have revealed a number of Earth-sized planets orbiting in or near the so-called habitable zones. Finding life on these planets is one of the key goals of the ongoing and future exoplanet observations. In this article, we discuss possible schemes to assess the life hypothesis, highlighting the importance of comprehensive understanding of the surface environment. We also introduce approaches to constrain it observationally, with a focus on the potential of high-resolution spectroscopy in the mid-infrared domain for identifying several atmospheric molecules.