

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24年 5月28日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究（S）

研究期間：2007～2011

課題番号：19104012

研究課題名（和文） 固体惑星起源物質としての非晶質珪酸塩の重要性とその初期進化

研究課題名（英文） Importance of amorphous silicates as source material of the solid planets and its initial evolution

研究代表者

土山 明（TSUCHIYAMA AKIRA）

大阪大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：90180017

研究成果の概要（和文）：

実験をもとに宇宙から太陽系に至る固体微粒子の進化モデルを提唱し、観測される珪酸塩鉱物は非晶質珪酸塩が結晶化したものであることを示した。スターダスト・はやぶさサンプル分析により、彗星物質は非晶質珪酸塩に高温物質が混入したもの、S型小惑星物質は熱変成を受けた普通コンドライトであることを示した。反応性が高く化学組成の多様性をもつ非晶質珪酸塩により、水質変成などが迅速におこりうる。これらより、非晶質珪酸塩が太陽系の起源物質であったと考えて矛盾のないことを示すことができた。

研究成果の概要（英文）：

Based on experimental study, we have proposed a model of solid particle evolution from the universe to the solar system, where silicate minerals observed were crystallized from amorphous silicates. Stardust and Hayabusa sample analysis shows that cometary material is amorphous silicate mixed with high-temperature materials and S-type asteroid material is ordinary chondrite suffered by thermal metamorphism. Amorphous silicates with high reactivity and compositional variety caused prompt reaction during hydrothermal metamorphism. These results showed that source material of the solar system is consistent with amorphous silicates.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|------------|-------------|
| 2007年度 | 52,900,000 | 15,870,000 | 68,770,000 |
| 2008年度 | 11,900,000 | 3,570,000 | 15,470,000 |
| 2009年度 | 5,600,000 | 1,680,000 | 7,280,000 |
| 2010年度 | 5,600,000 | 1,680,000 | 7,280,000 |
| 2011年度 | 5,600,000 | 1,680,000 | 7,280,000 |
| 総計 | 81,600,000 | 24,480,000 | 106,080,000 |

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：星周塵、彗星、小惑星、非晶質珪酸塩、結晶化、水質変成作用、スターダスト計画、はやぶさ計画

1. 研究開始当初の背景

(1) 太陽系原材料としての非晶質珪酸塩

珪酸塩は固体惑星の主要構成物質である。赤外線天文観測の進展により、晩期星や

若い星の星周領域にも、非晶質珪酸塩だけでなくかんらん石・輝石を主とする結晶質珪酸塩ダスト（星周塵）の存在が明らかにされた。一方、星間空間には結晶質珪酸塩は見出され

ず、星周塵の珪酸塩鉱物は、星間空間に放出されると粒子線照射によって非晶質化されたと考えられている。これらの非晶質星間塵(〜0.1 μ m)は水素を主体とするガスとともに分子雲に取り込まれ、ダストを核として氷が凝縮し、さらに原子結合反応・光化学反応によって有機物も生成された。分子雲はやがて収縮して原始惑星系円盤を経て、太陽系が形成された。このように、非晶質珪酸塩は太陽系固体物質の原材料であることが論理的な帰結であるにもかかわらず、太陽系形成初期における非晶質珪酸塩の役割については、ほとんどわかっていない。

(2) 太陽系始原物質と非晶質珪酸塩

彗星起源と考えられる宇宙塵(無水惑星間塵)には GEMS (glass with embedded metal and sulfides) と呼ばれる 100nm 程度の球状物質として非晶質珪酸塩が存在する。一方、小惑星を起源とする始原隕石(コンドライト)はコンドリュール中のガラスを除けばほとんどは結晶質の鉱物(かんらん石・輝石など)から成るが、ユニークな炭素質隕石(例えば、Acfer094)のマトリクス中には始原的な非晶質珪酸塩が存在する。しかしながら、これら始原的な非晶質珪酸塩の起源や、太陽系での進化はよくわかっていない。

(3) 太陽系リターンサンプル

① スターダストサンプルの分析

NASA のスターダスト計画により木星族彗星 Wild-2 のサンプルが 2006 年 1 月に地球に帰還し、研究代表者は国際分析チームの一員として初期分析に参加した。これにより、彗星から持ち帰られたサンプルと無水宇宙塵との類似性が判明するとともに、高温物質が発見された。

② はやぶさサンプルの分析

我が国の JAXA のはやぶさ計画により小惑星イトカワのサンプルが 2010 年 6 月に地球に帰還し、研究代表者は初期分析チームのリーダーとして分析に参加する予定であった。

2. 研究の目的

実験的研究と始原的な地球外物質の鉱物学的研究を有機的に組み合わせ、また星周塵の赤外観測データとの比較もおこなうことにより、以下のことを明らかにする。

(1) 始原天体の原材料が非晶質珪酸塩であったことを物質科学的に示す。

(2) 晩期星周・星間領域および原始惑星系円盤での珪酸塩ダストの進化(とくに非晶質・結晶質珪酸塩の起源)を明らかにする。

(3) 初期太陽系における非晶質珪酸塩の役割と進化を明らかにする。

① 彗星塵(スターダストサンプル)と

無水惑星間塵との比較をおこない、彗星での非晶質珪酸塩の結晶化を明らかにする。

② 小惑星レゴリス粒子(はやぶさサンプル)と隕石との比較をおこない、始原的な小惑星での非晶質珪酸塩の進化(結晶化・水質変成・熱変成など)を明らかにする。また、有機物との相互作用による前生物的進化についても議論する。

これらにより、太陽系原材料物質としての非晶質珪酸塩が太陽系形成にどのような役割を果たし、またどのような進化を遂げたのかについて解明する。

3. 研究の方法

(1) 非晶質珪酸塩の合成・結晶化実験

隕石・宇宙塵を考慮した化学組成(MgO-SiO₂系: CI・フォルステライト(Mg₂SiO₄)・エンスタタイト(MgSiO₃)組成、MgO-FeO-SiO₂系: CI 組成)をもつ非晶質珪酸塩を合成し(ゾル・ゲル法、融体急冷法、高周波誘起熱プラズマ法(ITP)を用いたガス急冷法)、加熱による結晶化実験(600-850°C、0.5-500 時間)をおこなった。合成した非晶質珪酸塩や実験生成物は、赤外分光、X線回折、FE-SEM や TEM による組織観察・元素分析によりキャラクター化をおこなった。これにより、結晶化する鉱物種の特定、赤外吸収スペクトルの星周塵赤外天文観測データとの比較、TTT (Time-Temperature-Transformation) 図の作成、結晶化の活性化エネルギーの決定、非晶質-結晶質珪酸塩間の Fe-Mg 分配係数の決定をおこない、星周・星間領域および原始惑星系円盤での珪酸塩ダストの進化と、彗星での結晶化を議論した。

GEMS 平均組成の珪酸塩ガラスの合成と結晶化実験(600-1400°C、0.25-24 時間)をおこなうとともに、ITP を用いた MgO-SiO₂-Fe 系での GEMS 模擬物質再現実験をおこない、GEMS の成因と彗星での結晶化を議論した。

(2) 非晶質珪酸塩の合成・水質変成実験

隕石を考慮した化学組成(Na₂O-CaO-MgO-(NiO)-Al₂O₃-SiO₂系: CI 組成)について非晶質珪酸塩を合成し(ゾル・ゲル法、融体急冷法)、水質変成実験をおこなった(純水とともにテフロン容器に密封し 100-200°C で 1-260 日間加熱)。合成した非晶質珪酸塩や実験生成物は、X線回折、FE-SEM/EDX や TEM による組織観察・元素分析によりキャラクター化をおこなった。これにより、始原的な小惑星での水質変成作用と、非晶質珪酸塩の役割を議論した。

さらに、有機物(アミノ酸)を含む系での水質変成実験をおこなった(アミノ酸は高速液体クロマトグラフィーで分析)。これにより、有機物を含む系での鉱物生成を明らかに

するとともに、水質変成によるアミノ酸構成比およびL体エナンチオマー過剰の変化を求め、隕石との比較をおこなった。

(3) スターダストサンプルの分析

高速 (6 km/s) で探査機に突入した彗星塵粒子は、超低密度 (5-50 mg/cc) のシリカエアロジェルに捕獲された。エアロジェル内に形成された衝突トラックやトラック内に捕獲された微細粒子 (<数 10 μm) の3次元構造を、放射光マイクロ CT により非破壊で求めた。室内実験をおこない衝突モデルを構築し、衝突トラック3次元構造より彗星塵粒子のバルク密度を求めた。捕獲粒子については、3次元構造データをもとにして、FE-SEM による組織観察や EPMA による元素分析、SIMS による同位体分析を効率的におこない、無水惑星間塵との比較・検討をおこなった。

(4) はやぶさサンプルの分析

小惑星表面から採取された数 100 μm 以下の微粒子のうち、配分された約 60 粒子の初期分析をおこなった。約 50 粒子は、放射光マイクロ CT や X 線回折により鉱物の3次元分布を求め、その後の破壊分析 (FE-SEM や TEM による組織観察、EPMA による元素分析、SIMS による同位体分析) を効率的におこなった。特定の粒子については、希ガス分析、FE-SEM や TEM による粒子表面およびその断面観察と元素分析、顕微ラマン・赤外分光による炭素質物質分析、溶媒抽出した有機物の分析、NAA による元素分析をおこなった。これらにより、隕石との比較・検討をおこなった。

4. 研究成果

(1) 星周領域での珪酸塩ダストの進化

① 非晶質珪酸塩の合成と結晶化実験

ゾル・ゲル法や融体急冷法を用いて CI 組成や GEMS 平均組成の非晶質珪酸塩を合成するとともに、ITP ガス急冷法により、エンスタタイト組成だけでなく、従来合成ができなかったフォルステライト組成の非晶質球状ナノ粒子 (図 1 A) 合成に成功した (論文⑥)。

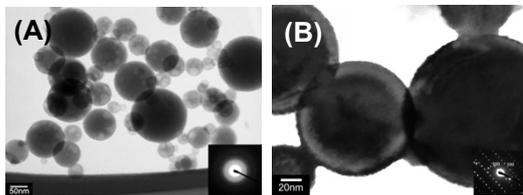


図 1 ITP により合成されたフォルステライト組成ナノ粒子。(A) 非晶質、(B) 結晶。

この粒子を加熱することにより結晶の球状ナノ粒子 (図 1 B) が初めて得られた。赤外吸収スペクトルを、晩期星周塵の観測データと比較したところ、カンラン石および輝

石とともに、これまで未同定であった吸収ピークを説明することができ、晩期星周での球状結晶粒子の存在が強く示唆された (論文⑥)。また、非晶質珪酸塩の結晶化によって生成されたエンスタタイトは多数の積層欠陥を含み、晩期星周で観測される輝石の吸収スペクトルをよく再現する (論文⑩)。

② 非晶質珪酸塩結晶化のカイネティクス

結晶化実験生成物の赤外吸収スペクトルより結晶分率を求め、結晶化カイネティクスのデータを定量的に得た (論文⑫)。かんらん石は不均一核形成と拡散律速成長、輝石は均一核形成と拡散律速成長により結晶化が進む。活性化エネルギーは、かんらん石では 3000-4000 K (図 2)、輝石ではこれより大きく 9000-11000 K であった (論文⑨)。これにより結晶化の TTT 図 (図 3) を作成した。

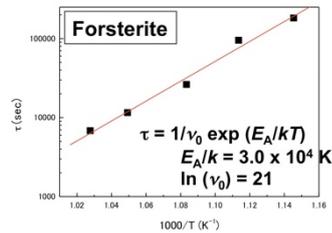


図 2 フォルステライト組成非晶質珪酸塩の結晶化時定数のアレニウスプロット。

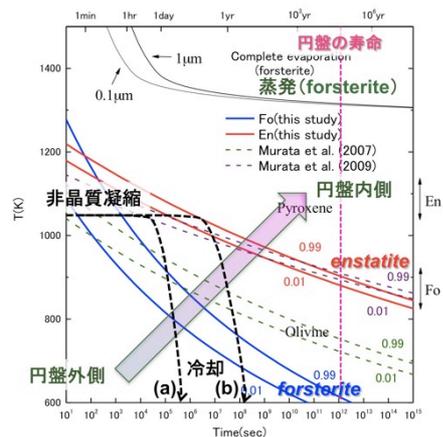


図 3 非晶質珪酸塩の結晶化実験による TTT 図 (フォルステライト・エンスタタイトの結晶分率 = 0.01, 0.99 を示す)。フォルステライトの蒸発は結晶化よりも高温でおこる。

③ 晩期星周塵への応用

赤外観測により、晩期星周塵には非晶質珪酸塩と約 15%の結晶質珪酸塩が存在すると考えられている。結晶質珪酸塩の成因として、

(a) 晩期星からガスから凝縮した非晶質珪酸塩の結晶化と (b) ガスからの直接凝縮が提唱されている。①で述べた球状粒子や積層欠陥を含むエンスタタイトの存在は (a) を支持する。さらに TTT 図において、1000 K 程度での非晶質珪酸塩の凝縮とその後の冷却により、部分的な結晶化が起こりえる (図 3 の冷却曲線) (論文⑨)。

④ 若い星周塵への応用

若い星（原始惑星系円盤）の星周塵においても、多くの非晶質珪酸塩と10-20%程度の結晶質珪酸塩が観測されている。結晶質珪酸塩の成因としては、主として (a) 非晶質星間塵が円盤の外側から内側へ移動する際の加熱による結晶化と (b) 星間塵が加熱蒸発した高温ガスからの直接凝縮とが提唱されている。TTT 図において星間塵の移動・加熱を考えると（図3の矢印）、円盤外側ではかんらん石の、内側では輝石の結晶化が期待される。これは最近の赤外観測の結果と調和的であり、少なくとも (a) がおこなっていることが示される（論文⑨）。

⑤ GEMS 模擬物質の再現実験

GEMS 平均組成の Mg 珪酸塩と金属鉄を出発物質としたガスからの凝縮実験（ITP）により、中心に金属鉄粒子をもつ非晶質珪酸塩ナノ粒子（図4A）が生成された。これを1次粒子としてナノ粒子が多数集まったものが GEMS 粒子（図4B）であると考え、1次粒子は極めて小さく周囲のガスと低温でも交換反応が起こることが期待される。ほとんど酸素同位体異常がないことから GEMS は太陽系起源であると考えられているが、本研究の結果は晩期星周起源でもよいことを示している（投稿準備中）。

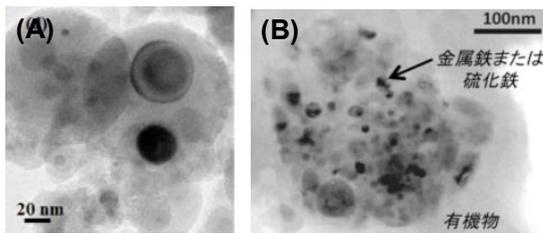


図4 (A) ITPにより生成された金属鉄-非晶質珪酸塩ナノ粒子と (B) GEMS 粒子の TEM 像

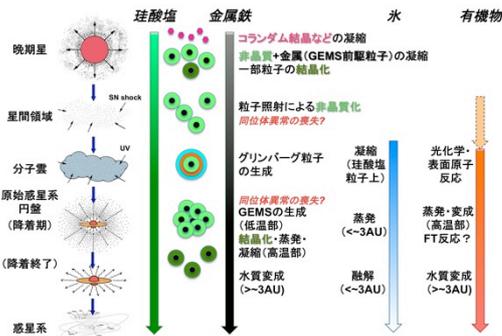


図5 本研究によって得られた宇宙から太陽系に至るダスト進化モデル

⑥ 珪酸塩ダストの進化における鉄の挙動

結晶化実験により生成したかんらん石と非晶質珪酸塩間の Fe-Mg 分配は、かんらん石に Mg が濃集することを示した。星周塵の赤外吸収スペクトルにより、かんらん石・輝石ともにほとんど Fe を含まないことが指摘されている。実験で得られた元素分配係

数, $K_D (=0.4)$, をもとにすると、非晶質珪酸塩もほとんど Fe を含まないことが示唆される（論文⑧）。⑤で述べた金属鉄-非晶質珪酸塩ナノ粒子が晩期星でガスから凝縮したと考えると、Fe をほぼ含まない結晶質珪酸塩を説明することができる。

⑦ まとめ

以上の成果をモデル化して図5に示した。

(2) 彗星塵とスターダストサンプル

① スターダストサンプルの分析

彗星塵の中にコンドリュールの欠片が含まれることを発見した（図6、論文⑩）。コンドリュールは原始太陽系円盤内側の高温生成物であり、外側の低温彗星形成領域への物質の還流があったことが示された。一方、彗星塵を特徴づけると考えられる GEMS などの多孔質物質は、衝突時のエアロジェルとの混合により未発見であるが、衝突トラック形状より求めた彗星塵のバルク密度 (0.5 g/cc)（図7）より、無水惑星間塵と同様の物質からなることがわかった（論文⑤⑦）。

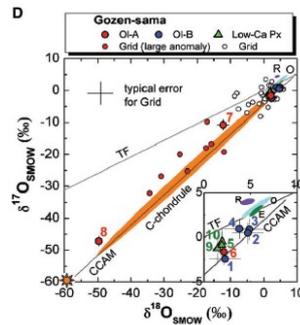


図6 スターダストサンプル粒子の酸素同位体組成

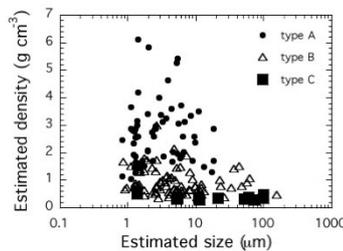


図7 スターダストサンプル粒子のバルク密度

② 彗星物質の結晶化

GEMS 平均組成ガラスの結晶化実験により、600°C 以下では容易に結晶化がおこらないことが示された（論文②）。①の結果からも、彗星塵に観測される結晶質珪酸塩は、高温域で形成された結晶が円盤外側に還流して、彗星に取り込まれたものと考えられる。

(3) 小惑星の物質進化とはやぶさサンプル

① 小惑星での水質変成と始原隕石

非晶質珪酸塩は反応性が大きく Mg, Si 以外の元素を含むため、従来の結晶を用いた実験では容易に生成されなかったスメクタイトやサーペンティン（炭素質コンドライトに特徴的に含まれる含水珪酸塩鉱物）が、純水中で容易に生成された。水/岩石比によりスメ

クタイトとサーペントインの生成比が変化し、炭素質コンドライト CM, CI, CR グループの含水珪酸塩鉱物組成の違いが説明できる(図8)。水/岩石比が小さいと安定相の方解石ではなく準安定なアラレ石が生成し、アミノ酸を加えることによりアラレ石がさらに生成しやすくなった(投稿準備中)。

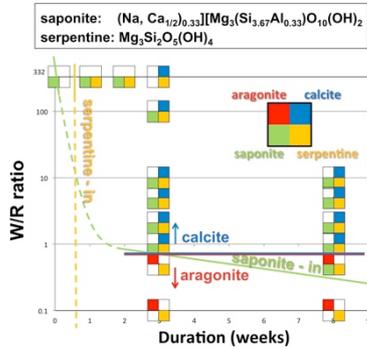


図8 非晶質水質変成実験による、岩石/水比(W/R ratio)と時間による鉱物組成変化

炭素質コンドライトでは水質変成によりアラニン/グリシン比が減少し、イソバリンの正のLエナンチオマー過剰が現れることが知られている。予備的な結果ではあるが、水質変成実験により、アラニン/グリシン比が減少する条件があること(図9)、アラニンおよびイソバリンの正または負のLエナンチオマー過剰が現れることがわかった。

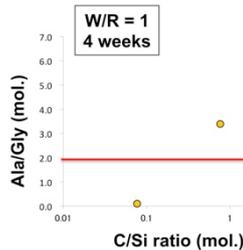


図9 水質変成による、アラニン/グリシン比の変化

② 有機物ナノグロビュールの3次元構造

炭素質コンドライトには数100 nm径の有機物から成る中空の球状物質(有機物ナノグロビュール)が特徴的に含まれる。中空部分に閉じ込められていた始原的な流体が従来の破壊分析では逃げてしまった可能性があるため、マイクロCTを用いてナノグロビュール撮影をおこなった。屈折コントラストのため流体の有無は確認できなかったが、3次元形状と空間分布から、ナノグロビュールの分子雲起源説が支持される(論文①)。

③ はやぶさサンプル分析

粒子全体の鉱物モード組成(図10)、粒子の組織、鉱物の化学組成および同位体組成から、イトカワ粒子が熱変成を受けたLL5あるいはLL6コンドライトに対応することがわかった(LL4が一部混ざっている)(論文③④ほか)。イトカワ粒子は衝突破片であり(粒子の3次元形状分布)、太陽風照射(希ガス分析)や宇宙風化(TEM観察による鉄ナノ粒子の発見)を受けている(論文③ほか)。ま

た、衝突誘起による粒子運動で機械的に摩耗された可能性もある(粒子の3次元形状、表面観察)(論文③ほか)。一方、炭素質物質を含むより始原的な物質を含む可能性も指摘されているが、現在のところ炭素質物質や有機物は発見されていない。

以上のように、S型反射スペクトルをもつ小惑星の表面物質は宇宙風化を受けた普通コンドライトであることを示し、隕石の起源について最終的な決着を与えると同時に、宇宙風化を含む小惑星表面での活動的なプロセスを明らかにした(図11)。

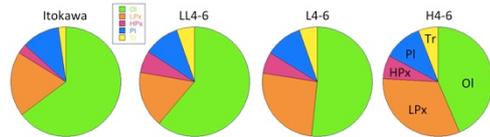


図10 イトカワ粒子と普通コンドライトの鉱物モード組成。

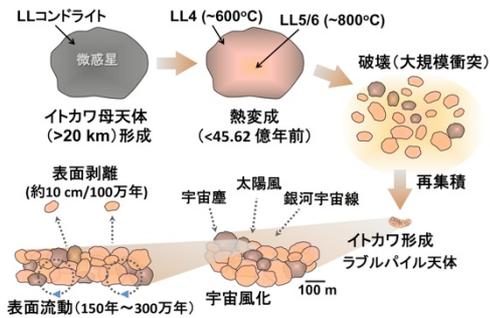


図11 はやぶさサンプル初期分析のまとめ

(4) まとめ

実験にもとづいた宇宙や惑星系円盤での珪酸塩ダストの進化モデルや彗星塵の分析より、太陽系始原天体の原材料が非晶質珪酸塩であったと考えて矛盾のないことを示すことができた。非晶質珪酸塩は準安定であり結晶に比べて反応性が高く多様な化学組成をもつので、水質変成など初期太陽系における多くのプロセスが迅速におこった可能性が示唆される。

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37件)

① T. Matsumoto, A. Tsuchiyama, K. Nakamura-Messenger, T. Nakano, K. Uesugi, A. Takeuchi, and M. E. Zolensky (2012) Three-dimensional observation and morphological analysis of organic nanoglobules in a carbonaceous chondrite using X-ray micro-tomography. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, in print. 査読有

② J. Matsuno, A. Tsuchiyama, C. Koike, H. Chihara, Y. Imai, and R. Noguchi (2012)

Crystallization experiments of SiO₂-rich amorphous silicate: Application to SiO₂-rich circumstellar dust and GEMS. *Astrophysical Journal*, in print. 査読有

③ A. Tsuchiyama, M. Uesugi, T. Matsushima, T. Michikami, T. Kadono, T. Nakamura, K. Uesugi, T. Nakano, S. A. Sandford, R. Noguchi, T. Matsumoto, J. Matsuno, T. Nagano, Y. Imai, A. Takeuchi, Y. Suzuki, T. Ogami, J. Katagiri, M. Ebihara, T. R. Ireland, F. Kitajima, K. Nagao, H. Naraoka, T. Noguchi, R. Okazaki, H. Yurimoto, M. E. Zolensky, T. Mukai, M. Abe, T. Yada, A. Fujimura, M. Yoshikawa, J. Kawaguchi (2011) Three-Dimensional Structure of Hayabusa Samples: Origin and Evolution of Itokawa Regolith. *Science*, **333**, 1125-1128. 査読有

④ T. Nakamura, T. Noguchi, M. Tanaka, M. E. Zolensky, M. Kimura, A. Tsuchiyama, A. Nakato, T. Ogami, H. Ishida, M. Uesugi, T. Yada, K. Shirai, A. Fujimura, R. Okazaki, S. A. Sandford, Y. Ishibashi, M. Abe, T. Okada, M. Ueno, T. Mukai, M. Yoshikawa, J. Kawaguchi (2011) Itokawa Dust Particles: A Direct Link Between S-Type Asteroids and Ordinary Chondrites. *Science*, **333**, 1113-1116. 査読有

⑤ R. Niimi, T. Kadono, A. Tsuchiyama, K. Okudaira, S. Hasegawa, M. Tabata, T. Watanabe, M. Yagishita, N. Mcchii, A. M. Nakamura, K. Uesugi, A. Takeuchi, and T. Nakano (2011) Size and density estimation from impact track morphology in silica aerogel: Application to dust of comet 81P/Wild 2. *Icarus*, **211**, 986-992. 査読有

⑥ C. Koike, Y. Imai, H. Chihara, H. Suto, K. Murata, A. Tsuchiyama, S. Tachibana, and S. Ohara (2010) Effect of forsterite grain shape on infrared spectra. *The Astrophysical Journal*, **709**, 983-992 査読有

⑦ A. Tsuchiyama, T. Nakamura, T. Okazaki, K. Uesugi, T. Nakano, K. Sakamoto, T. Akaki, Y. Iida, T. Kadono, K. Jogo, and Y. Suzuki (2009) Three-dimensional structures and elemental distributions of Stardust impact tracks using synchrotron microtomography and X-ray fluorescence analysis. *Meteoritics and Planetary Science*, **44**, 1203-1224. 査読有

⑧ K. Murata, T. Takakura, H. Chihara, C. Koike, and A. Tsuchiyama (2009) Mg/Fe fractionation in circumstellar silicate dust involved in crystallization. *The Astrophysical Journal*, **696**, 1612-1615. 査読有

⑨ K. Murata, H. Chihara, C. Koike, T. Takakura, Y. Imai, and A. Tsuchiyama (2009) Crystallization experiments on amorphous magnesium silicate. I. Estimation of activation energy of enstatite crystallization. *The Astrophysical Journal*, **697**, 836-842. 査読有

⑩ K. Murata, H. Chihara, C. Koike, T. Takakura, T. Noguchi, Y. Imai, and A. Tsuchiyama (2009) Crystallization experiments on amorphous magnesium silicate. II. Effect of stacking faults on infrared spectra of enstatite. *The Astrophysical Journal*, **698**, 1903-1906. 査読有

⑪ T. Nakamura, T. Noguchi, A. Tsuchiyama, T. Ushikubo, N. T. Kita, J. W. Valley, M. E. Zolensky, Y. Kakazu, K. Sakamoto, E. Mashio, K. Uesugi, T. Nakano (2008) Chondrule-like Objects in Short-Period Comet 81P/Wild 2. *Science*, **321**, 1664-1667. 査読有

⑫ K. Murata, H. Chihara, A. Tsuchiyama, C. Koike, and T. Takakura (2007) Crystallization experiments on amorphous silicates with chondritic composition: quantitative formulation of the crystallization. *The Astrophysical Journal*, **668**, 285-293. 査読有

[学会発表] (計 154 件)

① R. Noguchi, A. Tsuchiyama, H. Yabuta, and S. Ichikawa. Hydrothermal alteration experiment of amorphous silicates: Effect of organic-inorganic interaction. 74th Annual Meteoritical Society Meeting, 2012.8.11, London (UK).

② A. Tsuchiyama et al. Preliminary examination of particles recovered from the surface of the Asteroid 25143 Itokawa by the Hayabusa mission. Lunar and Planetary Science Conference, XLII, 2011.3.7-11, Woodlands, TX (USA).

③ J. Matsuno, A. Tsuchiyama, R. Noguchi, A. Miyake, N. Shimobayashi, S. Ichikawa, and N. Souma. Reduction experiments of amorphous silicates with the mean composition of GEMS. Lunar and Planetary Science Conference, XLII, 2011.3.7-11, Woodlands, TX (USA).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

土山 明 (TSUCHIYAMA AKIRA)

大阪大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：90180017

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

野口 高明 (NOGUCHI TAKAAKI)

茨城大学・理学部・教授

研究者番号：40222195

(H19 まで連携研究者として参加)

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

(H19 まで連携研究者として参加)