

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 5月 9日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23654194

研究課題名（和文） 局所K-Ar年代法による隕石衝撃変成年代測定を試み

研究課題名（英文） An attempt at dating of impact ages for meteorites based on the *in situ* K-Ar method

## 研究代表者

岡崎 隆司 (OKAZAKI RYUJI)

九州大学・大学院理学研究院・助教

研究者番号：40372750

## 研究成果の概要（和文）：

隕石衝撃年代決定に必要な極微量の Ar と K 濃度測定を行うため、Ar はパルス Nd:YAG レーザーにて抽出し質量分析計で、K はレーザー照射の際に発生するプリューム光の分光 (LIBS) によって測定するシステムを開発した。抽出される  $^{40}\text{Ar}$  量は微量であるため、装置のバックグラウンド低減を行い、従来の約  $1/10$  ( $\sim 10^8$  atoms) にすることが出来た。また、LIBS システムを設計・開発し、地球岩石試料からの K 検出に成功した。

## 研究成果の概要（英文）：

In situ analysis of impact ages for meteorites needs to determine small amounts of Ar and K. Low background  $^{40}\text{Ar}$  ( $\sim 10^8$  atoms) for the mass spectrometer has successfully been achieved. In addition, the LIBS (Laser-induced breakdown spectroscopy) system has been developed. Potassium in terrestrial andesite was detected using the LIBS system.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

## 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：K-Ar 年代、衝撃変成、希ガス、LIBS、小惑星、原始太陽系、レゴリス

## 1. 研究開始当初の背景

隕石には衝撃加熱により熔融したもの、高圧鉱物を産するもの、機械的に破碎し角礫岩化したものなどあり、その衝撃変成の程度は極めて多様であることが知られている (Bischoff et al., 2006)。しかし、衝突年代に関する報告は強い衝撃変成を示す隕石、例えば Vesta family 起源の HED 隕石 (Bogard, 1995) や H コンドライト隕石 (Swindle et al., 2009) などに限られ、弱い衝撃を受けた隕石の衝突変成年代は得られていない。また、衝

撃変成で生じる圧力や温度の影響は空間的にきわめて不均一であり、同一の隕石試料においても衝撃変成の程度は異なる。さらに、複数回の衝突過程を経験したことを示唆する組織を示す隕石も報告されており、個々の衝突イベントの年代を決定することは太陽系物質進化を紐解く上で極めて重要である。これらの様々な衝撃変成に関する年代を得るためには試料の局所領域に対する年代測定法の確立が必須である。衝突年代を決定する手法はいくつかあるが、

放射性同位体  $^{40}\text{K}$  の娘各種  $^{40}\text{Ar}$  を用いた年代(K-Ar、Ar-Ar 年代)は他の年代法(Rb-Sr、Pb-Pb、Sm-Nd 年代)に比べて加熱による若返りの影響を受けやすい。従って、衝突年代を求めるにはもっとも適した年代法といえる。

これまでは局所 Ar 年代として Ar-Ar 年代法がもっとも有力であったが、Ar-Ar 方では事前に中性子照射し、生成した  $^{39}\text{Ar}$  によって K 濃度を求めるが、この中性子照射によって隕石本来の希ガス同位体組成は乱されてしまう。また、照射後の試料は放射性物質管理区域内での質量分析が必要になり、放射性物質管理区域内での高感度質量分析装置の開発は困難である。

一方、本研究では、レーザーによる局所 Ar 抽出と LIBS によるカリウム測定を同時に行い、微小試料(1-10 マイクログラム)中のカリウム (> 0.5 wt%) と Ar (>  $10^9$  atoms)の同時分析を行うことで、「局所 K-Ar 年代測定」を実現するシステムの開発をめざす。

本研究で開発する局所 K-Ar 年代測定法を用いれば、1) 天然の試料の同位体比を保存したまま、2) 通常の実験室で局所年代測定が可能となる。

## 2. 研究の目的

多くの隕石が様々な規模の衝突過程の痕跡を残すが、その個々のイベントの年代を求めることは太陽系惑星進化を議論する際に重要である。また、コンドライト隕石には、天体の小ささ故に弱い衝撃変成を示す物も多い。コンドライト隕石は太陽系星雲に存在した始原的な物質の集合体であり、それらがいっ、どういう物理化学的環境下で集積合体したのか、といったコンドライト母天体表面での衝突過程を年代づけることができれば、母天体表面に飛来した他天体起源の物質の時間的変遷を知ることができる。また、regolith breccia には太陽風が含まれているが、それらの衝撃変成年代(レゴリス形成年代)が求まれば、天体表面に太陽風がいつ照射され始めたか、つまり星雲散逸年代を得ることができる。このような様々な衝撃変成や天体衝突イベントの年代づけを行うため、局所 K-Ar 年代測定法を開発・実用化することが本研究の目的である。

## 3. 研究の方法

まず、希ガス質量分析装置の超高感度・低バックグラウンドを目指す。そのために、1) 質量分析計イオン源の調整、2) ガス抽出装置の新規開発を行う。また、カリウム定量分析のために必要な、LIBS(Laser-induced breakdown spectroscopy)システムの設計・開発を行う。

これらの希ガス質量分析装置と LIBS 分光装

置は個々の装置としてはすでに市販されているが、これらを1つのシステムとして運用することを前提とした市販品は存在しない。実際の隕石試料を用いた研究では、1) 試料の観察による年代測定領域の同定、2) 測定領域へのレーザー照射、3) レーザープリューム光の分光、4) 抽出希ガスの分析、を行う必要があり、そのためにはレーザー集光とプリューム分光を同時に成立させる光学系の開発が重要である。

その後、地球の岩石や標準硝子試料などを用いた分析し、システムの評価・キャリブレーションなどを行い、本装置を用いた隕石中衝撃変成鉱物・溶融脈の年代測定を試みる。

## 4. 研究成果

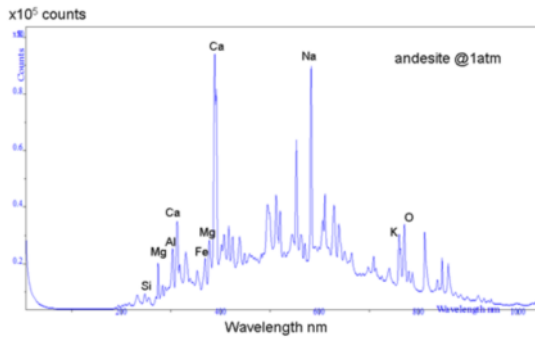
(1) 希ガス質量分析装置の開発・改良  
質量分析計の高感度化のためにイオン源の調整を行った。また、バックグラウンド  $^{40}\text{Ar}$  の発生源の1つはイオン源であるため、イオン化用電子線発生効率にも配慮した調整を行った。また、試料の局所領域からガスを抽出するために必要なガス抽出・精製(活性ガスの除去)ラインを新規に設計・開発した。これらの改良により、装置全体でのバックグラウンドを従来の約  $1/10$ 、原子数で  $\sim 10^8$   $^{40}\text{Ar}$ -atoms にまで低減することが出来た。従って、この装置で「K を 0.1 wt% 含み、年代が 45.6 億年の試料 0.1 マイクログラム(直径約 50 ミクロン)から得られる  $^{40}\text{Ar}$  量( $2 \times 10^9$  atoms)」を定量出来る条件が達成された。これは実際の隕石試料に含まれる長石を測定可能な条件である。

## (2) LIBS 分光装置の開発

隕石試料薄片の局所(直径数十~数百ミクロン)から希ガスをパルスレーザー照射にて抽出する際に発生するプリューム光を分光するために必要な光学系の設計・開発を行った。主な開発点は Nd:YAG レーザー基本波(1064 nm)を試料表面に集光しつつ、プリューム光を分光器に導入するレンズ・ミラーの選定・開発である。レンズは高耐損傷用に石英レンズを用い、ミラーは UV 反射ミラーと誘電体ミラーをあわせることで 1064 nm では透過率 70%以上、250~800 nm では反射率 90%を達成することが出来た。

分光・検出器としては紫外-近赤外領域で分光可能な装置を選定し、ファイバー導入方式のシステムを組んだ。

このレーザー照射・分光システムを用いて、地球岩石試料(アンデサイト)薄片に大気中にてパルスレーザー照射した際に発生したプリューム光の分光テストを行い、K のスペクトルを取得することに成功した。



一方、試料を真空中でレーザー照射した場合、レーザー光自身の発光が強く、試料本来の発光スペクトル取得の妨害になることが判明した。必要以上に高エネルギーのパルスレーザーの照射は妨害になることが分かったため、今後は試料分析に適切なレーザーエネルギーの選定や光学設定を進めていくことで改善されると思われる。

研究期間中に実際の隕石試料の分析までは行えなかったが、最も時間のかかる装置開発についてはほぼ完了することが出来た。今後、すみやかに隕石試料の分析が行えると思われる。

#### 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 11 件)

(1) T. Yada, A. Fujimura, M. Abe, T. Nakamura, T. Noguchi, R. Okazaki, K. Nagao, Y. Ishibashi, K. Shirai, M. E. Zolensky, S. Sandford, T. Okada, M. Uesugi, Y. Karouji, M. Ogawa, S. Yakame, M. Ueno, T. Mukai, M. Yoshikawa, and J. Kawaguchi. (2013) Hayabusa return sample curation in the Planetary Material Sample Curation Facility of JAXA. *Meteoritics & Planetary Science* (accepted). 査読有り

(2) T. Noguchi, M. Kimura, T. Hashimoto, M. Konno, T. Nakamura, M. E. Zolensky, M. Tanaka, R. Okazaki, A. Tsuchiyama, A. Nakato, T. Ogami, H. Ishida, R. Sagae, S. Tsujimoto, T. Matsumoto, J. Matsuno, A. Fujimura, M. Abe, T. Yada, T. Mukai, M. Ueno, T. Okada, K. Shirai, and Y. Ishibashi. (2013) Space weathered rims found on the surfaces of the Itokawa dust particles. *Meteoritics & Planetary Science* (accepted). 査読有り

(3) K. Bajo, H. Sumino, M. Toyoda, R. Okazaki, T. Osawa, M. Ishihara, I. Katakuse, K. Notsu, G. Igarashi, and K. Nagao (2012) Construction of a newly

designed small-size mass spectrometer for helium isotope analysis: Toward the continuous monitoring of  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratios in natural fluids. *Mass Spectrometry A0009* (DOI: 10.5702/mass\_spectrometry. A0009). 査読有り

(4) Jenniskens P., Fries M. D., Yin Q-Z., Zolensky M., Krot S., Sandford S., Sears D., Beauford R., Ebel D. S., Friedrich J. M., Nagashima K., Wimpenny J., Yamakawa A., Nishiizumi K., Hamajima Y., Caffee M. W., Young E. .D., Kohl I. E., Thiemens M., Nunn M. H., Mikouchi T., Hagiya K., Ohsumi K., Cahill T., Lawton J., Barnes D., Laubenstein M., Welten K., Steele A., Rochette P., Verosub K., Cooper G., Glavin D. P., Burton A. S., Dworkin J. P., Pizzarello S., Ogliore R., Schmitt-Kopplin P., Harir M., Hertkorn N., Verchovsky A., Grady M., Nagao K., Okazaki R., Takechi H., Hiroi T., Binzel R., Smith K., Silber E. A., Brown P., Albers J., Klotz D., Hankey M., Matson R., Fries J. A., Walker R. J., Puchtel I., Lee CT., Erdman M., Eppich G. R., Hutcheon I. D., Roeske S., Zelimir Gabelica, Michael Lerche, Michel Nuevo, Beverly Girtten, and Worden Peter S. (the Sutter's Mill Meteorite Consortium) (2012) Radar enabled recovery of Sutter's Mill, a unique carbonaceous chondrite regolith breccia. *Science* 338, 1583-1587. 査読有り

(5) M. Ebihara, S. Sekimoto, N. Shirai, Y. Hamajima, M. Yamamoto, K. Kumagai, Y. Oura, T. R. Ireland, F. Kitajima, K. Nagao, T. Nakamura, H. Naraoka, T. Noguchi, R. Okazaki, A. Tsuchiyama, M. Uesugi, H. Yurimoto, M. E. Zolensky, M. Abe, A. Fujimura, T. Mukai, Y. Yada. Neutron activation analysis of a particle returned from asteroid Itokawa. *Science* 333, 1119-1121, 2011. 査読有り

(6) K. Nagao, R. Okazaki, T. Nakamura, Y. N. Miura, T. Osawa, K. Bajo, S. Matsuda, M. Ebihara, T. R. Ireland, F. Kitajima, H. Naraoka, T. Noguchi, A. Tsuchiyama, H. Yurimoto, M. E. Zolensky, M. Uesugi, K. Shirai, M. Abe, T. Yada, Y. Ishibashi, A. Fujimura, T. Mukai, M. Ueno, T. Okada, M. Yoshikawa, J. Kawaguchi. Irradiation history of Itokawa regolith material deduced from noble gases in the Hayabusa samples. *Science* 333, 1128-1131, 2011. 査

読有り

(7) T. Nakamura, T. Noguchi, M. Tanaka, M. E. Zolensky, M. Kimura, A. Tsuchiyama, A. Nakato, T. Ogami, H. Ishida, M. Uesugi, T. Yada, K. Shirai, A. Fujimura, R. Okazaki, S. A. Sandford, Y. Ishibashi, M. Abe, T. Okada, M. Ueno, T. Mukai, M. Yoshikawa, J. Kawaguchi. Itokawa dust particles: A direct link between S-type asteroids and ordinary chondrites. *Science* 333, 1113-1116, 2011. 査読有り

(8) T. Noguchi, T. Nakamura, M. Kimura, M. E. Zolensky, M. Tanaka, T. Hashimoto, M. Konno, A. Nakato, T. Ogami, A. Fujimura, M. Abe, T. Yada, T. Mukai, M. Ueno, T. Okada, K. Shirai, Y. Ishibashi, R. Okazaki. Incipient space weathering observed on the surface of Itokawa dust particles. *Science* 333, 1121-1125, 2011. 査読有り

(9) A. Tsuchiyama, M. Uesugi, T. Matsushima, T. Michikami, T. Kadono, T. Nakamura, K. Uesugi, T. Nakano, S. A. Sandford, R. Noguchi, T. Matsumoto, J. Matsuno, T. Nagano, Y. Imai, A. Takeuchi, Y. Suzuki, T. Ogami, J. Katagiri, M. Ebihara, T. R. Ireland, F. Kitajima, K. Nagao, H. Naraoka, T. Noguchi, R. Okazaki, H. Yurimoto, M. E. Zolensky, T. Mukai, M. Abe, T. Yada, A. Fujimura, M. Yoshikawa, J. Kawaguchi. Three-dimensional structure of Hayabusa samples: Origin and evolution of Itokawa regolith. *Science* 333, 1125-1128, 2011. 査読有り

(10) H. Yurimoto, K. Abe, M. Abe, M. Ebihara, A. Fujimura, M. Hashiguchi, K. Hashizume, T. R. Ireland, S. Itoh, J. Katayama, C. Kato, J. Kawaguchi, N. Kawasaki, F. Kitajima, S. Kobayashi, T. Meike, T. Mukai, K. Nagao, T. Nakamura, H. Naraoka, T. Noguchi, R. Okazaki, C. Park, N. Sakamoto, Y. Seto, M. Takei, A. Tsuchiyama, M. Uesugi, S. Wakaki, T. Yada, K. Yamamoto, M. Yoshikawa, M. E. Zolensky. Oxygen isotopic compositions of asteroidal materials returned from Itokawa by the Hayabusa mission. *Science* 333, 1116-1119, 2011. 査読有り

(11) H. Naraoka, H. Mita, K. Hamase, M. Mita, H. Yabuta, K. Saito, K. Fukushima, F. Kitajima, S. A. Sandford, T. Nakamura, T. Noguchi, R. Okazaki, K. Nagao, M. Ebihara, H. Yurimoto, A. Tsuchiyama, M.

Abe, K. Shirai, M. Ueno, T. Yada, Y. Ishibashi, T. Okada, A. Fujimura, T. Mukai, M. Yoshikawa, J. Kawaguchi. Preliminary organic compound analysis of microparticles returned from Asteroid 25143 Itokawa by the Hayabusa mission. *Geochemical Journal* 46, 61-72, 2011. 査読有り

[学会発表] (計 53 件)

(1) Yabuta, H., Noguchi, T., Itoh, S., Sakamoto, N., Hashiguchi, M., Abe, K., Tsujimoto, S., Kilcoyne, A. L. D., Okubo, A., Okazaki, R., Tachibana, S., Nakamura, T., Terada, K., Ebihara, M., Nagahara, H. Evidence of Minimum Aqueous Alteration in Rock-Ice Body: Update of Organic Chemistry and Mineralogy of Ultracarbonaceous Antarctic Micrometeorite [#2335]. The 44th Lunar and Planetary Science Conference, March 18-22, 2013, Texas, USA.

(2) Ebihara, M., Sekimoto, S., Shirai, N., Tsujimoto, S., Noguchi, T., Nakamura, T., Okazaki, R., Ito, S., Tachibana, S., Yabuta, H., Terada, K., Nagahara, H. Chemical Composition of Dust Samples (Micrometeorites) Recovered from Antarctic Snow [#2086]. The 44th Lunar and Planetary Science Conference, March 18-22, 2013, Texas, USA.

(3) Nagao, K., Okazaki, R., Miura, Y., Osawa, T., Gilmour, J. D., Nishimura, Y. Noble Gas Analysis of Two Hayabusa Samples as the First International A/O Investigation: A Progress Report [#1976]. The 44th Lunar and Planetary Science Conference, March 18-22, 2013, Texas, USA.

(4) Yada, T., Abe, M., Okada, T., Uesugi, M., Karouji, Y., Ishibashi, Y., Yakame, S., Shirai, K., Nakamura, T., Noguchi, T., Okazaki, R., Fujimoto, M., Yoshikawa, M. Mineral Ratios of Itokawa Samples - Difference Between Two Rooms of a Hayabusa Sample Catcher [#1948]. The 44th Lunar and Planetary Science Conference, March 18-22, 2013, Texas, USA.

(5) Tachibana, S., Sawada, H., Okazaki, R., Takano, Y., Okamoto, C., Yano, H., Hayabusa-2 Sampler Team. The Sampling System of Hayabusa-2: Improvements from the Hayabusa Sampler [#1880]. The 44th Lunar and Planetary Science Conference, March 18-22, 2013, Texas, USA.

(6) Yabuta, H., Itoh, S., Noguchi, T., Sakamoto, N., Hashiguchi, M., Abe, K., Tsujimoto, S., Kilcoyne, A. L. D., Okubo, A., Okazaki, R., Tachibana, S., Terada, K., Nakamura, T., Nagahara, H. Coexisting Nitrogen-Rich and Poor Organic Materials in Ultracarbonaceous Antarctic Micrometeorite [#5196]. The 75th Annual Meeting of the Meteoritical Society. August 12-17, 2012, Cairns, Australia.

(7) Yada, T., Abe, M., Okada, T., Uesugi, M., Karouji, Y., Ishibashi, Y., Yakame, S., Shirai, K., Nakamura, T., Noguchi, T., Okazaki, R., Fujimura, A. A Mineral Ratio of Itokawa Particles Recovered from the Hayabusa Sample Catcher [#5245]. The 75th Annual Meeting of the Meteoritical Society. August 12-17, 2012, Cairns, Australia.

(8) 岡崎隆司、太陽系探査リターンサンプルに向けた超高感度希ガス同位体分析システム、日本地球惑星科学連合 2012 年大会、幕張メッセ、千葉、2012 年 5 月 20~25 日。

(9) 長勇一郎、杉田精司、三浦弥生、亀田真吾、諸田智克、吉岡和夫、岡崎隆司、並木則行、荒井朋子、小林正規、石橋高、大野宗祐、千秋博紀、和田浩二、橘省吾、K-Ar 法を用いた月・火星着陸探査用その場年代計測装置、日本地球惑星科学連合 2012 年大会、幕張メッセ、千葉、2012 年 5 月 20~25 日。

(10) 藪田ひかる、伊藤正一、野口高明、坂本直哉、橋口未奈子、阿部憲一、辻本真一、A. L. D. Kilcoyne、大久保彩子、岡崎隆司、橘省吾、寺田健太郎、中村智樹、永原裕子、超炭素質南極微隕石から見つかった窒素に富む有機物、日本地球惑星科学連合 2012 年大会、幕張メッセ、千葉、2012 年 5 月 20~25 日。

(11) 北島 富美雄、小嗣真人、大河内拓雄、奈良岡 浩、石橋 之宏、唐牛 讓、上楯 真之、安部 正真、藤村 彰夫、岡崎 隆司、矢田 達、中村 智樹、野口 高明、長尾 敬介、土山 明、坂本 尚義、向井 利典、スコット サンドフォード、岡田 達明、白井 慶、上野 宗孝、吉川 真、川口 淳一郎、顕微分光による”はやぶさ”微粒子の分析、日本地球惑星科学連合 2012 年大会、幕張メッセ、千葉、2012 年 5 月 20~25 日。

(12) 野口 高明、木村 眞、橋本 隆仁、今野 充、中村 智樹、Zolensky Michael、田中 雅

彦、藤村 彰夫、安部 正真、矢田 達、向井 利典、上野 宗孝、岡田 達明、白井 慶、石橋 之宏、上楯 真之、唐牛 讓、岡崎 隆司、土山 明、イトカワ粒子の宇宙風化産物の STEM 観察と N2 パージ環境の重要性、日本地球惑星科学連合 2012 年大会、幕張メッセ、千葉、2012 年 5 月 20~25 日。

(13) 伊藤 正一、坂本 尚義、坂本 直哉、小林 幸雄、橋爪 光、土山 明、瀬戸 雄介、アイルランド トレバー、Zolensky Michael、中村 智樹、野口 高明、長尾 敬介、海老原 充、奈良岡 浩、岡崎 隆司、北島 富美雄、向井 利典、藤村 彰夫、安部 正真、矢田 達、上楯 真之、吉川 真、川口 淳一郎、はやぶさ回収試料の初期分析 2: 酸素同位体分析、微量元素分析、日本地球惑星科学連合 2012 年大会、幕張メッセ、千葉、2012 年 5 月 20~25 日。

(14) M. Abe, T. Yada, A. Fujimura, T. Okada, Y. Ishibashi, K. Shirai, M. Uesugi, Y. Karouji, S. Yakame, T. Nakamura, T. Noguchi, R. Okazaki, T. Mukai, M. Fujimoto, M. Yoshikawa and J. Kawaguchi. Asteroid Itokawa sample curation and distribution for initial analyses and international AO held in the planetary material sample curation facility of JAXA [#1708], The 43rd Lunar and Planetary Science Conference, March 19-23, 2012, Texas, USA.

(15) H. Yabuta, S. Itoh, T. Noguchi, N. Sakamoto, M. Hashiguchi, K. Abe, S. Tsujimoto, A. L. D. Kilcoyne, A. Okubo, R. Okazaki, S. Tachibana, K. Terada, T. Nakamura and H. Nagahara. Finding of nitrogen-rich organic material in Antarctic ultracarbonaceous micrometeorite [#2239], The 43rd Lunar and Planetary Science Conference, March 19-23, 2012, Texas, USA.

[その他]

ホームページ等

<http://jupiter.geo.kyushu-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岡崎 隆司 (OKAZAKI RYUJI)

九州大学・大学院理学研究院・助教

研究者番号：40372750