

[招待論文]

宇宙生物学入門

生命の起源、分布、未来を考える

Introduction to Astrobiology

Origins, Distribution and Future of Life in the Universe

藤島 皓介

NASA Ames 研究所研究員

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科特任講師

Kosuke Fujishima

Research Scientist, NASA Ames Research Center

Project Assistant Professor, Graduate School of Media and Governance, Keio University

Abstract: 私が SFC の先端生命科学研究会で過ごした 9 年間で実に様々な“生物学”に触れる機会があった。骨格筋細胞のシミュレーションにはじまり、タンパク質の配列解析、極限環境微生物の培養、分子生物学実験、さらには生命システムの進化の研究と、様々な角度から生命現象を見てきた。私が現在、取り組んでいる「宇宙生物学」はその延長上、様々な科学分野（惑星科学、地質学、有機化学、物理学、天文学、人類学など）と生命科学が交わる分野横断的な学術領域であり、3つの大きなテーマ「宇宙における生命の起源、分布、未来」が研究の軸となっている。本論文ではこの新しい学術領域の説明を通じて、一人でも多くの学生や研究者が宇宙生物学に興味を持って参入してくれることを願う。

Nine years of experience at SFC Keio Advanced Biosciences program has provided knowledge and diversified views toward understanding biological processes of the modern life. My current scientific focus tackles the origin, distribution and future of life in the universe, which are known as a three fundamental questions in Astrobiology. The multidisciplinary approaches including biology, geology, chemistry, physics, earth science, astronomy, etc., are the keys to decipher such big questions. This invited article will be a good introduction to improve awareness and commitment of young students and researchers towards Astrobiology.

Keywords: 宇宙生物学、生命の起源、地球外生命探査、火星移住、合成生物学

astrobiology, origins of life, extraterrestrial life, colonizaion of Mars, synthetic biology

1 宇宙生物学の歴史と背景

宇宙生物学が誕生した背景には、現在私が勤務している NASA エイムズ研究所が密接に関わっている。1959 年、世界に先んじてエイムズ研究所に生命の起源に関する研究を行うための基金が設立された。当時はまだ Exobiology と呼ばれる学問で、主にユリー・ミラーの実験に代表される化学進化実験や炭素質隕石の成分分析など、原始地球や宇宙における有機分子の多様性に関する研究が行われていた。これらの先駆的な研究が実を結び、1995 年に正式に宇宙における生命の起源、分布、未来を総合的に探求する学問として Astrobiology という分野が生まれた。現在エイムズ研究所には NASA 宇宙生物学研究所 (Astrobiology Institute, NAI) の本部が設置され、全米の大学や研究機関を対象に宇宙生物学に従事する研究グループの研究助成を行うと同時にオンラインセミナーを運営している。宇宙生物学に関する最新の情報をまとめた web サイトも管理している^[1]。また日本でも 1960 年代から「生命の起原」に特化した研究会として「生命の起源および進化学会」が発足し、学術誌 *Viva Origino* を定期的に刊行している^[2]。また 2012 年には文部科学省の世界トップレベル研究拠点プログラムに東京工業大学の地球生命研究所 (ELSI) が採択され、生命の起源と進化を、地球誕生直後の環境やその後の変動と関連づけて明らかにすることを目指している。そのほかにも日本アストロバイオロジー・ネットワーク^[3]という研究コミュニティがあり、日本全国の宇宙生物学関係者が定期的に情報交換やミーティングを行っているので、興味のある人はぜひ一度訪ねてみてほしい。

2 宇宙生物学との出会い

私が宇宙生物学に興味を持ち始めた理由はいくつかあるが、その一つは SFC の輪読会を通じて、ノーベル生理学・医学賞受賞者のクリスチャン・ド・デューブの「Singularities: landmarks on the pathways of life」(邦題: 進化の特異事象: あなたが生まれるまでに通った関所) と出会ったことである。ド・デューブは、地球生命の進化において、後の生物学上のルールを規定したターニングポイント(特異事象)のうち、なにが必然でなにが偶然だったのかを化学の視点から見極め、説明しようとした人物の一人である。例えば生命に

とって必須な高分子ポリマー (DNA、RNA、タンパク質) をとってみても、なぜ鏡像異性体の片方のみを利用しているのか? (ホモキラリティ問題) や、なぜ 4 種類の塩基、20 数種類のアミノ酸から成るのか (遺伝暗号の問題) といった数々の疑問が生じる。これらの根源的な命題は残念ながら、生物学の教科書では“前提知識”として記載されている。しかし生命とはなにかを理解する上で、これらの生物学上の大前提 (ルール) がどのように決定されてきたかを解明することほど、チャレンジングで面白いことはないと思われる。結局、この「生命の起源」に関する知的好奇心が引き金となり、NASA エイムズ研究所にて宇宙生物学の扉を叩いたわけだが、3 年半が経った今、地球外生命探査に関するプロジェクトや、人類の火星移住をサポートするバイオ技術の開発などを含め、3 つのテーマそれぞれに対応する研究が走り始めたことで、ようやく宇宙生物学者としての第一歩を本格的に踏み出したと感ずるようになった。

3 生命の起源の研究

もしもあなたがこれから生命の起源に関する研究をしたいと考えた時、どのようなアプローチを考えるだろうか? 地質学者や惑星科学者であれば、微化石の解析や古い地層の炭素や酸素の同位体比などから、初期の地球環境や生命の痕跡を調べるかもしれないし、化学者であれば化学進化実験を通じて複雑な有機物が合成される経路や条件を調べるだろう。もちろん 38 億年という年月をかけた地球生命の進化を再現することは不可能だが、私自身は再構成実験を通して生命のシステムを理解し、生命と非生命の境界、さらには生命の起源に迫ることができると考えている。実はド・デューブも晩年はこれらの根本的な生命の謎を解くために生化学に立脚した実験を提案している^[4]。彼が提案した実験は生命の初期に存在していたであろう鍵となる分子化合物を合成し、生命と関連がある機能を調べていくというものである。私はこの分子レベルでの系の再構築こそがまさに宇宙生物学へのアプローチの切り札だと考える。近年、合成生物学と呼ばれているこの分野は狭義では DNA 合成および切り貼りに代表される遺伝子改変とデザインが主流であるが、本来の有機合成を含めた枠で鑑みると宇宙生物学との親和性が非常に高

いことに気づかされる。例えばクローニンらは最近の研究で、4種類の異なる脂質の割合を少しずつ変えた単純なプロトセル（球状の脂質二重膜）が複雑な表現系（動き回る、分裂する、回転する等）を示すこと、さらに特定の表現系に特化したプロトセルをセレクションすることで、適応度が上昇し、またその適応度地形も単純ではないことを見出した^[5]。つまり表現系に対応する情報は膜系を構成する脂質の量比が担っており（これをコンポジットゲノムと呼ぶ）、遺伝情報を担うポリマーが存在しない系においてもダーウィンの進化が働くことが示されたわけである。この膜系の再構成実験は「RNA ワールド」^(注1)の最大の謎でもある、自己複製する RNA 分子の起源に関しても重要な知見をもたらした。ショスタックらは RNA 合成を内部で行うプロトセルができた場合、膜内の浸透圧の上昇を引き起こし積極的に膜融合と分裂を促すことを初めて示した^[6]。つまり内部の RNA 合成効率が高い膜系ほど、より分裂を繰り返しやすい、ダーウィンの進化を促すことから、RNA ワールドにつながる細胞複製の始まりのモデルとしてプロトセルが機能しうることを意味している。残る問題は、RNA 誕生以前に、その素となる核酸合成をはじめとする様々な化学反応を可能とし、膜系の選択/淘汰に大きな影響をもたらした触媒分子がなんだったのか？ ということだが、それに対する私の答えは、「金属ペプチド錯体」である。

現在、タンパク質の素となるアミノ酸がこの宇宙において普遍的に存在する事は隕石や宇宙塵の解析によってすでに明らかとなっており、その存在量から推定するに、後期重爆撃期^(注2)以降、実に 10^{11} トンものアミノ酸が地球に降り注いだと試算されている^[7]。それらのアミノ酸が脱水縮合してペプチドとなる作用については、例えば 岩石の変成作用^[8]、乾燥と湿潤^[9]、粘土鉱物や硫化鉱物を介した反応^[10] など多岐にわたることから、おそらく原始の地球環境において短いペプチドが存在していた可能性は十分に考えられる。一方でこれらのペプチド単体の触媒活性が高いかということも必ずしもそうではないと思われる、というのも原始ペプチドを構成するアミノ酸の種類と側鎖がかなり限定されるからだ。そこで私は、それらのアミノ酸のみから成る短いペプチドが金属イオンの助けを借りることで、様々な化学反応を触媒するようなモデルを提案している^[11]。例えば深海熱水や温泉などに含まれる鉄、亜

鉛、ニッケル、マンガン、マグネシウムなどをはじめとする金属イオンはアミノ酸の側鎖の種類乏しさを補って酸化還元反応の手助けをしたり、構造的な安定性をもたらしたりすることが想像できる。事実、NASA ジェット推進研究所のラッセル博士らも金属ペプチド錯体が原始代謝にもたらす作用について言及している^[12]。私はこれまでにグリシンやアラニンのような原始的なアミノ酸のみをコードする短い DNA 断片を用意し、それらをランダムになぎあわせることで、原始ペプチドに特化した遺伝子ライブラリを作成することに成功した^[13]。今後は触媒活性を有するペプチドをスクリーニングすると同時に、将来的にはプロトセルと組み合わせた進化実験を行う予定である。興味深いことに、非生物的に合成されるアミノ酸の多くは疎水性であるため、原始的な膜貫通ペプチドとしてプロトセルの安定性や特定の分子の取り込みに貢献した可能性がある。このペプチドを中心とした生命の起源に関する仮説のアイデア自体は以前から提唱されてはいたものの、実証実験はほとんど行われてこなかった。合成生物学が進歩し、試験管内で何百億ものペプチドを同時にスクリーニングできるようになった結果、ようやく私達はこの問題に本格的に取り組むことが可能となったわけである。

4 宇宙における生命の分布

宇宙生物学における第二のテーマは「宇宙における生命の分布」つまり、地球外生命の存在可能性についてである。私達が現時点で理解している生命は地球型の一種のみであるため、地球外生命の可能性を探る際には、どうしても地球生命の生育限界と生存限界を基準に考える必要がある。例えば、温度、pH、圧力、塩濃度といった様々な物理化学的パラメーター空間における生命の限界を理解する必要があるだろう。その意味で極限環境生物の研究は、生命化学反応を維持しうる地球外の環境条件に関する知見をもたらしてくれるという点で非常に重要である。一方、ケプラー計画に代表される系外惑星探査により、地球の条件に合致するような惑星候補の探索も進んでいる。これまでに得られたデータから、天の川銀河だけでも太陽に似た恒星が 500 億個程度存在し、そのうち 22% は液体の水が存在する軌道距離にある岩石惑星が存在すると見積もられていることから^[14]、その中には地球生命の生育・

生存限界条件に当てはまるものも数多く存在するだろう。気をつけなければならないのは、これらの条件というのは現在の多様化した個々の地球生命が生存できる環境であり、生命が誕生しうる条件と同義ではないということである。また近年、有機化学と合成生物学を組み合わせた人工核酸塩基対や非天然アミノ酸の導入により、遺伝情報の拡張^[15]やタンパク質のリプログラミング^[16]が大腸菌などを用いた *in vivo* (注³) の系で応用されつつある。これはまさにド・デューブのいうところの「進化の特異事象」から逸脱する第二の生命を造る挑戦であり、我々が設定した生育・生存限界を拡張する可能性が大いにある。

一方で宇宙に目を戻すと、太陽系内における生命探査がにわかに注目を浴びている。これまでに NASA は金星、火星、タイタンといった惑星や衛星に探査機を着陸させ、生命が存在した可能性や存在しうる環境条件を調べてきた。その結果、金星の雲、あるいはタイタンの液相圏（液体メタン/エタン、アンモニア）といった特殊な環境における生命の存在可能性が議論されている。特に液体メタン/エタンのような非極性溶媒中ではリパースミセルのような疎水基を外側に向けた膜構造が存在することから、細胞膜の組成とその化学的特性に関しても様々な種類を試す必要がある。さらにごく最近、エンセラダスやエウロパといった木星や土星の衛星から内部海の水を含んだプリューム (注⁴) が噴出していることがわかり、サンプルリターン計画が本格的に検討されつつある^[17]。私も 昨年から JAXA の矢野創博士との出会いを通じて、エウロパ/エンセラダスからのサンプルリターン計画に関わることになった。氷衛星内部での化学進化に関して様々なモデルが提唱されているが、今のところ潮汐摩擦により、内部海の底で熱水が岩石と反応する場が存在する可能性が示唆されている。実際にカッシーニに搭載されているイオン中性質量分析計によるプリュームの分析結果から、水、アンモニア、水素、メタノール、一酸化炭素、種々の炭化水素やミネラルなどの成分が検出されている^[18]。一方で生命の存在可能性に関してはアミノ酸や脂質、糖、塩基、補酵素など、地球型生命が利用する代謝物質の検出が一つの目安となるが、私自身は「生命の起源」の章でも述べた通り、短いペプチドを Biosignature (生命の痕跡) の候補として解析することを提案している。ペプチドが有する配列、キラリテ

ィ、構成するアミノ酸の種類、存在量といった情報は単純な有機物よりも高次の情報を提供するため、これらのデータを総合的に解析することで、非生物的に合成されるペプチドとの相違を浮き彫りにしたいと考えている。

5 宇宙における生命（人類）の未来

さて、宇宙生物学における最後のテーマは「生命の未来」である。哲学的でもあり、且つ人間原理的な側面も兼ね備えたこのテーマに私達はどのように向き合っていけばいいのか？ 地球生命の進化と繁栄は幾多の天文学的イベントにその運命を左右されてきたと言っても過言ではない。例えば月となる天体が衝突していなければ、潮汐力が存在せず、波打ち際で有機物が濃縮 / 拡散する割合も激減したかもしれない。また恐竜を 6500 万年前に絶滅させた隕石の軌道が少しでもずれていたら衝突は起きず、いまでもその子孫達が地上を闊歩し、哺乳類が知的生命体として進化する機会は訪れなかっただろう。そういう幾多の偶発的な環境要因の揺らぎの中からたまたま知性を持った私達が誕生したわけである。そんな我々も、資源の枯渇、環境汚染、宗教や民族の対立、人類増加といった短期的なリスク、さらには巨大隕石衝突といった長期的なリスクなど、常に人類の衰退 / 滅亡と隣り合わせである。逆に言えば、人類が宇宙進出に本格的に取り組む時期に差し掛かっているのかもしれない。Space X 社のイーロン・マスク氏の言葉を借りると “A multi-planet version of humanity’s future is going to last a lot longer than if we were a single-planet species”^[19]、すなわち一つの惑星に住む種よりも、複数の惑星に居住する種の方が未来は明るい、というわけである。そしてその言葉は近い将来現実となる可能性を秘めている。私達はおそらく今世紀の半ばまでに太陽系の第 4 惑星である「火星」へ到達する。NASA は「火星有人計画」を鮮明に打ち出しており、早ければ 2035 年にも実行に移す予定である。また日本の文部科学省をはじめ世界各国が、2014 年に国際宇宙探査協働グループ (ISECG) のロードマップに基づき、長期的な目標として「火星への有人探査」に協力していく姿勢を明確にしている^[20]。その一方で、移住のための問題も山積しているのも事実である。火星は地球と比べ質量が小さいため重力が 0.38 倍しかなく、流動体のコアが冷えた影響で地磁気が存在しない。そのため大気が

太陽風に吹き飛ばされ非常に薄く、水はすべて干上がり、生命にとって有害な紫外線や宇宙線が降りそそぎ、過塩素酸塩という有害物質が地表を覆う劣悪な環境である。コストの面から見て、人類が暮らす上で必要な資源を地球から全て持ち込むことは事実上不可能である。

そこで私達のグループでは、火星移住計画において合成生物学を利用することを真剣に検討している。特に資源の確保のための様々な有用微生物の応用例が検討されている。例えば光合成細菌などを利用して、火星で得られる水、二酸化炭素、光エネルギーなどから、糖分や酸素を合成したり、炭酸カルシウムを沈殿させる細菌を利用したバイオセメンテーション、細菌の酸化還元反応を利用して土中から金属を浸出させるバイオリーチング、紫外線を吸収する色素を合成する細菌など、火星移住における用途は多岐にわたる(図1)。



図1 宇宙における有用微生物の利用例

“有用微生物”を利用した宇宙開発における資源の創出と利用法をまとめたもの、微生物を利用したバイリアクター、廃棄物および地下水処理槽、空気清浄、バイオセメンテーション、バイオリーチング、DNA合成装置など、地球からの輸送コストさらには現地における持続的なエコシステムの確立に向けて、幅広い用途で合成生物学の応用が期待される。(Cumbers J., Shih J., Woebecke J., “Synthetic Biology in Space” より一部改変)

言ってみれば、人類の火星移住計画はまさに我々が惑星を超えて存在できる種 (Interplanetary species) になれるかどうかの命運をかけたチャレンジであり、そのような一大ミッションに携われることは幸運でもあり、心底ワクワクするのである。

あとがき

もし、皆さんがこの論文を読んで少しでも宇宙生物学や関連するテーマに関して興味を持ったのであれば、ぜひ気軽に fujishi@sfc.keio.ac.jp までご連絡ください。

注

- (1) RNA ワールド 現在の生命は、遺伝物質と機能分子をそれぞれに特化した化学物質 (DNA とタンパク質) が担っているが、最初期の生命では、遺伝と機能の双方を担える RNA が単独で生命システムをつくっていたのではないかとする RNA ワールド仮説に基づく、生命の起源直後の世界のこと。
- (2) 後期重爆撃期 太陽系の歴史上、約 41 ～ 38 億年前を指す。この時期には地球を含む惑星はすでに形成されており、大量の星間物質が衝突することで、それらが急速に成長したと考えられている。月のクレーターの多くは後期重爆撃期に形成された。
- (3) *in vivo* 「生体内」を意味する。実際に生物の体内で現象が起こることを観察する実験を指す。これに対して、試験管内などの人工的な環境を *in vitro* と呼ぶ。
- (4) ブリューム 熱対流などによって運動する、岩石や水などの惑星内部の構成物質の流れ、および流れている物質。

参考文献とリンク

- 1 <https://astrobiology.nasa.gov/nai/>
- 2 <http://www.origin-life.gr.jp>
- 3 <http://logos.ls.toyaku.ac.jp/~astrobiology-japan/>
- 4 Duve, C. de, “A Research Proposal on the Origin Of Life. Closing Lecture given at the ISSOL Congress in Oaxaca, Mexico, on July 4, 2002.” *Orig. Life Evol. Biosph.*, 33, 2003, pp.559–574.
- 5 Gutierrez, J.M.P., Hinkley, T., Taylor, J.W., Yanev, K. and Cronin, L., “Evolution of oil droplets in a chemorobotic platform.” *Nat. Commun.*, 5, 2014, p.5571.
- 6 Chen, I.A., Roberts, R.W. and Szostak, J.W., “The emergence of competition between model protocells.” *Science*, 305, 2004, pp.1474–1476.
- 7 Thomas, P.J., Hicks, R.D., Chyba, C.F. and McKay, C.P. Eds., *Comets and the Origin and Evolution of Life*, Springer, 2006.
- 8 Otake, T. *et al.*, “Stability of Amino Acids and Their Oligomerization Under High-

- Pressure Conditions: Implications for Prebiotic Chemistry.” *Astrobiology*, 11, 2011, pp.799–813.
- 9 Yanagawa, H., Kojima, K., Ito, M. and Handa, N., “Synthesis of polypeptides by microwave heating I. Formation of polypeptides during repeated hydration-dehydration cycles and their characterization.” *J. Mol. Evol.*, 31, 1990, pp.180–186.
- 10 Huber, C. and Wächtershäuser, G., “Peptides by activation of amino acids with CO on (Ni,Fe)S surfaces: implications for the origin of life.” *Science*, 281, 1998, pp.670–672.
- 11 藤島 皓介「拜啓、未来のアストロバイオロジストへ」『細胞工学』Vol.32 No.12、2013年12月号。
- 12 Milner-White, E.J. and Russell, M.J., “Functional Capabilities of the Earliest Peptides and the Emergence of Life.” *Genes*, 2, 2011, pp.671–688.
- 13 Fujishima, K., Venter, C., Wang, K., Ferreira, R. and Rothschild, L.J., *An overhang-based DNA block shuffling method for creating a customized random library*, in press.
- 14 Petigura, E.A., Howard, A.W. and Marcy, G.W., “Prevalence of Earth-size planets orbiting Sun-like stars.” *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 110, 2013, pp.19273–19278.
- 15 Malyshev, D.A. *et al.*, “A semi-synthetic organism with an expanded genetic alphabet.” *Nature*, 509, 2014, pp.385–388.
- 16 Mandell, D.J. *et al.*, “Biocontainment of genetically modified organisms by synthetic protein design.” *Nature*, 518, 2015, pp.55–60.
- 17 Tsou, P. *et al.*, “LIFE: Life Investigation For Enceladus A Sample Return Mission Concept in Search for Evidence of Life.” <http://dx.doi.org/10.1089/ast.2011.0813> 12, 730–742 (2012).
- 18 Waite, J.H. Jr. *et al.*, “Liquid water on Enceladus from observations of ammonia and 40Ar in the plume.” *Nature*, 460, 2009, pp.487–490.
- 19 <http://aeon.co/magazine/technology/the-elon-musk-interview-on-mars/>
- 20 http://www.nasa.gov/sites/default/files/files/GER-2013_Small.pdf

〔受付日 2015. 3. 13〕