

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 23 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25247091

研究課題名(和文) 探査機リターンサンプルによる初期太陽系進化の解明

研究課題名(英文) Evolution of early solar system viewed from return sample analysis

研究代表者

中村 智樹 (Nakamura, Tomoki)

東北大学・理学研究科・教授

研究者番号：20260721

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,900,000円

研究成果の概要(和文)：探査機リターンサンプルによる初期太陽系進化の解明を目的に、1. 小惑星探査機はやぶさが回収した小惑星イトカワの微粒子試料を分析し、イトカワが経験した強い衝撃変成作用を伴うS型小惑星の形成進化過程を検証した、2. 小惑星探査機はやぶさ2が向かうC型小惑星リュウグウの反射スペクトルを解析するために、始原炭素質隕石に対して大気遮断真空加熱実験を行い、地球大気中の水分の影響を完全に排除した加熱によるスペクトルの変化、水分量変化を求めることに成功した。

研究成果の概要(英文)：In order to clarify the evolution of early solar system, we performed (1) analysis of small dust particles returned by Hayabusa mission from S-type asteroid Itokawa, which showed that Itokawa experienced very strong impact that disrupted parent asteroid of Itokawa, (2) heating experiments of hydrous carbonaceous chondrites in order to understand spectral changes during heating of C-type asteroids. The experiments were performed in vacuum and the heated samples were never exposed to atmosphere after heating and thus we obtained spectra that are free of atmospheric water.

研究分野：惑星科学

キーワード：小惑星探査 始原隕石 S型小惑星 サンプルリターン C型小惑星

1. 研究開始当初の背景

太陽系の小天体には太陽系初期の天体形成のプロセスや天体内部での物質進化過程の記録が残されている。太陽系誕生と同時に形成され、現在も大きな変化を遂げずに残っている小惑星や彗星には、太陽系初期の物質進化の情報が残されている。このような天体の一部が始原隕石や惑星間塵として地球に飛来し回収され、実験室で分析され、太陽系の初期進化過程の鶏鳴に貢献してきた。一方、地球で回収される隕石や惑星間塵は、どの小惑星や彗星から飛来してきているか不明であった。したがって、隕石研究では一つの小惑星、彗星の天体スケールでの形成プロセスや物質進化の過程を知ることができない。一方、太陽系探査機が小惑星や彗星に近接し、分光観測を行いシャン者スペクトルのグローバルマッピングを行うことで天体スケールでの物質分布を明らかにし、その後に着陸して物質回収を行うことが可能になった。

2006年に彗星探査機スターダストが短周期彗星 81P/ビルド2の微粒子を地球に持ち帰り、地上での詳細分析により彗星の構成物質が明らかになった (Brownlee et al. 2006; Zolensky et al. 2006)。一方、小惑星の方では、2003年に打ち上げられた小惑星探査機はやぶさが2005年にS型小惑星イトカワに到着し、2回の着陸を行い多数の微粒子を回収することに成功した。微粒子の初期分析から、小惑星イトカワの形成進化過程が明らかになった。1. 初期太陽系において半径20 km以上のS型小惑星として形成され、その後短寿命元素崩壊熱により天体内部の温度が上昇した、2. 天体内部は約800 Kの平衡温度に到達し、その後ゆっくりと冷却された、3. 大きな衝突が起こり、天体が破壊された、4. 破壊され生成した破片の一部が集まり、現在のサイズのラブルパイル型小惑星が形成された。

2. 研究の目的

本研究では、初期分析時に行われた分析結果の解析を継続し、また、初期分析後に行われたイトカワ微粒子公募分析により配分され

たサンプルの分析、解析を行うことで、上記したイトカワの形成史を精密化することを目的とした。

3. 研究の方法

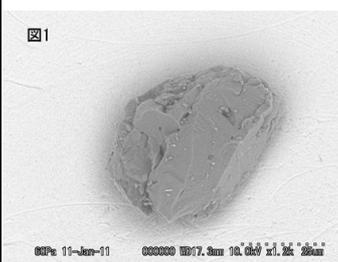
初期分析、および公募分析を合わせて約60試料の分析を行った。放射光X線回折実験、により構成鉱物種を特定したのちに、走査型電子顕微鏡 (FE-SEM)、エレクトロンマイクロプローブ (FE-EPMA)、透過型電子顕微鏡 (TEM) を用いて詳細組織観察や化学組成分析を行った。

4. 研究成果

分析した約60試料のうち6試料 (個数割合10%) から強い衝撃の証拠を残す組織を見出した。そのうち代表的な2種類の粒子の分析結果と考察を以下に示す。

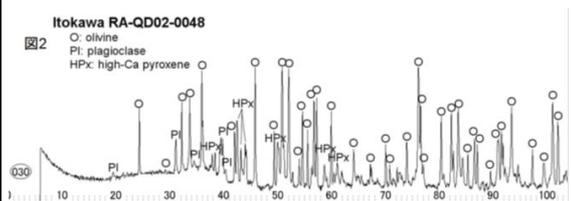
2.1. RA-QD02-0048

非破壊分析：この微粒子は約50ミクロン程度

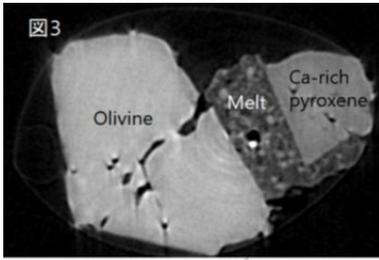


の平たい粗粒な粒子である。空隙は全く見当たらない (図1)。放射光X線回折実験の結果、こ

の粒子の主要構成鉱物は Olivine, Ca-rich pyroxene, plagioclase であった (図2)。

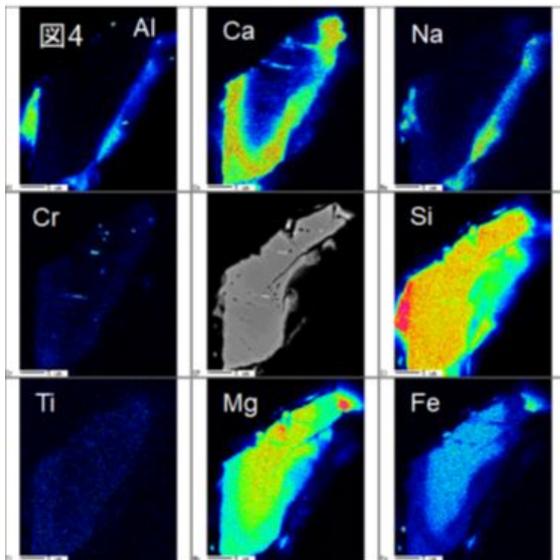


X線CTの結果、鉱物種別の割合は Olivine = 68.9vol%, Ca-rich pyroxene = 10.3vol%, Plagioclase = 18.2vol%, Ca-poor pyroxene = 2.5vol%, Troilite = 0.1vol%であった。CTによる3次元解析の結果、粗粒な olivine と Ca-rich pyroxene に挟まれるようにして、発泡溶融したメルトが確認された (図3)。このメルトは接している olivine, Ca-rich

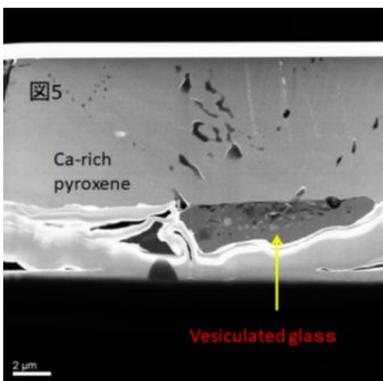


pyroxene と反応していないことから、他所で溶融したメルトが両

鉱物の隙間に入り込んできたと考えられる。研磨面分析：Ca-rich pyroxene が表面に出るように研磨をして、断面を FE-EPMA で観察、分析をした。その結果、この Ca-rich pyroxene は非常に大きな Ca ゾーニング (Wo10-50) を示すことが分かった(図4)。中心が Ca に乏しく Mg, Fe に富み、結晶外側にかけて Ca, Ti に富む傾向が見られた。Ca の濃度に関わらず、Mg/Fe 比はほぼ一定であった。その後、FIB を用いて



Ca-rich pyroxene とメルトを含む部分の超薄切片を作成し TEM で観察を行った。その結果、pyroxene の部分には空隙が連なるように分布していた(図5)。また、溶融部分はガラスと troilite の微粒子、および泡状空隙が多数観察された(図5)。また、pyroxene とメルトはシャープな境で接していた(図5)。

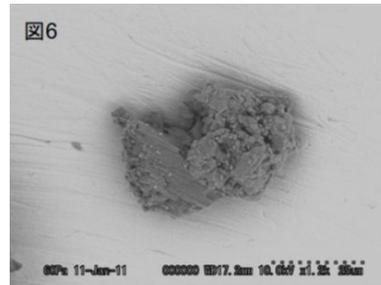


以上の観察事実から、この粒子は複雑なプロセスを経て形成されたと考えられる。

大規模で強い衝撃を受けることで粒子は部分溶融し、Ca-poor, Mg-rich な pyroxene から Ca-rich pyroxene が成長した。その後再度衝撃を受けることで、斜長石成分と FeS が溶融したメルトがこの粒子が存在していた部分に侵入してきて脈状の衝撃脈を形成した。この脈は温度の上がない Olivine, Ca-rich pyroxene に接することで熱を奪われ、急速に冷却したと考えられる。その結果、衝撃脈と脈と接する Olivine, pyroxene の境界はシャープなままであり、また衝撃脈中には急冷されたために発泡した状態がクエンチして残った。もし Ca-rich pyroxene を溶かした衝撃と衝撃脈を作った衝撃が同じであれば、Ca-rich pyroxene と衝撃脈がこのようにシャープな境界で接するとは考えにくい。したがって、この粒子は少なくとも複数回の衝撃を経て形成されたと考えられる。

2.2 . RA-QD02-0060

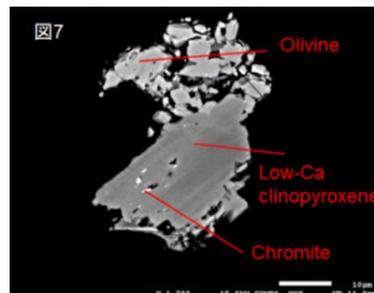
非破壊分析：粒子全体は 70 ミクロン程度で



あるが、この粒子は2つのサブ粒子が合体してできている(図6)。片方

は細粒で空隙率が高いが、他方は粗粒でクリベージが発達していることから pyroxene であると推定できる。放射光 X 線回折実験の結果、Olivine, Ca-poor clinopyroxene が主要構成鉱物であることが分かった。放射光 X 線 CT 分析の結果、Olivine = 29.6vol%, Ca-poor pyroxene = 54.4vol%, plagioclase (or glass) = 12.71vol%, Ca-rich pyroxene = 3.2vol% であることが分かった。

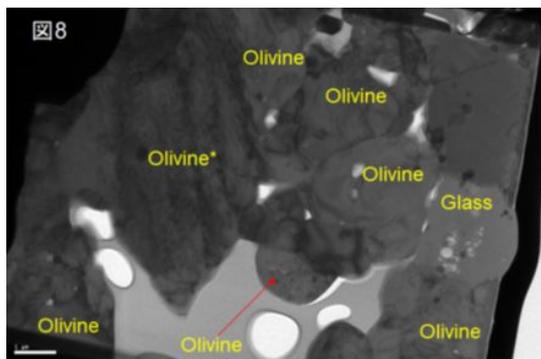
研磨面分析：Olivine と Pyroxene の両方が断面に出るように研磨をして(図7) FE-EPMA



で観察、分析を行った。その結果、Ca-poor pyroxene は線状の

Mg-Fe ザーニング(En10-20)を示した。一方、Olivine は細粒(10 μm 以下)で粒子間にガラス物質が存在し、細粒 Olivine を接着していた。Olivine の Fe/Mg 比(Fa~26)は多くのイトカワ微粒子のそれと近いが、少し Mg に富む傾向が見られた。一方 Pyroxene の Fe/Mg 比は他の粒子のそれよりも明らかに低かった。これら Olivine, Pyroxene の化学組成の傾向は、両者ともに天体内部での熱変成による化学平衡状態に達していないことを示唆する。したがって、この粒子の構成鉱物は破壊前のイトカワ母天体の表層付近にあったと考えられる。

TEM による観察の結果、細粒の Olivine は粒子同士が直接接着している場合と、溶融したガラスを挟んで接着している場合があることが分かった(図8)。Olivine 粒子は衝撃変形による転位が発生していたが、丸い形の Olivine は転位密度が低い傾向があった。また、Olivine 粒間には発砲したガラスが観測された。



以上の観察により、小惑星表面における衝突現象によるレゴリス粉体の物質変化を詳しく知ることができた。隕石観察からは得ることができない天体表面における微粒子同士の接着のメカニズムを理解することができた。1. 非溶融の粒子間に斜長石成分のメルトが入り込むことにより、接着剤の役割を果たすこと、2. Olivine どうしは衝突後に加熱シンタリングによっても接着できること、3. これらの粒子接着は短時間に起こり、ガラス部分は発砲した状態で急冷されていること、などが判明した。一方、天体スケールでの衝突の影響は粗粒な結晶の内部にまで及び、多くの隕石に見られるような衝突変成による鉱物の再結晶化、元素の再分布、などが観察された。イトカワ微粒子の特徴は、こ

のような隕石にも観察される大きな衝突現象と同時に天体表層で定常的に起こっている小規模な衝突現象の証拠も残っているという点である。今後、微小スケールでの衝突で溶融した Olivine 粒子境界の斜長石ガラス部分(~1 μm 程度のサイズ)の年代決定がナノシムスを用いた Al-Mg 法で可能になれば、小惑星表面での小規模、大規模衝突現象によるレゴリス進化のプロセスを時間スケールとともに精密化できると考えられる。

(はやぶさ2に関連する研究成果は現在投稿論文を制作中であるため、本科費の報告書にその成果を公表するのは差し控える。成果の概略は国際隕石学会2017で報告済み)

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13件)

Matsumoto, T., Tsuchiyama, A., Uesugi, K., Nakano, T., Uesugi, M., Matsuno, J., Nagano, T., Shimada, A., Takeuchi, A., Suzuki, Y., Nakamura, T., Nakamura, M., Gucsik, A., Nagaki, K., Sakaiya, T., Kondo T. (2016) Nanomorphology of Itokawa regolith particles: Application to space-weathering processes affecting the Itokawa asteroid, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **187**, 195-217. DOI: 10.1016/j.gca.2016.05.011 (査読有)

Ebihara M., Shirai N., Sekimoto S., Nakamura T., Tsuchiyama A., Matsuno J., Matsumoto T., Abe M., Fujimura A., Mukai T., Uesugi M., and Yada T. (2015) Chemical Composition of tiny grains recovered from an asteroid Itokawa: an INAA study. *Meteoritics and Planetary Science* **50**, 243-254. Doi: 10.1111/maps. 12418 (査読有)

Vernazza, P., Zanda, B., Nakamura, T., Scott, E., Russell, S. (2015) The formation and evolution of ordinary chondrite parent bodies, In Asteroids IV (P. Michel et al., eds.), pp. 617-634. Univ. of Arizona, Tucson. (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 and Planetary Science* **49**, 215-227. (査読有)
- Tanaka M., **Nakamura T.**, Noguchi T., Nakato A., Ishida H., Yada T., Shirai K., Fujimura A., Ishibashi Y., Abe M., Okada T., Ueno M., and Mukai T. (2014) Crystallization temperature determination of Itokawa particles by plagioclase thermometry with X-ray diffraction data obtained by a high-resolution synchrotron Gandolfi camera. *Meteoritics and Planetary Science* **49**, 237-244. Article first published online: 24 OCT 2013 DOI: 10.1111/maps.12215. (査読有)
- Tsuchiyama A., Uesugi M., Uesugi K., Nakano T., Noguchi R., Matsumoto T., J. Matsuno, Nagano T., Imai Y., Shimada A., Takeuchi A., Suzuki Y., **Nakamura T.**, Noguchi T., Abe M., Yada T. and Fujimura A. (2014) Three-dimensional microstructure of samples recovered from asteroid 25143 Itokawa: Comparison with LL5 and LL6 chondrite particles. *Meteoritics and Planetary Science* **49**, 172-187. Article first published online: 9 AUG 2013 DOI: 10.1111/maps.12177. (査読有)
- Nakashima D., Kita N. T., Ushikubo T., Noguchi T., **Nakamura T.**, and Valley J. W. (2014) Oxygen three-isotope ratios of silicate particles returned from asteroid Itokawa by the Hayabusa spacecraft: A strong link with equilibrated LL chondrites. *Earth and Planetary Science Letters* **379**, 127-136. (査読有)
- Wakita S., **Nakamura T.**, Ikeda T. and Yurimoto H. (2014) Thermal Modeling for a Parent Body of Itokawa. *Meteoritics and Planetary Science* **49**, 228-236. Article first published online: 2 AUG 2013 DOI: 10.1111/maps.12174. (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., and Ishibashi Y. (2014) Space weathered rims found on the surfaces of the Itokawa dust particles. *Meteoritics and Planetary Science* **49**, 188-214. Article first published online: 26 APR 2013 DOI: 10.1111/maps.12111. (査読有)
- Yada T., Fujimura A., Abe M., **Nakamura T.**, Noguchi T., Okazaki R., Nagao K., Ishibashi Y., Shirai K., Zolensky M. E., Sandford S., Okada T., Uesugi M., Karouji Y., Ogawa M., Yakame S., Ueno M., Mukai T., Yoshikawa M., and Kawaguchi J. (2014) Hayabusa return sample curation in the Planetary Material Sample Curation Facility of JAXA. *Meteoritics and Planetary Science*, **49**, 135-153. Article first published online: 12 FEB 2013 DOI: 10.1111/maps.12027. (査読有)
- Uesugi M., Noguchi R., Matsumoto T., Matsuno J., Nagano T., Tsuchiyama A., Harada S., Yokoyama K., Yodo Y., Takeda N., Yada T., Yakame S., Karouji Y., Ishibashi Y., Abe M., Okada T., Fujimura A., Ebihara M., Kitajima K., Nagao K., **Nakamura T.**, Naraoka H., Noguchi T., Okazaki R., Yurimoto H. (2014) Investigation of cutting methods for small samples of Hayabusa and future sample return missions. *Meteoritics and Planetary Science* **49**, 1186-1201. (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: Salts on Itokawa? *Meteoritics and Planetary Science* **49**, 1305-1314. (査読有)

Noguchi T., Bridges C. J., Hicks J. L., Gurman J. S., Kimura M., Hashimoto T., Konno M., Bradley P. J., 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, Planets and Space* **66**, 124. (DOI: 10.1186/1880-5981-66-124). (査読有)

中嶋 大輔 (NAKASHIMA, Daisuke)
東北大学・大学院理学研究科・講師
研究者番号 : 90734757

[学会発表] (計 3 件)

Mogi K., Yamashita S., **Nakamura T.**, Matsuoka M., Okumura S., Furukawa Y., Dehydration process of experimentally heated Murchison without any effects of adsorbed and rehydrated water, 80th Annual Meeting of The Meteoritical Society, Santa Fe, USA. July 23-28th, 2017.

Nakamura T., Mineralogical and compositional analysis of Itokawa dust particles returned by the Hayabusa mission, ISSI Workshop on Cosmic Dust from the Lab to the Stars, Bern, Switzerland, 31 Oct-4 Nov, 2016.

Nakamura, T., Jourdan, F., Kishi, Y., Oike, R., Timms N, Bland P., Mineralogy and mineral chemistry of a newly identified shock-melted Itokawa particle RB-CV-0082., 2016 Hayabusa symposium., Tokyo, Japan., November 29–December 2, 2016.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

6 . 研究組織

(1) 中村 智樹 (NAKAMURA, Tomoki)
東北大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号 : 20260721

(2) 連携研究者