

エンスタタイトコンドライトの希ガス同位体組成

岡崎 隆司^{1,2}, 長尾 敬介¹, 高岡 宣雄², 中村 智樹²

1. はじめに

エンスタタイト(E-)コンドライトには、太陽や地球大気など既知の希ガスを混ぜ合わせただけでは説明することの出来ない、特異な元素組成を持つ希ガスの存在が知られている。最近の我々の研究によって、この特異な希ガスはコンドリュール中に捕獲された太陽風が元素分別を起こした結果であることが明らかになりつつある。本稿では、このE-コンドライト中の希ガスに関する研究について報告する。

2. 隕石の持つ原始太陽系の記録

小惑星や惑星は原始太陽系星雲中で固体粒子が集積したものである。惑星は大きくなりすぎたため、全体として融けてしまい惑星形成以前の出来事の記録を残していない。一方、小惑星のあるものは原始太陽系での出来事を現在でも記録している。隕石はその小惑星の破片が宇宙空間をさまよったあげく、地球に落ちてきたものとされている。隕石の中でも最も始源的なのは、コンドリュールという球粒状の物質を含むコンドライトと呼ばれるものである。コンドライトは元素組成や酸素同位体比などをもとに炭素質(C-)コンドライト、普通(O-)コンドライト、E-コンドライトなどに分類される(詳細については[1]等)。C-コンドライトは炭素質物質に富み、酸化的な鉱物から構成される。

一方、E-コンドライトは地球には存在しない極めて還元的な環境でのみ存在し得る鉱物を多く含んでいる。このような、元素の酸化還元状態や元素存在度及びそれらの同位体存在度における違いは、それぞれのコンドライトの材料物質やコンドライト母天体が形成した環境の物理(温度・圧力など)・化学的(酸素フガシティーなど)条件、あるいはそこで起こった化学反応・物理過程の違いを反映していると予想される。従って、C-コンドライトは酸化的な、E-コンドライトは還元的な環境での物質進化過程に関する情報を記録していると期待される。

一方、Mg, Si, Fe, O, Sなどの元素とは異なり、希ガスは化学的に不活性であるという特徴を持ち、その同位体存在度は原子核反応、吸着、拡散、蒸発などの物理過程にのみ左右されると思われる。ところが、過去の隕石中の希ガスに関する研究によると、E-コンドライトには、C-やO-コンドライトに含まれている希ガスとは全く異なる元素組成を持つものが見つかった(図1)。このE-コンドライトに特徴的な希ガスは、E-コンドライトの母天体が形成(存在)した原始太陽系星雲の環境とどのような関係を持つのだろうか、という疑問が生じる。しかし、E-コンドライトは極めて落下頻度が低く入手困難であるため、20年ほど前にE-コンドライトの希ガスに関する研究[2-4]がなされて以来ずっとこの問題は手つかずのままであった。

近年、南極や砂漠で多くのE-コンドライトが見

1 東京大学地殻化学実験施設

2 九州大学大学院理学研究科

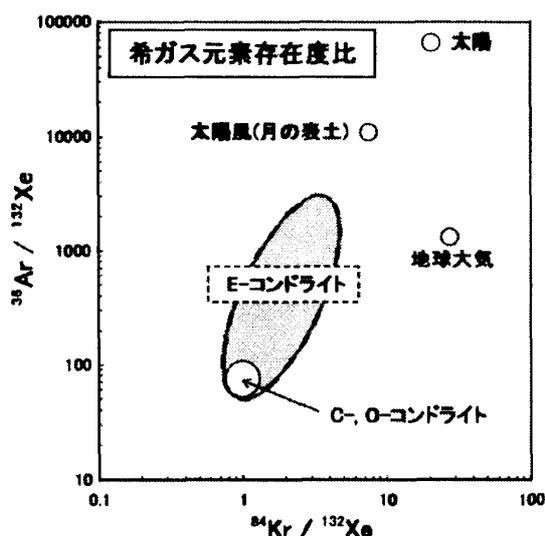


図1 コンドライトに含まれる捕獲成分希ガスAr, Kr, Xeの元素存在度比。炭素質(C-)、普通(O-)コンドライトは $^{36}\text{Ar}/^{84}\text{Kr}/^{132}\text{Xe}$ 比がおおよそ50-100/1/1の希ガス(Qガス)を含んでいる。一方、エンスタタイト(E-)コンドライトにはQガス以外にも、Arに富む捕獲成分希ガス(subsolarガス)が含まれている。

つかっており、分析の機会が得られるようになってきた。我々は、E-コンドライト中のsubsolarガスの起源を明らかにする事を目標に、高感度質量分析計を用いた包括的な希ガス分析を行った。

3. 隕石中の希ガス成分

まず、隕石中の希ガス研究を理解するために必要なことから簡単にまとめておく。隕石中の希ガスの元素比や同位体比(特にXe)は非常に多様である。このことは、隕石中に存在する希ガスは異なる物理過程によって出来たものの混合であることを意味する。希ガスをその起源別に分類すると、(1)放射性同位体の壊変により生成された放射起源成分、(2)自発、及び中性子誘導核分裂により生成された核分裂成分、(3)宇宙線とその照射を受けた物質との核反応により生成された宇宙線起源成分、(4)隕石を構成する物質が周囲の希ガスを取り込んだ捕獲成分、の4つの成分がある。(1)から(3)の希ガス成分は、隕石の中で出来たものであることか

ら、*in situ produced* (その場で生成された)成分とひとくくりにして、(4)の捕獲成分希ガスと対応させることが多い。放射起源や核分裂起源の希ガス同位体(例えば、消滅核種ヨウ素-129の崩壊で出来た ^{129}Xe や、カリウム-40の娘核種 ^{40}Ar 、 ^{244}Pu の核分裂により作られた重いXe同位体など)は、さまざまな隕石の年代測定に利用することが出来る。また、(3)の宇宙線起源成分の量とその生成率から、隕石が宇宙線を浴びた期間を決めることが出来る。E-コンドライトの宇宙線起源希ガスについては[5]等を参照されたい。

一方、捕獲成分希ガスには、惑星や小惑星などを構成する材料物質が形成される時、あるいは天体に集積する時に取り込まれたものと、天体形成後にインプランテーションなどによって取り込まれたものがある。前者を特に“原始(primordial)成分”と呼ぶ。隕石中の捕獲成分希ガスの代表的なものを表1にまとめた。C-, O-コンドライトに含まれている原始成分希ガスのほとんどは、“Q (Quintessence)”フェイズ(炭素質物質の吸着相と考えられている)に含まれている希ガスで、“Qガス”と呼ばれているものである[6]。C-コンドライト中のQフェイズは、コンドリュールを包むリム物質やマトリックス部に濃集していることが報告されている[7]。また、Qガスの同位体組成は太陽風とも地球大気のそれとも異なるが、同位体組成にそれほど大きな差が見られないため、吸着によって太陽系星雲中の炭素質物質に捕獲されたという説がある。しかし、Qガスの起源は現在のところまだはっきりしていない。

グラファイトやダイヤモンド、シリコンカーバイドといったプレソーラーグレインには大きな同位体異常を示す希ガス(Xe-HL, Xe-S, Ne-Eなど)が含まれており、これらは太陽系形成以前に銀河系内の恒星内部における元素合成で作られたものであることが知られている[8]。一方、太陽風と同

じ同位体組成を持つ大量の希ガスが隕石の角礫(角張った碎屑粒子)化した部分に見つかっている。これは月の表土と同じように、隕石母天体表層で衝突過程により細粒化した鉱物粒子の表面に太陽風がたたき込まれたものである[9]。このように隕石中に含まれる捕獲成分希ガスとそれを保持している物質(鉱物)に関する情報から、隕石母天体の材料物質の起源や、太陽系で起こった物理過程に関する情報を得ることが出来る。

4. 希ガス分析

希ガス同位体にもとづいて宇宙空間での出来事を解読するために重要なことは、いかに個々の希ガス成分を分離・抽出して測定するかである。過去の隕石希ガスの研究では、鉱物表面へトラップされた希ガスの粒度による分離、特定の鉱物から放出される希ガスの試料の段階的加熱や酸処理による分離など、様々な方法によって希ガスのホストフェイズの分離がなされてきた。これは希ガスが化学的に不活性であるために隕石中の存在度が低く、これらの測定にはある程度の試料量が必要だったためである。

長尾(東京大学地殻化学実験施設)らは、イオンカウンティングシステムの導入などにより、超高感度(たとえば数千個のXe原子を検出することが出来る)の希ガス質量分析を可能とした。また、この希ガス質量分析計は非常に低バックグラウンドの希ガスを抽出・精製する(希ガス分析の妨害粒子となる活性ガスや炭化水素等を除去するための装置)ステンレス製の真空ラインを備えている。この希ガス質量分析計と抽出ラインを利用すれば、非常に少ない希ガスでも同位体存在度を精度よく決めることが出来る。

質量分析計の感度と精度が飛躍的に向上した結果、レーザーによる局所分析など、これまで不可

能であった極微量の希ガスの分析が可能になった。現在、東京大学地殻化学実験施設にある希ガス分析装置では、以下の3つの希ガス抽出法を用いることが出来る。

- 1) 餅つき方式のクラッシング法
- 2) タンタルヒーターを用いた段階加熱法
- 3) Nd-YAGレーザー(直径20-70mmのビームを出力できる)を用いたレーザー局所分析法

これらの希ガス抽出法のそれぞれの長所を生かして、隕石及び地球の岩石試料の希ガス分析を行っている。これだけの希ガス抽出法を備え、かつ、希ガス全元素(He, Ne, Ar, Kr, Xe)を高精度で効率よく短時間で(とは言っても、HeからXeまでの測定にはクラッシングや段階加熱法で約4時間、レーザー分析法でも2.5時間を要する)測定可能な希ガス分析装置をもつ研究室は世界的にも少ない。

上記3つの希ガス抽出法を用いたE-コンドライト中の希ガス分析の結果について、以下に述べる。

5. 希ガス分析結果

5.1 クラッシング&段階加熱分析

E-コンドライトを構成する鉱物はその名の通り、ほとんどがエンスタタイト(MgSiO_3)で、その他には金属鉄やトロイライト(FeS)が含まれている。いくつものE-コンドライトの研磨薄片には、エンスタタイト結晶中の割れに沿って出来たと思われる無数の気泡状の包有物が観察された(図2)。この包有物に希ガスが濃集しているのなら、クラッシングで容易に抽出できるのではないかという予想のもと、12個のE-コンドライトについてクラッシング&段階加熱法による希ガス分析を行った。その結果、E-コンドライトは全岩の希ガス元素組成($^{36}\text{Ar}/^{132}\text{Xe}$ と $^{84}\text{Kr}/^{132}\text{Xe}$)をもとに2種類に分類出来ることが分かった。1つは原始成分希ガスとしてほぼQガスのみを含んでいるもの(図3a)、もう1つはQ

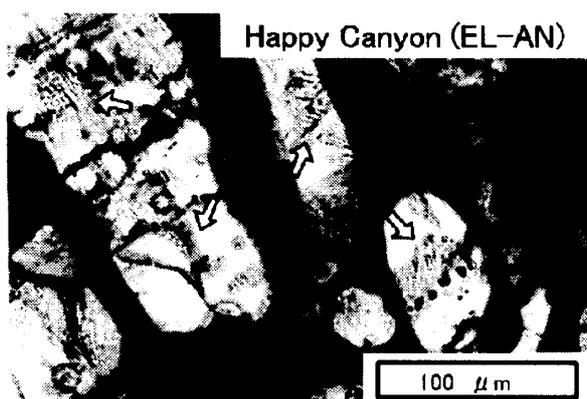


図2 Happy Canyon隕石の透過顕微鏡写真。矢印で示した気泡のような包有物が、輝石や斜長石の結晶の割れ目に沿って無数に存在している。

ガス以外にも、高い $^{36}\text{Ar}/^{132}\text{Xe}$ 比を持つ希ガスを含んでいるもの(図3b)である。このArに富む希ガスはAr-richガスあるいはsubsolarガス[2]と呼ばれているものであるが、これが希ガス端成分の1つなのか、あるいは何らかの元素分別の結果を反映したものなのか不明であった。

まず、ほぼQガスのみを含むものについて説明する。C-, O-コンドライト中のQガスの存在度は隕石の岩石学的タイプ(隕石の受けた熱的影響を反映しており、数字が大きいものほど強い熱的影響を残している)と非常に良く相関していることが知

られている。一方、我々の分析結果から、E-コンドライト中のQガス存在度も岩石学的タイプと相関していることが分かった(図4)。このことは、Qガスを捕獲していたフェイズQがコンドライトの母天体に集積し、その後、母天体での熱変成によって脱ガスを受けたこと示唆する(C-, O-, E-コンドライトはそれぞれ、化学組成等が異なる母天体に由来すると考えられているのに、これら全てのコンドライトのQガス存在度が岩石学的タイプときれいな相関を見せることは驚きであるが)。また、E-コンドライト中のQガスもマトリックス中に含まれていることを、最近レーザー局所分析により確認した[10]。

次にsubsolarガスとQガスを含む隕石であるが、Qガスを含むマトリックスやコンドリュールリム以外の、どこにsubsolarガスは含まれているのだろうか。クラッシングと段階加熱の元素比を見ると、subsolarガスはクラッシングで破壊されやすく、1400-1600°Cという高温で希ガスを放出する場所に捕獲されていることが分かる(図3b)。これらの条件に合うのは、エンスタタイトで構成されている物質であると予想される。それならば、subsolarガ

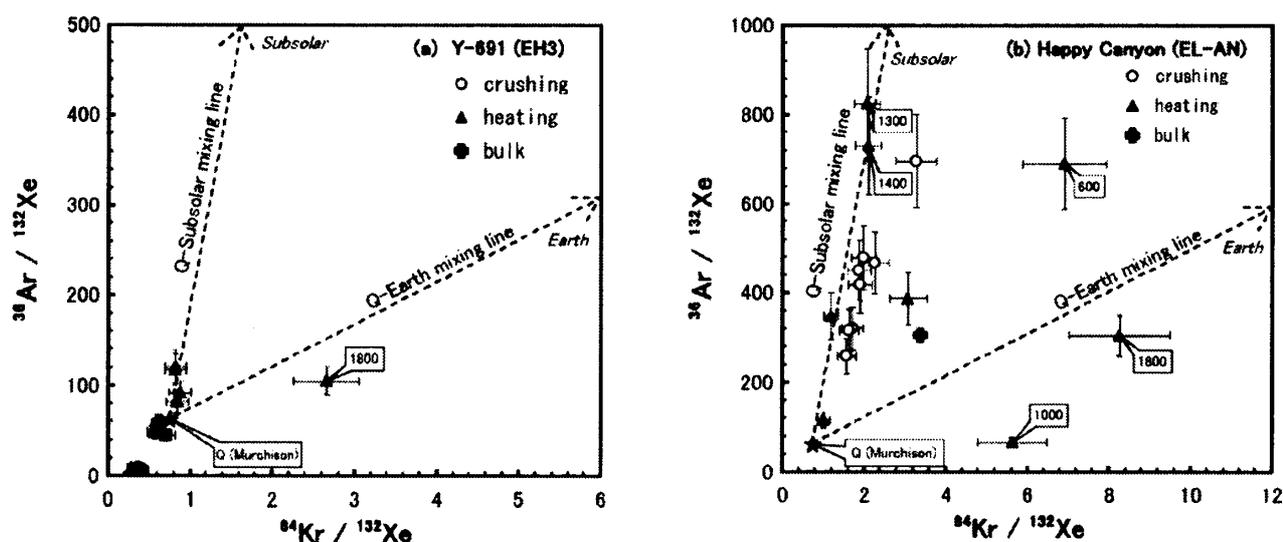


図3 クラッシング及び段階加熱により抽出された希ガスの元素存在度比。(a) ほぼQガスだけが含まれているE-コンドライト。(b) Qガスに加えてArに富む元素比を持つ希ガス(subsolarガス)を含んでいるもの。subsolarガスはクラッシングと段階加熱の高温フラクション(1300°C, 1400°C)で顕著に放出されている。(b)の縦横軸の範囲が(a)の倍であることに注意。

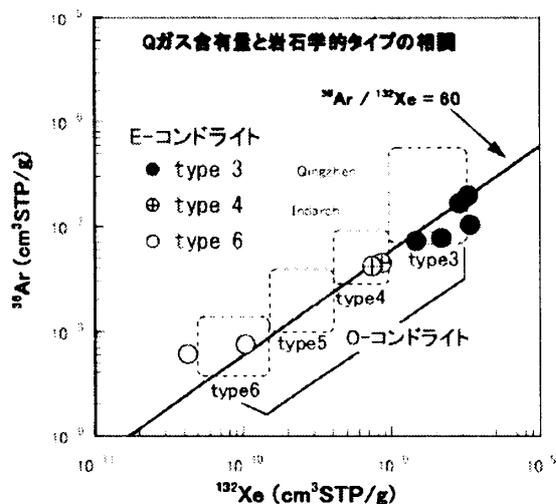


図4 Qガスだけを含むE-コンドライトの ^{36}Ar と ^{132}Xe 濃度。サンプル数はまだ少ないが、希ガス濃度と岩石学的タイプ(熱変成度の指標)には相関が見られる。岩石学的だけでなく、Qガス存在度も母天体での熱的影響を反映していることが示唆される。O-コンドライト中の希ガス濃度を岩石学的タイプごとに点線で囲った領域で示した。また、図中の直線は原点を通り、傾き $^{36}\text{Ar}/^{132}\text{Xe}=60$ (Qガスの元素比に相当)の直線を示す。Qingzhen, Indarchのデータはそれぞれ[3]と[2]より。

スを含むのはコンドリュールに違いはないと考え、レーザー局所分析を行うことにした。この予想は、コンドリュールに関するこれまでの報告に反するものであった。つまり、これまではコンドリュールは星雲中での瞬間的な加熱の際に一度融け、そのときに揮発性元素である希ガスは逃げてしまったと考えられていた。事実、コンドリュール中の放射起源の ^{129}Xe 等の過剰はあるものの、捕獲成分希ガスの濃集は報告されていなかった[7, 11, 12]。

5.2 レーザー局所分析

subsolarガスを含む隕石でコンドリュールを識別できる2つの隕石(Y-791790 [13], Abee)についてレーザー局所分析を行った。Abee隕石は地球に落下したE-コンドライトの総重量の35%に相当する107kgもの大きな隕石である。レーザーをもちいてコンドリュール、マトリックス、不透明鉱物(金属鉄やトロイライト)中の希ガスを局所的に抽出し、

同位体測定を行った。その結果、Y-791790とAbeeには非常に高濃度の ^{36}Ar を含むコンドリュールが存在する事が判明した。コンドリュール中 ^{36}Ar 濃度の最高値はY-79179, Abeeでそれぞれ、 7×10^{-6} , 3×10^{-6} $\text{cm}^3\text{STP/g}$ にも及び、これは地球大気の ^{36}Ar 量を地球質量で割った値 2×10^{-8} $\text{cm}^3\text{STP/g}$ [16]の100倍以上にも相当する。高いAr濃度を示すコンドリュール中のAr同位体比($^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}=30-100$)は地球大気のもの($^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}=296$)とは全く異なり、地球大気の汚染ではなくコンドリュールに固有の希ガスであることを示す。また、subsolarガスの特徴である高い $^{36}\text{Ar}/^{132}\text{Xe}$ 比はコンドリュールにのみ見られた。より詳細なレーザー局所分析の結果についてはまた別の機会に譲ることにするが、ここで強調したいのは、今まで捕獲成分希ガスを含まないと考えられてきたコンドリュールこそが起源不明の謎の希ガス、subsolarガスを保持している物質だったということである。

6. subsolarガスの起源

これまで、subsolarガスがどこに含まれているかという点について述べた。では、subsolarガスの起源は何であり、どのようにしてコンドリュールに捕獲されたのであろうか?今のところ、"コンドリュールの前駆物質にたたき込まれた太陽風組成の希ガスが、コンドリュール形成過程の際に一部逃げ残ったもの"、というのが最も有力な案である。その根拠となる希ガス元素存在度及び同位体組成を残りの紙面を使って述べたい。

まず、subsolarガスを特徴づける元素存在度について述べる。subsolarガスの元素存在度比は地球大気やC-コンドライト中の希ガスに比べると高いAr/Xe比を持っているが、Ne存在度比はむしろ地球大気のそれよりも低いという特異なものである(表1)。これはなぜか?過去の報告では、太陽風が元

表1 代表的な捕獲成分希ガス。

Component	Host Phase	$^{20}\text{Ne}/^{36}\text{Ar}/^{84}\text{Kr}/^{132}\text{Xe}$	$^{20}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$	$^{130}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}/^{136}\text{Xe}$	Ref.
subsolar gas (South Omap:EH4)	enstatite	8/2650/6/1	unknown	unknown	[2]
solar wind (lunar soil)	grain-surface	$3.7 \times 10^5/11000/8/1$	13.26-13.56/0.032/1	0.165/1/0.300	[9]
Q-gas	phase Q	3/60/0.8/1	10.7/0.0294/1	0.162/1/0.318	[15]
terrestrial atm	-	691/1330/28/1	9.80/0.0290/1	0.151/1/0.329	[16]

素分別した結果であるという予想がなされている [3, 4]. 確かに我々の見積もりでも, コンドリユール中に捕獲された太陽風がその後拡散[14]によって元素分別を起こしたと仮定すると, subsolarガスの元素存在度を説明することが出来る.

次に同位体組成であるが, 一般的に希ガスの起源を知る上で最も有力な情報を与えてくれるのは NeとXeの同位体比である. これは, 先に述べたさまざまな希ガス成分の同位体比の間には, 互いに区別できるほどの大きな差があること(表1), 同位

体数が多いことがその理由である. subsolarガスの元素存在度は, Neが著しく乏しいので, Neの同位体比を正確に決めることは出来ないが, Xeの同位体組成から非常に重要なことが分かった. 図5は高い $^{36}\text{Ar}/^{132}\text{Xe}$ 比を示す隕石(Happy Canyon; 図3b)のXe同位体比を示したものである. この隕石をクラッシングしてでてきたXe同位体比は, 全岩の溶融及び段階加熱で得られたものとは異なり, 太陽風のそれに近い値を示した. これはクラッシングで得られたXeは太陽風のそれに酷似したものであることを示しており, Qガスや地球大気の質量分別では説明できない. この隕石はクラッシングでsubsolarガスの特徴である高い $^{36}\text{Ar}/^{132}\text{Xe}$ 比を放出した. 従って, subsolarガスは太陽風もしくは太陽系星雲中の希ガスがコンドリユールあるいはその材料物質に取り込まれたことを示唆していると考えられる.

元素存在度とXe同位体比の2点から, subsolarガスの起源は, 太陽風もしくは原始太陽系星雲中の希ガスであったと予想される. しかし, 太陽風よりも高いエネルギーを持つ太陽フレアのアルゴンでも珪酸塩鉱物中に進入できる深さは1mmを超えない. 従って, コンドリユールがマトリックスなどと一緒に母天体ができあがった後で希ガスがコンドリユール内部に入り込んだとは考えにくい. これが本当ならば, コンドリユール形成時の加熱に関する制約, 例えば到達温度や冷却速度

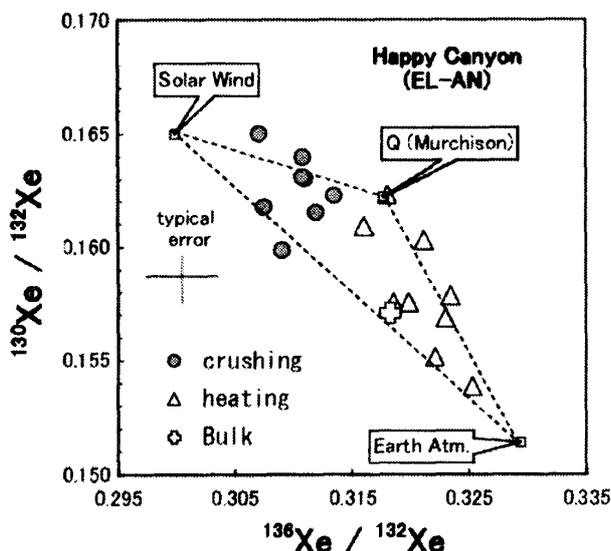


図5 Happy Canyon隕石のXe同位体組成. 点線で囲まれた領域の同位体比は, 太陽風, Qガス, 地球大気の3成分の混合で説明できる. クラッシングでは全岩の組成に比べて, 太陽風の組成を持つXeが選択的に抽出されている. このクラッシングででてきた希ガスの元素組成はsubsolarガスのようなものであった(図3b).

などへの制約を与えることが出来る。あるいは、E-コンドライトの母天体を形成した領域では、非常に高エネルギーの粒子が多く存在し得たのであろうか？コンドリュール中にsubsolarガスが取り込まれた原因を明らかにするためには、今後さまざまな角度からの研究を行うことが重要である。

参考文献

- [1] Brearley, A. J. and Jones, R. H., 1998 in "Planetary Materials", Papike, J. J. ed., Mineralogical Society of America, 3-1.
- [2] Crabb, J. and Anders, E., 1981, *Geochim. Cosmochim. Acta* 45, 2443.
- [3] Crabb, J. and Anders, E., 1982, *Geochim. Cosmochim. Acta* 46, 2351.
- [4] Wacker, J. F. and Marti, K., 1983, *Earth Planet. Sci. Lett.* 62, 147.
- [5] Okazaki, R. et al., 2000, *Antarctic Meteorites Res.* 13, 153.
- [6] Lewis, R. S. et al., 1975, *Science* 190, 1251.
- [7] Nakamura, T. et al., 1999, *Geochim. Cosmochim. Acta* 63, 241.
- [8] Anders, E., 1988, in "Meteorites and the Early Solar System" (eds. Kerridge, J. F. and Matthews, M. S., The Univ. of Arizona Press), 927.
- [9] Eberhardt, P. et al., 1972, *Proc. Lunar Sci. Conf.* 3, 1821.
- [10] Okazaki et al., 2001, in preparation.
- [11] Kim, J. S. and Marti, K., 1994, *Meteoritics* 29, 482.
- [12] Miura, Y. N. and Nagao, K., 1997, *Antarctic Meteorites*, 22, 118.
- [13] Okazaki, R. et al., 2001, submitted to *Nature*.
- [14] Hiyagon, H., 1981, MA thesis, University of Tokyo (compiled in [16]).
- [15] Wieler, R. et al., 1992, *GCA* 56, 2907.
- [16] Ozima, M. & Podosek, F. A., 1983, "Noble Gas Geochemistry" (Cambridge Univ. Press).