

## 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 25 年 6 月 16 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究 A

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22244056

研究課題名（和文） X線透過法をもちいた天体衝突過程の新しい理解

研究課題名（英文） New perspective of impact processes among planetary bodies by means of the flash X-ray transmission method

研究代表者

加藤 學 (KATO MANABU)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

研究者番号：80115550

研究成果の概要（和文）：本研究は、天体の高速度衝突現象の時間変化を新しい視点から調べるため、300kVのフラッシュX線装置を導入し、衝突現象をX線透過法により観測した。そのため、新しく導入した2台のフラッシュX線源を用いた衝突実験手法を開発し、衝突貫入やクレーター形成過程のX線透過観測を行った。さらに平行して数値シミュレーションも行った。その結果、多孔質標的への弾丸貫入とクレーター形成実験、クレーター掘削流の数値シミュレーション、さらに、クレーター形成時のエジェクタ観察に関して新しい結果を得ることができた。

研究成果の概要（英文）：We have introduced a pair of flash X-ray system with the applied voltage of 300kV in order to study the transient phenomena during the high velocity collision among planetary bodies, and we have tried to construct a new perspective of an impact cratering process by means of these apparatus. Then, we succeeded to observe the impact penetration of a projectile and the crater formation accompanied by this penetration. As a result, we have obtained several new results on the laboratory experiments of the projectile penetration and the crater formation on the porous target, the numerical simulation of the excavation flow during the crater formation, and the observation of the ejecta-expansion from the impact point.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 22 年度	25,200,000	7,560,000	32,760,000
平成 23 年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
平成 24 年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
年度			
年度			
総計	36,600,000	10,980,000	47,580,000

研究分野：理学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：クレーター、衝撃波、X線透過法、イジェクタ、二段式軽ガス銃、スケール則

## 1. 研究開始当初の背景

惑星系の形成と進化の過程において、天体衝突は最も基本的で重要な物理過程の一つである。小天体の破壊過程や天体表面へのク

レーター形成過程については、1960年代の惑星探査の始動とともに、室内衝突実験、地球のクレーターのフィールド調査、衝突の痕跡をとどめた天体の地上・探査機観測、数値

シミュレーションといった、複数の手法により研究がなされてきた。多くの研究では、クレーター形成や衝突破壊の「終状態」一すなわち、クレーターの直径や深さ、あるいは、有限標的の場合の最大破片一と、その「終状態」をもたらした弾丸・標的のパラメータの関係を明らかにすることが目標とされてきた。そのような方向性の主要な原因の一つとして、惑星系における観測量が、過去の衝突の痕跡であるクレーターや、小天体の破片群であったことが挙げられる。ところが近年になって、天体の衝突過程只中の観測量が得られるようになり、天体衝突の研究は新たなステージを迎えた。たとえば、2005年に遂行された彗星表面の衝突探査（DEEP IMPACT）、本年10月に行われた月面の水探査を目的とした衝突探査（LCROSS）など、天体への能動的な衝突によるその場観測によって、表面下の物質や構造を探査する有力な手法として注目されるようになってきた。天体表面に弾丸が衝突すると、その直後、弾丸と天体とに衝撃波が走り高圧状態が発生する。衝撃波は自由表面（たとえば弾丸の背面など）に達すると高圧状態が解放される。十分に強い衝撃波の場合、エントロピーの増大により解放後断熱膨張した物質は元の固体に戻らずに蒸気となり、膨張する蒸気雲をなし、この中では種々の化学反応がおこると考えられる。一方、衝撃波の伝播によって天体内部に励起された掘削流はクレーター孔を形成し、破碎された標的物質を固体イジェクタとして放出する。したがって、膨張途上の蒸気雲、放出中のイジェクタ、そして穿たれるクレーター孔の形状変化といった「過渡状態」の観測から天体の内部構造や物性を推定するためには、衝撃波の発生・伝播から掘削流場の形成までの一連の物理素過程を理解しておくことが必要となる。

一方、近年の惑星探査により、多くの小惑星がその密度が低く、多孔質であることがわかってきた。そのため、小惑星表面に見られる衝突クレーターは、空隙率の影響を大きく受けていると考えられている。従って、多孔質小惑星上の衝突クレーター形成過程の理解には、多孔質物質のクレーター形成における物理素過程を知る必要がある。

## 2. 研究の目的

超高速衝突現象における圧縮掘削過程は、クレーター形成全体を理解する上で最も重要な過程である。しかし、固体標的中で起きる圧縮掘削過程を精密に面的・立体的に計測することは非常に困難であり、本過程に関してこれまでに得られた実験データは非常に限られているのが実情である。そこで本研究課

題では、2段式高速衝突銃を用いた実験において、X線をプローブ光とする高速画像を取得し、X線がその光路の柱密度に比例して減衰することを利用して、(1) 衝突クレーター形成過程における衝撃波発生・弾丸のもぐり込みと蒸気雲生成から掘削流生成・発達までの一連の素過程をX線透過法を用いた可視化によってその場観測し、(2) DEM法による衝突クレーター形成シミュレーションによる掘削流解析と比較することで、掘削流の新たなモデルを構築し、(3) 衝突蒸気雲内部の密度構造を定量化し、高速分光によって推定されている蒸気雲の物理的性質と比較することで、蒸気雲の密度分布モデルを導く。

近年の惑星探査から数10kmまでの小惑星には高い空隙率を持つものが多いことがわかってきた。このような多孔質天体上に行えるクレーターでは、従来の掘削流モデルを適用することが難しく、圧縮型クレーターと呼ばれる大きな密度変化を伴うクレーター形成を適用する必要がある。本研究では、この多孔質天体に注目し、圧縮型クレーターの形成メカニズムに重要な、弾丸の貫入過程とクレーター孔の圧密過程をフラッシュX線により調べることにした。

## 3. 研究の方法

### (1) フラッシュX線

フラッシュX線(L3 communications社Pulserad)は2台設置した。そのため、1回の実験で得られる画像は2枚である。フラッシュX線装置の印加電圧は300kVである。X線撮影のために、標的下部に2枚のイメージングプレートを設置した。X線撮影のトリガーにはピエゾゲージを用い、弾丸が標的前方に設置したゲージを通過してからの経過時間を設定することで、同標的・同衝突条件で衝突後の経過時間が異なる標的内部画像を得ることができる。

### (2) 多孔質試料のクレーター形成実験

標的には空隙率50%の石膏を用いた。石膏試料の場合、サイズは直径34mm、高さ65mmの小標的と、直径64mm、高さ70mmの大標的とし、両試料共にアクリルパイプで側面を覆った。小標的は、衝突破片の飛翔を抑えるため、標的周囲をさらに大きなアクリル筒で覆った。弾丸は、直径1.6、3.2mmのステンレス球(s.s.)、直径3.2mmのアルミニウム球(Al)とナイロン球(Ny)を用いた。直径3.2mmのs.s.弾丸のみ小試料と大試料を用いて、他は全て小試料とした。実験は、宇宙科学研究所の二段式水素ガス銃を使用した。衝突速度は1.9-2.4km/s(低速)、5.6-6.4km/s(高速)とした。

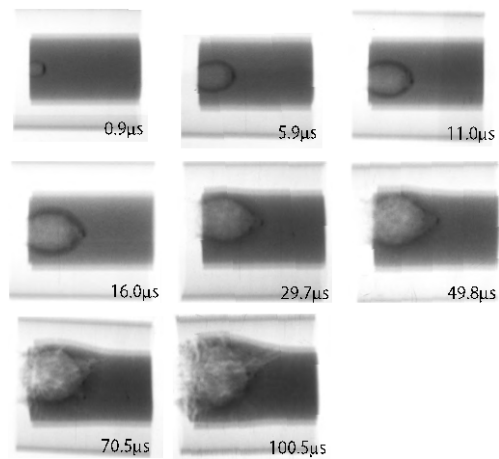


図1 フラッシュ X線による石膏クレーターの形成過程の観測

#### 4. 研究成果

##### (1) 石膏クレーター実験

石膏クレーター形成実験で得られた X線画像を時間毎に並べたものを図 1 に示す。本研究では、エネルギー密度  $Q$  によって 2 つのクレーター形成モードに分けることができた。エネルギー密度とは、弾丸の運動エネルギーを標的の質量で割った値である。エネルギー密度  $Q$  が小さい場合 (6500J/kg 以下)、半球型のクレーターが形成され、周囲に圧密層 (黒い層) が見られた。また、弾丸は円盤型に変形 (Al 球, Ny 球), もしくは数個に分裂した (s.s. 球)。実験後は Al 球のみ回収できた。エネルギー密度  $Q$  が大きい場合 (9000J/kg 以上: 図 1), 弾丸は変形・分裂し、標的には半球型クレーターが形成された後に、分裂した弾丸が標的の内を個々に進行して、クレーター孔の先端にピットが形成された。その後、標的は破壊した。

##### (2) 多孔質標的への弾丸貫入実験

直径 1, 3mm の Al, Ti, Sus 球弾丸と、直径 3mm 高さ 2mm の円柱形岩石弾丸を速度 2~7 km/s で空隙率 80-94% の多孔質ガラスビーズ焼結体と空隙率約 50% の石膏に衝突させ、2 方向からフラッシュ X 線を用いて観察した。さらに実験後に標的の X 線透過画像を取得し、弾丸の貫入深さを決定した。弾丸の変形や破壊が小さい (弾丸質量の 3 分の 1 以上残る) 場合は、弾丸速度の 2 乗に比例する抵抗と弾丸の強度に比例する抵抗により弾丸が減速するという式を用いて貫入距離をほぼ再現できることが分かった。また、弾丸の変形や破壊が大きい場合は、抵抗係数が 2 以上と大きくなることがわかった。さらに、弾丸貫入実験より求めた弾丸貫入のモデルと弾丸破壊の経験式を用いて、多孔質氷小天体へのシ

リケイト質感星間塵の潜り込み深さについて検討した。その結果、空隙率 90% の弾丸の大きさに比べて無視できる大きさ (細かさ) の空隙からなる天体への潜り込み深さは、弾丸直径の 100 倍程度となることがわかった。

##### (3) 掘削流のシミュレーション

様々な空隙率をもつ粉体ターゲットへの弾丸衝突のシミュレーションを行い、弾丸貫入・掘削流のシミュレーションを行った。結果として空隙が大きいほど圧縮貫入型孔の形成が見られイジェクタ放出に寄与する掘削流は見られなくなることで、貫入抵抗則については弾丸速度の 2 乗に比例する抵抗ならびに弾丸速度に比例する抵抗が生じることが示された。とくに得られた貫入抵抗則については 4.2 の実験とも調和的であることが確かめられた。さらに、粉体層における弾丸貫入・掘削流のシミュレーションを室内実験と同じ条件で行い、結果を比較した。結果的に、弾丸貫入時には衝撃波様の波の伝播や孤立分離波の伝播といった粉体特有の現象が観察された他、弾丸速度の 2 乗に比例する抵抗ならびに弾丸速度に比例する抵抗が貫入時に生じることが確認され実験とも調和的であることが確かめられた。また、この貫入抵抗は粒子間相互作用をあらわすパラメータによらないことが示され、様々な粉体状況への適用可能性が示された。

##### (4) イジェクタ観測

多孔質ガラスビーズ焼結体とシリカサンドに、直径 3mm の金属弾丸を速度 2~7 km/s で衝突させ、高速度カメラを用いたイジェクタ観察を行い、岩石からの固体エジェクタの最高速度と同様に衝突初期発生圧力に応じて速度が大きくなることがわかった。また、直径 3mm の岩石弾丸を空隙率約 50% のシリカサンド標的に衝突させる実験を行い、エジェクタの先端速度を測定したところ、衝突速度とエジェクタ先端速度の関係は、空隙率 40% のガラスビーズ焼結体と同程度であることがわかった。

##### (5) 衝突蒸気雲の観察

光学的手法を用いた衝突実験を行い、輝線発光スペクトルから衝突生成プラズマの圧力計測を行う方法の開発した。また、断熱膨張開始直後にイオン輝線の強い発光があることの発見した (衝突圧縮状態における高度の電離を示唆)。さらに、大気中の斜め衝突において発生する超高速の衝突蒸気雲が形状を安定に保ちつつ高速飛散することを発見した。また、レーザーによる弾丸および平板飛翔体衝突と直接照射による高圧力の発生技術を開発し、衝突速度 10km/s 以上、1 TPa までの衝撃圧力の発生を可能にした。

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 29 件)

1. Kadono, T., et al. (2012) Penetration into Low-Density Media: In situ Observation of Penetration Process of Various Projectiles, *Icarus*, 221, 587-592, doi: 10.1016/j.icarus.2012.08.026 (査読有)
2. Nakamura, A. M., Setoh, M., Wada, K. et al. (2012) Impact and intrusion experiments on the deceleration of low-velocity impactors by small-body regolith, *Icarus*, 223, 222-233, doi: 10.1016/j.icarus.2013.02.023 (査読有)
3. Okamoto, T., Nakamura, A. M., Hasegawa, S., et al. (2012) Impact experiments of exotic dust grain capture by highly porous primitive bodies, *Icarus*, 224, 209-217, doi: 10.1016/j.icarus.2013.02.023 (査読有)
4. 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*, 646-657, doi: 10.1016/j.icarus.2012.08.018 (査読有)
5. 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, doi: 10.1016/j.icarus.2012.08.005 (査読有)
6. 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, doi: 10.1016/j.icarus.2012.03.008 (査読有)
7. 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, doi: 10.1016/j.icarus.2012.01.018 (査読有)
8. Shimaki, Y. and Arakawa, M. (2012) Experimental study on collisional disruption of highly porous icy bodies, *Icarus*, 218, 737-750, doi: 10.1016/j.icarus.2012.01.021 (査読有)
9. Kurosawa, K., Ohno, S., Sugita, S., Mieno, T., Matsui, T., Hasegawa, S. (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 Planetary Science Letters*, 337, 68-76, doi:10.1016/j.epsl.2012.05.022 (査読有)
10. Sugita, S., Kurosawa, K. and Kadono, T. (2012) A Semi-Analytical On-Hugoniot EOS of Condensed Matter using a Up-Us relation, AIP Conference Proceedings, 1426, 895-898, doi: 10.1063/1.3686422 (査読有)
11. Kurosawa, K., Kadono, T., Sugita, S., et al. (2012) Time-resolved spectroscopic observations of shock-induced silicate ionization, AIP Conference Proceedings, 1426, 855-858, doi: 10.1063/1.3686412 (査読有)
12. Ohno, S., Kadono, T., Kurosawa, K., et al. (2012) Direct measurement of chemical composition of SO<sub>x</sub> in impact vapor using a laser gun, AIP Conference Proceedings, 1426, 851-854, doi: 10.1063/1.3686411
13. Takasawa, S., Nakamura, A. M., Kadono, T., Arakawa, M. et al. (2011) Silicate dust size distribution from hypervelocity collisions: Implications for dust production in debris discs, *Astrophys. J.*, 33L, 39, doi: 10.1088/2041-8205/733/2/L39 (査読有)
14. Kadono, T., et al. (2011) Flyer acceleration by high-power laser and impact experiments at velocities higher than 10km/s, Proc 17th APS Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter, AIP Conference Proceedings 1426, 847-859, doi: 10.1063/1.3686410 (査読有)
15. Hong, P. K., Sugita, S., et al. (2011) A ground-based observation of the LCROSS impact events using the Subaru Telescope, *Icarus*, 214, 21-29, doi: 10.1016/j.icarus.2011.05.008 (査読有)
16. Sekine, Y., Genda, H., Sugita, S., Kadono, T., and Matsui, T. (2011) Replacement and late formation of atmospheric N<sub>2</sub> on undifferentiated Titan by impacts, *Nature Geoscience*, 4, 359-362, doi: 10.1038/ngeo1147 (査読有)
17. Wada, K., Tanaka, H., Suyama, T., Kimura, H. et al. (2011) The Rebound Condition of

- Dust Aggregates Revealed by Numerical Simulation on their Collisions, *Astrophys. J.*, 737, 36(12pp), doi: 10.1088/0004-637X/737/1/36 (査読有)
18. Yasui, M., Arakawa, M. (2011) 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, doi: 10.1016/j.icarus.2011.05.012 (査読有)
  19. Arakawa, M. and Yasui, M. (2011) Impact crater on sintered snow surface simulating porous icy bodies, *Icarus*, 216, 1-9, doi: 10.1016/j.icarus.2011.08.018 (査読有)
  20. Kurosawa K., Sugita, S., Kadono, T., Shigemori, K., and 11 coauthors (2010) In-situ spectroscopic observations of silicate vaporization due to >10 km/s impacts using laser driven projectiles, *Geophysical Research Letters*, 37, doi:10.1029/2010GL045330 (査読有)
  21. Kurosawa, K. and Sugita, S. (2010) A pressure measurement method for high-temperature rock vapor plumes using atomic line broadening, *J. Geophys. Res.*, 115, doi:10.1029/2010JE003575 (査読有)
  22. Fukuzaki, S., Sekine, Y., Genda, H., Sugita, S., Kadono, T., and Matsui, T. (2010) Impact-induced N<sub>2</sub> production from ammonium sulfate (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: Implications for the origin and evolution of N<sub>2</sub> in Titan's atmosphere, *Icarus*, 209, 715-722 (査読有)
  23. Ishimaru, R., Senshu, H., Sugita, S., and Matsui, T. (2010) 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 (査読有)
  24. Machii, N., and Nakamura, A. M. (2010) Experimental study on static and impact strength of sintered agglomerates, *Icarus*, 211, 885-893 (査読有)
  25. Ishiguro, M., ほか (15 著者の 7 番めに Nakamura, A.M.) (2010) The Hayabusa spacecraft asteroid multi-band imaging camera: AMICA, *Icarus*, 207, 714-731 (査読有)
  26. 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)
  27. Niimi, R., Kadono, T., Arakawa, M., Yasui, M., Dohi, K., Nakamura, A. M., Iida, Y., and Tsuchiyama, A. (2010) In Situ Observation of Penetration Process in Silica Aerogel: Deceleration Mechanism of Hard Spherical Projectiles, *Icarus*, 211, 986-992 (査読有)
  28. Kadono, T., ほか 21 著者 (2010) 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, doi: 10.1029/2009JE003385 (査読有)
  29. Wada, K., and Barnouin O. S. (2010) Investigating the Formation of Ramparts at Fluidized Ejecta on Mars Using a Granular Flow Model, *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.* 42th, 42, #1726 (査読無)
- [学会発表] (計 16 件)
1. Yasui, M., Arakawa, M., and Hasegawa, S., et al. (2013) In Situ Flash X-ray Observation of Crater Formation in Porous Gypsum Analogous to Low-Density Asteroids, 44th Lunar and Planetary Science Conference, March 21, 2013, The Woodlands, Texas, USA
  2. Fujita, Y., Arakawa, M., Hasegawa, S., and Shimaki, Y. (2013) Experimental Study on Impact Disruption of Rocky Rubble-pile Bodies: Effect of Disruption of Constituent Boulders on Reaccumulation Process, 44th Lunar and Planetary Science Conference, March 21, 2013, The Woodlands, Texas, USA
  3. Yasui, M., Arakawa, M., and Hasegawa, S., et al. (2012) In-situ flash X-ray observation of projectile penetration and crater formation in porous asteroid analogue, *Asteroids, Comets, Meteors (ACM) 2012*, 2012年5月17日, 朱鷺メッセ (新潟)
  4. Okamoto, T., Nakamura, A. M., Hasegawa, S., et al. (2012) Laboratory penetration experiments of high velocity projectiles into very porous targets on exotic origin of dusts in primitive bodies, *Asteroids, Comets, Meteors (ACM) 2012*, 2012年5月17日, 朱鷺メッセ (新潟)
  5. Nakamura, A. M., Okamoto, T., and Hasegawa, S. (招待講演) (2012) Impact cratering and ejection experiments of porous targets and implications for observational studies of small solar system bodies, *AOGS2012*, August 16, 2012, Resorts World Convention Centre (シンガポール)

6. Okamoto, T., Nakamura, A.M., Hasegawa, S., et al. (2011) Laboratory simulation of dust penetration into porous small bodies, *Asia Oceania Geosciences Society 8th Annual Meeting*, 2011年8月11日, Taipei International Convention Center, Taipei, Taiwan
7. Kadono, T. et al. (2011) Flyer acceleration by high-power laser and impact experiments with velocities higher than 10 km/s, 17th APS (American Physical Society) Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter 2011, 2011年7月27日, Chicago, USA
8. Hamura, T., Kurosawa, K., Hasegawa, S., and Sugita, S. (2012) A ground-hugging downrange vapor cloud due to oblique impacts, *Lunar Planet. Sci. Conference., XXXXIII*, 2012年3月22日, The Woodlands, Texas, U.S.A
9. Kurosawa, K., Ohno, S., Sugita, S., Mieno, T., and Hasegawa, S. (2012) Shock-induced decarbonation in an open system using a 2-stage light gas gun, *Lunar Planet. Sci. Conference., XXXXIII*, 2012年3月20日, The Woodlands, Texas, U.S.A
10. Wada, K., and Nakamura, A. M. (2012) Numerical Simulation of Penetration into Porous Granular Target, *Lunar Planet. Sci. Conference., XXXXIII*, 2012年3月20日, The Woodlands, Texas, U.S.A
11. Arakawa, M. et al. (2011) Laboratory experiments of crater formation on basalt and dunite impacted at the velocity higher than 11 km/s, *Asia Oceania Geosciences Society 8th Annual Meeting*, 2011年8月11日, Taipei International Convention Center, Taipei, Taiwan
12. Okamoto, T., Nakamura, A. M., Hasegawa, S., Tsuchiyama, A., Ikezaki, K. (2010) Impact compaction experiments on high-porosity sintered targets, East Asia Young Astronomers Meeting 2011, 2011年2月17日, 濟州島, 韓国
13. Kadono, T., ほか 12 著者 (2010) Flyer Acceleration Using a High-Power Laser to Velocities Higher Than 10 km/s, Western Pacific Geophysical Meeting 2010, 2010年6月22日, Taipei, Taiwan
14. Kadono, T., ほか 9 著者 (2010) Flyer acceleration using high-power laser and impact experiments at velocities 10-60 km/s, European Planetary Science Conference 2010, 2010年9月23日, Roma, Italia
15. Arakawa, M., K. Dohi, , C. Okamoto, and S. Hasegawa (2010) Experimental study on impact craters formed on layered crusts, 2010 Western Pacific Geophysics Meeting, 2010年6月22日, Taipei, Taiwan
16. Arakawa, M., and M. Yasui (2010) Measurements of post shock temperature deposited in ice impact crater, 12th International conference on the Physics and Chemistry of Ice, 2010年9月9日, Sapporo, Japan

[その他]

ホームページ等

<http://www.edu.kobe-u.ac.jp/fsci-eps1/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

加藤 學 (KATO MANABU)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

研究者番号：80115550

### (2) 研究分担者

荒川政彦 (ARAKAWA MASAHIKO)

神戸大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：10222738

中村昭子 (NAKAMURA AKIKO)

神戸大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：40260012

門野敏彦 (KADONO TOSHIHIKO)

産業医科大学・医学部・教授

研究者番号：60359198

杉田精司 (SUGITA SELJI)

東京大学・新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：80313203

和田浩二 (WADA KOUJI)

千葉工業大学・惑星探査研究センター・上席研究員

研究者番号：10396856

### (3) 連携研究者

長谷川直 (HASEGAWA SUNAO)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・開発員

研究者番号：10399553