

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23340170

研究課題名(和文) 原始太陽系星雲の散逸時期を新しい手法で解明する

研究課題名(英文) New method to examine the timing of clear up of solar nebula

研究代表者

長尾 敬介 (Nagao, Keisuke)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40131619

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,000,000円

研究成果の概要(和文)：太陽系の形成は、水素とヘリウムを主成分として微量の重元素や塵からなる原始太陽系星雲中で、固体粒子の合体成長を経て微惑星や惑星へと進んだ。多量にあった星雲ガスが惑星形成領域から散逸して太陽系の晴れ上がりが起こった時期を、角礫岩質隕石を対象とした希ガス同位体分析と、中性子照射した試料を用いたI-Xe年代測定で解明することを目的とした。

強い衝撃を受けた形跡のある隕石を分析した結果、この衝撃が太陽系形成時より数億年以上後に起こったもので、初期の情報の大部分が消去されていることがわかった。この結果は、それまでに我々が得た結果と矛盾するものではなく、条件の適した隕石の選択が重要であることを示している。

研究成果の概要(英文)：Our solar system grew in dens protoplanetary solar nebula composed of mainly hydrogen and helium gas with minor amounts of heavier elements and dusts. The nebula had dissipated at some stage of the solar system formation, resulted in clear up of the solar system. We intended to give a constraint on the timing of clear up based on noble gas composition and I-Xe age determination for meteorites showing brecciated structure and/or heavily shocked appearance.

As far as the results obtained for several meteorites with heavily shocked melt veins and brecciated structure, they were affected by heavy shock much later than the solar system formation. These data indicate an importance to select samples reserving information at the initial stage of breccia formation. Even though the data did not give clear constraints on the timing of nebular dissipation, they do not contradict the findings obtained before in our laboratory.

研究分野：数物系科学

キーワード：原始太陽系星雲 太陽風 ガスリッチ隕石 I-Xe年代 星雲散逸 中性子照射

1. 研究開始当初の背景

(1) 宇宙空間に存在した局所的に濃い分子雲の重力的収縮により形成された原始太陽系星雲から、現在のような太陽系が形成されたと考えられている。原始太陽を中心とした円盤状の原始太陽系星雲は、水素とヘリウムを主成分として、微量の重元素や塵からなっており、この中から析出した固体粒子の合体成長を経て惑星系が誕生した。この過程のどの時期かに、多量にあった星雲ガスなどが惑星形成領域から散逸して、太陽系の晴れ上がりが起こった。固体粒子の形成と合体成長の過程において、どの程度の濃度のガスや塵が存在し、どのタイミングで晴れ上がりが起こったかは、惑星形成プロセスに密接に関わる問題である。

(2) 原始太陽系星雲散逸の時期は、太陽系外のいくつかの星雲中で形成されつつある原始星およびその周りのガスと塵からなる円盤を観測することにより推定されている。この結果、太陽程度の質量を持つ星では形成開始から 5-10 My (My: 百万年) 程度で散逸するとされている。我々の太陽系でのガス散逸が起こった時期は、主として隕石およびその中に含まれる CAI やコンドルール中の元素や同位体組成、太陽起源ガスの存否などから推定されているにすぎない。

(このような現状は、Pascucci and Tachibana, 2010 に詳しくまとめられている。) 隕石やそれを構成する鉱物などの形成年代は、放射性核種を用いた様々な年代測定法で詳細に決定されているのに対して、それらが形成された環境の変化を、これらの時計を使って年代測定する方法がわからないのが現状である。

2. 研究の目的

(1) 太陽系形成過程の研究において、原始太陽系星雲中に多量に存在したガスと塵が消滅した時期の決定は、隕石の母天体である小惑星や惑星などの形成環境解明において最も重要な問題の一つでありながら有効な方法が無かった。我々は2010年頃までにおこなってきた角礫岩質隕石の研究から、太陽風起源希ガスを多量に含む暗色部分とほとんど含まない白色部分を持つ、いわゆるガスリッチ隕石のI-Xe年代を測定することにより、その隕石母天体形成領域の晴れ上がり年代を数値として絞り込んで行ける可能性があることを発見した。

(2) ガスリッチ隕石と呼ばれる典型的な隕石は、

cm スケールの暗色部分と白色部分が混在した角礫岩であり、暗色部分には隕石母天体表層で頻繁に起こった天体衝突による破砕攪拌時の太陽風照射による高濃度の太陽風起源ヘリウムやネオンが存在するのに対して、白色部分の希ガス含有量は非常に低い。暗色部分は太陽起源の水素により鉱物表層部が還元されて鉄微粒子が析出したためとも言われている (Signer and Suess, 1963) のに対し、白色部分に太陽風ガスが含まれない理由については未だに明確な説明はなく、衝突攪拌時に天体表面に現れずに太陽風照射を受けなかったものと漠然と考えられてきた。

これに対して、以下のような解釈も考えられる。隕石母天体が星雲ガスに包まれていた時期には天体衝突による破砕が起こっても、太陽風が到達出来ないために水素や希ガスの叩き込みが起こらななかった。その後、星雲ガス散逸が進行して中心星から後退すると、太陽風が直接照射され始めるため、希ガス濃度が高い暗色部分が形成された。この解釈が正しいとすれば、暗色部分と白色部分から成る角礫岩質隕石は、太陽系星雲ガス散逸と密接に関連した極めて重要な情報を秘めており、その時期についてI-Xe年代測定で初めて具体的な数値として制約を与えることができる。本研究は、この手法を衝突破砕を経験した隕石に適用して、長年の懸案であった原始太陽系星雲からのガスや塵の散逸時期を、初めて数値として絞り込んでいくことを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 我々は、隕石中の希ガス研究を数十年継続しており、また2004年には国内で初めて隕石のI-Xe年代測定を可能とした (Ebisawa et al., 2004)。この年代測定法は、半減期が約16 My の消滅核種¹²⁹Iが¹²⁹Xeに壊変する事を利用したもので、太陽系形成時から100 My程度までの初期年代測定が可能である。ハロゲン元素であるヨウ素と希ガスであるXeの組み合わせを用いるこの時計は、隕石母天体における水質変成や天体衝突などの衝撃でリセットされやすい点で、他の年代測定法と異なる特色を持つ。この年代測定とHeからXeの全希ガス分析を、ショックを受けた角礫岩質隕石に適用する。

(2) I-Xe年代測定を行うには、実験用原子炉内で分析試料を中性子照射して、ヨウ素同位体¹²⁷Iを核反応を利用して¹²⁸Xe同位体に変換すること

が必須である。さらに、中性子照射した試料は中性子捕獲反応により生成する様々な放射性同位体を試料内に持つため、放射性物質を扱う実験施設で分析することが義務付けられている。さらに、この実験室内に設置した希ガス質量分析装置が、このような年代測定に十分な性能を持つことが必要である。本研究では、分析精度と能率向上のため、試料から希ガスを抽出・精製・希ガス元素間の分離をおこなうための、超高真空装置の改良型を新たに製作して性能の検証もおこなった。

4. 研究成果

(1) 初年度には、従来使っていた希ガス精製ラインを廃棄して、本研究で申請した冷凍機を組み込んだ希ガストラップを含む、従来よりも更に高能率・低バックグラウンドを目標とした高性能希ガス精製ラインを製作した。この冷凍機を組み込んだ希ガストラップを用いることにより、トラップを任意の温度に制御して希ガスを吸着・脱着して元素ごとに分離し、質量分析計に導入することが能率的かつ容易におこなえるようになった。この新ラインの性能確認のために、中性子照射によりハロゲンやカルシウム、バリウム、ウランなどから希ガス同位体を生成した種々の岩石試料の分析を行い、文献値や他の研究者が別の方法で測定した値と比較検討した。この結果は、我々が達成した中性子照射によりハロゲンを希ガス同位体に変換して検出する、いわゆる「希ガス化法」が、他の分析法に比べて2-3桁低い濃度のハロゲンを含む物質の分析が可能であることを示した。このことは、本研究目的である、隕石中の微小な異なる岩相を分離して分析することが、従来よりも更に能率的かつ高精度でおこなえることを示している。これにより、目的とする隕石の希ガス同位体分析を従来よりも能率的かつ信頼度良く測定できる態勢が整ったことが確認された。

(2) 角礫岩質隕石や強いショックを受けた隕石の希ガス同位体と、I-Xe年代測定をいくつかの隕石についておこなった。Chelyabinsk隕石は2013年2月15日にロシアのチェリャビンスク近郊に落下し、多くの負傷者を出した。この隕石はLL5に分類され、強いショックによる溶融脈を持っている。落下途中の爆発で多数の小破片に分裂して回収された隕石のうち10数個の隕石の希ガス分析結果、これら隕石が落下前の天体の表面から3 m程度までの様々な深さにあつ

たことがわかった。Ar-Ar年代は20億年程度の年代とごく最近(約30 My)の、少なくとも2度の強い衝撃を経験したことを示す。I-Xe年代もほぼ完全にリセットされていて、太陽風起源希ガスは検出されなかった。宇宙線照射年代は1.2 Myという短いものである。

サンプルリターン試料である「はやぶさ」粒子の研究からは、母天体「イトカワ」がチェリャビンスク隕石と同じLL5に分類され、その母天体が約13億年前に強い衝撃を受けたことを示している(Park et al., 2014)。我々とスイスETHで独立におこなわれた希ガス同位体分析では、イトカワ表面粒子に太陽風が打ち込まれていることや、宇宙線照射年代がチェリャビンスクとほぼ同じ短いものであることがわかった。これらのことは、イトカワ程度以下の小天体では、表面物質に太陽風が打ち込まれていると同時に、表面物質が連続的に宇宙空間に逃散しており(Nagao et al., 2011)、チェリャビンスク隕石も大気圏通過時に太陽風を受けた表面が失われたために、太陽風が検出されなかったとともに、宇宙線照射年代がイトカワと同程度に短いのであろう。以上の結果は、微惑星形成から数億年以後に強いショックを受けた天体からは、原始太陽系初期の環境情報が失われていることを示している。

H5に分類されるChergach隕石は隕石シャワーとして落下し、回収された破片の総量が100 kgに達する。強いショックを受けて破碎された暗色の基質のなかに強いショックを受けた明色の角礫が埋め込まれている(Meteoritical Bulletin)。基質と礫の希ガス組成は良く似ており、太陽風希ガスは検出されなかった。宇宙線照射年代は6 My程度である。Ar-Ar年代は30から45億年の間で大きくばらつき、鉱物間でK-Ar系のリセットの程度が異なることを示している。I-Xe年代も大幅にリセットが進んでいるが、高温でわずかに見られるアイソクロニックなデータは、年代標準として使っているShallowater隕石から約23 My後の年代を示している。通常のコンドライトの年代に比べるとかなり遅いこのI-Xe年代は、強いショックによる影響を受けた結果であろう。太陽風が検出されないこの隕石は、母天体中の太陽風の届かないほど深いところで受けたショックで作られた角礫と細粒が混合後に固化したものか、暗色部分に打ち込まれた太陽風がショックで失われたとも考えられる。

これまでに我々の研究室で得たデータに基づ

くと、このような研究を行うには、当然のことながら微惑星成初期に起こった角礫岩化以降に強い衝撃を被っていない隕石を選択することが重要である。このためには、候補となる隕石を多数、中性子照射して分析することが必要であるが、以下に述べる理由により困難であった。

(3) この科学研究費による研究課題の遂行は、研究を開始した2011年度の直前(3月11日)に起こった東北地方太平洋沖地震と、それに伴って起こった東日本大震災の影響を大きく被った。それまで東北大学金属材料研究所附属量子エネルギー材料科学国際研究センターの共同利用としておこなっていた東海村の実験用原子炉(JRR3やJMTR)を使った中性子照射が、原子炉停止のために全く出来なくなった。代替として京都大学の実験原子炉による中性子照射をおこなったが、中性子フラックスの不足や稼働時間の制約から十分な数の照射を行うことが難しいなど、東海村の原子炉で経験を積んでいた照射条件と異なることがあり、必ずしも満足できる分析精度を得ることが出来なかった。さらに、東京大学アイソトープ総合センターの予想されなかった改修工事が重なって、センター内での分析が大きく制限されたため、分析装置全体を他のアイソトープ実験施設に移転することも行った。このような悪条件が重なったため、本研究の成果は満足できるものとは言い難い。

本研究で目標とした、太陽系形成環境を記憶していると考えられる隕石試料を用いた研究は、今後重点的に推進されるべき課題であると考ええる。分析などの研究体制は整っているので、実験用原子炉の再稼働が可能となれば更なる進展が期待される。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計13件)

①Miura Y. N., Nagao K., and Kimura M. (2014) Noble gases in individual chondrules of the Allende CV3 chondrite. *Meteoritics & Planetary Science* **49**, 1037–1056. (査読あり)

②Popova O.P., et al. (the Chelyabinsk Airburst Consortium) (59名中56番) (2013) Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization, *Science* **342**, 1069–1073. (査読あり)

③Jenniskens P. et al. (the Sutter's Mill Meteorite Consortium) (70名中48番) (2012) Radar-enabled recovery of the Sutter's Mill meteorite, a carbonaceous chondrite regolith breccia. *Science* **338**, 1583–1587. (査読あり)

④Nagao K., et al. (26名中1番) (2011) Irradiation history of Itokawa regolith material deduced from noble gases in the Hayabusa samples. *Science* **333**, 1128–1131. (査読あり)

⑤Bajo K., Akaida T., Ohashi N., Noguchi T., Nakamura T., Nakamura Y., Sumino H., and Nagao K. (2011) Single grain noble gas analysis of Antarctic micrometeorites by stepwise heating method with a newly constructed miniature furnace. *Earth, Planets and Space* **63**, 1097–1111. (査読あり)

[学会発表] (計32件)

①Nagao K., Haba M. K., Zolensky M., Jenniskens P., and Shaddad M. H. (2014) Noble gases in two fragments of different lithologies from the Almahata Sitta meteorite. *77th Annual Meteoritical Society Meeting*, 5204.pdf, Casablanca, Morocco

②Yoshida S, Mikouchi T., Nagao K., Haba M. K., Hasegawa H., Komatsu M., and Zolensky M. E. (2014) Mineralogical variation of Chelyabinsk with depth from the surface of the meteoroid. *45th Lunar and Planetary Science Conference*, 2509.pdf, Houston, USA

③Haba M. K., Sumino H., Nagao K., Mikouchi T., Komatsu M., and Zolensky M. E. (2014) Noble gases in the Chelyabinsk meteorite. *45th Lunar and Planetary Science Conference*, 1732.pdf, Houston, USA

④Nagao K., Okazaki R., Miura Y.N., Osawa T., Haba M. K., Tobimatsu Y., Gilmour J., and Nishimura Y. (2013) Solar noble gases in eight Hayabusa samples from Itokawa's surface with short duration of cosmic ray exposure (Abstract). *HAYABUSA2013: Symposium of Solar System Materials*, 16-18 October 2013, JAXA-ISAS, Japan

⑤Righter K., Fries M. D., Gibson E. K., Harrington R., Kel-ler L. P., McCoy T. J., Morris R.V., Nagao K., Nakamura-Messenger K., Niles P., Nyquist L., Park J., Peng Z.X., Shih C.-Y., Simon J.I., Zeigler R.A. (2013) Consortium study of the Chelyabinsk meteorite. *76th Annual Meteoritical Society Meeting*, 5235.pdf, Edmonton, Canada

⑥Kobayashi M., Sumino H., Saito T., Nagao K., Ishimaru S., Arai S., Yoshikawa M., Kawamoto T., Kumagai Y., Kobayashi T., Burgess R. and Ballentine C.J. (2013) Slab-derived halogens and noble gases in mantle peridotites from subduction zones. *IAVCEI 2013 Scientific Assembly* (Kagoshima, Japan) 1W_1A-P33

⑦Kobayashi M., Sumino H., Nagao K., Ishimaru S., Arai S., Yoshikawa M., Kawamoto T., Kumagai Y., Kobayashi T., Burgess R. and Ballentine C.J. (2013) Subducted halogens and noble gases in the mantle wedge peridotites. *23rd Annual V.M. Goldschmidt Conference* (Florence, Italy) *Mineralogical Magazine*, 77(5), 1484

⑧Nagao K., Okazaki R., Miura Y.N., Osawa T., Gilmour J., and Nishimura Y. (2013) Noble gas analysis of two Hayabusa samples as the first international A/O investigation: a progress report. *44th Lunar and Planetary Science Conference*, 1976.pdf, Houston, USA

⑨Shirai N., Ebihara M., Sekimoto S., Yamaguchi A., Nyquist L., Shih C.-Y., Park J., and Nagao K. (2012) Geochemistry of lunar highland meteorites MIL 090034, 090036 and 090070. *43rd Lunar and Planetary Science Conference*, 2003.pdf, Houston, USA

⑩Nagao K., Okazaki R., Nakamura T., Miura Y. N., Osawa T., Bajo K., Matsuda S., Ebihara M., Ireland T. R., Kitajima F., Naraoka H., Noguchi T., Tsuchiyama A., Uesugi M., Yurimoto H., Zolensky M. E., Shirai K., Abe M., Yada T., Ishibashi Y., Fujimura A., Mukai T., Ueno M., Okada T., Yoshikawa M., Kawaguchi J. (2011) Solar Noble Gases in Itokawa Regolith Materials Returned by the Hayabusa Mission. *74th Annual Meeting of the Meteoritical Society*, #5238.pdf. Greenwich, London, UK

[図書] (計4件)

①長尾敬介・角野浩史、化学同人、同位体の科学 (分担執筆)、現代質量分析学—基礎から応用まで—、高山光男、早川滋雄、瀧浪欣彦、和田芳直編、2013、107-117.

②角野浩史・長尾敬介、化学同人、宇宙地球科学における同位体 (分担執筆)、現代質量分析学—基礎から応用まで—、高山光男、早川滋雄、瀧浪欣彦、和田芳直編、2013、441-464.

③長尾敬介、朝倉書店、希ガス元素 (分担執筆)、地球と宇宙の化学事典、日本地球化学会編、2012、400-401

④長尾敬介、国際文献印刷社、同位体の質量分析 (分担執筆)、質量分析の源流—基礎から学ぶマスマスベクトロメトリー—、平岡賢三編著、2011、209-253

[その他] (アウトリーチ: 講演 15 件)

①Nagao K. (2014) Noble gas study of the Chelyabinsk meteorite fell on February 15, 2013 in Russia. Seminar at KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), Daejeon, Korea, April 3.

②Nagao K. (2014) Noble gas study of Itokawa Samples Returned by the Hayabusa Spacecraft. Lecture at the Daejeon University, Daejeon, Korea, April 3.

③長尾敬介 (2012) 微小な宇宙物質から太陽系の成り立ちを探る～はやぶさサンプルリターン計画～. 科学の祭典～科学の甲子園東京都大会・講演会～, 東京都立日比谷高等学校, 主催・東京都教育委員会, 11月18日.

④長尾敬介 (2012) はやぶさと宇宙物質分析のすごさ. 日本学術会議 (化学委員会・分析化学分科会) 講演会, 夏期の高校生対象の講演会, 8月7日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長尾 敬介 (NAGAO, Keisuke)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号: 40131619

(2) 研究分担者

角野 浩史 (SUMINO, Hirochika)

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号: 90332593

(3) 連携研究者

該当なし