

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18725

研究課題名（和文）炭素安定同位体比で制約する隕石炭酸塩の生成反応

研究課題名（英文）Meteoritic carbonate synthesis constrained by carbon isotope compositions

研究代表者

古川 善博（Furukawa, Yoshihiro）

東北大学・理学研究科・准教授

研究者番号：00544107

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：水質変質した隕石や小惑星は、主要な炭素形態の一つとして ^{13}C に富む幅広い炭素同位体組成をもつ炭酸塩も含まれており、その成因を理解することは、有機物の成因や炭素の起源を理解することにつながる。アルデヒドを炭素源とする種々のホルモース型反応実験を実施し、生成した炭酸塩を同定した。その結果、生成した方解石は同時に生成する不溶性炭素質物質と比べ、 ^{13}C に富むことが明らかになった。一方で、 ^{13}C に富む程度は、大きくなく、隕石中で見つかる ^{13}C に富む幅広い炭素同位体組成を説明できない。しかし、小惑星集積時に含まれる ^{13}C に富む二酸化炭素との混合を考えると、隕石中で見つかる炭酸塩を説明できる可能性がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では隕石や小惑星に含まれる炭素の形態の形態の一つである炭酸塩の起源に関して、新たな説を提供し、その説によって生成する炭酸塩の炭素同位体組成を制約した。その結果、この炭素源の寄与はありうるが、全てがこの起源では説明できないことが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：Aqueously-altered meteorites and asteroids contain organic matter such as amino acids and sugars, which may have contributed to the supply of life's building blocks to the Earth. Such meteorites also contain carbonates with a wide range of carbon isotopic compositions enriched in ^{13}C . In this study, we focused on the fact that formose-type reactions using aldehydes as a carbon source produce amino acids and sugars, and that these reactions are catalyzed by calcium.

Various Formose-type reaction experiments were performed to identify the carbonates produced. The results showed that the carbonate produced was calcite, and that the calcite carbon was enriched in ^{13}C compared to the insoluble organic matter produced at the same time. On the other hand, the extent of ^{13}C enrichment is not enough to explain the wide range of ^{13}C -rich carbon isotopic compositions found in the meteorites. Mixing with highly ^{13}C enriched CO_2 in asteroids may explain the wide range of ^{13}C enrichments.

研究分野：地球宇宙化学

キーワード：炭酸塩

1. 研究開始当初の背景

隕石の母天体である小惑星は、現在の軌道で集積したという考えと、別の場所で集積して現在の位置に動いてきたという考えがある。水や有機物を含む小惑星の軌道進化は地球の水と有機物の起源の理解のために不可欠な情報であるが物質科学的な理解が欠乏している。

隕石の中で特に始原的な炭素質隕石には ^{13}C に富む炭酸塩が含まれている(例えば、 $\delta^{13}\text{C} = +20\text{--}+80\text{‰}$)。隕石中の炭酸塩は隕石の母天体である小惑星中の水熱反応で形成されたと考えられている。隕石に含まれる主要な有機物である酸不溶性有機物は、 ^{13}C に欠乏していることから ($\delta^{13}\text{C} = \sim -20\text{‰}$)、 ^{13}C に富む炭酸塩の炭素源は隕石の主要な有機物ではないと考えられ、その成因は謎であった。近年、彗星の CO_2 が ^{13}C に富むことから、隕石中の ^{13}C に富む炭酸塩は極低温環境で固化したドライアイスであったと推察されるようになった(Fujiya *et al.*, *Nature Astronomy* 2019)。このことは多くの炭素質小惑星が、かつて二酸化炭素が固体で存在するような環境で形成されたことを示唆している。ドライアイスは1気圧でも -78°C の昇華点を持つので、このモデルに従えば、ほとんどの炭素質小惑星は土星より外側の太陽から遠い軌道で集積した後、現在の軌道に移動してきたことになる。

2. 研究の目的

研究代表者らは、炭素質小惑星内部で起こり得る、ホルモース型反応という水熱反応で、 ^{13}C に富むアミノ酸と ^{13}C に欠乏した酸不溶性有機物が生成することを示した(Furukawa *et al.* 2021 *Science Advances*)。ホルモース反応の反応原理と先行研究で示された同位体分別から推測すると、ホルモース型反応に伴って ^{13}C に富む炭酸塩が形成される可能性がある(図1)。ホルモース型反応由来の炭酸塩はこれまでに全く考慮されていなかった起源のものなので、この炭酸塩の炭素同位体組成が ^{13}C に富むようであれば、隕石で見つかる ^{13}C に富む炭酸塩の起源がこれまでのモデルである極低温環境で固化したドライアイス由来と相反する結果となる。その場合、小惑星が現在の位置で集積しても ^{13}C に富む炭酸塩が生成し得ることになるので、その結果は太陽系天体の軌道進化とそれに伴う地球型惑星への水や有機物の供給に大きな影響を与える。本研究では炭素質小惑星内部で起

こり得る水熱反応に伴う有機化学反応で、どのような炭酸塩が生成するか、生成する場合はその炭素同位体比が予想通り ^{13}C に富むかどうか、その程度は隕石中に見つかる ^{13}C に富む炭酸塩の成因として考えられる程度であるかどうかを明らかにすることを目的とする。

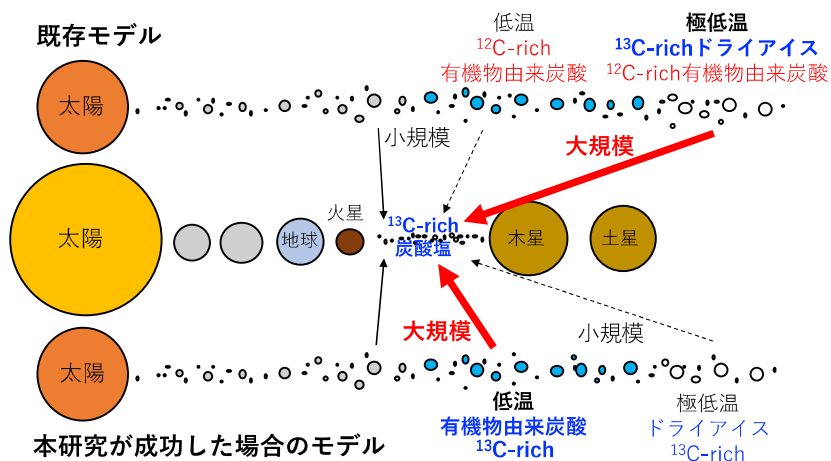


図1: 既存の物質科学的証拠に基づく軌道進化モデルと本研究のモデル

3. 研究の方法

炭素質小惑星内部で起こり得る水熱反応による有機化学反応を再現するために、ホルムアルデヒド、グリコールアルデヒド、アンモニア、水酸化カルシウムを含む水溶液を隕石鉱物と共に加熱しホルモース型反応を進行させる。この反応では、糖、アミノ酸、酸不溶性有機物が生成するが、研究の第一段階として、この反応で同時にどのような炭酸塩がどれだけ生成するかを明らかにする。炭酸塩が生成する場合、第二段階として、各種の実験条件（温度、pH、反応時間）の違いによって生成した炭酸塩の炭素同位体比を、炭酸塩処理装置に接続した安定同位体質量分析計で測定する。炭酸塩の分析と並行して生成する酸不溶性有機物の炭素同位体比は、軽元素分析計と接続した安定同位体質量分析計で分析を行う。これらの分析結果を基に、実験で生成する炭酸塩の炭素同位体比と酸不溶性有機物の炭素同位体比との差が、隕石中のそれらの差を説明できるかを検討する。

4. 研究成果

水質変質した隕石や小惑星はアミノ酸や糖などの有機物を含むことから、生命材料分子の供給に貢献した可能性がある。そのような隕石には、主要な炭素形態の一つとして ^{13}C に富む幅広い炭素同位体組成をもつ炭酸塩も含まれており、その成因を理解することは、有機物の成因や炭素の起源を理解することにつながる。本研究では、アルデヒドを炭素源とするホルモース型反応がアミノ酸や糖などを生成すること、この反応がカルシウムによって触媒されることに着目し、カルシウムを含むホルモース型反応によって炭酸塩が生成するか、それはどれだけの量が、生成した炭酸塩の炭素同位体組成は隕石のように ^{13}C に富むのかどうかを明らかにすることを目的とした。

種々のホルモース型反応実験を実施し、生成した炭酸塩を同定した。その結果、生成した炭酸塩は方解石であり、同時に生成する不溶性炭素質物質と比べ、方解石の炭素は ^{13}C に富むことが明らかになった。一方で、 ^{13}C に富む程度は、大きくなく、それだけでは隕石中で見つかる ^{13}C に富む幅広い炭素同位体組成を説明できない。しかし、小惑星集積時に含まれる二酸化炭素が ^{13}C に富み、それらの混合を考えると、隕石中で見つかる ^{13}C に富む幅広い炭素同位体組成を説明できる可能性がある。これらの研究成果は論文にまとめ、国際誌に投稿した。現在は査読中となっている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Furukawa Yoshihiro, Saigusa Daisuke, Kano Kuniyuki, Uruno Akira, Saito Ritsumi, Ito Motoo, Matsumoto Megumi, Aoki Junken, Yamamoto Masayuki, Nakamura Tomoki	4. 巻 13
2. 論文標題 Distributions of CHN compounds in meteorites record organic syntheses in the early solar system	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 6683
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-023-33595-0	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0件

〔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
研究分担者	石田 章純 (Ishida Akizumi) (10633638)	東北大学・理学研究科・助教 (11301)	
研究分担者	高柳 栄子 (Takayanagi Hideko) (40729208)	東北大学・理学研究科・准教授 (11301)	

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
---------	---------