

# 生命を育む惑星～惑星気候学からのアプローチ～

はしもとじょーじ

## 1. たくさんの惑星

この広い宇宙には我々の他にも知的生命体が存在するのではなかろうか。我々は宇宙を知るほどに知的生命体との遭遇をよりあり得るものとして考えるようになってきたのではないかと思う。古代には天空でまたたく星のひとつでしかなかった火星や金星は、科学的な観測によって地球と同様な固体の地面を持ち大気をまとった惑星であることが明らかにされた(図1、2)。また古代にはその存在すらうかがい知ることのできなかつた土星の衛星タイタンには、地球と同じ窒素を主成分とする大気があるだけでなく、その地表には液体(メタン)をたたえた湖が存在し、大気中で凝結したメタンが雲を作ったり雨を降らせたりしていることまでも観測された(図3、4)。このような地球に似た環境を持った天体の存在は、地球以外にも人類のように知性を備えた生命体が存在している可能性を現実のものとして我々の眼前に提示していると言えるだろう。

そして太陽系の外にも惑星が発見されるようになったいま、地球によく似た環境を持つ惑星がこの宇宙のどこかに存在するであろう確率は決して低いとは言えなくなった。現在までに 200 を超える惑星が太陽系外に発見されている(2008年3月31日現在で228個、<http://exoplanets.org/>)。これまでに発見された系外惑星の多くは木星のような巨大ガス惑星であり、岩石質で地球と同程度の質量であるような地球っぽい地球型惑星はまだ発見されてはいないが、観測能力の伸展によって地球っぽい地球型惑星が発見されるのはすでに時間の問題である。そしてこれから続々と発見されるであろう地球っぽい地球型惑星の中には地球と同様に知的生命体を育てている惑星もあるかもしれないと期待されるのである。

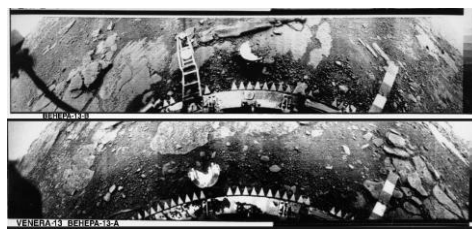


図1(左) . NASAの無人探査車スピリットが撮影した火星の地表(画像提供: NASA)

図2(右) . 旧ソ連の探査機ベネラ13号が撮影した金星の地表(画像提供: NASA)

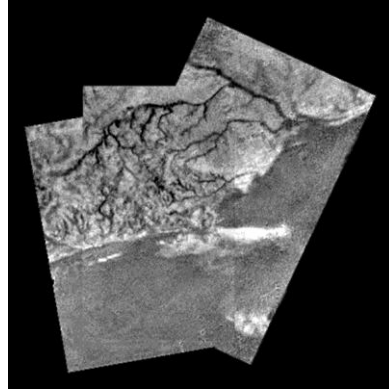


図 3. タイタンの地表 (画像提供 : NASA) ヨーロッパ宇宙機関の探査機ホイヘンスが撮影した画像。10cm 程度の大きさの丸くなった氷の塊が転がっている。

図 4. タイタンの河川地形 (画像提供 : NASA) 探査機ホイヘンスによる撮影。画像の上方に見える樹状の地形は川によって侵食されて作られた地形。画像の下方にあるのっぺりとした場所は干上がった湖底と考えられる。

## 2. 生命を育む惑星

一方で、これまでおこなわれてきた科学探査では地球以外の天体に生命が存在する(存在した)痕跡は発見されていない。10 数年前には火星から飛来したと考えられている隕石中に火星生物の化石とおぼしき構造が発見されたとの報告もあったが、これを確かな生命の痕跡であると認定するにはかなりの証拠不足というのが正直なところである。もちろん十分な探索がおこなわれたわけではないので、まだ発見されていない生命体が太陽系内に存在する可能性は否定できないし、実際に顕微鏡でなければ確認できないような小さい生命体がどこかに存在していることはあり得ることである。しかしながら、人類と同様なサイズがあって我々と会話できるような類いの生命体が太陽系に存在しないということは、ほぼ間違いのない事実である。そしてまた太陽系外の知的生命体についてもその存在を明確に示す観測は未だ存在しない。

生命を育む惑星である地球と、生命が蔓延しているように見えない火星や金星。地球とそれ以外をわけたのはいかなる条件であったのか。この問いに答えるためのアプローチのひとつに、惑星表層環境の成り立ちを考える惑星気候学がある。惑星上に棲息する生命体にとっての境界条件である惑星表層環境がどのように形成・維持されているのかを理解することができれば、生命が誕生できるような環境が形成される条件、原始的な生命が洗練された知的生命体へと進化するための環境条件、などといった問題に答えることができるようにな

る。そしてこうした条件を天文学的な観測によって得られる系外惑星の統計的性質(中心星からの距離、質量、組成、など)と組み合わせることによって、生命を育む惑星が形成されるための条件や、さらにはその存在確率・宇宙に存在する知的生命体の数を推定することができるようになるだろう。

実際に惑星気候学から知的生命体を育む惑星の形成条件を導くためには、生命が誕生するための条件であるとか、原始的な生命体から洗練された知的生命体へと進化するための条件、さらには生命とはそもそも何であるのか、といった生命科学分野からの情報インプットが必要とされる(宇宙人を議論することはまさに分野横断的な学術課題なのである)。とはいえ地球っぽい地球型惑星が見つかってもない現状でもあるので、大枠を理解するという方向の下、惑星気候学では液体の水が安定に存在できるかどうかをもって生命を育む惑星を議論することが多い。これは地球に存在する生命はそのライフサイクルにおいて必ず液体の水を必要としているためである。地球の生命体とは全く異なるタイプの生命体にとっては何の意味も持たないかもしれない基準ではあるが、少なくとも我々のような炭素を基本とした生命を考える上ではそれほど大きく外した基準ではないはずである。

液体の水が存在するための条件は、まず十分な量の水 $H_2O$ が存在することであり、次には温度・圧力がちょうどよい範囲にあることである。 $H_2O$ は宇宙にありふれた原子である水素(H)と酸素(O)から構成される分子であり、宇宙には広く存在していることが天文観測によって確認されている。また十分に大きな惑星では圧力の条件は満たされるので、液体の水が存在するための条件として問題になるのは惑星表面の温度がちょうどよい範囲にあるかどうかを集約される。すなわち、温度が低ければ凍り付いて固体の氷となってしまうし、温度が高くても蒸発して気体(水蒸気)になってしまうということである。

### 3. 惑星の気候を決めるもの

惑星表面の温度がどう決まるのかという問題は、惑星気候学の中心課題とも言えるほどに重要な問題である。基本的に温度は加熱と冷却がバランスするように決まる。

惑星表層環境を考える場合、加熱の大部分は中心星(太陽系の場合は太陽)の光を吸収することによるもので、冷却は惑星自身が射出する熱放射による。

まず加熱については、日なたにいと太陽光を浴びて暖かくなることを思い出せばよい。太陽光でどれくらい暖められるかは、黒い服を着ているときと白い服を着ているときでだいぶ違う。これは、黒い服は太陽光をよく吸収して暖まりやすく、白い服は太陽光を吸収しにくい(反射しやすい)ので暖められにくい、という理屈だ。惑星の場合でも事情は同じで、黒っぽい惑星は暖められや

すく温度が高くなるのに対し、白っぽい惑星は暖められにくく温度は黒いものに比べて低くなる。ちなみにこの惑星が太陽光を反射する割合のことをアルベドと呼び、観測された地球のアルベドはおよそ 30%となっている。ただ、この 30%という地球のアルベドの値がどのような理屈で決まっているのかはわかっていない。近年よく喧伝されている地球温暖化では温度が 2 度上昇するとかいう問題であるが、アルベドがたった 1%変化するだけでも地表温度は 1 度くらい変化する。これから先、地球の気候がどう変化するのかを定量的に評価するためには、よく問題にされている二酸化炭素の排出だけでなくアルベドがどのように変化するのかもきちんとわかっておく必要がある。

次に惑星の冷却に寄与する熱放射とは、世の中に存在するあらゆる物質がその温度に応じて射出している電磁波のことである。熱放射を射出した物質はその熱放射のエネルギーの分だけエネルギーを失うので冷却する。射出される熱放射は温度が高いほどに大きくなる。いわゆるサーモグラフィはこの原理を利用したもので、物体の出している熱放射を測定して温度を推定している(熱放射をたくさん出している物体は高温で、あまり出していない物体は低温ということ)。惑星表面の加熱が冷却よりも大きいときには温度が上昇することで射出される熱放射が強くなって加熱と冷却がバランスする。逆に冷却が加熱よりも大きいときは温度が低下して熱放射が弱くなることでバランスする。ただし実際には惑星表面が射出した熱放射の全てが宇宙空間に放出されて冷却するわけではなく、一部は大気によって吸収されて冷却に寄与しない。この大気によって熱放射が吸収されることで冷却が妨げられる過程が温室効果である。

#### 4. 水惑星の形成条件

惑星表面の温度が加熱と冷却のバランスで決まっているのであれば、地球に海(液体の水)があってそのお隣の火星と金星に海がない理由はすんなりと理解できそうに思える。ストーブに近付けば熱くなり離れれば寒くなるのと同じ理屈で、太陽に近い金星はより強く加熱されるために温度が高くなりすぎて海ができず、太陽から遠い火星は加熱が弱いために温度が低すぎて海ができないと考えるのである。実際に金星の地表は摂氏 460 度を超える灼熱の環境であり、火星地表の平均気温は摂氏 -40 度を下回る酷寒の世界というように、それぞれの惑星の地表温度は予想通りのものになっている。しかしながら、このとてもわかりやすい説明は正しくない。

まず金星が太陽から受ける加熱は地球の受けている加熱よりも弱いのである。全面を雲で覆われた金星は地球よりも太陽光をよく反射して(アルベド 77%)太陽光をあまり吸収しない。そのため太陽に近いにもかかわらず太陽光による加熱は地球のそれよりも弱い。それにも関わらず金星の地表が高温であるのは

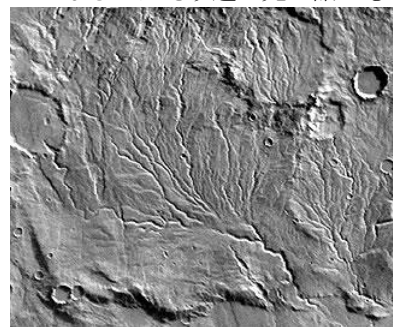
地球よりもずっと濃密な大気による温室効果がとても強く働いているためである。

もう一方の火星についても悩ましい問題のあることがわかっている。現在の火星については太陽から遠いために寒冷で海(液体の水)が存在できないとする理解でよいのだが、火星には過去に海が存在したらしい地質学的な証拠が見つかったのである(図 5)。昔の火星に強い温室効果を持つ大気があれば昔の火星に海が存在してもよいのだが、なぜ昔の火星大気は強い温室効果を持っていたのか、そのような温室効果を持った大気はいつ/どのように失われたのか、といった疑問に答えることができていない。さらには金星でも昔は海が存在していた可能性が指摘されていて、それが本当であるとしたら金星でも、なぜ/いつ/どのように海が失われたのかが問題になる。

海が存在できるかどうかは惑星表面の温度によって決定される。そして惑星表面の温度は加熱と冷却のバランスによって決まることもわかっている。しかしその加熱の強さを決める惑星アルベドと、冷却の強さに影響を及ぼす温室効果の強さが、どのように決まるのについて我々はまだ十分に理解できていない(これは地球温暖化予測を十分な精度でおこなうことができていないということにも通ずるものである)。そして金星や火星に海が存在しないことやかつて存在したかもしれないことについても、十分に満足のいく説明を与えることができていない。かつては存在したらしい海が消失することもあるということは、海が持続的に存在するためには何らかのからくりが必要である可能性を示唆している。海を持った惑星が形成される条件を解き明かすためには、海を長期間にわたって安定に維持することのできるからくりや、その逆の海を消失させてしまう仕組みについても調べていく必要があるだろう。まだまだわからないことだらけと言えなくもない現状ではあるが、やらねばならないことはわかっているので、海を持つ惑星の形成条件が明らかになるのはそう遠い先の話でもないのかもしれない。

図 5. 火星の河川地形(画像提供 : NASA)

バイキング探査機が火星周回軌道上から撮影した画像。水が流れたことによって作られた河川地形と考えられていて、かつての火星は地球と同様に雨が降って地表を水が流れるような気候状態の時期があったことを示唆している。



## 5. 多様な系外惑星

太陽系内と系外で場所は違っても現象を統べる物理法則に違いはない。したがって太陽系内で海を持つ惑星の形成条件を解き明かすことができれば、それは太陽系外の惑星についても適用することができる。この筋書きは大筋では正しいのだが、太陽系外の惑星も考えるにはいくつかの拡張が必要になる。

これまでに発見された系外惑星は太陽系内の惑星とは異なる特徴を示すものも多い。例えば、中心星を回る公転の軌道が著しくいびつ(季節によって太陽からの距離が大きく変化する)な惑星や、自転と公転が同期した同期回轉惑星(地球に対する月のように主星に対し常に同じ面を向けている惑星)の存在などが示唆されている。こうした惑星では、中心星による加熱に大きな非一様性がある(例えば同期回轉惑星は惑星の半分が常に昼で加熱され続けるのに対し残りの半分は常に夜で加熱されることがない)ため地球とはかなり違った気候状態になっている可能性がある。そういった気候・表層環境システムに関する研究は現在鋭意進められていて解き明かされつつある。

我々の現状は無数に存在するであろう系外惑星のごく一部についてその存在を確認したにすぎず、惑星の性質(例えば大気の組成)に関する手がかりが得られているものはそのまたごく一部でしかない。系外惑星の表層環境が観測的に明らかにされるのはもう少し先のことになるだろう。世界で進められている新しい観測装置の開発や観測計画の実施(図 6)によってそうした観測が可能となりデータが出てくるようになったとき、その結果と惑星気候についての研究成果をリンクさせることで、人類以外の知的生命体が存在する確率をより根拠をもって議論することができるようになるだろう。

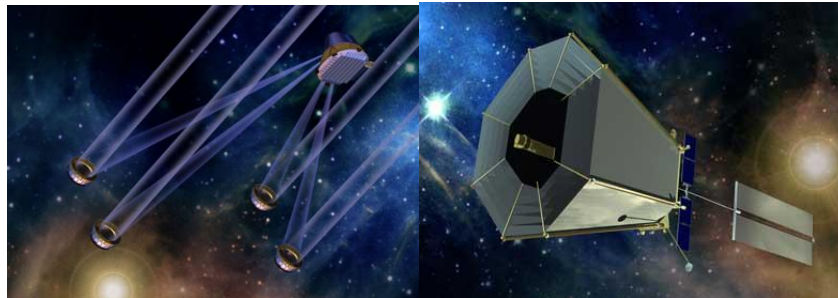


図 6. TPF (Terrestrial Planet Finder) 計画 (画像提供 : NASA) 地上からでは観測できない系外の地球型惑星を発見するため、2種類の望遠鏡の打ち上げが計画されている。

はしもとじょーじ:神戸大学自然科学系先端融合研究環助教/惑星科学研究センター協力研究員。45億年の時間スケールでの惑星表層環境の進化や気候システムの安定性などを研究している。2010年の打ち上げ予定の日本の金星探査計画(Venus Climate Orbiter)ではデータ解析などを担当する予定。