

窒素同位体惑星科学

橋爪 光¹

1. メインテーマは「太陽系形成初期における同位体不均質性」

地球外物質中の窒素同位体の研究は 1970 年代に Apollo 計画により月の表土が地球に持ち帰られたときに本格的に開始された。月の表土中に打ち込まれた太陽風中の窒素同位体の興味深い測定結果が報告されて以来 25 年、月試料や様々な隕石中の窒素同位体が測定されてきた [1, 2]。窒素同位体が主にハイライトするテーマは「太陽系形成初期における同位体不均質性」である。

コンドライト隕石の化学・鉱物組成を説明するために提唱され、隕石研究者の間で広く受け入れられた古典的なダスト形成のシナリオ - 平衡凝縮論 - において、隕石は - そして惑星は - 熱い原始太陽系星雲ガスが冷却する際に生じた凝縮物を材料に形成された、と説明された。初期状態として熱い星雲ガスを仮定するということは、すべての惑星物質中の元素・同位体は均一な出発点を持つことを意味する。しかしながら、隕石中の酸素同位体の研究[3]から原始太陽系星雲が完全に均一な同位体組成を持っていたという仮定は少なくとも完全には成り立たないことが示された。

同位体不均質性というテーマは高揮発性元素 - H, C, N, O 及び希ガス - の同位体の研究に共通のものである。ただ、これらの元素の間でも、その化学的屬性の違いを反映し、不均質性見え方 - 観測の容易さが相当違う。窒素に注目するのは観

測される同位体比異常の程度が非常に大きいからである。窒素は同位体不均質性を探るのに非常に感度のよいプローブとしての役割を担う。

2. 隕石中の presolar grain とその分布

熱変成度の低いコンドライト隕石の中には太陽系のものとは全く異なる同位体比組成を持ち、太陽以外の恒星の周囲、あるいは星間空間で形成されたと考えられている presolar (interstellar) grain と呼ばれる微粒子が存在する。これらはいずれも希ガス, C, N, O その他の元素の同位体比組成に著しい異常を持つ。

Presolar grain として認められたもの - 単離され、同位体比異常を根拠にそう判断されたもの - は現在 5 種類存在する。それらは 1980 年代に発見され詳細に調べられている 3 種類の炭素質キャリア - ダイヤモンド・SiC・グラファイト [レビュー: 4, 5] に加えて最近報告された Al_2O_3 [6]・ Si_3N_4 [7] である。表 1 にこれら presolar grain の特徴的な同位体比組成をまとめる。これらの中で粒径が比較的大きいもの - SiC, グラファイトや Al_2O_3 で $1\mu m$ 程度以上のものについては、SIMS(2 次イオン質量分析計)を用いて粒子 1 個ごとの主要構成元素 C, N, O や Si などの同位体が測定されている。SiC 中の C, N やグラファイト中の C の各同位体比はとてつもなく広い範囲 (太陽組成をはさんでその両側に 3-4 桁の範囲) にわたって値がばらついている。このことはそれぞれの presolar grain は多様な (核合

¹大阪大学理学部

表1. Presolar grain 一覧

ホスト相	ダイヤモンド	SiC		グラファイト	Al ₂ O ₃	Si ₃ N ₄
平均粒径(μm)	0.001	0.03-10	0.03-10	0.8-7	max. 8	0.4 - 5.0
特徴的な希ガス	Xe-HL	Xe-S	Ne-E(H)	Ne-E(L)		
隕石中の含有量 (ppm)	400	7	7	<2	0.5 (1-8μmのもの)	0.03
		(C2 コンドライト中)			(C1 コンドライト中)	(非平衡普通 Chnd.中)
(¹² C/ ¹³ C) @=1 (*)	1.04	0.02-28	0.02-80	0.02-28		
(¹⁴ N/ ¹⁵ N) @=1 (*)	1.52	0.05-60	0.15-1.8	0.05-60		0.81
(¹⁷ O/ ¹⁶ O) @=1 (*)					2.5 - 6.8	
(¹⁸ O/ ¹⁶ O) @=1 (*)					0.58 - 1.0	

注*: 実際には標準試料の同位体比で規格化している。太陽の同位体比組成の詳しい値はわかっていない。

引用: ダイヤモンド・SiC・グラファイト: [4]; Al₂O₃: [6]; Si₃N₄: [7]

成の条件の異なる複数の場を) 供給源として持つことを示唆する。表1の値は個々の粒子の持つ同位体比組成の範囲を示した。([4, 6, 7] の数値を引用。)

ある presolar grain を粒子毎ではなく何千個とまとめて同位体測定をすると隕石中のその presolar grain の持つ同位体平均値がわかり、同位体組成の分布が隕石毎に異なるかどうかを推察することができる。[8] によると CI や CM コンドライト隕石中の SiC は隕石によらず、比較的一定の C, N 平均同位体比組成を持つことがわかった。Presolar grain のうち、ダイヤモンド・SiC はほとんどのグループのコンドライト隕石で確認されている[9]。しかも、これらの presolar grain の存在量は熱変成度の違いによってのみ変化し、隕石のグループの違いにほとんど依存しないことが報告された[9]。異なる化学グループ (例えば CI や CM といった分類) のコンドライト隕石は異なる隕石母天体を起源に持つと考えられているので、上の結果はダイヤモンドや SiC が原始太陽系星雲のある程度の広い空間 - 複数のコンドライト隕石母天体が形成した領域 - において均質に分布していたということを示唆する [9]。

Presolar grain はいくら同位体比異常が顕著でも隕石の中からその成分だけを分離し、鉱物相が確認されないとそうは呼ばれない。確認された上記

の5種類以外にキャリアの特定できていない presolar grain はまだ何種類も存在するらしい。窒素同位体は未知の presolar grain を含む隕石を探し出しそのキャリアの候補を絞ってゆく段階でその威力を発揮する。全岩で、つまり鉱物分離をしない状態でも、窒素の同位体比異常を持つ presolar 成分が検知できることも多い (例, [10])。窒素に同位体比異常が見えやすいわけは、おそらく、窒素は揮発性が著しく高く、その上太陽系が全体的には酸化的な雰囲気であるため (C/O 存在比が1よりかなり低い) 太陽系平均同位体比組成を持った窒素を含む凝縮物が少なく[11]、なおかつ、炭素に富んだ還元的な環境で形成された多くの presolar grain の中には窒素が豊富に含まれるためと考えればよいのではなかろうか。(窒素は N₂ 分子 (気相) が広い温度範囲にわたって熱力学的に非常に安定であり、窒素を含む固相は形成されにくい。しかしながら、酸素が欠乏している系では、例えば窒化物の形や珪酸塩中の酸素を置換するような形で、窒素はある程度は凝縮する。)

Presolar 成分としてもう一つ重要なのは有機物である。(これも presolar grain の仲間に入れてもよさそうなものだが、presolar 成分の濃集は可能でもそれ単独の抽出というのはなかなか難しく上述の5種類とは区別される。) 隕石中の有機物はそれらの合成過程や生命の起源という問題に関連して

注目されている。隕石中に含まれる有機物の中には著しく高い D/H 比 (最高で $\delta D > 7000\text{‰}$) , 重たい窒素 ($\delta^{15}\text{N} > 90\text{‰}$) を持つものが観測されている [12]. 隕石に含まれる有機物を太陽系内で合成する方法として Fischer-Tropsch-type 反応や Miller-Urey 反応 などいくつかの過程が有望視され, 実際に実験室で合成実験が行われた. これらの過程で合成された有機物中の C,N,特に H 同位体比は材料の持つそれと隕石中の有機物の同位体比異常を説明できるほど大きくは変わらなかった. この実験を根拠に同位体比異常を持つ有機物は太陽系内で合成されたのではなく, おそらくは極低温の星間空間でイオン-分子反応のような過程で合成されたのではないかと考えられている. (一般に, 化学反応過程の際にはたらく質量依存同位体分別効果は温度の関数であり, 低温になるほど大きく効く. しかし, 反応速度も普通は温度の関数なので何か特別な励起源がないと低温では反応が進まない. イオン分子反応の場合, 宇宙線などが励起源となる.) 星間分子雲の電波観測の結果によると

星間分子雲中の有機物は非常に高い D/H 比 ($D/H > 0.01$, つまり $\delta D > 10^5\text{‰}$) を持つ. 隕石中の有機物の δD は異常を示すとはいえ, 上の値に比べると何桁か低い値を示す. このことに対する説明として次の様な選択肢があり, それぞれの可能性を検討しなければならない. 1. 隕石中の有機物は観測されている分子雲より温度の高い領域で合成された. 2. presolar 有機ダストが太陽系星雲内で太陽組成のガスと同位体交換をした, あるいは, 3. presolar 有機物が大量の太陽系起源の有機物とともに隕石母天体の中にとりこまれた. この問題は決着していないが, 考察の基礎となり得る興味深い成果が最近報告された. 図1に CI と CR 隕石中の有機物の δD と $\delta^{15}\text{N}$ を比較した結果を示す[13]. CR という化学グループのコンドライト隕石には高い D/H 比を持つ有機物が豊富に含まれていることが知られている. CI も有機物を豊富に含んでいる. CI と CR とでは, 有機物の持つ δD も $\delta^{15}\text{N}$ も異なるが, この2つの値の間には相関があることがわかる. Ash et al. [13] はこれは presolar 有機物と太

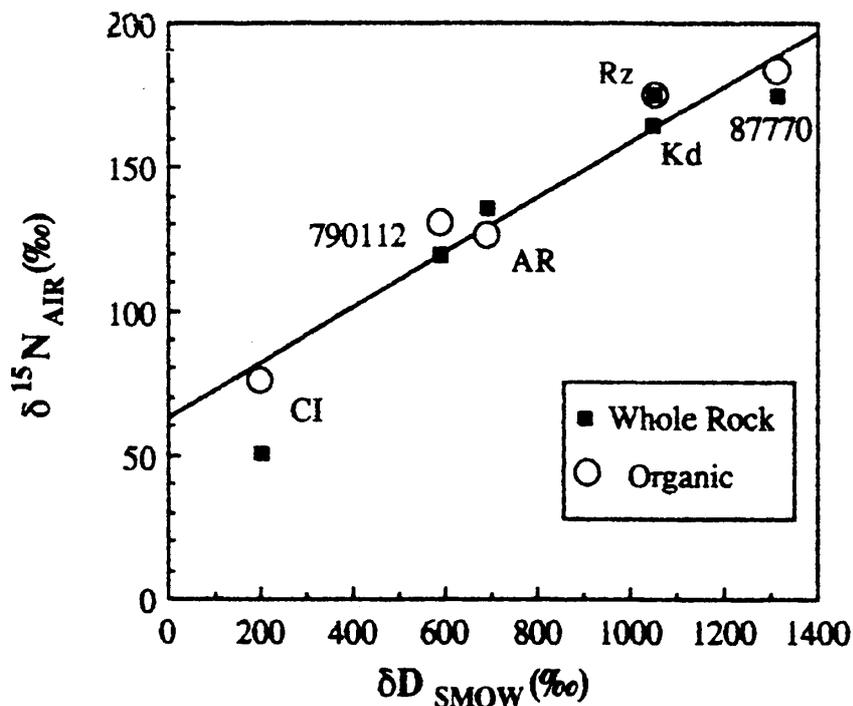


図1 CI 隕石と CR 隕石中の有機物および全岩の水素・窒素同位体比. [13] の図を引用. CI と記されているデータ点は CI 隕石のもの. それ以外は CR 隕石のデータ. 記号・数字は個々の隕石につけられた略符号. 790112, AR, Rz, Kd, 87770 はそれぞれ, Y790112, Al Rais, Renazzo, Kaidun, EET87770 をさす.

陽系有機物の混合曲線(直線)を表すのではないかと考えた。(δD と δ¹⁵Nだと分母が共通でないのになぜ混合の結果が直線で表されるのか不思議に思う方もおられるかもしれないが、次の2つの条件を満たせば混合の結果は直線に近似される。それは、1. presolar 有機物の有機物全体に占める割合が小さく、なおかつ、2. presolar 有機物中の H/N 比が太陽系有機物のものと大きく異なる場合である。1 が成り立つ可能性はすでに述べた。2 は有機物という形態を考える以上、極端に H/N 比平均値が異なることはむしろ考えにくいのではないかと、という予想に基づいてそう仮定された。) Ash et al. が他の可能性をすべて否定してこの説を展開しているわけではないが、ともかくもこれほどきれいな相関が見られたのは初めてである。図1が示すことがもう一つある。それは炭素質隕石の全岩の H, N 同位体比は有機物の持つ同位体比ではほぼ決まっている、ということである。後で述べるように隕石中の窒素同位体を全岩で測定すると、コンドライト隕石も分化隕石も隕石ごと、あるいは、隕石グループ毎に大きく異なる値を示す。原始太陽系星雲中の有機物の平均同位体比組成の場所による(隕石母天体による)違いは全岩隕石中の窒素同位体比異常の原因の解明の鍵となるかもしれない。また、presolar ダイヤモンドや SiC の一見均質に見える分布と有機物の同位体不均質性の整合的な説明なども今後の課題である。

今後の研究により presolar grain の一覧表を用意し、これらの presolar grain が原始太陽系星雲の中で周囲のガス・ダストと同位体平衡化しなかった(あるいは部分的にした)条件を推定し、星雲中の温度・圧力条件・化学組成に何らかの制約条件を課すこと、星雲中のダストの分布の同位体・化学不均質性を検証すること、及び太陽系の起源を推定することが presolar grain 研究の目的である。

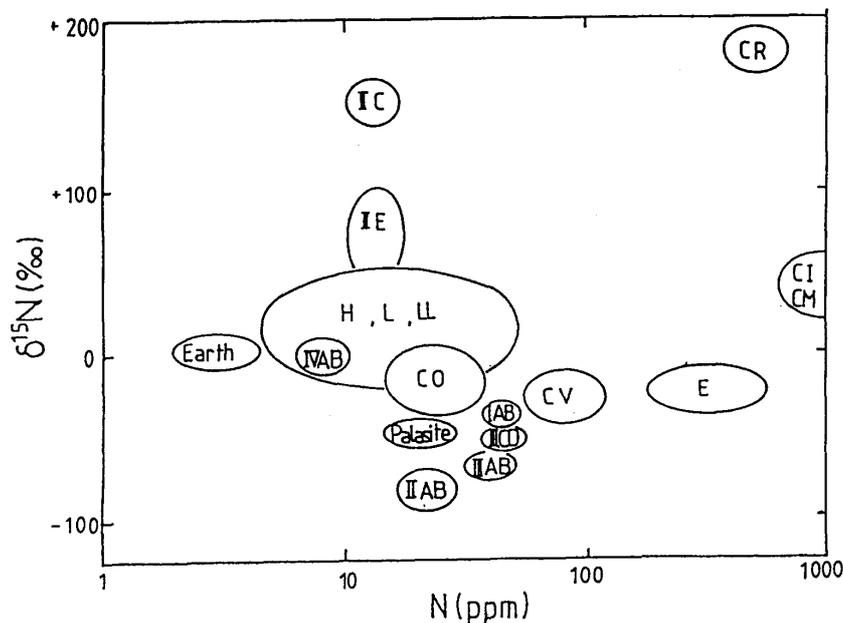
3. さまざまな隕石中の窒素同位体

様々な presolar grain を含む、微視的に見ると同位体的に不均質なダストの集まりを考える。様々な同位体比を持つダストが広範囲(例えば1つの微惑星が集積したときに集められたダストの存在した範囲、あるいはそれ以上)にわたって等しい混合比で存在していたならば、隕石母天体(微惑星)や惑星の材料という観点から見ればダストの集まりは同位体的に均質化されているといえる。同位体的に均質化されたダストのあつまりから出発すると全岩隕石中あるいは惑星構成物質中の平均同位体組成は隕石母天体集積以後変動する理由²がない限りどの隕石でも一定のはずである。

図2に全岩隕石中の窒素同位体比組成を示す。窒素同位体比組成は多くの隕石グループではグループに対応して窒素同位体比がある程度の範囲で決まっているのがわかる。これに対して普通コンドライト隕石は同じ化学グループのものでも隕石によって全岩窒素同位体比が 100 ‰ 近く[14]、あるいはそれ以上[10]異なる。

隕石グループ毎に窒素同位体比が大きく異なる主たる原因を考える。考慮しなければならないのは、化学(平衡)過程や拡散や蒸発などの非平衡過程に伴う質量依存同位体分別効果である。前者の場合、一般的に反応が低温(例えば、10-100K)で進行しないと 100 ‰ を超えるような窒素同位体の分別効果が生じないので、結局先ほど述べた presolar 有機物と同じところに問題が行き着く。非平衡過程による同位体分別は通常大規模な質量移動に伴って起こる。従って、このプロセスによる分別効果の場合、窒素の量と同位体比との間に相関 - 窒素存在量が少なくなるほど同位体比が高くなるという傾向 - が期待されるが、現実にはそのような傾向は見られない。普通コンドライト隕石

図2 種々の隕石中の全岩窒素同位体比.



のように同じ化学グループの隕石や鉄隕石のように窒素の主ホスト相が同じであると考えられる隕石に限定して比較してもやはり相関は見られない。(定量的にどの程度の分別効果が期待されるのかは分別係数に依存する。効果が最大の場合(窒素原子の媒体中の拡散を考え、拡散速度が質量の $-1/2$ 乗に比例すると仮定した場合)、例えば90%の窒素が失われると元の相に残った窒素の $\delta^{15}\text{N}$ は約80 ‰高くなる。実際にはガスが失われる際の同位体分別の程度は様々である。ほとんど同位体分別が起こらない場合もある。例えば、ホスト相が分解あるいは相変化してガスが失われた場合などはそうである。)結局、全岩隕石に見られる窒素同位体比異常の主原因が非平衡過程による同位体分別効果である可能性は低い。私は同位体比組成の初期値が隕石によって異なる、すなわち、原始太陽系星雲中の場所による(おそらくはpresolarダストの寄与による)窒素同位体不均質性をそのまま反映していると考えられる。

今後の窒素・酸素・炭素・水素それに希ガス同位体を組み合わせた研究により、同位体不均質が

どの程度の空間的広がりを持っていたのか、つまり、どの程度の空間スケールならダストの集まりは同位体的に均質あるいは不均質なのか、ということを知りたい。これにより原始太陽系星雲中のダストの初期分布やダストから微惑星が集積する際のダストの成長の様子や、ダストが乱流などにより混ざりあう様子などについての情報を得たい。

4. 惑星大気同位体組成

私たちの地球の表面を覆う窒素を主成分とする大気は二次大気だと考えられている。つまり、地球大気は地球の材料となった微惑星の中に含まれていた気相濃集元素-H, C, N, O及び希ガスを出発材料にして形成された。微惑星がどのような同位体比組成を持っていたのか?-惑星大気を構成する元素の同位体初期値の問題は大気の形成史に関する考察に制約を与えるので重要である。例えば、我々が知る隕石の中で最も元素組成が太陽に近いCIコンドライト隕石中に含まれる気相濃集元素の同位体・元素組成と同じものを地球大気の初期値

と仮定した場合、現在の地球大気の組成をすべて満足に説明できる大気形成シナリオはない。(窒素もうまく説明できない元素の一つである。CIコンドライト隕石は $\delta^{15}\text{N} = +50\text{‰}$ 程度の平均同位体比組成を持つ。最初 $\delta^{15}\text{N} = +50\text{‰}$ の組成を持っていたものを現在の大気の窒素同位体比組成 ($=0\text{‰}$ まで同位体分別効果で軽くすることはかなり難しい。) CIコンドライト隕石が気相濃集元素の同位体組成についてまでも太陽系を代表するような物質であったのか、という点を検討しなければならない。少なくとも窒素に関してはCIコンドライト隕石は presolar 成分の影響を受けて、全岩平均同位体比組成が太陽系組成からずれている可能性がある。(酸素同位体からも同じ結論が導かれる。) 原始太陽系星雲中に最も普遍的に存在したであろう成分(太陽系始原成分)の同位体比組成の推定は同位体不均質性の研究と表裏を成すものであり、また、惑星大気の同位体初期値の推定にも欠かせない重要なテーマである。太陽系始原成分の推定に関してはこの研究分野の先輩格である希ガス、特にXeについてはかなり理解が進んでいる。(これについては Meteoritics の solar 成分特集号で Pepin が非常に簡潔に解説している[15].)

5. 太陽風の窒素同位体

原始太陽系星雲中に最も普遍的に存在したであろう成分(太陽系始原成分)の同位体比組成はどのようにして推定すればよいであろうか? 太陽系全体の質量の99%以上は太陽に集まっているので、太陽中に含まれる各元素の同位体組成が推定できれば、それでほぼ始原組成が推定できたことになるだろう。(もちろん、太陽中で進行している核反応の反応・生成核種を含む元素 - H, He, Li, Be など - の同位体比は太陽系形成初期の頃とは変わっているであろうが、それより重たい元素については現在でも始原組成を保持していると期待してよい。)

太陽の彩層の化学組成は光学的観測によりかなりの精度で測定されている(例えば[16])。しかし、同位体比組成は今のところ光学観測では正確に求めることはできない。同位体比を精度よく求めようと思えば、現状では質量分析計を用いて対象を直接測定するしかない。そこで、太陽から吹き出している太陽風の同位体比組成を測定して太陽の組成を推定する試みが行われてきた。太陽風の組成は太陽型(solar)組成と呼ばれ、その同位体比は希ガス・窒素・炭素などの高揮発性元素の同位体惑星科学では重要な値として位置づけられている。太陽型組成は太陽風に曝された隕石((solar-)gas rich 隕石と呼ばれるもの)や月の表土などを用いて調べられている。探査衛星を用いた太陽風中の同位体比組成のその場観測をした例もあるが、gas rich 隕石や月の表土を用いて実験室内で測定したデータに比べて精度が劣るので、今のところ同じ土俵での議論には使いにくい。

希ガスでは太陽型の同位体組成が隕石型(planetary) - 始原隕石中の全岩平均同位体比組成 - と必ずしも一致しないことがよく知られている。また、太陽型の同位体比組成も粒子の持つエネルギーによって異なることも知られている。典型的なのはNeの場合で $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ が隕石型で8.2であるのに対して、太陽風(SW)で13.3 - 14.5, 太陽フレア(SEP = Solar Energetic Particles という)で10.6 - 11.3 という値を持つことが知られている。太陽風と太陽フレアで同位体比が異なるのは加速機構が異なるからではないかと考えられている。太陽風/フレアの加速の仕組みとその際の同位体分別効果の関係については, Bochsler and Kallenbach [17] がフレア加速の際にイオンサイクロトロン加速メカニズムによって特定の質量数(厳密にはmass/charge)のもの、例えば ^3He , ^{15}N , ^{22}Ne 等を選択的に加速できる、という説を最近提示している。

太陽型組成の窒素同位体を測定する試みは月の

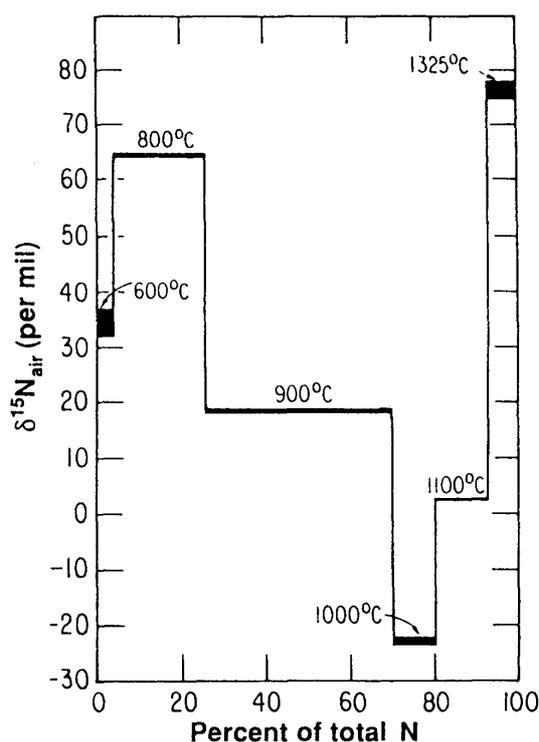


図3 月の表土に含まれる窒素同位体比組成の典型的なリリースパターン。[18]中の図を引用。段階加熱法を用いている。データはApollo 17 試料 70011のもの。合計で70 ppmの窒素が抽出された。

表土(砂)を用いてまず行われた。図3に典型的な同位体測定例を示す[18]。ここで使われているのは段階加熱法³⁾という技術である。同位体比組成が異なる成分が複数見えているのがわかる。このうち、600℃では地球大気・有機物起源の窒素($\delta^{15}\text{N} = 0 - 20 \text{ ‰}$)の影響を受けてこのような値を示している。また、1100・1325℃では宇宙線と酸素原子の衝突による核破砕反応によって生成された窒素(生成量は非常に微量だが $^{15}\text{N}/^{14}\text{N} = 1$ 程度の値を持つ)が抽出された結果高い $\delta^{15}\text{N}$ を示している。注目すべきは800℃の(同位体的に)重たい窒素と1000℃の軽い窒素である。太陽型窒素の候補が2つも、しかも同位体比が100 ‰も異なるものが一つの試料に見えている。これはこの試料だけの特徴ではなく、月の表土の窒素を測定すると程度にいろいろ差はあるがほとんどのもので同位体比の異なる窒素が(地球起源成分と宇宙

線生成成分以外に)複数見られる。これらの成分の間の窒素同位体比の違いは最大で300 ‰を越えることが現在ではわかっている。これらの成分についてわかっていることは次の2点に要約される。(1)これらはいずれも月の表土の粒子表面付近に存在する成分であるが、比較的低温で抽出される重たい窒素の方がより表面に近いようである。(実際に粒子表面をエッチングして確かめられた。)これは両成分とも月の表土が固有に持つ成分ではなく外から供給されたものであることを示唆する。(フレア(SEP)の方がより深くに打ち込まれるだろうから、低温の(抽出されやすい)成分がSW窒素、高温の軽い同位体の方がSEP窒素という考え方もなくはないが、NeはSEPの方が重たいのに、なぜ窒素はSEPの方が軽いのかという疑問が残る。Bochsler and Kallenbach [17]の計算結果もSEP窒素の方が重たくなることを示唆している。) (2)2つの成分を足し合わせた平均窒素同位体比は宇宙線照射年代が長くなるほど軽くなる傾向を示す。宇宙線照射年代はその粒子が月面から2m程度より浅いところにいた期間を示し、月表土の場合、典型的には10-100Myr.のオーダーの値を示す。月の表土は隕石の飛来により定期的に掘り返されるので(gardeningという)、ある粒子がある時期に月面から2mより浅いところに位置していても、その粒子はgardeningによりいずれまた深いところに位置させられることになる。Kerridge [2]は、gardeningの間隔は平均的にはどの月面粒子でも一定であると仮定し、宇宙線照射年代が長い試料は相対的に長いgardeningの歴史をもつ、すなわち、より昔から宇宙線それに太陽風を照射されていたと考えた。彼はこの考えに基づいて、太陽風の窒素同位体比 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ が数十億年の間に変化し、30%ほど重たくなったのではないかと考えた。本当だとしたら重大なことである。太陽風の加速機構がその間に変化したのか?太陽の窒素同

位体比組成が変化したのか?などいろいろと想像をたくましくさせられる説である。もちろん、異論を唱える人もいる。重たい方が太陽風/フレアで、軽い方は太陽以外を起源に持つ(たとえば月に飛来した隕石に含まれていた)成分ではないかと主張する人もいる[19].

最近わかってきたのは、少なくとも最近の太陽風の窒素は同位体的に比較的軽たいという点である。最近(49 myr.前)の月面上のインパクトで初めて太陽風に曝された月の岩石では +40 ‰ 程のやや重い窒素のみが観測された [20]. Gas rich 隕石においては太陽型希ガスと関連した太陽型窒素が観測されたがその同位体比は最高で $\delta^{15}\text{N} = +150$ ‰ という重たいものであった [21]. Gas rich 隕石のデータで解釈に困るのは隕石がいつ太陽風に曝されたのかがわからないという点である。(本当はこの問題は月試料についても同じである。)もし、何十億年も昔に照射されていたのなら、太陽風の窒素同位体比は(従って太陽の窒素同位体比も?)常に重かったということになる。仮に太陽系始原窒素同位体比が比較的軽たく $\delta^{15}\text{N} > +40$ ‰ であったとすると、地球大気の出発材料中には太陽系始原成分以外に軽い窒素を持った異常(presolar?)成分が多量に混入していたということになる。(4章で述べたように $\delta^{15}\text{N} > +40$ ‰ の材料から同位体分別効果により $\delta^{15}\text{N} = 0$ ‰ の現在の地球大気を作るのは簡単ではないので。)

結局、太陽系始原組成の窒素同位体比を推定するためにはまだ少し時間がかかりそうである。それは2つの未解決の課題が存在するからである。まずは月の砂の窒素同位体比の問題、すなわち、本当に太陽型窒素の同位体比組成は時間とともに変化したのか?そうでないとすると、観測されている複数の成分の内、どれが太陽型組成で、それ以外の成分の正体は何なのかという問題。もうひとつは加速機構の問題。太陽風・フレアの同位体比

と太陽(始原組成)のそれを結びつけるための理論が確立されているわけではない。太陽風・フレアの加速メカニズムとその際に生じる同位体分別効果をはっきりさせなければならない。

6. これからの展望

同位体惑星科学は観測科学である。観測領域を広げることにより理解が進む。我々にとって観測領域の拡張とは、今まで人が測ったことのないモノを見る、より微細にモノを見る、あるいは、複合的により多くの元素を対象として、より精度よく測る、などということを目指すのだと思う。

私はまずは守備範囲とする元素を拡張したい。ここで示したテーマは高揮発性元素 - H, C, N, O 及び希ガス - すべてについて当てはまるものである。特に、H, C, Nの3種類は化学的属性がかなり似ているので(例えば、有機物の主要構成元素となりうる点、金属鉄中へ溶解しやすい点や還元的气氛で酸素に代わり金属イオンと化合する点)、太陽系初期においても類似の挙動を示したのではないかと予想する。これらの元素同位体を同時観測できれば単独の元素に注目するのに比べて、不確定性の少ない議論ができるはずである。(例えば、同位体比異常が見られた場合にそれが質量依存同位体分別効果によるものなのか、同位体不均質性を示唆するものなのかは2つしか同位体を持たない元素では状況証拠抜きには判断できない。しかし、挙動の類似した元素を同時観測できればこのようなケースでは大きな判断材料になる。)ここで、特に窒素同位体を強調したのは、隕石中の同位体比異常が現に窒素で最も顕著に観測されているからである。(隕石の全岩同位体測定をして隕石グループごとの同位体組成の違いが観測されるのは窒素と酸素だけである。)炭素や水素の場合になぜ窒素のように顕著に見られないのか理由は明らかではない。窒素は1970年代中頃までは地球の汚染物

質（大気と有機物）を除去する技術がなく隕石中の同位体比異常は何も見られず、まともに研究されることもなかった。炭素・水素も明らかに同様の問題を抱えているが、その点をクリアすれば新しい世界が開けてくるはずである。

[注]

*1. δ 値 (δD , $\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$, $\delta^{17}O$ や $\delta^{18}O$) は以下の式で定義される。

$$\delta \equiv \left(\frac{R_{\text{measured}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000$$

ただし、 $R = D/H$, $^{13}C/^{12}C$, $^{15}N/^{14}N$, $^{17}O/^{16}O$, $^{18}O/^{16}O$ とする。また、標準試料として H, O は標準海水 (SMOW), C は PeeDee Belemnite 化石 (PDB), N は大気 (AIR) をとることになっている。

*2 同位体比を変動させるプロセスには恒星中で進行する核合成反応以外に大別して2種類ある。それは、(A) 惑星物質中での in-situ 成分の付加と、(B) 同位体分別効果による同位体比の変動である。In-situ 成分とは惑星物質中で進行する核反応（高エネルギー宇宙線との衝突による核破碎反応，不安定核種の放射壊変・核分裂，及びそれに付随した反応）により新たに付加される成分のことである。H,C,N,O 同位体の場合，ほとんどの場合 in-situ 成分による同位体変動は無視できるか，あるいは，補正が可能な程度である。

同位体比は in-situ 成分の付加がなくても蒸発・拡散等の非平衡過程あるいは化学反応 - 平衡過程の際生じる質量依存同位体分別効果により変動しうる。（その他に非質量依存同位体分別効果というプロセスもあるが，隕石にその効果の痕跡を残し得たかどうかは定かではない (Navon and Wasserburg, 1985, EPSL).) 酸素のように同位体が3つ以上存在する場合，同位体分別効果による同位

体の変動と presolar 成分（太陽以外の恒星で核合成された時の同位体組成をそのまま保持している成分）の寄与による同位体比異常を区別できる。H,C,N はそれぞれ2つしか同位体を持たないのでこの区別は状況証拠から判断するしかない。

*3 窒素（に限らず希ガスなど気相が安定な元素）は試料を真空中あるいは酸素中で加熱して中からこれらの元素を追い出してガスの形で質量分析をする。ここで一挙に試料からガス元素を全部追出すのではなく，最初に低い温度で加熱して抽出されたガスを質量分析し，その後徐々に温度を上げながら同じ操作を繰り返す。そうすると，ある温度で不安定な相が分解や燃焼することにより，あるいは，拡散により表面に近いものから順にガス元素が試料から抽出される。この技法を用いることによりガス元素が含まれている相(場所)を区別して質量分析することができる。地球表面での汚染 - 大気の吸着や生物起源有機物の付着など - も区別して測定できる。

参考文献

- [1] Pillinger C. T. (1984) Light element stable isotopes in meteorites - from grams to picograms. *Geochim. Cosmochim. Acta* **48**, 2739 - 2766.
- [2] Kerridge J. F. (1993) Long-term compositional variation in solar corpuscular radiation: evidence from nitrogen isotopes in lunar regolith. *Rev. Geophysics* **31**, 423-437.
- [3] Clayton R. N. (1993) Oxygen isotopes in meteorites. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **21**, 115-149.
- [4] Anders E. and Zinner E. (1993) Interstellar grains in primitive meteorites: diamond, silicon carbide, and graphite. *Meteoritics* **28**, 490-514.

- [5] Ott U. (1993) Interstellar grains in meteorites. *Nature* **364**, 25-33.
- [6] Huss G. R., Fahey A. J., Gallino R. and Wasserburg G. J. (1994) Oxygen isotopes in circumstellar Al_2O_3 grains from meteorites and stellar nucleosynthesis. *Astrophys. J.* **430**, L81-L84.
- [7] Russell S. S., Lee M. R., Arden J. W. and Pillinger C. T. (1995) The isotopic composition of silicon nitride in ordinary and enstatite chondrites. *Meteoritics* **30**, 399-404.
- [8] Russell S. S., Ash R. D., Pillinger C. T. and Arden J. W. (1991) Meteoritic silicon carbide - separate grain populations and multiple components revealed by stepped combustion. *Meteoritics* **26**, 390
- [9] Huss G. R. (1990) Ubiquitous interstellar diamond and SiC in primitive chondrites: abundances reflect metamorphism. *Nature* **347**, 159-162.
- [10] Sugiura N. and Hashizume K. (1992) Nitrogen isotope anomalies in primitive ordinary chondrites. *Earth Planet. Sci. Lett.* **111**, 441-454.
- [11] Fegley B. Jr. (1983) Primordial retention of nitrogen by terrestrial planets and meteorites. *Proc. 13th Lunar Planet. Sci. Conf., J. Geophys. Res.* **88 Suppl.**, A853-A868.
- [12] Yang J. and Epstein S. (1983) Interstellar organic matter in meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta* **47**, 2199-2216.
- [13] Ash R. D., Morse A. D. and Pillinger C. T. (1993) The survival of presolar organic material in CR chondrites. *Meteoritics* **28**, 318-319.
- [14] Hashizume K. and Sugiura N. (1995) Nitrogen isotopes in bulk ordinary chondrites, *Geochim. Cosmochim. Acta*, in press.
- [15] Pepin R. O. (1994) The hunt for U-Xenon. *Meteoritics* **29**, 568-569.
- [16] Anders E. and Grevesse N. (1989) Abundances of the elements: Meteoritic and solar. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **53**, 197-214.
- [17] Bochsler P. and Kallenbach R. (1994) Fractionation of nitrogen isotopes in solar energetic particles. *Meteoritics* **29**, 653-658.
- [18] Becker R. H. and Clayton R. N. (1977) Nitrogen isotopes in lunar soils as a measure of cosmic-ray exposure and regolith history. *Proc. Lunar Sci. Conf. 8th*, 3685-3704.
- [19] Geiss J. and Bochsler P. (1982) Nitrogen isotopes in the solar system. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **46**, 529-548.
- [20] Kim J. S., Kim Y., Marti K. and Kerridge J. F. (1995) Nitrogen isotope abundances in the recent solar wind. *Nature* **375**, 383-385.
- [21] Sugiura N. and Zashu S. (1994) Nitrogen isotopic composition of a gas-rich chondrite, ALHA77216. *Earth Planet. Sci. Lett.* **125**, 323-339.