

# トランジット惑星の内部構造と組成

生駒 大洋

〈東京工業大学大学院理工学研究科 地球惑星科学専攻 〒152-8551 東京都目黒区大岡山 2-12-1〉

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

トランジット観測の利点の一つは、系外惑星のサイズがわかることである。これまでに、すでに約150個の惑星について半径と質量が測定されている。その二つの物理量がわかれば、惑星の内部構造と組成を理論的に推定することができる。そして、さらに惑星の起源を制約することもできる。本稿では、これまでに得られた知見と最近の展開について概観する。

## 1. はじめに

1995年の初検出以降、系外惑星の検出数は着実に伸び、現在では600を超える<sup>1)</sup>。さらに、惑星数の増加だけでなく、新たな観測法の開発により、一つの惑星に対してさまざまな観測データが得られるようになった。なかでも、最近のトランジット観測の発展は目覚ましい。これまでに検出された600個の系外惑星のうち、約150個についてトランジットが観測されている。そのうち80%以上がこの5年間で行われたものである。

トランジット観測の利点の一つは、惑星の半径が測定されることである。多くの場合、惑星の質量は他の観測（視線速度法など）からわかるので、その二つの量から惑星の平均密度がわかる。平均密度は内部の状態、特に組成を反映する。そして、惑星の組成は、惑星の起源に重要な制約を与える。

これまでに半径と質量が測られたトランジット惑星の中でも、「ホット・ジュピター」と呼ばれる質量が地球の100倍程度以上ある惑星については、ある程度まとまった議論ができるようになってきた。さらに最近では、「ホット・ネプチューン」や「ホット・スーパーアース」と呼ばれる小質量の惑星のトランジットも検出され始めてい

る。本稿では、こうしたトランジット惑星の内部構造と組成に関して得られた知見をレビューする。

## 2. 質量-密度の関係

図1にトランジット惑星の質量と平均密度を示した（灰色点）。また、比較のため、太陽系の木星と土星、天王星、海王星、地球を青点で示した。

まず、地球質量の100倍程度以上で、右斜め上に帯状に分布する集団がある。次に、その集団の下方から左斜め上に灰色点が分布していることが分かる。こうしたV字分布は、青点の分布と比較すれば分かるように、定性的には太陽系と同じである。しかし、分散は大きく、これが系外惑星の多様性を示している。

図に示した実線は、水素のみからなる天体についての理論曲線である。灰色の線はホット・ジュピターを想定して表面温度を1,000 Kとした場合で、青線は木星と土星を想定して表面温度を100 Kとした場合である。この図を見ると、分散はあるものの、水素天体の理論曲線がホット・ジュピターの分布をよく表していることがわかる。もともとホット・ジュピターの「ジュピター」は質量が木星級であることから名づけられたが、この図

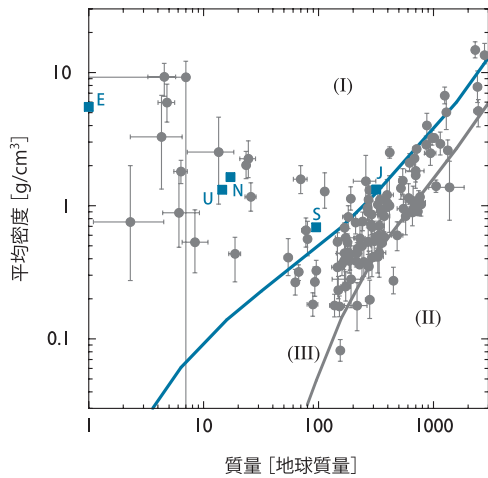


図1 惑星の質量と平均密度。灰色点は系外惑星を表し、青点は太陽系の地球(E)・木星(J)・土星(S)・天王星(U)・海王星(N)を表す。実線は水素のみからなる天体についての理論曲線で、灰色線と青線の違いは惑星の表面温度（ここでは、1気圧の温度）の違いで、前者は1,000 K、後者は100 Kである。

からホット・ジュピターが水素主体の惑星で、組成の点でも木星に類似の惑星であることが確認できる。

一方、図の中央から左斜めに分布する惑星は、太陽系の惑星（氷を主成分とする天王星と海王星、岩石を主成分とする地球）と比較すれば、氷や岩石でできた惑星であると推定される。

図中で番号を付した空白領域(I)-(III)は、惑星の構造上の理由だけでなく、形成・進化過程と関連する理由で惑星が存在しない。例えば、領域(I)については、

- ・水素天体の密度に上限があること
- ・氷や岩石の惑星を作る初期材料物質に限りがあること

が原因であろう。以下では、灰色点の分散と空白領域について、ホット・ジュピターとそれよりも小さい惑星に分けて、実際の観測例を示しながら述べる。

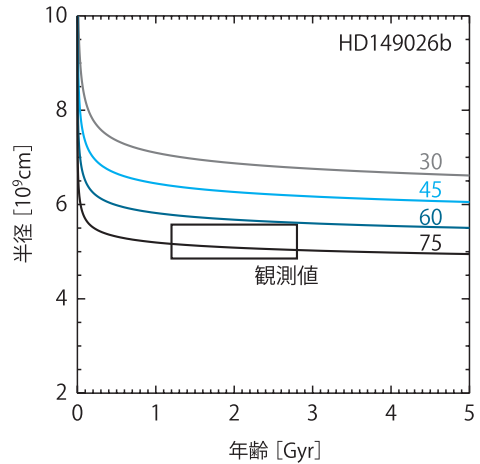
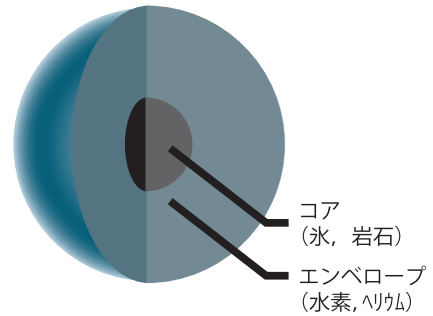


図2 巨大ガス惑星の内部構造モデル（上図）と巨大ガス惑星HD149026bを想定した熱進化シミュレーションの結果<sup>8)</sup>（下図）。下図において、各進化曲線に付した数字は仮定したコア質量（単位は地球質量）を示す。四角は、HD149026bの半径と中心星の年齢の観測値<sup>7)</sup>である。

### 3. ホット・ジュピター

図1のホット・ジュピターの分布を理解するために、木星型惑星（巨大ガス惑星）の形成過程を簡単に復習する。惑星は、「原始惑星系円盤」（以下、単に「円盤」と呼ばれる星周ガス円盤の中で形成される<sup>2)</sup>。その円盤は水素とヘリウムを主成分とし、重元素を約1%程度含む。まず、このわずかな重元素が円盤内で固体となり、集積して、固体の原始惑星を作る。これが、巨大ガス惑星のコアとなる。そして、そのコアがある臨界質量にまで成長すると、周囲の円盤ガスを大量に取り込む<sup>3)</sup>。やがて、円盤ガスの取り込み速度に、円盤

からのガスの供給が追いつかなくなると、原始惑星の周りに溝が形成され、エンベロープの成長は止まる<sup>4)</sup>。その後、原始惑星は孤立し、それまでに獲得したエネルギーを宇宙に放出しながら、準静的に収縮して、現在の状態に至る。

領域(II)の空白領域の存在は、最終ステージの準静的収縮に起因する。巨大ガス惑星が円盤ガスから離れて孤立した直後はいまよりも半径は大きく(つまり、密度が低く)、領域(II)のあるところに現れる。しかし、孤立直後の熱進化は非常に速く、すぐに収縮して、密度が上昇する(図2参照)。つまり、領域(II)の滞在時間は非常に短く、発見確率が非常に低い。

次に、領域(III)は、形成過程を反映していると考えられる。上記の形成過程において重要なことは、コアが臨界質量を超えた後の円盤ガスの取り込みが暴走的に起きる<sup>5)</sup>ということである。つまり、地球質量の数十倍程度の段階は円盤ガスの集積は急速に起きるため、領域(III)での滞在時間は非常に短い。また、その程度の質量では、巨大ガス惑星が円盤に溝を開けて成長が止まることはない<sup>6)</sup>。

このように、図1上でのホット・ジュピターの分布は、おおよそ理論的に説明できる。系外惑星のトランジットが観測されるようになって、われわれが得た新たな知見は、この「帯」の広がりにあるだろう。ホット・ジュピターの表面温度は、約1,000–2,000 Kであり、図1の灰色線と青線を比べればわかるように、灰色点の広がりには温度の違いによる広がりではない。これは、ホット・ジュピターに含まれる重元素量の違いである。

実際、ホット・ジュピターには重元素に富む惑星が多いことがわかってきた。その代表例が、日本のすばる望遠鏡が発見したHD149026bである。この惑星は、質量と半径がそれぞれ土星の1.2倍と0.86倍である<sup>7)</sup>。注目すべきは平均密度の高さだ。質量が土星の1.2倍であるのに、密度が土星の約2倍(= 1.3 g/cm<sup>3</sup>)と高い。これは木

星とほぼ同じである。図2にHD149026bを想定した巨大ガス惑星の進化曲線を示した<sup>8)</sup>。上で述べたように、巨大ガス惑星は、形成時には非常に膨らんだ構造を取っている。その後収縮を行うが、コアの質量が大きいほど、早く収縮する。図からわかるように、観測値と整合的な結果を与えるコア質量は、60地球質量から75地球質量であり、この惑星が巨大なコアをもつことがわかる(実際にはコア中の氷/岩石比の不定性があり、それを考慮すると、この惑星は50–80地球質量のコアをもつと推定される)。このような巨大なコアを作る機構はまだ十分な説明がないが、おそらく巨大ガス惑星同士の衝突が起きたのではないかと考えられている<sup>8)</sup>。

このようなコア質量の見積りをこれまでに見つかったホット・ジュピターについて行ってみると、中心星の金属量([Fe/H])と相関をもつ<sup>9),10)</sup>。しかし、コア集積モデルでは、円盤ガスの取り込みを始めるコア質量にそのような強い相関は発生せず<sup>8)</sup>、これは未解決の問題であると言える。

最後に、低密度側にも未解決の問題がある。それは、ホット・ジュピターの異常膨張の問題である<sup>11)</sup>。図2と同様の計算を行い、コア質量を見積もると、コアがない、すなわち水素・ヘリウムだけの惑星でも、現在の大きな半径(低密度)を説明できない天体が無視できない数存在する。詳細は紙数の都合上割愛するが、おそらく中心星との相互作用によって、ホット・ジュピター側に中心星からエネルギーが供給されて、惑星内部で加熱があると考えられている。さまざまなアイデアが提案されているが、現時点では、まだ特定されていない。

## 4. ホット・スーパーアース

宇宙望遠鏡の稼働などにより、最近では、ホット・ジュピターよりサイズの小さい、いわゆるホット・ネプチューンやホット・スーパーアースと呼ばれる惑星のトランジットも観測されるよう

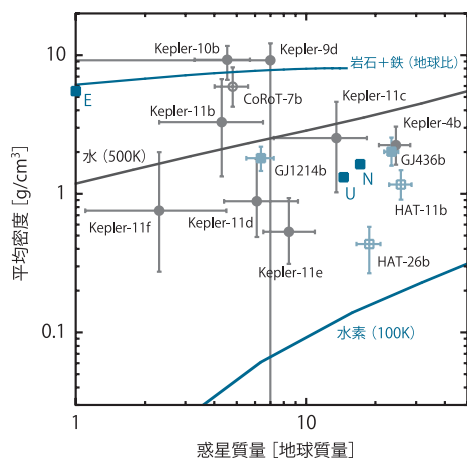


図3 惑星の質量と平均密度. 濃い青の四角点は太陽系の地球(E)・天王星(U)・海王星(N)を表す. それ以外のシンボルは系外惑星を表す<sup>1)</sup>. シンボルの脇にある文字列は惑星名である. さらに, 実線は下から水素のみ(表面温度は100 K), 水のみ(表面温度は500 K), シリケイトと岩石からなる天体についての理論線である.

になってきた. 図3に, これまでにトランジット観測された低質量惑星のいくつかについて, 質量と平均密度の関係を示した. また, 表面が100 Kの水素の天体と表面が500 Kの水の天体, 地球と同様に岩石と鉄からなる天体についての理論線も載せた.

この図から見て取れるように, 小質量の惑星は, 理論曲線を横切って比較的偏りなく分布している. つまり, 地球のような岩石惑星や天王星・海王星のような氷惑星だけでなく, 太陽系には存在しないさまざまな混合組成の惑星が系外には存在することを表している. もう一つ重要なことは, それらが中心星近傍に存在することだ. ホット・ジュピターの存在は, 巨大ガス惑星が中心星に向けて移動することを決定づけたと言える. 同様に, 岩石惑星であれ, 氷惑星であれ, さまざまな組成の天体どれもが中心星に向かって落ちてく

るという重要な示唆を与えている.

ホット・ジュピターとは違い, こうした小質量の惑星については, まだ統計的に有意な数が発見されているわけではない. 以下では特筆すべき事例をいくつか挙げ, 研究動向を概観する.

#### 4.1 CoRoT-7b

2009年, 欧州の宇宙望遠鏡CoRoTがスーパーアースと呼ぶにふさわしい惑星を初めて検出した. 報告によると, 半径が地球の1.7倍で, 質量は地球の約5倍である<sup>12)</sup>. 図4に, われわれが行った内部構造モデリングの結果を示した<sup>13)</sup>. 図4(a)では, シリケイトと鉄の2層構造を仮定し, 両層の質量比が異なるいくつかの場合について質量と半径の関係を求めた. 理論的な推定値(実線)と観測値(灰色四角)を比べればわかるように, (鉄/シリケイト比は別として)地球と類似の岩石惑星である可能性が示唆される.

しかし, 解は一つとは限らない. 図4(b)では, 鉄とシリケイトの比を地球と同じとし, さらに水の層を加えた場合の半径と質量の理論線を水の割合ごとに示した. これからわかるように, 惑星質量の10%程度の水をもつ惑星であっても, 観測的に得られた質量と半径の関係が満たされることがわかる.

このように, 半径と質量という情報だけでは, 解の縮退が起きることが多い. しかし, 惑星が岩石惑星なのか, 大量に水をもつ惑星かによって, その惑星および惑星系の起源に対する解釈が大幅に異なる. その場合, 新たな情報を追加する必要がある. 例えば, CoRoT-7bの場合は中心星に非常に近く(0.017 AU), 中心星からの紫外線照射によって水蒸気大気の上層が加熱され, それによって大気が惑星外へと流出する. 理論的な見積りによれば, 図4(b)で示された量の水蒸気を失うのに要する時間は, 惑星の年齢よりも短い<sup>13)</sup>. したがって, 岩石惑星である可能性が高いと言え

\*1) ただし, 質量の推定値についてはいまだ論争中であることに注意されたい.

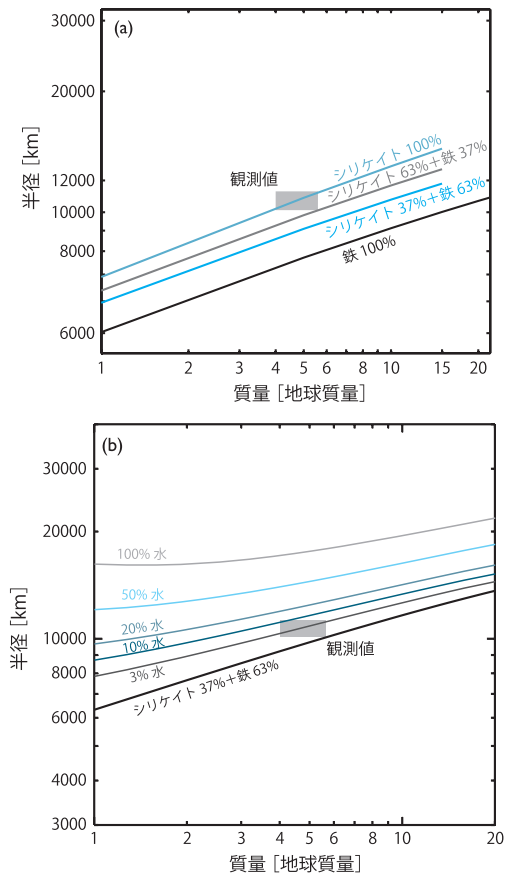


図4 CoRoT-7bの内部構造モデリングの結果<sup>13)</sup>。  
 上図：岩石惑星を想定した場合。シリケイトのマントルと鉄のコアの2層構造を仮定した。下図：岩石部分（シリケイト63%、鉄37%）の上に水の層を乗せた場合。観測値は文献12から取ったが、まだ論争中であることを注意。

る。ただし、確率的な評価であって、後者の可能性が否定されるわけではない。

#### 4.2 GJ 1214b

2009年には、もう一つのスーパーアースが発見された。米国の地上望遠鏡MEarthが検出したGJ 1214bという惑星である<sup>14)</sup>。半径は地球の2.7倍で、質量は5-7地球質量と報告されている。CoRoT-7bと同様に中心星に非常に近い(0.014 AU)が、CoRoT-7bと異なり中心星が暗い恒星(M型)であるため、表面温度は約600 Kと比較的低い。

GJ 1214bは、図3を見ればわかるように、CoRoT-7bと比べると密度が低い。すべて水でできた惑星よりも密度が若干低く、天王星や海王星のように水素・ヘリウム大気をまとった惑星であると考えられている<sup>14)</sup>。しかし、CoRoT-7bと同様に中心星に近いために、水素・ヘリウム大気の安定性の問題が残る。

この惑星に関しては、地球に比較的近く明るいためトランジット時に大気の透過スペクトルが取られている。それを基に水素の存在の可否が議論されている<sup>15)-16)</sup>が、現時点では決着がつかない。今後の展開に期待したい。

#### 4.3 Kepler-11

最後に、今年の2月に米国の宇宙望遠鏡Keplerが検出したKepler-11周りのスーパーアース<sup>17)</sup>について触れる。この系は、複数のスーパーアースからなる系であり、その点だけでも非常に話題性のある興味深い惑星系である。内部組成の観点で言えば、図3を見てもわかるように、最も内側のKepler-11bを除いてどれも密度が低く、GJ 1214bのようにわずかな水素大気をまとった氷惑星か、あるいは比較的厚い(惑星質量の10-20%を占める)水素大気をまとった岩石惑星の可能性もある。水素大気の安定性の見積り<sup>17)</sup>から前者は考えにくく、(太陽系には存在しない)水素大気をまとった岩石惑星である可能性が示唆されている。しかし、その水素大気は円盤ガスを取り込んだものだと考えられているが、惑星質量の10-20%という中途半端な量だけ円盤ガスを獲得するのは簡単ではない。いずれにせよ、大気組成の観測やその他の情報が必要である。

#### 5. 終わりに

以上のように、トランジット観測によって系外惑星の内部が「見える」ようになり、組成という観点で起源を制約できるようになった。ホット・ジュピターについては系統的な議論がなされ、時代はスーパーアースへと移行しつつある。上述し

たように、太陽系では、地球質量と天王星質量（地球質量の約15倍）の間に惑星が存在しないので、スーパーアースは太陽系形成論の一般化に極めて重要な天体である。宇宙望遠鏡Keplerはすでに多数の候補天体を検出しているので、スーパーアースについても統計的に有為な数のサンプルが得られるのは時間の問題である。一方で、組成の縮退を解くための大気の観測など新たな情報の追加に期待したい。

## 謝 辞

執筆機会をくださった成田憲保氏に感謝いたします。また、図の作成に当たり、共同研究者の堀 安範氏、黒崎健二氏の協力を得ました。この場をお借りして御礼を述べます。

## 参考文献

- 1) <http://www.exoplanet.eu>
- 2) Hayashi C., 1981, Prog. Theor. Phys. Supplement 70, 35
- 3) Mizuno H., 1980, Prog. Theor. Phys. 64, 544
- 4) Bryden G., et al., 1999, ApJ 514, 344
- 5) Bodenheimer P., Pollack, J. B., 1986, Icarus 67, 391
- 6) Tanigawa T., Ikoma M., 2007, ApJ 667, 557
- 7) Sato B., et al., 2005, ApJ, 633, 465
- 8) Ikoma M., et al., 2006, ApJ 650, 1150
- 9) Guillot T., et al., 2006, A&A 453, L21
- 10) Miller N., Fortney J. J., 2011, ApJ 736, L29
- 11) Burrows A., et al., 2007, ApJ 661, 502
- 12) Léger A., et al., 2009, A&A 506, 287
- 13) Valencia D., et al., 2010, A&A 516, A20
- 14) Charbonneau D., et al., 2009, Nature 462, 891
- 15) Bean J. L., et al., 2010, Nature 468, 669
- 16) Désert J.-M., et al., 2011, ApJ 731, L40
- 17) Lissauer J. J., et al., 2011, Nature 470, 53

## Interior and Bulk Compositions of Transiting Exoplanets

Masahiro IKOMA

*Department of Earth and Planetary Sciences,  
Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama,  
Meguro-ku, Tokyo 152-8551, Japan*

Abstract: Transit photometry reveals sizes of exoplanets. Until today, the radii and masses of about 150 exoplanets have been measured. Based on both data, we can infer the internal structure and composition of the planets theoretically, which provide us with important constraints on the origin of the planets. In this article, I make a brief review on findings that we have gained and recent progresses.