

機関番号：14501

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20340118

研究課題名 (和文) 熱進化する微惑星の衝突破壊と小惑星・氷衛星の多様性の起源

研究課題名 (英文) Origin of the variety of asteroids and icy satellites driven by the impact disruption of planetesimals in thermal evolution

研究代表者

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

研究成果の概要 (和文) : 熱進化により内部構造を持った微惑星が衝突破壊を起こすことによって、様々な組成や密度を持った小惑星・衛星を形成したと考えられる。本研究では、氷微惑星の圧密・焼結過程とその結果形成した多様な空隙率を持つ氷小天体の衝突破壊過程を実験的に研究し、氷小天体の空隙率分布と衝突破壊強度の空隙率依存性を明らかにした。また層構造を持つ岩石微惑星の表層に形成される衝突クレーターと微小天体の典型であるラブルパイル (岩塊集積) 天体の衝突過程について実験的に研究し、クレーター形成に対する層構造の影響と衝突破壊過程に対する岩塊数や岩塊サイズの影響を明らかにした。

研究成果の概要 (英文) : Impact disruption of planetesimals with layered structure in their interiors could be one of the origins of the density and composition variation observed in asteroids and satellites. Thus, we studied the compaction and the sintering processes of icy planetesimals and also studied the impact process of small icy bodies with various porosities originated from the impact disruption of the sintered bodies, so that we clarified the porosity distribution of the planetesimal interiors and the porosity dependence of the impact strength. Furthermore, we also made impact-cratering experiments on the layered surface of the rocky planetesimals and collisional experiments on the rubble-pile bodies. Thus, we clarified that the effects of layered structures on the crater formation and the effects of fragment number and fragment size of the rubble-pile on the impact disruption.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
2009年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2010年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
年度			
年度			
総計	13,600,000	4,080,000	17,680,000

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：小惑星, 衝突破壊, 氷微惑星, 焼結, 層構造, 熱進化, 多様性, 圧密

1. 研究開始当初の背景

(1) 太陽系小天体の多様性

太陽系には微惑星から惑星に至る様々な段階を凍結した数多くの小惑星や衛星が存在する。一方、彗星やカイパーベルト天体の一部は微惑星の化石とも考えられ、これらの天体を系統的に研究することにより、惑星集積過程の実像に迫ることができる。特に近年の惑星探査や天体観測の進展により、小惑星及び木星や土星の氷衛星に関して密度や表面組成、表層地質に関する情報が飛躍的に増えてきた。例えば、土星の氷衛星の密度は $0.4 \sim 1.9 \text{g/cm}^3$ と非常に広い幅をもち、同程度のサイズの衛星を比べても $0.6 \sim 1.6 \text{g/cm}^3$ と変化することが知られている。

(2) 内部構造進化と衝突破壊による多様性の起源

氷衛星の大きな密度変動は、構成物質の違い（例えば岩石含有率）と空隙率により説明されるが、その原因は明らかではない。申請者は今まで、雪や氷、氷・岩石混合物の衝突破壊実験を系統的に行い、氷天体の衝突破壊条件やラブルパイル天体の形成条件を明らかにしてきた。また、最近の理論的研究では、微惑星サイズの小天体でも²⁶Alなどの短寿命放射性核種による加熱により、天体内部で熱進化が起ることが指摘されている。そこで、氷衛星の密度変動の仮説として、熱進化により圧密焼結した天体の衝突破壊・再集積説を着想するに至った。一方、分化隕石の母天体では熱進化が進んだ結果、重力分離により鉄と岩石の物質分化が起きたとされる。小惑星帯では、この分化天体が衝突破壊により鉄隕石、石鉄隕石、エコンドライトなどを生じたと言われており、この放出された様々な物質が原材料となり、さらに多様な小惑星が形成された可能性が高い。現在、小惑星は表面の反射スペクトルの特徴からいくつもの種類に分類されており、分化隕石との関係が研究されている。しかし、その内部構造に関する情報は、限られた数の小惑星の平均密度のみである。分化天体の衝突破壊による原材料物質の供給を考慮すると、破片の再集積により極めて多様な組成や内部構造を持つ小惑星が形成される。そこで、分化天体の衝突破片から形成される小天体の組成と内部構造について系統的に研究し、小惑星の多様性に対する衝突の役割を明らかにする研究を着想した。

2. 研究の目的

微惑星は元の組成や熱源の量、さらに熱

進化の段階によって様々な内部構造を持つ。例えば、外惑星領域では氷を主とする氷微惑星、小惑星帯では岩石を主とする岩石微惑星となる。熱源となる放射性元素は岩石中に存在するため、岩石微惑星内部では温度上昇が大きくなる。一方、氷微惑星内部の温度上昇は相対的に低くなる。

氷微惑星では温度上昇が比較的小さいため、圧密焼結により密度（空隙率）の層構造ができると期待される。そこで、この層構造天体の衝突破片や破片の再集積により形成される氷天体の密度を実験と数値シミュレーションから求める。その結果を実際の氷衛星の密度と比較し、密度の多様性に対する衝突の寄与を考察する。

一方、温度上昇が大きく熱進化が進んだ岩石微惑星の場合、重力により鉄と岩石の物質分化が起こる可能性がある。そこで、物質分化した天体の衝突破壊により生ずる破片や破片の再集積天体を実験と数値シミュレーションにより推測し、それらの天体を持つ組成や内部構造を推定する。その結果を実際の小惑星の分類や密度の実測データと比較し、観測データと矛盾しない組成や内部構造を求める。

3. 研究の方法

(1) 多孔質氷衝突実験

実験は北海道大学低温科学研究所の大型低温室で行った。標的は直径 60mm の球形治具に、平均粒径 $<100\mu\text{m}$ の氷粒子を 31.0~62.4g 入れ、押し固めて作成した。この試料を温度 -15°C 、飽和水蒸気圧下で 1 時間から 1 ヶ月間保管し、焼結させた。弾丸は直径 15mm (1.1g) で空隙率 30% の雪球、直径 15mm (1.6g) の氷円柱、直径 10mm (0.3g) で空隙率 30% の雪円柱を用いた。弾丸の加速には He ガス銃を用い、衝突速度を 30~440m/s とした。衝突のエネルギー密度は 10~3000J/kg である。衝突の様子は高速度デジタルビデオカメラで撮影した。撮影速度は毎秒 1 万コマ、シャッタースピードは $10\mu\text{s}$ とした。実験後、回収した破片質量、そして映像から破片速度を測定した。

(2) 模擬ラブルパイル天体衝突実験

ラブルパイルターゲットは、等サイズのガラスビーズを構成要素として作成した。ターゲットに用いたビーズのサイズは 7、10、16mm で、各サイズにおいて 3~100 個のビーズを用いて 4、5 種類のターゲットを作成した。ビーズ同士は木工用ボンドで接着し、ビーズの組み方は面心立法格子とした。この場合の空隙率は約 26% となる。ほとんどのビーズにはカラーリングまたは数字を書き、破壊後の個々のビーズの同定や破壊前の初期位置の再構築に利用した。ターゲット質量 (M_t) は 18~78g である。衝突実験には名古屋大学と宇宙科学

研究所の二段式軽ガス銃を使用し、ナイロンの弾丸(6.4mm, 154mg)を衝突速度2~7km/sと変化させた。破壊の様子は高速度デジタルビデオカメラで撮影し、映像を解析することで衝突破壊の様子や破片の速度を調べた。また、破壊後に回収した破片を分類し、それらのサイズ分布を調べた。

(3) 層構造試料へのクレーター形成実験

玄武岩表面にモルタルを塗布した2層構造試料に対する衝突実験を行い、形成された衝突クレーターのサイズを調べた。衝突エネルギーを変化させるため、弾丸の加速には名古屋大学、宇宙科学研究所に設置された2種類の二段式軽ガス銃を用いた。衝突エネルギーの大きさと対応する衝突速度、弾丸質量は50J(4km/s, 7mg), 400J(2km/s, 180mg), 2400J(4km/s, 300mg)である。また、衝突エネルギーの大きさに応じて一辺が5cm, 10cmの立方体、約20×20cmの衝突面を持つブロックからなる玄武岩試料を用いた。3つの衝突エネルギーでそれぞれモルタル層厚を1~30mmと変化させて実験を行った。そして、クレーターサイズの衝突エネルギー及びモルタル層厚依存性を調べた。また、層構造を持たない均質な玄武岩、モルタルブロックに対しても50~2500J(モルタルは7000Jまで)の衝突エネルギーで実験を行い、クレーターサイズと衝突エネルギーの関係性を求めた。

(4) 氷・岩石混合物の圧密・変形実験

① 圧密実験

圧密実験の出発試料は、直径700 μ m以下の氷粒子と直径1 μ mのシリカビーズを均等に混ぜて準備した。比較のため、純氷試料も用意した。シリカ体積含有率は0.004, 0.15, 0.22, 0.29の4種類とした。実験にはピストン・シリンダー型の封圧装置を用いた。北海道大学低温科学研究所の低温室に設置された変形圧縮試験機を用いて、出発試料を入れたシリンダーを約10kPa以下まで減圧し空気を取り除きながら、2mm/minの等速度で圧縮した。温度は-10 $^{\circ}$ C、最大圧縮圧力は約30MPaとした。実験後に取り出した試料は完全な円筒形固体試料となるため、空隙率は取り出した試料の質量、直径、長さから計算した測定値を用いた。また作成後の試料を顕微鏡で観察し、各シリカ含有率における内部構造の違いを調べた。

② 変形実験

試料は直径710 μ m以下の氷粒子と直径1 μ mのシリカビーズを均等に混合し、それを圧密して作成した。シリカ含有率は0, 30, 50wt.%、空隙率は0~25%と変化させた。実験は北海道大学低温科学研究所の低温室に設置された変形試験機を用いて、等歪速度

一軸圧縮実験を行った。歪速度は $1.2 \times 10^{-6} \sim 4.2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ とした。温度は-10~20 $^{\circ}$ Cと変化させた。

4. 研究成果

(1) 多孔質氷衝突実験

本研究では、空隙率とエネルギー密度によって4種類の破壊モードが観察された(図1)。それぞれ弾丸が跳ね返るRebound、弾丸がターゲット内に捕獲されるSticking、ターゲット表面層が壊れるCratering、カタストロフィックに破壊するDisruption、弾丸が貫通したように見えるPenetrationである。StickingとPenetrationは主に空隙率70%で見られた。これは破壊が圧縮によって起こるため、空隙率65%付近に急激な物性変化があることを示唆している。

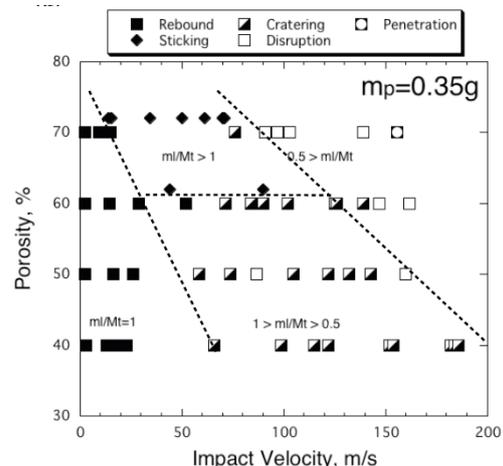


図1: 衝突モードの分類

また今回の実験で初めて、空隙率40~70%における衝突破壊強度を実測することができた。衝突破壊強度は、空隙率の増加と共に70 J/kgから30 J/kgへ単純に減少した(図2)。この結果を先行研究の空隙率0~40%での衝突破壊強度と一緒に図示し、空隙率0%から70%までの衝突破壊強度の空隙率依存性が見た結果、雪の衝突破壊強度は空隙率40%で最大値をとるように変化することがわかった。

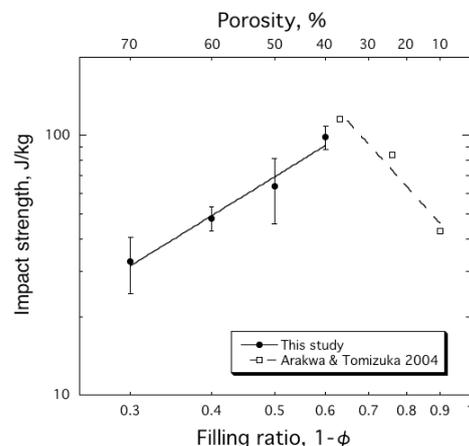


図2: 衝突破壊強度の空隙率依存性

(2) 模擬ラブルパイル天体衝突実験

ラブルパイルターゲットは複数のビーズから構成されており、ほとんどの実験でビーズ同士の結合が切れ、バラバラになった。この場合、一般的に用いられる最大破片を破壊の程度を表すパラメータとして使用すると、破壊の実態を表さないことになる。そこで代わりに破壊の程度を表す量として、総小破片質量 (M_f) を定義した。 M_f は各ビーズの質量から回収された各ビーズの最大破片質量を引いたものを、要素の数だけ足し合わせたものである。この M_f を用いてラブルパイル試料の破壊の程度を調べたのが図3である。各ビーズサイズにおいて、ターゲット質量が小さい場合、その増加とともに M_f が増加した。また、ターゲット質量が大きくなるとほぼ一定の値になるが、その一定値はビーズサイズが小さくなるとともに小さくなった。このように、ラブルパイルターゲットの要素サイズが小さくなると、その破壊は抑制されることが分

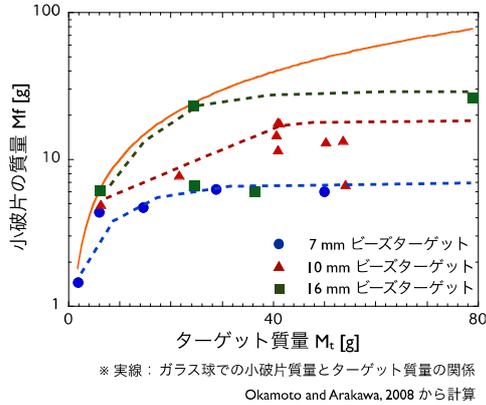


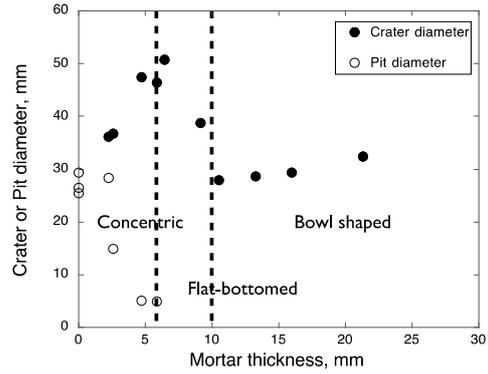
図3：ラブルパイル試料の破壊量

(3) 層構造試料へのクレーター形成実験

均質な玄武岩及びモルタルブロックに衝突実験を行った結果、クレーターの直径はエネルギーの0.36乗、深さはエネルギーの0.35乗(モルタルは0.28乗)に比例することがわかった。この結果はGault (1973)の玄武岩に対する衝突実験の結果と一致する。二層構造試料に形成されるクレーターの形態は、モルタル層の厚みによって系統的に変化した(図4)。モルタルの厚みが薄くなるにつれて、おわん型、平底型、同心円型と変化し、さらにその時のクレーター直径や同心円型クレーターのピット径も複雑な変化を見せた。特に、同心円型クレーターの深さは、モルタル層厚(T)と玄武岩に形成されるピットの深さ(d_b)の和で示される。 d_b は T が厚いほど浅くなり、その変化は弾丸が試料に衝突する際の運動モデルを仮定して、 $d_b/d_{b0} = 1 - T/(0.8d_m)$ と表されることがわかった(d_{b0} :層構造のない玄武岩上に形成されるクレーター深さ、 d_m :層構造の

な

い



モルタル上に形成されるクレーター深さ)。

図4：二層試料上のクレーター深さ

(4) 氷・岩石混合物の圧密・変形実験

①圧密曲線

先行研究から、本研究で得られた圧縮曲線は圧密メカニズムの違いで3つの領域に分けられる。(1) 低圧 ($P < 1 \text{MPa}$): 氷とシリカ粒子の再配列によるもので、シリカ含有率依存性はない。(2) 高圧 ($P > 3 \text{MPa}$): 氷粒子の破壊・塑性変形・再結晶によるもので、シリカ含有率依存性がある。遷移領域は(1)と(2)のメカニズムが両方働く領域と思われる。また(1)と(2)の領域をベキ乗則でフィッティングしたところ、(1)の領域のベキは約-6とほぼ一定になり、(2)の領域のベキ b とシリカ体積含有率 f は、 $b = -0.9 - 7.9f$ と表されることがわかった。両領域で求めたベキ乗則を用いると、天体内部の空隙率分布を求めることができる。500kmサイズの天体で求めた空隙率分布から天体の平均密度を計算すると、岩石の体積含有率が0から0.29になると密度が約 800kg/m^3 から 1200kg/m^3 になった。この含有率と平均密度の関係からDione、Tethysの岩石体積含有率がそれぞれ0.49、0.11と見積もられた。

②流動則の空隙率依存性

流動則は応力-歪み曲線上の最大応力 σ_{\max} と歪速度 $d\epsilon/dt$ の関係式 $d\epsilon/dt = A_0 \exp(-Q/RT) \sigma_{\max}^n$ で表すことができる。シリカ含有率が一定の場合、空隙率が小さく温度が低いほど最大応力は大きくなった。この結果を用いて流動則のパラメータ A_0 、 n 、 Q を詳しく調べたところ、ベキ n と活性化エネルギー Q はシリカ含有率のみに依存し、さらにシリカ含有率の増加とともに大きくなった。 A_0 と空隙率の関係を示したのが図5である。 A_0 はシリカ含有率が同じ場合、温度に依存せず1本の関係式でフィッティングでき、 A_0 の絶対値やフィッティング線の傾きはシリカ含有率の増加とともに大きくなることがわかった。この結果から A_0 は、 $A_0 = B(1 - \phi)^m$ と表され(ϕ は空隙率)、 B と m はシリカ含有率のみに依存し、シリカ含有率の増加とともに大きくなることがわかった。この

結果を用いて岩石含有率 50wt.%の天体表面上

の起伏の緩和時間を見積もったところ、0~20%の空隙率変化に伴い、緩和時間が約 10^4 桁変化することがわかった。

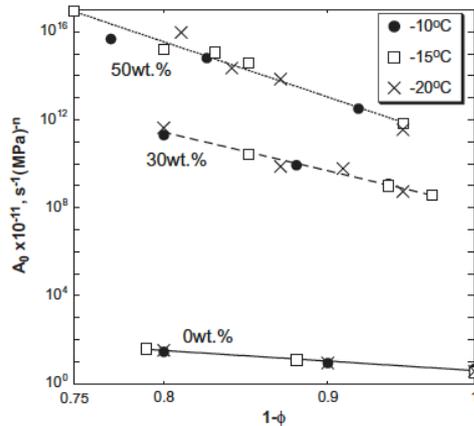


図 5 : A_0 の空隙率依存性

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 17 件)

1. Yasui, M. and Arakawa, M. (2010) Rate-dependent strength of porous ice-silica mixtures and its implications for the shape of small to middle-sized icy satellites, *Icarus*, 210, 956 – 967. (査読有)
2. Yamashita, Y., Kato, M., and Arakawa, M. (2010) Experimental study on the rheological properties of polycrystalline solid nitrogen and methane: Implications for tectonic processes on Triton, *Icarus*, 207, 972–977. (査読有)
3. Watanabe, N., Kimura, Y., Kouchi, A., Chigai, T., Hama, T., and Pirronello, V. (2010) Direct measurements of hydrogen atom diffusion and the spin temperature of nascent H_2 molecule on amorphous solid water, *Astrophys. J. Lett.*, 714, L233-L270. (査読有)
4. Kouchi, A., Watanabe N., Hidaka, H., Miyauchi, N., Oba, Y., and Chigai, T. (2010) Formation of amorphous H_2O ice from the reactions of cold H atoms with solid O_2 at 10 K, *Astron. Soc. Pacific Conf. Ser.*, 414, 338. (査読有)
5. Yasui, M. and Arakawa, M. (2009) Compaction experiments of ice-silica particle mixtures: Implication for residual porosity of small icy bodies, *J. Geophys. Res.*, 114, E09004, doi:10.1029/2009JE003374. (査読有)
6. Kadono, T., Arakawa, M., Ito, T., and Ohtsuki, K. (2009) Spin rates of fast-rotating asteroids and fragments in impact disruption, *Icarus*, 200, 694-697. (査読有)
7. Dohi, K. and Arakawa, M., (2009) Experimental study on impact craters formed on the oceanic crust: Effects of sediment-covering oceanic basalt on the crater formation, *Proc. of the 41st ISAS Lunar Planetary Symp. (CD-ROM)* (査読無)
8. 荒川政彦, 寫生有理, 保井みなみ (2009) 「氷微惑星の衝突破壊」, *天文月報 (日本天文学会学会誌)*, 102, 127-133. (査読無)
9. 岡本千里, 荒川政彦 (2009) 「熱進化した岩石微惑星の衝突破壊に関する実験的研究」, *遊星人 (日本惑星科学会学会誌)*, 18, 10-17. (査読無)
10. Yasui, M. and Arakawa, M. (2008) Experimental study on the rate dependent strength of ice-silica mixture with silica volume fractions up to 0.63, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L12206, doi:10.1029/2008GL033787. (査読有)
11. Kadono, T., Arakawa, M., and Kouchi, A. (2008) Size distributions of chondrules and dispersed droplets by liquid breakup: An application to shock wave conditions in the solar nebula, *Icarus*, 197, 621-626. (査読有)
12. Okamoto, C. and Arakawa, M. (2008) Experimental study on the impact fragmentation of core-mantle bodies: Implications for collisional disruption of rocky planetesimals with sintered core covered with porous mantle, *Icarus*, 197, 627-637. (査読有)
13. Shirai, K., Kato, M., Mitani, N., and Arakawa, M. (2008) Laboratory impact experiments and numerical simulations on shock pressure attenuation in water ice, *J. Geophys. Res.*, 113, E11002, doi:1029/2008JE003121. (査読有)
14. Cox, R., Ong, L. C. F., Arakawa, M., and Scheider, K. C. (2008) Impact penetration of Europa's ice crust as a mechanism for formation of chaos terrain, *Meteorit. Planet. Sci.*, 43, 2027-2048. (査読有)
15. Hiraoka, K., Arakawa, M., Setoh, M., and Nakamura, A. M. (2008) Measurements of target compressive and tensile strength for application to impact cratering on ice-silicate mixtures, *J. Geophys. Res.*, 113, E02013, doi: 10.1029/2007JE002926. (査読有)
16. Arakawa, M. and Yasui, M., (2008) Measurements of post shock temperature deposited in ice impact crater, *Proc. of the 40th ISAS Lunar Planetary Symp. (CD-ROM)* (査読無)
17. Okamoto, C. and Arakawa, M., (2008) Experimental study on collisional disruption of gypsum sphere: implication for formation of

rubble pile bodies, The 10th Asteroids, Comets, Meteors meeting, abstract 8249. (査読無)

[学会発表] (計 18 件)

1. Okamoto C., Arakawa, M., and Hasegawa, S. Impact experiments of metal core-rocky mantle targets simulating collisional disruption of iron meteorite parent bodies, 42nd Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, USA (March 2011)
2. Arakawa, M., Dohi, K., Okamoto, C., and Hasegawa, S., Experimental study on impact craters formed on basalt target covered with weak mortar layer, 42nd Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, USA (March 2011)
3. Yasui, M. and Arakawa, M., Impact experiments of gypsum-glass beads mixtures simulating parent bodies of ordinary chondrites, 42nd Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, USA (March 2011)
4. 寫生有理, 荒川政彦, 保井みなみ, 「氷微惑星の衝突破壊様式と破片速度分布に対する空隙率の効果」, 日本惑星科学会 2010 年秋季講演会, 名古屋, 2010 年 10 月
5. 岡本千里, 荒川政彦, 「分化天体の衝突破壊および鉄隕石放出条件の解明」, 日本惑星科学会 2010 年秋季講演会, 名古屋, 2010 年 10 月
6. 藤田幸浩, 荒川政彦, 寫生有理, 長谷川直, 「ラブルパイル構造を持つ天体の衝突破壊の特徴」, 日本惑星科学会 2010 年秋季講演会, 名古屋, 2010 年 10 月
7. Yasui, M., and Arakawa, M., Flow law of ice-silica mixtures and the effects of silica content and porosity, 12th International conference on the Physics and Chemistry of Ice, Sapporo, Japan (September 2010)
8. Arakawa, M., Dohi, K., Okamoto, C., and Hasegawa, S., Experimental study on impact craters formed on layered crusts, 2010 Western Pacific Geophysics Meeting, Taipei, Taiwan (June 2010)
9. Shimaki, Y., Arakawa, M., and Yasui, M., Experimental study on the collisional disruption of sintered snowball with various porosities, 2010 Western Pacific Geophysics Meeting, Taipei, Taiwan (June 2010)
10. Fujita, Y., Arakawa, M., and Dohi, K., Experimental study on the impact disruption of rubble pile bodies, 2010 Western Pacific Geophysics Meeting, Taipei, Taiwan (June 2010)
11. 保井みなみ, 荒川政彦, 「氷・シリカ混合物の流動則に対する空隙の効果: 氷衛星の地形緩和への応用」, 日本惑星科学会 2009 年秋季講演会, 東京・本郷, 2009 年 9 月
12. 寫生有理, 荒川政彦, 保井みなみ, 土肥弘嗣, 河村恵里, 「超高空隙率雪球の衝突破壊と破片速度分布に関する実験的研究」, 日本惑星科学会 2009 年秋季講演会, 東京・本郷, 2009 年 9 月
13. 土肥弘嗣, 荒川政彦, 長谷川直, 岡本千里, 鈴木絢子, 「層構造に形成される衝突クレーターに関する実験的研究」, 日本惑星科学会 2009 年秋季講演会, 東京・本郷, 2009 年 9 月
14. Yasui, M. and Arakawa, M., Flow law of compacted ice-silica mixtures with residual porosity less than 30 %: Implications for geology of small icy satellites, Asia Oceania Geosciences Society 6th Annual Meeting, Singapore (August 2009)
15. Dohi, K. and Arakawa, M., Experimental study on the impact crater formed on the layered structure, Asia Oceania Geosciences Society 6th Annual Meeting, Singapore (August 2009)
16. 岡本千里, 荒川政彦, 「石膏球の衝突破壊に関する実験的研究: ラブルパイル天体形成との関連」, 日本惑星科学会 2008 年秋季講演会, 福岡・博多, 2008 年 11 月
17. 保井みなみ, 荒川政彦, 「氷・シリカ微粒子混合物の圧密実験と氷小天体の密度進化への応用」, 日本惑星科学会 2008 年秋季講演会, 福岡・博多, 2008 年 11 月
18. Okamoto, C. and Arakawa, M., Experimental study on collisional disruption of gypsum sphere: implication for formation of rubble pile bodies, The 10th Asteroids, Comets, Meteors meeting, Maryland, USA (July 2008)

[その他]

ホームページ等

http://web.mac.com/masahiko_arakawa

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

香内 晃 (KOUCHI AKIRA)

北海道大学・低温科学研究所・教授

研究者番号: 60161866