

走査型蛍光X線分析顕微鏡を用いた層状はんれい岩の
組織解析：予察

メタデータ	言語: ja 出版者: 静岡大学地球科学教室 公開日: 2013-04-03 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 針金, 由美子, 道林, 克禎 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.14945/00007130

走査型蛍光X線分析顕微鏡を用いた 層状はんれい岩の組織解析：予察

針金由美子¹・道林克禎²

Texture analysis of a layered gabbro by the scanning X-ray analytical microscope: a preliminary study

Yumiko HARIGANE¹ and Katsuyoshi MICHIBAYASHI²

Abstract The elemental X-ray maps of a layered gabbro sample obtained by a scanning X-ray analytical microscope have been used to produce mineral-distribution maps of the layered gabbro. These element-distribution maps have been transformed into mineral-distribution maps by Michibayashi *et al.* (2002)'s method. To examine the mineral-distribution maps, we tested two texture analyses: spatial distribution method and Hough transform method. As a result, the spatial distribution method could have a possibility to reveal anisotropic characters of the layered gabbro, whereas the Hough transform method would be partially able to show its anisotropic nature. Further study will be required to develop a realistic texture analysis for the mineral-distribution maps obtained by this procedure.

Key words: layered gabbro, scanning X-ray analytical microscope, mineral-distribution map, the spatial distribution, Hough transform

はじめに

岩石組織の構成要素として、構成鉱物のモード（容量比）、各鉱物あるいは空隙の粒径分布、形状（外形）、空間分布、結晶間の方位関係、結晶内部のミクロな割れ目及び岩石スケールのマクロな割れ目の形状やネットワーク、各鉱物の色調及び岩石全体としての色調などがあげられる（池田ほか、1996、1997；戸上ほか、1998；坂野ほか、2000）。

岩石組織は岩石形成過程の重要な情報源であるにも関わらず、その情報は定性的になりがちである。そのため、岩石組織の情報を客観的及び定量化する手法の開発は地

球惑星物質科学において重要な課題である。岩石組織情報を定量化する手法として統計的なアプローチが早い時期から考えられていたが、計算量が膨大なため、アイデアの段階で留まり実行が困難であった。最近では、コンピュータの処理速度が著しく向上したことと、MATLAB®（米国 Mathworks 製）などの汎用計算プログラムを用いた画像処理システムが構築されたことで、容易に実行できるようになってきた（戸上ほか、1998；Michibayashi *et al.*, 1999；Togami *et al.*, 2000；道林ほか、2002；Okamoto *et al.*, 2008；Tsuji *et al.*, 2010）。

走査型蛍光X線分析顕微鏡を用いて岩石組織画像（すなわち鉱物マップ）を得る方法は、戸上ほか（1998）、

¹産業総合研究所地質情報研究部門，〒305-8567 つくば市東1-1-1中央第7

¹Institute of Geology and Geoinformation, Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8567, Japan

E-mail: y-harigane@aist.go.jp (Y. H.)

²静岡大学理学部地球科学教室，〒422-8529 静岡市駿河区大谷836

²Institute of Geosciences, Shizuoka University, 836 Oya, Suruga-ku, Shizuoka, 422-8529 Japan

E-mail: sekmich@ipc.shizuoka.ac.jp (K. M.)

道林ほか(2002)によって確立されている。しかし、この鉱物マップを用いて組織解析を行う手法についてはまだ検討されていない。そこで本研究は層状はんれい岩を用いて鉱物マップに適用可能な組織解析法について検討した。

試料と装置と分析手順

分析試料

分析及び組織解析に用いた層状はんれい岩はオマーンオフィオライト北部フィズ岩体のワジスクバから採取された転石である。本研究で用いた層状はんれい岩の写真をFig. 1に示す。この層状はんれい岩を構成する主な鉱

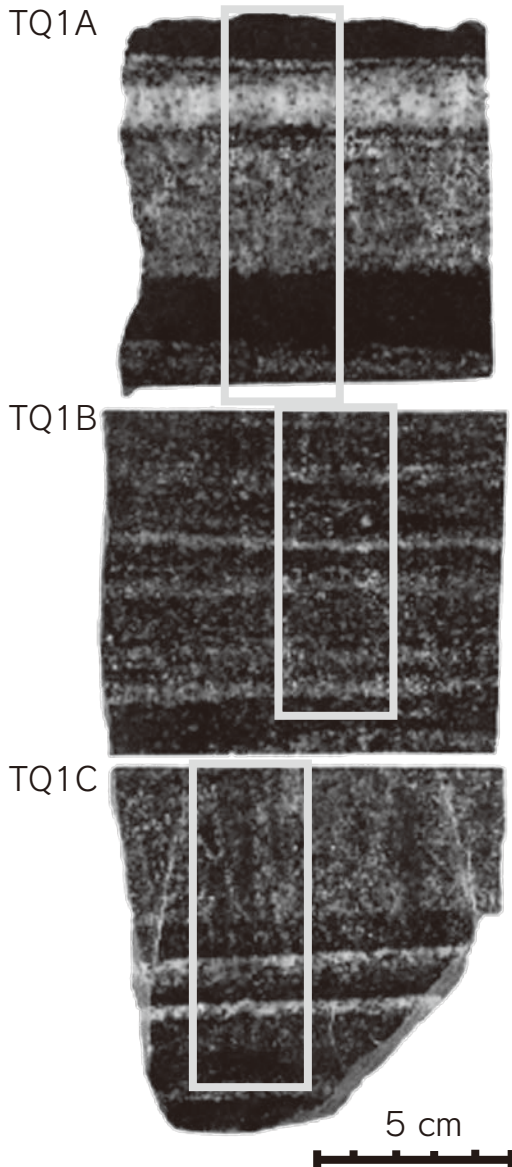


Fig. 1 Photographs of the gabbro samples (TQ1A, TQ1B and TQ1C). A box in each gabbro sample shows the analyzed area by SXAM.

物は、かんらん石 $[(Mg, Fe^{2+})_2SiO_4]$ 、単斜輝石 $[Ca(Mg, Fe^{2+})Si_2O_6]$ 、斜長石 $[(Na, Ca)(Si, Al)Si_2O_8]$ 、少量の斜方輝石 $[(Mg, Fe^{2+})Si_2O_6]$ である。

鉱物粒径は数mmから数cm程度であり、肉眼で確認できる大きさである。また特徴的な層状構造が観察される。本研究では、この転石を10 cm × 10 cmの大きさに収まるように3個に切り分けた後、厚さ約1 cmのスラブに切断して分析試料とした (Fig. 1)。

走査型蛍光X線分析顕微鏡

本研究において鉱物マップを得るために、走査型蛍光X線分析顕微鏡 (Scanning X-ray Analytical Microscope, SXAM; HORIBA XGT-2700V) を用いた (戸上ほか, 1998; Michibayashi *et al.*, 1999; 道林ほか, 2002; Koshikawa *et al.*, 2003; Katsuta *et al.*, 2007)。

X線発生管 (30 kV, 1 mA) で発生させた一次X線をX線導管 (X-ray Guide Tube) に通すことにより、高輝度で微細なX線ビームが試料に照射される。試料から発生する蛍光X線はBe窓を通過して高純度Si検出器で検出され、そのエネルギーの値が計測される (エネルギー分散型X線分光法, EDX)。そして試料表面を面的に走査することにより、表面 (深さ: 数mm) の蛍光X線強度の二次元組成画像 (すなわち元素マップ) を得ている。測定系はエネルギーウィンドウを設定することで、 ^{11}Na から ^{92}U の間で任意に30元素もの蛍光X線を同時に測定できる。

X線ビームはX線導管の切り替えにより、径10 μm と径100 μm の2段階に設定できるが、XGT-2700Vの径10 μm のX線導管では十分な強度のX線を照射できないため、径100 μm のX線導管を使用した (戸上ほか, 1998; 道林ほか, 2002)。

得られた元素マップは256画素 × 256画素、または512画素 × 512画素に分割され、蛍光X線強度が色調表示される。画像サイズは最小で2.56 mm × 2.56 mm (1画素10 μm × 10 μm) から最大で100 mm × 100 mm (1画素0.4 mm × 0.4 mm) である。

実際の測定において、試料を複数回走査することで発生する蛍光X線強度を解析可能な強度まで元素ごとに積算すると同時に、一次X線強度の揺らぎを平均化させることを行った (戸上ほか, 1998; 道林ほか, 2002)。

SXAMでは試料が大気中に置かれており、試料交換などの操作が簡単に行え、効率よく測定ができること、試料を非破壊・非汚染で測定できることが最大の特徴である。また岩石試料の場合、岩石の表面を#600の研磨剤で磨く程度で分析が可能であるため、試料を前処理する必要がないことも特徴として挙げられる。

XGT-2700Vでは、大気中の試料を測定することから生じるX線吸収によって、Naの感度がきわめて悪いため、Naの元素マップを取得できない。Mgについてははらうじて元素マップを取得できるが、感度は悪い。これらの問題については、XGT後継機 (X線分析顕微鏡) の検出感度が飛躍的に向上しているため、今後は改善されていくだろう。

岩石組織の画像取得において後方電子散乱像 (BSE

	Si	Al	Ca	Fe	Mg	Na
Plagioclase (Na, Ca)(Si, Al)Si ₂ O ₈	○	◎	○			×
Clinopyroxene Ca(Mg, Fe)Si ₂ O ₆	○		◎	○	△	
Olivine (Mg, Fe) ₂ SiO ₄	○			◎	△	

Fig. 2 Relationships among six elements (Si, Al, Ca, Fe, Mg and Fe) and the constituted minerals of the gabbro samples.

image) や走査型電子顕微鏡 (SEM) - エネルギー分散型X線分光器 (EDS), 電子線マイクロアナライザ (EPMA) の元素マップの方が可視画像より鉱物の識別に向いている。しかし, 可視画像を用いるのは, その広い画像サイズと測定の迅速さによる。画像サイズにおいて, SXAM は可視画像と同様に SEM や EPMA より大きな画像を取得することができる。

画像取り込み時間において, SEM では長時間測定すると試料表面が帯電することから測定時間が制限されるが, SXAM は十分な S/N 比が得られるまで測定時間を長くすることができる。また測定に長時間を要すると言っても, 試料のセットさえ済めば元素マップの取得まで自動的に測定が行われるため, 測定者の手を煩わすことはない。

分析手順

分析する前準備として3個のスラブ試料の片面を研磨した (Fig. 1)。SXAM 分析の手順は道林ほか (2002) に従った。

最初に試料の位置を把握するために全体マッピングを行った。測定する領域を 99.84 mm × 99.84 mm に設定し, 30 kV, 1 mA で発生させたX線ビームを1フレームあたり 1800 s で走査した。ただし全体マッピングでは, SXAM から照射されるX線ビーム径は 100 μm であるため, 得られる元素マップは試料をすだれ状に走査した元素マップになり試料面全体を捉えきれていない。

次にX線ビーム径 100 μm で試料を隙間無く走査できるように1画素が 100 μm × 100 μm になる測定領域を設定して, 部分マッピングを行った。1走査1時間で測定させる作業を繰り返し24回行い, 積算させて元素マップを得た。画像解析には, この部分マッピングのデータを使用した。

元素マップから鉱物マップへの変換法

元素マップの取得

SXAM から得られた元素マップについてX線の強度スペクトルから Mg, Al, Si, Ca, Fe, Ni, Mn, Cr, Ti の9元素のスペクトルを確認できた。これらのスペクト

ルは測定領域全体から得られた蛍光X線を積算したものである。この中で主要元素である Al, Si, Ca, Fe の4元素は強いピークを持つが, 同様に存在量が多いはずの Mg のピークは非常に弱い。これは大気中に試料を置いているために, Mg の蛍光X線が大気中に吸収されてしまったためと考えられる (道林ほか, 2002)。

鉱物ごとの化学組成と主要な四つの元素 (Al, Si, Ca, Fe) の蛍光X線強度の関係を Fig. 2 に示した。

Al は斜長石にのみ含まれているため, 蛍光X線強度の強い領域が斜長石に対応する。

Si は全ての鉱物に含まれているため, 鉱物間の蛍光X線強度の差は小さく, 特定の鉱物を推定することは難しい。

Ca は単斜輝石と斜長石に多く含まれており, 蛍光X線強度の強い領域が二つの鉱物に対応していると考えられる。元素の存在量の違いから, 蛍光X線強度の強い領域が単斜輝石, 蛍光X線強度のやや強い領域が斜長石に対応していると考えられる。

Fe は単斜輝石とかんらん石に多く含まれており, これも存在量の違いから蛍光X線強度の強い領域がかんらん石, やや強い領域が単斜輝石に対応している。

3個のスラブ試料について, SXAM から得られた元素マップを Figs. 3~5 にそれぞれ示す。それぞれの元素マップにおける各画素の測定値は, それぞれの元素の $K\alpha_1$ 線のエネルギーを中心とした ± 0.1 keV の幅に入るエネルギーを持ったX線の光子数をカウントしたものである。

各元素のエネルギーウィンドウを示すと, Al ($K\alpha_1 = 1.49$ keV) が 1.39 - 1.58 keV, Si ($K\alpha_1 = 1.74$ keV) が 1.64 - 1.83 keV, Ca ($K\alpha_1 = 3.69$ keV) が 3.58 - 3.79 keV, Fe ($K\alpha_1 = 6.40$ keV) が 6.27 - 6.52 keV である。

観測方程式

元素マップから鉱物マップへの変換をする方法は道林ほか (2002) に従って行った。

任意の画素中での Si, Ca, Al, Fe の各エネルギーウィンドウで検出されるX線のカウント数をそれぞれ x_1, x_2, x_3, x_4 として, その画素中に存在する3鉱物の割合をそれぞれ m_1, m_2, m_3 とする。既知数 (x_i) から未知数 (m_i) を求めるが, これらの間を関係づける式を導く

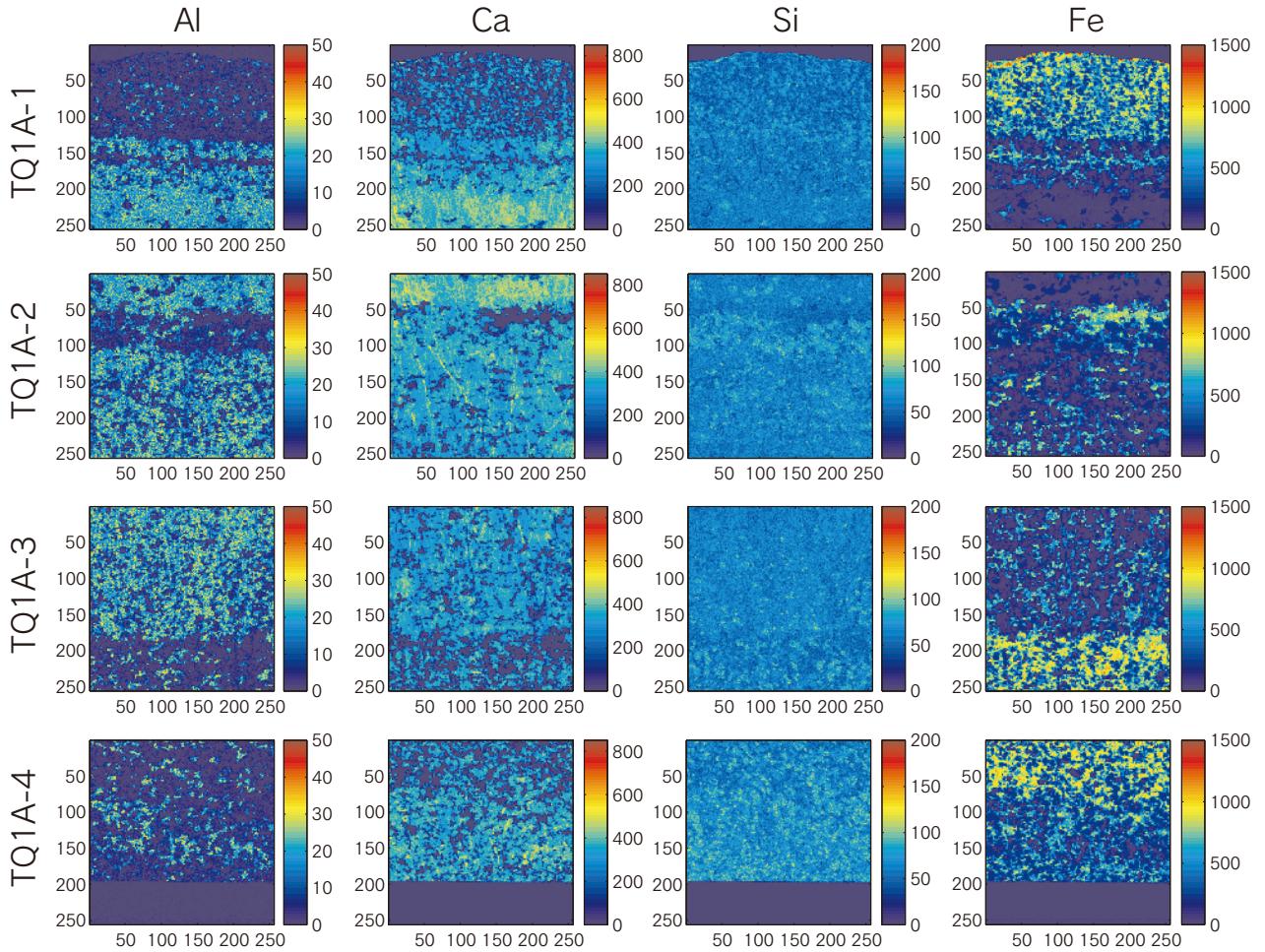


Fig. 3 Al, Ca, Si and Fe element maps in the TQ1A. Color bar of the right side in each element map shows X-ray counts of each element.

ため、次の三つの仮定を置いた。

1) 各鉱物の化学組成を一定であると仮定する。

2) 1画素内において、各エネルギーウィンドウ内でカウントされる当該元素の蛍光X線カウント数は各鉱物組成の線形結合で表すことができる。例えば、Siの蛍光X線カウント数 (Si_{XRF}) は次式で表すことができる。

$$Si_{XRF} = a_1 m_1 + a_2 m_2 + a_3 m_3 \quad (1)$$

ここで、 a_1 、 a_2 、 a_3 は測定時間に依存する係数である。

3) 1画素内において、各元素のエネルギーウィンドウ内でカウントされるX線で当該元素の蛍光X線以外のX線カウント数、すなわちバックグラウンドX線も各鉱物組成の線形結合で表されると仮定する。例えば、Siのエネルギーウィンドウ内でカウントされるもの (Si_{bg}) は次式で表すことができる。

$$Si_{bg} = b_1 m_1 + b_2 m_2 + b_3 m_3 \quad (2)$$

以上の三つの仮定により、1画素あたりエネルギーウィンドウ内でカウントされる測定値 (x_i) と鉱物組成 (m_i) を関係づける式は、Siの測定値 (x_1) を例とする

と次式で表すことができる。

$$x_1 = Si_{XRF} + Si_{bg} = A_1 m_1 + A_2 m_2 + A_3 m_3 \quad (3)$$

$A_i = a_i + b_i$ ($i = 1, 2, 3$) である。ほかの元素についても同様である、まとめると以下ようになる。

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\therefore x = A \cdot m$$

この式は観測方程式と呼ばれる。この式の行列 A (観測行列) の要素を決めれば、これを m について解くことで各画素における鉱物組成を算出できる。

行列 A の決定法

任意の画素において、1画素中に含まれる鉱物がかんらん石のみの場合、(4)式は次式のように表される。

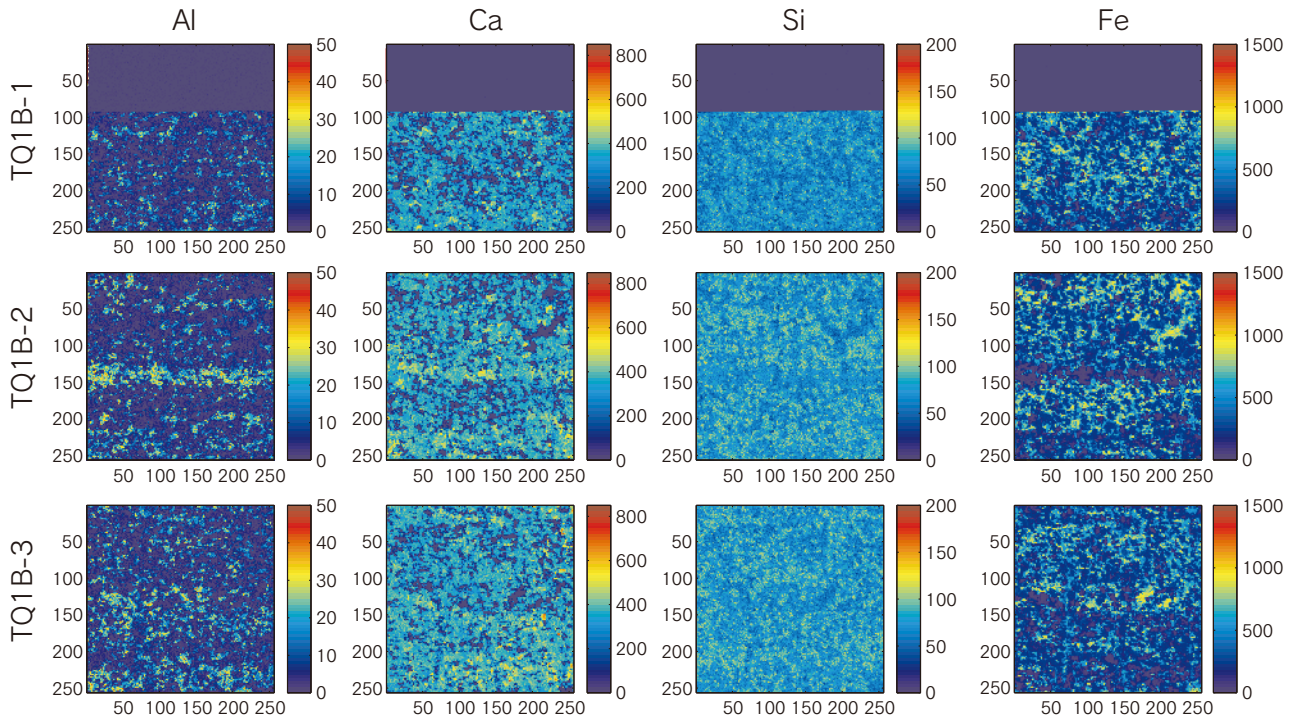


Fig. 4 Al, Ca, Si and Fe element maps in the TQ1B. Color bar of the right side in each element map shows X-ray counts of each element.

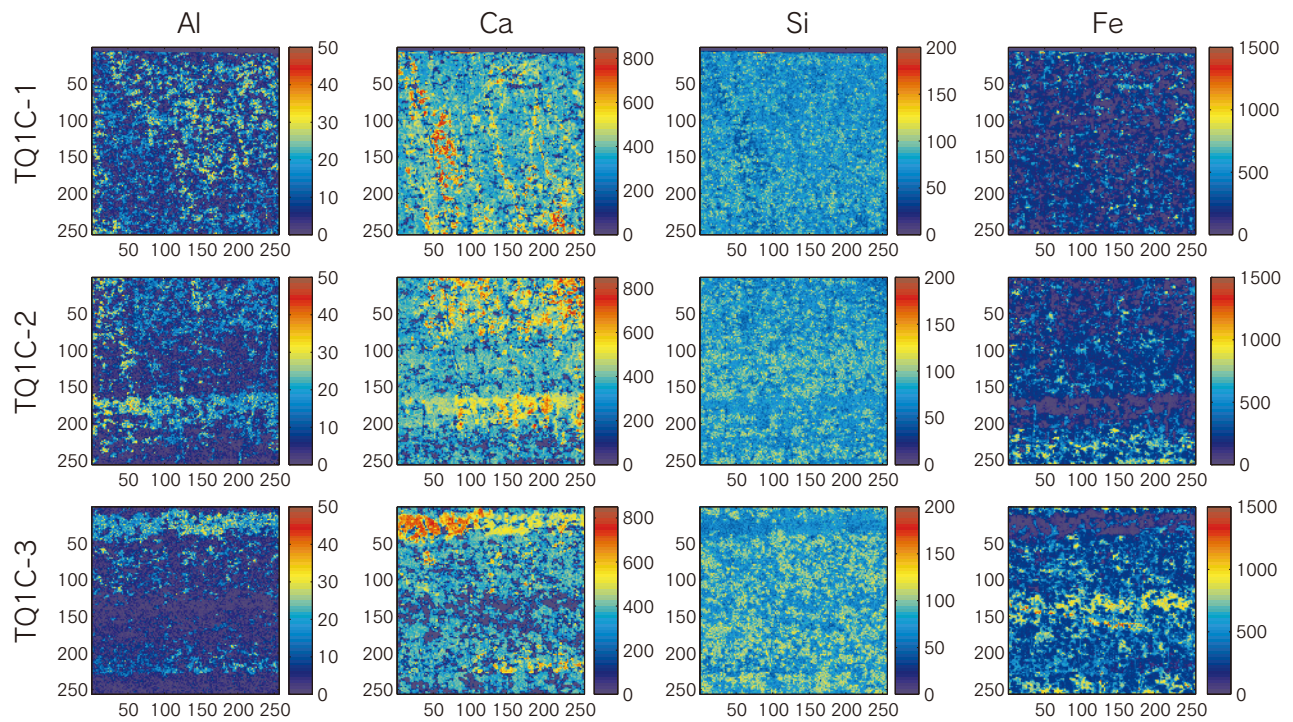


Fig. 5 Al, Ca, Si and Fe element maps in the TQ1C. Color bar of the right side in each element map shows X-ray counts of each element.

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} \\ A_{21} \\ A_{31} \\ A_{41} \end{pmatrix} \quad (5)$$

つまり、このとき得られる各元素の蛍光X線強度は行列 A の第1列に相当する。従って、かんらん石の標準試料を用意し分析試料と同じ画素中に測定することで行列 A の第1列を決めることができる。

今回の試料は1画素の大きさに比べて鉱物の粒径が大きいため、3鉱物がそれぞれ単独で1画素を占めていると思われる領域を元素マップから選び出すことは可能である(戸上ほか, 1998; Michibayashi *et al.*, 1999)。戸上ほか(1998)では、画素の選択を元素マップから部分的に選び出していたため、測定者の主観が入り得る要素があった。さらに、65,536画素の元素マップから同じ要素を繰り返し選択するのは困難であるため、決定される行列 A の再現性を保てないという欠点があった。道林ほか(2002)では画素の選択方法に主観的な要素をできるだけ排除して再現性の高い行列 A を決定する方法を提案した。そこで本研究では、行列 A を決定する方法は道林ほか(2002)に従い、さらに道林ほか(2002)によってMATLAB®で作成されたプログラムを使用した。

層状はんれい岩の場合、3鉱物(かんらん石・単斜輝石・斜長石)を最も識別しやすいのはFeの元素マップである。これを蛍光X線強度の頻度分布で見ると、3鉱物の分布が三つのピークとして識別できる(Fig. 6)。そこでFeの蛍光X線の強度の頻度分布の三つのピークをそれぞれ鉱物のFeの平均の蛍光X線強度とし、ピークを平均値とする正規分布を最小二乗法によって求めた。そして、正規分布の平均値を3鉱物のFeについての標準値とみなし、行列 A の要素とした。

他の元素については、Feの元素マップの標準値算出に使用した画素と同等の画素をそれぞれの鉱物について元素マップから選定し行列 A の要素を求めた。これらの値

は試料の測定時間によって変化し、行列 A の各要素は測定時間に比例する(道林ほか, 2002)。

観測方程式の解法と鉱物マップの取得

(4)式の観測方程式を解くには普通、最尤法が用いられる。最尤法の具体的なアルゴリズムは測定データの性質により異なる。測定データはある確率分布を示す母集団からの標本であると考え、様々な確率分布に対応した最尤法を用いなければならない。

今回扱うX線のカウント数は一般的には二項分布をとるが、これは確率が低いときにはポアソン分布に近似できる。このため、普通はポアソン分布で考えるが、X線のカウント数が大きく(>約20カウント)になると、平均値 μ のポアソン分布は平均値 μ 分散 μ の正規分布に近似できるため、正規分布に対応した最尤法を用いた(戸上ほか, 1998)。

最尤法とは、尤度関数 L が最大となるように未知数 (m_i) を求める方法で、測定値 x_i の分散を σ_i と置くと L は次のように書ける。

$$L = \left(\frac{1}{2\pi} \right)^{\frac{5}{2}} \prod_{i=1}^4 \left(\frac{1}{\sigma_i} \right) \exp \left\{ -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 \frac{(x_i - f_i)^2}{\sigma_i^2} \right\} \quad (6)$$

ここで、

$$f_i = \sum_{j=1}^3 A_{ij} m_j$$

である。(6)式が最大となる m_i の値を求めるには、(6)式対数をとり、 m_i で微分し、それぞれを0と置いた次の方程式を解けばよい。

$$\sum_{i=1}^4 \frac{x_i - f_i}{\sigma_i^2} \frac{\partial f_i}{\partial m_j} = 0 \quad (j=1, 2, 3) \quad (7)$$

これはいわゆる重みつき最小二乗法に相当し、(7)式は解析的に解くことができる。この方法で解いた鉱物マップを3個のスラブ試料について Figs. 7~9 にそれぞれ示した。さらに各画素で最も組成値の高い鉱物を一つのマッ

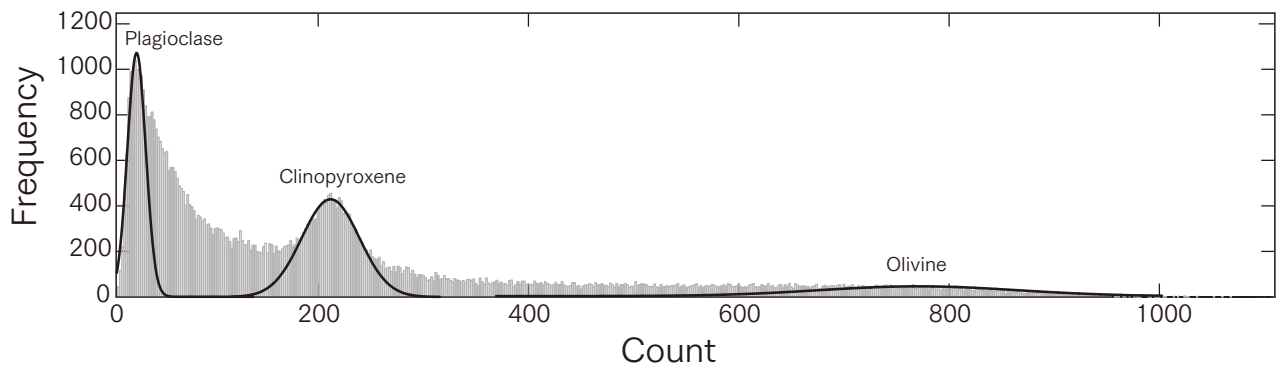


Fig. 6 Histogram for the X-ray map of Fe. Gaussian curves (solid line) have been fit by a least-squares method to estimate for X-ray intensity distribution of olivine, clinopyroxene and plagioclase, respectively.

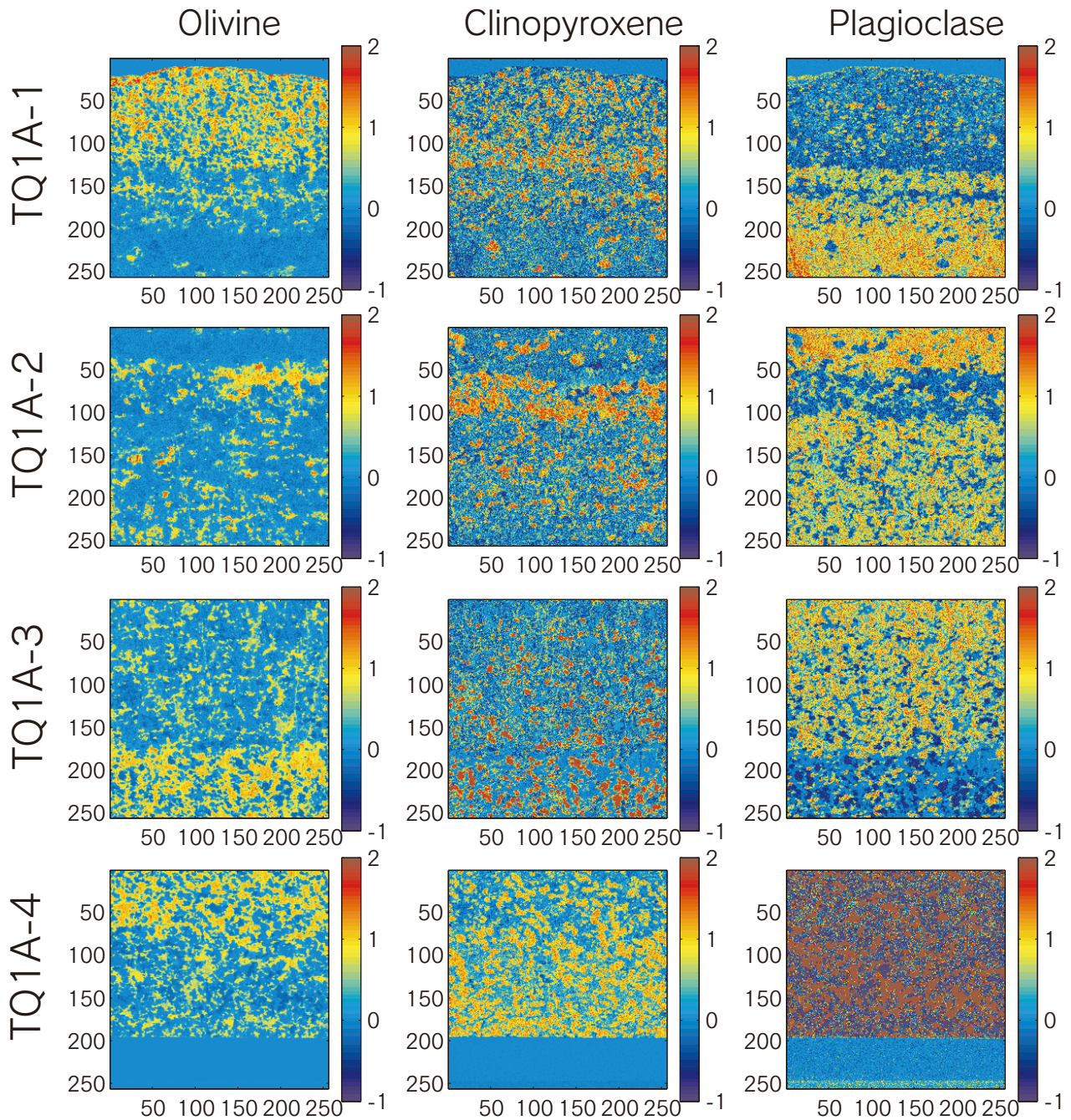


Fig. 7 Mineral distribution maps in TQ1A for three minerals: olivine, clinopyroxene and plagioclase, respectively.

ブにまとめた構成鉱物マップ（すなわちこれが岩石組織画像に対応する）をFig. 10に示す。

また、作成した鉱物マップにどのくらいの不確定要素が存在するのかを表す鉱物組成値の誤差マップを観測行列 (A) 要素の標準偏差から求めることが可能である（戸上ほか, 1998; Togami *et al.*, 2000）。以上の最小二乗法による解法の検討に関しては、戸上ほか（1998）、道林ほか（2002）で詳しく説明されている。

鉱物マップの画像解析

空間相関関数 σ 分布と τ 分布

鉱物マップを用いた組織解析手法として岩石組織中の鉱物の空間分布を統計的に処理する方法である空間相関関数（森下・小畑, 1995; Morishita & Obata, 1995; 森下ほか, 1998; 坂野ほか, 2000）に注目した。以下にその原理を示す。

最初に、 σ 分布と 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分

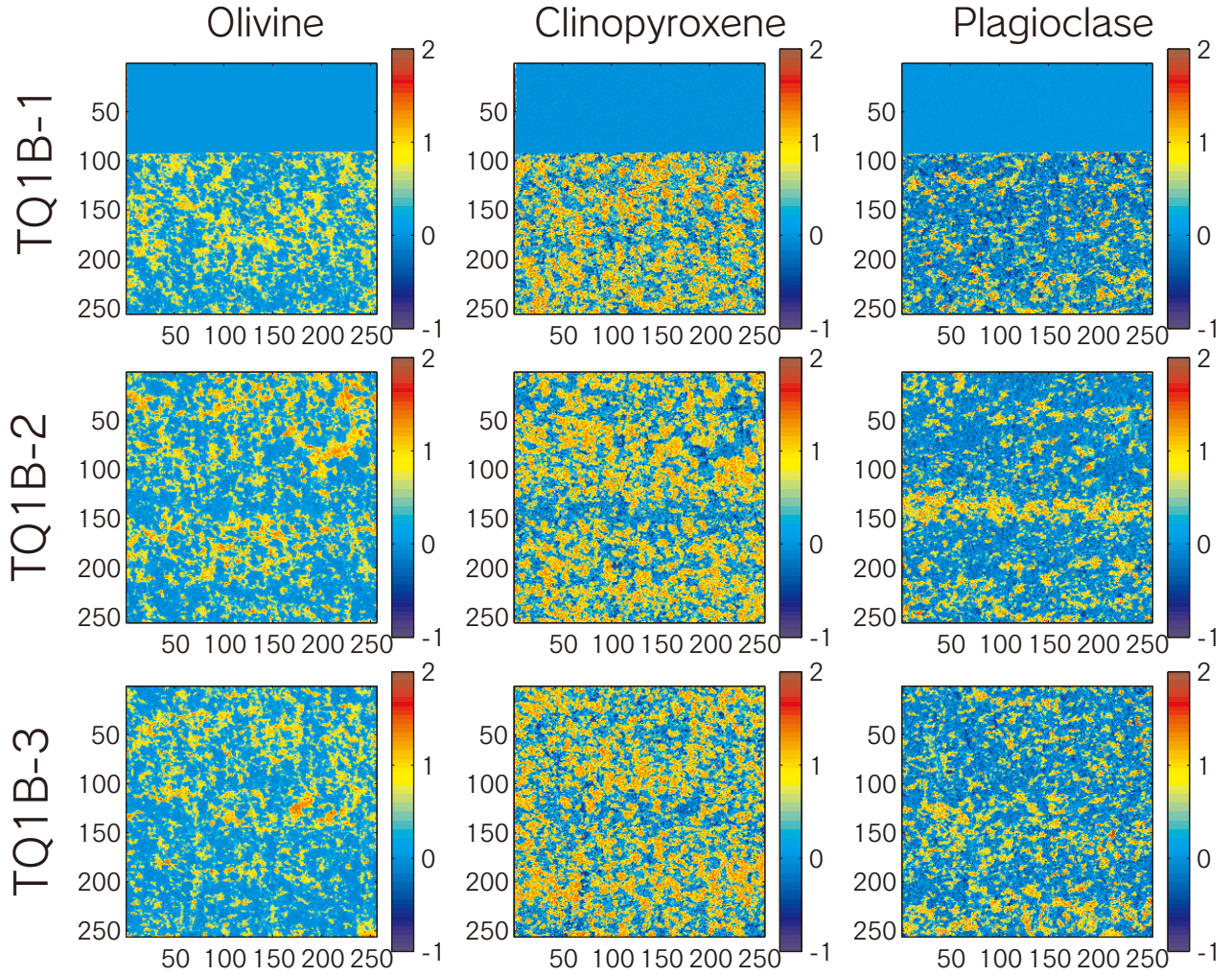


Fig. 8 Mineral distribution maps in TQ1B for three minerals: olivine, clinopyroxene and plagioclase, respectively.

布のかたよりが検証できることを示す。例えば、2種類の鉱物1, 2からなる岩石組織を考える。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。

$$F_1 + F_2 = 1 \quad (8)$$

ここで、空間中の任意の点をランダムに1点選んだとき、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 に等しい。同様に鉱物2である確率は F_2 である。

次に、空間中からランダムに2点選んだときの確率を考える。2つの点がどちらも鉱物1に存在する確率は F_1^2 である。同様に2つの点がどちらも鉱物2に存在する確率は F_2^2 となる。また片方の点が鉱物1に、もう片方の点が鉱物2に存在する確率は $2F_1F_2$ である。これらの全ての場合の確率の合計は

$$F_1^2 + 2F_1F_2 + F_2^2 = 1 \quad (9)$$

となる。2点がランダムに選ばれている限り、鉱物1, 2の形やサイズ、空間的なかたよりにかかわらず(9)式は常

に成り立つ。

さらに、距離 D 離れた2点を選んだときを考える。2点とも鉱物1に存在する確率を P_{11} 、2点とも鉱物2に存在する確率を P_{22} 、片方が鉱物1、もう片方が鉱物2にある確率を P_{12} とする。このとき常に

$$P_{11} + P_{22} + P_{12} = 1 \quad (10)$$

が成り立つ。これらの確率は一般に距離 D の関数であるため、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確率に一致するはずである。つまり、 P_{11} , P_{22} , P_{12} はそれぞれ F_1^2 , F_2^2 , $2F_1F_2$ に等しくなる。

距離 D が0のとき、2点は重なってしまうため P_{11} , P_{22} は1点が鉱物1または鉱物2に存在す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と鉱物2に属することはあり得ないから P_{12} は0になる。逆に距離 D が0より十分大きいとき、片方の点が鉱物1、もう片方が鉱物2の領域に存在することが考

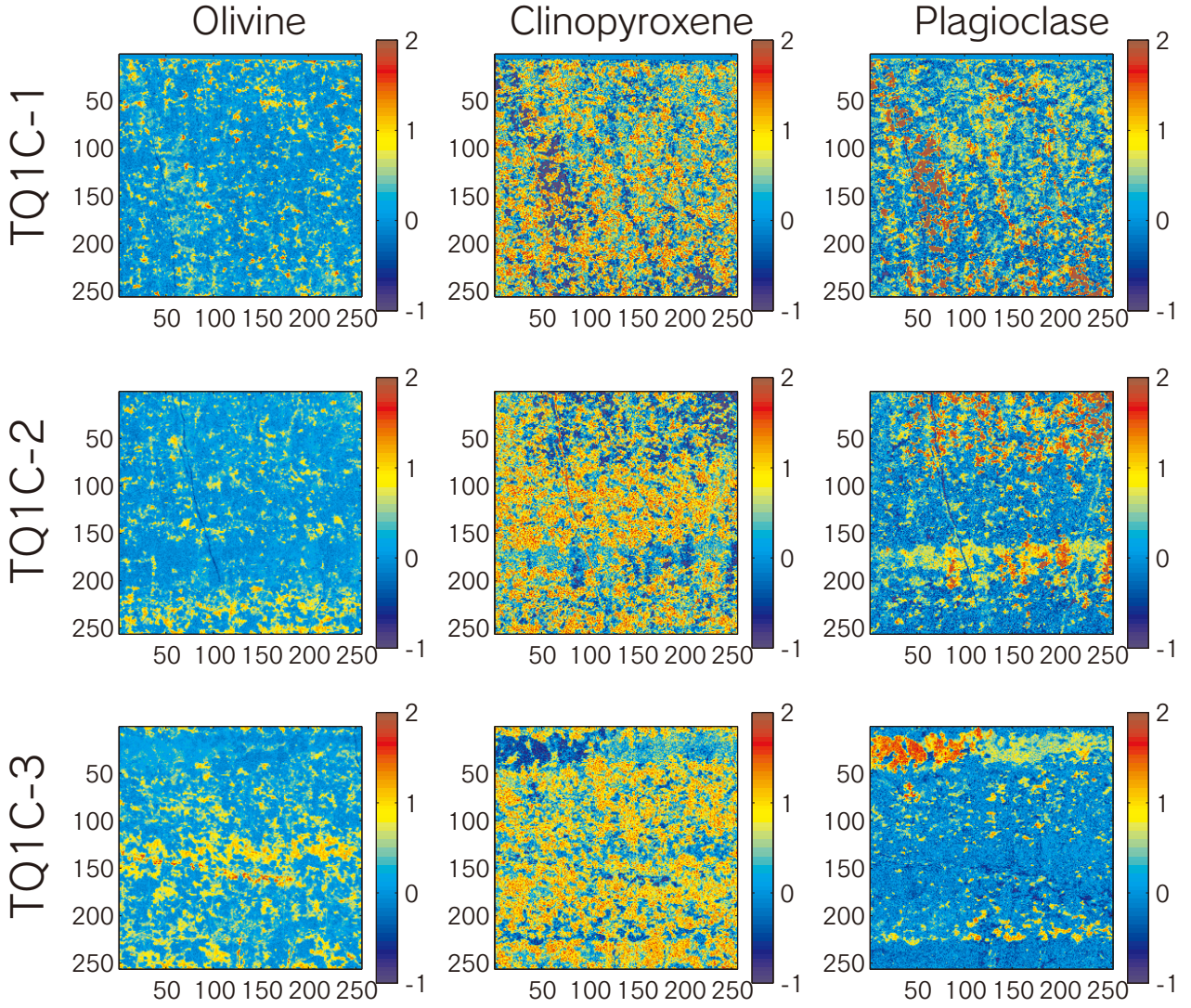


Fig. 9 Mineral distribution maps in TQ1C for three minerals: olivine, clinopyroxene and plagioclase, respectively.

えられる。このため、 P_{11} は F_1 より小さくなり、 P_{12} は 0 ではなくなる。

これらの結果をまとめると、 P_{11} は距離 $D=0$ で F_1 、そして距離 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。 P_{22} は P_{11} と同様である。また P_{12} は距離 D が大きくなるに従い、0 から徐々に大きくなり、距離 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_{22} 、 P_{12} 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 l に鉱物種 i が存在するとき 1、存在しないとき 0 になる関数 $\rho_i(l)$ を考える。このとき P_{11} 、 P_{22} は

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

$$P_{22}(\mathbf{r}) = \langle \rho_2(\mathbf{l})\rho_2(\mathbf{l}+\mathbf{r}) \rangle \quad (12)$$

$\langle \rho_i(l) \rangle$ は様々な位置 l について求めた $\rho_i(l)$ の平均をあ

らわす。また P_{12} は

$$P_{12}(\mathbf{r}) = \langle \rho_1(\mathbf{l})\rho_2(\mathbf{l}+\mathbf{r}) \rangle + \langle \rho_1(\mathbf{l}+\mathbf{r})\rho_2(\mathbf{l}) \rangle \quad (13)$$

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 ($D \equiv |\mathbf{r}|$)。

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。

$$\sigma_1(\mathbf{r}) = \frac{P_{11}(\mathbf{r}) - F_1^2}{F_1 - F_1^2} \quad (14)$$

$$\sigma_2(\mathbf{r}) = \frac{P_{22}(\mathbf{r}) - F_2^2}{F_2 - F_2^2} \quad (15)$$

$$\tau_{12}(\mathbf{r}) = \frac{P_{12}(\mathbf{r})}{2F_1F_2} \quad (16)$$

σ_1 、 σ_2 は鉱物の占める割合にかかわらず、距離 0 で 1、

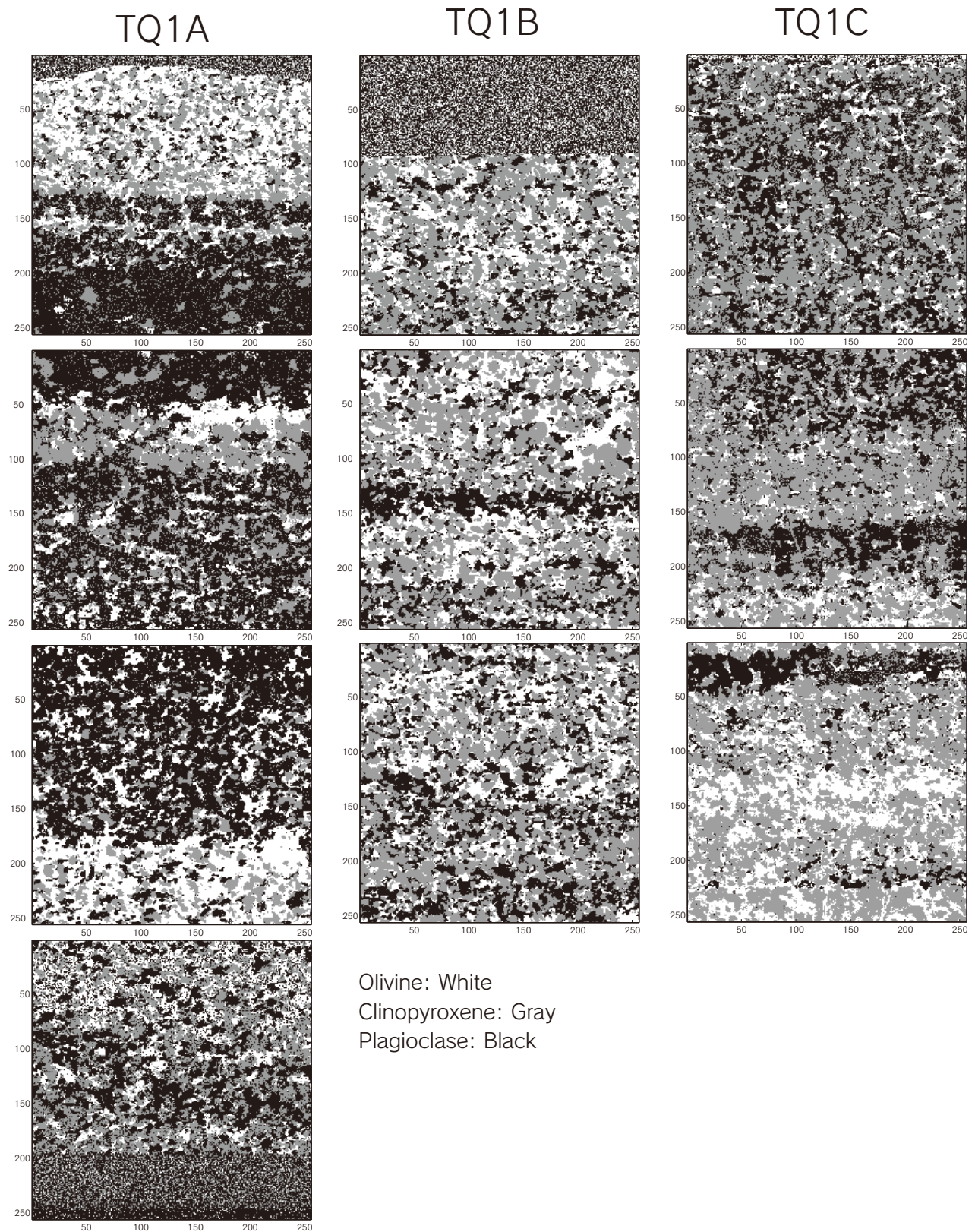


Fig. 10 Mineral distribution maps in TQ1A, TQ1B and TQ1C, respectively. These maps were obtained by combining three mineral distribution maps in Figs. 7–9. Black, plagioclase; gray, clinopyroxene; white, olivine.

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(14)、(15)式のように同じ種類の鉱物から得られる関数を σ 分布、(16)式のように異なる種類の鉱物から得られる関数を 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。

$$\sigma_i(\mathbf{r}) = \frac{P_{ii}(\mathbf{r}) - F_i^2}{F_i - F_i^2} \quad (17)$$

$$\tau_{ij}(\mathbf{r}) = \frac{P_{ij}(\mathbf{r})}{2F_i F_j} \quad (18)$$

ここで $P_{ij}(\mathbf{r})$ は鉱物 i 、 j の組み合わせの距離 D での存在確率である。 F_i は鉱物種 i の占める割合で、常に次の規格化条件を満たす。

$$\sum_{i=1}^n F_i = 1 \quad (19)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_{ij}(\mathbf{r}) = 1 \quad (i \leq j) \quad (20)$$

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。

理論的に鉱物がランダムに分布する場合、 σ 分布は常に0になる。しかし、 σ 分布が0より大きいとき、同じ鉱物が存在する確率はランダム分布のときよりも大きくなるため、鉱物マップ画像では同じ鉱物が密に分布する。逆に、 σ 分布が0より小さいとき、同じ鉱物が存在する確率はランダム分布のときよりも小さくなるため、鉱物マップ画像では、同じ鉱物が疎に分布する。

τ 分布では、鉱物がランダムに分布する場合、常に1になる。 τ 分布が1より大きいとき、二つの鉱物が存在する確率はランダム分布のときより大きくなるため、鉱物マップ画像ではその二つの鉱物が密に分布する。森下・小畑（1995）とMorishita & Obata（1995）において、 τ の値が最大になるときの距離を「平均鉱物間距離」と定義している。逆に τ 分布が1より小さいとき、二つの鉱物が存在する確率はランダム分布より小さくなるため、鉱物マップ画像ではその二つの鉱物は疎に分布する。

森下・小畑（1995）では σ 分布と τ 分布のおおよその傾向を知りたい場合には、 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1万組で十分正確な値が得られると説明された。本研究における岩石組織画像の画素数は65,536画素で、計算する2点の組み合わせは約20億組あるため、森下・小畑（1995）の条件を十分に満たしている。

本研究では、さらに、空間相関関数を距離と方向についてそれぞれ検討した。

距離は、ある1点から距離 D 離れたところにある1点の確率を、すべての方向に対して計算を行った。本研究における距離は画素数に相当する。半径 D の円を描き、その軌跡上に存在する点全ての確率を計算した。その作

業を、距離を徐々に増やして行った。例えば距離が5の場合、任意の1画素から距離が5（つまり、5画素分）離れた全ての方向に対して同じ鉱物が存在する確率、異なる鉱物が存在する確率を計算し、それを画像中に存在する画素全てに当てはめて平均を取った。この平均を規格化して距離が5のときの σ 値とした。

方向は、距離に対する確率の計算に、角度を考慮した。ある1点を中心に半径 D の円を描く。それを水平 0° を基準として 10° ごとに分け、角度の範囲内の確率を計算した。そして、この計算を全ての画素に当てはめて平均を取り、規格化して σ 値と τ 値を求めた。

本研究では、距離 D を変えたときどのような傾向を示すかを調べるために、距離を30（つまり、30画素）まで計算した。方向については、角度を 10° 毎にして距離を30まで計算した。

Hough変換

本研究では、一般的な画像処理方法であるHough変換について検討した。これは投票メカニズム（voting）を使った曲線パラメータ推定アルゴリズムである（Russ, 1999）。

Hough変換の前提にあるものは、現存する大きなイメージ中の最もフィットするカーブあるいは直線を見つけることである。Hough変換では、いくつかの組み合わせのパラメータにより与えられる曲線状に存在する点座標を投票する。

原理を簡単に説明するため、一般的である二つのパラメータである直線にフィットするHough変換について説明する。直線の式を

$$\beta = m \cdot \alpha + c \quad (21)$$

とする。②1式では α 、 β は2値化された画像中の点座標、 m と c はそれぞれ傾きと切片パラメータを示す。②1式について m と c を変数、 α 、 β を定数であると考えると次のような式になる。

$$c = -\alpha \cdot m + \beta \quad (22)$$

この式は、 m - c 座標系において直線を表すことになる。傾きと切片が α 、 β により決定される（Fig. 11a）。つまり点 (α, β) は、②2式のように m - c 平面における直線の一部に対応することになる。 m - c 座標系では傾きが0にならないため、実用的にHough変換は②3式にあるような極座標表現で表される。

$$\rho = \alpha \cos \theta + \beta \sin \theta \quad (23)$$

この場合、観測点 (α, β) は (ρ, θ) 座標空間にプロットされる（Fig. 11b）。直線の場合、もし複数点 n が同じ観測座標 $\alpha - \beta$ の直線上にあった場合（Fig. 11c）、それらに対応する同じポイント (ρ, θ) 空間にマスを作り対応する点に対し投票する（Fig. 11d）。最も投票の大きい箇所 (ρ, θ) が最適な直線を表す（Fig. 11e）。

Hough変換のアルゴリズムは以下の(a)から(d)で表される。(a)適当にパラメータ空間を量子化する、(b)それぞれのパラメータ空間におけるセルを加算できるユニットと

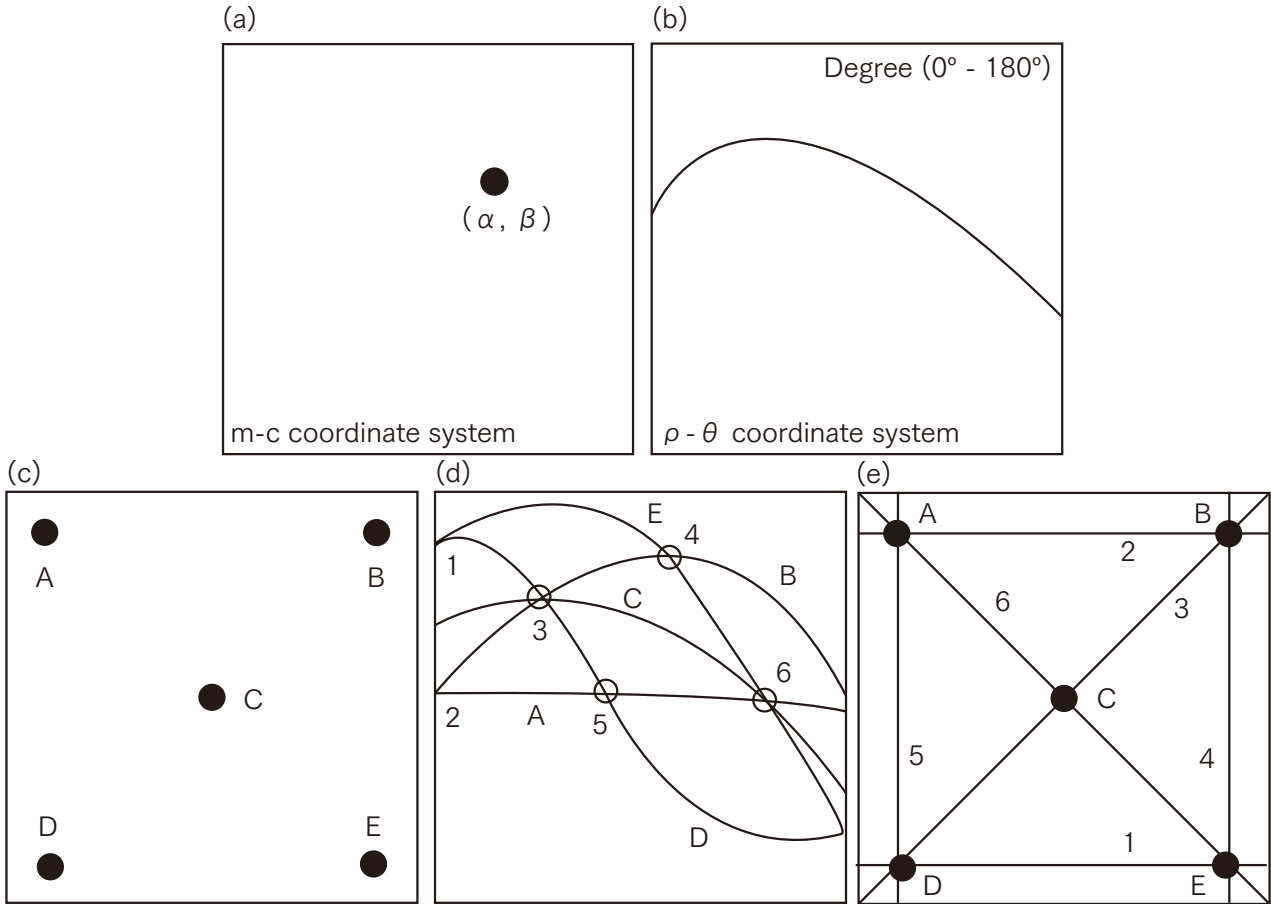


Fig. 11 The example patterns for the explanation of Hough transformation. (a) Point (α, β) plots in the m - c coordinate system as a black point. (b) Point (α, β) was displayed as a curve in the ρ - θ coordinate system. Horizontal axis for degree displays the range between 0° and 180° . (c) Some points from A to E locate at the m - c coordinate system. (d) These points display as curves at the ρ - θ coordinate system; *i.e.*, Hough space. There are some intersections from 1 to 6 on these curves in the ρ - θ coordinate system. (e) The m - c coordinate system transformed from the ρ - θ coordinate system again after the application of hough transformation. Some intersections (1-6) in the ρ - θ coordinate system correspond to the straight lines connected from point to point in the m - c coordinate system.

仮定し、全てのセルを0に初期化する、(c)画像空間において2値化したそれぞれの (α, β) ポイントに対応するパラメータ空間のセルに1を加える、(d)加算されたセルの最大値がパラメータモデルの最も特徴となるパラメータになる。

Hough変換におけるパラメータ空間は離散的な配列を仮定している。先の説明では、直線を例に扱った。またこの方法は直線だけでなく円や曲線にも適用可能である。パラメータ空間の中のピークが複数存在する場合には、その重心となる箇所が推定パラメータになる。

結果

鉱物マップと空間相関関数

鉱物マップを空間相関関数に適用した結果をFigs. 12~14に示す。 σ 分布では、赤をかんらん石、緑を単斜輝石、青を斜長石として示した。 τ 分布では、かんらん石と単斜輝石、かんらん石と斜長石、単斜輝石と斜長石の鉱物

組み合わせをそれぞれ実線、破線、点線で表示した。

TQ1A-2の鉱物マップは単斜輝石の層状構造が認められるほかに、部分的にかんらん石の層状構造も確認できる (Fig. 12a)。 σ 分布はどの鉱物もほぼ似た分布をする。距離30で斜長石の σ 値はランダムを表す0になる。 τ 分布において、かんらん石と単斜輝石のペアが距離15のところをランダムである1を超えている。他のペアは1に到達していない。方向 10° 毎に区分けされた σ 分布では、全ての鉱物が 0° で極大値を持つ。同様に、方向 10° 毎に区分けされた τ 分布については、かんらん石と単斜輝石のペアが 0° で極小値をもち、他のペアは1に到達していない。

TQ1A-3の鉱物マップは斜長石の層状構造とかんらん石の層状構造が同時に存在するという他の鉱物マップにはない特徴を持つ (Fig. 12b)。 σ 分布が0にならず、 τ 分布は1にならないことから、距離と方向どちらもランダム分布とは言えない。強いて言えば、 τ 分布において、かんらん石と単斜輝石のペアが距離5で1になり、距離

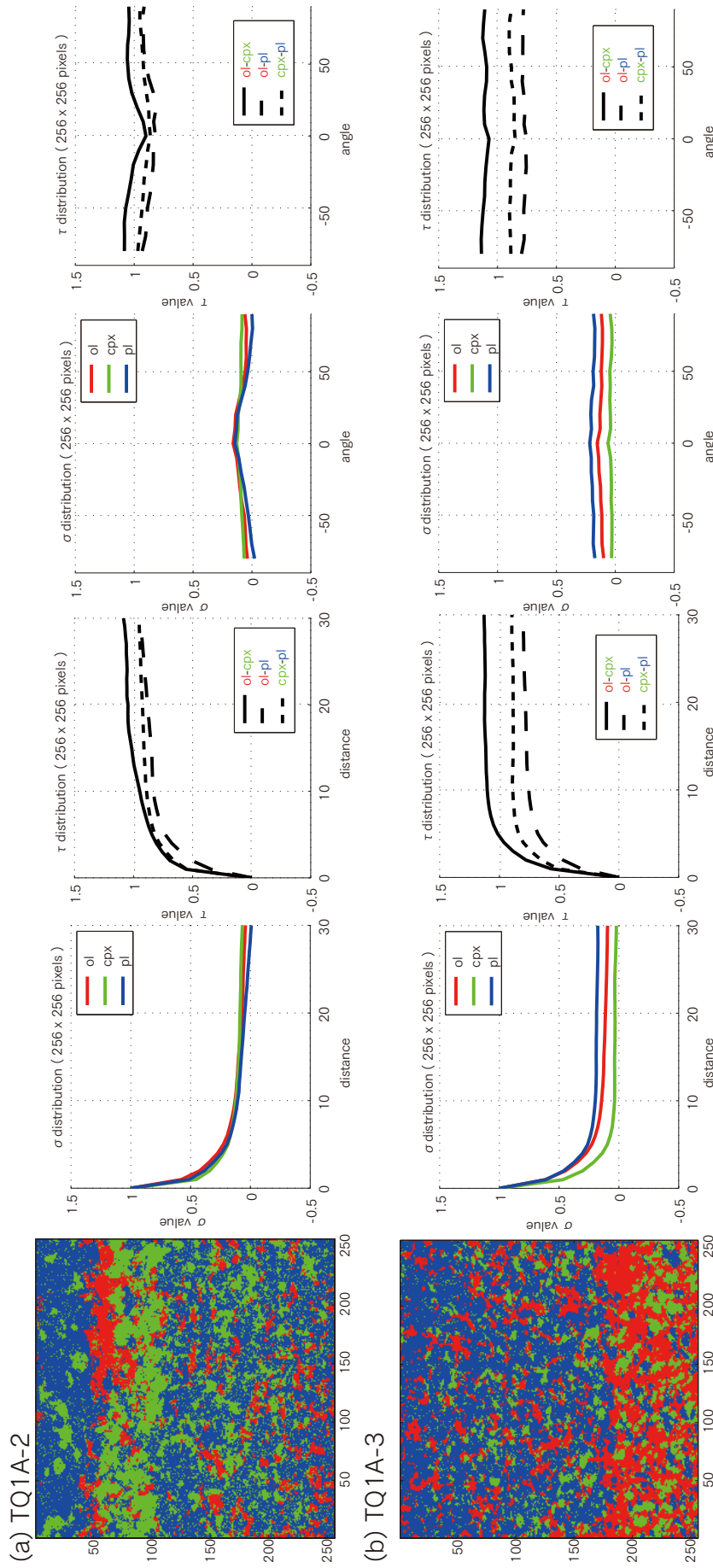


Fig. 12 σ and τ distributions for TQ1A sample. The left panel shows a mineral distribution map; red, olivine (ol); green, clinopyroxene (cpx), and blue, plagioclase (pl). The two center panels indicate σ and τ distributions for distance. The two right panels show for σ and τ distributions for angle. RGB colors in σ distributions correspond to individual minerals in the mineral distribution map. Solid, broken and dotted lines in τ distributions indicate a pair of constituted minerals; olivine-clinopyroxene, olivine-plagioclase, and clinopyroxene-plagioclase, respectively. (a) Results for TQ1A-2. (b) Results for TQ1A-3.

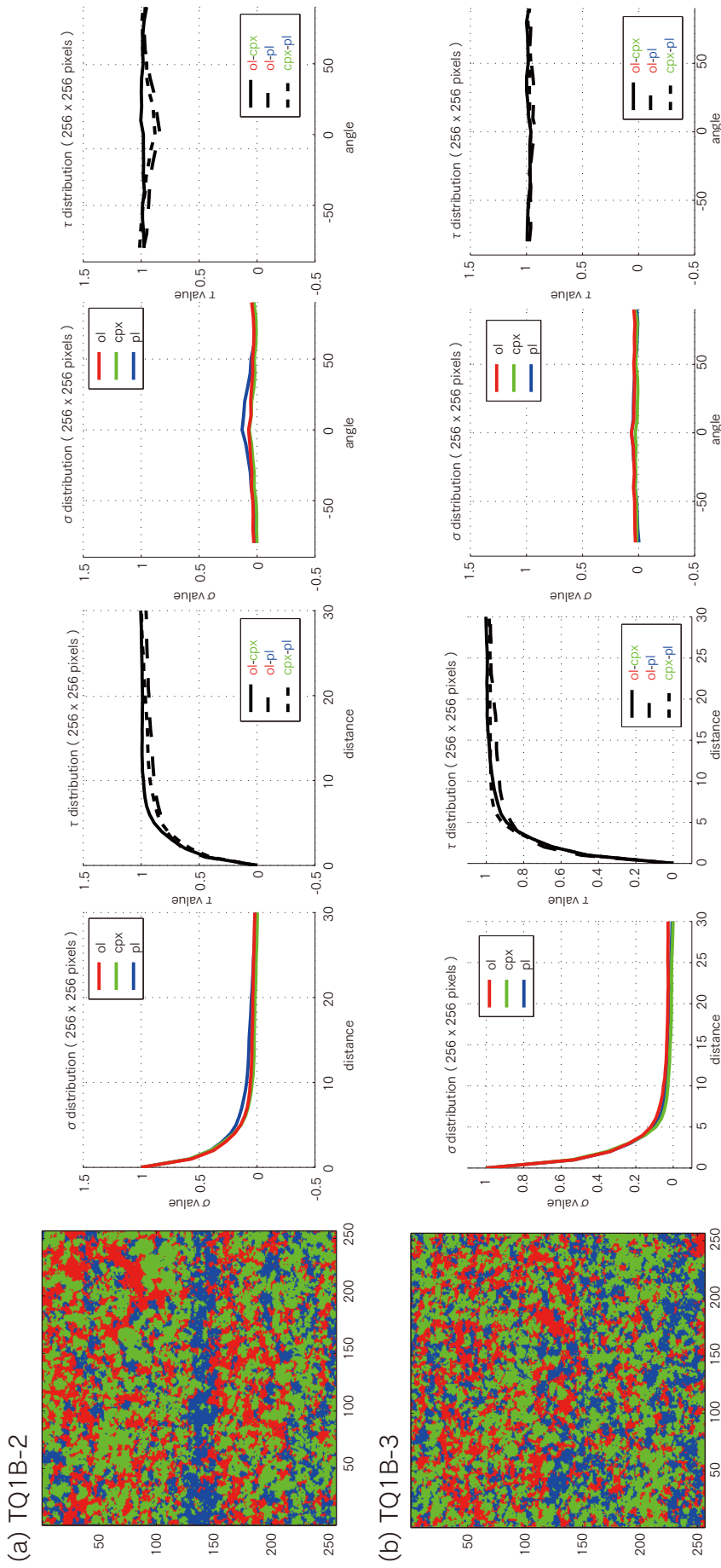


Fig. 13 σ and τ distributions for TQ1B sample. The left panel shows a mineral distribution map; red, olivine (ol); green, clinopyroxene (cpx), and blue, plagioclase (pl). The two center panels indicate σ and τ distributions for distance. The two right panels show σ and τ distributions for angle. RGB colors in σ distributions correspond to individual minerals in the mineral distribution map. Solid, broken and dotted lines in τ distributions indicate a pair of constituted minerals; olivine-clinopyroxene, olivine-plagioclase, and clinopyroxene-plagioclase, respectively. (a) Results for TQ1B-2. (b) Results for TQ1B-3.

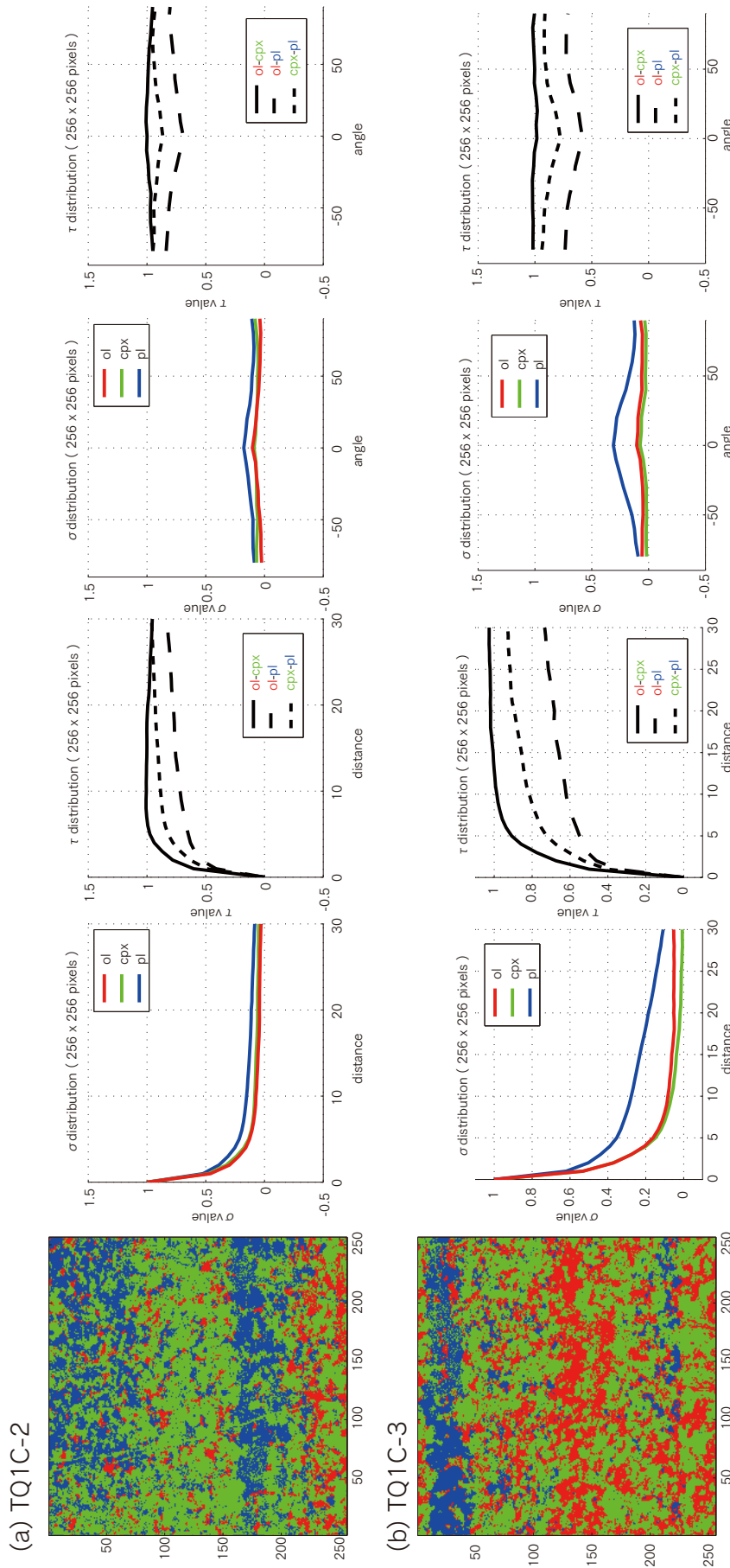


Fig. 14 σ and τ distributions for TQ1C sample. The left panel shows a mineral distribution map; red, olivine (ol); green, clinopyroxene (cpx); and blue, plagioclase (pl). The two center panels indicate σ and τ distributions for distance. The two right panels show also σ and τ distributions for angle. RGB colors in σ distributions correspond to individual mineral in the mineral distribution map. Solid, broken and dotted lines in τ distribution indicate a pair of constituted minerals; olivine-clinopyroxene, olivine-plagioclase, and clinopyroxene-plagioclase, respectively. (a) Results for TQ1C-2. (b) Results for TQ1C-3.

が増えると1を超えてしまう。

TQ1B-2の鉱物マップは斜長石の層状構造が認められる (Fig. 13a)。 σ 分布は距離が20でランダムを表す0になる。その後距離が増えても分布は変わらない。 τ 分布では、かんらん石と単斜輝石のペアは距離が10でランダムを表す1になる。他の鉱物ペアは距離が30で1になる。方向10°毎に区分けされた σ 分布では、斜長石の分布が0°に極大値を持つ。さらに他の鉱物の分布も斜長石の分布より小さいけれども0°に極大値を持つ。方向10°毎に区分けされた τ 分布では、かんらん石と斜長石、単斜輝石と斜長石のそれぞれのペアが0°で極小値を持つ。特にかんらん石と斜長石のペアは単斜輝石と斜長石のペアよりも低い極小値を持つ。

TQ1B-3の鉱物マップ (Fig. 13b) の場合、 σ 分布では距離が20のときランダムを表す0になる。 τ 分布については、 σ 分布と同じように距離が20でランダムを表す1になる。方向10°毎に区分けされた σ 分布では、全ての鉱物が0°にほぼ近い分布をしている。方向10°毎に区分けされた τ 分布については、かんらん石と斜長石のペアが0°に極小値を持っているが、他のペアはほぼ1になる。

TQ1C-2の鉱物マップは斜長石の層状構造が観察できる (Fig. 14a)。 σ 分布について、全ての鉱物は距離が増えても0にならない。 τ 分布では、かんらん石と単斜輝石のペアが距離10から距離20にかけて1になるが、距離が20より大きくなると1より小さくなる。他のペアは距離が増えても1にならない。方向10°毎に区分けされた σ 分布について、全ての鉱物が0°で極大値を持ち、特に斜長石が他の鉱物よりも大きい値を示す。方向10°毎に区分けされた τ 分布では、かんらん石と単斜輝石のペアが1になる。かんらん石と斜長石、単斜輝石と斜長石それぞれのペアは0°で極小値を持つ。

TQ1C-3の鉱物マップもTQ1C-2の鉱物マップと同様に斜長石の層状構造が認められる (Fig. 14b)。 σ 分布について、単斜輝石は距離が30でランダムを表す0になる。しかし、かんらん石と斜長石は0にならない。 τ 分布はかんらん石と単斜輝石のペアは距離が15でランダムを表す1になり、距離が増えると1を超えている。他のペアは1にならない。方向10°毎に区分けされた σ 分布では、斜長石が0°で極大値を持つ。方向10°毎に区分けされた τ 分布については、かんらん石と斜長石、単斜輝石と斜長石のペアが0°で極小値を持つ。特にかんらん石と斜長石のペアは0°以外の角度でもランダムを表す1にならない。また、かんらん石と単斜輝石のペアは1になる。

サンプル画像と空間相関関数

空間相関関数を鉱物マップに適用して得られる傾向を比較するため、ある条件を加えて作成した画像 (サンプル画像とよぶ) についても空間相関関数を適用した。サンプル画像を Fig. 15 に示す。

サンプル画像の条件として、サイズは256画素×256画素に統一したが、プログラムの設定により一部で260画素×256画素で構成されたサンプル画像を用いた。このサイズの変更による空間相関関数の σ 分布と τ 分布に影響はほとんどないと考えられる。なぜなら、空間相関

関数の計算に必要な2点の組み合わせ数は十分満たしており、正確な値が出ると判断されるためである。

色は層状はんれい岩の組織画像と同じような組織画像にするため、赤・緑・青の三つの色からなる分布画像を作成した。サンプル画像の種類として、(1)赤・緑・青の3色がランダムに分布した画像 (Fig. 15a)、(2)赤・緑・青の層が繰り返し連続的に入っている画像 (Fig. 15b)、(3)赤・緑・青の3色がランダムに分布した画像に赤の層を重ねた画像 (Fig. 15c) の3種類で行った。

計算は、層状はんれい岩と同様に距離を30まで、方向については角度を10°毎、距離を30まで行った。 σ 分布について赤・緑・青の3色で表示し、 τ 分布について赤と緑、赤と青、緑と青のペアをそれぞれ実線、破線、点線で表示した (Fig. 15)。

ランダムに分布したサンプル画像 (Fig. 15a) では、距離と方向に関係なく、すべて σ 分布は常に0 (すなわちランダム)、 τ 分布は1 (すなわちランダム) になった。 σ 分布も τ 分布も一つしか分布が描かれていないように見られるのは、全ての色が同じように分布するためである (Fig. 15a)。

赤、緑、青の層が入ったサンプル画像 (Fig. 15b) では、距離の σ 分布と τ 分布に周期性が見られた。方向10°毎に区分けされた σ 分布において、0°に極大値が見られる。一方、方向10°毎に区分けされた τ 分布には、0°に極小値が見られた (Fig. 15b)。

ランダム分布と赤の層が入ったサンプル画像 (Fig. 15c) の場合、 σ 分布は全ての色に周期性が見られた (Fig. 15c)。しかし緑と青の分布はほとんど0になる。 τ 分布も同様に周期性が見られた。方向10°毎に区分けされた σ 分布では、全ての色が0°に極大値を持つ。特に赤の σ 値が大きく、残りの色は赤の σ 値よりも小さい。方向10°毎に区分けされた τ 分布では、赤と緑、赤と青のペアは0°に極小値を持ち、緑と青の分布は0°に極大値を持つ (Fig. 15c)。

鉱物マップとHough変換

Hough変換に適用するため、鉱物ごとに分けた鉱物マップを使用した (Fig. 16a)。さらにHough変換では2値化した画像を用いるため、それぞれの鉱物マップについて、存在しない部分を白、存在する部分を黒にしたマップを作成した (Fig. 16a)。鉱物マップ中に黒の画素が一番多い直線を算出し、それを集中度として図に示す (Fig. 16b)。直線をかんらん石だけの鉱物マップに重ねて表示する (Fig. 16c)。このとき、直線の傾きと角度も表示し、単斜輝石や斜長石の鉱物マップと比較できるようにした。上と下の縦軸と横軸は画素数を表す。中央の図は縦軸が ρ で表され、直線を引く位置を示す。横軸は0から180°までの角度 θ を表し、左端は0°、中央は90°、右端は180°になる。そして集中度が高いほど色が赤に近づく。

TQ1A-2はかんらん石と単斜輝石に層状構造が確認できる (Fig. 16a)。Hough変換では、かんらん石と単斜輝石の鉱物マップから層状構造の部分に直線が引かれた (Fig. 16c)。二つの鉱物マップの集中度において、両端の2カ所は特に集中が強い (Fig. 16b)。両端は水平方向

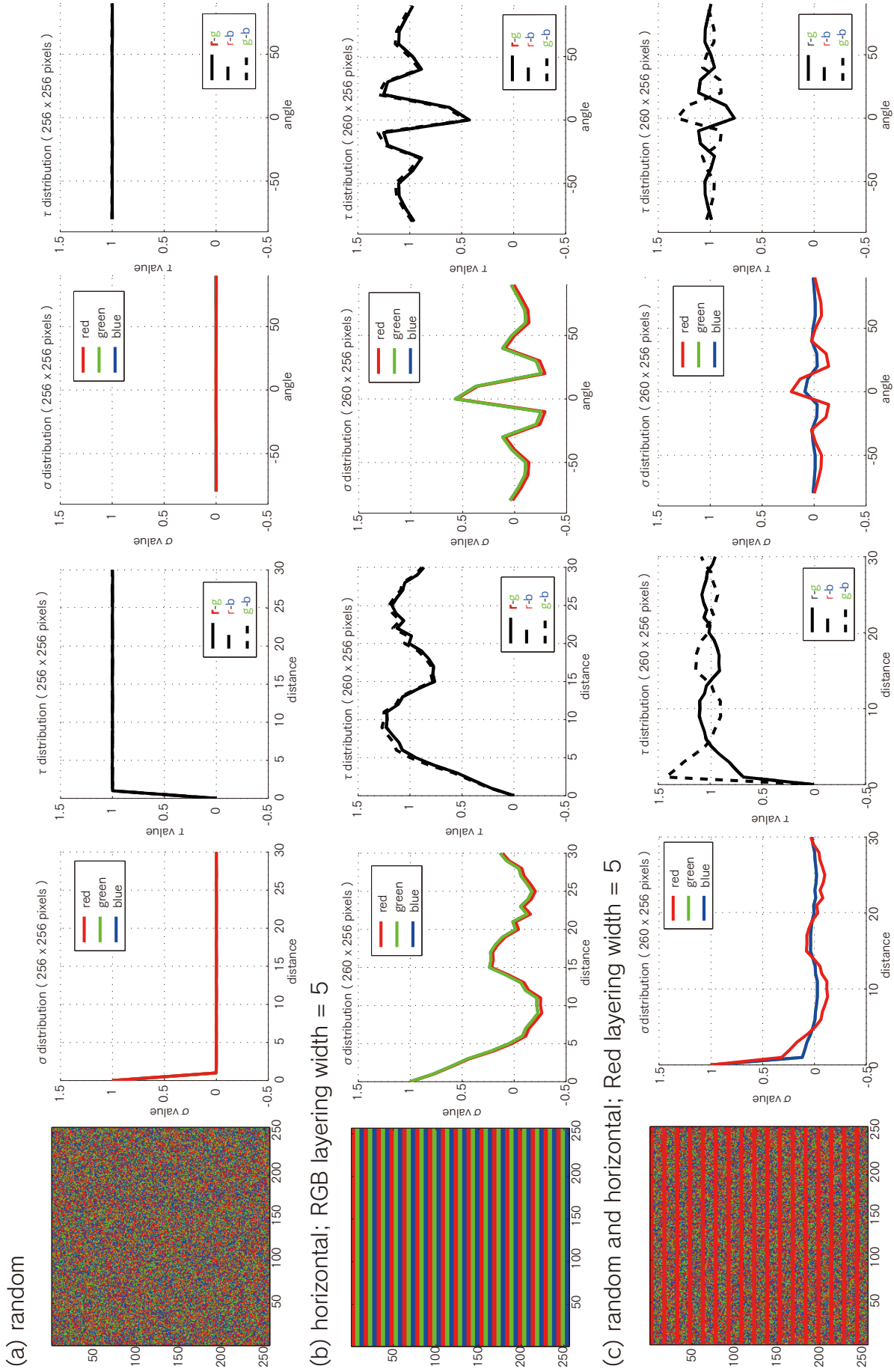


Fig. 15 σ and τ distributions for pattern maps. The left panel shows a pattern map in red-green-blue (RGB) color. The two center panels indicate σ and τ distributions for distance. The two right panels show σ and τ distributions for angle. RGB colors in σ distributions correspond to individual colors in the pattern map. Solid, broken and dotted lines in τ distributions indicate a pair of colors; red-green, red-blue, and green-blue, respectively. (a) Results for a random pattern map. RGB layering width is 5 pixels. (b) Results for a horizontal pattern map. RGB layering width is 5 pixels. (c) Results for a random pattern map with red layering. The red layering width is 5 pixels.

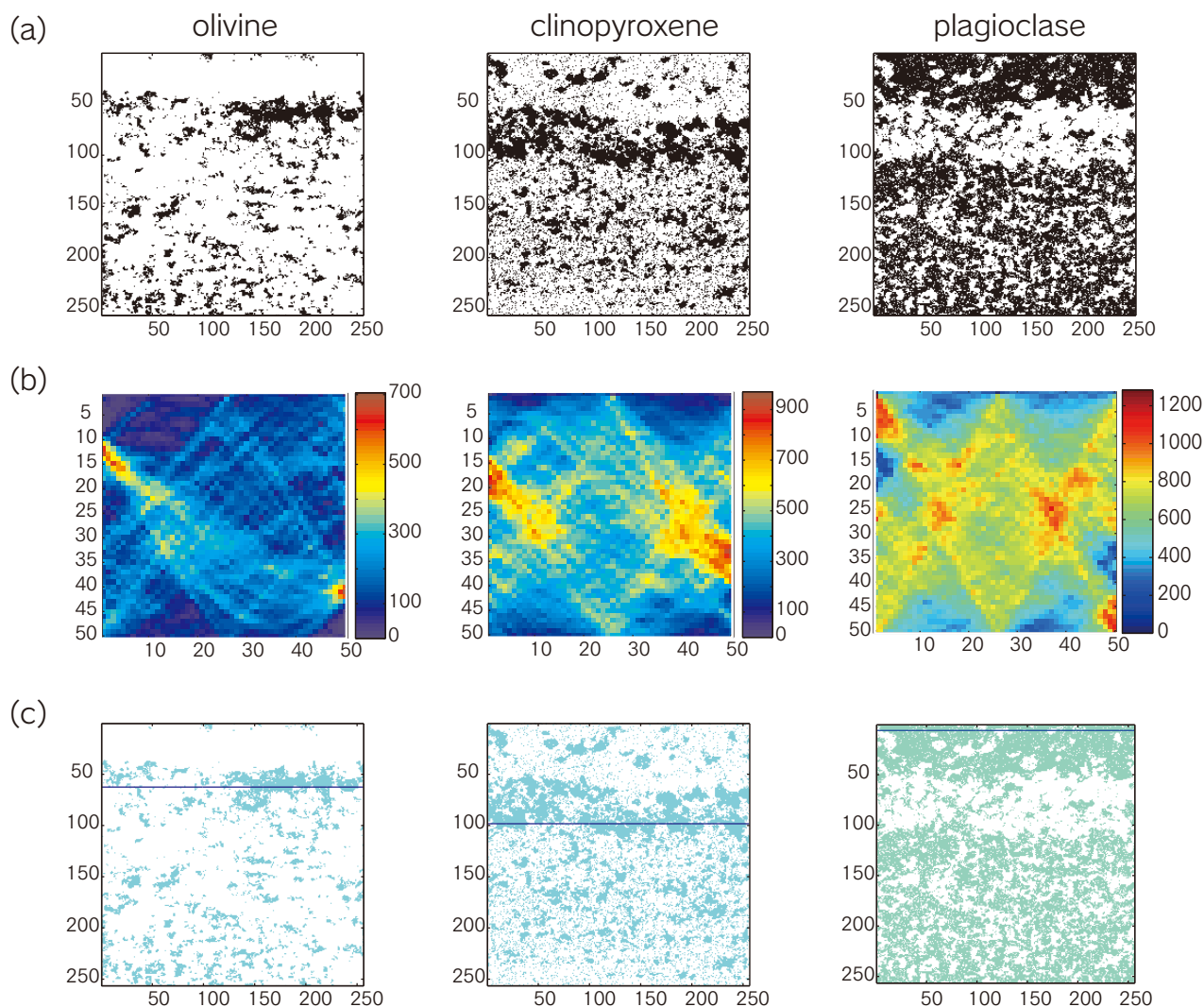


Fig. 16 The result of Hough transform method in TQ1A-2. (a) Mineral distribution maps for three constituted minerals. (b) The intensity images in the Hough spaces. The color bar of the right side in each Hough space shows intensity of intersections in each mineral distribution map. (c) Results of the Hough transform methods in each mineral distribution map. The blue straight line in each mineral distribution map displays the anisotropy such as layering and orientation of constituted minerals most likely identified by the method.

(0° と 180°)に直線が引かれることを示している。斜長石は層状構造を確認できない (Fig. 16a)。しかし斜長石の鉱物マップの上部に直線が引かれた (Fig. 16c)。集中度を見ると全体的に色が強く、様々な方向の直線が存在することを示す (Fig. 16b)。

議論

鉱物マップ

走査型X線分析顕微鏡から得られた元素マップを鉱物マップに変換する方法は戸上ほか (1998) や道林ほか (2002) によって提案された。本研究では道林ほか (2002) で提案された方法を用いたが、この方法にはいくつかの制約条件がある。(1)構成鉱物を識別しており、鉱物の数

が測定可能な元素数より少ないこと、(2)結晶粒径がX線ビーム径である $100\ \mu\text{m}$ より大きいこと、そして(3)鉱物の化学組成が比較的均質であること。

(1)の制約は、観測方程式を画像解析手法に使用したために起こる。(2)については、走査型蛍光X線分析顕微鏡のX線ビーム径は $10\ \mu\text{m}$ と $100\ \mu\text{m}$ の2種類あるが、 $10\ \mu\text{m}$ の方が使用不可であるためにこのような制約条件が付く。(3)の制約は、鉱物の化学組成に不均一性が大きい鉱物では正確な鉱物組成を得ることができないためである (戸上ほか, 1998)。

層状はんれい岩は、かんらん石・単斜輝石・斜長石の3鉱物からなり、鉱物の化学組成も均質で、走査型蛍光X線分析顕微鏡で測定可能な元素が多く存在する。変換する鉱物の数も元素の数より少ない。結晶粒径は数mm

から数 cm と走査型蛍光 X 線分析顕微鏡の X 線ビーム径 100 μm より大きい。以上のことから層状はんれい岩はほぼ(1)~(3)の条件を満たし、走査型蛍光 X 線分析顕微鏡を用いた岩石組織画像の取得に適した岩石であると考えられる。

解析の問題点として、標準試料がないため観測行列の値が客観的ではないことがあげられる。道林ほか (2002) は、この問題に対して元素マップの X 線強度の頻度分布図を用いて観測行列を決定する方法を示した。しかし、この方法には以下に述べるような問題が残されていることがわかった。

行列 A の要素 (各鉱物の存在量) を決める際、Fe 元素マップの頻度ヒストグラムのピークを用いて各鉱物の存在量を決めている。しかし、この層状はんれい岩にはかんらん石、単斜輝石、斜長石の他に、少量の斜方輝石が含まれている。Fe 元素マップの頻度ヒストグラム (Fig. 6) では蛍光 X 線カウント数が大きくなるにつれて頻度が減少しピークが見にくくなっているため、かんらん石と斜方輝石のピークをはっきりと確認することは難しい。ピークの値を決める際、ここに主観が入るためかんらん石と斜方輝石どちらかのピークだけが選択されるか、両方が混ざったピークを選択することになる。そのため、得られた鉱物マップのかんらん石領域に関しては斜方輝石、あるいはかんらん石と斜方輝石が混在している可能性がある。

層状はんれい岩から得られる主要な元素九つのうち、かんらん石と斜方輝石を区別できる元素は Na と Mg の二つあるが、Na は走査型蛍光 X 線顕微鏡で測定不可能なことで、Mg は測定可能であるが感度が悪く、元素マップでの識別は難しい。この問題に関しては走査型蛍光 X 線分析顕微鏡の精度の向上を計ることが一番の解決法であるが、すでに本研究で使用した XGT-2700V の後継機が登場しているため、今後改善されていくだろう。

空間相関関数

ランダムに分布したサンプル画像 (Fig. 15a) の場合、結果は空間相関関数の原理と一致する。ランダムに分布したサンプル画像 (Fig. 15a) と TQ1B-3 の鉱物マップ (Fig. 13b) はほぼ似たような分布をする。鉱物マップの σ 分布では、距離が 20 で 0 (すなわちランダム) になる。これは同じ鉱物である確率が距離 20 を超えたときランダムな分布になったと解釈される。この距離までが同じ鉱物の領域である。つまり、ランダムな分布になる距離は鉱物ごとのおおよそのサイズを表すと考えられる。

τ 分布も、 σ 分布と同じように距離が 20 でランダムに分布する。方向 10° 毎に区分けされた σ 分布は、全ての鉱物が 0 にほぼ近いランダム分布である。方向 10° 毎に区分けされた τ 分布はかんらん石と斜長石のペアが 0° に極小値を持っているが、他のペアはほぼ 1 になる。これは、ランダムに分布したサンプル画像とは異なる傾向であった。

赤、緑、青の 3 色からなる層が存在するサンプル画像 (Fig. 15b) について考える。

距離の σ 分布において、各色の分布が極小値と極大値

になるときの距離は層の幅に関係すると考えられる。 τ 分布も σ 分布と同様のことが考えられる。

方向 10° 毎に区分けされた σ 分布において、極大値が見られるのは、層が水平方向に存在することで、同じ色が 0° 方向に多く存在しているためと考えられる。

対称的に方向 10° 毎に区分けされた τ 分布で見られた極小値は、水平方向に二つの色が存在しないことによる結果と考えられる。このサンプル画像と比較できる鉱物マップは存在しないため、この傾向をふまえて他のサンプル画像と合わせて考察を行う。

ランダム分布と赤の層の組み合わせからなるサンプル画像 (Fig. 15c) について考える。

距離において、 σ 分布は全ての色に周期性が見られるが、緑と青に関してはほとんどランダムと考えられる。方向 10° 毎に区分けされた σ 分布において、他の色の σ 値が赤の σ 値よりも小さい値を示すのは赤の層が影響していると考えられる。こうした層状構造の影響により、赤の層が存在しない部分は全ての色は赤の層の部分よりも密に分布してしまうため、層状構造を構成する色以外の色も極大値を示したと考えられる。

方向 10° 毎に区分けされた τ 分布において、赤と緑、赤と青のペアが極小値を持ち、緑と青のペアは極大値を持つことも赤の層の影響によるものと考えられる。層状構造をもたない緑と青は水平方向に多く存在しているので緑と青の τ 分布は極大値を示すことになる。結果として、層状構造を持つ鉱物の異方性が組織に存在すると方向の σ 分布と τ 分布に極値が存在すると考えられる。

一つの層状構造が入っている TQ1B-2 の鉱物マップ (Fig. 13a) とランダム分布と赤の層の組み合わせからなるサンプル画像 (Fig. 15c) を比べた。

距離の σ 分布において、全ての鉱物は距離が 20 のときランダムを表す 0 になる。これも先程述べたように各鉱物のおおよそのサイズを表すと考えられる。

τ 分布は多少のかたよがりがあるが、全ての鉱物は距離が 20 のときランダムを表す 1 になる。距離が 20 でランダム分布になり、距離がさらに増えても全ての鉱物はランダム分布と考えられる。

方向 10° 毎に区分けされた σ 分布では、斜長石が極大値を持つ。他の鉱物も斜長石より小さいが 0° で極大値を持つ。これは斜長石が水平方向に多く存在するために極大値が存在すると考えられる。また他の鉱物が斜長石の層状構造の影響を受けて斜長石と同じような極大値を持つことが考えられる。ただし、層状構造を持った鉱物ほど極大値は大きくなる。

方向 10° 毎に区分けされた τ 分布において、かんらん石と斜長石、単斜輝石と斜長石のペアは 0° に極小値を持ち、かんらん石と単斜輝石のペアは 0° に極大値を持つ。これも斜長石の層状構造の影響によるものと考えられる。これらの結果を合わせると、サンプル画像から得られた異方性が存在すれば σ 分布と τ 分布で極値を持つという傾向を鉱物マップからも得られる。

Hough 変換

Hough 変換において、鉱物マップ中に存在する鉱物が

多いほど集中度は強くなる。これは鉱物のモード比に Hough 変換が影響を受けてしまうためである。鉱物のモード比が高くなるとマップ全体にその鉱物は分布する。その結果、様々な方向に直線を描くことが可能になり、鉱物の異方性を特定することができなくなる。肉眼で層状構造が確認できる鉱物マップの場合には、層状構造が確認できる部分に Hough 変換によって直線が引かれた (Fig. 16c)。しかし、層状構造とは関係しないような他の方向にも直線性が認められた。従って、本研究で適用した Hough 変換は鉱物分布の異方性を定量的に示すことはできず、現段階では Hough 変換から鉱物分布の異方性を調べるには限界があると判断される。

まとめ

層状はんれい岩の組織解析を行うため、戸上ほか (1998) と道林ほか (2002) で提案された方法を用いて鉱物マップを得た。この方法で得られた鉱物マップを用いて定量的な組織解析を行うために、空間相関関数 (森下・小畑, 1995; Morishita & Obata, 1995; 森下ほか, 1998; 坂野ほか, 2000) と Hough 変換 (Russ, 1999) の二つの手法に適用し、これらの手法の有効性について検討した。空間相関関数を適用した結果、この手法から鉱物の異方性について定量的に情報を得られることがわかった。しかし、Hough 変換について鉱物分布の異方性を定量的に示すことができなかったため、現時点では鉱物マップに用いるための組織解析手法に向いていないと判断した。

今後の課題

鉱物マップを取得するまでの方法はすでに確立されている (戸上ほか, 1998; 道林ほか, 2002)。鉱物マップを用いた組織解析を迅速かつ簡単に行うために、鉱物マップの取得から空間相関関数による組織解析手法適用までの操作の簡潔化とルーチン化、それに応じたプログラムの改変・修正を行うことが次の課題となる。さらに実際の組織から得られる空間相関関数は鉱物の空間分布、形、異方性、サイズ分布、異なる鉱物種相互の相対的位置関係などの情報すべてを含んでいる (森下ほか, 1998)。このように新たな鉱物の定量化データが得られる可能性を秘めているため、この手法を層状はんれい岩以外の岩石や様々な条件で作成されたサンプル画像と併せて適用し、傾向を理解することが必要である。また、今回検討した組織解析手法以外の手法も考察・検討していくことも必要であろう。

謝辞

本研究は平成 16 年度に実施された卒業研究をまとめたものである。本研究を進めるにあたり、戸上昭司氏にはプログラム作成を手伝っていただいた。戸上氏の協力なくして本研究はまとまらなかった。新潟大学の宮下純夫教授と足立佳子博士にはオマーンにおける試料採取について多くの助言をいただいた。水産総合研究センター遠

洋水産研究所外洋いか研究室の一井太郎室長と酒井光夫博士には、同研究室所有の走査型蛍光 X 線分析顕微鏡の使用許可だけでなく分析中に多くの便宜を図っていただいた。東北大学大学院環境学研究科の岡本 敦准教授には原稿を読んで有益なご意見をいただいた。静岡大学理学部地球科学科の宗林留実講師と生形貴男准教授には丁寧な原稿の校正をしていただいた。以上の方々に感謝の意を表します。

引用文献

- 坂野昇平・鳥海光弘・小畑正明・西山忠男 (2000), 岩石形成のダイナミクス. 東京大学出版会, 東京, 304p.
- 池田 進・佐伯和人・田野雄一 (1996), 岩石の可視画像の解析. 月刊地球, **18**, 217–223.
- 池田 進・中島 悟・土山 明 (1997), 岩石組織の画像解析—その自動化における現状と問題点—. 鉱物学雑誌, **26**, 185–196.
- Katsuta N., Takano M., Kawakami S., Togami S., Fukusawa H., Kumazawa M. & Yasuda Y. (2007), Advanced micro-XRF method to separate sedimentary rhythms and event layers in sediments: its application to lacustrine sediment from Lake Suigetsu, Japan. *Journal of Paleolimnology*, **37**, 259–271.
- Koshikawa T., Kido Y. & Tada R. (2003), High-resolution rapid elemental analysis using an XRF microscanner. *Journal of Sedimentary Research*, **73**, 824–829.
- 道林克禎・戸上昭司・足立佳子・内山尚和 (2002), 走査型蛍光 X 線分析顕微鏡画像の解析による層状斑れい岩の鉱物分布マップの作成. 静岡大学理学部地球科学報告, **29**, 103–112.
- Michibayashi K., Togami S., Takano M., Kawakawa M. and Kageyama T. (1999), Application of scanning X-ray analytical microscope to the petrographic characterization of a ductile shear zone: an alternative method to microstructures. *Tectonophysics*, **310**, 55–67.
- 森下律生・小畑正明 (1995), 鉱物の空間分布パターンから見た岩石組織定量化の試み. 地質学雑誌, **7**, 489–498.
- Morishita R. and Obata M. (1995), A new statistical description of the spatial distribution of minerals in rocks. *Journal of Geology*, **103**, 232–240.
- 森下律生・秋月盛雄・小畑正明 (1998), 空間相関係数による塩基性火成貫入岩体の組織変化の定量的評価について—一室戸岬はんれい岩体を例として—. 火山, **5**, 283–295.
- Okamoto A., Kikuchi T. & Tsuchiya N. (2008), Mineral distribution within polymineralic veins in the Sanbagawa belt, Japan: implications for mass transfer during vein formation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **156**, 323–336.
- Russ J. C. (1999), *The Image Processing Handbook Third*

- Editon*. CRC Press LLC, Florida, 771p.
- 戸上昭司・高野雅夫・道林克禎・村上雅美・熊澤峰夫
(1998), 走査型X線分析顕微鏡の解析による鉱物
分布画像の作成. 鉱物学雑誌, **27**, 203–212.
- Togami S., Takao M., Kumazawa M. & Michibayashi K.
(2000), An algorithm for the transformation of XRF
images into mineral-distribution maps. *The Canadian Mineralogist*, **38**, 1283–1294.
- Tsuji T., Yamaguchi H., Ishii T. & Matsuoka T. (2010),
Mineral classification from quantitative X-ray maps
using neural network: application to volcanic rocks.
Island Arc, **19**, 105–119.