

ハビタブルな太陽系外惑星の 放射線環境の評価

山敷 庸亮 Yamashiki Yosuke

1. はじめに

太陽系外惑星が生命居住可能な領域(ハビタブル・ ゾーン)に位置しているかどうかを評価する上(惑 星系ハビタブルゾーン (Circumstellar habitable zones- CHZs)) で基準とされるのは、「液体の水」 が存在可能な領域に惑星が位置しているかどうかで ある。一般的には CHZs の内側の境界条件は、「暴 走温室条件」として、射出限界と等しい恒星放射を 受ける線として定義され、また外側の境界条件は「全 球凍結条件」として、全球凍結が発生しないために 温室効果ガスである CO2 が凍ってしまわない限界 を示す。この考え方によると、太陽より明るい恒星 では CHZs は太陽系よりずっと外側に位置し,ハビ タブルな惑星の公転周期は非常に長くなる。太陽と 同じくらいの主系列星(G型星)であれば、ハビタ ブルな惑星の公転周期は地球のそれに近いはずなの で、おおよそ1年前後となる。このような条件で発 見されたハビタブル惑星候補の1つ, Kepler-452bは, 公転周期が384日、地球とほぼ同じ環境を有してい る可能性が示唆され、2015年7月23日の NASA に よるプレスリリースの際「地球のいとこ」とされた。 ところが、発見から2年が経った2018年4月、 Kepler-452bのような公転周期の長い惑星のトラン ジットが惑星由来のものであるかについては, Kepler 宇宙望遠鏡の固有ノイズ等の影響が排除でき るといいきれなければ惑星が実際に存在するとはい いきれない、すなわち、存在しない可能性も議論さ れ始めた¹⁾。しかし Kepler-452b の存在をもう1度

観測により検証しようとしても, Kepler 宇宙望遠鏡 は 2018 年 10 月 30 日で運転終了しており、後継の TESS (トランジット系外惑星探索衛星) では長期 にわたって1つの恒星を観測することは予定されて いない。ましてや昼夜があり、曇天の日もある地上 の望遠鏡からは、1年以上にわたって連続的に恒星 を観測することはできない。このような経緯から, Kepler-452b はその存在の確からしさをしばらくは 確認することができない「幻の地球のいとこ」とな りつつある。G型星をまわる地球型ハビタブル惑星 の発見や観測が困難になる状況の中, TESS では, CHZs に位置する惑星の公転周期がはるかに短く, トランジット法での観測が容易な、太陽よりはるか に小さな赤色矮星(M型星)の周りを公転する惑 星に焦点を当てた。これは、恒星の前を惑星が通過 する際の減光を捉えるトランジット観測において, 減光が大きく公転周期が短いために非常に発見が容 易なためである。そして、そのM型星のまわりには、 ハビタブルと考えられる惑星が発見されつづけ、著 者が EXOKyoto を用いて行った解析によると 2020 年5月15日現在で46個の地球サイズのハビタブル 惑星が存在すると言える。その中で M 型星を主星 として持つ惑星は35個で、ハビタブル惑星の捜索 は、M型星周りが主流となりつつある。

M型星は太陽よりもはるかに不安定で,活発な フレアを引き起こすことが知られている。フレアと 一言でいっても,M型星のフレア活動を近傍から 詳細に観測することはできないため,遠方(地球近 傍)からはるかかなたのM型星である点光源から

出る光の特に可視光線成分と,X線領域や近赤外線 成分の時間変化データが観測で得られた程度であ る。太陽における太陽観測衛星 (Solar Dynamics Observatory-SDO) や GOES 衛星, また我が国の太 陽観測衛星「ようこう (SOLAR-A)」や「ひので (SOLAR-B)|. また京大飛騨天文台の太陽磁場活動 望遠鏡 (SMART) 等による詳細な三次元+時系列 の四次元データ解析の結果と比べると、何も分かっ ていないに等しい。太陽においては、その構造から、 プロミネンスの発生、コロナ質量放出(CME)の 存在. そして太陽高エネルギー粒子 (SEP) が. 地 球の磁場の影響を受け、最終的に地球大気に衝突す る際、様々な二次粒子が発生することが詳細に解明 されている。特に CME 発生に伴う太陽陽子イベン ト (SPE), あるいはそれに伴って地上で中性子が 観測される地上観測レベル上昇事象(GLE)の際. ¹⁴C や ¹⁰Be 等の同位体が形成され, それぞれスギの 年輪2)や南極氷床3)等を用いてこれらの元素の同位 体比を調べることにより過去の巨大イベント (AD774 Mivake event 等)の存在を推定することが できる。すなわち、G型星である太陽のフレアによ るイベントは、立体的に詳細が観測されていると言 える。しかしながら、太陽ですら、過去に発生した であろう超巨大フレアの痕跡は垣間見ることができ るものの、実際にどのような現象であったかを知る ことはできない。それを推定する1つの方法は、太 陽より若くて活発な星を観測することであり、もう 1つの方法は、そのような星の電磁流体力学シミュ レーション (MHD) 解析を行って詳細な運動を予 測することである。残念ながら M 型星においては、 この双方がまだ不足している。観測データは今 TESS で進められているが、まだまだ不十分である。 また実際にどのような構造で CME が発生するかも 分からない。にもかかわらず、フレアが頻繁に発生 しており、恒星からの距離が近いことから、フレア の影響は大きいだろうと見積もられ、これらハビタ ブルな惑星は「居住が困難」と言われることとなっ た。このような状況を鑑み、フレアの発生頻度と、 その大気圧を定量的に把握できれば、これらの M 型星周りのハビタビリティに新しい切り口を切り開 くのではないかというのがそもそもの研究の発端で ある。

従来ハビタブル惑星を有する惑星系において,実

際のフレアの発生頻度やその規模,またフレアによ り発生する CME に伴う惑星表面の宇宙放射線被ば く等において,定量的な評価はなされてこなかった。 その原因は,(1)系外惑星の主星におけるフレアの 発生頻度と規模の評価が不十分であったこと,(2) ある一定規模のフレアが発生したとき,周回する惑 星にどれくらいの影響が生ずるのかについて定量的 な評価を行う手法が確立していなかったこと,(3) 系外惑星の大気環境や磁場環境が不明確であったこ と,(4)系外惑星の主星から出る宇宙放射線のスペ クトルが不明であること,(5)一連のプロセスを統 合的に評価できるシステムがなかったこと,が理由 として考えられる。

2. PHITS-EXOKyoto アルゴリズム

今回筆者らのグループ*では、上記の4つの問題 点を以下のような取組みによって解決した⁴(図1)。

- (1) 黒点面積及び自転速度等の系外惑星の主星の観 測情報と、従来のケプラー宇宙望遠鏡及び関連の 観測結果を用いて、それぞれの主星のフレアの発 生頻度と規模を、(a) 1年に1度のフレア、(b) 観測された黒点に対する最大のフレア、(c) その 温度の主星で発生しうる最大のフレアに分けて、 そのエネルギーの定量化を行った。
- (2) MHD や観測から推定される CME の飛行経路 に基づいて,惑星の公転軌道面からの広がりの角 度と,水平に飛散する方向を考慮して,惑星の主 星からの距離や位置に従って CME による宇宙放 射線強度の比を算出する定式化を行い,簡単な計 算でおおよその比率を求める工夫を行った。
- (3) 系外惑星の大気として想定される3つの代表的 な大気組成(N₂+O₂, CO₂, H₂)を想定し,また地 球規模の双極子磁場(2つの極が生む磁場)があ る場合と,磁場がない場合等を想定し,放射線輸 送計算コード PHITS を用いて大気中の宇宙放射

^{*} 山敷庸亮 京都大学総合生存学館教授、佐々木貴教 京都大 学理学研究科助教、柴田一成 京都大学名誉教授、前原裕 之 国立天文台助教、Vladimir Airapetian アメリカ航空宇宙 局ゴダード宇宙飛行センター(NASA/GSFC)博士、野津 湧太 コロラド大学・日本学術振興会海外特別研究員、佐 藤達彦 日本原子力研究開発機構研究主幹、野津翔太 理化 学研究所特別研究員ら



図1 生命が居住可能な系外惑星へのスーパーフレアの影響を算出



図 2 今回の計算に用いた宇宙放射線スペクトル

過去に観測された太陽 CME で最大規模といわれる Carrington イベント (1859.9.1) と、過去に観測された太陽 CME で最も大気中の透過力の高 かったイベント (GLE43) と同じスペクトル

線挙動を詳細に解析して想定被ばく量を定量化した。

(4) 過去に観測された太陽 CME で最大規模といわれる Carrington イベント(1859.9.1)と,過去に観測された太陽 CME で最も大気中の透過力の高かったイベント(GLE43)と同じエネルギースペクトルの双方を想定した(図2)。

(5) これらの一連の測定データと、PHITS による計 算手法及び計算結果を、系外惑星データベース ExoKyoto に組み込むことにより、すべてのデー タを統合的に評価できるシステムを構築した。こ れらの一連の工夫により、世界で初めて定量的に 系外惑星における恒星フレアの影響を評価可能に した。

上記のアルゴリズムを用いた計算の結果,系外惑 星のほとんどの表面環境では、1気圧の大気圧が備 わっている限りにおいて,地表面での想定被ばく量 は最大で1~数mSv程度となり,地球型生命にとっ ては致命的でないレベルであることが示唆された。 また,惑星が地球のような双極子磁場を備えている 場合,更にその値が低くなるため,基本的にこれら の惑星は大気を十分に有している限りにおいて, CME に伴う宇宙放射線被ばくの影響は少ないと評 価された(図3,図4)。

しかしながら、大気圧が十分でない環境(例えば ヒマラヤ山脈山頂部等,地球の表面上における最低 気圧環境)の場合,生命にとって十分に危険なレベ ルまで放射線被ばく量が高くなることが算定された (図3,図4)。更に、これらの系外惑星の大気散逸率



図 3 地球型大気 (N₂+O₂) を透過する推定被ばく量 (Sv)の鉛直分布、過去に観測された太陽 CME で最 も大気中の透過力の高かったイベント (GLE43) と Carrington イベント (1859.9.1) を想定

系外惑星は Proxima Centauri b (緑の四角), TRAPPIST-1 e (青丸), Kepler-283 c (茶色い四角), Kepler-1634 b (青いクロス), Ross-128 b (赤い四角) and GJ-699 b (ピンクの四角) で、比較のために地球(青い四角) と火星(赤十字)を配置している。それぞれ 毎年 1 回起こる最大のフレア (α) (c) と、黒点面積から推定される最大のフレア (β) (d) による推定被ばく量を計算。単位は(Sv). 火星表面の大気圧は 9 g/cm²; 地上最低気圧は 365 g/cm²; 地上の気圧は 1037 g/cm²; 系外惑星の想定大気圧は 1/10 気圧、すなわち 103.7 g/cm² とした



図 4 地球型大気 (N₂+O₂) を透過する推定被ばく量 (Sv) の鉛直分布、過去に観測された太陽 CME で最 も大気中の透過力の高かったイベント (GLE43) と Carrington イベント (1859.9.1) を想定

系外惑星は TRAPPIST-1 b (青の四角), c (赤いクロス), d (緑の四角), e (青い丸), f (茶色い四角), g (青のクロス), h (赤い四角)。 毎年1回起こる最大のフレア (α)(β)による推定被ばく量を計算。単位は(Sv)。火星表面の大気圧は9g/cm²;地上最低気圧は 365 g/cm²;地上の気圧は1037 g/cm²;系外惑星の想定大気圧は1/10気圧、すなわち103.7 g/cm²とした







それぞれ1/10年に1回のフレア(三角)毎年発生(赤丸)10年に1回のフレア(緑丸)黒点面積から 推定される最大フレア(逆三角)同じ温度のG型星で起こりうる最大のフレア(クロス)による推定被 ばく量を想定。通常の飛行高度(12 km)から高度を下げると、被ばく量を低減できる

を評価するため,主星からの極端紫外線(XUV) 成分の定量評価を行い,大気散逸率を比較したところ,地球と比較して70倍前後の高い大気散逸率が 算定された。これらを考慮すると,M型星周りの ハビタブルゾーンに存在する地球型の系外惑星は, 十分な大気圧を有していない可能性が高く,更に主 星の重力により潮汐固定(惑星が常に同じ面を主星 に向けること)されている可能性を考えると、十分 な磁場も有していない可能性が想定される。これら を考慮し、推定被ばく量を再算定すると(条件は 「1/10気圧、磁場なし」)、ハビタブルと考えられて いる系外惑星プロキシマ・ケンタウリ β (Proxima Centauri b)やトラピスト-Ie(TRAPPIST-Ie)であっ ても、毎年1度発生する頻度における CME(Annual Flare)において、地球型生命に危険な影響を及ぼ すレベルの被ばく量(10 Sv)に近くなることが算 定された。

なお、今回の研究においては、上記(4)において、 推定エネルギースペクトルを GLE43 のものとした が、実際の M 型星のフレアにおけるスペクトルは 不明である。これらの星で推定されているフレアの エネルギー規模が大きいことを考慮し、かつ、フレ アのエネルギーに比例して陽子が更に加速されると 考えた場合、更に大きな被ばく量が想定される。

更に、同じシステムを用いて太陽系の他の惑星の CMEによる被ばく量と頻度を推定することができ、 それによると、地球のような磁場を持たず、大気圧 が地球に比べ極端に小さい(0.007気圧)火星にお いては、GLE42/43と同等のCMEが発生してその 宇宙放射線が火星に直撃した場合、火星表面での被 ばく量が200mSvに達する可能性があることが示 唆された。これは地上の想定被ばく量に比べて約 50万倍、航空機飛行高度の推定被ばく量の約千倍 にも及び、地球が大気と磁場によって危険な宇宙放 射線から守られていることが定量的に明らかになっ た。

3. 研究への応用

本研究プロジェクトでは、系外惑星における恒星 スーパーフレアの影響を定量的に評価する手法を世 界で初めて開発し、それらを主要なハビタブルな系 外惑星に適用し、様々なシナリオのもとに放射線環 境について議論を行った。また本手法は、ExoKyoto を通じて他の系外惑星への応用を可能とし、更には 同じ手法で太陽系内の惑星における被ばく量推定も 可能であることを示した。ただし、恒星スーパーフ レアに起因する CME を実際に観測した例はなく、 今後系外惑星のオーロラ等の観測や、恒星の磁場観 測に基づいた MHD の結果により,惑星の大気構造 や粒子の加速メカニズムがより詳細に明らかになれ ば、今回の結果を更に上回る評価が可能となると思 われる。また、CME に伴う宇宙放射線被ばくを予 想し、危険性を回避する方法を確立することは、将 来の月や火星の探査において大変重要であり、有人 宇宙開発に貢献することが期待される。

また, 系外惑星に本当に生命がいるのか?あるい

はいるとしたらどのような生命であろうか?遠い将 来人類は移住先としてこれらの惑星を候補に挙げる ことができるのか?等,系外惑星の居住可能性に関 しては様々な疑問が残されており,本研究はこれら の疑問に対する現時点での定量的な答えの1つであ るが,これから更に具体的な議論と想像が高まるこ とを期待している。

4. 課題

以上, 今回のモデルと計算プロセスについて紹介 を行ったが、以下が今後の課題である。(1)恒星フ レアの発生は、可視光観測等によって明らかにされ ているが、果たして恒星フレアが発生した際、CME が発生し、そこからが同じように飛来するのか?ま たそれはどの程度の規模か?現在のモデルは、太陽 における黒点とフレア発生頻度から, CME 発生頻度 も含めた一般化を行い、その発生スペクトルを GLE43 のものとした。ただ、実際はこれらは太陽と 同一ではなく、恒星フレア発生と、CME 発生には太 陽とは別のメカニズムがある可能性もある。CME 及 び SEP を観測しようとすると、高エネルギー粒子(陽 子線)等を捉える必要があるが、太陽系外惑星は我々 からはるかに離れているため、直接観測は無理であ る。間接的に CME が惑星大気に接する際のオーロ ラ発生を観測しようという試みもある。ただし、こ れは中心星からそれほど遠くない場所を公転する惑 星の大気での微弱な増光を観測する必要があること から、非常に困難であると考えられる。フレア・ CME 発生については、直接様々な望遠鏡での観測プ ロジェクトがあるが、X線天文衛星(XMM)やハッ ブル宇宙望遠鏡(HST)での紫外線観測、そして James Webb Telescope 等による系外惑星大気の分光観 測も考えられる。我が国のせいめい望遠鏡等も同時 観測が期待できる。これらの動きを MHD モデルを 用いて解析し,理論的に頻度は到達距離等を予測し ようという試みもある。ただし、実際の恒星の活動 状況を知るために、活発なフレア星の連続観測が必 要である。また、スペクトルについて、現在は GLE43 を用いて計算を行ったが、はるかに規模の大 きな恒星フレアではスペクトルが更に高エネルギー 側にピークが移る可能性もある。そのようなスペク トルを実際にその恒星系にて観測することは、しば らくは不可能だと思われるので,これも MHD を用 いた数値予測に依存する必要がある。

次に、今回の研究においては、大気散逸を XUV 成分に比例したものとして算定した。可能なら、恒 星風や SEP による大気散逸への影響を加味したかっ たが、これについての理論がまだ確立していない。 また、現実にハビタブル惑星を見つけたとしても、 その惑星の大気圧を計測するのはずいぶん先の話と 考えられる。そのためシミュレーションはあくまで も様々な大気圧を仮定した場合のケースである。

更に,SPEによる大気の化学的変化について計算 が必要となる。Airapetian らは、これらによって、 一酸化二窒素 (N₂O) やシアン化水素 (HCN) が発 生し、若くて暗い太陽のもとで地球や火星の初期大 気での温暖化を促進したと発表し[®]、恒星フレアの 影響が系外惑星の生命誕生に非常に重要な役割を果 たすとした^{¬¬}が、恒星フレアの影響により、本来は CHZ の外側にある惑星が、温室効果によりハビタ ブルとなる可能性もある。

我々の太陽も大きなフレアにさらされる可能性も あり[®]地球への影響評価も重要となる。筆者らは, このモデルを用いて,地球の航空機被ばくについて 一般的な解析を行った。SPE 発生時の航空機の被ば くリスクの定量化を行い,経済コストと被ばくによ る人体への健康被害を最小限に抑えるための代替飛 行高度を提案した[®]。PHITS-EXOKyoto放射線量推定 モジュールとの組み合わせにより,フレアの規模と 磁場の影響を考慮した様々な惑星上での被ばくリス クの定量化が可能となった。SEP の発生確率は GOES の観測による X 線強度による X スケールを 使用し,現在までに地上での中性子の増加が確認さ れている地上観測レベル上昇事象(GLE)の回数を 基準とした。本論文では更に,活動期と非活動期に おける黒点面積を仮定し,各場合におけるフレアの 発生確率を比例関係から算出⁵⁰することで,フレア による粒子イベントの強度を仮定,それぞれの場合 での通常飛行航路と低空飛行航路における推定被ば く量及び燃料コスト上昇を評価した(図5)。スー パーフレア発生時に航空機を運航する場合,20 mSv を超えるため,フライトはキャンセルを余儀なくさ れ,経済的損失も大きくなる。そこで,航空機の飛 行高度を12 kmから9.5 km程度に下げるだけで被 ばく量を減少させる事ができ,経済的損失もそれほ ど大きくないことが推定された。この解析は,太陽 系外惑星の被ばく評価を行ったものと同じモデルを 用いているためにシンプルなものであるが,現在 行っている更に高度な解析と線量率等の比較検討を 用いても,その値は妥当であることが分かっている。

引用文献

- Mullally, et al., The Astronomical Journal, 155:210 (6pp), doi: 10.3847/1538-881/aabae3 (2018)
- Miyake, et al., Nature, 486. 240-242, doi: 10.1038/ nature11123 (2012)
- Mekhaldi, et al., Nature Communications, 6, 8611 doi: 10.1038/ncomms9611 (2015)
- 4) Yamashiki, et al., The Astrophysical Journal, 881, 2. doi : https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab2a71 (2019)
- 5) Maehara, et al., Publications of the Astronomical Society of Japan, 69, 3. doi: 10.1093/pasj/psx013 (2017)
- Airapetian, et al., Nature Geoscience, 9, 452-455. doi: 10.1038/ngeo2719 (2016)
- Airapetian, et al., International Journal of Astrobiology doi:10.1017/S1473550419000132 (2019)
- Notsu, et al., The Astrophysical Journal. 876:58 (39pp) doi: 10.3847/1538-4357/ab14e6 (2019)
- Yamashiki. et al., Evolutionary and Institutional Economics Review. doi: 10.1007/s40844-020-00163-4 (2020)

(京都大学大学院総合生存学館(思修館))