

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：32503

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K22370

研究課題名(和文) シリカ鉱物を用いた隕石の熱史の定量的な制約手法の開発

研究課題名(英文) Development of a method for quantitatively constraining the thermal history of meteorites using silica minerals

研究代表者

大野 遼 (Ono, Haruka)

千葉工業大学・附属研究所・研究員

研究者番号：10880320

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、これまで鉄ニッケルでしか推定できなかった低温領域の冷却速度を石鉄隕石メソシデライト中のシリカ鉱物を詳細に分析することで、シリカ鉱物を用いた新たな推定手法の確立を試みた。分析結果から、シリカ鉱物であるクリストバライトからトリディマイトに相転移する冷却速度が0.003-0.01 °C/day以下であることが示唆された。本研究を継続することで、これまで低温の冷却速度を推定できなかった金属鉄を多く含まない石質隕石の詳細な熱史を明らかにすることができるかと期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

隕石の冷却速度などの熱史は、これまで輝石や金属鉄などを用いて見積もられてきた。しかし、それらが示す熱史は限られた温度領域に限定されている。本研究では、高温から低温まで幅広い温度領域において、数多くの多形(形態)を持つシリカ鉱物に着目した。輝石と金属鉄両方を含むメソシデライト隕石中のシリカ鉱物を詳細に分析することで、シリカ鉱物が850-400 °C以下までの冷却速度を示す新しい指標になりうることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this study, we attempted to establish a new estimation method using silica minerals by analyzing silica minerals in the stony-iron meteorite mesosiderite in detail to determine the cooling rate in the low-temperature region, which had previously been estimated only using iron-nickel zoning. The analysis results suggest that the cooling rate of the phase transition from cristobalite to tridymite is less than 0.003-0.01 °C/day. Continuation of this study is expected to provide a detailed thermal history of stony meteorites that do not contain much metal, for which low-temperature cooling rates have not been estimated.

研究分野：惑星物質科学

キーワード：隕石 シリカ鉱物 メソシデライト 冷却速度

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

隕石の形成環境や温度圧力履歴の推定を行う際には、隕石の各構成鉱物が持つ特性を利用するが、組成の単純さや反応の鈍さから、熱史推定に用いられていない鉱物も多く存在する。その一つとしてシリカ鉱物が挙げられる。シリカ鉱物は組成が単純 (SiO_2) なため記録できる情報量が少なく、隕石中ではあまり注目されていなかった。しかし、シリカ鉱物は数多くの結晶構造(多形)を持つことが報告されており (Kihara et al. 2001)、本研究ではこれまで、その多形が温度情報を反映する可能性に注目してきた。その結果、隕石中のシリカ鉱物は低温での冷却や再加熱イベントを反映していることを明らかにした (Ono et al. 2019)。特にトリディマイトと呼ばれるシリカ鉱物は、 400°C 以上では六方晶系であるが、 400°C を下回ると速やかに直方晶系に相転移し、その後の冷却速度によって室温では単斜晶系トリディマイトまたは擬直方晶系トリディマイトとして存在する。そのため、隕石では単斜晶系のみ、擬直方晶系のみ、あるいはその両方、が存在する場合があるが、それらの定量的な冷却速度の差は明らかとなっていない。シリカ鉱物の多形はそれらの形成環境や熱史を議論する指標になる可能性があるが、上述のように、多形間の相転移に関する情報が不十分であり、定量的な議論を行うためにはシリカ鉱物多形間の具体的な相転移条件、相転移速度を解明する必要があると考える。

2. 研究の目的

本研究では、「シリカ鉱物各多形間の相転移速度を、天然の隕石の観察・分析および加熱実験により精査し、隕石の熱史を定量的に制約するための新しい指標を確立すること」を目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、次の2つのアプローチで研究に取り組んだ。

(1)メソシデライト隕石を用いた低温でのトリディマイトの相転移速度の制約

メソシデライト隕石中の Fe-Ni メタルには 500°C 以下において、 $0.1\sim 0.01^\circ\text{C}/\text{Myr}$ ($\text{Myr}=\text{百万年}$)という室内実験では再現できない非常に遅い冷却速度が記録されている (Hopfe and Goldstein, 2001)。これは、集積岩ユークライト隕石の高温での冷却速度と同程度であり (Miyamoto and Takeda, 1994)、メタルと共存する石質部分には、単斜晶や擬直方晶トリディマイトが存在すると予想される。実際、単斜晶のものは本研究によってすでに発見している。複数の異なる冷却速度を持つメソシデライト隕石において、メタルによる 500°C 以下での詳細な冷却速度を推定し、共存するトリディマイトの多形とその割合を分析することで、擬直方晶と単斜晶の相転移速度を半定量的に制約する。

(2)天然のシリカ鉱物の加熱実験による高温での相転移条件・速度の制約

地球の単斜晶トリディマイトは加熱により擬直方晶に相転移する (今村・松本, 1980) と報告されていたが、隕石中の単斜晶トリディマイトは石英に相転移した。シリカ鉱物の相転移には不純物元素が大きな役割を果たすため (鈴木・荒堀, 1980; 金 他, 2003)、同一多形であっても不純物元素量の違いによって加熱・冷却時の安定性が変化する。そのため代表者は、出発物質、加熱温度、加熱時間を変化させた加熱実験により、晶出過程や不純物元素量の異なる各多形の相転移関係と相転移速度を系統的に調査する。その結果から隕石中のシリカ多形の高温での相転移速度を半定量的に制約し、研究(1)と合わせることで、シリカ鉱物相の存在割合からその岩片が経験した高温から低温までの熱史の推定法の指針を作成する。

4. 研究成果

4つのメソシデライト (NWA1878、NWA2924、ALH77219、A-881154) 隕石中に含まれるシリカ鉱物の観察およびシリカ相の同定を行った。4つの隕石薄片において、まず走査型電子顕微鏡により全体の反射電子像を取得し、シリカ鉱物が存在する場所を特定した。次に、顕微ラマン分光計を用いて、観察したシリカ鉱物の相を特定した。その結果、メソシデライトの中で比較的速く冷却されたと報告されている NWA1878 隕石では、高温から比較的速い冷却速度を経験したことを示唆するクリストバライトと石英の集合体が見つかった。 400°C 以下で、これらが示す冷却速度よりも遅い冷却速度を経験していた場合には、クリストバライトの部分が単斜晶系トリディマイトに相転移している必要がある。そのため、NWA1878 隕石に存在していたクリストバライトと石英の集合体は、先行研究と総合的な結果を示していることが明らかとなった。NWA1878 以外のメソシデライトは、いずれも Fe-Ni メタルは遅い冷却速度を示唆していると報告されている。それらのメソシデライトには単斜晶系トリディマイトが含まれており、これも先行研究が示す冷却速度と総合的な結果となった。NWA2924 の単斜晶系トリディマイトは、クリストバライトが高温型から低温型に相転移する際に見られる "fish-scale" と呼ばれる組織を保持しており、高温で急冷を経験したのち 400°C 以下で徐冷に転じたことを示唆していた (図 1)。

シリカ鉱物が示す幅広い温度領域での冷却速度を定量的に見積もるため、メソシデライト隕石である NWA1878 および Vaca Mueruta (VM) 中に含まれるシリカ鉱物の詳細な観察およびシリカ相の同定を行った。NWA1878 にはクリストバライトと石英の集合体が見つかったため、高温から比較的速い冷却速度 (0.1-0.01 °C/hr) を経験したことが示唆された。VM には 400°C 以下で非常に遅い冷却速度 (約 0.0001 °C/yr) を経験したことを示す単斜晶系トリディマイトが見つかった。本研究では以上のメソシデライトに加え、近年発見された未グループの分化隕石 Erg Chech (EC) 002 隕石中のシリカ鉱物についても詳細に分析を行い、メソシデライト中のシリカ鉱物との比較を行った。NWA 1878 および VM はそれぞれ輝石の融溶ラメラと Fe-Ni メタルから冷却速度が 0.01°C/day と 10⁻⁷°C/yr と見積もられている。Fe-Ni メタルは 500°C 以下の低温領域での冷却速度を示しているため、本研究のシリカ鉱物の分析結果は整合的であったといえる (表 1)。

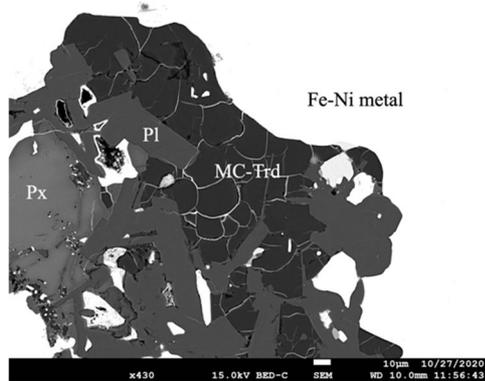


図 1 : NWA2924 中の単斜晶系トリディマイト (Pl: Plagioclase, Px: Pyroxene, MC-Trd: Monoclinic tridymite)

表 1 : NWA 1878 および Vaca Muerta の冷却速度と存在したシリカ鉱物の比較

試料	Fe-Ni メタルから見積もられた冷却速度 (<500 °C)	輝石から見積もられた冷却速度 (>-850 °C)	シリカ鉱物	実験的に求めた冷却速度 (1100->900 °C)
Vaca Muerta	10 ⁻⁷ °C/yr	—	単斜晶系トリディマイト	—
NWA 1878	—	0.01 °C/day	クリストバライト+石英	2.4 °C/day

Kimura et al., 2020; Schwartz, 2005; Mikouchi et al., 2021; Yamaguchi et al., 2021; Barrat et al., 2021; Ono et al., 2021

一方で、NWA1878 の結果と冷却速度から、クリストバライトからトリディマイトへの相転移は 0.01°C/day の冷却速度では起こらないことが推測される。また、EC002 にはクリストバライトとトリディマイトの集合体の存在が報告されており、冷却速度は 0.003-0.014°C/day と見積もられている。以上のことから、クリストバライトがトリディマイトに相転移する冷却速度は 0.003-0.01°C/day 以下であることが示唆された (図 2)。

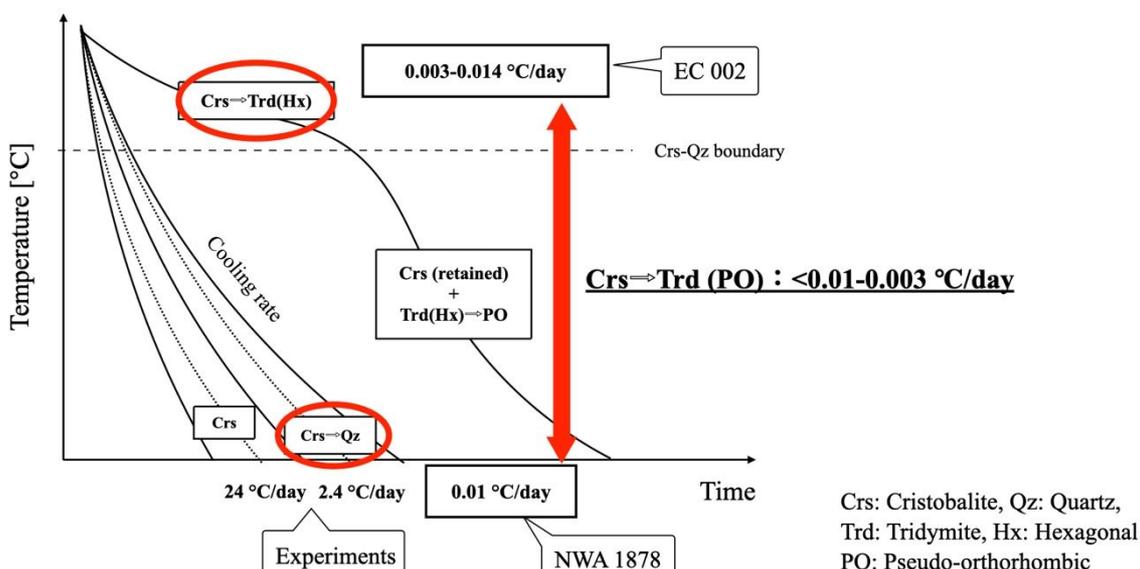


図 2 : クリストバライトからトリディマイトへ相転移する冷却速度の見積り概略図

以上のように、本研究によってメソシデライトの石質部分にもユークライト隕石と同様にシリカ鉱物の多様性が存在することを明らかにし、シリカ鉱物が輝石などと同様に隕石の冷却速度推定に利用可能であることが示された。

<引用文献>

- Kihara K. 2001. Crystal structures of silica polymorphs and their phase transitions (Japanese). *Journal of the crystallographic society of Japan*. 43:218-226.
- Ono H., Takenouchi A., Mikouchi T., and Yamaguchi A. 2019. Silica minerals in cumulate eucrites; Insights into their thermal histories. *Meteoritics and Planetary Science* 54, 11, 2744-2757.
- Hopfe W. D. and Goldstein J. I. 2001. The metallographic cooling rate method revised: Application to iron meteorites and mesosiderites. *Meteoritics and Planetary Science* 36, 135-154.
- Miyamoto M., and Takeda H. 1994. Evidence for excavation of deep crustal material of a Vesta-like body from Ca compositional gradients in pyroxene. *Earth and Planetary Science Letters* 122:343-349.
- Imamura M., and Matsumoto T. 1980. Change of X-ray diffraction pattern of tridymite by heating and cooling (in Japanese). *Kobutsu-gaku-zasshi* 14:387-396.
- Suzuki T., and Arahori T. 1981. Effects of Al₂O₃ on transformation of tridymite to cristobalite in silica refractories (in Japanese). *Yogyo-Kyokai-Shi* 89:637-642.
- Jin Y., Shinno I., Xu J. and Sugihara S. 2003. Synthesis of quartz from high purity silicon dioxide and doping of various impurities. *岩石鉱物科学* 32, 226-235.

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 0件）

1. 著者名 Koike Mizuho, Sano Yuji, Takahata Naoto, Iizuka Tsuyoshi, Ono Haruka, Mikouchi Takashi	4. 巻 549
2. 論文標題 Evidence for early asteroidal collisions prior to 4.15 Ga from basaltic eucrite phosphate U-Pb chronology	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 116497 ~ 116497
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.epsl.2020.116497	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	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 3件）

1. 発表者名 大野遼, 三河内, 岳, 山口亮
2. 発表標題 ユークライト隕石中シリカ鉱物が示すユークライト質地殻の2段階熱変成履歴
3. 学会等名 日本鉱物科学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 新原隆史, 黒澤耕介, 大野遼, 佐竹渉, 鹿山雅裕, 小池みずほ, 玄田英典, 三河内岳, 佐野有司, 松井孝典
2. 発表標題 衝撃変成時の塑性変形加熱効果の実証に向けた3次元衝突回収実験
3. 学会等名 日本鉱物科学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大野遼, 黒澤耕介, 新原隆史, 三河内岳, 玄田英典, 鹿山雅裕, 小池みずほ, 富岡尚敬, 佐野有司, 佐竹渉, 松井孝典
2. 発表標題 3次元衝撃回収実験によるコンドライト隕石の衝撃変成度の見直しに向けて
3. 学会等名 日本惑星科学会秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 黒澤耕介, 大野遼, 佐藤雅彦, 新原隆史, 長谷川直, 佐竹渉, 松井孝典
2. 発表標題 粉体衝突実験における衝突直下点物質の回収
3. 学会等名 日本惑星科学会秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大野遼, 黒澤耕介, 新原隆史, 三河内岳, 玄田英典, 富岡尚敬, 鹿山雅弘, 小池みずほ, 佐野有司, 佐竹渉, 松井孝典
2. 発表標題 数値衝突計算を用いた3次元衝撃回収実験試料の経験温度圧力推定
3. 学会等名 CfCA users meeting
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kurosawa K., Ono H., Niihara T., Mikouchi T., Tomioka N., Genda H., Sakaiya T., Kondo T., Kayama M., Koike M., Sano Y., Satake W. and Matsui T.
2. 発表標題 Shock Metamorphism in a Quasi-Open System I: Undulatory Extinction in Calcite (CaCO ₃)
3. 学会等名 Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ono H., Kurosawa K., Niihara T., Mikouchi T., Genda H., Tomioka N., Kayama M., Koike M., Sano Y., Satake W. and Matsui T.
2. 発表標題 Shock Metamorphism in a Quasi-Open System II: Melt Veins in Basalt at Shock Stage 2
3. 学会等名 Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takenouchi A., Sumino H., Mikouchi T., Ono H. and Yamaguchi A.
2. 発表標題 Argon-Argon Chronology of Two Shocked Eucrites, Northwest Africa 1000 and Yamato 980433
3. 学会等名 Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2021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
---------	---------