

## 生命の惑星は銀河系に充満している？

東京工業大学地球惑星科学科教授 井田 茂

### ケプラーの衝撃

2011年、NASAが打ち上げたケプラー宇宙望遠鏡による観測の中間結果として、2,000個を超える太陽系外の惑星（系外惑星）の候補の発見が発表された。それまでも500個もの系外惑星が発見されていたが、発見数をいっきに5倍以上にする衝撃的な発表だった。さらに驚くべきことは、発見された惑星候補の7～8割が地球型惑星と思われる惑星だったことだ。存在確率でいうと、太陽に似た恒星が地球型惑星を持つ割合は50%を越えるのではないかと推定されるのだ。

予感があった。

半世紀にもわたる失敗の連続、失意の撤退という長い冬の時代を経て、1995年に初めて系外惑星が発見された。巨大で重い惑星が発見されやすいので、当初、木星や土星のような巨大ガス惑星が次々と発見されていった。

発見された系外巨大ガス惑星の多くは、中心星のすぐそばの高温領域を数日周期で高速周回する巨大惑星「ホット・ジュピター」（太陽系では、木星、土星は中心星から遠く離れた低温領域を周期10～30年かけてゆっくりと周回する）や偏心した楕円軌道をめぐる「エキセントリック・ジュピター」（太陽系の惑星は同心円の軌道を巡っている）といったものだった。そんな魅惑的な異形のジュピターたちに天文学者たちは興奮した。

一方で、木星よりもずっと小型（地球の質量は木星の1/300、断面積は1/100に過ぎない）の地球型惑星を観測するなどという話は、依然として夢物語だった。

だが、3、4年前から状況は大きく変わった。

観測精度が急速に進歩して、地球型惑星が発見されるようになってきたのだ。大きな技術革新があったわけではない。1995年までの半世紀の間、成果がなかったのだ。系外惑星探査には、予算はおろない、人は少ない、そして大望遠鏡は使わせてもらえなかった。しかし、いったん大発見があれば、それら全てが与えられるのだ。当然、観測精度は一気に向上する。木星質量の数十分の一以下という比較的大型の地球型惑星「スーパーアース」が、ドップラー偏移法（次節参照）で次々と発見されるようになった。この観測精度に達したことで、次なるパンドラの箱を開けてしまった。そんな感じだった。

2009年3月、ケプラー宇宙望遠鏡が打ち上げられた。宇宙空間からトランジット法と呼ばれる観測方法（次節参照）で地球サイズの惑星まで発見しようという野心的なプロジェクトだった。その中間報告が冒頭の衝撃の発表だった。

「第二の地球探し」というフレーズがよく使われる。地球と同じように海を持ち、生命を宿す「奇跡の惑星」が、この広い宇宙には地球の他にも存在しているかもしれないという期待をこめた言葉だ。ケプラー宇宙望遠鏡は、海を持ち得る地球型惑星も多数発見しだした。海を持つ惑星は奇跡的な存在などではなく、遍在しているのだ。

### 系外惑星の観測方法

まずは系外惑星の観測方法を簡単に説明しておこう。

惑星そのものを、自身が発する光でとらえることは非常に難しい。すぐそばに明るく輝く主星があるからだ。物理半径 $d$ 、軌道半径 $r$ の惑星が中

心星の光（単位時間あたりのエネルギー放出量を  $L$  とする）を反射して光っていると、惑星が受けるエネルギーは  $(L/4\pi r^2) \times \pi d^2$  となる。つまり、惑星と主星の光度差は  $(2r/d)^2$  となり、太陽系の木星だと 10 億倍にもなるのだ。そのため、系外惑星の探索には、惑星が中心星に与える影響を調べる「間接法」が中心となる。

恒星のまわりを公転する惑星は、恒星の重力と遠心力が釣り合って一定の半径（軌道半径）でまわり続けている。この釣り合いから、公転周期は軌道半径の  $3/2$  乗に比例することになる（ケプラーの第三法則）。この回転運動の中心は恒星ではなく、恒星と惑星の重心なので、恒星も重心のまわりを惑星と同じ周期で回転運動をする（図 1 参照；ハンマー投げの砲丸と選手の関係と同じ）。太陽系の木星の場合、軌道半径が 5.2AU（AU は天文単位で、1AU が太陽と地球の間の平均距離）、質量比が  $1/1000$  なので、太陽は 0.005AU ほどの半径を 12 年かけて周回することになる。回転速度に直すと、 $2\pi \times 0.005\text{AU}/12$  年で、秒速 13m ほどになる（1AU は  $1.5 \times 10^{11}\text{m}$  で、1 年は約  $3 \times 10^7$  秒）。恒星はこの回転運動に合わせて、われわれから見ると近づいたり遠ざかったりするので、恒星からの光は周期的にドップラー偏移することになる。

ドップラー偏移の周期が惑星の軌道周期なので、ケプラーの第三法則から、惑星の軌道半径がわかり、その軌道半径とドップラー偏移の大きさから惑星質量がわかることになる。

ドップラー偏移は具体的には恒星の光のスペクトルの吸収線のずれを測る。1980 年代以前は、秒速 100m くらいが測定限界だったが、1980 年代にガスセル法という方法で秒速 10m まで精度が上がり、現在では秒速数十 cm の精度にまで達している。太陽系の場合、木星によるものは秒速 13m、地球の場合は秒速 10cm であり、もうすぐ地球レベルの惑星の観測が可能となる。

ケプラー宇宙望遠鏡が使っているのは、惑星の食による恒星の明るさの変化を利用したトランジット法と呼ばれる別の方法だ。木星クラスの惑星が食をおこせば、減光率は 1% 程度の減光であり、数十 cm 程度の小望遠鏡でも測定可能だ。ただし、検出確率が低いという大きな問題がある。食が観測できるためには、その惑星の軌道面と視線方向がほぼそろっている必要があり、太陽と木星を太陽系外から見た場合、食がおこる軌道の傾きになっている確率は 0.1% に過ぎない。だが、0.05AU のホット・ジュピターなら確率は 10% にもなる。ケプラー宇宙望遠鏡では、約 15 万個もの大量の恒星を見張っていて、食をとらえている。

ドップラー偏移法では惑星質量がわかり、トランジット法では断面積がわかるので、両方の方法で観測できれば、その惑星の密度がわかる。惑星をつくる成分の代表的なものには、鉄・岩石、水、水素・ヘリウムガスの 3 つがある。鉄・岩石は絶対温度 1300 ~ 1400K、水は 160 ~ 170K で凝縮して、水素・ヘリウムガスは原始惑星系円盤で凝縮しないので、この 3 つにおおまかに分けること

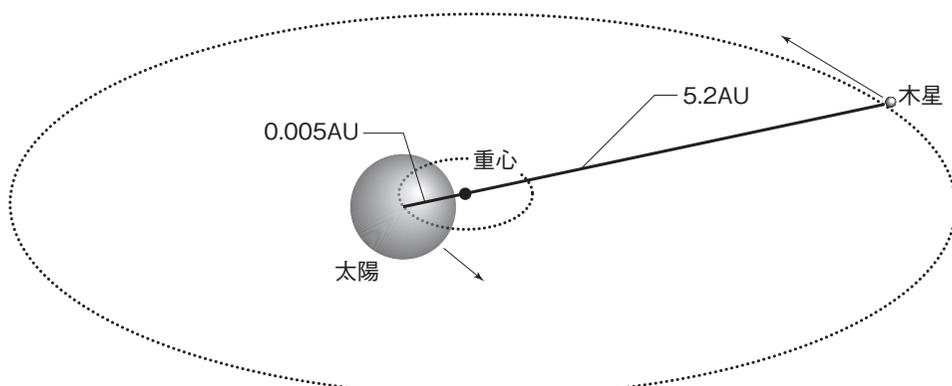


図 1 惑星の公転による中心星の回転運動（太陽系の木星を例に書いてある）。

ができるのだ。鉄・岩石、水、水素・ヘリウムガスは、この順で密度が低くなっていき、その差はかなり大きいので、平均密度の測定から惑星の組成がある程度推定できることになる。

ほかにも一般相対性理論を使った重力マイクロレンズでも惑星は発見されており、難しかった直接検出も成功するようになってきた。今後も系外惑星に関する新しい発見はどんどん出てくるであろう。

## ハビタブル・ゾーン

では、海を持ち、生命を宿し得る惑星の話に移ろう。

標準的な生命起源モデルは、液体の水（海）の中で、炭素化合物である有機物が結合してアミノ酸や塩基、リン酸などができて、それらがつながって、タンパク質やDNA、RNAなどの核酸をつくるという「化学進化説」だ。

無機物からの生命の合成実験はまだ成功していないが、流動性の高い液相状態が広い温度範囲で実現する水（ $H_2O$ ）のなかで、有機物の化学進化が進むという考えは受け入れやすい。ビッグバンのときにできた主成分の水素・ヘリウムの次に宇宙の組成で多いのは酸素で、その次が炭素であり、ヘリウムは不活性ガスで結合性が低いことを考えると、水素と酸素でできた水のなかで炭素を中心とした有機物が組み上がるというのは、この宇宙ではとても合理的だ（もちろん、アンモニアやメタンの海の中で、炭素主体に限らない生命が誕生する可能性を否定するわけではない）。

出発点は海の存在だ。太陽系では表面に海を持つ惑星は地球だけだ。地球軌道のそばを回る岩石惑星の金星にも火星にも海はない。

金星は太陽に近すぎて、海が暴走的に蒸発して失われてしまったと考えられている。惑星の表面温度は、基本的には、中心星の光によって与えられるエネルギーで決まる。惑星が単位時間に受ける中心星の光のエネルギーは  $(L/4\pi r^2) \times \pi d^2$  だった。大気による温室効果を見無視すると、惑星が宇宙空間に出す単位時間あたりの熱は、 $\sigma T^4 \times 4\pi d^2$  な

ので[ $\sigma$ はステファン・ボルツマン定数]、これらを釣り合わせると、惑星表面温度は  $T=(L/4\pi\sigma r^2)^{1/4}$  と求まる。

金星の軌道半径は0.72AUなので、 $T$ は絶対温度で15%程度大きくなる。金星では90気圧もの大気があるので、実際は温室効果が効いて、かなりの高温になり、水が蒸発し、その水蒸気が温室効果を強めるので、ますます蒸発し、と暴走的に海が蒸発してしまったと考えられている。

火星は1.5AUにいて、 $T$ は20%程度小さくなり、火星の大気は薄くて温室効果が効かないので水は凍ってしまう。火星は地球の1/10の質量しか持たず、重力が弱いので、大気を留めておくことができなかつたと考えられている。もし、火星がもっと重くて厚い大気を持っていたら、今の位置でも海を持つことが可能かもしれない。しかし、太陽からもっと離れると、厚い大気を持つ惑星でも海を持つことができなくなる。

十分な量の大気を持った惑星を考えて、その表面で海が蒸発してなくなりもせず、凍結もしない軌道半径の範囲を「ハビタブル・ゾーン」と呼ぶ。ハビタブル・ゾーンの位置は中心星の明るさによって変わる。太陽はスペクトル型でいうとG型だが、銀河系ではM型と呼ばれる、太陽の数分の一の質量しかない赤い恒星が大多数を占める。M型星は暗いので、ハビタブル・ゾーンは中心星のそばに存在する。

ハビタブル・ゾーンにあっても、天体が軽くて大気が0.006気圧以下になると、 $H_2O$ の液相状態がなくなるので、海は存在できない。つまり、天体が海をもつためにはある一定以上の質量が必要だ。火星の大気はほとんど剥がされているので、火星より若干重い必要があると考えられる。

一方で、惑星質量が地球の10倍程度になると、重力が強すぎて、大気が落ち込み、惑星が生まれた頃にまわりに存在したガスが流入して、巨大ガス惑星になってしまう。つまり、海を持つ惑星には質量の下限値だけではなく、地球の10倍程度という上限値も存在する。

ケプラー宇宙望遠は（精度ぎりぎりだが）ハビ

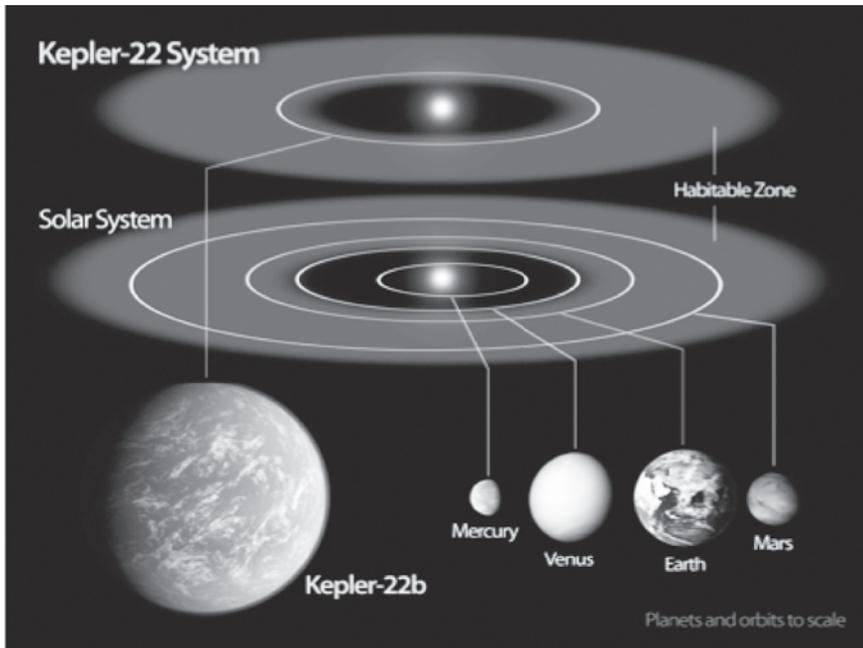


図2 Kepler-22 のハビタブル・ゾーンとそのゾーン内で発見された惑星 Kepler-22b の想像図

((c) AFP/NASA/Ames/JPL-Caltech)。

ダブル・ゾーンにある惑星をどんどん発見している。図2は Kepler-22 という太陽とほぼ同じタイプの恒星のまわりで発見された地球サイズの2倍程度の惑星の例を示してある。

### M 型星の海惑星？

銀河系の7～8割の恒星はM型星だが、M型星は暗いので、ハビタブル・ゾーンは0.1AU程度になる。これだけ軌道半径が小さいと、ドップラー偏移法でも現在の観測精度で、地球質量に近い惑星まで観測できる（実際にグリーゼ581というM型星では、ハビタブル・ゾーンに地球質量の5倍、8倍の惑星が発見されている）。

このような惑星の環境は、同じ海があると言っても、地球からは大きくかけ離れているはずだ。まず、これだけ中心星に近いと、惑星は変形して（潮汐変形と呼ぶ）、自由に自転できなくなり、月が地球にいつも同じ面を見せているのと同じように、いつも同じ面を中心星に向けているはずだ。惑星表面の半面はずっと昼で、別の半面はずっと夜だ。また、同じ潮汐変形の影響で自転軸は公転面に垂直になるはずなので、四季もない。そのよ

うな惑星の気候は地球とはまったく違ったものとなる。そこに生物がいたら、昼夜にしたがう地球の動物の睡眠や四季にしたがう植物の発芽というようなりズムがないものになる。

M型星は可視光や赤外線では暗いのだが、紫外線やエックス線はG型星と同程度で、恒星表面で爆発現象であるフレアも強い。ハビタブル・ゾーンの軌道半径はG型の場合の1/10くらいなので、惑星が単位面積あたりで受ける紫外線やエックス線の強さは地球の100倍くらいになるし、フレアは直接惑星に襲いかかる。

さらに、M型星のハビタブル・ゾーンのスーパーアースはもしかしたら、岩石主体ではなく、H<sub>2</sub>O主体で、深さ数千キロメートルにもわたる海をもつ惑星かもしれない（地球では海の総質量は全体の0.02%にしか過ぎず、平均の水深は4キロメートル程度）。実際、M型星のスーパーアースで、これまでにトランジット観測とドップラー偏移観測の両方が成功しているもの（GJ1214bなど）では密度が低めで、H<sub>2</sub>O主体の可能性がある。

こんな過酷な異世界に生命は住んでいるのだろうか？ もちろん、過酷な世界なのは、昼面の話

で、夜面には照射されないで、昼夜の境目の地域では意外に暮らしやすいかもしれない。さらに、過酷なのは必ずしも悪いとは言えない。

生命の特徴として自己複製能力があるが、完全正確に複製が成功すれば、そこには進化はない。環境変動などが原因になって、複製に失敗すると、それが進化につながるのだ。実際、最新の古生物学、地質学、ゲノム科学の結果によると、地球は46億年の間に環境の大激変に何度か見舞われ、その度に生命が大きく進化したようだ。たとえば5～6億年前のカンブリア爆発は有名だ。生命の進化の原因究明はとても難しい問題だが、大進化のためには完全に絶滅しない程度の大きな環境変動が必要なかもしれない。過酷なM型星のハビタブル・ゾーンの惑星では、実は生命が高度に進化しているかもしれない。

## 系外生命探査

生命がいてもおかしくない惑星が多数あると考えられるようになってきた今、系外惑星での生命存在の痕跡（バイオ・マーカー）の観測も大いに議論されている。

ひとつの考え方は、惑星の大気を観測して、非平衡な組成を探すとということだ。無機的な反応は平衡へと向うが、生命の関与は平衡からずらそうとするのだという仮定の考えだ。たとえば、地球の大気を考えてみると、大気で不安定な酸素分子が2割を占めている。酸素分子は壊され続けているが、光合成生物が酸素を絶え間なく吐き出しているため、酸素分子はこれだけの量、存在し続けている。

系外の地球型惑星の直接観測は将来の地上大型望遠鏡を使えば可能になるかもしれない。日米を中心とした口径30mのTMT（Thirty Meter Telescope）やヨーロッパの口径42mのELT（Extremely Large Telescope）といった地上大型望遠鏡計画がある。

これらの大望遠鏡による直接観測で、系外惑星系のハビタブル・ゾーンにある地球型惑星の光を分光できれば、その大気組成がわかる。大気組成

が明らかに非平衡にあれば、その惑星には生命が宿っている可能性があるということになる。

それだけだと原始的なバクテリアかもしれないが、高等生物の植物を赤外反射スペクトルから見つけようというアイデアもある。植物は光合成をするので、自然に陸地を広くおおうようになる。一方で、植物の葉は赤外線を強烈に反射することが知られている（レッド・エッジ）。中心星光からエネルギーを得るプロセスでは、一般的にこのような反射がおこるのではないかという考えがある。

## まとめ

最新の天文観測の結果は、数千億個とも言われるこの銀河系の星々の多くが多様な惑星を宿していることを示す。今まさに、その華やかで豊かな世界のベールが剥がされていこうとしている。そして、その流れは地球科学や生命科学を巻き込みながら、地球外生命の存在可能性や生命の起源の問題といった根源的な問題の探求へとつながっていくであろう。

2012年12月、東京工業大学に新しい研究所「地球-生命研究所」(Earth Life Science Institute; 略してELSI)が設立された。天文学、地球科学、生命科学の研究者が世界中から集まり、地球外生命の存在可能性や生命の起源・進化の問題に取り組もうとする研究所である。他にも同じ方向を向いたプロジェクトが計画されている。科学の世界で新しい風が吹き始めている。