

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340168

研究課題名(和文)衝突脱ガス水蒸気大気の分子組成と水素散逸効率の推定

研究課題名(英文) Estimation of the molecular composition and hydrogen escape rate of impact-induced steam atmospheres

研究代表者

杉田 精司 (Sugita, Seiji)

東京大学・新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：80313203

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,800,000円、(間接経費) 4,740,000円

研究成果の概要(和文)：本計画の主な成果は以下の3つである。第一は衝突脱ガス大気分子組成。金星やM型星周りのスーパーアースでは、CO+H<sub>2</sub>タイプ大気が卓越し、火星や地球ではCH<sub>4</sub>大気が卓越することが分かった。第二は地球型惑星の水素散逸量の推定(Nature掲載)。惑星集積終了後直ちに水蒸気大気が凝縮するか否かで、水素散逸量が大きく異なり、地球のような水惑星にあるか金星のように乾燥惑星になるかが変わることが判明。第三は衝突実験および脱ガス気体の分子組成計測である(Nature Geoscience掲載)。実験結果は、海洋表層を酸性化するに十分な量の硫酸雨がK/Pg衝突事件で降ったことを強く示唆する。

研究成果の概要(英文)：We obtained three main results in this project. First is on the molecular compositions of impact-induced planetary atmospheres. Calculation results revealed that Venus and super Earth's around M-type stars would have CO-H<sub>2</sub>-rich atmosphere and Mars and Earth would have CH<sub>4</sub>-rich atmosphere. Second is on hydrogen escape rate from terrestrial planets. Calculation results indicate that hydrogen escape rate depends greatly on whether or not a steam atmosphere would condense to an ocean after accretion and determines whether an Earth-like wet planet or Venus-like dry planet, including its interior, would form. Third is impact experiments and mass spectroscopic measurements of impact-degassed volatiles. Experimental results show that the K/Pg impact would generate acid rain sufficient to acidify the ocean surface layer, which may lead to the K/Pg mass extinction.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・地球宇宙化学

キーワード：天体衝突 初期地球大気 触媒反応 衝突蒸気雲 ユゴニオ曲線 高速衝突実験

### 1. 研究開始当初の背景

地球の大気および海洋の起源は、微惑星の衝突脱ガスとそれに伴う水蒸気大気の形成でうまく説明できる。そのため、水蒸気大気の構造や時間進化過程は多数の研究者により詳細に調べられている。だが、衝突脱ガス水蒸気大気がどんな化学組成を持つかについては、詳細な検証はなされていない。水蒸気大気は地球大気進化の初期条件であり、その後の地球大気進化を考える上で非常に重要である。

水蒸気大気仮説を提唱した Matsui and Abe (1986)もその後の Zahnle et al. (1988)も  $H_2O \cdot CO_2$  主体の大気を仮定しているが、これはモデルの仮定であって理論計算で得られた結果ではない。しかし、その後の初期地球大気の化学組成進化の初期条件としては、 $H_2O$  と  $CO_2$  主体の大気が使われることが主流となって現在に至っている(e.g., Kasting, 1990; 1993)。さらに、その後、地球史の初期においては還元的な大気成分が比較的高濃度に存在していた可能性があるという主張が現れるようになったが、いずれも生物活動によって地球史の途中でメタンが生じる可能性を指摘するものが主流である(e.g., Pavlov et al., 2000; Catling et al., 2001)。地球形成直後に形成する最初の大気の化学組成については、ほとんど手つかずの状態が長く続いている。

水蒸気大気の化学組成が手つかずの状態が続いてきたことには、2つの大きな理由がある。1つは、地球大気・海洋の材料物質が唯一に決定できないことである。2つ目の理由は、化学反応プロセスの不確定性である。同じ化学組成を持つ大気であっても、大気中で起きる化学反応プロセスによっては高温安定種を主体とした分子組成(e.g.,  $H_2+CO+H_2O$ )になったり、低温安定種主体とした分子組成(e.g.,  $CH_4+H_2O$ )になったりと様々な可能性がある。

### 2. 研究の目的

本研究計画では、最近提案された太陽系内で最も酸化的な材料物質で構成した衝突脱ガス大気のエントロピーと最も還元的な材料物質の場合について、水蒸気大気の分子組成推定を試みる。そのために、天体衝突時に生じる蒸気雲の分子組成の推定を行う。さらに、集積中にできた水蒸気大気が、惑星集積終了後にどのような進化を経て、どのような効率で水素を散逸させるかを見積もることを主眼とする。

### 3. 研究の方法

上の目的の実現のためには、3つの重要な要素がある。一つは、宇宙速度での惑星構成物質の衝撃加熱実験である。衝突蒸気雲の熱力学状態の正確な推定には、正確なユゴニオ曲線のデータ(衝撃圧力の関数としての衝撃波速度および衝撃温度)が必要である。これの取得のために、高強度レーザー照射実験を

実施した。ここでは、単純なシリケート組成以外に、揮発性成分を含んだ物質の実験も行った。次に、得られたユゴニオデータを基にして、衝突蒸気雲の温度圧力の進化経路を正確に推算し、その条件の全てにおける平衡分子組成を求めた。最後に、水蒸気大気からの水素の散逸率を、マグマオーシャンとの熱化学平衡を考慮しつつ計算して、水蒸気大気の長期進化を求めた。

### 4. 研究成果

本研究計画では、主に3つの成果が得られた。

第1は、衝突脱ガス大気の分子組成推定についてである。阪大レーザー研での高強度レーザー照射実験によって得られた宇宙速度条件でのユゴニオのデータに基づき、衝突エントロピー増加率と分子組成の関係の導き出した。その結果を用いつつ、現実的な惑星表面物性を考慮して大気組成モデル計算を行った。その結果、惑星重力や日心距離(平均衝突速度の制御因子)と並んで、惑星表面が海で覆われているか否かが非常に重要な影響を持つことが判明した。これらの3つの要素を総合すると、金星およびM型星周りのスーパーアースでは  $CO+H_2$  タイプ大気が卓越し、火星および地球では  $CH_4$  大気が卓越することが分かった。

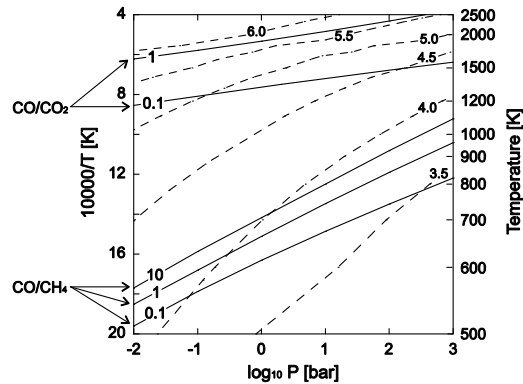


図1 .CI コンドライト組成の衝突蒸気雲中の炭素化合物の組成進化曲線。図中の破線は衝突蒸気雲のエントロピーを、実線は分子組成( $CO/CO_2$ 比および  $CO/CH_4$ 比)を表す。エントロピーが  $3.5kJ/K/kg$  程度以下であれば、高温条件から定温条件に至るまで常に  $CH_4$  が卓越することが分かる。

第2は、初期地球型惑星の水素散逸量の見積りである。集積期間中に形成する水蒸気大気が惑星集積終了後直ちに凝縮して海になる場合と、その後も主星の放射のみで保持される場合では、水素散逸量が大きく異なることが分かった。前者では現在の地球のような海の数倍の水に相当する水素が惑星に残るが、後者では地球の海の  $1/10$  相当以下まで水素が枯渇する。この成果は、Nature 誌に掲載された。

第3は、レーザー銃を用いた衝突実験および質量分析計測である。実験結果は、天体衝突の直後に硫黄の酸化還元状態が急速に変

化することを示していた。これは K/Pg 衝突事件において大量の硫酸雨が極めて短期間に降ったことを意味しており、当時の海洋表層の酸性化を強く示唆している。この成果は、Nature Geoscience 誌に掲載された。

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 35 件)

- 1) 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)
- 2) Hamano, K., Y. Abe and H. Genda (2013), Emergence of two types of terrestrial planet on solidification of magma ocean, *Nature*, 497, 607-610, DOI: 10.1038/nature12163 (査読有)
- 3) 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, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 500, Part 6, 062001. (査読有)
- 4) Kurosawa, K., S. Sugita, K. Ishibashi, S. Hasegawa, Y. Sekine, N. O. Ogawa, T. Kadono, 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)
- 5) 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.2012.12.010(査読有)
- 6) 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)
- 7) 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)
- 8) 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)
- 9) 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)
- 10) 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*, (査読有)
- 11) 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)
- 12) 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)
- 13) 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, 68-76. (査読有)
- 14) Cho, Y., T. Morota, J. Haruyama, M. Yasui, N. Hirata, 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)
- 15) 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)
- 16) 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)
- 17) Nagata, K., S. Sugita, M. Okada (2012),

- Bayesian Spectral Deconvolution with Exchange Monte Carlo Method, *Neural Networks*, 28, 82-89. (査読有)
- 18) 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)
- 19) 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)
- 20) 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)
- 21) 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)
- 22) 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)
- 23) 石橋高, 亀田真吾, 荒井朋子, 和田浩二, 小林正規, 並木則行, 千秋博紀, 大野宗祐, 長勇一郎, 杉田精司, 松井孝典, 月・惑星着陸探査用元素分析装置: レーザ誘起絶縁破壊分光装置 (LIBS)(2012), *日本惑星科学会誌 遊星人*, 21, 260-277. (査読有)
- 24) 長勇一郎, 諸田智克, 三浦弥生, 亀田真吾, 吉岡和夫, 岡崎隆司, 並木則行, 荒井朋子, 小林正規, 石橋高, 大野宗祐, 千秋博紀, 和田浩二, 橘省吾, 渡邊誠一郎, 古本宗充, 本田親寿, 杉原孝充, 石原吉明, 大竹真紀子, 小林直樹, 唐牛謙, 武田弘, 寺田健太郎, 鎌田俊一, 佐伯和人, 小林進悟, 國井康晴, 大槻真嗣, 杉田精司. その場年代計測装置による月惑星年代学探査 (2012), *日本惑星科学会誌 遊星人*, 21, 268-276. (査読有)
- 25) 並木則行, 小松吾郎, 臼井寛裕, 杉田精司, 宮本英昭, 久保田隆, 石上玄也, 出村裕英, 岡田達明, 三浦弥生, 長勇一郎, 湖東和央, 千秋博紀, 和田浩二, 石橋高, 荒井朋子, 小林正規, 大野宗祐, 火星ローバ検討グループ (2012), ローバによる火星地質調査計画, 地質学雑誌, 118, 606-617. (査読有)
- 26) Meech, K. J. et al., 共著 197 人中 160 番目 S. Sugita, *EPOXI: Comet 103P/Hartley 2 Observations from a worldwide campaign*, *Astrophys. J.*, 734, L1-L9, 2011. (査読有)
- 27) 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. (査読有)
- 28) Sekine, Y., H. Genda, S. Sugita, T. Kadono, and T. Matsui, Replacement and late formation of atmospheric N<sub>2</sub> on undifferentiated Titan by impacts, *Nature Geosci.*, 4, 359-362, 2011. (査読有)
- 29) 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. (査読有)
- 30) Sekine, Y., Y. Takano, H. Hano, R. Funase, K. Takai, et al. (2014) Exploration of Enceladus' water-rich plumes toward understanding of chemistry and biology of the interior ocean, *Trans. Japan Soc Aeron. and Sp. Sci.*, in press. (査読有)
- 31) Sekine, Y. (2013), Formation of a nitrogen-rich atmosphere on Titan: a review" in *The Early Evolution of the Atmospheres of Terrestrial Planets*, 107-122, (査読有)
- 32) Komatsu, G., P. S. Kumar, K. Goto, Y. Sekine, T. Matsui (2014), Drainage systems of Lona Crater, India: Contributions to Lona Lake hydrology and crater degradation, *Planet. and Sp. Sci.*, in press, (査読有)
- 33) Takano, Y., H. Yano, Y. Sekine, R. Funase, K. Takai (2014), Planetary protection on international waters: An onboard protocol for capsule retrieval and biosafety control in sample return mission, *Adv. Sp. Res.*, 53, 1135-1142, (査読有)
- 34) Goto, K. T., Y. Sekine, K. Suzuki, E. Tajika, R. Senda, et al. (2013), Redox conditions in the atmosphere and shallow marine environments during the first Huronian deglaciation: Insights from Os isotopes and redox-sensitive elements, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 376, 145-154 (査読有)
- 35) 門屋辰太郎, 渡邊吉康, 関根康人, 田近英一 (2013) 地球惑星環境進化論 第2回, *遊星人*, 22, 234-241 (査読有)

〔学会発表〕(計 39 件)

- 1) Kuwahara, H. and S. Sugita (2014), Impact Generation of Methane-Rich Atmospheres on Early Terrestrial Planets, *Lunar Planet. Sci. Conf.*, XXXV, #1867 March, 18. Houston, TX, U.S.A.

- 2) Okamura, N., S. Sugita, S. Kamata, F. Usui, T. Hiroi, T. Ootsubo, T. G. Müller, I. Sakon, and S. Hasegawa (2014), Principal-Component Analysis of the Continuous 3- $\mu$ m Spectra of Low-Albedo Asteroids Observed with the Akari Satellite, *Lunar Planet. Sci. Conf.*, XXXXV, #2446, March, 21. Houston, TX, U.S.A.
- 3) Okamura, N., S. Hasegawa, F. Usui, T. Hiroi, T. Ootsubo, T. G. Müller, and S. Sugita (2014), Spectroscopic Observations of Dark Main-Belt Asteroids in The 2.6-3.1 $\mu$ m Range with the Akari Satellite, *Lunar Planet. Sci. Conf.*, XXXXV, #1375 March, 20. Houston, TX, U.S.A.
- 4) Cho, Y., Y. N. Miura, and S. Sugita (2014), Development of an In-Situ K-Ar Isochron Dating Method 2: Validation Measurements with Natural Rocks, *Lunar Planet. Sci. Conf.*, XXXXV, #1205 March, 20. Houston, TX, U.S.A.
- 5) Koga, S., S. Sugita, S. Kamata, M. Ishiguro, T. Hiroi, S. Sasaki (2014), Spectral Evolution Tracks of S-Type Asteroids Suggested by Principal Component Analysis of Multi-Band Images of Itokawa, *Lunar Planet. Sci. Conf.*, XXXXV, #1721 March, 19. Houston, TX, U.S.A.
- 6) Kurosawa, K., Y. Nagaoka, S. Hasegawa, S. Sugita, and T. Matsui (2014), Ultrafast Imaging Observations of the Impact Jetting during Oblique Impacts, *Lunar Planet. Sci. Conf.*, XXXXV, #1856 March, 18. Houston, TX, U.S.A.
- 7) 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, *Lunar Planet. Sci. Conf.*, XXXXV, #2140 March, 18. Houston, TX, U.S.A.
- 8) Sekine, Y., T. Shibuya, F. Postberg, H.-W. Hsu, K. Suzuki, Y. Masaki, T. Kuwatani, and S. Tachibana (2014), Experimental Evidence for High-Temperature Water-Rock Interactions in a Chondritic Core of Enceladus, *Lunar Planet. Sci. Conf.*, XXXXV, #1714, March, 18. Houston, TX, U.S.A.
- 9) Chang, Y., K. Goto, Y. Sekine, E. Tajika (2014), Vertical Profile of PDF Orientations and Grain Size Distribution of Shocked Quartz in The Yaxcopoil-1 Core, Chicxulub Impact Structure, Mexico: Constraints on the Ejecta Deposition Process, *Lunar Planet. Sci. Conf.*, XXXXV, #1990 March, 18. Houston, TX, U.S.A.
- 10) Tsou, P., A. Anbar, K. Atwegg, J. Baross, D. Brownlee, R. Dissly, D. Glavin, C. Glein, I. Kanik, C. McKay, C. Porco, Y. Sekine, K. Takai, Y. Takano, P. Williams, and H. Yano (2014), LIFE-Enceladus Plume Sample Return via Discovery, *Lunar Planet. Sci. Conf.*, XXXXV, #2192 March, 18. Houston, TX, U.S.A.
- 11) Mori, M., Y. Sekine, T. Shibuya, T. Kuwatani, K. Suzuki, Y. Masaki, S. Tachibana (2014), Reaction Conditions for Formation of Alteration Minerals on Ceres Inferred from Hydrothermal Experiments, *Lunar Planet. Sci. Conf.*, XXXXV, #1698, March, 17. Houston, TX, U.S.A.
- 12) Sugita, S., D. Kuroda, S. Kameda, S. Hasegawa, S. Kamata, T. Hiroi, M. Abe, M. Ishiguro, N. Takato, and M. Yoshikawa (2013), Visible spectroscopic observations of asteroid 162173 (1999 JU3) with the GEMINI-S telescope, *Lunar Planet. Sci. Conf.*, XXXXIII, #2591, March, 22, Houston, TX, U.S.A.
- 13) Sugita, S., T. Morota, S. Kameda, R. Honda, C. Honda, and Hayabusa-2 ONC Science Team (2013), Science observations strategy for HAYABUSA-2 optical navigation cameras (ONC), *Lunar Planet. Sci. Conf.*, XXXXIII, #3026, March, 21, Houston, TX, U.S.A.
- 14) Kuwahara, H. and S. Sugita (2013), Methane-rich impact-induced atmosphere on Mars and post-accretion Earth, *Lunar Planet. Sci. Conf.*, XXXXIII, #1982, March, 19, Houston, TX, U.S.A.
- 15) Cho, Y., Y. N. Miura, and S. Sugita (2013), Development of an in-situ K-Ar isochron dating method using LIBS-QMS configuration, *Lunar Planet. Sci. Conf.*, XXXXIII, #1505, March, 19, Houston, TX, U.S.A.
- 16) Kamata, S., S. Sugita, Y. Abe, Y. Ishihara, Y. Harada, N. Namiki, T. Iwata, H. Hanada, H. Araki, K. Matsumoto, and E. Tajika (2013), Highly degraded early pre-Nectarian impact basins: implications for the timing of the magma solidification. *Lunar Planet. Sci. Conf.*, XXXXIII, #1491, March, 19, Houston, TX, U.S.A.
- 17) 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 fro shock-heated forsterite: implications atmospheric blow-off on the early Earth and Venus, *Lunar Planet. Sci. Conf.*, XXXXIII, #2537, March, 19, Houston, TX, U.S.A.
- 18) Ohno, S., T. Sakaiya, T. Kadono, K. Kurosawa, H. Yabuta, K. Shigemori, Y. Hironaka, H. Kuwahara, S. Sugita, T. Kondo, T. Yamanaka, T. Matsui (2013), Direct gas analysis experiment on impact-vaporizaed carbonaceous chondrites, *Lunar Planet. Sci. Conf.*, XXXXIII, #2746, March, 19, Houston, TX, U.S.A.
- 19) Sugita, S., K. Kurosawa, P. H. Schultz, T. Hamura, K. Ishibashi, S. Hasegawa, and T. Matsui (2012), Experimental assessment for organic production within vapor plumes due to oblique impacts within an atmosphere, *Geol. Soc. Amr.*, #212482. Nov. 6, Charlotte, NC, U.S.A.
- 20) Sugita, S., D. Kuroda, S. Kameda, S. Hasegawa, S. Kamata, M. Abe, M. Ishiguro, N. Takato, M. Yoshikawa (2012), Visible spectroscopic observation of Asteroid 162173 (1999JU3) with the GEMINI-S telescope, AAAS, *DPS Mtg.* # 12-RC-562-AAS-DPS, Oct. 15, Reno, NV,

- U.S.A.
- 21) Sugita, S., K. Kurosawa, T. Kadono, and T. Sano (2012), A High-Precision Semi-Analytical on-Hugoniot EOS for Geologic Materials, *Lunar Planet. Sci. Conf., XXXXIII*, #2053, March 21, Houston, TX, U.S.A.
  - 22) Cho, Y., T. Morota, M. Yasui, N. Hirata, J. Haruyama, and S. Sugita (2012), Young mare volcanism in the orientale region contemporary with ~2ga PKT volcanism peak period, *Lunar Planet. Sci. Conf., XXXXIII*, #1575, March 20, Houston, TX, U.S.A.
  - 23) Hamura, T., K. Kurosawa, S. Hasegawa, and S. Sugita (2012), A ground-hugging downrange vapor cloud due to oblique impacts, *Lunar Planet. Sci. Conf., XXXXIII*, #1888, March 20, Houston, TX, U.S.A.
  - 24) Ishibashi, K., T. Arai, K. Wada, M. Kobayashi, S. Ohno, H. Senshu, N. Namiki, T. Matsui, S. Kameda, Y. Cho, and S. Sugita (2012), Analysis method for minerals with laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) for in-situ lunar mineral measurement, *Lunar Planet. Sci. Conf., XXXXIII*, #1786, March 20, Houston, TX, U.S.A.
  - 25) Kurosawa, K., S. Ohno, S. Sugita, T. Mieno, and S. Hasegawa (2012), Shock-induced decarbonation in an open system using a 2-stage light gas gun, *Lunar Planet. Sci. Conf., XXXXIII*, #1730, March 20, Houston, TX, U.S.A.
  - 26) Larson, E., Y. Sekine, S. Sugita, T. Sasamori, and C. McKay (2012), Tholin sensitivity to atmospheric methane abundance and the implications for multiple stable states of Titan's climate system, *Lunar Planet. Sci. Conf., XXXXIII*, #1427, March 20, Houston, TX, U.S.A.
  - 27) Ohno, S., T. Kadono, K. Kurosawa, T. Sakaiya, H. Yabuta, K. Shi-gemori, Y. Hironaka, T. Sano, T. Hamura, S. Sugita, T. Arai, T. Matsui (2012), Impact-induced sulfur release from a carbonaceous chondritic impactor: implication to the K/PG event, *Lunar Planet. Sci. Conf., XXXXIII*, #1894, March 20, Houston, TX, U.S.A.
  - 28) Okamura, N., S. Hasegawa, T. Hiroi, T. Ootsubo, T. G. Müller, F. Usui and S. Sugita (2012), 3- $\mu$ M spectroscopic observations of asteroid 21 LUTETIA using AKARI satellite, *Lunar Planet. Sci. Conf., XXXXIII*, #1918, March 21, Houston, TX, U.S.A.
  - 29) Kurosawa, K. and S. Sugita (2011), Pressure measurements of self-luminous rock vapors using atomic line broadening, *Lunar Planet. Sci. Conf., XXXXII*, #1714, March 8, Houston, TX, U.S.A.
  - 30) Sugita, S., K. Nagata, N. Tsuboi, T. Hiroi, and M. Okada (2011), A new modified Gaussian model (MGM) using a Bayesian estimation approach: Toward automated analysis of planetary spectra, *Lunar Planet. Sci. Conf., XXXXII*, #2624, March 8, Houston, TX, U.S.A.
  - 31) Kamata, S., S. Sugita, Y. Abe, Y. Ishihara, Y. Harada, N. Namiki, T. Iwata, H. Hanada, and H. Araki (2011), Radiogenic heat source concentration in the lunar farside crust estimated from viscoelastic deformation of impact basins, *Lunar Planet. Sci. Conf., XXXXII*, #1648, March 8, Houston, TX, U.S.A.
  - 32) Barnouin, O.S., C.M., Ernst, J.T. Heinick, S. Sugita, M.J. Cintala, D.A. Crawford, and T. Matsui (2011), Experimental results investigating impact velocity effects on crater growth and the transient depth-to-diameter ratio, *Lunar Planet. Sci. Conf., XXXXII*, #2258, March 9, Houston, TX, U.S.A.
  - 33) Ohno, S., T. Kadono, K. Kurosawa, T. Hamura, T. Sakaiya, S. Sugita, K. Shigemori, Y. Hironaka, T. Watari, and T. Matsui (2011), Experimental study of SO<sub>3</sub>/SO<sub>2</sub> ratio in impact vapor clouds using a high-speed laser gun, *Lunar Planet. Sci. Conf., XXXXII*, #1752, March 9, Houston, TX, U.S.A.
  - 34) Ishibashi, K., S. Ohno, T. Arai, K. Wada, S. Kameda, H. Senshu, N. Namiki, T. Matsui, Y. Cho, and S. Sugita (2011), Prediction of the elemental composition of olivine by laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), *Lunar Planet. Sci. Conf., XXXXII*, #1743, March 9, Houston, TX, U.S.A.
- [図書](計 2 件)
- 1) 杉田精司(2013), 図説 地球環境の事典 (分担執筆), pp.392, 朝倉書店
  - 2) 杉田精司(2012), 地球と宇宙の化学事典, 日本地球化学会 編 (分担執筆), 朝倉書店, pp. 500.
- 6 . 研究組織
- (1)研究代表者  
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
  - (2)研究分担者  
橘 省吾 (TACHIBANA, SHOGO)  
北海道大学・理学研究院・准教授  
研究者番号 : 1010188427  
  
関根 康人 (SEKINE, YASUHIITO)  
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・講師  
研究者番号 : 1260194722  
  
阿部 豊 (ABE, YUTAKA)  
東京大学・大学院理学系研究科・准教授  
研究者番号 : 1260188427
  - (3)連携研究者  
該当なし