沈み込み帯での地震波異方性とかんらん石の格子選択配向

Seismic anisotropy in subduction zones and lattice-preferred orientation of olivine

片山 郁夫(Ikuo KATAYAMA)*

Seismic anisotropy is a powerful tool for detecting the geometry and style of deformation in the Earth's interior, as it primarily reflects the deformation-induced preferred orientation of anisotropic crystals. Although seismic anisotropy in the oceanic upper mantle is generally parallel to the plate motion, the propagation direction of the fast shear-wave is oriented sub-parallel to the trench axis in several subduction zones. In this study, the distribution of seismic anisotropy in the mantle wedge is inferred from deformation mechanism: a lattice-preferred orientation and seismic anisotropy are generated by deformation via dislocation creep, but not by diffusion creep or frictional sliding. Based on the thermal structure beneath northeast Japan, deformation throughout most of the mantle wedge is inferred to be controlled by diffusion creep, and the region of dislocation creep is limited to a thin layer of 10–20 km thickness within a region of relatively high stress and low temperature located above the subducting plate and beneath the island arc crust. The variation of the seismic anisotropy in subduction systems is probably due to the change of active slip-system in olivine as a consequence of chemical and physical properties in the mantle wedge.

Keywords: Seismic anisotropy, Lattice-preferred orientation, Deformation mechanism, Subduction zone

I. はじめに

マントルを代表する鉱物であるかんらん石は弾性的な異方性を持つため、地震波の伝搬速度が結晶方位により顕著に異なる(Abramson *et al.*, 1997)。そのため、マントル内でかんらん石が定向配列していれば、地震波速度がその振動方位により異なることが期待される。そのような地震波の伝搬特性は地震波異方性とよばれ、60年代に海洋リソスフェアでの異方性が検出されて以来(Hess, 1964)、様々な地域において確認されている。Tanimoto and Anderson (1984)は全マントル規模の地震波異方性を表面波の解析により検出し、異方性の速い伝搬速度成分はプレートの運動方向にほぼ平行に向くことを見いだした。かんらん石では地震波伝搬速度が最も速いa-軸が流れの向きに配列するとの報告から(Carter and Avelallemant, 1970)、上部マントルの流れ場が基本的にプレートの運動方向と平行であると解釈されている。しかしながら、東北日本やトンガなどの沈み込み帯においては海溝と平行な横波偏向異方性が報

告されており(e.g., Smith *et al.*, 2001; Nakajima and Hasegawa, 2004; Fig. 1), プレート運動方向と垂直な異方性の成因が議論となっている。なお、東北日本では前弧域において海溝に平行な異方性が確認されるのに対し、背弧側では異方性の速い伝搬速度方向はほぼ90度回転し、沈み込み方向と平行に向くと報告されている(Nakajima and Hasegawa, 2004)。このような複雑な地震波異方性の原因としては、(1)スラブ後退や背弧拡大による複雑なマントル流動(e.g., Buttles and Olson, 1998; Wiens and Smith, 2003), (2)部分融解層に関連した異方性(e.g., Nur, 1971; Holtzman *et al.*, 2003), (3)水や温度によるかんらん石のすべり系変化(e.g., Jung and Karato, 2001; Katayama and Karato, 2006; Kneller *et al.*, 2007)など様々な説が提案されているが、未だコンセンサスが得られていないのが現状である。その理由としては、地震波異方性の解析では深さ方向の解像度がないため(震源と観測点の間、すなわちマントルウェッジを主にサンプリングしていることに疑いはないが)、異方性がどの領域に分布するのかが不明だとい

doi 10.2465/gkk.39.12

(平成21年11月14日受付, 平成21年12月1日受理)

* 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻, 〒739-8526 広島市鏡山1-3-1

* Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8526, Japan
E-mail: katayama@hiroshima-u.ac.jp

Fig. 1. Seismic anisotropy in northeast Japan (after Nakajima and Hasegawa, 2004). Trench-parallel fast shear wave splitting is observed in the forearc region, whereas the fast propagated direction rotates subparallel to the subduction direction in the backarc region.

点が挙げられる。そこで、本論文では異方性がマントルウェッジのどこに存在するかを变形メカニズムの観点から議論する。また、これまで变形実験により報告されているかんらん石の格子選択配向をレビューし、沈み込み帯で観測されている複雑な地震波異方性の成因について考察する。

II. 異方性形成メカニズム

異方性の形成メカニズムとしては、弾性的性質の異なる物質が層構造をなす場合やクラックの定向配列も挙げられるが、そのような異方性は局所的な場合が多く、ここでは格子選択配向による異方性に注目して議論を進める。結晶方位の選択配向による異方性は塑性流動により岩石が変形する場合に生じる。塑性変形のメカニズムには、主に点欠陥の拡散が支配する拡散クリープと線欠陥(転位)が支配する転位クリープがあるが、拡散クリープでは鉱物がランダムに向き等方体として振る舞うのに対し、転位クリープでは鉱物が選択的に配向し異方性を生じる。そのため、異方性の分布を調べるには変形がどの領域で転位クリープに支配されているかを決定すればよい。岩石多結晶体の変形速度(歪み速度)は流動則により、温度、圧力、応力、粒径や含水量の関数として表現でき、両者の変形メカニズムは次のように表される。

$$\dot{\epsilon} = Af_{H_2O}^r d^{-m} \sigma \exp\left(-\frac{H}{RT}\right) \quad (\text{拡散クリープ})$$

$$\dot{\epsilon} = Af_{H_2O}^r \sigma^n \exp\left(-\frac{H}{RT}\right) \quad (\text{転位クリープ})$$

ここで、 σ は応力、 T は温度、 d は粒径、 f_{H_2O} は水のフガシティー(含水量の関数)、 H は活性化エンタルピー、 R は気体定数である(圧力効果は活性化エンタルピーに含まれ、温度効果に比べ非常に小さい)。なお、転位クリープには転位の上昇が律速する場合と転位すべりが支配する場合があります、上記の転位クリープ構成則は転位の上昇によるメカニズムである。転位すべりにより変形が支配される場合はパイエルス機構とよばれ、次のように変形速度は応力の指数関数に依存する。

$$\dot{\epsilon} = Af_{H_2O}^r \sigma^2 \exp\left(-\frac{H_0}{RT}\left(1 - \left(\frac{\sigma}{\sigma_p}\right)^2\right)\right) \quad (\text{パイエルス機構})$$

σ_p はパイエルス応力であり、絶対零度での臨界応力になる。岩石のマクロな変形は、これらのうち変形速度が最も速いメカニズムに支配され、その境界条件は流動則を用いて解析することができる(流動則のパラメーターは室内変形実験により決定される)。Figure 2には、温度、粒径、応力に関する変形機構図を示す。基本的に、低応力且つ粒径が小さい場合は拡散クリープが支配的になり、応力が高く粒径が大きい場合は転位クリープが支配的な変形機構になる。地球内部は実験室の条件とは異なるが、この変形機構図を作成することにより、幅広い条件下で支配的な変形メカニズムを推定することができる。

一方、地下深部では塑性的な変形をする岩石も、浅部(低圧下)では脆性的な振る舞いに移行する。なぜなら、地下浅所では温度の低下に伴い、塑性強度が増大し岩石の破壊強度を超えてしまうためである(塑性強度は温度に非常に敏感である)。これは脆性-塑性転移とよばれ、岩石の破壊条件(クーロン・ナビエの破壊条件)と上記の流動則からその遷移領域を見積もることができる。Figure 3では、参考のため大陸リソスフェアの脆性-塑性転移条件を示す。破壊強度は圧力(垂直応力)に依存し地下浅部では低いため、岩石の変形は脆性破壊や摩擦すべりにより行なわれるが、地下深部では圧力の増加に伴い破壊強度が増加する一方、温度の上昇により塑性強度が減少するため塑性変形が容易になる。また、塑性強度は含水量(水のフガシティー)に敏感な特徴をもつため、無水と含水条件では脆性-塑性境界が異なり、含水条件ではより浅部まで塑性変形が卓越する。なお、このような強度断面図では、塑性強度として高温型のベキ乗則クリープが用いられることが多いが、遷移領域のような低温条件ではパイエルス機構が支配的になり、その場合はベキ乗則クリープに比べ塑性強度が著しく減少し、脆性-塑性境界が低圧側にシフトする点は注意が必要である(Fig. 3)。このように、岩石は低温低圧条件下では破壊や摩擦すべりによる変形が支配的になり、その場合は結晶の選択的配向による異方性は生じないことが予想される。

Fig. 2. Deformation mechanism map of wet olivine as functions of stress, grain-size, and temperature at $P = 2$ GPa. Three field of (1) diffusion creep (2) power-law dislocation creep (3) Peierls mechanism were calculated from flow law of Karato and Jung (2003) and Katayama and Karato (2008). The thick lines represent the transition of the deformation mechanism, and the thin lines represent constant strain-rates of 10^{-5} , 10^{-10} , and 10^{-15} s^{-1} .

Fig. 3. Brittle-ductile transition under wet ($C_{\text{OH}} = 1000 \text{ ppm H/Si}$) and dry conditions calculated at a strain-rate of 10^{-15} s^{-1} , and geotherm from McKenzie *et al.* (2005). Deformation is controlled by frictional sliding at shallow depth and by plastic flow at greater depths.

III. 沈み込み帯での異方性の分布域

ここでは、上記の変形機構図を東北日本での沈み込み帯条件に適用し、異方性がどこに分布するかを考察する。東北日本下のマントルウェッジの温度構造は Peacock *et al.* (2003)を採用し、粒径は 1 mm 、歪み速度は 10^{-14} s^{-1} 、含

水量は 1000 ppm H/Si と仮定し、かんらん石の流動則から拡散クリープと転位クリープどちらの変形機構が卓越するかを解析した(パイエルス機構においても変形は転位の運動に支配され異方性を生じるため、ここでは転位クリープとして一括している)。その結果、沈み込むプレートから離れたマントルウェッジの高温領域では応力が低く拡散クリープが支配的なのに対し、プレート直上やモホ面直下などの低温高応力な場においては転位クリープが支配的な変形メカニズムになることが分かる (Fig. 4)。なお、粒径や歪み速度の値を変えると、転位クリープと拡散クリープの境界条件は若干変化するが、転位クリープが沈み込むプレート直上などの低温高応力条件に集中する傾向は変わらない(含水量に関しては、どちらのメカニズムにも同程度の寄与があるためほとんど影響しない)。したがって、沈み込み帯で観測される地震波異方性はマントルウェッジ全域に分布するわけではなく、非常に薄い領域 ($10\text{--}20 \text{ km}$ 程度の厚さ)に集中していることが予想される (Fig. 4)。

転位クリープでの結晶選択配向により生じる異方性は岩石が蓄積する歪みにも依存する。なぜなら、結晶の集中度は歪み量により変化し、歪みの増加とともに結晶の特定方位が流れの方向に集中し異方性が強くなるからである (e.g., Zhang and Karato, 1995)。二次元の数値計算によると、マントルウェッジの変形が沈み込むプレート運動に誘発される場合、剪断歪みは主にプレート直上に集中する (e.g., McKenzie, 1979)。そのため、マントルウェッジでの異方性は沈み込むプレート直上の歪み集中帯に分布することが期待される。なお、マントルウェッジ先端のような低圧低温領域では、変形は脆性破壊に支配され異方性は生じない。

Fig. 4. Distribution of anisotropic layer in the mantle wedge beneath northeast Japan, as inferred from dominant deformation mechanisms (after Katayama, 2009). Thermal structure is taken from Peacock *et al.* (2003), and the boundaries are calculated from the rate-controlling flow law assuming a strain-rate of 10^{-14} s^{-1} , grain-size of 1 mm, and water content $C_{\text{OH}} = 1000 \text{ ppm H/Si}$. Deformation throughout most of mantle wedge occurs via diffusion creep: anisotropic region dominated by dislocation creep limited to thin layer located above subducting plate and beneath island arc crust.

そのような薄い異方性の存在を検証するには異方性の遅延時間が有効である。遅延時間は異方性物質を通過した際に別れる二つの横波の時間差になり、次のように異方性の強度と厚さに依存する。

$$dt = \frac{AVs}{\langle Vs \rangle} L$$

ここで、 dt は遅延時間、 AVs は異方性強度、 $\langle Vs \rangle$ は横波の平均速度、 L は異方性の厚さである。東北日本で報告されている異方性の遅延時間は $0.06\text{--}0.26$ 秒であり (Nakajima and Hasegawa, 2004), 実験データからかんらん石の異方性強度と横波平均速度を用いると、異方性の厚さは $5\text{--}25 \text{ km}$ と見積もられ、変形メカニズムから推定される薄い異方性の存在 ($10\text{--}20 \text{ km}$) と一致する。このように、マントルウェッジでの異方性は沈み込むプレート直上の薄い領域に集中すると期待され、その場合、マントル流動方向はプレート沈み込み方向に制約されるため、沈み込み帯での横波偏向異方性は複雑な流動パターンでは説明することができない。また、異方性が部分融解層に関係するとの説も、海溝に平行な異方性は前弧域において確認されるため、メルトの存在で説明することは難しい。では、東北日本などで確認される地震波異方性が前弧と背弧で異なるのはなぜだろうか？ 次の章では、かんらん石の格子選択配向への水や温度の効果が注目し、沈み込み帯で確認される地震波異方性の変化について検討してみる。

IV. かんらん石の格子選択配向と地震波異方性の多様性

転位クリープにより塑性変形した岩石では、個々の結晶

の向きが特定の方向に集中するが(格子選択配向)、どの方向に向くかはすべり系(slip system)に支配される。かんらん石のすべり系に関しては、Carter and Avelallemant (1970)が先駆的な研究をしており、すべり系は温度や応力に依存すると報告している。彼らは高温高压変形装置(ピストンシリンダー型)を用いて異なる温度応力条件でかんらん石を変形させ、高温低応力下では $[100](010)$ すべり系が卓越し、低温高応力下ではすべり方向が $[001]$ 方向に変化することを示した。この結果によると、上部マントル条件では主に $[100](010)$ のすべり系が卓越するため異方性の速い伝搬速度成分は流れの方向を指すことになり、地震波異方性からマントルの流動センスを推定するのに用いられた。

一方、最近の変形実験によると、結晶中に微量に取り込まれる水(水酸基)がかんらん石のすべり系に影響を与えるとの報告がある。Jung and Karato (2001)はかんらん石格子選択配向への水の効果を高压変形実験により調べ、無水の条件ではCarter and Avelallemantと同様に $[100](010)$ すべり系が安定なのに対し、高含水量では $[001](100)$ や $[001](010)$ のすべり系に変化することを見いだした。この成果は、すべり系が応力や温度などの物理量に依存しマントル条件下では $[100](010)$ すべり系が支配的であるとの従来の考えに一石を投じた。唐戸グループではこの結果を基に、かんらん石のすべり系が含水量及び応力でどのように変化するかを系統的に調べ、かんらん石のすべり系図を作成した(Fig. 5)。これら様々な条件下で報告されているすべり系のうち $[001](010)$ (B-type)は他のすべり系とは異なる特徴をもつ。なぜなら、B-typeでは地震波伝搬速度の最も速いa軸が流れに対し垂直に向くため、地震波の速い振動方向が流れに対し垂直になることが期待されるからで

Fig. 5. Olivine fabric diagram as function of stress and water content at $P=2 \text{ GPa}$ and $T=1200\text{--}1300^\circ\text{C}$ after Jung and Karato (2001) and Katayama *et al.* (2004).

Fig. 6. A schematic diagram showing the anisotropic pattern for each olivine fabric. The flow-parallel anisotropy is produced by A-, E-, C-type fabric, whereas the flow-normal anisotropy is produced by B-type olivine fabric; the latter case causes the trench-parallel seismic anisotropy.

Fig. 7. Olivine fabric diagram in temperature and stress space at a constant pressure (2.0 GPa) under water-saturated condition (after Katayama and Karato, 2006). The B-C transition is sensitive to temperature, and B-type will be dominant under low stress when temperature is as low as 800 °C. The extrapolation of experimental data (square symbols) is consistent with the naturally deformed olivine fabrics from the plate-convergent regions.

ある(それ以外のすべり系では速い振動方向は流れに対し平行になると予想される; Fig. 6)。すなわち、B-typeのかんらん石すべり系がマントルウェッジにおいて安定であれば、東北日本などで報告されている海溝に平行な(プレート運動方向に垂直な)異方性を説明することができる。しかしながら、B-typeすべり系をマントル条件に

用するには一つ重要な問題点がある。それは Figure 5 を見ても分かるように、B-type は高応力条件(> 300 MPa)に限られるため、実際のマントル応力下(~10 MPa 以下)には適用できないと考えられるからである。

しかし、これまでの実験は高温条件(1200–1300 °C)に限られていたため、東北日本などの冷たい沈み込み帯の条件を再現できていない可能性がある。そこで私たちは B-type すべり系に注目し、その出現条件の温度効果を調べた。その結果、低温では B-type の格子選択配向は低応力下において出現し、800 °C 以下ではマントルの応力条件でも B-type すべり系が卓越することを示した(Fig. 7)。また、天然のかんらん石ファブリックについても、アルパイン型の沈み込みに関連したかんらん岩体では、ノルウェーのように高温の場合は C-type のすべり系が卓越するのに対し(Katayama *et al.*, 2005)、四国三波川帯東赤石岩体のように低温で変形したかんらん岩では B-type の格子選択配向が出現すると報告されている(Mizukami *et al.*, 2004)。この天然のファブリックは実験結果と調和的であり(Fig. 7)、水に富んだマントルでは低温領域においては B-type のすべり系が卓越し、海溝に平行な横波偏向異方性を形成できることを意味している。また、かんらん石のすべり系は上述のように温度や含水量に依存するため、物理化学条件が変わることによりすべり系が変化し、形成される異方性の特徴が異なることが予想される。

V. 沈み込み帯での異方性モデル

沈み込み帯で観察される異方性は地域により異なり、これはマントルウェッジの温度構造や含水量の違いを反映していると考えられる。沈み込み帯では、沈み込むプレートの年代により温度構造が異なる。例えば、東北日本のように古い太平洋プレートが沈み込む領域では、沈み込むプレートとその周辺では温度が低く、プレート上面温度は深さ 100 km でも 500 °C 程度である(Peacock and Wang, 1999)。そのため、前弧域では含水鉱物などの脱水分解により水をマントルウェッジへ供給するのは難しいが、沈み込む地殻物質中の間隙水の崩壊などにより少量の水がマントル内に供給される場合、低温且つ含水条件(> 200 ppm H/Si)となり B-type のかんらん石選択配向が発達し、海溝に平行な横波偏向異方性を生じる。また、東北日本の背弧側では異方性の方向が沈み込み方向に平行に向くが、これは火山フロントを境にマントル中の水がマグマに分配し枯渇するため、かんらん石のすべり系が低含水量で卓越する A-type や E-type に変化することで説明できる(Fig. 8a)。我々のグループでは数値シミュレーションにより、マントルウェッジで安定するすべり系を解析しているが、その結果もほぼ火山フロントを境に B-type から他のすべり系へ変化する結果が得られている(Kneller *et al.*, 2007)。

一方、カスケディアなど非常に若いプレートが沈み込む場では、海溝に平行な異方性は確認されず、前弧・背弧

(a) cold subduction zone (e.g. NE Japan)

(b) warm subduction zone (e.g. Cascadia)

Fig. 8. Schematic diagrams for the interpretation of subduction zone anisotropy (after Katayama and Karato, 2006). (a) A cold subduction zone where an old plate is subducting, such as northeast Japan. (b) A warm subduction zone where a young plate is subducting, such as the Cascades. The variations of seismic anisotropy are due to the change of active olivine slip-system in the mantle wedge.

領域ともプレート沈み込み方向に平行な地震波異方性が報告されている (Currie *et al.*, 2004)。これは、若いプレートが沈み込む周辺では温度が比較的高いため、水がマントルウェッジへ供給されても、B-type でなく高温高含水量で安定な C-type のすべり系が卓越するためと考えられる。なお、カスケディアにおいても火山フロントを境に低含水量で安定なすべり系に変化していることが予想されるが、その場合は速い伝搬速度方向は C-type と変わらず、流動方向 (プレート運動方向) に平行に向くことが期待される (Fig. 8b)。このように、沈み込み帯で観測される地震波異方性の特徴は、かんらん石の選択配向 (すべり系) がマントルウェッジの含水量や温度構造に伴い変化することで統一的に説明することができる。

ここまでは、主にかんらん石の選択配向による異方性を議論してきたが、琉球弧などで報告されている地震波異方性のかんらん石の選択配向だけでは説明することができない。なぜなら、琉球弧では遅延時間が 1-2 秒という非常に強い異方性が確認されているが (Long and van der Hilst, 2006)、かんらん石の選択配向による異方性では、たとえマントルウェッジ全域が異方性の原因となったとしても不

十分なためである (かんらん石による異方性では、1-2 秒の遅延時間は 100-200 km の厚さが必要となる)。マントル物質が含水化して形成される蛇紋石は層状ケイ酸塩鉱物のため、非常に強い異方性をもつ。そのため、琉球弧で報告されている異方性はプレート境界上に存在する蛇紋石の選択配向によるとのモデルが提唱されている (Katayama *et al.*, 2009)。

VI. おわりに

室内実験の出発点は、まず観察事実にある。ここでは沈み込み帯の地震波異方性を説明するために行なった変形実験を紹介したが、対象が何であれ観測事実から仮説を立てそれを検証するスタイルは変わらない。また、実験はいくらでも仮想的な条件で行なえるが、それが実際に地球内部で起きている現象かは自明ではない。実験室で起きている現象が自然界に適用できるかは、フィールド調査や天然試料の観察と比較することで検証できる。観測で得られた事実を仮想的なモデルではなく、より現実的なモデルにより説明できるよう、今後も実験やフィールド調査をとおして、沈み込み帯で起きる様々な現象の解明に取り組んでいきたい。

謝 辞 本研究で行なった変形実験についてはエール大学の唐戸俊一郎教授から指導して頂いた。また、学生・ポストドク時代を通して丸山茂徳教授、鳥海光弘教授からご指導頂いた。広島大学に赴任してからは嶋本利彦教授、安東淳一氏に多岐に渡り研究協力を頂いている。小畑正明教授には本研究奨励賞に推薦して頂いた。また、これまで多くの諸先輩方、研究仲間にもご指導ご鞭撻頂いた。この場を借りて深く御礼申し上げたい。なお、研究奨励賞受賞者として本稿を執筆する機会を与えて頂いた日本鉱物科学会に深く感謝致します。

引用文献

- Abramson, E.H., Brown, J.M., Slutsky, L.J. and Zaug, J. (1997): The elastic constants of San Carlos olivine to 17 GPa. *J. Geophys. Res.*, **102**, 12253-12263.
- Buttles, J. and Olson, P.A. (1998): A laboratory model of subduction zone anisotropy. *Earth Planet. Sci. Lett.* **164**, 245-262.
- Carter, N.L. and Avé Lallemant, H.G. (1970): High temperature deformation of dunite and peridotite. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **81**, 2181-2202.
- Currie, C.A., Cassidy, J.F., Hyndman, R. and Bostock, M.G. (2004): Shear wave anisotropy beneath the Cascadia subduction zone and western North America craton. *Geophys. J. Int.*, **157**, 341-353.
- Hess, H.H. (1964): Seismic anisotropy of the uppermost mantle under oceans. *Nature*, **203**, 629-631.
- 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.
- Karato, S. and Jung, H. (2003): Effects of pressure on high-temperature dislocation creep in olivine. *Phil. Mag.*, **A 83**, 401–414.
- Katayama, I. (2009): Thin anisotropic layer in the mantle wedge beneath northeast Japan. *Geology*, **37**, 211–214.
- Katayama, I., Hirauchi, K., Michibayashi, K. and Ando, J. (2009): Trench-parallel anisotropy produced by serpentine deformation in the hydrated mantle wedge. *Nature*, **461**, 1114–1117.
- 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 Planet. Int.* **157**, 33–45.
- Katayama, I. and Karato, S. (2008): Low-temperature, high-stress deformation of olivine under water-saturated condition. *Phys. Earth Planet. Int.*, **168**, 125–133.
- Katayama, I., Karato, S. and Brandon, M. (2005): Evidence of high water content in the deep upper mantle inferred from deformation microstructures. *Geology*, **33**, 613–616.
- Kneller, E.A., van Keken, P.E., Katayama, I. and Karato, S. (2007): Stress, strain, and B-type olivine fabric in the fore-arc mantle: sensitivity tests using high-resolution steady state subduction zone models. *J. Geophys. Res.*, **112**, B04406.
- McKenzie, D. (1979): Finite deformation during fluid flow. *Geophys. J. Royal Ast. Soc.*, **58**, 689–715.
- McKenzie, D., Jackson, J. and Priestley, K. (2005): Thermal structure of oceanic and continental lithosphere. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **233**, 337–349.
- Mizukami, T., Simon, W. and Yamamoto, J. (2004): Natural examples of olivine lattice preferred orientation patterns with a flow-normal a-axis maximum. *Nature*, **427**, 432–436.
- Long, M.D. and van der Hilst, R.D. (2006): Shear wave splitting from local events beneath the Ryukyu arc: Trench-parallel anisotropy in the mantle wedge. *Phys. Earth Planet. Inter.* **155**, 300–312.
- Nakajima, J. and Hasegawa, A. (2004): Shear-wave polarization anisotropy and subduction-induced flow in the mantle wedge of northeastern Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **225**, 365–377.
- Nur, A. (1971): Effects of stress on velocity anisotropy in rocks with cracks. *J. Geophys. Res.*, **76**, 2022–2034.
- Peacock, S.M. (2003): Thermal structure and metamorphic evolution of subducting slabs. In *Inside the Subduction Factory* (Eiler, J. Ed.). Amer. Geophys. Union, *Geophys. Monogr.*, Washington DC, **138**, 7–22.
- Peacock, S.M. and Wang, K. (1999): Seismic consequences of warm versus cool subduction metamorphism: examples from southwest and northeast Japan. *Science*, **286**, 937–939.
- Smith, G.P., Wiens, D.A., Fisher, K.M., Dorman, L.M., Webb, S.C. and Hildebrand, J.A. (2001): A complex pattern of mantle flow in the Lau Backarc. *Science*, **292**: 713–716.
- Tanimoto, T. and Anderson, D.L. (1984): Mapping convection in the mantle. *Geophys. Res. Lett.*, **11**, 287–290.
- Wiens, D.A. and Smith, G.P. (2003): Seismological constraints on structure and flow patterns within the mantle wedge. In: *Inside the Subduction Factory* (Eiler, J. Ed.). Amer. Geophys. Union, *Geophys. Monogr.*, Washington, DC, **138**, 59–81.
- Zhang, S. and Karato, S. (1995): Lattice preferred orientation of olivine aggregates deformed in simple shear. *Nature*, **375**, 774–777.