南 極 隕 石

武 田 弘*

Antarctic Meteorites

Hiroshi TAKEDA

I. は し が き

1969年は地球・惑星科学の歴史において、重要な事件があった年だと言われている。巨大な炭素質コンドライト、アエンデ Allende 隕石の落下、地球居住者による月試料の回収、および日本南極観測隊によるやまと隕石の発見と回収の三つの事件である。これらの試料はその後の十数年間のこの方面の研究について、主要な話題を提供して来た。アエンデ隕石に発見された酸素同位体異常と新しい太陽系起源論の発展、月のマグマ大洋のモデルと地球型惑星のリソスフェア形成過程、南極隕石にもとづく隕石母天体の復元などである。

やまと隕石発見以前にも南極では4ヶ所より隕石が発見されている。しかしいわゆる南極隕石と呼ばれる隕石の発見はやまと隕石の発見に端を発している。やまと隕石発見の一番大きな意義はただ単に多量の隕石が発見されたということではない。やまと山脈近くの裸氷上の狭い地域で同時に9個発見された隕石の中には数種の異なった隕石が含まれていた点にある (SHIMA *et al.* 1973)。このような隕石の産状は稀であり、何らかの隕石の収積機構をうかがわせるものであった。一般に南極の狭い地域に多種の隕石が多数集積しているものを回収したのが南極隕石といわれるものである。

南極隕石の特徴として特筆されるべきは、長年氷河中あるいは裸氷上にあったため、地球に落下したのは数千年から十数万年の隕石である点である。南極以外で発見回収された隕石はせいぜい過去200年のものであることを考えれば、地球近傍に飛来している小惑星の破片が時代とともに、どう変っているかを見るにも面白い資料ということになる。

さらに、裸氷上で回収するという特徴のため、あまり地球上の生物の有機物により汚染されていない、炭素質コンドライトが得られるとか、地球上の岩石に似た隕石でも回収され易いとか、あるいは非常に小さな隕石の中にある稀な種類の隕石も採集可能な点もある。この点南極隕石の研究のうちとくに進展の著るしかったのは、地球上の岩石に似ているエコンドライトおよび炭素質コンドライトの研究であった。本稿ではこれらの種類の隕石の研究結果を示すことが多くなるのもそのためである。

南極隕石のレビューおよび研究成果には、日本側のものは1970年より毎年国立極地研究所より発行されている南極隕石シンポジウムのプロシーディングおよび幾編かの要約 (e.g. YANAI and KOJIMA 1986) がある。1976年頃からは米合衆国テキサス州ヒューストンで行われている月惑星科学会議でも多くの発表がありそのプロシーディングにも南極隕石研究の成果が報告されている。

本稿では、1985年7月西ドイツ、マインツ市のマクスプランク化学研究所で開催された南極隕石ワークショップ (e.g. DREWRY 1986) および最近刊行の運びになっている国立極地研究所の「南極の科学」の中の「南極隕石」(古今書院)に掲載されている研究成果のうち鉱物学的、岩石学的な研究を中心に話を進めて行く。南極隕石の研究に刺激されてそれ以外の隕石研究も盛んになり、コンドライト中のコンドルー

* 東京大学理学部鉱物学教室 Mineralogical Institute, Faculty of Science, University of Tokyo

ルにおよびマトリックス物質の研究でも多くの成果があがっている。

本稿では紙面が限られているので、これらのうち特に南極隕石の特徴として重要な項目以外のものを紹介できないのは残念であるが、それらは隕石関係の教科書 (DODD 1981) を参照いただければ幸いである。

II. 隕石の集積機構と南極隕石の特徴

集積機構については、初期には多くの想像がなされたが、論文の形で記録されたものは NAGATA (1978) によるものである。隕石が落下して以後雪に埋もれ、それが氷づけになったまま大陸氷河のおそい流動で大陸周辺の山脈に長年月をかけて運ばれる。山脈などにはばまれて流動がおそくなった氷は表面で消失し、ブルーアイスと呼ばれる裸氷帯ができる。隕石はこの部分に取り残されている。

裸氷帯における氷の消耗の程度が実測され氷面下の地形と、隕石の濃集帯との関係が知られるようになって、隕石の集積機構は単純なものではないことがわかってきている。この点については第2回南極隕石ワークショップのレポートに詳しく論じられている (DREWRY 1986)。

重要なことは上記のような機構で10万年も以前の隕石が現在手に入ることによって、その利点を利用した研究が有利なように思われる。今まで南極隕石とそうでないものを比較してみても、隕石種として同じであるが、その化学組成が隕石種の中の二種のものの中間であったり、一隕石種の組成範囲を超えるもの、微量元素の存在比の異なるもの (LIPSCHUTZ 1986) 組織の異なるもの (TAKEDA 1986) などがあった。

もしこの差が地球に落下してくる隕石の時代の差によるとしたら、惑星科学上非常に面白い問題を提起する。もっともこの問題を考えるときネックになるのは、南極隕石に変種のものが多くても、それは落下した時には1つであった可能性がある。この隕石対を発見することが重要で、これには地球落下年代を求める必要がある。南極隕石は氷の上で発見されるという特殊性により、地球の石に似た隕石、非常に小さい隕石も発見されやすい。このようなものの中に変種のもので多い可能性もある。

III. コンドライトとコンドルールの成因と南極隕石

コンドライトはコンドルールと呼ばれる丸いケイ酸塩質の玉とその破片の間をマトリックス物質が埋めている組織を持っている。数も多く化学的にもこれを太陽系の平均化学組成と考えていい根拠がある。この分類と成因については南極隕石発見前より多くの研究が行われていた (DODD 1981)。とくにアエンデ隕石は大量の試料を研究者に提供しただけでなく、CaAl 包有物などにみられる同位体異常 (ONUMA *et al.* 1983) などそれまでの平衡凝縮モデルを不均質太陽系モデルに変えさせた大きな貢献があった。

これらの研究の陰にかくれ、南極産コンドライトの研究はあまり目立たない存在であった。しかし日本の隕石研究という面で見れば、今までほとんど入手できなかったものが入手できるようになったという点で、多くの岩石鉱物研究者をこのフィールドに引き入れる役目を果たしたと言える。とくに非平衡コンドライトは今まで入手困難であったが Y74191コンドライトなどは大きかったので、多くの研究者がこれ进行研究した (KIMURA and YAGI 1980, IKEDA and TAKEDA 1979)。幾つかの注目すべき結果も公表された。

コンドルールの成因としていろいろ提出されていたが、そのうちガスから液体として凝縮したという説があった。NAGAHARA (1981) はコンドルールの中に前駆物質の溶け残りがあることを発見し、コンドルールは固体物質が溶けて急冷されたものであることを示した。また土山とともに合成コンドルールの冷却実験よりその組織を再現し、冷却速度を推定した (TSUCHIYAMA *et al.* 1980)。

普通コンドライトのバルク化学組成は全鉄量の Si に対する比、全鉄量のうち金属鉄と硫化鉄として存在する割合により、E. H. L. LL の化学的グループに分類される。HARAMURA, KUSHIRO, YANAI (1983) は東大地質学教室原村寛氏の分析したコンドライトの化学組成にもとづき、化学的グループごと

の組成変化を検討し、コンドライトの太陽系星雲からの凝縮過程を推定した。

南極コンドライトの初期の岩石、鉱物学的研究では、分類学的なものが主体であった (OKADA 1975; MIURA and MATSUMOTO 1982)。ついでコンドルールやマトリックスの研究も盛んになった。それまでコンドライト中のコンドルールは主に組織にもとづく分類研究が行われていたが、IKEDA (1983) はコンドルールの組織は化学組成により変化するが、各コンドルールのバルク化学組成変化の方が成因を考えるとき、より本質的であると考え、その系統的变化をブロード・ビーム・マイクロプローブ法で研究した。

コンドルールの化学組成は CP, IP, SP, KF の4つのタイプに分類され (IKEDA 1983), CA, IP, SP の順で含まれる斜長石成分の組成が Na に富む。KF はカリ長石成分を含むコンドルールの破片で Y7442 など角レキ岩化した非平衡コンドライトのみに見られる。これらの差は原料物質がどのような温度での凝縮物であるか、それがどう溶けたかによる。CP は高温で凝縮した原料物質を多く含み、SP は低温のものを多く含む。さらにこれらの物質はまわりの星雲ガスと反応して組成が変化している。

コンドライトの化学グループ H, L, LL の中に含まれるコンドルールはそれぞれ共通であり、コンドライトのバルク組成も金属鉄を除いたものでは同じようなものであることは (HARAMURA *et al.* 1980), 太陽系のかなり広い領域で物質が混合されていることを物語る。コンドルールは続く過程で母天体がつくられる以前に低温で凝縮したマトリックス物質をも含めて混合され、均質化されていたものと思われる。

コンドルールの組織やマトリックスの微細な鉱物はマイクロプローブおよび電子顕微鏡により詳しく観察された (MATSUNAMI 1984; IKEDA *et al.* 1981)。KOJIMA *et al.* (1984) は南極産炭素質コンドライトのマトリックスの変化を研究し、AKAI (1982) はそれを電顕で観察した。彼は TOMEOKA and BUSECK (1983) が発見した、マチソンその他の炭素質コンドライト中のよく特性化されていない相 (PCP) のトシリナイト様の鉱物などを研究した。

KITAMURA *et al.* (1983) は、放射状輝石コンドルールの縁にあった輝石のスピノーダル分解組織よりこのコンドルールの熱史を推定し、コンドライトの熱変成度をあらわす岩石学的タイプ (3-6) はコンドルールが母天体に集積する以前に確立したものであることを提唱した。しかし非常に変成度の高いコンドライト (LL7) は、鉱物岩石学的データと微量元素の損失のデータとの両方より、母天体上の隕石様物体衝突の加熱により生じたものもある (TAKEDA *et al.* 1984) ことがわかった。

やまと隕石中の LL コンドライトにはこの他に母天体上での激しい衝突により角レキ岩化したり、一部分熔融気化して、多孔質結晶質のコンドライトになったものがある (MIYAMOTO *et al.* 1984)。コンドライトの成因を考えるときも、母天体上あるいは母天体同志の衝突の影響を見逃すと、とんでもない解釈を下すこともあるので、今後の研究における注意が必要である (OHTA and TAKEDA 1982)。

このように衝突により固結し変化したコンドライトの反射スペクトルが、今までよくわからなかった近地球小惑星の1つ887アリンダ Alinda のものに似ていることもわかってきた (McFADDEN *et al.* 1984 私信)。南極隕石の試料が得やすくなって日本における研究で新しく進展した分野にこの反射スペクトルの測定 (MIYAMOTO *et al.* 1983) を含め隕石の物性測定の研究がある。とくに日本で研究の盛んなのが磁性 (NAGATA and FUNAKI 1982), ポロシティ (MATSUI *et al.* 1980) の測定などがある。これらのデータは太陽系惑星の形成過程のシミュレーションのデータに使われる。

IV. 分化した隕石母天体のリソスフェア復元

最近のエコンドライトの研究の発展は南極産エコンドライトの発見と研究の発展と密接なかかわりあいをもってきた。エコンドライトは隕石のうちでは非常に数の少ない部類に属し、研究のための試料は得にくいものであった。この点で過去10数年間に南極より持ち帰られた多数のエコンドライトはこの分野の研究に大きな貢献をなした。

エコンドライトは、一度熔融した高温の液から結晶化した結晶質の岩石である。名前の示すようにコン

ドライトによくみられるコンドルールを含まない種類の隕石ということである。エコンドライトの多くは、月ほど大きくないが、かなり大きな天体の表面が一度溶けて固化する時に、物理的・化学的に分化した地殻を持った天体から来たものである (CONSORMAGNO and DRAKE 1977; TAKEDA 1979)。この分化した地殻を持っているという点では地球などの惑星や月に似ている。しかも太陽系ができた46億年前の記録をそのまま保っているという点で、地球などの惑星のリソスフェアの起源を考える上でもっとも単純な基本的なモデルを与えてくれる。地球のように大きく成長した天体では、その誕生時の記録はその後の惑星の活動で37億年より古いものは失われてしまっているため、これらの隕石は貴重な研究材料である。太陽系誕生時の謎を秘めた唯一の研究材料を提供してくれる。

この種の母天体に属する隕石にはホルダイト (Howardite)、ユークライト (Eucrite) およびダイオジェナイト (Diogenite) がある (DUKE and SILVER 1967)。これを以下その頭文字をとって HED 隕石と略する。特に南極産エコンドライトに特異な隕石種から紹介しよう。

ダイオジェナイトは斜方輝石よりなる隕石である。南極で見つかった結晶質ダイオジェナイトは今まで南極以外で見つかったものに比べ数が非常に多いが、この中のほとんどはその鉱物学的な特異性から二つの落下による隕石雨に属するものであると解釈されている。その二つともが非南極隕石では見られなかった特徴を持っている。

その一つ、Y74013タイプの隕石は他のダイオジェナイトは粗粒モノミクト角レキ岩であるのに、これは、特異な斜方輝石のグラノブラスティックな細粒結晶質の組織を示し、その中により大きい直径5 mmに達するクロム鉄鉱の自形結晶を含む。この組織と輝石の化学的ゾーニングなどの組成変化により、この隕石はショックをうけて一部分落けたものが再結晶したものと解釈されている (TAKEDA *et al.* 1981)。

Y75032タイプのダイオジェナイトは、ガラス質の暗色のマトリックス中に最高数 mmの白色ないし淡黄色のショックによる損傷を受けた輝石結晶の破片がある特異な組織を示す。この隕石のバルク化学組成はダイオジェナイトとユークライトではもっともマグネシウムに富むビンダ Binda の中間のものである。この輝石の組織はビンダなど Mg に富む集積岩的ユークライト中の Ca の低い転移ピジョン輝石に類似のものも含む。(TAKEDA and MORI 1985)。ダイオジェナイトは初生斜方輝石を含むものとして定義されており、転移ピジョン輝石の存在は分類上困難な問題を提起する。このタイプの隕石は平均化学組成および輝石組成についてダイオジェナイトとユークライトの間に今まであったギャップをうめるものであり、両者は成因上密接な関連があることを示した点で、大きな貢献をした。また、この種の隕石中に含まれる岩石片の輝石の $Mg/(Mg+Fe) \times 100$ と斜長石の An を系統化してみても、この天体のリソスフェア中での分化の道筋が解明できた点も重要である。特に、初期に沈積した輝石の多い層での An のみが増加する分化過程も明らかになった (第1図)。

ユークライトは、前記ダイオジェナイトよりはより Ca, Al および Fe に富む平均化学組成を持つ。構成鉱物はピジョン輝石と斜長石で、輝石の化学組成も Fe と Ca により富んでいる。斜長石は An は95から70位までの Ca に富むものが多い。輝石の化学組成と岩石の組織により、集積岩ユークライト (C)、普通ユークライト (O) および表層ユークライト (S) に分類されている。これらの隕石はホルダイト母天体の層状地殻モデル (TAKEDA 1979) に関する仮説を受け入れれば、その地殻の深い方から C, O, S の順番に存在していたことになる (第2図)。パサモンテなどの表層ユークライトは母天体表層上に流出した溶岩流と考えてよい。

今まで南極以外の地域で発見されていたユークライトには、モノミクト角レキ岩の組織を示す普通ユークライトが多く、パサモンテを除き、組織は火山岩的であるが、ピジョン輝石の組成は均質化し、(001)面にオーザイトを離溶している。これに対し南極産のものは、ポリミクトユークライトという南極で最初に発見され命名されたものが多い (TAKEDA *et al.* 1983; DELANEY *et al.* 1984)。これも南極隕石発見の大きな貢献の一つと言ってよい。これはホルダイトに似たポリミクト角レキ岩の組織を示すが、

ダイオジェナイトおよびカンラン石成分はほとんど含まない。前記 C, O, S 三種のユークライトの混合物であり、バルク組成はあまりユークライトと変わらない。

南極産ポリミクトユークライト中の結晶質の包有岩石片は溶岩的な S が多く、その母天体上での火山活動の多様性を知る上で、豊富なデータを提供しつつある。46億年前に生成して以後あまり変質を受けていない太陽系最古の溶岩も発見された。代表的なものは、Y 75011 中に見つかった大きな岩石片である。これらの溶岩岩石片は母天体表層への隕石衝突で掘り起こされ、表層レゴリス中にもたらされたものと思われる。モノミクト角レキ岩はクレータの底や側壁中のできるので、これらはインパクトメルトなどができる加熱熱変成の影響を受け、非南極産の主グループ普通ユークライト (O) ができたのだろう。南極にポリミクトユークライトが多い原因は南極隕石の特徴と関連して論じられている (TAKEDA *et al.* 1983)。

ホワルダイトは、ダイオジェナイトからユークライトへの一連の分化作用でできた岩石を含むポリミクト角レキ岩である。やまと隕石の中に初期に見つかった Y 7308 は、ホワルダイトのうちではもっとも Mg に富む地殻の成分をも含むものであり、ホワルダイト母天体の層状地殻モデル (TAKEDA 1979) を考える上で大きな貢献をし、IKEDA and TAKE-DA (1985) はこの母天体の結晶分化過程を復元した。

今まで非南極産 HED 隕石のみから復元された輝石の化学組成変化、分化過程には、幾つかのギャップがあり、それらが一連の結晶分化作用でできたというには難点があった。特に普通ユークライトの化学組成はシリカ-カンラン石-アノサイト三成分系のカンラン石-輝石-

Differentiation of Magma Ocean

第1図 分化した隕石 (HED) の母天体および月におけるマグマ大洋の分化過程推定のための鉱物組成変化図。輝石およびカンラン石の $Mg/(Mg+Fe)$ と斜長石の An のプロット。ダイオジェナイト (Diog) とユークライト (Euc) は SM より分枝し、月隕石 (Lunar Meteor.) は鉄に富む斜長岩 (ferro. Anorth.) と月の主系列 (Mg-suite) をカバーする。

第2図 ホワルダイト母天体の層状地殻モデルと隕石衝突の大小による種々の角レキ岩形成過程を示す。表層ユークライト (S) は集積岩ユークライト (C) の上に、普通ユークライト (O) はクレータの底周辺にある。ダイオジェナイト (D) は最も深い。

Differentiation of HED Magma Ocean

第3図 シリカ・カンラン石・斜長石の擬三成分液相図(LONGHI and PAN, 1986)を HED マグマ大洋の分化を説明するため $Mg/(Mg+Fe)$ が 0.70, 0.40 および 0.25 の面で書き換えたもの。図は酸素単位を用いてある。

こせば、やまと的なポリミクトユークライトになるし、もう少し深い所のダイオジェナイトを少しかすめるような衝突であれば、ALH 78006 および Y791960 のようなホルダイトとユークライトの中間的なものができる(第2図)。

このような衝突過程は 4 Vesta のような小惑星でも起こっているはずであり、月の雨の海のような大きな円形の海が出来ればダイオジェナイト的な成分が大量に底に残っていてよい。ハワイ大学のギャフィ博士は筆者のこのような見通しに乗ってくれて、4 Vesta の反射スペクトル中の輝石の吸収波長がその小惑星回転により変化することから、このようなダイオジェナイト的スポットがあることを提唱している。この予想が 4 Vesta の探査により確認される日が待ち遠しい。

V. 超塩基性岩的隕石ユレイライトの形成と母天体の衝突

ユレイライトは Ca に乏しい単斜輝石とカンラン石よりなる超塩基性岩的エコンドライトである。同じエコンドライトでも前記 HED 隕石と異なる点は、鉱物粒間のマトリックスにくまなく炭素を含むことである。この点では未分化な隕石である炭素質隕石に関連がある。この炭素はグラファイトでありその中に微粒のダイヤモンドおよび炭素の多形であるロンズデーライト、チャオアイトなどを含み、その起源をめ

斜長石の peritectic 点付近に濃集していたので、この組成の溶岩を母天体内部で生ずる部分溶融説(STOLPER, 1977)が有力であった。

南極産 HED 隕石の中には、そのギャップをうめる個別の隕石、あるいは隕石中の岩石片などが次々に発見され、結晶分化説に有利になった。特に最近、LONGHI と PAN (1986) のつくった上記の系の相図(第3図)では、ダイオジェナイトを晶出する組成では輝石-カンラン石共析線が輝石-斜長石を結ぶ線上にあり、IKEDA & TAKEDA (1985) の提唱するようなダイオジェナイト輝石の分別に都合がよく、また Fe に富むユークライトの領域では輝石フィールドが狭くなり、結晶分化の末路でも組成は peritectic 点以上には変化しないこととなり、結晶分化説に有利になった。

ホルダイト層状地殻モデルによれば、深い部分のダイオジェナイトを掘り起こし、混合するような大規模な隕石衝突が起きれば、ホルダイトができるし、浅い所のみを攪乱して角レキ岩ができれば、アランヒルズのポリミクトユークライトができる。丁度集積岩ユークライトまでのところを掘り起

ぐって、過去にノーベル賞受賞学者ユレーイなどの間で大論争があったことは有名な話である。

ユレーライト問題と呼ばれる疑問は未分化で炭素質コンドライトのような物質から、いかに高温起源の超塩基性岩をつくるかで、その時粒界に炭素を集め、その中に吸着されている惑星タイプの希ガスを逃さぬようにしないといけない。南極より多くの特異な種類が回収されたので今後の研究の発展が大いに期待される。南極ユレーライトは個数が多いというだけでなく一つ一つがそれぞれの独立の落下で、かつある特徴をもったユレーライトである。

もっとも強調されるべき点は、今まで知られていた組成や組織の範囲を大幅に越えるものが見つかった点である。Y74659と ALH 82106は記録破りに高い Mg に富む均質なピジョン輝石を産する。また今までよりはもっと Fe に富む ALH 78019と Y74130が見つかった。Y74130はユレーライトの定義にはないオーザイトおよび斜方輝石様の相と合せて3相を含む。化学組成の範囲だけでなくショックによる変形のもっとも少ないものが見つかった。

ユレーライトの起源について提出されている説は、地球の超塩基性岩に似ているのでその成因説もこの岩石に対するものと似ている。マントル物質のような部分熔融の残査であるという説と、マグマから結晶分化を起こしたものが沈積した集積岩（沈積岩）であるという説の二つがある。炭素の成因と関連して炭素質隕石の変成したものであるという説もある。変成の熱源としては隕石の衝突が一番考えやすい。酸素同位体位からしてもこの隕石は炭素質コンドライトと関連があるので都合がよい。

さてこのようなユレーライトの成因説の上で、やまとおよびそのほかの南極ユレーライトの特徴を述べてみよう。バルク化学組成の特徴を非南極ユレーライトと比較するため第4図のようなプロットをしてみた。この図からみて南極産ユレーライトの発見による鉱物組成範囲の拡大が理解していただけると思う。Y74659はもっとも Mg に富む大きなピジョン輝石の均質な結晶を含む。輝石の量はカンラン石よりも少し多く、Mg に富めば輝石が多いという地球のマグマの分化傾向と反対の傾向を示し、酸化還元過程が関与していることを示唆する。輝石の量が多くなれば、それだけ Ca が多くなるということは、還元されて

第4図 ユレーライトのバルク化学組成変化。123, 130, 659はやまと74隕石, 257はAllan Hills 77隕石, アルファベットは非南極隕石の化学組成 (Dodd, 1981)。分析は東大地質学教室原村寛氏による。

カンラン石が輝石になればそれに入り得るに十分な Ca がまわりにあったことになる。

輝石の組成変化には HED 隕石のような系統的变化はなく、ビジョン輝石とオーギャイトが共存するものが、もっとも Mg に富んだ ALH 82106 と、やまとの Y74130 のように Fe に富んだものに、産出しその中間ではない。この事実はユレイライトが単純なマグマの分化によりできたものでないことを物語る。

ユレイライト問題を解決する手掛りとして 南極隕石から得られたもう一つの データがある。輝石中の MnO/FeO 比は、月や HED 隕石母天体のマグマからの晶出のように正の相関関係がなく、むしろ弱い負の相関がある。炭素が炭素質コンドライト的なものから引き継がれたのであれば、かなりの物質は固体であり、鉱物の化学組成変化は金属鉄の関与した酸化還元反応によると考えざるを得ない。

このモデルのいい所は、ユレイライト中の鉱物の配向関係を説明する点にもある。今まで配向関係を説明するのにマグマからの沈積過程を考える人が多かったが、全部を溶かしてしまうと炭素を粒界にとどめるのに苦労する。母天体表面に隕石が衝突すればコンパクションの過程でも配向が起こる。これをショックによる熱を保ってマトリックスが一度一部溶ける位の高温にして結晶化させると、ユレイライトの組織はできるだろう。酸素分圧の平衡関係が保たれたまま、余分な Ca, Al, Fe などの元素を一部液体として逃してやると、MnO/FeO の負の相関関係および輝石やカンラン石中の $Mg/(Mg+Fe)$ の関係が説明できる。Ca の部分的な濃集がオーギャイトをつくったりビジョン輝石をつくったりするとも考えられる。

Ca, Al の集まったと思われるものに、ポリミクト角レキ岩に相当するユレイライトに Ca と Al に富むアンゴラ・ドス・レイス隕石のような斜長石と輝石よりなる岩石片が見つかった。

第5図 ユレイライトと高度に結晶化した LL コンドライト (Y74160) の微量元素の分布図。Si で規格した C1 に対する相対存在比を示す。黒丸はユレイライトの文献値、白丸は Y74160 で TAKEDE *et al.*, (1979) より計算。

Fe や S を除くにはどうすればよいか。Fe—Ni—S の混合物が存在すると、温度は1000°C 付近でもユーテクティックの液ができ、粒界にそってこれを除くことは容易に考えられる。実は Y74160 という LL コンドライトで粗粒の結晶質の岩石になっているものに、このような過程で Fe—Ni—S のユーテクティック液を失ったものがある。この液が取り去られる際に、親鉄元素や親銅元素、揮発性元素を微妙な割合で取り去る。

第5図にユレイライトと Y74160 の微量元素の存在度を図示したが、Rb, Cs, Ga などを除き、よい一致をみせる。これらの不一致の親石元素は Y74160 ではメルトポケットより成長した斜長石の中にあると考えられるが、ユレイライトでは Ca および Al に富む液として他に逃げたと考えればうまく説明がつく。この仮説が、今後のユレイライト研究の指針となれば幸いである。

VI. SNC 隕石と火星起源説

シャーゴットタイト (Shergottite) は南極隕石中に発見されるまで二つしか知られてない隕石種であった。この隕石が13億年という比較的若い結晶化年代をもつことがわかって以後特に注目を集めている隕石である。この他ナクタイトおよびシャシナイトもこれに関連した隕石として1つのグループとみなし (DODD 1981)、頭文字を組合せて SNC 隕石と呼んでいる。

シャーゴットタイトは玄武岩質の隕石で、小惑星のような小さな天体でこのような岩石をつくる火山が、13億年前までも活動的であるような熱源を持っていたとは考えられない。そこから火星のような10億年前まで活動的であったと考えられている惑星が、母天体と考えられるようになった。また SNC 隕石の微量元素の分布が、マントルをもつような大きな惑星のマントルの部分熔融でできたと思われる様相を示すことから、火星のような大きな惑星がそのソースと考えられている。

このような話題のある隕石が南極より2つも見つかったことは非常にタイムリーであった。アランヒルズ (ALH) 77005 は日米合同の隕石探査でまず見つかったが、これはシャーゴットタイトの特徴をもつとはいえ、鉱物組合せはもっとマフィックであった。シャーゴットタイトの特徴としてピジョン輝石、オージャイトとマスケリナイト化した Na に富む斜長石を含む。これに対し ALH77005 はそれまでのシャーゴットタイトより Mg に富む低カルシウム輝石とカンラン石をも含む。

2年後同じ南極だが、今度はエレファントモレーン (Elephant Moraine EET) で、この両者の関係を解くもう一つの隕石 (EET 79001) が米国の隕石探査隊により発見された。

EET 79001 のもっとも面白い点は、今まで知られていたシャーゴットタイトと ALH77005 の両方の特徴をもった結晶質の岩石が一面を接して一つの隕石の中に共存することである。これは火成岩的接触をしているということで、両者は非常に強い成因的な関連性を持っているということである (McSWEEN *et al.* 1979)。

EET 79001 中の希ガスの濃度と同位体比は驚くことに、火星探査機バイキングが測定した火星の大気のものによく似ていた (BOGARD *et al.* 1983)。隕石が衝突した時出来たガラスが火星の大気を閉じ込めたものと解釈される。この結果は SNC 隕石の火星起源説に大きな支持を与えたことになる。

火星起源説で一番問題になるのは、隕石の衝突で表面から掘り出された岩石が加速され、火星の重力圏を脱出することができるかどうかにある。月から来た隕石がないのに火星から隕石が来るわけがないというのが反論の根拠であった。この時タイムリーに南極で発見されたのが月から来た隕石である。

VII. 月 隕 石

最初の月から来た隕石 (Y791197) が第20次隊により1979年に発見され極地研に持ち帰えられてはいたものの、アメリカ隊が1981年に発見回収して、月から来たものであることがわかったのが1982年であった (WARREN *et al.* 1983)。この年もう2つの月隕石が日本隊により発見された。

これらの試料が月の石であるという決め手は、酸素同位体比と MnO/FeO 比であった。この岩石の組織は月高地のレゴリス角レキ岩のものであり、ガラス質のマトリックスの中に、斜長石をはじめとする月高地の岩石、鉱物の破片と、レゴリス中で隕石の衝突でできたガラス玉やアグリティネートという土の融結したものが散在している。

Y791197の研究結果は1985年3月、第10回南極隕石シンポジウムの特別セッションで発表された。

アポロ月探査計画で地球に持って帰った石は、雨の海周辺のカリウム、希土類元素、リンなどの多い岩石を含むので、これらの元素の存在度は高い。しかし月隕石の中には、これらの元素は非常に低い存在度でしかないことより、月隕石は雨の海から遠い月の縁の部分か、裏側より来たのではないかとされている。

月の原始地殻がマグマ大洋からできる時、種々の岩石ができるとされている。月隕石 Y791197の中に入っている岩石片の研究から推定される、その地域の月地殻形成の過程(第1図)は、斜長岩質の岩山がマグマ大洋にできたのが、アポロの地域よりもっと初期で、より Mg に富んでいたような解釈もできる。月高地とくに裏側の研究の重要性が浮び上ってくる。

最後に南極隕石研究に関する文部省、国立極地研究所の支援に感謝し本稿を終らせていただきます。

文 献

- AKAI, J. (1982): High resolution electron microscopic characterization of phyllosilicates and finding of a new type with 11A structure in Yamato-74662. *Mem. Natl. Inst. Polar Res.*, Spec. Issue **25**, 131-144.
- BOGARD, D. D. and Johnson, P. (1983): Martian gases in an Antarctic meteorite, *Science*, **221**, 651-654.
- CONSOLMAGNO, J., and DRAKE, M. J. (1977): Composition and evolution of the eucrite parent body: evidence from rare earth elements. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **41**, 1271-1382.
- DODD, R. T. (1981): Meteorites. Cambridge University Press, 368pp.
- DELANEY, J. S., M. PRINZ, and H. TAKEDA (1984): The polymict eucrites. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 15th.* in *J. Geophys. Res.* **89**, Suppl. C251-C288.
- DREWRY, D. J. (1986): Entrainment, transport and concentration of meteorites in polar ice sheets. In *Workshop on Antarctic Meteorites*, pp. 37-47. *LPI Tech. Rpt.* 86-01. Lunar and Planetary Inst., Houston.
- DUKE, M. B. and Silver, L. T. (1967): Petrology of eucrites, howardites and mesosiderites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **31**, 1636-1665.
- HARAMURA, H., KUSHIRO, I., and YANAI, K. (1983): Chemical compositions of Antarctic meteorites I. *Mem. Natl. Inst. Polar Res.* Spec. Issue **30**, 109-121.
- IKEDA, Y. (1983): Major element chemical compositions and chemical types of chondrules in unequilibrated E, O, and C chondrites from Antarctica. *Mem. Natl. Inst. Polar Res.*, Spec. Issue **30**, 122-145.
- IKEDA, Y. and TAKEDA, H. (1979): Petrology of the Yamato 74191 chondrite. *Mem. Natl. Inst. Polar Res.*, Spec. Issue **12**, 38-58.
- IKEDA, Y. and Takeda, H. (1985): A model for the origin of basaltic achondrites based on the Yamato-7308 howardite. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 15th.* in *J. Geophys. Res.*, **90**, C649-C663.
- IKEDA, Y., KIMURA, M., MORI, H. and TAKEDA, H. (1981): Chemical compositions of matrices of unequilibrated ordinary chondrites. *Mem. Natl. Inst. Polar Res.*, Spec. Issue **20**, 124-144.
- KIMURA, M. and YAGI, K. (1980): Crystallization of chondrules in ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **44**, 589-602.
- KITAMURA, M., YASUDA, M., WATANABE, S. and MORIMOTO, N. (1983): Cooling history of pyroxene chondrules in the Yamato-74191 chondrite (L3)-an electron microscopic study.

- Earch Planet. Sci. Lett.*, **63**, 189-201.
- KOJIMA, H., IKEDA, Y. and YANAI, K. (1984): The alteration of chondrules and matrices in new Antarctic carbonaceous chondrites. *Mem. Natl. Inst. Polar Res.*, Spec. Issue **35**, 184-199.
- LIPSCHUTZ, M. E. (1986): Trace elements in Antarctic meteorites: Weathering and genetic information. In *Workshop on Antarctic Meteorites*. pp. 68-70. *LPI Tech. Rpt.* 86-01. Lunar and Planetary Inst., Houston.
- LONGHI, J. and PAN, V. (1986): The architecture of the O1-P1-Otz pseudoternary liquidus diagram. *Lunar and Planetary Science XVII*, p. 492-493, LPI, Houston.
- MATSUI, T., HAMANO, Y. and HONDA, M. (1980): Porosity and compressional-wave velocity measurement of Antarctic meteorites, *Mem. Natnl. Inst. Polar Res.* Spec. Issue **17**, 268-275.
- MATSUNAMI, S. (1984): The chemical compositions and textures of matrices and chondrule rims of eight unequilibrated ordinary chondrites: a preliminary report. *Mem. Natl. Inst. Polar Res.*, Spec. Issue **35**, 126-148.
- MC SWEENEY, H. Y., Jr., TAYLOR, L. A. and STOLPER, E. M. (1979): Allan Hills 77005: A new meteorite type found in Antarctica. *Science*, **204**, 1201-1203.
- MIURA, Y. and MATSUMOTO, Y. (1982): Classification of several Yamato-75 chondrite (IV). *Mem. Natnl. Inst. Polar Res.* Spec. Issue **25**, 1-16.
- MIYAMOTO, M., KINOSHITA, M. and TAKANO, Y. (1983): Spectral reflectance (0.25-2.5 μ m) of olivine and pyroxene from an ordinary chondrite. *Mem. Natul. Inst. Polar Res.* Spec. Issue **30**, 367-377.
- MIYAMOTO, M., DUKE, M. B. and MCKAY, D. S. (1985): Chemical zoning and homogenization of Pasamonte-type pyroxene and their bearing on thermal metamorphism of a howardite parent body. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 15th, J. Geophys. Res.* **90**, Suppl. C629-C635.
- MIYAMOTO, M., TAKEDA, H. and ISHII, T. (1984): Mineralogical comparison and cooling history of lunar and chondritic vesicular melt breccias. *J. Geophys. Res.* **89**, No. B13, **11**, 581-588.
- NAGAHARA, H. (1981): Evidence for secondary origin of chondrules. *Nature* **292**, 135-136.
- NAGATA, T. (1978): A possible mechanism of concentration of meteorite within the meteorite ice field in Antarctica. *Mem. Natnl. Inst. of Polar Res.*, Spec. Issue, **8**, 70-92.
- NAGATA, T. and FUNAKI, M. (1982): Magnetic properties of tetrataenite-rich stony meteorites, *Mem. Natnl. Inst. of Polar Res.*, Spec. Issue **25**, 222-250.
- OHTA, T. and TAKEDA, H. (1982): H5 clast and unequilibrated host in Yamato 75028 chondrite breccia. In G. J. Taylor and L. L. Wilkening, *Workshop on lunar breccias and soils and their meteoritic analogs. LPI Tec. Rep.* 80-02: 102-104. Lunar and Planetary Inst., Houston.
- OKADA, A. (1975): Petrological studies of the Yamato meteorites. Part 1. Mineralogy of the Yamato Meteorites. *Mem. Natl. Inst. Polar Res.*, Spec. Issue **5**, 14-66.
- ONUMA, N., IKEDA, Y., MAYEDA, T. K., CLAYTON, R. N. and YANAI, K. (1983): Oxygen isotopic compositions of petrographically described inclusions from Antarctic unequilibrated ordinary chondrites. *Mem. Natl. Inst. Polar Res.*, Spec. Issue **30**, 306-314.
- SHIMA, M. and SHIMA, Masako (1973): Mineralogical and chemical composition of new Antarctic Meteorites. *Meteoritics*, **8**, 439-440.
- STOLPER, E. (1977): Experimental petrology of eucritic meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **41**, 587-611.
- TAKEDA, H. (1979): A layered crust model of a howardite parent body. *Icarus*, **40**, 455-470.
- TAKEDA, H. (1986): Parent sources of Antarctic meteorites as inferred from pairing of the specimens. In *Workshop on Antarctic Meteorites*. pp. 107-109, *LPI Tech. Rpt.* 86-01. Lunar and Planetary Inst., Houston.
- TAKEDA, H. and MORI, H. (1985): The diogenite-eucrite links and the crystallization history of a crust of their parent body. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 15th*, in *J. Geophys. Res.* **90**,

C636-C648.

- TAKEDA, H., MORI, H. and YANAI, K. (1981): Mineralogy of the Yamato diogenites as possible pieces of a single fall. *Mem. Natl. Inst. Polar Res.*, Spec. Issue No. 20, pp. 81-99.
- TAKEDA, H., HUSTON, T. J. and LIPSHCUTZ, M. E. (1984): On the chondrite-achondrite transition: mineralogy and chemistry of Yamato 74160 (LL7). *Earth Planet. Sci. Lett.*, 71, 329-339.
- TAKEDA, H., WOODEN, J. L., MORI, H., DELANEY, J. S., PRINZ, M. and NYQUIST, L. E. (1983): Comparison of Yamato and Victoria Land polymict eucrites: a view from mineralogical and isotopic studies. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 14th*, in *J. Geophys. Res.*, 88, B245-B256.
- TOMEOKA, K. and BUSECK, P. B. (1983): A new layered mineral from Mighei CM2 carbonaceous chondrite, *Nature*, 306, 354-356.
- TSUCHIYAMA, A., NAGAHARA, H. and KUSHIRO, I. (1980): Experimental reproduction of textures of chondrules. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 48, 155-165.
- WARREN, P. H., TAYLOR, G. J. and KEIL, K. (1983): Regolith breccia Allan Hills A81005; Evidence of lunar origin and petrography of pristine and nonpristine clasts. *Geophys. Res. Lett.* 10, 779-782.
- YANAI, K. and KOJIMA, H. (1986): Over 5600 Japanese collection of Antarctic meteorites: Recoveries, curation and distribution. In *Workshop on Antarctic Meteorites*, pp. 113-116, *LPI Tech. Rpt.* 86-01. Lunar and Planetary Inst., Houston.