

令和 3 年 5 月 14 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2015～2020

課題番号：15K05268

研究課題名（和文）原始惑星系ガス円盤の散逸に伴う微惑星形成モデルの構築

研究課題名（英文）Planetesimal formation induced by the gas disk dispersal

研究代表者

関谷 実（Sekiya, Minoru）

九州大学・理学研究院・名誉教授

研究者番号：60202420

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：星が生まれるときには、周囲にガスや固体微粒子から成る円盤が存在することが観測されている。太陽系当初の状態を保存している隕石は、主にコンドルールというミリメートルサイズの球状の岩石から成る。コンドルールが集まって微惑星という小天体が形成される過程として最も有力なのは、円盤内でガスと固体微粒子が摩擦相互作用をしているときに固体微粒子が濃集するストリーミング不安定性と呼ばれる機構である。本研究ではストリーミング不安定性による固体微粒子の濃集条件が2つのパラメータで表現できることを明らかにした。この結果は、様々な原始惑星系円盤における微惑星形成条件に応用可能である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原始惑星系円盤内で固体微粒子がストリーミング不安定性により濃集する条件を2つのパラメータで表現できたことは、太陽系だけでなく宇宙で普遍的に起こっている星形成過程における惑星形成についての研究を進めるために役立つ。ガスと固体微粒子からなる系は惑星形成に限らず存在するので、他の分野での固体微粒子の濃集プロセスへの応用も可能であると期待される。

研究成果の概要（英文）：The astronomical observations show that there are disks of gas and solid particles around forming stars. The primitive meteorites made mainly of chondrules that are mm-sized spherical rocks. The most promising process for the formation of planetesimals is the streaming instability, which boost the concentration of solid particles when the drag force between the gas and solid particles act in a disk. This work elucidates that the condition for the particles concentration is expressed by two parameters, which enabled us to apply the condition for various protoplanetary disks.

研究分野：宇宙惑星科学

キーワード：惑星 惑星形成 太陽系 隕石 微惑星

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 地球のような岩石と鉄からなる惑星(地球型惑星)は、微惑星と呼ばれる小天体が衝突合体を繰り返して形成されたと考えられている。地球型惑星は、溶融することにより、密度の高い鉄が中心に沈み核となり、密度が小さい岩石が核の周りをマントルとして取り囲む構造に変化しているために、太陽系形成当初の状態を保存していない。

(2) コンドライト隕石は、形成当初の微惑星内部の組織がよく保存された小惑星の破片であり、コンドルールと呼ばれるミリメートルサイズの球状の岩石、CAIと呼ばれる高温凝縮物、マトリックスと呼ばれるミクロンサイズのダストなどにより構成される。コンドルールの形成年代はCAIの形成年代(太陽系初期と考えられている)から約200万年後であり、微惑星形成はそれ以降に起こったはずである。

(3) 太陽系初期に太陽の周りを公転していた原始惑星系円盤のガスは、数100万年で散逸したと推定される。

(4) 先行研究(文献)により、固体微粒子のガスに対する比率が太陽系組成から推定される値の場合は重力不安定性(固体微粒子の集団が、自身の重力で集まる現象)による微惑星形成は起こらないが、比率が上昇すると微惑星形成が起こることが示唆されていた。

2. 研究の目的

原始惑星系円盤ガスの散逸に伴い、ガスに対する固体の比率が上昇したことが引き金になって、コンドライト隕石の組織を持つ微惑星が形成されたと予想し、コンドライト隕石の組織を持つ微惑星形成条件の解明を目的とした。

3. 研究の方法

(1) 定式化

コンドルールなどの固体微粒子には、固体微粒子のサイズに依存し、固体微粒子とガスの速度差に比例したガス摩擦力が働く。ガスには摩擦力の反作用が働く。固体微粒子は莫大な数あるので1個ずつの運動方程式を解くのは不可能である。そこで、実際の固体微粒子数よりはるかに少数の粒子で代表させて運動方程式を解く。円盤の全領域を解くのは不可能なので、円盤の一部を切り取った形で、星の周りを公転する小さな領域においてガスと粒子の運動を解く。

(2) 計算コードの選定と改良

固体微粒子とガスが摩擦力で相互作用する場合の運動を数値シミュレーションするためのいくつかのコードが公開されている。そのうち、本研究ではAthena 4.2コードを用いることにした(文献)。理由は、粒子に関するコードが解読でき、必要な変更が可能であったことや、国立天文台で共同利用可能なスーパーコンピュータとの相性が良かったことなどである。中心星の重力のガスへの作用、計算領域の境界から流失した粒子を反対の境界から流入させる方法、数値不安定を防ぐための時間刻みの与え方、初期の粒子分布の与え方などについて必要な改良を加えた。

4. 研究成果

(1) 原始惑星系円盤の中心面において圧力が極大・極小の軌道半径があるときの微惑星形成(文献)

3次元計算に入る前に、まず、計算時間がかからない2次元の数値シミュレーションを行った。具体的には、星の周りの原始惑星系円盤の公転軸について対称であることを仮定した。軌道半径方向にガス圧力が極大や極小になる位置が存在するような初期のガス分布の場合について、数値シミュレーションを行った。中心星の重力の円盤に垂直な成分により固体微粒子は円盤の中心面付近に集まった。同時に、ガスと固体微粒子の公転速度の差によりガス圧力が極大の半径(図1の上図で横軸の-3の位置)に向かって固体微粒子は集まっていった。圧力が極大になる半径付近では、固体微粒子の濃集が非常に顕著であり、自己重力によって集まることができる臨界密度を超えることが分かった。これにより、圧力極大の軌道半径があると、その付近で微惑星形成が促進されることが示された。他方、圧力が極小の位置(図1の下図で横軸の-20の位置)においても固体微粒子の濃集が促進されることが明らかになり、これは想定していなかった新たな成果であった。ガス圧力が極大や極小になる半径の周辺では、中心面付近の固体微粒子が濃集している領域とそれ以外の領域との相対速度が小さくなることにより、乱流が抑えられる。そのために、固体微粒子の濃集が促進されていくつかの固体微粒子の塊が生成されたということが分かった。

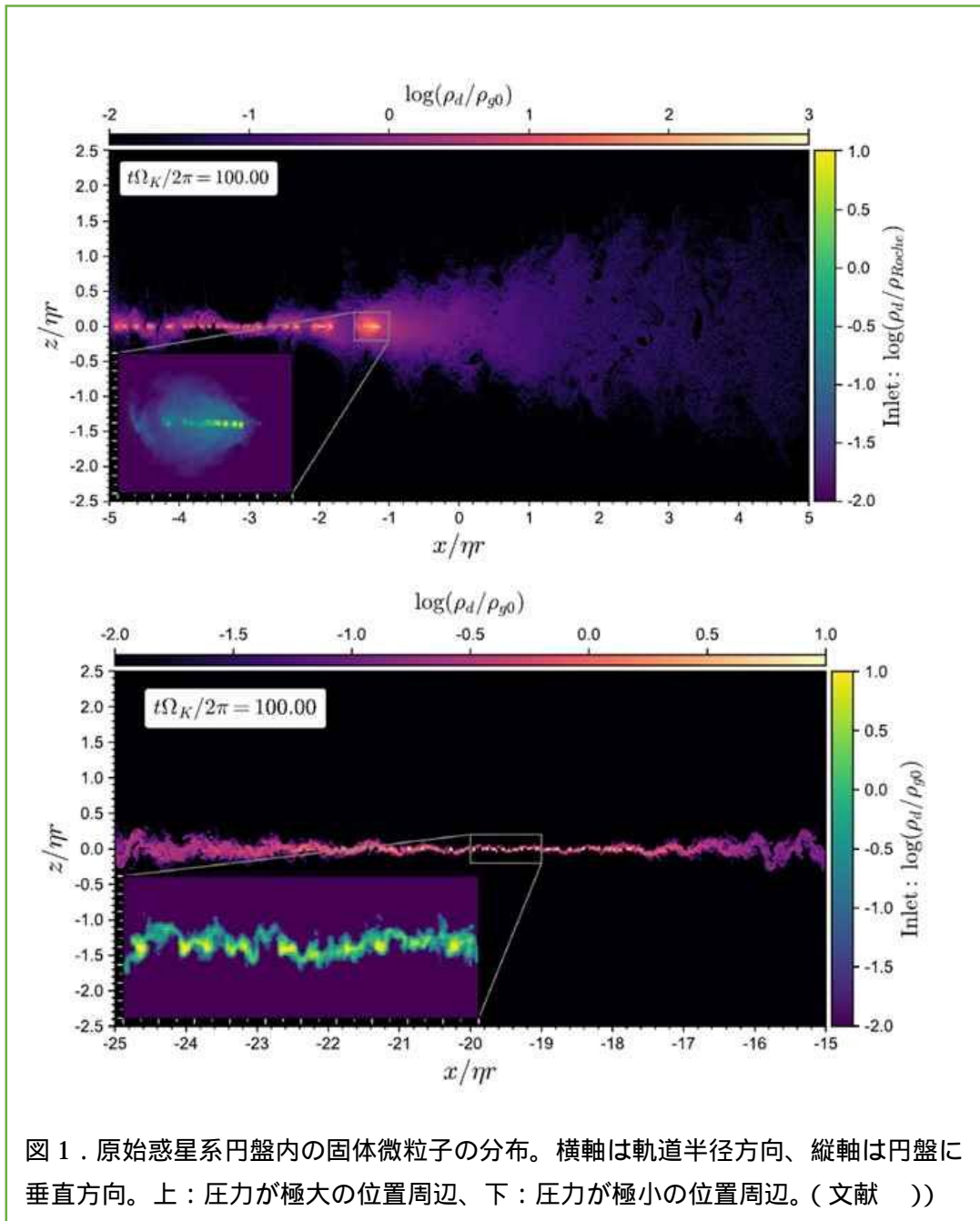


図1．原始惑星系円盤内の固体微粒子の分布。横軸は軌道半径方向、縦軸は円盤に垂直方向。上：圧力が極大の位置周辺、下：圧力が極小の位置周辺。(文献)

(2) 原始惑星系円盤内で固体微粒子が濃集する条件を表す2つのパラメータ(文献)
 粒子が初期に軌道半径方向に均一に分布する場合において3次元数値シミュレーションを行った。ただし、乱数により分布させているので、微小な揺らぎは与えられていて、これが不安定性のもとになる。軌道半径方向の初期の圧力勾配は一定と仮定した。円盤には乱流がもともとないことを仮定する。その場合でもストリーミング不安定性やケルビン・ヘルムホルツ不安定性により乱流が生じる。ストリーミング不安定性とは、固体微粒子に働くガス摩擦力と関係する不安定性であり、乱流の発生源になるが、固体微粒子を濃集するように働く場合もある。ケルビン・ヘルムホルツ不安定性とは、流れの速度差により生じる不安定性であり、原始惑星系円盤では固体微粒子の濃集した部分とそうでない部分の公転速度差が原因となって不安定性が起こり乱流を引き起こす。先行研究(文献)により固体微粒子の濃集条件は3つのパラメータで与えられることが分かっていた。本研究では、これらのパラメータをうまく組み合わせることにより、2つのパラメータで濃集条件を表すことができることを明らかにした。1つ目の τ はストークス数と呼ばれるもので、ガス摩擦が効くタイムスケールとケプラー角速度の積であたえられる無次元量である。このパラメータは先行研究でも用いられていた。2つ目の Σ は固体微粒子の面密度(円盤の単位面積当たりの固体微粒子の質量)を、ケプラー速度とガス公転速度との差、ケプラー角速度、およびガス密度を用いて無次元化した量である。図2に見られるように2つの無次元パラメータが同じ場合は、その他のパラメータの値が異なっても固体微粒子の濃集は同じように進む。パラメータの数が3から2に減ったことにより、相似則が成り立つ。すなわち、3つのパラメータ下での数値シミュレーションの結果のうち同じような結果になる組み合わせ

があることがあらかじめ予測できる。このことにより、様々な原始惑星系円盤での固体微粒子の濃集を調べるときに行うべき数値シミュレーションの回数を大幅に減らすことができる。また、ダスト濃集条件の物理的意味を考察するためにも本研究の結果は役立つことが期待される。

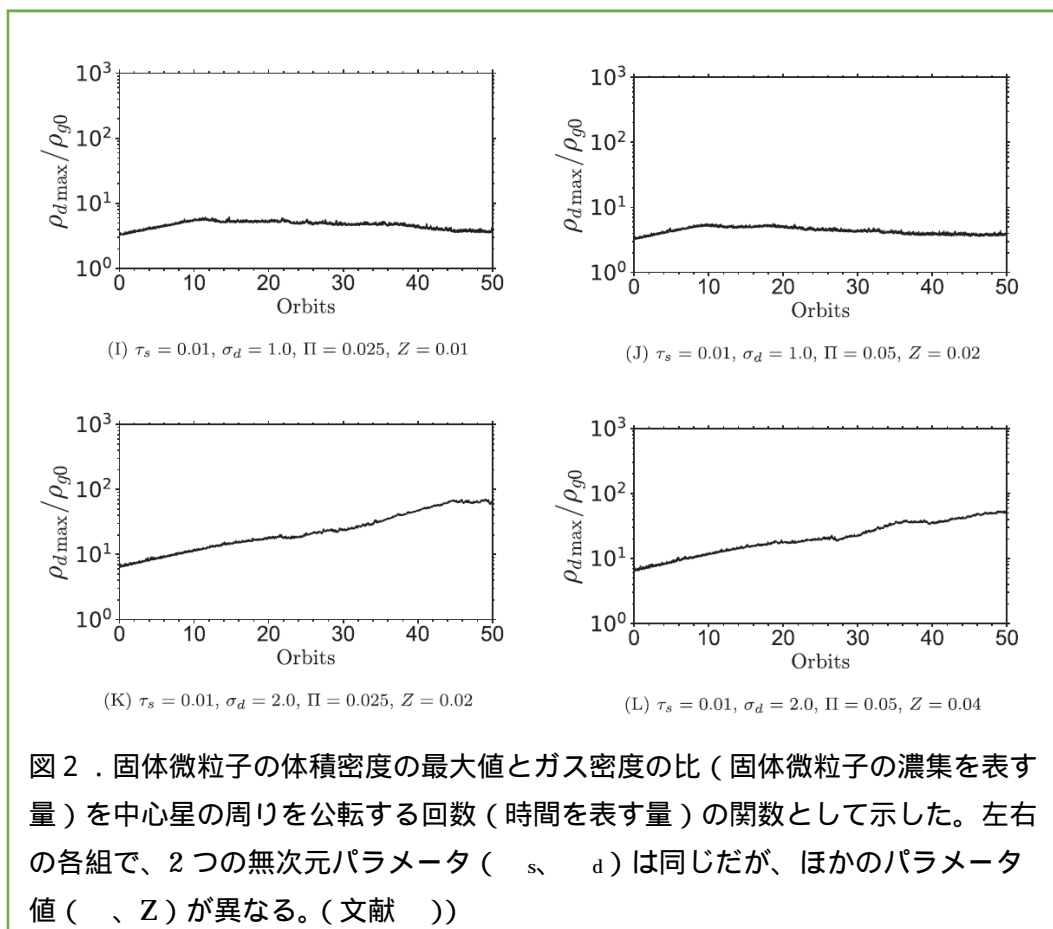


図 2 . 固体微粒子の体積密度の最大値とガス密度の比（固体微粒子の濃集を表す量）を中心星の周りを公転する回数（時間を表す量）の関数として示した。左右の各組で、2つの無次元パラメータ（ τ_s 、 σ_d ）は同じだが、ほかのパラメータ値（ Π 、 Z ）が異なる。（文献（1））

(3) 初期に固体微粒子がリング状に濃集している場合の3次元数値シミュレーション
 原始惑星系円盤において固体微粒子がリング状に集まっている場合があることは、観測や理論により示唆されている。初期にリング状に濃集している固体微粒子がさらに濃集するのか、それとも拡散されて一様な分布に向かうのかは、微惑星形成を考えるうえで興味深い問題である。本研究では円盤の一部を切り取った領域においてはリングを公転方向には一様な円柱状の分布で近似的に表すことにした。領域から流出した粒子は、反対の境界から流入させるようにしたために、計算領域中にある粒子数は増減しない。数値シミュレーションの結果、あらかじめ濃集していた固体微粒子がさらに濃集するための条件が、研究成果(2)で述べた濃集条件と同じ2つのパラメータで表されることがわかった。ただし、この結果は、原始惑星系円盤内での固体微粒子の初期の濃集のさせ方や数値シミュレーションを行う領域のサイズに依存する可能性があるため、さらなる検証が必要である。

< 引用文献 >

Sekiya, M. (1998) Quasi-equilibrium density distributions of small dust aggregations in the solar nebula, *Icarus*, 133, 298-309.
 Bai, X.-N. and Stone, J. M. (2010) Dynamics of solids in the midplane of protoplanetary disks: implications for planetesimal formation, *The Astrophysical Journal*, 722, 1437-1459.
 Onishi, I. K. and Sekiya, M. (2017) Planetesimal formation by an axisymmetric radial bump of the column density of the gas in a protoplanetary disk, *Earth, Planets and Space*, 69, 50.
 Sekiya, M. and Onishi, I. K. (2018) Two key parameters controlling particle clumping caused by streaming instability in the dead-zone dust layer of a protoplanetary disk, *The Astrophysical Journal*, 860, 140.
 Carrera, D., Johansen, A. and Davies, M. B. (2015) How to form planetesimals from mm-sized chondrules and chondrule aggregates, *Astronomy & Astrophysics*, 579, A43.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Sekiya Minoru, Onishi Isamu K.	4. 巻 860
2. 論文標題 Two Key Parameters Controlling Particle Clumping Caused by Streaming Instability in the Dead-zone Dust Layer of a Protoplanetary Disk	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 140
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/aac4a7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Onishi Isamu K., Sekiya Minoru	4. 巻 69
2. 論文標題 Planetesimal formation by an axisymmetric radial bump of the column density of the gas in a protoplanetary disk	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 50
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-017-0637-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 関谷実
2. 発表標題 原始惑星系円盤内のダストリングの局所数値シミュレーション
3. 学会等名 日本惑星科学会2020年秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 関谷 実、大西 勇武
2. 発表標題 ストリーミング不安定性の成長条件を表す臨界パラメータ
3. 学会等名 日本惑星科学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 関谷 実, 大西 勇武
2. 発表標題 原始惑星系円盤内のダスト・クランプ形成と個々のダスト粒子の運動
3. 学会等名 日本惑星科学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大西勇武、関谷実
2. 発表標題 原始惑星系円盤のダスト層における2次元軸対称不安定性の局所数値シミュレーション
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2016年大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 大西勇武、関谷実
2. 発表標題 原始惑星系円盤でのガスとダストの相互作用による不安定性の数値シミュレーション
3. 学会等名 日本天文学会2016春季年会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻惑星系形成進化学研究分野
<https://jupiter.geo.kyushu-u.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------