

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 4月 1日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21244069

研究課題名（和文）超高速レーザー銃実験による惑星間衝突の実験的研究

研究課題名（英文）An experimental study on interplanetary collision using hypervelocity impact guns

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

研究成果の概要（和文）：本研究では超高速天体衝突による極限状況下に置かれた造岩鉱物の状態方程式を解明するため高強度レーザーを用いた衝撃蒸発実験を行った。時間分解自発光計測の結果、電子が電離吸熱/電子再結合性発熱を介して重要なエネルギー貯蔵庫として振る舞うことがわかった。この結果は珪酸塩鉱物の状態方程式に修正を迫り、惑星科学の多くの研究に再考を促す非常に波及効果の高いものである。

研究成果の概要（英文）：Laser shock experiments were carried out to investigate the equations of state (EOS) for silicate materials under impact-induced extreme conditions. Based on time-resolved emission spectra, we conclude that electrons behave as an important energy reservoir during impact-driven processes via endothermic shock-induced ionization and exothermic electron recombination. A number of previous studies related to silicate vaporization should be re-visited because the widely used EOS' s do not consider such electron behaviors.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
21年度	25,100,000	7,530,000	32,630,000
22年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
23年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
総計	36,500,000	10,950,000	47,450,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体惑星物理学

キーワード：惑星形成・進化

1. 研究開始当初の背景

惑星形成の最終期には10 km/sを超える速度での天体衝突が頻発していた。このような超高速天体衝突は、太陽系内惑星の主要構成要素である珪酸塩ですら蒸発させると予想されていた。高速度衝突で発生する珪酸塩蒸気は「衝突蒸気雲」と呼ばれ、(1)巨大衝突による月形成過程、(2)初期惑星大気の剥ぎ取り、(3)地質に残る珪酸塩球粒の起源、(4)生命前駆物質の生成といった惑星科学上の様々な大事件に重要な役割を果たしてい

たと考えられている。ところがその重要性にも関わらず、個々の天体衝突の際に発生する衝突蒸気雲の質量、膨張速度、内部で進行する気相化学反応生成物などはほとんど理解されていなかった。これは実験的困難のために実証的な研究が進まず、天体衝突時のエネルギー分配過程を決定する珪酸塩の状態方程式が確立されていないことが原因であった。

2. 研究の目的

本研究では近年急速に発展してきた高強

度レーザーを用いた衝撃圧縮技術を世界的にも初めて珪酸塩鉱物に適用し、超高速天体衝突の極限状況を実験室で再現し、時間分解発光分光計測によってその熱力学状態を直接観察し、状態方程式を確立するためのデータをj得ることを目指した。

3. 研究の方法

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」装置を用いて主要な造岩鉱物である橄欖石、透輝石を衝撃圧縮した。実験装置の概略図を図 1 に示す。本科研費の助成を受けて新規導入された時間掃引型分光計を用いて、その場時間分解自発光分光計測を実施した。工学分野の先行研究との違いは標的の違いだけではなく、衝撃圧縮からの解放過程をも含めた発光分光計測を行ったことである。従来の研究では衝撃圧縮状態にある物質の圧力、温度、反射率などの計測が行われているが、圧縮からの解放過程は蓄えられたエネルギーがどの程度珪酸塩の分解に使われるのか、物質の相図がどうなっているのかといった重要な情報を含んでいる。

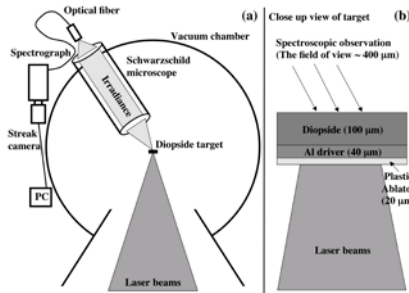


図 1. 実験装置概略図。

4. 研究成果

図 2 に時間分解発光分光計測例を示す。500 ns の長時間露光 (a) の分光観測では衝撃圧縮直後には黒体放射が卓越し、時間と共にイオン/原子由来の発光輝線に移りかわる様子が観測された。これは圧縮直後に超臨界流体状態にあった珪酸塩鉱物が、断熱膨張によって相変化 (蒸発) していく様子を直接捉えたことを意味する。驚くべきことは非常に高压となっていると予想されるにも関わらず、断熱解放初期にはイオンの発光輝線が卓越していたことである。各種発光輝線強度の時間変化の原因を検討したところ、輝線の

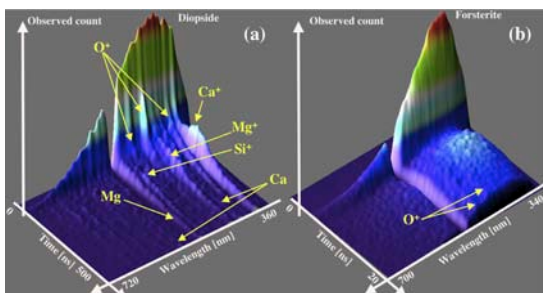


図 2. 時間分解発光分光計測例。(a) 露光時間 500 ns, (b) 露光時間 20 ns

出現順序にはイオン化エネルギーと良い相関があり、真空中へ膨張している珪酸塩プラズマ内で電子再結合が起こっていることが明らかとなった。衝撃圧縮直後の黒体放射を利用して衝撃圧縮温度を求めたところ、理論予測よりも大幅に低温であり、石英を用いた先行研究と調和的な結果が得られた。この低温の起源は衝撃圧縮中の電離吸熱によるものと考えられている。

これらの結果は超高速天体衝突の際には、

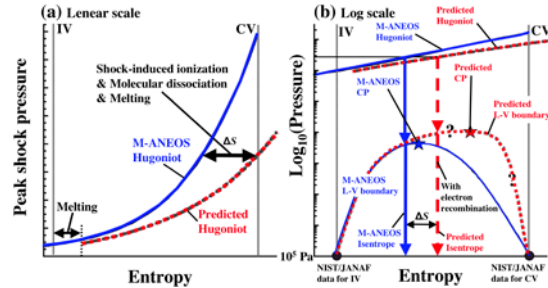


図 2. 時間分解発光分光計測例。(a) 露光時間 500 ns, (b) 露光時間 20 ns

珪酸塩鉱物中の電子が電離吸熱/電子再結合発熱を介して、一つのエネルギー貯蔵庫として振る舞うことを示唆している。極限状況における電子の振る舞いは多体量子系問題に帰着するため取り扱うことができず、これまでの理論 EOS には組み込まれていない。発光分光計測の結果から予想される珪酸塩のエントロピー - 圧力平面上での熱力学挙動の変化を図 3 に示す。従来の理論 EOS (M-ANEOS) からの主要な変化は (1) 衝撃圧縮で上昇するエントロピーは従来の理論予測よりも大きいこと、(2) 高压条件における気液相境界と臨界点の位置はより高いエントロピーを持つ可能性が高いことである。これらは電離吸熱が起こると衝撃圧縮時の比熱が上昇すること、高压条件での気相イオンの存在は珪酸塩蒸気がより高いエントロピーを持っていることを意味することによる。

現段階ではまだ定性的な議論だが、衝撃圧縮時のエントロピーの増加及び断熱解放中の電子再結合発熱は、従来の予測よりも衝突蒸気雲の質量が大幅に大きく、その力学挙動も異なるものであることを示唆する。以下に示すように、この影響は惑星科学の様々な研究に大きな影響を与える。

(1) 巨大衝突による月形成: 近年の数値流体計算の結果は月の巨大衝突起源に否定的である。それは地球-月系の酸素及びチタンの同位体の一致を説明できないからである。衝突後の原始地球と部分蒸発月円盤の物質交換で同位体一致を説明しようとする試みもあるが、巨大衝突後の原始月円盤構造では、物理的に難しいという厳しい反論にさらされている。これらはすべて 2004 年以降に行

われた研究であり、月の起源問題は、再び惑星科学の最重要課題となりつつある。本研究で見出されたような電子挙動を組み込んだEOSで数値計算を行えば結果が置き換わる可能性がある。より大きな質量とエントロピーを持つ衝突蒸気雲の発生は、その後の原始月円盤構造を大幅に変化させ、同位体平衡を達成させるような解が見出される可能性がある。

(2) 初期惑星大気の剥ぎ取り：惑星形成の最終期には隕石重爆撃期と呼ばれる非常に天体衝突の激しい時期があったことがわかっている。急激に膨張する衝突蒸気雲が火星の大気をすべて吹き飛ばしたとする研究がある一方で、地球の場合は重力が大きいために、地球大気の剥ぎ取りは起きないとされてきた。ところが近年発展してきた太陽系形成理論によれば、地球は水素を主成分とする原始惑星円盤由来の気体を獲得し、分厚い原始大気をまもってしまう。これは地球化学的分析と矛盾を示しており、原始大気を地球からいかに取り除くかという問題は地球の初期進化に関する重要問題である。本研究で見出されたように、実際には大きな質量とエントロピーを持つ衝突蒸気雲の発生が起きていたとすれば、天体衝突が原始地球大気の除去に効率的に寄与していた可能性がある。

(3) 地質に残る珪酸塩球粒の起源：30億年以前の地層から発見された >100 ミクロンの珪酸塩球粒は天体衝突で発生した衝突蒸気雲の凝縮によって生成されたものであると考えられている。この場合そのサイズ分布は(a)衝突蒸気雲を持つエントロピー、(b)臨界点のエントロピー、(c)衝突蒸気雲の減温率に強く依存する。つまり珪酸塩球粒のサイズ分布から太古の地球への天体衝突条件を推定できる可能性がある。これは地球の表層環境進化を考える上で重要である。本研究の結果はサイズ分布を支配する(a)-(c)のすべてが従来の理論EOSの予測とは異なることを予想する。先行研究で推定された太古の天体衝突条件は大幅に違ったものである可能性がある。

以上述べてきたように本研究で見出された天体衝突時の電子挙動は、多くの先行研究の結果に再考を促すものであり、大きな波及効果が期待される。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 63 件)

- 1) 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, Shock-induced silicate vaporization: The role of electrons, J.

- Geophys. Res., 2012(査読有).
- 2) Kamata, S., S. Sugita, and Y. Abe, A new spectral calculation scheme for long-term deformation of Maxwellian planetary bodies, J. Geophys. Res., 117, E02004, doi:10.1029/2011JE003945, 2012(査読有).
- 3) Nagata, K., S. Sugita, M. Okada, Bayesian Spectral Deconvolution with Exchange Monte Carlo Method, Neural Networks, 28, 82-89, 2012(査読有).
- 4) Sugita, S., K. Kurosawa, and T. Kadono, A Semi-Analytical On-Hugoniot EOS of Condensed Matter using a Up-Us relation, AIP Conf. Proc., 1426, 895-898, 2012(査読有).
- 5) 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, Time-resolved spectroscopic observations of shock induced silicate ionization, AIP Conf. Proc., 1426, 855-858, 2012(査読有).
- 6) 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, Flyer acceleration by high-power laser and impact experiments at velocities higher than 10 km/s, AIP Conf. Proc., 1426, 847-850, 2012(査読有).
- 7) Ohno, S., T. Kadono, K. Kurosawa, T. Hamura, T. Sakaiya, S. Sugita, K. Shigemori, Y. Hironaka, T. Watari, T. Matsui, Direct measurement of chemical composition of SO_2 in impact vapor using a laser gun, AIP Conf. Proc., 1426, 851-854, 2012(査読有).
- 8) Hong, P. K., S. Sugita, N. Okamura, Y. Sekine, H. Terada, N. Takatoh, Y. Hayano, T. Fuse, T. -S. Pyo, H. Kawakita, D. H. Wooden, E. F. Young, P. G. Lucey, K. Kurosawa, H. Genda, J. Haruyama, R. Furusho, T. Kadono, R. Nakamura, S. Kamata, T. Hamura, T. Sekiguchi, M. Sôma, H. Noda, J. Watanabe, A ground-based observation of the LCROSS impact events using the Subaru Telescope, Icarus, 214, 21-29, 2011, 2011(査読有).
- 9) Sekine, Y., H. Genda, S. Sugita, T. Kadono, and T. Matsui, Replacement and late formation of atmospheric N_2 on undifferentiated Titan by impacts, Nature Geosci., 4, 359-362, 2011(査読有).
- 10) Niimi, R., T. Kadono, A. Tsuchiyama, K. Okudaira, S. Hasegawa, M. Tabata, T. Watanabe, M. Yagishita, N. Machii, A. M. Nakamura, and 3 coauthors, Size and Density Estimation from Impact Track Morphology in Silica Aerogel: Application to Dust of Comet 81P/Wild 2. Astrophys. J., in press (2011) (査読有).
- 11) Tsuchiyama, A., 3 coauthors, T. Kadono, and 28 coauthors, Three-Dimensional Structure of Hayabusa Samples: Origin and

- Evolution of Itokawa Regolith. *Science*, 333, 1125–1128, 2011(査読有).
- 12) Sano, T., 13 coauthors, T. Kadono, 7 coauthors, Laser-shock compression & Hugoniot measurements of liquid hydrogen to 55 GPa. *Phys. Rev. B*, 83, 054117 doi:10.1103/PhysRevB.83.054117 (2011) (査読有).
 - 13) Niimi, R., T. Kadono, M. Arakawa, M. Yasui, K. Dohi, A. M. Nakamura, Y. Iida, and A. Tsuchiyama, In Situ Observation of Penetration Process in Silica Aerogel: Deceleration Mechanism of Hard Spherical Projectiles. *Icarus*, 211, 986–992, (2011) (査読有).
 - 14) Arakawa, M. and M. Yasui, Impact crater on sintered snow surface simulating porous icy bodies, *Icarus*, 216, 1–9, 2011(査読有).
 - 15) Yasui, M. and M. Arakawa, Impact experiments of porous gypsum-glass bead mixtures simulating parent bodies of ordinary chondrites: Implications for re-accumulation processes related to rubble-pile formation, *Icarus*, 214, 754–765, 2011(査読有).
 - 16) Arakawa, M., and M. Yasui, Measurements of post shock temperature deposited in ice impact crater, in *Physics and Chemistry of Ice* (Hokkaido University Press, Japan), 339–344 (2011) (査読有).
 - 17) Shimaki, Y., M. Arakawa, and M. Yasui, Impact experiments on sintered snowballs, in *Physics and Chemistry of Ice* (Hokkaido University Press, Japan), 379–386 (2011) (査読有).
 - 18) Ishiguro, M., Hanayama, H., 15 coauthors and Nakamura, A. M. (2011) Observational Evidences for Impact on the Main-Belt Asteroid (596) Scheila, *Astrophys. J.* 740L, article ID#11(査読有).
 - 19) Takasawa, S., Nakamura, A. M., Kadono, T., Arakawa, M. and 15 coauthors (2011) Silicate dust size distribution from hypervelocity collisions: Implications for dust production in debris discs, *Astrophys. J.* 733L, article ID#. 39. (査読有)
 - 20) Machii, N., and Nakamura, A. M. (2011) Experimental study on static and impact strength of sintered agglomerates, *Icarus*, 211, 885–893. (査読有)
 - 21) 杉田精司, 火星のアストロバイオロジー 探査はどこまで進んだか, *地球化学*, 45, 181–197, 2011.
 - 22) Schulte, P. (他 39 名中 22 番目 Matsui, T.), 2010, Response-Cretaceous Extinctions. *Science*, 328, 975–976(査読有).
 - 23) Schulte, P., (他 40 名中 22 番目 Matsui, T.) 2010, The Chicxulub asteroid impact and mass extinction at the Cretaceous-Paleogene Boundary. *Science*, 327, 1214–1218(査読有).
 - 24) Kurosawa K., S. Sugita, T. Kadono, K. Shigemori, Y. Hironaka, K. Otani, T. Sano, A. Shiroshita, N. Ozaki, K. Miyanishi, T. Sakaiya, Y. Sekine, S. Tachibana, K. Nakamura, S. Fukuzaki, S. Ohno, R. Kodama, and T. Matsui In-situ spectroscopic observations of silicate vaporization due to >10 km/s impacts using laser driven projectiles, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L23203, doi:10.1029/2010GL045330, 2010. (査読有)
 - 25) Kurosawa, K. and S. Sugita, A pressure measurement method for high-temperature rock vapor plumes using atomic line broadening, *J. Geophys. Res.*, 115, E10003, doi:10.1029/2010JE003575, 2010. (査読有)
 - 26) Ishimaru, R., H. Senshu, S. Sugita, and T. Matsui, A hydrocode calculation coupled with reaction kinetics of carbon compounds within an impact vapor plume and its implications for cometary impacts on Galilean satellites, *Icarus*, 210, 411–423, 2010. (査読有)
 - 27) Fukuzaki, S., Y. Sekine, H. Genda, S. Sugita, T. Kadono, and T. Matsui, Impact-induced N_2 production from ammonium sulfate $(NH_4)_2SO_4$: Implications for the origin and evolution of N_2 in Titan's atmosphere, *Icarus*, 209, 715–722, 2010. (査読有)
 - 28) Kadono, T., S. Sugita, T. Ootubo, S. Sako, T. Miyata, R. Furusho, M. Honda, H. Kawakita, J. Watanabe, Interpretation on Deep Impact results: Radial distribution of ejecta and the size distribution of large-sized grains, *Earth Planet. Sp.*, 62, 13–16, 2010. (査読有)
 - 29) Kadono, T., T. Sakaiya, Y. Hironaka, K. Otani, T. Sano, T. Fujiwara, T. Mochiyama, K. Kurosawa, S. Sugita, Y. Sekine, W. Nishikanbara, T. Matsui, S. Ohno, A. Shiroshita, K. Miyanishi, N. Ozaki, R. Kodama, A. M. Nakamura, M. Arakawa, S. Fujioka, and K. Shigemori, Impact experiments with a new technique for acceleration of projectiles to velocities higher than Earth's escape velocity 11.2 km/s, *J. Geophys. Res.*, 115, E04003, doi:10.1029/2009JE003385, 2010. (査読有)
 - 30) Yamashita, Y., M. Kato, and M. Arakawa, Experimental study on the rheological properties of polycrystalline solid nitrogen and methane: Implications for tectonic processes on Triton, *Icarus*, 207, 972–977 (2010) (査読有).
 - 31) Michikami, T., Nakamura, A. M., and Hirata, N. (2010) The Shape Distribution of Boulders on Asteroid 25143 Itokawa: Comparison with Fragments from Impact Experiments, *Icarus* 207, 277–284(査読有).
 - 32) Ishiguro, M., Nakamura, R., Tholen, D. J., Hirata, N., Demura, H., Nemoto, E., Nakamura, A. M., ほか 8 人 (2010) The Hayabusa Spacecraft Asteroid Multi-band Imaging Camera: AMICA, *Icarus* 207, 714–731(査読有).
 - 33) Setoh, M., Nakamura, A. M., ほか 6 人 (2010) High and Low-Velocity Impact Experiments on Porous Sintered Glass Bead Targets of Different Compressive Strengths: Outcome Sensitivity and Scaling, *Icarus* 205, 702–711(査読有).

- 34) 黒澤耕介, 門野敏彦, 杉田精司, 重森啓介, 弘中陽一郎, 尾崎典雅, 城下明之, 長勇一郎, 境家達弘, 橘省吾, 大野宗祐, 藤岡慎介, Tommaso Vinci, 兒玉了祐, 松井孝典, 宇宙速度衝突による珪酸塩蒸発過程のその場時間分解発光分光観測, 日本惑星科学会誌 遊星人, 19, 332-339, 2010. (査読有)
- 35) 洪鵬, 岡村奈津子, 杉田精司, 関根康人, 寺田宏, 高遠徳尚, 早野裕, 布施哲治, 河北秀世, 黒澤耕介, 春山純一, 古荘玲子, 門野敏彦, 中村良介, 羽村太雅, 関口朋彦, 渡部潤一, LCROSS 衝突の放出物のすばる望遠鏡による地上観測, 日本惑星科学会誌 遊星人, 19, 96-104, 2010. (査読有)
- 36) 廣井孝弘, 杉田精司, C型小惑星の探査における可視・近赤外分光の役割, 日本惑星科学会誌 遊星人, 19, 36-47, 2010. (査読有)
- 37) 杉田精司, 黒澤耕介, 門野敏彦, プラズマ・核融合学会誌, 高速レーザー銃がもたらす惑星間衝突物理学の進展, 86, 10, 589-593, 2010 (査読無).
- 38) Hamura, T., K. Kurosawa, S. Hasegawa, T. Matsui, and S. Sugita, High-Speed Time-Series Spectroscopic and Imaging Observations on Aerodynamic Ablation Processes within Vapor Plumes due to Oblique Impacts, Proc. of 43th Lunar and Planet. Symp., 掲載確定, 2010 (査読無).
- 39) Kadono, T., T. Sakaiya, Y. Hironaka, K. Otani, T. Sano, T. Fujiwara, T. Mochiyama, K. Kurosawa, S. Sugita, Y. Sekine, W. Nishikanbara, T. Matsui, S. Ohno, A. Shiroshita, K. Miyanishi, N. Ozaki, R. Kodama, A. M. Nakamura, M. Arakawa, S. Fujioka, and K. Shigemori, Impact experiments with projectiles at velocities higher than 10 km/s, Proc. 16th APS Topical Conf. on Shock Compression of Condensed Matter, 875-877, 2009. (査読有)
- 40) Sugita, S., and P. H. Schultz, Efficient cyanide formation due to impacts of carbonaceous bodies on a planet with a nitrogen-rich atmosphere, Geophys. Res. Lett., 36, L20204, doi:10.1029/2009GL040252, 2009. (査読有)
- 41) Kurosawa, K., S. Sugita, K. Fujita, K. Ishibashi, T. Kadono, S. Ohno, T. Matsui, Rotational-Temperature Measurements of Chemically Reacting CN using Band-Tail Spectra, J. Thermophys. Heat Transfer, 23, 463-472, 2009. (査読有)
- 42) Kawaragi, K. Y. Sekine, T. Kadono, S. Sugita, S. Ohno, K. Ishibashi, K. Kurosawa, T. Matsui, S. Ikeda, Direct measurements of chemical composition of shock-induced gases from calcite: an intense global warming after the Chicxulub impact due to the indirect greenhouse effect of carbon monoxide, Earth, Planet. Sci. Lett., 282, 56-64, 2009. (査読有)
- 43) Namiki, N., T. Iwata, K. Matsumoto, H. Hanada, H. Noda, S. Goossens, M. Ogawa, N. Kawano, K. Asari, S. Tsuruta, Y. Ishihara, Q. Liu, F. Kikuchi, T. Ishikawa, S. Sasaki, C. Aoshima, K. Kurosawa, S. Sugita, and T. Takano, Results from the Japanese SELENE mission shed light on differences between the far and near sides of the Moon, Science, 323, 900-905, 2009. (査読有)
- 44) Tsuchiyama, A., and 7 coauthors, T. Kadono, K. Jogo, and Y. Suzuki, Three-Dimensional Structures and Elemental Distributions of Stardust Impact Tracks Using Synchrotron Microtomography and X-ray Fluorescence Analysis, Meteor. Planet. Sci., 44, 1203-1224, (2009) (査読有).
- 45) Watanabe, J., M. Honda, M. Ishiguro, T. Ootsubo, Y. Sarugaku, T. Kadono, I. Sakon, T. Fuse, N. Takato, R. Furusho, Subaru/COMICS Mid-Infrared Observation of Near-Nucleus Region of Comet 17P/Holmes at the Early Phase of the Outburst, Publ. Astron. Soc. Japan, 61, 679-685, (2009) (査読有).
- 46) Ozaki, N., 11 coauthors, T. Kadono, and 11 coauthors Shock Hugoniot and Temperature Data for Polystyrene Obtained with Quartz Standard. Phys. Plasmas, 16, 062702 doi:10.1063/1.3152287 (2009) (査読有).
- 47) Kadono, T., M. Arakawa, T. Ito, and K. Ohtsuki, Spin Rates of Fast-Rotating Asteroids and Fragments in Impact Disruption, Icarus, 200, 694-697, (2009) (査読有).
- 48) Okamoto, C., and M. Arakawa, Experimental study on the collisional disruption of porous gypsum spheres, Meteoritics & Planet. Sci., 44, 1947-1954 (2009). (査読有)
- 49) Yasui, M. and M. Arakawa, "Compaction experiments of ice-silica particle mixtures: Implication for residual porosity of small icy bodies", J. Geophys. Res., 114, E09004, doi:10.1029/2009JE003374 (2009) (査読有).
- 50) Nakamura, A. M., Hiraoka, K., Yamashita, Y., and Machii, N. (2009) Collisional Disruption Experiments of Porous Targets, Planet. Space Sci. 57, 111-118(査読有).
- 51) Jutzi, M., Michel, P., Hiraoka, K., Nakamura, A. M., and Benz, W. (2009) Numerical Simulations of Impacts Involving Porous Bodies: II. Comparison with Laboratory Experiments, Icarus 201, 802-813(査読有).
- 52) Fujii, Y., and Nakamura, A.M. (2009) Compaction and Fragmentation of Porous Gypsum Targets from Low-Velocity Impacts, Icarus 201, 795-801(査読有).
- 53) Hirata, N., Honda, C.,ほか9人中5番めに Nakamura, A. M. (2009) Surface Morphology of the Asteroid Itokawa: Survey for Impact Structures, Icarus 200, 486-502(査読有).
- 54) 杉田精司, 宮本英昭, 橘省吾, 岡田達明, 出村裕英, 大森聡一, 並木則行, 高橋幸弘, 三浦弥生, 長尾敬介, 三河内岳, 佐藤毅彦, MELOS の目指す火星表層科学探査, 日本惑星科学会誌 遊星人, 18, 79-83, 2009. (査

読有)

- 55) 並木則行, 杉田精司, 石原吉明, 野田寛大, 佐々木 晶, 岩田隆浩, 花田英夫, 荒木博士, 黒澤耕介, 松村瑞秀, 横山聖典, 鎌田俊一, 久保中央, 森朝子, 佐藤麻里, 月衝突盆地地形補償メカニズムの比較研究, 日本測地学会誌, 55, 291-305, 2009. (査読有)
- 56) 門野敏彦, 重森啓介, 境家達弘, 弘中陽一郎, 佐野孝好, 大谷一人, 藤原隆史, 持山智浩, 藤岡慎介, 黒澤耕介, 城下明之, 宮西宏併, 尾崎典雅, 関根康人, 杉田精司, 松井孝典, 橘省吾, 大野宗祐, 荒川政彦, 竹内拓, 中村昭子, 高出力レーザーを使った弾丸飛翔体加速および衝突実験: 秒速10kmを越える衝突, 日本惑星科学会誌 遊星人, 18, 4-9, 2009. (査読有)

[学会発表] (計 18 件)

- 1) Kurosawa, K. and S. Sugita, Pressure measurements of self-luminous rock vapors using atomic line broadening, Lunar Planet. Sci. Conf., XXXXII, #1714, The Woodlands, TX, USA., Mar. 7, 2011.
- 2) Sugita, S., K. Nagata, N. Tsuboi, T. Hiroi, and M. Okada, A new modified Gaussian model (MGM) using a Bayesian estimation approach: Toward automated analysis of planetary spectra, Lunar Planet. Sci. Conf., XXXXII, #2624, The Woodlands, TX, USA., Mar. 7, 2011.
- 3) Kamata, S., S. Sugita, Y. Abe, Y. Ishihara, Y. Harada, N. Namiki, T. Iwata, H. Hanada, and H. Araki, Radiogenic heat source concentration in the lunar farside crust estimated from viscoelastic deformation of impact basins, Lunar Planet. Sci. Conf., XXXXII, #1648, The Woodlands, TX, USA., Mar. 7, 2011.
- 4) Barnouin, O. S., C.M., Ernst, J.T. Heinick, S. Sugita, M.J. Cintala, D.A. Crawford, and T. Matsui, Experimental results investigating impact velocity effects on crater growth and the transient depth-to-diameter ratio, Lunar Planet. Sci. Conf., XXXXII, #2258, The Woodlands, TX, USA., Mar. 7, 2011.
- 5) Ohno, S., T. Kadono, K. Kurosawa, T. Hamura, T. Sakaiya, S. Sugita, K. Shigemori, Y. Hironaka, T. Watari, and T. Matsui, Experimental study of SO₃/SO₂ ratio in impact vapor clouds using a high-speed laser gun, Lunar Planet. Sci. Conf., XXXXII, #1752, The Woodlands, TX, USA., Mar. 7, 2011.
- 6) Ishibashi, K., S. Ohno, T. Arai, K. Wada, S. Kameda, H. Senshu, N. Namiki, T. Matsui, Y. Cho, and S. Sugita, Prediction of the elemental composition of olivine by laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), Lunar Planet. Sci. Conf., XXXXII, #1743, The Woodlands, TX, USA., Mar. 7, 2011.

[図書] (計 3 件)

- 1) Mori, Y. T. Sekiguchi, S. Sugita, and 7 coauthors, One month of near-IR imaging

photometry of comet 9P/Tempel 1, in Deep Impact as a world observatory event: Synergies in space, time, and wavelength, ESO Astrophysics Symposia, edited by H. U. Käufel and C. Serken, Springer Verlag Berlin, 323-328, 2009.

- 2) Kadono, T., S. Sugita, and 8 coauthors, The subsurface structure of comet 9P/Tempel 1 projected into the dust plume, *ibid.*, 143-146, 2009.
- 3) Ootsubo, T., S. Sugita, J. Watanabe, M. Honda, H. Kawakita, T. Kadono, R. Furusho, Subaru/COMICS mid-infrared spectroscopic observations of the dust plume from comet 9P/Tempel, *ibid.*, 131-137, 2009.

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・大学院新領域創成科学研究科・教授
研究者番号: 80313203

門野 敏彦 (KADONO, TOSHIHIKO)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・准教授
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

(3) 連携研究者

該当なし