

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月15日現在

機関番号：14501
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22540439
 研究課題名（和文） 木星質量の意味

研究課題名（英文） Meaning of Jupiter' s mass

研究代表者

中川 義次（NAKAGAWA YOSHITSUGU）
 神戸大学・大学院理学研究科・教授
 研究者番号：30172282

研究成果の概要（和文）：Core Accretion Model に沿った木星型惑星形成においては、形成される惑星の質量に上限が存在すること、その上限値は星雲のパラメータに余り依らずおよそ300～1000 倍の地球質量で、わが太陽系の木星の質量や多くの系外惑星の質量に一致していることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：We have found that the Jovian type planets which are formed through the Core-accretion process have an upper limit of their mass 300 - 1000 Earth' s mass depending on the parameters of the nebular disks weakly.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：数理系科学

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：木星 惑星形成 太陽系起源 系外惑星

1. 研究開始当初の背景

2006年夏、チェコ・プラハで開催されたIAU総会で、惑星の新たな定義が決定され、冥王星が惑星の分類から外れることになった。私もこのIAU総会に出席していたが、惑星定義の見直しにおいて、惑星系形成論の立場からの議論はほとんどなされなかったのが実態であった。冥王星を惑星から外すという最終決定は、惑星系形成論の立場から見ても合理的ではあるが、現場の議論は冥王星をいかにスマートに惑星から外すか、あるいは

残すか、という点に関心が集中し、惑星系形成論あるいは太陽系起源論の立場からの議論は欠如していた。IAUによる惑星の新定義がマスコミに大きく取り上げられ惑星に関する一般の関心が高まる中、木星の質量の意味を惑星形成の立場から今一度問い直すことは、時機を得た研究であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、まず我が太陽系における木星の質量の物理的意味を惑星形成論の立

場から明らかにし、さらに太陽系外惑星系における木星型惑星の質量の普遍性を闡明することである。近年発見の相次ぐ太陽系外惑星も、そのほとんどが我が太陽系の木星と同程度かせいぜいその数倍程度の質量を持つことが明らかになっている。私はこの事実注目する。この事実は、木星質量が何らかの普遍的意味を持つ質量であることを示唆しているように考えられる。太陽系星雲中で氷微惑星が集積し、まず中心核が形成される。中心核の質量が地球質量の10倍ほどに達すると、その重力に引かれて星雲ガスが中心核上へ accrete する。星雲ガスの accretion により原始木星の質量が増大すると重力がさらに強くなり、より遠方の星雲ガスが引きつけられて accrete する。上記のプロセスを繰り返すことにより、巨大ガス惑星となる。上述の過程で注意すべきことは、星雲ガスの accretion は、ガスが太陽の周りを公転しているため潮汐力の支配を受けることである。したがって、原始惑星の重力が強くなっても一定限界距離内の星雲ガスしか accrete せず、最終的には自律的に accretion が止むと予想される。そしてこのことが、木星質量を決定していると考えられる。本研究では、解析的理論的手法および流体数値シミュレーションにより、木星型惑星の限界最大質量の存在を示し、それを支配している物理パラメータを明らかにする。

3. 研究の方法

数値シミュレーションおよび理論的解析を行って研究を進めたが、具体的研究の方法については、次項4. 研究成果の中で成果と合わせて述べる。

4. 研究成果

ガス円盤中で巨大惑星がガス捕獲をしていく過程を調べるために、同様のガス捕獲過程である連星系のガス捕獲過程について調べた。計算手法としては連星周りの原始惑星系円盤のガス運動を調べるためにシアー流の長時間進化を精度よく記述できるよう改良された SPH 法を使って研究を行った (Particle Rezoning 法)。特に連星が楕円軌道を運動している場合には、長時間相互作用の結果、原始惑星系円盤の運動も楕円軌道になることが準解析的計算から期待される。そこで連星と原始惑星系円盤の双方が楕円軌道を運動する場合について調べ、原始惑星系円盤中にほとんど時間変化しない一本腕

の密度構造と、円盤内縁部に激しく時間変化するヒゲ状のガス流入構造があらわれることを明らかにした。これは原始惑星系円盤が円運動かつ連星が楕円運動をしている場合について、準解析的に求められる結果から定性的に予測される結果と無矛盾である。結果は石垣島国際会議「進化する惑星形成論」にて発表した。また計算手法に関する成果としては、SPH 計算で必要となる初期粒子配置決定に、擬似的な重力計算を応用した反復法が大局的な収束を加速するのに有効であることを明らかにした。またもう一方の研究の柱である準解析的研究は、最終的に行列の固有値・固有ベクトル計算に帰着される。この計算が大規模計算になった場合でも数値丸め誤差が結果に影響を与えないようにすることは重要である。そこで丸め誤差の影響を考慮せずにすむ多倍長精度を使った固有値・固有ベクトル数値計算プログラムを開発した。大規模計算においては計算量の低減は必須事項である。そこで本プログラムでは固有ベクトル計算の計算量を N^3 から N^2 に低減すべく、I-SVD アルゴリズムを採用した。

巨大ガス惑星が原始惑星系円盤中に生まれると、原始惑星と原始惑星系円盤は互いに重力的に相互作用を始める。この潮汐相互作用により原始惑星系円盤内の密度構造と速度構造は変化する。この密度速度構造の変化は一般には複雑な時間進化を示すが、これを様々なパターン速度を持った変化モードの重ね合わせとして表現することを考えた。星・惑星形成過程が進んで、ガス惑星の質量が原始惑星系円盤の質量に比べて十分小さくなった時点では、このような扱いは妥当である。さらに様々な変化モードのうち、永年進化に相当するモードに着目して時間発展方程式を導いた。この時間発展方程式は、強制振動項をふくむ時間発展型のシュレディンガー方程式に帰着される。このシュレディンガー方程式を、開発した大規模行列反転プログラムを使って解き、様々なガス円盤や巨大惑星モデルに適用した。その結果、巨大惑星の質量が大きいほど、惑星の軌道離心率が大きいほど、またこれらのモデルパラメータから求められる変化モードのパターン速度が0に近いほど、原始惑星系円盤内に大きな $m=1$ の密度・速度構造を生じることがわかった。それらの変化は恒星-惑星系周りの永年進化がその原因である。従ってこの密度・速度構造は公転周期程度のタイムスケールではほぼ定常であり、より長い時間をかけてゆっくりと変化する。これらの結果は Ishigaki International Workshop,

Formation of Stars & Planets 2011にて発表した。

太陽系星雲のガスを中心核上に重力集積することによる木星の外層形成とその終了による木星質量の確定のメカニズムを明らかにすることが本研究の目的であった。解析的研究で以下の描像が明らかになっている。ガス集積による質量増加に伴って木星の自己重力圏（ヒル球）が膨張し遠方の星雲ガスを集積捕獲し、木星の質量は増大を続ける。しかし、ヒル球の半径は木星質量の1/3乗に比例してしか増大しないのでやがて自己重力圏の膨張は鈍化し、星雲ガスの集積捕獲は実質的に停止する。これによって木星の最終質量は確定する。この質量は解析的に見積もることが出来て、地球質量M(E)の約300倍、現木星の質量ときわめてよく一致している。しかもこの質量は星雲のパラメーターに依存するところが少なく、どのような星雲モデルにおいてもほぼ同じ値となり、木星質量の値の普遍性を示している。これは本研究の成果の目玉の一つである。以上の理論解析的研究の結果を数値シミュレーションで確認することが、本研究のもう一つの課題であった。2名の研究分担者により、それぞれ粒子法、メッシュ法等異なる数値計算スキームでガス集積のいくつかの段階に於ける木星の周りのガス流の再現を試みた。その結果、木星質量が100M(E)ぐらいより小さな間は、星雲ガスがスムーズに木星に流れ込むが、木星質量が300M(E)ぐらいに達すると木星の周りに円盤の空隙が大きく広がり、星雲ガスの捕獲はきわめて困難になる状況が示された。これは、上述の理論解析の描像を裏付ける結果である。

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4件)

- ① K. Suguyama, A. Suzuki, J. Takahashi, T. Nakamura, S. Manabe, S. Sakai, R. Tsurumaki, R. Nakaoka, S. Tatsumi, I. Tani, N. Kato, R. Umemoto, T. Oshikawa, S. Mikami, K. Kuramoto, Y. Hayashi, and Y. Nakagawa, A Repository for knowledge of planetary science served by Center for Planetary Science (CPS), Planetary People (査読有) **21**, 368-376, 2012.

- ② Y. Nakagawa, Report for JSPS Fall Meeting 2012, Planetary People (査読有) **21**, 397-398, 2012.

- ③ Y. Nakagawa, Obituary: Chushiro Hayashi (1920-2010). Bulletin of the American Astronomical Society (査読無)、**43**, October 2011 <http://dx.doi.org/10.3847/BAASOBIT20111014>

- ④ 中川 義次、太陽系形成論「京都モデル」の意義、日本物理学会誌 (査読有) **65**, 787-791, 2010.

[学会発表] (計3件)

- ① Y. Imaeda, Secular Evolution of Circumbinary Disks, Ishigaki International Workshop, Formation of Stars & Planets 2011, 石垣島, October 7, 2011.

- ② A. Kataoka, H. Nomura, and Y. Nakagawa, Coagulation and settling dust aggregates with porosity evolution in planetary disks, Ishigaki International Workshop, Formation of Stars & Planets 2010, 石垣島, June 22, 2010.

- ③ Y. Imaeda, Interaction of Eccentric Binary with an Elliptic Gas Disk, Ishigaki International Workshop, Formation of Stars & Planets 2010, 石垣島, June 22, 2010.

[図書] (計0件)

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
中川 義次 (NAKAGAWA YOSHITSUGU)
神戸大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：30172282
- (2) 研究分担者
松田 卓也 (MATSUDA TAKUYA)
神戸大学・名誉教授

研究者番号：20026206

(3) 連携研究者

今枝 佑輔 (IMAEDA YUSUKE)

東京工業大学・綜合理工学研究科・

研究員

研究者番号：50372652