

日 本 の 隕 石 学

永 原 裕 子*

Meteorite study in Japan

Hiroko NAGAHARA*

Abstract Meteorite studies in Japan made a great progress both quantitatively and qualitatively since about 1975 by the discovery of the Antarctic meteorites. Though meteorite study includes petrology, mineralogy, geochemistry, and geophysics, petrological and mineralogical studies are reviewed in this paper. Detailed microprobe works on the constituents of chondrites, such as chondrules, matrices, mineral and "lithic" fragments and inclusions showed that the chondrules are secondary products which were formed from the aggregate of the pre-existing minerals through incomplete or complete melting and that the matrix materials are extremely primitive which were condensed from the nebular gas. They have offered important informations for the estimation of chemical and physical conditions and processes which occurred in the early solar nebula. Mineralogical studies on achondrites succeeded to reconstruct the layered structure of their parental body (or bodies) with the radius of several hundred km. These studies have given important points of view for Japanese earth scientists, especially for geologists, to look at the earth as one of the planets of the solar system and to consider the origin and evolution of the earth.

は じ め に

わが国における隕石学は大量の南極隕石の発見によりスタートしたといって過言でない。天文学や天体物理学に関してはわが国は長い歴史と多くのすぐれた研究をうみだしてきたが、実際に固体物質を扱う分野の研究は諸外国とくらべて著しくたち遅れていた。現在でも決して十分な研究態勢が整っているというわけではないが、研究の質という面からは固体惑星科学の発展に寄与するすぐれた研究がなされるようになってきている。

わが国の隕石学の歴史をふりかえってみると、いくつかの先駆的な仕事が存在することに気づく。それは都城 (1962a, b, 1967) による隕石学の重要性の指摘、小沼 (1972) による“宇宙化学”と名づけられた本の出版、島正子・島誠とその共同研究者らによる分析である。これらの先駆的な仕事は南極隕石の発見に際し、その重要性を指摘しその後の発展の基

礎を築くものであった。

さらにみのがすことのできないのは、1969年の人類初の月面着陸に始まる月試料の研究である。これはマイクロプローブの発展と相まって、地球外物質の研究方法を飛躍的に発展させた。主としてアメリカにおいて月の研究にたずさわった日本の研究者たちは、その後のわが国における隕石研究を中心となって担ってきた。

南極で隕石が最初に発見されたのは1969年であるが、最初の南極隕石シンポジウムが開かれた1975年まで、ごく一部を除きほとんど研究は進んでいなかった。しかし、1977年の第2回シンポジウムからは飛躍的に研究が進んでおり、1976年頃を境に隕石に対するわが国の地球科学者の関心が高まったことがわかる。

1977年以降の研究は大きくわけて四つのグループに分けることができる。一つは池田らを中心としたコンドライトの研究、武田を中心としたエコンドライトの研究、本田、高岡、小嶋、増田、中村、兼岡らによる年代や同位体の研究、永田や松井を中心とした磁性や物理的特性の研究である。

* 東京大学理学部地質学教室, Geological Institute, Faculty of Science, University of Tokyo, 3-1, Hongo 7, Bunkyo-ku Tokyo, 113 Japan.

本論ではまず 1975 年以前の仕事をレビューしたあと、日本人研究者によるコンドライトとエコンドライトの研究を紹介する。それらの研究は質的にそれぞれの分野の先端にあるものであり、彼らの研究の紹介は隕石学の到達段階の紹介にほかならないからである。地球物理的な研究ではきわめてユニークな研究が多いがここでは割愛した。隕石学一般の進歩に関しては、MASON (1962), WASSON (1974), DODD (1981) らによるまとめがある。

1975 年以前の隕石学

1. 近代隕石学の誕生

都城 (1962a, b) は当時の論文をレビューして、隕石の成因と地球の層構造の成因を含めたモデルを紹介した。この中では隕石の分類、隕石の中でコンドライトが最も初生的なものであり重要であること、コンドライトが鉄の総量と酸化・還元程度により分類されることなど、基本的な事実をもとに、地球の起源物質や成層構造の成因としてコンドライトがいかに扱われているかが示されている。1962 年は MASON により “Meteorites” が出版された年であり、今日的な隕石学がスタートした時でもある。現在ではすでに古典的名著になりつつあるこの本は、1961 年東京大学に MASON が滞在していた時の講義をもとにしている。都城の論文の背景にも MASON の影響を想像することができる。その意味では、わが国における隕石学のスタートは MASON によるものであったともいえる。そして地球科学、とりわけ岩石学という目で隕石を眺めるということがその時始まったことは事実である。都城自身 1962 年から 1966 年にかけて数個の日本の隕石を研究しているが、ほとんど記載と分類にとどまっている。しかし、原村による日本の隕石の分析は現在でも貴重なデータである。その結果は島らの研究にうけつがれている。都城 (1967) はコンドライトをケイ酸塩鉱物の $\text{FeO}/(\text{MgO}+\text{FeO})$ 比で分類すると 0~0.01 (E コンドライト), 0.14~0.22 (H コンドライト), 0.22~0.32 (L および LL コンドライト) に大別でき、それは太陽系星雲内の温度勾配により形成されたと考えた。さらに、0.01~0.14 と 0.22 付近のものが欠如していることに注目し、そのギャップはそれぞれ地球と火星に対応するもので、太陽から遠

ざかる順に E コンドライト、地球、H コンドライト、火星、L コンドライト、C コンドライトが集積したものと論じた。この考えは発想のユニークさと、岩石学的視点に立って太陽系の成因を論じたものとして特筆されるべきものといえるし、日本の宇宙物理(特に太陽系)学に与えた影響は大きかった。しかし、隕石学のその後の発展は、隕石は小惑星から由来したという方向にむかいつつあり、都城のこのアイデアは十分議論されなかった。

1962 年から 1967 年にかけては世界的にも現在の隕石学の基礎の築かれた時期である。WOOD (1962a, b, 1963) はコンドライトを特徴づけているコンドリュールの成因を、太陽系ガスからの液滴の凝縮のメカニズムで説明しようとした。さらにコンドライトのマトリックス(コンドリュールや金属・硫化物など以外の部分)がコンドリュールにくらべ著しく FeO に富むことを見出し、これは太陽系ガスから低温で凝縮した塵であると考えた。WOOD のモデルはコンドリュールを初生的なものとし、コンドリュールとマトリックスの基本的な相違を論じた点で画期的であり、現在の隕石学はまさにこの延長上にあるといえる。その後の隕石学に大きな影響を与えた ANDERS の二成分モデル(コンドライトは、太陽系ガスからの高温成分と低温成分の混合物であるというモデル)もこの WOOD モデルをふまえたものといえる (ANDERS, 1964; LARIMER & ANDERS, 1967)。WOOD (1964, 1967) はさらに Ni-Fe 金属のゾーニングをマイクロプローブによって調べ、温度低下にともなう固体内拡散で説明されることを論じた。さらに、ゾーニングパターンを計算でシミュレートした結果とくらべ、鉄隕石と石鉄隕石の 500 °C 付近での冷却速度を求め、その結果をコンドライトにも応用し、冷却速度とそれら隕石のものの天体の大きさを推定した。この一連の研究は現在でも、隕石の岩石学的な研究から議論できる限界を示したものとしてきわめて重要であるばかりでなく、マイクロプローブを地球科学に導入し、ゾーニングの解析からその鉱物の温度履歴を推定するという、その後の岩石学の発展の端緒をひらいた点においても記念碑的なものである。これらの結果は WOOD (1968) によくまとめられている。

一方、化学組成によるコンドライトの分類で同一

グループに分類されるもののなかには、コンドリュール組織の明瞭なものとそうでないものが存在することを、WOOD (1962b) は同一起源物質からの熱変成作用の程度の差により説明しようとした。この考えは VAN SCHMUS & WOOD (1967) による岩石学タイプの概念の導入へとうけつがれた。この分類は、高温成分であるコンドリュールと低温成分であるマトリックスが集積し、そのままほとんど熱をこうむってないものを岩石学タイプ3、加熱を強くうけ全体が平衡化した(厳密にはケイ酸塩成分についてのみで金属成分は平衡ではない)ものをタイプ6とし、タイプ4と5はその中間をなすもので、全体の変化に伴い鉱物組成や組織も変化するものである。この分類は細部に問題はあるものの、コンドライトの特徴を端的に表わせることから、以後の分類に必ず使用されている。

エコンドライトに関しても、この時期に基本的性格が明らかにされている。MASON (1962) はエコンドライトをCaに富むグループとそうでないグループとに分け、それぞれをさらに鉱物組み合わせに基づき細分した。DUKE & SILVER (1967) は特にユークライトとホルワライトを角礫化の程度と鉱物組成から検討し、母天体におけるマグマの分化作用とその後のインパクトによる角礫化、再結晶の重要性を論じた。これはMASONの化学的な分類から進んで、組織や鉱物組成を隕石母天体に想像される諸現象と結びつけた点で、その後のエコンドライト研究の基礎となった。

一方、隕鉄についてもそれまでのNi量をもとにした大分類をおし進め、GaとGe量に基づく細分類がWASSON & KIMBERLIN (1967) によりなされた。この分類はさらにWASSON (1974) により完成されたが、形態による分類よりはるかに複雑な隕鉄のパラエティーを示した点で重要であった。この分類は当時急速に進みつつあった中性子放射化分析技術の発展によっている。

これらの仕事により、隕石の成因を含む分類とその後の研究方向というものが、1967年頃にほぼ確立していた。

1969年アポロ11号が月試料を地球にもちかえると、その後数年間は、アメリカやヨーロッパの大部分の研究者は月の研究に没頭し、隕石学の進歩はは

かばかしくなかった。しかし、理論の面ではこの時期に大きな進歩がある。それはLARIMERによる凝縮モデル(LARIMER, 1967; LARIMER & ANDERS, 1967, 1970)とそれをさらに発展させたGROSSMANの仕事(GROSSMAN, 1972; GROSSMAN & LARIMER, 1974)であった。それらの詳細は処々に紹介されているので省略するが、端的に言えば、太陽系のガスの冷却にともない順次結晶化する鉱物を熱力学的に示したことである。

2. Allende 隕石と隕石学

同じ1969年は、隕石学の発展の上できわめて重要な年であった。まずメキシコにAllendeと名づけられた隕石が落下したことである。Allende 隕石は炭素質(C)コンドライトであるが、中にCaやAlに富む鉱物を主とする包有物(Calcium-Aluminum rich Inclusion, 略してCAIとよばれる)が含まれていた(MARVIN *et al.*, 1970; CLARKE *et al.*, 1970)。隕石の主な鉱物といえばカンラン石や輝石であるから、CaやAlに富む鉱物(スピネル、ゲーレンナイト、ファッサイト、その他)から成る包有物自体異様なものであったが、それらが凝縮モデルで予想される最も高温で凝縮する鉱物であったため、多くの注目をあびた。CAIが高温凝縮物であるということについては疑問点もいろいろ指摘され、未だに結着がついていない。この隕石の重要性を決定的にしたのは、CAIから見つかった酸素同位体の異常(CLAYTON *et al.*, 1973)、低いSr初生値(GRAY *et al.*, 1973)、 ^{26}Al の存在の可能性(GRAY & COMPTON, 1974)であった。これらの同位体異常は太陽系内のあらゆる化学的分化作用で説明されないものであり、CAIに太陽系外で誕生した成分(固相か気相かは不明)が含まれていることを示している。この結果、Allende 隕石はすべての隕石の中で最も詳細に研究されることになり、現在でもなお盛んに熱い議論がたたかわされている隕石である。

3. 南極隕石の発見と隕石学

1969年のもう一つの重要なできごとは南極隕石の発見である。それらが隕石のなかでもとりわけ貴重なEコンドライトやCコンドライトを含んでいることは、SHIMA *et al.* (1973)、SHIMA (1974)によって発表された。しかし、それらの隕石が日本の地球科学者の関心をひくまでには、1974年の600個

という大量の発見までの数年が必要であった。

再び目を国内に転じると、1967年以降はわが国では隕石の研究はわずかに本田、島のグループによってなされていたのである。彼らは鉄隕石中の宇宙線により生じたCrの同位体の発見 (SHIMA & HONDA, 1966), 内的等時線法によるコンドライトのRb-Sr法の開発 (SHIMA & HONDA, 1967a), 普通 (O) コンドライトとエンスタタイト (E) コンドライト中でのアルカリ元素や希土類元素の分布のしかたのちがい (SHIMA & HONDA, 1967b) など質量分析計を用いた隕石研究の初期に、特に試料の分離法の開発等に大きな貢献をしている。

南極隕石とは別に、1972年小沼は“宇宙化学”を著わした。“コンドライトから見た原始太陽系”というサブタイトルをもつこの本はそれまでに知られていた隕石、とくにコンドライトに関するほとんどすべての事柄がレビューされている。前述したように1960年代末までに現代的な隕石学の基礎は確立し、月試料とAllende隕石により新しい固体惑星科学が誕生しつつあった時期に書かれたこの本は、国内の地球科学者に大きな影響を与えた。岩石、鉱物、同位体、微量元素などの情報により隕石が太陽系の起源や進化を論ずる上で決定的な役割を果たすことを、日本のほとんどの地球科学者はこの本により理解したといえる。

1975年以降の隕石学

1974年に大量の南極隕石が発見されて以来、岩石・鉱物学、REE・同位体・希ガスなどの地球化学、岩石物性や磁性などの地球物理といった広範な研究が日本の研究者によりすすめられてきている。

1. コンドライト

a. コンドリュール

コンドリュールはコンドライトを特徴づけるものであり、古くから隕石学上の重要な問題の一つとして議論されてきた。IKEDA & TAKEDA (1978) はL3コンドライト中のコンドリュールを調べ、化学組成 (主にSiO₂量) と組織により分類できることを示した。さらに、Mgに富むコンドリュールのカンラン石は著しいゾーニングを示すのに対し、Feに富むコンドリュールのカンラン石はかなり均質であることを見出した。この研究は、EPMAのブロードビームに

よい適当な大きさの鉱物集合体の総化学組成を測定すること、コンドリュールの組織が組成と関連があること、結晶作用を個々のコンドリュールの組成に応じて論ずることができること、結晶作用時やガラス失透時の冷却速度などの条件を推定できること、などを初めて示したもので、その後のコンドリュール研究におおきな影響をおよぼした。

KIMURA *et al.* (1978) はコンドリュールの化学組成とカンラン石や輝石の組成から結晶作用を論じ、組織のちがいを液の過冷却の程度の差により説明しようとした。さらにKIMURA & YAGI (1980) は液の過冷却は太陽系ガスから液滴が直接生じる時にもたらされた、というBLANDER & ABDEL-GAWAD (1969) のモデルを支持し、コンドリュールの凝縮による形成を議論した。

IKEDA (1980) はコンドリュールをAl, Ca, NaとKの比により三つのグループに分類し、それぞれのグループの結晶作用を調べ、ノルム鉱物と実際に晶出する鉱物が必ずしも一致しないことから、結晶作用には冷却速度とそれに応じた準安定相の晶出が大きな役割を果たしていることを強調した。

NAGAHARA (1981a, b) はコンドリュールの中にとけ残り結晶が存在することを見出し、コンドリュールは前駆鉱物の加熱・溶融により形成されたものであり、ガスから直接液が凝縮したのではないことを示した。とけ残り結晶はその後他の隕石からも発見され (RAMBALDI, 1981), もともと鉄に富むカンラン石や輝石がコンドリュール形成時に還元され、金属鉄を析出する可能性が指摘された (RAMBALDI & WASSON, 1982; RAMBALDI *et al.*, 1983). NAGAHARA (1983a) はさらに斑状の輝石中にポイキリティックにとり囲まれているカンラン石もとけ残り結晶の可能性が強く、それを含めるとほぼ半分コンドリュールはとけ残り結晶と含んでいることを示した。これらの多くのとけ残り結晶の存在はコンドリュールが前駆鉱物からの二次生成物であると同時に、形成時の加熱が不十分であったことを示している。コンドリュールが二次生成物であるということは化学組成の面からも論じられている (GOODING *et al.*, 1980; GOODING *et al.*, 1983; GROSSMAN & WASSON, 1982, 1983).

コンドリュールのある元素間に正の相関が存在す

ることが NAGAHARA (1981b), FUJIMAKI *et al.*, (1981), GROSSMAN & WASSON (1983) らにより指摘されている。そうした関係は、コンドリュールの前駆物質に特定の鉱物が任意の割合で含まれていたことを示している。

コンドリュールの形成条件を求める実験が TSUCHIYAMA *et al.* (1980a, b) によりおこなわれ、コンドリュール組織の多様性は化学組成と結晶作用時の冷却速度により説明されることが示された。さらにある種のコンドリュールの冷却速度が推定された。その後 TSUCHIYAMA & NAGAHARA (1981) はコンドリュール組織の決定要因として上述の条件のほかに、加熱の最高温度が重要であることを示した。このことはとけ残り結晶の存在と調和的であり、コンドリュール形成時の温度がそれらの液相温度付近 (1400~1600 °C 程度) であったことを示している。また、冷却速度は3ケタ以上の広い範囲にわたっていると議論された。KITAMURA *et al.* (1983) は輝石の分解に関する研究から冷却速度を求めたが、その結果は上記のものとほぼ一致している。また、TSUCHIYAMA *et al.* (1981) は、揮発性元素の蒸発の程度から加熱の程度に制約を与えたが、その結果も上記の結果に調和的であった。これらの結果は HEWINS *et al.* (1981), PLANNER & KEIL (1982) の求めたものとほぼ一致している。これらの結果は永原 (1982, 1984), HEWINS (1983) にまとめられている。また、コンドリュール組織を温度と冷却速度から整理したものが NAGAHARA (1983b) によりまとめられている。

炭素質コンドライトはコンドリュールのほかに CAI, アメーバー状カンラン石包有物 (AOI), 粗粒鉱物片などを含んでいる。IKEDA (1982) は一つの隕石中のそれら構成要素の化学組成、結晶作用を調べ、細粒 CAI はもとはファッサイト質輝石とスピネルから成り、それが低温でガスと反応し FeO やアルカリに富むようになったこと、AOI は細粒 CAI と密接な成因関係にあること、コンドリュールの一部もガスと反応していることなどを見出した。これは、コンドライトの構成成分が形成後に周囲のガスと反応し、組成が変化している可能性を指摘している点で重要である。

NAGAHARA & KUSHIRO (1982a) はある C コン

ドライト中のコンドリュールと包有物が形成温度のちがいで説明できることを示し、粗粒カンラン石片はコンドリュールの破片であることを示した。

IKEDA (1983a) は C コンドライト中のコンドリュールとマトリックスの変質について調べ、コンドリュール中の基質はクロライトに、マトリックス物質は蛇紋石に変化しており、それらの変質はコンドリュールやマトリックスが集積する以前におこっていることを示した。これは集積後か集積前かという C コンドライトの変質作用に関する議論に決着をつけたものといえる。

このほか NAGAHARA & KUSHIRO (1982b) は O コンドライト中に Ca と Al に富むコンドリュールを見出した。同様な物質はその後 BISCHOFF & KEIL (1983, 1984) により多量に見出され、O コンドライト中にも C コンドライトの CAI に関連した物質が含まれていることが明らかとなった。また、KIMURA (1983) はやはり O コンドライト中から AOI や、C コンドライトのマトリックス物質を見出し、O コンドライト形成の場と C コンドライト形成の場に関係があることを示した。さらにある種のコンドリュールはショックにより化学組成が変化しており、早期に形成されたコンドリュールは破碎され鉱物片となるなどの、相互に関連した複雑な形成過程がコンドライトの構成成分に見られることを示した。

b. マトリックス

コンドライトのマトリックス (コンドリュールや破片、金属、硫化物などの間をうめている数 μm 以下の物質) の成因については、太陽系ガスから低温で形成された物質 (LALIMER & ANDERS, 1970 ; MCSWEEN & RICHARDSON, 1977), コンドリュールの破片 (REID & FREDRIKSSON, 1967 ; ALLEN *et al.*, 1980) というまったく異なるモデルが出されていた。IKEDA (1980) は、マトリックスがコンドリュールにくらべ鉄に富むことから、異なる起源である可能性を指摘し、IKEDA *et al.* (1981) は O コンドライトのマトリックスが総化学組成の上で二つのグループにわけられることを示した。この分類では、一方は鉄に富むカンラン石と斜長石 (Ab) の混合物、他方は Na が乏しく相対的に Al の多いもので C コンドライトのマトリックスに類似している。しかし、この分類が一般的に成立つか、また、なぜ Al に富

むのかなど、不明な点も残されている。その理由は、マトリックス物質が細粒なためコンドライト形成後、あるいはその間に、化学組成が変化してしまい、もとの組成が反映されていない可能性があるためである。IKEDA (1982) はさらに C コンドライトのマトリックス物質の化学組成を検討し、太陽系星雲ガスからの低温凝縮物であるという結論を得ている。

FUJIMAKI *et al.* (1981) は O コンドライトのマトリックスの組成をコンドリュールのそれと比較し、FeO に富み比較的均質であることを示し、マトリックスはコンドリュールの破片ではないと述べている。

NAGAHARA (1984) は、形成後の加熱がとりわけ弱いと思われるコンドライトのマトリックスの構成鉱物を調べ、それらが全体として著しい非平衡状態にあること、鉱物の成長関係は太陽系ガスからの凝縮およびガスとの反応関係そのものを記録していることを見出した。また、マトリックス構成鉱物が E, O, C コンドライトの間で異なっていることから、それらの形成された場所がほぼ独立であったことを議論した。

MATSUNAMI (1984) はやはり変成の弱いコンドライトのマトリックスとコンドリュールの化学組成を比較し、それらは共通のある仮想的な成分と、別のそれぞれ異なる成分との混合物として表わされることを示した。そして、この仮想的な成分は太陽系ガスからの最終的な凝縮物である可能性を指摘した。

これらの研究を通じ、コンドライトのマトリックスは太陽ガスからの低温凝縮物であり、形成後の加熱をまぬがれた初生的な物質であることが明らかにされた。

c. その他の成分

コンドライトには組織あるいは化学組成の上から、ふつうのコンドリュールとは区別されるものが含まれている。それらは岩片 (lithic fragment, 又は clast), あるいは包有物 (inclusion) とよばれている。そのほか金属と硫化物も重要な成分である。それらは系統的に研究されていないが、個々の記載がなされているものは多い。

IKEDA & TAKEDA (1979) は O コンドライトの一つから K に富む岩片を見出し、カリ長石を含む前駆物質が天体上の火山活動により溶融、結晶化した火山岩片である可能性を示した。

KIMURA (1983) は O コンドライトの岩片を検討し、粗粒岩片はコンドライトが集積する以前に存在していた天体において溶融、分化、平衡化をうけた岩石片で、細粒岩片はある種のコンドリュールが二次的な加熱やショックによる加熱をうけたものだと議論している。

岩片の成因に関するこうしたモデルはコンドライト形成以前にすでに分化をし、火成活動をおこなった天体が存在していた可能性を示しており、今後より多くの記載に基づき議論されるべき問題と思われる。

大量にある南極隕石を統計的に処理することで有意義な議論をしようという試みがなされつつある。

HARAMURA *et al.* (1983) は多くの隕石を湿式分析し、隕石の種類やコンドライトのグループ間の化学組成の比較をおこなっている。その結果、O コンドライトは金属と FeS を除くと、すべてのコンドライトがほぼ等しい組成 (主要元素) をもつことが示された。また南極隕石では、金属鉄が酸化され、FeO が増加したり Fe_2O_3 が生じたりしていることが明らかとなった。したがって、金属あるいは FeO を含む成分の研究の際には、このことを注意しなくてはならない。

IKEDA (1983b) はすべてのグループのコンドライト中のコンドリュールの化学組成の検討をおこない、Na-K-Al の比によるコンドリュールのグループ分けにしたがうと、H, L, 角礫化してない LL コンドライト中のものはよく似たグループの割合をもち、C コンドライト中のものはそれらと異なり、E コンドライト中のものは SiO_2 に富むが、似た割合をもつことなどを示した。この結果は異なる化学グループ間のコンドリュールを系統的に比較したものとして重要である。

このほか、分類を目的とした研究が OKADA (1975), OKADA *et al.* (1975), YANAI *et al.* (1977), YAGI *et al.* (1977), YABUKI *et al.* (1977), KIMURA *et al.* (1977), NISHIDA *et al.* (1978), MATSUMOTO *et al.* (1978), KIMURA *et al.* (1979), MIYAMOTO *et al.* (1979), MATSUEDA *et al.* (1979), MATSUMOTO & HAYASHI (1980), MIURA & MATSUMOTO (1981, 1982), MASON & CLARKE (1982), MASON & YANAI (1983) などによりなされている。

2. エコンドライト

エコンドライトに関する研究は、ほとんど武田とその協同研究者によりすすめられてきた。その仕事は武田(1982)にまとめられている。

a. HED 隕石

ホワルダイト・ユークライト・ダイオジェナイトの3種のエコンドライトは互いに密接な成因関係にあり、これらは総称して HED 隕石とよばれている。TAKEDA *et al.* (1976) および武田(1976)はホワルダイト中の輝石は、大局的にはダイオジェナイトとユークライトに由来するものであり、混合以前に分化がおこっていたことを示した。TAKEDA (1979)は輝石の離溶・転移関係から、Mgに富む輝石はFeに富む輝石より徐冷したことを見出した。それをもとに、表層にユークライト、その下にダイオジェナイトの層構造をなしたホワルダイト母天体モデルが提案された。ユークライト層はさらに上から表層ユークライト、普通ユークライト、キウムレイトユークライト(これはさらに2層に細分される)に、ダイオジェナイト層は鉄に富む層と普通ダイオジェナイト層に細分され、それぞれ輝石の種類、離溶関係などにより特徴づけられた。そしてこれらの層構造は大規模な結晶分化作用によるのではなく、部分熔融により形成されたとする STOLPER (1977) のモデルを支持した。

MIYAMOTO & TAKEDA (1977) はピジョナイト中のオージャイトラメラの幅から冷却速度を求めるため、拡散に関するシュミレーションをおこなった。その結果、ユークライトの冷却速度は約 $1^{\circ}\text{C}/10^4\text{年}$ 、半径 1000km の天体なら、表面下 0.5~12km くらいのところに位置していたという解を得た。TAKEDA & MIYAMOTO *et al.* (1979) は月の高地のピジョナイトから転移した斜方輝石を同様に検討し、表面下数 km に位置していたことを指摘した。

南極隕石にはポリミクトユークライトが南極以外の隕石にくらべ大量に発見された (MIYAMOTO *et al.*, 1978; TAKEDA・MIYAMOTO & ISHII *et al.*, 1979)。それらが変化に富んでいることを TAKEDA & MIYAMOTO *et al.* (1980) は層状地殻の各要素の混合比の相違、すなわち層状の地殻をもつ天体がインパクトによりほりおこされる時、ほりおこした深さの差によりポリミクトユークライトやホワ

ルダイトの構成成分に差が生じたもの、として説明した。またポリミクトユークライトと月の玄武岩片をくらべ、ユークライトが多様な構成要素、特に徐冷された成分を含んでいることを指摘し、月とホワルダイト母天体は地殻表層の構造が異なっていた可能性を論じた。これらの研究結果は武田 (1980a, b) に端的にまとめられている。

その後電子顕微鏡の導入による鉱物の微細組織の研究は新たな情報を提供することになった。TAKEDA *et al.* (1981) は、月のハンレイ岩とユークライトの輝石の電顕による観察から、月の輝石のほうが強いショックを受けていることを示した。MORI & TAKEDA (1981) はダイオジェナイトが変形に伴うディスロケーションの回復あるいはアニーリングを受けた後、インパクトによる急冷をうけたというプロセスを描いた。これはさらに、輝石にみられるショックの質から、大量の南極のダイオジェナイトが、1回の隕石雨によりもたらされた、という話に発展している。TAKEDA *et al.* (1983) は岩石学的特徴から、南極のポリミクトユークライトは二つの異なる隕石雨であるが、それらは同一の天体の異なるマグマ異なる位置に由来すると論じた。

なお、ポリミクトユークライトとホワルダイトの定義に関し、ユークライト成分を 90% 以上、他の成分を 10% 以下含むものをユークライトとよぶという DELANEY や武田のグループ (DELANEY *et al.*, 1984) と、少しでもダイオジェナイト成分を含むものはホワルダイトとよぶ、という MASON ら (SCORE *et al.*, 1982; MASON, 1984) の間で議論がかわされている。

最近 IKEDA & TAKEDA (1984a, b) や TAKEDA *et al.* (1984) はホワルダイトのカンラン石、輝石が連続的な組成変化を示すことから、母天体におけるダイオジェナイト、ユークライトの生成は部分熔融ではなく結晶分化作用によると論じている。

b. ユレーライト

ユレーライトはエコンドライトの中で例外的にカンラン石を多く含み、また、ダイヤモンドやグラファイトを含む特殊なグループである。南極隕石から発見されたユークライトは従来知られていたもののどれより Fe に富むもの (TAKEDA & DUKE *et al.*, 1979) や、ピジョナイト-斜方輝石の組み合わせをもつもの (TAKEDA & MORI *et al.*, 1980) などユニ

クなものも多い。それらは高温で形成され、後に急冷をうけたという熱史をもつらしいが、成因はいまだによくわかっていない。

お わ り に

本論で紹介したコンドライトとエコンドライトに関する研究は、それぞれの分野における隕石学の進歩にほかならない。しかし、それらは隕石学全体からみれば一部にすぎない。隕石学はすべての構成要素を含む隕石の成因と相互関係を明らかにしなくてはならない。その意味では記載すらがまだ不十分であるということになる。

コンドライトに関しては構成要素の系統的な比較がもっとおこなわれなくてはならない。コンドリュールの比較が IKEDA (1983b) により試みられているが、これはケイ酸塩部分に関してのみであり、金属や硫化物、酸化物は除かれている。それらの成分は明らかにコンドリュール形成時に液から晶出したもので、コンドリュール組成の比較にはそれらの成分を含むべきである。そのような比較をおこなうためには変成をうけていないコンドライトを用いることが必要である。さらに、コンドライト中の不透明鉱物相の成因を明らかにしなくてはならない。それらの産状、形、組成などの間に何らかの関係があるのか否か、ケイ酸塩部分との関連はどうなっているのか、などの事実を調べたうえで不透明鉱物相の形成過程を考察する必要がある。その研究は金属相や硫化鉱物の形成された条件、すなわち、星雲ガスや天体の酸化・還元雰囲気や温度の変化を求めることにほかならない。岩片や包有物などがもっと多く、かつ系統的に調べられなくてはならない。それらはコンドライト形成以前に存在したであろうプロセスを知るうえで重要だからである。特にCコンドライトやEコンドライトの中のものの記載はまだきわめて不十分である。特に重要なのは、それぞれの構成要素の時間・空間的な成因関係である。たとえば、CコンドライトのCAIと他の多くのコンドリュールは同一のメカニズムにより形成されたのであろうか。CAIのある種のものは球形であり、コンドリュールと外見は似ている。ではどうして他のものは不規則な形なのか、あるいは球形のCAIはなぜコンドリュールより大きいのだろうか。さらにコンド

リュールの前駆物質はどこで形成されたのか。WOOD (1981, 1984a, b) はCAI, コンドリュール, マトリックスというすべての要素が星間物質起源であり、それらが太陽系星雲に突入した際のドラッグによる加熱でCAIやコンドリュールが形成され、加熱をまぬがれたものがマトリックス物質であるというモデルを提案している。このモデルは加熱メカニズムや同位体異常の説明としては魅力的である。しかし、少なくともマトリックス物質に関しては、低温凝縮物であるという最近の多くの研究結果とは一致しない。コンドリュールの前駆物質が太陽系起源の物質だとすると、個々のコンドリュールの酸素同位体の不均質 (GOODING *et al.*, 1983) はどのように説明されるのか。さらに、同位体的に不均質な酸素はどのような形で太陽系にもちこまれたのであろうか、ガスなのか固相なのか。

これらの問題のほか、コンドライトの化学グループ(E, H, L, LL, Cコンドライト)はいかにして作られたのかという問題がある。コンドリュールとマトリックスに関するかぎり、形成の場の雰囲気はそれぞれのコンドライトごとにほぼ独立であったようである。しかしCAIの中には、酸化・還元雰囲気が複数回著しく変化したと思われるものもあり、かなり複雑な成因があるらしい。またEコンドライトの物質はO, Cコンドライトの物質とは著しく異なる条件下で作られたらしい。ただし、構成要素は同じなので、メカニズムとしては同じことがおこったらしい。コンドライトの化学的分別のプロセスが構成要素とどのような関係にあるかを知することは、太陽系における固体物質の移動や形成条件を知る上で重要である。

次にコンドライトにみられる変成作用の性質を明らかにし、コンドライト母天体のイメージを作らなくてはならない。コンドライト母天体は中心に金属核のようなものをもっていたのか、中心までコンドライト的なものがあつたのか否かもわかっていない。したがって、半径10kmなのか500kmなのかさえ不明である。天体のサイズを推定するには数Kb以下を表わすことのできる圧力計を開発しなくてはならない。このことはコンドライトとエコンドライトや石鉄隕石あるいは鉄隕石との関連を考える上で重要である。これには硫化物が有効であるかもしれない(たとえば HUTCHISON & SCOTT (1983) による

spharerite barometer のように)。

そうした研究のほか、地球化学的な手法をとりいれた研究、あるいは岩石・鉱物学と地球化学の協同作業が急務であろう。これは Allende 隕石の CAI の研究が明らかにしたように、隕石の構成物質はみかけ上同一だったり平衡であったりしても、微量元素や同位体に関し不均質だったり非平衡であったりすることがしばしばあるからである。微量元素や同位体の情報は、分化作用や物質の混合に関し、有力な情報を与えることが隕石学の場合よくみられる。この協同研究という面では、日本はアメリカなどに決定的に立ち遅れている。コンドリュールやマトリックス物質など細かいオーダーでの総合的なデータが必要である。

エコンドライトに関しては、母天体のイメージをはっきりさせることが最重要な問題であろう。表層のイメージはかなりはっきり描かれるようになってきたが、その下はどうなっているのだろうか。コンドライト組成の物質を出発物質として仮定すれば、当然カンラン石や金属に富むものが残っているべきであるが、それにみあう隕石はほとんど発見されていない。その問題の解決のためには、石鉄隕石と鉄隕石、特にその中のケイ酸塩包有物の研究が重要である。それらは数は少ないが、天体のおそらくより内側にあったであろう物質だからである。それらのおかれていた温度、圧力の条件、冷却プロセスなどはこれまでの岩石・鉱物学の手法でもっと検討されるべきである。最近 YANAI *et al.* (1984) は、従来石鉄隕石として分類されていた南極隕石を初生的なエコンドライト (PRINZ *et al.*, 1983) として再検討している。それらはハルツバージャイトに金属成分を加えたようなものであり、組織のうえからも HED 隕石より深部にあったと考えられるものであり、今後の研究により、分化した天体の内部に関する情報を与えるものと思われる。

隕石の構成要素、相互の関係、母天体のイメージなどを明らかにした上で、それらの形成を太陽系の進化のなかに位置づけなければならない。太陽系の進化に関する理論的考察は、林らの京都グループにより詳細に検討されてきた(たとえば中沢, 1978)。しかし、隕石にみられる諸現象はかならずしもうまく説明されていない。たとえば、コンドリュールの形成はいつなのか、コンドライトの母天体はいつど

こに存在していたのか、KIMURA (1983) のいうようにコンドライト形成以前に分化し火成活動をおこなう天体がすでに存在していたとすると、コンドライト母天体は微惑星ではありえなくなってしまう。

南極隕石は隕石学の発展に重要な役割を果たしてきた。大量なものを統計処理することにより従来得られなかった情報が得られたものもある。あるいはそれまで発見されなかったものが発見されたために、新たな全体像を描くのに役立ったものもある。さらに火星や月から飛来したと思われる隕石も発見された (YANAI & KOJIMA, 1984)。

しかし何よりも重要であったと思われることは、日本の地質、岩石、鉱物研究者が地球の前駆物質として隕石をみるようになり、太陽系の一惑星としての地球を考えるようになったことではないだろうか。この意味で、最近の高圧下での隕石の溶融実験の試み (TAKAHASHI, 1983) や、コア中の水素の存在の可能性の指摘 (深井, 1984; SUZUKI *et al.*, 1984) など、地球科学の最大の問題へのダイレクトなアプローチの今後の発展が期待される。

文 献

- ALLEN, J. S., NOZETTE, S. and WILKENING, L. L., 1980 : A study of chondrule rims and chondrule irradiation records in unequilibrated ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **44**, 1161-1175.
- ANDERS, E., 1964 : Origin, age, and composition of meteorites. *Space Sci. Rev.*, **3**, 583-714.
- BISCHOFF, A. and KEIL, K., 1983 : Ca-Al-rich chondrules and inclusions in ordinary chondrites. *Nature*, **303**, 588-592.
- and ———, 1984 : Al-rich objects in ordinary chondrites: Related origin of carbonaceous and ordinary chondrites and their constituents. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **48**, 693-709.
- BLANDER, M. and ABDEL-GAWAD, M., 1969 : The origin of meteorites and the constrained equilibrium condensation theory. *Ibid*, **33**, 701-716.
- CLARKE, R. S. J., JAROSEWICH, E., MASON, B., NELEN, J., GOMEZ, M. and HYDE, J. R., 1970 : The Allende Mexico meteorite shower. *Smithsonian Contrib. Earth Sci.*, **5**, 1-53.
- CLAYTON, R. N., GROSSMAN, L. and MAYEDA, T. K., 1973 : A component of primitive nuclear composition in carbonaceous meteorites. *Science*, **182**, 485-487.

- DELANEY, S. D., TAKEDA, H., PRINZ, M., NEHRU, C. E. and HARLOW, G. E., 1984 : The nomenclature of polymict basaltic achondrites. *Meteoritics*, **18**, 103-111.
- DODD, R. T., 1981 : *Meteorites : a petrologic-chemical synthesis*. 368p., Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- DUKE, M. B. and SILVER, L. T., 1967 : Petrology of eucrites, howardites and mesosiderites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **31**, 1637-1665.
- FUJIMAKI, H., MATSU-URA, M., SUNAGAWA, I. and AOKI, K., 1981 : Chemical compositions of chondrules and matrices in the ALH-77015 chondrite (L3). *Mem. Natl. Inst. Polar Res. Spec. Issue*, no. 20, 161-174.
- 深井 有, 1984 : 地球創成期における鉄-水反応の役割. 科学, **54**, 36-42.
- GOODING, J. L., KEIL, K., FUKUOKA, I. and SCHMITT, R. A., 1980 : Elemental abundances in chondrules from unequilibrated chondrites : evidence for chondrule origin by melting of pre-existing materials. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **50**, 171-180.
- , MAYEDA, T. K., CLAYTON, R. N. and FUKUOKA, T., 1983 : Oxygen isotopic heterogeneities, their petrological correlations, and implications for melt origin of chondrules in unequilibrated ordinary chondrites. *Ibid.*, **65**, 209-224.
- GRAY, C. M. and COMPTON, W., 1974 : Excess Mg in the Allende meteorite. *Nature*, **251**, 495-497.
- , PAPANASTASSIOU, D. A. and WASSERBURG, G. J., 1973 : The identification of early condensates from the solar nebula. *Icarus*, **20**, 213-239.
- GROSSMAN, J. N. and WASSON, J. T., 1982 : Evidence for primitive nebular components in chondrules from the Chainpur chondrite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **46**, 1081-1089.
- and ———, 1983 : Refractory precursor components of Semarkona chondrules and the fractionation of refractory elements among chondrites. *Ibid.*, **47**, 759-771.
- GROSSMAN, L., 1972 : Condensation in the primitive solar nebula. *Ibid.*, **36**, 597-619.
- and LARIMER, J. W., 1974 : Early chemical history of the solar system. *Rev. Geophys. Space Sci.*, **12**, 71-101.
- HARAMURA, H., KUSHIRO, I. and YANAI, K., 1983 : Chemical compositions of Antarctic meteorites I. *Mem. Natl. Inst. Polar Res. Spec. Issue*, no. 30, 109-121.
- HEWINS, R. H., 1983 : Dynamic crystallization experiments as constraints on chondrule genesis. In KING, E. A. ed., *Chondrules and Their Origins*. 122-133, Lunar Planet. Inst., Houston.
- , KLEIN, C. K. and FASANO, V., 1981 : Conditions of formation of pyroxene excentroradial chondrules. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 12th*, 1123-1133.
- HUTCHISON, M. N. and SCOTT, S. D., 1983 : Experimental calibration of the sphalerite cosmobarometer. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **47**, 101-108.
- IKEDA, Y., 1980 : Petrology of Allan Hills-764 chondrite (LL3). *Mem. Natl. Inst. Polar Res. Spec. Issue*, no. 17, 50-82.
- , 1982 : Petrology of the ALH-77003 chondrite (C3). *Ibid.*, no. 25, 34-65.
- , 1983a : Alteration of chondrules and matrices in the four Antarctic carbonaceous chondrites ALH-77307(C3), Y-790123(C2), Y-75923(C2), and Y-74662(C2). *Ibid.*, no. 30, 93-108.
- , 1983b : Major element chemical compositions and chemical types of chondrules in unequilibrated E, O, and C chondrites from Antarctica. *Ibid.*, no. 30, 122-145.
- , KIMURA, M., MORI, H. and TAKEDA, H., 1981 : Chemical compositions of matrices of unequilibrated ordinary chondrites. *Ibid.*, no. 20, 124-144.
- and TAKEDA, H., 1978 : Petrology of the Yamato-74191 chondrite. *Ibid.*, no. 12, 38-58.
- and ———, 1979 : Petrology of the Yamato-74442 chondrite. *Ibid.*, no. 15, 123-139.
- and ———, 1984a : Petrology of the Yamato-7308 howardite. *Lunar Planet. Sci.*, **XV**, 391-392.
- and ———, 1984b : Petrology of the Y-7308 howardite (abst.). *Paper presented to the 9th symposium on Antarctic meteorites*, 34-35.
- KIMURA, M., 1983 : Chemical and petrologic relations of the constituent units in ALH-77249 meteorite (L3). *Mem. Natl. Inst. Polar Res. Spec. Issue*, no. 30, 146-167.
- , YAGI, K. and OBA, Y., 1977 : Petrological studies of Yamato-74 meteorites (2). *Ibid.*, no. 8, 156-169.
- , ——— and ONUMA, K., 1978 : Petrological studies on Yamato-74 meteorites. *Ibid.*, no. 12, 114-133.
- , ——— and ———, 1979 : Classification and petrography of some Yamato chondritic meteorites. *Ibid.*, no. 15, 41-53.
- and ———, 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. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **63**, 189-201.
- LARIMER, J. W., 1967 : Chemical fractionations in meteorites—I. Condensation of the elements. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **31**, 1215-1238.
- and ANDERS, E., 1967 : Chemical fractionations in meteorites—II. Abundance patterns and their interpretation. *Ibid.*, **31**, 1239-1270.
- and ———, 1970 : Chemical fractionations in meteorites—III. Major element fractionations in chondrites. *Ibid.*, **34**, 367-387.
- MARVIN, U. B., WOOD, J. A. and DICKEY, J. S., 1970 : Ca-Al rich phases in the Allende meteorite. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **7**, 346-350.
- MASON, B., 1962 : *Meteorites*. 274p., John Wiley & Sons, New York.
- , 1984 : The definition of a howardite. *Meteoritics*, **18**, 245.
- and CLARKE, R. S., 1982 : Characterization of the 1980-81 Victoria Land meteorite collection. *Mem. Natl. Inst. Polar Res. Spec. Issue*, no. 25, 17-33.
- and YANAI, K., 1983 : A review of the Yamato-74 meteorite collection. *Ibid.*, no. 30, 7-28.
- MATSUEDA, H., KANO, H. and YANAI, K., 1979 : A preliminary classification of Yamato chondrites with reference to metal-sulfide equilibria. *Ibid.*, no. 15, 24-40.
- MATSUMOTO, Y., HAYASHI, M., MIYAMOTO, M., TAKEDA, H. and YANAI, K., 1978 : A classification of the Yamato-75 chondrites based on chemical compositions of olivines and pyroxenes. *Ibid.*, no. 12, 72-81.
- and ———, 1980 : A classification of several Yamato-75 chondrites. *Ibid.*, no. 17, 21-31.
- MATSUNAMI, S., 1984 : Chemical compositions of matrices and chondrule-rims of unequilibrated ordinary chondrites (Abst.). *Paper presented to the 9th symposium on Antarctic meteorites*, 44-45.
- MCSWEEN, H. Y. and RICHARDSON, S. M., 1977 : The composition of carbonaceous chondrite matrix. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, **41**, 1145-1161.
- MIURA, Y. and MATSUMOTO, Y., 1981 : Classification of several Yamato-75 chondrites (III). *Mem. Natl. Inst. Polar Res. Spec. Issue*, no. 20, 53-68.
- and ———, 1982 : Classification of several Yamato-75 chondrites (IV). *Ibid.*, no. 25, 1-16.
- MIYAMOTO, M. and TAKEDA, H., 1977 : Evaluation of a crust model of eucrites from the width of exsolved pyroxene. *Geochem. Jour.*, **11**, 161-169.
- , ———, YANAI, K. and HARAMURA, H., 1978 : Mineralogical examination of the Allan Hills No. 5 meteorite. *Mem. Natl. Inst. Polar Res. Spec. Issue*, no. 12, 59-71.
- , ———, ——— and MATSUMOTO, Y., 1979 : A classification for some small chondrites in the Yamato-74 and -75 meteorites. *Ibid.*, no. 15, 140-147.
- 都城秋穂, 1962a : 隕石と地球 I. 科学, **32**, 229-235.
- , 1962b : 隕石と地球 II. 同上, **32**, 284-291.
- , 1967 : 惑星および隕石の起源. 同上, **37**, 520-527.
- MORI, H. and TAKEDA, H., 1981 : Thermal and deformational histories of diogenites as inferred from their micro textures of orthopyroxene. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **53**, 266-274.
- NAGAHARA, H., 1981a : Evidence for secondary origin of chondrules. *Nature*, **292**, 135-136.
- , 1981b : Petrology of chondrules in ALH-77015 (L3) chondrite. *Mem. Natl. Inst. Polar Res. Spec. Issue*, no. 20, 145-160.
- 永原裕子, 1982 : 隕石をつくる. 科学, **52**, 336-384.
- NAGAHARA, H., 1983a : Chondrules formed through incomplete melting of the pre-existing mineral clusters and the origin of chondrules. In KING, E. A., ed., *Chondrules and Their Origins*, 211-222, Lunar Planet. Inst., Houston.
- , 1983b : Texture of chondrules. *Mem. Natl. Inst. Polar Res. Spec. Issue*, no. 30, 61-83.
- , 1984 : Matrices of type 3 ordinary chondrites—primitive nebular records. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **48**, 2581-2595.
- 永原裕子, 1984 : 隕石をつくる. 長谷川博一(編), 現代太陽系科学, 72-79.
- NAGAHARA, H. and KUSHIRO, I., 1982a : Petrology of chondrules, inclusions and isolated olivine grains in ALH-77307 (CO3) chondrite. *Mem. Natl. Inst. Polar Res. Spec. Issue*, no. 25, 86-96.
- and ———, 1982b : Calcium-aluminum-rich chondrules in the unequilibrated ordinary chondrites. *Meteoritics*, **17**, 55-63.
- 中沢 清, 1978 : 太陽系の起源と進化. 岩波講座, 地球科学13, 小沼直樹・水谷 仁(編), 太陽系における地球, 21-88, 岩波書店, 東京.
- NISHIDA, N., ONUMA, N. and OHTSUKA, Y., 1978 : A classification of several Yamato-74 chondrites. *Mem. Natl. Inst. Polar Res. Spec. Issue*, no. 12, 144-160.
- OKADA, A., 1975 : Petrological studies of the Yamato meteorites. Part I. Mineralogy of the Yamato meteorites. *Ibid.*, no. 5, 14-66.
- , YAGI, K. and SHIMA, M., 1975 : Petrological studies of the Yamato-meteorites. Part 2.

- Petrology of the Yamato meteorites. *Ibid.*, no. 5, 67-82.
- 小沼直樹, 1972: 宇宙化学. 247p., 講談社, 東京.
- PLANNER, H. N. and KEIL, K., 1982: Evidence for the three-stage cooling history of olivine-porphyrific fluid droplet chondrules. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **46**, 317-330.
- PRINZ, M., NEHRU, C. E., DELANEY, J. S. and WEISBERG, M., 1983: Silicates in IAB and III CD irons, Winonaite, Lodranites and Brachina: a primitive and modified-primitive group. *Lunar Planet. Sci.*, **XIV**, 616-617.
- RAMBALDI, E. R., 1981: Relict grains in chondrules. *Nature*, **293**, 558-561.
- , RAJAN, R. S., WANG, D. and HOUSELY, R. M., 1983: Evidence for relict grains in chondrules of Qingzhen, an E3 type enstatite chondrite. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **66**, 11-24.
- and WASSON, J. T., 1982: Fine, nickel-poor Fe-Ni grains in the olivine of unequilibrated ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **46**, 929-939.
- REID, A. M. and FREDRIKSSON, K., 1967: Chondrules and chondrites. In ABELSON, P. H., ed., *Researches in geochemistry*, John Wiley & Sons, Inc., New York, London, Sydney.
- SHIMA, M., 1974: The chemical composition of the stone meteorites Yamato (a), (b), (c) and (d) and Numakai. *Meteoritics*, **9**, 123-135.
- and HONDA, M., 1966: Distribution of spallation produced chromium between alloys in iron meteorites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **1**, 65-74.
- and ———, 1967a: Determination of rubidium-strontium age of chondrites using their separated components. *Ibid.*, **2**, 337-343.
- and ———, 1967b: Distribution of alkali, alkaline earth and rare earth elements in component minerals of chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **31**, 1995-2006.
- , ——— and HINTENBERGER, H., 1973: Chemical composition and rare gas content of four new detected Antarctic meteorites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **19**, 246-249.
- SCORE, R., KING, T. V. V., SCHWARTZ, C. M., REID, A. M. and MASON, B., 1982: Descriptions of stony meteorites. *Smithsonian Contrib. Earth Sci.*, **24**, 19-48.
- STOLPER, E., 1977: Experimental petrology of eucritic meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **41**, 587-611.
- SUZUKI, T., AKIMOTO, S. and FUKAI, Y., 1984: Iron hydride and origin of the earth: can E-chondrite make the earth? (abst.). *Paper presented to the 9th symposium on Antarctic meteorites*, 64-65.
- TAKAHASHI, E., 1983: Melting of a Yamato L3 chondrite (Y-74191) up to 30kbar. *Mem. Natl. Inst. Polar Res. Spec. Issue*, no. 30, 168-180.
- 武田 弘, 1976: 惑星探査手法としての造岩鉱物学. 岩鉱特別号, no. 1, 185-197.
- TAKEDA, H., 1979: A layered-crust model of a howardite parent body. *Icarus*, **40**, 455-470.
- 武田 弘, 1980a: 惑星の表層とその構成物質. 科学, **50**, 779-787.
- , 1980b: 輝石の鉱物学と隕石母天体のリソスフェア. 岩鉱特別号, no. 2, 303-317.
- , 1982: 惑星の物質科学. 150p., 東大出版会, 東京.
- TAKEDA, H., MIZAMOTO, M., ISHII, T. and REID, A. M., 1976: Characterization of crust formation on a parent body of achondrites and the moon by pyroxene crystallography and chemistry. *Proc. Lunar Sci. Conf.*, **7th**, 3535-3548.
- , MIYAMOTO, M. and ISHII, T., 1979: Pyroxenes in early crustal cumulates found in achondrites and lunar highland rocks. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.*, **10th**, 1095-1107.
- , ———, ———, YANAI, K. and MATSUMOTO, Y., 1979: Mineralogical examination of the Yamato-75 achondrites and their layered crust model. *Mem. Natl. Inst. Polar Res. Spec. Issue*, no. 12, 82-108.
- , DUKE, M. B., ISHII, T., HARAMURA, H. and YANAI, K., 1979: Some unique meteorites found in Antarctica and their relation to asteroids. *Ibid.*, no. 15, 54-76.
- , MIYAMOTO, M. and ISHII, T., 1980: Comparison of basaltic clasts in lunar and eucritic polymict breccias. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.*, **11th**, 135-147.
- , MORI, H., YANAI, K. and SHIRAISHI, K., 1980: Mineralogical examination of the Allan Hills achondrites and their bearing on the parent bodies. *Mem. Natl. Inst. Polar Res. Spec. Issue*, no. 17, 119-144.
- , ———, ISHII, T. and MIYAMOTO, M., 1981: Thermal and impact histories of pyroxenes in lunar eucrite-like gabbros and eucrites. *Proc. Lunar Planet. Sci.*, **12B**, 1297-1313.
- , ———, DELANEY, J. S., PRINZ, M., HARLOW, G. E. and ISHII, T., 1983: Mineralogical comparison of Antarctic and non-Antarctic HED (howardites-eucrites-diogenites) achondrites. *Mem. Natl. Inst. Polar Res. Spec. Issue*, no. 31, 181-205.

- , ———, IKEDA, Y. and YANAI, K., 1984 : Yamato-79 howardites and their primitive crust (abst.). *Paper presented to the 9th symposium on Antarctic meteorites*, 18-19.
- TSUCHIYAMA, A., NAGAHARA, H. and KUSHIRO, I., 1980a: Experimental reproduction of textures of chondrules. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **48**, 155-165.
- , ——— and ———, 1980b : Investigation on experimentally produced chondrules. *Mem. Natl. Inst. Polar Res. Spec. Issue*, no. 17, 83-94.
- and ———, 1981 : Effects of precooling thermal history and cooling rate on the texture of chondrules. *Ibid.*, no. 20, 175-192.
- , ——— and KUSHIRO, I., 1981 : Volatilization of sodium from silicate melt spheres and its application to the formation of chondrules. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **45**, 1357-1367.
- VAN SCHMUS, W. R. and WOOD, J. A., 1967 : A chemical-petrological classification for the chondritic meteorites. *Ibid.*, **31**, 747-765.
- WASSON, J. T., 1974 : *Meteorites : Classification and properties*. 316p., Springer-Verlag, New York.
- and KIMBERLINE, J., 1967 : The chemical classification of iron meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **31**, 2065-2093.
- WOOD, J. A., 1962a : Chondrules and the origin of the terrestrial planets. *Nature*, **194**, 127-130.
- , 1962b : Metamorphism in chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **26**, 739-749.
- , 1963 : Origin of chondrules and chondrites. *Icarus*, **2**, 152-180.
- , 1964 : The cooling rates and parent planets of several iron meteorites. *Ibid.*, **3**, 429-459.
- , 1967 : Chondrites : their metallic minerals, thermal histories, and parent bodies. *Ibid.*, **6**, 1-49.
- , 1968 : *Meteorites and the origin of planets*. 117p., McGraw-Hill Book company, New York.
- , 1981 : The interstellar dust as a precursor of Ca, Al-rich inclusions in carbonaceous chondrites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **56**, 32-44.
- , 1984a : Formation of chondrules by drug heating in dust-enriched environments. *Lunar Planet. Sci.*, **XV**, 933-934.
- , 1984b : Meteoritic constraints on process in the solar nebula. In GEHRELS, T. ed., *Protostars and planets*, Univ. Arizona Press.
- YABUKI, H., YAGI, K. and ONUMA, K., 1977 : Petrological studies of Yamato-74 meteorites (1). *Mem. Natl. Inst. Polar Res. Spec. Issue*, no. 8, 142-155.
- YGI, K., LOVERING, J. F., SHIMA, M. and OKADA, A., 1977 : Mineralogical and petrological studies of the Yamato meteorites, Yamato-7301(j), -7305(k), -7308(l) and -7303(m) from Antarctica. *Ibid.*, no. 8, 121-141.
- YANAI, K., KOJIMA, H., PRINZ, M., NEHRU, C. E., WEISBERG, M. K. and DELANEY, J. S., 1984 : Petrological studies of three primitive achondrites from the Yamato meteorites collection, Antarctica (abst.). *Paper presented to the 9th symposium on Antarctic meteorites*, 24-28.
- and ———, 1984 : Lunar meteorites in Japanese collection of the Yamato meteorites (abst.). *Ibid.*, 42-43.
- , MIYAMOTO, M. and TAKEDA, H., 1977 : A classification for the Yamato-74 chondrites based on the chemical compositions of their olivines and pyroxenes. *Mem. Natl. Inst. Polar Res. Spec. Issue*, no. 8, 110-120.