Mn₂TiO₄ スピネル分解生成物の結晶粒成長と超塑性

岡山大学地球内部研究センター* 星熊昭人・佐藤博樹・伊藤英司

Grain Growth of the Dissociation Product of Mn₂TiO₄ Spinel: Implications for Superplasticity

Akihito HOSHIKUMA, Hiroki SATO and Eiji ITO

Institute for Study of the Earth's Interior, Okayama University, Yamada
827, Misasa, Tottori 682-01, Japan

(Received June 28, 1994; Accepted October 25, 1994)

Grain growth of the dissociation product (MnTiO₃ + MnO), as an analogue assemblage of (Mg, Fe) SiO₃ perovskite and (Mg, Fe)O magnesiowüstite for the lower mantle, was studied at pressures of 0.9 and 1.6 GPa and at temperatures of 1000° to 1320°C, for the time duration ranging from 0.125 to 256 hours. By fitting the grain growth data to an equation $G^n = K_0 \cdot t \cdot \exp\{-(Q^* + PV^*)/RT\}$, the grain growth exponent n , the activation energy Q^* , and the activation volume V^* were determined to be 3.55 ± 0.46 , 560 ± 70 kJ/mol and 70 ± 10 cm³/mol, respectively. These parameters indicate that the mutual intergrowth texture of the dissociation product suppresses grain growth substantially by a pinning effect. The present results thus suggest that a fine-grained mixture of the perovskite plus magnesiowüstite will persist to exhibit superplastic behavior in the slab penetrated into the lower mantle. If the grain growth rate of (Mg, Fe)SiO₃ + (Mg, Fe)O mixture is similar to that of MnTiO₃ + MnO, the superplastic slab may cause a dramatic change of the shape and geometry of the subducting plate beneath the 660 km discontinuity.

Key words: Grain growth, Dissociation product, Fine-grained mixture, Pinning effect, Superplastic slab.

§1. はじめに

最近の高圧相平衡実験によれば、パイロライトモデルにおけるマン틀の 660 km 不連続は、主に (Mg, Fe)₂SiO₄ スピネルの分解に起因し、下部マン틀における主要鉱物相は、(Mg, Fe)SiO₃ ペロフスカイト (Mg-Pv) と (Mg, Fe)O マグネシオヴスタイト (Mw) であると考えられている [Ito and TAKAHASHI (1989)]. この分解生成物は非常に細粒 (<5 μm) である [Ito and SATO (1991)]. 一方、残りの輝石-ざくろ石成分 (メジャライト, ~40 vol.%) では深さ約 600 km 付近から、CaSiO₃ ペロフスカイト (Ca-Pv) が徐々に析出し始め、最終的に約 720 km 付近で細粒なペロフスカイト二相 (Mg-Pv と Ca-Pv) に分解し、上述の分解生成物と共存する [IRIFUNE (1994)].

小粒径の集合体では、低応力の下で粒界拡散が優勢と

なり、拡散クリープが流動の支配的なメカニズムとなる [KARATO *et al.* (1986), KARATO and LI (1992)]. 一般に、細粒な材料ほど塑性変形の過程で、粒界すべり (diffusion-accommodated grain-boundary sliding) によるクリープ機構が支配的となり強度の低下を引き起こす [ASHBY and VERRALL (1973), RUTTER and BRODIE (1988), VAUGHAN and COE (1981)]. そのような材料がある条件を満たすと (後述 §4 参照) 破壊に到ることなく非常に大きな伸び (10~1000%) を示すことがある [例えば、BOULLIER and GUEGUEN (1975), WAKAI (1989), XUE *et al.* (1991)]. この現象は超塑性として広く知られている。沈み込むスラブの中で、分解生成物として生じる細粒のペロフスカイトとマグネシオヴスタイト集合体に関する結晶粒成長の研究は、下部マン틀スラブのレオロジーを理解する上で非常に重要である。

Ito and SATO (1991) はある地域 (例えば千島弧) では、スラブが下部マン틀まで沈み込んでいる [VAN

* 〒682-01 鳥取県東伯郡三朝町山田 827

Fig. 1. Back-scattered electron image of (a) $(\text{Mg}_{0.94}, \text{Fe}_{0.06})\text{SiO}_3$ perovskite (dark portion) and $(\text{Mg}_{0.74}, \text{Fe}_{0.26})\text{O}$ magnesio-wüstite (white portion) formed at 24 GPa and 1600°C for 1 hour [after Ito and SATO (1991)], and (b) MnTiO_3 ilmenite (dark portion) and MnO rocksalt (white portion) formed at 1.6 GPa and 1150°C for 8 hours. Black portions in (b) are holes which were made during polishing.

DER HILST *et al.* (1991)] にもかかわらず、深発地震の発生が深さ 700 km 付近で停止してしまうことの原因として超塑性をあげている。すなわち、 $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$ スピネルの分解によって生ずる極めて細粒の $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_3$ ペロフスカイトと $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{O}$ マグネシオヴスタイトの集合体となることから、下部マントルスラブが超塑性を示すというものである。この仮説の当否は超塑性領域がどのような広がりをもっているか、つまり、生成物の結晶粒成長速度にそのまま依存することになる。本研究ではこのような分解生成物の結晶粒成長速度を実験的に決定し、その結果から下部マントルスラブにおける超塑性の可能性について検討を加える。深発地震の発生やスラブのレオロジーにとって、遷移層に存在すると考えられる堅いガーネットの効果も議論されている [例えば、ANDO *et al.* (1993), 唐戸 (1994)] が、ここでは、下部マントルに沈み込んだスラブについて考察する。

実験試料として Mn_2TiO_4 スピネルの分解生成物であ

Fig. 2. Sample assembly for grain growth experiment by 1/2 inch piston-cylinder type high-pressure apparatus.

る MnTiO_3 イルメナイトと MnO ロックソルトの集合体を選んだ。これは Mn_2TiO_4 が、ピストンシリンダー型高圧発生装置の発生圧力領域において容易に分解反応を起こし、大きな試料容積と長時間のアニールを必要とする結晶粒成長実験に極めて適しているからである。Fig. 1 に示されているように、 Mn_2TiO_4 は高圧下で MnTiO_3 と MnO の分解混合物を生じ、ペロフスカイト型とイルメナイト型という結晶構造の違いはあるものの、スピネルの分解生成物であるペロフスカイトとマグネシオヴスタイトの集合体と区別がつかないほど酷似したテクスチャーを持つ。相転移に伴う結晶の細粒化という点において、アナログ物質としての資質を十分そなえていると考えられる。

§2. 実験の手順

実験の出発物質 Mn_2TiO_4 は、 Mn_2O_3 と TiO_2 の試薬混合粉末を $\text{CO}_2/\text{H}_2=1/5$ の混合気体中で 1280°C において 10 時間加熱することにより合成した。試料は粉末 X 線解析装置を用いてスピネル型の Mn_2TiO_4 であることを確認した。結晶粒成長実験には直径 1/2 インチのピストンシリンダー型高圧発生装置を用いた。試料部の構

成を Fig. 2 に示す。試料部の静水圧性を良くするため、モリブデン箔で包んだ試料の周りを比較的低温で軟化するソーダガラスの粉で覆った。ヒーターにはグラファイ

Fig. 3. Summary of the experimental results for the dissociation reaction of Mn₂TiO₄ spinel (open square: Mn₂TiO₄ spinel, solid square: MnTiO₃ ilmenite + MnO rocksalt).

トを使用し、温度は Pt/Pt13%Rh 熱電対の接点を試料上部に接触させて測定した。

0.9–3.0 GPa, 1000–1550°C の圧力温度範囲で Mn₂TiO₄ スピネルが MnTiO₃ イルメナイト + MnO ロックスルトに分解することが Fig. 3 のように確認された。逆反応実験 (MnTiO₃ + MnO → Mn₂TiO₄) は行っていないが、分解反応実験からこの相境界線は、 $P(\text{GPa}) = 3.64 \times 10^{-3} T(^{\circ}\text{C}) - 3.35$ と決められ、0.9 GPa では 1140°C、1.6 GPa では 1335°C で分解することが判明した。分解反応速度は大きく、例えば 1.6 GPa, 1250°C では、4 分以内で分解が完了していることを確認した。分解生成物の反射電子像から結晶粒径は大部分 5 μm 以下と非常に細粒であることが分かった (Fig. 1b 参照)。生成物の MnTiO₃ と MnO の集合体は、(Mg, Fe)SiO₃ ペロフスカイトと (Mg, Fe)O マグネシオヴスタイトの集合体 (Fig. 1a) と酷似のテクスチャーを示し、二相が入り組んで交互に配列している。

Table 1. Summary of the grain growth of the dissociation product MnTiO₃ + MnO at high pressure and temperature.

Run No.	Pressure (GPa)	Temperature (°C)	Time (h)	Average grain size (μm)
110	1.6	1250	0.125	1.46 ± 0.20
111	1.6	1250	1	1.81 ± 0.17
112	1.6	1250	2	2.60 ± 0.33
113	1.6	1250	4	3.00 ± 0.27
114	1.6	1250	8	3.81 ± 0.25
115	1.6	1250	64	9.21 ± 1.45
121	1.6	1150	1	0.66 ± 0.08
122	1.6	1150	2	0.86 ± 0.06
123	1.6	1150	4	1.02 ± 0.13
124	1.6	1150	8	1.41 ± 0.13
125	1.6	1150	64	2.72 ± 0.46
131	0.9	1000	1	0.51 ± 0.06
132	0.9	1000	2	0.59 ± 0.03
133	0.9	1000	4	0.74 ± 0.07
134	0.9	1000	8	1.15 ± 0.10
135	0.9	1000	64	1.57 ± 0.21
136	0.9	1000	256	1.73 ± 0.36
140	1.6	1320	0.125	2.52 ± 0.20
141	1.6	1320	1	4.77 ± 0.78
142	1.6	1320	2	6.04 ± 1.22
143	1.6	1320	4	7.01 ± 0.52
144	1.6	1320	8	8.54 ± 0.89
150	0.9	1100	0.125	0.95 ± 0.08
151	0.9	1100	1	1.25 ± 0.10
152	0.9	1100	2	1.49 ± 0.20
153	0.9	1100	4	1.81 ± 0.26
154	0.9	1100	8	2.43 ± 0.37
155	0.9	1100	64	4.52 ± 0.64
156	0.9	1100	256	4.84 ± 0.82

Fig. 4. Back-scattered electron image of the assemblage of MnTiO₃ ilmenite (dark portion) and MnO rocksalt (white portion). The sample was annealed at 0.9 GPa and 1000°C for (a) 2, (b) 8, and (c) 256 hours. It is clear that the average grain size gradually increases with annealing time. Black portions in (c) are holes which were made during polishing.

分解相の結晶粒成長実験は、0.9 GPa では分解生成物の安定な 1000°C と 1100°C の温度において、1.6 GPa では 1150°C、1250°C と 1320°C の温度において、0.125 時間から 256 時間試料をアニールすることにより行った (Table 1 参照)。出発物質である Mn₂TiO₄ スピネル (粒径 ~10 μm) をまず室温で所定の圧力まで加圧し、その後、分解生成物の安定領域内にある所定の温度まで短時間 (1 分以内) で昇温し、一定時間アニールした後、急

冷凍結した。回収試料は加圧軸に平行な方向に切り出し、研磨断面を作製した。走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて粒子の分布とテクスチャーを観察するとともに、反射電子像写真を撮り粒径を測定した。平均粒径 G は、次式によって決定した [MENDELSON (1969)].

$$G = 1.56 C / MN$$

ここで、 C は任意に引いた直線の全長、 N は直線と交差する結晶粒界の数、そして M は写真の倍率である。定数 1.56 は、結晶粒の形状が八面体の角を切断した十四面体で、粒径の対数が正規分布することを仮定して、統計論的に導かれた数値である。この方法によって求まる G は、MnTiO₃ と MnO の両者を含めた全粒子の平均粒径を与える。

§3. 結 果

結晶粒成長実験の条件と結果を Table 1 にまとめる。

また、アニールした試料の反射電子顕微鏡写真の一例を Fig. 4 に示す。MnTiO₃ と MnO の平均粒径はアニール時間と共に増加するが、粒成長速度は小さく、長時間 (256 時間) アニールしたもので非常に細粒 (<10 μm) であることがこの写真から認められる。

結晶粒成長速度は次式のように表わされる [例えば、BALDO and BRADT (1988), KAPADIA and LEIPOLD (1974)].

$$G^n - G_0^n = K_0 \cdot t \cdot \exp[-(Q^* + PV^*)/RT] \quad (1)$$

ここで G は時間 t における平均粒径、 G_0 は $t=0$ における平均粒径、 n は結晶粒成長指数、 K_0 は定数、 Q^* は活性化エネルギー、 V^* は活性化体積、 R はガス定数、 T は絶対温度である。式 (1) は、アニール時間が長くなると (すなわち $G \gg G_0$)

$$G^n = K_0 \cdot t \cdot \exp[-(Q^* + PV^*)/RT] \quad (2)$$

で近似することができる [例えば、KARATO (1989), SENDA and BRADT (1990)]. 従って、 G と t の対数をとって実験データをプロットすると、圧力と温度が一定のとき一つの直線上にのり、その直線の傾きから n を求めることができる。そのようなプロットの一例を Fig. 5 に示す。この図から明らかなように、粒径の対数はアニール時間に対してほぼ直線的に変化しており、式 (2) でよく表されることが分かる。すべてのデータに式 (2) をあてはめ最小二乗法により、 $n = 3.55 \pm 0.46$, $K_0 = 0.38 \pm 0.05 \text{ m}^{3.55}/\text{s}$, $Q^* = 560 \pm 70 \text{ kJ/mol}$, $V^* = (7 \pm 1) \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{mol}$ ($70 \pm 10 \text{ cm}^3/\text{mol}$) を得た。これらのパラメータから、それぞれの圧力-温度で式 (2) により計算された直線が Fig. 5 に示されている。実験データと計算結果の一致は誤差の範囲内で良好である。

ZnO, MgO, Mg₂SiO₄ など単相の酸化物や珪酸塩では、

Fig. 5. Grain growth of the dissociation product MnTiO₃ and MnO at high pressure and temperature. Vertical bar is one standard deviation. Straight lines are calculated from equation (2).

n の値は 2~3 である [例えば, GUPTA and COBLE (1968), KAPADIA and LEIPOLD (1974), KARATO (1989)]. $n=3\sim 6$ の値は粒成長が不純物や二次相の存在によって律速されていることを示している [例えば, BALDO and BRADT (1988), GUPTA (1971), NICHOLSON (1966)]. すなわち, 二次相の存在が粒界の“ピン止め効果 (pinning effect)”をおよぼし一次相の粒成長を妨げる. Fig. 4 から明らかなように, MnTiO₃ と MnO がそれぞれ交互に配列しているため, 相互に“ピン止め効果”をおよぼし合い, 結晶粒成長を妨げると考えられる. したがって, 全く同様のテクスチャーを示すペロフスカイトとマグネシオヴスタイトの混合相 (Fig. 1a) においても, 同様の粒成長の抑制効果が働き, n の値は 3.5 に近いものが得られると予想される.

圧力効果を表す活性化体積について, 例えばオリビンでは, 転位クリープが支配的な領域で $V^*=27 \text{ cm}^3/\text{mol}$ [GREEN and BORCH (1987)], また, 拡散クリープが支配的な領域で $V^*=6 \text{ cm}^3/\text{mol}$ [唐戸 (1994)] という値が報告されている. 今回得られた MnTiO₃ と MnO 集合体の結晶粒成長の $V^*=70 \text{ cm}^3/\text{mol}$ という値は, オリビン単相の V^* 値に比べてかなり大きい. これは, n の値と同様に結晶粒成長を妨げる“ピン止め効果”を反映した結果なのかもしれない.

§4. 考 察

酸化物や珪酸塩は以下のような条件で超塑性を示すことが報告されている [例えば, BOULLIER and GUEGUEN (1975), POIRIER (1976)].

- 1) 温度がある程度高いこと (一般に $T > 0.4 T_m$, T_m

Fig. 6. Average grain size of MnTiO₃+MnO as a function of time at 1.6 GPa and 1000°C. The length of the superplastic region (140 km) is calculated by assuming the subduction rate of 5 cm/year.

は融点)

- 2) 結晶粒が細粒であること (一般に約 $10 \mu\text{m}$ 以下)

- 3) 応力 σ が低いこと (一般に $\sigma < 100 \text{ MPa}$)

さらに, 超塑性状態が持続するためには粒径が小さいまま安定に存在すること (時間と共に粒径が急激に増大しないこと) が必要である.

SCHMID *et al.* (1977) は, 細粒な石灰岩を用いたクリープ実験から超塑性流動について研究を行った. 彼らは石灰岩の変形機構図を作成し, 例えば, $\sigma = 1 \text{ MPa}$, $\dot{\epsilon} = 10^{-12} \text{ s}^{-1}$, $T = 600^\circ\text{C}$ ($= 0.54 T_m$) では, $100 \mu\text{m}$ の粒径でも超塑性が生じる可能性を示唆した.

マントルでは, 一般に $T > 0.4 T_m$ [例えば, AKAOGI *et al.* (1989), ITO and KATSURA (1989, 1992)], $\sigma = 1\sim 10 \text{ MPa}$, $\dot{\epsilon} = 10^{-14}\sim 10^{-15} \text{ s}^{-1}$ [例えば, MERCIER (1980)] と見積もられており, 超塑性の条件 1) と 3) は満足されていると考えてよい. 不確実なのは 2) の条件である. この条件は特に周囲よりも低温である沈み込むスラブの中で満たされる可能性がある. ITO and SATO (1991) は下部マントルまで沈み込むスラブの中でスピネルの分解によって生ずるペロフスカイトとマグネシオヴスタイトの細粒の集合体が長時間保たれることによって, そこに超塑性の領域が広がると指摘した. この分解生成物と非常によく似たテクスチャーを示す MnTiO₃ と MnO の集合体に関する今回の粒成長実験の結果から, ポストスピネル相の粒成長速度の見積りを行い, 2) の条件が満足されるかどうかを以下で検討する.

下部マントルへ沈み込むスラブの温度は 700 km 前後の深さで 1000°C ($\approx 0.45 T_m$; $T_m \approx 2550^\circ\text{C} = 2820 \text{ K}$ [ITO and KATSURA (1992)]) 程度と見積られる [ITO and SATO (1992)]. 分解生成物の組織が酷似しているからといって, 粒成長速度も定量的に類似しているとは必ずし

もいえない。しかしながら、1250°C, 1.6 GPa, 1 h で得られた MnTiO₃ と MnO 集合体の粒径が、1600°C, 24 GPa, 1 h のペロフスカイトとマグネシオヴスタイトの集合体 (Fig. 1a) の粒径にはほぼ等しいので、ここでは 1.6 GPa における、MnTiO₃+MnO 集合体の粒成長のデータを用いて、(Mg, Fe) SiO₃+(Mg, Fe)O の粒成長の推定を試みる。超塑性を示す臨界粒径は歪速度に強く依存しており [SCHMID *et al.* (1977)], 10^{-14} s^{-1} 程度の歪速度のもとでは 100 μm の粒径でも十分超塑性が期待される。この場合に必要粒成長時間は、今回決定したパラメータを用いて、1000°C, 1.6 GPa でおよそ 280 万年となる (Fig. 6)。下部マントルへ沈み込むスラブの速度を年間 5 cm とすると、660 km 不連続面下に 140 km 程度にわたって超塑性領域が形成されることになる。粒成長速度への圧力効果を考えると V^* が正の値を持つから、実際の下部マントルの圧力 (>24 GPa) では、超塑性領域がさらに拡大する可能性がある。

以上の議論からスピネルの分解反応によって、660 km 不連続面で、剛体的でサイスミックなスラブから、流動的でアサイスミックなスラブに変化する可能性がある。その流動性のために、超塑性スラブ (superplastic slab) は容易に変形し、周囲のマントル物質とも同化しやすいと考えられる。すなわち、下部マントル超塑性スラブは、その形状や沈み込み角度を一変させる可能性がある [佐藤・伊藤 (1991)]。最近の地震波トモグラフィ [例えば、FUKAO *et al.* (1992)] により、下部マントルスラブの形状変化が報告されているのは興味深い。

謝 辞

京都大学防災研究所の島田充彦先生、広島大学理学部の下竹 徹先生及び大阪大学理学部の土山 明先生には、丁寧な査読をしていただき大変貴重なコメントをいただきました。おかげで本文の内容を大幅に改善することができました。以上の先生方に感謝申し上げます。この研究費用の一部は文部省科学研究費補助金 (課題番号 05231221, 06222218) によってまかなわれた。

文 献

- ANDO, J., K. FUJINO and T. TAKESHITA, 1993, Dislocation microstructures in naturally deformed silicate garnets, *Phys. Earth Planet. Interiors*, **80**, 105-116.
- ASHBY, M. F. and R. A. VERRALL, 1973, Diffusion accommodated flow and superplasticity, *Acta Metall.*, **21**, 149-163.
- AKAOGI, M., E. ITO and A. NAVROTSKY, 1989, Olivine-modified spinel-spinel transformations in the system $\text{Mg}_2\text{SiO}_4\text{-Fe}_2\text{SiO}_4$: Calorimetric measurements, thermochemical calculation, and geophysical application, *J. Geophys. Res.*, **94**, 15671-15685.
- BALDO, J. B. and R. C. BRADT, 1988, Grain growth of the lime and periclase phases in a synthetic doloma, *J. Am. Ceram. Soc.*, **71**, 720-725.
- BOULLIER, A. M. and Y. GUEGUEN, 1975, SP-mylonites: Origin of some mylonites by superplastic flow, *Contrib. Mineral. Petrol.*, **50**, 93-104.
- FUKAO, Y., M. OBAYASHI, H. INOUE and M. NENBAI, 1992, Subducting slabs stagnant in the mantle transition zone, *J. Geophys. Res.*, **97**, 4809-4822.
- GREEN, H. W. and R. S. BORCH, 1987, The pressure dependence of creep, *Acta Metall.*, **35**, 1301-1305.
- GUPTA, T. K., 1971, Inhibition of grain growth in ZnO, *J. Am. Ceram. Soc.*, **54**, 413-414.
- GUPTA, T. K. and R. L. COBLE, 1968, Sintering of ZnO: I, Densification and grain growth, *J. Am. Ceram. Soc.*, **51**, 521-525.
- IRIFUNE, T., 1994, Absence of an aluminous phase in the upper part of the Earth's lower mantle, *Nature*, **370**, 131-133.
- ITO, E. and T. KATSURA, 1989, A temperature profile of the mantle transition zone, *Geophys. Res. Lett.*, **16**, 425-428.
- ITO, E. and T. KATSURA, 1992, Melting of ferromagnesian silicates under the lower mantle conditions, in "High-Pressure Research: Application to Earth and Planetary Sciences", ed. by Y. SYONO and M. H. MANGHNANI, TERRAPUB, Tokyo/AGU, Washington D. C., 315-322.
- ITO, E. and H. SATO, 1991, Aseismicity in the lower mantle by superplasticity of the descending slab, *Nature*, **351**, 140-141.
- ITO, E. and H. SATO, 1992, Effect of phase transformations on the dynamics of the descending slab, in "High-Pressure Research: Application to Earth and Planetary Sciences", ed. by Y. SYONO and M. H. MANGHNANI, TERRAPUB, Tokyo/AGU, Washington D. C., 257-262.
- ITO, E. and E. TAKAHASHI, 1989, Postspinel transformations in the system $\text{Mg}_2\text{SiO}_4\text{-Fe}_2\text{SiO}_4$ and some geophysical implications, *J. Geophys. Res.*, **94**, 10637-10646.
- KAPADIA, C. M. and M. H. LEIPOLD, 1974, Grain growth in pure dense MgO, *J. Am. Ceram. Soc.*, **57**, 41-42.
- KARATO, S., 1989, Grain growth kinetics in olivine aggregates, *Tectonophysics*, **168**, 255-273.
- 唐戸俊一郎, 1994, 深部マントルのダイナミクス 地震トモグラフィ, 鉱物物理とマントル対流, 科学, **64**, 296-305.
- KARATO, S. and P. LI, 1992, Diffusion creep in perovskite: Implications for the rheology of the lower mantle, *Science*, **255**, 1238-1240.
- KARATO, S., M. S. PATERSON and J. D. FITZGERALD, 1986, Rheology of synthetic olivine aggregates: Influence of grain size and water, *J. Geophys. Res.*, **91**, 8151-8176.

- MENDELSON, M. I., 1969, Average grain size in polycrystalline ceramics, *J. Am. Ceram. Soc.*, **52**, 443-446.
- MERCIER, J.-C. C., 1980, Magnitude of the continental lithospheric stresses inferred from rheomorphic petrology, *J. Geophys. Res.*, **85**, 6293-6303.
- NICHOLSON, G. C., 1966, Grain growth in magnesium oxide containing iron oxide or titanium dioxide, *J. Am. Ceram. Soc.*, **49**, 47-49.
- POIRIER, J. P., 1976, *Plasticité à haute température des solides cristallins*, Eyrolles éd., Paris, 320 pp.
- RUTTER, E. H. and K. H. BRODIE, 1988, Experimental "syntectonic" dehydration of serpentinite under conditions of controlled pore water pressure, *J. Geophys. Res.*, **93**, 4907-4932.
- 佐藤博樹・伊藤英司, 1991, マントルの対流運動に及ぼす相転移のダイナミックな効果, 地球惑星科学関連学会 1991 年合同大会共通セッション予稿集, 131.
- SCHMID, S. M., J. N. BOLAND and M. S. PATERSON, 1977, Superplastic flow in finegrained limestone, *Tectonophysics*, **43**, 257-291.
- SENDA, T. and R. C. BRADT, 1990, Grain growth in sintered ZnO and ZnO-Bi₂O₃ ceramics, *J. Am. Ceram. Soc.*, **73**, 106-114.
- VAN DER HILST, R. D., R. ENGDAHL, W. SPAKMAN and G. NOLET, 1991, Tomographic imaging of subducted lithosphere below northwest pacific island arcs, *Nature*, **353**, 37-43.
- VAUGHAN, P. J. and R. S. COE, 1981, Creep mechanism in Mg₂GeO₄: Effects of a phase transition, *J. Geophys. Res.*, **86**, 389-404.
- WAKAI, F., 1989, A review of superplasticity in ZrO₂-toughened ceramics, *Br. Ceram. Trans. J.*, **88**, 205-208.
- XUE, L. A., X. WU and I-W. CHEN, 1991, Superplastic alumina ceramics with grain growth inhibitors, *J. Am. Ceram. Soc.*, **74**, 842-845.