

口頭講演 | R5：地球外物質

■ 2023年9月16日(土) 14:00 ~ 15:00 | 821 杉本キャンパス

R5：地球外物質

座長:松本 恵 (東北大学)、山本 大貴(九州大学)、瀬戸 雄介(大阪公立大学)、橘 省吾(東京大学)

14:00 ~ 14:15

[R5-12] 星周非晶質ケイ酸塩ダストの化学組成の制約：Na-Mg-Al-Si-Ca-Fe-Ni-O系での凝縮実験

*榎本 華子¹、瀧川 晶¹ (1. 東大・院地惑)

14:15 ~ 14:30

[R5-13] 原始太陽系円盤におけるプレソーラーSiC粒子の残存可能性に関する実験的研究

*山本 大貴¹、瀧川 晶²、橘 省吾² (1. 九州大学、2. 東京大学)

14:30 ~ 14:45

[R5-14] メラノフロジャイト仮晶を含む多孔質な南極微隕石：氷衛星地下海からの放出物か、未知の太陽系外縁天体の物質か？

*野口 高明¹、光成 拓也^{2,3}、松本 里佳子^{4,5}、山口 亮⁶、今柴 直也⁶、松本 徹¹、荒木 暢⁷、湯澤 勇人⁷、三宅 亮¹ (1. 京都大・院理、2. 茨城大・理、3. 三菱電機ソフトウェア、4. 九州大・院理、5. 伊根町役場、6. 極地研、7. 分子研)

14:45 ~ 15:00

[R5-15] 地球鉱物と地球外の混合岩石物質の固体系での対比研究

*三浦 保範¹ (1. 元・予定 (山口大・院理))

[zoom] Zoom

星周非晶質ケイ酸塩ダストの化学組成の制約：Na-Mg-Al-Si-Ca-Fe-Ni-O系での凝縮実験

Chemical Composition of Circumstellar Amorphous Silicate Dust: Condensation Experiments in the Na-Mg-Al-Si-Ca-Fe-Ni-O System

*榎本 華子¹、瀧川 晶¹

*Hanako Enomoto¹, Aki Takigawa¹

1. 東大・院地惑

1. UTokyo

中小質量星が進化した漸近巨星分枝（AGB）星周ダストは、多くのプレソーラー粒子の起源であることが知られており[1]、AGB星からの質量放出風のような高温ガスの急冷場は、彗星塵の主要物質GEMS（Glass with embedded metal and sulfides）の組織を再現できる環境としても重要である[2]。

酸素が豊富なAGB星の赤外分光観測では、10 μm と18 μm に、それぞれ非晶質ケイ酸塩の SiO_4 四面体中のSi-O伸縮とO-Si-O変角に由来するピークが確認されている。しかし、化学組成、温度、構造、サイズなどの複数の要素が縮退した観測スペクトルのみから特に非晶質ダストの性質を一意に定めることは困難である。これまで様々なMg/Si比やMg/Fe比を持つ非晶質ケイ酸塩ダスト模擬物質が合成されてきたが[3, 4]、限られた組成範囲でしか実験は行われておらず、観測される多様なダストの化学組成や構造の決定には至っていない。

そこで本研究では、CIコンドライト組成を基準にNa-Mg-Al-Si-Ca-Fe-Ni-O系で組成を系統的に変化させて気相凝縮実験を行った。組成の変化と生成物の赤外スペクトルの対応を調べ、観測スペクトルと比較してAGB星周ダストの化学組成の制約を試みる。

凝縮実験は誘導熱プラズマ（induction thermal plasma: ITP）装置（TP-40020NPS, JEOL [2]）を用いて行った。この装置では、粉末状の出発試料を $\sim 10^4$ Kのプラズマ炎に投入し即座に気化させ、急冷（ 10^{4-5} K/s）させることでナノ粒子が凝縮する。出発物質は、 Na_2SiO_3 , MgO, Al, CaCO_3 , Fe, Ni, SiO_2 のマイクロンサイズの粉末試薬（Kojundo Chemical Lab. Co., Ltd.）の混合物である。出発物質の組成を変え、8回の実験を実施した（表1）。

生成物を粉末X線回折（XRD; Rigaku Rint-2100）、電界放出型電子線マイクロアナライザー（FE-EPMA; JEOL JXA-8530F）、透過型電子顕微鏡（FE-STEM; JEOL JSM-2800）で分析し、KBrペレットに埋め込んでフーリエ変換赤外分光法（FT-IR; FT/IR-4200 JASCO）により赤外スペクトルを測定した。

TEM観察により、凝縮物は20–80 nm程度の大きさの非晶質ケイ酸塩粒子であることがわかった。XRDでは出発物質の蒸発残渣とみられるピークが確認されたが、EPMAとTEM分析の結果、凝縮した非晶質ケイ酸塩粒子のバルク組成は出発物質とほぼ変わらず、蒸発残渣による化学組成変化の影響は無視できる程度に小さいことがわかった。

得られた赤外スペクトルの比較から、以下(1)–(5)が示された。(1) 非晶質ケイ酸塩内部の金属粒子は12 μm 以降の強度をやや増加させるが、スペクトルに大きな影響を与えない。(2) Al含有量の増加に伴い、10, 18 μm のケイ酸塩ピークは長波長へシフトするとともに、11, 14 μm にそれぞれ AlO_4 四面体結合中のAl-O-Al振動、孤立した AlO_4 四面体または AlO_5 六面体中のAl-O伸縮に由来するピークが現れる。(3) Ca含有量の増加に伴い、10, 18 μm のケイ酸塩ピークは長波長へシフトする。(4) CIコンドライト組成のもとでのCa, Naの有無は、スペクトルに大きな影響を与えない。(5) ITPを用いた先行研究[5]の非晶質 MgSiO_3 と、本実験 $\text{Al}_8\text{Si}_{100}\text{Mg}_{103}$ との比較から、Alの存在により20 μm 以降のスペクトルは上に凸のブロードフィーチャーを示す。

Al/Si比を様々に変えた実験生成物の赤外スペクトルとAGB星Z Cygの観測[6]との比較から、AGB星周ダストはCIコンドライト組成[7]よりもAlに富んでおり、Al/Siは0.08~0.75であると考えられる。しかし、AGB星起源とされる非晶質ケイ酸塩プレソーラー粒子の多くはAlに乏しい（ < 1 at%）ことから[8]、AGB星周非晶質ケ

イ酸塩ダストはAlに富んだものと、Alに乏しいものの混合物である可能性がある。

[1] Nguyen A. N. et al. (2016) *ApJ*, **818**, 51. [2] Kim T. H. et al. (2021) *A&A*, **656**, A42. [3] Jäger C. et al. (2003) *A&A*, **408**, 193. [4] Dorschner J. et al. (1995) *A&A*, **300**, 503. [5] Imai (2012) Ph.D. thesis. [6] Onaka T. et al. (2002) *A&A*, **388**, 573. [7] Lodders K. et al. (2009) *Landolt-Börnstein* (Springer) [8] Vollmer C. et al., (2009) *ApJ*, **700**, 774.

キーワード：星周ダスト、非晶質ケイ酸塩、実験

Keywords: circumstellar dust, amorphous silicate, experiment

表 1 出発物質の化学組成

実験	Mg	Si	Fe	Al	Ca	Na	Ni
CI-02	1.03	1.00	0.85	0.08	0.06	0.06	0.05
CI-03	1.03	1.00	-	0.08	0.06	0.06	-
CI-04	1.03	1.00	-	0.75	0.06	0.06	-
$\text{Al}_8\text{Si}_{100}\text{Mg}_{103}$	1.03	1.00	-	0.08	-	-	-
$\text{Al}_{31}\text{Si}_{100}\text{Mg}_{103}$	1.03	1.00	-	0.31	-	-	-
$\text{Al}_{64}\text{Si}_{100}\text{Mg}_{103}$	1.03	1.00	-	0.64	-	-	-
$\text{Al}_8\text{Si}_{100}\text{Ca}_{103}$	-	1.00	-	0.08	1.03	-	-
$\text{Al}_8\text{Si}_{100}\text{Mg}_{51.5}\text{Ca}_{51.5}$	0.515	1.00	-	0.08	0.515	-	-

原始太陽系円盤におけるプレソーラーSiC粒子の残存可能性に関する実験的研究

Survivability of presolar SiC grains in the protosolar disk: An experimental study

*山本 大貴¹、瀧川 晶²、橘 省吾²

*Daiki YAMAMOTO¹, Aki TAKIGAWA², Shogo TACHIBANA²

1. 九州大学、2. 東京大学

1. Kyushu University, 2. University of Tokyo

プレソーラーSiC粒子は、原始太陽系円盤の酸化的環境下では蒸発反応を起こすため (Larimer and Bartholomay, 1979)、円盤の円盤物理化学条件 (温度、圧力等) の指標となり得る。円盤でSiCは、酸化還元状態に応じてSiO₂残渣層を形成しないアクティブ酸化またはSiO₂残渣層を形成しSiO₂が蒸発するパッシブ酸化を経験する (e.g., Narushima et al., 1997)。Mendybaev et al. (2002) では、1気圧の酸素分圧をコントロールした様々な酸化還元環境化でSiC蒸発実験をおこなった。その結果、酸化的な環境下 (IW-03) では、SiO₂残渣層の形成が確認され、一方還元的な環境下では (IW-06) ではSiO₂残渣層が形成されない (または極めて薄い) ことが確認された。SiO₂残渣層は円盤ガス・SiC間の直接の接触を妨げることでSiC蒸発速度を左右する。更に始原的隕石中のプレソーラーSiC粒子表面に見られる10-30 nm程度の酸化リム (Bernatowicz et al., 2006) の起源においても重要である。SiC蒸発速度やメカニズムは、ガス分圧やガス組成に関連している可能性があり、1気圧条件での反応速度を円盤環境での反応速度に直接応用できない可能性がある。そのため、本研究では、原始太陽系円盤でのプレソーラーSiC粒子の残存可能性の理解のため、円盤を模した低圧H₂-H₂O混合ガス環境下でのSiCの蒸発実験をおこなった。

実験出発物質には、主要なプレソーラーSiC粒子の多形であるβ-SiCのチップを用いた。加熱実験には、ガス供給系を備えた真空高温加熱縦型炉を用いて、温度1250-1450°C、H₂-H₂O混合ガス圧力0.5, 2.5 Paで4-110.3 hおこなった。ガス供給系では、室温でのH₂Oからの蒸発ガスとガスボンベから供給されるH₂ガスとが混合され、H₂Oの消費量から推定したP_{H₂O}は、全圧0.5, 2.5 Paの実験でそれぞれP_{H₂O} = 2.2 × 10⁻³ Pa, 6.0 × 10⁻³ Paであった。また全圧2.5 Paの一部の実験では、H₂Oを50, 75°Cに加熱し室温での飽和水蒸気圧を作り出すことで、P_{H₂O} = 3.7 × 10⁻² Paの条件での実験もおこなった。サンプル質量変化から蒸発量の推定をおこなった。いくつかのサンプルに関してFIB切片を作成し、透過型電子顕微鏡 (STEM-EDS; JEOL JEM-2800) で観察をおこなった。

STEM-EDS分析から表面に酸素を含む極めて薄い層 (~5-10 nm) の存在が確認され、パッシブ酸化を通じた蒸発の可能性が示唆された。これは、プレソーラーSiC粒子表面の酸化リムが円盤でも形成可能であることを示唆する。蒸発速度k (cm s⁻¹) は質量損失と初期サンプルサイズにより推定し (Takigawa et al., 2009)、蒸発フラックスJ (g cm⁻² s⁻¹) に変換した。Jは1350-1450°Cの高温領域では温度にほとんど依存しない一方、ガス圧・ガス組成に依存した。1300°C以下の低温領域では、Jは大きく温度に依存し、ばらつきの範囲内で異なるガス条件の結果は一致し、さらに先行研究 (Mendybaev et al., 2002) のIW-03, IW-06条件でのJと近い値を示した。高温領域においてJの小さな温度依存性は、ガス供給 (ガス供給速度に律速されたSiO₂形成速度) が律速段階である可能性を示す。高温領域でのJは、P_{H₂O}の平方根に依存したことから、表面でのH₂O分子の乖離が蒸発速度に関係している可能性がある。一方低温領域では、Jがガス種に非依存、また非常に薄いSiO₂残渣層であったことを考慮すると、SiC-SiO₂界面反応が反応速度を律速している可能性があり、本研究で得られた活性化エネルギー (~531 kJ mol⁻¹) が先行研究で報告しているSiC-SiO₂界面反応における活性化エネルギー

($\sim 548\text{--}563\text{ kJ mol}^{-1}$; (Pultz & Hertl, 1966; Mendybaev et al., 2002)) と整合的であることも説明可能である。

本研究で得られた蒸発速度に基づくと、プレソーラーSiC粒子は溶融CAI形成をもたらした熱的イベント ($\sim 1400^\circ\text{C}$, $P_{\text{H}_2\text{O}} > 0.1\text{ Pa}$, 2-3日; Yamamoto et al., 2021) において完全に蒸発する可能性がある。また、プレソーラーSiC粒子は、酸素同位体交換により同位体的特徴を失うプレソーラーケイ酸塩粒子に対して高温で残存する可能性があるが、プレソーラーコランダムが円盤ガスと酸素同位体交換をする温度領域においては、プレソーラーコランダムより先に蒸発し消失する可能性があることがわかった。

キーワード：プレソーラー粒子、シリコンカーバイド (SiC)、蒸発/酸化、速度論、原始太陽系円盤

Keywords: Presolar grains, Silicon carbide (SiC), Evaporation/Oxidation, Kinetics, Protosolar disk

メラノフロジャイト仮晶を含む多孔質な南極微隕石：氷衛星地下海からの放出物か、未知の太陽系外縁天体の物質か？

Antarctic micrometeorites containing pseudomorphs of melanophlogite: Dust from the sub-surface ocean of icy satellites or from an unknown type of trans-Neptunian objects?

*野口 高明¹、光成 拓也^{2,3}、松本 里佳子^{4,5}、山口 亮⁶、今栄 直也⁶、松本 徹¹、荒木 暢⁷、湯澤 勇人⁷、三宅 亮¹

*Takaaki NOGUCHI¹, Takuya Mitsunari^{2,3}, Rikako Matsumoto^{4,5}, Akira Yamaguchi⁶, Naoya Imae⁶, Toru Matsumoto¹, Toru Araki⁷, Hayato Yuzawa⁷, Akira Miyake¹

1. 京都大・院理、2. 茨城大・理、3. 三菱電機ソフトウェア、4. 九州大・院理、5. 伊根町役場、6. 極地研、7. 分子研
1. Kyoto Univ. Sci., 2. Ibaraki Univ. Sci., 3. Mitsubishi Elect. Soft. Co., 4. Kyushu Univ. Sci., 5. Ine T.H., 6. NIPR, 7. IMS

原始太陽系円盤ではシリカ鉱物は比較的まれな鉱物である。明らかな円盤内凝縮物は、Y-793261 CRコンドライトのアメーバ状オリビンアグリゲート(AOA)に含まれる石英である[1]。コンドライト、エコンドライト、南極微隕石(AMMs)、惑星間塵(IDPs)、81P/Wild 2彗星からスターダスト探査機が回収した試料にもシリカ鉱物は含まれるが、融液からの結晶化、あるいは、母天体の熱変成過程で形成されたものと考えられる[e.g. 2-6]。本研究では、AMMs中に、熱水環境で熱水溶液から形成されたと考えられるシリカ鉱物を見出したので報告する。

2つのAMM, D10IB324とD12IB086は、2010年と2012年にドームふじ基地近くから回収した表層雪より発見された。どちらも多孔質であり、SEM-EDSによるバルク定性分析から、コンドライト的組成に多く含まれる元素であるO, Mg, Si, Fe, Sの中で、Mg K α 線強度が明らかに低く、Si K α 線強度が高い。

D10IB324は、ほぼSiO₂からFeに非常に乏しいサポナイトとの間に連続的な組成を持つ非晶質物質（サポナイトに近い組成の部分は約1.0 nmの格子縞を持つ層状珪酸塩に置換）、正方形形状のSiO₂（電子線回折は石英で指数付け可）を多量に含み、<50 nmの磁硫鉄鉱を多く含む物体（GEMS様物体とここではよぶ）、>200 nmの磁硫鉄鉱、低Ca輝石も含む。D12IB086はより水質変成の程度が高く、非常に多孔質であるにもかかわらず、多量のフィラメント状の、ほぼSiO₂からFeに非常に乏しいサポナイトとの間に連続的な組成を持つ非晶質物質（サポナイトに近い組成の部分は約1.0 nmの格子縞を持つ層状珪酸塩に置換）、GEMS様物体、>200 nmの磁硫鉄鉱、低および高Ca輝石、正方形形状のSiO₂（電子線回折は石英で指数付け可）、分解して約10 nmサイズの酸化物集合体となっているMg-Fe炭酸塩分解物からなる。どちらにもかんらん石は含まれない。これらのAMMsに含まれるSiO₂結晶は例外なく立方体形状である。そのような（擬）立方体形状でも産するシリカ鉱物として、クラスラシルの一種であるメラノフロジャイト46SiO₂·6(N₂, CO₂)·2(CH₄, N₂)がある[e.g. 7]。メラノフロジャイトの形成には、これら小さいガス分子の存在下で、ガスがテンプレートとして働くことが重要である[e.g. 8]。このことは、これらAMMsの前駆物質は、これらのガス分子の存在下でSiO₂に富む熱水から結晶化したことを示唆する。現状ではガス分子が残留しているかは確認できていないが、引き続き分析を計画している。

このような環境を達成でき、惑星間空間に形成した物質を放出している既知の太陽系天体は、地下海から盛んに間欠泉を噴出している土星の衛星エンケラドスや、噴出物が地表に分布する木星の衛星のエウロパである。しかし、これらのAMMsの輝石とロダー石(Na,K)₂(Mg,Fe)₅Si₁₂O₃₀には>5 × 10¹⁰ cm⁻²を越える太陽フレアトラックが含まれる。[9]によると、そのようなIDPsやAMMsの母天体は太陽系外縁天体とされる。高トラック数密度は、太陽系外縁天体にも内部海を持ちかつて盛んな質量放出をした天体が存在したことを示唆するのか、ダストが木星や土星の重力圏から離脱して地球にまで到達するのに長期間かかったことを示すのか、今後更に検討が必要である。

References [1] Komatsu et al. 2018 PNAS 115, 7497–7502. [2] Rubin and Ma 2021. Meteorite Mineralogy. Cambridge Univ. Press. [3] Imae et al. 2013 GCA 100, 116-157. [4] Mikouchi et al. 2007 38th LPSC 1946 (abstract). [5] Matrajt et al. 2008 MaPS 43, 315–334. [6] Rietmeijer and McKay 1986 Meteoritics 743 (abstract). [7] Momma 2014 Phys. Condens. Matter 26, 103203. [8] D' Alessio et al. 2019 Microporous Mesoporous Mater. 286, 9-17. [9] Keller and Flynn 2022 Nat. Astronom. 6, 731-735.

キーワード：南極微隕石、メラノフロジャイト、内部海、太陽フレアトラック

Keywords: AMM, melanophlogite, sub-surface ocean, solar flare track

地球鉱物と地球外の混合岩石物質の固体系での対比研究

Studies of Earth's minerals and rocky mixtures beyond Earth

*三浦 保範¹

*Yasunori MIURA¹

1. 元・予定（山口大・院理）

1. Post Yamaguchi Univ. Sci.

はじめに：地球定義の鉱物が1970年頃の地球外物質の月面、南極・炭素隕石のミクロ分析研究のために地球外鉱物の名称を使用した。1986年頃月アポロ試料の国内で紹介をしたが光学的な観察で「鉱物」で紹介した。月や隕石の鉱物（斜長石）や衝撃変成物の分析結晶構造解析も行った。EPMA分析で地球内外鉱物報告レビューをした。地球鉱物は多様な実験授業を行った。アポロ月試料の斜長石は地球と異なっていた。地球三状態の全圏活動生成鉱物と他天体物質を区別するのが本目的である。

長時間継続形成：地球の3圏の状態変化では若い鉱物が継続的に形成され組成構造の定義が可能である。造岩鉱物のシリカ・斜長石構造がマクロ結晶で広く分布するが、衝撃変成石英（斜長石）は急冷形成で不規則な歪（ガラス化）を示す。地球外に大結晶（石英・長石）が無い事を示す。

海水圏の有無：液体層は固体-気体相図の中間相なので長期存在するには現在の穏やかな海水圏でなく全圏活動で急な高温・冷却過程で存在できる。海水の全圏は3圏で循環可能な状態変化の活動が必要で海水圏鉱物を多量形成する。地球外には無いです。

三圏地球での地球外分析の問題点：3圏惑星が形成された継続的な活動惑星でないと生命有機物形成は長期的に継続存在できない。地球外の運搬試料を地球内分析の場合は地球の3圏反応下での汚染には要注意である。

地球の地域と全圏生成物の問題点：活動地球惑星の継続成長で各地での地域地学と全圏での全圏地学が三圏惑星に混在するが両見方は大切で全圏的視野での研究教育がこれから望まれる。

日本の大学研究機関の大切な点：大学研究では地球物質の教育研究の人材育成が大切です（学位）。

まとめ：1) 地球の鉱物は3圏の活動的な状態変化で形成される。地球外で海水圏の無いと地球型のミクロ結晶化は困難である。2) 形成議論はミクロ鉱物でできる。地球外の不純物の多いマクロな粒形は鉱物名称でないと分類での指定ができない。3) 地球には局所と全域現象がある。4) 全圏的固体圏の形成は海水圏が関与する[1-3]。

参考文献：[1]日本の結晶学（1988）16.山口大学.271-272. [2] Miura Y. (2018) IMA-2018 (Melbourne, Aus.) 2039. [3] Miura Y. (2021) JAMS, R501-P01 (Hiroshima).

キーワード：地球鉱物、岩石状混合物、隕石、月、海洋圏

Keywords: Earth mineral, Rocky mixtures, Meteorite, The Moon, Ocean system

口頭講演

R5：地球外物質

座長:松本 恵 (東北大学)、山本 大貴(九州大学)、瀬戸 雄介(大阪公立大学)、橘 省吾(東京大学)

2023年9月16日(土) 14:00 ~ 15:00 821 (杉本キャンパス)

[zoom]Zoom

Zoomはこちら