

Ca, Al-rich inclusions からみた 原始太陽系における化学分別過程

川 辺 岩 夫 (愛媛大学理学部)
Iwao KAWABE

1. はじめに

1969年という年は 人類が地球外物質を大量に入手したという点で画期的な年であった。アポロ11号によって月の岩石が持帰られたこともさることながら この年には大量の隕石が北半球と南半球にそれぞれ落下している。アエンデ (Allende) 隕石とマチソン (Murchison) 隕石である。そしてこれらの隕石から発見された Ca, Al に富む包有物 (Ca, Al-rich Inclusion, 略して CAI) は 46億年前の太陽系創生期の出来事をさぐる貴重な試料となった。この地質ニュースにおいても 田中 (1978) によって これについての解説がなされている。この十年あまりの間に CAI の研究は大きく進展し その研究成果はこれまでの宇宙化学の内容を大巾に一新するに足る重要なものになっている。この小論では その研究経過をふりかえりつつ CAI からみた原始太陽系の化学過程についての研究成果を紹介することにする。

2. アエンデ隕石の落下と CAI の発見

1969年2月8日 メキシコに落下した大量の隕石は総重量4トンにも達すると推定されている。これはアエンデ隕石と命名され タイプ3炭素質コンドライトであることがわかった。CAIはこのアエンデ隕石中から多数発見された。この隕石の落下直後から いちはやく試料の組織的回収とその鉱物・化学的検討をおこなった CLARKE et al. (1970) は 形態上はオリビンなどからなる通常のコンドライトに似ているにもかかわらず 構成鉱物がゲーレンナイト ファッサイト アノーサイトスピネルなどである異常な「コンドライト」を発見し「Ca, Al-rich chondrules」と記載した。このほかに不規則な形状を示す細粒鉱物の集合体 (aggregate) も Ca, Al に富んでおり 細粒のスピネル グロッシュラー ファッサイト ペロプスカイト アノーサイトなどから出来ていることがわかった。Ca, Al に富むこの二つのタイプの「chondrules」と「aggregates」は後にそれぞれ「coarse-grained inclusions」と「fine-grained inclusions」と呼ばれるようになり アエンデ隕石中の CAI を組織・形態から区分する基本タイプと
1984年9月号

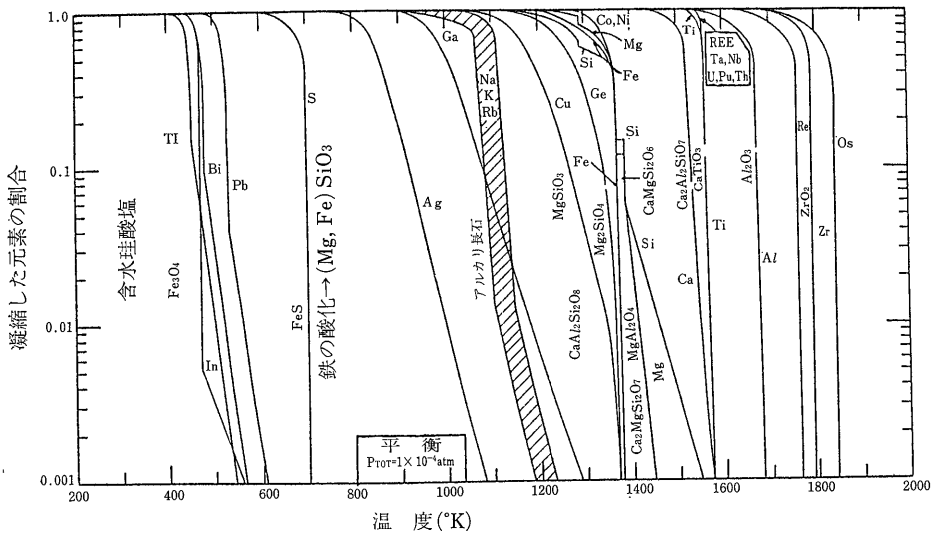
なる。

この二種類の CAI は 単に組織・形態上のちがいにとどまらず 微量元素組成からも重要なちがいがあることが後に明らかとなった。その糸口となったのは TANAKA & MASUDA (1973) による fine-grained inclusion の異常な REE 存在度パターンの発見である。ところで アエンデ隕石の落下したのが1969年であったということは その後の CAI の研究の発展を考える上で きわめて重要であるように思える。何故なら この1969年7月にはアポロ11号によって 初めて月の岩石試料が地球に持帰られている。従って アメリカではこの貴重な地球外物質を調べる為に 充分な研究投資がおこなわれ 研究設備・体制は充分に整備されつつあった。これらは 後の CAI の研究に大いに活用されていくことになる。これをコンピューターシステムのハードウェアと考えるならば これを稼働させる強力なソフトウェアに当るものも 準備されていたように思われる。それは LARIMER (1967) LARIMER & ANDERS (1967) による凝縮モデルであろう。彼らはコンドライトの多様性を 原始太陽系星雲ガスからの固体粒子の凝縮過程により統一的に説明しようとした。その一連の論文が最初に発表されたのは1967年であり 2年後の1969年頃には この凝縮説は一世を風びしつあったにちがいない。当時の筆者はまだ大学に入学したばかりの頃であり この当時の様子を直接感じることがなかったのはもちろんであるが この頃シカゴ大学の Clayton の下で研究された小沼直樹氏が1972年に出版された「宇宙化学」を読めば そのことは充分うかがい知れるように思われる。

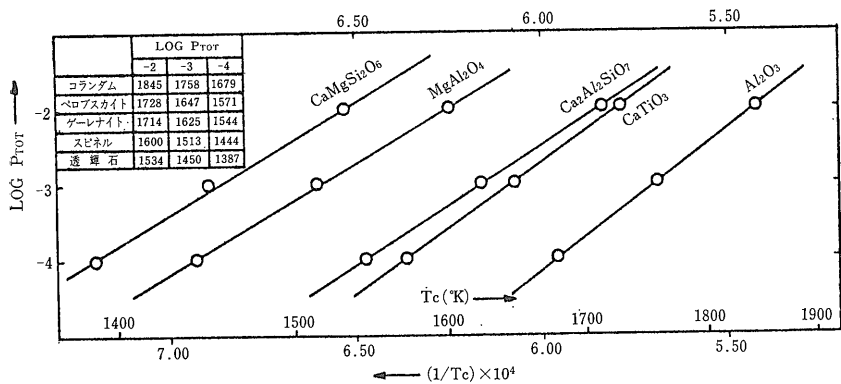
宇宙存在度の元素組成を有する高温星雲ガスから どのような鉱物粒子が平衡凝縮するかについては 既に LORD (1965) が調べていたが LARIMER と ANDERS は再度このことを取り上げ コンドライトの化学的多様性を解釈する基本原理としたのである。

3. 凝縮モデルと CAI

LARIMER (1967) の凝縮モデルの計算結果によれば 金属鉄とオリビンがガスから凝縮する温度よりも さらに



第 1 図
元素の凝縮モデルによる計算結果. ガスの組成は宇宙存在度 $PH_2(\text{tot.})=10^{-4}$ 気圧を仮定している (GROSSMAN & LARIMER, 1974による).



第 2 図
Ca-Al-Ti 鉱物の凝縮順序. 圧力依存性は $PH_2(\text{tot.})=10^{-2}\sim 10^{-4}$ atm. ではほとんどない (GROSSMAN & LARIMER, 1974による).

に高温で ペロプスカイト ($CaTiO_3$) スピネル ($MgAl_2O_4$) シリマナイト (Al_2SiO_5) アノーサイト ($CaAl_2Si_2O_8$) が凝縮することが示されている. 後に ペロプスカイト スピネル アノーサイトはメリライトなどとともに CAI から実際に発見されることになるが 1967年の LARIMER と ANDERS たちの議論の重点は これらの高温凝縮物にあった訳ではなくむしろ 金属鉄やオリピンの凝縮以後のさらに低温の領域におかれていた. とは言え この LARIMER と ANDERS による一連の凝縮モデルの論文は 多くの研究者に強い影響を与えることになった.

カナダのマクマスター大学を卒業し 1968年にエール大学の TUREKIAN の下で大学院生となったばかりの GROSSMAN もその例外ではなかった. GROSSMAN 自身の話しによると TUREKIAN は彼の講義の中で LARIMER と ANDERS の説を取り上げた. その講義を聞いた GROSSMAN は LARIMER (1967) が行った凝縮の熱

力学計算において mass-balance 方程式が厳密に取扱われていないことに疑問を持つことになる. 彼は平衡凝縮の計算を自らやり直して決意する. 計算プログラムをつくることに特に経験があった訳ではない彼にとって 正しい計算結果を得ることは容易ではなかった. しかし 何とか正しい結果が得られるようになり それは 宇宙存在度の元素組成を有する高温星雲ガスから最初に凝縮する主成分元素鉱物は コランダム (Al_2O_3) であり 以下 ペロプスカイト ($CaTiO_3$) メリライト ($Ca_2Al_2SiO_7$ - $Ca_2MgSi_2O_7$) スピネル ($MgAl_2O_4$) が凝縮するという結果であった. しかし このような鉱物群は 隕石から記載されたことが全くなかった訳ではないものの 隕石の構成鉱物としてはきわめてなじみの薄いものであった. しかし 既に述べたように これとほぼ時を同じくして アエンデ隕石が落下し その中から CAI が発見されるのである. このように CAI は凝縮モデルの正しさを証明するかのようになりアエンデ隕

第1表 Refractory trace elements の凝縮温度と主成分元素鉱物の凝縮温度の相互関係 (GROSSMAN & LARIMER, 1974による).

気体の種類	晶出相	凝縮温度 °K	
		10^{-8} atm	10^{-4} atm
Os	Os	1925	1840
WO, W	W	1885	1798
ZrO, ZrO ₂ , Zr	Zr, ZrO ₂	1840	1789
Re	Re	1839	1759
	Corundum (Al ₂ O ₃)	1758	1679
HfO~HfO ₂ , Hf	Hf, HfO ₂	1719	1652
YO, Y	Y, Y ₂ O ₃	1719	1646
ScO, Sc	Sc, Sc ₂ O ₃	1715	1644
Mo, MoO	Mo, MoO ₃	1684	1603
	Perovskite (CaTiO ₃)	1647	1571
REO, RE†	RE, RE ₂ O ₃	1647	1571
Ir	Ir	1629	1555
	Gehlenite (Ca ₂ Al ₂ SiO ₇)	1625	1544
Ru	Ru	1614	1541
VO, V	VO ₂ , V, VO, V ₂ O ₃	1534	1458
	Spinel (MgAl ₂ O ₄)	1513	1444
TaO, Ta	Ta, Ta ₂ O ₅	1499	1452
ThO ₂ , ThO, Th	Th, ThO ₂	1496	1429
	Diopside (CaMgSi ₂ O ₆)	1450	1387

石から発見されたのである。GROSSMAN が凝縮モデルに基づく CAI の研究の強力な推進者となったのは言うまでもない。凝縮モデルによる計算結果は 第1図・2図 及び第1表に示す通りである。GROSSMAN & LARIMER (1974) は「Early chemical history of the solar nebula」と題する総説を書き CAI をはじめ隕石物質の化学的・鉱物学的特徴が いかに凝縮モデルによってうまく説明されるかまとめている。この総説は1973年6月22日に Rev. Geophys. Space Phys. に投稿され 同年10月12日に改訂された後 1974年2月に出版されている。後に問題となる CAI の酸素同位体組成については 当時信じられていた ONUMA et al. (1972) による酸素同位体宇宙温度計からすると 800°K 前後の温度となり CAI 構成鉱物の計算上の凝縮温度 (>1400°K) とは大変な不一致があること。そして この不一致については現在その検討が進んでいると手短かに記されている。CLAYTON et al. (1973) による CAI の酸素同位体異常の発見の第一報は この総説の投稿された6日後に Science に投稿され受理されている。

4. 蒸発モデルと CAI

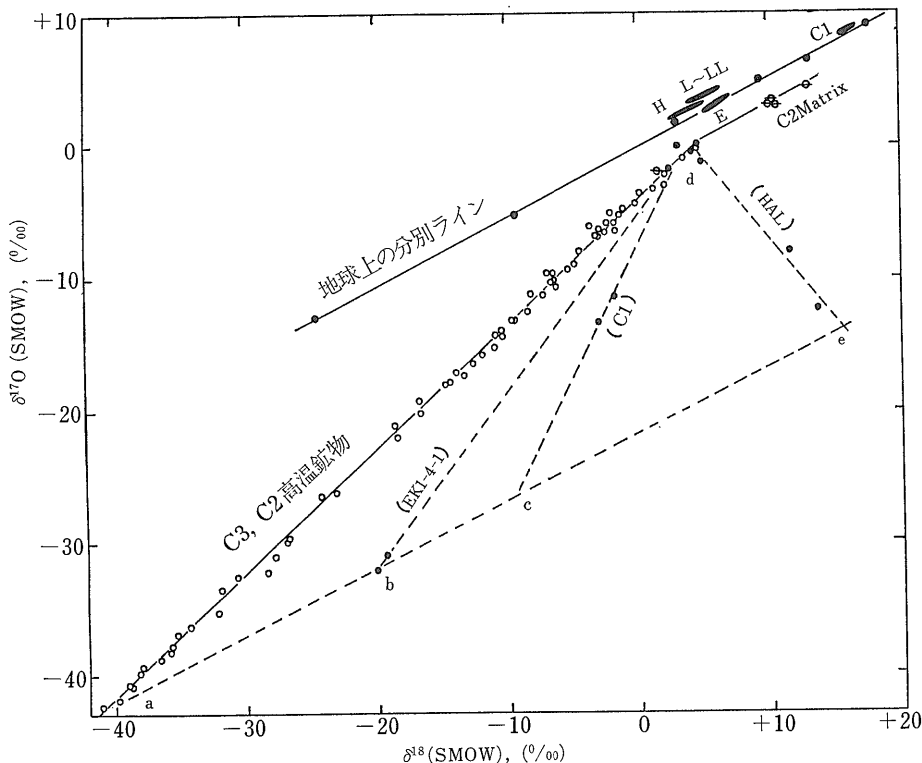
CAI の凝縮モデルによる解釈に対して 誰もが賛成していたのかと言うと必ずしもそうではない。KURAT 1984年9月号

(1970) KURAT et al. (1975) は アエンデ隕石以外の炭素質コンドライト (C3) から CAI を記載し その高温鉱物の組織や inclusions 内部の元素分布は ガスからこれらの鉱物が直接凝縮したと考えるのではうまく説明出来ないとし 高温の蒸発過程で出来たメルトから晶出したものと考えているべきであると主張した。

この KURAT たちの蒸発モデルは 1970年代末になって 隕石物質などの加熱蒸発実験の成果をふまえた日本の研究者たち (NOTSU et al., 1978; HASHIMOTO et al., 1979) により再度取り上げられることになる。そして 1981年には隕石学の大家 WOOD (1981) も CAI は interstellar dust の蒸発残留物であると主張するようになる。約10年前の1970年には WOOD たちのグループはアエンデ隕石からいちはやく CAI を記載し これらは原始太陽系星雲ガスからの初期凝縮物であろうと主張していたのである (MARVIN et al., 1970)。このような変化をもたらしたのは 言うまでもなく CLAYTON et al. (1973) が アエンデ隕石中の CAI に大きな酸素同位体組成の異常を発見したことによる。

5. CAI の酸素同位体組成異常の発見

酸素の安定同位体には ¹⁶O ¹⁷O ¹⁸O の三種類があり ¹⁸O/¹⁶O と ¹⁷O/¹⁶O 比の精密測定が可能である。第3図



第3図
CAI, 隕石物質の酸素同位体組成. C1: C1コンドライト, H: H-コンドライト, L~LL: L及びLLコンドライト, E: エンスタタイトコンドライト. カッコで示したEK1-4-1, C1, HALはいずれもFUN inclusionである (CLAYTON et al., 1977, 1978; LEE et al., 1980; CLAYTON, 1981による).

には これまでに Clayton のグループによって調べられた CAI や隕石の酸素同位体比の測定結果を示した. アエンデ隕石の CAI をはじめ 炭素質コンドライト (C2, C3) の高温鉱物の $\delta^{18}\text{O}$ と $\delta^{17}\text{O}$ の値は 勾配 = 1 の直接関係を保ちつつ 大きく負側に変化していることが この酸素同位体組成異常の理由である.

通常の化学過程で酸素同位体の分別が起るなら $\delta^{17}\text{O}$ と $\delta^{18}\text{O}$ は勾配 = 0.52 ~ 0.53* の直線関係を保ちつつ変化するはずである. 事実 地球上の鉱物や水 さらに月の岩石の酸素同位体組成はこのことを満足しており 第3図の地球上の分別ラインで示される. アエンデ隕石の CAI は勾配 = 1 の直線関係を示しており 通常の質量分別過程では当然説明出来ない. この見事な直線関係の可能な解釈は 同位体組成が直線を両側にそれぞれ延長した点に対応する二種類の物質が 様々な程度に混合された混合線と考えることであった (CLAYTON et al., 1973). その場合 ^{16}O に富む一方の端成分物質は 純

粋に ^{16}O だけからなる物質であるか 又は これと混合された物質でなければならない.

第3図には 勾配 = 1 の直線から大きくはずれて分布する分析結果が幾つか示されている. これらの点はいずれもアエンデ隕石の CAI であり それぞれ EK1-4-1 C1 HAL と名付けられている. これらの CAI は他の同様なアエンデ隕石の CAI とは 酸素同位体組成が異っており FUN inclusions と呼ばれている (LEE et al., 1980). FUN は Fractionation and Unknown Nuclear effects の頭文字に由来し これらの inclusions は次のような特徴がある.

- (1) 酸素同位体組成が示すように 質量数に依存する大きな分別過程が想定され得る.
- (2) しかし この質量分別の効果を除いたとしても 何らかの同位体異常を考えねばならない.
- (3) このような事状は 程度の差こそあれ Mg, Si, Ca の同位体組成にもあてはまる.
- (4) HAL と C1 には 明りような Ce の負の異常が認められ

(*) 同位体交換平衡における分別の場合を考えれば 調和近似による鉱物の reduced partition function ratio は

$$\ln f = \sum_q d_q \sum_1^{3r} \left[\left\{ \frac{1}{2} U_{i_q} + \frac{U_{i_q}}{\exp(U_{i_q}) - 1} \right\} \cdot \frac{1}{2} \sum_k^{3r} \left(\frac{\Delta M}{M^*} \right)_k (L_q)_{ki}^o \cdot (L_q)_{ki} \right] / \sum_q d_q$$

となる. 分子についても同様な式が与えられる. このことは $\delta^{17}\text{O}$ と $\delta^{18}\text{O}$ の勾配が

$$\left(\frac{\Delta M}{M^*} \right)_{17} / \left(\frac{\Delta M}{M^*} \right)_{18} = \left(\frac{m_{17} - m_{16}}{m_{17}} \right) / \left(\frac{m_{18} - m_{16}}{m_{18}} \right) = 0.5305$$

となることを意味する. 0.50 ではないことに注意. 上式の意味については KAWABE (1979) を参照されたい.

る。

これらの FUN inclusions も含めて 上記の混合説で解釈しようとするれば 酸素同位体組成を異にする2つの物質とは 必然的に 第3図の a と d に対応するとしなければならない。FUN inclusions は a の物質が何らかの質量分別過程を経ることにより b, c, e の組成に変化し これらがそれぞれ d の物質と混合したと解釈する訳である。質量分別過程としては 蒸発が考えられ これは Ce の負異常の説明にも好都合とされている (LEE et al., 1980). a にあたる物質は CAI を構成するスピネルなどの鉱物であり d に相当する物質は 全体としての星雲ガスであろうと考えられている (CLAYTON, 1981).

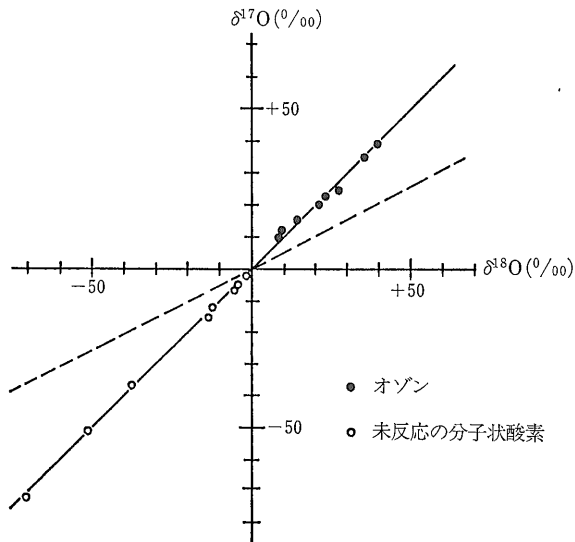
a の物質が何故 ^{16}O に富むかについては 幾つかの可能性が指摘されている (CLAYTON, 1978). いずれも星の内部における ^4He 燃焼反応又は超新星爆発における炭素燃焼反応により ^{16}O が選択的に合成されること根拠としており かかる ^{16}O に富むチリ・ガスが他の太陽系の原材料物質と完全に混合・均一化されることなく現在に到っているとされている。

以上のような CAI の酸素同位体組成異常の発見とその解釈が これまでの凝縮モデルの考え方を真向から否定するのは言うまでもない。凝縮モデルでは 原始太陽系の物質は 一担完全にガス化され 宇宙存在度に対応する均質・一様な化学組成 (同位体組成) を持つと仮定していた。そして そのような均質ガスから CAI をはじめ様々な隕石物質や惑星が出来たと考えていた。しかし 酸素同位体組成異常の解釈によれば そのような凝縮モデルでつくられるすべての物質の酸素同位体組成は 第3図に於いて勾配=0.52~0.53である一本の直線上に示されねばならない。しかし 現実の測定結果は明きらかにそうではない。均一ガスを前提とする凝縮モデルは その前提を修正せねばならない。しかし凝縮モデルの魅力は 均一組成のガスを仮定することで元素の宇宙存在度の概念をそのモデルの根幹にすえることが出来た点にある。任意性のある元素組成ガスの凝縮論では その魅力は半減してしまう。前に触れた蒸発モデルの復活には このような背景がある。CAI はその特異な鉱物・化学組成により 凝縮モデルの正しさを「説明」した。そして さらに CAI はその特異な酸素同位体組成により 自ら凝縮モデルを「否定」し 蒸発モデルを「復活」させたかに見える。

6. CLAYTON らによる酸素同位体組成異常の解釈への疑問

CAI の特異な化学組成と酸素同位体組成をめぐって その形成論は凝縮モデルと蒸発モデルの間を大きくゆれ動く訳であるが これは単に CAI や隕石の形成論にとどまらず 太陽系形成論にも大きな影響を与えている。しかし このような状況をもたらした CLAYTON らによる CAI 酸素同位体異常の解釈は はたして唯一可能な解釈であろうか。幾つかの疑問は提出されているが その中でも最も重要と思われるものは次のことである。CLAYTON らが主張するように 約4%もの純粋な ^{16}O 物質が直接・間接に CAI に混合されているとすれば これに対応する同位体異常は Mg, Si にも発見されねばならない。たしかに NISHIMURA & OKANO (1981) によれば $^{25}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$, $^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$ の間にも 酸素同位体組成異常にみられるような勾配=1 の変化が認められると言う。しかし 同一試料の Si, Mg 同位体組成が酸素同位体の如き異常な組成変化を示すとす測定結果はその努力にかかわらずまだ得られていない (CLAYTON et al., 1978).

さらに 筆者自身の疑問を一つ付加えるならば 同位体組成の異なる液体の水を混ぜあわせるような均一系の混合ならば その理解も容易であるが ガス・ダストの不均一系において あの見事な勾配=1 の直線関係を実現させる混合とは 一体どのような具体的プロセスを考えれば良いのであろうか。即ち このような不均一系の場合には 何らかの質量分別を伴うプロセスを想定しない限り 同位体の混合は実現しないのではないだろうか。しかし このような疑問は あくまで素朴な疑問であって 酸素同位体組成異常に別の解釈を与えようとする積極的なものではない。一方 陽子照射によって同位体異常を説明しようとするより積極的な考え方は KURODA (1975) HEYMANN & DZICZKANIEC (1976) LEE (1978) などによって展開されており CLAYTON, D. D. et al. (1977) の詳しい検討もある。この考え方は かつて FOWLER et al. (1962) が Li, Be, B の存在度の問題を解釈する為に提起したいわゆる初期照射説につながっている。もし Li, Be, B の存在度が高エネルギー陽子の照射による spallation によって規定されていると考えるなら この効果は他の元素の同位体組成にも何らかの影響を与えるにちがいないとするのは 当然であろう。最近になって 隕鉄中の $^{107}\text{Ag}/^{109}\text{Ag}$ に 200%にものぼる同位体異常を発見した KAISER & WASERBURG (1983) は ^{107}Pd に由来する ^{107}Ag とともに陽子照射による二次エピサーマル中性子と Pd の反応 (例え



第4図 オゾンと酸素分子の間の同位体分別。勾配=1.0の直線関係が成立している。破線は質量依存性分別に於ける勾配=0.52を示す (THIEMENS & HEIDENREICH, 1983による)。

ば $^{108}\text{Pd} (n, \gamma)^{109}\text{Pd} (-\beta)^{109}\text{Ag}$ によって ^{109}Ag が出来ることを考えねばならないと指摘している。そして陽子照射はT-Tauri段階の強い太陽風に起因するのではないかとしている。

これは FOWLER et al. (1962) の初期照射説のある意味での復活と考えられる。しかし陽子照射によってすべての同位体異常を同位体異常が認められない元素もあることも含めて定量的に説明するのは困難に見える (CLAYTON, D.D. et al, 1977)。特に CAI の $\delta^{17}\text{O}$ と $\delta^{18}\text{O}$ の直線関係の必然性を証明するのは恣意的又は偶然的仮定をおかない限りきわめて困難であろう。

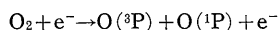
7. 非質量依存性酸素同位体分別の発見

しかしながら 1983 年になって THIEMENS & HEIDENREICH (1983) HEIDENREICH & THIEMENS (1983) は CAI に見られるような $\delta^{17}\text{O}$ と $\delta^{18}\text{O}$ の値が勾配=1の直線関係を示す酸素同位体分別がある種の化学過程で実現することを実験的に示すことに成功したのである。これはこれまでの混合説による酸素同位体組成異常の解釈は唯一可能な解釈ではないことを証明した点できわめて重要である。

THIEMENS と HEIDENREICH は酸素ガス中での電気放電によって生成するオゾンと未反応酸素ガス間の同位体分別を実験的に調べた。そして ^{16}O が未反応酸

素ガスに選択的に濃縮し 両者の $\delta^{17}\text{O}$ と $\delta^{18}\text{O}$ は見事な勾配=1の直線関係を満足していることを確認したのである (第4図)。

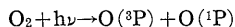
このことに対する彼等の解釈 (HEIDENREICH & THIEMENS, 1983) は次の通りである。オゾンと酸素ガス間の同位体分別を規定するのは酸素分子の解離反応にありこれは



と書ける。 $^{16}\text{O}^{16}\text{O}$, $^{17}\text{O}^{16}\text{O}$, $^{18}\text{O}^{16}\text{O}$ 分子のこの解離反応速度をそれぞれ k_{16} , k_{17} , k_{18} と記せば 第4図の結果は

$$k_{16} < k_{17} = k_{18}$$

の条件が必要であることを意味している。この解離反応は

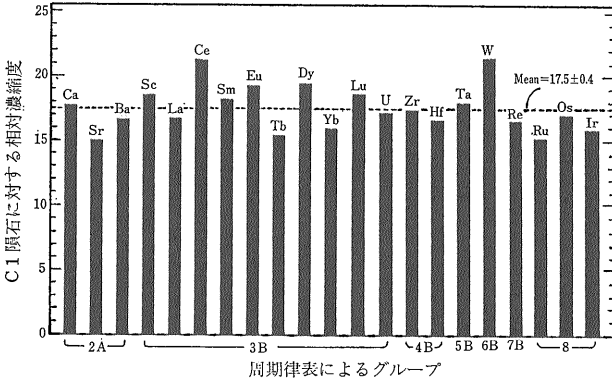


と等価と考えられこれに対応する O_2 の吸収帯は 175-205nmの紫外線吸収帯 (Schumann-Runge band) として知られている。この電子スペクトルには回転準位間の遷移に対応する細かな吸収帯が存在する。この回転吸収帯は $^{16}\text{O}^{16}\text{O}$ の等核対称分子と $^{18}\text{O}^{16}\text{O}$ 又は $^{17}\text{O}^{16}\text{O}$ の異核非対称分子とでは異なることが知られている (HERZBERG, 1950)。これが $k_{16} < k_{17} = k_{18}$ を結果するという訳である。しかしこれにはもう少し説明が必要であろう。

一般に H_2 , O_2 , N_2 のような等核二原子分子ではその電子スペクトルにあらわれる回転準位遷移はその原子の核スピン(I)の値によって回転量子数(J)の奇偶に対応するどちらかの一連の吸収帯が欠落したりその強度がJの奇偶によって交互に変化する。ラマンスペクトルでもこれと同じことが起るがもちろんこの場合は吸収帯ではない。このことは粒子位置交換の対称操作に対する波動関数の対称性に基づいている。

そしてこれは陽子の核スピンの発見とオルソ H_2 とパラ H_2 の問題として又その問題の解決に日本人研究者堀 健夫が大きな貢献をしたこととして知られている (朝永 1974)。このような核スピンと結びついた回転吸収帯の性質は逆に核スピンの分光学的決定法として利用されてきた (本田 1977)。

$^{16}\text{O}^{16}\text{O}$ の場合 ^{16}O の核スピンは0であり Schumann-Runge bandでは奇数のJに対応する吸収帯のみがあらわれ偶数のJに対応する吸収帯は存在しない (HERZBERG 1950)。しかし $^{18}\text{O}^{16}\text{O}$ と $^{17}\text{O}^{16}\text{O}$ は等核二原子分子ではない為すべての奇偶のJに対応する吸収帯



第5図

アエンデ隕石の coarse-grained CAI における refractory elements の一様濃縮 (GROSSMAN et al., 1977)による。

が存在することになる。従って Schumann-Runge band の紫外域に比較的平らなスペクトルをもつ幅射あるいはこれに対応するエネルギー源によって上記の解離が起るとすれば $2k_{16} = k_{17} = k_{18}$ が成立し上記の $k_{16} < k_{17} = k_{18}$ を満足することになる。このように THIEMENS と HEIDENREICH は 紫外線照射による光化学反応によって $\delta^{17}\text{O}$ と $\delta^{18}\text{O}$ が勾配 = 1 を示す酸素同位体分別が可能であることを示したのである。彼等の実験をそのまま CAI の生成条件にあてはめるのは困難であるかも知れないが 彼等も指摘するように 紫外線照射による光化学反応が原始太陽系で大きな役割をはたした可能性は大いにある。主系列星に到る直前段階の T-Tauri stage における原始太陽系は 現在よりもはるかに強い紫外線を放射していた可能性が指摘されているからである。この考え方は 酸素同位体異常を T-Tauri stage の太陽活動に結びつける点で 先に引用した KAI-SER & WASSERBURG (1983) の Ag 同位体異常についての推論と符号している。T-Tauri stage に於いて太陽が放出するとされる強い紫外線・エネルギー粒子は 原始太陽系星雲ガスの散逸過程に関連して 我国の林らによる「京都モデル」でも その重要性が指摘されているところである(中沢・水谷 1983)。隕石物質の同位体組成異常の問題と T-Tauri stage の活発な太陽活動との結びつきが 今後どのように明らかにされていくか期待したい。

しかし いずれにせよ 混合説による CAI の酸素同位体組成異常の解釈は「勾配 = 1 の酸素同位体分別は通常の化学変化の過程では実現しない」というその論理上の大前提を失ってしまったと言える。

従って CAI の酸素同位体組成異常を理由に 凝縮モデルを「否定」し 蒸発モデルを「復活」させる根拠はきわめて脆弱となったように思える。その意味で 既に述べたように CAI の特異な鉱物・化学組成をうまく説明出来る凝縮モデルの重要性は再評価される必要があ

1984年9月号

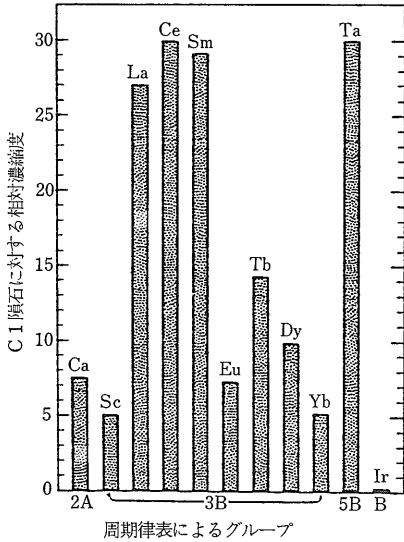
る。しかし このことは蒸発モデルの重要性を否定するものではもちろんない。凝縮モデルでは 星間塵は蒸発過程を経ることによって完全にガス化したと仮定しているが FUN inclusions の発見は 部分的にせよ完全ガス化をまぬがれた星間塵が存在することを意味しているのかも知れない。

コンドールはもちろん 多数の CAI はその形態からメルトの状態にあったことは間違いなく その際に物質の蒸発がないとするのはきわめて不自然であろう。いずれにせよ 凝縮及び蒸発の両過程は 基本的には物質の volatility が支配する過程であって このことが CAI の物質的特徴を大きく規定していると考えられる。このことの内容を 最近の CAI の化学的研究の進展から 次に見てみることにしよう。

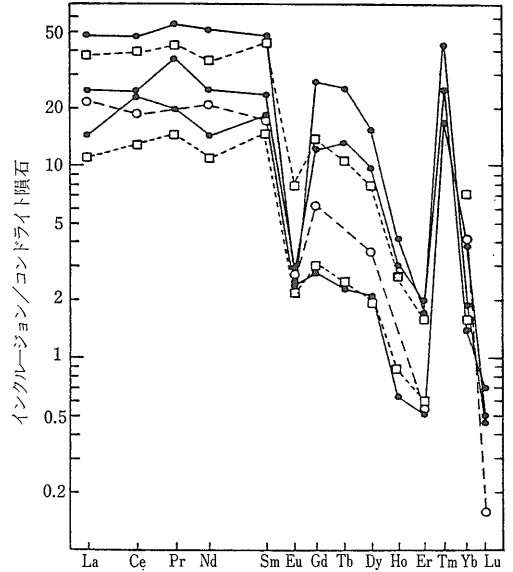
8. アエンデ隕石 CAI の化学的特徴

既に述べたように アエンデ隕石からの CAI は その形態上 Coarse-grained inclusions と fine grained inclusions の二つに大別され その化学的特徴も大きく異っている。

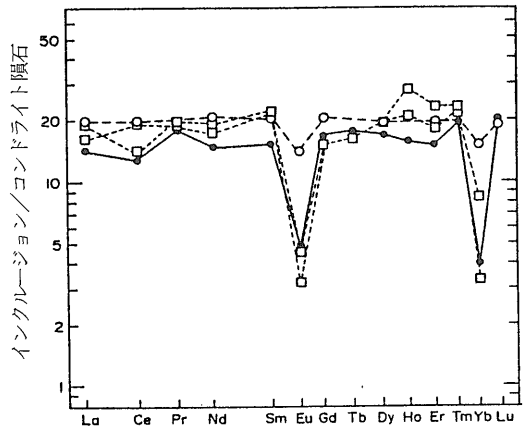
Coarse-grained inclusions の特徴は 第5図に示されるように 親石 (lithophile) 親鉄 (siderophile) の別を問わず refractory な元素がほぼ一様に濃縮していることである。一様という意味は C1 コンドライトに対する濃縮度がそれぞれの元素で比較的一定で 図にある通り約17.5倍となっていることを言う。GROSSMAN et al. (1977) によれば この17.5という値は凝縮モデルからするときわめて重要であるという。何故ならもし C1 コンドライトが原始太陽系物質から凝縮すべき全物質を代表するとすれば coarse-grained inclusions はその $100/17.5 = 5.7\%$ に相当することになる。凝縮モデルの計算によれば 5.7%の物質が凝縮する温度は 1437°K となり この時の鉱物組合せはメリライト



第6図 アエンデ隕石の fine-grained CAI における refractory elements の 分別濃縮 (GROSSMAN & GANAPATHY, 1976による).



第7図 アエンデ隕石の fine-grained CAI にみられる REE 存在度パターン. これは Group II パターンと呼ばれる (BOYNTON, 1978による).



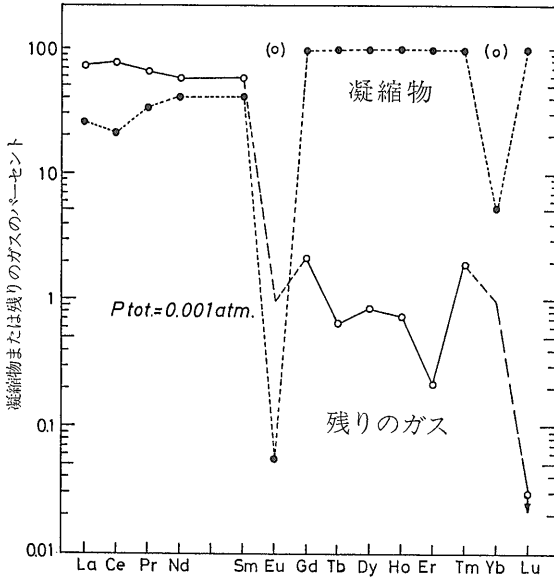
第8図 アエンデ隕石の fine-grained CAI にみられる REE 存在度パターン. これは Group III パターンと呼ばれる (BOYNTON, 1978による).

+スピネル+ダイオプサイドとなる。従って 微量元素の濃縮度と鉱物組成の関係は凝縮モデルによって大変うまく説明出来るとしている。

一方 fine-grained inclusions はどうであろうか。第6図は fine-grained inclusions における元素の相対濃縮度を示したもので 第5図と同じように縦軸はC1コンドライトに対する各元素の濃縮度をあらわしている。La Cl Sm Ta が約30倍の濃縮度を示すのに対し Sc Ir の濃縮度がきわめて小さいのが特徴的である。この図には示されていないが Lu Re Hf Zr も Sc Ir 程度のきわめて小さい濃縮度しか示さないことがわかっている。このことは はじめに少し触れた TANAKA & MASUDA (1973) によって発見された fine-grained inclusion の異常な REE 存在度パターンと対応している。第7図は BOYNTON (1978) によってまとめられたこの種の fine-grained inclusions の REE 存在度パターンである。C1コンドライトに対する濃縮度が元素ごとで大きく異なり このことがこの異常な REE パターンとなって表われている。このタイプの REE パターンを特に Group II パターンと呼び このタイプの REE パターンを有する fine-grained inclusions は Group II fine-grained inclusions と呼ばれる。その理由は fine-grained inclusions のすべてが第7図のような REEパターンを示すわけではなく fine-grained inclusions であっても 第8図に示されるような REEパターンを有するものは存在するからである。こちら

のタイプは Group III パターンと呼ばれ Eu と Yb に負の異常がある点を除けば coarse-grained inclusions の場合のように REE の一様な濃縮が特徴的である。このように fine-grained inclusions はその REE 存在度パターンによって Group II inclusions と Group III inclusions にさらに区分される。

このような fine-grained inclusions の化学的特徴が



第9図 1660°KにおけるREEの凝縮。この温度に於いて宇宙存在度の元素組成ガスから凝縮する鉱物はヒボナイトとペロプスカイトである。REEはこれらの鉱物のCa-sitesを理想固溶体として置換するものと仮定されている。

ガスと固体の間の化学平衡によって説明出来ることを最初に指摘したのはBOYNTON (1975)であった。ガスからの固体粒子の平衡凝縮の計算は第1図・2図第1表に引用したようにGROSSMAN (1972 1973)によってなされている。しかしこの計算結果のうち微量元素のガスからの凝縮はあくまでその元素が他の元素化合物と固溶体を形成することなく純粋固相として凝縮するものとの仮定の上に計算されている。しかし平衡凝縮を前提とする限り各微量元素がそれぞれ純粋相として凝縮するとするのは誤りであって当然何らかの固溶体として凝縮することを考慮しなければならない。そうすればBOYNTON (1975)が指摘したように実際の凝縮温度は純粋相が凝縮すると仮定した場合より高くなり純粋相の凝縮温度は固溶体形成による凝縮温度のほぼ下限に対応すると考えられることになる。

BOYNTON (1975)は1700°~1650°Kで凝縮すると考えられる Y_2O_3 や $CaTiO_3$ にREEが固溶体としてとり込まれるとするならばREEの各元素の何%が凝縮するかは個々の元素の熱力学的性質によって規定されREEの間で大きく異なることを示した。そしてこのような固溶体は何らかの理由でガスから分離されたとすれば残ったガスのREE存在度パターンはGroup IIパターンと類似したものになることを明らかにした。

このBOYNTONの考え方はいくつかの点でDAVIS & GROISMAN (1979)によって批判を受けることになるがGroup II fine-grained inclusionsは高温ガスから初期凝縮物が分離された残留ガスからの二次凝縮物であるとす結論には変更はない。

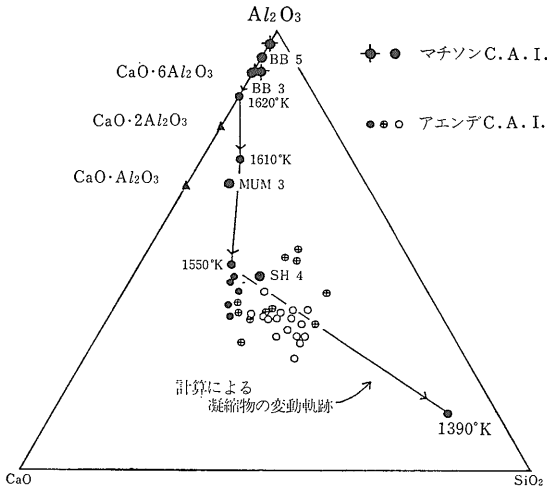
第9図は1660°Kに於いてヒボナイト($CaAl_2O_6$) + ペロプスカイトの凝縮に伴ってペロプスカイト及びヒボナイトと理想固溶体をなして凝縮するREEと残留ガスのREEの存在度パターンを計算したものである。

(Davis 1982 私信)。凝縮物に於いてはEuとYbの負の異常が著しく軽希土(La-Sm)と重希土(Gd-Lu)の分別が予測される。1660°Kより低温になれば軽希土と重希土の間の分別は次第に小さくなりEuとYbの負の異常だけが残ることになる。これはまさにGroup III fine-grained inclusionsのパターンに対応することになる。一方残留ガスのREEパターンはおおむね第7図に示したGroup IIパターンに対比出来ることは明らかであろう。ただしTm Eu Ybの対応は充分ではない。EuとYbの不一致はGroup IIIパターンの場合と同じように残留ガスからEuとYbが100%凝縮する温度以上で二次凝縮が終了したと考えれば問題とはならない。第9図に於いて残留ガスのEuとYbの点が別に扱ってあるのはこのことによる。

このようにGroup II fine-grained inclusionsのREEパターンからきわめて初期の高温凝縮物の形成とそのガスからの分離プロセスが推定される。既に述べたようにGroup II fine-grained inclusionsではSc Hf Zr Re Irなどの濃縮がみられない。これらの元素はいずれもきわめてrefractoryな微量元素でありREEのLuやErなどの重希土類元素とともに初期高温凝縮物として早期にガスから分離されたと考えられる。この推論が正しいとすればこの初期高温凝縮物はアエンデ隕石などのCAIと同じように隕石中のinclusionsとして実在しても不思議ではない。そしてそれが実際に発見されることになればそれこそultra-refractory inclusionsと呼ばれるべきものであろう。このultra-refractory inclusionsはようやく最近になって発見されたがアエンデ隕石ではなくC2コンドライトであるマチソン隕石からであった。その結果を次にみることにしよう。

9. マチソン隕石からのCAI

マチソン(Murchison)隕石はアエンデ隕石の落下から約8ヶ月後の1969年9月28日オーストラリア・メル



第10図 マチソンCAIとアエンデCAIの Al₂O₃-CaO-SiO₂ ダイアグラムへのプロット。

ボルン郊外に落下している。回収された総重量は 100 kg を越える。C 2 コンドライトの「fall」としては最大量である。このマチソン隕石については FUCH et al. (1973) によって詳しい岩石学・鉱物学的研究報告書があり、ヒポナイト+ペロプスカイト スピネル(±ダイオプサイド)からなる CAI が存在するとの報告がなされていたにもかかわらず、これらの CAI の詳しい研究は最近までほとんどなされていなかった。同じ年に落下したアエンデ隕石の CAI の方が脚光を浴びたのはきわめて対照的である。ただし、隕石中の有機物質についての研究では事実は逆である。マチソン隕石からは多くの炭化水素、アミノ酸などが確認され、有機宇宙化学の進展に重要な役割をはたしている (ANDERS et al., 1973; 早津 1976)。マチソン隕石中の CAI は個々の CAI のサイズも小さく、含有量も小さい。このことがマチソン CAI が充分研究されてこなかった理由であろう。しかし、最近になって MACDOUGALL のグループ (MACDOUGALL 1979; 1981) や筆者の参加する機会があった GROSSMAN のグループ (BAR-MATTHEWS et al., 1982; MACPHERSON et al., 1983; KAWABE et al., 1981) の努力によって、マチソン隕石の CAI の岩石・鉱物学的性質や化学的特徴が明らかにされつつある。

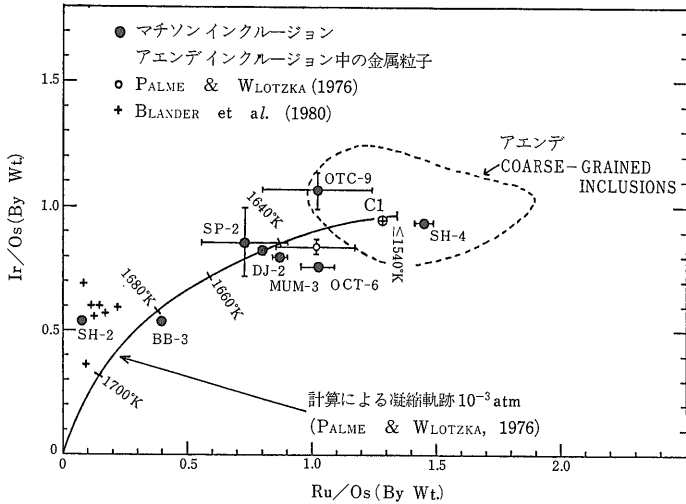
これらの CAI の構成鉱物は様々であるが、代表的なものは (1)スピネル+ヒポナイト+ペロプスカイト (2)コランダム+ヒポナイト+ペロプスカイト (3)メリライト+スピネル+ヒポナイト+ペロプスカイト などである。ヒポナイト (hibonite, CaAl₁₂O₁₆) はカルシウム-アルミネイトであるが、地球上での天然鉱物として産す

ることはきわめて希れであるとされている。マチソン隕石の CAI の特徴は、このヒポナイトやスピネルなどのアルミネイトが主要構成物であることが多いということである。アエンデ隕石の CAI からヒポナイトは発見されているが、多量に存在する訳ではない。マチソン CAI にアルミネイトが多量に存在することは、これらがアエンデ CAI に比べ Al₂O₃ に富み SiO₂ に乏しいことを意味し、このことは第10図に示す Al₂O₃-CaO-SiO₂ の三角ダイアグラムによく表現される。この図には凝縮モデルから予測されるトレンドも記入してあるが、このトレンドとの細かな比較にどれだけ意味があるかは別にして、マチソン CAI がアエンデ CAI よりもさらに refractory であることは間違いなであろう。

GROSSMAN (1972) の凝縮モデルによれば $P_{H_2} = 10^{-3}$ atm. の宇宙存在度に対応する元素組成ガスから最初に凝縮する主成分元素鉱物は、コランダム (Al₂O₃) である。しかし、彼の計算では、ヒポナイト (CaO·6Al₂O₃) や CaO·2Al₂O₃、CaO·Al₂O₃ などのカルシウム-アルミネイトは当時充分な熱力学データが無かった為、全く考慮されていない。ところが、最近になってこれらのカルシウム-アルミネイトの熱力学データが利用出来るところとなり、再計算がおこなわれた。その結果 $P_{H_2} = 10^{-3}$ atm. においては、コランダムとヒポナイトの凝縮温度はほとんど差がないものの、コランダムの方がわずかに高温で凝縮することがわかった。これは、ガスの冷却に伴ない最初に凝縮するコランダムは、ただちにヒポナイトに変化することを意味する。従って、コランダム+ヒポナイトあるいはヒポナイトを含む inclusions の存在は、マチソン CAI のきわめて refractory な性質を強く示唆していると考えられる。

このような主成分元素組成の特徴に対し、微量元素組成はどうであろうか。マチソン CAI では、アエンデ coarse-grained inclusions のようにどの refractory trace elements もほぼ一様に濃縮するパターンはほとんどないが、これらの CAI の特徴を端的に示してくれるのは refractory siderophiles 即ち Os, Ir, Ru の相互分別である。第11図に示すように、マチソン CAI の Ir/Os と Ru/Os の比は C 1 コンドライトの値から系統的にずれており、このずれは PALME & WLOTZKA (1976) が熱力学計算によって予測した太陽系星雲ガスから 1700°~1540°K に於いて凝縮する金属合金の組成変化に対応していることが判明した (KAWABE et al., 1981; 準備中)。

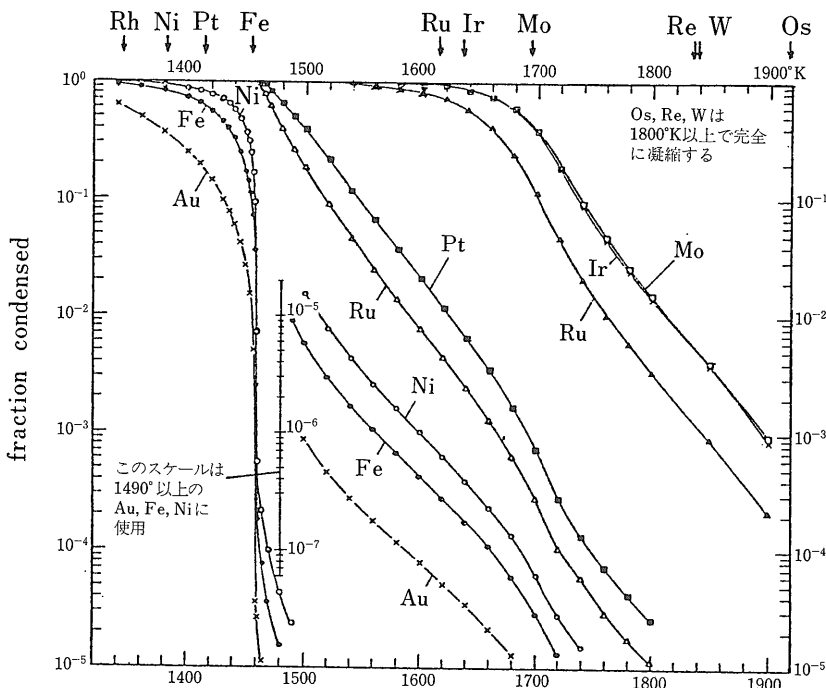
PALME & WLOTZKA (1976) は Os, Re, W, Mo, Ir, Ru, Ni, Fe, Co などの親鉄元素が星雲ガスから凝縮する際に、これらが固溶体合金をなして凝縮するとし



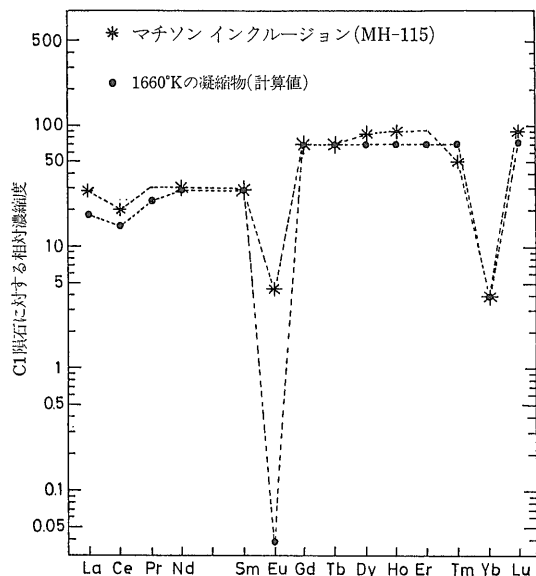
第11図
マチソンCAIのIr/Os-Ru/Os比

てこれらの凝縮モデル計算を行った。固溶体を考えることの重要性は既に述べたREEの凝縮の場合と同じである。彼等の計算結果は第12図に示す通りである。ガスから最初に凝縮するのはOsでありガスの冷却に伴ってOs-W-Reからなる合金が1800°Kで出来ることになりこれにMo Ir Ruなどが固溶されて少しづつ凝縮していく。1500°K以上においては凝縮によって出来た合金はOs Ir Ruなどの白金族元素を多量に含みFeをわずかにしか含まない。その意味

でこれは白金族元素合金である。しかし1500°K以下になるとFe Ni Coの凝縮が急速に進行し白金族元素合金はFe-Ni合金へと変化することになる。第12図からわかるように1800°Kから1540°Kへの温度低下によって合金のIr/Os Ru/Os比は徐々に増大するがIrの方がRuよりも少しrefractoryである為第11図のようにIr/OsとRu/Os比をプロットすると上に凸な曲線となる。Os IrはもとよりRuの凝縮が完了する温度は1540°Kであるのでこの温度



第12図
親鉄元素の凝縮 宇宙存在度のガスが 10^{-3} 気圧であるとき親鉄元素が理想固溶体合金を形成して凝縮すると仮定 (PALME & WLOZKA, 1976による)。



第13図 マチソン隕石のCAIから発見された ultra-refractory condensate に対応するREE存在度パターン (Boynton et al., 1980).

計算値は図9に示した凝縮物の値、両者のパターン的一致度を見る為に両者のSmの存在度を一致させている。

以下では Ir/Os Ru/Os 比は はじめのガスの組成比である宇宙存在度の比 (= C1コンドライトの比) に一致し一定の値となる。

この PALME & WLOTZKA (1976) の計算結果は 白金族元素に富む金属粒子が実際にアエンデ CAI 中に多数発見されるに到り (EL GORESY et al., 1978) 単なる計算結果にとどまらない重大な現実的意味がある。第11図には PALME & WLOTZKA (1976) と BLANDER et al. (1980) によってアエンデ coarse grained CAI から発見された金属粒子もプロットしてある。放射化分析によるアエンデ隕石の coarse-grained inclusions のバルク分析値は 第11図の鎖線で囲まれた範囲に入り C1 コンドライトの値と一致している。従って アエンデ CAI に於いても これに含まれる個々の金属粒子の組成は必ずしも同一ではなく BLANDER et al. (1980) が発見したようなきわめて Os に富む粒子も存在しており これら粒子の全体としての荷重平均値がバルクの分析値として与えられ この値が C1 コンドライトに対応すると考えられる。第11図のマチソンCAIの値も 放射化分析によるバルクの分析値であるから 個々の値はそのCAIに含まれる幾つかの金属粒子の全体としての平均値を表わしており 相対的に Os に富む粒子が多いことが C1 コンドライトの比からのずれとなって表われている

ものと考えられる。

先に述べたように アエンデ隕石の Group II CAI の REE 存在度パターンから推定された ultra-refractory inclusions は BOYNTON et al. (1980) によってマチソンCAI から最初に発見された (第13図)。第9図に示した 1660°K での計算値との対応は見事である。そして筆者らによって検討されたマチソンCAIのうち 第11図に示した SH-2 も やはりそのような ultra-refractory inclusion の一種であることが明らかとなった (KAWABE et al., 1981)。このことは マチソンCAI の鉱物組合せ 主成分化学組成 refractory siderophiles 分別から結論される そのきわめて refractory な性格からすれば 当然の発見としなければならない。

お わ り に

CAIの本格的研究が始ってから 十年を越えようとしている。この間の研究経過をふりかえりつつ 最近の研究成果を簡単に紹介したが 取り上げられなかったことも多い。特にCAIと関係した隕石物質などの蒸発実験については その重要性にもかかわらず 紙面の関係もあり 充分取り上げることが出来なかった。別の機会があれば それにゆずることとする。

参 考 文 献

ANDERS, E., HAYATSU, R. and STUDIER, M.H. (1973) Organic compounds in meteorites. *Science*, 182, 781-790.

BAR-MATTHEWS, M., HUTCHEON, I.D., MACPHERSON, G. J. and GROSSMAN, L. (1982) A corundum-rich inclusion in the Murchison carbonaceous chondrite. *Geochim. Cosmochim. A*, 46, 31-41.

BLANDER, M., FUCHS, L.H., HOROWITZ, C. and LAND, R. (1980) Primordial refractory metal particles in the Allende meteorite. *Geochim. Cosmochim. A*, 44, 217-223.

BOYNTON, W.V. (1975) Fractionation in the solar nebula: condensation of yttrium and rare earth elements. *Geochim. Cosmochim. A*, 39, 569-584.

BOYNTON, W.V. (1978) The chaotic solar nebula: Evidence for episodic condensation in several distinct zones. In *Protostar and Planets* (ed. T. Gehrels), 427-438, Univ. Arizona Press.

BOYNTON, W.V., FRAZIER, R.M. and MACDOUGALL, J.D. (1980) Identification of an ultra-refractory component in the Murchison meteorite (Abst.) *Lunar Planet. Sci. XI*, 103-105.

CLARKE, R. S., Jr., JAROSEWICH, E., MASON, B., NELEN, J., GOMEZ, M. and HYDE, J.R. (1970) The Allende, Mexico, meteorite shower. *Smithson. Contrib. Earth Sci.*, no. 5, 1-53.

CLAYTON, D.D., DWBK, E. and WOOSLEY, S.E. (1977) Isotopic anomalies and proton irradiation in the early solar system. *Astrophys. J.* 214, 300-315.

CLAYTON, R.N., GROSSMAN, L. and MAYEDA, T.K. (1973) A component of primitive nuclear composition in carbonaceous meteorites. *Science*, 485-488.

CLAYTON, R.N., ONUMA, N., GROSSMAN, L. and MAYEDA,

- T. K. (1977) Distribution of the pre-solar component in Allende and other carbonaceous chondrites. *Earth Planet. Sci. Lett.* 34, 209-224.
- CLAYTON, R. N., MAYEDA, T. K. and EPSTEIN, S. (1978) Isotopic fractionation of silicon in Allende inclusions. *Proc. Lunar Planet. Conf. 9th*, 1267-1278.
- CLAYTON, R. N. (1978) Isotopic anomalies in the early solar system. *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.*, 28, 501-522.
- CLAYTON, R. N. (1981) Isotopic variation in primitive meteorites. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A303*, 339-349.
- DAVIS, A. M. and GROSSMAN, L. (1979) Condensation and fractionation of rare earths in the solar nebula. *Geochim. Cosmochim. A.* 43, 1611-1632.
- EL GORESY, A., NAGEL, K. and RAMDOHR, P. (1978) Fremdlinge and their noble relatives. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 9th*, 1279-1303.
- FOWLER, W. A., GREENSTEIN, J. L. and HOYLE, F. (1962) Nucleosynthesis during the early history of the solar system. *Geophys. J.* 6, 148-220.
- FUCHS, L. H., OLSEN, E. and JENSEN, K. J. (1973) Mineralogy, mineral-chemistry, and composition of the Murchison (C2) meteorite. *Smithson. Contrib. Earth Sci.* no. 10, 1-39.
- GROSSMAN, L. (1972) Condensation in the primitive solar nebula. *Geochim. Cosmochim. A.* 36, 597-619.
- GROSSMAN, L. (1973) Refractory trace elements in Ca-Al-rich inclusions in the Allende meteorite. *Geochim. Cosmochim. A.* 37, 1119-1140.
- GROSSMAN, L. and LARIMER, J. W. (1974) Early chemical history of the solar system. *Rev. Geophys. space Phys.* 12, 71-101.
- GROSSMAN, L. and GANAPATHY, R. (1976) Trace elements in the Allende meteorite-II. Fine-grained, Ca-rich inclusions. *Geochim. Cosmochim. A.* 40, 967-977.
- GROSSMAN, L., GANAPATHY, R. and DAVIS, A. M. (1977) Trace elements in the Allende meteorite-III. Coarse-grained inclusions revisited. *Geochim. Cosmochim. A.* 41, 1647-1664.
- HASHIMOTO, A., KUMAZAWA, M. and ONUMA, N. (1979) Evaporation metamorphism of primitive dust material in the early solar nebula. *Earth Planet. Sci. Lett.* 43, 13-21.
- 早津一 (1976) 太陽系における有機物の起源. 新実験化学講座 宇宙地球化学 (本田雅健編) 133-166, 丸善.
- HEIDENREICH, J. E. III. and THIEMENS, M. H. (1983) A non-mass-dependent isotope effect on the production of ozone from molecular oxygen. *J. Chem. Phys.* 78, 892-895.
- HERZBERG, G. (1950) Molecular Spectra and Molecular Structure I. Spectra of diatomic molecules. Van Nostrand Reinhold, 658 pp.
- HEYMANN, D. and DZICZKANIEC, M. (1976) Early irradiation of matter in the solar system: Magnesium (Proton, neutron) scheme. *Science*, 191, 79-81.
- 本田雅健 (1977) 元素. 三省堂 249pp.
- KAISER, T. and WASSERBURG, G. J. (1983) The isotopic composition and concentration of Ag in iron meteorites and the origin of exotic silver. *Geochim. Cosmochim. A.* 47, 43-58.
- KAWABE, I. (1979) Lattice dynamical aspect of oxygen isotope partition function ratio for alpha quartz. *Geochem. J.* 13, 57-67.
- KAWABE, I., GROSSMAN, L., TANAKA, T. and DAVIS, A. M. (1981) Trace elements in refractory inclusions from the Murchison C2 chondrite. *Meteoritic. Soc. Meeting Abst.* 75.
- KURAT, G. (1970) Zur Genese der Ca-Al-reichen Einschlüsse im Chondriten von Lancé. *Earth Planet. Sci. Lett.* 9, 225-231.
- KURAT, G., HOINKES, G. and FREDRIKSSON, K. (1975) Zoned Ca-Al-rich chondrule in Bali: New evidence against the primordial condensation model. *Earth Planet. Sci. Lett.* 26, 140-144.
- KURODA, P. K. (1975) The puzzle of the rare gases and of oxygen in materials with the solar system. *Geochem. J.* 9, 51-62.
- LARIMER, J. W. (1967) Chemical fractionations in meteorites, I, Condensation of the elements. *Geochim. Cosmochim. A.* 31, 1215-1238.
- LARIMER, J. W. and ANDERS, E. (1967) Chemical fractionations meteorites, II, Abundance patterns and their interpretation. *Geochim. Cosmochim. A.* 31, 1239-1270.
- LEE, T. (1978) A localprot on irradiation model for isotopic anomalies in the solar system. *Astrophys. J.* 224, 217-226.
- LEE, T., MAYEDA, T. K. and CLAYTON, R. N. (1980) Oxygen isotopic anomalies in Allende inclusion HAL. *Geophys. Res. Lett.* 7, 493-496.
- LORD, H. C. III. (1965) Molecular equilibria and condensation in a solar nebula and cool stellar atmosphere. *Icarus*, 4, 279-288.
- MACDOUGALL, J. D. (1979) Refractory-element-rich inclusions in CM meteorites. *Earth Planet. Sci. Lett.* 42, 1-6.
- MACDOUGALL, J. D. (1981) Refractory spherules in the Murchison meteorite: Are they chondrules? *Geophys. Res. Lett.* 8, 966-969.
- MACPHERSON, G. J., BAR-MATTHEWS, M., TANAKA, T., OLSEN, E. and GROSSMAN, L. (1983) Refractory inclusions in the Murchison meteorite. *Geochim. Cosmochim. A.* 47, 823-839.
- MARVIN, U. B., WOOD, J. A. and DICKEY, J. S., Jr. (1970) Ca-Al rich phases in the Allende meteorite. *Earth Planet. Sci. Lett.* 7, 346-350.
- 中沢清・水谷仁 (1983) 太陽系の形成論. 科学, 53, 24-29.
- NISHIMURA, H. and OKANO, J. (1981) SIMS measurement of Mg isotopic ratios in chondrites. *Meteoritic. Soc. Meeting Abst.* 6.
- NOTSU, K., ONUMA, N., NISHIDA, N. and NAGASAWA, H. (1978) High temperature heating of the Allende meteorite. *Geochim. Cosmochim. A.* 42, 903-907.
- 小沼直樹 (1972) 宇宙化学, 講談社, 247pp.
- ONUMA, N., CLAYTON, R. N. and MAYEDA, T. K. (1972) Oxygen isotope cosmothemometer. *Geochim. Cosmochim. A.* 36, 169-188.
- PALME, H. and WLOTZKA, F. (1976) A metal particle from a Ca, Al-rich inclusion from the meteorite Allende, and the condensation of refractory siderophile elements. *Earth Planet. Sci. Lett.* 33, 45-60.
- TANAKA, T. and MASUDA, A. (1973) Rare-earth elements in matrix, inclusions and chondrules of the Allende meteorite. *Icarus*, 19, 523-530.
- 田中剛 (1978) 宇宙の地向斜? 原始太陽系. 地質ニュース, no. 281, 20-29.
- THIEMENS, M. H. and HEIDENREICH, J. E. III. (1983) The mass-independent fractionation of oxygen: A novel isotope effect and its possible cosmochemical implications. *Science*, 219, 1073-1075.
- 朝永振一郎 (1974) スピンはめぐる. 中央公論社, 365 pp.
- WOOD, J. A. (1981) The interstellar dust as a precursor of Ca, Al-rich inclusions in carbonaceous chondrites. *Earth Planet. Sci. Lett.* 56, 32-44.