

# Primitive Achondrites

三澤 啓司<sup>1</sup>

## 1. はじまりはいつも突然？

地球科学関連合同学会の共通セッションの申し込み締切がせまった頃、地球化学会の年会会場で都立大学の海老原さんから「惑星学会と地球化学会と合同して、隕石の物質科学に重点をおいて共通セッションをやりましょう」という提案を受けた。惑星学会運営委員および企画部で検討していただいた結果、「隕石だけでは漠然としすぎているのもっと対象が絞れないか」という意見が出たので、「それでは "Primitive Achondrites" でいきましょう」ということで話がまとまった。このセッションでは、惑星物質のごく初期の分化過程を議論するために、後に述べる "いわゆる" primitive achondrites に限らず、オーブライトとユレイライトも含めることにした。しかしながら特定の隕石に対象を絞りすぎたため、これらを研究対象としている人にはよいが、一般の人には偏りすぎたテーマであるという意見も聞かれた。学会誌、ニューズレターなどで共通セッションへの参加を募り、それでもプログラム締切までになんとか 11 論文の口頭発表を組むことが出来た。セッションは合同学会最終日の 3 月 22 日午後で開催され、座長は海老原さん(コンピーナー)と茨城大学の池田さん(コンピーナー)にお願いした(コンピーナー三澤が 3 月 19 日まで月惑星科学会議に出席したため)。

本稿では少し欲張って合同学会共通セッション "Primitive Achondrites" での討論とともに、その前の週の 3 月 15 日から 3 月 19 日に Houston で開

催された第 24 回月惑星科学会議 (LPSC) の関連したセッションでの議論および 5 月 31 日から 6 月 2 日に極地研究所で開催された第 18 回南極隕石シンポジウムでの話題もあわせて紹介する。

## 2. いま何故 primitive achondrites なのか

コンドライト隕石は、全岩の化学組成そしてカンラン石や Ca に乏しい輝石の Fe/(Fe + Mg) 比に基づき、エンスタタイト (E) コンドライト、普通 (H, L, LL) コンドライト、炭素質 (C) コンドライトの 3 クラスに分類され、さらに EH, EL, H, L, LL, CI, CM, CO, CV, CR, CK の 11 グループに細分されている。隕石の酸素同位体分析から、原始太陽系星雲は酸素同位体に関して不均質であったことが示され [1]、酸素同位体組成に基づいて隕石(母天体)を分類することが出来るようになった [2]。これはコンドライトに限らず、エコンドライト、石鉄隕石、隕鉄中の珪酸塩包有物にも適用され、分類のうえで重要なそして決定的な要素のひとつになっている。図 1 に示すように、3 isotope plot では、酸素同位体について閉じた系内での質量に依存した分別は、傾き 1/2 の直線であらわされる。また C コンドライト中の無水鉱物は、元素合成の名残の  $^{16}\text{O}$  に富む端成分との傾き 1 の混合線上にプロットされる。隕石種を分類する指標として、地球分別線 TF (terrestrial fractionation line) からの縦軸方向の deviation  $\Delta^{17}\text{O} = \delta^{17}\text{O} - (0.52 \times \delta^{18}\text{O})$  が用いられている。

<sup>1</sup> 国立極地研究所隕石資料部門

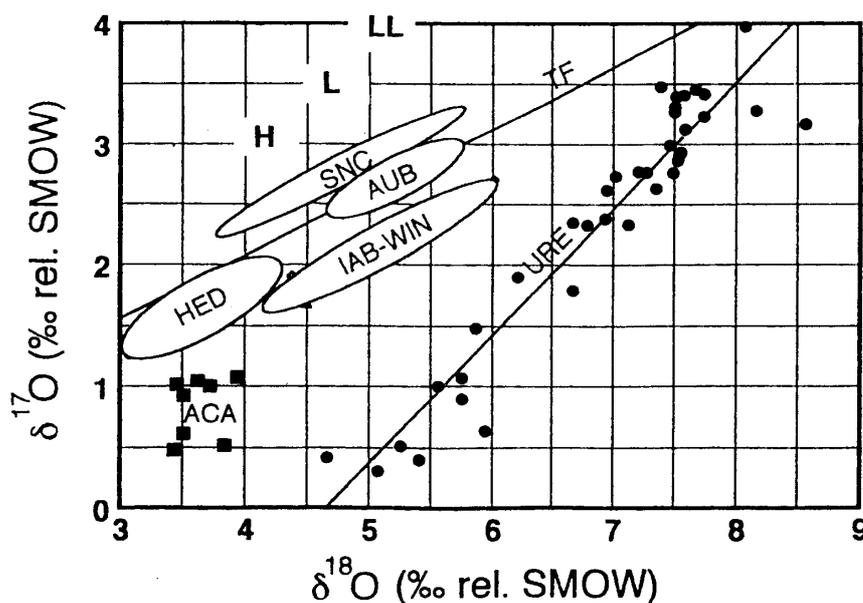


図1 Oxygen 3 Isotope Diagram. データは Clayton & Mayeda [21] などに基づいている。TF = terrestrial fractionation; SNC = shergottites, nakhlites, Chassigny; AUB = aubrites; HED = howardites, eucrites, diogenites; IAB-WIN = IAB irons and winonaites; ACA = acapulcoites and lodranites; URE = ureilites.

隕石の記載，分類がすすむにつれて，なかには上記の11グループにはおさまらないものがみつかってきた。Acapulco, Lodran とそれに類似した隕石や，これまでに他の隕石と化学組成および岩石学的な特徴が異なるということから，*unique meteorites* という範疇に入れられていたいくつかの隕石もそのなかに含まれる。それらの隕石は，化学組成はコンドライト的であるが結晶質の組織はむしろエコンドライト的で，カンラン石や輝石の組成がHコンドライトのそれよりも鉄に乏しく，Eコンドライトのそれよりも鉄に富むという特徴を持っていた(図2)。またこれらの隕石は，普通コンドライトともエコンドライトとも異なった酸素同位体組成を示した。その代表例として，Acapulco, Yamato (Y)-791493, Y-74025, Winona の薄片写真を図3に示す。これらの隕石は，未分化のコンドライトと分化したエコンドライト，石鉄隕石，隕鉄等の形成過程を知るうえで，また惑星(特に地球)の初期進化を探るうえでも重要である

と考えられていた。1970年代後半からいくつかのグループによって研究されてきたが，その経緯と隕石の鉱物学的特徴については，前号の武田と廣井の論文[3]に詳しく述べられているので参照していただきたい。

隕石母天体の集積した場所や

時間の違いが，個々の隕石の化学組成，同位体組成，酸化還元環境の違いに反映されていると考えられることから，このような新しい隕石種の発見は重要な意義を持つ。また最近の新しい種類の隕石の議論は，南極大陸やサハラ砂漠から多量の隕石が発見され，分類，記載が進んできたことが契機となっている。

### 3. 始原的なエコンドライト：コンドライトとエコンドライトを繋ぐ架け橋

#### 3.1 "いわゆる" primitive achondrites

岩石学的な組織はエコンドライト的であるが化学組成はコンドライト的な隕石を *primitive achondrites* と呼び始めたのは Prinz である[4]。しかし何をもって *primitive* というかという基準は曖昧であるうえに，この言葉は特定の隕石種を指すのではなく，いままでの分類に当てはまらない特異な隕石(アカプルコアイト，ロドラナイト，プラチナイト，フォルステライトコンドライト，IAB

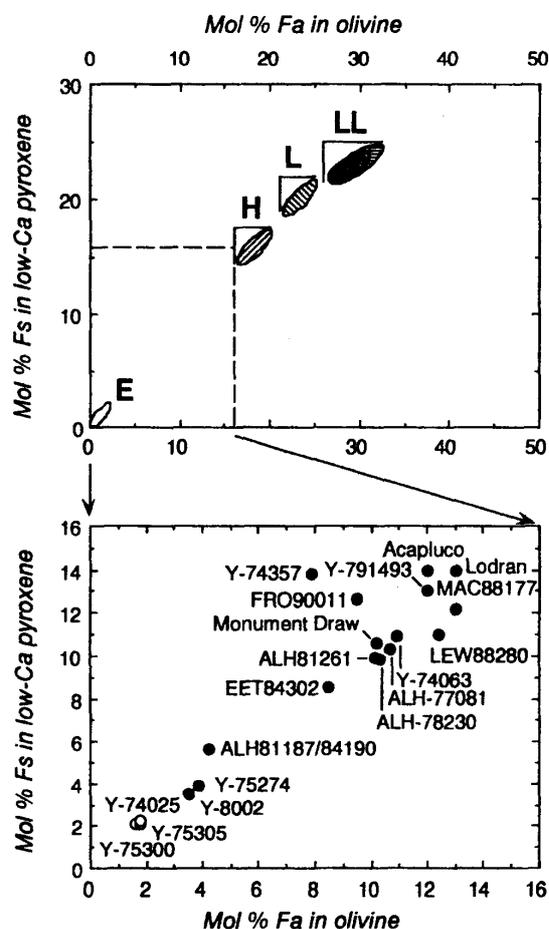


図2 Primitive achondrites 中のカンラン石と Ca に乏しい輝石の fayalite ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ) および ferrosilite ( $\text{FeSiO}_3$ ) contents (mol%). 白丸はウイノナイト、黒丸はロドラナイト-アカプルコアイト。データは本文中に引用した論文によっている。

と III CD 隕鉄中の珪酸塩包有物、そしてウイノナイトなどと呼ばれてきたもの) をまとめて指しているようなので、ここではロドラナイト-アカプルコアイトおよびウイノナイト-IAB 隕鉄中の珪酸塩包有物のみを "いわゆる" primitive achondrites と呼ぶことにする。たとえば HED (ホルダイト-ユークライト-ダイオジュナイト) もメソダイトもアングライトも、固化年代が ~45 億年前であり、隕石が固化したときに消滅核種  $^{146}\text{Sm}$  が存在していた痕跡 ( $^{142}\text{Nd}$  の過剰) が認められて

いるという同位体年代学の見地からすれば、文字通り始原的なエコンドライトである。しかしこれらのエコンドライトは、岩石学的な組織も化学組成もコンドライト隕石から著しく分化しており、大規模な溶融過程を経て形成されたものと考えられている。

合同学会の共通セッションにおいて南極産の primitive achondrites について矢内と小島が概説したように、極地研究所のコレクションのなかにもこのような隕石がいくつも報告されていた。そのなかでも酸素同位体組成が H コンドライトと一致した Y-74359 と Y-74360 は、先駆物質との関係がはっきりした例である。これらの隕石が H コンドライト母天体上での部分溶融物の残渣に相当し、酸素同位体組成が H コンドライトと同じ IIE 隕鉄中の珪酸塩包有物は、化学組成からその時に生じた部分溶融液と考えられると池田は主張していた。したがってこのふたつの隕石は、H-type achondrites と呼ぶことが出来るということである。

図1に示すように、ロドラナイト-アカプルコアイトとウイノナイト-IAB 隕鉄中の珪酸塩包有物は、酸素同位体組成から明確に分けることが出来るので、これらの隕石の母天体は別のものである(当初公表されていたロドラナイト-アカプルコアイトの酸素同位体組成は、地球上で酸化した鉱物の影響を受けていたことから信頼性の高いものとはいえなかった。その後シカゴ大学ではすべてのサンプルについて酸で洗うなどの処理をして、再測定をおこなったという)。永原は、岩石学的な特徴と酸素同位体組成を基にして、ロドラナイト-アカプルコアイトの成因関係について考察した。ロドラナイト-アカプルコアイトは、酸素の 3 isotope plot において  $\delta^{17}\text{O} = 0.5 - 1.0$ ,  $\delta^{18}\text{O} = 3.5 - 4.0$  付近に分布する。最近のより詳細な酸素同位

体分析から、これらは更に $\Delta^{17}\text{O}$  値の高いグループと $\Delta^{17}\text{O}$  値の低いグループのふたつに分けられ、それは比較的酸化的环境下で形成したグループ (F086-87) と、還元的な环境下で形成したグループ (F092-96) に対応している。したがってロドラナイト-アカプルコアイトの母天体はひとつではないらしい。McCoy *et al.* [5] は、ロドラナイトとアカプルコアイトの成因的な違いを部分熔融の程度の違いで説明しようとしていた。アカプルコアイトは、比較的細粒で硫化鉄のベインが認められることを根拠に、再結晶作用が主で部分熔融は僅かしかしていないものとしている。これに対してロドラナイトは、比較的粗粒で硫化鉄のベインが認められないことから、アカプルコアイトに比べ部分熔融の程度が大きいとしている。集積後の母天体の加熱については、アカプルコアイトでは Fe,Ni metal - FeS eutectic ( $\sim 980^\circ\text{C}$ ) まで、ロドラナイトではそれよりもやや高い温度 ( $\sim 1050^\circ\text{C}$ ) まで加熱されたと考えられている [5]。熱源は母天体どうしの衝突による熔融ではなく、むしろ比較的小さな母天体上でのマグマのながれが、隕石の組織をつくるのに重要な役割をはたしているとして永原は主張している。由上らは Allan Hills (ALH)81187 と ALH81261 の鉱物学的な比較に基づき、ALH81187 はもともと ALH81261 と同じようなアカプルコアイトであったが、ショックによる加熱により部分的に還元されてカンラン石と輝石に鉄が乏しくなると結論した。

微量元素組成に基づく成因関係は、馬場ら、福岡、森川と中村によって示された。特に希土類元素パターンは、部分熔融の程度と液の除去および付加の割合を見積もるうえで重要となっているようである。部分熔融により生じた液が系から取り除かれていく際には、固相-液相間の分配係数の大きな Rb が著しい欠乏となって表れることがモ

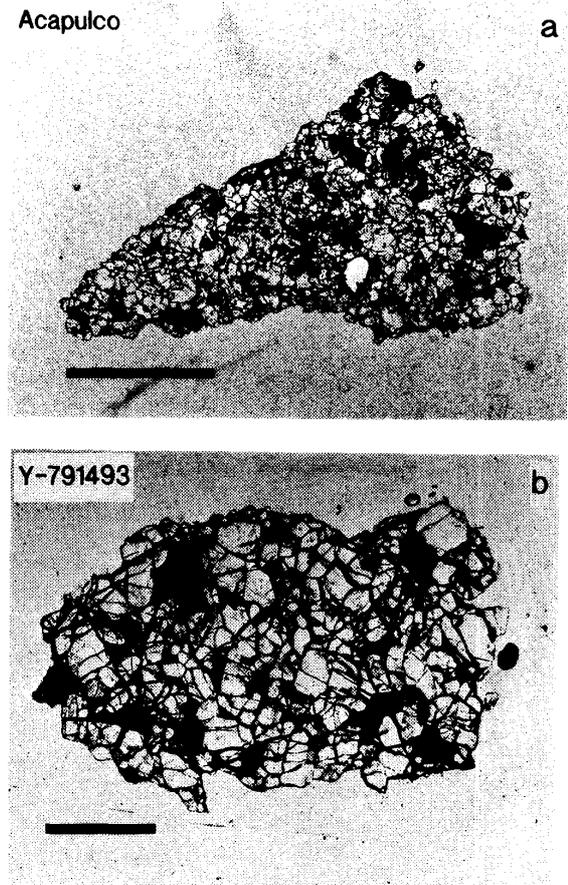


図3 (a) Acapulco, (b) Y-791493 (lodranite), (c) Yamato-74025 (winonaite), (d) Winona の薄片顕微鏡写真。スケールバーは、いずれも 2 mm.

デル計算によって示され、ロドラナイト-アカプルコアイトの存在度パターンの特徴とよく合うことが示された。ロドラナイト-アカプルコアイトとウィノナイトの希土類元素存在度パターンの違いは、定性的には部分熔融液 (斜長石成分 + 金属相) の除去の割合で説明されるが、細部まで考慮すると単純なモデルにはあてはまらないところもあるという。LPSC では、Davis *et al.* [6] が、イオンマイクロプローブを用いて鉱物ごとの微量元素存在度を求め、 $1.5 \times \text{CI-chondrite}$  を仮定して、固相-液相間の分配係数から推定される構成鉱物相の微量元素存在度パターンと比較していた。「バルク組成、モードなどを用いて部分熔融の程度が

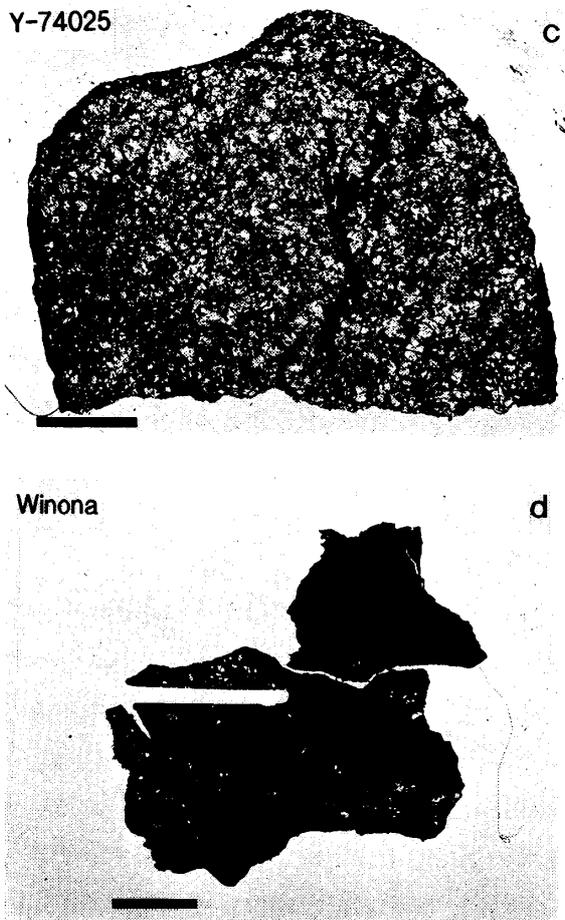


図3 (つづき)

どのくらいであったか見積もらないのは何故か」という Torigoye の質問に, Davis は「時間がなかった」と言って逃げていた。ロドラナイトーアカプルコアイトのような隕石では, 構成鉱物が平衡に達していたかという問題とともに, 分析に使うサンプル量が非常に少ない場合には, 隕石が粗粒であるためバルク組成やモードなどが全岩試料を代表しているのかということも重要になる。特に微量元素組成は, 磷酸塩鉱物などの不均一な分布に大きく左右されることから, Davis は不確実性を含む議論を避けたのかもしれない。

特に Acapuruco では, 消滅核種  $^{146}\text{Sm}$  の娘核種  $^{142}\text{Nd}$  の存在が Prinzophor *et al.* [7] により確認さ

れていることから, ロドラナイトーアカプルコアイト母天体の集積は太陽系形成直後  $\sim 4.56$  Ga と考えてよかろう。またこれは Kaneoka *et al.* [8] が求めた Y-74063 および ALH-78230 の  $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$  年代  $4556 \pm 53$  および  $4531 \pm 23$  Ma と矛盾しない。Bogard *et al.* [9] は, Gibson と Acapulco の  $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$  年代を測定し, ロドラナイトとアカプルコアイトでは  $\sim 20 - 40$  Ma の有意な差が認められ, 後者の方が K-Ar 系の閉鎖年代が古いという結果を示した。これは, ロドラナイトのほうがアカプルコアイトにくらべ到達温度が  $\sim 100^\circ\text{C}$  高いので, 冷却の際にそれだけ時間がかかり, 閉鎖年代に差がでたものと解釈されるという。ロドラナイトのいくつかは宇宙線照射年代が  $\sim 5$  Ma と一致することが Eugster *et al.* [10] により報告され, 母天体はひとつなのではないかという可能性が指摘された。残りのロドラナイトについても宇宙線照射年代が重要となってくることを Eugster は力説していた。「いわゆる」primitive achondrites のなかでも Y-74063 の希ガス組成は特異である。この隕石の  $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$  年代が古いことは先にも触れたが, 捕獲成分の重い希ガスと放射起源の  $^{136}\text{Xe}$  を多量に含むこと [11,12] は他の隕石では例がないことを高岡は指摘していた。これらの希ガス組成からの制約は, 隕石母天体が太陽系初期に形成され, 大規模な溶融をしていないことと調和的である。これほど多量の希ガスがどの相に入っているのかは重要な問題で, fluid inclusions の可能性もあるという。Y-74063 の窒素同位体組成は, すでに杉浦と橋爪によって報告されていたが, LPSC では UCSD の Kim & Marti [13] が, Acapulco の珪酸塩相と金属相では窒素同位体組成が異なることを示した。これに対し Sugiura は, 「金属相の同位体組成の異常は, 何らかの汚染によるものではないか」と質したが, UCSD グループはその可能性

を否定した。また新しい南極産アカプルコアイト FRO90011 の窒素同位体組成は、Acapulco のそれとは大きく異なり軽い同位体に富む特徴を示さないことから、アカプルコアイトの窒素同位体組成には多様性があるらしい。

### 3.2 オーブライイト (エンスタタイトエコンドライト) とユレイライイト

HED-メソシテライト、アングライイト以外のエコンドライトで形成初期の分化の名残をとどめるものとして、オーブライイトとユレイライイトを共通セッションではとりあげた。木村は南極産オーブライイトと非南極産オーブライイトおよび E コンドライイトを比較して論じ、オーブライイトの前駆物質は E コンドライイト (EL6) とは異なることを示した。岡田は Norton County の岩片から形成過程について検討し、Norton County 母天体は激しい衝突により表層で溶融し、またかなり深部まで掘り起こされたが、Mg に富むマグマは、組成からみると現在知られている E コンドライイトの部分溶融によって出来たのかは明かではないという結論を得た。微量元素存在度をもとにした島岡と海老原のオーブライイト母天体の進化過程の議論は、オーブライイト母天体の部分溶融の程度はそれほど大きくないというものであった。

ユレイライイトは粗粒のカンラン石とピジョン輝石からなる超塩基性岩である。最新のレビューは、Goodrich [14] によってなされているので参照されたい。図 1 からわかるように、ユレイライイト (炭素質隕石 Allende の dark inclusion と関連があると考えられている) とロドラナイト-アカプルコアイトとは母天体は異なる。しかし玄武岩質的な成分つまり部分溶融液がとり除かれているという点からみれば、両者は分化の形態が類似している (たとえばアカプルコアイト MAC88177 は、最初 Score & Mason によって炭素質ペインのないユレイ

ライイトに分類されていた)。LPSC では、Boynton & Hill [15] が新たに発見されたユレイライイトの微量元素分析結果を発表していたが、特に新しい解釈はなされていないようであった。また Goodrich & Lugmair [16] は、Sm-Nd ダイアグラムにおいて Kenna の acid leachates が構成するラインとユレイライイト全岩試料の進化線が  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} \sim 0.51$  で交わることを示し、以下のような推論をしていた。もし Kenna の leachates が構成するラインが混合線であったならば、proto-Kenna の  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  比は  $\sim 0.51$  で、軽希土に富む物質は、還元剤としての炭素質とともに二次的に母天体に注入されたのではないかというものである。

ユレイライイト中のダイヤモンドの起源についての希ガスからのアプローチと、ラマンスペクトルを用いた分光学的研究はユニークである。数年前にユレイライイト中のダイヤモンドは chemical vapor deposition (CVD) によって形成されたという新しいモデルが提唱されたが [17]、福永はダイヤモンドの起源についての新たな可能性を示した。それによると、ユレイライイト中のダイヤモンドは必ずしも CVD でつくる必要はなく、ショックにより形成されたとしても説明がつくというものであった。つまり、原始太陽系星雲で形成されたアモルファスカーボンが希ガスの担体で、重い希ガスに富んでいたならば、そしてショックによってダイヤモンドがアモルファスカーボンから形成された際に、希ガス間での分別が起こらなければよいというものである。これを証明するためには、希ガス雰囲気下でのアモルファスカーボンの合成と、そのアモルファスカーボンを用いてダイヤモンドをショックで合成する実験が必要となる。いずれにしても、炭素質が後から注入されたのでなければ、母天体では希ガスが脱ガスするような物理現象は起こらなかったという結論である。また、ユレイ

ライト中のダイヤモンドの光学的研究から、ユレイライトの酸不溶残渣のラマンスペクトルにみられる  $\sim 10 \text{ cm}^{-1}$  エネルギーシフトは隕石が  $^{13}\text{C}$  に富むためによるものではなく、ヘキサゴナルダイヤモンドに起因することが鍵らによって示された。

#### 4. 残されたいくつかの問題

南極産特異隕石コンソーシアムの研究結果 (*Proc. of NIPR Symp. Antarc. Meteorites*, 4 - 6) および LPSC のセッションをみてもわかるように、岩石鉱物、反射スペクトル、化学一同位体組成、年代学研究などを総合することによって、primitive achondrites についてかなり (あるいは、ある程度までは) 解ってきたといえよう。Primitive achondrites の重要な問題点は、池田が指摘しているように、先駆物質は何か、部分熔融の程度はいかほどか、熱源は何か、失われた部分熔融液に相当する隕石が存在するのかなどである。

先駆物質については、酸素同位体からの強い制約があり、またアカプルコアイトのなかには溶け残りのコンドリユールが存在するものもあることから、E, H, L, LL, C コンドライトとは違ったコンドライト母天体といえる。平衡コンドライト (H4) においても  $^{26}\text{Al}$  の痕跡が認められている [18] ことを考慮すると、primitive achondrites の熱源についても  $^{26}\text{Al}$  が有力な候補になる。しかし  $^{26}\text{Al}$  だけで考えると母天体のサイズに制約がでてくることから、衝突による部分熔融 [19] も考慮しなくてはいけないのかもしれない。

ある種のエコンドライトは、太陽系が形成されてから、たかだか 1000-3000 万年の間に分化したと考えられている。残念ながら熱史を含めたコンドライトの分化過程については、1000 万年のタイムスケールでははっきりとしていないのが現状である。たとえば Hutchison [20] のように、「コンド

ライト隕石中の深成岩的な組織および組成をもつ岩片は、すべて "すでに火成活動をしていた" エコンドライトの破片である」と主張する研究者もいる。最大 cm (大部分は mm) オーダーの岩片から、その成因を母天体の分化に求めるのか、あるいは衝突溶融の際に母天体上に形成された大規模なマグマプールに起因するのかを結論するのは、現時点では容易ではないと思われる。そして "いわゆる" primitive achondrites やユレイライトあるいはオーブライイト母天体から失われた部分熔融液に相当する隕石は、まだみつかっていない。

ユレイライトに関しては、濃硝酸で洗うことによって溶けだしてしまう軽希土に富んだ成分が、いつどのようなかたちでもたらされたのか、そして火成活動の形態はどのようなものであったかが問題となっている。勿論ダイヤモンドの成因についても、新しいモデルが提出されたわけであるが、まだ決着はついていない。E コンドライトとオーブライイトの成因的な関係についても、微量元素のデータがやっと揃ってきたので、これから母天体のモデルが構築されていくところである。Primitive achondrites に関する幾つかの問題点は、最近の研究によってより一層明確化されたことになる。現在、primitive achondrites の希ガス組成の詳細な検討、窒素同位体による primitive achondrites の分類、すべてのロドラナイトの宇宙線照射年代測定などの研究計画が引続き提案されている。

最後に primitive achondrites の研究に南極隕石が多大な貢献をしてきたことは言うまでもないが、今後南極隕石の分類および記載が進み、そして近い将来に計画されている隕石探査により新しい種類の隕石の発見が続けば、研究に供する試料の制約もある程度緩和され、primitive achondrites に限らず、太陽系の惑星の初期進化に対する我々の理解も深まっていくものと期待される。

## 謝辞

年度末のお忙しい時期にもかかわらず合同大会共通セッションにおいて論文を発表して下さった皆様には感謝いたします。第24回月惑星科学会議出席に際しましては文部省国際研究集会派遣の助成を受けました。国立極地研究所の矢内桂三博士、小島秀康博士には有益なコメントを頂きました。

## 参考文献

- [1] Clayton, R. N., Grossman, L. and Mayeda, T. K., 1973: A component of primitive nuclear composition in carbonaceous meteorites. *Science*, **182**, 485-488.
- [2] Clayton, R. N., Onuma, N., Mayeda, T. K., 1976: A classification of meteorites based on oxygen isotopes. *Earth Planet. Sci., Lett.*, **30**, 10-18.
- [3] 武田弘, 廣井孝弘, 1993: 小惑星・隕石・物質科学 - S型小惑星物質と原始的エコンドライトの関連性 - 遊・星・人. **2**, 54-62.
- [4] Prinz, M., Wagoner, D. G. and Hamilton, P. J., 1980: Winonaites: A primitive achondritic group related to silicate inclusions in IAB irons (*abstr.*). *Lunar Planet. Sci.*, **XI**, 902-904.
- [5] McCoy, T. J., Keil, K., Clayton, R. N. and Mayeda, T. K., 1993: Classificational parameters for acaplcrites and lodranites: The cases of FRO 90011, EET84302 and ALHA81187/84190 (*abstr.*). *Lunar Planet. Sci.*, **XXIV**, 945-946.
- [6] Davia, A. M., Prinz, M. and Weisberg, M. K., 1993: Trace element distributions in primitive achondrite (*abstr.*). *Lunar Planet. Sci.*, **XXIV**, 375-376.
- [7] Prinzhofer, A., Papanastassiou, D. A. and Wasserburg, G. J., 1992: Samarium-neodymium evolution of meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **56**, 797-815.
- [8] Kaneoka, I., Takaoka, N. and Yanai, K., 1992:  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  analyses of Y-74063 and ALH-78230: Consortium study on unique meteorites from Antarctica. *Proc. NIPR Symp. Antarc. Meteorites*, **5**, 224-232.
- [9] Bogard, D. D., Garrison, D. H., McCoy, T. J. and Keil, K., 1993:  $^{39}\text{Ar}$ - $^{40}\text{Ar}$  ages of acaplcrites and lodranites: Evidence for early planetary body heating (*abstr.*). *Lunar Planet. Sci.*, **XXIV**, 141-142.
- [10] Eugster, O. and Weigel, A., 1993: Xe-Q in lodranites and a hint for Xe-L. FRO90011 another lodranite? (*abstr.*). *Lunar Planet. Sci.*, **XXVI**, 453-454.
- [11] Takaoka, N. and Yoshida, Y.-I., 1991: Noble gas composition in unique meteorite Yamato-73063. *Proc. NIPR Symp. Antarc. Meteorites*, **4**, 178-186.
- [12] Takaoka, N., Nagao, K. and Miura, Y., 1993: Noble gases in the unique meteorites Yamato-74063 and -74357. *Proc. NIPR Symp. Antarc. Meteorites*, **6**, 120-134.
- [13] Kim, Y. and Marti, K., 1993: Isotopic signatures and distribution of nitrogen and trapped and radiogenic xenon in the Acapulco and FRO90011 meteorites (*abstr.*). *Lunar Planet. Sci.*, **XXIV**, 801-802.
- [14] Goodrich, C. A., 1992: Ureilites: A critical review. *Meteoritics*, **27**, 327-352.
- [15] Boynton, W. V. and Hill, D. H., 1993: Trace elements in several new ureilites (*abstr.*). *Lunar*

- Planet. Sci.*, **XXIV**, 167-168.
- [16] Goodrich, C. A. and Lugmair, G. W., 1993: Stalking the LREE-enriched component in ureilites (*abstr.*). *Lunar Planet. Sci.*, **XXIV**, 547-548.
- [17] Matsuda, J-I., Fukunaga, K. and Ito, K., 1991: Noble gas studies in vapor-growth diamonds. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, **53**, 1117-1121.
- [18] Zinner, E. and Göpel, C., 1992: Evidence for  $^{26}\text{Al}$  in feldspars from the H4 chondrite Ste. Marguerite (*abstr.*). *Meteoritics*, **27**, 331.
- [19] Takeda, H., Saiki, K., Otsuki, M. and Hiroi, T., 1993: A new Antarctic meteorite with chromite, orthopyroxene and metal with reference to a formation model of S asteroids (*abstr.*). *Lunar Planet. Sci.*, **XXIV**, 1395-1396.
- [20] Hutchison, R., 1992: Earliest planetary melting - the view from meteorites. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **50**, 7-16.
- [21] Clayton, R. N. and Mayeda, T. K., 1992: Oxygen isotopic compositions of achondrites, Papers presented to the 17th Symp. on Antarct. Meteorites, 160-162.