

HABITABILITY AND CHARACTERIZATION OF EXOPLANETS

Yasunori Hori

Exoplanet Detection Project, Astrobiology Center
Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan
2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 1818588, Japan
yasunori.hori@nao.ac.jp

(Received: November, 21, 2020 Accepted: December, 9 2020)

Abstract

Exoplanet census revealed that Earth-sized planets are abundant and ubiquitous in the Galaxy. Upcoming space missions such as JWST and the development of 30-m class telescopes as well as the recent discovery of water plumes on Enceladus and possibly, on Europa have encouraged us to search for life beyond Earth; e.g., biosignatures such as the red edge and biotic gases. In the context of astronomy, both liquid water on the planetary surface and greenhouse effects in the atmosphere are indispensable to the habitability of terrestrial planets.

Technological advances in exoplanet observations are capable of exploring atmospheres of Earth-sized planets outside the Solar System. Here we review the current status of exoplanet characterization and our understating of the habitability of terrestrial planets, including the Earth.

Keywords: exoplanet, extrasolar planet, atmosphere, habitability, biosignature, astrobiology

太陽系外惑星の特徴付けと生命居住可能性

堀 安範

アストロバイオロジーセンター

国立天文台 ハワイ観測所

〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1

yasunori.hori@nao.ac.jp

1. はじめに

中性水素原子の 21cm 線を利用した電波交信を目指す地球外知的生命探査(SETI)のオズマ計画や探査機バイキングによる火星での生命探査に代表されるように、地球以外に生命が存在するか否かは有史以来、人類にとって根源的な問いである。月の地下氷や火星極域での氷冠や地底湖の発見、そして火星大気中でのメタンの存在によって、地球外での生命の有無は連綿と衆目を集める。近年、カッシーニ探査機によって、木星の氷衛星 Enceladus の南極付近か

ら水蒸気プルームの噴出が観測[1]されたのを皮切りに、土星最大の衛星 Titan の表層にエタン・メタン湖の発見[2]、そしてハッブル宇宙望遠鏡の紫外線観測で木星の氷衛星 Europa から水蒸気噴出が検出[3]され、宇宙生命探査の機運は急速な高まりを見せる。

宇宙での生命探査の転換期となったのは 1995 年の太陽系外での惑星(太陽系外惑星: exoplanet / extrasolar planet)発見である[4]。それから 25 年、現在までに 4,000 個を超える太陽系外惑星が発見され(図 1 参照)、宇宙には地球サイズの惑星が普遍的かつ豊富に存在する[5]ことも明らかになってきた(図 2 参照)。今後の 10 年、太陽系外惑星で生命の兆候・痕跡(バイオシグネチャー: biosignature)を探すべく、口径 30m 級の超大型望遠鏡(TMT, GMT, E-ELT)の建設や宇宙望遠鏡の打ち上げ(例. ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡: JWST)が続々と予定されている。まさにいま、私たちは宇宙生物学(アストロバイオロジー: astrobiology)の黎明期にいる。

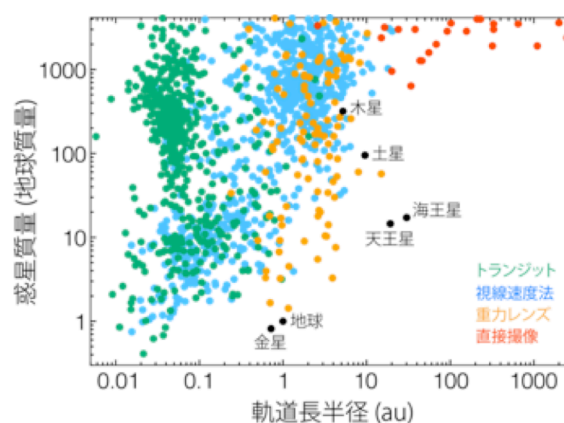


図 1. これまでに発見された太陽系外惑星の質量と軌道長半径の関係。各色は惑星の発見手法に対応し、1au(1 天文単位)は太陽-地球間の距離(データは NASA Exoplanet Archive 参照)。

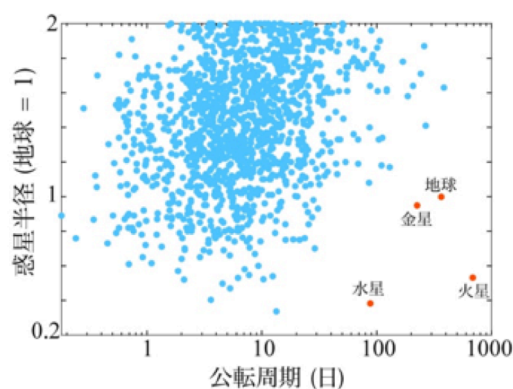


図 2. 太陽系の惑星と地球サイズの太陽系外惑星の半径と公転周期の関係（データは NASA Exoplanet Archive 参照）。

我々の知る、生命を宿す惑星は地球しかなく、太陽系でさえも、地球以外の他の天体での生命の有無はいまだベールに包まれる。異なる表層環境や太陽以外の星の周りでどのような生命が誕生または存在し得るかは推測の域を出ない。地球の初期生命と目される好熱細菌や好塩菌のような古細菌は温泉や海底熱水環境に生息する事実から、液体の水（海）の存在は地球の気候安定化に加えて、生命誕生と密接に関係した要素の一つであったと想像される（ただし、地球の海洋は表面積の約 70 %を占めるが、海洋質量は地球質量の約 0.023 %、海の平均的深さに換算するとおよそ 4 km しかない。地球は海惑星より陸惑星に近い）。そこで、天文学では、惑星表面に液体の水が存在することが生命居住可能な惑星（ハビタブル惑星：habitable planet or 潜在的ハビタブル惑星：potentially-habitable planet）の必要条件に挙げられる。次章では、宇宙の生命探査という壮大な挑戦に対する第一歩として、地球と似た環境を有する惑星に着目して、惑星表面に液体の水が存在する条件から考察していく。

2. 生命居住可能な惑星

惑星表面に液体の水が存在する条件は、星からの距離が鍵を握る。直感的な理解では、星に近すぎる惑星の表面は高温で水がすべて蒸発してしまい、星から遠すぎると温室効果を担う気体（例、二酸化炭素）を以ってしても惑星の表面温度が氷点下に達する状況が想定される。この内と外の境界に挟まれた軌道位置を「惑星

表面に液体の水が存在可能な領域」として、ハビタブルゾーン（habitable zone または Goldilocks zone）と呼ばれる[6]。

ハビタブルゾーンの内側境界は暴走温室（runaway greenhouse）状態で定義される。表面に液体の水を保持する惑星では、表面温度の上昇とともに大気中の（飽和）水蒸気量が増加する。水蒸気量の増加は温室効果を増大し、表面温度の更なる上昇につながる。しかし、水蒸気大気は光学的に不透明になるため、惑星から放射されるエネルギーの上限値（射出限界）[7]が存在する。星からの入射エネルギーが閾値以上になると、熱を捨てきれない惑星は暴走温室状態に突入し、海が完全に蒸発してしまう。また、星からの紫外線照射を受けて、蒸発した水は光解離（ $\text{H}_2\text{O} + h\nu \rightarrow \text{H} + \text{OH}$ ）し、宇宙空間への水素の散逸も生じる。

ハビタブルゾーンの外側境界は H_2O 以外の温室効果ガスの寄与で定義される。例えば、 CO_2 が相当量存在すれば、星からの入射エネルギーが減少しても温室効果で惑星の表面温度を氷点下以上に維持できる。しかし、 CO_2 量の増加に伴って、星からの入射光を反射する逆効果も働くため、毛布効果が期待できる CO_2 量にも上限が存在する。すなわち、星からの入射エネルギーがある値より低くなると、温室効果ガスの量に関わらず、惑星表面は氷点下になる。

太陽系外の世界生命居住可能な惑星探査では、ハビタブルゾーンに存在する惑星候補の発見を目指すことになる。ただし、「ハビタブルゾーン」の厳密な定義は、惑星の大気組成や水の存在量、さらには自転軸の傾きや軌道要素に強く依存することに留意頂きたい。

3. 地球と生命居住可能性

太陽系では、金星は暴走温室状態、火星は全球凍結状態にあり、ハビタブルゾーンに位置する惑星は地球のみである。しかし、約 46 億年間の地球史のなかで、地球は絶えず豊かな海に恵まれていたわけではない。原生代に少なくとも 3 回（原生代初期のヒューロニアン氷河期、原生代後期のスターチアン氷河期とマリノアン氷河期）、地球は赤道付近まで分厚い氷床に覆われた全球凍結状態（雪玉地球あるいはスノーボール・アース：snowball Earth と呼ばれる）を経験したことが地層中の氷河堆積物や縞

状炭酸塩岩（キャップ・カーボネイト）から判明している[8]。氷殻下に内部海の存在が示唆され、生命探査の有力候補に挙がる土星の氷衛星 Enceladus や木星の氷衛星 Europa は全球凍結期の地球環境と類似する。生物の多様性に壊滅的ダメージを及ぼしたと予想される全球凍結は、火山から供給される CO_2 が温室効果で氷床の融解を引き起こすために十分な量を蓄積するまでのおよそ数百万年から数千万年間継続したと推定されている[9]。地球上の生命は海から繁栄し、激動の環境変化を生き延びた事実は太陽系外の極限環境下に存在するかもしれない生命の選択肢を与える 1 つの例証になる。

地球の気候変動と切っても切れない関係にあるのが太陽である。およそ 40 億年前の太陽は内部の核融合反応（水素燃焼）の関係で、いまより約 30%暗かったと考えられている。これは昔の地球が現在と同一の大気組成を持つ場合には、全球凍結状態の気候を意味する。しかし、約 42 億年前のジルコン(ZrSiO_4)の酸素同位体比($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$)測定から、当時の地球には海洋が存在し、温暖な気候が続いていた可能性が高い[10]。この矛盾は暗い太陽のパラドックス (Faint young Sun paradox)として知られている[11]。過去の地球気候を温暖化する解決策として、大気中の NH_3 および有機もやの存在や OCS による紫外線遮蔽、 CH_4 などの温室効果が提案されている。近年では、若い太陽はコロナ質量放出が激しく、いまより質量が大きかった可能性も提案されている[12]が、いまだ確証は得られていない。表面地形の痕跡や鉱物から、火星も昔、温暖湿潤な気候で表層に水を保持していた時期があったと示唆される[13]が、暗い太陽パラドックス同様に、その原因は未解明である。

酸素の存在が生命の兆候としばしば言われる。しかし、地質学的証拠から、過去の地球は金星や火星と同様に CO_2 に富み、還元的(H_2 , CO , CH_4 ?)な環境だったと言われている。海洋中で酸化した鉄イオンが海底に堆積して形成した大規模な縞状鉄鉱床 (BIF) が 18 億年以前の地質記録に残っていることから、約 25 億年前から 20 億年前に最初の酸素濃度の急激な上昇(大酸化イベント: GOE) が起き、現在の酸素濃度の 1%程度まで増加したとされている[14,15]。さらに、大気中の質量非依存の硫黄同位体異常[16]や酸化的環境下では不安定で水溶性の碎屑

性閃ウラン鉱床(UO_2)や黄鉄鉱(FeS)の有無[17]も同時期の酸素発生を反映している。24.5 億年前の分子化石の存在[18]から(27 億年前のシアノバクテリアの分子化石(2α -メチルホパン)の検出[19]はその後、誤混入と特定された [20])。大酸化イベントは細胞内共生で葉緑体を獲得した藍藻類の酸素発生型光合成生物(シアノバクテリア: cyanobacteria) の登場が影響したと考えられている。実際、この時代には、有機炭素中の炭素同位体比($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$)は同年代の炭酸塩炭素の $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比より顕著に低い値を示す、すなわち生物の炭素固定の兆候が見られている[21]。その後、現在の水準まで CO_2 濃度が低下したのは、海洋での炭酸塩固定およびプレートの沈み込み運動が関係している[22]。大気中の CO_2 濃度が炭素循環で時間とともに減少したことで、窒素と酸素主体の地球が誕生した。したがって、現在の地球上の生命にとっては必要不可欠な酸素でも、初期生命の誕生時の地球大気は酸素主体ではなかったことになる。酸素の存在しない環境が、惑星に生命が存在しない結論にはならない。ちなみに、地球大気中の CO_2 量を平衡値に維持して、地球気候を安定化させる機構 (ウォーカーフィードバック: Walker feedback と呼ばれる[23]) がある。これには、大陸の化学的風化作用、溶解した大気中の CO_2 の海洋での炭酸塩固定、そしてプレート運動の 3 つのプロセスが複合的に作用している。すなわち、地球の生命居住可能な環境作りには海と陸の存在が重要な役割を果たしている。

4. 太陽系外惑星の生命居住可能性

太陽系外惑星の生命居住可能性について、一歩踏み込んだ議論を行う上で大気組成および大気量の理解が鍵となる。太陽からの適度な日射量以外に大気の温室効果によって、現在の地球は約 15°C の平均気温を維持している。温室効果を担う気体として、水蒸気、二酸化炭素そしてメタンは有名であるが、必ずしも地球の大気組成が唯一解ではない。例えば、これらの分子以外でも、水素分子同士[24]や水素-窒素分子[25]の衝突誘起吸収も強い温室効果を発揮する。

太陽系外惑星の大気推定は、惑星のトランジット (transit) 現象を利用する。トランジットとは、観測者から見て、惑星が星の前を横切る天体現象である。この時、星からの光は惑星

本体に遮蔽されるが、一部の光は惑星大気を透過して観測者に届く。この透過光を多波長観測することで、惑星大気中に存在する分子や原子の吸収・散乱特性が明らかになる。他には、惑星自身の熱放射を利用して、大気成分や雲の有無を推定するアプローチもある。

これまでに（上層）大気組成の推定に成功した太陽系外の地球サイズまたは地球より大きな惑星（スーパーアース：super-Earth と呼ばれる）は 20 例に満たない。これらの惑星の大部分は、可視光から近赤外線の波長域での透過光スペクトルに顕著な吸収特徴が見られなかった。このことから、これらの惑星大気は雲や靄（もや）に覆われている、あるいは水蒸気大気や金星のように CO₂ に富む、平均分子量の高い大気成分を持つ可能性が高い[26]。ただし、星近傍に位置する太陽系外惑星の場合では、大気中に生成される雲は地球の水蒸気雲や金星の硫酸雲とは異なり、KCl（塩化カリウム）や ZnS（硫化亜鉛）といった凝縮温度の高い金属凝縮物（鉱物）の雲が形成される[27]。また、もやは、星からの紫外線照射による光化学反応で生成される有機物（炭化水素：アセチレン、エチレン、エタンやシアン化水素など）となる[27]。いまだ太陽系外惑星の大気組成に対する理解は乏しい状況にあるが、今後 2021 年打ち上げ予定のジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡を用いた近赤外線観測によって、太陽系近傍の地球型惑星（例、TRAPPIST-1[28]）の大気では、(O₂ や O₃、H₂O 酸素の検出は困難かもしれないが[29]) CO₂ や CH₄ の存在を直接検出できるかもしれないと期待されている[30]。ここで、酸素の検出が必ずしも生命の兆候となり得ないことは前述（初期地球の大気組成の観点）の通りであるが、水の光解離で生成される非生物由来の酸素による偽検出の可能性があることにも注意が必要である。

微に入り細に穿って、生命居住可能な惑星環境を検討すると、水や大気組成以外に、惑星磁場や衛星の存在などを考慮しなければならない。月の存在は地球の自転軸を木星や土星の重力摂動から守り、気候安定化に貢献している。惑星の固有磁場は銀河宇宙線や星からの高エネルギー粒子（恒星風：太陽の場合は太陽風と呼ぶ）の大気貫入に対する防護壁の役割をする。残念ながら、太陽系外惑星の磁場および衛星の

存在の直接検出に成功した確実な報告例はない。地球型惑星形成の最終段階では、天体同士の激しい衝突（巨大衝突：giant impact）が起きると考えられている。巨大衝突イベントの副産物として、月のような衛星が形成される。太陽系外でも同様の形成過程を経て、地球型惑星が形成されると仮定すれば、衛星の存在は当然、期待される。惑星の磁場生成は惑星内部の導伝性流体中の熱輸送（対流）で駆動される（ダイナモ：dynamo 機構）ため、地球型惑星が完全に冷却しきる前であれば、惑星磁場も存在するはずである。しかしながら、理論的に予想される衛星および惑星磁場の存在に対する観測的検証には、もう少し年月を要するだろう。

これから 5 年、10 年先の観測的進展では、惑星の表層環境に対する知見の深化が期待される。これには惑星が反射する（星からの）光を利用する。見る角度によって、水面は光の鏡面反射（glint と呼ばれる）を起こす。自転する惑星表面に海が存在すれば、反射光スペクトルで鏡面反射現象が観測される。仮に、地球上の光合成生物に類似した植物が生息していれば、光合成に利用されない近赤外光の反射（レッドエッジ：red edge）も見られる。陸や海、植生といった惑星の表層環境のマッピングは、口径 30m 級の超大型望遠鏡時代に実現されるサイエンスとして期待されている。このように、SF や夢物語ではなく、現実的に実現可能となった宇宙の生命探査という大航海が始まったいま、天文学と生物学の両輪がこれからの舵取りには欠かせない。宇宙生物学を対象にした学際的研究が今まで以上に一層、推進されることを強く願っている。

謝辞

本総説執筆の機会を頂いた癸生川陽子博士（横浜国立大学）に御礼申し上げます。

引用文献

1. Porco, C. C., Helfenstein, P., Thomas, P. C., et al., Cassini Observes the Active South Pole of Enceladus, *Science*, **311**, 5766, 1393-1401 (2006)
2. Stofan, E. R., Elachi, C., Lunine, J. I., et al., The lakes of Titan, *Nature*, **445**, 61-64 (2007)
3. Roth, L., Saur, J., Retherford, K. D., et al.,

- Transient Water Vapor at Europa's South Pole, *Science*, **343**, 6167, 171-174 (2014)
4. Mayor, M. & Queloz, D., A Jupiter-mass companion to a solar-type star, *Nature*, **378**, 355-359 (1995)
5. Petigura, E. A., Howard, A. W., & Marcy, G.W., Prevalence of Earth-size planets orbiting Sun-like stars, *Proceedings of the National Academy of Science*, **110**, 48, 19273-19278 (2013)
6. Kasting, J.F., Whitmire, D.P., & Reynolds, R.T., Habitable zones around main sequence stars, *Icarus*, **101**, 1, 108-128 (1993)
7. Nakajima, S., Hayashi, Y.-Y., & Abe, Y., A Study on the "Runaway Greenhouse Effect" with a One-Dimensional Radiative Convective Equilibrium Model, *Journal of Atmospheric Sciences*, **49**, 23, 2256-2266 (1992)
8. Kirschvink J.L., J.W. Schopf, C. Klein, & D. Des Maris (Eds), *The Proterozoic Biosphere: A Multidisciplinary Study*, Cambridge University Press (1992)
9. Hoffman, P.F., Kaufman, A.J., Halverson, G.P., et al., A neoproterozoic snowball earth, *Science*, **281**, 5381, 1342-1346 (1998)
10. Wilde, S.A., Valley, J.W., Peck, W.H., et al., Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago, *Nature*, **409**, 175-178 (2001)
11. Sagan, C. & Mullen, G., Earth and Mars: Evolution of Atmospheres and Surface Temperatures, *Science*, **177**, 4043, 52-56 (1972)
12. Suzuki, T.K., Imada, S., Kataoka, R., et al. Saturation of Stellar Winds from Young Suns, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **65**, 98 (2013)
13. Craddock, R. A. & Howard, A. D., *Journal of Geophysical Research*, **107**, 5111 (2002)
14. Holland, H.D., Sedimentary mineral deposits and the evolution of Earth's near-surface environments, *Economic Geology*, **100**, 1489-1509 (2005)
15. Canfield, D. E., The early history of atmospheric oxygen: homage to Robert A. Garrels, *Annual Review Earth Planet. Science*, **33**, 1-36 (2005)
16. Farquhar, J., Huiming B. & Thieme, M., Atmospheric Influence of Earth's Earliest Sulfur Cycle, *Science*, **289**, 5480, 756-758 (2000)
17. Johnson, J. E., Gerpheide, A., Lamb, M. P., Fischer, W. W., O₂ constraints from Paleoproterozoic detrital pyrite and uraninite, *Geological Society of America Bulletin*, **126**, 5-6, 813-830 (2014)
18. Dutkiewicz, A., Volk, H., George, S.C., Ridley, J., Buick, R., Biomarkers from Huronian oil-bearing fluid inclusions: An uncontaminated record of life before the Great Oxidation Event, *Geology*, **34**, 6, 437-440 (2006)
19. Brocks, J.J., Logan, G.A., Buick, R., Summons, R.E., Archean Molecular Fossils and the Early Rise of Eukaryotes, *Science*, **285**, 5430, 1033-1036 (1999)
20. Rasmussen, B., Fletcher, I.R., Brocks, J.J., Kilburn, M.R., Reassessing the first appearance of eukaryotes and cyanobacteria, *Nature*, **455**, 1101-1104 (2008)
21. Krissansen-Totton, J., Buick, R., & Catling, D.C., A statistical analysis of the carbon isotope record from the Archean to Phanerozoic and implications for the rise of oxygen, *American Journal of Science*, **315**, 275-316 (2015)
22. Sleep, N. & Zahnle, K., Carbon dioxide cycling and implications for climate on ancient Earth, *Journal of Geophysical Research*, **106**, 1373-1400 (2001)
23. Walker, J.C.G, Hays, P.B. & Kasting, J.F., A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature, *J. Geophys. Res.*, **86**, 9776-9782 (1981)
24. Pierrehumbert, R. & Gaidos, E., Hydrogen Greenhouse Planets Beyond the Habitable Zone, *The Astrophysical Journal Letters*, **734**, L13 (2011)
25. Wordsworth, R. & Pierrehumbert, R., Hydrogen-nitrogen greenhouse warming in Earth's early atmosphere, *Science*, **339**, 6115, 64-67 (2013)
26. Howe, A.R. & Burrows, A., Theoretical Transit Spectra for GJ 1214b and Other "Super-Earths", *The Astrophysical Journal*, **756**, 176 (2012)
27. Morley, C.V., Fortney, J.J., Kempton, E.M.-R., et al., Quantitatively Assessing the Role of Clouds in the Transmission Spectrum of GJ 1214b, *The Astrophysical Journal*, **775**, 33 (2013)
28. Gillon, M., Triaud, A.H.M.J., Demory, B.-O., et al., Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1, *Nature*, **542**, 456-460 (2017)
29. Komacek, T.D., Fauchez, T.J., Wolf, E.T., et al., Clouds will Likely Prevent the Detection of Water Vapor in JWST Transmission Spectra of Terrestrial Exoplanets, *The Astrophysical Journal Letters*, **888**, L20 (2020)
30. Lustig-Yaeger, J., Meadows, V.S. & Lincowski, A.P., The Detectability and

Characterization of the TRAPPIST-1
Exoplanet Atmospheres with JWST, *The
Astronomical Journal*, **158**, 27 (2019)