

原始月円盤における角運動量輸送と月の起源

Angular Momentum Transport in the Protolunar Disk and the Origin of the Moon

武田 隆顕 [1], 井田 茂 [1]

Takaaki Takeda [1], Shigeru Ida [2]

[1] 東工大・地惑

[1] Earth and Planetary Science, TITech, [2] Dept. of Earth and Planetary Sci., Tokyo Inst. of Tech.

月の起源として現在もっとも有力な仮説は、巨大衝突説と呼ばれる説である。これは、原始地球に火星程度の大きさの天体が衝突して、衝突物体のマントル物質が投げ出されて地球を回る円盤を形作り、それが集積して月が生まれたとするものである。この原始月円盤からの月への集積の過程に関しては、未だ充分な研究がなされていない。本研究では、自己重力によってひきおこされる角運動量輸送と、粒子同士の衝突と移動によってひきおこされる角運動量輸送を、 N 体シミュレーションによって調べ、月集積のタイムスケールを求めた。この際、粒子数 N によって結果がどのように変わるかも調べ、粒子数によらず月の集積は非常に速いことが分かった。

月の起源として、現在最も有力な仮説は巨大衝突説と呼ばれる説である。この説によれば、月の起源は次のようなものである。太陽系形成の後期に、原始地球に火星程度の大きさの天体が衝突し、衝突天体のマントル物質が地球の周囲にばらまかれて原始月円盤が形成される。その後原始月円盤内で集積過程が進み、最終的に月が形成される。この原始月円盤から月が集積される過程を、Ida et al. (1997) が N 体シミュレーションで調べた。彼らの結果によると、月はロッシュ限界のすぐ外に形成され、その形成過程は数カ月という非常に短い期間で進行する。この急速な月の形成は、月の熱的進化において重要な意味をもつであろう。

ここで月の集積過程を詳しく見ると、月はロッシュ限界の外に形成され、原始月円盤から外へ拡散する粒子を集積することによって成長している。このために、月の形成時間は原始月円盤が拡散する時間によって決まる。一方、粒子間の重力を考えずに粒子円盤の拡散を考えると、粒子の速度分散が粒子の大きさに依存するために、構成粒子が大きいほど円盤の拡散速度は大きい。従って原始月円盤の拡散時間は粒子サイズに依存すると予想できる。しかし、彼らのシミュレーションは比較的少ない粒子数（3000 体）で行なわれており、これは原始月円盤を構成する粒子の大きさを 200 km 程度としたことに対応する。そのため、原始月円盤の拡散時間に粒子サイズに対する依存性が存在すれば、初期の構成粒子の大きさによって、月の形成時間は大幅に変わる可能性がある。

本研究では、原始月円盤の拡散時間に粒子サイズ依存性が存在するのか、また存在するとすれば、それが粒子サイズにどのような影響を受けるのかを調べた。差動回転する粒子円盤の拡散は、内側の粒子が角運動量を失うことでさらに内側へ落下し、外側の粒子が角運動量を得てさらに外側へ移動することによって進行するので、角運動量輸送量が大きいほど原始月円盤は速く拡散する。そこで我々は角運動量輸送に着目し、角運動量の輸送効率が粒子サイズによってどのように影響を受けるのかを次のように解析した。第一に、ボルツマン方程式から定式化を行うことで、角運動量輸送はメカニズムごとに次の三つ成分に分解できることが分かった。それは、粒子が衝突することにより運ばれる角運動量輸送と、個々の粒子が移動することにより運ばれる角運動量輸送と、相互重力によって運ばれる角運動量輸送である。第二に、その結果をふまえて、1000 体から 30000 体まで粒子数と、それに従って粒子サイズを変えた N 体シミュレーションを行い、それぞれ円盤の拡散の様子と角運動量輸送の三つの成分を比較した。

その結果、相互重力をいれた場合においても、粒子の衝突及び移動による角運動量輸送は粒子が小さければ、より小さくなる傾向にあることが分かった。これに対し、重力による角運動量輸送は、重力不安定によって原始月円盤中で発達する渦巻状の密度構造によるものであり、これは面密度のみに依存し構成粒子の大きさには依存しない。我々の結果によると、粒子数を増やし個々の粒子を小さくしても、原始月円盤の拡散時間はあまり長くないことが分かった。これは、数千体程度の N 体シミュレーションにおいても、ロッシュ限界近傍で起きる角運動量輸送のうち、重力による角運動量輸送が半分近い割合を占めているためである。角運動量の全輸送量は粒子が小さくなれば小さくなるが、重力による角運動量輸送量は減少しないため、全角運動量輸送量は面密度によって決まるある量以下まで減少することはない。そのために、原始月円盤の拡散時間もある程度以上長くなることはない。つまり、限られた粒子数の N 体シミュレーションにおける、月の形成時間が非常に短いという結果は、ほぼ正しい月の形成時間を表していると言える。重力による角運動量輸送が全体の半分近くを占めているため、さらに粒子数を増やした計算を行なっても、月の形成時間の変化はせいぜい 2 倍長くなる程度であり、月の形成は非常に短期間に行なわれる。