

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月1日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22740352

研究課題名（和文）氷衛星エンセラダスにおける海底熱水反応実験：内部海の化学の理解に向けて

研究課題名（英文）Laboratory experiments of hydrothermal reactions in Enceladus: Toward understanding chemistry in the interior ocean

研究代表者 関根 康人 (SEKINE YASUHITO)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・講師

研究者番号：60431897

研究成果の概要（和文）：本研究では、氷衛星エンセラダス内部海における熱水反応を模擬した室内実験を行ない、氷衛星の材料物質に含まれる始原始的な揮発性分子（例えば、アンモニア、二酸化炭素）と鉱物（例えば、オリビン）との化学反応を調べた。そして、その結果をカッシーニ探査機によるエンセラダスのプルーム物質の観測結果と比較することにより、内部海における熱水反応の有無や温度条件を制約し、生命生存可能性について議論した。

研究成果の概要（英文）：We have investigated chemical reactions between primordial volatiles (such as ammonia and carbon dioxide) and primitive minerals (such as olivine) in Enceladus' interior ocean by conducting laboratory experiments of hydrothermal reactions. By comparing the results with the observations of Enceladus' plume by the Cassini spacecraft, we have discussed the temperature conditions of possible hydrothermal systems and habitability in Enceladus' ocean.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・地球宇宙化学

キーワード：惑星科学、地球化学、惑星探査

1. 研究開始当初の背景

“宇宙に地球以外で生命を宿している天体は存在するのか”という問いに答えることは、地球惑星科学分野のみならず、21世紀における自然科学の重要課題の1つである。地球型生命の誕生や生存には、液体の水の存在が不可欠であるが、これまでの太陽系探査により、木星や土星を周るいくつかの氷衛星の地殻

の下に、液体の水が内部海として存在していることが明らかになっている。しかしながら、氷衛星内部海に関する物理的制約に比べ、その物質化学的情報、つまり、内部海がどのような化学組成で、どのような化学反応が起きているのかといった、内部海の化学についてはほとんどわかっておらず、従って内部海における生命の存否に関する議論も現在ののと

ころ空想の域を出ない。これは、厚さ数キロ以上という氷地殻の下の内部海物質を直接探査で調べることは、技術的に困難であるためである。

この状況に光を差し込みつつあるのが、土星の衛星エンセラダスである。近年の惑星探査における最大の発見の1つは、カッシーニ探査機により、エンセラダスの南極付近の地殻の割れ目から、主に水蒸気と氷微粒子から成るジェットが噴出していることが明らかになったことだろう。氷衛星の中でも、エンセラダスのように内部海の物質が宇宙空間に噴出している天体は他になく、カッシーニ探査機による2008年のフライバイでは、ジェット内に水以外にもナトリウム塩や二酸化炭素、メタン、アンモニア、さらにはシアン、アルデヒドといった生命前駆有機分子も観測された。このようなエンセラダスのジェットの発見は、今後、我々の氷衛星内部海に対する理解の地平線を、物理的なものから化学的な領域へ大きく広げる可能性を持っていると言えよう。

エンセラダスの内部海の化学を調べるにおいて、最も重要な研究課題は、海底熱水活動が存在するかどうかを明らかにすることであろう。なぜなら、熱水活動は内部海の化学組成進化のみならず、生命存在可能性を考える上でも本質的であるからである。

エンセラダスなどの氷衛星は、原始太陽系円盤に存在した氷微惑星（現在の彗星）を材料物質に形成されたと考えられている。実際、ジェット中に観測されたメタンやアンモニアの存在量は、彗星に含まれるそれによく一致する。一方、シアン化水素など、彗星に含まれている量よりも多く含まれている分子や、逆に、メタノールなど、彗星に含まれているよりも桁で少ない分子もある。またジェット内には、 C_2 から C_6 までの炭化水素も検出されている。このように、ジェットに含まれる有機分子は、衛星の材料物質をそのまま保持しているわけではなく、エンセラダス形成後に何らかの化学反応を経験し、化学組成が変化（進化）した可能性が高い。熱史モデルによると、エンセラダスの内部海では地球の海底熱水活動に似た地質活動が起きている可能性が考えられるが、これまでの熱水反応実験は地球の海底環境を模擬したもので、エンセラダスで推定される条件で実験を行った例は皆無であり、最新の観測結果との対比・解釈を行うためには基礎的な室内化学反応実験が必要であった。

2. 研究の目的

本研究では、エンセラダスで想定される条件（圧力：200気圧、温度：50–400℃、鉱物：オリビン）で、不確定要素の大きい温

度と鉱物をパラメタに熱水反応実験を行い、以下の項目を明らかにする。

- (1) 彗星組成の有機分子を含む模擬内部海水を出発物質とし、アンモニア、二酸化炭素、メタノールなど主要揮発性分子の生成率や消費率を測定する。さらに、オリビンなどの鉱物が、エンセラダス内部の熱水環境で変成されて形成される鉱物組成を明らかにすることで、反応のメカニズムを考察する。
- (2) 上の(1)により、観測結果を整合的に説明する温度条件、反応鉱物候補が存在するかを調べ、エンセラダスにおける海底熱水活動の有無を議論する。また、そのときに示唆される熱水環境の温度条件から、熱水反応が起きていた時期やエネルギー源を制約する。
- (3) 推測される温度条件や熱水反応による生成分子種の組み合わせから、メタン生成菌などの微生物がエンセラダス内部で生存のためのエネルギーを獲得できるか議論する。
- (4) さらに、タイタンやガニメデなど他の氷衛星内部での化学反応に実験結果を応用し、氷衛星におけるコア、マントル、大気間での物質の分化過程を明らかにする。

3. 研究の方法

熱水実験では、エンセラダスを形成した氷微惑星（彗星）の組成を出発物質に用いる。この出発物質は、アンモニア、二酸化炭素、メタン、メタノールなどを含む水溶液であり、それぞれの量比は、彗星で観測されるものに基づいて定める。二酸化炭素とメタンは気体で反応容器に封入し、高圧状態にすることで水に溶かす。使用する鉱物は、隕石にも豊富に含まれ、エンセラダスの岩石核にも同様に含まれていることが予想される鉱物の内、フィッシャー・トロプッシュ触媒反応や蛇紋岩化作用に関わる可能性のある、金属鉄、マグネタイト、オリビンである。これら鉱物粉末を実験前に BET 法により表面積測定を行い、単位表面積当たりの生成率を比較する。

生成物分析については、分析装置には、東京大学に設置されている四重極質量分析計およびガスクロマトグラフ質量分析計を用いる。これにより、熱水反応によるシアン化合物とアルコールの生成や消費、炭化水素化合物 (C_2 , C_3 , C_4 , C_6) の定量、および窒素の生成の有無を明らかにする。

溶液中の陽イオン濃度変化については、ICP-AES を用いて濃度変化を明らかにする。また、溶液中のイオン濃度から、エンセラダス内部で、溶液が低温に冷やされた場合に沈殿しうる鉱物や塩化物についても計算を行

なう。

また、実験後に鉱物を回収し、X線分析や電子顕微鏡 EPMA 観察を行い、その鉱物の組成変化や形状の観察をあわせて行なうことで、熱水反応条件下での鉱物表面反応メカニズムも明らかにする。

4. 研究成果

研究目的であげた項目(1)–(4)に対し、研究結果をそれぞれ以下にまとめる。

- (1). エンセラダス内部海での熱水反応条件では、オリビンなどの蛇紋岩化反応により水素が活発に生成されることがわかった。その活発な蛇紋岩化反応により、水溶液中は強還元力的になり、アンモニアの分解反応が熱力学的に妨げられることがわかった。さらに、二酸化炭素はオリビンから供給されるマグネシウムや鉄イオンと結合し、炭酸塩として沈殿することがわかった。以上のことから、始原的揮発性分子であるアンモニアは熱水反応が起きて分解せずにそのまま残り、二酸化炭素は炭酸塩になることで消費されていくことが明らかになった。水溶液と鉱物組成については、アンモニア存在下での高 pH 条件で、溶存シリカ濃度が高まり、 0°C 付近まで水溶液温度が低下すると、シリカの沈殿を引き起こすことがわかった。
- (2). エンセラダスのプルーム物質の観測結果から、プルーム内にはアンモニアが H_2O に対して 0.5-1%程度存在していることが近年明らかになった。これらの事実は、我々の実験結果と整合的であり、エンセラダス内部海には熱水環境が存在する(していた)可能性が高いことが示唆された。さらに、予備的な観測結果ではあるが、プルーム中の水素濃度も 1 mM 程度と極めて高く、このことも熱水環境の存在を支持している。温度条件としては、 400°C 以上の高温になると、蛇紋岩化反応が進行しなくなるため、 $100-400^{\circ}\text{C}$ 程度であることが推測される。
- (3). 我々の実験結果やカッシーニ探査機による予備的な観測結果は、エンセラダス内部海の水素濃度は 1 mM 程度であることを示唆している。このことは、大量に存在する水素と始原的に含まれている二酸化炭素を使って、メタンを生成するメタン菌のような代謝経路をもつ生命がエンセラダスにおいても生存可能であることを示している。
- (4). さらに、タイタンやガニメデなどの巨大氷衛星に本研究結果を応用した。これらの巨大氷衛星は集積中に集積エネルギーによって氷が融解した原始海洋を形

成すると考えられている。この原始海洋中では、エンセラダスの熱水反応と同様、始原的な二酸化炭素が炭酸塩になり沈殿し原始コアの構成物質となる。一方、アンモニアは原始海洋での活発な蛇紋岩化により大量に生成する水素のお陰で、熱分解を免れて安定に存在すると考えられる。近年のカッシーニ探査機による観測では、タイタンのコアは低密度の物質で構成されていることが明らかになったが、この結果は原始海洋における炭酸塩の形成と沈殿によるコア形成という本研究の結果と矛盾しない。また、集積後、氷マントルや地殻にはアンモニアが残り、これがその後の隕石高速衝突や衝撃加熱によって窒素に分解して今のタイタンの窒素大気になったと考えられる。以上のように、本研究の結果は氷衛星の形成期における、原始海洋での分化と物質分配においても本質的な実験データとなる。

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 16 件)

- (1). Sekine, Y.*, H. Genda “Giant impacts in the Saturnian system: a possible origin of diversity in the inner mid-sized satellites” *Planetary and Space Science*, 査読有、**63–64**, 2012, 133–138.
- (2). Ishimaru, R.*, Y. Sekine, T. Matsui, O. Mousis “Oxidizing proto-atmosphere on Titan: constraint from N_2 formation by impact shock” *Astrophysical Journal Letters*, 査読有、**741:L10**, 2011, 1–6, doi: 10.1088/2041-8205/1/L10.
- (3). Sekine, Y.*, K. Suzuki, R. Senda, K.T. Goto, E. Tajika, R. Tada, K. Goto, S. Yamamoto, N. Ohkouchi, N.O. Ogawa, T. Maruoka “Osmium evidence for synchronicity between a rise in atmospheric oxygen and Palaeoproterozoic deglaciation” *Nature Communications*, 査読有、**2:502**, 2011, 1–6, doi: 10.1038/ncomms1507.
- (4). Sekine, Y.*, E. Tajika, R. Tada, T. Hirai, K.T. Goto, T. Kuwatani, K. Goto, S. Yamamoto, S. Tachibana, Y. Isozaki, J.L. Kirschvink “Manganese enrichment in the Gowganda Formation of the Huronian Supergroup: a highly oxidizing shallow-marine environment after the last Huronian glaciation” *Earth and Planetary Science Letters*, 査読有、**307**, 2011, 201–210.
- (5). Sekine, Y.*, H. Genda, S. Sugita, T. Kadono, T. Matsui “Replacement and late formation

- of atmospheric N₂ on undifferentiated Titan by impacts" *Nature Geoscience*, **4**, 2011, 359–362.
- (6). 関根 康人* “化学実験から惑星の起源・多様性の理解を目指して” *日本惑星科学会誌 遊星人*, **19**, 4, 303–313, 2010.
- (7). Fukuzaki, S. Y. Sekine*, H. Genda, S. Sugita, T. Kadono, T. Matsui "Impact-induced N₂ production from ammonium sulfate: Implications for the origin and evolution of N₂ in Titan's atmosphere" *Icarus*, **209**, 2, 2010, 715–722.
- (8). Sekine, Y.*, E. Tajika, N. Ohkouchi, N.O. Ogawa, K. Goto, R. Tada, S. Yamamoto, J.L. Kirschvink "Anomalous negative excursion of carbon isotope in organic carbon after the last Paleoproterozoic glaciation in North America" *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **11**, 2010, Q08019, doi:10.1029/2010GC003210.

[学会発表] (計 11 件)

- (1). Sekine, Y., T. Shibuya, T. Kuwatani, K. Suzuki, "Hydrothermal systems in Enceladus: Constraints from experiments and observations", **Planetary Geology Field Symposium**, 2011 年 11 月 6 日、Kitakyusyu, Japan
- (2). Sekine, Y. (invited) "Experimental constraints on exogenic and endogenic N₂ formation on Titan, Triton, and Enceladus" **Nitrogen in planetary systems: the early evolution of the atmospheres of terrestrial planets**, 2011 年 9 月 23 日、Barcelona, Spain
- (3). Sekine, Y., T. Shibuya, K. Suzuki (invited) "Experimental constraints on hydrothermal systems on Enceladus" **Asia Oceania Geosciences Society 2011**, 2011 年 8 月 11 日、Taipei, Taiwan
- (4). Sekine, Y., H. Genda, S. Sugita, T. Kadono, T. Matsui "Atmospheric replacement and late formation of N₂ on undifferentiated Titan during the Late Heavy Bombardment" **American Geophysical Union fall meeting**, 2010 年 12 月 14 日、San Francisco, USA
- (5). Sekine, Y. (invited) "Laboratory experiments on hypervelocity impacts on planetary ices" **International Workshop on Advances in Planetary Atmospheres and Exploration**, 2010 年 7 月 11 日、Ahmedabad, India, July 2010

6. 研究組織

(1) 研究代表者

関根 康人 (SEKINE YASUHITO)
東京大学 大学院新領域創成科学研究科
講師
研究者番号 : 60431897

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし