

講演

「地球と生命の謎～生命の起源はどこまでわかったのか？ 宇宙における生命の存在確率は？～」

第35回蔵前科学技術セミナー報告および講演録

2016.10.22 くらまえホール

蔵前工業会主催、東京工業大学ならびに東京工業大学地球生命研究所共催による「地球と生命の謎～生命の起源はどこまでわかったのか？宇宙における生命の存在確率は？～」と題する第35回蔵前科学技術セミナーを10月22日（土）の午後くらまえホールにて開催しました。

蔵前工業会の石田理事長と東京工業大学三島学長の挨拶に引き続き、東京工業大学地球生命研究所副所長・教授 井田茂氏、東京工業大学地球生命研究所研究員 望月智弘氏、日本学術振興会特別研究員の黒川宏之氏から講演があり、参加者245名が熱心に聴講しました。

2012年度にWPI拠点（世界トップレベル研究拠点プログラム）として東京工業大学に設置された地球生命研究所が科学技術面から果敢に挑戦してきた世界最先端の研究の歩みと成果を紹介いただき、地球と生命に関する理解を深める貴重な機会となりました。

東京工業大学 地球生命研究所 副所長・教授

井田 茂

同

研究員

望月 智弘

日本学術振興会特別研究員／東京工業大学 地球生命研究所

黒川 宏之(H20地惑22修)

講演 1

「系外惑星—宇宙における生命」

東京工業大学
地球生命研究所
副所長・教授
井田 茂 氏



1. 系外惑星の発見

恒星のまわりをまわる、恒星にくらべたらずっと小さな天体が惑星で、その惑星のまわりをまわる小さな天体が衛星です。太陽系には巨大でガスを主成分にした木星や土星のような木星型惑星もあり、小型で岩石を主成分とした地球や火星などの地球型惑星もあります。

太陽は銀河系の中で平凡な恒星のひとつなので、銀河系の他の恒星にも惑星系があっていいはずで、生命が住んでいる惑星もあるかもしれません。そう考

えて、別の恒星のまわりをまわる惑星（「系外惑星」と呼びます）の探索が、大型の望遠鏡が整備された1940年代に始まりました。ところが、系外惑星の探索は失敗の連続で、誤報がいくつか流れては否定され、天文学者はだんだんと興味を失い、1990年代には観測チームは次々と系外惑星探索から撤退しようとしていました。

ところが、1995年に系外惑星がいきなり発見されました。発見された惑星は、それまで誰も想像をしたことがなかったような異形の木星型惑星「ホット・ジュピター」でした。その後、堰を切ったかのように、木星型惑星が次々と発見されていき、2010年には系外惑星の発見数は500個に達し、現在ではその数は3500個に達しています。

系外惑星の発見が半世紀もの間、失敗した最大の原因は、天文学者たちが太陽系の姿にとらわれすぎていたことです。それまでは惑星系と言えば、太陽系という一つのサンプルしか知らなかったので、得

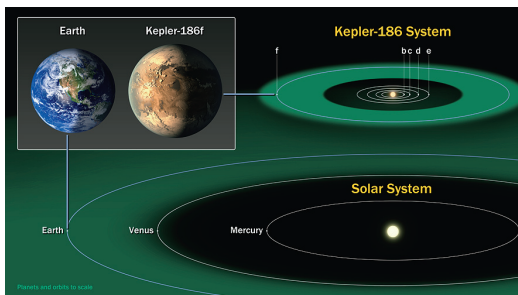
られていたデータから異形の惑星をあぶり出すことができなかったのです。

2010年頃から、地球よりやや大きいけれど、地球型惑星ではないかと推定される「スーパー・アース」が続々と発見されるようになり、地球と同サイズの「アース」も今では発見されるようになりました。統計をとってみると、どうも、少なくとも半分くらいの恒星には地球型惑星がまわっているようです。



2. ハビタブル・ゾーンの系外地球型惑星

さらに、表面に海を持ち得る軌道半径にあるスーパー・アースも発見されるようになっていきます。中心星に近すぎると、海は蒸発してしまうし、遠すぎると凍結してしまいます。海が存在し得る軌道範囲を「ハビタブル・ゾーン」と呼んでいます。ハビタブル・ゾーンとは生命居住可能領域という意味ですが、惑星で生命が生まれて進化していくには、液体の水の存在が重要だろうと言われているからです。太陽と同じ明るさの恒星では、ハビタブル・ゾーンは0.9天文単位～1.5天文単位（1天文単位は太陽と地球の距離）



図表1-1：実際に発見されているケプラー186星系の惑星軌道配置
太陽系も比較のために並べてあります。緑のリング状の領域がハビタブル・ゾーンで、ケプラー186fという惑星は、地球と同じような大きさで、ハビタブル・ゾーンに入っています。
(NASA Ames/SETI Institute/JPL-Caltech)

くらいだろうと見積もられていて、地球はハビタブル・ゾーンの中にきっちり入っています。

ハビタブル・ゾーンにあるスーパー・アースやアースの発見が続いていることにより、地球外生命への関心も高まってきました。

最新のデータによると、銀河系の恒星の2割以上はハビタブル・ゾーンに入っている地球型惑星を持っているという見積もりまであります。（図表1-1）

3. 地球外生命論争

「地球外生命」というと、UFO、タコ型宇宙人というような怪しい響きがありますが、実は19世紀までは天文学の発展と地球外生命の議論は密接な関係にありました。

17世紀には、地球は世界の中心ではなく、ほかの惑星と一緒に太陽のまわりをめぐるという地動説が登場しました。19世紀には、それまで世界の中心だと思っていた太陽も銀河系（天の川銀河）を構成する数千億の恒星の中の平凡な恒星だとわかりました。地球外生命の議論は活気づきました。

しかし、19世紀末に天文学者は「火星運河論争」という大スキャンダルを引き起こしてしまいました。当時、一流の天文学者が、先入観から火星に運河を見てしまい、一般の人々を巻き込んだ大論争になってしまったのです。しかし、火星運河は、（意図的だっ

たかは別として) 捏造だったことがわかり、科学者が地球外生命の議論をすることはタブーとなりました。

4. バイオ・マーカーの観測可能性

系外惑星、とりわけハビタブル・ゾーンの地球型惑星の発見は、この百年のタブーの封印を解きました。長いタブーの時間の反動もあってか、大変な盛り上がりです。

科学の議論をするためには、実証が重要となります。望遠鏡観測で、どのようにして系外惑星の生命の存在の兆候「バイオ・マーカー」を確かめることができるのか、大気中の酸素やメタンの量を分光観測すればいいのではないか、そのためにはどのような技術を開発すればいいのかというような議論が行われています。ですが、そもそも何を観測すれば、生命のしるしなのでしょう? バイオ・マーカーの議論は、「生命とは何か」という深遠な問題に結びついているのです。

2020年代には日米中などの国際協力による口径30メートルの望遠鏡やヨーロッパ共同のさらに口径が大きい望遠鏡の建設が計画されています。系外惑星系のハビタブル・ゾーンの地球型惑星におけるバイオ・マーカーはそれらの巨大望遠鏡の重要な目標になっています。楽しみにしたいと思います。

講演 2

「熱湯の中の微生物から探る生命の起源と進化」

(※講演題目は、講演者の意向により修正しています)

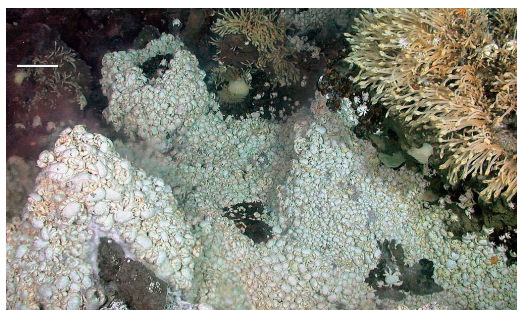
東京工業大学
地球生命研究所
研究員
望月 智弘 氏



1. 地球を食べる生態系の発見

系外惑星の発見以降の地球外生命体探索の主流は、大型望遠鏡などを使って地球と似た惑星を宇宙の遙か彼方に探す、というものでした。それは、地球上の全ての生き物が「水(液体の H_2O)」を使い、我々ヒトを含む動物、さらには光の届かない深海など

に生息する生き物も、元を辿ると全ては植物や藻類が太陽エネルギーを利用する光合成に依存した「太陽を食べる生態系」として成り立っていることから、液体の水が存在し太陽から適度な距離にある、すなわち「ハビタブル・ゾーン」に存在する惑星の探索でした。我々の太陽系内でハビタブル・ゾーン内にあるとされる惑星には、地球の他にお隣の火星があり、長年多くの研究者や天文ファンが火星に生命の可能性を期待していました。世界中の熱い視線を背に打ち上げられたNASAのViking 1号2号が、1976年に火星表面に着陸し返ってきた画像に写っていたのは岩と砂だけの「死の世界」で、太陽系内の地球外生命体研究は完全に潰えたかに見えました。しかし翌1977年、アメリカの海洋研究チームが深海底から数百度に達する熱水が噴き出す深海熱水噴出孔(deep sea hydrothermal vent, 別名『チムニー』)を発見し、その周辺にはエビ・カニ・ハオリムシなどの高等生物が繁茂する、深海のオアシスのような奇妙な生態系が見つかりました。(図表2-1) さらに調査を進めるとこの暗黒の生態系は、熱水中に含まれる水素や硫化物などの酸化還元反応によりエネルギーを獲得する特殊な微生物が一次生産者となっていることが明らかとなりました。前述の「太陽を食べる生態系」と比較し、太陽に依存しない「地球を食べる生態系」の発見です。



図表2-1: 深海熱水噴出孔(チムニー)の「地球を食べる生態系」の様子
出典: Wikimedia Commons, 原典: A. D. Rogers et al., 2012. PLoS Biology より

この深海での大発見は地球外生命体研究に大転換をもたらしました。それまでの「水+太陽」に主眼を置いたハビタブル・ゾーンの探索に限定された調査対象に、「水+熱水系」という新たなキーワードが追加され、それまで絶対視されてきた太陽からの距離を無視することが可能となりました。これにより、バイキング計画の火星探索から一度は否定された太陽系内の地球外(微)生命体の可能性が再び沸き

起こりました。例えば火星の地下には今でも水があるとされ、少なくとも過去には活発な地熱活動があったことも明らかとなっています。さらには木星のエウロパ、土星のエンセラドゥスのような衛星において、「水＋熱水系」の存在が確かめられているものが見つかり、このような環境にはかなりの高確率で微生物が存在するのではないかと今では多くの研究者が考えています。系外惑星と比較すると近所さんであるこれらの天体からのサンプルリターンが可能となれば、早ければ今世紀前半のうちにも地球外（微）生命体の存在が確かめられるのは不可能ではありません。

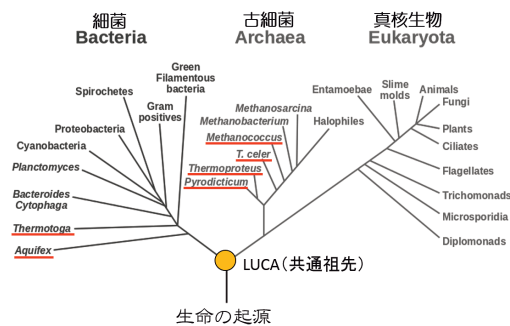
2. 生物学における革命

深海熱水噴出孔が発見された1977年は、この分野においても一つ大きな発見がありました。それまでの生物分類学は、形状などのアナログかつ主観的な情報に依存していて、特に形状が単調な単細胞微生物などの進化関係の解明は非常に難しいものでした。しかしこの年、動物から大腸菌まで全ての生物に共通する生命の設計図であるDNAの塩基配列をデジタル情報として比較することにより、はじめて系統解析という客観的かつデジタルに解析する手法の原型が出来上がりました。（図表2-2）

3. 「古細菌」の発見と生命の起源の理解

これにより生命進化を理解する上で2つの重要な事実が明らかとなりました。まず、生物界は古細菌（Archaea）、細菌（Bacteria）、真核生物（Eukaryota）の3つのグループに大別されることが明らかとなりました。それまでは細胞の形状、主に核の有無により原核生物と真核生物に分けられていましたが、同じ原核生物に分類されている微生物のうち一部は他の細菌と進化的に大きく異なる独自のグループを形成することがわかり、古細菌と名づけられました。この古細菌はかなりのキワモノ微生物で、一般的には生物が存在しないと考えられるような飽和塩濃度（漬物や塩蔵は食物の腐敗、すなわち微生物の増殖防止のために加えられる）、さらには煮沸消毒されるようなアツアツの熱水の中からも見つかっています。

細菌は80～90℃くらいまでは見つかりますが、それ以上の温度で生存できるのはこの古細菌のみで



図表2-2：全生命の系統樹

生物界は細菌・古細菌・真核生物の3ドメインに大別され、理論上LUCA（Last Universal Common Ancestor）と呼ばれる共通祖先に集約される。赤い下線は80℃以上で増殖する超好熱菌。生命の起源はそれよりも昔の出来事。出典：Wikimedia Commons より一部改変。

す。特に深海では水圧により100℃でも水が沸騰しないため、100℃以上で良好に増殖する微生物が、先程の深海熱水噴出孔から数多く見つかりしています。このような熱い環境を好む微生物を好熱菌（thermophile）、中でも80℃以上を好む微生物を超好熱菌（hyperthermophile）と呼びます。現在の高温生命圏のレコードホルダーは、122℃で増殖し130℃でも死滅しないMethanopyrusという超好熱古細菌で、深海研究を数多く行っている日本の海洋研究開発機構（JAMSTEC）に所属する高井研博士のチームが発見しました。好熱微生物の研究は、海洋研究におけるNASAに匹敵するJAMSTECの存在に加え、国内各地に温泉が存在することなどから、日本は世界をリードする立場にあると言えます。

系統解析法がもたらした二つ目の大きな発見は、これらの超好熱菌が生命の系統樹において根本の近くに存在することの発見です。これにより、約40億年前に何かしらの熱水系において最初の生命が発生したであろう、という考えはもはや定説となっています。

4. 地球外生命体・生命の起源研究の今後

生命誕生がどの程度の高温で起きたのか、またその発生の場が海底の熱水孔だったのか、はたまた陸上の温泉だったのか、などについてはまだまだ議論の余地があります。しかし、古くは古代ギリシャ哲学時代にまで遡る生命の起源の探求が、この30年ほどの間に飛躍的に進歩したことは間違いありません。これから、天文学、地球科学、化学、生物学などの様々な科学分野の融合により地球における40億年前の

奇跡の実態の解明、さらには地球外生命体の可能性が少しずつ明らかになるでしょう。

講演 3

「生命を宿す惑星の条件」

日本学術振興会特別研究員／
東京工業大学地球生命研究所
黒川 宏之 氏



1. 生命を宿す星 —地球の特徴

生命はどのようにして誕生したのか？地球以外の星に生命は存在するのか？この謎の答えの手がかりを得るには、まず地球がどのような特徴をもつ惑星なのかを知る必要があります。

現在の地球の平均気温は15℃程度であり、液体の水が安定に存在できます。液体の水は、生命誕生に至る有機物の化学進化の場や、生体内反応の溶媒となるため、生命の誕生に不可欠な要素です。

また、現在の地球大気には20%程度の酸素が含まれています。酸素の存在は、酸素呼吸によって効率的にエネルギーを得ることで、生命が大型化した一因であると考えられています。さらに、酸素からは光化学反応によってオゾンが生成されます。オゾン層は太陽からの紫外線を吸収し、陸上に生命が存在できる環境をつくり出します。

太陽系内の2つの惑星—金星と火星は地球と全く異なる特徴を持っています。金星は分厚い二酸化炭素の大気に覆われた灼熱の惑星であり、その平均気温は約460℃にもなります。地表面に液体の水は存在せず、微量の水が大気中に水蒸気として存在しています。

一方、火星は希薄な大気しか持たない寒冷な惑星で、その主成分は金星と同様、二酸化炭素です。火星の平均気温は氷点下60℃程度であり、地表に存在する少量の水は、北極や南極に氷として存在しています。このような惑星ごとの環境の違いをつくり出した要因は一体何だったのでしょうか。

2. 地球の水と有機物の起源

地球と金星・火星の違いを理解するために、まず

地球の海水のもととなった水、生命のもととなった有機物がどこからやってきたかを考えてみます。水分子を構成する水素原子には、水素（H）と重水素（D）の2種類の同位体が存在します。この水素と重水素の存在比（D/H比）は天体ごと・環境ごとに異なるため、D/H比をもとに水の起源を調べることができます。地球の海水のD/H比は、炭素質コンドライトと呼ばれる、水を多く含んだ隕石のそれとよく一致しています。

また、アミノ酸には左手型（L型）と右手型（D型）という2種類の鏡像異性体が存在しています。地球の生命を構成するアミノ酸は、ほぼ全てL型であることが知られていますが、有機物を含む炭素質コンドライトには、D型に対してL型が多く含まれているものがあります。

これらの特徴は、地球の水と有機物は、惑星形成期に地球に降り注いだ小天体によってもたらされたことを示しています。小天体による水と有機物の供給は、地球と同様に金星や火星にも起きたはずですが、従って、惑星形成後の過程が惑星ごとに異なる表層環境をつくり出したことになります。

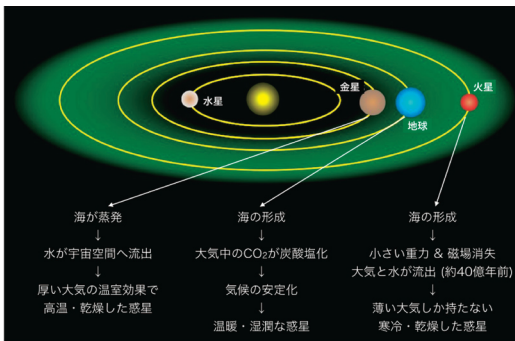
3. 生命と惑星の共進化

惑星の表層環境の違いを理解する上で、惑星の表面に液体の水（海）が存在できる軌道範囲—ハビタブル・ゾーンの概念が重要となります。（図表3—1）この領域より惑星が恒星に近すぎると海は全て蒸発してしまい、一方で、遠すぎると海は全て凍りついてしまいます。

地球の軌道はハビタブル・ゾーンの中に収まっていますが、金星はハビタブル・ゾーンから外れています。このために、金星では海が全て干上がってしまいます。さらに水蒸気が大気中で紫外線によって分解され、宇宙空間に流出することによって、現在のような乾燥した惑星になりました。

海の有無は大気の組成にも影響を与えます。海が形成された地球では、大気中の二酸化炭素が海に溶け込み、陽イオンと結びつき炭酸塩鉱物として沈殿します。この過程が原始の地球大気から二酸化炭素を除去したことで、分厚い二酸化炭素の大気を持つ灼熱の金星と、程よく温暖な地球の違いが生まれました。

その後、地球で生命が誕生し、酸素発生型光合



図表3-1: 太陽系の惑星の軌道とハビタブル・ゾーン的位置関係

軌道の位置と惑星サイズの違いが地球と金星・火星の運命を分ける要因となりました。Credit: Milagli/Shutterstock (改変)

成をする生物が生まれると、酸素が大気中に溜まっていきます。酸素からは、紫外線による光化学反応でオゾンが生成されます。このようにして、生命は酸素呼吸が可能な環境・紫外線から守られた陸上環境を自らつくり出してきました。

火星はハビタブル・ゾーンの中に位置するため、条件によっては海を持つことができます。実際、火星探査によって、過去の火星は厚い大気によって温暖な気候が保たれ、北半球には広大な海が広がっていたことがわかってきました。

火星は地球と比較してサイズが小さく、磁場を持たない惑星です。火星はその歴史の早い段階で磁場を失ったことにより、太陽から吹きつける高エネルギーの粒子の流れである太陽風に晒されてきました。この太陽風によって、火星の大気や水は宇宙空間に流失してしまったのではないかと考えられています。

ただし、過去に火星に存在した水が全て失われたわけではなく、極域にある少量の氷に加え、火星の地下には大量の水が眠っている可能性も指摘されています。特に、火星の赤道域付近には夏になると流水地形のようなものが現れる地域が発見されていて、これは地下の水が溶けて流れ出ているものだという説もあります。

4. 生命を宿す星の条件を探る

最後に、生命を宿す惑星の条件に迫るため、今後行われていく地球外生命探しについて触れます。地球と同じように表面に海を持つ惑星に限れば、探査の対象として、過去に海が存在した火星とハビタブル・ゾーンの中にある系外惑星が挙げられます。火星の場合、地表面の探査からは過去の生命の痕跡探しや、流水地形付近の探査からは現存するかもしれない地下生命圏探しが検討されています。系外惑星の場合、具体的な地球外生命探しの方法としては、大気の観測から生命由来の酸素やオゾンなどを探すごことになります。

さらに、現存する地球生命の中には日光に頼らない生態系を持つものがあることから、ハビタブル・ゾーンを外れていても地中に海を持つ可能性がある木星や土星の水衛星も生命探査の対象です。プルームと呼ばれる、内部海の水が吹き出している噴泉を探査することで、水衛星の地下生命圏に比較的容易にアクセスできる可能性があります。

地球外生命探しを通じて、生命の存在を系統的（どのような惑星に生命がいるか）に、統計的（どのような確率でいるか）に生命を宿す星の条件に迫ることができると期待しています。

