

# 隕石の反射スペクトルと小惑星表面物質

宮本正道 (東京大学教養学部)  
Masamichi MIYAMOTO

## 1. はじめに

1970年頃から小惑星の反射スペクトルの測定が精力的に行われ、それらを実験室で測定された隕石の反射スペクトルと比較・検討する事により、その類似性から小惑星が隕石の供給源であるという観測的根拠の1つとなっている。これらの研究は天文的な観測と地球科学的方法による固体物質の研究とが互いに組み合わさって進展してきている。

反射スペクトルの解釈には、現在でもいろいろな問題点が残されている。それはある反射スペクトルを与えられたとき、それから一意的に存在する鉱物の化学組成と量比を決定する方法が開発されていないからである。ある複合物質の反射スペクトルは、その中に含まれている物質の量比の簡単な関数とはなっていない。また物質の粒状性、その形、つめこみ方、あるいは光の当たる角度等に関係する。しかし研究の進展に伴い、いずれは解決され得る問題であろう。ここでは小惑星の反射スペクトルの解釈及び隕石との比較について簡単に述べる。

## 2. 隕石の反射スペクトル

通常は分光光度計に反射積分球を取り付けて0.25~2.5 $\mu\text{m}$ の範囲でHalonを標準物質として測定される。小惑星の反射スペクトルと比較のために天体望遠鏡での観測と同じ特別製の装置が使用される事も多い。

いろいろな種類の隕石の反射スペクトルの系統的な測定はGAFFEY (1976)によってなされた。実験室内で測定されたデータに基づいて小惑星の反射スペクトルの解釈がなされるので、隕石の反射スペクトルの全般的な形状が吸収帯についての研究は重要な情報を与える。主な特徴を小惑星の反射スペクトルの解釈という観点から見てみる。

上記の波長範囲ではケイ酸塩中の遷移金属イオンの結晶場分裂エネルギーに相当する吸収帯が同定のために用いられる(第1図)。カンラン石中のFeの吸収帯は1 $\mu\text{m}$ 付近にある。輝石のそれは0.9 $\mu\text{m}$ 付近と2 $\mu\text{m}$ 付近と2ヶ所に現れる。Feの含有量が増加す

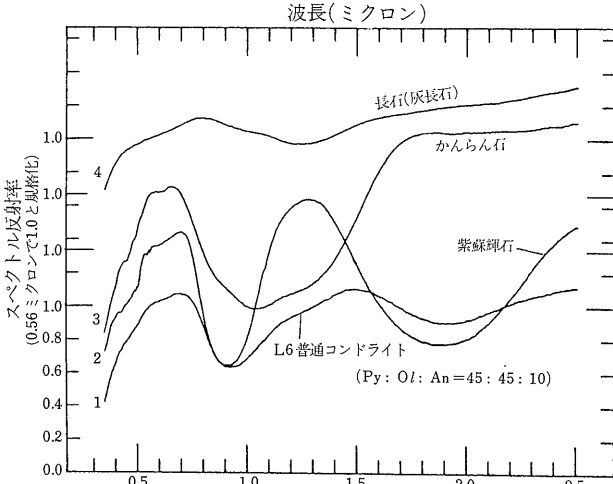
るとこれらの吸収帯はわずかに長波長側に移動するので、これによってカンラン石や輝石の大体の化学成分が解る。月や隕石試料中の斜長石は微量のFeを含んでいるので、その吸収帯が1.25 $\mu\text{m}$ 付近にある。さらにスペクトル曲線全体の傾斜も曲率も用いられる。Fe-Ni合金の反射スペクトルは右上りの傾向を示し、横軸をエネルギー( $\text{cm}^{-1}$ )目盛にするとかなり良い直線性を示す。この性質はFe-Ni合金の存在の判定に用いる。遷移金属イオンを含むケイ酸塩では青や紫外部において電荷移動による吸収があり、紫外領域で反射率が急激に落ちる。

各鉱物は以上に代表される様な特徴を持つが、複数種混合されると事態は複雑になる。カンラン石と輝石の吸収帯の位置は近いので、カンラン石の有無は輝石の0.9 $\mu\text{m}$ 付近の吸収帯の形状が輝石のみならばかなり対称性が良いが、カンラン石が存在すると長波長側にふくらんで非対称となるという性質を用いる。さらに問題はカンラン石は1.3 $\mu\text{m}$ 付近の肩の部分にわずかの吸収を示すので、斜長石と混同する恐れもある。エンスタタイトは目立った吸収帯がないのでFe-Ni合金と同時に存在すれば区別がつきにくい。また炭素や磁鉄鉱などの不透明鉱物が少量(<5wt%以下)含まれているだけでも、反射率は著しく低下しかつスペクトルの特徴が失われる。第2図に主な隕石の反射スペクトルを示す。

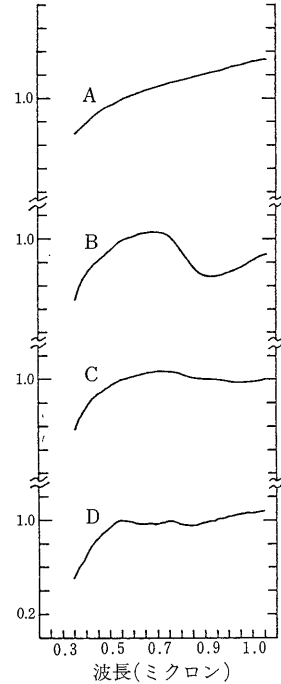
以上の様に現在の段階では反射スペクトル・データからそれ程多くの種類の鉱物を同定する事が出来ない。また通常の鉱物学的・岩石学的研究では考えられない様な鉱物種同定の間違いが起る可能性がある。従って小惑星の反射スペクトルに対応させる隕石の種類が全く違ったものになってしまうこともある。

## 3. 小惑星の反射スペクトル

McCord et al. (1970)は小惑星4 Vestaの反射スペクトルが玄武岩質エイコンドライトのそれとよく似ている事を指摘した。その後数多くの小惑星の反射スペクトルが0.3~1.1 $\mu\text{m}$ の波長範囲で測定され、隕石のそれらと比較されてきた。最近では問題となってい



第1図 代表的隕石鉱物 輝石(2) カンラン石(3) 長石(4)の反射スペクトル。1はL6普通コンドライト。(GAFFEY & McCORD 1977)。



第2図 代表的な隕石の反射スペクトル (GAFFEY & McCORD 1977) による。  
A: 鉄隕石 (4個の平均)  
B: L6コンドライト (15個の平均)  
C: C30炭素質コンドライト (5個の平均)  
D: C2炭素質コンドライト (4個の平均)

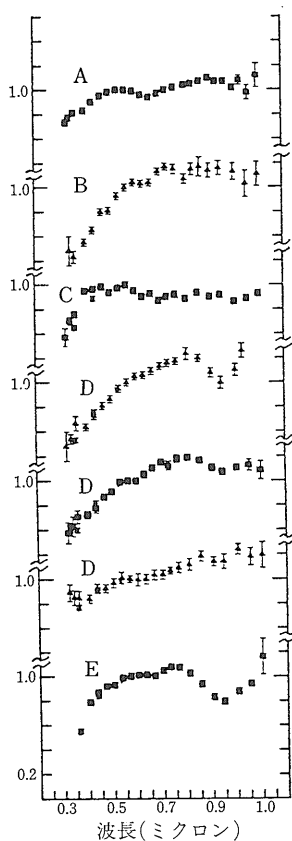
る小惑星の反射スペクトルは0.3~2.5 $\mu\text{m}$ まで精度良く測定される様になっている。反射スペクトル・データの分類は CHAPMAN et al. (1975) によって与えられ 'C-S' 分類システムとして知られている。その後 GAFFEY & McCORD (1977) は隕石の反射スペクトルの特徴を考察し それに基づいて新しい分類システムを発表した。前者の 'C-S' システムの方は多少の混乱もあるが簡単であるためよく使用される。しかし 後者の方がより正確である。

CHAPMAN et al. は 0.7と0.4 $\mu\text{m}$ でのスペクトルの強度比 可視部でのスペクトルの曲率 近赤外におけるカンラン石の吸収 および輝石の吸収帯の深さ それにアルベドと偏光測定用のデータを用いて分類した。「C型」はアルベドが9%以下で強い負の偏光度を小さな位相角のところを示し スペクトルは平坦で目立った吸収帯がない。これは炭素質 (carbonaceous) の頭文字を取ってC型と呼ばれる。このタイプは炭素質コンドライトが示す反射スペクトルに '似ている' というだけであって 表面がその物質であると確定したわけではない。炭素が含まれているという事も必ずしも意味しない。観測された小惑星のうち約80%以上がこのタイプである。「S型」とは 高いアルベド(9%以上) 弱い負の偏光度 赤みがかった(長波長側で上昇する)スペクトルを示すもので 特性吸収帯を示す場合もある。これらは比較的多くのケイ酸塩を含んでいる隕石に対応するので Silicaceous あるいは Stony-Iron の頭文字を取ってS型と呼ばれる。この分類システムでは他

に M型 E型 R型があり 未分類のものをU型としている。

GAFFEY & McCORD (1977) は 'C-S' 分類システムをもとに 隕石の反射スペクトルの詳しい解析と横軸をエネルギーに対してプロットしたスペクトルを判断して新しい分類システムを提唱した(第3図)。

彼らは赤みを帯びる反射スペクトルを示すものを「R型」とし Fe-Ni合金が存在すると考える。約30%の小惑星がこれに属する。1 $\mu\text{m}$ 付近の吸収帯の違いによってさらに細分される。ほとんど flat なスペクトルを示すものを「F型」という。0.4 $\mu\text{m}$ という非常に短い紫外吸収端が特徴である。約10%がこのタイプで 彼らはC4隕石に対応させるが正確な鉱物組成はまだよく解らない。このF型とR型との移行型 (transition) を「T型」という。スペクトルの特徴によって5つに細分される。彼らはC1~C3コンドライトに対応させている。約40%の小惑星がこのタイプに属する。CHAPMAN et al. の「C型」のほとんどはこのタイプに入る。GAFFEY と McCORD は 'C-S'



第3図  
 代表的な小惑星の反射スペクトル (GAFFEY & McCORD 1977) による。  
 A : 141 Lumen (TA, TB, TC, 型)  
 B : 80 Sappho (TD, TE 型)  
 C : 1 Ceres (F型)  
 D : 3 Juno 8 Flora 16 Psyche (R型)  
 E : 4 Vesta

がどのエイコンドライトに対応するかが正確には決定されていない。4 Vesta は玄武岩質エイコンドライトの母天体だと考えられており 場所による成分変化も調べられ 隕石の研究より提出されたエイコンドライト母天体モデルと対応した研究も進められている。

F型に分類されている 1 Ceres 2 Pallas の構成鉱物はまだ論争点が多い。C 1 C 2 あるいは C 4 コンドライト的といろいろな説がある。隕石には対応するものがないとの説もある。これは 0.4  $\mu\text{m}$  付近という非常に短い紫外吸収端を説明出来ないのが主な原因である。

表面鉱物組成と軌道の長半径との相関は 長半径が増加すると C 2 コンドライト的な小惑星の相対的存在度が多くなる傾向にあり メソシデライト的表面を持つものが長半径の小さな領域に多い事が指摘されている。しかし いろいろなタイプのスペクトルを示す小惑星が入り交って存在している事も事実である。

表面組成と小惑星の大きさの相関は 確定的でないと言うのが正確なところであろう。いくつかの相関が指摘されているが そもそも1番目と2番目の小惑星の表面物質が論争中なのであるから 今後の研究によるだろう。

#### 4. おわりに

以上の様に反射スペクトルの測定によって 表面鉱物の大体の組成は解る。しかし これはごく表面の組成である事に注意すべきである。今後は隕石との対応のみならず 反射スペクトルから一意的に構成鉱物の成分と量比を導き出す方法の開発が望まれる。測定精度が上り 観測される波長範囲も広くなる事が十分期待できるので 反射スペクトルによる表面物質の研究は将来実際にその惑星の物質が持ち帰られるまでは 重要な手段の1つであろう。

#### 文 献

CHAPMAN, C. R., MORRISON, D. and ZELLNER, B. (1975) Surface properties of asteroids: A synthesis of polarimetry, radiometry and spectrophotometry. *Icarus*, 25, 104-130.

GAFFEY, M. J. (1976) Spectral reflectance characteristics of the meteorite classes. *J. Geophys. Res.*, 81, 905-920.

GAFFEY, M. J. and McCORD, T. B. (1977) Asteroid surface materials: Mineralogical characterizations and cosmological implications. *Proc. 8th Lunar Science Conf.*, 113-143.

McCORD, T. B., ADAMS, J. B. and JOHNSON, T. V. (1970) Asteroid Vesta: Spectral reflectivity and compositional implications. *Science*, 168, 1445-1447.

システムでのC型かS型かは C 2 コンドライト的か否かと考えれば解りやすいと言っている。「A型」はエイコンドライト的な反射スペクトルを示すもので 4 Vesta と 349 Dembowska が属する。

以上の様な精力的な研究から明らかになった重要な事の1つは メインベルトの小惑星には 炭素質コンドライト的な反射スペクトルを示すものが非常に多く 普通コンドライトに属するものはほとんど存在しない事である。普通コンドライト的なスペクトルを示すものはアポロ・アモール群の小惑星に存在する事が知られている。普通コンドライトは地球に落下してくる隕石中の約80%を占めている。アポロ・アモール群は 地球軌道の近くを横切るので 地球に多く落下してくる事は十分考えられる事である。アポロ・アモール群が彗星の残骸であるかどうかに興味あるところである。433 Eros と 1685 Toro が普通コンドライト的であると考えられている。以前にはメインベルトにある 8 Flora が普通コンドライト的と言われたが 今では否定されている。

4 Vesta と 349 Dembowska はエイコンドライトに対応するスペクトルを示す。後者はまだその表面組成