

学 位 審 査 報 告 書

(ふ り が な) 氏 名	むとう たかゆき 武藤 恭之
学位 (専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 号
学位授与の日付	平成 年 月 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	理学研究科 物理学・宇宙物理学 専攻
(学位論文題目) Diversity of Disk-Planet Interaction (円盤・惑星相互作用の多様性)	
論 文 調 査 委 員	(主査) 大向一行 准教授 柴田大 教授 国広悌二 教授

(続紙 1)

京都大学	博士（ 理学 ）	氏名	武藤 恭之
論文題目	Diversity of Disk-Planet Interaction		
（論文内容の要旨） 惑星形成理論において、原始惑星系円盤と惑星の重力相互作用は重要な素過程の一つである。一般に、原始惑星系円盤中に惑星が存在すると、惑星は周囲のガス円盤と重力的に相互作用することにより、角運動量をやり取りする。その結果、惑星の軌道長半径が変化し、惑星は原始惑星系円盤中を動径方向に移動する。この現象は原始惑星移動と呼ばれる。 もっとも簡単な等温の円盤で、かつ標準的な円盤モデルのパラメータを考えると、原始惑星移動は中心星に落下する方向に起こるということが知られており、しかもその時間スケールは観測されている円盤ガスの散逸時間に比較して短いと見積もられている。したがって、惑星は形成されても円盤中に維持されないということになる。これは、原始惑星落下問題と呼ばれ、惑星形成理論における深刻な問題の一つとなっている。 ところが、最近になって、原始惑星移動は円盤の物理状態の詳細に依存する可能性が指摘されてきており、原始惑星移動はその方向さえもはっきりしないという状態になっている。そこで、円盤・惑星相互作用の素過程を見直し、円盤がどのような物理状態にあればどのような相互作用が起こるのかということをも明らかにしていくことが重要になる。 円盤中の惑星が軽い場合には、円盤・惑星相互作用は線形解析を用いて定性的には理解することができる。そこで、本論文では、円盤・惑星相互作用に対し、円盤にかかる磁場や粘性の効果がどのように効くかを線形解析を主に用いて明らかにした。さらに、数値計算と解析的手法を組み合わせることによって、円盤・惑星相互作用の非線形性についても研究した。 まず、磁場のかかった円盤における円盤・惑星相互作用の研究においては、円盤・惑星相互作用の描像が磁場のない場合に比べてまったく異なっている可能性があることを示した。磁場の影響により、惑星が通常の音波のみでなく、磁気流体波も励起する。磁気流体波は惑星のすぐ近くで励起されることを明らかにし、磁場が強い場合には音波よりも磁気流体波の方が強く円盤・惑星相互作用に影響するということを示した。磁場のかかっている円盤との相互作用の結果、惑星にかかるトルクに関する解析的な公式を導き、数値計算と比較して非常によく一致していることを示した。 第二に、粘性のかかった円盤における円盤・惑星相互作用の研究においては、粘性のかかっている場合には、惑星の近傍の密度構造が円盤・惑星相互作用に重要な影響を与える可能性を示した。粘性のかかっていない場合には、惑星の近傍のガス密度の構造は対称的な構造をしており、惑星にトルクをかけないが、粘性がかかっている場合にはその構造が歪むことによって、トルクに重要な寄与をしている可能性がある。これは、今後の高解像度の数値計算の重要性を示すものである。また、この研究では円盤・惑星相互作用の解析における新しい線形解析の定式化を開発した。この定式化は粘性のみならず、他の効果も取り入れやすい定式化になっており、今後の研究の広がりも期待できる方法である。 最後に、円盤・惑星相互作用における非線形性の研究においては、線形解析によって多くのことが理解できると考えられてきたような軽い惑星についても、長時間の進化を考える上では非線形効果が無視できない可能性を示した。重い惑星は、原始惑星系円盤中にギャップをあけることは今まで知られていたが、本研究では、粘性のかか			

っていないような円盤を考えると、軽い惑星でさえも長時間かけてギャップをあける可能性があることを示した。また、ギャップ生成の過程には、波の非線形的な伝搬が重要な役割をしている可能性があることを示した。もし非常に深いギャップがあけば惑星移動の時間スケールは長くなることが期待される。とはいえ、最終状態を調べるには非常に長時間の計算が必要で、これは今後の課題として残されている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文では、惑星形成理論における円盤・惑星相互作用について、その重要性を明らかにするとともに、円盤の物理状態によってさまざまなモードがありうるということ、具体例を通じて示している。円盤・惑星相互作用において、今まで知られていなかった物理過程の影響や、非線形性を詳細に調べ、解析的および数値的両方の側面から、円盤・惑星相互作用の物理的性質に迫ろうとするものである。

惑星形成のモデルを構築するにあたって、大きな不定性を持つものが原始惑星系円盤の物理状態である。これは、原理的には星間雲の重力収縮のプロセスを詳細に調べることによって得られる。しかしながら、このような計算は非常に大きなダイナミックレンジを必要とするため、現在もまだ達成されていない。また、観測的に原始惑星系円盤の物理状態に制限を与えるという方法も考えられるが、ダストの光学的特性の不定性や、角度分解能の限界という問題があり、よく制限がつけられているという段階にはない。そこで、惑星形成のモデル構築にあたっては、円盤の物理状態を仮定して進めることが多いが、この過程の不定性に伴い、その後の惑星形成にどのような影響が出るのかということを考えることが重要になる。また、このような初期条件の多様性は、観測されている系外惑星の多様性の解釈にもつながる。

本論文では、まず、円盤・惑星相互作用の線形解析においては、宇宙物理的に重要になるであろう磁場および粘性（一般的に円盤上に存在していると考えられる乱流をモデル化した乱流粘性）について、円盤・惑星相互作用の定性的な描像を明らかにした。磁場の研究においては、磁気流体波の重要性を指摘し、また粘性の研究においては、惑星近傍の構造の重要性を指摘した。いずれの研究結果も、これまでにあまり知られていなかった円盤・惑星相互作用の描像を指摘したものであり、今後の高解像度数値計算の重要性を指摘するものである。

粘性の研究において用いられた、時間発展的に線形定常解を求める手法は、円盤・惑星相互作用の計算ではあまり行なわれてこなかった独自の手法である。本研究において、その有用性が明らかにされ、また時間発展の結果なぜ定常解が得られるのかという数学的なバックグラウンドについても論文中で議論されている。この手法は、円盤に粘性以外の他の効果もかかっていた場合にも簡単に応用が可能であり、今後の発展が期待される。

本論文では、線形解析だけでなく、円盤・惑星相互作用の非線形的な性質についても研究している。軽い惑星と円盤との相互作用およびそれに伴う密度波の伝搬は、線形解析である程度理解が得られると考えられてきたが、本論文では、波の非線形伝搬による衝撃波の形成が円盤の長時間進化に影響し、惑星の周囲にギャップをあける可能性があることを指摘した。軽い惑星でも周囲にギャップをあける可能性については、ごく最近になって高解像度の数値計算によって指摘されつつあるが、その物理的なメカニズムについて定量的に議論した研究はなく、本研究によって初めて明らかになった点である。

本論文は、惑星形成理論の包括的な解説から始まり、円盤・惑星形成理論の基礎的な内容をまとめたうえで、上述した著者本人の研究成果について首尾一貫した形でまとめられている。著者自身の研究については、上述したように、内容について十分な新規性および独自性を備えている。また、これらの成果は共同研究に基づいて得られたものであるが、審査対象者の寄与が十分に大きいことも認められる。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。

また平成22年1月14日に論文内容とそれに関連した事項について試問を行なった結果、合格と認めた。