

# 惑星系形成から生命を探す

## 地球惑星科学専攻 井田 茂 研究室

井田 茂 教授 1960年東京都生まれ。1984年京都大学理学部物理学卒業、1989年東京大学大学院理学系研究科地球物理学専攻博士課程修了。1993年より東京工業大学理学部地球惑星科学科助教授。同教授を経て、2013年から地球生命研究所（ELSI）教授、副所長。



井田研究室では、太陽系などの惑星系がどのようにして形成され進化していくのかを知るために、コンピュータシミュレーションを用いた理論的な研究をしている。井田研究室は2012年に設立された地球生命研究所で、惑星系形成という立場から、地球と生命の起源や宇宙における生命をテーマに今まで研究されたことのない問題にも挑戦している。

### 系外惑星

太陽系には8個の惑星があり、特に地球には生命が存在する。銀河系に無数に存在する惑星系の中で、私たちの太陽系や地球は特別な存在なのか、それともありふれたものなのだろうか。そして、まだ見ぬ地球外生命体はいるのだろうか。このように宇宙に関する疑問は尽きない。

宇宙には太陽系以外にも惑星がある。このような惑星を系外惑星といい、近年の技術の発達により観測が進んでいる。惑星系形成を研究するためには、太陽系だけでなく太陽系の外に目を向けて、多数の惑星系、系外惑星を観測することは重要なことである。

初めて発見された系外惑星は、1995年10月に発見されたペガサス座51番星の巨大ガス惑星だ。その後系外惑星は爆発的な勢いで発見されて、2003年には累計100個、2013年には累計1000個発見された。そして現在でも系外惑星は発見され続けて

いる。発見された惑星はまだ一部にすぎないが、銀河系には無数の恒星があるので、多くの惑星が存在していることは間違いないと考えられている。

ここで、系外惑星の観測について紹介しよう。系外惑星の観測では恒星から発せられる光の波長や強さの変化を見る。これらの変化はとても小さいため、地上からの観測では地球の大気が邪魔になる。そこで、地上からだけでなく、宇宙望遠鏡によって観測することでもデータが得られている。

従来主流だった観測方法はドップラー法というものだ。惑星が公転していれば、恒星は惑星の重力によって引っ張られて揺れる。すると、ドップラー効果により、恒星から発せられる光の波長が変化する（図1）。これを観測することで惑星の存在を知ることができる。恒星の揺れの大きさは惑星の質量によるので、ドップラー法によって惑星の質量がわかる。

近年では、トランジット法という観測方法による系外惑星の発見が増えている。ある恒星に惑星

が存在するならば、月が日食を起こすように惑星が恒星の前を通り過ぎる。すると、惑星は恒星の光を部分的に遮り、恒星の光が弱まったように見えることがある。この光の弱まりが周期的に起こっていれば、惑星が公転している証拠になる(図2)。減光率は通過する惑星と恒星の大きさによるので、恒星の方の大きさがわかっていれば惑星の体積を知ることができる。さらに、惑星に大気があれば光の一部はそれを通過しているはずである。惑星が光を遮っているときと、そうでないときのスペクトルの差を考えることで、惑星大気が吸収する波長を知ることができ、大気の組成がわかるのだ。

ただ、恒星の明るさは黒点などの影響によっても変化する。そのため、トランジット法だけでは惑星を見つけたと断言しにくいので、ドップラー法により重ねて確認されている。ドップラー法とトランジット法を組み合わせれば、惑星の体積と質量の情報が得られるので、密度がわかり、そこから惑星の内部組成も推定可能なのだ。

## 惑星系の形成とその進化

観測によって得られたデータと物理法則をもとに、惑星系形成のモデルが考えられている。それでは惑星系形成のモデルを紹介しよう。

宇宙空間に漂う水素やヘリウムからなるガスとその他のチリが万有引力により収縮、回転して、恒星が生まれる。このとき、原始惑星系円盤という恒星を取り巻くガスとチリの円盤ができる。この原始惑星系円盤は数百万年間存在して、そのなかで惑星が形成されていく。

最初に形成される惑星は岩石惑星だ。原始惑星

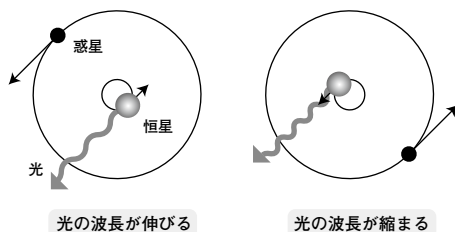


図1 ドップラー法

恒星は重心の周りを動き、ドップラー効果が生じる。

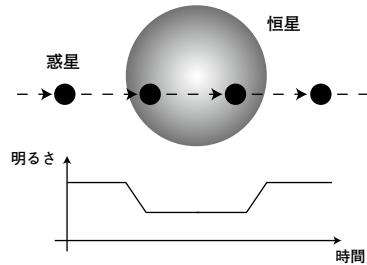


図2 トランジット法

惑星が通過するときに恒星は暗く見える。

系円盤中の恒星に近い範囲では氷は蒸発して存在しないため、岩石や金属が惑星を形成して地球や火星のような岩石惑星ができる。次に、恒星からある程度離れると、氷も惑星の材料となり大きな惑星ができる。このような惑星は岩石惑星に比べ重力が強まるため、ガスを取り込み木星のようなガス惑星ができる。最後に、恒星からかなり離れたところで惑星ができるときには、円盤が消失してしまっていてガスを取り込めず、海王星のような氷惑星ができる(図3)。

この惑星系形成モデルは太陽系を参考にして構築された。これは系外惑星でもある程度正しいと考えられている。ところが、系外惑星系ではこのような従来のモデルだけでは説明できない惑星が多く観測されている。

先に紹介した惑星系形成モデルによると、ガス

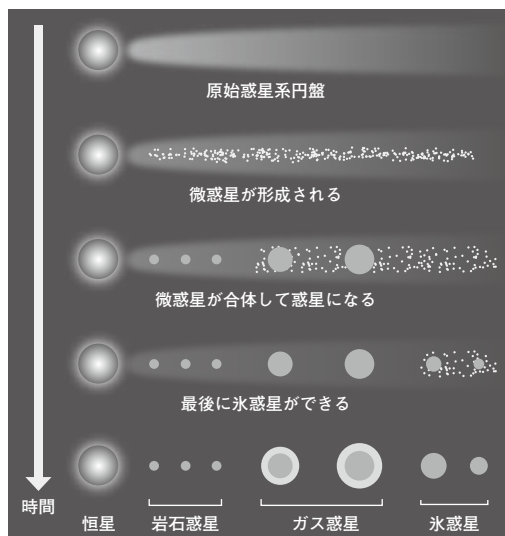


図3 惑星系形成

惑星は恒星からある程度離れたところに形成される。ところが、初めて観測された系外惑星はホット・ジュピターと呼ばれる恒星の近くを回る灼熱のガス惑星であった。また、エキセントリック・プラネットと呼ばれる、公転軌道が潰れた楕円となっている惑星も発見された。

では、そのような異形の惑星はどのようにしてできたのだろうか。井田研究室によるシミュレーションの結果、予想もしなかった可能性が発見された。3個以上の巨大ガス惑星が存在するとき、互いの重力によって、ある惑星は惑星系の外へ飛ばされ、またある惑星は軌道が大きく歪められてエキセントリック・プラネットとなる。さらに、潮汐力という恒星の重力がエキセントリック・プラネットとなった惑星にはたらき、惑星自体を歪ませる。惑星が楕円軌道の近点、つまり恒星との距離が近いときに、潮汐力は大きくはたらき、このとき惑星はエネルギー、つまり速度を失う。近点でエネルギーを失った惑星の軌道は小さな円となり、その結果ホット・ジュピターとなる可能性が高いこともわかった（図4）。

さらに、井田研究室のこのシミュレーションは、重力相互作用により軌道が歪められた結果、恒星の自転と逆方向に公転してしまう逆行惑星が存在することも予言した。惑星系の形成を考えると恒星の自転と惑星の公転は同じ向きとなるのが自然であり、実際に太陽系もその通りになっている。逆行惑星の存在を予言したこの研究は、その後実際に逆行する惑星が観測されて注目的となった。

このように系外惑星を調べることで、惑星系は一度従来のモデルで説明されるようにして形成さ

れた後、軌道が変化してホット・ジュピターや逆行惑星などをもつ惑星系へと進化していく可能性があることがわかった。

### ■ 衛星の影響

地球の衛星である月の起源は、原始地球に他の原始惑星が斜めに衝突して月と地球ができたというジャイアントインパクト説が有力だ。この衝突の際にどのような位置、角度で衝突したかは偶然性が大きいものであったと考えられている。そのため、衝突の仕方によって公転が惑星の自転と逆向き、あるいは直交した衛星が生まれていたかもしれないし、そもそも衛星がなかった可能性もある。井田研究室では、そのような場合において衛星が惑星にどのような影響を与えるのかシミュレーションを行なったことがある。

惑星の自転軸は常に同じ方向にある訳ではなく、長い時間をかけてわずかに揺れている。地球の場合、自転軸が1°変化するだけで、氷河が大きく発達した氷期と比較的温暖な間氷期のサイクルが生まれることがわかっている。このように自転軸の揺れは惑星の気候に大きな影響を与えるのだ。

衛星はこの自転軸の揺れに大きな影響を及ぼしている。衛星がなかった場合は惑星の自転軸の揺れが大きくなり、気候に大きな変化が起きると考えられる。そうなれば、そのような過酷な環境に生物が適応して生きていくことは困難だろう。衛星の存在は生物に対しても大きな影響があるのだ。

系外惑星の衛星を観測することはまだできていないが、先生は不可能ではないと考えている。どのようなデータが得られれば衛星を観測したとい

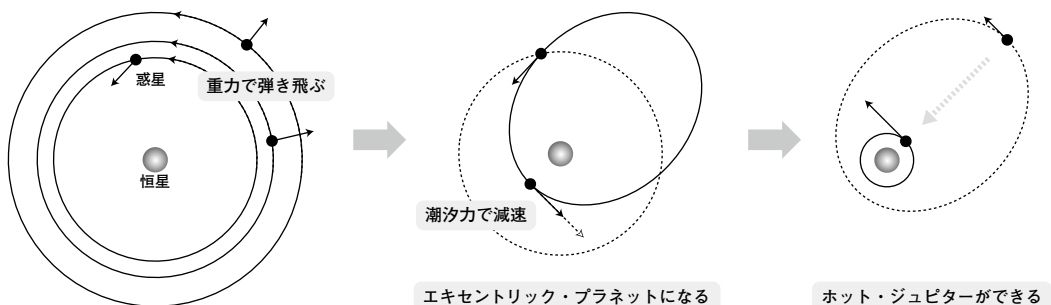


図4 ホット・ジュピターの形成

惑星は互いを弾き飛ばし、残った一つの惑星は軌道が歪む。その後ホット・ジュピターとなる。

えるか、そして衛星の大きさや公転半径などの情報をどうすれば知ることができるかということも研究対象なのだ。

## 系外惑星における生命

### ■ 生命と海

惑星に海が存在するためには、惑星がハビタブルゾーンと呼ばれる範囲にある必要がある。ハビタブルゾーンとはH<sub>2</sub>Oがあれば液体として存在する領域であり、恒星の明るさによってその範囲が定まる。

もちろん地球はこの範囲に存在しており、太陽と同じような大きさの恒星のハビタブルゾーンにもスーパーアースと呼ばれる地球の数倍程度の質量がある岩石惑星が多く存在していることが、シミュレーションにより予測されている。そのため、系外惑星にも生命が存在する可能性がある。

全宇宙に最も多く存在している元素は水素であり、次いでヘリウム、酸素、炭素となっている。そのため、酸素と水素からなる水、すなわち海の中で化学反応が進み、炭素からなる有機物で生命体が形成されるとするのが妥当だと考えられる。

だが一方で、生命体に必要なリンやカルシウムは宇宙に多く存在しているとはいえない。では、そんな微量元素を集めるためには何が必要かという、それは陸である。陸が存在することにより、微量元素が濃縮されて生命体が形成されうると考えられている。しかも地球の場合、生物が大きく進化するためには、陸上に出て酸素を効率よく得る必要があったと一般的に考えられている。陸の存在は地球における生命の起源、進化に重要な役割を果たしている。存在している水の量は多すぎても少なすぎてもいけないのだ。

井田研究室では、系外惑星表面における海の割合を観測する方法も研究している。遠く離れた惑星を地球から観測すれば、それはただの点としか認識することはできない。では、点のような惑星表面の海の割合をどのように推定するのだろうか。

点にしか見えない惑星も自転しているため、時間によって地球に向いている面は異なってくる。

さらに、惑星を直接観測するとき、表面が海である場合と、陸である場合では各波長の光の反射率が異なる。もし、海と陸が存在する惑星ならば時間によって反射率が変化するので、そこから海と陸の割合を知ることができるのである。

### ■ 地球とは異なる環境の惑星での生命

生命の住む惑星というよりは地球のような惑星を思い浮かべられるだろうが、はたしてそれだけだろうか。

銀河系には私たちの太陽よりも小さくて暗い恒星が多く存在している。小さい恒星ではハビタブルゾーンに水を多くもった惑星が多数存在していると予測されている。

小さい恒星のハビタブルゾーンは恒星の近くにある。そこにある惑星は一般に、月が常に地球と同じ面を向けていることと同様に、常に恒星へ同じ面を向ける。そのため昼と夜の部分が入れ替わることがない。したがって、昼の部分では常に強い日差しにさらされ、夜の部分ではまったく日が当たらない、生物が発生して進化するには厳しい環境だと考えられる。だが、その中間である夕方の部分や、日差しの影響が少ない海の深い場所ならば地球とはまったく異なる生命が存在するのではないかと考えられている。生命の住む惑星は、地球のような惑星以外にも存在する可能性がある。

### ■ バイオマーカー

バイオマーカーとは生命活動の結果生じる生命の痕跡のことだ。まだ地球外生命体を発見できてはいないが、次世代の望遠鏡によってバイオマーカーを発見できれば、その惑星に生命が存在している可能性が高いといえる。

バイオマーカーのひとつの例として惑星大気中のオゾンがある。惑星大気の組成を調べて、オゾンがあれば、それは大気中に酸素分子が存在することを意味する。本来酸素は反応性が高い物質であるため、すぐに他の物質と反応して大気中からなくなってしまうのが自然である。しかし、酸素が存在するという事は酸素が発生し続けていることになり、その惑星には光合成をして酸素を発生させている生物がいる可能性がある。

他にも、惑星が赤外線を強く反射していれば、それは植物のバイオマーカーだと考えられる。地球の植物は砂や水面とは異なった特殊な反射をしている。植物は波長によって反射率が大きく異なり、可視光線をよく吸収するのに対して、赤外線を強く反射することが知られている。この可視光線と赤外線の境における反射率の急激な変化をレッドエッジという(図5)。反射光を分光した結果、可視光線に比べて赤外線が強く検出されれば、地球と同じような植物が惑星表面を覆っているこの可能性があることがわかる。そのためレッドエッジは植物のバイオマーカーということになる。

将来の電波望遠鏡を用いれば、知的生命体を発見できる可能性もある。そもそも知的生命体とは何だろうか。さまざまな定義ができるかもしれないが、天文学における定義では、電波を用いて通信をする生命体を知的生命体としている。高度に発達した生命体が通信をしようとするとき、電波を用いれば信号が遠くまで届く。通信に電波を利用していれば、それを地球から観測することが可能である。

人類は知的生命体と通信をしようと宇宙に向けて信号を発信することがある。もし、他の知的生命体も同様に地球に対して信号を発信していれば、人類はその知的生命体を見つけることができる。そうでなくても観測技術がさらに進歩した将来の電波望遠鏡を用いることで、10光年離れたところから私たちが日常生活で使っている程度の電波を観測することさえ可能になると先生は言う。

## 未来の可能性

惑星系形成という分野は、系外惑星の発見による大きな進歩があった。これからも新しい望遠鏡によってこの分野が発展するだろうと期待されている。続々と新しい理論が提唱されては古い理論を塗り替えていく。学生でもアイデア次第で大きな発見をすることができる分野だ。

ハワイに建設予定の30メートル望遠鏡(TMT)などの次世代の望遠鏡によっても観測がさらに進み、理論も発展していくことだろう。惑星からの反射光と恒星の光を分離して系外惑星を直接観測する

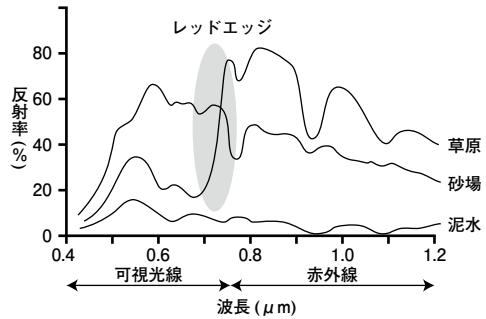


図5 光の波長による反射率の違い

物質によって光の反射率は異なり、特に植物は赤外線をよく反射する。

ことで、バイオマーカーを発見できる精度をもつ次世代の望遠鏡の建設が期待されている。地球外生命体の発見はそう遠い未来の話ではないかもしれない。

さらに、先生は生命の起源のシミュレーションに挑戦しようとしている。生命の起源における、アミノ酸がタンパク質を形成するステップを研究する生命学者がいたり、タンパク質が細胞膜を構成するステップを研究する生命学者がいたり、生命の専門家である生命学者は、生命の起源におけるそれぞれの独立した段階について研究している。そこで先生は、惑星系形成で培われた個々のステップを一つの大きなモデルに連結するノウハウを用いて、生命の起源における個々のステップを統合し、生命の起源のシミュレーションをしようと言うのだ。

先生は今まで地球内部、太陽系、銀河など、その時々でおもしろいと思ったことを研究してきた。系外惑星が観測できるようになって、これはおもしろいとすぐに飛びついたようだ。

先生は言う。目標を決めてかかるのではなく、おもしろいと思ったものを研究する。おもしろいものが最先端なのだから。

## 執筆者より

惑星系形成だけでなく生命も研究対象に入れた井田研究室に私は新鮮な印象を受けました。取材やメールに快く応じてくださった井田先生に御礼申し上げます。(吉田 雄祐)