

2006年度日本地球化学会奨励賞受賞記念論文

マントル鉱物の流体包有物から探る
沈み込み帯の物質循環系
—マントルウェッジの四次元解析—

山本 順 司*

(2007年1月18日受付, 2007年3月30日受理)

Subduction-related fluid occurrence in mantle revealed by residual pressure and isotopic compositions of fluid inclusion

Junji YAMAMOTO *

* Institute for Geothermal Sciences, Kyoto University,
Noguchibaru, Beppu, Oita 874-0903, Japan

An active convergent plate boundary comprises dynamic material circulation system where materials risen up from descending oceanic plate partly go back to the Earth's surface. An evaluation of the material flux in this system is important to assess future view of the planet Earth. In the mantle wedge, fluids circulate in various forms; i.e., aqueous fluids released from the descending oceanic lithosphere trigger partial melting of the mantle wedge, and the melt ascends through the mantle wedge leading arc volcanism.

Investigations of mantle-derived xenoliths sampled from the active margin of a continent or an island arc are effective for identifying mantle processes, including partial melting and material circulation, in the mantle wedge. For the mantle xenoliths, however, various technical difficulties lie in the estimation of the depth where the xenoliths entrained by host magma. Since internal pressure (density) of CO₂ inclusions in a mantle xenolith reflects both conditions of temperature and pressure where the xenolith existed, CO₂ density in a fluid inclusion was estimated by Micro-Raman spectroscopy to calculate the depth (pressure) of origin applying to the equation of state of CO₂ and the equilibration temperature. This newly developed method can serve as a new depth probe.

Combination of the geobarometry and various micro-analyzing technique reveals the occurrence of subduction-related fluid in the mantle wedge with high spatial resolution. Four-dimensional (latitude, longitude, depth and geologic age) mapping of the fluid migration in the mantle wedge is theoretically possible to apply my developed techniques to mantle-derived xenolith, which remains the ancient record of the mantle.

Key words: fluid inclusion, grain-boundary component, mantle xenolith, mantle wedge, geobarometry, Raman spectroscopy, noble gas

* 京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設
〒874-0903 大分県別府市野口原

1. 緒 言

近年、地球表層の環境変動に関する議論が活発であるが、地球内部からもたらされるエネルギーとの関連性が忘れられがちである。例えば、地球深部から火山活動を通して地表へもたらされる二酸化炭素流量は、人為的な排出量の1%に満たないが、地球の年齢で積分すると地球表層付近に存在する総炭素量に匹敵する (Sano and Williams, 1996; Yamamoto *et al.*, 2001)。この事実は、地球表層の炭素が全て地球内部から火山活動を通してもたらされたものであることを示唆するとともに、地球内部には依然として大量の炭素が存在し、今後も現在と同程度の地球深部起源の二酸化炭素流量が継続するという地球表層環境にとって極めて深刻な未来を暗示する。しかも、人為的に排出される二酸化炭素は地表で固定された炭素（化石燃料）を地表（大気・サンゴ礁・森林など）へ移す横滑りの循環に過ぎないが、地球内部から流入する二酸化炭素は地球表層の炭素量を永続的に増大させるという、人為的な擾乱を遙かに凌ぐ潜在的な影響力を有している。そのため、我々の環境が抱える諸問題にはこのような大規模な時空的変遷の末に顕在化したものも少なくない。

ただし、上述のような議論では地球内部からの流入量だけに着目してはならない。例えば、沈み込む海洋プレートとともに地球表層物質が地球内部へ戻っていく可能性も十分考えられよう。それゆえ、地球内部へ沈み込む地球表層物質の行方を追うことも地球全体の物質循環系ひいては地球内部の化学構造や温度構造および物性の進化を見極めるための重要な課題の一つと考えられる。しかし、地球内部へリサイクルされる地球表層物質の流量は室内実験やシミュレーションに頼る部分が多い。そこで筆者は沈み込み帯における物質循環系を解明するため、マントルウェッジ (mantle wedge) 起源の岩石に見られる流体に着目した。マントルウェッジには様々な起源を持つ流体が存在する (Fig. 1)。例えば、沈み込んだ海洋プレートの脱水や脱炭酸に起因する流体や島弧火山活動の源となる初生マグマ、また、マントルに普遍的に存在する流体などである。マントルウェッジを駆け巡るこれらの流体の分布・流量、ならびに起源が明らかになれば地球表層と地球内部をつなぐ物質循環系の定量的な理解が可能になるであろう。

筆者は、共同研究者らとともにマントルウェッジの物質循環系を物質科学的に解き明かすために下の三つ

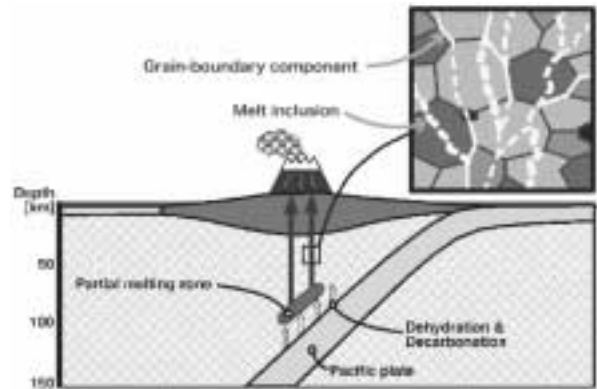


Fig. 1 Schematic cross-section beneath Japan. When aqueous fluid dehydrated from subducted oceanic plate reaches a region with solidus temperature of hydrous peridotite, partial melting in the mantle wedge occurs and produces initial magma. If melt segregation occurs, the initial magma is extracted upwards and leads to subduction-related volcanism. Part of the melt should remain in the mantle wedge as melt inclusions or as grain-boundary components. Both carbonaceous fluid derived from the oceanic plate and aqueous fluid ascending through fore-arc region also partly remain in the mantle wedge.

の課題に取り組んだ。

- ・マントルウェッジ起源岩石（マントル捕獲岩）の採取
- ・マントル捕獲岩に適用できる地質圧力計の開発
- ・マントル捕獲岩の局所分析

本稿では、これらの課題の検討結果の概要を解説し、地球内部物質循環系解明の展望を述べる。

2. マントル捕獲岩

マグマが地球深部から上昇し、地表へ噴出するまでの間のどこかで捕獲され運び上げられた火道の岩石を捕獲岩と呼ぶ (Fig. 2)。特に、マグマがマントルで発生し、その上昇途中でマントル構成岩石を引っ掛けて地表へ運び上げたものはマントル捕獲岩と呼ばれ、採取地直下のマントルの情報を直接与えてくれる極めて重要な岩石である。私の行った一連の研究の醍醐味はこのマントル捕獲岩に見られる流体包有物に秘められた過去の記憶を読み解くことにある。その研究過程は示相化石を用いた古環境解析に似た所がある。様々な年代に噴出したマントル捕獲岩中の流体包有物を用

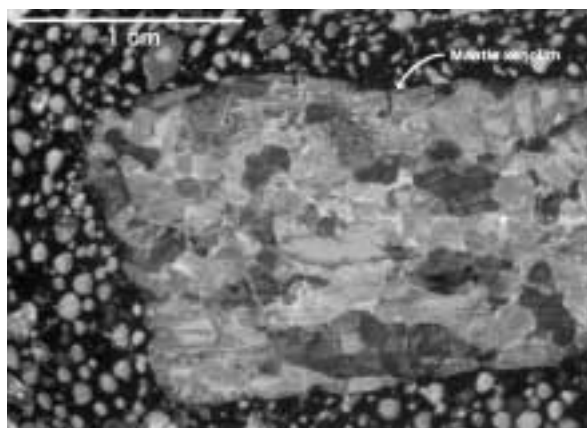


Fig. 2 A photograph of a 500-micrometer thick section of a mantle xenolith from oceanward slope of the Japan Trench. This xenolith consists of olivine, orthopyroxene and clinopyroxene with lesser amounts of chromian-spinel, and shows an allotriomorphic-granular texture. The average diameter of the mineral particle is about 1 mm. Numerous ellipsoidal vesicles are visible in host basalt.

いた研究の結果、地球深部環境の変遷を四次元的（緯度・経度・深度および地質的年代）に論じられるようになった。

最上部マントルを構成している主要な鉱物は、高温高圧実験や火山岩化学組成、地震波特性等によりカンラン石・斜方輝石・単斜輝石およびクロムスピネル（または斜長石やざくろ石）と考えられている。そのような鉱物組み合わせの捕獲岩が見つければマントル捕獲岩である可能性が高い。ただし、マグマ内で晶出した斑晶がマグマ溜まり内で沈積し、似たような鉱物組み合わせを持つ沈積岩を形成する可能性も考えられるため、真にマントル由来かどうかを見極めるにはその岩石の化学組成・由来深度・構成鉱物の形および歪みの有無など様々な情報が必要になる。

マントルは世界中どこでも足の下数十 km に存在する。しかしながらマグマが噴出すればどの火山でもマントル捕獲岩が見られるかと言えばそうではない。活発なマグマ活動が起こっている日本でさえ十数地域でしか見つかっていない。マントル捕獲岩の噴出機構を決めている要素はホストマグマの発生深度・粘性・上昇速度およびマグマ溜まりの有無である。これらの条件が上手く揃わないと、マントル捕獲岩はマグマと反応して溶けたり、マグマ中を沈んでしまい地表に姿

を現さない。

実際にマントル捕獲岩の上昇速度を計算してみよう。ただし、この計算の要とも言えるマグマの粘性に関しては天然における実測例が存在しないため不確定である。しかし、実験測定例（例えば、Taniguchi, 1993; 2000）や今年報告された“斑晶の形状効果を考慮したマグマの粘性測定法 (Ishibashi and Sato, 2007)”からある程度推定することが可能である。マントル捕獲岩の大きさは直径数 cm 以下のものが多いが、数十 cm を超えるものも時折見られる。もし半径 a の球状のマントル捕獲岩（質量 m ）が上昇するマグマ中に静止しているならば、マントル捕獲岩がマグマ流から受ける抵抗は粘性抵抗が卓越しているので、ストークス近似式から下式の関係が成り立つ。

$$6\pi\eta aV = mg$$

ここで η 、 V はそれぞれマグマの粘性と上昇速度である。直径 10 cm のマントル捕獲岩（密度 3.3 g/cm^3 ）が粘性率 $100 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (Ishibashi and Sato, 2007) の上昇するマグマ（密度 2.7 g/cm^3 ）中に静止しているならば、マグマの上昇速度はおよそ 0.033 m/s である。このマグマ中に直径 5 cm のマントル捕獲岩があれば、その運搬速度はおよそ 0.025 m/s であり、30 km の深さで捕獲されたマントル岩石は 14 日間ほどで地表へ運び上げられる。カンラン石中の主要元素の一つであるマグネシウムがこの運搬期間に拡散する平均距離は $1,000^\circ\text{C}$ の状態でおよそ 2 ミクロンほどである (Morioka, 1981)。比較的拡散の速いヘリウムでも 23 ミクロン程度の拡散距離であり (Hart, 1984)、マントル捕獲岩の化学組成はその上昇中、およびその後の冷却期間にホストマグマの影響をほとんど受けないことが分かる。このようにマントル捕獲岩は地球深部の情報を比較的良く保持しており、現在の掘削技術では手の届かない地球深部に直接接触するための理想的な試料と言えよう。

3. マントル捕獲岩に適用できる地質圧力計の開発

マントル捕獲岩を分析することにより、我々は採取地直下の様々な情報をつまびらかに知ることが出来る。しかし、ホストマグマは様々な深さから捕獲岩を運び上げてくるため、それぞれの由来深度を精密に決めなければ地球科学的な議論に使うことはできない。

マントル捕獲岩の由来した深度は、鉱物組み合わせによって定性的に議論できる。例えばクロムスピネ

ルを含むマントル捕獲岩の由来深度はおよそ25~90 kmで、ざくろ石を含むマントル捕獲岩より一般的に浅い。しかしこの境界値は全岩組成に依存し、またその圧力分解能は地球深部を議論するうえでは不十分である。岩石から‘深さ’の情報を抽出する定量的手法として地質圧力計がある。ざくろ石を含むマントル捕獲岩については有効な地質圧力計があり、その‘深さ’を精度良く決めることができる。一方、ざくろ石を含まないマントル捕獲岩の‘深さ’を鉱物組み合わせの制約以上の精度で決める有効な手法は存在しなかった。したがって化学的・物性的にかなり解析が進んでいる最上部マントルについての議論を深度と関連させて展開させるため、これまでになく高精度・高精度の地質圧力計の開発が切望されてきた。

地質圧力計の名こそ冠していないが、マントル捕獲岩の由来深度を探る研究は全く発想の異なる手法を用いて1960年代から行われている。それは流体包有物の持つ残留圧力を利用する手法である。マントル起源の鉱物に見られる流体包有物はマントルの情報を残しており（例えば Burnard *et al.*, 1998; Yamamoto *et al.*, 2004）、しかも一般的に高い内圧を保持している。もっとも良い例は天然ダイヤモンド中の数 GPaにも及ぶ高压流体であろう（例えば Navon, 1991; Schrauder and Navon, 1993; Kagi *et al.*, 2000）。マントル捕獲岩を構成する鉱物は差応力に対してダイヤモンドほど強くはないが、液体二酸化炭素が観察されることなどからマントル捕獲岩構成鉱物中の流体包有物もマントル中で閉じ込められた時の圧力がある程度保持しているものと考えられる。この流体が持つ深度の記憶を何らかの手立てで読み取る事が出来れば、新たな地質圧力計としてマントル捕獲岩全般に適用できる可能性がある。

3.1 マントル捕獲岩中の流体包有物

マントル捕獲岩の薄片を顕微鏡で観察すると、多くの場合、鉱物中に流体包有物が見られる。顕微分光分析や冷却ステージを用いた凝固温度測定等によると、これらの流体の主成分は水・一酸化炭素ならびに二酸化炭素の純相または混合相である。中でも傑出して多いのが二酸化炭素である。Fig. 3は極東ロシアで採取したマントル捕獲岩に見られる液体二酸化炭素包有物である。ホスト鉱物（斜方輝石）の形が流体包有物の内側に現れる負結晶と呼ばれる形を呈している。負結晶は流体包有物がホスト鉱物内で最も安定に存在できる形態であり、そのような流体包有物は周りの環境

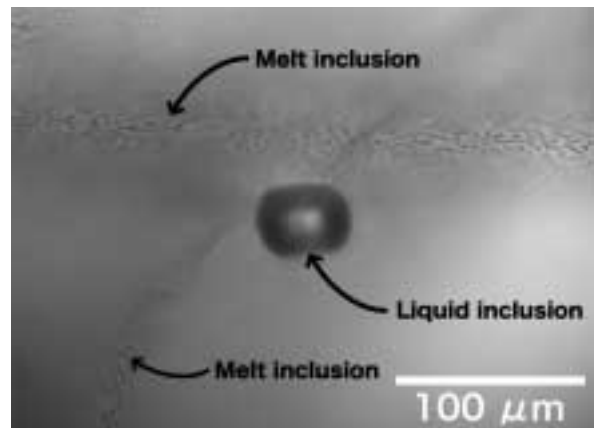


Fig. 3 A photomicrograph of xenolith thick section from Far Eastern Russia. Two generation of fluid inclusion are visible in an orthopyroxene. The one is vermicular melt inclusions within a plane of the section. The other is indicated by a liquid inclusion, whose shape is negative crystal.

（温度や圧力）と平衡に近い状態であると推定できるため、圧力指標として最適の流体包有物である。

読者の中にはなぜ二酸化炭素包有物がマントルに存在するのか不思議に思われる方がおられるかもしれない。その起源や形成過程に関して固まった説は無いが、提唱されている形成過程について簡単にまとめる。マントル内における炭素自身の存在は、ダイヤモンドの存在や噴気ガス中の二酸化炭素から誰もが認める所であろう。マントル内における炭素の存在形態としては、グラファイト・メタン・一酸化炭素・二酸化炭素・炭酸塩鉱物がある。マントル構成鉱物中に不純物として存在する炭素も考えられるが、高压下では炭素の鉱物（かんらん石）への溶解度は小さいため（Tingle *et al.*, 1988）多くはマグネシウムを含む炭酸塩鉱物として存在する（Schwab and Freisleben, 1988）。炭酸塩鉱物はマントル対流等により約100 kmよりも浅い深度に移動すると、マグネサイト（ $MgCO_3$ ）成分が輝石と反応し、かんらん石の生成とともに遊離二酸化炭素を放出すると考えられている（Shcheka *et al.*, 2006）。このモデルが正しければ、100 kmより浅いマントルに炭素が存在する際、その存在形態は主に二酸化炭素であろう。このような減圧に伴ってマグネサイト成分から遊離した二酸化炭素や、マントル鉱物の塑性変形中に粒間に存在した二酸化炭素が取り込まれて流体包有物となることが考えられる。また、マントル内を通過した珪酸塩メルトが

ントル鉱物に包有された場合には、珪酸塩成分がメルト包有物から周りの鉱物に拡散し、揮発性成分（二酸化炭素）が取り残されて二酸化炭素包有物になる可能性もある（Yamamoto *et al.*, 2003; Hirano *et al.*, 2004）。近年、マントル内の温度勾配がメルトと揮発性成分（二酸化炭素）の分離を引き起こすとの注目すべき実験結果が報告された（Schiano *et al.*, 2006）。二酸化炭素は熱膨張率が大きいので、メルト包有物内で遊離した二酸化炭素は低温側へ移動する。一方、相対的に高温側に配置した珪酸塩メルトは高温側の包有物壁を溶かしつつ低温側で結晶化するという過程を続けてメルト包有物として独立し、残された二酸化炭素は二酸化炭素包有物となる。この説が流体包有物の形成過程として普遍的なものであるならば、メルト包有物と二酸化炭素包有物は同源ということになる。一方、起源を異にする複数の流体がマントルに侵入した場合には、様々な同位体組成を持つ流体包有物がマントル内に散在することになるだろう。

3.2 顕微ラマン二酸化炭素密度計

二酸化炭素包有物の密度（圧力）測定にはマイクロサーモメトリー（Microthermometry）と呼ばれる手法が良く用いられている。この手法は二酸化炭素の気相—液相境界温度の密度依存性を利用したものであり、加熱冷却ステージを用いた流体包有物中の気泡（または液相）の消失温度の観察から二酸化炭素密度を推定する。そのため、当手法の適用にはいくつかの制限や困難がある。例えば、およそ5ミクロン以下の流体包有物や気相—液相が共存しない密度範囲の流体包有物には適用できず、測定に要する時間も比較的長い。このような隘路を打開すべく顕微ラマン分光法がマントル捕獲岩中の二酸化炭素包有物に応用され始めている（Pasteris and Wanamaker, 1988; Kerkhof and Olsen, 1990; Frezzotti *et al.*, 1992; Seitz *et al.*, 1996; Yamamoto *et al.*, 2002; 2003; 2007; Hirano *et al.*, 2004）。

ラマン分光法とは、物質に光（レーザー光）を通した時に物質中の原子や分子の振動によって非弾性的に散乱されるラマン散乱光を分光し、そのスペクトルから物質中の分子や原子の種類や結合状態を解析する手法である。二酸化炭素のラマンスペクトルを測定すると二酸化炭素分子の振動に起因するピークが波数 $1,388\text{ cm}^{-1}$ と $1,285\text{ cm}^{-1}$ 付近に観測される（Fig. 4）。この2つのピークは Fermi diad（フェルミ分裂）と呼ばれるもので、二酸化炭素の3つの基準振動のうち対

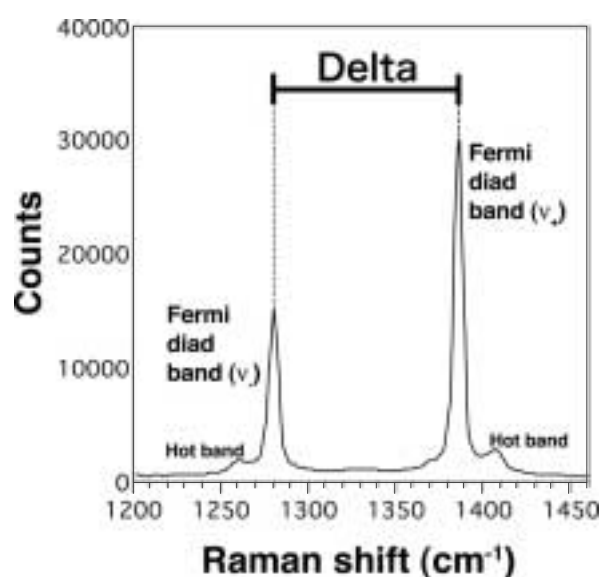


Fig. 4 Raman spectrum of CO₂ in a fluid inclusion in a mantle xenolith. Delta designates the Fermi resonance split between the upper (ν_+) and lower (ν_-) bands.

称伸縮振動 ($1,333\text{ cm}^{-1}$) と変角振動 (667 cm^{-1}) の倍音が非調和に相互作用（フェルミ共鳴）することによって現れる。この2本のピークの波数差 ($\nu_+ - \nu_-$, Delta) は圧力と正の相関を持ち（Bertrán, 1983）、この波数差と二酸化炭素密度との関係は線形であると推定された（Rosso and Bodnar, 1995; Hacura *et al.*, 1990）。Kawakami *et al.* (2003) は二酸化炭素流体の温度を臨界温度 (31.1°C) 以上まで上げることによって $0.1\sim 1.2\text{ g/cm}^3$ の連続した密度範囲で Delta を測定し、Delta と密度の関係を三次式で近似した。また Kawakami *et al.* (2003) は Delta が温度の上昇に伴う二酸化炭素の圧力上昇の影響を受けない事も発見している。これは Delta が圧力指標ではなく密度指標である事を示す重要な発見である。近年、Yamamoto and Kagi (2006) は耐圧光学セルを用いて測定された二酸化炭素流体の密度と Delta のデータをまとめ、8次近似の有用性を提唱した（Fig. 5）。この近似式を用いると、Delta が未測定の高密度領域 ($>1.24\text{ g/cm}^3$) の Delta と密度の関係のある程度予言することができる。

以下に顕微ラマン分光法を用いた二酸化炭素密度計の長所を整理する。

- (1) 1ミクロン径程度の流体包有物にも適用可能
- (2) マイクロサーモメトリーでは測定できない密度

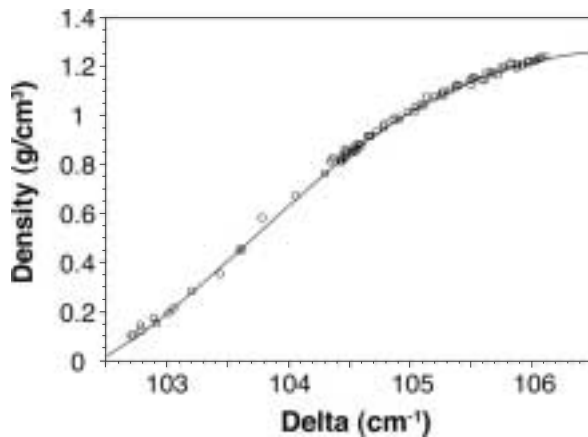


Fig. 5 Plots of Delta vs. density of CO₂. Data are from Kawakami *et al.* (2003), Yamamoto *et al.* (2005) and Yamamoto and Kagi (2006).

範囲の二酸化炭素包有物にも適用可能

(3) 一回の分析に要する時間が短い (数分程度)

このように、顕微ラマン分光法を用いることによって、様々な密度を持つ二酸化炭素包有物を、その大きさや形で差別することなく短時間で、且つ精度良く測定する事が可能になった。

3.3 マントル捕獲岩の由来深度と地温勾配

得られた二酸化炭素密度から、マントル捕獲岩がマグマに捕獲された圧力を知るには Fig. 6 に示される関係を用いれば良い。Fig. 6 は二酸化炭素の相図である。例えばマイクロサーモメトリーや顕微ラマン分光法によってある二酸化炭素密度が得られた場合、その二酸化炭素流体が安定に存在しうる温度-圧力条件はその密度の等密度線上にある。この等密度線と、マントル捕獲岩がマントルに存在していた時の温度を推定する手法 (地質温度計) によって見積もられた地質温度との交点がマントル捕獲岩の捕獲圧力 (由来深度) である。Yamamoto *et al.* (2002) では極東ロシアのマントル捕獲岩から 1.04 GPa の捕獲圧力を得ており、深度にすると約 38 km となる (Fig. 6)。極東ロシアの地殻の厚さは 30~34 km であるため (Karp and Leikov, 1990; Zai-Yi *et al.*, 1992), このマントル捕獲岩はマントル最上部からもたらされたものと判断された。また、Hirano *et al.* (2004) では、日本海溝海側斜面で採取されたかんらん石捕獲結晶 (Hirano *et al.*, 2001; 2006) に見られる流体包有物の二酸化炭素密度を測定し、その等密度線と地温勾配の交点から由来深度を求めている。さらに、私は共同研究者らとともに下部地殻起源のはんれい岩捕獲岩と上部マント

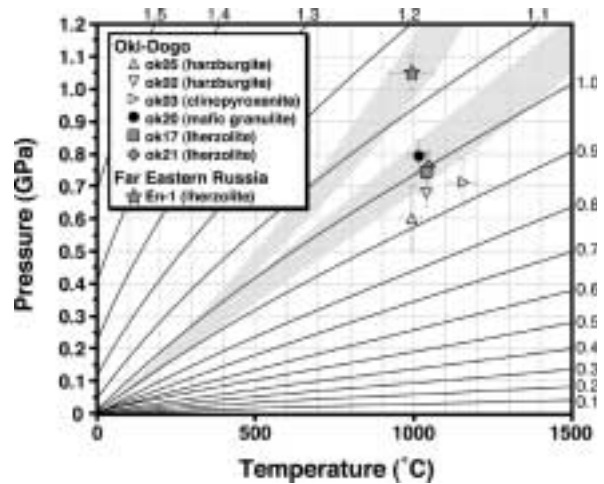


Fig. 6 P-T diagram for the system CO₂ with P-T data of Oki-Dogo (Yamamoto *et al.*, 2007). Contours represent density of CO₂ in g/cm³. Shaded areas indicate possible geothermal gradient for each region.

ル起源のかんらん岩捕獲岩に見られる流体包有物の二酸化炭素密度から過去のモホ面深度を推定する試みも行った (Yamamoto *et al.*, 2007)。このように流体包有物を圧力指標とした研究例が増加しつつあり、最上部マントルの描像が次第に解像度を増している。

マントル捕獲岩から得られた由来深度と地質温度の関係はマントル捕獲岩が地表へもたらされた時代の地温勾配の推定にもつながる。Yamamoto *et al.* (2007) ではマントル捕獲岩から推定された隠岐島後直下のリソスフェアの地温勾配が 11~17 Myr の若い海洋プレートの推定地温勾配に近いことを指摘している。この発見は、11~17 Ma に突如として出現した謎の多い日本海の形成機構を考える上で有用な知見になりうるかもしれない。現在の地球内部の温度構造は温度プローブによる地表付近の温度勾配や地震波トモグラフィによって盛んに議論されている。これらの議論にマントル捕獲岩から推定された過去の地温勾配が組み合わせるとその地域の温度構造の時間変化が議論できるようになる。異なった年代に同地域に噴出したより多くのマントル捕獲岩を用いれば、温度構造の変遷をより詳細に論じられるであろう。

3.4 圧力計完成までの課題

本稿で紹介してきた流体包有物を用いた地質圧力計は岩石種をそれほど選ばない。原理的には地質温度と流体の密度が分かれば適用できる。また、流体包有物が見られないマントル捕獲岩の由来深度も、地質温度

が推定できれば、同じ溶岩から採取された他のマントル捕獲岩を用いて見積もられた地温勾配を用いることで大まかに推定することもできる。当手法によって推定された圧力値の誤差はおよそ5%（例えば40 km \pm 2 km）ほどであり（山本ほか, 2005）、マントル最上部付近の描像を十分議論しうる解像度である。

このように当手法はマントル最上部付近に適用できる地質圧力計として広範に応用できる可能性があるが、一点だけ克服せねばならない課題を負っている。それは流体包有物を包有している鉱物の変形量の見積りである。マントル捕獲岩中の流体包有物はマントル捕獲岩の上昇及び冷却中に膨張もしくは収縮し、密度を変化させるかもしれない。前述した地質圧力計の要は流体包有物の密度を精確に求めることにあり、流体包有物の密度の二次的な変化は地質圧力計の確度に著しい影響を及ぼす。流体包有物の密度の変化は取り囲む鉱物の変形量であるため、その影響を精確に補正するには鉱物の二種類ある変形機構（弾性変形・塑性変形）両方について精査する必要がある。マントル捕獲岩がホストマグマによって地表付近へもたらされ冷却していく間に生じる弾性的な変形量は鉱物の状態方程式や熱膨張率を用いて計算することができる。その結果によると流体包有物の密度に対する影響は2~3%程度に収まるものと考えられる（Yamamoto *et al.*, 2002）。流体包有物を取り囲む結晶格子の塑性変形は深刻な影響を与える。マントル中の鉱物と内包される負結晶の流体包有物は圧力平衡にあるが、マントル捕獲岩として地表付近まで移動する間、鉱物の持つ圧力はその時の外圧に応答して減少する。しかし、流体包有物の内圧は温度に強く依存しているため、1,000°C程度のマグマに包まれている間は、地表付近であってもその内圧はマントルにあった時とそれほど変わらない。それゆえ、地表付近にもたらされたマントル捕獲岩中の流体包有物とその周りの結晶格子の間には数百MPaという巨大な差応力が長時間はたらく可能性がある（Roedder, 1965; Andersen *et al.*, 1984）。このような差応力下で鉱物がどの程度歪むかは構成方程式を用いて計算することができ、少なくとも輝石中の流体包有物に関してはその影響は無視できる程度であると報告されている（Yamamoto *et al.*, 2002; 2007; 山本ほか, 2005）。しかし、その計算に必要な鉱物の物性値は人工的に合成された鉱物から得られたものが多い。また、数百MPaにも及ぶ巨大な差応力下では、鉱物内で発生した転位が絡まり合い、鉱物の塑性変形

強度を増大させるという報告もあり（Bulatov *et al.*, 2006）、鉱物の塑性変形が流体包有物の密度にどの程度の影響を与えているかは未だに判然としない。そこで私は、共同研究者らと二酸化炭素包有物を有する天然のマントル捕獲岩を用いて様々な変形実験を繰り返してきた。上昇途上のマントル捕獲岩中の流体包有物の密度変化量は、言い換えれば鉱物の変形量であるため、実験結果の解析を進めていけば流体包有物圧力計の確度推定とともにマントル鉱物の変形機構の本質にも迫れる可能性がある。それらの成果は近い将来に報告できるものと確信している。

4. マントル流体の局所分析

前述の地質圧力計を適用したマントル捕獲岩は、大深度掘削によって採取された岩石試料に勝る価値を持つ。なぜならボーリングによって40 km や50 km といった深さから岩石を採取する技術は存在しないからである。さらに様々な年代に噴出したマントル捕獲岩を用いれば様々な年代のマントル構造を直接探ることができる。そのような試料に高い空間分解能を持つ化学分析法を適用すれば、マントル流体の四次元（緯度・経度・深度および地質的年代）分布が見えてくるかもしれない。

マントルウェッジには沈み込んだ海洋プレートから直接由来した流体や部分溶融メルト、普遍的なマントル流体など様々な流体が駆け巡っていると予想されている（Fig. 1）。沈み込み帯の物質循環系を定量的に解釈するための最初の一步はそれらの流体をマントルウェッジ由来の捕獲岩から探し出すことにある。プレート収束域に産するマントル捕獲岩の薄片を観察すると流体の在り処は流体包有物と粒間であることが分かる。これらの流体を非破壊で、もしくは抽出して分析し、その起源を同定できればマントルウェッジの流体循環系が見え始めるだろう。

4.1 流体包有物の分析例

流体包有物は大きく二種類に区分できる。一つは常温で固体のメルト包有物。もう一つは常温で液体もしくは気体の包有物。時折両者が共存している包有物も見られる。常温で固体のメルト包有物ならば、メルト包有物の断面を削り出して電子線マイクロプローブなどの局所分析法でその主成分元素組成を比較的容易に分析することができる。その一方で液体もしくは気体包有物は高い内圧を保持していることが多く、断面を削り出して分析することは困難である。従来、液体も

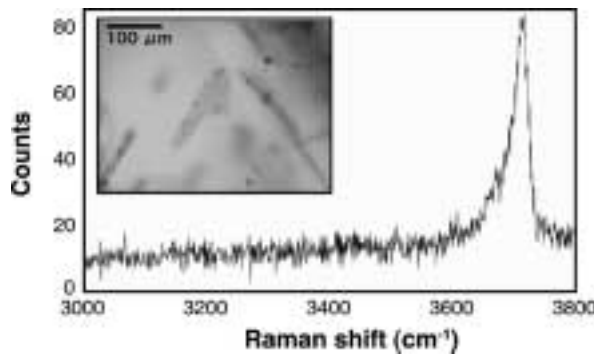


Fig. 7 A photomicrograph of a fluid inclusion in an orthopyroxene in a mantle xenolith from Far Eastern Russia and a Raman spectrum of the inclusion located almost at the center in the photomicrograph (Yamamoto, 2001). Raman band around 3700 cm^{-1} results from OH stretching mode in a hydrous mineral.

しくは気体包有物の主成分元素組成分析にはマイクロサーモメトリーを多用してきたが、微小な流体包有物中に複数種の液体が不混和に共存している場合はそれらの同定は極めて困難である。そのため最近では顕微分光分析法を併用するようになってきており、高い空間分解能を有する非破壊分析法として顕微ラマン分光分析法が注目されている。Fig. 7は顕微ラマン分光分析法によって測定したマントル捕獲岩中の包有物壁のラマンスペクトルであり、蛇紋石の存在がうかがえる。これは元々水を主成分とする流体包有物であったが、マントル捕獲岩が地表付近で冷却するとともに周囲の斜方輝石と反応し、蛇紋石を形成したものと考えられる。包有物内に液体水は見られないためマイクロサーモメトリーでは得られない知見である。ちなみにマントル鉱物からの液体水および含水鉱物包有物の報告は未だ4地域5例しかない (Roedder, 1965; Trial *et al.*, 1984; Schiano *et al.*, 1995; Yamamoto, 2001; Mizukami *et al.*, 2004)。

流体包有物の微量元素組成に関しては Laser Ablation (LA)-ICP-MS による分析値が報告され始めている。しかし精確な同位体分析を行うには流体包有物内の測定対象元素の量が不足している場合が多い。筆者らは超高真空中でマントル鉱物を破壊し、複数の流体包有物中の希ガスをまとめて抽出し、その同位体組成を分析した (Yamamoto *et al.*, 2004)。超高真空中での鉱物の破碎 (真空破碎法) は希ガス抽出法として良く用いられているものであるが、鉱物中に複数種の流体包有物が存在していた場合、そのどちらの特徴を捉

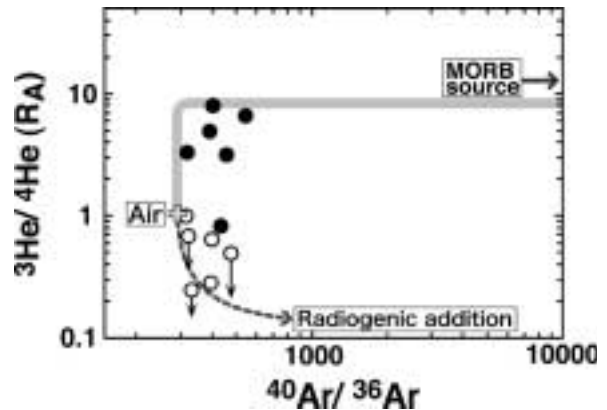


Fig. 8 Noble gas isotopic compositions of gases extracted from fluid inclusions by the crushing method for the Far Eastern Russian mantle-derived xenoliths (after Yamamoto *et al.*, 2004). A broken line indicates predicted radiogenic change in noble gas isotopic compositions of the original mantle source having an initial isotopic ratio like air. Samples designated by closed circles have both inclusions of liquid CO_2 and melt. Whereas open circles indicate samples having no liquid CO_2 inclusion. From the observation, we infer that the Far Eastern Russian mantle is MORB-like source that was partly infiltrated by subduction-related melt.

えているか判断に困る事態に陥る危険性をはらんでいる。そこで筆者らは極東ロシアのマントル捕獲岩の薄片を詳細に観察し、真空破碎法による希ガスの抽出源と考えられる流体包有物の特定に挑んだ。その観察の結果、抽出源としては液体二酸化炭素包有物とメルト包有物中の収縮泡しかないと判断された。そこで、液体二酸化炭素包有物とメルト包有物双方を有するマントル捕獲岩と液体二酸化炭素包有物が見られないマントル捕獲岩を選り分け、それぞれの流体包有物の希ガス同位体的特徴を同定することに成功した (Fig. 8)。最近ではレーザーアブレーション法によって流体包有物一つひとつの希ガス同位体組成を分析することも可能になってきている (例えば Burnard *et al.*, 1998; Kendrick *et al.*, 2001)。

4.2 粒間成分の分析例

マントル捕獲岩を構成する鉱物の粒界には、光学顕微鏡では何も見えなくとも粒間成分と呼ばれる相の存在が窺える場合がある。例えば、希酸で洗ったマントル鉱物とその処理液の微量元素組成を比較すると鉱物の周りに微量元素を濃縮した相の存在が推察される

(Suzuki, 1987; Ionov *et al.*, 1995; Yamamoto, 2001)。Hiraga *et al.* (2007a) は透過電子顕微鏡による分析から、マントルには厚さ0.7~0.8 nmの粒間成分が普遍的に存在することを示しており、マントル構成鉱物に対してカリウム以上の不適合性を持つ元素のマントル構成鉱物からの分離(凝離)による形成過程を詳細に報告している(Hiraga *et al.*, 2007b)。Ishimaru *et al.* (2007) はLA-ICP-MSによって、マントル捕獲岩中の粒間から鉱物との平衡分配と調和的な微量元素組成を検出した。しかし、粒間には光学顕微鏡で検出可能な数ミクロン以上の幅を持つ珪酸塩メルトもしくは炭酸塩メルト(ガラス)が観察される場合もある(例えばColtorti *et al.*, 2000)。数nm以上の幅を持つ粒間成分は鉱物からの平衡分離過程(Hiraga *et al.*, 2007a)によるものとは考えられないため、粒間に浸入した外来流体である可能性が示唆される。Fig. 9は京都大学地球熱学研究施設において筆者らがLA-ICP-MSを立ち上げる際に得た極東ロシアのマントル捕獲岩の粒間成分の微量元素組成である。参考のためにYamamoto (2001)で報告した同じマントル捕獲岩の単斜輝石と岩石全体の微量元素組成も合わせて示している。通常、マントル捕獲岩中で微量元素が最も多く分配されるのは単斜輝石であり、岩石全体の微量元素組成は単斜輝石と似たパターンを示す。ところがこ

のマントル捕獲岩の微量元素組成は明らかに粒間成分の微量元素組成に支配されている。しかも水溶液に溶け難い特徴を持つ元素群(Th, Nb, Ta, Ce(IV), Hf and Zr)の負異常が顕著であり、粒間成分は含水流体である可能性がうかがえる。極東ロシアのマントル捕獲岩からはこの他にも水包有物の存在(Fig. 7)や放射起源的な希ガス同位体組成(Fig. 8)が報告されており、更に、リチウム同位体組成から沈み込んだ海洋プレート由来成分の影響も示唆されている(Nishio *et al.*, 2004)。極東ロシアのマントル捕獲岩についてこれまでに報告されている成果をまとめると次のような流体侵入史が描ける。「一億年以前からユーラシア大陸東縁のプレート収束域であった極東ロシアの深さ38 km(流体包有物圧力値)のマントルウェッジは、最初MORB源的な同位体組成を持っていた(二酸化炭素包有物の希ガス同位体組成)。そこに、約一千万年前(マントル捕獲岩の噴出年代)、沈み込んだ海洋プレートから由来した含水流体が浸入した(リチウム同位体組成・メルト包有物の希ガス同位体組成・水包有物の存在ならびに粒間流体の微量元素組成)。そして、このマントルはマントル捕獲岩として約一千万年前に玄武岩質マグマによって地表へもたらされた」。このように一つの地域のマントル捕獲岩を多角的に調べることで、マントルウェッジを駆け巡る流体の特徴や存在形態、起源を特定できるようになるであろう。

5. ま と め

マントル鉱物に見られる流体包有物は地球深部環境の化石である。その残留圧力や化学組成を精密に読み取ることができればその流体の起源や存在していた深さを復元できる。そこで、二酸化炭素を主成分とする流体包有物に対して顕微ラマン分光分析を行い、分子の振動から残留圧力を読み解く手法を開発した。この手法の適用によって、マントル捕獲岩の由来深度を±2 kmほどの誤差で議論できるようになった。

沈み込み帯に産するマントル捕獲岩に対し、流体包有物の残留圧力を利用した地質圧力計と局所同位体分析を組み合わせると、マントルウェッジを駆け巡るプレート由来流体が見えてくる。更に、マントル捕獲岩は過去に活動したマグマによって地表へ運び上げられたものであるため、過去の地球深部環境を知ることができる。つまり、マントルウェッジで展開されている流体循環系を四次元的(緯度・経度・深さおよび地質的年代)に議論することが技術的に可能と

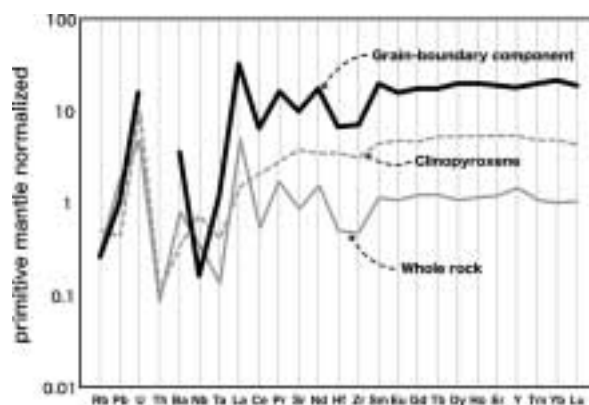


Fig. 9 A normalized trace element pattern for grain-boundary component in a mantle xenolith analyzed by LA-ICP-MS accompanied by that of clinopyroxene and whole rock. Data of the clinopyroxene and the whole rock are from Yamamoto (2001). Generally, trace elements tend to occur mostly in clinopyroxene in mantle xenolith. Trace element composition of the xenolith is, however, strongly controlled by the occurrence of the grain-boundary component.

なった。

6. 今後の展望

プレート収束域に産するマントル捕獲岩の噴出年代と由来深度、局所微量元素組成をある程度盲目的に測定していけば、全地球的に巻き起こっている物質循環系が見えてくるかもしれない。例えば、マントルウェッジに存在する二酸化炭素の量とその起源（同位体比）、ならびに沈み込む海洋プレート内の石灰岩や有機堆積物の量が分かれば、より深部に沈み込んでいく炭素の流量が概算できる。これに石灰岩など海洋プレート構成物質の高温高压実験結果（例えば Isshiki *et al.*, 2004）を勘案すると全地球規模の炭素循環系を議論できる日が迎えられるかもしれない。そして、そのようにして推定された過去の物質循環系と地震波観測などによって推測されている現在の地球内部構造を比較することにより、我々はその延長線上にある未来の地球の姿を垣間見ることができるとも思われる。

謝 辞

私は1996年の入会以来、日本地球化学会および学会員の皆様からのひとかたならぬご厚恩に浴して参りました。この度も日本地球化学会奨励賞ならびに本論文を執筆する機会を与えて戴きましたこと心より感謝致しております。地球化学を研究の方途とするきっかけになりましたのは、広島大学二回生の折、同位体比を使った議論の美しさを熱く語られていた西尾嘉朗博士（当時四回生）の姿を見かけたことでした。そして、研究室配属の際、流体包有物を用いた卒業研究を志望した私に佐野有司博士は「蛍石の地球化学」というテーマを鉱床学者の渡邊洵博士とともに考えて下さいました。五十嵐丈二博士、日高洋博士、寺田健太郎博士、高畑直人博士には超高真空技術や質量分析法、誤差論など分析化学の土台を仕込んで戴きました。東大海洋研究所に依託学生として所属していた折には野崎義行博士、蒲生俊敬博士、天川裕史博士、児玉幸雄博士、堤真博士らに海洋化学の世界に触れる機会を与えて戴きました。大学院時代を過ごした東大地震研究所では、兼岡一郎博士の「僕は指導教官ではなく担当教官である」とのお言葉に甘え様々な研究テーマに挑戦することができました。修士二年の初夏から挑み始めた本研究にも温かいご助言をたくさん戴き、いつも後ろからそっと支えて戴けているような気持ちを抱いております。三浦弥生博士、佐々田俊夫博士、岩田

尚能博士、羽生毅博士、熊谷英憲博士には希ガス同位体の分析法を基礎から丁寧に教えて戴きました。中井俊一博士ならびに研究室の皆様にはクリーンルーム技術を指南して戴きました。研究員として所属していた東大地殻化学実験施設の野津憲治博士、長尾敬介博士はじめ構成員の皆様には火山化学・隕石学ならびに結晶学に触れる機会を与えて戴きました。東京工業大学の高橋栄一博士は当時七人目の研究員として快く受け入れて下さり、高温高压科学と間近に接する機会を与えて下さいました。研究員としてフランス共和国IPGPに赴任した際にはB. Marty博士、P. G. Burnard博士らが研究環境や言葉の違いに戸惑う私を家族ぐるみで温かく迎え入れて下さいました。柴田智郎博士、横地麗果博士からの多くのご助言も渡仏中の研究生活の大きな支えでした。角野浩史博士、谷水雅治博士、平野直人博士をはじめ同分野に多くの優秀な同輩を持たれたことも研究を進める上で大きな刺激となりました。ここでは書ききれませんが、現在の職場の皆様はじめ本当に多くの方々のご助言やご支援を戴いて参りました。この場をお借りして感謝の意を表します。鍵裕之博士、石橋秀巳博士には本原稿に関して多くの建設的なご意見を戴きました。最後になりましたが、本賞に推薦して下さいました鍵裕之博士には、大学院時代から分光学や高压化学を熱く楽しく指導して戴き、様々な研究分野や測定技術に挑戦する体質を植え付けて戴きました。これからも手持ちの技術に囚われず、どん欲な好奇心を抱き続けていきたいと考えております。

参 考 文 献

- Andersen, T., O'Reilly, S. Y. and Griffin, W. L. (1984) The trapped fluid phase in upper mantle xenoliths from Victoria, Australia: implications for mantle metasomatism. *Contrib. Mineral. Petrol.* **88**, 72-85.
- Bertrán, J. F. (1983) Study of the Fermi doublet $\nu_1-2\nu_2$ in the Raman spectra of CO₂ in different phases. *Spectrochim. Acta* **39A**, 119-121.
- Bulatov, V. V., Hsiung, L. L., Tang, M., Arsenlis, A., Bartelt, M. C., Cai, W., Florando, J. N., Hiratani, M., Rhee, M., Hommes, G., Pierce, T. G. and de la Rubia, T. D. (2006) Dislocation multi-junctions and strain hardening. *Nature* **440**, 1174-1178.

- Burnard, P. G., Farley, K. A. and Turner, G. (1998) Multiple fluid pulses in a Samoan harzburgite. *Chem. Geol.* **147**, 99–114.
- Coltorti, M., Beccaluba, L., Bonadiman, C., Salvini, L. and Siena, F. (2000) Glasses in mantle xenoliths as geochemical indicators of metasomatic agents. *Earth Planet. Sci. Lett.* **183**, 303–320.
- Frezzotti, M. L., Burke, E. A. J., De Vivo, B., Stefanini, B. and Villa, I. M. (1992) Mantle fluids in pyroxenite nodules from Salt Lake Crater (Oahu, Hawaii). *Eur. J. Mineral.* **4**, 1137–1153.
- Hacura, A., Bródka, A., Nikiel, L. and Baglin, F. G. (1990) High pressure Raman study of Fermi resonance spectrum in gaseous carbon dioxide. *J. Mol. Struct.* **218**, 297–302.
- Hart, S. R. (1984) He diffusion in olivine. *Earth Planet. Sci. Lett.* **70**, 297–302.
- Hiraga, T. and Kohlstedt, D. L. (2007a) Equilibrium interface segregation in the diopside-forsterite system I: analytical techniques, thermodynamics, and segregation characteristics. *Geochim. Cosmochim. Acta*, in press.
- Hiraga, T., Hirschmann, M. M. and Kohlstedt, D. L. (2007b) Equilibrium interface segregation in the diopside-forsterite system II: applications of interface enrichment to mantle geochemistry. *Geochim. Cosmochim. Acta*, in press.
- Hirano, N., Kawamura, K., Hattori, M., Saito, K. and Ogawa, Y. (2001) A new type of intra-plate volcanism; young alkali-basalts discovered from the subducting Pacific Plate, northern Japan Trench. *Geophys. Res. Lett.* **28**, 2719–2722.
- Hirano, N., Yamamoto, J., Kagi, H. and Ishii, T. (2004) Young olivine xenocryst-bearing alkali-basalt from the oceanward slope of the Japan Trench. *Contrib. Mineral. Petrol.* **148**, 47–54.
- Hirano, N., Takahashi, E., Yamamoto, J., Machida, S., Abe, N., Ingle, S., Kaneoka, I., Hirata, T., Kimura, J., Ishii, T., Ogawa, Y. and Suyehiro, K. (2006) Evidence for partial melt in Earth's asthenosphere: volcanism in response to plate flexure during subduction of the Cretaceous Pacific Plate. *Science* **313**, 1426–1428.
- Ionov, D. A., Prikhod'ko, V. S. and O'Reilly, S. Y. (1995) Peridotite xenoliths in alkali basalts from the Sikhote-Alin, southeastern Siberia, Russia: trace-element signatures of mantle beneath a convergent continental margin. *Chem. Geol.* **120**, 275–294.
- Ishibashi, H. and Sato, H. (2007) Viscosity measurements of subliquidus magmas: Alkali olivine basalt from the Higashi-Matsuura district, Southwest Japan. *J. Vol. Geotherm. Res.* **160**, 223–238.
- Ishimaru, S., Arai, S., Ishida, Y., Shirasaka, M. and Okrugin, V. M. (2007) Melting and multi-stage metasomatism in the mantle wedge beneath a frontal arc inferred from highly depleted peridotite xenoliths from the Avacha volcano, southern Kamchatka. *J. Petrol.*, in press.
- Isshiki, M., Irifune, T., Hirose, K., Ono, S., Ohishi, Y., Watanuki, T., Nishibori, E., Takata, M. and Sakata, M. (2004) Stability of magnesite and its high-pressure form in the lowermost mantle. *Nature* **427**, 60–63.
- Kagi, H., Davidson, R. L. P., Goncharov, A. F., Mao, H. K. and Hemley, R. J. (2000) Evidence for ice VI as an inclusion in cuboid diamonds from high P-T near infrared spectroscopy. *Min. Mag.* **64**, 1089–1097.
- Karp, B. and Leikov, E. P. (1990) Geological structure, composition and evolution of crustal layers of the Japan Sea. *Tectonophysics* **181**, 277–283.
- Kawakami, Y., Yamamoto, J. and Kagi, H. (2003) Micro-Raman densimeter for CO₂ inclusions of mantle-derived minerals. *Applied Spectroscopy* **57**, 1333–1339.
- Kendrick, M. A., Burgess, R., Patrick, R. A. D. and Turner, G. (2001) Halogen and Ar-Ar age determinations of inclusions within quartz veins from porphyry copper deposits using complementary noble gas extraction techniques. *Chem. Geol.* **177**, 351–370.
- Kerkhof, A. M. Van den and Olsen, S. N. (1990) A natural example of superdense CO₂ inclusions: microthermometry and Raman analysis. *Geochim. Cosmochim. Acta* **54**, 895–901.

- Mizukami, T., Wallis, S. R. and Yamamoto, J. (2004) Natural examples of olivine lattice preferred orientation patterns with a flow-normal a-axis maximum. *Nature* **427**, 432–436.
- Morioka, M. (1981) Cation diffusion in olivine-. Ni-Mg, Mn-Mg, Mg and Ca. *Geochim. Cosmochim. Acta* **45**, 1573–1580.
- Navon, O. (1991) High internal pressures in diamond fluid inclusions determined by infrared absorption. *Nature* **353**, 746–748.
- Nishio, Y., Nakai, S., Yamamoto, J., Sumino, H., Matsumoto, T., Prikhod'ko, V. S. and Arai, S. (2004) Lithium isotopic systematics of the mantle-derived ultramafic xenoliths: implications for EM 1 origin. *Earth Planet. Sci. Lett.* **217**, 245–261.
- Pasteris, J. D. and Wanamaker, B. J. (1988) Laser Raman microprobe analysis of experimentally re-equilibrated fluid inclusions in olivine:some implications for mantle fluid. *Am. Mineral.* **73**, 1074–1088.
- Roedder, E. (1965) Liquid CO₂ inclusions in olivine-bearing nodules and phenocrysts from basalts. *Am. Mineral.* **50**, 1746–1782.
- Rosso, K. M. and Bodnar, R. J. (1995) Microthermometric and Raman spectroscopic detection limits of CO₂ in fluid inclusions and the Raman spectroscopic characterization of CO₂. *Geochim. Cosmochim. Acta* **59**, 3961–3975.
- Sano, Y. and Williams, N. S. (1996) Fluxes of mantle and subducted carbon along convergent plate boundaries. *Geophys. Res. Lett.* **23**, 2749–2752.
- Schiano, P., Clocchiatti, R., Shimizu, N., Maury, R. C., Jochum, K. P. and Hofmann, A. W. (1995) Hydrous, silica-rich melts in the sub-arc mantle and their relationship with erupted arc lavas. *Nature* **377**, 595–600.
- Schiano, P., Provost, A., Clocchiatti, R. and Faure, F. (2006) Transcrystalline melt migration and Earth's mantle. *Science* **314**, 970–974.
- Schrauder, M. and Navon, O. (1993) Solid carbon dioxide in a natural diamond. *Nature* **365**, 42–44.
- Schwab, R. G. and Freisleben, B. (1988) Fluid CO₂ inclusions in olivine and pyroxene and their behaviour under high pressure and temperature conditions. *Bull. Mineral.* **111**, 297–306.
- Seitz, J. C., Pasteris, J. D. and Chou, I. -M. (1996) Raman spectroscopic characterization of gas mixtures. II. Quantitative composition and pressure determination of the CO₂-CH₄ system. *Am. J. Sci.* **296**, 577–600.
- Shcheka, S. S., Wiedenbeck, M., Frost, D. J. and Keppler, H. (2006) Carbon solubility in mantle minerals. *Earth Planet. Sci. Lett.* **245**, 730–742.
- Suzuki, K. (1987) Grain-boundary enrichment of incompatible elements in some mantle peridotites. *Chem. Geol.* **63**, 319–334.
- Taniguchi, H. (1993) On the volume dependence of viscosity of some magmatic silicate melts. *Mineral. Petrol.* **49**, 13–25.
- Taniguchi, H. (2000) Theoretical background of viscosity of magmatic silicate melt -Role of free volume and configurational entropy-. *Japan Mag. Min. Petrol. Sci.* **29**, 97–109.
- Tingle, T., Green, H. W. and Finnerty, A. A. (1988) Experiments and observations bearing on the solubility and diffusivity of carbon in olivine. *J. Geophys. Res.* **93**, 15289–15304.
- Trial, A. F., Rudnick, R. L., Ashwal, L. D., Henry, D. J. and Bergman, S. C. (1984) Fluid inclusions in mantle xenoliths from Ichinomegata, Japan: evidence for subducted H₂O? *EOS, Trans. Am. Geophys. Union* **65**, 306–306.
- Yamamoto, J. (2001) Investigation of the subcontinental mantle based on noble gas isotopes, petrological and spectroscopic studies of Siberian mantle xenoliths. *PhD Thesis*, University of Tokyo, 132 p.
- Yamamoto, J. and Kagi, H. (2006) Extended micro-Raman densimeter for CO₂ applicable to mantle-originated fluid inclusions. *Chem. Lett.* **35**, 610–611.
- Yamamoto, J., Watanabe, M., Nozaki, Y. and Sano, Y. (2001) Helium and carbon isotopes in fluorites: implications for mantle carbon contribution in ancient subduction zone. *J. Vol. Geotherm. Res.* **107**, 19–26.
- Yamamoto, J., Kagi, H., Kaneoka, I., Lai, Y.,

- Prikhod'ko, V. S. and Arai, S. (2002) Fossil pressures of fluid inclusions in mantle xenoliths exhibiting rheology of mantle minerals: Implications for the geobarometry of mantle minerals using micro Raman spectroscopy. *Earth Planet. Sci. Lett.* **198**, 511–519.
- Yamamoto, J., Hirano, N., Hanyu, T., Kagi, H. and Kaneoka, I. (2003) Noble gases in mantle-derived xenocrysts in an alkali basalt from Japan Trench oceanward slope. In: *Plume and problems of deep sources of alkaline magmatism* (edited by N. V. Vladykin), pp. 39–50. Irkutsk State Technical University, Irkutsk.
- Yamamoto, J., Kaneoka, I., Nakai, S., Kagi, H., Prikhod'ko, V. S. and Arai, S. (2004) Evidence for subduction-related components in the subcontinental mantle from low $^3\text{He}/^4\text{He}$ and $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ratio in mantle xenoliths from Far Eastern Russia. *Chem. Geol.* **207**, 237–259.
- 山本順司, 石橋秀巳, 川上曜子, 鍵裕之 (2005) マントル捕獲岩に適用できる地質圧力計. 岩石鉱物科学, **34**, 159–172.
- Yamamoto, J., Kagi, H., Kawakami, Y., Hirano, N. and Nakamura, M. (2007) Paleo-Moho depth determined from the pressure of CO_2 fluid inclusions: Raman spectroscopic barometry of mantle- and crust-derived rocks. *Earth Planet. Sci. Lett.* **253**, 369–377.
- Zai-Yi, T., Ping, H. and Ke-Ding, X. (1992) The Mesozoic-Cenozoic East China rift system. *Tectonophysics* **208**, 341–363.