

2024 年度在外研究（長期）研究概要報告書

農学部
加藤雅彦

1. はじめに

私は、ドイツのハノーファーにある Leibniz Universität Hannover, Institute of Earth System Sciences, Soil Science Section（以下、Soil Science Section）におよそ 11 カ月間研究留学させていただいた。Leibniz Universität Hannover, Institute of Earth System Sciences, Soil Science Section を選んだ理由はいくつかあるが、主には以下のとおりである。土壌学は、土壌生成、土壌物理、土壌化学、土壌生物などの基礎学問的な内容から農業生産、環境保全、資源循環など応用学問的な内容まで幅広い。私が土壌学を研究し始めおよそ 20 年が過ぎた。特に、最近の私の研究は、応用学問的な内容に偏りがちになっており、少し行き詰まり感を感じるが多くなった。Soil Science は、他学問と同様に、アメリカ、日本、ヨーロッパ、特にヨーロッパでは、ドイツ、イギリス、フランスなどにおいて先駆的である。Soil Science Section では、土壌を土壌たらしめる土壌有機物の機能解明、また土壌の構造発達に必要な土壌団粒構造の形成解明、土壌中での物質輸送に関わる先駆的な研究を行っている。また Section を主宰する Prof. Guggenberger は、この分野における世界的な権威である。Soil Science Section で研究を実施することで、改めて土壌を基礎から見つめ直すことができ、またドイツ人強いてはヨーロッパの方々の土壌学の考え方、研究アプローチの仕方を学ぶことで、私の今後数十年間の土壌学研究のマイルストーンにできるのではないかと考えた。

2. 研究プロジェクト

実際の研究は、PhD Stefan Dultz を Supervisor として、Stefan がリーダーを担っているプロジェクトへ参画した。バイオセメントプロジェクトである。CO₂ 発生量の削減が必要とされている。セメントはその製造過程で多量の CO₂ が発生するため、従来セメントに代わる材が求められている。バイオセメントは、シアノバクテリア、微生物が生成する CO₂ と土壌中のカルシウムイオンとによる炭酸カルシウムやシアノバクテリア、微生物から分泌される細胞外高分子物質によって土壌粒子同士をくっつけ、あたかもセメントのように土壌を固化させようとする技術である。バイオセメントは、従来のセメントに比べて十分な強度を得ることは、現時点で、まだ難しい。しかし、海浜浸食の防止などへの適用が期待されている。また、本プロジェクトの最終ゴールは、バイオセメント技術を実ビル構造に適用することである。ヨーロッパ人の考え方の大きさ、大胆さ、また夢のある話だと思った。以下に、Soil Science Section で行った研究の一端の概要を記す。

3. 研究の背景と目的

- 研究タイトル：

微生物による炭酸塩形成 - 湿潤-乾燥サイクルにおける水のメニスカスと骨材形成と安定性における炭酸カルシウム析出の位置と機能との関係

● 背景および目的：

陸と海の境界線である海岸線の浸食は、世界的な問題である。海岸浸食を確実に防ぐためには、様々な対策を組み合わせる必要があり、特に自然を利用した解決策が注目されている。本研究では、シアノバクテリアによって石灰化プロセスが促進された海岸のバイオクラストに注目している。微生物由来の細胞外高分子物質は、その接着性によって凝集体の形成を促進する。バイオミネラリゼーション生成物や粘土鉱物、溶液から沈殿した炭酸塩やケイ酸塩相などの小さな無機土壌化合物は、セメントとして機能する可能性がある。これらの結合剤の位置と機能は、存在する水のメニスカスと強く関連している。粘土鉱物はカルシウムイオンを保持する能力が高い。そのため、粘土を含まない砂質土壌と比較すると、炭酸カルシウムの形成レベルやその微細形態が異なる可能性がある。ここでは、粘土の有無による炭酸カルシウム形成の違いが、湿乾サイクルにおける細砂の安定した凝集にどのように寄与するかをモデル実験で評価した。

4. 材料および方法

モデルとして、研磨したガラスビーズ（200~250 μm ）を模擬砂として、ベントナイトを粘土鉱物として用いた。ガラスビーズに対してベントナイトを1wt%、炭酸カルシウムはナノ粒子および飽和溶液として添加した。溶液の添加により間隙の飽和度を部分的に調整した。その後、飽和溶液を室温で2時間保持し、35 $^{\circ}\text{C}$ で24時間乾燥させた。この工程を1サイクルとして、湿潤-乾燥サイクルを計5回繰り返した。ガラスビーズのセメンティングの微細形態は、接触点に焦点を当てた走査型電子顕微鏡によって決定した。また、表面被覆の程度、表面粗さ、平均高さは共焦点レーザー走査型顕微鏡で定量化した。

5. 結果および考察

析出物の顕著な集合体は、ガラスビーズの接触点またはその近傍で見つかった。これらの形成は水メニスカスの形状と強く関連していた。炭酸カルシウムナノ粒子の存在下では、ガラスビーズの接触点周辺にリング構造の沈殿が観察されたが、炭酸カルシウム飽和溶液から析出した炭酸カルシウムは、接触点のガラスビーズ同士を効率的に結合させた。ベントナイトの存在下では、接触点からかなり離れた位置でガ

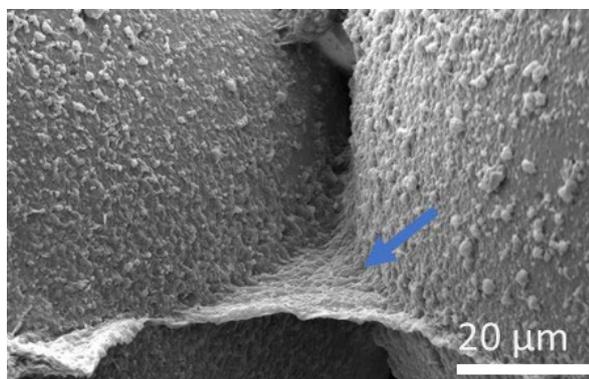


Fig. 1 SEM image of glass beads with clay minerals

ラスビーズ同士をつなぐ壁状の析出物が観察された (Fig. 1). 表面電荷, ガラスビーズの接触点におけるサイズ排除, ベントナイトの安定な凝集構造の形成がセメントの微細形態に影響を与えた. 凝集体の形成と安定性はセメント固化剤に依存する可能性があるため, このプロセスを工学的に応用するためには, 細孔空間におけるさまざまなセメント固化剤の微細形態に関する知見が重要である.

6. 研究成果について

在外研究中に得られた研究成果の一部を, 在外期間中である 2024 年 9 月にチェコ, ピルゼンにて開催された 11th Mid-European Clay Conference にて発表を行った¹⁾. また, 2025 年度には, 2 つの国際会議にて発表予定である^{2,3)}. また, 研究成果を取り纏め, 国際学術論文誌へ投稿すべく, Supervisor と論文を執筆中である. 在外研究では, ベントナイトの存在による炭酸カルシウムの形成や微細構造の変化を追跡した. 在外研究で行った研究テーマについては, 引き続き学内での研究として継続する予定であり, Supervisor とも連携を継続している. 今後は, 粘土鉱物の種類の違いによる影響なども明らかにする研究を進める予定である.

- 1) Katoh, M., Dultz, S., Guggenberger, G. 2024. Combined effect of clay minerals and calcium carbonate precipitation at wet-dry cycles on aggregate formation and stability. Proceedings of 11th Mid-European Clay Conference, Pilsen, Czech, p. 76
- 2) Dultz, S., Katoh, M., Matthias, M.K., Guggenberger, G. 2025. Effect of water menisci on location and function of clay minerals and calcium carbonate precipitation within aggregate formation and stability, The Annual Meeting of the German Soil Science Society, Tübingen, Germany
- 3) Katoh, M., Dultz, S., Matthias, M.K., Jung, P., Guggenberger, G. 2025. Microbial induced carbonate formation - Effect of water menisci in wet-dry cycles on location and function of calcium carbonate precipitation within aggregate formation and stability, M-FED25 conference, Hannover, Germany

7. 今後の展望

従事した研究プロジェクトで得られた成果は, 地盤改良へのバイオセメント技術適用への一助になると考えている. また, 従来の私の研究では, 土壌をミクロな視点で観察することはおよそなかった. しかしながら, 研究プロジェクトに参画することで, ミクロな視点での観察の重要性を認識した. 今後の研究活動にも適用していきたい. 実験技術のみならず, 本研究プロジェクトで得られた成果は, 土壌が形成される過程, すなわち土壌団粒構造の発達といった土壌学の基礎プロセスの解明にも寄与できると考えている. このことは, “はじめに”で記したとおり, 当初の私のモチベーションである土壌学を基礎から見つめ直すことに繋がった. また研究活動を通じ, 今後私が進むべき, 進みたい道を考えるこ

とができ、今後数十年間の土壌学研究のマイルストーンを得られたことは大きかった。また、ヨーロッパ人の研究の考え方など参考になることも多く、今後の自身の研究活動に活かしていきたい。

8. 教育への効果

ドイツ学生と日本学生の能力の違いはそれほどないと感じた（いずれも優秀）。ただ、大きく異なるのは、ドイツ学生は自身の考えを自身の表現で伝えることができることと思った。そして、自身の考えに基づいて行動できる場所である。これは、大学教育のみならず、教育過程の違いが大きいのであろうと思った。他方、日本学生は真面目でコツコツ物事を進められるところと思った。研究室活動を通じて日本学生も自身で考え、行動できるような人材に教育できるようにしたい。

以上