

# スーパーアースの形成と大気

荻原 正博<sup>1</sup>  
堀 安範<sup>2,3</sup>



荻原



堀

〈<sup>1</sup> 国立天文台科学研究部 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

〈<sup>2</sup> アストロバイオロジーセンター 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

〈<sup>3</sup> 国立天文台ハワイ観測所〉

e-mail: <sup>1</sup> masahiro.ogihara@nao.ac.jp, <sup>2</sup> yasunori.hori@nao.ac.jp

スーパーアースの観測例の急激な増加に伴い、スーパーアースについて様々な特徴が明らかになってきている。これらのうち、軌道周期比に代表される軌道分布の特徴はスーパーアースの形成起源を探る上で非常に有用であり、実際に過去数年でスーパーアースの形成起源の研究が大きく進展した。本稿ではまず、最新の惑星形成 $N$ 体計算の結果を用いて、スーパーアース形成についての理論モデルを紹介する。次に本稿では、今後の系外惑星の特徴付けとして重要なスーパーアース大気に注目する。これまでの多波長測光観測から明らかになったスーパーアース大気の特徴を概観するとともに、大気形成の起源や惑星形成後の大気進化について現状の理解を整理する。

## 1. スーパーアースの軌道分布

2019年のノーベル物理学賞は太陽系外惑星発見の功績に贈られることが決定したが、スーパーアースは太陽系外惑星（以下、系外惑星）の一分類である。図1は軌道長半径-惑星質量平面上に、これまでに存在が確認された系外惑星をプロットしたものを示しており、系外惑星は大別して3つの集団に分類されることがわかる。スーパーアースは左下に位置する低質量惑星の集団に属する。なお、スーパーアースの定義として「質量が1-10地球質量程度」というものが一般によく使われているが、厳密な定義は存在せず、現在はその時々注目する事象によって都度、定義されている<sup>\*1</sup>。最も広い定義では「木星などの巨大ガス

惑星ではない」の意味で使用され、これには海王星質量の惑星も含まれる。最も狭い定義では、惑星質量が1-3地球質量程度（惑星半径は1-1.5地球半径程度）として扱われる。現在、発見されている系外惑星の大部分はスーパーアースであり、ケプラー宇宙望遠鏡の観測成果に基づいたスーパーアースの存在頻度は（定義にも依るが）数10%程である<sup>2,3</sup>と見積もられている<sup>\*2</sup>。ここで惑星の存在頻度とは、観測対象の恒星のうち特定の種類の惑星を持つ恒星の割合を表す。

観測数の増加に伴って、スーパーアースの軌道分布が統計的に議論できるようになってきた。軌道特徴付ける重要な指標として、軌道周期比が挙げられる。軌道周期比とは、複数の惑星が発見された系において隣り合う惑星ペアの軌道周期の

<sup>\*1</sup> 惑星の定義は本来、物理的特徴で決定されるため、系外惑星の素性（例、内部組成）がよくわかっていない現状では、注目している事象によって異なる定義が許容されている。将来、系外惑星の物理的な性質が明らかになっていくと、冥王星の準惑星分類のように議論・決定されるだろう。

<sup>\*2</sup> スーパーアースの存在頻度の軌道周期依存性や中心星質量依存性は、筆者による総説記事<sup>1)</sup>も併せて参照されたい。

比 ( $P_{out}/P_{in}$ ) を表す。中心星から 1 au 以内の短周期軌道に限定した上で、観測された全ての複数スーパーアース系について隣り合う惑星ペアの軌道周期比分布をプロットしたのが図2である。軌道周期比分布は、隣り合う惑星の平均運動共鳴関係や軌道間隔の情報を含んでおり、スーパーアース形成モデルを構築する際には重要な制限となる。図2のヒストグラムから、一部のスーパーアースは平均運動共鳴状態にある(例、3:2の共鳴)ことがわかる。一方、実線で表される累積分布は滑

らかであり、殆どの惑星ペアは平均運動共鳴状態には無い。こうした傾向は太陽系の地球型惑星とも類似している。なお、図2では質量が100地球質量以下もしくは半径が10地球半径以下のものをスーパーアースとする広義な定義を使用しているが、狭義な定義を採用してもこの傾向は変わらない。2節ではこの軌道分布の特徴の起源を説明できるスーパーアースの形成モデルを見ていこう。

## 2. スーパーアース形成論

本節ではスーパーアース形成論の現状を最新の研究結果から概説する。標準の惑星形成理論では、恒星の周囲に形成した原始惑星系円盤中でダストから微惑星、原始惑星の段階を経て惑星は誕生したと考えられている。微惑星や原始惑星がいつ、どこで、どの程度、形成したかについては未だよく分かっていない。そこで、微惑星や原始惑星の形成についての不確定性をモデルに導入して議論するのではなく、原始惑星が形成した段階以降の惑星形成・軌道進化を議論する。なお、スーパーアースについては、観測的制約から現在までのところ短周期軌道(1 au より内側)のみで発見されている(図1)ので、本稿で議論するのは短周期スーパーアースの形成論である。

### 2.1 スーパーアースの形成理論モデル

原始惑星から短周期スーパーアースへの形成モデルは、起源となる原始惑星の初期軌道位置に

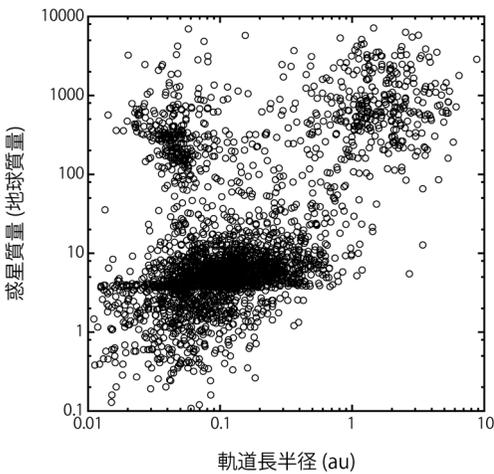


図1 太陽系外惑星の分布。3つの集団は左上から時計回りで短周期巨大惑星(ホットジュピター)、長周期巨大惑星、短周期スーパーアースと呼ばれる。データはNASA Exoplanet Archiveによる。(荻原2018, 遊星人より転載<sup>1)</sup>)

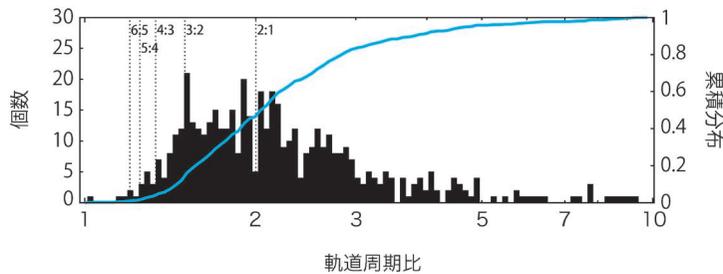


図2 観測された短周期スーパーアース系の軌道周期比分布<sup>4)</sup>。実線は累積分布、破線は平均運動共鳴の位置を表す。データはNASA Exoplanet Archiveによる。Credit: Ogihara et al., 2015, A&A, 578, A36より許可を得て転載 © ESO.

よって「短周期原始惑星起源」と「長周期原始惑星起源」に分別される。前者は、初期の軌道配置として現在、短周期スーパーアースが存在する軌道領域（1 auより内側）を想定しており「その場形成モデル」とも呼ばれる。一方で、後者は中心星から離れた遠方領域（数au以遠）で誕生した原始惑星が短周期軌道まで移動したと考えるもので「惑星移動モデル」とも呼ばれる。その場形成に基づくモデルにおいても惑星の軌道移動は生じ得ることから、混同を回避するために、以降では「その場形成モデル」「惑星移動モデル」という分類は使わない。また、惑星形成は原始惑星系円盤の化学的かつ力学的な構造・進化に依存する為、仮定する円盤モデルも重要な要素となる。

ここからは、短周期原始惑星起源と長周期原始惑星起源という分類に従って、図2で示したスーパーアースの軌道周期比分布を再現可能かどうかの観点で短周期スーパーアースの起源を議論する。天体の平均運動共鳴関係への捕獲や天体衝突を正確に追う必要があることから、天体同士の重力相互作用を数値的に解く重力N体計算の結果を元に議論を進めていく。

## 2.2 短周期原始惑星起源

原始惑星の初期位置として短周期軌道（1 auより内側）を考えた場合には、様々な問題が生じることがこれまで指摘されてきた。原始惑星系円盤の面密度や温度として、単一のべき乗分布を用いた太陽系最小質量円盤（以下、最小質量円盤：惑星形成モデルにおいて最も汎く採用されてきた円盤モデル）を想定すると、中心星から1 au離れた場所に置かれた地球質量の惑星は10万年程度のタイムスケールで最小質量円盤中を中心星方向へ軌道移動してしまう。この軌道の移動はタイプI移動と呼ばれる<sup>5)</sup>。タイプI移動速度は惑星質量に比例するため、地球よりも質量の大きなスーパーアースは10万年よりも短いタイムスケールで軌道減衰し、結果としてガス円盤が寿命（典型的に、数100万年程度）を迎える前に中心星に落

下してしまう。なお、短周期軌道では火星サイズの原始惑星からスーパーアースサイズの惑星までの成長時間も1万年程度と極めて短い為、スーパーアースの成長を遅らせることも難しいと考えられている。

中心星の近傍（0.1 auより内側）に存在したと考えられる原始惑星系円盤の内縁（典型的には、中心星の自転速度とガスのケプラー速度が釣り合う共回転半径の位置付近）を考慮すると、スーパーアースの中心星落下を防ぐことはできる。しかし、円盤中を惑星が素早く移動することは変わらない為、形成するスーパーアース系は必然的に円盤内縁付近に集中した軌道分布になる<sup>6)</sup>。これは現在、観測されているスーパーアースの軌道分布（図1）とは矛盾する。またこの場合には、隣り合う惑星ペアの最終的な軌道間隔は非常に狭くなる<sup>4)</sup>。惑星の初期軌道配置をわずかに変えて行った10ランのN体計算の結果をまとめた分布でみると（図3）、隣り合う惑星ペアの軌道周期比は1.5以下が殆ど（黒破線）であり、半数以上の惑星ペアの軌道周期比が2以上という観測結果（細実線）と大きく異なる。

上記の最小質量円盤モデルでは、ガス円盤が光学的に薄いと仮定し、中心星輻射による加熱と放射冷却が釣り合った平衡温度を温度分布としてい

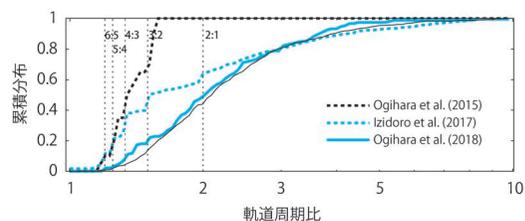


図3 軌道周期比の累積分布の比較。細実線は図2と同様の観測されたスーパーアースの分布を表す。黒破線、青破線、青実線はそれぞれ、最小質量円盤での短周期原始惑星起源の計算結果<sup>4)</sup>、現実的な温度構造を考えた場合の長周期原始惑星起源の計算結果<sup>7)</sup>、円盤風で進化する円盤を考えた場合の短周期原始惑星起源の計算結果<sup>8)</sup>を表す。

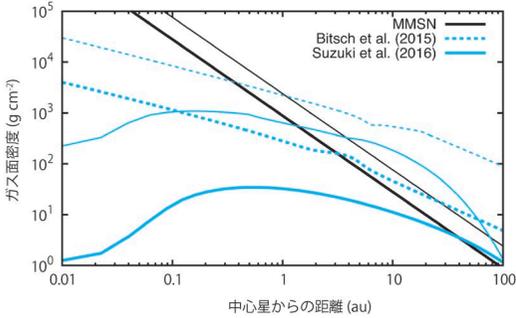


図4 円盤モデルの比較。黒実線は最小質量円盤モデルを、青破線は現実的な温度構造を考えた場合の円盤モデル<sup>9)</sup>を、青実線は円盤風で進化する円盤モデル<sup>10)</sup>を表す。細線と太線はそれぞれ初期と100万年経過後を表す。

る。より現実的な温度分布として、粘性加熱や2次元の輻射輸送を考慮した円盤モデルも提唱されている<sup>9)</sup>。この円盤モデルは、従来の最小質量円盤モデルと比較して短周期領域でガス面密度が小さく、面密度勾配が緩やかになっている(図4の青破線)。これを用いて短周期原始惑星起源のスーパーアース形成を調べた筆者らの $N$ 体計算によると、スーパーアースの移動タイムスケールは10万年程度と最小質量円盤と比較してやや長くなるものの、依然として円盤寿命よりはかなり短い。従って、最終的には円盤内縁付近でコンパクトなスーパーアース系が形成されるという結論は変わらない\*<sup>3</sup>。また松村想子氏らの最近の研究<sup>11)</sup>でも同様の円盤モデルを使用して $N$ 体計算を行い、円盤内縁付近にスーパーアースが集中して形成することが確認されている\*<sup>4</sup>。

### 2.3 長周期原始惑星起源

次に長周期原始惑星を起源とするスーパーアース形成を考える。円盤モデルとして最小質量円盤を採用した場合には、短周期原始惑星起源の場合

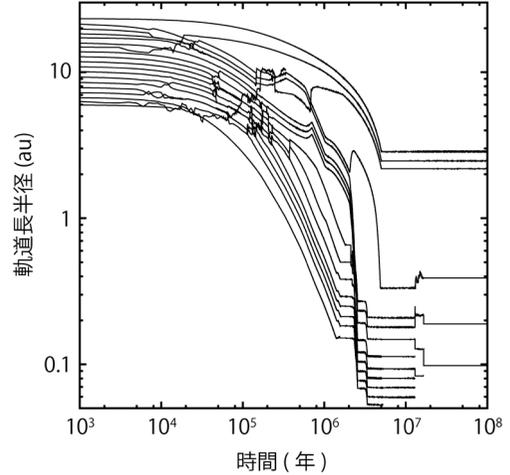


図5 現実的な温度構造を考慮した円盤モデルを採用した $N$ 体計算での天体の軌道長半径の時間進化。Izidoro et al., 2017, Breaking the chains: hot super-Earth systems from migration and disruption of compact resonant chains, MNRAS, 740, 図5より転載)

と同様に、タイプI移動が速すぎることでスーパーアースは中心星に落下してしまう<sup>12)</sup>。より現実的な温度構造を考えた円盤モデルを採用した場合でも、 $N$ 体計算によって軌道周期比分布が再現できないことが指摘されていた<sup>13)</sup>。

一方で、同様の温度構造を用いたA. Izidoro氏らによる別の研究(筆者も共著者)では、観測と矛盾しない結果を得る可能性も見出されている<sup>7)</sup>。質量がおよそ3地球質量と初期に大きな原始惑星を中心星から5 au以遠に配置した $N$ 体計算の結果の一例を図5に示す。この場合にも惑星の軌道移動は見られるが、移動のタイムスケールは100万年程度と長い。軌道減衰によって短周期軌道まで移動した後に移動を停止し、100-300万年後には円盤内縁(0.1 au)付近から0.5 au付近まで並

\*<sup>3</sup> タイプI移動はガス面密度分布の他に円盤ガスの温度分布にも依存し、オパシティ(単位質量あたりの光吸収度)が急激に変化する軌道位置(例: 雪線もしくはスノーライン)では軌道移動が停止する性質が知られているが、この効果の影響は限定的であるようだ。

\*<sup>4</sup> 但し、ペブル集積(ペブル/pebble=小石)を考えた筆者らによる最新の研究では、スーパーアース系が内縁付近に集中しない条件も発見され始めている。

んでいることがわかる。隣り合う惑星ペアは平均運動共鳴に捕獲されており、この平均運動共鳴が数珠繋ぎになっている様子は鎖状共鳴 (resonant chain) と呼ばれる。円盤ガスが散逸した後 (1000 万年以降), この系は軌道不安定を起し、惑星は軌道交差及び衝突合体を経験する。軌道不安定を経験した惑星は共鳴軌道から外れ、最終的には平均運動共鳴の無い状態でスーパーアースが形成された。ところが, A. Izidoro 氏らの  $N$  体計算では、円盤寿命内に鎖状共鳴がほぼ 100% のランで形成するのにに対し、図5で見られる円盤散逸後の軌道不安定は 50% 程度のランでしか生じないこともわかった。そのため、平均運動共鳴にとどまるスーパーアース系が過剰に存在し、スーパーアースの軌道周期比の観測結果 (図2) を依然として再現することができない (図3の青破線)。なお, A. Izidoro 氏らの計算では初期に3地球質量と大きな原始惑星が遠方領域 (5 au 以遠) に存在すると仮定したが、質量の大きな原始惑星を短時間 (およそ数10万年程度) で形成することは困難であるという問題も残る。

#### 2.4 短周期原始惑星起源の再考

ここまで、速いタイプI移動が懸念材料であること、そして円盤モデルが惑星の軌道進化の描像を大きく変え得ることをみてきた。近年、磁気駆動円盤風などの磁場の効果を考慮した長時間円盤進化モデルが、鈴木建氏らの研究 (筆者も共著者) によって新たに提唱されている<sup>10)</sup>。図4にこのモデルの面密度進化の例を示している (青実線)。この円盤モデルでは主に円盤風駆動の質量降着が円盤進化を決定しているが、短周期軌道では面密度が小さくなり、また面密度勾配も最小質量円盤とは大きく異なる。筆者らはこの新たな円盤モデルに基づいて、スーパーアースの短周期原始惑星起源説を再検討した<sup>8)</sup>。火星サイズの原始惑星からの成長と軌道進化を追った  $N$  体計算の結果の一例を図6に示す。原始惑星の成長時間は短周期軌道では非常に短く (1万年程度)、短時間で地球質

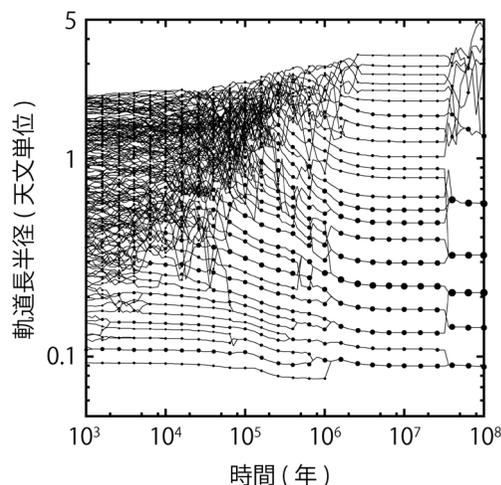


図6 円盤風を考慮した円盤モデルを採用した  $N$  体計算での天体の軌道長半径の時間進化<sup>8)</sup>。Credit: Ogihara et al., 2018, A&A, 615, A63 より許可を得て転載©ESO.

量程度まで成長するが、惑星は軌道移動を殆ど経験していないことがわかる。一方で、軌道移動速度は図5と比べて大きく異なるが、全体的な軌道進化の傾向は同様である。すなわち、軌道移動によって惑星は鎖状共鳴に捕獲され、円盤が散逸した後 (1000 万年以降) に系は軌道不安定を経験し、最終的にスーパーアースは平均運動共鳴から外れた状態で形成する。2.3 節の A. Izidoro 氏らの研究との決定的な違いは、殆どすべてのランが円盤散逸後に軌道不安定を生じていることである。結果として、全ての  $N$  体計算の結果を合わせた軌道周期比分布は観測されたスーパーアースの分布とよく合致することが示された (図3の青実線)。紙面の関係上、詳細は割愛するが、最終的な惑星の質量分布などの本稿では取り上げていないスーパーアース系の特徴も大凡再現されている。

なお、図4に示した磁気駆動円盤風を考慮した円盤モデルを長周期原始惑星起源説に適用して、 $N$  体計算を実施したが、この場合は2.3 節の A. Izidoro 氏らの研究と同様の結果が得られることがわかっている。すなわち、長周期軌道に配置した大きな原始惑星から計算を開始した場合、軌道

移動後、惑星は短周期軌道で鎖状共鳴を形成するが<sup>5</sup>、円盤散逸後に軌道不安定を経験する割合は低く、観測されたスーパーアースの軌道周期比分布を自然に説明することはできていない。

### 2.5 議論

以上から、天体の軌道移動速度が遅いと、観測されたスーパーアースの軌道周期比分布を再現可能であることがわかった<sup>\*5</sup>。一方で、完全に惑星の軌道移動が無い場合には観測事実を説明できないことも分かっている。実際、円盤ガスと惑星の相互作用を無視して、短周期軌道に配置した原始惑星からのスーパーアース形成を調べた $N$ 体計算の結果によると、最終的に形成する隣り合う惑星ペアの軌道間隔や軌道周期比が観測結果と比べて大きすぎる<sup>15)</sup>。従って、スーパーアースの軌道分布を再現する為には、ゼロでは無いがかなり遅いタイプI軌道移動が必要ということになる。なお、2.4節では磁気的効果考えた円盤モデルに限って言及したが、別のメカニズムで惑星の軌道移動が遅くなった場合においても同様の結果が得られることが予想される。また2.3節では鎖状共鳴が円盤散逸後に惑星系が軌道不安定を経験しないことが問題となっていたが、今後、鎖状共鳴を不安定化する新たなメカニズムや条件が発見された場合には、長周期原始惑星起源でもスーパーアース系の特徴を再現することが可能になるかもしれない。これらは今後の研究の課題である。

## 3. スーパーアースの大気及び組成

ここまで、スーパーアースの軌道分布からスーパーアースの形成起源について見てきた。系外惑星を取り巻く状況として、系外惑星系の発見そして統計学の時代から一歩進み、次はいよいよ系外惑星本体の姿（大気や表層環境、内部組成）に迫る、すなわち惑星の特徴付けの段階になってきている。本節ではスーパーアースの大気及び組成に

ついて現状の理解を整理する。

### 3.1 スーパーアースの大気及び組成の観測的特徴

近年、ハッブル宇宙望遠鏡やスピッツァー宇宙望遠鏡、そして（大型の）地上望遠鏡を駆使して、太陽系近傍に存在するスーパーアースの大気特性や内部組成を探る試みが精力的になされている。地球から遠く離れた探査機も到達困難な系外惑星の大気観測では、惑星のトランジット（観測者から見て、惑星が恒星前面を横切る）現象が利用される。惑星が恒星前面を横切る時、恒星からの光は惑星自身の遮蔽により減光する。同時に、惑星が大気を保有する場合、一部の光は惑星大気を通過して観測者に届く。この透過光を様々な波長で測光観測すると、惑星大気中に存在する分子や原子の吸収・散乱特性に応じた減光率の波長依存性が見えてくる。すなわち、惑星の大気組成や温度構造、さらには雲・有機物もや（炭化水素ヘイズ）の有無を反映する。例えば、水蒸気大気のような大きな平均分子量を持つ大気組成の場合には、大気の厚み（圧力スケールハイト）が小さくなるために大気吸収されにくい。より正確には、レイリー散乱の特徴<sup>\*6</sup>（入射する光の波長に比べて粒径が十分小さい時、散乱断面積は光の波長の4乗に反比例）は弱まる。もし上空に雲や有機物もやが存在すると、粒径や光学特性にも依るが、入射光の一部は反射され、大気吸収は起きにくい。このように、トランジットを起こす惑星の大気分光観測を通して、遙か彼方のスーパーアースの大気特性を詳しく知ることができる。

視線速度法およびトランジット法の観測的性質上、発見されるスーパーアースは中心星近傍を周回するものが多い。中心星近傍（公転周期が10日以下）を周回する低質量惑星では、これまでに17例のみ大気の透過光スペクトル観測から上層大気の組成推定がなされている。その内訳は質量が15地球質量程度までの8例<sup>16-19)</sup> (GJ 1214b, GJ 3470b,

<sup>\*5</sup> 軌道移動速度を人工的に遅くした過去の $N$ 体計算でも同様の結果が得られていた<sup>14)</sup>。

<sup>\*6</sup> 可視光領域で顕著に見られる散乱現象で地球の日中の晴れた空が青い原因である。

表1 太陽系外の低質量惑星の大気組成 ( $M_{\oplus}$ および $R_{\oplus}$ は地球質量と地球半径を表す).

惑星	質量	半径	平衡温度	Rayleigh 散乱	大気組成
GJ 1132b	1.58-1.66 $M_{\oplus}$	1.16-1.43 $R_{\oplus}$	300-644 K	No?	高い平均分子量or大気なし?
Kepler-51b	2.1 $M_{\oplus}$	7.1 $R_{\oplus}$	543 K	?	高い平均分子量or H <sub>2</sub> /Heに富む (雲/もや)
Kepler-51d	7.6 $M_{\oplus}$	9.7 $R_{\oplus}$	381 K	?	高い平均分子量or H <sub>2</sub> /Heに富む (雲/もや)
GJ 1214b	6.26-6.55 $M_{\oplus}$	2.27-2.85 $R_{\oplus}$	547-604 K	No?	高い平均分子量or H <sub>2</sub> /Heに富む (雲/もや)
HD 97658b	7.55-9.5 $M_{\oplus}$	2.25-2.4 $R_{\oplus}$	757 K	?	高い平均分子量or H <sub>2</sub> /Heに富む (雲/もや)
55 Cancri e	7.81-8.63 $M_{\oplus}$	1.91-2.17 $R_{\oplus}$	1,958 K	?	高い平均分子量or H <sub>2</sub> /Heに富む
GJ 3470b	13.9-14.1 $M_{\oplus}$	3.88-4.83 $R_{\oplus}$	593-615 K	Mie 散乱?	H <sub>2</sub> /Heに富む, CH <sub>4</sub> 枯渇?
K2-18b	6.05-9.87 $M_{\oplus}$	2.28 $R_{\oplus}$	200-320 K	H <sub>2</sub> /He?	H <sub>2</sub> O吸収あり
HAT-P-26b	18.75-22 $M_{\oplus}$	6.33-7.1 $R_{\oplus}$	1,000 K	No?	高い平均分子量
GJ 436b	21.7-25.4 $M_{\oplus}$	3.96-4.22 $R_{\oplus}$	649-686 K	?	高い平均分子量or H <sub>2</sub> /Heに富む (雲/もや)
HAT-P-11b	24-29 $M_{\oplus}$	4.36-4.73 $R_{\oplus}$	838-878 K	?	H <sub>2</sub> /Heに富む, H <sub>2</sub> O吸収あり
TRAPPIST-1b	1.017 $M_{\oplus}$	1.121 $R_{\oplus}$	400.1 K	?	高い平均分子量or大気なし?
TRAPPIST-1c	1.156 $M_{\oplus}$	1.095 $R_{\oplus}$	341.9 K	?	高い平均分子量or大気なし?
TRAPPIST-1d	0.297 $M_{\oplus}$	0.784 $R_{\oplus}$	288.0 K	?	高い平均分子量or大気なし?
TRAPPIST-1e	0.772 $M_{\oplus}$	0.910 $R_{\oplus}$	251.3 K	?	高い平均分子量or大気なし?
TRAPPIST-1f	0.934 $M_{\oplus}$	1.046 $R_{\oplus}$	219.0 K	?	高い平均分子量or大気なし?
TRAPPIST-1g	1.148 $M_{\oplus}$	1.148 $R_{\oplus}$	198.8 K	?	高い平均分子量or大気なし?

HD 97658b, 55 Cancri e, GJ 1132b, Kepler-51b, 51d, K2-18d) とそれよりもやや質量の大きい (ホットネプチューンとも呼ばれる) 3例<sup>20-22)</sup> (HAT-P-11b, 26b, GJ 436b), そしてTRAPPIST-1周りの地球質量程度の6天体<sup>23-25)</sup> (TRAPPIST-1b, c, d, e, f, g) である (表1参照: NASA Exoplanet Archiveのデータを利用). HAT-P-11b, 26bを除けば, (可視から) 近赤外領域で観測された透過光スペクトルは総じて平坦で吸収特徴がほとんど見られない. こうした観測事実から, スーパーアースは水蒸気や二酸化炭素のような揮発性分子に富む大気, あるいは水素主体の超還元的かつ雲/もや (ヘイズ) に覆われた大気のいずれかを持つ可能性が高い\*7. ただし, 短周期スーパーアースの大気中に生成される雲は地球上の水蒸気の雲や金星で見られる硫酸の雲とは異なり, KCl (塩化カリウム) や ZnS (硫化亜鉛), Na<sub>2</sub>S (硫化ナトリウム), MnS (硫化マンガン) といった凝縮温度の高い金属凝縮物 (鉱物) の雲となる. また, もやに関しても, 恒星からの紫外線照射による光化学反応で生成される有機物もや (炭化水素: アセチレン C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, エチレ

ン C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, エタン C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> やシアン化水素 HCN など) である. 近年では, ホットジュピターの上層大気では, Na や K のアルカリ金属<sup>26)</sup>, TiO (酸化チタン)<sup>27)</sup>, He<sup>28, 29)</sup>, CO や H<sub>2</sub>O<sup>30)</sup> の検出が報告されており, その後, HAT-P-11b の大気でも He<sup>31)</sup> や H<sub>2</sub>O<sup>21)</sup>, そして HAT-P-26b の大気でも H<sub>2</sub>O<sup>22)</sup> の吸収が検出され始めている.

幾つかの短周期スーパーアースが実際に, 大気を保持していることは惑星の質量-半径関係, すなわち平均密度からも予想されている. 惑星の平均密度から, 太陽系の地球型惑星と同様に岩石や鉄主体の惑星以外に “氷” マントルを持つスーパーアースの存在も示唆されている. なかには, 内部組成をすべて H<sub>2</sub>O と仮定した水惑星よりも低密度なスーパーアース (スーパーパフとも呼ばれる: 例えば, Kepler-11<sup>32)</sup> や Kepler-51<sup>33)</sup> の惑星系, Kepler-79d<sup>34)</sup> も多数発見されており, こうしたスーパーアースは大気を保持している可能性が高い. 低密度なスーパーアースは天王星や海王星の縮小版として, ミニネプチューン (小型海王星型惑星) またはサブネプチューンや小型ガス惑

\*7 これらの惑星が分厚い大気を保持していない可能性も残されている.

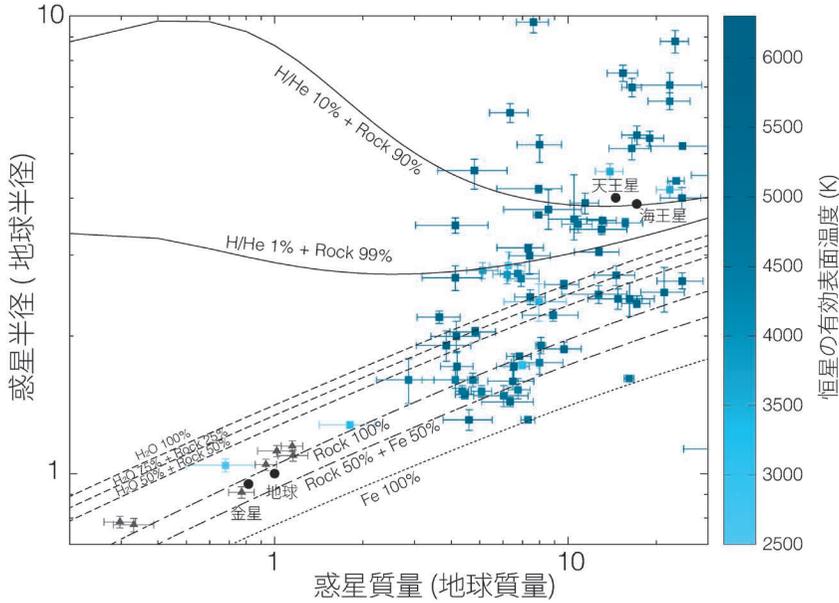


図7 短周期低質量惑星の質量-半径関係. ■は質量および半径が誤差30%以内で決定されている太陽系外惑星, ▲はTRAPPIST-1の惑星系, ●は太陽系の惑星を表している. 各線はそれぞれ惑星の内部組成を仮定した時の惑星の質量-半径の理論線<sup>35)</sup>(但し, H/He大気を持つ惑星の質量-半径関係は著者による計算結果). 色は主星の有効表面温度に対応している.

星とも呼称される. 低密度なスーパーアースの大部分は惑星質量の0.1-10%程度の大気を保持していることが示唆されている(図7を参照).

ケプラー宇宙望遠鏡で発見された膨大な系外惑星サンプルによると, およそ1.5倍から2倍の地球半径を持つ惑星の有意な欠乏が見られる<sup>36, 37)</sup>. ベイズ統計に基づく短周期惑星の内部組成の確率分布によると, こうした半径ギャップは岩石/鉄主体の惑星と大気を持つ惑星の半径境界に対応する<sup>38)</sup>. 半径境界の要因としては, 短周期惑星は中心星からの強烈なX線および極紫外線に晒されることによる大気散逸(主に流体力学的散逸)が有力視されている<sup>39)</sup>. 実際にGJ 436bでは, ハッブル宇宙望遠鏡によるライマンα線の観測から, 彗星の尾のように流失する水素大気の様子が報告されている<sup>40)</sup>.

以上から, スーパーアースの形成史を紐解く上では, 軌道要素や質量以外に大気組成および大気量も制約条件となる. 3.2節では, スーパーアース

の大気量に注目して, スーパーアースの起源について考察していく.

### 3.2 円盤ガス由来の一次大気(水素・ヘリウムに富む還元的な大気)

ここでは円盤ガス起源(水素・ヘリウム主体)の一次大気を考察する. 一部の短周期スーパーアースは水素・ヘリウムに富む大気を有している可能性がある(例えば, GJ 3470b). スーパーアースが獲得する原始惑星系円盤ガスの量はコア(中心核)質量に左右される. コア質量が臨界値に達すると, 周囲の円盤ガスを暴走的に降着し始め, 木星や土星のような分厚い大気に覆われたガス惑星になる. 仮に, 短周期スーパーアースが形成後, 大気流失を経験していないとすれば, スーパーアースは何らかのメカニズムによって暴走ガス捕獲を回避して, ガス惑星にならずに適度な大気量(=惑星質量の10%以下)を獲得したことになる.

円盤ガスの降着は, 惑星大気の冷却に伴う重力収縮によって引き起こされる. 従って, スーパー

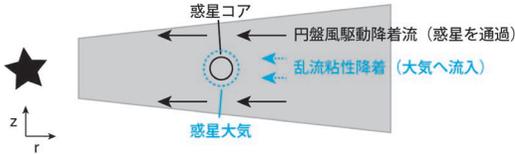


図8 円盤風駆動降着で進化する円盤中でのガス降着流と惑星への大気流入の模式図。

アースの獲得大気量は惑星質量以外にも、ガス円盤の環境（例えば、ガス温度やオパシティ）に強く依存する。円盤ガスおよび惑星大気中のオパシティ<sup>41)</sup>（主にダストのオパシティ）あるいは金属量が高い<sup>42)</sup>と、大気の冷却が非効率となる。また、高温環境下では円盤ガスの熱速度が大きく、惑星重力による束縛がされにくい。いずれの場合でも、スーパーアースの大気獲得量は減少する。ガス円盤自体の寿命が短い状況でも、円盤ガスを獲得する期間が短く、暴走ガス捕獲段階に突入前にガス円盤が散逸することで、最終的な大気量が少なくなる<sup>43)</sup>。

近年、スーパーアースに流入する円盤ガスの振る舞いも注目されている。円盤から惑星へ高緯度領域から流入するガスは大気の冷却時間よりも素早く低緯度領域から流出し、大気の獲得を遅延させる可能性がある<sup>44-47)</sup>。

また筆者らは円盤中のガス降着流に着目して、別の解決案も提示している<sup>48)</sup>。2.4節で述べた磁気的効果を考慮した円盤進化モデルでは、円盤表層での質量降着率が赤道面付近の降着率より大きいことが考えられる。円盤表層の高速のガス降着流（円盤風駆動降着）は惑星へのガス降着に寄与せず惑星軌道を通過し、赤道面付近の粘性降着流のみが惑星への大気流入を担う可能性がある（図8参照）。また赤道面付近のガスは粘性加熱によって、円盤表層よりも高温状態にあるために惑星の大気獲得量が減少する効果も期待されるかもしれない。ただし、この効果についてはガス円盤

からの惑星コアへの大気流入のダイナミクスを追った3次元流体計算で調べる必要がある。

以上で見たように、ガス円盤の環境および流入する円盤ガスの振る舞いによって、スーパーアースが獲得する円盤ガス起源の一次大気量は決まる。今後、近赤外線ドップラー観測および全天惑星探索用衛星TESSミッション（4節も参照）によって、M型星周りのスーパーアースの発見が多数期待される。それらの短周期スーパーアースの大気分光観測から水素・ヘリウム主体の還元的な大気を持つスーパーアースの存在頻度が明らかになれば、短周期スーパーアースおよびその大気の起源によりいっそう、迫れるようになるだろう。

### 3.3 二次大気および大気散逸の可能性

3.2節では、スーパーアースによる一次大気の獲得を述べたが、ここでは次に二次大気の生成と形成後の大気進化を考察する。灼熱環境下の短周期スーパーアースの表層は、巨大衝突直後の原始地球のようにマグマオーシャン状態にあると予想されている。短周期スーパーアースが形成段階で円盤ガス由来の水素・ヘリウム主体の還元的な一次大気を十分に獲得できなかった、あるいはその後の大気流失で消失していたとしても、蒸発した岩石由来の大気組成（SiO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, O, Mgなど）を持つ可能性はある<sup>49)</sup>。さらに、その後の火山活動や天体衝突による脱ガスによる揮発性物質の供給（例：H<sub>2</sub>OやCO<sub>2</sub>）も考えられる<sup>50)</sup>。実際、地質学的証拠から、過去の地球は金星や火星のような二酸化炭素に満ちた酸素欠乏の還元的環境にあったことが知られている。地球大気中の希ガス<sup>\*8)</sup>の存在度は太陽組成（円盤ガス組成）のおよそ100万分の1程度しかなく、炭素質コンドライト（とりわけCIコンドライト）と類似していることから現在の地球大気は二次大気起源とされている<sup>\*9)</sup>。もしスーパーアースが“氷”成分を豊富に含む惑

\*8 地球型惑星の大気に共通して見られるアルゴンは地殻中に含まれる放射性元素40 K起源である。

\*9 酸素同位体比の類似性から、地球の主な材料物質はエンスタタイト・コンドライト由来と考えられている。

星の場合には（特に雪線が中心星近傍に位置するようなM型星周りのスーパーアース）、“氷”マントル由来の物質が混合された大気組成になる可能性も考えられる。実際、これまでに大気観測に成功した短周期の低密度なスーパーアースの中で、大気の透過光スペクトルに顕著な吸収特性が見られないスーパーアース（例：GJ 1214b）は、こうした脱ガス起源の二次大気を保持しているのかもしれない。

一方で、中心星近傍に存在する短周期スーパーアースは、大気獲得と同時に大気の流失も経験する。大気流失には、中心星からのX線や極紫外線（XUV）照射で惑星の上層大気が加熱されることで駆動される熱的散逸（主に、流体力学的散逸）と中心星からの恒星風やコロナ質量放出に伴う高エネルギー粒子によるイオン・ピックアップ（スパッタリング）の非熱的散逸の2つがある。特に後者では、荷電粒子の侵入を遮蔽する効果をはたす惑星磁場の有無およびその強度が重要となる<sup>51)</sup>。中心星、とりわけ若い恒星（およそ10億年以下）近傍では、前者による惑星の大気流失が顕著となる。これらの議論は大気以外にも氷マントルの流失に対しても同様に当てはまる<sup>52)</sup>。事実、太陽系の地球型惑星でも太陽からのXUV照射で、過去に地球や金星、火星でも水の散逸（主に水素の散逸）が起きたことが水素同位体比（D/H比）から推測されている。また、近年、第3の大気散逸機構として、磁気流体波動による惑星大気の流失の可能性も指摘され始めている<sup>53,54)</sup>。いずれにおいても、多かれ少なかれ短周期惑星が大気散逸を経験することは間違いないだろう。

短周期惑星が中心星からの強烈なXUV照射で大規模な流体力学的散逸を経験した場合でも、ホットジュピターのような短周期ガス惑星が適度な大気量を持つスーパーアースになる可能性は低い<sup>55)</sup>。系外惑星の確率頻度分布によると、ホット

ジュピターの存在頻度は恒星の質量に依らず、数%以下に対して、短周期スーパーアースの存在頻度は低質量星ほど高く、およそ数10%程度と見積もられている<sup>1)</sup>。この事実からも、ホットジュピターが低密度なスーパーアースの前駆天体とは考えにくい。しかしながら、形成後、適度な大気量を持っていた短周期スーパーアース（典型的には0.1 au以内）がほぼすべての大気を失うような状況は起こり得る。さらに、潮汐による大気加熱<sup>56)</sup>や中心核の冷却に伴う大気加熱<sup>57)</sup>といった他の加熱源が惑星大気の膨張を促すことで大気散逸が加速される可能性も指摘されている。従って、大気獲得後のスーパーアースが最終的に保持する大気量は大気散逸の影響を反映するため、今後の研究課題として、中心星のXUV強度の時間進化およびXUV照射に伴う惑星上層大気の加熱率の情報が大気損失の詳細な定量的評価には欠かせないと言える。

#### 4. 今後の展望

本稿では系外惑星の大多数を占めるスーパーアースについて、軌道分布や大気及び組成の観測的特徴を概観し、更にそれらの起源を説明する理論モデルの現状を整理した。

過去10年の系外惑星観測によりスーパーアースの特徴の理解が急進したが、今後の観測の発展も大いに期待される。2018年に全天惑星探索用衛星TESSが打ち上げられ、太陽系近傍の恒星（主に低質量星）周りに存在する系外惑星候補が発見され始めている。同時に、地上望遠鏡にも近赤外線分光器が次々と導入されており<sup>\*10)</sup>、特にM型星周りでの惑星探査が今後、急速に進展するだろう。更に2019年に打ち上げ予定のCHEOPS計画、そして2020年代にはWFIRSTやハッブル宇宙望遠鏡の後継機ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡も控えている。これらの観測により今後10–15年以内

\*10 VLT (10 m)/CRIRES, Subaru (8.2 m)/IRD, Hobby-Eberly Telescope (10 m)/HPF, Calar Alto 3.5 m Telescope/CARMENES, Canada–France–Hawaii Telescope (3.6 m)/SPIRou, ESO 3.6 m Telescope/NIRPS.

で、中心星近傍から雪線以遠に及ぶスーパーアースの質量-軌道分布が明らかになっていく。また、現在は20例に満たないスーパーアースの大気に関する情報も多様性と普遍性を議論できる水準になっていこう。これによって、太陽系外のスーパーアースの形成史の解明とともに、太陽系になぜ短周期スーパーアースは存在しないのか？といった問いに対する答えの道筋が見えてくるだろう。近い将来、太陽系、太陽系外の混沌とした惑星系形成を包括的に理解できる時代が現実のものとなることを期待している。

## 謝 辞

今回、本稿の執筆機会をくださった滝脇知也氏及び原稿を注意深く読んでいただいた押野翔一氏に感謝いたします。また、本稿で紹介した研究に携わっていただいた共同研究者の方々にこの場を借りて、感謝いたします。本研究の一部は日本学術振興会からの助成を受けております。

## 参考文献

- 1) 萩原正博, 2018, 遊星人, 23, 235
- 2) Howard, A.W., et al., 2010, *Science*, 330, 653
- 3) Fressin, F., et al., 2013, *ApJ*, 766, 81
- 4) Ogihara, M., et al., 2015, *A&A*, 578, A36
- 5) Tanaka, H., et al., 2002, *ApJ*, 565, 1257
- 6) Terquem, C., & Papaloizou, J.C.B., 2007, *ApJ*, 654, 1110
- 7) Izidoro, A., et al., 2017, *MNRAS*, 470, 1750
- 8) Ogihara, M., et al., 2018, *A&A*, 615, A63
- 9) Bitsch, B., et al., 2015, *A&A*, 575, A28
- 10) Suzuki, T.K., et al., 2016, *A&A*, 596, A74
- 11) Matsumura, S., et al., 2017, *A&A*, 607, A67
- 12) McNeil, D.S., & Nelson, R.P., 2010, *MNRAS*, 401, 1691
- 13) Cossou, C., et al., 2014, *A&A*, 569, A56
- 14) Ogihara, M., & Ida, S., 2009, *ApJ*, 699, 824
- 15) Hansen, B.M.S., & Murray, N., 2013, *ApJ*, 775, 53
- 16) Kreidberg, L., et al., 2014, *Nature*, 505, 69
- 17) Fukui, A., et al., 2013, *ApJ*, 770, 95
- 18) Knutson, H.A., et al., 2014, *ApJ*, 794, 155
- 19) Southworth, J., et al., 2017, *AJ*, 153, 191
- 20) Knutson, H.A., et al., 2014, *Nature*, 505, 66
- 21) Fraine, J., et al., 2014, *Nature*, 513, 526
- 22) Wakeford, H.R., et al., 2017, *Science*, 356, 628
- 23) de Wit, J., et al., 2016, *Nature*, 537, 69
- 24) de Wit, J., et al., 2018, *Nature Astronomy*, 2, 214
- 25) Zhang, Z., et al., 2018, *AJ*, 156, 178
- 26) Sing, D.K., et al., 2015, *MNRAS*, 446, 2428
- 27) Sedaghati, E., et al., 2017, *Nature*, 549, 238
- 28) Nortmann, L., et al., 2018, *Science*, 362, 1388
- 29) Salz, M., et al., 2018, *A&A*, 620, A97
- 30) Snellen, I.A.G., et al., 2010, *Nature*, 465, 1049
- 31) Allart, R., et al., 2018, *Science*, 362, 1384
- 32) Lissauer, J.J., et al., 2011, *Nature*, 470, 53
- 33) Masuda, K., 2014, *ApJ*, 783, 53
- 34) Jontof-Hutter, D., et al., 2014, *ApJ*, 785, 15
- 35) Zeng, L., & Sasselov, D., 2013, *PASP*, 125, 925
- 36) Hirano, T., et al., 2018, *AJ*, 155, 127
- 37) Fulton, B.J., & Petigura, E.A., 2018, *AJ*, 156, 264
- 38) Owen, J.E., & Wu, Y., 2017, *ApJ*, 847, 29
- 39) Rogers, L.A., 2015, *ApJ*, 801, 41
- 40) Ehrenreich, D., et al., 2015, *Nature*, 522, 459
- 41) Lambrechts, M., & Lega, E., 2017, *A&A*, 606, A146
- 42) Lee, E.J., et al., 2014, *ApJ*, 7, 97, 95
- 43) Ikoma, M., & Hori, Y., 2012, *ApJ*, 753, 66
- 44) Ormel, C., et al., 2015, *MNRAS*, 447, 3512
- 45) Cimerman, N.P., et al., 2017, *MNRAS*, 471, 4662
- 46) Kurokawa, H., & Tanigawa, T., 2018, *MNRAS*, 479, 635
- 47) Kuwahara, A., et al., 2019, *A&A*, 623, 179
- 48) Ogihara, M., & Hori, Y., 2018, *ApJ*, 867, 127
- 49) Schaefer, L. & Fegley, B., 2009, *ApJ*, 703, L113
- 50) Elkins-Tanton, L.T., & Seager, S., 2008, *ApJ*, 685, 1237
- 51) Khodachenko, M.L., et al., 2007, *Planetary & Space Science*, 55, 631
- 52) Kurosaki, K., et al., 2014, *A&A*, 562, A80
- 53) Tanaka, Y. A. et al., 2014, *ApJ*, 792, 18
- 54) Tanaka, Y. A. et al., 2015, *ApJ*, 809, 125
- 55) Owen, J.E., & Wu, Y., 2013, *ApJ*, 775, 105
- 56) Ginzburg, S., & Sari, R., 2016, *ApJ*, 819, 116
- 57) Ginzburg, S., et al., 2018, *MNRAS*, 476, 759

## Formation of Super-Earths and Their Atmospheres

Masahiro OGIHARA<sup>1</sup> and Yasunori HORI<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>*Division of Science, National Astronomical Observatory of Japan,* <sup>2</sup>*Astrobiology Center,* <sup>3</sup>*Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan*

Abstract: Exoplanet surveys have discovered a large number of super-Earths, which provide useful constraints on the development of formation theory of super-Earths. In this article, we first show results of  $N$ -body simulations of super-Earth formation and compare them with the observed population of super-Earths. We then review our current understanding of super-Earths' atmospheres, and discuss their origin and subsequent evolution.