

学位論文題名

A unified model of the thermal history of icy planetesimals:
Evolution of their temperature, chemical composition and
mechanical properties

(水微惑星の熱史および化学組成と力学的性質の進化)

学位論文内容の要旨

星間分子雲中は 10 K 程度の低温であるため、その中に存在するサブミクロン・サイズのダストは、シリケートコア、有機物マントル、「氷」マントルの 3 層構造を持つ。「氷」の組成は H_2O だけでなく、 CO 、 CO_2 といった揮発性に富む分子からなっている。また H_2O も結晶ではなく、アモルファスな構造をもっていることが、赤外線天文観測から知られている。現在の太陽系形成論によると、分子雲コアが重力崩壊し、原始星とその周囲に原始惑星系円盤が形成される。表面が「氷」に覆われた円盤中のダストが多数集合して固体微粒子の集合体(粉体)である水微惑星が形成される。その後、水微惑星が衝突合体し惑星が形成される。

現在の太陽系形成論において、水微惑星はダストから惑星への進化の過程で鍵となる天体である。太陽系の母体となった星間分子雲中のダストから水微惑星へ、さらに惑星への物質進化を研究する上で水微惑星はミッシングリンクとなっている。しかし、これまで水微惑星の系統的な物質科学的研究は全く行われていない。

本論文において、水微惑星の温度、化学組成、および力学的性質の進化についての研究を行った。

その基礎として、まず水微惑星の進化において重要な 3 つの物理量として、粉体の 1) 熱伝導率、2) 自己重力を支えるための臨界密度、3) 引っ張り強度について考察し、それぞれの表式を求めた。上述のように、水微惑星を構成している氷はアモルファス氷であり、一般に CO 等の揮発性分子を含む。揮発性分子が氷から放出される過程の活性化エネルギーおよび結晶化潜熱の値を実験データを解析することにより求めた。結晶化潜熱は揮発性分子の量に依存する。

水微惑星の進化の定式化を行なった。進化を次の 3 方程式で記述される：1) 熱伝導方程式、2) 揮発性分子の水微惑星中の拡散方程式、3) 水微惑星内部の応力分布を決定する方程式。これらを数値的に解いた結果、以下の結果を得た：

1) CO, CO₂ともに多量に含まれる場合

この場合は結晶化潜熱が負である。その結果、ある温度に達すると放射性核種の崩壊による加熱率と結晶化による吸熱率が等しくなり、氷微惑星の温度は一定に保たれる。この一定温度で結晶化が約 10⁷年かけて進行する。最終的にはアモルファス氷の約 4 割が結晶化する。結晶化に伴いダスト表面の氷マントルから CO と CO₂が放出される。CO₂は再凝縮しダスト粒子間の焼結を起こす。その結果、微惑星の引っ張り強度を増す。一方 CO は微惑星外に散逸する。

2) CO, CO₂ともに少量の場合

この場合は結晶化潜熱が正である。ある温度以上で結晶化→温度上昇→更なる結晶化という正のフィードバックが起こり、微惑星の温度は暴走的に上昇する。結晶化に伴い氷マントルから放出された CO が微惑星内にたまりガス圧が上昇する。しかし同時に CO₂と H₂O の焼結により微惑星の引っ張り強度が増すため、微惑星が破壊することはない。

3) CO が少量含まれるが CO₂は存在しない場合

2)と同様に結晶化潜熱は正であり暴走的温度上昇がおこる。この場合には H₂O による焼結のみが進行する。H₂O の表面拡散係数が大きい場合には、H₂O による焼結の進行が遅くガス圧が引っ張り強度を越えてしまい微惑星は自己爆発する。

本研究により、異なる氷組成をもつ原始星の周りの原始惑星系星雲内で形成された氷微惑星はそれぞれ異なった進化をすることが明らかとなった。原始星周辺の氷組成の差異が星間分子雲内で形成される多数の惑星系に多様性を生じる原因となる。

本研究の結果から、氷微惑星が進化するに伴いその引っ張り強度が増大することが帰結される。微惑星衝突の従来の数値計算によると、引っ張り強度が大きいほど微惑星は衝突により成長しやすいことが示されている。本研究で明らかにした CO₂がダスト粒子間に焼結を起こし強度を増加させる効果は、木星型惑星やカイパーベルト天体を形成するのに不可欠なプロセスであったことを示唆する。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 山 本 哲 生
副 査 助 教 授 橋 元 明 彦
副 査 教 授 香 内 晃 (低温科学研究所)
副 査 教 授 向 井 正 (神戸大学大学院理学研究科)

学位論文題名

A unified model of the thermal history of icy planetesimals: Evolution of their temperature, chemical composition and mechanical properties

(氷微惑星の熱史および化学組成と力学的性質の進化)

現在の太陽系形成論において、氷微惑星はダストから惑星への進化の過程で鍵となる天体である。太陽系の母体となった星間分子雲中のダストから氷微惑星へ、さらに惑星への物質進化を研究する上で氷微惑星はミッシングリンクとなっている。しかし、これまで氷微惑星の系統的な物質科学的研究は全く行われていない。

本論文において著者は、氷微惑星の温度、化学組成、および力学的性質の進化についての研究を行った。まずその基礎として、氷微惑星の進化において重要な3つの物理量である粉体の1) 熱伝導率、2) 自己重力を支えるための臨界密度、3) 引っ張り強度について考察し、それぞれの表式を求めた。ここで得られた結果は、惑星科学にとどまらず粉体理工学等の他の分野にも応用できる一般的表式である。

これらの物理量に関する考察を基に、著者は氷微惑星の温度、化学組成、力学的性質の進化を記述する方程式系の定式化を行ない、それを数値的に解いた。その結果、氷の初期組成によって、氷微惑星の進化は3通りに別れることを明らかにした。そして、原始星周辺の氷組成の差異が、星間分子雲内で形成される多数の惑星系に多様性を生む原因となることを指摘した。

上記に加えて、氷微惑星の進化に伴い、その引っ張り強度が増大することを示した。微惑星衝突の従来の数値計算によると、引っ張り強度が大きいほど微惑星は衝突により成長しやすいことが示されている。このことから著者は、氷微惑星の物質科学的進化が惑星形成に大きな役割を果たしたものと結論した。

本論文の意義は以下のようにまとめられる：

(1) 氷微惑星、すなわち、氷微粒子の集合体(粉体)の諸性質を定量的に評

価した。まず、アモルファス氷と氷結晶の混合物よりなる氷微粒子の熱伝導率、および氷微粒子の集合体である粉体の熱伝導率を理論的に導くことに初めて成功した。また、粉体中のガス（たとえば、一酸化炭素や二酸化炭素）の移動を理論的に評価した。さらに、氷微粒子の集合体である粉体の力学的性質を理論的に評価した。これらの研究は氷微粒子の集合体である粉体（氷微惑星）の諸性質を系統的に研究した初めての研究であり、高く評価できる。以上の研究により、氷微惑星の長時間にわたる進化を定量的に議論することが初めて可能になった。

- (2) 氷微惑星の内部構造（熱、化学組成、力学的性質）の進化を(1)の成果をもとに、考えうる全ての重要な物理・化学過程を考慮して議論した。その結果、氷微惑星の進化は氷微粒子中に含まれる一酸化炭素および二酸化炭素の組成に大きく依存して3つの場合に分かれることが初めて明らかにされた。これは、これまでにない全く新しい発見であり特筆すべき成果である。特に力学的性質の進化を考慮したのは著者が初めてであり、非常に独創性に富んだ研究である。

以上に加えて、申請者は i) 研究の立案から論文に纏めて投稿するまでをひとりで行う、ii) 国際会議で研究成果を発表する、等すでに独立した研究者として研究を行っている。

よって、著者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。