

令和 6 年度廣川研究助成事業報告： 熱環境攪乱が地圏環境に及ぼす影響評価に関する 国際共同研究打ち合わせ

齋藤 健志¹

1. はじめに

令和 6 年度廣川研究助成事業のご支援により、2024 年 6 月 28 日(金)～7 月 8 日(月)までの 11 日間、デンマーク北部に位置する第 4 の都市オールボーにある、オールボー大学に滞在した。本訪問の目的は、オールボー大学の Per Moldrup 教授(The Faculty of Engineering and Science, Department of the Built Environment, Division of Civil and Environmental Engineering, Soil Technology Research Group, Head of Research Group)を訪問し、熱環境攪乱が地圏環境に及ぼす影響評価に関する共同研究打ち合わせを行うことであった。本稿では、その概要について報告するとともに、Moldrup 教授の同僚である Urban Pollution Research Group の Alvis Vianello 准教授、Fan Liu 准教授らとマイクロプラスチックの環境動態研究に関する情報交換や実験室見学等の機会を頂けたため、その概要についても報告する。

2. 訪問の背景・目的

近年、世界各地において、地下の温度が上昇する、地下温暖化現象が観測されている(例えば、Harris and Chapman, 1997; Pollack *et al.*, 1998; Perrier *et al.*, 2005)。この現象は、東京や大阪でも観測されており(Taniguchi *et al.*, 2007)、具体的に、オランダにおいては、過去 30 年間で 0.8 °C 程度の温度上昇が確認されている(Kooi, 2008)。その原因として、地球温暖化や都市化など、地表面温度の上昇が示唆されている(例えば、Huang *et al.*, 2000; Taniguchi *et al.*, 2003)。例えば、特に東京や大阪周辺を始めとする世界各地のメガシティでは、地下鉄や地下街、下水道などといった地下のインフラ構造物が高密度に発展しており、すでに深刻な熱環境攪乱が生じている可能性、もしくは、将来的な熱環境攪乱深刻化の可能性が想定される。

一般的に、地下の温度上昇は、地下の物理的・化学的・生物的なプロセスに、変化・影響を及ぼす(例えば、Bonte *et al.*, 2011; Banks, 2012; Hähnlein *et al.*, 2013; 齋藤・小松, 2014)。例えば、化学的なプロセスに着目すると、Bonte *et al.* (2013a) では、カラムに充填した堆積物を異なる温度条件(5 °C, 11 °C, 25 °C, 60 °C)において、嫌気条件下での通水試験を行い、流出水への温度影響を実験的に評価している。ここでは、原位置の温度 11 °C に対し、14 °C 高い 25 °C の温度条件において、As (ヒ素) の有意な溶出が確認されている。また、60 °C では、pH, DOC (Dissolved Organic Carbon: 溶存有機炭素), P (リン), K (カリウム), Si (ケイ素), As, Mo (モリブデン), V (バナジウム), B (ホウ素), F (フッ素) 濃度に、有意な上昇傾向が認められている。これらは、温度上昇に伴い、ケイ酸塩鉱物の溶解、鉄酸化物からの脱離やその還元溶解、有機物の無機化に起因する可能性が示唆されている。一方、生物的なプロセスに着目すると、例えば、Bonte *et al.* (2013b) では、上述した Bonte *et al.* (2013a) と同様の試験システムを用い、5 °C～80 °C までの温度条件において、微生物活動に伴う酸化還元環境の変化を実験的に評価している。原位置の温度である 11 °C から 25 °C への温度上昇により、酸化還元環境の変化が認められ、すなわち、鉄還元環境から硫酸還元並びにメタン発酵環境への変化が確認されている。さらに、45 °C より高い温度条件では、硫酸還元や発酵に特化した高熱性細菌が出現している。酸化還元環境の変化により、例えば、金属酸化物などの還元が生じ、場合によっては、そこに含有または吸着などされている有害な重金属類が同時に溶出する可能性も十分に考えられる(Bonte *et al.*, 2013a)。加えて、硫酸還元では硫化水素が、メタン発酵ではメタンがそれぞれ生成され、有害な気体成分や温室効果ガスを生じる可能性も想定される。

以上の背景を踏まえ、筆者らは以前より、原位置で地下に強制的な熱負荷、自然放冷を繰り返し与え、その際の地下水質等に及ぼす影響を評価してきた。成果物の一例と

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、熱環境攪乱、温度上昇、地圏環境、影響評価

しては、今回訪問する Moldrup 教授との共著論文である、Saito *et al.* (2016) がある。本成果では、約 40 °C の温水を 13 か月間、地下 50 m までに埋設した閉鎖系の地中熱交換器内に循環し、周辺地下に間接的な熱攪乱を与え、地下水質を継続的に観測してきた。この強制的な熱負荷試験後、地下を 14 か月間の自然放冷条件におき、モニタリングを継続した。本試験の熱源となる地中熱交換器より水平距離で 1 m の地点において、7 °C 程度の温度上昇が確認され、B, Si, Li (リチウム), DOC, Na (ナトリウム), K に、9 ~ 31 % の濃度上昇傾向が確認された。一方、Mg (マグネシウム) については、その濃度に減少傾向が認められ、それは 4 % 程度であった。これらは、試験現場における深度 17 m 付近の被圧帯水層における結果であるが、その後の継続的な観測により、深度 39 m 付近の被圧帯水層では、10 数°C 程度の上昇に伴う、As 濃度の上昇傾向も確認されている (斎藤ほか, 2019)。

特に、温度上昇に伴う化学的なインパクトに関しては、その程度は絶対的な温度や自然の温度に対する温度上昇幅などに依存すると考えられる。具体的には、絶対的な温度が 25 °C 以上もしくは温度上昇幅が 20 °C 以上ではない場合、その化学的なリスクはマイナーであるという報告もある (Possemiers *et al.*, 2014)。また、絶対的な温度が 40 °C 以上でなければ地下水質に有意な影響を及ぼさないと報告も見受けられるが (Riedel, 2019)、上述した Bonte *et*

al. (2013a) における 25 °C での有意な As の溶出 (室内カラム通水試験による)、斎藤ほか (2019) による 10 数°C 程度の上昇に伴う As 濃度の上昇傾向 (原位置試験による) が認められており、比較的低い温度条件や温度上昇幅においても、具体的な影響が生じる可能性が否定できない。したがって、これまでの Moldrup 教授との共同研究体制を継続・強化し、蓄積されている貴重な観測データ類の解析、成果物創出に向けた作業、また、今後の新たな展開等について議論した。コロナ禍によって、実質的な共同研究体制が希薄になりつつあった中、本訪問を契機に、再度の活発化を図る目的もあった。

3. 訪問の内容

デンマークのオールボーは、首都であるコペンハーゲンから 230 km 前後あり、鉄道では 4 時間程度を要する。一方、フライトでは、1 時間以内にオールボー空港に到着できる。筆者は以前、鉄道でオールボーを訪問した経験もあることから、今回は利便性も考慮してフライトを利用した。オールボー空港からオールボー市内へは、バスで 20 分程度であり、利便性も良く移動が容易である。加えて、オールボー市内からオールボー大学へは、バスが非常に便利であり、30 分程度で大学まで移動が可能である。ここで、一つ驚いたことに、バスは全て、電気自動車であった (写真 1)。



写真 1 オールボー大学構内を走るバス (電気自動車)。

加えて、余談とはなるが、大学へのバスは片道 24DKK（デンマーククローネ）であり、日本円で 550 円程度といったところである。よく北欧諸国は物価が高いと言われる。例えば、マクドナルドのセットメニューも 2,000 円以上するケースも見受けられた。宿泊費については、アメリカなどと比較した場合には、非常に安価に感じた。

オールボー大学には、毎日バスで移動し、バス停のすぐ近くある Department of the Built Environment の建物(AAU BUILD)を訪問した(写真 2)。道路を挟み、この建物の反対側には AAU ENERGY があり(写真 3)、発電量に占める再生可能エネルギーの割合が極めて高いデンマークを象徴するように、そのような研究開発等を精力的にされているであろう様子も窺い知れた。Moldrup 教授との打ち合わせでは、基本的に Saito *et al.* (2016) の後継論文に関わる内容確定のため、そのデータ解析等に取り組んだ。筆者らは、2011 年から継続的に、上述の原位置熱負荷・自然放冷試験を進めており、地下水質を含む複数の項目に対する地下環境影響を評価してきている。2020 年頃からは、多少、原位置試験内容を修正・変更しているものの、現在でも継続して試験を進めており、10 数年間の膨大な観測データが蓄積されている。今回は、特に Saito *et al.* (2016) で扱った、約 40 °C の温水循環に伴う 13 か月間の熱負荷、その後の 14 か月間における自然放冷、そして、斎藤ほか(2019)で一部利用した約 60 °C の温水循環に伴う 9 か月間の熱負荷、その後の 18 か月間の自然放冷について、それぞれのデータを詳細に比較検討し、非常に興味深い解析結果が得られた。その詳細については、成果物が出版された後に、機会が頂ければ詳述したいと考えている。また、今後の展

望としては、将来的な熱環境攪乱が特に地下水質に及ぼす影響の理解・予測に向けて、このような観測データ類を活用し、熱・水・溶質移動および化学反応等を考慮した数値シミュレーションにも取り組んでいく予定である。その基礎として、原位置試験で得られたデータに基づき、地下の温度と地下水質等に関わる関係性などを詳細に検討もしてきた。これにより、今後のスムーズな研究展開に繋がることが期待でき、想定していた以上の良い成果を得ることができた。

加えて、上述したように、Moldrup 教授の同僚である Urban Pollution Research Group の Vianello 准教授、Liu 准教授、また、ポスドク研究員の方々や学生さんなどとも情報交換、交流をさせていただく貴重な機会に恵まれ、実験室も見学させてもらった(写真 4)。筆者は、マイクロプラスチックの環境動態研究に関連して、例えば、水試料中におけるマイクロプラスチックの測定に関する手法を検討してきた経験がある。その際、外部からのコンタミネーション防止策、また、測定に際する前処理における各ステップの細かなテクニックなど、判断に迷うことも多々あった。今回、各ステップなどを詳細に見せていただき、有機物分解プロセスでは、効率的にバブリングできるように自作の器具を作成されており、また、前処理に利用しているステンレスフィルターも自作されるなど、多数の細かい工夫を見ることができた。Vianello 准教授や Liu 准教授とは、帰国してからもやり取りを続け、今後、機会を見つけて、双方に有益な共同研究を立ち上げ、推進したいとも考えている。訪問前は、マイクロプラスチックに関わる研究開発を進めているグループがあることを知らなかったため、偶然



写真 2 訪問先である Department of the Built Environment の建物 (AAU BUILD)。



写真 3 AAU ENERGY の建物の一部 (AAU BUILD 側から撮影)。



写真4 マイクロプラスチック分析ラボの一室(顕微 FT-IR やラマン顕微鏡などが並ぶ)。

にも貴重な機会に恵まれ、大変得るものが多い11日間となった。

4. おわりに

本訪問では、以前より共同研究を進めさせていただいた Moldrup 教授のご厚意・ご尽力により、当初の目的を上回る収穫に繋がった。研究活動に関わると指導だけではなく、別の総合大学であるオーフス大学への訪問にも同行させていただき、また、マイクロプラスチック関係の研究課題に関しても、貴重な人脈となる方々をご紹介いただいた。コロナ禍により、海外との渡航などを含む実質的な共同研究が希薄になりつつあった中、対面での研究交流という貴重性・重要性を再認識する良い機会となった。今後、双方にとって有益なものとなるよう、研究活動を進めていきたいと考えている。

謝辞：本渡航は、廣川研究助成にご支援を賜り、実現したのになります。ここに記して、廣川 治氏とそのご親族の方々、また、本事業に関わる関係者の皆様方に深く謝意を表します。

文 献

- Banks, D. (2012) *An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling*. 2nd ed., Wiley-Blackwell, Oxford, 526p.
- Bonte, M., Stuyfzand, P. J., Hulsmann, A. and van Beelen, P. (2011) Underground thermal energy storage: environmental risks and policy developments in the Netherlands and European Union. *Ecology and Society*, **16**, 22.
- Bonte, M., van Breukelen, B. M. and Stuyfzand, P. J. (2013a) Temperature-induced impacts on groundwater quality and arsenic mobility in anoxic aquifer sediments used for both drinking water and shallow geothermal energy production. *Water Research*, **47**, 5088–5100.
- Bonte, M., Roling, W. F. M., Zaura, E., van der Wielen, P. W. J. J., Stuyfzand, P. J. and van Breukelen, B. M. (2013b) Impacts of shallow geothermal energy production on redox processes and microbial communities. *Environmental Science & Technology*, **47**, 14476–14484.
- Hähnlein, S., Bayer, P., Ferguson, G. and Blum, P. (2013) Sustainability and policy for the thermal use of

- shallow geothermal energy. *Energy Policy*, **59**, 914–925.
- Harris, R. N. and Chapman, D. S. (1997) Borehole temperatures and a baseline for 20th-century global warming estimates. *Science*, **275**, 1618–1621.
- Huang, S., Pollack, H. N. and Shen, P.-Y. (2000) Temperature trends over the past five centuries reconstructed from borehole temperatures. *Nature*, **403**, 756–758.
- Kooi, H. (2008) Spatial variability in subsurface warming over the last three decades; insight from repeated borehole temperature measurements in The Netherlands. *Earth and Planetary Science Letters*, **270**, 86–94.
- Perrier, F., Le Mouél, J.-L., Poirier, J.-P. and Shnirman, M. G. (2005) Long-term climate change and surface versus underground temperature measurement in Paris. *International Journal of Climatology*, **25**, 1619–1631.
- Pollack, H. N., Huang, S. and Shen, P.-Y. (1998) Climate change record in subsurface temperatures: a global perspective. *Science*, **282**, 279–281.
- Possemiers, M., Huysmans, M. and Batelaan, O. (2014) Influence of aquifer thermal energy storage on groundwater quality: a review illustrated by seven case studies from Belgium. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, **2**, 20–34.
- Riedel, T. (2019) Temperature-associated changes in groundwater quality. *Journal of Hydrology*, **572**, 206–212.
- 斎藤健志・小松登志子 (2014) 地中熱ヒートポンプが地下環境に与える影響—持続的利用に向けて—. 地下水学会誌. **56**, 15–25.
- Saito, T., Hamamoto, S., Ueki, T., Ohkubo, S., Moldrup, P., Kawamoto, K. and Komatsu, T. (2016) Temperature change affected groundwater quality in a confined marine aquifer during long-term heating and cooling. *Water Research*, **94**, 120–127.
- 斎藤健志・濱本昌一郎・竹村貴人・小松登志子 (2019) 地下熱環境攪乱が地下水質に及ぼす影響評価に向けた原位置長期熱負荷試験. 第13回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 29–32.
- Taniguchi, M., Shimada, J. and Uemura, T. (2003) Transient effects of surface temperature and groundwater flow on subsurface temperature in Kumamoto Plain, Japan. *Physics and Chemistry of the Earth A/B/C*, **28**, 477–486.
- Taniguchi, M., Uemura, T. and Jagoon, K. (2007) Combined effects of urbanization and global warming on subsurface temperature in four Asian cities. *Vadose Zone Journal*, **6**, 591–596.
-
- SAITO Takeshi (2025) Report of the Hirokawa Research Fund in the 2024 fiscal year: A meeting for international collaboration on the assessment of the effect of temperature disturbance on the subsurface environment.

(受付：2025 年 1 月 14 日)