

系外地球型惑星の理論

—スーパー・アースから—



井田 茂

〈東京工業大学・理・地球惑星科学 152-8551 東京都目黒区大岡山 2-12-1-I2-10〉

e-mail: ida@geo.titech.ac.jp

「スーパー・アース」と呼ばれる、観測限界ぎりぎりの地球質量の数倍から20倍くらいまでの質量をもち、岩石を主成分とした地球型惑星と推測される系外惑星が観測されるようになってきた。その観測データは、系外の地球型惑星は木星型に負けず劣らずの軌道多様性をもつことを示唆し、さらなる観測を刺激するとともに、惑星形成理論、惑星進化理論を刺激している。このことは、生命を宿す惑星環境の条件や多様性といった議論につながり、天文学のみならず、地球惑星科学から生命科学にまで波及していこうとしている。

1. スーパー・アースの発見

視線速度観測や重力レンズ観測によって、この1-2年で急速に系外「地球型惑星」が発見されてきた。2008年までで約20個発見されている。ここで、「地球型」とは岩石を主成分とする惑星という意味であるが、視線速度や重力レンズ観測では惑星の組成まではわからないので、質量で推測している。

コア集積モデル¹⁾に従うと、木星のようなガス惑星は、まずは岩石や氷のコアが微惑星から集積し、そのコア質量が地球質量の10倍程度を超えると円盤ガスが引きつけられて地球質量の100倍程度以上にまで成長すると考えられている。惑星に集積したガスはそれ自身が重力源になってさらにガスを引きつけるという具合に、ガス集積は暴走的に起こり、円盤ガスが(ギャップがあくなど)局所的になくなったり、または粘性散逸などで大域的になくなるまで続く。この形成過程を考えると、惑星質量の分布は、ガス集積しない地球質量の10倍程度以下か、暴走的ガス集積をして地球質量の100倍程度以上になるかの二極分化になる

と予想される²⁾(円盤外側領域ではコア集積が一般に遅いため、ガス集積できないままに中間的質量の数十倍の地球質量の固体惑星が残る可能性があることに注意がいるが)。したがって、地球質量の10倍程度以下のものは固体惑星だろうと想像できる。また、軌道半径が比較的小さいものは、岩石成分が主成分と考えられるので「地球型惑星」だろうと推測できる。

観測の限界で地球質量程度以下のものはまだ検出できていない。このような地球質量の数倍以上の地球型惑星をスーパー・アース(“Super-Earths”)と呼んでいる(明確な定義ではないことに注意)。観測されているスーパー・アースの分布が理論的に説明できるようになれば、地球質量程度の「地球型惑星」(“Earths”),特にハビタブル・ゾーンにある地球型惑星「ハビタブル・プラネット」(下記4節参照)の分布の理論予測も信頼度の高いものになるであろう。これまでは³⁾,木星型惑星の分布の観測データを使って、理論モデルを校正してハビタブル・プラネットの予測などがされてきたが、木星型惑星の形成はコア集積に加えてさまざまな過程がからむので、スー

パー・アースの観測データを較正に使っての予測のほうが、より直接的であり、さらに信頼度が高いと言えるであろう。

観測データでは、サンプル数が少ないものの、そのような二極分化の兆候は示されている。ただし、0.1 AU 程度以下という領域で、地球質量の20倍にも達しているものも何個もあり、それらがなぜ暴走的气体集積をしなかったのかという問題は残っている。また、GJ436b という23倍の地球質量で0.03 AUにある惑星は、視線速度観測とトランジット観測の両方ができていて密度が推定されているが、その密度は岩石惑星というよりは氷惑星であることを示唆し、「地球型」と呼ぶのははばかれる。これが大型氷惑星ならば、どのように惑星が形成されたのかは大きな謎である。この惑星はM型星の周りを回っているが、そのような低質量恒星の周りの低温円盤での惑星形成ではそのような惑星が作られるのかもしれない⁴⁾。

スイスの視線速度観測チームは、データは確定していないとしながらも、軌道長半径が短い（周期が短い）スーパー・アースは、太陽型星に多数存在すると発表した。その特徴は

- a) 太陽型星の約3割に存在。
- b) スーパー・アースの軌道周期の分布は10日程度にピークをもち、ガス惑星と想像される大質量のホット・ジュピターの3日周期のピークとは明らかにずれている。
- c) 短周期スーパー・アースが存在する系の8割では複数のスーパー・アースが存在。
- d) その複数のスーパー・アースの軌道はお互いに比較的離れていて、共鳴には入っていない。
- e) 軌道離心率は大きいものもあるが、小さく円軌道に近いものも多い。

というものだ。

2. スーパー・アース系の多様性

このように、短周期スーパー・アースは、太陽

型星で存在確率1%程度のホット・ジュピターよりも1桁以上存在確率が高い普遍的な存在のようだ。一方で、われわれの太陽系も含めて短周期スーパー・アースが存在しない系もたくさんある。つまり、地球型惑星も木星型と同様にその軌道分布に大きな多様性があるということになる。観測もその多様性の追及に向かうであろうし、理論研究もこのような地球型惑星の多様性をどう説明するのかという方向に向いてくるであろう。

興味深いのは、太陽系の木星衛星系と土星衛星系は、このようなスーパー・アース系に類似している部分があることである。スーパー・アースは太陽質量の数万分の1の固体惑星だ。木星では木星半径の6~26倍という木星に近いところに木星質量の数万分の1程度の同じような質量の四つのガリレオ衛星が回っている（その他の衛星はこれらより4桁以上質量が小さい）。一方、土星では土星半径の20倍のところに土星質量の5千分の1という巨大な衛星であるタイタンがぼつんと回っている。木星でも土星でも、恒星周りの惑星系と同じように、惑星の周りに一時的に形成されたガス円盤の中で衛星系が集積したと考えられている。これらの衛星系とスーパー・アース系は、中心天体のそば（かつてあったはずの円盤の内縁付近）に存在すること、固体の天体であること、中心天体に対する質量比が1万分の1のオーダーであること、といういくつかの共通の特徴をもつ。

ところが、木星のガリレオ衛星はすべて隣同士の間隔軌道に入っていて、複数スーパー・アース系とは違う。また、そもそも同じような姿でいいはずの、木星衛星系と土星衛星系は系を構成している衛星の数が全く違う。このことが示すのは、スーパー・アース系にはさらなる多様性が今後見つかってくる可能性があり、その多様性の起源は木星衛星系と土星衛星系の多様性も含めて検討されるべきであろうということである。

3. スーパー・アースの形成モデル ——円盤内縁の磁場カップリング が鍵？

このようなスーパー・アースが、現在存在している軌道半径の小さな位置で始めから形成されることは難しい。そのような内側の領域では材料物質である岩石微惑星の量が足りないからである。したがって、もっと外側で集積して内側に移動したか、外側にあった材料物質が内側に移動してきたか、特定の位置で移動が止まり、そこで集積したかのどちらかだと考えられる。

移動は原始惑星系ガス円盤との重力相互作用が考えられる。スーパー・アースの質量では円盤にクリヤーなギャップは開かず、その場合は、惑星は、かなり速いスピードで一般に内側に動くことが知られている⁵⁾。一方で、この移動は円盤の構造に敏感に依存するので、たとえば、円盤が内側で途切れている場合は、その内縁の手前で移動は止まってしまうはずである^{5), 6)}。短周期のスーパー・アースは外側で集積して内側に移動して円盤内縁で止まったか、外側で地球質量程度以下のものが円盤内縁で集積したと考えられる。

一つの可能性は、ガス集積しない地球質量程度以下の原始惑星が外側から移動してきて、円盤内縁付近で先に移動していた衛星の軌道共鳴にはまって、そこにたまり、円盤ガスが散逸した後に共鳴にはまっていた多数の原始惑星が合体成長したというシナリオである。合体後に地球質量の10倍以上になったとしても、もはやガスはないのでガスを集積しない。また、複数の惑星が共鳴からはずれた状態で残ることも円盤散逸後に軌道が乱れたとすれば説明できる。円盤ガスが散逸しても、何らかの原因で合体成長が起きなければ木星のガリレオ衛星系に似た系が残る。一方で、明瞭な円盤内縁がなく、中心星まで円盤がつながっていたら、短周期のスーパー・アースは残らず、太陽系のような系、または土星衛星系のような系に

なるかもしれない。

円盤内縁半径は中心星の自転と共回転している場所と考えられることが多い。中心星の双極子磁場があって、円盤ガスがイオン化していれば、共回転半径の内側では、ガスは磁場より速く回っているの、磁場とのカップリングによって角運動量を失って落ちてしまうし、共回転半径の外側では磁場から角運動量を受け取るの、落ちないでたまる。観測からは、磁場が強いと考えられる古典的Tタウリ型星の自転周期の分布は1週間くらいのところにピークをもつが⁶⁾、ケプラー回転している円盤ガスを集積しているの、そのままならもっと速く回っているはずである。磁場で自転角運動量を円盤に継続的に渡していると考えれば、この遅い自転周期の説明がつく。一方で、自転周期分布には、もう一つ1日という高速回転側にもピークがある⁶⁾。この場合は、磁場が弱く、中心星と円盤の磁場によるカップリングが弱く、だからと恒星表面まで円盤が繋がっていると考えればつじつまがあう。

このようにスーパー・アースの系の多様性、さらには太陽系木星型惑星の衛星系の多様性は、円盤の構造や進化、特に円盤内縁での中心星磁場とのカップリングの仕方によって生み出されている可能性が高い。今後、このような円盤の大域的進化や円盤内縁での磁気流体的相互作用と惑星集積・移動がからんだシステムの理論解析と、円盤および系外惑星の観測データの比較検討により、地球型惑星の軌道分布の多様性の起源が明らかになっていくであろう。

4. ハビタブル・プラネット

地球型惑星の予測精度が上がってくると、生命が住んでいる惑星の存在確率が興味の対象になってくる。よく引き合いに出されるのは「液体の水が存在可能な惑星」であり、そのような惑星を「ハビタブル・プラネット」と呼ぶことが多い。地球の地質データの分析によると、地球では海形成

(40億年前?) 後の5億年以内には生命が生まれたい。したがって、液体の水の存在と生命存在をほぼ同義で考える、多少の根拠はある。

水が液相にあるためには温度と分圧がある範囲内にあることが必要となる。温度は基本的には中心星の明るさと惑星の中心星からの距離で決まる。ただし、十分な量の大气があれば温室効果により、かなり遠方でも温度条件を満たすことが可能となるので、大気量(正確に言えば、メタンや二酸化炭素などの温暖化ガスの量)も重要なファクターになる。分圧は大気量で決まり、大気量は基本的に惑星の質量で決まる(重い惑星ほど大量の大気をまとえる)。ただし、大気は惑星形成後に、惑星の内部に取り込まれてしまう可能性があることに注意がいる。たとえば、地球は金星よりも重い、地球大気圧は金星の100分の1程度しかない。これは地球ではプレート・テクトニクスが発達していて、もともとあった大量の二酸化炭素大気が地殻やマントルに取り込まれたからだとして解釈されている。このような不定性はあるものの、中心星の明るさ、惑星と中心星の距離、惑星質量はきちんと定義された天体物理学的な量で、観測可能であり、「液体の水が存在可能な惑星」の予測・検証は可能である。惑星質量や大気量が最適だった場合を考えた、惑星表面に液体の水が存在できる最大軌道範囲を「ハビタブル・ゾーン」と呼んでいる。楽観的な見積もりでは、太陽質量の恒星の場合、0.75-1.8 AU という、軌道半径が2倍以上の変化の範囲が引き合いに出されていて、ハビタブル・ゾーンは意外に広いと言える。

しかし、液体の水の存在が示すのは、地球で言えば原核生物のような極めて原始的な生命の存在可能性にすぎない。進化した生命はどうであろうか? 地質データが示唆するのは、約27億年前には酸素発生型光合成生物(シアノバクテリア)が大量に生まれたようだ。ここで、生命は地熱エネルギーから中心星エネルギーへとエネルギー源を大転換し、のちの生命進化に重大な影響を与える

酸素をはきだし始めた。約20億年前には、原核生物とはオーダーで大きく、複雑な真核生物が生まれたようだ。真核生物は、酸素を使ってATPを合成するミトコンドリアを細胞内に含み、その後の多細胞生物へのもとになっていると言える。そして約6億年前には、カンブリアの大爆発と呼ばれる、急激な爆発的進化により陸上の生物(植物、動物)が誕生した。特に動物はエネルギー効率の高い酸素呼吸を行い、急速に高等化していき、人類へとつながった。

このような生命の進化は時間がたてば自然に起こるのだろうか、それとも惑星が一定の条件を満たすことが必要なのだろうか? 光合成生物の誕生には、惑星磁場の誕生がかかわっていると言われることもある。惑星磁場ができれば、宇宙線の侵入を防ぐので、生物が浅海に上がることができ、中心星放射を生命活動を支えるエネルギーに利用できるようになったという考えだ。確かにその頃に地磁気が現在レベルにまで強くなったことを示唆する地質データはあるが、古地磁気データの復元は極めて難しく、不定性が極めて大きい。ただし、少なくとも生物が陸に上がるためには宇宙線の侵入を防ぐ惑星磁場の存在が必要条件だということは言えるだろう。もちろん、陸上生命の存在のためには安定した気候や紫外線を防ぐオゾン層も併せて必要だろう。

生命が飛躍的進化をした約20億年前と約6億年前は地球が全面的に凍りついた(全球凍結)時期と一致している。その一致に意味があるのかどうかは、まだ不明である。また、そもそも全球凍結の原因もわからない。10-20億年という長い時間間隔で起こる全球凍結の原因を地球そのものや太陽系内の現象に結びつけるのは簡単ではないので、銀河スケールの現象、たとえばスターバーストによる宇宙線大量照射によって雲量が増えて寒冷化するというアイデアもある。「風が吹けば桶屋が儲かる」的などころもあるが、宇宙線大量照射がゲノム進化を加速したと考えれば(“ストレ

ス”がゲノム進化を加速するという考えは、最近一般的になってきているようだ)、その時期に生命の大進化があったということとつじつまは合うし、ヒッパルコスによる恒星の詳細な絶対等級のデータは約20億年前にスターバーストがあったということとは矛盾はないようなので、全く無視すべきアイデアではなく、他の可能性とともに検討に値する。

今後、系外地球型惑星の研究を進めて、バイオマーカーの観測も検討するならば、(天体物理学で扱え、観測側可能量である)惑星、中心星、銀河環境のどのような条件がどのような進化レベルの生命の存在・進化条件になるのかということも併せて考えていく必要があるであろう。たとえば、これだけスーパー・アースが存在することがわかってきたので、質量の大きな地球型惑星の熱進化、磁場発生、プレートテクトニクスはどうなっているのだろうかという検討や、どのような機構になるのかというようなことも検討され始めている。また、M型星は暗いので、視線速度観測で検出可能な軌道半径の小さなスーパー・アースがハビタブル・ゾーンに入っている可能性がある。このような軌道半径の小さなスーパー・アースでは中心星との潮汐相互作用で(月-地球系のように)自転と公転が同期していつも同じ面を中心星に向けていると考えられる。そのような惑星での気候は地球の気候とはかなり違ったものになると想像されるが、どのような気候になるのかという

ようなことも検討され始めている。

生命のいる地球型惑星の探索を相手にすると、天文学者だけの手には到底負えず、地球惑星物理学、気象学、地質学、生命進化学、ゲノム科学といった、多彩な学問分野との共同がだんだんと必要となっていくはずであり、それは新たな学問分野へと発展していくであろう。

参考文献

- 1) 井田 茂, 2007, 系外惑星 (東京大学出版会)
- 2) Ida S., Lin D. N. C., 2004, ApJ 604, 388
- 3) Ida S., Lin D. N. C., 2008, ApJ 685, 584
- 4) Ida S., Lin D. N. C., 2005, ApJ 626, 1045
- 5) Tanaka H., Takauchi T., Ward W., 2002, ApJ 565, 1257
- 6) Masset F. S., Morbidelli A., Crida A., Ferreira J., 2006, ApJ 642, 478
- 7) Herbst W., Mundt R., 2005, ApJ 633, 967

Theory of Extrasolar Terrestrial Planets

—From Super-Earths

Shigeru IDA

*Tokyo Institute of Technology, 2-12-1, 12-10
Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8551, Japan*

Abstract: Super-Earths, rocky planets with mass of several to ~20 earth masses are being observed. The observed data suggest that they have diversity in orbits as well as extrasolar Jovian planets, which stimulates further observations and formation/evolution theories of planets. Discussions of habitability will expand to Earth and life sciences through astronomy.