

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	埋没惑星によって引き起こされるガスの流れ、ダスト動力学、及び原始惑星系円盤の構造
Title(English)	Gas flow, dust dynamics, and protoplanetary-disk substructures induced by embedded planets
著者(和文)	桑原歩
Author(English)	Ayumu Kuwahara
出典(和文)	学位:博士(理学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12323号, 授与年月日:2023年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:井田 茂,中本 泰史,佐藤 文衛,玄田 英典,奥住 聡
Citation(English)	Degree:Doctor (Science), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12323号, Conferred date:2023/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

(博士課程)

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	桑原 歩	
論文審査 審査員		氏名	職名	氏名	職名
	主査	井田 茂	教授	佐藤 文衛	教授
	審査員	中本 泰史	教授	玄田 英典	教授
		奥住 聡	准教授		

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は「Gas flow, dust dynamics, and protoplanetary-disk substructures induced by embedded planets」というタイトルであり、全6章から成っている。

第1章「General introduction」では、はじめに太陽系外惑星系及び原始惑星系円盤(以下、円盤)についての観測事実と、惑星形成過程の理論モデルに関するレビューを行い、これを踏まえて本論文の目的を述べている。近年の円盤観測から、ダストの空間分布にリング・ギャップ構造(ダストが濃集・枯渇している領域)が普遍的に存在していることが明らかになった。これらの構造は円盤内に存在する成長途中の惑星によって形成された可能性がある。過去の研究では、円盤内に存在するガス・ダストの空間分布にギャップを形成するような大質量惑星を想定しているが、観測的にはガスとダストの空間分布間の相関は判然としない。本論文は、円盤ガスの分布に顕著なギャップ構造を形成しない地球質量程度の小質量惑星に着目している。これまで小質量惑星によるリング・ギャップ構造形成は困難であると見なされてきた。近年の高解像度流体シミュレーションから、円盤内に埋没した小質量惑星は重力によって周囲のガスの流れを乱し、複雑なガス流れ場を作ることが明らかになった。円盤内に存在する小さなダストはガスからの抵抗を強く受けるため、ガス流れ場がダストの空間分布に影響を及ぼす可能性がある。本論文では、惑星が作るガスの流れ、及びガス流れ場の影響を受けたダストの動力学を調査することで、小質量惑星によるダストのリング・ギャップ構造形成シナリオを検証することを目的としている。

第2章「Gas flow induced by low-mass planets」では、円盤内に埋没した小質量惑星が作るガス流れ場の性質について述べている。近年の高解像度の3次元流体シミュレーションから、円盤ガスが惑星重力圏に極方向から流入して円盤赤道面から流出することが示されているが、本論文でも幅広いパラメータに対して3次元流体シミュレーションを実施し、円盤中心面を通して動径方向に流出するガスの速度が、惑星質量や円盤ガスの圧力勾配に応じてどのように変化するかを明らかにした。ガス流出速度は惑星質量とともに増加し、スーパーアース質量程度でピークを取る。また、圧力勾配が強く働くと、ガス流出速度が大きくなることを示した。さらに、シミュレーション結果と整合的なガス流出速度に関する解析式の導出も行っている。

第3章「Dust motion influenced by the planet-induced gas flow」では、第2章で得られた流体シミュレーション結果にもとづき、ガス流れ場の影響下でのダストの運動を調べている。ガス流れ場中のダストの運動方程式を数値積分した結果、惑星軌道の内外に向かって生じるガス流出によって、惑星近傍におけるダストの軌道が惑星軌道の内外へと大きくそらされることを明らかにした。この結果にもとづき、惑星成長率についても議論している。小さなダストほどガス流れ場の影響を強く受けるため、mmサイズ以下のダストの惑星への集積率は極端に減少し、惑星成長率が大きく低下する可能性があることを示した。また、ガスの流れによってダストの軌道が変化することで、円盤内における大局的なダストの空間分布にも影響が現れる可能性についても議論している。

第4章「Dust ring and gap formation by the planet-induced gas flow」では、第3章で提案した仮説を検証すべく、ガス流れ場の影響を1次元の定常移流拡散方程式に組み込み、ダストの面密度計算を行っている。その結果、ダストの拡散に寄与する円盤乱流の強度が弱く、惑星質量が1地球質量以上であるとき、1 cm以下のサイズのダストの空間分布にリング・ギャップ構造が形成されることを明らかにした。さらに、第2章で得られたガス流出速度に関する解析式を用いたガス流れ場中でのダストの運動を記述する理論モデルから、数値計算結果と整合的な解析式の導出も行っている。これにより、高い計算コストを必要とする流体シミュレーションを実施することなく、小質量惑星近傍においてガス流れ場の影響を受けたダストの動力学を推定することが可能になると結論づけている。

第5章「Discussion and outlook」では、第2~4章で得られた結果にもとづき、ガス流れ場の影響下での惑星系形成シナリオを議論している。最新の理論モデルや観測的制約にもとづき、円盤内におけるダストサイズ及び乱流強度を仮定することで、特に1 au以内の円盤内側領域において惑星の成長が抑制され、小質量惑星が多数形成される可能性を示した。このことは系外惑星の質量-軌道半径分布において、中心星近傍の領域で小質量惑星が豊富に見つかっていることと整合的である。また、本論文の結果と円盤観測結果を比較することで、特定の天体で見つかっているリング・ギャップ構造を説明し得る惑星質量・ダストサイズ・乱流強度の推定にも取り組んでおり、本論文が提案する理論モデルと観測的研究の結びつけを行っている。

最後に第6章「Summary」において本論文全体のまとめを行っている。

以上の通り、本論文は原始惑星系円盤内に埋没した小質量惑星が駆動するガス流れ場、及びガス流れ場の影響を受けたダストの動力学に関する理論モデルを新たに構築・提唱した。本論文の結果は、今後の理論・観測的研究の両面に新たな方向性を与えるものである。よって、博士(理学)の学位を与えるにふさわしいものと認める。

注意:「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。