

木星の形成に伴うコンドリュールの形成

° 城野信一¹, Turrini, D.²

¹ 名古屋大学大学院環境学研究科, ²INAF-IAPS, Rome

研究の背景

コンドリュール形成は未だに解決されていない惑星科学上の重要問題の一つである。コンドリュールの形成メカニズムについてはこれまで様々なものが提案されてきた。その一つとして、²⁶Alの崩壊によって内部が溶融した始原天体同士の衝突によってメルトが放出され、そのしぶきがコンドリュールとなったとするモデルが提案されている (Asphaug et al. 2011, EPSL **308** 369, Sanders and Scott 2012, MAPS **47** 2170, Dullemond et al. 2014, ApJ **794**:91 など)。様々な観測事実が整合的に説明できるとされているが、重要な点であるコンドリュールのサイズ (0.1-1mm 程度) が説明されていない。Asphaug et al.(2011) において議論がなされているものの、実験的な裏付けはなされていない。液滴のサイズの見積もりとして、液滴の表面エネルギーとシアに伴う運動エネルギーとの釣り合いを考えるとそのサイズは 10cm 程度になってしまい、コンドリュールサイズである 0.1mm からは大きく異なってしまう。

しかし、水を含んだ天体が数 km/s で衝突すれば、シリケイトがメルトとなった上で水と混合する可能性がある。すると何が起こるであろうか？ マグマと水が接触すると水の急激な膨張にともなって爆発が生じることは火山の研究でよく知られている。Zimanowski et al.(1997, JGR **102** 803) はシリケイトメルトに少量の水を今後する実験を行い、0.1mm サイズの球が放出されることを実験的に示した。

ここから、含水岩石微惑星の衝突によってコンドリュールが形成される可能性があると言える。しかし問題は、数 km/s といった高い衝突速度が原始惑星系円盤の中で実現されるのか？ という点である。ガス円盤中においては、円軌道からのずれはガス抵抗によって減衰してしまうため、衝突速度はせいぜい 100m/s のオーダーとなる。しかし、木星が形成されるとその大きな質量によって微惑星の軌道を乱し、高速衝突を実現できる可能性がある。Nagasawa et al.(2019, ApJ **871** 110) によると、このプロセスによってガス円盤に対して 10km/s 程度の相対速度をもつ微惑星も現れることが示されている。そこで我々は木星の形成にともなう微惑星の相互衝突の頻度と速度の分布を数値シミュレーションにより求めた。

シミュレーション方法

微惑星集団の運動は N 体シミュレーションコードである Mercury-Archés コードを用いた。ただし、微惑星間の重力は計算せず、微惑星は太陽と木星からのみ力を受ける。10⁵ 個の微惑星を 1-30AU の間に配置した。スノーラインの内側に存在する微惑星の密度は 2.4 g cm⁻³, 外側の微惑星の密度は 1.0 g cm⁻³ とし、半径 100 km としてガス抵抗力を算出した。ガス円盤からは、抵抗力の他にガス円盤の重力も作用する。ガスの温度分布は林モデルを採用した。ガスの密度分布は林モデルと、HD163296 での観測を再現する密度分布モデルを用いた。木星は初期において 0.1 地球質量の原始惑星であり、1 Myr かけて 30 地球質量まで成長する。その後は 5000 年で現在の木星質量まで成長

するものとした。シミュレーションにおける一つの微惑星は、実際には複数の微惑星からなる集団であると考え、微惑星集団の相互衝突の頻度および速度を軌道要素から算出した。

数値計算の結果と議論

図 1 に、時間の関数としての速度 3km/s を超える衝突の割合を示す。1-2 AU, 2-3 AU, 3-4 AU, 4-5 AU と領域を分割し、それぞれの領域内における割合となっている。時刻 0 が、木星形成が開始した時刻に対応する。時刻 $t=0.5$ Myr 付近に高速衝突頻度のピークが存在し、その後 0.5 Myr 程度の期間の間持続していることがわかる。現在の小惑星帯に対応する 2-3 AU における割合がもっとも高くなっており、ピーク時で約半分の衝突が 3km/s 以上の衝突速度をもつ。時刻 0 からピークまでのタイムラグは、微惑星がガス抵抗により徐々に太陽方向へドリフトし、木星との 2:1 平均運動共鳴に到達するまでの時間に対応する。

以前に行った微惑星の相互衝突の数値シミュレーションと、この結果 (2-3 AU における衝突速度) を用いてシリケートメルトの生成効率を見積もると、微惑星体積の 3 割ほどがメルトに変換されることがわかった。一方で、Pape et al.(2019, GCA 244 416) によると、コンドリュールの形成年代分布は CAI 形成後 2 Myr ほどにピークが存在し、そのピークが 0.5 Myr ほど持続してその後 1.5 Myr ほどの期間をへて減衰する。したがって、CAI 形成後 1.5 Myr において木星の形成が開始すれば、ピークの位置は説明できる。一方でピークの持続時間はシミュレーションではかなり短くなってしまっている。これは、永年共鳴と原始惑星を含めていないことが原因の一つと考えられるので、今後取り入れていきたい。

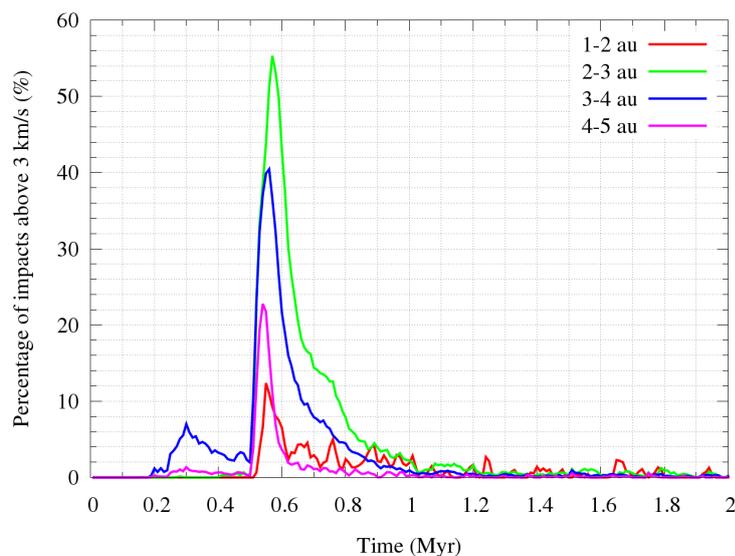


図 1: 速度 3km/s を超える衝突の割合の時間進化。このグラフでの時刻 0 が、木星形成が開始した時刻。木星形成開始後 0.6 Myr 後にピークを持つ。ピーク時の上から順に、2-3 AU, 3-4 AU, 4-5 AU, 1-2 AU の領域内の衝突。