

極限状態における橄欖石の Hugoniot 曲線: 原始地球表層環境への O₂ の供給 Hugoniot curve for forsterite under extreme conditions: O₂ supply into the surface environment on the early Earth

黒澤 耕介^{1*}, 門野 敏彦², 弘中陽一郎³, 重森 啓介³, 桑原 秀治⁴, 境家 達弘⁵, 佐野 孝好³, 大野 宗祐⁶, 関根 利守⁷, 尾崎 典雅⁸, 兒玉了祐⁸, 橘 省吾⁹, 松井 孝典⁶, 杉田 精司⁴

Kosuke Kurosawa^{1*}, Toshihiko Kadono², Yoichiro Hironaka³, Keisuke Shigemori³, Hideharu Kuwahara⁴, Tatsuhiro Sakaiya⁵, Takayoshi Sano³, Sohsuke Ohno⁶, Toshimori Sekine⁷, Norimasa Ozaki⁸, Ryosuke Kodama⁸, Shogo Tachibana⁹, Takafumi Matsui⁶, Seiji Sugita⁴

¹ 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, ² 産業医科大学 医学部, ³ 大阪大学 レーザーエネルギー学研究センター, ⁴ 東京大学 大学院神領域創成科学研究科, ⁵ 大阪大学 理学研究科, ⁶ 千葉工業大学 惑星探査研究センター, ⁷ 広島大学 大学院理学研究科, ⁸ 大阪大学 工学研究科, ⁹ 北海道大学 大学院理学研究院

¹Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, ²School of Medicine, University of Occupational and Environmental Health, ³Institute of Laser Engineering, Osaka University, ⁴Department of Complexity Science and Engineering, The University of Tokyo, ⁵Department of Earth and Space Science, Osaka University, ⁶Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, ⁷Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University, ⁸Division of Electrical, Electronic and Information Engineering, Osaka University, ⁹Earth and Planetary System Science Department of Natural History Sciences, Hokkaido University

アポロ探査以来の月試料分析, 詳細なりモセンデータによるクレータ年代解析, 最新の惑星形成理論によれば, 後期隕石重爆撃期の開始は4.1億年ほど前であり, 力学的に励起された天体群の平均衝突速度は ~ 30 km/sにも及ぶとされている。このような超高速衝突の際に何が起るか, 発生する蒸気の量さえ明らかになっていない。これは技術的困難によって実証的研究が進まず, 200 GPaを超える衝撃圧力に適用可能な Hugoniot 曲線が確立されておらず, 相図上での断熱解放線がわからないことが主原因である。近年の多くの数値的研究で用いられている M-ANEOS と呼ばれる状態方程式は, 衝撃圧縮時のエントロピー増加量を過小評価することが知られており, 得られた結果に対しては, その不定性を考慮した評価が必要である。我々は阪大レーザー研に設置された高強度レーザー「激光 XII 号 HIPER」を用いて, 主要な珪酸塩鉱物である橄欖石を 1200 GPa まで圧縮し, 衝撃圧力と温度を同時計測した。温度と圧力を同時に計測することができれば, 熱力学関係式を用いてエントロピー増加量を算出することができる。得られた圧力-エントロピー平面上の Hugoniot 曲線を M-ANEOS の予測値と比較したところ, M-ANEOS は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。衝撃圧縮状態からの解放過程が断熱であり, 熱力学平衡を保ち続けると仮定すると, 発生する蒸気量はレバールを用いて算出することができる。その結果, 発生する珪酸塩蒸気量は M-ANEOS の予測値の 1.5-2 倍になることがわかった。大量の珪酸塩蒸気は衝突蒸気雲の酸化還元状態を大幅に変化させ得る。炭素質隕石を仮定し, ~ 30 km/s の衝突時の等エントロピー線に沿った熱化学平衡計算の結果, 原始地球表層には存在しないと考えられてきた分子状酸素が放出されることがわかった。後期隕石重爆撃で想定される超高速衝突は原始地球表層に大量の酸素を供給していたのかもしれない。酸素は強力な酸化剤として振る舞い, 大きな自由エネルギーを供給するため, 原始地球表層の化学進化を考える上で重要であったかもしれない。

キーワード: 天体衝突, 橄欖石, 後期隕石重爆撃, レーザー衝撃圧縮, Hugoniot 曲線, 原始地球表層環境

Keywords: Meteoritic impacts, Forsterite, Late heavy bombardment, Laser shock compression, Hugoniot curve, Surface environment on the early Earth