

実験構造地質学の最近の進歩

Recent Progress in Experimental Structural Geology

唐戸 俊一郎*
Shun-ichi Karato*

Abstract : Significant progress has been made in the experimental structural geology due mainly to the advancement of experimental technology. They include the development of new apparatus or techniques to conduct large-strain, shear deformation experiments under high-pressure and temperature conditions and a technique of high-resolution micro-fabric measurements such as EBSP. Significant microstructural evolution at high strain has been documented in both calcite and olivine associated with dynamic recrystallization which results in grain-size reduction and associated rheological weakening. However, no evidence of shear localization was observed in these experiments. Some thoughts to resolve this puzzling observation are presented emphasizing the role of strong constraints on deformation geometry imposed in torsion tests. Using newly developed technique of large-strain shear deformation at high pressures, new types of fabrics have been identified in olivine under high water-fugacity conditions. They provide a new interpretation of observed wide range of fabrics in peridotites and the complicated pattern of seismic anisotropy in subduction zones. Microscopic models for the origin of water-induced fabric transition are proposed in which the role of anisotropic Peierls stress is emphasized.

Key words : *experimental structural geology, lattice preferred orientation, shear localization, seismic anisotropy*

はじめに

生物学などの他の科学と同様に地球科学も実験的手法の導入によって画期的な進歩をする。それは実験的研究では現象の起こる条件が制御されており、仮説の白黒がはっきりと判定できるからである。しかし、多くの地質現象は実験室での再現が難しくとくに構造地質学の分野では実験的研究が遅れていた。実験的研究がこの分野で困難な理由は(1)構造地質の本質である岩石の変形のメカニズムが時間スケールによって変わり、地質学的時間で起る現象を実験室の時間スケールで再現するのが困難であること、(2)構造地質学的に興味深い多くの現象が大きな歪みでのみ生じ、かつ変形の幾何学によってもその構造が違ってくるのであるが、実験室で大きな歪みを発生させ、変形の幾何学を制御することはそう簡単ではない等のためである。これらの困難を解決するには(1)様々な変形の様式(幾

何学)を実験室で再現し、大歪みの変形実験を行う技術を開発すること、そして(2)実験結果を地球上に外挿するためのスケーリング則(つまりことなった時間スケールの現象を結び付ける法則)を確立することが重要である。このような思想のもとで行われる研究を「実験構造地質学」と呼ぼう(Karato et al., 1998 : Fig. 1)。

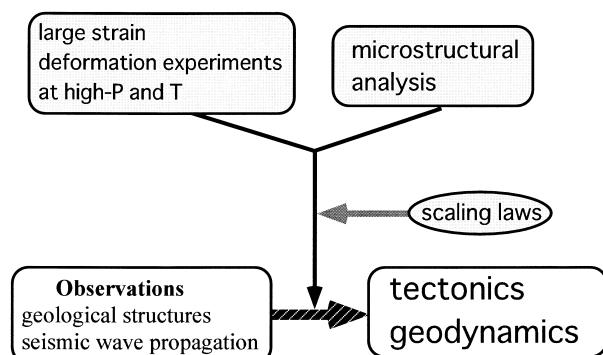


Fig. 1 Conceptual framework of "Experimental Structural Geology"

2001年5月11日受付、2001年5月26日受理。

* Department of Geology and Geophysics, University of Minnesota, 108 Pillsbury Hall, Minneapolis, MN 55455

この実験構造地質学の分野で最近いくつかの技術的開発が行われ、画期的な進歩があったが、同時にいくつかの（私には）不可解な問題も出てきた。この小論では最近の進歩を手短かに紹介し、未解決の重要な問題のいくつかを解説してみよう。

実験構造地質学の進歩

実験構造地質学といつても色々な分野があるがここでは二つの問題に焦点をあわせよう。それは変形の局所化と結晶方位（格子）選択配向の研究である。このどちらの分野にとっても画期的な進歩だったのは、大歪みでかつ変形様式が色々に制御できる実験法（実験装置）が開発されたことである。まず、Schmid et al. (1987) は最初に普通の三軸圧縮試験機の試料部分を改造し、カルサイトの近似的に単純ズリの変形実験をおこなった（この場合、ズリ変形は試料をピストンの間にサンドイッチすることによって行う。そこでこの方法をサンドイッチ法と呼ぼう）。同様な試みを私達もより高温に拡張し、オリビンの単純ズリ変形実験を行い、浅い上部マントルで見られる結晶方位選択配向を初めて実験室で再現することができた（Zhang & Karato, 1995）。この方向での技術面でのより画期的な

進歩は Paterson の設計したねじれ試験機である（Paterson & Olgaard, 2000）。この試験機によって事実上、どんな大きな歪みでも実験室で再現できるようになり、変形組織の研究には大きな進歩が期待できることになった（Fig. 2）。

この他にもいくつかの技術的な進歩があった。その一つは結晶方位（格子）選択配向の測定法で、電子線を使った高分解能の方法が開発され実用化されたことである。これは日本の菊池正士の発見した結晶中での電子の多重散乱による回折パターンの解析にもとづく方法で、1ミクロン以下の領域の結晶方位を高精度で決定することができる（この方法は EBSP とか EBSD とか呼ばれている；菊池はこの業績で 1936 年度のノーベル賞候補になったが惜しくも受賞にはいたらなかった）。細かい結晶粒径の試料を扱う高圧の変形実験ではこの技術は必需品である。高圧の変形実験によって動的再結晶による格子選択配向の変化を研究する上ではこの技術が決定的な役割を果たした（Lee et al., 2001）。今までの U-stage を使った測定では見えていなかった格子選択配向の詳細が始めて明らかになった。また天然の岩石を扱う場合でも、マイロナイトなどの細粒の岩石の研究では有用であるし、どんな対称性の鉱物にでも使えるという利点も大きい。

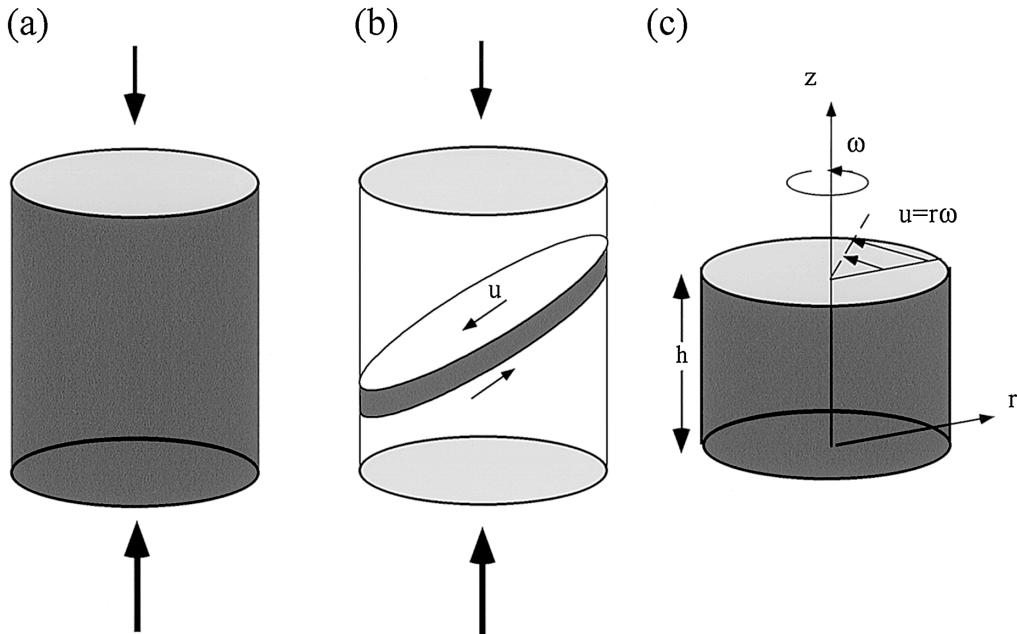


Fig. 2 Three methods of deformation experiment. A large strain, non-coaxial deformation is possible by methods (b) and (c).

(a) A triaxial compression test

This method is most common. A sample undergoes coaxial deformation.

(b) A sandwich method

A thin sample is sandwiched between two strong pistons. Axial motion of pistons is transformed to (nearly) simple shear deformation of a sample.

(c) A torsion test

A cylindrical sample is twisted by a rotational actuator. The displacement velocities, u , of materials along a line from the center follow $u = r\omega$ where r : distance from the center and ω : angular velocity of rotation. Therefore the strain-rate of a material increases with distance r from the center as $\dot{\epsilon} = \omega / h$ (h : thickness of the sample).

もう一つは従来より高压の条件下で大歪みの（半）定量的な変形実験が行えるようになったことである。高压といつてもなにもマントル深部にだけ関係するのではない。例えば地殻の岩石の変形には水の効果が大きいことはよく知られているが水の効果は圧力によって大きく変わるので下部地殻当たりの変形特性を知るには1 GPa 程度の圧力は必要である ($P=2 \text{ GPa}$ では水の逃散能 (fugacity) は $\sim 13 \text{ GPa}$)。そこで低圧（ガス圧試験機は高精度なのだが圧力は0.5 GPa 程度しか出せない）での実験では地質学的に興味深い現象が見えない可能性が高い。ところがすでに1 GPa の圧力では定量的な変形実験が困難なのである。この圧力領域では応力の測定が高压容器の外部に設置したロードセルで測定されるので摩擦の補正が大きく、精度のよい測定ができないのである。私達は変形した試料の転位密度を走査電子顕微鏡を使って高精度で測定する手法を開発し、転位密度と応力の関係から応力をかなりの精度で推定することができた。また10 GPa を超える超高圧での大歪み変形実験にもとりくみ、マントル全体のレオロジーや変形構造の研究を開始した (Karato & Rubie, 1997; Karato et al., 1998; Yamazaki & Karato, 2001)。これには私の研究室の山崎大輔君が大きく貢献した。

変形の局所化

変形の局所化は地殻の多くの部分で見られ、構造地質学にとって大変重要な問題である。変形が局所化する理由は物体の中で他より多く変形した部分がより変形しやすくなるという、「歪み軟化」にあると通常考えられている（例えば Poirier, 1980）。この考えでは変形の局所化は、

$$\frac{d\tau}{d\gamma} < 0 \quad (1)$$

の条件が満たされた時に起る（ここに τ は試料の強度、 γ は歪み）。例えば脆性領域での変形の場合、より多く変形した部分にはより多くのクラックが存在しており、より変形しやすくなっている。そこで脆性領域での変形ではほぼ例外なく変形は局所化する。ところが延性領域では変形の局所化は限られた条件でのみ起る。それは「歪み軟化」が限られた条件でのみ起るからだと考えられている。この「歪み軟化」 \Leftrightarrow 変形の局所化という図式には多くの証拠があり、よく確立した概念のように思われていた。

ところが、最近行われた、ねじれ試験機での実験結果はこの考えと必ずしも相容れない。スイスのETHでは Paterson の機械を初めて購入し、カルサイトとオリビンの変形実験を大歪みまでおこなった (Bystricky et al., 2000; Pieri et al., 2001)。そのどちらの場合も動的再結晶に伴うはっきりした歪み軟化が見られ

ているにもかかわらず変形の局所化は見られなかった。これは私には不可解なことに見える。「歪み軟化」 \Leftrightarrow 変形の局所化という図式がおかしいのか、ねじれ試験機という実験方法が変形の局所化を調べるのに適切でないのかどちらかなのであろう。

この問題を考えるのにいくつかのポイントがある。一つは、局所化の条件には機械の特性も入ってこなくてはならないという点である。それはしばしば機械の硬さ (stiffness) として取り扱われる。硬さを E とすれば、

$$E < \left| \frac{d\tau}{d\gamma} \right| \quad (2)$$

の条件も満たされていなければならない。つまり機械があまり硬いと加速した変形についていけなくなり、局所化は起きない。Paterson apparatus はあまりにも硬いので変形の局所化が起きにくいのだろうか？もう一つの可能性は「境界条件」である。今までの実験はすべて回転速度（歪み速度）一定の条件で行われた。一般に歪み速度一定の条件では応力一定の条件に比べて、変形の局所化が起きにくい（例えば Fressengeas & Molinari, 1987）。応力一定での変形実験も行ってみるべきである。また、ねじり変形という様式は変形への拘束条件がきつい。というのは、試料の中心から外部へ向かって書いた線上の物質は同じ角速度で動かなければならぬ。ところが、この線上の各点では物質の運動速度は中心からの距離に比例するので、各点の物質の歪速度は中心からの距離に比例する。そこでこの変形様式で変形の局所化が起こりうるためにには局所化があらゆる歪み速度で同時に起らなければならないことになる。一方、より簡単なサンドイッチ法では、ある一つの歪み速度で変形の不安定が起れば局所化に至りうる。従って、ねじり試験での変形の局所化の条件はサンドイッチ法による実験に比べてよりキビシイ条件であると言える。そのため変形の局所化はねじり試験では発生しにくいのかもしれない。ねじれ試験機は変形の局所化を含めて、「実験構造地質学」を建設していく上での大変有力な道具である。それだけにこの問題は重要であり、厳密に数学的に定式化して解析し、実際の地球での変形の局所化の解明にこの試験機がどれだけ役立つかの注意深い検討が必要である。

また歪み軟化に関連して注目に値するのは、カルサイトの場合もオリビンの場合とともに、歪み軟化と動的再結晶による細粒化との関連は明確なのが、歪みとともに格子選択配向はむしろ強くなっていることがある。これは軟化が変形メカニズムが拡散クリープ（または超塑性）に変わったために起るという考えとは単純には一致しない。もしこの考えが正しいなら、格子選択配向は弱くなることが予測されるからである。細粒化によって拡散クリープ（超塑性）は促進さ

れるが歪みの大部分はまだ転位クリープで起る「中間領域」がこれらの実験では見えているのかも知れない。

格子選択配向の転移 (Fabric transitions)

格子選択配向（結晶方位選択配向）とは岩石の中での個々の結晶の向きがある特定の方向にそろってくることをいう。結晶の向きの揃い方は変形の幾何学や変形のミクロなメカニズムによって決まってくるので、格子選択配向とこれらの因子との関係が知れていれば、格子選択配向から変形の幾何学や変形のミクロなメカニズムの推定ができる。

私達は地震波の異方性を解釈する方法を確立するという目的で上部マントルのもっとも重要な鉱物であるオリビンの格子選択配向の研究をしてきた。その結果、次の二つの点に気づいた。(1)古典的な結果である Carter & Avé Lallement (1970) の格子選択配向図 (fabric diagram) と現在手にできるもっとも信頼できるオリビンの流動則とは矛盾している。(2)Carter & Avé Lallement (1970) の格子選択配向図は不完全で、水の効果を入れると格子選択配向図は大きく変化する。

まず(1)の方から説明しよう。Fig. 3 は Carter & Avé Lallement (1970) による図で、オリビンの中で卓越するすべり系を温度と歪速度の関数として示したものである。この図は近似的には応力がある値になれば卓越するすべり系が変化し、格子選択配向も変化することを示している。Carter & Avé Lallement (1970) の結果は高温、低歪速度 (つまり低応力) で [100](010) スベリ系が、高応力では [001](010) などのすべり系が卓越することを示している。この結果は上部マントルの岩石の変形組織の研究では古典的な業績と考えられているが、Bai et al. (1991) の詳細にわたるオリビン単結晶の変形実験の結果とは相容れないものである。Bai et al. (1991) はオリビンの流動則についての詳細な研究を行いその結果を

$$\dot{\varepsilon} = A f_{O_2}^p a_{SiO_2}^q \sigma^n \exp\left(-\frac{E^*}{RT}\right) \quad (3)$$

という形にまとめた。ここに $\dot{\varepsilon}$: 歪み速度、 f_{O_2} : 酸素分圧、 a_{SiO_2} : シリカの活動度、 σ 応力、 T : 温度、 E^* : 活性化エネルギー、 n : 応力指数である。彼等はこの式に含まれるパラメータをいくつかの結晶方位 (つまりすべり系) にたいして決定した。その結果は大変複雑であるが応力指数がどのすべり系でも共通である点は注目に値する。応力指数が共通であるため、応力が変化しても各すべり系の相対的強度が変化することはなく、応力によって格子選択配向の変化が起るはずはないのである。

このように Carter & Avé Lallement (1970) の格

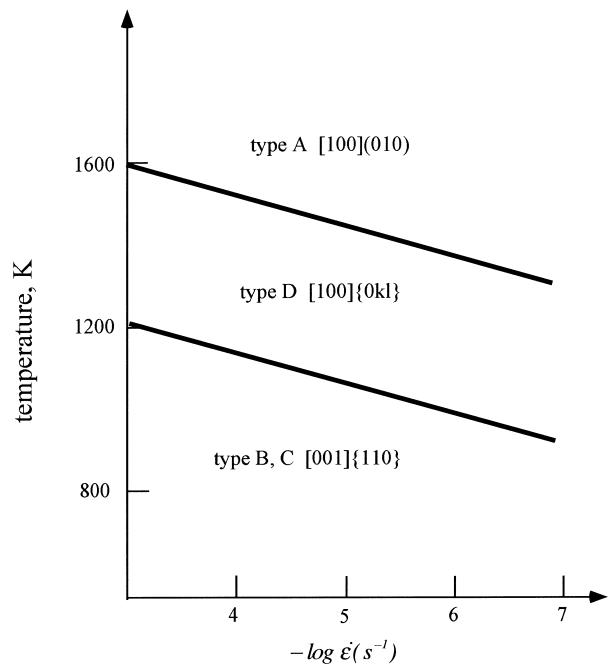


Fig. 3 Dominant slip systems in olivine (modified after Carter and Avé Lallement, 1970). The conditions at which dominant slip systems change correspond roughly to constant stress values.

子選択配向図 (fabric diagram) も Bai et al. (1991) 流動則も広く受け入れられている結果であるが両者は相容れないものなのである。何かがおかしいに違いない。まず Carter & Avé Lallement (1970) の格子選択配向図に疑問を投げかけることは可能である。

実際、当時の実験技術は低く、後に述べる水の効果は考慮されていなかったし、温度分布の不均質さや応力測定の荒っぽさは結果に影響を与える可能性がある。しかし、彼等の図は天然の岩石の格子選択配向の研究からも大筋は支持されているのでそれほど間違っているとは思えない。そこで Bai et al. (1991) の採用した流動則 (式(3)) が不充分だという可能性も検討してみる価値がある。実は(3)は近似式であるが共有結合性の強い化合物の変形特性にはあまりよい近似とはならない。共有結合性の強い化合物では塑性変形を起こす結晶の転位の動きが応力に大変敏感になってきて、流動則としては

$$\dot{\varepsilon} = B \sigma^n \exp\left[-\frac{E^*(\sigma)}{RT}\right] \quad (4)$$

の形になることが多い。この式の特徴は活性化エネルギーが応力によって変化 (減少) することで、例えば $E^*(\sigma) = E_0^* - C\sigma$ となる。そのため、歪み速度が応力によって急激に増加することになる。ここで定数 C は転位の性質によって異なる定数だから、ある特定のすべり系が応力の増加とともに卓越してくることも理解できる (Fig. 4)。

次に水の効果について述べよう。水が鉱物の塑性変

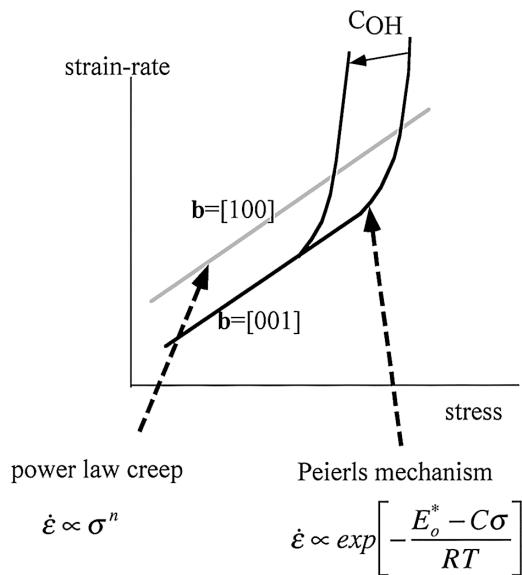


Fig. 4 A schematic diagram showing a mechanism of change in the dominant slip system (both axes are log-log scale). If the flow law were the power law with the same stress exponent, then all the lines for different slip systems are parallel in this diagram and one would not expect any changes in slip systems when stress magnitude is changed. However, when the Peierls mechanism becomes important for certain slip systems in which a flow law of the type $\dot{\varepsilon} \propto \exp\left[-\frac{E_o^* - C\sigma}{RT}\right]$ operates, then there will be a change in the dominant slip systems when stress is increased. Water could also modify the parameter C, leading to a water-induced fabric transition (s).

形に大きな影響を与えることは30年以上も前から知られていた。しかし水の効果が鉱物の方位によって大きく違うことはあまりよく知られていなかった。鉱物にはいくつかのすべり系があるが、水の効果はすべり系によって大きく違うのである。オリビンの場合、 $b=[100]$ と $b=[001]$ という二つのバーガースベクトルを持つ転位がある。水の少ない、応力の低い（通常のリソスフェアの）条件では $b=[100]$ という転位の運動がより容易で、歪みの大部分は $[100](010)$ というすべり系でまかなわれる。そこでズリの方向にオリビンの $[100]$ 軸がズリの面に垂直な方向に $[010]$ 軸が揃ってくるという格子選択配向が普通は見られる。ところが水が加わると $b=[001]$ の転位は大変動き易くなるが、 $b=[100]$ の転位の動き易さはあまり変化しない。そこで私は、多量の水が入るとオリビンの格子選択配向が変化するかも知れないと予測した (Karato, 1995)。この予測をテストすべく院生の Jung 君にがんばってもらい、高温、高圧での大歪み変形実験を行った。もちろん、変形の幾何学は単純ズリである。というのは普通に行われている三軸圧縮法ではズリ方向の変化を同定できないからである。格子選択配向は EBSP を使って高精度の測定を行った。数

年の努力の結果、やっと納得のいく結果がまとまり、最近 Science 誌に投稿したところである (Jung & Karato, 2001 : Fig. 5)。私の予測は大方確認されたが予想外のことも分かった。すべり方向のみならずすべり面も水の効果で変化すること、そして水だけでなく応力の大きさも卓越するすべり系、つまり格子選択配向を決めていることが分かってきたのである。

この図を見て分かるように私達の実験は温度、水の量（典型的な海洋のアセノスフェアでは～600-800 H/Si ppm, サブダクション帯では～2,000-3,000 H/Si ppm）に関しては地球内部をほぼ再現しているが応力については地球内部の値（1-100 MPa）よりもかなり大きい。そこで低応力に私達の結果をどのように外挿するのかが一つのポイントになる。これが「スケーリング」の問題である。

まず地震学の観測結果から典型的な海洋マントルでは今までよく知られていた $[100](010)$ スベリ系（タイプ A）の格子選択配向が卓越していることが推定される。典型的な海洋マントル（アセノスフェア）では変形の応力は～1-10 MPa である。そこで $C_{OH} \sim 600-800$ H/Si ppm, 応力～1-10 MPa の条件ではタイプ A の格子選択配向が卓越すると考えられる。そこで図 5 のような平面で表示した場合、タイプ A とタイプ C の境界は負の勾配を持つはずだと推定できる。これは図 4 に示したミクロなモデルと調和的である。それは次のような理由からである。まずオリビン中のそれぞれのすべり系が式(4)で記述できる流動則に従うと仮定する。この式のパラメーター C は転位の動き易さを決めるバイエルスボテンシャルの大きさに関係しているので各すべり系ごとに違っているはずである。そして水の量が増えると C は増加する傾向がある。こう考えると観察された格子選択配向の変化を説明することができる (Fig. 4)。このモデルではタイプ A と C の境界は $E_o^* - C\sigma$ が一定の値をとるところであるがパラメーター C は水の量とともに増加する。そこでこの境界は Fig. 5 のような平面では負の勾配を持つはずなのである。

もちろん、もっと定量的な議論をするには今のデータはあまりにも不足している。とくに低温領域のデータが足らないので、衝突帯などへの応用は容易ではない。よりデータを増やし、格子選択配向の境界を決める条件をもっと定量的に決めなければならない。低温領域の実験は難しいが、天然の岩石の研究結果との比較なども低温領域での格子選択配向図を確かなものにするのに役に立つであろう。実際、最近の研究結果を見ると南スイスの Alpe Arami ペリドタイトなどではタイプ C, B の格子選択配向が観察されている (K. Frese, 私信)。この領域では多量の水と高い応力が期待できる。これは私たちの実験結果と調和的である。このようにこの新しい結果は日本などの沈み込み帯の

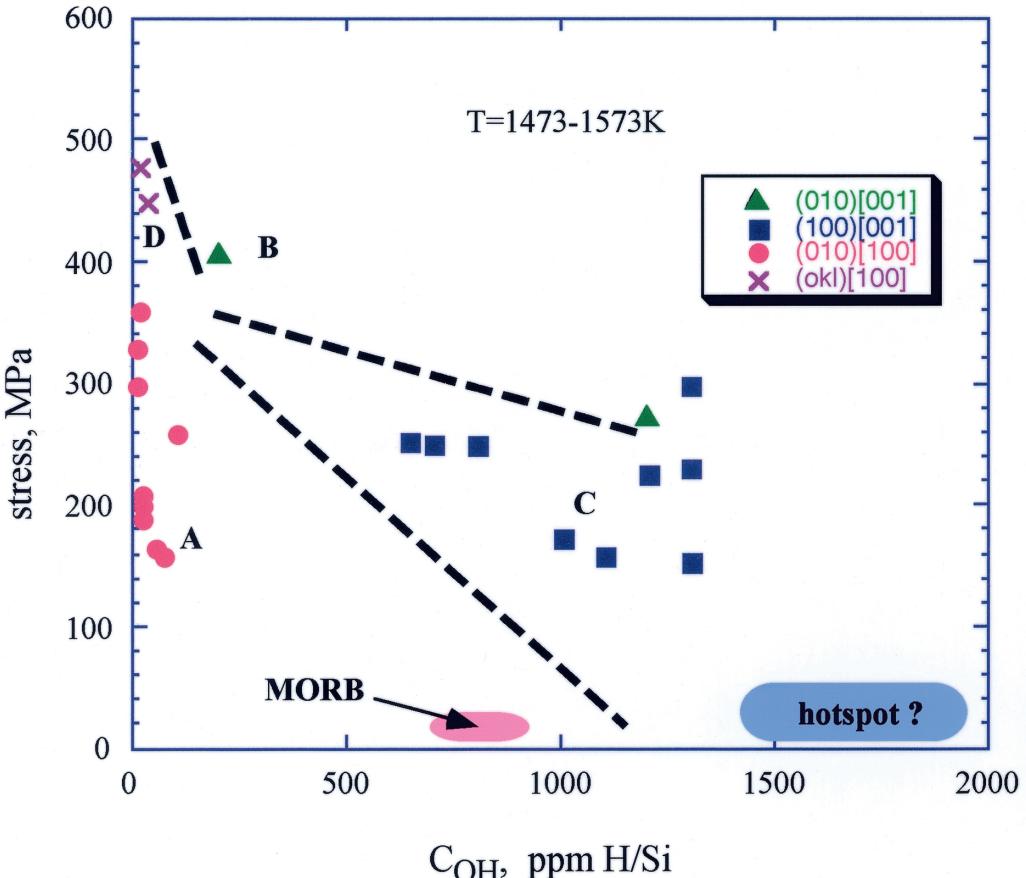


Fig. 5 Fabric diagram for olivine in the water content-stress space (modified after Jung and Karato, 2001). A, B, C, D correspond to various fabric types identified in our study. Dominant slip systems inferred for each fabric are shown in the legend.

岩石（ペリドタイト）の変形組織、地震波異方性の解釈に新しい視点を提供する。特に、沈み込み帯で観測されている横波分裂（shear wave splitting）の解釈はこの結果を使うとずっと簡単になる。またハワイなどのホットスポットの下の上部マントルではタイプCが卓越していると考えると新しい地震学のデータを説明できる。つまりホットスポットはウェットスポットでもあるらしい（Jung & Karato, 2001）。

実験構造地質学の今後

構造地質学では直接目に見えるものを研究対象にするので、その方法が定性的、幾何学的な傾向がある。室内実験にもとづいた実験構造地質学的アプローチによれば構造地質学をより物理的基礎のしっかりした定量的なものに変えていく可能性が生まれてくる。この小文では最近の実験構造地質学の進歩のうち、とくに変形の局所化と格子選択配向に焦点をあていくつかの問題を論じた。読者諸氏のこの分野への関心を増やすきっかけになれば幸いである。

謝 辞

ここで紹介した研究の大部分は NSF からの研究費でサポートされた私の研究室での同僚、学生諸君との共同研究の結果である。スイスの ETH の Katrine Frese さんにはスイスの Alpe Arami ペリドタイトの格子選択配向についての未発表の結果を教えていただいた。またこの原稿は道林克徳氏のお薦めによって書いたものである。金川久一、増田俊明の両氏には有益なコメントをいただいた。これらの諸氏に感謝したい。

文 献

- Bai, Q., Mackwell, S.J. and Kohlstedt, D.L., 1991, High temperature creep of olivine single crystals, I. Mechanical results of buffered samples, *J. Geophys. Res.*, **96**, 2441–2463.
 Bystricky, M., Kunze, K., Burlini, L. and Burg, J-P., 2000, High shear strain of olivine aggregates :

- rheological and seismic consequences, *Science*, **290**, 1564–1567.
- Carter, N.L. and Avé Lallement, H.G. 1970, High temperature flow of dunite and peridotite, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **81**, 2181–2202.
- Fressengeas, S. and Molinari, A., 1987, Instability and localization of plastic flow in shear at high strain rates, *J. Mech. Phys. Solids*, **35**, 185–211.
- Jung, H. and Karato, S., 2001, Water-induced fabric transitions in olivine, *Science*, in press.
- Karato, S., 1995, Effects of water on the seismic wave propagation in the upper mantle, *Proc. Japan Acad.*, **71**, Ser. B, 61–66.
- Karato, S. and Rubie, D.C., 1997, Toward an experimental study of deep mantle rheology : a new multianvil sample assembly for deformation studies under high pressures and temperatures, *J. Geophys. Res.*, **102**, 20111–20122.
- Karato, S., Zhang, S., Zimmerman, M.E., Daines, M. J. and Kohlstedt, D.L., 1998, Experimental studies of shear deformation of mantle materials : towards structural geology of the mantle, *PAGEOPH*, **151**, 589–603.
- Lee, K-H. Jiang, Z. and Karato, S., 2001, A scanning electron microscope study of effects of dynam-ic recrystallization on lattice preferred orientation in olivine, *Tectonophysics*, in press.
- Paterson, M.S. and Olgaard, D.L., 2000, Rock deformation tests to large shear strains in torsion, *J. Struct. Geol.*, **22**, 1341–1358.
- Pieri, M., Kunze, K., Burlini, L., Stretton, I., Olgaard, D.L., Burg, J-P., and Wenk, H-R., 2001, Texture development of calcite by deformation and dynamic recrystallization at 1000 K during torsion experiments of marble to large strains, *Tectonophysics*, **330**, 119–140.
- Poirier, J-P., 1980, Shear localization and shear instability in materials in the ductile field, *J. Struct. Geol.*, **2**, 135–142.
- Schmid, S.M., Panizzo, R. and Bauer, S., 1987, Simple shear experiment on calcite rocks : rheology and microfabrics, *J. Struct. Geol.*, **9**, 747–778.
- Yamazaki, D. and Karato, S., 2001, A high-pressure rotational deformation apparatus to 15 GPa, *Rev. Sci. Instrum.*, in press.
- Zhang, S. and Karato, S., 1995, Lattice preferred orientation in olivine aggregates deformed in simple shear, *Nature*, **375**, 774–777.