

溶融岩石微惑星と溶融氷微惑星との衝突

○城野信一¹

¹名古屋大学大学院環境学研究科

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。コンドリュールの加熱メカニズムについては様々なものが提案されてきた。近年、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、そのしづ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、中でも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、. Wakita and Sekiya(2011, EPS 63, 1193)によれば、微惑星の半径が 10km よりも大きければ微惑星内の氷が溶融して水になることが示されている。水を含んだ天体と、シリケートメルトを含んだ二天体が衝突すると、シリケートメルトと水が混合する可能性がある。すると何が起ころうか？マグマと水が接触すると水の急激な膨張に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)はシリケー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。このサイズは、急激な膨張にもなって周囲のシリケートメルトが押し出され、レイリーテイラー不安定が発生しているとするとうまく説明できる。

ここから、溶融岩石微惑星と溶融氷微惑星と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。そこで本研究では、どのような条件が整えばシリケートメルトと水が接触しうるのかを様々な観点から検討した。

水の質量分率

メルトが吹き飛ばされてレイリーテイラー不安定が発生するためには、ある程度の水の量が必要となる。そのために、H₂O ガスが持っている内部エネルギー (並進運動のエネルギー) と、天体の脱出速度を持っているメルトの運動エネルギーを比較した。その結果、水の質量分率はシリケートメルトの 0.4%程度あれば十分であることがわかった。ここから、爆発を引き起こすために必要な水は非常に少量でよいことがわかる。

逆に水の量が多すぎるとシリケートメルトの温度が低下しすぎてしまう。水の量の上限は制約をつけるのが困難である。水との接触による温度低下がどの程度まで許容されるのかが不明であるためである。また、温度低下はどのように水とシリケートメルトが混合するかに依存している。水とシリケートメルトが均質に混合し、温度低下が数 Kにとどまったものとする、水の質量比は数%程度であった必要がある。

一方で、このシナリオが成立するためにはシリケートメルトが²⁶Alの崩壊熱によって形成されていないといけない。しかし H₂O 氷が存在しているとその大きな比熱により温度上昇を抑えらえて

しまう。そこで ^{26}Al の崩壊によってどこまで温度が上昇しうるのかを検討した。その結果、水の質量分率が 0.6 以下でないとシリケイトが溶融する温度まで上昇しないことがわかった。標準的なモデルではスノーライン以遠において氷の質量分率は $2/3$ 程度であるので、氷の量はある程度減っている必要があることがわかった。

表面の岩石層を破壊できるか？

内部の温度が上昇した微惑星では、物質が移動することによって内部が分化する。表面には温度が低いままの氷層（厚さ 500m 程度）が存在する。その下には水の層が存在する。この層の厚さはもともと含まれていた水の量に依存する。さらにその下には溶融していない岩石層がある。この層の厚さは 2km 程度である。さらにその下に溶融シリケイト層が存在することになる。したがって、水とシリケイトメルトが混合するためには、2km 程度の岩石層を衝突で突き破る必要がある。そこで iSALE コードを用いて数値シミュレーションを行った。半径 25km、厚さ 35km の円筒（衝突される天体）に、半径 1km の球を衝突速度 1, 3, 5km/s で衝突させた。円筒と球はダナイトで構成されており、深さ 2km 以深では温度が融点に到達している。円筒の表面に厚さ 0, 1, 5km の水の層を配置してシミュレーションを行った。また比較のため、水の層は無しで低温（170K）の場合のシミュレーションも行った。

シミュレーションの結果、厚さ 2km の岩石層は衝突によって破壊され、水とシリケイトメルトが混合しうるということがわかった。円筒の内部は溶融しているため、低温（170K）の場合に比べると形成されるクレーターの大きさがより大きい。衝突速度 1km/s において低温では半径 5km、深さ 3km 程度のクレーターであるのに対し、内部が溶融していると半径 10km 程度の球形に近いクレーターが形成された。このクレーターの表面近くにおいて水とシリケイトメルトが混合することが考えられる。

水とシリケイトメルトの混合比を明らかにするため、水の層の中に配置したトレーサー粒子の位置から概算を試みた。その結果、もともとの水の層の厚さが 1km、衝突速度が 5km/s であるときにクレーター表面に残る水の層の厚さが 1m 程度であることがわかった。どの程度の厚さのシリケイトメルトが混合に寄与するかが明確で無いため混合比の推定は困難である。クレーター掘削時の粒子速度は 100m/s のオーダー、要する時間は 10s のオーダーであるので、1km 程度の厚さで混合すると仮定すると、厚さ 1m の水の層は 0.1% 程度の混合比となる。したがって、このシミュレーションで仮定した程度の水の量があればおそらく十分であり、これ以上水が存在するとシリケイトメルトは冷えすぎることが考えられる。衝突される天体のサイズが 100km であるとする、厚さ 1km の水は質量比で 1% 程度であるので、ごく少量の水が残存している氷微惑星が衝突に関与すると水とシリケイトメルトの接触によって爆発が起こることが期待される。