

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2010～2014

課題番号：22224010

研究課題名(和文) 初期太陽系における鉱物-水-有機物相互作用：惑星と生命起源物質初期進化

研究課題名(英文) Interaction among minerals, water, and organic materials in the early solar system: evolution of planetary materials and precursor materials of life

研究代表者

永原 裕子 (NAGAHARA, Hiroko)

東京大学・理学系研究科・教授

研究者番号：80172550

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 166,800,000円

研究成果の概要(和文)：原始惑星系円盤進化と生命材料物質の共進化を、彗星の塵と考えられる微隕石から得られる物質科学的情報と円盤進化の物理化学モデルにより調べた。彗星を作る物質は太陽系外縁部からもたらされた氷-有機物からなる粒子と、高温で形成された鉱物粒子が混合したもので、低温においてもっとも初期に有機物の芳香族化、次に非晶質珪酸塩の水質変成、最後に鉱物の粘土鉱物化という一連の水質変成作用が明らかとなった。生命材料物質の惑星への取り込みは、原始惑星系円盤進化の初期に起きたことが示された。

研究成果の概要(英文)：Evolution of protoplanetary materials and precursor materials of life was investigated by observation of micrometeorites and physico-chemical evolutionary model of protoplanetary system. Cometary materials consisting of a mixture of ice-organic grains originated at extremely low temperature region of the solar system and mineral grains formed at high temperature have suffered a series of aqueous alteration, where organic materials changed to aromatic at first, then amorphous silicate became hydrated, and finally anhydrous minerals reacted with water to form hydrous silicates. The precursor materials of life, organics and hydrous silicates, were incorporated to small planetary bodies at the early stage of the protoplanetary disk evolution.

研究分野：地球惑星科学

キーワード：原始惑星系円盤 ガスト 無機物 有機物 水 相互作用 彗星 隕石

1. 研究開始当初の背景

太陽系初期の物質進化に関する知見の大部分は従来、隕石や惑星間塵の主たる構成物である無機鉱物から得られてきた。スターダスト探査機が取得した彗星塵に、内惑星領域で形成された高温無機物質が含まれ、太陽系での大規模物質循環が示唆されるようになった。一方、隕石中不溶性有機物の元素組成や同位体組成に関する研究は、隕石天体において、有機物が多様に化学変化を起こしたことを示し、集積物質はどのような物質で、どのようなサイズであったのかを解明することが望まれている。

分子雲から隕石母天体に至る過程において、物質がいかに進化したかを理解することは、惑星系における生命起源物質進化の理解に決定的に重要である。H, C, N, O は高い反応性をもち、低温でも化学反応を起こしうることから、鉱物-有機物-水の関与する反応がいかに進化したかを、特に原始惑星系円盤進化の中で理解する必要がある。さらに、恒星の周囲に普遍的に発見されるようになった系外惑星は、宇宙における生命素材物質進化を円盤進化との関係で普遍的に予測することの重要性を示している。原始惑星系円盤における有機物の進化は、生命進化には直接は関わらないものの、天文学から生物学までをつなぐ最先端課題の重要なリンクとなる。

2. 研究の目的

- (1) 原始惑星系円盤条件における無機-有機-水反応実験。
- (2) 母天体条件における無機-有機-水相互作用実験。
- (3) 南極雪微隕石中の鉱物・有機物相互作用の解明。
- (4) 地球・生命材料物質の形成・進化の解明。

3. 研究の方法

- (1) 円盤条件における無機-有機-水の複合粒子の加熱による変成、さらに無機触媒によるFTT反応実験をおこない、反応様式、反応速度、元素・同位体分別係数を決定する。
- (2) 微惑星の条件(数100°C以下、液体の水の存在下)水質変成実験・熱変成実験をおこない、有機物の構造、元素組成、同位体組成の変化と無機鉱物の変成の関連を調べる。
- (3) 南極の新雪に含まれる微隕石に関し、TEM, STM-XANESを用いたその場観察・構造解析, SIMSを用いたその場同位体分析と年代測定, 抽出試料に対する希ガス分析と全元素分析を系統的に実施し、隕石に集積する以前・以降におこった無機-有機相互作用の实体を解明する。
- (4) 原始惑星系円盤におけるダスト移動に

よるダストの化学変化をモデル化する。原始惑星系円盤内ダスト移動にともなう温度・圧力条件の変化に応じた物質の化学変化を組み込んだモデルの開発をおこない、惑星系形成における物質進化を予測的に論ずることを可能にする。

4. 研究成果

(1) 円盤条件における反応実験

原始惑星系円盤の全圧, H₂O分圧条件において、非晶質珪酸塩と水蒸気の反応実験をおこなった。その結果、熱力学的な安定条件にくらべ、約200度程度低い温度において、非晶質ケイ酸塩の加水、層状ケイ酸塩合成が進行することが明らかとなった。この結果、有機物合成の重要な場を提供する層状ケイ酸塩は原始惑星系円盤において容易に形成されうることを初めて示し、速度論的データの取得にも成功した。

(2) 南極雪微隕石中の鉱物・有機物相互作用

① 試料処理

日本の南極観測隊メンバーにより採取されたドームふじ周辺の新雪約200kgを、茨城大学においてクリーンブースを設置し、濾過をおこなった。濾紙に残った微小物質を実体顕微鏡で観察し、非球形の粒子約300個をさらなる観察に選別し、7個の多孔質な粒子を、その後の詳細研究の対象として選択した。その後の鉱物・有機物の詳細検討の結果、多孔質であることが、加熱程度の低さをきわめてよく反映していることが判明した。

それらの粒子を、電子顕微鏡あるいは二次イオン質量分析計により分析対象とするための、試料処理方法の開発をおこなった。本研究では無機物だけでなく有機物もその対象とすることから、従来広く用いられるエポキシ樹脂の使用の可否を評価した。その結果、有機物とエポキシ樹脂は微小程度ではあるものの化学反応をおこすことが明らかとなり、新たな試料処理方法の開発が必須となった。様々な金属を試した結果、加熱し、やや柔軟になった金箔に押しつける方法がもっとも適していることが明らかとなった。

金箔埋め込み試料をSEM-FIBにより観察し、無機物と有機物の分布状態等を観察した。その結果、もっとも原始的な物質では、約50%が空隙であり、残りの50%の部分は、ミクロン以下の無機物の間を有機物が埋めている構造であることが明らかとなった。このことは、原始惑星系円盤における微粒子合体がどのように起きたかを表し、物理モデルと物質の情報の結合にきわめて重要な情報を提供した。

電子顕微鏡、二次イオン質量分析、XANES分析の順番自体も、有機物を含む物質の場合はクリティカルであることが研究初期に判明

した。順序を変更した分析を試行し、電子線やイオン照射の影響を排除するため、XANES分析を第一におこない、その後電子顕微鏡、最後に二次イオン質量分析を行うという手順を確立し将来において惑星探査により回収される宇宙物質の分析にきわめて重要な情報を提供できることになった。

② 無機物

無機物はケイ酸塩鉱物、金属鉄、硫化鉄、炭酸塩鉱物を含み、鉱物の種類と化学的特徴から、それらを3つのグループに分類した。最初のグループは、ミクロン以下のかんらん石、Caに乏しい輝石、磁硫鉄鉱、GEMS (glass embedded with metal and sulfide; きわめて細粒の金属鉄、磁硫鉄鉱を含む非晶質珪酸塩) を含み、かんらん石、輝石はMg成分に富み、Fe成分に富む物はない。磁硫鉄鉱は単独で大きな粒子が存在するが、金属鉄は大きな粒子は存在しない。GEMSの非晶質珪酸塩はMg成分に富む。

第2のグループは、GEMS中に金属鉄が存在せず、Feに富む非晶質珪酸塩、あるいは層状ケイ酸塩鉱物を含む。その他の鉱物は、第1のグループと同じである。鉱物の組み合わせと化学組成から、GEMSが水質変成し、金属鉄が酸化され、ケイ酸塩成分に含まれるようになったことが明らかとなった。

第3のグループは、かんらん石、輝石が存在せず、全体がMgに富む層状ケイ酸塩からなる。鉱物組み合わせと化学組成から、全体が水質変成し、無水ケイ酸塩がFeに富む層状ケイ酸塩と反応して、Mgに富む層状ケイ酸塩を作ったことが明らかである。また、炭酸塩鉱物(Mg, Fe)CO₃が形成される。

化学的多様性から考え、もっとも始原的な物質は第1グループで、第2、第3のグループとなるにつれ、水質変成の進行したものと判断した。第1のグループと第2のグループのGEMSの非晶質珪酸塩の化学組成は、従来報告されていた惑星間塵(IDP)中のGEMSの化学組成のひろがりと完全に一致する。従来報告されていた著しい化学組成の広がりは、さまざまな程度の水質変成の結果をすべて含むものであることを初めて明らかにし、宇宙物質研究分野に大きなインパクトを与えた。

さらに、第2のグループと第3のグループの層状ケイ酸塩の化学組成変化は、従来隕石から報告されていた層状ケイ酸塩の化学組成のFeに富むグループとMgに富むグループの成因を明瞭に説明するものである。すなわち、水質変成程度により、金属と硫化物成分のみが水と反応することで、Feに富む層状ケイ酸塩が作られ、さらに無水鉱物が水質変成することで、岩石全体がMgに富む層状ケイ酸塩に変化するという一連の化学反応の進行度合の違いが、層状ケイ酸塩鉱物の化学組成に

反映していることが明らかとなった。

③ 有機物

第1のグループの有機物は、カルボキシル基やカルボニル基に富むものと、環状炭素を種とするものが存在する。水への溶解を考え、始原物質においては結合の末端にカルボキシル基やカルボニル基、内部に環状炭素をもつ高分子有機物が存在し、弱程度の水質変成によりカルボキシル基やカルボニル基の結合が切れ、水に溶け込み失われたと解釈した。カルボキシル基・カルボニル基に富むものは、水素、窒素の同位体が重い(D, ¹⁵Nに富む)という特徴をもつことが明らかとなった。

第2・第3のグループの有機物はすべて環状化合物が主である。これらの環状化合物のXANESスペクトルは、隕石において観察されるものとよく類似する。これらには水素・窒素同位体異常は存在しない。

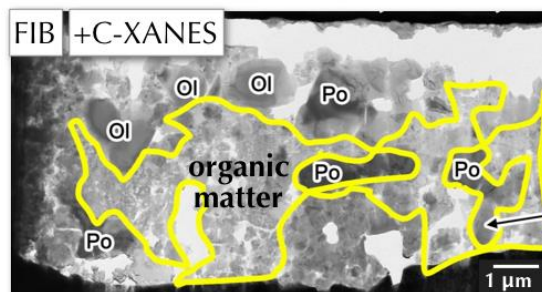


Fig. 1 もっとも始原的な微隕石の有機物分布。全体のほぼ半分を有機物が占め、無機物の間を埋めている。

有機物は、第1のグループに多く、第2のグループでは乏しく、第3グループではより顕著に乏しい。このことから、無機物を変化させた水の存在が、有機物を溶出させることが明らかとなった。原始惑星系円盤に取り込まれる以前、あるいは円盤中において、高分子有機物が合成されていたことが明らかとなった。さらに、これらの水質変成を起こした天体においては、芳香族有機物が主たる有機物であったことが明らかとなった。

④ 鉱物-有機物-水相互作用

無機物と有機物の組織・化学変化を統合し、以下の相互作用が進行したことを明らかにした。最も始原的な微隕石はかんらん石・輝石・磁硫鉄鋼・GEMSそして氷粒子がカルボキシル基・カルボニル基に富む有機物中に散在する集合体である。なんらかの原因で氷が融解し液体の水が形成されると、有機物のカルボキシル基・カルボニル基が脱離し、水に溶解し、有機物は環状組織が顕著となる。この段階での化学変化は水と有機物の間でおこり、無機物と有機物の間では反応はおきない。次のステージとして、GEMS中の金属鉄と磁硫鉄鉱が水と反応し酸化鉄が形成される。酸化鉄は、GEMS中のMgに富む非晶質珪酸塩と反

応し、Fe に富む非晶質珪酸塩を経て Fe に富む層状ケイ酸塩を形成する。無機成分から溶脱した S は有機物と反応し、有機物に少量の S が含まれる。水溶液には C が溶け込む。さらに水質変成が進行すると、C は炭酸塩鉱物 (Mg, Fe)CO₃ として沈殿する。このように、H, C, N, O 等の軽元素は、条件に応じその存在形態を変化させ、天体において一部は蒸発により損失、一部が天体に保存されることが明らかとなった。また、D よび ¹⁵N の濃縮程度は水質変成の弱いものほど大きいことから、それら重同位体は高分子有意物の構造の末端に多く含まれており、水との反応により溶出した成分となっていたことも明らかとなった。

水質変成の条件は、非晶質珪酸塩の水質変成実験 (Nakamura et al., 2010) から推定した。本研究において示されたように、微隕石の一部は非晶質珪酸塩が存在し、一部は完全に層状ケイ酸塩鉱物である。すなわち、液体の水が長時間安定的に存在しないことから、0°C に限りなく近い温度でおきたこと、多孔質の天体においては、衝撃による加熱で、局所的に液体の水が形成され、水質変成作用がおきたものの、液体の水は短時間で蒸発し、観察された多様なステージの部分形成されたと推定された。

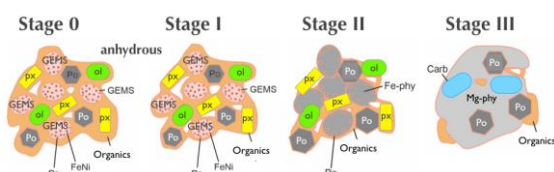


Fig. 2 微隕石における水質変成進行の概念図。

(3) 地球・生命材料物質の形成・進化の解明：上記(2)において観察された、かんらん石、輝石、硫化鉄、GEMS が氷とともに有機物に補角されているという事実は、彗星塵において観察された事実と整合的で、始原的低温天体に共通の事実と考えることができる。かんらん石、輝石、硫化鉄は原始太陽系円盤においては、1300-1000K 程度の高温において形成される。他方、それらを取り込んでいる有機物は、もっとも始原性の高いものが水素・窒素同位体異常を持つことから、太陽系形成の元となった分子雲あるいは原始惑星系円盤の外縁部の 10-20K 程度の極低温領域において形成されたものと考えられる。

高温で形成された物質と低温で形成された物質が共存するためには、原始惑星系円盤内における大規模な物質移動・混合が必要である。この混合過程を検証するため、原始惑星系円盤の構造と進化を表す物理モデルに、物質に関する化学情報を組み合わせることの

できるモデル開発をおこなった。本研究においては、物質変化を密度・温度の関数として現すことにより両者を整合的に扱うことが可能となり、個々の粒子の運動を記述する移流拡散方程式を Lagrange 法を用いて表し、円盤が継続したと考えられる 100 万年にわたり、10 万-100 万粒子の運動を追跡する方法の開拓に成功した。

開発したモデルを用い、円盤内側において形成されたかんらん石や輝石などの高温鉱物の移動と、円盤外側に存在する低温粒子 (氷-有機物を含む粒子) の移動を、空間分布の時間進化として調べた結果、両者の混合は、円盤進化の比較的早期 (10 万年のオーダー) にのみ可能であるということが明らかとなった。より後期には、大部分の物質は円盤の内側に移動し、円盤外側から移動してくる低温物質のみから構成され、高温物質を含むことが不可能となるためである。ただしこの時空関係は、原始太陽系円盤が初期の温度構造に強く依存し、高温領域が外側まで拡大していた場合には、より後期・より外側の位置において、高温物質と低温物質の混合した天体が作られうることも明らかとなった。ALMA 望遠鏡により原始惑星系円盤の初期温度構造が観察され始めており、本研究の結果を用いることで、惑星系進化における生命起源物質が惑星にどのように取り込まれるかを予測することが可能となった。

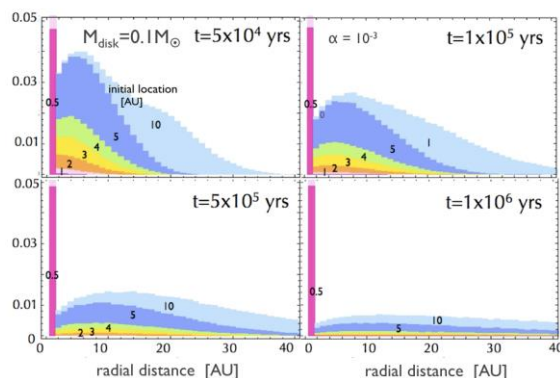


Fig. 3 原始惑星系円盤におけるダスト移動にもなうダストの混合。色は初期状態のダストの位置 (太陽からの距離 [単位 AU]) . 4 枚の図は時間変化、縦軸は初期の量に対する量。

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149件) (すべて査読あり)

- ① Okazaki, R., Noguchi, T., Tsujimoto, S., Tobimatsu, Y., Nakamura, T., Ebihara, M., Itoh, S., Nagahara, H., Tachibana, S., Terada, K. and Yabuta, H., Mineralogy and noble gas isotopes of

- micrometeorites collected from Antarctic snow, *Earth Planets and Space*, 67, 2015, 90, DOI: 10.1186/s40623-015-0261-8.
- ② 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., Chemical Composition of tiny grains recovered from an asteroid Itokawa: an INAA study, *Meteoritics and Planetary Science*, 50, 2015, pp. 243-254, DOI: 10.1111/maps.12418.
- ③ Yabuta, H., Uesugi, M., Naraoka, H., Ito, M., Kilcoyne, A. L. D., Sandford, S. A., Kitajima, F., Mita, H., Takano, Y., Yada, T., Karouji, Y., Ishibashi, Y., Okada, T. and Abe, M., X-ray absorption near edge structure spectroscopic study of Hayabusa Category 3 carbonaceous particles, *Earth, Planets and Space*, 66, 2014, 156, DOI: 10.1186/s40623-014-0156-0.
- ④ Noguchi, T., Ohashi, N., Tsujimoto, S., Mitsunari, T., Bradley, J. P., Nakamura, T., Toh, S., Stephan, T., Iwata, N., and Imae, N., Cometary dust in Antarctic ice and snow: Past and present chondritic porous micrometeorites preserved on the Earth's surface, *Earth Plane. Sci. Lett.*, 410, 2014, pp. 1-11, DOI: 10.1016/j.epsl.2014.11.012.
- ⑤ Terada, K., Ninomiya, K., Osawa, T., Tachibana, S., Miyake, Y., Kubo, M. K., Kawamura, N., Higemoto, W., Tsuchiyama, A., Ebihara, M. and Uesugi, M., A new X-ray fluorescence spectroscopy for extraterrestrial materials using a muon beam, *Sci. Rep.*, 4, 2014, 5072, DOI: 10.1038/srep05072.
- ⑥ 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., Mineralogy of four Itokawa particles collected from the first touchdown site. *Earth Planet Space*, 66, 2014, pp. 124-134, DOI: 10.1186/1880-5981-66-124.
- ⑦ Tachibana, S., M. Abe, M. Arakawa, M. Fujimoto, Y. Iijima, M. Ishiguro, K. Kitazato, N. Kobayashi, N. Namiki, T. Okada, R. Okazaki, H. Sawada, S. Sugita, Y. Takano, S. Tanaka, S. Watanabe, M. Yoshikawa, H. Kuninaka and the Hayabusa2 Project Team, Hayabusa2: Scientific importance of samples returned from C-type near-Earth asteroid (162173) 1999 JU3, *Geochemical Journal*, 48, 2014, pp. 571-587, DOI: 10.2343/geochemj.2.0350.
- ⑧ 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., 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, 2013, pp. 215-227, DOI: 10.1111/maps.12247.
- ⑨ 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., Space weathered rims found on the surfaces of the Itokawa dust particles, *Meteoritics Planet. Sci.*, 49, 2013, pp. 185-214, DOI: 10.1111/maps.12111.
- ⑩ 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., Sylvite and halite on particles recovered from 25143 Itokawa: A preliminary report, *Meteoritics Planet. Sci.*, 49, 2013, pp. 1305-1314, DOI: 10.1111/maps.12333.
- ⑪ Tachibana, S., S. Tamada, H. Kawasaki, K. Ozawa, and H. Nagahara, Interdiffusion of Mg-Fe in olivine at 1400-1600° C and 1atm total pressure, *Phys. Chem. Mineral.*, 40, 2013, pp. 511-519, DOI: 10.1007/s00269-013-0588-2.
- ⑫ Nagahara, H. and Ozawa, K., The role of exchange reactions in oxygen isotope fractionation during CAI and chondrule

formation, Meteorit. Planet. Sci., 47, 2012, pp. 1209-1228, DOI: 10.1111/j.1945-5100.2012.01377.x.

- ⑬ Ozawa, K., Nagahara, H., Morioka, M., Hutcheon, I., Noguchi, T. and Kagi, H., Kinetics of evaporation of forsterite in vacuum, Ame. Min., 97, 2012, pp. 80-99, DOI: 10.2138/am.2012.3750.

[学会発表] (計550件)

- ① Nagahara, H. and Ozawa, K., Temporal and spatial evolution of the proto-solar disk: silicates, ice, and oxygen isotopic compositions, 47th Lunar and Planetary Science Conference, 2016年3月24日, Houston (アメリカ)
- ② Noguchi, T., Yabuta, H., Itoh, S., Sakamoto, N., Mitsunari, T., Okubo, A., Okazaki, R., Nakamura, T., Tachibana, S., Terada, K., Ebihara, M., Imae, N., Kimura, M. and Nagahara, H., Early stage of aqueous alteration and interaction between inorganic and organic materials in cometary bodies: insights from Antarctic micrometeorites, 47th Lunar and Planetary Science Conference, 2016年3月23日, Houston (アメリカ)
- ③ Nagahara, H., Dynamic-chemical evolution of the early protoplanetary disk and chemical diversity of asteroids, IAU 29th General Assembly, 2015年8月4日, Honolulu (アメリカ)
- ④ Nagahara, H., Distribution and compositional change of organic materials with the evolution of a protoplanetary disk, IAU 29th General Assembly, 2015年8月4日, Honolulu (アメリカ)
- ⑤ Yabuta, H., Noguchi, T., Itoh, S., Nakamura, T., Mitsunari, T., Okubo, A., Okazaki, R., Tachibana, S., Terada, K., Ebihara, M. and Nagahara, H., Variations in Organic Functional Groups between Hydrous and Anhydrous Antarctic Micrometeorites, 78th Annual Meeting of the Meteoritical Society, 2015年7月31日, Berkeley (アメリカ)
- ⑥ Yabuta, H., Noguchi, T., Itoh, S., Nakamura, T., Tsujimoto, S., Sakamoto, N., Hashiguchi, M., Abe, K., Kilcoyne, A. L. D., Okubo, A., Tachibana, S., Okazaki, R., Terada, K., Ebihara, M., and Nagahara, H., Relationship of organics, minerals, and water in ice-rock small body recorded in an

ultracarbonaceous Antarctic micrometeorite, Origins 2014, 2014年7月7日, 奈良新公会堂 (奈良県奈良市)

- ① Nagahara, H., and Ozawa, K., Evolution of the Protosolar Disk and Planetary Compositions, Goldschmidt 2014, 2014年6月12日, Sacramento (アメリカ)

[図書] (計6件)

- ① 藪田ひかる, 他, アグネ技術センター, X線分析の進歩 45, 2014, 472 (47-59).

[その他]

ホームページ等

<http://www-sys.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~nagahara-kaken/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永原 裕子 (NAGAHARA, Hiroko)
東京大学・大学院理学系研究科・教授
研究者番号: 80172550

(2) 研究分担者

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

藪田 ひかる (YABUTA, Hikaru)
大阪大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号: 30530844

伊藤 正一 (ITOH, Shoichi)
京都大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号: 60397023

橘 省吾 (TACHIBANA, Shogo)
北海道大学・大学院理学研究院・准教授
研究者番号: 50361564

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

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

寺田 健太郎 (TERADA, Kentaro)
大阪大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 20263668

海老原 充 (EBIHARA, Mitsuru)
首都大学東京・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 10152000