

## 論文内容の要旨

### 論文題目 Evolution of Icy Planetesimals in the Inner Solar System: Formation of Terrestrial Planets and Water Supply

(地球型惑星領域における氷微惑星の進化：惑星形成と水の供給)

氏名 町田 亮介

標準的な惑星形成シナリオでは、原始惑星系円盤光学的に薄く、太陽から2.7 AU以上離れた領域でしか氷が凝縮しないと仮定されてきた。このような円盤では、地球型惑星形成領域では固体物質は岩石からなることになる (Hayashi 1981; Hayashi et al. 1985)。林の円盤モデルは最小質量太陽系星雲モデルと呼ばれ、標準的な原始惑星系円盤のモデルとして広く用いられてきた。

しかし、初期の原始惑星系円盤は細かいダスト粒子によって光学的に厚くなっていることが天文学的に確かめられている。光学的に厚い円盤の温度分布は、Chiang & Goldreich (1997), Chiang et al. (2002) によって研究され、観測されるSEDの特徴を説明することに成功している。光学的に厚い原始惑星系円盤では、中心星からの直達光は円盤の内部までは到達しないため、円盤の内部では地球型惑星形成領域においても氷が存在可能な低温に保たれることが示されている。このことから、地球型惑星形成領域においても固体物質は氷と岩石の混合物からなり、ダスト粒子の量は光学的に薄い円盤モデルの4.2倍にも達すると予測される。光学的に厚い円盤内で微惑星が形成した場合、地球型惑星形成領域においても氷を主成分とした微惑星が形成されるはずである。本研究では、このような微惑星を「氷微惑星」と呼ぶ。

本研究では、光学的に厚い原始惑星系円盤中では地球型惑星形成領域で氷微惑星が

形成すると仮定し、氷微惑星の一般的な進化シナリオについて調べた。氷微惑星は、光学的に厚い円盤内で形成するとすぐに合体成長を始める。やがて細かいダスト粒子が沈降して原始惑星系円盤が光学的に薄くなると、氷微惑星は中心星からの直射光に晒されて昇華を開始すると考えられる。したがって、氷微惑星の進化について検討するためには、氷微惑星の合体成長と昇華を同時に考慮する必要がある。

氷微惑星が昇華して水蒸気が放出すると、氷と一緒に存在するダストの一部も同時に放出されて、原始惑星系円盤の中心面付近にダスト雲を形成すると考えられる。もしも十分な光学的厚さを持ったダスト雲が形成すれば、中心星からの直達光が遮られるため氷微惑星の昇華が遅くなる。ダスト雲の光学的な厚さは氷微惑星が昇華したときに放出されるダストの割合によって決まる。本研究では、この割合を  $\epsilon_d$  と定義し、パラメーターとして取り扱った。 $\epsilon_d=0$  の場合はダスト雲が形成されず、氷微惑星の昇華速度は最大となる。ダスト雲が存在する場合 ( $\epsilon_d>0$ ) については、ダスト雲中での放射平衡場から氷微惑星の昇華速度を推定した。また、氷微惑星の合体成長については、Inaba et al. (2001), Ohtsuki et al. (2002) による微惑星の統計的なサイズ分布の進化モデルを氷と岩石の2成分の系に拡張したモデルを用いて数値計算を行った。数値計算にあたって、ダスト放出率  $\epsilon_d$  の他に、ダスト面密度が最小質量太陽系星雲モデルの何倍であるかを表す  $f$ 、氷微惑星が形成してから昇華が開始するまでの時間  $t_s$  をパラメーターとして用いた。

氷微惑星の合体成長と昇華をカップリングさせた数値計算を行い、氷微惑星から原始惑星までの進化について調べた。主な結果を以下に示す。

1. 乾いた原始惑星から水浸しの原始惑星まで、多様な含水率を持った原始惑星が形成される可能性がある。最終的な原始惑星の含水率は、円盤質量  $f$  や氷微惑星の昇華開始時間  $t_s$ 、ダスト放出率  $\epsilon_d$  に強く依存する (図1)。
2. 重い円盤 ( $f=10$ ) では、 $\epsilon_d, t_s$  に依らず常に10%以上の水が原始惑星に残る。
3. 原始地球で推定される水の量 (~2%; Abe et al. 2000) を説明するためには、標準的な質量の円盤 ( $f=1$ ) で昇華開始時刻  $t_s$  が数百年以下であることが要請される。氷微惑星から地球の水が供給された可能性は、現在のところ同位体的な根拠からは否定されない。
4. 推定される原始地球の水の量を説明可能な氷微惑星形成から円盤が光学的に薄くなるまでの時間間隔 (数百年以下) は、原始惑星系円盤の進化のタイムスケール ( $10^5 \sim 10^6$  年) よりもかなり短い。このことから、氷微惑星の形成が細かいダスト粒子の急激な消失を引き起こしている可能性が示唆される。

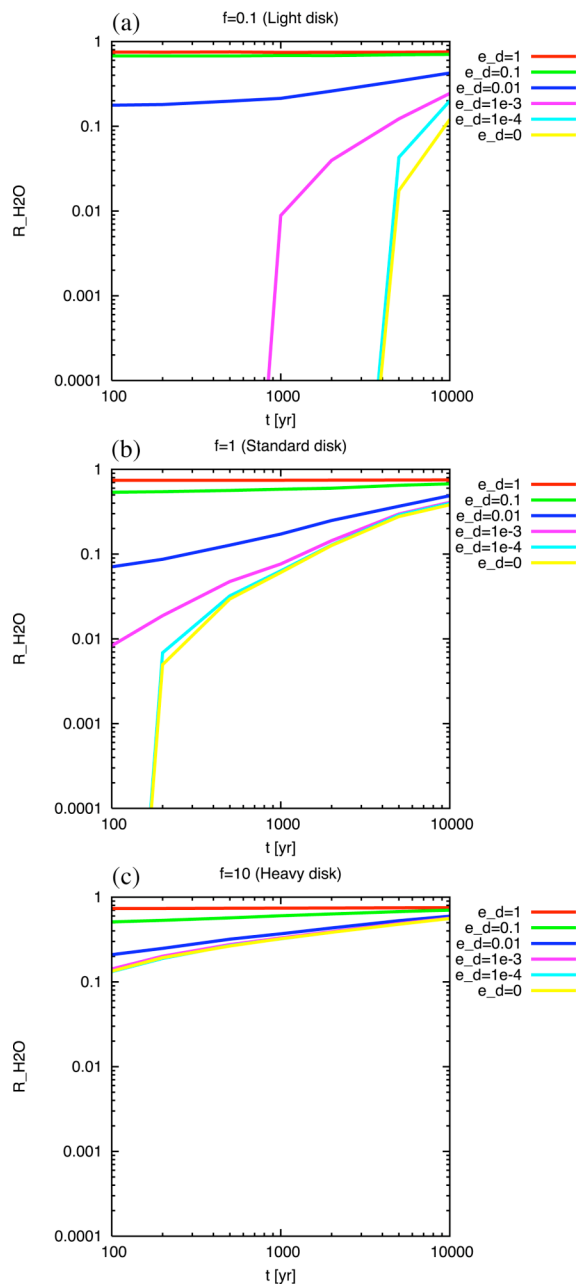


図1 円盤質量，氷微惑星の昇華開始時間，ダスト放出率による原始惑星の含水率の変化。(a) 軽い円盤 ( $f=0.1$ )，(b) 標準的な質量の円盤 ( $f=1$ )，(c) 重い円盤 ( $f=10$ )。それぞれの線は、 $\varepsilon_d=1$  (赤)、 $\varepsilon_d=0.1$  (緑)、 $\varepsilon_d=10^{-2}$  (青)、 $\varepsilon_d=10^{-3}$  (マゼンタ)、 $\varepsilon_d=10^{-4}$  (シアン)、 $\varepsilon_d=0$  (黄) を表している。

5. 円盤が光学的に薄くなった後でダスト雲が形成される場合、ダスト雲は $10^6$ 年のタイムスケールに渡って存続する。ただし、円盤の正面から観測したときのダスト雲の光学的厚さが $10^{-2}$ を超えることはない。
6. 原始惑星系円盤中の同じ領域で形成された天体のあいだでも化学的な不均質が生じる可能性がある。氷微惑星の含水率は中間的なサイズで最大となった。このことから、隕石に見られる化学的な不均質性は、形成領域の違いだけではなく、隕石母天体のサイズの違いを反映している可能性があるといえる。

7. 付随的な問題として、光学的に厚い円盤中で微惑星の形成が促進される可能性についても検討した。光学的に厚い円盤中では光学的に薄い円盤中よりも固体物質が豊富に存在しているため、たとえその大半の質量が氷の昇華によって最終的には失われてしまうとしても、原始惑星系円盤中に大量の固体物質が存在することによって氷微惑星が形成されやすくなると考えられる。