

令和元年5月31日現在

機関番号：62616

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H07415

研究課題名(和文) 円盤構造計算及び大気構造計算と連成した重力多体計算で解き明かす現実的な惑星形成

研究課題名(英文) N-body simulations of planet formation including disk evolution and atmospheric calculation

研究代表者

荻原 正博(Ogihara, Masahiro)

国立天文台・理論研究部・特任助教

研究者番号：90781980

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、最新の理論研究の進展を組み込んだ原始惑星系円盤構造・進化計算、大気構造・進化計算、惑星形成N体計算を行うことで、惑星形成過程の理解を深めることを目的とした。具体的な問題として、円盤風駆動降着流に代表される円盤の降着流がタイプI軌道移動に及ぼす影響の解明、円盤風の影響下で進化する円盤中での惑星形成計算による太陽系地球型惑星の起源モデルの提示やスーパーアース系の形成起源の解明などに取り組んだ。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、円盤進化計算や大気量進化計算といった最新の数値計算を惑星集積N体計算に導入して惑星形成過程を調べるという点に重要な学術的意義がある。特に、円盤風の効果を考慮した最新の原始惑星系円盤進化計算を惑星集積N体計算に組み込んだ研究例はこれまでに無く、本研究によって初めて調べられたものである。この数値計算の結果として、これまでの計算では不可能であった観測されたスーパーアース系の特徴の再現に成功していることから、本研究の重要性を読み取ることができる。

研究成果の概要(英文)：We investigated planet formation processes by using N-body simulations that take into account the disk evolution and atmospheric structure calculations. We first focused on revealing effects of global gas flows on the type I migration. We also examined origins of solar system's terrestrial planets and super-Earths in extrasolar systems in evolving protoplanetary disks under effects of magnetically driven disk winds.

研究分野：惑星系形成理論

キーワード：N体計算 原始惑星系円盤

1. 研究開始当初の背景

(1)近年、原始惑星系円盤の構造・進化の解明が進展してきている。従来は円盤の面密度・温度分布は動径方向に様々べき乗分布で表されていたが、実際にはそれらはより複雑な分布をとることがわかってきている。特に、円盤密度構造・進化に磁気駆動円盤風を考慮した場合には、円盤面密度分布は従来の分布から大きく変わることが指摘されている（例：Suzuki et al. 2010）。現実的な惑星形成を議論する為には、これらの円盤の構造・進化を惑星集積N体計算に導入する必要がある。しかしこれには、プログラムコード作成及び数値計算の実行のハードルが高く、これまでに殆ど取り組まれていない。

(2)惑星形成理論においては、様々な未解決問題が存在している。問題の一つとして、太陽系地球型惑星の局所的な配置という問題がある。太陽系の地球型惑星は、水星から火星までの軌道が0.4-1.5auという局所的なリング領域に密集している。これらの惑星の材料物質である微惑星はより幅広い領域で形成したと考えられており、局所的に密集した特徴を説明する有力な説は提示されていない。

(3)別の問題として、短周期スーパーアースの起源を説明できないという問題がある。太陽系外惑星について、短周期のスーパーアースが1000個以上発見されており、それらの軌道等の統計的な特徴が明らかになってきた。これまで研究代表者も含めた世界の研究者は惑星集積N体計算を実行し、短周期スーパーアースの起源の解明に取り組んできた（例：Ogihara et al. 2015）。ところがいずれの計算においても、短周期スーパーアースの重要な特徴（例：軌道周期比分布、質量分布）を矛盾なく再現することはできておらず、その起源はよくわかっていない。

2. 研究の目的

(1)本研究課題では、円盤構造・進化計算を導入した惑星集積N体計算を実行し、現実的な惑星形成過程を世界に先駆けて提示するとともに、惑星形成理論における未解決問題に挑むことを目的としている。

(2)具体的な問題として、磁気駆動円盤風で進化する円盤構造・進化を最新の物理モデルを組み込んだ円盤進化計算によって提示し、またこの円盤中での惑星軌道移動の描像を明らかにすることに取り組む。次に、この円盤構造進化を導入した惑星集積N体計算を実行することで、太陽系地球型惑星の軌道配置や短周期スーパーアースの起源の解明にも取り組む。

3. 研究の方法

(1)磁気駆動円盤風の影響下で進化する円盤面密度進化の解明に取り組む。これまでの円盤風を考慮した円盤進化計算ではいくつかの点で単純化がされていた（Suzuki et al. 2010）。例えば、円盤の面密度分布進化は円盤ガス中での角運動量輸送によって決定されるが、これまでは角運動量輸送は粘性拡散のみが担うとしていた。実際には、円盤風自体が角運動量を持ち出す影響を考慮する必要がある。本研究では、円盤面密度進化を追う1次元拡散方程式に改良した円盤風モデルを組み込むことで、長時間の円盤進化を計算する。

(2)円盤密度構造・進化をN体計算に導入し、惑星集積シミュレーションを実行する。具体的には、過去に研究代表者が行ってきたものと同様に、惑星の成長や軌道進化を追うN体計算において、各タイムステップ毎に1次元拡散方程式で求めた円盤構造を参照するという方法を取る。上記の具体的な未解決問題（太陽系地球型惑星の軌道配置・短周期スーパーアースの特徴の再現）に対して、その都度計算コードを改良することで、その問題解決に取り組む。

4. 研究成果

(1)本研究ではまず、磁気駆動円盤風を考慮してグローバル円盤の長時間進化を計算した。計算の結果、円盤風の影響を考慮した原始惑星系円盤の進化では、円盤風が角運動量輸送を持ち去ることで原始惑星系円盤ガスが中心星方向に降着する現象（円盤風駆動降着）が重要な役割を担うことが明らかになった。また、中心星に近いほど円盤中の質量降着率が大きいことから、従来の円盤進化とは異なり、面密度分布は中心星の近傍領域（1au以下）では面密度勾配が平坦や正となる場合があることもわかった。

(2)円盤風駆動降着流は、従来考えられていた乱流駆動降着流よりも高速である可能性があり、結果として円盤中に存在する惑星と周囲のガスの動径方向の速度差が大きくなることが予想される。この場合に、惑星の中心星方向への軌道移動（タイプI移動）は従来の描像とは異なる可能性があることがわかった。具体的には、高速の円盤降着流の影響によって、質量の大きな惑星の中心星落下が阻害される可能性があることを示した。円盤風駆動降着流の惑星軌道移動への影響はこれまで認識されておらず、この影響を検討する必要性が生じたことで当初の計画の軽微な変更を余儀なくされたが、それに見合う成果があったと言える。

(3)次に、磁気駆動円盤風の影響下で進化する円盤中での太陽系地球型惑星の形成を調べた。計算の結果、円盤ガス面密度の減少率が中心星近傍で大きい場合には、中心星近傍に存在する微惑星は外側方向への軌道移動を経験することを発見した。この軌道移動の結果、微惑星は中心星から1au程度の軌道位置に集中し、太陽系地球型惑星の1au付近に密集した軌道配置が再現可能であることを示した。この結果により、これまで謎とされてきた太陽系地球型惑星の配置について、一つの解決策を提示することができた。

(4)更に、磁気駆動円盤風の影響下で進化する円盤中での短周期スーパーアースの形成を調べた。計算の結果、円盤風の影響下で進化する円盤中では惑星が経験するタイプI軌道移動は強く抑制され、スーパーアースの中心星への落下が回避されることを発見した。結果として最終的に形成するスーパーアースの軌道分布や質量分布は、観測されたスーパーアース系の特徴とも整合的であることも示した。更に、TRAPPIST-1といった特徴的な系外惑星系の軌道の特徴とも比較し、その形成起源についても議論した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計3件）

①Masahiro Ogihara, Eiichiro Kokubo, Takeru K. Suzuki, Alessandro Morbidelli, Formation of close-in super-Earths in evolving protoplanetary disks due to disk winds, *Astronomy & Astrophysics*, 査読有, 2018, 615, A63

DOI: 10.1051/0004-6361/201832720

②Masahiro Ogihara, Eiichiro Kokubo, Takeru K. Suzuki, Alessandro Morbidelli, Formation of the terrestrial planets in the solar system around 1 au via radial concentration of planetesimals, *Astronomy & Astrophysics*, 査読有, 2018, 612, L5

DOI: 10.1051/0004-6361/201832654

③Masahiro Ogihara, Eiichiro Kokubo, Takeru K. Suzuki, Alessandro Morbidelli, Aurélien Crida, Effects of global gas flows on type I migration, *Astronomy & Astrophysics*, 査読有, 2017, 608, A74

DOI: 10.1051/0004-6361/201730777

〔学会発表〕（計7件）

①Masahiro Ogihara, Formation of close-in super-Earths in an evolving disk via disk winds, 49th DDA Annual Meeting, 2018

②Masahiro Ogihara, Formation of close-in super-Earths in a disk evolving via disk winds, DTA Symposium 8, 2018

③Masahiro Ogihara, Formation of close-in super-Earths in disks evolving via disk winds and implications for the origin of outer planets, Exoclipse 2017, 2017

④Masahiro Ogihara, Formation of close-in super-Earths in disks evolving via disk winds, ACCRETE meeting, 2017

⑤Masahiro Ogihara, Migration and accretion of close-in super-Earths, Planet2 Symposium 2017, 2017

⑥Masahiro Ogihara, Formation of terrestrial planets in disks evolving via disk winds, Japan-Germany planet & disk workshop, 2016

⑦Masahiro Ogihara, Terrestrial planet formation in disks evolving via disk winds, New Directions in Planet Formation, 2016

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。