鉱物・岩石組織から探る惑星の進化過程

The evolution process of planets explored from the texture
of minerals and rocks

佐伯 和人 (Kazuto SAIKI)*

Study of rock texture will surely make a breakthrough in the elucidation of the evolution process of planets. This report presents two examples showing methodologies for the study of rock texture in planetary materials. The first example is the study of pallasites. Rounded texture of olivine grains was reproduced through annealing experiments and rounding kinetics was characterized. The result shows that small scale rounding of olivine in pallasites such as Eagle Station requires a rapid cooling after olivine-metal mixing. The second example is the study of polymict eucrites. The results from detailed observation of their texture show the individual origin of pyroxene fragments and suggest that the polymict breccias were generated by gathering locally ordinary eucrites and cumulate eucrites. In future planetary exploration, observation of rock texture will serve as indispensable technology.

Keywords: Texture, Pallasite, Eucrite, The moon, Asteroid, Evolution process

I. はじめに

岩石組織の研究は、組織の定量化や解釈が複雑であるため、敬遠されがちである。しかし、組織は、岩石の形成史を雄弁に物語っている特徴であり、さまざまな切り口で取り組むことが可能である。本稿では、惑星科学分野で著者が行った研究例を中心に、岩石組織を読み解く戦略の一例を示したい。

II. 惑星の初期進化研究の意義と岩石組織という切り口

46億年前に太陽系星雲ガスの凝縮物が集積して微惑星ができ、さらに微惑星が衝突合体して天体が形成した(Wetherill, 1989等)。ここで天体とは、惑星・小惑星・衛星のことをいう。半径数百km以上のサイズを獲得した天体は、集積エネルギー、放射性元素の壊変エネルギー、中心核の形成に伴う位置エネルギーや潜熱の解放により、大部分が熔融し、層分化し、あらたな物質の多様性を持つに至った(Solomon, 1979等)。これが地球型惑星の進化である。地球がどうやって進化したかを知る上でも、他の天体との比較は大変重要である。物理学や化学の研究手法は、反復可能な観察や実験が可能な現象の解明には大変効果的であるが、地球の形成のように歴史上一度しか起こっていない現象の解明には、単純には適用できない。地球の進

化は、数百万年、場合によっては数億年かかるような現象の集大成であるため、部分的にも再現実験や反復実験をする事は困難である。しかし、類似した材料がほとんど同じ時期に集積し、その後の進化が様々に異なる太陽系の兄弟の天体が数多くある。これら複数の他天体の構造を比較することは、パラメータを変えて惑星形成実験をした生成物を調べるようなもので、地球そのものや、天体形成というプロセスそのものを理解するための重要な材料となる。本稿で取り上げる隕石は、かつて表面が全熔融して地殻やマントル等の層状構造に分離した小惑星が、崩壊してできた破片だと考えられている。これらの隕石には分化した天体の表層から中心付近に至るまでの各層が含まれているはずである。従って隕石は天体地殻の垂直構造進化の過程を探るための鍵となる物質と言える。

天体の進化はリモートセンシングデータの解釈や、隕石やリターンサンプル等の試料の分析結果を元に、物理モデルを組み立てることでだんだんと明らかになってきた。岩石組織研究の重要性は、進化モデルに冷却速度の具体的な情報を付加できること。得られたサンプルの起源を明らかにし、そのサンプルの持つ化学組成に真の意味を与えること。物理的混合や変質など岩石が形成後にたどってきた変化の歴史を読み解くことができること、等である。一言で言えば、状況を知る最大の情報源であるということ

(平成16年10月8日受付、平成17年10月11日受理)

* 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻、〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町1-1

* Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University, 1-1 Machikaneyama, Toyonaka 560-0043, Japan E-mail: ksaiki@ess.sci.osaka-u.ac.jp

である。

III. パラサイト隕石の謎

パラサイト隕石は、鉄ニッケル合金の中にカンラン石が包含される特異な岩石組織を持っている (Fig. 1)。パラサイトを薄切りにすると、あたかもステンドグラスのような美しさである。比重の大きく異なる二つの物質がなぜ分離せずに共存しているのであろうか。どのような場所で、またどのような条件下でこの組織が形成されたのかは、大きな謎となっている。パラサイトの形成過程を知ること、惑星の核マントル存在形態や核マントル分離プロセスを知る鍵になるかも知れない。まず、パラサイトの起源についての諸説を紹介した後、組織に着目した研究を紹介する。

1. パラサイト隕石の起源

金属鉄中の微量元素や少量元素の研究によりパラサイト隕石はメイングループとイーグルステーショングループの二つのグループに分けられる (Scott, 1977a)。これら二つのグループはそれぞれ別の母天体上でできたと考えられている。Boesenberg ら (1995) は酸素同位体比の証拠から三つ目のパラサイトのグループ: 輝石パラサイトのグループを報告した。このパラサイトは86体積%の金属鉄と、球化した、もしくはほぼ球化したカンラン石、斜方輝石、クロム鉄鉱、そしてウィットロッカイトからなっている。パラサイト隕石形成には大きく分けて2つの説がある。一つは一次生成説で、カンラン石と金属が混ざった岩石組織は、生成時の一次特徴であるという考え方である (Buseck, 1977; Wood, 1978; Takahashi, 1983; Greenberg and Chapman, 1984 等)。もう一つの説は二次生成説 (Scott, 1977b; Ulf-Møller *et al.*, 1998; Wasson *et al.*, 1999 等) で天体衝突によって、マントル下部のカンラン石層が破碎して、そこに溶融金属核が混合したとするものである。様々なモデルをもう少し詳しく紹介する。

2. 火成集積物としてのパラサイト

このモデルでは、カンラン石と金属の混合組織は一次特徴である。Greenberg and Chapman (1984) によれば、母天体は直径 50-100 km くらいの小さな分化した天体であった。最初に天体が完全に溶融して金属鉄核を形成した。そして、溶融した珪酸塩マグマの中からカンラン石が晶出して、沈降し、密にパッキングされた集積層を形成した。集積層下部は上部のカンラン石の重みによって押し付けられ、カンラン石層の 10% ほどが核にめり込んだ。カンラン石粒界は融けた金属鉄で満たされ、パラサイト状岩石組織を持つにいたった。Takahashi (1983) はもう少し異なったモデルを提唱した。それによれば、パラサイトは部分溶融した母天体中で、メルトが珪酸塩層から完全に分離できなかった結果生じたものとされる。

3. カンラン石とメルトの巨大衝突

Scott (1977b) によれば、コンドライト的な母天体が融けて分化して、まず金属鉄コアと珪酸塩マントルが完全に分

離した。その後、ダナイト的下部マントルが断片化し、その角レキ岩化したダナイトの中に融けたメタルが貫入した。断片化と混合は巨大衝突の際に同時に起こったであろうと推定している。

4. パラサイトの冷却速度

パラサイト母天体のサイズは今日でも決着がつかない。Buseck and Goldstein (1969) は鉄ニッケル合金がニッケル含有量の異なる二つの相に離溶してできる Widmanstätten 構造の Fe, Ni の拡散プロファイルから 700 °C から 300 °C までの間は 100 万年あたりおよそ 0.5-2 °C の速度で冷却したと推定した。しかし、後に Narayan and Goldstein (1983), Yang *et al.* (1997) では、この値は過小評価であったと結論し、後者によると 100 万年あたり 2-5 °C 程度としている。Buseck and Goldstein (1969) の遅い冷却速度は、何百 km もの直径をもつ母天体の深部でパラサイトができるとするモデルの最も強力な証拠であった。新しい冷却速度による見積もりでは、パラサイト母天体の直径は 50 km にまで小さくなる (Greenberg and Chapman, 1984)。Miyamoto and Takeda (1993, 1996) と Miyamoto (1997) ではカンラン石中の FeO, MgO, CaO の濃集プロファイルを測定することで、パラサイトの温度履歴を調べることを試み、1100 °C から 600 °C のリニアクーリングでおよそ 20-200 °C/年という冷却速度を推測した。1 年あたり 20-200 °C という冷却速度は、パラサイトと同程度の熱拡散率 0.1 cm²/s の岩石層の下にあったとすると、数十 m 程度の深さに埋もれていたことを示唆している。カンラン石から計算された冷却速度は 1100 °C から 600 °C といった高温域での推定値であり、メタルから計算される冷却速度は 700 °C 以下の低温域での推定値であるので、メタルとカンラン石の混合直後は表面付近で急冷された後、断熱性の高いレゴリスで覆われたために冷却速度が遅くなるという二段階冷却モデルも考えられる (Miyamoto, 1997; Taylor *et al.*, 1987)。化学ゾーニングプロファイルのモデリングはデリケートであり、化学ゾーニングが発達した温度の推測に大きく推定冷却速度は左右される。また、試料を覆っていたものが熱伝導率の高い岩石か、熱伝導率の低い圧密の程度の低いレゴリスかによって冷却速度と埋没深度の関係も大きく変わるので、冷却環境を特定するには、さらなる証拠集めが必要である。

5. パラサイト組織再現実験

パラサイトの岩石組織は、カンラン石の形により2種類に大別される。多くのパラサイトは丸くなったカンラン石を持つが (Fig. 1a)、イーグルステーションのように角張った形を持つものもある (Fig. 1b)。角張ったものも、さらに拡大してみると、角の部分がわずかに丸くなっていることが観察される。このように角が丸くなる現象は、カンラン石が鉄ニッケル金属中で高温に保たれたためにおこると考えられている (Buseck, 1977; Scott, 1977b)。Scott (1977b) のモデルでは、カンラン石-金属間の岩石組織のバリエーションは、巨大衝突による破碎混合後のアニーリ

Fig. 1. Photographs of (a) Brenham pallasite with rounded olivines, and (b) Eagle Station pallasite with angular olivines.

ングの程度の違いを表している。もしカンラン石・金属の混合物が急速に冷え固まったとしたらカンラン石は角張ったままに残り、角張った粒の角のみがわずかに丸みを帯びるという訳である。

著者は丸くなる速度を調べることでパラサイトの熱史が明らかになるのではないかと考えた。そこで、フランスのブレイズパスカル大学実験岩石学研究室で、パラサイトの組織再現実験を行った (Saiki *et al.*, 2003)。カンラン石の粉 (Mg/(Mg + Fe) mol ratio = 0.91, 粒径 20 μm 以下) と Fe, Ni パウダーを 1 : 5 の体積比で混ぜ、ピストンシリンダ装置を使ってアニーリングをした。結果の一部の走査電子顕微鏡 (SEM) 写真を Figure 2 に示す。

1400 $^{\circ}\text{C}$, 4 時間のカンラン石の形状は、粉碎したままの初期形状とほぼ同じである。これを 1400 $^{\circ}\text{C}$, 1 週間かけることで、Figure 2c のように、カンラン石が球化したパラサイトに類似した岩石組織を再現する事に成功した。なぜ、カンラン石も FeNi 合金も溶融しない温度なのに固相のまま球に変形したのか？それは、拡散クリープという現象で説明できる。「粒子の界面エネルギーを最低とするように極小表面積の球に近づいた」と解釈できる。別の表現をすると、「角張った曲率の高い曲面にいる分子が曲率の低い

周辺に移る事で減る界面面積の分、エネルギー的に得なので、その化学ポテンシャルを駆動力として拡散フラックスが生じた」と言うこともできる。曲率とは曲面に内接する球の半径の逆数である。

アナログ実験で難しいのは、現象の再現以上に、実験室の現象と自然現象との対応をつける部分である。何百万年もかかって起きるような現象がたった 1 週間で起きたのは微小スケールの実験をしたからである。実際のパラサイトカンラン石のサイズにもどした結果を考えるためには、現象のモデル化が不可欠である。そこで、粒界拡散を仮定して次のようなモデルを作った。カンラン石表面の微小セルに流入する分子数を N , 有効拡散層厚を δ , カンラン石表面が盛り上がる高さを h とすると、Figure 3 の Δh の形状変化を起こすのに必要な時間 Δt は拡散の式を変形していくことで以下のように表すことができる。

$$\Delta t = - \frac{kT}{D\gamma\Omega\delta} \left[\frac{2\kappa_x}{x^2} + \frac{2\kappa_y}{y^2} \right]^{-1} \Delta h$$

ここで、 D はカンラン石分子の拡散定数、 k はボルツマン定数、 T は絶対温度、 κ は曲率 (カンラン石粒表面の凸面の曲率を正、凹面の曲率を負と定義)、 γ は単位面積あたりの界面エネルギー、 Ω はカンラン石分子の体積である。このモデルから、粒界拡散の場合は、形状変化の時間は粒子サイズの 4 乗に比例することが推定される。また、体積拡散の場合は拡散有効層厚もサイズ依存があると考えらることで、形状変化時間は粒子サイズの 3 乗に比例することが推定される。このモデルは、冶金の分野で古くから研究が進んでいる拡散クリープのモデルと駆動力こそ違うものの結果的にほとんど同じ形となる。体積拡散は Nabarro-Herring Creep (Herring, 1950)、粒界拡散は Coble Creep (Coble, 1963) と呼ばれている。どちらの様式の拡散が支配的であるかで、現象の速度が大きく変化する。そして、どちらが支配的かを知るためには高温保持時間と組織の変化量とを定量的に論じる必要がある。

通常粒の丸さの評価には、「周囲長 ÷ 粒と同じ面積を持つ円の半径」という値が使われる。しかし、このパラメータは角が少し取れるような微妙な変化には鈍感であるし、初期形状の影響が大きすぎて使えない。粒の重心に原点を取って粒境界までの動径の長さ変化を関数化してフーリエ解析するという手法もあるが、拡散クリープの現象と直接対応するようなデータにはならなかった。試行錯誤の結果、一つの使えるソフトウェアが完成した。それは粒周辺の形状をスプライン関数でフィッティングした後、形状を曲率分布で表す方法である (Saiki, 1997)。この手法は、ある程度丸くなった曲線の解析には大変効果があった。地層から古水理条件を読み取るためのリップル形態の解析 (井出ら, 1999)、マイロナイト中の再結晶組織の解析 (Nishikawa *et al.*, 2003) 等、他の研究者の曲線構造の解析にも役立ててもらった。しかしながら、曲率解析はある程度丸くなったものの解析には威力を発揮するが、角

Fig. 2. Secondary electron images of polished sections of the run products at 1400 °C. Run duration is (a) 4 hours, (b) 27 hours, and (c) 7 days. Scale bars = 100 μm.

Fig. 3. Sketches showing the model for matter transport near the surface of olivine grains: gradients in chemical potential along the olivine-metal interface drive a flux of olivine molecules from regions of larger curvature, such as the hump in the bottom sketch, to regions of smaller curvature.

がほんの少し丸くなるような初期の変化を検出するには不十分であった。それは、スプライン関数にフィットする過程で、細かい起伏の情報が失われるからである。さらに試行錯誤を重ね、全く新しい解析方法を考えついた。それは、観測の尺度を変える方法である。人間の眼は細かなところに注目するときは細かな尺度で測定し、形全体を把握する時は大雑把な尺度で測定をしている。その尺度の自動的な変化のおかげで、粒の角が少し取れるような変化から、粒の形全体の変化まで、一目で総合的に解釈できるのである。そこで、ソフト的に尺度を変える事を考えた。これは、フラクタル解析の手法に少し似ている。Gaussian-Diffusion-Resample Method (GDR 法) と名付けたこの方法の詳細を解説する (Fig. 4)。まず粒子形状を輝度 0 (背景) と輝度 255 (粒) の 2 値画像にし (a)、次にガウスぼかしをかける (b)。ガウスぼかしというのは、輝度をガウス分布状に拡散させる処理で、ガウス分布の 1σ の幅を変える事で、少し拡散させることも、広範囲に拡散させることもできる (Fig. 5 は 1 次元の例。実際の画像処理には

2 次元ガウス関数が使われる)。そして拡散した画像を再び 2 値化する (c) ののであるが、そのときは、元の粒と面積が同じになるように、輝度の閾値を計算して決める。そうすると、ガウス分布のぼかし幅に応じた角のとれた画像を作ることができる。最後に元の粒から角が取れた粒を引き算し、減った角の部分の面積を測定することで、球化の度合いを判定する (d)。つまり、角張った物質はガウスぼかしの半径が小さくても欠落するピクセルがあり、ある程度球化したものは、ガウスぼかしの半径を大きくしないと欠落するピクセルが出てこないという理屈である。こうして、ガウスぼかし半径と拡散・再二値化によって欠落したピクセルをグラフにする事で、異なる実験生成物画像相互で球化の度合いの微妙な変化を定量的に比較できるようになった。画像解析ソフトウェア NIH-Image のマクロ言語で記述された解析手続きのソースは Saiki *et al.* (2003) に記述されている。人間の感覚ではわかりにくいわずかな球化の差しかない場合も、この解析法を使うと、アニーリング時間に応じた差を明確に見分けることができるようになった。アニーリング温度・時間と組織の観察倍率を変えた多数の球化度データの比較の結果、時間はサイズの 3 乗のスケールを持っている事がわかり、支配的な拡散プロセスは体積拡散であることが推定された。

この結果から実際の小惑星で起こった出来事を推定する。球化したパラサイト隕石と球化していないもの (実は角がほんの少しだけ球化している) を比べると、1300 ~ 1400 °C 前後の状態では、丸いカンラン石の形成には数百万年から数千万年かかるのに対して、角張ったカンラン石の寿命は、長くても 100 年前後と計算できる。つまり角張ったカンラン石は核マントル境界のような冷却速度の遅い場所では存在できないという事になる。さらに、カンラン石と FeNi 合金の混合の時には少なからずメルトが存在していたはずであるが、メルトが存在すると拡散速度は何桁も加速すると考えられるので、ますます角張ったカンラン石は惑星表層で冷却しなくてはできないという結論に達する。パラサイト全てがそうとは言えないが、少なくとも角張ったカンラン石を含むものは、天体衝突によって

Fig. 4. The Gaussian Diffusion - Resample method. (a) Initial image constructed by picking up a certain regular number of grains from the binarized secondary electron image. For clarity, only four grains are shown. (b) Image filtered by Gaussian diffusion. (c) Rebinarized image; the total area of grains in the initial image and in the rebinarized image are equal. (d) Resultant image obtained by subtracting (c) from (a). The subtraction in (d) yields for each grain a few islands of residual pixels that correspond to the angular portions of the olivine grains. The aperture of the Gaussian diffusion filter is 1.5 pixels in the upper row and 4.5 pixels is the lower row.

Fig. 5. Sketch showing one-dimensional Gaussian diffusion.

カンラン石と鉄ニッケル合金が急速に混合したのち、天体表面付近で急冷されたものと推定できる。

前述のように、パラサイト隕石の冷却速度データや起源を示唆する化学分析データは様々な研究から提出されているが、冷却環境が複数あるという前提のもとに、岩石組織での分類を行った後、各データを再整理する必要がある。また、冷却速度の問題以前に、母天体のかなりの体積をカンラン岩層が占めていたはずであるが、カンラン岩だけで構成された隕石が見当たらないことは大きな謎である。天体の核マントル分離過程には我々のまだ全く思いついていない過程が存在するのかもしれない。

IV. ポリミクト隕石はもともとの地層の特徴を反映しているか？

小惑星にある様々な起源を持つ岩石が度重なる隕石衝突による掘り起こしのために混合して再び岩石として固化したものがある。このような多様な起源を持つ複数種

類の岩石が混合してできた隕石をポリミクト隕石と呼ぶ。一方、地殻やマントルが分離したと考えられる小惑星から来た隕石にユークライトという種類のものがある。ユークライトはパラサイト母天体の地殻を形成していたというモデルもあり、ユークライト母天体の構造の推定は小規模な天体の層分離過程のメカニズム解明の鍵となる。母天体の一つとして有力な候補は小惑星ベスタである。このユークライトの中にもポリミクト隕石がある。ポリミクトユークライトの中には種類の異なる岩石が複数含まれているため、数々の地層を掘りぬいたボーリングコアを砕いて見ているようなものである。構成岩片を細かく調べることで、地殻表面から深部までの様々な地層を復元することが可能のように思われる。著者はそのような発想で、小惑星の地層の復元を試みた。例えば、Figure 6a の Yamato82009 隕石には化学組成や鉱物組織で分類すると、5種類の起源の異なる輝石が含まれている (Fig. 6a-d)。Figure 6 では輝石に、Mg/Fe 比と離溶組織が似た輝石を含む、ポリミクトではない隕石の頭文字をつけている。D タイプは、ユークライト隕石と同じ母天体から来たと考えられているダイオジェナイト (diogenite) 隕石という隕石種の輝石によく似ている。B, MC タイプはそれぞれビンダ (Binda), ムアカウンティ (Moore County) という集積岩ユークライト隕石の輝石に、JV タイプはジュビナス (Juvinas) という普通ユークライト隕石の輝石に似ている。Z タイプは表面ユークライト隕石の輝石に似ているが、化学ゾーニング構造を持つためゾーニングの頭文字の Z をタイプ名とした。それぞれの輝石の化学組成を Figure 7 に示す (Saiki and Takeda, 1999)。マグマ分化の一般則から考えて、Mg に富むものから順に固化したと推定できるが、多くのポリミクト隕石の観察を総合すると、輝石の鉱物組織もそれを裏付けている。もっとも Mg/Fe 比の高い D タイプを除き、初期に晶出したもののほど Ca の離溶組織が発達して

Fig. 6. Photomicrographs of Y82009. (a) plane-polarized light and (b)-(d):backscattered electron images of typical pyroxenes in Y82009. (b) D and B-type, (c) B-type pyroxene with both exsolution lamellae and Fe-enriched rim and JV-type pyroxene, (d) MC-type.

Fig. 7. Pyroxene quadrilaterals showing the distribution for each type of pyroxene in Y82009.

おり、深部でゆっくり冷えたことを示唆している。Figure 6 では Ca に富む部分が暗い縞となっている。D タイプは Ca 含有量が少ないために離溶組織はできなかったと解釈できる。また、もっとも表層にあったと思われる Z タイプの輝石は Fe-Mg 化学ゾーニングを残しており、晶出後に高温環境に保持されなかった事を示唆している。鉱物組織からだけでも含有岩片の種類を区分し、冷却環境を推定することができる。

著者はこのようなポリミクト隕石を複数調べてユークライト母天体の垂直構造を推定し、次のようなモデルを提唱した。「JV タイプと似た輝石を持つ普通ユークライトという隕石と、MC や B タイプのような輝石を持つ集積岩ユークライトという隕石は同じ母天体で近接して存在しており、しかも集積岩ユークライトは集積岩といいながらも、様々な種類のものが垂直分布している」というものである。しかし、米国では、「混合後の加熱のために元の岩

Fig. 8. The liquid path and instantaneous solid path in fractional crystallization. Vertical axis is mg number ($= \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$ atomic ratio). (a) The case of maximum fractional crystallization. (b) The case of fractional crystallization with trapped liquid. The calculation assumes trapped liquid of 50% volume fraction in cumulus.

Fig. 9. Photograph of Micro-5 lunar rover.

石の化学組成は保存されない」という考えが主流であり、著者の論文は96年にリジェクトされた。そこで、著者は、元の岩石形成時の組織と混合後の影響を分離できるような岩石・鉱物組織を探した。Figure 6cのBタイプ輝石に、まさに求めていた組織があった。太い離溶ラメラができた輝石の周辺部が後方散乱電子像で明るくなっている。これは、周辺のFeに富む領域から拡散でFeが輝石内に進入してきた事の現れである。これこそが、混合後の均質化現象である。離溶組織の拡散速度と、混合後の均質化の拡散速度を見積もった (Saiki and Takeda, 1999)。アニーリング温度を1000℃と仮定すると、離溶ラメラ形成には280~400年かかる一方、Fe拡散組織は2年でできる事がわかった。温度が仮定である以上、絶対値にあまり意味はないが、これだけ時間の差があるということが重要である。この必要な時間差から、Feの拡散はラメラ形成より後の出来事であり、かつ、Feの拡散の速度は速いので、周辺の

Fe拡散部分を除いた輝石の中心付近のFe/Mg比は、少なくとも混合前に岩片が独立して存在していた状態のものを保存していると考えて良いと結論できる。

さらにもう一つ、ユークライトには大きな謎があった。ユークライトの中には、マグマから析出して集積したと考えられる集積岩ユークライトと、マグマそのものが固結したと考えられる普通ユークライトという隕石がある。これらの起源は別々に論じられるのが常であった。その大きな理由は、化学組成の整合性のなさであった。マグマとそこから晶出した結晶が集積してできた岩石には、元素分配の制約から「固相の Fe^{2+}/Mg = 液相の $\text{Fe}/\text{Mg} \times 0.30$ (主要な苦鉄質鉱物が輝石の場合)」という関係が成り立つ (Stolper, 1977; Grove, 1978; Longhi and Pan, 1988; Barrat *et al.*, 2000)。すなわち、集積した岩石はマグマよりも、分配係数によって決まる割合でMgに富み、Mgに富む結晶を落としたマグマはさらにFeに富むようになる。ところが、マグマから晶出したものが集積岩ユークライトで、残液が固まったものが普通ユークライトであると仮定して、普通ユークライト組成の液から Fe^{2+}/Mg の固液分配の計算をすると、既知の隕石コレクションの集積岩ユークライトの多くは Fe^{2+} が過剰に含まれていることとなり問題である。一方、普通ユークライトの存在は無視して、多くの集積岩ユークライトと共存する仮想マグマの Fe^{2+}/Mg を計算すると、Feに富むマグマが大量に存在することになるが、そのようなFeに富むマグマが固化したような隕石はほとんど見られないという問題もあった。これらの問題のために、両者の起源を同時に論じることができなかった。ポリミクトユークライト中に普通ユークライト的な破片と集積岩ユークライト的な破片とがどちらも見つかることから、著者は普通ユークライトと集積岩ユークライトは垂直分布していると考えた。そして、連続的につくる方法として

集積岩の鉱物粒間にマグマがトラップされた状態で沈積すれば、マグマの組成の割に Fe に富む集積岩をつくることができると考えた。このアイデアも 96 年にリジェクトされた。ところがその直後、トラップされた液で集積岩ユークライト組成をつくるというアイデアを、もっと巧妙に論じた論文が出てきた。Treiman (1997) がそれである。奇しくもその査読者をやることとなった。彼は様々な集積岩ユークライトの希土類元素の組成リストをつくり、トラップ液の混入で REE のパターンが説明できることを示した。この論文が世に出て後、集積岩ユークライトの化学組成のバリエーションをつくる原因の一つはトラップ液の量であるという考え方が学会に浸透した。トラップ液説の浸透と、先のポリミクト隕石が混合前の組成を保持できるという論文を礎に、ようやく普通ユークライトと様々な化学組成の集積岩ユークライトを一連のマグマ分化でつくるモデルを発表することができた (Saiki *et al.*, 2001)。Figure 8 は、マグマと晶出した岩石が完全に分別した場合と、岩石にマグマが 50% 混入しながら分別した場合の固体と液体の化学組成の変化を計算したものである。50% 程度の混入を過程すると、 Fe^{2+} に富む集積岩ユークライトをつくりつつ、最後は普通ユークライト組成のところでマグマの進化を止めることができ、ポリミクト隕石にふくまれている様々な組成の岩石を一連のマグマ進化でつくることができるわけである。このモデルは論文発表はなされたが、様々な種類のユークライトが同じ地域に垂直分布しているという考え方は、欧米の研究者にとっては、まだまだ突飛な説と受け取られているようである。

岩石組織から得た直感的アイデアを信頼されるモデルとするには、補完する証拠集めや、モデルを組み立てる個々のアイデアの学会への浸透など、それなりのステップが必要であることが研究を通じて実感される。母天体上の粉碎された岩片が再固結していく過程は研究例がほとんどない未開の分野であるが、岩石組織の研究がこの分野を切り開く重要な道具となるであろう。

V. 岩石組織研究の今後

著者は岩石組織研究の新たな展開をめざしている。それは、宇宙における岩石組織観察技術の開発である。現在、日本は月探査計画 (SELENE) を準備中である。今回は着陸探査ではないが、この何年か後の実現をめざしている次期月探査計画では着陸探査の構想がある。著者は岩石切断研磨装置の搭載を提案し、中央大の國井康晴博士や宇宙研の久保田孝博士の研究室で無人観測車ローバ開発 (Fig. 9) に並行して岩石研削装置の開発が進んでいる。冷却や切りくず排出のための水や大気がない環境で岩石を加工するというのは大変な挑戦である。そして、著者のところでは、岩石切断面から、地質学者が薄片を観察して得る以上の情報を抽出することを目指して、画像分光顕微鏡を使った観測技術開発を進めている。地質学者や鉱物学者が、岩石組織や鉱物組織を見ぬまま鉱物や岩石の研究を

する困難さは、本誌読者には容易に想像できるであろう。無人探査で岩石切断面の組織が観察できるようになれば、地質学者や鉱物学者は、サンプルリターン計画の実現まで傍観を余儀なくされることなく、無人探査の段階から容易に参入できるようになる。そして、固体惑星、小惑星、惑星の固体衛星へと、鉱物・岩石組織研究の領域が近い将来に一気に広がることを期待している。

謝 辞 本稿は、2003 年 11 月 1~3 日、東京・八王子で行われた YMO 鉱物科学秋の学校での講演原稿を元に雑誌用に再構成したものである。講演の場を与えてくださった三宅 亮博士、富岡尚敬博士、糺谷 浩博士、宮島延吉博士、本誌への投稿機会を与えてくださった本誌編集委員会、そして、本稿を改善する有益な助言を下された木村 眞博士と匿名の査読者の方、担当編集委員の松原 聡博士に感謝申し上げます。

引用文献

- Barrat, J.A., Blichert-Toft, J., Gillet, Ph. and Keller, F. (2000): The differentiation of eucrites: The role of in situ crystallization. *Meteorit. Planet. Sci.*, **35**, 1087-1100.
- Boesenberg, J.S., Prinz, M., Weisberg, M.K., Davis, A.M., Clayton, R.N., Mayeda, T.K. and Wasson, J.T. (1995): Pyroxene pallasites: A new pallasite grouplet (abstract). *Meteoritics*, **30**, 488-489.
- Buseck, P.R. (1977): Pallasite meteorites Mineralogy, petrology, and geochemistry. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **41**, 711-740.
- Buseck, P.R. and Goldstein, J.I. (1969): Olivine compositions and cooling rates of pallasitic meteorites. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **80**, 2141-2158.
- Coble, R.L. (1963): A model for boundary diffusion controlled creep in polycrystalline materials. *J. Appl. Phys.*, **34**, 1679-1682.
- Greenberg, R. and Chapman, C.R. (1984): Asteroids and meteorites: Origin of stony-iron meteorites at mantle-core boundaries. *Icarus*, **57**, 267-279.
- Grove, T.L. (1978): Experimentally determined FeO-MgO-CaO partitioning between pyroxene and liquid in lunar basalts (abstract). *EOS*, **59**, 401.
- Herring, C. (1950): Diffusional viscosity of a polycrystalline solid. *J. Appl. Phys.*, **21**, 437-445.
- 井出典孝, 横川美和, 佐伯和人 (1999): 曲率によるリップル形態の解析: 複合流リップルの例. 堆積学研究, **49**, 41-48.
- Longhi, J. and Pan, V. (1988): Phase equilibrium constraints on the Howardite-Eucrite-Diogenite association. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 18th*, 459-470.
- Miyamoto, M. (1997): Chemical zoning of olivine in several pallasites. *J. Geophys. Res.*, **102**, 21613-21618.
- Miyamoto, M. and Takeda, H. (1993): Rapid cooling of pallasite: Comparison of chemical zoning with primitive achondrites (abstract). *Meteoritics*, **28**, 404-405.
- Miyamoto, M. and Takeda, H. (1996): Chemical zoning of olivine in several pallasites suggestive of faster cooling (abstract). *Lunar Planet. Sci. Conf.*, **25**, 921-922.
- Narayan, C. and Goldstein, J. I. (1985): A major revision of iron meteorites cooling rates An experimental study of the

- growth of Widmanstätten pattern. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **49**, 397-410.
- Nishikawa, O., Saiki, K. and Wenk, H. (2004): Intra-granular strains and grain boundary morphologies of dynamically recrystallized quartz aggregates in a mylonite. *J. Struct. Geol.*, **26**, 127-141.
- Saiki, K. (1997): Morphology and simulation of solid state rounding process. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 1519-1522.
- Saiki, K., Laporte, D., Vielzeuf, D., Nakashima, S. and Boivin, P. (2003): Morphological analysis of olivine grains annealed in an iron-nickel matrix: Experimental constraints on the origin of pallasites and on the thermal history of their parent bodies. *Meteorit. Planet. Sci.*, **38**, 427-444.
- Saiki, K. and Takeda, H. (1999): Origin of polymict breccias on asteroids deduced from their pyroxene fragments. *Meteorit. Planet. Sci.*, **34**, 271-283.
- Saiki, K., Takeda, H. and Ishii, T. (2001): Mineralogy of Yamato-791192, HED breccia and relationship between cumulate eucrites and ordinary eucrites. *Antarct. Meteorite Res.*, **14**, 28-46.
- Scott, E.R.D. (1977a): Pallasites Metal composition, classification, and relationships with iron meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **41**, 349-360.
- Scott, E.R.D. (1977b): Formation of olivine-metal textures in pallasite meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **41**, 693-710.
- Solomon, S.C. (1979): Formation, history and energetics of cores in the terrestrial planets. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **19**, 168-182.
- Stolper, E. (1977): Experimental petrology of eucritic meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **41**, 587-611.
- Takahashi, E. (1983), Melting of a Yamato L3 chondrite (Y-74191) up to 30 kbar. *Proc. 8th Symp. Antarct. Meteorites*, 168-180.
- Taylor, G.J., Maggiore, P., Scott, E.R.D., Rubin, A.E. and Keil, K. (1987): Original structures and fragmentation and reassembly histories of asteroids: Evidence from meteorites. *Icarus*, **69**, 1-13.
- Treiman, A.H. (1997): The parent magmas of the cumulate eucrites: A mass balance approach. *Meteorit. Planet. Sci.*, **32**, 217-230.
- Ulff-Møller, F., Choi, B.G., Rubin, A.E., Tran, J. and Wasson, J.T. (1998): Paucity of sulfide in a large slab of Esquel: New perspectives on pallasite formation. *Meteorit. Planet. Sci.*, **33**, 221-227.
- Wasson, J.T., Lange, D.E., Francis, C.A. and Ulff-Møller, F. (1999): Massive chromite in the Brenham pallasite and the fractionation of Cr during the crystallization of asteroidal cores. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **63**, 1219-1232.
- Wetherill, G.W. (1989): The Formation and Evolution of Planetary Systems, Formation of the solar system: consensus, alternatives and missing factors. pp. 356, Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Wood, J.A. (1978): Nature and evolution of the meteorite parent bodies: Evidence from petrology and metallurgy. In *Asteroids: An exploration assessment* (Morisson D. and Wells W.C., Eds.). NASA Conf. Pub., **2053**, 45-57.
- Yang, C.W., Williams, D.B., and Goldstein, J.I. (1997): A new empirical cooling rate indicator for meteorites based on the size of the cloudy zone of the metallic phases. *Meteorit. Planet. Sci.*, **32**, 423-429.