

惑星探査と太陽系外惑星探査：地球外生命体は見つかるか？

真貝寿明

大阪工業大学情報科学部

宇宙のどこかに、地球以外に、生命体は存在するのだろうか。そして知的生命体は存在するのだろうか。どなたも一度はそんな疑問をもたれたことかと思います。映画や小説では宇宙人は親しみやすい存在になっていますが、科学的にはどこまでわかってきているのでしょうか。火星にはかつて水が存在し、現在も極地域には水が存在する可能性がわかってきています。また、太陽系以外にも惑星系をもつ星が数千個見つかっています。日本の探査機「はやぶさ2」も小惑星リュウグウから岩石を持ち帰ることに成功しました。最近10年で急速に進展しているこの分野を紹介します。

1 太陽系を構成する天体

■ 惑星

古来から、満天の星の中で、相対的な位置を変えながら動いていく明るい星があり、**惑星**として注目されていた。私たちの太陽系には惑星が8個あり、太陽から近い順に次の順である。

水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星

地球より内側の軌道にある**内惑星**は、太陽に近いところにある。そのため、金星は夕方あるいは明け方にしか見ることができない。水星は太陽に近すぎて、通常は見ることはできない。地球より外側の軌道にある**外惑星**のうち、火星は公転周期が1.8年であり、地球と接近する年と観測しにくい年が交互にくる。木星と土星はここ数年は春から夏にかけてが観測に適している。

■ 惑星の定義

2006年8月に開催された国際天文連合総会 (IAU) にて、惑星の定義がなされ、それまで、『水金地火木土天海冥』として親しまれていた9個の惑星から冥王星が外された。観測技術が進展し、冥王星がそれまでに考えられていたよりも小さかったことが判明し、ついには冥王星よりも大きいエリスという天体まで発見されたことが発端である。冥王星を惑星として数えるならば、その他の星も多数仲間に入れられないといけなくなり、今後も数が増えていくことが予想された。

そこでIAUは惑星の定義を定めるとともに、新たに**準惑星** (dwarf planet) や**太陽系小天体** (small solar system bodies) と呼ぶ天体の定義も定めた (表1)。冥王星は準惑星の1つに降格された。準惑星は現在次の5つが認定されている (表2)¹。

ケレス、冥王星、ハウメア、マケマケ、エリス²。

¹惑星と準惑星を太陽から近い順に並べると、次の順になる。

水、金、地、火、ケ、木、土、天、海、冥、ハ、マ、エ

²名前の由来は次のようである。ケレスはローマ神話に登場する豊穡神 Ceres。ハウメアはハワイ諸島の豊穡の女神ハウメア Haumea。マケマケはイースター島の創造・豊穡の神 Makemake。エリスはギリシア神話の不和と争いの女神 Eris。

表 1: 太陽系を回る天体の分類

	定義
惑星	(1) 十分な質量があってほぼ球形の天体である, (2) 太陽を周回する軌道である, (3) その軌道上では他の天体を一掃してしまっている, の3条件をみたす天体
準惑星	惑星の定義の(1)(2)をみたし, かつ (3) その軌道近傍では他の天体が存在する (4) 衛星ではない天体.
太陽系小天体	冥王星型天体以外の太陽系外縁天体, 小惑星, 彗星, 惑星間塵など.

表 2: 太陽系の惑星と準惑星. a は軌道長半径. 離心率はどれだけ円軌道からずれているかを示す. ハウメアの楕円体の大きさは $1960 \times 1518 \times 996$ km.

天体名	a [AU]	周期 [年]	離心率	半径 [km]	質量 [kg]	分類
太陽 Sun	-	-	-	696000	1.99×10^{30}	-
水星 Mercury	0.39	0.24	0.21	2440	3.3×10^{23}	岩石惑星
金星 Venus	0.72	0.62	0.007	6052	4.9×10^{24}	岩石惑星
地球 Earth	1.00	1.00	0.02	6378	6.0×10^{24}	岩石惑星
火星 Mars	1.52	1.88	0.09	3396	6.4×10^{23}	岩石惑星
木星 Jupiter	5.20	11.86	0.05	71492	1.9×10^{27}	ガス惑星
土星 Saturn	9.55	29.46	0.06	60268	5.7×10^{26}	ガス惑星
天王星 Uranus	19.22	84.02	0.05	25559	8.7×10^{25}	ガス惑星
海王星 Neptune	30.11	164.77	0.009	24764	1.0×10^{26}	氷惑星
ケレス Ceres	2.77	4.6	0.08	474	9.5×10^{20}	
冥王星 Pluto	39.54	247.80	0.25	1151	1.3×10^{22}	
ハウメア Haumea	43.03	282.29	0.197	楕円体	4.0×10^{21}	
マケマケ Makemake	45.35	305.45	0.163	??	$4.0 \times 10^{21}?$	
エリス Eris	68.05	305.45	0.163	??	$1.66 \times 10^{22}?$	

2 惑星探査

■ 火星探査

地球のすぐ外側の軌道を回っている火星へは, アメリカは最近 15 年間だけでも, 7 回の探査ミッションを実施している.

火星探査は, 1960 年代より続いているが, 約 2/3 がミッション完了前またはミッション開始直後に何らかの失敗を起こしている. 火星への通信には片道 4 分かかるため, 不慮の事故に対応できないのも一因だが, 最近は自動操縦の技術が発達して成功率が高まった.

スピリット (2003-2011), フェニックス (2003-), キュリオシティ (2012-) と命名されたローバーを火星表面に着陸させて, 岩石などの調査を行っている. また周回軌道からは, 高解像度カメラを用いて火星表面や大気の観測をしている. 最大の科学的成果は, 火星には過去に液体の水が存在したこと (2004 年発表), そして, 極地方では現在も水が存在している可能性を発見 (2015 年発表) したことである. また, 火星の大気は太陽から吹き出したプラズマ流 (太陽風) によって剥ぎ取られたことも明らかになった.

アメリカは 2030 年代には有人探査を目指す計画を掲げているが, 火星への往復には 1 年強か



図 1: [左] 火星. 火星の大気は 95% が二酸化炭素. 大気圧は地球の 0.75%. 気温は最高 20°C. 重力は地球の 40%. [右] キュリオシティが着陸直後に撮影した火星表面のパノラマ写真. 2012 年 8 月 NASA 発表.

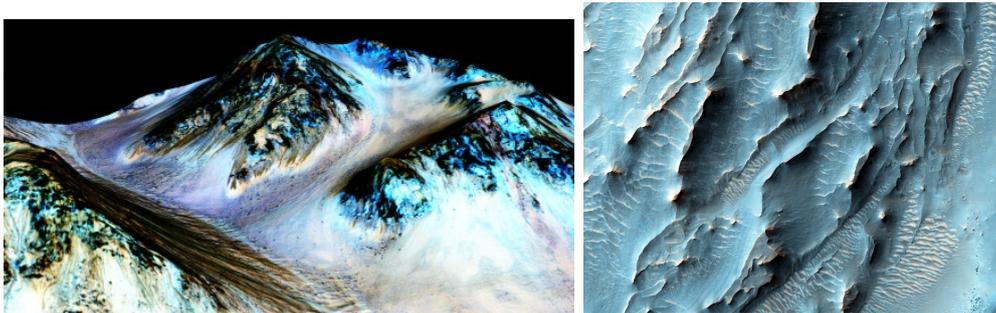


図 2: 斜面上を約 100m の長さにはわたって伸びる暗い筋模様は液体の水の存在を示している. 山の斜面と上空からの写真. 2015 年 9 月 NASA 発表.

ら 3 年を要し, 燃料や食料の確保など技術的な課題も多い. 宇宙空間での乗組員の放射線被爆等の問題を考えると, 人類が到達できる最遠方は火星とも言われている.

■ 準惑星ケレス

2016 年 12 月, 火星の外側を周回する準惑星ケレスの表面近くに水の氷が存在している証拠が, NASA の探査機「ドーン」による探査結果から得られた. また, 太陽光が決して当たらないクレーター内にも氷があることがわかった.

これまでの観測では, 準惑星ケレスは暗くクレーターが多い天体で, 氷が存在するようには見えなかった. しかし, 米・惑星科学研究所の研究チームは, ガンマ線・中性子検出器「GRaND」によるデータから, ケレスの中緯度から高緯度にかけての広い範囲で地表近くに水素が豊富に存在していることを明らかにした. この水素はおそらく水の氷という状態で存在し, 凍った層というよりはむしろ岩を含む多孔質の混合物になっていると考えられている. 質量換算で 10% 程度が氷のようだ.

■ 木星の衛星・エウロパ

木星の衛星のひとつであるエウロパ (Europa) は, 地球の 1/4 ほどの大きさの天体で, 少なくとも厚さ 3km 以上の氷で覆われている. しかし, 木星や衛星イオからの潮汐力によって, ひび割れていて, 地球の海洋深部にあるような熱水噴出孔も存在する可能性があると言われている. 地球の生命の起源が, 海底の熱水噴出孔にある, とする説もあり, そうであれば, エウロパにも生命が存在する可能性がある.

■土星の衛星・エンケラドス

2017年4月、NASAは、土星の衛星エンケラドス(Enceladus)に生命誕生の環境があるかもしれないと発表した。エンケラドスは氷の割れ目から空高くガスを噴き上げることで知られていて、表面を覆う厚い氷の下には広大な海があるとみられている。探査機カッシーニを噴出物に接近させて成分を分析した結果、ほとんどは水だったが、0.4–1.4%という高い濃度で水素分子を含んでいた。この量の水素が継続的に含まれるには、海底から噴き出した熱水が周囲の岩石と反応して水素を作っていると結論付けた。地球の海底での生命誕生説と似た環境にあると考えられている。

■JAXA 小惑星探査機「はやぶさ2号」の成果

日本のJAXAは、2003年5月9日に小惑星探査機「はやぶさ³」を打ち上げ、火星近傍の小惑星イトカワ⁴の表面物質を地球に持ち帰るミッションを行った。この「初代はやぶさ」はエンジントラブルや制御トラブルなど多くの問題を抱えながらも、5年遅れの2010年6月13日に帰還し、その後続くミッションへの技術に大きな功績を残した。持ち帰った試料は、人間の髪の毛の半分にも満たない大きさの500粒ほどだったが、含水鉱物の存在がわかった。大きさが500m×300m×200mほどの「イトカワ」は、現在よりも10倍ほど大きな母天体が破壊してできたS型小惑星と分類されるが、宇宙空間にさらされている小岩石中に、想定以上の含水鉱物が発見されたことは驚きだった。

JAXAは、後継機「はやぶさ2」を2014年12月3日に打ち上げ、小惑星リュウグウに向かわせた。リュウグウは、900mほどのほぼ球形をした小惑星で、スペクトルからC型小惑星と分類されている。炭素質コンドライトと呼ばれている隕石の母天体だと考えられており、有機物や水を含んでいることから、太陽系の生命の起源になんらかのヒントを与えてくれるものと期待されている。「はやぶさ2」は、リュウグウへの往復や試料回収をほとんどトラブルなく遂行し、2020年12月6日に試料カプセル本体を地球に帰還させた。探査機本体は、拡張ミッションとして、小天体2001CC₂₁と1998KY₂₆へと向かっている。前者は2027年、後者は2031年に到着予定だという。

回収されたリュウグウからの資料は5.4gもの量であり、最大で直径1cmほどの小石も含まれていることがわかっている。

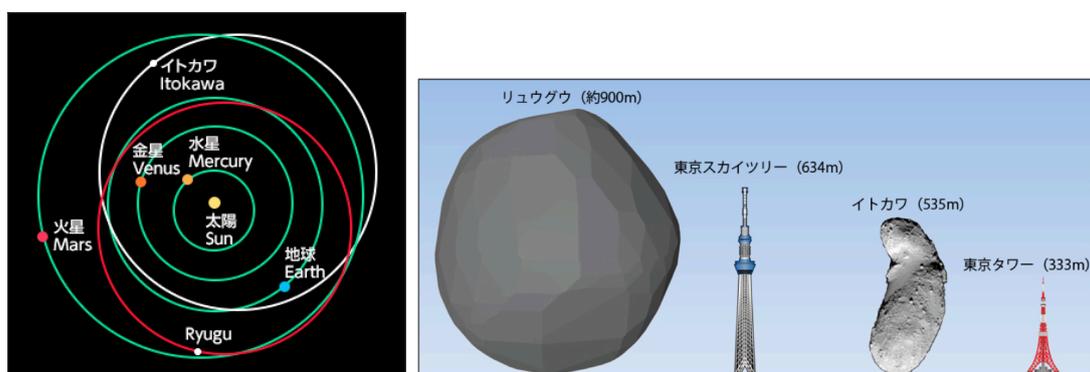


図 3: [左] 小惑星イトカワ、リュウグウの軌道。[右] 小惑星イトカワ、リュウグウの大きさ。[JAXA]

³ 「はやぶさ」の命名は、小惑星のサンプル採取が1秒ほどの着地と離陸の間に行われる様子をハヤブサに見立てたから、と言われている。

⁴ 「日本の宇宙開発・ロケット開発の父」と呼ばれる糸川英夫(1912–1999)にちなんでJAXAが命名した。

3 ドレークによる地球外文明の推定

1960年にアメリカの天文学者ドレークが発表した「地球外文明の数を推定する式」は、太陽系が属する銀河系内に現存する文明の数 N を推定する式である。

$$N = R_* \times f_p \times n_e \times f_\ell \times f_i \times f_c \times L \quad (1)$$

式の右辺の記号の意味と推定値を表3に示すが、楽観的に考えるか悲観的に考えるかで、ずいぶん最後の値が違ってくる。



図 4: Frank Drake (1930-)

表 3: ドレークの式 (1) にいれるべき値はどれだろうか。天の川銀河にある恒星は約 2000 億個とされているが、はたして知的生命体の存在する星の数はいくつだろうか。

	楽観論	中間論	悲観論
R_* 銀河系で毎年生成される星の数 (個/年)	50	20	1
f_p 生成される星のうち惑星系を持つ星の割合	1.0	0.5	極めて小
n_e 星の周りで生命にとって適当な環境を持つ惑星の数	1.0	0.1	極めて小
f_ℓ そうした惑星上で生命が発生する確率	1.0	0.5	極めて小
f_i 生命が知的文明段階にまで進化する確率	1.0	0.1	極めて小
f_c 知的生命が星間通信可能な文明まで進化する割合	1.0	0.5	極めて小
L そのような技術文明の平均寿命	10^8	10^4	100

この式を根拠に、電波望遠鏡を使って、宇宙人からの信号を探索するプロジェクトが進行中だ。銀河系の星の数は約 2000 億個とされているが、はたして知的生命体の存在する星の数はいくつだろうか。

不明な点が多いが、ゼロではないとも考えられる。ドレークの式は、地球外知的生命体探索 (SETI, 略してセチ; Search for Extra-Terrestrial Intelligence) を開始する根拠にもなった。

映画『コンタクト』にも登場したが、最も大きなプロジェクトは、電波望遠鏡を用いるもので、宇宙から受信した電波の中に、未知だが意味のありそうな情報を持った信号があるかどうかを見つけようという作戦だ。1960年代から始まっているが、残念ながらまだ未発見である。

信号の分析には、多くのコンピュータを必要とする。そこで現在、各家庭のパソコンで信号解析を協力してもらおうという SETI@home (セチ・アット・ホーム) と呼ばれるプロジェクトもある。

4 太陽系外惑星の探査

はじめて太陽系外惑星 (略して系外惑星 (extrasolar planet)) が報告されたのは、1995年のことである。

■ 太陽系外惑星の検出法

これまで報告された系外惑星の多くは、間接的な方法で発見されている。つまり、中心となる主星を継続的に観測し、その前を系外惑星が横切った時の減光を調べるトランジット法 (食

検出法) や、主星の前を系外惑星が横切った時に主星の光が重力レンズ効果で集光することを調べる**重力レンズ法**、惑星の公転によって主星も共通重心のまわりをふらつくことを利用した**アストロメトリ法 (位置天文学法)**、あるいはふらつくことで地球から見た視線方向に主星がドップラー効果を引き起こすことを観測する**ドップラー偏移法 (視線速度法)** である。主星がパルサーであれば、系外惑星の通過によって、パルス周期が変化することを利用した**パルサー・タイミング法**もある。

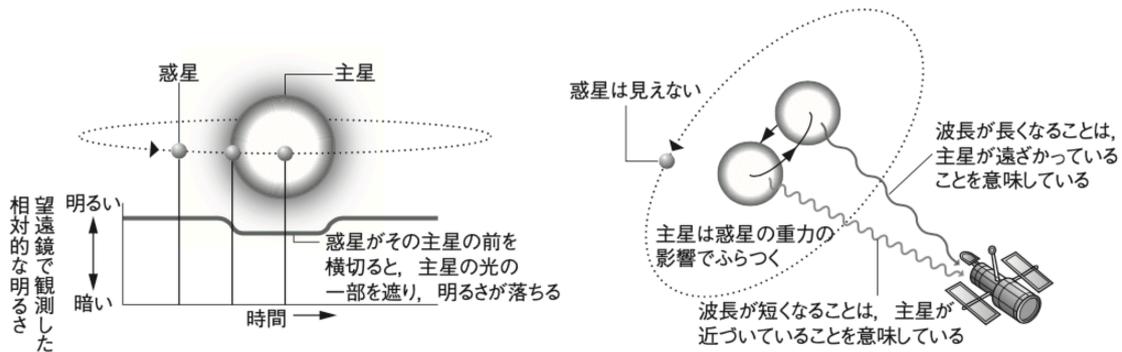


図 5: [左] トランジット法 (食検出法) による惑星検出。恒星の手前を惑星が横切れば、恒星が暗くなる。木星サイズの惑星ならば約 1% の減光を生じるが、地球サイズの惑星なら 0.01% の減光になる。[右] ドップラー偏移法 (視線速度法) による惑星検出。恒星がふらつくことによるドップラー偏移を検出する。

■ 太陽系外惑星の発見状況

1995 年にはじめて発見された系外惑星は、地球から 50.1 光年の距離にあるペガサス座 51 番星 (51 Peg) を主星とする「ベレロフォン」(Bellerophon) である。質量は木星の 0.47 倍 (地球の 150 倍) で、主星からわずか 0.05AU⁵ (太陽-水星の距離の 1/6) という近距離を 4.2 日で公転している。表面は 1000 °C まで熱せられていると考えられ、このようなタイプの惑星は**ホット・ジュピター**と呼ばれる。ジュピターは木星 (Jupitar) のことである。当初、このような惑星があるとは想定されていなかったため、惑星形成理論は大きな変更を迫られている。系外惑星を初めて発見したマイヨール (Michel G. Mayor, 1942-) とケロー (Didier Queloz, 1966-) は、2019 年のノーベル物理学賞を受賞した。

2009 年に、系外惑星探査を目的とした探査機 (宇宙望遠鏡) ケプラーが NASA によって打ち上げられた。ケプラーは 4 年にわたって、はくちょう座の同じ方向を見続けて 10 万個の恒星の明るさを 3 時間おきに測定し、トランジット法を用いて系外惑星の発見を続けた (図 6)。その成果は素晴らしく、Kepler 衛星 (2009-2013) のミッションは、一旦終了したものの、同衛星を用いて K2 ミッション (2014-2018) が引き続き行われた。その後 TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite, 2018-) に観測が引き継がれている。2021 年 1 月現在の数値は表 4 のようになっている。

⁵AU (天文単位) は太陽-地球間を 1 とする長さの単位。

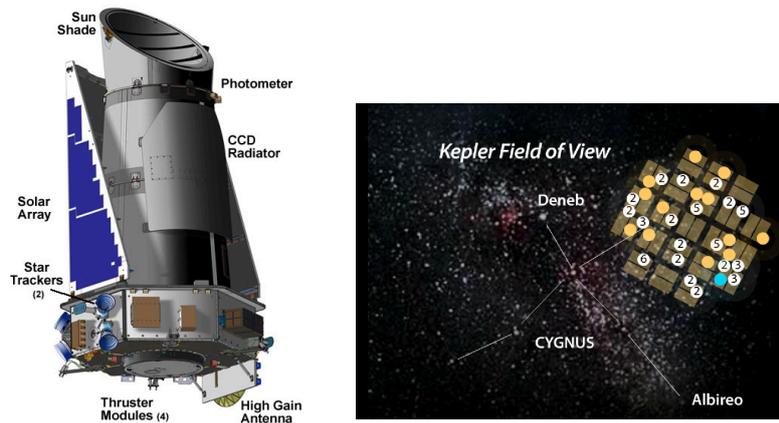


図 6: [左] ケプラー探査機 (宇宙望遠鏡) [右] ケプラー探査機ははくちょう座の領域を見続けた。
[http://kepler.nasa.gov/]

表 4: これまでに発見された太陽系外惑星の数. (2021 年 1 月 16 日現在).
[http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/]

	全観測	Kepler	K2	TESS
確認された太陽系外惑星 (confirmed planets)	4331	2394	425	98
複数の惑星からなる系 (multi-planet systems)	1856			
ハビタブルゾーンにある 星 (確定+候補天体)		361		
候補天体 (Kepler/K2 Candidates)		2366	889	1395

■ ハビタブルゾーン

系外惑星探査の目的の1つは、地球外に生命が存在するかどうか、という点である。宇宙の中で生命が誕生するのに適した環境となる天文学上の領域のことをハビタブルゾーン (生命居住可能ゾーン, habitable zone) という。

ハビタブルゾーンは、少なくとも2つの条件が必要である。1つは生命が誕生できる可能性を考えるならば (少なくとも地球と同じ生命体を考えるならば)、水が液体として存在できる位置に惑星がなければならない。

(この条件を満たす領域を**ゴルディロックスゾーン** (Goldilocks zone) という。英国童話「ゴルディロックスと3匹の熊」の主人公の女の子の名前である。) もう1つの条件は、土星や木星のようなガス惑星ではなく、地球や火星のような岩石惑星であることだ。

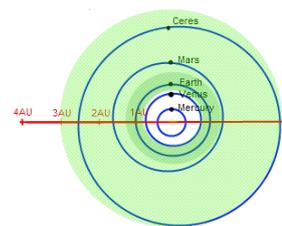


図 8: 太陽系のハビタブルゾーンは金星軌道の外側からケレス付近まで。数値は太陽からの距離を A.U. 単位で示したもの。

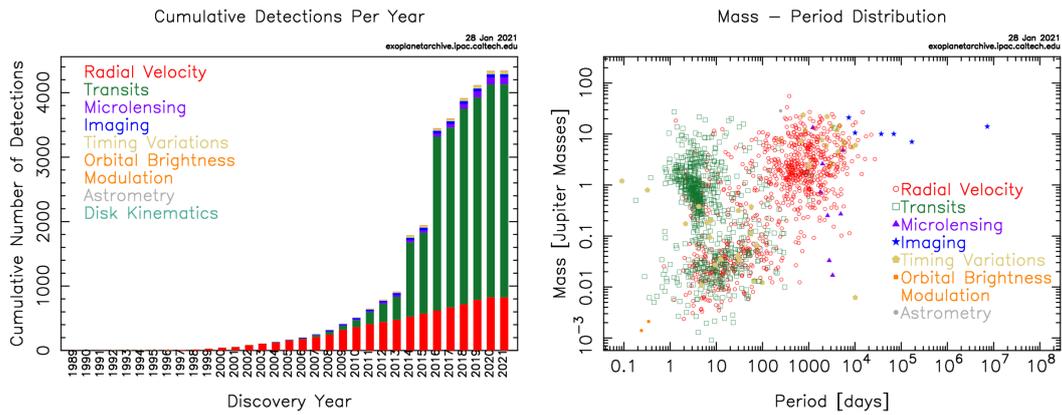


図 7: これまでに発見された太陽系外惑星の統計分布 (2021 年 2 月現在). [左] 発見報告数の年別累積. [右] 横軸は公転周期 (日), 縦軸は質量 (木星質量を 1). 短い周期のものが多くは, 観測期間がまだ浅いのが理由. [<http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/exoplanetplots/>]

■ 速報された系外惑星

1つの主星に複数の惑星が存在していることがわかったり, 衛星 (月) をもつ惑星の存在も確認されている.

- 2013 年 4 月, NASA は, ケプラー衛星によってついに『第 2 の地球』を発見した, と発表した. ケプラー 62 (こと座, 距離 1200 光年, K2 型矮星) を中心とする太陽系には, 5 つの惑星があり, このうちの惑星 f は, ゴルディロックゾーンにあり, しかも半径が地球の 1.4 倍で岩石惑星と考えられ, 生命が存在するかもしれない「ハビタブル惑星」と判明した (図 9 [左]). また, ケプラー 69 (はくちょう座, 距離 2400 光年, G 型) を中心とする太陽系でも, ゴルディロックゾーンに周回する惑星が存在するという.
- 2014 年 4 月, NASA は, ケプラー 186 (はくちょう座, 距離 500 光年) に, ハビタブル惑星でかつ地球サイズ (直径で 1.1 倍) の第 4 惑星が発見された, と発表した. 中心の恒星は, 太陽の半分ほどの大きさであり, 周期は 130 日. 中心星から受けとるエネルギーは地球に降り注ぐ太陽エネルギーの 3 分の 1 程度と見積もられている (図 9 [右]).
- 2015 年 7 月, NASA は, ケプラー 452 (はくちょう座, 距離 1400 光年) に, 太陽と同タイプの恒星のハビタブルゾーンに地球サイズの系外惑星「ケプラー 452b」を発見した, と発

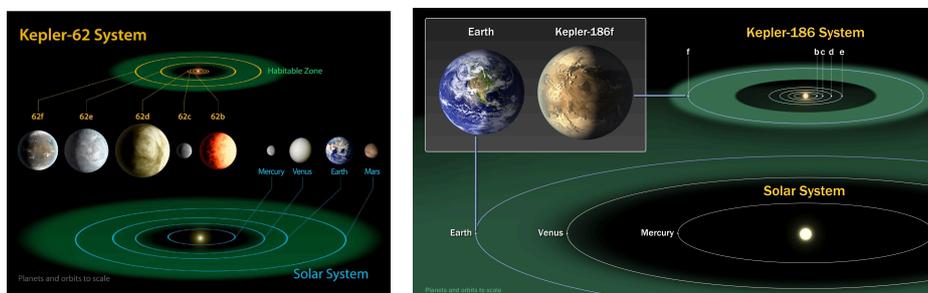


図 9: [左] 2013 年 4 月に報告された, 初のハビタブル惑星の発見. ケプラー 62 系の惑星 f. 地球の 1.4 倍の直径. [右] 2014 年 4 月に報告された, 初のハビタブル惑星かつ地球サイズ惑星の発見. ケプラー 186 系の惑星 f. 地球の 1.1 倍の直径. [NASA]

表した。中心星は太陽に似た G2 型星で、誕生から 60 億年、温度は同程度、直径は 10% 大きい。ケプラー 452b は 385 日周期で公転しており、直径が地球の 1.6 倍のスーパーアースと考えられている。

- 2016 年 2 月、NASA は、地球からわずか 4.2 光年の距離にあるプロキシマ・ケンタウリが惑星をもっていることを発表した。もっとも近い恒星に惑星が見つかったことで、次世代無人ロケットによる探査の可能性が議論されはじめている。プロキシマ b (Proxima-b) と呼ばれる惑星は、プロキシマ・ケンタウリからの距離が 750 万キロで太陽と地球の距離の 5% ほどしかないが、プロキシマ・ケンタウリは赤色矮星と呼ばれる恒星のため太陽と比べると非常に熱量が小さく、近距離であってもハビタブルゾーンであるという。公転周期は 11.2 日。
- 2017 年 2 月、NASA は、みずがめ座の方角に 39 光年離れた恒星「トラピスト 1 (TRAPPIST-1)」の周りに、大きさが地球の 0.76–1.13 倍の惑星 7 つを発見した、と発表した。このうち 6 つは地球に似た質量で、岩石できているとみられる。赤外線をとらえる NASA のスピッツァー宇宙望遠鏡などで観測した。

以上のとおり、地球に似た惑星はここ数年で続々と発見されてきている。今後、各ハビタブルプラネットの大気成分の検出や、生命存在の証拠をつかむための、次世代望遠鏡の建設や打ち上げが世界中で計画されている。

5 地球外生命探査

地球以外に生命体はいるのか、そして地球以外に知的生命体はいるのか、これらの可能性について考えてみよう⁶。

■ アミノ酸の起源

そもそも地球にはどうやって生命が誕生できたのだろうか。これについては諸説あり、まだ確定的なものはない。

星形成の起きている星雲に分光学を用いると、その中の浮遊物中に（生命体の構成要素である）有機物が検出されている。実際に、生命に不可欠な何百もの分子が検出されていて、（タンパク質の構成要素である）アミノ酸は普通に存在するようだ。したがって、太陽系でも、おそらく惑星が形成される以前に、すでに生命をつくるのに必要なすべての化合物が宇宙空間に存在していたと思われる。

ちりが集積して星になり、太陽が燃え始めてガスを飛び散らし、惑星が形成された。初期の地球は灼熱の星だったが、やがて冷え、約 40 億年前には、もう一つの星と衝突して、一度大きく破損するが、やがて月を伴う 2 つの連星系になった。

現在でも数百トンもの有機物が彗星や小惑星のちりとして毎年地球へ届けられているが、地球ができた頃には、このような衝突はもっと頻繁だった。数億年ほどの間に数十億トンもの生命体の化学的なブロックが届けられたと考えられている⁷。

⁶ 「地球外生命体の存在」と「地球外知的生命体の存在」はレベルの異なる問題である。UFO とは、未確認飛行物体 (Unidentified Flying Object) の意味である。多くは風船や鳥である。「UFO=宇宙人」ではない。

⁷ ここでは、有機化合物が宇宙から飛来する可能性について言及したが、もちろん地球上でも有機化合物は合成される。また、宇宙から微生物が飛来すると考える説（パンスペルミア説）もある。panspermia はギリシャ語で「種をまく」の意味である。

■ 生命の起源

この状態から、生命体がどのようにして単細胞生物として自己複製可能な微生物になりえたのか、という疑問はまだ解明されていない。さまざまな説が出されている。

有力な説の一つは、熱水噴出孔説である。海底にあるマグマからの噴出孔で生命が生まれた、というものだ。原始地球ではメタン、硫化水素、アンモニア、水素などの還元的物質が豊富に存在していた。それらが高温・高圧下で反応して生体分子がつくられ、鉱物表面で重合して高分子化し、紫外線が遮断された環境で細胞化した、と考える説である。この説では、海と火山活動があればよい。原始火星にも大量の水と熱水活動があった。木星の第2衛星エウロパ (Europa) は、表面を覆う厚い氷殻の下に、今でも海と熱水噴出孔が存在する可能性が高い。

もう一つの説は、月の重力が引き起こす絶え間ない潮の流れによって、生命体が出現した、というものだ。原始の月は今より地球に近かった（月はできてからずっと少しずつ地球から遠ざかっている）。月の潮汐力は今より大きく、初期の地球は今の1000倍の高さの潮の干満が発生していた。地球の1日は6時間ほどしかなく、3時間ごとに巨大な津波が押し寄せたり引いたりしていたはずである。こうして陸地の水たまりで水が濃縮され、強い太陽光が化学反応を促進し、脂肪酸（炭素・酸素・水素原子の鎖）やタンパク質のようなこれまでになかった複雑な有機化合物を作り出したのではないか、というものである。

もう一つの説は、原始の地球は強い太陽光による放射線で満ちていて、地中にも放射性物質が多量にあり、それらが複雑な分子合成を促進した、というものである。

諸説あるが、いずれも、**生命の基本的性質**として、

- (1) 細胞や皮膚など、外界との境界をもつ。
- (2) 化学反応で発生したエネルギーを利用して代謝をする。
- (3) 成長し、自己複製をする。
- (4) 環境に応じて進化（変異）する。

という性質に結びつくところまではシナリオができていない。

生命誕生の謎・生命進化の謎を解き明かすため、これからは、生物学と宇宙観測とが対になって進められていく**宇宙生物学** (astrobiology) の時代になっていくだろう。

参考文献

- [1] 真貝寿明『現代物理学が描く宇宙論』（共立出版、2018）

-
- 今回の講義で配布したこのプリントとスライドファイル (pdf) は、
<http://www.oit.ac.jp/is/shinkai/nara2020/>
からダウンロードできます。