

令和元年6月12日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17661

研究課題名(和文) 原始惑星系円盤のダストと氷昇華線の統合進化モデル

研究課題名(英文) Modeling the coevolution of dust and the snow line in protoplanetary disks

研究代表者

奥住 聡 (Okuzumi, Satoshi)

東京工業大学・理学院・准教授

研究者番号：60704533

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：地球をはじめとする惑星は、若い星の周囲にあるガスと塵(ダスト)の円盤(原始惑星系円盤)の中で形成されると考えられている。この円盤の内側には水が存在できない領域があり、その領域の境界線のことを氷昇華線という。本研究では、原始惑星系円盤の現実的な内部加熱メカニズムを理論シミュレーションを用いて詳しく調べ、氷昇華線が太陽系形成の大部分の期間において現在の地球軌道よりも内側に存在していた可能性があることを明らかにした。また、ダストから惑星が形成される過程と、氷昇華線が移動する過程を矛盾無く取り扱える理論モデルを完成させ、氷昇華線の外側で水を多量に含む小天体が急速に形成される新たなメカニズムを発見した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球は岩石を主成分とする惑星であり、原始惑星系円盤の氷昇華線より内側で形成されたと考えられる。しかし、氷昇華線が具体的に太陽からどの程度の距離に存在していたのかは、これまで謎に包まれていた。本研究により、ダストから惑星が形成される過程と、氷昇華線が移動する過程を、1つの一貫した理論モデルによって研究することが可能になった。さらに、太陽系を生んだ円盤は従来の推定よりも低温だったはずであり、水に欠乏する地球は現在よりも太陽に近い軌道付近で形成された可能性があることを明らかにした。これらの成果は、「地球がどのように形成されたのか?」という人類の根源的な問いの解明を大きく後押しするものである。

研究成果の概要(英文)：Planets form in gas disks around young stars. These protoplanetary disks have an inner region where water cannot exist in its solid form. The outer boundary of this ice-free region is called the snow line. In this study, we investigated the efficiency of disk heating due to Joule dissipation, finding that the heating is so inefficient that the snow line in the solar nebula must have located interior to the current orbit of the Earth. We also developed a numerical model that can treat dust growth and disk temperature evolution, and discovered a new mechanism by which icy small solid bodies promptly form in a region outside the snow line.

研究分野：惑星形成論

キーワード：ダスト 原始惑星系円盤 惑星形成 氷昇華線

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

惑星は、若い星を取り囲むガスとダスト(塵)の円盤(原始惑星系円盤)の中で形成される。一般に原始惑星系円盤の温度は中心星に近いほど高温であり、ある軌道より内側では氷が昇華する。そのような軌道のことを氷昇華線(スノーライン)と呼ぶ。太陽系の地球型惑星(水星・金星・地球・火星)は水や氷に欠乏した惑星であるが(例えば地球の海水量は、地球質量の0.02%程度しかない)、このような惑星は氷昇華線より内側で形成されると考えられている。惑星系の水量の分布がどのように決まるかを明らかにするためには、原始惑星系円盤の中での氷昇華線の位置とその時間進化を理解することが決定的に重要である。

ところが、現実の原始惑星系円盤において氷昇華線がどこに存在するのかは大きな謎である。というのも、昇華線の位置を定める円盤の温度分布が、理論的にも観測的にも不確定であるためである。理論的には、円盤の温度分布は単純な中心星の直接照射だけからは決まらず、内部加熱源の空間分布や、円盤の冷却率を決める微小なダストの量と空間分布にも強く依存する。従来の円盤温度モデルは、内部加熱率やダストの量を自由なパラメータとして扱っており、昇華線の位置を確定的に予言することができない。このことは、惑星形成の理論モデルに大きな不定性をもたらしている。

2. 研究の目的

本研究の大目標は、原始惑星系円盤の温度構造や氷昇華線の進化を、ダストから惑星が形成される過程と一体的に明らかにすることである。この目標を達成するための基礎として、「円盤の現実的な内部加熱メカニズムである電流のジュール散逸が円盤の電離度にどのように依存するか」、「様々な物質から成るダストの成長効率が温度にどのように依存するか」の2点を体系的に明らかにすることを目指した。さらに、ダストの衝突成長と円盤の温度分布進化を一体的に取り扱うような統合モデルを構築し、形成過程が謎に包まれている微惑星(キロメートルサイズの固体天体)がダストと円盤温度分布の共進化の中からどのように誕生するかを解明することを目指した。

3. 研究の方法

(1) 非理想磁気流体シミュレーションによる円盤加熱率分布の体系的評価

原始惑星系円盤の主要な内部加熱メカニズムの1つは、円盤内部を流れる電流の電気抵抗による散逸(ジュール加熱)である。原始惑星系円盤はわずかに電離しており、これが星間磁場の中で運動すると内部に電流が発生する。このような電流生成と散逸は、電気抵抗を考慮した磁気流体力学(「非理想磁気流体力学」と呼ばれる)を用いて記述することができる。原始惑星系円盤の非理想磁気流体シミュレーションは盛んに行われているが、円盤の加熱構造に注目したシミュレーションはほとんど例がない(Hirose & Turner 2011)。特に、ダストが成長すると円盤の電離度(電気伝導度)が変化するが、電離度の変化とともに円盤加熱構造がどのように変化するかはこれまでの研究からは明らかでない。そこで本研究では、研究協力者の森昇志氏らと共同して、さまざまな電離度分布を仮定した非理想磁気流体シミュレーションを実施して電流の生成・散逸分布を体系的に調べた。磁気流体力学シミュレーションには公開コードAthena++を使用し、非理想磁気流体力学の3効果(オーム散逸、ホール効果、両極性拡散)のすべてを考慮した。

(2) 多様な物質からなるダストの昇華・焼結を考慮したダスト成長モデルの構築

惑星形成は、円盤の中の微小なダストが微惑星を形成するところから始まる。微惑星形成にはいくつかのメカニズムがあるが、どのメカニズムにせよダストが付着合体などを通じてある程度大きな固体粒子へと成長することが必要である。ダストの付着力は表面を覆う物質に依存するため、氷昇華線の前後で微惑星形成の効率は大きく変化する可能性がある。また、氷昇華線よりわずかに外側では、氷を含むダストの塊が焼結によって硬化し、付着合体しにくくなる可能性が指摘されている(例えばSirono 2011)。ダストの成長度合いが氷昇華線の前後で異なると、それは氷昇華線の進化自体に対しても影響を及ぼすことになる。本研究では、このようなダストと円盤温度構造の共進化の描像を解明するための基礎として、多成分の物質から成るダストの昇華・焼結を考慮したダスト成長モデルを構築した。具体的には、ダストの構成物質として、シリケート(珪酸塩)と水氷に加え、彗星に含まれる揮発性物質(一酸化炭素、二酸化炭素、アンモニアなど)の水や、惑星間ダストに見られるような難揮発性の有機物を考慮した。

(3) ダストと氷昇華線の同時進化計算モデルの開発

原始惑星系円盤の温度分布は、乱流および中心星からの照射による加熱と、円盤内のダストによる放射冷却を釣り合わせることで決めることができる。本研究では、ダストと昇華線位置の進化を同時に追跡可能な数値計算手法を開発した。この計算法で追跡するのは、円盤の中のダストの空間およびサイズ分布と、円盤温度の空間分布である。ダストの空間分布はガス円盤

中でのダスト運動（軌道移動、赤道面方向への沈殿、乱流による拡散）によって進化し、サイズ分布は各軌道でのダストどうしの衝突（合体、破壊）により進化する。本モデルでは、これらの進化を統計的な手法 (Okuzumi et al. 2012) を用いて追跡する。各時刻のダストの空間・サイズ分布がわかれば、そこから円盤の加熱および放射冷却を計算し、その時刻の円盤の温度分布を決定することができる。本モデルでは、円盤表面に影が差す場合でも温度分布を正しくかつ高速に計算できるようにするため、過去の研究 (Jang-Condell & Turner 2012) で開発された解析的な輻射輸送モデルを温度計算に採用した。

4. 研究成果

(1) 磁気流体力学的な円盤加熱が一般に非効率であることの解明

上記 3.(1) で述べたようなシミュレーションの結果、原始惑星系円盤の磁気流体力学的な加熱はほとんどの場合において非効率であることが明らかになった。円盤の赤道面付近では、ホール効果などによって強い磁場が生成される。しかし赤道面ではオーム抵抗が大きいため、電流の分布は円盤の表面付近に集中する傾向にある。円盤表面で生じた熱は放射(輻射)によって効率よく円盤外部へ逃げるため、惑星形成の場である円盤赤道面付近の加熱にほとんど寄与しない。さらに、赤道面付近で発生する強い磁場も、そのかなりの割合が円盤表面をすり抜けて円盤外部へと排出されることがわかった。このことは、磁場のエネルギーがすべて円盤内部のジュール熱に変換されるわけではないことを意味する。加熱が主に円盤表面で起こることは、先行研究(Hirose & Turner 2011)でも指摘されていた。我々の研究の新しい点は、これが現実的な電離度分布のもとでは高い一般性をもって起こることを示した点にある。本研究成果を 1 編の論文にまとめ、査読付き国際学術誌に発表した(発表論文③)。

(2) 円盤内部加熱の非効率性を考慮した氷昇華線の時間進化の再検証

円盤の内部加熱が非効率であるという上記 4.(1) の結果にもとづき、氷昇華線の時間進化を理論的に計算した。その結果、氷昇華線が円盤進化の非常に早い段階で、地球軌道より内側へと移動することを突き止めた。氷昇華線が地球軌道をまたいで移動しうること自体は、古典的な円盤モデルを用いた従来の理論 (例えば Oka et al. 2011) から予想されていたものである。本研究結果の新しい点は、現実的な円盤加熱モデルを採用すると、その移動が星・円盤形成の直後の段階ですでに起こりうることを示した点にある。このように低温の円盤では、現在の地球軌道 (太陽から 1 天文単位の距離) で岩石惑星を形成することは困難を伴うため、地球は現在よりも太陽に近い軌道で形成された可能性がある。本研究の成果は、太陽系形成論を大きく転換しうる非常に重要な成果である。本研究成果は現在、査読付き国際学術誌への投稿を目指して論文をまとめているところである。

(3) 氷昇華線におけるダストリング形成機構の発見と天文観測への示唆

3.(2) で述べたような、多成分水ダストの焼結を考慮したダスト成長モデルを用いて、原始惑星系円盤におけるダストの合体・破壊・軌道移動を同時にシミュレートした。その結果、それぞれの揮発性物質の昇華線のすぐ外側に、ダストがリング状に堆積することを発見した。昇華線のすぐ外側でダストの焼結が起これば、衝突破壊によってダストのサイズが小さくなる。小さいダストは中心星に向かって軌道移動する速度も小さいので、ダストは焼結を経験する軌道に堆積するようになるのである。このようなリング状のダスト堆積は、ダストを構成するさまざまな揮発性物質の昇華線付近で起こるため、円盤全体で見ると多重のダストリングが形成する。興味深いことに、ダストのリング状の構造は、多くの現実の原始惑星系円盤に見られることが最新の天文観測によって明らかになっている。本研究では、我々のモデルを代表的な多重リング天体であるおうし座 HL 星(HL Tau)まわりの原始惑星系円盤に適用し、この天体の多重リングが氷昇華線付近でのダスト焼結によるものであると解釈することが可能であることを示した (発表論文⑧)。この解釈が正しければ、このダストリングはさまざまな物質の氷昇華線の位置を示すものであるため、円盤の温度分布や氷昇華線の位置がどのように進化するかを理解するための重要な手がかりとなる可能性がある。

(4) 原始惑星系円盤偏光観測との比較による、二酸化炭素氷の低い付着力の検証

二酸化炭素の氷の付着力が低いとする最新の室内実験の報告 (Musiolik et al. 2016) に注目し、上記 4.(3) で使用したモデルに二酸化炭素氷の低い付着力を取り入れた。この新しいモデルを用いたシミュレーションより、HL Tau 周囲の円盤では、二酸化炭素氷の昇華線の外側にあるダストは 100 ミクロン程度までしか成長しないことを示した。研究協力者の田崎亮氏と共同して、このシミュレーション結果に基づいた円盤の電波偏光放射マップを作成したところ、最近の観測 (Stephens et al. 2017) で見られた HL Tau 円盤の特徴的な偏光パターンを再現することに成功した(発表論文①)。本研究成果は、二酸化炭素氷の低い付着力を、最新の天文観測との比較から初めて裏付けた点で画期的である。二酸化炭素氷の存在する原始惑星系円盤の外

側の領域は、円盤全体のダストの大部分が存在する領域であるため、この領域でのダストの成長が非効率であることは円盤ダストの大局的な進化の描像を大きく変える可能性がある。

(5) 難揮発性有機物によるダストの成長の促進と、局所的な岩石微惑星形成機構の解明

惑星間塵に含まれるような難揮発性の有機物は 200–300 K 以上の温度で軟化することが実験で示されている (Kudo et al. 2002)。この効果が氷昇華線より内側の岩石質ダストの成長を促進する可能性が指摘されていた (Kouchi et al. 2002) が、理論計算にもとづく本格的な検証はこれまで行われてこなかった。本研究では、研究協力者の本間和明氏と共同して、有機物に覆われた岩石質ダストの付着合体モデルを初めて開発し、このようなダストが氷昇華線より内側に存在するという仮定のもとでダスト進化をシミュレートした。その結果、有機物に覆われたダストは、円盤内の暖かい領域で十分に軟化して付着しやすくなり、衝突破壊を免れて微惑星サイズの天体へと成長することを明らかにした。400 K より高温の領域では有機物は破壊されるため、有機物による微惑星形成の促進は温度がおおよそ 200 K から 400 K の範囲に入る円盤領域でのみ起こりうる。興味深いことに、太陽系の地球型惑星を作った固体小天体は、金星・地球軌道付近の特定の領域で形成されたとする説がある (Hansen 2009)。我々の発見は、この説を微惑星形成の観点から裏付けるものである。本研究成果を 1 編の論文にまとめ、査読付き国際学術誌に発表した (発表論文②)。

(6) 氷昇華線が円盤表面につくる「影」が円盤温度構造・ダスト進化にもたらす影響の解明

4.(2)(3)で述べたダスト成長モデルと温度構造計算モデルを組み合わせ、水氷の昇華線の前後における岩石および水ダストの成長進化と氷昇華線の移動を同時に追跡するシミュレーションに成功した。計算では、岩石質のダストは水氷に覆われたダストよりも付着効率が低いことを仮定した。このような仮定は過去の理論計算 (Chokshi et al. 1993) や実験 (Gundlach & Blum 2015) にもとづくものであるが、近年ではこれらの先行研究の結果に疑問を投げかける理論計算・実験の結果も現れており (Kimura et al. 2015; Gundlach et al. 2018; Steinpilz et al. 2019)、仮定の妥当性は今後慎重に検討する必要がある。シミュレーションの結果、昇華線のすぐ外側には中心星の光が届かない「影」のような領域ができることを示した。この影領域は、昇華線より内側にある小さな岩石質ダストが、より外側の領域を照らす中心星の光を遮蔽してしまうことによって形成される。さらに重要なことに、影領域ではダストの衝突速度および軌道移動速度が低下し、効率よく微惑星が形成されるというこれまで知られていなかった現象を発見した。円盤の中におけるダストの軌道移動は円盤ガスの圧力勾配によって生じるのだが、影領域ではガス圧力の低下するため、移動移動も遅くなるのである。このような急速微惑星形成は、円盤の内部加熱源が存在する場合でも起こるが (下図参照)、4.(1)で示したように内部加熱が非効率である場合はより顕著に起こる。以上の結果は、本研究課題で注目したダストと円盤温度構造 (氷昇華線) の連動した進化が、微惑星形成を理解するために決定的に重要である可能性を示すものである。本研究成果は国内の学会において発表済みであり (学会発表④)、今後速やかに論文化していく予定である。

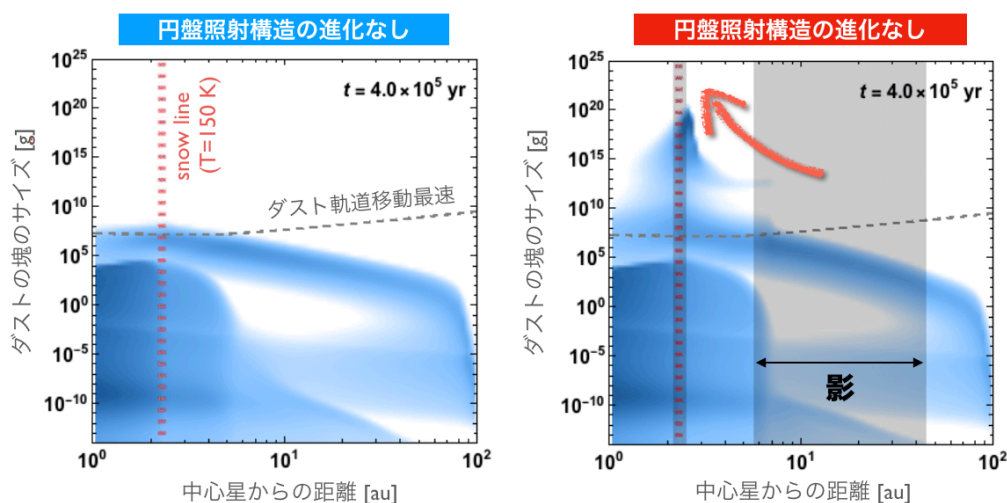


図: 原始惑星系円盤におけるダストと昇華線進化の統合シミュレーションの結果の例。上図は計算開始から 40 万年後のダストの空間・サイズ分布を表す。左パネルと右パネルはそれぞれ、中心星による照射加熱の時間進化を無視した計算と考慮した計算の結果を示している。これらの計算では、昇華線より内側の岩石ダストが低い付着効率を持つと仮定している。照射加熱の時間進化を考慮した計算では、円盤外側に照射光の当たらない「影」領域 (灰色領域) が生じる。この領域はガスの温度と圧力が低下し、ダストが中心星へ落下するよりも速く成長するようになる。その結果、影領域もしくはそれよりも内側の領域で、微惑星が形成される (赤色矢印)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 16 件)

- ① Okuzumi, S., & Tazaki, R. 2019, Nonsticky Ice at the Origin of the Uniformly Polarized Submillimeter Emission from the HL Tau Disk, *The Astrophysical Journal*, 掲載受理 (掲載巻・頁・DOI 未定), 査読有, <https://arxiv.org/abs/1904.03869>
- ② Homma, K. A., Okuzumi, S., Nakamoto, T., & Ueda, Y. 2019, Rocky Planetesimal Formation Aided by Organics, *The Astrophysical Journal*, 877, article id. 128, 査読有, DOI: 10.3847/1538-4357/ab1de0
- ③ Mori, S., Bai, X-N., & Okuzumi, S. 2019, Temperature Structure in the Inner Regions of Protoplanetary Disks: Inefficient Accretion Heating Controlled by Nonideal Magnetohydrodynamics, *The Astrophysical Journal*, 872, article id. 98, 査読有, DOI:10.3847/1538-4357/ab0022
- ④ Ueda, T., Flock, M., & Okuzumi, S. 2019, Dust Pileup at the Dead-zone Inner Edge and Implications for the Disk Shadow, *The Astrophysical Journal*, 871, article id. 10, 査読有, DOI: 10.3847/1538-4357/aaf3a1
- ⑤ Ueda, T., Okuzumi, S., & Flock, M. 2017, Analytic Expressions for the Inner-rim Structure of Passively Heated Protoplanetary Disks, *The Astrophysical Journal*, 843, article id. 49, 査読有, DOI:10.3847/1538-4357/aa74b5
- ⑥ Schoonenberg, D., Okuzumi, S., & Ormel, C. W. 2017, What pebbles are made of: Interpretation of the V883 Ori disk, *Astrophysical & Astrophysics*, 605, article id. L2, 査読有, DOI: 10.1051/0004-6361/201731202
- ⑦ Mori, S., Muranushi, T., Okuzumi, S., & Inutsuka, S. 2017, Electron Heating and Saturation of Self-regulating Magnetorotational Instability in Protoplanetary Disks, *The Astrophysical Journal*, 849, article id. 86, 査読有, DOI: 10.3847/1538-4357/aa8e42
- ⑧ Okuzumi, S., Momose, M., Sirono, S., Kobayashi, H., & Tanaka, H. 2016, Sintering-induced Dust Ring Formation in Protoplanetary Disks: Application to the HL Tau Disk, *The Astrophysical Journal*, 821, 82, 査読有, DOI: 10.3847/0004-637X/821/2/82

〔学会発表〕 (計 40 件)

- ① 奥住 聡, CO₂ 氷を考慮したダスト成長モデルによる HL Tau 円盤のサブミリ波偏光観測の再現, 日本天文学会 2019 年春季年会, 2019 年
- ② 奥住 聡, 惑星形成研究の最新の動向と将来(招待講演), 宇宙電波懇談会シンポジウム 2018, 2018 年
- ③ 奥住 聡, 焼結が誘起する若い原始惑星系円盤での多重ダストリング形成, 日本惑星科学会 2018 年秋季講演会, 2018 年
- ④ 奥住 聡, ダストとスノーラインの共進化: 数値計算法の開発, 日本天文学会 2018 年秋季年会, 2018 年
- ⑤ 奥住 聡, CO₂ 氷が引き起こすダストの衝突破壊: HL Tau 円盤の観測への示唆, 日本天文学会 2018 年春季年会, 2018 年
- ⑥ Okuzumi, S., Dust growth inside and outside the snow line (招待講演), Disk Formation Workshop 2017, 2017 年
- ⑦ Okuzumi, S., Dust growth and planetesimal formation near the snow line in protoplanetary disks (招待講演), JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 2017 年
- ⑧ Okuzumi, S., Satellitesimal formation in circumplanetary disks (招待講演), Circumplanetary Disks and Satellite Formation, 2017 年
- ⑨ Okuzumi, S., Dust Sintering and Ring Formation near the Snow Lines in Protoplanetary Disks (招待講演), New Directions in Planet Formation, 2016 年
- ⑩ Okuzumi, S., Dust growth in the early stage of planet formation disks (招待講演), New Directions in Planet Formation, 2016 年

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.geo.titech.ac.jp/~sokuzumi/>

6. 研究組織

(2)研究協力者

研究協力者氏名： 森 昇志
ローマ字氏名：(MORI, shoji)

研究協力者氏名： 田崎 亮
ローマ字氏名：(TAZAKI, ryo)

研究協力者氏名： 本間 和明
ローマ字氏名：(HOMMA, kazuaki)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。