

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5月23日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22340158

研究課題名（和文） 粒子物性評価に基づく月面表層土堆積過程の解明とその応用

研究課題名（英文） Estimation of the mechanical properties of lunar surface soil and its astrophysical and engineering applications

研究代表者

松島 亘志 (MATSUSHIMA Takashi)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：60251625

研究成果の概要（和文）：

米国アポロ計画で回収された月表層土(レゴリス)を分析し、その3次元粒子物性や分光特性を検討した。これと月探査機「かぐや」で得られたリモートセンシングデータ(分光データ)を用いて月表面土壌の風化度や初期マグマ形成に関わる化学組成分布を推定した。また、それらの分光解析に及ぼす表層土の堆積構造の影響を実験的に検討した。更に、粒子シミュレーションにより、土壌の風化度から土の力学特性(かさ密度、圧縮・せん断強度など)を推定する手法の検討を行った。これらの結果を基に、将来の月探査計画についての提案を行った。

研究成果の概要（英文）：

We analyzed Apollo retrieved samples to study their 3D grain properties and spectrographic properties. Together with the remote sensing data obtained in the Kaguya project, the results were used to compute lunar global maps on maturity and magnesium contents. We also studied the effect of lunar surface condition on the spectrographic properties. Moreover we performed the grain-scale numerical simulations using the obtained grain properties, which helps to evaluate the mechanical properties of lunar soil (bulk density, compressibility and shear strength) from its maturity index. Based on these results, we proposed some future missions on lunar exploration by JAXA.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	13,500,000	4,050,000	17,550,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	1,100,000	330,000	1,430,000
総計	15,600,000	4,680,000	20,280,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：月表層土(レゴリス)、アポロ計画回収サンプル、SPring-8 マイクロ X線 CT、個別要素法(DEM)、月探査機「かぐや」、分光解析

1. 研究開始当初の背景

JAXA による月探査機「かぐや」(2007～2009年)によって得られた膨大なリモートセンシングデータの解析が進み、惑星科学に関する多くの新しい情報が得られてきている。一方で、これらの解析の検証を行い、より詳細で確度の高い知見として積み上げるためには、実際の月面表層土(レゴリス)を用いた

実験的検討が欠かせない。また、同じく JAXA による探査機「はやぶさ」によって、小惑星イトカワのレゴリスが地球に持ち帰られ、この解析も進んでいる。これを、月のレゴリスと合わせて検討することにより、月のみならず固体惑星や小天体全般に関する新たな知見を得ることも期待できる。

## 2. 研究の目的

そこで本研究では、「かぐや」分光データおよび米国アポロ計画で採取された月レゴリスサンプルの解析を通して、月レゴリスの堆積構造およびその形成過程についての新たな知見を得て、将来の月探査計画立案に資することを目的とした。具体的には以下のような項目についての研究を行った。

### (1) 「かぐや」の分光データ解析による月レゴリス化学組成の空間分布の検討

月周回衛星「かぐや」により取得した可視・近赤外波長域分光データを用いて、最も古い地殻である高地地殻の月面堆積層水平化学組成分布推定（鉄、マグネシウム量および鉄、マグネシウム比の分布推定）を行い、これら表層堆積層の組成から月地殻深さ方向の組成分布を推定する。

### (2) レゴリス物性が分光データに及ぼす影響の実験的検討

月の表土の主要構成成分である斜長岩や玄武岩の光散乱特性は、表面のナノメートルからマイクロメートルサイズの細かな凹凸のサイズによって変化することが考えられる。この変化が月面の反射率補正の精度に悪影響を及ぼす可能性がある。そこで本研究では、月表面層物質の可視・近赤外線領域の光散乱特性を調べるために、光入射角度、観測角度を様々に制御できる分光カメラを開発し、様々な月表面模擬物質の散乱特性を調べ、月表面観測データの高精度化のための基礎データの収集や、将来の月面探査の方向性を示すことを目的とする。

### (3) 月レゴリス粒子物性を取り込んだ数値シミュレーションによる、月表面層土のバルク物性の検討

X線CTより得られた月レゴリス粒子形状をモデル化し、コンピュータ上で力学試験を行うことで、月表面層土の堆積状況および形成過程について検討する。その結果を基に、月レゴリスのバルク力学特性マップを作成するための手順を検討する。

### (4) クレーター形成解析のためのレゴリス構成モデルの検討

隕石衝突により、粒子破碎を生じながら変形する粒状体の構成モデルを構築し、数値解析により検証する。この結果は、「かぐや」で得られたクレーター周辺の表層土物性から深さ方向の物性分布を定量評価するのに役立つ。

### (5) 将来の月探査に向けた提案および準備

上述の検討結果をベースに、将来の月探査に向けた提案および準備を行う。

以下、定められた書式に従い、研究方法および研究成果について「各研究項目毎に」述べる。

## 3. 研究の方法

### (1) 「かぐや」の分光データ解析による月レゴリス化学組成の空間分布の検討

月周回衛星「かぐや」に搭載されたスペクトルプロファイラ (SP) およびマルチバンドイメージャ (MI) により取得した可視・近赤外波長域分光データを用い、鉱物種に依存する 1000nm 付近の吸収が鉄、マグネシウム量の増加とともに深くなる効果、同吸収中心波長が鉱物中に含まれる鉄とマグネシウムの比により変動する効果を使って鉄、マグネシウム量と鉄、マグネシウム比を推定する新しいアルゴリズムを開発し、月面堆積層水平化学組成分布推定を行う。次に、クレータによる放出物はクレータリム近傍では地下最深部からの掘削物が堆積し、遠方に向かってより浅い掘削物となる効果を用いて、求めた水平化学組成分布と大小様々なサイズのクレータ位置関係から、月地殻深さ方向の物質分布を求める。

### (2) レゴリス物性が分光データに及ぼす影響の実験的検討

光入射角度、観測角度を様々に制御できる分光カメラ (位相角可変分光装置) を開発し、様々な月面模擬物質を観測する。具体的には、電気炉で宇宙風化の状態を再現した斜長石の粉体、カンラン石の粉体と焼結体、表面粗さを制御した斜長岩や玄武岩、など、月面の様々な表面状態を模擬的に再現した物質について可視・近赤外領域での散乱特性を測定する。また、実験室で再現したような散乱特性を持つ表面が実際に月面にあるかを、月探査衛星「かぐや」のデータから探す。

### (3) 月レゴリス粒子物性を取り込んだ数値シミュレーションによる、月表面層土のバルク物性の検討

放射光施設 SPring-8 の高精度マイクロ X線 CT を用いて、アポロサンプル 60501(高地地方)および 10084(海地方)の月レゴリス粒子の 3次元形状および内部鉱物分布を取得してカタログを作成する。また、ハヤブサ計画で回収されたイトカワ粒子を比較することで、固体惑星表層土の形成過程について検討する。更に、X線 CT より得られた粒子形状を球の集合体としてモデル化し、それらをコンピュータ上で堆積させ、力を加えることで堆積物の応力-ひずみ関係を取得する。特にアグルーチネイト含有率を変化させた計算より、土壌の風化度(maturity)と強度定数の関係を導く。

#### (4) クレーター形成解析のためのレゴリス構成モデルの検討

コンピュータ上で堆積させた破砕性粒子に圧力を加え、応力-ひずみ関係と粒子破砕の関係について検討する。また、得られた最終的な粒度分布および粒子形状分布を(3)のX線CTで得られた統計データと比較する。更に、既往の高速衝突実験データおよび衝撃波の支配方程式を解釈し直し、準静的圧縮時の応答とシームレスにつなぐ構成モデルを構築する。また、それをを用いた簡易な数値シミュレーションを実験結果と比較し、その妥当性を検証する。

#### (5) 将来の月探査に向けた提案および準備

上述の研究で得られた知見を踏まえて、将来の月探査の意義を惑星探査研究のコミュニティで議論し、必要な工学技術をフィールド実験等により準備する。

### 4. 研究成果

#### (1) 「かぐや」の分光データ解析による月レゴリス化学組成の空間分布の検討

月面堆積層水平化学組成は、図1に示す通り月裏側では表側に比べて鉄、マグネシウムを含む鉱物に富み、また鉄とマグネシウムの比は裏側でよりマグネシウムに富む事が解った(Ohtake et al., 2012)。これは月裏側が表よりも、より早い段階でマグマオーシャンから固化した物質で形成されている事を意味し、従来の同心円対称形成モデルとは異なる非対称の地殻形成を示唆する。一方で深さ方向には、深さ数 km 程度まではクレータ形成等による月面表層土形成に伴う攪拌・混合により地殻組成は不均一化している事が解った(混合層と呼ぶ)。混合層以深では、地殻は深くへ行くほど鉄、マグネシウムを含

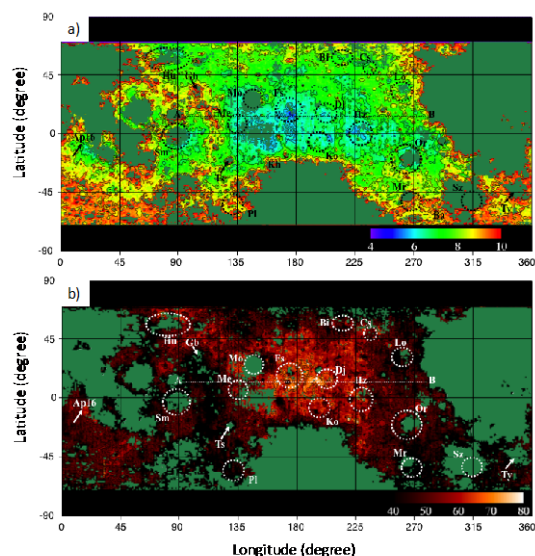


図1 月表層化学組成分布 a) 鉄、Mg含有鉱物量(vol. %), b)鉄、Mg比(Mg/(Mg+Fe) in mole %)

む鉱物が減少し、よりマグネシウムに富む傾向を示した。これら深さ方向への化学組成変化は、地殻形成モデルを今後さらに修正する必要がある事を示唆する。

#### (2) レゴリス物性が分光データに及ぼす影響の実験的検討

位相角可変分光装置を開発し様々な試料を様々な観測幾何条件で分光測定できるようになった。斜長石を風化させた物質の測定では、月面の還元的な環境下でも二価鉄に起因する吸収は保存される可能性が高いことがわかった。カンラン石の粉体と焼結体(岩石を模擬)の測定では、基本構成粒子サイズが同じであっても、焼結体の方が反射率が極端に低くなることや散乱特性や反射スペクトル形状も変化することがわかった。また、斜長岩や玄武岩の表面粗さの違いでも散乱特性やスペクトル形状に変化があらわれることがわかった。月探査衛星「かぐや」のマルチバンド画像から、月面の代表的な粉体と異なる散乱特性を持つ場所を探し出して示し、粉体と岩石表面を区別する重要性を主張した。これらの情報を基に将来の月面探査における観測機器の検討を行い、月面の粒子サイズや表面の粗さ状態を光散乱特性から把握し、表面状態にかかわらず正しく鉱物種を同定するための眺望分光カメラ(ALIS)の設計提案や、月探査シナリオの提案を行った。

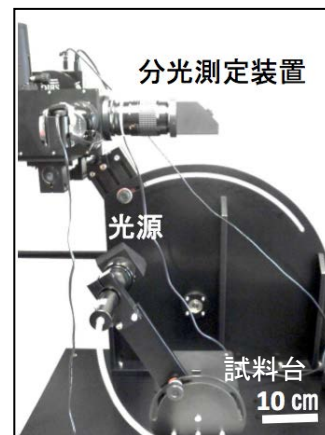


図2 位相角可変分光測定装置主要部

#### (3) 月レゴリス粒子物性を取り込んだ数値シミュレーションによる、月表層土のバルク物性の検討

高精度CTで得られた3次元粒子形状統計を、イトカワや破砕実験粒子と比較した結果、風化度が上がると楕円体近似の全体形状が球に近づく傾向が確認された(Tsuchiyama et al., 2011)。また、粒子破砕モデルを用いた2次元粒子シミュレーションを行い、月面表層土の進化過程に関する検討を行った。その結果、初期状態に拘わらず、粒子破砕の進行に

伴って粒度分布および粒子形状が定常状態に近づくことを明らかにした(Ueda et al., 2012, 2013)。この結果を、既往の粒度分布に関する結果(風化度が上がると平均粒径および分散が減少する傾向)と合わせると、「かぐや」のデータから得られる月表面の風化度マップやクレーター密度などから、各地域の粒子モデル(粒度分布および粒子形状モデル)を作成することが可能となった。

一方、アグルチネイト含有率を変化させた堆積シミュレーション(松島ほか,2010)より、風化度が上がり、アグルチネイトの割合が大きくなるほど、堆積物の間隙率が大きくなることが示された。更に、単純せん断試験シミュレーションでは、最も密づめおよびゆるづめの試料のせん断抵抗角は、アグルチネイト含有率に依存せず、それぞれ  $50^\circ$  および  $30^\circ$  程度となり、既往の実験結果と整合する結果となった。これらの結果は、月面のバルク密度マップやせん断強度マップなどを作成する基礎情報となるものである。



図3 CTイメージから再構築した74個の月レゴリス粒子3次元画像

#### (4) クレーター形成解析のためのレゴリス構成モデルの検討

粉体材料への飛翔体高速衝突実験の応答結果および準静的1次元圧縮試験結果に対して、粒子破碎をベースとした圧縮モデルを導入することで、統一的な状態方程式(平均応力に関する構成モデル)を導いた。得られた構成モデルは、実験結果を定量的に表現でき、また(3)の粒子シミュレーション結果とも整合的である。このモデルを地盤工学の分野で用いられるCam-clayモデルなどと合わせることにより、粒子破碎を考慮したクレーター形成シミュレーションを行うことが可能となる。

#### (5) 将来の月探査に向けた提案および準備

上述の情報を基に将来の月面探査における着陸候補地点の検討を行い、月裏側から、これまでにアポロ探査等で得られていない未知の地殻試料を採取し、地上に持ち帰って

化学組成や年代測定を行う、サンプルリターンミッションの提案を行った(大竹ほか, 2012(8))。また、月着陸探査における月面の表面状態の地域差への対応の必要性を広く訴えた(佐伯, 2012(11))。

一方、月表土の状態に近い伊豆大島火山フィールドでの無人探査車の性能実証試験の環境を整え、複数の研究グループの探査車を実証試験に導き、不整地走行機構の開発に貢献した(佐伯, 2012(10))。

#### 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20件)

(1) Ueda, T., Matsushima, T., Yamada, Y., DEM simulation on the one-dimensional compression behavior of various shaped crushable granular materials, Granular matter, accepted, 2013.(査読有)

(2) Matsushima, T., Blumenfeld, R., Microstructural characteristics of planar granular solids, Powders and grains 2013, accepted. (査読有)

(3) 片桐 淳, 松島 亘志, 山田 恭央, DEMによる試料作製方法が粒状体のせん断挙動に及ぼす影響の定量的評価, 土木学会論文集A2 (応用力学), 68(1), 67-77, 2012. (査読有)

(4) Takao Ueda, Takashi Matsushima, Yasuo Yamada, Discrete element simulation on the grading change of the granular materials caused by grain crushing, the Seventh Asian Young Geotechnical Engineers Conference, 7AYGEC, 77-84, 2012. (査読有)

(5) Ueda, T., Matsushima, T., Yamada, Y.: Micro structures of granular materials with various grain size distributions, Powder Technology, 217, 533-539, 2012.02. (査読有)

(6) Ueda, T., Matsushima, T., Yamada, Y.: Ball-bearing effect on shear behavior of binary granular mixture, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2, 68(1), 1-9, 2012. (査読有)

(7) Makiko Ohtake, Hiroshi Takeda, Tsuneo Matsunaga, Yasuhiro Yokota, Junichi Haruyama, Tomokatsu Morota, Satoru Yamamoto, Yoshiko Ogawa, Takahiro Hiroi, Yuzuru Karouji, Kazuto Saiki, Paul G. Lucey, 2012, Asymmetric crustal growth on the Moon indicated by primitive farside highland materials, Nature Geoscience 5,384-388. (査読有)

(8) 大竹真紀子, 荒井 朋子, 武田 弘, 唐牛 謙, 佐伯 和人, 諸田 智克, 小林 進悟, 大槻 真嗣, 國井 康晴 2012, 月裏側高地物質サンプルリターンミッションの提案, 遊星人, 21, 217-223. (査読有)

(9) 佐伯和人 (2012) 月面の地質学, 化学工学, 76, 407-409. (査読有)

(10) 佐伯和人 (2012) 火山観測ロボット実証試験場の選定と実証試験運営の試み, 日本惑星科学会誌, 21, 94-102. (査読有)

(11) 佐伯和人 (2012) 次期月着陸計画 SELENE-2 の着陸地点検討, 日本惑星科学会誌, 21, 45-56. (査読有)

(12) Ueda, T., Matsushima, T., Yamada, Y.: Effect of particle size ratio and volume fraction on shear strength of binary granular mixture, *Granular Matter*, 13:731-742, 2011(査読有)

(13) Tsuchiyama, A., Uesugi, M., Matsushima, T., Michikami, T., Kadono, T., Nakamura, T., Uesugi, K., Nakano, T., Sandford, S.A., Noguchi, R., Matsumoto, T., Matsuno, J., Nagano, T., Imai, Y., Takeuchi, a., Suzuki, Y., Ogami, T., Katagiri, J., Ebihara, M., Ireland, T.R., Kitajima, F., Nagao, K., Naraoka, H., Noguchi, T., Okazaki, R., Yurimoto, H., Zolensky, M.E., Mukai, T., Abe, M., Yada, T., Fujimura, A., Yoshikawa, M., Kawaguchi, J. : Three-Dimensional Structure of Hayabusa Samples: Origin and Evolution of Itokawa Regolith, *Science* 333, 1125, 2011 (DOI: 10.1126/science.1207807)) (査読有)

(14) Matsushima, T., Chang, C.S.: Quantitative evaluation of the effect of irregularly shaped particles in sheared granular assemblies, *Granular Matter*, 13:269-276, 2011. (査読有)

(15) Ueda, T., Matsushima, T., Yamada, Y.: Effect of grade changing due to grain crushing on the compressibility of granular materials, *Proc. International Conference on Advances in Geotechnical Engineering*, (ICAGE 2011, Perth), 165-170, 2011. (査読有)

(16) Ueda, T., Matsushima, T., Yamada, Y.: Effect of particle size ratio on shear strength of dense binary mixtures, *Proc. Geomechanics and Geotechnics: From Micro to Macro*, Jiang, Liu, Bolton eds, CRC Press, vol. 1, 507-512, 2010.10. (査読有)

(17) J. Katagiri, T. Matsushima and Y. Yamada: Statistics on 3D particle shapes of lunar soil (No.60501) obtained by micro x-ray CT and its image-based DEM simulation, *proc. Earth and Space 2010: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments*, ASCE, 254-259, 2010.3. (査読有)

(18) T. Ueda and T. Matsushima and Y. Yamada: Effect of grain size distribution on mechanical properties of lunar soil, *proc. Earth and Space 2010: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments*, ASCE, 49-56, 2010.3. (査読有)

(19) Katagiri, J., Matsushima, T., Yamada, Y.: Simple shear simulation of 3D irregularly-shaped particles by image-based DEM, *Granular Matter*,

12, 5, 491-497, 2010. (査読有)

(20) 松島亘志, 片桐淳, 上田高生, 佐伯和人, 土山明, 大竹真紀子, 月面表層土の粒子特性とバルクの力学特性, 日本惑星科学会誌, 19,2 105-111, 2010. (査読有)

[学会発表] (計 25 件)

(1) 丸山薫,佐伯和人,大井修吾,カンラン石の粉体とカンラン岩との反射スペクトルの比較, 日本惑星科学会 2012 年度秋季講演会,2012/10/25,神戸大学

(2) 鳥居大亮,佐伯和人,岩石表面粗さと反射スペクトルの関係,日本惑星科学会 2012 年度秋季講演会,2012/10/25,神戸大学

(3) 大竹真紀子, 武田弘, 松永恒雄, 横田康弘, 春山純一, 諸田智克, 石原吉明, 山本聡, 小川佳子, 廣井孝弘, 唐牛讓, 佐伯和人 月高地地殻の化学組成から推定する高地地殻形成過程, 日本惑星科学会 2012 年度秋季講演会 2012 10/24-26 神戸大学

(4) 佐伯和人,荒井朋子,荒木博志,石原吉明,大竹真紀子,唐牛讓,小林直樹,春山純一,杉原孝充,本田親寿,佐藤広幸,武田弘,諸田智克,栗谷豪,三谷烈史,大嶽久志,田中智,SELENE-2 の着陸地点評価,日本惑星科学会 2012 年度秋季講演会,2012/10/24,神戸大学

(5) Ohtake, Makiko New Understanding of the Lunar Highland Crust and Candidate for Future Lunar Exploration, 75th Annual Meeting of the Meteoritical Society 5150 2012 8/12-17 Cairns, Australia (招待講演)

(6) Matsushima, T., Elementary Volumes Distribution and Cell Structural Stability in 2D Granular Assemblies, 8th European Solid Mechanics Conference, 2012/7/12, Graz, Austria.

(7) 佐伯和人,諸田智克,大嶽久志,大竹真紀子,杉原孝充,本田親寿,次期月探査計画セレーネ 2 のための月面眺望画像分光カメラ(ALIS)開発状況と科学目的,日本地球惑星科学連合 2012 年大会,2012/5/23,幕張メッセ

(8) 丸山 薫,佐伯和人,大井修吾,カンラン石の粉体と焼結体との反射スペクトルの比較,日本地球惑星科学連合 2012 年大会,2012/5/23 ,幕張メッセ

(9) 大竹真紀子, 武田弘, 松永恒雄, 横田康弘, 春山純一, 諸田智克, 石原吉明, 山本聡, 小川佳子, 廣井孝弘, 唐牛讓, 佐伯和人 かぐや分光データを用いた月高地地殻の鉱物量比と Mg# の深さ方向変化, Japan Geoscience Union Meeting 2012 2012 5/20-25 幕張メッセ

(10) Matsushima, T., Characteristics of Irreducible Cell Structure of 2D Granular Solid, International Symposium on Discrete Element Modelling of Particulate Media, 2012/3/31, School of Chemical Engineering, University of Birmingham, Birmingham UK.

(11) 佐伯和人, 諸田智克, 大嶽久志, 大竹真紀子, 杉原孝充, 本田親寿, Advanced Lunar Imaging Spectrometer (ALIS) for the Next Japanese Lunar Mission SELENE-2: Present Status and Science Objectives, 「かぐや」拡大サイエンス会議, 2012/1/12, 名古屋大学(名古屋, 愛知)

(12) 佐伯和人, 諸田智克, 大竹真紀子, 本田親寿, 杉原孝充, 大嶽久志, SELENE-2 搭載を目指した眺望分光カメラ ALIS の科学的意義と開発課題, 太陽系科学シンポジウム, 2011/11/16, 宇宙科学研究所 (相模原, 神奈川)

(13) 大隈裕一郎, 佐伯和人, 大竹真紀子, 月探査衛星「かぐや」MI データを用いた月クレーター内壁, 中央丘における正反射特性の検出, 日本惑星科学会 2011 年度秋季講演会, 2011/10/24, 相模女子大学 (相模原, 神奈川)

(14) 大竹真紀子, 月高地地殻の化学組成, 日本鉱物科学会 2011 年年会, 2011/9/10, 茨城大学水戸キャンパス

(15) Ueda, T., Matsushima, T., Yamada, Y.: DEM simulation of the shear strength and shear band development of well-graded granular materials, 5th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials (IS-Seoul 2011). Vol.1, pp520-525, 2011.9.1, Sheraton Grande Walkerhill, Seoul, Korea

(16) Saiki, K., Arai, T., Araki, H., Ishihara, Y., Ohtake, M., Karouji, Y., Kobayashi, N., Sugihara, T., Haruyama, J., Honda, C., Progress Report on Landing Site Evaluation for the Next Japanese Lunar Exploration Project: SELENE-2, American Geophysical Union Fall Meeting, 2010/12/13-17, San Francisco, USA

(17) T. Matsushima, Liquefaction and resolidification of dense granular assembly, Recent Progress in Physics of Dissipative Particles.- From fine powders to macroscopic behaviors of granular particles, 2010.11.24, Yukawa Institute for Theoretical Physics (YITP), Kyoto University (招待講演)

(18) T. Matsushima, Granular mechanics research with micro-X ray CT, The 1st international Workshop on X-ray CT Visualization for Socio-Cultural Engineering & Environmental Materials, 2010.11.18, Kumamoto University, Kumamoto, JAPAN

(19) 佐伯和人, 荒井朋子, 荒木博志, 石原吉明, 大竹真紀子, 唐牛讓, 小林直樹, 杉原孝充, 春山純一, 本田親寿, 次期月探査計画 SELENE-2 の着陸地点検討報告, 日本惑星科学会秋期講演会, 2010/10/7, 名古屋

(20) 神前喬, 佐伯和人, 下林典正, 大竹真紀子, 荒井朋子, 山明, 月の斜長石の反射スペクトルにおける  $1.25 \mu\text{m}$  吸収帯と含有微量 Fe との関係, 日本惑星科学会秋期講演, 2010/10/7, 名古屋

(21) T. Matsushima, 3D particle characterization of geomaterials and its application to DEM simulation, Particulate Materials in Extreme Environments, PMEE 2010, 2010.9.20, Lawrence Livermore National Laboratory, CA, USA, (招待講演)

(22) T. Matsushima, A Micromechanics-based Constitutive Model of Granular Assemblies with Force-Chain Buckling Mechanism, EMI2010: Annual conference of Engineering Mechanics Institute, ASCE., 2010.8.9, Univ. of Southern California, USA.

(23) T. Matsushima, Shear band formation due to the degradation of granular structure, WCCM2010 (9th World Congress on Computational Mechanics), 2010.7.19, Sydney Convention and Exhibition Centre, Australia

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松島 亘志 (MATSUSHIMA Takashi)  
筑波大学・システム情報系・准教授  
研究者番号: 60251625

### (2) 研究分担者

佐伯 和人 (SAIKI Kazuto)  
大阪大学・理学研究科・准教授  
研究者番号: 50292363  
大竹 真紀子 (OHTAKE Makiko)  
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・  
宇宙科学研究本部・助教  
研究者番号: 30373442

### (3) 連携研究者

土山 明 (TSUCHIYAMA Akira)  
京都大学・理学研究科・教授  
研究者番号: 90180017