

小松登志子

埼玉大学大学院理工学研究科・教授

### 研究題目

地圏熱エネルギー利用を考慮した地下水管理手法の開発

## §1. 研究実施体制

### (1)「埼玉大学」グループ

- ① 研究代表者:小松 登志子 (埼玉大学大学院理工学研究科, 教授)
- ② 研究項目
  - ・熱的かく乱が地圏の物質動態に与える影響の解明
- ③ 主たる共同研究者:大西 純一 (埼玉大学大学院理工学研究科, 教授)
- ④ 研究項目
  - ・熱的かく乱が地圏の微生物叢に与える影響の解明

### (2)「日本大学」グループ

- ① 主たる共同研究者:竹村 貴人 (日本大学文理学部地球システム科学科, 准教授)
- ② 研究項目
  - ・地質要素・地圏熱特性・地下水の相互作用の評価法の確立

### (2)「東京農工大学」グループ

- ① 主たる共同研究者:斎藤 広隆 (東京農工大学大学院農学研究院, 准教授)
- ② 研究項目
  - ・地圏熱・地下水利用のための地圏熱環境シミュレーション解析

## § 2. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(3-1)に対応する)

### 研究目的

平成 24 年度の研究目的は、①ボーリング対象サイトの初期地盤環境の把握(研究項目 1-2)、②地圏熱利用ヒートポンプシステムの導入および長期観測開始(研究項目 1-3)、③原位置熱物性測定装置の開発開始(研究項目 1-4)、④熱かく乱が地盤環境に与える影響把握に向けた室内実験(研究項目 1-5)、⑤三次元地質構造のモデル化(研究項目 2-1)、⑥地圏微生物叢の評価手法提案(研究項目 2-2)、⑦物質・力学・熱連成解析モデルの構築(研究項目 2-4)である。

### 研究方法及び結果

#### ①ボーリング対象サイトの初期地盤環境の把握(研究項目 1-2)

H23 年度に採取したコア試料を用いて微生物叢、鉱物組成、間隙水組成など、詳細な初期調査を実施し、各サイトの初期地盤環境を把握した。また、埼玉大学と東京農工大学サイトでは、参照用井戸から定期的に地下水を採水・分析し、両サイトともに年間を通して帯水層深度によらず、地下水質(主要イオン類・重金属類)の大きな季節変動はないことを確認した。研究項目 1-2 は各グループで H24 年度中に研究を終え、マイルストーンを達成した。

#### ②地圏熱利用ヒートポンプシステムの導入および長期観測開始(研究項目 1-3)

埼玉大学構内に設置した地中熱利用ヒートポンプシステムを稼働させ、原位置長期熱負荷試験を実施した。昨年 8 月より現在まで、約 40℃の温水を継続的に循環させ、現場の地下水温を人為的に上昇させると同時に、定期的に地下水質の変化を調査した。その結果、熱源から近い観測井より順に水温が上昇し、特に海成層から構成される帯水層において、複数種の重金属類濃度が有意に増加した。

東京農工大学サイトでは、昨年 12 月よりプレハブ恒温室に接続したクローズタイプの地中熱利用型ヒートポンプを稼働させ、地中熱利用時の地温、地盤変位、および地下水水質の長期観測を開始した。また、オープンタイプの地中熱利用ヒートポンプを模した実験施設を稼働させ、短期的な予備実験として、地下水を汲み上げ後 45℃に加熱し地下帯水層に戻す現場実験を実施した。

#### ③原位置熱物性測定装置の開発開始(研究項目 1-4)

H24 年度に試作機を完成させ、直径 100mm 前後を想定した観測井内部から、水平方向に測定装置挿入用の孔をあけることを実験室レベルで成功させた。穿孔方法は、高水圧によるウォータージェット方式で、関東地方の基盤より上位の層に相当する堆積物までの穿孔が可能であることが確認され、既存の観測井における新たな採水や温度測定用のセンサーを追加挿入できるようになった。

#### ④熱かく乱が地盤環境に与える影響把握に向けた室内実験(研究項目 1-5)

熱攪乱が物質移動特性に与える室内実験については、模擬粘土試料および埼玉大学サイトから採取したコア試料を用いて、温度調整型透水・溶質拡散試験装置による実験を行った。水の粘性係数の温度依存性を考慮した場合、温度変化が透水性に与える影響は小さいものの、温度上昇により溶質拡散係数は増加し、二次圧密領域での圧密沈下が促進されることが分かった。

地盤力学特性の温度依存性の把握のため、H23 年度に引き続き、東京農工大学に設置した温度調節型三軸試験機を用いて、室内実験を実施した。その結果、応力-ひずみ関係で得られるピーク強度は温度依存性を示し、温度の低いものほど高い強度を示した。一方軟化速度は温度の影響をほとんど受けなかった。この傾向は、密度が異なる試料でも同様の傾向を示すことが分かった。

各サイトのそれぞれ 3 つの代表深度のボーリングコアを、5, 15, 25, 40℃で保存し、半年後の PCR-DGGE (Polymerase Chain Reaction-Denaturing Gradient Gel Electrophoresis : ポリメラーゼ連鎖反応-変性剤濃度勾配ゲル電気泳動法)パターンを 4 種試料間で予備的に比較した。温度上昇に伴っていくつかのバンドに対応する微生物種が減少していると推定された。

#### ⑤三次元地質構造のモデル化(研究項目 2-1)

H24 年度に各自治体の協力のもと、高密度のボーリングデータの収集を行った。世田谷北部の 500 点のボーリングデータの整理、および府中近郊 (5×5km) のボーリングデータの整理を実施し、基礎データを作成した。この基礎データを用いて、試験的に地球統計学の手法を用いた方法と地質学的な解釈による方法の2種類の地質モデルを作成した。

#### ⑥地圏微生物叢の評価手法提案(研究項目 2-2)

地圏微生物に対する温度影響の評価手法提案に向けて、埼玉大学サイトおよび農工大サイトに、熱負荷試験に伴う地下水微生物叢変化の長期モニタリング実験を開始した。地下水から DNA を抽出し PCR-DGGE 法で微生物叢のパターンが変化するかどうかを調べつつある。温度上昇に伴い、真正細菌については、好氣的メタン酸化菌が減少し、還元的環境により適応した細菌が増加している可能性が示唆された。

#### ⑦物質・力学・熱連成解析モデルの構築(研究項目 2-4)

要素試験で求められた様々な物理特性、力学特性の温度依存性を取り入れた、物質・力学・熱連成解析モデルを開発するために、H24 年度は力学特性の温度依存性を考慮した構成式の提案を行った。また、水・熱同時移動モデルにより、H23 年度実施した短期熱応答試験および H24 年度に実施している長期熱応答試験の解析を行った。解析により地盤の成層構造が熱交換に与える影響を明らかにすることができた。

### §3. 成果発表等

#### (3-1) 原著論文発表

##### ● 論文詳細情報

1. 斎藤広隆, 濱本昌一郎, 小松登志子 (2012) 地中熱利用と地盤環境, 農業機械学会誌, **74**, 20-25.
2. Moldrup, P., Chamindu Deepagoda T.K.K, S. Hamamoto, T. Komatsu, K. Kawamoto, D. E. Rolston, and L. W. de Jonge (2013) Structure-Dependent Water-induced Linear Reduction Model for Predicting Gas Diffusivity and Tortuosity in Repacked and Intact Soil, *Vadose Zone Journal*, **11**(5), DOI: 10.2136/vzj2013.01.0026.
3. Naveed, M., S. Hamamoto, K. Kawamoto, T. Sakaki; M. Takahashi, T. Komatsu, P. Moldrup, M. Lamandé, D. Wildenschild, M. Prodanović, and L.W. de Jonge (2013) Correlating Gas Transport Parameters and X-Ray Computed Tomography Measurements in Porous Media. *Soil Science* **178**(2): 60-68.
4. Hamamoto, S., P. Moldrup, K. Kawamoto, T. Komatsu (2012) Maxwell's Law Based Models for Liquid and Gas Phase Diffusivities in Variably-Saturated Soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **76**, 1509-1517. DOI: 10.2136/sssaj2012.0033.
5. Hamamoto, S., P. Moldrup, K. Kawamoto, T. Komatsu (2012) Organic Matter Fraction Dependent Model for Predicting the Gas Diffusion Coefficient in Variably Saturated Soils. *Vadose Zone Journal*, **11**, DOI: 10.2136/vzj2011.0065.
6. Rouf, M. A., S. Hamamoto, K. Kawamoto, T. Sakaki, T. Komatsu, and P. Moldrup (2012) Unified Measurement System with Suction Control for Measuring Hysteresis in Soil-Gas Transport Parameters, *Water Resour. Res.*, **48**, W02506. DOI: 10.1029/2011WR010615.
7. Dissanayaka, D. M. S. H, S. Hamamoto, K. Kawamoto, T. Komatsu, and P. Moldrup (2012) Thermal Properties for Peaty Soils under Variable Saturation: Effects of the Liquid Phase Impedance Factor and Volume Shrinkage, *Vadose Zone Journal*, **11**. DOI: 10.2136/vzj2011.0092.
8. 竹村貴人, 小田匡寛, 濱本昌一郎, 川本健, 赤間友哉, 田井秀迪, 木村克己 (2013) 沖積粘性土の剪断剛性率とその堆積時環境依存性に関する研究—関東平野南部における事例—, 地学雑誌. (印刷中)
9. 鴨志田剛久, 濱本昌一郎, 川本健, 榊利博, 小松登志子 (2013) 異なる水分条件を有する砂の熱特性: 粒子の粒径・形状, および石英含有率の影響, 土壌の物理性. (印刷中)
10. Mon, E. E., S. Hamamoto, K. Kawamoto, T. Komatsu, and P. Møldrup (2013) Temperature Effects on Geotechnical Properties of Kaolin Clay: Simultaneous

Measurements of Consolidation Characteristics, Shear Stiffness, and Permeability Using a Modified Oedometer. *Journal on Geological and Earth Sciences*. (in press)

11. Saito, T., Hamamoto, S., Komatsu, T., Ohnishi, J., Takemura, T. and Saito, H. (2012) Pore Water and Groundwater Chemistry Coupled with Geological and Microbiological Investigations in Arakawa Lowland and Musashino Upland, Central Japan. Proceedings of the 39<sup>th</sup> International Association of Hydrogeologists Congress, Paper 899, 5p.
12. 伊東 良晴, 藤森 裕基, 名古屋 啓太, 竹村 貴人(2013)熱力学の視点から見た多孔質岩の熱物性精密測定と微小空孔の評価, 第 13 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 793-796.