

昭和62年3月

日本温泉科学会第39回大会

会長講演

## 放射能から火山・地熱・温泉へ(I)

日本温泉科学会会長

村上 悠紀雄\*1

## Trial Approach to the Function of the Volcanoes, Geothermal Sources, and Spa from a Standpoint of the Radioactivity (I)

Yukio MURAKAMI

Atomic Energy Safety Engineering Center

## 1 はじめに

温泉の科学に関係深い皆様から貴重な時間を与えられながら、三題晰めいた題目で恐縮に存じますが、しかし小生の守備範囲の放射能からみると、きわめて深い関係でつながっております。関連諸分野におけるこの十年ばかりの成果をいただきますと、一つのシナリオができます。すなわち放射能、原子の崩壊、核反応といった筋道で、火山、地熱、温泉の地球上の位置づけができます。

先人の積み上げで地球化学的な元素の分布がわかり、微量分析と質量分析の発達は隕石の元素分布をあきらかにし、地球の成因に手がかりを与えた。また天文学は太陽始め恒星のスペクトルの解明を進め70種余の元素分布を明らかにし、また1970年代の電波天文学、X線天文学の急速な発展の成果は、それ迄無縁だった天文学を地球物理学、地球化学へとつなげ始めた。さらに人工衛星、宇宙飛行の技術的発展が大きなインパクトを与え、その効果は大きかった。他方放射能の発見は核反応、核分裂、核融合へと発展し、ついに核物理、素粒子論をとりこみ\*2、両分野の知見の融合は星の構造と進化、元素の生成、宇宙の始源へと急速な展開となってきた。

主題の火山、地熱、温泉の成因にマグマ、熱源の必要なことは明白で、放射能起源の熱が大きな働きをしていると考えている。これらを理解するためには、放射能と地球の成因やその背景をしる必要がある。したがって、以下少し廻り道になるが、放射能と地球の固化年齢、太陽系の成因と地球の生成、隕石と地球の起源などにふれつつ進めていく。このような見地にとってシナリオをすすめたい。

\*1 61年4月まで北里大学教授(衛生学部)、現在財団法人原子力安全技術センター参与(非常勤)

\*2 1955年2月京都大学湯川記念館で天体核現象セミナーが国内各大学の研究者を集めたのに始まる。つづいて1965,66年京都大学基礎物理研究所で研究会がもたれ、研究会報告(地球及び惑星の内部構造)を出している。また1977年京大で太陽系起源に関するシンポジウムがひらかれ、科学48巻No.9に特集号(1978)がでた。さらに1980年より3年間文部省特定研究「太陽系の進化と惑星環境の研究」(太陽系構成元素の起源と太陽系年代)がつけられた。そもそも1953年9月ベルギーのリエージュの「天体における核現象」のシンポジウムが大きな刺激となった。

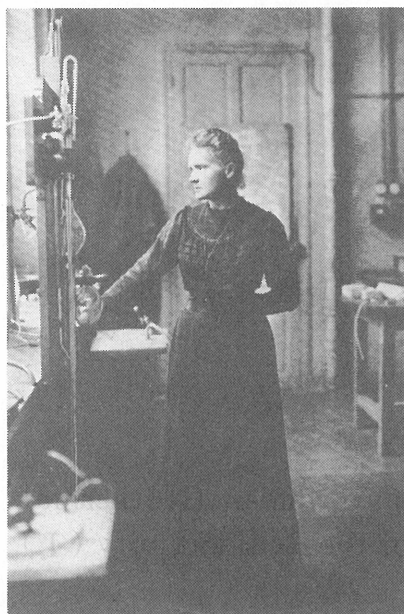


図1 キュリー夫人

1867年生れ ポーランドに革命がおこり、1891年パリ、ソルボンヌ大学で物理化学を学んだ、1895年ピエール・キュリーと結婚、ウランの放射能を発見(1896年)、放射性元素Po, Raを発見(1898年)、1903年PhD学位、ノーベル物理賞、1911年ノーベル化学賞をもらう、1934年再生不良性貧血で死亡。

どこ遠くないある時期につくられたに違いないという考え方は自然のなりゆきであった。

まさに放射能の発見は物質観の革命をもたらし、諸分野に大きな革命の波を及ぼしていった。一定不変の半減期があるということは、原子に寿命があることで、“初め”があり、“終り”があるということである。放射性原子こそまさに“未来を刻む時計”であると共に、“過去を刻んできた

## 2 放射能の発見

まず キュリー夫人(1867~1934年)の放射能の発見(1896年)に始まる。物質をつくる究極の粒子である原子atomは、物質の認識の基礎として近代科学の発展の原点であった。その原子が放射線として $\alpha$ 粒子、 $\beta^-$ 粒子、 $\gamma$ 線などを出して、違う種類の原子にかわっていく(放射性壊変又は崩壊)。この事実は、原子がさらに粒子的構造(subatomicな構造)をもつ事を示している。もともと“もはやわけ(tom)られない(a)”故に“atom”と命名されたのである。その結果、原子が原子核と軌道電子から成り立つとわかり、しかも放射線を出して原子核の様子がかわることになった。しかもその変化の速度(壊変速度又は半減期)は原子核の固有の性質によるものであり、原子の種類によりその長さは千差万別でそれぞれ一定なのである。半減期は短い方は $3 \times 10^{-7}$ 秒から長い方は $4.80 \times 10^{10}$ 年が知られており<sup>2)</sup>、いかなる天変地異をもってしても変えることはできないのである。

放射性元素は放射線を出し他の元素に変わり、その量は指数関数的に減少していく。これを見るとおそらくすべての元素は永遠の昔から存在していたことはありえないことであろう。それどころかそれほ

表1 放射能に関する主な発見と放射性核種の種別

1896年	放射能	キュリー夫人命名	
		原子が自発的に外界条件に左右されずに次の現象を示す。	
		透過作用、蛍光作用、写真作用、電離作用	
		放射性元素U, Thの発見	
1898年	放射性元素Po, Raの発見		
1906年	K, Rbの $\beta$ 放射能	イ)一次放射性核種 ロ)二次放射性核種 イ)からの崩壊生成物 ハ)宇宙線生成核種	}
1921年	白金の $\alpha$ 放射能		
1932年	サマリウムの $\alpha$ 放射能 $^{14}\text{C}$ , $^3\text{H}$ の発見		
1939年	核分裂の発見		
1960年	$^{129}\text{I}$ , $^{129}\text{Xe}$	ニ)消滅核種	}
1965年	$^{244}\text{Pu}$ , $^{240}\text{U}$		

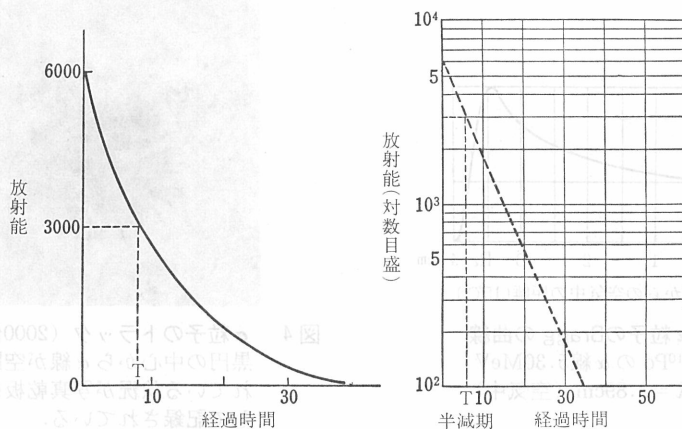


図2 放射能の時間変化(半減期をTで示す)

時計”なのである。したがって放射能をはかり、現在をしることこそ過去をとく鍵となるであろう。宇宙の変化の歴史は、地球,星,宇宙をつくっている元素の中に刻みこまれている筈である。星,隕石,地球,太陽などの測定,観測によってえられた新しい科学的な事実は、地球上で適用されている原理をあてはめ、地球,隕石,惑星の見解を整理し拡大し、次第に太陽,太陽系,銀河系,宇宙へと仮説を立てては測定を進めてきた。理論と測定事実との戦いはきわめて烈しいものがあり、二三年をへずして入れかわって来た\*3。

この三題断めいた題目で、地球の起源から火山,温泉を主として放射性元素,核反応などを通して、科学的な考えの発展のあとをたどろうというわけである。

まず崩壊,半減期などこれからの展開と関係の深いものをのべよう。

### 3 放射能と崩壊熱

鉱物にルミネッセンス,熱ルミネッセンスや着色(水晶や岩塩など)などの現象のあることは古くから知られており\*4,それは結晶格子と電子の問題であり,放射線で起る現象とわかっている。

放出されたα粒子,β粒子は周囲の原子に励起電離を起しつつ,エネルギーを失っていく。本稿で一番関係あるα粒子だが,エネルギーを失っていくと,ついに電子を周囲からもらって中性のヘリウムガスとなる。放出されたα粒子は固有の一定エネルギーをもち,一定の距離に到達し(飛程),飛程の一寸手前で急速にエネルギーを失なう\*5。3図の如くである。5.3MeVのα粒子の空気(密度0.00129g/cm<sup>3</sup>)中のこの飛程は岩石中では30~40μくらいになる。

いいかえれば岩石(密度~3g/cm<sup>3</sup>)などの中では,非常に限局された点にエネルギーを与え,ポテンシャルエネとして貯えられている。

\*3 いづれ太陽系などの理論は歴史的な意義しかもたないものになる日もくるであろう。

\*4 暗室でホタル石の小片を加熱すると,ある温度になると一瞬光る。熱ルミネッセンス現象である。グローという,放射線があたると自由電子と正孔を生じ,格子欠陥に電子がトラップされている。加熱により電子(あるいは正孔)が開放され,光を発してもとに戻る。放射線の量と熱発光量はある範囲で比例している。この現象は熱ルミネッセンス線量計(TLD)として用いている。

\*5 α粒子(質量m,速度v)のエネルギーEは,  $E(\text{MeV}) = \frac{1}{2}mv^2$  である。5.3MeVのα粒子の速度は  $1.6 \times 10^9 \text{ cm/s}$  で,1cmあたりの線エネルギー付与(LET)は474MeVで,1MeVになると  $0.7 \times 10^9 \text{ cm/s}$  と速度は減り,LETは1410MeVと大きくなる。

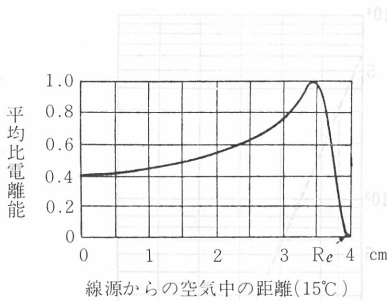


図3  $\alpha$ 粒子のBraggの曲線  
 $^{210}\text{Po}$ の $\alpha$ 線5.30MeV  
 $R=3.89\text{cm}$ (空気中)

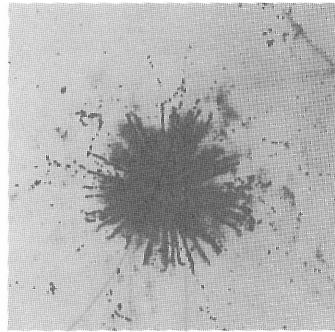


図4  $\alpha$ 粒子のトラック(2000倍拡大)  
 黒円の中心から $\alpha$ 線が空間的に放出さ  
 れている状況が写真乾板にトラックと  
 して記録されている。  
 (The Natural Radiation Environment,  
 p38, USAEC 1968 より引用)

$\alpha$ 粒子が放出されるさいでできた娘核種は反対方向に反跳され、格子点から変位または転移する(格子欠陥)\*6。放射線のエネルギーはこのような経過でポテンシャルエネルギーとして貯えられる<sup>1)</sup>。放射性原子一個のエネルギーでは小さいが、集まるとその効果は大きい。これが熱にかわるメカニズムはまだ十分に解明されていない。しかし実験的にはこのような鉱物を加熱すると(熱伝導で失うより早く高温にすると)、電子を供給して結晶中の空位に入り、貯えられているポテンシャルエネルギーが放出されて熱となる。温度が上がると一層早く熱を放出する。すなわち断熱的に放出されるとさらに温度は上がる結果となる。

さて放射性物質がこのような過程で、周囲より温度が高くなっていることは、まずキュリー夫妻が気がついていた。1gのラジウムが1時間あたり140calの熱を放出しており、 $\alpha$ 粒子の寄与はそのうちの124calと実測している。

1gの $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ がその崩壊生成物と共存している(放射平衡になっている)とき、それぞれ0.71、0.20cal/yを発生する計算になる\*7。平均的な岩石はU、Thをそれぞれ1、3ppmを含んでいるので、計 $1.3 \times 10^{-6}\text{cal/g} \cdot \text{y}$ となる。もしU 10、Th 30ppmを含むとすると、2000万年には260cal/gとなる。岩石の融解熱60cal/g、熱容量を0.2とすると、1000℃をこえて容易に融解が起る<sup>1)</sup>。簡単な結晶格子では、相当な深度の地殻における温度でも容易にその変位を回復してしまう。しかし放射性鉱物フェルグソナイト、サマルスカイト、ジルコン<sup>3)</sup>などは、希土類の含量が多く結晶格子が複雑で、容易に回復しにくいことが知られている。しかしなにかの外界条件で急激にしかも断熱的(熱伝導がない状態)に変化が起ると、ポテンシャルエネルギーが放出され、有力な熱源になりうる事が推定される。

さてこの崩壊にもとづく熱寄与をウラン・ラジウム系列を例にして求めてみる。 $^{238}\text{U}$ は崩壊をくり返して安定な鉛 $^{206}\text{Pb}$ となる。両者の質量の差は0.005550原子質量単位<sup>2)</sup>で、51.7MeVにあたる\*8。この間に8個の $\alpha$ 粒子と6個の $\beta^-$ 粒子を放出している。 $\beta^-$ 粒子のエネルギー6.3MeV

\*6  $^{238}\text{U}$   $\rightarrow$   $^{234}\text{Th}$ の場合を考えると、格子点にあった $^{238}\text{U}$ は $^{234}\text{Th}$ にかわり、その $^{234}\text{Th}$ が反跳される。崩壊のエネルギーの2%くらいが反跳エネルギーで、残りは $\alpha$ 粒子(4.20MeV)のエネルギーである。

\*7  $^{235}\text{U}$ は $^{238}\text{U}$ にくらべ半減期が $7.0 \times 10^8\text{y}$ と短いので、1gあたり4.3cal/yを放出する。

\*8 エネルギーEと質量mとは等価である。cを光の速度とすると、 $E=mc^2$ である。なお1原子質量単位は $1.66043 \times 10^{-27}\text{kg}$ で、931.5MeVである。

1 MeV =  $1.602 \times 10^{-6}\text{erg}$  =  $1.602 \times 10^{-3}\text{J}$  =  $3.829 \times 10^{-20}\text{cal}$ , 1W = 1 Js<sup>-1</sup>

の2/3は、ニュートリノが持ち去り役に立たないので、差引くと47.4MeVの崩壊エネルギーとなる。これが全部熱にかわりうるとすると、1年間には1gの<sup>238</sup>Uから下記の如き<sup>238</sup>U原子が崩壊するので、

$$-dP/dt = \lambda p = \frac{0.693}{4.5 \times 10^9} \times \frac{6.02 \times 10^{23}}{238} \times 1 = 3.90 \times 10^{11} \text{ 原子/g} \cdot \text{年}$$

その放出エネルギーは大きくしかも絶間なく続いている。

$$47.4 \times 3.90 \times 10^{11} \text{ MeV/g} \cdot \text{年} = 1.85 \times 10^{13} \text{ MeV/g} \cdot \text{年}$$

U, Th, Kなどの半減期は表2に示した如くながいが、45億年前の状況は崩壊の式(2)に $t = 4.5 \times 10^9$ 年を入れ減衰の補正をすると、図5となる。35~45億年前の放射能の主役は<sup>235</sup>Uと<sup>40</sup>Kで、現在の全熱量の~50倍以上あったことが推定できる。

地球全体における放射性元素の量が<sup>4)</sup>、地球の熱の歴史をふり返えるには大切だ。地殻、隕石などから出したこれら放射性元素の値は、K以外は研究者間であまり大きい変化はない。K量の小さい方の一例を3表に示した。全崩壊熱は $2.42 \times 10^{13}$  Wで<sup>5)</sup>、地球は冷えていくことになる。

高い方のK量の例800ppm<sup>6)</sup>をとると、全熱量は $3.8 \times 10^{13}$  Wとなり、地殻熱流量 $4 \times 10^{13}$  Wにきわめて近くなり、地球は温かくなることになる。この高いK量は太陽中の存在量、コンドライト隕石のK量にもとづいている。なぜ地球は隕石よりKが低いかかわかなければ適否の判定はできない。いづれにしても地殻熱流量の100%ではないにしても、60%はこれら天然放射性元素の崩壊でまかなへることがわかった<sup>7)</sup>。

表2 長寿命放射性核種の崩壊による発熱量

核種	半減期	$\lambda$ in $10^{-9} \text{ y}^{-1}$	崩壊熱	
			MeV/原子	$\text{cal} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$
<sup>238</sup> U	$4.468 \times 10^9 \text{ y}$	0.1551	51.70	$5.015 \times 10^9$
<sup>235</sup> U	$7.038 \times 10^8 \text{ y}$	0.9849	46.39	$4.55 \times 10^9$
<sup>232</sup> Th	$1.41 \times 10^{10} \text{ y}$	0.04916	38.34	$6.80 \times 10^9$
<sup>40</sup> K	$1.427 \times 10^9 \text{ y}$	0.4857	0.521	$0.300 \times 10^9$
<sup>87</sup> Rb	$4.80 \times 10^{10} \text{ y}$	0.01444	0.271	$0.156 \times 10^9$

表3 U, Th, Kの熱の発生量<sup>7)</sup>

放射性元素	存在量	全地球発熱量
カリウムK	170 ppm	$3.7 \times 10^{12}$ W
ウランU	$18 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{13}$
トリウムTh	$65 \times 10^{-3}$	$1.05 \times 10^{13}$

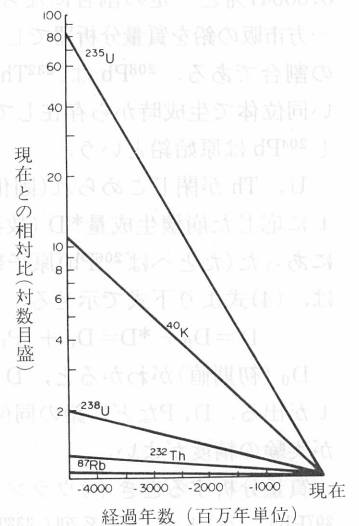


図5 45億年前の放射性元素の相対的な比(現在を1とし)(Wasserbergモデル)

## 4 地球の固化年令

親核種  $\xrightarrow{\text{放射線}}$  娘核種  
 $P \longrightarrow D$  (反跳される)

$$dP/dt = -\lambda P \quad \lambda : \text{壊変定数} \quad (1)$$

$$P = P_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

$$T = 0.693 / \lambda \quad (3)$$

$$D = P_0 - P = P(e^{\lambda t} - 1) \quad (4)$$

$$t = \frac{2.303}{\lambda} \log \left( \frac{D}{P} + 1 \right) \quad (5)$$

つぎに崩壊の速度すなわち半減期により年代決定のできる関係を見る。放射性原子(親核種)がdt時間にdP個崩壊して他の原子(娘核種)になるとき  
 例  ${}_{92}^{238}\text{U} \xrightarrow{\alpha} {}_{90}^{234}\text{Th}$ ,  ${}_{37}^{87}\text{Rb} \xrightarrow{\beta} {}_{38}^{87}\text{Sr}$   
 その崩壊速度dP/dtはそのとき存在する親核種の数Pに比例している((1)崩壊の法則).

はじめ  $t=0$  のとき  $P_0$  個あったとしてとくと、(2)の関係となる。親核種が半分になる時間(半減期)は  $P=P_0/2$  を(2)式に入れると(3)式で示せる。半減期Tは天変地異に無関係で一定であることにはいくつかの証明がある。

(4)式で生まれた娘核種Dが示せる。この対数をとると(5)式がでて、D, Pを測定すれば経過時間tすなわち岩石の年令、隕石の年令などが求められる。

はじめの親核種数  $P_0$  がわかっているならば、残存量Pを測定すると(2)式で経過時間tがわかる。しかし実際には  $P_0$  がわからないが、その娘核種Dは測定できる。すなわち  $D=P_0 - P$  であるから、これから出した(5)式によると、直線の型であり、勾配から経過時間が出ることがわかる。

Uを含む鉱物ができてから風化やその他の変化がなく、t時間の間の崩壊生成物がみなその中にある。いわゆる“閉じた系”であれば、娘核種をはかると経過時間tがわかる。いわゆる固化年令が出せる<sup>8)</sup>。

ウラン・ラジウム系列のUと鉛の例をあげる。現存のウランは  ${}^{238}\text{U}$ ,  ${}^{235}\text{U}$ ,  ${}^{234}\text{U}$  が99.274, 0.7205, 0.00547%と一定の割合になっており、最後の崩壊生成物はそれぞれ安定な鉛206, 207である。一方市販の鉛を質量分析器でしらべると、 ${}^{204}\text{Pb}$  と  ${}^{206}\text{Pb}$ ,  ${}^{207}\text{Pb}$ ,  ${}^{208}\text{Pb}$  が1.42, 24.1, 22.6, 52.3%の割合である。 ${}^{208}\text{Pb}$  は( ${}^{232}\text{Th}$ )トリウム系列の最終崩壊生成物である<sup>2)</sup>。 ${}^{204}\text{Pb}$  は崩壊と関係ない同位体で生成時から存在しているものである。したがって後三者を放射性起源鉛というのに対し ${}^{204}\text{Pb}$  は原始鉛という。

U, Thが閉じこめられ(固化)してから崩壊生成物は外へ全く逃げるのがないとき、経過時間tに応じた崩壊生成量\*D(放射性起源鉛)が、はじめにあった $D_0$ に加わってくる。固化した当時にあった(たとへば ${}^{206}\text{Pb}$ )原子数を $D_0$ (図6のハッチ部分)とすると、定量できる現在の原子数Dは、(4)式より下式で示せる。

$$D = D_0 + *D = D_0 + (P_0 - P) = D_0 + P(e^{\lambda t} - 1) \quad (6)$$

$D_0$ (初期値)がわかると、DとPの関係は直線関係であり、その勾配( $e^{\lambda t} - 1$ )より経過時間tが出る。D, Pなどに鉛の同位体の絶対値を用いず、一定不変の原子鉛  ${}^{204}\text{Pb}$  との比を用いる方が実験の精度がよい。

質量分析するときイ)ウラン・ラジウム系列( ${}^{238}\text{U} \rightarrow {}^{206}\text{Pb}$ )、ロ)アクチノウラン系列( ${}^{235}\text{U} \rightarrow {}^{207}\text{Pb}$ )、ハ)トリウム系列( ${}^{232}\text{Th} \rightarrow {}^{208}\text{Pb}$ )について、 ${}^{206}$ ,  ${}^{207}$ ,  ${}^{208}\text{Pb}$  と原始鉛  ${}^{204}\text{Pb}$  が同時に測定できる。それぞれにつき経過時間tが求められる有利である。

その詳細は省略するが<sup>8)</sup>、最初の鉛同位体が等しく経過時間tが同じならば、U/Pb比がことなっても、たとえば  ${}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}$  と  ${}^{207}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}$  を両軸にとると、一定の直線(アイソクロンという)の上に測定点がのる(図7)。

C. Patterson (米国)<sup>9)</sup>が隕鉄(中のトロイライト)をはじめ種々の隕石について実験した結果(8節参照)、いづれも測定点は同じ直線にのっており、この傾きからtを求めると  $(4.55 \pm 0.07) \times 10^9$  年と出た。

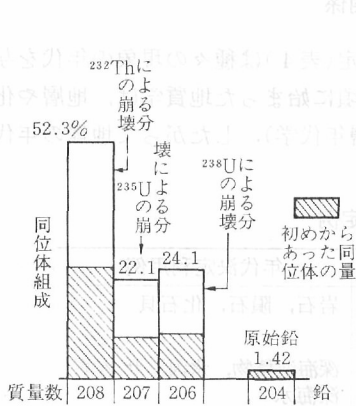


図6 放射性鉱物中の鉛の同位体の存在度  
時間経過と共に崩壊によりそれぞれ増加がみられる(白色部).

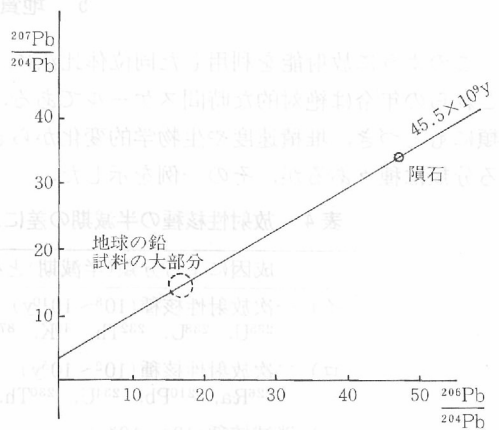


図7 地球のU-Pb法のアイソクロン  
(y軸の交点に初期比を仮定する)

また地球の鉛が風化して、無作為に集ってできたとみられる海底堆積物の鉛をしらべると、かなり同じ直線上にのり、あるいはその周囲に散在している。この結果は地球と隕石が同じ経過時間tすなわち同じ固化年令であるということを示している。

またこの年令は  $^{40}\text{K}-\text{Ar}$  法,  $^{87}\text{Rb}$  ( $4.80 \times 10^{10} \text{ y}$ )  $\beta^-$ ,  $^{87}\text{Sr}$  法でも求められた。 $^{87}\text{Rb}$ ,  $^{87}\text{Sr}$  につき同じ関係式(6)がでる。 $^{87}\text{Sr}$  は崩壊と関係なく、存在比(9.86%)<sup>2)</sup>も大きく測定精度もよい。同様にアイソクロンがえられ、 $(4.56 \pm 0.13) \times 10^9$  年とでた<sup>10)</sup>。その後の研究から45.5億年を地球の年令としている。これは地球が外界から独立したときの年令ということである。

地球は今も昔も造山運動、火山運動を長い歴史の中でくり返しており、比較的最近に固化したことは種々の証がある\*9。地球上の岩石で45億年以上の古いものは一つもみつからないのはそのためである。今までのところ世界で一番古い岩石は、前カンブリア期初めのグリーンランド西海岸(Godthaab 地方)の花崗片麻岩類で、 $\text{Rb}-\text{Sr}$  法で $(3.69 \sim 3.75) \times 10^9$  年<sup>11)</sup>である。これより若い岩石 $(3.0 \sim 3.2) \times 10^9$  年はアジア、アフリカ、北米大陸などで知られている。

これに対してわが国の岩石の最も古いものは、岐阜県の飛騨片麻岩で6~8億年である。

アポロ飛行士が月から持ち帰った岩石\*10を同じように測定してみると、年令は地球上のものと同じでやはり $4.6 \pm 0.1 \times 10^9 \text{ y}$ であった<sup>13)</sup>。しかし多くの岩石はもっと若い年令を示した。高地の岩石は39~40億年に集中し、海の岩石は30~38億年であった。また隕石が烈しい衝突したこと(表面のクレータ)や、地球でマントルからマグマが分離し、地殻を形成したような激しい元素の分化がやはり起こったことを示すデータもえられ、月の起源、内部構造、その歴史の大きな解明となり、地球の歴史に示唆を与えた。

\*9 地球は  $^{235}\text{U}$ ,  $^{40}\text{K}$  などの崩壊熱で熔融状態を20億年くらい保っており、重い金属が核をつくり、そのまわりに金属酸化物と珪酸塩のマントルができた。 $^{235}\text{U}$ ,  $^{40}\text{K}$  の崩壊による減少と共に冷却し、30億年くらい前にこの地殻ができたという説もある。

\*10 1969年7月のアポロ11号以来17号まで6回にわたり、400kgの岩石を持ち帰った。18ヶ国 800人の研究者が調べた。また5台の地震計を設置し、地震波により地球のような層状構造がわかった。14号の着陸後に直径3mの隕石が地震計の近くにおちた。クレータの出来ることもわかった(1972年5月13日)。

5 地質年代との関係

このように放射能を利用した同位体比法による年代決定(表4)は種々の現象の年代を与えた。これらの年令は絶対的な時間スケールである。18世紀中頃に始まった地質学は、地層や化石の種類にもとづき、堆積速度や生物学的変化からきめた(地層年代学)。したがって地球の年代に関する分類は種々あるが、その一例を示した。

表4 放射性核種の半減期の差による年代決定例

成因による分類(半減期)と核種	年代決定利用例
イ) 一次放射性核種(10 <sup>8</sup> ~10 <sup>10</sup> y) 235U, 238U, 232Th, 40K, 87Rb, 147Pm	岩石, 隕石, 化石貝
ロ) 二次放射性核種(10 <sup>2</sup> ~10 <sup>5</sup> y) 226Ra, 210Pb, 234U, 230Th, 231Pa	深海沈積物, 氷河, サンゴ, 深海水
ハ) 消滅核種(10 <sup>5</sup> ~10 <sup>8</sup> y) 129I, 244Pu, 146Sm, 26Al	太陽系の年令, 宇宙の年令
ニ) 宇宙線誘導放射性核種(0.15~10 <sup>3</sup> y) 14C, 3H, 32Si, 10Be, 7Be	木片, 骨, 貝殻, 古代鉄塊, 深海沈積物, 深海水

表5 地質年代と絶対年代(単位: 10<sup>6</sup>年)

特 有 生物	代	紀	世	開 始 年代	示 準 化 例	
人 類	新生代	第四紀	完新世	現代	示 準 石 の 例	
哺乳類			更新世	2.5		
			中新世	7		
			第三紀	漸新世		26
		始新世	38			
		白亜紀	54			
		65				
は虫類		中生代	ジュラ紀	136		
				三疊紀		190
				225		
両棲類	二疊紀	280				
		石炭紀	325			
魚 類	古生代	デボン紀	345			
		シルル紀	395			
三葉虫	カンブリア紀	430				
		500				
			570			

しかしこれは現在からふり返った時間の前後を示す相対的年代である。新生代の始まりは6500万年前で第3紀と第4紀にわけ、後者はわずかに約200万年と短い。これはさらに現在につながる完新世(沖積世, 約1万年)と更新世(洪積世)にわけている。

ついで中生代は1億6000万年、古生代は2億2500万年前から始まり、2億7500万年つづいてカンブリア紀となる。これが1億年くらいといふとこまでわかっていたが、それより先きは考へていなかった。

この分類の対象は主として水成岩を用いたが、放射能測定では火成岩や変成岩を用いている。対象とする試料の差や研究方法自身(化石、堆積など)のため、新しいものほどよくわかり、したがって分類も当然こまかくなっている。カンブリア紀から先の40億年近くはまさに地球の歴史にとっては大切な時代だが、従来のやり方ではどうしようもなく、放射能にもとづく Nuclear Geology の活躍が必要となってくる。その研究には前述の鉛同位体法、<sup>40</sup>K-<sup>Ar</sup>法、<sup>147</sup>Sm-<sup>143</sup>Nd法などが用いられている。

6 宇宙と地球

小生の故郷は本学会が行われている当地上田市です。さへわたる秋天の星を眺め、宇宙の神秘さを追っていた少年時代を思い出します。天の川(銀河)を眺め、太陽系、太陽、惑星、地球を全宇宙と当時は考えていた。今日ではこの銀河はthe galaxyでありour galaxyであり、そして全数はわからないが、恐らく数えきれない程に銀河galaxisがあり、それらがしめている空間が宇



宙となった。しかもこの宇宙はたへず膨張しており、さりとて無限というわけではなく、有限であるが果てはないというのである。

この宇宙にたとえ話がある。ゴム風船に墨でアットランダムに点々を書いておき、これを徐々に膨らませるとき、各点が遠ざかっていく様子に宇宙の膨張はにている。各点は島宇宙ともよび、この太陽系もその一つの点にすぎない。

宇宙が膨張していることは、星のカルシウムイオンの吸収線が実験室のそれにくらべて、波長がずれて長くなっていることからみつかった(ハッブル 1929年)。よく経験する電車が近づくとときその信号音は高くなり、遠ざかるときは低くなる(ドップラー効果)のと同じ理屈であり、この測定事実は光の発生源は地球から離れていくことになる\*11。そのことは年代をへだてた同じ星の測定写真をみて離れていく状態が確められた\*12。

宇宙は膨張しているということは、逆に“時”をさかのぼっていくと、ついに一点に宇宙のエネルギーが集まることになる\*13。ここに宇宙の始まりがあり、エネルギーが発散して物質である星ができたというG.Gamowのビックバンの考えが生れた<sup>13)</sup>。それは100億年～150億年前とされている。1965年の宇宙背景放射3°Kの発見により急速にこの考え方が注目された。

現在のところ宇宙とは佐藤勝彦(宇宙の誕生とインフレーション 1985)によれば、“宇宙”は時間・空間・物質のまったくない“無”の状態から量子重力的効果によって創生される。創生された宇宙はプランクサイズ $\sim 10^{-24}$  cm程度の閉じた宇宙であるが、それはインフレーションによってただちに何十桁何百桁と引き延ばされ、マクロな宇宙となる。その中で銀河が生まれ星が生まれ、また人類が誕生するというドラマが進行するが、やがて収縮消滅し“無”に帰る。Universe(宇宙)は常にこのように無からの生成消滅をくり返している、というのである。

## 7 太陽系の生成と地球

さて地球を知るには、まず太陽系を知らねばならない。太陽系は太陽、惑星、遊星および彗星からなっており、8図に示したようなうすい凸レンズ二枚をあわせた円盤型(直径10万光年、中心部の厚さ約1.5万光年)で2000億個以上の恒星がある。太陽は中心から3万光年離れ、近い方から図9に示したような順に、9個の惑星が楕円軌道を廻りつつなっている。これらの特性の要約を示した<sup>14)</sup>。

銀河の質量の殆どは円盤状のところや中心核にあり、5～10%が星間ガスまたは星間塵(星間物質)\*14であり、渦状腕部に多く集中している。このように銀河は星とガス雲からなり、星の大きさは様々で、大体 $10^{11} \sim 10^{12}$ 個ある。一様に分布しているわけではなく星が集団(クラスターという)となっている。

\*11 光が1年にとぶ距離を1光年といい、 $9.4605 \times 10^{11}$  mである。太陽と地球の距離を1天文単位といい、 $1.49597870 \times 10^{11}$  mである。惑星など近い天体に用いる。太陽系外の天体の距離にはパーセックpcを使う。  
 $pc = 3.0856 \times 10^{16}$  m = 32615光年。

\*12 肉眼でみえる他の銀河の一例はアンドロメダ星雲だが、それでも地球から200万光年も離れているので、秒速30～60kmで地球から遠ざかっている計算になる。

\*13 初めの温度 $10^{33}$  K、密度 $10^{94}$  g/cm<sup>3</sup>、粒子のエネルギー $10^{27}$  MeVといわれる。ガモフは宇宙の誕生から数分の中にすべての元素ができたと考えた。今日ではこの合成の過程は否定された。しかし宇宙背景放射3°Kの発見と軽い元素の存在量の測定結果と素粒子物理学の知識がむすびついて、急速にビックバンの考えが再び注目された。すなわち、時間と空間、物質の区別がない状態から三者が分離し(プランク時刻)、今日の物質のもとである素粒子が生まれた。S. Weinberg, The First Three Minutes, N.Y. Basic Books, 1977, 小尾信弥訳, 宇宙生成ははじめの三分間, 231頁, ダイヤモンド社 1977が、素粒子の役割をわかり易くのべている。

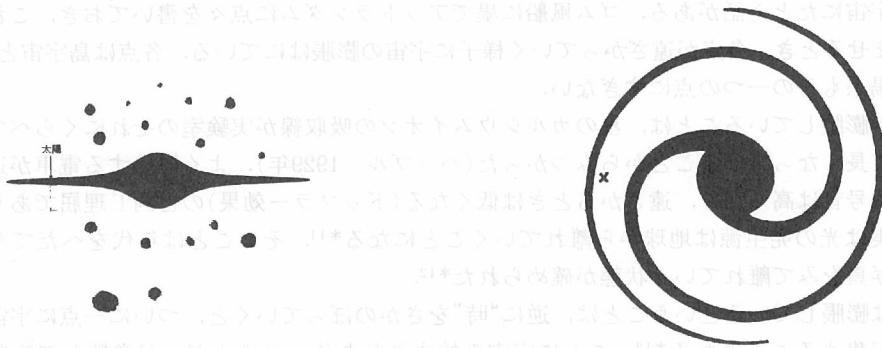
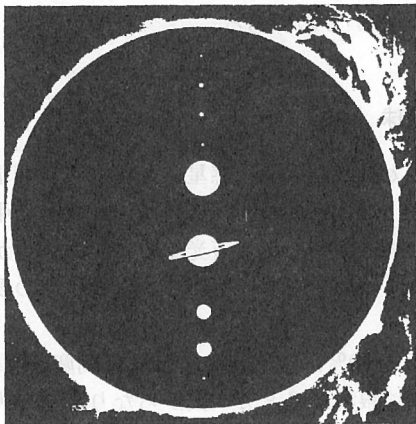


図8 わが銀河の横からみた円盤状と上からみたうず巻型の想像図

- a) 円盤の厚さは約5000光年といわれ、この円盤を内側からみたのが天の河である。  
 b) 銀河はうず巻型だ、その他楕円型、不規則型など色々ある。太陽の位置は×で示した。



太陽系 惑星	太陽から の距離 百万マイル	(地球 質量 1)	(水 1) 密度	平均 温度 (K)	大気 組成
太陽	—	343.00	1.4	5800	—
水星	36	0.1	5.4	~600	なし
金星	67	0.8	5.1	750	CO <sub>2</sub> , Ar, N <sub>2</sub>
地球	93	1.0	5.5	180	N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>
火星	142	0.1	3.9	140	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , Ar
木星	486	317.8	1.3	128	H, He
土星	892	95.2	0.7	105	H, He
天王星	1,790	14.8	1.6	70	H, He, CH <sub>4</sub>
海王星	2,810	17.2	2.3	55	H, He, CH <sub>4</sub>
冥王星	3,710	<0.2	?	?	?

図9 太陽と惑星の相対的の大きさで特性の一部 相対的な大きさを示すため、一番大きな太陽(外側の大きな円形)の中に、上から順に各惑星(表の順)を比例した大きさで示した(P. W. Merrill, Space Chemistry 70p より作成)

惑星はその外側を回転しており衛星を持っている。地球には1個(月)、火星には2個といったように、木星から順に外側へ10, 21, 5, 3, 1個の衛星がある。太陽から火星までを地球型惑星、それより外側は木星型惑星といい、密度、大きさその他の性質から区別していることが表からわかる。

\*14 1930年頃種々の星団の明るさがその距離に比して急激に減ることより、星と星の間に光を吸収するもの(星間物質)があることに気づいた。それまでは宇宙は真空と思われていた。Na, K, Ca, Feの原子、Ti<sup>+</sup>イオン、CN, CH, CH<sup>+</sup>などの分子が発見された。真空というのはエネルギー最低の状態という考え方がよい。宇宙の温度がある温度までさがると真空のエネルギーはより低い状態にうつる(真空の相転移という)。この差が熱として放出され、宇宙の温度はあがる。



となる。その一つ原始地球はその重力圏に入った微惑星をさらに集め、外側は濃いガス(原始大気)でおおわれていた。形成開始後  $2 \times 10^6$  年で地球は成長を完了した。  $10^7$  年頃には原始太陽から吹き出す強い太陽風や紫外線によって太陽系星雲は散逸し、同時に地球をとりまく原始大気も散逸した。その後  $(1 \sim 5) \times 10^8$  年の頃 核とマントルの分離がおこり、ほぼ同時期に現在の大気、海洋が形成されたというのである。このモデルに対して真空に近い状況下で成長したとする松井・水谷モデル<sup>18)</sup>、その他がある<sup>19)</sup>。

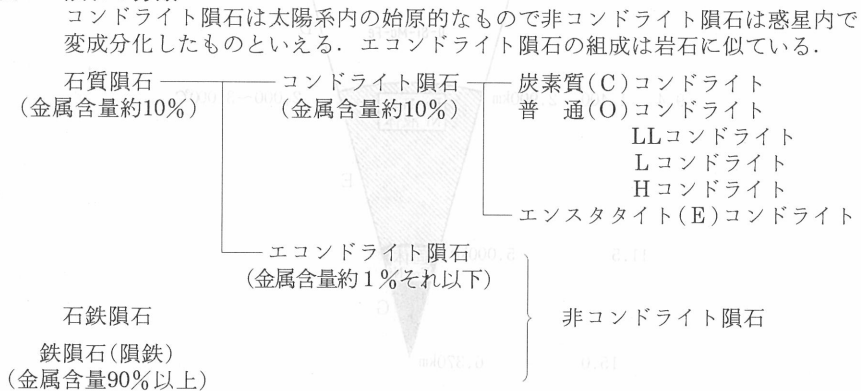
さて固体微粒子から小惑星になるまでの間、原始太陽系の円板内で微粒子の固化、付着成長(accretion)があり、隕石も形成されており(小惑星帯起源)、そのさい放射性元素による熱が大きな働きをしている。地球のもっている重要な性質の中で、放射能はきわめて重要な性質の一つであり、起源、化学的分化、地質時代の変化などを証明するのにかかせないことは容易に想像できよう。しかし放射性元素に関する情報はまだ少ない。したがって地球を知るには隕石を調べねばならない順序となる。

### 8 隕石 —地球の起源—

隕石は太陽系から地球への手紙だといわれる。星、太陽などのスペクトル的な測定だけでは、なんとしても隔靴搔痒の感がある。隕石は化学者が手にとり最高の技術を用いて、その素性をしらべることができるえがたい地球外試料である。したがって隕石こそまさに元素合成、凝縮、集積、変成、宇宙線の作用、母天体などを知るよい手がかりとなりえよう\*17。

研究が進むにつれケイ酸塩鉱物を主成分とする石質隕石と、Fe、Ni を主成分とする鉄隕石(隕鉄)、そして両者の中間の石鉄隕石が見つかった。それぞれの落下数の割合は93, 6, 1%である\*18。それではこれが惑星間空間の組成を示すかということそうはいかない。地上におちてから隕鉄はみづかり易いが、石質隕石は地上の岩石と判別がむづかしく、しかも風化し易いからである<sup>14) 20) 21)</sup>。

表6 隕石の分類



\*17 隕石は太陽系からくる地球外物質とは思われていた。たまたま落下するのを見て確められた(200年前)。落下をみて軌道が求められたのは、チェコのプリブラム隕石(1959年4月7日)と、米国の16ヶ所の自動カメラステーションでとらへたロストシティ隕石(オクラホマ、1970年1月8日)がある。宇宙をとんでいる隕石をメテオロイド、地上に落下した隕石をメテオライトと区別することがある。宇宙線照射年代を求めるような場合によくつかわれる。

\*18 地球上に年に500個くらいの隕石が落下し、 $3 \sim 30 \times 10^6$  トンと推定され、年に5~6個が回収されている位といわれる<sup>14)</sup>。日本では100年間に13個しか落下しない計算といわれる。明治以来100年間に14個の落下が目視されている。コンドライト隕石は火星木星の中間にある小惑星(直径370km又はそれ以下)の破片とされている。炭素質(C)コンドライトは全世界で15kgにみたない<sup>22)</sup>。

石質隕石にはコンドリュールとよばれるカンラン石又は輝石の小さい粒を含んでおり、コンドライト隕石という。化学組成が驚くほど相互に一定している。しかし高い圧力や温度をうけるとコンドリュールは消失してしまう。そういう意味で太陽系の始源物質と考えられている。

惑星内部でこのような過程で変成分化すると、コンドリュールを含まないようになり、非コンドライト隕石とよばれる。これは前者と異なり、化学組成が相互で大きくかわっている。炭素質(C)コンドライトは金属鉄はほとんど入っておらず、他種の隕石にはみられない有機物、水、硫黄など揮発性物質を多量に含んでいる点に特色がある。事実5%位の有機物、20%位の化合している水などを含んでいる<sup>22)</sup>。したがって低温ででき熱変成を受けていない点で、太陽系をつくった始源的な隕石と考えられる<sup>\*19</sup>。加熱分別を起こした他のコンドライト隕石の初めの組成を持っているとみられる。

表7 世界の隕石(南極と南極外)<sup>24)</sup>

種類	南極外		南 極
	落下	発見	ヴィクトリヤランド
鉄質隕石	42	683	14
石鉄隕石	10	83	3
石質隕石			
エコンドライト	69	63	45
コンドライト*	784	897	756
	内訳	内訳	内訳
H	276	405	542
L	319	350	167
LL	66	30	24

\* H, Lは鉄含量の高低を示し, LLは鉄とニッケル含量の低いことを示す。

一寸余談になるが、いまやわが国は世界で一番の隕石所有国である。それは南極地域観測隊が「やまと山脈」近くの青氷帯(南極全体の1%くらい)上で、69年~80年に7500個以上を発見<sup>\*20</sup>したためである<sup>24)</sup>。過去200年に全世界の隕石の落下数と発見数<sup>25)</sup>は2600個にすぎない(表7)。南極で発見した隕石の中には他の地域にない珍しい型の隕石がある。コンドライト隕石さへH, L, LLの分布が他地域とは異なり、H/L比も他地域の1に対し南極では3になっている。

古い時代(おそらく数千年から数十万年の古さと推定)に降った雪が自重で氷に変わり、表面にあらわれたのが青氷である。これが落下した隕石を保存しており、発見され易い状況をつくったと想像されている<sup>25)</sup>。すでに月の表面の異なった場所からきた隕石や、火星起源とみられる隕石もみつがっている。そしてコンドライト隕石のデータが集積されてくると、その元素の平均組成は、太陽大気中の不揮発性成分元素の相対組成とよくにていることがわかった<sup>26)</sup>。いいかえれば太陽系の原始物質からできた太陽大気中の不揮発性成分を代表していると考えられた。一方地球は生成当時の揮発性成分(H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>など)をとばしてしまっており、したがって地球の組成はコンドライト隕石と同じでないかと考えられるようになった。これが地球のコンドライトモデルの起りである<sup>27)</sup>。

地球がコンドライト隕石の衝突凝集でできたかとする、U 0.01×10<sup>-6</sup>, Th 0.04×10<sup>-6</sup>, K 800×10<sup>-6</sup> g/gと少ないが一様に分布しているとして計算すると、発熱量は3.8×10<sup>-8</sup> cal/g・yが期待される。しかし6~20億年後には、内部温度は(低温凝集時(1300℃)から出発したとしても)鉄の融点(1535℃, 密度7.87g/cm<sup>3</sup>)をこえ、高圧下において他成分もおそらく液体状になると予想される。

\*19 1969年2月8日午前1時35分太平洋側からメキシコ北部アジエンデ村におちたアジエンデ隕石は炭素質(C3)で特異であった。幅5km, 長さ50kmにわたり、先端に~100kgの破片で後尾に小片がたくさん落ち、2トン回収された。火の玉が米国アリゾナ, ニューメキシコ, テキサス各州でみられた。CAIとよばれる白色鉱物や酸素同位体の異常が報ぜられ、隕石研究に大きな問題を提示した<sup>26)</sup>。

\*20 69年9個を発見 やまと隕石と命名した。74年 307, 76~78年日米合同で 11, 310, 8個を発見し、79~80年に3676個を採集した。おそらく1200~3800個のインパクトがこれらの7,500個の隕石をつくったとみられている。

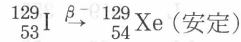
したがって重い鉄は次第に下に沈み層状化が始まったと想像される。また地殻熱流量(後述)が世界各地で測定された結果、海洋陸地ともほとんど一定の値であることが示された。これを地球全表面について積分してみると、地球と同体積のコンドライトの発熱量と一致することがわかり注目された。しかし地球内部までコンドライト隕石と考えることは、地球の他の物理性からできないことである。コンドライト隕石ではK/U比が $7.2 \times 10^4$ で、花崗岩の0.8に比べて大きく、またKの半減期は13億年で短いことを考えると、初期の頃のKの崩壊熱の寄与はきわめて大きかった(図5参照)。隕鉄にはU, Thはほとんど測定できるほどはない。したがって生成時からないと考えられ、放射性起源鉛は事実上ないことになる。したがって鉛があるとすれば原始鉛が存在するとみてよく、 $^{204}\text{Pb}$ を1.04とすると、 $^{206}\text{Pb}$  9.56,  $^{207}\text{Pb}$  10.42,  $^{208}\text{Pb}$  29.71の組成である<sup>9)</sup>。図6のハッチ部に示したのはこの部分であり、これをもとにして鉛の初期比がわかり、アイソクローンにより地球の年令の決定が4節でのべたようにできたのである。

なお隕石の固化した年令も $^{40}\text{K}$ - $^{40}\text{Ar}$ 法、鉛同位体法、 $^{87}\text{Rb}$ - $^{87}\text{Sr}$ 法などで測定された400個余りのデータが集まったが、いずれも45~46億年の中に入っており、45.5億年を固化した年令としている。

隕石構成元素の同位体組成は地球の元素の同位体組成と同じである。これは地球と同一の物質からできた証である\*<sup>21</sup>。しかしごく少量しか含まれていない希ガス(He, Ne, Kr, Xe)の同位体組成は大きく異なっている点に関心が集まった。

## 9 消滅核種の存在

その異なっている著名な例は隕石中のキセノンである。他の試料にくらべて $^{129}\text{Xe}$ がきわめて高いのは、 $^{129}\text{I}$ の崩壊による生成増加のためである。



$^{129}\text{I}$ の半減期は $1.57 \times 10^7$ 年であるから、隕石や地球が固化してから45億年たっているので、現在の隕石中では崩壊しつくして、この $^{129}\text{Xe}$ に変わってしまった。したがってこの $^{129}\text{Xe}$ 量が変わると、元素生成から隕石をつくり、それが固化するまでの経過時間が出せる。詳細は省略するが<sup>10)</sup>1.5~2億年位といわれる\*<sup>22</sup>。

このような半減期が $\sim 10^8$ 年以下の放射性核種<sup>2)</sup>はあったとしても、現在では約 $10^{14}$ 分の1以下になってしまい放射能はほとんどはかれない。しかし太陽系生成時には存在していたが、現在は存在していないので消滅核種とよばれる。太陽系星雲からできたとされる隕石の中には、この“化石”が残っているのである。Uのような長い半減期のものでは、もっと短い時点におこった事件をさぐるには時間の目が粗大すぎる。そこで消滅核種が短い半減期にふさわしい働きをするわけである(表4参照)。

$^{26}\text{Al}$ ( $\beta^+$ 82.1%,  $7.2 \times 10^5$  y)は安定な $^{26}\text{Mg}$ (“化石”にあたる)となる。アジエンデ隕石で $^{26}\text{Mg}$ / $^{24}\text{Mg}$ を出してみると、普通のマグネシウム中の $^{26}\text{Mg}$ / $^{24}\text{Mg}$ より大きい。しかも安定なAl/Mg比の大きいものほど、 $^{26}\text{Mg}$ の増加分は大きい。放射性的な $^{26}\text{Al}$ は安定な $^{27}\text{Al}$ (100%)と同じ行動

\*<sup>21</sup> Ag, Au, Bi, Cd, Co, Cs, In, Rb, Se, Te, Tl, Znの12の微量元素(1 ppm からpptレベル)が、落下のさいの発熱でどのように分化されるかの解明に関心がよせられている。放射化分析, ICPの測定がおこなわれている。温泉中で定量例の少ない元素が多い。

\*<sup>22</sup> 星間雲に含まれる星間塵は、46億年より前に形成されその期間はこのくらいということで、その後一つの超新星の爆発が引き金となり、星間雲は収縮して原始太陽系星雲となったとされている。

\*<sup>23</sup> 詳細は省略したが、超新星の爆発から固体物質の形成までの時間差を示している。太陽系星雲の出来事として $^{129}\text{I}$ や $^{26}\text{Al}$ をつくった核反応の年代を示している。

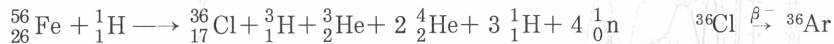
をしていたはずである。とすれば増加分は  $^{26}\text{Al} \xrightarrow{\beta^+} ^{26}\text{Mg}$  でできたということになる。同じようにアイソクロンをつくり年代を求めると、300万年前に  $^{26}\text{Al}$  がつくられた核合成が起ったといえる\*23。

消滅核種の他の例に  $^{236}\text{U}$  ( $\alpha$ ,  $2.34 \times 10^7$  y)がある。娘核種は長半減期の  $^{232}\text{Th}$ で、 $^{236}\text{U} \xrightarrow{\alpha} ^{232}\text{Th}$  現在のトリウム系列の先祖として生きている。原子核ができた時には  $^{238}\text{U}$ と同じように  $^{236}\text{U}$ はできているはずである。したがって  $^{238}\text{U}$  ( $4.5 \times 10^9$  y)は現在の2倍以上あったが、始めの10億年は半減期の短い  $^{236}\text{U}$ の熱寄与の方が、 $^{238}\text{U}$ より地球にとって大きかったことは容易に想像できる。なぜかといえば生き残っている  $^{232}\text{Th}$ はUの3~4倍は存在しているからである。

もう一つ隕石鉱物中のフィッシュントラックをしらべると、Uがつくったとするより数十倍も多くしかも長いトラックがみつかると、Uより原子番号の大きい放射性元素の自発核分裂のあったことを示している。 $^{244}\text{Pu}$  ( $\alpha$ ,  $8.1 \times 10^7$  y)の自発核分裂は0.185%だが、これにもとづくものとわかった。また核分裂生成物である  $^{131}, ^{132}, ^{134}, ^{136}\text{Xe}$ のため、これらの同位体の異常も起ることがわかった。

これら消滅核種の存在は地球生成時の大きな熱寄与のあったことをしめしている\*24。

隕石は地上に達するまで宇宙線の照射を長時間うけている。宇宙線は高エネルギーの陽子を主成分としており、破砕反応などの核反応を起す<sup>14)</sup>。つぎはその一例で放射性  $^{36}\text{Cl}$  ( $\beta^-$  98.1%,  $3.0 \times 10^5$  y)を生ずる。



宇宙線は隕石では1mまでしか透過できない。したがってこれより中ではこの反応は起こらない。この部分と生じた  $^{36}\text{Ar}$ 量とを比較すると、宇宙線の照射を受けた時間(宇宙線照射年令)を求めることができる。これも消滅核種の重要な効用の一つである。

## 10 宇宙の元素存在度

こうして話題を展開してくると、当然ながら宇宙の元素存在度までふれる必要がある。この状態は当然核合成の理論の組み立、超新星の爆発、星間物質の測定、隕石の測定などの事実と整合していかなくてはならない。U, Thの位置づけもわかり、また核分裂を通じての寄与も考えられる。

地殻に関するデータは比較的容易に明らかになってきたが、それも地殻のほんの表面の化学組成を示したにすぎない。深部掘削が地熱開発やその他の目的でおこなわれたがそれには限度があり、深部の状況は火山噴出物以外にたよるものはない。まして地球が層状構造をしていることを思えば、ごく表面に近いところの情報にすぎないのが実情である(図10)。

太陽は太陽系の中心でその質量の99.9%をもっているといわれるから、当然地球の組成の情報をもっているはずである。しかしスペクトル的手法(例へばフラウンホーヘル線の解析)しか適用できず\*25、定量的な解析には限度がある。上述の如く隕石をしらべるとは太陽系元素の組成

\*24 隕石にみられる熱変成作用の熱源は  $^{26}\text{Al}$ であったろうといわれる(文献15-a)。7節でのべた凝縮モデルの立場では化学組成上一様に集積したはずの原始惑星から、どのようにして組成の分離が起り、層状構造をとったか説明がむずかしい。惑星をとくエネルギー源が必要だが、それには十分なエネルギー源がない。イ)微惑星集積時に開放される重力エネルギー、ロ)惑星中の崩壊熱、ハ)惑星形成後自ら収縮して開放される重力エネルギーなどが考えられている。イ)の重力エネルギーが有力と考えられている。

\*25 太陽表面ガスから約70種の元素がしられている。しかしスペクトル強度は励起温度できまり、元素含有率を示していない。Cl炭素質隕石の分析結果と太陽のスペクトル分析の結果は、揮発性元素を除いてよく一致していた。

を与える有力な手がかりである. こうした背景で宇宙は同一組成のものからできたと考えて, 宇宙の元素存在度が考えられ始めた.

まず, V.M. Goldschmidt\*26は軽い方の元素は太陽大気のスเปクトル観測により, 不揮発性元素は隕石の結果により, Si原子数を100として, ノルマライズして太陽系の元素存在度を示した(1938)\*27. その後原子力進展につれ急速に核データがふえ, 軽い元素の安定度と中性子捕獲断面積や核システムティックスの考え方をいれ, Si=10<sup>6</sup>としてノルマライズした宇宙存在度が示された<sup>29</sup>.

さらに隕石の研究の進展につれ, CI炭素質隕石の分析結果をいれ若干のデータの改変もおこなわれた<sup>30</sup>. CI炭素質隕石は他のコンドライト隕石が分化する前の物質であり, 太陽系からできた始源物質の不揮発性の元素組成を示していると考えられている.

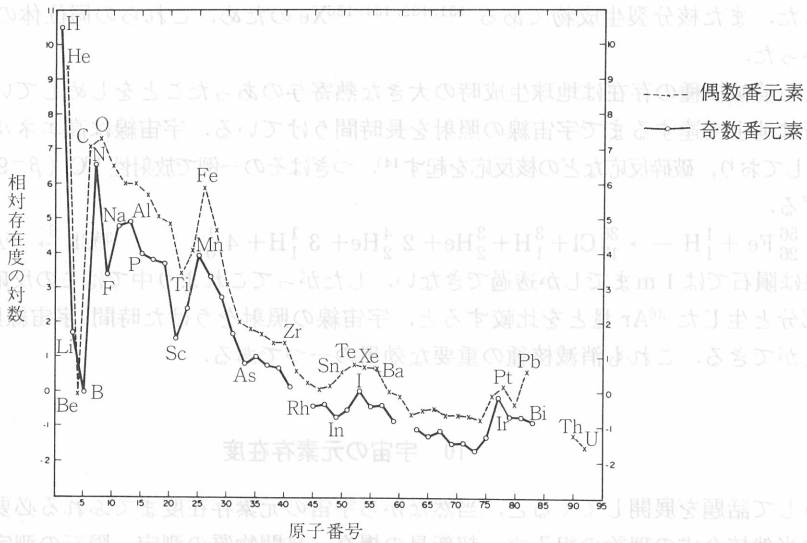


図11 太陽系元素の宇宙存在度 (Si=10<sup>6</sup>)

最近の宇宙存在度を原子番号の偶数と奇数にわけて示したのが図11である. 酸素と鉄に大きなピークがみられ, H, He, C, N, Oと順次45番ロジウムくらいまで指数関数的に急速に減少していく. それ以上では減少の程はゆるくなる. また<sup>3</sup>Li, <sup>4</sup>Be, <sup>5</sup>Bはまわりの元素にくらべてきわめて少ないのが目立っている.

Hは一番多く原子数で93%, 質量で75%, Heは二番目で原子数で約7%, 質量で24%で, それ以外の全元素(炭素, 窒素, 酸素, ネオン, マグネシウム, ケイ素, イオウ, 鉄, その他全元素の順に少なくなる)\*28は, 質量で1%くらいで原子数では1%より少ない. U, Thは0.0262, 0.058で最少値のグループ(5元素)に入っている.

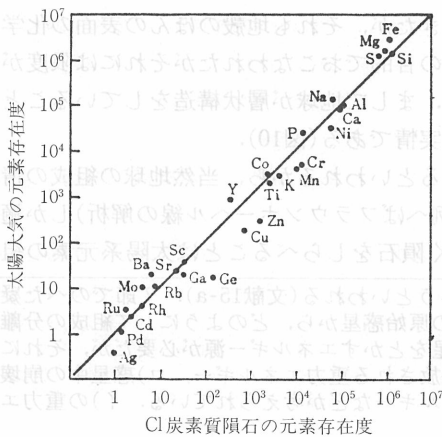


図12 不揮発性元素のC I炭素質隕石と太陽大気元素存在度 (Masonによる, 1975)



表8 地球上元素の安定核種の偶奇性

区分	原子番号	中性子数	安定核種数
偶々核	偶	偶	162
偶奇核	偶	奇	53
奇偶核	奇	偶	49
奇々核	奇	奇	4

また太陽大気とCI 炭素質隕石の不揮発性元素の存在度を同じ目盛でとると45℃の直線にのる(図12)。両者の存在度が等しいことを示している。

また安定な元素の安定同位体を核子の偶奇性によってしらべてみると、表8の如くで核構造からみると偶偶核が65%近くをしめている。偶奇核と奇偶核とはほとんど同じくらいだが、奇々核では ${}^6_3\text{Li}$ ,  ${}^{10}_5\text{B}$ ,  ${}^{14}_7\text{N}$ ,  ${}^{18}_9\text{F}$ の4種しか安定で天然に存在するものはない。つぎの奇々核 ${}^{22}_{11}\text{Na}$ ,  ${}^{24}_{11}\text{Na}$ は放射性であり、安定で天然にあるのは奇偶核は ${}^{23}_{11}\text{Na}$ である。また陽子又は中性子が魔法の数(2, 8, 20, 28, 50, 82, 126)になると、核が閉殻となり安定なものが多くなる。(例 ${}^4_2\text{He}$ ,  ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ )

このような元素の存在度については、化学性よりも原子核の構造の方が関係が深いとおもわれる。核の電荷が化学性を示す電子の配置をきめるわけであるから、原子核のでき易さが存在度として当然あらわれているといえよう(つづく)。

文 献

多くの先人の成果によってまとめており、文献の引用はきわめて多数になり紙数の制限上必要最少限にとどめざるをえなかった。成書として国内でつぎの3種がある。また通俗的なものも多くあり、若干の例をあげた。さらに詳しく知るのに有用である。ここにあげて感謝の意を表します。

イ)長谷川博一, 大林辰蔵編, 現代の太陽系の科学, 上巻, 311頁, 東京大学出版会(1984), ロ)中沢清編, 太陽系の構造と起源, 242頁(現代天文学講座3), 恒星社(1979), ハ)小沼直樹, 水谷仁編, 太陽系における地球(岩波講座地球科学13巻), 岩波(1978), ニ)野口喜三雄, 杉村行勇訳, H.C. ユーレイ, 地球から宇宙へ, 308頁, 白揚社(1960), ホ)一國雅巳, 佐藤壮郎, 鎮西清高訳, P. クラウド, 宇宙・地球・人間I, 247頁, 岩波(1981), ヘ)竹内均, 都城秋穂, 地球の歴史, 234頁, 日本放送出版会(1965), ト)竹内均訳, P.M. ハーレイ, 地球の年令, 190頁, 河出書房(1967)

- 1) Henry Faul ed., Nuclear Geology, A Symposium on Nuclear Phenomena in the Earth Sciences, Chapt 6, John Wiley & Sons, NY 1954
- 2) 村上悠紀雄, 団野皓文, 小林昌敏編, 放射線データブック 429頁, 地人書館, 1982. 核データは主にこれによる。
- 3) 柴田雄次, 木村健二郎, 東洋含希産鉱物に関する研究, 日化誌, **43** 306 (1922)に始まり, すでに60報告が引きつづいている。
- 4) T.P. Kohman & N. Saito, Radioactivity in Geology and Cosmology, Ann. Rev. of Nucl. Sci., **30** 401~462 (1954)
- 5) John Verhoogen, Energetics of the Earth, 24p, National Academy of Science, Washington D.C. 1980
- 6) K.A. Goethel, Geophys. Surv., **2** 369~397 (1976)

\*26 Geochemische Verteilungsgesetze der Element, 元素の地球化学的分布(1937)として有名である。なお, 岩石鉱物中の元素の分布について, J. Chem. Soc. London Part I 655~673 (1937)がある。

\*27 Si原子数を $10^6$ としたのは, 微量元素の対数値が負にならないためである。

\*28 太陽の中ではイオンとしてこれら存在している。原始太陽系星雲の中では,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{N}_2$ などの気体分子, MgとSiを主成分とし, 時にNa, Al, Caを加えたケイ酸塩鉱物の微粒子として存在している。これらから惑星形成が始まる<sup>17)</sup>。

- 7) R. Garapathy & E. Anders, *Geochem. Cosmochim. Acta*, **5**, 1181~1206 (1974)
- 8) 齊藤信房監修, 佐野博敏, 富永健編, 同位体と化学 7章 171~212頁, 広川書店 1978
- 9) C. Patterson, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **10**, 230 (1956)
- 10) 長沢 宏, *科学* **48**, 420(1977)
- 11) S. Moorbath et al, *Natur. Phys. Sci.*, **240**, 78~82 (1972)
- 12) 中沢 清, 12章 月の起源, 現代の太陽系の科学, 上巻, 長谷川, 大林編, 東京大学出版会, 1984
- 13) R. A. Alpher & R. C. Herman, *The Original and Abundance Distribution of the Elements - Ann. Rev. of Nuclear. Sci.*, **2**, 1~40 (1953); C. Burbidge, *Nature*, **233**, 36 (1971)
- 14) Paul Henderson, *Inorganic Geochemistry*, Chapt. 1, Pergamon Press, London, 1982
- 15-a) 中沢 清編, 太陽系の構造と起源, 89 P, 現代天文学講座 3, 恒星社, 1979
- 15-b) 海部宜男, *科学* **53**, 754~761 (1983)
- 16) O. Hauge, *Sol. Phys.*, **26**, 263 (1972), **27**, 286 (1972)
- 17) 中沢 清, 中川義次, 2章 惑星形成のシナリオ, 長谷川, 大林編 現代の太陽系の科学 上巻, 1984, 東京大学出版会
- 18) 松井孝典, 水谷 仁, *科学*, **49**, 81~84 (1979)
- 19) 中沢 清, 水谷 仁, *科学*, **53**, 24~29 (1983)
- 20) 小沼直樹, 水谷 仁編, 太陽系における地球, 地球科学 13巻, 岩波(1978)
- 21) 長谷川博一, 4章 隕石概説, 長谷川, 大林編, 現代の太陽系の科学 上巻, 1984, 東京大学出版会
- 22) B. Mason, *Space Sci. Rev.*, **1**, 621 (1962)
- 23) K.T. Turekian, *Chemistry of the Earth*, p15, Holt, Rinehart & Winston Inc., NY, 1972
- 24) 矢内桂三, *極地* **20**, 2, (1975), **27**, 43(1978), **33**, 43(1981), 極地研究振興会, 東京
- 25) M.E. Lipschutz, *Ana. Chem.*, **58**, 969A~982A (1986)
- 26) R. Clayton, N. Onuma, others, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **34**, 209~224 (1977)
- 27) A.G.W. Cameron, *Origin and Distribution of the Elements*, p125~143, L.H. Ahrens ed., Pergamon Press 1968
- 28) A.E. Ringwood, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **15**, 257~ (1959)
- 29) H.E. Suess & H.C. Urey, *Rev. Mod. Phys.*, **28**, 53~741 (1956)
- 30) 松井義人, *科学*, **37**, 544~546 (1957)