

平成 30 年 4 月 24 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17791

研究課題名(和文) 隕石の多元素同位体分析から原始太陽の挙動を理解する

研究課題名(英文) Activity of the proto-Sun revealed by multi-isotope analyses

研究代表者

馬上 謙一 (Bajo, Ken-ichi)

北海道大学・理学研究院・助教

研究者番号：70624758

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)：本研究はNaを含む火成メリライトの成因を鉱物組成・化学組成から把握したうえで、二次イオン質量分析装置(SIMS)及び希ガス質量分析装置を用いた同位体分析を行った。Allende隕石中の火成メリライトに対し、同位体分析を行った。Be-B系ではBe-10の過剰が見られ、先行研究の結果と比較するとこのCAIは典型的なBe-10を保持していたCAIであることが分かった。またAl-Mg年代は最古のCAIよりも9万年ほど若い年代を示した。希ガス同位体分析では、Ne-22の過剰が見つかり、このCAIは太陽起源の高エネルギー粒子の照射によってNa-22がCAI形成領域で生成されていたことが明らかにできた。

研究成果の概要(英文)：Ca-Al-rich inclusions (CAIs) in primitive chondrite meteorites contain detectable amounts of extinct nuclides such as  $^{26}\text{Al}$  (half life of 0.705 Myr) and  $^{10}\text{Be}$  (half life of 1.36 Myr). Especially, excess  $^{10}\text{Be}$  in CAIs, which would have been produced by solar cosmic ray (SCR) spallation, suggests that the proto-sun was more radiative than the present sun [1]. The intense SCRs could also produce  $^{22}\text{Na}$ , which decays to  $^{22}\text{Ne}$  (half life of 2.61 yr), from Mg, Al, and Si via spallation reaction. As sodium is a minor element composing melilite crystals of igneous CAIs [2, 3], excess  $^{22}\text{Na}$  could be found in CAIs formed at the early stage of the solar system evolution. However, such CAIs with excess  $^{22}\text{Ne}$  derived from  $^{22}\text{Na}$  have not been observed. Here, we report the excess in  $^{22}\text{Ne}$  in an igneous CAI from Allende CVox.

研究分野：同位体宇宙科学

キーワード：希ガス同位体 二次イオン質量分析 消滅核種 原始太陽 太陽宇宙線

## 1. 研究開始当初の背景

始原的な隕石に含まれる Ca と Al に富む岩石 (CAI) には  $^{26}\text{Al}$  (半減期 70.5 万年),  $^{10}\text{Be}$  (半減期 140 万年) に代表される短寿命消滅核種の痕跡が記録されている (MacPherson, 2014, in *Treatise on Geochem.*). 特に, CAI からの  $^{10}\text{Be}$  の発見は太陽からの高エネルギー粒子 (Solar Cosmic Rays: SCRs) が太陽始原物質に照射され, 原子核反応が起こっていたことを裏付ける結果であり, 当時の太陽は現在に比べ活動的であったと考えられている (McKeegan et al., 2000, *Science*). また, 太陽程度の質量を持つ恒星の X 線観測によると, 原始太陽進化におけるある時期に, それら恒星の X 線放出量が極めて大きくなる期間があることが示されている (Feigelson et al., 2002, *ApJ*). それらの恒星が放出するエネルギーは現在の太陽の 10 万倍以上であると見積もられており, 太陽でも同様の活動的な期間を経ていたと考えられている。原始惑星円盤において SCR 照射場として有力な候補となっているのが, 中心星近くの星雲ガスのない領域である。そこでは磁場リコネクションに伴う SCR 射が起こると予測されている (Shu et al., 1997, *Science*). この領域において, SCR が CAI 前駆物質に照射され核破砕反応を主とする核反応が起こる。そこで  $^{10}\text{Be}$  などの核種が生成されたと考えられている。核破砕反応はターゲットと生成核種との原子量差が小さいほど生成率が高くなる (Honda, 1962, *JGR*). また, CAI 前駆物質中には主要元素として Al, Mg, Si が含まれている。もし, CAI 前駆物質に SEP が照射されていたのであれば短寿命核種である  $^{22}\text{Na}$  (半減期 2.6 年で  $^{22}\text{Ne}$  に崩壊) も生成されていたはずである。 $^{22}\text{Na}$  は  $^{10}\text{Be}$  と比べ半減期が極めて短いため,  $^{22}\text{Na}/^{23}\text{Na}$  初生比を知ることができれば, CAI に取り込まれた消滅核種が短期間で生成されたものか, ある期間定常的に作られていたかを明らかにすることが出来る。もし, 短期的な元素合成が行われていたとしたならば  $^{22}\text{Na}$  が崩壊する前に CAI に取り込まなければならないため  $^{22}\text{Na}/^{23}\text{Na}$  比は大きくなる。一方, 定常的なものであればこの比は小さくなる。しかしながら, これまでの研究では  $^{22}\text{Na}$  の痕跡は CAI 中から見つかっていなかった (例えば, Vogel et al., 2004, *MAPS*).

## 2. 研究の目的

上記のように, CAI 形成領域での原子核反応による  $^{10}\text{Be}$  および  $^{22}\text{Na}$  生成を考えることで当時の SEP 照射領域で起きた現象を詳細に議論することが出来ると考えた。特に,  $^{22}\text{Na}$  に注目し, CAI 中の Na に富む鉱物を対象にした局所同位体分析によって原始太陽の挙動の理解を深めることを目的とした。

## 3. 研究の方法

炭素質コンドライトに含まれる CAI 中の Na

を含む鉱物の Ne 同位体組成を測定する。CAI には Na を含む鉱物がいくつかあり, Type-B CAI 中には普遍的に Na を含むメリライトが存在している。メリライトの Na は母天体中での二次変性でなく円盤内での加熱中に取り込んだものである (以降, 火成メリライトとする) (MacPherson and Davis, 1993, *GCA*; Simon and Grossman, 2006, *GCA*). 希ガスである Ne はこの時の加熱によって脱ガスしている, その後,  $^{22}\text{Na}$  の壊変によって  $^{22}\text{Ne}$  がメリライト中に蓄積される。

試料に用いる CAI の鉱物・化学組成を観察していき, 火成メリライトを探し出す。この火成メリライトについて局所 Be-B 同位体分析を行い,  $^{10}\text{Be}$  の過剰があればこの CAI (もしくはその前駆物質) に SCR 照射が起きていたことになる。また, Al-Mg 年代測定を同時に行うことが出来るので, 各 CAI の形成年代を求め, それらの年代差から SCR の照射期間が見積もることが出来る可能性がある。Al-Mg と Be-B 同位体系は初期太陽系の年代測定に使われているが, それぞれの年代系では合致しない点も見られる (e.g., Wielandt et al., 2012, *ApJ*), 同一プロセスで形成したメリライトの Be-B-Al-Mg 分析は, この年代システム不一致の原因を考察する上で貴重な基礎データとなる。最後に行う Ne 同位体分析は微量希ガス分析法を用いて, メリライトから希ガスを抽出・分析する。火成メリライトの Ne 同位体組成を解析することで初生  $^{22}\text{Na}/^{23}\text{Na}$  比を求める。

以上のようにして, CAI 形成期に起こった SCR 照射起源核種の  $^{22}\text{Na}$  生成量を明らかにして, 原始太陽から放出される SCR の照射タイムスケールを解明することが目的である。

## 4. 研究成果

Allende 隕石中に発見した compact Type-A CAI (以下, BaCA01) を試料として用いた。この CAI の反射電子像および Mg, Ca, Al の X 線強度をそれぞれ RGB に反映させた RGB マップを図 1 に示す。図 1b において, メリライトはエメラルドグリーン箇所である。このメリライトのほかに, スピネル, ペロプスカイト, ファッサイトが少量存在している。二次イオン質量分析装置 (SIMS) を用いて, Na 濃度の測定, Al-Mg 年代測定, Be-B 同位体分析を行った。Na 濃度はどれも 0.1% を下回っており, 典型的には 80 ppm 程度であった。Al-Mg 年代測定はゲーレンナイトに比較的富む組成であったため, 精度の良い結果を得ることができた (図 2)。初生  $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$  比は  $(4.81 \pm 0.11) \times 10^{-5}$  となり, 一般的な CAI の Al-Mg 年代と同程度であった。カノニカル年代とされている  $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} = 5.2 \times 10^{-5}$  と比較すると 9 年ほど若い年代を示した。

Be-B 同位体測定において,  $^{10}\text{Be}$  の過剰が確認できた。 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$  初生比はアイソクロンから  $(5.1 \pm 1.0) \times 10^{-4}$  となった (図 3)。この初生比は先行研究で得られていた初生比 (Wielandt et al.

2012, GCA)と同程度であった．分析を行うにあたり，地球上での $^{10}\text{B}$ のコンタミネーションを十分に考慮しなければ正しい Be-B 同位体分析は難しいことがわかった．これは先行研究(例えば, Sugiura et al., 2001, MAPS)でも言及されているように CAI 起源で $^{10}\text{Be}$ 由来ではないの $^{10}\text{B}$ が極めて少ないことに起因する．本研究で得られた B 濃度は数 ppb 程度かそれ以下であった．

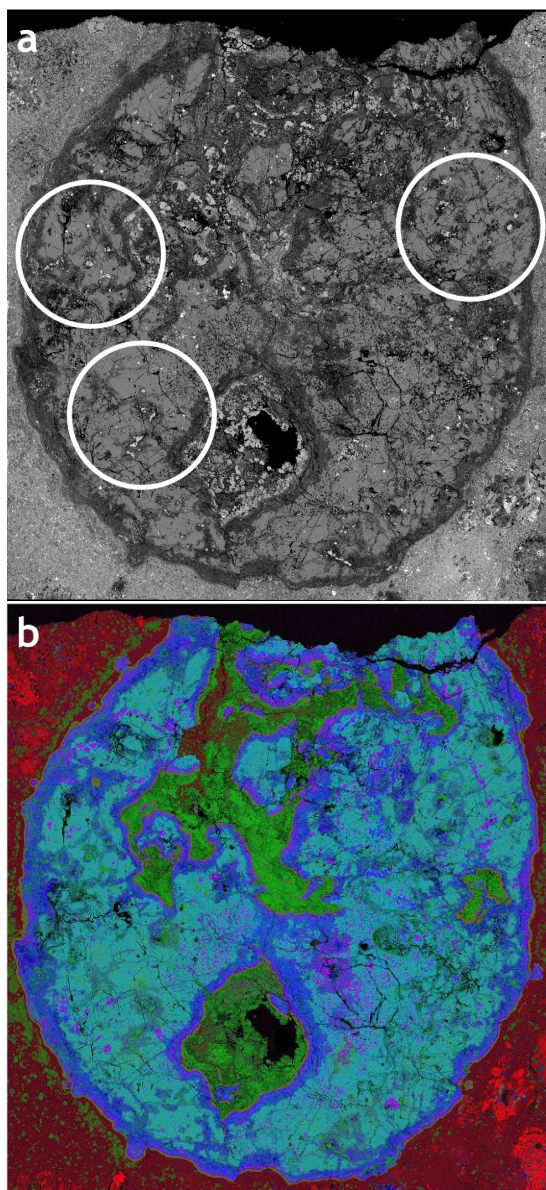


図 1a .BaCA01 の反射電子像 .1b .BaCA01 の RGB マップ(R: Mg , G: Ca , B: Al) .

希ガス同位体分析の結果， $^{22}\text{Ne}$ の過剰を発見することができた．得られた Ne 同位体比の中で最低の値は， $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} = 0.09 \pm 0.08$ ， $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} = 0.06 \pm 0.01$ と極めて低い同位体比となった．図 4 に示すように，すべての Ne 同位体比測定値は一般的な宇宙線照射で生成される同位体比( $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} \sim 0.9$ ， $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} \sim 0.9$ )と比べて低くなった．また，隕石構成鉱物に Na が豊富な鉱物(例えば長石やソーダ石)があると， $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 比は低くなるが，最低でも $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} = 0.5$ までしか下がらない

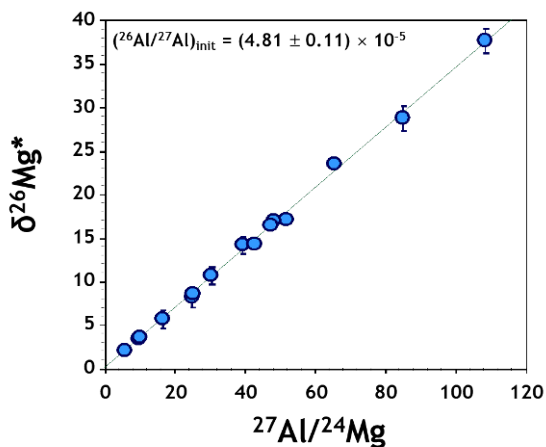


図 2 .BaCA01 メリライトの Al-Mg アイソクロン .  $\delta^{26}\text{Mg}^*$ は放射壊変起源 $^{26}\text{Mg}$ の過剰を示す .

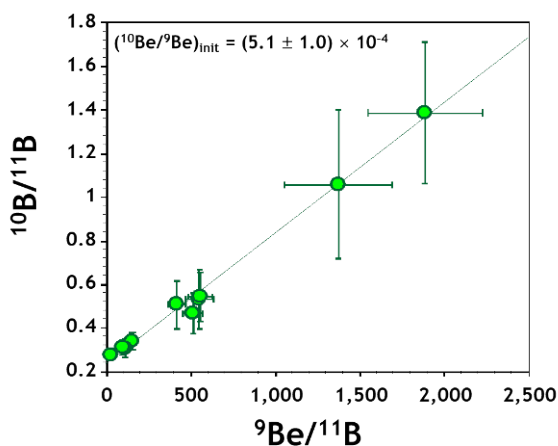


図 3 . Be-B アイソクロン .

め，BaCA01 の $^{22}\text{Ne}$ は宇宙線照射起源だけでなく消滅核種である $^{22}\text{Na}$ が原始太陽から放射されていた SCR によって生成され，CAI 形成時にメリライトに取り込まれ，それが放射壊変し， $^{22}\text{Ne}$ になっていたことが分かった．また，Allende 隕石としての宇宙線照射起源 $^{22}\text{Ne}$ 以外の過剰 $^{22}\text{Ne}$ を， $^{22}\text{Na}$ 壊変起源と仮定して $^{22}\text{Na}$ 濃度を計算すると，平均値で 20 ppt であった．以上より，Ne と Na が CAI 形成時から閉鎖系であったとすれば，初生 $^{22}\text{Na}/^{23}\text{Na}$ 比は $3 \times 10^{-7}$ となった．

この初生 $^{22}\text{Na}/^{23}\text{Na}$ 比を Leya et al. (2003) ApJ で提唱されている原始太陽近傍で起こる SCR 照射起源核種の生成率の計算モデルに当てはめると， $10^{-7}$ という $^{22}\text{Na}/^{23}\text{Na}$ 比を作るには比較的短い期間に大量の SCR の照射が必要であることがわかった．具体的には，100 年間で $10^{16} \text{ cm}^{-2}$ の SCR 照射が起こると，この初生比を作ることができた．

以上のように，原始太陽の SCR 起源 $^{22}\text{Na}$ の痕跡を Ne 同位体分析から明らかにすることができた．また，初生 $^{22}\text{Na}/^{23}\text{Na}$ 比から，原始太陽の活動の描像のスナップショットを得ることができる可能性が高い．そこで，今後は測定する CAI を増やし，Al-Mg 年代と

$^{22}\text{Na}/^{23}\text{Na}$  比に相関はあるか、また、 $^{22}\text{Ne}$  の異常が火成メリライトに普遍的に存在するものであるかなどを引き続き研究していく予定である。

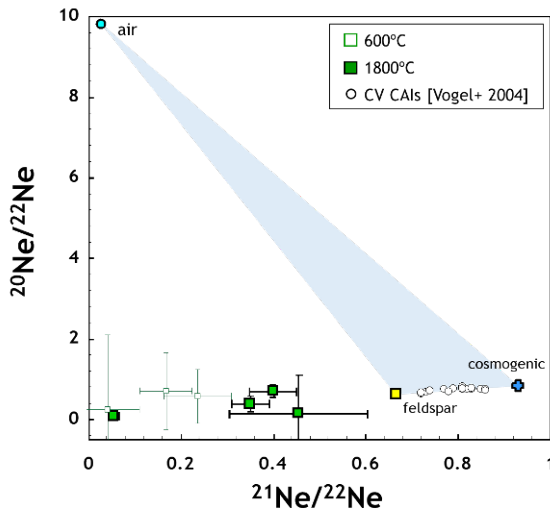


図 4 . Ne 同位体プロット . Feldspar は Smith and Huneke (1975) GCA による .

#### 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 0 件 )

〔 学会発表 〕 ( 計 1 件 )

K. Bajo, N. Kawasaki, R. Okazaki, and H. Yurimoto, Spallogenic  $^{22}\text{Na}$  in an Allende Ca-Al-rich inclusion , Solar System Symposium in Sapporo (3S 2018), Rusutsu, Japan , (February 2018)

〔 図書 〕 ( 計 0 件 )

〔 産業財産権 〕

出願状況 ( 計 0 件 )

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年月日 :  
国内外の別 :

取得状況 ( 計 0 件 )

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :

取得年月日 :

国内外の別 :

〔 その他 〕

ホームページ等

#### 6 . 研究組織

##### (1) 研究代表者

馬上 謙一 (BAJO , Ken-ichi )

北海道大学・大学院理学研究院・助教

研究者番号 : 70624758

##### (2) 研究分担者

( )

研究者番号 :

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号 :

##### (4) 研究協力者

岡崎 隆司 (OKAZAKI , Ryuji )

川崎 教行 (KAWASAKI , Noriyuki )