

原始惑星系円盤におけるダスト整列過程 Grain alignment in protoplanetary disks

*田崎 亮^{1,2}、Lazarian Alexandre³、野村 英子²

*Ryo Tazaki^{1,2}, Alexandre Lazarian³, Hideko Nomura²

1. 京都大学、2. 東京工業大学、3. ウィスコンシン大学マディソン校

1. Kyoto University, 2. Tokyo Institute of Technology, 3. University of Wisconsin, Madison

近年、ALMAによって(サブ)ミリ波域における原始惑星系円盤の偏光特性が明らかになりつつある。しかし、これらの波長における偏光の起源は未だ明らかになっていない。そこで、我々は(サブ)ミリ波における円盤偏波の起源を探る為、原始惑星系円盤におけるダストの整列過程について検討を行った。

我々はダストの輻射整列理論と円盤の3次元輻射輸送シミュレーションを組み合わせ、円盤中の各場所における輻射トルクの大きさを計算し、円盤の各場所において整列可能なダスト半径、整列軸を求めた。輻射トルクによるダスト整列理論によると、ダストの歳差運動の歳差軸が整列軸となる。星間空間においては、ダストは磁場周りをLarmor歳差運動していると考えられているため、磁場に対してダストが整列していると考えられている。しかし、今回、円盤中のmmサイズのダストの場合、円盤ガスの影響によってLarmor歳差運動が妨げられ、ダストが磁場に整列することは困難であることがわかった。その代わりに、このようなダストに対して輻射トルクを成因とする輻射歳差運動が支配的な歳差運動となるため、輻射フラックスの向きにダストが整列することがわかった。従って、mmサイズのダストをトレースすると考えられる(サブ)ミリ波での円盤偏光撮像観測においては、磁力線の構造ではなく、輻射場をトレースするような偏光ベクトルが観測されることになる。一方で、円盤表層に存在するミクロンサイズのダストも磁性体に欠乏している場合は、同様に、輻射フラックスの向きに整列する。しかし、ダストが超常磁性体を豊富に含む場合、円盤表層のガス密度の薄い領域で磁場に対する整列が可能であることを示した。このような表層のミクロンサイズのダストは中間赤外線偏光撮像観測によって観測が可能であることがわかった。

キーワード：原始惑星系円盤、偏光観測、ダスト整列

Keywords: Protoplanetary disks, polarimetric observations, grain alignment

3D radiation hydrodynamics simulations of gravito-turbulence in protoplanetary disks

*廣瀬 重信¹、Shi Ji-Ming²

*Shigenobu Hirose¹, Ji-Ming Shi²

1. 国立研究開発法人海洋研究開発機構、2. Princeton University

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Princeton University

Angular momentum transport in protoplanetary disks controls their time evolution and thus strongly affects the planet formation process within them. In some cold and massive protoplanetary disks, angular momentum can be transported by shear stresses associated with the gravitational instability (GI). A natural consequence of the long-range nature of gravity is formation of spiral arms as a result of GI, which globally transport angular momentum. On the other hand, Gammie (2001) showed another nonlinear outcome of GI, called gravito-turbulence, in which angular momentum transport can be described locally as in the alpha disk model (Shakura & Sunyaev 1973). Following Gammie (2001), many authors have studied numerically various aspects of the gravito-turbulence, but, in most cases, a simple cooling function with a constant cooling time has been used as in Gammie (2001).

In this paper, we present 3D radiation hydrodynamics simulations in a local shearing box to explore the outcome of self-gravity in a protoplanetary disk with realistic thermodynamics. We found that gravito-turbulence is sustained for a finite range of the surface density, from 20 to 50 times the one in the minimum mass solar nebula at 50AU, when the grazing angle of the irradiation is 0.02. The flow is laminar below the range while fragmentation occurs above the range. In the range of gravito-turbulence, the Toomre parameter decreases monotonically from 1 to 0.7 as the surface density increases while an effective cooling time takes an almost constant value that depends on the radius. The turbulent motions are supersonic at all heights, which dissipates through both shock waves and compressional heating. The compressional motions, occurring near the midplane, create upward flows, which not only contribute to supporting the disk but also to transporting the dissipated energy to the disk surfaces. We also show that the simple cooling function with a constant cooling time does not approximate the realistic cooling.

キーワード：原始惑星系円盤、重力不安定、乱流

Keywords: protoplanetary disk, gravitational instability, turbulence

誘導熱プラズマ装置を用いた宇宙ダスト模擬微粒子の合成 Synthesis of cosmic dust analogue particles in the newly developed ITP (induction thermal plasma) system

*Kim Taehee¹, Tsuchiyama Akira¹, Takigawa Aki¹, Matsuno Junya¹

*Taehee Kim¹, Akira Tsuchiyama¹, Aki Takigawa¹, Junya Matsuno¹

1. 京都大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻

1. Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University

Cosmic dust formed by condensation from high temperature gas around young and evolved stars or in the primordial solar nebula [1,2]. Some of them could be building block of our solar system. The ITP (Induction Thermal Plasma) system enables the formation of nanoparticles from supersaturated vapors by homogeneous nucleation and growth because it offers vaporization of refractory materials at thousands of degree Celsius and very rapid quenching rates [3]. It can also control the evaporation and condensation environments by adjusting the characteristic of the thermal plasma. Moreover, condensation experiments from gases with various chemical compositions can be relatively easily performed in the ITP system because almost any reagents can be introduced into the plasma. For example, GEMS-like materials were reproduced in the different ITP system in the previous study [2]. In order to examine the formation processes of various cosmic dust analogues, a new ITP system (JEOL TP-40020NPS, max. 6 kW) was set up in our laboratory. The objective of the research is examination of the performance of the newly developed ITP system on production of nano-sized condensates simulating cosmic dust formation in circumstellar environments. We have already performed preliminary examinations using starting materials of SiO₂ (quartz), MgO (periclase), and Si-Mg-Fe-Na-Al-Ca-Ni-O in our ITP system [4]. In this study, we performed condensation experiments in the system of MgO-SiO₂ and examined the performance of the ITP system by changing plasma conditions. We used mixtures of periclase and quartz powders with 1:1 molar ratio as starting materials for all experiments. The various operating parameters were applied to improve the evaporation rate and condensation conditions, such as feeding rates of starting material, reactor pressures, the presence of an additional slit gas, and the injecting direction of plasma forming gas. Plasma input power was fixed at 6 kW. The produced powders were analyzed by XRD, FT-IR, SEM, and TEM. Nano-sized condensates of amorphous silicate, forsterite, and protoenstatite were observed in most of the experimental products. We found that (1) the feeding rate of the starting material and reactor pressure control the vapor density and residence time at the high temperature regions of the plasma flame, (2) the vapor condenses into particles more rapidly by injecting the slit gas into the plasma flame, and (3) the injecting direction of the plasma forming gas changes temperature distribution of the plasma flame, which most influences condensation conditions. The plasma forming gas flows into the plasma generating torch axially (tangential flow) or swirly (radial flow). The radial flow provides a longer and narrower plasma flame that improves the residence time of the starting material at the high temperature region than the tangential flow. The more uniform nanoparticles were produced in the radial flow condition.

References:

- [1] L. P. Keller et al. (2011) *Geochim. Cosmochim. Acta*, 75, 5336–5365.
- [2] J. Matsuno (2015) Ph.D. thesis, Kyoto University, Japan
- [3] M. I. Boulos et al. (1994) *Thermal Plasmas-fundamentals and applications*, New York and London
- [4] T. H. Kim et al. (2016) JAMS (Japan Association of Mineralogical Sciences) meeting, R5-P04 (abstract)

キーワード : Cosmic dust, GEMS, Induction thermal plasma, Condensation experiment, Nanomaterial synthesis, Infrared spectrum

Keywords: Cosmic dust, GEMS, Induction thermal plasma, Condensation experiment, Nanomaterial synthesis, Infrared spectrum

星周ダスト形成を模擬したMg-Si-O系での凝縮実験：Mg/Si比依存性 Condensation experiments in the Mg-Si-O system for understanding of circumstellar dust formation: dependence on the Mg/Si ratio.

*瀧川 晶^{1,2}

*Aki Takigawa^{1,2}

1. 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻、2. 京都大学白眉センター

1. Division of Earth and Planetary Science, Kyoto University, 2. The Hakubi Center for Advanced Research, Kyoto University

Silicates are major dust species around young and evolved stars, and in the interstellar medium. Experimental and theoretical studies on solid formation are crucial for understanding the origin of precursor materials of chondrites and dust formation around stars. Condensation experiments of silicates were performed in various systems, where most of the studies evaporated starting materials with compositions of $(\text{Mg}_x, \text{Fe}_{1-x})_2\text{SiO}_4$, SiO_2 , and MgO [1-7]. Condensation from vapors with different Mg/Si ratio, however, has not been studied systematically. In this study, we performed condensation experiments of silicates from vapors with various Mg/Si ratios to examine the condensation sequence in different circumstellar environments.

Condensation experiments were carried out in a vacuum chamber. We produced Mg-Si-O gases by evaporation of (1) melts with Mg/Si ~ 1 (Exp02 and 03) and (2) SiO_2 and MgO powders separately filled in Knudsen cells (Exp04-06) placed on the bottom of the crucible of 90 mm in depth. Here, the Mg/Si ratio was controlled by changing the size of the hole on the lids of the Knudsen cells to be 0.9, 1.6, and 20.0, respectively. The vapors condense onto Pt (Exp02-05) and Ir (Exp06) wires of 50-80 mm in length hung from the top of the crucible. The temperature gradient on the wire was measured by thermocouples before the experiments.

A mixture of SiO_2 and MgO powders were heated as a gas source at 1650 (Exp02) and 1580°C (Exp03), which are higher than the melting temperature. We obtained condensates on the Pt-wires. In Exp02, forsterite was obtained at ~1570°C and clino-enstatite at lower temperature regions. In Exp03, ortho- (or proto-) enstatite was observed at the highest temperature region (~1520°C) and forsterite was not confirmed. Clino-enstatite covered the Pt-wire at lower temperatures than 1510°C.

Quartz and periclase powders were put into Ir Knudsen cells separately and heated at 1580°C (Exp03-06). No condensate was observed at >1360°C. Forsterite covered the wires at <1350°C and enstatite was not condensed at lower temperatures. No clear difference was observed between the three experiments with different Mg/Si ratio of 0.9-20.0.

Fractional evaporation may have occurred from Mg-Si-O melts, and the gas composition gradually enriched in Si compared to Mg during the experiments. We did not use Knudsen cells for the experiments Exp02 and 03. Therefore, the differences between the condensation experiments from gases evaporated from melts and powders may be the Mg/Si ratio and gas fluxes. As future works, we plan to perform experiments with much lower Mg/Si ratios and with higher gas fluxes (higher supersaturation ratios) to determine the condition to form clino- and proto-enstatite from gas phases.

[1] Mysen, B. O. and Kushiro, I. (1988) *Am. Min.* **73**, 1-19. [2] Nagahara, H. et al. (1988) *Nature* **331**, 516-518. [3] Tsuchiyama, A. (1988) *Mineral. J.* **20**, 59-80. [4] Toppani, A. et al. (2006) *GCA*, **70**, 5035-5060. [5] Kobatake H. et al. (2008) *Icarus*, **198**, 208-217. [6] Yamada, J. et al. (2008) *The 1st International Workshop "Crystallization in The Early Solar Nebula 4.6 Billion Years Ago"*. [7] Tachibana, S.

and Takigawa, A. (2013) *LPS XXXIV*, #1799.

キーワード：凝縮、実験、ケイ酸塩、星周ダスト

Keywords: condensation, experiments, silicate, circumstellar dust

宇宙における分子進化：星間雲から原始惑星系まで Evolution of molecules in space: from interstellar clouds to proto-planetary nebula

*香内 晃¹、橘 省吾²

*Akira Kouchi¹, Shogo Tachibana²

1. 北海道大学低温科学研究所、2. 北海道大学理学研究院

1. Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, 2. Graduate School of Sciences, Hokkaido University

Our understanding of the origin and evolution of planetary systems has been mostly limited to the dynamics. The importance of chemistry has been emphasized, however, systematic studies about chemical evolution have not yet been performed. We have thus started research project on “Evolution of molecules in space” supported by Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas from MEXT, Japan from 2013.

We focus our attention on the most abundant solid materials in space: ices and organic materials. How do these molecules evolve in space? We aim at answering this question by interdisciplinary approaches including laboratory and theoretical studies about surface processes, observation of young stellar objects, modeling of molecular cloud and protoplanetary-disk chemistry, and analyses of extraterrestrial materials.

We are now investigating the evolution of molecules by following groups; (1) Experimental studies about surface reactions of atoms and molecules and photochemical reactions of solids at low temperatures to mimic phenomena occurring in molecular clouds (PI: A. Kouchi, Hokkaido Univ.), (2) Heating experiments of molecular-cloud organics and Fischer-Tropsch type surface reaction experiments to mimic phenomena occurring in proto-planetary nebulae (PI: H. Nagahara, Univ. of Tokyo), (3) Observation of young stellar objects by radio telescopes (ALMA, ASTE etc.) to understand the evolution and variety of organic molecules (PI: S. Yamamoto Univ. of Tokyo), (4) Modeling of surface processes and developing of chemical network model (PI: T. Fukazawa, Meiji Univ.), and (5) Analyses of chemical and isotopic composition of organic molecules in meteorites and cometary dust (PI: H. Yurimoto, Hokkaido Univ.). I will introduce some important achievements of respective groups.

Our project will contribute to not only the understanding of origin and evolution of molecules in space but also the analysis of returned samples by Hayabusa 2 and OSIRIS-REx. We have developed some new analytical setups: High-resolution imaging-type soft X-ray microscope/spectrometer, two-dimensional HPLC-MS for amino acids analysis, high-sensitive HPLC-MS for organic material analysis, etc.

キーワード：分子進化、氷、有機物、星間分子雲、原始惑星系円盤

Keywords: Evolution of molecules, Ices, Organic materials, Interstellar molecular clouds, Proto-planetary disk

炭化水素5員環・6員環結合モデル分子による星間赤外スペクトルの再現 Reproducing interstellar infrared spectrum by modeling a hydrocarbon pentagon-hexagon combined molecule

*太田 憲雄¹

*Norio Ota¹

1. 筑波大学・数理物質科学研究科

1. University of Tsukuba, Graduate school of pure and applied sciences

星間の多環炭化水素に由来する赤外スペクトルは、数千光年離れた多数のダスト雲でも共通の発光パターンを示す¹⁾。これらの有機分子は生命発現に至る化学進化の第一ステップではないかと推論されている。しかしこれまで数千種にわたる多環芳香族炭化水素 (PAH) が地上実験と量子化学計算両面から追及されてきたものの¹⁾、この観測スペクトルを再現できる単一あるいは数個の優位な分子種は未だに見出されていない。

今回5員環・6員環結合の炭化水素に着目し、電荷とスピンをパラメーターとして量子化学計算を行った。数多くの候補の中で、2価陽イオン $C_{23}H_{12}^{2+}$ (5員環2個+6員環5個) の赤外発光スペクトルが、単一分子でありながら3~15ミクロンの範囲で観測結果をほとんど再現できることが分かった²⁾。またこれより小さい $C_{12}H_8^{3+}$ (5員環1個+6員環2個) でも主要波長が一致した。Table 1 にその結果を示す³⁾。

Table 1、Observed interstellar Infrared spectrum and calculated wavelength of hydrocarbon pentagon-hexagon combined molecule $C_{23}H_{12}^{2+}$ and $C_{12}H_8^{3+}$

Observation (micrometer) : 3.3, 6.2, 7.6, 7.8, 8.6, 11.2, 12.7, 14.3

Calculation on $C_{23}H_{12}^{2+}$: 3.2, 6.4, 7.6, 7.8, 8.6, 11.2, 12.7, 14.1

Calculation on $C_{12}H_8^{3+}$: 3.2, 6.4, 7.5, 7.8, -, 11.2, -, -

このような単一分子での一致は初めてであり、5員環・6員環結合の炭化水素が重要な星間有機分子のファミリーになっている可能性を示唆する。こうした分子ファミリーが生じたひとつの仮説としては、恒星爆発などで生じたグラフェン様物質に、空孔を生じさせる高エネルギー粒子 (主にプロトン)、さらに多価の陽イオンを生じさせる高エネルギー光が照射されて起きたと考えている。

参考文献

- 1) Christiaan Boersma et al, *Astrophysical Journal* 690.1208 (2009)
- 2) Norio Ota, arXiv:1412.0009 (2014)
- 3) Norio Ota, arXiv:1510.07403(2015)

キーワード : 星間ダスト、赤外スペクトル、PAH

Keywords: interstellar dust, infrared spectrum, PAH

低質量星形成領域L1527における長鎖炭素鎖分子 CH_3CCCCH , C_6H , *linear-C₆H₂*, C_7H の検出

Detections of Long Carbon Chains CH_3CCCCH , C_6H , *linear-C₆H₂* and C_7H in the Low-Mass Star Forming Region L1527

*荒木 光典¹、高野 秀路²、坂井 南美³、山本 智⁴、小山 貴裕¹、久世 信彦⁵、築山 光一¹

*Mitsunori Araki¹, Shuro Takano², Nami Sakai³, Satoshi Yamamoto⁴, Takahiro Oyama¹, Nobuhiko Kuze⁵, Koichi Tsukiyama¹

1. 東京理科大学理学部第一部化学科、2. 日本大学、3. 理化学研究所、4. 東京大学、5. 上智大学

1. Department of Chemistry, Faculty of Science Division I, Tokyo University of Science, 2. Nihon University, 3. RIKEN, 4. The university of Tokyo, 5. Sophia University

我々はアメリカ国立電波天文台のGBT 100 m 電波望遠鏡を用いて、Warm Carbon Chain Chemistry (WCCC) 領域における炭素鎖分子の存在量調査を42-44 GHz帯で行った。長鎖の炭素鎖分子 C_7H , C_6H , $\text{CH}_3\text{C}_4\text{H}$, *linear-C₆H₂*と環状分子 C_3H , $\text{C}_3\text{H}_2\text{O}$ が検出できた。特に、 C_7H は分子雲での初の検出となった。その柱密度は $6.2 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ と求められた。 C_6H の基底状態 $^2\Pi_{3/2}$ の21.6 K上に存在する電子励起状態 $^2\Pi_{1/2}$ と*linear-C₆H₂*のパラ種も、分子雲での初の検出となった。 C_6H の柱密度は $1.3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 、*linear-C₆H₂*は $1.86 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ となった。これまでに得られているTMC-1とL1527での炭素鎖分子の柱密度（存在量）を比較すると、炭素鎖が長くなるとL1527での柱密度が少なくなる傾向がある。 $\text{CH}_3\text{C}_2\text{H}$ と $\text{CH}_3\text{C}_4\text{H}$ の間では、この傾向が表れている。しかし、*linear-C₆H₂*と C_7H の場合、その傾向からずれ、L1527でも存在量がTMC-1と同等であった。よって、観測された*linear-C₆H₂*と C_7H の存在量は、L1527もTMC-1同様に炭素鎖分子が豊富であることを示す。

キーワード：炭素鎖、電波、分子雲

Keywords: carbon chain, radio, molecular cloud

鉄、ニッケルおよび、その合金基板上での水素と一酸化炭素の触媒反応効率

Reaction efficiency between hydrogen and carbon monoxide on a catalytic substrate of iron, nickel or its alloy

*木村 勇気¹、佐藤 里佳子¹、土山 明²、永原 裕子³、羽馬 哲也¹、日高 宏¹、渡部 直樹¹、香内 晃¹
 *Yuki Kimura¹, Rikako Sato¹, Akira Tsuchiyama², Hiroko Nagahara³, Tetsuya Hama¹, Hiroshi Hidaka¹, Naoki Watanabe¹, Akira Kouchi¹

1. 北海道大学低温科学研究所、2. 京都大学、3. 東京大学

1. Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, 2. Kyoto University, 3. University of Tokyo

Reaction of hydrogen and carbon monoxide on a catalytic substrate to form methane and water has widely been used to synthesize fuel and called the Fischer-Tropsch reaction (FT reaction). Typical conditions of the FT reaction for manufacturing application is a total gas pressure of 10^5 - 10^6 Pa with a ratio of $H_2 / CO = 2$ at 500-650 K together with a catalysis of Fe, Co or Ru[1]. Then, water-gas shift reaction has been occurred as a side reaction; carbon dioxide and hydrogen molecules form from carbon monoxide and water. The efficiencies of both reactions depend on the substrate, temperature, pressure and other conditions. Cobalt has most been used as a catalysis because of the lower activity of the side reaction [2,3]. Although the FT reaction has been used for long years, the atomic/molecular scale mechanisms that govern the FT reaction are still disputable [4]. Therefore, it is not obvious that the results of the reaction experiments are able to extrapolate to the actual solar nebula environment. Here we demonstrate the reaction rates in the solar nebula conditions (below 500 K and under 10^2 Pa) on the surface of cosmic dust particles, such as iron, iron-nickel alloys and nickel.

We developed an experimental system to test the catalytic chemical reactions in the temperature and pressure ranges of 50-800 K and 10^{-3} - 10^3 Pa, respectively, using a metallic plate as a catalytic substrate. Our experimental system has a temperature-controlled substrate, a Fourier transform infrared spectrometer (FT-IR), and two quadrupole mass spectrometers (Q-MSs). FT-IR is able to measure the vibration modes of adsorbed and produced molecules on the substrate. Currently, several IR features has been detected at the temperature below 150 K. To identify the mass signal of produced methane and water in the Q-MSs spectra, deuterium was used instead of hydrogen. The intensity of the signal of masses 20 and 44 decreases as temperature decrease from 800 K. The mass 20 corresponding to D_2O and CD_4 , which are first products in the Fischer-Tropsch type reaction, was detected. Simultaneously, mass 44 corresponding to CO_2 was also detected. In our presentation, the substrate dependence of the reaction efficiency will be presented.

References

- [1] Van der Laan & Beenacker *Catal. Rev. Sci. Eng.* 1999.
- [2] Chaumette et al. *Top Catal.* 1995.
- [3] Anderson *The Fischer-Tropsch synthesis* 1984.

Acknowledgment: This work was supported by a grant-in-aid for Scientific Research on Innovative Areas "Evolution of molecules in space from interstellar clouds to proto-planetary nebulae" supported by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, Japan (25108003).

キーワード：FT反応、表面反応、原始太陽系星雲

Keywords: Fischer-Tropsch reaction, Surface reaction, Solar nebula

New formation mechanisms of meteoritic amino acids based on the discovery of hydroxy amino acids identified in the Murchison meteorite

*古賀 俊貴¹、奈良岡 浩¹

*Toshiki Koga¹, Hiroshi Naraoka¹

1. 九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門

1. Department of Earth and Planetary Sciences Kyushu University

Introduction: Carbonaceous chondrites contain a diverse suite of extraterrestrial amino acids, which have various structures such as α , β , γ or δ amino-group [1], while terrestrial life use only α -amino acids. The distribution of meteoritic amino acids had been influenced by aqueous alteration on the meteorite parent body (e.g. α -aminoisobutyric acid versus β -alanine [2], and L-enantiomeric excess of isovaline [3]). However, a comprehensive formation mechanism, which could explain the diversity of meteoritic amino acids, remains unclear. In our previous study, nine new hydroxy amino acids and one β -aminodicarboxylic acid were identified in the extract of the Murchison for the first time (Koga and Naraoka, under revision). In this study, the simulation experiments of amino acid synthesis were performed under plausible conditions of the meteorite parent body in order to pursue their formation mechanisms.

Materials and Methods: The aqueous solutions containing ammonia/formaldehyde/acetaldehyde and/or glycolaldehyde (100/10/1/1 by mol) with $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ (1/100 by mol) were heated at 60 °C for 6 days in a N_2 -purged glass ampoule with or without olivine or quartz powder with the water/mineral ratio of 1/9 (by weight). The reaction mixtures were extracted with hot water at 100 °C for 20 h. The supernatants were divided into three fractions: one hydrolyzed with 6M HCl for analysis of amino acid distribution, and two non-hydrolyzed for investigation of their precursors. The hydrolyzed and one non-hydrolyzed fractions were analyzed by GC/MS with a Chirasil-L-Val capillary column. The other non-hydrolyzed fraction was analyzed by GC/MS with a DB-5 capillary column.

Results and Discussion: The simulation experiments gave totally 20 amino acids including the nine new amino acids identified in the Murchison extract by our previous study (Koga and Naraoka, under revision). Glycine was the most abundant (approximately 0.1 % relative to the total initial carbon concentration of aldehydes), which is the similar occurrence as observed by the previous study. The amount and variety of amino acids increased in the presence of olivine compared to those in the absence of olivine and the presence of quartz. When glycolaldehyde was used in addition to formaldehyde, acetaldehyde and ammonia, the yield of hydroxy amino acids increased 1.4 times, but β -aminodicarboxylic acid decreased by one-fifth relative to the experiment in the absence of glycolaldehyde. These results indicate that formose reaction with ammonia in the presence of mineral is an important formation pathway to produce meteoritic amino acids during aqueous alteration on the meteorite parent body. In addition, the identification of a hydroxy amino acid precursor (3-Hydroxy-2-pyrrolidinone) is suggestive of a possible formation pathway using the formose reaction products with ammonia.

References: [1] Burton A. S. et al. (2012) Chem. Soc. Rev., 41, 5459-5472. [2] Glavin D.P. et al. (2006) Meteor. Planet. Sci., 41, 889-902. [3] Glavin D. P. and Dworkin J. P. (2009) Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 106, 5487-5492.

キーワード：炭素質コンドライト、アミノ酸、ホルモース反応、水質変成、隕石母天体

Keywords: Carbonaceous chondrite, Amino acid, Formose reaction, Aqueous alteration, Meteorite parent body

Bus-DeMeo分類と物理観測から推定される小惑星表層組成: C,Cb,B型小惑星表層における水氷の存在の可能性

Estimation of surface composition of asteroids in combination with Bus-DeMeo taxonomy and other physical observations

*長谷川 直¹、黒田 大介²、柳澤 顕史²、臼井 文彦³

*Sunao Hasegawa¹, Daisuke Kuroda², Kenshi YANAGISAWA², Fumihiko Usui³

1. 宇宙航空研究開発機構、2. 国立天文台、3. 神戸大学

1. Japan Aerospace Exploration Agency, 2. National Astronomical Observatory of Japan, 3. Kobe University

C型小惑星は小惑星の大半を占めていることが知られており(e.g., Usui et al. 2013 ApJ 726, 56)、炭素質コンドライトの母天体であると一般的に考えられている(e.g., Burbine 2008, Rev. Mineral. Geochem. 68, 273)。但し、地球に落ちてくる炭素質コンドライトと小惑星帯のC型小惑星の存在比率は等しいわけではない。これは地球まで隕石を運ぶためのメカニズム（共鳴の強さ、ヤルコフスキー効果の効き方）の小惑星位置での依存性、地球に突入してくる時に小惑星の強度（強度の弱いものは地球突入時に壊れて隕石として生き残れない）等が効いているからである。

小惑星表層の分類は可視光の波長を使って行われていた(e.g., Tholen 1984, PhD thesis, Univ. Arizona; Bus & Binzel 2002, Icarus 158,146)が、近年の近赤外線観測技術の発展により、近赤外波長域の観測が盛んになった背景があり、可視光に加えて近赤外まで拡張したBus-DeMeo分類法が提案されている(DeMeo et al. 2009, Icarus 202, 160)。近赤外線まで適応範囲を拡張したことにより、特に、可視光でfeature-lessだったものが、明瞭に分類できるようになった。

小惑星の物理観測は可視・近赤外線の分光観測以外でも実施されている。Bus-DeMeo分類法とその他の物理観測結果情報を加えることによって、小惑星表層の物理情報を引き出すことができると考えられる。情報の組み合わせによって、小惑星帯の小惑星の組成について新たに制約を引き出すことが本研究の目的である。

本研究ではまず、過去に論文として出版されているあるいは公開済みのデータを集め、Bus-DeMeo分類法に基づき再編し、我々自身の観測結果（岡山天体物理観測所で実施）を加えたデータベースを作成した。

まとめたBus-DeMeo分類データにアルベド観測(AKARI,WISE,IRAS衛星等のデータ)・紫外線観測(Tedesco et al. 1989, AJ 97,580等のデータ)・偏光観測(Cellino et al. 2016, MNRAS 455,2091等のデータ)・レーダー観測(Neese et al. 2012, NASA PDS)等のデータを加えて、情報の引き出しを行った。

紫外線のデータからは、Ch,Cgh型小惑星とC,Cb,B型小惑星の傾向が異なること、X_{low}(X,Xc,Xkでアルベドが0.1以下のものはC,Cb,B型小惑星と似た傾向にあることが分かった。偏光観測からは偏光度の反転角度が低いものがC,Cb,D型小惑星であることが分かった。更にレーダー観測からはOCレーダーアルベドでCh/Cgh型小惑星とC,Cb,B型小惑星を比較するとその一部にレーダーアルベドが低いものが存在しているものが分かった。

偏向角が小さく表層には水氷が存在している可能性が指摘されており(Steigmann 1993, Observatory 113, 70)、OCレーダーアルベドが低い場合には密度の低い物質可能性が指摘されている(Harmon et al. 2004, in Comet II, 211)。このことから、表層近くに水氷の存在の可能性があると期待される。

C型小惑星について近年新しい見解が提案されている(Vernazza et al. 2015, ApJ 806, 204)。Ch,Cgh型の小

惑星の表層組成はCMコンドライトに代表されている水質変性を受けたコンドライト隕石であるが、B,C,Cb,Cg型の小惑星の表層組成は隕石には存在してなく、寧ろ、地球上層大気で採取された惑星間塵のうち無水で輝石が豊富な粒子に近くという説である。B,C,Cb,Cg型にの表層下には水氷と無水含水鉱物が存在しているとも提案されている(Vernazza et al. 2017, AJ 153, 72)。我々の研究結果はこのVernazzaの説に矛盾しない結果になっている。

キーワード：小惑星、隕石

Keywords: asteroid, meteorite

太陽風による宇宙風化を模擬した輝石・かんらん石への水素イオン照射実験

H⁺ irradiation experiments to pyroxene and olivine for simulating space weathering by solar wind.

*浅田 祐馬¹、土山 明¹、瀧川 晶^{1,2}、松本 徹³、仲内 悠祐⁴、安部 正真^{3,4}、渡部 直樹⁵

*Yuma Asada¹, Akira Tsuchiyama¹, Aki Takigawa^{1,2}, Toru Matsumoto³, Yusuke Nakauchi⁴, Masanao Abe^{3,4}, Naoki Watanabe⁵

1. 京都大学大学院理学研究科、2. 京都大学白眉センター、3. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、4. 総合研究大学院大学（総研大）、5. 北海道大学低温科学研究所

1. Division of Earth and Planetary Science, Graduate School of Faculty of Science, Kyoto University, 2. The Hakubi Center for Advanced Research, Kyoto University, 3. Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 4. SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies), 5. Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

月や小惑星などの大気のない天体表面における宇宙風化の原因として、微隕石の衝突、太陽風の照射、宇宙線の照射などが考えられている[1-3]。小惑星においても太陽風照射や微隕石衝突により宇宙風化が起きていると考えられてきたが[3]、はやぶさ探査機が持ち帰った粒子の分析によって、小惑星イトカワ上にブリスターと呼ばれる水ぶくれ構造を伴う非晶質層などの宇宙風化を受けた証拠が見出される[4-6]とともに、太陽風照射が主としてイトカワ粒子の宇宙風化をもたらしたことが指摘された[4]。

太陽風を構成するイオンのほとんどが1 keVのH⁺ (95.41 %) と4 keVのHe⁺ (4.57 %) である[7]。したがって、太陽風による宇宙風化においてそれぞれのイオンがどのような影響を及ぼすのかを明らかにするためには、1 keVのH⁺と4 keVのHe⁺を、イトカワ粒子を構成する鉱物に照射する実験を行う必要がある。ところが、4 keVのHe⁺を照射する実験はこれまで多数行われているのに対して [e.g., 8]、1 keVのH⁺を照射する実験はほとんど行われておらず、太陽風構成粒子の大半を占める1 keVのH⁺が太陽風による宇宙風化においてどのように振る舞うのかは未だ明らかになっていない。

本研究では、宇宙科学研究所において現在開発中のイオンビーム照射装置の性能試験を行うとともに、これを用いて、1 keVのH⁺をオルソエンスタタイトと組成の異なるオリビンに対して照射する実験を行った。実験後の試料は走査型電子顕微鏡（JEOL JSM 7100F）により表面を観察し、一部の試料断面は収束オンビーム装置（FE-SEM/FIB FEI Helios NanoLab 3G CX）で加工し、透過型電子顕微鏡（FE-TEM JEOL 2100F）で観察を行った。

一次元多点ファラデーカップを試料導入方向に移動させることでイオンビームの二次元分布を測定した結果、半値幅1.2-2.7 mmのビームを、電流密度0.52-1.22 $\mu\text{m}/\text{cm}^2$ で再現性よく得られることがわかった。さらに、1時間ごとに多点ファラデーカップの電流値を測定したところ、およそ10時間変化が見られずビームの安定性を確認した。

照射実験のターゲットとして、普通コンドライトの主要構成鉱物であるオルソエンスタタイト（En₉₉, Tanzania）、フォルステライト（Fo₁₀₀, 合成）、オリビン（Fo₉₂, San Carlos）の3種類を用いて、サンプルサイズが3 mm×5 mm、厚さ0.5 mmの平板状の直方体をそれぞれ複数枚用意した。粒径0.25 μm までのダイヤモンド砥粒による機械研磨を行った後に、表面のダメージ層を取り除くために、コロイダルシリカによる化学研磨を行った。その後、超音波洗浄により表面をクリーニングした。

1×10^{17} ions/cm²のH⁺照射によりエンスタタイト表面には、基盤結晶と明瞭な境界をもつ非晶質層（厚さ26 nm）の形成が確認された。これはSRIM計算[9]によって推定される1 keVのH⁺照射によるダメージ層の厚みと調和的である。しかし、未照射領域でも照射領域ほど明瞭な境界はないものの同程度の厚さの非晶質層が見られたことから、サンプル準備の段階で研磨によるダメージ層が取り除ききれなかったことがわかった。また、照射領域には試料表面直下に直径30 nmで密度 3×10^{10} /cm²のブリスターが観察された。これを先行研究

におけるイトカワ粒子[4-6]と比較してみると、ブリストアのサイズや密度、形成深さがイトカワ粒子とよく似ているのに対し、イトカワ粒子の非晶質層の厚さはより深い（40-50 nm）という違いが見られた。この厚さの違いは、4 keVの He^+ は1 keVの H^+ よりもエネルギーが高く、深いところまで入り込むことができる[4,9]ためだと考えられる。以上のことから、イトカワ粒子表面のブリストアの形成は1 keVの H^+ の照射が、非晶質層の形成は4 keVの He^+ の照射が支配的である可能性が示唆される。

[1] Pieters C. T. et al. (2000) MAPS. 35, 1101-1107.

[2] Hapke B. (2001) J. Geophys. Res. 106, 10039-10073.

[3] Clark B. E. et al. (2002) in Asteroid Space Weathering and Regolith Evolution, Asteroids III. pp. 585-599.

[4] Noguchi T. et al. (2014) MAPS. 49, 188-214.

[5] Matsumoto T. et al. (2015) Icarus 257, 230-238.

[6] Matsumoto T. et al. (2016) GCA. 187 195-217.

[7] Reisenfeld D. B. et al. (2007) Space Sci. 130, 79-86.

[8] Demyk K. et al. (2001) A&A 368, L38-L41.

[9] Ziegler J. F. et al. (2008) SRIM -The stopping and range of ions in matters.

キーワード：宇宙風化、太陽風

Keywords: space weathering, solar wind

アモルファス氷表面におけるイオン吸着過程

Adsorption process of ion on amorphous ice surface

*原典史¹、富樫陸、熊谷悠¹、深澤倫子¹

*Norifumi Hara¹, Riku Togashi, Yu Kumagai¹, Tomoko Ikeda-Fukazawa¹

1. 明治大学工学部応用化学科

1. Department of Applied Chemistry, Meiji University, Japan

In interstellar molecular clouds, various molecules (for instance, H₂O, NH₃, CO, CO₂, and so on) are formed from elements such as H, C, O, and N [1]. Most of H₂O exists as a thin shell of amorphous ice around dust grain. The molecules undergo chemical evolutions to organic molecules through various processes on the surface of amorphous ice [2]. Thus, the surface structure of amorphous ice is an important factor to understand the molecular evolution of organic molecules in molecular clouds. To investigate the effects of adsorption of ion on the surface structure of amorphous ice, the molecular dynamics (MD) calculations of amorphous ice with NO₃⁻ were performed.

The MD calculations were performed using an atom-atom potential model, KAWAMURA potential model [3]. The amorphous ice was prepared by quenching of a liquid phase consisting of 2760 water molecules from 280 to 235 K with 2.5 K/fs in cooling rate. After annealing at 235 K, the system was cooled to 10 K. The density of amorphous ice at 10 K was controlled with the time period of the annealing at 235 K. To equilibrate the fundamental cell, the MD code was run for 40 ps at 10 K. Then, an ion (NO₃⁻) was put in a position, such the center of nitrogen in ion was at a distance of 0.5 nm from the outermost hydrogen atom in surface. An infinite surface was simulated by replicating the cell in the directions parallel to the surface using periodic boundary conditions. The pressure was kept at 0.1 MPa. The layer with 0.5 nm in thickness from the outmost atom was analyzed as the surface layer.

The result shows that the atomic displacement parameters (ADP) of oxygen and hydrogen of water molecules in surface layer increase during the adsorption of NO₃⁻. The values are diminished with formation of hydrogen bonds with surrounding water molecules, and gradually approach the values of pure amorphous ice without ions. For surface with NO₃⁻, three oxygen atoms of NO₃⁻ form hydrogen bonds with hydrogen atoms in dangling bonds of water on the surface layer. When an ion is adsorbed, surrounding water molecules rotate to form hydrogen bonds with the ion. Thus, the rearrangement of water molecules occur even at low temperature. The result indicates that the thermal vibrations of water molecules are enhanced with adsorption and diffusion of ions on the surface. To investigate the effects of ion adsorption on smoothing of surface roughness, the potential map of surface layer were calculated. The results show that the potential map charges with a collision of ion on a convex position, whereas no charge was observed when the ion adsorbs on a concave position. This indicates that the smoothing of surface roughness of amorphous ice at low temperature results from ion collisions. The effects of ion adsorption might have important implications for surface reaction in interstellar molecular clouds.

References

[1] A. Kouchi, T. Yamamoto, T. Kuroda, J. M. Greenberg, 1994, *Astron. Astrophys.* 290, 1009.

[2] N. Watanabe, A. Kouchi, 2008, *Surface Science*, 83, 439.

[3] N. Kumagai, K. Kawamura, T. Yokokawa, 1994, *Mol. Simul.* 12, 177.

フォルステライト結晶およびガラスの表面構造 Surface Structures of Forsterite Crystal and Glass

*西澤 隼哉¹、深澤 倫子¹

*Junya Nishizawa¹, Tomoko Ikeda-Fukazawa¹

1. 明治大学大学院理工学研究科応用化学専攻

1. Department of Applied Chemistry, Meiji University

In interstellar molecular clouds, elements such as hydrogen, oxygen, carbon, and nitrogen deposit on dust grains, and form various molecules (e.g., H₂O, CO, CO₂, NH₃, CH₄, H₂CO, CH₃OH, and so on). These molecules undergo chemical evolutions to organic molecules through various processes on the surface of dust grains [1]. Forsterite (Mg₂SiO₄) and enstatite (MgSiO₃) have been observed in interstellar molecular clouds and young stellar objects [2]. Although various studies have been performed for bulk structures of forsterite and enstatite, their surface structures are less conclusive [3]. To investigate the surface structures of forsterite in crystalline and glassy states, molecular dynamics (MD) calculations were performed. The surface structure is one of the important factors governing the chemical evolutions in interstellar molecular clouds.

The MD calculations were performed using an atom-atom potential model [4]. The potential parameters were empirically determined by constraining the model to reproduce the experimental results of density, thermal expansion coefficient, and bulk modulus [4]. The glass structure was prepared by quenching the liquid phase consisting of 2400 Mg₂SiO₄ from 3000 K to 10–1750 K with 2 K/fs in rate. An infinite surface was simulated by replicating the cell in the directions parallel to the surface using periodic boundary conditions. The pressure was kept at 0.1 MPa. The MD code was run with NTV ensemble at each temperature for 500 ps with a time step of 0.5 fs. The layer with 0.5 nm in thickness from the outmost atom was analyzed as the surface layer.

The result shows that the melting temperature of forsterite crystal with surface layer was 1927 K. This value is lower than the MD result of bulk state without surface (2418 K [4]) and experimental result (2171 K [5]). This depression of the melting temperature is attributed to the structure and thermal vibrations of atoms in surface layer of forsterite crystal. The nearest Si–Si distance, which was analyzed using the pair correlation functions of atoms, for surface layer of crystal is larger than that of internal part. Furthermore, the amplitudes of thermal vibrations of atoms in surface layer are larger than those of internal part. The results indicate that a surface layer with low density and high thermal vibrations exists in forsterite crystal. The amplitudes of thermal vibrations in surface layer increase with warming and approach the values of the bulk state at its melting point (i.e., 2418 K) at around 1927 K. This induces the depression of the melting temperature for system with the surface layer. For glassy state, a surface layer with short Si–Si distance exists, although the amplitudes of thermal vibrations of atoms are large in comparison with the values of the internal part. This inverted tendency may be resulted from an inhomogeneous structure of surface layer in the glassy state. The surface structures of crystalline and glassy forsterites have important implications for adsorption, diffusion, and chemical reaction in interstellar dust grains.

References:

- [1] N. Watanabe, A. Kouchi, *Prog. Surf. Sci.*, **83**, 439 (2008).
- [2] J. P. Bradley, L. P. Keller, T. P. Snow, M. S. Hanner, G. J. Flynn, J. C. Gezo, S. J. Clemett, D. E. Brownlee, J. E. Bowey, *Science*, **285**, 1716 (1999).
- [3] S. Kohara, K. Suzuya, K. Takeuchi, C. K. Loong, M. Gimsditch, J. K. R. Weber, J. A. Tangeman, T. S. Key, *Science*, **303**, 1649 (2004).

[4] T. Ikeda-Fukazawa, *J. Soc. Inorg. Mater. Jpn.*, **23**, 130 (2016).

[5] B. T. C. Davis, J. L. England, *J. Geophys. Res.*, **69**, 1113 (1964).

キーワード：フォルステライト、表面、星間分子雲、分子動力学

Keywords: Forsterite, Surface, Interstellar molecular clouds, Molecular dynamics

アルデヒド、ケトンとアンモニアからの含窒素複素環化合物合成:隕石母天体での模擬有機反応

N-heterocyclic compound synthesis from aldehydes and ketone with ammonia: A simulation of organic reactions on the meteorite parent bodies

*宮崎 惇也¹、奈良岡 浩¹、土山 明²

*Junya Miyazaki¹, Hiroshi Naraoka¹, Akira Tsuchiyama²

1. 九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門、2. 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

1. Department of Earth and Planetary Sciences Kyushu University, 2. Division of Earth and Planetary Sciences Kyoto University

[序論]

炭素質コンドライトは太陽系の始原始的な化学組成を持ち、水や炭素などの揮発性成分を含んでいる。始原始的な特徴を持つ一方で、ほとんどの炭素質コンドライトが含水鉱物を持つことから、母天体での水質変質を経験していると考えられている。隕石中の炭素の大半が有機物として存在し、カルボン酸やアミノ酸などの比較的 low molecular weight 化合物である可溶性有機物(SOM, 1~30wt%)と、高分子で複雑な構造を持つ不溶性有機物(IOM)に分類される。地球外での鉱物-有機物相互作用に、水質変質が影響を与えていたことが示唆され、太陽系での有機物の化学進化を研究するために、鉱物の役割を明らかにする必要がある。本研究では、分子雲でも見出される簡単な分子であるアンモニア(NH₃)、ホルムアルデヒド(HCHO)、アセトアルデヒド(CH₃CHO)、プロピオンアルデヒド(CH₃CH₂CHO)、アセトン(CH₃COCH₃)を原料に用いて隕石母天体上の環境を模擬した有機物合成実験を行った。

[実験]

水溶液として、NH₃(1~10)/HCHO(0.1~1)/CH₃CHO(0.01~0.1)/CH₃CH₂CHO(0.01~0.1)/CH₃COCH₃(0.01~0.1)を様々な濃度比(括弧内はモル比)に調製した6種類の反応溶液に、鉱物(Forsterite(San Carlos)、Magnetite(Utah)、合成Forsterite)粉末や非晶質ケイ酸塩(MgSiO₃)粉末を加え、それぞれを窒素ガス置換したアンプル中で60~80°C、144~192時間加熱した。鉱物の、有機物合成への影響を調べるために鉱物が存在しない系の実験も実施した。合計20種類の反応生成物を塩化メチレン/メタノール(2/1,体積比)で抽出し、高速液体クロマトグラフィー質量分析を行った。

[結果と考察]

今回実施した全ての反応系において、アルキルピリジン(C_nH_{2n-5}N)、アルキルイミダゾール(C_nH_{2n-3}N₂)、ヘキサメチレンテトラミン(C₆H₁₂N₄)が同定できた主な生成物であった。また、未同定だが組成式C_nH_{2n-1}N₃Oで表される化合物も主な生成物として検出された。アルキルピリジン、アルキルイミダゾールについては、炭素質隕石から検出されている(e.g. Yamashita and Naraoka, 2014)。一方、ヘキサメチレンテトラミンは炭素質隕石からの報告例はないが、極低温での紫外線照射による模擬星間生成物から主な生成物として検出されている(V. Vinogradoff et al., 2011)。非晶質ケイ酸塩、Forsterite(San Carlos)存在下の系ではヘキサメチレンテトラミンの生成量が減少し、アルキルピリジン、アルキルイミダゾールの生成量が増加した。特に、非晶質ケイ酸塩は分子雲で主な固体物質である(Kemper et al., 2004)ことから、地球外での有機物形成に重要な役割を果たしていたことが示唆される。反応中間体や、反応による鉱物相の変化を明らかにするために、さらなる実験が必要である。

[参考文献]

Yamashita Y. and Naraoka H. (2014) Two homologous series of alkylpyridines in Murchison meteorite. *Geochemical Journal* 48: 519-525.

F. Kemper, W. J. Vriend, and A. G. G. M. Tielens(2004) THE ABSENCE OF CRYSTALLINE SILICATES IN THE DIFFUSE INTERSTELLAR MEDIUM. *The Astrophysical Journal*, 609, 826-837

V. Vinogradoff, F. Duvernay, G. Danger, P. Theulé, and T. Chiavassa New insight into the formation of hexamethylenetetramine (HMT) in interstellar and cometary ice analogs. *Astronomy & Astrophysics* 530, A128

キーワード：化学進化、鉱物-有機物相互作用、水質変質、含窒素化合物、炭素質コンドライト

Keywords: Chemical Evolution, Mineral-organic interaction, Aqueous alteration, N-Containing Compound, Carbonaceous chondrite

隕石中有機化合物のナノ液体クロマトグラフィー質量分析

Meteoritic organic compound analysis by nano-liquid chromatography/mass spectrometry

*小池 総司¹、奈良岡 浩¹

*Soshi Koike¹, Hiroshi Naraoka¹

1. 九州大学

1. Kyushu University

【序論】

太陽系における始原的な化学組成をもつ炭素質隕石の揮発性成分には有機物や水が含まれている。隕石有機物にはアミノ酸や核酸塩基などの生体関連分子が含まれており(e.g. Burton et al., 2012)、生命の起源の観点から研究されてきた。従来手法では、一般的に、隕石粉末試料をクロマトグラフィーを用いて順次溶媒抽出をして分析されてきた。しかし、始原的な隕石は化学組成・鉱物組成において不均一であるが、粉末化した試料では鉱物組織などの局所的な情報は失われてしまう。ほとんどの隕石は母天体上で水質変成を経験しているため、有機物と鉱物との関連を理解することは、地球外での有機物の化学進化を解明するために必要である。さらに、非破壊の有機物分析は貴重なサンプルにも応用される。本研究では、高感度なナノ液体クロマトグラフィー(nanoLC)と高分解能質量分析(HRMS)を用いて、地球外物質微粒子の有機物分析の開発を目的としている。

【試料と分析手法】

炭素質隕石2種(Murchison, Murray:CM2)の微粒子(約300~900 μm , 0.168mg~2.392mg)をメタノール5 μL に浸し、超音波抽出、または、攪拌による抽出を行った。その抽出液1 μL をnanoLC/HRMS($m/\Delta m = \sim 140,000$ at m/z 200)で分析した。イオン源にはESI(electro spray)を用い、分離にはC18逆相カラムおよびAmideカラムを用い、溶離液にはアセトニトリル/水/ギ酸系を用いた。抽出・分析はすべてクリーンルーム内で行った。

【結果と考察】

使用した隕石微粒子表面に目立った変化は分析の前後で見られなかった。CHNやCHNOの組成をもつ化合物が多く検出され、イオン質量が14.0156 (m/z ; $-\text{CH}_2^-$) ずつ異なることやマスクロマトグラムの保持時間のずれから、これらはアルキル同族体であると考えられる。同族体の検出は先行研究とも一致しており(Schmitt-Kopplin et al., 2010; Yamashita and Naraoka, 2014)、アルキル鎖が順次増加する炭素伸長反応が起こっていることを示唆している。Murray隕石からは $\text{C}_n\text{H}_{2n-5}\text{N}$ ($n=5\sim 26$), $\text{C}_n\text{H}_{2n-7}\text{N}$ ($n=9\sim 28$), $\text{C}_n\text{H}_{2n-1}\text{N}_2$ ($n=5\sim 23$), $\text{C}_n\text{H}_{2n-1}\text{NO}$ ($n=3\sim 20$), $\text{C}_n\text{H}_{2n-3}\text{NO}$ ($n=9\sim 12$), $\text{C}_n\text{H}_{2n-5}\text{NO}$ ($n=6\sim 26$)の同族体を検出することができた。また、Murchison隕石からは $\text{C}_n\text{H}_{2n-5}\text{N}$ ($n=5\sim 24$), $\text{C}_n\text{H}_{2n-7}\text{N}$ ($n=10\sim 26$)の同族体を検出することができた。それぞれの同族体の炭素数範囲は隕石試料毎に異なり、隕石中有機物の不均一性を示している。また、不均一な分布は鉱物との関連があると考えられる。隕石母天体上の流動がクロマトグラフィーのような効果により有機物分布にも影響しているかもしれない。隕石組織と有機物分布との関係を解明するためにはさらなる分析が必要である。

キーワード：有機化合物、炭素質コンドライト、nanoLC/MS、不均一性

Keywords: organic compound, carbonaceous chondrite, nanoLC/HRMS, heterogeneity

MULTUM-SNMSを用いたMurchison SiCの同位体分析 Isotopic Analysis of Presolar SiC Grains with the Post-Ionization SNMS

*宮 晃平¹、寺田 健太郎¹、藪田 ひかる²、河井 洋輔¹、松田 貴博¹、豊田 岐聡¹、青木 順¹、石原 盛男¹
、中村 亮介³

*Kohei Miya¹, Kentaro Terada¹, Hikaru Yabuta², Yosuke Kawai¹, Takahiro Matsuda¹, Michisato Toyoda¹, Jun Aoki¹, Morio Ishihara¹, Ryosuke Nakamura³

1. 大阪大学大学院理学研究科、2. 広島大学大学院理学研究科、3. 大阪大学産学連携本部

1. Graduate School of Science, Osaka University, 2. Graduate School of Science, Hiroshima University, 3. Office for University-Industry Collaboration, Osaka University

For unveiling nucleosynthesis during stellar evolution, in-situ isotopic analyses of individual presolar grains have played important roles. So far, we have been developing a new mass spectrometer, Secondary Neutrals Mass Spectrometer (SNMS) with a femto-second laser, in order to enable further sensitive and higher mass/spatial-resolution measurements. At the conference, we'll report our recent progress of development of SNMS and application to the analysis of SiC grains collected from Murchison meteorite. As preliminary results, we detected isotopic anomalies of major elements (Si and C), which is consistent with those of previous works. We will also refer the challenging isotopic measurements of other minor elements.

キーワード：恒星進化、プレソーラー粒子、同位体分析

Keywords: Stellar Evolution, Presolar Grain, Isotopic Analysis

物質の電子状態の変化により結合力が増す効果で形成される天体 Formation of celestial body that was caused by the change of electronic states of matter

*唐澤 信司¹

*Shinji Karasawa¹

1. 宮城工業高等専門学校 名誉教授

1. Miyagi National College of Tecnology Professor emeritus

従来の天体の形成理論では星間ガスの重力崩壊と宇宙塵の集積と凝縮が論議されました[1]。物質の塊は大きくなるに従い収縮した電子状態に変化して自己凝集して結合力を増します。ここでは、天体の形成において物質の凝集による電子状態の変化の効果を論議します。

短距離力のクーロン力と長距離力の万有引力が同時に作用しています。隣接した原子の 10^{-10} m程度の近傍において万有引力の 10^{36} 倍も強力な物質を形成する近距離力が作用します。星間物質には水の分子が含まれていて、その分子による分子間結合も宇宙塵の塊の成長に寄与します。一般に、物質が大きな塊になると電子状態間の相互作用が大きくなります。また、電子状態が収縮した状態になると、エネルギーが低い状態になります。なお、塊の内部で構成要素の接触点の近傍だけが近距離力で結合に寄与する場合には構成要素が大きくなると接点の結合の効果の割合は減少します。

他方、万有引力は質量が増えると接点に関係なく累積されます。そして、質量が 2.0×10^9 kgを超えると重力が近距離力を凌駕します。大きな微惑星は小さい微惑星を取り込みます。天体が大きくなると水素ガスの重力崩壊の核になり天体の成長を加速します。天体の成長で微粒子が接触して近距離力で成長するので時間がかかります。他方、天体が巨大になり、宇宙塵の100倍も有る星雲ガスの重力崩壊が始まると短時間で成長が進行します。巨大惑星形成時間の問題は水素ガスの重力崩壊の以前に原始惑星が成長したとすれば解決です。太陽は第一世代の恒星ではないので、核融合を始める前の中心部には固体のコアがあり、その外側に金属の電子状態の水素がありました。そこで、固体のコアの外層の水素外層底部で核融合が始まります。

46億年前に太陽の中心部の固体のコアの外層の水素層で核融合が始まり、核融合反応で固体のコアが爆発したことを隕石に含まれる放射性物質が物語っています。

詳しくは “https://youtu.be/Wi5G2F_pDXM” , “<https://youtu.be/BrzQAS2rr8Y>” をご覧ください。

[参考文献]

[1] Black, D. C. & Matthews, M. S., eds., “Protostars & Planets II” , The Univ. of Arizona Press, (1985).

キーワード：原始星、宇宙塵、分子間結合、近距離力、重力崩壊、核融合

Keywords: protostar, cosmic dust, intermolecular bond, short-range force, gravitational collapse, nuclear fusion

Mid-infrared observations of the dust-forming classical nova V2676 Oph with Subaru/COMICS

河北 秀世¹、*大坪 貴文²、新井 彰¹、新中 善晴³、長島 雅佳

Hideyo Kawakita¹, *Takafumi Ootsubo², Akira Arai¹, Shinnaka Yoshiharu³, Masayoshi Nagashima

1. 京都産業大学神山天文台、2. 東京大学大学院総合文化研究科、3. 国立天文台

1. Koyama Astronomical Observatory, Kyoto Sangyo University, 2. Graduate School of Arts and Sciences, University of Tokyo, 3. National Astronomical Observatory of Japan

A dust-forming nova V2676 Oph (discovered in Mar 2012) was the first nova to provide evidence of both C₂ and CN molecules during its near-maximum phase and evidence of CO molecules during its early decline phase (Nagashima et al. 2014). The derived carbon- and nitrogen-isotopic ratios in the nova (Kawakita et al. 2015) are consistent with that the nova explosion was hosted by a CO-rich white dwarf (WD) star. To confirm a type of the hosting WD (CO-rich or ONe-rich), we performed the mid-infrared imaging and low-resolution spectroscopic observations of V2676 Oph with COMICS mounted on the Subaru telescope in June 2013 and May 2014 (482 days and 782 days respectively after its discovery). No clear [Ne II] emission line at 12.8 micron was observed. Based on the absence of [Ne II] emission, the WD hosting V2676 Oph is considered a CO-rich WD. Both types of dust grain, carbon-rich and oxygen-rich, were detected on both dates, although this nova is considered as a Carbon-rich (C/O > 1) based on the presence of C₂ observed earlier. The 11.4 micron unidentified infrared emission was also detected on these dates. Non-equilibrium processes are likely to be responsible for the grain formation in the nova.

キーワード：新星、ダスト、赤外線

Keywords: nova, dust, infrared

原始惑星系円盤でのケイ酸塩ダストの進化

Silicate dust evolution in protoplanetary disks

*橘 省吾¹、山本 大貴¹、小林 航大¹

*Shogo Tachibana¹, Daiki Yamamoto¹, Kodai Kobayashi¹

1. 北海道大学大学院理学研究院自然史科学専攻地球惑星システム科学分野

1. Department of Natural History Sciences, Hokkaido University

Silicate is the dominant solid component in circumstellar environments. Infrared spectroscopic observations have shown that both crystalline and amorphous silicate dust are present in protoplanetary disks, and crystalline silicate dust seems more abundant in the inner warm region of the disks. This suggests that thermal annealing of interstellar amorphous silicate dust occurred in the disk and changed the dust properties of disk dust temporally and spatially with disk evolution. Some of those processes occurred in the early Solar System may have been recorded in fine-grained matrices of less altered/metamorphosed chondrites, which contain abundant amorphous silicates and a small fraction of presolar silicate grains. Laboratory experiments help us extract the record of disk thermal processes from natural samples quantitatively. We have done experiments on crystallization and hydration experiments of amorphous silicates and evaporation and condensation experiments of crystalline silicates, focusing on kinetics of these processes. In this presentation, based on experimentally-obtained kinetic data, we will discuss the silicate dust evolution in protoplanetary disks.

キーワード：ケイ酸塩、原始惑星系円盤、速度論

Keywords: silicate, protoplanetary disk, kinetics