

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2008

課題番号：19340134

研究課題名（和文） 天体衝突がもたらす地球環境変動の実験的解明

研究課題名（英文） **Experimental investigation of Earth's environmental perturbations  
due to meteoritic impacts**

研究代表者

松井 孝典（MATSUI TAKAFUMI）

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号 80114643

研究成果の概要：本研究では、堆積岩及び各種氷の衝突脱ガス過程における化学反応過程の解明を目的として実験を行った。また、脱ガス過程からの反応生成物が、地球気候システムに及ぼす影響の定量的評価を行った。結果として、衝撃脱ガスによるCO<sub>2</sub>の発生は、先行研究の推定より非常に高圧でのみ起きることと、白亜期末の巨大隕石衝突後には、従来想定されていたCO<sub>2</sub>の大量発生ではなくCOが大量に発生したらしいこと、COが大量発生した場合には、強力な温室効果が起きることが分かった。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	7,900,000	2,370,000	10,270,000
2008 年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
年度			
年度			
年度			
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学, 気象・海洋・陸水学

キーワード：地球環境システム

## 1. 研究開始当初の背景

地球の気候システムの理解は、今や純粋な学問的興味にとどまらず、広く社会一般からの切実な要請がある課題である。しかし、地球気候システムの研究の大半は、CO<sub>2</sub>増加に伴う地球温暖化の定量化のみに注力されており、それ以外の地球システム気候変動解析は非常に立ち後れているのが現状である。

例えば、生命史上最も大きなイベントである K/T 境界事件を見ただけでも、実に様々な環境変動が起きていたらしいことが地質記録から読みとれる。地球環境に多大な影響を与えるまでに巨大化した人間圏をどのように管理・運営すべきかを考えるとき、過去

の地質記録から読みとれる多種多様な環境変動を正確に理解し、地球気候システムの大構造を把握することは、非常に重要なことである。

## 2. 研究の目的

このような状況のもと、本計画では、K/T 境界事件における環境変動の地質記録を読みとるための基礎的物理化学過程の解明を主眼にして研究を進めた。具体的には、堆積岩及び各種氷の衝突脱ガス過程における化学反応過程の解明を実験的にを行うことを目的とした。また、脱ガス過程からの反応生成物が、地球気候システムに及ぼす影響の定量

的評価を行う。本計画において研究のテーマとして取り上げるのは、環境擾乱ガスとして非常に重要性が高く且つ地球表層中に大量に存在する炭酸カルシウム  $\text{CaCO}_3$  である。

### 3. 研究の方法

本研究計画では、主に2つの研究手法を用いた。一つは、ダイヤモンドアンビルセル (DAC) を用いた静的圧縮法であり、もう一つは高エネルギーパルスレーザーを用いたレーザー銃による動的圧縮法である。

#### (1) 静的圧縮実験

炭酸塩 ( $\text{CaCO}_3$ ) ターゲット上への天体衝突が起こると、 $\text{CO}_2$  の脱ガスが起こると考えられている。従来考えられてきた典型的な衝突脱ガス機構は、衝撃波通過直後の段階では、まだ  $\text{CaCO}_3$  は分解しておらず、希薄波の伝播による圧力の解放後に分解が起こり、脱ガスするというものであった。しかし、衝撃圧が十分に高ければ、衝撃波通過直後の段階で、すでに分解が起こるはずである (Hugoniot 上での分解)。そのような場合、大規模な脱ガスが起こると考えられる。 $\text{CaCO}_3$  の Hugoniot 上での分解が起こる衝撃圧を知るには、高温・高圧における  $\text{CaCO}_3$  の分解境界を知る必要がある。しかし、従来の研究では  $\text{CaCO}_3$  の分解境界は高々  $\sim 1700 \text{ K}$ 、数 MPa までしか決定されておらず、大規模な脱ガスに必要な衝撃圧はよくわかっていなかった。そこで本研究では本年度、レーザー加熱式ダイヤモンドアンビル装置 (LHDAC) を用いて、高温・高圧における  $\text{CaCO}_3$  の分解境界を求めた (図1)。

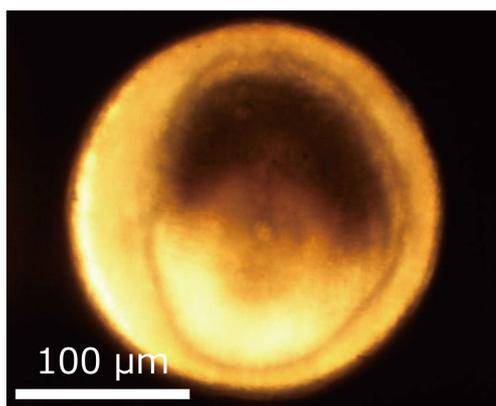


図1. LHDAC で加圧・加熱後の  $\text{CaCO}_3$  サンプルの顕微鏡写真。中心の目玉状テクスチャー部分で分解が起きている。

#### (2) 動的圧縮実験

レーザー銃は、飛翔体となる金属箔 (フライヤー) にレーザー光を照射し、発生する金属蒸気の膨張の反作用を推進力としてフライ

ヤーを加速する。図2に実験装置の模式図、及び図3にその写真を示す。実験手順は、まず真空チェンバー内にフライヤーと標的物質 (ターゲット) を設置し、 $10^{-4} \text{ Pa}$  程度に排気した。その後、内部校正ガスのヘリウム ( $\text{He}$ ) を  $10 \text{ Pa}$  導入し、レーザー光をチェンバーに照射することで、フライヤーの加速・衝突を起した。その後、衝突脱ガス気体を四重極質量分析計 (QMS) に導入し、組成分析を行った。フライヤーには、銅、金、白金の金属箔 (厚さ  $2.5\text{--}10 \mu\text{m}$ ) を用いた。ターゲットとして、炭酸塩の代表的鉱物である方解石 (calcite:  $\text{CaCO}_3$ ) を使用し、含まれる炭素を安定同位体  $^{13}\text{C}$  により同位体ラベリングを行った。

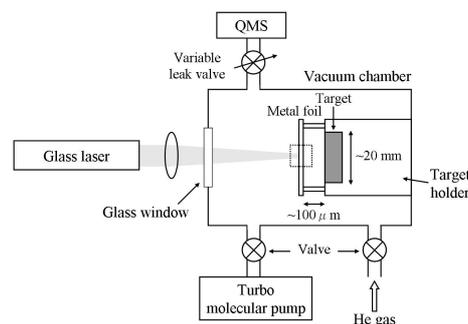


図2. 実験装置の模式図

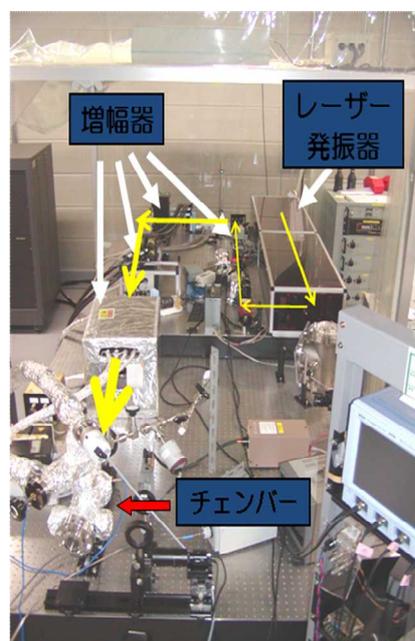


図3. 実験装置全体の写真。黄色の矢印は、レーザー光の光路

### 4. 研究成果

LHDAC を用いた静的圧縮実験およびレーザー銃を用いた動的圧縮実験から、それぞれ以下のような成果が得られた。

## (1) 静的圧縮実験

### LHDAC の温度測定

LHDAC の温度測定には、色収差による測定温度不定性が含まれることが以前から指摘されていたが、本研究で定量的に評価したところ、その不定性は無視できないほど大きいことが判明した（最大で >1500 K）。したがって、まずは LHDAC の温度測定法の改良を行った。従来一般的な温度測定手法である測定放射スペクトルへの黒体スペクトルのフィッティングに加え、放射輝度を用いることで、従来よりも確からしい温度を求めることに成功した。

### CaCO<sub>3</sub> 分解の判別手法の確立

LHDAC による加圧・加熱後の試料の分解（CaCO<sub>3</sub> → CaO + CO<sub>2</sub>）の判別手法を確立した。ラマン分光法およびエネルギー分散型 X 線分析法を用いて、分解生成物である CO<sub>2</sub> を検出することで分解を判別した。

### 炭酸塩（CaCO<sub>3</sub>）の分解境界の決定

上記 1 および 2 の手法を用いて、CaCO<sub>3</sub> の分解境界を ~5000 K、~10 GPa まで求めた（図 4）。その結果、高温における CaCO<sub>3</sub> の分解境界は、比較的低压領域に位置することがわかった（~5000 K で ~10 GPa）。この分解境界とユゴニオの位置関係より、ユゴニオ上での分解による CaCO<sub>3</sub> からの CO<sub>2</sub> の脱ガスに必要な推定衝撃圧は >~115 GPa である。

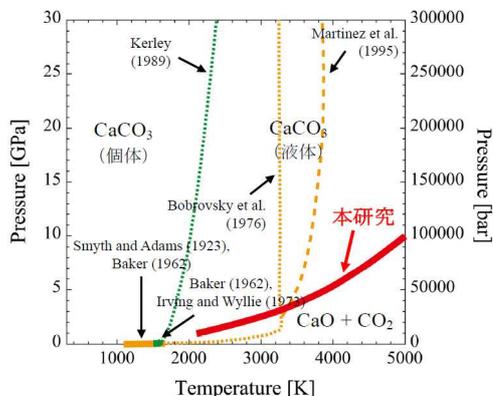


図 4 . CaCO<sub>3</sub> の相図 . 赤実線 : 本研究により求められた CaCO<sub>3</sub> の分解境界 . その他は先行研究による相境界 (オレンジは分解境界 . 緑は融解境界 . 実線は実験的に決定 . 点線・破線は理論的に推定 .)

以上の結果より、大規模な脱ガスに必要な衝撃圧は、先行研究における仮定よりも非常に高圧であることがわかった。これは、CaCO<sub>3</sub> からの CO<sub>2</sub> の大規模な脱ガスが従来考えられていたよりも起こりにくいことを示唆する。たとえば、CaCO<sub>3</sub> から脱ガスする CO<sub>2</sub> による温室効果は、6500 万年前の K/P 境界における生物大量絶滅機構の一つとして提唱されて

いるが、本研究の結果は、そのような絶滅機構は有効ではないことを示唆する。また、分解境界が高温でも比較的低压領域に位置することは、メルトの生成領域が広いことを示唆する。これは、炭酸塩のメルトが大量に存在するという、近年の衝突クレーター堆積物の分析結果と調和的な結果である。

## (2) 動的圧縮実験

### 脱ガス量

図 5 にフライヤー体積で規格化した総衝突脱ガス量 (CO<sub>2</sub>+CO) と衝突の際発生する、最大衝撃圧力の関係を示す。衝突脱ガスは、最大衝撃圧力が 20 GPa 付近で開始し、圧力の増加とともに脱ガス量も増加していることがわかる。先行研究において、衝突脱ガス開始圧力は、10-60 GPa とばらつきが大きかったが、これは、衝突時にターゲットを密閉している場合 (閉鎖系) と開放している系 (開放系) とで封圧が異なるためであると考えられる。

### 脱ガス組成

図 6 に炭酸塩からの衝突脱ガス組成 (CO/CO<sub>2</sub>) を、最大衝撃圧力に対して示す。最大衝撃圧力が、25 GPa 以下では脱ガス量が非常に少ないため、CO/CO<sub>2</sub> 比の結果の誤差が非常に大きい。また、25-45 GPa において、CO/CO<sub>2</sub> 比が大きくばらつく原因も、脱ガス量が少なく、精度のよい組成比の決定が出来ていないためであると考えられる。一方、45 GPa 以上では、衝突脱ガス量も多く、CO/CO<sub>2</sub> 比もばらつきが小さい。したがって、我々は 45 GPa 以上における CO/CO<sub>2</sub> 比の結果 (= 2.02 ± 0.41) が、炭酸塩からの衝突脱ガス組成を反映したものであると考える。また、イオン化効率が異なるフライヤー (銅、金、白金) を用いた場合でも、生成する CO/CO<sub>2</sub> 比に顕著な差が見られないことから、炭酸塩からの衝突脱ガス気体とフライヤーとの酸化還元反応が起こっている可能性も低い。これらの結果は、炭酸塩の脱ガス気体の主成分は、従来の CO<sub>2</sub> がほとんどであるという描像とは異なり、CO が主成分であることを示している。

### 隕石衝突による気候環境変動への応用

以上の実験結果を使い、Chicxulub 衝突後に引き起こされる気候環境変動を定量的に評価するため、衝突脱ガスで CO が大気に放出された際の対流圏オゾンの増加量を大気化学反応計算により求めた。そして、引き起こされる対流圏オゾンの増加量から、放射強制力と地表面温度の上昇を見積もった。その結果、隕石衝突後、約 5 年間は対流圏オゾンの放射強制力が支配的に働き、その強さは衝突脱ガスで生成する CO<sub>2</sub> の 3-10 倍にもなることが明らかになった。この放射強制力から見

積もった気温上昇と脱ガス量の関係を図7に示す。従来のように衝突脱ガス気体がすべてCO<sub>2</sub>と仮定すると、気温上昇は1-2程度であるが、COの脱ガスを考慮した場合は、3-6の気温上昇が起こると考えられる。このような急激かつ大きな気温上昇は、生態系への深刻なダメージを与え、白亜紀末の生物大量絶滅事件につながった可能性がある。

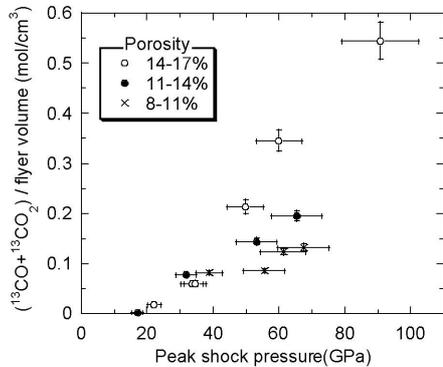


図5．最大衝撃圧力と衝突脱ガス量の関係

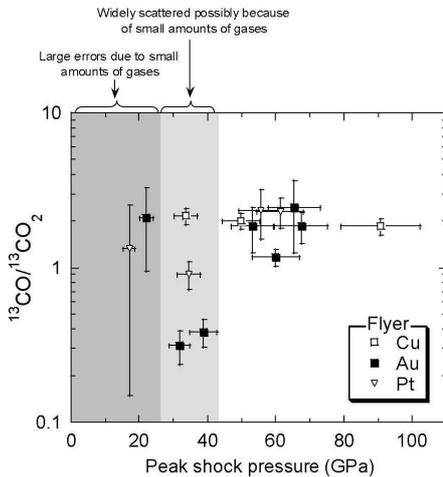


図6．最大衝撃圧力とCO/CO<sub>2</sub>比との関係。シンボルの違いはフライヤーの素材の違い。

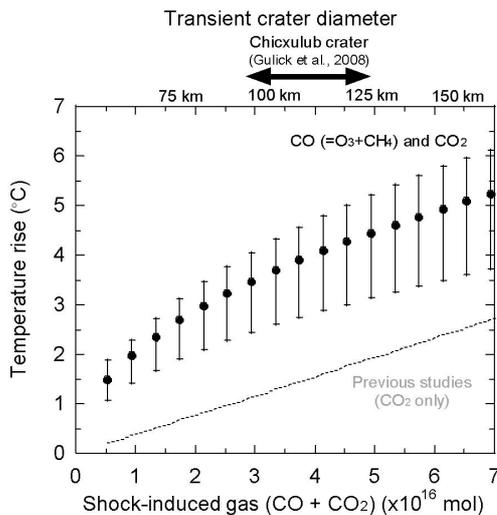


図7．炭酸塩の衝突脱ガス量と脱ガス気体に

よる気温上昇との関係。点線は脱ガス気体がすべてCO<sub>2</sub>の場合の気温上昇。点は、CO/CO<sub>2</sub>=2の時の気温上昇をあらわす。上軸は、衝突脱ガス量に対応した、衝突クレータの直径を示す。

### 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15件)

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, *AIAA J.*, in press, 2009 (査読有).

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).  
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, 橋省吾, 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10 kmを越える衝突, *日本惑星科学会誌遊星人*, 18, 4-9, 2009 (査読有).

Kadono T. K. Shigemori, S. Fujioka, K. Otani, T. Sano, Y. Sakawa, H. Azechi, N. Ozaki, T. Kimura, K. Miyanishi, T. Endo, M. Arakawa, A. M. Nakamura, S. Sugita, and T. Matsui, Impact vaporization of rocks using a high-power laser, *Proc. Fifth Intl. Conf. on Inertial Fusion Sci. and Applications, (IFSA2007)*, *J. Phys. Conf. Ser.*, 112, 042014, 2008 (査読有).

Ohno, S., T. Kadono, K. Ishibashi, K. Kawaragi, S. Sugita, E. Nakamura, and T. Matsui, Direct measurements of impact devolatilization of calcite using a laser gun, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L13202, doi:10.1029/2008GL033796, 2008 (査読有).

Sekine, Y., S. Lebonnois, H. Imanaka, T. Matsui, B. N. Khare, E. L.O. Bakes, C. P. McKay, and S. Sugita, The role of organic haze in Titan's atmospheric chemistry II: Effect of heterogeneous reaction to the hydrogen budget and chemical composition of the atmosphere, *Icarus*, 194, 201-211, 2008 (査読有).

Sekine, Y., H. Imanaka, T. Matsui, B. N. Khare, E. L.O. Bakes, C. P. McKay, and S. Sugita, The role of organic haze in Tita's atmospheric chemistry I: Laboratory investigation on heterogeneous reaction of atomic hydrogen with Titan tholin, *Icarus*, 194, 186-200, 2008 (査読有).

関根康人, 今中宏, 杉田精司, セバスチャン レボノア, エマ ベイクス, ビシユン カレー, クリス マツケイ, 松井孝典, タイタン大気における有機物エアロゾルの表面不均一反応とその役割, *日本惑星科学会誌 遊星人*, 17, 105-116, 2008 (査読有).

大野宗祐, 門野敏彦, 河原木皓, 石橋高, 黒澤耕介, 関根康人, 杉田精司, 中村栄三, 松井孝典, レーザー銃実験と衝突脱ガスの新しい描像, *日本惑星科学会誌 遊星人*, 17, 98-104, 2008 (査読有).

Kamata, S., K. Kurosawa, S. Sugita, Y. Sekine, M. Yokoyama, K. Ozawa and T. Matsui, Toward applications of LIBS to the lunar and asteroid explorations: Effects of laser pulse repetition rate, *Proc. of 41th Lunar and Planet. Symp.*, 159-162, 2008 (査読無).

Kurosawa, K., Y. Sekine, S. Sugita, N. Ohkouchi, N. O. Ogawa, K. Ishibashi, T. Kadono, S. Ohno, and T. Matsui, Cyanide production by chemical reactions between impactor material and an ambient atmosphere after oblique impacts, *Proc. of 41th Lunar and Planet. Symp.*, 163-167, 2008 (査読無).

Kadono, T., Y. Hironaka, K. Otani, T. Sano, T. Fujiwawa, K. Takarada, A. Shiroshita, S. Fujioka, and K. Shigemori, T. Sakaiya, K. Miyanishi and N. Ozaki, K. Kurosawa, S. Sugita, and T. Matsui, Impact Vaporization with a velocity larger than 10 km/s, *Proc. of 40th ISAS Lunar Planet. Symp.*, 41, 35-38, 2008 (査読無).

Barnouin-Jha, O. S., S. Yamamoto, T. Toriumi, S. Sugita, and T. Matsui, Non-intrusive measurements of crater growth, *Icarus*, 188, 506-521, 2007 (査読有).

Fuyuki, M., S. Sugita, S. Hasegawa, T. Kadono, and T. Matsui, Spectroscopic observation of thermal dissociation of SiO<sub>2</sub> in impact-induced vapor, *Earth Planet. Space*, 59, 437-451, 2007 (査読有).

Kurosawa, K., K. Ishibashi, S. Sugita, T. Kadono, S. Ohno, and T. Matsui, HCN formation by the chemical interaction between high-speed impact fragments and a planetary atmosphere, *Proc. of 40th ISAS Lunar Planet. Symp.*, 40, 101-105, 2007 (査読無).

[学会発表] (計 11 件)

Ishibashi, K. et al., Determination of the

Decomposition Boundary of CaCO<sub>3</sub> at High Temperature: Implications for Impact-induced Degassing of CaCO<sub>3</sub> *Lunar Planet. Sci. Conf.*, XXXX, #1569, Mar. 26, 2009, Houston Texas, U.S.A.

Kurosawa, K., et al., Spectroscopic observations of a liquid-vapor phase change of silicate in the warm dense matter region, *International Workshop on Warm Dense Matter 2009* (Mar. 16 – 19, Hakone), 2009.

Sugita, S., et al., In-situ spectroscopic observation of silicate vaporization due to >10km/s impacts using a laser-driven launcher, *Lunar Planet. Sci. Conf.*, XXXX, #2493, Mar. 26, 2009, Houston Texas, U.S.A.

Kurosawa, K. et al., Cyanide production by chemical reactions between impactor material and an ambient atmosphere after oblique impacts, *Lunar Planet. Sci. Conf.*, XXXX, #1636, Mar. 24, 2009, Houston Texas, U.S.A.

Fukuzaki, S. et al., Impact devolatilization of ammonium sulfate: implications for the origin of N<sub>2</sub> in Titan's atmosphere, *Lunar Planet. Sci. Conf.*, XXXX, #1575, Mar. 24, 2009, Houston Texas, U.S.A.

Kadono, T. et al., Technique for acceleration of projectiles to a velocity larger than the escape velocity of Earth 11.2 km/s, *AGU Fall Meeting*, #P31A-1387, Dec. 12, 2008, San Francisco, California, U.S.A.

Kadono, T. et al., Projectile acceleration to a velocity over the Earth's escape velocity and application in planetary science, *American Physical Society, 2008 APS April Meeting and HEDP/HEDLA Meeting* (Apr. 11-15), #S1.024, 2008, Huntsville, Tennessee, U.S.A.

Ohno, S., T. Kadono, K. Ishibashi, K. Kawaragi, S. Sugita, E. Nakamura, and T. Matsui, Impact devolatilization of calcite; Direct measurements using a laser gun, *Lunar Planet. Sci. Conf.*, XXXIX, #2046, Mar. 10, 2008, Houston Texas, U.S.A.

Sugita, S., T. Kadono, K. Shigemori, S. Fujioka, K. Otani, T. Sano, Y. Sakawa, H. Azechi, N. Ozaki, T. Kimura, K. Miyanishi, T. Endo, M. Arakawa, A. M. Nakamura, and T. Matsui, Acceleration of projectiles to >10 km/s with a laser gun: Toward silicate impact vaporization experiments, *Lunar Planet. Sci. Conf.*, XXXIX, #2501, Mar. 11, 2008, Houston Texas, U.S.A.

Kurosawa, K., K. Ishibashi, S. Sugita, T. Kadono, S. Ohno, and T. Matsui, An experimental study on HCN production in redox-neutral atmospheres by oblique impacts: size and velocity scaling, *Lunar Planet. Sci. Conf.*, XXXIX, #2037, Mar. 13, 2008, Houston

Texas, U.S.A.

Herrick, R. R., S. Yamamoto, O. S. Barnouin-Jha, S. Sugita, and T. Matsui, Constraints from laboratory experiments on crater excavation and formation of an uprange forbidden zone in an oblique impact, *Lunar Planet. Sci. Conf.*, XXXIX, #2305, Mar. 11 2008, Houston Texas, U.S.A.

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

松井 孝典 (MATSUI TAKAFUMI)  
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授  
研究者番号：80114643

### (2)研究分担者

阿部 彩子 (ABE AYAKO)  
東京大学・気候システム研究センター・准教授  
研究者番号：30272537

杉田 精司 (SUGITA SEIJI)  
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授  
研究者番号：80313203

大野 宗祐 (OHNO SOHSUKE)  
千葉工業大学・惑星探査研究センター準備室・研究員  
研究者番号：80432631

### (3)連携研究者

該当無し