

# 短周期スーパーアース系の形成

荻原 正博<sup>1</sup>

2018年7月1日受領，査読を経て2018年7月20日受理。

(要旨) 系外惑星観測によって数多くの短周期スーパーアースが発見されており，特にケプラー宇宙望遠鏡を用いた観測成果から短周期スーパーアース系の様々な特徴が明らかになってきた。観測から得られる情報の中には，惑星形成時の様子を記録したものもある。一例として，隣り合う惑星の軌道周期比分布からは，惑星形成の最終段階の様子を議論することが可能である。このような情報が得られている現在，惑星形成過程を正確に追う惑星形成 $N$ 体計算は短周期スーパーアース系形成理論の構築に極めて有用である。本稿では，短周期スーパーアース形成 $N$ 体計算結果と観測結果の特徴をそれぞれ示し，短周期スーパーアース系形成理論の現状の理解を整理する。

## 1. はじめに

太陽系外惑星の一分類である「短周期スーパーアース」が初めて発見されたのは十数年前( $\mu$  Arae cは2004年に，Gliese 876 dは2005年にそれぞれ発見)であった。その後の観測手法の高度化・多様化により，短周期スーパーアースの発見数は急激に増加し，2018年6月現在で存在が確認された系外惑星3,730個のうち，実に1,000個以上が短周期スーパーアースであり，大部分を占める(図1参照)。2008年6月にナント(フランス)で初めて「スーパーアース」をテーマに据えた国際会議<sup>1</sup>が開催され，これは大いに盛り上がったのだが，当時のスーパーアースの観測例はせいぜい数十個であった。丁度10年経った今の観測数を考えると，改めて系外惑星観測の急速な進展に驚かされる<sup>2</sup>。

本稿では，現在の惑星系形成理論において最もホットなテーマの一つといえる短周期スーパーアースに注目し，特に重力 $N$ 体計算を用いた短周期スーパーアース系形成の理論的研究の現状を紹介する。筆者の最近の研究成果が中心となるが，当該分野のレビューともなるように，周辺の重要な論文は極力取り上げること

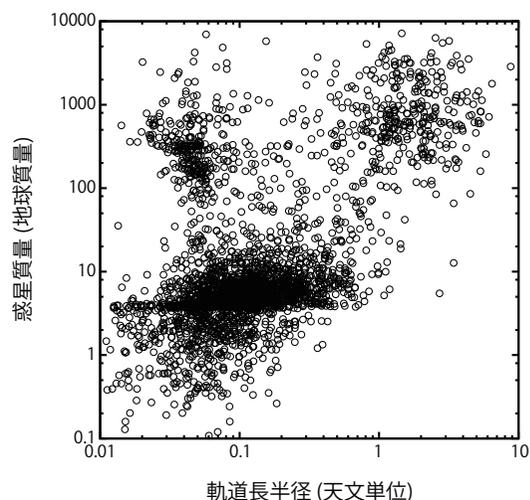


図1: 系外惑星の質量と軌道長半径の分布。大きく分けて，短周期スーパーアース，短周期巨大惑星(ホットジュピター)，長周期巨大惑星の3分類が可能であることがわかるが，短周期スーパーアースが大部分を占める。データはNASA Exoplanet Archiveによる。

1. 国立天文台 理論研究部  
masahiro.ogihara@nao.ac.jp

1. M. Mayor氏の基調講演で新たに数個のスーパーアースの発見が発表され，新たな時代の始まりにわくわくしたことを覚えている。  
2. 2018年3月に国立天文台にてスーパーアースをテーマにした国際会議を開催したが，そこでもこの10年の急速な発展を実感することができた。

とする。また、数式を使用せずに通読のしやすさに注意したので、当該分野の専門家以外の方にも読んで頂けると幸いである。

本稿の構成は以下である。まず、2節で主にケプラー宇宙望遠鏡を用いた観測で明らかになった短周期スーパーアースの特徴を概説する。3節では、短周期スーパーアース系形成モデルとそれを検証する手法について述べる。4節及び5節では実際に $N$ 体計算の結果を紹介し、6節では $N$ 体計算の結果と観測結果の特徴の比較を整理し、形成モデルを議論する。7節では今後の課題を述べ、8節で本稿をまとめる。

## 2. 観測により明かされた特徴

本節では短周期スーパーアースのいくつかの観測的特徴を挙げ、更にそれによる形成理論への示唆も述べる。

### 2.1 検出頻度

観測例の増加により、従来より高精度で惑星の検出頻度が見積もり可能となってきている。検出頻度とは、観測対象の恒星のうち特定の惑星を持つ恒星の割合を表す<sup>3</sup>。視線速度法やトランジット法では、長周期の惑星や低質量の惑星の検出効率は小さくなるが、この影響を考慮して検出頻度は求められる。太陽型星周りの短周期スーパーアースの検出頻度は、解析の手法や短周期スーパーアースの定義<sup>4</sup>にも依るが、40-50%程度であると見積もられている[1]。これは短周期の巨大惑星(ホットジュピター)の検出頻度(およそ1%)と比較すると、非常に高い。従って、短周期スーパーアースの形成理論としては、何らかの偶発的な現象を必要とする理論モデルは不適當であろう。また、太陽系に存在しない短周期スーパーアースの検出頻度が高いことは、太陽系は他の惑星系と比較して「標準」ではないということを示唆しているという意見もある[2]。太陽系と短周期スーパーアース系の違いの起源をいかに説明するかは重要な問題であるが、本稿では扱わない<sup>5</sup>。

### 2.2 検出頻度の軌道周期依存性

特定の軌道に存在する惑星の検出頻度(即ち検出頻度の軌道位置依存性)も求められており、ここからい

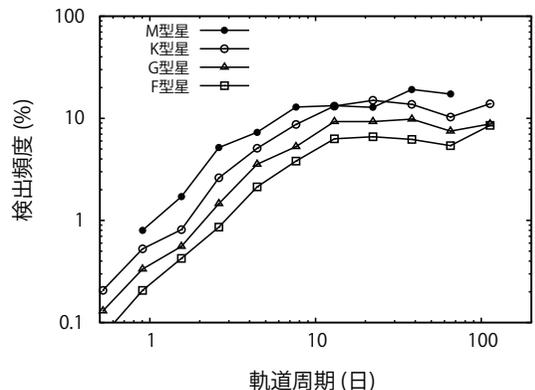


図2: 短周期スーパーアースの検出頻度の軌道周期依存性及び中心星タイプ依存性。ここでは半径が1-4地球半径のケプラー候補惑星(ケプラー望遠鏡により観測され、惑星候補とされた天体)を考えている。データはMulders et al. (2015)による。

くつの特徴が見いだせる(図2)。まず、検出頻度は軌道周期10日程度(軌道長半径では0.1 au程度)以遠ではほぼ一定である。また、軌道周期10日より内側では検出頻度は単調減少している。これらの特徴から惑星形成時及びその後の軌道進化の示唆が得られるが、これについては6節で議論する。

### 2.3 検出頻度の中心星質量依存性

更に短周期スーパーアースの検出頻度は中心星質量に依存することがわかっており(図2)、低温度の晩期型星(低質量星)ほどスーパーアースの検出頻度が高い。この特徴の起源については、ケプラー望遠鏡が観測した早期型星は系統的に晩期型星より低金属量である可能性があるという観測バイアス起源であるという指摘もあるが、明確な説明はなされていない。観測バイアスではなく、惑星形成プロセスに理由を求め、この起源を説明する方が自然かもしれない。尚、巨大惑星の検出頻度は中心星が軽くなるにつれて減少することも知られており、スーパーアースの巨大惑星に対する相対的な検出頻度は、低質量星ほど高くなる。

3. 一部では、対象の恒星1つあたりが持つ惑星個数と定義される場合もある。  
 4. 質量が1-20地球質量程度、公転周期が200日程度以下の惑星として検出頻度が求められることが多い。  
 5. 筆者らは、太陽系と短周期スーパーアース系の違いを円盤進化の違いで説明し得ることを提唱した。詳しくは論文を参照されたい[3, 4]。

## 2.4 惑星系の多重性及びKepler dichotomy

複数の惑星を持つ短周期スーパーアース系が多く発見されており、惑星系の多重性も議論されてきている。実際に短周期スーパーアース系に存在する惑星の平均個数を求めるにはモデルを介する必要があるが、平均惑星個数は3個程度という見積り[7]やより多数の惑星(7個以上)が存在するという見積り[2]もある。

惑星系の多重性に関連する特徴として、「Kepler dichotomy<sup>6</sup>」が最近注目されている[8]。これは一つの惑星のみがケプラー望遠鏡で観測された「単一惑星系」と複数の惑星が観測された「複数惑星系」は、それぞれ軌道の特徴が異なる別集団である可能性があるというものである<sup>7</sup>。特に複数惑星系は、惑星同士の相互軌道傾斜角が小さいことが知られている。この特徴については、観測及び解析手法によってバイアスを受けた特徴であるという指摘もあるが、この起源を惑星形成時の物理過程(例えば外側軌道にある巨大惑星の影響)によって説明する試みも行われている。本稿の5節においても、一つの説明を与える。

## 2.5 惑星サイズの二峰性分布

ケプラー望遠鏡で発見された惑星の性質をより精密に議論するプロジェクトであるCalifornia-Kepler Surveyによって、検出頻度は惑星半径について滑らかな分布ではなく、惑星半径が約1.3地球半径及び約2.5地球半径をピークにした二峰性分布をしていることも最近指摘されている[5]。本稿ではこの特徴の起源については扱わないが、形成直後から数億年以内に、中心星からの強いX線と紫外線照射による加熱によって水素・ヘリウムエンベロープが蒸発し、半径が約1.5-2地球半径の惑星が欠乏することによって説明できそうである<sup>8</sup>[6]。また別のモデルとして、コアの冷却による水素・ヘリウムエンベロープの加熱が原因とする案もある。

## 2.6 軌道周期比分布

最後に、本稿で検討する最も重要な特徴として、隣り合う惑星の軌道周期比を挙げる。軌道周期比もどの

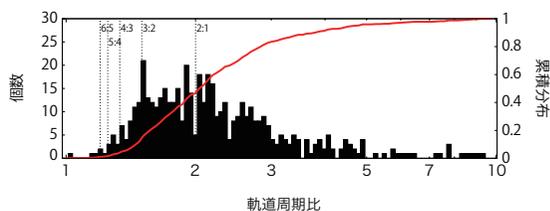


図3: 隣り合う短周期スーパーアースの軌道周期比。破線は一次の平均運動共鳴の位置を表している。データはNASA Exoplanet Archiveによる。ここで扱う短周期スーパーアースの定義は、質量が100地球質量以下(もしくは半径が10地球半径以下)、軌道長半径が1 au以下(もしくは軌道周期が200日以下)としている。この定義には1地球質量以下の惑星やサブネプチューンと呼ばれる惑星も含まれている。尚、ケプラー候補惑星のみを解析しても同様の累積分布が得られる。

Credit : Ogihara et al., 2015, *Astron. & Astrophys.* 578, A36, reproduced with permission © ESO.

様な惑星形成過程を経たかの情報を含んでおり、惑星形成 $N$ 体計算結果と比較する際には非常に重要になる。過去には、ケプラー望遠鏡で発見された惑星は平均運動共鳴からわずかに外れた位置や軌道周期比が約2.2の位置に小さなピークを持つという特徴が注目され、これの起源が議論された。図3はこれまでに存在が確認された短周期スーパーアース系(短周期軌道にはスーパーアースしか存在しない系)において、隣り合う惑星の軌道周期比を表す。一部の短周期スーパーアースは3:2などの1次の平均運動共鳴状態にあり、軌道間隔がある程度近い。しかし、多くのペアは平均運動共鳴関係を持っていない。軌道周期比の累積分布からも、平均運動共鳴の位置に顕著な特徴が見られないことがわかる。

## 3. 形成モデルと計算手法

短周期スーパーアースの最初の観測報告後から今に至るまで、いくつかの形成モデルが検討されてきた。例えば、惑星の形成位置に注目した「その場形成モデル」「軌道移動モデル」「軌道移動後形成モデル」や巨大惑星からの影響を調べた「巨大惑星シェパードモデル」などが挙げられる。これらのモデルは系統的に分類されているわけではなく、同じ名称のモデルが、別々の論文で異なる定義で使用されていることもあり、

6. ケプラー二分性と訳すのが適当だろうか。

7. 仮に観測対象の惑星系が軌道傾斜角等が類似した単一の集団であると考えて模擬観測を行うと、単一惑星系と複数惑星系の検出割合が実際の検出割合と異なる為である。

8. 半径が約1地球半径の惑星コアに惑星質量の数%の水素・ヘリウムエンベロープをまとった惑星(半径は約2地球半径となる)からの大気蒸発が最も効率的であり、このサイズの惑星が選択的に大気蒸発を経験することが理由である。

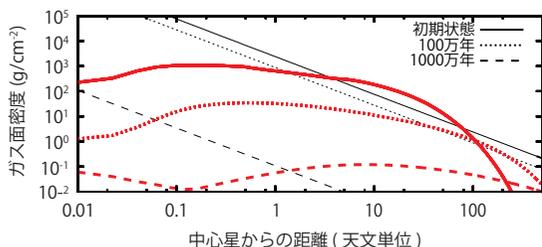


図4: 円盤ガス面密度の進化。細線は太陽系最小質量円盤を仮定したべき分布モデル。太線は Suzuki et al. (2016) で計算された円盤風を考慮した円盤モデル。  
Credit : Ogihara et al., 2018, *Astron. & Astrophys.* 615, A63, reproduced with permission © ESO.

注意が必要である。

本稿では、軌道周期比を比較するという観点で有効な方法で形成モデルを分類する。軌道周期比を含めた惑星の最終的な軌道を決定する際に重要となる効果は、円盤中の軌道移動(タイプI移動)と円盤散逸後の軌道再配置である。従って、これらの効果が有効な惑星形成の後期段階に着目する。具体的には、火星サイズの原始惑星が形成した時点で注目し、その原始惑星が短周期領域(中心星からおよそ1 au以内)に形成した場合と長周期領域に形成した場合の二パターンに分類する。前者は軌道位置が大きく変化せずに惑星が形成するので「その場形成モデル」、後者は惑星の軌道移動が必要となるので「軌道移動モデル」と呼ばれる。注意すべき点は、前述の通り「その場形成モデル」や「軌道移動モデル」は本稿での定義とは異なる定義で使用されている論文が存在することである。本稿における分類は、それぞれ「短周期原始惑星起源モデル」「長周期原始惑星起源モデル」と言い換えた方がわかりやすいかもしれない。

これらの形成モデルのどちらを採用すると、惑星形成計算の結果として観測結果と整合的な惑星系が得られるのだろうか。この検証には軌道決定に重要な素過程を正確に考慮することが可能である惑星形成 $N$ 体計算が有効である。この惑星形成 $N$ 体計算は極めて高い計算コスト(1ランあたり3ヶ月から半年程度)を要するが、これを辛抱強く可能な限り多数のランを実行して惑星の分布を生成することで、他の惑星形成計算(例:種族合成モデル生成計算)よりもはるかに信頼性のある議論をすることが可能となる。種族合成モデル生成計算の改良については、7.1節で後述する。

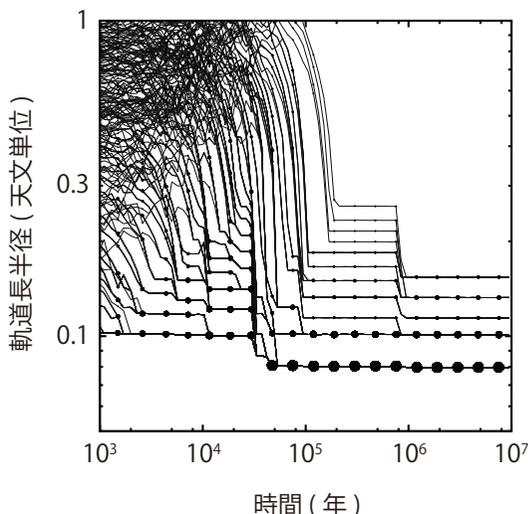


図5: べき分布円盤モデルを考慮した計算での惑星の軌道長半径の時間進化。丸印の大きさは惑星半径に比例する。軌道移動速度が速く、円盤内縁(0.1 auと仮定)付近でコンパクトな軌道配置をした系が形成する。  
Credit : Ogihara et al., 2015, *Astron. & Astrophys.* 578, A36, reproduced with permission © ESO.

次節からは、前節で挙げた観測的特徴を再現することを目的とした惑星形成 $N$ 体計算の結果を紹介する。再現を目指す観測的特徴は主に軌道周期比分布であるが、他の特徴とも矛盾が生じないことに注意する。

#### 4. その場形成モデル: 短周期原始惑星起源

その場形成モデルに則り $N$ 体計算を実行した研究結果を紹介する。まず検討されたのは原始惑星系円盤ガスの効果を考慮しない場合である[9]。この研究では寡占成長の結果形成した原始惑星を数十個程度(総質量では20-100地球質量)、中心星から0.05-1 auの間に分布させた状態から $N$ 体計算を開始した。合体・成長した後のスーパーアースは、基本的には平均運動共鳴からは外れた軌道で形成する。平均運動共鳴に捕獲される為にはある程度の軌道移動が必要であるが、この計算では円盤ガスによる軌道移動の効果が考慮されていないので、ある意味当然の結果ではある。また、軌道間隔が近い系があまり作られない傾向があることも示された。

上記の計算結果は、平均運動共鳴から外れた系が形成するという点では観測と整合的ではあるが、軌道間

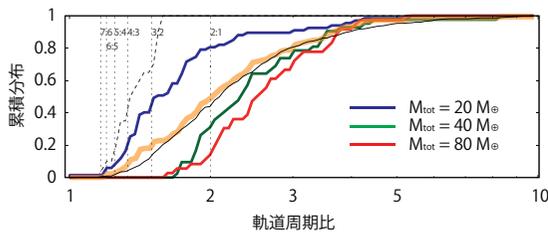


図6: 軌道周期比の累積分布の比較。細実線は図3と同じ観測された分布である。細破線はべき分布円盤を用いた10ランの計算結果(Ogihara et al. 2015)。太実線は円盤風で進化する円盤分布を用いた計算結果(Ogihara et al. 2018b)であり、初期の固体総質量を変えて実行した10ランの結果をそれぞれ示している。太破線は円盤風を考慮した場合で、初期の固体総質量を変えた3つの計算セットの結果を全て合わせた分布を表す。

Credit : Ogihara et al., 2018, *Astron. & Astrophys.* 615, A63, reproduced with permission © ESO.

隔が狭い系は形成しないという問題もある。従って、次に円盤ガスの存在下での惑星形成計算が行われた。これまでの多くの惑星形成計算では、円盤ガスの構造と進化として図4の細線で示したような単一のべきで表されるべき分布円盤モデルが使用されてきた。これは太陽系最小質量円盤をガス面密度の初期条件とし、数百万年のタイムスケールで指数関数的に減少させるモデルである。この円盤に、初期条件として原始惑星(planetary embryos)及び微惑星を配置し、それらの合体・成長と軌道進化を追った筆者らの $N$ 体計算の結果が図5である[10]。原始惑星の成長時間は非常に短く、いくつかの惑星はおおよそ数千年程度で地球質量を越えるまで成長している。これは、惑星の成長時間は固体の面密度に反比例して短くなるが、観測されている質量の短周期スーパーアースを形成する為に、初期に固体面密度が大きい状態を考えている為である。成長時間が円盤寿命と比較して非常に短いことから、初期に全ての固体材料物質が短周期領域に存在すると考えるその場形成モデルでは、惑星は円盤ガス散逸前に十分に成長したと考えるべきであろう。

この計算では円盤ガスの効果によって、惑星の軌道が変化する効果(例: タイプI移動)が最新のモデルを使用して組み込まれているが、地球質量程度まで成長した惑星は非常に速い軌道移動を経験することもわかる。移動を終えた惑星は、円盤の内縁付近( $\sim 0.1$  au)に非常にコンパクトな軌道配置(円盤内縁付近のパイルアップと呼ばれる)をしており、複数の惑星が

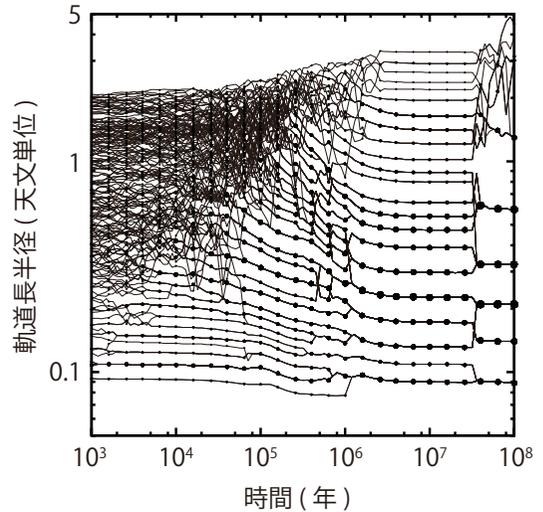


図7: 円盤風で進化する円盤中での惑星の軌道長半径の時間進化。タイプI軌道移動が強く抑制されている。円盤散逸後に軌道不安定が生じ、最終的には平均運動共鳴から外れた状態で形成する。

Credit : Ogihara et al., 2018, *Astron. & Astrophys.* 615, A63, reproduced with permission © ESO.

連なって平均運動共鳴に捕獲された状態(鎖状共鳴と呼ばれる)にある。また、この軌道配置は数百万年以降の円盤散逸後も長時間(1億年以上)安定である。図6では、初期の軌道位置を変えて実行した10ランの計算結果の軌道周期比分布を観測結果と比較しているが、計算結果では多くの惑星は平均運動共鳴にあり、観測された短周期スーパーアースの軌道周期比分布とは全く合致しないことがわかる。つまり、円盤ガスの影響を考慮した結果、惑星系は内縁付近にパイルアップを形成し、またそれらは共鳴に入っていることから、観測結果を説明できない。

これに対し、最近の筆者らの研究によって、円盤進化モデルを改良することで観測結果が再現可能であることが示されている。上記の計算結果で軌道周期比分布が観測と一致しない最大の原因は、惑星の軌道移動が速すぎて、円盤内縁付近にパイルアップを形成したことにある。従って、何らかの方法で軌道移動を遅くしてパイルアップの形成を回避することができればこの問題を解決する可能性がある。ここで円盤進化に重要な影響を与え得るとして近年注目されている「磁気駆動円盤風」を考える。2009年に鈴木建氏(東京大学)の3次元磁気流体計算によって、原始惑星系円盤からの乱流駆動円盤風による質量流出(損失)が発見された

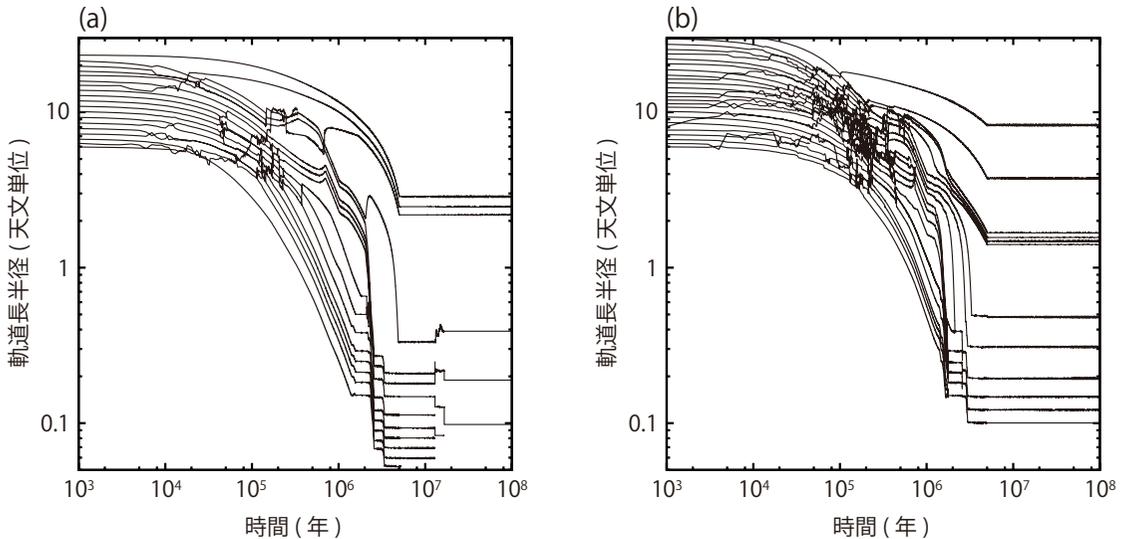


図8: 温度構造・進化を考慮した円盤中での惑星の軌道長半径の時間進化。(a)と(b)では初期の原始惑星の軌道配置が異なる。(a)では円盤散逸後に軌道不安定を起こしたが、(b)では鎖状共鳴が壊されなかった。From Izidoro et al. (2017, Figures 4 and 5), *Breaking the chains: hot super-Earth systems from migration and disruption of compact resonant chains*, MNRAS, 740.

[11]. それ以降の研究の発展により、現在では磁気遠心力風による質量降着<sup>9</sup>(円盤風駆動降着)も併せて考えた円盤進化が提示されている[13]. 図4に、乱流粘性によって進化する円盤の面密度進化を表す拡散方程式に、磁気駆動円盤風による質量損失と質量降着を導入して数値的に解いた円盤進化の例を太線で示す。尚、理想MHD計算を元にしたモデルであるが、非理想MHD効果がパラメータの値によって間接的に考慮されている。図から、中心星に近い短周期領域では円盤風の効果が強く現れ、面密度の減少が早く、また面密度の傾きが外側領域とは異なることがわかる。

この円盤風で進化する円盤中で、初期に短周期軌道に配置した原始惑星の合体・成長と軌道進化を $N$ 体計算で追った結果の例を図7に示している[4]. べき分布円盤を仮定した図5と比較すると明らかなように、タイプI移動による軌道移動が強く抑制されており、従来の計算結果で見られていた円盤内縁付近のパイルアップも形成されていない。軌道進化を少し詳しく見てみると、惑星は遅い軌道移動中に隣りの惑星との平均運動共鳴に捕獲され、鎖状共鳴関係を形成している。ところが、円盤散逸後(数百万年以降)に軌道不安定が

生じ、離心率が跳ね上げられることで、惑星同士の軌道交差が引き起こされる。これは惑星同士の衝突へと繋がり、軌道共鳴関係は失われる。

同様の計算を原始惑星の初期位置を変えて10ランを行い、最終的に形成した惑星系の軌道周期比をみると(図6)、惑星の多くは平均運動共鳴状態に無いことが確認できる。これは観測された短周期スーパーアース系の特徴と整合的である。更に筆者らの研究では、初期の総固体質量を変えた計算セットでも計算を実行し、これらの結果を合わせることで、観測された軌道周期比分布を良く再現することも示されている(図6の太淡線)。尚、この $N$ 体計算の結果では軌道周期比分布に限らず、2節で概観したその他の特徴とも矛盾していない。例えば検出頻度の軌道長半径依存性については、最も内側の軌道の惑星が円盤内縁付近(0.1 au)に形成し、それより外側では1 au程度までlogで等間隔に分布しており、検出頻度の特徴と一致している(図7参照)。

## 5. 軌道移動モデル：長周期原始惑星起源

次に軌道移動モデルを採用した場合の短周期スーパーアース系形成を考える。前節では、惑星形成理論で

9. これはブラックホール等への降着円盤の研究で議論されてきた現象である [12].

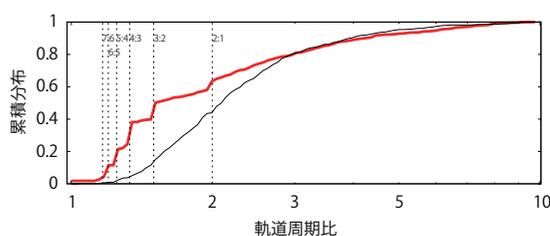


図9：軌道周期比の累積分布の比較。太線は円盤温度構造を考えた計算 (Izidoro et al. 2017) 全120ランのまとめ。

よく使われている単一のべきで表される円盤モデルではタイプI移動速度が速すぎることが問題であることをみた。軌道移動モデルにおいては、そもそも短周期惑星を作る為に軌道移動が必要ではある。しかし、従来のべき分布円盤ではやはり移動が速すぎることが問題であるとN体計算で示されている(この結果は本稿では省略)[14]。

従って、軌道移動モデルにおいてもタイプI移動を変える必要がある。ここ数年、主に欧州の研究者によって研究されているのが、円盤の詳細な温度構造の影響である。中心星放射による加熱、粘性加熱、及び放射冷却を考慮した多次元流体計算によって計算された円盤の温度分布は、中心星から外側領域までなめらかな関数で表されるのではなく、ところどころに窪み(dip)や出っ張り(bump)が形成する[15]。これらは主に水やシリケートの凝縮位置に対応するが、この付近ではタイプI移動速度がゼロになり得る。

この円盤温度進化を導入してN体計算を行った計算結果の例が図8である[16]。初期には原始惑星を20個程度、6 au以遠に配置している。計算結果では、円盤温度が変化する位置で軌道移動がせき止められることで、惑星が常に速い軌道移動を経験することはない。実際に、惑星が短周期軌道まで移動するには百万年程度かかっている。円盤内縁まで移動した後は、複数の惑星が円盤内縁の外側に平均運動共鳴に捕獲された鎖状共鳴状態と並ぶ。図8(a)では、この鎖状共鳴状態の惑星が円盤ガスの散逸後に軌道不安定を経験し、最終的には平均運動共鳴から外れている。

一方で、計算によっては図8(b)の様に円盤散逸後も軌道不安定が生じず、共鳴関係が残る場合もある。この研究では全ランの40-50%では不安定が生じなかった。図9では全120ランの計算結果の軌道周期比分

布を観測と比較しているが、全ランの結果を合わせると平均運動共鳴にある系が多すぎることがわかる。観測と合うような分布を得る為には、90-95%の系で円盤散逸後の軌道不安定が生じることが必要であると見積もられた。ところが、実際のこの計算結果では50-60%程度の系でしか軌道不安定が生じておらず、観測された軌道周期比分布を直接説明することはできていない。

ところで、軌道不安定を経験した系としていない系を9:1で混合した場合には、軌道周期比分布と同時にKepler dichotomy(2節参照)も説明できることも指摘された。軌道不安定を経験した系は、そうでない系より最終的な軌道傾斜角が大きいが、これを模擬観測すると「単一惑星系」として観測される可能性が高い。一方で、軌道不安定を経験しておらず軌道傾斜角が小さい系を観測した場合には「複数惑星系」として観測される。これによって、現在観測されている単一系と複数系の検出割合も説明されるという。

更に筆者らは、その場形成モデルで実行した計算と同様に、磁気駆動円盤風で進化する円盤(図4)を用いて軌道移動モデルN体計算も行った。図示は省略するが4節の計算結果で見たのと同様に、外側領域からの軌道移動速度も遅くなり、結果として短周期軌道(1 au以下)までの原始惑星の移動には百万年程度かかる。この計算の結果、大多数のランで円盤散逸後の軌道不安定が生じた場合には、観測された軌道周期比分布と整合的な分布になるという結論を得た。これは、上記の温度構造を変えた計算の結論と同様である。但し、円盤風で進化する円盤モデルを使用したN体計算でも、円盤散逸後の軌道不安定は生じにくいということが示唆されている。

## 6. 議論

これまでにその場形成(短周期原始惑星起源)モデル及び軌道移動(長周期原始惑星起源)モデルそれぞれについて、N体計算の結果とその特徴を概観してきた。本節では、これらの結果が2節で挙げたいくつかの観測結果と整合的であるかを整理するとともに、更なる議論を加える。

## 6.1 軌道周期比分布

これまでみてきたように、観測された短周期スーパーアース系において隣り合う惑星ペアの殆どは平均運動共鳴状態にはない。円盤ガス中での軌道移動を考えた $N$ 体計算の結果では、何れのモデルであっても軌道移動後に複数の惑星が平均運動共鳴状態(鎖状共鳴)に捕獲されることが分かった。従って観測結果を説明する為には、円盤散逸後の軌道不安定によって殆どの共鳴関係が壊される必要がある。その場形成(短周期原始惑星起源)モデルでは、円盤風の影響下で進化する円盤進化モデルを採用した場合には、ほぼ全てのランで円盤散逸後の軌道不安定が生じることから、観測された軌道周期比分布を再現できる。一方で、軌道移動(長周期原始惑星起源)モデルでは、円盤温度構造進化や円盤風を考慮した場合の計算で、最大50%程度のランでしか軌道不安定が生じない。従って軌道移動モデルで観測結果を説明する為には、より多くのランで軌道不安定が生じる必要がある。

ところで、鎖状共鳴にある惑星系が円盤散逸後に軌道不安定を経験するか否かの違いは何が決めるのだろうか。これは軌道不安定化時間で理解できる。軌道不安定化時間とは軌道が不安定になるまでのタイムスケール(惑星が3体以上だとこの時間は有限の値をとる)を表し、惑星同士の軌道間隔が狭いほど、また系内の惑星の個数が多いほど、短くなる(つまり軌道不安定になりやすい)ことが知られている。図7のその場形成モデルの計算では、軌道が不安定になる前には10個以上の惑星が存在しているのに対し、図5では百万年以降で惑星個数は5である。図5のべき分布モデルでは個数が少なく軌道不安定化時間が1億年以上と長い為、円盤散逸後も軌道が安定で平均運動共鳴関係が壊されなかったと解釈できる。尚、速い軌道移動を経験した場合(図5)に惑星個数が少なくなっているが、これは惑星移動が速いことで多くの惑星を平均運動共鳴に捕獲することが困難になるからである。軌道移動モデルの計算(図8)でも同様に、図8(b)で軌道不安定が生じない主原因は共鳴に捕獲された系の惑星個数が少ないからである(短周期軌道の惑星個数は6)。

## 6.2 検出頻度の軌道周期依存性

検出頻度の軌道周期依存性については、2節でみた

ように、軌道周期が10日(軌道長半径では0.1 au)以下では検出頻度が減少し、それ以上では一定である。べき分布円盤モデルを採用した $N$ 体計算の結果、軌道移動が速い場合には惑星は円盤内縁付近でパイルアップを形成し、観測と不整合であることが判明した<sup>10</sup>。一方で、軌道移動がある程度遅くなった場合、最も内側の軌道の惑星は円盤内縁付近(およそ0.1 au)で移動を停止し、その他の惑星はそれから外側の軌道にlogで等間隔に並ぶという結果が得られた(例えば図7や図8)。このような観測と整合的な分布は、軌道移動が遅くなった場合には何れのモデルでも得られており(その場形成モデルで円盤風を導入した計算、軌道移動モデルで円盤温度構造を考えた計算及び円盤風を考慮した計算)、この観点からはどちらかのモデルがより観測に合うとは決められない。

この様に軌道長半径0.1 au程度の検出頻度の傾きが変わる位置(cutoffやbreakなどと呼ばれる)は、円盤内縁の位置として説明できる。このcutoffの位置は短周期スーパーアース系で最も内側軌道の惑星の位置を反映しているが、この位置は他のメカニズムでも説明される可能性がある。例えば、ダストの昇華位置や惑星の潮汐による軌道移動が重要となる位置などが挙げられる。但し、別の研究によると、最も内側軌道の惑星の位置は原始惑星系円盤の内縁で決まるという説がやはり有望なようである。詳しい説明は省略するが、異なるメカニズム(例:ダストの昇華、惑星の潮汐)で決定されるcutoffの位置は、それぞれ異なる中心星質量依存性を持つ。また、観測の結果として得られたcutoffの位置も中心星質量に依存することが確認されている。これらの中心星質量依存性を比較すると、円盤内縁の位置の依存性が観測結果を最もうまく説明できるようである[17]。

## 6.3 惑星系の多重性及びKepler dichotomy

ケプラー望遠鏡で観測された惑星には二分性がある。即ち、スーパーアース系は軌道の特徴によって2つの集団(単一惑星系と複数惑星系)に分けられる可能性がある。これは5節で述べたように、円盤散逸後に軌道不安定を経験して軌道傾斜角がある程度大きい系(単一惑星系として観測される)と、軌道不安定を経験せ

10. 同様の円盤内縁付近のパイルアップは過去の種族合成計算の結果でも見られている。

ず軌道傾斜角が小さい系(複数惑星系として観測される)の2つの集団によって説明することが可能である。また、9割以上の系で軌道不安定が生じた場合に、観測された「単一惑星系」と「複数惑星系」の検出割合も説明できるようである。これらは軌道移動モデルの計算結果から指摘されたものだが、その場形成モデルでも同様のことが言える。単一系と複数系の検出割合の比まで説明するには、殆どの系で軌道不安定が生じる必要があり、これは6.1節の検出頻度分布と同様に、その場形成モデルで円盤風を考慮した計算が最も整合的である。

## 6.4 議論のまとめ

以上から、タイプI移動が遅くなった場合のその場形成(短周期原始惑星起源)モデルは、短周期スーパーアース系の起源としてかなり有力であると言える。ポイントは軌道移動が遅くなることであるようだが、本稿で示した計算では円盤風を考慮した円盤進化モデルを採用することで軌道移動が遅くなった。おそらく円盤風モデルに限らず、別のメカニズムでも軌道移動が遅くなれば、それも有力なモデルになり得るだろう。

軌道移動(長周期原始惑星起源)モデルについても、短周期軌道まで百万年程度の時間をかけて移動した後、軌道不安定によって平均運動共鳴関係が壊されれば、観測と整合的であるという流れはその場形成モデルと同様である。但し、ほぼ全てのランにおいて軌道不安定が生じるような計算を実現することはできていないという問題は残された。今後の課題として、軌道移動モデルにおいて計算条件を系統的に変えた計算を行い、観測結果の再現に成功する条件を見つける研究が必要かもしれない。

## 7. 今後の課題

### 7.1 素過程の研究及び種族合成計算の改良

最後に、今後の短周期スーパーアース系形成計算の発展についていくつかコメントしておく。

惑星系形成理論において最も重大な問題の一つが、タイプI移動問題であった。タイプI移動は一般にその移動速度が速いことから、惑星形成において様々な困難を引き起こすと指摘されている。従って、タイプ

I移動はここ20年にわたり重要な研究テーマであり、この間我々の理解も大きく進んだ。しかし、その発展はまだ完了しておらず、現在も検討が続けられている。例えば、惑星近傍に作られる温度と密度の非対称性によってもたらされる加熱トルク[18]や、3次元の効果[19]が最近検討されてきた。現在最も注目されているのは動的トルク(dynamical torque)[20]である。これは惑星の軌道移動によって共回転領域内のガスの流線が変更されることで共回転トルクの不均衡が生じる現象である。局所等温を仮定した流体計算での検討から始まり、非等温の円盤にも応用されてきたが、まだ系統的な理解には至っていない。筆者らの最近の研究ではこれを応用し、惑星と円盤ガスの動径方向の相対速度によって軌道移動が変わる可能性を検討した<sup>11</sup>[21]。更に現在、主にイギリスにおいてこの効果を惑星形成N体計算に導入する試みも開始されており、今後の結果に注目される。

次に円盤モデルについてもコメントする。本稿では、円盤モデルを書き換えることで短周期スーパーアースの観測的特徴が説明可能となることを示した。ここからわかる通り、円盤モデルは非常に重要である。本稿で紹介した円盤風で進化する円盤モデルは、べき分布モデルと比較すると現実的であると言えるが、円盤進化の導出の際にいくつかの仮定を置いており、完璧なものというわけではない。例えば、円盤進化は円盤を貫く磁場の進化に依存する。これについてはこれまで多くの研究が行われてきたが、依然として磁場の進化についての定量的な理解は得られていない。また、円盤風モデルに関しても更に発展が必要であり、例えば円盤風駆動降着が存在する円盤内の3次元方向の角運動量の輸送、つまりガス流の3次元構造の解明は今後の重要な研究テーマとなり得る。

また本稿では触れていないが、ペブルと呼ばれるcmサイズ程度の固体粒子が惑星コアに集積する物理過程(ペブル集積)を考慮することも重要である。現状では、ペブルの流入量やサイズ分布またその時間進化が制限されていないが、短周期スーパーアース形成過程にも影響を及ぼすと考えられる。

本稿では惑星形成N体計算の結果を紹介したが、別

11. 同時期に同様の考察がC. McNally氏らによって行われている[22]。彼らは「惑星と円盤ガスの相対速度」と読み替える手法は彼らが初めて導入したと主張しているが、著者らの論文は彼らより3ヶ月以上前に投稿している。

の手法である惑星形成種族合成モデル生成計算の改良についてコメントを付す。惑星形成種族合成モデル生成計算とは、惑星系形成理論に存在する不定なパラメータを変化させたモデル計算を大量に実行し、系外惑星の統計的な分布と合致するパラメータ値を決定する方法である。従来、恒星の観測と恒星形成の理論モデルを比較する際に使用されてきた手法であるが、これを惑星に応用したものである。この計算では、惑星形成の素過程を簡単なモデルに落とし込むことで、数値計算にかかる時間を大幅に短縮し、大量の計算を実行することが可能であることが大きな特徴である。一方で、この手法を用いて惑星形成後の軌道を議論する際には注意が必要である。本稿の4節及び5節の $N$ 体計算によって、軌道周期比に代表される軌道分布を議論する際には、平均運動共鳴への捕獲とその後の軌道不安定が極めて重要となることを確認した。しかし、現在の種族合成モデル生成計算では、共鳴への捕獲や円盤散逸後の軌道再配置に簡単なモデルが使用されている。一例として、平均運動共鳴にある惑星系の軌道不安定化時間は、共鳴にない場合と比較して桁で変わる[23]が、この効果は種族合成計算に導入されていない。この問題に対し、 $N$ 体計算の結果によって求められた平均運動共鳴への捕獲条件[24]と共鳴にある系の軌道不安定条件[23]を現在の種族合成モデル生成計算に導入することで、比較的簡単に計算の信頼性を向上させることが可能であることから、この方針での発展も期待したい。

今後、上記のような研究が実行されることによって、短周期スーパーアースを含めた惑星形成とその素過程を記述する理論がより確固としたものになるだろう。

## 7.2 スーパーアースの組成

2018年に打ち上げられたTransiting Exoplanet Survey Satellite (TESS)が更に多くの短周期スーパーアースを発見し、短周期スーパーアースの理解がより深まることが期待される。一方で、今後の系外惑星に関する大型観測プロジェクトの方向性として、惑星の特徴づけ(即ち惑星や大気の組成の決定)を目指す計画が進行中であり、研究テーマとしてスーパーアースの組成は重要性が増していく。

惑星の組成を表すもっとも基本的な物理量は密度であり、これから惑星の構造を推定することができる。

実際に、惑星の質量と半径が求められた系外惑星については、その組成について色々な議論が行われてきた。一方で、惑星の内部組成は、質量と半径の情報だけでは一意に決定することができない場合が多い(内部組成の縮退)という問題がある。この問題に対して、大気組成の観測を用いるという試みがある。例えば大気の透過光観測によって、水素・ヘリウムが主成分の大気か、水蒸気大気かが判別できる可能性がある。また大気中のC/O比を計測することで、その惑星が形成した際のスノーラインとの位置関係が推定できるかもしれない。このように、主に大型の観測プロジェクトに後押しされる形でスーパーアースの組成の議論が進むことから、理論サイドとしても組成を含んだ短周期スーパーアース系形成理論の構築が必要となる。惑星の組成は、集積中の様々な効果(例:材料物質の組成、大気量進化)に依存して決定されることから、惑星集積計算と組成進化計算を結びつけて検討することが重要である。 $N$ 体計算でスーパーアースの大気量進化を追った研究の例として筆者らの研究[10]が挙げられるが、今後の観測と比較して議論する為にはより現実的な組成進化を追った $N$ 体計算の実行が必要である。

一方で、 $N$ 体計算を用いずにスーパーアースの大気獲得過程を調べる研究はいくつか存在する。それらの研究で現在特に問題視されているのは、暴走ガス降着問題である。従来の大気降着モデルに従うと、スーパーアースとして典型的な質量である5地球質量の惑星が暴走ガス降着するまでの時間は典型的なガス円盤の寿命よりも短い。つまり多くのスーパーアースは暴走ガス降着を経験しガス惑星になり得る。しかし、2節で述べた通り、ホットジュピターの検出頻度は短周期スーパーアースよりも10倍以上低く、これはスーパーアースは暴走ガス降着を回避したことを意味しており、理論と観測が一致していない。この問題に対して、これまでにいくつかの解決案が提示されてきた。例えば、惑星への3次元的なガス降着流の構造[25, 26]や大気中の高いオパシティ [27]によって大気の冷却を遅らせる案が検討されている。別の案として、本稿の $N$ 体計算でみたように、スーパーアースの最後の成長は円盤散逸後に生じることを考慮し、円盤ガスの寿命以内ではコア質量が小さくガス降着率も低いという可能性が筆者らによって指摘されている[28]。更に筆者らは最近別の案として、惑星コアが円盤から獲得する大気

量は、円盤内の動径方向のガス降着率とその鉛直分布に依存して制限されるという可能性も指摘した。今後は、この暴走ガス降着問題を含めて、惑星形成と組成進化を結びつける理論の構築が必要となる。

## 8. まとめ

本稿では、短周期スーパーアース系の形成過程として、短周期軌道で形成した原始惑星を起源とする「その場形成モデル」と長周期原始惑星を起源とする「軌道移動モデル」それぞれを採用した最近の $N$ 体計算の結果を紹介した。

これまでの10年がそうであった様に、今後も観測による発見に後押しされる形で、スーパーアース形成理論は進展していくだろう。ところで、 $N$ 体計算を用いた惑星形成研究では、最近欧米の研究者の存在感が増してきている。それ自体は必ずしも悪くは無いが、緻密な計算を得意とする日本人グループが再び惑星形成 $N$ 体計算をリードしていくことが必要だと考えている。ともあれ、今は今後の10年間の進展を考えて再びわくわくしており、また10年後に本稿を読み返すことも(例え本稿の内容が大幅に塗り替えられていたとしても)楽しみである。

## 謝辞

本稿を執筆する機会を与えて下さった、和田浩二編集長に感謝致します。また本稿で紹介した研究の共同研究者である小久保英一郎氏、鈴木建氏、Alessandro Morbidelli氏、Tristan Guillot氏、Aurélien Crida氏、André Izidoro氏らに感謝致します。

## 参考文献

- [1] Howard, A. W. et al., 2010, *Science* 330, 6004.
- [2] Mulders, G. D. et al., 2018, *Astron. J.* 156, 24.
- [3] Ogihara, M. et al., 2018, *Aston. & Astrophys.* 612, L5.
- [4] Ogihara, M. et al., 2018, *Aston. & Astrophys.* 615, A63.
- [5] Fulton, B. J. et al., 2017, *Astron. J.* 154, 109.
- [6] Owen, J. E. and Wu, Y., 2017, *Astrophys. J.* 847, 29.
- [7] Zhu, W. et al., 2018, *Astrophys. J.* 860, 101.
- [8] Lissauer, J. J. et al., 2011, *Astrophys. J. Suppl.* 197, 8.
- [9] Hansen, B. M. and Murray, N., 2013, *Astrophys. J.* 775, 53.
- [10] Ogihara, M. et al., 2015, *Aston. & Astrophys.* 578, A36.
- [11] Suzuki, T. K. and Inutsuka, S., 2009, *Astrophys. J.* 691, L49.
- [12] Blandford, R. D. and Payne, D. G., 1982, *MNRAS* 199, 883.
- [13] Suzuki, T. K. et al., 2016, *Aston. & Astrophys.* 596, A74.
- [14] McNeil, D. S. and Nelson, R. P., 2010, *MNRAS* 401, 1691.
- [15] Bitsch, B. et al., 2015, *Aston. & Astrophys.* 575, A28.
- [16] Izidoro, A. et al., 2017, *MNRAS* 470, 1750.
- [17] Mulders, G. D. et al., 2015, *Astrophys. J.* 798, 112.
- [18] Benitez-Llambay, P. et al., 2015, *Nature* 520, 63.
- [19] Fung, J. et al., 2017, *Astron. J.* 153, 124.
- [20] Paardekooper, S. -J., 2014, *MNRAS* 444, 2031.
- [21] Ogihara, M. et al., 2017, *Astron. & Astrophys.* 608, A74.
- [22] McNally, C. P. et al., 2017, *MNRAS* 472, 1565.
- [23] Matsumoto, Y. et al., 2012, *Icarus* 221, 624.
- [24] Ogihara, M. and Kobayashi, H., 2013, *Astrophys. J.* 775, 34.
- [25] Ormel, C. et al., 2015, *MNRAS* 447, 3512.
- [26] Kurokawa, H. and Tanigawa, T., 2018, *MNRAS* 479, 635.
- [27] Lee, E. J. et al., 2014, *Astrophys. J.* 797, 95.
- [28] Ogihara, M. and Ida, S., 2009, *Astrophys. J.* 699, 824.