

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 29 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24244071

研究課題名(和文) 超高強度レーザー衝撃実験による惑星形成過程の解明

研究課題名(英文) An experimental study on planetary evolution using a high-power laser

研究代表者

松井 孝典 (Matsui, Takafumi)

千葉工業大学・惑星探査研究センター・所長

研究者番号：80114643

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,200,000円

研究成果の概要(和文)：固体岩石惑星上での超高速衝突に際して起きる蒸発現象の物理化学過程を解明することを目的とし、主要珪酸塩鉱物であるカンラン石の衝撃圧縮実験を行った。400-900 GPaの圧力範囲で密度-圧力-温度-エントロピー空間上でのHugoniot曲線の決定に必要なデータを取得できた。実験結果は、衝突後の珪酸塩蒸発度が従来の見積もりよりも高いことを強く示唆する。この珪酸塩が酸素を気相に放出しやすい性質は、冥王代の地球での超高速衝突では過渡的に酸素に富む大気が生じた可能性を示唆する。酸素に富む大気の出現は、堆積物の酸化還元状態に大きな影響を与えるため、地質記録から検証できる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study is to determine the Hugoniot curve of forsterite, one of the most important silicates, in the density-pressure-temperature-entropy space. We conducted a series of laser shock experiments using a high power laser and obtained shock-induced radiance and shock velocity in forsterite samples under 400-900 GPa compression. Our results indicate that the degree of vaporization of forsterite after shock compression is much higher than previously thought. Hypervelocity impacts at >30 km/s on the Hadean Earth may produce a transient O<sub>2</sub>-rich atmosphere. This hypothesis can be tested by the geochemical analyses of impact-related geologic record.

研究分野：比較惑星学

キーワード：惑星形成・進化 惑星大気進化 高速度天体衝突 衝突蒸発 Hugoniot曲線 高強度レーザー 時間分解分光計測 速度干渉計測

## 1. 研究開始当初の背景

惑星科学において天体衝突現象は最も基本的な素過程の一つである。特に我々は衝突点近傍の高エネルギー密度領域の現象に注目し研究を行ってきた。2000年代に入ってから超高強度レーザーを用いた衝撃波生成技術によって、室内実験で天体衝突の極限状況(>300 GPa, >10<sup>4</sup> K)を再現できるようになり、衝撃物理学は大きな転換期を迎えていた。また、系外惑星系で高速度衝突由来と推測される珪酸塩蒸気とダストの入り混じった円盤が観測されたり、最近起きた小惑星同士の衝突現象が観測されたりと惑星間衝突の現場が明らかにされはじめた時期でもあった。

## 2. 研究の目的

本研究では惑星間衝突現象の素過程を実験的に明らかにし、太陽系惑星の初期進化を明らかにすることを目的としている。具体的には上部マントルの構成要素であるカンラン石について秒速30 kmの衝突まで適用できる Hugoniot 曲線を得ることを目指した。特に衝撃波通過に伴う珪酸塩鉱物のエントロピー上昇量を実験的に決定することが目的であった。衝撃圧縮からの解放過程は等エントロピー過程であるため、初期条件としてエントロピーが決定されると解放後の珪酸塩蒸気の発生量や化学組成を推定でき、高速度衝突の惑星表層環境への影響をある程度推定することができるからである。

## 3. 研究の方法

実験には大阪大学レーザーエネルギー学研究センターの超高強度レーザーである「GEKKO XII HIPER」を用いた。近年急速に進展してきたレーザー直接照射による衝撃波生成技術を用い、衝撃圧縮時の熱力学データの取得を行った。標的には固体岩石惑星に豊富に存在するカンラン石を用いた。ストリーク分光器と速度干渉計(VISAR)で衝撃波伝播を同時計測し、衝撃波速度と輝度を同時に計測した。既知の衝撃波速度と衝撃圧力の関係式と、分光計の感度較正式を用いることで衝撃温度と衝撃圧力を同時に算出することができる。衝撃圧力と衝撃温度を同時に計測すると熱力学演算によって不可逆加熱によって上昇するエントロピーを算出することができる。エントロピーが既知となれば、衝撃圧縮された珪酸塩の解放後の蒸発度をレバールールを使って見積もることができる。

## 4. 研究成果

(1)レーザー衝撃実験: 図1にこれまでの実験で最適化されたレーザーによる衝撃圧縮実験の構成と得られたデータの例を示す。試料はプラスチック燃料、アルミドライバー、カンラン石薄片の3層からなる。レーザー照射によって発生する高エネルギー光子、電子による試料の衝撃波到達前の事前加熱を防ぎ、レーザーのエネルギーを効率良く試料に伝

播させる構成となっている。図中左下が衝撃波伝播中の発光スペクトル、図中右下が速度干渉のデータである。衝撃波伝播中に輝度も衝撃波速度も減衰していく様子が見取れる。試料を50 mm厚とやや厚めにすると、試料中で衝撃波が減衰する。この減衰衝撃波をうまく使うと、1 shotのデータから Hugoniot 曲線の点を連続的に得ることが可能となる。輝度から温度への変換には用いた光学系と装置の感度特性を含めた較正曲線が必要となる。このために先述の3層標的の最裏面に標準試料である石英を貼り付けた4層試料を用いた較正実験も実施した。衝撃圧力が同じとみなせるカンラン石-石英界面近辺で、衝撃波が石英に入射すると輝度が若干上昇するという結果が得られた。これは、>300 GPaという高压条件であっても物質の個性は失っておらず、個々の鉱物について丁寧に衝撃温度を調べることの重要性を改めて認識させる結果である。近いうちにカンラン石の密度-圧力-温度-エントロピーの Hugoniot 曲線として公表できる見込である。

(2)惑星初期進化への応用: 我々は本応募申請の前身となる研究課題「超高速レーザー銃実験による惑星間衝突の実験的研究」(基盤A)において、>300 GPaまで衝撃圧縮した珪酸塩鉱物の長時間進化をストリーク分光器で観測し、高压条件で発生する珪酸塩蒸気が高電離状態にあることを見出した。石英を用いた先行研究では衝撃温度が従来の理論予測値よりも大幅に小さいことが報告されていた。これらの結果は高压条件では電子の自由度が大きなエネルギーを保持し、衝撃圧縮された珪酸塩の比熱が大きくなっていると解釈できる [Kurosawa et al., 2012, *Journal of Geophysical Research Planets*]. これは衝撃圧縮時に上昇するエントロピーが従来予測値よりも大幅に大きくなり得ることを示している。先述したようにカンラン石のエントロピーを決定するには至っていないが、石英の例から類推すると高速度惑星間衝突では従来予測よりも大量の珪酸塩蒸気が発生する可能性が高い。そこで我々はモデル Hugoniot 曲線を作成し、炭素質隕石が地球に衝突した際の珪酸塩蒸発度を衝突速度の関数として計算した。初期条件として衝撃圧縮で増加するエントロピーが既知であれば、解放中の詳細な温度圧力の履歴がわからなくても最終的に環境に放出される際の蒸発度や化学組成を推定することができる。計算の一例を図2に示す。炭素質隕石をある温度圧力条件にした際の分子酸素(O<sub>2</sub>)の平衡モル分率を示した。熱力学的な考察を合わせると>30 km/s程度の高速度衝突が起きた時には炭素質隕石に含まれる珪酸塩が凝縮することなく酸素を放出しうる [Kurosawa and Kuwahara, 2015, *LPSC*]. 珪酸塩の蒸発⇔凝縮の反応速度論的な解析と蒸気雲の膨張冷却についての流体力学的な考察を合わせると、ある衝突速度、サイズの炭素質隕石が衝突した際に最終的に

環境に放出される酸素の量を推定できる. 図3に結果を示す. 衝突天体サイズが大きくなると冷却速度が下がり, 結果として化学凍結温度が下がるために生成酸素量はサイズ依存性を持つ. カンラン石のエントロピー曲線が未決定のためこの図の横軸は変動する可能性があるが, 衝突速度が速くなると酸素の生成量は劇的に増加し 30 km/s を超えると衝突天体質量の~1 wt%に及ぶ酸素が環境に放出されることがわかった. 気相に酸化的な分子酸素が放出されるが, カウンターパートとして凝縮相には還元的な微粒子が大量に生成されることになる. >30 km/s の超高速衝突時には局所的に強い酸化還元電位勾配を生み出す可能性が有ることを示唆する結果である. この化学ポテンシャル勾配は冥王代地球においては環境から取り出せる自由エネルギー源として重要であったかもしれない.

近年の惑星形成理論からは巨大惑星の移動によって力学的に励起された天体群の集中的な衝突(後期隕石重爆撃期と呼ばれる)を予測するものもある. この際には>30 km/s の高速度衝突も頻発するはずである. 衝突によって分子酸素の発生が起こると惑星大気中の光化学反応を乱したり, 海に溶け込んで無酸素地球では作り得ない堆積物を生成したりする可能性がある. 地質試料を発見できれば, この仮説を検証できるのかもしれない. また系外惑星の衝突起源円盤の観測時には珪酸塩の分解度に注目することで, 衝突条件に制約を与えることができる可能性がある.

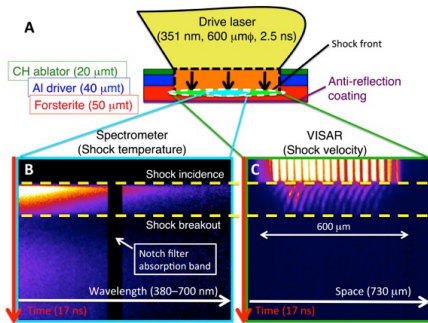


図 1. 試料構成と取得データの例.

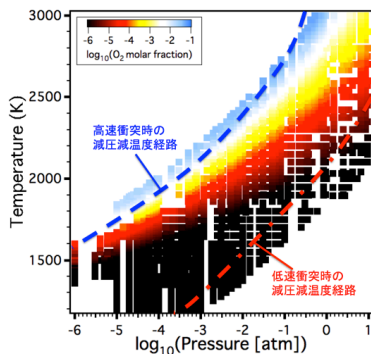


図 2. 炭素質隕石組成を用いた化学平衡計算の結果. 酸素の平衡モル分率を色分けして示している. 図中の点線は衝突蒸気雲の断熱冷却経路である.

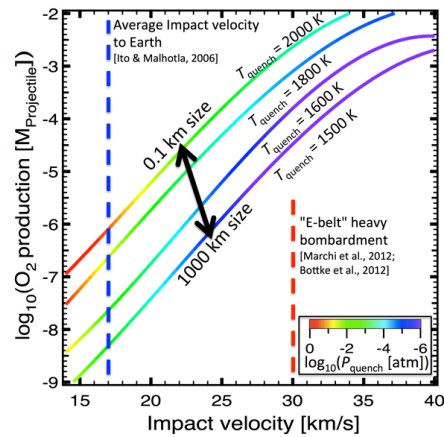


図 3. 炭素質隕石衝突時に環境に放出される酸素量. 衝突天体の質量で規格化した.

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 46 件)

- 1) Kuwahara, H. and S. Sugita (2015), Chemical composition diversity among early terrestrial atmospheres generated by impacts, *Icarus*, in press. (査読有)
- 2) Okochi, K., T. Mieno, K. Kondo, S. Hasegawa, and K. Kurosawa (2015), Possibility of Production of amino acids by impact reaction using a light gas gun as a simulation of asteroid impacts, *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, **45**, 195-205, DOI 10.1016/j.sls.2014.11.030. (査読有)
- 3) Kadono, T., A. I. Suzuki, K. Wada, N. K. Mitani, S. Yamamoto, M. Arakawa, S. Sugita, J. Haruyama, and A. M. Nakamura (2015), Crater-Ray Formation by Impact-Induced Ejecta Particles. *Icarus*, **250**, 215-221, doi: 10.1016/j.icarus.2014.11.030. (査読有)
- 4) Cho, Y., S. Sugita, S. Kameda, Y. N. Miura, K. Ishibashi, S. Ohno, S. Kamata, T. Arai, T. Morota, N. Namiki, and T. Matsui (2015), High-precision potassium measurements using laser-induced breakdown spectroscopy under high vacuum conditions for in situ K-Ar dating of planetary surfaces, *Spectrochim. Acta Part B*, **106**, 28-35, doi:10.1016/j.sab.2015.02.002. (査読有)
- 5) Kamata, S., S. Sugita, Y. Abe, Y. Ishihara, Y. Harada, T. Morota, N. Namiki, T. Iwata, H. Hanada, H. Araki, K. Matsumoto, E. Tajika, K. Kuramoto, and F. Nimmo (2015), The relative timing of Lunar Magma Ocean solidification and the Late Heavy Bombardment inferred from highly degraded impact basin structures, *Icarus*, **250**, 492-503. DOI: 10.1016/j.icarus.2014.12.025 (査読有)
- 6) Okamoto, T., Nakamura, A. M., Hasegawa, S., (2015), Impact experiments on highly porous targets: Cavity morphology and disruption thresholds in the strength regime. *Planet. Space Sci.*, **107**, 36-44, doi:10.1016/j.pss.2014.08.008. (査読有)
- 7) Nakamura, A. M., Yamane, F., Okamoto, T., Takasawa, S., (2015), Size dependence of the disruption threshold: Laboratory examination of millimeter-centimeter porous targets. *Planet. Space Sci.*, **107**, 45-52, doi:10.1016/j.pss.2014.07.011. (査読有)

- 8) Sekine, Y., H. Genda, Y. Muto, S. Sugita, T. Kadono, T. Matsui (2014), Impact chemistry of methanol: Implications for volatile evolution on icy satellites and dwarf planets, and cometary delivery to the Moon, *Icarus*, **243**, 39-47, doi: 10.1016/j.icarus.2014.08.034. (査読有)
- 9) Ohno, S., K. Ishibashi, T. Sekine, K. Kurosawa, T. Kobayashi, S. Sugita, and T. Matsui (2014), Gas recovery experiments to determine the degree of shock-induced devolatilization of calcite, *Journal of Physics: Conference Series*, **500**, 062001, doi:10.1088/1742-6596/500/6/062001. (査読有)
- 10) Fujiwara, A., N. Onose, M. Setoh, A. M. Nakamura, K. Hiraoka, S. Hasegawa, and K. Okudaira (2014), Experimental study of impact-cratering damage on brittle cylindrical column model as a fundamental component of space architecture. *Adv. Space Res.*, **54**, 1479-1486, doi:10.1016/j.asr.2014.06.015. (査読有)
- 11) Katsura, T., A. M. Nakamura, A. Takabe, T. Okamoto, K. Sangen, S. Hasegawa, X. Liu, and T. Mashimo (2014), Laboratory experiments on the impact disruption of iron meteorites at temperature of near-Earth space, *Icarus*, **241**, 1-12, doi:10.1016/j.icarus.2014.06.007. (査読有)
- 12) Kiuchi, M. and A. M. Nakamura (2015), Corrigendum to "Relationship between regolith particle size and porosity on small bodies" [*Icarus* 239 (2014) 291-293]. *Icarus*, **248**, 221, 10.1016/j.icarus.2014.10.039. (査読有)
- 13) Leliwa-Kopystynski, J. and M. Arakawa (2014), Impacts experiments onto heterogeneous targets simulating impact breccia: Implications for impact strength of asteroids and formation of the asteroid families, *Icarus*, **235**, 147-155, doi:10.1016/j.icarus.2014.03.012. (査読有)
- 14) Yasui, M., R. Hayama, and M. Arakawa (2014), Impact strength of small icy bodies that experienced multiple collisions, *Icarus*, **233**, 293-305, doi:10.1016/j.icarus.2014.02.008. (査読有)
- 15) Ohno, S., T. Kadono, K. Kurosawa, T. Hamura, T. Sakaiya, K. Shigemori, Y. Hironaka, T. Sano, T. Watari, K. Otani, T. Matsui and S. Sugita (2014), Production of sulphate-rich vapour during the Chicxulub impact and implications for ocean acidification, *Nature Geoscience*, **7**, doi: 10.1038/NGEO2095, pp. 1-4. (査読有)
- 16) 荒川政彦, 保井みなみ, & 寫生有理 (2014), 太陽系における高速度衝突現象と惑星の起源と進化, *高圧力の科学と技術*, **24**, 13-20, doi.org/10.4131/jshpreview.24.13 (査読有)
- 17) Kurosawa, K., S. Sugita, K. Ishibashi, S. Hasegawa, Y. Sekineb, N. O. Ogawa, T. Kadonoe, S. Ohno, N. Ohkouchi, Y. Nagaoka, and T. Matsui (2013), Hydrogen cyanide production due to mid-size impacts in a redox-neutral N<sub>2</sub>-rich atmosphere, *Origin Evol. Life Biosph.*, **43**, 221-245, DOI: 10.1007/s11084-013-9339-0 (査読有)
- 18) Ishibashi, K., S. Ohno, S. Sugita, T. Kadono, and T. Matsui (2013), Oxidation of carbon compounds by silica-derived oxygen within impact-induced vapor plumes, *Earth Planets Sp.* **65**, 811-822. DOI:10.5047/eps.2012.12.0 (査読有)
- 19) Hattori, M., M. Kobayashi, T. Miyachi, S. Takechi, O. Okudaira, T. Iwai, N. Okada, S. Sugita, (2013), Influence of a Polyimide Surface Layer on the Piezoelectric Response of Lead-Zirconate-Titanate Cosmic Dust Detector, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **52**, 028002, DOI: 10.7567/JJAP.52.028002. (査読有)
- 20) Kobayashi, M., T. Miyachi, M. Hattori, S. Sugita, S. Takechi, and N. Okada (2013), Dust detector using piezoelectric lead zirconate titanate with current-to-voltage converting amplifier for functional advancement, *Earth Planet. Sp.*, **65**, 167-173, doi:10.5047/eps.2012.08.011. (査読有)
- 21) Okamoto, T., A. M. Nakamura, S. Hasegawa, K. Kurosawa, K. Ikezaki, A. Tsuchiyama (2013), Impact experiments on capture of exotic grains by highly porous primitive bodies, *Icarus*, **224**, 209-217, doi.org/10.1016/j.icarus.2013.02.023. (査読有)
- 22) Nakamura, A. M., Setoh, M., Wada, K., Yamashita, Y., and Sangen, K (2013). Impact and intrusion experiments on the deceleration of low-velocity impactors by small-body regolith. *Icarus*, **223**, 222-233, 10.1016/j.icarus.2012.11.038 (査読有)
- 23) Suzuki, A. I., Nakamura, A. M., Kadono, T., Wada, K., Yamamoto, S., & Arakawa, M. (2013), A formation mechanism for concentric ridges in ejecta surrounding impact craters in a layer of fine glass beads, *Icarus*, **225**, 298-307, doi.org/10.1016/j.icarus.2013.03.027 (査読有)
- 24) Kamata, S., S. Sugita, Y. Abe, Y. Ishihara, Y. Harada, T. Morota, N. Namiki, T. Iwata, H. Hanada, H. Araki, K. Matsumoto, E. Tajika, (2013), Viscoelastic deformation of lunar impact basins: Implications for heterogeneity in the deep crustal paleo-thermal state and radioactive element concentration, *J. Geophys. Res.*, **118**, doi:10.1002/jgre.20056. (査読有)
- 25) 長勇一郎, 三浦弥生, 諸田 智克, 杉田 精司, K-Ar 法を用いた惑星探査におけるその場年代計測法の開発 (2013), *日本惑星科学会誌 遊星人*, **22**, 132-145. (査読有)
- 26) Guettler, C., Hirata, N., and Nakamura, A. M. (2012), Cratering experiments on the self armoring of coarse-grained granular targets *Icarus*, **220**, 1040-1049, doi:10.1016/j.icarus.2012.06.041 (査読有)
- 27) Lykawka, P. S., H. Jonathan, M. Tadashi. and A. M. Nakamura (2012), The dynamical evolution of dwarf planet (136108) Haumea's collisional family: General properties and implications for the trans-Neptunian belt. *MNRAS*, **421**, 1331-1350, 10.1111/j.1365-2966.2011.20391.x (査読有)
- 28) Kadono, T., R. Niimi, K. Okudaira, S. Hasegawa, M. Tabata, and A. Tsuchiyama, Penetration into Low-Density Media: In situ Observation of Penetration Process of Various Projectiles, *Icarus*, **221**, 587-592, (2012). (査読有)
- 29) Yasui, M., Arakawa, M., Hasegawa, S., Fujita, Y., and Kadono, T. (2012) In-situ flash X-ray observation of projectile penetration processes and crater cavity growth in porous gypsum target analogous to low-density asteroids, *Icarus*, **221**, 646-657. (査読有)
- 30) Shimaki, Y., and Arakawa, M. (2012) Low-velocity collisions between centimeter-sized snowballs: porosity

- dependence of coefficient of restitution for ice aggregates analogues in the solar system, *Icarus*, **221**, 310–319. (査読有)
- 31) Uchiyama, Y., Arakawa, M., Okamoto, C. and Yasui, M. (2012) Restitution coefficients and sticking velocities of a chondrule analogue colliding on a porous silica layer at impact velocities between 0.1 and 80 m s<sup>-1</sup>, *Icarus*, **219**, 336–344. (査読有)
- 32) Dohi, K., Arakawa, M., Okamoto, C., Hasegawa, S. and Yasui, M. (2012) The effect of a thin weak layer covering a basalt block on the impact cratering process, *Icarus*, **218**, 751–759. (査読有)
- 33) Shimaki, Y. and Arakawa, M. (2012) Experimental study on collisional disruption of highly porous icy bodies, *Icarus*, **218**, 737–750. (査読有)
- 34) Ozawa, T., T. Suzuki, K. Okudaira, T. Mikouchi, K. Kurosawa, H. Takayanagi, S. Sugita and K. Fujita (2012), Investigation of Martian Dust Sample Capture toward Mars Aero-flyby Sample Collection Mission, *Trans. Jpn. Soc. Aeronautical Sp. Sci., Aerospace Technology Japan*, **10**, 11–17. (査読有)
- 35) Suzuki, A., S. Hakura, T. Hamura, M. Hattori, R. Hayama, T. Ikeda, H. Kusuno, H. Kuwahara, Y. Muto, K. Nagaki, R. Niimi, Y. Ogata, T. Okamoto, T. Sasamori, C. Sekigawa, T. Yoshihara, S. Hasegawa, K. Kurosawa, T. Kadono, A. M. Nakamura, S. Sugita, and M. Arakawa (2012), Laboratory experiments on crater scaling-law for sedimentary rocks in the strength regime, *J. Geophys. Res.*, **117**, E08012, doi:10.1029/2012JE004064. (査読有)
- 36) Hattori, M., M. Kobayashi, T. Miyachi, T. Takechi, O. Okudaira, T. Iwai, and S. Sugita (2012), Position-Dependent Behavior of Piezoelectric Lead–Zirconate–Titanate Cosmic Dust Detector, *Jpn. J. App. Phys.*, **51**, 098004, pp. 4. (査読有)
- 37) Kurosawa, K., S. Ohno, S. Sugita, T. Mieno, T. Matsui, S. Hasegawa (2012), The nature of shock-induced calcite (CaCO<sub>3</sub>) devolatilization in an open system investigated using a two-stage light gas gun, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **337–338**, 68–76. (査読有)
- 38) Cho, Y., T. Morota, J. Haruyama, M. Yasui, N. Hirata, and S. Sugita (2012), Young mare volcanism in the Orientale region contemporary with the Procellarum KREEP Terrane (PKT) volcanism peak period ~2 billion years ago, *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L11203, 5 pp., doi:10.1029/2012GL051838 (査読有)
- 39) Kurosawa, K., T. Kadono, S. Sugita, K. Shigemori, T. Sakaiya, Y. Hironaka, N. Ozaki, A. Shiroshita, Y. Cho, S. Tachibana, T. Vinci, S. Ohno, R. Kodama, and T. Matsui (2012), Shock-induced silicate vaporization: The role of electrons, *J. Geophys. Res.*, **117**, E04007, 14 pp., doi:10.1029/2011JE004031. (査読有)
- 40) Kamata, S., S. Sugita, and Y. Abe, A new spectral calculation scheme for long-term deformation of Maxwellian planetary bodies (2012), *J. Geophys. Res.*, **117**, E02004, 17 pp., doi:10.1029/2011JE003945. (査読有)
- 41) Nagata, K., S. Sugita, M. Okada (2012), Bayesian Spectral Deconvolution with Exchange Monte Carlo Method, *Neural Networks*, **28**, 82–89. (査読有)
- 42) Sugita, S., K. Kurosawa, and T. Kadono (2012), A Semi-Analytical On-Hugoniot EOS of Condensed Matter using a Up-Us relation, *AIP Conf. Proc.*, **1426**, 895–898. (査読有)
- 43) Kurosawa, K., T. Kadono, S. Sugita, K. Shigemori, Y. Hironaka, N. Ozaki, T. Sakaiya, A. Shiroshita, Y. Cho, S. Fujioka, S. Tachibana, T. Vinci, S. Ohno, R. Kodama, T. Matsui (2012), Time-resolved spectroscopic observations of shock-induced silicate ionization, *AIP Conf. Proc.*, **1426**, 855–858. (査読有)
- 44) Kadono, T., T. Sakaiya, Y. Hironaka, T. Watari, K. Otani, T. Sano, T. Fujiwara, T. Mochiyama, M. Arakawa, S. Takasawa, A. M. Nakamura, K. Kurosawa, T. Hamura, S. Ohno, S. Sugita, T. Matsui, H. Nagatomo, S. Fujioka, K. Shigemori (2012), Flyer acceleration by high-power laser and impact experiments at velocities higher than 10 km/s, *AIP Conf. Proc.*, **1426**, 847–850. (査読有)
- 45) Ohno, S., T. Kadono, K. Kurosawa, T. Hamura, T. Sakaiya, S. Sugita, K. Shigemori, Y. Hironaka, T. Watari, T. Matsui (2012), Direct measurement of chemical composition of SO<sub>x</sub> in impact vapor using a laser gun, *AIP Conf. Proc.*, **1426**, 851–854. (査読有)
- 46) Heldmann, J. L. et al. 共著 86 人中 72 番目 S. Sugita, LCROSS (Lunar Crater Observation and Sensing Satellite) Observation Campaign: Strategies, Implementation, and Lessons Learned, *Sp. Sci. Rev.*, **167**, 93–140, 2012. (査読有)
- [学会発表] (計 24 件)
- 1) Ohno, S., T. Sakaiya, K. Kurosawa, T. Kadono, T. Arai, K. Shigemori, Y. Hironaka, S. Sugita, T. Matsui (2015), Impact-induced melt droplets created by hypervelocity impact experiments using a laser gun, 46<sup>th</sup> LPSC, #2094, March 16–20, The Woodlands, Texas (USA).
- 2) Tatsumi, E. and S. Sugita (2015), Dynamical Evolution of Itokawa Inferred from Impact Experiments on Rubble-pile Targets, 46<sup>th</sup> LPSC, #1909, March 16–20, The Woodlands, Texas (USA).
- 3) Kurosawa, K., H. Senshu, T. Kasuga, S. Sugita, and T. Matsui (2015), In-situ imaging and spectroscopic observations of artificial shooting stars, 46<sup>th</sup> LPSC, #2766, March 16–20, The Woodlands, Texas (USA).
- 4) Kurosawa, K., H. Senshu, K. Wada, and TDSS team (2015), Numerical simulations of impacts of a half spherical shell projectile on small asteroids, 46<sup>th</sup> LPSC, #1868, March 16–20, The Woodlands, Texas (USA).
- 5) Kurokawa, H., K. Kurosawa, and T. Usui (2015), Escape of early martian atmosphere and hydrosphere: Constraints from isotopic compositions, 46<sup>th</sup> LPSC, #1643, Lunar and Planetary Institute, March 16–20, The Woodlands, Texas (USA).
- 6) Kuwahara, H. and S. Sugita, Impact Generation of Methane-Rich Atmospheres on Early Terrestrial Planets (2014), 45<sup>th</sup> LPSC, #1867 March, 16–20, The Woodlands, Texas (USA).
- 7) Matsue, K., Arakawa, M., et al. (2015), Experimental study on propagation process of impact-induced seismic wave in quartz sand simulating asteroid regolith layer, MISASA V “Comprehensive Exploration of the Solar System: Sample Return and Analysis”, Japan,

- March 6-8, ブランナール三朝 (鳥取県東伯郡) .
- 8) Matsue, K., Arakawa, M., et al. (2015), Experimental study on propagation process of impact-induced seismic wave in quartz sand simulating asteroid regolith layer, East Asian Young Astronomers Meeting 2015, February 9-12, Taipei (Taiwan).
- 9) Kadono, T., Suzuki, A., K. Wada, S. Yamamoto, M. Arakawa, S. Sugita, J. Haruyama, and A. Nakamura (2014), Crater Rays and Mesh-like Pattern in Impact Ejecta, Asia Oceania Geosciences Society 11th Annual Meeting, SE02-A008, Aug. 1, ロイトン札幌 (北海道札幌市) .
- 10) Ohno, S., T. Kadono, T. Sakaiya, K. Kurosawa, T. Hamura, T. Sakaiya, K. Shigemori, Y. Hironaka, T. Sano, T. Watari, K. Otani, T. Matsui and S. Sugita (2014), Impact-driven Ocean Acidification as a Mechanism of K-Pg Mass Extinctions, Asia Oceania Geosciences Society 11th Annual Meeting, BG14-A001, July 31, ロイトン札幌 (北海道札幌市) .
- 11) Yasui, M., Matsumoto, E., Arakawa, M., Matsue, K., and Kobayashi, N. (2014), Experimental study on the impact-induced seismic wave propagating through granular materials: Implications for a future asteroid mission, ACM2014, Marina Congress Center, June 30 - July 4, Helsinki (Finland).
- 12) Tsujido, S., Arakawa, M., Suzuki, A. I., and Yasui, M. (2014), Experimental study on the ejecta-velocity distributions caused by low-velocity impacts on quartz sand, ACM2014, Marina Congress Center, June 30 - July 4, Helsinki (Finland).
- 13) Leliwa-Kopystynski, J. and Arakawa, M. (2014), Impact experiment onto heterogeneous targets and their interpretation in relation with formation of the asteroid families, ACM2014, Marina Congress Center, June 30 - July 4, Helsinki (Finland).
- 14) Okamoto, T., A. M. Nakamura, and S. Hasegawa (2014), Experimental investigation for cavity dimensions of highly porous small bodies, ACM'2014, Marina Congress Center, June 30 - July 4, Helsinki (Finland).
- 15) Katsura, T., A. M. Nakamura, A. Takabe, T. Okamoto, K. Sengen, S. Hasegawa, X. Liu, and T. Mashimo (2014), Outcome of impact disruption of iron meteorites at room temperature, ACM'2014, Marina Congress Center, June 30 - July 4, Helsinki (Finland).
- 16) Kurosawa, K. (2014), The thermodynamic response of silicate minerals after meteoritic impacts: Implications for the evolution of planetary atmospheres, The 10th international conference on High Energy Density Laboratory Astrophysics, May 12-16, Bordeaux (France). (invited)
- 17) Kurosawa, K., Y. Nagaoka, S. Hasegawa, S. Sugita, and T. Matsui, Ultrafast Imaging Observations of the Impact Jetting during Oblique Impacts (2014), 45th LPSC, #1856 March, 18, The Woodlands, Texas (USA).
- 18) Ohno, S., K. Ishibashi, T. Sekine, K. Kurosawa, T. Kobayashi, S. Sugita and T. Matsui (2014), An Experimental Study of Shock-induced Devolatilization of Calcite: Dependence on the Ambient Pressure, 45th LPSC, #2140 March, 18, The Woodlands, Texas (USA).
- 19) Arakawa, M., Wada, K., Takagi, Y., Kadono, T., Saiki, T., Sawada, H., Ogawa, K. (2013), Small Carry-on Impactor (SCI): Its scientific purpose, operation, and observation plan in Hayabysa-2 mission, Asia Oceania Geosciences Society 10th Annual Meeting, June 24-28, Brisbane (Australia) (invited).
- 20) Hayama, R., Yasui, M., Arakawa, M. (2013), Experimental study on the impact strength of icy bodies damaged by multiple collisions. 8th Workshop on Catastrophic Disruption in the Solar System, June 24-27, Hawaii. (USA).
- 21) Kurosawa, K., T. Kadono, Y. Hironaka, K. Hamano, K. Shigemori, T. Sakaiya, T. Sano, S. Ohno, T. Sekine, N. Ozaki, R. Kodama, S. Tachibana, T. Matsui, and S. Sugita (2013), Entropy gain for shock-heated forsterite: Implications for atmospheric blow-off on the early Earth and Venus, 44<sup>th</sup> LPSC, #2547, March 18-22, The Woodlands, Texas (USA).
- 22) Ohno, S., T. Sakaiya, T. Kadono, K. Kurosawa, H. Yabuta, K. Shigemori, Y. Hironaka, H. Kuwahara, S. Sugita, T. Kondo, T. Yamanaka, and T. Matsui (2013), Direct gas analysis experiment of impact-vaporized carbonaceous chondrite, 44<sup>th</sup> LPSC, #2547, March 18-22, The Woodlands, Texas (USA).
- 23) Arakawa, M., et al. (2013), Small Carry-on Impactor (SCI): Its scientific purpose, operation, and observation plan in HAYABUSA-2 mission, 44th LPSC, March 18-22, The Woodlands, Texas, (USA).
- 24) Yasui, M., Arakawa, M., Hasegawa, S., Fujita, Y., and Kadono, T. (2013), In situ flash X-ray observation of crater formation in porous gypsum analogous to low-density asteroids, 44th LPSC, March 18-22, The Woodlands, Texas (USA).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

松井孝典 (MATUI, TKAFUMI)

千葉工業大学・惑星探査研究センター・所長  
研究者番号: 80114643

### (2)研究分担者

杉田 精司 (SUGITA, SEIJI)

東京大学・理学系研究科・教授

研究者番号: 80313203

門野 敏彦 (KADONO, TOSHIHIKO)

産業医科大学・医学部・教授

研究者番号: 60359198

中村 昭子 (NAKAMURA, AKIKO)

神戸大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号: 40260012

荒川 政彦 (ARAKAWA, MASAHIKO)

神戸大学・自然科学研究科・教授

研究者番号: 10222738

黒澤 耕介 (KUROSAWA, KOSUKE)

千葉工業大学・惑星探査研究センター

・研究員

研究者番号: 80616433