

特集

水の惑星「地球」

—生命に不可欠といわれる水はどこからやって来たのか

生命を育んだ惑星“地球”の起源と進化

地球および火星の“水”は
どこからもたらされたのか

地球内部の水

系外惑星と水・生命

系外惑星と水・生命

私たちの星“地球”は高等生命が躍動する、きわめて活動的であり、命あふれる色鮮やかな星です。いま、私たち人類は太陽系の外に存在する惑星を探知する技術をもち、「宇宙に存在する生命は私たちだけか」といった永遠に答えの出ないと思われた命題を科学的に議論し得るところまでできました。ここでは、最初に地球史の紹介をし(図1)、地球史研究をもとに系外惑星の生命環境進化について考えてみます。



文・図版・写真

小宮 剛 こみや つよし

東京大学大学院総合文化研究科
広域システム科学系准教授

1999年東京工業大学大学院理工学研究科応用物理学専攻修了。博士(理学)。理化学研究所情報基盤研究部計算科学技術推進室協力研究員、東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻助教授、准教授、米国アリゾナ州立大学客員研究員などを経て、2009年より現職。地球生命環境進化史専攻。

地球に生命が生まれるまで

地球は太陽系に存在する8つの惑星の一つとして、およそ45億6000万年前に形成されました。現存する最古の岩石はカナダ・スレーブ地域の約40億3000万年前のアカスタ片麻岩体で(図2a、c)、最古物質は西オーストラリア・ナリア岩体に産する礫岩中のジルコンとよばれる鉱物で、約44億年前の年代をもつものが発見されています。しかし、約43億年前以前の粒子は10万個中たった100個未満しか発見されておらず(図2d)、地球には最初の5億年間の歴史はほとんど残さ

れていないため、当時の描像は月の研究や数値計算などから間接的に調べられています。それによると、誕生時、地球は微惑星の集積に伴う重力エネルギーの解放などによって高温になり、表層が融解し、マグマオーシャンという状態になりました。さらには、火星(直径が地球の半分ほどの大きさ)サイズの天体が地球に衝突し、その際飛び散った破片が地球を周回し、やがてそれらが集積して、月が形成されました(ジャイアントインパクト仮説)。その後、表層が冷え、大気中の水蒸気が凝結し雨が降り、海が形成されました。カナダ・ラブラドル地域や西グリーンランドの約38

億年前以前の地質体には最古の堆積岩(図2b)や枕状溶岩から構成される海洋プレート層序や、現在の日本のような沈み込み帯で特徴的な付加体が存在するので、38億年前にはプレートテクトニクスがすでに機能していました。ただし、当時のマントルは高温だったので、地球表面はおよそ300ものたくさんのマイクロプレートに分かれ、若いプレートが沈み込み大量の花崗岩がつくられる先カンブリア型のプレートテクトニクスが機能していました。

中央海嶺や海山の熱水系では、チムニーとよばれる熱水噴出孔から高温の熱水が放出されます。300℃を超える熱水は鉄などの大量の重金属を溶かし込み、特に酸素に乏しい初期地球では熱水中にリンなどの生命必須元素やア

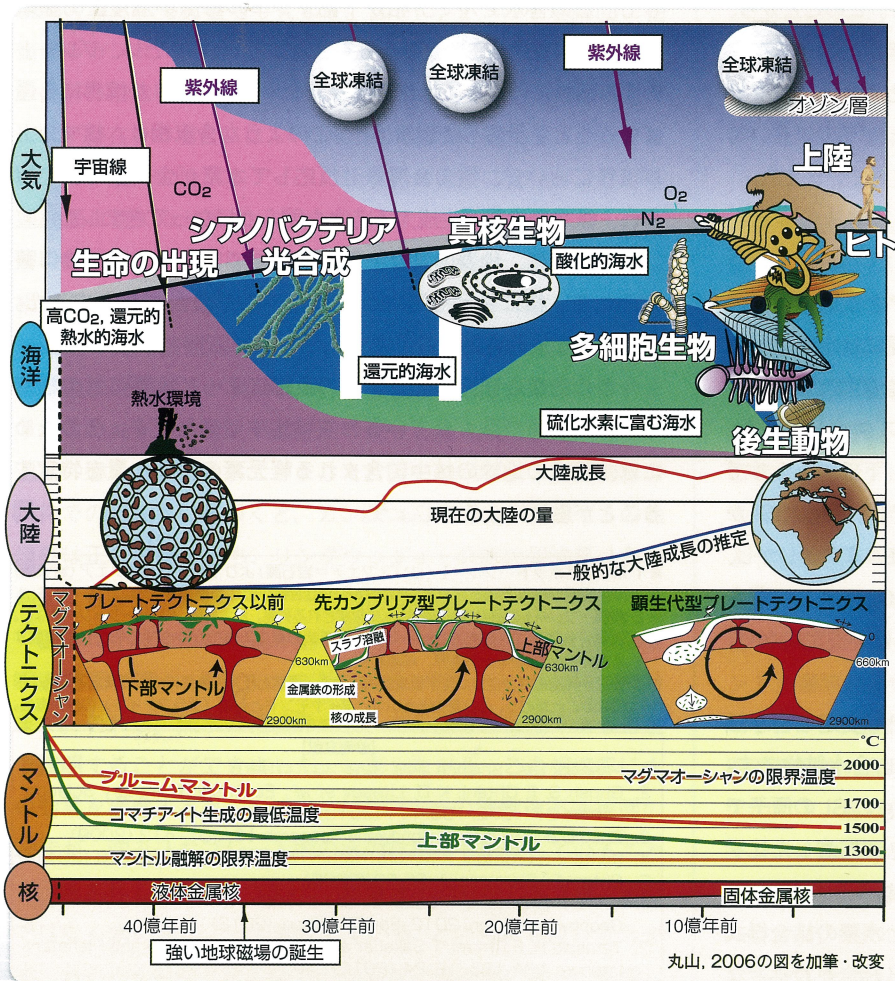


図1 地球・生命進化史の概観

核、マントル、テクトニクス、大陸、海洋と大気のサブシステムの進化の概要と生命進化の概略。

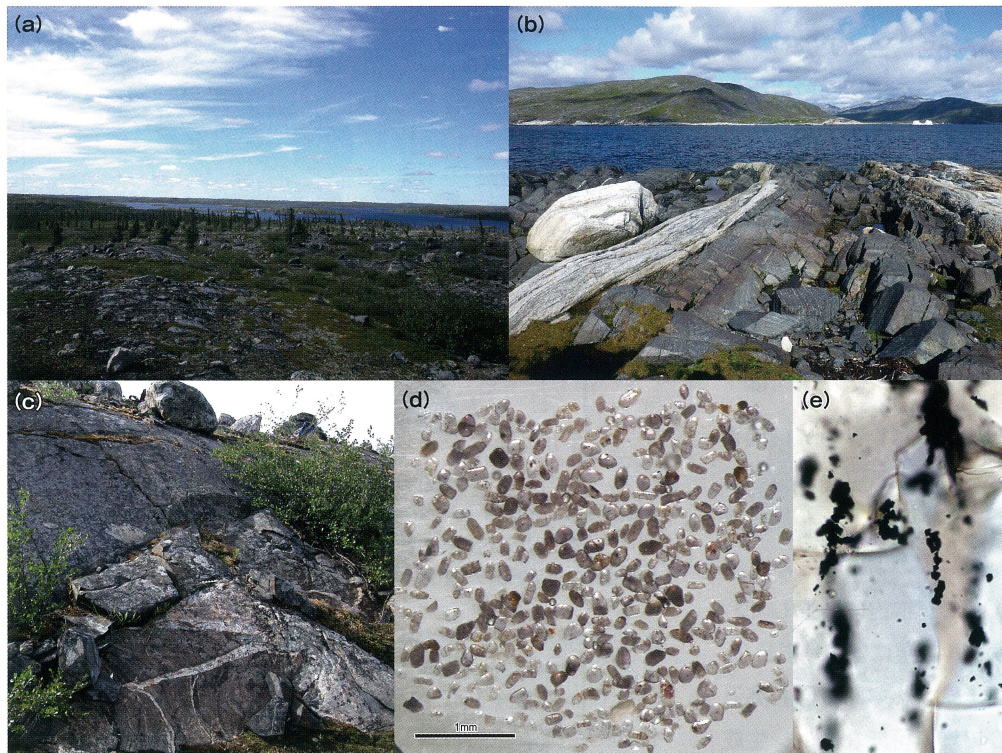


図2

(a) 最古の地質体であるカナダ・スレーブ地域のアカスタ片麻岩体の様子
手前の岩石が40億3000万年前の年代をもつ白色片麻岩。

(b) カナダ・ラブラドル地域のネーン岩体に産する最古(39億6000万年前)の堆積岩(縞状鉄鉱層)

(c) アカスタ片麻岩体に産する40億3000万年前の白色片麻岩(右下の白色部)と、原生代の岩脈(左上の灰色塊状)に切られた角閃岩(中央茶色部)

正確な年代は不明だが地質学的には最古とされる(40億3000万年前以前)。

(d) 西オーストラリア・ナリア岩体の礫岩中のジルコン(43億5000万年前のジルコンを含む)

同じ地層から地球最古の物質(44億年前)が見つかった。

(e) 西グリーンランド・イスア表成岩帯のチャート中の炭質物

その低い炭素同位体比($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$)は最古の生命の痕跡とされる。

ミノ酸などの有機分子の合成やメタン生成菌など原始的な生命の活動に必要な水素 (H_2) が多く存在し、海水に供給されていました。また、熱水系は 300°C の熱水と 4°C の海水が混じり合うところであるため、温度勾配が大きく熱エネルギーを得やすい場所です。さらに、鉄酸化物などの酸化的な物質と溶存二価鉄 (Fe^{2+}) や水素などの還元的な物質が共存するため、酸化還元反応による化学エネルギーも得やすい場所です。生命は、このようなエネルギーと生命に必要な元素や分子の供給源である熱水環境で出現したと考えられています。現存する最古の生物起源物質は西グリーンランドに存在する、深海で堆積したチャートや黒色頁岩中の炭質物です(図2e)。その後、酸素発生型光合成を行う生物が出現し、大気中の酸素濃度が増加するようになり、特に、24億年前ごろ、酸素濃度は急激に上昇しました。

現在の地球は氷河期とよばれる、極域に氷床が存在する寒冷な時代です。先カンブリア時代(約5億4000万年前以前)にも氷床が存在する時代が何度か繰り返され、全球凍結という、海洋も含めて地球全体が凍結するほど大規模な寒冷化も起こりました(図1)。そして、約6億3000万年前の全球凍結直後に後生動物(多細胞の動物)が出現し、海洋組成変動に連動し、急速に生物の種類が多様化しました。そして、約5億2000万年前までにはアノマロカリスなどに加え、脊椎動物も出現するようになり、すべての動物門が出そろいます(カンブリア爆発)。その後、大気中の酸素濃度が増加し、上空にオゾン層が形成されると紫外線が遮蔽され、陸上で生物が活動できるようになりました。最初はクックソニアなどの陸上植物が上陸し、後生動物が続きました。石炭紀(約3億

5920万~2億9900万年前)になると巨大な森林が形成されるようになります。私たち現生人類が出現したのは約20万年前で、長い地球史ではごく最近のことです。

生命の存在する条件、ハビタブルゾーン

さて、系外惑星の生命に話を移しましょう。20年前までは系外惑星の研究は理論的考察の域を出なかったのですが、1995年以降、系外惑星を検出する方法が確立されると劇的に状況は変化し、いまや年間200個ほど、2013年5月末の時点で900個近い系外惑星が発見されています(図3)。そのなかには、公転周期のみならず軌道長半径、質量、平均密度が推定

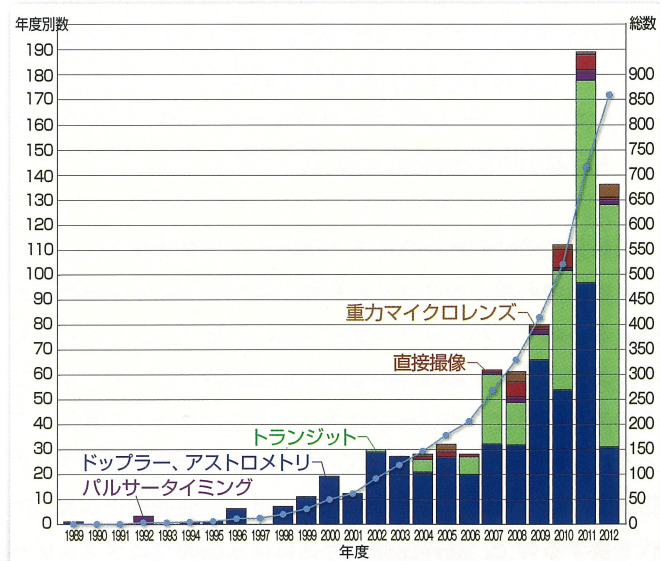


図3 これまでに発見された系外惑星の数とその検出手法

されているものもあり、惑星個々の情報も詳しくわかってきました。惑星は小さく、自身で発光しないので、一般に中心星の挙動からその存在を間接的に調べます。そのため、中心星に近く、ガスを主成分とする木星型の大きな惑星ほど検出しやすいものの、地球半径の2倍以下の地球型惑星（スーパーアース）も発見されています。

生命の存在を期待するには、その惑星がハビタブル（居住可能）な地球型惑星であることが必要です。そこで、それはどのような惑星かを考えてみます。

- ① 一般に、中心星に近すぎるとその潮汐力によって破壊されてしまうので惑星が形成されず、遠すぎると木星のようなガス惑星になってしまいます。その間で地球型惑星が形成されます。
- ② 小さな惑星は重力が弱いので、ガスが宇宙に散逸してしまい、大気を保持できず、ハビタブル惑星にはなりません。
- ③ 適度の表層温度が必要で、現在発見されている最も高温条件で生息できる生物は122℃で増殖可能なメタン生成古細菌です。
- ④ 利用可能なエネルギー源が存在する。
- ⑤ 炭素は軽くかつ莫大な数（1000万種以上）の化合物をつくる元素で、その特長は他に代え難いものです。
- ⑥ 生命には炭素だけでなく、鉄（Fe）、ニッケル（Ni）、亜鉛（Zn）やモリブデン（Mo）などの重元素も必要です。重元素が存在するには、それまでに超新星爆発などが起きた必要があります。
- ⑦ 最も重視されているのが、液体の水が存在することです。地球上に液体の水を必要としない生物は存在しません。また、水分子は、水素結合のおかげで軽分子なのに常温で液体として存在し、かつ比熱や潜熱が大きいといった特長をもちます。また、'いろいろなものを溶かす'粘性があまり高くない'解離して水素イオンを生成するためpHの変化を起こし、酸化還元によるエネルギーを生じやすい' '非極性分子は水に溶けず凝縮するので膜をつくりやすい'といったさまざまな特長があり、生命の存在に最も重要な物質とされています。

惑星系で液体の水が存在する領域をハビタブルゾーンといいます。中心星の光度はその質量に依存し、大きな恒星ほど強くなるので、ハビタブルゾーンは中心星が大きいほど遠くなります（図4）。また、中心星の光度は時間とともに強くなるので、ハビタブルゾーンは徐々に遠ざかります。長期（たとえば46億年間）にわたってハビタブルな環境が持続される領域を永続的ハビタブルゾーンといいます。生命進化は長い時代を要するので、高等生命の存在には永続的ハビタブルゾーン内に存在することが望めます。このように考えるとハビ

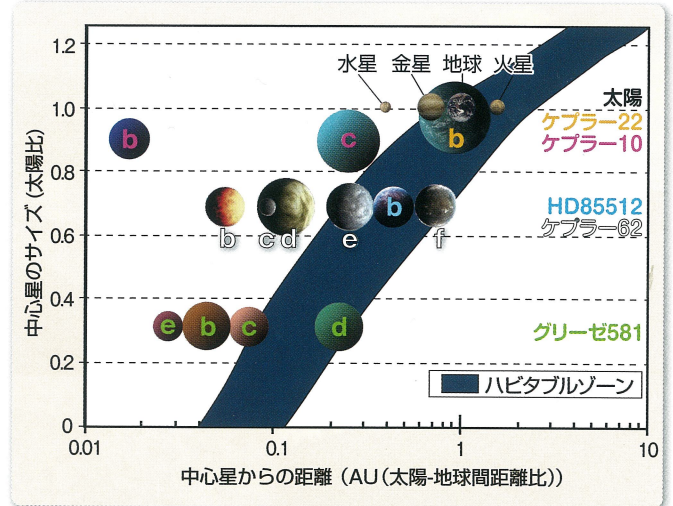


図4 これまでに発見された系外惑星のなかで、地球型惑星やハビタブル惑星とされるものと太陽系の地球型惑星の比較

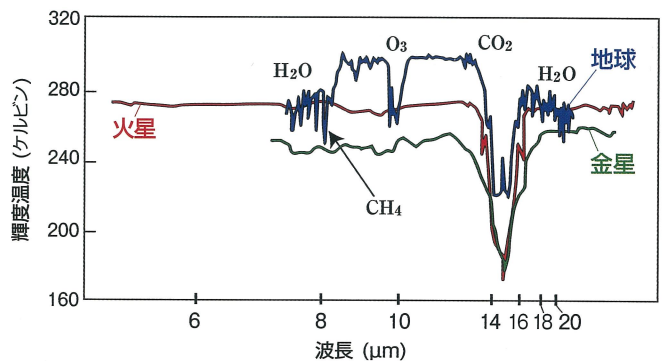


図5 金星、地球、火星の赤外線スペクトル Angel & Woolf, 1996

タブル惑星はとても希少な天体となり、まだ数えるほどしか見つかっていませんが、推定では銀河系内に400万個ほどあることが期待されています。

地球外生命の存在を求めて

私たちは生命が生息する惑星を発見することができるのでしょうか。その検出に向けて2つの方法が行われています。

1つは電波観測などの技術をもつ知的生命体を探索する方法です（地球外知的生命体探索：SETI）。電波を用いた探索は1950年代末に始まり、1960年にはアメリカ国立電波天文台（当時）のドレイクによって近傍の星からやってくる電波信号を探すオズマ計画が発足しました。その後も米国を中心にさまざまな探索が行われています。

もう1つは、系外惑星の直接観測から生命の痕跡（バイオマーカー）を検出するというものです。地球大気には酸素（O₂）が含まれ、上層にはオゾン（O₃）層が存在します。一方、金星の大気は96%が二酸化炭素（CO₂）から構成されており、酸素は含まれません。図5は、金星、地球と火星の赤外線スペクトルを比較したものです。いずれの惑星にも二酸化炭素由来の吸収バンドがみられますが、地球にはオゾンに由来す

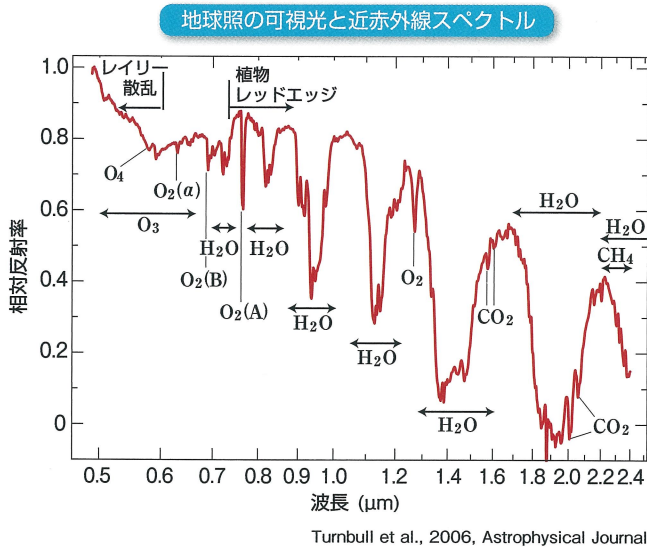


図6 地球照(日食時の月の影から反射される光:太陽光が地球で反射された光が月面で再反射されて生じる)の可視光と近赤外線スペクトル
地球の大気中に存在するO₂、CO₂、H₂O、CH₄やO₃に起因する吸収スペクトルが観察できる。また、0.7μm以下の波長は植物によって吸収されるため、0.7μm以上で反射光が増加する(レッドエッジ)。

る吸収バンドも存在します。オゾン層は大気中に十分な酸素が存在するとつくられるので、このことは地球の大気中に酸素が存在することを示し、酸素発生型光合成生物が存在することを示しています。

また、図6は、地球の可視光や近赤外線領域のスペクトルです。大気中に存在する酸素、二酸化炭素、水(H₂O)、メタン(CH₄)やオゾンに起因する吸収スペクトルが観察されることに加え、0.7μm [1μm(マイクロメートル)は100万分の1m]以上の波長で反射率が高くなっています。これはレッドエッジとよばれ、光合成植物が可視光を吸収し、赤外線を反射する性質に起因します。

図7は、雪、雲、植物、陸地と海洋のそれぞれの反射スペクトルを示したものです。陸地と海洋は対照的なスペクトルをもち、青色領域では海洋の方が反射率が高く、近赤外線領域では逆転します。この性質を用いて近赤外線と青色の反射率の差をとると、大陸分布をみることができます(図7b左)。一方、近赤外線と^{だいだい}橙色の反射率の差をとると、植物分布をみることもできます。また、系外惑星は遠いため、ほぼ点でしか観察することはできませんが、自転していると反射率の変動を観察することができます。その変動から大陸や植物の分布を知ることができるかもしれません。このように、惑星の直接撮像によって大陸や植物の存在などを検出することができます。しかし、小さな地球型惑星を直接撮像するのはとても難しいことです。たとえば、3000光年先から太陽系を見たとき、地球と太陽のなす角度は1ミリ秒角(1度の360万分の1の角度)で、太陽の半径は5マイクロ秒角(1マイクロ

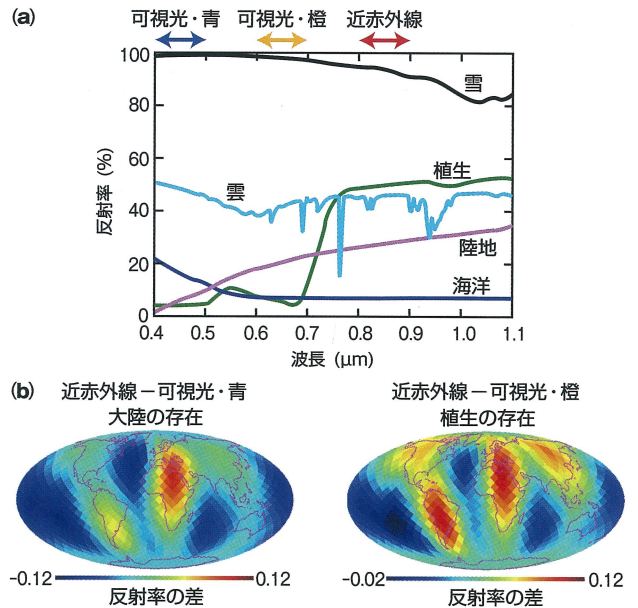


図7 (a) 地球上の代表的な物質の反射スペクトル
植物のスペクトルにみられる0.7μmでの反射率の急激な増加をレッドエッジという。
(b) 地球の1年分の光度変動

秒角=1ミリ秒角の1000分の1の角度)となります。従来の光学望遠鏡で、太陽半径を測定するには口径24kmの望遠鏡が必要となり、地上に建造するには非現実的です。しかし、将来宇宙に建設することが可能になるかもしれません。実際、2020年代には30~40m級の地上望遠鏡を用いて、太陽よりも低温の恒星の周りに位置する地球型惑星の直接撮像が検討されているので、もし大気中に十分な酸素濃度が存在すれば、検出することが可能になると期待されています。さらに、人工衛星を使った直接撮像も計画されていて、2020年代半ば以降には太陽型の恒星を回る惑星の直接撮像が可能となり、2030年代以降には地球型惑星の直接撮像も可能となることが期待されています(図7)。

私たちはこれまで、太陽系のことしか知らず、太陽系が普通だと思っていました。系外惑星から地球以外の生命が検出されるようになると、地球とは異なる生物の存在が期待されます。たとえば、中心星の温度に依存した光合成がみられるかもしれません。また、サイズの違う惑星、厚い海に覆われた惑星などさまざまな惑星を見つけて、カタログがつくられるようになるでしょう。また、冒頭で述べたように、私たちの地球は活動的で、マグマオーシャンや最初の海洋など昔の情報を残していません。また、大陸地殻は、地球誕生後間もなくつくられ、その後削られて減少したという説もあります。宇宙に散らばるたくさんの地球たちのスナップショットを得ることによって、私たちは地球の歴史を直接たどることができるかもしれません。その未来はそう遠くないと思われます。