

隕石衝突による高密度プラズマの生成:惑星大気進化への応用

○ 黒澤耕介¹, 門野敏彦², 弘中陽一郎³, 濱野景子⁴, 桑原秀治⁵, 重森啓介³, 境家達弘⁶, 佐野孝好³, 大野宗祐¹
関根利守⁷, 尾崎典雅⁸, 橘省吾⁹, 兒玉了祐⁸, 松井孝典¹, 杉田精司⁵
¹千葉工大 惑星探査研,²産業医大 医,³阪大 レーザー研,⁴東大理,⁵東大 新領域,⁶阪大理,⁷広島大理
⁸阪大工,⁹北大理

要旨

惑星形成最終期の >10 km/s の天体衝突で衝撃圧縮された岩石物質の熱力学状態は未解明であり、高速度天体衝突で発生する岩石蒸気質量や、放出される気相生成物の組成はよくわかっていなかった。我々は阪大レーザー研の激光 XII 号を用いて主要珪酸塩鉱物である橄欖石の衝撃圧縮実験を行い、1.2TPa までの温度-圧力-エントロピー曲面上の Hugoniot 曲線を決定した。この結果を用いて惑星形成最終期に頻発した天体衝突による惑星大気吹き飛ばし量を評価した。その結果、地球の原始大気が全散逸する可能性が高いことがわかった。

はじめに

惑星形成最終期において地球サイズの岩石惑星の脱出速度は 10 km/s を超え、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天体衝突による大気剥ぎ取り過程に注目する。現在の地球大気は初期に獲得した太陽組成ガスを全て失っているが、地球サイズの天体から大気を効率良く散逸させる過程は明らかになっていない。隕石重爆撃期に頻発した >10 km/s の天体衝突は、現在の地球大気の起源に重要な役割を果たした可能性がある。

天体衝突が起こると地表で高温高压の珪酸塩蒸気が発生する。その後の断熱解放によって、蒸気の内部エネルギーが膨張の運動エネルギーに変換され、直上にある既存惑星大気を心太式に加速する。一部の気相は惑星脱出速度を超える速度まで加速され、宇宙空間に散逸する。この過程を "Impact erosion" と呼ぶ[e.g., 5]。惑星大気散逸量を定量的に評価するためには衝突天体が持つ運動エネルギーの何割が珪酸塩蒸気の膨張エネルギーに変換されるか、を知っている必要があるが、宇宙速度衝突で生成される珪酸塩プラズマ内でのエネルギー分配過程はよくわかっていなかった。特に衝撃圧縮によるエントロピー増加量が不明であるために、相図上での断熱解放経路が分からず、最終的に気相に分配されるエネルギーがわからないことが本質的な問題であった。我々はこの問題に実験的に取り組んでいる。先ほど述べたような最終的な気相の膨張エネルギーを求めるといふ観点では、圧力-エントロピー(P - S)平面での Hugoniot 曲線を得るといふ課題に帰着する。

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中心に設置された高強度レーザー「激光 XII 号 HIPER」を用いて Forsterite(Mg_2SiO_4)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[7, 8]が、より高い衝撃温度を計測するために、従来の色温度計測でなく、

発光強度と温度の関係を用いる輝度温度計測法を採用した。衝撃波面の放射率は、速度干渉計で得た反射率データから算出した。

実験結果, M-ANEOS との比較

図 1 に試料の構造及び計測の概略図、及び取得したデータの一例を示す。衝撃波伝播中の発光スペクトルの青色領域(420-500 nm)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[9]を基に衝撃圧縮圧力を算出した。この結果をもとに半解析的手法[10]を用いて衝撃圧縮時のエントロピーを算出したところ、惑星科学分野の数値流体計算で頻りに使用される 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った。この原因としては(1)M-ANEOS は 2 段式軽ガス銃で得られた圧縮率データを外挿して構築されており、プラズマ化した Forsterite が軟化する効果を取り入れていないこと、(2)衝撃融解・電離・解離によるエントロピー増加量が考慮されていないことが挙げられる。我々の VISAR の反射光計測、色温度と輝度の時間変化計測からも衝撃圧縮状態の Forsterite の反射率は 20 % を超え金属化(=電離)を起こしていることは明らかである。第一原理計算からも電離に伴う電子配置の変化は Si-O の二体相関を弱くし、解離を引き起こすことが示唆されている[11, 12]。

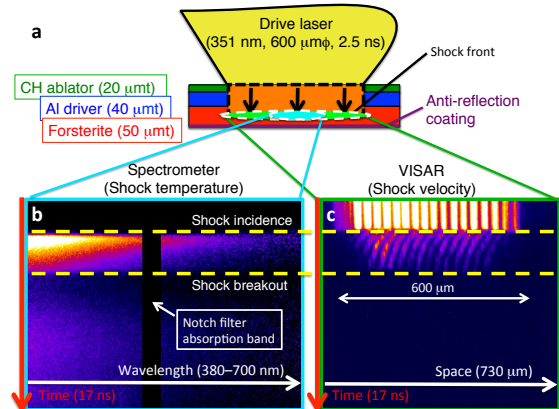


図 1. (a)衝撃圧縮試料の概略図, (b), (c)計測データ。

議論 1-大気剥ぎ取り問題への応用-

上記の実験結果から天体衝突で達成される極限状態でも適用可能な P - S 平面上の Hugoniot 曲線が得られた。衝撃圧縮状態からの解放過程が断熱かつ熱力学平衡を保ちつづけると仮定をすると、レバールールを用いることで最終的に気相に分配されるエネルギーを算出することができる。図 2 に衝突速度に対する橄欖石の蒸発率を示す。この比較から明らかなように従来用いられてきた状態方程式の予測値よりも 1.5-2 倍の質量の珪酸塩蒸気が発生することが明らかになった。

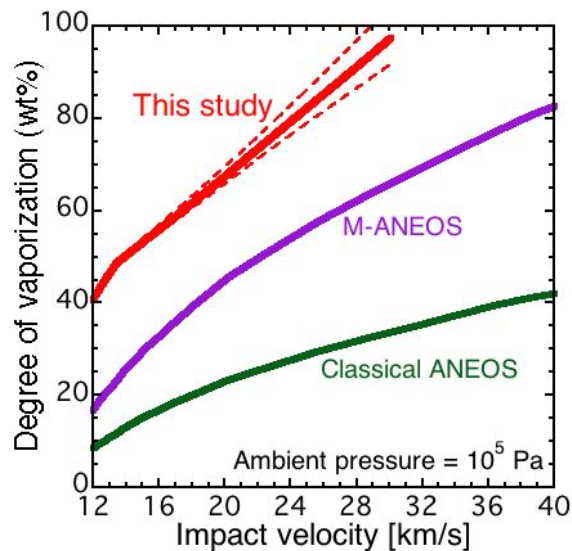


図 2. 衝突速度に対する橄欖石の蒸発率。一気圧まで断熱膨張した後の蒸発率を計算した。

気相に分配されたエネルギーは最終的に蒸気雲の膨張運動エネルギーになる。点源爆発するガス球の速度・密度動径分布に対する解析解を用いると、ガス球が持つ運動量に変換できる。このガス球と直上の惑星大気との運動量保存則を解くと、脱出速度を超えて宇宙空間に散逸する大気量を算出することができる [13]。

議論 2-隕石重爆撃期の大気進化-

新しい P - S Hugoniot 曲線をモンテカルロ法を用いた確率論的隕石重爆撃期モデルに組み込み、初期大気圧、スケールハイトをパラメータにして隕石重爆撃期の大気全圧の変遷を解いた。図 3 に初期大気圧力に対する大気全散逸確率を示す。地球サイズの岩石惑星の初期大気全圧が <10 気圧程度であれば、隕石重爆撃期に供給される衝突エネルギーによって大気が全散逸する可能性があることがわかった。結果は大気のスケールハイトにはあまり依存しない(大気の組成や温度によらない)。以下では、この結果を原始地球・金星に適用する。原始金星は集積最中に獲得した大量の水蒸気をまわっており、初期圧力は ~300 気圧に及ぶと予測されるが、原始地球では濃密な水蒸気大気は凝縮し、海洋を形成してしまうため、初期大気圧は 10 気圧を超えないと予想

できる。つまり 300 気圧の H_2O 大気を持つ金星は大気剥ぎ取りを免れた可能性が高い。それに対し、海洋形成を経た原始地球は、それまでに保持していた大気を失った可能性がある。この違いは現在の地球・金星大気中の希ガス存在度[e.g., 17]の違いと調和的である。

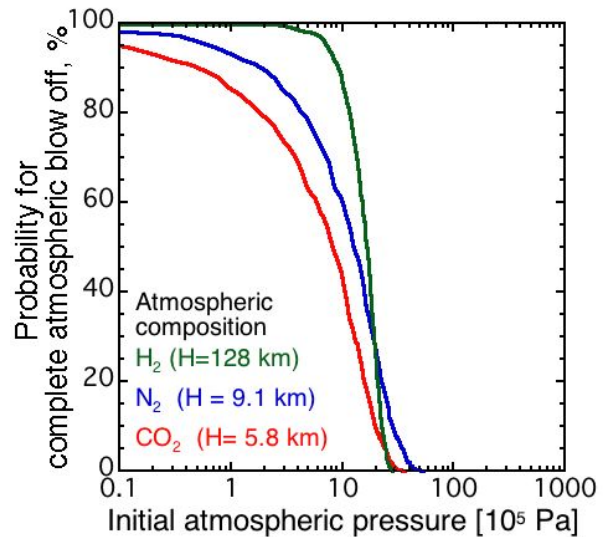


図 3. 確率論的重爆撃モデルの結果。惑星初期大気圧に対する惑星大気全散逸確率を計算した。惑星大気のスケールハイトによって多少依存するものの、<10 気圧の初期大気圧の場合は大気が全散逸する可能性が高い。

参考文献

- [1] Ahrens & O'keefe, *The Moon*, **4**, 214-249, 1972.
- [2] Kurosawa et al., *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L23203, doi:10.1029/2010GL045330, 2010.
- [3] Pahlevan & Stevenson, *EPSL*, **262**, 238-249, 2007.
- [4] Mukhin et al., *Nature*, **340**, 46-49, 1989.
- [5] Melosh & Vickery, *Nature*, **338**, 487-489, 1989.
- [6] Lisse et al., *ApJ*, **701**, 2019-2032, 2009.
- [7] Kurosawa et al., *17th SCCM*, 2012.
- [8] Kurosawa et al., *JGR*, **117**, E04007, doi:10.1029/2011JE004031, 2012.
- [9] Sekine et al., *Joint AIRAPT-22 & HPCJ-50*, 2009.
- [10] Sugita et al., *17th SCCM*, 2012.
- [11] Laudemet et al., *PRB*, **70**, 165108, 2004.
- [12] Knudson & Desjarlais, *PRL*, **103**, 225501, 2009.
- [13] Vickery & Melosh, *GSA Special paper*, **247**, 289-300, 1990.
- [14] Newman et al., *Icarus*, **138**, 224-240, 1999.
- [15] Svetsov, *Solar System Res.*, **41**, 28-41, 2007.
- [16] Shuvalov, *MAPS*, **44**, 1095-1105, (2009).
- [17] Ozima & Podosek, *Noble Gas Geochemistry*, 367 pp., Cambridge University Press, New York, 1983.