

隕石中の SiC：同位体比とその起源

甘利 幸子¹

ここ数年において隕石中から星間塵を分離し実験室において分析できるようになった。これらの星間塵は星のなかで起こる核合成の情報を保存していると考えられる。つまりこれらの分析結果を星の中の核合成の理論と比べることができるのである。今までに同定・分離された星間塵には、ダイヤモンド[1], SiC[2,3], グラファイト[4]がある。ここでは SiC について主に述べることにする。

1. 希ガス

始原的な隕石中に、太陽系起源では説明のつかない“anomalous”な希ガスが少量ながら含まれていることは1960年代の終わりからわかっていた。遅い中性子捕獲反応 (slow neutron capture process: s-プロセス) によって生成されたと考えられる Xe (s-Xe) は Srinivasan and Anders [4] によって報告されていたが、その担体が実際に Murchison 隕石から分離されたのはそれから約10年後の1988年であった。さらに粒子サイズによって分別された高純度の SiC フラクシオンの種々の測定はこれらの起源について新しい情報をもたらした。

Lewis *et al.* [5,6] はこれらの粒子サイズで分けられたフラクシオンの希ガスを測定した。測定結果について述べる前に、大部分の SiC 粒子が生成されたと考えられている AGB 星について触れたい。太陽質量の1倍から9倍までの単独星はすべて、進化して AGB 星になると考えられている。AGB 星は、中心の炭素と酸素のコアのまわりを巨大な水素のエンベロープ (envelope) が取り巻いている。エンベロープとコアの間には薄いヘリウム燃焼殻 (He-burning shell) があり、そこで

s-プロセスが起こる。ヘリウム燃焼は熱的に不安定なため、ヘリウム燃焼殻での生成物は外側のエンベロープに持ち上げられ、エンベロープの物質と混じり合う。燃焼殻での生成物¹²C がエンベロープの物質と混じることにより、エンベロープ外層で、酸素より炭素がおおくなったとき (C > O), SiC 粒子が生成する条件が整う。つまり、SiC は星の内部のヘリウム燃焼殻と外側のエンベロープの両方の情報を持っていることになる。

Lewis *et al.* [5,6] は Murchison 隕石から抽出されて粒子サイズにより分けられた8コの SiC フラクシオンの希ガスを測った。その元素比・同位体比から、以下に述べるように、SiC の希ガスが He 燃焼殻の希ガスと外側のエンベロープの希ガスとの混合によって説明できることがわかった。

彼らは、5種類全ての希ガスの同位体比を測定したが、その中でも特に Kr の同位体比は、星の組成、質量、中性子照射量などについて新しい情報を与えた。Kr の5個の同位体 (⁷⁸Kr は妨害元素のために測定できなかった) のうちとりわけ⁸⁰Kr と⁸⁶Kr は多くの情報を持っている (図1)。⁷⁹Se と⁸⁵Kr は radioactive であり、s-プロセスの分岐点に位置している。⁸⁰Kr と⁸⁶Kr の量は、これらの分岐点で反応がどちらに進むか、いいかえれば、中性子捕獲の間隔つまり中性子照射量に依存する。図2に彼らの測定結果のうち⁸⁴Kr/⁸²Kr と⁸⁶Kr/⁸²Kr の同位体比を示す。KJA-KJG はフラクシオンの名前であり、アルファベット順に粒子サイズは大きくなる。それぞれのフラクシオンは段階的に加熱された。1つのフラクシオン中の数コのデータ点は各温度ごとの値を表わす。この図から大きくわけて2つのことが言える。第1に、各フラ

¹ワシントン大学マクドネルセンター

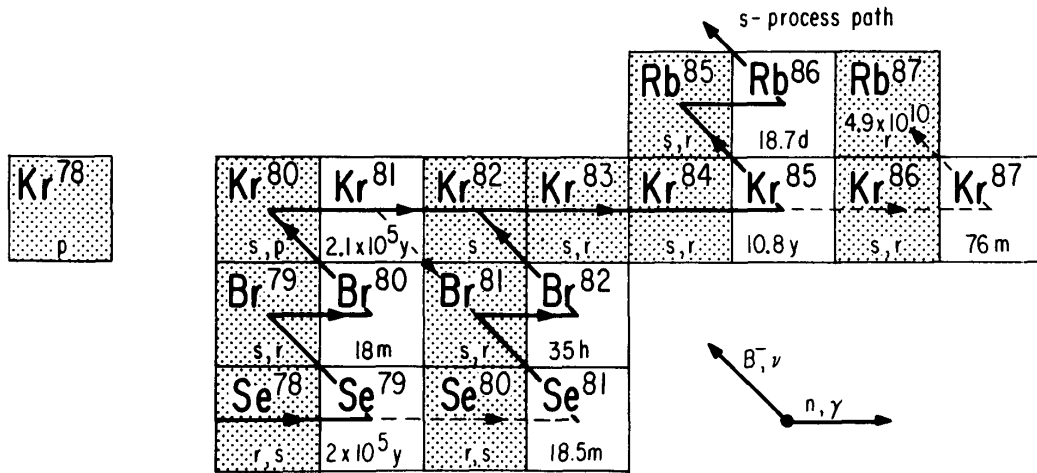


図1 Kr 付近の s-プロセス中性子捕獲の道すじを示す。安定同位体は影付きで表わしてある。s, r あるいは p という文字はその元素に主要な核合成プロセスを示す。

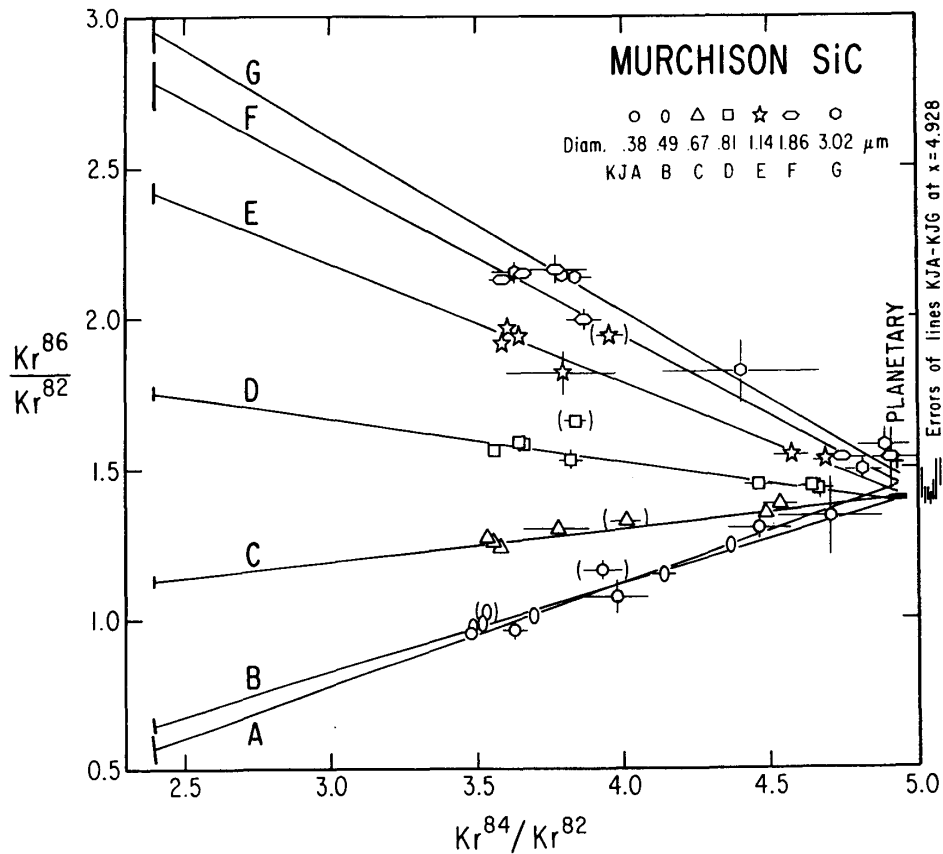


図2 粒子サイズで分けた SiC フラクションを段階加熱したときの Kr のデータを示す。高温フラクション (1400-2000°C) のデータポイントは異なる粒子サイズフラクションごとに直線に沿っている。s-プロセスの $^{84}\text{Kr}/^{82}\text{Kr}=2.4$ と仮定すると、直線との切片は各フラクションの s-プロセスの $^{86}\text{Kr}/^{84}\text{Kr}$ を示す。それらは粒子サイズが大きくなるにつれて大きくなる (Lewis, et al. [6] による)。

クシヨンのデータは、直線に乗ることである。この図では、縦軸、横軸の分母が同じなので、2成分の混合は直線にのる。これは、SiCの希ガスがエンベロープとヘリウム燃焼殻の混合であるということによって説明できる。もう一つの特徴は、 $^{86}\text{Kr}/^{80}\text{Kr}$ は粒子サイズによって系統的に異なる事である。細粒のSiCの $^{86}\text{Kr}/^{80}\text{Kr}$ は低く、粒子サイズが大きくなるにしたがって高くなる。これは何を意味するのであろうか。混合端成分の一つは、グラフの右側に位置するエンベロープの成分である。これは第一次近似としては隕石中に含まれる“planetary”と呼ばれる成分である。他の端成分であるヘリウム燃焼殻の希ガスであるが、図2から燃焼殻中の $^{86}\text{Kr}/^{82}\text{Kr}$ を知るためには、横軸にとっている $^{84}\text{Kr}/^{82}\text{Kr}$ の値を仮定しなければならない。s-プロセス $^{84}\text{Kr}/^{82}\text{Kr}$ の値はパラメータによって2.2~2.6と変動するが、ここでは2.4を仮定することにする。粒子サイズごとの直線と $^{84}\text{Kr}/^{82}\text{Kr}=2.4$ との交点が、それぞれのフラクシヨンのs-プロセスの $^{86}\text{Kr}/^{82}\text{Kr}$ にあたる。同位体比が各々のSiC粒子フラクシヨンのs-プロセスにより系統的に異なるということは、Gallino *et al.* [7]によれば、SiC粒子が1) 単独の星の異なったパルスの時に生成されたか、2) 複数の星から由来したかのどちらかであることを示す。ここでは割愛するが、他のいろいろな情報から今では2)の説の方が有力と考えられている。

s-プロセス Kr という星の内部での核合成が、粒子サイズという星の外層大気での凝縮条件と相関関係をもつということは、一見驚きであるが、この2つは究極的には、星の質量や重元素量と関係があり、そのような意味で相関関係を示すのであろう。

2. C, N, Si 同位体比

ワシントン大学の Zinner とそのグループはここ数年シカゴ大学の Anders グループと緊密な協力関係にあり、イオンプローブによる個々の SiC

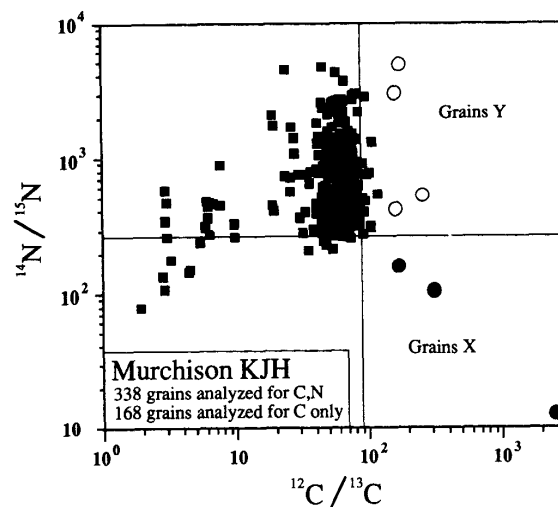


図3 比較的粒子サイズの大きい (4.6 μm) フラクシヨンの (KJH) の個々の SiC 粒子の C, N 同位体比を示す。図の中の直交する直線は太陽系の値を示す (Hoppe, *et al.* [8] による)。

粒子の同位体測定を行ってきた。これの測定の大きな利点は、粒子が1 μm 以上であれば、1コ1コの SiC 粒子から数種類の元素の同位体比を測定できることである。個々の粒子はそれぞれ異なった星から由来したと考えられ、集合体で測れば値は平均化されてしまう。今では、粒子の個々の情報から生成された星を同定しようとする試みが行なわれている。図3に Murchison 隕石から抽出された平均4.6 μm の SiC 粒子の C と N の同位体比を示す [8]。大部分の SiC は太陽系の値を原点としたとき第2象限に属している。大部分の SiC 粒子の $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ は40から100の値である。ごく少数の粒子は C の同位体比が10以下である。C 同位体比が150以上の粒子は異なる2つのグループに属している。それらは Grains X, Grains Y と名付けられている。Grains X は太陽系の値に比べて重い N を持っている。Grains Y は太陽系の値より軽い N を持つが、大部分の SiC は Grains Y に近い C と N の同位体比を持つので、この2つの同位体からだけでは Grains Y を見分けるのは難しい。

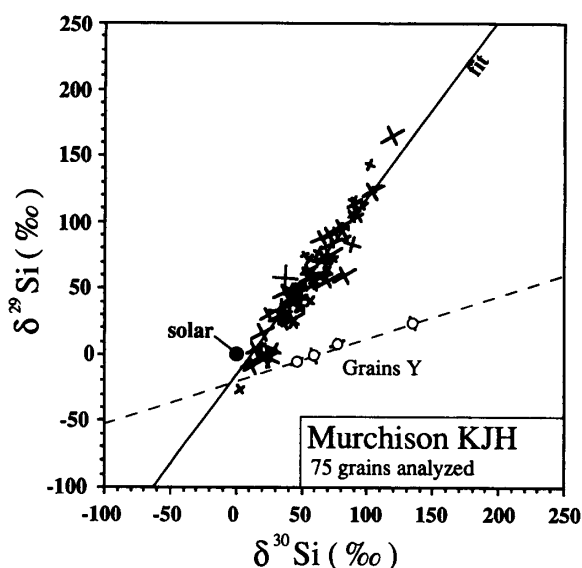


図4 KJH フラクションの SiC 粒子の Si 同位体比を示す。大部分の SiC 粒子は傾き 1.34 の直線にのる (実線で示してある)。白抜きで示してある Grains Y は傾き 1/2 の直線にのるように見える (Hoppe, *et al.* [8] による)。

しかし Grains Y は大部分の SiC 粒子とは異なる Si 同位体比を持つ。Si の同位体比を図 4 [8] に示す。個々の SiC 粒子のデータは Grains X, Y を除き直線上に並んでいるように見える。Best fit line の傾きは 1.34 である。Grains X は ^{28}Si に大変富んでいる ($\delta^{28}\text{Si} = -249 \sim -459\%$, $\delta^{30}\text{Si} = -388 \sim -585\%$)。Grains Y はダイヤグラム上で大部分の SiC 粒子の best fit line の右側に位置している。これは大部分の SiC 粒子に比べて、 ^{30}Si に富んでいることを意味している。

^{27}Al は N とならんで SiC 粒子中に一番多く含まれている微量元素であり、その Al の量は 10 ppm から 10% 程度にまで及ぶ。 ^{27}Al を含んでいるということは当然、消滅放射性核種である ^{26}Al の壊変でできた (半減期 $7.4 \times 10^5 \text{yr}$) 放射性起源の ^{26}Mg を期待できるということである。Hoppe *et al.* [8] は Mg の同位体比と ^{27}Al の量の測定から $(^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al})_0$ を個々の SiC 粒子について求めた。

$(^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al})_0$ は SiC 粒子が生成された時点での $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ という意味である。Grains X, Y を除く普通の SiC の値の最高値は 10^{-3} 台である。多くの SiC 粒子は放射性起源の ^{26}Mg の量が少ないため上限値しか求められなかった。Grains Y は $(^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al})_0$ に関しては、普通の SiC 粒子と同じで 0 から 10^{-3} の値をもっている。それに対して、Grains X の $(^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al})_0$ は 0.1 から 0.6 と大変高い。

3. SiC の生成環境

上に述べたデータは SiC 粒子の起源という観点から見て何を意味するのであろうか。まず、SiC が生成されるためには $C > 0$ の条件が満たされていないといけない。またこれら粒子サイズの大きい SiC の起源を考えるうえで注意しなければならない事がある。それは Lewis *et al.* [5,6] の希ガスのデータは粒子の集合体で測定されたものということである。それに対し、Nichols *et al.* [9] は個々の SiC 粒子の希ガスを測定し、約 4% の粒子が Ne, He を担っていることを示した。彼らは Kr は測定しなかったので、軽い希ガスを担っている粒子が Kr をも担っているかどうかは不明である。しかし Kr を担っている SiC 粒子も全体のごく一部かも知れないとは言えるだろう。つまり、[5,6] の Kr や Xe の希ガスのデータは粒子全体の特性ではない可能性があるということである。

普通の SiC が ^{13}C と ^{14}N に富んでいるが、これは CNO サイクルを通しての水素燃焼の特徴を表している。low または中程度 ($< 8M_{\odot}$) の質量の星は “the first dredge-up” により水素燃焼に富んだ物質がエンベロープと混じりあい、エンベロープは $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ が 20~30, $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ が 500~850 (太陽系の値はそれぞれ 89, 272) となる。この後さらに、ヘリウム燃焼殻の生成物 (^{12}C , s-プロセス生成物) がエンベロープ物質と混じり合うので、 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ は高くなってゆく。

普通の SiC の $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ は 50~80 で、このシナリ

オから推測される同位体比と一致する。少数であるが、 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ が20より下回るものがある。これらは Hot Bottom Burning という過程か J-type 炭素星から来たとする、炭素の同位体比は説明できる。しかし、これら $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ の低い粒子の他の同位体比を全て説明できるわけではない。

SiC 粒子の Si 同位体比は議論の的になっている。理論では AGB 星の進化に従い、Si の同位体比は傾き0.5~1の直線によって進むはずであるが、実際のデータは傾き1.34の直線に沿っている。最近、Gallino *et al.* [10] はこれを複数の星のエンベロープの初期の重元素存在度の違いにより、説明しようとしている。

Grains X の起源については超新星であろうという説が有力ではあるが、Grains X の全ての元素の同位体比を説明できるわけではない。Grains Y の起源についてはまだあまりよくわかっていない。

4. おわりに

隕石中から星間塵を分離しそれらの同位体比を実験室で測定できるようになって、我々の星内の核合成に関する知識は大きく広がった。この手法は、天文学の新しい分野として、今後ますます発展してゆくであろう。

参考文献

- [1] Lewis, R. S., Tang, M., Wacker, J. F., Anders, E., and Steel, E. 1987: Interstellar diamonds in meteorites, *Nature*, **326**, 160-162.
- [2] Bernatowicz, T., Fraundorf, G., Tang, M., Anders, E., Wopenka, B., Zinner, E., and Fraundorf, P. 1987: Evidence for interstellar SiC in the Murray carbonaceous meteorite, *Nature*, **330**, 728-730.
- [3] Tang, M. and Anders, E. 1988: Isotopic anomalies of Ne, Xe, and C in meteorites
- II. Interstellar diamond and SiC: carriers of exotic noble gases, *Geochim. Cosmochim. Acta.*, **52**, 1235-1244.
- [4] Srinivasan, B. and Anders, E. 1978: Noble gases in the Murchison meteorite: possible relics of s-process nucleosynthesis, *Science*, **201**, 51-56.
- [5] Lewis, R. S., Amari, S., and Anders, E. 1990: Meteoritic silicon carbide: pristine material from carbon stars, *Nature*, **348**, 293-298.
- [6] Lewis, R. S., Amari, S., and Anders, E. 1993: Interstellar grains in meteorites II. SiC and its noble gases, *Geochim. Cosmochim. Acta*, submitted.
- [7] Gallino, R., Busso, M., Picchio, G., and Raiteri, C. M. 1990: On the astrophysical interpretation of isotope anomalies in meteoritic SiC grains, *Nature*, **348**, 298-302.
- [8] Hoppe, P., Amari, S., Zinner, E., Ireland, T., and Lewis, R. S. 1993: Carbon, nitrogen, magnesium, silicon, and titanium isotopic compositions of single interstellar silicon carbide grains from the Murchison carbonaceous chondrite, *Astrophys. J.*, submitted.
- [9] Nichols, R. H. Jr., Hohenberg, C. M., Hoppe, P., Amari, S., and Lewis, R. S. 1992: $^{22}\text{Ne-E(H)}$ and ^4He in single SiC grains and $^{22}\text{Ne-E(L)}$ in single $\text{C}\alpha$ grains of known C-isotopic compositions, *Lunar Planet. Sci.* **XXIII**, 989-990.
- [10] Gallino, R., Raiteri, C. M., Busso, M., and Matleucci, F. 1993: The puzzle of silicon and titanium anomalies in meteoritic silicon carbide grains, *Astrophys. J.*, submitted.