

氏 名 坂谷 尚哉

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1747 号

学位授与の日付 平成27年3月 24 日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Experimental Study on Thermal Conductivity of Powdered
Materials under Vacuum and Its Application to Thermal
Evolution of Planetesimals

論文審査委員 主 査 教授 早川 基
准教授 田中 智
准教授 岩田 隆浩
准教授 小川 博之
教授 荒川 政彦 神戸大学大学院

論文内容の要旨
Summary of thesis contents

Experimental Study on Thermal Conductivity of Powdered Materials under Vacuum and Its Application to Thermal Evolution of Planetesimals

太陽系の過去から現在において、粉体物質は普遍的に存在し、太陽系天体の進化に重要な役割を果たしてきた。例えば、太陽系初期に形成した微惑星は、星雲中のダスト（粉体）の集合体であったと考えられており、また、現在の月や小惑星などの表層はレゴリスと呼ばれる岩石の粉砕物で覆われている。このような粉体物質の熱伝導率は真空下において空隙のない岩石に比べて 2 桁以上低いことが知られている。そのため、粉体の集合体である微惑星や表層がレゴリス粒子で覆われている天体の熱進化は、固結した岩石のみからなる天体とは大きく異なる。しかし、真空下での粉体の熱伝導率についての実験的、理論的理解は不十分であった。真空下での粉体の熱伝導率は粒径や空隙率、圧縮応力など様々なパラメータに依存することが知られているが、それらのパラメータ依存性は十分に調査されておらず、粉体熱伝導率の理論モデルは構築されていないのが現状である。本論文は個々の依存パラメータを精度よくコントロールした状況において真空下で粉体の熱伝導率測定実験を行い、パラメータ依存性を系統的に調査した。更に、これらの実験結果に基づいて真空下での粉体の熱伝導率モデルを構築し、そのモデルの応用例として、粉体集合体の微惑星の熱伝導率を推定し熱進化計算を行った。

サンプルにはアナログ物質として主に粒径 1 mm 以下の粒径の異なる 6 種類のガラスビーズを用いた。その他、月レゴリスシミュラント、金属ビーズを用いた。本論文で依存性を調査したパラメータは、温度、圧縮応力、粒径、空隙率、焼結度、物質の種類、粒径分布である。この中で外的な条件である温度と圧縮応力は異なる 2 つの実験系を用いて独立に制御し、その他のパラメータは異なるサンプルを用いること、およびサンプルの充填状態を変えることによってコントロールした。特に、全てのサンプルに対して取得した温度依存性データを利用することにより、粉体の実効的な熱伝導率に対する伝導寄与（固体伝導率）と輻射寄与（輻射伝導率）の 2 つの寄与率を決定し、それぞれの寄与のパラメータ依存性を調査した。実験中の真空度は 10^{-2} Pa 以下であり、熱伝導率は線加熱法で測定した。

本研究の主要な実験結果を以下にまとめる。

- (1) 固体伝導率の粒径依存性は、粒径 50 μm 以上と 10 μm 以下で異なる傾向を示した。粒径 50 μm 以上の 5 種類のガラスビーズは粒径の増加に伴って 0.001 W/mK から 0.003 W/mK までの増加を示し、粒子表面に存在している凹凸の影響を反映していると考えられる。一方、10 μm 以下のガラスビーズは約 0.02 W/mK の 1 桁高い固体伝導率を示した。これは粒子表面が滑らかで、小さな粒子ほど支配的に働く付着力の影響であると推測される。
- (2) 固体伝導率は空隙率の増加によって減少し、空隙率約 0.49 から 0.86 の範囲で 1 桁以上の変化を示した。この傾向は空隙率の増加によって、粒子同士の接触点の数、および単位体積当たりの粒子数が減少したためと解釈される。
- (3) 圧縮応力が大きいほど熱伝導率は増加し、ガラスビーズの固体伝導率は圧縮応力の 0.29~0.35 乗に比例した。粒子の弾性変形による接触面積が増加することが原因であ

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

り、固体伝導率が粒子同士の接触面の半径に比例することが明らかにした。

- (4) 焼結ガラスビーズの熱伝導率測定の結果、未焼結のガラスビーズに比べて 2 桁高い熱伝導率が測定された。焼結体の熱伝導率は粒子間の接触面（ネック）の半径を粒子の半径で規格化したネック半径比でスケーリングされることが分かった。
- (5) 輻射伝導率は粒径とともに増加した。これは、粒径が大きいほど空隙サイズに代表される輻射熱輸送距離が長くなるためである。
- (6) 空隙率 0.6 以上の範囲では、空隙率の増加によって輻射伝導率が高くなった。粒径依存性の場合と同様に空隙サイズが大きくなる影響だと考えられる。一方、空隙率 0.6 以下ではサンプル内での輻射伝導率の不均質性が大きく、この領域での依存性は判断できなかった。

これらの実験結果から推察される熱輸送メカニズムに基づき、固体伝導率、輻射伝導率の理論モデルを構築した。固体伝導率は均質サイズの球の接触点におけるコンダクタンスの直列・並列接続問題として解いた。接触点でのコンダクタンスは応力依存性の実験結果から推察されるように接触半径に比例するとし、自重などの外的な力と付着力を考慮した JKR 理論を用いて接触半径は決定される。輻射伝導率は平行板間の輻射問題として解いた。平行板間の距離は粒子間の実効的な熱輻射距離を表している。実験値との比較の結果、本論文で構築した固体伝導率モデルは最大で 3 倍程度実測値よりも高い値を示すことが分かった。この差は、粒子表面に存在している表面凹凸による実際の接触面積の縮小を反映していると思われる。一方、輻射伝導率は粒径 10 μm 以下の高空隙率のサンプルの場合は、約 15 倍の補正が必要であることが分かった。本研究で用いた高空隙率サンプルは、個々の粒子から成る大きな塊が形成している。それらの中には大きな空隙が存在しており、それら大きな空隙を通った熱輻射が支配的であるためモデルと実測値の違いが生じたと考えられる。一方、このような塊を形成していない粒径 50 μm 以上のサンプルに対しては、実測値とモデルの差はファクター 4 以下であった。

構築した熱伝導率モデルの一つの応用として、1 μm のダストからなる空隙率 90% の微惑星の熱伝導率を推定し、熱進化の数値計算を行った。推定した熱伝導率は温度 300 K において約 0.003 W/mK である。本論文では放射性核種による温度進化の計算と同時に、ダストの焼結によるネック成長の方程式を解くことにより、微惑星の熱進化によるネック成長を調査した。その結果、半径数百 m という小さな微惑星でも、ダストの断熱効果により内部温度は焼結が起こるのに十分な温度に達することが分かった。また、微惑星の形成から最短 7 万年でネックの形成が起き始めることが明らかとなった。標準的な惑星形成モデルである京都モデルでは、重力不安定によって瞬時に集積した km サイズの微惑星が衝突合体成長で現在の惑星系が形成されたと考えられている。そこで、微惑星形成から衝突するまでの時間と微惑星内部で焼結が起こるまでの時間を比較した。地球軌道付近では衝突タイムスケールは焼結が始まるまでにかかる時間よりも 1 桁以上短く、初期の微惑星の衝突合体成長は未焼結の状態に進む。一方、小惑星帯付近ではこれらのタイムスケールが同程度となり、微惑星の衝突は焼結した硬い状態に進む可能性があることが分かり、地球軌道とは衝突後の結果は異なることが示唆される。また、衝突時に微惑星の温度は初期温度よりも数百 K 上昇しているため、衝突前の熱進化は衝突合体成長した天体の熱進化にも影響を与えると考えられる。これまでの微惑星進化に関する研究では、熱進化と衝突進化は独立に取り扱われてきたが、このように精密に検討された粉体の熱伝導率の特性を取り入れて両者を結合させることにより、新たな微惑星の熱進化と衝突進化の具体的な研究を發

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

展させられる可能性があることを示すことができた。

(別紙様式 3)
(Separate Form 3)

博士論文の審査結果の要旨

Summary of the results of the doctoral thesis screening

Experimental Study on Thermal Conductivity of Powdered Materials under Vacuum and Its Application to Thermal Evolution of Planetesimals

真空下での岩石質粉体の熱伝導率は空隙のない岩石に比べて 2 桁以上低いことが知られている。太陽系初期に惑星形成に先立って形成されたと考えられる微惑星は、原始太陽系星雲内のダストの集合体であったと推定される。また、月や小惑星の表層は岩石が粉砕されたレゴリスで覆われている。粉体物質の強い断熱性のため、このような天体の熱進化は固結した岩石のみからなる天体とは大きく異なると予想され、粉体の熱伝導率が天体の熱進化をコントロールする重要なパラメータとなる。一方で、粉体の熱伝導率は温度や粒径、空隙率など様々なパラメータに依存するが、それらの依存性は十分に調査されておらず、粉体の熱伝導率の理論モデルは完全には構築されていない。本論文は、複数のパラメータ依存性を実験的に調査し、これらの実験結果に基づいた粉体の熱伝導率モデルの構築、および、そのモデルを用いた微惑星の熱進化計算を行った研究である。

本論文の第 1 章では、本研究の惑星科学における粉体の熱伝導率の重要性と研究目的を示した。

第 2 章では真空下での粉体物質の熱伝導率に関する実験的な先行研究の包括的なレビューを行った。研究によって実験結果が調和的ではないこと、各パラメータ依存性の物理的な要因が不明確であることを指摘し、系統的な実験によるパラメータ依存性の総合的な理解が必要であることを主張している。

第 3 章では、サンプルの記載、実験系の構成、および全ての実験結果について記載している。本論文では粒径の異なる 6 種類のガラスビーズ、金属ビーズ、月レゴリス模擬物質を用い、温度、粒径、空隙率、圧縮応力、物質固有の熱伝導率、粒径分布、焼結度が熱伝導率に与える影響について調査した。真空下における粉体の実効的な熱伝導率は、粒子間の接触面を通った熱伝導の寄与である固体伝導率と粒子間の空隙を通った熱輻射の寄与である輻射伝導率の和で表される。本研究では温度依存性の実験データを用いて、全てのサンプルに対して固体伝導率と輻射伝導率の分離を行い、各寄与のパラメータ依存性を調査した点において特色がある。

第 4 章では、第 3 章の実験結果、粒子表面の微細構造観察、および粒子の充填状態の観察結果を総合して、各パラメータ依存性の原因となる物理メカニズムの検討を行い、固体伝導率と輻射伝導率それぞれの理論モデルを構築した。特に、固体伝導率モデルにおいては粒子表面凹凸による接触コンダクタンスの減少を表すパラメータを導入したこと、輻射伝導率モデルにおいては粒子間の平均空隙サイズと実効的な輻射熱輸送距離のスケールパラメータを導入したことにより、オリジナリティの高いモデルを構築した。モデルと実験結果の比較を行い、モデルの妥当性について検討している。

第 5 章では、構築した粉体の熱伝導率モデルを用いて、太陽系初期に集積した微惑星の熱伝導率を推定し、熱進化の数値計算を行った。同時に粉体粒子の焼結の計算も行うことによって、微惑星が焼結する条件およびタイミングを決定することに成功している。また、微惑星の焼結の前後で、微惑星同士の衝突の様子が異なる可能性に着目し、熱進化と衝突過程の関連性についても言及している。

第 6 章では、本研究で得られた結果をまとめ、将来の展望を述べている。

(別紙様式 3)

(Separate Form 3)

以上のように、本論文は、真空下における粉体の熱伝導率に関する多くのデータを取得し、各パラメータ依存性を総合的に説明できる物理メカニズムの考察を行い、独創性のある熱伝導率モデルを構築することに成功している。審査会にて出願者の実験データ取得に対する粘り強い努力や、実験データに真摯に向き合う姿勢が認められた。微惑星の熱進化のみならず、月や小惑星表層のレゴリスの熱特性に対しても本研究で構築した熱伝導率モデルを応用しており、惑星科学、および今後の惑星探査に対する貢献度も高く、本審査委員会では本論文が博士（理学）の授与に値すると判断した。