

SEM-EBSP システムによるカンラン岩の結晶方位解析

Lattice preferred orientations in naturally deformed peridotites obtained from SEM/EBSP analysis

道林克禎*

Katsuyoshi Michibayashi

2000 年 11 月 14 日受付.

* 静岡大学理学部地球科学教室

Institute of Geosciences, Shizuoka University,
Shizuoka, 422-8529, Japan

Key words : SEM, EBSP, mantle, LPO, olivine, chromite, Oman ophiolite

はじめに

岩石を構成する造岩鉱物の持つ結晶方位の配向性やミクロな組織構造は、岩石の形成過程に密接に関係している。走査型電子顕微鏡 (SEM) に EBSP (Electron Backscatter Diffraction Pattern) 法を組み合わせた SEM-EBSP システムは、造岩鉱物の特性とその組織のもつ結晶方位の関係をより定量的に調べることを可能にした最新鋭の装置である。

EBSP 法の原理に関する歴史は古く、1954 年に M. N. Alam らが電子線発生装置により発生した電子線

を試料に当てフィルムに記録した菊池パターンが最初である (Alam et al., 1954)。この EBSP 法が最初に SEM と組み合わせて用いられたのは、それから 30 年後のことであった (Dingley, 1984)。しかし、EBSP 法が本当に実用的なものになったのは 1992 年に Hough 変換法が導入されてからである (Krieger-Lassen et al., 1992)。その後の進歩はめざましく、これまでに多くの実験結果が蓄積され、材料科学における組織解析には無くてはならない方法となりつつある。地球科学においてもすでに国際誌に特集号 (例えば Schmid et al., 1999) が出版されており、その有用性は年々高まるばかりである。

本稿では、SEM-EBSP システムをカンラン岩に適用した例を紹介する。本研究で使用した SEM-EBSP システムは、モンペリエ大学構造物理学研究室 (フランス) のものである。

EBSP 法

EBSP 法は、結晶性の試料に SEM 等で電子線を照射した際に、電子線が試料中で反射/回折を受け後方散乱し、菊池パターンと呼ばれる回折像を形成する現象を利用したものである (例えば Fig. 1)。菊池パターンは、さまざまな結晶構造の情報をもたらすと同時に、結晶方位も正確に示す (Kikuchi, 1928)。SEM-EBSP システムでは、この菊池パターンを直接スクリーンで像としてとらえ、それを高感度カメラによってコンピュータに取り込んだ後、Hough 変換して指数付けがなされる (Fig. 1 B)。この間の測定時間は 1

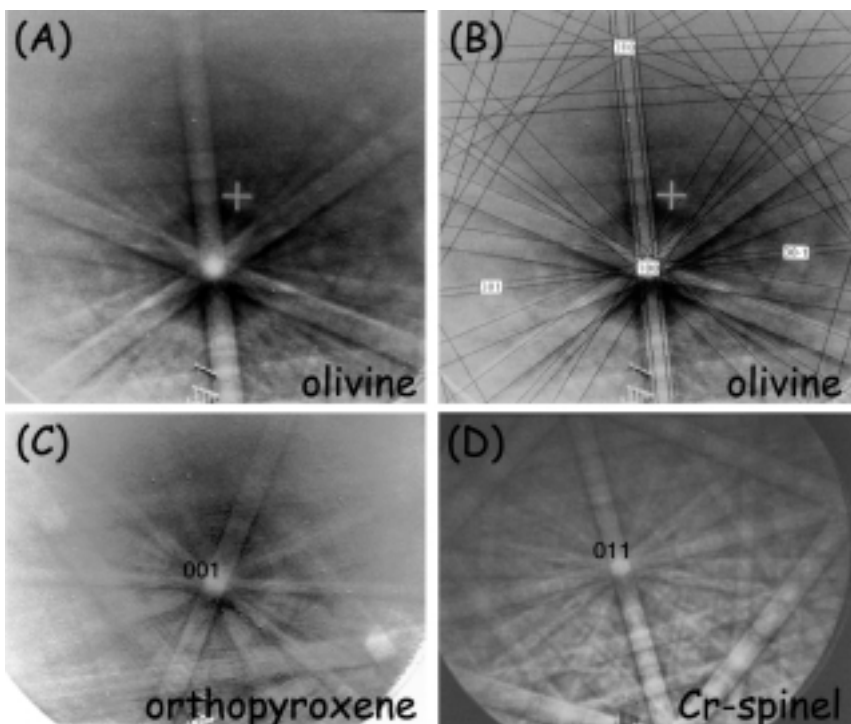


Fig. 1 Electron back-scattered diffraction patterns (Kikuchi patterns) (A) A Kikuchi pattern from olivine. (B) The same Kikuchi pattern from olivine as (A) showing the [100] zone axis with Kikuchi patterns made by a computer simulation. (C) A Kikuchi pattern from orthopyroxene showing the [001] zone axis. (D) A Kikuchi pattern from Cr-spinel showing the [011] zone axis.

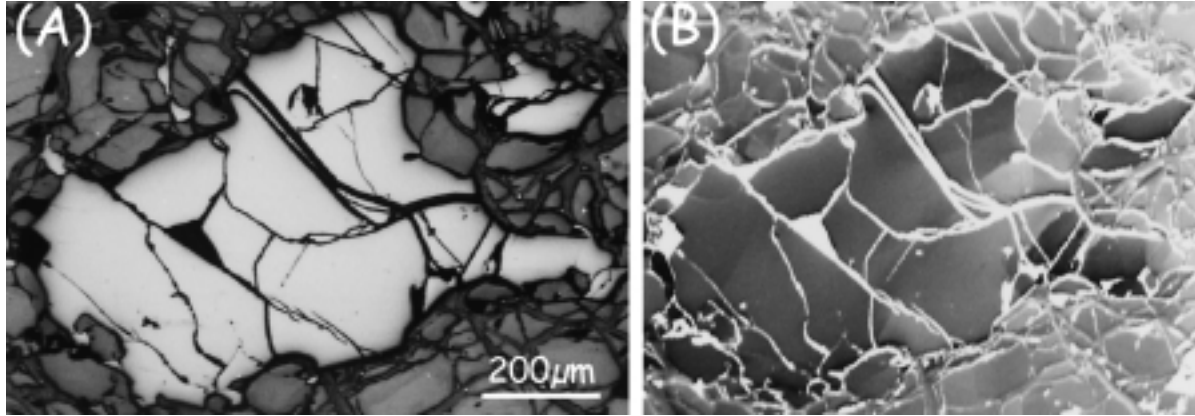


Fig. 2 (A) A photomicrograph of a Cr-spinel grain with reflected light. (B) a fore-scattered image of the same Cr-spinel grain as (A). Strong contrasts of the brightness within the Cr-spinel grain resulted from differences of crystallographic orientations.

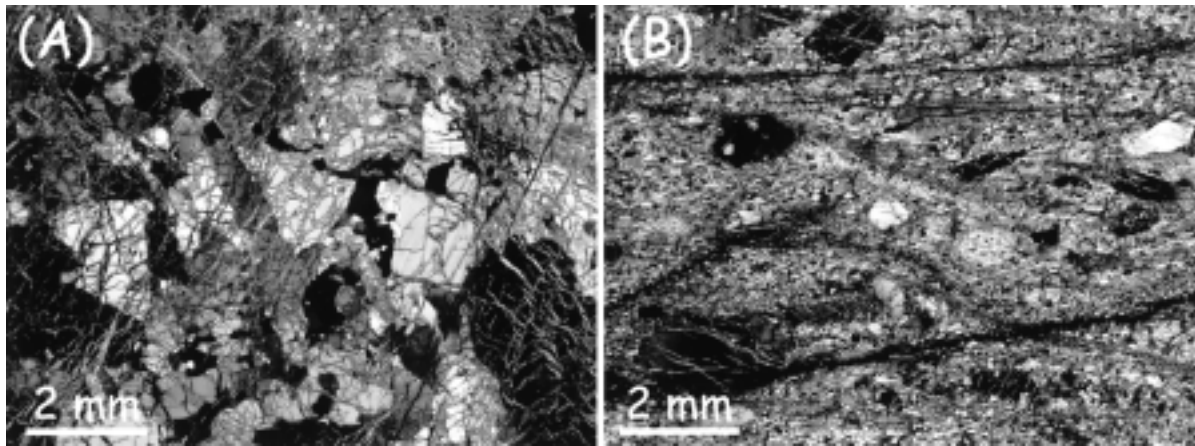


Fig. 3 (A) A photomicrograph of typical high-T type of hartzburgite in the Oman ophiolite. (B) A photomicrograph of typical low-T type of hartzburgite (i.e. well-developed mylonite) in the Oman ophiolite.

点につき1秒以下である。このSEM-EBSPシステムにより従来の技術では極めて困難であった結晶方位分布の完全な把握が可能となった。

SEM-EBSPシステムでは、 $0.2\mu\text{m}$ 程度またはそれ以下の領域から情報を得ることができる。したがって電子線を面走査して菊地パターンを連続的に取り込みながら方位解析を行うことにより、結晶方位により結晶粒を識別し、方位による色付けをした像(方位像)を得ることも可能である。そのため、SEM-EBSPシステムを「方位像顕微鏡(Orientation Image Microscope)」と呼ぶこともある。

また、EBSP法を前方散乱二次電子像(Fore-scattered SEM image)と一緒に活用することで、結晶方位解析をさらに直感的に行うことができる。前方散乱二次電子像は、結晶方位の違いによるコントラストを見せる(例えばFig. 2)。Figure 2Bのような亜粒界(subgrain boundary)の結晶方位のずれはわずかに 1° に満たないものもあり、その方位に対する解像度は驚くべきものである(例えばTrimby & Prior,

1999)。

分析試料：オマーンオフィオライト・カンラン岩

測定したカンラン岩は、オマーンオフィオライトから採取されたものである。これまでの研究からオマーンオフィオライトのカンラン岩は、現在の東太平洋海膨のような高速拡大海嶺下にダイアピル状に上昇してきたマントルアセノスフェアが水平方向に流れをかえながら冷却し、マントルリソスフェアとして海洋プレートの下側に付加したものと考えられている(例えば: Nicolas, 1989; Nicolas et al., 2001とこれらの引用文献参照)。このような海洋プレートとしての構造にオブダクション時のやや低温の構造が重複して存在する。ここでは、オマーンオフィオライトの中でもカンラン岩体の大構造がよくわかっている北部ヒルチ岩体(Michibayashi et al., 2000)から得られたカンラン岩について特徴的なものを示す。

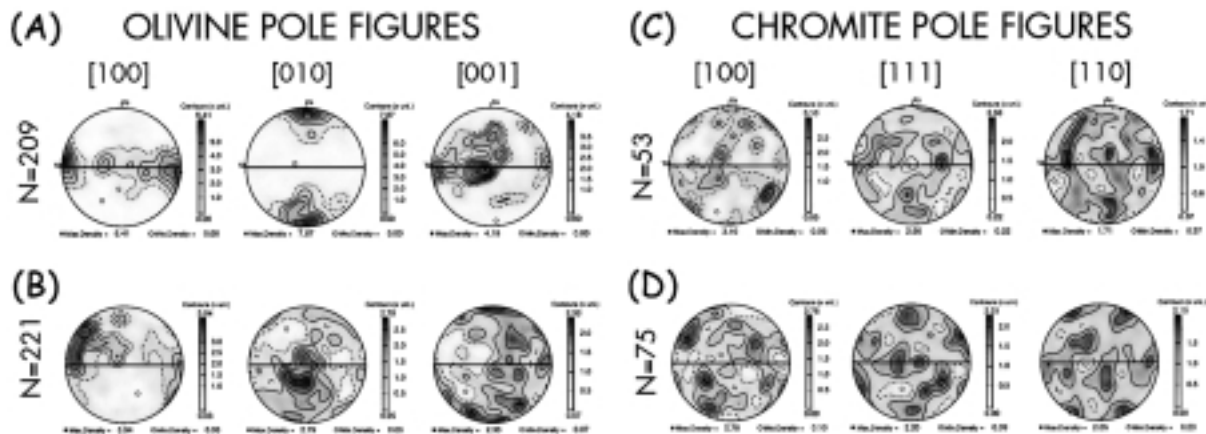


Fig. 4 (A) Olivine pole figures for high-T type hartzburgite in Fig. 3A. J-index is 8.3. (B) Olivine pole figures for low-T type hartzburgite in Fig. 3B. J-index is 3.2. (C) Chromite pole figures for high-T hartzburgite in Fig. 3A. (D) Chromite pole figures for low-T hartzburgite in Fig. 3B.

EBSP 法によるカンラン岩の結晶方位解析

解析したカンラン岩はハルツバージャイトであり、主な構成鉱物はカンラン石・斜方輝石・クロムスピネルである。Figure 1 に主要 3 鉱物から得られた菊地パターンを示す。Figure 1A と 1B は同一のカンラン石結晶に対する菊地パターンであるが、後者には Hough 変換を行うことにより求められた指数付けの結果を示した。このように菊地パターンから指数付けされた結晶方位は、3つの Euler angle (ϕ_1, Φ, ϕ_2) として記録される。これら 3つの角度によって結晶方位を再現することができる (Bunge, 1982)。

本研究では、北部ヒルチ岩体から得られた 20 個のカンラン岩中のカンラン石とクロムスピネルの結晶方位が測定された。解析したカンラン岩の微細組織は、アセノスフェアの流動変形によって形成された粗粒なカンラン石によって特徴づけられる高温変形組織 (Fig. 3A) と、リソスフェアの改変によって数 10 μ m の大きさにまで細粒化したカンラン石を有する低温変形のマイロナイト組織 (Fig. 3B) に大別された。各サンプルについて、カンラン石は 200 粒以上、クロムスピネルは 50 粒以上を目安に測定した。

カンラン石の LPO パターンについては、微細組織と関連した 2つのパターンを得た。1つは高温変形組織で顕著な (010) [100] パターンであり (Fig. 4A)、もう 1つは低温変形組織に見られた (001) [100] パターンである (Fig. 4B)。

Mainprice & Silver (1993) は、3つの Euler angle を使って LPO パターンの強度を J-index と呼ばれる値として定量的に示す方法を提案した。この J-index は結晶方位が完全にランダムな時に 1 となり、結晶方位が集中するに従いその値も次第に大きくなる (例えば Ben Ismail & Mainprice, 1999; Tommasi et al.,

2000)。Figure 4A の (010) [100] パターンの J-index は 8.3 であり、Figure 4B の (001) [100] パターンの J-index は 3.2 である。

(010) [100] パターンは、高温変形で形成される典型的なものである (例えば Nicolas & Poirier, 1977; Mainprice & Nicolas, 1989)。それに対して (001) [100] パターンは、これまで (010) [100] すべりに次いで高温変形で見られる LPO パターンであると考えられてきた (Nicolas & Poirier, 1977)。しかし、今回低温で形成したと考えられるマイロナイトでこのパターンが認められたことから、このすべり系の成因についてはより詳細な検討が必要とされるだろう。

クロムスピネルはユニバーサルステージでは結晶方位が測定できなかった不透明で等方性の鉱物であるが、EBSP 法では結晶方位の測定が容易な鉱物のひとつである。クロムスピネルの LPO パターンは複雑であるが、カンラン石の LPO パターンの変化と対応しており、高温変形と低温変形では異なるパターンをもつことがわかってきた (Figure 4C&D; Michibayashi et al., 準備中)。

これまでクロムスピネルの変形メカニズムについては、拡散クリープについて議論がなされている (Ozawa, 1989) もの、まだ不明な点が多い。今回、EBSP 法により LPO パターンが解析された結果を数値実験によるクロマイトの LPO パターンと比較したところ、とくに低温変形を受けたカンラン岩中のクロムスピネルの LPO パターン (Fig. 4D) が転位クリープによって形成された可能性がでてきた (Michibayashi et al., 準備中)。さらに、Figure 4C のように LPO パターンのはっきりしない高温変形のハルツバージャイト中のクロムスピネルについても、亜粒界が普遍的に存在することが前方散乱二次電子像による観察から明らかになってきている (Fig. 2)。亜粒界の存在は、クロムスピネル内に転位すべりがあったこと

を示唆しているのです、このLPOパターンについてもより詳細な検討がのぞまれる。

おわりに

SEM-EBSP システムは、これまで光学顕微鏡では測定不可能であった鉱物を含めて多くの造岩鉱物の結晶方位測定を画期的に容易にした。これにさらにエネルギー分散型 X 線解析装置を組み合わせれば、化学組成解析を含めて微細組織の研究に大きな変革をもたらす可能性がある。

本稿では、このシステムをカンラン岩の結晶方位解析に適用した例を示した。この新しい解析法により、カンラン岩中の変形メカニズムについて新たな知見が得られつつある。

謝 辞

モンペリエ大学の David Mainprice 博士には同大学の SEM-EBSP システムの使用に関して多くの便宜をはかっていただいた。また、静岡大学技官の森英樹氏とモンペリエ大学技官の Christophe Nevado 氏には、研磨薄片作成をしていただいた。本研究は、日本学術振興会特定国派遣事業と文部省科学研究費補助金の援助を受けた。ここに記して感謝いたします。

文 献

Alam, M. N., Blackman, M. and Pashley, D. W., 1954, High-angle Kikuchi patterns. *Proc. Roy. Soc.*, **221**, 224-242.

Ben Ismaïl, W. and Mainprice, D., 1999, An olivine fabric database : an overview of upper mantle fabrics and seismic anisotropy. *Tectonophysics*, **296**, 145-157.

Bunge, H. J., 1982, *Texture analysis in materials sciences*, 593 pp., Butterworth, London.

Dingley, D. J., 1984, Diffraction from sub-micron areas using electron backscattering in a scanning electron microscope. *Scanning Electron Microscopy*, **2**, 569-575.

Kikuchi, S., 1928, Diffraction of cathode rays by

mica. *Jap. J. Phys.*, **5**, 83-96.

Krieger Lassen, N. C., Juul Jensen, D. and Conradsen, K., 1992, Image processing procedures for analysis of electron backscattering patterns. *Scanning Microscopy*, **6**, 115-121.

Mainprice, D. and Nicolas, A., 1989, Development of shape and lattice preferred orientations : application to the seismic anisotropy of the lower crust. *J. Struct. Geol.*, **11**, 175-189.

Michibayashi, K., Gerbert-Gaillard, L. and Nicolas, A., 2000, Shear sense inversion in the Hilti mantle section (Oman ophiolite) and active mantle uprise. *Marine Geophysical Researches*, **21**, 259-268.

Nicolas, A., 1989, *Structures in ophiolites and dynamics of oceanic lithosphere*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 367 pp.

Nicolas, A. and Poirier, J. P., 1976, *Crystalline plasticity and solid state flow in metamorphic rocks*. John Wiley & Sons, 444 pp.

Nicolas, A., Boudier, F., Michibayashi, K. and Gerbert-Gaillard, L., 2001, Aswad massif (United Arab Emirates) : paradigm of the Oman-UAE ophiolite belt. *Geological Society of America Bulletin*, in press.

Ozawa, K., 1989, Stress-induced Al-Cr zoning of spinel in deformed peridotites. *Nature*, **338**, 141-144.

Schmid, S. M., Heilbronner, R. and Stunitz, H., 1999, Deformation mechanisms in nature and experiment. *Tectonophysics*, **303**, 1-319.

Tommasi, A., Mainprice, D., Canova, G. and Chastel, Y., 2000, Viscoplastic self-consistent and equilibrium-based modeling of olivine lattice preferred orientations : Implications for the upper seismic anisotropy. *J. Geophys. Res.*, **105**, 7843-7908.

Trimby, P. W. and Prior, D. J., 1999, Microstructural imaging techniques : a comparison between light and scanning electron microscopy. *Tectonophysics*, **303**, 71-81.