

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2022

課題番号：18K13608

研究課題名（和文）連成シミュレーションによるスーパーアース形成過程と大気量進化の解明

研究課題名（英文）Formation of super-Earths and their atmospheric evolution by coupled simulation

研究代表者

荻原 正博 (Ogihara, Masahiro)

東京工業大学・地球生命研究所・研究員

研究者番号：90781980

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、惑星集積N体計算及び原始惑星系円盤進化計算をスーパーアースの大気量進化計算と連成してシミュレーションを実行することで、現実的なスーパーアース形成モデルを構築し、従来の形成モデルに内在する諸問題の解決に挑んだ。研究の結果、磁気駆動円盤風および光蒸発の影響下で進化する円盤モデルを考慮した場合には、観測されたスーパーアース系の様々な特徴（大気量、コア組成、軌道配置）を再現することが可能であることを発見した。更に、構築した円盤モデルを巨大ガス惑星形成やTRAPPIST-1惑星系形成に応用し、それぞれの惑星系の特徴を説明する際にも進化する円盤モデルが有用であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、現実的な円盤モデルを用いることによってスーパーアースの特徴を説明することができることがわかった。この研究の過程で、惑星形成は原始惑星系円盤モデルに強く依存するということが確認され、惑星形成研究における円盤モデルの重要性を指摘することに繋がった。従来の惑星形成研究では、1980年頃に提案された古典的な円盤モデルが使用されてきた。これに対し本研究の結果では、系外惑星系の特徴を説明する為には古典的な円盤モデルの使用は妥当ではなく、より現実的な円盤モデルの使用が必要であることを指摘したのである。円盤モデルは惑星形成の様々な研究に関わる為、この点が本研究の学術的意義の一つであると言える。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a realistic model of super-Earth formation by unifying planet formation simulation and disk evolution simulation with atmospheric evolution simulation. We also challenged to solve several problems in previous planet formation models. Using the protoplanetary disk model, which evolves under the influence of magnetically driven disk winds and photoevaporation, we found that various features (e.g., atmospheric mass, core composition, and orbital configuration) of observed super-Earth systems can be reproduced. We also applied the disk evolution model to the formation of gas giant planets and the TRAPPIST-1 system, and found that the evolving disk is also useful in explaining the characteristics of each planetary system.

研究分野：惑星形成論

キーワード：N体計算 太陽系外惑星 スーパーアース 惑星形成

1. 研究開始当初の背景

太陽系外惑星観測によって 1000 個以上の「短周期スーパーアース(軌道長半径が 1au 以下、質量が 100 地球質量以下と定義)」が発見されており、軌道分布などの特徴が統計的に議論可能になっている。更に惑星が保持する大気量も推定されており、多くの短周期スーパーアースは質量で 0.1-10%程度の水素・ヘリウム大気を保持していると考えられている。また、短周期のスーパーアースは短周期のガス惑星と比較して存在確率が 10 倍程度高く、これはスーパーアースが暴走的に周囲の原始惑星系円盤ガス(水素・ヘリウムが主成分)を獲得する「暴走ガス降着」を回避したことを示している。ところが従来の大気量進化計算によると、質量が約 5 地球質量以上の惑星は一般的に暴走ガス降着すると考えられており、観測結果と矛盾する。この問題に対して、暴走ガス降着を回避する方法について抜本的な解決策はなかった。この問題を「暴走ガス降着問題」と呼ぶ。

短周期スーパーアースの形成起源を記述したモデルは、原始惑星(火星サイズから地球サイズ程度)まで成長した軌道位置によって「その場形成モデル」と「軌道移動モデル」の 2 つに大別される。2 つのモデル間では惑星を作る材料物質が異なり、これは惑星の性質や生命居住可能性の議論にも直結することから、観測されたスーパーアースの形成起源を決定することは重要である。これまでそれぞれの形成モデルに従った惑星形成 N 体計算の実行により、どちらのモデルが観測されたスーパーアースの軌道分布を再現し得るかが議論されてきた。ところが、我々の過去の計算を含めた従来の N 体計算では「その場形成モデル」「軌道移動モデル」いずれも観測された軌道分布と矛盾しない結果が得られ、スーパーアースの形成起源を決定することはできていなかった。この問題を「形成起源問題」と呼ぶ。

2. 研究の目的

本研究課題では、惑星集積 N 体計算及び原始惑星系円盤進化計算をスーパーアースの大気量進化計算と組み合わせた最先端の惑星形成シミュレーションを実行することで、現実的なスーパーアース形成モデルを構築し、従来の惑星形成モデルに内在する諸問題(例:暴走ガス降着問題、形成起源問題)の解決に挑む。特に、これまで見過ごされてきた磁場駆動円盤風や光蒸発によって進化する原始惑星系円盤中でのスーパーアースの形成過程や大気獲得の具体的な描像を明らかにすることや、微惑星集積やペブル集積によって成長する際にスーパーアースが獲得する大気量の具体的な進化を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究課題では、惑星形成に関わるいくつかの重要な計算を組み込んだ惑星形成シミュレーションを実行する。具体的な計算としては、微惑星集積やペブル集積での成長と軌道進化を扱う惑星集積 N 体計算、乱流粘性に加えて磁気駆動円盤風や中心星放射による光蒸発を考慮した原始惑星系円盤進化計算、大気降着・衝突大気散逸・光蒸発による大気散逸を考慮した大気進化計算を考慮する。これらの計算を組み込んだ惑星形成シミュレーションの実行によって、スーパーアースの形成過程に生じる様々な物理過程の具体的な影響を明らかにし、またそれぞれの物理過程が形成するスーパーアースの特徴へ及ぼす影響を調べる。

4. 研究成果

本研究課題ではまず、原始惑星系円盤中の動径方向の降着流の速度がスーパーアースへの大気降着に及ぼす影響を調べた。円盤降着流によって大気降着が制限される効果を考慮した数値シミュレーションを実行した結果、磁気駆動円盤風によって駆動される高速な円盤風駆動降着流がスーパーアースへの大気降着に寄与しない場合には、スーパーアースは暴走ガス捕獲を回避することが可能であることを発見した。これにより、計算の結果形成するスーパーアースが保持する大気量は、観測されたスーパーアースの大気量とも整合的になり得ることもわかった。この研究は、限定された条件下ではあるものの「暴走ガス降着問題」に対して一つの解決策を提案したことになる。

続いての研究として、スーパーアースの成長と大気量進化を同時に追う複合シミュレーション

を本格的に実行し、以下の3つの物理過程がスーパーアースの大気量に及ぼす影響を評価した。まず、ペブル集積の結果として大気が加熱されることで、スーパーアースが獲得する大気量が抑制される効果を見た。その結果、ペブル集積による大気加熱は惑星形成後期段階では有効ではないことが明らかになった。次に、惑星同士の衝突時に大気が散逸する効果に着目した。シミュレーションの結果、惑星同士の衝突時にある程度の大気が散逸することがわかったが、一方でスーパーアースが大量の大気を獲得した後は惑星同士の衝突イベントの数が少ないため、衝突による大気散逸の効果は限定的であるということが明らかになった。最後に、惑星形成後に中心星からの放射により長時間かけて大気が宇宙空間へ流出する効果（光蒸発）も調べた。その結果、一部のスーパーアースにおいては長時間の大気流出が重要であるが、多くのスーパーアースはその効果に影響されないことが明らかになった。以上の結果から、「暴走ガス降着問題」を解決するという観点においては、ペブル集積による大気加熱・惑星衝突時の大気散逸・中心星放射による光蒸発は十分な役割を果たさないということがわかった。

更に別の研究として、原始惑星系円盤の進化について磁場駆動円盤風の影響に加えて中心星放射に伴う光蒸発の影響を考慮した上で、スーパーアースの形成と大気進化を追った。その結果、原始惑星系円盤は惑星形成後期に光蒸発によって素早い円盤散逸を経験し、これによりスーパーアースは大量の大気獲得を回避することが可能であることを発見した。これまでの観測的研究によって、スーパーアースは大量の大気を獲得していないことが明らかになっており、この観測的特徴の起源を説明することに成功したものである。即ち、これは「暴走ガス降着問題」に対して一つの解決案を提案したことになる。

我々はこのシミュレーションを更に詳しく分析し、スーパーアースの大気量に加えてその他の観測的特徴にも注目した。具体的には、これまでの観測から多くのスーパーアースのコアは岩石組成である可能性が高いこと、またスーパーアースが複数存在する系においては隣り合う惑星の軌道が平均運動共鳴関係に無いことがわかってきている。我々のシミュレーションの結果で形成したスーパーアース系の特徴は、これらの観測的特徴とも無矛盾であることもわかった。この結果はスーパーアースの形成起源としてその場形成モデルを支持しており、「形成起源問題」に対しても一つの案を提示することに繋がった。

以上の研究から、観測されたスーパーアースの様々な特徴の起源を説明する際には、磁気駆動円盤風及び中心星放射に伴う光蒸発で進化する円盤モデルが有望であることが明らかになった。そこで我々はこの円盤モデルを他の惑星系形成に応用する研究にも取り組んだ。具体的には、これまでに開発した原始惑星系円盤進化計算及び大気量進化計算を用いて巨大ガス惑星の形成シミュレーションを行った。これまでの観測によって、多くの系外巨大惑星はコアに対する大気（エンベロープ）の割合が小さいことが明らかになってきていたが、この特徴の起源については明確にわかっていなかった。本研究において現実的な円盤進化計算を導入した巨大惑星形成計算を行った結果、巨大惑星の暴走ガス降着が光蒸発による素早い円盤散逸によって途絶することがわかった。これにより、エンベロープ割合が小さい系外巨大惑星の特徴を説明することが可能であることを示した。

更に別の研究として、磁気駆動円盤風で進化する円盤モデルを TRAPPIST-1 系の形成に応用したシミュレーションも実行した。TRAPPIST-1 系には現在 7 個のスーパーアースが発見されているが、その一部の惑星がハビタブルゾーンに存在すると考えられている。従ってこの惑星系は非常に注目を集めており、これまでに様々な観測が行われ、比較的詳細な情報が明らかになってきている。我々は円盤風の影響下で進化する円盤中で TRAPPIST-1 系が形成した場合には、TRAPPIST-1 系の特徴的な質量分布を再現することが可能であるということを発見した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Ogihara Masahiro, Hori Yasunori, Kunitomo Masanobu, Kurosaki Kenji	4. 巻 648
2. 論文標題 Formation of giant planets with large metal masses and metal fractions via giant impacts in a rapidly dissipating disk	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 L1 ~ L1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202140464	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Ueda Takahiro, Ogihara Masahiro, Kokubo Eiichiro, Okuzumi Satoshi	4. 巻 921
2. 論文標題 Early Initiation of Inner Solar System Formation at the Dead-zone Inner Edge	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L5 ~ L5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ac2f3b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Ogihara Masahiro, Kokubo Eiichiro, Nakano Ryuunosuke, Suzuki Takeru K.	4. 巻 658
2. 論文標題 Rapid-then-slow migration reproduces mass distribution of TRAPPIST-1 system	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A184 ~ A184
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202142354	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Wimarsson John, Liu Beibei, Ogihara Masahiro	4. 巻 496
2. 論文標題 Promoted mass growth of multiple, distant giant planets through pebble accretion and planet-planet collision	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3314 ~ 3325
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa1708	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ogihara Masahiro, Kunitomo Masanobu, Hori Yasunori	4. 巻 899
2. 論文標題 Unified Simulations of Planetary Formation and Atmospheric Evolution. II. Rapid Disk Clearing by Photoevaporation Yields Low-mass Super-Earth Atmospheres	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 91 ~ 91
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aba75e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ogihara Masahiro, Hori Yasunori	4. 巻 892
2. 論文標題 Unified Simulations of Planetary Formation and Atmospheric Evolution: Effects of Pebble Accretion, Giant Impacts, and Stellar Irradiation on Super-Earth Formation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 124 ~ 124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab7fa7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ogihara Masahiro, Hori Yasunori	4. 巻 867
2. 論文標題 A Limit on Gas Accretion onto Close-in Super-Earth Cores from Disk Accretion	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aae534	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Masahiro Ogihara
2. 発表標題 Giant planets with large metal masses and metal fractions such as HD 149026b and TOI-849b form via giant impacts in a rapidly dissipating disk by photoevaporation
3. 学会等名 DPS 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masahiro Ogihara
2. 発表標題 Unified simulations of formation and atmospheric evolution: Origin of non-resonant super-Earths with less massive H/He atmospheres
3. 学会等名 Exoplanets III (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 荻原 正博
2. 発表標題 大気降着を考慮したN体計算によるスーパーアースの形成
3. 学会等名 JpGU2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiro Ogihara
2. 発表標題 Formation of close-in planets in an evolving disc with n-body simulations
3. 学会等名 Great Barriers in Planet Formation (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiro Ogihara
2. 発表標題 Unified model of formation and atmospheric evolution of super-Earths and Neptune-mass planets
3. 学会等名 Extreme Solar Systems VI (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiro Ogihara
2. 発表標題 Formation of super-Earths in an evolving disk
3. 学会等名 From protoplanetary discs to planetary systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荻原 正博
2. 発表標題 詳細な惑星形成過程を考慮したシミュレーションによるスーパーアースの形成と大気量進化
3. 学会等名 日本惑星科学会2019年秋季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiro Ogihara
2. 発表標題 Origin of close-in super-Earths: In-situ formation in an evolving disk due to disk winds
3. 学会等名 European Planetary Science Congress 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masahiro Ogihara
2. 発表標題 Formation of close-in super-Earths from embryos with suppressed type I migration
3. 学会等名 Take a closer look (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masahiro Ogihara
2. 発表標題 Formation of close-in super-Earths under suppressed type I migration
3. 学会等名 50th annual meeting division for planetary sciences (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------