超高压下における応力場によるオリビンの選択配向

東北大学理学部地球物質科学科* 山崎大輔†・加藤 工・大谷栄治

Preferred Orientation of Olivine in Stress Field under Ultra-high Pressures

Daisuke YAMAZAKI, Takumi KATO and Eiji OHTANI

Faculty of Science, Tohoku University Aoba, Sendai 980, Japan

†Geological Institute, Faculty of Science, University of Tokyo Hongo 7-3-1,
Bunkyo, Tokyo 113, Japan

(Received September 2, 1995; Accepted March 5, 1996)

Deformation experiments using a multianvil apparatus have been performed to investigate the preferred orientation of olivine aggregates at confining pressures of 6 GPa and 9 GPa, temperature of 1200°C and differential stresses of 80–400 MPa. In this study, the lattice preferred orientations are produced by recrystallization (grain boundary migration) driven by dislocation energy. In a compressional stress field, c-axis concentrates on the plane perpendicular to the compressional direction, whereas a- and b-axes rotate with time at high temperature, and then a- and b-axes approach to the direction of an angle of about 45° from the compressional direction. In a tensional stress field, a- and c-axes concentrate on the plane perpendicular to the tensional direction and b-axis concentrates toward the tensional direction. The preferred orientation at the confining pressure of 9 GPa is weaker than that observed at confining pressure of 6 GPa. The magnitude of the anisotropy on P-wave velocity in most samples are 2–4%, which is nearly equivalent to that observed in the upper mantle.

Key words: High pressure, Differential stress, Preferred orientation, Dislocation density, Anisotropy.

§1. 序 論

最近の地震学的研究は、地球内部に地震波速度の異方性の存在を確認した [例えば, ANDERSON and DZIEWONSKI (1984), TANIMOTO and ANDERSON (1984)]. 特に, 上部マントルでの地震波速度の異方性は、古くからマントル主要構成鉱物のオリビンの選択配向に起因すると考えられている [例えば, HESS (1964)]. 従って, 実験的に上部マントルの温度圧力条件を再現し, 応力場でのオリビンの選択配向を研究することは, 地震波速度の異方性からマントルの運動様式を理解するために重要である.

選択配向の実験的研究はこれまで様々な研究者によって行われている [例えば, KARATO (1988), TORIUMI and KARATO (1985), TSUKAHARA *et al.* (1976)]. しかし, これらの実験はいずれも 1 GPa 程度以下の比較的低圧力

での実験である. 一方, BUSSOD *et al.* (1993) は, マルチアンビル型高圧発生装置を用い, より高い圧力を実現し, 単結晶オリビンの変形実験を行った. しかし, マントル内あるいはスラブ内の応力状態の議論には, 上部マントル条件下の圧縮, 引っ張り応力場あるいは単純ずり応力場での多結晶体の挙動を調べる必要がある. 多結晶体の選択配向には, 二種類のメカニズムが提唱されている. 一つは, 金属学の分野で比較よく研究されてきた結晶のすべり運動に起因する結晶格子の回転であり, Taylor-Bishop-Hill モデルと呼ばれる [LISTER (1982), TAYLOR (1938)]. このメカニズムでは, 変形への幾何学的な拘束条件及びすべり系が結晶軸の方位を決定する. つまり, 結晶が変形する際すべり運動によって変形し, その変形は幾何学的に求められている形状を満足するように変形, 回転する. 多結晶体において, 各結晶に求められる形状が同じとき (TAYLOR モデル), 結晶格子の回転を伴う選択配向を引き起こす. もう一つのメカニズムは, 変形時の粒界移動などの再結晶に起因するモデルで

* 〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉

† 現在, 東京大学理学部地質学教室

〒113 東京都文京区本郷 7-3-1

ある。結晶内部に主に転位として蓄積されるエネルギーが個々の結晶によって異なり、転位密度の低い結晶、すなわち低エネルギーの結晶が粒成長して高エネルギーの結晶を消費していく。この過程で、低エネルギーの結晶に定方位性が存在するとき、粒界移動などの再結晶化の結果として選択配向が生じる。一般に、応力場において結晶の方位と応力軸の方向によって貯えられるエネルギーが異なるので、応力軸の方向が選択配向を決定する [KARATO (1987a)]。

我々は、出発物質にオリビン多結晶を用い、マルチアンビル型高圧発生装置により、上部マントル深部の温度・圧力条件において実験を行った。本研究の目的は、一軸圧縮と一軸引っ張り応力場の発生における選択配向様式の決定と、それに対する時間・応力条件・圧力の影響を明らかにすることである。

§2. 実験方法

2.1 出発物質

粉末 (粒径 $3\sim 4\mu\text{m}$) にした San Carlos olivine (Fo_{90-91}) を、圧力 6 GPa、温度 1200°C で 6 時間保持し、準静水圧下で焼結した。この試料は、有意な選択配向をしていないことをユニバーサルステージを用いて確認した。この試料の転位密度は $1\times 10^7/\text{cm}^2$ 、粒径は $30\mu\text{m}$ であり、再結晶粒径差応力計 [KARATO *et al.* (1980)] 及び転位密度差応力計 [KOHLESTEDT and GOETZE (1974)] から推定される応力の大きさは 120 MPa 及び 30 MPa である。変形実験の出発試料は、試料封入時点での選択配向の影響を取り除くため、上記のように焼結したオリビン多結晶である。

2.2 高温高圧実験

圧力の発生には東北大学理学部の MA8 型高圧発生装置を使用した。アンビルは一辺 26 mm 立方体のタングステンカーバイト製であり、アンビル先端のサイズは 8 mm である。圧力較正は、圧力定点物質の Bi の常温での I-II 転移 (2.55 GPa)、Bi の III-V 転移 (7.7 GPa) に基づいた。この圧力較正は常温での値であり、実験を行う高温では ± 0.3 GPa 程度の誤差を含む。温度測定には、アルメル・クロメル熱電対を用いた。試料部構成は、Fig. 1 に示す。圧力媒体には一辺 14.1 mm の正八面体のマグネシア (MgO)、ヒーターにはグラファイト、断熱材としてジルコニア (ZrO_2) を用いている。オリビン試料はグラファイトカプセルに封入されている。これらの部品は電気炉により 800°C で 2 時間、その後 200°C で 10~24 時間オープンにより十分に乾燥され、実験に用いられた。試料内部の温度勾配は中心部で 1200°C のとき両端部で 1150°C である。差応力の発生には、ヒーター

Fig. 1. Specimen assemblies for (a) hydrostatic experiments, (b) uniaxial compressional experiments and (c) uniaxial tensile experiments (see text).

Fig. 2. Load and temperature variation with time for experiments of (a) heating with a constant load and (b) heating with a load increasing with time.

Table 1. Experimental conditions and results at 1200°C and 6 and 9 GPa.

Run No.	Stress condition	P-T path*	Length of piston mm	Pressure GPa	Time hour	Strain**	Aspect ratio***	Grain size μm	Dislocation density ×10 ⁸ /cm ²	Differential stress**** MPa	Differential stress***** MPa
HP†	hydrostatic	a		6	6.0		1.1	30	0.1	120	30
CO-15	compression	a	3.1	6	0.0	0.21	1.4	12	2.5	260	160
CO-7	compression	a	3.1	6	1.5	0.20	1.5	14	8	220	280
CO-6	compression	a	3.1	6	5.0	0.23	1.5	14	7	220	260
CO-5	compression	a	3.1	6	15.0	0.18	1.4	16	3.5	200	190
CO-10	compression	a	1.5	6	5.0	0.04	1.3	15	2.5	210	160
CO-14	compression	a	0.5	6	5.0	0.07	1.4	15	2	210	140
CO-11	compression	a	3.1	9	5.0	0.17	1.4	14	6	220	240
CO-16	compression	b	3.1	6	5.0	0.24	1.4	14	3	220	170
TE-7	tension	a		6	5.0	-0.08	1.3	21	0.5	160	70
TE-5	tension	a		6	15.0	-0.06	1.3	21	0.5	160	70

* See Fig. 2

** $\epsilon = (l_0 - l)/l_0$ l_0 : length of sample before experiment
 l : length of sample after experiment

*** a/b a: short axis, b: long axis

**** $Dg = 8.3 \times 10^3 \sigma^{-1.18}$ (KARATO *et al.*, 1980)***** $\rho_d = 10^4 \sigma^2$ (KOHLESTEDT and GOETZE, 1974)Dg: Grain size, ρ_d : Dislocation density, σ : Differential stress

† Starting material for deformation experiments (hot-pressed olivine aggregates)

内部の構成材料の物性の違いを利用した。すなわち、準静水圧条件は試料カプセルの周囲全体を NaCl で囲んで実験した (Fig. 1a)。一軸圧縮応力条件の実験は、圧縮軸方向をアルミナ (Al_2O_3) のピストン、周囲をソーダガラス (SiO_2 : 75 wt%, Al_2O_3 : 1%, MgO : 4%, CaO : 7%, Na_2O : 11%, K_2O : 1%) とする試料構成を採用した (Fig. 1b)。ソーダガラスは、常温で十分な強度をもち、軟化点 (550°C: 常圧) より高温で流動する。従って、高温でアルミナのピストンが進行し、一軸圧縮応力が発生する。アルミナのピストンの長さを変化させることによって、発生する差応力を変化させた。一軸引っ張り応力は、引っ張り軸方向をソーダガラスあるいは粉末にしたソーダガラスピストンとし、周囲をマグネシアとすることによって発生させた (Fig. 1c)。差応力の発生を確認するため、塑性変形しやすいタンタル (Ta) を試料として前述の試料部構成を用いて予備実験を行った。その結果、一軸圧縮予備実験では 6 GPa において加熱する事によって応力軸方向の歪みが 0.31→0.38 と増加し、一軸引っ張り実験では 0.25→0.12~0.18 へと減少し、差応力の発生を確認した。変形実験は、以下の a, b の二通りの方法で行った。すなわち、(a) 目的の圧力 (6 GPa または 9

GPa) まで室温で加圧し、その後 1200°C まで加熱 (昇温速度: 180°C/min) し、数時間保持した後、加熱電力を遮断することにより急冷する方法 (Fig. 2a), (b) 目的の圧力まで室温で加圧し、一定加重で 1200°C まで加熱、温度を保持しつつ、さらに加重を増した後急冷する方法である (Fig. 2b)。その後、12 時間かけて脱圧し試料を回収した。実験条件を Table 1 に示す。

2.3 試料の解析

選択配向の解析には、ユニバーサルステージを用いた。回収した試料を薄片にし、試料の中心部から、結晶方位の測定が可能な粒径 (10 μm 以上) を持つ、可能な限り隣接した 100 粒子を選び結晶方位を測定した。この際、測定した二軸の角度より求められた測定精度は、±4°である。

転位は、酸化デコレーション法 (回収した試料を電気炉を用いて 900°C で 45 分間熱処理 [KOHLESTEDT and VANDER SANDE (1975)]) を施した試料について、光学顕微鏡と走査型電子顕微鏡 [KARATO (1987b)] によって観察した。使用した走査型電子顕微鏡は、日本電子製 (JEOL8800M) で、測定条件は、加速電圧 20.0 kV, 電流 1×10^{-9} A である。

Fig. 3.

§3. 実験結果

歪み, アスペクト比, 粒径, 転位密度の測定結果を Table 1 に示す. 歪み量は変形実験前の試料と実験後の試料の応力軸方向の長さの変化から見積もった. アスペクト比(長軸/短軸)と粒径は, 結晶方位を測定した 100 粒子の平均値である. 転位密度は, 100 粒子の内の 5~20 粒子の平均値である. 差応力の見積もりについて, 様々な種類の地質差応力計が提唱されている [例えば, KARATO *et al.* (1980), KOHLSTEDT and GOETZE (1974), ROSS *et al.* (1980)]. Table 1 には, KARATO *et al.* (1980) の再結晶粒径差応力計及び KOHLSTEDT and GOETZE (1974) の転位密度差応力計を用いて見積もった差応力を示している. 両者から算出された差応力の違いは, 差応力計の誤差と再結晶の平衡状態からのずれによると考えられる. WANG *et al.* (1988) によると, 転位は実験の

最高温度圧力で生成され, 温度圧力履歴に依存しない. 従って, 本実験においては, 転位密度差応力計を採用する.

Fig. 3 に示すように一軸圧縮の実験では, a 軸が応力軸と平行な方向と応力軸と 45° をなす方向の間に集中し, b 軸には特に顕著な傾向は見られなく, c 軸は応力軸と垂直な方向に集中するという選択配向がみられる. このとき, 転位密度は, $2 \times 10^8 \sim 8 \times 10^8 / \text{cm}^2$ である. セル内部のアルミナピストンを短縮 (CO-6: 3.1 → CO-10: 1.5 → CO-14: 0.5 mm) させることによって, 転位密度は減少 (CO-6: $7 \times 10^7 \rightarrow$ CO-10: $2.5 \times 10^7 \rightarrow$ CO-14: $2 \times 10^7 / \text{cm}^2$) し, 差応力の減少が確認される (Table 1). また, 転位密度の高い結晶の境界に転位密度の非常に低い粒径 $2 \mu\text{m}$ 程度の結晶が存在する (Photo. 1 = Run No. CO-6). これは, エネルギーの高い結晶粒界に核生成した結晶と

Fig. 3.

考えられる。Photo. 2 (=Run No. CO-5) は Photo. 1 の試料の実験条件からさらに 10 時間加熱続けた試料の写真である。転位密度の低い結晶の粒径は $7\mu\text{m}$ 程度まで成長している (Photo. 2)。本実験から得られた試料では、低転位密度の結晶は凸型の粒界をもち、成長過程にあるという解釈 [KARATO (1988)] と調和的である。従って、Run No. CO-6 で観察された転位密度の低い結晶と、Run No. CO-5 で観察された転位密度の低い結晶との関係は、転位密度の低い結晶が転位密度の高い結晶を消費するように成長していく過程を表している。また、圧力による選択配向の様式の変化 (Run No. CO-6 と Run No. CO-11 を比較) は認められない。差応力の緩和を防ぐため、温度を保持しつつ 5 時間でさらにプレス荷重を加えて圧力を 6 GPa から 6.3 GPa まで上昇させた実験の選択配向の様式にも変化が認められない (Run No. CO-6 と Run No. CO-16 を比較)。

Fig. 4 と Fig. 5(a), (b) にみられるように、一軸引っ張り実験では、a 軸と c 軸が引っ張り軸と垂直方向に、b 軸が引っ張り軸と平行方向に集中する。Run No. TE-5 の実験において、転位密度の高い結晶と低い結晶の選択配向の相違を Fig. 5 に示す。Fig. 5(b) は測定した全ての結晶の配向を示し、Fig. 5(c) は転位密度が低い結晶 49 個について、Fig. 5(d) は転位密度が高い結晶 51 個について示した。転位密度が高い結晶は、比較的均質に分布しているのに対して、転位密度が低い結晶は、強い選択配向を示し、全体の選択配向の様式と同様な傾向を示す。すなわち、転位密度の低い結晶が、全体の選択配向を決めている。Run No. CO-5 の結果から得られたように、再結晶の過程で、転位密度の低い結晶が、転位密度の高い結晶を消費していくように粒界移動する。その結果、転位密度の低い結晶の方が優勢となり、選択配向が形成される。

Fig. 3.

§4. 考 察

4.1 選択配向のメカニズムおよび様式

KARATO (1987a) は、粒界の移動速度と結晶全体の歪み速度との大小関係から、すべり転位による選択配向が支配的な領域と再結晶による選択配向が支配的な領域を示した。本実験は、温度 1200°C、差応力 $10 \sim 10^3$ MPa なので再結晶による選択配向が支配的な領域 (Fig. 6) となる。転位密度と選択配向の関係もこの選択配向形成メカニズムと調和的である。Fig. 5 に示されるように転位密度の低い結晶は転位密度の高い結晶に比較して強い選択配向が見られる。従って、本実験での高温高圧下での選択配向のメカニズムは、転位の持つエネルギーを駆動力とした再結晶化であると考えられる。

圧縮実験から、a 軸が応力軸と平行な方向と応力軸と 45 をなす方向の間に集中し、b 軸には特に顕著な傾向は見られなく、c 軸は応力軸と垂直な方向に集中すると

いう選択配向が得られた。従って、実験の温度・圧力・応力条件では、a 軸が圧縮軸に対して 45 方向をもつ結晶が転位密度の増加の最も低い方位である。一方、引っ張り実験では a 軸と c 軸が引っ張り軸と垂直方向に、b 軸が引っ張り軸と平行方向に集中する。よって、b 軸が圧縮軸に対して垂直方向をもつ結晶が転位密度の増加の最も低い方位である。また、KARATO (1988) は、圧縮実験において a 軸と c 軸が圧縮軸と垂直に、b 軸が圧縮軸と平行になるという結果を得た。本実験結果との相違についての考察は後述する。

4.2 試料の弾性波速度

選択配向の存在は、弾性波速度の異方性を生じる。ここでは、試料全体としての弾性波速度の異方性を考察する。単結晶の任意の方向の弾性波速度は、弾性定数と密度が与えられれば弾性体の運動方程式と波動方程式を組み合わせることによって得られる [井田・水谷 (1978)].

Fig. 3. Equal-area projections on the lower hemisphere of a-, b- and c-axes of olivine crystals in deformed specimens. A couple of arrows show the direction of compressional stress. Kamb's (1959) method is used in contour maps. (a) CO-15, (b) CO-7, (c) CO-6, (d) CO-5, (e) CO-10, (f) CO-14, (g) CO-11, (h) CO-16 ($A=0.08$, $E=8.3$, $\sigma=2.8$).

各弾性定数の値と密度を Table 2 に示す。単結晶の任意の方向の弾性波速度が求められているので、多結晶体中の各結晶の粒径と結晶方位から多結晶体全体の任意の方向の弾性波速度を求めた。

$$V_{\text{sample}} = \sum l_i / \sum (l_i / V_i) \quad (1)$$

ただし、 V_{sample} はある方向の試料全体の弾性波速度、 l_i は i 番目の結晶の粒径、 V_i は i 番目の結晶のある方向の弾性波速度である。Fig. 7 に、代表的な試料の、方向による縦波 (P 波) の弾性波速度を示す。単結晶の弾性波速度の値は、6 GPa, 1200°C では、 $a=10.01$, $b=7.82$, $c=8.51$ km/s であり、9 GPa, 1200°C では、 $a=10.27$, $b=8.11$, $c=8.77$ km/s である。

一軸圧縮の実験から得られた試料では、弾性波速度の最大値を示す方向はおおよそ応力軸と平行な方向であり、

逆に、一軸引っ張りの実験から得られた試料では応力軸と垂直な方向である。計算された弾性波速度の値は、6 GPa の試料でおよそ 8.4~8.9 km/s であり、9 GPa の試料で 8.8~9.1 km/s である (Fig. 7)。

ここで、弾性波速度の異方性の大きさを表すパラメーターとして異方度 A を次のように定義する。

$$A = (V_{\text{max}} - V_{\text{min}}) / V_{\text{average}} \times 100 \quad (2)$$

ただし、 V_{max} は弾性波速度の最大値、 V_{min} は最小値、 V_{average} は平均値 $((V_{\text{max}} + V_{\text{min}}) / 2)$ である。等方体のとき異方度は 0 となり、すべての結晶が定配列したとき異方度は最大になる。ただし、オリビンの a, b, c 軸の弾性波速度を比較すると a 軸の弾性波速度が突出して大きい。従って、a 軸の選択配向が主として本実験試料中の弾性波速度異方性を決定する。Table 3 に各試料の最大弾性

Fig. 4. Equal-area projections on the lower hemisphere of a-, b- and c-axes of olivine crystals in deformed specimens. A couple of arrows show the direction of tensional stress ($A=0.08$, $E=8.3$, $\sigma=2.8$, Run No. TE-7).

Fig. 5. Equal-area projections on the lower hemisphere of a-, b- and c-axes of olivine crystals in deformed specimens (Run No. TE-5). A couple of arrows show the direction of tensional stress. (a) Solid and open circles represent grains with low and high dislocation density. (b) All grains are plotted ($A=0.08$, $E=8.3$, $\sigma=2.8$). (c) Grains with low dislocation density are plotted ($A=0.16$, $E=7.8$, $\sigma=2.6$). (d) Grains with high dislocation density are plotted ($A=0.16$, $E=8.2$, $\sigma=2.6$).

Photo. 1. A back-scattered electron image of a scanning electron microscope of a decorated sample (Run No. CO-6). Small grains with low dislocation density locate near the grain boundaries between large grains with high dislocation density.

Photo. 2. A back-scattered electron image of a scanning electron microscope of a decorated sample (Run No. CO-5). The small grains with low dislocation density have grown up to about 7 μm.

波速度, 最小弾性波速度を示す。CO-15, CO-6, CO-16 では選択配向が強く, 大きな異方度を示す。一方, CO-14, TE-5 では, 最大弾性波速度と最小弾性波速度の差が小さく異方度は低い。CO-11 は 9 GPa の実験であるが, 6 GPa と 9 GPa の弾性定数を代入し異方度を計算した。その結果 9 GPa の方が多少異方度が低くなっている。従って, それぞれの弾性定数の圧力依存性の相違により, 選択配向の様式・強さが全く同じでも, 圧力によって異方度が異なる。

4.3 選択配向の時間変化

Fig. 8 の横軸は応力軸からの角度, 縦軸は結晶を球面投影したときの単位面積当たりの結晶軸の本数である。一軸圧縮, 高差応力場 (高転位密度) での時間変化によ

Fig. 6. A lattice preferred-orientation mechanism-map for olivine under dry condition [modified after KARATO (1987)]. The heavy lines show the transition conditions between the dislocation glide dominating and the grain boundary migration dominating mechanisms. "Mantle" area shows the mantle condition. "This study" shows the estimated experimental conditions in this study.

る選択配向の違いを示す。比較に用いた試料は, Run No. CO-15 (0 時間), CO-7 (1.5 時間), CO-6 (5 時間), CO-5 (15 時間) である (括弧内は加熱時間を表わす)。a 軸の集中方向が時間の経過とともに, 0° 付近 (圧縮軸方向と平行) から, 45° 付近へと移動していく。これと同時に, 弾性波速度の最大値を示す方向が Fig. 9 のように, 0° 付近 (圧縮軸方向と平行) から, 23° 付近へ移動する。a 軸の集中方向と弾性波速度の最大値を示す方向の 2 つの角度にずれがあるのは, 三軸中最も弾性波速度のおそい b 軸が 45° 付近に集中することの影響である。加熱する前の試料 (CO-15) にも選択配向が観察される。

本実験において, 試料は常温で加圧していく過程で破壊あるいは変形し, すべり面あるいはそのとき形成された結晶の形状によって初期の選択配向が形成される。その後の加熱によって変形が促進される。このとき, 変形に要した仕事が塑性エネルギーへと変換される。それが, 転位密度の増加となって現われている。その後, 転位密度差を駆動力として再結晶し, 転位密度が減少していく (Fig. 9)。この再結晶にともなって選択配向の様式が変化する。選択配向が変化していく様子は, 最大弾性波速度方向の応力軸からの角度が変化していくことでも示される。Fig. 8 に示されるように, 時間経過とともに, a 軸が 0° → 30° ~ 45° へと移動し, b 軸がバイ モーダル

Table 2. Elastic constants and density of olivine at 1200°C calculated from KUMAZAWA and ANDERSON (1969) and FEI and SAXENA (1986).

Pressure GPa	Cij GPa									Density g/cm ³
	11	22	33	44	55	66	23	31	12	
6	332	202	240	62	73	74	92	87	82	3.31
9	356	221	259	69	78	81	103	101	97	3.37

Table 3. Elastic wave velocities and the degree of anisotropy.

Run No.	Maximum velocity	Angle*	Minimum velocity	Angle**	The degree of anisotropy
	km/s	degree	km/s	degree	
CO-15	8.82	4	8.52	90	3.52
CO-7	8.75	0	8.53	90	2.45
CO-6	8.82	8	8.50	90	3.66
CO-5	8.73	23	8.55	90	2.06
CO-10	8.73	1	8.54	81	2.16
CO-14	8.67	1	8.56	76	1.34
CO-11***	9.08 (8.77)	1 (1)	8.83 (8.52)	85 (86)	2.84 (2.90)
CO-16	8.80	0	8.52	89	3.30
TE-7	8.66	90	8.45	21	2.50
TE-5	8.61	90	8.56	45	0.56

* Maximum velocity direction at an angle from the stress axis.
** Minimum velocity direction at an angle from the stress axis.
*** Values in parentheses are calculated by using elastic constants at 6 GPa.

な分布を経て一方向に配向する。
一軸引っ張りの実験では、5時間 (TE-7) から 15 時間 (TE-5) への時間経過にともなった、選択配向の様式の変化はみられない (Figs. 4, 5, 10). 時間経過にともなって転位密度はほとんど変化しない (Fig. 11). すなわち、TE-5 に見られる選択配向は 5 時間の加熱時間 (TE-7) によって形成されており、5 時間 (TE-7) から 15 時間 (TE-5) への時間経過にともなった転位密度差を駆動力とした粒界移動が活発でない。従って、選択配向を形成するメカニズムが機能せず、異方度の低下を引き起こしたと考えられる。

4.4 選択配向の差応力による変化

本実験では、セル内部のアルミナピストンの長さを変化させることで発生する差応力の大きさを変化させた。そのため、転位密度に差が生じる。転位密度 $2.5 \times 10^8 / \text{cm}^2$ (Run No. CO-10) と $2 \times 10^8 / \text{cm}^2$ (CO-14) の実験では、特に、a 軸が圧縮軸と平行になる傾向があるが、7 ×

The angle from the stress orientation (degree)
Fig. 7. Compressional wave velocities of the specimens calculated from measured preferred orientation as a function of the angle from the stress orientation: (a) CO-6, (b) CO-11, (c) TE-7.

$10^8 / \text{cm}^2$ (CO-6) の実験ではその傾向は見られない (Fig. 12). 転位密度を選択配向の駆動力としているので、試料全体として転位密度が低い状態では、時間経過に伴う選択配向の形成が十分になされない。すなわち、常温での加圧過程で生じた選択配向を変化させるに至っていない。そのために、選択配向の様式に相違が見られるものと思われる。選択配向の様式に相違があるが、異方度は

Fig. 8. Variations of the axial orientation with time. Experiments were made at 6 GPa, 1200°C and a stress field of uniaxial compression.

転位密度の増加にともなう増加する (Fig. 13). すなわち、常温での加圧過程で生じる選択配向よりも、高温での再結晶によって生じる選択配向の方が、強い定方位性を示す。

4.5 選択配向の圧力による影響

差応力 (転位密度)、加熱時間がほぼ同じ 6 GPa (Run No. CO-6) と 9 GPa (CO-11) の実験を比較すると、選択配向の様式は圧力によって変化しない (Fig. 14). しかし、異方位は 9 GPa の実験の方が小さくなっている (Fig. 15). すなわち、圧力の増加に伴って、選択配向の程度が弱くなることが観察された。本実験では、粒界移動による再結晶が選択配向を形成するので、粒界移動の速度が大きいとき、選択配向はより早く形成される。KARATO (1987a) より、粒界移動の速度 v は次式で与えられる。

$$v = MF \quad (3)$$

Fig. 9. Degree of anisotropy, dislocation density and maximum velocity direction versus time for the experimental results of CO-15, CO-7, CO-6 and CO-5.

ここで F は駆動力 (転位密度に比例する)、 M は易動度であり、

$$M = M_0 \exp(-Q/kT) \quad (4)$$

と表される。ただし、 M_0 は定数、 Q は活性化エネルギー、 k はボルツマン定数、 T は温度である。ここで、(4) 式の活性化エネルギー Q は圧力 P とともにほぼ一定の割合で変化するので、

$$Q = Q_0 + PV^* \quad (5)$$

と表される。ただし、 Q_0 は圧力 0 での活性化エネルギー、 P は圧力、 V^* は活性化体積である。(3)~(5) 式より、

$$v = M_0 F \exp\{-(Q_0 + PV^*)/kT\} \quad (6)$$

となる。従って、圧力の増加にともなう、観察される選択配向の程度が低くなるという実験結果は、(6) 式において $V^* > 0$ の条件で説明できる。オリビンの活性化体積 V^* については、拡散クリープや転位クリープにつ

Fig. 10. Distribution of the axial orientation. These figures show variations of the orientation with time: 5 (TE-7: solid line) and 15 hours (TE-5: dotted line). Experiments were made at 6 GPa, 1200°C and a stress field of uniaxial tension.

いて調べられており [例えば, STOCKER and ASHBY (1973), WEERTMAN (1970)], いずれも $V^* > 0$ である.

4.6 過去の研究との比較

KARATO (1988) は圧力 300 MPa, 温度 1300°C, 応力 100 MPa 以下の条件でオリビンの変形実験を行った. この条件は Fig. 6 から明らかなように本実験と同じ転位密度の低い結晶が高い結晶を消費するように成長し低い結晶の方位性が卓越して形成される選択配向機構領域の実験であると考えられる. KARATO (1988) の一軸圧縮実験では, a 軸と c 軸が圧縮軸と垂直に, b 軸が圧縮軸と平行になる. 本実験の一軸圧縮の実験では, a 軸と b 軸には実験条件によって違いが見られるが, c 軸はすべて圧縮軸と垂直になっている. 時間経過とともに弾性波速度の最も速い方向と圧縮軸のなす角が増加する (Fig. 9). 実験の範囲では最終的に, a 軸が圧縮軸と 45°

Fig. 11. Changes in the degree of anisotropy and dislocation density with time for run No. TE-7 and TE-5.

をなす方向に配向し, b 軸は圧縮軸と 45°をなす方向に弱い集みがみられるが決定的ではない. c 軸は圧縮軸と垂直になる. 本実験と KARATO (1988) の実験結果の異なる原因として, (1) 圧力の違いに起因する可能性, (2) 本実験での歪量が小さく変形が定常状態に達していない可能性の二つが考えられる. (1) の解釈に従うと, 応力軸に対して転位密度の増加しにくい結晶の方位が圧力によって変化することが示唆される.

本実験で観察された高压下 (6~9 GPa) の a 軸の集中は, 上記の圧力効果により形成され, 深部捕獲岩の観察と対応させることが可能である.

4.7 選択配向とスラブ内応力状態

一軸圧縮実験と一軸引っ張り実験による本実験の選択配向の結果が一般の応力状態に適用可能であると仮定する. 実験結果から, $\sigma_1 < \sigma_2 \ll \sigma_3$ という応力状態 ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ は直交座標の応力を表す) では, a 軸, b 軸は σ_3 と 45°をなす方向に集中し, c 軸は $\sigma_1\sigma_2$ 面内に集中する. この場合では σ_3 と 20~30°を方向を伝える弾性波速度が最も大きい. $\sigma_1 \ll \sigma_2 < \sigma_3$ という応力状態では, b 軸は σ_1 方向に集中し, a 軸と c 軸は $\sigma_2\sigma_3$ 面内に集中する. この場合では $\sigma_2\sigma_3$ 面内を伝える弾性波速度が最も大きい.

上部マントルに沈み込んでいくスラブ内は, 一様な応力状態ではないと考えられる. スラブの中心部では一軸圧縮的な応力場であり, スラブの外殻側では引っ張りのな応力場であると考えられている [WIENS *et al.* (1993)].

Fig. 12. Variations of the orientation with dislocation density. Experiments were made at 6 GPa, 1200°C, 5 hours and a stress field of uniaxial compression.

Fig. 14. Variation of the orientation with pressure. Experiments were made at 6 GPa and 9 GPa, 1200°C, 5 hours and a stress field of uniaxial compression.

Fig. 13. Change in a degree of anisotropy with dislocation density for CO-6, CO-10 and CO-14.

Fig. 15. Change of the degree of anisotropy with pressure for CO-6 and CO-11.

これらの応力状態によりオリビンは種々の選択配向の様式を示す。沈み込んでいくスラブの応力状態でオリビンが選択配向し、地震波速度の異方性として観察されるは

ずである。例えば、スラブの中心部においては、沈み込んでいく方向に対して、20~30°の方向を伝わる地震波速度が最も大きく、スラブの外殻側では、沈み込んでい

く方向に対して、垂直方向を伝わる地震波速度が最も大きいことが期待される。

§5. ま と め

本実験的研究では、常温での加圧過程および昇温過程で生じた選択配向が、高温高压下において転位の持つエネルギーを駆動力とした再結晶化により異なる選択配向へと変化していく様子を観察したものであり、以下のようによまとめられる。

1. 一軸圧縮応力場では、a 軸の集中方向は応力軸と平行方向から、45°をなす方向へと変化する。b 軸は同様に 45°をなす方向へと変化する。c 軸は応力軸と垂直な方向へ集中する。一軸引っ張り応力場では、a 軸には顕著な傾向がみられないが、b 軸は応力軸と平行方向に、c 軸は応力軸と垂直方向に集中する。

2. 加圧中の応力が大きい場合転位密度は高くなり、その後の加熱による選択配向の変化の速度を大きくする。

3. 圧力 6 GPa の方が 9 GPa のときよりも選択配向が強い。

4. 1 GPa 以下の低圧での実験と比較すると、選択配向の様式が異なり、応力軸に対して転位密度の増加ににくい結晶の方位が圧力によって変化する可能性がある。

謝 辞

本研究を行なうにあたり、東北大学の大沼晃助教授、森島秀明氏、東京大学の鳥海光弘教授には有意義な助言や議論をしていただきました。またミネソタ州立大学の唐戸俊一郎教授、岡山大学の桂 智男博士、および匿名の査読者には丁寧な査読をしていただきました。これらの方々に深く感謝します。

文 献

- ANDERSON, D. L. and A. M. DZIEWONSKI, 1984, Seismic tomography, *Sci. Am.*, **251**, 58-66.
- BUSSOD, G. Y., T. KATSURA and D. C. RUBIE, 1993, The large volume multi-anvil press as a high P-T deformation apparatus, *Pure Appl. Geophys.*, **141**, 579-599.
- DURHAM, W. B. and C. GOETZE, 1977, Plastic flow of oriented single crystals of olivine, *J. Geophys. Res.*, **82**, 5737-5753.
- FEI, Y. and S. K. SAXENA, 1986, A thermochemical data base for phase equilibria in system Fe-Mg-Si-O at high pressure and temperature, *Phys. Chem. Minerals*, **13**, 311-324.
- HESS, H. H., 1964, Seismic anisotropy of the uppermost mantle under oceans, *Nature*, **203**, 629-631.
- 井田喜明・水谷 仁, 1978, 岩波講座地球科学 2 地球の物質科学 1 高温高压の世界, 秋本俊一・水谷 仁編, 1-100, 岩波書店.
- KAMB, W. B., 1959, Ice petrofabric observations from Blue Glacier, Washington, in relation to theory and experiment, *J. Geophys. Res.*, **64**, 1891-1909.
- KARATO, S., M. TORIUMI and T. FUJII, 1980, Dynamic recrystallization of olivine single crystals during high temperature creep, *Geophys. Res. Lett.*, **7**, 649-652.
- KARATO, S., 1987a, Seismic anisotropy due to lattice preferred orientation of minerals: kinematic or dynamic?, in *High-Pressure Research in Mineral Physics*, edited by M. H. MANGHANI and Y. SYONO, 455-471, American Geophysical Union, Washington D. C., 1987.
- KARATO, S., 1987b, Scanning electron microscope observation of dislocations in olivine, *Phys. Chem. Minerals*, **14**, 245-248.
- KARATO, S., 1988, The role of recrystallization in the preferred orientation of olivine, *Phys. Earth Planet. Interiors*, **51**, 107-122.
- KOHLSTEDT, D. L. and C. GOETZE, 1974, Low stress high-temperature creep in olivine single crystal, *J. Geophys. Res.*, **79**, 2045-2051.
- KOHLSTEDT, D. L. and J. B. VANDER SANDE, 1975, An electron microscopy study of naturally occurring oxidation produced precipitates in iron-bearing olivines, *Contrib. Mineral. Petrol.*, **53**, 13-24.
- KUMAZAWA, M. and O. L. ANDERSON, 1969, Elastic moduli, pressure derivatives, and temperature derivatives of single-crystal olivine and single-crystal forsterite, *J. Geophys. Res.*, **74**, 5961-5972.
- LISTER, G. S., 1982, A vorticity equation for lattice reorientation during plastic deformation, *Tectonophysics*, **82**, 351-366.
- ROSS, J. V., H. G. AVÉ LALLEMANT and N. L. CARTER, 1980, Stress dependence of recrystallized-grain and subgrain size in olivine, *Tectonophysics*, **70**, 39-61.
- STOCKER, R. L. and M. F. ASHBY, 1973, On the rheology of the upper mantle, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **11**, 391-426.
- TANIMOTO, T. and D. L. ANDERSON, 1984, Mapping convection in the mantle, *Geophys. Res. Lett.*, **11**, 287-290.
- TAYLOR, G. I., 1938, Plastic strain in metals, *J. Inst. Met.*, **62**, 307-324.
- TORIUMI, M. and S. KARATO, 1985, Preferred orientation development of dynamically recrystallized olivine during high temperature creep, *J. Geology*, **93**, 407-417.
- TSUKAHARA, H., T. YAMAZAKI and I. OHNO, 1976, Preferred lattice orientation produced by deformation in natural olivine aggregate and synthetic fayalite under stress, *J. Geological Society of Japan*, **82**, 713-727.
- WANG, Y., R. C. LIEBERMANN and J. N. BOLAND, 1988,

- Olivine as an in site piezometer in high pressure apparatus, *Phys. Chem. Minerals*, **15**, 493-497.
- WEERTMAN, J., 1970, The creep strength of the earth's mantle, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **8**, 145-168.
- WIENS, D. A., J. J. MCGUIRE and P. J. SHORE, 1993, Evidence for transformational faulting from a deep double seismic zone in Tonga, *Nature*, **364**, 790-793.