

令和 6 年度廣川研究助成事業報告： 地下水・土壌汚染の微生物による浄化メカニズム 解明に関する国際共同研究へ向けた事前協議

吉川 美穂¹

1. はじめに

令和 6 年度廣川研究助成事業により、2024 年 12 月 9 日から 14 日までスイス連邦、パウル・シェラー研究所 (PSI: Paul Scherrer Institut) を訪問致しました。PSI では鉱物の酸化還元を専門とし Laboratory for Waste Management を率いている Anke Neumann Jenal グループ長の元を訪問し、国際共同研究の打ち合わせを行いました。また、筆者の研究内容への理解を深めてもらうことを目的にグループが主催するセミナーで研究発表を行い、参加者との意見交換を行いました。将来的な在外研究を見据え滞在中にはスイスで在外研究を行っている研究者とも懇談し、現地での情報収集を行いました。本稿ではその内容について報告致します。

2. 研究内容と訪問の背景

揮発性有機化合物であるテトラクロロエチレン、トリクロロエチレン等のクロロエチレン類は非常に多くの地下水・土壌汚染サイトで確認される汚染物質であり、国内外で広く問題視されています(環境省, 2024; US EPA, 2020)。これらの汚染は人為的な産業活動で発生し、汚染土壌から揮発したガスの吸引や汚染が移行した地下水の摂取によるガンや肝機能障害等の健康被害が懸念されています。持続的な産業活動を行うためには、低環境負荷、低コスト、及び事業の操業や浄化コストに影響が出ないよう短期間での土壌汚染の浄化を実現する技術が求められていますが、これら全てを満たす技術は現時点では確立されていません。微生物を用いたクロロエチレン類の浄化は、低環境負荷、低コストであるという利点があるものの、完全浄化に時間がかかる点が課題です (Zhang and Yoshikawa, 2016)。

筆者はこれまで、微生物による揮発性有機化合物の浄化の研究を微生物の単離、微生物叢解析、安定同位体による微生物解析等の微生物側からのアプローチを中心として進

めてきました(例えば Yoshikawa *et al.*, 2017, 2021)。この分野の研究では実験室内で液体培地を用いて浄化実験を行うケースがほとんどですが、筆者はより実環境に近い条件として培地中に二価鉄や土壌粒子が存在する複雑な条件で研究を進めており、この点にオリジナリティーを見出しています。近年には二価鉄とメタン生成菌が共存することにより揮発性有機化合物の浄化速度が大幅に短縮されることを発見し (Yoshikawa *et al.*, 2021)、また、実用化へ向けた最適化条件の解明にも取り組んでいます。しかしこのような複雑な条件で研究するにあたり、これまで行ってきた微生物側からのアプローチだけでは微生物による浄化速度短縮のメカニズムを十分に解明することができず、難しさを感じていました。

そこで今回、メカニズム解明へ向けて微生物側からのアプローチだけではなく二価鉄という地球化学側からのアプローチにも取り組むために、鉄の形態分析を得意とし鉄による揮発性有機化合物の分解に長年取り組んでいる PSI の Anke Neumann Jenal グループ長(例えば Rothwell *et al.*, 2023) を訪問致しました。今回の訪問は、筆者が 2019 年に広島で開催された IWA Microbial Ecology and Water Engineering Specialist Conference で前述の研究内容を発表した際、Neumann グループ長の元同僚であるイギリスのニューカッスル大学の Thomas Curtis 教授が「鉄の分析に詳しい同僚がいるから一緒にやってみたら?」と声をかけて下さったのがきっかけでした。Curtis 教授による紹介後に連絡を取っていたものの、コロナ禍となり直接お会いしたことがないまま研究相談をするという状況でした。状況を進展させ共同研究を実現させるためには一度対面でお話する必要性を強く感じ、今回の渡航を計画致しました。

PSI はスイス連邦工科大学チューリッヒ校 (ETH Zürich) の傘下にあるスイス最大の自然科学及び工学の研究機関で、スイスの大都市チューリッヒから電車とバスを乗り継ぎ 1 時間ほど行ったスイス北部に位置します。大都市からの距離や交通の便、研究所から少し離れると田舎が広がっ

¹ 産総研 地質調査総合センター地圏資源環境研究部門

キーワード：廣川研究助成事業、地下水・土壌汚染、微生物、鉄、揮発性有機化合物

ているところ等、つくばにある産総研とよく似ています。原子核物理学を専門とする物理学者パウル・シェラーの名を冠した PSI は設立当初は素粒子物理が研究の中心でしたが、現在では保有する放射光施設等を利用した自然科学や工学の研究を広く行っています。環境分野に関しては、原子力発電が盛んなスイスらしく放射性廃棄物の地層処分の長期安定性評価等が行われています。

3. 研究室訪問

研究室訪問ではまず、グループ主催のセミナーで発表の機会を頂き 1 時間のプレゼンテーションを行いました(写真 1)。その際、自己紹介とともに今後の共同研究に繋げることを念頭に置いた研究紹介を行いました。産総研や地圏環境リスク研究グループについて紹介した後、これまで公表してきた論文をベースに研究内容を発表致しました。微生物ではなく地球化学をベースとする研究者が多かったためここまで伝わるか手探りでの発表でしたが、20 名程のメンバーが興味を持って聞いてくれました。発表後も微生物が生息するための環境やバイオレメディエーションの実態などについて活発な質疑があり、有意義な意見交換を行うことができました。

その後、Neumann グループ長に研究所をご案内いただきました(写真 2)。Neumann グループ長は着任後間もないため、研究室では従来の放射性廃棄物の地層処分の安全性評価を行うための研究が主に行われていましたが、数年のうちに非放射性の地球化学研究や微生物研究も立ち上げ

るとのことでした。研究室では地層処分が実施されるような嫌気環境下での元素や化合物の形態を調査しているため、大型分析装置を除きほぼ全ての実験は嫌気チャンバー内で行われていました。各実験室に 10 個程の堅牢なチャンバーが並ぶ姿は圧巻そのものでした。コアのカット器具や拡散試験装置など筆者のこれまでの研究でなじみのあるものも嫌気チャンバー内に入っていました。一般的に嫌気チャンバー内での作業は煩雑ですが、少しでも操作性が良くなるようオペレーションが工夫されており興味深かったです。なお、放射性物質を多く扱うため入退室の管理は厳格で、滞在期間中は常に放射線測定器であるサーベイメータを身に付けて行動しました。また、扱う放射性物質のレベルに応じて実験室の使い分けをしたり、実験室からの退室時には contamination monitor で手足に放射線汚染が無いか確認をしたりと、一般の生物・化学実験室とは大きく異なる安全管理の違いに気を引き締められました。

また、PSI が運営する放射光施設 Swiss Light Source (SLS) も見学させていただきました(写真 3)。筆者は以前、産総研の研修の一環で九州シンクロtron光研究センターの放射光施設を見学させていただきましたが、比較すると SLS は 16 本のビームラインが稼働している大規模な施設、また国内外の研究者に加え Roche 等の世界的な製薬会社もタンパク質構造解析に使用している国際的な施設でした。Neumann グループ長のグループでもマイクロスケールの高い空間分解能を持つ microXAS ビームラインを使用して元素の化学形態や酸化状態を解析していました(写真 4)。

滞在中には共同研究について打ち合わせる時間も設けて



写真1 筆者によるプレゼンテーションの様子.



写真2 Neumann グループ長(左)と筆者(右).



写真3 放射光施設 Swiss Light Source (SLS) の外観.

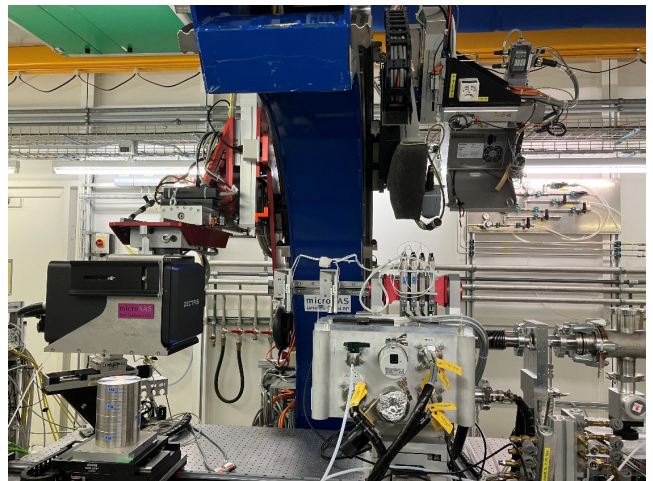


写真4 高い空間分解能を持つ microXAS.

いただきました。Neumann グループ長と筆者の専門分野は異なりますが「鉄」をキーワードに学際的な研究をすることの意義を共通認識として持っており、共同研究を進めることについて改めて確認しました。技術を持ち帰って日本でも発展させられるような研究をしたらよいと、世界各国の研究機関を渡り歩いてこられた Neumann グループ長ならではのご意見を頂き、鉄の分析についていくつか分析装置を挙げて検討することができました。今後、共同研究を進めるための申請書を作成することでも一致し、全面的にバックアップするとの心強いお言葉を頂くことができました。渡航前は単身で乗り込んで初対面の研究者と打ち合わせをすることに不安しかありませんでしたが、今回の渡

航の目的を達成することができ非常にほっとした瞬間でした。

滞在期間を通して研究グループのメンバーと交流する機会も作っていただきました。研究グループにはドイツ、デンマーク、オーストラリアなど世界各国から集まった研究員やポスドクが在籍しています。コーヒープレークや昼食時に活発に情報交換をしており、複数の国での研究経験がある彼らがスイスの研究環境の素晴らしさを口々に語っていたのが非常に印象的でした。研究設備に限って言えば、産総研を含む日本国内の研究機関でも同等のものが揃っていると思います。しかし、短期間の訪問で筆者が感じた範囲ではありますが、国際色豊かな研究者が集い、スキルの

高い技術職員が在籍するという人的面、居室にドアがなくコミュニケーションをとりやすいオープンな環境面、電子キーでの来訪者の入退室管理やスマホでの会議室予約等のITシステム面等でPSIは充実しており、高い生産性とワークライフバランスの実現を可能にしているようでした。

4. 現地での情報収集

スイス滞在中にはPSI研究所への訪問に加え、現在ETH Zürichで在外研究をされている活断層・火山研究部門の岩橋くるみ博士とも懇談致しました。スイスへ移住し在外研究を行う上での各種手続きや物価が日本の約3倍のスイスで生活するコツなど、現在進行形で現地に暮らしていらっしゃる方だからこそ知り得る貴重な情報を教えていただきました。また、海外の研究者とのコミュニケーションの取り方の違いを乗り越えて真摯に研究を進めようとしている岩橋博士の姿を垣間見て、私自身在外研究、国際共同研究への決意を新たに致しました。

5. 終わりに

今回の渡航は、今後の共同研究に向けた予算獲得や研究内容の具体的な打ち合わせができ、非常に有意義なものとなりました。また、対面で打ち合わせをさせていただく中でNeumannグループ長の研究に対する考え方と筆者の考え方は多くの点で一致しており、改めて一緒に研究を進めたいと強く感じたことも大きな収穫でした。この経験が無駄にしないよう、コンタクトを絶やさず、日々目の前の研究を進めて予算獲得に繋がりたいと思います。

謝辞：今回の訪問は廣川研究助成事業の支援を受けて実施致しました。筆者は育休明けだったため小さな子供を日本に残して渡航することへの罪悪感や逆にそれを研究が進まない理由としてしまうことへの葛藤がありましたが、本支援を受け予算面のハードルが下がることで自分の気持ちを整理し大きな一歩を踏み出すことができました。このような機会を与えて下さいました旧地質調査所OBである廣川治氏とそのご遺族、並びに関係者の皆様に心より御礼申し上げます。

また、お忙しい中事前調整から当日のアテンドまで終始大変ご親切にいただいたAnke Neumann Jenalグループ長、そしてこのようなネットワーク構築のきっかけとなったニューカッスル大学のThomas Curtis教授にこの場をお借りして深く感謝申し上げます。

文 献

- 環境省 (2024) 令和4年度土壌汚染対策法の施行状況及び土壌汚染調査・対策事例等に関する調査結果。
<https://www.env.go.jp/content/000216011.pdf> (閲覧日：2025年2月25日)
- Rothwell, K.A., Pentrak, M.P., Pentrak, L.A., Stucki, J.W. and Neumann, A. (2023) Reduction pathway-dependent formation of reactive Fe(II) sites in clay minerals. *Environmental Science & Technology*, **57**, 10231–10241. doi:10.1021/acs.est.3c01655.
- United States Environmental Protection Agency (US EPA) (2020) Superfund remedy report, 16th ed. EPA 542-R-20-001, United States Environmental Protection Agency, <https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-07/documents/100002509.pdf> (閲覧日：2025年2月25日)
- Yoshikawa, M., Zhang, M., Kurisu, F. and Toyota, K. (2017) Bacterial degraders of coexisting dichloromethane, benzene and toluene, identified by stable-isotope probing. *Water, Air, & Soil Pollution*, **228**, 418.
- Yoshikawa, M., Zhang, M., Kawabe, Y. and Katayama, T. (2021) Effects of ferrous iron supplementation on reductive dechlorination of tetrachloroethene and on methanogenic microbial community. *FEMS Microbiology Ecology*, **97**, fiab069. doi:10.1093/femsec/fiab069.
- Zhang, M. and Yoshikawa, M. (2016) An overview of remediation technologies for sites contaminated with volatile organic compounds. *Proceedings of Geo-Chicago 2016*, 295–301.

YOSHIKAWA Miho (2025) Report of the Hirokawa Research Fund in the 2024 fiscal year: Preliminary discussions on joint international research to elucidate the mechanisms of bioremediation of soil and groundwater pollutant.

(受付：2025年2月25日)