

アストロバイオロジーセンター10周年特集 (4)

太陽系外における生命の天文学的探索

ビクトリア・メドウズ 訳: 日下部展彦 592

EUREKA

宇宙線の「超新星残骸起源」を検証する

福井康雄・佐野栄俊 612

天球儀

ALMA 較正用天体の自動解析ツールの開発とその科学的応用

成田佳奈香・西田明正 622

シリーズ: 海外の研究室から

英国ハートフォードシャー大学でZ-groupを始めた

Centre for Astrophysics Research, University of Hertfordshire,
the United Kingdom

小林千晶 629

シリーズ: 天文学者たちの昭和

日江井榮二郎氏ロングインタビュー

第7回: アメリカ滞在 高橋慶太郎 633

日本天文学会行動規範

日本天文学会行動規範を作る

Code of Conduct/ハラスメント防止ガイドライン策定タスクフォース

望月優子(座長)・片岡章雅・日下部晴香・
小松英一郎・新永浩子・野村英子・林左絵子 643

雑報

日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書

*Galaxy origins in the JWST era: a "crisol" of stars, ISM, and supermassive
black holes in the City of the Three Cultures & COSMOS Conference 2025*

田中匠 654

書評

星の文化史 世界13地域における星の知識・伝承・信仰

吉田二美 656

月報だより・寄贈図書リスト

657

【表紙画像説明】

超新星残骸 RX J1713.7-3946 の H.E.S.S. によるガンマ線カウント画像に, NANTEN と ATCA & Parkes による星間陽子分布(左)と, XMM-Newton によるX線強度分布(右)を重ねた. 等高線の破線領域は, 周囲よりも強度が低い. これら3分布は大局的には似ているものの, 局所的には有意に異なる. この違いを定量化することで, 星間陽子に比例する成分とX線(宇宙線電子)に比例する成分が分離できる.

【今月の表紙デザイン】

宇宙観測技術の発展は目覚ましいものがあります. 宇宙の起源と進化, その深い謎を解き明かすために, 過去, 現在, 未来へと繋がっていく研究者の情熱をイメージしました.

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

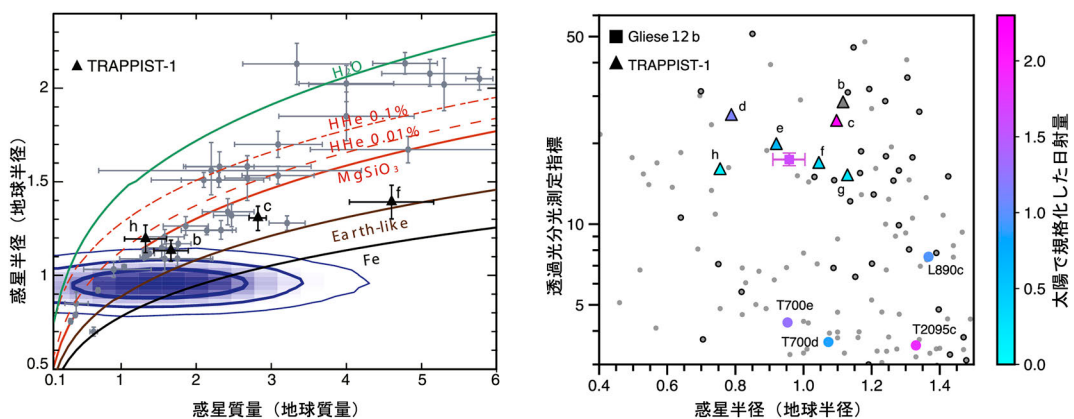


図1 (左) 冷たいM型矮星 (<3900 K) の周りがある6地球質量以下の既知の惑星すべての質量と半径の関係。等高線は、Gliese 12 bの質量と半径の1 σ , 2 σ , 3 σ の推定値を示している。(右) TRAPPIST-1惑星 (三角形) を含む既知の惑星の半径と透過分光指標。Gliese 12 bはTRAPPIST-1惑星に匹敵する位置にあり、大気研究のよいターゲットであることがわかります (Kuzuhara, M., et al., 2024 [13] の図9に和訳を加えて改変)。

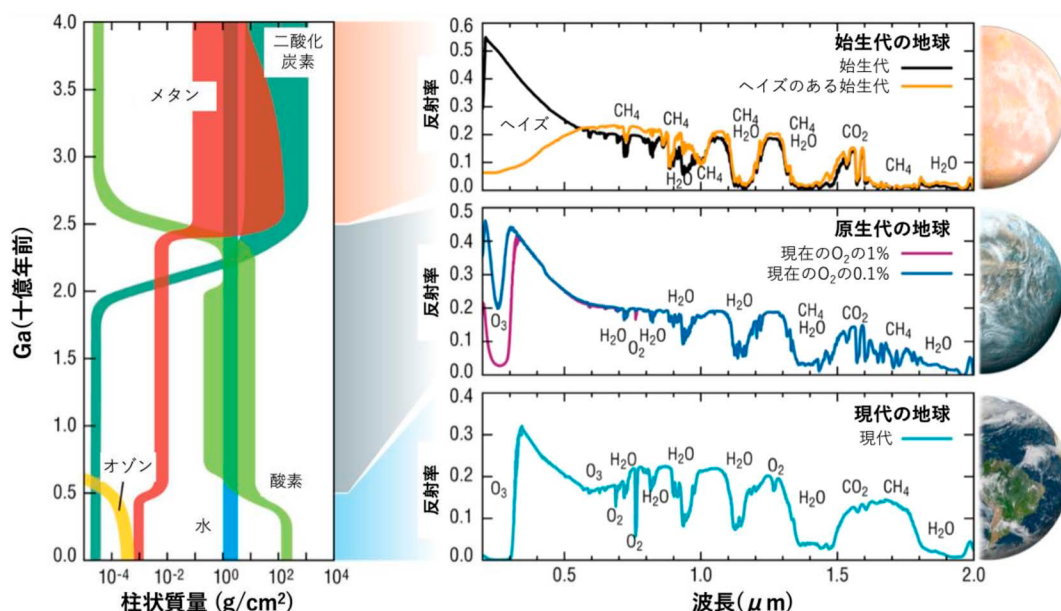


図2 図の左側は、現在(下)から約40億年前(上)までの時間の経過に対して、地球大気中の各種ガスの濃度(x軸)がどのように変化してきたかを示した図です。こうした生命活動によってもたらされた地球大気の変化は、時間とともに地球のスペクトル(右側)にも異なる特徴として現れます。たとえば、酸素(O_2)は現代の地球のスペクトル(下)では顕著にみられますが、始生代(上)にはその存在を確認することはできません(クレジット: G. Arney, S. Domagal-Goldman, T. B. Griswold (NASA GSFC; LUVOIR STDT 最終報告書)より和訳を加えて引用, <https://asd.gsfc.nasa.gov/luvoir/reports/>). ※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(O_2)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が作り出す、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

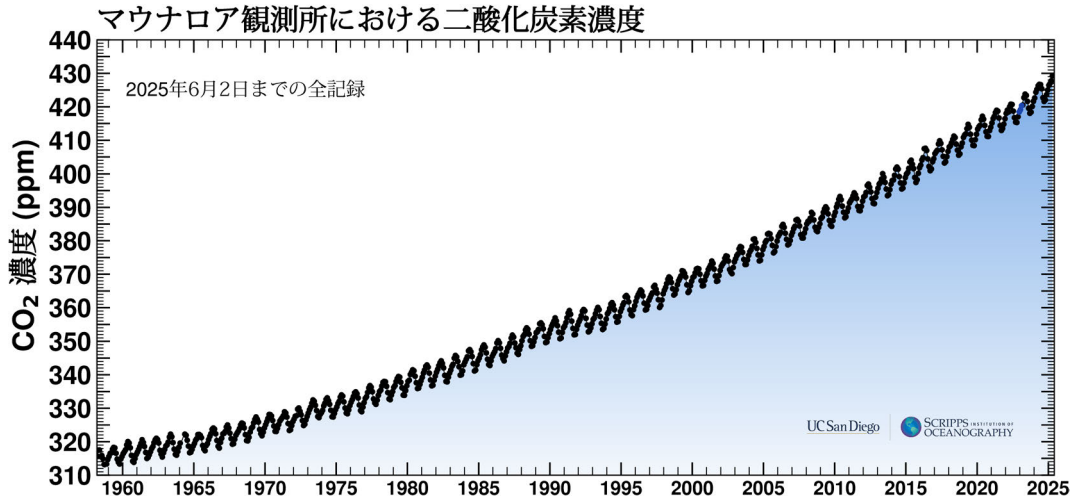


図3 キーリング曲線は、1958年からマウナロア観測所で記録されている大気中の二酸化炭素（CO₂）の変動を示しています。この曲線の周期的な変化は、植生による光合成活動によってCO₂が吸収され、植物の枯死や分解によって再び大気中に放出されるという、季節に応じた周期的なCO₂の変動を表しています（クレジット：Scripps Oceanography Keeling Labの図に和訳を加えて改変，<https://keelingcurve.ucsd.edu/>，CC BY 4.0）。

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、アストロバイオリ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ますようになります。

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 $4.2 \mu m$ 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。

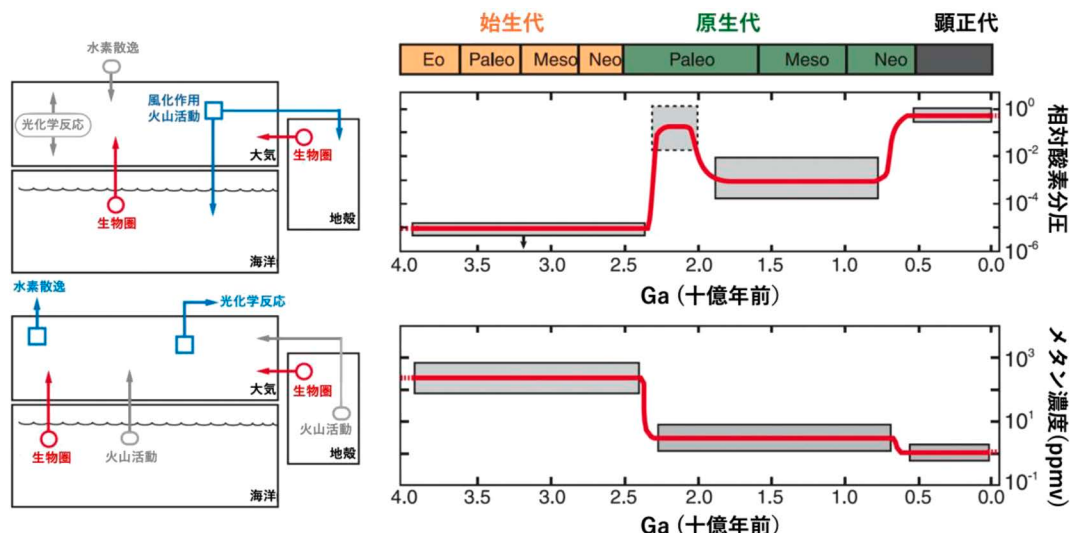


図5 左パネル：大気中の酸素 (O_2) およびメタン (CH_4) 濃度を制御する主要なプロセスの概要。これらの要因の相互作用により、バイオシグネチャーの環境的な抑制や、生命が存在するにもかかわらず検出できない「偽陰性」が生じる可能性があります。右パネル：地球の歴史を通じた大気中の O_2 の相対分圧（現在の地球大気中の酸素分圧21%を1とした相対分圧）および CH_4 濃度の進化を示す模式図（クレジット：Meadows, V. S., et al., (2018) [14] より和訳を加えて引用）。

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

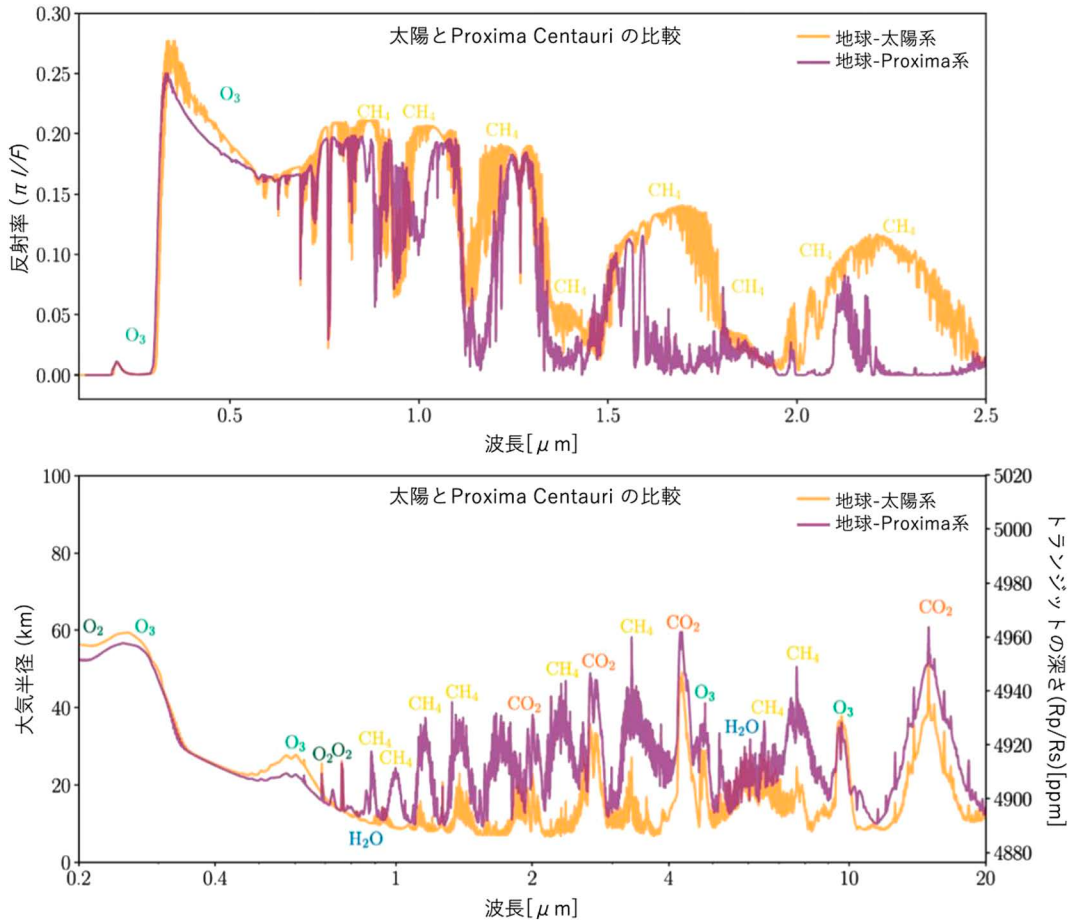


図6 太陽のまわりを公転する地球（オレンジ）と、M型矮星Proxima Centauriのまわりを公転する地球（紫）の、反射スペクトル（上）および透過スペクトル（下）のシミュレーション結果. いずれのケースでも、地表からのガスの放出量は同一です. メタンやオゾンといった分子の検出可能性の違いは、G型星（太陽）とM型矮星が持つ紫外線スペクトルの違いにより、駆動される光化学反応が異なるために生じます. 特にM型矮星の場合、 CH_4 （メタン）は大気中での寿命が長くなるため、同じ地表フラックスでも大気中により多く蓄積されます (Meadows V. S. et al., 2018b [95] より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

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

比べて非常に低いことで、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変化 (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.

宇宙線の「超新星残骸起源」を検証する

福井 康雄^{1,2}・佐野 栄俊²

〈¹ 名古屋大学大学院理学研究科 〒464-8602 愛知県名古屋市千種区不老町〉

〈² 岐阜大学工学部 〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1〉

e-mail: ¹ fukui@phys.nagoya-u.ac.jp, ² sano.hidetoshi.w4@f.gifu-u.ac.jp



福井



佐野

銀河系内宇宙線の加速源として超新星残骸（SNR）が最も有力視されてきた。これを立証するためには、SNRのガンマ線が宇宙線陽子起源であることを証明する必要がある。2021年と2024年に発表した我々の研究によって、陽子起源ガンマ線が2個の若いSNRにおいて初めて実証され、研究はあらたな段階に入った。この研究は、ガンマ線が宇宙線陽子起源と宇宙線電子起源の2つの成分からなり、それぞれが[星間雲の陽子数]と[宇宙線電子数]とに比例するとして2成分を分けて定量した結果である。これによって、2成分のガンマ線カウントがほぼ1:1であることが導かれ、宇宙線の陽子がSNR起源であることが確実になった。ここでは、解析手法の概要と成果の意義を紹介したい。

1. はじめに

宇宙線が1912年にV. ヘスによって発見されて以来、宇宙線の起源は宇宙物理学の最重要課題の一つとされてきた。宇宙線のエネルギースペクトルは 10^{20} eV以上にのびているが、 $10^{15.5}$ eVに「ニー（knee）」と呼ばれる不連続がある。「ニー」より低いエネルギーの宇宙線は銀河系内にとじこめ可能なので、銀河系内で加速されたものと考えられる。一方、これ以上のエネルギーの宇宙線は系外起源とみられる。宇宙線加速の理論として拡散衝撃波加速（DSA）がよく知られており、超新星残骸（SNR）などの 1000 km s^{-1} をこえる衝撃波面が加速場所として有力視される [1]。しかしこれまで、宇宙線の起源は定量的に実証されておらず、多くの文献に「宇宙線の起源は未解決」と記述されてきた。

宇宙線の定量につながる最も有力な情報源はガ

ンマ線である。特にGeV-TeV帯の高エネルギーガンマ線は銀河系内最高エネルギー付近の宇宙線陽子と宇宙線電子の双方から放射されるので、ガンマ線観測が宇宙線起源の解明につながると期待された。しかし、ここで注意すべきは、陽子起源と電子起源の峻別が必須であるという点である。地球近傍での宇宙線の測定によって、宇宙線は陽子を主成分とし、その100分の1程度の電子を含むことがわかっている。このため、宇宙線陽子がガンマ線放射の全て、または一部を担っていることを立証しないと、電子起源が卓越する可能性は排除できず、宇宙線起源は立証できない。ある天体のガンマ線放射の少なくとも一部が宇宙線陽子起源であることが定量的に立証されれば、ただちにそれが宇宙線起源天体であると結論できる。1990年代のガンマ線観測は度のオーダーの低角度分解能であり、詳しいガンマ線の空間分布は分解されていなかった。本格的な高分解能（ <0.1 度）

のガンマ線観測は、2000年代に入って大気チェレンコフ光望遠鏡によって実現した [2]。大気チェレンコフ光は、地球大気に入射するTeV領域のガンマ線が作る粒子シャワーによって生じる。MAGIC, H.E.S.S., VERITAS等の大気チェレンコフ光望遠鏡によって、高分解能のガンマ線観測が開花した。また、フェルミ衛星はGeV領域のガンマ線観測に大きな役割を果たしてきた。さらに、ASCA, Suzaku, Chandra, XMM-NewtonなどによるX線観測も、高エネルギー電子のシンクロトン放射をとらえて宇宙線電子成分の振る舞いを明らかにした。これらの高エネルギー放射の観測によって、宇宙線起源の解明に向けた研究の基盤が開拓された。

ガンマ線観測において特に重要な役割を果たしたのは、ナミビアに設置されたH.E.S.S.である。H.E.S.S.の成果は、TeVガンマ線を0.1度の分解能で広範囲かつ高感度で観測したものであり、SNRのシェルが初めてガンマ線で空間的に分解された。H.E.S.S.天体の内20個あまりを占めるSNRは宇宙線発生源の最有力候補である。全天で最も明るいガンマ線SNR RX J1713.7-3946 (以後RXJ1713) [3, 4] は特に注目される天体であり、本稿でもこのSNRをとりあげる。同様のガンマ線SNRとしてRX J0852.0-4622 (以後RXJ0852)があり、共に年齢1000-2000年程度のコア崩壊型SNRである。これらのSNRにおける宇宙線加速を立証するためには、ガンマ線の放射機構を定量的に解析し、ガンマ線放射が不定性なく陽子起源であることを証明することが必須である。

2. 2つのガンマ線放射機構：陽子起源と電子起源

歴史的にみると、2002年RXJ1713のTeVガンマ線がカンガルー望遠鏡によって検出され、SNRのガンマ線起源をめぐる追究が始まった [5]。TeV領域のガンマ線の生成に宇宙線粒子が関係していることは、そのエネルギーの大きさからみて

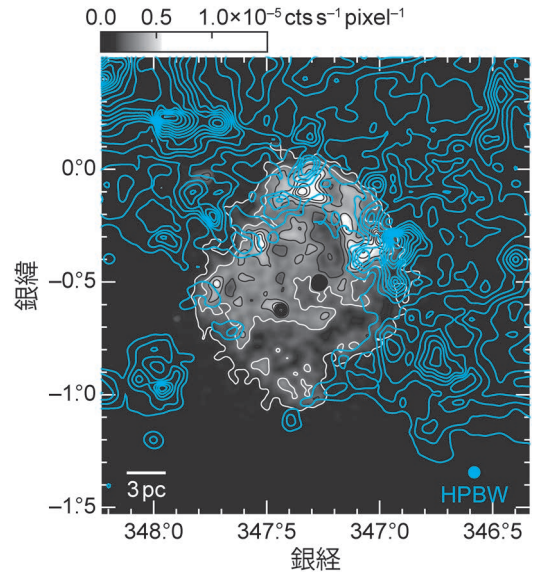


図1 RXJ1713のNANTENによるCO ($J=1-0$) 輝線強度分布 (青等高線, 4 K km s^{-1} 毎) [6]. 背景のグレースケールイメージはROSATによるX線強度分布。

間違いない。カンガルーの結果は早速分子雲の分布と比較され、チリに設置された名古屋大学のサブミリ波望遠鏡NANTEN (現在は高精度化されたNANTEN2) によってガンマ線ピークに一致する分子雲が発見され、陽子起源ガンマ線の可能性が示唆された [6] (図1)。さらに2004年、H.E.S.S.によってRXJ1713のガンマ線分布がシェル状に分解され [7], 本格的なガンマ線起源の追究が始まったのである。

ガンマ線の二つの起源「陽子起源」と「電子起源」の模式図を図2に示した。陽子起源ガンマ線は、宇宙線陽子と星間陽子の衝突によってつくられる。まず、陽子-陽子衝突によって中性パイ中間子がつくられ、これがガンマ線に崩壊する (この過程は、 $\pi^0 2\gamma$ 「パイゼロ・ツーガンマ」と呼ばれる)。

一方、電子起源ガンマ線は、宇宙線電子が宇宙背景放射などの低エネルギー光子にエネルギーを与えてつくられる (逆コンプトン散乱)。もちろん、ガンマ線は同等なので両起源は区別できな

い。理論的には、宇宙線のエネルギー分布を与えてガンマ線スペクトルを計算することができるが、陽子起源ガンマ線・電子起源ガンマ線のどちらも観測されたガンマ線スペクトルを説明できることがわかり、両起源の決着はつかなかった [3]。

各放射の空間分布も重要な決め手になりうる (図3)。電子起源ガンマ線の場合は、電子の放射するシンクロトロンX線とガンマ線の分布が相似になると期待される。実際、図3 (a) と (c) に

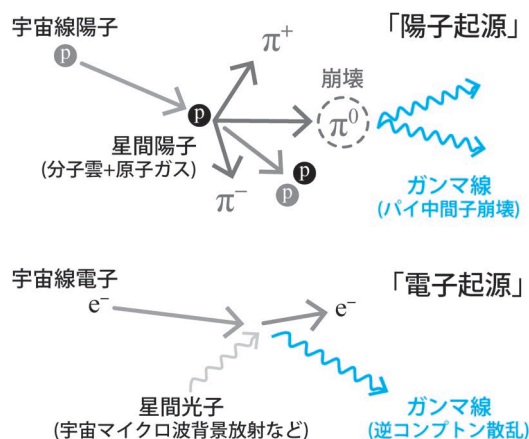


図2 ガンマ線の二つの起源「陽子起源」と「電子起源」の模式図。陽子起源 (上) では、宇宙線陽子が星間陽子と衝突し、中性パイ中間子をつくる。中性パイ中間子はすぐに2個のガンマ線に崩壊する。電子起源 (下) では、宇宙線電子が宇宙背景放射などの光子と衝突し、逆コンプトン散乱によって光子にエネルギーを与えてガンマ線をつくる。

示すように、RXJ1713において、両分布はよく似たシェル状を示す [3, 12]。また、陽子起源ガンマ線の場合は、 $\pi^0 2\gamma$ を生じる星間陽子とガンマ線がよく似た分布になることが期待される。この点については、CO観測などによってSNR中の星間陽子 (水素原子+水素分子) がX線・ガンマ線と共通するシェル状分布を持つことが明らかにされた [9, 10] (図3b)。つまり、これら3つの観測量は相似なシェル状分布を示し、いずれの起源でもガンマ線の分布は定性的には説明可能であり、ガンマ線の起源は依然として決着しなかった。ちなみにRXJ0852についても同様のシェル状のガンマ線、X線、星間陽子分布が観測されており [13]、これら2個のSNRは多くの点で共通する性質を持つ。

3. 星間雲と高エネルギー放射との強い相関

ここで重要なのは、高エネルギー放射と星間物質の緊密な関係である。星間物質の質量は主にエネルギーの低い粒子が担っており、高エネルギー天文学の主要な研究対象ではなかった。そのため、高エネルギー天文学の論文では、「星間物質は密度 1 cm^{-3} の一様な水素原子ガス」と大雑把に仮定されることが多かった [14]。しかし、このような単純な仮定では、高エネルギー放射における星間物質の役割は理解できない。中性水素原子ガスは熱

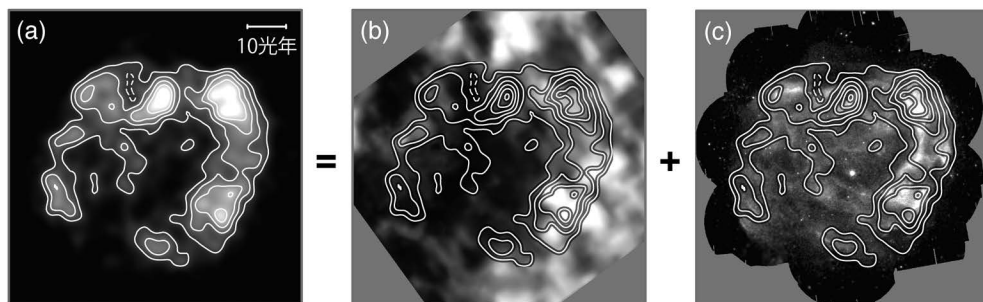


図3 RXJ1713における (a) H.E.S.S. ガンマ線 [8], (b) 星間陽子 [9, 10], (c) XMM-Newton X線 [11] の空間分布。等高線はガンマ線分布を表す。星間陽子は、水素ガス中の分子・原子成分の総和を柱密度に換算して表示している。分子成分はサブミリ波望遠鏡NANTENによる一酸化炭素分子 (CO) 輝線観測、原子成分はATCA & Parkes 21 cm 線 (Hi) 観測により、それぞれ定量した。

的不安定性によって、粒状のCNM (cold neutral medium) と広がったWNM (warm neutral medium) に分かれる [15]. CNMは、0.1 pcスケールの低温高密度ガス塊である。WNMは、より高温の低密度ガスであり、CNMの間の空間を広く満たす。このように現実的なガス分布はきわめて非一様であり、高密度部分の密度が 1000 cm^{-3} をこえることも珍しくない。「低密度で一樣」という仮定は全く成り立たないのである。年齢1000–2000年程度のコア崩壊型SNRの場合、宇宙線陽子は星間陽子と衝突して陽子起源ガンマ線をつくる。一方、宇宙線電子は密度の高い星間陽子雲中には侵入できずそれを避けて分布し、シンクロトロンX線を放射する。現実の密度分布は、星間ガスと宇宙線との相互作用において本質的な役割を果たす。特に陽子起源ガンマ線発生において、陽子衝突の標的である星間陽子の役割は本質的である。

3.1 星間雲とX線・ガンマ線放射との関係

星間雲の種類とX線・ガンマ線の関係は以下のように整理できる。

分子雲コア：密度 1000 cm^{-3} 以上の分子雲コアは、CNMの濃い部分で形成される。SNRの衝撃波面は分子雲コアと衝突して乱流状態をつくり、乱流運動は磁場を増幅する。増幅された磁場によって、分子雲コア表面のサブpcスケールで宇宙線電子によるシンクロトロンX線が増光する。同時に分子雲コア中では、陽子–陽子衝突によってガンマ線が放射される。

中性水素原子ガス：SNR全体では、広い密度範囲 ($10\text{--}1000 \text{ cm}^{-3}$) の星間陽子が宇宙線陽子と相互作用して陽子起源ガンマ線を放射する。これらの星間陽子は、水素原子と分子雲コア中心部以外の水素分子であり、後述するように陽子起源ガンマ線放射のほぼ50%を担う。ここで、宇宙線陽子のエネルギー W_p は、陽子起源ガンマ線光度に比例し、星間陽子密度に反比例する [7].

3.2 COとH α の観測が必須

ガンマ線観測の分解能は数分角であることが

ら、比較研究のためには星間陽子の観測も同程度の分解能が必要である。また、SNRの見かけの大きさは度のオーダーであり、広い視野が要求される。水素分子とよく共存するCO分子の輝線によって、水素分子は定量される。NANTENの分解能1.3–2.6分角 (CO遷移の波長2.6 mmと1.3 mmにおいて) と広視野性は、ガンマ線との比較によく適している。また、観測可能なSNRの多くは銀河系中心方向・マゼラン雲にあるため、南半球のチリに設置されたNANTENは有利である。CO分子スペクトルは、一般に星形成領域では強いがSNRでは弱く、高い感度が必要になる。この意味で、NANTENが標高5000 mにあり、感度が高いことも有利である。水素原子H α もまた、ガンマ線発生に寄与する星間陽子である。COと同程度の分解能を達成するためにはATCAなどのH α 21 cm線の干渉計観測が必須である。NANTENのCO観測とATCAのH α 観測を統合して初めて、ガンマ線と比較できる星間陽子の完全な分布が得られる [10].

3.3 星間陽子観測によるSNR研究史

ガンマ線SNRの星間陽子観測としては、まず2003年、NANTENによってRXJ1713方向の分子雲の全体像が明らかになった [6]. その結果、高密度分子雲コアがシンクロトロンX線のピーク方向にpcスケールで集中し、分子雲全体はシェル状に広がるX線分布を10 pcスケールで取り囲むことが明らかになった。注目されたのは、分子雲コアがコンパクトであり、その周囲でシンクロトロン放射が著しく増光していることであった。この増光は、衝撃波と分子雲との相互作用を強く示唆する。この結果を受けて2012年、磁気流体力学数値シミュレーションが行われ、「分子雲コアに入射するSNR衝撃波面との相互作用」(shock cloud interaction) による磁場増幅が理論的に示された [16]. 衝撃波面は分子雲コアと衝突すると歪み、コアの周りは乱流状になる。乱流によって増幅された磁場によって、シンクロトロンX線

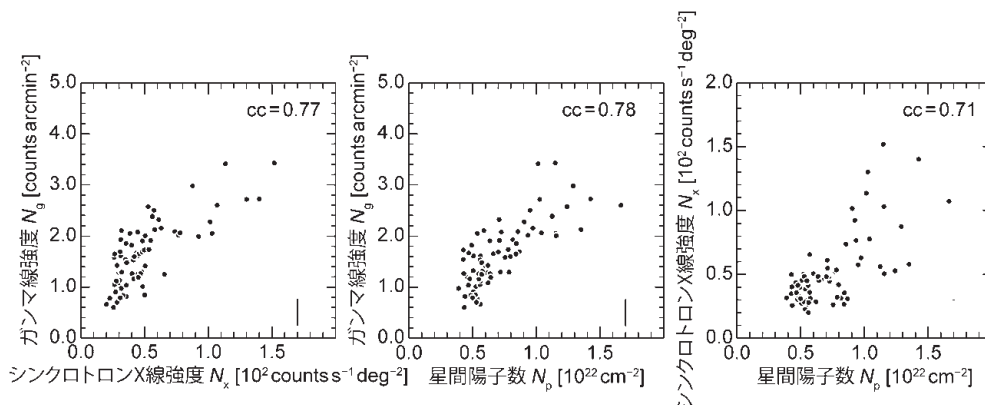


図4 RXJ1713における3つパラメータ（ガンマ線カウント，X線カウント，星間陽子柱密度）の相関図 [11]. 図中右上のccは相関係数を表す（一般に値が1に近いほど，2つのパラメータの相関が強い）. 各データ点の典型的な誤差範囲は図右下に示した.

が増光する. この増光は，同時にSNRに付随する星間雲を特定する強い証拠となる [17–19].

3.4 星間陽子密度に依存するガンマ線スペクトル：フェルミ衛星の結果

もうひとつ重要なのは，陽子起源ガンマ線スペクトルが星間陽子の「密度分布」に強く影響されることである. 初期のガンマ線スペクトルについての理論的予想は，一様な低密度ガスを仮定していた. この仮定をおくと，電子起源ガンマ線は「硬い（高エネルギーガンマ線の割合が大きい）」スペクトルを示し，陽子起源ガンマ線は「軟らかい」スペクトルを示す. 2011年，フェルミ衛星によってRXJ1713のGeV–TeV領域のガンマ線スペクトルが「硬い」ことが明らかになり，この結果は当初電子起源を支持すると解釈された [20]. しかし，NANTENによればRXJ1713に付随する星間陽子は高密度分子雲コアを含み，宇宙線と星間陽子の相互作用は宇宙線陽子のエネルギーと星間陽子の密度に強く依存する. 高エネルギー宇宙線陽子は分子雲コア全体に浸透するが，低エネ

ギー宇宙線陽子はコアの高密度部には侵入できない. このために，ガンマ線スペクトルは高エネルギー側が相対的に盛り上がり，低エネルギー側のガンマ線強度は相対的に減少する. その結果，陽子起源ガンマ線もまた「硬い」スペクトルを示す [16]. つまり，硬いスペクトルは電子起源の証拠にはならない. さらに踏み込んだ解析を行わないと，ガンマ線の起源は特定できないのである.

4. 新たな解析手法：宇宙線陽子の定量

我々は，この問題を解決するためには，ガンマ線，シンクロトロンX線，そして星間陽子の3者を統合した定量的解析が必要であると考え，新たな解析手法を模索した [11]. 出発点は，各パラメータの相関関係であった.

図4にRXJ1713における3つの相関図を示した. これらは，この問題の独立な3パラメータ，ガンマ線，X線，星間陽子のカウント数，または，個数の間の相関図である^{*1}. いずれも正の相関が有

^{*1} 読者は，星間陽子とX線の分布は衝撃波–星間雲相互作用（3.1節参照）のために0.1 pcスケールで相補的であり，相関よりはむしろ反相関を示すはず，と思われるかもしれない. これは，図4の3パラメータの分布がガンマ線の空間分解能約1 pcでスムージングされているためであり，0.1 pcスケールの反相関はここでは十分にならされている. また，磁気流体力学シミュレーションによると，磁場は衝撃波星間雲相互作用によってサブpcスケールで増幅されるが [16]，磁場が強く増幅される体積は本研究の分解能に比べると無視できる程度である.

意である．ここから示唆されるのは、ガンマ線は星間陽子数に比例して増加すると同時に、X線を放射する宇宙線電子数にも比例して増加することである．つまり、ガンマ線のふるまいは、2つの放射機構のどちらか一つではなく、むしろ電子と陽子の両方に依存するとみるべきではないか、という描像が浮かび上がる．

より詳しくみると、さらにいくつかの物理量がこれらの相関に関係している．まず、陽子-陽子衝突のガンマ線強度は、衝突断面積に加えて宇宙線陽子のエネルギー密度と星間陽子数の積に比例する．ここでは、宇宙線陽子のエネルギー密度は一樣と仮定することとし、星間陽子数は電波観測から導かれたものを使う．また、逆コンプトン散乱によるガンマ線強度は、散乱断面積に加えて宇宙線電子密度と宇宙背景放射のエネルギー密度との積に比例する．さらに宇宙線電子密度は、シンクロトロンX線強度を(磁場)²で割ったものに比例する．宇宙背景放射密度は一定であり、磁場もSNR内で一樣と仮定すると、諸係数はすべて定数とみなすことができる(磁場は分子雲コアの表面で増加するが、その体積はここでの空間分解能に比べて十分小さい)．これらの仮定を置くと、ガンマ線強度 N_g は、星間陽子数 N_p とシンクロトロンX線強度 N_x の線型結合

$$N_g = aN_p + bN_x \quad (1)$$

で表される [11]．式(1)の中で独立変数は N_p と N_x の二つであり、観測量 N_p , N_x , N_g を用いて、ベストフィットの係数 a , b を求めることになる．式(1)は3次元空間における平面を表すので、観測で得られたデータ点(N_p , N_x , N_g)の張る空間において、ベストフィット平面を求めるという問題に帰着する．十分なデータ点数がないとよい

精度で平面を求めることはできない．これは空間的な分解能に対する制約を与える．RXJ1713全体の場合、X線と星間陽子の分解能は高く、ガンマ線の空間分解能(距離1 kpcにおいて1.4 pc)によって一つのデータ点のピクセルサイズが制限される．試行するとほぼ30-50点程度のピクセルがあれば、平面は十分な精度で求められることがわかる．

フィットの結果を図5に示す．5%程度の精度で式(1)の係数 a , b が求められ、平面が決定される^{*2}．各点での陽子起源ガンマ線と電子起源ガンマ線はそれぞれ、式(1)右辺の第1項と第2項で与えられる．この結果、二つのガンマ線強度は、SNR全体でほぼ6:4であることがわかり、それぞれの空間分布が図6のように求められた．X線の強い場所で電子起源が優勢であり、それ以外で陽子起源が優勢であるという、自然な傾向が見て取れる．宇宙線陽子の全エネルギー W_p は

$$W_p = \text{const} \times (\text{ガンマ線光度}) / (\text{星間陽子密度}) \quad (2)$$

で与えられるので、 $W_p = (0.5-1.4) \times 10^{48}$ ergと計算される．また、宇宙線電子の全エネルギーは陽子よりも2桁程度小さく 10^{46} erg程度と推定され、もちろん全エネルギーとしては無視できる．陽子は宇宙線エネルギーの主要部分を担い、電子はそれよりも小さいが、両者のガンマ線強度は同程度である．言い換えれば、宇宙線電子は宇宙線陽子よりも2桁ほど高い放射能率を持ち、このことがガンマ線起源の分離を難しくしていた．電子起源ガンマ線は精度よく求められるが、宇宙線電子のエネルギー W_e は測定のない磁場の値に依存するため、 W_p のようには精度よく決められない．

以上の解析は、RXJ0852にも適用され、定量

^{*2} この解析では、宇宙線陽子密度と磁場が一樣と仮定しているが、厳密にはこれらは場所によって変動する可能性はある． a , b の変動が多少大きい場合でも、データのピクセル数が十分あれば、SNRをいくつかの部分に分けて平面をフィットすることも可能であり、必要に応じて a , b の小幅な空間的変動量を推定することができる．実際、その後のRXJ0852の解析では3つの平面に分けたフィッティングが行われ、 a , b の空間的変動が推定されている [21]．

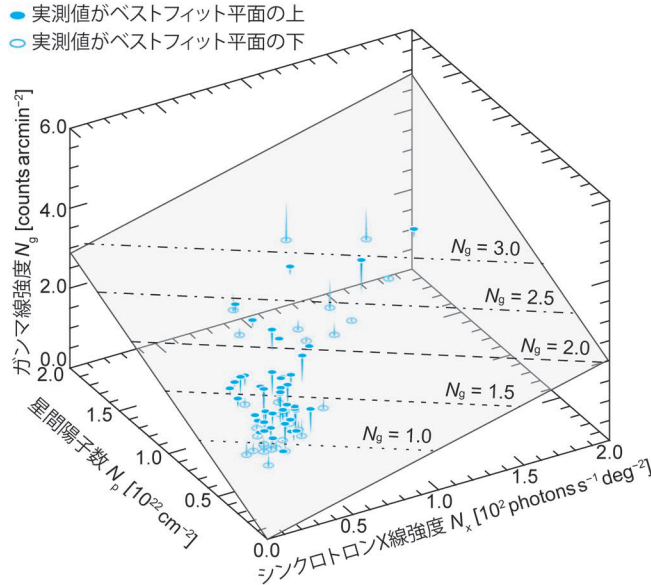


図5 式 (1) によって導かれたRXJ1713のベストフィット平面（星間陽子数-非熱的X線カウント-TeVガンマ線カウントの張る3次元空間内）[11]. 小円盤は観測データ点の位置を示し、塗りつぶされた物（青色）は平面の上（測定値 > フィッティングによる予測値）、白抜きは平面の下に位置する（測定値 < フィッティングによる予測値）。各データ点と平面の間は、鉛直方向の直線で結ばれている。ベストフィット平面上の点線は、それぞれ $N_g = 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0$ counts arcmin⁻²の等値線を示す。

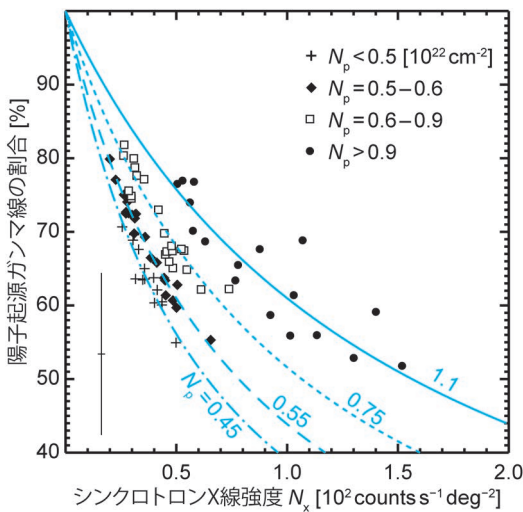


図6 RXJ1713における陽子起源ガンマ線の割合の空間分布 [11]. 星間陽子数（柱密度） N_p の範囲による変動を示した。曲線は式 (1) による。

的にも矛盾のない結果が得られている [21]. こうして、陽子起源と電子起源のガンマ線カウント数は、両SNRともおおむね同程度であることが確立された。

今後、本解析は他のSNRに適用すべきであるが、2025年初頭時点ではガンマ線の統計および角度分解能が十分ではなく、有意な結果が得られる段階にはない。他の有望なSNRとしてはRCW 86, HESS J1731-347, SN1006他がある [22-24]. 今後CTAの観測が実現されれば、さらに多くのSNRが視野に入ってくることは疑問の余地がない。

本節の最後に、銀河系の宇宙線全体へのSNRの寄与について吟味しよう。通常、SNR 1個について 10^{50} ergの宇宙線加速があれば、銀河系の宇宙線を供給できると言われる。上で求めた W_p はこれよりも2桁ほど小さい。この違いには、2つの原因があると思われる。ひとつは、陽子-陽子

反応の標的となる星間物質の粒状性である。RXJ1713の場合、陽子を含む分子雲コアの体積占有率は10%程度であり、宇宙線陽子の内、陽子-陽子衝突に寄与するのは10%である。ちなみに、分子雲コアの周囲に存在した水素ガスは、すでに親星の星風によって吹き払われているとみられる。さらに、二つ目として宇宙線はSNR内から相当量がSNRから「逃亡する」と考えられる。例えば、SNR W44では内部の宇宙線よりも1桁以上大きいエネルギーが逃亡したとみられる [25]。これらを考慮すると 10^{48} erg の2桁上のレベル 10^{50} erg の宇宙線加速が起きていることは、十分にありうる。これが現在、我々に許された宇宙線の定量の限界であり、SNRが主な宇宙線加速天体である、という考えは妥当であると言える。

5. ガンマ線SNRの進化像

ここで取り上げたRXJ1713とRXJ0852は、X線がシンクロトロン放射であり、TeV領域のガン

マ線が全天のSNRの中で最も強く、年齢（爆発してからの経過時間）は1000–2000年と若い。一方で、ガンマ線で明るいSNRの中には、年齢が1万年以上の天体も多く存在する。そのような天体も含めて、SNRからのガンマ線が主に陽子起源であるとの仮定のもと、10数個のSNRについて W_p を整理すると、 W_p の時間発展の様子がみえてきた（図7） [24, 26–28]。

年齢数100年のごく若いSNRでは、十分に宇宙線加速が進行していないためにエネルギーが小さくガンマ線強度も弱い。1000–2000年で加速が進行し、時間と共に被加速宇宙線陽子が周辺ISMに浸透することでガンマ線光度が上昇し、やがて W_p はピークに達する。年齢1万年をこえるとガンマ線エネルギーは減少し、低エネルギー宇宙線が蓄積される傾向が示唆されるが、その強度は小さくない。さらに時間が経過すると、宇宙線の逃亡によって W_p は減少する。このようなふるまいは、宇宙線加速における進化の傾向を示唆する。

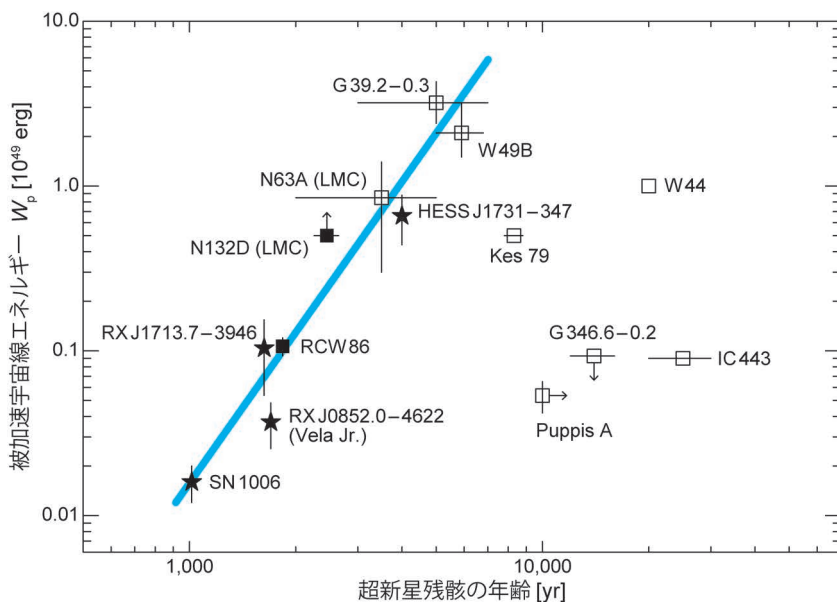


図7 14個のSNRに関する $[W_p$ -年齢] 関係 [24, 26–28]。青い直線は、年齢6000年程度までのSNRについての最小二乗フィット結果を表す。また、黒塗りと白抜きは、それぞれTeVガンマ線またはGeVガンマ線で明るいことを示す。星形のシンボルは陽子起源と電子起源の割合を考慮してガンマ線光度を計算した天体であり、四角のシンボルは陽子起源が卓越するとして定量した天体である。

ここで、星間物質とX線のシェル状空間分布の起源にふれておこう。RXJ1713はコア崩壊型SNRであり、親星（O型星、または早期B型星）は母体星間雲から形成され、400万年以上を経過して超新星に進化する。この大質量星は強い星風を伴い、母体雲を含む周囲の星間物質（分子ガス・原子ガス）を 10 km s^{-1} 程度に加速し、100万年程度かけて半径 10 pc 程度のシェル状分布をつくる。この過程では高密度の分子雲コアは吹き飛ばされないが、その周囲の低密度ガスは加速されて一掃される。SNR以前の星風でガスがシェル状になる過程は、星風のみが効いている「ペガサスループ」などで確認されている [29]。

RXJ1713のシェルの中性ガス質量は 10^4 太陽質量程度である。このようなシェル状分布がつけられたあと、RXJ1713の親星が1600年前に超新星となり、衝撃波が数 1000 km s^{-1} でシェル内をほぼ自由に膨張する。衝撃波面では宇宙線が加速され、宇宙線電子はシンクロトロンX線を放射するシェル状分布をつくる。この時間尺度は親星形成時間の千分の1であり、この短期間に衝撃波と星間雲の相互作用によって増幅された磁場でシンクロトロンX線がさらに増光し、シェル状X線分布を強調する。宇宙線電子は逆コンプトン散乱によって電子起源ガンマ線も放射し、同時に、宇宙線陽子が分子雲コアに照射して陽子起源ガンマ線もシェル状に放射される。つまり、ガンマ線とX線のシェル状分布は、星風のつくった星間陽子のシェル状分布が起源である。以上の過程は、コア崩壊型SNRに普遍的にみられるものと推定され、親星の母体星間雲の一部とみられる大質量の星間物質の付随によって陽子起源ガンマ線が増光する。Type Ia SNRでは、このような質量の大きな星間物質は存在しない場合もあり、陽子起源ガンマ線が卓越しない場合があってもおかしくない [24]。

6. 今後の展開

以上、ガンマ線によるSNRの宇宙線起源の解析について紹介してきた。今後の展開において次期ガンマ線望遠鏡であるCTAの飛躍的な高性能に待つところ大である。また、ニュートリノを用いた発展研究の可能性、大質量星団他による宇宙線加速の可能性なども議論されており、さらに周到な宇宙線理解のために、以下の諸点が課題である。

6.1 ニュートリノによる宇宙線研究

パイ中間子をつくる陽子-陽子衝突には、パイゼロのほかに2つの分枝（荷電 $[+/-]$ パイ中間子の発生）があり、これらは高エネルギーのニュートリノをつくる。このニュートリノが空間的に分解して検出できれば、ガンマ線とは独立に宇宙線陽子を定量する可能性がある [30]。ただし、陽子-陽子衝突における標的陽子は本解析の星間陽子と同等である。つまり、観測されたニュートリノ強度を使う場合も、電波観測によって求められた星間陽子密度を用いて宇宙線陽子エネルギーを推定することになり、星間陽子の体積占有率、逃亡宇宙線の問題などの制約はガンマ線の場合と同様である。ニュートリノでは、電子起源を除く必要はないことが利点である。この意味で、ニュートリノ観測は将来の独立な検証実験として重要とみられる。

6.2 若い星団における宇宙線加速の可能性

フェルミ衛星によって広域ガンマ線観測が進行し、多数の大規模星団がGeVガンマ線源であることが明らかになってきた [31–33]。顕著な例として、帆座のRCW 38, RCW 34, RCW 32等がある。これらの星団質量は 10^3 – 10^4 太陽質量であり、年齢は200万年以下と若いものが多く、SNRはまだ生まれていない。粒子加速機構としては数 1000 km s^{-1} の星風による衝撃波面が加速場所として働いていることが考えられる。これらの観測によると、ガンマ線エネルギーはほぼGeV帯以下であり、ガンマ線強度もSNRよりも一桁程度

弱い。現状では、これらの星団がSNRに匹敵する宇宙線源である可能性は高くないとみられるが、今後の展開は宇宙線加速の全体像の理解という意味で注目される。

6.3 PeVatron等の可能性

既知のSNRの最高エネルギーは、 10^{14} eV程度であり、ニーのエネルギーには達していない。このギャップを埋めるさらにエネルギーの高い加速源PeVatronがある可能性が指摘されてきた。本稿で述べたSNRはわずか2個であり、このエネルギーギャップは統計の限界と解釈可能である。最近、LHAASOによる超高エネルギーガンマ線源候補が銀河系に10個程度発見され（SNR G106.3+2.7, W51C, HESS J1641-463など）注目されるが、対応天体の実態は未解明である [34]。このほかに、マイクロクエーサー候補天体「ウェスターlund 2」もガンマ線源であることが知られており [35]、SNR以外の候補天体の把握という意味で、今後の観測の展開が注目される。

謝 辞

本研究の共同研究者として、特に以下の各氏の寄与に感謝の意を表したい：井上剛志，早川貴敬，山根悠望子，G. Rowell，立原研悟。本研究はJSPS 科 研 費 24224005, 15H05694, 16K17664, 19H05075, 19K14758, 20H01944, 21H01136, 24H00246の助成を受けたものである。

参 考 文 献

- [1] Longair, M. S., 2011, High Energy Astrophysics, (Cambridge University Press, Cambridge)
- [2] Aharonian, F. A., & Akerlof, C. W., 1997, Ann. Rev. Nucle. Particle Sci., 47, 273
- [3] Aharonian, F., et al., 2006, A&A, 449, 223
- [4] Koyama, K., et al., 1997, PASJ, 49, L7
- [5] Enomoto, R., et al., 2002, Nature, 416, 823
- [6] Fukui, Y., et al., 2003, PASJ, 55, L61
- [7] Aharonian, F. A., et al., 2004, Nature, 432, 75
- [8] H. E. S. S. Collaboration, et al., 2018, A&A, 612, A6
- [9] Moriguchi, Y., et al., 2005, ApJ, 631, 947
- [10] Fukui, Y., et al., 2012, ApJ, 746, 82
- [11] Fukui, Y., et al., 2021, ApJ, 915, 84
- [12] Uchiyama, Y., et al., 2002, PASJ, 54, L73
- [13] Fukui, Y., et al., 2017, ApJ, 850, 71
- [14] Morlino, G., et al., 2009, MNRAS, 392, 240
- [15] Field, G. B., 1965, ApJ, 142, 531
- [16] Inoue, T., et al., 2012, ApJ, 744, 71
- [17] Sano, H., et al., 2010, ApJ, 724, 59
- [18] Sano, H., et al., 2013, ApJ, 778, 59
- [19] Sano, H., et al., 2020, ApJ, 904, L24
- [20] Abdo, A. A., et al., 2011, ApJ, 734, 28
- [21] Fukui, Y., et al., 2024, ApJ, 961, 162
- [22] Fukuda, T., et al., 2014, ApJ, 788, 94
- [23] Sano, H., et al., 2019, ApJ, 876, 37
- [24] Sano, H., et al., 2022, ApJ, 933, 157
- [25] Uchiyama, Y., et al., 2010, ApJ, 723, L122
- [26] Sano, H., et al., 2021a, ApJ, 919, 123
- [27] Sano, H., et al., 2021b, ApJ, 923, 15
- [28] Aruga, M., et al., 2022, ApJ, 938, 94
- [29] Yamamoto, H., et al., 2003, ApJ, 592, 217
- [30] Cristofari, P., et al., 2021, MNRAS, 508, 2204
- [31] Peron, G., et al., 2024a, Nat. Astron., 8, 530
- [32] Peron, G., et al., 2024b, ApJ, 972, L22
- [33] Aharonian, F., et al., 2024, ApJ, 970, L21
- [34] Amenomori, M., et al., 2021, Phys. Rev. Lett., 126, 141101
- [35] Aharonian, F., et al., 2007, A&A, 467, 1075

Origin of Cosmic Rays in the Galaxy

Yasuo FUKUI^{1,2} and Hidetoshi SANO²

¹Department of Physics, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa, Nagoya 464-8602, Japan

²Faculty of Engineering, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193, Japan

Abstract: We have applied the method to quantify the hadronic and leptonic gamma-ray components to the two TeV gamma-ray core-collapse SNRs RXJ1713 and RXJ0852. The gamma rays were expressed by the hybrid scheme which combines the hadronic and leptonic gamma rays by using three quantities, TeV gamma-rays, nonthermal X-rays, and the interstellar protons, and the hadronic and leptonic gamma-ray components were derived to be $\sim 1:1$. The present results quantified the two gamma-ray components for the first time, where the inclusion of the interstellar protons is essential in the gamma-ray production. The cosmic ray energy density was derived to be $\sim 10^{48}$ erg in the two SNRs, and lend support for the SNRs as the cosmic ray acceleration sites in the Galaxy by considering the highly clumped distribution of the target interstellar protons and the escaping of cosmic rays.

ALMA 較正用天体の自動解析ツールの開発とその科学的応用

成田佳奈香¹・西田明正²

〈^{1,2} 東京大学大学院理学系研究科 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

e-mail: ¹naritakn@gcc.u-tokyo.ac.jp, ²nishida-akimasa990@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計（ALMA）は運用開始から10年が経過し、観測データが日々蓄積されている。新たな観測提案に加え、膨大なアーカイブデータを有効活用することが科学的成果を最大限に引き出すうえで重要である。本記事前半では、ALMAで較正用天体として観測されているクエーサーのデータダウンロードから解析までの自動化を紹介する。後半では、較正用天体を用いたサイエンスの一例として、クエーサーの連続光を背景光源とした、銀河系内の分子雲の吸収線解析を紹介し、分子雲の化学的多様性や構造について得られた知見を紹介する。

1. はじめに

観測開始から10年を迎えたALMAのアーカイブデータサイトでは、PIデータ占有期間を経たサイエンスターゲット天体のデータのみならず、較正用天体の観測データも公開されている。較正用天体とは、大気の影響による電波信号の振幅や位相の乱れを補正するために観測される天体で、サイエンスターゲット天体の近くに位置する別の天体である。較正用天体として多く選ばれているのが、クエーサーと呼ばれる天体である。

このクエーサーの連続光を背景に、手前の分子ガスが影絵（吸収線）として図1のように観測される。分子吸収線系として観測されるような希薄な分子ガスでは、水素分子との衝突励起が十分に

吸収線系においては、現在の宇宙背景放射（CMB）温度を仮定することで、複数の回転遷移を観測していなくとも分子の柱密度を決定することができる。宇宙論的遠方天体の場合は、逆に複数の吸収線から励起温度を求めることで、その赤方偏移のCMB温度を測定できる。分子吸収線系は物理量を高い精度で測定できる特長があり、分子雲の形成における初期条件を制限したり、輝線では捉えにくい宇宙論的距離に存在する希薄な分子ガスの物理的・化学的進化を探ったりできるなどの大きな可能性を秘めている。しかしながら、既知の吸収線系は限られており、較正用天体データも用いた大規模な探査が求められている。

2. 自動解析ツールの開発

2.1 概要と開発の経緯—なぜ自動化／パッケージ化が必要か？

本来サイエンスターゲットの較正に用いられる較正用天体に吸収線があると、サイエンスターゲットの較正精度を劣化させてしまう。そのため、観測所から配布されるスクリプトを用いたキャリブレーションでは、較正用天体の吸収線は

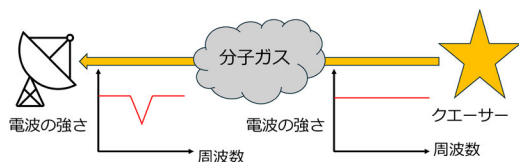


図1 吸収線観測の模式図

マスクされる。しかし今回紹介する解析では、まさしくこの吸収線をターゲットとするため、配布スクリプトは使用できず、マニュアルでスクリプトを作成する必要がある。さらに、較正用天体データはPIのサイエンスに合わせた様々な観測モードや観測時期で取得されている。単に吸収線をマスクしないだけでなく、それらに対応する解析コードを作成する必要がある。これらの要件を満たして大規模な探索を行うには、データのダウンロードから適切なキャリブレーションまでを自動で行うツールの開発が必要である。

このような背景のもと、吉村勇紀氏によって自動解析コードの作成が行われた。それを用いて2019年から2020年にかけて、当時のアーカイブデータにある702個の較正用のクエーサーの2000個を超えるデータに対して大規模な探索が行われた[1]。

図2は、ALMAで観測されたデータに対する一般的な処理と、吉村氏により開発されたツールによる自動化の概要図である。観測データを解析するためには、先んじて生データに対して較正を行う必要がある。通常であれば、配布される較正用スクリプトを実行するだけでよい。しかし、今回は吸収線をマスクしない較正用スクリプトが必要であるため、これを作成する必要がある。吉村氏のツールでは、生データのダウンロードから、較正

用スクリプトの作成とその実行までを自動化した。

吉村氏による開発から年数が経過し、本ツールは解析ソフトウェアの新しいバージョンに対応しなくなってしまった。また、ソースコードを読み解く中で、機能を改善・追加できる箇所や不要な箇所も見つかった。さらに、インストールの方法が煩雑という問題点も浮かび上がった。

そこで今回の開発では、

- ・現在の解析ソフトウェアへの対応
- ・機能の整理・追加
- ・ツールのインストールの簡易化

を目標に、コード全体の再設計から行った。

2.2 ツールの開発

吉村氏が作成した吸収線の解析のスクリプトの素案[2]を元にバグとりを行い、誰もが解析環境を手に入れられるようにPythonのパッケージ化を行なった。以下では、自動化ツールの開発（プログラミング）の様子を述べる。開発は図3のようなサイクルを繰り返すことで行われた。

Step 1：目標の明確化

Step 1として、ツールが行うべき操作を明確化した。本ツールの場合、最終目標は「較正を自動で行う」ことである。その実現のため、最初に「データをインポートする」必要があり、その次に「較正用のスクリプトを生成する」という操作が必要である。こういったことを明確にすること

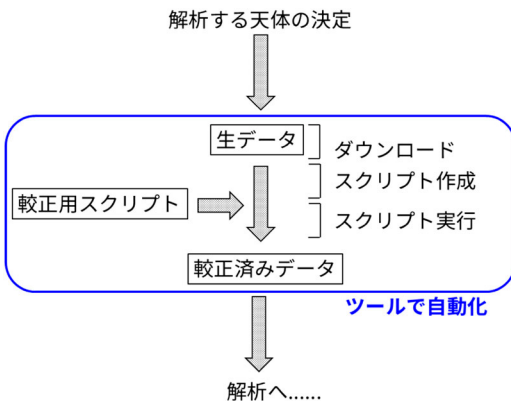


図2 ALMAデータの解析を始めるまで

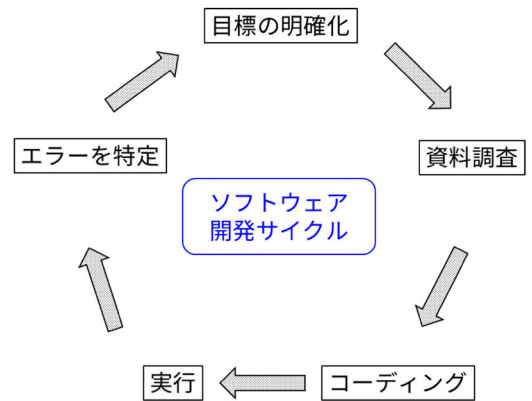


図3 ツール開発のサイクル

吸収線を探査・解析した [5].

観測結果

ダウンロードしたアーカイブデータを解析することにより, J1851+0035 方向の視線上で, 14 種 (CO , ^{13}CO , HCO^+ , H^{13}CO^+ , HCO , C_2H , $c\text{-C}_3\text{H}$, $c\text{-C}_3\text{H}_2$, CN , HCN , HNC , CS , SO , SiO) の分子が検出され, そのうちの 5 種 (HCO , C_2H , $c\text{-C}_3\text{H}$, CN , HCN) には顕著な超微細構造が見られた. ALMA で得られた代表的な吸収線プロファイル

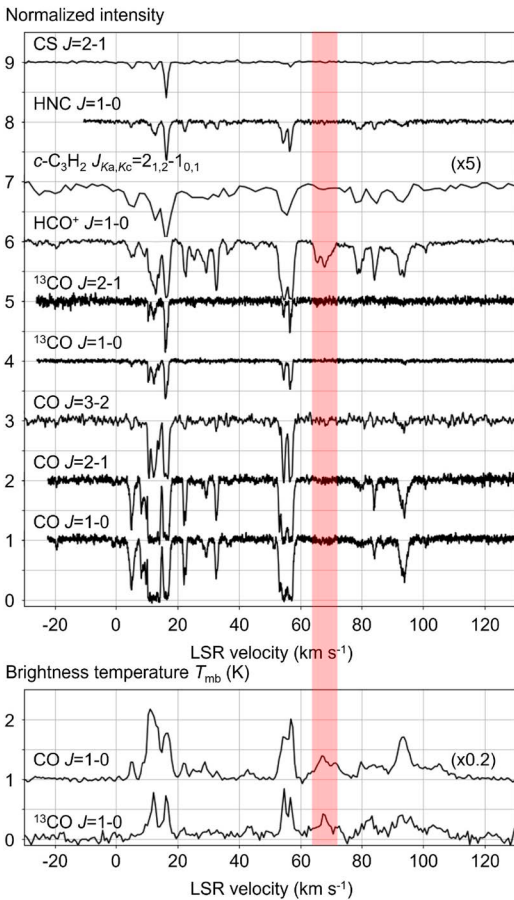


図4 ALMA で検出された吸収線のプロファイル (上パネル) と NRO 45 m での CO 輝線のプロファイル (下パネル). 薄く塗り潰された領域は, ALMA では CO 吸収線が未検出だが, NRO 45 m では CO 輝線が観測されている. [5] より転載.

と, 同じ領域を国立天文台 野辺山 45 m 電波望遠鏡 (NRO 45 m) で観測した輝線と吸収線プロファイルでは明らかな違いが見られる. 例えば, 図4の薄く塗りつぶした領域 (視線速度 $\sim 70 \text{ km/s}$) のように, ALMA では CO の吸収がないにもかかわらず, NRO 45 m による輝線データでは CO の強い輝線が確認できる.

吸収線・輝線解析で見てきた分子雲の構造

吸収線と輝線プロファイルの違いは, 雲が内部構造を持っていると考えることで説明できる. 図5は吸収線と輝線の観測を比較したものである. NRO 45 m のビームサイズは 15 秒角であるのに対し, クエーサーの大きさはミリ秒角オーダーであり, 秒角以下の分解能を実現する ALMA の極めて細いペンシルビームによってクエーサーの大きさに肉薄することが可能である. 分子雲の内部に単一鏡では分解できないコンパクトな構造があり, またそれらがクエーサーの視線方向になく ALMA のペンシルビームから外れてしまう場合, 単一鏡の広いビームでは輝線として検出される一方, ALMA では吸収線が見えないという結果が説明できる. そこで, HCO^+ と CO の吸収線, CO の輝線のプロファイルを比較することにより, 拡散した分子ガスの中に分子ガス塊が浮いているような雲の構造 (図6) を提唱した.

Extream CO-poor ガスの発見

吸収線のプロファイルより, 速度成分から個々の雲を同定した. また, 分子が CMB 温度で励起

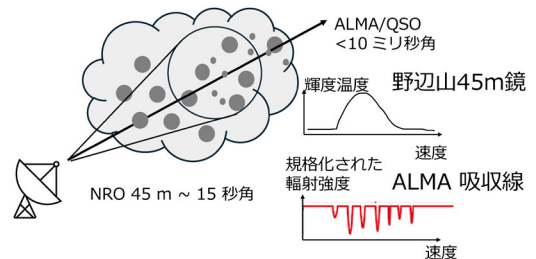


図5 ALMA での吸収線観測と NRO 45 m での輝線観測の比較図.

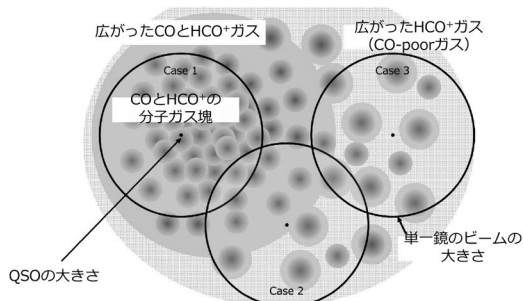


図6 我々が提唱した雲のモデル。[5]より転載。

されていると仮定すれば、複数の回転遷移で得られた吸収線や他分子の同一速度コンポーネント内で分子の光学的厚みを積分することで、柱密度を導出することが可能である。検出された分子吸収線で同定したコンポーネント毎に柱密度を導出した。その中でもHCO⁺とCOの結果について紹介する。

先行研究[6]より、diffuse cloudのような希薄な分子雲環境では、 $N(\text{HCO}^+)/N(\text{H}_2) = 3 \times 10^{-9}$ 程度の柱密度比が一般的に見出されている。この値は、星形成雲の外縁部などの低密度領域 ($< 10^3 \text{ cm}^{-3}$) における観測結果[7]とも一致する。これは、希薄な環境においてHCO⁺がH₂の良好なトレーサーであることを示している。

では、同じく水素分子ガスのトレーサーとされてきたCOとの比をとってみるとどうであろうか？結果は図7と図8の通りである。CO/HCO⁺存在比は～3桁の大きなばらつきがあり、～ 2×10^4 から～30の範囲であった。図8の左パネルから分かるようにN/HCO⁺の低い領域はCO/HCO⁺存在比が低いという傾向がみられた。

HCO⁺はCOを含む他の主要な分子種と正の相関を示していた。さらに図7と図8からわかるように、COは3桁もの柱密度の分散をもっていた。このことから、HCO⁺や他の分子種の増加というよりも、むしろCOの存在量が減少していると考えられる。

CO/HCO⁺存在比をHCO⁺の柱密度と銀河中心距離 (R_G) の関数としてプロットしたのが図8であ

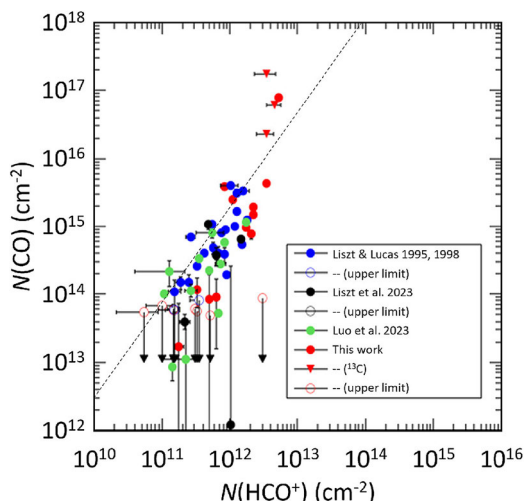


図7 H¹³CO⁺/HCO⁺の存在量比が50であると仮定して、H¹³CO⁺の柱密度から求めたHCO⁺データ点を三角マークで表す。銀河系内の吸収線の先行研究[6, 8, 9]も合わせてプロットした。[8]でフィットにより得られたべき乗則の傾きは1.4であった。[5]より転載。

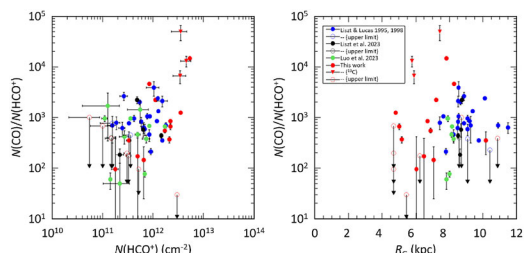


図8 HCO⁺柱密度と銀河中心距離 (R_G) を横軸にCO/HCO⁺比をプロットした。[5]より転載。

る。大きな分散を伴っているが、HCO⁺の柱密度、すなわち A_V (減光量) への依存性は見えている一方で、銀河中心距離への依存性は明らかではない。“CO-dark” (ここでは“CO-poor”と呼ぶ) 分子ガスの存在は、紫外線に照射されている環境 (e.g., [10, 11]) や希薄な環境 (e.g., [12–14]) で指摘されている。さらにこのHCO⁺に対するCOの存在量の相対的な減少は、先行研究[9, 15–17]でも指摘されているが、これらの結果では最大10分の1程度とその減少幅はあまり大きくはなかった。今回の我々の結果では、暗黒雲に対する測定 (図7

で $N(\text{CO}) \geq 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ のデータ点に対応) を加えることにより, 3桁にも及ぶCOの存在量の減少が見出された. さらに, CO/HCO^+ 存在比が HCO^+ 柱密度に依存する可能性が示された. これらの結果は, COの欠乏した希薄な分子ガス(CO-poorガス)の中に微小なCO分子塊が浮いているという我々が提唱した雲の構造モデル(図6)とも整合的である. 特に, このモデルはCO/ HCO^+ 存在比の大きな分散を自然に説明し, ALMAのペンシルビームと単一鏡の広いビームによる観測結果の違いも統一的に理解する手がかりを与える.

紙面の制約上, 論文内の全ての成果を紹介することはできなかったが, この記事を読んで興味を持たれた方は是非論文[5]を手にとってみていただきたい.

4. おわりに

この記事では, ALMAの観測データの自動較正ツールの開発について説明した. ツール開発において最大の障壁となるのはエラーの特定およびその修正である. 先にも述べた通り, 本プロジェクトにおいてもこのステップに最も時間が割かれている. しかし, そのような開発コストを鑑みても, 自動化のメリットは非常に大きい. 時間と労力を大きく取られる作業がある場合は, 自動化を検討することは有力である.

一見すると, ソフトウェア開発は天文学の研究からは離れた存在のようにも感じられる. しかし, 実際には似た思考方法や試行錯誤を経て行われる. 本投稿を通じてより多くの方に自動化の利点を感じていただけたならば幸いである.

また, ここで紹介した開発は, プロフェッショナルに取り組まれている方にとっては日曜大工のようなものであろう. お気づきになった点をご教示いただけるとありがたく存ずる(西田).

ALMAの較正用天体のデータを用いた研究について紹介をさせていただいた. 普段はサイエン

スとして解析されずに見過ごされているデータであるが, このような中にもお宝となるデータが沢山眠っていることを知っていただけたら幸いである. 今回紹介したのは手動解析で得られた結果であるが, 自動化ツールにより他の天体に対して高速で適用できると考えている. 今後の進展が楽しみである. また, 今回の自動化プロジェクトは学生のみで行われた. 一緒に取り組んでくれた西田氏には大変感謝している(成田).

謝 辞

まずは本記事の校閲をされ有益な提案をしてくださった天文月報編集委の宮本祐介さんと小山翔子さんに感謝いたします. 較正用天体を用いた吸収線の自動解析のスキプトの素案を共有していただいた吉村勇紀氏には感謝いたします. 較正用天体のデータを含め, ALMAの豊富なアーカイブデータでサイエンスを行うことができるのは, アルマ地域センター(ARC)をはじめとしてALMAに関わる全ての方々の多大なるご尽力のおかげであり, この場を借りて御礼申し上げます.

参考文献

- [1] Yoshimura, Y., 2020, Masters Thesis, The University of Tokyo
- [2] <https://github.com/astroysmr/almaqso> (2025.7.30)
- [3] <https://doi.org/10.5281/zenodo.14752251> (2025.7.30)
- [4] Ando, R., et al., 2016, PASJ, 68, 6
- [5] Narita, K., et al., 2024, ApJ, 969, 102
- [6] Liszt, H., & Gerin, M., 2023, ApJ, 943, 172
- [7] Rodríguez-Baras, M., et al., 2021, A&A, 648, A120
- [8] Liszt, H. S., & Lucas, R., 1998, A&A, 339, 561
- [9] Liszt, H., et al., 2019, A&A, 627, A95
- [10] van Dishoeck, E. F., & Black, J. H., 1988, ApJ, 334, 771
- [11] Wolfire, M. G., et al., 2010, ApJ, 716, 1191
- [12] Sonnentrucker, P., et al., 2007, ApJS, 168, 58
- [13] Sheffer, Y., et al., 2008, ApJ, 687, 1075
- [14] Liszt, H., et al., 2018, A&A, 617, A54
- [15] Lucas, R., & Liszt, H. S., 1995, eds. Winnewisser, G., & Pelz, G. C. in The Physics and Chemistry of Interstellar Molecular Clouds, 459, eds.(Springer), 120
- [16] Luo, G., et al., 2020, ApJ, 889, L4
- [17] Luo, G., et al., 2023, ApJ, 946, 91



Development of an Automatic Analysis Tool for ALMA Calibration Sources and Its Scientific Applications

Kanako NARITA and Akimasa NISHIDA

The University of Tokyo, Graduate School of Science, Department of Astronomy, 7-3-1 Hongo, Bunkyo, Tokyo 113-0033, Japan

Abstract: The Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) has been in operation for over a decade, accumulating vast observational data. In addition to proposing new observations, effectively utilizing the extensive archive data is crucial for maximizing scientific outcomes. This study presents an absorption line analysis using quasars, which are observed as calibration sources with ALMA, as background sources. In the first part, we report on developing the Python package `almaqso`, which facilitates the downloading and calibration of archive data. The second part introduces scientific research results derived from calibrated data.

英国ハートフォードシャー大学でZ-groupを始めた

Centre for Astrophysics Research, University of Hertfordshire, the United Kingdom

英国ハートフォードシャー大学（イギリス、ハットフィールド）

<https://www.herts.ac.uk/research/centres/car>

小林千晶（ハートフォードシャー大学・教授）

Z-meetingを始めます。赤方偏移の小文字 z でなく、金属量の大文字 Z 、星でも銀河でもいい、元素の組成があればなおよい。宇宙の化学進化を研究するには、近傍の星の観測と遠方の銀河の観測、両方を知ることが大切です。コアメンバーは毎回参加することを期待しますが、ここはオープンなので誰でも、今日は化学進化の話をしたいなあと思ったときに来るので構わない。ただ会議室が狭くて入れる人数に限りがあるので学生優先で。すると他の研究室からも定期的に来る人ができて、いつも10名ほど集まるようになった（写真1）。

昨秋から学生^{*1}二人とポスドク二人の、私史上最大のグループを率いている。私は東京大学で学位をとった後、ドイツ・ミュンヘンのマックス

プランク天体物理研究所と、オーストラリア国立大学にいたので、世界的にも大きな研究所ばかりにいた。そういうところの教授の下には10人もの人がいて、番頭さんがいて、階層構造になっていた。イギリスはどの大学^{*2}も教務が多く、常勤職員が比較的多く、細分化されているのだ。

ハートフォードシャー大学はロンドンの北、M25という環状高速道路のすぐ外にあるHatfieldという小さな町にある。エリザベス1世が育った絢爛豪華なハットフィールド城があり、モスキート戦闘機を作ったデ・ハビランド社があって、1952年から工学専門学校があり、1992年の法改正で大学となった。

6マイル西にある中世の町セント・オールバンズの方が歴史的で小洒落た店も多く、そこに住んでいる同僚も多い。ハートフォードシャー大学は私が赴任した2011年よりも前から天文に力を入れている。そもそもイギリスでは天文が大人気なので、天文学の最先端の研究に基づいた授業が受けられると謳い文句にしている。わが宇宙物理研究センターは国内で5番目に大きい天文学研究所で、現在スタッフ33名、ポスドク17名、学生40名（女性率は24%, 35%, 33%）。日本と比べるとスタッフの数の割に学生が少なく、ポス



写真1 2024年のクリスマス・ランチにて。

^{*1} 本記事での「学生」はすべて博士過程の学生を指す。学部生の生活は全く違う。

^{*2} 寄付金の多いいわゆるオックスブリッジ（オックスフォード大学とケンブリッジ大学の併称）は若干違う。うちは研究費の大半が学部生の授業料（約200万円/年、外国人は約300万円/年）からきていて、学部生はお客様。

ドクがもっと少ない構成になっているであろう。最近データ・サイエンス学科を新設して、イギリス国内では珍しく拡大し続けている。学部の授業の多くは物理も数学もデータサイエンスも天文屋が教えている。私も原子核物理を教えていた。今は一年生向けの惑星から宇宙論までカバーする天文学概論と、物理実験と、プログラミング基礎を担当している。

コロナ以降、研究所は変わった。flexible workingという指針が出て、毎日出勤することを要求されない。会議もセミナーも原則ハイブリッド。遠方から週に一度程度来るほぼリモートな学生もいる。私自身も大学から60マイル離れたオックスフォードに住んでいるし、two-body/three-body問題^{*3}を抱える多くのスタッフにとってもflexible workingは都合がよかった。が、当然予想されるように学生へのダメージは大きい。学生同士の日常会話から学ぶことが少なくなり、小さな技術的な問題に時間をかけ、知識の幅が狭くなった。それでいてプレゼン技術はあがっていて、カラフルでキャッチーなスライドで流暢に語るが、質疑になると理解の浅さが露呈する。

そこでグループ・ミーティングである。研究所全体のセミナーが週に2回、銀河や星など分野別の会合も隔週であり、私は一対一のミーティングも週一でやっているのだが、それに加えて毎週1時間。同じ興味をもつグループ内で研究の過程を共有し、質問しあい、学生はポスドクから学び、互いにやる気があがるように。グループの長である私は、基本励ましモードで、足りない知識があればその場でさっと教えたり、誰と誰が後で個別に話をするように指示したりする。自分の主著者論文や自分で作った図を、ちょいちょい出すことも大事、年をとると人を使って成果をあげる

人も多くなるが。Set an example—規範となれ、と自分に課している。

私の今いる二人の学生DynaとAliceはどちらも女性、真面目で熱心で、私の銀河シミュレーション・コードに手を加え、自分で走らせ解析している。イギリスでは、博士過程に誰でも行けるものではない。ドクターになれば呼び名が変わるし、研究に残らなくても給料があがるので、みなキャリアのためにやってくる。基本、給料^{*4}が出るものなので、厳しい選抜がある。指導教官がプロジェクトをオファーし、面接後の順位と学生本人の希望と合わせて委員会が決める。国からの資金で国内学生が年に数名、大学からの資金でヨーロッパ含む外国人学生が数名、合格率は10-20%。イギリスでは修士はあってもあまり意味がなく、3年半で博士号を取らせないといけないので、博士過程の初日からやることが決まっている状態で、指導教官が忙しい。

今いるポスドクFedericoとSouradeepはたまたま観測家で、理論の理解も深く、ものすごく優秀で仕事が早いので、学生にいい影響を与えていると思う。イギリスのポスドクは、これまたプロジェクトが明確に決まっている国からの資金のものと、自由に研究できる大学のフェローシップとがある。合格率は3-10%。年に複数の主著者論文があり、引用数も多く、面接の出来もよくないと受からない狭き門である。日本の学振に相当するScience and Technology Facilities Council (STFC)、天文学会に相当するRoyal Astronomical Society (RAS)、学術会議に相当するはずのRoyal Societyなど外部資金のフェローシップは競争がさらに厳しい。誰でも応募できるものでなく、ホストの大学での一次選抜があり、獲得すると常勤職につながる可能性がぐぐっとあがる。あとは

^{*3} 基本共働きなので、夫婦 (two-body) が同じ町で職を得る可能性は低い。同じ国であればまだよい。子供がいると多体問題 (three-body/N-body) になる。

^{*4} 4 stipend という、約370万円/年、非課税、返還なし。職歴を積んだ後、夢を叶えたいと自費で博士課程に申し込み、指導教官が受け入れるケースも稀にある。

European Research Council (ERC), Brexit (イギリスの欧州離脱) 後も継続してアクセスできることになった。書類は多いが金額が大きいので、当たれば長者になれる。

うちの大学では、EDI^{*5}推進のため、人事委員の40%を女性にするという指針があり、女性率はすべての研究職のあらゆる選抜過程でモニターされる。それでも現在の女性率は前述のようにまだ足りない。会議の女性率が3割を超えると発言がしやすくなるといわれている。比較として、私が代表をしているイギリスでの宇宙核物理の研究ネットワーク BRIDGE^{*6}の女性率は44%、各種イベントでは男女問わず非常に活気がある。EDI推進の三本柱はモニター・メンター・ロールモデルだと私は思っていて、実際に女性率をモニターした結果を図1に示す。20%を切る灰色は禁止領域である。

最後に、なぜ私がこの大学に来たかという、オファーがきたからである。2011年当時はオーストラリアのフェローシップの途中だったので、特段ジョブを探していたわけではなかった。常勤職は逃すとまた来るものでもない、意を決してまた引っ越しをすることにした。その昔はミュンヘンにいたので、私の荷物は三度目の地球半周をすることとなった。イギリスは天気が悪いのに天文では観測が盛んだが、その研究所に自前のスーパーコンピューターがあったのも魅力でもあった。私のグループが主な利用者なので、CPUの総数はそう多くなくてもジョブがすぐ走るのが便利である。大きな計算にはDiRACというSTFCのスーパーコンピューターを、私がプロポーザルを書いてとった時間をグループで使っている。10年経った2021年に教授になった。

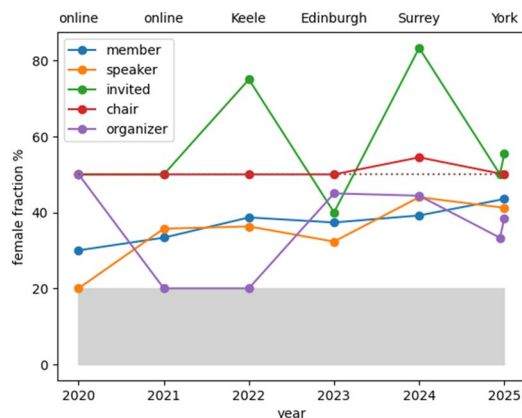


図1 2020年から2025年までのBRIDGEネットワーク参加者(member)と、年会での総講演者(speaker)・招待講演者(invited)・座長(chair)・世話人(organizer)における女性率

私の専門の銀河の化学進化は欧州が中心地である。そこに近くて英語圏なもの都合がいい。ドイツでの研究環境はよかったが日常生活がやはり大変だったし、オーストラリアは自然も満喫できがいかなせん研究会が遠すぎる。アメリカは昔から嫌いなので選択肢にない。イギリス人はとにかく効率重視で、会議も事前に資料が配られ短時間で合意に至ることを目的として開かれるのが、私は好きだ。日本人と似ていると言ったのは誰なんだ。直接的な言い回しをしないのはそうなのだが、それは責任を回避しつつ相手にYesと言わせるため。イギリスに住んでいたら鍋の中の麴海苔になると言ったのは漱石^{*7}だ。退化したのかしらないが、私なりの生き方を見つけるまでに数年かかった。

日本人の私は夜でも週末でも仕事をしている。自分の指導教官もそうであった。私のグループのメンバーには、24時間365日いつでもメールして

^{*5} Equality (平等性), Diversity (多様性), Inclusion (包摂性) の頭文字をとった略称。イギリスではEquity (公平性) の代わりにこの順序で用いることが多い。

^{*6} BRIDGE the Disciplines related to the Galactic Chemical Evolution (BRIDGE) bridge.ac.uk, 国内22大学から約85名が参加し、日本の宇宙核物理連絡協議会、欧州のCheTEC、アメリカのIReNAなどとも連携している。

^{*7} 夏目漱石著『倫敦塔』(ろんどんとう) (1905年) より。

いい、私は返事ができる時にしかしないし、また
そちらもすぐ返す必要は全くない、と言ってあ
る。働き方についての考え方も多様であり、5時
以降はメールしてはいけないと思っている人や、
返事を期待しないといちいち書いてくる人もい
る。私はどちらでもない、個々の様子を見ながら
対応を変えている。学生もポスドクも人である。
人を動かす、というのは、一人で研究するのとは
違うスキルを要し、いまだ手探りである。あまり

過剰な期待はせず、決して怒らず、大切なことは
嫌な顔せず繰り返し、いい論文がより多く出せれ
ばいいと思っている。そもそも楽しくなければ人
は集まらないので、機会があればちょっといいレ
ストランでみなで食事をし、世界中からビジター
も積極的に受け入れている。自分の研究について
同じ興味をもつが同じ専門ではない人々と話すこ
とで、みな日に日に自信がついてきた気がする。

日江井榮二郎氏ロングインタビュー

第7回：アメリカ滞在



高橋 慶太郎

〈熊本大学大学院先端科学研究部 〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪 2-39-1〉

e-mail: keitaro@kumamoto-u.ac.jp

日江井榮二郎氏のインタビューの第7回です。今回は1960年代から70年代にかけての日江井氏のアメリカ滞在経験とその前後の国際共同研究、そして当時の日本の天文学界の動向について詳しく語っていただきます。ニューギニアでの日食観測をきっかけにして、1963年から2年間、日江井氏は新設されたJILA (Joint Institute for Laboratory Astrophysics) およびHAO (High Altitude Observatory) で研究に従事することになりました。そこで当時の日本とは異なる国際色豊かな研究環境の中で多くの刺激を受けて研究を進めました。その後も日江井氏はアメリカのスカイラブ計画で得られたデータの解析や日米共同研究会への参加を通じ、太陽物理学の国際的な進展に寄与しました。また、インタビューではスカイラブに関する研究や研究会に関わったことで学生運動のターゲットになったことや、数世代にわたる東京と京都の太陽研究グループの交流についても語っていただきます。

●アメリカ滞在

高橋：前回と前々回は日食観測のお話を詳しく伺いました。今回からまた時系列のお話に戻しまして、先生が東京天文台で在職中にアメリカで研究されたお話を聞いてもいいでしょうか。1963年から2年間アメリカに行ったってことですよね。これはどういう経緯なんですか？

日江井：アメリカのボルダーにですね、JILA, Joint Institute for Laboratory Astrophysics という物理と天文を一緒にしたような研究所が新たにできたんですよ (1962年設立)。それでお前、来いよ、と言われたの。どうして言われたかっていうのはね、実は以前お話したニューギニアの日食観測がきっかけなんです。僕らはグレージングインシデンスでフラッシュスペクトルを観測しようとして、結局失敗してしまいましたけど (第5回参照)、ア

メリカの研究者にいろいろ説明したんですね。したらそこにいたジェフェリーズ (J. T. Jeffries) って人に呼ばれてね、JILAに来いよ。それでそこへ行ったわけ。だからそれも日食のおかげじゃないかしらと私は思ってるわけよね。

高橋：ニューギニアで知り合ったわけですね。

日江井：そのときにまあ個人的にいろいろしゃべったんです。それで日本人というのはね、私の前から萩原 (雄祐) 先生といい、藤田 (良雄) 先生、末元 (善三郎) さん、海野 (和三郎) さんとか日食観測に行ってるね、世界的にも日本てのは結構レベルが高いよということがわかってたんじゃないのかしら。そういうおかげで私が呼ばれたんじゃないかと思います。そのときJILAには日本だけじゃなくて他の国からも来ていました。

高橋：いろいろな国からゲストみたいな人がいっぱい来ていたわけですか？



当時のJILA（日江井氏提供）。

日江井：そうですね。だから世界中から物理と天文の研究者を呼ぶという合同の研究所を新たに作ったんだね。私はその第1回生か第2回生か、そこらへんだったです。原子分子物理学の高柳和夫先生も一緒でした。そのJILAへ1年通ったわけです。それからもう1年、今度は同じボルダーのHAO（High Altitude Observatory）に滞在しました。High Altitude っていうだけあって、HAOがクライマックス観測所の面倒を見てコロナ観測をしてたんですね。同時にハワイのマウナロワにも分室ができてKコロナ（連続光で観測されるコロナ）の観測所を作ってました。あそこは空気がきれいだからね。そこでやる観測のコントロールのメインがHAOにあったんです。とにかくボルダーは太陽研究のメッカの1つですからね。そんなんでアメリカに行ったんですよ。

高橋：そこで何か共同研究をしたということですか？

日江井：向こうではですね、やっぱり太陽の縁のことをやりました。ファーラー（J. E. Faller）って男と一緒に論文を書いて、Solar Physicsに出しましたけどね（Hiei & Faller 1968）。あれは太陽のリム、縁の連続光強度の高度勾配を波長ごとに調べたんです。日食観測を使って、赤の波長ではスロープがより急で、青の方は緩やかかっていう波長依存性がちゃんと出た。そこからですね、下

部クロモスフィアで温度が高度とともに上がってるといことを議論したんです。

高橋：何の研究をするかっていうのは自分で決められたんですか？

日江井：そうです。好きな研究をしていいって言われた。

高橋：アメリカでの研究生活はいかがでしたか？

日江井：もう悠々としてましたねえ。自分の好きなことができたしね。ああ、何よりもいいと思ったのはね、あるときベーム・ビテンセ（E. Böhm-Vitense）っていうできのいい人が来てさ、彼女はドイツのウンゼルト（A. Unsöld）のスクールの出身なんですね。当時、とにかくアメリカにはフランスだのドイツだのヨーロッパの連中が来てね、セミナーが多かったから非常にうらやましかったな。やっぱり日本にはなかなか外国から人が来なかったですから。

それでその頃、アメリカのトーマス（R. N. Thomas）という男が太陽大気の輻射はnon-radiativeで、輻射平衡ではないよと言ってたんです。昔は輻射平衡でradiative transferをやってたんですけど、non-radiativeなプロセスが重要だというんですね。ところがドイツはまだ古典的ですね、ベームはまだradiative transferでやってた。そのときにトーマスがね、「ベームを大いにやっつけろ」っていうわけよ。そういうのがアメリカ式なのかね。私はそういうのは非常に嫌で、そんな攻撃するようなことはしなかったですけどもね。だけどまあ聞くだけ聞いて。

高橋：non-radiativeなプロセスの研究が新しく始まっていたわけですね。

日江井：それと私はねえ、もっと英語力がよければいろいろ話ができたんですよ。英語力がやっぱり足りなかったなあと思うっております。アメリカではサンタフェとか、ずいぶんいろんなところで国際会議があって、太陽の連中が大勢集まったんです。アメリカ人ってのは人がしゃべるよりもこう自分がしゃべらなきゃいけない。僕らはそ

ういうカルチャーがないからね、それに増して語学力のこともある。だからね、もうちょっとこううまく話せればよかったなあと思いますけどもね。

高橋: まあ多くの日本人はそうですね。もっと英語力があればアピールできたよ。

日江井: 我々はいい成果を持っていたの。それは何かというと、タワー（塔望遠鏡）でフレアのスペクトルを撮った。そのときにシュタルク効果で電場を測ってたんです。それが非常にフレアの観測に向いててね、末元・日江井といういい論文を書いているんです（Suemoto & Hiei 1959）。でもその後、シュヴェストカ（Z. Svestka）とかっていう男がその方法で観測して国際会議で発表するわけですよ。だから今でもってそれはシュヴェストカの方法というんですけど、その前に我々がやってたんです。

高橋: 電場を測る方法ということですか。その方法でどういうことがわかるんですか？

日江井: 当時、フレアというのはみんな1000キロくらいのサイズの大きな構造しか見えてなかった、1秒角のね。1秒角というのは700キロに相当するんです。でもフレアのスペクトルを見たらバルマー系列の高次線の線幅がやたら広い。それはシュタルク効果で決まるわけだけど、そういう広がりを説明するには電子密度がものすごく高いといけないうです。そうすると結局、微小な高密度の構造、つまり10キロとかそのくらいのスケールの小さなフィラメント状のものがたくさんあると考えざるを得ないんです。我々はそういう小さな構造の存在をあの論文で書いたんですよ。私はそれを大いに宣伝すればよかった。というのはその当時、どうやってフレアが爆発するかっていうとリコネクションで、リコネクションが起こるには大きなサイズだと時間が長くなる。だから10キロとか20キロとか小さなサイズである必要があると。我々の成果はそれに相当するわけだよ。だからその通りだよってもうちょっと声を大にして言えばですね、もうちょっとこの



ボルダーでの日江井氏宅でのパーティー（日江井氏提供）。前列左から内田豊氏、日江井氏。

シュタルク効果の話を広めることができたんだね。私はそれやっぱり残念に思ってる。残念だなあと。まあとにかくその当時自分でできることはやったけど、もうちょっと語学の勉強をしておくべきだったなあと思って。

高橋: まあなかなか国際的な場でアピールするのは日本人には難しいですよ。

日江井: でも今の日本の若い連中はどんどんどんどん英語をしゃべるようになりましたね。後の話、1990年代になりますけど、ワシントンでフレアの会議があったときにさ、常田（佐久）君が「ひのとり」の話をしてさ。やっぱりアメリカ人というのは自分が納得するまで質問をするわけね、相手をやっつけるわけじゃないんだけど。そのときにしっかり答えられれば、あああいつはしっかりしたやつだと。そのときに常田君はずいぶんうまく答えましたね。よくしゃべってね、ああ若いのにすごい男がいるなあと。

高橋: へえ〜。そういうことがあったんですね。それでアメリカにはJILAとHAOで2年間いたわけですね。

日江井: そうです。その当時は2年間までは許してくれたわけ。3年間はだめだよ。

高橋: それは東京天文台が？

日江井: いやあ文部省というか、国家公務員全体

がそうじゃない？

高橋：それはアメリカ側で雇ってもらったということですか？

日江井：そうです。雇ってもらった。

高橋：向こうの給料はすごくいいわけですか？

日江井：いいですよ。1,000ドルなんてのは日本に比べてだいぶいいですよ。その当時、私が東京天文台に入った頃、日本での給料は最初1万円以下だったですからね。当時は1ドル360円だったから100ドルいってなかったですね。

高橋：じゃあ何十倍もの給料で…。

日江井：だからもうびっくりしちゃいましたね。もう夢の国へ来たみたい。それでとにかくもうアメリカ人の栄養がいいのを見てねえ、ああこんなところと戦争したら負けちゃうわなあと思いましたね。それで私の後には尾崎（洋二）君がJILAに行きました。

●塔望遠鏡

高橋：タワーの望遠鏡でいい観測データを撮ってたということでしたけど、タワーでもずっと観測が続いてたんですか？

日江井：いや、定常的なには使わない。タワーは研究のためのです。それでそのフレアの研究の後、私は日食の方が忙しくなって、末元さんも74インチ（岡山天体物理観測所）のことで忙しくなって、それで斎藤（国治）さんがやろうとしたんですよ。斎藤さんはコロナを撮ってましたからね。あそこは実際はオプティックスのいい実験場なんです。レンズのハレーションを調べたりですね。コロナの精密な測光をするために斎藤さんが使いました。でもその後はもうあんまり使わなくなりましたね。岡山にタワーに相当する太陽用の望遠鏡ができましたからね（65 cm クーデ型太陽望遠鏡、1967年）。だから僕らはもっぱら岡山で観測するようになりました。

高橋：それまではタワーの望遠鏡を使ってたんですね。

日江井：そうですね。

高橋：タワーの方は装置としてはだいぶ古いんですよ（1930年完成）。

日江井：古いですよ、それはね。

高橋：でも一応使える状態でメンテナンスがしてあったってことなんです。

日江井：してあったんですが、僕らが岡山の望遠鏡の方に行っちゃったんで使わなくなって、その後ずうっとそのままで。最近また少し動かせるようになりましたけども、今は第一線の研究をするような望遠鏡ではないですね。

高橋：岡山のお話はまた後ほど伺います。

●日米共同研究会

高橋：当時、太陽研究でもやっぱりアメリカがトップだったんですか？

日江井：IAUに行くわけですよ。そうするとね、世界中の連中が太陽という1つのモノをやっているからね、IAUの要職のような人から言わせるとね、「世界中の太陽研究者っていうのは集団として比較的うまくいってるよ」と。まあアメリカだけじゃなくてヨーロッパもそうだしね、いろんなところでいろんな人がいい研究をやってましたね。ロシアだっていいのをやってましたよ。ただスターリン時代（1924-1953年）とかそれからしばらくはかわいそうだったね。プルコヴォ天文台の太陽の男がね、「こんな論文を書いたんだけど投稿できない」ってわけだよ。「悪いけど日本から投稿してくれ」っていうわけ。それで私が受け取ってSolar Physicsに投稿しましたよ。

高橋：投稿できないっていうのは？

日江井：当時、英語圏への論文投稿は制限されたり許可が必要とされたりしたそうです。そういうのがスターリン後もしばらく続いたわけ。それから天文台に金がなくて投稿料も出せないというのもあったんでしょう。だからプルコヴォ天文台ってのは歴史的にはすごいところで、いろんないい天文学者を出してるんですけども、あれを見



1965年日米共同研究会での写真（Sturrock, Solar Physics, 2017 より）。最前列：斎藤国治，末元善三郎，Gordon Newkirk, 田中春夫，海野和三郎，内田豊，宮本正太郎，Peter Sturrock. 2列目：河鯉公昭，Grant Athay, Keith Pierce, Robert Leighton. 3列目：Frank Orrall, Jack Zirker, John Jefferies, 高倉達雄，Gunther Elste. 4列目：William Erickson, 日江井榮二郎，Jack Thomas, 平山淳，川口市郎。最後列：Gerald Mulders, James Warwick, 守山史生，牧田貢，Harold Zirin.

ると政治形態がずいぶん影響するなあと思いました。それからプルコヴォ天文台は第二次大戦のレニングラード攻防戦ではドイツ兵の声がそこまで聞こえたくらいでね、爆撃も受けたらしいんです。

高橋：そうなんですね。

日江井：だから太陽の研究はですね、どこへ行っても友達というか、自分が病気になってもそいつが面倒見てくれるだろうという連中がいましたね。彼らが日本に来れば、いざというときにはこちらが面倒を見るという気持ちで、そういう点ではアンゲネーム（ドイツ語で「快適な」）といったらいいのかな、気持ちがよかったですね。外国行くのだって平気だったしね。

高橋：やっぱり国際共同でっていうのが太陽では盛んだったと。

日江井：そうですね。国際共同がかなり最初から行われましたからね。そういえば日米二国間の

ね、共同研究会がハワイであったんです。それが1964年。その当時、天文ではそういう二国間の共同研究っていうのはあまりなかったのではないかしら。他の天文で戦前ではあったかもしれないけど、戦後の二国間の共同研究ってのは太陽が最初だったんじゃないかなあ。

高橋：そうかもしれないですね。

日江井：まあ太陽の場合には日本という後進国にだって小さい望遠鏡でいい観測ができますからね。星の場合には大きい望遠鏡でないとできないからつらかったでしょうけども。だからそういうことでアメリカの連中もそれじゃあ日本と一緒に研究会開こうっていうんで、ハワイで研究会が行われましたね。そのときにレイトン先生（R.B. Leighton）が来てさ。レイトン先生ってのは物理屋で oscillation（5分振動）を見つけた人なんだ。

高橋：ああ、5分振動ですか。日江井先生もそこに呼ばれたっていうことですか？

日江井: 私はそのときアメリカにいたけども、その日米の研究会に参加したわけよ。アメリカ側が十数人くらいで日本からも十数人くらい行ったな。レイトン先生という人をこちは本で知ってたけどもね、いやあさすがレイトン先生、非常に気品のある方でね。その頃ですよ、レイトンがoscillationを見つけたの。やっぱり僕は戦後にアメリカのヤンキー兵を見てましたからね、アメリカ人てのはそんな人たちかと思ってたらとんでもないですよ。いろんな人がいてね、立派な学者がいるなど思いましたよ。本当にいい会議でしたね。

●スカイラブと学生運動

高橋: では先生はアメリカではよい研究生活をされ、日米での共同研究会にも参加したということで、結構アメリカとつながりがあったんですね。

日江井: それからアメリカに関して私はですね、後でスカイラブの研究会でまたアメリカに行くんですね。アメリカのスカイラブってのはたくさん金を使った大きな宇宙ステーションで、太陽観測をする望遠鏡があったんです。あれはNRL, Naval Research Laboratory (アメリカ海軍調査研究所) が関わって、鉄が13, 14, 15階電離した極紫外線のスペクトルを撮ったわけよ。私はそれを調べたんです。スカイラブのデータはものすごくいいからね、そのコピーをもらったんですね。もうNRLは宝の山だったですねえ。でねえ、アメリカでスカイラブの研究会があったんですが、年に3回あるっていうわけよ。そこで我々もその研究会にアプライしてですね、内田(豊)君と私がOKもらって、内田君は理論の研究、私は観測の研究で発表することになった。ところが1年の間に3回出張なんて、文部省はお金出さないよね。だから大沢(清輝)先生が文部省に連れて行ってくれたんですが、文部省の人に「あなた3回行く気か」って聞かれてね。ノーって言うわけにいかないから「はい」って言ってね。「じゃあ1回分

は出す、あとの2回分は自分で出せ」と。まあそれはそうだね。1人に1年に3回なんか出せないですよ。それで1回だけ文部省に出してもらって、2回目は自分で出した。3回目はNRLで出してもらったの。もう旅費っていうのは大変だったからね、その当時は。

高橋: 文部省から許可をもらわなきゃいけないんですか？

日江井: それはそうですよ。国家公務員だったからね。文部省の許可をもらわなきゃいけなかった。今でこそ研究費と旅費ってのは一緒に自由に使えるけども、そのときは外国旅費ってのは大変だったですね。それで金がないから帰国のときにワシントンD.C.の空港で寝たりしたこともありましたよね。

それで話は別だけど、NRL っていうのはNaval ですから海軍と関係してる。その当時、学生運動がさかんでね。東大の赤門にね、「日江井は軍と関係してる」という看板が立てられた。

高橋: ええ、そうなんですか？

日江井: 海軍の関係だから。天文学ってのは海軍と結びつくことがありますよね。確かにNRLに入るときにはこうエスコートを必要とする、1人で自由に入れない。どっかで軍事研究をやってるんでしょうけど、天文はそれとは別でスペース関連でもものすごくいいことやってるわけですよ。あそこもしばしば出かけて楽しかったなあ。その後、文部省の研究費でNRLから人を天文台に呼んだわけよね。でもそれで私、つるし上げを食いましてねえ、どこかの学生だか若い職員が5人来て……。

高橋: 天文台に来たんですか？

日江井: ここに、天文台に来ました。そのときは大変だったですよ。学生運動か何かの人たちが「あいつは軍と結託している」と。でも私は軍なんかと全然関係ない。本当にまあ大変なときでね、それこそ60年安保、70年安保とかいって若い人が元気だったですね。それで東大の学生部の

部長、本郷にいろいろ学生の面倒を見る事務官がいるわけよ。その人をたまたま知っててね、「今度、全共闘の人が来るんだけどどうしたらいいですか」と(笑)。そしたら「日江井さん、説得しようとしちゃいかんよ」と。俺はこういう天文の研究をやってるから NRL に行ったし、NRL の人を天文台に呼んだ。だから軍は関係ないと。ただね、学生を説得しようとする必ずボロが出る。だから同じことを繰り返せばいいと。本当は説得したいよ、自分が決して悪いことじゃなくてこういう学問のためにやってるんだよって言いたいわけだよね。だけど「彼らにそんなこと言っても理解はしませんよ」と言われて。あ、そういうものですかと。

高橋: そういうものなんですね。

日江井: それでここに5人来た。東大の学生なのか職員なのかはわかりません。3人は黙ってて、残りの2人がうるさいことを言う。とにかく海軍というところから人を呼んでるんだから、海軍の研究をしてるんじゃないでしょうかと、いろんなうまいこと言ってたなあ。だから私は説明して、その学生部長の言った通り学生に同じことを聞かれたら、それはさっき言ったようにこうこうこうと、同じことを答えるようにしてね。それで面談の時間が決まってるわけ、1時間だか2時間だか覚えてないけど。すると彼らは始めと終わりの時間をちゃんと守って、それで帰っていったよね。それでこちらも学生部長にありがとうございますって(笑)。まああの頃は政治的にも大変だったですね。

高橋: それはいつ頃のお話ですか？

日江井: 70年安保のもっと後、1982年頃じゃないかな。

高橋: スカイラブは1973年から始まったみたいですね。

日江井: 60年安保は自分自身もやったしね、70年安保のときは僕は助教授だったから逆に学生を抑える方だった。もうちょっとその後だったと思

いますね。まだその名残があったですね。だから Naval Research Laboratory から人を呼ぶとは何事ぞ、軍と結託してるんだ、と言われた経験があります。

高橋: 60年安保のときは、日江井先生はもう東京天文台に就職してたわけですよね。

日江井: 就職してましたね。

高橋: 何かされたんですか？

日江井: いやあけしからんなあと、でも別に何とかするわけじゃない。そんなアクティブじゃなかった。

高橋: デモに行ったりとかは？

日江井: デモには行かなかったなあ。天文台の中で組合大会もあってね。60年安保はそうだったけど、70年安保は逆に今度は「デモを止めろ」とか言ってね。だけど私は本郷に行った覚えはないな。

高橋: 三鷹はだいぶ平和だったって聞いています。

日江井: 平穏ですよ。だから東大の教授会か、あるいは学部長会議だったかもしれないけど、東大でやると学生たちが乗り込んで来るからひそかに天文台でやったらいいです。そのくらいに三鷹は静かだった。そううるさくはなかった。でももちろんここにも元気のいいのがいましてね。

高橋: 海部(宣男)さんなんかはだいぶ活動されたと聞いております。

日江井: そうみたいです。実際はよく知りませんが、学生に聞くと民青(日本民主青年同盟)と全共闘(全学共闘会議)とがあって、なんか複雑ですよっていうことでした。特定の個人の話はあまり聞きませんでしたね。

高橋: 本郷の方は大変なことになって……。

日江井: 本郷は大変だったようですね。本当に本郷は大変。私は本郷に行った覚えはないし、学生の正面に立ってどうするという事はないとね。天文台でストライキをやりたいとかいうときには、いやあそんなのしない方がいいよ思ったくらいです。

高橋: 先生としては当時そういう活発な学生たちを見てどう思っていました？

日江井: いやあ、そんなことやるんだったら天文学を勉強しろと思ったですね。私は自分が学生するとき、駒場でのストライキで警官と学生が衝突して学生が警棒で殴られているのを見ましたので(第2回参照)、怪我をしなければいいなという思いでした。やっぱり政治と学問の両立ってのは難しいですね。

高橋: まあ三鷹には学生はほとんどいなかったんですかね。

日江井: いないわけではないよ。もうそれこそオーバードクター問題なんてのがあったりね、大変でしたよ。あの頃の若い学生ってのは元気がよかったね。今は本当にそういう点じゃあものすごく静か、おとなしいんじゃないかなあ。

●オーバードクター

日江井: だからそういう点じゃあ今みたいに自由に研究できる時代がいいとは思うものの、今の若い人は3年制5年制という年限で限られててね、あれは厳しいんじゃないかなあとと思いますね。だから文部省としてはポストクのシステムを作ったけども年限があるわけだよね。だからね、かわいそうだろうと思うよな。

高橋: そうですね、まあ僕自身もそうでしたけど、安定した職に就くまではなかなか先が見えないので大変だと思います。当時から天文でオーバードクターが結構いたわけですか？

日江井: 当時からいてですね、それはちょうど日本の経済が上がっていく時期でしょう？ だから社会としてはどんどんいい学生を作ってくれよということで人数が多くなった。するとドクターも多くなる。でもドクターを育てたってその就職先までは面倒を見ないですからね。するとオーバードクターになる。だから公務員の定員制ってのがあって、天文台は何人、東京大学は何人と決まってるわけですよ。だから人を1人採るのにものすごく苦労した。非常に厳しかった。だからねえ、ああいうシステムっていうのは下を増やしたとき

には上も考えてやってほしいと思うけれども、まあ難しいのかもしれないけど、大蔵省としては国の予算がこうだからそんなに人を採れないよって、それはそうかもしれないけどもね。でもオーバードクターってかわいそうでしたね。

高橋: 今みたいに3年間の任期の職とかいうのもなかったわけですか？

日江井: そんなのないよ。

高橋: 完全に無給で？

日江井: 天文台はそういう点はよくてですね、僕らのときには東京大学に理学部天文学教室があって、三鷹に現場の天文台があって、非常にうまくいってましたね。鎗木(政岐)先生ってのが学生の就職の面倒を見てくれてね、お前はどこへ行け、お前はどこへ行けと。水沢の緯度観測所へ行ったり、地理院へ行ったり。そういう点は京都大学はかわいそうだったですね。京都大学の人たちっていうのはどっか近くの中学とか高校の先生になって働きながら研究をしてましたから。

高橋: 小暮(智一)さんもそうだったみたいですね。

日江井: そういう点で東京はですね、まあパイが大きいということもあったかもしれない。

●京都との交流

高橋: 京都の太陽グループとはどれくらい交流があったんですか？

日江井: よい交流がありましたね。京都には第1講座・第2講座ってのがあって昔は大変だったみたいですね。文房具も互いに流用できないと聞いて、驚きました。

高橋: そうですね、川口(市郎)さんや小暮(智一)さんからある程度聞いております(川口市郎氏、小暮智一氏インタビュー参照)。宮本先生のさらに上の世代ですよ。

日江井: それから若い世代になって、東京から加藤(正二)君が行ったりもして非常によくなったと聞きました。京都と東京はですね、宮本さんと末元(善三郎)さんがとても上手くやったんです

ね。あるとき宮本さんが天文学会理事長で、末元さんが副理事長だった（1969-1971年）。私はそのとき庶務だったと思うな。それで非常によくやってた。その世代がうまくいくとその下がです。京都には川口（市郎）さんがいて、東京には守山（史生）さんがいるわけ。だから川口・守山がうまくいった。その下が京都に神野（光男）君とか久保田（諄）君がいたり、東京には僕ら、西（恵三）さん・牧田（貢）さん・平山（淳）君がいたりして仲良くなって、牧田君も京都の飛騨天文台に行ったわけですよ（1988年）。だから東京と京都の太陽グループは仲良かったですね。

高橋: 上の世代でうまくいくと、下の方もうまくいくわけですね。

日江井: ただあのう、君は聞いているかもしれませんが飛騨天文台を作るについてね、ある天文学会で私は京都の人に呼ばれた。「京都で飛騨天文台の予算を出そうとしてるけど、お前なんかは反対するんじゃないか」って。

高橋: え、なんでですか？

日江井: だいたい当時みんなはね、京大で飛騨天文台を作るんだったら東京には金が来なくなると思ってたんです。だからその京都の人は、東京の人間としては当然反対するだろうと思って来たのかもしれないけど、私は「いやあ、いいのを作ってくればいいんだよ」って言ったんで、その人もびっくりしちゃってそれ以上話をしなかったんだけど。

高橋: 飛騨天文台ができたのが1968年、ドームレス望遠鏡ができたのが1979年ですので、東京では岡山の次を考えるという頃でしょうか。

日江井: 星の連中は星の連中で大きな望遠鏡が欲しかったんでしょうね。それにもかかわらず、京都は飛騨天文台をやるというようなことで、そんなにいいのかしらというグループがあったんでしょう。

それで飛騨天文台を作った人で服部（昭）さんという方がいた。服部さんというのは川口さんと

同期の人なんですけども、彼が予算要求をやったんでしょう。私はあんまり話をしなかったけども、飛騨天文台ができて立派な装置を作れたのは服部さんのおかげではないかと思いますね。だけど服部さんは論文が少なくてね、助教授のままでした。まあ京都大学には京都大学の考えがあるんでしょう。早川（幸男）さんは装置作りもサイエンスの1つだと言ったそうだけどね、服部さんがいなければできなかったでしょうね。だから飛騨天文台もあそこでいい観測ができましたね。服部さんは早くに亡くなってしまいましたけどもね。

高橋: 宮本先生はどんな印象の方でした？

日江井: 宮本先生はやっぱり秀才なんですよ。ね。コロナの温度の研究で業績をあげられましたからね。宮本さんの話は面白かったなあ、うん。

高橋: ああそうですか。学会とかですか？

日江井: 学会の話だね。それから宮本先生の本も面白かったな。宮本先生の講義を聴いてるわけじゃないんだけど、それから天文学会のことで宮本先生と接触するようになって、宮本先生はその頃は月に関心を持っててね、それでアイスランドの島へ行って、あその石はどうだ、ハワイの石はどうだなんて話をされてね。学識のある方だなあと思った。私は京都の外部の人間だからあまり接触はなかったですけども、宮本先生のお弟子さんと仲良くやってほしいという感じだったんじゃないでしょうかねえ。だから私は宮本先生にはいい印象を持っていますね。だから川口さんとも平気でしゃべったりね。

●萩原雄祐と荒木俊馬

高橋: 東京と京都の交流と言いますと、年末とかに東大の天文教室で集まって勉強会をするというのがあって、京都の方もそれに行ったとかいう話を聞きましたけども。

日江井: 誰が来たんですか、それは。

高橋: ええと、杉本大一郎さんとかですね。

日江井: ああだからそこらへんはたぶん海野さん

だとかそのへんがやり出してたのかもしれませんが。天文教室でやったんでしょうね。

高橋: 林忠四郎も行ってたと聞きましたね。

日江井: 林先生も来られてたことがあったんだね。そういえばちょうどいいや、あなたに聞きたいんだけどさ、どうして京都では量子力学があれだけ盛んでね、東京では遅れたんだろう。あなた物理屋さんとしてはどう思ってる？

高橋: 古在さんがちょっとそんな話をしてましたね。量子力学が始まった頃、東大物理では寺田寅彦が非常に有名で学生に人気があって、そっちの方に引っ張られてあんまり近代的な物理が取り入れられなかったみたいな話を聞きました。寺田寅彦は途中までは近代的な物理をやってたんですが、途中から日常の物理みたいな方にシフトしましたよね。むしろ天文の萩原先生が物理の人に量子力学をやれやれって発破をかけてたっていうふうには聞きました。

日江井: 萩原先生が？

高橋: と古在さんはおっしゃってました。

日江井: 萩原先生は早くに量子力学を天文に取り入れてたからね。萩原先生ってのは非常に勉強家で、もう本当にいろんなことを勉強されてたようです。ああそうですか、萩原先生が東大の物理に言ってたと、それは私は知らないけどもそうかもしれない。やっぱり東大はそういう点では腰が重かったね。だけど京都は誰がいたの？ 湯川（秀樹）・朝永（振一郎）両先生を教えた先生は誰だったの？

高橋: 荒木俊馬が京都で最初に量子力学の講義をしたというのも聞いたことがあります。それを湯川・朝永が聞いてたようです。その後で仁科芳雄も講義したみたいですけどね。

日江井: だけど荒木俊馬が量子力学を知ってたのかなあ。

高橋: 荒木俊馬は宮本先生よりもさらに上の世

代、それこそ先ほどの第一講座・第二講座という時代の人ですけども、会ったことがありますか？

日江井: 荒木俊馬先生も私はちらっと学会でお会いしたことがありますね。やっぱりね、萩原先生と両雄並んで緊張感がありましたよ（笑）。麻布の天文学教室で学会があるわけです。もう人数少ないですからね、かたや荒木先生、かたや萩原先生とおられて、私なんかチン係ですよ。講演時間の5分だよとか10分だよとかの。ちょちょこっとした話の中になんか互いに意識しているというものがあるなど感じたよ。遠くで聞いてただけですけどね。

（第8回に続く）

A Long Interview with Prof. Eijiro Hiei [7]

Keitaro TAKAHASHI

Faculty of Advanced Science and Technology,
Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami,
Kumamoto 860-8555, Japan

Abstract: This is the seventh article of the series of a long interview with Prof. Eijiro Hiei. In this article, Prof. Hiei discusses in detail his experiences during his stay in the United States from the 1960s to the 1970s, the international collaborative research he engaged in before and after that period, and the trends in Japanese astronomy at the time. Triggered by his solar eclipse observations in New Guinea, Prof. Hiei spent two years from 1963 conducting research at the newly established JILA (Joint Institute for Laboratory Astrophysics) and HAO (High Altitude Observatory). There, he was exposed to a vibrant, international research environment that was markedly different from Japan at the time, which provided both inspiration and stimulation for his work. Later, Prof. Hiei continued to contribute to the international development of solar physics by analyzing data from the American Skylab program and by participating in US-Japan joint research meetings. In this interview, he also reflects on his experiences of becoming a target of student protests due to his involvement with Skylab and related conferences, as well as on the intergenerational exchanges between the Tokyo and Kyoto solar research groups.

日本天文学会行動規範を作る

Code of Conduct/ハラスメント防止ガイドライン策定タスクフォース 望月優子(座長)¹・片岡章雅²・日下部晴香³・ 小松英一郎⁴・新永浩子⁵・野村英子²・ 林左絵子⁶

〈¹ 理化学研究所仁科加速器科学研究センター雪氷宇宙科学研究室 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1〉

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

〈³ 東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻広域システム科学系 〒153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1〉

〈⁴ Max-Planck-Institut für Astrophysik, Karl-Schwarzschild-Str. 1, D-85748 Garching, Germany〉

〈⁵ 鹿児島大学大学院理工学研究科 物理・宇宙プログラム天の川銀河研究センター 〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元 1-21-35〉

〈⁶ 東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構(WPI) 〒277-8583 千葉県柏市柏の葉 5-1-5〉

e-mail: asj-cg-tf@asj.or.jp (メンバー全員), ¹motizuki.riken@gmail.com

日本天文学会では、Code of Conduct/ハラスメント防止ガイドライン策定タスクフォースが2024年6月に発足した。これは、2024年3月時の代議員総会の議事に基づき、実務理事（会長、副会長、庶務理事、会計理事）の主導のもとで提案されたものである。当タスクフォースに与えられた仕事は、まず行動規範を策定し、続いてハラスメント防止ガイドラインを策定することである。行動規範は、日本語版が2025年1月に、英語版が2025年3月に代議員総会にて承認された。本稿では、新しく導入された行動規範の策定過程で交わされた議論を振り返り、今後の課題を展望する。

1. タスクフォースの設置とこれまでの活動

2025年、日本天文学会では、「行動規範」が制定された。学会ウェブサイトには、日本語版 (<https://www.asj.or.jp/jp/about/code-of-conduct/>) と英語版 (<https://www.asj.or.jp/en/about/code-of-conduct/>) が掲載されているので、会員お一人おひとりにお目通しをお願いしたい。日本語版と英語版は、内容は同一であるが、日本語版が正本である。

Code of Conduct/ハラスメント防止ガイドライン策定タスクフォース（以降、TF）は、以下の経

緯により設置された。きっかけとしては、2024年3月年会時の理事会において、男女共同参画委員会よりハラスメント防止のためのガイドラインの策定が提案された。理事会議事録 [1] によると、当該ガイドラインが必要な理由として、2019年度に男女共同参画委員会によって実施されたアンケート結果（女性会員の44.3%、男性会員の25.6%がハラスメント被害を申告 [2]）、学会内外でハラスメントが減少していないこと、および他の学会の状況が挙げられている。続いた代議員総会で、「ガイドライン」は必要だが、日本天文学会には「行動規範」がなく、早急に制定すべきであるとの指摘がなされた [3]。当時の実務理事（会

長、副会長、庶務理事、会計理事）が具体的に検討することとなり、実務理事会の主導により、TFの設置が決まりメンバーが選任され、5月の理事会にて報告された [4]。このようにして当TFが発足し、2024年6月から活動を開始する運びとなった。

ここで、TFとは、日本天文学会においては常設の委員会ではなく、喫緊の課題を早急に解決していくための会員の集まりをいう。委嘱されたTFのメンバーは、この記事を共同執筆している7名である。図1にメンバーの写真を示す。

実務理事からTFへの諮問事項は、学会の行動規範を先行して策定し、その後にハラスメント防止ガイドラインを策定することであった。第一の目的である学会の行動規範を策定するため、TFでは、2024年6月4日にオンラインで初会合をもって以来、月に1-3回のペースで合計14回のオンライン会合とメール審議、ならびに実務理事会や関連委員会との意見交換や情報共有を随時行い、日本語版および英語版の行動規範最終案の策定に取り組んだ。上述の関連委員会としては、男女共同参画委員会、ジュニアセッション実行委員

会、コンプライアンス委員会がある。

策定にあたっては、大方針として、「大多数の会員が賛成できる、本当に必要な最小限の」行動規範を作成することを目指した。したがって、何が会員および学会にとって必要不可欠なのか、公益法人として学会の外から見られたときにはどうか、など、多様なメンバーの視点からかなり密な議論が重ねられた。

TFでは、上述の方針に則って、まず以下の活動を行った。

- ・TF発足直後の代議員総会（2024年6月5日）において、メンバーと役割の紹介、今後のスケジュールの見通しについての報告 [5]、
- ・国内外の他学会・他組織の行動規範もしくは倫理規範の調査・検討、
- ・日本天文学会としての行動規範スタイルの方針と盛り込むべき内容の検討、素案の作成、
- ・天文・天体物理若手夏の学校参加者および天文・天体物理若手の会へのアンケート調査（2024年7月17日～8月9日）と、素案へのフィードバックの収集。



図1 Code of Conduct/ハラスメント防止ガイドライン策定タスクフォースのメンバー。上段に望月，中段左から小松，林，片岡，下段左から日下部，野村，新永。

続いて、行動規範の導入が進んでいる状況が広く会員に周知されるよう、2024年秋季年会において、

- ・若手の会や実務理事からの意見等をもとに改訂された行動規範案（日本語版・英語版）、ならびにTFと意見交換可能な機会や場所を掲示したチラシを作成し、現地受付時に配布、
 - ・「日本天文学会の規範とハラスメント防止ガイドラインを作ろう」と題した口頭・ポスター講演 [6] を行い、口頭発表時とポスター前にて、会員からの意見収集、
 - ・理事会（9月9日）及び代議員総会（9月12日）にて現状報告および意見交換 [7, 8]、
 - ・会員全体集会（9月12日）にて現状報告、意見の募集、および今後の導入見通しの提示 [9]、
- を行った。そして、これらのインプットをもとに改訂を重ねた日本語・英語の各案について、

- ・tennetで会員向けアンケート調査（10月28日-11月25日；第2節参照）
- を実施し、集計結果を検討した。寄せられた意見はすべて解析・分析し、必要に応じて適宜、最終案に取り込んだ。このtennetアンケート結果の概要は、「『行動規範』アンケートご協力への感謝と結果のご報告」と題したお知らせ [10] にて、会員に速報された（2024年12月26日）。

日本語版の最終案は、諮問した実務理事会へ答申され（12月17日）、理事会承認（12月26日）を経て、代議員総会（2025年1月14日）において最終的に承認された [11]。これを受けて、井田茂会長から会員へ向けて、行動規範制定の報告がなされた（2025年2月6日） [12]。

日本語版に続き、英語版の最終案が実務理事会へ提出され（2025年2月26日）、理事会において承認（3月17日）、続いて代議員総会において承認され（3月18日）、日本語版・英語版そろっての制定に至った [13]。一連の学会承認を受け、TFから会員向けには、2025年春季年会中に、

- ・会員全体集会（2025年3月18日）にて、行動

規範（日本語版・英語版）制定の報告 [14]

を行い、また、

- ・天文月報2025年4月号（3月20日発行）の月報だより・会務案内に行動規範制定の報告 [15] を行った。春季年会会員全体集会での報告 [14] で使用した資料から、本行動規範の策定にあたって参考にした国内外の行動規範等の一覧を表1に掲げる。このうち、International Astronomical Union (IAU) のCode of Conduct [16] については、リニューアルされたばかりのIAUウェブサイト上で、最新バージョン（2023年9月版）を参考文献中のURLで確認できる。

2. tennet会員アンケートについて

本章では、TFが実施したtennetアンケートについて概要をまとめる。

第1章で述べたように、秋季年会からのインプットと以降の関係者との意見交換をふまえ、TFでは行動規範案（日本語版、英語版）をさらに更新し、tennetを用いて会員アンケートを実施した。アンケートは、2024年10月28日-11月25日の1ヵ月間行われた。この実施期間は、2年に一度の代議員選挙や会長選挙実施時と同じ期間である。

アンケートへの回答数は、628件であった。回答率は、tennetに登録されている2024年11月1日時点での正会員数（2,039名）の31%であった。ここで、「正会員」とは、日本天文学会定款で「本会の運営に責任を持つ個人」と定義されている会員である。通常、回答率30%が、統計学的にアンケート成功の目安とされているため、上記回答率により、結果はおおむね会員の総意を表していると考えられる。日本天文学会に行動規範を導入することについて、賛成した回答者の割合は、96%であった。

自由記述欄に頂いたコメントの総数は、226件であった。第1章で述べたように、TFでは、会員から頂いた意見をすべて分析・検討し、必要に

表1 参考にした国内外の行動規範等のリスト

日本/Domestic	海外/International
日本学術会議/Science Council of Japan	International Astronomical Union
日本物理学会/The Physical Soc. of Japan	Max Planck Society
東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構/Kavli IPMU, The Univ. of Tokyo	Max Planck Institute for Astrophysics
日本教育心理学会/The Japanese Association of Educational Psychology	Institute of Physics (Physical Soc. for UK and Ireland)
日本数学会/The Mathematical Soc. of Japan	American Astronomical Society
日本地球惑星科学連合/Japan Geoscience Union	European Astronomical Society
日本化学会/The Chemical Soc. of Japan	Royal Astronomical Society
JST研究公正ポータル国内学会の行動規範/JST Research Integrity Portal	American Physical Society
	CERN
	London Code of Conduct (天文関係研究会用オープンCoC)
	Caltech
	P5: Particle Physics Project Prioritization Panel
	ILO C190—Violence and Harassment Convention, 2019.「仕事の世界における暴力とハラスメント」に関する国際労働基準第190号条約・勧告 (厚生労働省資料)

*太字は特に参考にした比重が高いもの。

応じて最終案に反映されるよう、努力した。特に多かったコメントは、「相談窓口」の設置に関する要望（26件）と、違反に対する罰則の必要性に関するもの（18件）であった。このことは、相談窓口や罰則の必要性を感じている会員がかなり潜在的にいることを示唆していると思われた。よって、この点についてTFから実務理事会へ情報を共有し、また、2024年12月の理事会および2025年1月の代議員総会において、TFからの行動規範（日本語版）の最終案の提案とともに、座長から報告を行った [11]。

3. 日本天文学会行動規範とは

以下では、行動規範の各部位ごとに、日本語版ならびに英語版の該当箇所を取り上げ、これまで理事会、代議員総会で行われてきた議論や、実務理事会ならびに関係委員会（どちらも前理事会期）との意見交換を通じて、TF内で議論されてきた内容を振り返る。

3.1 前文

日本天文学会は、本会の目的である天文学の振興と普及の推進のため、会員の自由闊達な活動が促進されるよう、本行動規範を定める。会員は、本会に関わるすべての活動において、本規範を遵守する。また、本会が主催する年会等の事業に限っては、非会員の参加者にも本規範の遵守が求められるものとする。

The Astronomical Society of Japan (ASJ) has established this Code of Conduct (CoC) to promote the free and vibrant activities of its members, in alignment with its mission to advance and promote astronomy. Members of the ASJ must comply with this CoC in all ASJ-related activities. Non-members must also comply with this CoC when participating in events organized by the ASJ, such as its annual meeting.

前文において、日本天文学会が、本会の公益目的を達成するために、本行動規範を定めることを明記した。行動規範を定めることで、会員の身体的・心理的安全性^{*1}（3.9節参照）が守られ、自由闊達な活動が促進されることを期待する。会員は、メールやSNS（Social Networking Service）なども含め、本会に関わるすべての活動において、本規範を遵守する、とした。また、日本天文学会が主催する年会などにおいては、中高生が発表するジュニアセッション等、非会員が参加する機会も多いが、そのような場においては、非会員の参加者にも、本規範の遵守が求められる、とした。

3.2 基本理念

基本理念とは、行動規範の基盤を成す根本的な理念のことである。行動規範は7つの項目から構成されているが、これらの項目の基盤を成す2つの価値観（コア・バリュー）を明確に定めることで、日本天文学会の会員、および学会の事業に参加する関係者がこれらの理念と価値観を共有することを目指したものである。

基本理念の1つ目は、他者を個人として尊重し、その立場や地位にかかわらず、敬意を持って接することである。

会員は、他者に対し、敬意をもって接する。
Members must treat others with respect.

基本理念の2つ目は、日本天文学会における研究や活動、および社会への取り組みに関するものである。すなわち、日本天文学会は社会の信頼なしにはその活動を維持できないことを認識し、日常の研究と活動や社会との関わりにおいて、誠実さをもって取り組むことである。

会員は、科学と社会に対して誠実に向き合う。
Members must approach science and society with sincerity and integrity.

以下の7項目の行動規範は、これら2つの基本理念を、日本天文学会に関連する活動において具体的に実現するために定めたものである。

3.3 項目1（基本的責任）

会員は、関連する法令やガイドラインを遵守し、誠実に研究や活動を行い、天文学の振興と普及に寄与する。

Members shall comply with relevant laws and guidelines, conduct research and other activities with integrity, and contribute to the advancement and promotion of astronomy.

会員は、日本天文学会の目的である天文学の振興と普及に寄与するに際し、行動規範の基本理念である科学と社会に対する誠実さをもって行う、すなわち、関連する法令やガイドラインを遵守した上で、誠実に研究や活動を行う、とした。

3.4 項目2（個人の尊重）

会員は、公平性を重んじ、個人の人權と尊厳を尊重する。

Members shall uphold fairness and respect the human rights and dignity of individuals.

TFでは会員が誰に対してもその各人の人權と尊厳を尊重することが、あらゆる場での行動の基本にあると考えた。TF内に限らず学会メンバーとの議論を重ねる中で、この人權と尊厳の尊重に基づいて、それぞれの会員が意識的に公平に考え、行動するよう努めることが重要であるとの認識が高められた。互いにそのように尊重しあうことで、一人ひとりの力が十分に発揮されるようになり、活躍しやすくなるであろう。

^{*1} 心理的安全性（Psychological Safety）という概念は、“a shared belief held by members of a team that the team is safe for interpersonal risk taking” という定義で考案された [17]。

3.5 項目3（差別やハラスメント行為の排除）

会員は、多様な価値観があることを認識し、人種、国籍、民族、年齢、性別、性自認、性的指向、身体的特徴、障がい、宗教、信条、所属、経歴、社会的身分、家族の状況などに基づく、いかなる形態の差別も行わない。また、会員は、いじめやハラスメント行為は一切行わない。

Members shall recognize there are diverse values and shall not engage in any form of discrimination based on race, nationality, ethnicity, age, sex, gender identity, sexual orientation, physical characteristics, disability, religion, creed, affiliation, background, social status, family situation, or any other such grounds. Furthermore, members shall not engage in any form of bullying or harassment.

日本天文学会の一員として、他者が自分とは異なる価値観を持っていることを認め合うことは、会員一人ひとりが活躍でき、ひいては日本天文学会がさらに発展していくために必要な素地である。本項目により、会員はいかなる形態の差別も行わないことが求められる。その差別の例がやや細かく列挙されているが、これは、具体的な例を挙げることで、会員一人ひとりがこのような差別形態もあるのかと気づきやすくなる、との考えに基づいた。

同様に、本項目により、会員は、いじめやハラスメント行為は一切行わないことが求められる。差別やいじめ、ハラスメント行為は、影響を受ける側、しばしば脆弱な立場にある会員の、精神面や身体面の健康に悪影響を及ぼす可能性があるだけでなく、個々の会員の成果創出や学会活動を妨げるため、学問の発展や学会組織全体にとっての不正行為（サイエンティフィック・ミスコンダクト）であるという国際的な認識（例えば、[18,

19]）を、日本天文学会においても、もっと育てていきたいものである。

こういった差別やハラスメントの現場に居合わせた第三者としての行動については、将来的な課題として、第4章に述べる。

3.6 項目4（研究や活動における倫理）

会員は、ねつ造、改ざん、盗用、二重投稿などの不正行為は行わず、破壊的行為も行わない。また、情報の記録保全を徹底し、成果の公表に際しては、他者の知的成果を誠実に評価し、適切に明示する。

Members shall not engage in misconduct such as fabrication, falsification, plagiarism, duplicate publication, or any destructive behavior. Furthermore, members shall ensure the comprehensive preservation of records and, when publishing results, shall sincerely credit the intellectual contributions of others and properly acknowledge them.

研究や活動は、信頼の上に成り立つ共同の営みである。本項では、ねつ造、改ざん、盗用、二重投稿といった不正行為を明確に否定し、それらを行わないことを定めた。また、「破壊的行為」—すなわち研究や活動の進展を不当に妨げる行為—も、これに含まれる。たとえば、学術的対話の妨害、実験データや装置の意図的な損壊などはこれにあたり、決して行ってはならない。さらに、研究や活動の資料の正確な記録と保全の徹底や、成果の公表に際しての他者の知的貢献への誠実な評価と適切な明示も、重要な倫理事項として位置付けた。研究や活動は、個人で完結するものではなく、研究者や関係者の協力、信頼関係の上に成り立つものである。お互いの安全と尊厳が守られる環境を維持することは、研究や活動における倫理の重要な柱の一つである。こうした考えに基づき、研究や活動における倫理を単なる禁止事項として捉えるのではなく、誰もが安心して取り組み

る環境を皆で支えるための共通の指針として位置付けた。

3.7 項目5（他者の活動への批判）

会員は、他者の活動や成果を批判する際には、個人への攻撃や威圧的な言動は慎み、科学的根拠に基づいた客観的批評をもって行う。また、自らの活動や成果に関する客観的批評に対しても、科学的根拠に基づき、真摯に対応するよう努める。

Members shall refrain from personal attacks or coercive behavior when critiquing the activities or results of others and shall provide objective critiques based on scientific grounds. Furthermore, members shall strive to respond sincerely to objective critiques of their own activities and results, based on scientific grounds.

科学の健全な発展には、他者との建設的な議論が欠かせない。例えば、共同研究や学会発表の場において、外部の視点を取り入れることで、自分では気づかなかった課題が明確になり、研究内容の質を高められることが多い。研究の質を向上させるためにも、批判はあくまで研究内容や方法論に対して行うべきであり、批判の際に個人を侮辱したり攻撃したりしてはならない、というのがこの項目の主旨である。たとえば、「その解析方法には根拠が乏しい」「前提としている仮定に問題がある」といった指摘は建設的な批評であるのに対し、年会における質疑応答など、多くの人の前で「君はまったく理解していない」「そんなことでは信用されない」といった発言をするのは個人攻撃に当たり、研究の発展を阻害する。したがって、批判の場面においては、相手の意見や立場を尊重しながら議論を進めることが重要である。感情的な言葉を避け、事実やデータに基づいて意見交換を行うことで、相互の理解を深められる。また、他者からの指摘を受けた際には、感情的にならずに科学的根拠を再確認し、必要であれば自ら

の研究や主張を見直す姿勢が求められる。批判をよりよい研究のための機会と捉える努力が重要である。

3.8 項目6（社会との関係）

会員は、持続的な天文学の振興のためには、社会からの信頼の付託が不可欠であることを認識し、成果の発信や普及活動をとおして、天文学への社会的理解が深まるよう心がける。研究や活動が社会に及ぼす影響に留意し、自らの活動や成果は、客観性をもって発信するよう努める。

Members shall recognize that the trust of society is essential for the sustained promotion of astronomy and shall strive to deepen public understanding of astronomy through the dissemination of results and outreach activities. Members shall be mindful of the impact of their research and activities on society and shall strive to objectively communicate their work and results.

日本天文学会には、直接その研究面の振興や得られた知見を広めることに携わる人々とともに、愛好家の方々も含まれる。学会における活動や、それに基づくより広い範囲の天文学に関わるさまざまな活動は、広く社会一般の方々の関心と、研究および研究者に対する信頼とに支えられている。これは研究活動などへの公的資金投入への理解という、より現実的かつ直接的な支持ばかりでなく、社会的な認知と理解という広範な支持を含む。天文学を市民とともに楽しむ・歩むことにより、天文学のような基礎科学への理解が持続的なものになっていくと考える。一方で、現実にはビッグプロジェクトが高額になっていることへの理解を広く多くの方々にご理解いただく必要性や、観測施設が遠隔の地に設立されることにおいて、その立地の地元との関係性に想いを至し、そうした地元の人々と共に歩む姿勢がいっそう重要

になってきている。

また、研究成果や活動を広く知らせようとするときに、誇大・過剰な表現を避け、誤解を招く表現にならぬよう注意を払い、客観的に内容を伝えるように努力していくことが重要である。

天文学の研究や活動において、自分がやりたいことが広い範囲に及ぼす影響に想像を働かせ、研究成果を伝える発信やさまざまな活動が続けていくことの責任と重要性を議論したことも規範の記述につながっている。

3.9 項目7（研究・教育・活動環境の整備）

会員は、公正性と透明性を重視し、敬意ある対話に基づいて、身体的・心理的安全性の高い、研究・教育・活動環境の構築に積極的に取り組む。会員が自由闊達に活動できる学会環境を維持・発展させるため、互いに支援的に行動するよう努める。

Members shall uphold and promote fairness and transparency and, based on respectful dialogue, actively foster research, education, and activity environments that ensure both physical and psychological safety. Members shall strive to act supportively toward one another in order to develop and maintain an academic environment in which all can engage in their activities freely.

天文学の振興と普及を推進するためには、研究・教育・活動環境の構築と整備が欠かせない。この環境整備は、広い意味での人材育成にも重要な役割を果たす。公正性と透明性を重視することは、私心を排し公平で正しくあるように努め、第三者によって確認・検証可能な形で活動状況や成果を提供するよう努力するということである。敬意ある対話とは、立場や意見が異なる者同士であっても、感情に流されることなく、プロフェッショナルな態度で冷静に意見を述べ、相手の話にしっかりと耳を傾けることである。さらに、研

究・教育・活動環境は身体的のみならず、心理的にも安全性が高い必要がある。心理的安全性（脚注*1参照）が確保された環境では、メンバー同士が健全に意見を戦わせることができ、それによりその集団の生産性と創造性が向上するとされている。特に、若手や立場が下の者が気兼ねなく意見や意向を伝えられるということでもある。これらの要素は、前述の項目2-5とも強く関連している。また、会員が互いに支援的に行動することは、会員が自由闊達に活動できる学会環境を維持・発展させるために非常に重要であると考えた。これからの日本天文学会が、立場や個人の背景によらず、すべての会員にとってよりよい環境を追求し続けることを期待する。

4. 今後の課題と展望

今回、日本天文学会において初めて行動規範が策定された。しかし、今後の学会活動を通じて、この行動規範では不十分であることが明らかになる可能性は高い。したがって、今回策定された行動規範は、最初のステップとして位置付けられ、今後の検証を通じて改善されるべきものである。天文月報の本記事が、その検証の一助となれば幸いである。

例えば、第2章で述べたように、本行動規範に関する年会や若手の会でのアンケート調査、およびtennetで実施されたアンケート調査において最も多く寄せられた意見は、相談窓口の設置と罰則に関するものであった。日本天文学会としての行動規範の建て付けに沿って、これらの項目は行動規範には含まれなかったが、相談窓口については、TFから実務理事に報告し、執行部による設置の検討が始まった [11, 12, 20]。また、代議員からも相談窓口に関する意見が活発に出されている [11, 20]。罰則については、大枠は細則を新規導入することで対応することが実務理事によって検討されている。今後の「ハラスメント防止ガイドライン」などの、より具体的なガイドラインで

定められていく内容もあるだろう。

次に、項目3（差別やハラスメント行為の排除）に関して、「その場に居合わせた第三者は、いじめやハラスメント行為を見過ごさない」等の趣旨の文言を入れるかどうかについて、TF内で議論を重ねた結果、「日本天文学会は、まだそのような文言を入れられるほどには成熟していない」という理由で、今回の行動規範に含めることは見送られた。なぜなら、もしその場に居合わせた第三者が行動できなかった場合、このような文言が行動規範にあることによって、逆にいじめやハラスメントの行為者の側に利用されかねないという危惧があったためである。例えば、「行動規範で定められているのに、君は行動しなかった。（被害を受けたと主張している者にとっても、君にとっても、）自分の行為はたいしたことではなかったということだ」といったような文脈で利用されてしまうのではないか、という具体的な危惧が、若手・中堅世代の会員を中心に寄せられたからである [11]。

これらの対応策が最善だったかどうかは、今後の検証に委ねられることとなる。

なお、日本天文学会事務所職員の行動規範については、同様の文言で別途、導入される見通しである。

5. む す び

日本天文学会に、行動規範は必要であろうか？ この問いに答えるためには、まず行動規範を策定し、実施し、その有効性を検証することが必要である。なぜなら、このプロセスを経ずに、行動規範の必要性や有効性を判断することはできないからである。

日本天文学会の会員の中には、今回の行動規範が「押しつけられた」「どこからか降ってきた」と感じている方もいらっしゃるかもしれない。実際、日本天文学会の会員や学会の事業に参加する関係者にアンケートを実施したとはいえ、この行

動規範の草案が少数のTFのメンバーによって作成されたものであることに変わりはない。

しかし、この行動規範が日本天文学会内で実施され、経験が蓄積され、「行動規範の存在は有益であるが、改善すべき点もある」と議論が重ねられることで、「会員の、会員による、会員のための行動規範」へと進化することは可能であろう。それが、TFの希望である。

謝 辞

本稿の執筆者の一人で実務理事との橋渡し役となった前副会長の野村を中心に、井田茂前会長、百瀬宗武前副会長、勝川行雄庶務理事、町田真美前庶務理事、鈴木竜二会計理事、酒向重行前会計理事の実務理事の方々には、学会規範の策定に関わる重要な機会を与えて頂いただけでなく、全体を通じて密で有益な意見交換をさせて頂いた。本行動規範が成立した背景には、会長・副会長はじめ、前会期の実務理事の方々の貢献が極めて大きかったことを記し、深く感謝申し上げたい。

人数が多いため一人ひとりのお名前を挙げさせて頂くことができないが、2024年度時の理事や代議員の方々には、理事会や代議員総会において数々の貴重なご意見やお励ましを頂いたばかりでなく、tennetアンケートへ周囲の会員の回答を促す草の根的な活動にも、複数回のご協力を頂いた。男女共同参画委員会からは、行動規範導入のきっかけやその後の意見交流を頂き、ジュニアセッション実行委員会からも、貴重なご意見を頂戴した。

英語版の行動規範の策定に関しては、会員の、Alexander Wagner氏（筑波大）とKelly Blumenthal氏（IAU OAO）から多大なご支援を頂いた。また、天文・天体物理若手夏の学校参加者および天文・天体物理若手の会へのアンケート調査に関しては、2024年度夏の学校校長であった成田佳奈香さん（東京大学理学系研究科）と若手の会委員会のご協力を頂いたおかげで、学生・若手世代

からの意見収集が可能になった。学会事務所職員の行動規範の導入については、市川隆元会長（東北大）から貴重なご助言を頂いた。

最後に、tennetアンケートや若手の会アンケート、TFによる秋季年会での学会発表やこれまでの意見交流にご回答や貴重なご意見をお寄せ下さった、すべての会員の皆さまに、この場をお借りしてあらためて心より感謝申し上げたい。

参考文献

- [1] 公益社団法人日本天文学会 理事会議事録(2024年3月8日) II-2. ハラスメント防止に対するガイドライン策定について, https://www.asj.or.jp/jp/about/minutes/item/rijikai_20240308.pdf (2025.7.22)
- [2] 馬場彩ほか, 2021, 「天文学会男女共同参画20年の歩み—天文学会アンケートから学ぶ—」, 天文月報, 114, 688
- [3] 公益社団法人日本天文学会 代議員総会議事録(2024年3月9日) II-1. 理事会(2024年3月8日)の報告, https://www.asj.or.jp/jp/about/minutes/item/daigiin_20240309.pdf (2025.7.22)
- [4] 公益社団法人日本天文学会 理事会議事録(2024年5月21日) III-6. Code of Conduct/ハラスメント防止ガイドラインタスクフォース, https://www.asj.or.jp/jp/about/minutes/item/rijikai_20240521.pdf (2025.7.22)
- [5] 公益社団法人日本天文学会 代議員総会議事録(2024年6月5日) III-5. Code of conduct / ハラスメント防止ガイドラインに関するタスクフォース報告, https://www.asj.or.jp/jp/about/minutes/item/daigiin_20240605.pdf (2025.7.22)
- [6] 林左絵子ほか, 2024, 「日本天文学会の規範とハラスメント防止ガイドラインを作ろう」, 日本天文学会2024年秋季年会(神戸)
- [7] 公益社団法人日本天文学会 理事会議事録(2024年9月9日) III-6. Code of Conduct/ハラスメント防止ガイドライン策定タスクフォース報告, https://www.asj.or.jp/jp/about/minutes/item/rijikai_20240909.pdf (2025.7.22)
- [8] 公益社団法人日本天文学会 代議員総会議事録(2024年9月12日) II-3. Code of Conduct/ハラスメント防止ガイドライン策定タスクフォース報告, https://www.asj.or.jp/jp/about/minutes/item/daigiin_20240912.pdf (2025.7.22)
- [9] 望月優子ほか, 2024, 「Code of Conduct/ハラスメント防止ガイドライン策定タスクフォース報告」, 2024年秋季年会会員全体集会(神戸)
- [10] 望月優子ほか, 「行動規範アンケートご協力への感謝と結果のご報告」, tennet1845(2024年12月26日付発信); 学会HP掲載(2025年1月7日付「会員へのお知らせ」欄) <https://www.asj.or.jp/jp/news/2025/news0107161707.html> (2025.7.22)
- [11] 公益社団法人日本天文学会 代議員総会議事録(2025年1月14日) II-4. 行動規範案および、それに関する定款の一部改訂について, https://www.asj.or.jp/jp/about/minutes/item/daigiin_20250114.pdf (2025.7.22)
- [12] 井田茂(日本天文学会会長), 「行動規範策定完了について」, tennet2005 (2025年2月6日付発信), 学会HP掲載(2025年2月10日付「会員へのお知らせ」欄) <https://www.asj.or.jp/jp/news/2025/news0210183805.html> (2025.7.22)
- [13] 公益社団法人日本天文学会 代議員総会議事録(2025年3月18日) II-1. 行動規範英語版について, https://www.asj.or.jp/jp/about/minutes/item/daigiin_20250318.pdf (2025.7.22)
- [14] 望月優子ほか, 2025, 「日本天文学会行動規範(Code of Conduct)の策定」, 2025年春季年会会員全体集会(水戸)
- [15] 望月優子ほか, 2025, 天文月報 月報だより・会務案内, 「日本天文学会行動規範の制定について」, 118, 253
- [16] IAU Code of Conduct (September 2023 version), <https://iau.org/Iau/About/Statutes---Rules/Code-of-Conduct.aspx> (2025.7.22)
- [17] Edmondson, A., 1999, Admin. Sci. Quart., 44, 350
- [18] Particle Physics Project Prioritization Panel, 2023, "Exploring the Quantum Universe—Pathways to Innovation and Discovery in Particle Physics", 105, https://www.usparticlephysics.org/2023-p5-report/assets/pdf/2023_P5_Report_Spreads.pdf (2025.7.22)
- [19] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2023, "Pathways to Discovery in Astronomy and Astrophysics for the 2020s", 110, The National Academies Press, <https://doi.org/10.17226/26141> (2025.7.22)
- [20] 公益社団法人日本天文学会 代議員総会議事録(2025年3月18日) III-2. 行動規範細則および、コンプライアンス委員会の内規の改訂について, https://www.asj.or.jp/jp/about/minutes/item/daigiin_20250318.pdf (2025.7.22)

Creating the Code of Conduct of the Astronomical Society of Japan

Yuko MOTIZUKI (Chair)¹, Akimasa KATAOKA²,
Haruka KUSAKABE³, Eiichiro KOMATSU⁴,
Hiroko SHINNAGA⁵, Hideko NOMURA² and
Saeko HAYASHI⁶

¹*Astro-Glaciology Lab., RIKEN Nishina Center,
2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan*

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

³*Department of General Systems Studies,
Graduate School of Arts and Sciences, The
University of Tokyo, 3-8-1 Komaba, Meguro-ku,
Tokyo 153-8902, Japan*

⁴*Max-Planck-Institut für Astrophysik, Karl-
Schwarzschild-Str. 1, D-85748 Garching, Germany*

⁵*Amanogawa galaxy Astronomy Research Center,
Graduate School of Science and Engineering,
Kagoshima University, 1-21-35 Korimoto,
Kagoshima 890-0065, Japan*

⁶*Kavli Institute for the Physics and Mathematics
of the Universe (WPI), The University of Tokyo
Institutes for Advanced Study, The University of
Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba
277-8583, Japan*

Abstract: The Task Force for formulating the Code of Conduct (CoC) and Harassment Prevention Guideline was launched in June 2024 under the leadership of the Working Directors. As the first mission of the Task Force, we developed the CoC of the Astronomical Society of Japan. The Japanese version CoC was approved in January 2025, followed by the approval of its English edition in March 2025. This report reviews the discussions that took place during the process of establishing the newly introduced CoC and looks ahead to future issues.

日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書

Galaxy origins in the JWST era: a “crisol” of stars, ISM, and supermassive black holes in the City of the Three Cultures & COSMOS Conference 2025

氏 名：田中 匠（東京大学理学系研究科天文学専攻（渡航当時））

渡航先：スペイン トレド，フランス マルセイユ

期 間：2025年5月10日～24日

本渡航では、トレド（スペイン）で5月12～16日に開催された（1）“Galaxy origins in the JWST era: a “crisol” of stars, ISM, and Supermassive black holes in the City of the Three Cultures”，およびマルセイユ（フランス）で5月19～23日に開催された（2）“COSMOS Conference 2025”の2つの国際研究会に参加し、両研究会で口頭発表を行った。研究会（1）のテーマは、James Webb Space Telescope (JWST) により明らかになった遠方宇宙の銀河や超大質量ブラックホール (SMBH) の形成・進化過程である。スペイン語で「るつぼ」を意味する “crisol” という名前の通り、この研究会では恒星・星間物質・SMBHなどの様々な構成成分が混ざり合う複雑な銀河の進化を理解するため、観測・理論両面の研究者が集まり、様々な観点から近年の研究成果や今後の研究戦略などが議論された。研究会（2）は、系外銀河分野で様々な望遠鏡を用いて重点的にサーベイが行われている領域の1つである COSMOS 領域についての研究会である。COSMOS 領域では、JWST Cycle 1 の COSMOS-Web (GO1727) において、NIRCam と MIRI を用いたサーベイとしてこれまでで最も広い領域（約0.54 平方度）を探索した撮像サーベイが実施された。さらに Cycle 3 では、一部の COSMOS-Web 探索領域において、スリットレス分光と新たなフィルターによる撮像を行う COSMOS-3D (GO5893) が展開されている。COSMOS 領域での研究を加速させるため、研究会内

では同領域における研究成果の共有や今後の研究・観測戦略が議論された。研究会（1）、（2）ともに、観測・理論の両面から遠方銀河関連の発表があり、自分が追い切れていなかった分野の最新成果なども知ることができた。さらに休憩時間の議論なども含めて、様々な分野からの多くの参加者と議論することができ、大変有意義な研究会であった。

私は両研究会にて、“The discovery of dual and offset “little red dots” with a pixel-by-pixel color selection method” というタイトルで口頭発表を行った。本研究は little red dot (LRD) と呼ばれる、JWST で発見された新たな天体種族に関する研究である。LRD は静止系紫外から可視域で Balmer 端付近に谷が来る V 字型の SED を持ち、コンパクトな形態を示す。幅の広い Balmer 輝線を持つことから活動銀河核であるとの見方が強いが、顕著な変光が確認されず、X 線や電波で検出されず、熱いトラスからの放射が見られるはずの中間赤外線域で平たい SED を示すなど、一般的な活動銀河核とは異なる性質を示すことから、正体は未だに議論され続けている。また母銀河成分もほとんど検出されず、ブラックホール質量 (M_{BH}) を幅の広い輝線を用いて推定した場合には、近傍宇宙におけるブラックホール質量と銀河の星質量 (M_*) との間の関係 ($M_{\text{BH}}-M_*$ 関係) よりも高い質量比 (M_{BH}/M_*) を持つことが示唆されている。そして高赤方偏移 ($z \sim 5-8$) において高い数密度を持つものの、低赤方偏移 ($z \sim 2-4$) においては数密度が急激に低下することが報告されている。このように既存の種類の天体とは異なる特徴を持つ初期宇宙に特有の種族であり、超 Eddington 降着や、種 BH に近い種族であ

る可能性など、SMBH形成の初期段階に対応する天体なのではないかという見方もなされている。

私はLRDが低赤方偏移に向けてどのように進化するのかという観点で研究を進めている。LRDを急激にLRDではなくするためのプロセスとして、私は銀河合体に注目しているものの、これまでの研究ではLRDの合体はあまり注目されていない。その要因の一つが、既存のLRD選択手法にあると考えている。先行研究では異なる半径での開口測光の結果を基に色やコンパクトさを評価してLRDを選択しているが、合体直前のようにLRDが近接する別の天体を持つ場合には、その天体が開口測光の結果に寄与するため見逃してしまう可能性がある。そこで私は、観測画像内のピクセルごとの色に注目した選択手法を新規に開発し、COSMOS-WebのNIRCam画像に適用した(Tanaka et al. in prep.). その結果、2つのLRDが近接しており合体途中にあると考えられる系(dual LRD)を世界で初めて発見した(Tanaka et al. 2024, arXiv:2412.14246). またLRDと銀河が近接している系も多数発見することに成功した。こうしたLRDの合体現象は、LRDやその母銀河の進化に大きく影響する重要な現象である可能性がある。口頭発表ではこの研究成果について、理論研究の成果(Tanaka et al. submitted)も踏まえながら議論した。

LRDは遠方銀河分野において非常に注目を集めており、中でも私の研究は独創的な手法を使い非常にユニークなサンプルを構築しているため、両研究会で多くの方から興味を持ってもらい議論を深めることができた。研究会(1)では、LRD分野で精力的な研究を行っているRoberto Maioli-

no氏やAnthony Taylor氏ともお互いのサンプルについて議論できた。私と同じようにLRDの合体現象やLRDに付随する成分について研究しているChang-Hao Chen氏、Rosa Mérida氏とは、互いの研究についての認識を深めながら、JWSTやALMAを用いた将来の観測計画について議論することができた。またDaniel Anglés-Alcázar氏とは、銀河合体を通じての $M_{\text{BH}}-M_*$ 関係の形成について、理論方面から議論を行うことができた。研究会(2)では、COSMOS領域でLRDの研究を行っているHollis Akins氏やCaitlin Casey氏、さらにはCOSMOSチームの中心人物の一人であるJeyhan Kartaltepe氏らと今後の観測方針について議論を行うことができた。また私自身が主導する、COSMOS領域からの $z \geq 10$ のLRD探査プロジェクトの初期成果を共有し、今後の研究・観測計画について議論を行うことができた。チーム内で普段行っているようなSlackやZoom上での議論よりもスムーズに話が進んだほか、共同研究者が所持しているデータをすぐにチェックしてもらうこともでき、研究が一気に進展した(なお、この $z \geq 10$ でのLRD探査の成果は既にTanaka et al. 2025, arXiv:2508.00057で報告されている)。

本渡航を通じて、最新成果を知るとともに、自身の研究結果を国際的にアピールし、JWST Cycle 5も含めた今後の研究・観測方針について深く議論することができた。特に日本国内には多くないLRDの研究者との議論は、非常に有意義な機会であった。本渡航中の議論は、今後の自身の研究および観測計画の立案に大きく貢献するものになると確信している。最後に、この有意義な渡航をご支援いただいた早川幸男基金、関係者の皆様に深く感謝を申し上げる。



星の文化史 世界13地域における星の知識・伝承・信仰

後藤 明 編著

丸善出版, 254頁, 定価4,500円+税

読み物
お薦め度
5
☆☆☆☆☆

古代人は星をよく観察した。星の出没方向や運動の周期性に意味を見出し、月や太陽の動きから方位を知り、暦を作り、生業に役立て、儀礼に取り込み、天体を神格化して信仰の対象とすることもあった。大規模なモニュメントを建造し、その信仰や暦観を刻み込んだ文明もあった。古代において星と人々の生活は密接に関わりを持っていた。

本書が収録するのは、最新の観測機器や天文学の専門知識が存在しなかった時期に「肉眼天文学」により人類が蓄積した膨大な星の知識・伝承・信仰である。世界の様々な地域から星文化が集められ、本文に収録しきれなかった情報はコラムで紹介されている。収集の対象地域は全大陸と太平洋である。世界は広い。聞いたこともない星や神々の名前、地名、民族名が本書には幾つも登場する。本書を読めば世界一周した気分になる。しかも時を遡って紀元前から現在までの星に対する人々の信仰や伝承を伺い知ることができる。それらは多種多様で、日本で教わるギリシャ・ローマ神話に基づいた星や星座の文化がいかに限定的であるか思い知る。世界には人々の生活に根ざして生まれ育った星文化が溢れている。人々の宇宙観は住む場所（緯度）に依存して多様である。極地方に住む人にとっては星の大部分が周極星であり、地平下に沈むことなく地平線とほぼ平行に回り続ける。赤道に住む人が寝転んで夜空を見れば、星はただ東から西へ流れていく。中緯度域の人々は星が天の北極（あるいは南極）を軸に東か

ら昇り、空高くを通過して西に沈むのを見る。星の動きのこうした違いは、それぞれの地域に住む人々の心に根付く宇宙観に大きな影響を及ぼすだろう。気候の違いも無視できない。様々な土地で行われる農業、狩猟、漁撈に合わせて人々が作り上げた暦は、雨季と乾季しかない地域と四季がある地域、そして年中同じような気候が続く地域ではまるで異なるだろう。それぞれの場所で独自に積み上げられ、独自に発展した星の知識や宇宙観を、文字を持つ民族は膨大な古文書に綴った。文字を持たない民族は物語や歌として後世に引き継いだ。長期間にわたる民族の移動があれば、物語や歌はその起源となった地域を離れて伝搬する。類似する神話や伝承を辿ることで人々が移動した足跡を追うことが可能かもしれない。地球上に散りばめられた星や宇宙観のタペストリーは、人類そのものの来歴を写す。

本書は、人類学者、暦学者、考古学者といったいわゆる文科系の学者による星文化の入念な分析の集積である。末尾の星座名の索引を見れば、星座が各地域でどのように認識されているかを直ちに知ることができる。精密化、機械化された現代の天文学とは異なる、人類が生身の体で自然から読み取り利用した星の知識を、ぜひ味わっていたきたい。

吉田二美（産業医科大学）

寄贈図書リスト

定金晃三・佐藤勝彦 編, A5判, 392ページ,
3,200円+税, 日本評論社

シリーズ現代の天文学7 恒星 [第2版], 野本憲一・

月報だより

月報だよりの原稿は毎月20日に締切り、翌月に発行の「天文月報」に掲載いたします。ご投稿いただいた記事は、翌月初旬に一度校正をお願いいたします。

記事の投稿は、e-mailでtougou@geppou.asj.or.jp宛にお送りください。折り返し、受領の連絡をいたします。

人事公募

京都大学大学院理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 (物理学第二分野) 助教

1. 職種: 助教
2. 募集人員: 1名
3. 勤務場所:
 - ・京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻物理学第二分野宇宙線研究室
 - ・京都市左京区北白川追分町
(変更の範囲) 大学が在宅勤務を許可又は命じた場合は自宅等
4. 勤務内容: 宇宙物理学に関する実験・観測的研究及び教育を行う。
5. 資格等: 博士号取得者 (着任時までに取得見込みの方)、もしくはそれと同等の研究業績を有すること
6. 着任時期: 令和8年4月1日以降のできるだけ早い時期
7. 任期: 5年
8. 試用期間: あり (6か月)
9. 勤務形態: 専門業務型裁量労働制 (週38時間45分相当, 1日7時間45分相当)
専門業務型裁量労働制を適用しない場合は、週5日8:30~17:15勤務
(休憩12:00~13:00)、超過勤務を命じる場合あり
休日: 土・日曜日, 祝日, 年末年始, 創立記念日
10. 給与・手当等: 本学支給基準に基づき支給
11. 社会保険: 文部科学省共済組合, 厚生年金, 雇用保険および労災保険に加入
12. 提出書類:
 - 履歴書 (顔写真, e-mailアドレス, 着任可能時期を明記)

○研究業績リスト

○主要論文3編以内

○研究業績概要

○着任後の研究計画 (教育に対する抱負も含む)

○推薦書または意見書

13. 公募締切:

令和7年10月31日(金) 23:59 (JST) 必着

14. 選考方法:

書類選考 (*必要と判断した場合、セミナーをお願いする場合があります。)

15. 書類送付先および問い合わせ先

(1) 書類送付先:

京都大学大学院理学研究科物理・宇宙物理学系学系長 中家剛

電子メールにてapply_at_scphys.kyoto-u.ac.jp (「_at_」を「@」に変えてください) 宛にpdf (最大サイズ20MB) を送付する。Subject欄は「宇宙線研究室 助教」とし、ファイル受領の返信を必ず確認のこと。

(2) 問合せ先:

京都大学大学院理学研究科物理学第二教室
准教授 榎戸輝揚

電話: 075-753-3858

e-mail: enoto.teruaki.2w_at_kyoto-u.ac.jp
(「_at_」を「@」に変えてください)

16. その他

- ・本公募は、主に、理化学研究所と京都大学・理学研究科の共同研究「量子光科学プロジェクト—先端的な量子光科学手法を用いた基礎的な物理学の諸問題の解決」に基づくものです。
- ・採用後は、物理・宇宙物理学系に所属し、大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻において勤務していただきます。
- ・個人情報保護法に基づき、応募書類は採用審査

にのみ使用します。正当な理由なく第三者への開示、譲渡および貸与することは一切ありません。

- ・京都大学は男女共同参画を推進しています。女性研究者の積極的な応募を期待します。
- ・本学における男女共同参画推進施策の一環として、「雇用の分野における男女の均等な機会及び待遇の確保等に関する法律（男女雇用機会均等法）」第8条の規定に基づき、選考において評価が同等である場合は、女性を優先して採用します。
- ・京都大学では教育・研究および就業と家庭生活との両立を支援いたします。 <https://www.cwr.kyoto-u.ac.jp>
- ・出産、育児または介護により研究を中断した期間がある場合は、応募者の申し出により、研究業績の審査において考慮しますので、その旨を提出書類に記入してください。
- ・京都大学では、すべてのキャンパスにおいて、屋内での喫煙を禁止し、屋外では、喫煙場所に指定された場所を除き、喫煙を禁止するなど、受動喫煙の防止を図っています。
- ・京都大学大学院理学研究科は、研究活動におけるコンプライアンスに対する教職員や学生の意識の向上に努めています。

研究助成

2026 年度笹川科学研究助成の募集

■主な募集条件

【実践研究部門】助成上限額：1件50万円

- ・生涯学習施設（博物館、図書館等）に所属している専門職員（学芸員、司書等）
- ・年齢、雇用形態は問わない

【学術研究部門】助成上限額：1件150万円

- ・35歳以下
- ・大学院生等（修士課程・博士課程）または任期付き雇用の若手研究者

※但し、「海に関係する研究」は重点テーマとして支援するため任期無し雇用の方も対象とする

■申請期間

2025年9月16日から2025年10月15日17:00まで

■申請方法

Webからの申請となります。詳細は本会Webサイトをご確認下さい。

<https://www.jss.or.jp/ikusei/sasakawa/>

会務案内

第9期日本天文学会代議員選挙に関する公示

2025年9月20日

選挙管理委員会委員長 山崎 了

定款第32, 33, 34, 35条および代議員選挙施行細則（以下「細則」）に基づき、第9期代議員24名（任期2026～2029年度の4年間）を選出する選挙を下記のとおり実施いたします。選挙日程は次のとおりです。

9月20日（土）：選挙公示

9月20日（土）～10月3日（金）：推薦委員会への推薦受付期間

9月20日（土）～10月10日（金）：選挙管理委員会への立候補受付

11月7日（金）：電子投票に必要な情報を有権者へ通知開始。

11月7日（金）～12月4日（木）：投票期間

12月11日（木）：開票

1. 選挙権および被選挙権を有する方は、公示の時点での正会員です。ただし、非改選代議員は被選挙権がありません（細則第5条）。非改選代議員の一覧は本案内の後半をご参照ください。
2. 投票は10名以内の無記名連記とします（細則第9条）。
3. 立候補される方は、選挙管理委員（rikkouho2025@asj.or.jp）宛に、氏名・会員番号・立候補の意志を電子メールにてご連絡ください。所信表明がある場合には、1ページ以内のPDF（文章のみ）で作成し、電子メールに添付してください（細則第7条）。
4. 候補者を推薦される場合には、推薦委員会（suisen2025@asj.or.jp）宛に、推薦する正会員の氏名を電子メールで送って頂くか、ウェブフォームをご利用ください（細則第7条）。
候補者推薦フォーム：<https://www.asj.or.jp/jimu/suisen/>
5. 有権者には、11月7日（金）以降に電子投票に必要な情報を電子メールまたは郵送で通知いたします（細則第8条）。なお、立候補者、推薦委員会による候補者、および有権者の名簿は投票用サイトに掲載いたします。
※学会へ登録のメールアドレスや住所に変更があ

る方は10月17日(金) までに変更届を学会事務所へ提出してください。

6. 選出された代議員の名簿は、天文月報119巻2号(2026年1月20日発行予定)にて発表いたします(細則第11条)。

【非改選代議員】(24名)〈任期: 2024.4.1~2028.3.31〉

相川祐理	赤堀卓也	浅井歩	石垣美歩
市来淨興	井上昭雄	井上芳幸	江草芙実
大朝由美子	大須賀健	大向一行	岡本桜子
檜山和己	諏訪雄大	富田晃彦	深川美里
藤井通子	細川隆史	堀田英之	松本浩典
望月優子	山岡均	山崎了	吉田直紀

編集委員より

天文月報オンライン記事全公開のお知らせ

天文月報オンラインでは、これまで一部の記事を発行後一年間アクセス制限することにより、会員限定で公開していました。2025年4月号よりアクセス制限をやめ、過去一年間のバックナンバーも含めすべての記事をパスワード無しで読めるようになります。

今後一層、天文月報オンラインを日本の天文学の普及にお役立ていただければ幸いです。

天文月報記事投稿用アップローダー

https://www.asj.or.jp/jp/activities/geppou/author_submission/

■ログイン

ユーザー名: geppou パスワード: toukou

■アップロードの仕方

アップロード画面で必要事項を埋めてください。するとアップロードに進むことができます。できる限りファイルは1つにまとめてください。ファイルが複数ある場合は「複数のファイルを投稿する」ボタンを押してください。押すたびに欄が増えます。1回あたり全部で最大50 Mbyteまで、個数は20個まで送信でき

ます。それ以上の巨大なファイルのアップロードは推奨されませんが、やむをえない場合は分割してお送りください。

■注意

投稿者の個人の認証はcookieを利用しています。したがってcookieを受け取らないブラウザでは使えません。

またフォームのチェックや可変個数のアップロードボックスはjavascriptを利用していますのでjavascriptが使えなければこのアップローダーは使えません。

その場合はtoukou@geppou.asj.or.jpまでメールでご投稿ください。

■連絡先

アップローダーに関するご質問はtoukou@geppou.asj.or.jpまでお願いします。

(天文月報編集長)

天文月報記事ご執筆用テンプレート

SKYLIGHT, EUREKA, 天球儀などのご執筆にあたりましては、日本天文学会HP内「天文月報」のページにあります「投稿用テンプレート」をご活用ください。

https://www.asj.or.jp/jp/activities/geppou/author_template/

TeX・LaTeXで執筆される方はテンプレートをオンライン上またはダウンロードしてご利用ください。MSWordで執筆される方はwordテンプレートをダウンロードしてご利用ください。また、ご執筆の前に必ず「執筆マニュアル」をご一読ください。

https://www.asj.or.jp/jp/activities/geppou/author_manual/tex/をご利用される場合は、あわせてreadmeもお読み下さい。

また、ご利用にあたって不具合を発見された方は、編集委員会までご連絡をお願い申し上げます

天文月報 118巻11月号 主な掲載予定記事

林忠四郎賞：高エネルギー突発天体の理論的研究【井岡邦仁】

ASTRO NEWS: XRISM ニュース (5) 国際相互較正 -IACHEC 年次集会 2025 開催記録-

天球儀：〈2024年度日本天文学会天体発見賞〉超新星 2024aeee の発見まで【大野眞一】〈2024年度日本天文学会天体発見賞〉光害地のマンションからデジタル観測 超新星 2024ahv の発見【大越英比古】すばる望遠鏡共同利用観測プロポーザルにおける無意識バイアス調査報告【岡本桜子・井上昭雄・植村誠】

〈シリーズ〉海外の研究室から：非磁気流体を愛する国から【大場崇義】

〈シリーズ〉天文学者たちの昭和：日江井榮二郎氏ロングインタビュー [第8回] 日本の太陽観測施設の拡充【高橋慶太郎】

編集委員：日下部展彦（編集長）、岡本文典、小山翔子、志達めぐみ、鈴木大介、高橋葵、田中壱、谷川衝、鳥海森、中島亜紗美、信川久実子、橋本拓也、福島肇、藤澤幸太郎、宮武広直、宮本祐介、守屋堯

令和7年9月20日 発行人 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1 国立天文台内 公益社団法人 日本天文学会

印刷発行 印刷所 〒162-0801 新宿区山吹町332-6 株式会社 国際文献社

定価733円（本体667円）発行所 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1 国立天文台内 公益社団法人 日本天文学会

Tel: 0422-31-1359（事務所）／0422-31-5488（月報） Fax: 0422-31-5487

振込口座：郵便振替口座00160-1-13595 日本天文学会

三菱UFJ銀行 三鷹支店（普）4434400 公益社団法人 日本天文学会

日本天文学会のウェブサイト <https://www.asj.or.jp/> 月報編集 e-mail: toukou@geppou.asj.or.jp

会費には天文月報購読料が含まれます。

©公益社団法人日本天文学会 2025 年（本誌掲載記事は無断転載を禁じます）