鉱物の空間分布パターンからみた岩石組織定量化の試み*

Quantification of rock textures using spatial distribution of minerals*

Abstract

森下律生** 小畑正明***

Ritsuo Morishita** and Masaaki Obata***

1994年11月18日受付.

1995年5月22日受理.

** 熊本大学自然科学研究科.
〒860 熊本県熊本市黒髪2丁目39-1
Graduate School of Natural Sciences and
Technology, Kumamoto University, Kuma-
moto 860, Japan

*** 熊本大学理学部地球科学科.
〒860 熊本県熊本市黒髪2丁目39-1
Department of Earth Sciences, Kumamoto
University, Kumamoto 860, Japan

σ and τ distribution are proposed for quantifying the spatial distribution of minerals in rocks. σ distribution can distinguish the deviation from random distribution for same mineral species and τ distribution that of different minerals species. σ distribution of granite, hornfels and sandstone decrease exponentially with distance. The decreasing rate is related to the mean grain size of the minerals. σ distribution of bubbles on lava surface is smaller than zero at some horizontal distance ranges. Most τ distributions increase with distance, and converge to unity. τ distributions of biotite-quartz and K-feldspar pairs in granite shows maximum value which is greater than unity, and slowly decreases to unity with distance. It indicates the affinity of quartz, biotite and K-feldspar. τ distribution for the bubble-matrix pair for horizontal azimuth also shows the same tendency.

Key words : rock texture, crystal size, spatial correlation, digital image analysis

はじめに

岩石組織は、構成鉱物の形、サイズ、空間分布や鉱物相互の位置関係により特徴づけられる。これら諸性質のうち、空間分布や鉱物相互の関係は、岩石形成時の鉱物間相互作用を反映した重要な性質である。例えば、火成岩や変成岩の結晶作用において、ある空間領域に特定の鉱物結晶が成長しつづくと、その結晶のごく近傍には、結晶を構成する成分に乏しい微小領域が多かれ少なかれできるはずである (Carlson, 1989, 1991)。そこでは同種の結晶の核形成や結晶成長が抑制されるかわりに他の成分の濃度が高くなり、近くの結晶と異なる成分を主とする鉱物の結晶化がうながされることがあるかもしれない。このようにして、鉱物の空間分布は厳密な意味でのランダム分布から外れ、一定の準秩序構造が岩石中に発生することが期待される。しかし、空間分布にかぎらず岩石組織の性質を定量的に記述することは一般に困難である。従来の組織のキャラクタリゼーションは写真やスケッチを使った、言葉による記述が多く、そのためこの種のデータは客観性に欠けるきらいがあった。

岩石組織のような一見不規則で複雑な画像を数値を使って客観的に記述する方法としては、統計的なアプローチが早い時期から考えられていた (例えば, Rogers and Bogy, 1958; Kretz, 1969; Agterberg, 1974; Vistelius, 1987)。しかし、岩石組織の他の側面、例えば、結晶形態 (Donaldson, 1976; Lofgren, 1980; Hibbard, 1994) や結晶サイズ (火成岩では Kirkpatrick, 1977; Marsh, 1988; Cashman and Marsh, 1988; Maaløe et al., 1989; Armienti et al., 1994; 変成岩で

は Kretz, 1966; Galwey and Jones, 1966; Cashman and Ferry, 1988; Miyazaki, 1991) の研究の進展に比べて、空間分布の研究は、理論面でも記載面でも研究例はまだ少ない。筆者らは最近、岩石中の鉱物空間分布を定量的に表現する方法として、デジタル画像処理と統計的手法を組み合わせた簡単な方法を提案した (森下, 1992, 1993; 小畑・森下, 1994; Morishita and Obata, 1995)。画像処理システムを使えばどんな複雑な画像も、いったんコンピューターに取り込むことによって、統計処理が簡単にかつ迅速に行える。近年のパーソナルコンピューターの性能の向上により安価で簡便な画像処理システムが可能になった。したがって、計算量が膨大なため以前はアイデアの段階でとどまって実行が困難であった方法も、容易に実行できるようになってきた。この意味で岩石組織の定量的研究はまだ端緒にいたばかりといえよう。

本稿は岩石組織中の鉱物の空間分布を統計的に処理する新しい方法、 σ 分布、 τ 分布を紹介し、岩石組織から求められた σ , τ 分布の数理的な解釈を中心に論じる。岩石組織形成の物理化学過程については本稿ではあまり触れていない。特に Morishita and Obata (1995) で触れることのできなかった、岩石組織から空間相関関数 σ , τ 分布を具体的に求める手法とアルゴリズムについては、詳しく解説を行った。応用例として、花こう岩、変成岩、堆積岩中の主要鉱物と溶岩中の気泡の σ , τ 分布の解析結果を示す。最後に σ , τ 分布から推定できる岩石組織中の特徴について論じる。今までにも鉱物の空間分布を定量化する方法として、鉱物の重心分布を用いる方法 (Fry, 1979) や、接している鉱物の組み合わせから鉱物相互の空間相関を推定する方法が考えられている (Rogers and

* 日本地質学会 1993, 1994 年年会で講演.

Bogy, 1958; Vistelius, 1987). ただし, これらの手法では鉱物の重心や結晶境界を明確に認識する必要がある. それに対してここで提唱する σ, τ 分布は, デジタル画像から直接作成可能であり, どんな画像に対してもある一定の手続きを行えば必ず求めることができる. また鉱物の空間分布以外に, 結晶サイズの情報を読み取ることも可能である.

σ 分布と τ 分布

まず σ, τ 分布の定義が, 幾何確率の概念から導かれること, そしてこれらの分布から鉱物の空間的分布のかたよりが検証できることを示す. 2 種類の鉱物 1, 2 からなる岩石組織を考えよう. 鉱物 1, 2 の占める割合 (体積分率) をそれぞれ F_1, F_2 とする ($F_1 + F_2 = 1$). このとき空間中の任意の点をランダムに選んだとき, そこに鉱物 1 が存在する確率は幾何確率の定義より, 鉱物 1 の占める割合 F_1 となる. 同様に鉱物 2 の確率は F_2 である. つぎに空間中から 2 点をランダムに選んだときを考える. このとき 2 つの点がどちらも鉱物 1 にある確率は F_1^2 である. 同様に 2 つの点がどちらも鉱物 2 にある確率は F_2^2 となる. また片方の点が鉱物 1 にあり, もう一方の点が鉱物 2 にある確率は $2F_1F_2$ である. これらのすべての場合の確率の合計は

$$F_1^2 + 2F_1F_2 + F_2^2 = (F_1 + F_2)^2 = 1 \quad (1)$$

となる. 2 点がランダムに選択されているかぎり, 鉱物 1, 2 の形やサイズ分布, 空間的なかたよりにかかわらず, (1) 式は常になりたつ.

次に, 距離 D 離れた 2 点を選んだときを考えよう. このとき, 2 点とも鉱物 1 にある確率を P_{11} , 2 点とも鉱物 2 にある確率を P_{22} , 片方が鉱物 1 にあり, もう一方が鉱物 2 にある確率を P_{12} としよう. このとき常に $P_{11} + P_{22} + P_{12} = 1$ がなりたつ. ところでこれらの確率は一般に距離 D の関数である. もし鉱物 1, 2 がランダムに空間中に分布し, 距離 D が平均的な鉱物のサイズより十分大きいならば, これらの確率は 2 点をランダムに選択した場合のそれに一致するはずである. すなわち確率 P_{11}, P_{22}, P_{12} はそれぞれ $F_1^2, F_2^2, 2F_1F_2$ に等しい. また距離 D が 0 のときは 2 つの点は重なってしまうため, P_{11}, P_{22} は 1 点が鉱物 1 または 2 にある確率に等しくなり, それぞれ F_1, F_2 となる. またこのときは 1 点が同時に鉱物 1 と 2 に属することはありえないから P_{12} は 0 になる. それでは距離 D が 0 より少し大きくなると P_{11} はどうなるだろうか. このときは鉱物 1 が鉱物 2 と接する境界付近では片方の点が鉱物 1, もう片方の点が鉱物 2 の領域に属することが起こる. このため P_{11} は F_1 より小さくなり, P_{12} は 0 でなくなる. 以上の結果を整理すると, P_{11} は $D=0$ で F_1 , そして D が徐々に大きくなるに従い, F_1 より小さくなり F_1^2 に近づいてゆく. また P_{12} は D が大きくなるに従い, 0 から徐々に大きくなり, D が十分大きくなると 2 点をランダムに選んだときの確率 $2F_1F_2$ に近づく.

P_{11}, P_{12}, P_{22} は空間相関関数で, 次のように定義することができる. 位置 $\mathbf{x}$ に鉱物種 i が存在するとき 1, 存在しないとき 0 となる関数 $\rho_i(\mathbf{x})$ を考える. このとき P_{11}, P_{22} は

$$P_{11}(\mathbf{r}) = \langle \rho_1(\mathbf{x})\rho_1(\mathbf{x}+\mathbf{r}) \rangle$$

$$P_{22}(\mathbf{r}) = \langle \rho_2(\mathbf{x})\rho_2(\mathbf{x}+\mathbf{r}) \rangle \quad (2)$$

$\langle f(\mathbf{x}) \rangle$ はさまざまな位置 $\mathbf{x}$ について求めた $f(\mathbf{x})$ の平均をあらわす. また P_{12} は

$$P_{12}(\mathbf{r}) = \langle \rho_1(\mathbf{x})\rho_2(\mathbf{x}+\mathbf{r}) \rangle + \langle \rho_1(\mathbf{x}+\mathbf{r})\rho_2(\mathbf{x}) \rangle \quad (3)$$

で与えられる. ここで $\mathbf{r}$ は距離 D をベクトル表記したものである ($D \equiv |\mathbf{r}|$).

さて, ここで空間相関関数 P_{11}, P_{22}, P_{12} に対して次のような規格化を行う.

$$\sigma_1(\mathbf{r}) = \frac{P_{11}(\mathbf{r}) - F_1^2}{F_1 - F_1^2} \quad (4)$$

$$\sigma_2(\mathbf{r}) = \frac{P_{22}(\mathbf{r}) - F_2^2}{F_2 - F_2^2} \quad (5)$$

$$\tau_{12}(\mathbf{r}) = \frac{P_{12}(\mathbf{r})}{2F_1F_2} \quad (6)$$

ここで σ_1, σ_2 は鉱物の占める割合にかかわらず, 距離 0 で 1, ランダム分布では 0 となる. また τ_{12} は距離 0 で 0, 十分離れた距離で 1 となる. 以下では (4), (5) 式のように同じ種類の鉱物から得られる確率分布関数を σ 分布, (6) 式のように異なる種類の鉱物から得られる確率分布関数を τ 分布と呼ぶことにする.

一般的に n 種類の鉱物からなる組織に対して, 次のように σ, τ 分布を定義する.

$$\sigma_i(\mathbf{r}) = \frac{P_{ii}(\mathbf{r}) - F_i^2}{F_i - F_i^2} \quad (7)$$

$$\tau_{ij}(\mathbf{r}) = \frac{P_{ij}(\mathbf{r})}{2F_iF_j} \quad (8)$$

ここで $P_{ij}(\mathbf{r})$ は鉱物 i, j の組み合わせの距離 $\mathbf{r}$ での存在確率である. F_i は鉱物種 i の占める割合で, 常につきの規格化条件をみたす.

$$\sum_{i=1}^n F_i = 1 \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n P_{ij}(\mathbf{r}) = 1 \quad (i \leq j) \quad (10)$$

n 種類の鉱物からなる組織に対して σ 分布は n 個, τ 分布は $n(n-1)/2$ 個得られる. 1 種類のみの鉱物からなる組織に対しては σ 分布, τ 分布は得られない.

岩石から σ 分布, τ 分布を求める方法

σ 分布, τ 分布を求めるには, コンピューターを用いたデジタル画像処理装置を用いるのが便利である. 岩石組織画像はカメラやスキャナーによりコンピューターへ入力される. 特に岩石組織を写した写真から画像データを得るにはイメージスキャナーが便利である. 入力された組織画像はコンピューター内部で画像データとして扱われる. 画像は正方形の画素 (ピクセル) の集まりからなる. 画像は多くの画素が縦, 横方

第1図. アナログ画像をデジタル画像に変換する方法。(A) 原画像, (B) ある明るさ以上の画素を白, それ以下の画素を黒として2値化したデジタル画像。デジタル画像では原画において画素より細かい特徴は失われる。解像度をあげれば(すなわち画素の大きさを小さくすれば)より細かいところまで表現できるが、データ量、計算量はそれに比例して増える。

向にタイルのように規則正しく並んだものからなり、位置座標と濃度を持つ。画素の座標は一般に左上の画素の座標を原点(0, 0)として右方向へx軸の正の方向、下方向へy軸の正の方向と定義する。座標値は1画素ごとに1ずつ変化する。そのため座標 (i, j) の画素は一番左の画素から $i+1$ 番目、1番上の画素から $j+1$ 番目に位置する。各画素はそれ自身、濃度を持ち、これは一般に整数値の集まりで定義される。例えば、白黒画像では真黒の状態を0、真白の状態を15と定義すると、中間的な灰色は1から14のいずれかの数値であらわされる。このようにして各画素に対応した画像の明るさを離散的な数値に置き換えると、どの画素も唯一の濃度を持った画像データが得られる。コンピューターが扱う画像は座標や明るさがすべて離散化されたものであり、これをデジタル画像という。それに対してコンピューターに入力される前の写真や顕微鏡の像をアナログ画像という。デジタル画像にたいして、アナログ画像は画像の位置や明るさが連続量からなる。第1図にデジタル画像とアナログ画像の違いを示す。簡単のためここではデジタル画像の画素の濃度が白と黒の2値だけの場合について示す。実際のアナログ画像はさまざまな明るさのパターンの集合体と考えられる(第1A図)。この画像をある一定の明るさ以上は白、それ以下の場合黒としてあらわしたものがデジタル画像(第1B図)である。デジタル画像中の像の輪郭の滑らかさはそれを構成する画素の数と、各画素のとることができる濃度の数で決定される。より多くの画素と濃度から画像を構成すればより滑らかな表現が可能となるが、コンピューター内で画像が占めるデータ量が大きくなり、かつ計算量も増加する。

次にこのようにして得られた2値画像に対して σ , τ 分布を求める方法を具体的に示す。以下の方法はアルゴリズムを具体的に示すため、第1図にある簡単なデジタル画像から σ , τ 分布を手計算で求めている。前節でも述べたように σ , τ 分布を求めるためには距離 D 離れた2点をランダムに選ぶ操作が必要である。2次元画像中から任意に一点を選んだとき、その座標を (i, j) とすると角度 θ の方向に距離 D 離れた点 k, l は

$$k = i + [D \cdot \cos(\theta)] = i + dx$$

第2図. 2次元画像で距離 D 離れた2点の関係。 θ を一定とすると座標 i, j の点から距離 D 離れた点はx, y軸に対してそれぞれ dx, dy 離れたところにある。デジタル画像では dx, dy は整数値でなければならない。

第1表. $\sigma=30^\circ$ のときの dx と dy の値の変化。

D	dx	dy
0	0	0
1	1	1
2	1	2
3	2	3
4	2	3
5	3	4

$$l = j + [D \cdot \sin(\theta)] = j + dy \quad (11)$$

で求められる(第2図)。ここで関数 $[x]$ は x に最も近い整数をかえす。2次元画像から σ 分布を求める場合、 θ は一定とする。そのため1枚の画像データがあれば異なる θ に対して異なる σ , τ 分布を得ることができる。具体的に θ が 30° の場合について第1B図より σ , τ 分布を求める手続きを示す。距離 D が変化したときの dx, dy の値を第1表に示す。例えば、 D が2のとき、 $dx=1, dy=2$ である。 x 軸方向に1, y 軸方向に2離れた画素の組み合わせは全部で30組($N=30$)ある。この画素の組み合わせを黒一黒(N_B)、白一白(N_W)、黒一白(N_{BW})の場合について分けると、それぞれ8, 7, 15組になる。これより黒一黒(P_B)、白一白(P_W)、黒一白(P_{BW})の画素の組み合わせの存在する確率は0.23($=8/30$)、0.27($=7/30$)、0.50($=15/30$)である。距離 D が0のときの黒一黒、白一白の画素の組み合わせの存在する確率は黒と白の組織中に占める割合に等しく、それぞれ0.47, 0.53である($D=0$ の時の値)。またランダムに2点を選んだとき黒一黒、白一白の画素の組み合わせとなる確率は0.22($=0.472$)、0.28($=0.532$)である。これらの値と(7)式より、距離2における黒、白の σ の値はそれぞれ0.2, -0.2として求めることができる。またランダムに選んだ2点が白一黒の組み合わせの確率は0.5だから、(8)式より距離2における τ の値は1.0となる。このようにしてさまざまな距離に対して σ , τ の値を求めることができる(第2表)。

第2表. σ , τ 値の計算方法.

D	N	N_B	P_B	σ_B	N_W	P_W	σ_W	N_{BW}	P_{BW}	τ_{BW}
0	49	23	0.47	1.0	26	0.53	1.0	0	0.00	0.0
1	36	8	0.22	0.0	8	0.22	-0.2	20	0.56	1.1
2	30	8	0.27	0.2	7	0.23	-0.2	15	0.50	1.0
3	20	9	0.45	0.8	7	0.35	0.3	4	0.20	0.4
4	20	9	0.45	0.8	7	0.35	0.3	4	0.20	0.4
5	12	2	0.17	-0.2	2	0.17	-0.4	8	0.67	1.3

第3図. 岩石のデジタル画像. (A) 肥後変成帯の優白質花こう岩. (B) 四国宇和島花こう岩周辺のホルンフェルス. (C) 熊本市地下に広がる砥川安山岩溶岩. (D) 天草地方坂瀬川層のリシク砂岩. A, B は実際に測定した画像の一部である. B は Morishita and Obata (1995) の第1図より引用.

第4図. 第3図のそれぞれの組織画像から得られた σ 分布. BはMorishita and Obata (1995) の第2図より引用.

σ , τ 分布を求めるため, 実際に用いた岩石画像は縦, 横が約800から1000あまりの画素より構成されている. これらの画像はイメージスキャナー (マイクロテック製 Scan Maker II) を用いて取り込みを行った. 使用したスキャナーは濃淡256階調を識別する. スキャナーから取り込んだ画像は, 2-4種類の鉱物に分けられる. 鉱物の種類がちがうと, デジタル画像中で異なる明るさの度合 (輝度) を示すので, デジタル画像に適当なしきい値をもうけることで, 識別が可能である. しきい値は実際の岩石組織をみながら, 最適とおもわれるレベルを探していく. このようにしてデジタル画像は数種類の鉱物の領域に分けることができる. ただし実際の画像中の各鉱物の輝度は幅があるため, ある一定のしきい値でデジタル画像を処理すると, 現実とは異なる鉱物に分類されている領域ができる. そのような部分はあとで, 修正を行った. デジタル画像のしきい値に伴う問題についてのより詳細な議論は Pareschi et al. (1990) がある.

こうして得られたデジタル画像に対して σ , τ 分布を求める. 今回求めた σ , τ の値は約100万組の画素の組み合わせすべてを用いて計算を行った. 使用したコンピューターはプロサイド製 JD 1992 (80486 DX/50 MHz) である. またプログラムは Turbo Pascal を用いた. これらのシステムではデジタル画像から, ひとつの σ 分布を求めるのに, 約4-5分かかる. コンピューターの能力が不足していたり, また σ , τ の値の大体の傾向を知りたいのであれば, すべての画素について計算を行う必要はない. σ 分布のある距離の値を計算するために必要な2点の数は, 約1万組ぐらいあれば, 十分正確な値が得られるようである. この場合は, 画像中からある距離だけ離れた2点をランダムに選択し, それらのデータを元に計算を行えばよい.

応 用 例

以下では (A) 肥後変成帯の優白質花こう岩 (B) 四国宇和

第5図. (A) 花こう岩, (B) ホルンフェルスの σ 分布の対数プロット. BはMorishita and Obata (1995) の第3図より引用.

島花こう岩接触変成帯から採取したホルンフェルス (C) 熊本市地下に広がる気泡を含んだ安山岩溶岩 (D) 熊本県天草の等粒状リシクな砂岩の4つの試料について σ および τ 分布の測定結果を示す. 気泡以外は岩石組織中の主要構成鉱物に対して分析を行った. 解析した画像を第3図に示す. なお各サンプルの産状と画像についてのより詳細な解説は付録に示す.

1. σ 分布

第4図に σ 分布を示す. 花こう岩の σ 値は鉱物の種類に限らず距離の増加とともに, 急激に小さくなることわかる (第4A図). しかし減少の割合は鉱物で異なる. 約0.2 mm付近で, 石英の σ の値はほぼ0に収束する. それに対して斜長石の σ 値は0.3-0.4 mm付近まで0に収束しない. またカ

リ長石の σ 値は0.15 mm付近まで急激に減少し, その後0にならないで一定の値をとる. 第5A図に花こう岩の σ 値を対数でプロットしたものを示す. 各鉱物の σ 値はほぼ指数的に減少していることがわかる. カリ長石は他の鉱物比べて傾きが大きい. 0.3 mm以上の黒雲母と石英の σ 値は0.01と小さくなるため, σ 分布の急激な減少は測定誤差が含まれる. ホルンフェルスの σ 分布 (第4B図) も σ 値は急激に小さくなる. 黒雲母や石英の σ 値の減少率が長石類の減少率より大きい. 第5Bに接触変成岩の σ 値の対数プロットを示す. 斜長石とカリ長石の σ 値は黒雲母と石英に比べて長距離にわたり指数的に減少していることがわかる. 石英は約40 μ m付近で減少の割合がわずかにゆるやかになる. 逆に黒雲母は約20 μ m付近で減少率が大きくなる.

気泡を含んだ溶岩の画像 (第1C図) より明らかなように, 気泡は地表方向に向かって伸びている. そこでこのサンプルについては地表面に水平な方向と垂直な方向の二つの方向に対して σ 分布を求めた. 気泡の垂直方向の σ 分布 (第4C図) は指数的に減少している. それに対して, 水平方向の σ 分布は約4 mm付近で0より小さい値をとり, 12 mm付近でまた0より大きくなり, 下に凸な部分があらわれる. 砂岩中の石英の σ 値も, やはり指数的に減少している (第4D図).

σ 分布は組織や鉱物が異なってもほぼ指数関数で近似できることがわかった. そこで σ 値の減少率を σ の値が $1/e$ (= 0.368) になる距離 D_e で表すことにする. 第3表にすべての鉱物と気泡に対する D_e の値を示す. 花こう岩ではカリ長石の D_e 値が約0.06 mmと小さく, その他の鉱物は約0.1 mm程度である. 接触変成岩では斜長石とカリ長石の D_e 値は約15 μ mに対して黒雲母と石英は約12 μ mである. 気泡の D_e 値は垂直方向が1.19 mm, 水平方向が0.93 mmで, 気泡の伸びた方向に大きくなっている. 砂岩の石英では0.19 mmである.

次に D_e の値と鉱物の平均サイズとの関係を調べるため, 平均サイズを求めた. 気泡以外の組織中の鉱物のサイズは次のようにして求めた. 組織画像の中から, 任意に約50個の鉱物を選び, それぞれの鉱物の長軸をマウスを用いて抽出する. こうして得られた長軸の長さを結晶のサイズとして, その平均値を求めた. 気泡は, それぞれの気泡を楕円で近似し, 楕円の長軸と短軸の長さの平均値をサイズとして用いた. 垂直方向には長軸のサイズを, 水平方向には短軸のサイズを用いている. 粒径を D_e で割った値を第3表に示す. その結果, この値は1-3の範囲におさまった. 砂岩中の石英は特に大きな値を示している. これは砂岩の σ 分布の減少率が特に小さな距離で急激なことを示す. そのために, D_e が平均サイズより小さくなった. ただし砂岩の石英の平均サイズである約100 μ m付近で, σ 分布は0に収束している.

2. τ 分布

第6図に τ 分布を示す. 花こう岩, 接触変成岩については6種類の τ 分布が得られる. 砂岩, 溶岩の τ 分布は1つずつ求められる. 花こう岩と接触変成岩ではそのうちの代表的なもの4種類を示す. 花崗岩中の鉱物の τ 分布は距離 D が0のとき0で, 距離の増加とともに急激に増加して1へと収束す

第6図. 第3図のそれぞれの組織画像から得られた τ 分布. BはMorishita and Obata (1995) の第4図より引用.

る。黒雲母-カリ長石はほかの鉱物組み合わせに比べて急激に増加している。また黒雲母-カリ長石と黒雲母-石英は τ の値が1を越えて、それぞれ距離が約0.15 mmと0.25 mmのところで最大値に達している。その後、距離の増加に伴い τ の値は減少する。それに対して、黒雲母-斜長石の τ 値はゆるやかに増加している。 τ の値が1を越える距離はそれらの鉱物が見いだされる確率がランダムに鉱物が分布している場合に比較して大きいことを示す。すなわち、黒雲母-カリ長石と黒雲母-石英は第3図中の組織において τ の値がピークに達する距離に存在しやすいことを意味する。 τ の値が最大になる距離を“平均鉱物間距離”と定義する。また τ の値の最大値は鉱物間の空間的な親和度の強さをあらわしていると考えることができる。接触変成岩では黒雲母-石英の τ 分布がもっとも急速に1へと収束しているが、花崗岩のようにピークの値をもたない。それに対して斜長石-カリ長石は最も収

束が遅い。水平方向に測定した気泡の τ 分布は花崗岩中の黒雲母-石英のように、最大値が認められる。砂岩の τ 分布は石英の平均結晶サイズ付近で1に収束している。

まとめと今後の課題

実際の岩石組織から得られた σ および τ 分布から鉱物の空間分布の均一性や不均一性を測ることができることがわかった。 σ 分布は同種鉱物の空間分布の不均一性を測ることができる。 τ 分布は異種鉱物間の空間相関を測ることができる。 σ 分布は鉱物の種類に限らずある距離までは指数的に減少することがわかる。特に σ 分布では σ が $1/e$ に減少する特徴的な距離 D_e を定義した。またこの D_e は鉱物の平均的なサイズとよい相関を示すことがわかった。気泡の水平方向と垂直方向の σ 分布から得られる D_e の値と、気泡の長軸、短軸の平均値の比はほぼ同じ値となる。 σ 分布を方位の関数として扱うこと

第3表. 平均結晶サイズと D_c の関係.

Granite				
mineral	fraction (%)	size (mm)	D_c (mm)	size/ D_c
Biotite	6.1	0.21	0.087	2.4
Quartz	26.2	0.19	0.088	2.2
Plagioclase	47.6	0.27	0.103	2.6
K-feldspar	19.9	0.20	0.058	3.3
Hornfels				
mineral	fraction (%)	size (μm)	D_c (μm)	
Biotite	18.2	30	11.7	2.6
Quartz	28.5	27	12.9	2.1
Plagioclase	25.3	38	15.1	2.5
K-feldspar	28.0	42	15.2	2.8
Bubble				
bubble	fraction (%)	size (mm)	D_c (mm)	size/ D_c
Vertical	39.5	2.6	1.19	2.2
Horizontal	39.5	1.9	0.93	2.0
Sandstone				
mineral	fraction (%)	size (μm)	D_c (μm)	size/ D_c
Quartz	51.4	96.3	18.6	5.2

により, 組織の異方性を調べる手法としてもつかえる.

特定の鉱物同士がお互いに近くに共存しているなら, τ 分布の値は1を越えて最大値を示す. このとき最大値となる距離を平均鉱物間距離として定義することができる.

今後の課題としては(1)画像入力段階での前処理, (2) σ , τ 分布の精度(3) σ , τ 分布の解釈にわけられる. まず最初の問題点は, 技術的な事柄であるが, 岩石組織を画像処理するときについてきまとう. 累帯構造や双晶によって, 鉱物中の化学組成や光学的方位は連続的, または不連続に変化する. そのためデジタル画像からひとつの鉱物を識別することが, 困難なおおしい. 今のところ, 鉱物の明るさのちがいを利用して, 適当なしきい値をもうけることで画像を鉱物種ごとに領域分割している. その後, 実際の顕微鏡写真やサンプルをみながら, マウスを使って部分的な修正をほどこす. この作業は, どうしても経験にたよらざるをえず, また時間もかかる. 鉱物のように, 画像中で識別したい領域がある一定の明るさをもたないが, 統計的には他の領域より暗かったり, ざらざらしていたり, または浮き上がって見えたりする性質を画像処理ではテクスチャと呼んでいる(尾上, 1988). テクスチャはある一定のしきい値で識別するより, 近傍の画素同士の統計的性質を利用したほうが, より忠実に領域の分割を行うことができる. 今後, 画像処理におけるテクスチャ解析の分野での成果を岩石組織解析に応用することが必要であろう.

σ , τ の精度は鉱物の占める割合, 取り込んだ画像の広さに関係している. σ , τ 分布を求めたい鉱物の占める割合が小さければ, 統計量が少なくなるため, 精度は悪くなる. これは取り込む画像の画素の数を増やせば解決できる. 例えば縦横

1000 画素からなる画像で1%の割合を占める鉱物は1万個の画素を占める. 縦横3000画素の画像であれば10万個になる. このようにして, 一枚の画像の画素数をふやすことで, サンプルングに伴う統計的誤差は小さくすることができる. 画像を取り込む広さに関する誤差は岩石組織の不均一性に起因する. 特に変成岩のように大小さまざまなスケールの縞構造が含まれる組織に対して問題となる.

σ 分布の傾きと平均結晶サイズの関係や, 花崗岩の石英-黒雲母対の τ 分布から得られる平均鉱物間距離以外に, ここで紹介した空間分布関数から得られる情報がある. 例えば, ある鉱物種がクラスターを形成していると仮定しよう. このとき, クラスター間の平均距離におけるその鉱物種の存在確率はランダムに分布しているときより大きくなり, 平均距離の約半分の距離では逆に小さくすると予想される. このときの σ 分布は距離に対して σ 値が0の付近で波うつように変化する. 気泡の水平方向の σ 分布で σ 値が0以下になる部分はこのようなクラスタリングの効果によるものかもしれない. 絶縁体と金属の混合物における金属クラスターの分布を調べるため, 同様の手法がなされている(高安, 1986).

ここでは岩石組織の特徴を定量化する試みを紹介した. これらの定量化の手法から得られた結果は岩石組織形成時の鉱物間相互作用を推定する重要な手掛かりを与えるであろう. 最後に, ここで示した手法は岩石組織に限らず広くパターン定量化の手法として用いることが可能である.

謝 辞

本論文の理論的な部分については名古屋大学藤井直之教授, 同大学関本謙博士, 筑波大学平田隆幸博士に有益なご意見をいただいた. 熊本大学武田昌尚氏は試料を提供していただいた.

た。高知大学吉村康隆氏には SEM 画像の作成を手伝っていただいた。2 名の査読者には貴重なコメントをいただき、参考となった。本研究には日本学術振興会からの援助と、科学研究費補助金の一部をつかわせていただいた。

文 献

- Agterberg, F. P., 1974, *Geomathematics*. Elsevier Scientific Publishing Company, 596 p.
- Armienti, P., Pareschi, M. T., Innocenti, F. and Pompilio, M., 1994, Effects of magma storage and ascent on the kinetics of crystal growth; the case of the 1991-1993 Mt. Etna eruption. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **115**, 402-414.
- Carlson, W. D., 1989, The significance of intergranular diffusion to the mechanisms and kinetics of porphyroblast crystallization. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **103**, 73-85.
- Carlson, W. D., 1991, Competitive diffusion-controlled growth of porphyroblasts. *Mineral. Mag.*, **55**, 317-330.
- Cashman, K. V. and Ferry, J. M., 1988, Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization. III. Metamorphic crystallization. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **99**, 401-415.
- Cashman, K. V. and Marsh, B. D., 1988, Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization. II. Makaopuhi lava lake. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **99**, 292-305.
- Donaldson, C. H., 1976, An experimental investigation of olivine morphology. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **57**, 187-213.
- Fry, N., 1979, Random point distribution and strain measurement in rocks. *Tectonophysics*, **60**, 89-105.
- Galwey, A. K. and Jones, K. A., 1966, Crystal size frequency distribution of garnets in some analysed metamorphic rocks from Mallaig, Inverness, Scotland. *Geol. Magazine*, **103**, 143-152.
- Hibbard, M. J., 1994, Petrographic classification of crystal morphology. *Jour. Geol.*, **102**, 571-581.
- Kirkpatrick, R. J., 1977, Nucleation and crystal growth of plagioclase, Makaopuhi and Alae lava lakes, Kilauea Volcano, Hawaii. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **88**, 78-84.
- Kretz, R., 1966, Grain-size distribution for certain metamorphic minerals in relation to nucleation and growth. *Jour. Geol.*, **74**, 147-173.
- Kretz, R., 1969, On the spatial distribution of crystals in rocks. *Lithos*, **2**, 39-66.
- Lofgren, G., 1980, Experimental studies on the dynamic crystallization of silicate melts. In Hargraves, R. B. ed., *Physics of Magmatic Processes*. Princeton Univ. Press, 487-551.
- Maaløe S., Tumyr, O. and James, D., 1989, Population density and zoning of olivine phenocrysts in tholeiites from Kauai, Hawaii. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **101**, 176-186.
- Marsh, B. D., 1988, Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization. I. Theory. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **99**, 292-305.
- Miyazaki, K., 1991, Ostwald ripening of garnet in high P/T metamorphic rocks. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **108**, 118-128.
- 水田敏夫・小畑正明・江上圭子, 1990, 砥川安山岩溶岩中の気泡の形態と分布. *火山*, **2**, 249-262.
- Morishita, R., 1992, Quantitative description of rock textures and mathematical modeling of rock texture formation. Kumamoto University Doctoral Dissertation, 84 p.
- 森下律生, 1993, 岩石中の鉱物の空間分布の定量的研究. 日本地質学会第 100 年学術大会演旨, 397.
- Morishita, R. and Obata, M., 1995, A new statistical description of the spatial distribution of minerals in rocks. *Jour. Geol.*, **103**, 232-240.

永川勝久・小畑正明・吉村康隆, 1991, 肥後変成岩 I: 変成分帯一特

に泥質岩中の OPX の出現について. 日本地質学会第 98 年学術大会演旨, 315.

尾上守夫, 1988, 画像処理ハンドブック. 昭晃堂, 東京, 756 p.

小畑正明・森下律生, 1994, 岩石中の鉱物の空間分布の測定法について. 日本地質学会第 101 年学術大会演旨, 367.

Pareschi, M. T., Pompilio, M. and Innocenti, F., 1990, Automated evaluation of volumetric grain-size distribution from thin-section images. *Computer and Geosciences*, **16**, 1067-1084.

Rogers, J. J. W. and Boggy, D. B., 1958, A study of grain contacts in granitic rocks. *Science*, **127**, 470-471.

高安秀樹, 1986, フラクタル. 朝倉書店, 東京, 186 p.

Teraoka, Y., Ikeda, Y. and Kashima, N., 1986, Geology of the Uwajima district, with geological sheet map at 1:50,000. *Geol. Surv. Japan*, 91p. (in Japanese with English abstract 6 p.).

Vistelius, A. B., 1987, Ideal granites and models of their metasomatic transformations: theory, experience and current problems. *Math. Geol.*, **19**, 589-612.

付録一岩石記載

優白質花こう岩は肥後変成帯の C 帯から得られたものを用いた (永川ほか, 1991). 主な構成鉱物は石英, 変質した斜長石, カリ長石, 黒雲母からなる. 画像は SEM から得られる BEI 像写真をスキャナーで読み込んだ.

接触変成岩は四万十層群の花こう岩 (Teraoka et al., 1986) の周辺から採取した. 花こう岩体は 6×6 km の範囲にわたって露出しているが, 変成帯の幅は 20 km に達する. これは花崗岩体の大部分が地下に埋もれていることを示す. 本研究で用いた試料は細粒で石英, 斜長石, カリ長石, 黒雲母と少量のイルメナイトよりなる. 平均的な粒径は 30-50 μm である. 画像は優白質花こう岩と同様の方法で得た.

気泡を含む溶岩は砥川安山岩溶岩を用いた. 砥川溶岩の気泡の分布については水田ほか (1990) の研究がある. 砥川溶岩は熊本市の地下に約 55 km² にわたり分布し, 層厚は約 50-60 m である. ここで用いたサンプルは溶岩層の上部にあたる. 溶岩サンプルの表面を白色の絵の具で塗り, 気泡部分が黒くなるようにした. 画像は, その面をスキャナーで直接読み込んで作成した.

砂岩は熊本県天草の坂瀬川層群のリシックな砂岩を用いた. 石英, 少量の長石類, 岩片からなる. 岩片は細粒な泥質物や雲母の集合体からなる. 石英は等粒状で角は少し丸みをおびる. 包有物をたくさん含むものが一部みとめられる. 長石は半自形か他形で, 角は丸みをおびる. ほとんどが, 双晶を示す. 画像は, 顕微鏡に CCD カメラを接続し, 顕微鏡画像を直接用いた. この画像中で石英は他の部分より, 表面が明瞭で明るい. このため適当なしきい値をもうけることで, 石英を識別することができる. ほとんどの長石は石英と比べて, 表面の明るさが暗いためこの方法で識別できた. しかし, 少量の長石は石英と識別できなかったが, σ 分布の測定には大きな影響はない.

(要 旨)

森下律生・小畑正明, 1995, 鉱物の空間分布パターンからみた岩石組織定量化の試み. 地質雑, 101, 489-498. (Morishita, R. and Obata, M., 1995, Quantification of rock textures using spatial distribution of minerals. *Jour. Geol. Soc. Japan*, 101, 489-498.)

岩石組織中の鉱物の空間分布を定量化する方法として σ , τ 分布というものを提唱する. σ 分布からは同種鉱物の空間分布を, τ 分布からは異種鉱物の空間分布を知ることができる. 花こう岩, 接触変成岩, 砂岩の σ 値はどの鉱物も指数関数的に減少することがわかった. またこの減少率は鉱物の平均サイズと関係のあることが示された. 安山岩溶岩中の気泡の σ 値は0より小さな値を示す. ほとんどの鉱物の τ 値は距離の増加とともに急激に増加して, 徐々に1へ近づく. 花こう岩中の黒雲母-石英と黒雲母-カリ長石の τ 値は最大値を示し, その後, 距離の増加とともにゆるやかに1へ向かって減少することがわかった. これは花こう岩中の黒雲母は石英とカリ長石の近くに存在しやすいことを意味する. 気泡の地表面に水平な方向に対する τ 分布にも同様な傾向がみられた.