

珪酸塩の状態方程式と月形成巨大衝突

○黒澤耕介¹, 門野敏彦², 弘中陽一郎², 杉田精司³, 重森啓介², 佐野孝好², 境家達弘⁴, 大野宗祐⁵, 橘省吾⁶, 松井孝典⁵
1.ISAS/JAXA, 2. 阪大レーザー研, 3. 東大 新領域 4. 阪大 理, 5. PERC/Chitech, 6. 東大 理

要旨

月形成巨大衝突に適用可能な状態方程式の確立を目指して、Forsterite の衝撃圧縮実験を行い、800GPa までの P - T Hugoniot を取得した。その結果をもとに衝撃圧縮によるエントロピーの増加量、1 気圧まで断熱膨張した際の蒸発率を算出し、M-ANEOS と比較したところ、M-ANEOS は衝撃圧縮時のエントロピー増加量を大幅に過小評価していることがわかった。この矛盾を解決するには極限状態にある珪酸塩内の原子-電子、原子-原子間相互作用モデルの修正が鍵になると考えられる。

はじめに

惑星形成最終期において天体衝突は内惑星の主要構成要素である珪酸塩でさえ蒸発させるほどのエネルギーを供給する[e.g., 1, 2]。そのような高速度衝突は地球史上の様々な大事件で重要な役割を果たしてきたと考えられている[e.g., 3-6]。本研究ではその中でも月形成巨大衝突に焦点をあてる。月の起源には諸説あるが、現在の最有力説は巨大衝突仮説である。それは惑星形成過程の最終段階で自然に起こること[e.g., 7]、地球-月系の様々な物理化学的特徴を一度に説明可能と考えられているからである。しかし近年急速に発達してきた数値流体計算の結果は巨大衝突仮説に否定的であった。巨大衝突後、周地球円盤領域にバラまかれる質量の~80%が衝突天体由来であり[8]、地球-月系の最大の特徴の一つである酸素同位体の一致と矛盾してしまうことが明らかとなってきたのである。これは”Isotopic crisis”と呼ばれ[9]、月の起源は再び惑星科学上の最重要未解決課題の一つとなりつつある。

我々はこの問題に実験的に取り組んでいる。近年指摘されてきている様に、従来の数値流体計算手法は月形成巨大衝突には不適當なものであり[10]、複数のグループによって改良した計算手法を用いた研究が始まりつつある[e.g., 11, 12]。ところが流体運動を支配する EOS に対する関心は薄く、近年の数値流体計算の多くは M-ANEOS[13]と呼ばれる EOS が使用されている(月形成巨大衝突問題に限らない)。Quartz に対する M-ANEOS は >100 GPa, >10000 K の高温高压条件において実験で得られた Quartz の P - T Hugoniot を再現できず、

衝撃加熱温度を大幅に過大評価してしまうことがわかっている[14]。これは衝撃圧縮で不可逆的に蓄えられたエネルギーの分配過程を正しく取り扱えていないことを意味し、衝突後の蒸気発生量や駆動される流体運動、周地球領域に放出された物質の密度、温度分布は M-ANEOS による予測とは異なるものになると考えられる。そこで我々は Quartz と並んで重要な Forsterite に対して衝撃圧縮実験を行い P - T Hugoniot を取得し、既存の Quartz データと合わせて、月形成巨大衝突に適用可能な EOS の構築を目指している。

高強度レーザーによる衝撃圧縮実験

大阪大学レーザーエネルギー学研究センターに設置された高強度レーザー「激光 XII 号 HIPER」を用いて Forsterite の衝撃圧縮実験を行った。基本的な実験手法は我々の先行研究と同様であるので、詳しくは参考文献を参照して頂きたい[15, 16]。レーザーによって衝撃圧縮した Forsterite の背面から 3 台のストリークカメラを用いて時間分解速度干渉/発光分光計測を行い、衝撃波伝播中の試料の温度圧力同時計測を行った。今回用いたレーザーの持続時間は 2.5 ns ほどしかなく、標的内で希薄波が衝撃波に追いつき、衝撃圧力が急激に減衰する。この特徴は透明試料を用いた場合には大きな利点となる。透明試料を用いると試料中を伝播する衝撃波面からの発光、干渉計測用のプローブレーザーの反射光を観測することができる。すなわち、1 Shot で Hugoniot 上の温度圧力データを複数点取得することが可能となる。衝撃波面は光学的に厚いため、衝撃波背面からの光汚染は起こらない。今回干渉/分光を同時に計測できたのは 2 Shot であるが、350-750 GPa の Hugoniot 曲線上温度を連続的に得ることに成功した。

実験結果, M-ANEOS との比較

衝撃波伝播中の発光スペクトルの Planck 関数 fitting から衝撃圧縮温度を、干渉縞移動量から衝撃波伝播速度を計測した。得られた衝撃波速度を用いて既存の Hugoniot data[17]を基に衝撃圧縮圧力を算出した。実測された衝撃圧縮温度は 350-600 GPa(15-20 km/s の衝突に相当)の範囲で M-ANEOS の予測値よりも系統的に低温であり、定積比熱 $5R$ 一定の理論曲

線とよく一致した(固体比熱の高温極限は $3R$, The Dulong-Petit value)。この結果をもとに半解析的手法[18]を用いて衝撃圧縮時のエントロピーを算出した。M-ANEOS の予測値はエントロピー上昇量を過小評価していることがわかる。これは M-ANEOS を構築する際に考慮されていないエネルギー貯蔵庫があることを意味する。我々の先行研究では衝撃圧縮された珪酸塩の解放過程で観測される発光輝線のほとんどがイオン由来であることが確認されている[19]。また今回の観測からは可視光領域に最初に現れる輝線が酸素イオンであることが明らかとなった。この観測結果は非常に高压の条件であるにも関わらず、衝撃圧縮された珪酸塩は解離/電離していることを意味する。一般に電離は大きなエネルギーを必要とする吸熱過程である。今回観測された定積比熱の上昇は電離吸熱に起因する可能性が高い。

議論-月形成巨大衝突への影響-

衝撃圧縮時の定積比熱の上昇はエントロピーの増加を促す[14]。断熱解放中の珪酸塩の蒸発率は、熱力学平衡を仮定できれば、衝撃圧縮で上昇したエントロピーとその圧力における蒸発開始/完全蒸発エントロピーの値から容易に計算することができる(The lever rule)。ここでの蒸発率は1気圧まで断熱解放された場合の蒸発率である。1気圧条件では実験データが存在するために、仮定を置くことなく、蒸発率を計算することができる。Quartz に対しても先行研究の P - T Hugoniot data を基に同様の計算を行った。Quartz, Forsterite とともに M-ANEOS は蒸発率を大幅に過小評価していたことがわかる。例えば 20 km/s 衝突時には従来予測の~1.5倍もの蒸気が発生する。また衝突時のエントロピー増加量が変化すると、断熱解放後の残留温度も変化する。その場合は周地球円盤の力学・化学進化も従来予測とは異なるのかもしれない。

また衝撃圧縮-解放中に電離が起きているとするとその後の流体運動にも大きく影響を与える。電子がエネルギーを溜め込んでしまった場合には珪酸塩蒸気の比熱比が減少し、蒸気発生直後の膨張速度は従来予測よりも遅くなる。ところが発熱過程である電子再結合が起こり始めると、蒸気が加速を受ける可能性がある。このような後期加速は凝縮相の放出速度、角度を変化させる可能性がある。加速を受けた高温の凝縮相放出物が再び地球に

衝突すると、さらに多くの蒸気が発生するはずである。周地球物質の蒸発率は従来予測よりもさらに高くなるのかもしれない。

近年のレーザー実験の発展によって、宇宙速度衝突条件での珪酸塩の状態方程式データを取得することが可能になってきた。その結果従来よく用いられている M-ANOES には考慮されていないエネルギー分配過程が存在することが明らかになった。我々は電離/電子再結合が重要な役割を果たしていると考えている。この過程を M-ANEOS に取り込むためには、使用されている原子-電子、原子-原子間相互作用モデルを高压下での解離/電離を許すように修正し、実験データによる較正を行うことが必要である。

参考文献

- [1] Ahrens, T. J., & O'keefe, J. D., *The Moon*, **4**, 214-249, (1972).
- [2] Kurosawa, K. et al., *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L23203, doi:10.1029/2010GL045330, (2010).
- [3] Pahlevan, K., & Stevenson, D. J., *EPSL*, **262**, 238-249, (2007).
- [4] Mukhin, L. M. et al., *Nature*, **340**, 46-49, (1989).
- [5] Melosh, H. J. & Vickery, A. M., *Nature*, **338**, 487-489, (1989).
- [6] Lisse, C. M. et al., *ApJ*, **701**, 2019-2032, (2009).
- [7] Kokubo, E. & S. Ida, *Icarus*, **131**, 171-178, (1998)
- [8] Canup, R. M., *Icarus*, **168**, 433-456, (2004).
- [9] Melosh, H. J., *72nd AMSM*, **5104**, (2009)
- [10] Wada, K., et al., *ApJ*, **638**, 1180-1186, (2006).
- [11] Canup, R. M. & A. C. Barr, *41st LPSC*, **2488**, (2010)
- [12] Crawford, D. A., *11th HVIS*, **155**, (2010)
- [13] Melosh, H. J., *MAPS*, **42**, 2079-2098, (2007).
- [14] Hicks, D. G. et al., *PRL*, **97**, 025502, (2006).
- [15] Kurosawa, K. et al., *17th SCCM*, in press, 2011
- [16] Kurosawa, K. et al., submitted.
- [17] Sekine, T. et al., *Joint AIRAPT-22 & HPCJ-50*, (2009).