

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）
研究期間：2007 ～ 2008
課題番号：19840048
研究課題名（和文） 原始太陽系星雲中での無機・有機ダストの振る舞いに関する実験的アプローチ
研究課題名（英文） Experimental approach concerning behavior of cosmic dust particles both inorganic and organic in proto Solar nebula
研究代表者 木村 勇気（KIMURA YUKI） 北海道大学・低温科学研究所・博士研究員 研究者番号：50449542

## 研究成果の概要：

宇宙固体微粒子（ダスト）の類似物としての微粒子を実際に研究室で合成し、その光学特性や高温での振る舞い等を調べる事で、星・惑星形成過程におけるダストの果たす役割を明らかとする事を目的に研究を展開した。その結果、(1)結晶質珪酸塩微粒子の生成条件と非晶質珪酸塩微粒子の低温での結晶化過程を明らかにした。(2) 質量に依存しない酸素の同位体分別を示す珪酸塩微粒子の生成に世界で初めて成功し、ダストの生成にプラズマが重要であることをしめした。(3) 様々な天体に幅広く分布している PAH のクラスターを実験室で再現し、その光学特性を明らかにした。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,330,000	0	1,330,000
2008 年度	1,320,000	396,000	1,716,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,650,000	396,000	3,046,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：(1)惑星科学 (2)天文学 (3) ナノ領域科学 (4) 結晶成長 (5) 透過型電子顕微鏡法 (6) 宇宙ダスト (7) 多環芳香族炭化水素

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙空間に存在する物質の大部分は気体であるが、一部は凝縮して 1  $\mu\text{m}$  以下の固体微粒子（ダスト）を形成する。そのダストを原材料物質として、隕石や小惑星、惑星などが形成される。それゆえ、ダストについての研究は、惑星科学・天文学において重要であるが、観測と理論の研究が盛んに行なわれて

いるのに対して、実験的研究を行っているグループは少数である。国内では主にバルクを用いた研究が大阪大学や東京大学のグループで行なわれているが、実際のダストはサブミクロンオーダーであり、その光学特性はダストの形によって大きく異なる事が知られている。反応や成長もナノ領域での特異現象が現れるサイズである為、実際に実験室で類

似物を生成し、その反応・生成条件や光学特性を明らかとする事が必要である。国外では、ガスから生成した珪酸塩ダスト類似物の結晶化に関する実験を行なっている NASA のグループと（研究代表者はここに二年間滞在していた）、レーザーアブレーションで作製した蒸発凝縮物のスペクトル測定に関する実験を行なっているドイツのイエナのグループが知られているが、世界的に見ても実験からのアプローチは不足している。研究代表者は、超微粒子と結晶成長の研究をバックグラウンドとしていることから、ダスト類似物の生成実験を他にない視点から展開できる。また、最近有機物ダストの生成手法を考案した事から、珪酸塩ダストをメインとした無機物のダストから PAH のような有機物のダストまで幅広く取り扱い、その相互作用までを明らかと出来る状況である。

## 2. 研究の目的

ダストの類似物としての微粒子を実際研究室で合成し、その光学特性や高温での振る舞い等を調べる事で、星・惑星形成過程におけるダストの果たす役割を明らかとする事を目的に研究を展開する。具体的には、研究代表者の一連の研究プロジェクトの中で本研究課題では下記の三点を研究の目的とした。

- (1) 最も豊富に存在する珪酸塩微粒子の生成条件と結晶化に対する雰囲気依存性の解明。
- (2) 質量に依存しない酸素の同位体分別を示す珪酸塩微粒子の生成から太陽形成史に制限を与える。
- (3) 様々な天体に幅広く分布している PAH のクラスターを合成し、その光学特性を明らかとする事で、天体環境の物理的、化学的パラメータを明らかとする。

## 3. 研究の方法

生成条件を変えて実験室で作製したシリケイトや PAH 等のダスト類似物を透過型電子顕微鏡観察、紫外、可視、赤外スペクトル測定、示差走査熱量計等を用いて分析する。さらに、熱、UV、プラズマ等の外場による変成作用を明らかとする事で、ダスト類似物の生成条件や結晶化条件、分解条件等を明らかとし、宇宙空間におけるダストの生成条件や環境等に制限を与える。

## 4. 研究成果

- (1) 非晶質シリケイト微粒子に炭素質層を

形成した星間ダスト類似物の結晶化実験により、メタンを含む炭素質層で結晶化温度が著しく下がる事を見出した。この結果は、シリケイトダストの結晶化がその周囲の環境に影響を受けることを意味している。本成果は *The Astrophysical Journal* に査読付論文として公表した[13]。また、電子線照射により非晶質シリケイト微粒子が低温で結晶化することを見出し、連星天体が示すシリケイトの高い結晶化率を説明した。本成果は *The Astrophysical Journal Letters* に査読付論文として掲載された[4]。さらに、シリケイトの凝縮実験から、質量放出率の大きい晩期星が示す結晶質シリケイトの生成条件と原始太陽系星雲中での結晶質シリケイトの生成過程を示し、*The Astrophysical Journal* に公表した[3]。

(2) 隕石中に含まれるある種の鉱物は質量に依存しない酸素の同位体分別を示すことが知られており、太陽系創世記を理解する為のトレーサーとして使われているが、これまで同位体異常を示す固体微粒子の合成には至っていなかった。これに対し、プラズマ場中での固体微粒子の生成実験において、非質量依存の酸素同位体分別を示す珪酸塩微粒子の生成に世界で初めて成功した[11]。

(3) 従来のガス中蒸発法による無機微粒子の生成法を応用して、出発試薬のあるアントラセンやナフタセンの PAH クラスターを生成し、その光学スペクトルを測定した。PAH クラスターは星からの紫外線照射により、合成、成長、変成が同時に起こっていると考えられている。その為、紫外線に対する PAH の振る舞いを明らかにすることが重要である。そこで、出発試薬を用いて作製した PAH クラスターの UV に対する変成実験を行なった。さらに、昨年8月にすばる望遠鏡を用いた観測を行い惑星状星雲の環境での PAH から PAH クラスターへの成長の様子と、HII 領域、反射星雲、Young Stellar Objects 中で PAH クラスターが破壊されて free flying PAH となる変成のプロセスをサイズの観点から探る研究を行った。この成果をまとめ、IAU Symposium[32] や The Workshop on the Chronology of Meteorites and the Early Solar System[37] など[27] の国際会議で報告した。PAH クラスター実験の成果を論文としてまとめ、*Earth, Planets and Space* に掲載の運びとなった[1]。

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 14 件)

全て査読有

- ① M. Saito, I. Sakon, C. Kaito, Y. Kimura, Formation of polycyclic aromatic hydrocarbon grains using anthracene and their stability under UV irradiation, Earth, Planets and Space, in press.
- ② Y. Kimura, C. Kaito, Possible Driving Force behind Formation of Cosmic Carbyne Crystals, *The Astrophysical Journal Letters*, 685 (2008) L83-86.
- ③ Y. Kimura, S. Sasaki, H. Suzuki, A. Kumamoto, M. Saito, C. Kaito, Experimental Demonstration of Condensation of Mg-Bearing Silicate Grains around Evolved Stars, *The Astrophysical Journal*, 684 (2008) 1496-1501.
- ④ Y. Kimura, Y. Miyazaki, A. Kumamoto, M. Saito, C. Kaito, Characteristic Low-Temperature Crystallization of Amorphous Mg-Bearing Silicate Grains Under Electron Irradiation, *The Astrophysical Journal Letters*, 680 (2008) L89-L92.
- ⑤ 木村勇氣, 原始太陽系星雲中での物質進化に関わるダストの振る舞い, *日本惑星科学会誌*, 17 (2008) 62-68.
- ⑥ Y. Kimura, C. Kaito, Production of refractory-metal ultrafine particles by gas evaporation method and their surface oxide layer, *Surface and Coatings Technology*, 202 (2008) 4159-4162.
- ⑦ K. Nina, Y. Kimura, K. Yokoyama, O. Kido, G. Binyo, C. Kaito, Direct observation of MoO<sub>2</sub> crystal growth from amorphous MoO<sub>3</sub> film, *Physica E*, 40/9 (2008) 2995-2998.
- ⑧ F. J. M. Rietmeijer, A. Pun, Y. Kimura, J. A. Nuth III, A refractory Ca-SiO-H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> vapor condensation experiment with implications for calciosilica dust transforming silicate and carbonate minerals, *Icarus*, 195 (2008) 493-503.
- ⑨ C. Kaito, M. Shintaku, R. Sakao, A. Kumamoto, M. Saito, Y. Kimura, S. Ohyagi, S. Morikawa, H. Suzuki, Structural Alterations of Carbon Particles in Saturated Water Vapor, *Japanese Journal of Applied Physics*, 47 (2008) 6588-6591.
- ⑩ C. Kaito, Y. Kinuta, H. Suzuki, S. Adachi, A. Kumamoto, Y. Saito, Y. Kimura, Morphological Alteration and Structure on ZnO Particles Produced in Electric Field, *Journal of the Physical Society of Japan*, 77 (2008) 094708-1 – 094708-4.

- ⑪ Y. Kimura, J. A. Nuth III, S. Chakraborty, M. H. Thiemens, Non-Mass-Dependent Oxygen Isotopic Fractionation in Smokes Produced in an Electrical Discharge, *Meteoritics & Planetary Science*, 42 (2007) 1429-1439.
- ⑫ Y. Kimura, J. A. Nuth III, What is the Driving Force to Form Refractory Oxide Grains? Silicate Spectra Depend on their Formation Environment, *The Astrophysical Journal*, 664 (2007) 1253-1263.
- ⑬ C. Kaito, Y. Miyazaki, A. Kumamoto, Y. Kimura, Exothermic chemical reactions can drive “nonthermal” crystallization of amorphous silicate grains, *The Astrophysical Journal Letters*, 666 (2007) L57-L60.
- ⑭ C. Kaito, R. Ono, R. Sakao, A. Kumamoto, M. Saito, Y. Kimura, S. Ohyagi, Structural alteration of nanostructure carbon particles carrying Pt clusters in H<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> gases, *Japanese Journal of Applied Physics*, 46 (2007) L1141-L1142.

[学会発表] (計 30 件)

- ① 木村勇氣, 隕石中に見られるカルビン結晶の成因から探る炭化水素分子の進化, 名古屋大学 GCOE 「星間物質と構造形成」 PAH 小研究会: プラズマと PAH, 2009 年 3 月 23 日, 名古屋大学.
- ② Y. Kimura, Formation of nanoparticles in gas phase, The 2nd International Symposium "Interface Mineralogy" in conjunction with The 2nd International workshop "Crystallization in The Early Solar Nebula 4.6 Billion Years Ago", 2009 年 3 月 9-12 日, Tohoku University. (招待講演)
- ③ 木村勇氣, Formation process of forsterite via condensation from gas phase around evolved stars and in primitive solar nebula, 第一回ワークショップ『46 億年前の原始太陽系星雲における結晶』, 2008 年 11 月 19-20 日, 東北大学.
- ④ 木村勇氣, ナノ粒子と惑星科学, 東北大学 GCOE セミナー, 2008 年 11 月 18 日, 東北大学.
- ⑤ Y. Kimura, Transmission electron microscope study on the formation of carbyne crystals via synchrotron radiation irradiation, JANE-2008 Japan-Netherlands Symposium on Crystal Growth -Theory and in situ Measurements-, 2008 年 10 月 20-23 日, Chateraise Gateaux Kingdom, Sapporo.
- ⑥ Y. Kimura, How forms observed low-temperature crystalline silicate: Approach from laboratory experiments, Workshop for Interstellar Matter 2008, 2008

- 年 9 月 4-6 日, Hokkaido University. (招待講演)
- ⑦ **Y. Kimura**, C. Kaito, J. A. Nuth III, Crystallinity of Mg-bearing silicate grains due to condensation or thermal evolution, 71th Annual Meeting of the Meteoritical Society, 2008 年 7 月 27-8 月 1 日, Kunibiki Messe, Matsue.
- ⑧ **Y. Kimura**, C. Kaito, Possibility of low-temperature crystallization of silicate in protostars, Silicate Dust in Protostars: Astrophysical, Experimental and Meteoritic Links, 2008 年 7 月 25-26 日 Busan, Korea.
- ⑨ **木村勇氣**, 衝撃波後面におけるシリケートダストの凝縮に対する実験的アプローチ第三回コンドリュール研究会、2008 年 7 月 14-15 日, 東北大学.
- ⑩ **Y. Kimura**, Growth of nanometer-sized solid particles and their cluster, *Asia Oceania Geosciences Society 5th Annual Meeting*, June 16-20, 2008, Busan, Korea. (招待講演)
- ⑪ C. Kaito, A. Kumamoto, M. Saito, **Y. Kimura**, Low Temperature Crystallization of Thin Amorphous Silicate Layer on the Crystalline Fe Dust, *Asia Oceania Geosciences Society 5th Annual Meeting*, June 16-20, 2008, Busan, Korea.
- ⑫ T. Miyashita, A. Kumamoto, M. Saito, **Y. Kimura**, C. Kaito, Laboratory Production of Crystalline and Amorphous Forsterite Grains, *Asia Oceania Geosciences Society 5th Annual Meeting*, June 16-20, 2008, Busan, Korea.
- ⑬ M. Saito, **Y. Kimura**, C. Kaito, Laboratory Experiments on the PAH Grains with Inorganic Matters and Their Alteration by Plasma, *Asia Oceania Geosciences Society 5th Annual Meeting*, June 16-20, 2008, Busan, Korea.
- ⑭ A. Kumamoto, **Y. Kimura**, C. Kaito, Characteristic Grain Formation in Hydrogen Gas Atmosphere, *Asia Oceania Geosciences Society 5th Annual Meeting*, June 16-20, 2008, Busan, Korea.
- ⑮ **木村勇氣**, S. Chakraborty, J. A. Nuth III, Laboratory synthesized silicate grains with mass dependent and independent oxygen isotopic fractionation, 日本地球惑星科学連合大会 2008 年連合大会、2008 年 5 月 25-30 日、幕張メッセ国際会議場、千葉市.
- ⑯ **木村勇氣**, 宮下徹平、熊本明仁、齋藤碧、 堀内千尋、晩期星に見られる結晶質シリケートの生成過程に対する再現実験、日本天文学会 2008 年春季年会、p30、2008 年 3 月 24-27、国立オリンピック青少年総合センター、東京都.
- ⑰ **Y. Kimura**, C. Kaito, Formation of carbyne crystals via synchrotron radiation irradiation, *IAU Symposium 251: Organic Matter in Space*, February, 18-22, 2008, HongKong, China.
- ⑱ M. Saito, **Y. Kimura**, C. Kaito, What kind of change do polycyclic aromatic hydrocarbons undergo in plasma environments?, *IAU Symposium 251: Organic Matter in Space*, February, 18-22, 2008, Hong Kong, China.
- ⑲ A., Kumamoto, **Y. Kimura**, Chihiro Kaito, In Situ Observation of Structural Alteration Process of Filmy Quenched Carbonaceous Composite, *IAU Symposium 251: Organic Matter in Space*, February, 18-22, 2008, Hong Kong, China.
- ⑳ S. Chakraborty, **Y. Kimura**, Oxygen Isotopic Study of Smoke Particles Synthesized in RF Plasma, *Terrestrial Planets: Evolution through Time*, 22-25 Jan., 2008, Ahmedabad, India.
- ㉑ **Y. Kimura**, J. A. Nuth III, C. Kaito, Laboratory Annealing Experiments of Refractory Silicate Grain Analogs using Differential Scanning Calorimetry, *The Workshop on the Chronology of Meteorites and the Early Solar System*, November 5-7, 2007, Kauai, Hawaii.
- ㉒ C. Kaito, **Y. Kimura**, Crystallizations of Forsterite from Amorphous Mg-Bearing Silicate Grains, *The Workshop on the Chronology of Meteorites and the Early Solar System*, November 5-7, 2007, Kauai, Hawaii.
- ㉓ M. Saito, **Y. Kimura**, C. Kaito, Laboratory Experiments on the Formation of PAH Clusters and their Alteration with Inorganic matter by Plasma, Ultraviolet and Electron Beam Irradiation, *The Workshop on the Chronology of Meteorites and the Early Solar System*, November 5-7, 2007, Kauai, Hawaii.
- ㉔ 横山香織, 山下鉄平, 熊本明仁, **木村勇氣**, 小池千代枝, 堀内千尋、原始太陽系星雲中におけるCaS粒子の生成メカニズムと酸素ガスの効果、第37回結晶成長国内会議 NCCG-37、2007年11月5-7日、北海道大学.
- ㉕ 新名賢治, 熊本明仁, **木村勇氣**, 堀内千尋 マグネシウム粒子の窒素プラズマ中での構造変化、第37回結晶成長国内会議 NCCG-37、2007年11月5-7日、北海道大学.
- ㉖ 熊本明仁, **木村勇氣**, 堀内千尋, 齋藤嘉夫、アルミ空孔クラスター形成過程のその場観察、第37回結晶成長国内会議NCCG-37、2007年11月5-7日、北海道大学.
- ㉗ 弥永英臣, 熊本明仁, **木村勇氣**, 堀内千尋、アドヴァンスドガス中蒸発法によるZrO<sub>2</sub> ナノ粒子の構造と相転移、第37回結晶成長国内会議NCCG-37、2007年11月5-7日、北海

道大学.

- ⑳ 山下鉄平, **木村勇氣**, 城戸修, 熊本明仁, 墻内千尋、鉄ニッケル同時蒸着薄膜の構造とテトラテーナイト相の生成、第37回結晶成長国内会議 NCCG-37、2007年11月5-7日、北海道大学.
- ㉑ **木村勇氣**、原始太陽系星雲中での物質進化に関わるダストの振る舞い、日本惑星科学会 2007年秋季講演会「**2006年度惑星科学会研究者賞受賞記念講演**」、2007年9月26日、高知大学. (特別講演)
- ㉒ 齊藤碧、**木村勇氣**、墻内千尋、PAHクラスターの成長に及ぼすプラズマ効果、日本惑星科学会 2007年秋季講演会、2007年9月26日、高知大学.

[図書] (計 1件)

- ①現代の天文学 第6巻「星間物質と星形成」共著 2008 日本評論社  
総ページ数325 149-153

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

木村 勇氣(KIMURA YUKI)  
北海道大学・低温科学研究所・博士研究員  
研究者番号: 50449542