

機関番号：82706
 研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20740310
 研究課題名(和文) 剪断歪に伴う高結晶度マグマからのメルト絞り出しプロセスの解明
 研究課題名(英文) Melt segregation from highly crystallized magmas under simple shear

研究代表者
 川畑 博 (KAWABATA HIROSHI)
 独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部ダイナミクス領域・技術研究副主任
 研究者番号：90392943

研究成果の概要(和文)：

火山岩組織の記載と数値シミュレーションによって、剪断歪に伴う高結晶度マグマの組織変化を明らかにした。板状結晶を含むマグマの組織は次の2つの要因に支配される。1つめは、板状結晶の方位と最大圧縮応力軸との幾何学的関係であり、2つめは結晶-液体、結晶-結晶間の相互作用である。前者は、局所的な結晶濃度を支配し、後者は剪断にともなう結晶回転の角速度を変化させる役割をもつ。結晶量や結晶間相互作用の増加が、結晶クラスターの成長を促進し、その結果としてメルトが結晶クラスター間へ絞り出されることがわかった。

研究成果の概要(英文)：

We examined the microstructure of magma under simple shear. The evolution of the microstructure is governed by two factors: (1) geometric relationships between the particle orientation and the maximum principal axis and (2) magnitude of particle-fluid and particle-particle interactions, which modifies the rotation behavior of particles. The first factor results in the coupling of the particle orientation and the local fraction of particles. The second factor controls the rotation behavior of particles. Through the combined effect of the two factors, particles are rearranged because of shear-induced strain, and both the microstructure and the bulk viscosity reach a steady-state condition. Under this condition, the microstructure is composed of two domains having different particle fractions and particle orientations. Increase in particle fraction and particle-particle interaction develops the cluster with strong inter-particle force, which results in the segregation of liquid. These findings have important implications for the kinematics of the flow-related microstructure recorded in igneous rocks.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,600,000	780,000	3,380,000

研究分野：火山岩岩石学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：剪断歪・マグマ・岩石組織

1. 研究開始当初の背景

固液二相系から流体が分離するプロセ

スは、部分熔融やマグマの結晶作用時に生じる固相からのメルト分離、地球核形成におけ

る珪酸塩マントルからの金属鉄合金メルトの分離、未固結堆積物からの脱水など、様々な地質学的現象に関わる問題であり、理解すべき重要なプロセスの1つである。1990年代以降、主として Kohlstedt 一派によって進められてきた、剪断応力発生装置を用いたアナログ実験(例えば Bruhn et al.,2000; Scott and Kohlstedt,2006; Holtzman et al.2003)によって、部分溶融体からメルトが絞り出される過程が明らかになりつつある。現在までのところ、浸透率・マトリックスの粘性・メルト粘性の関数として表される **compaction length** がサンプル厚さを上回った時点で、粒界に存在するメルトが出発物質の剪断歪に伴って定向配列しはじめ、それらが連結してメルトチャンネルが形成されることが報告されている。しかし、これまで精力的に行われてきた実験は、マントルの部分溶融を想定したアナログ実験であるため、出発物質には少量の玄武岩質メルト (0.5-12 vol%) とカンラン石を主体とした固相との混合体が用いられている。

一方、マントル内での玄武岩質メルトの分離と対照的なのが、地殻内に定置したマグマの結晶化に伴って生じうる、斜長石を主とした固相からの高粘性流紋岩質メルトの絞り出しである。島弧や大陸に噴出する斑晶に乏しい流紋岩質マグマは、玄武岩質～安山岩質マグマが約 50-60 vol%以上結晶を分別してできる残液組成に相当する。結晶を 50-60 vol%以上含むマグマは非ニュートン流体として振る舞い、メルト分離条件をコントロールする要因として結晶間の相互作用が重要な役割を果たすと予想される。しかも、こうした流紋岩質メルトの絞り出しは **critical melt fraction** 付近で生じている可能性があるため、McKenzie (1984) や Holtzman et al. (2003)がメルト量の小さな物質に対して定義した固相の粘性や浸透率を直接適用できない可能性が大きい。

研究代表者は香川県小豆島に露出する安山岩質～デイサイト質溶岩流の石基組織の中に、流紋岩質メルトおよびガスが濃集した残液絞り出し組織を見いだした。この溶岩流では、メルト/気相濃集層が複合面構造を示し、残液濃集層に囲まれた結晶に富む領域では石基長石の定向配列が発達している。溶岩内の剪断歪に伴って生じたと考えられる同様の組織は、他の島弧火山岩や海洋島火山岩試料においても認められ、一定の条件を満たせば、溶岩固結直前に残液の絞り出しが生じる可能性が高い。

こうしたメルト絞り出し時の情報を保存している溶岩流サンプルは、高結晶度マグマからの流紋岩質メルトの絞り出しと剪断歪の関係を明らかにする上で適した天然サンプルである。天然サンプルを用いてメルト絞

り出し条件を明らかにする一方、固相の形態的性質、メルト粘性、歪速度や歪量を変えたアナログ実験を行うことにより、高結晶度マグマの組織変化とメルト絞り出しプロセスを明らかにできると期待できる。

火山岩石基組織の研究、特に火山岩石基のファブリック(岩石構成要素の空間的幾何学的配置)に関する研究は非常に少ない。これは、一般に火山岩岩石学では石基組織への注目度が低いこと、また注目されても、マグマ上昇速度や脱ガス過程を解明する対象として利用されているため、マイクロライトの組成やサイズ分布などを用いた議論に留まっているためである。しかし実は、溶岩流はメルト絞りだしプロセスを明らかにする上で、これまで研究対象とされてきたミグマタイトや花崗岩などの深成岩体よりも、魅力的かつ有益な研究対象である。なぜなら、溶岩流の場合、絞り出しが大気圧下で生じたことが自明であることや、テクtonicな外力を考慮する必要がないため、溶岩流内の変形をもたらした要因は自重もしくは引き続いて噴出したユニットの溶岩流からの荷重に限定できること、さらに、冷却速度が深成岩体にくらべ速いため、メルト絞り出し以降のプロセスによる、初期構造の改変が少ないなどの利点があるからである。このように、火山岩石基という新たな研究対象を用いて、構造学と岩石学の守備範囲の狭間に存在する、高結晶度マグマの変形とそれに伴う残液絞り出しという問題に取り組む点が、本研究の特色である。

2. 研究の目的

マグマは、様々な形態やサイズをもつ結晶とシリケートメルトからなる分散系の一種とみなすことができる。高結晶度マグマからどのようにしてメルトが固相と分離し、絞り出されるか?という問いに答えるには、マグマの流動条件の違いによって、マグマ中にどのような組織が生じるのかという問題を明らかにする必要がある。本研究では、火山岩組織の記載によってマグマの固結過程を読み解く一方で、数値シミュレーションを用いて、板状結晶を含む流体の組織形成過程を明らかにする。これらの情報を統合することで、溶岩流内で固相から残液が絞り出される過程を明らかにすることが研究の最終目的である。具体的には以下の点を明らかにする。(1) 溶岩流噴出時とメルト絞り出し組織形成時のそれぞれの時点におけるメルト組成、温度、斑晶量を明らかにする。(2) 残液濃集層が作る複合面構造や石基長石の定向配列をもとにして、剪断センスと剪断方向を推定し、剪断方向とメルトチャンネルの発達する幾何学的関係を明らかにする。(3) 石基斜長石と類似した板状形態をもつ粒子と粘性流体

の混合試料を出発物質とし、条件を変えながら剪断歪を与えることで生じる組織変化を調べる。以上の3点から、残液濃集層形成に至る組織変化を明らかにする。

3. 研究の方法

以下の2つの研究方法を通して、本研究課題を実施した。

(1) 野外調査及び、岩石組織記載、鉱物・全岩組成分析

①野外調査：瀬戸内火山岩が露出している地域において地質踏査を行い、溶岩流の層序と残液濃集層の発達方向、さらに節理との関連性を調査した。溶岩内の剪断変形の強さや剪断センスは不均質であり、流れの様式によっても異なる。そのため、露出のよい場所では、垂直・水平方向の連続サンプリングを行い、溶岩内の剪断変形様式の変化を把握することに努めた。

②岩石記載：火山岩石基組織を系統的に記載した研究はほとんどない。そのため、一般に火山岩石基がどのような結晶定向配列を持っているかさえ不明である。そこで、まずは組織の違う代表的なサンプルを選び、メルトチャンネルの発達度の違いによって、石基ファブリックがどのように変化するかを調べた。結晶定向配列を定量的に議論する手段として、電子線後方散乱回折像法を用いた。結晶方位測定の際は、主要な石基構成鉱物である斜長石、斜方輝石、石英のそれぞれについて分析し、phaseの違いによる結晶定向配列のちがいを押さえた。X線CTを用いたメルト濃集層形態の把握を試みたほか、帯磁率異方性を測定し、石基組織発達度との関係を調べた。

③全岩組成分析・鉱物組成分析：XRF および ICP-MS を用いて全岩組成を分析し、メルトチャンネルと、その周囲を占めるメルト割合の少ない領域との組成差を求めた。また、EPMA を用いて斑晶・石基鉱物の組成分析を行った。特にメルトチャンネル中とその周囲のメルト割合の少ない領域中の鉱物組成を比較することで、メルトチャンネル形成時期やメルト組成差を検討した。得られた鉱物組成は、石基形成時の酸素分圧やマグマ温度推定に用い、組織形成時の条件決定に利用した。

(2) 数値シミュレーション

溶岩の組織は時間（そして温度・結晶量・結晶サイズ変化に応じて）とともに変化するため、岩石サンプルが保存している情報は時間積分の組織情報であると考えられる。ここに、天然試料から“プロセス”を明らかにする難しさがある。そこで、数値流体力学および個別要素法をカップリングさせた数値シミュレーションによって、組織発達過程を考

察した。シミュレーションでは、石基斜長石と類似した板状形態をもつ粒子と粘性流体の固液混合相を出発物質とし、流体の粘性、粒子量、歪速度、歪量による組織変化を調べ、これらのパラメーターが絞り出し組織形成に与える影響を調べた。

4. 研究成果

(1) 主な成果

小豆島西部に位置する皇踏山では、領家花崗岩を不整合に中期中新世の溶岩流が不整合に重なる。野外調査の結果、溶岩流内では、層序的下位の高マグネシアン安山岩から上位のデイサイトに向かって、全岩組成、斑晶・鉱物組み合わせが漸移的に変化することがわかった。残液絞り出し組織は溶岩流の中部から上部にかけてよく発達している。残液濃集層は約 2~5mm 間隔で面構造を作り、それらは10-20度の傾斜を示す。溶岩の石基組織は、石基斜長石の定向配列や結晶濃度の異なる2つの領域から構成されるのが特徴である。以下では、石基斜長石に富む領域を「クラスタードメイン」、メルト・ガスにより富む領域を「マトリックスドメイン」と呼ぶことにする。

溶岩固結時の結晶化プロセスは次のようにまとめられる。地表に噴出したマグマは、斑晶およびゼノクリストを約 15 vol.%含む安山岩~デイサイト質溶岩流である。岩石記載の結果と、結晶のリキダス温度を考慮すると、1000-900℃の条件下で斜長石、単斜輝石、斜方輝石、イルメナイト、アパタイトなどの石基鉱物が成長したと考えられる。数値シミュレーションの結果、石基の主要構成鉱物である斜長石結晶が、溶岩の流動に伴い回転・並進運動をすることで、最終的にドメイン組織が形成されたことが明らかとなった。これについては後述することにし、まずは、ドメイン組織形成後のプロセスについて、岩石記載から得られた結果をまとめることにする。

ドメイン組織では、クラスタードメインとマトリックスドメインとで、板状の形態を示す石基斜長石の定向配列方位が異なる。クラスタードメインでは、石基斜長石結晶のa軸（長軸）がマトリックスドメインの伸びに対して約45度の角度、マトリックスドメインでは、a軸がマトリックスドメインの作る面構造と平行になるように定向配列する。マトリックスドメインではクラスタードメインに比べメルト・ガスがより濃集している。クラスタードメイン中心部から周辺部にかけて、斜長石の(010)面が次第にメルトチャンネルに対し平行に近づくように斜長石配列方位が変化しているが、これは、相対的に粘性が低下したマトリックスドメインでは応力が集中し、マトリックスが剪断面として働くようになったためだと解釈される。

石基斜長石の粒間が結晶化すると、当然ながら石基斜長石の再配置はそれ以上進まなくなる。そこで、全岩組成と粒間物質の組成のマスマランスから、粒間物質結晶開始時、マグマ中にどれだけの結晶が存在したか見積もった。その結果、結晶量が約 60 vol%に達した時点で結晶・残液の再配置は終了したことがわかった。

石基斜長石の粒間に存在する流紋岩質残液の結晶化過程は次のようにまとめられる。クラスタードメインでは、石基斜長石とメルトの反応で生じたサニディンが石基斜長石のリムからエピタキシャルに結晶化しはじめ、樹枝状の形態をなして成長する。その後、長石成分に乏しくなった分化液から約 850°Cで石英が樹枝状サニディンの隙間を埋めるように結晶化し、微文象組織を作った。さらに石英やサニディンの隙間では、含水鉱物であるサポナイトが結晶化した。

マトリックスドメインでも、クラスタードメインと同じように、石基斜長石の粒間は主にサニディンと石英から構成されるが、微文象組織は発達しない。これはサニディンの成長形態が樹枝状ではなく planar な形態をとるため、こうした成長形態の違いは成長速度の違いを反映していると予想される。マトリックスドメインでは、流紋岩質メルトから晶出した結晶以外にガスから晶出した結晶が存在するのが特徴である。マトリックスドメインに移動、濃集したガス成分からはトリディマイト、フロゴパイトが成長し、残った空隙を 700°C以下でサポナイトが部分的に埋め、Vesicle が形成された。

天然の岩石のみを使って、組織やマグマ粘性の時間変化を追うことは困難である。そこで、溶岩流での組織変化を模擬したアナログ実験として、有限要素法および個別要素法をカップリングさせた数値シミュレーションを行った。数値シミュレーションでは、ニュートン流体中に 5 から 40 vol%の板状粒子を分散させた固液混合相に、一定の歪速度で単純剪断をかけた。板状粒子のサイズは $50 \times 70 \times 10 \mu\text{m}$ で、この粒子の軸比は火山岩中の石基斜長石と同じにした。シミュレーション法上の制約から、流体粘度は安山岩質から流紋岩質メルトに比べて 6-7 桁小さく ($0.001 \text{ Pa} \cdot \text{s}$)、逆に剪断歪速度は溶岩流に比べ 4-8 桁大きな値 (4000 s^{-1}) に設定した。流体と粒子の運動は、数値流体力学と個別要素法を使って、粒子一流体間の相互作用力を考慮しながら交互に計算を行った。粒子は剛体と考え、粒子同士が接触する際の相互作用は、ばね、dashpot、まさつスライダーを用いて計算してある。なお、粒子間の粘着力や気泡の影響は考えていない。板状粒子と流体の混合物を箱にいれ、上下の板を一定速度で移動させることで、左横ずれの simple shear をかけた。

なお、上下の板と接する面以外の境界は循環境界として扱った。

シミュレーションで得られた重要な結果は次のとおりである。5-40 vol%のいずれの粒子濃度においても、歪量の増加とともに板状粒子の回転、再配列が起こり、粘性が減少する。ある一定歪量をこえると、粘性、接触している粒子の数、粒子の方位分布が定常状態となった。定常状態では、剪断歪に伴うクラスターの回転によって、クラスターの形成-破壊が周期的に起こる。定常状態に達する歪量は粒子の初期配置に依存するが、初期配置をどのようにかえようとも、定常状態の組織は変化しない。定常状態ではドメイン組織が形成されており、相対的に流体に富むマトリックスドメインと粒子密度の高いクラスタードメインとの層状構造が、最大圧縮軸とほぼ平行に形成されていた。クラスタードメインを構成する粒子長軸は最大圧縮軸とほぼ垂直である一方、マトリックスドメインを構成する粒子の長軸はバルク剪断面とほぼ平行に並ぶ。クラスターには強い圧縮力が働き、応力の鎖が発達する一方で、クラスターに比べ強度の低いマトリックスには歪が集中している様子も観察された。シミュレーションで得られた組織は溶岩に見られるドメイン組織の基本的特徴をよく再現している。

ドメイン組織は与えられた流動条件の中で、もっとも流れやすい組織であることがわかった。では、なぜ、ドメイン組織が形成されると粘度が低くなるのだろうか？サイズ分布が鍵ではないかと考えられる。サイズの異なる球体粒子群があるとき、その二つのグループの粒子を混ぜた方が、単一サイズの粒子群の場合にくらべ、粘性が下がることが知られている。これは、大きな粒子の隙間に小さな粒子が入り込むことで、みかけの粒子濃度が低くなるためである。シミュレーションでは、板状粒子のサイズは一定であるものの、粒子よりも大きな準安定粒子群であるクラスターが形成される。その結果、系に含まれる固体のサイズ分布幅が広くなり、みかけ粒子濃度が下がるため、ドメイン組織の発達とともに粘性が下がったと解釈できる。

では、なぜドメイン組織ができるのだろうか？このような自己形成組織は 2つの要因によって生み出されると解釈できる。1つは、板状結晶の方位と最大圧縮応力軸との幾何学的関係である。たとえば、クラスターの最小単位として、2つの近接した粒子を考えると、粒子の a 軸が最大主圧縮応力 σ_1 に直交するとき、二つの粒子はもっとも圧縮される。そのため、局所粒子量が大きくなる。剪断歪に伴い、粒子が回転運度すると、粒子間に働く応力場が圧縮から引張場へとかわる。結果として、粒子間距離が増し、局所粒子濃度が低下する。このように粒子方位に応じた応力

場の変化が粒子方位と粒子濃度の異なる2つのドメインからなる層状組織を生む根本的な要因だと考えられる。

組織形成を支配する2つめの要因は、粒子-液体、粒子-粒子間の相互作用の変化に伴う、粒子回転の角速度を変化である。シミュレーションの結果、接触粒子数が増えるほど、また粒子間接触にともなうエネルギー散逸が増加するほど、角速度分布がJeffery orbitからより大きくずれることがわかった。Jeffery orbitとは、一様な速度勾配をもつ剪断流の中に粒子が孤立して存在するとき、解析的に求められた粒子の角速度分布をさす。粒子濃度や粒子間接触時のエネルギー散逸量の増加によって角速度分布が変化すると、クラスターを構成する粒子の数が増え、クラスター構成粒子の長軸が最大圧縮軸と垂直に近くなった。こうした変化はクラスター構成粒子に働く接触力を高め、結果的に強度の高いクラスターの成長をもたらす。よって、角速度分布変化と、粒子方位に依存した粒子間応力場の変化との相互作用がドメイン組織の特徴（接触粒子数、クラスターのアスペクト比、粒子の方位分布）や分散系の粘度を決めると考えられる。

組織を支配する2つの要素の関係を現象論的に表しているのが、クラスターの進化過程である。粒子濃度や粒子間接触時のエネルギー散逸量を増加させると、クラスターは回転するかわりに、座屈するようになる。このとき、クラスターはS字型に変形し、その屈曲点でのみ、クラスター構成粒子の回転が起こる。すると、クラスター構成粒子を結びつけていた接触応力の鎖が切れ、座屈点を境にして、よりアスペクト比の小さなクラスターに分裂する。クラスターの回転よりもクラスターの座屈が起こる頻度が上がることで、クラスター構成粒子の分散が起こりにくくなり、安定的に存在できるクラスターの数が多くなる。そのため、アスペクト比の大きなクラスターが発達する組織が形成されるようになる。

今回、粒子量を40 vol%まで変化させたが、さらに粒子量を多くすると、クラスターの成長が促進され、粒子間をつなぐ応力鎖のネットワークが強固になる。そのため、最終的には粒子の再配置が困難となり、固液混合相が流動できなくなると予想される。それと同時に、マトリックスドメインに歪がさらに集中し、そこが剪断帯として働くようになると考えられる。このように固液混合相の流動が停止する直前に生じる組織が、溶岩流でみられる残液濃集層が顕著に発達するドメイン組織に対応すると考えられる。

(2) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

火山岩石基に保存されたドメイン組織の形成過程は、主に構造学的アプローチを用いて解釈されてきており、ドメイン組織に見られる2つの定向配列は、次のように、異なる2つのステージで作られたものと考えられてきた(Smith, 2000)。まず、単純剪断に伴い、粒子長軸がstretchingの方向と平行に配列し1つめの定向配列が生じる。さらに歪が増すとshear zoneが発達するため、1つめの定向配列を切るように、shear zoneに2つめの定向配列ができる。これがこれまで考えられていた組織形成プロセスである。一方、本研究では、このドメイン組織形成に異なる2つのステージは必要なく、異なる定向配列と結晶濃度をもつ2つのドメインが同時に形成されることが明らかになった。Smith(2000)によると、剪断帯の形成が2つめの定向配列を作る原因とされてきたが、今回の結果はその関係が逆であることを示している。つまり強度の異なるクラスターとマトリックスの2つの領域ができるため、相対的に粘度の低いマトリックスに歪が集中し、そこが剪断帯として働くようになる過程を示している。このように本研究により、これまでにない新しいマグマの組織形成プロセスを提案することができた。この結果は組織を用いたマグマの流動過程の復元に新しい知見を与えることができる。

今回得られた、板状粒子を含む流体の組織・粘度変化についての成果は、地質学分野にとどまらないことを強調しておきたい。固液分散系の組織形成やレオロジー変化は食品を始め、工業分野でも重要なテーマの1つであるからである。これまで、多くの実験、数値シミュレーションによって、組織やレオロジー特性の変化が調べられているが、その多くは球状粒子や棒状粒子を含む分散系を対象にしたものである。粒子間相互作用まで考慮し、かつ板状粒子を含む物質の組織・粘度変化の研究はいまだ少ない。本研究は、板状粒子を含む流体に剪断歪を与えることで、異方性をもった組織が形成されることを示した。この結果は、液晶のように組織異方性をもつ新材料やそれを応用した製品の開発においても新しい知見をあたえることができるだろう。

(3) 今後の展望

今回行った数値シミュレーションでは、シミュレーション法による制約から、天然の溶岩流に比べて、4-8桁大きな歪速度、6-7桁低い流体粘度を用いている。こうした条件の違いにも関わらず、数値シミュレーションで、天然の溶岩流に類似した組織が形成された。このことは、分散系の組織が流体粘度や歪速度の値よりも、クラスターの壊れやすさとできやすさのバランスでコントロールされて

いることを示唆している。このことから、クラスタの強度や粒子回転挙動を指標とすることで、固液混合相の組織・粘度変化を表す相図を構築することが可能かもしれない。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 2 件)

①川畑 博 Shear-induced melt localization and microstructures within a crystallizing magma, American Geophysical Union 2009 Fall meeting, 2010 年 12 月 6 日、Moscone South (サンフランシスコ)

②川畑 博 高結晶度マグマの流れが生む組織：メルトチャンネルと結晶定向配列、日本地球惑星科学連合 2010 年大会、2010 年 5 月 27 日、千葉県幕張 幕張メッセ

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川畑 博 (KAWABATA HIROSHI)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部ダイナミクス領域・技術研究副主任

研究者番号：90392943