

令和7年度 糸魚川ジオパーク学術研究奨励事業 研究概要

No.6 田村航遥（東北大学大学院）

【研究の名称】

蛇紋岩化マントルウェッジにおける非生物起源炭素の挙動：糸魚川産グラファイト含有ひすい輝石岩の総合研究

【背景と目的】

過去10年にわたり、沈み込み帯における炭素循環を定量的に理解するための研究が数多く行われてきた（例：Sverjensky et al., 2014; Galvez and Pubellier, 2019; Plank and Manning, 2019）。その一つのアプローチとして、現在は地表に露出している高圧～超高圧（HP-UHP）変成岩に保存された、炭素を含む流体包有物を調べる方法がある。最近、Peverelli et al. (2025) は、ひすい輝石岩や曹長石岩のような高圧・低温の交代作用岩の観察に基づき、 CH_4 や H_2 といった還元的なエネルギー源を運ぶ沈み込み帯の変成流体が、収束プレート境界における地下微生物生命を維持するうえで重要であると指摘した。彼女らは、メタン・水素・グラファイトを保持する鉱物の安定領域が、マントルウェッジ内の深さ 35 km 超から、微生物群集が存続可能なより浅部へ向けて、これらの流体が断続的に移動することを示唆すると結論づけた。

本研究では、地表に保存された炭素含有の高圧交代作用岩である「グラファイト含有ひすい輝石岩」に焦点を当てる。ひすい輝石自体は、HP-UHP変成岩における主要造岩鉱物として安定に存在する。しかし、ひすい輝石を卓越して含む岩石（ひすい輝石岩）は比較的希少で、世界でも産地は19か所しか知られていない（Harlow et al., 2015; Tsujimori and Harlow, 2017）。

ひすい輝石岩は一般に、蛇紋岩が卓越する収束域の環境において、（1）水流体からの沈殿によって、あるいは（2）既存岩石が広範囲に交代置換を受けることによって形成される（Tsujimori and Harlow, 2012）。通常、レンズ状・ポッド状・脈状の岩体として、または蛇紋岩化した超苦鉄質岩中のメランジュの一部として産し、低温・高圧条件で形成されたと考えられている（Harlow, 1994; Harlow and Sorensen, 2005; Tsujimori and Harlow, 2012, 2017; Harlow et al., 2015）。ひすい輝石岩の脈状産状は、含水流体からの沈殿を示唆し、沈み込み帯内部の流体履歴を記録する岩石学的証拠として位置づけられる（Harlow and Sorensen, 2005; Takahashi et al., 2017）。したがって、ひすい輝石岩中の流体包有物の研究は、前弧深度においてひすい輝石岩が形成された際に存在した、スラブ起源の変成流体の組成に重要な

制約を与える。

【研究内容】

以下のスケジュールにて、本研究を実施した。

日程	主な調査・研究等の概要
令和7年 6月～11月	DEWモデルの Simple back-Calculated Electrolyte Speciation によるアプローチのモデリング計算を行った。
11月9日～ 11月11日	野外調査を行った。 また、糸魚川市内のひすい販売店で研究観察用のひすい輝石岩試料を購入した。
11月～翌年 1月	採集・購入した岩石の薄片を作成し、偏光顕微鏡・SEM-EDS による鉱物組織の観察、ラマン分光法による流体包有物の観察を行った。

本研究では、糸魚川の青海蛇紋岩メランジュに属する金山谷上流域から採取したグラファイト含有ひすい輝石岩について、岩石学的調査を行った。加えて、ひすい輝石岩、オンファス輝石岩、MORB、蛇紋岩のバルク組成の参照値を用い、温度300～600℃、圧力0.5～2.5 GPa、酸素フガシィ (f_{O_2}) -10～-40の圧力-温度条件で、相平衡モデリングおよび DEWモデリングを実施した。

DEWモデリングでは、平衡状態にある岩石の化学ポテンシャルに基づいて水流体の化学組成を計算し、単純な逆計算による電解質スペシエーション手法 (Galvez et al., 2015) を用いた。これらの結果に基づき、グラファイト含有ひすい輝石岩がどのように産するのか（どのような条件・過程で出現するのか）を検討した。

【研究のまとめ】

岩石組織観察の結果、対象のひすい輝石岩は以下の3種類に分類できることが分かった：グラファイトに富む黒色のひすい輝石岩、グラファイトに乏しいひすい輝石脈、そしてグラファイト集合体を欠く非常に淡い緑色のひすい輝石である。これらのタイプは、時間的に順次結晶化したと考えられる。グラファイトは、ひすい輝石結晶の内部と粒界の双方に認められ、ひすい輝石とグラファイトが同時に沈殿したことを示唆する。P-Tシュードセクションモデリングでは、ひすい輝石とグラファイトの安定領域が広範に重なることが示され、グラファイトの有無が圧力-温度条件のみによって決まるわけではないことが示唆された。むしろ、グラファイト量は、ひ

すい輝石が沈殿した流体中の炭素含有量と関連している可能性が高い。

比較的低温・低圧条件で生じた炭素に富む流体が、グラファイトを含む黒色ひすい輝石岩を形成したと考えられる。これに対し、Ca・Mg・Fe に富む炭素に乏しい流体は、グラファイトに乏しいひすい輝石脈および非常に淡い緑色のひすい輝石を結晶化させており、より高温・高圧条件での形成を反映する。微量元素分析では、ひすい輝石岩の微量元素濃度がMORBやDMMに比べて著しく低いことが示され、沈み込む海洋地殻やマントル物質の影響を強く受けた流体というより、より化学的に「純粋」な流体から沈殿したことを示唆する。

沈み込み帯における流体化学の観点からは、DEWモデリングにより、広い岩石バルク組成に対して、温度・圧力が高いほどpHが低下するという一般的傾向が示された。沈み込むMORBが卓越するより深部の環境では、流体は段階的に酸性化する。一方、ひすい輝石岩や仮想的なオンファス輝石組成のようにSiとNaに富む局所領域では、pH低下が比較的小さい可能性がある。これらの結果は、沈み込み帯におけるグラファイト含有ひすい輝石岩の形成を理解するうえで、流体-岩石相互作用、とりわけ炭素含有量の変動が重要であることを示している。また、収束プレート環境において、変成過程と局所的な組成差が、鉱物組み合わせと流体化学の進化の双方を支配することを強調する。

今後、より多くの種類のひすい輝石岩試料を用いて研究を行うことで、ひすい輝石中の微量元素組成や炭素の存在形態や量を系統的に分析し、地下深部の炭素を含む物質の不均質性をより定量的に議論したい。

【参考資料】

- Galvez, M. E. and Pubellier, M. (2019). How do subduction zones regulate the carbon cycle? In *Deep carbon: Past to present*, pages 276-312. Cambridge University Press.
- Harlow, G. E. (1994). Jadeitites, albitites and related rocks from the motagua fault zone, guatemala. *Journal of Metamorphic Geology*, 12(1):49-68.
- Harlow, G. E. and Sorensen, S. S. (2005). Jade (nephrite and jadeitite) and serpentinite: Metasomatic connections. *International Geology Review*, 47(2):113-146.
- Harlow, G. E., Tsujimori, T., and Sorensen, S. S. (2015). Jadeitites and plate tectonics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 43(1):105-138.

- Peverelli, V., Olivieri, O. S., Tsujimori, T., Giovannelli, D., Shi, G., Canna`o, E., Piccoli, F., and Vitale Brovarone, A. (2025). Cold-subduction biogeodynamics boosts deep energy delivery to the forearc. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 388:195-207.
- Plank, T. and Manning, C. E. (2019). Subducting carbon. *Nature*, 574(7778):343-352.
- Pouchou, J. and Pichoir, F. (1988). A simplified version of the “pap” model for matrix corrections in epma. *Microbeam analysis*, pages 315-318.
- Sverjensky, D. A., Stagno, V., and Huang, F. (2014). Important role for organic carbon in subduction-zone fluids in the deep carbon cycle. *Nature Geoscience*, 7(12):909-913.
- Takahashi, N., Tsujimori, T., Kayama, M., and Nishido, H. (2017). Cathodoluminescence petrography of p-type jadeitites from the new idria serpentinite body, california. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 112(5):291-299.
- Tsujimori, T. and Harlow, G. E. (2012). Petrogenetic relationships between jadeitite and associated high-pressure and low-temperature metamorphic rocks in worldwide jadeitite localities: a review. *European Journal of Mineralogy*, 24(2):371-390.
- Tsujimori, T. and Harlow, G. E. (2017). Jadeitite (jadeite jade) from Japan: History, characteristics, and perspectives. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 112(5):184-196.