

要旨

>10 km/s 衝突時の造岩鉱物のエントロピー増加量を決定するために阪大レーザー研に設置された激光 XII 号 HIPER を用いて、Forsterite の衝撃圧縮実験を行った。時間分解速度干渉/発光分光計測の結果 ~800 GPa までの圧力-エントロピー平面上の Hugoniot 曲線を得ることに成功した。得られた Hugoniot 曲線から断熱解放後に気相が持ち得る膨張運動エネルギーを算出し、初期地球型惑星大気の散逸問題に適用したところ、初期地球型惑星大気圧が~10 気圧程度であれば、隕石重爆撃期に大気全散逸が起こる可能性があることがわかった。これは現在の地球、金星大気中の希ガス存在量と調和的な結果である。

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。隕石重爆撃期に頻発した>10 km/s の天体衝突が惑星大気組成及び大気全圧の変動にどの程度寄与したかを知ることは、その後の惑星表層環境進化の初期条件を調べる上で重要である。

天体衝突が起こると地表で高温高圧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う観点では、圧力-エントロピー(*P-S*)平面上での Hugoniot 曲線を得るという課題に帰着する。

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(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]。今回は標的に設置時にレーザーに対する傾斜を軽減する工夫を施したことで、裏面に無反射コートを施すことで、昨年とは比較にならない綺麗なデータを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[9]を基に衝撃圧縮圧力を算出した。温度-圧力平面上の Hugoniot 点を用いてべき乗関数でフィッティングすると 400-860 GPa(17-25 km/s の衝突速度に相当)の範囲で衝撃圧縮温度は圧力の~1.5 乗で変化することがわかった。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繁に使用される 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]。

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。Impact erosion の多くの先行研究では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、完全蒸発を仮定し、そのかわりに蒸発潜熱を引き算するという方法が取られていた[5, 13]。しかし提唱者の Melosh 自身が凝縮に伴う発熱を考慮していないために、気相のエネルギーを著しく過小評価していると指摘している[13]。

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]。ここで一つ注意が必要なのは静水圧平衡状態にある惑星大気の質量分布は著しい天頂角依存性を持つことである。Vickery & Melosh, 1990[13]では蒸気雲と大気との運動量保存を解く際に、天頂角の依存性を取り入れたモデル(“Sector blow-off model”)を構築した。このモデルは流体運動を全く考慮していないことから、様々な批判に晒された[14-16]。しかし、熱平衡状態を保ちながら断熱膨張するガス球を仮定することで、状態方程式の不定性の影響を受けることなく、衝突から大気散逸に至るエネルギーの流れを表現できるところが非常に優れている。このモデルを用いることで、Hugoniot 曲線の改訂がどの程度影響を与えるかを明確にすることができる。

我々が得た Forsterite の *P-S* Hugoniot 曲線はまだ誤差評価などが十分でないため、精度よくエントロピーを計算可能な Quartz に対する *P-S* Hugoniot 曲線[7]を Sector blow-off model に組み込み、先行研究との比較を行った。その結果、従来モデルでは地球への平均衝突速度程度(~17 km/s)の衝突エネルギーでは大気散逸が起こらないが、改訂された *P-S* Hugoniot 曲線から得られる気相のエネルギーを用いると、15 km/s でも十分に大気散逸が起こることがわかった。

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。その結果、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。つまり暴走温室状態に入り数 100 気圧の H₂O-CO₂ 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、CO₂ の炭酸塩への固定を経た原始地球は、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。

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] Laudernet 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.