

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