

別紙 4

報告番号	※ 甲 第 号
------	---------

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 Dust-Gas Instabilities in Protoplanetary Disks: Toward Understanding Planetesimal Formation

(原始惑星系円盤におけるダスト・ガス不安定性：微惑星形成過程の解明に向けて)

氏 名 富永遼佑

## 論 文 内 容 の 要 旨

これまで4000個以上の惑星が太陽系外に発見されてきた。宇宙に普遍的に存在する惑星の起源解明は現代科学の最重要課題の1つである。惑星形成は、星の形成に付随してその周りにできる円盤構造（原始惑星系円盤）の中で起こると考えられている。円盤内の微量の固体微粒子（ダスト）が成長し、キロメートルサイズの微惑星の形成を経て惑星が形成されると考えられている。その中で、微惑星形成が様々な要因で困難であるとわかっており、宇宙物理学の重要課題として多くの研究が現在行われている。

近年の高解像度電波観測によって円盤内のダストがリング状に分布していることが明らかになった。リングの起源は未解明であるが微惑星・惑星形成との関連が示唆されている。リング形成機構の候補の1つとして永年重力不安定性が考えられている。永年重力不安定性はダストが受けるガス抵抗で駆動される不安定性であり、微惑星形成機構の候補としても有力視されている。申請者は永年重力不安定性による円盤進化を調べた。

まず永年重力不安定性を安定化するダストの乱流拡散に注目した。従来、ダスト拡散は拡散項を質量保存の式に導入することでモデル化されてきたが、その定式化では円盤の全角運動量保存則が破れてしまうことがわかっている。そこで平均場近似に基づき方程式を再定式化し、ダスト拡散の影響を運動量保存の式でも考慮することで保存則を満たしつつ拡散を記述できることを示した。再定式化した方程式をもとに線形解析を行った結果、従来過安定モードと考えられていた永年重力不安定性は、指数関数的に単調成長するモードであることがわかった。

次に永年重力不安定性の非線形過程を調べた。先行研究では永年重力不安定性の線形成長過程が調べられてきたが、微惑星形成への発展を議論するためには非線形成長の理解が不可欠である。非線形成長を調べる上で数値計算が有効な手段となるが、永年重力不安定性の成長時間はケプラー周期の100倍程度長く、数値拡散や誤差の蓄積をできるだけ回避した手法を用いる必要がある。そこで申請者は、ラグランジュセル法とシンプレクティック法に基づいてそれらを抑えた長時間流体計算法を定式化し、永年重力不安定性の長時間発展を数値的に調べた。その結果、非線形成長が起こればダストがリング状に集積し、密度が10倍程度上がることがわかった。高密度なダストリングは自己重力的な分裂を経由して微惑星形成に発展する可能性が示唆される。またその典型的な時間はリング半径でのケプラー周期よりも短いということがわかった。一方、非線形成長に至らなかった場合には、ダストリングは円盤内側の安定領域まで伝播し消失してしまうことがわかった。ダストリングは徐々に減衰していくため、安定領域であっても永年重力不安定性起源のリングが観測され得るという示唆を得た。

さらにサブミクロンサイズから起こるダストの付着合体成長から永年重力不安定性による微惑星形成を繋ぐ過程を調べた。永年重力不安定性は、ミリメートル程度の大きいダストがガスの数パーセント以上の質量を持つ場合に起こる。一方、付着合体成長によりそのサイズまで成長するとダストは動径方向に落下し、ダスト総質量が単調に減少してしまうことがわかっている。つまり成長したダストを再集積する機構が必要である。そこで申請者は、ダストの付着合体成長自体が駆動する円盤の不安定性(coagulation instability)をダストの再集積機構として提唱した。付着合体成長も考慮しダスト円盤の線形解析を行った結果、coagulation instabilityはダストの質量がガスの1000分の1程度であっても成長することがわかった。またその成長時間はケプラー周期の数10倍程度であり、ダストがなくなる前に再集積できることがわかった。ダスト拡散を考慮した場合、ガス円盤の厚み程度で成長率が最大となりダスト再集積を引き起こす。この最大成長波長は永年重力不安定性の最大成長波長と同程度であり、永年重力不安定性の前に必要なダストの再集積機構として有効であると期待される。つまり時間・空間スケールの両面からcoagulation instabilityが再集積機構として有力であることが本研究で示された。

以上のように申請者は、円盤の初期進化段階で起こるダストの付着合体成長とその後の微惑星形成への発展を、複数の不安定性による時間発展過程として論じた。coagulation instabilityによりダストの枯渇を回避し、永年重力不安定性の非線形成長が起こることで微惑星形成に至ることを示した。