

太陽系外における生命の天文学的探査

ビクトリア・メドウズ^{1,2}

訳：日下部展彦²



〈¹University of Washington, Astronomy Department, Physics-Astronomy Building, 3910 15th Ave NE, Seattle, WA, 98195-1580 USA〉

〈²自然科学研究機構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〉

系外惑星における生命の兆候（バイオシグネチャー）の探査は、現在、最も注目されている科学分野の一つです。バイオシグネチャーには、代謝によって放出されたガスのように、生命が惑星全体の環境に及ぼす影響で、望遠鏡により検出可能なものが含まれます。こうしたシグナルは、火山活動や光化学反応といった非生物のプロセスによって模倣・増強・破壊されうするため、それぞれの惑星環境に基づいて慎重に解釈する必要があります。観測の戦略は、地上望遠鏡か宇宙望遠鏡か、使用する波長帯などによって異なります。近年では、ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡や8 m級を含む大型地上望遠鏡により、M型矮星周囲の惑星を対象とする探査が進められています。将来は、NASAのHabitable Worlds Observatoryのような大型宇宙望遠鏡によって、太陽型星を主星に持つ系外惑星を対象とするバイオシグネチャー探査が実現するでしょう。

1. はじめに

「私たちは、宇宙で孤独な存在なのだろうか？」という問いは、何千年もの間、人類の想像力をかきたててきましたが、人類が太陽系外の生命探査を開始するための科学的知識と技術力を手に入れたのは、ごく最近のことです。太陽系内では、火星、エウロパ、エンケラドスのような天体で、居住可能な環境や過去または現在の微生物を探索するといった、アストロバイオロジーの目標を含む惑星ミッションが増えつつあります。しかし、1995年に最初の太陽系外惑星（以下、系外惑星）が発見された[1]ことにより、太陽系を越えて他の恒星を公転する惑星にまで生命探査を拡大することができるようになりました。

太陽系内と太陽系外におけるこの2つの取り組みは、それぞれ異なる課題と強みを持ちながら、

相補的な関係にあります。どのような機器や測定法でどの程度の生命を検出できるかという点で、両者は長所と短所を補い合っています。太陽系内において、地球以外の天体は、我々が知っているような生命にとって住みやすい環境ではないため、これらの天体に微生物が存在したとしても、それはまれなことでしょう。しかし、無人の探査機を利用することで、惑星や衛星を周回し、着陸してサンプリングし、多くの機器で補足的な測定を行うことができます。一方、太陽系外では、居住可能な惑星が多数存在する可能性があります(e.g., [2, 3])。地球型惑星は、主星から適切な距離にある場合、その表面に液体の水が存在する可能性があります[4, 5]。地表の海は、惑星の大気や地表と強く相互作用し、複雑で豊富な生物圏を支えるのに役立つ可能性があります。このような惑星は、太陽とは異なるスペクトル型や異なる年

齢の恒星を公転している可能性があり、恒星の明るさや活動レベルの経年変化に対する系外惑星の反応を理解することができます。海を持つ系外惑星には、地球以外の太陽系の世界よりも多くの生命が存在するかもしれない一方、生命が惑星に与える影響の兆候は、主に分光法と測光法を用いた望遠鏡観測によって、非常に遠く離れた遠隔地から検出しなければなりません。

系外惑星における生命探査は、日本のみならず世界にとって重要かつタイムリーな課題です。生命が他の惑星に存在する可能性を理解することは、地球と人類をより普遍的に捉える手助けになります。また、進化の異なる段階にある他の地球型惑星の環境を研究することは、私たちの惑星の進化にとって重要なプロセスを明らかにするかもしれません。このような「文脈の中での惑星と恒星の理解と探究 (Worlds and Suns in Context^{*1})」というコンセプトは、アメリカや他の国々における今後の研究の主要な科学的テーマであり、NASAの将来の旗艦望遠鏡の設計の原動力となっています。居住可能性が高いのはどの惑星か、そしてどのようにすればその惑星で生命を検出できるかという問いは、学際的な研究の推進力となり、アストロバイオロジーにおける新しい分野を牽引しています。これは、科学者を目指す若い世代を惹きつける刺激的なテーマでもあります。こうした探査は、ようやく技術的に可能になりつつあり、その挑戦と興奮が、地上および宇宙空間から地球型系外惑星の大気を観測できる次世代望遠鏡や観測機器の開発を日本、アメリカ、ヨーロッパを中心に大きく推進しています。

近い将来（現在から2030年まで）、G型星である太陽に比べると低温のM型矮星の周りを公転する地球型惑星が、主星の前を横切る「トラン

ジット」中に、その惑星大気の透過光を望遠鏡で調べることができるようになります。これには、現在運用中のNASAジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST) も含まれます。さらに、地上に建設されるヨーロッパ主導のE-ELT、米国主導の巨大マゼラン望遠鏡 (GMT)、日本も参加している米国主導の30 m望遠鏡 (TMT) などの超大型望遠鏡群（以下、ELTs）も含まれます。これらは、地球型系外惑星大気の透過光、あるいは反射光に含まれる大気分子による吸収を探すことによって観測できる可能性があります。TMTに向けては、日本の研究者やアストロバイオロジーセンター (ABC) の装置開発チームを含む国際的なパートナーシップによって、このような研究・開発がサポートされています。

長期的な展望（2030年代から2040年代）において、米国科学アカデミーはHabitable Worlds Observatory (HWO) を2040年代の天体物理学旗艦ミッションとして選定しました。この大型宇宙望遠鏡は、数百個の近傍の恒星を調査し、ハビタブルゾーン (HZ) に存在する地球型惑星の兆候を探し出し、最も有望なターゲット25個のスペクトルを観測することが計画されています (Astro2020参照[6])。同じ時期に欧州宇宙機関 (ESA) は、系外惑星のための大型干渉計ミッション Large Interferometer for Exoplanets (LIFE) [6] を検討しており、LIFEは地球型系外惑星からの熱放射を観測する中間赤外線観測のための宇宙望遠鏡として計画されています。

これらの新しい望遠鏡が完成すると、観測する系外惑星のターゲットが必要です。現在、居住可能な世界 (HZ内にある岩石惑星) が数多く存在することが知られています [3]。系外惑星がトランジットしているときに恒星の光が遮られる割合

^{*1} “Worlds and Suns in Context” は、Astro2020のサイエンステーマの一つです。恒星と惑星の相互接続システムを理解するための研究を、その起源である塵とガスの原始惑星系円盤から、多様な太陽系外惑星系の形成と進化に至るまでの軌跡をたどることと定義されています。

で測定される惑星の大きさと、系外惑星の密度（大きさと、視線速度法から質量の両方がわかる場合）との関係から、1.5地球半径以下の惑星が地球のような密度を持つ可能性が高いことが示されています [7, 8]。視線速度法で発見されたトランジットを起こさない惑星については、恒星の速度に惑星系の傾き (i) による不定性が残るため、大きさを測定することができません。このような場合、惑星の質量 (M) は ($M \cdot \sin i$ から) 統計的に計算され、その質量から大きさが推測されます。この曖昧さがあっても、系外生命探査に最適なターゲットとなる既知の系外惑星が複数存在します。具体的には、主星の大きさが木星よりわずかに大きい (1.4倍) 晩期M型矮星 TRAPPIST-1 をトランジットする7つの地球型系外惑星 [9, 10]、太陽から最も近い恒星を公転している可能性の高い Proxima Centauri b [11, 12]、ABCの研究者が発見したM型矮星を公転する Gliese 12 b [13] などが最も有望な惑星です。特に活動度の低いM型矮星周りの系外惑星は、JWSTで惑星大気の観測を容易にする可能性があるため、重要です (図1)。

2. どうやって太陽系外惑星において生命を探すのか？

私たちは、地球のような系外惑星の大気を研究するのに必要な技術が手に入るか、あるいは10年以内に手に入れられる稀有な時代を生きています。しかし、どのようにして生命の痕跡を探すのでしょうか？この疑問に答えるためには、惑星環境の理論的モデリングや、生物圏や主星との相互作用を含む、アストロバイオロジーの学際的研究が不可欠です [14]。もし探査する系外惑星に、我々にメッセージを送ったり、技術の使用に関する手がかりを残したりする知的な地球外文明が存在しない場合、私たちは生命によって生み出される惑星規模の環境変化に頼らざるを得ません。この場合、地球の時間的進化に関する研究によると、地球惑星環境に最も大きな影響を与えているのは、微生物によるものである可能性が高く、大気の変化は数十億年にわたって蓄積されることとなります [15] (図2)。このような生命による惑星環境全体の変化はバイオシグネチャーと呼ばれ、検出されるだけでなく、発見された惑星環境の文脈で解釈されなければなりません。現代の地

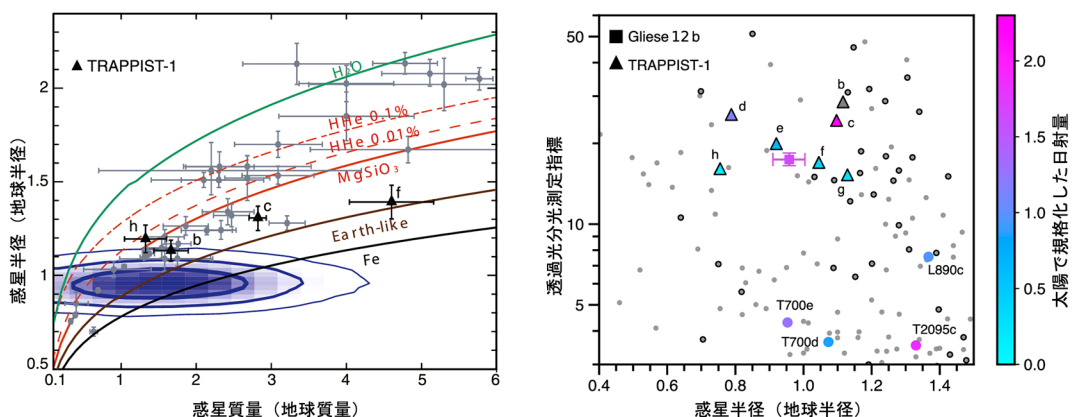


図1 (左) 冷たいM型矮星 (<3900 K) の周りがある6地球質量以下の既知の惑星すべての質量と半径の関係。等高線は、Gliese 12 bの質量と半径の1 σ , 2 σ , 3 σ の推定値を示している。(右) TRAPPIST-1惑星 (三角形) を含む既知の惑星の半径と透過分光指標。Gliese 12 bはTRAPPIST-1惑星に匹敵する位置にあり、大気研究のよいターゲットであることがわかります (Kuzuhara, M., et al., 2024 [13] の図9に和訳を加えて改変)。

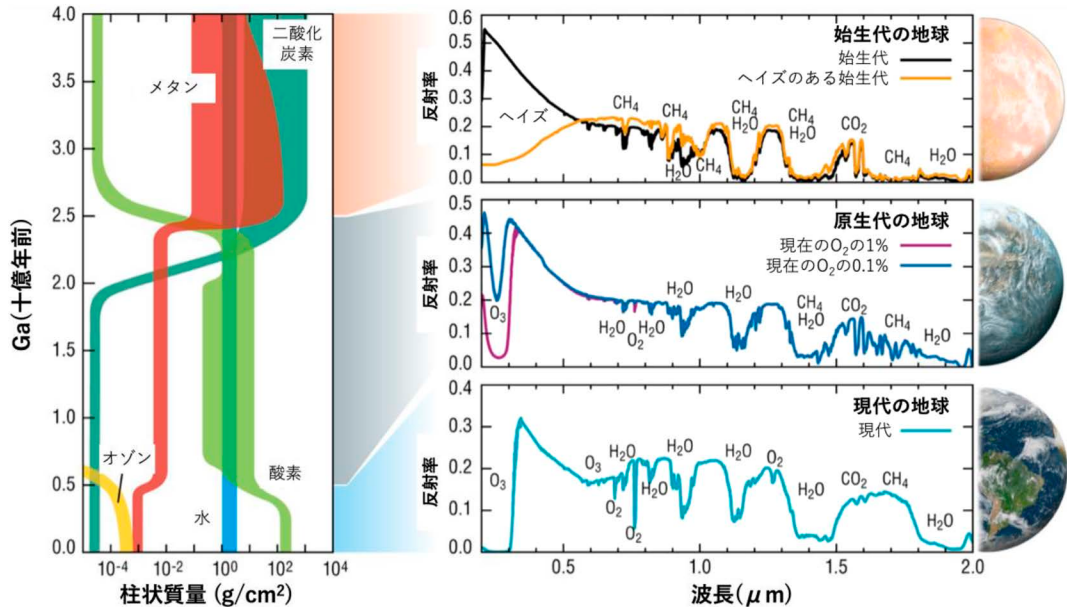


図2 図の左側は、現在(下)から約40億年前(上)までの時間の経過に対して、地球大気中の各種ガスの濃度(x軸)がどのように変化してきたかを示した図です。こうした生命活動によってもたらされた地球大気の変化は、時間とともに地球のスペクトル(右側)にも異なる特徴として現れます。たとえば、酸素(O₂)は現代の地球のスペクトル(下)では顕著にみられますが、始生代(上)にはその存在を確認することはできません(クレジット: G. Arney, S. Domagal-Goldman, T. B. Griswold (NASA GSFC; LUVOIR STDT 最終報告書)より和訳を加えて引用, <https://asd.gsfc.nasa.gov/luvoir/reports/>). ※Web版ではカラー表示

球において、最も顕著でよく知られているバイオシグネチャーは、大気中の豊富な酸素(O₂)です[14, 16]。このバイオシグネチャーは、シアノバクテリアからの光合成による放出と、それに対応する有機炭素の埋没によって何十億年もかけて作られたもので、酸素が地殻と反応するのを阻害し、大気中にゆっくりと蓄積されました[15]。現在、大気中の酸素分子は地球大気の21%を占めており、このような酸素は、ELTsとHWOを使えば系外惑星の大気のスペクトルから検出することが可能です[17-19]。

3. よいバイオシグネチャーとは？

生命によって変化させられた惑星の特徴(大気の組成や地表の色など)が有用なバイオシグネ

チャーとなるためには、信頼性、持続可能性、検出可能性という3つの基準を満たさなければなりません[14]。これらの基準を組み合わせることで、バイオシグネチャーが検出され、それが生命によるものである確率が高まります(e.g., [16])。この「信頼性」とは、惑星環境の特徴が、地質学や光化学などの非生物的(非生命的)惑星プロセスよりも、生命によって生成される可能性が高いかどうかを意味します。「持続可能性」とは、候補となるバイオシグネチャーが、光化学反応、火山ガスとの反応、地表との反応、海洋への溶解など、惑星大気における通常の破壊・除去プロセスを受けてなくならないかどうかを検討します。「検出可能性」は、それらのガスが十分な濃度で待機中に存在し、大気の透過光、二次食*2、位相

*2 二次食: トランジット惑星が主星の裏側に入る時に起きる食。

曲線^{*3}、直接撮像などの観測技術を使って検出可能かどうかを検討します。また、バイオシグネチャーとなるガスのスペクトルの特徴が、望遠鏡とその観測装置が利用可能な波長領域で検出可能であること、そして、これらの特徴が他の一般的な惑星の物性と異なり、明確に同定できることも重要です。

4. どのようなバイオシグネチャーが検討されているのか？

系外惑星のバイオシグネチャーという概念は、1965年にJames Lovelockが、生命が惑星の大気組成を何桁も変化させる可能性があり、その変化は天文学的距離でも認識できると提唱したことから生まれました [20]。

系外惑星のバイオシグネチャーの種類は、主に3つの分野に分けることができます：既知の（つまり地球のような）代謝に由来する標的型バイオシグネチャー、未知の生命代謝や惑星環境プロセスに依存するアグノスティック（未知の）バイオシグネチャー、そして知的エイリアン文明を示唆する高度な技術（惑星環境の改変を含む）の兆候であるテクノシグネチャーです。この記事では主に、技術的能力を持たない生命体を作り出す、標的型およびアグノスティック・バイオシグネチャーに焦点を当てます。テクノシグネチャーの事例と他のバイオシグネチャーとの関係については、Wrightら（2022） [21] に、また現在計画中のミッションと計画中のミッションによるテクノシグネチャー検出の評価については、Haqq-Misraら（2022） [22] に優れた論考があります。

標的型バイオシグネチャー

対象となるバイオシグネチャーは、既知の地球代謝（例：メタン生成、光合成）によって生成され、最も一般的には大気、地表（例：波長依存反射率）、または時間的（例：季節変化）に観測さ

れる兆候を含みます。既知の代謝や生物の産物であることで、対象となるバイオシグネチャーは、「生命によって生成される特定の目標」として探すことができるのが大きな利点です。しかし、同じ代謝や類似の代謝が系外惑星で進化したという暗黙の仮定が存在します。そのため、探す価値があることは間違いない一方、このアプローチは「私たちの知る生命」だけに偏ってしまう可能性があります。

大気中のバイオシグネチャー

おそらく最も昔から、最もよく研究されている系外惑星のバイオシグネチャーは、惑星大気中に存在する生命由来のガスです。Lovelock（1965） [20] は当初、生命が天文学的距離でも認識できるような形で大気組成を変化させる可能性があり、化学的非平衡が生命の影響の特徴であると提唱しました。続いてHitchcock & Lovelock（1967） [23] は、地球の大気中に酸素（ O_2 ）とメタン（ CH_4 ）が同時に存在することから、既知の惑星プロセスから予想されるよりも高い割合で、これら2つのガスが生成されていると仮定しました。特に現在では、地球の生物活動によって、 CH_4 が非生物学的プロセスから予想される速度の60倍から200倍以上の速度で生成されることがわかっています [24, 25]。

Hitchcock & Lovelock（1967） [23] はまた、惑星大気中の O_2 が高濃度であることは生命によって生成された可能性が高いが、過去の生命がその濃度をもたらした可能性があるため、その惑星に現在も生命が存在する決定的な証拠にはならないと主張しました。しかし、 O_2 が現在の生物圏の証拠であることをより強く主張できるのは、 O_2 が非生物学的に生成される割合と、大気から O_2 が除去される割合との間に乖離がある場合です [23]。したがって、高い酸素濃度が現在の生命を示す可能性を高めるには、 O_2 を化学的に破壊

*3 位相曲線：トランジット惑星の精密な測光により、系外惑星の位置（位相）によって変化する反射光の光度曲線。

するようなガス、例えばメタンを同時に大気中で見つける必要があります。

古典的な O_2/CH_4 非平衡のバイオシグネチャーが指摘されて以来、地球環境における他のいくつかの生命活動に起因する化学的非平衡も、バイオシグネチャーとして提案されています。地球大気中のオゾン (O_3) は、生物学的に生成された O_2 の光分解によって生成されるため、 O_3 は O_2 が豊富に存在することを示す指標となり、 O_3/CH_4 非平衡のバイオシグネチャーのペアが提案されるようになりました [26]。 O_3/CH_4 ペアの利点は、 O_2 の吸収線は中間赤外線領域にはないが、 O_3 、 CH_4 両方の吸収線が存在するため、中間赤外線をバイオシグネチャー探索のために利用することができます [26]。さらに、硝酸 (HNO_3) を含む海の存在は、大気が窒素 (N_2) で大部分を占め、 O_2 が大気中にほとんど、あるいは全く残らない状態に向かう傾向があります [27]。そのため、 N_2 、 O_2 、そして海が同時に存在するためには、生命活動による物質の流入・流出が不可欠であり、潜在的なバイオシグネチャーとなります。また Krissansen-Totton ら (2018) [28] は、二酸化炭素 (CO_2) と CH_4 の共存についても、 CO_2 が CH_4 を破壊するため、 CH_4 の一定の供給があることを意味することから、非平衡バイオシグネチャーとなると提案しました。しかし、このバイオシグネチャーを検証するためには、観測された CH_4 の存在量を大気中に維持するために必要な CH_4 の供給量を計算することが重要です。もし推測される供給量が、非生物のプロセスによる CH_4 の生産で予想される供給量よりも高ければ、観測された CH_4 が生命により生成された可能性が高まります [28]。

提案されている非平衡に加えて、亜酸化窒素 (N_2O)、クロロメタン (CH_3Cl)、ジメチルスルフィド (DMS) のような硫黄ガスなど、地球大気において生物学的起源が知られており、検出可能性が高いバイオシグネチャーとして注目されています。たとえば N_2O は、細菌や菌類が生物に

利用可能な窒素化合物を利用し、 N_2 に戻す際に生成されます [29]。一部の細菌や古細菌によるアンモニアの酸化でも、 N_2O が生成されることがあります [30]。 N_2O の生物による供給は、海と陸の両方からの寄与があり、非生物による供給よりも数桁大きくなります。例えば、雷によって生成される N_2O の量は、地球大気中の N_2O の 0.002% しかないと推定されています [31]。また、大気中の N_2O は近赤外線と中間赤外線に強い吸収を持つため、検出される可能性があります [32]。現代の地球における N_2O の供給量は比較的控えめですが、シミュレーションによると、生物学的な供給が多くなったり、主星からの紫外線量が低くなり破壊が抑制されたりすると、 N_2O はより豊富になることで、検出可能性が高くなります [33, 34]。

最近新たに注目され、検討されているもう1つのバイオシグネチャーは、クロロメタン (CH_3Cl) です。 CH_3Cl は、高塩分湿地に生息する好塩性細菌 [35] や、熱帯沿岸域のシダ植物や植生などの光合成細菌 [36–38] など、多くの地球代謝によって生成されます。 Segur ら (2005) [33] は、 CH_3Cl を系外惑星のバイオシグネチャーとして最初に提案しました。彼らのモデルでは、M型矮星周りの惑星において、 CH_3Cl が地球大気での存在量よりも3桁も多く蓄積されうることを示しました。これは、M型矮星がG型星と比較して近紫外線 (NUV) 放射が少なく、化学的分解速度が低下することに起因します。これらの高い存在量と、 CH_3Cl が近・中間赤外線を持つ強いスペクトルの特徴 [39] は、可視より長い波長において、 O_2 よりも光合成の指標として優れている可能性を示しています [40]。

地球型惑星におけるその他の潜在的なバイオシグネチャーガスとしては、硫黄細菌によって生成される硫化ジメチル (DMS)、二硫化ジメチル (DMDS)、メチルメルカプタン (CH_3SH) などが挙げられます。 Pilcher (2003) [41] は、これらを

初期地球のような地球型惑星のバイオシグネチャーとして提案し、Domagal-Goldmanら(2011) [42] は、これらのガスが主星からの放射にさらされた際の、地球型惑星における表面フラックスをシミュレーションしました。彼らは、これらの有機ガスが生物起源と関連が極めて強いものの、紫外線(UV)放射により CH_3 分子の機能基が分解されやすく、脆弱であることも指摘しました。しかし、彼らのシミュレーションでは、 CH_3 分子が大気中でエタン(C_2H_6)に結合し、中間赤外線領域で強く吸収するため、有機化合物よりも検出可能性が高いことも明らかになりました。この研究は、生命によって直接生成されるガスそのものよりも、その光分解や化学的副産物が、環境中で生命が活動していることをスペクトル上でより明確に示す可能性があることを示しています。逆に言えば、脆弱なバイオシグネチャーの放出量が多いことを確認する手段として、その光化学分解によって生成される豊富な副産物の存在が重要な手がかりになる場合もあります。これは、 CH_4 やDMSなどの有機化合物のように、「非生物的発生量に対して、生物的生成速度が極端に高い」ことが検出の根拠となる場合で特に重要です [43]。Arneyら(2018) [44] は、Domagal-Goldmanら(2011) [42] の成果をもとに、硫黄細菌の生物圏によって媒介される有機ヘイズ(もや)の生成を調査しました。これらのケースでは、微生物によって生成された有機化合物が光分解され、有機ヘイズが発生し、惑星の大気中に蓄積しました。このヘイズは、非常に検出しやすい可能性がある一方、生命によるものと解釈するのはやや難しいという特徴がありました。さらに最近では、Meadowsら(2023) [40] が、TRAPPIST-1系の惑星における硫黄生成生物圏の環境をシミュレーションしました。ヘイズが形成されると、それが紫外線を吸収し、有機分子(DMSや CH_3SH など)を光分解や化学分解から保護し、大気中に蓄積することを示しました。このヘイズは、赤外線

では透過性があるため、保護された有機分子を赤外線で検出することが可能であることが明らかになりました。

地表バイオシグネチャー

地表バイオシグネチャーとは、惑星の地表に生じた生命による変化が、惑星全体のスケールで検出可能なものを指し、特徴的な波長依存性をもつ反射スペクトルや、全体的な明るさ・色の変化などが含まれます。例えば、地球の植生は、クロロフィルによって688 nm付近の強い吸収があり、その後、700 nm付近でスペクトルに特徴的な「レッドエッジ」と呼ばれる不連続性が生じ、より長い波長では植物の反射率が急激に高くなるという振る舞いです。このレッドエッジはGatesら(1965) [45] によって最初に指摘され、葉の構造内での内部反射によるものであり、光合成に使用しない波長を吸収することで、植物を加熱による損傷から守るために必要だと考えられています。系外惑星全体を平均化したスペクトルのシミュレーションと理論では、雲の存在下でも系外惑星のスペクトルにおいてレッドエッジが見える可能性が示唆されています [46–48]。実際に地球全体を平均化した観測では、これらのシミュレーションが検証されており、700 nmより長い波長で2%程度の反射率の増加(レッドエッジ)が確認されており、部分的に雲に覆われた場合でも、この特徴は観測可能であることが示されています [49]。

しかし、異なる光合成色素、あるいは他の目的に使われる色素による吸収や、太陽と異なるスペクトル環境下における進化の末、レッドエッジの波長がシフトする可能性があります。何人かの研究者は、惑星の表面反射率に影響を与える可能性のある光合成生物(e.g., [50] など)と非光合成生物(e.g., [51] など)の両方の潜在的な色素スペクトルの範囲を探索してきました。生物が光合成活性の吸収率のピークを示す波長は、主星のスペクトル、惑星大気の組成、生物が水中にいるか陸上にいるかを含む複数の要因に支配される可能性が

あります [52]. そのため、異なるスペクトル型の恒星を公転する惑星では、光合成が行われている場合、そのレッドエッジが地球の植生に対してシフトしている可能性があります [52–54].

日本のアストロバイオロジーセンターの研究者たちは最近、系外惑星における光合成生命の潜在的な新しい地表シグネチャーを特定する上で重要な革新をもたらしています. M型矮星を公転する惑星において、滝澤ら (2017) [54] は、光栄養生物が進化する過程で、陸上と水中の両方で利用可能な光の波長の違いを検討しました. 彼らは、近赤外線を利用する光合成は最終的には陸上で有利な一方、海中ではまず可視光を利用するように進化する可能性が高く、それは陸上に最初に進出する際にも利用されるだろうと結論づけました. その結果、M型矮星周りの系外惑星では、地球植生に近い波長と、もっと長い近赤外線でのレッドエッジの両方を調査するべきだと提案しました. 村上ら (2025) [55] は、これが海に覆われた世界や湖の多い世界での生命検出に最適な選択肢かもしれないと主張しています. 彼らは浮遊植物の分光反射率を研究し、レッドエッジが陸上植物と同等か、それ以上に明瞭であることを発見しました. また、背景となる水面による反射率が低いことで、浮遊植物の検出感度が向上することも示しました. 光合成生物を検出するもう一つの新しい方法は、光合成色素からの蛍光であり、この潜在的なバイオシグネチャーとその検出可能性は、小松ら (2023) [56] により検討されています. 彼らは、地球規模でのクロロフィル蛍光の検出は、水蒸気などの大気種による類似波長の吸収のため、非常に困難である可能性が高いことを示しました. しかし、1000 nm から 1100 nm の領域で蛍光を発するバクテリアのクロロフィルは、特にM型矮星を公転する惑星や、バクテリアのコロニーが水面近くに存在する場合は、より検出しやすい可能性があることを示しました. 一方、HWOのような口径6 mの宇宙望遠鏡では、この

蛍光を検出する感度には達しないと考えられ、次世代の大型地上望遠鏡（口径30–40 m）で観測されるM型矮星系の地球型惑星について、蛍光がどの程度検出可能であるかをよりよく理解することが、今後の最も重要な課題であると結論づけています.

時間的（季節性）バイオシグネチャー

時間的バイオシグネチャーとは、生命活動が要因となる、惑星表面や大気中において時間的に変動する現象であり、季節によるものなど、周囲の環境の変動に対応しているものが主です [57, 58]. 現在の地球では、大気中のCO₂ [59] とCH₄ [60] の季節的な変動は生命によるものです. ただし後者の場合、大気中の水蒸気量の季節変動、ひいてはCH₄を分解する化学的シンクであるOHの季節変動にも影響しています. 惑星大気中のCO₂の単一の測定は、説得力のあるバイオシグネチャーとはみなされません. CO₂は火山活動からの大規模な発生源が知られているため、生命によって生成されたものとしての信頼性は低くなります. しかし、CO₂の季節変動は光合成生物による明確な影響を反映しており、生命の存在を示す有力な手がかりとなります. 地球上では、北半球の春から夏にかけての植物バイオマスが急速に増加することで、大気中のCO₂が吸収され減少します. その後秋から冬にかけて、植物が枯れ、分解される過程でCO₂が再び大気中に放出され、大気中の濃度が上昇します (図3) [59]. 南半球では季節が逆であるため、このサイクルは反転しますが、地球では北半球の方が陸地（そして植生）の面積が圧倒的に多いため、この現象は依然として大気中のCO₂存在量に全球的な変化をもたらしています.

時間的バイオシグネチャーのもう一つの可能性として、オゾン (O₃) による現象が挙げられます. これは、酸素発生型光合成が始まったものの、大気中のO₂がまだ顕著に増加していなかった初期の地球において、Olsonら (2018) [58] が

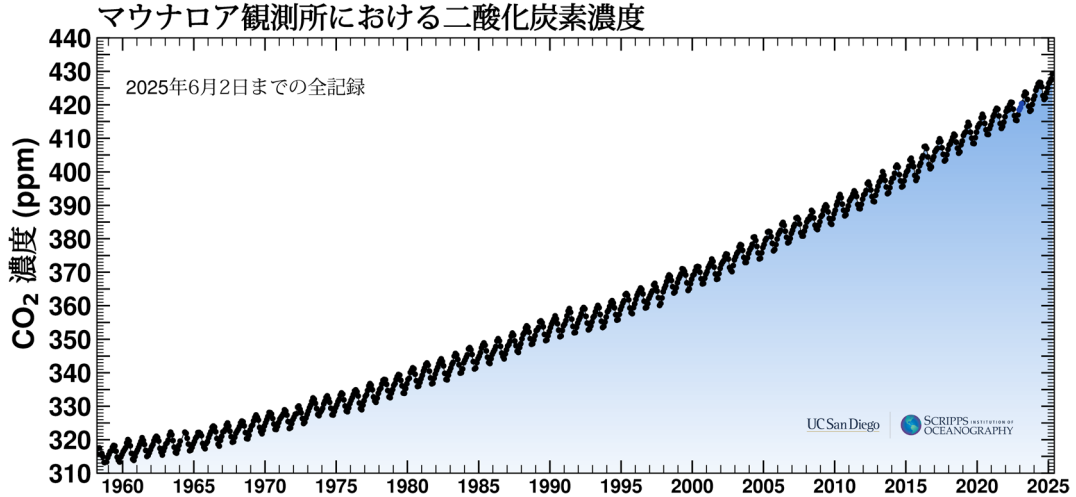


図3 キーリング曲線は、1958年からマウナロア観測所で記録されている大気中の二酸化炭素（CO₂）の変動を示しています。この曲線の周期的な変化は、植生による光合成活動によってCO₂が吸収され、植物の枯死や分解によって再び大気中に放出されるという、季節に応じた周期的なCO₂の変動を表しています（クレジット：Scripps Oceanography Keeling Labの図に和訳を加えて改変，<https://keelingcurve.ucsd.edu/>，CC BY 4.0）。

提案しました。光合成によって少量のO₂が生成されることで、光化学的なO₃の生成が季節変動を起こします。この季節変動は、O₂を生成する光合成と、O₃を生成するO₂の光分解の両方が、太陽からの入射光の変化によって生じます。このようなO₃の変化は、紫外領域のオゾン・ハートレー帯（200–300 nm）における季節変動として、吸収スペクトルに現れる可能性があるとし唆されています。

もう一つの時間的なバイオシグネチャーは、季節によって変化する植生であり、惑星表面の色と反射率です。植生に由来する全球的なレッドエッジの強さは、植生被覆率の季節的な変化によって増減し、陸地面積に半球的な偏りがあれば、より識別しやすくなり、平均化された惑星の全体的な色や反射率も変化することが期待されます[61]。

アグノスティック・バイオシグネチャー

系外惑星におけるバイオシグネチャー研究における比較的新しい進展として、アグノスティック（未知の）バイオシグネチャーという概念の発展があります。これは、既知の代謝経路や既知の生

物を仮定することなく、生物圏によるものである可能性が高い環境変化を対象とするものです。つまり、非生物学的プロセスによって引き起こされた可能性が低い現象を探すことで、「惑星らしくないもの」が環境の中で作用している兆候を見つけようとする試みです。地球型の生命にとらわれることなく、地球外生命の性質に関する前提を制限しないことによって、「我々が知らない生命」を探索することが可能になり、生命探索の幅が大きく広がります[62]。しかし、ある現象やプロセスが本当に「惑星由来ではない」＝「生命によるものである可能性がある」かどうかを判断するためには、その惑星環境を極めてよく理解する必要があります。したがって、地球上の惑星プロセス（非生物学的プロセス）は非常によく理解しておく必要があると同時に、地球とは大きく異なる環境下でも適用できる知識が求められます。

系外惑星の環境において、アグノスティック・バイオシグネチャーを探索する方法の例としては、「化学的非平衡の探索」、「広い波長範囲にわたるスペクトルの不連続性の検出」、「光化学のよ

うな非生物的な惑星プロセス由来とは考えにくい、季節的に変化する現象の探査」が考えられます。既知の代謝によるガスの非平衡の例は既にいくつか述べましたが、アグノスティックなアプローチでは、既知の代謝の産物ではないガスについて、惑星大気の組成における不平衡を同定することが目的です。この場合、アストロバイオロジストの仕事は、非平衡はどちらか、あるいは両方のガスが活発に移動していることを示し、少なくとも一方のガスが、火山活動や光化学のような既知の惑星プロセスによる生成ではない可能性を評価することになります。これらが除外できれば、観測された現象が生命によるものである可能性が高まります。同様に、ある波長と次の波長との間で反射率が増加するスペクトルの「ジャンプ」を観測することは、植生のレッドエッジに似たプロセス、または別の生物学的色素による可能性があります [62]。季節に応じた大気中のガスの増加や、地表の反射率の変化が観測され、それが非生物的な惑星プロセスでは説明できない場合、どの生物がその変化を引き起こしたかを仮定することなく、生命の存在を推測できることになります。

5. バイオシグネチャーをどのように解釈すればいいのか？

生命に起因する可能性のある惑星環境の異常を検出することは重要な第一歩ですが、それが実際に生命によるものなのかを評価できるようにすることも非常に重要です。したがって、すべてのバイオシグネチャー候補は、それが発見された環境（場合によっては惑星全体）の文脈で解釈されなければなりません [14]。具体的な例として、惑星大気のスペクトルにおける O_2 からの強いシグナルは、光合成生物の存在を強く示唆します [23]。しかし、豊富な酸素は時間をかけて海が失われる過程でも生成される可能性があり、M型矮星を公転する惑星ではこのような現象がよく起こりうるとされています [51, 63]。このように、非生物

的な惑星プロセス（例：海洋の消失）によってバイオシグネチャー候補（例： O_2 ）が生成されることは、バイオシグネチャーの偽陽性として知られています。これは、「生命があるように見えて、実際にはない」という誤認です。同様に、ある生物によって真のバイオシグネチャーが生成されたとしても、そのバイオシグネチャーが急速に破壊されるか、あるいは検出可能なレベルまで蓄積されない場合（例：DMSの光分解など）、バイオシグネチャーは偽陰性となります。こちらは、「生命が存在するにもかかわらず、生命が存在しないように見える」ことになります。したがって、バイオシグネチャーの評価において最も重要な「文脈（Context）」の一つが、主星と惑星との相互作用です。これは、惑星そのものが、探しているバイオシグネチャーを増強、破壊、あるいは偽装したりすることがあるからです。

バイオシグネチャーの偽陽性

バイオシグネチャーの偽陽性とは、生命が環境に与える影響を模倣した非生物的な惑星現象であり、大気、地表、季節のバイオシグネチャーが存在するという仮説が立てられています。季節的なバイオシグネチャーの場合、砂嵐は植物による惑星の反射率の変化を模倣する可能性があり、楕円軌道上の惑星における光化学は、生物学的駆動によるガス量の季節的な変化を模倣する可能性があります [57]。地表のバイオシグネチャーについては、地表鉱物の反射率も、植生のレッドエッジに見られる波長の関数としての反射率の急激な変化を再現できる可能性があります [45]。

しかし、現在までに最も広く研究されているバイオシグネチャーの偽陽性の例は、特にM型矮星を公転する惑星の大気中の O_2 の偽陽性です（e.g., [16] ほか）。 O_2 は、長い間、最も信頼性の高いバイオシグネチャーとされてきました。なぜなら、現代の地球環境では、地質学的プロセスや光化学などによって、十分な量の O_2 を非生物的に生成する方法が知られていなかったからで

す[23]。G型星の太陽を公転する地球では、水蒸気の光分解によって非生物由来の O_2 を生成することができますが、その割合は光合成の少なくとも100万分の1です[65, 66]。しかし、最近の主星と惑星の相互作用のモデリング研究、特にM型矮星を公転する惑星に関する研究では、かなりの量の O_2 の非生物的生成につながる可能性のあるいくつかのメカニズムが同定されています[14, 16]。こうした偽陽性の可能性を理解することは、アストロバイオロジストにとって重要な意味を持ちます。なぜなら、偽陽性のメカニズムが作用しているかどうかを見極めるための、追加的な環境観測項目を特定できるようになるためです。その結果、観測された O_2 が生命によるものである確率（信頼性）を高めることができるようになります。

非生物的な O_2 生成による偽陽性のメカニズムは主に、 H_2O や CO_2 の光分解によって引き起こされます。これらの気体は、HZにある地球型惑星に存在する可能性の高い物質です。非常に大きな酸素の蓄積をもたらす可能性のあるメカニズムの一つは、次のようなものです。まず、惑星の海が主星からの強い放射で蒸発し、水蒸気が大気中に放出されます。そして、水蒸気が紫外線によって光分解され、HとOに分かれます。軽い水素原子が宇宙に放出され、結果として O_2 が惑星の大気に蓄積されることになります[63, 64]。このプロセスは、M型矮星を公転する惑星で一般的に起こりうると考えられています。それは、M型矮星は、誕生直後の前主系列星段階から、恒星が収縮して主系列に入るまでの間に、超高光度段階を経るためです[67]。また、 CO_2 の光分解でも、M型矮星周りの惑星の大気中に O_2 が蓄積される可能性があります。そのためには、主星が CO_2 を効率よく光分解でき、一酸化炭素(CO)とOが再結合する触媒過程や化学過程が抑制されているという、2つの条件を満たす必要があります（例えば[70]ほか）。

しかし、これらの偽陽性メカニズムは、惑星の環境やスペクトルに特有の兆候が残されるため、観測された O_2 が無生物起源であることを示す手がかりとなります（図4）。例えば海洋喪失後の水素散逸シナリオでは、残された O_2 大気は地球の大気圧の何倍にもなる可能性があります[63, 69]。 O_2 が支配的な大気の場合、表面圧力が3気圧を超えると、 O_2 分子同士の衝突が頻発し、惑星大気のスペクトルには O_2 からの衝突誘起吸収が現れます[16, 70]。また別の非生物的 O_2 生成メカニズムとして、極端に乾燥した大気における CO_2 の光分解があります。水がないためにCOとOの再結合を促す触媒の反応が阻害され、 O_2 が蓄積されやすくなります[71]。この偽陽性シナリオでは、光化学的に生成された O_2 に加えて、水が存在しないこと、さらに水分子が関与する $CO+O$ の再結合が起こりにくいことから、大量のCOおよび CO_2 が存在するスペクトル線を示す可能性があります[71]。つまり、水蒸気が存在しないのに酸素が豊富にあるという状況は、光合成生物圏を持つハビタブル惑星では通常あり得ないため、これは無生物起源である可能性を強く示唆します。さらに、 CO_2 とOがあるにもかかわらず光化学反応の産物であるCOが同時に大量に存在することから、観測された O_2 は光化学的に生成された可能性が高いことを示します。

また、より太陽に近いFGK型星を公転する地球型惑星においても、無生物起源の O_2 生成のメカニズムも提案されており、これらの多くは環境的な文脈から識別するのが難しいことが特徴です。成田ら(2015)[72]は、主星の近紫外線(NUV: 280–400 nm)放射下で、酸化チタン(TiO_2)で覆われた表面が70,000平方km程度（北海道より小さい面積）存在すれば、地球と同程度の量の O_2 が、液体の水から触媒反応によって発生・維持されると示唆しました。このメカニズムは、強い極紫外線(XUV: 10–121 nm)を必要としないため、M型矮星と比較してNUVは強いがXUV



図4 酸素(O_2)の生成に関する偽検出の可能性と、それが真の生物圏によるものではないことを示す環境的特徴を示した図。左側には、地球の例が示されており、 O_2 , O_3 , CH_4 によるバイオシグネチャーや、居住可能性の指標である CO_2 および H_2O がみられます。一方で、 O_2 が CO_2 の光分解によって生成されたことを示唆する一酸化炭素(CO)は存在しておらず(下部)、これにより光合成が O_2 の起源である可能性が高まります。中央と右のパネルでは、 O_2 の偽検出を引き起こすさまざまな環境が示されており、それぞれのケースで偽検出の原因を明らかにする指標(○で囲まれたもの)や欠如している分子(下部バー)が表示されています。たとえば中央のパネルでは、海洋の消失によって大量の O_2 が生成されていますが、 O_2 - O_2 (O_4)衝突誘起吸収の存在と大気中の水蒸気の欠如によって、この偽検出が判明します(クレジット: Meadows (2017) [16]より和訳を加えて引用)。※Web版ではカラー表示

が弱い、より太陽に近いFGK型星にも十分に作用する可能性があります。また別のメカニズムとして、Wordsworth & Pierrehumbert (2014) [73]は、次のようなシナリオを提案しています。惑星大気中の非凝縮性ガス(N_2 や O_2 など)の割合が低い場合、成層圏に水蒸気が大量に到達しやすくなります。これは、非凝縮性ガスが少なくなると、対流圏の「コールドトラップ」*4の高度が上昇し、水蒸気が冷やされて凝縮・落下することなく上空に到達してしまうためです。その結果、上層大気で H_2O が光分解されやすくなり、 H が宇宙空間に失われ、 O_2 が蓄積されます。この偽陽

性メカニズムは、 O_2 の生成が主星のスペクトルではなく、惑星の大気組成に大きく依存するため、あらゆるタイプの恒星での系外惑星において引き起こされる可能性があると考えられています[73]。しかし、 N_2 は地球と同じような大気の場合、スペクトル的に検出するのが非常に難しいため、このメカニズムが作動していることを特定するのは非常に困難です。とはいえ、もし系外惑星の表面気圧が数気圧以上ある場合、 N_2 分子間の衝突誘起吸収が4.2 μm 付近の波長で検出できる可能性があり[74]、それによりこの偽陽性メカニズムを否定できる可能性があると考えられています。

*4 コールドトラップ: 地表面で蒸発した水蒸気が対流により対流圏界面に到達するまでに凝結するため、大気上層への水蒸気の輸送は制限される機構。

太陽のような主星における他の偽陽性シナリオには、初期の大気中のCO₂濃度が高い惑星や、「海惑星（Waterworld）」シナリオが含まれます。まず、初期大気に高濃度のCO₂を持つ惑星では、HZでも強力な温室状態を作り出し、水が凝縮せず海が形成されない可能性があります[75]。海が存在しないため、これらの惑星は大気中のCO₂を海で吸収・固定することができません。そして、内部からの水蒸気が継続的に火山ガスとして放出され、それが光分解されてHが宇宙へ散逸することによって、O₂が大気に蓄積されます[76]。もう一つのシナリオでは、地球の50倍以上の海を持つハビタブルな「海惑星」に、無生物起源のO₂が蓄積する可能性があります。この場合、陸地が存在せず、巨大な海による圧力が新しい地殻物質の形成を停止させます。大陸によるO₂の吸収（岩石との反応など、酸素が使われる場所）がない一方、水とCO₂の光分解によるO₂の供給が、非常に低い割合でも地質学的な時間をかけて大気中に蓄積することを可能にします[76]。この偽陽性を識別するためには、惑星に陸地が露出しているかを調べることが有効です。例えば、時間分解系外惑星マッピング技術^{*5}を用いて、海や大陸の存在を特定できる可能性があります（e.g., [77-79]）。地球サイズの重力下では、大陸の主な成分である珪酸塩がこれ以上の重さを支えられないため[80]、露出した陸地が存在するためには、海洋の深さが10 km未満（地球の海の数倍）である必要があります。

バイオシグネチャーの偽陰性

多くの研究は、系外惑星の生命探査における「偽陽性」についての検討に重点を置いてきましたが、「偽陰性」についてはあまり焦点が当てられてきませんでした。この偽陰性は、惑星の環境そのものによってバイオシグネチャーが抑制されているか、望遠鏡で検出できないことが原因であ

る可能性があります。バイオシグネチャーがどのように抑制されるかを知ることは、「どのような惑星環境では、たとえ生命がいてもその兆候が見えにくい」をアストロバイオロジストが理解するのを助けてくれます。Reinhardら（2017）[81]は、光合成とメタン生成の代謝が地球の初期に既に進化したとしても、その副産物（O₂やCH₄）が大気中で検出可能なレベルまで上昇したのは、過去5億年以内であると主張しています。例えば、地球初期の光合成は、おそらく検出が非常に困難だったと考えられます。非酸素発生型光合成は、少なくとも33億年前には存在していたと思われ[82]、Hまたは硫化水素（H₂S）を電子供与体として、単一の光化学系で光を利用していたとされています[83]。しかし、これらの還元剤（H₂やH₂S）は火山活動によって供給されましたが、それは噴出孔に近い限られた環境に留まります。光合成の還元物質に対するこのような空間的制限は、無酸素生物圏の生産性を制限し（e.g., [84]）、そのバイオシグネチャーは大気中に広く拡散し、検出も大幅に難しくすると考えられます。

しかし、23億年前以前に酸素光合成が発達したとき、CO₂・H₂O・太陽光を利用することで、地球全体に広がり、地球規模の生産性を大きく向上させました。ただし、O₂が検出可能なレベルまで上昇するかどうかは、光合成によるO₂の生産だけでなく、環境中のO₂の供給源と吸収源である惑星のプロセスにも依存します。例えば、光合成によって生産されたO₂の大部分は、地表環境では好気呼吸（酸素を利用してエネルギーを生成する代謝過程）によってすぐに消費されてしまいます。また、光合成で作られた有機炭素のうち、呼吸を経ずに海や陸の堆積物として埋もれるのは1%未満とされています[85]。このわずかな有機炭素が地殻に埋もれた結果、O₂の大気中への継続的な供給源となり、結果として少しずつで

*5 時間分解系外惑星マッピング技術：系外惑星の反射光の時系列データから、惑星表面の空間分布を復元する方法論。

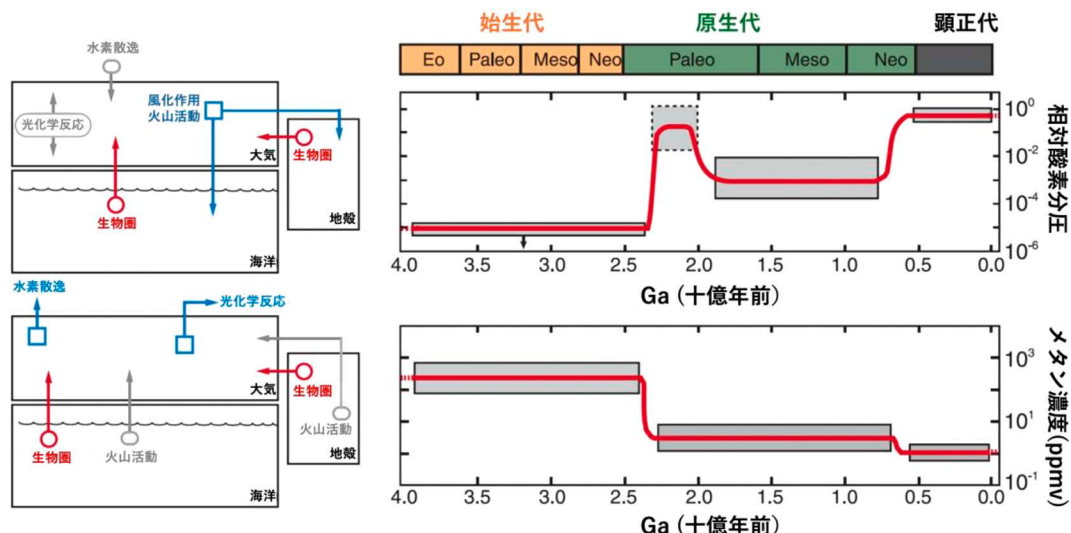


図5 左パネル：大気中の酸素 (O_2) およびメタン (CH_4) 濃度を制御する主要なプロセスの概要。これらの要因の相互作用により、バイオシグネチャーの環境的な抑制や、生命が存在するにもかかわらず検出できない「偽陰性」が生じる可能性があります。右パネル：地球の歴史を通じた大気中の O_2 の相対分圧（現在の地球大気酸素分圧21%を1とした相対分圧）および CH_4 濃度の進化を示す模式図（クレジット：Meadows, V. S., et al., (2018) [14] より和訳を加えて引用）。

はあるが着実に O_2 が大気中に蓄積されました (e.g., [86]). また, H_2 の宇宙空間への散逸 [87] や O_2 が反応する火山・変成活動由来の還元剤の供給量の変化 [88] も, 大気中の酸素濃度上昇に寄与する可能性があります。同様に, メタン生成によって大量の CH_4 が生成されるかもしれませんが, それが大気中に放出されるかどうかは, 海の化学組成, 特に硫酸塩濃度に強く依存します [81] (図5)。

バイオシグネチャーへの主星の影響

バイオシグネチャーの偽陽性に加えて, 主星の紫外線によって駆動される光化学反応は, 惑星大気中のバイオシグネチャーを強めたり, 逆に抑制したりすることがあります。これらの効果は, FGK型星 [89] とM型矮星 [33, 90] のHZにある惑星について検討されています。F型星の場合, 恒星からの強い紫外線は大きな惑星オゾン層を生成しますが, O_3 の大きなシグナルは生成せず, むしろ吸収スペクトルが抑制されることがわかりました。可視光の $0.7 \mu m$ にある酸素分子の吸収帯

は, 大気中の酸素濃度の増加に応じて一貫して吸収強度が増加します。しかし, 中間赤外線の $9.6 \mu m$ にあるオゾンバンドでは, 大気中の O_2 が増加しても吸収がそれに比例して増加しません。これは, O_2 の存在量と O_3 の生成との間に非線形性があるためで, O_2 の存在量が地球大気レベルの1%から100%の間であれば, オゾンの吸収線の強さはほぼ変わらないことが知られています [91]。この効果の大部分は, オゾンによる紫外線吸収のために大気上層で強い温度逆転が起こることに起因します。これにより, オゾン層が中間赤外線での「発光」し, 対流圏からの O_3 吸収スペクトルを部分的に打ち消してしまうため, 全体としてバイオシグネチャーとしての O_3 の検出が難しくなります [89]。一方で, M型矮星 Proxima Centauri b を公転する地球のような表面フラックスを持つ惑星などの場合, 主星のスペクトルによって引き起こされる光化学反応によって, オゾン分子が破壊されたり, O_2 の光分解から生成されなかったりする場合にも, 抑制が起こる可能性

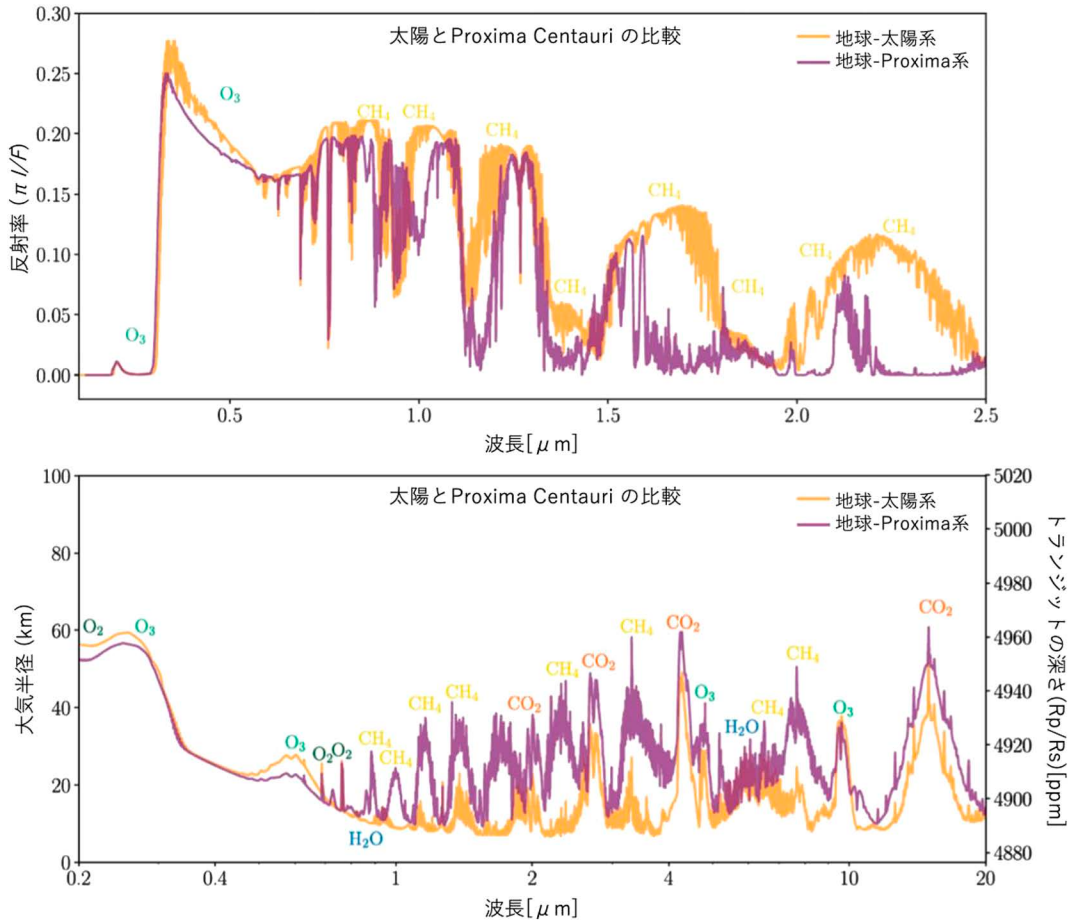


図6 太陽のまわりを公転する地球（オレンジ）と、M型矮星Proxima Centauriのまわりを公転する地球（紫）の、反射スペクトル（上）および透過スペクトル（下）のシミュレーション結果. いずれのケースでも、地表からのガスの放出量は同一です. メタンやオゾンといった分子の検出可能性の違いは、G型星（太陽）とM型矮星が持つ紫外線スペクトルの違いにより、駆動される光化学反応が異なるために生じます. 特にM型矮星の場合、 CH_4 （メタン）は大気中での寿命が長くなるため、同じ地表フラックスでも大気中により多く蓄積されます (Meadows V. S. et al., 2018b [95] より和訳を加えて引用).

があります [92].

主星のスペクトルはまた、光化学的な分解反応を抑制することによって、いくつかのバイオシグネチャーの検出可能性を高める働きもあります. 例えば、M型矮星を公転する惑星上の場合、地球と同じような CH_4 の発生量でも、大気中の CH_4 は地球の最大1000倍に達する可能性があります [33, 40]. これは、M型矮星からのNUVのフラックスが地球（つまり太陽からのNUV）に

比べて非常に低いので、310 nm以下の波長ではオゾンの光乖離が遅くなります. そのため、 CH_4 を破壊するOHラジカルの生成が遅くなり、 CH_4 が多く生き残り、検出する可能性が高くなります [33] (図6).

バイオシグネチャー検出の主張を評価するためのフレームワークの開発

バイオシグネチャーの偽陽性、偽陰性、そして主星がバイオシグネチャーに与える影響に関する

理解が進む中で、バイオシグネチャー科学の最も興味深いフロンティアの1つが、「生命検出の主張を科学的に評価するためのフレームワークの開発」です。生命の検出はアストロバイオロジー分野にとって極めて重要であり、生命検出の主張が最近増加していること（e.g., [93-95]）や、火星サンプルリターンやHWOのようなアストロバイオロジー的目標を持つ現在および将来のミッションが増えていることから、評価フレームワークの必要性が明確かつ喫緊であることを示しています。このフレームワークは、可能性のあるバイオシグネチャーが生物起源か無生物起源かを慎重に判断するための文脈の手がかりを用いることによって、生命検出の信頼性を評価し伝える手段を提供することができ、また今後のミッションのための生命検出／測定戦略の開発にも役立ちます。この広範なテーマをワークショップで議論し、最初の試みとして、米国、アジア、ヨーロッパのアストロバイオロジー参加者を含むコミュニティ白書[96]が作成されました。開発されたフレームワークは、次の5つの重要な視点を中心に構築されています。最初の2つは、検出された信号が確かに存在し、かつ正しくバイオシグネチャーとして同定されているかどうか。調査に値するバイオシグネチャーが確立されると、3つ目は、そのバイオシグネチャーについて、既知の偽陽性メカニズムがあり、データによってそれを除外できるか。4つ目は、検出された環境において、実際に生命がそのバイオシグネチャーを生成することが可能かどうか。そして5つ目は、生命由来と非生命由来のどちらがより妥当かを判別するために、さらなる追観測が可能かどうか。これらの視点に基づいた評価手法を、今後様々なバイオシグネチャーに適用し、このフレームワークにより統計的な裏付けを与えることが、現在進行中の研究課題となっています。

6. 現在および将来の観測による生命検出への道

これまでに述べた研究分野は、地球型系外惑星の環境に影響を与える生命の兆候を探索する望遠鏡や観測装置の開発を支える基盤として、バイオシグネチャー科学を大きく前進させました。今後の探索は、以下の2つのアプローチが考えられます。1つはM型矮星のHZを公転する地球型惑星を研究するもの。もう1つはより太陽に近いFGK型星を公転する惑星を研究するものです[62]。それぞれのアプローチでは、異なるターゲット星、観測装置と天文観測技術を必要とし、宇宙における地球の位置付けや文脈について、異なる角度から、しかも補完的な真実を明らかにすることが期待されています。

近い将来、系外惑星における生命探索は、JWSTや地上からのELTsによる近傍のM型矮星のトランジット透過分光観測と系外惑星の反射分光観測に焦点が当てられるでしょう。これにより、天の川銀河の中における地球型系外惑星の進化の多様性を明らかにできると期待されています。ただしこの段階では、M型矮星周りの系外惑星に限られます。なぜなら、大きな恒星を公転する惑星に比べて、惑星と主星の大きさの比が大きくなり、透過分光法による大気検出に有利なためです。例えば水蒸気のような吸収分子が、ある波長で大気を不透明にする場合、不透明な「大気の薄い輪」が、M型矮星からの光を相対的に大きく遮るため、検出しやすくなります。同様に、地球型系外惑星からの反射光をELTsで地上観測する場合、中心星からの光を抑制する必要がありますが、これは暗いM型矮星の方が主星・惑星のコントラストが小さく技術的に容易という利点があります。JWSTは現在、M型矮星のHZにある地球サイズの系外惑星のいくつかについて、透過スペクトルを取得可能ですが、主星の光による影響を正確に除去するという課題が残され

ています (i.e., [97]). さらに、今後10年以内に運用が開始される予定の地上の超大型望遠鏡群 (ELTs) は、星の光を抑制する高コントラストと高分散分光の両方を組み合わせ (i.e., [98]), 地球型系外惑星の透過光と反射光の分光を行い、その吸収と地球大気吸収を分離することも可能になります [17, 99]. 地上の望遠鏡で観測可能な惑星候補は数十個あると見込まれていますが、大気の詳細な測定は依然として困難が伴うと考えられています。では、JWSTやELTsで観測可能な一握りのHZ内の地球型系外惑星のターゲットから、我々は何を学ぶことができるのでしょうか？

JWSTにとって、最も有望なアストロバイオロジー的ターゲットの一つが、TRAPPIST-1惑星系です [9, 10]. また、最近発見された Gliese 12 b も、大気の観測対象として期待されています [13]. TRAPPIST-1系は、木星の半径のわずか1.4倍しかないM8 V型の超低質量星を主星とし、地球サイズの惑星が7つもあるという、アストロバイオロジー研究にとって理想的な対象です。これらの惑星について、最初のハッブル宇宙望遠鏡による観測では、透明な水素を主成分とする大気が存在しないことが示されました [100, 101]. その後の雲のモデリングでも、雲を伴った水素大気である可能性も否定されました [102]. Hori & Ogihara (2020) [103] は、TRAPPIST-1の惑星が形成され、内側に移動する際のガス円盤降着のシミュレーションを行いました。これらの結果は、大気散逸モデルと併せて、TRAPPIST-1の惑星が原始的なH₂主体の大気を持たず、火山活動などによる二次的なアウトガス大気を持つ可能性が高いことを示しました。ある惑星が連続して通過する間の時間の变化 (TTV: トランジットタイミングの変化) により、惑星同士の重力の影響による軌道のわずかなずれが明らかになり、個々の惑星の質量は3%という非常に高い精度で求められています [104]. そのため、これらの惑星質量は、地球より少し低いものの、すべて地球と同程度である

ことがわかっており、地球ほどではないものの、二次大気を保持している可能性が示唆されています。ただし、現時点でまだ観測的に惑星大気が確認された惑星はありません。また、Gliese 12 bはTRAPPIST-1の惑星と同様、地球に近い大きさと質量を持つ惑星ですが、TRAPPIST-1よりやや大きいM型矮星の周りを回っています。非常に穏やかで活動度の低い「静かな」恒星であるため、JWSTによる惑星大気の観測がしやすいという利点があります [13].

JWSTによるこれらの惑星の透過スペクトルのモデリング・シミュレーションは、どのようなバイオシグネチャーにアクセスできるかを調べるために行われてきました。主星のスペクトルの差し引きの問題が克服されれば、TRAPPIST-1の惑星およびGliese 12 bの大気からCO₂/CH₄の非平衡バイオシグネチャーを探ることが可能になるかもしれません [28, 40]. これら2つのガスは、JWSTの観測波長域に複数のバンドを持ち、比較的観測しやすいものです。さらに、Meadowsら (2023) [40] によるシミュレーションでは、メタン生成の存在を示すCO₂/CH₄のペアが、地球型惑星の生涯を通じて、現代の地球のような環境でも検出可能であることが示され、可能性の高いバイオシグネチャーとなります。その一方、他のバイオシグネチャーもJWSTによる観測がシミュレーションされましたが、検出可能性は低いとみなされています。例えば、JWSTでは地球型惑星のO₂を検出できないことが現在では広く認識されています [40, 70, 105–110]. これは、TRAPPIST-1のような小さな恒星が主に近赤外線を放射しており、O₂の吸収帯がないこと、JWSTの感度が可視光に近い短波長では十分ではないことが原因です。Meadowsら (2023) [40] はまた、CH₃Cl, DMS, DMDS, C₂H₆, および生物によって生成される有機ヘイズについてもシミュレーションを行いました。これらのバイオシグネチャーのうち、検出可能性があるものはヘイズのみでしたが、そのヘイ

ズも生物起源であるかどうかの解釈は非常に難しいとされています。

シミュレーションによると、ELTsによる観測はJWSTの透過光観測を補完するものであり、 O_2 が検出可能となる可能性が高くなると期待されています。また、 CO_2/CH_4 のバイオシグネチャーペアも検出可能性があります。Currieら(2023) [17]によると、現代の地球および古代の地球環境、ならびに偽陽性のケースを想定したELTsによる透過スペクトル中の分子検出に関するシミュレーションでは、12パーセク以内のさまざまなM型矮星(TRAPPIST-1のHZ惑星を含む)において、 CH_4 および CO_2 をそれぞれ10回以下のトランジット観測により3シグマの信頼度で検出できる可能性が示されました。 O_2 も検出可能性がありますが、より困難であり、最も強いシグナルは $1.27\ \mu m$ の O_2 吸収バンドであり、30-100回のトランジットで検出できると考えられています。水蒸気やCOも50-100時間で検出できる可能性があります。また、反射光スペクトルのELTsによる相互相関法によるシミュレーションでは、Currie & Meadows (2025) [99]の研究により、最も近い地球型惑星候補であるProxima Centauri bにおいて、 O_2/CH_4 および CO_2/CH_4 の非平衡バイオシグネチャーペアの両方が、約10時間の観測時間で検出可能とされています。偽陽性の指標にもなるCO(10-100時間)や H_2O (10時間未満)も検出可能性があります。Proxima Centauri bがサブ・ネプチューン型惑星であるかどうか($M \cdot \sin i$ の不定性により依然としてその可能性がある)を判別するには、還元性ガスである CH_4 、 NH_3 、COを検出することが有効です。もしこの惑星がサブ・ネプチューンであれば、これらの分子はELTsを使って1時間以内の観測で検出可能とされています[99]。特筆すべきは、水蒸気は透過光よりも反射光の方がはるかに検出しやすいことです。これは対象までの距離の違いによりますが、主に透過光分光が惑星の成層圏(水は対流圏

に冷却トラップされて成層圏では少ない)を観測するのに対し、反射光は理論的には大気全層、つまり地表まで観測可能であり、水の検出が容易になるためです。

将来的には、2040年代初頭の打ち上げを目指すNASAのHWOと、欧州で開発中のLIFE構想により、より大規模な地球型系外惑星のサンプルに対して、反射光と放射光の直接撮像分光データを得ることが期待されています。HWOは紫外線から近赤外線(少なくとも $1.7\ \mu m$ 、おそらく $2.5\ \mu m$ まで)にわたる波長域で観測を行うと見込まれています。観測する候補天体において、HWOは部分的な雲に覆われた惑星でもその大気の下層および地表まで観測することができるので、大気全層の鉛直構造をサンプル可能です。そのため、水蒸気や O_2 の検出は比較的容易とされますが、 CH_4 を地球並みの濃度で検出するのは困難です[19]。また、F、G、K、M型星を対象としたより大規模な統計的観測を行うことで、複数の惑星にわたって水蒸気や CO_2 の存在を探ることができます。さらに、惑星が主星からどの程度の距離にあるかに応じた分布を調べることで、ハビタブルゾーンの存在を観測的に裏づけることが可能になるでしょう。

7. おわりに

私たちは今、太陽系の外に生命を探すという人類の探究において、非常に刺激的な時期を迎えています。これまでの数十年にわたる研究により、地球型系外惑星の大気や表面を研究するうえで必要な技術開発をするための科学的基盤が築かれてきました。今後20年の間に、人類は地上および宇宙に新たな望遠鏡を建設し、遠く離れた系外惑星における生命居住可能性や生命の兆候を探索する能力を手に入れるでしょう。バイオシグネチャーの探索は、今や科学研究の重要な一部であり、この目標を支えるために、日本のアストロバイオロジーセンターの研究者と共同研究者は、理

論, 実験, 装置開発, 系外惑星探査, そして原始惑星系円盤観測において重要な役割を果たしてきました。この研究は, 人類にとって最も根源的で, 長らく抱かれてきたこの問いに, ついに答えを出すための世界的な科学的探究の一翼を担っています。

——「私たちは, 宇宙で孤独な存在なのだろうか？」

参考文献

- [1] Mayor, M., & Queloz, D., 1995, *Nature*, 378, 355
- [2] Bergsten, G. J., et al., 2022, *AJ*, 164, 190
- [3] Hill, M., L., et al., 2023, *AJ*, 165, 34
- [4] Kasting, J. F., et al., 1993, *Icarus*, 101, 108
- [5] Kopparapu, R. K., et al., 2013, *ApJ*, 765, 131
- [6] Kammerer, J., et al., 2022, *A&A*, 668, A52
- [7] Weiss, L. M., & Marcy, G. W., 2014, *ApJL*, 783, L6
- [8] Rogers, L. A., 2015, *ApJ*, 801, 41
- [9] Gillon, M., et al., 2016, *Nature*, 533, 221
- [10] Gillon, M., et al., 2017, *Nature*, 542, 456
- [11] Anglada-Escudé, G., et al., 2016, *Nature*, 536, 437
- [12] Bixel, A., & Apai, D., 2017, *ApJL*, 836, L31
- [13] Kuzuhara, M., et al., 2024, *ApJL*, 967, L21
- [14] Meadows, V. S., et al., 2018, *Astrobiology*, 18, 630
- [15] Lyons, T. W., et al., 2014, *Nature*, 506, 307
- [16] Meadows, V. S., 2017, *Astrobiology*, 17, 1022
- [17] Currie, M. H., et al., 2023, *Planet. Sci. J.*, 4, 83
- [18] Currie et al., 2024, *Planet. Sci. J.*, 5, 148
- [19] Gilbert-Janizek, S., et al., 2024, *Planet. Sci. J.*, 5, 148
- [20] Lovelock, J. E., 1965, *Nature*, 207, 568
- [21] Wright, J. T., et al., 2022, *ApJL*, 927, L30
- [22] Haqq-Misra, J., et al., 2022, *Acta Astronaut.*, 198, 194
- [23] Hitchcock, D. R. & Lovelock, J. E., 1967, *Icarus*, 7, 149
- [24] Thompson, M. A., et al., 2022, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 119, e2117933119
- [25] Wogan, N., et al., 2020, *Planet. Sci. J.*, 1, 58
- [26] Léger, A., et al., 1993, *A&A*, 277, 309
- [27] Krissansen-Totton, J., et al., 2016, *Astrobiology*, 16, 39
- [28] Krissansen-Totton, J., et al., 2018, *Sci. Adv.*, 4, eaao5747
- [29] Chen, H., et al., 2015, *Microb. Ecol.*, 69, 180
- [30] Prosser, J. I., & Nicol, G. W., 2012, *Trend. Microbiol.*, 20, 523
- [31] Schumann, U., & Huntrieser, H., 2007, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 3823
- [32] Robinson, T. D. & Reinhard, C. T., 2018, *arXiv*: 1804.04138
- [33] Segura, A., et al., 2005, *Astrobiology*, 5, 706
- [34] Schwieterman, E. W., et al., 2022, *ApJ*, 937, 109
- [35] Leung, M., et al., 2022, *ApJ*, 938, 6
- [36] Yokouchi, Y., et al., 2002, *Nature*, 416, 163
- [37] Seinfeld, J. H., & Pandis, S.N., 2006, *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate Change*(John Wiley & Sons, Hoboken, NJ)
- [38] Saito, T., & Yokouchi, Y., 2008, *Geogr. Res. Lett.*, 35, CiteID L08807
- [39] Nikitin, A. V., et al., 2016, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, 177, 49
- [40] Meadows, V. S., et al., 2023, *Planet. Sci. J.*, 4, 192
- [41] Pilcher, C. B., 2003, *Astrobiology*, 3, 471
- [42] Domagal-Goldman, S. D., et al., 2011, *Astrobiology*, 11, 419
- [43] Reed, N. W., et al., 2024, *ApJL*, 973, L38
- [44] Arney, G., et al., 2018, *Astrobiology*, 18, 311
- [45] Gates, D. M., et al., 1965, *Appl. Opt.*, 4, 11
- [46] Seager, S., 2005, in *Astrophysics of Life*, eds. Livio, M., et al. (Cambridge University Press, Cambridge), 16, 67
- [47] O'Malley-James, J. T., & Kaltenegger, L., 2018, *Astrobiology*, 18, 1123
- [48] Tinetti, G., et al., 2006, *ApJ*, 644, L129
- [49] Montañes-Rodriguez, P., et al., 2006, *ApJ*, 651, 544
- [50] Kiang, N. Y., et al., 2007, *Astrobiology*, 7, 222
- [51] Schwieterman, E. W., et al., 2015, *Astrobiology*, 15, 341
- [52] Kiang, N. Y., et al., 2007, *Astrobiology*, 7, 252
- [53] Wolstencroft, R. D., & Raven, J. A., 2002, *Icarus*, 157, 535
- [54] Takizawa, K., et al., 2017, *Sci. Rep.*, 7, 7561
- [55] Murakami, A., et al., 2025, *Astrobiology*, 25, 209
- [56] Komatsu, Y., et al., 2023, *ApJ*, 942, 57
- [57] Meadows, V. S., 2008, in *Exoplanets: Detection, formation, properties, habitability*, eds. Mason, J. W. (Springer, Berlin, Heidelberg), 259
- [58] Olson, S. L., et al., 2018, *ApJL*, 858, L14
- [59] Keeling, C. D., et al., 1976, *Tellus*, 28, 538
- [60] East, J. D., et al., 2024, *Geogr. Res. Lett.*, 51, e2024GL108494
- [61] Schwieterman, E. W., et al., 2016, *ApJL*, 819, L13
- [62] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2018, *An Astrobiology Strategy for the Search for Life in the Universe* (NASEM, Washington, DC)
- [63] Luger, R., & Barnes, R., 2015, *Astrobiology*, 15, 119
- [64] Tian, F., 2015, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 432, 126
- [65] Walker, J. C., 1977, in *Chemical evolution of the early precambrian*, ponnamperuma, C.,(Academic Press), 1
- [66] Harman, C. E., et al., 2015, *ApJ*, 812, 137
- [67] Baraffe, I., et al., 2015, *A&A*, 577, A42
- [68] Domagal-Goldman, S. D., et al., 2014, *ApJ*, 792, 90
- [69] Gialluca, M. T., et al., 2024, *Planet. Sci. J.*, 5, 137

- [70] Lustig-Yaeger, J., et al., 2019, *AJ*, 158, 27
- [71] Gao, P., et al., 2015, *ApJ*, 806, 249
- [72] Narita, N., et al., 2015, *Sci. Rep.*, 5, 13977
- [73] Wordsworth, R., & Pierrehumbert, R., 2014, *ApJL*, 785, L20
- [74] Schwieterman, E. W., et al., 2018, *Astrobiology*, 18, 663
- [75] Marcq, E., et al., 2017, *J. Geophys. Res.*, 122, 1539
- [76] Krissansen-Totton, J., et al., 2021, *AGU Advances*, 2, e2020AV000294.
- [77] Fujii, Y., et al., 2010, *ApJ*, 715, 866
- [78] Kawahara, H., & Fujii, Y., 2010, *ApJ*, 720, 1333
- [79] Lustig-Yaeger, J., et al., 2018, *AJ*, 156, 301
- [80] Cowan, N. B., & Abbot, D. S., 2014, *ApJ*, 781, 27
- [81] Reinhard, C. T., et al., 2017, *Astrobiology*, 17, 287
- [82] Westall, F., et al., 2011, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 310, 468
- [83] Olson, J. M., & Pierson, B. K., 1986, *Photosynth. Res.*, 9, 251
- [84] Canfield, D. E., et al., 2006, *Philos. Trans. R. Soc. B*, 361, 1819
- [85] Berner, R. A., 1982, *Am. J. Sci.*, 282, 451
- [86] Des Marais, D. J., et al., 1992, *Nature*, 359, 605
- [87] Catling, D. C., et al., 2001, *Science*, 293, 839
- [88] Kasting, J. F., & Canfield, D. E., 2012, in *Fundamentals of Geobiology*, eds. Knoll, A. H., et al. (Blackwell Publishing), 93
- [89] Segura, A., et al., 2003, *Astrobiology*, 3, 689
- [90] Rugheimer, S., et al., 2015, *ApJ*, 809, 57
- [91] Kasting, J. F., & Donahue, T. M., 1980, *J. Geophys. Res.: Oceans*, 85, 3255
- [92] Meadows, V. S., et al., 2018, *Astrobiology*, 18, 133
- [93] Affholder, A., et al., 2021, *Nat. Astron.*, 5, 805
- [94] Greaves, J. S., et al., 2021, *Nat. Astron.*, 5, 655
- [95] Loeb, A., 2022, *Astrobiology*, 22, 1392
- [96] Meadows, V. S., et al., 2022, *arXiv:2210.14293*
- [97] Lim, O., et al., 2023, *ApJL*, 955, L22
- [98] Lovis, C., et al., 2017, *A&A*, 599, A16
- [99] Currie, M. H., & Meadows, V. S., 2025, *Planet. Sci. J.*, 6, 96
- [100] de Wit, J., et al., 2016, *Nature*, 537, 69
- [101] de Wit, J., et al., 2018, *Nat. Astron.*, 2, 214

- [102] Moran, S. E., et al., 2018, *AJ*, 156, 252
- [103] Hori, Y., & Ogihara, M., 2020, *ApJ*, 889, 77
- [104] Agol, E., et al., 2021, *Planet. Sci. J.*, 2, 1
- [105] Pidhorodetska, D., et al., 2020, *ApJL*, 898, L33
- [106] Gialluca, M. T., et al., 2021, *PASP*, 133, 054401
- [107] Gialluca, M. T., et al., 2023, *PASP*, 135, 119201
- [108] Wunderlich, F., et al., 2019, *A&A*, 624, A49
- [109] Wunderlich, F., et al., 2020, *ApJ*, 901, 126
- [110] Lin, Z., et al., 2021, *MNRAS*, 505, 3562

The Astronomical Search for Life Beyond the Solar System

Victoria MEADOWS^{1,2}

¹*University of Washington, Astronomy Department, Physics-Astronomy Building, 3910 15th Ave NE, Seattle, WA, 98195-1580 USA*

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

Abstract: The search for signs of life on exoplanets is an exciting quest that is now a key scientific priority. Exoplanet biosignatures are potentially detectable impacts of life on a global planetary environment, such as gases released by metabolic processes. However, all biosignatures must be interpreted in the context of their planetary environment, to rule out planetary processes including volcanism and photochemistry that may enhance, destroy or mimic a targeted biosignature. Depending on wavelength range and whether ground- or space-based, different telescopes will be capable of advancing the search for life in different ways, ultimately providing synergistic pieces of a much larger puzzle. In the near-term, biosignatures will be sought on M dwarf exoplanets, using JWST and the upcoming ground-based Extremely Large Telescopes. In the longer term, large-aperture space-based telescopes like NASA's Habitable Worlds Observatory will study more Sun-like FGK dwarf stars, and expand the search to planetary systems more like our own.