



海洋科学掘削によるマントル到達への挑戦  
—地球最大のフロンティアに挑む—

## 海洋“深部”マントル物質獲得に向けた試み

秋澤紀克

An attempt to procure “deep” mantle materials beneath the ocean

Akizawa Norikatsu

あきざわのりかつ：東京大学大気海洋研究所

海洋マントル物質は、日々対流するマントルの物理化学情報を与えてくれる。その情報を空間的に広く収集することができれば、現在対流するマントルの描像を描くことができ、プレートテクトニクスの現象理解にもつながる。ここでは、特に海洋“深部”マントル物質に焦点を当てて紹介し、海洋掘削で得られる“浅部”マントル物質の重要性を論じる。

### 1. はじめに

人類が手にすることのできる地球深部物質の一つにカンラン岩がある。カンラン岩はマントル物質を代表すると考えられているが、その確証は得られていない。マントルは、地震波速度が増加するモホロビッチ不連続面＝モホ面以深に存在し、直接採取が達成されていないためである。しかし、これまで地質温度圧力計をカンラン岩に適応することでモホ面を優位に超えた深部由来であるとする報告は数多く存在し（例えば、Ishikawa et al., 2004 ; Yamamoto et al., 2014 ; Sato and Ozawa, 2019）、カンラン岩はマントル物質であると考えて良いであろう。

数多くのカンラン岩に地質温度圧力計を適応するとバリエーションのある温度圧力が得られ、地温勾配を求めることができる (Pearson et al., 2003; O'Reilly and Griffin, 2006)。時には地球深部での地温勾配変化が確認される場合もあり (図 1)、一時的な加熱イベント、または定常状態での加熱イベントが関係している可能性が示唆される (Griffin et al., 1999)。そのようなイベントが検出できればマントルのダイナミクスを明らかにすることができ、さらには空間的に広く検証できれば普遍性を論ずることもできる。しかし、地球表面から数 100 km に達する“深部”由来のカンラン岩採取は一般的に困難である。その入手手段はいくつかあるが、マグマによる地表への運搬を本稿では対象とする。噴出岩中にはしばしば、カンラン岩捕獲岩が含まれる。運搬中のカンラン岩とマグマの反応は免れないが、地表にもたらされる時間が短時間でサンプリング履歴は明確であるため、化学組成改変に制

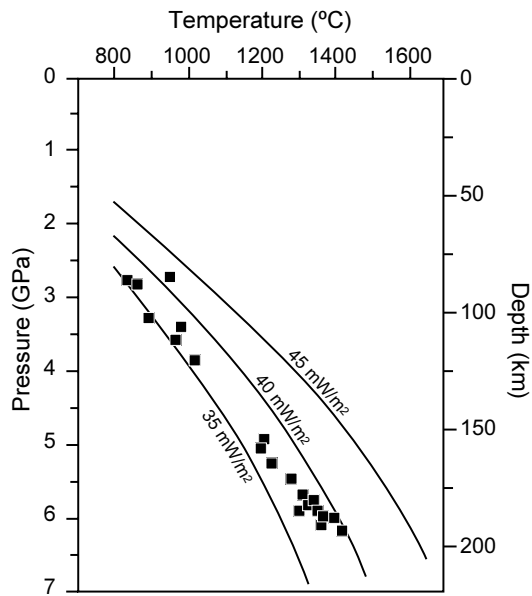


図1 ザクロ石カンラン岩の推定温度圧力プロット。サンプルは、Slave CratonのLac de Grasで採取されたもの。熱流量等温線を実線で示す。Griffin et al. (1999) を改変。4~5 GPaを境に地温勾配の変化が確認できる。

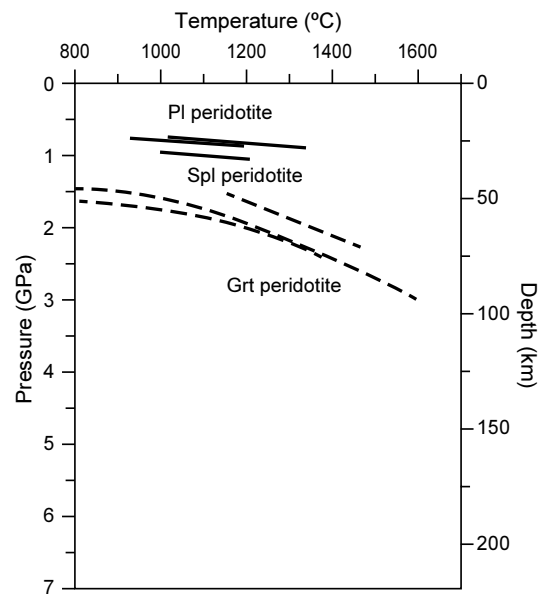


図2 カンラン岩の鉱物相変化曲線。ザクロ石カンラン岩とスピネルカンラン岩の変化曲線(点線)はKushiro and Yoder (1966), O'Hara et al. (1971), Klemme and O'Neill (2000) を参照した。スピネルカンラン岩と斜長石カンラン岩の変化曲線(実線)はKushiro and Yoder (1966), Green and Ringwood (1967), Borghini et al. (2010) を参照した。

約を課することができる点で優れる(小澤ほか, 2018)。

カンラン岩は、温度圧力変化により構成鉱物種が変わる(図2)。特に、地球深部> 60 kmではザクロ石を含み、そのような場合正確な圧力推定が可能になる(苗村ほか, 2012)。つまり、ザクロ石を含むカンラン岩捕獲岩採取が極めて重要であり、“深部”での地温勾配推定にもザクロ石カンラン岩が用いられてきた(図1)。特に、大陸では実に多くのザクロ石カンラン岩の報告が存在する。そのザクロ石の起源として、もともと存在していたものではなく、最近付加されたとする報告もあるため(例えば, Pearson and Wittig, 2008)注意は必要であるが、ザクロ石が重要であることに変わりはない。

ではここで、海洋に焦点を当てる。海洋では、ハワイやタヒチに代表される海洋島が存在する。その中でもカンラン岩捕獲岩は存在し、海底下マン托ルの物理化学情報を引き出す研究が数多く存在

する(例えば, Tracy, 1980; Goto and Yokoyama, 1988; Tommasi et al., 2020)。ここ10年ほどにおいては、海洋プレートが沈み込む手前で屈曲して、マグマが噴出する新種のタイプの海底火山であるプチスポット(Hirano et al., 2006; 平野, 2021)からも、カンラン岩捕獲岩が報告されている(Yamamoto et al., 2009; Harigane et al., 2011)。海洋プレートの生成場である海嶺においては掘削やドレッジによってカンラン岩を採取することができるが、若い~古い海洋プレート上では海洋島からカンラン岩捕獲岩を、そしてより古い海洋プレート上ではプチスポットからカンラン岩捕獲岩を入手することができるため、太平洋プレートに限ってみれば広範囲でカンラン岩を採取することが可能である。では、深度方向にはどうかというと、残念ながら大陸のようにはいかない。ザクロ石の存否で言えば、限られたサンプルしか海洋では採取できていない(図3a)。本稿では、太平洋で確認されて

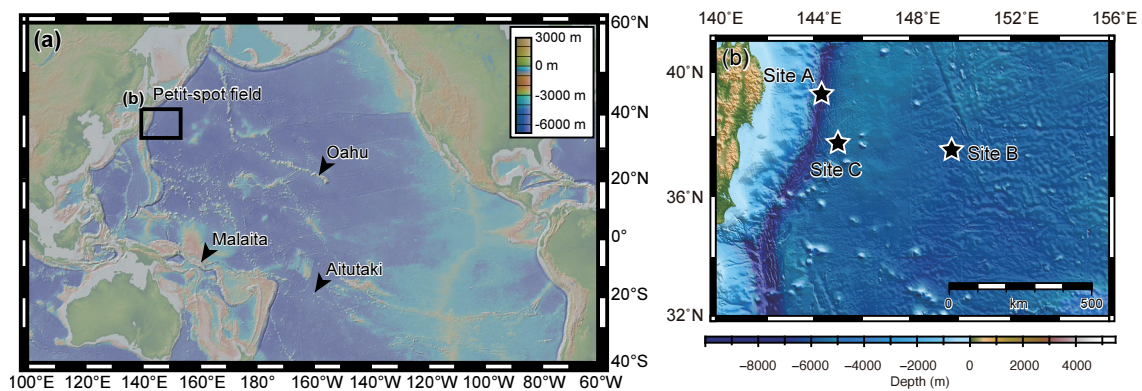


図3 ザクロ石カンラン岩捕獲岩が採取される地域を示した地図。(b)にはこれまでに報告されている東北沖のプチスポットサイトを示している。(a)はGeoMapAppで作成した(www.geomapp.org)。(b)はAkizawa et al. (2022)を改変した。

いるザクロ石カンラン岩捕獲岩を紹介し、海洋での“深部”マントルの物理化学情報の引き出しが困難であることを明確にした上で、筆者らがそれでも諦めずに“深部”カンラン岩を見つけ出した報告を行う。そして、太平洋掘削で得られると期待される、圧力-年代が既知のモホ面直下“浅部”カンラン岩の重要性を示す。

## 2. 太平洋のザクロ石カンラン岩捕獲岩

太平洋において最も有名なカンラン岩捕獲岩採取地域は、ハワイ諸島であろう(図3a)。特にオアフ島が有名であり、ザクロ石カンラン岩よりも低圧由来のスピネルカンラン岩(図1)がよく採取されている。ザクロ石を含む捕獲岩も多く産するが、ザクロ石輝岩(輝石が多く、相対的にカンラン石が少ない)に分類される(Sen et al. (2005)の図2参照)。Goto and Yokoyama (1988)は、唯一オアフ島産のザクロ石カンラン岩を報告しているが、同時にカンラン岩と輝岩の複合捕獲岩も報告しているため、真にザクロ石カンラン岩であるのか疑問が残る。そのサンプルを対象に、詳細に再解析する必要があるであろう。いずれにせよ、ハワイ諸島全体を見回してもザクロ石カンラン岩の報告は他になく、その産出は極めて稀である。University of HawaiiのM. Garcia博士は、ザクロ石カンラン岩を2つ所有しているが、正式な報告は

なされていない(私信)。

次に、ソロモン諸島を挙げる(図3a)。マライタ島ではザクロ石カンラン岩が確かに存在し、特徴的にクロムスピネルを中心に含むようなザクロ石が報告されている(Neal and Nixon, 1985)。この特徴的な鉱物組織は、海嶺から離れる温度低下に伴いスピネルと輝石が反応して、ザクロ石とカンラン石が形成されたと解釈されている(Neal and Nixon, 1985)。Ishikawa et al. (2004)は、マライタ島を対象として多様な捕獲岩の記載を実施し、そのサンプルを用いてマントル中での“深部”物理化学情報を引き出す一連のユニークな研究群につなげた(Ishikawa et al., 2011; Tommashi and Ishikawa, 2014; Demouchy et al., 2015)。マライタ島のカンラン岩捕獲岩の中には、溶融年代(Re-depletion age)が~17億年に遡るほど古いものが存在する(Ishikawa et al., 2011)。それらが普通の海洋プレートの構成物質であるのか(Jackson et al., 2016)、プリュームに由来する異質なマントル物質の付け足しに由来するののか(Ishikawa et al., 2011)議論は分かれるが、“深部”カンラン岩捕獲岩は新たな知見を我々にもたらしてくれる。

最後に、プチスポットのザクロ石カンラン岩捕獲岩を紹介する。東北沖においてプチスポットが2000年代初めに発見されたが、そこは1億3千年を超える古い海洋プレート上であり、より過去の

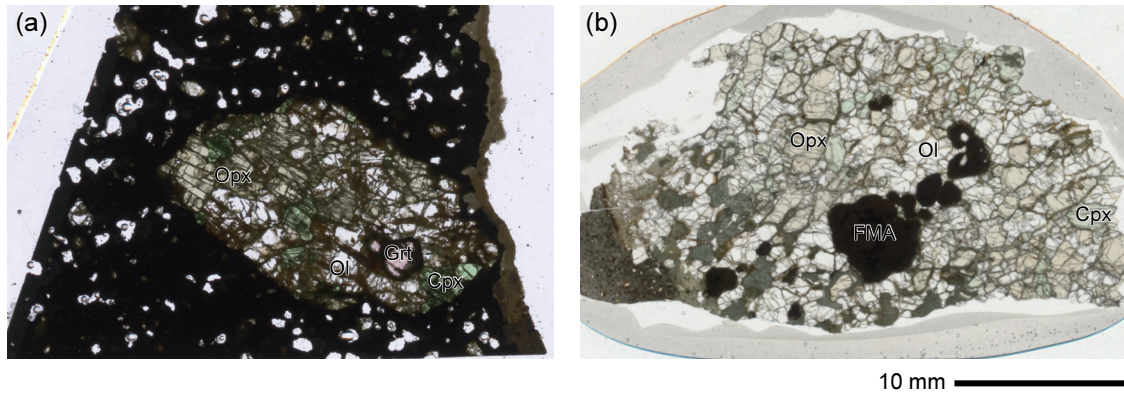


図4 薄片のスキヤン写真. (a) プチスポット Site Bで採取されたザクロ石カンラン岩捕獲岩 (YK21-07S-6K1585-R2c). 赤く色付いた鉱物がザクロ石. (b) アイタキ島で採取されたカンラン岩捕獲岩 (A170). くすんだ色の部分は、~数 $\mu\text{m}$ 程度の大きさの細粒鉱物集合体. 細粒鉱物集合体は、主にカンラン石-斜長石-自然鉄で構成される. Ol=カンラン石. Opx=直方輝石. Cpx=単斜輝石. Grt=ザクロ石. FMA=細粒鉱物集合体.

マントルの情報を引き出せる点で優れる. ザクロ石カンラン岩は、プチスポット Site A (図 3b) で採取されており、母岩のアルカリ玄武岩噴出年代推定値は約 176 ~ 853 万年と直下の海洋プレート年代と比べて明らかに若い (Hirano et al., 2001, 2006, 2008 ; Machida et al., 2015). このザクロ石カンラン岩中のザクロ石は赤く色づいているが、くすんでおり、現在はスピネルと直方輝石に分解してしまっていると報告されている (Harigane et al., 2011). つまり、ザクロ石カンラン岩 'だった' サンプルが採取されているということである. ザクロ石は完全に分解してしまっているものの、その他の構成鉱物は残存しており、今後より詳しい化学分析が望まれる.

以上のように、太平洋におけるザクロ石カンラン岩捕獲岩は取り扱いに注意が必要なものが存在するものの、先述の通りマグマに取り込まれてからの組成非平衡性を取り除くことは可能であり、マグマに取り込まれる直前の物理化学情報を引き出すことができる.

### 3. 他にも存在する太平洋でのザクロ石カンラン岩捕獲岩

海洋でのザクロ石カンラン岩捕獲岩獲得は、大陸に比べて困難であることは先述の通りである. そ

の理由の一つとして、海洋プレートが大陸プレートに比べて薄く、マグマによるカンラン岩の捕獲深度がザクロ石安定領域にまで達しないことが挙げられる. 海洋ではプレートが海嶺から側方移動していくにつれて冷却していくため対流を誘発し (Small-scale sublithospheric convection: Richter and Parsons, 1975), プレートの底が加熱を受けて想定されるよりも高い熱流量や浅い海底深度が観測されると考えられている (例えば, Stein and Stein, 1992). そのようなプレートテクトニクスが引き起こす、特殊な海洋プレート冷却の阻害も関与して、ザクロ石安定領域まで達するカンラン岩の獲得には困難が生じているのであろう. しかし、より古く冷たくなった海洋プレートでは、ザクロ石安定領域からのカンラン岩捕獲岩採取が見込め、その点でもプチスポットは極めて重要な研究調査の対象になる. 筆者らは、2020年と2021年に2度の調査航海をデザインし (航海番号 YK20-14S と YK21-07S), Site A と Site B でカンラン岩捕獲岩を採取することに成功した. Site B では初めてプチスポット由来のザクロ石カンラン岩を採取することに成功し (図 4a), 新たなザクロ石カンラン岩の産地としてプチスポット Site B を追加することに成功した.

もう少し若い海洋プレートでも、ザクロ石カンラン岩 'らしき' 捕獲岩を見つけることに成功してい



る。南太平洋海洋プレート上に位置するクック諸島(図3a)のうち、ラロトンガ島(Thompson et al., 1998)とアイツタキ島(Fodor et al., 1982)では、捕獲岩が報告されている。その中でも、アイツタキ島のカンラン岩捕獲岩中には、「reddish brown reaction product」と名付けられている鉱物が報告されているが、Fodor et al. (1982)やSnortum et al. (2019)は直方輝石が分解した鉱物であると解釈した。一方で、筆者らもアイツタキ島のカンラン岩捕獲岩を手に入れ、詳細な解析を実施したところ、元々はザクロ石であったが、現在は数 $\mu\text{m}$ サイズの細粒鉱物(カンラン石-斜長石-スピネル-自然鉄-ネフェリン)の集合体になっていることを突き止めた(大嶋, 2020MS)。

以上のように、太平洋においてもザクロ石カンラン岩捕獲岩は存在し、既に研究されているサンプルでも、詳しく再解析することで新たな産地を発見できる可能性がある。広い範囲(図3a)、かつ深度方向にもバリエーションのあるカンラン岩捕獲岩のセットが揃えば、現在対流する海洋でのマンツルの描像を描くことができる。例えば、上記したプレートテクトニクスを特徴づける現象である Small-scale sublithospheric convection の存否は、熱流量や海底深度異常といった地球物理学的観測や数値モデルから議論されてきてきたが(Stein and Stein, 1992; Ballmer et al., 2007)、その検証を岩石学的視点から行えるかもしれない。

#### 4. 海洋掘削の重要性

最後に、海洋掘削で得られるモホ面直下“浅部”カンラン岩の重要性について論じたい。スピネルカンラン岩や斜長石カンラン岩が安定に存在する60 km以浅では(図2)、圧力依存性の高い反応が少ないことから正確な圧力決定は困難である(小澤, 2018)。そのため、深さが特定された海洋“浅部”カンラン岩は、海洋プレートの温度や化学組成、組織の空間構造を構築する際のリファレンス物質になり得る点で特に重要である。その“浅部”カンラン岩を既知の深度で採取できるメリットを最大限活かすためにも、掘削地点近辺でカンラン岩捕

獲岩も採取できれば、ある海洋プレート年代の空間構造のリファレンスを構築することにつながる。地球全体で見れば、我々が直接手にすることができる地球内部物質の深度はとても限られてしまうが、モホ面直下の“浅部”と~数100 kmに達する“深部”カンラン岩を戦略的に採取・解析を行うことで、正確な海洋プレートの空間構造やプレートテクトニクスの実態に迫ることができるであろう。

謝辞; 本稿執筆の機会を与えていただいた、海洋研究開発機構マントル掘削プロモーション室の稲垣史生室長には、深く感謝いたします。また、東京大学の小澤一仁教授には日々の研究議論でお世話になりました。本研究は、科研費20H02003の一環として行われました。

#### 参考文献

- [1] Akizawa, N., Hirano, N., Matsuzaki, K.M., Machida, S., Tamura, C., Kaneko, J., Iwano, H., Danhara, T., Hirata, T. (2022) A direct evidence for disturbance of whole sediment layer in the subducting Pacific plate by petit-spot magma-water/sediment interaction. *Marine Geology*, 444, 106712.
- [2] Ballmer, M.D., van Hunen, J., Ito, G., Tackley, P.J., Bianco, T.A. (2007) Non-hotspot volcano chains originating from small-scale sublithospheric convection. *Geophysical Research Letters*, 34, L23310.
- [3] Borghini, G., Fumagalli, P., Rampone, E. (2010) The stability of plagioclase in the upper mantle: Subsolidus experiments on fertile and depleted lherzolite. *Journal of Petrology*, 51, 229-254.
- [4] Demouchy, S., Ishikawa, A., Tommasi, A., Alard, O., Keshav, S. (2015) Characterization of hydration in the mantle lithosphere: Peridotite xenoliths from the Ontong Java Plateau as an example. *Lithos*, 212-215, 189-201.
- [5] Fodor, R.V., Bauer, G.R., Keil, K. (1982) Ultramafic inclusions and megacrysts in olivine nephelinite, Aitutaki Island, Cook Islands. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 25, 67-76.
- [6] Goto, A., Yokoyama, K. (1988) Lherzolite inclusions in olivine nephelinite tuff from Salt Lake Crater, Hawaii. *Lithos*, 21, 67-80.
- [7] Green, D.H., Ringwood, A.E. (1967) The stability fields of aluminous pyroxene peridotite and garnet peridotite and their relevance in upper mantle structure. *Earth and Planetary Science Letters*, 3, 151-160.
- [8] Griffin, W.L., Fisher, N.I., Friedman, J., Ryan, G.G., O'Reilly, S.Y. (1999) Cr-pyrope garnets in the lithospheric mantle 1. Compositional systematics and relations to tectonic setting. *Journal of Petrology*, 40, 679-704.
- [9] Harigane, Y., Mizukami, T., Morishita, T., Michibayashi, K., Abe, N., Hirano, N. (2011) Direct evidence for

- upper mantle structure in the NW Pacific Plate: Microstructural analysis of a petit-spot peridotite xenolith. *Earth and Planetary Science Letters*, 302, 194-202.
- [10] Hirano, N., Kawamura, K., Hattori, M., Saito, K., Ogawa, Y. (2001) A new type of intra-plate volcanism ; young alkali-basalts discovered from the subducting Pacific Plate, northern Japan Trench. *Geophysical Research Letters*, 28, 2719-2722.
- [11] Hirano, N., Takahashi, E., Yamamoto, J., Abe, N., Ingle, S.P., Kaneoka, I., Hirata, T., Kimura, J.-I., Ishii, T., Ogawa, Y., Machida, S., Suyehiro, K. (2006) Volcanism in response to plate flexure. *Science*, 313, 1426-1428.
- [12] Hirano, N., Koppers, A.A., Takahashi, A., Fujiwara, T., Nakanishi, M. (2008) Seamounts, knolls and petit-spot monogenetic volcanoes on the subducting Pacific Plate. *Basin Research*, 20, 543-553.
- [13] 平野 (2021) 太平洋プレートの組成進化~海山・ブチスポット・緑色岩. *新地球*, 1, 33-41.
- [14] Ishikawa, A., Maruyama, S., Komiya, T. (2004) Layered lithospheric mantle beneath the Ontong Java Plateau: Implications from xenoliths in alnöite, Malaita, Solomon Islands. *Journal of Petrology*, 45, 2011-2044.
- [15] Ishikawa, A., Pearson, D. G., Dale, C. W. (2011) Ancient Os isotope signatures from the Ontong Java Plateau lithosphere: Tracing lithospheric accretion history. *Earth and Planetary Science Letters*, 301, 159-170.
- [16] Jackson, M.G., Shirey, S.B., Hauri, E.H., Kurz, M.D., Rizo, H. (2016). Peridotite xenoliths from the Polynesian Austral and Samoa hotspots: Implications for the destruction of ancient  $^{187}\text{Os}$  and  $^{142}\text{Nd}$  isotopic domains and the preservation of Hadean  $^{129}\text{Xe}$  in the modern convecting mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 185, 21-43.
- [17] Klemme, S. and O'Neill, H.S. (2000) The near-solidus transition from garnet lherzolite to spinel lherzolite. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 138, 237-248.
- [18] Kushiro, I., Yoder, H. S. (1966) Anorthite-forsterite and anorthite-enstatite reactions and their bearing on the basalt-eclogite transformation. *Journal of Petrology*, 7, 337-362.
- [19] Machida, S., Hirano, N., Sumino, H., Hirata, T., Yoneda, S., Kato, Y., 2015. Petit-spot geology reveals melts in upper-most asthenosphere dragged by lithosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 426, 267-279.
- [20] 苗村康輔, 中村大輔, 平島崇男 (2012) 超高压変成帯中のザクロ石観覧岩およびエクロジャイトの温度圧力履歴解析法: 地質温度圧力計の概要と適用. *岩石鉱物科学*, 41, 225-246.
- [21] Neal, C.R., Nixon, P.H. (1985) Spinel-garnet relationships in mantle xenoliths from the Malaita Alnöites, Solomon Islands, South-Western Pacific. *Transactions of the Geological Society of South Africa*, 88, 347-354.
- [22] O'Hara, M. J., Richardson, S. W., Wilson, G. (1971) Garnet-peridotite stability and occurrence in crust and mantle. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 32, 48-68.
- [23] 大嶋ちひろ (2020) 海洋リソスフェア深部への熱供給プロセスの制約: クック諸島産かんらん岩捕獲岩の温度-圧力推定からのアプローチ. 東京大学大学院理学系研究科修士論文.
- [24] O'Reilly, S.Y., Griffin, W.L. (2006) Imaging global chemical and thermal heterogeneity in the subcontinental lithospheric mantle with garnets and xenoliths: Geophysical implications. *Tectonophysics*, 416, 289-309.
- [25] 小澤一仁, 佐藤侑人, 成田冨理 (2018) スピネルカンラン岩捕獲岩の圧力推定の現状. 問題点. 解決策: リソスフェア-アセノスフェア境界域のダイナミクスの理解に向けて. *地質学雑誌*, 124, 575-592.
- [26] Pearson, D.G., Canil, D., Shirey, S.B. (2003) Mantle samples included in volcanic rocks: xenoliths and diamonds. In: Holland, H.D., Turekin, K.K. (eds) *The mantle and core. Treatise of geochemistry 2*. Elsevier Ltd, Oxford, UK, pp 171-275.
- [27] Pearson, D.G., Wittig, N. (2008) Formation of Archaean continental lithosphere and its diamonds: The root of the problem. *Journal of the Geological Society, London*, 165, 895-914.
- [28] Richter, F. M., Parsons, B. (1975) On the interaction of two scales of convection in the mantle. *Journal of Geophysical Research*, 80, 2529-2541.
- [29] Sato, Y., Ozawa, K. (2019) Reconstruction of the lithosphere-asthenosphere boundary zone beneath Ichinomegata maar, Northeast Japan, by geobarometry of spinel peridotite xenoliths. *American Mineralogist*, 104, 1285-1306.
- [30] Snortum, E., Day, J. M., Jackson, M. G. (2019) Pacific lithosphere evolution inferred from Aitutaki mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 60, 1753-1772.
- [31] Stein, C. A., Stein, S. (1992) A model for the global variation in oceanic depth and heat flow with lithospheric age. *Nature*, 359, 123-129.
- [32] Thompson, G.M., Malpas, J., Smith, I.E.M. (1998) Volcanic geology of Rarotonga, southern Pacific Ocean. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 41, 95-104.
- [33] Tommashi, A., Ishikawa, A. (2014) Microstructures, composition, and seismic properties of the Ontong Java Plateau mantle root. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15, e2014GC005452.
- [34] Tommasi, A., Mameri, L., Godard, M. (2020) Textural and compositional changes in the lithospheric mantle atop the Hawaiian Plume: Consequences for seismic properties. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 21, e2020GC009138.
- [35] Tracy, R.J. (1980) Petrology and genetic significance of an ultramafic xenolith suite from Tahiti. *Earth and Planetary Science Letters*, 48, 80-96.
- [36] Yamamoto, J., Nishimura, K., Sugimoto, T., Takemura, K., Takahata, N., Sano, Y. (2009) Diffusive fractionation of noble gases in mantle with magma channels: Origin of low He/Ar in mantle-derived rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 280, 167-174.
- [37] Yamamoto, J., Korenaga, J., Hirano, N., Kagi, H. (2014) Melt-rich lithosphere-asthenosphere boundary inferred from petit-spot volcanoes. *Geology*, 42, 967-970.

☐