

令和 6 年度廣川研究助成事業報告： 5th SerpentineDays 2024 への参加と 国際共同研究に向けた沈み込み帯における 水流体の移動・分離過程に関する情報交換

中谷 貴之¹

1. はじめに

令和 6 年度廣川研究助成事業による支援を受け、2024 年 9 月 23 日～27 日にかけてスペインのグラナダにて開催された 5th SerpentineDays 2024 会議および、シエラネバダ山脈のアルミレス山への地質巡検に参加した。これらの概要について報告する。

2. 背景

プレート沈み込み帯では、海水との反応で岩石中に水酸基として固定された水が、プレートの沈み込みに伴い地下で脱水し、水流体となって上盤側のプレートに浸透する。浸透した水流体は、高温のマントルにおいてマグマの生成を促進するとともに、地殻において内陸地震を誘発することもあると考えられている。こうした水流体の分離・移動過程を解明することは、火山現象の理解や地下深部の地質環境の長期的な変化の予測に重要な知見を与える。

筆者はこれまで、原子力規制庁からの受託研究を通じて、内熱式ガス圧装置を用いた珪長質マグマの相平衡実験を行い、カルデラ噴火を起こした珪長質マグマの蓄積深度の推定などを行ってきた。2023 年にパーマネント型研究員として採用されてからは、より広い視点からマグマの発生や流体を通じた物質循環を理解することを目的に、内熱式ガス圧装置を用いて、蛇紋岩の脱水組織に注目した実験的研究を実施している。蛇紋岩とは、蛇紋石と呼ばれる含水鉱物から主に構成される岩石である。マントル岩石中のカンラン石や輝石が海水と反応して加水することで、蛇紋石が生じる。蛇紋石は、重量にして 12-13 % もの水を水酸基として結晶構造中に保持するため、沈み込みプレートにおける水の輸送の重要な担い手として認識されている。これまでに、蛇紋石の脱水が生じる温度圧力条件が実験的

に明らかにされ、沈み込み帯にて水流体が生じる深度が詳細に検討されてきた(例えば Ulmer and Trommsdorff, 1995)。一方、脱水に伴う岩石からの水流体の分離過程は、沈み込みプレートからの流体の供給を規制する重要な要素であるが、脱水反応と岩石の変形、流体の移動が密接に関係し合う複雑な現象であるため、まだ理解が十分に進んでいない。天然の岩石に記録された情報に基づき地下で実際何が起こっていたのかを理解することが、重要なアプローチの一つとなる。スペインの Cerro del Almirez (アルミレス山) は、沈み込み帯深部に相当する高压下での蛇紋岩の脱水過程が地質露頭として完璧に保存されている世界的にみても稀有な場所であり、これまでに重要な研究成果が数多く発表されてきた。特に、蛇紋岩が脱水する際に生じるカンラン石が顕著に伸長する場合があることが古くから報告されており、超苦鉄質マグマにおける冷却組織(スピニフェックス組織)に酷似していることから、スピニフェックス“様”組織などと呼ばれている。その起源について、組織があまりにもマグマの急冷組織に似ているため、脱水時に形成された断層で摩擦溶融が生じたのち急冷した組織であるとする解釈等もあったが(Evans and Cowan, 2012)、現在は脱水時の割れ目形成等に伴う流体圧の急減少によってそのような組織が生じるのではないかと考えられている(Dilissen *et al.*, 2021)。しかし、伸長方向とかんらん石の結晶軸方向の特殊な関係性など未解明な点もあり、本当に流体圧の減少に伴って同様の組織が生じうるのか、十分に理解されていなかった。このような問題にアプローチするために、圧力を精密に制御可能な内熱式ガス圧装置を用いて、流体圧(実験においては全圧に等しい)を様々に変えた蛇紋岩の脱水実験を行った。地質情報研究部門の針金由美子上級主任研究員にご協力いただき、実験生成物中のかんらん石の伸長度合いや伸長方向と結晶軸の関係を調べた結果、流体圧が低い場合、天然のスピニフェックス

¹ 産総研 地質調査総合センター活断層・火山研究部門

キーワード：廣川研究助成事業、沈み込み帯、水流体、蛇紋岩、かんらん石、スピニフェックス様組織、内熱式ガス圧装置、グラナダ

様組織と非常によく似た組織が生じることが分かった。5th SerpentineDays 2024 会議では、国際共同研究に向けて上記の結果についてポスター発表を行い、関連情報を収集するとともにアルミレス山での地質巡検に参加し、スピニフェックス様組織の成因と沈み込み帯における水流体の移動分離過程について現地で議論を行った。

3. 5th SerpentineDays 会議

SerpentineDays 会議は、前身となるフランスの研究共同体が、蛇紋石および蛇紋岩の鉱物学的・地球化学的研究を対象とした研究会議の成功を受けて、研究分野を環境科学や惑星科学にまで広げ、国際会議に発展させたものである。前身の会議を含めて第5回目となる今回は、スペイ

ンのグラナダで開催され、75名の参加者が世界各国から集まった。

9/23の初日から会議に参加するために、イスタンブール経由でグラナダに前日入りする予定であったが、イスタンブール着が予定より遅れたため、イスタンブールで1泊することになった。航空会社の手配されたホテルは空港から1時間も離れた場所にあり、なぜこんな遠くまで連れてこられるのか不思議であった。空き時間に周囲を散策すると、近所に石灰岩や大理石で作られた帝国時代の Yedikule (イエディ・クレ) 要塞があり、塔の上から数多くの貨物船がマルマラ海に浮かぶ様子を一望することができた(写真1a)。交通の要所であることが一目でわかる印象的な景色であり、これを見せたかったのかとマルマラ海の風を感じながら勝手に納得した。翌日、1日遅れでグラナダに



写真1 イスタンブールとグラナダの様子。(a) イスタンブールのイエディ・クレ要塞から見たマルマラ海の眺め。(b) 5th SerpentineDays の会場となったグラナダの Carmen de la Victoria の庭園。(c) 会議参加者の集合写真。アルハンブラ宮殿が背景に見える。

到着し、夕方のポスター発表から SerpentineDays 会議に参加した。会場はグラナダ大学が保有する Carmen de la Victoria という美しい庭園付きの宿泊施設であり、アルハンブラ宮殿が目と鼻の先に見える絶好のロケーションであった(写真 1b および 1c)。ポスター発表では、アルミレス岩体等における蛇紋岩の脱水過程を詳細に研究しておられる Padrón-Navarta 博士や、スピニフェックス様組織を持つ岩石の CT 分析をしておられた Wolf-Achim 博士らと議論することができた。実験で見られたカンラン石の双晶が天然の岩石にも存在することや、実験産物の CT 分析の可能性等について話し合う等、今後研究を発展させる上で非常に有益な意見交換を行うことができた。口頭発表では、蛇紋岩を通じた水循環のトレーサーとなるホウ素やマグネシウムの同位体の分析や、蛇紋岩の脱水に伴う酸化的な水流体の発生、蛇紋岩の炭酸塩化に伴う変形様式の変化等、蛇紋岩に関するホットな研究トピックを概観することができた。また、東北大学の岡本 敦教授が現地で招待講演をされ、天然岩石の分析や室内実験、シミュレーションを組み合わせた蛇紋岩化における物質移動と破碎に関する研究内容について聴くことができた。一貫して本質的な問題に多様なアプローチで取り組まれており、世界の第一線に立つ研究者とはこういうものかと唸らされた。上記の岩石・鉱物学的な研究に加え、蛇紋岩化および蛇紋岩の炭酸塩化をアナロジーとした工業的な水素の発生や二酸化炭素固定の研究についても触れることができた。SerpentineDays という(かなり?)マニアックな研究会議を存続させる上で、このように社会的な要請をうまく取り込むことが大切なのだろうと感じた。

4. アルミレス山への地質巡検

SerpentineDays 会議の終了後、地元大学所属の 5 名の案内者と希望者 25 名が 1 泊 2 日のアルミレス山への地質巡検に参加した。会議の約 1 年前、フランスのリヨンで開催された Goldschmidt 国際会議に参加した際、蛇紋岩関係のセッションが行われていた部屋で SerpentineDays 会議のフライヤーを見つけて、運命めいたものを感じたことを覚えている。たまたま筆者が興味を持って始めていた実験の典型的で完璧な天然の例が、この目で見られる機会があると知ったからだ。巡検の参加希望者は、朝早くにグラナダ駅前に集合し、案内者と一緒にレンタカーに分かれて乗り込んで、東のシエラネバダ山脈に向かった。高速道路を過ぎて、土煙を上げながら乾燥した山道を進むことおよそ 2 時間後、アルミレス山手前の最初の地点に到着した。巡検

案内書が事前に配られていなかったもので、そういうものかと思っていたら、後からやってきた案内者から昼食のサンドイッチや果物と一緒に案内書が配られた。聞くと、できるだけ正確な資料とするため作成に時間がかかり、手渡すのが遅れてしまったとのことだった。これまでの研究成果が案内順に従って分かりやすく図と共にまとめられていた。

晴天の下、案内書片手に眼下に広がる眺望に目を奪われながら、アルミレス山周辺の地質史について案内者から説明を受けた(写真 2)。海洋底に露出したマントル岩石と海水の反応により生成した蛇紋岩が、地下深くに沈み込む過程でアニールされて均質化した後、脱水しつつある状態を保存したまま地表まで上昇したとのことだった。岩体上位の脱水前の蛇紋岩から、岩体下位のほぼ完全に脱水した岩石(主にカンラン石と直方輝石から構成されるハルツバージャイト)までその推移を細かに追うことができるように巡検スケジュールが組まれており、最終的に脱水の「カタルシス」に至ると案内者が表現していたのが印象的であった。蛇紋岩に加え、ロジン石と呼ばれる蛇紋岩化に伴って生成する変質岩の変成履歴を一緒に追うことで、脱水時の



写真 2 巡検開始時に岩体の地質史について説明をする Padrón-Navarta 博士。背後に見える山がアルミレス山である。

温度圧力経路や各種物質の出入りを比較検証できるような構成になっていた。

アルミレス山の山腹まで行き、車を降りて息を切らしながら急な山道を登ると、片理の発達した蛇紋岩が見えてきた(写真 3a および 3b)。脱水前の蛇紋岩は良くアニールされ組織が均質であることが特徴で、それゆえにその後の脱水過程が容易かつ詳細に把握できる利点がある。山を下り

始めるとカンラン石などからなる脈が見える等、脱水の兆候が現れ始めた(写真 3c)。さらに下ると、遷移的な蛇紋岩の脱水前線が克明に保存された露頭が見れ、脱水が本格的に生じていることが分かった(写真 3d)。ここで生じているカンラン石は等方的な形状をしている。

一方、少し離れた場所では、伸長したカンラン石を有する見事なスピニフェックス様組織が見られ、参加者から感

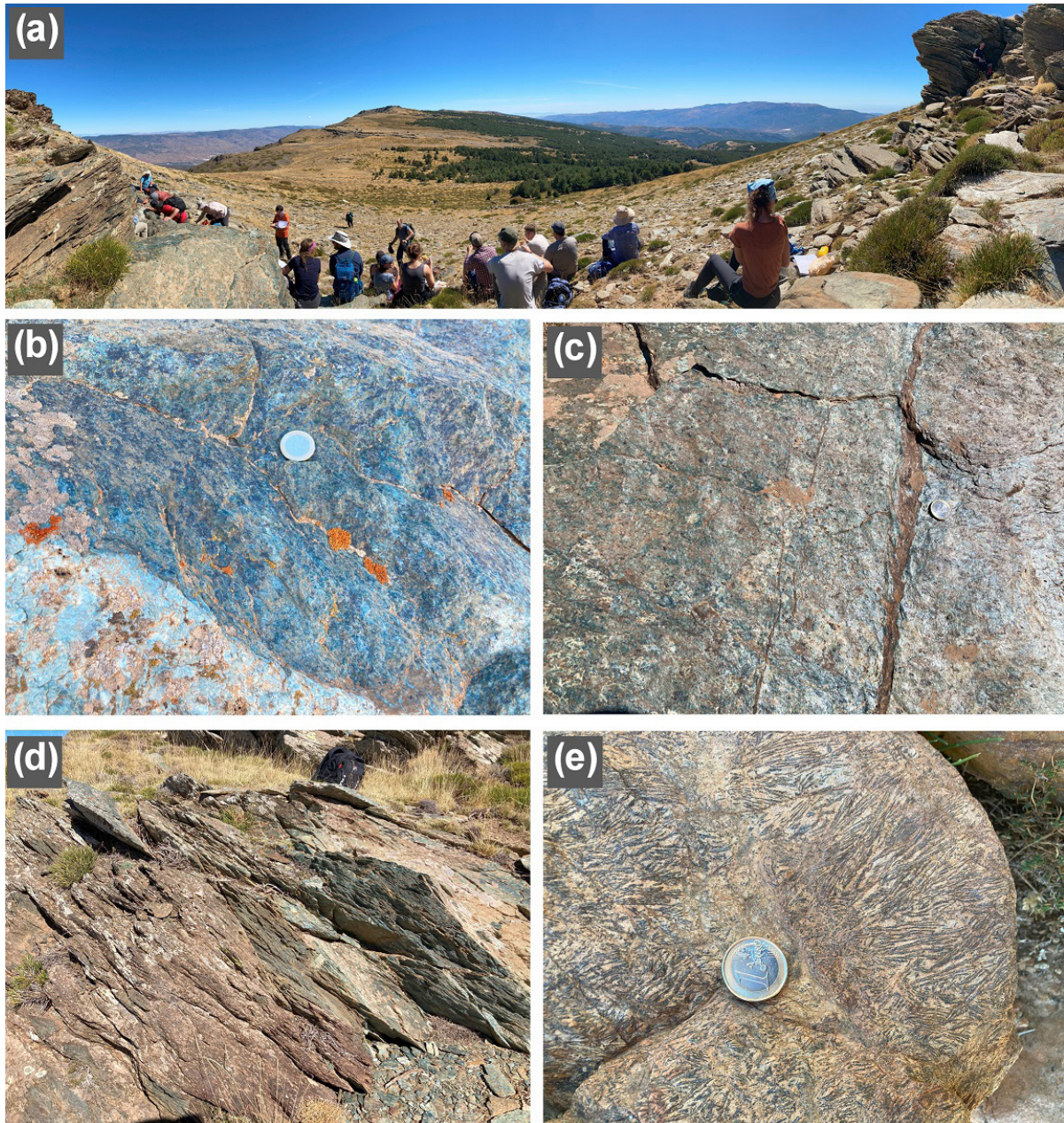


写真 3 アルミレス山における蛇紋岩の脱水の様子。(a) 山頂付近にて、片理の発達した蛇紋岩を背に昼食を取った。(b) 脱水前の蛇紋岩。主に蛇紋石と磁鉄鉱から構成される。(c) 脱水の兆候が表れ始めた蛇紋岩。主にカンラン石や含チタン斜ヒューム石から構成される厚みの異なる 2 種類の褐色脈が、片理と交わる方向に発達している。(d) 遷移的な脱水前線が確認できる露頭。右手の緑色の蛇紋岩が左手の赤褐色のハルツパージャイトへと脱水する間に緑泥石や直方輝石が順に結晶化し、遷移的な岩相を生み出している。(e) 蛇紋岩が脱水してできたと考えられるスピニフェックス様組織を持った岩石(ハルツパージャイト)。伸長した黒っぽい粒子がカンラン石であり、その周りを主に白色の直方輝石(多くの場合滑石に変質)が埋めている。

嘆の声が上がった(写真 3e)。メルトの急冷組織であると解釈するのも、もはや仕様がなと思う程の見た目であり、長軸の長さが最大約 30 cm にもなると説明を受けた。周囲の露頭で実際に石を手にとってみると、かんらん石の伸長の具合や方向のパターンにバリエーションがあることがすぐに分かり、非常に興味深かった。Garrido 博士からスピニフェックス様組織を切る特殊な粉碎脈の存在 (Padrón-Navarta *et al.*, 2010) も教えてもらい、水圧の変動と破壊と脱水反応が、水流体の分離過程において密接に関わっていることがうかがわれた。また、この脱水の「カタルシス」の説明の場で、案内者である Padrón-Navarta 博士から筆者の研究を取り上げてもらったことが、単純に嬉しかった。

1 日目の巡検を終えた後は、地元研究者らがいつも利用しているという宿に泊まった(写真 4)。夕食の前に飲み物片手に歓談する場があり、そこで案内者の一人であるハエン大学の Sánchez-Vizcaíno 教授と話す機会を得た。1995 年に、Ulmer and Trommsdorff (1995) という蛇紋石の安定条件を圧力 8 GPa まで高压実験により制約した論文が Science 誌に掲載され、当時の教授はそれを受けてアルミレス山の研究を始めたとのことだった。Trommsdorff 氏と Sánchez-Vizcaíno 教授らは、アルミレス山の岩体が 1.6 GPa 以上の高压下での蛇紋岩の脱水が観察できる稀有な例であることを示し (Trommsdorff *et al.*, 1998)、それ以降アルミレス山は世界的な注目を浴びるようになった。その後、Sánchez-Vizcaíno 教授は、断片的であったアルミレス山の研究を総合的に推し進め、約 30 年にわたって本岩体の地質学的・鉱物学的研究に従事されてきた。今なお、重要な

成果がこの岩体の研究から生み出されているのは、この岩体の希少性もさることながら、彼ら先人の先駆的で緻密な研究があってこそだということを改めて感じた。その後、夕食は 24 時前まで続き、最後は地ワインで酔いが回って半分寝ていたが、楽しい時間を過ごすことができた。

翌日は、若手の Menzel 博士の案内で炭酸塩を伴った蛇紋岩を見て回った。海洋底で生成した炭酸塩(主に石灰石)を含む蛇紋岩(蛇灰岩)が沈み込む際、周囲の炭酸塩を含まない蛇紋岩の脱水に伴って炭酸塩も溶けだしてしまうことが直感的に予想されたが、実際には多くの炭酸塩が生き残っており、より深部のマントルまで運ばれるのだと説明された。近年整備が進んだ高压下における水流体中の溶存種の熱力学モデルに基づき、相当の水岩石比(時間積分した流体フラックス)がないと、炭酸塩が十分溶けださないことが一つの要因であると議論されており、参考になった (Menzel *et al.*, 2019, 2020)。

今回の巡検全体を通じて、参加者の一人である Timm 教授が、折に触れて鋭い質問を投げかけることで議論が盛り上がる事が多く、こういった場での議論の仕方について学びを得た。そして、巡検の締めくくりに際しては、参加者の一人から、アルミレス山は素晴らしい天然の「博物館」であり、キュレーターとして博物館を維持し、今回その魅力を伝えてくれた地元研究者の方々にお礼を言いたい旨の挨拶があり、筆者もひどく共感した。巡検の間、参加者らと場の雰囲気共有しながら、研究について議論することで思考のヒントを得る等、オンラインでは得難い体験をすることができた。

5. おわりに

今回の渡航に際して旧地質調査所 OB である廣川 治氏のご遺族から地質調査総合センターへご寄付いただいた資金(廣川研究助成金)の一部を使用させていただいた。関係者の方々に深く感謝申し上げる。

文 献

- Dilissen, N., Hidas, K., Garrido, C. J., Sánchez-Vizcaíno, V. L. and Kahl, W. A. (2021) Morphological transition during prograde olivine growth formed by high-pressure dehydration of antigorite-serpentinite to chlorite-harzburgite in a subduction setting. *Lithos*, **382**, 105949.
- Evans, B. W. and Cowan, D. S. (2012) A melt origin for



写真 4 巡検の 1 日目が終了した後に宿泊した宿のバルコニーからの眺め。

- spinifex-textured metaperidotite in the Cerro del Almirez Massif, southern Spain. *American Journal of Science*, **312**, 967–993.
- Menzel, M. D., Garrido, C. J., López Sánchez-Vizcaíno, V., Hidas, K. and Marchesi, C. (2019) Subduction metamorphism of serpentinite - hosted carbonates beyond antigorite - serpentinite dehydration (Nevado - Filábride Complex, Spain). *Journal of Metamorphic Geology*, **37**, 681–715.
- Menzel, M. D., Garrido, C. J. and Sánchez-Vizcaíno, V. L. (2020) Fluid-mediated carbon release from serpentinite-hosted carbonates during dehydration of antigorite-serpentinite in subduction zones. *Earth and Planetary Science Letters*, **531**, 115964.
- Padrón-Navarta, J. A., Tommasi, A., Garrido, C. J., Sánchez-Vizcaíno, V. L., Gómez-Pugnaire, M. T., Jabaloy, A. and Vauchez, A. (2010) Fluid transfer into the wedge controlled by high-pressure hydrofracturing in the cold top-slab mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, **297**, 271–286.
- Trommsdorff, V., Sánchez-Vizcaíno, V. L., Gómez-Pugnaire, M. T. and Müntener, O. (1998) High pressure breakdown of antigorite to spinifex-textured olivine and orthopyroxene, SE Spain. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **132**, 139–148.
- Ulmer, P. and Trommsdorff, V. (1995) Serpentine stability to mantle depths and subduction-related magmatism. *Science*, **268**, 858–861.
-
- NAKATANI Takayuki (2025) Report of the Hirokawa Research Fund in the 2024 fiscal year: The participation in 5th SerpentineDays 2024 and sharing ideas about fluid migration and liberation in subduction zones for potential international collaborative research.
-
- (受付：2025 年 2 月 28 日)