

かんらん石ファブリック：上部マントル構造を探る手がかり

Olivine fabrics: a key to explore upper mantle structure

道林 克禎 (Katsuyoshi MICHIBAYASHI)*

The understanding of olivine fabric has dramatically been progressed during the last~10 years by both natural and experimental studies along with the major technological improvement. Crystal-preferred orientations (CPO) are the expression of crystallographic fabrics of grains within the rock with respect to the structural frame (X-, Y- and Z-axes). CPO patterns can be interpreted based on the plane of plastic flow and the flow direction. Olivine fabrics, which are olivine CPO patterns, have been classified into five types: A, B, C, D and E types by a series of experimental studies. An additional AG type has also been proposed in recognition of its common occurrence in nature. New results have already required major modifications to the geodynamic interpretation of the upper mantle, although some uncertainties still remain regarding the olivine fabrics and their development.

Keywords: Olivine fabrics, Texture, Structure, Crystallographic preferred orientation, Upper mantle

I. はじめに

かんらん岩の構造研究を元にして、70年代にかんらん岩の塑性流動を前提とした上部マントル流動の全体像が議論された(Nicolas and Poirier, 1976)。Nicolasらのモデルは、その時点までに確立した高圧実験技術と電子顕微鏡による転位観察によって得られたかんらん石のすべり系の研究(Raleigh, 1968; Carter and Avé Lallemant, 1970; Avé Lallemant and Carter, 1970), 黎明期のプレートテクトニクス理論に貢献した上部マントルの地震波異方性研究(Raitt, 1963; Shor and Pollard, 1964; Raitt *et al.*, 1969; Morris *et al.*, 1969; Keen and Barrett, 1971), さらに岩石・鉱物の弾性波速度実験(Birch, 1960, 1961; Christensen, 1966, 1971; 笠原ら, 1968; Kumazawa and Anderson, 1969)に基づいて構築された。彼らのモデルはさらに体系化され(Nicolas and Christensen, 1987), 上部マントルの構造研究のパラダイムとして、その後の地震学の進展に多大なる影響を与え続けている。しかし、かんらん岩の構造研究は、2000年以降に新しい分析技術の登場と普及によって大きく進展した。そして、Nicolasらによって80年代までに確立したかに思えたマントル構造の描像は大きく書き換えられつつある(唐戸, 2011)。本論では、この現在も活発なかんらん岩の構造研究の手法と成果の概要を紹介する。

II. かんらん岩の面構造と線構造

かんらん岩は主にかんらん石と輝石から構成される上部マントルの主要な岩石である。かんらん岩は肉眼観察では1 mm以上の粗粒なかんらん石からなる粒状の組織なので、一見しただけではこれらの粒子が適当に分布した塊状の岩石に思える。しかし、最上部マントル由来のかんらん岩は、鉱物が面状に伸長または配列した面構造と、鉱物が伸長または線状に配列した線構造をもつ場合が多い(道林, 2006, 2008)。

高度な分析機器がたくさん登場している今日でさえ、面構造・線構造の同定において最も効果的で信頼性が高いのは肉眼観察による識別である。後で述べるかんらん石ファブリックのタイプは面構造・線構造の取り方で変わってしまう。肉眼観察による岩石の構造決定は、最も原始的であるが最も肝心な作業である。例えるなら、構造解析のアキレス腱とも言え、注意が必要である。また、肉眼観察でかんらん岩の面構造・線構造の確認が困難な場合には、複数面で構造を観察することやファブリック解析など他の分析結果を合わせて何度も再確認するべきである。

III. 組織、微細構造、ファブリック

組織、微細構造、ファブリックという用語は研究分野・

doi: 10.2465/gkk.120712b

(平成24年7月12日受付, 平成24年9月25日受理, 平成24年11月29日早期公開)

* 静岡大学理学部地球科学科, 〒422-8529 静岡市駿河区大谷 836

* Institute of Geosciences, Shizuoka University, Shizuoka 422-8529, Japan E-mail: sekmich@ipc.shizuoka.ac.jp

研究者で使い方が異なる (Hobbs *et al.*, 1976; Passchier and Trouw, 2005; 鳥海・金川, 1999) ため, 本論におけるこれらの用語の使い方を示しておく。

組織の英訳は *texture* である。岩石学分野では, 組織は偏光顕微鏡下の岩石構造を表す用語として使われるが, 金属学分野などでは, *texture* は集合組織と訳されて後で述べる結晶方位ファブリックに関して使用されることが多い (例えば, Wenk, 1985; Kocks *et al.*, 1998)。本論では, 偏光顕微鏡下で光学的に観察される岩石構造を表す用語を「組織 (*texture*)」と呼ぶ。

組織だけを記載する場合, 薄片は岩石の「任意の面」かもしれない。しかし, 構造解析では複数の組織を比較して研究することが一般的である。さらに対象となる岩石の多くには面構造や線構造があるので, これらを無視した任意の面では組織に含まれる情報が変化してしまう。そこで, 岩石の構造に従った「特定の面」で作成された薄片を偏光顕微鏡で観察することによって, 他の岩石と組織を比較しやすくする。この特定の面で観察される組織を総称して本論では「微細構造 (*microstructure*)」とよぶ。

構造解析する場合の最も一般的な微細構造は, 「面構造に垂直で線構造に平行な面」の薄片を偏光顕微鏡で観察したときの組織である (Fig. 1)。通常は線構造方向を X 軸, 面構造上の線構造に直交した方向を Y 軸, 面構造の法線方向を Z 軸として表記する (Figs. 1 and 2)。面構造に垂直で線構造に平行な面は「XZ 面」とよばれる (Figs. 1 and 2)。構造解析用の岩石薄片は, この XZ 面を偏光顕微鏡観察用に $\sim 30 \mu\text{m}$ の厚さまで削った後でダイヤモンド研磨を施し, さらに結晶方位解析のためコロイダルシリカで数時間琢磨して仕上げられる (例えば, 道林, 2000; 重松, 2001)。

岩石の構造を表す用語には, 他に「ファブリック (*fabric*)」がある。従来, ファブリックは「岩石を構成するすべての要素の空間的・幾何学的な配置であり, 組織, 構造, 定向配列などの概念を含んでいる」として定義された (Hobbs *et al.*, 1976; 鳥海・金川, 1999)。しかし最近では, 分析機器の発達によって岩石の主要構成鉱物の結晶方位解析が普通に行われるようになり, 専門用語としてファブリックは, 結晶方位に関する「構造」を記載するために使われる傾向にある。研究者によっては「結晶方位ファブリック (*crystallographic fabric*)」と明確にしている論文も見かける (例えば, Tommasi *et al.*, 1999)。結晶方位解析はマンツルの構造を理解する上で必要な手法であるため, 本論でもファブリックを結晶方位に関する用語として使うことにする。

IV. ファブリックのステレオネット投影

最も典型的なかんらん岩は粗粒粒状組織 (*Coarse granular texture*) をもち, それはかんらん岩がマンツル流動に関連した高温状態 ($> 1000^\circ\text{C}$) で塑性流動した時の微細構造

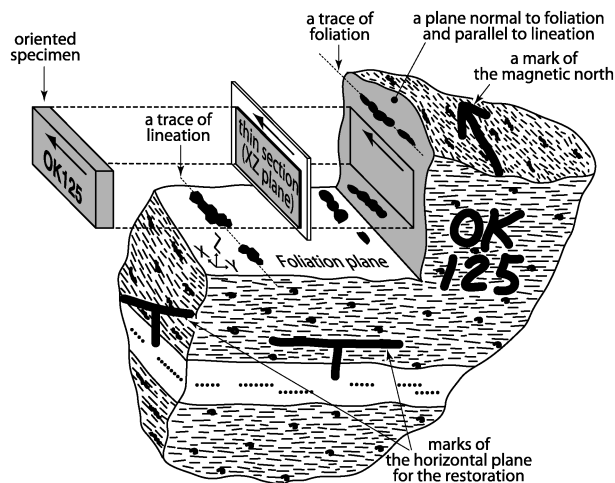


Fig. 1. Peridotite structures and a method to prepare an oriented thin section normal to foliation and parallel to lineation based on an oriented sample collected from an outcrop. Modified after Michibayashi (2006).

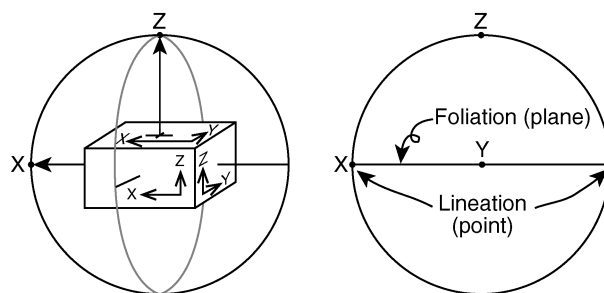


Fig. 2. Stereonet projection with respect to the structural frame (X, Y, and Z axes).

だと考えられている (Nicolas and Poirier, 1976)。肉眼観察では, 全体的に数 mm の粗粒な鉱物が識別可能である。これらのかんらん岩は, 塑性流動した痕跡を結晶方位のファブリックとして保持している。

ファブリックは, 地球科学分野ではステレオネット投影 (ワルフネット, 等角投影法) で示されるのが一般的である。ステレオネットでは, 面構造が水平線で表され, 線構造がこの水平線の両端に位置するようにして結晶方位を投影するのが, 最近では一般的である (Fig. 2)。このような図は極図 (*Pole figure*) とよばれる。結晶方位は通常互に対称性ではない結晶面あるいは結晶軸 (または晶帯軸) を 3 つ程度組み合わせ, それぞれ々の極図に示される。かんらん石の場合には, 3 軸が独立した斜方晶系に属するため [100], [010], [001] の 3 つの極図が示されることが多い (Fig. 3)。

極図によるファブリックの表現は, その岩石を構成する鉱物粒子が面構造・線構造に対してどのように分布するか直感的に理解しやすい方法である。さらに, それぞれの極図上で結晶方位に特徴的な集中や分布がみられる場合,

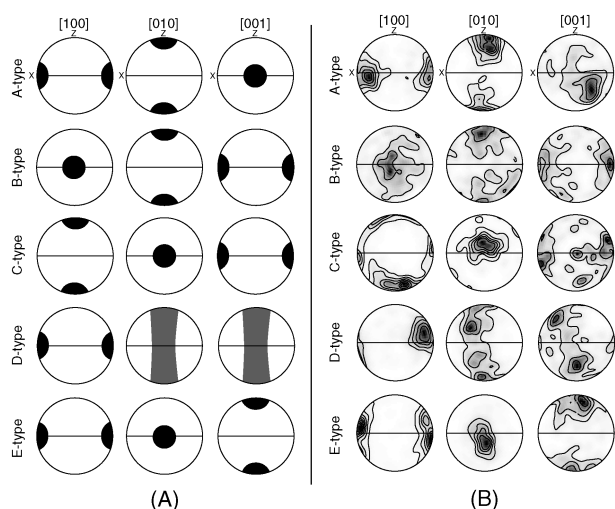


Fig. 3. Olivine fabric types after Karato *et al.* (2008). (A) Schematic types. (B) Natural examples of olivine fabrics. Simplified after Michibayashi (2008). Contours in multiples of a uniform distribution (m.u.d.).

それらを結晶方位定向配列 (Crystallographic preferred orientation, 略して CPO) とよぶ。

英語の CPO も日本語の結晶方位定向配列もどちらも比較的新しい専門用語である。CPO について、この英語は 2000 年頃から学術論文で頻繁に使われはじめた。古典的には、Lattice preferred orientation (略して LPO) の方が一般的である。CPO という用語を使うフランス・モンペリエ大学の David Mainprice 博士は、「Lattice (格子) は理論上の結晶配列の構造であり実体はなく、そこに元素が配置されてはじめて結晶構造である。鉱物の結晶方位を記述するのであれば、LPO よりも CPO の方が本来の意味を表す」と説明した (道林, 私信)。ヨーロッパではモンペリエ大学が結晶方位解析の中心的役割を果たしており、ヨーロッパ発の論文では CPO が浸透しつつある。一方、アメリカ発の多くの論文では LPO が今も主流に使われる。日本国内ではどちらも使われているが、これは大雑把にスクールの系列を反映しており、科学史の視点からみれば興味深いかもかもしれない。いずれにしても、CPO も LPO も表現は異なるものの実質的に同じ意味である。

次に和訳である。LPO の和訳として「格子選択配向」が古典的である (例えば, 唐戸, 2011)。しかし、である。「格子選択配向」を字面から直接その意味を読み取るのは難しい。Passchier and Trouw (1996) の訳本である「マイクロテクニクス」(鳥海・金川, 1999) では、「格子定向配列」と訳されており、この訳の方が著者にはわかりやすく思えた。一方、鳥海・金川 (1999) では、CPO の和訳として「結晶軸定向配列」が使われた。しかし CPO データの示し方には、結晶軸だけでなく、結晶面の法線がステレオ投影されることも多いため「結晶軸定向配列」では誤解を与えてしまう恐れがある。本論では「結晶方位定向配列」

を CPO の対応訳とする。

V. 2000 年頃までのかんらん石ファブリックの研究小史

マントル中のファブリック解析の流れは、ちょうど 2000 年頃を境として大きく変化した。2000 年以前は、1970 年の Carter and Avé Lallemont (1970) などの実験研究によって明らかにされたかんらん石すべり系と Nicolas *et al.* (1971) などの天然のかんらん岩研究の結果などから、上部マントルのファブリックはほぼすべて (010)[100] すべり系で形成される A タイプ (Fig. 3) だと考えられていた (Nicolas and Poirier, 1976; Karato *et al.*, 2008)。

また、2000 年頃までの多くの研究機関におけるファブリック解析は、偏光顕微鏡にユニバーサルステージを追加して測定されていた (Nicolas and Poirier, 1976; 鳥海・金川, 1999)。ユニバーサルステージによる鉱物の結晶方位測定は、鉱物の光学理論や測定技術の取得が必要だったため、ごく一部の研究グループで研究成果がときどき発表されていた時代であった (例えば, Ben Ismail and Mainprice, 1998)。そのため、2000 年頃のファブリック研究は、野外研究よりも数値実験で A タイプのすべり系を再現して (例えば, Takeshita *et al.*, 1990; Tommasi *et al.*, 2000)、それを元にして大スケールのマントル対流を再現することが最先端であった (例えば, Tommasi, 1998; Blackman and Kendall, 2002)。こうした状況にあって、野外調査では記載以上の学術的価値を見出すことが難しい時代であった。

2000 年以降にファブリック研究の流れを加速させた要因の一つには、結晶方位測定技術の革新であったのは間違いない。それは、走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM) の電子線後方散乱 (Electron Back-Scattered Diffraction, EBSD) を利用した結晶方位測定法 (EBSD 法とよぶ) の普及である (Passchier and Trouw, 2005; 唐戸, 2011)。従来のユニバーサルステージによる結晶方位測定では 100 粒子測定するのに熟練の研究者でも 3 時間程度は必要だったのに対して、EBSD 法では 100 粒子の測定に 1 時間もかからず、さらに測定後の疲労度はほとんどなくなった。そのため、EBSD 法では 1 試料あたり 200–300 粒測定が基本となっている (Skemer *et al.*, 2005)。さらにユニバーサルステージの使用には鉱物の光学的性質を理解していないと結晶方位を測定できなかったが、SEM ではマニュアルに従えば誰でも測定できるようになった。その上、90 年代以降に確立したソフトウェアによって簡単に結果の分析と応用を可能にした (Mainprice, 1990; Mainprice *et al.*, 2011; 唐戸, 2011)。こうした先人の活躍によって結晶方位研究が、一部の専門家集団から学部学生レベルまで降りてきた。この新技術の普及に従って、世界各地のかんらん岩から杓子定期的にかんらん石ファブリックの測定結果が頻繁に発表されるようになった。そして、測定データが積み上がるにつれて、上部マントルのファブリックが

単純に A タイプだけでないことがわかってきた。また SEM を利用するため、光学的測定では不可能であった細粒な粒子も分析対象になったことによって、極細粒なウルトラマイロナイトや変形実験の小さな試料が効率よく解析されるようになった。これによって、2000 年以降は次節で述べる様々なファブリックの存在とその物理化学的条件が徐々に明らかにされる時代になった。

VI. かんらん石の 6 つのファブリック

2000 年以降に明らかになったカンラン石の代表的なファブリックを Figure 3 に示す。イエール大学の唐戸教授のグループは、高温高压単純剪断実験の結果を元にしてかんらん石のファブリックを A から E までの 5 つのタイプに分類した (Jung and Karato, 2001; Katayama *et al.*, 2004; Jung *et al.*, 2006; Karato *et al.*, 2008; 大内, 2013)。

A タイプから D タイプまでは Jung and Karato (2001) で定義された。A タイプは、*a* 軸が線構造方向 (X 軸に平行)、*b* 軸が面構造の法線方向 (Z 軸に平行)、*c* 軸が面構造上で線構造に直交した方向 (Y 軸に平行) にそれぞれ集中して分布するファブリックである (Fig. 3)。B タイプは、*c* 軸が X 軸、*b* 軸が Z 軸、*c* 軸が Y 軸にそれぞれ平行に集中したファブリックである (Fig. 3)。C タイプは、*c* 軸が X 軸、*a* 軸が Z 軸、*b* 軸が Y 軸にそれぞれ平行に集中したファブリックである (Fig. 3)。D タイプは、*a* 軸が X 軸に平行に集中するのに対して、*b* 軸と *c* 軸は *a* 軸に直交する YZ 面上に帯状に分布するファブリックである (Fig. 3)。その後、Katayama *et al.* (2004) はさらなる実験結果からもう 1 つのタイプが存在するとして E タイプを追加した。この E タイプは、*a* 軸が X 軸、*c* 軸が Z 軸、*b* 軸が Y 軸にそれぞれ平行に集中したファブリックである (Fig. 3)。

これらの 5 つのタイプは唐戸らによって彼らの実験研究から分類されたのに対して、野外のかんらん岩研究から別に AG タイプが提案された (Fig. 4; Mainprice, 2007)。AG タイプでは、*b* 軸は Z 軸に集中するが、*a* 軸と *c* 軸は面構造 (XY 面) 上 (ステレオ図では帯状) に分布するパターンをもつ (Fig. 4)。

A タイプから E タイプまでのファブリックは、基本的に鉱物内の結晶すべりを反映しているのだから、ファブリックから鉱物の結晶すべり系を推定することが可能である。A タイプは *b* 面をすべり面として *a* 軸方向にすべる (010)[100] すべり系である。B タイプは *b* 面をすべり面として *c* 軸方向にすべる (010)[001] すべり系である。C タイプは *a* 面をすべり面として *c* 軸方向にすべる (100)[001] すべり系である。D タイプは *a* 軸を晶帯軸とする晶帯に属した面をすべり面として *a* 軸方向にすべる {0kl}[100] すべり系である。E タイプは *c* 面をすべり面として *a* 軸方向にすべる (001)[100] すべり系である。一方、AG タイプ (Fig. 4) では、CPO から一意的にすべり系を特定できない。この点でも、唐戸らの 5 つのファブリックとは一線を画するべ

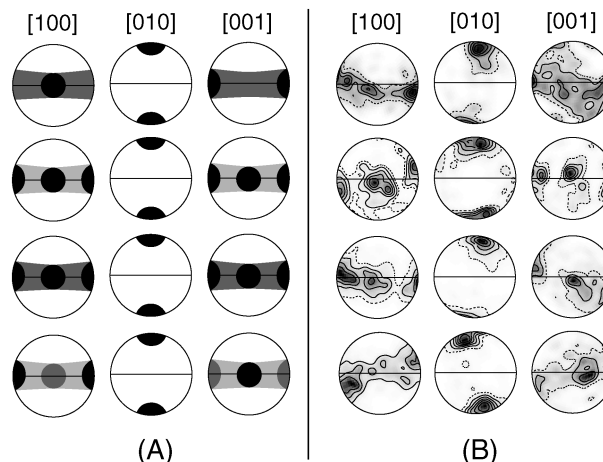


Fig. 4. Olivine fabrics classified to be AG-type. (A) Schematic variations. (B) Some natural examples from the Oman ophiolite. Simplified after Michibayashi and Mainprice (2004). Contours in multiples of a uniform distribution (m.u.d.).

きファブリックと言える (後述)。

VII. かんらん石ファブリックの形成条件

本節では、A タイプを除いたかんらん石ファブリックのなかで、最近天然のかんらん岩でも報告されている B タイプと AG タイプをとりあげてみたい。

1. B タイプファブリック

B タイプは最も有名なファブリックである。先に述べたように SEM を利用した EBSD 法の普及によって 10 μm 以下の細粒な微細構造の分析が現実的になり、室内実験で変形させた小さなかんらん岩実験試料のファブリックが、系統的に測定可能となった。その結果、かんらん石ファブリックの形成条件の理解が著しく進んだ。特にかんらん石の B タイプファブリック研究は、2001 年に Science 誌に掲載された Jung and Karato (2001) とそれから続く唐戸グループの実験研究によって水の効果が示され、従来のマントル像 (Nicolas and Christensen, 1987) を大きく変えるものとして地球科学界に大きなインパクトを与えた。そのなかでも、島弧で観測される S 波の地震波異方性の変化に関して、マントル対流が水の付加のために A タイプから B タイプへ変わるかんらん石ファブリックによって説明されるとしたモデルは斬新だった (Jung and Karato, 2001; Katayama and Karato, 2006)。唐戸らのモデルは、東北日本で観測された地震波を詳細に解析して S 波異方性が前弧から背弧で南北方向から東西方向に変化すると報告した地震学の論文において早々に引用され (Nakajima and Hasegawa, 2004)、岩石学者だけでなく地震学者にも大きな関心をもたらした。その後、国内外の研究者からも B タイプは水の影響で形成されることを支持する観察結果が報告されている (Mizukami *et al.*, 2004; Skemer *et al.*, 2006; Tasaka *et al.*, 2008; Muramoto *et al.*, 2011)。B タイプの形

成条件については、水の効果の他に、温度効果(Katayama and Karato, 2006; Karato *et al.*, 2008; 唐戸, 2011)や圧力効果(Jung *et al.*, 2009; Ohuchi *et al.*, 2011, 2012; 大内, 2013)が研究されるなど、ほぼこの話題が最近のマントルの構造研究を席卷していると言っていきたい。

2. AGタイプファブリック

AGタイプは野外のかんらん岩研究において2000年以前からよく知られていたかんらん石ファブリックである(Ben Ismail and Mainprice, 1998)。特徴は、[010]がZ軸に強く集中していることで、[100]と[001]はXY面に帯状に分布するが、X軸やY軸付近に比較的高い集中を示す様々な帯状のパターンとなっている(Fig. 4)。これらを総称してAGタイプとしている(Fig. 4)。CPOの軸集中強度と歪みの相関について十分な情報が得られておらず、AGタイプの形成メカニズムは他のファブリックタイプと同様に解釈することはできない。また、AGタイプという呼び方自体の認知度もとても低いのが現状である。*a*-axis girdleを省略してAGタイプとされたが、別名*b*軸集中タイプ(axial-[010] or [010]-fiber pattern)ともよばれる(例えば, Tommasi *et al.*, 2000; Tommasi *et al.*, 2008)。

2000年以前のAタイプ全盛の時代には、マントル内のかんらん石の転位クリープは基本的に{0kl}[100]すべり系だけと考えられていたので、AGタイプを数値実験で形成させるためには、単純剪断だけでは困難であり純粋剪断成分を含んだ歪が必要であった(例えば, Tommasi *et al.*, 1999)。

AGタイプを単純剪断変形によって形成するためには、(010)[100]すべり系だけでなく、(010)[001]すべり系を必要とする。Holtzman *et al.* (2003)は、AGタイプが単純剪断すべりによって形成されることを室内変形実験によって示した。このAGタイプを形成させた実験ではメルトを数%含ませていた(大内, 2013)。この実験結果は、かんらん石のすべり系だけではAGタイプが形成されないことを示唆しており、AGタイプの成因を考察するために重要に思えた。ところがHoltzman *et al.* (2003)では、当時(今も)最も注目されていたBタイプが同時に形成されたため、AGタイプもBタイプと同様に注目されたとは言いがたい。野外のかんらん岩研究でメルトの存在が変形に関与していたことを示すのは困難であり、Holtzmanらの実験を支持する天然の例が示されなかったことも注目度が低かった理由かもしれない。また、2004年に欧州からCタイプを11 GPaの高圧力下で形成させた実験結果が報告された(Couvy *et al.*, 2004)。この実験結果は、地球深部の地震波異方性を解釈するために取り上げられた(Mainprice *et al.*, 2005)。かんらん石CPOのタイプ形成が、水の効果だけでなく圧力効果も示されたことで、これ以降、かんらん石ファブリックの実験研究はさらにヒートアップしていったように思える(大内, 2013)。

AGタイプについて野外で観察可能なかんらん岩からの

報告は、モンペリエ大学のAndré TommasiとAlan Vauchezのグループがイタリアのロンダ岩体(Vauchez and Garrido, 2001)やフランスのレルツ岩体(Le Roux *et al.*, 2007)、さらには捕獲岩(Vauchez *et al.*, 2005; Bascou *et al.*, 2008; Tommasi *et al.*, 2008)などから報告している。特にTommasi *et al.* (2008)では、彼らのそれまでの研究結果をふまえて、AGタイプの形成が単なる変形時のすべりに原因を求めず、メルトとの反応によるかんらん石の再結晶作用の効果を議論していることは注目に値するだろう。また、著者はオマーンオフィオライトのかんらん岩研究でAGタイプが一部存在することを報告した(Fig. 4; Michibayashi and Mainprice, 2004)。オマーンオフィオライトのAGタイプではCPOパターンが面構造に対して斜行しており、単純剪断すべりによって形成されたことが示唆される(Fig. 4)。しかし、この論文を書いたのはHoltzmanらの研究を知る前であったこともあり、論文中でAGタイプの議論が歪の効果等に限られたのは今から振り返ると残念である。

最近、AGタイプは意外なかんらん岩で見つかった。それはプチスポット火山のかんらん岩捕獲岩である(Harigane *et al.*, 2011)。プチスポット火山は、2006年に発見された新しいタイプの海底火山である(Hirano *et al.*, 2006)。この火山は、プレート収束帯のアウトライズでプレートが屈曲することによってリソスフェアとアセノスフェアの境界で形成されたマグマが噴火したと考えられている(Hirano *et al.*, 2006)。このプチスポット火山の玄武岩に小さなかんらん岩の岩片が捕獲されており、そのかんらん石のファブリックがAGタイプだった(Harigane *et al.*, 2011)。この結果は、アセノスフェアとは何であるのかを考える上でも興味深い。最近の地震学研究から、海洋底のアセノスフェア最上部ではメルト層の存在が示唆されている(Kawakatsu *et al.*, 2009)。これらの結果をふまえると、AGタイプはメルトの影響によって形成されたのかもしれないし、あるいは圧力効果が反映されたものかもしれない(Harigane *et al.*, 2011)。今後の研究の進展に期待したい。

VIII. おわりに

本論では、かんらん岩がマントル対流として流動する高温下の変形構造に関係したファブリックについて研究の概略を述べてきた。イェール大学の唐戸のグループによる実験研究(唐戸, 2001)がマントルのファブリック研究をAタイプだけの単色の世界から多彩なものへと変えた(Karato *et al.*, 2008; 唐戸, 2011)ことによって、かんらん岩研究は俄然面白くなっている。野外のかんらん岩には唐戸らが定義したAタイプからEタイプまでの5つのファブリックだけでは説明できないAGタイプのようなファブリックも存在する。その実験研究は他のファブリックに比べて遅れており、その形成条件の理解に向けて今後の研究が期待される。また、地震学の進歩(例えば, Kawakatsu

et al., 2009; Long and Becker, 2010) もかんらん岩の構造研究を盛り上げていることは間違いない。

最後に、かんらん岩の細粒化過程についての最近の動向について一言追加しておきたい。構造地質学のマイクロテクニクス分野として、微細構造発達過程の研究は1970年代から続く最も盛んな分野である。かんらん岩の微細構造研究も盛んであるが、かんらん石の組織変化に対してその他の鉱物(これを第2相とよぶ)の効果が、特に細粒組織に大きく影響を与えることがわかってきた(例えば、Hiraga *et al.*, 2010)。第2相の効果を考慮した新たな微細構造論は分析技術の向上によって飛躍しつつあり(Linckens *et al.*, 2011; Tasaka, 2012; Michibayashi *et al.*, 2012)、今後の展開が大いに期待される分野である。

謝辞 本論は、日本学術振興会科学研究費補助金による助成を受けた研究成果の一部をまとめたものである。本論を執筆するにあたり、金沢大学の森下知見教授には便宜をはかっていただいた。東北大学の岡本敦准教授には粗稿を読んでいただいた。平賀岳彦准教授(東京大学地震研究所)と曾田祐介博士(金沢大学理工研究域自然システム系)、そして編集担当の水上知行博士(金沢大学理工研究域自然システム系)には査読を通じて有益な助言をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

引用文献

- Avé Lallemont, H.G. and Carter, N.J. (1970): Syntectonic recrystallization of olivine and modes of low in the upper mantle. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **81**, 2203–2220.
- Bascou, J., Delpech, G., Vauchez, A., Moine, B.N., Cottin, J.Y. and Barruol, G. (2008): An integrated study of microstructural, geochemical, and seismic properties of the lithospheric mantle above the Kerguelen plume (Indian Ocean). *Geochem. Geophys. Geosys.*, **9**, Q04036.
- Ben Ismail, W. and Mainprice, D. (1998): An olivine fabric database: an overview of upper mantle fabrics and seismic anisotropy. *Tectonophysics*, **296**, 145–157.
- Birch, F. (1960): The velocity of compressional waves in rocks to 10 Kilobars, 1. *J. Geophys. Res.*, **65**, 1083–1102.
- Birch, F. (1961): The velocity of compressional waves in rocks to 10 Kilobars, 2. *J. Geophys. Res.*, **66**, 2199–2224.
- Blackman, D.K. and Kendall, J.-M. (2002): Seismic anisotropy in the upper mantle 2. Predictions for current plate boundary flow models. *Geochem. Geophys. Geosys.*, **3**, 8602.
- Carter, N.L. and Avé Lallemant, H.G. (1970): High temperature flow of dunite and peridotite. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **81**, 2181–2202.
- Christensen, N.I. (1966): Elasticity of ultrabasic rocks. *J. Geophys. Res.*, **71**, 5921–5931.
- Christensen, N.I. (1971): Fabric seismic anisotropy and tectonic history of the Twin Sisters dunite, Washington. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **82**, 1681–1694.
- Couvy, H., Frost, D.J., Heidelbach, F., Hyilas, K., Ungár, T., Mackwell, S. and Cordier, P. (2004): Shear deformation experiments of forsterite at 11 GPa–1400 °C in the multianvil apparatus. *Eur. J. Mineral.*, **16**, 877–889.
- Harigane, Y., Mizukami, T., Morishita, T., Michibayashi, K., Abe, N. and Hirano, N. (2011): Direct evidence for upper mantle structure within the NW Pacific Plate: microstructural analyses of a petit-spot peridotite xenolith. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **302**, 194–202.
- Hiraga, T., Tachibana, C., Ohashi, N. and Sano, S. (2010): Grain growth systematics for forsterite ± enstatite aggregates: Effect of lithology on grain size in the upper mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **291**, 10–20.
- Hirano, N., Takahashi, E., Yamamoto, J., Abe, N., Ingle, S. P., Kaneoka, K., Kimura, J., Hirata, T., Ogawa, Y., Machida, S. and Suyehiro, K. (2006): Volcanism in response to plate flexure. *Science*, **313**, 1426–1428.
- Hobbs, B.E., Means, W.D. and Williams, P.F. (1976): An Outline of Structural Geology. pp. 571, John Wiley & Sons, Singapore.
- Holtzman, B., Kohlstedt, D.L., Zimmerman, M.E., Heidelbach, F., Hiraga, T. and Hustoft, J. (2003): Melt segregation and strain partitioning: implications for seismic anisotropy and mantle flow. *Science*, **301**, 1227–1230.
- Jung, H. and Karato, S. (2001): Water-induced fabric transitions in olivine. *Science*, **293**, 1460–1463.
- Jung, H., Katayama, I., Jiang, Z., Hiraga, T. and Karato, S. (2006): Effect of water and stress on the lattice-preferred orientation of olivine. *Tectonophysics*, **421**, 1–22.
- Jung, H., Mo, W. and Green, H.W. (2009): Upper mantle seismic anisotropy resulting from pressure-induced slip transition in olivine. *Nature Geosci.*, **2**, 73–77.
- 唐戸俊一郎(2001): 実験構造地質学の最近の進歩. 構造地質, no. 45, 1–7.
- 唐戸俊一郎(2011): 地球物質のレオロジーとダイナミクス, 現代地球科学入門シリーズ14. pp. 245, 共立出版, 東京.
- Karato, S., Jung, H., Katayama, I. and Skemer, P.A. (2008): Geodynamic significance of seismic anisotropy of the upper mantle: New insights from laboratory studies. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **36**, 59–95.
- 笠原順三, 鈴木 功, 熊沢峰夫, 小林洋二, 飯田汲事(1968): Dunite の P 波異方性. 地震, **21**, 222–228.
- Katayama, I., Jung, H. and Karato, S. (2004): A new type of olivine fabric from deformation experiments at modest water content and low stress. *Geology*, **32**, 1045–1048.
- Katayama I. and Karato S. (2006) Effect of temperature on the B- to C-type olivine fabric transition and implication for flow pattern in subduction zones. *Phys. Earth Plane. Inter.*, **157**, 33–45.
- Kawakatsu, H., Kumar, P., Takei, Y., Shinohara, M., Kanazawa, T., Araki, R. and Suyehiro, L. (2009): Seismic evidence for sharp lithosphere-asthenosphere boundaries of oceanic plates. *Science*, **324**, 499–502.
- Keen, C.E. and Barrett, D.L. (1971): A measurement of seismic anisotropy in the northeast Pacific. *Can. J. Earth Sci.*, **8**, 1056–1064.
- Kocks, U.F., Tomé, C.N. and Wenk, H.-R. (1998): Texture and anisotropy: preferred orientations in polycrystals and their effect on materials properties. pp. 676, Cambridge University Press, Cambridge.
- Kumazawa, M. and Anderson, O.L. (1969): Elastic moduli, pressure derivatives, and temperature derivatives of single-crystal olivine and single-crystal forsterite. *J. Geophys. Res.*, **74**, 5961–5972.
- Le Roux, V., Bodinier, J.L., Tommasi, A., Alard, O., Dautria, J.M., Vauchez, A. and Riches, A. (2007): The Lherz spinel-lherzolite: refertilized rather than pristine mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **259**, 599–612.

- Linckens, J., Herwegh, M., Müntener, O. and Mercolli, I. (2011): Evolution of a polymineralic mantle shear zone and the role of second phases in the localization of deformation. *J. Geophys. Res.*, **116**, B06210.
- Long, M.D. and Becker, T.W. (2010): Mantle dynamics and seismic anisotropy. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **297**, 341–354.
- Mainprice, D. (1990): A Fortran program to calculate seismic anisotropy from the lattice preferred orientation of minerals. *Comput. Geosci.*, **16**, 385–393.
- Mainprice, D. (2007): Seismic anisotropy of the deep Earth from a mineral and rock physics perspective. In Mineral Physics (Price, G.D. Ed.), *Treatise on Geophysics* (Schubert, G. Ed.), **2**, 437–491, Elsevier.
- Mainprice, D., Hielscher, R. and Schaeben, H. (2011): Calculating anisotropic physical properties from texture data using the MTEX open-source package. In Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics: Microstructures, Mechanics and Anisotropy (Prior, D.J., Rutter, E.H. and Tatham, D.J. Eds.). *Geol. Soc. London, Spec. Publ.*, **360**, 175–192.
- Mainprice, D., Tommasi, A., Couvy, H., Cordier, P. and Frost, D. (2005): Pressure sensitivity of olivine slip systems and seismic anisotropy of Earth's upper mantle. *Nature*, **433**, 731–733.
- 道林克禎(2000): SEM-EBSD システムによるカンラン岩の結晶方位解析. 構造地質, no. 44, 63–66.
- 道林克禎(2006): かんらん岩の構造解析と最上部マントルのレオロジー. 日本レオロジー学会誌, **34**, 291–300.
- 道林克禎(2008): かんらん岩の構造敏感性と弾性的異方性. 地学雑誌, **117**, 93–109.
- Michibayashi K. and Mainprice D. (2004): The role of pre-existing mechanical anisotropy on shear zone development within oceanic mantle lithosphere: An example from the Oman ophiolite. *J. Petrol.*, **45**, 405–414.
- Michibayashi, K., Suzuki, M. and Komori, N. (2012): Progressive deformation partitioning and recrystallization of olivine in the lithospheric mantle. *Tectonophysics.*, in press.
- Mizukami, T., Wallis, S.R. and Yamamoto, J. (2004): Natural examples of olivine lattice preferred orientation patterns with a flow-normal a-axis maximum. *Nature*, **427**, 432–436.
- Morris, G.B., Raitt, R.W. and Shor, G.G. (1969): Velocity anisotropy and delay time maps of the mantle near Hawaii. *J. Geophys. Res.*, **74**, 4300–4316.
- Muramoto, M., Michibayashi, K., Ando, J. and Kagi, H. (2011): Rheological contrast between garnet and clinopyroxene in the mantle wedge: An example from Higashi-akaishi peridotite mass, SW Japan. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **184**, 14–33.
- Nakajima, J. and Hasegawa A. (2004): Shear wave polarization anisotropy and subduction-induced flow in the mantle wedge of northeast Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **225**, 365–377.
- Nicolas, A., Bouchez, J.L., Boudier, F. and Mercier, J.-C.C. (1971): Textures, structures and fabrics due to solid state flow in some European lherzolites. *Tectonophysics.*, **12**, 55–86.
- Nicolas, A. and Christensen, N.I. (1987): Formation of anisotropy in upper mantle peridotite: a review. In Composition, Structure and Dynamics of the Lithosphere-Asthenosphere System (Fuchs, K. and Froidevaux, C. Eds.). *Geodynam. Ser.*, **16**, Amer. Geophys. Union and Geol. Soc. Amer., Washington DC., 111–123.
- Nicolas, A. and Poirier, J.P. (1976): Crystalline Plasticity and Solid State Flow in Metamorphic Rocks. pp. 444, John Wiley & Sons, New York.
- 大内智博(2013): カンラン石の結晶方位定向配列に関する実験的研究: レビュー. 岩石鉱物科学, 印刷中.
- Ohuchi, T. Kawazoe, T., Nishihara, Y. and Irifune, T. (2012): Change of olivine a-axis alignment induced by water: Origin of seismic anisotropy in subduction zones. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **317–318**, 111–119.
- Ohuchi, T. Kawazoe, T., Nishihara, Y., Nishiyama, N. and Irifune, T. (2011): High pressure and temperature fabric transitions in olivine and variations in upper mantle seismic anisotropy. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **304**, 55–63.
- Passchier, C.W. and Trouw, R.A.J. (1996): Microtectonics. pp. 289, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Passchier, C.W. and Trouw, R.A.J. (2005): Microtectonics 2nd, Revised and Enlarged Edition. pp. 366, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Raleigh, C.B. (1968): Mechanisms of plastic deformation of olivine. *J. Geophys. Res.*, **73**, 5391–5406.
- Raitt, R.W. (1963): Seismic refraction studies of the Mendocino fracture zone. Marine Geophysics Laboratory, Scripps Institution of Oceanography, University of California, Los Angeles, Report MPL-U-23/63.
- Raitt, R.W., Shor, G.G., Francis, T.J.G. and Morris, G.B. (1969): Anisotropy of the Pacific upper mantle. *J. Geophys. Res.*, **74**, 3095–3109.
- 重松紀生(2001): 走査型電子顕微鏡後方散乱電子回折法(SEM-EBSD)による石英-長石質ウルトラマイロナイトの結晶方位解析. 構造地質, no. 45, 1741–1759.
- Shor, G.G. and Pollard, D.D. (1964): Mohole site selection studies north of Maui. *J. Geophys. Res.*, **69**, 1627–1637.
- Skemer, P.A., Katayama, I., Jiang, Z. and Karato, S. (2005): The misorientation index: Development of a new method for calculating the strength of lattice-preferred orientation. *Tectonophysics.*, **411**, 157–167.
- Takeshita, T., Wenk, H.-R., Molinari, A. and Canova, G. (1990): Simulation of dislocation-assisted plastic flow in olivine polycrystals, in: Barber, J. D. and Meredith, P. G. (Eds.), Deformation Processes in Minerals, Ceramics, and Rocks, Hyman, London, 365–377.
- Tasaka, M. (2012): Grain-size sensitive creep of forsterite + enstatite aggregates. pp. 141, Thesis for Doctor of Science, The University of Tokyo.
- Tasaka, M., Michibayashi, K. and Mainprice, D. (2008): B-type olivine fabrics developed in the fore-arc side of the mantle wedge along a subducting slab. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **272**, 747–757.
- Tommasi, A. (1998): Forward modeling of the development of seismic anisotropy in the upper mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **160**, 1–13.
- Tommasi, A., Mainprice, D., Canova, G. and Chastel, Y. (2000): Viscoplastic self-consistent and equilibrium-based modeling of olivine lattice preferred orientations. Implications for upper mantle seismic anisotropy. *J. Geophys. Res.*, **105**, 7893–7908.
- Tommasi, A., Tikoff, B. and Vauchez, A. (1999): Upper mantle tectonics: three-dimensional deformation, olivine crystallographic fabrics and seismic properties. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **227**, 539–556.
- Tommasi, A., Vauchez, A. and Ionov, D.A. (2008): Deformation, static recrystallization, and reactive melt transport in shallow subcontinental mantle xenoliths (Tok Cenozoic volcanic field, SE Siberia). *Earth Planet. Sci. Lett.*, **272**, 65–77.
- 鳥海光弘, 金川久一(1999): マイクロテクニクス—微細構造地質学. pp. 277, シュプリンガー・フェアラーク株式会社, 東京.
- Vauchez, A., Dineur, F. and Rudnick, R. (2005): Microstructure,

- texture and seismic anisotropy of the lithospheric mantle above a mantle plume: Insights from the Labait volcano xenoliths (Tanzania). *Earth Planet. Sci. Lett.*, **232**, 295–314.
- Vauchez, A. and Garrido, C. (2001): Seismic properties of an asthenospherized lithospheric mantle: constraints from lattice preferred orientations in peridotite from the Ronda massif. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **192**, 235–249.
- Wenk, H.-R. (1985): Preferred orientation in deformed metals and rocks: an introduction to modern texture analysis. pp. 610, Academic Press, Inc., Orlando, Florida.