



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—

オマーンオフィオライトの マントルかんらん岩から推測 されるマントルウェッジの 酸化還元状態

高 澤 栄 一
谷 雅 史

**Redox state of mantle wedge estimated from
mantle peridotites of the Oman ophiolite**

Eiichi Takazawa, Masafumi Tani

たかざわ えいいち：新潟大学理学部
たに まさふみ：新潟大学理学部

オマーンオフィオライトのマントルセクションにおける酸素フガシティーの分布は、上部で酸化しているのに対し、基底部はより還元的である。この違いは、海嶺付近での含水溶融や熱水循環による酸化と、沈み込み帯形成時にスラブ上面の堆積物に由来する還元的なメルトによる基底部からの還元の結果を反映している可能性が考えられる。

1. はじめに

マントルの酸化還元状態は地球内部の炭素循環や沈み込み帯での物質移動を理解する上で重要である。上部マントルの酸化還元状態は、FMQ から IW バッファー付近まで幅広い範囲をもつことが推定されている（例えば、Foley, 2011）。大陸の楯状地のかんらん岩がもっとも還元的で、大陸縁辺および深海底かんらん岩で FMQ バッファーの近傍にあり、島弧リソスフェアでは FMQ からやや酸化状態にあると考えられている。沈み込むスラブから放出された流体は島弧で噴出するマグマから推定して、酸化的な H_2O や CO_2 を主体とするとされる。このことは、島弧の玄武岩に包有されるかんらん岩捕獲岩や前弧で採取されたかんらん岩の組成からも支持されている。そのため、島弧の玄武岩や島弧マントル由来の捕獲岩は中央海嶺玄武岩 (MORB) や深海底かんらん岩よりも酸素フガシティーが高く、島弧のマントルは海嶺下のマントルよりも酸化的であると考えられている。たとえば、世界各地の島弧のマントル捕獲岩や前弧域のかんらん岩の酸素フガシティーは、 $\Delta \log f\text{O}_2$ で FMQ バッファーよりも高く、海洋性マントルよりも酸化的であるとされる (Brandon and Draper, 1996 ; Parkinson and Pearce, 1998 ; Parkinson and Arculus, 1999)。しかし、マントル捕獲岩から得られるデータはリソスフェリックマントルの比較的浅所に関する情報であり、マントルウェッジ深部の島弧マグマ形成領域におけるアセノスフェアの酸化還元状態や流体の性質は不明な点が多い。そこで筆者らは、オマーンオフィオライト北部フィズ岩体のマントルセクション (図 1) をマントルウェッジのアナログとして用い、かんらん岩に記録

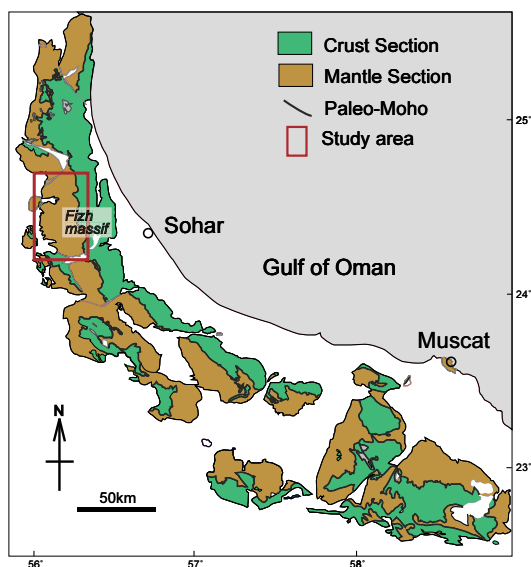


図1 オマーンオフィオライトの分布図。研究地域であるフィズ岩体のマントルセクションを赤枠で表示。

された酸素フガシティーを解読することを試みた。

2. オマーンオフィオライトの概要

オマーンオフィオライトは、約9,500万年前に新期テチス海が拡大から縮小に転換する際に、海嶺の近傍で生じた海洋プレート同士の衝上運動によって高温の沈み込み帯が形成されたことが指摘されている (Umino et al., 1990; 海野, 2019)。その際に、衝上する海洋プレートが沈み込む海洋プレートの上面に接触変成作用を与え、角閃岩と緑色片岩からなるメタモフィックソールを形成した (Hacker and Mosenfelder, 1996)。すなわち、オマーンオフィオライトでは形成まもないマントルウェッジ (オフィオライト) と沈み込むスラブの上面 (メタモフィックソール) が基底部の衝上断層を隔てて直接接している稀有な例である。

オマーンオフィオライトのマントルセクションは、海洋プレート同士の衝上運動の際に、下位のメタモフィックソールから H_2O を主体とする流体がマントルセクションに流入し、フラックス溶融を起こしたと考えられている (Ishikawa et al., 2002, 2005)。このことは、オマーンオフィオライ

トに島弧ソレライトからなる噴出岩の層序があることや、マントルセクション内にスピネルの $Cr\#$ ($= Cr/[Cr+Al]$ 原子比) の高い高枯渇なかんらん岩が多数存在することから支持される (Arai et al., 2006; Tamura et al., 2006; 高澤, 2012; 野本・高澤, 2013; Kanke and Takazawa, 2014; Kusano et al., 2012, 2014, 2017)。かんらん岩のスピネルの $Cr\#$ は海嶺で形成されるとけ残り岩の場合は 0.6 以下であるが、前弧マントルのかんらん岩では 0.6~0.8 と高く、高枯渇な溶け残りであることを示す (Arai, 1994)。また、海嶺下で一度溶融したとけ残りマントルかんらん岩を再度溶融して形成したマグマに由来するボニナイト質岩脈群もオマーンオフィオライトの地殻セクションから報告されている (Ishikawa et al., 2002; Umino et al., 2019)。

3. フィズ岩体マントルセクションの酸化還元状態

筆者らは、オマーンオフィオライト北部のフィズ岩体マントルセクションのかんらん岩を用いて、Ballhause et al. (1991) の方法で酸素フガシティー ($\Delta \log fO_2 (FMQ)$) を計算し、フィズ岩体マントルセクションにおける酸化還元状態の空間変化を検討した。 $\Delta \log fO_2 (FMQ)$ を地形図上にプロットしたところ、東部のモホ面側で $\Delta \log fO_2 (FMQ)$ が高く、より酸化的に、西部の基底スラスト面側で $\Delta \log fO_2 (FMQ)$ が低く、より還元的であることが分かった (図2)。とくに、基底スラスト付近では、 $\Delta \log fO_2$ が FMQ-2 に達するところもある。この結果は、沈み込むスラブと接するマントルウェッジ基底部は従来の通説とは逆に、より還元的である可能性を示唆している。なお、Ballhause et al. (1991) の計算方法を用いて、かんらん石とスピネルの組成から求めた平衡温度は、ほとんどが $650 \sim 850^\circ C$ の範囲であり、かんらん岩の蛇紋岩化作用の温度 ($500^\circ C$ 以下) をはるかに上回っていることから、蛇紋岩化作用で生じる還元的な水素の影響とは考えられない。

次に、かんらん岩の V/Sc 比や Zn/Fe 比を酸素フガシティーのプロキシとして捉え、 $\Delta \log fO_2 (FMQ)$

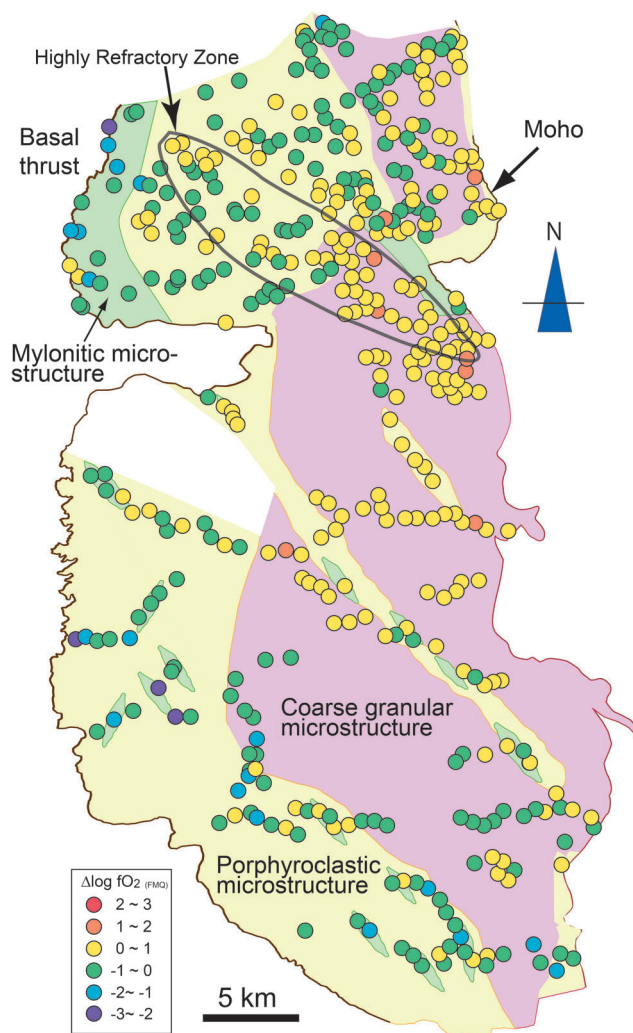


図2 オマーンオフィオライトのフィズマントルセクションにおけるハルツバージャイトの $\Delta \log fO_{2(FMQ)}$ の空間分布. 各地点の $\Delta \log fO_{2(FMQ)}$ を色の違いで区分. Highly refractory ZoneはKanke and Takazawa (2014) を参照.

との関係を検討した. V と Sc はマンツルの部分溶融では似た挙動をするが, V はかんらん岩とメルト間の分配係数が酸素フガシティーの影響を強く受け, 酸化的になるほど分配係数が低くなる. すなわち, より酸化的な環境における部分溶融では V はメルトに移動しやすくなり, 溶け残りかんらん岩の V 含有量は低くなると予測される (Canil, 2002 ; Canil and Fedortchouk, 2000 ; Lee et al., 2005). 一方, Sc の分配係数は酸素フガシティーに依存しないため, より酸化的な環境で生じた溶け残りかんらん岩の V/Sc 比は低くなると考えられる (Lee et al., 2005). Zn/Fe 比も酸化還元状態に

敏感とされる (Lee et al., 2010). V と Sc の関係と同様に, Fe^{2+} と Zn は同じ挙動をするが, Fe^{3+} は Fe^{2+} よりも不適合な挙動をするので, より酸化的な環境では Fe^{3+} は Fe^{2+} よりメルトに移動しやすくなり, 結果として溶け残りかんらん岩の Zn/Fe 比は高くなる (Lee et al., 2010).

オマーンオフィオライトのフィズ岩体の $\Delta \log fO_{2(FMQ)}$ とかんらん岩全岩の V/Sc 比の関係を検討した結果, $\Delta \log fO_{2(FMQ)}$ と V/Sc 比の間に負の相関が, $\Delta \log fO_{2(FMQ)}$ と Zn/Fe 比の間に正の相関が確かめられた (図 3). 上記の結果は, Ballhaus et al. (1991) の計算式を用いて算出された $\Delta \log fO_{2(FMQ)}$

のバリエーションが、V/Sc比およびZn/Fe比としてかんらん岩に記録された酸化還元傾向と一致することを示している。また、オマーンオフィオライトのマントルセクションにおけるかんらん岩の全岩V/Sc比およびZn/Fe比は、マントルセクションの部分溶融によってもたらされた可能性が高い。酸素フガシティーの異なる環境で部分溶融を経験した可能性を示している。すなわちフラックス溶融が起こっていた時のマントルセクションの最下部（沈み込みスラブ直上のマントルウェッジに相当）はその時点で還元的であり、同セクションの上部ほど酸化的であった可能性を示唆している。

4. 還元的なマントルセクション最下部の形成要因

マントルセクションの上部が酸化的となった要因として、オマーンオフィオライトにおける沈み込み帯形成時の初期の起こったマントルセクションの含水フラックス溶融が影響しているのかもしれない。あるいは、海嶺付近での熱水循環によるマントル最上部の酸化による可能性も考えられる。

一方、フィズ岩体マントルセクションの最下部が還元的となる要因として、沈み込んだ還元的な堆積物の溶融で生じた還元的なメルトとマントルかんらん岩の反応が考えられる。基底スラスト面付近にあたる $\Delta \log fO_2$ (FMQ) 値の低いかんらん岩試料は、全岩および単斜輝石とともに比較的高いTh/Ce比を持つ傾向が認められる(図4)。高いTh/Ce比は海洋性堆積物の寄与を示す特徴の一つであり、還元的なメルトとの反応の可能性を支持する。すなわち、オマーンオフィオライトはその衝上の過程で還元的な海洋性堆積物由来のメルトがマントルウェッジの下底から浸透し反応することで、かんらん岩に還元的な特徴を記録した可能性が考えられる。海洋性堆積物由来のメルトとかんらん岩が反応した場合、斜方輝石岩が形成されるであろう。確かに $\Delta \log fO_2$ (FMQ) 値の低いかんらん岩が分布する地域には斜方輝石岩の岩脈が比較的多いことから、堆積物由来のメルトとかんらん岩の反応の可能性について今後さらなる検証が必要である。

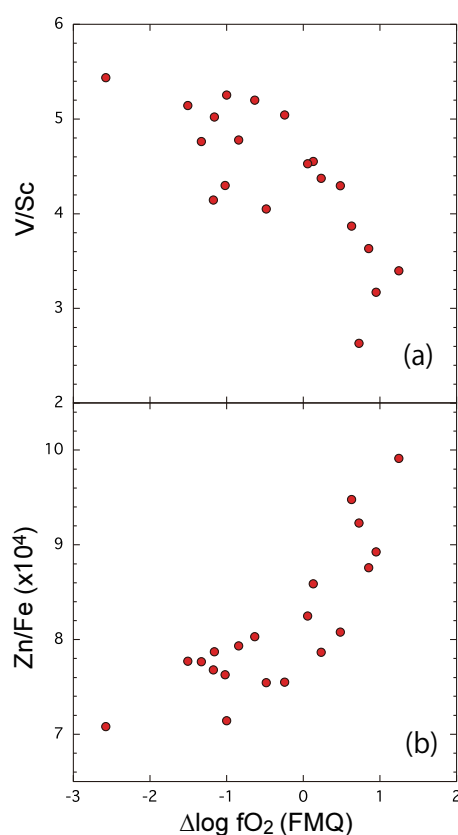


図3 オマーンオフィオライトのフィズマントルセクションにおけるハルツバージャイトの全岩組成比と酸素フガシティーの関係図。(a) V/Sc重量比対 $\Delta \log fO_2$ (FMQ)、(b) Zn/Fe重量比対 $\Delta \log fO_2$ (FMQ)。

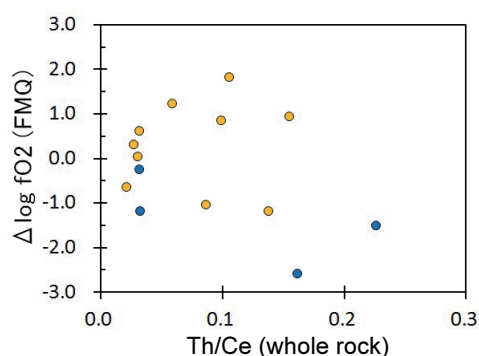


図4 オマーンオフィオライトのフィズマントルセクションにおけるハルツバージャイトの $\Delta \log fO_2$ (FMQ)とTh/Ce濃度比との関係図。黄丸：マントルセクション上部、青丸：基底部付近。

参考文献

- [1] Arai, S. (1994) : Characterization of spinel peridotites by olivine-spinel compositional relationships: Review and interpretation. *Chem. Geol.*, 113, 191-204.
- [2] Arai, S., Kadoshima, K. and Morishita, T. (2006) : Widespread arc-related melting in the mantle section of the northern Oman ophiolite as inferred from detrital chromian spinels. *J. Geol. Soc. London*, 163, 869-879.
- [3] Ballhaus, C., Berry, R. F. and Green, D. H. (1991) : High pressure experimental calibration of the olivine-orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer: implications for the oxidation state of the upper mantle. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 107, 27-40.
- [4] Brandon, A. D. and Draper, S. D. (1996) : Constraints on the origin of the oxidation state of mantle overlying subduction zones: An example from Simcoe, Washington, USA. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60, 1739-1749.
- [5] Canil, D. (2002) : Vanadium in peridotites, mantle redox and tectonic environments: Archean to present. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 195, 75-90.
- [6] Canil, D. and Fedortchouk, Y. (2000) : Clinopyroxene-liquid partitioning for vanadium and the oxygen fugacity during formation of cratonic and oceanic mantle lithosphere. *J. Geophys. Res.*, 105, 26003-26016.
- [7] Foley, S. F. (2010) : A Reappraisal of redox melting in the Earth's mantle as a function of tectonic setting and time. *J. Petrol.*, 52, 1363-1391.
- [8] Hacker, B. R. and Mosenfelder, J.L. (1996) : Metamorphism and deformation along the emplacement thrust of the Semail ophiolite, Oman. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 144, 435-451.
- [9] Ishikawa, T., Nagaishi, K. and Umino, S. (2002) : Boninitic volcanism in the Oman ophiolite: Implications for thermal condition during transition from spreading ridge to arc. *Geology*, 30, 899-902.
- [10] Ishikawa, T., Fujisawa, S., Nagaishi, K. and Masuda, T. (2005) : Trace element characteristics of the fluid liberated from amphibolite-facies slab: Inference from the metamorphic sole beneath the Oman ophiolite and implication for boninite genesis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 240, 355- 377.
- [11] Kanke, N. and Takazawa, E. (2014) : Kilometre-scale highly refractory harzburgite zone in the mantle section of the northern Oman Ophiolite (Fizh Block): Implications for flux melting of oceanic lithospheric mantle. In : Rollinson, H. R., Searle, M. P., Abbasi, I. A., Al-Lazki, A. and Al Kindi, M. H. (eds.) *Tectonic Evolution of the Oman Mountains*, Geol. Soc., London, Spec. Pub., 392, 229-246.
- [12] Kusano, Y., Adachi, Y., Miyashita, S. and Umino, S. (2012) : Lava accretion system around mid-ocean ridges: Volcanic stratigraphy in the Wadi Fizh area, northern Oman ophiolite. *Geochem. Geophys. Geosys.*, 13, Q05012, doi:10.1029/2011GC004006.
- [13] Kusano, Y., Hayashi, M., Adachi, Y., Umino, S. and Miyashita, S. (2014) : Evolution of volcanism and magmatism during initial arc stage: Constraints on the tectonic setting of the Oman Ophiolite. In : Rollinson, H. R., Searle, M. P., Abbasi, I. A., Al-Lazki, A. and Al Kindi, M. H. (eds.) *Tectonic Evolution of the Oman Mountains*, Geol. Soc., London, Spec. Pub., 392, 177-193.
- [14] Kusano, Y., Umino, S., Shijo, R., Ikei, A., Adachi, Y., Miyashita, S. and Arai, S. (2017) : Contribution of slab-derived fluid and sedimentary melt in the incipient arc magmas with development of the paleoarc in the Oman Ophiolite. *Chem. Geol.*, 449, 206-225.
- [15] Lee, C.-T. A., Leeman, W. P., Canil, D. and Li, Z.-X. A. (2005) : Similar V/Sc Systematics in MORB and Arc Basalts: Implications for the Oxygen Fugacities of their Mantle Source Regions. *J. Petrol.*, 46, 2313-2336.
- [16] Lee, C.-T. A., Luffi, P., Le Roux, V., Dasgupta, R., Albarède, F. and Leeman, W. P. (2010) : The redox state of arc mantle using Zn/Fe systematics. *Nature*, 468, 681-685.
- [17] 野本有希・高澤栄一 (2013) : オマーンオフィオライト・サラヒ岩体南西部に分布する超苦鉄質複合岩体の成因. *岩石鉱物科学*, 42, 123-135.
- [18] Parkinson, I. J. and Arculus, R. J. (1999) : The redox state of subduction zones: insights from arc-peridotites. *Chem. Geol.*, 160, 409-423.
- [19] Parkinson, I. J. and Pearce, J. A. (1998) : Peridotites from the Izu-Bonin-Mariana forearc (ODP Leg 125): evidence for mantle melting and melt-mantle interaction in a supra-subduction zone setting. *J. Petrol.*, 39, 1577-1618.
- [20] 高澤栄一 (2012) : オマーンオフィオライトマントルセクションの組成マッピング. *岩石鉱物科学*, 41, 257-266.
- [21] Tamura, A. and Arai, S. (2006) : Harzburgite-dunite-orthopyroxenite suite as a record of supra-subduction zone setting for the Oman ophiolite mantle. *Lithos*, 90, 43-56.
- [22] 海野進 (2019) : 無人岩のテクトニクス: 沈み込み帯発生とマントル進化. *岩石鉱物科学*, 48, 63-75.
- [23] Umino, S., Kusano, Y., Yamaji, A., Fudai, T., Tamura, A. and Arai, S. (2019) : The conversion tectonics from spreading to subduction: Paleostress analysis of dike swarms during the subduction initiation in the Oman Ophiolite. *Geological Society of America Bulletin*, 132, 1333-1343.
- [24] Umino, S., Yanai, S., Jaman, A.R., Nakamura, Y. and Iiyama, J.T. (1990) : The transition from spreading to subduction: evidence from the Semail ophiolite, northern Oman mountains. In : Malpas, J., Moores, E.M., Panayiotou, A. and Xenophontos, C. (eds.) *Ophiolites, Oceanic Crustal Analogues*, Proceedings of the Symposium "Troodos 1987", 733, Geol. Survey Dept., Min. Agri. Natural. Res., Nicosia, 375-384.

