

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13873

研究課題名(和文)地球外天体における有機物化学進化の実証的解明

研究課題名(英文) Investigation of organic chemical evolution on extraterrestrial planetary bodies

研究代表者

関根 康人 (Sekine, Yasuhito)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授

研究者番号：60431897

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、地球外天体に存在する海の化学状態の理解を、無機化学から有機化学へと進める萌芽的研究を行った。多様な反応条件での有機熱水合成反応装置を構築し、これによって探査機によって取得された冥王星表面の有機物の反射スペクトルと、熱水実験で合成された有機物を比較することで、太陽系初期において冥王星に巨大衝突とそれに伴う有機合成が起きていたことを明らかにした。また、合成された有機物に対して衝撃変性実験を行うことで、将来の氷天体サンプルリターン探査の立案に必須となる実験データを取得した。

研究成果の概要(英文)：The present study performed exploratory research to investigate organic syntheses occurred within exo-oceans of icy bodies in the Solar system toward understanding of the mechanisms and variety of chemical evolution beyond Earth. By comparing the reflectance spectra of organic matter on Pluto obtained by the spacecraft with our laboratory experimental data, we show the occurrence of a giant impact and subsequent organic synthesis onto this icy dwarf planet in the early stage of its evolution. We also investigate shock-induced alterations of organic matter through hyper-velocity impact experiments, which is necessary for future sample-return missions to icy bodies in the Solar system.

研究分野：惑星科学

キーワード：太陽系形成 有機合成 巨大天体衝突 化学進化

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 太陽系の天体には、内部に液体の海を有するものが複数存在している。氷衛星エンセラダスやエウロパ、初期火星、準惑星セレス、冥王星、さらにはC型小惑星もこれに含まれる。近年では、これらの天体への探査によって、液体の水の化学組成も明らかになるようになっている。これまで申請者は、このような探査結果を実験やモデルで解釈することで、これら天体の水の無機化学組成に迫る研究を行ってきた。現在では、このような地球外の海洋の化学状態を明らかにする研究は、無機化学からより生命に迫るべく有機化学へとシフトしつつある。

(2) しかしながら、探査機がその場で行える分析には限界があり、得られている観測結果は赤外反射スペクトルや低分解能質量スペクトルのみである。したがって、観測結果から直接、これら天体の水環境における化学進化の有無や有機物微粒子のキャラクタリゼーションを行えるわけではなかった。

### 2. 研究の目的

(1) そこで本研究では、有機合成熱水実験をはじめとする様々な条件での室内実験データと探査機による観測との比較を行うことで、どの反応条件での有機物が現実の観測を再現するかを明らかにする。そして、最もよく再現する条件での生成物や反応中間物を実験・分析によって精査することで、氷天体や火星、C型小惑星における化学進化や有機物の組成・構造の推定(間接的キャラクタリゼーション)を行い、生体関連分子の存否を明らかにすることを目的とする。

(2) これらを実現すれば、地球外天体での化学進化の初めの実証となり、惑星科学のみならず合成有機化学、極限環境生物学など、生命の起源に関連する他分野への波及効果は大きい。

### 3. 研究の方法

(1) まず、既存の熱水反応実験オートクレーブに高温高圧反応セルを導入し、熱水環境での有機合成実験が可能な装置へと拡張する。そして、太陽系の始原物質である彗星組成に基づいて、アルデヒドやアルコール、シアンを含む水溶液を熱水環境(100~300気圧、50~200℃)で加熱することで、有機合成を行う。生成・成長する有機物微粒子をその場観察と溶液の化学分析を行うことで、生成メカニズムを明らかにする。

(2) 次に様々な条件で作成した有機物に対して、紫外可視分光や赤外分光、質量分析を行うことで、探査機ニューホライズズやドーン、探査機カッシーニによって得られた観測と直接対応可能な実験データを取得する。そして、得られた実験結果と探査データを比

較することで、冥王星やセレス、エンセラダスでの有機物の生成条件や、それを引き起こした天体進化、太陽系進化イベントを制約する。

(3) 最後に、将来のこれら天体からのサンプルリターン探査の計画・立案に必要な有機物サンプル回収時の衝撃変性を評価する衝突実験を行う。これらは、探査計画や必要となる回収装置を開発する基礎データとなるだけでなく、炭素質隕石など、すでに手に入る地球外物質の有機物の衝撃変性の評価を行う。

### 4. 研究成果

(1) まず本研究の主要な成果として、冥王星においてかつて巨大衝突(ジャイアント・インパクト)が起きたことを、探査機ニューホライズズのデータから明らかにしたことが挙げられる。ジャイアント・インパクトが起きた場合、衝突地点付近の水が加熱されて広大な温水の海ができ、そこで冥王星に元々存在していた単純な分子種が重合反応を起こして褐色の有機物が生成される可能性がある。この仮説を検証するため、まず、室内実験により、巨大衝突後の温水の海の中での化学反応を実験室で再現した。反応後の水溶液や生成した有機物の色の変化を調べた結果(図1)、およそ50℃以上で数か月以上の加熱時間の場合、冥王星に元々含まれる物質から、冥王星赤道領域と同様の褐色の有機物が生成することが明らかになった。

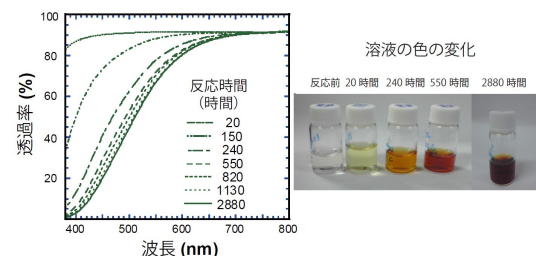


図1. 熱水実験で生成した有機物の可視透過スペクトルと色の時間変化の写真。

(2) つぎに、このような温度条件が、はたして冥王星の衛星カロン形成のジャイアント・インパクト時に達成されるのかを数値シミュレーションによって調べた。その結果、カロンのような大きさの衛星を形成する衝突条件の場合、ほぼすべてのケースで、冥王星赤道領域と同程度の広さの加熱領域が形成されることが明らかになった(図2)。つまり、カロンを形成するようなジャイアント・インパクトが起きた場合、その帰結として必然的に赤道域に褐色の領域が形成するのである。裏を返せば、クジラ模様のクトゥルフ領域が冥王星に存在することは、ジャイアント・インパクトによって冥王星カロン系が形成したことを強く裏付ける物的証拠

と言える。

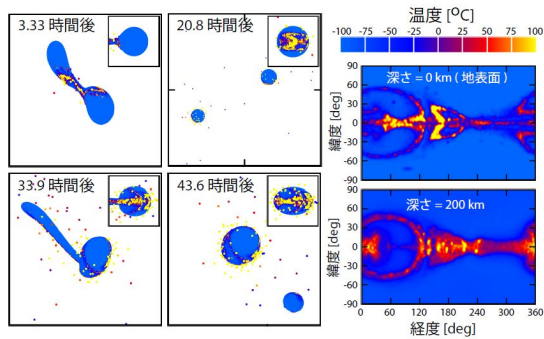


図2．冥王星へのジャイアント・インパクトでカロンを形成する数値シミュレーションの計算結果の1例（衝突速度はおよそ1 km/sで、衝突角度は60度）。左が各経過時間におけるスナップショットで、右が衝突後の冥王星の表面および深さ200 kmにおける温度分布。色のコンターは温度を示す。

(3) 本研究は、冥王星 カロン系が、地球月系と同様、ジャイアント・インパクトでできたことを示すものである。さらに本研究の結果、衝突の速度や角度を変えると、全球が褐色になる場合やほとんど加熱されない場合が生じることなども明らかになった。カイパーベルトには、冥王星の他にもマケマケやセドナ、エリスといった大型の天体が存在するが、これら天体の表面の色には多様性があることも最近わかってきた。例えば、マケマケやセドナは全球的に褐色な一方、エリスは白っぽい色をしている。このようなカイパーベルト天体の多様性の起源について、これまで統一的な説明はなかったが、本研究は、かつてカイパーベルトではジャイアント・インパクトが頻発し、その結果として上記の多様性が生じたという、統一的な説明を初めて提示した。これらの成果は Sekine et al. (2017) として Nature Astronomy に掲載された。

(4) また本研究では、炭素質隕石中に含まれる有機物の模擬物質を室内熱水実験によって合成し、これに対して系統的に衝撃変成実験を行うことで、有機物への衝撃波加熱の程度を定量的に明らかにする指標を構築した。衝突実験は物質材料研究機構の衝突銃を用いて行われ、衝突前後の有機物の赤外分光分析、ラマン分光分析、元素・同位体分析を行った。その結果、最大衝撃波圧力5 GPa以下では、有機物同士の脱水縮合反応が進行し高分子化が促進される一方、7 GPaを超えると水素を含む結合が切れて急激に炭化することがわかった（図3）。5~7 GPaという衝撃波圧力は、衝突速度に換算するとおよそ4 km/sec程度であり、ちょうど巨大ガス惑星の形成・移動によって小天体が激しく重力散乱されて衝突し合う速度に対応する。したがっ

て、巨大ガス惑星の移動により小天体に普遍的な高速衝突の痕跡が残るのであれば、それは地球外試料の統計的分析から判断できる可能性がある。

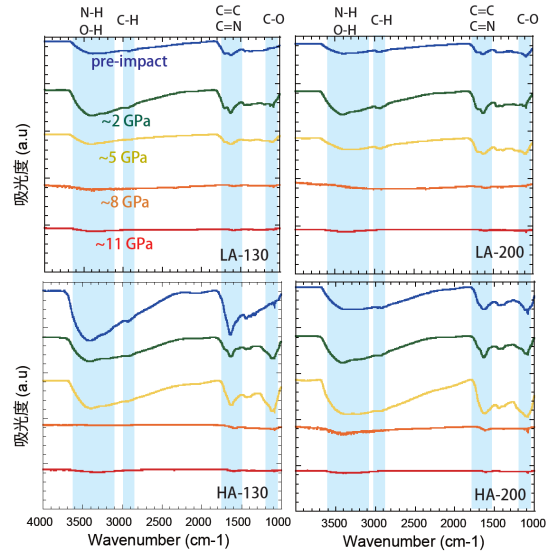


図3．様々な有機物への衝撃変性による赤外吸収スペクトルの変化。衝撃波圧力が5 GPaを超えると官能基による吸収が消失することがわかる。

(5) これらの実験結果は、将来の地球外からの有機物のサンプルリターンの際にも重要な制約となりうる。すなわち、サンプル回収の際の探査機と回収物質の相対速度が2~3 km/secを超える場合には、有機物の初生的な官能基の情報は試料回収の際に大部分が失われてしまうことを意味する。例えば、エンセラダスのプルーム物質のサンプル回収の場合にも、2~3 km/secを下回る回収速度を達成するにはエンセラダスの周回軌道に探査機が入る必要があり、将来の探査計画における軌道設計にも大きな制約を与える。これらの成果は、Sekine et al. (2018)として Meteoritics and Planetary Science に掲載された。

## 5．主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計7件)

Sekine, Y., Kodama, K., Kobayashi, T., Obata, S., Chang, Y., Ogawa, N.O., Takano, Y., Ohkouchi, N., Saiki, K., Sekine, T. (2018) An experimental study on impact-induced alterations of planetary organic simulants, Meteoritics and Planetary Science, 査読有,印刷中, DOI:10.1111/maps.13075

Hong, P.K., Sekine, Y., Sasamori, T.,

Sugita, S. (2018) Experimental study of heterogeneous organic chemistry induced by far ultraviolet light: Implications for growth of organic aerosols by CH<sub>3</sub> addition in the atmospheres of Titan and early Earth, *Icarus*, 査読有, Vol.307, pp.25-39, DOI:10.1016/j.icarus.2018.02.019

Chang, Y., Goto, K., Sekine, Y., Tajika, E. (2018) Depositional processes of impactites from the YAX-1 drill core in the Chicxulub impact structure inferred from vertical profiles of PDF orientations and grain size distributions of shocked quartz, *Meteoritics and Planetary Science*, 査読有、印刷中.  
DOI:10.1111/maps.13082

黒田 剛史, 佐川 英夫, 関根 康人, 笠井康子, Hartogh, P. (2017) 深宇宙探査機によるテラヘルツ波帯観測が拓く惑星科学, *日本リモートセンシング学会誌*, 査読有, vol.37, pp.351-361, DOI:10.11440/rssj.37.351

Sekine, Y., Genda, H., Kamata, S., Funatsu, T. (2017) The Charon-forming giant impact as a source of Pluto's dark equatorial regions, *Nature Astronomy*, 査読有, vol.1, pp.1-6, DOI:10.1038/s41550-016-0031

Yamamoto, S., Matsunaga, T., Nakamura, R., Sekine, Y., Hirata, N., Yamaguchi, Y. (2017) An Automated Method for Crater Counting Using Rotational Pixel Swapping Method, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 査読有, vol.55, pp.4384-4397, DOI: 10.1109/TGRS.2017.2691758

洪 鵬, 関根 康人, 杉田 精司 (2016) 還元的な惑星大気における有機物エアロゾルの成長過程に関する実験的研究, *エアロゾル研究*, 査読有, vol.31, pp.185-191, DOI:10.11203/jar.31.185

[学会発表](計 16 件)

Chida, T., Sekine, Y., Fukushi, K., Matsumiya, H., Solongo, T., Hasebe, N., Davaadorj, J. (2018) Hydrology of Subsaline Lakes in Southern Mongolia: A Terrestrial Analog Study for Lacustrine Environments and Chloride Depositions on Early Mars, 49<sup>th</sup> Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands Waterway Marriott Hotel and Convention

Center, The Woodlands, Texas, USA

関根康人, 齋藤義文, 春山純一, 松岡彩子, 笠羽康正, 浅村和史, 塩谷圭吾, 小林正規, 笠井康子, 東原和行, JUICE-日本チーム (2018) 木星氷衛星探査 JUICE からの今後の惑星科学、宇宙科学シンポジウム、JAXA、相模原市、神奈川県

Sekine, Y., Imamura, S., Noda, N., Takahashi, Y., Uesugi, S., Kurisu, M., Hartmann, J. (2017) High-O<sub>2</sub>, low-CO<sub>2</sub> atmosphere on early Mars inferred from manganese oxide deposits, AGU Fall meeting, New Orleans Ernest N. Morial Convention Center, New Orleans, Louisiana, USA

Sekine, Y. (2017) Water chemistry of "aqua" planets: Pluto & Ceres, Joint meeting of Multi-scale asteroid science & Aqua planetology, JAXA, Sagami-hara, Kanagawa, Japan

丹秀也, 関根康人, 渋谷岳造, 宮本千尋, 高橋嘉夫 (2017) エウロパ内部海の熱水環境における硫酸還元反応、日本惑星科学会 2017 年秋季講演会、大阪大学、豊中市、大阪府

田畑陽久, 関根康人, 菅崎良貴, 杉田精司, 村上隆 (2017) 中性 pH における Fe<sup>2+</sup>光酸化反応の実験的研究：初期火星の表層酸性化イベントに対する示唆、日本惑星科学会 2017 年秋季講演会、大阪大学、豊中市、大阪府

野田夏実, 今村翔子, 関根康人, 上杉宋一郎, 栗栖美菜子, 宮本千尋, 田畑陽久, 高橋嘉夫, 村上隆 (2017) Experimental study on manganese oxide formation: Interpretation of manganese oxide on Gale crater and oxidizing environment on early Mars, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会、幕張メッセ、千葉市、千葉県

丹秀也, 関根康人 (2017) Experimental investigations on hydrothermal reactions within large icy satellites and Martian crustal rocks using a 130-MPa hydrothermal autoclave, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会、幕張メッセ、千葉市、千葉県

今村翔子, 野田夏実, 関根康人, 上杉宋一郎, 栗栖美菜子, 宮本千尋, 田畑陽久, 村上隆, 高橋嘉夫 (2017) 火星は厚い CO<sub>2</sub> 大気を持っていなかった？マンガン酸化実験から探る初期火星の大気組成、日本地球惑星科学連合 2017 年大会、幕張メッセ、

## 千葉市、千葉県

Tabata, H., Sekine, Y., Kanzaki, Y., Sugita, S., Murakami, T. (2017) Experimental study of Fe<sup>2+</sup> photo-oxidation in circumneutral-pH solution: Implications for the trigger for acidification of surface water on early Mars, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会、幕張メッセ、千葉市、千葉県

Sekine, Y., Shibuya, T., Aikawa, Y. (2016) Neutral pH ocean on Ceres: Implications for formation temperature of Ceres in the protoplanetary disk, American Geophysical Union Fall meeting 2016, Moscone Center, San Francisco, California, USA

Sekine, Y., Tabata, H. (2016) Runaway acidification of surface water on early Mars in response to atmospheric evolution, Asian Oceanian Geoscience Conference, China National Convention Centre, Beijing, China

Sekine, Y., Shibuya, T., Aikawa, Y., Funatsu, T. (2016) Neutral pH of water on early Ceres, Goldschmidt conference 2016, パシフィコ横浜、横浜市、神奈川県

### [図書](計 1 件)

Sekine, Y., Shibuya, T., Kamata, S., Springer, Enceladus evidence and unsolved questions for an ice-covered habitable world (in Astrobiology: Origin and history of life and the Earth, and Search for life in Solar System and extra-solar planets), 2018, 印刷中

### [産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

関根 康人 (SEKINE, Yasuhiro)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・  
准教授

研究者番号: 60431897