

ハビタブル惑星の起源，進化，多様性

倉本 圭

〈北海道大学大学院理学研究院宇宙理学専攻 〒060-0810 札幌市北区北10条西8丁目〉
e-mail: keikei@ep.sci.hokudai.ac.jp

阿部 豊

〈東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1〉
e-mail: ayutaka@eps.s.u-tokyo.ac.jp

はしもとじょーじ

〈岡山大学大学院自然科学研究科先端基礎科学専攻 〒700-8530 岡山市津島中3-1-1〉
e-mail: george@gfd-dennou.org

林 祥介

〈神戸大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1〉
e-mail: shosuke@gfd-dennou.org

関根 康人

〈東京大学大学院新領域創成科学研究科複雑理工学専攻 〒277-8561 千葉県柏市柏の葉5-1-5〉
e-mail: sekine@impact.k.u-tokyo.ac.jp

佐藤 光輝

〈北海道大学大学院理学研究院宇宙理学専攻 〒060-0810 札幌市北区北10条西8丁目〉
e-mail: msato@ep.sci.hokudai.ac.jp

惑星が生命を育む惑星となるために満たすべき条件は何だろうか。地球型惑星大気の初期状態とそこでの生命前駆物質の合成の可能性，惑星気候学的に見た液体の水の安定性，そして惑星の水の起源について，系外惑星研究の今後と関連づけながら最新の理解を紹介する。

1. ハビタブル惑星とは

系外惑星の観測，とりわけ近い将来に実現が見込まれる地球型系外惑星の直接観測は，宇宙地球科学に大きなブレイクスルーをもたらすと期待される。この新しい試みは，地球外に初めて生命活動の兆候を発見できる可能性がある点が最も注目されるであろう。たとえ生命発見に至らなかったとしても，地球型惑星の多様性とそれをもたらす種々の要因について考察する手がかりが得られ，生命を育むことのできる惑星の普遍性と特

殊性の深い理解につながることは間違いない。

惑星がハビタブル惑星，すなわち生命を育む惑星になるために満たすべき条件はあまりはっきりしていない。この問題の最大のネックは，今のところ生命に関する知識が地球上の生命に限定されていることにある。

しかしながら地球外の生命も，地球の生命同様に，液体の水を溶媒とした多種の有機化合物からなる自己触媒化学反応系として存在している可能性は高いだろう。まず水と有機物を作る元素 (H, O, C, N) は宇宙でもっともありふれたものであ

る。また、 H_2O はその分極した分子構造から、物質の優れた溶媒として振舞うことができ、液体として存在できる温度範囲も比較的広い。そして炭素原子は、その化学的性質から、多様な水溶性化合物とそれらの反応ネットワークを作ることができる。

そこで以下では、惑星表面に液体の水が長期間安定に存在できることが、ハビタブル惑星の満たすべき必要条件と考える。生命の前駆体となった有機物の起源については、主に原始大気における合成の可能性について触れることにする。

2. 地球型惑星の初期状態

惑星形成の標準モデル¹⁾によると、地球型惑星は微惑星の衝突合体によって形成し、地球のサイズに達するまでの時間は、原始惑星系円盤の質量にもよるが、1千万年のオーダーである。微惑星は成長しつつある惑星の重力によって加速を受けて惑星表面に衝突する。その際の運動エネルギーがすべて熱に変わるとすると、地球サイズの惑星上では平均して数万度の温度上昇が起こる。岩石の融点はおよそ $1,000^\circ\text{C}$ であるから、熱への転換効率がかかなり低かったとしても、衝突に伴って微惑星物質の融解や蒸発が引き起こされる。

こうして微惑星に含まれていた揮発性成分が気化することによって、成長期の惑星には厚い原始大気が形成される。水蒸気をはじめとする複数の温室効果ガスを含んだ原始大気の保温効果によって地表は高温に保たれ、惑星全体がマグマの海に覆われる。マグマの海の中では岩石成分と金属成分の重力的な分離が起こり、マントルと核が分化する。やがて微惑星の落下がやむと原始大気は冷え、そこに含まれていた水蒸気が雨となって地表に降り注ぎ、海洋が形成される。

わが国の研究者が中心となって確立したこの地球型惑星の形成のシナリオ²⁾は、地球、火星および月の分化、すなわち核、マントル、地殻、大気（月は除く）への分離が太陽系の歴史のごく初期

に起こったことを示す多くの年代学的証拠³⁾と合致している。

原始大気は、生命の材料となる有機化合物の最も効率的な生成の場の一つとして有力視されているが、それが実際に有効かどうかは原始大気の組成による。たとえば現在の火星や金星の大気のように $\text{CO}_2\text{-N}_2$ を主体とする酸化型大気では、そこに放電や放射線の照射、あるいは衝撃を加えてもほとんど有機物は生じない⁴⁾。

これに対して CH_4 や NH_3 を含む還元型大気は有機物の生成に適している。土星の巨大氷衛星タイタンは CH_4 を含む濃密な N_2 大気をもち、ここでは太陽紫外線による光化学反応によって高分子有機物の霞粒子が生じ、この衛星全体を包み隠している（図1）。現在の有機物生成率を45億年間積分すると、太陽紫外線量が地球軌道のおよそ1/100しかないタイタンにおいてすら、全球が厚さ数百mの有機物層で覆われてしまうと推算される⁵⁾。仮に現在の地球の生物体すべてを地球表面に均した場合にどのくらいの厚さになるかを想像すれば、還元型大気中での有機物の生成がいかに効率的なものか実感することができる。

80年代から90年代にかけて地球型惑星の原始大気の組成としては酸化型のものが、特に欧米の研究者らにより支持されてきた。これは CH_4 や NH_3 が光化学的に分解されやすいことや、また揮発性物質の主要な供給源が、金属鉄が完全に酸化されている炭素質隕石に似た物質であり、そこからは酸化型の化学種しか気化しないと考えられたことによっている。もしこれが事実なら、原始大気では生命の前駆物質はほとんど合成されなかったことになり、有機物の主要な供給源を他のもの、たとえば星間雲起源の有機物などに求めなければならない。

しかし現在では、地球型惑星の原始大気はむしろ還元型の組成を長期間保っていたのではないかと広く考えられるようになってきた（60年代前後にもそのような考えが広まったが、それは、惑星

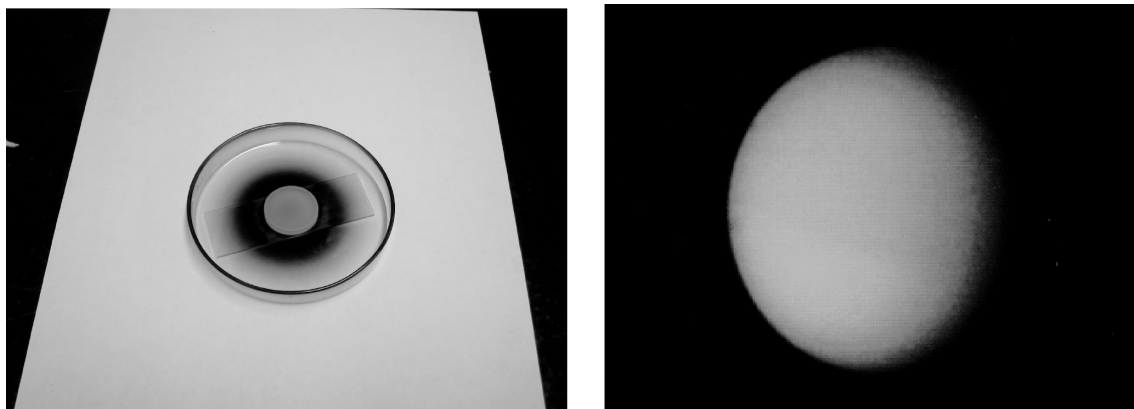


図1 (左) タイタン大気での光化学反応を模擬した室内実験により生成した、オレンジ色の高分子の有機物微粒子 (タイタンソリン: 中央ガラスシャーレ上). タイタン大気組成を模擬した N_2-CH_4 混合ガスに、紫外線と荷電粒子をたった数分間照射することで、透明だったガラスシャーレ上に、生成した高分子有機物が層状に降り積もる。(右) ボイジャー探査機により撮像されたタイタン (NASA 提供). タイタンの高層大気では、室内実験で生成されるような高分子有機物の合成が活発に起きていると考えられ、これらの有機物は衛星全体を包み隠し、タイタンを太陽系でもユニークなオレンジ色の天体になっている。

は誕生時に冷たかったとする古い惑星形成理論に基づく)。もともとわが国の研究者は仮に炭素質隕石的な物質が揮発性物質の供給源だったとしても、衝突によって生じる気体成分には還元型の化学種が高い割合で含まれるはずであることを化学平衡計算や衝突実験の結果から指摘してきた (詳しくはレビュー文献⁶⁾を参照されたい)。そして近年、還元型化学種の光分解で生じる H_2 が従来の推定よりもはるかに長期間 (10 億年以上)、宇宙空間に散逸することなく原始大気に滞留する可能性があることが理論的に示された⁷⁾。

最近、すばる望遠鏡による微小惑星のサイズ分布の統計データと、月のクレーター被覆域のクレーターサイズ分布が合致することから、太陽系の最初の数億年間、メインベルトに起源をもつ小惑星が内惑星領域に降り注いだらしいことが明らかにされている⁸⁾。実はこのこともまた、太古の地球で還元型大気が長期的に持続されたことを支持する。なぜなら小惑星起源の天体は地球表層に揮発性物質だけでなく、 H_2O や CO_2 を H_2 や CH_4 へ還元する働きをもつ金属鉄を惑星にもたらすと考えられるからである。

以上のように、われわれの太陽系では、地球型惑星は最初の 10 億年程度の間、還元型の化学種を多く含む大気をもっていた可能性が高い。もしかすると地球の最初の生命は、このような大気から生命の前駆物質が豊富に得られたことによって生じたのかもしれない。将来、形成年代の異なる系外地球型惑星の直接分光と大気組成の同定が可能になれば、地球型惑星の大気進化の道筋を、その多様性も含めて明らかにできると期待される。また惑星上への小天体のフラックスは惑星の配置と軌道進化にも依存する。これらの観測的、理論的研究も、地球型惑星の初期表層環境の多様性の解明につながる。

3. 温暖湿潤気候の長期的安定性とハビタブルゾーン

惑星表面に液体の水が存在するには適度な中心星放射フラックスが必要である。中心星放射は恒星の進化に伴って時間変化する。たとえば 40 億年前の太陽光度は現在よりも 30 パーセント程度小さかったと理論的に推定されている。もしも過去の地球の大気組成が現在と同じであれば、地球

はその歴史の最初の半分の期間を凍結した状態で過ごしてきたことになる。しかし地質記録からは地球が全球的に凍結した時期は少数回しかなく、基本的には常に液体の水の循環があったことが示されている（地球の大気進化についてはレビュー文献⁹⁾を参照されたい）。太陽放射が小さいにもかかわらず太古の地球が現在同様に温暖であったことを「暗い太陽のパラドックス」という¹⁰⁾。

暗い太陽のパラドックスを解消するには、大気が過去に温室効果ガスに富んでいたと考えるしかない。地球では温室効果ガスとしてCO₂が重要な役割を果たしていたと考えられている。ほかにも強い温室効果をもつ分子種はあるが、CO₂に特徴的な点は、その大気中の濃度が太陽放射量と負のフィードバック関係をもっている点にある。

大気中のCO₂の濃度は火山ガスなどによる大気中への供給と、化学風化を介した炭酸塩岩への固定のバランスで決まる¹¹⁾。たとえば仮にある時点から急に太陽放射が強くなったとしよう。すると一時的に気温が上がり地表の岩石の化学風化、すなわち岩石からのCa²⁺など水溶性イオンの溶出が活発になる。これは温度上昇による化学風化の反応速度の増加と全球降水量の増加による。Ca²⁺は河川を通じて海洋に運ばれ蓄積し、そこで大気から海水に溶けこんだCO₂と結合して炭酸塩岩を形成する。こうして大気からしだいにCO₂が取り除かれ、温室効果が弱まり、気温は太陽光度の増加以前の値へ回復することになる。逆に太陽光度が小さくなると、まず気温が一時的に下がって化学風化が弱まり、CO₂の固定はゆっくりとしか進まなくなる。その一方、火山ガスの放出は太陽光度と無関係に継続するので、大気中CO₂濃度が上昇して温室効果が強まり、やはり気温はしだいに回復する。

このような気温調節の仕組みには、海洋だけでなく、陸地の存在と、惑星内部からCO₂を放出する火成活動が関係していることを忘れてはならない。地球の陸地は主に花崗岩でできた大陸地殻か

らなるが、これは金星や火星にはほとんど存在しない特殊なタイプの岩石である。地球型惑星の表面を覆う地殻は、玄武岩からなるのが普通である。実は地球の7割を覆う海洋地殻の大部分もこのタイプの岩石からできている。プレート運動によって海洋地殻が少量の海水分を帯びた状態で地球内部にもぐりこむと、熱と水分の影響で玄武岩が一部溶けて花崗岩の組成をもったマグマが生じる。これが上昇して地表付近で固まったものが大陸地殻である。つまり陸地の形成にも水が重要な役割を果たしている¹²⁾。

またプレート運動の存在は、地球に効率的な火山活動とそれに伴う地球内部からの揮発性物質の脱ガスをもたらしている。実際、プレート運動がなく、地球のハワイ島のようなホットスポット型の火山活動しかない金星では、内部からの総脱ガス量は地球の数分の1であることが、大気中の⁴⁰Ar量の比較から示唆される。実はマントル対流の様式としてプレート運動が発現するには、惑星内部に水分が取り込まれていることが極めて重要だと考えられている¹³⁾。これは水分の有無によって岩石の流動特性が著しく変化することによっている。

惑星表面の水の総量がどのように決まったのかはいまのところ定かではない。水が大量に存在した場合には陸地は形成できず全球が海で覆われる。逆に少量の場合には全球規模の海洋は存在せず、湖沼が点在する状況が考えられる（現在のタイタンはこちらに近い。ただし湖沼を作っているのは液体メタンである）。ここでは前者を海惑星、後者を陸惑星と呼ぶことにしよう。

海惑星と陸惑星では、液体の水の存在できる温暖湿潤な気候の長期的な安定性が大きく異なると予想される。まず惑星の浴びる中心星放射フラックスが増した場合を考えよう。海惑星では海からH₂Oが蒸発し、水蒸気の温室効果によって気温の上昇が促される。放射フラックスがある臨界値を上回ると、大気の水蒸気量の増加と気温上昇の間の正のフィードバックに歯止めがかからなくなる

暴走温室状態に陥る。この状態に陥ると、地表面温度は海水がすべて蒸発するまで上昇し、液体の水は失われてしまう。金星は誕生直後に、この暴走温室状態に陥ってしまい、海洋が失われたと考えられている。

一方、陸惑星の場合には、表層の液体の水の分布が大気運動によって決まる点が海惑星と決定的に異なる。たとえば自転軸傾斜が小さい場合には、水分が赤道域から蒸発し大気運動によって中心星放射の小さな極域に輸送され、そこで雨や雪として降り地表にとどまることができる。この場合、中心星放射を強く浴びている赤道域では大気が乾燥し、水蒸気による温室効果の暴走は起こりにくくなる。

逆に中心星放射が小さくなった場合を考えよう。地表の H_2O が一部凍結すると、地表面のアルベド（反射率）が増し、それが惑星全体のさらなる寒冷化を促す。これをアイスアルベドフィードバックという。全球に海が広がる海惑星の場合、中心星放射がある臨界値を下回ると、アイスアルベドフィードバックが暴走して、全球が凍結した状態に陥る。一方の陸惑星では赤道域が乾燥することでアルベドの上昇が抑えられるため、暴走的な寒冷化は起こらない。

惑星サイズ、自転運動、大気組成 (H_2O を除く) に地球と同様のものを想定した大気大循環数値モデルを用いて解析した結果、液体の水が長期間存在できるための中心星放射の値は、海惑星では現在の地球軌道上での値の 90% から 110% までの範囲なのに対して、陸惑星では 77% から 170% まで拡大することがわかってきている¹⁴⁾。これはハビタブルゾーン、つまり地表に液体の水の存在を許す惑星軌道の範囲（中心星は太陽とする）に焼き直すと、海惑星の場合は 0.95 AU から 1.05 AU と非常に狭いのに対し、陸惑星の場合は 0.87 AU から 1.3 AU までと著しく広がる。つまり惑星にどれだけの水があるかということが、ハビタブル惑星の成立に大きくかわることになる。

4. 水の起源

地球型惑星の水の起源の候補には大きく原始惑星系円盤ガスと凝縮物が考えられる。凝縮物には含水鉱物、有機物、そして水が挙げられる。地球の場合には、これらと海水の D/H 比や大気中の希ガス元素の存在度との比較がなされ、現在の地球海洋を作っている揮発性物質の大部分は、原始的隕石に見いだされるものと同様の含水鉱物や有機物に由来すると考えられている⁶⁾。

惑星の水の起源についてきちんと理解するには、分子雲から原始惑星系円盤へ至る物質進化、微惑星形成、そしてその後の惑星集積と軌道進化を併せて考える必要がある。惑星系形成の力学面の理解は進んでいるが、物質進化については今なお不明な点が多い。ここでは、原始的隕石の構成粒子と分子雲における酸素同位体組成の不均質性の比較を基に、原始太陽系星雲での H_2O のグローバルな再配置を明らかにする新しい試み^{15), 16)}を紹介する。

固体物質を作る元素として酸素は宇宙で最も豊富なものである。原始的隕石を構成する個々の粒子の年代と酸素同位体データから、原始太陽系星雲の内惑星領域ではおよそ百万年の時間スケールで、円盤ガスの酸素同位体組成が ^{17}O と ^{18}O により富んだ組成へ進化したことが示唆される。その一方、分子雲に含まれている CO 分子は ^{16}O に富む組成をもつことが観測的に示されている。CO は酸素を含む気相分子としては分子雲中で最も豊富なものであり、その同位体分別を補償して ^{17}O と ^{18}O に富んでいると考えられるものがおもに塵粒子の表面で合成される H_2O 分子である。

分子雲が重力収縮し、原始惑星系円盤が作られると、 H_2O 氷をまとった塵粒子はガス抵抗のために選択的に中心星方向に落下し、円盤内側領域で H_2O を蒸発させ、そこで H_2O の濃集を引き起こす。初期存在度から数倍以上の濃集が起こったとすると、隕石データの示唆する同位体組成の進化が再現できる。つまり酸素同位体の記録は原始惑

星系円盤での大規模な物質再配置を示す痕跡と見なすことができる。

今後、原始惑星系円盤の高空間分解能観測と比較しながら、同位体組成の不均質性を手がかりとして原始惑星系円盤での有機物、ケイ酸塩も含めた物質進化を明らかにすることによって、惑星の材料物質の起源に迫ることができるとわれわれは考えている。

5. 比較惑星学の展開に向けて

これまでのハビタブル惑星の理解は、主として地球を金星、火星、月と対比することから得られてきた。地球型系外惑星の観測によって、比較の対象は大きく広がることになる。それによって中心星の放射特性や惑星質量など、惑星表層環境を決めている境界条件だけでなく、惑星形成からの年代の違いも検討できるようになることが重要である。

系外惑星の直接観測では、惑星の分光スペクトルが得られる。これは直接的には大気組成と構造についての情報をもつ。ここからその惑星の特性をより深く明らかにするには、惑星大気の組成と構造を決定するメカニズムについて多角的な知見が必要である。実は太陽系内の惑星に関しても、大気の探査はようやく本格化しつつある段階にある。わが国でも2010年に金星大気の構造解明を第一目標とする金星探査機 Planet-C を打ち上げる予定になっている。この探査からサイズや組成が地球と瓜二つの惑星が、どのようにして地球と全く異なる姿をもつに至ったのか明らかにされていくはずである。

これら太陽系内の惑星の研究と、系外惑星の研究を融合させることによって、ハビタブル惑星の起源と進化、成立要件についてのこれまでの理解を試すだけでなく、地球の科学を太陽系外に拡張した新たな学問体系の構築が可能になるだろう。

参考文献

- 1) 例えば、小久保英一郎, 井田 茂, 2003, 天文月報 96,

215

- 2) 松井孝典編, 1996, 地球惑星科学入門, 岩波講座地球惑星科学 1
 3) 例えば, 坂本尚義, 2000, 天文月報 93, 123
 4) Miller S. L., Schresinger G., 1984, *Origins of Life* 14, 83
 5) Niemann H. B., et al., 2005, *Nature*, 438, 779.
 6) はしもとじょーじ, 2005, 天文月報 98, 7
 7) Tian F., Toon O. B., Pavlov A. A., De Sterck H., 2005, *Science* 308, 1014
 8) Strom R G., Malhotrs R., Ito T., Yoshida F., Kring D. A., 2005, *Science* 309, 1847
 9) 阿部 豊, 田近英一, 2007, 天気 (日本気象学会誌) 54, 5
 10) Sagan C., Mullen G. 1972, *Science* 177, 52
 11) Walker J. C. G., Hays P. B., Kasting J. F., 1981, *J. Geophys. Res.* 86, 9776
 12) 丸山茂徳, 磯崎行雄, 1998, 生命と地球の歴史
 12) 唐戸俊一郎, 2000, レオロジーと地球科学
 14) Zahnle K. J., Abe Y., Abe-Ouchi A., Sleep N. H., 2006, 37th Annual Lunar and Planetary Science Conference, abstract no. 2359
 15) Yurimoto H., Kuramoto K., 2004, *Science* 305, 1763
 16) 福井 隆, 倉本 圭, 2008, 低温科学 66, 83.

Origin, Evolution, and Diversities of Habitable Planets

Kiyoshi KURAMATO

Department of Cosmo sciences, Hokkaido University
 Yutaka ABE

Department of Earth and Planetary Sciences, University of Tokyo

George HASHIMOTO

Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University

Yoshi-Yuki HAYASHI

Graduate School of Sciences, Kobe University

Yasuhito SEKINE

Department of Earth and Planetary Sciences, University of Tokyo

Mitsuteru SATO

Department of Cosmo sciences, Hokkaido University

Abstract: What conditions should be satisfied to form a habitable planet? Concurrent searches for the early state of terrestrial planet atmosphere as a potential field of abiotic synthesis of precursor of life, for the long-term climatic stability of surface liquid water, and for the origin of planetary water are reviewed with their relationship to the future sciences on extrasolar planets.