元素存在度からみた最近の宇宙科学

田 中 剛*

Recent Progress in Cosmogony in View of Chemical Features

Tsuyoshi TANAKA

I. はじめに

最近の宇宙科学には、かつて月試料の研究が広く行なわれていた時のようなはなばなしはない。しかし、今日の宇宙科学は以前に化学と生物学と物理学の間に分子生物学が生れ、1つの学問分野として定着したように、地質学を含むいくつかの既成学問分野にまたがって、確固とした根をおろしつつあるように見える。その要因としては、他の科学にも共通することであるが、第1に先導的で優れた仮説が提案されたこと、第2に研究の的を射た試料が得られたこと、そして第3には優れた装置と技術が揃ったことにある。以下に元素存在度という地質学にも共通する立場からそれぞれの要因を解説し、最近の宇宙科学、特に太陽系生成時期に主点を置いた研究を概観したい。

II. 宇宙科学の発展を支えた技術

今日の宇宙科学の発展の基は1969年に始まった。人類が月試料を初めて手にしたのは同年7月20日である。以来、380kg余の試料が地球に持ち帰られた。それを待ち受けていた研究グループが154 (Principal Investigator の数)、研究最盛期の1972年には日本の4グループを加え200を越す研究グループがその成果を競い合った。そこでは月試料の化学的取扱い、特にその低汚染処理、高感度・高精度分析等において著しい進展がみられた。たとえば $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比を0.01%以下の誤差で測定する場合、0.02ng以下の汚染で試料処理ができること。感度においても、測定精度が0.1%で良いならその試料の量は岩石 (鉱物) として、数 μg で良いという所まで高められた。試料の非化学分離による試料の直接塗布法による希土類元素の定量や、Ca・Mg・Pb同位体比の測定技術の進歩も著しいものであった。

中性子放射化分析法も月試料の処理の過程において進歩した技術の1つである。最近では高分解能の測定装置の普及と相まって、非破壊で数10 μg の試料中の30余元素が数パーセント以内の誤差で定量できるまでになった (第1表)。もちろん化学処理を行えば、より感度よく精度の高い値が得られる。これは地質学で広く用いられている EPMA や、用いられつつある IMA が非破壊で数 $\sim$ 数10 μm の試料分解能を持つことを考慮すれば、化学分析と、いわゆる非破壊分析の領域がごく接近してきたと言えよう。そして、1970年代後半、月試料の研究に携わった研究者の多くが、プロジェクトの縮小とともに、その知識と技術をもって、一部は地球形成初期の火成作用の研究へ、一部は隕石を用いた宇宙科学の研究へと転進していったのである。

III. 宇宙科学の発展を契機づけた試料

1969年には前述の科学の進歩における第2の要因においても画期的な事件があった。Allende 隕石と Murchison 隕石の落下である。前者は同年2月8日にメキシコに落下したもので、炭素質コンドライトの

* 地質調査所技術部 Geochemistry and Technical Services Department, Geological Survey of Japan

第1表 中性子放射化分析法（非破壊）による Allende 隕石中の極微量包有物（重量 24.3 μ g）の分析例（DAVIS et al. 1982 による）

Na ₂ O*	6.83 ±.12	Fe*	8.178 ±.027	Ba	9.1 ±4.4	Tm	3.73 ±.12
MgO*	<4.0	Co	58.62 ±.13	La	16.65 ±.26	Yb	21.73 ±.42
Al ₂ O ₃ *	23.93 ±.36	Ni	555 ±40	Ce	<2.1	Lu	4.240 ±.090
CaO*	19.3 ±1.6	Zn	149 ±30	Nd	<68	Hf	23.66 ±.15
Sc	704.3 ±.2	Br	9.6 ±1.2	Sm	17.67 ±.04	Ta	3.328 ±.072
TiO ₂ *	10.78 ±.26	Sr	27 ±13	Eu	2.567 ±.025	Os	<1.8 1.368
V	<32	Zr*	0.124 ±.010	Gd	24.1 ±6.2	Ir	±.011
Cr	38.6 ±3.7	Ru	3.0 ±1.5	Tb	4.157 ±.099	Au	<0.045
Mn	897 ±24	Cs	<0.10	Dy	32.1 ±1.3	Th	4.28 ±.21
						U	<0.48

単位は ppm, 但し * 印の元素は% 誤差は測定時の計数誤差 (1 σ) を示す

写真1 Allende 隕石の切断面 スケールは 1mm

Allende 隕石の切断面を写真 1 に示す。形・大きさ・色において種々の異なったタイプの包有物の集合体であることがわかる。それらが微粒黒色のマトリクス中に埋め込まれている。大体、マトリクス 60%，コンドルールと呼ばれる、隕石に特徴的な球形粒子 30%，白く不規則な形をした包有物 10% から構成されている。マトリクスは鉄に富むかんらん石（平均して Fe_2SiO_4 50%）で、コンドルールはマグネシウムに富むかんらん石（平均して Fe_2SiO_4 9%）を主体として構成されるものが多い。白い不規則な形をした包有物には多種類の Ca-Al 鉱物が含まれている。現在までの研究者の主な興味はこの mm から cm サイズの包有物に向けられてきた。包有物のなかには、世界のいくつかの研究所で、異った手法を用いて研究されたものもあり、例えば“HAL”のように世界的に通用する個有名を持つに至ったものもある。これらの包有物は冷却しつつある原始太陽系星雲の逐次凝縮による、ごく初期の生成物であると考えられている。これは顕微鏡下で観察される鉱物生成の前後関係とも一致することが認められ、次節で述べる 2 つの考えを支えている。

始源的な隕石と太陽大気の観測から推定される元素の宇宙存在度をもつ高温の星雲が、冷却していった場合、どのような鉱物がどのような順序で生ずるかは熱力学的に計算することができる。この手法はシカゴ大学の LARIMER によって最初に試みられ、GROSSMAN により発展させられた。第1図に GROSSMAN and LARIMER (1974) による結果を示す。 10^{-4} 気圧の全圧を持つ高温の原始太陽系星雲の冷却を仮定すると、 1671°K でコランダム (Al_2O_3), 1557°K でペロプスカイト (CaTiO_3) が凝縮を始める。 1528°K でコランダムは、残りのガスと反応し、メリライト ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) を生成する。メリライトはその端成分の1つオケルマナイト ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$) 成分が多くなるにつれ、Al はスピネル (MgAl_2O_4) として、メリライ

— 31 —

トの結晶外へ排斥される。又、メリライトは残りのガスと反応し、輝石 ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) を作る。ここまでを凝縮の第1段階と考えよう。Os, W, Zr, Re, 希土類元素なども金属や酸化物として凝縮したり、平行して凝縮している主要元素鉱物に取り込まれることにより固相に移る。ここまで凝縮する元素の量は、気体を除く宇宙存在度の10% (重量) で、熱力学的に計算された鉱物種は写真1に示した Allende 隕石中の白色包有物を構成する鉱物種に一致する。なお、前述のように Allende 隕石中の白色包有物のモードも10%である。したがって白色包有物 (Calcium-and Aluminium-rich inclusion ; CAI) を構成する鉱物を高温凝縮鉱物という²⁾。

温度が1365°Kで金属鉄、1361°Kでフォーステライト、1294°Kでエンスタタイトが凝縮を始める。Murchison 隕石にはきれいに生長した自形の上記結晶が多量に含まれる。これらにはほとんど酸化鉄が含まれず、顕微鏡でみると結晶の中央部に金属粒がみられることがあり、鉱物凝縮順序の理論による推定が正しいことを裏付ける (写真2)。

写真2 Murchison隕石中のフォーステライト結晶と、その中心にある金属粒

原始太陽系星雲が 1000°K 以下になると、水素の1部は水やメタン分子になる。結果として、相対的に酸素分圧が増加するので、金属鉄が酸化され、先に凝縮したフォーステライトとエンスタタイトに固溶する。又、硫黄が鉄とともにトロイライト (FeS) を生じ、それに伴って鉛・ビスマスといった揮発性元素が金属粒あるいは固溶体として凝縮する。ここに述べたものはいずれも写真1の黒っぽい色をしたマトリクス部分に含まれている。

上に述べた凝縮過程は、熱力学的な平衡関係を仮定して

計算されたものである。大筋においては鉱物の観察結果とも合致するが、熱力学的データ不足から、現実には隕石中に存在するものの、ここでは取扱われていない鉱物もあり、又、鉱物形態からみて、急成長したものも存在する。今日、宇宙科学における原始太陽系時代の研究は、

- 1) 非平衡凝縮の場合はどうか、
- 2) 一方的温度低下だけでなく、再加熱 (温度の一時的上昇) があった時どうか、
- 3) 実験的に物質を蒸発・凝縮させた時、その結果と隕石鉱物や理論値の関係はどうか、
- 4) 雰囲気異なる条件下での凝縮はどうか、
- 5) 凝縮した鉱物の付着・成長過程はどうか、

等の観点から、物理学者、化学者、鉱物学者の協力のもとに進められている。

真空中で天然の玄武岩を蒸発させ、さまざまな条件下で再凝縮させた物質中の元素存在度を第2図に示す。Na, K, Rbなどは気化し易く、るつばから遠方まで飛翔するが、Ca, Al, Sr, 希土類元素は気化しにくく、すぐ凝縮する元素であることがわかる。この結果は定性的に前記凝縮モデルや隕石の観察結果と一致する。このように、隕石を構成する鉱物の多くが、地球におけるマグマ溜りでの鉱物の晶出のよう

第2図 真空中で玄武岩 (JB-1) を蒸発させ、蒸発するつばとコレクター間の距離を変化させて補集した物質中の JB-1 に対する元素濃度 (MASUDA and TANAKA 1979による)

に、均質な高温ガスの冷却にしたがって、次々と生じたように思われた。しかしここに最近の宇宙科学方向づけた1つの出来事があった。

V. 宇宙科学の展開を方向づけた発見

地質学では、岩石・鉱物・鉱床あるいは、石油・石炭・化石、さらには地下水などの起源と生成過程を調べるために、各種元素の同位体組成が測定される。その中で最も一般的かつ有用であるのは、最も身近な酸素同位体組成である。酸素には ^{16}O ・ ^{17}O ・ ^{18}O と3つの異なった質量数を持つ同位体がある。

通常の地質学的な研究では $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比しか測定しないのだが、シカゴ大学のCLAYTON達のグループでは $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比とともに $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比を測定した。同位体分別現象では、それが平衡でも、平衡への途中にあっても、質量数の差に比例する同位体分別がみられる。つまり $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比が1%変化すれば、 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比は2%変動する。そして、月・地球上のすべての物質にみられる分別はこの規則に従っている。ところがAllende隕石を構成する包有物の分析結果は第3図に示すようになった。つまり図中のADという傾きが1の線上に乗ったのである。図中最上部の太い実線が月・地球にみられる、同位体分別の理論に合致する線である。ADの線に沿って変化させる場合は ^{17}O と ^{18}O を等量減少させるか、 ^{16}O だけを加えてやらなければならない。前者の場合には、強い太陽輻射を仮定することにより、たとえば ^{17}O と ^{18}O が(p, α)反応で ^{14}N 、 ^{15}N に変化したと考えることも可能である。しかし、この強い太陽輻射により、より激しく変化すると考えられるLiなどの同位体比変動がないこと、および、より重い元素の同位体比異常の発見などにより、後者、すなわち太陽系内に大きく同位体比組成の異なった物質が混入しているとする説が有力となった。このことは第3図に示した、大きく酸素16に富むものが、先に述べた輝石、スピネルといった高温凝縮鉱物であること、および、一部の高温凝縮鉱物には最後の核合成からごく短時間(100万年以内)に凝縮したことを示す、消滅核種 ^{26}Al の存在を示す ^{26}Mg の過剰が発見された事、さらには、水素の多い還元的な太陽系星雲の中でなく、酸素の多い条件下で凝縮したと判断される、特異な化学組成の鉱物

第3図 Allende 隕石を構成する各種包有物中の酸素同位体比 EK1-4-1, CI, HAL は特異な包有物名 (LEEほか 1980による)。

原始太陽系星雲にその起源を異にする物質が混入しているらしいことは、隕石中のネオンの同位体比組成が現在の太陽系内でネオンの供給源として考えられる3つの源、すなわち太陽風、惑星本体、および核破砕反応のいずれでもない ^{22}Ne に富むものがある事から一部では唱えられていた事である。しかし、 ^{22}Ne に富むもの(ネオンEと言う)は、高温凝縮鉱物よりも、隕石のマトリクス部分に多く含まれているらしい。

最近、酸素の17, 18が核反応によらず、酸素16に対し同等の分別を示すことが実験的に確かめられた(THIEMENS and HEIDENRICH 1983)。これは酸素ガス中で電気放電によりオゾンを作ると、 ^{16}O が選択的に未反応ガス中に濃縮することによる。同等の反応が原始太陽系星雲内で、強い紫外線照射によって起ると考えられるが、酸素同位体比の異常をこの光化学反応によるとした場合、他の元素にみられる同位体比異常はどう解釈されるのか、かの著者らは慎重である。

VI. 月からの隕石と火星からの隕石

前節では、太陽系は一部に超新星の影響を受けた星雲から形成されたとの考えを紹介した。これは主に、月試料のプロジェクトの縮小とともに、隕石を用いた太陽系生成論の研究へと向った人達の成果である。他方、月試料の研究から、原始地球における火成作用の研究や、火成作用により分化した隕石(エコンドライト)を用い、月・地球・小惑星・火星・金星等をそれぞれ比較しながら、その発達過程を探ろうとする人達も多く存在した。最近、この“比較惑星学”の分野からも興味ある知見が多く得られている。その1つが標記の月からの隕石と火星からの隕石に関する研究である。

隕石は一般的に、火星と木星の間にある小惑星帯に、また一部は彗星に、その起源をもつと考えられてきた。それは、いくつかの隕石について、その落下速度と方向が観測され、軌道計算がなされた結果による。更に、赤外線反射スペクトルによる、隕石と小惑星表面物質の対比は、一層両者の因果関係を強固なものとしてきた。しかし、ここに一般の隕石と趣を異にする2種類の隕石が注目されている。それは1981年に南極のAllan hillsの近くで発見された1個の隕石と、Shergottite, Nakhilite, Cassiniteと区別され

が発見された事などから、この異物質は超新星に由来するとの考えが提唱された。

酸素16の過剰が超新星の名残りである可能性が指摘されると、核合成の連鎖から、 ^{24}Mg や ^{28}Si の過剰が予想され、その探策がなされたが、1~2の特異な包有物を除き、この ^{16}O 、 ^{24}Mg 、 ^{28}Si の同位体比に必然的な関係は見い出されていない。また今日まで、Ne, Mg, Ca, Ti, Si, Kr, Sr, Xe, Ba, Nd, Smなどの同位体比異常を持つ包有物やマトリクスの存在が報告されているが、そのすべてが、必ずしも単純な過程では説明されず、詳細なストーリーの展開は今後に残された問題であろう。

酸素同位体異常の発見以前にも、

る8個の隕石である(SNC隕石)。

月に由来する隕石というのは決して新しい説ではない。よく知られているテクタイトは、実際に月の試料が分析されるまでは、月面衝撃や火山作用の結果、地球に飛来した月の岩石であるとする仮説も存在した。しかし、月試料が研究されるに及び、化学組成・同位体組成の両面から、テクタイトの月起源説は否定されてしまった。以来、天体の衝突に関する計算は、隕石の月面衝突により、年間数千トンの物質が月面から宇宙空間に放出され、その0.5%は地球の重力圏に捕捉される可能性を示してはいたものの、月からの隕石についてはほとんど注意が払われなかった。

初めて月からの隕石と考えられたのは、MASON博士により記載されたALHA81005である。これは1辺が約3cm、重さ31.4gのAnorthositic brecciaで、薄片上では、碎屑性の岩片がガラス状のマトリクスに埋め込まれており、流理構造を持つ。碎屑岩片とマトリクスの比は40:60で、碎屑岩片の多くは長石で、輝石と稀にかんらん石を含む。岩相はユークライト隕石にも似るが、より長石に富み、薄片からは月の高地で採集されたAnorthositic brecciaに酷似する。

18の研究グループにより、この試料の研究がなされ、1982年3月の第14回月・惑星会議で、その結果が討論された。化学組成からは、特に月の高地からの試料であるApollo 16号、およびLuna 20号による試料に対比せられた。試料のFe/Mn比は77で、従来知られているエコンドライト隕石や地球物質の値と異なり、月試料の平均値80に近いことから、月試料との類似性が強調される。しかし、Na, Tiは月の高地の試料の値より低く、希土類元素およびU, Thは、月の高地の試料の約1/2とやや異った値を示す。

アルミニウム-26は、73万年の半減期を持ち、地球上では天然に存在せず、宇宙線照射により生成される核種である。もし、このALHA81005が一般の隕石のように、小さな岩片として宇宙空間に存在し、宇宙線照射を受けていたのなら、 ^{26}Al に飽和しており、100-300dpm/kgの放射能を持つと考えられる。逆に、この岩片が月面の数メートルより深い所(宇宙線が届かない所)に存在し、衝撃により、空間へ放出せられたのなら、月から地球にたどり着くまでの時間は十分に短いと考えられるので、ほとんど放射能はないはずである。結果は46.3dpm/kgと中間的な値となった。これはこのALHA81005が月起源でないのなら、隕石母天体が破壊されてのち、50万年以上を経たものか、地上に落下してから十分長時間(100万年以上)を経たものと考えられる。逆に、この試料が月起源なら、試料は以前月表面近くにあったものか、月の深部に由来するなら、月から地球への移動に50万年以上を要したものと考えられる。He, Ar, Ne, Xe, Kr等の希ガスは、太陽風の値を示し、月試料なら月の表面近くに存在したことが示唆される。

ALHA 81005の月起源説に決定的な役割を果たしたのは酸素同位体である。一般のエコンドライト隕石はすべて第3図上部Dの近辺に4つのグループにわかれてプロットされる。それぞれのグループはいずれも、第3図上部の、月・地球を構成する物質の質量分別線とは重ならず、それぞれが、この線に平行な集団を作り分布する。しかし、ALHA 81005は、その全岩も、そこに含まれる斜長岩質岩片とともに、月・地球を構成する物質の線上に分布し、月起源であることを裏付けた。

しかし、前述のように、その化学組成から細かく比較すれば、ALHA 81005は、月から採集されたいずれの岩石にも一致しない。これは、月試料の採集地点が技術的な制約から、月面のごく地球に面した場所に限られていたからであろう。従ってこの月からの隕石は、人類の月試料採集地点(月の前面)から離れた、月のやや側面に由来するとの考えもある。

月に由来する隕石の存在については上記のように、大方の研究者により、強い反論もなく受け入れられた。しかし、ある隕石の起源を火星に求めることは、以前から提唱されてはいたものの、研究者の一般的な同意を得るに至っていなかった。その1つの理由は、火星に起源を持つ隕石が存在するのならなぜもっと地球に近くて小さい(脱出速度の少い)月からの隕石が発見されないのか?と言うことであった。しかし、前述のように月からの隕石が確認された今、火星に由来する隕石という仮説は、にわかに真実味を帯びてきた。

火星に由来するとされるのは前述の SNC 隕石と分類される隕石である。いずれも エコンドライトで、地球の苦鉄質から超苦鉄質岩に相当する組織をもつ。SNC 隕石のいくつかについて、K-Ar 法、Rb-Sr 法、Sm-Nd 法により、その生成年代が求められ、いずれも 1.3Ga という異常に若い結晶化年代が得られた。これは少なくとも 1.3Ga 以前までその母天体に火成作用が存在したことを示すもので、直径が 1,000km 以下の小惑星母天体では考えられない事である（月試料中で最も若い結晶化年代は 3.1Ga である）。希土類元素存在度パターンは Nakhla と Chassigny は軽希土に富む液体形パターンを持ち、ALHA 77005 と Shergotty と Zagami は軽希土に乏しい、固体型のパターンを持つ。両者は Co-magmatic な関係にはないと考えられる。

SNC 隕石の特異性を最も明確に位置づけたのはやはり酸素の同位体である。SNC 隕石は第 3 図に示した D 点の近傍で、月・地球および他のエコンドライトとは全く異なる位置において、傾斜 $\frac{1}{2}$ の質量分別線にのる集団を作って分布する。又、南極隕石の内ですら新しく Shergottite と分類された EETA79001 中の希ガスの相対存在度と同位体比が測定された。その値は地球上のもの、隕石のもの、太陽風のもののいずれよりも Viking で分析された火星大気の希ガスの特徴に類似する。

以上のように SNC 隕石の火星起源を支持する（否定しないと言ふべきかもしれない）意見の多い一方、重力の大きな火星から衝撃により、物質が溶融することなく、宇宙空間に放出されるのは困難であるとの意見もある。しかし、この火星からの物質の放出には衝撃により、火星土壤中の水分などの揮発性分が一気に気化し、それによる押し上げ作用も考えられている。

いずれにしろ、前述の月からの隕石も、人類が事前に月試料についての知識を持っていたからこそ、月に由来するとの仮説が得られたが、もし月試料に関する知識がなかったら、おそらく 1 個の特異な隕石として片付けられたものと思われる。火星に由来するとされる隕石も、最終的には火星の物質を手にするまで、議論が続くものと考えられる。

VII. おわりに

前記のように、原始太陽系星雲は均質なものでなく、種々の起源を異にする物質の集合体であり、まだ十分に混合されていない部分を持つと考えられている。この仮説に基づいて、各分野の研究者が自己のデータを解釈したり、又逆にこの仮説を検証しようと試みているのが最近の宇宙科学の一面である。さらには、この原始太陽系に関する研究とともに、分化したエコンドライト隕石による惑星形成初期の研究や、太陽系内の惑星を比較しようとする試みも多くなされている。

地質学的な関連からは、恐龍が白亜紀末に突然死滅した原因を巨大な隕石の落下や、それによる生態系の変化に求めようとする試みも興味あるものである。この議論は世界各地（4ヶ所）で白亜紀と古第三紀の間の粘土層中に、イリジウム等の隕石にのみ特徴的な元素が多量に含まれることにその端を発したものである。更に推論を重ねるならば、白亜紀と古第三紀のような、大きな地質学的境界だけでなく、古生物学的に認識される、より小規模な地質学的境界にも、そのような宇宙物質を特徴づける元素が多いことはないだろうか。

宇宙塵や隕石に代表される宇宙物質は、地質学的な年代尺度で見た場合、絶え間なく、しかも量的に変動しながら地球に落下しているものである。やがて分析技術の進歩とともに、宇宙物質を特徴づける元素の存在度パターンが化石に加えて、チャートや石灰岩の地層対比に用いられる時代が来るのではなかろうか。これは、化学というハンマーを持った筆者の夢でもある。

謝 辞

松久幸敬博士には草稿を読んでいただき、貴重な助言をいただいた。ここに記して、お礼申し上げる。

注

- 1) 現在, 日本国内の地質標本取扱い店でも自由に購入できる。
- 2) CAI も, 現実にはより後期の低温変質鉱物により汚染されている場合が多い。

文 献

- DAVIS, A. M., TANAKA, T., GROSSMAN, L., LEE, T. and WASSERBURG, G. J. (1982) : Chemical composition of HAL, an isotopically unusual Allende inclusion. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **46**, 1627-1651.
- GROSSMAN, L. and LARIMER, J. W. (1974) : Early chemical history on the solar system. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **12**, 71-101.
- LEE, T., MAYEDA, T. K. and CLAYTON, R. N. (1980) : Oxygen isotope anomalies in Allende inclusion HAL. *Geophys. Res. Lett.*, **7**, 493-496.
- MASUDA, A. and TANAKA, T. (1979) : Experimental studies on behaviors of major and minor lithophile elements in vaporization under evacuated condition. *Meteoritics*, **14**, 13-28.
- THIEMENS, M. H. and HEIDENRICH, J. E. (1983) : The mass-independent fractionation of oxygen : A novel isotope effect and its possible cosmochemical implication. *Science*, **219**, 1073-1075.