
宇宙における分子進化：星間雲から原始惑星系へ

領域番号：2507

平成25年度～平成29年度

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）

（新学術領域研究（研究領域提案型））

研究成果報告書

令和元年6月19日

領域代表者 香内 晃

北海道大学・低温科学研究所・教授

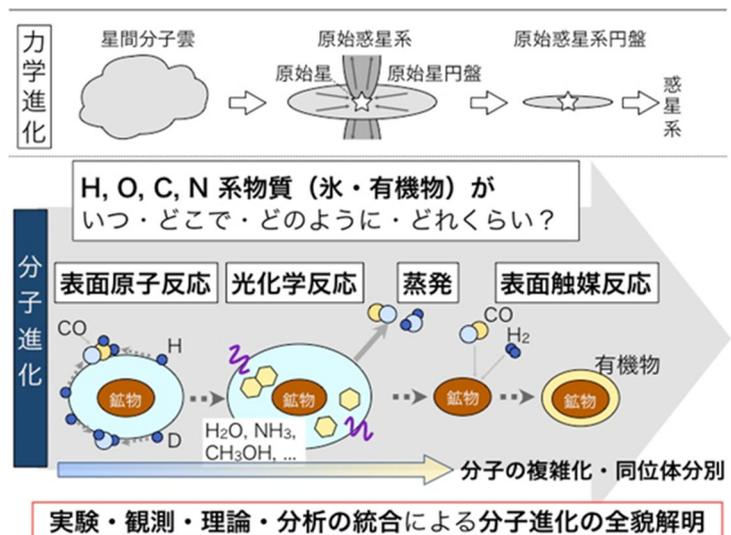
はしがき

新学術領域研究「宇宙における分子進化：星間雲から原始惑星系まで」が、平成25年から29年度まで実施されました。また、平成30年度には成果取りまとめの課題を実施しました。

これまでの惑星系の形成および進化の研究は、力学的な手法による「構造形成」の研究が主であり、天体を構成する「分子進化」の研究は断片的なものにとどまっていた。両者の研究はいわば「車の両輪」であり、両者の研究なくして、惑星系の進化を理解することはできません。

本領域では、宇宙で最も大量に存在する元素（H, O, C, N）からなる固体物質（氷および有機物）の形成・進化に着目し、実験、天文観測、理論、分析等の多様な手法で、分子進化の全体像を描き、これらを通して、化学的視点に立脚した惑星系形成論を新たに構築することを目指しました（図）。特に、分子生成の実験・理論的研究成果から、惑星系形成に至る化学進化の法則性を物理化学の基盤の上に構築することを主な目的としました。

幸い、領域の研究は当初の計画通り順調に進行するだけでなく、各班間および公募研究との連携が非常にうまく機能し、当初想定していなかった画期的な成果もいくつか生まれました。詳細は以下の報告を参照して頂きたいのですが、5年間の研究で、星間分子雲から原始惑星系円盤に至る分子進化とその多様性についての理解が格段に深まるとともに、新たな興味深い研究課題も見えてきました。したがって、本研究領域は、当初の目的を十分達成できたと言えます。



研究組織

領域代表者 香内 晃（北海道大学・低温科学研究所・教授）

計画研究

(X00 総括班)

研究代表者 香内 晃（北海道大学・低温科学研究所・教授）

研究分担者 橘 省吾（東京大学・大学院理学系研究科・教授）

連携研究者 永原 裕子（東京工業大学・地球生命研究所・フェロー）

連携研究者 深澤 倫子（明治大学・理工学部・教授）

連携研究者 山本 智（東京大学・大学院理学系研究科・教授）
連携研究者 塚本 尚義（北海道大学・大学院理学研究院・教授）
連携研究者 奈良岡 浩（九州大学・大学院理学研究院・教授）
連携研究者 渡部 潤一（国立天文台・副台長・教授）

(Y00 国際活動支援班)

研究代表者 香内 晃（北海道大学・低温科学研究所・教授）
研究分担者 橘 省吾（東京大学・大学院理学系研究科・教授）
連携研究者 永原 裕子（東京工業大学・地球生命研究所・フェロー）
連携研究者 深澤 倫子（明治大学・理工学部・教授）
連携研究者 山本 智（東京大学・大学院理学系研究科・教授）
連携研究者 塚本 尚義（北海道大学・大学院理学研究院・教授）
連携研究者 奈良岡 浩（九州大学・大学院理学研究院・教授）

(A01 分子雲実験班)

研究代表者 香内 晃（北海道大学・低温科学研究所・教授）
研究分担者 羽馬 哲也（北海道大学・低温科学研究所・助教）
研究分担者 日高 宏（北海道大学・低温科学研究所・助教）
研究分担者 橘 省吾（東京大学・大学院理学系研究科・教授）
研究分担者 藪下 彰啓（九州大学・大学院総合理工学研究院・准教授）
研究分担者 荒木 光典（東京理科大学・総合研究機構・プロジェクト研究員）
研究分担者 中野 英之（京都教育大学・教育学部・准教授）
連携研究者 川野 潤（北海道大学・大学院理学研究院・准教授）

(A02 原始惑星系実験班)

研究代表者 永原 裕子（東京工業大学・地球生命研究所・フェロー）
研究分担者 木村 勇気（北海道大学・低温科学研究所・准教授）
研究分担者 為則 雄祐（高輝度光科学研究センター・副主席研究員）
研究分担者 星野 真人（高輝度光科学研究センター・研究員）
研究分担者 高橋 修（広島大学・サステナブルディベロプメントセンター・特任講師）
研究分担者 土山 明（京都大学・大学院理学研究科・教授）（H26年5月まで）
研究分担者 青木 貞雄（総合科学研究機構中性子科学センター・主任研究員）（H26年4月より）
研究分担者 渡辺 紀生（筑波大学・大学院数理物質科学研究科・講師）（H26年4月より）

(A03 理論班)

- 研究代表者 深澤 倫子 (明治大学・理工学部・専任教授)
研究分担者 田地川 浩人 (北海道大学・大学院工学研究科・助教)
研究分担者 三浦 均 (名古屋市立大学・大学院システム自然科学研究科・准教授)
連携研究者 野村 英子 (東京工業大学・大学院理学研究科・准教授)
連携研究者 相川 祐理 (東京大学・大学院理学系研究科・教授) (H27 年まで)

(A04 観測班)

- 研究代表者 山本 智 (東京大学・大学院理学系研究科・教授)
研究分担者 坂井 南美 (国立研究開発法人理化学研究所・坂井星・惑星形成研究室・主任研究員)
研究分担者 酒井 剛 (電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授)
研究分担者 渡邊 祥正 (筑波大学・大学院数理物質系科学研究科・助教)
研究分担者 高野 秀路 (日本大学・工学部・准教授)
研究分担者 廣田 朋也 (国立天文台・水沢 VLBI 観測所・助教)
研究分担者 前澤 裕之 (大阪府立大学・大学院理学系研究科・准教授)
研究分担者 小嶋 崇文 (国立天文台・先端技術センター・助教)

(A05 分析班)

- 研究代表者 塚本 尚義 (北海道大学・大学院理学研究院・教授)
研究分担者 三田 肇 (福岡工業大学・工学部・教授)
研究分担者 濱瀬 健司 (九州大学・大学院薬学研究院・教授)
研究分担者 奈良岡 浩 (九州大学・大学院理学研究院・教授)
研究分担者 伊藤 正一 (京都大学・大学院理学研究科・准教授)
研究分担者 高野 淑識 (国立研究開発法人海洋研究開発機構・生物地球化学研究分野・主任研究員)

(公募)

平成 26 年度～平成 27 年度

- 研究代表者 大場 康弘 (北海道大学・低温科学研究所・助教)
研究代表者 杉本 敏樹 (京都大学・大学院理学研究科・助教)
研究代表者 荒川 雅 (九州大学・大学院理学研究院・助教)
研究代表者 Danielache Sebastian (上智大学・理工学部・准教授)
研究代表者 中井 陽一 (国立研究開発法人理化学研究所仁科加速器研究センター・専任研究員)
研究代表者 松田 欣之 (東北大学・大学院理学研究科・助教)
研究代表者 左近 樹 (東京大学・大学院理学系研究科・助教)
研究代表者 國貞 雄治 (北海道大学・大学院工学研究院・助教)
研究代表者 田中 今日子 (北海道大学・低温科学研究所・学術研究員)

研究代表者 中嶋 浩之（特定非営利活動法人量子化学研究協会・研究所・部門長）
 研究代表者 金森 英人（東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授）
 研究代表者 小林 かおり（富山大学・理工学研究部・教授）
 研究代表者 本田 充彦（久留米大学・医学部・助教）
 研究代表者 青木 順（大阪大学・大学院理工学研究科・助教）
 研究代表者 田中 真人（国立研究開発法人産業技術総合研究所・分析計測標準研究部門・主任研究員）

平成 28 年度～平成 29 年度

研究代表者 大場 康弘（北海道大学・低温科学研究所・助教）
 研究代表者 松田 欣之（東北大学・大学院理工学研究科・助教）
 研究代表者 杉本 宜昭（東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授）
 研究代表者 杉本 敏樹（京都大学・大学院理工学研究科・助教）
 研究代表者 荒川 雅（九州大学・大学院理工学研究院・助教）
 研究代表者 橋口 未奈子（九州大学・惑星微量有機化合物研究センター・学術研究員）
 研究代表者 田中 今日子（北海道大学・低温科学研究所・学術研究員）
 研究代表者 國貞 雄治（北海道大学・大学院工学研究院・助教）
 研究代表者 相川 祐理（東京大学・大学院理学系研究科・教授）
 研究代表者 高柳 敏幸（埼玉大学・大学院理工学研究科・教授）
 研究代表者 田代 基慶（東洋大学・理工学部・准教授）
 研究代表者 中嶋 浩之（特定非営利活動法人量子化学研究協会・研究所・部門長）
 研究代表者 尾中 敬（東京大学・大学院理学系研究科・教授）
 研究代表者 Laurette Piani（北海道大学・大学院理工学研究院・講師）
 研究代表者 田中 真人（国立研究開発法人産業技術総合研究所・分析計測標準研究部門・主任研究員）
 研究代表者 菅原 春菜（国立研究開発法人海洋研究開発機構・生物地球化学研究分野・ポストドクトラル研究員）

交付決定額

	合計	直接経費	間接経費
平成 25 年度	247,780,000 円	190,600,000 円	57,180,000 円
平成 26 年度	281,970,000 円	216,900,000 円	65,070,000 円
平成 27 年度	221,910,000 円	170,700,000 円	51,210,000 円
平成 28 年度	215,410,000 円	165,700,000 円	49,710,000 円
平成 29 年度	203,450,000 円	156,500,000 円	46,950,000 円
総計	1,170,520,000 円	900,400,000 円	270,120,000 円

研究発表

A01 分子雲実験班

雑誌論文(全て査読有)

1. Y. Oba, T. Tomaru, T. Lamberts, A. Kouchi, N. Watanabe (2018) An infrared measurement of chemical desorption from interstellar ice analogues, *Nature Astronomy*, 2, 228–232, DOI:10.1038/s41550-018-0380-9
2. M. Telus, G. R. Huss, K. Nagashima, R. C. Ogliore, and S. Tachibana (2018) In situ ^{60}Fe - ^{60}Ni systematics of chondrules from unequilibrated ordinary chondrites, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 221, 342-357, DOI: 10.1016/j.gca.2017.06.013
3. S. Matsuda, M. Yamazaki, A. Harata, A. Yabushita (2018) CO₂ formation yields from different states of CO adsorbed on amorphous solid water under 157 nm photoirradiation, *Chemistry Letters*, 47, 68-471, DOI: 10.1246/cl.171121
4. Kuroda M., Tachibana S., Sakamoto N. Nakamura M., Okumura S., Yurimoto H. (2018) Water diffusion in silica glass through pathways formed by hydroxyls, *American Mineralogist*, 103, 412-417, DOI:10.2138/am-2018-6208
5. 香内晃, 日高宏, 羽馬哲也, 木村勇氣, 渡部直樹, 中坪俊一, 藤田和之, 新堀邦夫, 池田正幸 (2018) 超高真空極低温透過型電子顕微鏡の開発—氷のその場観察をめざして—, *雪氷*, 80,19-36
6. 後藤創紀, 中野英之 (2018) 教員養成系大学の学生を対象とした液晶セルの作製実習, *工学教育*, 66, 84-88
7. Y. Oba, Y. Takano, H. Naraoka, A. Kouchi, N. Watanabe (2017) Deuterium Fractionation upon the Formation of Hexamethylenetetramines through Photochemical Reactions of Interstellar Ice Analogs Containing Deuterated Methanol Isotopologues, *The Astrophysical Journal*, 849,9pp, DOI:10.3847/1538-4357/aa8ea5
8. S. Tachibana, A. Kouchi, T. Hama, Y. Oba, L. Piani, I. Sugawara, Y. Endo, H. Hidaka, Y. Kimura, K. Murata, H. Yurimoto, N. Watanabe (2017) Liquid-like behavior of UV-irradiated interstellar ice analog at low temperatures, *Science Advances*, 3, eaao2538(6pp), DOI: 10.1126/sciadv.aao2538
9. L. Piani, S. Tachibana, T. Hama, H. Tanaka, Y. Endo, I. Sugawara, L. Dessimoulie, Yuki Kimura, A. Miyake, J. Matsuno, A. Tsuchiyama, K. Fujita, S. Nakatsubo, H. Fukushi, S. Mori, T. Chigai, H. Yurimoto, A. Kouchi (2017) Evolution of morphological and physical properties of laboratory interstellar organic residues with ultraviolet irradiation, *The Astrophysical Journal*, 837, 11pp, DOI: 10.3847/1538-4357/aa5ca6
10. A. Mitsunori, S. Takano, N. Sakai, S. Yamamoto, T. Oyama, N. Kuze, K. Tsukiyama (2017) Long carbon chains in the warm-carbon-chain-chemistry source L1527: First detection of C₇H in molecular clouds, *The Astrophysical Journal*, 847, 51(7pp), DOI:0.3847/1538-4357/aa8637
11. A. Yoshida, H. Sasaki, T. Toyama, M. Araki, J. Fujioka, K. Tsukiyama, N. Hamada, and

- F.Yoshino(2017) Antimicrobial effect of blue light using Porphyromonas gingivalis pigment, *Scientific Reports*, 7, 5225 (9 pp), DOI: 10.1038/s41598-017-05706-1
12. Kebukawa Y., Chan Q. H. S., Tachibana S., Kobayashi K. and Zolensky M. E. (2017) One-pot synthesis of amino acid precursors with insoluble organic matter in planetesimals with aqueous activity, *Science Advances*, 3, 8pp, DOI:10.1126/sciadv.1602093
 13. R. Escribano, E. Artacho, A. Kouchi, T. Hama, Y. Kimura, H. Hidaka (2017) Simulations and spectra of water in CO matrices, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 19, 7280-7287, DOI: 10.1039/C6CP08248C
 14. H. Kobayashi, H. Hidaka, T. Lamberts, T. Hama, H. Kawakita, J.Kastner, N. Watanabe (2017) Hydrogenation and Deuteration of C₂H₂ and C₂H₄ on Cold Grains: Clue to the Formation Mechanism of C₂H₆ with Astronomical Interest, *The Astrophysical Journal*, 837, 15pp, DOI:10.3847/1538-4357/837/2/15
 15. 後藤創紀, 布村一興, 中野英之, 仁科篤弘 (2017) 児童や生徒の金属に対する興味・関心を醸成するビスマス結晶づくり, *日本金属学会誌『まてりあ』*, 56, 291-295
 16. A. Shiotari, Y. Sugimoto (2017) Ultrahigh-resolution imaging of water networks by atomic force microscopy, *Nature Comm.*, 8, 14313(7pp), DOI:10.1038/ncomms14313
 17. T. Endo, Y. Matsuda, A. Fujii (2017) Infrared spectroscopic study of the acidic CH bonds in hydrated clusters of cationic pentane, *J. Phys. Chem. Lett.*, 8, 4716-4719, DOI:10.1021/acs.jpcclett.7b02282
 18. M. Araki, S. Takano, N. Sakai, S. Yamamoto, T. Oyama, N. Kuze, and K. Tsukiyama (2016) Precise observations of the ¹²C/¹³C ratios of HC₃N in the low-mass star-forming region L1527, *The Astrophysical Journal*, 833, 9pp, DOI: 10.3847/1538-357/833/2/291
 19. K. Kim, A. Yabushita, M. Okumura, A. Saiz-Lopez, C. A. Cuevas, C. S. Blaszcak-Boxe, D. Wi Min, Ho-Il Yoon, W. Choi (2016) Production of Molecular Iodine and Tri-iodide in the Frozen Solution of Iodide: Implication for Polar Atmosphere, *Environmental Science & Technology*, 50, 1280-1287, DOI: 10.1021/acs.est.5b05148
 20. T. Hama, A. Kouchi, N. Watanabe (2016) Statistical ortho-to-para ratio of water desorbed from ice at 10 kelvin, *Science*, 351, 65-67, DOI: 10.1126/science.aad4026
 21. K. Nagashima, G. Sazaki, T. Hama, H. Asakawa, K. Murata, and Y. Furukawa (2016) Direct Visualization of Quasi-Liquid Layers on Ice Crystal Surfaces Induced by Hydrogen Chloride Gas, *Crystal Growth & Design*, 16, 2225–2230, DOI: 10.1021/acs.cgd.6b00044
 22. S. Hoshino, M. Araki, Y. Nakano, T. Ishiwata, and K. Tsukiyama (2016) Infrared radiative decay dynamics from the γ 1_u (³P₂), H 1_u (³P₁), and 1_u (¹D₂) ion-pair states of I₂ observed by a perturbation facilitated optical-optical double resonance technique, *The Journal of Chemical Physics*, 144, 034302 (9pp), DOI:10.1063/1.4939639
 23. A. Kouchi, T. Hama, Y. Kimura, H. Hidaka, R. Escribano, N. Watanabe (2016) Matrix sublimation method for the formation of high-density amorphous ice, *Chemical Physics Letters*, 658, 287-292, DOI: 10.1016/j.cplett.2016.06.066

24. Y. Nakai, H. Hidaka, N. Watanabe, T. M. Kojima, (2016) Stepwise formation of $\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})_n$ in an ion drift tube: Empirical effective temperature of association/dissociation reaction equilibrium in an electric field, *J. Chem. Phys.*, **144**, 224306, DOI:10.1063/1.4953416
25. T. Sugimoto, N. Aiga, Y. Otsuki, K. Watanabe Y. Matsumoto, (2016) Emergent high-Tc ferroelectric ordering of strongly correlated and frustrated protons in heteroepitaxial ice film, *Nature Physics*, **12**, 1063–1068, DOI:10.1038/NPHYS3820
26. S. K. Simakov, A. Kouchi, N. N. Mel'nik, V. Scribano, Y. Kimura, T. Hama, N. Suzuki, H. Saito, T. Yoshizawa (2015) Nanodiamond Finding in the Hyblean Shallow Mantle Xenoliths, *Scientific Reports*, **5**, 10765(8pp), DOI: 10.1038/srep10765
27. T. Hama, H. Ueta, A. Kouchi, and N. Watanabe (2015) Quantum Tunneling Observed without Its Characteristic Large Kinetic Isotope Effects, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **112**, 7438–7443, DOI:10.1073/pnas.1501328112
28. H. -W. Hsu, F. Postberg, Y. Sekine, T. Shibuya, S. Kempf, M. Horanyi, A. Juhasz, N. Altobelli, K. Suzuki , Y. Masaki , T. Kuwatani , S. Tachibana , S. Sirono , G. Moragas-Klostermeyer, R. Srama (2015) Ongoing hydrothermal activities within Enceladus, *Nature*, **519**, 207-210, DOI:10.1038/nature14262
29. M. Araki, Y. Matsushita, K. Tsukiyama (2015) Laboratory Optical Spectroscopy of the Phenoxy Radical as a Candidate for Diffuse Interstellar Bands, *Astronomical Journal*, **150**, 113 (6 pp), DOI:10.1088/0004-6256/150/4/113
30. T. Hama, H. Ueta, A. Kouchi, N. Watanabe, and H. Tachikawa (2014) Quantum Tunneling Hydrogenation of Solid Benzene and Its Control via Surface Structure, *Journal of Physical Chemistry Letters*, **5**, 3843-3848, DOI: 10.1021/jz5019948
31. M. Araki, K. Niwayama and K. Tsukiyama (2014) Laboratory Optical Spectroscopy of Thiophenoxy Radical and Its Profile Simulation as a Diffuse Interstellar Band Based on Rotational Distribution by Radiation and Collisions, *Astronomical Journal*, **148**, 15 pp, DOI: 10.1088/0004-6256/148/5/87
32. P. D. Hamer, D. E. Shallcross, A. Yabushita, M. Kawasaki, V. Marecal, C. S. Boxe (2014) Investigating the photo-oxidative and heterogeneous chemical production of HCHO in the snowpack at the South Pole, Antarctica, *Environmental Chemistry*, **11**, 459-471, DOI: 10.1071/EN13227
33. Sakai R., Nagahara H., Ozawa K. and Tachibana S. (2014) Composition of the lunar magma ocean constrained by the conditions for the crust formation, *Icarus*, **229**, 45-56, DOI: 10.1016/j.icarus.2013.10.031
34. T. Hama, N. Watanabe (2013) Surface Processes on Interstellar Amorphous Solid Water: Adsorption, Diffusion, Tunneling, Reaction, and Nuclear-Spin Conversion, *Chemical Review*, **113**, 8783-8839, DOI : 10.1021/cr4000978
35. A. Yabushita, T. Hama, M. Kawasaki (2013) Photochemical reaction processes during vacuum-ultraviolet irradiation of water ice, *Journal of Photochemistry and Photobiology C*:

学会発表

1. A. Kouchi (2018) In Situ Observation of Amorphous Ices by Ultrahigh Vacuum TEM, **2018 MRS Spring Meeting & Exhibit**
2. T. Hama (2018) The ortho-to-para ratio of water molecules desorbed from ice made from para-water monomers, **Hydride Chemistry: From Earth to Space workshop**
3. A. Kouchi (2017) Evolution of molecules in space: From interstellar clouds to proto-planetary nebulae, **新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」研究会**
4. S. Tachibana (2017) Hayabusa2: Sample return from C-type near-Earth asteroid (162173) Ryugu, **Royal Astronomical Society Specialist Discussion meeting 'Science of Primitive Asteroid Sample Return Missions'**
5. Hirakawa N, Nakano H., Kouchi A. (2017) Experimental Studies on the Metamorphism of Interstellar Organic Materials in Meteorites' Parent Bodies, **48th Lunar and Planetary Science Conference**
6. Kawano, J., Toyofuku, T., Nishimura, K., Nagai, Y., Kawada, S., Teng, H., Nagai, T. (2017) Visualization of pH distribution around dissolving/growing calcium carbonate crystals in inorganic solution: a baseline to understand vital effect in biomineralization, **BiominiXIV**
7. A. Yabushita (2016) Formation reactions of molecular iodine related to water and ice, **the 2nd International Workshop on Heterogeneous Kinetics Related to Atmospheric Aerosols**
8. Tachibana S. (2016) A supernova with mixing fallback as a last spike of short-lived radionuclides 107Pd, 129I and 182Hf in the early solar system, **79th Annual Meeting of the Meteoritical Society**
9. Tachibana S. (2016) Early Evolution of the Solar System: Laboratory Experiments and Sample Return Missions, **Seminar at U.S. Naval Research Laboratory**
10. Piani Laurette, 橘 省吾, 羽馬 哲也, 菅原いよ, 大場 康弘, 田中秀和, 木村 勇氣, 三宅 亮, 松野 淳也, 土山 明, 坂本 尚義, 香内晃 (2016) 低温光化学反応による分子雲での有機物形成・進化, **日本地球惑星科学連合2016年大会**
11. T. Hama (2016) Tunneling H addition to benzene and its control via surface structure, **Astrophysical Ices in the Lab**
12. H. Hidaka, Y. Sugimoto, S. Nakatsubo, N. Watanabe, A. Kouchi (2016) Observation of amorphous solid water by non-contact atomic force microscopy, **Astrophysical Ices in the Lab**
13. S. Tachibana (2015) Hayabusa2: Sample return from a C-type near Earth asteroid Ryugu, **Seminar at Department of the Geophysical Sciences**
14. T. Hama, H. Ueta, A. Kouchi, N. Watanabe (2015) Tunneling hydrogenation and deuteration of solid benzene without large kinetic isotope effects, **A symposium to honor Lou Allamandola's Contributions to the Molecular Universe**
15. S. Matsuda, Y. Kurotani, M. Yamazaki, A. Yabushita (2015) Measurement of translational and rotational energies for photodesorbed CO from CO-H₂O ice, **The Second Asian Symposium on**

Analytical Sciences

16. M. Araki, S. Takano, N. Kuze, T. Oyama, K. Tsukiyama (2015) Detectability of Prolate Symmetric-Top Molecules in Diffuse Clouds by a “Hot-Axis Effect, ***Symposium on Advanced Molecular Spectroscopy***
17. 日高 宏, 杉本 宜昭, 中坪 俊一, 渡部直樹, 香内 晃 (2014) 極低温原子間力顕微鏡によるアモルファス氷の表面構造観察, ***日本地球惑星科学連合 2014 年大会***
18. S. Tachibana, T. Hama, Y. Endo, L. Piani, H. Yurimoto, A. Kouchi (2014) Photo-induced synthesis of interstellar organic matter: Volatile compounds and texture of organic residues, ***Workshop on Interstellar Matter 2014***
19. N. Watanabe, K. Kuwahata, T. Hama, A. Kouchi (2014) Diffusion of hydrogen atom on amorphous solid water: Thermal or tunneling?, ***247th ACS National Meeting & Exposition***
20. Y. Oba, N. Watanabe, T. Hama, K. Kuwahata, H. Hidaka, A. Kouchi (2014) Role of quantum tunneling for the formation of H₂O by reaction of H₂ with OH on interstellar grains, ***247th ACS Chemistry & Materials for Energy***
21. S. Tachibana (2013) Scientific importance of return samples from near-Earth C-type asteroid 1999 JU3: Sampling method/strategy and sample analyses, ***Hayabusa Symposium***

A02 原始惑星系実験班

雑誌論文(全て査読有)

1. Takahashi O, Tamenori Y, Suenaga, T., Fukazawa T., Matsuno J., and Tsuchiyama A. (2018) XANES spectra of forsterite in crystal, surface, and amorphous states, ***AIP Advances***, 8 025107(10pp)
2. Tamenori Y and Hoshino M. (2018) Development of the full-field imaging microscope for nanoscale analysis with minimal radiation damage, ***SPring-8 Section C : Technical Report 2018 Early***
3. Noguchi T., Yabuta H., Itoh S., Sakamoto N., Mitsunari T., Okubo A., Okazaki R., Nakamura T., Tachibana S., Terada K., Ebihara M., Imae N., Kimura M., and Nagahara H. (2018) Variation of mineralogy and organic material during the early stages of aqueous activity recorded in antarctic micrometeorites, ***Geochim. Cosmochim. Acta***, 208, 119-144
4. Noguchi T., Yabuta H., Itoh S., Sakamoto N., Mitsunari T., Okubo A., Okazaki R., Nakamura T., Tachibana S., Terada K., Ebihara M., Imae N., Kimura M., and Nagahara H. (2018) Variation of mineralogy and organic material during the early stages of aqueous activity recorded in Antarctic micrometeorites, ***Geochim. Cosmochim. Acta***, 208, 119-144
5. N. Watanabe, S. Aoki and N. Yamaguchi (2018) Design and Fabrication of Wolter-type 4-mirror system, ***J. Phys: Conf. Ser.***, 849, 12058-12061
6. Hohisno, M., Uesugi, K., Shikaku, R., and Yagi N. (2017) Current status of X-ray phase imaging at SPring-8: Toward 4D X-ray phase tomography for biological samples, ***J. Phys.***, 849,

12054(4pp)

7. Yokoyama K., Kimura Y. and Kaito C. (2017) Experiments on Condensation of Calcium Sulfide Grains To Demarcate Environments for the Formation of Enstatite Chondrites, *ACS Earth Space Chem*, 1, 601-607
8. Hama T., Ishizuka S., Yamazaki T., Kimura Y., Kouchi A., Watanabe N., Sugimoto T., and Pirrenello V. (2017) Fast crystalline ice formation at extremely low temperature through water/neon matrix sublimation, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 19, 17677-17684
9. Takahashi O. (2017) Relativistic corrections for single- and double-core excitation at the K-and L-edges from Li to Kr., *Comp. Theor. Chem.*, 1102, 80-86
10. M. Arakawa, T. Omoda, A. Terasaki, (2017) Adsorption and subsequent reaction of a water molecule on silicate and silica cluster anions, *J. Phys. Chem. C*, 121, 10790–10795
11. S. Aoki, N. Watanabe, H. Asami, A. Shimada (2016) Design of axisymmetric multi-mirror grazing incidence system to increase the numerical aperture of neutron and X-ray microscopes, *Opt. Rev.*, 23, 161-171
12. Piani L., Tachibana S., Hama T., Tanaka H., Endo Y., Sugawara I., Dessimoulie L., Kimura Y., Miyake A., Matsuno J., Tsuchiyama A., Fujita K., Nakatsubo S., Fukushi H., Mori S., Chigai T., Yurimoto H., and Kouchi A. (2017) Evolution of morphological and physical properties of laboratory interstellar organic residues with ultraviolet irradiation, *Astrophys. J.*, 837, 35
13. Tachibana S., Kouchi A., Hama T., Oba Y., Piani L., Sugawara I., Endo Y., Hidaka H., Kimura Y., Murata K., Yurimoto H., Watanabe N. (2017) Liquid-like behavior of UV-irradiated interstellar ice analog at low temperatures, *Science Advances*, 3, eaao2538 (6pp)
14. N. Watanabe, Y. Tsuburaya, A. Shimada and S. Aoki (2016) Quantitative Phase Tomography by Using X-Ray Microscope with Foucault Knife-Edge Scanning Filter, *AIP Conf. Proc.*, 1696, 200441(4pp)
15. Kimura Y., Murayama K., Yamazaki T., and Maki T. (2016) Assembling interferometers and in-situ observation of ambient environments and solid/liquid interfaces, *Prog. Crystal Growth Character Mater*, 62. 400-403
16. I. Sakon, S. Sako, T. Onaka, T. Nozawa, Y. Kimura, 他 10 名 (2016) Concurrent formation of carbon and silicate dust in nova V1280 Sco, *Astrophys. J.*, 817, 145, 23pp
17. N, Nishida, K, Kanai, T, Tokushima, Y, Horikawa, O, Takahashi (2015) A Theoretical Study on the Selective Oxygen K-edge Soft X-ray Emission Spectroscopy of Liquid Acetic Acid, *Chem. Phys. Lett.*, 640. 55-60
18. Osamu Takahashi, Mai Kimoto, Lars G. M. Pettersson (2015) Theoretical study of the X-ray natural circular dichroism of some amino acids in crystal, *Chem. Phys.*, 450, 109-114
19. M. Ebihara, N. Shirai, S. Sekimoto, T. Nakamura, A. Tsuchiyama, J. Matsuno, T. Matsumoto, M. Tanaka, M. Abe, A. Fujimura, Y. Ishibashi, Y. Karouji, T. Mukai, T. Okada, M. Uesugi and T. Yada (2015) Chemical and mineralogical compositions of two grains recovered from an asteroid Itokawa, *Meteorit Planet Sci.*, 50, 243-254

20. Ito, Y., Ikoma, M., Kawahara, H., Nagahara, H., Kawashima, Y., and Nakamoto, T. (2015) Theoretical emission spectra of atmospheres of hot rocky super-earths, *Astrophys. J.*, 801, 144(15pp)
21. Y. Kimura, H. Niinomi, K. Tsukamoto, J., M. Garcia-Ruiz (2014) In Situ Live Observation of Nucleation and Dissolution of Sodium Chlorate Nanoparticles by Transmission Electron Microscopy, *J. Amer. Chem. Soc.*, 136, 1762-1765

学会発表

1. H. Nagahara and K. Ozawa (2017) The role of initial protostellar disk size on the chemical evolution of the disk, *Star Formation in Space and Time*, 2017/6/5-9, Firenze, Italy
2. H. Nagahara and K. Ozawa (2017) Physico-chemical evolution of protoplanetary disks, *Current and Future Perspectives of Chemical Modelling in Astrophysics*, 2017/7/17-19, Hamburg, Germany
3. Y. Kimura, R. Sato, A. Tsuchiyama, H. Nagahara, T. Hama, H. Hidaka, N. Watanabe, A. Kouchi (2017) Reaction efficiency between hydrogen and carbon monoxide on a catalytic substrate of iron, nickel or its alloy, *JpGU-AGU Joint Meeting 2017*, 2017/5/20-25, Makuhari, Japan
4. H. Nagahara and K. Ozawa (2016) Temporal and spatial evolution of the proto-solar disk, *Lunar Planet. Sci. Conf.*, 2017/3/20-24, The Woodlands, Texas
5. 為則雄祐 (2017) 高輝度軟 X 線を光源とした散乱・顕微分光観測技術の進展, **第 66 回高分子討論会**, 2017/9/20-22, 愛媛
6. 高橋 修 (2016) ケイ酸塩鉱物の電子状態及び XANES 計算, **日本コンピュータ化学会年会**, 2016/10/22-23, 島根
7. 木村勇氣, 佐藤理佳子, 土山明, 永原裕子, 羽馬哲也, 日高宏, 渡部直樹, 香内晃 (2016) 鉄基板上での FT 型触媒反応実験における反応効率の温度依存性, **日本地球惑星科学連合 2016 年大会**, 2016/5/22-26, 幕張
8. M. Hoshino, K. Uesugi and N. Yagi (2016) Current status of X-ray phase imaging at SPring-8: Toward 4D X-ray phase tomography for biological sample, *13th International Conference on X-ray Microscopy*, 2016/8/15-19, Gottingen, Germany
9. H. Nagahara and K. Ozawa (2016) Transportation of ice and silicate in the protosolar disk, *Water in the Universe*, 2016/4/12-15, Noordwijk, Netherland
10. H. Nagahara, K. Ozawa, and T. Noguchi (2016) Mixing of high- and low-temperature cometary components in the protoplanetary disk, *Symposium Comets*, 2016/11/14-18, Toulouse, France

A03 理論班

雑誌論文(全て査読有)

1. Osamu Takahashi, Yusuke Tamenori, Taiga Suenaga, Tomoko Ikeda-Fukazawa, Junya Matsuno, and Akira Tsuchiyama: XANES spectra of forsterite in crystal, surface, and amorphous states, *AIP Advances*, 8 (2018) 025107 (10pp)

2. Tomohiro Yokota, Takuya Miki, Michiyo Honda, Tomoko Ikeda-Fukazawa, Ken Ishii, Morio Matsumoto, and Mamoru Aizawa: Fabrication and biological evaluation of hydroxyapatite ceramics including bone minerals, *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 126 (2018) 1-10
3. S. Notsu, H. Nomura, C. Walsh, M. Honda, T. Hirota, E. Akiyama, T. J. Millar: Candidate water vapor lines to locate the H₂O snowline through high-dispersion spectroscopic observations. III. Sub-millimeter H₂ ¹⁶O and H₂ ¹⁸O lines, *Astrophys. J.*, 855 (2018) 62 (24pp)
4. Yu Kumagai and Tomoko Ikeda-Fukazawa: Structures of surface and interface of amorphous ice, *Chemical Physics Letters*, 678 (2017) 153-158
5. Ryo Naohara, Kentaro Narita and Tomoko Ikeda-Fukazawa: Change in hydrogen bonding structures of a hydrogel with dehydration, *Chemical Physics Letters*, 670 (2017) 84-88
6. Akihiro Ishida, Shigeo Hori, Toshihiko Tani, Tomoko Ikeda-Fukazawa, and Mamoru Aizawa: Hydrothermal synthesis of single-crystal-tristrontium phosphate particles, *Journal of the European Ceramic Society*, 37 (2017) 351-357
7. Ryota Namiki, Takuya Suyama, Chihiro Izawa, Tomoko Ikeda-Fukazawa, Michiyo Honda, Tomoaki Watanabe, Mamoru Aizawa: Chemical State of Nitrogen in Nitrogen-Doped Hydroxyapatite Ceramics with Enhanced Bioactivity, *Key Engineering Materials*, 720 (2017) 215-218
8. H. Tachikawa: Hydrogen atom addition to the surface of graphene nanoflakes: A density functional theory study, *Appl. Surf. Sci.*, 396 (2017) 1335-1342
9. H. Tachikawa: Effects of zero point vibration on the reaction dynamics of water dimer cations following ionization, *J. Comput. Chem.*, 38 (2017) 1503-1508
10. H. Miura, T. Yamamoto, H. Nomura, T. Nakamoto, K. K. Tanaka, H. Tanaka, M. Nagasawa: Comprehensive study of thermal desorption of grain-surface species by accretion shocks around protostars, *Astrophys. J.*, 839 (2017) 47 (16pp)
11. Yuki Takeuchi and Tomoko Ikeda-Fukazawa: Phase Transition Dynamics of Three Types of Water within Poly-N,N-dimethylacrylamide Hydrogels, *Journal of the Physical Society of Japan*, 85 (2016) 114604 (4pp)
12. Tomoko Ikeda-Fukazawa: Molecular dynamical investigations for effect on temperature history of forsterite glass, *Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan*, 23 (2016) 130-135
13. H. Tachikawa: Ionization dynamics of water dimer on ice surface, *Surf. Sci.*, 647 (1026) 1-7
14. H. Tachikawa, H. Kawabata: Effects of a single water molecule on the reaction barrier of interstellar CO₂ formation reaction, *J. Phys. Chem., A* 120 (2016) 6596-6603
15. H. Tachikawa: Reaction dynamics following ionization of ammonia dimer adsorbed on ice surface, *J. Phys. Chem., A* 120 (2016) 7301-7310
16. H. Nakashima, H. Nakatsuji (2016) Analytical potential curve from Non-Born-Oppenheimer wave function: Application to hydrogen molecular ion, *AIP. Conf. Proc.*, 1790, 020017-1-4
17. Tomoko Ikeda-Fukazawa and Yuihiro Kawahara: Effects of empty cages on lattice distortion of tetrahydrofuran clathrate hydrate, *Journal of the Physical Society of Japan*, 85 (2015) 014801

(6pp)

18. T. Kobashi, T. Ikeda-Fukazawa, M. Suwa, J. Schwander, T. Kameda, J. Lundin, A. Hori, M. Döring, and M. Leuenberger: Post bubble-closeoff fractionation of gases in polar firn and ice cores: effects of accumulation rate on permeation through overloading pressure, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15 (2015) 15711-15753
19. Yurina Sekine, Riki Kobayashi, Songxue Chi, Jaime A. Fernandez-Baca, Kentaro Suzuya, Fumika Fujisaki, Kazutaka Ikeda, Toshiya Otomo, Tomoko Ikeda-Fukazawa, Hiroki Yamauchi, Hiroshi Fukazawa: Neutron Diffraction of Ice and Water in Hydrogels, *Journal of the Physical Society of Japan Conference Proceedings*, 8 (2015) 033009 (6pp)
20. H. Tachikawa, T. Takada: Proton transfer rates in ionized water clusters (H₂O)_n (n =2–4), *RSC Adv.*, 5 (2015) 6945-6953
21. T. Aota, T. Inoue, Y. Aikawa: Evaporation of grain-surface species by shock waves in a protoplanetary disk, *Astrophys. J.*, 799 (2015) 141 (9pp)
22. R. Angelil, J. Diemand, K. K. Tanaka, H. Tanaka (2015) Homogeneous SPC/E water nucleation in large molecular dynamics simulations, *J. Chem. Phys.*, 143, 0640507 (10pp)
23. Y. Kunisada, H. Kasai (2015) Hindered rotational physisorption states of H₂ on Ag(111) surfaces, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 17, 19625-19630
24. Yurina Sekine, Hajime Takagi, Sayoko Sudo, Yutaro Kajiwara, Hiroshi Fukazawa, Tomoko Ikeda-Fukazawa: Dependence of structure of polymer side chain on water structure in hydrogels, *Polymer*, 55 (2014) 6320-6324
25. Yurina Sekine, Tomoko Ikeda-Fukazawa, Mamoru Aizawa, Riki Kobayashi, Songxue Chi, Jaime A. Fernandez-Baca, Hiroki Yamauchi, and Hiroshi Fukazawa: Neutron Diffraction of Ice in Hydrogels, *Journal of Physical Chemistry B*, 118 (2014) 13453-13457
26. Kushi Kudo, Junichi Ishida, Gika Syuu, Yurina Sekine, and Tomoko Ikeda-Fukazawa: Structural changes of water in poly (vinyl alcohol) hydrogel during dehydration, *Journal of Chemical Physics*, 140 (2014) 044909 (8pp)
27. Y. Sekine, K. Okazaki, T. Ikeda-Fukazawa, M. Ichikawa, K. Yoshikawa, S. Mukai, and K. Akiyoshi: Microrheology of polysaccharide nano gel-integrated system, *Colloid Polymer Science*, 292 (2014) 325-331
28. C. Walsh, E. Herbst, H. Nomura, T. J. Millar, W. Widicus Weaver: Complex organic molecules along the accretion flow in isolated and externally irradiated protoplanetary disks, *Faraday Disc*, 168 (2014) 389-421
29. Tomoko Ikeda-Fukazawa, Naohiro Ikeda, Mayu Tabata, Masataka Hattori, Mamoru Aizawa, Shunji Yunoki, and Yurina Sekine: Effects of Crosslinker Density on the Polymer Network Structure in Poly-N,N-dimethylacrylamide Hydrogels, *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics*, 51 (2013) 1017-1027
30. H. Tachikawa, T. Takada: Ionization dynamics of the water trimer: A direct ab initio MD study, *Chem. Phys.*, 415 (2013) 76-83

31. Y. Aikawa: Interplay of chemistry and dynamics in the low-mass star formation, *Chem. Rev.*, 113 (2013) 8961-8980

A04 観測班

雑誌論文(全て査読有)

1. Soma, T., Sakai, N., Watanabe, Y., Yamamoto, S. (2018) Complex Organic Molecules in Taurus Molecular Cloud-1, *Astrophysical Journal*, 854, 116 (11pp), DOI: 10.3847/1538-4357/aaa70c
2. Oya Y., Moriwaki, K., Onishi, S., Sakai, N., Lopez-Sepulcre, A., Favre, C., Watanabe, Y., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Yamamoto, S. (2018) Chemical and Physical Picture of IRAS 16293-2422 Source B at a Sub-arcsecond Scale Studied with ALMA, *Astrophysical Journal*, 854, 96 (19pp), DOI: 10.3847/1538-4357/aaa6c7
3. K. Kobayashi, T. Kuwahara, H. Tachi, Y. Urata, S. Tsunekawa, N. Hayashi, H. Higuchi, M. Fujitake, N. Ohashi (2018) Microwave spectroscopy of HCOO¹³CH₃ in the second methyl torsional excited state, *J. Molecular Spectroscopy*, 343, 50-53
4. Sakai, N., Oya, Y., Higuchi, A.E., Aikawa, Y., Hanawa, T., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Lopez-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Sakai, T., Hirota, T., Caux, E., Vastel, C., Kahane, C., Yamamoto, S. (2017) Vertical Structure of the Transition Zone from Infalling Rotating Envelope to Disc in the Class 0 Protostar, IRAS 04368+2557, *MNRAS*, 467, L76-L80, DOI: 10.1093/mnras/lsx002
5. Oya, Y., Sakai, N., Watanabe, Y., Higuchi, A.E., Hirota, T., Lopez-Sepulcre, A., Sakai, T., Aikawa, Y., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Caux, E., Vastel, C., Kahane, C., Yamamoto, S. (2017) L483: Warm Carbonchain Chemistry Source Harboring Hot Corino Activity, *Astrophysical Journal*, 837, 174 (15pp) DOI: 10.3847/1538-4357/aa6300
6. H. Kanamori, Z. T. Dehghani, A. Mizoguchi, Y. Endo (2017) Detection of MW transitions between ortho and para states in a free isolated molecule, *Phys. Rev. Lett.*, 119, 173401(5pp)
7. Oya, Y., Sakai, N., Lopez-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Favre, C., Yamamoto, S. (2016) Infalling-Rotating Motion and Associated Chemical Change in the Envelope of IRAS 16293-2422 Source A Studied with ALMA, *Astrophysical Journal*, 824, 88 (19pp), DOI: 10.3847/0004-637X/824/2/88
8. Imai, M., Sakai, N., Oya, Y., Lopez-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Caux, E., Vastel, C., Kahane, C., Sakai, T., Hirota, T., Yamamoto, S. (2016) Discovery of a Hot Corino in the Bok Globule B335, *Astrophysical Journal letters*, 830, L37 (7pp), DOI: 10.3847/2041-8205/830/2/L37
9. Honda, M., Kudo, T., Takatsuki, S., Inoue, A. K., Nakamoto, T., Fukagawa, M., Tamura, M., Terada, H., Takato, N. (2016) Water ice at the surface of the HD 100546 disk, *Astrophys. J.*, 821, 2 (6pp), DOI:10.3847/0004-637X/821/1/2
10. Yoshida, K., Sakai, N., Tokudome, T., Lopez-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Takano, S., Lefloch, B., Ceccarelli, C., Bachiller, R., Caux, E., Vastel, C., Yamamoto, S. (2015) Abundance Anomaly of

the ^{13}C Isotopic Species of c-C₃H₂ in the Low-Mass Star Formation Region L1527, *Astrophysical Journal*, 807, 66 (9pp), DOI: 10.1088/0004-637X/807/1/66

11. Oya, Y., Sakai, N., Lefloch, B., Lopez-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Ceccarelli, C., and Yamamoto, S. (2015) Geometric and Kinematic Structure of the Outflow/Envelope System of L1527 Revealed by Subarcsecond-Resolution Observation of CS, *Astrophysical Journal*, 812, 59 (12pp), DOI: 10.1088/0004-637X/812/1/59
12. Soma, T., Sakai, N., Watanabe, Y., and Yamamoto, S. (2015) Methanol in the Starless Core, Taurus Molecular Cloud-, *Astrophysical Journal*, 802, 74 (9pp), DOI: 10.1088/0004-637X/802/2/74
13. Sakai, N., Oya, Y., Sakai, T., Watanabe, Y., Hirota, T., Ceccarelli, C., Kahane, C., Lopez-Sepulcre, A., Lefloch, B., Vastel, C., Bottinelli, S., Caux, E., Coutens, A., Aikawa, Y., Takakuwa, S., Ohashi, N., Yen, H.-W., Yamamoto, S. (2014) A Chemical View of Protostellar Disk Formation in L152, *Astrophysical Journal*, 791, L38 (5pp), DOI: 10.1088/2041-8205/791/2/L38
14. Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., Watanabe, Y., Ceccarelli, C., Kahane, C., Bottinelli, S., Caux, E., Demyk, K., Vastel, C., Coutens, A., Taquet, V., Ohashi, N., Takakuwa, S., Yen, H.-W., Aikawa, Y., & Yamamoto, S. (2014) Change in the Chemical Composition of Infalling Gas Forming a Disk around a Protostar, *Nature*, 507, 78-80, DOI: 10.1038/nature13000
15. Sakai, N., & Yamamoto, S. (2013) Warm Carbon-Chain Chemistry, *Chem. Rev.*, 113, 8981-9015 DOI: 10.1021/cr4001308

学会発表

1. 山本 智, (2018) 星間雲の階層構造と化学, 2017年度「物質階層の原理を探求する統合的実験研究」研究報告会
2. 吉田健人 (2017) 星形成領域における H₂CO の ^{13}C 同位体比の観測, 天文学会 2017 年秋季年会
3. 大小田結貴 (2017) Class 0 低質量原始星 IRAS15398-3359 の円盤・エンベロープ構造, 天文学会 2017 年秋季年会
4. Oya, Y. (2017) Chemical Change in the Disk Forming Region of IRAS 16293-2422 Studied with ALMA, *IAU Symposium 332 Astrochemistry VII*
5. Yamamoto, S. (2017) Chemical Tracers of Dynamics in Low-Mass Protostellar Objects, *IAU Symposium 332 Astrochemistry VII*,
6. Oya, Y. (2016) Infalling-Rotating Envelopes and Disks around Low-Mass Protostars, *The Early Phase of Star Formation 2016*
7. 今井宗明 (2016) ALMA による低質量原始星天体 B335 の化学組成の研究 2, 天文学会 2016 年秋季年会
8. 大屋瑤子 (2016) Class 0 原始星天体 IRAS 16293--2422 Source B の回転構造の解析, 天文学会 2016 年秋季年会
9. Satoshi Yamamoto & Nami Sakai (2015) Carbon-Chain Molecules in Astrophysics, *Symposium on Advanced Molecular Spectroscopy*

10. 大屋瑤子 (2015) Class 0 原始星 IRAS 16293-2422 におけるエンベロープの速度構造解析, *天文学会 2015 秋季年会*
11. 坂井南美 (2015) Unbiased Chemical Survey of Protostellar Sources in Perseus, *天文学会 2015 秋季年会*
12. Sakai, N. (2014) A Drastic Chemical Change in Protostellar Disk Formation, *The Early Phase of Star Formation*
13. 相馬達也 (2014) Detection of Complex Organic Molecules in Starless Core; TMC-1, *天文学会 2015 年春季年会*
14. Sakai, N., “New carbon-chain chemistry found in solar-type star-forming regions”, *247th American Chemical Society National Meeting 2014*, 2014
15. 大屋瑤子 (2014) ALMA によるおおかみ座 Class 0 原始星 IRAS 15398-3359 の観測, *天文学会 2014 年春季年会*

図書

1. Yamamoto, S. (2017) Springer, Introduction to Astrochemistry, 286

A05 分析班

雑誌論文(全て査読有)

1. Sugahara, H., Meinert, C., Nahon, L., Jones, N.C., Hoffmann, S.V., Hamase, K., Takano, Y., Meierhenrich, U. (2018) d-amino acids in molecular evolution in space: Absolute asymmetric photolysis and synthesis of amino acids by circularly polarized light, *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) Proteins and Proteomics*, DOI:10.1016/j.bbapap.2018.01.004
2. Kawasaki, N., Simon, S. B., Grossman, L., Sakamoto, N. and Yurimoto, H. (2018) Crystal growth and disequilibrium distribution of oxygen isotopes in an igneous Ca-Al-rich inclusion from the Allende carbonaceous chondrite, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 221, 318-341, DOI:10.1016/j.gca.2017.05.035
3. Piani L., Yurimoto H., Remusat L. (2018) A dual origin for water in carbonaceous asteroids revealed by CM chondrites. *Nature Astronomy*, 2, 317-323, DOI:10.1038/s41550-018-0413-4
4. Naraoka, H., Yamashita, Y., Yamaguchi, M. and Orthous-Daunay F. R. (2017) Molecular evolution of N-containing cyclic compounds in the parent body of the Murchison meteorite, *ACS Earth Space Chem.*, 1, 540-550 DOI:10.1021/acsearthspacechem.7b00058
5. Piani, L., Tachibana, S., Hama, T., Tanaka, H., Endo, Y., Sugawara, I., Dessimoulie, L., Kimura, Y., Miyake, A., Matsuno, J., Tsuchiyama, A., Fujita, K., Nakatsubo, S., Fukushi, H., Mori, S., Chigai, T., Yurimoto, H. and Kouchi, A. (2017) Evolution of morphological and physical properties of laboratory interstellar organic residues with ultraviolet irradiation, *Astrophys. J.*, 837, 35, DOI:10.3847/1538-4357/aa5ca6
6. Oba, Y., Takano, Y., Naraoka, H., Kouchi, A. and Watanabe, N. (2017) Deuterium fractionation upon the formation of hexamethylenetetramines through photochemical reactions of interstellar

- ice analogs containing deuterated methanol isotopologues, *Astrophys. J.*, 849, 122(9pp), DOI:10.3847/1538-4357/aa8ea5
7. Sugahara, H., Takano, Y., Ogawa, N. O., Chikaraishi, Y. and Ohkouchi, N. (2017) Nitrogen isotopic fractionation in ammonia during adsorption on silicate surface, *ACS Earth and Space Chemistry*, 1, 24-29, DOI:10.1021/acsearthspacechem.6b00006
 8. Sawada, H., Okazaki, R., Tachibana, S., Sakamoto, K., Takano, Y., Okamoto, C., Yano, H., Miura, Y., Abe, M., Hasegawa, S., Noguchi, T. and Hayabusa2 sampler team (2017) Hayabusa2 Sampler: Collection of asteroidal surface material, *Space Science Reviews*, 208, 81-106, DOI: 10.1007/s11214-017-0338-8
 9. Fuchida, S., Naraoka, H. and Masuda, H. (2017) Formation of diastereoisomeric piperazine-2,5-dione from DL-alanine in the presence of olivine and water, *Origin Life Evol. Biosphe*, 47, 83-92, DOI:10.1007/s11084-016-9500-7
 10. Koga, T. and Naraoka, H. (2017) A new family of extraterrestrial amino acids in the Murchison meteorite, *Scientific Reports*, 7, 636 (8pp), DOI:10.1038/s41598-017-00693-9
 11. Oba, Y., Takano, Y., Watabane, N. and Kouchi, A. (2016) Deuterium fractionation on the formation of amino acids by photolysis of interstellar ice analogues containing deuterated methanol, *The Astrophysical Journal Letters*, 827, L18, DOI:10.3847/2041-8205/827/1/L18
 12. Chan, H.S., Chikaraishi, Y., Takano, Y., Ogawa, N.O. and Ohkouchi, N. (2016) Amino acid compositions in heated carbonaceous chondrites and their compound-specific nitrogen isotopic ratios, *Earth, Planets and Space*, 68: 7, DOI:10.1186/s40623-016-0382-8
 13. Takano, Y., Chikaraishi, Y. and Ohkouchi, N. (2015) Isolation of underivatized amino acids by ion-pair high performance liquid chromatography for precise measurement of nitrogen isotopic composition of amino acids: development of comprehensive LC xGC/C/IRMS method, *International Journal of Mass Spectrometry*, 379, 16-25, DOI:10.1016/j.ijms.2014.1011.1012
 14. Kitajima, F., Uesugi, M., Karouji, Y., Ishibashi, Y., Yada, T., Naraoka, H., Abe, M., Fujimura, A., Ito, M., Yabuta, H., Mita, H., Takano, Y. and Okada, T. (2015) A micro-Raman and infrared study of several Hayabusa category 3 (organic) particles, *Earth, Planets and Space*, 67:20, DOI: 10.1186/s40623-015-0182-6
 15. Oyama, T., Negishi., Onigahara, H., Kusano, N., Miyoshi, Y., Mita, M., Nakazono, M., Ohtsuki, S., Ojida, A., Lindner, W., Hamase, K. (2015) Design and synthesis of a novel pre-column derivatization reagent with a 6-methoxy-4-quinolone moiety for fluorescence and tandem mass spectrometric detection and its application to chiral amino acid analysis, *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 116,71-79, DOI:10.1016/j.jpba.2015.05.039
 16. Ishigo, S., Negishi, E., Miyoshi, Y., Onigahara, H., Mita, M., Miyamoto, T., Masaki, H., Homma, H., Ueda, T., Hamase, K. (2015) Establishment of a two-dimensional HPLC-MS/MS method combined with DCI/D₂O hydrolysis for the determination of trace amounts of D-amino acid residues in proteins, *Chromatography*, 36, 45-50, DOI:10.15583/jpchrom.2015.017
 17. Bajo, K., Olinger, C. T., Jurewicz, A. J. G., Burnett, D. S., Sakaguchi, I., Suzuki, T., Itose, S.,

- Ishihara, M., Uchino, K., Wieler, R. and Yurimoto, H. (2015) Depth profiling analysis of solar wind helium collected in diamond-like carbon film from Genesis, *Geochem. J.*, 49, 559-566, DOI:10.2343/geochemj.2.0385. 1601
18. Hashiguchi, M., Kobayashi, S. and Yurimoto, H. (2015) Deuterium- and ¹⁵N-signatures of organic globules in Murchison and Northwest Africa 801 meteorites, *Geochem. J.*, 49, 377-391, DOI:10.2343/geochemj.2.0363
 19. Hamase, K., Nakauchi, Y., Miyoshi, Y., Koga, R., Kusano, N., Onigahara, H., Naraoka, H., Mita, H., Kadota, Y., Nishio, Y., Mita, M., Lindner, W. (2014) Enantioselective determination of extraterrestrial amino acids using a two-dimensional chiral high-performance liquid chromatographic system, *Chromatography*, 35, 103-110, DOI:10.15583/jpchem.2014.014
 20. Yamashita, Y. and Naraoka, H. (2014) Two homologous series of alkylpyridines in the Murchison meteorite, *Geochem. J.*, 48, 519-525. DOI:10.2343/geochemj.2.0340
 21. Yurimoto, H., Itoh, S., Zolensky, M., Kusakabe, M., Karen, A. and Bodnar, R. (2014) Isotopic compositions of asteroidal liquid water trapped in fluid inclusions of chondrites, *Geochem. J.*, 48, 549-560, DOI:10.2343/geochemj.2.0335
 22. A. Takanabe, M. Tanaka, A. Taniguchi, H. Yamanaka, T. Asahi (2014) Quantitative analysis with advanced compensated polarized light microscopy on wavelength dependence of linear birefringence of single crystals causing arthritis, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 47, 285402(8pp), DOI:10.1088/0022-3727/47/28/285402

学会発表

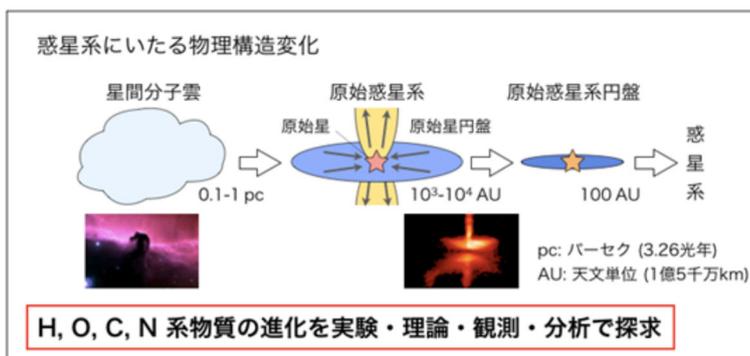
1. Hamase, K., Koga, R., Miyoshi, Y., Mita, M., Lee, J., Lindner, W., Multi-dimensional HPLC analysis of D-amino acids and related compounds in complicated biological matrices and its clinical applications, *The 3rd International Conference of D-Amino Acid Research*, 2017
2. Naraoka, H., Recent technical advances in organic geochemistry: High-resolution mass spectral, chromatographic and spatial analyses, *International Workshop of Organic Geochemistry "Biomarkers and Molecular Isotopes"*, 2016
3. Yurimoto, H., Evolution of planet-forming components in the first one million year of the protoplanetary disk, *ELSI Workshop Before the Moon*, 2016
4. Mita, H. and Nagasawa, E., Prebiotic formation of polyamino acids under molten states, *The International Seminar on the Origin of Life and Chemical Evolution of RNA*, 2015
5. Hamase, K., Miyoshi, Y., Sasabe, J., Kimura, T., Mita, M., Yamamoto, R., Isaka, Y., Aiso, S., Lindner, W., Chiral amino acid metabolomics using two-dimensional HPLC for novel biomarker screening, *30th International Symposium on Chromatography*, 2014
6. Yurimoto, H., Origin of the solar system shed light on by secondary ion mass spectrometry 05PL01, *9th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '13 (ALC'13)*, 2013

研究成果

X00 総括班

1. 研究開始当初の背景

本研究領域の研究者らは、惑星形成過程を化学的視点から理解することをめざし、星間塵表面での原子反応による氷や有機物の生成・同位体濃縮過程の解明、炭素鎖分子に富んだ原始星の発見、同位体顕微鏡による太陽系最古の水の発見など世界的業績をあげてきた。いずれも化学的進化の一断面において特筆すべき成果であるが、分子雲から原始惑星系までの統一的理解には至っていない。これは H, C, O, N 系物質の豊富で多様な情報を読み解くための戦略が欠如しているためである。これらの元素を含む系の反応は非平衡で時に不可逆であるため、物理化学的基盤に立った実験的・実証的研究が必要になる。すなわち、分子雲から原始惑星系に至る環境での氷・有機物の生成効率、生成経路、同位体分別機構を解明する実験を中心に置き、観測や分析で有機物進化を読み解くための戦略を立てることが最も重要となる。



2. 研究の目的

宇宙で最も大量に存在する元素 (H, O, C, N) からなる固体物質 (氷および有機物) の形成・進化に着目し、実験、観測、理論、分析等の多様な手法で、分子進化の全体像を描き、これらを通して、化学的視点に立脚した惑星形成論を新たに構築することを目的とする。研究領域全体で、分子雲から原始惑星系に至る分子進化を物理化学的手法によって解明し、分子進化シナリオを作成する。総括班の重要な役割は、領域全体を1つの学際的な融合研究として機能させることである。

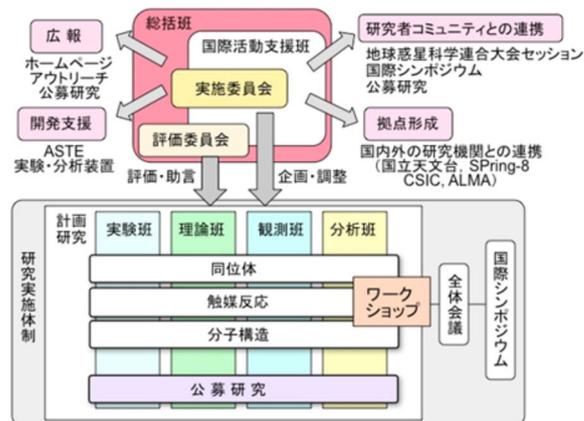
3. 研究の方法

- (1) 各班および公募研究の連携構築を目的とし、領域全体研究集会を各年度1回開催する。複数班にまたがる特定の研究テーマを深く議論するために、若手研究者がリーダーシップをとってワークショップを開催する。領域全体の進展状況を把握し、状況に適宜対応するために、必要に応じて総括班会議を開催する。
- (2) 若手支援・育成のために、公募研究で優先的な採択、ワークショップでのリーダーとしての登用、積極的な海外派遣等をおこなう。

(3) 領域の研究成果を広く学界に知らしめ、また、研究者コミュニティとの連携をはかるために、日本地球惑星科学連合大会でセッションを開催する。

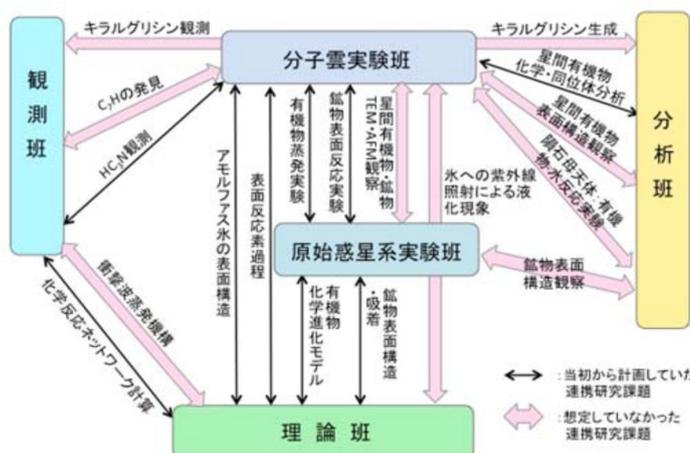
(4) 大型観測・実験装置の開発を支援するために、対応する研究機関との連携を推進するとともに、若手技術者の育成を図る。

(5) 領域の研究成果を広く知らしめ、また、領域内の情報伝達等のために、ホームページを開設する。また、多種多様な方法でアウトリーチ活動をおこなう。



4. 研究成果

(1) 図に計画研究間で遂行された連携研究課題を示す。当初の想定以上に幅広い課題で連携・融合研究が進展した。総括班メンバー間の密接な連絡や、総括班会議を通して連携研究の推進を図った。計画研究の分担者や公募研究を含む領域全体の研究や連携に関しては、年1回開催される全体集会で、研究成果をできる限り多くのメンバーと共有しさらに新たな展開に結びつかせるよう努めた。さらに、共通性の高い研究課題に関しては、各計画研究の枠を超えた「ワークショップ」を研究の進展に応じて随時開催し、より深い議論が進むよう工夫をして、最大限の有機的連携を図るよう努めた。研究期間内に計17回のワークショップを開催した。



(2) 本研究領域での2回の公募研究として、計画研究と有機的に結びつき新たな研究の創造が期待できる課題、計画研究がカバーしていない重要な課題およびその他独創的・萌芽的な課題等、計31件の課題が採択された。特筆すべきは、これまで天文学や地球惑星科学に携わっていない物理や化学の研究者の提案課題を半数程度採択したこと、さらに採択研究者の平均年齢が2回の公募でそれぞれ38.5歳、39.5歳と、若手研究者の研究を多く採択できたことである。

全体集会やワークショップでの議論を通じて、公募研究と計画研究間の連携も想定以上に活発におこなわれ、優れた研究成果が多数生み出された。

(3) 領域の研究成果を広く学界に知らしめ、また、研究者コミュニティとの連携をはかるために、日本地球惑星科学連合大会で毎年「宇宙物質進化」セッションを共催した。領域の年間の研究成果を広く発信するための国際会議 Symposium 'Molecular Evolution in Space'

を北海道大学で開催するとともに、他に8回の国際会議等を主催（共催）した。

(4) 全体集会，ワークショップ，総括班会議での情報交換を通じ，各班の進捗状況，連携情報を把握し，評価委員会から各班に対し，班員追加などの具体的な助言をおこなってきた。また，観測・実験装置開発，ワークショップの開催を通じ，国立天文台，放射光施設 SPring-8 との協力体制強化に努めてきた。国立天文台 ASTE 望遠鏡の観測装置開発を，若手技術者を中心に行わせ，観測装置の望遠鏡への搭載にあたっては，技術者をチリに派遣して経験をつませた。

(5) 領域発足直後にウェブサイト(www.astromolecules.org/) を立ち上げ，成果報告・活動報告をおこなってきた。本研究領域がめざす「分子雲から原始惑星系までの有機物進化の統一的理解」は，社会からの注目度の高い ALMA 望遠鏡や小惑星探査機「はやぶさ 2」のめざす科学との親和性が高い。本研究領域にはこれらの計画にも深く関わる研究者が多数参加しており，一般向け講演やメディアを通じた情報発信の機会が多く，それらの機会を利用し，本研究領域の意義や成果を紹介し，社会還元に努めてきた。

Y00 国際活動支援班

1. 研究開始当初の背景

本領域は，国内での各分野での最先端研究を融合し，世界に類のない学際融合研究として発展させ，宇宙での H, C, O, N 系物質の進化を統一的に理解し，惑星系形成論に化学的視点を初めて導入することをめざし，発足したものである。

本領域で構築する「分子進化シナリオ」は，宇宙科学・太陽系科学分野全体の大きな流れのひとつであり，複数の大型計画が国際協力で実施されている。例えば，ALMA 望遠鏡は星・惑星形成領域の化学的特徴を H, C, O, N 系分子から追究することをめざしている。また，探査対象天体をめざし運用中の JAXA 小惑星サンプルリターン探査機「はやぶさ 2」，2016 年秋打ち上げ予定の NASA 小惑星サンプルリターン探査機 OSIRIS-REx は有機物を含む小惑星からのサンプルリターンをおこない，2020 年代初頭に採取試料中の有機物分析がおこなわれる。

本領域の成果は，これらの大型計画に直接的かつ本質的な貢献をするものであり，計画が順調に進行している現段階から，積極的に国際大型計画との連携を進めていく必要がある。また，実験，理論，観測，分析を統合した世界に類のない本領域が順調に進行していることを受け，この取り組みを世界に積極的に発信し，広めることも必要であり，時宜を得ていると考える。

2. 研究の目的

本領域で構築する「分子進化シナリオ」は ALMA 望遠鏡や始源小天体（彗星，小惑星）探査の成果に直接の貢献が可能なものである。これらの国際協力大型計画が本格化を迎える前の段階から，国内の研究者が積極的に関与し，本領域の成果を最大限に活かす体制を構築する。本領域では実験，理論，観測，分析が有機的に連携した世界に類のない研究組織を構築し，研究を進めている。この新たな学融合研究創出が宇宙での分子進化研究のブレークス

ルーとなることを世界に積極的に発信する。また、日本発の学融合研究をさらに確固たるものにするための国際連携を強化する。関連分野で国際的に活躍する次世代研究者の育成が必要である。

3. 研究の方法

指導的研究者から若手研究者までの派遣および招聘を主として、下記の計画を推進する。

(1) 国際大型計画との連携・協力

ALMA および始原的小惑星からのサンプルリターンミッション「はやぶさ 2」、OSIRIS-REx と密接に連携して、これらの研究を推進する。

(2) 国際研究ネットワークの強化

拠点研究機関同士の研究交流を重点的におこない、共同実験・観測、シンポジウム等の共催で、研究を推進する。

(3) 次世代研究者の育成

若手研究者・技術者の招聘・派遣や上記(1)、(2)への参画により、次世代を担う若手研究者の育成に資する。

4. 研究成果

(1) 国際大型計画との連携・協力

ALMA 関連では、ヨーロッパの関連グループと共同観測を定常的に実施し、大きな成果に繋がった。さらに、国際シンポジウムの際に、関連する研究者を招聘し、今後の研究展望を議論し、今後の観測提案として結実した。「はやぶさ 2」や OSIRIS-REx では、関連する研究機関や国際シンポジウムに研究者を派遣するとともに、外国の研究者を国内の関連研究機関へ招聘した。このような努力により、両プロジェクトで採取した小惑星サンプル分析にあたっては、密接に協力して高度な分析をおこなっていくことが合意された。

(2) 国際研究ネットワークの強化

スペインの Institute of Structure of Materials-CSIC と北海道大学低温科学研究所間で研究者の相互交流によって氷の物質科学に関する共同研究を推進するとともに、国際シンポジウムを 2 回開催した。その結果、両機関での部局間交流協定の締結に繋がった。

(3) 次世代研究者の育成

上記(1)、(2)関連のみならず、個々の研究者がおこなっている共同研究においても、若手研究者を比較的長期にわたって招聘・派遣し、共同研究を推進した。優れた研究成果が生み出されただけでなく、今後の継続的な共同研究の実施にも道筋をつけた。国立天文台 ASTE 望遠鏡の観測装置開発を、若手技術者を中心に行わせ、観測装置の望遠鏡への搭載にあたっては、技術者をチリに派遣して経験をつませた。

A01 分子雲班

1. 研究開始当初の背景

星間分子雲では、ケイ酸塩鉱物を有機物および氷が取り囲んだ星間塵が形成され、この星間

塵が惑星系の起源物質となる。したがって、氷や有機物の形成メカニズム、化学組成・同位体組成・構造の理解は、分子雲のみならず惑星系の起源や進化を議論する上でまず明らかにすべき本質的に重要な課題である。

分子雲では、(a) 気相でのイオン-分子反応、(b) 微粒子で起こる表面原子反応、(c) 微粒子表面の光化学反応が起きている。長年の研究により、(a)のイオン-分子反応では H_2 , H_2O , CO_2 , NH_3 , CH_3OH などの重要な分子を効率よく生成できないことが明らかとなった。そのため、(b)の表面原子反応および(c)の光化学反応を定量的に理解することが、分子進化の全容解明に必要である。しかし、代表者たちによる研究で一部の分子については理解が進んだものの、多くの分子については、未だに定性的な理解に留まっており、早急な取り組みが必須である。さらに、光化学反応の研究は、定性的な実験に限られ、反応素過程を系統的に解明する研究はほとんどおこなわれていない。

2. 研究の目的

本研究では、分子雲における氷・有機物の生成機構を系統的に調べ、分子雲でどこまで分子が化学進化するかを明らかにし、以後の原始惑星系での進化の初期条件を確定する。具体的な課題は以下の通りである。

(1) 表面原子反応による分子生成過程

極低温(10K)の星間塵表面でおこる原子結合反応による簡単な分子 (H_2 , H_2O , CO_2 , H_2CO , CH_3OH , NH_3 など) の生成過程および同位体分別機構を実験的に解明する。同時に、生成された分子の核スピン状態を測定し、温度計としての有用性を検討する。さらに、反応の基板となるアモルファス氷の表面構造を直接観察する。

(2) 光化学反応による有機分子生成過程

不純物を含むアモルファス氷 (H_2O , CO , CH_3OH , NH_3 など) に紫外線を照射して生成される固体有機物の化学組成、組織、粘弾性的性質等を調べる。これによって分子雲で生成される固体有機物がどのようなものであるかを明らかにする。

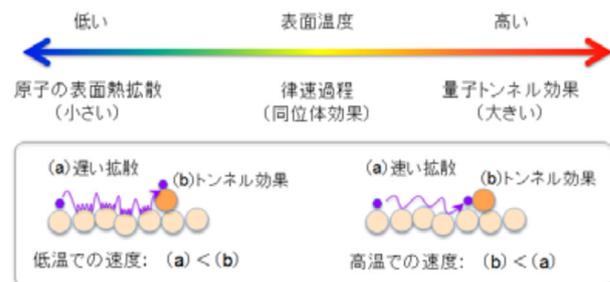
3. 研究の方法

(1) 極低温の表面原子反応実験装置を用いて、原子同士の反応、分子と原子の反応などを赤外線分光法でその場測定し、反応速度を測定する。反応後にレーザーを照射して分子を脱離させ、波長可変レーザーによるイオン化、飛行時間型質量分析計による分析によって、分子の励起状態、運動エネルギー、核スピン状態を測定する。氷の表面構造は、極低温・超高真空の原子間力顕微鏡で観察する。

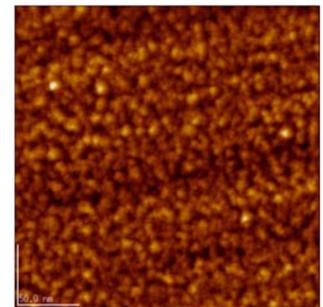
(2) 本研究で開発した光化学反応実験装置 (PICACHU: Photochemistry in Interstellar Cloud for Astro-Chronicle in Hokkaido University) を用いて、不純物を含むアモルファス氷 (H_2O , CO , CH_3OH , NH_3 など) に 10K で紫外線を照射する。紫外線照射後に温度を上昇させると、150-180K で氷が蒸発し、固体有機物が残る。この固体有機物を、分析班と協力して分析し、さらに、組織や構造を、光学顕微鏡、走査型電子顕微鏡、透過型電子顕微鏡、原子間力顕微鏡で観察し、さらに粘弾性的性質を測定する。

4. 研究成果

(1) 表面原子反応実験により、主要な分子 (H_2O , CO_2 , NH_3 , CH_3OH など) の反応速度、水素と重水素による反応速度の違いを測定し、分子生成機構および同位体 (H,D) 分別機構を解明した。さらに、量子トンネル反応の一般的描像 (図) を描くことに成功した。これまで、H と D による反応速度の違いだけで議論されてきたが、反応の律速過程により、H と D による反応速度が大きく異なる場合や違いがない場合もあることが示された。

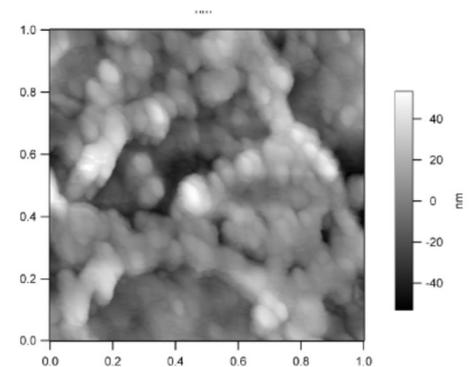


(2) アモルファス氷の表面構造を原子間力顕微鏡で初めて観察した。これまでは、物性測定から低温ではポーラスで高温ではコンパクト (平坦) になると考えられてきた。しかし、推定と大きく異なることが示された。すなわち、低温(40K) ではポーラスではあるが比較的平坦な構造を示すのに対し、高温(100K) ではポーラスであった (図)。

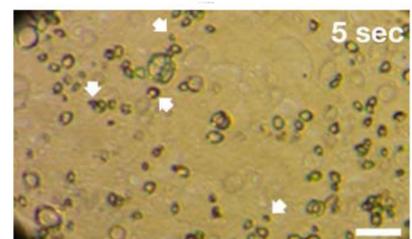


(3) 表面原子反応で生成された水分子の核スピン状態 (オルソ/パラ比) を、レーザー照射脱離-波長可変レーザーによるイオン化-飛行時間型質量分析で測定した。その結果、水分子の生成温度(10K, 145K)や水分子の蒸発温度(10K, 150K)によらず、常に統計平衡値の3になることを示した。これまで水分子のオルソ/パラ比は水分子の生成温度によって決まり温度計になると考えられてきたが、そうではないことが明らかになった。

(4) 光化学反応実験装置 (PICACHU) で作製した固体有機物を、各種顕微鏡を使って観察し、氷に紫外線を照射しその後に氷が蒸発した後に残る有機物 (分子雲有機物) と分子雲有機物にさらに紫外線を照射した有機物 (低密度雲有機物) で組織が大きく変化する事が示された。低密度雲有機物の微細構造 (図) は惑星間塵や始原的隕石中に見られる炭素質グルービュルと同様な構造であることを発見した。



(5) 10K で氷 (H_2O , および $\text{H}_2\text{O}-\text{CH}_3\text{OH}-\text{NH}_3$ など) に紫外線を照射し、紫外線照射後に氷の温度を上昇させると、50-150K で氷が液体的挙動 (氷中での気泡の生成および濡れ) をることを、光学顕微鏡および透過型電子顕微鏡を用いた観察から見いだした (図)。



これらの結果から粘性係数を推定すると、 H_2O では 10^{7-8} Pa s, $\text{H}_2\text{O}-\text{CH}_3\text{OH}-\text{NH}_3$ では 10^3 Pa s であった。このような現象が起こるとはこれまで全く考えられておらず、画期的な発見である。氷の液体的振る舞いは、氷中での化学反応を著しく促進し、さらに氷星間塵の付着・成長過程にも大きな影響を与える。

A02 班 原始惑星系実験班

1. 研究開始当初の背景

宇宙において H, C, O, N はもっとも大量に存在する元素であり、分子雲においてはそれらの相当部分が多様な氷として存在している。原始惑星系円盤は 100 万年程度の時間において温度、密度が顕著に上昇、再び低下という変化をし、空間的にも指数関数的な構造的変化が存在する。そこでは氷、有機物など低温で安定な物質は強い化学変化を受けることが推定される。他方、初期太陽系情報を残す隕石からは多様な高分子有機物が発見され、有機物進化過程の全貌を解明することが求められている。しかしながら従来、原始惑星系円盤条件における氷、有機物の化学進化を論ずるに足る実験は行われていなかった。特に、化学反応過程は物質や観測と理論モデルをつなぐ決定的な情報であり、太陽系、系外惑星系における有機物化学進理解のため、反応物、反応速度を決定する実験が求められていた。

2. 研究の目的

本研究においては、実験により、原始惑星系円盤環境（圧力 $0.1 < P < 100$ Pa 程度、温度 $10K < T < 700K$ 程度）における H, C, N, O の化学反応により形成される主要な有機物を決定するとともに、その反応速度を決定する。特に、多量に存在すると考えられる固体微粒子表面への化学吸着、微粒子表面における触媒化学反応の実験をおこなう。実験により得られる結果は本新学術領域研究理論班による分子進化モデルに組み込み、分子雲から微惑星・彗星にいたる過程の有機分子進化の統合的理解に貢献する。

3. 研究の方法

原始惑星系円盤に相当する温度圧力条件において、その場において吸着確率、反応生成物の質量・赤外スペクトルを測定可能な実験装置を開発する。当該装置で得られた知見を元に、より詳細に有機物形成反応をその場観測するための装置（顕微 XANES）を開発する。特に、Wolter ミラーを用いることで、高精度・高空間分解能の結合状態分析と、ターゲット物質の 2 次元分布の観察をおこなうことを可能とする。実験結果、特にエネルギースペクトルの解析のための理論的ツール開発を行う。実験により得られた結果を、新規に開発する原始惑星系円盤の物理的進化にともなう物質移動と氷・有機物化学進化を統合したモデルに摘要し、初期太陽系における氷・有機物の時空分布変化を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 原始惑星系円盤の主要ガス成分である水素（実験においては生成分子同定のため重水素を利用）と一酸化炭素ガスを、もっとも普遍的に存在すると考えられる金属鉄、鉄ニッケル合金、金属ニッケル、非晶質 Mg-珪酸塩基板上に照射し、触媒反応により生成する有機分子を観測した。その結果、50-100K において金属上で C₄, C₄D, C₅, C₅D 等の炭素直鎖分子が生成した（図 1）。反応効率は Ni が Fe に比し顕著に高いことが明らかとなった。

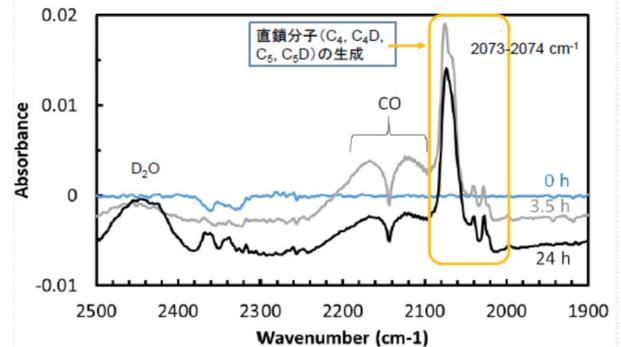


図 1. 水素と一酸化炭素照射により 100K の金属基板上で生成した有機物の赤外スペクトル。炭素直鎖分子であることがわかる。

他方非晶質珪酸塩上では、金属上で有機物が形成される温度では何も形成されず、200K以上において炭素（鎖）が形成した。

以上の結果から、原始惑星系円盤における触媒反応は、相対的に低温においては金属上において、相対的に高温においては非晶質珪酸塩上において炭素鎖からなる有機物が形成されることが示唆された。金属と非晶質珪酸塩の役割の違いは、本新学術領域研究における重要な成果の一つである。

(2) 有機物生成反応のその場観察を目的とした、SPring-8にウォルターミラー光学系を用いた高空間分解能の結像型軟X線分光装置（以下、顕微XANES装置）を開発した。本装置は高い空間分解能において、物質の化学組成、化学状態変化をリアルタイム観察可能なことが特徴であり、世界の多くで使われる走査型STXMに比べ、実時間で分析できること、試料上光子密度が低く容易に分解してしまう有機物を正確に分析することが可能という特徴をもつ。開発に成功した装置は、数100nmの空間分解能および数msの観測時間のスペックをもち、エネルギーを替えながらのイメージング等も可能である。

本装置開発にあたっては、照明系を用いない結像光学系、同型の軸外しのタイプ、集光素子としてポリキャピラリレンズを用いた集光光学系、スペックル用軟X線ビームディフューザーの利用、リレータンデム光学系の結像等、多様な光学系の適正のチェックも行い、より高機能装置の開発に重要な知見を得た。

本装置はさらに、当新学術領域研究A01班の光化学実験による反応生成物の分析、A05班によるにも用いられ、有機物種の同定、官能基の同定などに成功した。

以上の結果から、結像型軟X線分光装置が完成し、将来の日本の惑星探査ミッション（小惑星探査はやぶさ2、火星衛星探査MMXなど）により地球に持ち帰られる試料の分析に貢献することが可能となった。

(3) 原始惑星系円盤における金属あるいは非晶質珪酸塩表面における有機物形成を理論的に検討するため、第一原理計算による物質表面、吸着サイトの決定をおこなった。特に、ケイ酸塩に関する従来の研究では表面エネルギー自体の研究例がないため、結晶質物質から研究をスタートした。既存研究の存在する結晶質フォルステライト Mg_2SiO_4 の複数の面の表面エネルギーを決定し、計算の妥当性を確認した。

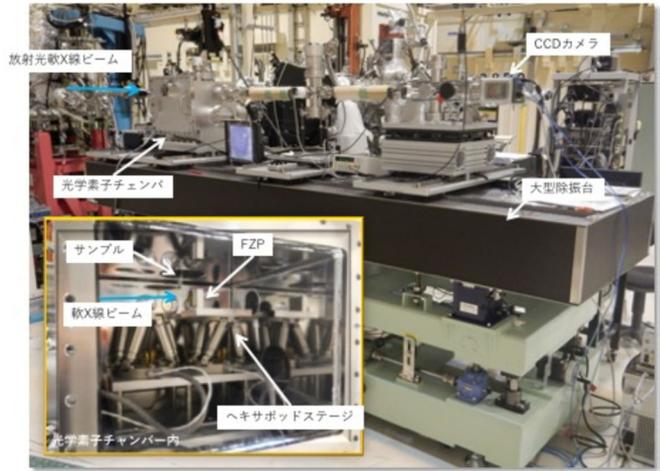


図2. SPring-8に新規開発した高分解能結像型軟X線分光装置の外観

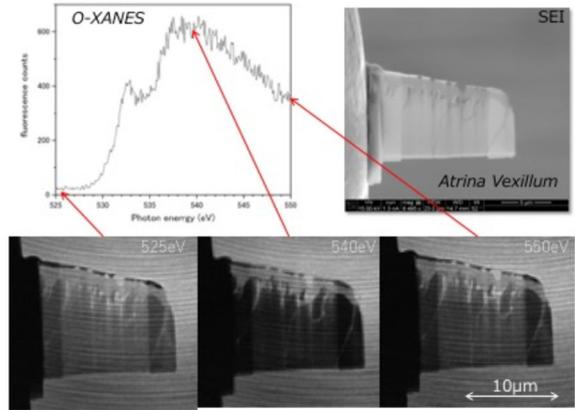


図3. テスト用試料クロタイラギの酸素吸収端コントラスト。酸素は $CaCO_3$ 由来

続いて、従来データの無いより高次の面の表面エネルギーを決定した。その手法を用い、本新学術領域研究 A03 班との共同研究により求められた非晶質 Mg_2SiO_4 の分子構造の表面エネルギーを決定した。次に、原始惑星系円盤の最も主要ガス分子である H_2 , CO のそれらの表面への吸着エネルギーを決定した。

第三ステップとして、結晶質および非晶質 Mg_2SiO_4 の軟 X 線吸収スペクトルを決定した。結晶質 Mg_2SiO_4 の主要な 3 つの面の酸素、マグネシウムの吸収端スペクトルを、第一原理計算により求め、Spring-8 において開発した軟 X 線分光装置により測定したスペクトルと比較し、極めてよい一致を得た。

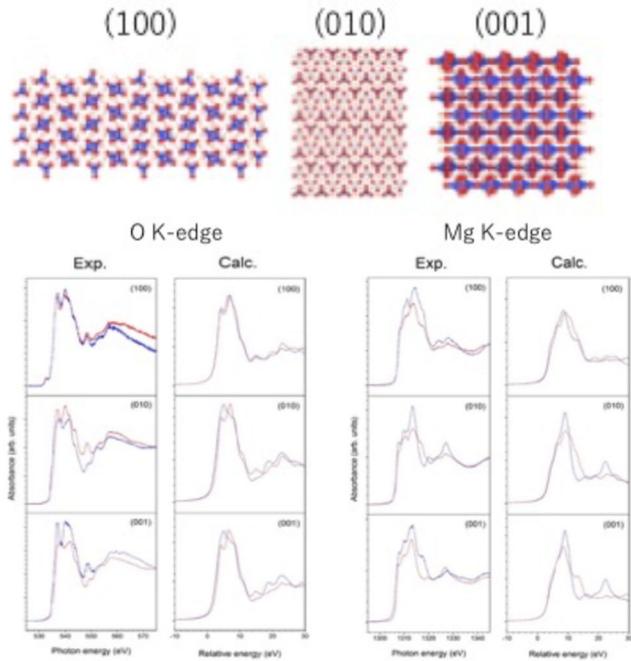


図 4. (上) 結晶質 Mg_2SiO_4 の (100)(010)(001)面の表面分子構造, (下) 第一原理計算による酸素 (下左) とマグネシウム (下右) の XAS スペクトル. 上から(100), (010), (001). それぞれ, Spring-8 に開発した装置により測定されたものと第一原理計算によるものの比較. 第一原理計算は測定をよく再現している.

さらに、本新学術領域研究 A01 班による光化学反応実験生成物の測定を試み、試料電流法により、表面から数 nm というまさに反応生成物に限定した分析を行い、酸素、窒素、炭素の吸収端スペクトルの解析により、実験条件ごとに、化学反応の実態、生成物を特徴づける官能基の種類、反応物の種類を同定することに成功した。

以上の結果から、本新学術領域研究における当初目的を大きく超えた成果を生み出すことができた。

(4) 惑星系円盤進化にともなう粒子移動とその結果である有機物・氷の時空分布についてのモデルを完成させた。モデルは原始惑星系円盤進化とケイ酸塩・金属等に関しては化学平衡、氷・有機物に関しては、蒸発実験結果に基づく蒸発温度の設定により、低温で安定な粒子が円盤内を内側に移流するにつれ蒸発がおり、C, H, O, N の存在量が変化することと、中心星近傍の高温領域で安定であったケイ酸塩や金属が乱流拡散により外側領域に移動し、両者の混合が起こる過程を求めるものである。円盤の初期条件 (円盤の空間的広がりおよび質量) をパラメータとして変化させた計算の結果、初期の広がりが物質の時空分布に大きな影響を与えることが明らかとなった。初期の広がりが 10AU の場合は、有機物、氷は蒸発してしまい、内側から外縁部まで、岩石質な惑星が形成されることになる。すなわち、われわれの太陽系の初期は、数 10AU 以上の空間的広がりを持っていたことが明らかとなった。

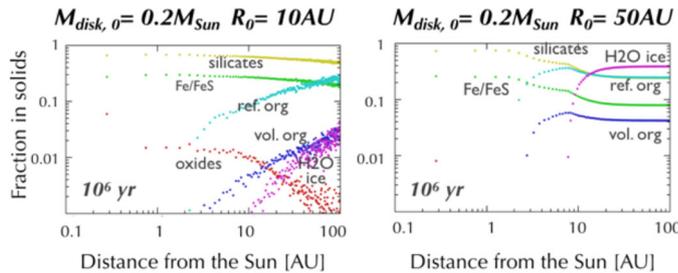


図 5. 初期円盤質量 0.2 太陽質量, 空間的広がり 10AU (左) と 50AU (右) の惑星系円盤における 100 万年後の物質混合. 広がりが 10AU の場合は、外縁領域の有機物と氷が相対的に欠乏している。

A03 理論班

1. 研究開始当初の背景

低温の星間分子雲では、H, O, C, N 等の元素が微粒子表面に凝集し、氷と単純な構造の有機分子を形成する。この有機分子は、原始惑星系、微惑星を経て隕石母天体に至る過程で、部分蒸発、Fischer-Tropsch 型反応、付着成長等により、複雑な有機物へと進化する。しかし、星間分子雲で生まれた単純な有機分子が隕石母天体に存在する複雑な分子に進化する過程は明らかではない。有機物の生成・進化の過程を探るためには、星間分子雲における主要な反応場となる微粒子表面の構造と触媒機能を理解し、分子進化の素過程を明らかにするとともに、マクロな視点から見た分子進化の過程を理解することが重要となる。

星間分子雲に存在する微粒子物質としては、ケイ酸塩鉱物、炭素質物質、アモルファス氷が知られているが、これらの物質の表面における原子分子反応プロセスの研究例はきわめて少ない。香内・渡部らの実験的研究 (Watanabe and Kouchi, *Astrophys. J.* L173, (2002) 571) により、極低温アモルファス氷表面で H, O, C, N 原子が反応することで H₂O, CO₂, NH₃, H₂CO, CH₃OH 等が生成することや、反応系によってはアモルファス氷が触媒的な働きをすることが明らかになっている。しかしながら、表面構造や組成による反応性の違いや、触媒機能を裏付ける理論的研究はほとんど例がない。

原始惑星系では、まず、分子雲の微粒子が加熱による部分蒸発（熱分解）を受ける。鉱物の加熱過程に関しては報告されているが、氷や有機物の加熱過程については研究されていない。また、鉱物表面の Fischer-Tropsch 型反応に関する理論研究は全く例がない。部分蒸発、Fischer-Tropsch 型反応に続いて起こる微粒子の衝突合体による微惑星形成については多くの研究が報告されているが、その大部分は仮想的な「粒子」を想定した研究である。

分子雲や原始惑星系で起こり得る多数の化学反応（気相反応、表面原子反応）および原子・分子の凝縮・蒸発過程を計算し（化学反応ネットワーク計算）、気相と固相の分子が時間とともにどのように変化するか（分子進化）を追跡する研究は古くから行われてきた。しかし、実験データの不足により、表面原子反応の効果については正確に評価されていない。また、小惑星帯での Fischer-Tropsch 型反応を理解する上で重要となる詳細な表面反応は考慮されていない。

電波観測の発展により、分子雲や彗星に存在する H-O-C-N 系分子（H₂O, NH₃, H₂CO, CH₃OH 等）の H/D, ¹²C/¹³C 比等の同位体組成が、分子の存在状態により大きく異なること明らかになっている。しかしながら、星間分子雲における同位体分別のメカニズムについては明らかではない。

2. 研究の目的

本課題では、星間分子雲における主要な反応場である微粒子表面の構造や吸着原子・分子の挙動を研究し、原子から分子への進化の素過程を解明することを目標とした。さらに、得られた成果を実験班・観測班の成果と統合して数値シミュレーション計算を行い、原始惑星系に存在する分子種が時間とともにどのように進化するのか、その過程について研究を実施した。

3. 研究の方法

本課題では、古典分子動力学法、ダイレクト・アブイニシオ分子動力学法、第一原理法、数値シミュレーション等の理論的手法を用いて、星間分子雲から原始惑星系に至るプロセスで起こる氷および有機物の生成・進化の過程をマイクロおよびマクロな視点から解明することを目的として研究を実施した。研究目的を達成するために、(1) アモルファス表面構造の解明、(2) アモルファス表面における吸着・拡散および表面反応機構の解明、(3) 原始惑星系における低分子の熱変性過程の解明、(4) 星間分子雲および原始惑星系における分子進化シナリオの構築、以上四つの個別目標を設定して研究を進めた。目標(1)(2)については分子シミュレーションを手法とするマイクログループが、目標(3)(4)については数値シミュレーションを手法とするマクログループが担当し、各課題を推進した。

4. 研究成果

(1) アモルファス表面構造の解明：

古典分子動力学法を用いて、アモルファス氷の表面構造を解析した(図1)。結果として、アモルファス氷には、熱振動の振幅が大きい低密度の層が存在することを明らかにした。また、ガラス転移点以下の極低温においても焼結現象が起こることを示した。さらに、アモルファスフォルステライトについても同様の計算を行い、表面構造やガラス転移のメカニズムを明らかにした。

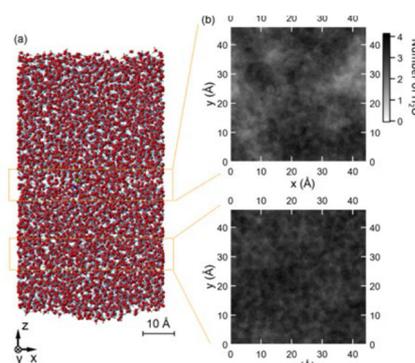


図1.アモルファス氷の表面および界面構造

(2) アモルファス表面における吸着・拡散および表面反応機構の解明：

ダイレクト・アブイニシオ分子動力学法を用いて、アモルファス氷表面に吸着した水ダイマーおよびアンモニアダイマーのプロトン移動速度を解析した(図2)。この成果として、氷表面のプロトン移動速度は気相中のほぼ倍の速さであり、さらに中間体の寿命が極めて短いことを示した。このことから、氷表面にはプロトン移動速度を加速する効果があることを明らかにした。

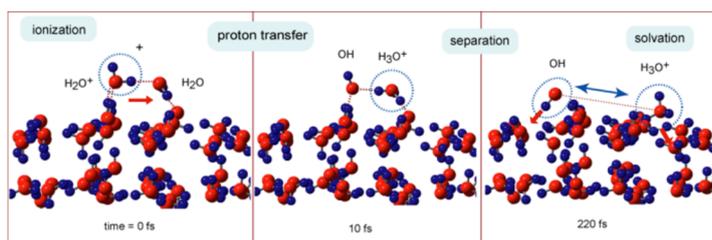


図2. 氷表面の水分子の光イオン化後のダイナミクス

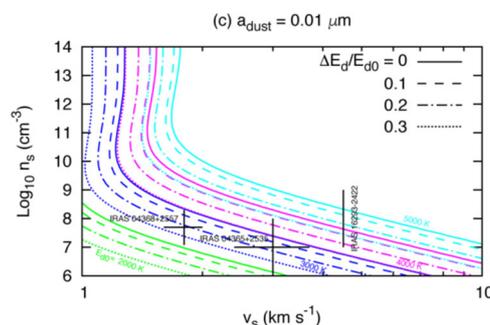


図3. 微粒子の遠心カバリアでの衝撃波加熱

(3) 原始惑星系における低分子の熱変性過程の解明：

数値シミュレーションにより、衝撃波に伴う氷ダストの蒸発過程を解析した(図3)。この成

果として、固体状態の SO や CO₂ が、典型的な降着衝撃波により昇華可能であることを明らかにした。

(4) 星間分子雲および原始惑星系における分子進化過程の解明：

原始惑星系円盤中の塵表面反応を含めた化学反応計算を行い、半径数十 AU 程度の暖かな領域で、ラジカル同士の塵表面反応により有機分子生成が促進されることを明らかにした。また、計算結果が彗星内の分子組成と良い一致を示すことから、メタノール分子輝線の観測により円盤内の塵表面反応の検証が可能であることを示した。

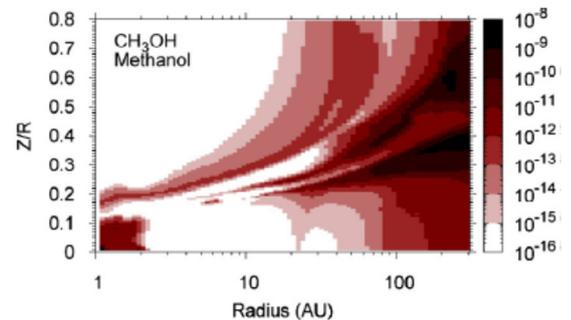


図 4. 表面反応過程を考慮した分子進化

A04 観測班

1. 研究開始当初の背景

星間物質と太陽系物質との関連を調べ、太陽系の物質的起源を解明することは、天文学、物理学、地球惑星科学、化学にまたがる学際的研究課題である。そのためには、現在まさに誕生しつつある原始星を実際に調べ、星間物質の進化を直接辿る天文観測からのアプローチが非常に重要である。

2000 年代の観測研究の結果、太陽程度の質量を持つ原始星（低質量原始星）天体の化学組成は、進化段階がほぼ同じであっても多様性をもつことが明らかになった。その一つの極端なケースはホットコリノ天体と言われるもので、アルコールやエステルなどの飽和度の高い有機分子に富むものである。一方、逆の極端なケースとしては、WCCC (Warm Carbon Chain Chemistry) 天体が知られている。そこでは、炭素鎖分子などの不飽和な有機分子が豊富に存在する。それまで、星形成から惑星系形成に至る過程は統一的に理解され、その間の化学進化も天体による違いはないと信じられてきたが、その理解は単純すぎるということが明らかになった。化学的に異なる低質量原始星天体がなぜ生じ、それぞれどのような化学組成を持つ惑星系を作るかに、関心が集まっている。

2. 研究の目的

本研究では、星間分子雲から星・惑星系に至る過程での化学進化を、最先端電波望遠鏡による観測で明らかにし、太陽系物質との関連を探求する。特に、上記で述べた化学的多様性の起源と進化に着目して研究を進める。そのために、次の 2 つの目標を置く。即ち、①原始星天体の統計的研究により化学組成の多様性の全貌とその起源を探求することと、②原始星天体の化学的多様性が原始惑星系円盤にどう伝播されるかを解明することである。

3. 研究の方法

研究には国内外の最先端電波望遠鏡を用いる。①の研究においては、国立天文台 ASTE10

m サブミリ波望遠鏡を用いた観測を想定していたが、望遠鏡の解像度や性能が必ずしも十分でないこともあり、フランス・ドイツが主体となって運用している IRAM 30 m 電波望遠鏡および国立天文台野辺山観測所の 45 m 電波望遠鏡を併用して研究を進めた。化学組成の多様性と原始星の置かれている環境との関連を同一分子雲複合体に属する数 10 個の原始星を対象にして調べる。これにより環境効果が化学的多様性にどのような影響を与えているかを、先入観なしに明らかにする。

一方、②の研究においては、2011 年から部分運用を開始した国際共同大型ミリ波サブミリ波干渉計 ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) をフル活用した。ALMA はそれまでの電波望遠鏡と比べて桁違いに高い解像度と感度を持つ。この望遠鏡によって、はじめて原始星近傍の惑星系が形成される領域における化学組成に切り込むことができる。ALMA を用いた観測研究を代表的低質量星形成領域に対して展開し、原始星天体全体で見られていた化学的多様性がどのように惑星系形成領域、そして原始惑星系円盤へ伝播されるかを、観測的に解明する。

4. 研究成果

5 年間の集中した観測研究を通して、上記の目標をほぼ達成することができた。ここではそのハイライトを紹介する。

4.1 ペルセウス座分子雲における化学組成の多様性の研究

ペルセウス座分子雲複合体に属する Class 0 および Class I 段階にある原始星 36 個に対して、IRAM 30 m 電波望遠鏡および国立天文台野辺山 45 m 電波望遠鏡を用いて CCH 分子、c-C₃H₂ 分子と CH₃OH 分子のサーベイ観測を行った。CCH と c-C₃H₂ は不飽和有機分子の代表、CH₃OH は飽和有機分子の代表とみなすことができるので、両者の存在量比が化学組成の多様性の指標となる。

観測の結果、CCH/CH₃OH 比は 2 桁ものばらつきを示すことがわかった (図 1)。

c-C₃H₂/CH₃OH 比も同様のばらつきを示した。

一方、c-C₃H₂ と CCH はよい相関を示す。このことから、ペルセウス座分子雲複合体における原始星天体に大きな化学的多様性が見られることがわかった。その原因を調べるために、CCH/CH₃OH 比を原始星の光度、進化段階指標 (エンベロープ質量や Bolometric Temperature) と比較したところ、相関は見られなかった。一方、分子雲複合体の中での原始星の位置に着目すると、孤立した原始星や分子雲の外縁部にある原始星は CCH/CH₃OH が高い傾向にあり、クラスター形成をおこなっている分子雲中心部では低いことが判明した。このように、原始星が形成された環境が化学組成に大きな影響を与えていることが初めて示された。

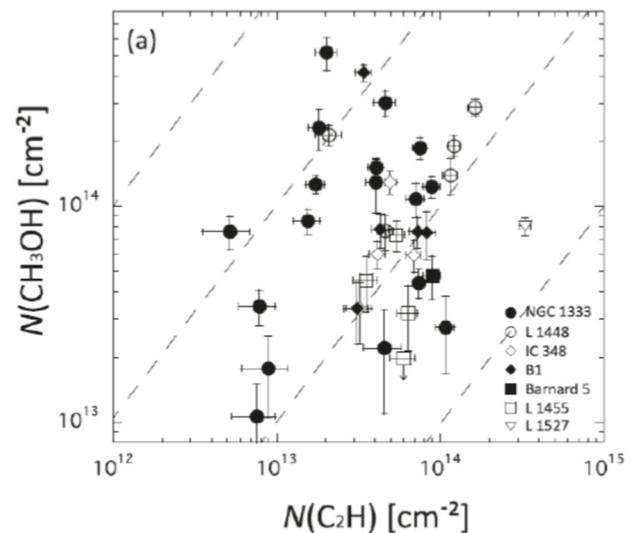


図 1. ペルセウス座分子雲複合体の原始星天体における化学組成の多様性

同様のサーベイ観測を HN^{13}C 分子と DNC 分子についても RAM 30 m 電波望遠鏡および国立天文台野辺山 45 m 電波望遠鏡を用いて行った。その結果、 $\text{DNC}/\text{HN}^{13}\text{C}$ 比 (重水素を含む割合) は天体ごとに数倍程度異なるが、上記の結果とは対照的に、その比は原始星の進化段階指標 (Bolometric Temperature) と負の相関を示した。即ち、重水素を含む割合は、おもに原始星進化によって変化していくことがわかった。このように、化学組成の多様性を支配する要因は、環境効果と原始星進化にあり、どちらが卓越するかは分子種によって異なることが示された。

4.2 ASTE 望遠鏡を用いた低質量原始星における ^{13}CO ($J=8-7$) 輝線の観測

本研究で開発した超伝導ホットエレクトロンボロメータ (HEB) ミクサ受信機をチリ・アタカマ砂漠にある国立天文台 ASTE 望遠鏡に搭載して、0.9 THz にある ^{13}CO ($J=8-7$) 輝線の観測を行った。受信機は正常に動作し、低質量星形成領域 IRAS 16293-2433, RCrAIRS7B について同輝線の検出に成功した。特に RCrA IRS7B は近傍の星からの紫外線によって化学組成が影響を受けており、それが化学的多様性の一因となっていることが指摘されてきたが、その影響 ^{13}CO ($J=8-7$) 輝線と中性炭素原子 ($^3P_1-^3P_0$) 輝線の視線速度のずれから確認することができた。

4.3 低質量原始星 L1527 における遠心力バリアの発見

L1527 はおうし座にある代表的 Class 0 天体である。化学的には WCCC 天体の典型例として知られる。この原始星周りには回転落下する扁平なエンベロープが視線に対してほぼ Edge-on の向きに存在していることが知られている。我々は、ALMA の初回の観測公募において、その化学組成分布を調べる観測を提案し、採択された。観測の結果、南北に延びる回転落下エンベロープの構造が $\text{c-C}_3\text{H}_2$, CCH , CS 輝線で詳細に明らかになった。その速度構造を解析したところ、回転落下エンベロープの遠心力バリア (落下ガスの近日点) が初めて明瞭に捉えられた。しかも、その遠心力バリアの位置で、化学組成が大きく変化していることがわかった。即ち、 $\text{c-C}_3\text{H}_2$, CCH , CS は回転落下エンベロープに存在するのに対し、

SO 分子は遠心力バリア近傍にのみ集中して現れる。これは遠心力バリアにおいて弱い降着衝撃波が生じるため、温度が上昇して星間塵マントルから SO が蒸発してきたものと見られる (図 2)。一方、 H_2CO 分子はエンベロープ、遠心力バリアに加えて、その内側の原始星円盤にも存在する。このように、遠心力バリアにおいて、化学組成が劇的に変化する様子が初めて明らかになった。回転落下ガスの遠心力バリアの存在とそこでの劇的的化学組成変化は、これまで理論的にも観測的にも全く予想していなかったものであり、星・惑星系形成とそこでの物

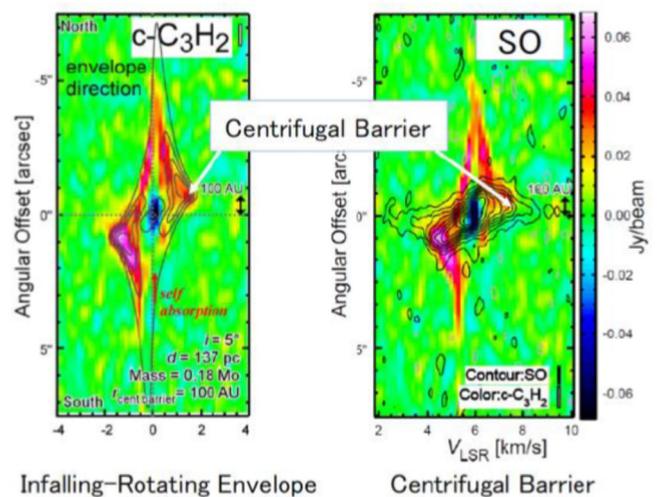


図 2. L1527 におけるエンベロープ方向の位置速度図。左図で回転が途切れているところが遠心力バリアの位置。SO は遠心力バリア近傍に局在する。

質進化の理解を大きく進める成果として、国際的に注目を集めた。

回転落下エンベロープの物理構造は、回転しながら自由落下する粒子を考えるモデルで非常によく説明できる。このようなモデルが成立するということは、原始星に向かって落下する動圧が、ガスの静圧や磁気圧を上回っているためと考えられる。このことは、星形成の理論研究にも大きな示唆を与えるものと言える。

一方、遠心力バリアの内側には原始星円盤が形成され、やがては原始惑星系円盤に進化していくものと考えられる。円盤構造が形成されるためには、遠心力バリアまで落下したガスの少なくとも一部が、何らかのメカニズムによって角運動量を失う必要がある。そのメカニズムについてはまだよくわかっておらず、今後の重要な研究課題として残されている。それでも、その一つのヒントが我々の観測から得られている。

我々は、ALMA による高解像度(0.2")観測を行い、L1527 の遠心力バリア付近の詳細構造を調べた。その結果、回転落下ガスは遠心力バリアの前で澱み、エンベロープ/円盤面の垂直方向に流れ出していることが示された。この流れが低速のアウトフローまたはディスクウィンドとなって角運動量を逃がす役割を果たしている可能性がある。このような遠心力バリアからのアウトフローの可能性は、国外のグループによって他の天体でも指摘されるようになってきており、今後の発展が期待される。

4.4 低質量原始星 IRAS 16293-2422 における化学構造の解明

上で述べた L1527 は WCCC の化学的特徴を持つ天体である。回転落下エンベロープの遠心力バリアの存在とそこでの化学変化という物理・化学現象が他の低質量原始星でも見られるかどうかを確かめるため、IRAS 16293-2422 の ALMA アーカイブデータの解析を行った。この天体は、L1527 と対照的に、飽和有機分子に恵まれるホットコリノ天体の化学的特徴を持つ。また、この天体は Source A と Source B からなる連星系でもある。まず、我々はエンベロープ/円盤が視線に対して Edge-on に近い Source A の解析を行った。

どの分子種が回転落下エンベロープをトレースするかを調べるために、原始星周りの分子分布を調べた。その結果、OCS 分子が最も広がって分布していることがわかった。そこで、この分子輝線の速度構造を詳しく調べたところ、それは回転落下エンベロープのモデルでよく説明できることが示された。そして、遠心力バリアの半径が、40-60 au と求められた。CH₃OH や HCOOCH₃ のような有機分子は、遠心力バリア近傍に局在していた。この分布は L1527 の SO 分子の場合と酷似している。一方、H₂CS 分子は、エンベロープ、遠心力バリア、およびその内側の原始星円盤に存在していることが示された。このように、IRAS 16293-2422 Source A においても、回転落下エンベロープ、遠心力バリア、原始星円盤という構造は L1527 と同様であるが、それぞれに特徴的に存在する分子種は、原始星天体全体の化学組成を反映して、大きく異なる。この結果は、原始星天体の化学組成の多様性が、惑星系形成領域にまでもたらされていることを初めて示したものであり、星・惑星系形成に伴う物質進化の理解において、非常に重要な結果である。

連星系のもう片方の Source B については、エンベロープ/円盤面が視線方向に正対する Face-on の配置にある。そのため、回転落下に伴う速度構造は小さくなるが、Source A における分子分布の特徴をもとにして丁寧な解析を進めた結果、回転構造を特定することができ、Source A と同様の物理構造と遠心力バリア近傍での化学組成変化を確認した。また、Face-on の配置にも拘らず、視線方向の落下運動が Inverse P Cygni プロファイルとして見られることから、原始星近傍の円盤構造は数 10 au 程度の厚みを持っていることを指摘した。

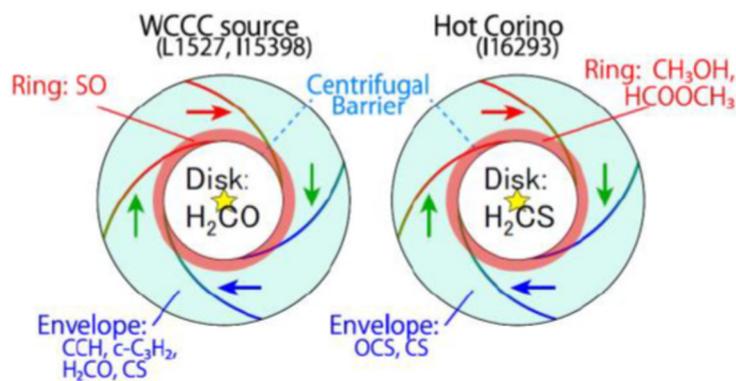


図 3. 回転落下エンベロープ、遠心力バリア、原始星円盤の化学組成の特徴。WCCC 天体とホットコリノ天体で物理構造は同じだが、各部分をトレースする分子種は異なる。

4.5 WCCC 天体とホットコリノ天体の中間の化学的性質を持つ天体の発見

Aquila Rift 領域にある低質量原始星 L483 は、炭素鎖分子に比較的恵まれていることから WCCC 天体の候補と考えられてきた。我々は、この天体を ALMA で観測したところ、確かに数 100 au スケールで原始星に集中した CCH や c-C₃H₂ の分布が見られ、WCCC 天体の特徴が確認された。また CS 輝線では回転落下エンベロープと原始星円盤の両方が見られ、モデル解析から遠心力バリアの半径をおよそ 100 au 程度と見積もった。一方、驚いたことに、遠心力バリアあるいはその内側で、ホットコリノ天体に特徴的な HCOOCH₃, NH₂CHO などの有機分子が検出された。このように、この天体では WCCC とホットコリノ化学が空間的に別々のところで起こっていることが明らかとなった。このような構造が確認されたのは、この天体がはじめてである。

我々は、ALMA の観測で同様の化学的特徴を持つ原始星天体をもう一つ見出した。それは低質量原始星 B335 である。この天体は孤立した環境にあり、星形成の物理過程の研究のよい検証対象として、これまで活発な研究が行われてきたが、その化学組成に着目した研究はほとんどなかった。我々はこの天体の観測で、ホットコリノ天体に特有な HCOOCH₃, NH₂CHO などの有機分子を初めて検出した。その分布は非常にコンパクトで、原始星方向に局在している。孤立した原始星天体でホットコリノ化学が確認されたのは初めてである。一方で、ALMA の ACA を用いて広がった分子分布を調べたところ、CCH や c-C₃H₂ が原始星に付随しつつも数 100 au のスケールで広がって存在していることも明らかになった。これはまさに WCCC 天体の特徴である。したがって、L483 と同様に、B335 も両方の化学的特徴が空間的に別々のところで起きている。

外側で WCCC、内側でホットコリノ化学という化学組成分布は、実は Aikawa ら(2008)の化学モデル計算で予想されている。原始星に向かって落下するガスは、原始星近傍の数 100 au 程度に近付くと温められ、25 K 程度で星間塵から CH₄ が蒸発する。その結果、一時的に炭素が豊富な状況が生まれ、WCCC が起こる。さらに、原始星に近付くと、今度は 100 K 程

度で氷とともに種々の有機分子が蒸発する。これがホットコリノ化学である。L483 と B335 はこのような「標準的」状況にあるものと見られる。

一方、星間塵上の CH_4 や有機分子の存在量は星ができる前の環境によって大きく変わる。そのため、星間塵上に CH_4 が少なければ WCCC は起こらず、有機分子が少なければホットコリノ化学は起こらない。WCCC 天体とホットコリノ天体はそのような両極端のケースを見ているものと考えられる。4.1 節で述べた原始星天体の化学的多様性は、それを反映していると考えられる。

星間塵の化学組成を決める要因は、大きく言うと環境効果である。具体的な可能性としては、星間紫外線が遮断されてから、星形成が起こるまでの時間ではないかと考えている。この時間が、星間塵における分子組成を変化させるからである。この時間が短ければ CH_4 が多く生成し、WCCC 天体を生む傾向にある。逆に長ければ、 CO の水素化を種として様々な有機分子が作られると考えられる。しかし、この検証はまだ道半ばである。

4.6 星なしコアにおける有機分子の検出

TMC-1 シアノポリインピーク (CP) はおうし座にある星なしコア (まだ原始星が生まれていないコア) で、様々な炭素鎖分子に恵まれていることで知られる。米国国立電波天文台の GBT 100 m 電波望遠鏡、IRAM 30 m 電波望遠鏡でこの天体の CH_3OH の観測を高周波数分解能で行ったところ、そのスペクトル線プロファイルが、炭素鎖分子のものと異なり大きく分かれたダブルピーク構造をしていることがわかった。このことは、 CH_3OH の分布が炭素鎖分子の分布と異なることを示している。そこで、 CH_3OH の分布を調べたところ、TMC-1(CP) から $1'$ 北西方向にそのピークがあることがわかった。その密度は TMC-1(CP) よりも低く、TMC-1(CP) の周辺の構造を捉えているとみられる。その CH_3OH ピークで HCOOCH_3 や $(\text{CH}_3)_2\text{O}$ の輝線を検出した。星形成が始まる前にすでにこれらの有機分子が星間塵上で生成し、非熱的過程によって気相に放出されていると見られる。この結果は、有機分子がいつ形成されるかについて重要な知見と言える。

4.7 まとめ

以上のように、5年間の研究で星形成から惑星系形成領域に至る物質進化とその多様性についての理解が格段に深まった。多様性を生み出す原因、惑星系形成に伴う化学進化が残された課題であるが、それらについても重要な足掛かりを得た。したがって、本研究は当初目的を十分達成したと言える。

A05 分析班

1. 研究開始当初の背景

宇宙において卓越した存在度を持つ、炭素・水素・窒素・酸素は低温環境で「有機物」および「氷」を形成し、始原的隕石などの地球外物質にも多く存在する。隕石中の有機物・氷の起源とその生成プロセスの解明は宇宙分子進化を解く鍵である。

星間分子雲で微粒子として存在した有機物・氷・鉱物などは原始太陽系円盤を経て、惑星系物質となる。始原的な炭素質隕石などには様々な有機物や水が含まれており、分子組成お

よび同位体比($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, D/H , $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ など)は非常に不均一である(Schmitt-Kopplin et al., 2010; Zega et al., 2010 など). 隕石有機物の起源として, 1) 分子雲に存在したものがそのまま隕石中に取り込まれた, 2) 原始太陽系円盤形成時に生成された, 3) 隕石母天体上で生成・変質した, 等が考えられる. また, “不均一”は上記プロセスの違いに起因することが考えられるが, 詳細は未だに謎である.

特に, 重い同位体の濃集が分子雲でどのようなプロセスでできたかは明らかになっていない. また, 分子雲を模擬した有機物生成実験はおこなわれているが, 生成過程と分子構造との関係についての研究は少ない. 分子雲に続く原始惑星系での有機物形成過程についても同様にほとんど理解が進んでいない.

2. 研究の目的

本研究では, 難燃性有機物から可溶性有機物まで極微量有機物に対して, 網羅的に分子構造を同定し, 同位体を含め世界最高感度で分析する手法を開発し, 実験班と協力して行う濃縮同位体をトレーサーとした分子雲有機物・原始惑星系有機物生成実験での生成有機物の定性定量分析, 有機化合物単位の構造解析・同位体分析により, 分子雲, 原始惑星系での有機物生成過程と分子構造との関係を解明する. 地球外物質中の極微量有機化合物に同様の分析方法を適用し, 隕石有機物分子と分子雲分子・原始惑星系分子をリンクする新しいマーカー分子・マーカー官能基を探索する. 例えば, 隕石の加水分解生成物であるアミノ酸や糖の前駆有機分子や, 分子雲分子として広く存在するメタノールの隕石中での状態を決定し, 分子雲から原始惑星系までの有機分子進化の解読をめざす.

3. 研究の方法

分子雲有機物・原始惑星系有機物の存在状態, および有機化合物の分子構造と同位体配置の関係を明らかにするために, 分子雲有機物・原始惑星系有機物模擬物質と隕石有機物の分子構造と同位体組成($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, D/H , $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, $^{18}\text{O}/^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$)を有機化合物単位で高感度・高空間分解能で測定する.

(1) 合成実験生成有機物と隕石有機物の直接比較を可能とするため, 極微量試料に対して, 特にこれまで隕石有機物中で分子構造が未特定の化合物を含め, 網羅的に分子構造を同定し, 同位体を含め世界最高感度で分析する手法を開発する.

(2) 分子雲・原始惑星系を模擬した環境で反応機構を制御しつつ, 濃縮同位体をトレーサーとして合成した有機物における同位体濃縮の官能基選択性を分子内部位レベルで解明し, 有機物生成条件や生成メカニズム特定の鍵となるマーカー分子・マーカー官能基を見つける.

(3) 隕石有機物の同位体組成の多様性をクロマトグラフ同位体比質量分析計によって測定する. 特に, これまで研究例のない難分解性有機物や分子内部位レベルでの同位体分布や, 3種以上の安定同位体を持つ酸素などの有機分子レベルでの同位体比分析を行う.

これらの結果および他班との密な連携に基づき, 分子雲, 原始惑星系での反応機構における同位体濃縮過程と隕石有機物との関係を明らかし, 分子雲から原始惑星系にいたる有機分

子進化を解明する。

4. 研究成果

(1) 網羅的に分子構造を同定するために超高質量分解能液体クロマトグラフ質量分析計を導入し、合成模擬分子雲有機物と隕石より抽出した可溶性有機物に対し分子量決定精度 1ppm の高分解能質量スペクトルを取得する分析法を開発した。その結果、どの試料からも分子量 700 に至る全ての質量数を持つ多種の有機分子が存在することが認められ、その精密質量とスペクトルパターンからいくつかの同族体有機化合物として分類することが有効であることが判明した (図 1)。この分類は分子雲有機物の生成経路と対応すると考えられる。このスペクトルパターンの解析により、アルデヒドとアンモニアが分子雲分子から隕石有機物分子をリンクする新しい鍵となるマーカー分子・マーカー官能基であることが判明した。また、生成有機物の一つであるアミノ酸に注目して、アミノ酸分子部位レベルの同位体分析とアミノ酸キラル分析が達成された。

(2) マーチソン炭素質隕石中に 600 個以上の含窒素環状化合物アルキル同族体 (C_nH_mN , $C_nH_mN_2$; n, m : 自然数) を新たに発見し、それらがアルデヒドとアンモニアから合成される反応過程を示した (図 2)。同じく、マーチソン炭素質隕石中からヒドロキシ基を有する地球外アミノ酸を新発見し、今まで主張されてきた過程と異なるアルデヒドとアンモニアからの合成経路を発見した。これらの結果は、原始惑星系の有機物の化学進化にアルデヒドとアンモニアが重要であることを示している。

(3) 隕石アミノ酸のキラル分析のために新規に 3 次元 HPLC 分析システムを開発することに成功し、マーチソン隕石中のアミノ酸においてエナンチオ過剰が検出されるものは一部の生物アミノ酸だけに限ることを明らかにした (図 3)。これは従来の定説を覆す発見で、地球の生物アミノ酸が持つエナンチオ過剰の原因は宇宙起源ではないことを強く示唆する。

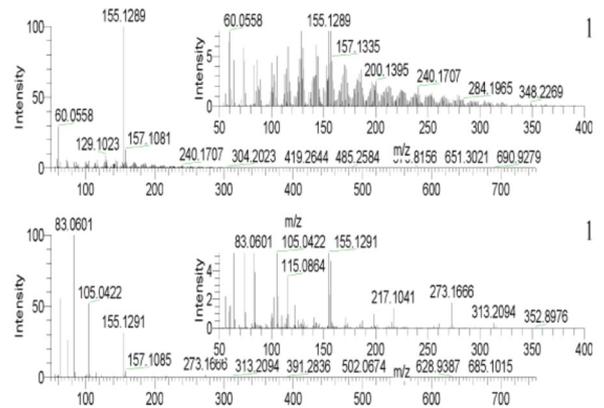


図1. 超高質量分解能液体クロマトグラフ質量分析計による分子雲有機物の合成実験試料の分析結果。(上図)メタン、水蒸気、アンモニアの混合ガスから合成された試料の質量スペクトル。(下図)メタノール、水蒸気、アンモニアの混合ガスから合成された試料の質量スペクトル。生成する有機化合物の種類はあまり変わらないが、生成分子の量比は出発ガスの種類に強く依存することがわかる。

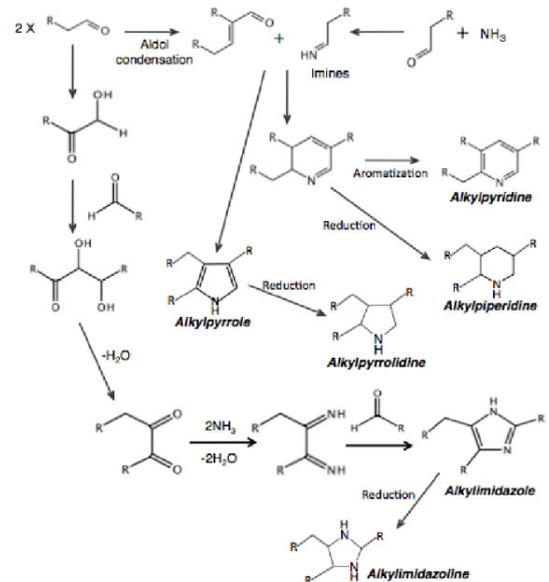


図 2. マーチソン隕石中から新たに発見された含窒素環状化合物のアルキル同族体の主な種類と推定される生成経路

(4) 同位体顕微鏡を用いて炭素質隕石 NWA801 (CR2)のマトリックスを観察することにより、重水素 D に濃縮した有機物ナノ粒子の形状・分布・重水素濃縮度を決定し、成因推定をおこなった。普通隕石中に保存されている小惑星表面の H₂O 液体の同位体分析に成功した (図 4)。この小惑星 H₂O の同位体分析により分子進化に彗星起源の水が重要な役割をするかもしれないことが導かれた。

(5) 分子雲模擬有機物の精密質量スペクトル解析を進めた。分子雲に普遍的に存在すると考えられるメタン・メタノール・水・アンモニアの混合氷への紫外線照射により生成する可溶性有機物は、C_xH_yN_zO_w と C_xH_yN_z(x,y,z,w:自然数)の全ての組み合わせが存在するが出發ガスの種類によりその量比が異なることが判明した。一方、分子雲模擬有機物のアミノ酸は分子部位ごとに重水素濃縮度が異なることを明らかにし、分子雲におけるアミノ酸の重水素濃集プロセスを解明した。

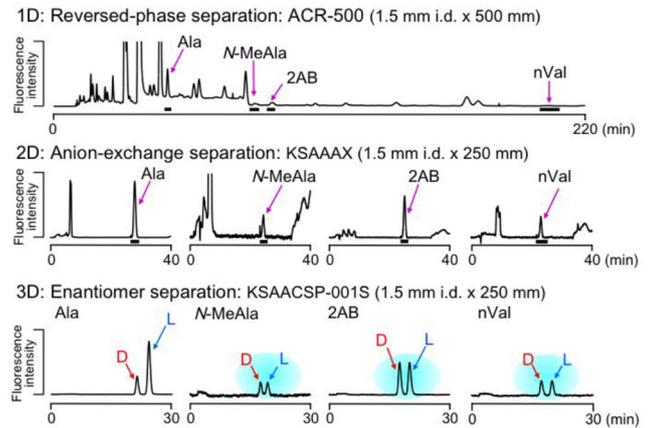


図 3. 3次元 HPLC によるマーチソン隕石中アミノ酸のキラル性分析結果

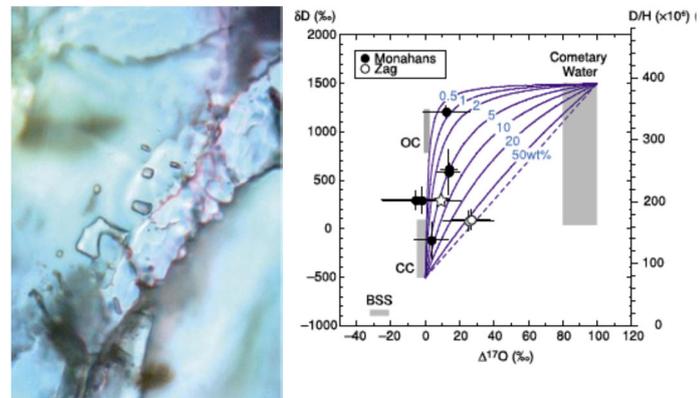


図 4. 普通隕石中の岩塩結晶中にトラップされた 45 億年前の水溶液とその水素・酸素同位体組成。同位体組成は、彗星起源の氷が小惑星鉱物の水和水と小惑星上で化学反応を起こしていることを示す