

イオンプローブによる星間塵の同位体比測定

甘利 幸子¹⁾

1. はじめに

1960年代には宇宙地球化学者たちは隕石も地球も(いったん蒸発して)均一となった太陽系星雲からつくられたと考えられていた。しかし1960年代の半ばに Reynolds により異常 Xe (excess ^{136}Xe) が発見され、後半に Black and Pepin (1969) が炭素質コンドライト中に当時知られていた太陽系中のどの Ne とも異なる同位体比をもつ Ne の存在を報告し、さらに、Mg 同位体比異常、O 同

位体比異常が報告されるに到り、太陽系星雲はこれまで考えられていたように均一でなく、ごくわずかであるが始原隕石中に45億年以上前の星雲形成前の記憶を保持している物質が蒸発をまぬがれて存在していることがわかった。その後とりわけ希ガスの同位体比異常をもつ物質については、それらを同定する試みが種々行なわれてきたが (e. g., Eberhardt, 1974), 実際にこうした太陽系外起源物質が隕石の中から単体の形で実際に分離され同定されたのは、ついこの数年の出来事に過ぎない。これら

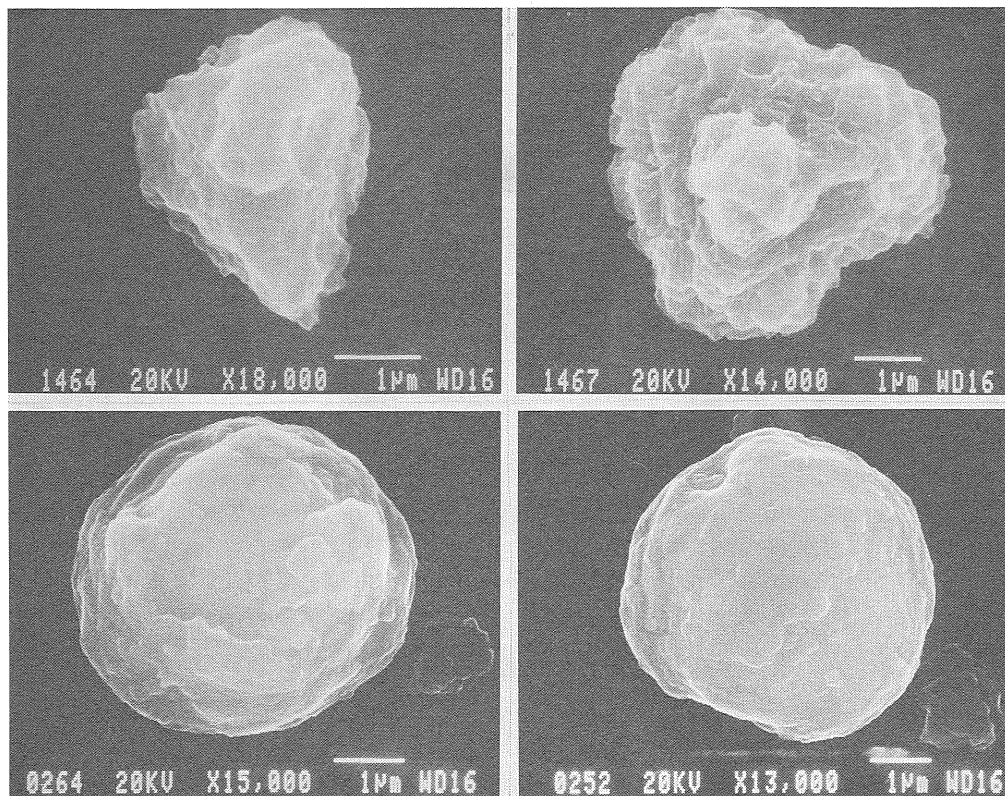


写真1 SiC (上段2個)とグラファイト (下段2個)の写真。右下の線は1マイクロンである。

1) McDonnell Center for the Space, Sciences, Washington University: Box 1105, One Brookings Drive, St. Louis, MO 63130-4899, U. S. A.

キーワード: 星間塵, 核合成, 隕石, SiC, グラファイト

はダイヤモンド (Lewis et al., 1987), SiC (Tang and Anders, 1988), そしてグラファイト (Amari et al., 1990 a) である。写真 1 に SiC とグラファイトを示す。この 3 種類はいずれも同位体比異常を示す希ガスを含んでいる。ダイヤモンドは Xe-HL (軽い Xe 同位体と重い同位体が共に enrich している成分), SiC は Ne-E(H) (^{22}Ne に富んだ成分, 後述する Ne-E(L) に比べて高密度 ($3\text{--}3.5\text{ g/cm}^3$) のフラクシオンに濃集し希ガスを高温 ($1200\text{--}1400^\circ\text{C}$) で放出する.), および s-プロセス (slow neutron capture process) Kr と s-プロセス Xe, グラファイトは Ne-E(L) (^{22}Ne に富んだ成分, 密度が 2.3 g/cm^3 以下のフラクシオンに濃集し, $500\text{--}700^\circ\text{C}$ で Ne を放出する.) と呼ばれる同位体比異常をもっている。これら 3 つの星間塵は星の大気が $\text{C} > \text{O}$ である carbon star と呼ばれる星で生成された。これらはいずれも化学的に安定なため, 分離する際のトレーサーとして希ガスを使い, 隕石を化学的に溶解して抽出されたものである。抽出された星間塵の同位体比から我々はそれがどのような星から来たのか, 星の中の核反応はどうであるか, 理論に照らして調べ理解を深めることができる。イオンプローブはそのためには強力な分析手段である。その最大の利点は粒子が 1 マイクロンかそれ以上であれば粒子 1 個 1 個の同位体比が測定できることである。

ここではイオンプローブによる SiC とグラファイトの同位体比測定について述べる。星間塵の同位体比について述べる前に, 少し簡単にこれらの星間塵に関連のある, 星内部での核合成反応について見てみよう。宇宙初期に生成された元素は軽い元素だけだったと考えられる。重い元素は 150 億年にわたる宇宙の進化の過程で星の内部で生成されたものである。鉄より重い元素を合成する反応は中性子捕獲反応と呼ばれる反応であり, それには二つの独立の反応系列がある。一つは, 速い中性子捕獲反応 (r-プロセス, rapid neutron capture) と呼ばれるもので, $1\text{--}100$ 秒間に 100 個程度までの中性子捕獲が起こり, 中性子に富んだ不安定な同位体が生成され, その後のベータ崩壊で安定な同位体が合成される反応である。これは超新星などのカスτροφイックな星の爆発時に起こると考えられる。もう一つは遅い中性子捕獲反応 (s-プロセス, slow neutron capture) であり, 中性子捕獲が比較的長いタイムスケール ($10^3\text{--}10^6$ 年) で起こり原子核がベータ崩壊した後に次の中性子捕獲が起こるものである。この反応により一般的に質量数が偶数の同位体の存在度が高くなる。

2. SiC

2-1. 大多数の SiC

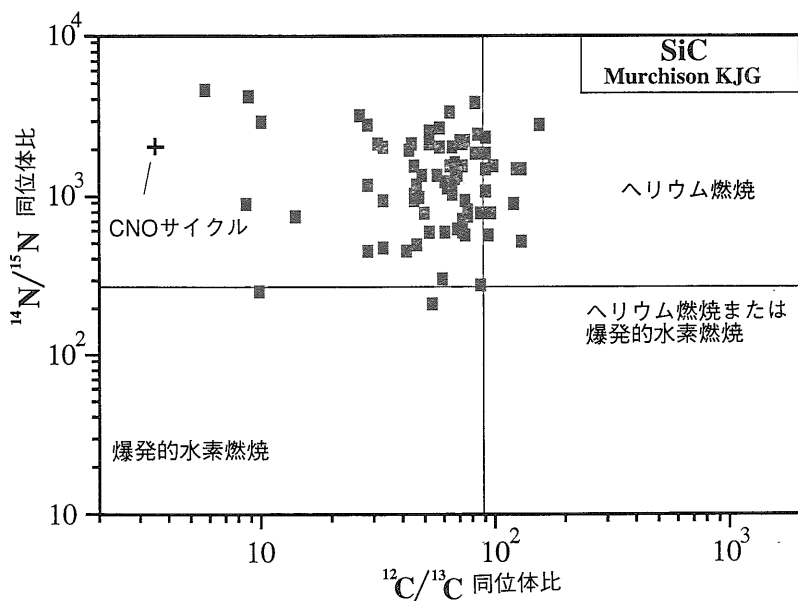
先に述べたように上記の三種類の星間塵は化学処理に対して極めて安定であり, しかも希ガスの同位体比異常を持っていると言うことが同定, 分離を可能にした大きな要因である。というのは SiC を例にとると Murchison 隕石に 6 ppm しか含まれておらず, それらを隕石中から濃集するのは西洋の諺にあるように“干し草の中から針をさがす”に等しいからである。はじめて分離, 同定に成功したシカゴのアンダースグループは化学的・物理的に干し草をひとつひとつ除いていくという方法をとっている。

SiC は通常研磨剤に使用されていることからわかるように堅い鉱物である。星の大気中では C と O が化合して CO となり O が全部使いはたされた後に Si と C が結合して生成される。

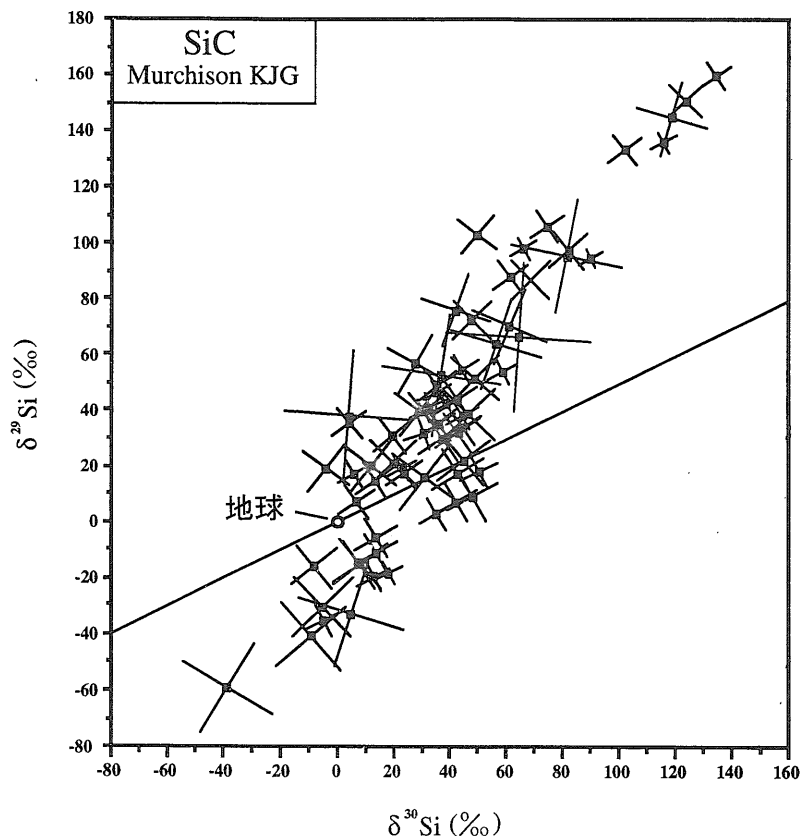
1988年, Tang and Anders (1988) が, Murray 隕石 (CM) から SiC に富んだフラクシオンを得ることに成功し, 初めて Ne-E(H) と s-プロセスの担体と同じ鉱物であることがわかった。Zinner et al. (1987) はそれらのフラクシオンの C, N, Si の同位体比をイオンプローブで測定し, どの同位体比も太陽系の同位体比 (solar ratio) に比べて異常を示すことを見いだした。その異常は Si の同位体比では約 50 倍にも達する。そのことから彼らはこれらのフラクシオンの中に含まれる鉱物—主に SiC—が太陽系外起源であることを結論した。

さらに Tang et al. (1989), Zinner et al. (1989) は, 新たに Murchison 隕石から濃集した SiC に富むフラクシオンの Si, C, N 同位体比を測定した。彼らは Zinner et al. (1987) と同様にそれらの同位体比に大きな異常が見られることを報告している ($^{12}\text{C}/^{13}\text{C}=10$ から 90 , $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}=50$ から 6000 , $^{29}\text{Si}=-50$ から $+110\%$, $^{30}\text{Si}=-50$ から $+110\%$)。彼らはさらに aggregate の同位体比も測定したが, 同時に 12 個の大きな ($2\text{--}10$ マイクロン) SiC 粒子の同位体比を個々に測定した。aggregate による測定では多数の粒子の平均値を求められるという利点はあるが起源が異なる粒子を“解読”するためには個々の粒子の測定が大きな意味を持つ。Solar より低い $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$, 高い $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ は水素燃焼時の CN 循環反応の特徴を示している。これらの結果から, 彼らは大部分の SiC 粒子は赤色巨星から来たかと結論した。

SiC の起源についてのさらに詳細な情報は, 新しく Murchison 隕石から分離された高純度のフラクシオン (Amari et al., 1992) から得られた。彼らは SiC をサイズにより分け, Lewis et al. (1990) はそれらのフラクシ



第1図 SiC 粒子 (2-5 マイクロン) の C, N 同位体比.



第2図 SiC 粒子 (2-5 マイクロン) の Si 同位体比.
直線は傾き 1/2 のフラクションを表わす.

シンの希ガスを測定した。Lewis et al. (1990) は Gallino et al. (1990) と共に SiC が赤色巨星の進化の一段階である AGB (asymptotic giant branch) stars に由来することを示した。AGB stars は中心に C, O のコアを持ち外側は巨大な H envelope が取り囲んでいる。またその両者の間には薄い He-burning shell があり、そこで s-プロセスが起こっていると考えられている。Lewis et al. (1990) は SiC の希ガスは He-shell とそれを取り巻く H envelope の希ガスの混合であると結論した。さらに $^{80}\text{Kr}/^{82}\text{Kr}$ および $^{86}\text{Kr}/^{82}\text{Kr}$ が粒子サイズによって組織的に変動する ($^{80}\text{Kr}/^{82}\text{Kr}$ は粒子サイズが増加するにつれて減少し、一方 $^{86}\text{Kr}/^{82}\text{Kr}$ は増加する.)。このことは1個の AGB star のなかの異なった pulse (He-burning shell は周期的に熱的に不安定になるがそれは thermal pulse と呼ばれる.) に由来するものであるか、または異なった中性子照射量を持つ複数の星に由来するもののどちらかと考えられることを示した。

Zinner et al. (unpublished data) は Lewis et al. (1990) が使ったものと同じフラクションの中の比較的大きな (1-6 マイクロン) 数個の SiC フラクションを使って個々の粒子の C と N の同位体比を測定した。第1図にそのうちの一つのフラクションの C と N の同位体比測定の結果を示す。図に示されているように個々の粒子の $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ は大部分は solar C ($^{12}\text{C}/^{13}\text{C}=89$) より低い。また $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ は solar N ($^{14}\text{N}/^{15}\text{N}=272$) よりたかい。また Si の同位体比(第2図)は傾き1.3の直線にのるようにみえる。他方核合成理論によれば、He shell で生成される Si は $^{29}\text{Si}/^{30}\text{Si}$ が 0.4 となることが期待される。従って

H envelope 中の Si の同位体比が solar だと仮定すれば、混合を考えれば傾き 0.4 の直線に乗るはずである (Solar Si は第 2 図で原点である事に注意)。この理論と測定の違いはいまだに説明されていない。Stone et al. (1990) も Murchison, Orgueil 隕石中の Si の同位体比をはかり、傾き 1.4 の直線にのることを報告している。

より細かいサイズのフラクションについては粒子自体がすぐスパッタされてしまうので個々の粒子の同位体比を測定することは困難であり、このため Amari et al. (1991a) は 5 個の SiC フラクション (0.2-1.7 マイクロン) の aggregate についての平均値を求めた。この結果は、C, N, Si の同位体比は $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}=37-42$, $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}=365-516$, $\delta^{29}\text{Si}=22-32\%$, $\delta^{30}\text{Si}=35-42\%$ とほぼ同じ範囲にかたまり Kr 同位体比にみられたような、粒子サイズによる系統的な変動は見られなかった。

Si, C などの主要元素だけでなく、微量元素の同位体比もイオンプローブで測定されている。

Lewis et al. (1990) の希ガスの測定からフラクション KJB (0.3-0.7 マイクロン) に s-プロセスで生成された Xe が最も濃集している (80% の ^{130}Xe は s-プロセス起源である。) ことがわかっていて、それゆえ他の元素の s-プロセスの“指紋”を見いだすには KJB は最も適当なフラクションであるといえる。

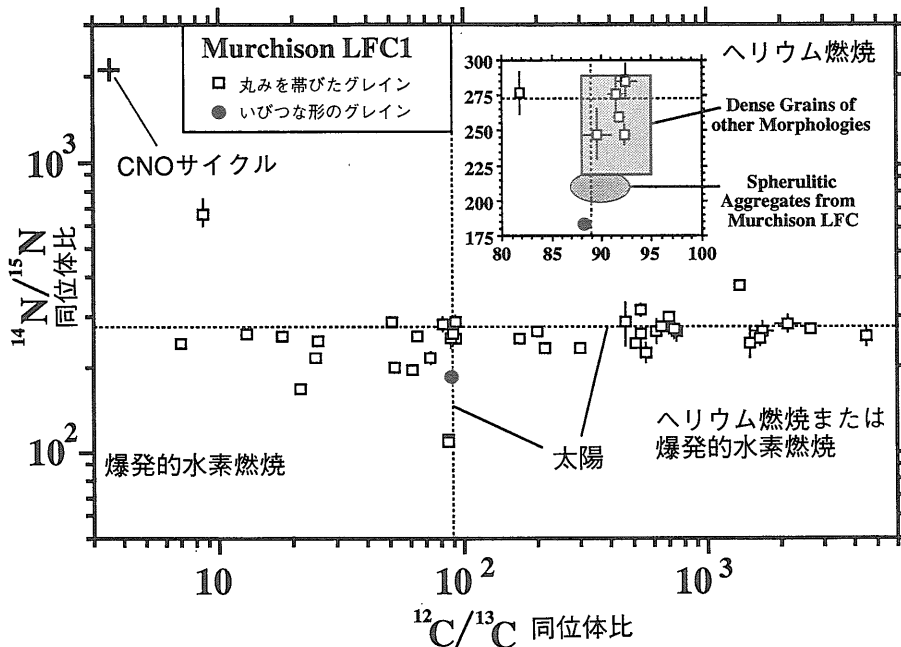
Zinner et al. (1991a) は 0.2-3.0 マイクロンにわたる 6 個のフラクションの Ba を測定した。この結果から、Xe の場合と同じように 85% の ^{136}Ba が s-プロセス起

源であることがわかった。この測定で注目すべき点は $^{138}\text{Ba}/^{136}\text{Ba}$ も Kr の同位体比と同じく粒子サイズによって組織的に変化するが、中性子照射量との関係が逆になることである。すなわち Kr 同位体比の変動は粒子サイズが大きくなるに従って、中性子照射量が増加することで説明できるが、Ba の同位体比の変動を説明するためには粒子サイズが大きくなるに従って中性子照射量が減少しなければならない。つまり Kr と Ba から導きだされる結論は逆であるということである。この不一致についての解釈は、今後の研究に待つべきであろう。

その他、Ti (Ireland et al, 1991; Amari et al, 1991b), Nd (Zinner et al., 1991a), Sm (Amari et al., 1991b) などの同位体比も測定されているが理論と実験値にはずれが見られる。

2-2. 異常の同位体比をもつ 2 個の粒子

これまで全部で約 120 個の SiC の同位体比が個々に測定されたが、そのうち 2 個は前にのべた他の粒子と全く異なった同位体比を持っていた (Zinner et al., 1991 b)。Zinner et al. (1991 b) はそれらを “Grain X and X2” と呼んでいる。それらは軽い C ($^{12}\text{C}/^{13}\text{C}=1135, 304$), 重い N ($^{14}\text{N}/^{15}\text{N}=18, 106$), 軽い Si ($\delta^{29}\text{Si}=-379, -459\%$; $\delta^{30}\text{Si}=-591, -454\%$) を持っている。 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ も 0.2, 0.23 である。Grain X2 には Ca の異常 (3000 permil) も見られる。いまのところこれらがどの星から来たのか、つまりこれらの同位体比をすべて説明できるような星の site は見いだされていない。



第 3 図
LFC 1 中のグラファイト粒子の C, N 同位体比。四角いシンボルの “round grain” がグラファイトを表わす。

3. グラファイト

グラファイトは Ne-E (L) の担体である。Amari et al. (1990a) が最初に分離したフラクシオン LFC 1 (1.75-2.2g/cm³, >1 マイクロン) の ¹²C/¹³C の同位体比は、7 から 4000 までにわたり非常に大きな範囲に及んでいる (第3図)。一方窒素の同位体比は solar ratio に近いものが多い。しかしながらグラファイトの窒素の濃度は極めて低く (N は CN⁻ として測定されるがグラファイトの CN/C は 0.02 以下である。), それゆえ少しの地球物質の混入も同位体比に大きな影響を及ぼすので、全く地球物質混入の影響が無いとは言いきれない。

Amari et al. (1990 b) は Murchison 隕石から分離を行ない LFC 1 とほぼ同じ密度領域から、KE 1 (1.6-2.05 g/cm³), KFA 1 (2.05-2.10g/cm³), KFB 1 (2.10-2.15g/cm³), KFC 1 (2.15-2.20g/cm³) という、4 個の粒子サイズが 1 マイクロン以上のフラクシオンを取り出した。Ne-E(L) の放出パターンは KE 1 がゆるやかな一つのピークであるのに対し、KFA 1, KFB 1, KFC 1 は低温 (600°C) と高温 (800-900°C) に二つのピークを持っている。これは明らかに Ne-E(L) には二つの担体があることを示している。一つは 600°C で Ne-E(L) を放出し密度は 1.6-2.15g/cm³, もう一つは 900°C で Ne-E(L) を放出し密度が 2.15-2.20g/cm³ のフラクシオンに濃集する。特に KFC 1 は 85% の Ne-E(L) が高温のピークで放出されているので高温で Ne-E(L) を放出する担体に富んでいることがわかる。はたしてこの二つの担体の違いが Ne-E (L) の放出温度だけであるかどうか、他の特性にも違い

があるかどうかを調べるため KFA 1 と KFC 1 の C の同位体比を測定した (Amari et al., 1990c)。その結果二つのフラクシオンとも、それぞれ軽い、solar-, それに重い同位体比を持った三種類の粒子を含んでいるものの、その相対分布の違いがあることがわかった (第4図)。KFA 1 は重いものと、solar の同位体比をもつ粒子に富んでいるのに対し、KFC 1 は 80% の粒子は軽い同位体比を持っている。つまり高温で Ne-E(L) を放出する担体は軽い C の同位体比を持っていることがわかる。

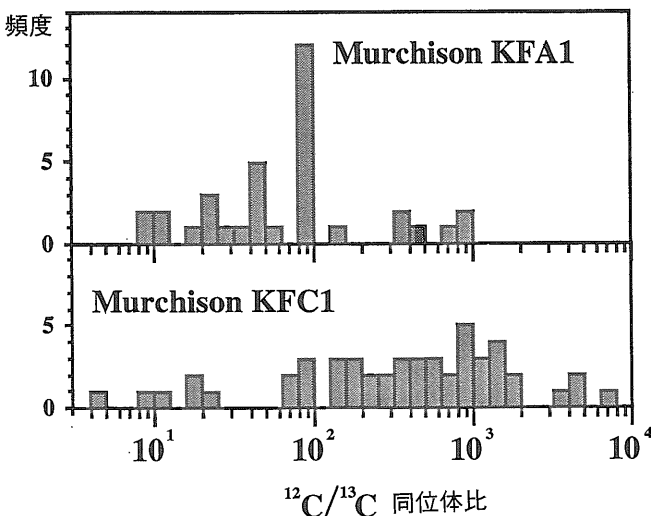
KFA 1 中の大きな (2-8 マイクロン) グラファイトのいくつかで Al, Mg の同位体比も測定されている。この測定が難しいのは、Al, Mg は O⁻ 一次イオンを使って測定しなければならないのだが、主要元素の C は O⁻ 一次イオンで二次イオンになる率は低いので粒子の位置をさがすことが難しいためである。C の同位体比が軽い、重いにかかわらず測定された数個のグラファイトの ²⁶Al/²⁷Al は大変高い値を示した。あるものでは上限値しか求められなかったが、5 個の粒子では 0.007-0.06 であった (Zinner et al., 1991 c)。

グラファイトがどのような種類の星から由来したかについては SiC ほど詳細な情報はまだ得られていない。しかし少なくとも二つの担体があるということ、s-プロセス Kr, s-プロセス Xe が同じフラクシオンから検出されるということから複数のソースに由来するものであり、そのうちの一部分は ABG stars から来ているのかも知れない。

4. 終わりに

ここでは主に炭素質コンドライトの中の星間塵に関して紹介したが普通コンドライトにも SiC やダイヤモンドが含まれており (Huss, 1990, Alexander et al., 1990b), イオンプローブでの測定で隕石の種類により Si の同位体比が異なるという結果が報告されている (Alexander et al., 1990 a)。これからは炭素質コンドライトのみでなく、普通コンドライト中の星間塵についてもますます研究が進むに違いない。また、ここでは述べなかったが、ダイヤモンドは CM 隕石中には 500 ppm と最も多量に存在する星間塵であり、グラファイト中から発見された細粒 (7-21 nm) の TiC (Bernatowicz et al., 1991) は実験室で確認された 4 番目の星間塵となった。

イオンプローブは星間塵の研究にたいへん大きな役割を果たして来た。イオンプローブの特性は特に個々の粒子の測定に遺憾なく発揮され



第4図 KFA 1 と KFC 1 中のグラファイトの C 同位体比のヒストグラム。縦軸はグラファイトの個数を表す。

ている。粒子1個1個の由来を調べることができ、我々の星の中での核合成に関する知識は理論と星間塵の同位体比測定結果を比較することによって飛躍的に広がりつつある。イオンプローブを使った実験は今後ますます発展していくものと思われる。

謝辞：この原稿を読んで有益なコメントをくださった小嶋 稔教授に、また未発表のグラフを使うことを快諾してくださった Ernst Zinner 教授に感謝します。

文 献

- Alexander, C. M. O'D., Arden, J. W., Pier, J., Walker, R. M. and Pillinger, C. T. (1990 a): Ion probe studies of interstellar SiC in ordinary chondrites. *Lunar Planet. Sci.*, **21**, 9-10.
- Alexander, C. M. O'D., Arden, J. W., Ash, R. D. and Pillinger, C. T. (1990b): Presolar components in the ordinary chondrites. *Earth Planet. Sci. Lett.* **99**, 220-229.
- Amari, S., Anders, E., Virag, A. and Zinner, E. (1990a): Interstellar graphite in meteorites. *Nature*, **345**, 238-240.
- Amari, S., Lewis, R. S. and Anders, E. (1990b): Interstellar graphite in meteorites: Growing complexity, implied by its noble-gas components. *Lunar Planet. Sci.* **21**, 19-20.
- Amari, S., Zinner, E. and Lewis, R. S. (1990c): Two types of interstellar carbon grains in the Murchison carbonaceous chondrite. *Meteoritics* **25**, 348-349.
- Amari, S., Zinner, E. and Lewis, R. S. (1991a): The C, N, Al and Si isotopic compositions of SiC grain size separates from Murchison: Indirect evidence for highly anomalous grains. *Lunar Planet. Sci.*, **22**, 19-20.
- Amari, S., Zinner, E. and Lewis R. S. (1991b): Ca, Ti, and Sm isotopic compositions of fine-grained interstellar SiC. *Meteoritics*, **26**, 314.
- Amari, S., Lewis, R. S. and Anders, E. (1992): Interstellar grains in meteorites. I. Isolation of SiC, graphite, and diamond; Size distributions of SiC and graphite. *Geochim. cosmochim. Acta*, submitted.
- Bernatowicz, T. J., Amari, S., Zinner, E. K. and Lewis, R. S. (1991): Interstellar grains within interstellar grains. *Ap. J.*, **373**, L 73-L 76.
- Black, D. C. and Pepin, R. O. (1969): Trapped neon in meteorites-II. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **6**, 395-405.
- Eberhardt, P. (1974): A neon-E-rich phase in the Orgueil carbonaceous chondrite. *Earth Planet. Sci. Lett.* **24**, 182-187.
- Gallino, R., Busso, M., Picchio, G. and Raiteri, C. M. (1990): On the astrophysical interpretation of isotopic anomalies in meteoritic SiC grains. *Nature* **348**, 298-302.
- Huss, G. R. (1990): Ubiquitous interstellar diamond and SiC in primitive chondrites: abundances reflect metamorphism. *Nature* **347**, 159-162.
- Ireland, T. R., Zinner, E. K. and Amari, S. (1991): Ti isotopic composition of Murchison SiC. *Lunar Planet. Sci.* **22**, 613-614.
- Lewis, R. S., Tang, M., Wacker, J. F., Anders, E. and Steel, E. (1987): Interstellar diamonds in meteorites. *Nature* **326**, 160-162.
- Lewis, R. S., Amari, S. and Anders, E. (1990): Meteoritic SiC: Pristine material from carbon stars. *Nature* **348**, 293-298.
- Stone, J., Hutcheon, I. D., Epstein, S. and Wasserburg, G. J. (1990): Si isotopes in SiC from carbonaceous and enstatite chondrites. *Lunar Planet. Sci.* **21**, 1212-1213.
- 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.
- Tang, M., Anders, E., Hoppe, P. and Zinner, E. (1989): Meteoritic silicon carbide and its stellar sources; implications for galactic chemical evolution. *Nature*, **339**, 351-354.
- Zinner, E., Tang, M., and Anders, E. (1987): Large isotopic anomalies of Si, C, N and noble gases in interstellar SiC from the Murray meteorite. *Nature*, **330**, 730-732.
- Zinner, E., Tang, M. and Anders, E. (1989): Interstellar SiC in the Murchison and Murray meteorites: Isotopic composition of Ne, Xe, Si, C and N. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **53**, 3273-3290.
- Zinner, E., Amari, S. and Lewis, R. S. (1991a): S-process Ba and Nd in presolar Murchison SiC. *Lunar Planet. Sci.*, **22**, 1553-1554.
- Zinner, E., Amari, S. and Lewis, R. S. (1991b): Silicon carbide from a supernova? *Meteoritics*, **26**, 413.
- Zinner, E., Amari, S., Anders, E. and Lewis, R. S. (1991 c): Large amounts of extinct ²⁶Al in interstellar grains from the Murchison carbonaceous chondrite. *Nature*, **349**, 51-54.

AMARI Sachiko (1992): Isotopic analyses of interstellar grains by SIMS

<受付：1991年11月8日>