

特集「新・惑星形成論」

新・地球型惑星形成論

荻原 正博¹

2021年12月16日受領, 査読を経て2022年1月13日受理

(概要) 系外惑星観測や原始惑星系円盤観測の進展に後押しされ, 惑星形成理論は大きな進展を果たし, また地球型惑星形成の理論研究も重要な進歩を遂げた. 本稿ではまず, 太陽系地球型惑星形成理論モデルの構築にあたり, 太陽系のどのような特徴を説明する必要があるのかを簡単に整理する. 次に, これまでの地球型惑星形成モデルでは何が説明できているのか, そして新たな惑星形成モデル(主にグラントラックモデルおよび円盤風を考慮した円盤進化モデル)で何が説明できるようになったのかを概括する. 更に, 太陽系地球型惑星と太陽系外惑星の特徴を比較し, 相違点を含めた特徴を説明可能な汎惑星形成理論の構築に向けた今後の展望についても議論する.

1. はじめに

地球型惑星形成は太陽系形成理論において核となる部分の一つであり, 1960–1970年代に太陽系形成理論の構築が開始されたときから検討されてきた. 本格的な惑星形成 N 体計算が開始された1990–2000年代以降には, 軌道進化や惑星成長が詳細に議論できるようになり, 微惑星からの地球型惑星形成の基本的な描像が明らかになった. そして2010年代になると, 惑星形成理論研究にいくつかの大きな進展があった. 地球型惑星形成に関連する過去10年の重要な発展として, グラントラックモデル・円盤風を考慮した円盤進化モデル・ペブル集積モデルの提案が挙げられる. 本稿では主にこれらに注目した上で, 惑星形成理論が専門でない方々に読んでいただくことを念頭に, 最新の地球型惑星形成理論を概観したい¹.

1. 東京工業大学 地球生命研究所
ogihara@nagoya-u.jp

1. 上海交通大学 李政道研究所
1. 国立天文台 科学研究所

2. 太陽系地球型惑星の特徴

太陽系地球型惑星の特徴についてまとめる. 地球型惑星形成理論の構築にあたっては, 惑星形成 N 体計算によって系の特徴を再現し得るか否かが重要な指標となる. その特徴として, 軌道長半径や質量及び個数といった基本的なものに加えて, 以下の特徴も重要視される.

(a) 軌道離心率と軌道傾斜角

軌道離心率は軌道状態を表す重要な指標である. 惑星それぞれの離心率(水星=0.2, 金星=0.007, 地球=0.02, 火星=0.1)に加え, 以下の式で表されるAMD(Angular Momentum Deficit)が軌道の励起状態を定量的に示す指標として用いられる[3].

$$\text{AMD} = \frac{\sum_j m_j \sqrt{a_j} (1 - \sqrt{1 - e_j^2} \cos i_j)}{\sum_j m_j \sqrt{a_j}}. \quad (1)$$

¹それ以前の研究については他の日本語の解説[1, 2]を参照いただき, それらにはほとんど立ち入らないことをご容赦いただきたい.

ここで m , a , e , i はそれぞれ質量, 軌道長半径, 軌道離心率, 軌道傾斜角である. この指標は, 全ての惑星が円軌道かつ同一平面軌道を持つ場合と比較してどの程度系が力学的に励起されているかを表す. 太陽系地球型惑星は $AMD=0.0018$ と小さい.

(b) 質量分布

太陽系地球型惑星の特徴として, 太陽からの距離 1 au 付近に質量が集中している点がよく注目される. 質量集中度合いを表す指標として RMC (Radial Mass Concentration) が用いられる [4].

$$RMC = \max \left(\frac{\sum_j m_j}{\sum_j m_j (\log_{10} \sqrt{a/a_j})^2} \right). \quad (2)$$

右辺の括弧内は a についての関数であり, RMC の値は a を変化させた上での最大値である². 太陽系地球型惑星は $RMC=89.9$ と大きな値をとる. 一方, 等質量の惑星が $a = 0.5 - 2$ au の間に等間隔で存在する場合 (即ち, 局在していない場合) には, RMC が 20 以下 (値は配置にも依る) とより小さくなる. RMC の大きさにも表れていることだが, 金星 (0.8 地球質量) と地球 (1 地球質量) と比較して水星 (0.06 地球質量) と火星 (0.1 地球質量) の質量が小さいことを説明することも必要となる. 更に, 水星軌道以内や火星軌道以遠に惑星が存在しないことも質量分布の特徴である.

(c) 形成年代

月の石や隕石などの同位体分析によって, 惑星の形成年代が見積もられている. 月を形成した巨大衝突のタイミングは, W 同位体分析などにより CAI 形成後およそ 50–150 Myr と比較的遅かったと考えられている [6–8]³. また Hf–W 同位体分析によって, 火星の形成は 2 Myr 以内には完了したとされる [9].

(d) 組成

惑星それぞれの組成情報も惑星形成計算の成功

条件としてしばしば参照される. 地球の組成としては, 水量が一つの指標になる. コアやマントル中に海水量の数倍から数十倍の水 (もしくは水素) が存在している可能性が指摘されているが [10], まだ統一した見解には至っていない. 従って, 多くの惑星形成計算では, 少なくとも海水量程度 (地球質量の 0.023%) の水が形成中もしくは形成後に地球に供給される必要があり, また形成後の供給が海水量を大きく上回ってはならないという制限を考える. またマントル中の強新鉄性元素 (HSE) の量も指標となる. 現在の地殻やマントルに存在する強親鉄性元素は, コアとマントルが分離後に地球に集積したと考えられる. これにより, 最後の巨大衝突後に生じる後期集積で地球にもたらされる質量は地球質量の 0.1–1% 程度であるとする見積りがある [11]. 他の惑星の組成としては, 水星の大きな金属コアが目すべき特徴である. 更に, 最近の惑星形成論においては隕石の同位体二分性が注目されているが, こちらは荒川氏らによる同特集記事を参照されたい.

(e) 小惑星帯

地球型惑星形成理論では, 小惑星帯の特徴を同時に説明し得るかという点も重要視されている. 最も大きな特徴は, 小惑星は質量が欠乏しているという点である. 地球型惑星や巨大惑星のコアをならして作成された太陽系最小質量円盤と比較すると, 固体面密度で 1000 倍程度枯渇している. このように面密度が枯渇していて小惑星同士の散乱 (viscous stirring) が効きにくいにも関わらず, 小惑星の離心率や軌道傾斜角は平均 0.2 程度と大きいことも謎である. また, 太陽に近い軌道から離れるにつれて特定のスペクトル型が存在 (ゾーニング) している. 特徴的なのは, 太陽に近い軌道に S 型が, 離れた軌道には含水鉱物を含む小惑星である C 型が分布している点である.

3. 地球型惑星形成の従来描像

1990 年代より実行されてきた惑星形成を追う N 体計算により, およそ以下のような描像で地球型惑星形成が進行すると考えられてきた. 図 1 にこれの概観を示す.

²この式が分かりづらい場合には [4] の図 14 も参考になる.

³CAI 形成後 30 Myr という見積りもある [5].

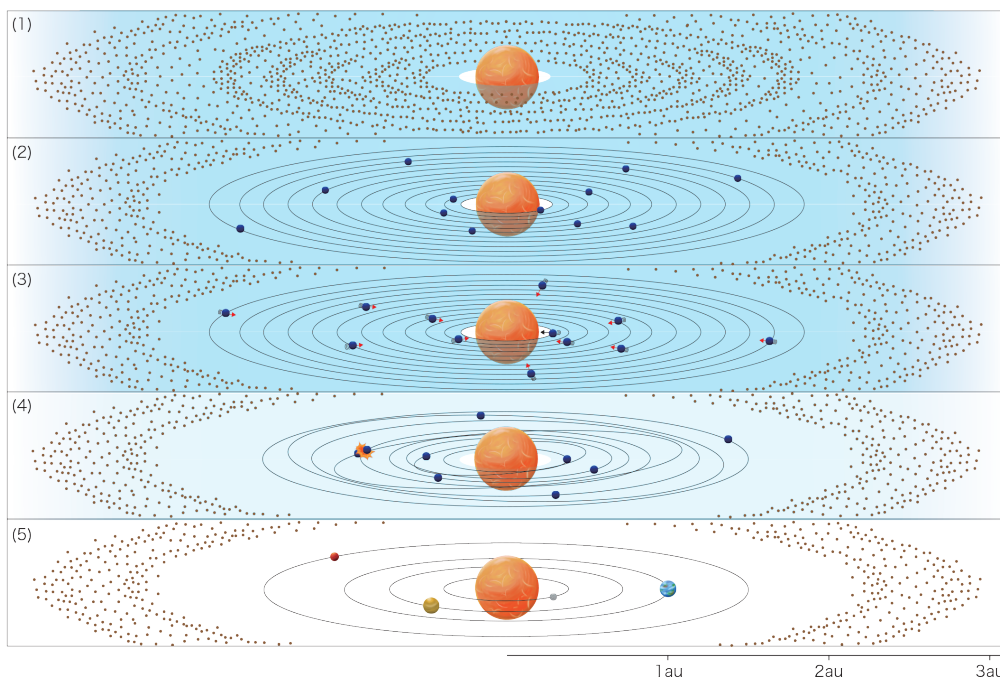


図1: 地球型惑星形成の概観. (1) 微惑星の形成, (2) 原始惑星の形成, (3) 原始惑星/惑星のタイプI 軌道移動, (4) 円盤散逸とともに軌道不安定および巨大衝突, (5) 軌道の安定化および後期集積.

- (1) 1–100 km程度のサイズの微惑星が形成する。最近では主にストリーミング不安定による微惑星形成が支持されているが、惑星形成 N 体計算においては微惑星の存在は仮定する。
- (2) 微惑星が暴走成長/寡占成長を経て、原始惑星まで成長する。原始惑星の質量は微惑星や原始惑星の軌道移動が無視できる場合には孤立質量で決まり、太陽系最小質量円盤ではおよそ火星質量程度と考えられる。
- (3) 火星質量程度まで成長した原始惑星は、周囲の円盤ガスとの重力相互作用により、タイプI軌道移動⁴を経験する。一般的には10万年程度の短い時間スケールで内向き移動が生じ、これは太陽系地球型惑星の軌道分布を説明する大きな障害となる(惑星落下問題)。
- (4) 原始惑星系円盤の寿命である数100万年程度で原始惑星系円盤ガスが散逸し、次第に惑星同士の軌道が交差する軌道不安定状態となる。この

⁴火星質量程度から数倍の地球質量程度の惑星が軌道移動する物理現象。

結果、原始惑星同士が巨大衝突を起こし、同時に月が形成される。

- (5) 衝突によって惑星同士の軌道間隔が十分に(およそ10–20ヒル半径以上)拡がると、それ以上の衝突が生じない安定な軌道となる。その後、残存円盤ガスや周囲に残った微惑星からの力学的摩擦によって軌道離心率が下げられる。また、小惑星帯などに残った微惑星が惑星へ集積(後期集積)する。

以上の惑星形成プロセスを真面目に N 体計算で追うと、それぞれの段階で(大規模並列計算機を使用しても)数週間から数ヶ月程度の計算時間を要する場合が多い。これが惑星形成 N 体計算に取り組む一つのハードルとなる。これまでに行われた N 体計算(主に円盤散逸後の(4)と(5)の段階の計算)によって、従来の地球型惑星形成モデルでは2節に記したいいくつかの特徴が再現可能であることがわかっている。

(a) 小さなAMDについては、(5)軌道不安定後の長時間進化で微惑星やガスによって離心率を減少

させることができる[12, 13]. (b)質量分布については, (4)軌道不安定の前段階で原始惑星が局所的に集中している分布が作られれば, 大きなRMCや小さな水星や火星を説明できる[14]⁵. 一方で, どのように局所的な分布を作るかは大きな問題である. (c)月の形成年代については, (4)軌道不安定段階を追った計算では巨大衝突は10–200 Myrの間に生じることがわかっている. 従って, 一定の確率で遅い月形成衝突を説明できるとされる[15]. (d)地球の海水量については, (5)軌道不安定後の後期集積で地球の海水量程度の水を小惑星帯にある含水微惑星から供給できると議論されている[16]. (e)小惑星帯の枯渇や軌道励起については, 例えば永年共鳴の移動によって説明できる可能性がある⁶とされる[17, 18]. 一方で, そのような励起を達成するにはやや恣意的な条件設定が必要とも言われている[19].

このように, 従来の惑星形成モデルにおいても複数の特徴の起源を説明できている. 一方で, (b)質量分布や(e)小惑星帯の特徴についてはうまく説明できていない, もしくは大胆な仮定に依存している. これらの問題を解決することを目指した惑星形成モデルが最近提案されており, 次節からはそれらの最新モデルを紹介する.

4. グランドタックモデル

グランドタックモデルとは, 原始惑星系円盤ガスが存在している段階で木星と土星が内向きに軌道移動し, 木星軌道が $a = 1.5$ au程度まで近づいた後に外向き移動へと移動の方向を転換したとする仮説である[20]. 図2に軌道移動の様子を示す. 状況設定がやや恣意的である(後述)ものの, 木星の内向き移動・土星の速い内向き移動・木星と土星の外向き移動[21]というそれぞれの素過程は流体計算によって特定の条件下で生じることが確かめられている. 太陽系最大惑星の木星が $a = 1.5 - 5.2$ auの領域を通過することによって, 現在の地球型惑星領域や小惑星帯に大きな影響を及ぼす.

ではグランドタックモデルを考えた場合に2節で見た太陽系地球型惑星の特徴は再現可能なのかをま

とめる. (a)軌道離心率やAMDが小さい点については, 従来モデル(3節)と同様に, 巨大衝突後に残った原始惑星系円盤ガスや微惑星によって説明することが可能である. 実際, 微惑星の力学的摩擦によって小さなAMDを説明できる場合があることが示されている[22]. (b)質量分布については, 木星が $a = 1.5$ auまで軌道移動することによって, 1.5 au以遠に存在する原始惑星は木星に集積・内側軌道への掃き集め・遠方への散乱のいずれかを経験し, 結果として原始惑星の集団の外側境界は1.5 au以内となる(図2(iii)参照). また原始惑星集団の内側境界が0.7 au程度であるという仮定を加えることで, 局所的な質量分布や火星が小さいことを説明することが可能である[20]. 実際に質量集中の指標でも, 初期の原始惑星分布を適当に仮定すれば, 現在の太陽系地球型惑星と類似のRMCが達成できる[22]. 但し, 水星の正確な質量までを再現するのはやや困難そうである[23]. (c)月や火星の形成年代についても, 従来モデルと同様におよそ説明可能である. 初期の原始惑星の分布によっては巨大衝突が早く完了してしまう可能性も指摘されている[23]が, 50 Myr以降の遅めの巨大衝突も一定割合で生じる. また, 火星の形成年代についても計算の設定によっては達成可能である[22]. (d)組成については, これも従来モデルと同様だが, マントル中のHSEの量を説明する計算結果が得られることが示されている[24]. 後期集積の量と最後の巨大衝突のタイミングには相関があることもわかっており, 地球マントル中のHSEの量と遅い月形成年代両方を説明できるパラメータが存在するようだ⁶. また巨大惑星の移動後に小惑星帯付近に残った微惑星の後期集積によって, 現在の地球海水量が説明できる[25]. (e)小惑星帯の特徴を再現することがグランドタックモデルの目的の一つである. まず, 木星が小惑星帯の領域を通過することでそこにいた微惑星を散乱及び集積することで, 質量欠乏と大きな離心率を同時に説明できる. 更に, 初期の木星軌道($a = 3.5$ au)を境に内側軌道にS型小惑星, 外側軌道にC型小惑星を配置して計算を開始するが, 木星の移動によって小惑星帯で2つの物質が適度に混ざり, またS型小惑星とC型小

⁵尚, (4)軌道不安定・巨大衝突段階でRMCはあまり変化しないか, もしくは軌道散乱によってやや小さくなる.

⁶これらの再現が難しいという研究もある[23].

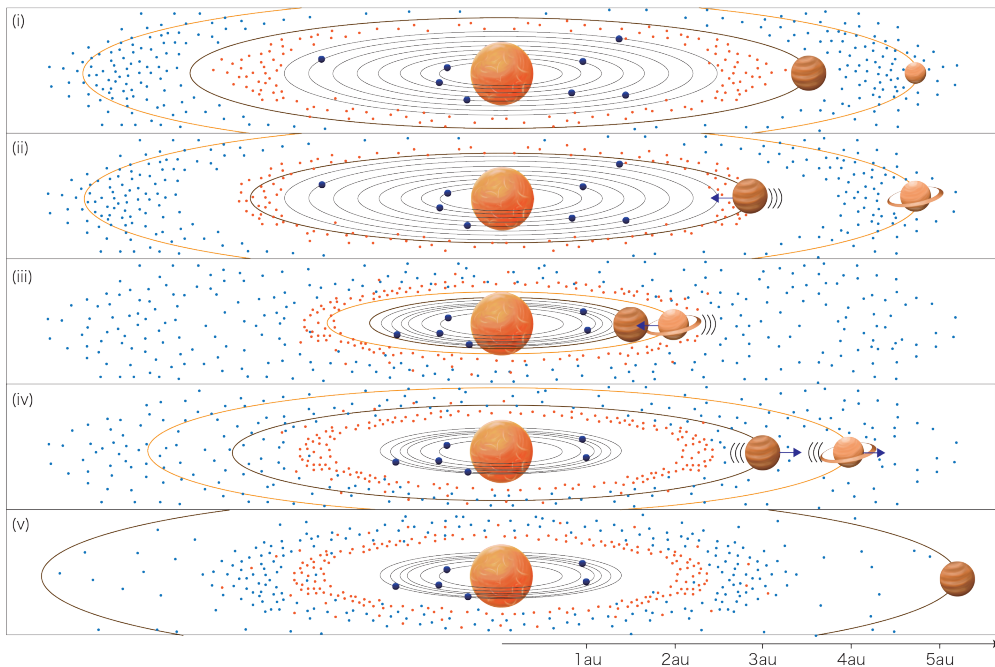


図2: グランドタックモデルの概観。(i) 木星が $a = 3.5$ auで形成する。この段階で木星の内側軌道にはS型小惑星(赤色)、外側軌道にはC型小惑星(青色)が分布していたと考える。(ii) 土星が成長する傍らで、木星は内向きに軌道移動する。(iii) 成長が完了した土星は素早い内向き移動を経験し、木星に追いつく。木星と土星が3:2の平均運動共鳴に捕獲された時に二つの惑星の内向き移動は終わる。この時、木星は $a = 1.5$ auあたりまで移動している。(iv) 木星と土星は3:2の平均運動共鳴を保ったまま外向きに移動する。(v) 木星が現在の軌道位置まで移動したところで移動を停止する。この後、ニースモデル(巨大惑星の軌道変化)が生じると考える場合もある。巨大惑星の移動によって、小惑星帯の欠乏と混合が説明できる。(i)から(v)の軌道進化は50万年程度の比較的短期間で生じるが、これは図1の(2)から(4)におよそ相当する。なおここでは円盤ガスの描写は省略している。

惑星のゾーニングも説明できる[20].

このようにグランドタックモデルは2節で挙げた多くの特徴(特に質量分布と小惑星帯の特徴)を再現可能であり、現在は有望な惑星形成モデルの一つとして考えられている。但しこのモデルでは、特定の設定を仮定していることに注意が必要である。まず(b)質量分布については、原始惑星が 0.7 au以内には形成しないことを仮定することによって局所的な質量集中が説明できているが、このような分布が達成されるかどうかは明らかではない。また、原始惑星や惑星のタイプI軌道移動については無視しており、これを考えると形成した惑星は内向きに移動してしまい、現在の 1 au付近の軌道を説明することは困難である。(d)組成については、巨大惑星の大規模な移動によって物質が混ざりすぎてしまうのではないかと指摘もある[26]。また、水星の組成や質量を説

明するためには、別のメカニズムが必要となる。更に(e)小惑星帯について、グランドタックモデルの初期条件では木星が形成した段階でS型とC型小惑星がきれいにわかれておりと仮定しているが、木星の成長段階にも外側軌道と内側軌道の微惑星が混ざることがわかっており[27, 28]、そもそも図2(i)のような初期条件が達成されない可能性もある。また、グランドタックモデルでは木星が形成した段階では小惑星帯付近の固体面密度は現在よりも桁で高かったと考えるが、この場合小惑星帯付近で微惑星は原始惑星まで成長する可能性がある。微惑星より大きな原始惑星は分化しやすく、リュウグウの様な始原的なC型小惑星の存在を説明するのは難しいかもしれない。

グランドタックモデルで仮定している力学進化が生じにくいという指摘もある。このモデルの肝である

木星と土星の外向き移動は、木星と土星が3:2の平均運動共鳴に捕獲されることを前提としているが、この為にはその前段階で2:1の共鳴に捕獲されないで通過する必要がある。このような条件を達成するにはパラメータのファインチューニングが必要かもしれない[29]。また、このモデルでは木星と土星の軌道移動の最中に惑星へのガス降着が殆ど生じないと仮定している。しかし、土星が外向き移動中にガス降着で成長した場合には外向き移動が抑制される可能性がある[30]。一方で、木星や土星の質量に達した際にガス降着による成長が終了している為には、円盤ガス面密度が低い必要があり、この場合には巨大惑星の十分な軌道移動が実現しないとも考えられる[31]。更に、木星や土星のコアの形成も仮定しているが、現在でも木星や土星のコアを素早く作るのは簡単ではない[32]。

5. 円盤風を考慮した円盤進化モデル

最近10年の惑星形成理論の発展として、円盤風を考慮した円盤進化モデルも重要である。従来の原始惑星系円盤モデルは、ガスの面密度や温度が太陽系最小質量円盤モデルのように半径方向にべき乗の分布で表されると考える場合が多かった(図3(a)灰色)。このような円盤モデルは惑星のタイプ I 軌道移動が非常に速く、移動後の惑星の軌道分布は太陽系や系外惑星系の軌道分布とあわないことが知られている(惑星落下問題)。従って、太陽系地球型惑星の軌道分布の再現を目指す研究では、軌道移動を無視するしかなかった[33, 34]。ところで、近年の磁気流体計算によって原始惑星系円盤から磁場を介して円盤ガスが主に円盤鉛直方向に向けて散逸する「磁気駆動円盤風」が発見され⁷、この効果を考慮した円盤進化モデルが提案されてきた[36, 37]。図3(a)が円盤風の効果を導入して行った円盤進化計算結果の模式図(橙色・青色)である[36, 38]。円盤風による質量損失及び円盤風駆動降着(円盤風が角運動量を取り除くことによって駆動される円盤ガス降着)が中心星に近いほど強くなるため[39, 40]、中

心星近傍ではガス面密度が従来モデルよりも桁で小さくなり得ること、また面密度の勾配が軌道半径に依存して変わることがポイントである。これらの影響により、惑星形成理論において最大の問題の一つである惑星落下問題を解決し、太陽系地球型惑星や系外スーパーアース系[41]の軌道分布を無理なく説明できる可能性がある。

太陽系地球型惑星の形成という文脈において、鈴木建氏らによって提案された円盤進化モデルの最大の利点は、(b)局所集中した質量分布を説明できる点にある。軌道半径1 au付近に圧力極大値が出現するような円盤の場合に、ダストや微惑星が受けるガス抵抗による動径方向移動(図3(b))の結果、1 au付近の局所領域に微惑星が偏在して形成/存在することが可能となる[42, 43]⁸。また1 au以内のガス面密度勾配が正になる場合には、正勾配の領域で原始惑星のタイプ I 軌道移動は外向き移動となるため、0.1 au 付近に形成した原始惑星の外向き移動によって原始惑星が1 au 付近に局在する軌道進化も達成可能である[42]。更に、面密度勾配が正にならずに平坦になる場合では、タイプ I 移動が強く抑制され、微惑星や原始惑星の形成段階で局所的に集中した質量分布が作られれば、その局所分布が長時間保たれる。これらのメカニズムによって十分に大きなRMCが達成可能であり[43, 44]、また水星や火星が小さいことも説明できる。更に、グランドタックモデルでは仮定の一つであった、水星より内側軌道に惑星が存在しないことも説明できるのである。

なお、質量分布以外の特徴についても、グランドタックモデルや従来モデルと同様に説明できる特徴も多い。具体例として、(a)軌道離心率に関して、小さなAMDは微惑星や残存ガスによって離心率が下がる。(c)形成年代についても、およそ説明可能であることがN体計算結果で見られている[44]。

一方で、円盤風モデルで十分に説明されていない特徴もある。具体的には、後期集積時に供給されるHSEの量が説明されるか、また地球への水輸送が適切な量だけもたらされるかなどの(d)組成の特徴や、(e)小惑星帯の諸性質の再現可能性については、

⁷円盤風研究で最も重要な貢献を果たした鈴木建氏による遊星人の解説記事[35]も参照されたい。

⁸但し、10 km以上のサイズの微惑星は十分に動径方向移動しない為[42]、微惑星形成の段階か惑星のタイプ I 移動で局所分布を作る方が適切かもしれない。

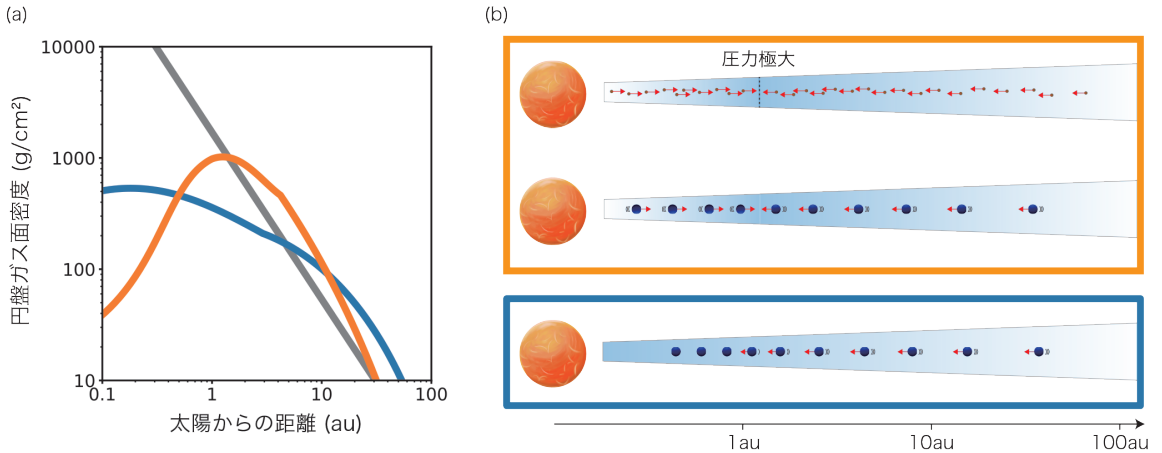


図3: 円盤風を考慮した円盤進化モデルを導入した惑星形成理論の要点. (a) 太陽系最小質量円盤モデル(灰色)と円盤風を考慮した円盤モデル(橙色・青色)の比較. 円盤進化計算のパラメータによっては, 1 au付近で圧力/面密度極大値を取る面密度分布となる(橙色). また1 auより内側で面密度勾配が平坦になる場合もある(青色). 何れにせよ, 従来のべき分布とは大きく異なる. (b) 円盤風を考慮した円盤中でダスト/微惑星と原始惑星/惑星の軌道進化の概念図. 太陽系最小質量円盤のようなべき分布モデルを用いた場合には, 固体は一方的に太陽に向かって落下していく. 一方で, 1 au付近に圧力極大値が出現する場合(橙色)には, ダストや微惑星の動径方向移動および原始惑星や惑星のタイプI 軌道移動によって1 au付近に物質が集中し得る. 1 auより内側で面密度勾配が平坦になる場合(青色)には, 原始惑星や惑星のタイプI 移動が1 au以内で強く抑制される.

これまでに検討されていない. 円盤風モデルとグランドタックモデルが共存することでより多くの特徴を再現できるモデルとなる可能性もあり, これらのモデルの共存可能性についても検討が必要である. また, 円盤風モデルでは磁気流体計算結果を元に行っているものの, それらの計算ではパラメータ(例: 磁場強度やその分布)の設定が必要であり, 実際にパラメータとして設定した値がどのように時間進化するかについてはよくわかっていない(塚本氏による同特集記事も参照). 従って, 太陽系地球型惑星の特徴をうまく再現できるパラメータが実際に実現するかは明らかではない.

6. その他のモデル

これまでにグランドタックモデルと円盤風を考慮した円盤進化モデルについて概説した. これ以外にも過去10年で地球型惑星形成についてのモデルはいくつか検討されており, それらの一部にも簡単に触れておく.

6.1 ペブル集積モデル

ペブル集積についての研究が進展し(詳細は小林氏による同特集記事を参照), これを用いた系外

惑星研究は大きな注目を集めてきた. 太陽系地球型惑星の形成においてもペブル集積が取り入れられており, 現在その中で注目している研究の一つがJohansen氏らによるものである[45].

この研究では, 金星・地球・テア(月を形成する巨大衝突をおこした原始惑星)・火星のもととなる原始惑星は, スノーラインが約1.6 auに存在している時に順々に形成したと考える. それらの原始惑星がペブル集積で成長しながらタイプI軌道移動で現在の軌道まで移動したとする. 従来のモデルから大きく異なることは, テアが地球に巨大衝突することを仮定するものの, その他の惑星は原始惑星から現在の惑星サイズに成長するまでに巨大衝突を経験しないという点である. このモデルでは金星・地球・火星の質量と軌道位置に加え, (d)組成に関連する特徴である「地球と火星の組成の違い」「地球の水と炭素量の起源」が説明できると主張されている⁹.

2節でみたその他の特徴については, N 体計算で十分に調べられていない為なんとも言えない. (a)小

⁹但し, 詳細な同位体組成の分析に基づいた最新の研究では, 地球や火星は非炭素質グループの物質から形成したことを示唆しており, 遠方領域から炭素質グループの物質がペブルで輸送されるモデルを否定している[46]. 非炭素質グループ, 炭素質グループの定義については荒川氏らの同特集記事を参照.

さいAMDや(c)月の形成年代については説明可能に思える一方で、従来モデルで考えていた(4)軌道不安定段階を経ないため、水星や火星の高い離心率を説明することが難しいと考えられる。また、(b)小さい水星の形成や(d)水星の組成については別の仮定が必要となる。更に、(e)小惑星帯の特徴が説明可能なのかについても今後の検討が必要である。

6.2 小惑星帯欠乏モデル

小さな火星や小惑星帯の欠乏を説明するために、局所的な質量分布が都合が良いと考えられている点についてはこれまで触れてきた。この考えのもと、小惑星帯はもともと質量が枯渇していたとするモデル(low-mass asteroid belt model)も提唱されている[47, 48]。(グランドタックモデルは、小惑星帯の枯渇を木星の移動で説明していたが、このモデルでは木星は現在の軌道から移動しないとす。)原始惑星は現在の地球型惑星領域に局所的に存在すると仮定することから、(b)小さな火星や(e)小惑星帯の枯渇を説明できる。またこのモデルでは、 $a = 5.2$ auで木星コアがガス降着によって成長することで、木星よりも外側軌道に存在していたC型小惑星が現在の小惑星帯に流入し、S型とC型のゾーニングや混合も説明できる[49]。但し細かくみると、火星の大きな離心率や十分に高いRMCなどを全て同時に説明できるわけではないという指摘もある[23]。

小さな火星や小惑星帯の枯渇を説明する別のモデルとして、early instability modelも提案されている[50]。このモデルは円盤ガス散逸後から1-5 Myrにニースモデルで考える巨大惑星の不安定が生じたとするものである。この不安定により小惑星帯が力学的に影響を受け、low-mass asteroid belt modelに類似した小惑星帯が枯渇した状態になる。このモデルでは、火星の成長を阻害し、また小惑星帯の組成分布も説明できるとされる。一方で火星の形成年代や十分に高いRMCを得られるかなど、その他の特徴の再現可能性については、詳しく検討される必要がある。

7. 系外惑星との比較

太陽系形成を考える際には「太陽系は特殊なのか」という問いに向き合う必要がある。系外惑星観測の進展により、太陽系以外の惑星系の性質について多種多様な情報が得られてきており、それらと太陽系の特徴を比較することでこの問いへの答えを探ることが可能になってきた。本節ではごく簡単に系外惑星系と太陽系の特徴を比較する。

現在の観測技術では、軌道長半径が1 au程度・質量が1地球質量程度の惑星(即ち太陽系地球型惑星)を観測することはできないが、系外惑星系において遍く存在している固体惑星であるスーパーアースと比較することは意味がある。スーパーアースとは質量がおおよそ1-4地球質量程度の惑星であり(それよりもやや大きなサブネプチューンと呼ばれる惑星を含めても軌道の特徴はほとんど変わらない)、太陽型星のおおよそ30-50%に存在すると見積もられている、系外惑星において大多数を占める惑星である。スーパーアースがどのような特徴を持つかについては、筆者らによる解説記事も参照されたい[52, 53]。

まずスーパーアース系と太陽系地球型惑星で類似している特徴としては以下が挙げられる。(a)軌道離心率については、スーパーアースはおおよそ0.02-0.05程度と考えられており[54]、太陽系地球型惑星の離心率とも合っている。また系内の惑星の相互軌道傾斜角も太陽系と同様に小さい(~ 0.02)[55]。(b)質量分布については、具体的な指標で比較されたものではないが、スーパーアース系はコンパクトな系であることが多いかもしれない(Weiss et al. 2018 の図1を参照[56])。隣り合う惑星同士の軌道間隔は10-30ヒル半径程度であり[56]、金星-地球-火星の値(26-40ヒル半径)と比較しても似ている。また、大部分のスーパーアース系は隣り合う惑星同士で平均運動共鳴の関係を持っていない[57]。この2つの特徴から、スーパーアース系も太陽系地球型惑星と同様に円盤ガス散逸の段階で軌道不安定および巨大衝突を経験している可能性が高い[58]。

一方で、太陽系地球型惑星には無い特徴も明らかになっている。明確な違いとして、最も内側軌道の惑星の位置が挙げられる。太陽系には水星($a = 0.38$ au)以内に惑星は存在しないが、多数のスーパーアース

スが $a = 0.1$ au以内の近接軌道に存在している。別の特徴として、コールドジュピターとの共存関係がある。ベイズ推定により、コールドジュピター(軌道長半径がおよそ1 au以上かつ質量が0.3木星質量以上)が存在する系には90%以上の高い確率でスーパーアースが存在するということがわかっている[59, 60]。一方で、太陽系にはコールドジュピター(木星)が存在するにも関わらず、スーパーアースが存在していない。

これらの類似点および相違点を包括的に説明する惑星形成理論を構築する必要がある。相違点を説明する一案として、軌道分布の違いは、スーパーアース系がより早く成長したことでタイプI軌道移動の影響をより強く受けたことで説明する案がある[61]。また、円盤進化の違いによって軌道分布の違いが説明できる可能性もある[58]。コールドジュピターとの共存関係については、今のところ惑星の材料物質の総量の違いによって説明するしかない[62, 63]。これらの議論は開始されたばかりでありまだ明確な答えには至っていない。これらの謎を解くことが太陽系地球型惑星とスーパーアース系の両方の形成を説明する惑星形成理論構築の緒になることだろう。

8. おわりに

本稿では、太陽系地球型惑星の特徴を概観し、それらが従来の惑星形成モデルや新たな惑星形成モデルで説明可能かについて、現状の理解をまとめた。2011年に提案されたグランドタックモデルは有望なモデルではあるものの、これだけで全ての特徴が説明できるわけではない。また円盤風を考慮した円盤進化モデルが提案され、これも有望そうなモデルではあるが、まだ十分に惑星形成に応用されてはならず、今後より深い検討が必要である。

今後の地球型惑星形成研究の発展についてポイントになり得ることを2点挙げておく。まずは組成についての議論がより重要度を増すことになるだろう。今後の探査や分析によって、太陽系内の物質の組成情報が引き続き得られる。例えば、リュウグウの始原的な特徴が明らかになってきた[64]。地球型惑星形成モデルとしては、それらの分析結果をうまく説明することが必須条件となる。そのために、地球化学

的アプローチと比較可能な、組成を考慮した惑星形成 N 体計算の発展が必要不可欠となるだろう。組成を考慮するためには、原始惑星系円盤の温度進化計算を導入した惑星形成 N 体計算の改良が必要となる。また、系外惑星との比較も引き続き重要である。今後も新たな系外惑星の発見が続き、またそれらの特徴の情報も次々に明らかになってくる。例えば2022年中頃から開始されるJWSTのCycle 1観測では、海王星サイズ以下の低質量惑星の特徴付けを狙う観測提案が10個程度採択されている。系外惑星系と太陽系の形成を同時に説明可能な惑星形成理論の構築が、今後の大きな目標となるだろう。

以上のような研究を行っていく上で、(筆者としては)大々的に惑星形成モデルを提案することにも注意していきたい。本稿で紹介したグランドタックモデルや2000年代に提案されたニースモデルは、惑星形成研究業界においてインパクトを持って受け止められた。注目を集めたことによって、否定的な研究を含め様々な角度から検討され、それらは惑星形成理論の進展につながった。今後は、素過程の研究の重要性も忘れない上で、より大局的な視点で惑星形成モデルの提案を行うことも目指したい。そのために筆者がまず行うべきことは、円盤風を考慮した円盤進化モデルを用いた惑星形成理論の確立であろう。本稿5節で紹介した円盤進化モデルは、(モデルに内在するパラメータに自由度があるためでもあるが)惑星形成における様々な問題を解決し得る優れたモデルである。円盤風の効果は最近数年は世界で特に注目され始めている一方で、本稿で紹介した主に日本人研究者が提案した円盤風を考慮した円盤進化モデルが十分に認知されている状況ではまだない。この円盤進化モデルを用いたより大局的な惑星形成理論を組み立て、これを効果的に宣伝することを近い将来の目標にすべきと感じている。

本稿では言及しなかったが、地球型惑星形成研究の肝である惑星形成 N 体計算も進化している。国内でも、大規模計算機(京・富岳・アテルイ)の利用や計算コードの開発(例:GPLUM)が進展している[65, 66]。惑星形成 N 体計算コードの開発や実行は骨の折れる作業ではあるが、これらの進展も引き続き重要であることを付言して、本稿を閉じることにする。

謝辞

本稿を丁寧に査読して頂いた田中秀和氏、及び本稿の執筆の機会を与えて頂いた奥住聡氏に感謝いたします。執筆が進まないことでご迷惑をおかけしましたが、締め切り直前の2週間は(運良く?)中国入国直後で隔離されていましたため執筆の時間を確保できました。また、日頃から研究の相談にのっていただいている共同研究者の方々および様々な刺激をいただいている東工大や国立天文台の学生の皆様にもお礼申し上げます。

参考文献

- [1] 小久保英一郎, 井田茂, 1996, 天文月報 96, 215.
- [2] 森島龍司, 2010, CPS セミナー.
- [3] Laskar, J., 1997, A&A 317, L75.
- [4] Chambers, J. E., 2001, Icarus 152, 205.
- [5] Jacobsen, S. B., 2005, Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 33, 531.
- [6] Touboul, M. et al., 2007, Nature 450, 1206.
- [7] Allégre, C. J. et al., 2008, EPSL 267, 386.
- [8] Thiemens, M. M. et al., 2019, Nature Geoscience 12, 696.
- [9] Dauphas, N. and Pourmand, A., 2011, Nature 473, 489.
- [10] Tagawa, S. et al., 2021, Nature Communications 12, 2588.
- [11] Bottke, W. F. et al., 2010, Science 330, 1527.
- [12] Kominami, J. and Ida, S., 2002, Icarus 157, 43.
- [13] O'Brien, D. P. et al., 2006, Icarus 184, 39.
- [14] Hansen, B. M., 2009, ApJ 703, 1131.
- [15] Morishima, R. et al., 2010, Icarus 207, 517.
- [16] Raymond, S. N. et al., 2004, Icarus 168, 1.
- [17] Nagasawa, M. et al., 2000, AJ 119, 1480.
- [18] Nagasawa, M. et al., 2005, ApJ 635, 578.
- [19] O'Brien, D. P. et al., 2007, Icarus 191, 434.
- [20] Walsh, K. J. et al., 2011, Nature 475, 206.
- [21] Masset, F. and Snellgrove M., 2001, MNRAS 320, L55.
- [22] Jacobson, S. A. and Morbidelli, A., 2014, Phil. Trans. R. Soc. A 372, 0174.
- [23] Lykawka, P. S. and Ito, T., 2019, ApJ 883, 130.
- [24] Jacobson, S. A. et al., 2014, Nature 508, 84.
- [25] O'Brien D. P. et al., 2014, Icarus 239, 74.
- [26] Woo, J. M. Y. et al., 2018, A&A 617, A17.
- [27] Raymond, S. A. and Izidoro, A., 2017, Icarus 297, 134.
- [28] 萩原正博ほか, 2021, 日本惑星科学会2021年秋季講演会, P02-03.
- [29] Chametla, R. et al., 2020, MNRAS 492, 6007.
- [30] D'Angelo, G. and Marzari, F., 2012, ApJ 757, 50.
- [31] Tanaka, H. et al., 2020, ApJ 891, 143.
- [32] Johansen, A. and Bitsch, B., 2019, A&A 631, A70.
- [33] Kominami, J. and Ida, S., 2004, Icarus 167, 231.
- [34] Ogihara, M. et al., 2007, Icarus 188, 522.
- [35] 鈴木建ほか, 2009, 遊星人 18, 147.
- [36] Suzuki, T. K. et al., 2016, A&A 596, A74.
- [37] Tabone, B. et al., 2021, MNRAS, stab3442.
- [38] Kunitomo, M. et al., 2020, MNRAS 492, 3849.
- [39] Suzuki, T. K. et al., 2010, ApJ 718, 1289.
- [40] Bai, S., 2013, ApJ 772, 96.
- [41] Ogihara, M. et al., 2018, A&A 615, A63.
- [42] Ogihara, M. et al., 2018, A&A 612, L5.
- [43] Ueda, T. et al., 2021, ApJL 921, L5.
- [44] Ogihara, M. et al., 2018, A&A 579, A65.
- [45] Johansen, A. et al., 2021, Science Advances 7, eabc0444.
- [46] Burkhardt, C. et al., 2021, Science Advances 7, eabj7601.
- [47] Izidoro, A. et al., 2014, ApJ 782, 31.
- [48] Izidoro, A. et al., 2015, MNRAS 453, 3619.
- [49] Raymond, S. N. and Izidoro, A., 2017, Science Advances 3, e1701138.
- [50] Clement, M. et al., 2018, Icarus 311, 340.
- [51] Clement, M. et al., 2019, Icarus 321, 778.
- [52] 萩原正博, 2018, 遊星人 27, 235.
- [53] 萩原正博, 堀安範, 2019, 天文月報 112, 906.
- [54] Hadden, S. and Lithwick, Y., 2017, AJ 154, 5.
- [55] He, M. et al., 2020, AJ 160, 276.
- [56] Weiss, L. M. et al., 2018, AJ 155, 48.
- [57] Lissauer, J. J. et al., 2011, APJS 197, 8.
- [58] Ogihara, M. et al., 2018, A&A 615, A63.

- [59] Zhu, W. and Wu, Y., 2018, AJ 156, 92.
- [60] Bryan, M. L. et al., 2019, AJ 157, 52.
- [61] Lambrechts, M. et al., 2019, A&A 627, A83.
- [62] 萩原正博, 原川紘季, 2020, JpGU-AGU Joint Meeting, PAE22-P14.
- [63] Chanchan, Y. et al., 2022, ApJ 926, 62.
- [64] Yada, T. et al., 2021, Nature Astronomy 6, 214.
- [65] Ishigaki, Y. et al., 2021, PASJ 73, 660.
- [66] Shibata, T. et al., 2021, ApJ 921, 163.