

## 特集「21世紀へ向けての惑星科学」

## 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—

武田 弘<sup>1</sup>・廣井 孝弘<sup>2</sup>

## 1. はしがき

小惑星と隕石の関係は、落下の目撃された隕石の軌道が小惑星帯まで達していること、隕石と小惑星の反射スペクトルの比較、隕石からの母天体の復元と小惑星との対応づけなどにより、明らかになってきた。隕石の母天体と関連づけて、小惑星の物質進化のシミュレーションにより、隕石や小惑星には太陽系の物質進化を考える重要な鍵が秘められていると見られている。

これらの研究を通じ、問題点がクローズアップ

されてきた。その1つは、コンドライト母天体としての小惑星が見当たらないことと、最も多いS型小惑星の隕石種が見つからないというミステリーである。大きなC型小惑星の隕石種も、未だはっきりした解答が得られていない。本文では、このようなトピックスに話をしぼって、小惑星と隕石の関係のうち、物質科学的アプローチで解決されつつある問題を紹介しようと思う。

小惑星の表面鉱物組合わせは、何からわかるかについては [1] に詳しく述べられている。ある鉱物種に対応する反射スペクトルの特徴は次のよ

- 
- (1) 粘土鉱物+不透明鉱物 (炭素)  
10 フィギェア, 19 フォルトゥナ, 511 ダビダ, C型
  - (2) 苦鉄質ケイ酸塩鉱物 (カンラン石)+不透明鉱物 (炭素)  
80 サフォ, 211 エオス, 877 アリンダ, C型
  - (3) 苦鉄質ケイ酸塩鉱物 (カンラン石)+不透明鉱物  
1 セレス, 2 パラス
  - (4) 金属 (ニッケル鉄)+ケイ酸塩鉱物  
金属+カンラン石: 3 ジュノー, 354 エレオノラ  
金属+輝石: 8 フロラ, 40 ハルモニア, S型  
金属, 又は金属+エンスタタイト: 16 サイキー, 140 シワ
  - (5) ケイ酸塩鉱物  
輝石-斜長石: 4 ベスタ, 1915 ケツァルコートル  
1980PA, 1985DO2, 3351(1983RD)
  - (6) カンラン石+輝石+金属  
433 エロス, 113 アマルセア, 354 エレオノラ  
246 アスポリナ, 446 アエテルミタス
- 

表1 小惑星の表面鉱物組合わせの種類

<sup>1</sup>東大理学部<sup>2</sup>NASA ジョンソン宇宙センター

表2 小惑星とエコンドライト隕石母天体の対応

隕石種	鉱物種	小惑星
HED 隕石		
ホワルダイト (H)	輝石	4 ベスタ
ユークライト (E)	斜長石	1915 ケツァルコートル
ダイオジュナイト (D)		1980PA, 1985DO2, 3351(1883RD)
パラサイト	カンラン石 FeNi	113 アマルセア
E コンドライト・エコンドライト		
オーブライト	Mg 輝石	44 ナイサ
鉄隕石	FeNi	135 ハーサ
ユレイライト	輝石, カンラン石 炭素	
原始的エコンドライト	輝石, カンラン石 FeNi	S 型小惑星
SNC 隕石	輝石, カンラン石	火星
月隕石	斜長石 斜長石 輝石, カンラン石	月

うなものである。すなわち、主に Fe のまわりの酸素の8面体配位の変形による d 軌道電子のエネルギー分裂に関連した吸収であるので、輝石やカンラン石、斜長石の結晶構造中にある 6 配位 (8 面体配位) の Fe の周りの酸素配位が、小惑星の反射スペクトルを理解する上で大切なことになる。この酸素配位多面体が、上記鉱物の構造により歪むことで、Fe の d 軌道のエネルギー準位の分裂が起り、その間の電子の移動により、可視光から近赤外の間で鉱物に特異な吸収が起る。

実際に結晶構造が精密化され、その吸収帯のアサイメントが行われた[2,3]。輝石は、0.9, 2 $\mu$ m に対称的な2つの吸収を持つ。カンラン石は、輝石の0.9 $\mu$ m のバンドに近く、1 $\mu$ m の長波長側に非対称な吸収を持つ。斜長石は1 $\mu$ m より大のところに弱い吸収を持つ。金属鉄は、赤色長波長側に連続して吸収大となる。粘土鉱物などは H<sub>2</sub>O, OH による吸収が特徴である。

これらの鉱物の吸収スペクトルの特徴を手がかりに、隕石種に関係なく小惑星の表面鉱物組合わせを要約すると表1のようになる。それぞれのグ

ループに対応した小惑星の名前も記入されている。

次に、隕石種から考えられる、関連した隕石グループの母天体を小惑星と対比したものが表2に示されている。この表には原始的エコンドライトと S 型小惑星が対比されているが、これについては本文で詳しく述べる。この対応は我々の提案であり、一般には定説はない。この表にないものがコンドライトに対応する小惑星である。C 型が炭素質コンドライトに対応すると言うのは一般にも受け入れられている。

## 2. コンドライト隕石と小惑星

コンドライトに属する隕石は、地球上に最も多く落下してくるとともに、太陽系の平均化学組成に近いものである。このような事実から、隕石の故郷の小惑星帯には、コンドライト的な物質が多く残っていると考えられてきた。一方、南極から数多くの隕石が回収されてくるにつれ、化学組成と鉱物の種類について言えば、コンドライトに似ているにもかかわらず、普通コンドライトと言われているものと異なる結晶質の隕石の数が多くな

ってきて、これらのあった天体はどの様なものであったかに関心が集まってきた [4].

一方、小惑星の表面の反射スペクトルを、実験室で測定された隕石のものと比較して、小惑星はどの様な物質でできているかの研究も進んできた。最も始原的と言われる炭素質コンドライトについては、隕石のものに似たスペクトルを示す小惑星は多く見つかっている。これらはC型小惑星と呼ばれているが、必ずしも炭素を含んだとか、炭素質コンドライトと同じというわけではないが、少なくとも炭素質コンドライト（あるいはその加熱脱水したもの）と似たスペクトルを持った天体があるということになり、我々の太陽系についての理解の正しさを保証してくれるものである。

スペクトルの測定が進むにつれ、いわゆる普通コンドライトに相当するスペクトルを持ったものが、火星と木星の軌道の間にある主小惑星帯にはないのではないかという不安が広がってきた。地球の軌道近くまで入り込んでくる近地球小惑星には1, 2普通コンドライトに近いものは見つかっている (L. McFadden, 私信)。主小惑星帯には、鉄を含むケイ酸塩鉱物の吸収を示すスペクトルと、金属鉄を含むと思われる、赤い波長の反射が強くなるようなスペクトルを示す天体が多くあることが分かってきた。これらはS型小惑星と呼ばれるものである。C型の場合と同じく、ただスペクトル型を示すもので、ケイ酸塩 (Silicate) のSを取って名付けられた。

このS型小惑星のスペクトルを数多く測定し、その変化の傾向を調べたハワイ大学にいたM. ギャフィー [5] やP. ベルら [6] によると、その鉱物組成は変化に富み、コンドライトに近いものでもなく、これまで知られているケイ酸塩鉱物と金属鉄を含む石鉄隕石のものとも一致しないということである。そのスペクトルの多様性から言えることは、コンドライトに含まれるカンラン石や輝石の存在比と、これらの鉱物中のFe/Mg比、お

よびケイ酸塩鉱物と金属鉄の比も変化に富むものであることがわかってきた。[5]によると、S型小惑星に特徴的な2つの吸収 (Band I, II) について、Band II/Band Iの面積比に対し、Band Iの中心波長をプロットすると、その鉱物組合せの系統的变化をよく示せる。斜方輝石 (Opx) に富むものからカンラン石 (Ol) に富むものまで、変化し、中間に単斜輝石 (Cpx) を含むものがあるという。

小惑星表面の輝石やカンラン石中のmg数  $[100 \times \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}) \text{ モル\%}]$  がわかると、それがコンドライトであった場合には、そのmg数からどの様なコンドライト (H, L, LL) かが推定できる。また原始のエコンドライトとの関連も、この吸収の微妙な変化から推定できる。カンラン石も同じ位置に吸収をもつが、少し長波長側にずれるので、 $0.95 \mu\text{m}$  の吸収の非対称性からカンラン石も含めた鉄マグネシウムを含むケイ酸塩鉱物に関する情報を得ることができる。

### 3. S型小惑星と隕石種との対応

石鉄隕石の中に、カンラン石と輝石 (Opx) と金属鉄を含むロドランという隕石がある。一種の隕石グループに1つだけロドランという隕石があるので、ロドランという名前がつけられていた。南極から回収された隕石の中に、このロドランに似たものが数個見つかったが、どれも、もとのロドランとは何か違う鉱物を少量含んでいた [4].

ロドランという名前をこれらにつけるのが適当かどうか分からなくなったが、南極産のものはカンラン石と輝石の割合がロドランより変化している上に、カルシウムやアルミニウムを含む鉱物である普通輝石や斜長石を少量含むものが出てきた。このような鉱物がある事実は、この種の隕石は、新しい隕石が発見されるにつれ、だんだんコンドライトとの間を埋める鉱物組成を持ったものがでてきたということになる。また、この鉱物

組み合わせの変化の傾向は [5] の言う S 型のものの傾向と一致する。

一方、コンドライトに近いが、コンドライトと同一ではないという隕石も増えてきて、その全体像も明らかになってきた。そのほとんどが、普通コンドライトよりも、より鉄の少ない輝石、カンラン石を含むが、エンスタタイト (E) コンドライトと呼ばれるものほど鉄の少ないものは少ない。カンラン石と輝石の mg 数をプロットすると図 1 のように、H コンドライトと E コンドライトの中間に分布する。ケイ酸塩中の鉄が少ないということは、2 価の鉄が還元されて、ケイ酸塩鉱物より抜け出し、金属鉄をつくることによる。これらの鉱物の他、普通コンドライトに含まれるカルシウムを含む普通輝石、カルシウム、アルミニウムを含む斜長石も含まれている。その割合もかなり変化を示すので、ロドラナイトとつながってきて、

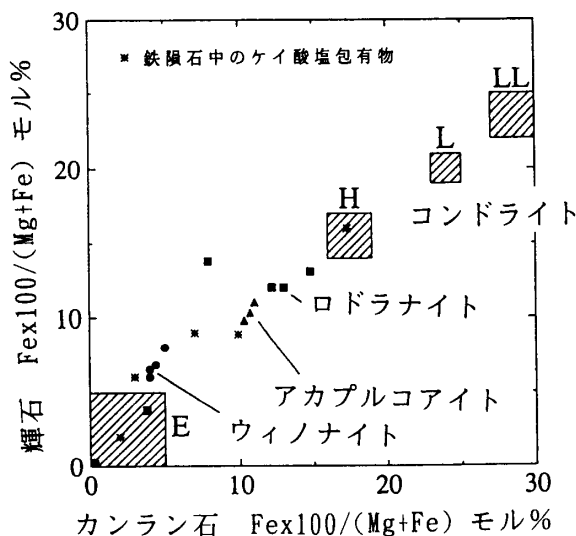


図 1 輝石とカンラン石中の  $\text{Fe} \times 100 / (\text{Mg} + \text{Fe})$  モル% (100-mg 数) による原始のエコンドライトの鉱物組成の特徴。平衡普通コンドライト (H, L, LL) と E コンドライトの中間にプロットされる。\*印は鉄隕石中のケイ酸塩包有物で、ウィノナイトと同じ酸素同位体比を持つもの [9]。

同じグループに属するとも考えられるようになった。これらはメキシコのアカプルコに落下した隕石に似ているのでアカプルコアイトと呼ばれるようになった。酸素同位体比 (図 2) もロドラナイトとアカプルコアイトは同じ様な値をとる [7]。

この他アカプルコやロドライトとは異なるが、一連のものと考えられるものに、ウィノナイトと呼ばれるグループと、鉄隕石のあるものに含まれるケイ酸塩鉱物の多い部分があった。ウィノナイトはウィノナと呼ばれる隕石に代表されるもので、図 1 では Mg コーナーの E コンドライト寄りに分布する [8]、より還元された鉱物組成を持つ。これらも関連があるものであることがわかり、これらをすべて含めて原始のエコンドライトと呼ぶ人もいる。ここではそれに従った。

ここで原始的というのは、化学組成が大まかに言って始原的物質であるコンドライトから簡単なプロセスで導かれるものであることである。カンラン石、輝石、斜長石、金属鉄、硫化鉄などコン

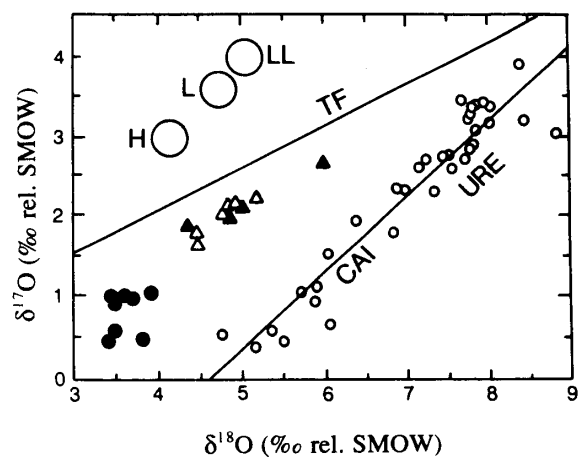


図 2 原始のエコンドライトの酸素同位体比。TF (地球分化線) と CAI (炭素質コンドライト中のカルシウムアルミニウム包有物) の混合線の間分布。H, L, LL はコンドライト。アカプルコアイトとロドラナイト (黒丸) は、ウィノナイトと IAB 鉄隕石中のケイ酸塩包有物 (三角) とは別の比を持つ。ユレイライト (URE, 白丸) は CAI 上に分布。[7] による。

ドライトに含まれるものと同じ種類の鉱物を含むものである。エコンドライトは分化していて原始的でないのに、原始的という言葉が用いられているのは、エコンドライトの中では最も原始的なものであることを示す。しかし一番大切な痕跡は、これらの物質が、大規模な溶融分化の過程を経てない証拠に、コンドライトに含まれるタイプの希ガスを多く含むことである。酸素同位体比も普通コンドライトとは異なるが、よく知られた分化した隕石とは違う比率を示す (図2)。

エコンドライトという名前が使われているのは、これらの隕石に共通なのは、コンドライトに特徴的なコンドルールを含まないことである。高温で結晶化した組織を示すので、エコンドライトというが、エコンドライトの多くは、その中に含まれる斜長石はカルシウムに富むものであるのに対し、すべての原始のエコンドライトは、コンドライトと同じナトリウムに富む斜長石を含む (図3)。

ここでもう一度S型小惑星の鉱物組合せと原

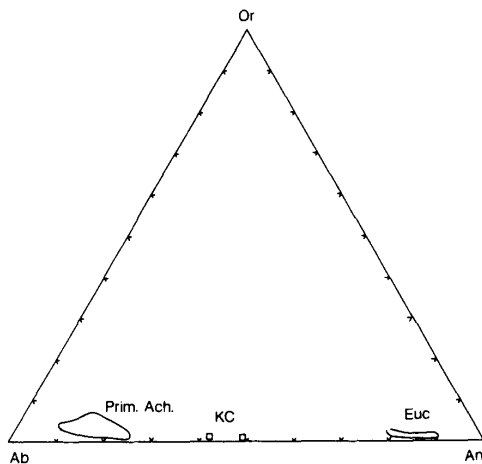


図3 原始のエコンドライト (Prim. Ach.) 中の斜長石の化学組成をアルバイト ( $\text{Ab:Na}_2\text{AlSi}_3\text{O}_8$ )、アノーサイト ( $\text{An:CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) とオーソクレス ( $\text{Or:KAlSi}_3\text{O}_8$ ) を端成分とする三角図に示す。分化した隕石のユークライト (Euc) とは別の傾向を示す。KCは特殊な鉄隕石中のもの。

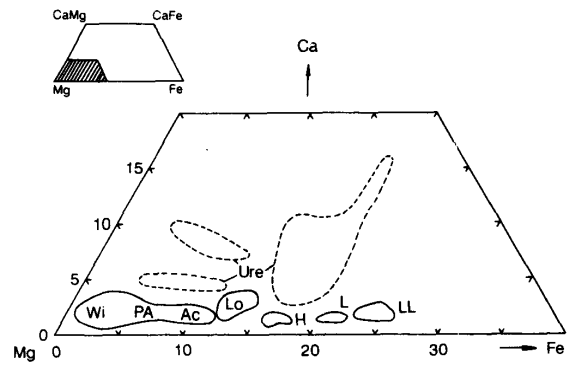


図4 原始のエコンドライト (PA) の輝石の化学組成の特徴をコンドライト (H,L,LL) とユレイライト (Ure) と比較。ロドラナイト (Lo), アカプルコアイト (Ac), ウィノナイト (Wi) と系統的な変化を示す。輝石台形 (左上) の斜線部分を拡大して示す。

始のエコンドライトの鉱物組合せとその化学組成を比較してみよう。どちらもコンドライトと同じ鉱物種を含む。輝石の Mg, Fe, Ca 比の変化を他の隕石中のものと比較すると、原始のエコンドライトと言われるものは、ある一定の化学組成変化を示す。すなわち、コンドライトよりも少し還元されたケイ酸塩鉱物 (輝石) 中の鉄の含有量の範囲を示す (図4)。今まで見つかったこの種の隕石中の輝石はすべて、H コンドライトよりは還元されているが、エンスタタイトができているものは少ない。ロドラナイトと言われるものの輝石が一番 Fe 含有量が多い。次にアカプルコアイトと言われるもの、さらに鉄隕石中のケイ酸塩包有物、ウィノナイト中のものという順番になる。

この化学組成変化は、結晶分化によるものよりも、再結晶時の還元によるものと解釈されている。この還元も天体が微惑星の衝突合体でできた時のもの、その後の天体内でのアニーリングの時のもの、さらに最後に天体が分裂した時、高温のものが真空中で冷える時のものである。ロドラナイト中のある隕石は、輝石は結晶のふちだけ還元され

ているのに、カンラン石は中心まで還元されているものもある。

鉱物種も輝石とカンラン石の割合は大幅に変化する。鉄隕石中のものはNaに富む斜長石が濃集されていたり、ロドラナイトは斜長石が全くないものから少し含んだもの、普通輝石を全く含まないものから、少量含んだものまである。これら原始のエコンドライトの鉱物種の存在比(図5)と金属鉄とケイ酸塩鉱物の割合も、前述した[4]のS型小惑星では似たような変化を示す。アカプルコアイトは比較的コンドライトに近い鉱物組合せをもつが、ロドラナイトはOl/(Opx+Cpx)比が大きく変化し、また斜長石が著しく減少している。IAB鉄隕石中のケイ酸塩包有物は斜長石に少し富む。太陽系中に非常に多種多様な物質が存

在するのであれば、少々似たような傾向を示す隕石と、小惑星が関係あるとは言えないという意見もあるかもしれない。小惑星帯に多くあるものと、隕石の中に多くあるものとは、何らかの関連性があれば、両者を積極的に関連づけて、簡単で美しい太陽系と進化のモデルを考えるのが、この分野の手法である。

このような話が収斂し出した頃にも、実際に原始のエコンドライトの反射スペクトルが測定されたことはなかった。我々は南極隕石の中のものについて、はじめて測定することができ、両者を関連づけるには、どの様なモデルを立てればよいかはわかってきた([2,4])。この後、[9]は幾つかの原始のエコンドライトを端成分として、それらのドメインを鉄隕石のマトリックスに混合すると

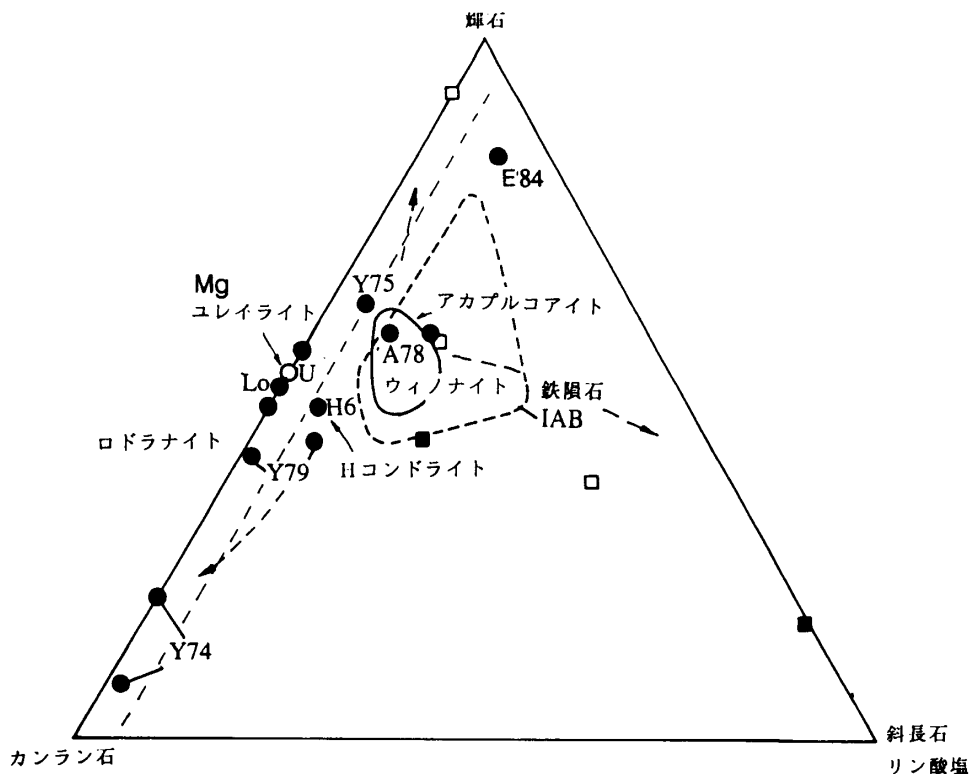


図5 原始のエコンドライト中の主要鉱物の存在比(体積比)をカンラン石、輝石、斜長石とリン酸塩鉱物を端成分として示す。[12]のデータを含む。Lo, Y79, Y74, E84はロドラナイト, A78はアカプルコアイト, 四角は鉄隕石中のケイ酸塩包有物。

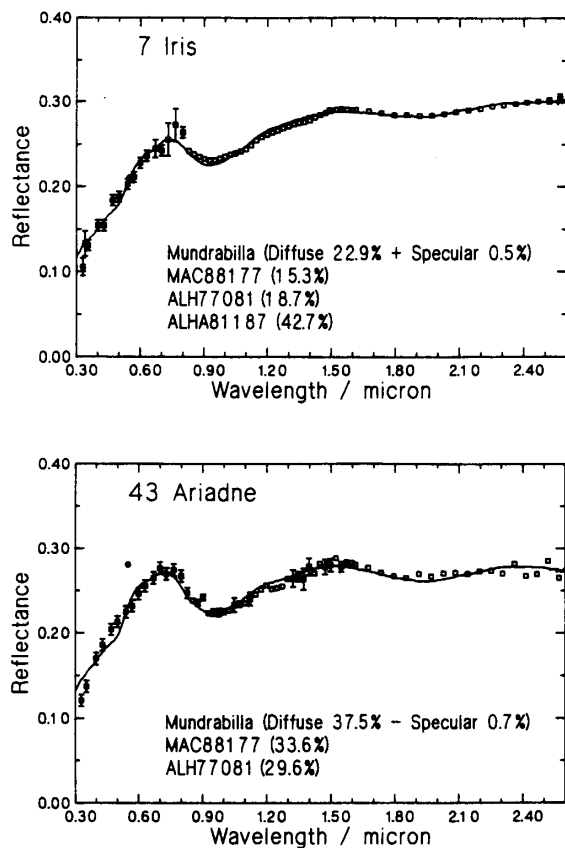


図6 S型小惑星の反射スペクトルを原始のエコンドライトと鉄隕石の線型結合でフィットしたもの。縦軸は相対反射率、横軸は波長(ミクロン)。7Irisと43Ariadneについて、ロドラナイト(MAC88177)とアカプルコアイト(ALH77081)および衝撃・還元で変化したALH81187)と鉄隕石(Mundrabilla)の混合の割合を示す。[9]による。

いうモデルで十数のS型小惑星の反射スペクトルを説明することができた(図6)。原始のエコンドライトをつくるモデルが、小惑星帯でS型のものをつくる過程のモデルとして説明できればよいわけである。

#### 4. 原始のエコンドライト形成モデル

我々は、この原始のエコンドライトと同じ始原的物質の痕跡を残しているという意味では、共通の性質をもっているユレイライトという隕石の形

成モデルを提出していた[10]。ユレイライトは、原始のエコンドライトと同じく、始原的物質のような希ガスを多く含み、酸素同位体比は炭素質コンドライトに似たものである。しかし、平均化学組成はコンドライトとはかなり異なって、地球の超塩基性岩に似ているので、なかなかよい形成モデルができていない隕石種である。

原始のエコンドライトは、低温で溶融する成分に濃集する元素が少なくなっているため、これらの隕石をつくるには、天体内の一部を高温にして、低温で溶ける物質を移動させねばならない。コンドライトを1000°C近くに熱すると、まず溶け出すのはカルシウムとアルミニウムを含んだ鉱物と、鉄、ニッケル、硫黄を含んだ鉱物である。カルシウム-アルミニウムのケイ酸塩メルトと、鉄・ニッケル・硫黄のメルトは比重も界面張力も違うので、別々に行動する。鉄・ニッケル・硫黄の混合したものは、ニッケルが多く含まれれば1000°C以下でも溶融する。

これらの溶融と同時に酸化還元状態が変化すれば、ケイ酸塩鉱物中の鉄・マグネシウムの比率も変化し得る。またカンラン石を還元すると一すなわち酸素を取り除くと一

$\text{MgFeSiO}_4$  [カンラン石]

$\rightarrow \text{MgSiO}_3$  [輝石] + Fe [金属鉄] + (O)

の反応により、カンラン石、輝石と金属鉄の割合も変化する。このような変化は原始のエコンドライトでもS型小惑星でも起っていることであるので、両者を関係付けるにはちょうど良い形成モデルである。

次に熱源は何であったかを考えなければならない。これらの隕石は45億年前の太陽系形成の初期に形成されたものである。その時代の熱源として考えられるものは、短寿命の放射性同位体元素である、アルミニウムの同位体 $^{26}\text{Al}$ が考えられる。事実、アカプルコ隕石中の $^{26}\text{Al}$ 量を仮定すると、この種の天体の一部を溶融することができるということが計算で示された[11]。しかし、このような熱源

は加熱速度も冷却の速度もゆっくりしている。

原始のエコンドライト中の鉱物には、結晶粒の芯に細粒の不透明なゴミのようなものがあるものがある。これらは部分的に熔融せずに残った鉱物が中心にあり、その周りに新しい部分が成長した組織と解釈できる。その残った組織は、衝突によりできた欠陥（転位等）に還元により鉄・硫化鉄などが沈着したものと考えられる。このような組織の存在は、原物質が完全には溶けなかったことと衝突のなごりがあることを物語る。

高温になり一部分熔融した液があることは、この液を他に移動したり、天体から逃がしてやるのに都合がよい。衝突により生じた残留圧力があればますます容易になる。衝突による加圧で圧縮されやすいマトリックスが、選択的に熔融され、この部分に多い、カルシウム、アルミニウム、鉄、ニッケル、硫黄などは容易に溶かされる事が想定される。このようなメルトが生じるのが結晶粒界であると、このような液だけを粒間を通して、移動したり逃がしたりすることができるので、この種の隕石の形成モデルの利点となる。

そもそも太陽系初期に、微惑星が大きくなり、原始惑星に成長する過程では、衝突合体が起きるのが必然である。太陽系初期には $^{26}\text{Al}$ があったと考えられているので、大きな天体になれば、これらの元素の崩壊により熱も蓄積される。この時、衝突により発生する熱が加われば、ここで示したような分化が起る可能性が高い。いずれにしても大きく成長しているS型小惑星の内部は高温になり、原始のエコンドライトが出来ていて不思議はない。現在残っている小惑星は、形成以後の衝突で壊れたものであることを考えると、もとはもっと大きく、より多くの化学的变化を受けてよいはずである。

## 5. むすび

では現在、地球に最も多く落下しているコンドライトには、このような微惑星成長の影響は残っ

ているのだろうか。コンドライトの中には岩石学的タイプ7という、高温期を経たものも幾つか存在する。しかし、あまり大きくは微惑星が成長しなかったので、熱変成も強度には起らなかったと考えるとよかろう。このような小さな小惑星の、そのまた破片は、カークウッド・ギャップなど重力不安定なレゾナンス軌道の近くをまわっていて、火星や木星の重力の影響を受けて、その軌道より跳ね飛ばされ、結果的に地球にやって来たことになる。大きくなったS型小惑星は、安定な軌道をまわっていると、そこから破片を地球に持ってくるのは困難である。小さなもののみが火星や木星の重力の影響を受けて、不安定な軌道に落ちて跳ね飛ばされるとすると、原始のエコンドライトが、小さなものしか地球に落下してこないことも理解できる。惑星物質進化論の立場からすると、微惑星の衝突合体の過程で、物質が進化して行き、あるものは、地球のマントルの物質のように変化したものが出来るのだと考えれば、これは原始的物質のもっとも初期の進化という意味で、興味ある研究対象である。また、地球をつくるのにコンドライトの原物質を考えるのが一般的であるが、上のモデルが正しければ、地球にはかなり分化した微惑星が集積するというモデルも考えなくてはならなくなるだろう。その時、金属鉄はかなり大きな塊りまで成長しているのだから、マグマオーシャンやマントル中を降下していく時、元素分配は起りにくいということも、コアの起源を考える時に考慮しなければならないだろう。

## 参考文献

- [1] 武田弘, 1979: 小惑星の構成鉱物とその成因 現代天文学講座2 月と小惑星 古在由秀 編 6章 197-238.
- [2] Hiroi, T., and Takeda, H. 1990: A method to determine silicate abundances from reflectance spectra with applications to Asteroid 29 Amphitrite associat-



- ing it with primitive achondrites, *Icarus*, **88**, 205-227.
- [ 3 ] Hiroi, T., and Takeda, H., 1991: Reflectance spectroscopy and mineralogy of primitive achondrites - lodranites, *Proc. NIPR Symp. Antarct. Meteorites, Natnl Inst. Polar Res., Tokyo*, **4**, 163-177.
- [ 4 ] Takeda, H., Saito, J., and Hiroi, T., 1992: A new type of Antarctic achondrites and their relationship to S asteroids and chondrites, *Proc. Japan Academy*, **68**, Ser B. No.8, 115-120.
- [ 5 ] Gaffey, M. J., Bell, J. F., Brown, R. H., Burbine, T. H., Piatek, J. L., Reed, K. L., and Chaky, D. A., 1993: Mineralogical variations within the S-type asteroid class, *Icarus*, 投稿中.
- [ 6 ] Bell, J. F., 1991: What are S-class asteroids made of? (And will Gaspra tell us?), *Lunar Planet. Sci.*, **XXII**, 81-82.
- [ 7 ] Clayton, R. N., Mayeda, T. K., and Nagahara, H., 1992: Oxygen isotope relationships among primitive achondrites, *Lunar Planet. Sci.*, **XXIII**, 231-232.
- [ 8 ] Kimura, M., Tsuchiyama, A., Fukuoka, T., and Iimura, Y., 1992: Antarctic primitive achondrites Yamato-74025, -75300, and -75305: Their mineralogy, thermal history and the relevance to winonaite, *Proc. NIPR Symp. Antarct. Meteorites*, **5**, 165-190.
- [ 9 ] Hiroi, T., Bell, J. F., Takeda, H., and Pieters, C.M., 1993: Modeling of S-Type asteroid spectra using primitive achondrites and iron meteorites, *Icarus*, **102**, 107-116.
- [10] Takeda, H., 1989: Mineralogy of coexisting pyroxenes in magnesian ureilites and their formation conditions, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **93**, 181-194.
- [11] Miyamoto, M., and Takeda, H., 1992: Thermal evolution of primitive achondrite parent body: Al heating, *Abstr. 17th Symp. Antarctic Meteorites. NIPR, Tokyo*, pp. 73-76.
- [12] Prinz, M., Nehru, C. E., Delaney, J.S. and Weisberg, M., 1983: Silicates in IAB and IIICD irons, winonaites, lodranites and Brachina: A primitive and modified-primitive group, *Lunar Planet. Sci.*, **XIV**, 616-617.