

広範囲のパラメータ領域での木星型惑星の形成時間：微惑星集積率とダストの吸収係数

Parameter Study on Formation of the Giant Planets: Core Accretion Rates and Grain Opacities

生駒 大洋 [1], 榎森 啓元 [2], 中澤 清 [1]

Masahiro Ikoma [1], Hiroyuki Emori [2], Kiyoshi Nakazawa [3]

[1] 東工大・理・地球惑星, [2] 東工大・理・地惑

[1] Earth and Planetary Sci., Tokyo Inst. Tech., [2] Earth and Planetary Sci., Tokyo Tech., [3] Earth and Planetary Sci., Tokyo Inst. Tech

大質量のガス成分を持つ木星型惑星は、ある限界質量まで成長した固体コアが纏う大気が重力不安定を起こすことによって形成されたと考えられている。しかし、過去の研究によって得られた限界質量の値(10地球質量)は惑星集積理論や内部構造理論と矛盾を生じる。本研究では、大気の重力不安定にとって重要なパラメータである微惑星集積率とダストの吸収係数をより広い範囲で変えて、大気の進化を数値実験することによって、過去に得られた限界コア質量の値の妥当性を検証した。その結果、10地球質量よりも小さいコアでも原始木星型惑星大気は重力不安定によって形成されることが分かった。

太陽系形成の標準モデルである京都モデルにおいて、1-300地球質量の水素・ヘリウムガスを持つ木星型惑星(木星、土星、天王星、海王星)の形成は水野不安定モデルに基づいて説明されている。星雲ガス中に存在する微惑星の合体成長により月質量程度に成長した固体コアは星雲ガスを自身の周りに重力的に引き付け、原始大気(ガスエンベロープ)を形成する。コアは微惑星の集積によって成長を続け、この微惑星が解放する重力エネルギーによって温められたガスエンベロープは安定な静水圧構造をとっている。やがてコアが10地球質量程度まで成長し、ガスエンベロープの質量が数地球質量になると大気は強い自己重力の為にや安定な静水圧構造をとられずに収縮を始め、それに伴って星雲ガスを急速に捕獲し現在のような大質量のガスエンベロープが形成されたと考えられている。この時のコア質量は限界コア質量と呼ばれる。水野によって得られた限界コア質量が10地球質量であるという結論は、当時の内部構造理論から予測されたコア質量の値が10-30地球質量であるという結論と合致した為に受け入れられた。

しかし、限界コア質量が10地球質量であるという結論は他の研究分野の結果と矛盾を生じる。それらは以下の3点である。1)木星型惑星コアの形成時間、2)系外惑星系における中心星に近い木星型惑星の形成、3)現在の内部構造モデルから予想されるコア質量。

1)に関して、惑星集積理論が与える木星領域での10地球質量のコアの形成時間は約7000万年、海王星領域においては100億年と星雲ガスが消失すると考えられる1000万年を大幅に超える。この問題と関係して、Pollackら(1996)はガスエンベロープの進化とエンベロープの及ぼすガス抵抗を考慮した微惑星集積率の進化を同時に解く大規模な計算を行ない、10地球質量程度のコアが10万-100万年で形成され、ガス消失時期までに木星型惑星が形成されることを示した。しかし、ここでは微惑星の面密度を京都モデルの数倍大きくするなど明確な根拠の無い仮定が含まれており、本質的な解決には至っていない。

2)近年恒星のドップラーシフト観測により、太陽以外の恒星の周りにも木星型惑星のような大質量の惑星が存在することが明らかにされている。これらの中には地球軌道程度以内に存在する惑星が幾つも確認されている。しかし、中心星に近い領域ではそもそも存在する微惑星が少ないため10地球質量のコアを形成することができない。

3)近年の観測技術の発展と高圧下での物性の研究の発展に伴って、内部構造の理論の見直しが続けられている。それによると木星、土星のコア質量は10地球質量に比べて小さいという報告が幾つもなされている。従って、10地球質量の限界コア質量を積極的に支持する理由はもはや存在しない。

上でも述べたように、ガスエンベロープが安定な静水圧構造を取り得るかどうかはエンベロープの熱構造が重要である。熱構造を決定するパラメータはコアに落下してくる微惑星が解放する重力エネルギー、すなわち微惑星集積率とエンベロープ中に存在するダストの吸収係数である。前者に関して、これまでの研究では地球質量のコアが10万-1000万年で作られるという比較的大きな集積率が採用されてきた。しかし、惑星理論が主張するように微惑星集積率の考え得る値はそれらよりも小さい。また原始惑星の周囲の微惑星が枯渇することや原始惑星が微惑星を重力的に散乱することにより形成後期には微惑星集積率が非常に小さくなることが十分予想される。また後者に関して、これまでの研究ではダスト量は星間雲のそれと同じか10分の1程度であるとされてきた。しかし、そもそも固体惑星がダストから形成されたことなどを考えるとエンベロープ中のダスト量は星間雲のそれに比べ

て非常に少ないと考えられる。従って、これまでの研究で考えられてきたようなパラメータ領域では不十分である。本研究では、重要なパラメータである微惑星集積率とダスト量をさらに広い範囲で変えて、ガスエンベロープの進化を数値実験した。特に微惑星集積率に関しては、コアがある程度の質量まで大きな集積率で成長した後、集積率が急激に減衰した場合を想定した数値計算も行なった。その結果、これまで言われてきた10地球質量よりも小さいコアでもガスを捕獲できることが明らかになった。この結果は、我々の太陽系の木星型惑星の形成時間の問題の解決だけでなく、発見が続いている多様な系外惑星系の形成に応用する際にも非常に重要である。