地球化学 **43**, 133-142 (2009) Chikyukagaku (Geochemistry) **43**, 133-142 (2009)

総説

# CH3コンドライト SaU 290のコンドリュールの 希ガス同位体組成

## 中嶋大輔<sup>\*,#</sup>·長尾敬介\*

(2009年1月31日受付, 2009年5月12日受理)

# Noble gas compositions of individual chondrules from the SaU 290 CH3 chondrite

Daisuke NAKASHIMA<sup>\*, #</sup> and Keisuke NAGAO<sup>\*</sup>

\* Laboratory for Earthquake Chemistry, Graduate School of Science, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

<sup>#</sup> Present address: Wisc SIMS Laboratory, Department of Geoscience, University of Wisconsin-Madison, 1215 W, Dayton St., Madison, WI 53706, USA

More than 300 small chondrules (50-200  $\mu$ m) were found in the Sayh al Uhaymir (SaU) 290 CH3 chondrite which is a solar wind noble gas bearing meteorite and shows a brecciated texture. We analyzed noble gases in the individual chondrules using a laser ablation noble gas extraction system which enables to reduce blank noble gases. Isotopic ratios of He and Ne show no clear evidence of solar wind exposure, suggesting that the chondrules have not been exposed to solar winds. A chondrule shows an excess of cosmogenic <sup>3</sup>He relative to other chondrules, which is explained by cosmic-ray exposure on the parent body. The derived parent exposure age is longer than 2.0 Ma, while the space exposure age is estimated as 1.4 Ma.

Key words: meteorite, chondrule, noble gases, laser ablation, solar winds, cosmic-rays

### 1.序 論

コンドリュールとは、ケイ酸塩鉱物からなる直径数 mm 程度の球粒物質であり、始源的隕石(コンドラ イト)の主要構成物質である。球状であること、ガラ スを含むこと、放射性同位体に基づく形成年代が45.6 億年(Amelin et al., 2002)を示すことから、コンド リュールは太陽系形成初期に宇宙空間で溶融・急冷を 経て形成されたと考えられている。地球に落下する隕 石の大部分がコンドライトであること、ほぼ全てのコ ンドライトにコンドリュールが含まれることを考える と、コンドリュール形成は初期太陽系における大規模 な加熱現象に起因すると考えられる。これまでに提案 されている主要なコンドリュール形成モデルとして は、星雲ガスとコンドリュール前駆物質(塵)との相 対速度によって生じる摩擦熱によりコンドリュールが 形成したという衝撃波モデル(Wood, 1984; Hood and Horanyi, 1993)や、太陽近傍での輻射熱により形成 したコンドリュールが X-wind というガス流によって 小惑星帯領域まで輸送されたという X-wind モデル (Shu et al., 1996)が挙げられる。いずれのモデルも 星雲ガス散逸前の熱的現象に由来する。一方で、金属 鉄に富む CB コンドライトのコンドリュールは、鉱物 学的観察及び放射性同位体年代測定から、星雲ガス散 逸後の大規模天体衝突によって形成されたとされてい る(Krot et al., 2005)。このようにコンドリュールは 様々な加熱現象によって形成された可能性がある。

Sayh al Uhaymir (SaU) 290隕石は15 vol%程度 の金属鉄を含み, CR-CH-CB コンドライト的な酸素

<sup>\*</sup> 東京大学大学院理学系研究科地殼化学実験施設 〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1

同位体比をもつことから, CH3コンドライトに分類 される (Park *et al.*, 2005 a)。CHコンドライトのコ ンドリュールの平均直径は50 µm であり (Scott and Krot, 2003), 他のコンドライトのコンドリュールに 比べて非常に小さい。また,表面の形状・サイズとも に月ソイルの衝撃溶融ガラス球 (Levine *et al.*, 2004) に類似している。CHコンドライトのコンド リュールは, CBコンドライトコンドリュール同様に 天体衝突によって形成された可能性がある (Wasson, 1988)。一方で,ある CHコンドライトコンドリュー ルが非常に<sup>16</sup>O に富む始源的な酸素同位体組成を示す という報告がある (Kobayashi *et al.*, 2003)。このよ うに CH コンドライトのコンドリュールは,二次的 生成物の可能性を持ちながら,始源的な側面を示す特 殊なコンドリュールであるといえる。

SaU 290には太陽風起源の希ガスが含まれるという 報告がある(Park *et al.*, 2005 a, b)。また,研磨薄片 を観察すると角礫岩構造がみられる。以上のことか ら, SaU 290は regolith breccia であると考えられる。

低エネルギー粒子(~数KeV)である太陽風は, 物質表面までしか打ち込まれない (<1µm; Walker, 1980)。従って、太陽起源希ガスは隕石表面、もしく は隕石母天体表面に打ち込まれるはずである。しか し, 隕石表面の太陽起源希ガスは大気圏突入時の加熱 により失われる。隕石内部から太陽起源希ガスが検出 されるということは, その隕石構成物質が母天体形成 以前に宇宙空間で,或いは母天体表層において太陽風 に曝されたことを意味する。SaU 290も母天体表層に おいて太陽風に曝されたと考えられる(角礫岩構造を 示すため)。隕石・隕石母天体には、太陽風の他に銀 河宇宙線という高エネルギー粒子(数 GeV; Walker, 1980)が打ち込まれる。銀河宇宙線と隕石構成物質 中の元素が核破砕反応(および二次中性子捕獲反応) を起こし、宇宙線起源核種が生成される。宇宙線起源 希ガスもこの反応で生成される。銀河宇宙線は物質表 面から1mかそれ以上の深さまで打ち込まれる

(Walker, 1980)。従って, SaU 290は, 母天体表層 において太陽風だけでなく銀河宇宙線にも曝されたは ずである (parent body exposure)。隕石として地球 に飛来する間にも銀河宇宙線に曝されるので (space exposure), SaU 290は母天体表層と合わせて二段階 照射を経験したと考えられる。このような二段階照射 は regolith breccia に特徴的であり, その角礫岩構造 は parent body exposure 時の宇宙塵や隕石衝突によ り作られたと考えられる (e.g., Housen et al., 1979)。

SaU 290が太陽風照射や二段階の宇宙線照射を経験 したのであれば、その隕石に含まれるコンドリュール も同様の照射を経験しているはずである。Okazaki et al. (2001 a) は、太陽風起源希ガスを持つ他の隕石 では、その太陽風起源希ガスはマトリックスに濃集し ている可能性が高いと報告している。太陽風は物質表 面までしか打ち込まれないため、マトリックスのよう な細粒の物質では太陽風起源希ガスが検出しやすいと 考えられる。しかし、コンドリュール表面にも例外な く太陽風起源希ガスは打ち込まれているはずである。 CH コンドライトコンドリュール (平均直径50 µm) のような表面積/体積比の大きい物質であれば、太陽 風起源希ガスを検出できるはずである。加えて、本研 究で調べた SaU 290コンドリュールは非常にスムー スな表面をもちマトリックス物質の付着がみられない (Figs.1 and 2)。従って、付着したマトリックス物 質の影響(Nakamura et al., 2008)を考慮する必要 がない。抽出された希ガスは全てコンドリュール由来 とすることができる。そこで、本研究では、希ガス同 位体分析に基づく SaU 290コンドリュールの照射史 および SaU 290母天体表層進化過程について議論す る。前述のように CH コンドライトのコンドリュー ルは非常に小さく、抽出される希ガス量も極微量であ ると推測される。従って、高感度・低ブランクが要求 される。一般に、希ガスを抽出する際には、真空炉中 で試料を炉ごと加熱する。この場合、炉壁からも希ガ スが放出されるため、微小試料分析には不向きであ る。試料のみを加熱することが理想であり、これを実



Fig. 1 A photomicrograph of chondrules extracted from the SaU 290 CH3 chondrite.



Fig. 2 Backscattered electron images of chondrules, C16 (panel a) and C17 (panel b). In panel b, bright grains on the C17 chondrule are FeNi metal. SEM-EDS spectra of C16 (panel c) and C17 (panel d). The vertical axes correspond to intensities (14000 counts in panel c; 15000 counts in panel d).

現するのがレーザー加熱である(長尾, 2007; Osawa et al., 2000)。試料と同程度かそれ以下に絞ったレー ザーを照射し加熱・溶融する。これにより,試料のみ からの希ガス抽出が可能である。加えて,真空炉での 加熱と異なり,昇温時間を必要としない。従って, static 状態(排気を止めた状態)が短時間なことも低 ブランク化に寄与している(通常行なう真空炉での 1700°C 加熱・希ガス抽出では,昇温15分及び温度維 持30分程度。レーザー加熱時間は5分程度。)。以下で は、レーザー加熱による希ガス同位体分析の具体的な 手法について述べる。

#### 2. 希ガス同位体分析

SaU 290隕石1.5gを Freeze-thaw method (隕石試 料を水に漬けて氷結・解凍を繰り返すことで,水の凝 固時の体積膨張により,鉱物粒間から隕石を徐々に破 壊していく方法;50回程度)で破砕した。その破砕片 をシリンダーモルタルに入れて上からハンマーで叩く ことで更に細かく破砕した。その破砕粉から球粒物質 (コンドリュール)を三百個以上取り出した(Fig. 1)。光学顕微鏡で見るコンドリュールの大部分は, 無色透明から白濁,僅かに黄色がかった透明であっ た。黒色不透明なものもみられた。コンドリュールの サイズは50~200 µm であり,殆どは100 µm 程度で あった。これらのうち、17個(透明なものが13個, 不透明なものが4個)を希ガス同位体分析に用いた。 僅かにマトリックス物質が付着しているものがあった ため、それらをエタノール(または水)に入れ、超音 波洗浄機で30分から1時間程度グラインディングする ことでマトリックス物質を除去した。その後、コンド リュールをカーボンテープに直接置き、走査型電子顕 微鏡(SEM)観察を行なった。分析時の加速電圧は10 kVであった。同時にエネルギー分散型X線分光計 (EDS)による定性分析を行なった(コンドリュー ル表面数ミクロン程度の化学組成)。その際、炭素化 合物による希ガス精製ラインの汚染を防ぐため、炭素 蒸着は行っていない。また、SEM観察後のコンド リュールに付着したカーボンテープ片はピンセット等 で取り除いている。

コンドリュールを秤量した後 (2.6~10.4 µg), 直 径2.5 cm・高さ5 mm のサンプルホルダーの穴一つ (直径1mm・深さ3mm) につきコンドリュールー つを入れ、このサンプルホルダーを入れたサンプル チャンバー (ビューポート付き70 *ϕ* CF フランジ) 全 体を150°C程度で24時間程度加熱し吸着希ガスを除 去した。希ガス抽出には、Nd-YAG レーザー(波長 1064 nm)を用いた。直径30 µm に絞ったレーザー を2.5~2.6 Wの連続波にして5分程度照射することで コンドリュールを加熱溶融し、希ガスを抽出した。抽 出された希ガスを,精製ラインにおいて Ti-Zr ゲッ ターで純化し、クライオトラップで He 以外の希ガス を吸着した。He の絶対量と同位体比を希ガス質量分 析計で測定した。続いて、クライオトラップを段階的 に昇温することで Ne, Ar の順に解放し、それらの絶 対量と同位体比を順次測定した(Ar 分析時に<sup>84</sup>Kr, <sup>132</sup>Xe 絶対量のみ測定)。各元素の感度および同位体分 別補正係数は、地球大気及び He スタンダード(<sup>3</sup>He /<sup>4</sup>He=1.71×10<sup>-4</sup>)を測定することにより求めた。ブ ランクは、それぞれ、<sup>4</sup>He~3.1×10<sup>-12</sup>cm<sup>3</sup>、<sup>20</sup>Ne~6.7  $\times 10^{-13} \text{cm}^3$ ,  ${}^{36}\text{Ar} \sim 6.8 \times 10^{-14} \text{cm}^3$  ( ${}^{40}\text{Ar} \sim 2.1 \times 10^{-11}$ cm<sup>3</sup>) であった。これらの値を用いて, 各コンドリュー ルの希ガスのブランク補正を行なった。コンドリュー ルの Kr, Xe 量はブランクレベルであったため、議論 の対象としていない。希ガス同位体比に伴う誤差は全 て1σである。

#### 3.結果

コンドリュールの反射電子像を Fig. 2に示す。Fig.

2 a に示すように, 殆どのコンドリュールがスムース な表面をもつ一方で, ざらつきのあるものや表面に僅 かに金属鉄が付着しているものもある (Fig. 2 b)。マ トリックス物質が付着している様子はほとんどないた め, これらのコンドリュールから抽出された希ガスは 全てコンドリュール由来とみることができる。コンド リュール表面の EDS スペクトルは, Si ピークが最も 高く, 次いで Mg ピークが高くみられた (Figs. 2 c and 2 d)。僅かに Ca や Fe ピークを示すコンド リュールもあったが,総じて Low-Ca pyroxene 的 (Fe-poor)であった。光学顕微鏡でみられたコンド リュールの色や透明度の違いと EDS スペクトルとの 間に関連性はみられなかった。

Fig. 3は、Ne の三同位体図である。Ne 同位体比の 多くは、地球大気 Ne と宇宙線起源 Ne の間に分布す る。これらのコンドリュールが本来保持していたのは 宇宙線起源 Ne のみである。一部、太陽風 Ne にシフ トしているものがある (C7; Table 1)。太陽風 Ne と 宇宙線起源 Ne との混合ともとれるが、誤差が大きく 断定できない。地球大気 Ne と宇宙線起源 Ne との混 合であると考えてもよい。以上のように、Ne 同位体 比から、太陽風照射の明確な痕跡はみられなかった。

Fig. 4には, He 同位体比及び<sup>4</sup>He 濃度を示してい る。<sup>4</sup>He 濃度が増加するにつれて<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 比が減少し ている。この傾向は, 宇宙線起源 He (<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He~0.2 in stone meteorites; Wieler, 2002) に U・Th の α 壊 変起源 He が寄与することでできたと考えられる。一 方で,太陽風 He の寄与による可能性も挙げられる。 太陽風起源希ガスは物質表面に打ち込まれるので,サ イズの小さい (表面積/体積比が大きい;密度一定で



Fig. 3 Ne three isotope diagram. Ne isotopic ratios of solar component ( $^{20}$ Ne/ $^{22}$ Ne,  $^{21}$ Ne/ $^{22}$ Ne)<sub>Solar</sub> = (11.2-13.8, 0.0295-0.0328) are from Benkert *et al.* (1993), and those of Air ( $^{20}$ Ne/ $^{22}$ Ne,  $^{21}$ Ne / $^{22}$ Ne)<sub>Air</sub> = (9.80, 0.0290) from Eberhaldt *et al.* (1965). Those of the SaU 290 bulk sample (Park *et al.*, 2005 b) are shown for comparison.

Table 1	Concentrations and isotopic ratios of noble gases in the individual chondrules
	from the SaU 290 CH3 chondrite.

	Mass	<sup>4</sup> He	<sup>3</sup> He/ <sup>4</sup> He	<sup>20</sup> Ne	20Ne/22Ne	<sup>21</sup> Ne/ <sup>22</sup> Ne	<sup>36</sup> Ar	- <sup>38</sup> Ar/ <sup>36</sup> Ar	$40  \Lambda r / ^{36}  \Lambda r$	<sup>3</sup> He
	μg	10 <sup>-5</sup> cm <sup>3</sup> /g	10-4	10 <sup>-8</sup> cm <sup>3</sup> /g	ive/ ive	ine/ ine	10 <sup>-8</sup> cm <sup>3</sup> /g			10 <sup>-8</sup> cm <sup>3</sup> /g
C1	5.4	1.23	$15.45 \pm 0$	.77 6.81	$6.24 \pm 1.44$	$0.361 \pm 0.067$	2.41	$0.171 \pm 0.079$	$171 \ \pm \ 20$	1.90
C2	4.7	2.07	$9.52 \pm 0$	.79 3.25	$5.30 \hspace{0.2cm} \pm \hspace{0.2cm} 1.83$	$0.374 \pm 0.131$	4.01	$0.170 \pm 0.035$	$6012 \hspace{0.2cm} \pm \hspace{0.2cm} 213$	1.97
C3	6.3	1.61	$12.00 \pm 0$	.81 2.79	$5.25 \pm 1.51$	$0.524 \hspace{0.2cm} \pm \hspace{0.2cm} 0.138$		n.d.		1.93
C4	9.3	1.87	$10.74 \pm 0$	.56 2.06	$2.54 \hspace{0.1in} \pm \hspace{0.1in} 0.83$	$0.783 \pm 0.100$	1.00	$0.167 \pm 0.092$	$547 \hspace{0.2cm} \pm \hspace{0.2cm} 25$	2.01
C5	6.7	5.44	$8.75 \pm 0$	.41 15.4	$5.99 \hspace{0.2cm} \pm \hspace{0.2cm} 0.46$	$0.330\ \pm\ 0.049$	2.06	$0.228 \hspace{0.2cm} \pm \hspace{0.2cm} 0.111$	$354 \pm 20$	4.75
C6	3.8	2.71	$7.93 \pm 0$	.74 4.16	$5.58 \pm 2.16$	$0.309 \ \pm \ 0.097$	5.15	$0.188 \pm 0.039$	$202 \ \pm \ 14$	2.15
C7	2.9	1.87	$13.63 \pm 1$	.27 3.71	$6.20 \hspace{0.2cm} \pm \hspace{0.2cm} 2.63$	$0.571 \pm 0.273$	1.79	$0.237 \pm 0.139$	$195 \ \pm \ 49$	2.55
C8	2.7	1.97	$11.70 \pm 0$	.98 2.52	$4.68 \hspace{0.2cm} \pm \hspace{0.2cm} 3.13$	n.d.	2.03	n.d.	$224 \ \pm \ 37$	2.31
С9	10.4	2.10	$11.96 \pm 1$	.00 1.00	n.d.	$0.724 \pm 0.141$	3.77	$0.204 \pm 0.017$	$9327 \hspace{0.2cm} \pm \hspace{0.2cm} 265$	2.51
C10	4.3	3.02	$8.69 \pm 0$	.78	n.d.		1.30	$0.110\ \pm\ 0.042$	$131 \pm 33$	2.62
C11	6.2	1.86	$18.23 \pm 1$	.60 3.88	$2.58 \pm 1.47$	$0.697 \pm 0.091$	0.883	$0.245 \pm 0.035$	$428 \pm 32$	3.40
C12	3.4	1.29	$15.94 \pm 1$	.37	n.d.		0.496	$0.215 \pm 0.086$	$362 \pm 61$	2.05
C13	2.6	2.17	$10.04 \pm 1$	.03	n.d.		1.52	$0.247 \hspace{0.2cm} \pm \hspace{0.2cm} 0.034$	$146 \ \pm \ 36$	2.18
C14	2.6	1.08	$21.14 \pm 2$	.12	n.d.			n.d.		2.28
C15	6.1	1.74	$15.08 \pm 1$	.16	n.d.		0.574	$0.273\ \pm\ 0.053$	$144 \ \pm \ 53$	2.62
C16	3.7	1.76	$12.29 \pm 1$	.38	n.d.		0.690	$0.228 \hspace{0.2cm} \pm \hspace{0.2cm} 0.057$	$189 \ \pm \ 61$	2.16
C17	6.4	1.36	$16.03 \pm 1$	.32 3.84	$4.52 \pm 1.97$	$0.561 \pm 0.104$	0.516	$0.237 \pm 0.057$	$107 \pm 59$	2.18

The errors in gas concentrations are less than 10 % (<sup>4</sup>He), 80 % (<sup>20</sup>Ne), and 80 % (<sup>36</sup>Ar) and include all errors of experiments, standard air, etc.

n.d. = not determined.



Fig. 4 Relationship between <sup>4</sup>He concentrations and <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He ratios. He isotopic ratio of solar component (<sup>3</sup>He /<sup>4</sup>He)<sub>Solar</sub> = 0.000217 -0.000457 are from Benkert *et al.* (1993). The <sup>4</sup>He concentration and <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He isotopic ratio of the SaU 290 bulk sample (Park *et al.*, 2005 b) are shown for comparison.

あれば質量の小さい) コンドリュールほど<sup>4</sup>He 濃度が 高くなるはずであるが、そのような傾向はみられない (Table 1)。太陽風起源 He の寄与は小さいと考えら れる。太陽風起源希ガスの濃度は時間の関数でもある ので、コンドリュール質量と<sup>4</sup>He 濃度の逆相関がみら れないのは,太陽風照射期間のばらつきに起因するこ とも考慮に入れる必要がある。太陽風起源希ガスの寄 与の大きい物質では、<sup>3</sup>He 濃度と<sup>4</sup>He 濃度に正の相関 がみられる (e.g., Hintenberger et al., 1970)。しか し、SaU 290コンドリュールでは、C 5 (4.8×10<sup>-8</sup>cm<sup>3</sup> /g; Table 1)を除いて、コンドリュール中の<sup>3</sup>He 濃度  $[(2.3\pm0.8)\times10^{-8}\text{cm}^{3}/\text{g}; \text{on average}; 2\sigma]$  it it is  $\mathcal{I}$ 定であり、<sup>3</sup>He 濃度と<sup>4</sup>He 濃度に相関はみられない。 このことからも、太陽風 He の寄与は小さいと考えら れる。従って、コンドリュール中の He 同位体比は、 宇宙線起源 He と放射壊変起源<sup>4</sup>He の混合で説明され る。

<sup>36</sup>Ar 濃度は0.5-5.2×10<sup>-8</sup>cm<sup>3</sup>/g (Table 1) であり, Okazaki *et al.* (2001 b) で調べられたエンスタタイ トコンドライトのコンドリュールの<sup>36</sup>Ar 濃度 (1-7× 10<sup>-6</sup>cm<sup>3</sup>/g) に比べて遙かに低い。エンスタタイトコ ンドライトコンドリュールの高濃度の<sup>36</sup>Ar は,その前 駆物質に打ち込まれた太陽起源希ガスのコンドリュー ル形成加熱時の不完全な脱ガス (He と Ne のみが大 きく散逸) に起因する (Ar-rich ガスと呼ばれる; e.g.,



Fig. 5 Ar three isotope diagrams. Ar isotopic ratios of Air ( ${}^{38}$ Ar/ ${}^{36}$ Ar,  ${}^{40}$ Ar/ ${}^{36}$ Ar)<sub>Air</sub> = (0.188, 296) are from Nier (1950). Those of the SaU 290 bulk sample (Park *et al.*, 2005 b) are shown for comparison.

Crabb and Anders, 1982)。SaU 290コンドリュール には、太陽風由来の Ar-rich ガスのような捕獲成分は 含まれていないと考えられる。<sup>38</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 比は誤差が非 常に大きく, 議論の対象にはできない (Fig. 5; Table 1)。<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 比の多くが地球大気の<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar (=296) 比よりも低いか同程度である (Fig. 5)。太 陽風起源希ガスを含む物質に特徴的な同位体比であり (SaU 290全岩の Ar 同位体比; Fig. 5),太陽風 Ar の 存在が示唆される。この場合, He・Ne でより明確に 太陽風起源希ガスの痕跡がみられるはずであるが、そ のような明確な痕跡はみられない。一方で、二つのコ ンドリュールが6000と10000という非常に高い値を示 した (Table 1)。これは、<sup>40</sup>K 放射壊変由来の<sup>40</sup>Ar の 影響であると考えられる。<sup>40</sup>Ar を全て放射壊変起源 40Ar であるとし (241-352×10<sup>-6</sup>cm<sup>3</sup>/g), コンドリュー ル形成年代を45億年と仮定すると、K濃度はそれぞ れ0.3 wt%と0.45 wt%と計算される。これらの値は コンドリュール全体での濃度であり、局所的に Kphase が存在するとすれば, spot mode の EDS で K のピークがみられるかもしれない。しかし、EDS ス ペクトルでは, Kのピークは見られなかった。コン ドリュール内部に K-phase があった可能性がある。 一般に、CH コンドライトのコンドリュールは Mn, Na, Kのような揮発性元素が枯渇しており、K<sub>2</sub>O濃 度はエレクトロンプローブマイクロアナライザの測定 限界以下 (~数百 ppm) である (Krot et al., 2007; references therein)。稀に、0.1~0.7 wt%の K<sub>2</sub>O 濃度

(K濃度で0.08~0.6 wt%)を示すコンドリュールが 存在する(Weisberg et al., 1988; Lawrence et al., 2004)。これらのコンドリュールに共通するのは主要 構成鉱物が low-Ca pyroxene であることと Na が比 較的多く含まれる(0.15~0.36 wt%)ことである (Weisberg et al., 1988; Lawrence et al., 2004)。高濃 度の<sup>40</sup>Ar を示したコンドリュールも low-Ca pyroxene を主成分とし(SEM-EDS では Low-Ca pyroxene 的 組成), Na や K といった揮発性元素に比較的富むコ ンドリュールであるかもしれない。一方, <sup>40</sup>Ar/<sup>66</sup>Ar 比 が低いコンドリュールは, Kが枯渇した一般的な CH コンドリュールであったか,もしくは放射壊変起 源<sup>40</sup>Ar の散逸を経験したかもしれない。

SaU 290コンドリュール中の<sup>4</sup>He を全て放射壊変起 源<sup>4</sup>He であるとし、コンドリュール形成年代を45億年 と仮定する。更に、Th/U比を~3.5(太陽組成; Anders and Grevesse, 1989)とすると、U濃度は6 ~32 ppbと算出される。一方で、一般的なコンド リュールのU濃度(7-100 ppb; Fleischer, 1968; Fireman et al., 1970; Hu et al., 1995; Whitby et al., 2000; Amelin et al., 2003)は大きくばらついている。 従って、SaU 290コンドリュールからの放射壊変起源 <sup>4</sup>He の散逸は否定できない。SaU 290コンドリュール の<sup>3</sup>He 濃度がC5を除いてほぼ一定であり、<sup>3</sup>He が space exposure の間に蓄積したことを考慮すると(次 章参照)、放射壊変起源<sup>4</sup>He の散逸が起こっていたと すれば、それは space exposure の前、即ち母天体上 でのプロセスによって散逸したと考えられる。

以上のように,SaU 290コンドリュールからは,太 陽風照射の明確な証拠は得られなかった。これらのコ ンドリュールは太陽風照射をほとんど経験しなかった と考えられる(次章参照)。

#### 4. 宇宙線照射

SaU 290コンドリュール中のHeは、宇宙線起源 He と放射壊変起源<sup>4</sup>He で説明される (Fig. 4)。即ち、 <sup>3</sup>He は全て宇宙線起源であるといえる。コンドリュー ル毎の<sup>3</sup>He 濃度を比較すると (Fig. 6)、一つのコンド リュールの<sup>3</sup>He 濃度 (C 5; 4.8×10<sup>-8</sup>cm<sup>3</sup>/g) が他に比 べて卓越している (~2×10<sup>-8</sup>cm<sup>3</sup>/g)。宇宙線起源希 ガスの濃度は、一般に宇宙線照射期間・遮蔽深度・標 的核種濃度・生成後に起こる脱ガスの程度に依存す る。しかし、宇宙線起源<sup>3</sup>He の生成速度は、標的核種 濃度に殆ど依存しない (Eugster, 1988)。加えて、表



Fig. 6 Cosmogenic <sup>3</sup>He concentrations in the SaU 290 chondrules. The errors of the concentrations are  $2\sigma$ .

面数ミクロン程度の化学組成ではあるものの, C5の EDS スペクトルは,他のコンドリュールのスペクト ルとほぼ同じであった。また,C16 (Fig.2a)のよ うにスムースな表面をもち,表面の状態・形状等で他 のコンドリュールとの違いはみられなかった。従っ て、<sup>®</sup>He 濃度のパラメータは照射期間・遮蔽深度・脱 ガスの程度ということになる。本研究で測定したコン ドリュールは全て1.5g(直径1 cm 程度)の試料から 採取した。これらのコンドリュールは,SaU 290の一 部として母天体を飛び出した際には既にこの1 cm の 中にあったということになる。僅か1 cm 程度の深さ の違いでは、宇宙線起源<sup>®</sup>He の生成速度は変わらない

(Leya *et al.*, 2000)。また,地球に飛来するまでの 照射期間は全てのコンドリュールで同じである。更 に,1cm内のコンドリュールが一つを残して全て脱 ガスすることは考えにくい。従って,C5の<sup>8</sup>He 濃度 の卓越は,地球に飛来する間に作られたものではない といえる。

SaU 290は、太陽風希ガスを含む隕石である(Park et al., 2005 a, b)。即ち, parent body exposure と space exposureの二段階照射を経験した隕石である (序論参照)。母天体表層では、太陽風や宇宙線だけ でなく、宇宙塵・隕石等が飛来し衝突する。これによ り、母天体表層物質は、破砕・撹拌される。表層物質 の位置する深さは、時々刻々変化するといえる。これ を SaU 290コンドリュールに当てはめると、C5は宇 宙線の影響の及ぶ範囲(深さ1mかそれ以上)に比較 的長い間滞在し、それ以外のコンドリュールは宇宙線 の及ばない深い場所(もしくは宇宙線起源<sup>3</sup>He 生成速 度が小さい場所)にあったと考えられる。以上のよう に, parent body exposure の間に宇宙線起源<sup>3</sup>He 濃度 の差が作られたと考えられる。

コンドリュールとマトリックスの宇宙線照射年代の 差から、母天体集積前のコンドリュールへの宇宙線照 射の有無が議論されている (Polnau et al., 1999, 2001; Eugster et al., 2007; Nakamura et al., 2008; Roth et al., 2009)。しかし、コンドリュールとマト リックス間での宇宙線照射年代の明らかな差を示す隕 石は太陽風起源希ガスを含む隕石であり(Roth et al., 2009: Matsuda et al., 2009), 太陽起源希ガスを含ま ない隕石ではコンドリュール・マトリックス間の宇宙 線照射年代差はほとんどみられない。太陽風照射を経 験していれば宇宙線照射も経験しているはずであり, 太陽風起源希ガスを含む隕石にみられるコンドリュー ル・マトリックス間の宇宙線照射年代差は、母天体上 での照射で説明される(Roth et al., 2009; Matsuda et al., 2009)。SaU 290も太陽風起源希ガスを含む隕石 であり (Park et al., 2005 a, b), SaU 290コンド リュールの宇宙線起源<sup>3</sup>He 濃度の差は母天体上での宇 宙線照射によるものと解釈される。

ここで、SaU 290コンドリュールからの太陽風起源 希ガスの散逸について考える。宇宙線起源<sup>3</sup>He 濃度が C5を除いてほぼ一定であることは、C5以外のコン ドリュールが space exposure のみを経験したと考え るのが妥当である。この場合、C5以外のコンド リュールは母天体上で宇宙線照射ならびに太陽風照射 を経験しなかったことになる。SaU 290コンドリュー ルで太陽風照射の明確な痕跡がみられないのはそのた めであり、散逸によるものではない。C5は太陽風照 射を経験したかもしれないが、Ne 同位体比や<sup>40</sup>Ar /<sup>96</sup>Ar 比を見る限り、そのような痕跡はみられない (Figs. 3 and 5)。C5が太陽風照射を経験したとして

もその寄与は極めて小さいといえる。

C 5以外のコンドリュールの宇宙線起源<sup>®</sup>He が space exposure の間に蓄積したとすると、これらの コンドリュールの宇宙線起源<sup>®</sup>He 濃度の平均値 (2.3 ×10<sup>-8</sup>cm<sup>3</sup>/g) と宇宙線起源<sup>®</sup>He 生成速度1.6×10<sup>-8</sup>cm<sup>3</sup> /g·Ma (Eugster, 1988) から、SaU 290隕石の space exposure age は1.4 Ma と算出される。Park *et al.* 

(2005 a) では、宇宙線起源<sup>21</sup>Ne から宇宙線照射年 代を1.3~1.4 Ma と算出しており、本研究とほぼ同じ 値である。但し、Park *et al*.(2005 a) での試料は太 陽起源希ガスを含んでいることから、母天体上での宇 宙線照射の期間も含めての値であることに留意する必 要がある。少なくとも SaU 290コンドリュールの宇 宙線起源<sup>3</sup>He から得られた space exposure age (1.4 Ma)は、宇宙線起源<sup>21</sup>Neに基づく space exposure age (≤1.3-1.4 Ma; Park et al., 2005 a) を下回るこ とはないので、宇宙線起源<sup>®</sup>Heの散逸はないといえ る。この場合, 放射壊変起源<sup>4</sup>He の散逸も space exposureの間には起こっていないはずである。即ち、放 射壊変起源<sup>4</sup>Heの散逸が起こっていたとすれば、それ は母天体上でのプロセスによるものと考えられる。本 研究で得られた1.4 Maという値は、放射性核種に基 づく他の CH コンドライトの space exposure age (0.6 Ma から>3.5 Ma; Nishiizumi et al., 1996) と 同程度である。CH コンドライト母天体では、この頃 に集中的に隕石を放出するイベントがあったのかもし れない。

Parent body exposure の下限値を以下に求める。 仮に, C 5の<sup>3</sup>He 濃度と他のコンドリュールの平均<sup>3</sup>He 濃度の差 (2.5×10<sup>-8</sup>cm<sup>3</sup>/g)を母天体での照射期間の 違いによるものとする。また,C5がエンスタタイト

(MgSiO<sub>3</sub>)からなるとする。遮蔽深度40 g/cm<sup>2</sup>で, parent body exposure での宇宙線起源<sup>3</sup>He 生成速度の 最大値 $1.2 \times 10^{-s}$ cm<sup>3</sup>/g·Maが算出される(Wieler, 2002)。C 5の parent body exposure age は、上記の 濃度と生成速度から、2.0 Ma となる。しかし、<sup>3</sup>He 生成速度の最大値を用いていることや、C 5よりも宇 宙線起源<sup>3</sup>He 濃度の高いコンドリュールが見つかる可 能性があることから、実際の parent body exposure age は2.0 Ma よりも長いと思われる。

#### 5.まとめ

高濃度の太陽起源希ガスを持つ SaU 290 CH3コン ドライトのコンドリュールを300個以上採取し,その うちの17個の希ガス同位体分析を行なった。希ガス 濃度は極微量であり,太陽風照射の明確な痕跡は得ら れなかった。これらのコンドリュールは太陽風照射を 経験しなかったと考えられる。採取したコンドリュー ル300個以上の中の僅か17個の測定であるので,今後 の測定で太陽起源希ガスを含むコンドリュールが発見 できると期待される。あるコンドリュールが母天体上 での宇宙線照射由来と思われる宇宙線起源<sup>®</sup>He 過剰を 示した。他のコンドリュールの宇宙線起源<sup>®</sup>He 濃度と の差から, parent body exposure age は2.0 Ma 以上 と算出された。一方, space exposure age は1.4 Ma であった。

本研究で分析したコンドリュールは2.6~10.4 µgと 非常に微小であり,抽出された希ガスも極微量であっ た。このような微小試料の希ガス分析にはレーザー加 熱が有効であり,その試料の起源や照射履歴を知る上 で最良の手法であると考えられる。

#### 謝 辞

本稿の査読者である松田准一教授(大阪大学大学院 理学研究科),岡崎隆司助教(九州大学大学院理学研 究院)には的確なコメントをいただきました。本稿を 執筆する機会を与えて下さいました圦本尚義教授(北 海道大学理学研究院)にこの場を借りて御礼申し上げ ます。本研究は日本学術振興会の助成金のもと行ない ました。試料は Bartoschewitz Meteorite Laboratory からいただきました。

#### 参考文献

- Amelin, Y., Krot, A. N., Hutcheon, I. D. and Ulyanov, A. A. (2002) Lead isotopic ages of chondrules and calcium-aluminum-rich inclusions. *Science* 297, 1678–1683.
- Amelin, Y., Stern, R. and Krot, A. N. (2003) Distribution of U, Th, Pb and Nd between minerals in chondrules and CAIs (abstract). *Lunar & Planetary Science* 36, #1200.
- Anders, E. and Grevesse, N. (1989) Abundances of the elements: Meteoritic and solar. *Geochimica* et Cosmochimica Acta 53, 197–214.
- Benkert, J. -P., Baur, H., Signer, P. and Wieler, R. (1993) He, Ne, and Ar from the solar wind and solar energetic particles in lunar ilmenites and pyroxenes. *Journal of Geophysical Research* 98, 13147–13162.
- Crabb, J. and Anders, E. (1982) On the siting of noble gases in E-chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **46**, 2351–2361.
- Eberhaldt, P., Eugster, O. and Marti, K. (1965) A redetermination of the isotopic composition of atmospheric neon. *Zeitschrift für Naturforschung* 20a, 623–624.
- Eugster, O. (1988) Cosmic-ray production rates for <sup>3</sup>He, <sup>21</sup>Ne, <sup>38</sup>Ar, <sup>83</sup>Kr, and <sup>126</sup>Xe in chondrites based on <sup>81</sup>Kr-Kr exposure ages. *Geochimica et*

Cosmochimica Acta 52, 1649-1662.

- Eugster, O., Lorenzetti, S., Krähenbühl, U. and Marti, K. (2007) Comparison of cosmic-ray exposure ages and trapped noble gases in chondrule and matrix samples of ordinary, enstatite, and carbonaceous chondrites. *Meteoritics & Planetary Science* 42, 1351–1371.
- Fireman, E. L., DeFelice, J. and Norton, E. (1970) Ages of the Allende meteorite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 34, 873–881.
- Fleischer, R. L. (1968) Uranium distribution in stone meteorites by the fission track technique. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 32, 989–998.
- Hintenberger, H., Weber, H. W., Voshage, H., Wänke, H., Begemann, F. and Wlotzka, F. (1970) Concentrations and isotopic abundances of the rare gases, hydrogen and nitrogen in Apollo 11 lunar matter. *Proceedings of the Apollo 11 Lunar Conference*, pp. 1269–1282.
- Hood, L. L. and Horanyi, M. (1993) The nebular shock wave model for chondrule formation -One-dimensional calculations. *Icarus* 106, 179– 189.
- Housen, K. R., Wilkening, L. L., Chapman, C. R. and Greenberg, R. (1979) Asteroidal regolith. *Icarus* 39, 317–351.
- Hu, R., Guo, S., Hao, X. and Wang, Y. (1995) Increasing uranium migration in chondritic meteorites with annealing temperature. *Radiation Measurements* 25, 523–524.
- Kobayashi, S., Imai, H. and Yurimoto, H. (2003) New extreme <sup>16</sup>O-rich reservoir in the early solar system. *Geochemical Journal* **37**, 663–669.
- Krot, A. N., Amelin, Y., Cassen, P. and Meibom, A. (2005) Young chondrules in CB chondrites from a giant impact in the early solar system. *Nature* 436, 989–992.
- Krot, A. N., Ivanova, M. A. and Ulyanov, A. A. (2007) Chondrules in the CB/CH-like carbonaceous chondrite Isheyevo: Evidence for various chondrule-forming mechanisms and multiple chondrule generations. *Chemie der Erde* 67, 283–300.
- Lawrence, S. J., Krot, A. N., Scott, E. R. D., Bunch,

T. E. and Keil, K. (2004) Mineralogy and petrology of chondrules in carbonaceous chondrite NWA 770 (abstract). *Lunar & Planetary Science* **35**, #11451.

- Levine, J., Muller, R. A. and Renne, P. R. (2004) Electron microscopy of Apollo 12 glass spherules (abstract). *Lunar & Planetary Science* 35, #1033.
- Leya, I., Lange, H. J., Neumann, S., Wieler, R. and Michel, R. (2000) The production of cosmogenic nuclides in stony meteoroids by galactic cosmic ray particles. *Meteoritics & Planetary Science* 35, 259–286.
- Matsuda, S., Nakashima, D., Iio, H., Bajo, K. and Nagao, K. (2009) Laser microprobe noble gas analysis of chondrules in the NWA 801 CR 2 chondrite (abstract). *Lunar & Planetary Science* 40, #1628.
- 長尾敬介(2007)レーザーを用いた隕石および宇宙 塵の希ガス同位体分析.ぶんせき1,9-17.
- Nakamura, Y., Bajo, K., Nakashima, D. and Nagao, K. (2008) Noble gas analyses of individual chondrules from the Allende CV 3 chondrite (abstract). *Meteoritics & Planetary Science* 43, A110.
- Nier, A. O. (1950) A redetermination of the relative abundances of the isotopes of carbon, nitrogen, oxygen, argon, and potassium. *Physical Review* 77, 789–793.
- Nishiizumi, K., Caffee, M. W., Nagai, H. and Imamura, M. (1996) Multiple breakup of ALH 85085-like and CR group chondrites. *Meteoritics & Planetary Science* **31**, A99–A100.
- Okazaki, R., Nagao, K., Takaoka, N. and Nakamura, T. (2001 a) Studies of trapped noble gases in enstatite chondrites by a laser microprobe technique (abstract). *Meteoritics & Planetary Science* **36**, A 152.
- Okazaki, R., Takaoka, N., Nagao, K., Sekiya, M. and Nakamura, T. (2001 b) Noble-gas-rich chondrules in an enstatite meteorite. *Nature* **412**, 795–798.
- Osawa, T., Nagao, K., Nakamura, T. and Takaoka, N. (2000) Noble gas measurement in individual

micrometeorites using laser gas-extraction system. *Antarctic Meteorite Research* **13**, 322–341.

- Park, J., Okazaki, R., Nagao, K., Bartoschewitz, R., Kusakabe, M. and Kimura, M. (2005 a) Noble gases and oxygen isotopes of new CH chondrite, SaU 290 with abundant solar gases (abstract). *Antarctic Meteorites* XXIX, 69–70.
- Park, J., Okazaki, R., Nagao, K. and Bartoschewitz,
  R. (2005 b) Noble gas study of new enstatite
  SaU 290 with high solar gases (abstract). Lunar
  & Planetary Science 36, #1632.
- Polnau, E., Eugster, O., Burger, M., Krähenbühl, U. and Marti, K. (1999) Evidence for a precompaction exposure to cosmic rays in a chondrule from the H 6 chondrite ALH 76008. *Geochimica* et Cosmochimica Acta 63, 925–933.
- Polnau, E., Eugster, O., Burger, M., Krähenbühl, U. and Marti, K. (2001) Precompaction exposure of chondrules and implications. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 65, 1849–1866.
- Roth, A. S. G., Baur, H., Heber, V. S., Reusser, E. and Wieler, R. (2009) Cosmic-ray-produced helium and neon in chondrules in Allende and Murchison (abstract). *Lunar & Planetary Science* 40, #1838.
- Scott, E. R. D. and Krot, A. N. (2003) Chondrites and their components. In: *Meteorites, Comets,* and Planets, Treatiseon geochemistry, Vol. 1 (Davis, A. M. ed.), pp. 143-200, Elsevier-Pergamon, Oxford.
- Shu, F. H., Shang, H. and Lee, T. (1996) Toward and astrophysical theory of chondrites. *Science* **271**, 1545–1552.
- Walker, R. M. (1980) Nature of fossil evidence: Moon and meteorites. In: *The ancient Sun: Fos*sil record in the Earth, Moon, and meteorites (Pepin, R. O., Eddy, J. A. and Merrill, R. B., eds.), 11–28, Pergamon Press, New York.
- Wasson, J. T. (1988) A non-nebular origin for the Allan Hills 85085 subchondritic meteorite (abstract). Lunar & Planetary Science 19, 1240.
- Weisberg, M. K., Prinz, M. and Nehru, C. E. (1988) Petrology of ALH 85085: a chondrite with unique characteristics. *Earth and Planetary*

Science Letters 91, 19–32.

Whitby, J. A., Gilmour, J. D., Turner, G. and Russell, S. S. (2000) Timing of alteration events in the CV 3 chondrites Mokoia and Vigarano (abstract). Lunar & Planetary Science 31, #1695.

Wieler, R. (2002) Cosmic-ray-produced noble gases

in meteorites. Reviews in Mineralogy & Geochemistry 47, 125–170.

Wood, J. A. (1984) On the formation of meteoritic chondrules by aerodynamic drag heating in the solar nebula. *Earth and Planetary Science Letters* **70**, 11–26.