

特集「小惑星レゴリスの起源と進化」

実験的手法による小惑星レゴリスの研究

亀井秋秀¹，中村智樹²，長尾敬介³，高岡宣雄²，野口高明⁴，
中村昭子¹，中山博喜¹，佐々木晶⁵

小惑星は、太陽系形成初期の環境に関する情報を現在に至るまで保持していると考えられており、彗星とともに、太陽系の起源と進化を知るための鍵となる重要な天体である。これまで小惑星に関するデータを得るためにとられてきた手段は、地上からの観測と、惑星探査機によるその場観測がある。加えて、地上で得られる隕石の分析が、小惑星についての情報を与えてくれる。隕石は我々が確実に手に入れることができる主な地球外物質であり、供給源が小惑星だと考えられているからである。

小惑星表面には大気がなく、月の表面のように隕石などの衝突によりできた多数のクレーターが存在し、また、それらの破片が降り積もって形成されたレゴリスと呼ばれる細粒で全体が覆われている。レゴリスには惑星間塵や、隕石・他の小惑星の衝突、宇宙線や太陽風の照射など、その起源や進化過程など様々な情報が含まれていると思われる。

本稿の1章と2章では、隕石中に含まれる組織から、母天体表面の物理化学プロセスを推定する研究手法がとられる。3章と4章では、隕石・岩石細粒の測光・分光測定から、レゴリスの特性とそれらデータとの相関を調べる研究手法がとられる。前者が隕石母天体形成時のこと、後者がその後の惑星間空間における小惑星表層の進化と現状について扱っている。いずれの研究においても、レゴリスの存在が重要な鍵を握っており、その元素・鉱物組成や、光

散乱特性、宇宙風化作用といった様々な側面からレゴリスを捉えてみようというのが本稿の趣旨である。

1. レゴリス物質の組成について

レゴリスとは、基盤となる岩石を覆う、様々な大きさの岩片がルーズに積み重なった層のことである。アポロ計画において活動した宇宙飛行士の足跡が月面上にはっきりと残されていることから分かるように、月では表面には特にソイルと呼ばれる細かい粉体状の物質が多い。このレゴリスは数 μm から数 km にいたる様々な大きさの隕石が月表面に衝突して、月表面の物質が破壊されたり掘り返されたりすることで形成されたものである。小惑星の反射スペクトルの偏光特性から月表面と同様の物質がほとんどの小惑星の表面に存在するといつてよいかどうかということには問題があるが、今までガリレオ、NEARなどの探査機によって観測されたいくつかの小惑星や火星の衛星の表面は月と同様な粉体物質で覆われていることが知られている。

ここでは、小惑星のレゴリスを形成している物質について、我々が手にすることのできる物質である隕石からどのようなことが分かるか考えてみたい。

1 神戸大学大学院自然科学研究科

2 九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門

3 東京大学大学院理学系研究科地殻化学実験施設

4 茨城大学理学部自然機能科学科

5 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

1.1 レゴリス・ブレッチャー (regolith breccia) について

小惑星の表面に存在すると考えられるレゴリス層に存在していたと考えられる物質がレゴリス・ブレッチャーである。前述の通り、レゴリスは未固結な物質であるので、小惑星表面への隕石の衝突によってそれが放出されたとしても、隕石のように大きな固結した物質として手にすることが出来ないはずである。それが可能になるには、レゴリスが石化作用 (lithification) を受けなくてはならない。石化作用

とは、圧密と膠着によって未固結の物質が、構成要素がお互いに結合した岩石となることである。この作用によってレゴリスは固結した岩石であるレゴリス・ブレッチャーとなり、クレーターから掘り出され吹き飛ばされるといった衝撃に耐えるようになる。なお、ブレッチャーは角レキ岩とも言い、角張った岩片の集まりと、それらの間を埋める細粒のマトリックスから成る岩石のことである。

石化作用は隕石の衝撃に伴う熱による溶結、あるいは、溶結やメルトの形成に衝撃による圧縮の効果が加わることによって起こると言われている。しか

表1 角礫岩および集塊岩組織を示す隕石の組織 (Bunch and Rajan (1988) を改変)

隕石の組織	特徴	推定される形成条件
primitive breccia	本来の形を保っているコンドリュール、ガラス、及び珪酸塩鉱物から成る不透明マトリックスを含む。タイプ3普通コンドライトで一般的。	微惑星上か、あるいはレゴリス・ブレッチャーが形成される前に隕石母天体上で形成された?
regolith breccia	未固結の破片状のデブリが、集積時の物質と考えられるものと共にlithificationしている。普通コンドライトにおいては、レゴリス・ブレッチャーは特徴的なlight-dark structureを示し、衝撃も被っているものもある。これらの隕石は太陽風組成のガスと太陽フレア・トラックも含んでいる。HED隕石においては、炭素質コンドライトのゼノリス、衝撃によって形成されたガラスやアグルーチネイトに加えて、天体表面に曝されていた証拠を持つことがある。	隕石母天体のレゴリス層において形成された
fragmental /cataclastic breccia	いろいろな岩石組織を持った岩石や鉱物片から成る。これらは表面に曝されていたことを示す証拠がない。これらは同源の溶融がおきた物質を含むことがある。このような角礫岩は、全ての種類のコンドライトと角礫岩ユークライトに見られる。	隕石母天体状への隕石の衝突によってレゴリス層よりも深いところで形成された?
impact-melt breccia	火成岩組織を示すマトリックス中に溶融あるいは非溶融のクラストや鉱物粒子を含んでいるもの。急冷したことを示す組織は少ししか持たない。いくつかの普通コンドライト (Ramsdorfなど) はこの種類に属する。melt-brecciaは普通コンドライトやホルダイトに含まれている。	母天体表面に形成されたクレーターの底で形成された。
granulitic breccia	熱変成組織 (グラノブラスティックからポイキロブラスティック組織) を持つマトリックスと熱変成した破片状の角礫から成る。いくつかのLLコンドライトやホルダイト中のある種のクラストがこれに属する。	角礫化されたあと深いところに埋没させられたか、大きな衝撃を受けてより深いところに埋没させられた。
regolith agglomerate	CV3コンドライトにおいては、マトリックスがクラスティックと考えられる場合を除いて、破片が50 vol%未満である層状の堆積組織をもつクラストのこと。CMコンドライトも類似のものを含む。	暗色包有物は同じ母天体の異なった場所から衝撃によってもたらされた破片かも知れない。

し、隕石のレゴリス・ブレッチャーでは岩片をつなぎ合わせるガラス（固結したメルト）や岩片同士の溶結がほとんど見られないことから分かるように、石化作用の実体は必ずしも明らかではない。

コンドライト隕石の母天体と考えられるような小惑星においては、微惑星から成長していく際にも、始源的なレゴリスが形成されたと考えられている。このようなものはアクリーショナルリー・レゴリスと言われる。これが固結した物質は、アクリーショナルリー・ブレッチャー（表1, accretionary breccia）と呼ばれる。

小惑星形成時に作られたと考えられるアクリーショナルリー・レゴリスの一部は小惑星の進化の過程で、石化作用、熱変成作用、あるいは水質変成作用によって固結した岩石となる。こうした固結した岩石が隕石の衝突による衝撃によって角礫化(brecciation)を受けて、あらたにレゴリス物質が形成される。小惑星全体を破壊するような大きな衝突が起きない限り、小惑星の表面では隕石の衝突によりクレーターの形成が繰り返し起こり、レゴリスが発達する。レゴリスが十分発達すると、クレーター形成によって、レゴリス層の掘り返しと既にあったレゴリス物質をまき散らすことが起きるようになる。これをレゴリス・ガーデニング(regolith gardening)と言う。レゴリス・ガーデニングによって、新たな物質が小惑星表面に持ち出され太陽風などに曝されたり、レゴリス中の岩片がより粉碎されたり、場合によってはレゴリスの一部が石化させられたりする。そして、小惑星全体を破壊するような大きな衝突が起こると、また、新たなレゴリス層の形成が始まると考えられる。このように、レゴリスは小惑星の進化のいろいろな時期に形成されたはずである。そうしたレゴリスの一部の石化作用を受けたものをレゴリス・ブレッチャーとして我々は手にしているのである。

角礫岩組織やそれに類縁の組織を示す隕石にはいろいろなものがある（表1）。ここでは、特にコンド

ライト隕石における角礫岩組織を示す隕石について述べたい。表1に示した隕石のうちで、レゴリス・ブレッチャーとフラグメンタル／カタクラスティック・ブレッチャーは、ともに様々な大きさの岩片や鉱物片と、それらの間を埋める細粒のマトリックス物質から成る角礫岩組織を示す隕石である（図1）。こうした隕石は、普通コンドライト(ordinary chondrite)、炭素質コンドライト(carbonaceous chondrite)、エンスタタイトコンドライト(enstatite chondrite)、ルムルチコンドライト(Rumruti chondrite)のどの種類のコンドライトにも存在している。例えば、Hコンドライトの5%、Lコンドライトの22%、LLコンドライトの23%、CMコンドライトの約50%がこのような角礫岩組織を持つと言われており[1][2]、ルムルチコンドライトにいたっては今まで見つけられたもの全てが角礫岩組織を持っている。また、普通コンドライトの場合、角礫岩組織を示す隕石が、普通コンドライトの中の化学的グループの違うものも含めて他の種類の隕石の岩片を含むことは比較的まれである。こうした例として、Hコンドライトのレゴリス・ブレッチャーであるディミット(Dimitt)隕石がLコンドライトのクラストを含んでいたという報告がある[3]。これに対して、CMコンドライトのクラストが

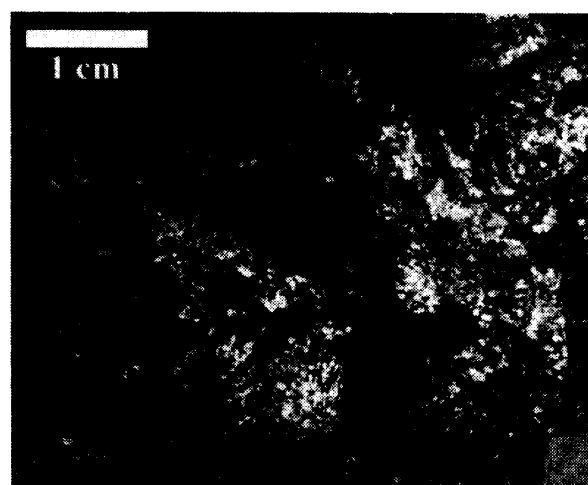


図1 Hコンドライトのレゴリス・ブレッチャーであるザグ(Zag)隕石の破断面。白っぽい岩片の隙間を暗い細粒のマトリックス物質が埋めているのが分かる。

他の種類の隕石にゼノリス(異質岩片)として含まれることは時々ある[2].

角礫岩組織を持つ隕石がレゴリス・ブレッチャーであるかどうかの判断を岩石の組織だけに基づいて行うことはかなり困難である。なぜなら、白っぽい岩片とその間を埋める暗色の細粒物質からなる light-dark structure という岩石組織が典型的なレゴリス・ブレッチャーでは見られるとはいえず、両者の最も大きな違いは、表1に示したように、隕石母天体(小惑星)表面に曝されていた証拠があるかどうかということに依っているからである。すなわち、レゴリス・ブレッチャーは太陽風組成のガスのインプラントーション(打ち込み)を受けており、更に太陽フレア・トラックを含んでいるが、フラグメンタル/カタクラスティック・ブレッチャーはこれらの特徴を持たない。以下、角礫岩組織を持つ隕石のうちで、普通コンドライトに属するものと、炭素質コンドライトに属するものをそれぞれ述べることにする。

1.2 普通コンドライトのブレッチャー

1.2.1 普通コンドライトのブレッチャーの特徴

隕石母天体(小惑星)表面に曝されていたかどうかという違いがあるが、特に普通コンドライトの場合、どちらの種類のブレッチャーも隕石母天体のいろいろな深さ(あるいは場所)の物質が、わずか数cm四方の範囲で見ても混ざっていることが知られている。例えば、Hコンドライトの角礫岩組織を示す隕石においては、その隕石に含まれる鉄ニッケル金属の化学組成から推定される金属組織学的な冷却速度が4桁異なるものが、数cm四方の範囲に含まれている[4][5]。コンドライト隕石における金属組織学的な冷却速度計は、鉄ニッケル鉱物の一つであるテーナイト(taenite)のコアと最も近い粒界からの距離と、テーナイトのコアでのニッケル含有量によって推定されるもので、500℃付近の冷却速度を表す。この方法は、母天体が冷却する際に、主要な鉄ニッ

ケル金属であるカマサイト(kamacite)とテーナイト間で、界面平衡は常に成立しているが、それらの内部は冷却中の温度に追従して結晶全体が平衡な化学組成になることができず、温度と組成の関数である両鉱物の鉄ニッケル相互拡散係数に従って組成のゾーニングを生じることを利用している。

普通コンドライトの角礫岩のうちで表面に曝されていないと考えられているものは、隕石母天体が岩石のかげらの集まり(rubble pile)であると考えない場合、隕石の母天体への衝突時にクレーターの内部や周囲のやや深いところで形成されたり、クレーターからの放出物のうちで下位のほうになり埋没したものであろうと考えられている[2]。一方、普通コンドライト隕石の母天体である小惑星が岩石のかげらの集まりになっていると考えれば、大きな衝突によって破壊された小惑星がリアッセンブル(再集積)した時に、レゴリス層が形成される小惑星の表層よりも深いところに埋没した物質が、角礫岩であっても表面に曝された証拠のない隕石になったと考えられている[6]。この場合、たまたま表面近くに位置することになった岩石が、レゴリスに進化し、その一部が焼結することでレゴリス・ブレッチャーになったという考えである。わずか数cm四方に小惑星の様々な部位からの物質が混合し、更にはレゴリス・ブレッチャーとそうではないものの組織が区別を付けられないということから、レゴリスを作る小さな衝突ばかりでなく、隕石母天体の深いところまで掘り返す大きな衝突も何度も繰り返していたであろうと考えられる。ブレッチャー中の岩石片・鉱物片には強い衝撃を受けたことを示すものがしばしば含まれることも、この考えを支持していると思われる。

固結したレゴリス物質であるレゴリス・ブレッチャーが隕石母天体上での衝突によって放出された時には、同時に未固結のレゴリス物質も放出されたはずである。このような物質は微隕石あるいは惑星間塵といった数〜数百 μm の粒子として地球に到達し

ているであろう。Beckerling and Bischoff(1995)とWalter et al.(1995)によると、普通コンドライトと同じ起源を持つ微隕石は全体の1%以下である[7][8]。これは普通コンドライト隕石の隕石全体に占める割合(約85%)に比べて非常に少ないが、粗粒の隕石と細粒の宇宙塵とでは地球に落下してくるメカニズムが違うためであろう。このことを考慮すると、未固結のレゴリス物質も地球に到達していることが推測される。だが、大気圏突入時の加熱の程度が低いものは更にその一部であると考えられるので、そうしたものから普通コンドライト隕石母天体のレゴリス環境について情報を得るのは非常に難しいであろう。

1.2.2 普通コンドライトと小惑星の反射スペクトルの比較におけるブレッチャーの意義

良く知られているように、小惑星の反射スペクトルからはS型小惑星の一部が普通コンドライト隕石に関係するものではないかと言われている。しかしながら、そのスペクトルのパターンを見ると隕石の場合とは違いが存在する[9]。それはスペクトルの赤化の程度の違いである。普通コンドライトのレゴリス・ブレッチャーや衝撃を受け細粒の鉄ニッケル金属や鉄の硫化物が析出することで黒っぽく見えるようになったブラック・コンドライト(black chondrite)と呼ばれる種類の隕石においても、短波長側と比べて長波長側での反射能は、小惑星の反射スペクトルの場合ほどには大きくなっていない[9]。

月のソイルの光学的特徴を見てみると、月での宇宙風化作用における赤化は、全体の25%未満を占めるにすぎない最も細かいフラクションが担っており、こうした光学的な変化は物質の表面に関係した現象であると言われている[10]。また、こうしたソイルを構成する鉱物粒子の縁にはアモルファスナリム、インクルージョン(包有物)に富むリム、多層構造を持つリム、発泡しているリムといったいろいろ

な種類の厚さ60-200 nmのリムが見られる[11]。そして、リムに含まれるnmサイズの金属鉄のインクルージョンがソイルの光学的及び磁氣的性質に大きな影響を与えている可能性が指摘された。また、実験的にもこのようなnmサイズのインクルージョンを持つリムは再現されており、こうしたリムの形成には微細な粒子の衝突と衝突時の加熱・蒸発・再凝縮が重要な役割を担っていると推測された[12][13](4章を参照)。もし、小惑星の反射スペクトルにおいてもこうした細粒フラクションを構成している物質のリムが最も影響を与えているとすると、普通コンドライト隕石のレゴリス・ブレッチャーをそのままあるいは粉末にしてスペクトルを測定しても小惑星のものと直接比較するのは問題があるかも知れない。なぜなら、レゴリス・ブレッチャーではその構成物が互いに焼結しているため、上記のようなリムの部分が元々あったとしても変化してしまっている可能性があるからである。今後、月のソイルなどで見出されたようなnmサイズの鉱物粒を含むリムあるいはそのようなリムが再結晶したと考えられる物質がレゴリス・ブレッチャーの細粒フラクションの鉱物粒子のリムで見出されれば、レゴリス・ブレッチャーの細粒フラクションと小惑星の反射スペクトルを比較することが重要になると思われる。

1.3 炭素質コンドライトのブレッチャー

普通コンドライトの場合と比べて、炭素質コンドライトで角礫岩組織を持つものは多い。しかしながら、レゴリス・ブレッチャーかどうかの判断は普通コンドライトの場合よりもより難しい。熱変成作用を強く受けているCKコンドライトを別とすると、多くの炭素質コンドライトの熱変成作用の程度は低い。そして、CIおよびCMコンドライトの全てと、CVコンドライトのいくつかは水質変成作用を受けている。このような理由のため、炭素質コンドライトの破壊強度は普通コンドライトに比べてかなり低

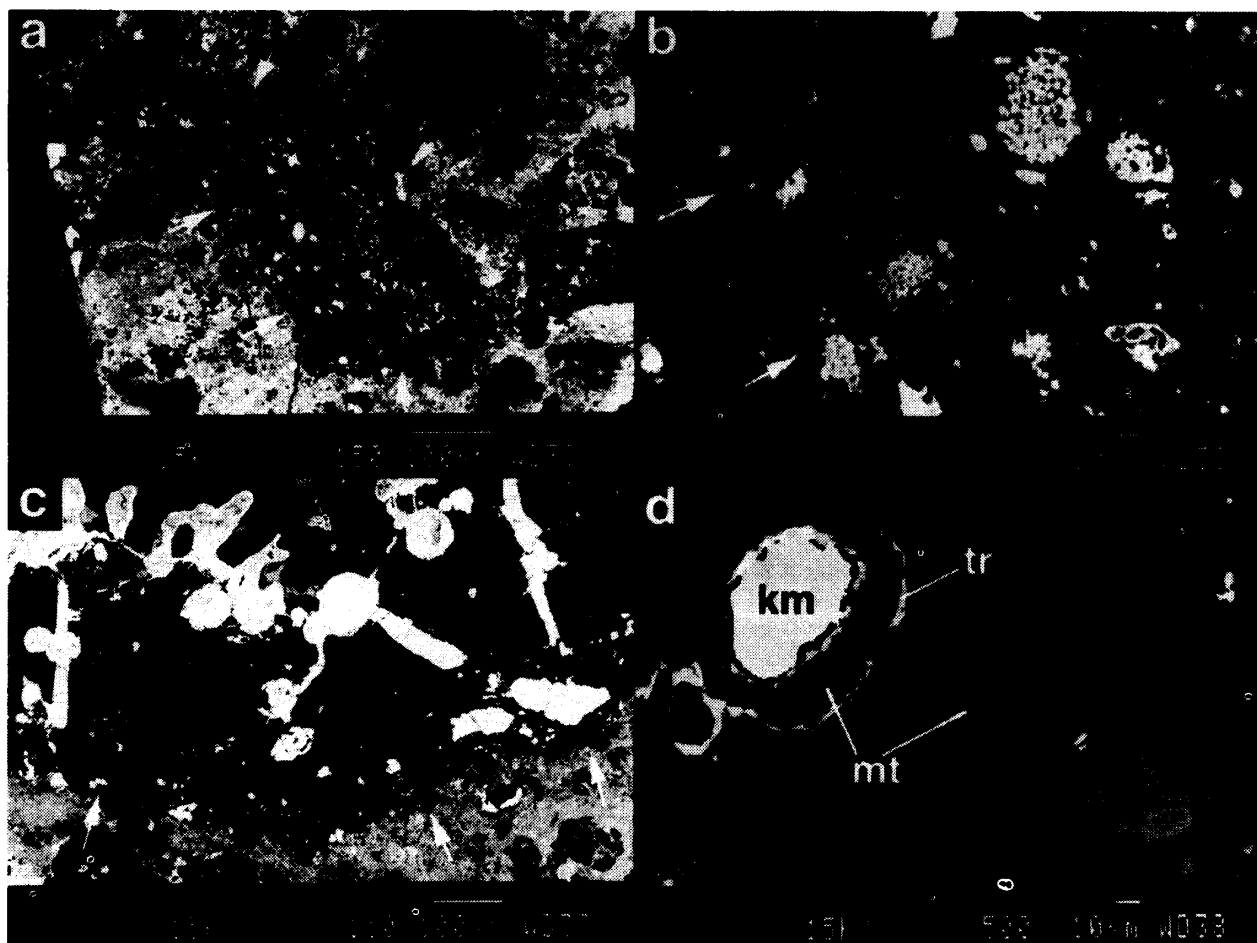


図2 CV3コンドライトであるヴィガラノ隕石の反射電子像写真。ほぼ無水鉱物から成るホスト中に、この写真に示したような水質変成作用を被ったクラストが含まれる。こうしたクラストに含まれるコンドリュールはメソスタシスの部分が含水鉱物に置換されている。(a) マグネタイトに富む層状珪酸塩に富むクラスト (b) その拡大写真。フランク状マグネタイトを含む。(c) ラス状マグネタイトを含む層状珪酸塩に富むクラスト。(d) マグネタイトの拡大写真。コンドリュールの縁に存在するカマサイトを核に成長したように見える。km：カマサイト mt：マグネタイト tr：トロイライト

い。そのため、隕石母天体となる小惑星への最終的な集積の際に形成されると考えられるアクリーショナル・ブレッチャー(表1)と、レゴリス・ブレッチャーやフラグメンタル／カタクラスティック・ブレッチャーの組織がかなり似ている。

CVコンドライトのひとつであるヴィガラノ(Vigarano)隕石は、わずか数 cm^2 の範囲にホストの含水鉱物を含まないマトリックス、コンドリュールなどとともに、水質変成作用を被っているクラストやコンドリュールを含んでいることが分かってきた(図2；[14][15][16])。水質変成作用で形成されている鉱物は、クラストのマトリックスでは主にサポナイ

ト(saponite)であり、ほとんど蛇紋石(serpentine)は含まれない。また、水質変成作用を受けたメソスタシス(mesostasis)は、緑泥石(chlorite)とおそらくNa金雲母(Na phlogopite)に置き換えられている(図3；[14])。これらのクラストに含まれるコンドリュールのサイズやコンドリュールに含まれる鉄ニッケル金属の化学組成は、水質変成作用を被っている構成要素もホストと同様にCVコンドライトの還元的サブグループに属することを示している。こうした様々なクラストやコンドリュールがひとつの母天体上の異なった場所に位置していたのが、レゴリス・ガーデニングによって混合したのか、あるいはこの隕石

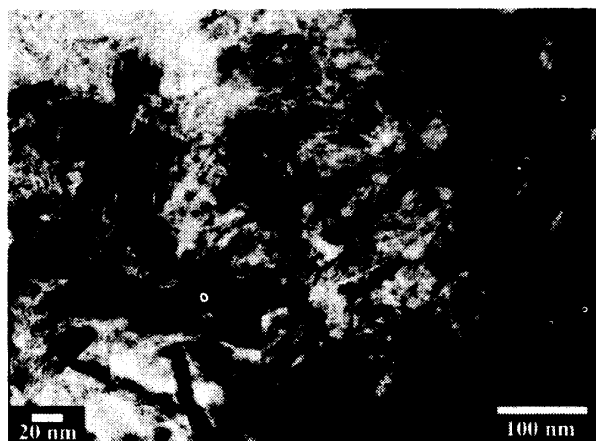


図3 層状珪酸塩に富むクラスト中のコンドリュールに含まれる、水質変成を受けたコンドリュールのメソスタシスの透過電子顕微鏡写真（明視野像）。幅数十nmの層状珪酸塩（緑泥石とNaに富む金雲母が主体）の集まりに置換されている。インセットは層状珪酸塩の拡大写真。

の母天体の最終的な集積の前に存在していた、同じ化学的グループに属するが履歴の異なった天体が集積したものなのか（アクリーショナリ・ブレッチャー）は、岩石学・鉱物学的な研究だけでは判断が付かない。この区別を付けるためにはやはり小惑星表面に曝されていたことを示す太陽風組成のガスなどの情報が必要である。

CMコンドライトにはブレッチャーが多く見られるということを先に述べた。このコンドライトについては、岩石組織学的な研究とそれに基づく希ガス同位体組成の分析によって、これらの隕石は原始太陽系初期においてレゴリスとして存在していたことが明らかになっている（[17][18]；詳細は2章を参照）。CIコンドライトも角礫岩組織を持つものが多いが、構成要素の少なくとも一部は小惑星表層にあった（すなわち過去のレゴリス・ブレッチャーであった）ことが示されている[19]。このように、CIやCMコンドライトについては、一部の特徴が水質変成作用で失われているとはいえ（2章）、太陽系初期における隕石母天体のレゴリス・ブレッチャーの化石を多く含んでいる。普通コンドライト隕石の場合は熱変成作用終了後のレゴリス・ブレッチャーしか見つか

っていないが、CMやCIコンドライトにおいては水質変成作用が終了した後の時代のレゴリス・ブレッチャーがまだ見つからない。

1.4 角礫岩組織を示す隕石についてのまとめ

原始太陽系星雲における惑星の進化においては、非常にしばしば衝突現象が起きていたと考えられる。すなわち、微惑星から小惑星を含む惑星が形成される時は常に、既に形成されていた天体の衝突と合体によって成長したはずである。しかし、その衝突速度には変化があったと考えられている。すなわち、微惑星の衝突合体が起こる時期に、衝突の相対速度が高速化したと考えられている。だが、このような衝突相対速度の変化を例えば角礫岩組織を示す隕石の構成要素の粒径分布からいうのはかなり難しいと思われる。なぜなら、例えば普通コンドライトの場合、ブレッチャーの粒径分布は複数回のいろいろな大きさの衝突の結果を重ね合わせたものだからである。

このようなブレッチャーは隕石母天体における熱変成作用が終了してからのレゴリス形成に対応した岩石である。なぜなら、先に述べたように金属組織学的冷却速度計が示すように500℃以下まで冷却した熱史の異なった物質が混合しているからである。より高温での熱史の違いを反映すると考えられる珪酸塩鉱物の組織の違い（それは岩石学的タイプの違いに反映されている）はあるが、鉄ニッケル金属からは500℃付近の冷却速度にばらつきのないというようなブレッチャーはまだ発見されていない。これは、熱変成作用の起こっている期間が非常に短く、その期間に形成されたレゴリス・ブレッチャーがほとんどなかったのか、そのような岩石がたまたま隕石として地球にもたらされていないだけなのかは分からない。あるいは、普通コンドライトの母天体での熱変成作用が起こる前や、起こっている間にもレゴリスの形成があったが、熱変成作用による再結晶

と焼結が十分に進んでいなかったために岩石の破壊強度が低く、明瞭な角礫岩組織を持たなかったうえ、更に熱変成作用によって角礫岩であったことが分からなくなっている隕石があるのかも知れない。

宇宙風化作用の解明という点については、先に述べたように、普通コンドライトのレゴリス・ブレッチャーの最も細かいフラクシオンの研究が重要になるであろう。その研究の進展によっては、小惑星レゴリス中のソイルと比較できるより詳しい情報が得られるかも知れない。

それに対して、炭素質コンドライト、特にCMコンドライトやCIコンドライトからは、原始太陽系星雲においてガスが吹き払われる時期と隕石母天体の最終的な集積から母天体表面におけるレゴリス層形成にいたる時期、及び水質変成作用の起きた期間との間の時間関係を推測する手がかりが得られつつある[17][18]。今後、更にC型小惑星の進化（特に表面付近の）について分かってくると思われる。

2. 始源隕石の希ガス局所分析に基づいた含水小惑星のレゴリスの起源

2.1 始源隕石母天体のレゴリス

太陽系初期に形成された化学的に未分化な小天体は、他天体との衝突合体、又は破壊により進化していったと考えられる。従って、小惑星の表面では角礫化が進行する。角礫化の程度は、形成期的小天体では、衝突の規模や頻度とともに小天体の成長速度も重要なパラメータとなる。

小天体内部と宇宙空間との境であるレゴリスは宇宙線照射を常に受けている。太陽系内での宇宙線は太陽から来る太陽風と太陽系外部の不特定多数の恒星などから来る銀河宇宙線である。両者はエネルギースペクトルが大幅に異なり、前者は低エネルギー側（～100 KeV）の強度が非常に強いスペクトルを持つが、後者は高エネルギー領域（100 MeV～10 GeV）

まで比較的フラットである。また、太陽風には定常成分と異なり、間欠的な太陽フレアに伴う高エネルギー成分（1 MeV～100 MeV）も存在する。太陽風はレゴリスが宇宙線に曝されると、インプランテーション（打ち込み）や、スポレーション（核破碎反応）で希ガスや他の微量元素の同位体比が変化したり（例えば $^3\text{He}/^4\text{He}$, $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ ）、放射性核種が生成したりする（例えば ^{10}Be , ^{26}Al ）。エネルギーの低い太陽風は、レゴリス表面のせいぜい100 μm 程度の深さまでしか影響を及ぼさないが、銀河宇宙線は表面から数mの深さまでレゴリス構成物質（レゴリス及びレゴリス・ブレッチャー）の同位体比に影響を及ぼす。このような宇宙線による影響と衝突による岩石層序の混合により、レゴリス起源の隕石は通常複雑な希ガス三次元分布を示す。

ここで紹介するCMタイプの炭素質コンドライト隕石は、主に隕石母天体の水質変成で形成された大量の含水鉱物を含む。このことは隕石母天体は含水小惑星であり、少なくともある時期、母天体に水（氷）が存在していたことを示唆する。また、希ガスの原始成分（隕石母天体が生成された時に既に含まれていた希ガス）を高濃度で含む。従って、CMコンドライトの母天体のレゴリスは、前述した太陽風成分と銀河宇宙線照射起源成分、それに加えて原始成分の三成分の希ガスが混在する。含水小惑星のレゴリスの起源と形成プロセスを知るには、これら三成分の隕石中での分布と角礫化組織との対応を知る必要がある。そのため筆者等（中村（智）・長尾・高岡）は、CMコンドライトの厚さ200-300 μm 程度の研磨切片を、電子顕微鏡による岩石鉱物学的な構成物質の同定の後、世界有数の感度を誇る東大長尾研のレーザー抽出型希ガス質量分析計で局所分析を行った[20]。ここでは、レゴリス進化という側面に関連した結果のみを簡潔に紹介する。分析結果の詳細はオリジナル論文を参照されたい[17][18]。

2.2 角礫化したCMコンドライトの組織

CMコンドライトの約半数は角礫化しており，そのような隕石は主に2種類の岩相(Lithology)から成ることが知られている[21]．筆者等(中村(智)・長尾・高岡)が研究した4種(マーチソン(Murchison)，マーレイ(Murray)，ノゴヤ(Nogoya)，やまと 791198 (Yamato 791198))の隕石の研磨切片も2種の岩相から成り(図4a, b)，両者の割合は隕石ごとに異なっていた．2種の岩相はPAR(Primary Accretionary Rock)とCMX(Clastic Matrix)と呼ばれる[21]．PAR(図4a)は一塊の岩片で，コンドリュールとその周りのダストリム，更にその外側はFe, S-richなPCP

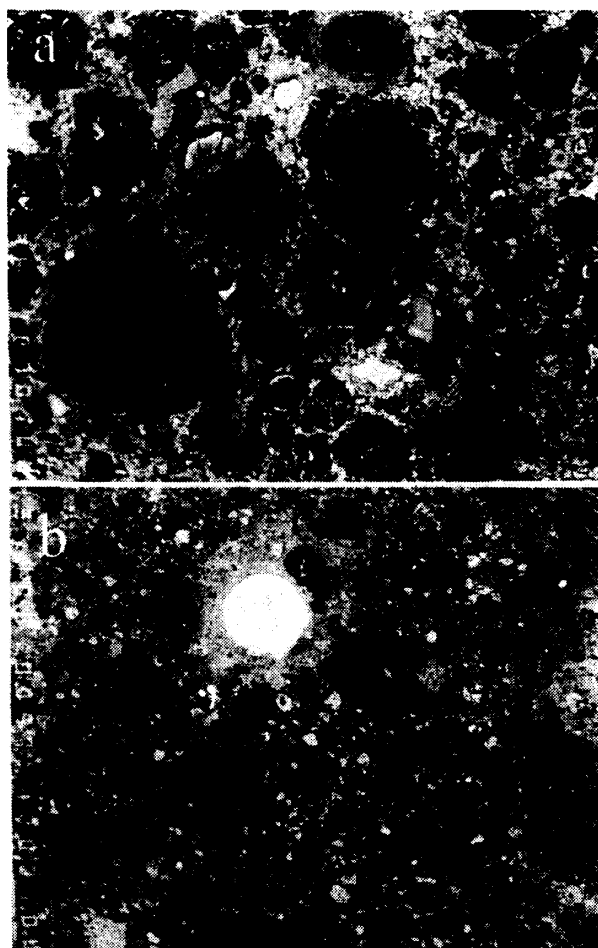


図4 (a) PAR 内部の組織．マーチソンCMコンドライト隕石の研磨切片表面の電子顕微鏡による反射電子像．コンドリュール(図中黒くて比較的丸い物質)の周りは常にダストリム(灰色)で覆われている．このダストリムの外側に点状する白色の楕円形の物質がPCP．(b) マーチソンCMコンドライト隕石のCMX 内部の組織．角張った細粒の含水及び無水鉱物の集合体．(a) (b) ともに写真の横幅5 mm．

(Poorly Characterized Phases)と呼ばれる物質[22]に富む部分で構成される．このコンドリュール，リム，PCPに富む部分から成る規則的な構造はPAR全域にわたって確認されるため，PARはその名が示すとおり，隕石母天体が集積した時の構造を残しているものである．一方，CMX(図4b)はPARが衝突時の圧力で破碎されてできたと考えられ，細粒な鉱物片が固結したものである．PARに見られるような構造の規則性はないが，構成鉱物種，バルクでの主要元素組成(Si, Al, Mg, Ca, Fe等)は，PARとほぼ等しい．CMXの中に様々な大きさ(数cm以下)のPARが含まれているのが，角礫化したCMコンドライトの一般的な構造である．

CMコンドライト中のPARのサイズ分布は，含水小惑星の衝突によるレゴリス進化の重要な情報になり得るが，まだ詳しく調べられてはいない．PARの判別は，普通コンドライトの角礫の判別と異なり電子顕微鏡を用いた観察が必要で，統計的有為性を示すのに十分なデータを取るには膨大な時間を要する．しかしながら，CMコンドライトを角礫化した衝突の衝撃圧は低かったと思われる．根拠は2つあって，CMコンドライトの特定鉱物の衝撃圧起因の組織観察から，CMコンドライトがその全生成過程で経験した衝突による衝撃圧は他の隕石に比べると低く，約10 GPa以上の衝撃圧を保存しているものは少ない[23]ということと，角礫化したCMコンドライトが，一部を除き，脱水せずに含水鉱物を保持していることである．CMコンドライトの含水鉱物は20 GPa程度の衝突で脱水することが知られている[24]．

2.3 希ガス微細分布に基づく角礫化したCMコンドライトの形成過程

約50 μm 径のレーザー光を用いた局所希ガス分析の結果，PARからは原始成分と宇宙線照射起源成分の希ガスが検出された(図5)．原始成分の希ガスは特にコンドリュールの周りのダストリムから高濃

度で検出された。その希ガス組成から、このダストリムには太陽系外起源のダイヤモンド[25]と、太陽系起源だと考えられている希ガス原始成分の担体 (Phase Q ; [26]) が、ほぼ均質に分布していることが分かった。(注：Phase Qとは始源隕石中のアルゴン、クリプトン、ゼノンの原始成分の大部分を保持している希ガス担体で、まだ特定されていないが、おそらく炭素質物質の表面付近であろうと考えられている。Phase Qに保持されている希ガスは太陽風希ガスと比べると重い元素に富む元素比を示すが、同位体比は類似しているため太陽系起源だと考えられている。)このリム物質はコンドリュールが原始太陽系星雲中で周りに在った星雲ダストを付着することで形成されたと考えられており[21]、従って、リム中のダイヤモンドの均質な分布は星雲中のダイ

ヤモンドの均質な分布を示唆する。

コンドリュールのダストリムの形成、それに引き続くPARの形成は、星雲内部のダストやガスに富む暗黒空間で行われたと考えられる。なぜならPARからは太陽風成分が検出されず、PARが形成された領域は、ダストやガスにより、太陽風が遮蔽されていたことになるからである。また、この領域は銀河宇宙線からも遮蔽されていた可能性が高い。PARからは銀河宇宙線照射起源の希ガスも検出されたが、これらは隕石が最終的に隕石母天体から放出されて地球に降下する数百万年の間に生成されたものである。なぜなら、母天体形成時からのすべての照射歴を保存する安定同位体である希ガスと、母天体から放出された後に宇宙線照射により形成された放射性核種である ^{26}Al から割り出した銀河宇宙線への照射期間[27]が一致するからである。PARが星雲内でどの程度まで成長したかは、隕石中のPARからは分からない。それらは衝突により元のPARが砕けたかけらであるからである。

PARがある大きさまで成長した後に、原始太陽系星雲の散逸が起こったと考えられる。そのため太陽風や銀河宇宙線がPAR表層に降り注ぎ、PAR上では他のPARや小天体との衝突による合体と角礫化作用が進行し、初期のCMコンドライト母天体を形成したと考えられる。衝突により極細粒物質に粉碎されたPARの一部はCMXを形成し、これらは細粒であるために表面積が大きく、太陽風に曝された部分は大量の太陽風成分が打ち込まれた。このことはCMX部分からのみ太陽風成分が検出されることから実証される(図5)。電子顕微鏡による観察では、比較的場所による片寄りのない構成粒子のサイズ分布を示すCMXも太陽風成分の希ガス分布は非常に不均質である(図6)。図6で最高濃度を示す部分のCMXは、かつて太陽風に直接曝された部分であり、その後の衝突によるCMXの混合が十分でなかったために、太陽風を直接打ち込まれた部分とその下部

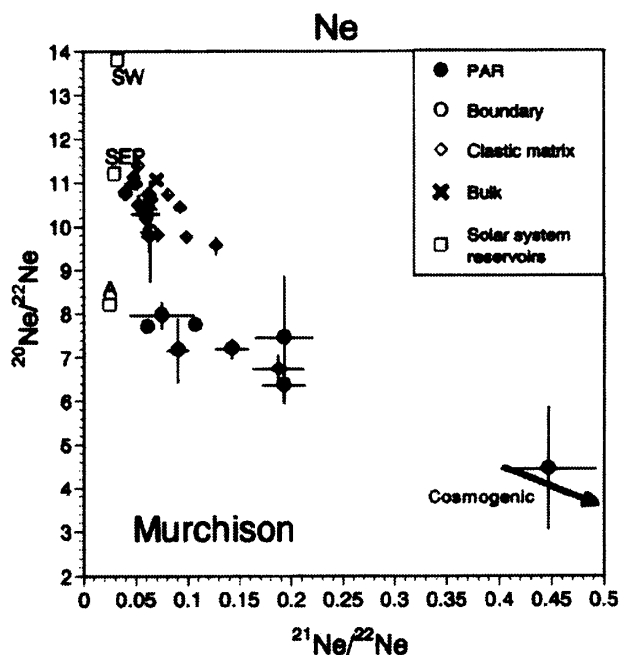


図5 レーザー抽出希ガス局所分析によって得られたマーチソンCMコンドライト隕石の構成要素ごとのNe同位体比。隕石中のNeの端成分は太陽風成分 (SW: Solar Wind, SEP: Solar Energetic Particles), 原始成分 (A), 宇宙線照射起源成分 (Cosmogenic) であり、測定値はこれらの成分の混合である。測定値がある端成分に近ければ、その端成分の割合が高い。PARは主に原始成分それに少量の宇宙線照射起源成分、CMXは太陽風成分が卓越していることが分かる。BoundaryはPARとCMXの境界部のPAR側の部分。この境界の部分から太陽風が検出されることもあり、このことはPAR表面が太陽風を直接打ち込まれた可能性を示す。

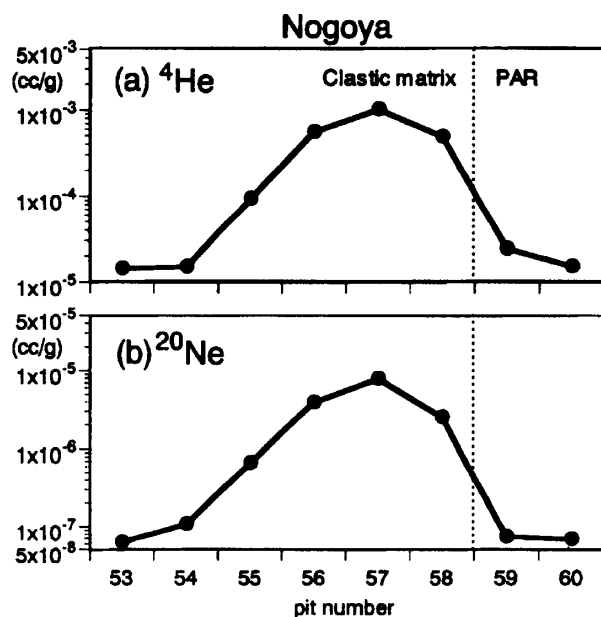


図6 ノゴヤCMコンドライト隕石の研磨切片をPARとCMXの境界をまたいで約500 μ m間隔で分析し、抽出された ^4He と ^{20}Ne の濃度。CMXの領域でこれらの同位体の濃度ピークが見られるが、これは太陽風成分が検出されたことを示す。太陽風はPARになくCMXに存在し、かつCMX中でも非常に不均質に含まれていることを示している。

にあった部分の太陽風希ガス濃度の不均一が残されている。一方CMXの銀河宇宙線照射起源の希ガス濃度はPARと大差ない。このことは、今回分析した4種の隕石が構成していた部分が隕石母天体表層数m以内に存在していた期間が短かった(およそ50万年以内)ことを示唆する。つまり、これらの隕石は太陽系の歴史の大部分を母天体の地中で過ごしたことになる。

かつて母天体の表層付近に位置していた物質は、母天体上の衝突現象により掻き乱され地中に埋没し、現在のCMコンドライト隕石(PARとCMXの混合物)の構造になったと考えられる。岩石学的証拠から[28]、地中で現在の構造になった後も水質変成は続いていたことが分かっている。この水質変成は太陽風成分が大量に打ち込まれたCMXの希ガス組成に影響を及ぼした。CMXの鉱物には太陽風の中でも比較的エネルギーの高い成分(SEPとSF: Solar Flare)、つまり鉱物内部まで打ち込まれた成分しか検出されない(図7)。このことは、太陽風の

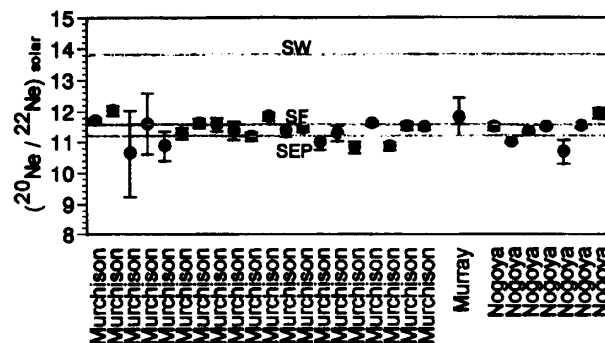


図7 三種のCMコンドライト隕石の太陽風成分のNe同位体比(原始成分と宇宙線照射成分を差し引いて求めたもの)。これらの隕石の太陽風成分は低エネルギー成分(SW)が欠損し、高エネルギー成分(SEP, SF)が卓越していることを示す。

低エネルギー成分(SW)が打ち込まれた鉱物の表面はすべて希ガス保持力の弱い含水鉱物へと変成され、そのため希ガスを失ったと解釈できる。つまり鉱物に打ち込まれた太陽風の一部分が水質変成により脱ガスしたということである。この現象はCMコンドライトに限らず、他のCIやCRコンドライトでも見られる。水質変成がいつ始まっていつ終わったかはまだ良く分かってないが、大規模な水質変成で形成されたとされる炭酸塩鉱物の形成年代から[29]、水質変成は太陽系形成の最も初期に起こった可能性が高い。今回分析した隕石は太陽風の打ち込みの後に水質変成を受けた証拠を残していることから、これらの隕石の構成物質が母天体表層のレゴリスに位置し、太陽風に曝されていたのは太陽系形成初期であり、従って、これらはレゴリスの化石である可能性が高い。今後この種の隕石の角礫化作用に焦点を当てた研究を行えば、含水小惑星のレゴリスがどのように進化していったかをより定量的に議論できるようになると考えられる。

3. 光散乱実験

表面を視覚的に模擬しようとする色(反射率の波長依存性)だけでは足りない。表面の質感は、光の反射の方向依存性で表現される。鏡のように磨か

れた面は、面の法線方向について光源に対称な方向に光を反射させる（鏡面反射）。一方、おしろいを厚くぬったような「マット」な面は全方向に光を反射させる（拡散反射）。コンピュータ・グラフィックスでは、このような鏡面反射成分、拡散反射成分、それにこの2つでは表現しきれない分を補う「げた」成分、の3つを適当な割合で調合していることが多い。

太陽反射光絶対・相対強度の波長依存性（すなわち絶対・相対スペクトル）は、太陽系天体の表面の、主として物質組成を知る手段として用いられてきた（ここで、主としてと書いたのは、スペクトルも粒径等によって変化することが知られているからである）。他方、反射光にはスペクトル以外の特性、すなわち、冒頭の方角依存性（光の入射角、出射角、光源と反射面と検出器の成す位相角による）や、偏光状態という特性がある。これらは、表面物質（光学定数）だけでなく、表面の構造（凹凸、レゴリスの粒径、粒子の配置など）に強く影響される。

偏光特性については、本収録の観測の章で取り上げられているので、ここでは、光散乱（強度）の方角依存性について、現在の課題を最近の研究結果を交えながら紹介する。

3.1 過去の研究成果から

月や惑星の衛星、小惑星など大気を持たない天体の測光観測から、位相角に伴い輝度は特徴的な変化を示すことが分かっている。それぞれ絶対輝度には違いがあるが、位相角が小さくなるにつれ増光するという現象（opposition effect）が共通に見られる。このような測光位相曲線は、岩石・隕石などを粉砕し作成した模擬レゴリス層による光散乱実験で再現されることが確認されてきた。Egan et al.(1973)は、波長(U: $0.36 \mu\text{m}$, G: $0.54 \mu\text{m}$, R: $0.67 \mu\text{m}$)や入射角(0° , 30° , 60°)、粒径による反射率位相曲線の違いについて示した[30]。Capaccioni et al.(1990)は、輝緑岩

(diabase)やカンラン岩(peridotite)による反射率位相曲線の粒径・空隙率依存性を示した。粒径が小さくなると反射率が高くなるのは、吸収率が粒子中を通過する光路の長さに比例するためであると説明した。また、隕石を細粒化した粒子の反射率曲線の形は、粒子の光学的性質（透明度、明るさ）によることを示した[31]。

測光位相曲線を物理的に解釈すると、絶対輝度はレゴリス粒子の平均1回散乱反射能と位相関数、つまり、鉱物組成や粒径・形状に依存する。一方、opposition effectはレゴリス層の表面構造にも依存すると考えられる。従来、opposition effectの原因は主にレゴリス粒子自身が作る影の影響(shadow hiding)であると考えられてきた。つまり、位相角が大きい場合、観測方向が太陽光入射方向と異なり影ができ光度が下降するが、位相角が小さくなるにつれ、それらの方向が近づき影ができなくなり光度が上昇するというわけである。このため、shadow hidingは影を作りやすい暗い天体のほうがより効果的だと思われていた。つまり、反射率が高いと幾何学的に影であっても多重散乱により影はなくなるからである。ところが、Europaなど氷衛星の観測やアルミナ(Al_2O_3)などの実験から、明るい天体・物質でも位相角が 0° 付近で狭く強いopposition effectが確認された。この原因は位相の揃った後方散乱の干渉(coherent backscattering)によるのではないかと考えられている。

小惑星表面などレゴリス層の測光観測データを解析する際には、Hapkeのbidirectional reflectance（二方向反射率）モデル[32]が広く用いられ（ある面がJの照度で照らされ、入射角*i*, 出射角*e*, 位相角*g*で観測される輝度値がIの時、bidirectional reflectanceを*r*とすると、 $r(i, e, g) = I/J$ である）、次の5つのHapkeパラメータにより表面状態や物質について議論されてきた。（括弧内はHapkeによる定義）

a) ω (single-scattering albedo)

b) ξ (asymmetry parameter)

ω は表面が明るいか暗いかを、 ξ は光をどの方向(正なら前方散乱, 負なら後方散乱が強い)に散乱するのかを表す。主に1回散乱に関係するパラメータなので、粒子の鉱物組成や粒径, 形状などに依存すると思われる。

c) B_0 (opposition surge amplitude)d) h (opposition surge width)

Opposition effectの強さと幅を表す。HapkeモデルではShadow hidingを考えており、 B_0 と h の大きさは、粒径分布や空隙率, 凹凸などの表面構造にも依存すると思われる。

e) θ (macroscopic roughness)

測定機器の分解能以下の表面凹凸を表し、表面起伏の平均勾配として定義される。

これまでの地上観測のように限られた位相角範囲の測光データでは、 ω 以外のHapkeパラメータは固有の値で決めることができないと言われていた(つまり、解がいくつもあるということ)。近年では、探査機による観測などで広い位相角範囲での測光データが得られるようになったが、Hapkeパラメータが本当にレゴリス層の物理特性を反映しているのか再検討が必要とされている。例えば、一般的にレゴリス粒子程度の粒径(数十～数百 μm)の鉱物では前方散乱成分が卓越している(ξ は正)のに対して、小惑星観測データから得られる ξ は負であることが挙げられる。この理由として、粒子の不規則な形状や複雑な組成、観測された位相角範囲が狭いことなどの可能性について検討がなされている。また、最近の月面画像の表面凹凸解析結果と月面の光散乱特性の比較から、 θ はsub-mmスケールの凹凸と関係があると示唆されている。

3.2 最近の研究結果から

近年では、天体の測光位相曲線をより理解するために、opposition effectが起こる低位相角と、探査機による観測が可能となった高位相角での詳しい実験結果が要求されている。それらに加えて、光学定数や粒子粒径, 表面凹凸など表面物理特性が既知な試料を使った実験的研究が、光散乱モデルの確立のためにも有効である。

Hapke *et al.*(1998)は、月試料による直線偏光, 円偏光の反射率測定から、月表面のopposition effectは位相角が 2° 以下のcoherent backscatteringと 8° 以下のshadow hidingの重ね合わせで表されることを示した[33]。

Nelson *et al.*(1998)の実験では、円偏光したレーザー光を入射したところ、反射率の高い試料ほど位相角が 2° 以下で円偏光度が増すことを示した[34]。依って、氷衛星など反射率の高い天体のopposition effectは、従来言われていたshadow hidingよりもcoherent backscatteringのほうが主要な要因であることが証明された。

筆者等(亀井・中村(昭))は、高位相角での測定に重点を置いた実験から、異なる位相角範囲によるHapkeパラメータの比較を行った。反射率測定の結果を図8に示す。試料には2種類の異なる粒径分布に篩い分けしたカンラン岩(dunite)とアエンデ(Allende)隕石(炭素質コンドライト), ガオ(Gao)隕石(普通コンドライト)を用いた。入射角が 0° の時の位相角範囲は $2 \sim 80^\circ$, 75° の時には $2 \sim 155^\circ$ である。粒径による違いを見ると、粒径の小さな試料のほうが反射率が高い傾向が見られ、カンラン岩のように光学的に明るい物質ほど、この傾向が顕著であった。位相角依存性を見ると、opposition effectが確認でき、アエンデ隕石のように光学的に暗い物質のほうが、より顕著に増光した。これらの結果は過去の実験結果に矛盾しない。また、広い位相角範囲($2 \sim 155^\circ$)の測定結果から、全ての試料において高

位相角で前方散乱成分と思われる反射率の上昇が見られた。この結果は、前節で触れた、 ξ についての論争にひとつの決着をもたらすと期待される。

また、筆者等（中山・中村(昭)・亀井）は表面構造が、光散乱にどのような影響を与えるのかを調べている。表面粗さ測定器により表面の面傾斜を異なるスケール($\mu\text{m} \sim \text{mm}$)ごとに求める。図9は、45-53 μm に篩い分けしたカンラン岩粒子で2種類の異

なる表面構造（滑らかな状態、粗い状態）を作成し、表面の粗さ分布を求めた結果である。図10は同サンプルを用いて光散乱実験を行った結果であり、表面構造の違いで異なる光散乱特性が得られた。表面構造が与える影響は、高位相角(150° 付近)と、低位相角(0° 付近)で顕著に見られた。今後、粗さ分布と光散乱特性との関係について、定量的な実験データをもとにした議論が進展するであろう。

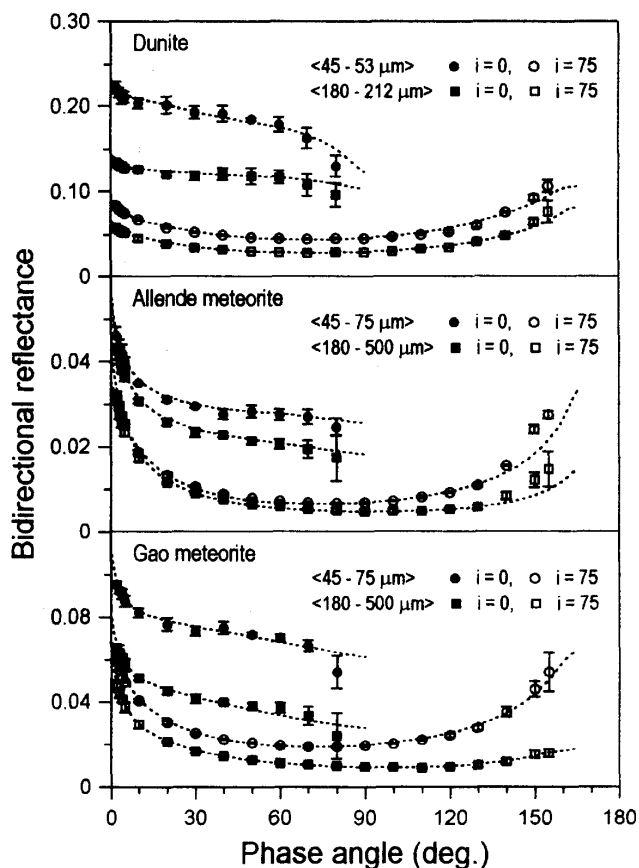


図8 光散乱実験によるカンラン岩、アエンデ隕石、ガオ隕石の反射率位相曲線。

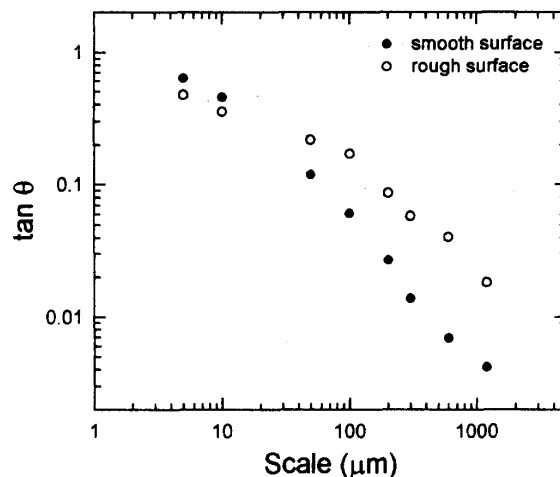


図9 表面粗さ測定器によるカンラン岩粒子層の各スケールにおける平均の粗さ。

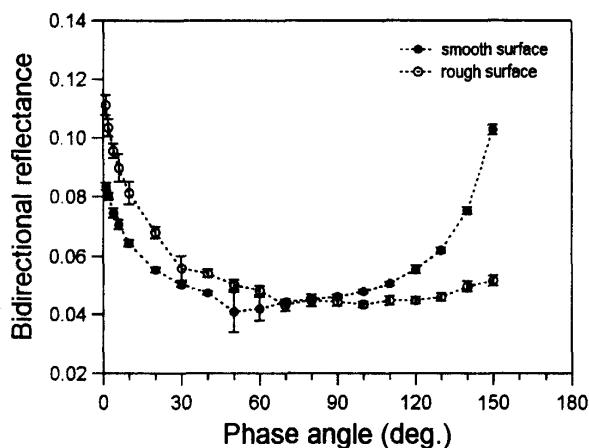


図10 図9と同サンプルを用いた光散乱実験による反射率位相曲線。

4. 宇宙風化作用

小惑星は可視・近赤外領域の反射スペクトルの違いからいくつかのグループに分類されている。小惑星の表面はレゴリスに覆われていると考えられる。そのため、対応する反射スペクトルを求めるため、隕石を粉末状にしたものの反射スペクトルが計測された。これを小惑星のスペクトルと比較することで、観測されている小惑星の組成を推定することができる。

レゴリスに覆われた小惑星の反射スペクトルと隕石のスペクトルの間には大きな違いがある。S型小惑星に対応する隕石はほとんど存在せず、一方、普通コンドライトのスペクトルに類似する小惑星は非常に少ない[35]。S型小惑星に近い反射スペクトルを持つ隕石は石鉄隕石である。この説明として、S型小惑星は、実際にシリケートと鉄の衝突混合物で、普通コンドライトは観測にかかりにくい小さな小惑星から供給されている、という主張がある。しかし、最近の小惑星サーベイ分光観測では、S型と普通コンドライトの間に入るスペクトルを持つ小惑星が多数発見されている[36]。また、ガリレオの観測により、S型小惑星 Ida では、クレータ内やエジェクタなど新しい表面で、普通コンドライトに近いスペクトル組成を示す場所があることが分かった[37]。このため、宇宙空間で微小隕石衝突や太陽風の打ち込みによりレゴリス表面の光学的性質が徐々に変化していく「宇宙風化作用」が重要であると考えられている。宇宙風化作用の特徴として、反射率の低下、特に紫外・可視部の低下によるスペクトルの赤化、更に吸収帯の弱化がある。Hapke (1975) は、この光学的性質の変化は sub- μ m スケールの微小鉄粒子 (SMFe = submicroscopic iron particles) の生成が原因であると考えた[38]。Keller and McKay (1993, 1997) は実際に、月面のソイルのリムで数 10 nm スケールの微小鉄粒子を発見している[39][11]。

しかし、微小鉄粒子とスペクトル変化の関係は、これまで実験的には確認されていない。

筆者等(佐々木ら)は、 μ m サイズの微小ダストの衝突現象の時間スケールに相当する 6-8 ns のパルスレーザー照射により、惑星構成鉱物試料の反射スペクトルの変化を調べた。以前の実験では照射時間スケールが長く(マイクロ秒以上)、現実の衝突加熱時間を反映していない[40]。1パルス当たりのエネルギーは 1-30 mJ である。この実験では微小隕石衝突による加熱をパルスレーザーで模擬している。レーザービームを 1mm 以下のサイズに絞ることで、単位面積あたりに与えるエネルギーは、微小隕石衝突と同等になる。小惑星や月表面を考えるために、一度粉碎して 75 μ m 以下にした鉱物粒子をベレット状に固めたものを試料としている。粉末試料にそのまま照射すると、試料が飛散するため照射効率が悪くなるためである。

照射窓のある小型真空チェンバーを X-Y ステージの上に置くことにより、真空中での均質なレーザー照射を行った。照射後のサンプルの二方向反射率を、宇宙開発事業団筑波センターの分光測定装置で測定した。入射角 30°, 反射角 0° で、250nm から 2600nm までの反射スペクトルを測定した。

図 11 にはレーザー照射によるカンラン石 (olivine; FeO 8.97 wt%), エンスタタイト (enstatite; FeO 9.88 wt%) のスペクトル変化を示してある。左側は反射率の絶対値。右側は 560 nm で規格化したスペクトルである。反射率の低下と赤化が確認された。Yamada et al. (1999) は、輝石 (pyroxene) よりカンラン石の方がはるかに変化しやすいという重要な結果を得た[12]。これは、宇宙風化作用において、鉱物組成の依存性があることを示している。この結果と対応させるため、小惑星のデータをコンパイルすると、宇宙空間ではカンラン石の多い小惑星ほど、実際に赤化が進んでいることが分かった[41]。一方で、レーザー照射によって、1

μm , $2\mu\text{m}$ の吸収帯の規格化した深さは大きく変化していない。これは、ガラス化が本質的な役割を果たしているのではないことを示唆している。

図12は、小惑星のスペクトルとパルスレーザー

照射後の反射スペクトルの比較である。左図は、A型小惑星に属する446 Aeternitasと、カンラン石のレーザー照射後のスペクトルとの比較である。パルスエネルギー30mJの照射後のスペクトルは、可視

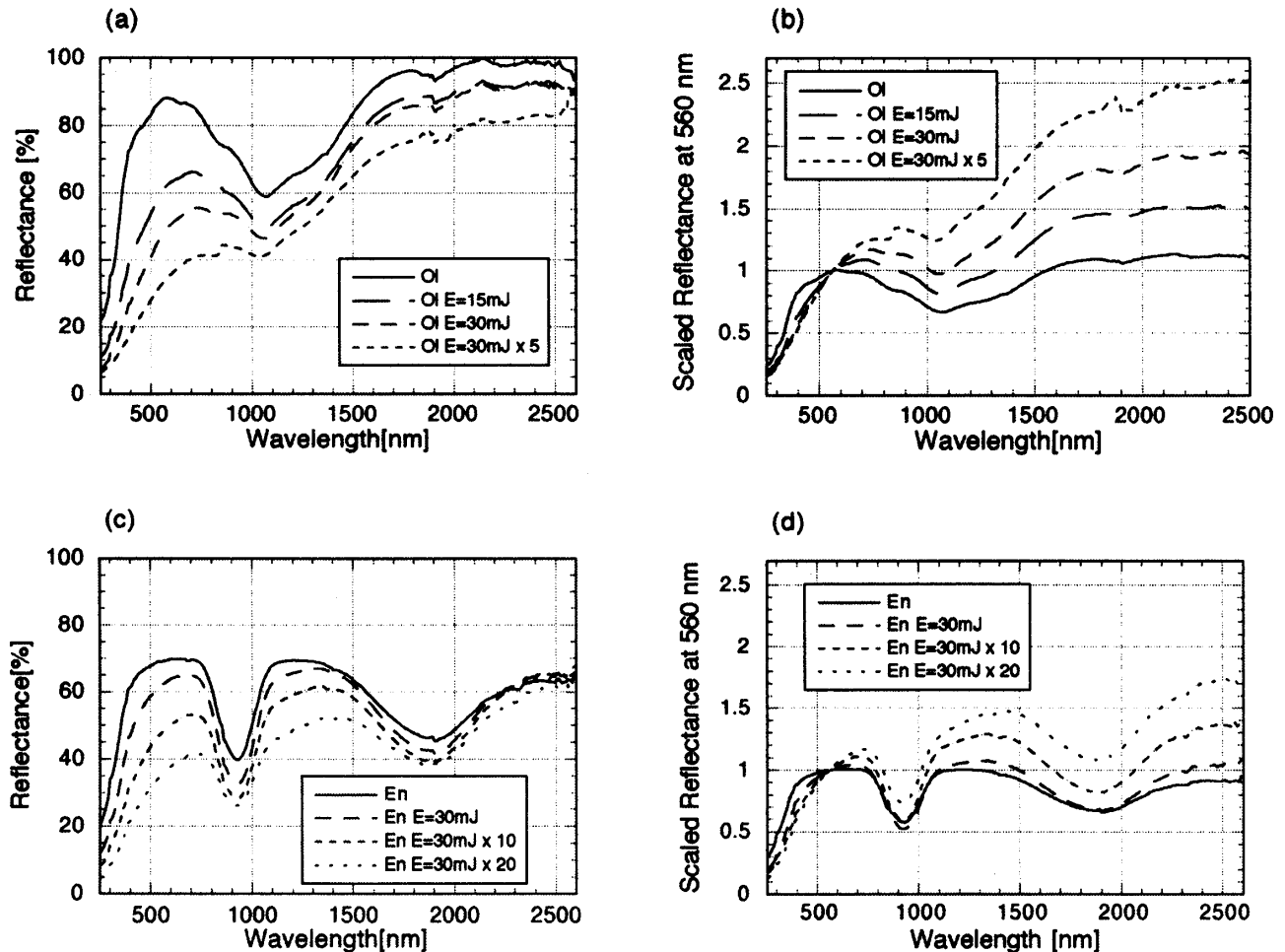


図11 パルスレーザー照射によるカンラン石、輝石のスペクトル変化。左側はもとの反射スペクトル、右側は560nmで規格化した反射スペクトル。

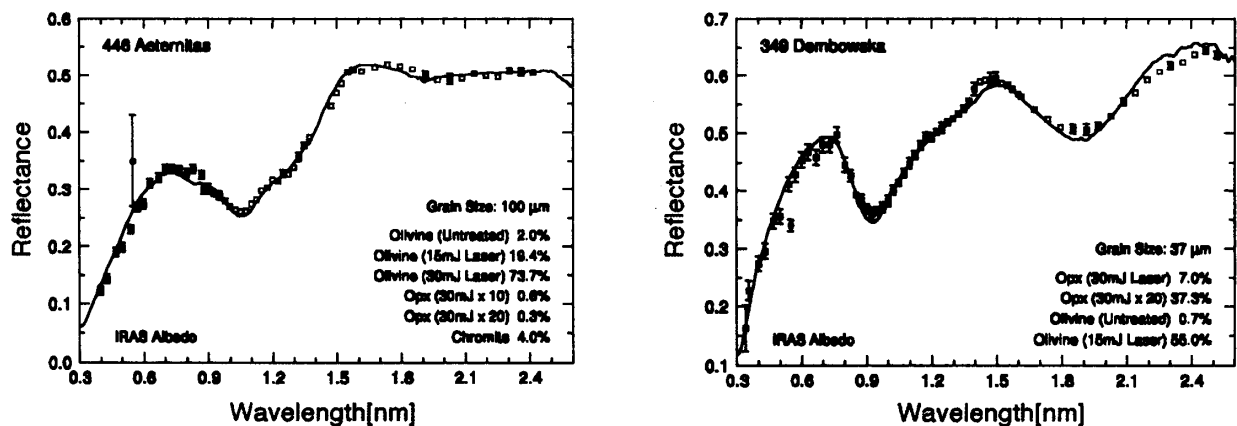


図12 小惑星 (446 Aeternitas と 349 Dembowska) とレーザー照射のスペクトルの比較。

域の傾きと2 μm 域の平坦な特徴とも、よく一致している。右図は、R型小惑星の349 Dembowskaのスペクトルと、エンスタタイトとカンラン石のレーザー照射後の反射スペクトルを混合したスペクトルとの比較である。両方の小惑星とも、スペクトルの赤化が見られる一方で、吸収帯の大きな変化がない、という特徴を、よく再現できている。

レーザー照射試料をSEMで観察すると、蒸発で形成されたような、小穴が表面に多く見られる。しかし、蒸発に伴う変成なのか、再凝縮に伴う変成で形成されたのか分からない。また、ミクロスケールで何が起きているかを調べるためには、nmオーダーの解像度で試料を観察する必要がある。そのため、ペレットの照射試料から色の変化している粒子をピックアップして、これをエポキシ樹脂に埋め込みmicrotomeで厚さ100nm以下の試料を作り、TEM(透過電子顕微鏡)で観察した。olivine粒子のリムには、多数の数10nmスケールの微小粒子が観察される(図13)[13]。元素分析ではこの領域は鉄に富んでいることが分かるので、これは微小鉄粒子と考えられ、月ソイルで観察されたものと同じものであろう。この実験では真空中でレーザー照射を行っているため、還元剤として水素などは用いていない。そのため、微

小鉄生成そして宇宙風化作用にとっては、太陽風のプロトン粒子は不可欠ではないことも示された。

一方、カンラン石結晶を磨いたものにレーザー照射を行った試料もTEMで分析した。この場合は、照射時に蒸発の起きていることは確認されているが、肉眼での色の変化は認められていない。TEMでの観察でも変化は確認できなかった。この原因として、粉末/ペレット試料ではレーザー照射に伴う蒸発の時に、凝縮できるターゲットがすぐそばにあるため、そこで選択的な凝縮変成が起きたことが考えられる。この仮説を小惑星に当てはめてみる。おそらく、粒子状の表層レゴリス層の存在が宇宙風化作用にとっては重要である。サイズが小さくレゴリス層がない小惑星では、ダストの高速衝突で蒸発した物質はすぐに外へ逃げてしまう。結果として宇宙風化作用は弱い可能性がある。

まとめ

本稿の1章と2章では、隕石中の固結した角礫岩組織から、母天体表層のレゴリスの進化過程について、3章と4章では、レゴリス本来の形態である隕石・岩石細粒の測光・分光データから、レゴリスの鉱物組成や粒径、宇宙風化作用などについて類推できることを示した。これら異なる研究手法により、物質の見地から互いに制限を与え、小惑星表面状態について共通認識を持つことが重要であり、今後望まれることであろう。

近年では探査技術の発展により、小惑星は直接接近し、あるいは表面物質を手にして調べられる対象となった。2002年には小惑星サンプルリターン計画MUSES-Cが打ち上げられる。測光・分光などのその場観測や、持ち帰ったサンプルの分析結果を、従来の地上観測や、本稿で述べた研究手法によるデータとリンクさせ、統一した小惑星表面描像を創り出せることを期待したい。

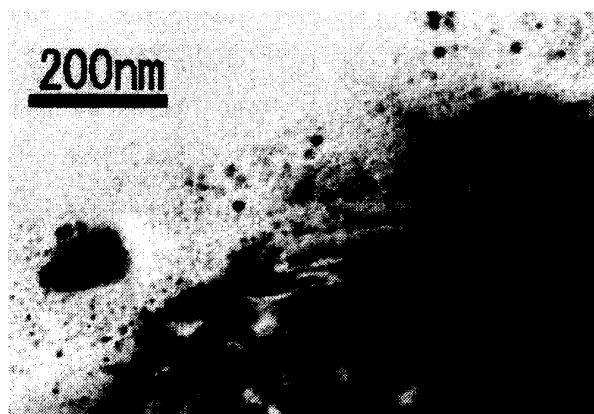


図13 30mJのパルスレーザーを5回照射したカンラン石粉末の透過電子顕微鏡写真。図の下方はカンラン石粒子で上側に蒸発物の再凝縮で形成されたリムがある。リムの中に、多数の数nm-数10nmスケールの微小鉄粒子が存在する。これは体心立方の $\alpha\text{-Fe}$ である(観察は神戸大の中村圭子氏による)。

参考文献

- [1] Rubin, A. E. *et al.*, 1983a : *Meteoritics* **18**, 179-196.
- [2] Bunch, T. E. and S. Rajan, 1988 : In *Meteorites and the Early Solar System*, Univ. of Arizona Press, pp. 144-164.
- [3] Rubin, A. E. *et al.*, 1983b : *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 13th*, A741-784.
- [4] Scott, E. R. D. and S. Rajan, 1981 : *Geochim. Cosmochim. Acta* **45**, 53-67.
- [5] Taylor, G. J. *et al.*, 1987 : *Icarus* **69**, 1-13.
- [6] McSween, H.Y. and Jr. McSween, 1999 : *Meteorites and Their Parent Planets* (2nd ed.), Cambridge Univ. Press, pp. 310.
- [7] Beckerling, W. and A. Bischoff, 1995 : *Lunar Planet. Sci. Conf. 26th*, 91.
- [8] Walter, J. *et al.*, 1995 : *Meteoritics* **30**, 592-593.
- [9] Pieters, C. M. and L. A. McFadden, 1994 : *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **22**, 457-497.
- [10] Pieters, C. M. *et al.*, 1993 : *J. Geophys. Res.* **98**, 20817-20824.
- [11] Keller, L. P. and D. S. McKay, 1997 : *Geochim. Cosmochim. Acta* **61**, 2331-2341.
- [12] Yamada, M. *et al.*, 1999 : *Earth, Planets and Space* **51**, 1255-1265.
- [13] Sasaki, S. *et al.*, 2000 : submitted to *Proc. of IAU Colloquium* **181**.
- [14] Noguchi, T. and T. Nakamura, 2000 : *EOS, Transactions, Am. Geophys. Union* **81**, 102.
- [15] Tomeoka, K. and I. Tanimura, 2000 : *Geochim. Cosmochim. Acta* **64**, 1971-1988.
- [16] Krot, A. N. *et al.*, 2000 : *Meteoritics and Planet. Sci.* **35**, 817-825.
- [17] Nakamura, T. *et al.*, 1999 a : *Geochim. Cosmochim. Acta* **63**, 241-255.
- [18] Nakamura, T. *et al.*, 1999 b : *Geochim. Cosmochim. Acta* **63**, 257-273.
- [19] Fredriksson, K. and J. F. Kerridge, 1988 : *Meteoritics* **23**, 35-44.
- [20] Nagao, K. and T. Abe, 1994 : *J. Mass Spectrom. Soc. Jpn.* **42**, 35-48.
- [21] Metzler, K. *et al.*, 1992 : *Geochim. Cosmochim. Acta* **56**, 2873-2897.
- [22] Nakamura, T. and Y. Nakamura, 1996 : *Proc. NIPR Symp. Antarctic Meteorites* **9**, 37-50.
- [23] Scott, E. R. D. *et al.*, 1992 : *Geochim. Cosmochim. Acta* **56**, 4281-4293.
- [24] Tyburczy, J. A. *et al.*, 1986 : *Earth Planet. Sci. Lett.* **80**, 201-207.
- [25] Lewis, R. S. *et al.*, 1975 : *Science* **190**, 1251-1262.
- [26] Lewis, R. S. *et al.*, 1987 : *Nature* **326**, 160-162.
- [27] Herzog, G. F. *et al.*, 1997 : *Meteoritics and Planet. Sci.* **32**, 413-422.
- [28] Hanowski, N. P. and A. J. Brearley, 1997 : In *Workshop on Parent-body and Nebular Modification of Chondritic materials*, LPI tech. Rpt. 97-01, part 1. pp. 21-22.
- [29] Endress, M. *et al.*, 1996 : *Nature* **379**, 701-703.
- [30] Egan, W. G. *et al.*, 1973 : *Icarus* **19**, 358-371.
- [31] Capaccioni, F. *et al.*, 1990 : *Icarus* **83**, 325-348.
- [32] Hapke, B., 1993 : *Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy*, Cambridge Univ. Press.
- [33] Hapke, B. *et al.*, 1998 : *Icarus* **133**, 89-97.
- [34] Nelson, R. M. *et al.*, 1998 : *Icarus* **131**, 223-230.
- [35] Wetherill, G. W. and C. R. Chapman, 1988 : In *Meteorites and the Early Solar System*, Univ.

of Arizona Press, pp. 35-67.

[36] Binzel *et al.*, 1996 : *Science* **273**, 946-948.

[37] Chapman, C. R., 1996 : *Meteoritics and Planet. Sci.* **31**, 699-725.

[38] Hapke, B. *et al.*, 1975 : *Moon* **13**, 339-353.

[39] Keller, L. P. and D. S. McKay, 1993 : *Science* **261**, 1305-1307.

[40] Moroz, L. V. *et al.*, 1996 : *Icarus* **122**, 366-382.

[41] Hiroi, T. and S. Sasaki, 1999 : *Lunar Planet. Sci. Conf. 30th*, 1444.