

Paper :

AVS*による岩石組織の3次元観察の試み

——マagma混合した岩石の実例——†

阿藤 生大** 大森 聡一** 小笠原義秀*** J. B. Noblett****

概要

3次元可視化ソフト AVS を用いて岩石組織の3次元観察を行った。観察に用いた試料は岐阜県北部の飛騨変成帯高原川東漆山産の苦鉄質-珪長質複合岩脈で、マagmaの混合を示唆する優白質部と優黒質部が複雑に入り組んだ組織を呈する岩石である。試料を6×10×12 cmの直方体に切断した後、岩石表面を削り落としながら、0.5 mm 間隔で連続的に240枚の研磨面の写真を撮影した。これらの写真をイメージスキャナーで読み込み、ボリュームデータに変換した後、任意の断面を表示するクロスセクション法と優白質部の形態を表示するボリュームレンダリング法で3次元観察を行った。クロスセクション法による岩石断面の連続表示では、優白質部と優黒質部が相互に包含し合う、いわゆる“commingling texture”を確認できた。ボリュームレンダリング法では、優白質部が流動を示唆するような3次元形態を呈していることや、優黒質部中に孤立した部分として存在する様子が確認できた。これらの結果は、この複合岩脈が2つのマagmaの機械的混合により形成されたことを証明するための有力なデータとなった。本研究で採用した研磨による写真断層法は、比較的単純な岩石組織の3次元観察には十分活用できる。また、岩石試料の精密研磨に手間と高度な技術が要求されることや、画像データ作成後には試料がなくなってしまうことなどの欠点はあるが、コンピュータ以外には特別な装置を必要としない容易さもあり、今後地質学・岩石学分野における活用範囲は広がるものと考えられる。

キーワード

AVS, 3次元可視化, 岩石組織, マagma混合

* AVS は米国 AVS 社が開発した3次元可視化システムの名称。

† 3D observation of rock textures with AVS—An example of magma-mingled rock— by Takao ANDO, Soichi OMORI (Graduate School of Science and Engineering, Waseda University), Yoshihide OGASAWARA (Institute of Earth Science, School of Education, Waseda University) and J. B. NOBLETT (Department of Geology, Colorado College, U.S.A.)

** 早稲田大学理工学研究所

*** 早稲田大学教育学部地学教室

**** Department of Geology, Colorado College, U.S.A.

<BCIW '95-A-10>1996.2.10

1. はじめに

近年のワークステーションなどのコンピュータハードウェアの急速な進歩は、画像処理技術の発展ともあわせ現象・物体の3次元可視化、3次元観察を可能にした。既に医療画像処理の分野をはじめ、様々な分野で活用されている¹⁾。

岩石組織は地下深所における岩石の生成環境や生成過程を推定するための重要な情報源である。本質的には3次元データであるが、3次元空間内における形態の2次元断面、特定の面構造や線構造の姿勢などとして把握されている。肉眼および顕微鏡による岩石の観察では、基本的には2次元断面に現れる組織が用いられ、それらをもとに3次元組織・形態を推定し

ている。このような2次元情報については、とり、誤った解釈がなさら指摘されている^{2),3)}。3次元観察は、工業用⁴⁾があるが、その⁵⁾はないことから、ほとある。

筆者等は岐阜県北部で、神岡町東漆山の露脈（以後この岩石を複それは、あたかも均質に混ざり合った態；magma minglingしたように観察されたよる研究例⁶⁾があるが、議論はなされてい入の年代値として暗付4億1500万年前、明付3億3320万年前といふ2つの年代値は明らかある。しかし、その後の岩石がマagma混合のわかってきた。岩石作の、2つのマagmaかいたことを示す直接自うな背景のもとで、複態の観点から証明する石組織を3次元的に本研究では岩石研写真の集合から3次元法)を採用し、3次元トウェアの1つであtion System)を用い法は、医療分野によputer Tomography)

a 複合岩脈：2種以上の脈。

b 片麻岩：比較的高圧する変成岩。

c 優黒質岩：有色鉱物の総称。

d 優白質岩：有色鉱物の総称。

iblett****

た試料は岐阜県
駿する優白質部
直方体に切断し
真を撮影した。
任意の断面を表
法で3次元観察
部が相互に包含
法では、優白
した部分として
機械的混合より
による写真層法
精密研磨に手間
ことなど欠点
質学・岩石学分

とコンピュータ
処理技術の発展とも
3次元観察を可能に
をはじめ、様々な分野
岩石の生成環境や生成
起源である。本質的に
空間内における形態
線構造の姿勢などと
顕微鏡による岩石の
面に現れる組織が用
組織・形態を推定し

ている。このような2次元断面から推定される3次元情報については、ときには危険な“落とし穴”があり、誤った解釈がなされる可能性があることが以前から指摘されている^{2),3)}。しかしながら、岩石組織の3次元観察は、工業用X線CT装置を用いた^{2,3)}の報告⁴⁾があるが、その装置が地質学分野では一般的ではないことから、ほとんど行われていないのが現状である。

筆者等は岐阜県北部の飛騨変成岩類を研究する過程で、神岡町東漆山の露頭で奇妙な流動構造を呈する岩脈(以後この岩石を複合岩脈と呼ぶ)に遭遇した。

それは、あたかも化学組成の異なる2つのマフィアが不均質に混ざり合ったまま(マフィアの機械的な混合状態; magma mingling)、周囲の片麻岩⁵⁾に貫入し固結したように観察された。この岩石については、荒川による研究例⁶⁾があるが、岩石組織に関する詳しい記載、議論はなされていない。荒川⁶⁾は、複合岩脈の貫入の年代値として暗色の部分(優黒質部⁷⁾)に対して4億1500万年前、明色の部分(優白質部⁸⁾)に対して3億3320万年前というマフィアを提示している。これらの2つの年代値は明らかにマフィア混合を否定するものである。しかし、その後の筆者等の研究^{7),8)}によりこの岩石がマフィア混合の産物である可能性が高いことがわかってきた。岩石化学的な多くの証拠は得られたものの、2つのマフィアが同時に存在し機械的に混合していたことを示す直接的な証拠が欠如していた。このよ

うな背景のもとで、複合岩脈におけるマフィア混合を形態の観点から証明することを目的として、筆者等は岩石組織を3次元的に把握する研究を始めた。

本研究では岩石研磨により等間隔に撮影された断面写真の集合から3次元画像を合成する方法(写真断層法)を採用し、3次元可視化ツールの代表的なソフトウェアの1つであるAVS (Application Visualization System)を用いて3次元観察を行った。この方法は、医療分野におけるX線を用いたCT (Computer Tomography)としてよく知られている方法と

- a 複合岩脈: 2種以上の要素で構成される不均質な岩脈。
- b 片麻岩: 比較的高温条件下で生成した縞状組織を呈する変成岩。
- c 優黒質岩: 有色鉱物の体積%が60~100%の火成岩の総称。
- d 優白質岩: 有色鉱物の体積%が0~30%の火成岩の総称。

同じ発想のものである。装置としては、通常の地質学教室に設置されている岩石薄片作成用の研磨装置コンピュータ、イメージキャプチャ以外には特別な装置を用いていない。

2. 岩石試料

本研究に用いた岩石試料は、岐阜県吉城郡神岡町東漆山の高原川右岸の露頭から採取した苦鉄質⁹⁾-珪長質¹⁰⁾の複合岩脈である。本岩脈は周囲の黒雲母ホルンブレンド片麻岩を貫くが、それ自身も後期の飛騨変成作用を被っている。露頭では、基質を占める角閃岩¹¹⁾の優黒質部と、変トータル岩¹²⁾の優白質部が相互に入り組んだ流動構造を呈することが特徴である。この構造は、本岩脈が貫入時に珪長質マフィアと苦鉄質マフィアが共存したまま、化学的には余り混合することなく、そのまま固結した可能性を想起させる。これら2つの岩石のほかに、本露頭には両者の中間化学組成を示す部分が存在する。これは、2つのマフィアが化学的に混合して均質な中間組成のマフィアを形成したと考えることもできる。

優黒質部(角閃岩)は粒径0.2~0.5mmの細粒クワソク¹³⁾組織を呈するが、わずかに鉱物の定向配列が認められる。鉱物組み合わせは斜長石-ホルンブレンド-石英土黒雲母主カリ長石である。源岩は玄武岩やグライアヘン¹⁴⁾のような苦鉄質の岩脈と自形の斑晶状斜長石が存在する。このホルンブレンドの半長石集合体の中心部にはスフェン(榎石)が含まれることが多い。この斑晶状斜長石は、優黒質部が多く、優白質部の割合が少ない部分に多く存在する。また、

- e 苦鉄質岩: SiO₂を50%前後含む火成岩の総称。
- f 珪長質岩: SiO₂を70%前後含む火成岩の総称。
- g 角閃岩: ホルンブレンドとCa成分を比較的多く含む斜長石を主成分鉱物とする変成岩。
- h 変トータル岩: 変化した珪長質の深成岩。
- i 鉱物が特定の伸長性を示さない等粒状変成組織。
- j 苦鉄質で細粒な火成岩。
- k 苦鉄質で中粒な火成岩。

優黒質部中の優白質部近傍には、優白質部起源と思われる2~5 mmの斜長石-石英集合体が存在する。この集合体は、優白質部が流動構造を呈して優黒質部中に入り込んだ組織を示す部分に多く存在し、優白質部からの連続性が確認できる。

優白質部(変トータル岩)は粒径1~2 mmの他形等粒状組織を呈し、鉱物組み合わせは斜長石-石英-黒雲母±カリ長石±ホルンブレンドで表される。時々、数mm前後の優黒質部も包含する。露頭では流動構造を呈して優黒質部中に入り込むように観察されることが多い。

3次元観察に用いた複合岩脈の試料は、6×10×12 cmの直方体で、全体の約50%を優白質部が占める。露頭では、平均的に優白質部が全体の約3割程度を占める。今回観察に用いた試料は、2種の岩石の形状を正確に区分して把握することが目的であるため、複合岩脈の中で優白質部の占める割合が多い試料を選んだ。また、この試料は白色部と黒色部という対照的な色を呈する要素から構成されるため、3次元可視化用の試料として適当であると考えられる。

3. 使用したハードウェア・ソフトウェア

使用したコンピュータは、早稲田大学教育学部地学教室に設置されている米国旧Stardent社製のTITAN3000とMIPS社製のMAGNUM4000SC-50である。前者はCPUにMIPS社製の33 MHzのR3000とFPUにR3010を用いたグラフィック専用のワークステーションで、4 CPUまでの並列処理も可能にしている。使用した機種は2 CPU仕様で、主記憶64 MB、シングルバッファの専用グラフィックボード、1280×1024ドットの19インチのモニターをもつ。後者はCPUにMIPS社製の50 MHzの64ビットR4000とFPUにR4010を搭載した汎用ワークステーションで、主記憶64 MB、1024×768ドットの15インチのモニターをもつ。観察に用いたAVSは、サイエンティフィックビジュアルイゼーションのために1989年に米国AVS社(旧Stardent社)により開発されたソフトウェアである。当初、TITAN上でのみ利用可能であったが、現在はほとんどのワークステーションやMS-WindowsNT上で利用できる。高品位の3次元グラフィックス表現が可能で、プログラミングなしにマウスによる操作のみで複雑で多様な応用プログラムを作成できることが大きな特徴である。その機能は年とともに高くなっており、既にバージョン5がリ

リースされている。本研究ではバージョン3を用いた。

AVSの機能は大きく2つに分けられる。1つは与えられたデータを対話的に可視化するビュー機能で、ジオメトリビューア、イメージビューア、グラフビューアをもつ。他方はユーザー独自のアプリケーションを対話的に作成する機能で、ネットワークエディタと呼ばれる。これは内蔵される多様な機能をもつモジュール群から必要なものを選び出し、それらをウィンドウ上で組み合わせて使用する機能である。

4. 方法

図1に直方体岩石試料から連続断面データを作成するまでの手順の流れを模式的に示す。直方体に切り出された岩石の内部組織の3次元観察の方法は、連続断面写真データの作成とAVSを用いた3次元画像合成の2つの工程に分けられる。以下にその詳細を述べる。

4.1 連続断面写真データの作成

観察用の岩石試料を直方体(6×10×12 cm)に切り出し、直方体の6面を研磨剤カーボラダム800番で研磨する。削り落とし工程に入る前に、コンピュータによる合成3次元画像との比較のために各面の写真を撮影しておく。画像入力観点から、3次元観察にもっとも適当な入力面を選択した後、その面を0.5 mm間隔でカーボラダム150番、400番、800番で研磨・削り落とし、表面を乾燥させて透明ラッカーで仕上げる。一定の被写体距離(50 cm)で写真撮影を行う。90 mmマクロレンズを用いて、35 mmカラーネガフィルム(ISO100)を使用し撮影を行った。研磨は手作業で行ったが、削り誤差は100回(5 cm)に対して約1 mm程度である。この方法で0.5 mm間隔の研磨とカラー写真撮影を240回繰り返して連続断面画像データとした。

スキャナーで読み込むための各断面写真は17.7 cm×12.6 cm(2Lサイズ)に引き伸ばして使用した。岩石試料断面の写真上での大きさは10×6 cmである。各写真をスキャナーの最低解像度である75 dpiで読み込み、xwd(X-window dump)形式ファイルとしてコンピュータに保存した。このときの各断面画像の画素数は178×351ドットである。断面の入力解像度をこれ以上あげても、厚さ方向の間隔が0.5 mmという制約があるため3次元画像の質の向上にはつながらない。

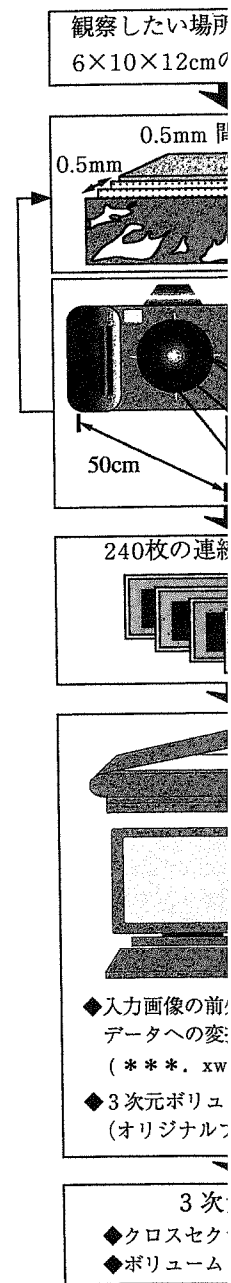


図1 岩石組織の3次元観察からAVSを用いた

4.2 データの前処理 xwd形式で保存されたデータをAVSで加工するためのAVS

3次元観察の3次元観察のためのデータ作成か
 図1 岩石組織の3次元観察のためのデータ作成か
 らAVSを用いた観察までの作業の流れ

図2 断面写真入力データ前処理のためのAVSネットワーク図

4.2 データの前処理

xwd形式で保存された240枚の断面データを、前処理加工するためのAVSネットワークを図2に示す。

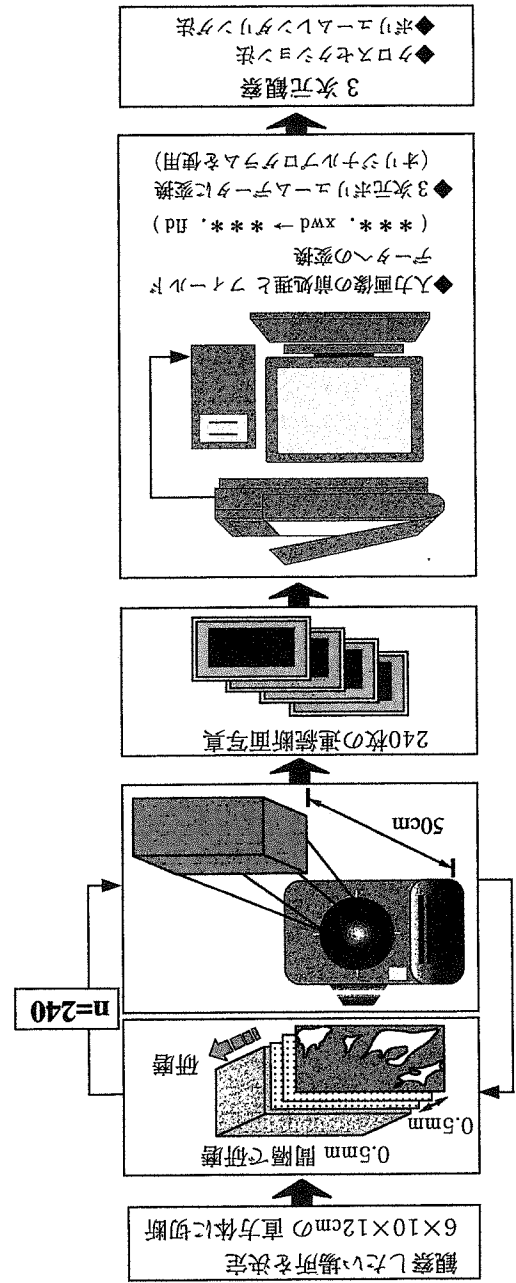


図1 岩石組織の3次元観察のためのデータ作成からAVSを用いた観察までの作業の流れ

このネットワークで、画像データに加える処理は以下の通りである。(1) "crop" モジュールによる不要部分の削除と、画像の原点・サイズ規格化、(2) "luminescence" モジュールによるカラー画像 (4ビット/ピクセル) のグレースケール (1ビット/ピクセル) 化、(3) "write field" モジュールによるAVS71ビットフォーマット形式 (2次元、1ビットカラー、ユニフォーマット座標系) による保存。このうち、(1)は最終的な3次元画像の品質を左右する重要な工程である。今回採用したユニフォーマット座標系は各ピクセルの座標を等軸格子上に固定しているため、3次元データを合成する前にあらかじめ各画像の原点とサイズをそろえておく必要がある。スキナーによる画像入力時に生じる微妙な座標のずれを補正するためには、画像切り出しのためのパラメータを各画像毎に手作業で入力しなくてはならない。その効率化と精密化を目的として、2枚の画像を比較しながら位置決めする機能をネットワー

クに加えてある。複合岩脈の組織は白、黒の輝度情報のみで "luminescence" でグレースケール化を行っている。この前処理後の1断面画像データの大きさは81932バイトである。

こうして得られた240枚分の2次元71ビットデータを、著者が作成したプログラム (2d-to-3d) を用いて1つの3次元71ビットデータ (3次元、1ビットカラー、ユニフォーマット座標系) に変換して3次元観察用のデータを作成した。プログラム "2d-to-3d" は、各画像データの連結と研磨解像度 (0.5mm 間隔≒2ピクセル/mm) との3分の2倍整合性をとるための断面画像 (75 dpi≒3ピクセル/mm) のサンプリング (75 dpi×2/3≒2ピクセル/mm) および、3次元データであることを示すAVS71ビットフォーマットを作成を行うプログラムである。

図2 断面写真入力データ前処理のためのAVSネットネットワーク図

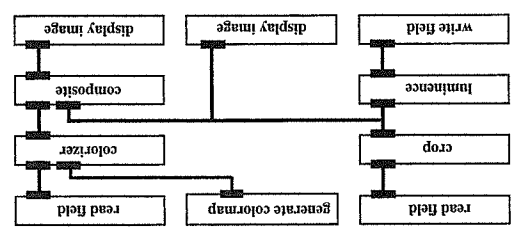


図2 断面写真入力データ前処理のためのAVSネットネットワーク図

表1 断面写真入力データの前処理と、3次元画像合成に用いたAVSモジュールとその機能

モジュール	機能
luminescence	カラー画像 (32バイト/ピクセル) をグレースケール (1バイト/ピクセル) に変換する。
animated float	浮動小数点の連続して変化する数値列を、モジュールのパラメータ・ポートに供給する。
brick	3次元テクスチャマッピングによりボリュームを直方体として表現する。任意の断面を1つ設定することができる。
colorizer	データの値のフィールドをカラーの値のフィールドに変換する“generate colormap”により生成されたカラーデータに基づき、1バイトスカラードータを1バイト×4成分ベクトルデータに変換する。
compute gradient	2次元または3次元データの勾配ベクトルを計算する。
crop	フィールドから指定された範囲の要素を抽出する。
downsize	サンプリングによりデータのサイズを小さくする。
generate colormap	AVSカラーマップを出力する。1バイトスカラードータの256段階の値に対して、32ビット (RGB+透明度) カラー属性を割り付ける。
geometry viewer	AVSの対話的3次元表示を受け持つサブシステム。
gradient shade	ライティングとシェーディングをカラーのデータに適用する。
read field	ディスクファイルからAVSフィールドデータを読み込む。
volume bounds	3次元3成分ベクトル・フィールドの境界枠を生成する。
volume render	ボリュームデータを3次元空間画像に変換する。
write field	フィールド・データをファイルに書き込む。
write image	イメージ・データをファイルに書き込む。
write volume	ボリュームデータをファイルに書き込む。

4.3 AVSによる観察

4.3.1 クロスセクション法

図3にクロスセクション法による3次元観察のためのAVSネットワーク図を示す。3次元フィールドデータを読み込んだ後、リアルタイム観察がスムーズに行えるよう“downsize”によりデータサイズを減少させ、また“crop”により観察したい場所のみを切り出す。“generate colormap”と“colorizer”によりデータを32ビット化した後、“brick”により、3次元テクスチャマッピングによる直方体画像を得る。“brick”の機能として、任意のマッピング面を1つ与えることができる。“animated float”は、この面を決定するパラメータポートに時間とともに変化する浮動小数点データを与え、断面変化のアニメーションを生成することができる。断面の位置や向きを連続的に変化させて、ディスプレイ上で観察することで、3次元形態を把握することができる。

4.3.2 ボリュームレンダリング法

図4にボリュームレンダリング法で用いたモジュールのAVSネットワーク図を示す。“downsize”、“colorizer”まではクロスセクション法と同一の工程をたどる。ボリュームレンダリング法による可視化で

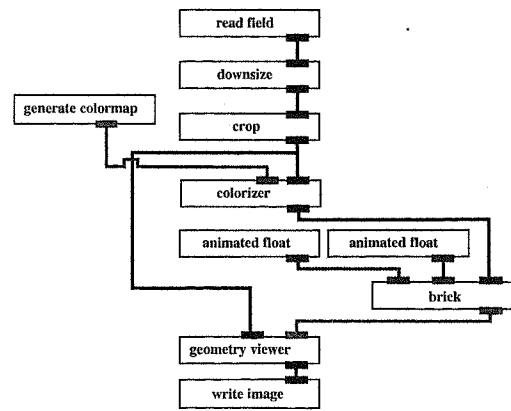


図3 クロスセクション法による3次元観察のためのAVSネットワーク図

は、“colorizer”による透明度の設定により、目的の画像要素のみを取り出して表示する。すべての要素を完全な不透明に設定すれば、得られる画像は“brick”を用いた場合と同様の直方体となる。複合岩脈の優白質部と優黒質部は、輝度の差が明瞭なため適当なしきい値を定めることで両者を区分して表現する

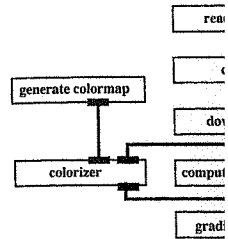


図4 ボリュームレンダリングのためのAVSネットワーク図

ことが容易である。“gradient shade”によりデータrender”により3次元“volume bound”は境界枠を表示する。

5. 結果

以下にクロスセクション法で得られた3次元試料のいずれもカラーネガティブの19インチモニター

5.1 クロスセクション法

図5a~dにクロスセクション法で得られた3次元試料のいずれもカラーネガティブの19インチモニターで表示する。図5aは連続断面法で得られた3次元試料のいずれもカラーネガティブの19インチモニターで表示する。図5aは連続断面法で得られた3次元試料のいずれもカラーネガティブの19インチモニターで表示する。図5aは連続断面法で得られた3次元試料のいずれもカラーネガティブの19インチモニターで表示する。

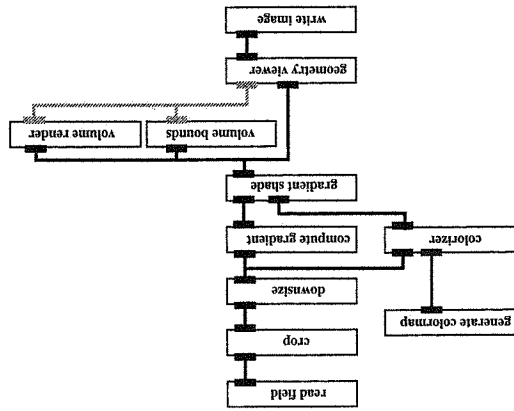
ができる。フォーマ画面による観察では、フォーマ
機能により、断面を奥行方向に連続的に移動させ
ながら現れる組織を観察でき、またそれを繰り返すこ
とで岩石内部の組織を忠実に把握できる。あたかも、
図5c,dでは優白質部中にかすかに斜めの縞模様が見
られる。これは試料の外面には認められなかつた。
この原因としては、1) 研磨面の写り、2) 画像入力時
の取込誤差による影響、3) 試料内部に局所的に存
在する実際の縞状組織の3つの可能性が考えられる。
もし原因が1), 2)であるならば、入力フォーマ作成上の
問題であり、より厳密に撮影条件と画像取り込み条件
を一定にすることで改善できる可能性が高い。原因が
3)の場合については、画像入力に用いた連続断面写
真と照らし合わせることで判断が可能である。今回撮
影した写真からは、このような縞模様は観察されなかつ
た。

図5cの矢印で示した線状にのびる白色部は、固結
した岩石を貫いた後期の脈(熱水起源?)による変質
帯である。このことは連続断面写真と顕微鏡下で確認
されている。岩石が固結した後、割れ目に沿って熱
水が浸入してできる脈は、3次的には平板状をなし、
2次元断面では線状に観察される。これに対して、後
述するようにポリアムを用いた観察して優黒質部中
に入り込んでいることがわかった。このことは、優白
質部が融体が固結した優黒質部中に“脈”状(平板状)
に貫入したものでなく、優黒質部が未固結の時に浸
入し、流動的なパイノ状構造を形成した可能性を示唆
するものと考えられる。

今回試料として選んだ複合岩脈に関しては、その流
動構造がマゼマの機械的混合により形成されたものか
否かを3次的に確認することが目的であった。具
体的には、優黒質部に優白質部が、また優白質部に優
黒質部がそれぞれ孤立した部分として包含されている
ことを示すことである。フォーマ法による観
察で、本試料の2つの部分が上記のような相互に包
含し合う関係(commingling texture)をもつことが
確認できた。

フォーマ機能を用いた連続断面の観察によ
り、図5dの矢印で示した部分は、優白質部中のレン
ズ状の塊(長さ1~2cm)として孤立して存在する優
黒質部であることが確認できた。このことは、優黒質

図4 ポリアムを用いた観察による3次元観察のためのAVSネットワーク図



ことが容易である。“compute gradient”と“gradient
shade”によりテクニカルに陰影の情報を加え、“volume
render”により3次元空間の画像を合成する。
“volume bound”は表示空間内のポリアムフォーマの
境界枠を表示する。

5. 結果

以下にフォーマ法とポリアムを用いた観察
法で得られた3次元画像について解説する。写真は
いずれもカラーフィルムを用いて1280×1024ピ
クセルの19インチモニター画面に接写したものである。

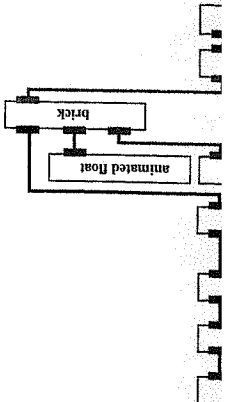
5.1 フォーマ法による3次元観察

図5a~dに連続断面から合成された、研磨前の直
方体試料に対応する3次元画像である。合成された
直方体の6つの表面に現れる組織は、いずれも実際
の岩石試料の組織を忠実に表現している。写真の左手
前の面が画像入力に用いた研磨面である(これを画像
入力面と呼ぶ)。画像入力面に比べ、それと直交する
他の2方向、4つの面においても同じ品質の断面組織
の画像が得られた。また、岩石組織の再現性について
の試料写真と比較しても、手作業による研磨間隔のば
らつきは画像への影響は認められない。

図5b~dには直方体の1つの隅方向から断面を作
る様子が示されている。3つの断面に現れる図形の変
化から奥行方向の形態の変化や連続性を読み取ること

セル)に交換する。
・ポートに供給する。
任意の断面を1
“generate colormap”によ
バイト×4成分ピク
セル)の値に対して、32ピ

による3次元観察のため



設定により、目的の
要素を。すべての要素を
得られる画像は
直方体となる。複合岩
度の差が明瞭なため適
者を区分して表現する

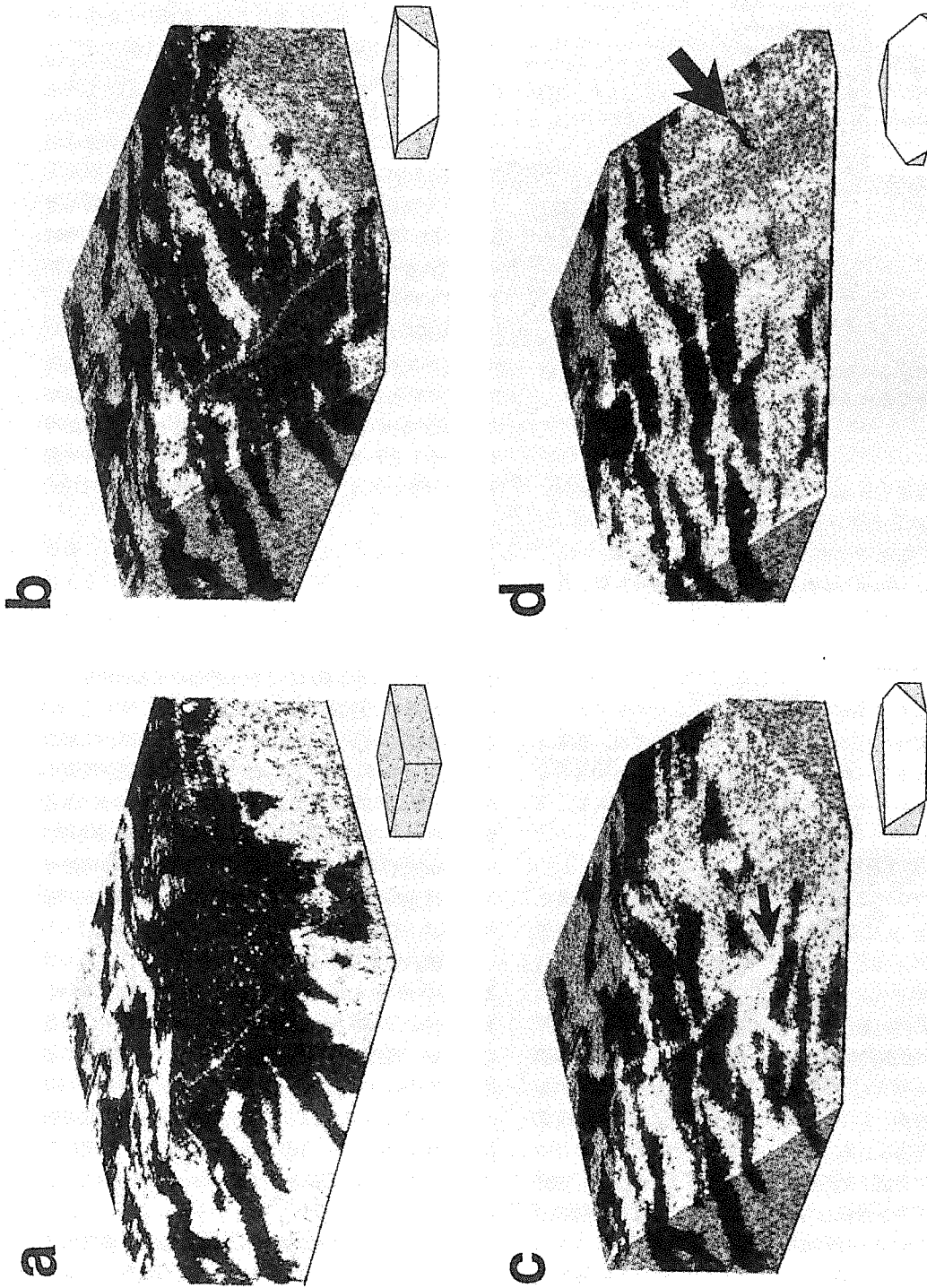
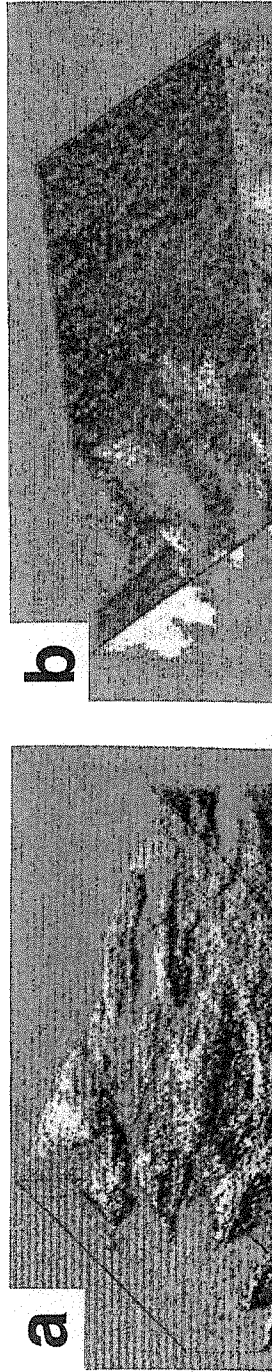


図5 クロスセクション法により合成された複合岩脈の組織と、手前の隅方向から見た連続断面写真
 aは全体を表し、b、c、dは手前の隅方向から見た連続断面を表す。aの左手前が画像入力面である。各写真の右下の図形は切断面を表す。cの矢印は岩石組織中の白色脈を表す。dの矢印は優白質部中に取り込まれた優黒質部を表す。



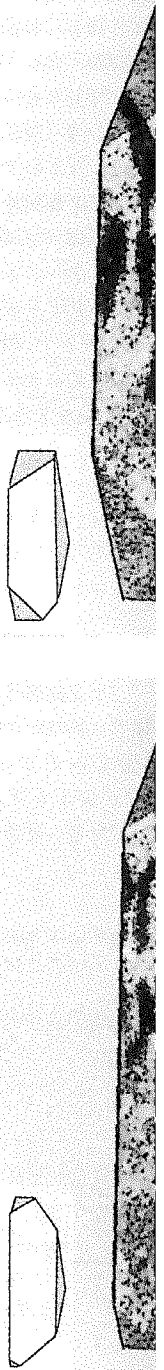


図5 クロスセクション法により合成された複合岩脈の組織と、手前の隅方向から見た連続断面写真
 aは全体を表し、b, c, dは手前の隅方向から見た連続断面を表す。aの左手前が画像入力面である。各写真の右下の図形は切断面を表す。cの矢印は岩石組織中の白色脈を表す。dの矢印は優白質部中に取り込まれた優黒質部を表す。

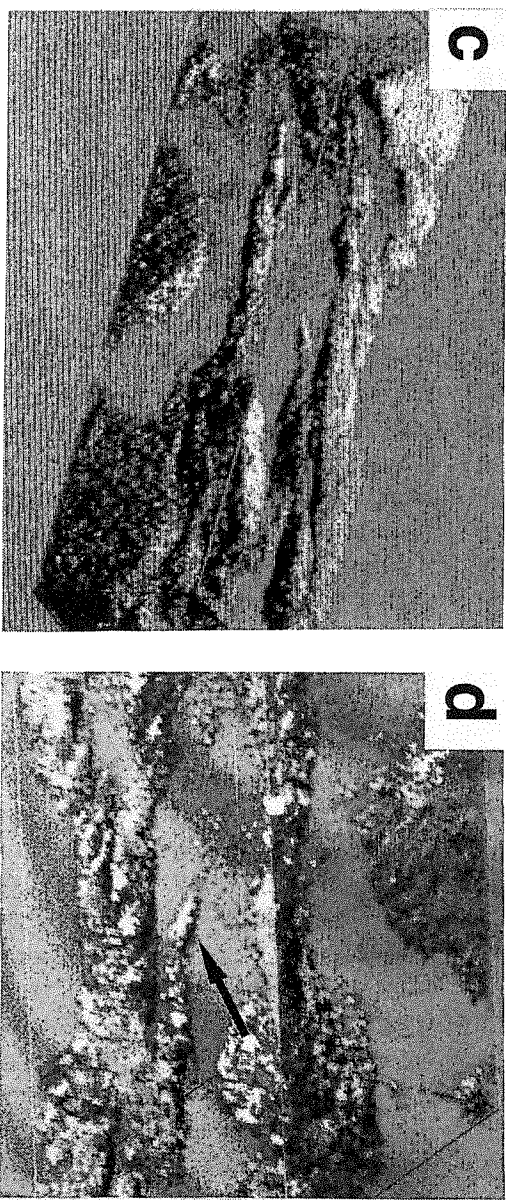
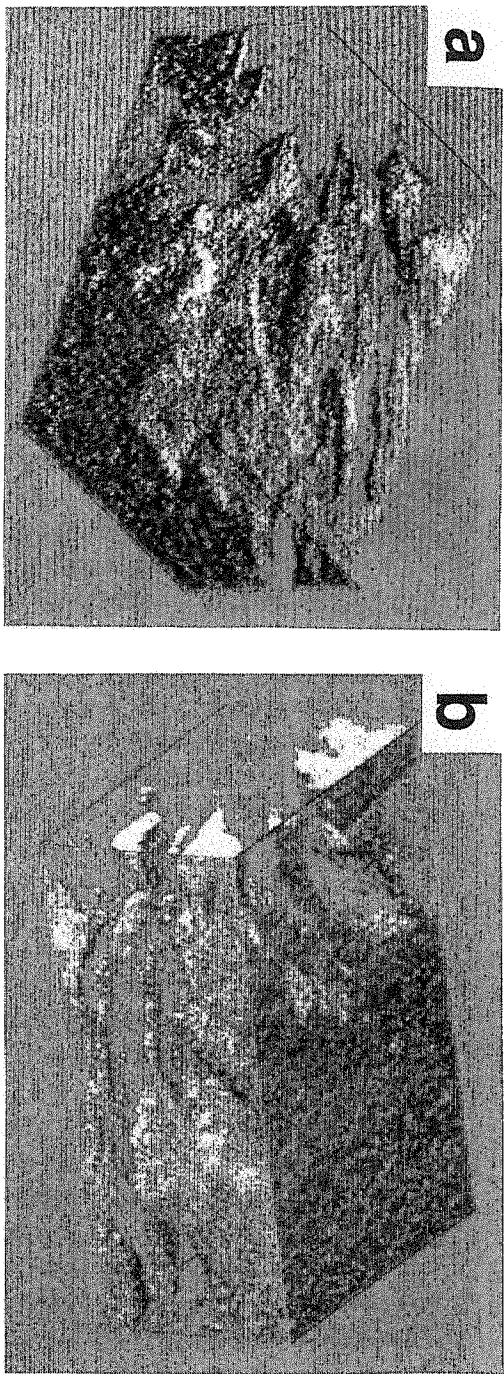


図6 ポリッシュ・エッチング法により合成された複合岩脈優白質部の形態
 aは試料全体の約3分の2相当中の優白質部の形態。bの左側が画像入力面である。cはaの中央上部のみを切り出して拡大した画像。dはbの中央下部のみを切り出して拡大した画像。dの矢印部分は優白質部パズルから孤立部分が分離する直前の様子を表している。

部が珪長質マグマの優白質部に取り込まれた時には溶融体であった可能性を示唆している。この局所的な関係のみを取り上げた場合には、この優黒質部は珪長質マグマ中で、ある程度同化作用¹が進んだ捕獲岩であるとも考えられる。しかし、その場合逆の関係、即ち優黒質部中に優白質部が孤立して包含されている可能性を否定することになる。実際にそのような優白質部が存在することは、次のボリュームレンダリング法による結果で明らかにされている。

5.2 ボリュームレンダリング法

図 6a~d にボリュームレンダリング法により得られた優白質部の形態を示す。透明の部分が優黒質部に当たる。この方法を用いて優黒質部の形態を表示することも可能である。しかし、今回用いた試料は基質を優黒質部が構成し、優白質部が優黒質部に入り込むような関係が多く存在するため、両者の入り組み方を優白質部の形態によって表示の方がより効果的である。見やすくするために試料の一部分を切り出した時の外形から得られる座標軸を輪郭線として表示してある。図 6b の左側の面が画像入力面の方向である。優白質部の 3 次元形態の合成画像は十分に観察に耐えられる程度の画質である。このことは、数 cm 規模の岩石内部組織の可視化には、0.5 mm 間隔程度の繰り返しで十分高品質な画像が得られることを物語っている。手操作による研磨間隔のばらつきの影響は認められない。

図 6a は全試料の約 3 分の 2 相当を切り出した時の優白質部の 3 次元画像である。全体としては優白質部は優黒質部中で滑らかな流動的形態を呈し、一定方向に細長いパイプ状に伸びながら枝別れを繰り返すように観察される。また優黒質部中に 2~3 mm 程度の孤立した小さな塊として存在する優白質部も多い。図 6b は図 6a を裏から見た画像である。

図 6c は、図 6a の 3 次元画像から中央上部のみを AVS 中で取り出し拡大した画像である。優白質部の 3 次元形態を細部にわたってよく把握することができる。

図 6d は、図 6b の 3 次元画像から同様に中央下部のみを AVS 中で取り出し拡大した画像である。矢印部分は、優白質部の先端から孤立部分として分離する直前の様子を示している。

¹ マグマに取り込まれた岩石の化学組成がマグマに近づくこと。

優白質部は、優黒質部中に流れたような不規則な形態で、細長いパイプ状を呈して観察される。その 3 次元形態から、優白質部が脈状（平板状）に存在しているのではなく、流動的な優黒質部中をパイプ状に流れた様子を呈していることが確認できた。このことは図 6d の矢印部分のような微細な領域でも観察されることで、珪長質マグマが脈状に固体の優黒質部中に貫入した可能性を明確に否定するものである。また、優黒質部中に孤立して存在する部分についても、その形態が流動的な液滴状をなすように観察できる。更に孤立した部分が、優白質部パイプの先端から連続的に分布していること等から判断して、取り込まれたときの優白質部の状態が溶融体であり、更に優黒質部についても溶融体であった可能性が大きい。

6. 考察

6.1 AVS による岩石組織の 3 次元観察の有効性

本研究で用いた複合岩脈は、2 つの要素に区分可能な岩石であり、本方法の適用目的はそれら 2 つの要素の形態把握にある。今回の試料の場合には、研磨面の写真を用いて優白質部と優黒質部を輝度により識別するだけでよいので、3 次元可視化を行うには好都合の試料といえる。本試料の場合、連続断面写真による目的部分の識別は十分な精度であった。より複雑な組織や岩石の構成要素をもつ試料の場合にこの方法を適用するには、3 次元観察の入力データを作るにあたり、断面写真画像データに対する更に工夫した前処理が必要であろう。

今回の方法の有効性を検証することも兼ねて、筆者等はこのようなより複雑な要素をもつ岩石の例として米国カリフォルニア産の変成岩エクロジャイト^mの 3 次元観察を行った^{15,16)}。岩石試料のサイズは 4×5×6 cm で、研磨間隔は 0.5 mm である。1 mm 前後の数種の鉱物がつくる基質（緑色と黒色）中に直径 7~9 mm の自形ざくろ石結晶（赤褐色）が存在する。目的はこのざくろ石の 3 次元形態とその分布を明らかにすることであった。輝度情報と色情報の両方を用いて、基質とざくろ石の識別を良好なコントラストで表現する前処理を施すことで、ざくろ石の 3 次元分布を観察することに成功した。しかしざくろ石の 3 次元形態は、対象とする鉱物のサイズが小さすぎて、0.5 mm 間隔の研磨では表現困難なことがわかった。

^m エクロジャイト：ザクロ石とオンファス輝石を主成分とする高圧下で生成した変成岩。

本研究で採用した 1 mm 間隔の研磨では、当初は 1 mm 間隔の研磨で得られた三次元画像の観察は困難であった。作成した合成画像の形態と分布を前後の大きさの岩石の研磨を要求される。仮に観察対象の材料中に現れる微細な鉱物と同等の画質の 3 度の研磨が必要となる。0.1 mm 前後の研磨時間を一定にして、この場合研磨れば手作業での研磨合成画像の正確さを補正法を考案する試料と一緒に既知形元表示を行い、形質を自動研磨装置を用い、更に小さい間隔であろう。いずれにしても、フィルムのために、被写体距離が生じる。

6.2 3 次元観察の

マグマ混合の実験の地域で報告されたマグマ混合の報告の成分に富む苦鉄融解させた結果、極端に異なる 2 種の混合したものと考えられる。3 次元的に比べて単純で理解量が豊富なことなどについてはおおむね

ような不規則な形
察される。その3
板状)に存在して
をパイプ状に流れ
た。このことは図
でも観察されるこ
優黒質部中に貫入
ある。また、優黒
いても、その形態
できる。更に孤立
から連続的に分布
込まれたときの優
優黒質部について

観察の有効性
の要素に区分可能
はそれら2つの要
場合には、研磨面
を輝度により識別
を行うには好都合
断面写真による
た。より複雑な組
合にこの方法を適
に工夫した前処理
とも兼ねて、筆者
つ岩石の例として
クロシ+1mmの3
試料のサイスは
1である。1mm前
と黒色)中に直径
褐色)が存在する。
とその分布を明ら
色情報の両方を用
いたコントラストで
くろ石の3次元分
かしざくろ石の3
スが小さすぎて、
ことがわかった。
ソフマ輝石を主

閃岩。

本研究で採用した方法では、研磨間隔0.5mmであ
るが、当初は1mmで行われた。1mmの研磨間隔で
得られた三次元画像は今回の結果に比べ低品質であ
る。このことは図
り、優黒質部中の2~3mm程度の微小優白質部の観
察は困難であった。しかしながら、研磨間隔0.5mm
で作成した合成画像は、2~3mm程度の微小優白質
部の形態と分布を細部にわたって表現できた。10cm
前後の大きさの岩石試料に対して、手作業により0.5
mmの等間隔の研磨を行なうことは限界に近い熟練技
術を要求される。仮に、通常の岩石顕微鏡の観察に用
いられる観察対象の大きさ(2×2×4cm)程度の試
料中に現れる微細組織を3次元観察する場合、今回
と同等の画質の3次元画像を得るには0.1mmの間隔程
度の研磨が必要となる。つまり、観察したい組織や
鉱物の大きさに依存して、削り落とし間隔は決定され
る。0.1mm前後の間隔で研磨する方法としては、研
磨時間を一定にして、一定荷重を加える方法が考えら
れる。この場合研磨間隔の相対誤差の大きさを無視す
れば手作業での研磨も可能である。しかし、得られる
合成画像の正確さを検討し、歪みがある場合には適切
な補正法を考案する必要もある。この方法としては、
試料と一緒に既知形態の小球などを同様の方法で三次
元表示を行い、形態の再現性を検討する方法が考えら
れる。このような数mmサイスの試料に対しては、
自動研磨装置を用いる方法も考えられる。それによ
り、更に小さい間隔(<0.1mm)での研磨が可能で
ある。いずれにしても、より小さい試料の写真撮影
においては、フィルム面上での大きさの再現性を得る
ために、被写体距離の正確さをより厳密に保つ必要が
生じる。

6.2 3次元観察の意義と複合岩脈の成因

マダラ混合の実例は既に米国をはじめ国外のいくつ
かの地域で報告されている^{10),11),12),13),14)}。これらのマ
ダラ混合の報告のいくつかは、マントル深部からアル
カリ成分に富む苦鉄質マダラが上昇し地殻下部を部分
融解させた結果、珪長質マダラが発生し、化学組成が
極端に異なる2種のマダラが同時に存在、機械的に
混合したものと考えられている。“commingling tex-
ture”を3次元的に観察してマダラ混合を論じた報告
はないが、いずれの岩石の組織も今回取り上げた試料
に比べて単純で理解しやすいこと、分布も広くマダ
ラ量が豊富なことなどから、マダラ混合が起こったこと
についてはおおむね受け入れられている状況である。

一方、我が国では、飛騨変成帯の花崗岩中に“お化
けダイク(岩脈)”と呼ばれる奇妙な名称を持つ複合
岩脈が古くから知られていた。特殊な野外名称をもつ
ことからわかるように、その岩石組織に重要な意味
があるであろうことは予想されていたものの、その成
因は明瞭にされていない。野沢¹⁵⁾は花崗岩体中の複
合岩脈を“同時性岩脈の可能性”として扱った報告の
なかで、2種のマダラの存在の可能性を示唆している
が、「世界には同時性を信じていない人もいる。同時に実証
することは容易でないからである。」とも述べている。
このことは3次元的に“commingling”の關係がある
ことが証明することの困難さと重要性をも物語って
いる。今回取り上げた片麻岩を貫く複合岩脈は、飛騨
変成帯においては東漆山の露頭においてのみ産出が知
られている。また、入り組んだ組織も米国の例¹⁰⁾と
比べ複雑なため、“commingling texture”をどうか否
かの判定は3次元観察なしには困難な岩石である。
本研究に用いた複合岩脈について、荒川¹⁶⁾はRb-
Sr法により優黒質部について4億
1500±1億4400万年、優白質部について3億
3320±7400万年という年代値を報告している。誤差
が非常に大きい。これらの年代をそれぞれの貫入の
年代と解釈している。このことは、両部分を時代の異
なる貫入岩であることとなり、優黒質部の貫入後に優白
質部が貫入したという解釈をしようとする解釈を否
定するものである。しかし、なぜ優白質部と優黒質部
が図5,6の写真に示されたような複雑な組織を呈す
るかにについては触れていない。

複合岩脈の中には本論文で扱った優黒質部、優白質
部のほかそれぞれの中間部が存在する。この部分の主
成分、微量成分の化学組成は、優黒質部と優白質部を
端成分とした場合、両者の中間付近に集中する。この
ことは、中間部が優黒質部と優白質部の化学的混合に
より生成された可能性を示唆するものと考えられる。
既に、前章で述べたように3次元組織は2つのマ
ダラの存在を示唆するものである。本複合岩脈がマダ
ラ混合によって生成されたならば、この2つの年代
値は誤差範囲内として見るべきで、有意の差がないと
いうことになる。しかしながら、残念なことには荒川¹⁶⁾
による年代値は誤差範囲を越えて飛騨変成帯における
マダラの活動史の中で重要なデータとしてしばしば引
用されている。放射性核種 (⁸⁷Rb→⁸⁷Sr) の量から測定する方法。

用されており、年代データの一人歩きの感すらある。今回得られた3次元組織は、これまでに得られている岩石化学上のデータとあわせ、マグマ混合の可能性を十分に示しており、本複合岩脈の成因論、年代論に重要な変更を要求するものである。

7. 結 論

AVS クロスセクション法とボリュームレンダリング法により飛騨変成帯神岡町東漆山に産出する複合岩脈の組織の3次元観察を行った。

クロスセクション法により適当な方向からの連続断面を観察することにより、優黒質部中に優白質部が孤立して存在すること。また、逆に優白質部中に優黒質部が孤立して存在することが確認された。またボリュームレンダリング法で観察した優白質部の形態は、優白質部が未固結の優黒質部中で流動したことを示唆するものであった。これらの事実は、飛騨変成帯東漆山の複合岩脈が組成の異なる2つのマグマの機械的な混合により形成されたとする解釈に極めて有力な証拠となる。

本研究で行った岩石組織の3次元可視化法では、初期の画像データ作成の技術的困難さはあるものの、コンピュータ以外には特別な装置を必要としないため、比較的容易に試料内部の3次元観察が可能である。この方法は、組織についての議論が主な目的で、観察対象が適当な大きさ（数mm～数cm）であり、組成鉱物の輝度と色調による識別が容易な場合には、特に有効な方法と言える。この方法を用いることで、従来の2次元の記載からより実際に近い3次元の記載が可能となり、新たな理解と発見が生まれるかもしれない。

謝 辞

本研究を行うにあたり、早稲田大学教育学部鞠子正教授には原稿を読んで頂き、貴重な助言を頂いた。またAVSの利用に関して(株)ケイ・シー・ティーの新国達也氏には有益な情報を提供していただいた。ここに記して両氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) R. S. Wolff and L. Yaeger: Visualization of natural phenomena, 377p, Springer Verlag, 1993.
- 2) D. Shelly: Igneous and metamorphic rocks under the microscope, 445p, Chapman and Hall,

- 1993.
- 3) M. J. Hibbard: Petrography to petrogenesis, 587p, Prentice Hall, 1995.
- 4) 中野 司, 西沢 修, 増田幸治, 稲角忠弘, 笠間俊次: X線CTによる岩石内部構造の3次元観察, 月刊地球, 14, No. 10, 616-620, 1992.
- 5) W. D. Carson and C. Denison: Mechanisms of porphyroblast crystallization: results from high-resolution computed X-ray tomography, Science, 257, 1236-1239, 1992.
- 6) Y. Arakawa: Rb-Sr ages of the gneiss and metamorphosed intrusive rocks of the Hida metamorphic belt in the Urushiyama area, Gifu Prefecture, central Japan, J. Japan. Assoc. Min. Petr. Econ. Geol., 79, 431-442, 1984.
- 7) 夏井 力: AVS (Application Visualization System) を用いた岩石構造の可視化, 教育学部卒業論文, 早稲田大学, 1993.
- 8) T. Ando: Study on the composite dike at Higashi Urushiyama, Hida metamorphic belt, Central Japan, Master's dissertation, Graduate School of Science and Engineering, Waseda University, 1993.
- 9) 安藤生大, 大森聡一, 小笠原義秀: 飛騨変成帯東漆山に産出する複合岩脈の産状と化学組成, 日本地質学会講演要旨, 736, 1993.
- 10) J. B. Noblett and M. W. Stab: Mid-Proterozoic lamprophyre commingled with late-stage dikes of the anorogen San Isabel batholith, Wet Mountains, Colorado, Geology, 18, 120-123, 1990.
- 11) R. H. Vernon, S. R. Paterson and E. E. Geary: Evidence for syntectonic intrusion of plutons in the Bear Mountains fault zone, California, Geology, 17, 723-726, 1989.
- 12) R. A. Wiebe: Coexisting intermediate and basic magmas, Ingonish, Cape Breton Island, J. Geology, 82, 74-87, 1974.
- 13) S. J. Seaman, E. E. Scherer and J. J. Standish: Multistage magma mingling and the origin of flow banding in the Aliso lava dome, Tumacacori Mountains, southern Arizona, J. Geophysical Researches, 100, 8381-8398, 1995.
- 14) S. M. Wickham, B. A. Litvinovsky and A. N. Zanzvilevich: Geochemical evolution of Phanerozoic magmatism in Transbaikalia, East Asia: A key constraint on the origin of K-rich silicic magmas and the process of cratonization. J. Geophysical Researches, 100, 15641-15654, 1995.
- 15) T. Ando, S. Omori, Y. Ogasawara: Synthesis of 3D textures of garnet porphyroblasts in Francis-

can eclogite, A(16) 安藤生大, 大部組織の三次元

- can eclogite, AGU Eos, 76, F669, 1995.
- 16) 安藤生大, 大森聡一, 小笠原義秀: 変成岩の内
部組織の三次元観察—ラソックスカソエクロシヤ
質—, 448, 59-60, 1991.
- 17) 野沢 保: 船津かこら岩類中の同時性岩脈, 地
質ニュース, 448, 59-60, 1991.
- イトへの適用, 三鉱学会講演要旨, 162, 1995.

角忠弘, 笠
の三次元観
1992.

mechanisms of
from high
y, Science,

gneiss and
Hida meta-
Hida Prefec-
Min. Petr.

ization Sys-
学部卒業論

te dike at

ic belt, Cen-
uate School
University,

飛騨変成帯
学組成, 日

Protterozoic
age dikes of
Wet Moun-

, 1990.

3. E. Geary:
of plutons in
rnia, Geolo-

te and basic
rd, J. Geolo-

J. Standish:
rigin of flow

racori Moun-

ical Resear-

y and A. N.
of Phaner-

East Asia: A
silicic mag-

J. Geophys-
1995.

Synthesis of
s in Francis-