

深海底の宇宙塵

山 越 和 雄*

1. はじめに

大洋の中央部に「赤粘土地域」と呼ばれる広い領域がある。陸から流入する破砕物が少なく、また、海水表面での活発な微生物、海生物の繁殖の名残りである生物残骸もその場所の海底までの深さが深いために、途中で溶けてしまうか、別の生物に喰べられてしまって、混入してこない。

混入物、堆積物が少ないので、その地域の堆積層の堆積速度は低く、千年で、1ミリの桁か、それ以下といった値である。従って、逆に、宇宙から地球に、宇宙物質がまんべんなく降りそそいでいるならば、その赤粘土地域に、相対的に、最も高い確率で、宇宙物質が発見されるはずである。「赤粘土」の「赤色」は、 Fe^{3+} の色である。溶存酸素の量も多く、極めて、「酸化性」の雰囲気があると云える。その様な環境では、純粋な鉄（例えば、隕鉄）が、錆びないで存在する事はできない。

この様な環境に於いて、深海底から鉄質または珪酸質の球粒（以下、スフェルールと呼ぶ）が発見された。前者の持つ主たる組成がマグネタイトであったこと、少なくとも、マグネタイトの殻を外側に持っていたのは当然であった。

発見したのは、ジョン・マレー、1872年（1972年ではない）12月より、1876年5月にかけて、イギリス政府が派遣した世界最初の海洋調査船「チャレンジャーVI世号」で、採取した深海の堆積物中から発見された。磁石につく性質を持った、丸い黒い粒で、数粒には、表面に丸い凹みがあった、と、マレーは、正確に、記述をしている。顕微鏡の視野の下で、角ばった岩石のかけら、丸い有孔虫の殻、さめの歯（乳歯か？）といった構成物の中から、ピカリと光る黒い丸い粒を発見して、「直観的」に、流星塵だ、宇宙起源だと固く信じたマレーの驚きは、それから百年経って、我国で始めて就役した海洋研白鳳丸の処女外国航海で採った堆積物中から得られたスフェルールを見た筆者には、痛い程よくわかる。

「cosmic spherules」——我々は、実は、未だこれらが「宇宙塵」であるとは、確信を持って云っていない。しかし、最近の研究から、少なくとも「宇宙起源」だという事は、はっきりと証明し得た。天文観測で、「黄道光」や、「対日照」を観測する。それらは、「惑星間塵」が太陽光

を反射したものである。

COSPAR 会議などで、飛翔体に積んだ「dust 検出器」が、宇宙塵の速度や、到来方向、強度などを観測したデータが報告される。化学組成らしいものが検出される事もある。太陽系より、もっと遠方で、星間塵が、星の誕生や死に関与したり、或る温度に暖められて、赤外線を放出したり、星の光を偏光させたりする。——そういった地球の大気圏より外に在る時の宇宙塵に対して抱くイメージと、実際に、顕微鏡の視野の下で見るスフェルールとは、どうにも、すぐには結びつかない——その様ないらだちを覚えるのは、筆者だけではないようである。

従来、宇宙物質の研究は、kg オーダーより重い隕石の研究に重点が置かれてきた。上に述べた宇宙塵は、サイズが、ミクロンか、サブミクロンといった小さなもの話である。我々が扱う数十～数百ミクロンの宇宙物質に関しての研究は、ずーっと、最近迄、欠落していたと云ってよいだろう。

隕石が、轟音や閃光を發して落下し、手に持った時は、未だ熱いといった、地球外起源が誰の目にも明らかなものは、それをすぐさま分析すれば、隕石の研究として、まとまった情報や知識を確立してゆけるが、1ミリより小さなスフェルールを、入手しても、誰も落下を目撃した者はおらず、工場の煙突から出る粉塵や、火山の噴出物中にも、似た様な丸い粒があるよ、と云われれば、丸い姿を、大気圏突入による溶融、凝固の証明と、頑張る訳にも行かないのが、スフェルール研究の辛い所である。サイズが小さいために、一粒ずつ料理する様な高感度の分析方法は、従来、非常に限定されており、むづかしいものであった。極微量試料の各種の分析技術、分析装置の抜本的な開発がどうしても必要であったのである。

スフェルールの研究は、こうして、「起源」の確認から始まった。いくつかの調べる方法がある。次に、それを列挙して、項目別に検討してみよう。

2. 「宇宙起源」の確認

地球の火成岩は、いくつかの種類に分類され、実に数多くの化学分析がなされ、平均値が求められている。次に、隕石についても、色々なグループに、化学組成の面から分類できる事が知られているが、同様に詳しい成分の平均値が求められている。火成岩と、隕石の元素別組成表を見ながら気づく事は、鉄、コバルト、ニッケル、そして、ロジウム、パラジウム及びレニウム、オスミウ

* 東京大学宇宙線研究所 K. Yamakoshi: Cosmic Spherules in Deep Sea Sediments.

ム、イリジウム、白金といった元素は、隕石の方に、圧倒的に濃縮されているという事である。これらの列挙した元素の大部分は、周期律表の第Ⅷ族に属している。また、かつて、ゴールドシュミットが、隕石質の物体が溶けた際に、金属相に濃集する元素群として名付けた、所謂「親鉄元素」である。鉄質のスフェールに、これらの元素が、隕鉄並みの超高濃度で検出できれば、火成岩＝地殻物質でない、高い確度で証明できよう。従来は、特にニッケルが、数%という高い含有率が見込める事から、X線マイクロ分析の手法を用いて、色々と調べられてきた。我々は、中性子放射化分析のやり方で、ニッケルのみならず、コバルト、イリジウム、金という元素を、一粒ずつのスフェールから検出したばかりでなく、隕鉄と同程度の含有率を持つものも多いこと、スフェールのサイズの大きさには、関係する元素と関係しない元素があるようだ、等の知見を得る事ができた。残念ながら、隕鉄中から十分に検出され、隕鉄分類の目安にもなっているガリウム、ゲルマニウムは、殆ど検出できなかった。それらは融点が低く、「揮発性」の元素だと考えられるので、大気中での摩擦熱で、熱変成を受け、蒸散してしまったと考えてよいだろう。

分析した試料の内のいくつかの、サイズ、重量、比重と、定量した鉄、ニッケル、コバルト、イリジウムそして金の値を示す。(第1表、第2表)。鉄の大部分が酸化したと思われ、含有率が(見掛けだけ)下がってしまったので、他の元素の定量値をそのままでは隕鉄の値と比較できなくなった。そこで、鉄との比をとって、相対値で示している。同じ堆積物(太平洋中央部、水深5000米以上)から採った磁性鉱物粒も併せて分析して、表中に示している。

第二の研究の方法は、スフェール中から、地上では作られない、いわゆる「宇宙線生成核種」を検出することである。我々の場合、鉄質の宇宙物質が、宇宙空間で、宇宙線によって照射され、二次的に作られた ^{58}Mn (半減期 3.7×10^6 年)と、 ^{59}Ni (7.5×10^4 年)が、検出の対象となる。鉄から作られる他の放射性核種は、短寿命だったりして適当ではない。宇宙塵は、太陽系空間では、太陽輻射の影響を受けて、いわゆる「ポインティングロバートソン効果」から、回転運動にブレーキがかかり、次第に太陽に向かって落ち込んでいく。宇宙塵のサイズによって、その寿命は異なるので、サイズと宇宙線生成核種の強度とは密接な関係にあると云ってよい。そして、そこで得られる知見は、宇宙塵の源が何かと云う事も我々に示唆してくれるはずである。スフェール一粒ずつの、 ^{58}Mn の測定は、困難ではあるが、可能である。また、いくつかのサイズグループに別けて、多くのスフェールから ^{59}Ni を検出するのも、意味があるだろう。どちらの

方法も、現在、進行中である。次に、堆積物から、ニッケルやマンガン抽出して、各々の試料から、 ^{59}Ni や ^{58}Mn を求める方法は、既に成果を上げた。一定量の宇宙塵が、堆積物に供給されたと考えられる。サイズ分布もわからない。種々雑多な歴史を持った宇宙塵の集まりである。唯、ほぼ同じ時期に、地球上に落下し、堆積物の同一地層に含まれた宇宙塵の集まりである。地球起源のニッケル、マンガン成分は、圧倒的である。しかし、同一試料から、ニッケル、マンガン化学的に抽出し、生成核種 ^{59}Ni 、 ^{58}Mn を測定すれば、堆積物中での、ニッケル、マンガンの量の多寡は、問題なくなる。それ以外の不定な、地球的要素も、キャンセルできるものが多い。唯、色々な履歴を持った宇宙塵の集合としての、「平均的」な強度そして、寿命などがわかるという面が残る。しかし、この様な情報も、学問の発展がその糸口についた段階では、限りなく貴重なものだと言えよう。一個ずつのスフェールについての定量的知見と併せ、我々は、世界で最初の宇宙塵の運動、寿命、供給に関する、可成りはっきりしたデータを、手にしつつあるのである。これは大変なことである。

宇宙塵の寿命——(宇宙線照射年代という表現であるが)を、一個ずつについて得られる方法が、もう一つある。極微量試料を扱える質量分析技術の開発が初めて、それを可能とした。もちろん、イオン発射をパルスで計測するやり方である。これで、 $\sim 10 \mu\text{gm}$ 位のスフェール中の痕跡量の元素について定量が可能になった。例えばカリウムの同位元素について調べる際に、 ^{40}K で 10^7 ケの原子数があれば、測定できる能力がある。

宇宙塵が、宇宙空間で、高エネルギー宇宙線の照射を受け、鉄が主成分の宇宙塵では、それより軽い各種のアイソトープが、破碎反応によって作られる。宇宙線が強い程、宇宙線に曝らされている時間が長い程、破碎反応生成物は多くなる。元々、宇宙塵中に、極微量しか含まれていない元素の中で、更に存在比が小さいアイソトープは、これらの破碎反応生成成分で、影響を受ける程の量であることがある。こうして、宇宙線の影響は、特定の元素に、同位体比異常をもたらすという形で検出できる。

スフェール中のカリウムとカルシウムについて調べた結果、($^{40}\text{K}/^{41}\text{K}$)、($^{48}\text{Ca}/^{40}\text{Ca}$)、($^{44}\text{Ca}/^{40}\text{Ca}$)、($^{43}\text{Ca}/^{40}\text{Ca}$)それに、($^{42}\text{Ca}/^{40}\text{Ca}$)などについて、異常を示すスフェールがいくつもあった。

前述の ^{59}Ni と ^{58}Mn の測定からは、半減期の長い ^{58}Mn が放射平衡になっていないことから、平均として、 $\sim 10^5$ 年の宇宙線照射年代が、帰納されたが、同位体比異常の測定では、(色々な仮定を設けての上であるが) 10^7 年、 10^8 年といった照射年代が算出できる。前者の場合、 ^{59}Ni

も ^{55}Mn も、主として太陽宇宙線でもたらされたもので、照射を受けていた場所での太陽宇宙線強度が、どの様なものであったかには、当然大きな仮定が入る。その点、同位体異常をもたらす高エネルギー銀河宇宙線強度については、太陽の磁場の影響が強く出る領域以外では、ほぼ、一定だったと考えて、それほど誤りはない。

スフェルールの、X線構造解析なども、起源を知る上で、また、大気中での熱変成の状況を知る上で、重要な手がかりを与えてくれる。鉄の酸化物—マグネタイト、ヘマタイト、ヴェスタイト等の組成と定量、鉄ニッケル合金—カマサイト、シュライパーサイト等の探素など、仕事が進んでいるところである。

これ迄、述べてきたところでは、鉄質スフェールについて、殆んど紙面を割いてきた。隕石では、隕鉄の20倍多い石質隕石の数を考えると、堆積物中からも、珪酸質の宇宙起源スフェールが、沢山みつかつてよいはずである。事実、珪酸質、ガラス質のスフェールは在る。しからば、上述の様な、宇宙起源に関する調査はどう進めたらよいだろうか。ガラス質のスフェールについて、稀土類の分布組成に、隕石と同様のパターンが得られている。この種のパターンは、地殻を形成する火成岩には、殆んどみられないもので、隕石起源を強く主張するものと思われる。一万数千粒の珪酸質スフェールを集め、アルミニウム成分を抽出し、宇宙線生成核種である ^{26}Al を検出する仕事も進めている。珪酸質スフェールを、ある程度まとまった量集め、化学組成を求めた結果では、可成り「粘土鉱物」に近いものと思われており、たとえ、粒の中心部に宇宙起源の部分があったとしても、大部分は海水中での自生鉱物で占められてしまっている可能性もないではない。

さて、これまで、宇宙物質が大気圏に突入して加熱され、構成要素の内、蒸発しやすい部分が、失なわれてしまい、残った部分も、殆んどが酸化物となってしまったという点に注意しながら、話を進めてきた。この熱変成のメカニズムを、室内実験で、組織的に調べようという仕事が進行中である。隕鉄を細断し、流星発光高度の 10^{-3} Torr 程度の真空中で溶融させ、残った試料中の成分を調べる事によって、熱変成が色々な元素に、どの様に作用するか調べている。融点の高いイリジウム等は、段々と濃縮され、蒸発しやすい元素と考えられているカリウム、ガリウム、ゲルマニウムなどは、大きく抜け出してしまっている様子がよくわかる。深海で得られるスフェールの組成を大気圏突入以前に戻すには、欠かせない実験の一つである。

今後、やらねばならないスフェールの仕事としてはどんなものがあるであろうか。今迄言及してきた内で、未だ完了していないテーマは早急に済ますとして、残っ

表 1 深海底堆積物より抽出した鉄質スフェールの直径、重量及び比重（中性子放射化分析に用いたもの。第2表参照）

試料番号	直径 (mm)	重量 (μg)	比重
35—(1)	0.46	328	6.4
(2)	0.48	316	5.4
(5)	0.39	164	5.3
(6)	0.36	196	8.0
(7)	0.45	311	6.5
12-2-(3)	0.35	126	5.6
(4)	0.37	111	4.2
(5)	0.36	183	7.5
20-3-(1)	0.33	117	6.2
(2)	0.16	12	5.6
(3)	0.31	52	3.3
(7)	0.42×0.38*	146	4.4
(8)	0.31	61	3.9
(9)	0.24×0.22*	35	5.5
(11)	0.27	53	5.1
(12)	0.31	128	8.2
(13)	0.37	201	7.6
(14)	0.32	135	7.5
15-3-(1)	0.23	39	6.1
(2)	0.33	84	4.5
(14)	0.26	50	5.4
(17)	0.40	164	4.9
12-2-(A)	マグネタイト鉱物	65	
20-3-(A)	マグネタイト鉱物	28	
(B)	マグネタイト鉱物	152	

試料番号	(採取) (航海名)	(採取地点)	(深度)
35—	KH-67-5	9°16.3'N, 179°20.5'W	(6000 m)
		11°30.8'N, 177°19.9'W	(5400 m)
12-2:	KH-71-5	11°00.7'S, 146°02.6'W	(4912 m)
15-3:	KH-71-5	20°23.4'S, 148°01.2'W	(4616 m)
20-3:	KH-71-5	35°04.5'S, 138°39.8'W	(4860 m)

* 楕円球形のもので、長、短軸の長さ

た重要な問題の一つに、サイズ分布の調査がある。既に、鉄質スフェールについて、サイズの逆三乗の頻度分布が報告されていた。我々も、同様に、堆積物からピックアップした鉄質スフェールを、大きさの順に並べたところ、同じ様な、サイズの逆三乗形が得られた。次に、我々は、片端しから、スフェールの放射化分析を行った。イリジウムや金やコバルトを検出するためである。大変な数であった。しかし、用いたスフェールの内~85%は、宇宙起源だという事がわかった。サイズ分布も、逆三乗形でよさそうである。逆三乗形を用いて、サ

イズ0から、得られた最大径(440 μ m)まで積分し、比重5を仮定すると、堆積物中の、スフェール濃度が出る。約1.3ppmである。

サイズの逆三乗形は、質量分布に直すと、(-5/3)乗の形となる。黄道光や彗星塵の観測による質量分布に合う、合わないという議論ができる。永田が、昭和基地の近くで採取された「やまと隕石」の質量分布を出した。質量の(-5/3)乗の形である。やまと隕石のコレクションは、cmサイズの小さなものまでであるのが特徴である。

スフェールのサイズ分布は、もっと別の地点の堆積物や、堆積物の柱状試料(堆積率1mm/千年とすれば、10mの柱状試料は、千万年の年代をカバーできる)の深さ別にも調べる必要がある。宇宙物質の降下率の時間変化も興味ある研究課題となるだろう。宇宙線生成核

種の測定と結びつけて、百万年のオーダーでの宇宙線強度の変化も追えるかもしれない。

スフェール、特に鉄質スフェールは、高山や、海上、雪や雨水からも採取され、我々を、宇宙への興味にかり立てる。深海底で得られる宇宙起源スフェールは、当然、地上で得られるものの中にも含まれているはずである。我々が当面、深海底堆積物にこだわるのは、長い年月の降下量を、手軽に採取できるからに外ならない。

鉄質スフェールを、隕鉄の表面から、溶融して飛び散った金属滴粒だと考える人がいる。その可能性も十分ある。しかし全部ではないだろう。ドゥナンニイのまとめた地球に降下する宇宙物質の質量分布を用いて計算すると、1kg以上の隕石が、地球全体で、年に~1.5ト

表2 中性子放射化分析による各種親鉄元素定量値(鉄以外は、鉄との相対値で示す)

試料番号	Fe (%)	[Mn/Fe] ($\times 10^{-6}$)	[Co/Fe] ($\times 10^{-3}$)	[Ni/Fe] ($\times 10^{-2}$)	[Ir/Fe] ($\times 10^{-6}$)	[Au/Fe] ($\times 10^{-6}$)
35—(1)	79	350	n.d.	n.d.	n.d.	
(2)	66	390	n.d.	n.d.	n.d.	
(5)	72	11	2.2	3.8	5.4	0.3
(6)	40	2	2.3	5.8	8.1	3.0
(7)	51	110	3.3	5.9	4.0	
12-2-(3)	65	65	2.2	1.5	22	
(4)	85	40	3.9	6.0	3.2	
(5)	31	31	3.2	1.7	7.4	
20-3-(1)	70	53	5.6	7.9	15	0.4
(2)	80	11	3.1	1.2	7.2	0.04
(3)	62	130	2.8	2.6	22	
(7)	78	n.d.	4.3	0.41	3.4	
(8)	49	48	1.4	1.3	2.8	0.87
(9)	81	5.0	3.7	6.6	9.8	
(11)	80	n.d.	5.2	5.8	4.7	0.45
(12)	39	620	12	3.9	4.6	
(13)	41	36	3.7	8.8	9.8	
(14)	25	16	3.2	2.5	11	
15-3-(1)	46	13	3.7	5.9	11	
(2)	74	14	1.5	1.4	7.1	
(14)	71	15	1.5	1.4	7.1	
(17)	77	1.8	4.1	5.8	4.8	
12-2-(A)	61	5960	n.d.	n.d.	n.d.	
20-3-(A)	56	890	n.d.	n.d.	n.d.	
(B)	29	4790	n.d.	n.d.	n.d.	
規 準 物 質 Canyon Diablo (隕鉄)	91.1	0.1	5.4	7.85	2.3	2.3

(注) n.d.=検出限界以下

ン、1mg 以上で、600トン程度である。一方、鉄質フェルールは、少な目に見積っても、 10^8 トンか、それ以上であり、大きなサイズの宇宙物質をすべて、潰しても量的に説明がつかないのではないか。しかし、大気圏外での、太陽系空間での、隕石の破碎というメカニズムを否定している訳ではない。勿論彗星起源かもしれない。今後は、天文観測や、飛翔体観測の仕事と、共通の言葉

で、起源を、寿命を、分布を、時間変化を、詰めていくのが課題であろう。

詳細は、'78年度東大宇宙航空研「月惑星シンポジウム報告」を参照されたい。化学組成や蒸発実験は、野上ら、 ^{59}Ni や ^{58}Mn 定量と解釈は、柳田ら、同位体比異常の検出は、島村ら、構造解析については田沢の報告に詳しい。その他は、筆者の総合報告を参照されたい。

掲 示 板

東京大学宇宙航空研究所助手公募

- 1. 公募人員 助手 1名
- 2. 専門分野 宇宙分子過程理論：惑星大気・彗星大気・星間分子雲などにおける分子過程の理論的研究。当研究所は共同利用研であり、研究外の仕事をある程度担当することを含んでおいていただきたい。
- 2. 着任時期 遅くとも 1979年4月
- 4. 応募資格 これ迄の研究歴には必ずしもこだわらない。着任時には博士号を持つか持つ見込であることが望ましい。

5. 提出書類 ① 自薦の場合

履歴書、論文リスト(主要論文別刷)、上記分野に関する抱負(異なる分野からの場合は詳しく)、本人について意見を求めることのできる2人名以上の名前

② 他薦の場合

略歴、論文リスト(主要論文別刷)、推薦書2通

- 6. 公募締切 1978年12月25日(月) 必着
- 7. 宛 先 〒153 東京都目黒区駒場 4-6-1
東京大学宇宙航空研究所所長 森大吉郎
- 8. 連絡先 同上 電話 467-1111 内線 440 清水幹夫
- 9. 注意: 封筒に「公募書類在中」と朱書き書留で郵送のこと。

わが国唯一の天体観測雑誌

天文ガイド

定価280円(〒45円) 78-12月号・11月5日発売!

●12月号のおもな内容

- ★年の暮がせまってきました。気になるのは来年の天文現象。白河天体観測所に1979年の天象を調べてもらいました。月食・星食と来年もにぎやかです。
- ★新製品紹介はアストロ光学のシステム反射赤道儀です。
- ★年末から来年にかけて、木星の衛星土士の食がしばしば見られるようになります。くわしくは観測ガイドで。
- ★新発売になったコダックのコダクローム400、天体写真用にはどうでしょうか。沢山の天体を撮影しました。
- ★天体写真の大先輩フェーレンベルク氏と新進気鋭の藤井さんが、この春ドイツで会い、意気投合しました。
- ★そのほか天文講演、私の愛機、同好会だよりなど。

全天星雲星団ガイドブック

星雲・星団の観測はこれ一冊でだいじょうぶと言う本です。天文ファンが持っている小型の望遠鏡や双眼鏡で見える星雲・星団が全部くわしく、写真入りで掲載してあります。望遠鏡で見るにしても、写真をとるにしても、これがなに星雲かしらべるにしても、この一冊があればだいじょうぶです。今度の版から、南半球へ旅行する人にも役立つように、日本からは見えない南天の星雲・星団も入れました。

全天の星雲・星団ガイドです。

●藤井旭著/A5変型判・332ページ・1,500円 発売中

月面フォトアトラス

●高橋実著/B5変型判・写真編・解説編・3,000円 発売中

誠堂新光社 東京都千代田区神田錦町1-5 振替東京7-6294 電話03(292)1211