

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18648

研究課題名（和文）太陽系形成初期の小天体における放射性核種起源のガンマ線によるアミノ酸形成の検証

研究課題名（英文）Amino acid formation by gamma rays from radionuclides in small bodies in the early solar system

研究代表者

癸生川 陽子（Kebukawa, Yoko）

東京工業大学・理学院・准教授

研究者番号：70725374

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：始原的な隕石にはアミノ酸などの有機物を含むものがある。これらの母天体内では太陽系形成初期に放射性核種の崩壊による熱で氷が溶け、水質変質が起こったことが知られている。水質変質過程は有機物の形成にも寄与したと考えられるが、熱の影響のみが考慮されており、放射性核種による放射線の直接的な効果は考慮されていない。本研究では、放射性核種の崩壊によるガンマ線の効果を検証するため、ホルムアルデヒドとアンモニアを含む水溶液にガンマ線照射実験を行った。その結果、ガンマ線がアミノ酸の形成を促進することがわかった。ガンマ線照射により生成したアラニン量は、線量率とは無関係に、総照射線量に対して直線的な関係を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、太陽系形成初期における有機物の生成過程に関する新たな知見を提供することにある。従来の研究では放射性核種の崩壊による熱の影響のみが考慮されてきたが、本研究はガンマ線の直接的な効果も重要であることを示した。ガンマ線がアミノ酸や糖の形成を促進することが明らかになり、宇宙における有機物の生成過程をより包括的に理解するための基盤を提供する。社会的意義は、宇宙における有機物の生成過程を解明することにより、地球外生命の可能性や生命の起源研究に貢献し、生命の起源に関する理解を深めることが挙げられる。これにより、科学教育や宇宙探査の意義が広まり、一般の科学への関心を高めることにつながる。

研究成果の概要（英文）：Primitive meteorites contain organic matter such as amino acids. It is known that aqueous alteration occurred in these parent bodies due to melting of ice caused by heat from decay of radionuclides in the early stages of the formation of the solar system. Although aqueous alteration process is thought to have contributed to the formation of organic matter, only the effect of heat has been considered, and the direct effect of radiation from radionuclides has not been taken into account. In this study, gamma-ray irradiation experiments were conducted on aqueous solutions containing formaldehyde and ammonia in order to verify the effect of gamma rays due to the decay of radionuclides. The results showed that gamma rays promoted the formation of amino acids. The amount of alanine formed by gamma irradiation showed a linear relationship with the total irradiation dose, independent of the dose rate.

研究分野：宇宙化学

キーワード：隕石 小惑星 放射線 アミノ酸

1. 研究開始当初の背景

始原的な隕石には、アミノ酸などの有機物を含むものがあり、このような地球外有機物が原始地球において、生命の原材料となった可能性がある。このような隕石の母天体は集積時に氷を含んでおり、放射性核種(^{26}Al 等)の崩壊による熱で氷が溶け、水質変質が起こったことが知られている。このような液体の水を生じる過程は、有機物の形成・進化にも寄与したと考えられ(Cody et al. 2011 *PNAS*)、小天体内での有機物の化学進化という点から興味深いプロセスである。代表者らは、小天体を模擬した水熱実験において、単純な分子から、隕石に含まれているものと同様の高分子固体有機物やアミノ酸などが形成されることを示してきた(Kebukawa et al. 2013 *Astrophys. J.*, 2017 *Sci. Adv.*, 2020 *Icarus*; Kebukawa & Cody 2015 *Icarus*)。しかし、これまでこのような小天体における反応の研究においては、熱の影響のみが考慮されており、放射性核種から放出されるガンマ線などの放射線の効果はまったく考慮されてこなかった。このような放射線による非平衡反応は、熱による平衡反応とは全く異なる生成物を生じる可能性がある。本研究では、全く新しい観点として放射性核種の崩壊により放出されるガンマ線が直接分子に作用し化学反応を促進するという仮定を立て、ガンマ線によるアミノ酸の形成を実験により検証する。本研究で推進する惑星科学と前生物化学との融合により、惑星物質から生命に至る化学進化に対する新しい知見が得られることが期待される。

2. 研究の目的

本研究の目的は、太陽系形成初期において、小天体内部で起こった水質変質過程でのアミノ酸などの有機物形成に対するガンマ線の寄与を明らかにすることである。

3. 研究の方法

小天体形成初期の水質変質の主要な熱源と考えられている ^{26}Al は半減期約 70 万年で崩壊し ^{26}Mg となり陽電子を放出する。陽電子はすぐに消滅しガンマ線を放出する。従って反応に寄与するのは主にガンマ線と考えられる。隕石中の Mg 同位体比などから、小天体の集積時に含まれていた ^{26}Al の割合が見積もられている(e.g., MacPherson et al. 1995, *Meteoritics*)。例えばマーチソン隕石の場合、これらがすべて崩壊した場合のガンマ線放出エネルギーの総量は約 4×10^6 J/kg と算出できる。その半分の 2×10^6 J/kg は半減期である 70 万年の間に放出されたことになる。本研究では、水質変質において、アミノ酸などの有機物の形成に対する ^{26}Al の崩壊によるガンマ線の寄与を調べるために次の実験を行う。

・ガンマ線照射実験

小天体形成時に比較的豊富に含まれていたと考えられる、ホルムアルデヒドとアンモニアを含む水溶液をガラス管に真空封入し、 ^{60}Co ガンマ線源を用いて照射を行う。照射総量及び照射強度の影響を評価するために、様々な強度・照射時間で実験を行う。

・加熱実験

アミノ酸の形成に対するガンマ線の効果と熱の効果の比較を行うため、上記と同様の水溶液に対して加熱実験を行う。小天体での水質変質の温度は 0 ~ 150 と推定されているため(Brearley 2006)、50 ~ 150 で数日 ~ 1 週間程度の加熱実験を行う。

・生成物のアミノ酸分析

実験生成物について、酸加水分解を行い、高速液体クロマトグラフィーやガスクロマトグラフィー質量分析によりアミノ酸の同定・定量を行う。

・生成物全体の分析

実験生成物について、全生成物の分子構造や分子式を調べ、反応経路に制約を与える。エレクトロスプレーイオン化 Orbitrap 質量分析(ESI-Orbitrap-MS)による精密質量分析を行い、反応生成物の分子式を決定する。また、分光分析により、有機物の分子構造などの情報を取得する。

・小天体におけるアミノ酸生成の定量的評価

以上の結果から、小天体の水質変質過程におけるアミノ酸の形成に対するガンマ線の効果を、熱の効果との対比を含めて明らかにする。また、ガンマ線の総照射量と各種アミノ酸生成量の関係を明らかにし、実際の小天体におけるガンマ線照射量や水質変質温度に対して、どのようなアミノ酸がどの程度形成されるかを評価する。さらに、実際の隕石から検出されているアミノ酸の種類や量の文献値(e.g., Elsila et al. 2016 *ACS Cent. Sci.*)と比較し、これらの形成条件やガンマ線の寄与の程度を推定する。

4. 研究成果

我々は、ホルムアルデヒドとアンモニアの水溶液にガンマ線を照射すると、様々なアミノ酸が得られることを見出した。アミノ酸の収量は総ガンマ線量と相関がみられたが、照射線量率には影響されなかった。隕石母天体でのガンマ線生成率を考慮すると、炭素質コンドライト中のアミノ酸存在量と比較して妥当な生成率であると推定された。この結果は、母天体における水質変質中のアミノ酸生成にガンマ線が寄与している可能性を示している。本成果は、生命の起源にも関連した新たなアミノ酸形成経路を提案するものである。(Y. Kebukawa, S. Asano, A. Tani, I. Yoda and K. Kobayashi. Gamma-ray-induced amino acid formation in aqueous small bodies in the early solar system. *ACS Cent. Sci.*, 8, 1664-1671 (2022) doi: 10.1021/acscentsci.2c00588)

様々な組成のホルムアルデヒド、アンモニア、メタノール、グリコールアルデヒドの水溶液とヘキサメチレンテトラミンについて、出発物質の違いによる影響を中心に、ガンマ線照射によるアミノ酸生成の詳細を調べた。ガンマ線を照射した生成物を酸加水分解した結果、最も多く生成したアミノ酸はアラニンとグリシンであった。アミノ酸の生成はガンマ線照射量の増加とともに増加した。ホルムアルデヒドに比べてアンモニアの量が少ないほど、より多くのアミノ酸が生成した。グリコールアルデヒドはアミノ酸収率を有意に増加させた。この結果から、ガンマ線照射により促進されたホルムアルデヒ

ドからのグリコールアルデヒド生成が、その後のアミノ酸生成の鍵となることが示された。(A. Ishikawa, Y. Kebukawa, K. Kobayashi and I. Yoda. Gamma-Ray-Induced Amino Acid Formation during Aqueous Alteration in Small Bodies: The Effects of Compositions of Starting Solutions. *Life*, 14, 103 (2024) doi: 10.3390/life14010103)

ホルムアルデヒドとアンモニアを含む水溶液に加熱とガンマ線照射の両方を行い、アミノ酸生成における加熱とガンマ線の相乗効果を調べた。その結果、アミノ酸前駆体の生成には、ガンマ線照射の後に加熱するのが最も効率的であることがわかった。また、紫外可視分光法と蛍光分光法を用いて実験生成物を分析した結果、アミノ酸前駆体の生成はメイラード型反応が関与している可能性が示された。(N. Imai, Y. Kebukawa, K. Kobayashi, I. Yoda, *In prep.*)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Y. Kebukawa, S. Asano, A. Tani, I. Yoda, K. Kobayashi	4. 巻 8
2. 論文標題 Gamma-ray-induced amino acid formation in aqueous small bodies in the early solar system	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Central Science	6. 最初と最後の頁 1664-1671
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acscentsci.2c00588	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Ishikawa Akari, Kebukawa Yoko, Kobayashi Kensei, Yoda Isao	4. 巻 14
2. 論文標題 Gamma-Ray-Induced Amino Acid Formation during Aqueous Alteration in Small Bodies: The Effects of Compositions of Starting Solutions	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Life	6. 最初と最後の頁 103
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/life14010103	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Akari Ishikawa, Isao Yoda, Kensei Kobayashi, Yoko Kebukawa
2. 発表標題 Amino acid production by heating and gamma-ray irradiation experiments simulating the process of aqueous alteration inside asteroids
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石川あかり、依田功、小林憲正、癸生川陽子
2. 発表標題 小惑星内部の水質変質模擬実験におけるガンマ線照射によるアミノ酸の生成
3. 学会等名 日本地球化学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 癸生川 陽子、安部 隼平、石川 あかり、依田 功、小林 憲正
2. 発表標題 太陽系初期の小天体におけるガンマ線によるアミノ酸や糖類の形成
3. 学会等名 日本分析化学会第71年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安部隼平、癸生川陽子、依田功、小林憲正
2. 発表標題 隕石母天体内部での水質変質を模擬したホルモース型反応による糖の生成への 線の影響
3. 学会等名 日本地球化学会第68回年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shunpei Abe, Yoko Kebukawa, Isao Yoda, Kensei Kobayashi
2. 発表標題 Abiotic synthesis of sugars by heating or gamma irradiation simulating aqueous alteration in meteorite parent bodies
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akari Ishikawa, Yoko Kebukawa, Isao Yoda, Kensei Kobayashi
2. 発表標題 Amino acid production by heating and gamma-ray irradiation experiments simulating aqueous alteration in small bodies
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoko Kebukawa, Shinya Asano, Atsushi Tani, Isao Yoda, Kensei Kobayashi
2. 発表標題 Gamma-ray induced amino acid formation during aqueous alteration in meteorite parent bodies
3. 学会等名 Pacifichem 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今井直希, 癸生川陽子, 小林憲正, 依田功
2. 発表標題 小惑星を模擬した環境におけるガンマ線と加熱によるアミノ酸生成の検討
3. 学会等名 第48回生命の起原および進化学会学術講演会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関