

平成 22 年 5 月 25 日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007～2009

課題番号：19740279

研究課題名（和文） 原始惑星系円盤進化と巨大ガス惑星形成について

研究課題名（英文） Evolution of Protoplanetary disks and Formation of Gas Giant Planets

研究代表者

稲葉 知士（INABA Satoshi）

早稲田大学・国際教養学院・講師

研究者番号：30409718

研究成果の概要（和文）：

本研究では、巨大ガス惑星形成の新たなモデルの提案を行った。このモデルにおいて、巨大ガス惑星は原始惑星系円盤進化の副産物として形成されるのである。2007年度、2008年度は、このモデルに必要な素仮定を数値計算プログラムに導入した。2009年度は、数値計算プログラムを用いて原始惑星系円盤進化の数値計算を行った。その結果、原始惑星系円盤中に巨大ガス惑星の質量を持つ渦が形成され、この渦が巨大ガス惑星へと進化する可能性があることが分かった。

研究成果の概要（英文）：

We study a new mechanism to explain the formation of gas giant planets. A gas giant planet is formed while a protoplanetary disk evolves. We introduced some elementary processes (e.g., self gravity) into the numerical program to simulate the evolution of a protoplanetary disk. Using the developed numerical program, we simulated the evolution of a protoplanetary disk and found that some vortices with the mass of a gas giant planet are formed in a protoplanetary disk. The vortices are thought to evolve into a gas giant planet.

交付決定額

（金額単位：円）

|        | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2007年度 | 1,400,000 | 0       | 1,400,000 |
| 2008年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 2009年度 | 900,000   | 270,000 | 1,170,000 |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 総計     | 3,300,000 | 570,000 | 3,870,000 |

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：惑星形成・進化

## 1. 研究開始当初の背景

ペガサス座 51 番星を周回する巨大ガス惑星が 1995 年に発見されて以来、ドップラー法やトランジット法などを用いた数多くの観測がなされ、現在には 300 個を超える巨大ガス惑星が太陽以外の星の周りに発見された。その結果、星周りにおける巨大ガス惑星の存在の普遍性が明らかになった。一方、ハッブル宇宙望遠鏡などの観測は、星は生まれてから 500 万年程度の間、主にガスから成る原始惑星系円盤に囲まれていることを示している。巨大ガス惑星の主成分もガスであることを考えあわせると、巨大ガス惑星は原始惑星系円盤中で形成されたと考えるのは非常に自然である。本研究課題の最大の目的は、原始惑星系円盤中における巨大ガス惑星の形成過程を明らかにすることである。

現在まで、巨大ガス惑星形成の理論モデルとして、定常的な原始惑星系円盤中で固体粒子の合体成長を通して作られたコアが後から重い大気を獲得し纏うというコア集積モデルが一般に受け入れられている。しかし、従来の研究では不十分な解析しかされておらず、コア集積モデルにおいて重要なプロセス(微惑星同士の衝突破壊、原始惑星の纏う原始大気の効果)の考慮がされていなかった。そこで、我々は 2003 年に、それらの重要なプロセスを導入したコア集積モデルの評価を行い、結果を論文に著した (Inaba, Wetherill, and Ikoma 2003)。その論文によると、コア集積モデルでは巨大惑星形成に要する時間は、観測から見積もられる原始惑星系円盤の寿命に比べて一般に長すぎる。太陽系内の惑星を考えると、木星の形成はどうか説明可能であるが、土星、天王星、海王星の形成を説明するのは非常に困難であるとの結果を得た。

## 2. 研究の目的

本研究では巨大ガス惑星形成の全く新しいシナリオを提唱し、その検証を行う。コア集積モデルにおいて、時間進化しない定常な原始惑星系円盤が仮定されてきた。本研究では、その仮定を外し、原始惑星系円盤進化の副産物として巨大ガス惑星は形成されたとする理論モデルを構築する。原始惑星系円盤は、円盤内のガス間における角運動量の受け渡しによって進化する。この角運動量の受け

渡しの担い手として、磁気流体不安定が考えられる。原始惑星系円盤外側では、宇宙線でイオン化されたガスは磁場とカップルして磁気流体不安定を起こし、中心星方向への流れを生じる。一方、ガス密度の大きい円盤内側では宇宙線は円盤内部まで入ることが出来ないため、磁気流体不安定を起こす程イオン化率は高くならずガスは流れない。そのため、円盤の内側と外側の境界付近にガスが溜まる。ガスが溜まり、ある臨界密度を超えるとロスビー不安定という別の不安定が起こり、高圧の逆行渦が生成される。巨大ガス惑星形成の新しいシナリオでは、この生成された高圧の逆行渦中で、巨大ガス惑星が形成されたと考える。

この新しいモデルに従ってガス惑星が形成されるならば、コア集積モデルが抱えていた形成時間に関わる問題がない。また、原始惑星系円盤は星の周囲に普遍的に観測されるため、現在発見されているような太陽系外の惑星の普遍的な発見を説明するのにも適している。そのため、本研究において考えたガス惑星形成の新しいモデルに沿った数値計算を行い、このモデルの検証を行うのが目的である。

## 3. 研究の方法

研究の目的の部分で記した新しいモデルに従って巨大ガス惑星形成を考えるために、これまで開発した 2 次元流体計算を行う数値プログラムにいくつかの改良を加える必要があった。改良する際には、解析解が得られる単純なモデルと比較検討することにより、数値計算の精度を調べ、複雑なモデルにおいても精度のいい数値計算が出来ることを確認した。

最初に行った改良点は、数値計算に粘性項の導入した。原始惑星系円盤には磁気流体不安定を起こす粘性が高い円盤外側領域と、密度が高いため宇宙線によってガスがイオン化されず磁気流体不安定を起こせない粘性の小さい円盤内側がある。本研究では、これら粘性の異なる領域を同時に扱う必要があるため、数値計算において粘性を導入すると共に、粘性の場所依存性も考慮できるように数値プログラムを改良した。その結果、円盤外側領域と内側領域の境界付近にガスが溜まるプロセスを計算できるように数値計算

を改良した。

第2に行った改良点は、ガスの自己重力を考慮できるようにしたところである。粘性によって円盤外側から移動してきたガスは、円盤外側と内側の境界付近にガス溜まりを形成する。ガス溜まりの密度が大きくなると、ロスビー不安定を通して、多数の渦が形成される。ロスビー不安定で作られた渦の中心密度が上昇するとガスの自己重力が効いてくる。自己重力が十分に強くなると、周りからガスを取り込んでガス惑星へと進化する可能性がある。このガス惑星への進化のプロセスを記述するために、ガスの自己重力を数値計算に導入した。

最後に行った改良点は、輻射によるエネルギー散逸の効果を導入したことである。粘性で円盤外側から落下してきてガスの温度は、粘性加熱を受けて上昇する。しかし、現実的な円盤では、粘性加熱によって上昇した温度は、円盤内のガスやダストからの円盤上方や下方への輻射を通して下がるのが予想される。そのため、円盤進化を考える上では、輻射によるエネルギー散逸機構は非常に重要であるので、本研究において輻射を通したエネルギー散逸機構を導入した。

本研究では、これまでに開発してきたガスとダストの運動を計算する2流体の数値計算プログラムに上記の3つの改良を行って、円盤進化の副産物としてガス惑星が形成されるか調べた。

#### 4. 研究成果

まずは、円盤外側でのみ動く磁気流体不安定を模擬するため、円盤内を通して一定の粘性を持つ円盤の進化について調べた。粘性項を導入すると、円盤外側のガスは内側へと移動することが確認された。しかし、粘性によってガスの中心星方向の落下過程は記述されるものの、粘性加熱により円盤が異常に温められてしまうという欠点が発見された。この欠点を取り除くために、輻射による熱の散逸項をエネルギー方程式に導入した。導入した輻射項の数値プログラムのおかげで、円盤は過剰に加熱さないうちになり、定常降着円盤の数値計算に成功した。円盤全体として一定の粘性を使った次元の円盤では、解析解が知られているため、数値計算結果を解析解と比較して数値計算結果が解析解と一致することを確認し、数値計算プログラムに粘性項を導入することに成功した。行っている数値計算は非常に長い計算時間を要するため

に、共有メモリ型クラスタで動くように数値計算プログラムを改良し、計算速度を向上させた。

次に、円盤外側と内側において粘性のギャップを形成した。粘性の大きい円盤外側から流れてきたガスが内側との境界に溜まりリング状のガス溜まりを形成することが確認できた。ガス溜まりの密度が周囲に比べて3割程度大きくなると、ロスビー不安定になり、リング状の高圧部分は高圧の逆行渦へと分裂した。以前に行われた他の研究者の数値計算結果との比較を行い、同様な計算結果が得られることを確認した。

ロスビー不安定を通して形成された逆行渦は比較的安定であるが、永久には存在できず、最終的にはケプラーシアによって破壊されて、ガス密度の大きいリング領域へと戻ってしまう。リング領域のガス密度は、円盤外側から更に落下してくるガスによって上昇を続ける。リング内のガス密度が大きくなって、Toomreの $Q$ 値が2程度まで下がると、今度は自己重力不安定によってリングは再び多数の渦へと分裂してしまうことが示された。

自己重力不安定によって形成された渦は、自分の密度を上げずに、落下してきたガスを中心星方向へと流す。その結果、円盤内側に第2のリングを形成される。第1のリングと同様に第2のリングでも自己重力不安定が効いてくるToomreの $Q$ 値が2程度までガス密度を上昇させる。重力不安定によって第2のリングも多数の渦へと分裂し、外側から流れてきてガスを、更に内側へと輸送し、第3のリングの形成が始まる。このように、円盤進化の過程でガス密度の大きい複数のリング領域が形成される可能性が示唆される。

長時間の数値計算を行うと、第2のリングは最初に形成された渦に摂動を与え、第1のリングの場所に形成された多数の渦の合体成長を促し、巨大ガス惑星の質量を持つひとつの渦が形成される。この渦が巨大ガス惑星へと進化する場合があることが分かった。しかし、ひとつのパラメタの場合においてのみ巨大ガス惑星の形成が確認されたため、更なる検証が必要である。

5. 主な発表論文等  
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

- (1)  
i. Kou Yamada, Satoshi Inaba  
ii. TYPE I MIGRATION IN A RADIATIVELY INEFFICIENT DISK  
iii. Proceedings of the 42th ISAS Lunar and Planetary Symposium  
iv. 無  
v. 1巻  
vi. 2009年  
vii. 123-126

- (2)  
i. Satoshi Inaba, Kou Yamada, Takayuki Tanigawa, Pierre Barge  
ii. EVOLUTION OF AN ACCRETION DISK WITH A DEAD ZONE  
iii. Proceedings of the 42th ISAS Lunar and Planetary Symposium  
iv. 無  
v. 1巻  
vi. 2009年  
vii. 127-130

[学会発表](計5件)

- (1)  
i. Kou Yamada, Satoshi Inaba  
ii. TYPE I MIGRATION IN A RADIATIVELY INEFFICIENT DISK  
iii. Lunar and Planetary Symposium  
iv. 2009年8月7日  
v. 宇宙科学研究本部

- (2)  
i. Satoshi Inaba, Kou Yamada, Takayuki Tanigawa, Pierre Barge  
ii. EVOLUTION OF AN ACCRETION DISK WITH A DEAD ZONE  
iii. Lunar and Planetary Symposium  
iv. 2009年8月7日  
v. 宇宙科学研究本部

- (3)  
i. Satoshi Inaba  
ii. Formation of Gas Giant Planet  
iii. Invited Lecture  
iv. 2009年3月17日  
v. Ohio Wesleyan University

- (4)  
i. 山田 耕、稲葉 知士  
ii. 断熱ディスク内でのタイプ I 惑星移動  
iii. 日本惑星科学会  
iv. 2008年11月3日  
v. 九州大学

- (5)  
i. 稲葉知士  
ii. 原始惑星円盤の安定性について  
iii. 太陽系起源研究会  
iv. 2007年9月5日  
v. 沖縄県恩納村

6. 研究組織

(1) 研究代表者

稲葉知士 (INABA Satoshi)  
早稲田大学・国際教養学院・講師  
研究者番号: 30409718