

地球化学の話

②

高橋 清

I 隕石の話 その2

前号(地質ニュース 154号)では ややくどくと隕石がどこから地球に落ちてきたのか またいろいろな種類の隕石がどのように分類され どのような化学組成や鉱物組成をもっているのかななどを紹介し 「隕石はどのようにしてできたのか？」 を考える上の知識を断片的ながら積み重ねてきた。この隕石のでき方を考える上に「隕石がいつごろできたのか？」をはつきりさせることはきわめて重要なことである。この問題を議論するためには 当然隕石の同位体の話をしなければならない。

7. 隕石の同位体組成

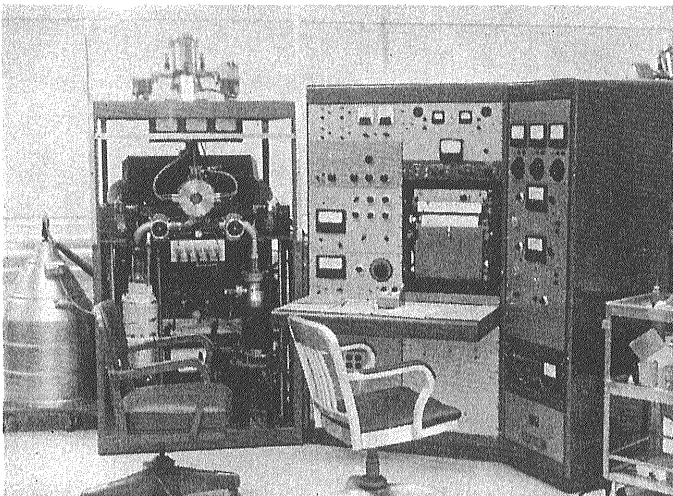
地球がコンドライト質の物質から出発し 現在のようによく混和され 分化の進んだ状態になったという仮説を信用すると 化学組成は 地球の分化の間にコンドライトと大きくちがったものになったとしても 同位体組成は 地球上のものとコンドライトは差がないはずである。実験結果によると 原則的には同位体組成の均一性は認められている。たとえば 隕石中の硫黄の同位体存在比 S^{32}/S^{34} はきわめて均一で 隕石中のトロイライトは 地球上の硫黄の同位体存在比測定のさいの国際的標準試料として用いられるほどである。

また カリウム-アルゴン法による年代測定のさいに

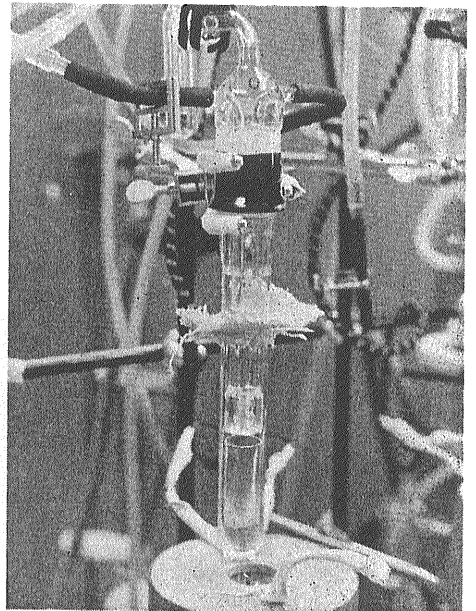
Kは化学分析で求め その0.0119% (地上のKについての測定値)を K^{40} として計算するのが普通である。このことは 隕石と地球が分離したさいに 物質がすでによく混和されていたことを示している。元素の生成はおもに星の進化にともなう各種の熱核反応の割合いに依存しており 比較的低温のガス状物質になって混和したあとは 同位体組成は部分によって変らなくともよいとみなされるからである。

隕石の安定同位体および長寿命(半減期 10^8 年以上)の放射性同位体は 最近の著しく進歩した質量分析法によって調べられ 不揮発性物質でも 1%程度の差が確実に検出できるようになってきた。この程度でも隕石と地球上のものの中には差がないものが多い。また 宇宙線の研究の進歩にともなって 短寿命の放射性同位体でも 1dpm/1kg (disintegration per minute. 約0.5 マイクロマイクログユリー) まで測られるようになってきた。測定技術の進歩とともに 隕石と地球上との間の同位体組成の均一性を破る例がいくつもみつかった。

これらの均一性を破る要因として 長寿命の放射性同位体による生成物とか 化石として残った半減期の短い放射性同位体 (extinct radioactivity) とか 宇宙線の



同位体測定用質量分析計 左側はイオン発生装置および付属部
右側は諸計器 (米国地質調査所のもの 倉沢一技官提供)



鉛同位体測定の場合 鉛含有量の少ない試料からの鉛の抽出には、このような蒸発法が有効
下位にある電気炉中に挿入された石英筒から 蒸発した鉛は筒中の冷却部に付着する (米国地質調査所のもの 倉沢一技官提供)

生成物とかがその例としてあげられる。

7.1 隕石の年代測定

隕石と地球上の物質との間の同位体組成の均一性を利用して 放射性同位体の壊変生成物を測定することによって隕石の年代は測定されている。その原理としては次のように説明されている。

放射性核種の壊変は 原子核内の変化によるもので核外電子の状態(化合物の種類)や温度によっても壊変の速度はまったく変化しない。したがって放射性核種の壊変は 隕石や地球生成の時から現在まで一定で それぞれの核種に特有の壊変定数にしたがって壊変をしつづけてきたと考えられる。

いま N_0 個の放射性核種があると t 時間後には

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

λ はその核種の壊変定数で 半減期 T を用いると

$$\lambda = 0.693/T$$

によって求めることができる。いま隕石や地球上の物質が生成したときのある1つの放射性核種の濃度が C_0 であったとし現在の濃度が C であったとすると 隕石や地球上の物質が生成してから 現在までの経過時間 t は

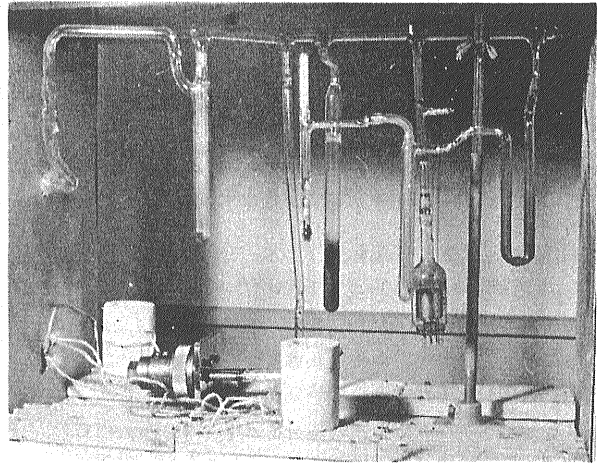
$$C/C_0 = e^{-\lambda t}$$

半減期 T を用いると次式となる

$$t = T/0.693 \ln(C_0/C)$$

実際に適用するときには 生成時の濃度 C_0 を求めることが一般に困難であるので C_0 と現在の濃度 C との差を測定して C_0 を推定している。この $(C_0 - C)$ は試料 1g 中でも年間に壊変した核種の量で これだけのものが壊変して他の核種となつてたまっているはずである。もしこの壊変生成物の核種が生成時には含まれておらず また t 年間にまわりから入りこんでいなければ 正確な結果を与えるはずである

このような原理を利用した年代測定法は よく知られ



加熱しておい出したアルゴンガスは精製されきれいなものにされ質量分析計に入る アルゴン精製のための装置 (柴田 賢技官提供)

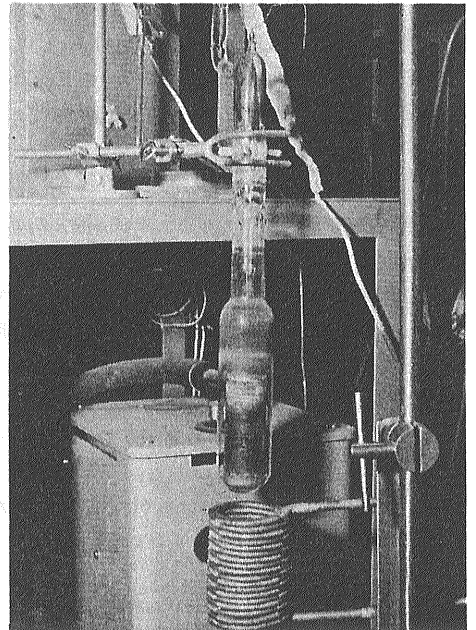
ているように ウラン—鉛法 ルビジウム—ストロンチウム法 カリウム—アルゴン法 ウラン—ヘリウム法などが挙げられる。

隕石の年代測定には 主として上に述べた4つの方法が使われている。

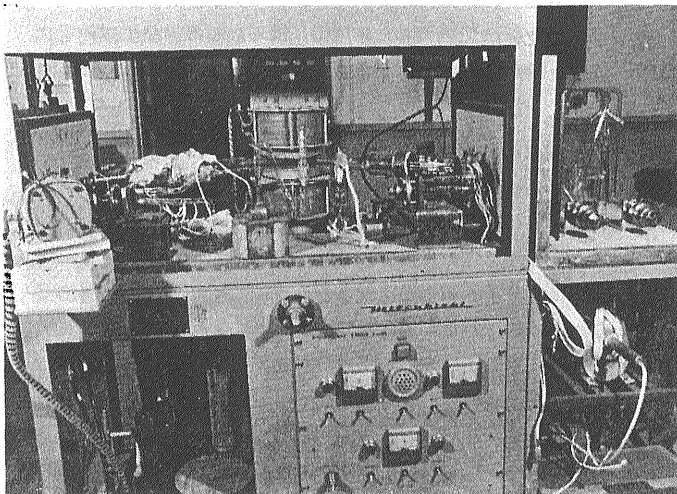
これらの方法を概括してみると 次のとおりである。

(i) ウラン—ヘリウム法 (U-He法)

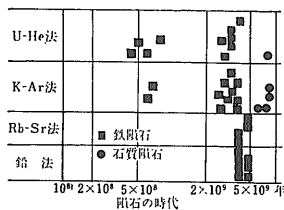
U^{238} が最終壊変生成物の Pb^{206} になるまで8個の α 線を出し U^{235} は7個 Th^{232} は6個の α 線を出して それぞれ Pb^{207} と Pb^{208} となる。いま隕石 1g 中に含まれるウラン トリウム核種の量を $[U^{238}]$ $[U^{235}]$ $[Th^{232}]$ とすれば t 年後に隕石中に蓄積される α 線の数



カリウム・アルゴン法の場合 試料中のアルゴンを追い出すために比較的高温加熱を行なう 試料は高周波炉で加熱される (柴田 賢技官提供)



カリウム・アルゴン法による年代測定用質量分析計—地質調査所のもの—(柴田 賢技官提供)



第1図
いろいろの方法で測定した隕石の年代
■：鉄隕石 ●：石質隕石
(木越小田：科学 vol. 32 p 2,2-241 1962より)

[He⁴] は次式で与えられる.

$$[\text{He}^4] = 8(e^{\lambda_{238t}} - 1)[\text{U}^{238}] + 7(e^{\lambda_{235t}} - 1)[\text{U}^{235}] + 6(e^{\lambda_{232t}} - 1)[\text{Th}^{232}]$$

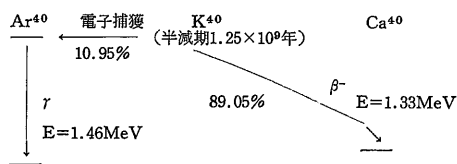
したがって隕石中のヘリウム含量を測定すれば この式から年代 t を算出することができる.

ウラン—ヘリウム法を使ってパネット (Paneth) らにより1920年代に隕石の年代測定が行なわれたが 現在ではあまり用いられていない.

(ii) カリウム—アルゴン法 (K-Ar法)

隕石や地球上の物質に存在するカリウムの同位体組成は K³⁹:93.08% K⁴⁰:0.0119% K⁴¹:6.91%である.

このうち放射性同位体である K⁴⁰ は下図のように壊変する.



この K⁴⁰ の壊変のうち年代測定には K⁴⁰ → Ar⁴⁰ を利用する. 実際に年代測定は 隕石中のカリウム含有量と 壊変生成物 Ar⁴⁰ の量(y)を測定すればよい. 隕石中のカリウム含有量を a % とすると K⁴⁰ の量(x)=(a × 6.02 × 10²³/39.10 × 100) × 0.000119 となり 年代 t は

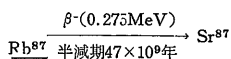
$$t = \frac{1.25 \times 10^9 \cdot 0.1085}{0.693} \ln \left(1 + \frac{y}{x} \right) \text{ で計算できる}$$

ウラン—ヘリウム法 カリウム—アルゴン法ともに壊変生成物が He⁴ Ar⁴⁰ のような気体であるために t 年の間に加熱その他のできごとがあると 逸散してしまい年代が若くする可能性がある. またこれを利用して隕石の熱的な歴史を検討している人々もいる.

(iii) ルビジウム—ストロンチウム法 (Rb—Sr 法)

天然のルビジウムの同位体組成は

Rb⁸⁵: 72.15% Rb⁸⁷: 27.85% であり Rb⁸⁷ は次のように S₁⁸⁷ に壊変する.



天然のストロンチウムの同位体組成は

Sr⁸⁴: 0.56% Sr⁸⁶: 9.86% Sr⁸⁷: 7.02% Sr⁸⁸: 82.

56%であるので 実際の測定には同位体希釈法により Sr⁸⁶ の量を測定し それに相当する Sr⁸⁷(7.02/9.86倍して求める)を差引いて Rb⁸⁷→Sr⁸⁷ の量を算出し この量が隕石が生成して t 時間に壊変した Rb⁸⁷ の量であるとして年代 t を求める.

ルビジウム—ストロンチウム法では このように同位体希釈法を行なえば 質量分析の精度のあがった現在では微量のルビジウムを含む隕石の年代も測定可能である.

(iv) ウラン—鉛法 ((U—Pb法)

ウランやトリウムの壊変生成物はいずれも鉛である.

	半減期(T)	壊変定数(λ)/year
U ²³⁸ → Pb ²⁰⁶	4.51 × 10 ⁹ 年	λ ₂₃₈ = 1.54 × 10 ⁻¹⁰
U ²³⁵ → Pb ²⁰⁷	7.1 × 10 ⁸ 年	λ ₂₃₅ = 9.8 × 10 ⁻¹⁰
Th ²³² → Pb ²⁰⁸	1.39 × 10 ¹⁰ 年	λ ₂₃₂ = 4.98 × 10 ⁻¹¹

隕石中の壊変生成した鉛の量を [Pb²⁰⁶] [Pb²⁰⁷] [Pb²⁰⁸] とすれば年代 t は

$$t = \frac{1}{\lambda_{238}} \ln (1 + [\text{Pb}^{206}]/[\text{U}^{238}]) \quad (1)$$

$$t = \frac{1}{\lambda_{235}} \ln (1 + [\text{Pb}^{207}]/[\text{U}^{235}]) \quad (2)$$

$$t = \frac{1}{\lambda_{232}} \ln (1 + [\text{Pb}^{208}]/[\text{Th}^{232}]) \quad (3) \text{ で与えられる.}$$

[U²³⁸]/[U²³⁵] は自然界では一定値 138 をしめすことを確かめられているので これを用いて [U²³⁸] [U²³⁵] を消去すると

$$\frac{[\text{Pb}^{207}]}{[\text{Pb}^{206}]} = \frac{1}{138} \times \frac{\exp(\lambda_{235}t) - 1}{\exp(\lambda_{238}t) - 1} \quad (4) \text{ がえられ この}$$

式から年代 t を算出する場合は Pb²⁰⁷ および Pb²⁰⁶ の存在比だけを知ればよいが (1) (2) (3)式から求める場合には ウラン—トリウムおよび鉛含有量を正確に求めなければならない. ルビジウム—ストロンチウム法とウラン—鉛法で測られた年代は 隕石の結晶生成の年代 (solidification age) と考えることができる.

隕石の年代測定では コンドライト アコンドライトのような石質隕石の場合には ウラン—鉛法 ルビジウム—ストロンチウム法 およびカリウム—アルゴン法が主として用いられている. 地球上の岩石から ジルコンやモナザイトのようなウランの濃縮した鉱物を選び出したり 雲母のようなルビジウムの高い鉱物を取り出すことは 隕石の場合十分にはできないので 石質隕石の平均組成に近いものを対象として隕石そのものを (whole rock 法) 測定している. これら隕石中の対象とするウランやルビジウムやカリウム含量はそれぞれ平均 0.014

ppmU 3ppmRb 0.1%Kで地球上の岩石・鉱物の場合と比較して 相当な測定の高難しさがあるが 隕石の年代の大きさのために相殺されている。

いろいろな方法で測定した隕石の年代を第1図に示した。図で明らかなように ウラン—鉛法 ルビジウム—ストロンチウム法で測定されたすべての石質隕石の年代は 約45億年の年代を示している。ウラン—ヘリウム法 カリウム—アルゴン法で測定されたものも大部分は約45億年に一致しているが その一部には約45億年よりも若い年代を示しているものがあることに気付く。

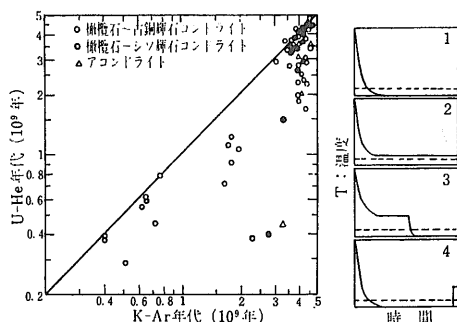
最近はいわゆる地球科学に関心をもっている人たちは太陽系宇宙(もちろん地球を含めて)の年代が約45億年であることを常識として知っている。これは隕石を上記述べた方法で測定した年代が約45億年であり ブラウン(H. Brown)らによって原始鉛をつかって測定した地球の年代も同様に約45億年であったからである。

ウラン—ヘリウム法 カリウム—アルゴン法で測定した隕石の年代の一部が 約45億年よりもずっと若く出るものがあるのはなぜであろうか？

アンダース(Anders)は1964年に隕石の起源や年代などについての総説を発表し ウラン—ヘリウム法とカリウム—アルゴン法で測定された隕石の年代は 隕石が原物質から天体母体となり 母体内の放射性物質の壊変によって熔融し 珪酸塩相と金属相との分離が行われ冷却して結晶を晶出した後に ウランや K^{40} の壊変によって生成した He^4 や Ar^{40} を隕石内に保持できるようになった年代 いわゆる気体保持年代(gas retention age)であるとした。年代が若くであるというのは 気体が保持できるようになってから He^4 や Ar^{40} がなんらかのできごとによって逃げ出したことをあらわしている。ゴールズ(Goles)らは1960年にその理由として3つの理由を挙げている。

- (1) 隕石の天体母体中で結晶の晶出が行われた後 やや冷却温度が高かったために折角できた He^4 や Ar^{40} が散逸してしまった
- (2) 隕石の天体母体が気体保持できるようになった後のある時期に温度が上昇したために それまで蓄積された He^4 や Ar^{40} が逃げだしてしまった
- (3) 十分に気体保持していた隕石が落下のさいに太陽熱によって加熱され He^4 や Ar^{40} を散逸してしまった

第2図はこのような考えのもとに なぜ若い年代ができたかを隕石の熱史的歴史から説明している。図の右側は隕石の天体母体の熱史的歴史を示しており 1は約45億年を示し 2は上の説明の(1) 3は(2) 4は(3)にあたる。



第2図 石質隕石のU-He年代とK-Ar年代との関係
右図は隕石の熱史的歴史 破線は保持された気体が逃げなくなった温度を示す
(Anders, Space Sci. Rev. vol 3 p 583-714 1964)

このようにウラン—ヘリウム法 カリウム—アルゴン法の測定対象である He^4 や Ar^{40} はある温度以上では散逸してしまう気体であるので ある時期に加熱されれば散逸してしまうので測定年代の意味を十分考えなければならぬ。

隕石の生成年代 すなわち気体を保持できるようになった年代と結晶生成の年代がほとんど同じ約45億年であるという結論が得られたが これは高温で熔融していた隕石の天体母体が冷却して結晶を晶出し さらに気体を保持できるほど十分に冷却するのに大した時間がかからなかったことを示している。しかし隕石の年代が約45億年であるということがはっきりするまでには いろいろの回り道があった。たとえば ウラン—ヘリウム法やカリウム—アルゴン法で測定された隕石の年代の一部に 45億年よりも若い年代を示すものが見つかっていることはすでに述べたが これは隕石の天体母体の熱史的歴史を考えることによって解釈できた。ところが一部の隕石ではウラン—ヘリウム法で 76億年もの大きな値を示すものが測定され 全く解釈に困ってしまった。しかし質量分析計の精度の向上とともに これまで全部が He^4 と考えていたもののうち 約半分が He^3 であることがわかり問題は解決した。

さて 隕石中のこの He^3 はどうしてできたのか？

これは後に隕石が落下の途中で 宇宙線の照射による核反応によって生成したものであることが明らかになった。ここで登場した宇宙線の隕石に与える影響について やや寄り道になるが簡単に紹介してみよう。

7.2 隕石への宇宙線の影響

約45億年前に生成した隕石の天体母体がなんらかのできごとによって破壊され 地球に落下してくる間に 隕石は宇宙線に直接さらされ 宇宙線による核反応生成物のためこんでいる。宇宙線は地球上では 厚い大気

層でシールドされているため 高い山の上だとか大気圏で捕えているに過ぎないが その性質は宇宙空間での宇宙線の性質と本質的には等しいと考えられている。

宇宙線の特長を一口にいえば 主成分は主として水素の原子核(プロトン)の加速されたもので 磁性と方向性があり 非常に高いエネルギー ($1\text{BeV}=10^9\text{eV}$ 以上) をもっている。

このような高エネルギーの宇宙線の照射をうけると ちょうど高エネルギー(100MeV~数 BeV)の加速プロトンによって核反応がおけると同じような反応が被照射物質におこる。

この高エネルギーの粒子による核反応は破砕反応 (Spallation reaction) と呼ばれ 二段階にわかれて核反応が進行すると考えられている。 すなわち はじめに高速粒子が原子核と衝突し 核内に中間子をつくりこれを放出させる。 また突入した高速プロトンと核内のプロトンあるいは 中性子との衝突で直接これらの核子が加速され核外にたたき出される (Knock-on 段階)。 この段階がすぎると 原子核全体に突入した粒子のもちこんだ残りのエネルギーがゆきわたる。 この励起された原子核から軽い粒子(n p α H^3 He^3 He^4 など) が蒸発して核のエネルギーは低い状態となり 同時に核はもとの質量数よりかなり小さいものになる。

はじめてこの宇宙線照射による生成物に気付いたのは隕鉄中のヘリウム(He)の問題である。

隕鉄から抽出した He を質量分析してみると $\text{He}^3 : \text{He}^4 = 1 : 4$ にもなることをパネット (Paneth) らが1952年に確かめ これが宇宙線の照射による影響であることを実証した。

(大気中 : $\text{He}^3 : \text{He}^4 = 1.3 \times 10^{-8} : 1$ 石油井 : $1.7 \times 10^{-7} : 1$)

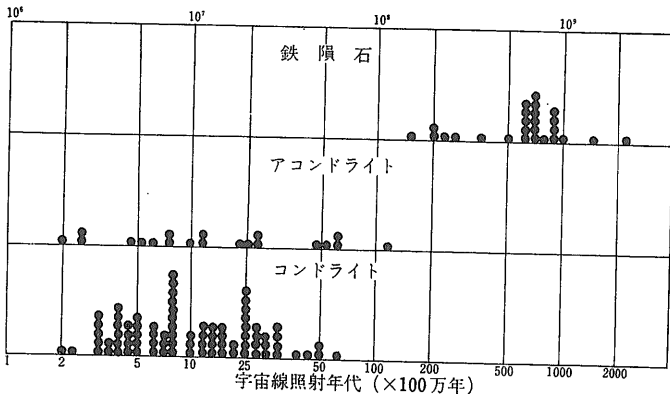
このように隕石と地球上の物質との同位体組成の均一性を破る1つの要因として宇宙線照射の影響がはっきりしてから また宇宙線生成物は原子炉でのプロントン照

射生成物と同じ核反応で生成することがわかって 隕石の宇宙線生成物の研究は大いに発展してきた。

カリフォルニア工科大学のラホヤ (La Jolla) グループは 1959年および1960年に落下した Aroos 隕石と

第1表 隕鉄石および石質隕石中に見出された宇宙線生成物

測定された核種	半減期	隕鉄石 Aroos (Jardymilnsky) U. S. S. R Fell Nov. 24, 1959		隕石 Bruder heim, Canada Fell March. 4, 1960	
		放射性同位体 dpm/kg	安定同位体 10^{-8}cc/g	放射性同位体 dpm/kg	安定同位体 10^{-8}cc/g
H^3	12.6年	50±10		260±30	
He^3			655	43.5±(10~15)%	
He^4			2540	790(全 He^4)	
Be^7	53 日			100以下	
Be^{10}	$2.5 \cdot 10^6$ 年	4.1±0.4		19±2	
C^{14}	5600 年	1.8±0.25		63±6	
Ne^{20}			8.5	8.5±(10~15)%	
Ne^{21}			8.15	9.0 "	
Ne^{22}			8.6	9.6 "	
Na^{22}	2.58 年	2.1±0.3		90±6	
Al^{26}	$7.4 \cdot 10^5$ 年	3.6±0.4		60±6	
Si^{32}	約 500年	0.8±0.3			
P^{32}	14.5 日			(14)	
Cl^{36}	$3.1 \cdot 10^5$ 年	16±2		7.5±0.8	
Ar^{36}			28		0.80±0.16
Ar^{37}	35 日	20±4		23±4	
Ar^{38}			43.5		1.22±0.24
Ar^{39}	265 年	16±2		10±1	
K^{40}	$1.3 \cdot 10^9$ 年	7.6±0.5	28±2		
K^{41}			49		
Ca^{42}			70		
Ca^{43}			89±8		
Ca^{44}			100		
Ca^{45}	164 日	5±1			
Ca^{46}			1.9±0.2		
Sc^{45}			140		
Sc^{46}	84 日	30±3		6.2±0.6	
Ti^{44}	約 200 年	4.4±0.4		2.0±0.2	
V^{48}	16.0 日	90±45		34±7	
V^{49}	330 日	164±16		34±5	
V^{50}			251±18	27±9(金属相)	
Cr^{51}	26.8 日	260±120		110±27	
Mn^{53}	$>2 \cdot 10^6$ 年	515±51		85±17	
Mn^{54}	300 日	470±47		100±13	
Fe^{55}	2.6 年	1600±600		340±80	
$\text{Co}^{56} + \text{Co}^{58}$	平均74日	120±34		14±4	
Co^{57}	240 日	89±9		11±1	
Co^{60}	5.26 年	17±2		9±1	
Ni^{59}	$8 \cdot 10^4$ 年	60±15		12±3	



第3図 隕鉄石および石質隕石の宇宙線照射年代 (Anders 1964のデータから)

放射能は落下時の値 安定同位体は共通に $10^{-8}\text{cc/g} = 3.10^{11} \text{atom/g}$ を単位とした

この数値のうち 放射性同位体の H^3 C^{14} Ar^{37} Ar^{39} K^{40} を除いたものは Honda, Arnold (1961) および Honda, Umamoto, Arnold (1961) による安定同位体中 隕鉄中の希ガスは Signer, Nier (1961) 隕石中のそれは Stauffer (1961) による Sc^{45} は Wanke (1960)による他の隕鉄中のデータを内挿 V^{50} 各 Ca, K^{40} は Stauffer, Honda(1961) $62)$ K^{41} は Voshage, Hintenberger (1961)のデータに K^{40} の絶対値を入れて算出した

(本田雅健 科学 vol. 33 p. 2-9 1963より)

Bruderheim コンドライトについて 20種の放射性同位体を測定し これに他で測定された H^3 C^{14} Ar^{37} Ar^{39} を加えて宇宙線生成物の一覧表をつくった(第1表)。この結果 二つの隕石は20日から100万年の間均等な宇宙線照射を受けていたと考えられるに至った。

放射平衡にある放射性同位体の量と蓄積された安定同位体の比から 宇宙線照射年代 (cosmic-ray exposure ages) を算出することができる。

実験的に宇宙線は相当高エネルギーの場合でも 隕石を数10cm 通過する間にほとんど吸収され それほど深部には到達しないことが確かめられている。それゆえ隕石の大きな天体母体の場合には宇宙線の影響は表面だけであり 実際に宇宙線の影響を強く全面的に受けるのは天体母体が直径1m以下の小片となった時である。したがって 宇宙線照射年代 は 天体母体が破壊されて小片になった年代を意味している。

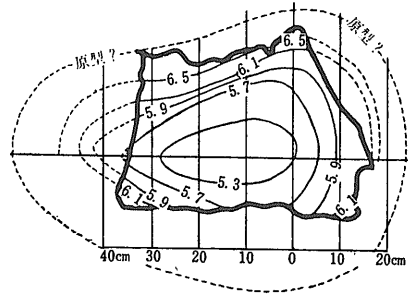
第3図でみられるように鉄隕石の場合は 10^6 年~ 10^9 年が多く 石質隕石の場合はやや若い 10^6 ~ $3 \cdot 10^7$ 年の年代を示している。

なぜ鉄の方が古いか? という疑問にたいして 鉄隕石は堅牢な金属からなり 衝突などではなかなか壊れないからだと説明されているが 何か割り切れないものがある。

宇宙線の残した痕跡を利用して 地上に落下した隕石についていろいろな検討がなされている。たとえば隕石が地上に落ちてから何年たっているのかとか 隕石が宇宙空間を飛行していたときの原形の推定などが宇宙線照射で生成した核種の検討から明らかにされている。

1958年にファイヤマン(Fireman)は Grant 鉄隕石について その断面の各点で He^3 含有量を測定し 等含量線を引いて(第4図)原形を復元する試みを行なった。この復元図によれば もとの重量は880kgとなり 落下時の重量が480kgであったから 全体の約45%が落下の際 大気層との摩擦で失われたことになる。ホフマン(Hoffman)とニヤ(Nier)は同じ鉄隕石について He^3 と He^4 の含有量の分布を測定し ファイヤマンとほぼ同様の結果を得ている。

同位体組成の均一性を乱す因子として 宇宙線照射の影響を例として挙げたが さらにすでになくなってしまった放射性核種の生成物も均一性を乱す重要な要因と考えられている。キセノン(とくに Xe^{129})がその中でも とくによく調べられているので Xe^{129} を例にとつていわゆる「消滅放射能」のはなしをしてみよう。



第4図
Grant 鉄隕石
における He^3
等含量線および
推定される
落下前の原形
(木越邦彦:
年代測定法
1964より:
Fireman 19
58 のデータ)

7.3 消滅放射能(extinct radioactivity)

隕石の年代測定の1つにキセノン (Xe) 法というのが1960年にレイノルズ(Reynolds)により提唱された。これは短寿命のヨードの放射性核種 I^{129} (半減期 1.64×10^7 年)が壊変して Xe^{129} になる反応を利用したものである。このキセノン法($I^{129} \rightarrow Xe^{129}$)で測られた年代の意味は星間物質から出発して 隕石ができた時 までの年代である。隕石ができた時 というのは その時以後 I^{129} 起原の Xe^{129} が空中へ逃げなくなった。つまり 隕石中に保持されるようになった時のことである。

このキセノン法による年代測定は 他の長寿命放射性核種の壊変を利用する年代測定法とちがって 親核種である I^{129} は とくに全部が壊変してなくなってしまっていて測定不能であるので 星間物質から出発した時にはヨードの安定同位体 I^{127} との比(I^{129}/I^{127} 比)が一定であったと仮定して計算している。

すなわち I^{129} を含む星間物質から出発した時には母体の大きさが小さいために 壊変生成物である Xe^{129} はガスとしてどんどん空中に逃げだしてしまうが だんだん母体が大きくなってきて ガスを保持できるような大きさに成長してはじめて Xe^{129} を蓄えることができる。出発点の I^{129}/I^{127} 比を一定とすると Xe^{129} の量とヨードの安定同位体 I^{127} の量を測れば Xe^{129} を保持できるような大きさになった時の I^{129} の量を推定し 年代を測ることができる。

このように既に消滅してしまった放射性核種の壊変反応(extinct radioactivity)の1つの証拠として Xe^{129} の価値は大きい。 Xe^{129} を利用するキセノン法には 二つの問題点がある。 Xe^{129} は Ar^{40} や He^4 と同様に気体であるので Xe^{129} が保持されるようになってから 何らかの方法で加熱されると逃げ出してしまうことと Xe^{129} は I^{129} から生成したものでばかりではないことである。このチェックには その他の Xe の同位体組成を測り その中の非放射性同位体を規準として行なっている。

第2表 $I^{129}\text{-Xe}^{129}$ 法による年代

隕石名	種類	補正しない キセノン年代	補正した キセノン年代 ($\times 10^6$ 年)
Abee	頑火輝石コンドライト	47	51.5 \pm 2
Indarch	頑火輝石コンドライト	77	
St. Marks	頑火輝石コンドライト	52	
Beardsley	古銅輝石コンドライト	254	
Richardton	古銅輝石コンドライト	97	51.5 \pm 1
Renazzo	炭素質コンドライト	—	66 \pm 6
Bruderheim	シソ輝石コンドライト	107	34.3 \pm 6
Murray	炭素質コンドライト	>128	
Sardis	鉄隕石中のトロイライト	238	

(Anders, Space Sci. Rev., Vol. 3 p, 583—714, 1964 より)

第3表 Bruderheim コンドライトおよび球粒中の Xe 同位体比
値は[(XeA/Xe¹³²)隕石/(XeA/Xe¹³²)空気-1] $\times 1000$

A	124	126	128	129	130	131	132	134	136
イン石全体	371 ± 18	566 ± 16	—	203 ± 10	62 ± 5	21 ± 28	0	3 ± 10	62 ± 10
コンドライト 空気中の存在 度 (atom %)	863 ± 250	1330 ± 250	72 ± 50	2158 ± 50	49 ± 20	12 ± 10	0	20 ± 10	32 ± 10

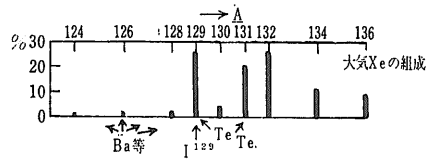
(本田雅健: 日本物理誌 vol. 21 p. 575—584 1966 より)

大部分の研究者は出発点の I^{129}/I^{127} 比は 0.01~0.001 の間だろうと考えており 0.00125 (レイノルズ 1963) として計算すれば 星間物質から隕石ができた時までの年代は ± 5500 万年 0.0025 とすれば 1 億4000年となる。
(第2表)

最初 I^{129}/I^{127} 比が 0.00125~0.0025 あったものが隕石のできた時には その約 $1/1000$ に減っているが この間が 5500 万年~1 億4000 万年かかったという計算である。この年代は 星間物質から地球が作られるのにもこれぐらいの年数を要したと考えられる点で意義がある。このような消滅放射能の考えを導入したのはブラウン(H. Brown)で いわゆるマンハッタン計画にも参画した地球化学者であるが 1947年に原子炉の中でつくられる人工放射性的核種についての知識からすでに壊変してなくなってしまった短寿命の放射性元素を考え始めたことにはじまっている。

第5図は地球大気中の Xe の同位体組成で 隣の X^{128} (1.92%) Xe^{130} (4.08%) に比べて Xe^{129} (26.44%) が異常に高く 大気中にも I^{129} の消滅放射能の化石をみることができる。この大気の Xe 比べて 隕石では重力の場をもたいために気体は散逸してしまい 隕石中に保持されている気体—この場合 $I^{129}\rightarrow Xe^{129}$ —が他の Xe 同位体と比べて過剰にあるはずである。第3表はコンドライト全体および球粒の Xe の同位体比を Xe^{132} を規準として示している。

これで見るとコンドライト全体の Xe^{129} より 球粒の



第5図
大気中の Xe
同位体組成
(本田雅健: 日
本物理誌 vol.
21p 575—584
1966 より)

Xe^{129} がはるかに大きいことがわかる。これをキセノン法年代で計算するとコンドライト全体より 球粒の方がずっと古いことがわかる。隕石の起原についての議論を後で述べるが ウッド (Wood) は球粒がコンドライト全体より先にできた点に着目して成因を考えている。
 $I^{129}\rightarrow Xe^{129}$ に続いて Pb^{205} (3×10^7 年) $\rightarrow Tl^{205}$ Pd^{107} (6.8×10^6 年) $\rightarrow Ag^{107}$ などが隕石について研究されたが残念ながら結果はネガティブであった。 Xe^{129} のように生成物が希ガスである場合には分離が十分に行なわれるが そうでない場合はうまくいかないのかも知れない。

ごく最近には(1965年) フライシャーたち (Fleischer Price Walker) は 消滅放射能 Pu^{244} の存在を示唆する核分裂飛跡の写真をとることに成功し 積極的に消滅放射能の存在の証拠たてに努めている。なぜこのように消滅放射能の存在の証拠を集めなければならないのか?

現在 地球内部の熱源として考えられているのは K^{40} や U^{235} U^{238} Th^{232} のような長寿命の放射性核種であるが 隕石や地球の創生時には これらよりもはるかに短寿命の放射性核種が大活躍したにちがいないと考えられているからだ。証拠はないが Al^{26} (半減期 7×10^5 年) などはかつて活躍した最も有力な短寿命放射性核種と考えられている。

Al は Mg と Si の間に位置しており 元素生成時には相当量存在していたらと想像される。もし原始惑星の中に Al^{26} が存在していたとすれば $Al^{26}:Si = 2\times 10^{-7}$ (10^4 cal/g 年) ほどあれば直径 200km ぐらいの小惑星でも熱源となって融解することができるといわれる。このように隕石母体となった惑星の熱源としても消滅放射能は大きな役割りを果たしていると考えられており隕石の起原を論ずる上に大きな意味をもっている。

7.4 隕石の同位体についてのまとめ

いままで述べてきた隕石の同位体についての話は 隕石の成因を考える上に数多くの重要な示唆を与えている。まず消滅放射能 $I^{129}\rightarrow Xe^{129}$ の問題から 星間物質から隕石ができた時までの年代が約 1 億年~2 億年であることが示された。また隕石が結晶化した年代および気体を保持できるようになった年代は 大部分の隕石につ

いて約45億年であり このことは鉛の含有量の異なる部分が分離した年代(ウラン—鉛法)とルビジウム—ストロンチウムの分離した年代(ルビジウム—ストロンチウム法) いわゆる結晶生成の年代と 隕石の天体母体が高温熔融状態から 200~300°Cの温度まで冷却して 気体が保持できるようになった年代(カリウム—アルゴン法ウラン—ヘリウム法)とが非常に似ていることは 隕石がほんのわずかな期間で冷却したと考えてよからう(その差は1~5億年と計算されている)。

このことは 隕石の天体母体があまり大きくなければ 1~5億年でそのまま冷却できるが 天体母体が大型であれば 途中で破壊されて小型となる過程を考えなければならぬ。しかし全面的に宇宙線照射の影響をうけるほど小型ではない。

宇宙線照射年代から 隕石が半径1m以下に砕かれた年代がわかるが 鉄隕石では1~10億年前 石質隕石では1000万~3000万年前という風に異なっている。

隕石と地球上の物質の同位体組成の均一性を乱す要因としては いろいろな認められているがここでは詳しくは述べない。

8. 隕石の成因起源

1794年にクラドニ(Chladni)が隕石は地球外から飛来してきた外来物質であり 大きな天体が衝突だとかあるいは内部爆発などによりこわされた破片であろうと述べ また19世紀のはじめに小惑星(asteroids)が発見され隕石は火星と金星との間にある小惑星か その破片であろうと考えられはじめて以来 数多くの隕石成因説が出されているが 非のうちどころのない完全な成因説はまだ確立されておらず 今後もいろいろな成因説が提唱されることだろう。

第二次世界大戦が終る頃までは 太陽系の天体としてはじめは太陽と同じような高温のガス球を頭に画いており これらが冷えて現在のような姿になったという考えが通説であった。だから 隕石もはじめは高温のガス球であったと考えられていた。たとえばディリー(Daly)の説など。

その後 太陽系の天体が冷たい宇宙塵やガスが集って濃縮生成したといういわゆる“星雲説”が 広く信じられるようになってきたので 隕石の起原もそれにしたがって変っていったのは当然のことである。

さて 隕石はどうしてできたのか? 隕石の成因を探る上の問題点として考えなければならないこととして

か?

- (2) 隕石ができたのはいつなのか?
- (3) 鉄隕石 石鉄隕石 石質隕石など全く種類のちがう隕石をどのような作用で生成したのか?
- (4) このような作用はいつ どこで行なわれたのか?

などが挙げられる。

これまで 隕石の分類 化学組成 鉱物組成 あるいは同位体組成などについて述べてきた。その折りに触れて 上記の問題点にタッチしていたが ここでこれまでの復習の意味を含めて 隕石について明らかになった事実を列挙してみよう。

- (1) 隕石の天体母体は太陽系起原であり 火星と金星との間の小惑星群起原であるらしい
- (2) いろいろに分類された隕石は その化学組成・鉱物組成の検討の結果 これらの隕石が1つあるいは似たような天体母体の破片であることを強く示唆される
- (3) コンドライトは観測された落下隕石の80%以上をしめ もっとも普通の隕石である
- (4) コンドライトの化学組成は 主成分については 酸素 炭素 水素 硫黄などの揮発性成分を除いて再計算してみると非常に均一な組成をもち 太陽系の宇宙存在度と非常によく似ている (Fe Ni の例外はあるが)
- (5) コンドライトの微量成分は 普通のコンドライトでは宇宙存在度に比べて 親銅元素などの元素群が欠損しているが 炭素質コンドライトと頑火輝石コンドライトでは これらの元素群の欠損はあまり認められない
- (6) 大部分のコンドライトは化学平衡状態に達していると考えてよい
- (7) コンドライト以外の隕石は コンドライト組成をもつ天体母体内の分化生成物と考えられる
- (8) 石鉄隕石と鉄隕石の金属相は普通 ウイドマンシュテッテン構造をもつが コンドライトとアコンドライト中の金属相にはこの構造はみられない。ウイドマンシュテッテン構造は 金属相がきわめてゆっくり冷えたことを示している
- (9) 隕石が気体を保持できるようになった年代と 結晶化した年代は いずれも約45億年前であることを示している

その他 やや不確定要素のある事実がいくつもあげられるがここには挙げない。

第二次大戦前の隕石学者はおもに隕石の記載に専念し隕石の成因や起原についてはほとんど論ぜられなかったが 戦後は上述のような基礎的な事実も整ってきたので多くの成因論が戦わされてきた。その中でおもなものを挙げてみよう。有名な隕石成因説としては リングウッド(Ringwood 1960 1961) ユーレイ(Urey 1962) メイスン(Mason 1960) ウッド(Wood 1963) アンダース(Anders 1964)の説などが挙げられる。

- (1) 隕石をつくった原物質はどのような性質をもっていたの

8.1 いろいろな成因説

1) リングウッドやメイスンの説

リングウッドは隕石の母体は冷たい宇宙塵が集合成長して生成したと仮定し、その組成を高度に酸化された状態の Type I の炭素質コンドライトによく似たものを想定している。母体の生成は約45億年前の太陽系の誕生のできごとの一部にあたる。多分もっと揮発性成分の濃度の高かった炭素質コンドライトに似た原物質は次第に大きくなり惑星をつくり、放射性核種の壊変などでできごとで内部が溶融され対流がおこる。溶融したコンドライト質物質はちょうど地球の火山活動と同じように大規模な火山活動によって表面にでてくる。このような条件の下では揮発性成分は急速に逸散し、結晶作用も早くなりコンドライトの球粒構造や凝灰岩質構造をつくる原因となっている。溶融過程の間で炭素と水素とは酸化した鉄やニッケルと反応して金属相をつくり、いっしょにできた水や炭酸ガスは揮発性成分として逸散する。すなわち惑星はこの溶融-対流-火山作用の段階を経てコンドライト質の物質からなる母体をつくるという考えである。

溶融のおこった温度は水や炭素などの存在のために余り高くならず約900°Cとしており、溶融-対流-火山作用の段階の後では300°C位に落ちる。しかし深層のある場所では溶融温度が900°C以上になるために完全溶融がおこり、コンドライト質の物質の分化作用をひきおこす。

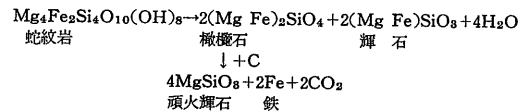
その結果、分化作用によって分離した金属相は中心部に沈んで鉄隕石をつくり、また300°C位のコンドライト質マントルとの境には金属相と珪酸塩相と混合相である石鉄隕石-たとえばパラサイト (pallasites) やメソシデライト (mesosiderites)-が生成する。コンドライト質マントルよりも比重の軽いアコンドライトは地球における地殻のように惑星表面を占めるようになる。マントル内部でも再結晶作用や変成作用がおこり、コンドライトもいろいろな種類に分化をする。このような惑星が衝突などでできごとによって破片となって隕石を生成したとするリングウッドの隕石成因説は、地球上の地質学および地球物理学的ないろいろな現象データを比較的忠実に仮定の基礎としている点でもっとも親しみやすいが、多くの都合の悪い点が指摘されている。

その大きな問題点として、隕石の天体母体の大きさがあげられている。リングウッドは鉄隕石の生成圧力を約50,000気圧と概算し、月かそれ以上の大きさの惑星を隕石の天体母体と考えた。しかし、ゴールズ(Goles) やアンダース (Anders) たちはもっと小さくて小惑星

ぐらいの大きさ(月の $\frac{3}{100}$ 位の重さ)を考え対立している。しかし、隕石の生成圧力を決定する決め手がないので、この問題はさらに今後に残されている。

メイスン(B. Mason)の説も Type I の炭素質コンドライトに似た原物質の脱水と漸進的な還元作用によって他のグループのコンドライトを生成したと考える点でリングウッドの説と似ているが、しかしリングウッドが溶融-対流-火山作用をコンドライトの分化の基礎にしたのに対して、メイスンはコンドライトは固相変成反応によっていろいろな種類のコンドライトをつくったと考えた点で異なっている。しかし、鉄隕石、石鉄隕石、アコンドライトについてはリングウッドと同様な考えで説明している。

メイスンは次のような反応を考えて説明している。
すなわち



これらの反応から、戦前の隕石学者が考えていた無水で還元状態にある頑火輝石コンドライトをコンドライトの出発点として、最後に酸化状態の炭素質コンドライトが生成するとする説と全く逆に、Type I の炭素質コンドライトを原物質とした。

2) ユーレイの説

1953年にユーレイは共同研究者のクレイグとともにコンドライトの化学組成を検討し、全鉄含量が高い H-グループと低い L-グループに分けられることを確かめ、H、L-グループのコンドライトの母体は少なくとも2つ以上の異なった組成をもつ小惑星に由来するものと考えた。しかしその後の数多くの新しいデータがあらわれて、ユーレイの説も少しずつ変わってきたが、この根本的な考えは変わっていない。すなわち高密度の冷たい宇宙塵の集合により星雲状物質となり、さらに成長して月ぐらいの大きさの隕石の母体天体をつくる。星雲状物質からこれらの隕石の母体ができ上がるまでの時間は、キセノン法で示されるように1~2億年であり、隕石の母体ができたのは約45億年前である。

これらの隕石母体の中では、局所的な熱化学反応がおこり、金属相と珪酸塩相の分離が行なわれるような還元溶融濃縮がおこる。隕石母体の中にはこの化学反応の結果、だいたい数m四方の金属相と珪酸塩相の溜り

があちこちででき上り 珪酸塩相の溜りは冷えるとともに多少の分化をおこし アコンドライト様のものができ 金属相の溜りは鉄隕石様の物質をつくる。鉄隕石の表面が多孔質であるのはこの時にできた穴であろう。

これらの隕石母体が生成するにつれて 深部ではグラファイトがダイヤモンドに変わるほど圧力が高くなり 金属相が 500°C 位がゆっくり(10⁷—10⁸年)冷えて生成したのがいわゆるウインドマンシュテッテン構造であると考えた。

リングウッドの説と根本的に異なる点は ここまできてもまだコンドライトがでてこないことである。

さて その後これらの隕石の母体は 相互の衝突によってこわされ こわされた破片は再び集合して第2の母体(これはせいぜい小惑星ぐらいの大きさ)をつくる。鉄隕石 石鉄隕石およびアコンドライトは最初の隕石母体の生き残りと考えられる。コンドライトはどうしてできたのであろうか? 最初の隕石母体がこわされて破片となったその微量のものが集ってできたものがコンドライトで コンドライトに特長的な球粒は熔融状態にある珪酸塩相の液滴がコンドライトに混ったものとして解釈した。これらの第2の隕石母体群は ふたたび衝突その他のできごとでこわされて地球上に落ちてきたユーレイの隕石である。このユーレイの説は 最初の隕石母体がどのようにしてこわされたかという点と コンドライトがグループごとに一定の組成をもち 相平衡関係にあると証明したプライアーの法則や リングウッドのデータはこの説では 説明困難である点などで アンダースたちに批判された。さらにアンダースたちはカンバーランド(Cumberland) アコンドライトを調べた結果ユーレイの説では 最初の隕石母体の生き残りであるはずのアコンドライトの中に 後からできたはずのコンドライトの破片を包有物として含まれていることを確かめ 一層批判攻撃を強くした。

さて ウッド アンダース ゴールズなどの隕石成因説はどうであろうか? 今までの説との大きなちがいは隕石の母体を小惑星と考え(月の約³/₁₀₀の重さ) 内部の高圧を否定していることである。

3) ウッドやアンダースたちの説

アンダースたち(Fish Golees Anders 1960)は 月か月より大きい隕石母体を考える説に反対して 小さな小惑星群を隕石母体とする説をうち出した。月の³/₁₀₀位の重さの小さい小惑星の熱源として すでに述べた Al²⁶(半減期74万年)や Fe⁶⁰(10~30万年)の短寿命の放射性核種の壊変——いわゆる 消滅放射能 を考えた点が

これまでの説と大いに異なっている。Al²⁶ や Fe⁶⁰ の壊変によって 小さな隕石母体内で溶融がおこり 中心部に金属相と硫化物相の核(core) その外側に分化した珪酸塩相の外核ができる。この核をさらに未分化な珪酸塩相からなるマントルがとりまき 表層には未固結の珪酸塩相が分布するようになる。温度は核とマントルの境界付近で 1000°C 以上 表面の未固結な部分では -100°C 以下と考えた。いろいろな隕石は この一回の溶融分化作用で生成し 核は鉄隕石 石鉄隕石とアコンドライト マントルは普通のコンドライト 未固結の表層は炭素質コンドライトにあたるとした。

コンドライトに特有な球粒(chondrules)の生成や 礫状構造の説明にはある種の火山活動とカルデラの崩壊などを考えている。また普通のコンドライトからなるマントルの親銅元素の欠損については一つの新しい考え(cyclic mechanism)で説明した。すなわち 熔融した硫化物相は原物質中の親銅元素を抽出しながら核の方へ滲透し さらに温度が上がると親銅元素のうち Hg Cd Se などの揮発性の元素は硫黄とともにふたたびマントルに戻り Fe In Pb Bi などは核に残って次第に濃縮した。

このようにして分化生成した小惑星が衝突などで崩壊し破片となり それらの軌道が地球の重力の場に入ったために地球上に落下したものと考えた。

このアンダースたちの説は リングウッドらの他の説に比べて 地球化学的なデータをきわめて重視し これらのデータに合致するモデルを考えている点で注目される。

これまでのすべての隕石成因説ではコンドライトの球粒(chondrules)は 宇宙塵が集って固まった後に生成したものと仮定しているが ウッドの説は正反対で 宇宙塵が集って固まる前にすでに球粒はできていたと考える点で大いに異なっている。ウッドは隕石母体をつくらせた原物質である星間物質は短時間ではあるけれども高温高圧の場(≥2000°K ≥1000 気圧)を経てきたと仮定している。この高温高圧の場として太陽から放出される高温ガスと衝撃波を想定している。急冷と圧力の低下でこの原物質のいくらかは相平衡図の液相部に入る。いかえれば金属相と珪酸塩相の液ができる。これらが凝集して合体し数mmの大きさの液滴となり金属粒子と珪酸塩質の球粒をつくった。相平衡図の液相部に入らなかった残りの原物質は直接塵状の物質に変わり 後に集合固結してコンドライトのマトリックスになったと考えている。この説はコンドライトの球粒がコンドラ

[以下12頁へつづく]