

令和 5 年 5 月 30 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14543

研究課題名（和文）隕石の不均一な衝撃変成作用を考慮した希ガス同位体による衝撃年代測定法の確立

研究課題名（英文）Ar/Ar chronology considering heterogeneous shock metamorphism in meteorites

研究代表者

竹之内 惇志（Takenouchi, Atsushi）

京都大学・総合博物館・助教

研究者番号：60865426

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：衝撃溶融脈や高圧鉱物を含む隕石や角礫化した隕石、あまり強い衝撃変成を受けていない隕石、角礫化した隕石など、様々な衝撃変成度合いの隕石についてそれらの詳細な観察と部分毎のアルゴン-アルゴン年代分析を行った。衝撃変成作用の不均一な隕石では分析する場所により、同一隕石でも特に低温フラクションにおいて異なる年代を示した。一方、角礫岩でも高温フラクションでは均一の年代を示しており、強い熱イベントは組織に依存しないことが明らかとなった。分析する場所によって記録できるイベントが異なるため、年代測定の際は目的のイベントと合致する組織を選んで分析する必要があることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

隕石の年代学と岩石組織学はそれぞれ専門性が高いため、別々に行われることがしばしばある。しかし、隕石の成因などを議論する際は両者を組み合わせることが多く、年代と組織が実際に対応しているか不明瞭なまま議論されてしまうことが多くある。本研究では、分析する箇所によっては同一の隕石でも異なる年代を示すことを明示し、議論の目的のイベントが記録されているであろう組織を選択して年代測定をすることの重要性を改めて示した。本研究は、今後精確な分析を行っていく上での足がかりと成る研究である。

研究成果の概要（英文）：We conducted detailed observations and part-by-part argon-argon dating of meteorites with various degrees of impact metamorphism, including those containing impact melt veins and high-pressure minerals, those that have been brecciated, and those that have not undergone strong impact metamorphism. The meteorites with heterogeneous impact metamorphism show different ages, especially in the low-temperature fraction, depending on the location of the analysis. On the other hand, the age of the high-temperature fractions of the breccia is uniform, indicating that the strong thermal events are independent of the microstructures. The results indicate that it is necessary to select a tissue that is consistent with the event of interest when dating because the events that can be recorded vary depending on the analysis location.

研究分野：隕石学

キーワード：隕石 衝撃変成作用 希ガス年代

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

隕石の衝撃温度圧力の履歴（衝撃変成履歴）を反映する衝撃変成組織は岩片内でもミリ～マイクロスケールの不均一性を持ち、同一の隕石（岩片）内でも ^{39}Ar - ^{40}Ar 年代が場所により異なることが明らかになってきた。例えば、比較的強い衝撃を受けた隕石には、鉱物の割れや変形のみを示す領域が存在する一方、鉱物が部分溶融している領域も存在する。両者は同一の衝撃により形成された組織であるが、実際に経験した衝撃温度や加熱時間などが異なるため、アルゴンの散逸度合いも大きく異なる。そのため、隕石から年代測定用の試料（ ~ 20 mg 程度）を「無作為に」サンプリングする従来の測定法の場合、上記のような衝撃変成作用の空間的な不均一性により、 ^{39}Ar - ^{40}Ar 年代がその隕石の衝撃変成の年代を正しく反映しない可能性がある。しかし、隕石の衝撃変成組織の差による年代のばらつきや相関を評価した研究はこれまで存在しない。これは、組織の観察と年代の測定に膨大な時間がかかるためだけでなく、専門性の高い衝撃組織観察と希ガス年代測定の両方を遂行可能な研究者が極めて稀なためでもある。隕石が全岩として記録している衝撃変成履歴を正しく読み解き、「天体衝突史」を明らかにするためには、マイクロスケールの衝撃変成組織の違いが希ガス同位体年代に与える影響を可能な限り定量的に評価し、適切な衝撃年代を得るための希ガス同位体年代の測定手法（衝撃変成の不均一性を考慮したサンプリング法、年代の解釈の仕方までの指針）を確立することが必要である。

2. 研究の目的

本研究の最大の目的は、隕石の衝撃変成作用を読み解き、過去の太陽系内での物質の動きを推定・制約することで、太陽系形成過程のモデルを検証・改定することである。その上で隕石が衝撃変成作用を受けた年代を意味する「衝撃変成年代」を正確に決定することは重要である。衝撃変成作用は隕石で不均一に影響を与えるため、変成作用に敏感な希ガス同位体年代測定であっても同一の隕石内で異なる年代を示すことがある。適切な衝撃変成年代を求めるためには詳細な組織観察と対応付けた年代測定が求められるが、両者に対応付けた研究は少ない。本研究ではマイクロスケールの衝撃変成作用の差が希ガス同位体年代に与える影響を可能な限り定量的に評価し、適切な衝撃変成年代を得るための希ガス同位体年代の測定手法（サンプリング、解釈の指針）を確立することが目的である。

3. 研究の方法

隕石が単一の衝突現象で経験する衝撃変成履歴は、温度・圧力の上昇度合い、角礫化の有無でいくつかの衝撃変成タイプに大別される。それぞれの衝撃変成タイプは構成鉱物の割れ方や変形の仕方、高圧で安定な鉱物（高圧鉱物）の存在度といった衝撃変成組織を観察することで判別ができるため、本研究では様々な衝撃変成履歴の隕石を選定し、各隕石のセンチメートルサイズの岩片内部での ^{39}Ar - ^{40}Ar 年代のばらつきを調べる。これにより衝撃変成組織を考慮せずに行われていた従来のサンプリング法が、どの程度確からしい衝撃年代を与え得るのかを明らかにする。

分析試料は、センチメートルスケールの大きさを持つ隕石をそれぞれ用意し、その隕石内の異なる 5～10 地点から作成した岩片（3 mm x 3 mm x 1 mm 程度）を用いる（合計 30 サンプル程）。比較的高い衝撃圧を受けた隕石では、様々な衝撃変成組織を異なる度合いに含むように岩片を作成する。各岩片の衝撃変成組織の観察・記録を行った後、試料を段階的に加熱し ^{39}Ar - ^{40}Ar 年代の測定を行う（段階加熱法）。もし、各岩片が示す年代がその測定誤差を上回って異なる場合、その衝撃変成タイプの隕石は組織の不均一性を考慮したサンプリングを行う必要があることを示唆する。また、 ^{39}Ar - ^{40}Ar 年代の解釈において重要となる「年代スペクトル（各加熱段階における、アルゴンの放出量及び同位体比の変化を表すグラフ）」と、岩片内に見られる衝撃変成組織を系統的に比較することで、衝撃変成組織の違いが、年代スペクトルをどのように変化させるかも明らかにする。特に温度の影響が大きい岩片内の溶融領域の種類（構成物、結晶性、溶融度等）や量比に着目する。

上記の結果をもとに、各衝撃変成タイプの衝撃年代測定における最適なサンプリング法・解釈法を提案する。例えば、ある衝撃変成タイプにおいて、年代スペクトルにばらつきが見られず、研究で溶融領域からも測定誤差範囲で一致する年代スペクトルが得られた場合、そのタイプの隕石の衝撃年代は無作為なサンプリングで得られると言える。一方、年代がばらつく衝撃変成タイプの場合、測定する岩片に見られる衝撃変成組織の組み合わせや量比ごとに、得られた年代スペクトルから確かな衝撃年代を得る解釈法を提示する。または、各衝撃変成タイプにおいてより確からしい衝撃年代を得るために最適なサンプリング法を提示する。本研究により、多くの隕石において、迅速でより確からしい衝撃年代分析を行うことが可能となり、「天体衝突史」の解明へ向けて大きく前進できる。

4. 研究成果

(1) NWA 2319 角礫化隕石の Ar/Ar 年代測定

比較的複雑な衝撃変成作用を受けた LL コンドライトの NWA 2319 隕石について、組織観察と年代測定をあわせて実施した。NWA 2319 は白色のクラスト部(L)と黒色の細粒な基質部(D)が存在するため、希ガス年代分析用にそれぞれの領域から二つずつ(計四つ)の試料を用意し、京都大学複合原子力科学研究所において中性子線照射を行った。希ガス分析の補正用に合成 K₂SO₄ と CaF₂、年代の明らかな Shallowater 隕石、Hb3gr 普通角閃石も同時に照射を行った。希ガス同位体比測定には希ガス質量分析計(modified-VG3600)を用いた。また、クラスト部と基質部それぞれで薄片試料を作成し、国立極地研究所の走査型電子顕微鏡(FE-SEM、JEOL JSM-7100F)を用いた組織観察、顕微ラマン分光器(JASCO NRS-1000)を用いた相同定を行った。

組織観察の結果、いずれの試料でも斜長石のガラス化は見られず、波状消光を示すのみであった。また基質部では細粒な硫化物が全体に存在しており、珪酸塩のダークニングが見られた。クラスト部ではヒールドクラックが観察され、その上から新たにクラックが入っている様子も観察された。また、いずれの薄片にも二種類の衝撃溶融脈が観察された。一つはアニールされ再結晶化したと考えられる細粒なカンラン石、輝石と硫化物で構成される脈で、もう一つは大部分がガラス質で球状の硫化物を多く含む脈である。結晶質な脈はガラス質脈にシャープに切られていた。これらの衝撃脈中には今の所高圧鉱物は観察されていない。

Ar/Ar 分析ではリコイルや ³⁹Ar-loss によりすべての試料でプラトー年代は得られなかったが、三つの試料の一部で<4.3-4.6 Ga という年代が示され、クラスト部の試料では低温で 3.9 Ga、高温で 4.2 Ga という 2 つの年代が得られた(図 1)。I-Xe 年代では 4.49-4.53 Ga の年代が得られた。NWA 2319 は角礫化で複雑な組織を示す一方、年代はあまり組織によらず同じような年代が得られた。これは、この隕石が記録する最も強い熱イベントは無作為なサンプリングでもある程度測定できることを示唆している。一方、1つのクラスト部の低温フラクションではより若い年代が示された。このようなマイナーな熱イベントは不均一に記録されており、組織を選ばないと見落としてしまうことがあることが本研究により示された。

普通コンドライト中の I-Xe 系が示す年代(4.49-4.53 Ga)は高温のピーク(1000K 程度)の年代を示していると考えられ、ヒールドクラックなどの高温時の衝撃や高温の残留熱で形成されることが考えられる組織はこの年代よりも前に形成された可能性がある。そのため LL コンドライト母天体でも、H コンドライトで指摘されるような[e.g. 1-2]熱変成中の衝撃イベントが 4.49 Ga 以前に起きていた可能性が示唆される[3]。

角礫化は<4.31-4.56 Ga の間に起こり、その後クラストから得られた二つの Ar-Ar 年代(4.2 Ga, 3.9 Ga)で示される二回の衝撃イベントを経験し、二種類の衝撃溶融脈を形成したと考えられる。合計三回の衝撃イベントに於いて、残留熱の影響が徐々に弱まっていることから、太陽系形成初期の 5-6 億年間に於いて衝撃の規模や頻度が急速に弱まった可能性が示唆される。

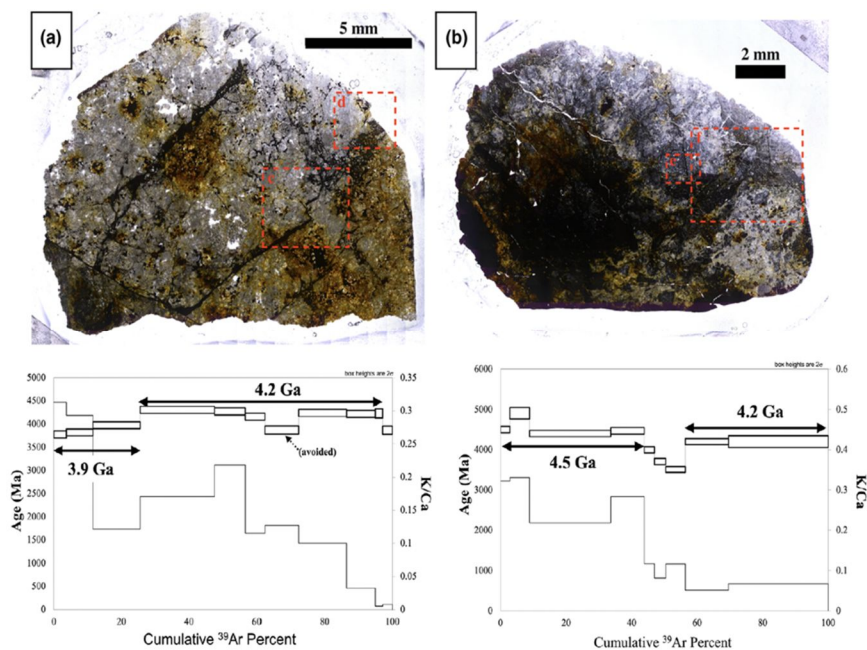


図 1 クラスト部とマトリックス部の薄片写真及びそれらの年代

参考文献: [1] Rubin (2004) GCA 68:673-689. [2] Scott et al. (2014) GCA 136:13-37. [3] Hugo et al. (2019) MAPS 55:1418-1438.

(2)複数の隕石の組織観察と Ar/Ar 年代測定

様々な衝撃変成度合いの普通コンドライトの組織観察と年代測定を行っている。角礫化した隕石では(1)と類似の結果が示されており、クラスト部とマトリックス部では高温フラクションでは同じくらいの年代が得られるが、マトリックス部の低温フラクションではわずかに若い年代が記録されていた(図2)。角礫化した隕石のマイナーなイベントの年代測定を行う場合には、クラスト部とマトリックス部をそれぞれ測定する必要があることが示唆された。強い衝撃変成を受けている隕石において、高圧鉱物が残るような比較的早い冷却を経験しているものにおいては、高温までの完全な年代のリセットが起きていなかった。一方、衝撃変成組織を示さない隕石であっても、完全な年代のリセットが見られ、衝撃変成組織と年代のリセットは必ずしも一緒に現れるものではない(組織は熱によりかき消される)ことが明らかとなった(表1)。また、衝撃変成組織を示さない隕石であっても、場所によっては 50Myr 程度の年代差が見られた。この程度の差は隕石の形成年代が古い(~46 億年)場合は誤差の範囲内であるため実際に不均一があるかは確かめられていない。

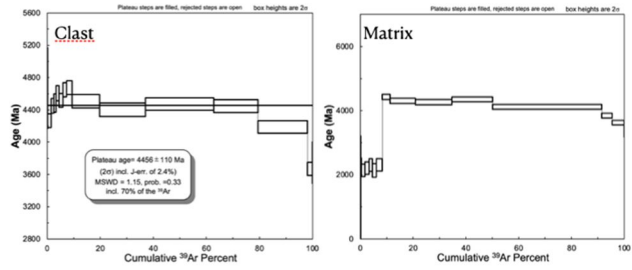


図2 コンドライト隕石のクラスト部とマトリックス部の年代

クラスト部とマトリックス部をそれぞれ測定する必要があることが示唆された。強い衝撃変成を受けている隕石において、高圧鉱物が残るような比較的早い冷却を経験しているものにおいては、高温までの完全な年代のリセットが起きていなかった。一方、衝撃変成組織を示さない隕石であっても、完全な年代のリセットが見られ、衝撃変成組織と年代のリセットは必ずしも一緒に現れるものではない(組織は熱によりかき消される)ことが明らかとなった(表1)。また、衝撃変成組織を示さない隕石であっても、場所によっては 50Myr 程度の年代差が見られた。この程度の差は隕石の形成年代が古い(~46 億年)場合は誤差の範囲内であるため実際に不均一があるかは確かめられていない。

表1 隕石の衝撃変成度と年代

Name	TYPE	Shock Stage	Age (Ma)	Name	TYPE	Shock Stage	Age (Ma)
Tulia(a)	H3-4	3	<2000-4000	Chergach	H5	4	
Y-75028	H3-6	3		Mills	H6	2	4206±97
Y-791428	H3.7	1		Ozona	H6	2	<4500**
Y-790460	H3.7	3	4520±110	Portales Valley	H6	1	4480±20*
Ochansk	H4	2	<4200**	A 10174	H6	3	
Salaices	H4	3	<4400**	A 12363	H6	2	
Wellman-c	H4	4	<3800**	Y981909	H6	5+	
Hassayampa	H4	3	4520±110	Y-791775	H6-melt rock	2	<4300
Kesen	H4	3		Y-75100	H6	5+	<4490±70*
Jilin	H5	3	<300-400 <3800	Tassédet 004	H5-melt rock	4	
Nuevo Mercurio	H5	1	4481±92**	Seagraves (c)	L6	5+	<1600-2900**
Gao-Guenie	H5	3	303±56*	Y000775	L6	5+	
Nadiabondi	H5	3		Y-790521	L-melt rock	3	
Plainview (1917)	H5	4	4460±110	Y-790144	LL7	3	<900
Forest City	H5	3		Y-790519	LL-melt rock	2	<1900
Y-794046	H5?	3	3790±40*	Y-790964	LL-melt rock	3	

*Swindle+ (2014) and references therein, ** Takenouchi+ (2020) after further data reduction *contains high-pressure phases

(3) 様々な度合いの衝撃変成作用を経験した隕石の詳細観察

隕石が経験した衝撃変成作用が年代をリセットするためには温度の上昇が必要である。衝撃を受けた隕石内で温度がどの程度上昇したかを調べるために、微細組織の観察を進めている。

A12325 隕石では、衝撃溶融脈から離れた地点でクロマイトの相転移が確認された(図3)。クロマイトは高温と低温で異なる相に相転移するため、これらの相を同定することで温度情報を取得し、年代測定と結びつけて解釈を行っていく。

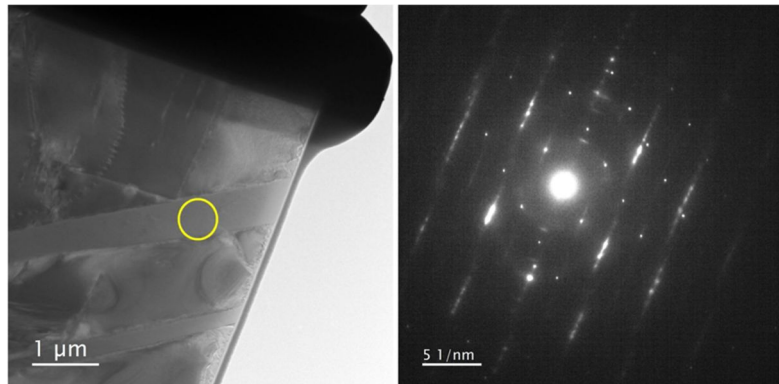


図3 クロマイトの相転移部とその回折像

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 Takenouchi Atsushi, Sumino Hirochika, Shimodate Karin, Yamaguchi Akira	4. 巻 56
2. 論文標題 Multiple shock events recorded in the Northwest Africa 2139 LL6 chondrite: Implications for collisional histories of the LL chondrite parent body	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Meteoritics & Planetary Science	6. 最初と最後の頁 2230 ~ 2249
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1111/maps.13768	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5件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 A. Takenouchi, S. Yoneda, A. Yamaguchi, R. Okazaki, N. Takahashi, N. Shirai, Y. Fujiwara, and R. Kataoka
2. 発表標題 The first fall-observed and recovered meteorite in Japan: narashino meteorite.
3. 学会等名 JpGU 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Takenouchi, H. Sumino and A. Yamaguchi
2. 発表標題 Comprehensive study of shock metamorphism and $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ ages in ordinary chondrites.
3. 学会等名 The 44th symposium on Antarctic Meteorites（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Takenouchi, A. Yamaguchi, and T. Mikouchi
2. 発表標題 Shock conditions for shergottites: A comparison between Asuka 12325 and other shergottites
3. 学会等名 2020 JpGU-AGU joint meeting（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A. Takenouchi, H. Sumino, A. Yamaguchi
2. 発表標題 Shock metamorphism and Ar-Ar ages of ordinary chondrites
3. 学会等名 The 11th Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A. Takenouchi, H. Sumino, T. Mikouchi, H. Ono, and A. Yamaguchi
2. 発表標題 Argon-Argon chronology of two shocked eucrites, Northwest Africa 1000 and Yamato 980433
3. 学会等名 52nd 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