

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 26 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24244088

研究課題名(和文) 大気のない天体表面で何が起きているか：イトカワ試料詳細分析と宇宙風化研究の新展開

研究課題名(英文) Reaction on the surface of air-less bodies: Detailed analyses of Itokawa grains and new progress of space weathering study

研究代表者

野口 高明 (Noguchi, Takaaki)

九州大学・基幹教育院・教授

研究者番号：40222195

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,700,000円

研究成果の概要(和文)：はやぶさ探査機が小惑星イトカワから持ち帰った粒子状の試料の最表面には、試料の内部とは違う組織・化学組成を持つ宇宙風化層が存在し、主に太陽風照射によって形成されたとされる。本研究では、この宇宙風化層の形成速度、深さごとの滞在時間、温度変化、衝撃履歴といった個々粒子の歴史を、走査電子顕微鏡観察・透過電子顕微鏡観察・希ガス同位体質量分析を組み合わせ研究した。この際、LLコンドライト隕石への模擬太陽風照射実験も行うことで、照射期間の推定を多角的に検討した。月レゴリス試料についても同様の分析を行った。さらに、小惑星リュウグウ回収試料を想定しCMコンドライト隕石への模擬太陽風照射実験も行った。

研究成果の概要(英文)： Grains recovered from Asteroid Itokawa by Hayabusa spacecraft have a thin layer (space weathering rim) on the top, which has different structure and chemical composition from those of the interior. The rims were formed mainly by solar wind irradiation. In this study, we investigated formation rates of the space weathering rims, dwell times at different depth in the regolith layer of Itokawa, and thermal and shock history of each grain by a combination of scanning and transmission electron microscopy and noble gas mass spectrometry. We also performed low-energy ion irradiation onto LL chondrites, which simulated solar wind irradiation of Itokawa. These experiments also served to estimate irradiation history of each Itokawa grain. We applied the same combination of investigations to lunar regolith grains. We also performed low-energy iron irradiation onto CM chondrite, which would simulate space weathering of Asteroid Ryugu.

研究分野：鉱物学

キーワード：イトカワ 宇宙風化 透過電子顕微鏡 希ガス同位体質量分析 月 照射実験

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

JAXA のはやぶさ探査機が探査及び試料を持ち帰った小惑星イトカワは、太陽光の反射スペクトルの形状による分類で S 型に属する。イトカワは地球と交差する軌道を持つ近地球型小惑星のひとつであり、その多くは S 型小惑星に属する。この意味で、イトカワは近地球型小惑星の典型例であるといえる。地球に衝突してくる隕石のほとんどは小惑星起源である。その 80% 以上は普通コンドライト隕石という種類の隕石であり、地球に衝突する以前の軌道が明らかになっている隕石はいくつか存在するが、それらはみな近地球型小惑星と同様な軌道を持っている。これらのことを考慮すると、S 型小惑星から普通コンドライト隕石がもたらされたと予想される。

ところが、普通コンドライト隕石の反射スペクトルは S 型小惑星とは異なっている。この原因については 1980 年代から議論があった。1990 年代末からは、鉱物や隕石へのレーザ照射によるスペクトル変化の研究によって、微小隕石の衝突によってナノメートルサイズの金属鉄 (nanophase Fe<sup>0</sup>) が形成され、それがスペクトル形状を変化させるのではないかといわれるようになった (例 Hapke et al., 1991?; Sasaki et al., 2001)。一方で、低エネルギー (~1 keV/amu) のプラズマ流である太陽風の照射がスペクトルを変化させているという天文学的および実験的研究もあった (Vernazza et al., 2009; Loeffler et al., 2009)。これら、微小隕石の衝突、太陽風の照射、あるいは、太陽風よりもずっと高エネルギーの粒子線である太陽宇宙線の照射や銀河宇宙線の照射などによって、大気のない天体表面物質が変質することで反射スペクトル形状の変化をおこす現象のことを宇宙風化とよぶ。

小惑星イトカワの回収試料の研究でもっとも重要なことは、イトカワの物質が普通コンドライトと同様の物質であることを示すこと、イトカワ試料が宇宙風化の影響を示すことである。本研究の研究代表者と研究分担者の木村および岡崎は、イトカワ試料の初期分析メンバーとして分析を行った。持ち帰られた微小試料 (以下、イトカワ粒子とよぶ) の鉱物学・岩石学的な研究は、それらが普通コンドライト隕石の一種である、LL5-6 コンドライトと同様の物質であることを明らかにした (Nakamura et al., 2011)。そして、本研究の研究代表者らの研究によって、イトカワ粒子の最表面 (約 60nm 以下の厚さ) は内部と異なる構造・化学組成を持ち、その組織の特徴はイトカワの宇宙風化作用の主な要因が太陽風照射であることと示唆していた (Noguchi et al., 2011)。その後のイトカワ粒子の研究により、この主張は基本的には認められるに至

った (例 Berger et al., 2014; Matsumoto et al., 2015)。

### 2. 研究の目的

次の研究段階としては、小惑星イトカワにおける宇宙風化の機構の解明と宇宙風化の進行はどのような速さで進むか明らかにすることである。本研究の一番重要な目的はこれら 2 点である。また、これらの結果を月試料と比較することは、はやぶさ 2 探査機の探査対象天体である小惑星リュウグウにおける宇宙風化について検討することも目的とした。

### 3. 研究の方法

宇宙風化の速度を推定するための新たな分析方法の開発が必要である。Noguchi et al. (2011) によって、イトカワでの宇宙風化の主要因は太陽風照射にあることが示唆されたことにもとづいて、本研究では、直径数十  $\mu\text{m}$  程度と小さなイトカワ粒子それぞれから、複数の方法で太陽風照射の影響を調べる方法を開発する必要があった。我々は、ガリウムイオンを使って TEM 観察用の薄膜 (~100 nm 厚) を切り出す集束イオンビーム加工観察装置 (Focused ion beam - scanning electron microscope: FIB-SEM) を使い、TEM 観察試料を各イトカワ粒子から切り出し、さらに、切り出した残りの試料を使って、太陽風起源の希ガスのインプラネーションについての情報を得る試料加工から希ガス同位体質量分析にいたる手順を開発した。開発は野口と研究分担者の九州大学・岡崎隆司博士との密接な協力によって成し遂げることができた。そして、この方法で TEM 試料を作成しても、残った試料の希ガス同位体質量分析には影響が出ないことを、微小な地球外物質である宇宙塵 (正確には、南極微隕石) の研究を行い確認した (Okazaki et al., 2015)。その上で、イトカワ粒子の分析を行っている。

この分析方法を第 2 回国際公募分析で配付された試料に対して適用した際に、太陽風照射だけでなく太陽宇宙線 (おもに太陽フレアあるいはコロナ質量放出に伴うより高いエネルギーを持つ) の解析も必要であることに気付いた。太陽風の低エネルギー粒子線とこれらの両方を比較することで、イトカワ粒子のレゴリス層内での深さごとの滞在期間の履歴や、イトカワ粒子が加熱や衝撃を受けたかを検討するのに重要と考えられるからである。特に、高エネルギー粒子線によって形成された鉱物中の線状の傷 (Solar flare track と呼ばれる) の数密度と共にその長さを測定することは加熱の影響を検討するのに重要である。一般的な加速電圧 200kV の TEM では試料厚さは 100 nm より多少厚い程度であるが、Solar flare track は数百 nm から数  $\mu\text{m}$  の長さを持つ。このため、こうした薄い試料では、Solar

flare trackの長さ分布を含めた全容を理解することは難しい。そこで、厚さ1-2  $\mu\text{m}$ の試料に含まれるSolar flare trackを観察するために、1 MeV以上の加速電圧を持つ超高压電子顕微鏡(HVEM)を用いることにした。地球惑星科学でHVEMが使われていたのは1980年頃までであるため、現代のHVEMを使ってSolar flare trackを観察できる条件を探るところから行う必要があった。九州大学のHVEMには厚い試料を観察する際に問題となる非弾性散乱された電子線をカットすることのできるエネルギーフィルタが組み込まれており、厚い試料に含まれるかすかなSolar flare trackを可視化するのに適した装置である。月レゴリス粒子を使い、試料厚さ0.8から2.0  $\mu\text{m}$ の試料を加速電圧0.7から1.3 MeVに変化させて観察し、最適な観察条件を見いだすことができた。この条件を使って、第3回目以降の国際公募によって配布されたイトカワ粒子のSolar flare trackを観察している。

イトカワ粒子の宇宙風化層の形成機構と形成期間の推定には、LL5に属するTuxtuac隕石に太陽風を模擬した(1 keV/amu)の $\text{H}^+$ と $\text{He}^+$ を照射した。低エネルギーイオン照射は、米国ヴァージニア大学材料科学科のC. A. Dukes氏に行っていた。照射試料の鉱物の構造・組織変化をTEMを用いて調べた。

小惑星イトカワと比べて宇宙風化の程度および過程はるかに複雑と考えられる月のレゴリス(未固結の表面物質)試料についても、SEM, TEM, 希ガス同位体質量分析を組み合わせた研究を行っている。月レゴリス試料の研究を長年にわたって行ってきた名古屋大学(科研費申請時には広島大学)の日高教授に研究分担者として加わっていただき研究を進めている。

はやぶさ2探査天体であるリュウグウはC型小惑星に属する。C型小惑星は宇宙風化によって長波長側の反射能が低下すると考えられており、その原因は明らかになっていない。リュウグウを構成する物質の候補として考えられているCM炭素質コンドライト隕石のひとつであるMurchison隕石に太陽風を模擬した低エネルギー $\text{He}^+$ イオンを照射し、反射スペクトル測定, TEM観察, 炭素のX線吸収端微細構造(X-ray absorption near-edge structure: XANES)スペクトル分析を行った。この試料の照射実験は、日本原子力研究開発機構の大澤博士と芹澤博士によってなされたものである。また、XANES分析は広島大学・藪田准教授によって米国立ローレンスバークレー研究所のALS放射光実験施設で行って頂いた。現在、より詳細な反射スペクトルの測定と有機物汚染の影響を減らしたXANES分析を再度行うため、追加の照射実験を行う準備中である。この研究によって、C型小惑星

での太陽風照射による宇宙風化過程を検討する。

#### 4. 研究成果

##### (1) イトカワ粒子に見られる宇宙風化組織の多様性

Noguchi et al. (2011)では、イトカワ粒子表面に宇宙風化層があることを報告した。初期分析以降も観察を進めて、宇宙風化層にどのような多様性があるか調べた。その結果、観察した試料では3種類の異なる組織を持つ宇宙風化層があることを本研究では示した(図1)。

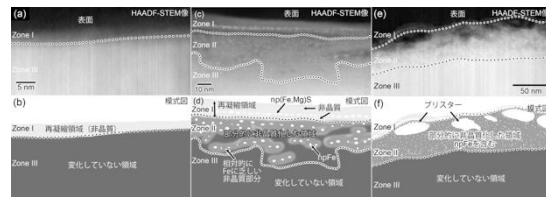


図1 イトカワ粒子に見出された3種類の宇宙風化層

なんらかの宇宙風化層は(S)TEM観察を行った12粒子の約半数に観察された。もっともかすかな宇宙風化層は、厚さ数nmの層で、その直下の鉱物には含まれない元素(K, Cl, Sなど)を含む。太陽風によってスパッタリングされた物質が再凝縮したか、微小隕石の衝突によって蒸発した元素が再凝縮することで形成されたと考えられることから、再凝縮リムと名付けた。2番目は、Noguchi et al. (2011)で見いだした宇宙風化層である。最表面の5-15 nmがその直下の鉱物には含まれない元素(K, Cl, Sなど)を含む非晶質層であり、時にNanophase Fe-bearing sulfideを含む。その直下25-45 nmは結晶構造が部分的に壊れて非晶質化している層からなる。再凝縮層と、部分的に照射損傷を受けた層からなるため、複合リムと名付けた。3番目は、基本構造は複合リムと同じではあるが、2層構造の境界付近から発泡が起きているものである。これを発泡リムと名付けた。発泡組織は火ぶくれ状であり、核融合炉材料の照射損傷組織として知られるプリスタリングに対応するものであると推定した。(なお、日本原子力研究開発機構の材料研究部門談話会で話をさせていただき、原子炉材料の研究者もプリスタリングと判断して下さったことは研究を進める上で大いに支えになった。)組織的には、核融合炉の磁場によってプラズマが閉じ込められているところから漏れ出した低エネルギー(~4 keV) Heイオンによる核融合炉内壁の損傷組織が最も似た組織を持っていた。このエネルギーは正に太陽風のHeイオンのエネルギーと同じであることを考慮すると、イトカワ粒子表面の発泡リムは、多量にインプラントされた太陽風が逆拡散することで形成されたもの

であることが示唆された。すなわち、これら3種類に宇宙風化層の中では、もっとも長期にわたって太陽風照射を受けたものと考えられた (Noguchi et al., 2014a)。

#### (2) イトカワ粒子表面に存在するサブミクロンサイズの KCl 結晶

研究代表者らは、イトカワ粒子の初期分析を行った際に、大きさ数百 nm の複数個の KCl 結晶がイトカワ粒子の表面に存在しているものがあることを見出ししていた。この試料を第1回のイトカワ粒子国際公募研究で再度研究を行った。この結果、上記の KCl 結晶は、Na, C, O に富む非晶質物質によってコーティングされていることが判明した。組織的には、コンタミネーションに寄ることを示唆する証拠はなかった。しかし、初期分析後に JAXA における試料保管が悪く、国際公募分析で再度同一試料の貸し出しを受けた際には、KCl 結晶は潮解していた。このため、この KCl 結晶がイトカワ上で既に存在していたかどうかについては決定的なことはいえなかった (Noguchi et al., 2014b)。なお、他のイトカワ粒子においてもサブミクロンの NaCl 結晶が宇宙風化層内に存在することが報告された (Keller and Berger, 2017)。

#### (3) 太陽風・太陽宇宙線照射履歴を含む個々のイトカワ粒子の履歴の検討

研究手法の章において、第1回のイトカワ粒子国際公募分析では、同一のイトカワ粒子で TEM と希ガス同位体質量分析を行うことが、実績のない手法であるため認められなかったことを述べた。このため、開発した手法を使って論文 (Okazaki et al., 2015) を出した後に、第2回の公募研究に申請を行い、4粒の試料が配付された。それらを開発した手法で分析を行った。その結果は、JAXA 宇宙科学研究所で開催された Hayabusa 2015 Symposium で発表した。

宇宙風化層の厚さは約 60nm までであり、また、Solar flare track の数密度と、粒子から放出される太陽風起源の  $^4\text{He}$  と  $^{20}\text{Ne}$  の総量の間には大まかには正の相関があることを見出した。同様に、Solar flare track の数密度と見かけの平均長の間にも正の相関がある結果が得られた。

しかし、研究手法の章で述べたように、厚さ 100 nm の試料で長さ数百 nm 以上ある Solar flare track の見かけの平均長を議論するには問題がある。この問題を検討するためと、分析数を増やすために、第2回の公募研究に申請を行い、5粒の試料が配付された。しかし、試料輸送時のトラブルによって2粒が失われ、3粒子の研究しか行うことができなかった。また、試料サイズは第2回公募研究よりもかなり小さかったため、TEM の観察は不十分なものとなった。そこで、平均径 100  $\mu\text{m}$  を越える大き

な粒子を第4回公募研究で5個申請し、配布が許可された。現在、本年度夏に分析をすべく準備を進めているところである。これら12個の分析結果をまとめて年内に論文を作成し、遅くとも年度内に投稿する予定である。

#### (4) Tuxtuac LL5 コンドライト隕石への模擬太陽風照射実験にもとづくイトカワ粒子宇宙風化層の形成期間・形成機構の推定

イトカワ粒子に観察された宇宙風化層の厚さは約 60 nm までであったが、これがどの位の期間で形成されるかを推定するために、Tuxtuac LL5 コンドライト隕石への模擬太陽風照射実験を行った。鏡面研磨した隕石の薄板(約  $14 \times 10 \times 2$  mm)の3カ所に、小惑星イトカワが 10, 100, 1000 年間太陽風照射を受けたのに相当するフルエンスの  $\text{H}^+$  と  $\text{He}^+$  イオンを照射した。現在、研究結果を論文にまとめているところである。

#### (5) 太陽風・太陽宇宙線照射履歴を含む個々の月レゴリス粒子の履歴の検討

(3) の分析手法を月レゴリス粒子にも応用することを試みている。しかし、月のレゴリス層中の物質はイトカワ試料と比較してはるかに複雑な履歴を経ているため、まずは、レゴリス粒子表面の微細組織を、SEM を使って高倍率で観察し、どのような組織が見られるかを検討している。その結果、旧ソ連のルナ 16 号の持ち帰った月レゴリス粒子表面に Assonov et al. (1998) が見出したプリスタリングがアポロ 11 から 17 号の持ち帰った月レゴリス粒子表面にも普遍的に存在することが確認された。その他にも特徴的な組織が観察されており、イトカワ粒子の表面に観察される組織と共通がかなりあることが分かってきた。アポロ 15 号試料については、SEM, TEM, 希ガス同位体質量分析を行った。各粒子の履歴が複雑であることから、さらに分析を行う必要がある。

#### (6) Murchison CM2 コンドライト隕石への模擬太陽風照射実験にもとづくイトカワ粒子宇宙風化層の形成期間・形成機構の推定

はやぶさ 2 の探査対象天体である C 型小惑星のリユウグウにおける太陽風照射による宇宙風化はおきていると予想される。C 型小惑星の宇宙風化を模擬するレーザー照射実験(微小隕石の衝突加熱を模擬)も低エネルギーイオン照射(太陽風を模擬)も行われてはいるが、何がスペクトル形状を変化させているのかという点も明確にはなっていない。我々は Murchison CM2 コンドライトに  $\text{He}^+$  イオンを照射し、表面の構造変化を TEM で観察・分析を行っている。イトカワに相当する物質である LL コンドライトの場合と異なり、Fe に富む含水鉱物を主要な

鉱物として含むため、照射によるスパッタリングの再凝縮の様子は大きく異なることが分かってきた。今年度はTEMやXANESを使って照射による変化の詳細を明らかにする予定である。さらには、宇宙風化による小惑星のスペクトル変化の定式化に使われるHapkeの式をCMコンドライトに適した形に修正し、宇宙風化によるスペクトル形状の変化を予測できるようにしたいと考えている。

#### 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53件)

Okazaki, R., Noguchi, T., Tsujimoto, S., Tobimatsu, Y., Nakamura, T., Ebihara, M., Ito, S., Nagahara, H., Tachibana, S., Terada, K., and Yabuta, H. (2015) Mineralogy and noble gas isotopes of micrometeorites collected from Antarctic snow. *Earth Planet Space* 67, 90-106. doi 10.1186/s40623-015-0261-8 査読有

Matsumoto, T., Tsuchiyama, A., Miyake, A., Noguchi, T., Nakamura, M., Uesugi, K., Takeuchi, A., Suzuki, Y., and Nakano, T. (2015) Surface and internal structures of a space-weathered rim of an Itokawa regolith particle. *Icarus* 257, 230-238.

doi:10.1016/j.icarus.2015.05.001 査読有  
Noguchi, T., Bridges, J. C., Hicks, L. J., Gurman, S. J., Kimura, M., Hashimoto T., Konno, M., Bradley, J. P., Okazaki, R., Uesugi, M., Yada, T., Karouji, Y., Abe, M., Okada, T., Mitsunari, T., Nakamura, T., Kagi, H. (2014) Mineralogy of four Itokawa particles collected from the first touchdown site. *Earth Planet Space* 66, 124-134. 査読有

Noguchi, T., Kimura, M., Hashimoto, T., Konno, M., Nakamura, T., Zolensky, M. E., Tsuchiyama, A., Matsumoto, T., Matsuno, J., Okazaki, R., Uesugi, M., Karouji, Y., Yada, T., Ishibashi, Y., Shirai, K., Abe, M., and Okada, T. (2014) Sylvite and halite on particles recovered from 25143 Itokawa: A preliminary report. *Meteoritics Planet. Sci.* 49, 1305-1314. doi: 10.1111/maps.12333. 査読有

Noguchi, T., Kimura, M., Hashimoto, T., Konno, M., Nakamura, T., Zolensky, M. E., Okazaki, R., Tanaka, M.,

Tsuchiyama, A., Nakato, A., Ogami, T., Ishida, H., Sagae, R., Tsujimoto, S., Matsumoto, T., Matsuno, J., Fujimura, A., Abe, M., Yada, T., Mukai, T., Ueno, M., Okada, T., Shirai, K., Ishibashi, Y. (2014) Space weathered rims found on the surfaces of the Itokawa dust particles. *Meteoritics Planet. Sci.* 49: 185-214. 査読有

Nakamura, T., Nakato, A., Ishida, H., Wakita, S., Noguchi, T., Zolensky, M. E., Tanaka, M., Kimura, M., Tsuchiyama, A., Ogami, T., Hashimoto, T., Konno, M., Uesugi, M., Yada, T., Shirai, K., Fujimura, A., Okazaki, R., Sandford, S. A., Ishibashi, Y., Abe, M., Okada, T., Ueno, M., and Kawaguchi, J. (2014) Mineral chemistry of MUSES-C Regio inferred from analysis of dust particles collected from the first- and second-touchdown sites on asteroid Itokawa. *Meteoritics Planet. Sci.*, 49, 215-227. 査読有

Nakashima, D., Kita, N. T., Ushikubo, T., Noguchi, T., Nakamura, T., and Valley, J. W. (2013) Oxygen three-isotope ratios of silicate particles returned from asteroid Itokawa by the Hayabusa spacecraft: A strong link with equilibrated LL chondrites. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 379, 127-136. 査読有

[学会発表] (計 13 件)

Noguchi, T. Surface process on airless solar system bodies preserved on samples recovered by Hayabusa 2. Hayabusa 2016 Symposium, National Institute for Japanese Language and Linguistics, Tachikawa, Tokyo, 2016/11/30. (Invited)

野口高明, C. Dukes 模擬太陽風を照射したTuxtuac LL5隕石の表面組織. 日本鉱物科学会2016年年会, 金沢大学理学部, 石川県・金沢市. 2016/9/23.

Noguchi, T., Okazaki R., Mitsunari T., Tobimatsu Y., Uesugi M., Yada T., Karouji Y., Hidaka H., and Kimura M. Relationships among morphology, microstructure, and noble gas signatures of four Itokawa grains. Goldschmidt Conference 2016, Pacifico Yokohama, Yokohama, Kanagawa, 2016/6/30.

Noguchi, T., Okazaki R., Mitsunari T., Tobimatsu Y., Uesugi M., Yada T., Karouji Y., Hidaka H., and Kimura M. Relationships between morphology, mineralogy, and noble gas isotopic

signatures of four Itokawa grains.  
Hayabusa 2015 Symposium, JAXA/ISAS,  
Sagamihara, Kanagawa, 2015/11/20.  
(Invited)

野口高明 はやぶさ探査機と小惑星イトカワ：小惑星イトカワの粒子から分かったこと。物理教育学会 2015 年大会，九州大学伊都キャンパス，福岡県・福岡市。2015/8/8

野口高明，岡崎隆司，光成拓也，飛松優，上根真之，矢田達，唐牛謙，日高洋，木村真 イトカワ試料の形態的特徴と希ガス同位体組成との関係。地球惑星科学連合 2015 年大会，幕張メッセ国際会議場，千葉県・千葉市。2015/5/24

野口高明 はやぶさ試料の電子顕微鏡学。日本顕微鏡学会，幕張メッセ，千葉県・千葉市，2014/05/13。（招待講演）

野口高明 イトカワ試料ハンドリングと TEM/EDS 観察・分析における雰囲気遮断。第 28 回分析電子顕微鏡討論会，幕張メッセ，千葉県・千葉市，2012/9/1（招待講演）

野口高明 地球惑星科学連合大会スペシャルレクチャー：イトカワ試料からはじまる次世代の惑星物質科学。地球惑星科学連合 2012 年大会，幕張メッセ，千葉県・千葉市。2012/05/24（招待講演）

Noguchi, T. Space weathering identified in Itokawa samples returned by the Hayabusa mission. Royal Astronomical Society Specialist Discussion Meeting, London, UK, May 10, 2012. (Invited)

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

出願状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://www.artsci.kyushu-u.ac.jp/~tnoguchi/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

野口 高明 (NOGUCHI, Takaaki)  
九州大学・基幹教育院・教授  
研究者番号：40222195

### (2) 研究分担者

岡崎 隆司 (OKAZAKI, Ryuji)  
九州大学・理学研究院・助教  
研究者番号：40372750

木村 真 (KIMURA, Makoto)  
茨城大学・理学部・教授  
研究者番号：20142226

日高 洋 (HIDAKA, Hiroshi)  
名古屋大学・環境学研究科・教授  
研究者番号：10208770

### (3) 連携研究者

大澤 崇人 (OSAWA, Takahito)  
日本原子力研究開発機構・原子力科学部門・研究副主幹  
研究者番号：70414589

芹澤 弘幸 (SERIZAWA, Hiroyuki)  
日本原子力研究開発機構・原子力科学部門・研究員  
研究者番号：90355008

藪田 ひかる (YABUTA, Hikaru)  
広島大学・理学研究科・准教授  
研究者番号：30530844

### (4) 研究協力者

キャサリン・A・デュークス (DUKES, Catherine A.)  
University of Virginia・Department of Materials Science & Engineering・Research Scientist

ジョン・P・ブラッドリー (BRADLEY, John P.)  
University of Hawai'i at Manoa・Hawai'i institute of Geophysics and Planetology・Researcher

ジョン・C・ブリッジス (BRIDGES, John C.)  
University of Leicester・Department of Physics and Astronomy・Professor