

戦略的創造研究推進事業 CREST  
研究領域「持続可能な水利用を実現する革新的な  
技術とシステム」  
研究課題「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」

## 研究終了報告書

研究期間 平成22年10月～平成28年3月

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)

## 目次

### § 1. 研究実施の概要

1. 実施概要
2. 顕著な成果
  - (1)優れた基礎研究としての成果
  - (2)科学技術イノベーションに大きく寄与する成果

### § 2. 研究実施体制

1. 研究チームの体制について
2. 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

### § 3. 研究実施内容及び成果

1. 研究項目1-1:文献調査・既往の知見の整理
2. 研究項目1-2:初期環境調査-地圏熱・地下水利用による地圏環境変化の把握-(埼玉大学グループ小松班・大西班, 東京農工大グループ, 日本大学グループ)
3. 研究項目1-3:ヒートポンプ導入試験による長期観測-地圏熱・地下水利用による地圏環境変化の把握-(埼玉大学グループ小松班・大西班, 東京農工大グループ, 日本大学グループ)
4. 研究項目1-4:原位置熱物性値測定装置の開発(日本大学グループ)
5. 研究項目1-5:室内試験による地圏熱環境の変化が物質移動特性に与える影響-地圏熱・地下水利用による地圏環境変化の把握-(埼玉大学グループ小松班)
6. 研究項目1-6:室内試験による地圏熱環境の変化が微生物叢に与える影響-地圏熱・地下水利用による地圏環境変化の把握-(埼玉大学グループ大西班)
7. 研究項目1-7:室内試験による地圏熱環境の変化が力学特性に与える影響-地圏熱・地下水利用による地圏環境変化の把握-(東京農工大グループ)
8. 研究項目2-1:3次元地質構造のモデル化-環境アセスメントツール開発-(日本大学グループ)
9. 研究項目2-2:物質輸送係数の予測モデル提案(埼玉大学グループ小松班)
10. 研究項目2-3:地圏微生物叢の評価手法提案-環境アセスメントツール開発-(埼玉大学グループ大西班)
11. 研究項目2-4:物質・力学・熱連成解析モデルの構築-環境アセスメントツール開発-(東京農工大グループ)
12. 研究項目3-1:地圏微生物叢・有害化学物質インベントリ作成-(埼玉大学グループ大西班, 日本大学グループ)
13. 研究項目3-2:地下水環境リスク予測-(埼玉大学グループ小松班, 東京農工大グループ)
14. 研究項目3-3:地下水利用・管理手法の提案-(全グループ)

### § 4. 成果発表等

1. 原著論文発表
2. その他の著作物(総説、書籍など)
3. 国際学会発表及び主要な国内学会発表
  - (1)招待講演
  - (2)口頭発表
  - (3)ポスター発表
4. 知財出願
  - (1)国内出願
  - (2)海外出願
  - (3)プログラムの著作物

(4) データベースの著作物

## 5. 受賞・報道等

(1) 受賞

(2) マスコミ(新聞・TV等)報道

(3) その他

## 6. 成果展開事例

(1) 実用化に向けての展開

(2) 社会還元的な展開活動

(3) 他分野への波及効果

## § 5. 研究期間中の活動

### 1. 主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

## § 6. 最後に

## § 1. 研究実施の概要

### 1. 実施概要

貴重な水資源である地下水には熱的な資源としての側面もあり、地中熱利用ヒートポンプや帯水層熱エネルギー貯留などの地圏熱利用システムの実用化が急速に進んでいる。これらのシステム普及により地圏の熱的環境が変化し、地下水水質や地圏生態系に影響を与える恐れがあるものの、その影響についてはこれまで明らかにされていない。本研究では、地圏への熱負荷が地圏の物質・熱循環および微生物叢に及ぼす影響を調査し、熱負荷(温度変化)の影響を評価するシミュレーション技術(アセスメントツール)を構築した。それらに基づいて地圏熱環境への影響を最小限に抑えるための地下水利用・管理手法の開発に向けて、その実践的な一例を提案した。

上記の目的を達成するために、本研究では、4つの研究項目を設定した。(1)地圏熱・地下水利用による地圏環境変化の把握、(2)3次元地質構造モデル・インベントリの作成、(3)環境アセスメントツール開発、(4)地圏熱エネルギーを考慮した地下水管理手法の開発、である。これらの研究の遂行にあたっては、埼玉大学(埼大)グループ小松班(現場・室内試験による熱的かく乱が地下物質動態に与える影響の解明、物質輸送係数予測モデル構築)、埼大グループ大西班(現場・室内試験による地圏熱環境の変化が微生物叢に与える影響の把握、地圏微生物叢の評価手法提案)、日本大学(日大)グループ(原位置熱物性値測定装置の開発、3次元地質構造のモデル化、地圏微生物叢・有害化学物質インベントリ作成)、東京農工大学(農工大)グループ(飽和・不飽和土の力学特性の温度依存性の解明、地圏熱利用下での物質・力学・熱連成モデルの構築)の役割分担および協力体制で研究チームを編成した。

#### (1)地圏熱・地下水利用による地圏環境変化の把握

世界で初めて地下への熱負荷・放冷実験を繰り返して行った。地下水水質と微生物叢変化を長期観測し、貴重なデータを得た。その結果、地下水の温度変化に影響される成分(特にホウ素・ヒ素)および特定微生物群を見出した。

3サイト(埼大・日大・農工大キャンパス)でのボーリング調査から、地盤の初期環境(物理・化学・力学特性、有機物組成、微生物叢)を調べた。2サイト(埼大・農工大キャンパス)では、地中熱利用ヒートポンプシステム導入による地圏への熱負荷実証試験(地盤内の物質動態の経時的観測、微生物生態系の経時的観測、地圏の熱応答および力学的挙動変化の観測)を行った。埼大サイトで実施した長期熱負荷と自然放冷試験(クローズドループ)では、温度上昇に伴い複数の水質成分濃度が上昇した。またこれらの成分は、温度低下に伴って元の濃度水準に戻った。農工大サイトで実施した試験(オープングループ)では、地下水注入による地下水のかく乱に伴う水質の変化はみられたものの、温度による影響は明確には現れなかった。原位置で長期的に地下の温度を変化させた実証試験は、世界的にも事例がほとんどないことが文献調査から分かっており、これらの成果は極めて貴重な知見である。各種物質移動特性(溶質分散・溶質拡散・透水性・吸着脱離・熱伝導)や力学特性(三軸圧縮・圧密)の温度依存性については、ボーリングコア試料(コア試料)および模擬試料を対象として、室内試験を行った。また、3サイトのコア試料を異なる温度環境下で一定期間保存し、DNA抽出、微生物叢に対する温度変化の影響を調べた。地圏の微生物叢変化については、その評価ツールとして、地下水中の微生物数をリアルタイムPCRで調べる方法と、地下水中の微生物叢パターンをPCR-DGGEによる半定量解析、および次世代シーケンサーによる定量解析で調べる方法を確立した。また、コア試料の保存試験より、地圏での熱的かく乱の影響を受ける微生物種を特定した。

#### (2)3次元地質構造モデル・インベントリの作成

埼玉県南部と東京西南部の地層について、3次元地質構造モデルを作成した。また、存在する元素および微生物の分布を国内で初めてインベントリ(データベース)にまとめた。これらから、浅部地下における物質の空間分布を推定することができるようになった。

世田谷区・東京都・埼玉県の既存のボーリングデータをデジタル処理し、地盤内の礫の連続性

などを定量化することで3次元地質構造のモデル化を行った。国内では3次元表示での地質情報の整備状況は遅れているため、本研究がその一助となることが期待される。このモデルによって地盤内の熱伝導率の空間分布が視覚的に把握できるようになった。また、初期地盤環境調査の結果をもとに、微生物および有害化学物質がどのような地質に分布しているかを示すインベントリを作成した。

### (3)環境アセスメントツール開発

長期間にわたる地中熱利用が地下水の温度・水質に与える影響を評価できるシミュレーション技術を構築した。

3 サイトのコア試料について得られた各種物質移動特性の結果を用いて、温度依存性を考慮した透水係数や溶質拡散係数の予測モデルを検討した。熱的かく乱に伴う地圏環境の変化を予測するための環境アセスメントツールとして、3次元地質構造モデルおよび各種移動特性パラメータを導入した物質・熱連成解析モデルを構築した。このアセスメントツールで、埼大サイトで実施した長期熱負荷試験による温度変化に伴う水質成分濃度の変化を概ね再現することができ、ツールの有効性を確認した。

### (4)地圏熱エネルギーを考慮した地下水管理手法の開発

地下水利用・管理手法の決定に向けて、上述の(2)「3次元地質構造モデル」、「インベントリ」、(3)「アセスメントツール」を利用することで、より高度な地下水利用・管理手法の決定が可能となった。開発した環境アセスメントツールを用い、埼大サイトを対象にケーススタディとして仮想的な地圏熱利用下での地下温度および地下水水質の変化を予測した。地圏熱利用時の環境リスクを抑制するための地下水管理手法の提案に向けて、本研究で得られた成果をもとに、地下温度変化の影響を受けると考えられる水質成分および微生物叢を整理し、地圏熱利用サイトの選定上で注意すべき地層および地域について、地質学的な知見をまとめた。最後に、環境アセスメントツールを活用する上で必要なパラメータの同定方法および取り扱い、ツールでの影響評価の際の留意事項、今後の検討課題を整理した。

## 2. 顕著な成果

### (1)優れた基礎研究としての成果

#### ① 現場長期熱負荷・自然冷却試験による地下水水質変化

概要:地中熱利用ヒートポンプ稼働による地温変化が地下水水質に与える影響を調査するため、埼大構内において、地盤への長期熱負荷および自然放冷試験を実施した。U字型熱交換器(U-tube)を埋設したボーリング孔を用いて約1年間40°Cの温水を循環させ、その後約1年間、自然放冷条件下におき、地下水水質を観測した。特に海成層において、地温上昇に伴う複数の水質成分濃度の上昇が確認された。自然放冷試験では、変化が認められた成分は、地温の低下と共に、ほぼ元の濃度水準に戻ることが確認された(Saito et al., 2015, Proceedings of the 3rd International Symposium on Advances in Civil and Environmental Engineering Practices for Sustainable Development および Saito et al., 2016, Water Research)。地温変化が地圏環境に与える影響については世界的にもほとんど研究例がなく、本研究で得られた成果は、今後、地中熱利用ヒートポンプ導入による地盤環境リスクを評価する上で、極めて貴重な科学的知見と言える。

#### ②地下堆積物および地下水中の微生物叢に関する研究

概要:関東平野南部の3地点において、地下堆積物および地下水中に存在する微生物種を網羅的に調べた。その結果、主に地質年代の若い沖積層からなる埼大サイトでは、他の2地点に比べて種の多様性が高いことや *Chloroflexi* 門の仲間が多く検出されるなど、堆積環境と微生物叢の

間に特徴的な関係が見られた(Ohkubo et al. *Microbes and Environments* 投稿中). また, 現場長期熱負荷試験において, 温度変化に伴う地下水中(埼玉大サイト)の微生物叢の変化を調べた結果, バクテリア(真性細菌), アーキア(古細菌)ともに温度変化に由来すると考えられる変化が見られた. 特にバクテリアについては, 温度上昇にともなって好気性菌の相対量が減少し, 嫌気性菌の相対量が増加する傾向が見られた. 地下数十メートルまでの範囲における堆積物や地下水中の微生物叢およびその温度依存性については, これまで国内外にほとんど研究例が無く, 本研究で得られたデータは学術的に非常に貴重な基礎的知見であると言える.

### ③地盤内の物質・熱輸送係数の温度依存性に関する研究

概要:地盤内の物質(水・溶質・ガス)・熱移動は, 各種支配方程式に物質・熱輸送係数を組み込むことで表される. 従って, 物質・熱輸送係数の理解は地盤内の物質・熱移動を予測・把握する上で非常に重要である. 本研究では, コア試料および模擬試料を用いて, 異なる温度環境下で溶質・熱移動パラメータを測定した. その結果, 透水係数や溶質拡散係数は, 温度上昇に伴い水の粘性係数が低下することで, これらの係数値が増加することが確認できた(Mon et al., 2013, *Journal of Geological Sciences*). 一方, 溶質分散係数については, 溶質分散係数の温度依存性には一貫した傾向が見られなかった. 熱伝導率については, 水分特性曲線に基づいた温度を考慮した熱伝導率予測モデルを構築した. 溶質・熱輸送係数の温度依存性については既往の研究が少なく, 今後のメカニズム解明に向けた貴重な基礎的知見が得られた.

## (2) 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果

### ① 地盤の物理特性を考慮した簡便な熱伝導率予測モデルの構築

概要:地中熱利用ヒートポンプ稼働による地下温度変化を予測する上で, 地盤の熱伝導率の正確な予測モデルは必要不可欠である. 本研究プロジェクトで掘削した地質構成の異なる関東平野南部 3 か所(埼玉大・日大・農工大 3 サイト)のコア試料を用いて, 室内試験より熱伝導率を測定し, 初期地盤の含水比および乾燥密度を関数とする簡便な予測モデルを構築した. 深度 50~80 m 程度までの深部に渡って高密度な熱伝導率データが得られ, 貴重な知見になると同時に, 構築したモデルにより, 簡易に測定可能な物理パラメータを用いた熱伝導率の深度分布が予測でき, 高精度な地温変化予測が可能となった(Saito et al., 2014, *Soils and Foundations*).

### ②3次元地質構造モデルの開発

概要:人口密度の高い地域である東京および埼玉南部を対象に数万本に及ぶボーリングデータを取りまとめ, 礫層をはじめとする地層の連続性をモデル化した. このモデルは地盤に関する環境・防災を考える上での基盤的な情報となるものである. 現状では, 埼玉南部の低地部のモデルは産業技術総合研究所により公開されているが, その他の地域に関しては公開の予定は立っていない. 例えば, 今後, 整備されるであろう都市部での地中熱ポテンシャルマップ(有効熱伝導率分布)などへの活用が見込まれる.

### ③ 地下水温を考慮した地下水中物質移動モデルの構築

概要:地下帯水層への熱負荷に伴い, 一部の重金属類が温度上昇で濃度が上昇し, 温度下降で濃度が低下したことに対して, 固相液相間の相互作用を線形平衡可逆反応と仮定し(たとえば線形吸着等温曲線)の傾きである分配係数の温度依存性を考慮したモデルを提案した. モデルでは, 固相中物質と液相中物質の和を一定とする保存則から, 温度変化に伴う液相濃度変化の関係を導き, 液相中の物質移動の基礎方程式である移流分散式内の吸込み・湧出し項の中に取り入れた. 計算の結果, 現場での温度変化に伴う濃度変化を概ね再現できた. 本研究で構築したモデルは, これまで地圏熱エネルギー利用の際に全く考慮されてこなかった地圏熱環境変化に伴う水質変化を評価することができるアセスメントツールに資するものであり, その有用性は高い.

## § 2. 研究実施体制

### 1. 研究チームの体制について

(1)「埼玉大学」グループ小松班

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
小松 登志子	埼玉大学理工学研究科	教授	H22.10～
川本 健	埼玉大学理工学研究科	教授	H22.10～
濱本 昌一郎	東京大学農学生命科学研究科	助教	H22.10～
Per Moldrup	Department of Civil Engineering, Aalborg University	教授	H25.7～
佐藤 邦明	埼玉大学地圏科学研究センター	名誉教授	H22.10～H25.5
小田 匡寛	埼玉大学理工学研究科	名誉教授	H22.10～H25.5
斎藤 健志	埼玉大学理工学研究科	助教	H23.4～
大久保 智司	埼玉大学理工学研究科	産学官連携研究員	H25.5～
坂口 巖	埼玉大学理工学研究科	研究支援者	H26.4～H27.10
上島 雅人	埼玉大学理工学研究科	産学官連携研究員	H27.11～
小林 邦宏	埼玉大学研究機構総合技術支援センター	技師	H25.7～
谷本 健太	埼玉大学環境科学研究センター	非常勤支援研究員	H23.4～H24.3
松倉 重雄	埼玉大学理工学研究科	非常勤支援研究員	H24.4～H26.3
新井 和乃	埼玉大学理工学研究科	非常勤支援研究員	H26.4～H27.3
宮坂 加理	埼玉大学理工学研究科	非常勤支援研究員	H27.4～11
Ei Ei Mon	埼玉大学理工学研究科	博士後期課程学生	H23.4～H25.9
植木 崇	埼玉大学理工学研究科	博士前期課程学生	H26.4～H27.3
釦持 将人	埼玉大学理工学研究科	博士前期課程学生	H26.4～
万代 俊之	東京大学農学生命科学研究科	博士前期課程学生	H27.5～

研究項目

- ・現場・室内試験による熱的かく乱が地下物質動態に与える影響の解明
- ・物質輸送係数予測モデル構築

(2)「埼玉大学」グループ大西班

研究参加者

大西 純一	埼玉大学理工学研究科	教授	H22.10～
朝井 計	埼玉大学理工学研究科	准教授	H22.10～
是枝 晋	埼玉大学理工学研究科	講師	H22.10～
小竹 敬久	埼玉大学理工学研究科	准教授	H22.10～
Azad Muhammad Abulkalam	埼玉大学理工学研究科	産学官連携研究 員	H22.10～H25.6
河合 博光	埼玉大学理工学研究科	産学官連携研究 員	H26.4～H28.1

研究項目

- ・現場・室内試験による地圏熱環境の変化が微生物叢に与える影響の把握
- ・地圏微生物叢の評価手法提案

(3)「日本大学」グループ

氏名	所属	役職	参加時期
竹村 貴人	日本大学文理学部地球シ ステム科学科	准教授	H22.10～
藤森 裕基	日本大学文理学部化学 科	教授	H23.4～
船引 彩子	日本大学文理学部地球シ ステム科学科	研究協力員	H23.4～H24.7
千葉 崇	東京大学大学院新領域 創成科学研究科	非常勤職員	H23.4～H25.3
堀越 英之	静岡大学大学院理工学 研究科	非常勤職員	H23.6～H23.12
秋葉 義彦	なし	非常勤職員	H23.12～H28.2
金木 厚憲	日本大学大学院総合基 礎科学研究科	博士前期課程学 生	H24.5～H25.2
伊東 良晴	日本大学大学院総合基 礎科学研究科	博士前期課程学 生	H24.5～H28.2
宮内 輝理	なし	非常勤職員	H24.4～H25.3
近藤 玲介	明治大学文学部	助教	H24.8～H28.2
植木 岳雪	産業技術総合研究所	研究員	H24.4～H25.3
高野 洋一	日本大学大学院総合基 礎科学研究科	博士前期課程学 生	H25.10～H26.3
野口 聡	日本大学文理学部自然 科学研究所	研究員	H25.10～ H25.11
植村 杏太	日本大学文理学部自然 科学研究所	非常勤職員	H26.4～H27.2
Kamran Panaghi	日本大学文理学部自然 科学研究所	研究員	H27.4～H27.12

研究項目

- ・原位置熱物性値測定装置の開発
- ・3次元地質構造のモデル化
- ・地圏微生物叢・有害化学物質インベントリ作成

(4)「東京農工大学」グループ

氏名	所属	役職	参加時期
----	----	----	------

齋藤 広隆	東京農工大学大学院農学研究院	准教授	H22.10～
向後 雄二	東京農工大学大学院農学研究院	教授	H22.10～
森谷 慈宙	東京農工大学大学院農学研究院	産学官連携研究員	H23.4～H24.12
Dang Quoc Thuyet	東京農工大学大学院農学府	産学官連携研究員	H25.4～H26.9
武藤 啓	東京農工大学大学院農学府	博士前期課程学生	H24.4～H26.3
佐藤 友孝	東京農工大学大学院連合農学研究科	博士後期課程学生	H27.4～
Magatt Thiam	東京農工大学大学院連合農学研究科	博士後期課程学生	H27.4～
山田 孝大	東京農工大学大学院農学府	博士前期課程学生	H27.4～

#### 研究項目

- ・飽和-不飽和土の力学特性の温度依存性の解明
- ・地圏熱利用下での物質・力学・熱連成モデルの構築

## 2. 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

これまで研究プロジェクトを通して、下記に示すような民間企業や研究機関・研究者との交流を深め、共同研究の実施や講演会やセミナーを通じた意見交換を行った。

#### 共同研究・研究協力

- ・ 株式会社アグリクラスター(研究協力:ヒートポンプシステム)
- ・ 株式会社アイル・クリーンテック(共同研究:微生物叢解析手法)
- ・ 株式会社アサノ大成基礎エンジニアリング(研究協力:地下水採水方法)
- ・ 人間文化研究機構総合地球環境学研究所(共同研究:平成 25～28 年度同位体環境学共同研究事業, 地下水中同位体分析について)
- ・ 熊本大学一柳錦平准教授(CREST 嶋田チームメンバー)(研究協力:降雨中同位体分析について)
- ・ オルボー大学(デンマーク) Per Moldrup 教授(共同研究:物質輸送係数モデリング, 平成 25 年 7 月よりプロジェクトメンバーとして参加)
- ・ 産業技術総合研究所 竹内美緒研究員(研究協力:微生物用ボーリングの採取方法)
- ・ 産業技術総合研究所 内田洋平研究員(研究協力:地中熱マップ作成)
- ・ 埼玉県環境国際科学センター 八戸昭一氏・濱元栄起氏(研究協力:地中熱マップ作成)
- ・ カリフォルニア大学リバーサイド校 Jirka Simunek 教授(研究協力:地中熱交換過程の数値計算)
- ・ Biomedware Inc. Pierre Goovaerts 主任研究員(研究協力:3次元地質モデルなどの地球統計学的手法)
- ・ 株式会社中央開発(研究協力:微生物ボーリングの採取方法)

#### シンポジウム・セミナー・情報交換

- ・ NPO 法人地中熱利用促進協会理事長 笹田政克氏(セミナー開催・情報交換)(平成 22 年 10 月)
- ・ ヒートポンプシステム勉強会(大林組技術研究所にて開催)(平成 23 年 5 月)
- ・ 秋田大学 林武司准教授(埼大にてセミナー開催・情報交換)(平成 23 年 6 月)

- ・ 地下熱利用とヒートポンプシステム研究会北海道ニセコ視察団参加(平成 23 年 8 月)
- ・ 第 1 回 CREST シンポジウム(埼大にて開催)(平成 23 年 11 月)  
北海道大学工学研究院 長野克則教授, 人間文化研究機構総合地球環境学研究所 谷口真人教授, 農業環境技術研究所生物生態機能研究領域長 藤井毅博士講演
- ・ 信州大学工学部藤縄克之教授訪問(次世代型ヒートポンプシステム視察・情報交換)(平成 23 年 11 月)
- ・ CREST 熊本大学嶋田純チームとの合同ワークショップ「地下水帯水層中での脱窒菌の振る舞い」(熊本大学にて開催)(平成 24 年 11 月)
- ・ 静岡大学理学部 加藤憲二教授(埼大にてセミナー開催・情報交換)(平成 24 年 12 月)
- ・ 地下熱利用とヒートポンプシステム研究会ドイツ視察団参加(平成 25 年 3 月)
- ・ 「地下熱利用オープンシステムの現状と課題」講演会参加(スウェーデン大使館にて開催)(平成 25 年 5 月)
- ・ 日本地下水開発株式会社(山形市にてセミナー開催・研究発表・情報交換)(平成 25 年 6 月)
- ・ 地下熱利用とヒートポンプシステム研究会参加(日建設計総合研究所にて開催)(平成 25 年 7 月)
- ・ 第 2 回 CREST シンポジウム(市ヶ谷私学会館にて開催)(平成 25 年 8 月)  
信州大学工学部 藤縄克之教授, 産業技術総合研究所 吉岡秀佳博士講演
- ・ 地下熱利用とヒートポンプシステム研究会参加(日大工学部にて開催)(平成 25 年 10 月)
- ・ 地下熱利用とヒートポンプシステム研究会イタリア視察団参加(平成 26 年 3 月)
- ・ 埼玉県環境国際科学センター 八戸昭一氏・濱元栄起氏 産業技術総合研究所 宮越昭暢氏(埼玉県環境国際科学センターにてセミナー開催, 研究発表・情報交換)(平成 26 年 6 月)
- ・ 地下熱利用とヒートポンプシステム研究会オーストリア視察団参加(平成 27 年 3 月)

その他

- ・ NGWA (National Ground Water Association) 大規模地中熱利用システムに関する規制検討委員会(オブザーバーとして参加)

### § 3. 研究実施内容及び成果

#### 1. 研究項目 1-1: 文献調査・既往の知見の整理

##### (1) 研究のねらい

地中熱ヒートポンプシステムが地盤環境に与える影響について、これまで体系的にまとめられた総説はほとんどない。本研究では、本システムについて概説するとともに、その導入ならびに利用時における潜在的な環境リスクの中でも、特にシステムの利用に伴う地温変化が地盤環境に与える影響を中心に、その規制やガイドラインについても文献調査を行い、現状を整理する。

##### (2) 研究実施方法

国内外の論文や報告書などを多数調査し、その内容を整理してまとめた。

##### (3) 研究成果

文献調査の結果、地中熱ヒートポンプシステムの利用における地温変化の実測例は、わずか数例程度しか認められず、それが誘発する潜在的な環境リスク(物理的, 化学的, 生物的风险)については、ほとんど研究例がないことが分かった。また、システムの利用時における温度に関する規制値や、システム間の最小距離などについては、主として欧州で設定されているが、それらは科学的な根拠にもとづいてというよりはむしろ、経験的な観点から稼働効率を主眼に決められている。このことは、地中熱ヒートポンプシステムの利用に伴う環境リスクについて、その研究例が非常に乏しく、未解明な部分が多いということを示している。さらに、再生可能エネルギーとしての側面から、こ

のシステムの持続性は完全には理解されておらず、それを明確にするためにも科学的な研究に取り組み、環境リスクを詳細に把握する必要がある。これら文献調査結果は、国内誌に総説として掲載された(斎藤・小松, 2014, 地下水学会誌; 竹村ほか, 2014, 地盤工学会誌)。

## 2. 研究項目1-2: 初期環境調査-地圏熱・地下水利用による地圏環境変化の把握-(埼玉大学グループ小松班・大西班, 東京農工大グループ, 日本大学グループ)

### (1) 研究のねらい

地中熱利用ヒートポンプ導入による地下温度変化が地盤環境に与える影響を調べる前段階として、本研究ボーリング対象サイトの初期地盤環境を把握する。また、得られたデータは、堆積年代や堆積環境を考慮した有害化学物質および微生物叢インベントリ作成に活用される。

### (2) 研究実施方法

埼玉大キャンパス内(埼玉県さいたま市, 完新統地盤), 日大文理学部キャンパス内(世田谷区, 更新統地盤), 農工大府中キャンパス内(府中市, 更新統地盤)の3サイトで得られたボーリングコア試料を用いて物理特性・化学特性, 力学特性, 微生物叢に関する初期環境を調べた。また、各サイトの地質学的な位置付けを堆積環境の視点からまとめた。

### (3) 研究成果

平成23年度に上記3サイト, 埼玉大キャンパス内(埼玉大サイト), 日大文理学部キャンパス内(日大サイト), 農工大府中キャンパス内(農工大サイト)での観測井・参照用観測井のボーリング掘削が終了し、得られたコア試料を用いて初期環境調査を実施した。各サイトの位置図を図3-2-1に示す。平成23年度に上記3サイト(埼玉大サイト, 日大サイト, 農工大サイト)での観測井・参照用観測井のボーリング掘削が終了し、得られたコア試料を用いて初期環境調査を実施した。各サイトの位置図を図3-2-1に示す。

各サイトの基本的な地質に関する情報として地質区分についてまとめた。堆積年代による地層区分はそれぞれのサイトを含む地質図幅(埼玉大サイト:5万分の1大宮図幅, 日大サイト:5万分の1東京西南部図幅, 農工大サイト:5万分の1青梅図幅)を参照し、堆積時環境とあわせて判定を行った(図3-2-2)。ここで、堆積時環境はコア試料の詳細な観察と粒度分析結果などに基づいて判定を行い、堆積時環境ごとのユニットに区分した。各サイトの地質区分については、埼玉大サイトでは小松原ほか(2010, 堆積学研究)を、農工大サイトでは船引ほか(2015, 堆積学研究)を、日大サイトでは竹村ほか(2013, 第10回環境地盤工学シンポジウム発表論文集)を参考にした。表3-2-1に各サイトの岩相, 地層名, 堆積年代, 堆積時環境をまとめた。ここで、堆積時環境の海成については、詳細が判別可能である場合は塩性湿地, 内湾, 汽水としたが、判別できない場合は単に海成とした。また、非海成については、陸成と河川成とした。これらの堆積時環境は、海成堆積物(塩性湿地, 内湾, 汽水もしくは単に海成とあるもの)と非海成堆積物(陸成と河川成)の2つの地質区分とした。それぞれのサイトの地質区分は以下の通りである。

- 埼玉大サイト: 下部より更新統下総層群, 沖積基底礫層をはさみ沖積層からなる。ここで、沖積層はGL-25m付近で下部の更新統と上部の完新統に区分される。また、ここでの下総層は汽水性をはさまれているが非海成層とした。
  - ・更新統(下総層群)-非海成堆積物(Pleistocene (Shimousa G.) non-marine sediment)
  - ・更新統-非海成堆積物(Pleistocene non-marine sediments)
  - ・完新統-海成堆積物(Holocene marine sediments)
- 農工大サイト: 下部より下部より更新統上総層群舎人層, 段丘礫層(立川礫層)をはさみ関東ローム層(立川ローム)からなる。ここで、舎人層はGL-30m付近より上部で海成層, 下部で非海成層の堆積時環境である。
  - ・更新統(上総層群)-非海成堆積物(Pleistocene (Kazusa G.) non-marine

sediments)

- ・更新統(上総層群)–海成堆積物(Pleistocene (Kazusa G.) marine sediments)
- ・更新統(関東ローム層)–非海成堆積物(Pleistocene (Kanto loam) non-marine

sediments)

- 日大サイト: 下部より更新統上総層群東久留米層, 段丘礫層(武蔵野礫層)をはさみ関東ローム層(武蔵野ローム)からなる.
- ・更新統(上総層群)–海成堆積物(Pleistocene (Kazusa G.) marine sediments)
- ・更新統(関東ローム層)–非海成堆積物(Pleistocene (Kanto loam) non-marine

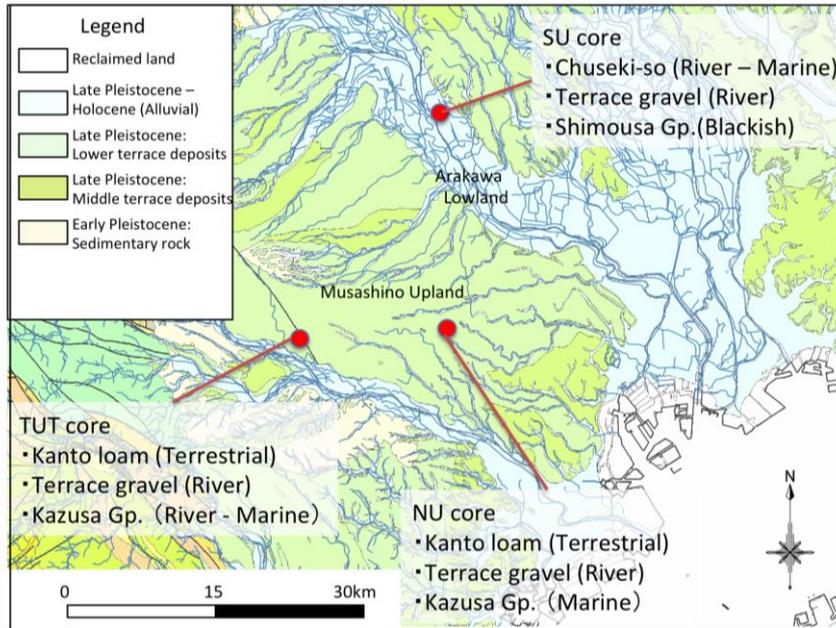


図 3-2-1 3 サイトの位置図 (背景の地質図は産業技術総合研究所地質調査総合センター) 1/20 シームレス地質図を使用した)

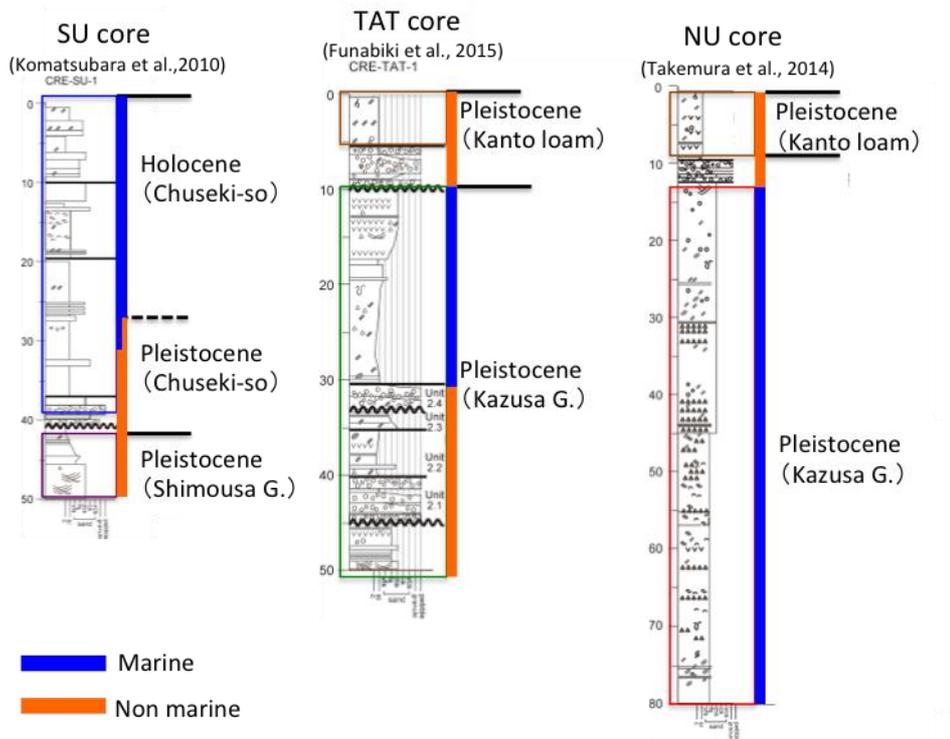


図 3-2-2 各サイトの地層区分と堆積時環境

表 3-2-1 各サイトの岩相, 地層名, 堆積年代, 堆積時環境

	上端深度 (m)	下端深度 (m)	ユニット	岩相	地層名	堆積年代	堆積時環境	備考
埼玉大サイト	2.0	10.0	5	砂およびシルト	沖積層	完新世	塩性湿地	
	10.0	19.5	4	砂層	沖積層	完新世	内湾	
	19.5	25.0	3-2	砂およびシルト	沖積層	完新世	内湾～砂質干潟	
	25.0	37.0	3-1	シルト質砂	沖積層	更新世	汽水	25m境界不明瞭
	37.0	41.0	2	礫層	基底礫	更新世	河川	
	41.0	50.0	1	シルト質砂	下総層群	更新世	汽水～海成	浅海
日大サイト	0.0	9.0	3	火山灰質粘土	武蔵野段丘堆積物	更新世	陸成	
	9.0	12.7	2	礫層	武蔵野礫層	更新世	河川成	
	12.7	45.0	1-2	砂質シルト	上総層群東久留米層	更新世	汽水～海成	外洋で浅海
	45.0	80.0	1-1	シルト質砂	上総層群東久留米層	更新世	汽水～海成	外洋で浅海
農工大サイト	0.0	5.1	7	火山灰質粘土	立川ローム	更新世	陸成	
	5.1	11.6	6	礫	立川礫層	更新世	河川	
	11.6	31.1	5	砂, シルト	上総層群舎人層	更新世	汽水～内湾	
	31.1	33.0	4	礫	上総層群舎人層	更新世	河川	
	33.0	40.3	3	砂質シルト	上総層群舎人層	更新世	陸～河川	
	40.3	45.2	2	砂	上総層群舎人層	更新世	河川	
	45.2	50.0	1	砂	上総層群舎人層	更新世	陸成	氾濫原

ここで、地層名の沖積層については補足的な説明が必要であろう。一つは地質時代の区分についてであるが、2008年以降、沖積世(約1万年前から現在)と洪積世(約180万年前から約1万前)の地質時代の区分はそれぞれ完新世(約1万1700年前から現在)と更新世(約258万年前から約1万1700年前)と変更されたことに伴い、沖積層や洪積層という語は使用されなくなり、それぞれ完新統と更新統となった点である。もう一つは、従来使われていた地層名のいわゆる沖積層が2つの地質時代にまたがっている点である。地層名としての沖積層は上部の有楽町層と下部の七号地層に区分されるが、その境界はほぼ完新世-更新世の境界と一致していることから、有楽町層を完新世の沖積層、七号地層を更新世の沖積層とした。

各サイトを地質学的な視点から位置づけると、埼玉大サイトは荒川低地の典型的な地質であり、農

工大サイトと日大サイトは東京の武蔵野台地の典型的な地質である。

図 3-2-3 に各サイトでの地盤の物理特性・化学特性を示す。埼玉大サイトは、海成の砂・シルト分が広く分布しており、それらは堆積した年代も若いことから、海水としての成分が残存している可能性があることが指摘できる。また、有機物は広範に存在することが分かった。農工大サイトは、主として更新統の段丘堆積物から成っており、複数枚の礫層からなることが特徴である。日大サイトは、関東ローム層が浅部に存在し、礫層をはさみその下部には海成の火山砕屑砂が厚く堆積(上総層群)し硫黄の濃集帯が存在することが明らかになった。各サイトの間隙水組成深度分布は、その地質時代や堆積環境に密接に影響を受け、特に埼玉大の 40 m 以深(更新統下総層群)と、パイライトの影響で高 EC・低 pH 条件を有する農工大の 15 m~30 m 深度および日大の 30~40 m 深度では、高い重金属濃度が得られた。なお礫層においては、コア試料採取時に自然排水が生じており、図中(図 3-2-3(c))の含水比の値は、自然含水比を大きく過小評価している。

また、埼玉大と農工大サイトでは、平成 23 年度および平成 24 年度を通して参照用観測井および観測井から定期的に地下水を採水・分析し、水質特性を把握した。埼玉大サイトでは、二つの帯水層(深度 17 m 付近、深度 39 m 付近)を対象としており、いずれにおいても硝酸イオンや硫酸イオンなどは確認されず、メタンなどが検出される還元条件下に地下水が賦存していることが分かった。深度 39 m 付近の帯水層では、カルシウムイオンや重炭酸イオンが主であり、一般的な浅層地下水の水質を呈しているが、深度 17 m 付近は海成層で構成されているため、ナトリウムイオンやマグネシウムイオン、ホウ素などが多く認められた。一方、農工大サイトでも、二つの帯水層(深度 32 m 付近、深度 44 m 付近)を対象としているが、いずれもメタンなどは確認されず、硝酸イオンなどが検出されたことから、酸化的な環境下に地下水が存在していることが分かった。また、いずれの帯水層においても、地下水の水質は、一般的な浅層地下水のものを示していた。農工大において、二つの帯水層より得られた微量元素や主要イオンのデータに対して、主成分分析やクラスター分析を行った。主成分分析の結果、ケイ素など移動性の高い成分、アルミニウムのように酸化還元電位に敏感な成分、鉛などの移動性の低い成分の 3 つの主成分により特徴づけられ、各主成分は主に移動特性の類似した元素から構成されることが分かった。また、クラスター分析の結果、ほぼ帯水層毎にグループ化され、濃度分布が帯水層毎に異なると判別された(図 3-2-4)。この結果は、深度 32m と 44m の帯水層では滞留時間が大きく異なることを示唆している。

コア試料中の微生物叢については、16S rRNA 遺伝子の塩基配列を対象とした次世代シーケンサーによる網羅的解析とリアルタイム PCR による定量的解析を行った。バクテリアについて見ると、埼玉大サイトでは *Proteobacteria*, *Acidobacteria*, *Firmicutes* が多く、深さによって組成が大きく異なっていた。日大サイトでは、深度 7 m で *Alphaproteobacteria*, 8.9 m で *Gammaproteobacteria*, 10 m 以深では *Betaproteobacteria* と *Gammaproteobacteria* がそれぞれ優占していた。農工大サイトでは、最も浅い深さ 3.5 m を除いた全ての深さで *Alpha*-, *Beta*-, *Gammaproteobacteria* が全体の 70~90%を占めていた(図 3-2-5)。また、特定の代謝機能をもつ微生物についてリアルタイム PCR による定量を行った結果、埼玉大サイトでは鉄還元バクテリア(*Geobacter*) や硫酸還元酵素遺伝子(*dsr*)をもつバクテリアが深度 0~30 m の範囲で多く検出された(表 3-2-1)。日大サイトと農工大サイトでは深い場所に硝酸還元酵素(*nirK*) が多く検出される地層が見られ、鉄還元菌と硫酸還元菌についても一部の深度で多く検出された(表 3-2-2)。アーキアについて見ると、埼玉大サイトでは比較的多く検出されたが、日大サイトと農工大サイトではほとんどの深さでバクテリアの数%しか検出されなかった(表 3-2-2)。その組成を見ると、埼玉大サイトと日大サイトでは *Crenarchaeota* 門の MCG というグループが優占していたが、同時に多くの深度でメタン生成菌を含むグループである *Methanobacteria* や *Methanomicrobia* (ともに *Euryarchaeota* 門) が検出された。一方、農工大サイトでは他の 2 サイトと異なり *Euryarchaeota* 門の *Thermoplasmata* 綱が優占していた。いくつかの分類群については、コア試料中の存在量と粒度分布、間隙水の pH や EC との間に相関が認められたことから、堆積物中の微生物叢は地質時代や堆積環境と密接に関わっていることが示唆された。

#### 引用文献

船引彩子・納屋友規・齋藤広隆・竹村貴人, 2014, 東京都府中市で掘削されたボーリングコア

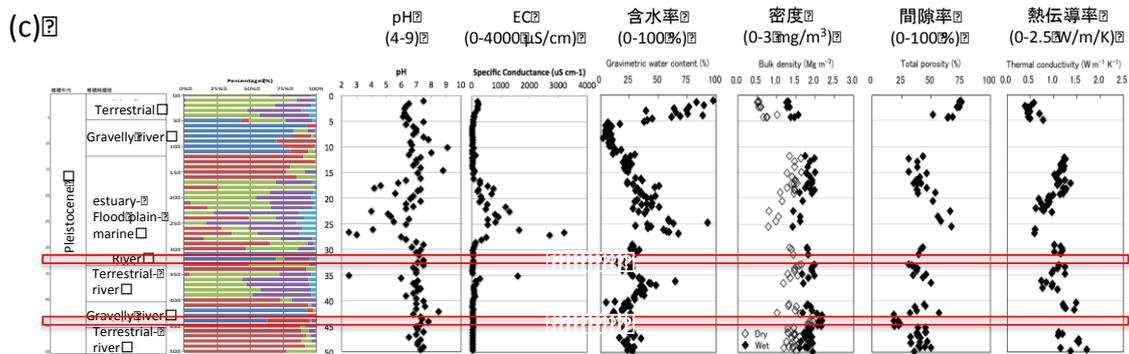
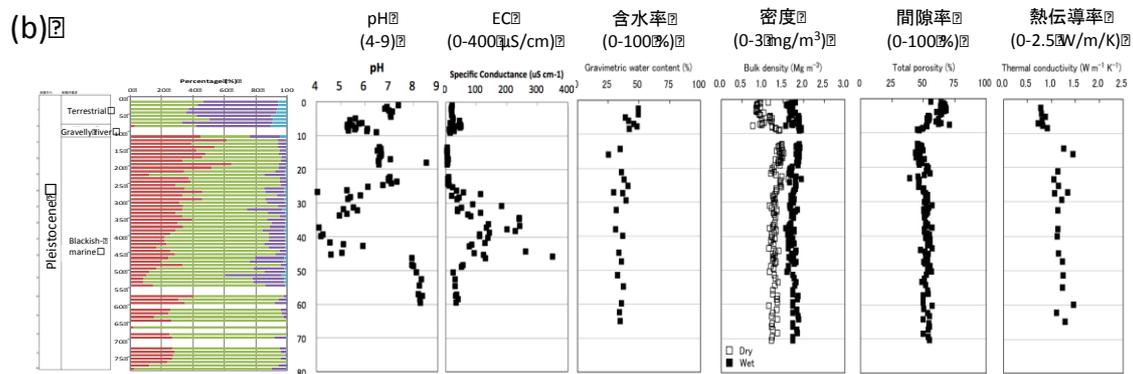
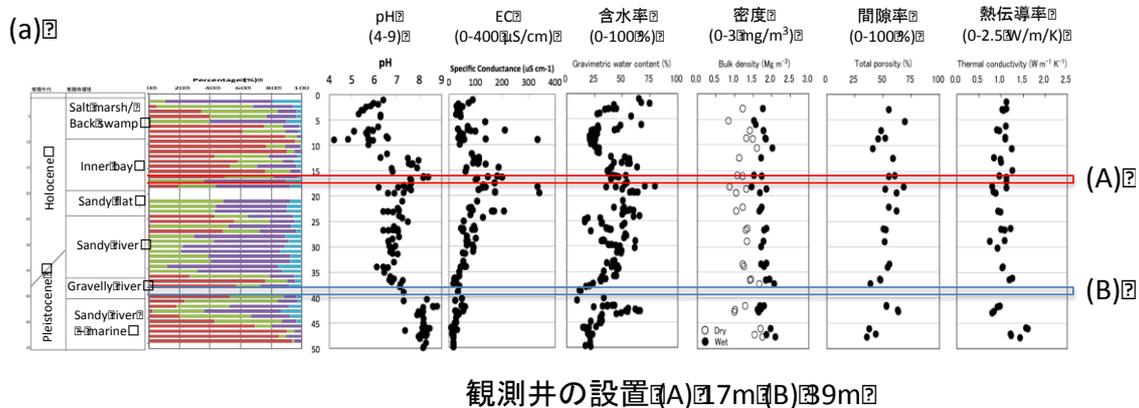
CRE-TAT-1,2 の堆積相と堆積環境, 堆積学研究, 73(2), 1-16

小松原純子・木村克己・福岡詩織・石原与四郎, 2010, 埼玉県さいたま市桜区宿地区から採取した沖積層ボーリングコア堆積物(GS-SSS-1)の堆積相および堆積物物性. 堆積学研究, 69(1), 3-15.

Saito, T., Hamamoto, S., Mon, E.E., Komatsu, T., Takemura, T., Saito, H., and Moldrup, P., 2014, Thermal properties of deep boring core samples from the Kanto district, central Japan: Development of predictive models for thermal conductivity and diffusivity, *Soils and Foundations*, 54(2), 116-125.

竹村貴人, 船引彩子, 原翔悟, 秋葉義彦, 伊東良晴, 2013, 環境地質学的なアプローチによる地温上昇が与える地下環境への影響評価, 第10回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 19-22.

Thuyet, D.Q., Saito, H., Satio, T., Moritani, S., Kohgo, Y., and Komatsu, T., 2016 Multivariate analysis of trace elements in shallow groundwater in Fuchu in western Tokyo Metropolis, Japan, *Environmental Earth Sciences*, 75:559.



- gravel
- coarse sand
- fine sand
- silt
- clay

図 3-2-3 初期地盤環境測定結果例 (a) 埼大サイト, (b) 日大サイト, (c) 農工大サイト (Modified after Saito et al., 2014, Soils and Foundations)

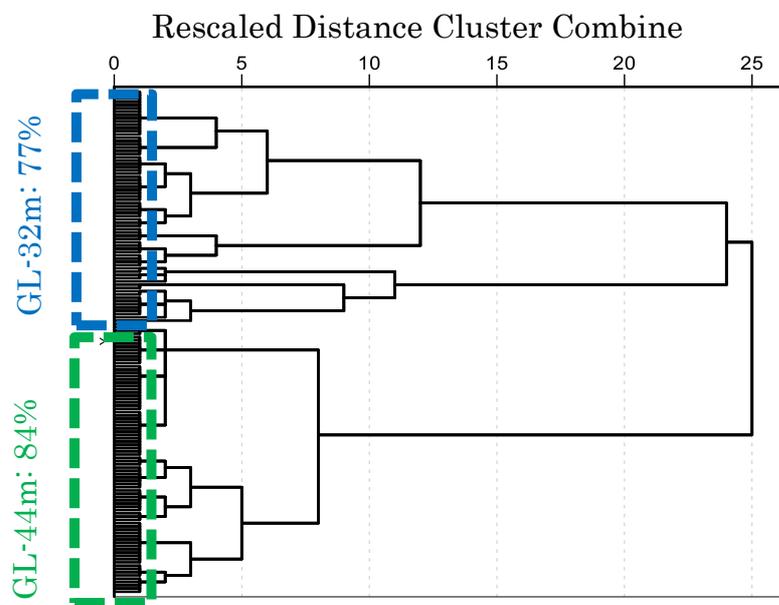


図 3-2-4 農工大サイトにおけるウォード法クラスター分析による元素のデンドログラム  
(Thuyet et al., 2016, Environmental Earth Sciences より引用)

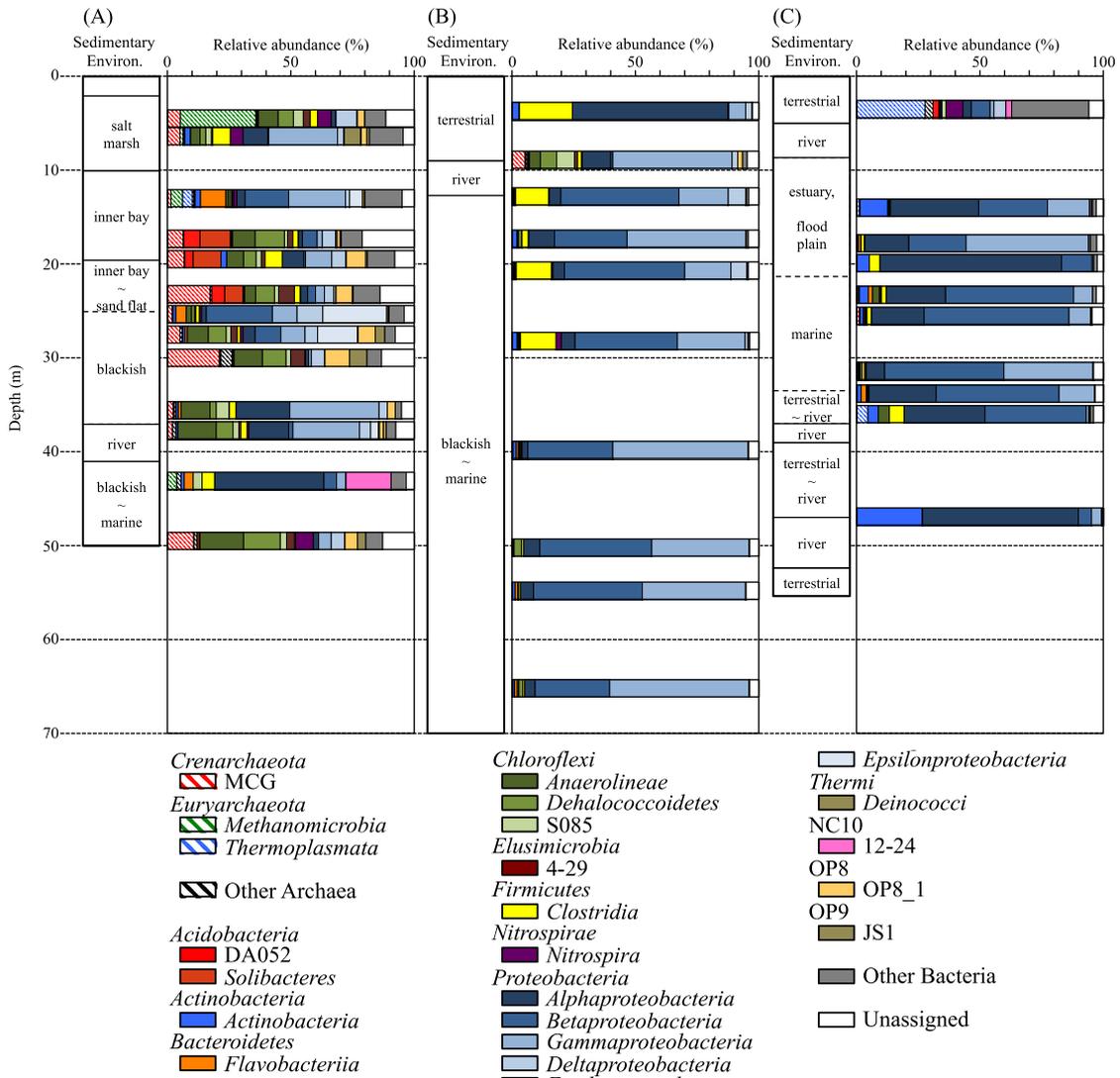


図 3-2-5 初期バクテリア群集解析結果 (a) 埼大サイト, (b) 日大サイト, (c) 農工大サイト

表 3-2-2 コア試料中におけるバクテリア, アーキア, 亜硝酸還元酵素 (*nirK*, *nirS*), 鉄還元菌 (*Geobacter*), 硫酸還元酵素 (*dsr*), メタン合成酵素 (*mcrA*) の各遺伝子の存在量

深さ (m)	バクテリア	アーキア	<i>nirK</i>	<i>nirS</i>	<i>Geobacter</i>	<i>dsr</i>	<i>mcrA</i>
	( $\times 10^4$ copies/g)*						
<b>埴大サイト</b>							
4.5	540	600	1.3	200	1000	1500	47
6.4	6.1	2.9	1	0.1	6	22	0.3
13	61	73	0.64	11	80	150	8.7
17.4	130	21	0.16	1.1	69	250	1.3
19.4	39	8.1	—	1.4	24	100	5.8
24.1	160	230	—	14	140	120	22
24.9	130	8	0.58	47	720	84	9.8
27.5	100	5.9	0.05	19	330	100	2
30	140	270	0.33	2.2	170	200	11
36.1	20	12	1	1	22	45	5
37.1	13	7.1	—	0.8	16	21	8.3
43.1	410	—	—	0.8	14	7	5.3
49.5	130	53	0.23	3.6	130	97	19
<b>日大サイト</b>							
3.7	32	31	—	—	190	27	—
8.9	17	11	—	—	15	11	—
12.8	600	6.5	—	870	1800	160	—
17.3	20	—	—	—	—	14	13
20.7	33	0.2	—	—	—	26	10
28.2	72	0.4	—	16	—	21	13
39.8	190	0.25	—	100	—	70	—
50.2	290	—	—	2100	—	110	—
54.8	160	0.1	—	—	—	11	—
65.2	330	—	—	130	—	18	—
<b>農工大サイト</b>							
3.5	1000	780	—	56	3400	560	53
14	9.3	0.2	—	—	26	17	—
17.8	33	—	—	—	—	—	—
19.9	4.6	—	—	—	—	—	—
23.9	18	0.3	—	40	—	—	—
24.9	16	0.1	—	12	—	15	—
27.9	53	0.5	—	23	22	29	16
31.4	160	0.1	—	140	—	100	—
33.9	4.2	0.2	—	—	—	—	—
35.9	1000	1.1	15	670	5200	310	5

\* 湿重量あたり

### 3. 研究項目 1-3:ヒートポンプ導入試験による長期観測-地圏熱・地下水利用による地圏環境変化の把握-(埼玉大学グループ小松班・大西班, 東京農工大グループ, 日本大学グループ)

#### (1) 研究のねらい

地中熱利用ヒートポンプシステムの実証試験から、地盤への熱負荷による地下温度変化が地盤環境に与える影響を明らかにする。

#### (2) 研究実施方法

埼玉大サイトおよび農工大サイトを対象とし、地圏の熱的かく乱の実証試験を行った。埼玉大グループ・小松班は、主に埼玉大および農工大サイトの観測井を用いて、地盤内における物質(水・溶存ガス・溶質)動態を経時的に観測した。埼玉大グループ・大西班は、地下水中の微生物叢を分析し、地圏熱利用に伴う微生物生態系の変化を経時的に観測した。農工大グループは、主に農工大サイトを中心に、地圏熱の利用(地下水くみ上げを含む)に伴う地圏の熱応答および力学的挙動変化(地盤沈下など)の実証試験を行った。

#### (3) 研究成果

埼玉大サイト(埼玉大グループ・小松班)では、埋設した深度 50 m の U-tube(熱源)から水平距離で 1, 2, 5, 10 m 離れた地点に、W1 (1 m), W2 (2 m), W5 (5 m), W10 (10 m), 4 つの観測井を設置した(図 3-3-1)。平成 23 年 5 月頃より、2 つの被圧帯水層(完新統(沖積層)の海成層:深度約 17 m 付近, 更新統(沖積層)の非海成層:深度約 39 m 付近)を対象とし、地下温度(地温)や地下水水質などのモニタリングを開始した。平成 24 年 8 月からは、U-tube に約 40°C の温水を 40 L/min 程度の流量で循環する長期熱負荷試験を 13 ヶ月間実施した。なお、対象とした観測項目は、地温、水位、pH、EC、DO、ORP、Li、B、Al、Si、Cr、Mn、Fe、Cu、Zn、As、Se、Sr、Cd、Sb、Pb、Cl、NO<sub>2</sub>、NO<sub>3</sub>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、DOC、Na<sup>+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、H<sub>2</sub>S、CH<sub>4</sub> の 34 成分である。結果、熱源に近い観測井から順に地温が上昇し、最終的に W1 では、7~8°C 程度上昇した(図 3-3-2)。このとき、特に、海成層から構成される被圧帯水層(深度約 17 m 付近)においては、一部の地下水水質成分(ホウ素、カリウムイオン、ケイ素、溶存有機炭素、リチウム、アンモニウムイオン、ナトリウムイオン)の顕著な濃度上昇が認められた(図 3-3-2:一例として、ホウ素を表示)。また、マグネシウムイオンについては、温度上昇に伴う濃度低下が確認された。

平成 25 年 9 月には、熱負荷を停止し、継続的な自然放冷過程に移行した(~平成 26 年 11 月まで)。自然放冷過程を通じて、熱負荷により濃度変化が認められた地下水水質成分は、地温の低下に伴って、熱負荷前(自然状態)の濃度水準に戻ることが確認された。これら、一連の長期的な熱負荷および自然放冷過程(27 ヶ月)において、熱の影響を最も受けた W1 と、熱の影響をほとんど受けなかった W10(参照用の観測井とする)を対象とし、地温変化幅と濃度変化量の関係性を比較・検討した。具体的には、地温ならびに濃度について、W1 から W10 のデータをそれぞれ引くことで、地温変化幅と濃度変化量を算出した。この解析により、温度と濃度には、線形関係が得られることが明らかになった(図 3-3-3:一例として、ホウ素を表示)。一方で、非海成層から構成される被圧帯水層(深度約 39 m 付近)では、観測井を設置する際のボーリングの影響と考えられる他の帯水層からの地下水の混合により、地下水水質データの安定に長期間を要したため、温度変化と濃度変化の関係性を検討できなかった。

平成 26 年 11 月からは、約 60°C の温水を U-tube に 40 L/min 程度で循環する、長期熱負荷試験(2 回目)を開始した。平成 27 年 8 月頃には、W1 の地温が概ね平衡状態に近づき、地温は 13~14°C 程度の上昇が確認された(図 3-3-2)。このとき、海成層では、1 回目の熱負荷試験とほぼ同様の成分を含む、いくつかの地下水水質成分(ホウ素、カリウムイオン、ケイ素、リチウム、アンモニウムイオン、ナトリウムイオン、塩化物イオン)で濃度上昇が認められた。また、ストロンチウムならびにマグネシウムイオンについては、温度上昇に伴う濃度低下が確認された。1 回目の熱負荷試験で検討できなかった非海成層でも、複数の地下水水質成分(カリウムイオン、ケイ素、リチウム、ヒ素)が地温の上昇に伴って、その濃度が上昇していた(図 3-3-2:一例として、ヒ素を表示)。加えて、ストロンチウムおよびカルシウムイオンは、温度上昇と共に濃度の低下が認められた。2 回目の熱

負荷試験においても、W1 ならびに W10(参照用の観測井として)を用い、地温変化幅と濃度変化量の関係性を検討したところ、線形関係が得られた。以上、温度変化によって、濃度変化が認められた地下水水質成分を表 3-3-1 にまとめると同時に、それぞれについて 1°C 上昇あたりの濃度変化量(mg/L もしくはµg/L)を示した。本研究では、最大で初期温度+14°C前後の地温変化であったことから、この濃度変化量は+14°C前後までの範囲で有効である。この表 3-3-1 の中では、ホウ素およびヒ素が地下水の水質汚濁に係る環境基準(地下水環境基準)に規定されているものであり、特にヒ素については、その基準が 10 µg/L と非常に低く、注意する必要がある(ホウ素の基準は 1000 µg/L)。なお、対象とした観測項目のうち、表 3-3-1 に示していない成分は、温度変化の影響が不明瞭であった。

微生物については、平成 24 年 7 月から平成 27 年 7 月まで(1 回目の熱負荷期間と自然放冷および 2 回目の熱負荷期間)リアルタイム PCR による微生物数の推定と、PCR-DGGE と次世代シーケンサーによる微生物叢の解析を行った(埼玉大グループ・大西班)。リアルタイム PCR によって定期的に地下水中の微生物数を調査したところ、バクテリアおよびアーキアの 16S rRNA 遺伝子コピー数はそれぞれ  $10^5 \sim 10^7$ 、 $10^2 \sim 10^4$  copies/mL で変動していたが、特に温度変化の影響は見られなかった。微生物叢解析の結果、特にバクテリアについては実験期間を通して全ての井戸で変化が見られ、地下水中のバクテリア群集は温度変化によらず常に変動していることが明らかとなった。また、バクテリアとアーキアともに一部の属ないし科については温度変化に由来すると考えられる割合の変化が見られた(図 3-3-4)。W1 では、1 回目の熱負荷によって一部の好気性バクテリアが減少し、特定の嫌気性バクテリアの割合が増加する傾向が見られた。2 回目の熱負荷では、地温の上昇にともなって、*Betaproteobacteria* 綱のバクテリアが増加しており(図 3-3-4)、特に *Methylophilus* 属などのメタンを酸化するバクテリア *Hydrogenophana* 属バクテリアが増加した。また、地下水中には種々のメタン生成アーキアが存在していたが、地温が上昇するにつれて *Methanosaetaceae* 科が減少する一方、*Methanomicrobiaceae* 科や *Methanomassiliococcaceae* 科が増加する傾向にあった。しかし本研究では、地下水水質に直接影響を与えるような微生物や病原性をもつ微生物の顕著な増加や減少は見られなかった。

農工大サイトでは、恒温実験室(広さ 25 m<sup>2</sup>)に接続したクローズドループ地中熱利用ヒートポンプを稼働させ、より現実に近い形でのヒートポンプ稼働条件での原位置長期熱負荷試験を実施した。恒温室は 20°C 一定としてヒートポンプを稼働し、定期的に地下水水質の変化を調査した。2 本の長さ 50 m の熱交換井から約 5.3 m の位置に埋設した観測井で地温を測定しているが、稼働後約 3 年で、GL-32 m の礫層では、夏と冬の冷暖房使用の結果、上昇と下降を繰り返しながら全体としては上昇傾向で、初期温度より 1°C を超える上昇となった(図 3-3-5)。一方、GL-44 m の礫層では上昇・下降を繰り返し、現時点では初期温度とはほとんど変わらない地温となっている(図 3-3-5)。GL-5 m では、熱交換器よりも地表面の変動の影響を大きく受け、年間を通して温度が上昇し下降するということを繰り返している。そのほか地層によって温度の変化は異なり、地盤中の熱移動を支配する体積熱容量、熱伝導率などの物性値、地下水の流向・流速、および地表面境界での温度が地温変化に大きな影響を及ぼしていることが分かった。埼玉大サイトで実施した熱負荷試験において、W5(熱交換井から 5m)の 1 年後の温度上昇が 1°C 程度であることを考慮すると、農工大サイトでも熱交換井直近では、埼玉大での W1(熱交換井から 1m)のような温度上昇が生じていることが考えられる。地下水水質については、観測井(熱交換井から約 5.3 m)においてこれまでのところ有意な変化は観察されなかった。

農工大サイトでは、クローズドループ地中熱利用ヒートポンプによる長期観測に加えて、オープンループ地中熱利用を模した長期観測実験も実施した。実験では揚水井から揚水した地下水を給湯器で 30°C まで熱し、約 10 m 離れた還元井の深さ約 50 m(GL-50m)の砂礫層(被圧帯水層)に流量 20 L/min で注入した。温水の注入期間は平成 26 年 10 月からの約 8 週間(55 日間)とした。還元井から 1.3 m および 5.2 m 離れた観測井(各々、O-1 および O-5)において、地下帯水層である GL-50 m および GL-40 m の砂礫層(各々、deep および shallow)を対象として、温度、地下水水質、地下微生物叢についての観測を行った。温水注入前の地下水温度は年間を通して 17°C 前後であり、30°C に加熱し上記流量で注入すると 18.1 kW の熱負荷となった。温水の注入により O-1 の GL-50 m での地下帯水層温度(地下水温度)が局所的に上昇し、他の深度での温度

上昇はわずかとなった(図 3-3-6). また O-5 においても, 同様の傾向が見られた. 図 3-3-7 に還元井 O-1 および O-5 の deep における温度測定結果を示す. 温水注入後すぐに温度が上昇し, 注入停止後約 40 日で温度が回復した. 温水注入前後での最も顕著な水質の変化は, 濁度にみられた(図 3-3-8). 還元井に近い O-1 の deep において濁度が上昇し, 温水注入時は常時 20NTU を超えていた. この値は WHO などで定めている飲料水の水質基準である 1NTU を大きく上回っている. この濁度の増加は, 温水の注入に伴う帯水層の物理的な攪拌によるものと考えられ, 温度の影響については今後さらに検討が必要である. 温水注入前と注入時, 注入停止後の各観測井での微量元素の濃度を, ICP-MS により測定した. 図 3-3-9 に O-1, deep での濃度の変化を示す. 一部元素については注入前後でその濃度に変化がみられ, これに対する温水注入の影響について今後検討する必要がある.

オープンループヒートポンプの観測実験では地下水中における微生物の存在量とバクテリアの群集構造について, 温水注入期間のみ解析を行った(埼玉大グループ・大西班). 地下水中のバクテリアおよびアーキアの存在量は, それぞれ  $10^4 \sim 10^6$ ,  $10^2 \sim 10^4$  copies/mL で変動し, 埼玉大サイトと同様に温度上昇の影響は見られなかった. バクテリア群集については, 埼玉大サイトよりも変動が大きく, 最も温度が変化した場所では複数種の好気性従属栄養細菌の増加が見られた.

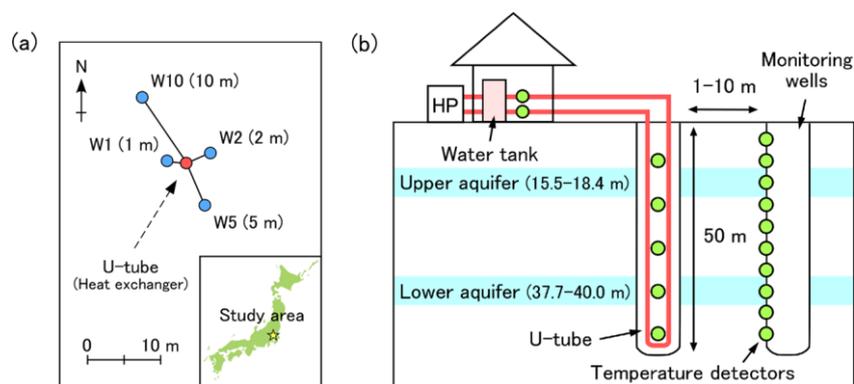


図 3-3-1 埼玉大サイトの(a)平面図, (b)断面図(Saito et al., 2016, Water Research より引用)

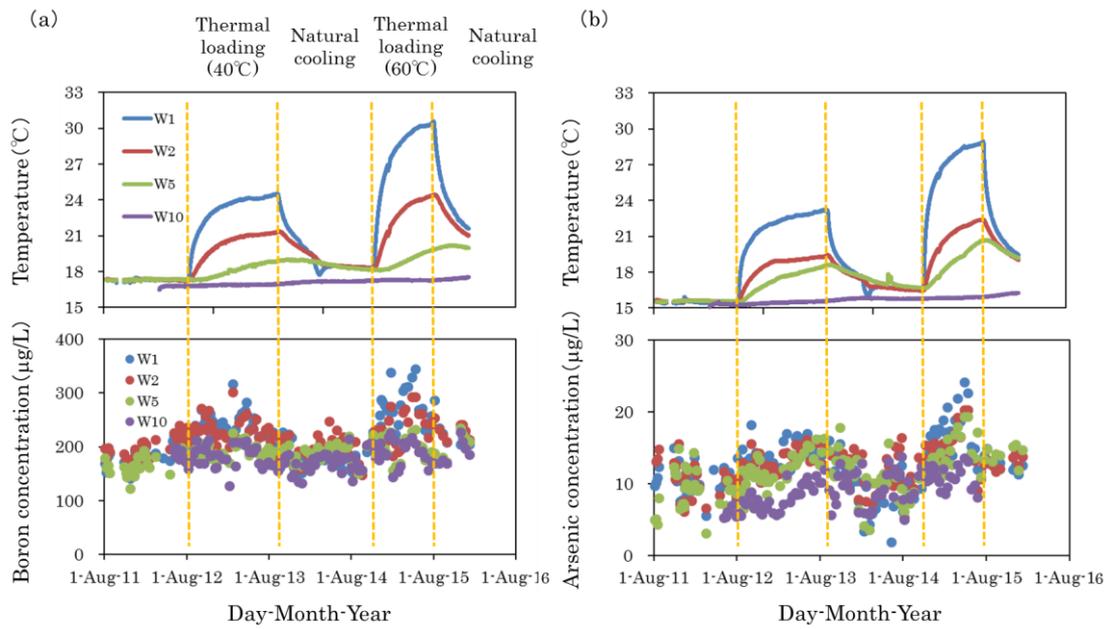


図 3-3-2 埼大サイトにおける, (a)海成層の地温変化とホウ素濃度変化, (b)非海成層の地温変化とヒ素濃度変化(一部, Saito et al., 2016, Water Research に加筆)

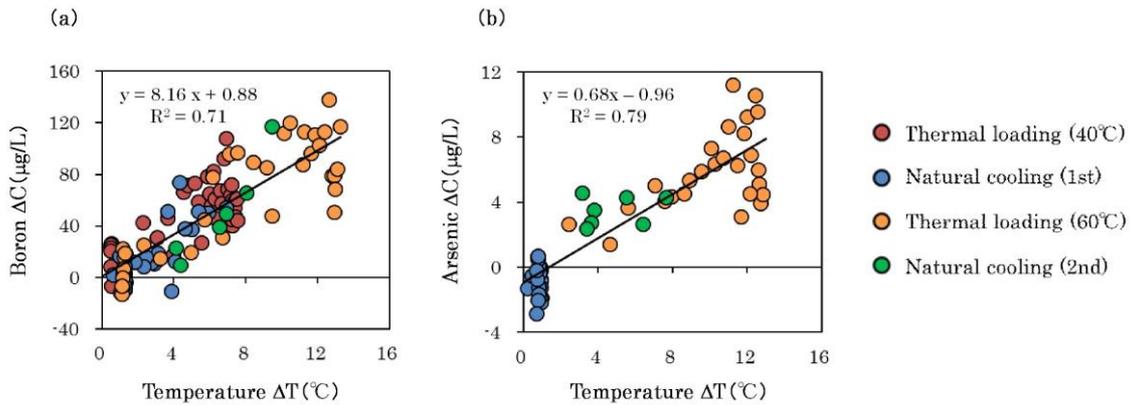


図 3-3-3 埼大サイトにおける, (a)海成層の地温変化幅( $\Delta T$ )とホウ素濃度変化量( $\Delta C$ )の関係性, (b)非海成層の地温変化幅( $\Delta T$ )とヒ素濃度変化量( $\Delta C$ )の関係性( $\Delta T$ と $\Delta C$ は, いずれも W1 から W10 のデータを引くことで算出)(一部, Saito et al., 2016, Water Research に加筆)

表 3-3-1 地温変化によって影響を受けた地下水水質項目の一覧

測定項目	温度上昇過程*	温度低下過程*	濃度変化量(mg/L or µg/L)/1°C上昇**		決定係数
<b>完新統沖積層(海成層)</b>					
Li	+	-	0.07	µg/L	0.36
B	+	-	8.16	µg/L	0.71
Si	+	-	0.53	mg/L	0.50
DOC	+	-	0.15	mg/L	0.25
Na <sup>+</sup>	+	-	0.17	mg/L	0.25
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	+	-	0.19	mg/L	0.46
K <sup>+</sup>	+	-	0.42	mg/L	0.82
Mg <sup>2+</sup>	-	+	-0.15	mg/L	0.61
Sr	-	※	-1.79	µg/L	0.26
Cl <sup>-</sup>	+	※	0.13	mg/L	0.21
<b>更新統沖積層(非海成層)</b>					
Li	+	※	0.02	µg/L	0.51
Si	+	※	0.33	mg/L	0.28
As	+	※	0.68	µg/L	0.79
Sr	-	※	-1.21	µg/L	0.25
K <sup>+</sup>	+	※	0.10	mg/L	0.46
Ca <sup>2+</sup>	-	※	-0.19	mg/L	0.69

\*(+:濃度上昇, -:濃度低下, Δ:変化なし, ※:未検討)

\*\* (現場試験は、初期温度+14°C程度までの観測であるため、14°C程度の温度上昇まで有効)

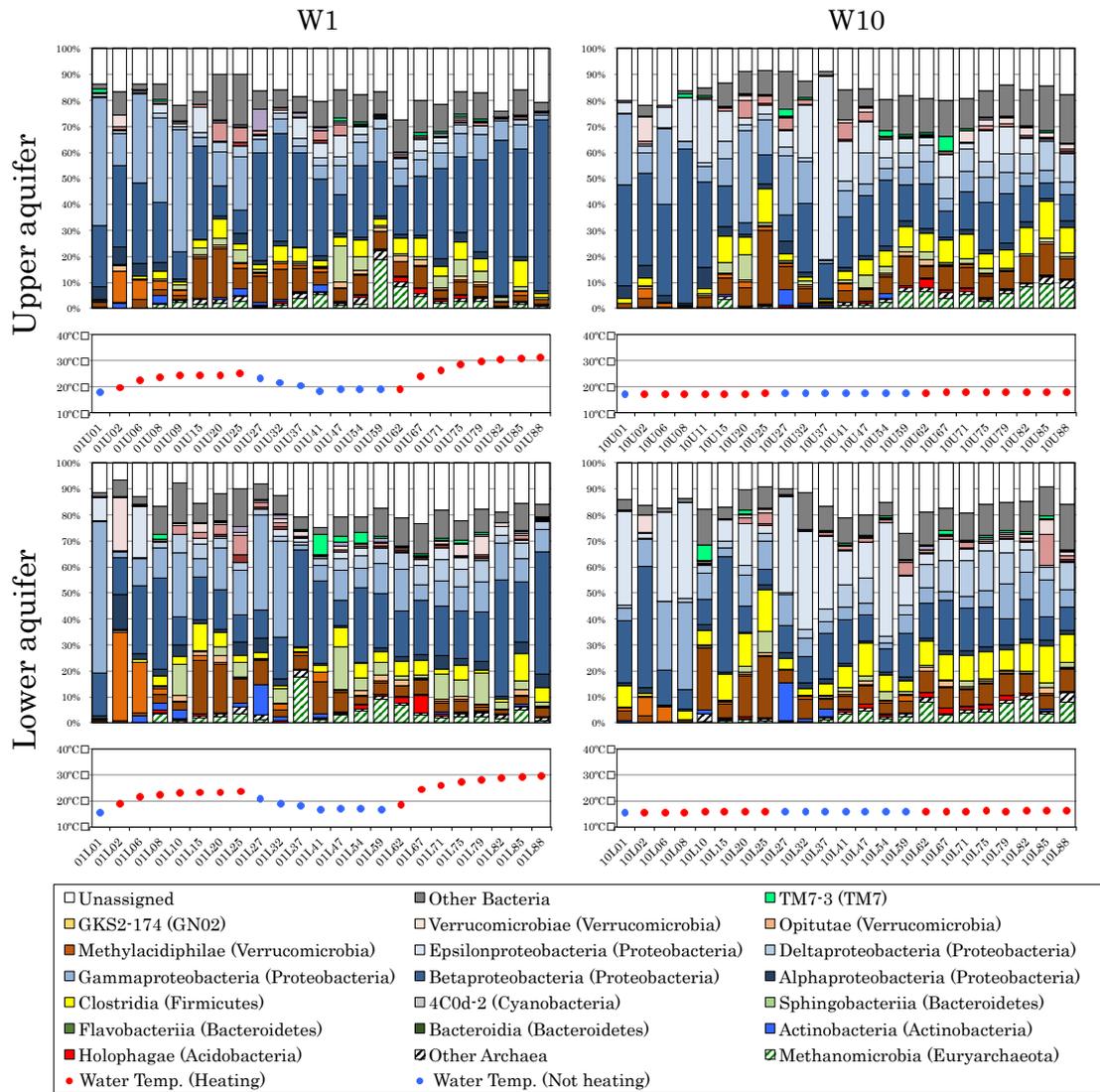


図 3-3-4 完新統(沖積層)海成層からなる被圧帯水層(埼大サイト)の地下水中に存在するバクテリアの群集構造変化

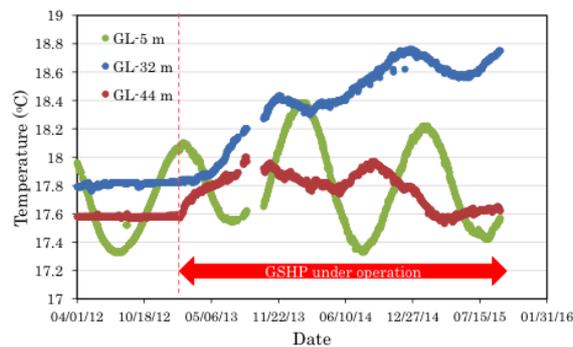


図 3-3-5 農工大クローズドループサイトの観測井での地中熱ヒートポンプ稼働時の地中温度変化

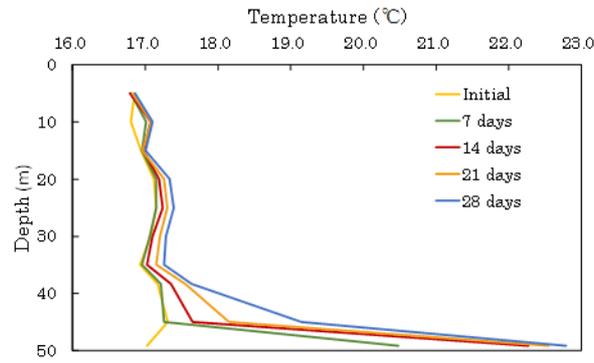


図 3-3-6 農工大サイト O-1 における温水注入後の温度プロファイルの変化

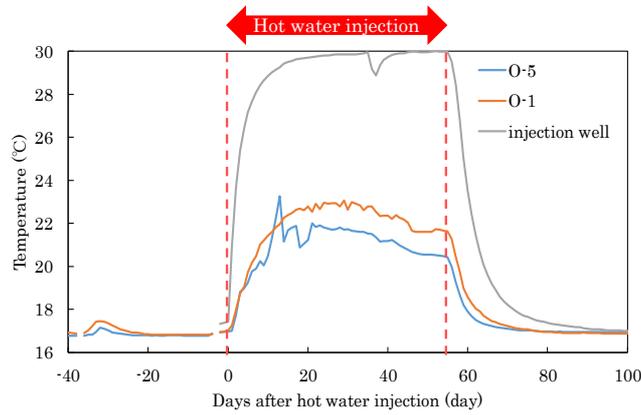


図 3-3-7 還元井, O-1, O-5 の deep における温度変化

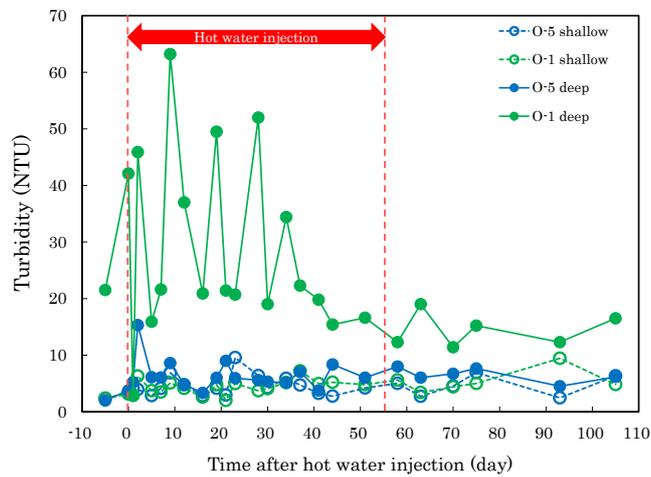


図 3-3-8 各観測井 (O-1, O-5) における濁度の変化

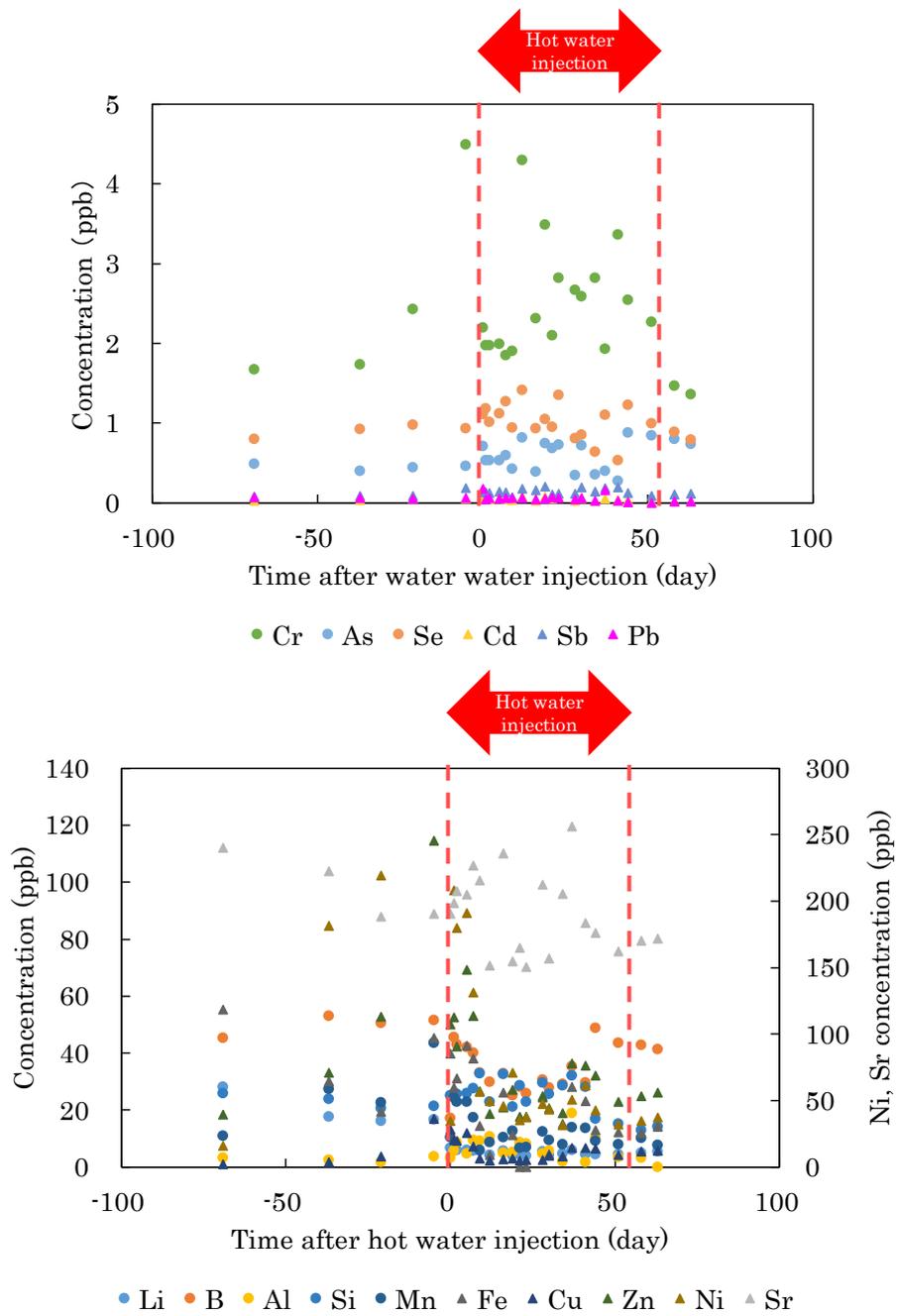


図 3-3-9 O-1, deep における微量元素の濃度の変化

#### 4. 研究項目 1-4: 原位置熱物性値測定装置の開発-(日本大学グループ)

##### (1) 研究のねらい

既存の観測井で、採水・地盤温度測定として使えるスクリーンがない井戸に対して、新たに水平方向の孔を穿孔するための装置を開発することにある。

##### (2) 研究実施方法

平成 23～25 年度にかけ、基本設計から試作機までの段階を複数回繰り返し、装置の開発を行った。穿孔の駆動力の選定を設計段階で数種類、試行した結果、技術的に水圧を利用したウォータージェット式が現実的であるという結論に至り、装置の試作を行った。

##### (3) 研究成果

直径 100 mm 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あり、図 3-4-1 のような井戸内に設置できる機器を作成した。装置は、図 3-4-2 のように井戸内に設置することができ、水圧によるバックシュューを利用して孔内壁面で反力がとれるようになっている。また、送水部より高圧(約 20 MPa)に圧縮された水を装置内に送水し、穿孔用の出口から口径を絞り、さらに高圧にした水を孔内壁面に射出する仕様である。ここで、孔壁が自立しない井戸の場合、ケーシングとして塩ビ管が挿入されている場合があるが、その場合は熱により塩ビ管に孔をあけ挿入口を確保する必要がある。本研究では孔壁が自立した上総層群にて実証実験を行った。実験の結果、軟岩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た。また、穿孔深度は堆積物の硬さ、射出部の水圧(絞り)にもよるが、堆積軟岩でおおよそ 5 cm ほどであった。また、石膏をつかった実験では、約 8cm 直径 3cm の孔が穿孔できた。これにより、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。

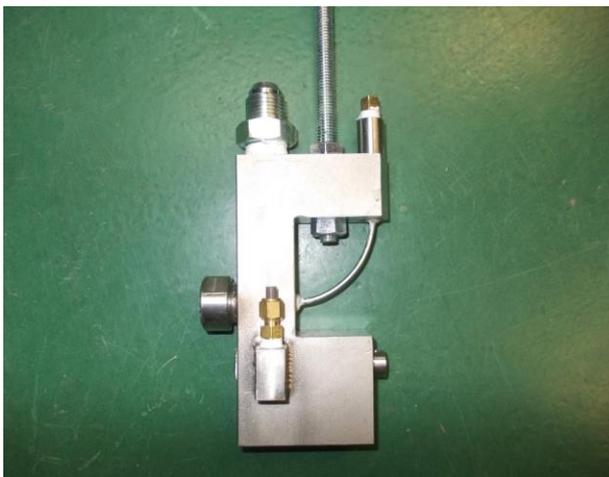


図 3-4-1 試作した原位置熱物性値測定装置.

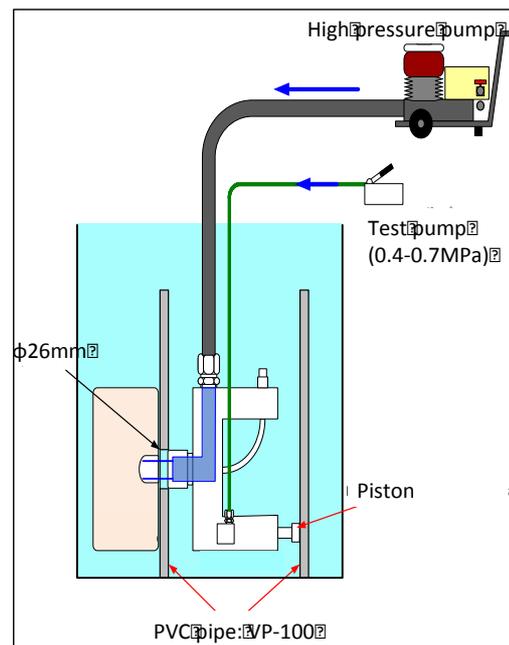


図 3-4-2 設置イメージ図

## 5. 研究項目 1-5:室内試験による地圏熱環境の変化が物質移動特性に与える影響-地圏熱・地下水利用による地圏環境変化の把握-(埼玉大学グループ小松班)

### (1) 研究のねらい

室内試験により地圏熱利用時の地圏環境を再現し、人為的な熱的かく乱を加えた場合の物質・熱移動特性変化を調べる。

### (2) 研究実施方法

模擬試料および採取したコア試料を用いて、異なる温度環境下での物質移動試験(溶質分散試験, 溶質拡散試験, 透水試験, 吸着・脱離試験)および熱伝導試験を実施し、各種物質移動特性の温度依存性について調べた。

### (3) 研究成果

模擬粘土試料および埼玉大サイトから採取したコア試料、豊浦砂およびガラスビーズを用いて、温度環境の違いが(砂質)地盤内の溶質移動特性に与える影響について調べた。その結果、温度上昇とともに水の粘性係数が低下することで、透水係数と溶質拡散係数が増加することが確認された(図 3-5-1a,b)。溶質分散係数については、豊浦砂の場合低温条件下で最も溶質分散係数が低下した(図 3-5-1c)。一方で、間隙の大きいガラスビーズでは溶質分散係数の顕著な温度依存性は確認されなかった。溶媒の粘性係数を変化させるため、異なる濃度のメタノール水溶液を用いて実験を行った結果、豊浦砂で得られた溶質分散係数の温度依存性は、溶媒の粘性係数変化のみでは十分に説明できないことが分かった。このように、溶質分散係数の温度依存性については、異なる試料で一貫した結果が得られず、そのメカニズムも未解明である。今後、トレーサーとしてトリチウムを用いたカラム実験から、温度環境が水自体の移動特性に与える影響について調べるなど、溶質分散係数の温度依存性解明に向けた更なる研究が必要と思われる。埼玉大サイトから採取したコア試料を用いて、異なる温度環境下で熱伝導率を測定した結果、熱伝導率は飽和度<0.7 では水分量の増加に伴い増大し、0.01<飽和度<0.7 では温度上昇と共に増大する結果が得られた。模擬粘土試料および埼玉大サイトコア試料を用いた実験では、温度上昇により陽イオン類の吸着能が低下し、遅延係数が低下すること、また二次圧密領域での圧密沈下が促進されること、などが分かった(Mon, et al., 2013, Journal of Geological Sciences)。

埼玉大サイトでは、地中熱利用ヒートポンプを用いた実証試験で対象とした被圧帯水層を含む、4 深度(約 17 m, 31 m, 39 m, 44 m 前後)から得られたコア試料を用い、異なる温度条件下(15°C, 25°C, 40°C)において、重金属類を中心とした溶出試験ならびに逐次抽出法による存在形態別分析を行った。なお、溶出試験で対象とした項目は、pH, EC, Li, B, Al, Si, Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, As, Se, Sr, Cd, Sb, Pb, Cl, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, DOC, Na<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>の 27 成分であり、逐次抽出法では、ホウ素とヒ素について、水溶性由来成分(最も溶出しやすい形態(溶出試験の結果を利用)), イオン交換態由来成分, 炭酸塩由来成分, 鉄・マンガン酸化物由来成分, 有機物由来成分, 鉱物態由来成分(最も溶出しにくい難溶性の形態)に分画した。結果、温度上昇に伴う、一部の成分の有意な溶出量の上昇が確認されたものの、深度によって温度の影響を受ける成分は異なっていた。溶出量が有意に上昇した成分をリスト化すると、表 3-5-1 のようにまとめられる。この中で、環境基準に規定され、また、複数の深度のコア試料で影響が認められた成分は、ホウ素およびヒ素である(図 3-5-2)。これらの成分は、現場での地中熱利用ヒートポンプによる実証試験でも濃度が上昇しているため、逐次抽出法を適用することで、温度変化に伴う存在形態変化を検討した。ホウ素については、水溶性由来成分が温度と共に上昇すると同時に、イオン交換態由来成分および鉄・マンガン酸化物由来成分が温度と共に減少し、また、ヒ素は、水溶性由来成分ならびにイオン交換態由来成分が温度と共に上昇すると同時に、鉄・マンガン酸化物由来成分が温度と共に減少する傾向が、それぞれ認められた(図 3-5-3 および図 3-5-4)。

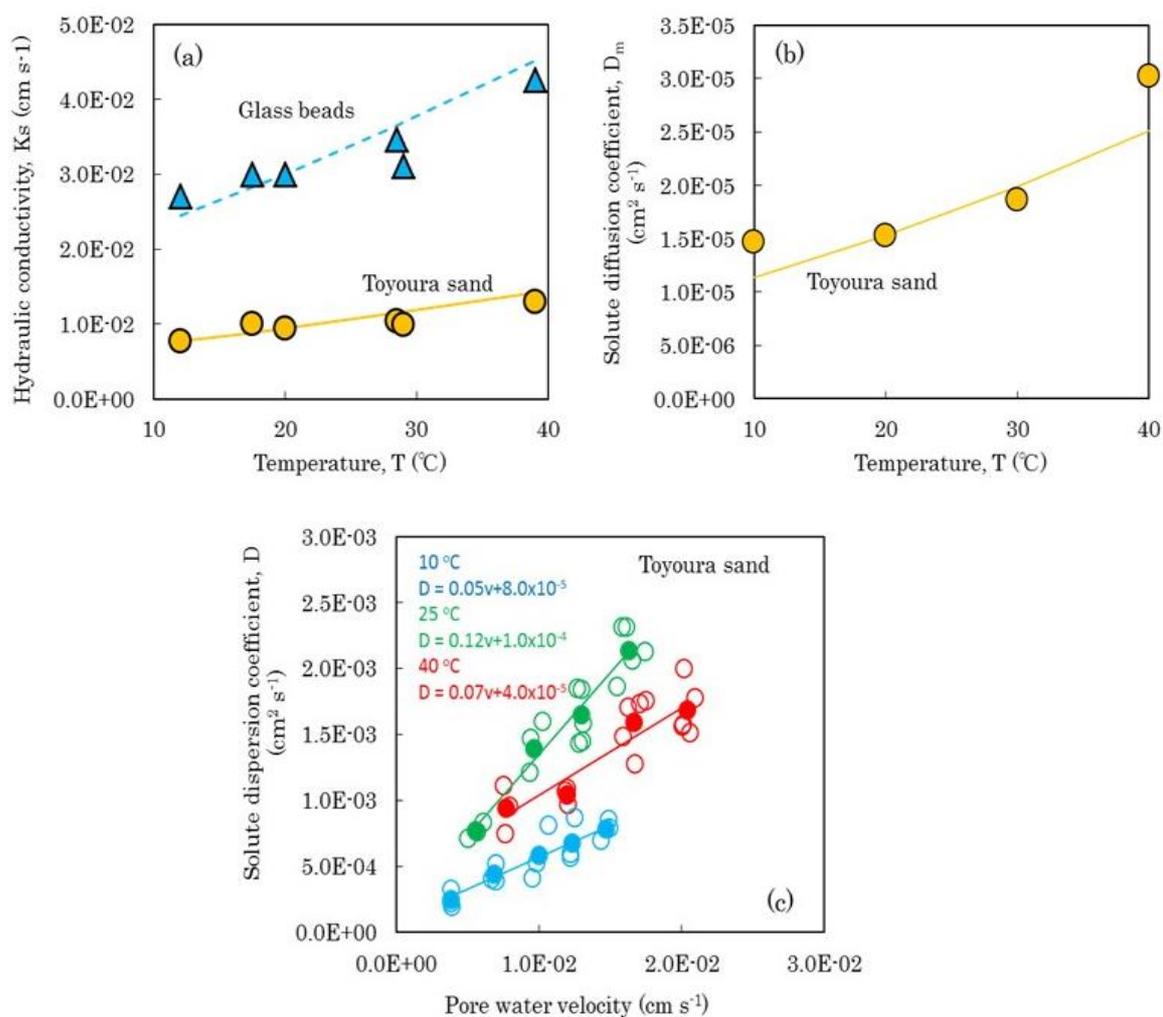


図 3-5-1 異なる温度環境下での物質移動係数測定結果  
(a)透水係数, (b)溶質拡散係数, (c)溶質分散係数

表 3-5-1 温度上昇によって溶出量が上昇した水質成分の一覧

試料採取深度	岩相	地層名	堆積年代	堆積時環境	温度の影響を受けた項目
17.55-17.65 m	砂層	沖積層	完新世	内湾	B, Si, Li, DOC
31.11-31.21 m	シルト質砂層	沖積層	更新世	汽水~河川	B, Si, Li, As, Zn
39.15-39.25 m	砂礫層	沖積基底礫層	更新世	河川	B, Si
44.34-44.46 m	シルト質砂層	下総層群	更新世	汽水~海成	As, Al, Ni, Cu, Se

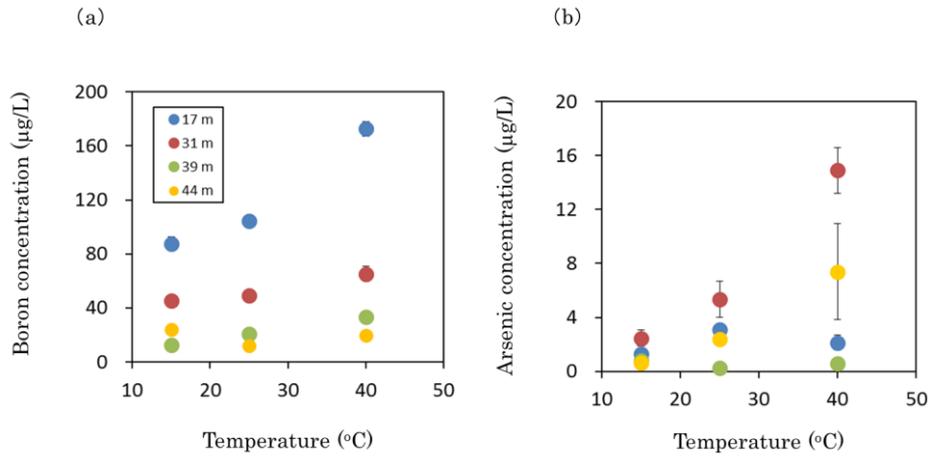


図 3-5-2 (a)ホウ素および(b)ヒ素の溶出試験結果(溶出試験は、600 時間程度まで実施しており、これらの結果は、200 時間以降の平均溶出量 (n=15)である。図中のエラーバーは、その標準偏差を示している) (斎藤ほか、投稿準備中より引用)

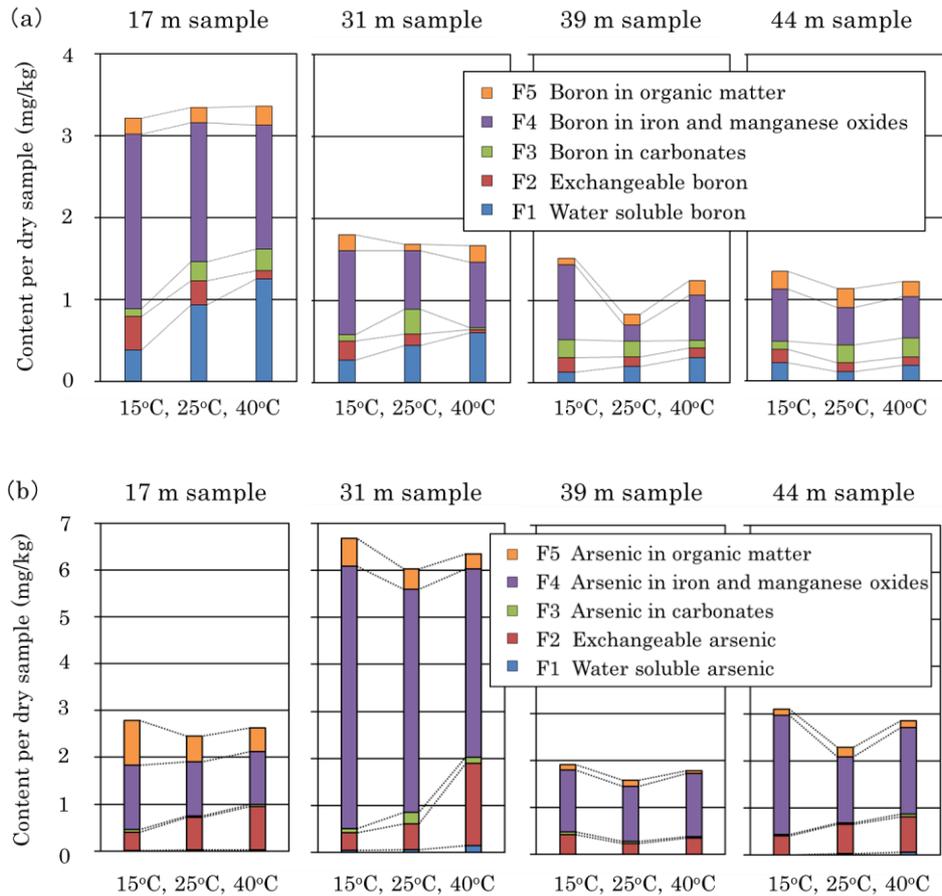


図 3-5-3 (a)ホウ素および(b)ヒ素の存在形態別分析結果(鉱物態由来成分を除く) (斎藤ほか、投稿準備中より引用)

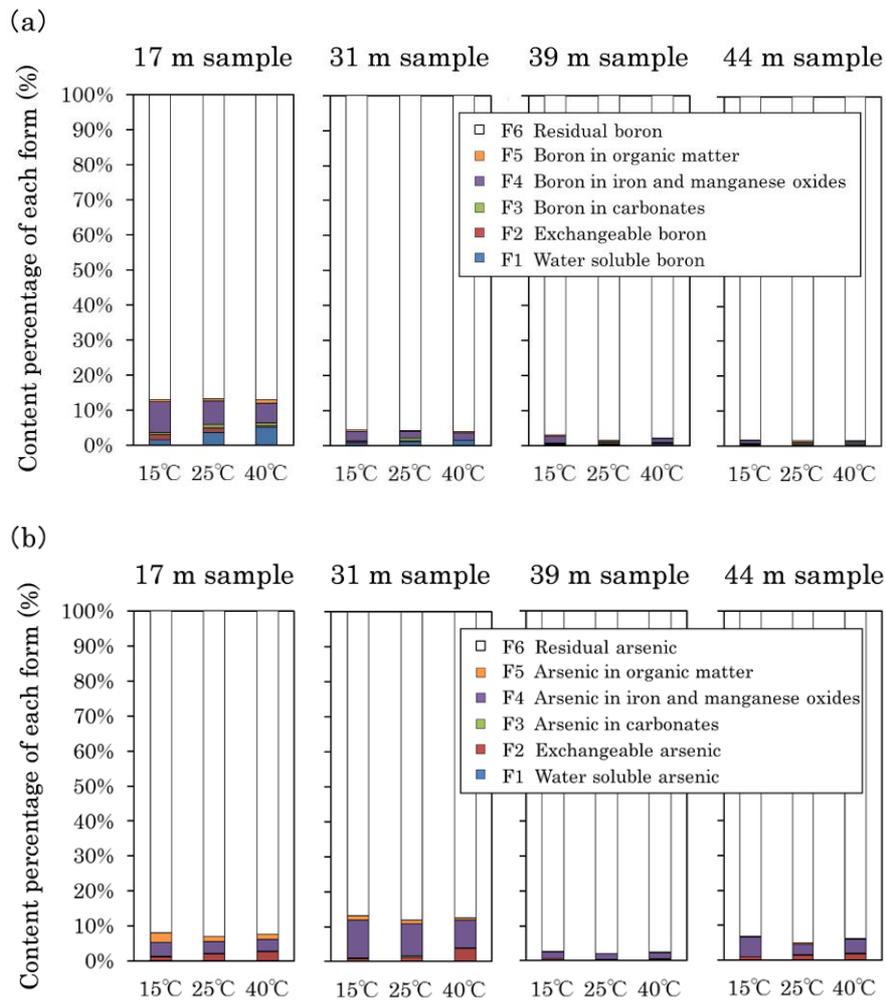


図 3-5-4 (a)ホウ素および(b)ヒ素の存在形態別分析結果(鉱物態由来成分を含む)  
(斎藤ほか, 投稿準備中より引用)

## 6. 研究項目 1-6:室内試験による地圏熱環境の変化が微生物叢に与える影響-地圏熱・地下水利用による地圏環境変化の把握-(埼玉大学グループ 大西班)

### (1) 研究のねらい

室内試験により地圏熱利用時の地圏の温度環境を再現し、異なる温度環境が微生物叢に与える影響を明らかにする。

### (2) 研究実施方法

埼玉大・日大・農工大の 3 サイトで採取した 9 種類のコア試料を異なる温度環境下(5, 15, 25, 40°C)で保存し、一定期間(6 ヶ月, 12 ヶ月)後に DNA を抽出して、微生物叢の変化を PCR-DGGE で調べた。現場の温度に近い 15°C を基準とし、5°C を低温環境, 25, 40°C を高温環境とした。40°C のサンプルについては、長期の保存期間中での蒸発によってコア試料中の水分含量が変化してしまったため、参考データとした。

### (3) 研究成果

微生物叢についての PCR-DGGE の結果から、程度の差はあるが全てのコア試料のバクテリア群集構造において、初期試料からの変化が認められた(図 3-6-1, 3-6-2, 3-6-3)。埼玉大サイトの深度 17, 30 m 試料については、異なる温度間でバクテリア群集構造はあまり変わらなかったが、深度 43 m 試料では温度によって大きく異なっていた(図 3-6-1)。日大サイトの試料では、バクテリア群集構造が保存温度によって異なっていたが、6 ヶ月後と 12 ヶ月後を比較してもほとんど変化が見られなかった(図 3-6-2)。農工大サイトでも温度によってバクテリア群集構造が異なっており、特に高温側の 25°C(および 40°C)で大きな変化が見られた(図 3-6-3)。

個々のバクテリアについて見ると、農工大サイトの深度 14 m 試料では高温側で *Aquamicrobium* や *Parvibaculum* といった通性嫌気性バクテリアが増加し、*Pedobacter*, *Acidovorax* などの好気性バクテリアが減少していた。一方、日大サイトの深度 40 m 試料では高温側で嫌気性バクテリアが減少し、好気性バクテリアが増加するという全く逆の現象が起こっていた。以上の結果から、堆積物中の微生物叢は温度変化の影響によって変化することが明らかとなった。また、微生物叢がどのように変化するかは、初期の微生物叢や堆積物の種類によって異なることが示唆された。

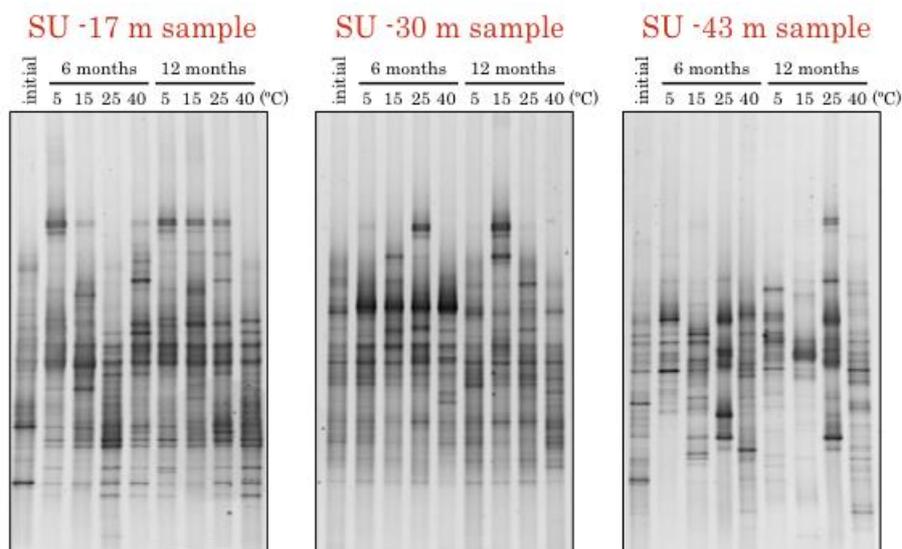


図 3-6-1 異なる温度で保存したコア試料中のバクテリア群集構造の変化  
(埼玉大サイト, 深度約 17, 30, 43 m)

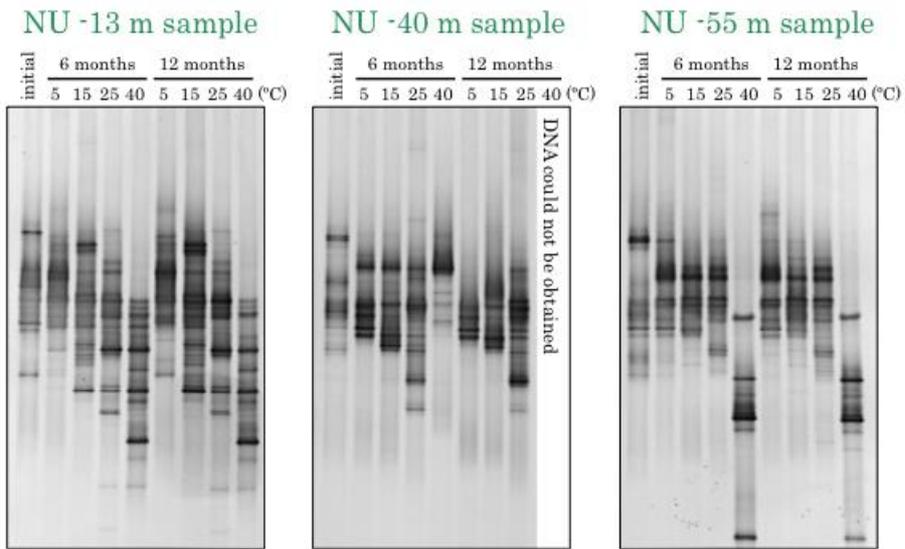


図 3-6-2 異なる温度で保存したコア試料中の細菌群集構造の変化  
(日大サイト, 深度約 13, 40, 55 m)

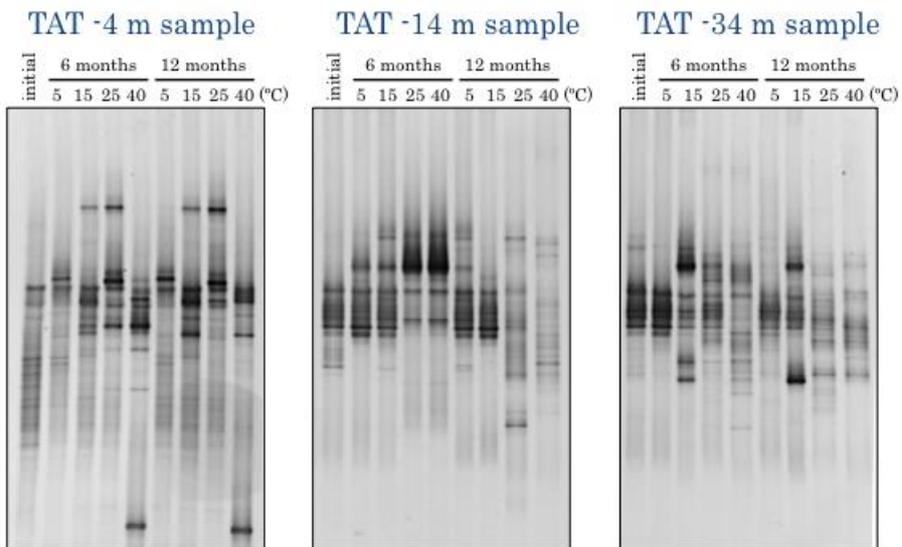


図 3-6-3 異なる温度で保存したコア試料中の細菌群集構造の変化  
(農工大サイト, 深度約 4, 14, 34 m)

## 7. 研究項目 1-7:室内試験による地圏熱環境の変化が力学特性に与える影響-地圏熱・地下水利用による地圏環境変化の把握-(東京農工大グループ)

### (1) 研究のねらい

飽和・不飽和地盤の力学特性の温度依存性について、現場観測サイトで採取したコア試料やかく乱試料を用いて調べ、温度依存性の予測モデルを構築する。

### (2) 研究実施方法

模擬試料および採取したコア試料を用いて、異なる温度環境下での力学試験(三軸圧縮試験、加熱・冷却試験)を実施し、力学特性の温度依存性について調べた。

### (3) 研究成果

地盤の力学特性の温度依存性把握のため、平成 23 年度に農工大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(図 3-7-1)。試験機は次のような特徴を持ち、温度制御が可能となっている。(1) 供試体の体積変化量の測定に、二重セルによる外体積法を用いる。内セルの上部は円筒状の中心部分とその周りに水槽が設けられている。この水槽の水位がリファレンス水位となる。中心部分は外セルに解放されていて、その部分の水位が内セルの水位となる。体積変化は、内セルの水位とリファレンス水位との水圧差を高感度差圧計で計測する。(2) 温水は外セルと内セルで独立に循環できる。温度設定時には通常両セルの水を循環して、設定温度にする。試験中は体積変化の測定が必要となるので、外セルの水のみを循環し、一定温度を保持する。(3) ペDESTALには空気侵入値 100 kPa のセラミックディスクを、キャップには撥水性のフィルターを設け、サクシオンを作用できるようにしている。

シルト質の DL クレイを、飽和および不飽和状態で温度特性を見るために、サクシオンおよび温度一定条件下での三軸圧縮試験および加熱と冷却による体積変化を調べるための加熱・冷却試験を行った。供試体の寸法は直径 5cm、高さ 10cm である。締固め時の含水比は 17% である。三軸圧縮試験では、緩詰め(乾燥密度 $\rho_d = 1.30\text{g/cm}^3$ )と密詰め( $\rho_d = 1.50\text{g/cm}^3$ )の供試体を用いた。供試体は所定の乾燥密度になるように 5 層に分けて締固めた。試験で用いたネット拘束圧 $\sigma_{3net}(= \sigma_3 - u_a)$ は 50 kPa と 100 kPa、温度  $T = 20, 30$  および  $40^\circ\text{C}$ 、サクシオン  $s(= u_a - u_w) = 0, 20$  および 50 kPa であった。ここに、 $\sigma_3$ は最小全主応力、 $u_a$ は間隙空気圧、 $u_w$ は間隙水圧である。供試体を所定の温度に作用後、サクシオンと拘束圧を所定の圧力に調整した後、圧密を行った。圧密終了後、軸ひずみ 0.02 %/min の速度で、サクシオン一定条件(排気・排水条件)下でせん断を行った。加熱・冷却試験では密詰めの供試体を用いて、拘束圧は 0, 100 kPa の 2 拘束圧、サクシオンは 0, 50 kPa の 2 サクシオンとした。温度の上昇および下降幅は  $5^\circ\text{C}$  とし、作用温度の範囲は  $25 - 60^\circ\text{C}$  で、一温度当たり 12 時間作用した。

試験結果の一部を図 3-7-2 および 3-7-3 に示す。図 3-7-2 は密詰め供試体の三軸圧縮試験の結果である。密詰め試料においては、ピーク強度は温度の影響を受け、温度の低い供試体程大きな強度を示したが、完全軟化強度である限界状態強度(Critical state)では、密詰め、緩詰めに関わらず温度の影響はほとんど受けなかった。加熱・冷却試験の結果を図 3-7-3 に示す。一定ネット拘束圧(100kPa)でサクシオンの異なる場合と、一定サクシオン(50kPa)でネット拘束圧の異なる場合の結果を示す。いずれの場合でも、加熱によって体積膨張が生じ、冷却によって体積収縮が生じている。加熱と冷却による体積ひずみ～温度関係は非線形で、ヒステリシスを描くこと、および加熱により生じた体積ひずみは若干の残留ひずみが生じるものの、冷却によってほとんど回復することが、この実験から得られた共通の性質である。実験では、 $35^\circ\text{C}$ の上昇で体積膨張が 1.8%程度となり、体積膨張率は  $5.1 \times 10^{-4}$  となった。水の体積膨張率は  $2 \times 10^{-4}$ 、ナトリウムは  $2.5 \times 10^{-4}$ 、パラフィンやゴムでは  $3.3 \times 10^{-4}$  であり、それとくらべて大きめの値となった。実験では、土供試体を設置しない状態で何回かのキャリブレーションを実施したが、今回の測定ではそのこの試験機のもつ機構的な誤差を十分にとれていない可能性もあるものの試験結果の再現性は確認した。今回の実験範囲では、ネット拘束圧およびサクシオンの違いによる差異はそれほど大きくなかった。このことから、以下のような弾塑性モデルを提案することによってそのモデル化は可能であると考えられる。つまり、

温度による二つの効果を考慮すればよい。それらは、①温度の上昇による弾性体積ひずみの増加、および②温度の上昇による降伏応力の低下、である。このモデルに対して定性的な検証を行った結果、定性的にそれらの挙動を説明できた。-

さらに、ボーリング抗から得られた不かく乱試料を用いてせん断試験を行い、現場試料の力学特性の温度依存性を明らかにした。実験には、東京農工大学府中キャンパスでボーリング採取された不攪乱試料のうち、深度 29~30 m, 33~34 m のものを用いた。今回用いた不攪乱土の粒度分布を表 3-7-1 に示す。ボーリングコア試料の一部を取り出し、直径 5 cm, 高さ 10 cm となるように整形した。これを温度調整型三軸圧縮試験機に設置し、圧密排水条件下で実験を行った。供試体作製時の初期条件および実験条件を表 3-7-2 に示す。

試験手順は次の通りである。供試体を三軸室に設置後、供試体に所定の温度を作用させ、初期拘束圧としてセル圧 10 kPa をかけた。次に、セル圧 10 kPa, 間隙水圧 10 kPa で通水後、セル圧を 210 kPa に調節し、間隙水圧 200 kPa で背圧をかけ、供試体を飽和した。有効拘束圧が 210 kPa になるようにセル圧を 410 kPa まで上昇させ、圧密を行った。圧密終了後、軸ひずみ速度 0.03 %/min でせん断を行った。

温度 20 °C 一定条件における、深度ごとの軸ひずみ  $\epsilon_a$ -主応力差軸差応力  $q(=\sigma_1-\sigma_3)$  関係を図 3-7-4 に、軸ひずみ  $\epsilon_a$ -体積ひずみ  $\epsilon_v$  ( $\epsilon_a-\epsilon_v$ ) 関係を図 3-7-5 に示す。ここで、 $\sigma_1$  は最大主応力、 $\sigma_3$  は最小主応力である。各深度で主応力差軸差応力のピークが見られ、ひずみ軟化に伴って体積膨張を生じ、不攪乱土は過圧密的な挙動を示した。また、各深度で初期剛性勾配と限界状態での強度が同じであった傾向を示した。さらに、深度によって差軸差応力のピークと体積ひずみの挙動が異なり、33~34 m の試料は 29~30 m の試料よりピーク強度が大きく、体積膨張が大きくなる傾向を示した。これについては、33~34 m の試料の方が大きな乾燥密度を持つが大きいと考えると考えられる。

次に、深度 29~30 m における、温度が異なる場合 (20 °C, 40 °C) の  $\epsilon_a-q$  関係を図 3-7-6,  $\epsilon_a-\epsilon_v$  関係を図 3-7-7 に示す。軸差応力に関して、多少のばらつきはあるものの、温度の影響はほとんど見られなかった。体積ひずみに関しても、温度の低い供試体ほど膨張した結果となったものの、試料間のばらつきが大きくかく乱試料と比較して明確な温度依存性の傾向を確認することはできなかった。かく乱試料による結果と、不かく乱試料による結果で大きな齟齬は見られないものの、かく乱試料による温度依存性と同様の特性を不かく乱試料でも確認するに十分な結果は得られなかった。

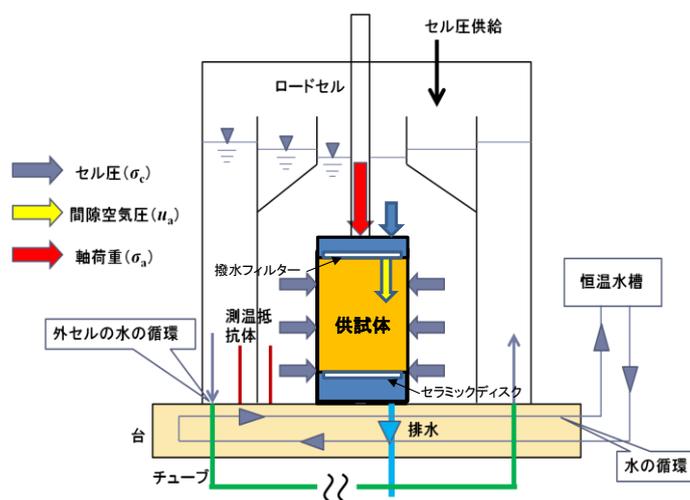


図 3-7-1 三軸室詳細図

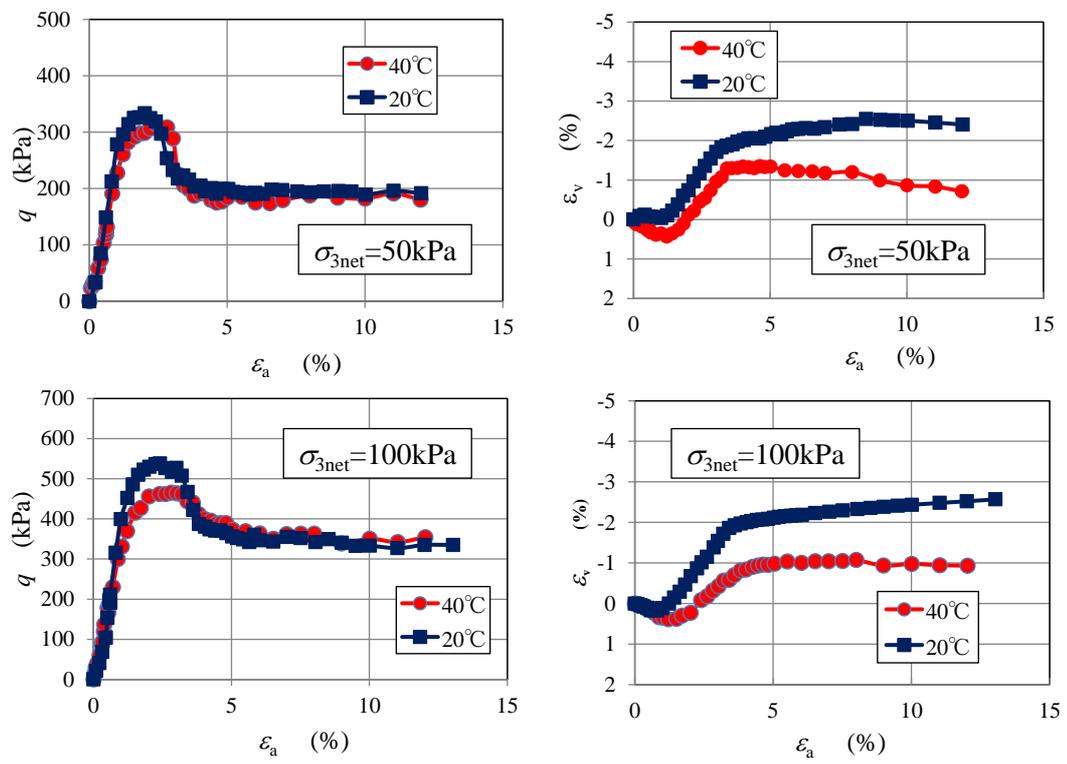
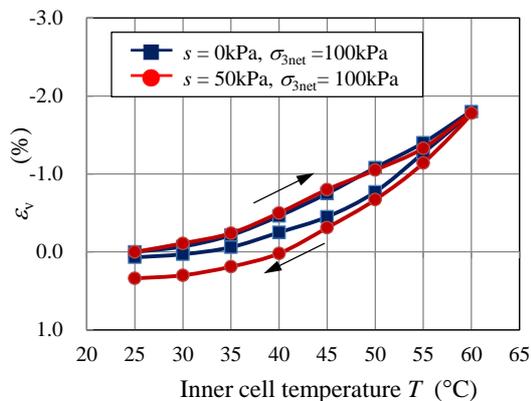


図 3-7-2 密詰め供試体の三軸圧縮試験結果 ( $\sigma_{3net}$  は正味の拘束圧を示す)

(a)



(b)

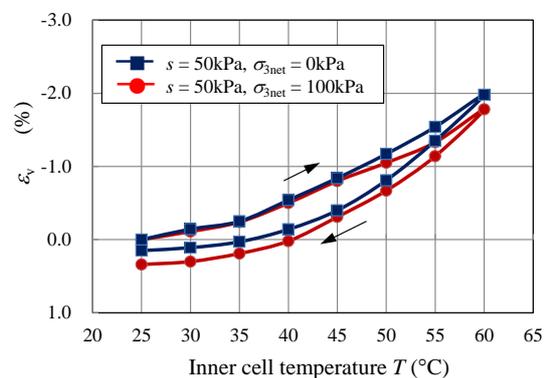


図 3-7-3 加熱・冷却試験結果:温度一体積変化関係  
(a)作用サクシヨンの違い (b)作用拘束圧の違い

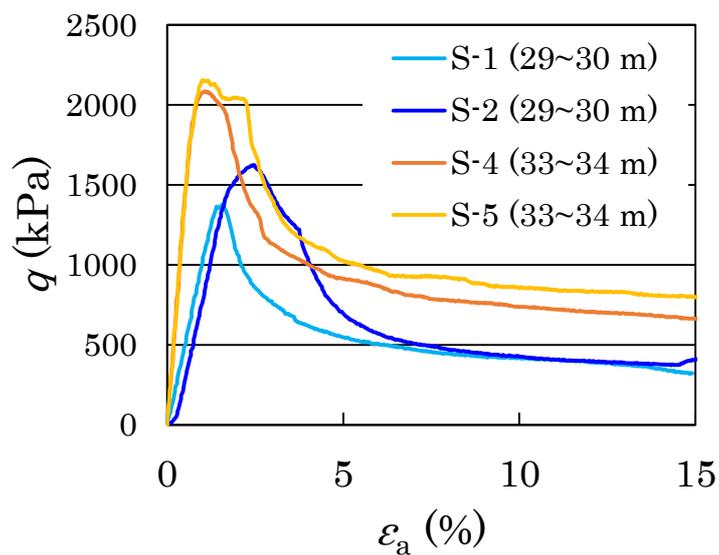


図 3-7-4 20 °Cにおける $\epsilon_a - q$ 関係

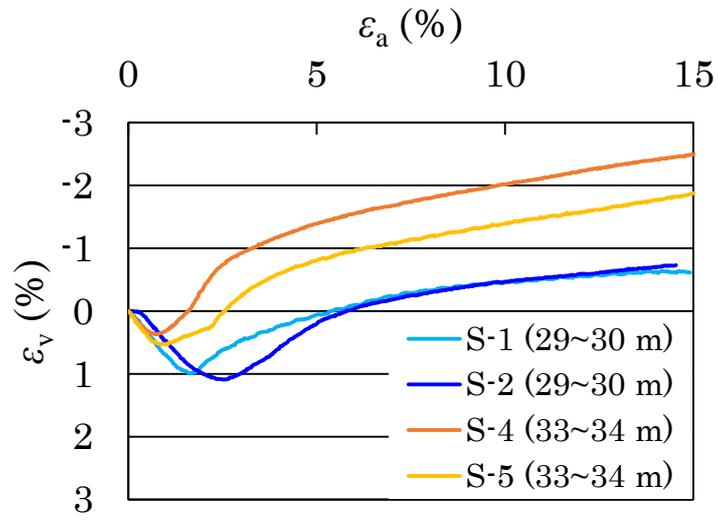


図 3-7-5 20 °Cにおける $\epsilon_a - \epsilon_v$ 関係

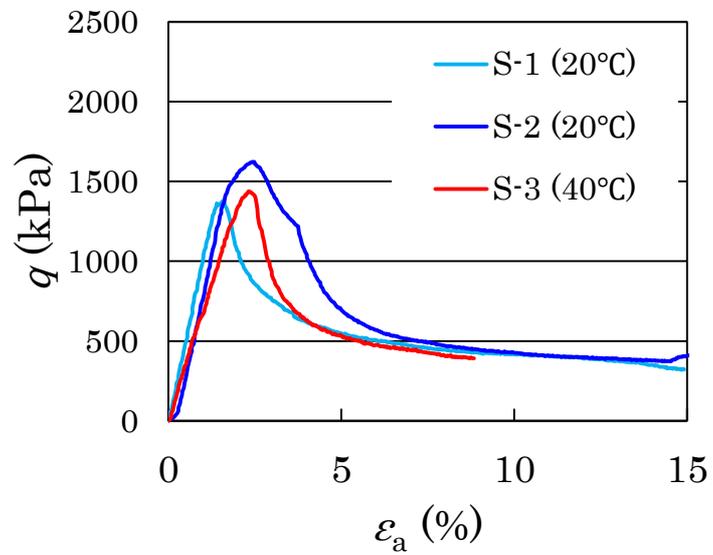


図 3-7-6 温度が異なる時の $\epsilon_a - q$ 関係

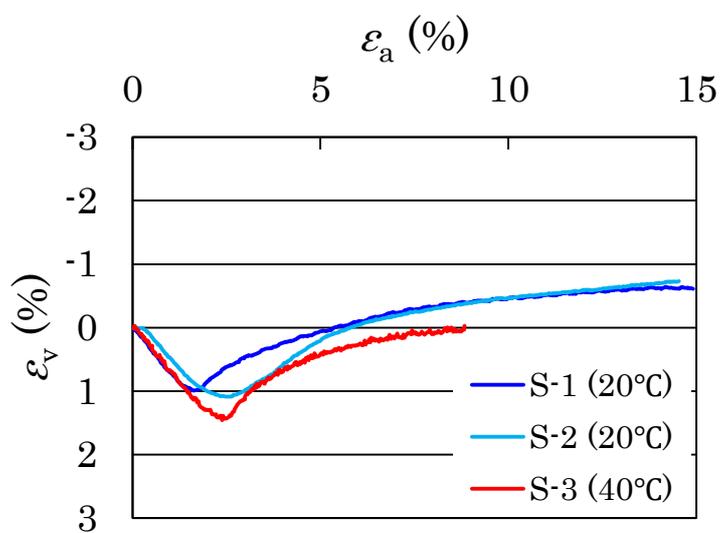


図 3-7-7 温度が異なる時の $\varepsilon_a - \varepsilon_v$ 関係

表 3-7-1 供試体の粒度分布

深度 (m)	sand (%)	silt (%)	clay (%)
29~30	82.0	14.9	3.1
33~34	97.9	2.1	0.0

表 3-7-2 供試体の初期条件

供試体 番号	深度 (m)	温度 (°C)	初期含水比 (%)	乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	土粒子密度 (g/cm <sup>3</sup> )	間隙比
S-1	29~30	20	41.9	1.15	2.708	1.36
S-2	29~30	20	47.7	1.12	2.646	1.42
S-3	29~30	40	47.5	1.09	2.684	1.39
S-4	33~34	20	14.2	1.62	2.668	0.64
S-5	33~34	20	15.5	1.56	2.624	0.69

## 8. 研究項目 2-1:3 次元地質構造のモデル化-環境アセスメントツール開発-(日本大学グループ)

### (1) 研究のねらい

少数のボーリングデータから坑間や、より広い領域にスケールアップするために必要となる地質の水平方向へのつながりを評価する手法を確立することが目的である。また、本研究で作成する 3 次元地質構造モデルは「物質輸送係数の予測モデルおよび物質・熱連成解析モデル」(アセスメントツール)で使う初期データの一つとなる。

### (2) 研究実施方法

より広い領域でのモデルを作成するため、建築確認申請用の自治体保有のデータなどを条件付きで収集し、デジタル化した後に、礫の連続性などの評価や有効熱伝導の空間分布を評価した。また、水平方向の連続性の評価は地質的な解釈を加えると共に地球統計学的手法を用いて行った。

### (3) 研究成果

世田谷区・東京都・埼玉県から合計 2 万点ほどの既存ボーリングデータを収集し、デジタル化を行った。次に、各ボーリングデータに対して岩相区分の確認を行った。ここで、同一の岩相であっても堆積年代の違いにより層順が異なるため併せて固結度の指標となる N 値を参照しつつ堆積年代を反映させた岩相の区分をおこなった。それぞれのボーリングデータは座標、標高、1 m おきの N 値と岩相、地形分類による段丘面を項目としたデータテーブルとしてまとめた。

3次元地質構造モデルは水平方向を  $xy(m)$ 、鉛直方向を  $z(m)$  とした要素を対象とする領域に水平方向に  $i \times j$  (個) 並べ、さらに鉛直方向に  $k$  (個) 積み重ねた 3次元グリッドとした。各要素にデータテーブルから岩相データを割当ててすることで、3次元地質構造モデルを作成することができる。ここで、1つの要素に複数のボーリングデータがある場合はその平均的な値を割り当てた。また、多くの場合、領域内のすべての要素にボーリングデータを割り当てることができないため、ボーリングデータの個数密度が小さい領域では空白となるグリッドは **Kringing** 法にて補完を行った。3次元地質構造モデルはボーリングデータが設定する領域内に存在していれば、任意の領域で作成可能である。ここで、設定する領域内の要素のサイズはボーリングデータの個数と求める推定精度に依存する。ボーリングデータが空白となるグリッドが多くなれば、当然ながらその推定精度は低下する。

ここでは、自治体からの許可を受けている世田谷区の事例をあげる。対象とする領域は約  $8km \times 8km$  の領域であり、領域内に 7512 本のボーリングデータが点在している。それぞれの要素は水平方向を  $200 m \times 200 m$ 、深さを  $1m$  とし、積み重ねることで 3次元グリッドを作製した。ボーリングデータの到達深度はそれぞれ異なるため、ここでは、地表面から標高-17m までを鉛直方向の領域とした(領域内の最高地点と最低地点の標高は約  $50m$  と  $9m$  である)。ここで、標高-17m に満たないボーリングデータに関しては水平方向の近傍データを用いて **Kriging** 法にて補完し、すべてのボーリングデータが地表面標高から-17m までデータを持つよう鉛直方向に補完した。図 3-8-1(a)には地表面にある各要素に入るボーリングデータの数がまとめられている(空白部はボーリングデータの存在しないグリッドである)。本地域では空白域となるグリッドの数が少ないため要素の水平方向の補完は行わず、水平方向への推定のない実データに基づいたモデルとした。図 3-8-1(b)と(c)は、各要素にある岩相データを用いて、要素内における地表面から一層目の礫層厚と粘土層厚をプロットしたものである。礫層は、北西から南東にかけて帯状に連続して分布しており、これは、図 3-8-1(e)の地形区分を参照すると武蔵野礫層に相当している。また、本地域での礫層の帯状の分布は過去の河川流向を反映しており、北西を上流とした扇状地堆積物であると推定できる。また礫の存在しない地域は下末吉面であり礫がないかわりに厚い粘土層が堆積している。図 3-8-1(d)にはグリッドごとに算定された平均有効熱伝導率を水平面上にプロットしたものである。ここで、平均有効熱伝導率は、それぞれのグリッドに岩相ごとに既知の有効熱伝導率(ローム層:  $1.20 W/mK$ , 粘土:  $1.27 W/mK$ , 砂礫:  $2.00 W/mK$ , 砂:  $1.60 W/mK$ , シルト:  $1.50 W/mK$  (Takemura et al., 2016))を割り当て、鉛直方向に平均をとったものである。図 3-8-1(e)の地

形区分と合わせてみると、平均有効熱伝導率の分布は地形区分と調和的であるといえよう。このことは、地形区分は地中熱ヒートポンプシステム導入時の目安の一つとなり得ることを示唆している。また、グリッド内のボーリング密度が高い箇所については、岩相の連続性の推定精度が高いため、地域レベル(200-500 m の領域)での 3 次元地質構造モデルを作成した。これらのモデルは環境アセスメントツールへ提供できる形式となっており、ここでは 3 大学のキャンパスを対象として作成した。

図 3-8-2 は、不圧地下水の主要な流れ場となる礫層について、その連続性を広域的に評価したものである。データは上述のデータテーブルを用いて各ボーリングデータの礫層上面標高を抽出したものである。解析した領域は東京区部西南部から多摩東部とし、主として武蔵野礫層についての連続性の評価を行った。ボーリングデータは全 8510 点である。ボーリング密度が低い地域があるため、ボーリングデータのない要素は河川古流向(北西-南東方向)に重み付けした **Kriging** 法に水平方向を補完した。また、ここでは礫層標高分布は要素ではなく等高線で表示した。図 3-8-2 から武蔵野礫層は、北西から南東に扇状地状に分布しており、かつ連続性が非常に高く、標高差(水頭差)で 5km につき 10m ほどの勾配であることが確認された。このような 3 次元で表示される地質情報(3 次元地質情報)は我が国においては、未だ整備されておらず、埼玉県南部から東京区部にかけての低地部(中川低地から東京低地)で公開されているのみである。3次元地質構造モデルは地下水を扱う上で支配的な情報であることより、今後、より汎用性の高い形式(3次元グリッドデータ)での情報公開を自治体と協力した上で行う必要がある。

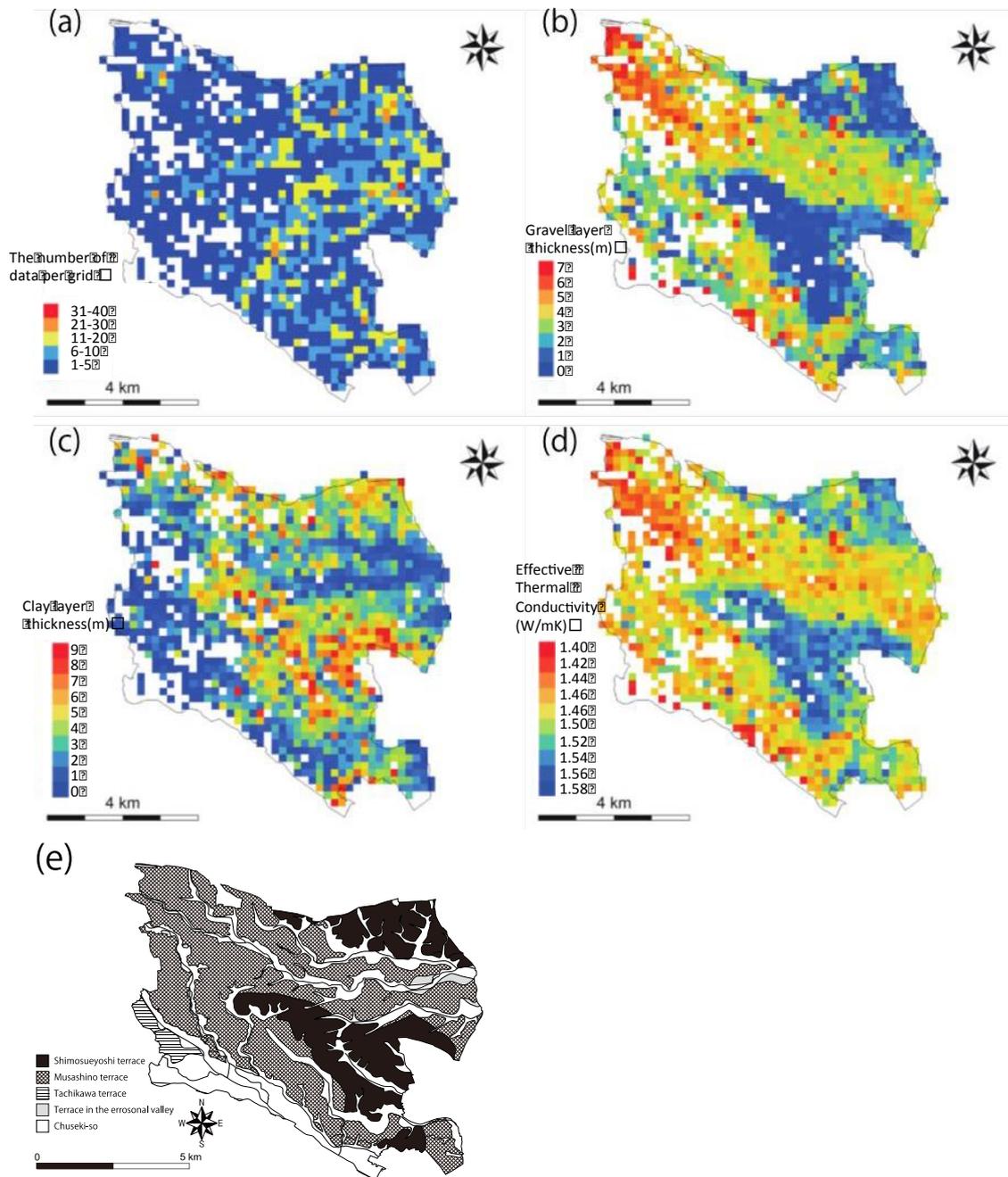


図 3-8-1 世田谷区での有効熱伝導率分布 (植村ほか, 2015, 都市社会研究より引用)

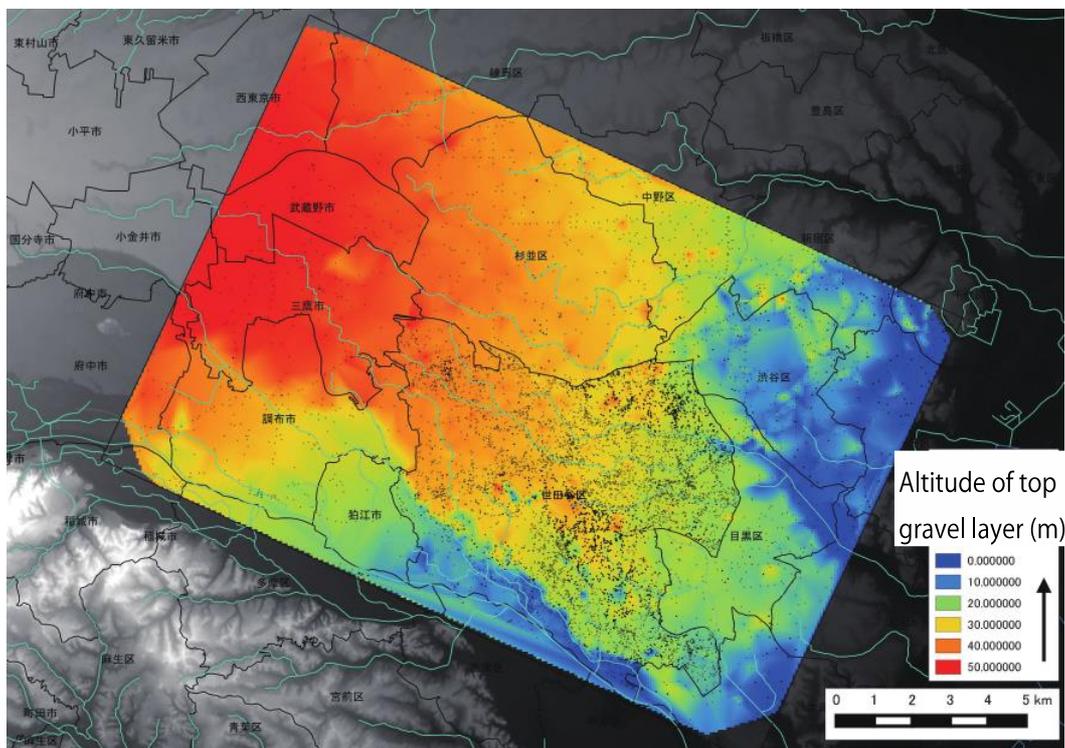


図 3-8-2 東京区部西南部から多摩東部にかけての礫層の分布

引用文献

Takemura, T., Sato, M., Chiba, T., Uemura, K., Ito, Y., Funabiki, A., 2016, Effect of sedimentary facies and geological properties on thermal conductivity of Pleistocene volcanic sediments in Tokyo, central Japan. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, in press.

植村杏太, 高野洋一, 竹村貴人, 2015, 世田谷区における地下地盤情報に基づく再生可能エネルギーとしての地中熱のポテンシャル評価, 都市社会研究, 7, 153-161.

## 9. 研究項目 2-2: 物質輸送係数の予測モデル提案-(埼玉大学グループ小松班)

### (1) 研究のねらい

地圏の物質・熱輸送を支配する各種輸送係数を測定し、地圏熱環境の変化を考慮した新たな物質・熱輸送係数モデルを提案する。

### (2) 研究実施方法

室内試験と同様、現場観測サイトから採取したコア試料を用いて、地圏の物質・熱動態を支配する物質・熱輸送係数(例えば、水:透水係数, ガス:ガス拡散係数, 溶質:溶質拡散係数, 熱:熱伝導度・熱容量など)を測定し、これらの物質・熱輸送係数の予測モデルを構築した。各種物質・熱輸送係数の予測モデルには、地盤の物理特性(水飽和度や全間隙率など)に加え、地圏熱利用による影響因子として地温を変数として加えた。

### (3) 研究成果

本研究プロジェクトで対象とする3サイト(埼大・日大・農工大)から採取したコア試料の溶質分散(拡散)係数, 透水係数, 熱伝導率等の物質・熱輸送係数を室内試験で測定した。熱伝導率については、地盤の含水比および乾燥密度を関数とする簡便な予測モデルを構築した。構築した熱伝導率予測モデルを用いて、埼大構内での短期熱負荷試験結果に対する高い再現性を得ることができた(図 3-9-1)(Saito et al., 2014, Soils and Foundations)。

透水係数と溶質拡散係数については、基準温度での物質輸送係数に対して水の粘性係数の変化率を考慮することで、任意温度での物質輸送係数を概ね予測できることが分かった。一方で、溶質分散係数の温度依存性については、異なる試料で一貫した傾向が見られず、予測モデルの検討は困難であった。引き続き実験データを蓄積し、温度環境を考慮した簡便でより精度の高い物質輸送係数予測モデルの構築を試みるなど今後の検討課題を残した。

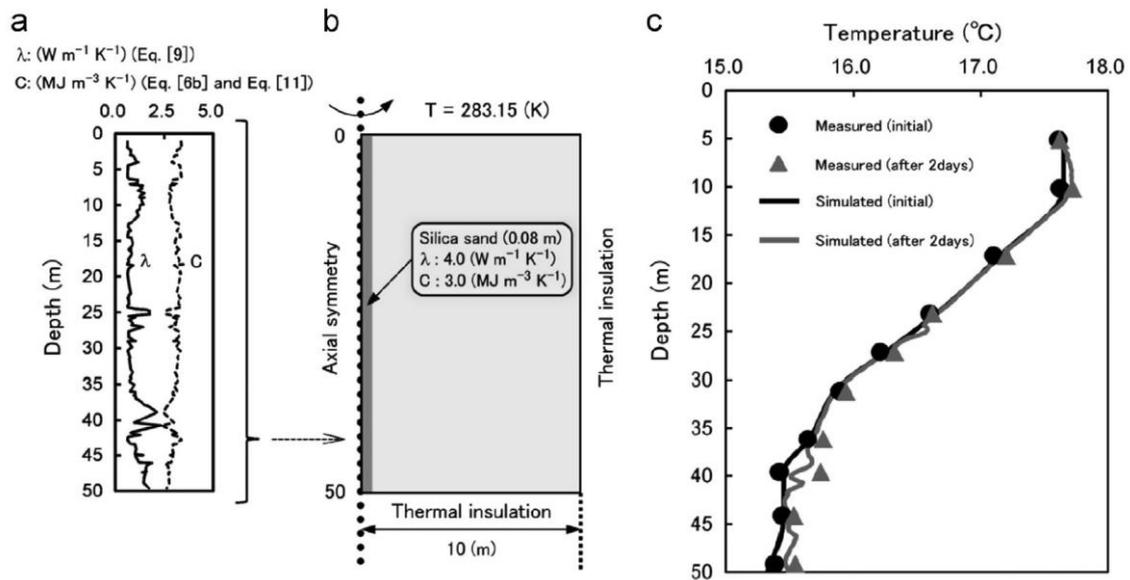


図 3-9-1 構築した熱伝導率予測モデルを用いた短期熱負荷試験中の地温分布(熱源から水平距離で 1 m の地点)シミュレーション結果(Saito et al., 2014, Soils and Foundations より引用)。

## 10. 研究項目 2-3:地圏微生物叢の評価手法提案-環境アセスメントツール開発-(埼玉大学グループ大西班)

### (1) 研究のねらい

地圏熱利用施設の設置前の環境アセスメント、稼働中の環境影響解析において、地圏熱・地下水利用が地圏の微生物動態に及ぼす影響を評価するためのツールを構築する。

### (2) 研究実施方法

継続的な現場試験から得られた微生物動態観測結果と温度制御下での室内試験による微生物分析から、地圏の微生物活動の温度応答性についての評価手法を構築した。

### (3) 研究成果

温度応答性について最も汎用性および有効性が高い評価方法として、地下水中の微生物数をリアルタイム PCR で調べる方法と、地下水中の微生物叢を PCR-DGGE で調べる方法とを確立した。リアルタイム PCR は特定の系統の微生物を定量的に検出でき、対象生物に合わせてプライマーを設計することで様々な生物に対応することが簡単にできる。温度変化によって対象となる微生物の数がどのように変動するかモニタリングするために有効である。PCR-DGGE は試料中に含まれる主要な微生物の組成を明らかにすることができる。次世代シーケンサーと比較すると検出感度や定量性が低いが、安価で迅速な解析が可能であり経時的なモニタリングに向けた技術である。また、現場での長期熱負荷試験（研究項目 1-3）と室内での堆積物保存試験（研究項目 1-6）から、温度変化の影響を受ける微生物種を特定した(表 3-10-1)。これらの微生物種の動態解析を上記の二つの評価方法を用いて行うことで、地圏熱・地下水利用が微生物叢に与える影響を評価することができると考えられる。

表 3-10-1 温度変化によって影響を受けた微生物一覧

微生物分類群	温度上昇過程*	温度下降過程*	実験方法**	備考
完新統沖積層（海成層）				
<i>Cloacibacterium</i> 属/バクテリア	+	-	NGS	
<i>Dehalococcoidales</i> 目/バクテリア	+	-	NGS	
<i>Hyphomicrobium</i> 属/バクテリア	+	-	NGS	
<i>Pelobacteraceae</i> 科/バクテリア	+	-	NGS	
<i>Pseudoxanthomonas</i> 属/バクテリア	+	-	NGS	
<i>Spirochaetaceae</i> 科/バクテリア	+	-	NGS	
<i>Polynucleobacter</i> 属/バクテリア	-	△	NGS	
<i>Rikenellaceae</i> 科/バクテリア	+	-	PCR-DGGE	嫌気性
<i>Sulfuricurvum</i> 属/バクテリア	+	△	PCR-DGGE	嫌気性
<i>Thermoplasmata</i> 綱アーキア	△	+	PCR-DGGE	
<i>Euryarchaeota</i> 門アーキア	△	+	PCR-DGGE	
更新統沖積層（非海成層）				
<i>Hydrocarboniphaga</i> 属/バクテリア	+	-	NGS	
<i>Methanobacterium</i> 属アーキア	+	-	NGS	メタン生成菌
<i>Desulfomonadales</i> 目/バクテリア	-	△	NGS	
<i>Magnetospirillum</i> 属/バクテリア	-	△	NGS	
<i>Methylophilates</i> 目/バクテリア	-	△	NGS	
<i>Rikenellaceae</i> 科/バクテリア	+	-	PCR-DGGE	嫌気性
更新統上総層群（非海成層）				
<i>Chryseobacterium hominis</i>	+	※	PCR-DGGE	好気性
<i>Moraxella osloensis</i>	+	※	PCR-DGGE	好気性
<i>Novosphingobium subterraneum</i>	+	※	PCR-DGGE	好気性
<i>Sediminibacterium</i> 属/バクテリア	+	※	PCR-DGGE	好気性
<i>Sphingobium xenophagum</i>	+	※	PCR-DGGE	好気性

\* (+ : 存在量増加, - : 存在量減少, △ : 変化なし, ※ : 未検討)

\*\* (NGS (次世代シーケンサー解析), PCR-DGGEによる解析結果から)

## 11. 研究項目 2-4:物質・力学・熱連成解析モデルの構築-環境アセスメントツール開発-(東京農工大グループ)

### (1) 研究のねらい

熱的かく乱に伴う地圏環境の変化(温度・水質)および地盤の変位を予測するためのシミュレーションツールの開発を行う。

### (2) 研究実施方法

熱的かく乱に伴う地圏環境の変化を予測するためのアセスメントツールとして、3次元地質構造モデルや物質移動に関するパラメータの温度依存性を導入した水・熱・溶質連成解析モデルを提案した。構築したモデルを用いて現場試験で得られた長期観測データを再現し、モデルの有効性を検証した。

### (3) 研究成果

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、平成24年度は研究項目1-7で得られた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(向後ら, 2013, 農業農村工学会論文集)。モデルでは、①温度の上昇による弾性体積ひずみの増加、および②温度の上昇による降伏応力の低下、の二つの温度の影響を考慮した。また、水・熱同時移動モデルにより、平成23年度実施した短期熱応答試験(TRT試験)および平成24年度に実施した長期熱応答試験の解析を行った。TRT試験における熱交換過程は、地盤、U-tube、熱交換井の充填剤(グラウト)に対しては3次元熱伝導方程式(式3-11-1)を適用し、U-tube内を循環する熱媒体には1次元熱移流方程式(式3-11-2)を適用し解析した。

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S \quad (\text{式 3-11-1})$$

$$C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial z} \right) - C_f u_f \frac{\partial T_f}{\partial z} + S_f \quad (\text{式 3-11-2})$$

ここで  $C$  は体積熱容量、 $\lambda$  は熱伝導率、 $T$  は温度、 $t$  は時間、 $S$  は熱媒体単位体積当たりの熱の吸込み・湧出し項、 $S$  は U-tube 本体のみに適用される U-tube 単位体積当たりの熱の吸込み・湧出し項、 $u_f$  は熱媒体のフラックス、 $z$  は鉛直方向の座標、下付き文字  $f$  は熱媒体を表す。地盤およびグラウトでは  $S=0$  とした。熱媒体と U-tube との熱交換については、U-tube は薄く瞬時に温度が平衡に達するとして、熱伝達係数  $h$  を用いて、たとえば熱媒体においては次式(式3-11-3)より吸込み・湧き出し項の中で扱った。

$$S_f = \frac{4h}{d_p} [T_p - T_f] \quad (\text{式 3-11-3})$$

ここで、 $d_p$  は U-tube の内径、 $T_p$  は U-tube の温度を表す。 $h$  は熱媒体とそれが接する U-tube の間の熱移動量と温度差の比例定数で、ヌッセルト数  $Nu$  から求められる。これら基礎方程式を有限要素により解き、TRT 試験によるクローズドループ地中熱交換器での熱交換過程を再現し、地盤の成層構造が熱交換に与える影響を明らかにした。また、農工大および埼大での TRT 試験データを用いた解析により、TRT 試験の実施時間がみかけ熱伝導率の推定に与える影響を評価した(斎藤ら, 2014, 土壌の物理性)。具体的には異なる条件下での熱媒体温度の変化量  $\Delta T_{avg}$  を数値解析より求め、線源関数の近似解と漸近解を用い、みかけ熱伝導率  $\lambda_g$  を推定した。その結果、漸近解を用いることで、グラウトの熱伝導率  $\lambda_g$  が地盤の熱伝導率  $\lambda_s$  と大きく異なる場合でも、誤差 5% 以内で試験時間を 20 時間以内に短縮できることがわかった(図 3-11-1)。また、現場 TRT デ

一タの解析により, 上記結果の正当性を評価することができた. なお, 解析に用いた各パラメータの値を表 3-11-1 に示す.

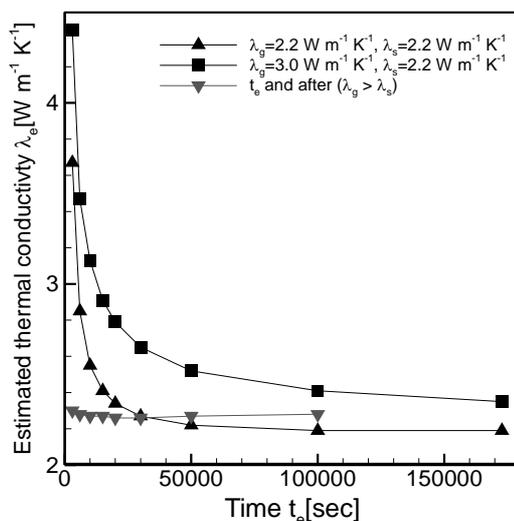


図 3-11-1 任意の時間  $t_e$  までの  $\Delta T_{\text{avg}}$  から漸近解法により推定されたみかけ熱伝導率  $\lambda_e$  と  $t_e$  との関係および任意の時間  $t_e$  以降の  $\Delta T_{\text{avg}}$  から漸近解法により推定された  $\lambda_e$  と  $t_e$  との関係

表 3-11-1 数値計算に用いた各パラメータ値

	TAT	SU
Internal diameter of U-tube, $d_p$ [m]	0.026	0.037
U-tube thickness, $t_p$ [m]	0.003	0.003
U-tube separation distance, $s_p$ [m]	0.052	0.058
U-tube length, $l_p$ [m]	50	50
Fluid flow rate, $U_f$ [l s <sup>-1</sup> ]	9.0	13.5
Fluid velocity, $u_f$ [m s <sup>-1</sup> ]	0.15	0.21
Heat transfer coefficient, $h$ [W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	834.7	1038.1
Initial temperature, $T_i$ [K]	290.15	289.35
Inlet-outlet temperature difference, $\Delta T_o$ [K]	4.5	3.0
Fluid density, $\rho_f$ [kg m <sup>-3</sup> ]	1000	1000
Fluid specific heat, $c_f$ [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	4182	4182
Fluid thermal conductivity, $\lambda_f$ [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	0.58	0.58
HDPE density, $\rho_p$ [kg m <sup>-3</sup> ]	950	950
HDPE specific heat, $c_p$ [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	1800	1800
Diameter of heat exchange well [m]	0.51	0.51

注:TAT は農工大サイト, SU は埼大サイトを指す

埼大サイトで実施している長期熱負荷試験については、2次元地下水・熱同時移動解析により、地下水の流れおよびそれに伴う熱移動を明らかにした。ここでは、採水を実施した帯水層のみに着目し、研究項目 2-1 で構築した 3次元地質構造モデルを直接入力可能な 3次元地下水流動モデルによる解析ではなく、2次元の地下水・熱同時移動解析を行った。解析では、水移動の基礎方程式(式 3-11-4)および熱移動基礎方程式(式 3-11-1)を、FlexPDE を用いて有限要素法により逐次解いた。

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nabla \cdot (K \nabla H) + S \quad (\text{式 3-11-4})$$

ここで、 $H$ は全水頭、 $K$ は飽和透水係数を表す。

解析の際には、観測された熱交換器内の熱媒体平均温度を境界条件とし、地盤の体積熱容量  $C$  および熱伝導率  $\lambda$  については TRT 試験の結果より得られた値を参考とした。物質移動に影響を与える地下水流向・流速については、観測井内の水位より三点推定法 (Sillman and Frost, 1986) を適用して求めた試験期間の流向および動水勾配の変化から推定した (図 3-11-2)。透水係数は現場透水試験の結果を参考にした。予備解析の結果、地下水流速が十分に遅く動水勾配の変動は温度変化の解析結果に影響を与えず、熱分散も無視できることが分かった。一方流向については、50 日前後を除き試験期間を通して一定となった。流向が大きく変動する期間は動水勾配が非常に小さくなっており、結果として観測井間の水位差が小さくなり、流向の推定値が大きく変動したと考えられる。以降の解析では、埼大サイトでの長期熱負荷試験においては、地下水の流向・流速は一定とし、熱分散長はゼロとした。以上より、熱交換井から 1, 2, 5, 10 m 離れた 4 つの観測井 (W1, W2, W5, W10) での、海成層 (GL-17 m) の温度変化を予測したところ、W2 以外では、熱負荷時も回復時も観測値をよく再現し (図 3-11-3)、用いた熱物性値や地下水流動に関するパラメータの妥当性が確認できた。一方 W2 では予測値が観測値を 1~2 度程度上回っており、W2 付近での熱物性値または地下水流動特性が異なることが示唆された。

埼大サイトで実施している長期熱負荷試験において、ホウ素やヒ素などの一部微量元素の地下水中の濃度が温度上昇とともに増加し、熱負荷停止後に温度降下とともに減少したことについて、熱・物質連成移動モデルを用いた解析を行えるようモデルツールの開発について検討した。温度変化に伴う液相濃度の変化については、固相と液相との相互作用 (吸着や溶解) を線形平衡可逆反応と仮定し、線形関係を表す平衡係数  $k$  が温度依存性をもつて次の van't Hoff (ファン・ホッフ) の式 (式 3-11-5) を用いた。このような係数は広義の意味で分配係数であり、以降分配係数とよぶ。

$$k = k_0 \exp \left( B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{293.5} \right) \right) \quad (\text{式 3-11-5})$$

ここで、 $k_0$  は 20°C のときの  $k$  の値、 $B$  は  $k$  の温度依存性の度合を示すパラメータである。この式によると  $k$  は温度上昇とともに小さくなる。温度変化に伴う液相濃度の変化について、移流分散式内の吸込み・湧出し項に導入したところ、式 3-11-6 が得られた。式 3-11-6 の最終項は、分配係数の温度依存性より導かれた項で、温度上昇時はプラス、下降時はマイナスの値をとる。この式を水移動および熱移動の基礎方程式と共に有限要素法により逐次的に解き、温度変化に伴う液相濃度の変化について解析した。

$$\frac{\partial C_l}{\partial t} = \nabla \cdot D_{ij} (\nabla C_l) - \mathbf{q} \cdot \nabla C_l - \frac{\rho_b C_l}{\theta + \rho_b k} \frac{\partial k}{\partial t} \quad (\text{式 3-11-6})$$

ここで  $\theta$  は飽和体積含水率 (または間隙率)、 $\rho_b$  は乾燥密度、 $C_l$  は液相濃度、 $\mathbf{q}$  は水分フラックス、 $D_{ij}$  は溶質分散係数である。

温度境界条件や流向については、図 3-11-3 の解析結果を用い、溶質移動の初期条件としては熱負荷試験前の原位置平均ホウ素濃度の 191 ppb を与えた。ファント・ホッフの式に適切なパラメータ値を与えると、現場で観察された温度上昇に伴う液相濃度の上昇の傾向を概ね再現できた(図 3-11-4)。また、熱負荷停止後に温度が低下した際に液相濃度が低下する現象についても同様に再現できた。このように、分配係数の温度依存性にファント・ホッフ式を用いパラメータの最適化を行うことで、長期地圏熱利用に伴う地下水水質変化予測に用いることができるツールを開発した。

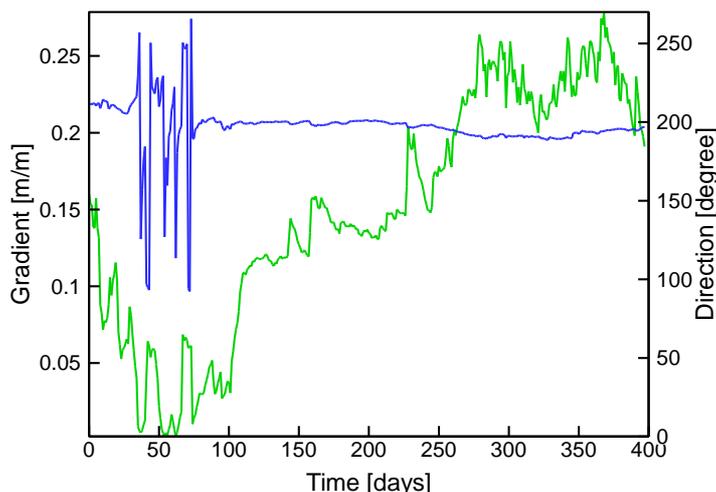


図 3-11-2 埼大での長期熱負荷実験時(熱負荷時と回復時を含む)の観測井の水位から三点推定法によりもとめた動水勾配(緑)および流向(青)。なお流向については北を0度として反時計回りに角度を与えた

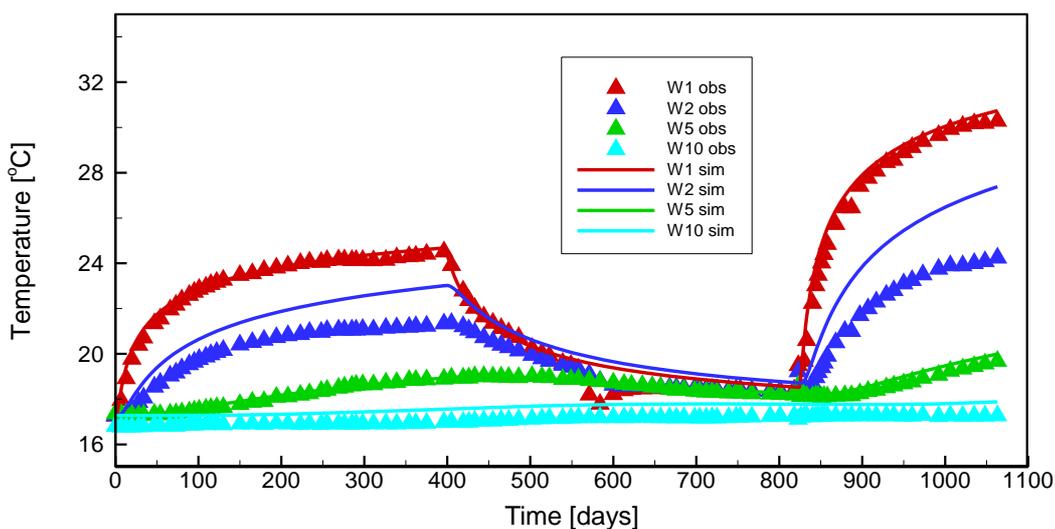


図 3-11-3 埼大での長期熱負荷実験時(熱負荷時と回復時を含む)の観測井における海成層(GL-17 m)の温度変化の実測値(▲と、地下水流向を西から東、流速を  $1.1 \times 10^{-2}$  m/d としたときの計算値(実線)

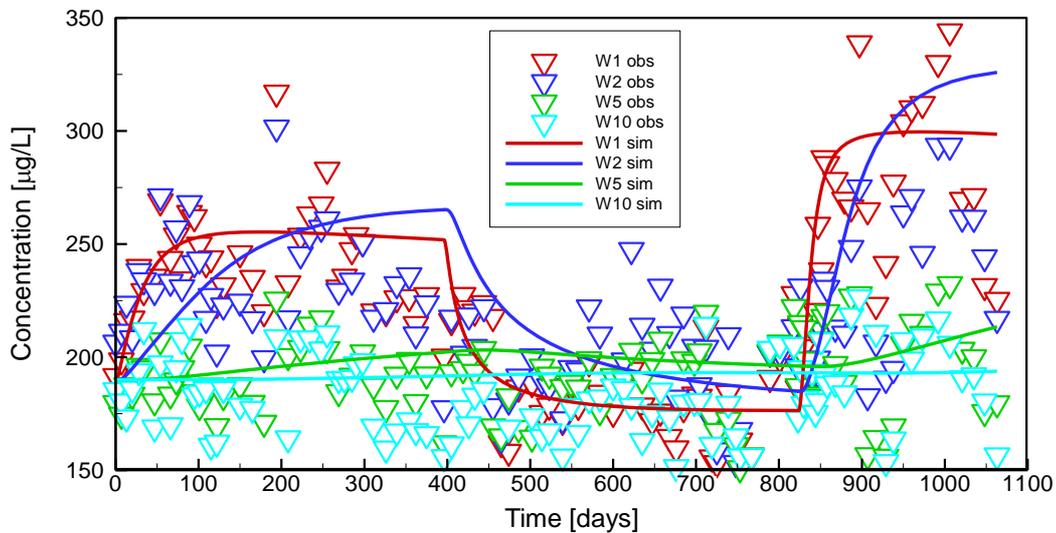


図 3-11-4 観測井の海成層における熱負荷時のホウ素濃度と温度の観測値(▽)と計算値(実線)

ここで用いたモデルは、温度変化に対して固相・液相間の分配係数が変化するモデルであり、地圏熱利用に伴う任意の化学物質の濃度変化は主には、地圏熱利用形態(温度・期間)、地下水流向・流速、式 3-11-5 内のパラメータ  $B$  によって決まる。温度の違いについては、図 3-11-4 に示すように、 $40^{\circ}\text{C}$ の熱媒体、 $60^{\circ}\text{C}$ の熱媒体を熱交換器内で循環させた場合、 $60^{\circ}\text{C}$ の熱媒体を循環させた方が、温度変化が大きく、濃度変化(ここでは上昇)が大きくなる。一方で温度上昇に対して濃度が上昇するため、図 3-11-4 の W1(赤線)に見られるように温度変化が一定となると濃度はそれ以上上昇しなくなる。一方で、地下水流動下では、拡散に加えて移流による移動が生じる。W2 の濃度が W1 のそれよりも高くなったのは、W2 が熱源からみておよそ下流、W1 がおよそ上流に位置しているためである。図 3-11-5 に、地下水流動がある場合とない場合の熱源から 1 m と 2 m の地点での濃度変化を示す。なお、この例では観測地点が図 3-11-4 とは一致しないため、濃度変化は図 3-11-4 とは一致しない。熱源の下流に位置する 2 m の観測地点では、地下水流動がある場合 1 m の観測地点より時間とともに濃度の大小が逆転するが、拡散移動のみの場合は熱源から近い 1 m の観測地点での濃度が 2 m の位置よりも高くなる。また、濃度も地下水流動がある場合は移流による混合により濃度上昇が抑制される。このように現場での濃度変化は地下水の流向と流速の影響を大きく受ける。一方、地下水流向・流速や境界での温度が同じ条件の場合、濃度変化は式 3-11-5 のパラメータ  $B$  によって決まる。図 3-11-6 に図 3-11-5 と同じ条件下で、 $B$  の値を 2 倍あるいは半分としたときの濃度変化を示す。 $B$  を大きくすると濃度変化が大きくなり、小さな  $B$  に対しては濃度変化が小さくなる。このように、濃度変化は様々なパラメータによって決定されるため、ある地点での地圏熱利用が地下水水質に与える影響を評価するためには、地下水流向・流速、地圏熱利用状況、パラメータ  $B$  の値が不可欠である。

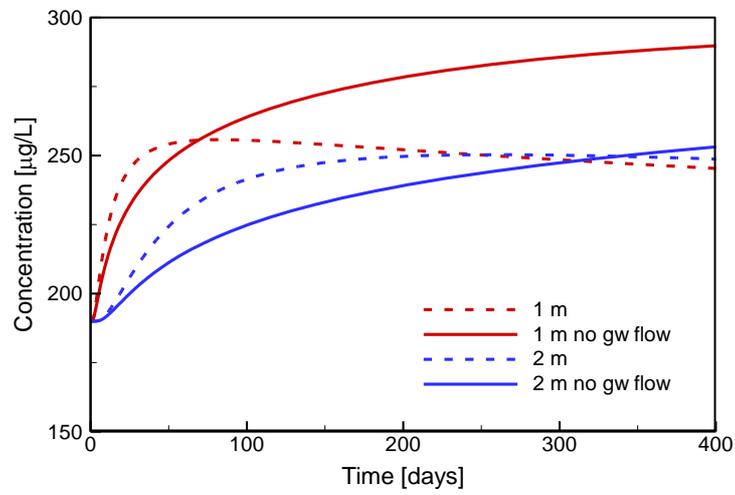


図 3-11-5 地下水流動がある場合(破線)とない場合(実線)での熱源(40°C)から1 m 上流, 2 m 下流地点での濃度変化

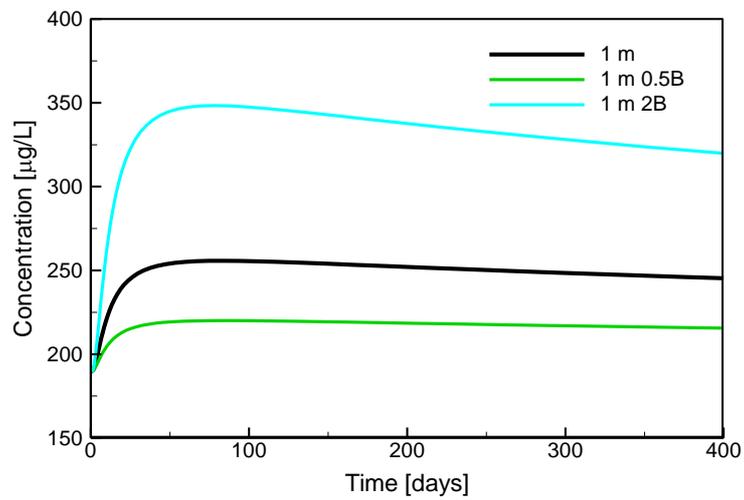


図 3-11-6 温度変化に伴う濃度変化に式 3-11-5 のパラメータ B が与える影響

## 12. 研究項目 3-1: 地圏微生物叢・有害化学物質インベントリ作成-(埼玉大学グループ大西班, 日本大学グループ)

### (1) 研究のねらい

地圏熱利用にあたり、地下水に影響を与えうる要因として微生物・有害化学物質が挙げられる。微生物・有害化学物質は人為的な攪乱の影響が小さい自然由来のものであれば、その存在状況は地質と堆積時環境により支配される。このうち地質は鉱物を構成する元素に、堆積時環境は堆積シーケンスを考慮にいれた粒度および間隙水組成により特徴付けることができる。ここでは、地圏熱利用時に注意を払うべき有害化学物質・地圏微生物叢がどのような地質と堆積時環境に出現するかについてのデータベースとしてのインベントリを作成することが目的である。

### (2) 研究実施方法と研究成果

初期環境調査で得られた堆積年代、地層名、堆積時環境、有害化学物質と微生物の相互の関係性を明らかにするためにインベントリ(データベース)の作成を行った。ここで、堆積年代、地層名と堆積時環境に基づき、それぞれの地質を次の6つの地質区分とした:

- ・ 完新統(沖積層)–海成堆積物(Holocene (Chuseki-so) marine sediments)
- ・ 更新統(上総層群)–海成堆積物(Pleistocene (Kazusa G.) marine sediments)
- ・ 更新統(沖積層)–非海成堆積物(Pleistocene (Chuseki-so) non-marine sediments)
- ・ 更新統(関東ローム層)–非海成堆積物(Pleistocene (Kanto loam) non-marine sediments)
- ・ 更新統(下総層群)–非海成堆積物(Pleistocene (Shimousa G.) non-marine sediments)
- ・ 更新統(上総層群)–非海成堆積物(Pleistocene (Kazusa G.) non-marine sediments)

各サイトの地質をこれらの区分に基づき分類し、それぞれの区分ごとに主要元素含有量、有害化学物質(堆積物中と間隙水中)含有量と微生物存在量をまとめた。ここで、主要元素含有量は地質を特徴付けるものの一つであり、地層の堆積年代、地層名だけしか情報がない時に堆積時環境を推測する上で有用な情報となるものである。また、主要元素、有害化学物質(堆積物中と間隙水中)と微生物のそれぞれの含有量もしくは存在量は、比較しやすくするために正規化したものをヒートマップとしてまとめた。ここで、正規化は、例えば主要元素含有量の場合では、主要元素ごとに全データの平均が0、標準偏差が1となるようにしたものである。従って、値が大きいもしくは小さいほど、平均からのずれが大きいことを意味している(その値が高いほど相対的に多く含まれていることを意味する)。

堆積物の主要元素含有量と地質区分との関係を図 3-12-1 にまとめた。用いたデータは各サイトで初期環境調査として行われたコア試料の蛍光 X 線分析による主要元素含有量の測定結果である。データの測定間隔は各コア試料で約 1m 間隔であり、3つのサイトでの全測定点数は 154 カ所である。また、ここでの主要元素は鉄(Fe)、アルミニウム(Al)、ケイ素(Si)、チタン(Ti)、塩素(Cl)、カルシウム(Ca)、カリウム(K)、マンガン(Mn)、硫黄(S)とした。表 3-12-2 に各主要元素の区分ごとの最大値と最小値をまとめた。ここで、蛍光 X 線分析の測定結果は標準試料により作成された各主要元素の検量線から定量化されており各元素の含有量は wt% である。地質区分ごとの主要元素含有量の特徴は以下の通りである。

- ・ 海成層では、完新統、更新統に関わらず、カルシウム、硫黄の含有量は他の堆積物より高い箇所が多くみられる。しかしながら、更新統上総層群に関しては海成、非海成に関わらず、カルシウムの含有量が他の堆積物より高い。
- ・ 沖積層では海成、非海成に関わらず、塩素の含有量が他の堆積物よりも高い。
- ・ 関東ローム層では、金属元素の含有量が他の堆積物よりも高い。

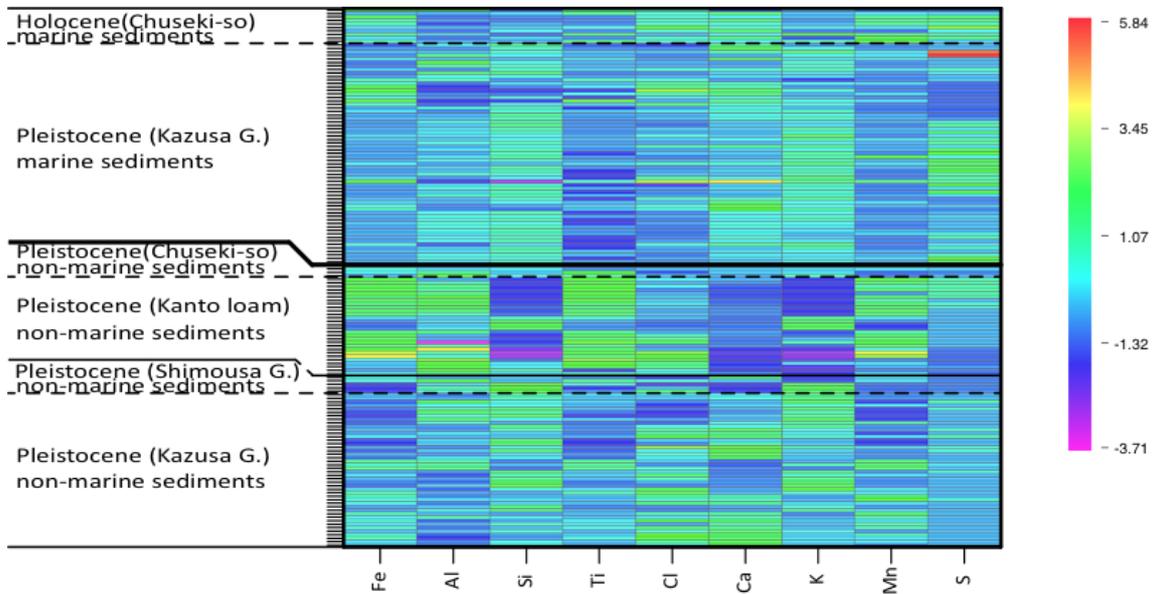


図 3-12-1 地質区分ごとの主要元素含有量. スケールは主要元素ごとに正規化されている. 同一の地質区分内での縦軸上の並び順は上位ほど堆積年代が新しいものとなっている

表 3-12-2 地質区分ごとの各主要元素含有量の最大値と最小値 (N.D.は不検出を表している)

		Fe	Al	Si	Ti	Cl	Ca	K	Mn	S
完新統(沖積層)-海成	最大値	15.6	8.3	57.9	1.2	1.4	5.5	4.5	0.4	1.2
	最小値	11.0	6.6	53.5	1.0	1.1	1.7	2.9	0.1	N.D.
更新統(上総層群)-海成	最大値	23.7	9.7	59.2	3.1	4.3	12.1	5.2	0.7	4.0
	最小値	7.1	3.9	22.6	0.6	1.0	1.8	1.6	0.1	N.D.
更新統(沖積層)-非海成	最大値	12.5	8.7	58.1	1.3	1.1	4.2	3.9	0.2	0.2
	最小値	10.9	7.3	56.8	1.0	1.0	2.7	3.5	0.1	N.D.
更新統(関東ローム)-非海成	最大値	40.2	15.3	64.0	3.4	4.4	3.4	6.2	1.2	0.5
	最小値	7.8	3.2	22.0	0.9	1.4	0.4	N.D.	0.1	N.D.
更新統(下総層群)-非海成	最大値	12.5	8.5	65.3	1.2	1.3	5.3	4.5	0.2	N.D.
	最小値	8.4	7.1	56.1	0.9	0.9	1.2	2.8	0.1	N.D.
更新統(上総層群)-非海成	最大値	29.2	9.2	65.6	2.2	5.9	8.5	7.3	0.6	0.3
	最小値	3.2	3.6	31.5	0.3	1.1	0.6	1.8	0.1	N.D.

(wt%)

堆積物中の有害化学物質含有量の地質区分の関係を図 3-12-2 にまとめた. ここで, 有害化学物質は, 地下水環境基準および土壌汚染対策法(第 2 種特定有害物質)により定められているもののうちホウ素(B), クロム(Cr), フッ素(F), ヒ素(As), セレン(Se), カドミウム(Cd), 鉛(Pb)の 7 元素とした. クロムは上記の法的基準では六価クロムであるが, 元素で評価をしているためクロムとした. また, 地下水環境基準および土壌汚染対策法とも定められている水銀については測定していないため除外した. ここで, 堆積物中の有害化学物質含有量は初期環境調査で使われた堆積物を酸処理(過酸化水素, フッ酸, 過塩素酸, 塩酸による処理)により溶解した試料を用いた ICP-MS による測定結果をまとめたものであり, 3つのサイトでの全測定点数は 44 カ所である. また, 表 3-12-3 に各有害化学物質の区分ごとでの最大値と最小値をまとめた. 地質区分ごとの堆積物中の有害化学物質含有量の特徴は以下の通りである.

- ・ ホウ素に関しては, 更新統(沖積層)非海成層, 更新統上総層群海成層がその他の堆積物と比べて含有量の高い箇所が出現しない.
- ・ ヒ素に関しては, 非海成層に比べて海成層の含有量の方が高い. しかしながら, 更新統上総

- 層群の非海成層の一部でも含有量の高い箇所が出現する。
- セレンに関しては、海成層で含有量の高い箇所が出現する。

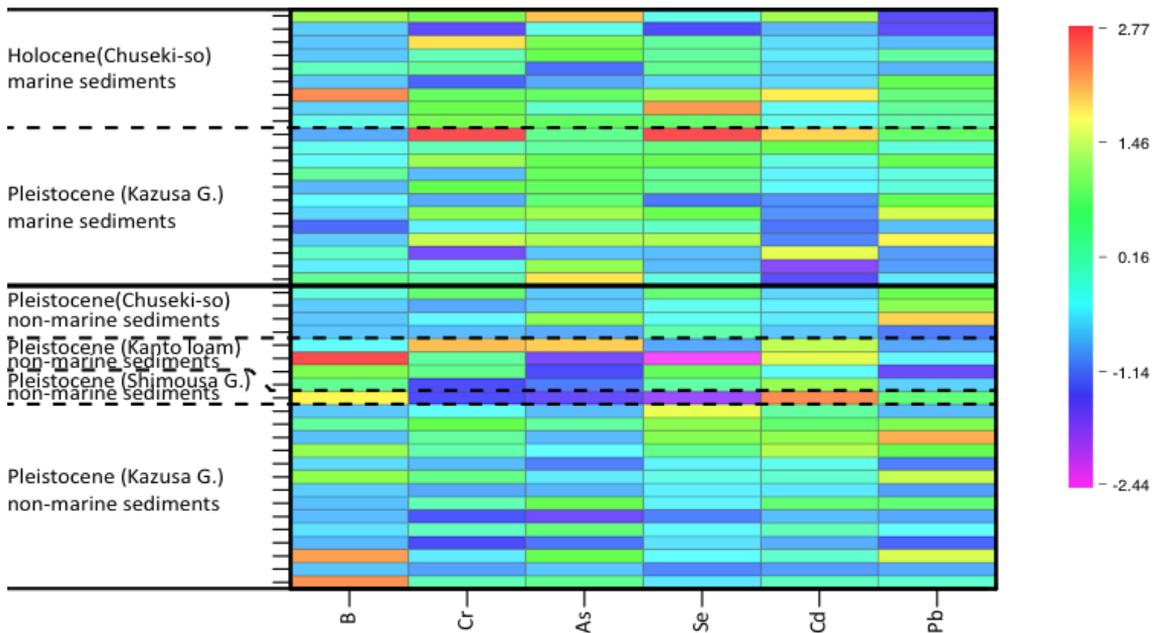


図 3-12-2 地質区分ごとの堆積物中の有害化学物質。スケールは元素ごとに正規化されている。同一の地質区分内のカテゴリでの縦軸上の並び順は上位ほど新しい堆積物となっている

表 3-12-3 地質区分ごとの堆積物の有害化学物質の最大値と最小値。更新統(沖積層)-非海成は測定試料が1つであるため値は1つとなっている

		堆積物					
		B	Cr	As	Se	Cd	Pb
完新統(沖積層)-海成	最大値	33808.597	1117.905	627.430	20.589	16.641	159.422
	最小値	311.944	390.674	454.324	13.696	1.401	77.707
更新統(上総層群)-海成	最大値	253.259	955.541	735.611	31.486	7.764	206.171
	最小値	19.326	325.848	466.333	13.523	0.895	77.395
更新統(沖積層)-非海成	最大値	27616.299	465.937	423.880	12.510	19.702	147.573
	最小値	-	-	-	-	-	-
更新統(関東ローム)-非海成	最大値	4951.275	814.639	575.574	17.009	3.094	205.150
	最小値	264.883	560.776	471.139	15.714	1.801	98.816
更新統(下総層群)-非海成	最大値	549.126	829.080	628.792	25.786	7.716	123.238
	最小値	79.483	412.516	314.740	13.018	2.695	75.035
更新統(上総層群)-非海成	最大値	474.252	552.761	537.463	25.570	3.172	269.317
	最小値	27.552	115.039	352.134	11.920	1.858	56.755

(ppb)

間隙水中の有害化学物質含有量の地質区分の関係を図 3-12-3 にまとめた。ここで、有害化学物質の含有量は初期環境調査で行われた間隙水を用いた ICP-MS による測定結果によるものであり、3つのサイトでの全測定点数は 48 カ所である。また、各有害化学物質の最大値と最小値は表 3-12-3 にまとめられている。地質区分ごとの有害化学物質の含有量の特徴は以下の通りである。

- ・ ヒ素を除く有害化学物質は更新統上総層群の海成層に存在しているといえる。
- ・ ホウ素については、更新統上総層群の海成層に加えて関東ローム層にも存在している
- ・ ヒ素については、海成、非海成に関わらず沖積層と更新統上総層群の非海成層に存在している。

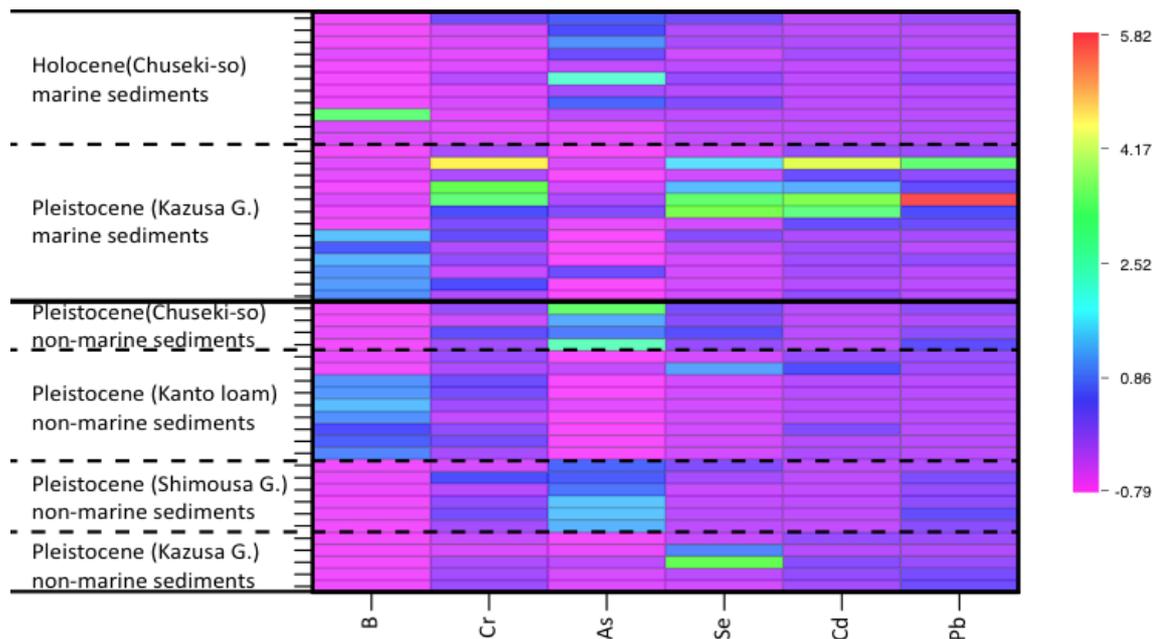


図 3-12-3 地質区分ごとの間隙水中の有害化学物質。スケールは元素ごとに正規化されている。同一の地質区分内での縦軸上の並び順は上位ほど新しい堆積物となっている

表 3-12-3 地質区分ごとの間隙水の有害化学物質の最大値と最小値

		間隙水					
		B	Cr	As	Se	Cd	Pb
完新統 (沖積層)-海成	最大値	16.763	0.105	0.138	0.025	0.006	0.084
	最小値	0.000	0.000	0.006	0.001	0.000	0.000
更新統 (上総層群)-海成	最大値	10.590	0.708	0.047	0.150	0.195	2.163
	最小値	0.000	0.020	0.000	0.000	0.003	0.000
更新統 (沖積層)-非海成	最大値	0.315	0.130	0.175	0.033	0.001	0.255
	最小値	0.000	0.015	0.087	0.015	0.000	0.023
更新統 (関東ローム)-非海成	最大値	10.531	0.106	0.015	0.068	0.037	0.087
	最小値	0.026	0.026	0.000	0.000	0.002	0.000
更新統 (下総層群)-非海成	最大値	0.318	0.151	0.110	0.020	0.001	0.224
	最小値	0.124	0.010	0.077	0.002	0.000	0.026
更新統 (上総層群)-非海成	最大値	0.178	0.061	0.018	0.135	0.017	0.190
	最小値	0.014	0.007	0.001	0.000	0.002	0.022

(ppb)

研究項目 3-1 で行った次世代シーケンサーによる網羅的解析で得られた分類群ごとの微生物存在量を地質区分ごとに図 3-12-4 にまとめた。ここで、図中の横軸は綱(Class)レベルで分類したそれぞれの微生物分類群ごとの ID であり、対応表を表 3-12-4 に示した。3つのサイトでの全測定点数は 33 点である。地質区分ごとの微生物叢の特徴は以下の通りである。

- 沖積層、関東ローム層と地表面近くに位置する堆積物では他の堆積物に比べて微生物の多様性が高い。更新統下総層群の非海成層の一部でも、同様の傾向がみられるが、沖積層、関東ローム層で見られる微生物とは異なる分類群である。
- アーキア (ID1-12) は沖積層と関東ローム層、非海成の更新統下総層群に多く存在する。特にメタン生成能をもつ *Methanobacteria* と *Methanomicrobia* 綱は沖積層で多い。
- バクテリアのうち *Actinobacteria*, *Anaerolineae*, *Bacilli*, *Clostridia*, *Alpha*, *Beta*, *Gamma*, *Deltaproteobacteria* の各綱は全ての層に存在する。
- 沖積層では他の堆積物に比べて *Anaerolineae*, *Dehalococcoidetes* 綱を含む *Chloroflexi* 門や OP8 門, OP9 門の存在量が多い。

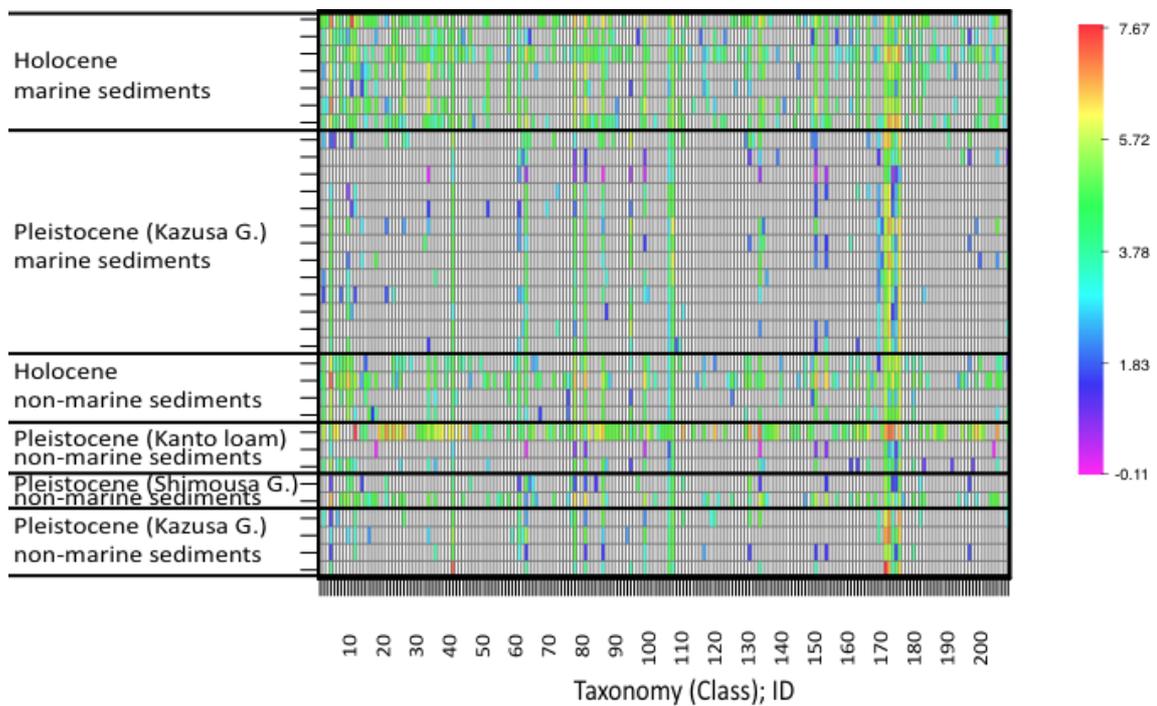


図 3-12-4 地質区分ごとの綱レベルで分類した微生物の存在量. ID は微生物種名であり, 表 3-12-4 に対応表を示した. 同一の地質区分内での縦軸上の並び順は上位ほど新しい堆積物となっている

表 3-12-4 各微生物種に割り当てた ID

ID	Taxonomy (Class)	ID	Taxonomy (Class)	ID	Taxonomy (Class)
1	Unassigned:Other:Other	71	k_Bacteria;p_Chlamydiae;c_Chlamydia	141	k_Bacteria;p_OP11;c_
2	k_Archaea;p_Crenarchaeota;c_	72	k_Bacteria;p_Chlorobi;c_	142	k_Bacteria;p_OP11;c_OP11-1
3	k_Archaea;p_Crenarchaeota;c_MBGA	73	k_Bacteria;p_Chlorobi;c_BSV26	143	k_Bacteria;p_OP11;c_OP11-2
4	k_Archaea;p_Crenarchaeota;c_MGBG	74	k_Bacteria;p_Chlorobi;c_Ignavibacteria	144	k_Bacteria;p_OP11;c_OP11-3
5	k_Archaea;p_Crenarchaeota;c_MCG	75	k_Bacteria;p_Chlorobi;c_OPB56	145	k_Bacteria;p_OP11;c_OP11-4
6	k_Archaea;p_Crenarchaeota;c_Thaumarchaeota	76	k_Bacteria;p_Chlorobi;c_SJA-28	146	k_Bacteria;p_OP11;c_WCHB1-64
7	k_Archaea;p_Crenarchaeota;c_Thermoprotei	77	k_Bacteria;p_Chloroflexi;Other	147	k_Bacteria;p_OP3;c_
8	k_Archaea;p_Euryarchaeota;c_ANME-1	78	k_Bacteria;p_Chloroflexi;c_	148	k_Bacteria;p_OP3;c_BD4-9
9	k_Archaea;p_Euryarchaeota;c_DSEG	79	k_Bacteria;p_Chloroflexi;c_Anaerolineae	149	k_Bacteria;p_OP3;c_PBS-25
10	k_Archaea;p_Euryarchaeota;c_Methanobacteria	80	k_Bacteria;p_Chloroflexi;c_C0119	150	k_Bacteria;p_OP3;c_kolI1
11	k_Archaea;p_Euryarchaeota;c_Methanomicrobia	81	k_Bacteria;p_Chloroflexi;c_Chloroflexi	151	k_Bacteria;p_OP8;c_OP8_1
12	k_Archaea;p_Euryarchaeota;c_Thermoplasmata	82	k_Bacteria;p_Chloroflexi;c_Dehalococcoidetes	152	k_Bacteria;p_OP8;c_OP8_2
13	k_Archaea;p_[Parvarchaeota];c_[Parvarchaea]	83	k_Bacteria;p_Chloroflexi;c_Elin6529	153	k_Bacteria;p_OP8;c_SAW1_B6
14	k_Bacteria;Other:Other	84	k_Bacteria;p_Chloroflexi;c_Gitt-GS-136	154	k_Bacteria;p_OP9;c_Js1
15	k_Bacteria;p_c_	85	k_Bacteria;p_Chloroflexi;c_Ktedonobacteria	155	k_Bacteria;p_OP9;c_OPB46
16	k_Bacteria;p_AC1;c_	86	k_Bacteria;p_Chloroflexi;c_P2-11E	156	k_Bacteria;p_PAUC34f;c_
17	k_Bacteria;p_AC1;c_HDBW-WB69	87	k_Bacteria;p_Chloroflexi;c_S085	157	k_Bacteria;p_Planctomycetes;c_
18	k_Bacteria;p_AC1;c_SHA-114	88	k_Bacteria;p_Chloroflexi;c_SAR202	158	k_Bacteria;p_Planctomycetes;c_028H05-P-BN-P5
19	k_Bacteria;p_AD3;c_ABS-6	89	k_Bacteria;p_Chloroflexi;c_SHA-26	159	k_Bacteria;p_Planctomycetes;c_BD7-11
20	k_Bacteria;p_AD3;c_JG37-AG-4	90	k_Bacteria;p_Chloroflexi;c_TK10	160	k_Bacteria;p_Planctomycetes;c_C6
21	k_Bacteria;p_Acidobacteria;c_	91	k_Bacteria;p_Cyanobacteria;c_TK17	161	k_Bacteria;p_Planctomycetes;c_ODP123
22	k_Bacteria;p_Acidobacteria;c_Acidobacteria-5	92	k_Bacteria;p_Chloroflexi;c_Thermomicrobia	162	k_Bacteria;p_Planctomycetes;c_OM190
23	k_Bacteria;p_Acidobacteria;c_Acidobacteria-6	93	k_Bacteria;p_Chloroflexi;c_[Thermobacula]	163	k_Bacteria;p_Planctomycetes;c_Phycisphaerae
24	k_Bacteria;p_Acidobacteria;c_Acidobacteriia	94	k_Bacteria;p_Cyanobacteria;c_4C0d-2	164	k_Bacteria;p_Planctomycetes;c_Pla3
25	k_Bacteria;p_Acidobacteria;c_BPC102	95	k_Bacteria;p_Cyanobacteria;c_Chloroplast	165	k_Bacteria;p_Planctomycetes;c_Pla4
26	k_Bacteria;p_Acidobacteria;c_DA052	96	k_Bacteria;p_Cyanobacteria;c_Gloeobacterophycidae	166	k_Bacteria;p_Planctomycetes;c_Planctomycetia
27	k_Bacteria;p_Acidobacteria;c_EC1113	97	k_Bacteria;p_Cyanobacteria;c_ML635J-21	167	k_Bacteria;p_Planctomycetes;c_vadinHA49
28	k_Bacteria;p_Acidobacteria;c_Holophagae	98	k_Bacteria;p_Cyanobacteria;c_Oscillatoriophyceidae	168	k_Bacteria;p_Proteobacteria;c_
29	k_Bacteria;p_Acidobacteria;c_OS-K	99	k_Bacteria;p_Elusimicrobia;c_	169	k_Bacteria;p_Proteobacteria;Other
30	k_Bacteria;p_Acidobacteria;c_PAUC37f	100	k_Bacteria;p_Elusimicrobia;c_4-29	170	k_Bacteria;p_Proteobacteria;c_
31	k_Bacteria;p_Acidobacteria;c_RB25	101	k_Bacteria;p_Elusimicrobia;c_Elusimicrobia	171	k_Bacteria;p_Proteobacteria;c_Alphaproteobacteria
32	k_Bacteria;p_Acidobacteria;c_S035	102	k_Bacteria;p_Elusimicrobia;c_Endomicrobia	172	k_Bacteria;p_Proteobacteria;c_Betaproteobacteria
33	k_Bacteria;p_Acidobacteria;c_Solibacteres	103	k_Bacteria;p_Elusimicrobia;c_OP2	173	k_Bacteria;p_Proteobacteria;c_Deltaproteobacteria
34	k_Bacteria;p_Acidobacteria;c_Sva0725	104	k_Bacteria;p_FBP;c_	174	k_Bacteria;p_Proteobacteria;c_Epsilonproteobacteria
35	k_Bacteria;p_Acidobacteria;c_TM1	105	k_Bacteria;p_FCPU426;c_	175	k_Bacteria;p_Proteobacteria;c_Gammaproteobacteria
36	k_Bacteria;p_Acidobacteria;c_[Chloracidobacteria]	106	k_Bacteria;p_Fibrobacteres;c_Fibrobacteria	176	k_Bacteria;p_SAR406;c_AB16
37	k_Bacteria;p_Acidobacteria;c_iii1-8	107	k_Bacteria;p_Firmicutes;c_Bacilli	177	k_Bacteria;p_SBR1093;c_
38	k_Bacteria;p_Actinobacteria;c_	108	k_Bacteria;p_Firmicutes;c_Clostridia	178	k_Bacteria;p_SBR1093;c_VHS-B5-50
39	k_Bacteria;p_Actinobacteria;c_Actinimicrobiia	109	k_Bacteria;p_Firmicutes;c_Erysipelotrichi	179	k_Bacteria;p_SC4;c_
40	k_Bacteria;p_Actinobacteria;c_Actinobacteria	110	k_Bacteria;p_Fusobacteria;c_Fusobacteria	180	k_Bacteria;p_SR1;c_
41	k_Bacteria;p_Actinobacteria;c_Coriobacteriia	111	k_Bacteria;p_GAL15;c_	181	k_Bacteria;p_Spirochaetes;c_MVP-15
42	k_Bacteria;p_Actinobacteria;c_MB-A2-108	112	k_Bacteria;p_GN02;c_3BR-5F	182	k_Bacteria;p_Spirochaetes;c_Spirochaetes
43	k_Bacteria;p_Actinobacteria;c_OPB41	113	k_Bacteria;p_GN02;c_BB34	183	k_Bacteria;p_Spirochaetes;c_[Brachyspirae]
44	k_Bacteria;p_Actinobacteria;c_Rubrobacteria	114	k_Bacteria;p_GN02;c_GKS2-174	184	k_Bacteria;p_Spirochaetes;c_[Leptospirae]
45	k_Bacteria;p_Actinobacteria;c_Thermoleophila	115	k_Bacteria;p_GN04;c_	185	k_Bacteria;p_TA06;c_
46	k_Bacteria;p_AncK6;c_	116	k_Bacteria;p_GN04;c_GN15	186	k_Bacteria;p_TM6;c_SBRH58
47	k_Bacteria;p_Armatimonadetes;c_	117	k_Bacteria;p_GN04;c_MSB-5A5	187	k_Bacteria;p_TM6;c_SJA-4
48	k_Bacteria;p_Armatimonadetes;c_0319-6E2	118	k_Bacteria;p_GOUTA4;c_	188	k_Bacteria;p_TM7;c_
49	k_Bacteria;p_Armatimonadetes;c_Armatimonadia	119	k_Bacteria;p_Gemmatimonadetes;c_	189	k_Bacteria;p_TM7;c_SC3
50	k_Bacteria;p_Armatimonadetes;c_Orthonomonadetes	120	k_Bacteria;p_Gemmatimonadetes;c_Gemm-1	190	k_Bacteria;p_TM7;c_TM7-1
51	k_Bacteria;p_Armatimonadetes;c_MD2902-B50	121	k_Bacteria;p_Gemmatimonadetes;c_Gemm-2	191	k_Bacteria;p_TM7;c_TM7-3
52	k_Bacteria;p_Armatimonadetes;c_SJA-176	122	k_Bacteria;p_Gemmatimonadetes;c_Gemm-5	192	k_Bacteria;p_Tenericutes;c_Mollucutes
53	k_Bacteria;p_Armatimonadetes;c_[Fimbriomonadia]	123	k_Bacteria;p_Gemmatimonadetes;c_Gemmatimonadetes	193	k_Bacteria;p_VHS-B3-43c_
54	k_Bacteria;p_BHI80-139;c_	124	k_Bacteria;p_Gemmatimonadetes;c_JL-ETNP-Z39	194	k_Bacteria;p_Verrucomicrobia;c_
55	k_Bacteria;p_BHI80-139;c_MD2896-B26	125	k_Bacteria;p_Kazan-3B-28;c_	195	k_Bacteria;p_Verrucomicrobia;c_Opituatae
56	k_Bacteria;p_BHI80-139;c_bOHTK-109	126	k_Bacteria;p_LCP-89;c_SAW1_B44	196	k_Bacteria;p_Verrucomicrobia;c_Verruco-5
57	k_Bacteria;p_BRC1;c_NPL-UPA2	127	k_Bacteria;p_LD1;c_	197	k_Bacteria;p_Verrucomicrobia;c_Verrucomicrobiae
58	k_Bacteria;p_BRC1;c_PRR-11	128	k_Bacteria;p_MVP-21;c_	198	k_Bacteria;p_Verrucomicrobia;c_[Methylacidiphilae]
59	k_Bacteria;p_Bacteroidetes;Other	129	k_Bacteria;p_MVS-104;c_	199	k_Bacteria;p_Verrucomicrobia;c_[Pedosphaerae]
60	k_Bacteria;p_Bacteroidetes;c_	130	k_Bacteria;p_NC10;c_	200	k_Bacteria;p_Verrucomicrobia;c_[Spartobacteria]
61	k_Bacteria;p_Bacteroidetes;c_At12OctB3	131	k_Bacteria;p_NC10;c_12-24	201	k_Bacteria;p_WPS-2;c_
62	k_Bacteria;p_Bacteroidetes;c_Bacteroidia	132	k_Bacteria;p_NC10;c_wb1-A12	202	k_Bacteria;p_WS2;c_
63	k_Bacteria;p_Bacteroidetes;c_Cytophagia	133	k_Bacteria;p_NKB19;c_	203	k_Bacteria;p_WS2;c_Kazan-3B-09
64	k_Bacteria;p_Bacteroidetes;c_Flavobacteriia	134	k_Bacteria;p_Nitrospirae;c_Nitrospira	204	k_Bacteria;p_WS2;c_SHA-109
65	k_Bacteria;p_Bacteroidetes;c_Sphingobacteriia	135	k_Bacteria;p_OD1;c_	205	k_Bacteria;p_WS3;c_PRR-12
66	k_Bacteria;p_Bacteroidetes;c_VC2_1_Bac22	136	k_Bacteria;p_OD1;c_ABY1	206	k_Bacteria;p_WS4;c_
67	k_Bacteria;p_Bacteroidetes;c_[Saprospirae]	137	k_Bacteria;p_OD1;c_Mb-NB09	207	k_Bacteria;p_ZB3;c_BS119
68	k_Bacteria;p_CD12;c_	138	k_Bacteria;p_OD1;c_SM2F11	208	k_Bacteria;p_[Caldithrix];c_KSB1
69	k_Bacteria;p_Caldiserica;c_Caldiserica	139	k_Bacteria;p_OD1;c_ZB2	209	k_Bacteria;p_[Thermi];c_Deinococci
70	k_Bacteria;p_Caldithrix;c_Caldithrixae	140	k_Bacteria;p_OP1;c_MSBL6		

### 13. 研究項目 3-2: 地下水環境リスク予測-(埼玉大学グループ小松班, 東京農工大グループ)

#### (1) 研究のねらい

研究項目 2-4 で開発した物質・熱連成モデルを用いて, 地中熱の大規模かつ長期の利用に伴う地圏環境の変化(温度・水質)を予測する。

#### (2) 研究実施方法

埼玉大を対象とし, 仮想的な長期の大規模地中熱利用を想定して, 地下温度と地下水水質の変化を予測した。その結果をもとに, 地下水利用・管理手法の提案に向けて物質・熱の移動に関わる物性値や各係数の重要性について検討した。

#### (3) 研究成果

埼玉大を対象として, 大規模かつ長期の地中熱利用に伴う地下環境の変化を予測した。計算の具体的な対象は埼玉大工学部で, 工学部所属のほぼすべての建物が図 3-13-1 に示す 100m 四方の領域内に位置している。ここでは, 埼玉大工学部建物の居室(研究室・実験室)すべてにおいてクロードループ地中熱利用ヒートポンプシステムを空調に利用するとした。床面積 25m<sup>2</sup> に対して 50m の熱交換器を使用するとしたところ, およそ 900 本の熱交換器が必要と見積もられた。一般に熱交換器 1 m あたり 30~80 W の採熱・放熱が可能といわれており(地中熱利用促進協会), 50 m の熱交換器であれば 1.5~4.0 kW の能力となる。U-tube を, 内径 80~100 mm 前後の熱交換井(ボーリング坑)に埋設するとした場合, 900 本の熱交換井を用いた数値計算は現実的ではないことから, 36 本ずつを内径 3000mm の熱交換井に埋設すると仮定して, 計 25 本の熱交換井を均等に分布させた(図 3-13-1)。この仮定のもとでは熱交換器の表面積を同じとしており, 温度境界条件を用いると地中に与える熱負荷は, 80~100 mm の熱交換器 900 本とほぼ同程度となる。

地下水環境リスクの予測として, 埼玉大での熱負荷実験でホウ素濃度の上昇がみられた海成層を対象として, 長期の地中熱利用時の地下水水質, 特にホウ素濃度の変化を予測した。対象を海成層としているため, 解析は 2次元で行った。計算は埼玉大キャンパスを含み, 工学部がほぼ中央に位置する 500m 四方の領域を対象とした(図 3-13-1)。W1~W5 の水位変化から三点法(Silliman and Frost, 1998)より得られた地下水流向はおおよそ西から東が卓越していたため, 計算では一定方向とした。また, 流速については地下水流速の実測値を参考に, 1 cm/d とした。初期の地下水温度, 地下水ホウ素濃度は実測値よりそれぞれ 17.3°C, 191ppb とした。また, 分配係数の温度依存性を表すファンツ・ホッフ式(式 3-11-5)のパラメータは, 埼玉大で実施した長期熱負荷試験におけるホウ素濃度の変化をよく再現する値を用いた。空調による地中熱利用を模すため, 冷房時は初期地温プラス X°C, 暖房時は初期地温マイナス Y°C を熱交換器での温度境界条件として, 水分移動, 熱移動, 溶質移動の基礎方程式(式 3-11-4, 式 3-11-1, 式 3-11-6)を有限要素法により逐次解いて予測を行った。

図 3-13-2 に, 冷房使用が暖房使用よりも卓越している条件として, X を 10°C, Y を 5°C としたときの 30 年後の地下水温度分布と地下水中のホウ素濃度分布の計算結果を示す。計算では研究項目 2-2 より得られた, 温度変化に伴う水の粘性係数が変化することにより, 透水係数および拡散係数が変化するモデルを用いた。温度分布図中の緑線は 19°C の等高線で, 熱負荷前の温度より約 1.7°C 上昇した境界であり, 埼玉大のキャンパスを超えて, 隣接する住宅地の地下水温度が上昇していることが分かる。30 年後のホウ素濃度は初期より 10 ppb 以上濃度が上昇した水塊(ブルーム)が埼玉大キャンパスの東側境界を越えて広がる分布となった。この例では, ホウ素濃度は環境基準よりも十分低い濃度になっているが, 長期の地中熱利用では温度のみならず, 地下水中のホウ素などの環境負荷物質の濃度上昇を引き起こすリスクを伴うと言える。一方暖房利用が卓越する場合(X=5°C, Y=10°C)の場合の 30 年後の分布を図 3-13-3 に示す。暖房利用が卓越する場合, 長期間では熱交換井の周辺では地下水温度が低下し, 結果としてホウ素濃度が初期よりも低下するブルームが形成される。この例では, 初期濃度より 8 ppb 程度低下した領域がキャンパスを越えて広がった。

埼玉大サイトにおいて、三点法により得られた地下水流向は比較的安定していたが、動水勾配は年変動が流向ほど安定していなかった。そこで地下水流速の影響評価をするために、図 3-13-2 の条件と比べて、地下水流速を 2 倍とした計算結果を図 3-13-4 に示す。温度一定境界条件のため、トータルの熱負荷量に違いが生じているが、流速が大きくなると、温度や濃度が上昇する領域がより地下水の下流に移動することが示された。特にホウ素濃度については、濃度が初期濃度より 20ppb 以上上昇した領域が埼玉大キャンパスを大きく出て、隣接する住宅街に広がった。

ここまでのリスク予測の例は、夏と冬で比較したときに、夏の方の負荷が多いとして計算を行ったものである。しかし、実際には冷房のみ、暖房のみ、あるいは猛暑期のみ等運転方法は地中熱利用の目的により様々である。また地球の気候変動により冷暖房の利用が増加することが予想される。そこで、比較のため夏と冬で負荷量を図 3-13-2 と比較して 2 倍程度大きくした場合、夏と冬の境界温度を初期温度プラスマイナス 10℃ した場合の結果をそれぞれ図 3-13-5 と図 3-13-6 に示す。負荷量を大きくした場合、温度上昇も濃度上昇も大きくなり、地下水水質へ与える影響が大きくなった。一方、夏と冬の負荷をほぼ同じとすると、埼玉大サイトの地下水流速では、30 年経過後も温度変化や濃度変化は局所的となり、キャンパス周辺の地下環境へほとんど影響を与えなかった。このように地中熱ヒートポンプの運転状況は、長期の利用を考える場合は、地下環境の変化に与える影響は大きく、導入前の設計段階で十分な検討をする必要がある。

参考文献

Silliman, S., & Frost, C. (1998). Monitoring Hydraulic Gradient Using Three-Point Estimator. *Journal of Environmental Engineering*, 124(6), 517-523. doi:10.1061/(ASCE)0733-9372(1998)124:6(517).



図 3-13-1 黄色線枠が埼玉大キャンパス、青点線枠が工学部、オレンジ丸が仮想的な熱交換井の位置を示す。白線枠は、地下環境リスク予測のために用いた 500 m 四方の計算領域

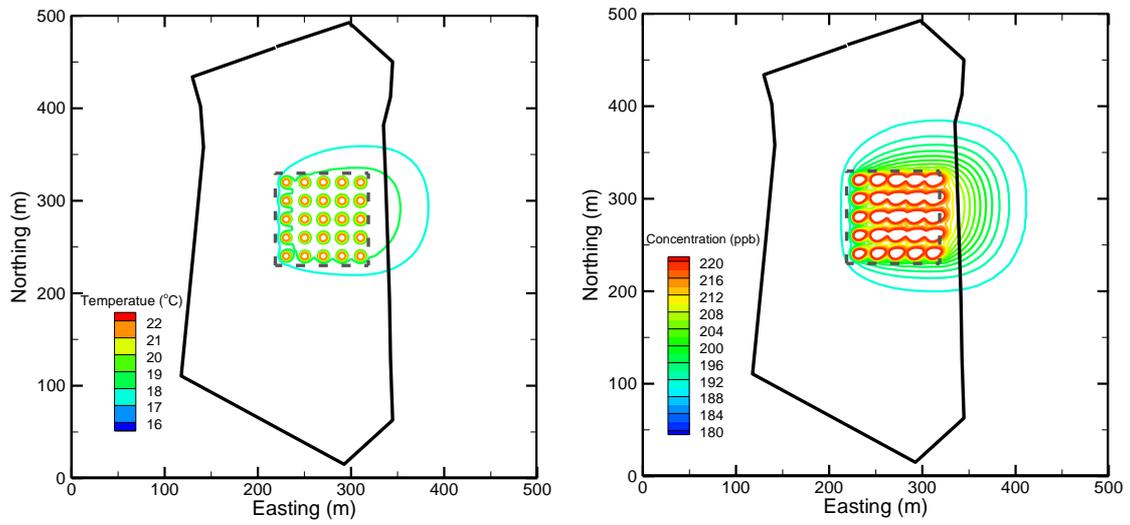


図 3-13-2 <冷房卓越の場合>年間のうち6か月間は $X=10^{\circ}\text{C}$ (冷房使用), 残り6か月は $Y=5^{\circ}\text{C}$ (暖房使用)で熱媒体を循環させたとしたときの30年後の地温(左図)およびホウ素濃度分布(右図)

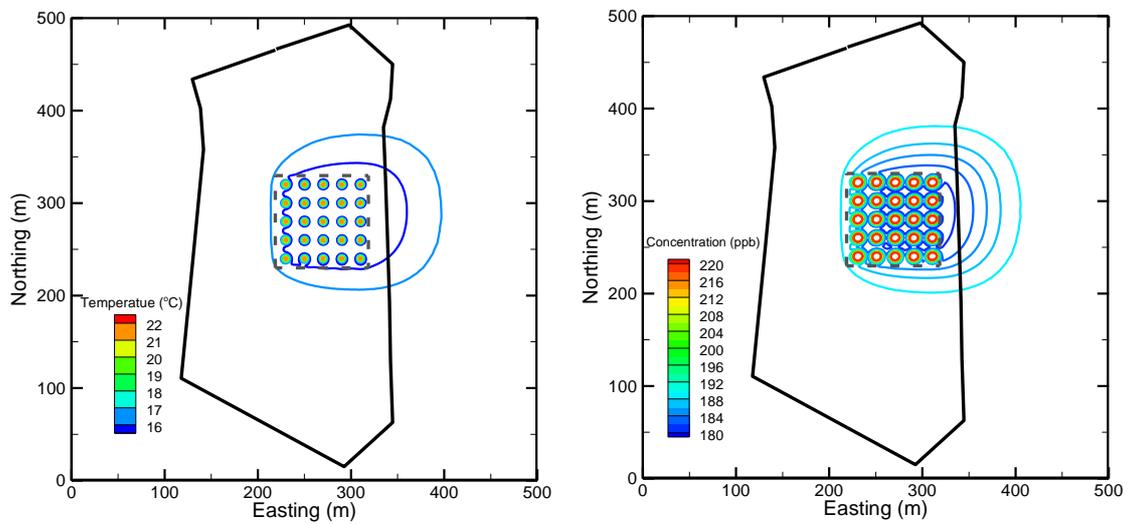


図 3-13-3 <移動係数の温度依存性>年間のうち6か月間は $X=5^{\circ}\text{C}$ (冷房使用), 残り6か月は $Y=10^{\circ}\text{C}$ (暖房使用)で熱媒体を循環させたとしたときの30年後の地温(左図)およびホウ素濃度分布(右図)

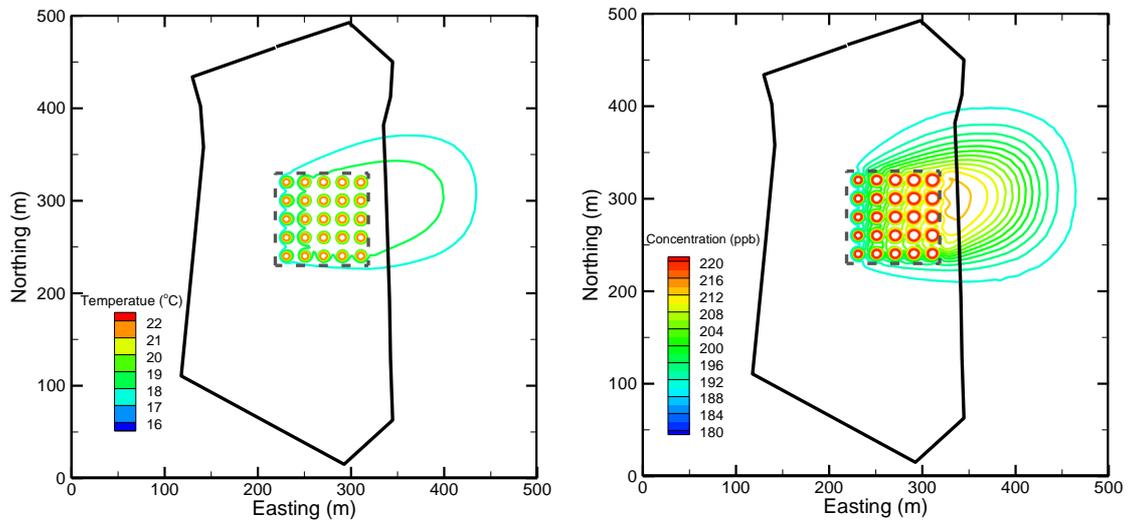


図 3-13-4 <流速の影響> 図 3-13-2と同じ条件で、地下水流速のみを2倍とした時の30年後の地温(左図)およびホウ素濃度分布(右図)

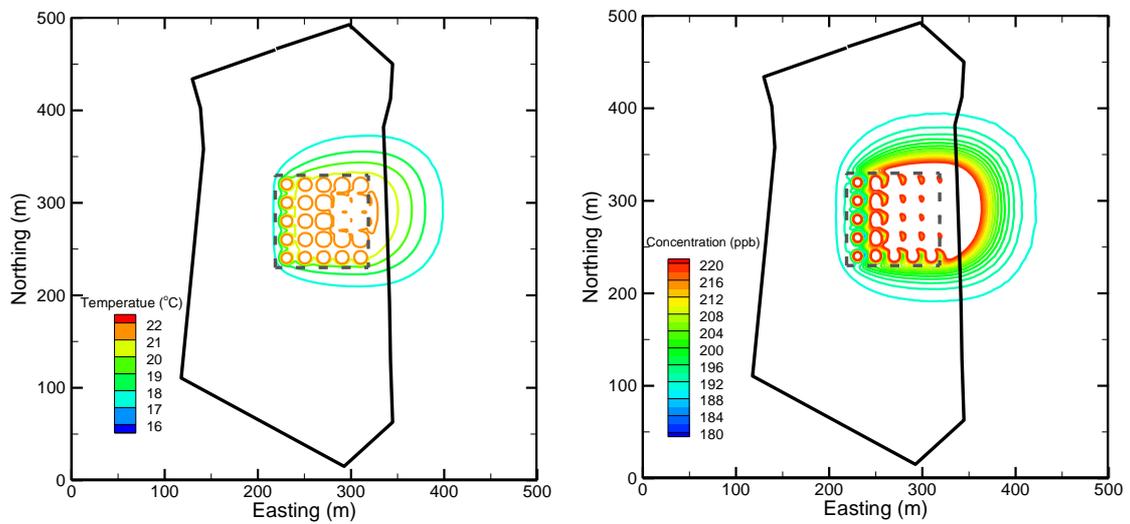


図 3-13-5 <冷房卓越の場合> 年間のうち6か月間は $X=20^{\circ}\text{C}$ (冷房使用), 残り6か月は $Y=10^{\circ}\text{C}$ (暖房使用)で熱媒体を循環させたときの30年後の地温(左図)およびホウ素濃度分布(右図)

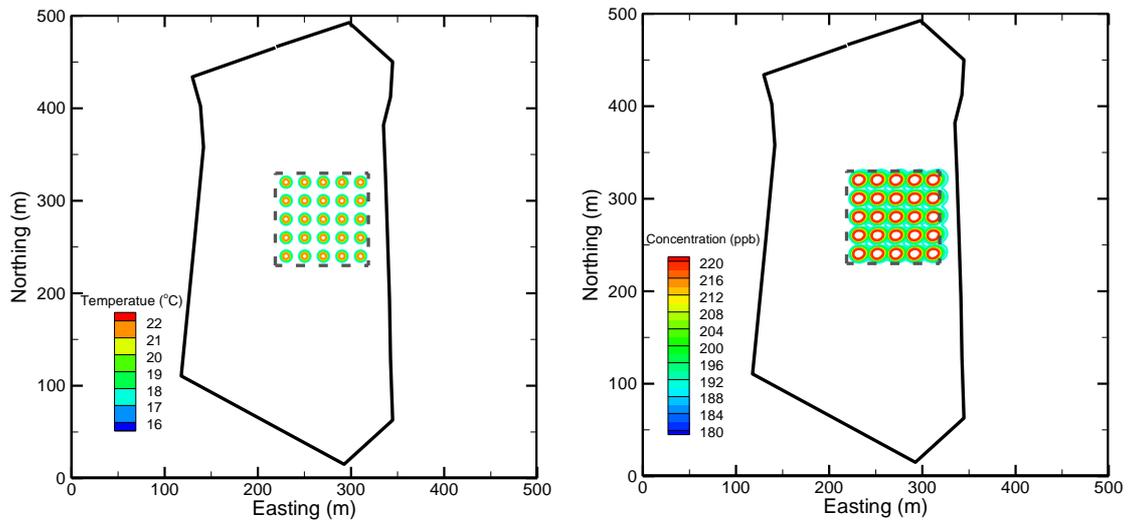


図 3-13-6 <暖房卓越の場合>初期地下水温度に対して、熱媒体温度が冷房時はプラス10℃(X=10℃)、暖房時はマイナス10℃(Y=10℃)とした時の30年後の地温(左図)およびホウ素濃度分布(右図)

#### 14. 研究項目 3-3: 地下水利用・管理手法の提案-(全グループ)

##### (1) 研究のねらい

地圏熱利用による環境リスクを最小限に抑えるための地下水利用・管理手法を提案するため、これまでの研究から得られた「地圏熱利用が地圏環境に与える影響」に基づいて地圏熱利用時に注意すべき事項やアセスメントツールを用いた環境影響評価において検討すべき項目をまとめる。

##### (2) 研究実施方法

地圏熱利用による環境リスクを最小限に抑えるための地下水(熱)利用・管理手法として、次の点について取りまとめた。① 本研究で得られた成果から、地下温度変化により変化しうると考えられる地下水水質成分および微生物叢を整理した。② これらの結果を踏まえ、地質学的な観点から地圏熱利用時の対象サイトとして注意すべき地層や地域についてまとめた。③ 本研究で得られた成果を用いて、地下水利用・管理手法決定のためのフローを提案した。また、本研究で開発したアセスメントツールを利用した環境影響評価を行う上で、シミュレーションに必要な物理パラメータ(物質輸送係数)の同定方法や取り扱い方、留意すべき項目を整理した。最後に、今後の検討課題をまとめた。

##### (3) 研究成果

本研究の調査結果から得られた温度変化により濃度変化が見られた地下水成分を表 3-14-1 にまとめた。この中で、ホウ素とヒ素が地下水環境基準に規定されている成分であり(水質基準値はそれぞれ、1000 µg/L、10 µg/L)、特に人体への影響が大きい有害化学物質である。地下温度変化に伴う地下水水質変化を考慮した地下水利用・管理手法として、特に人体に影響の大きいホウ素とヒ素に注目し、次のように提案した。

ホウ素は、完新統(沖積層)の海成層で濃度上昇が認められ、1℃の温度上昇に対して9.0 µg/L程度の濃度上昇が見られた。一方、ヒ素については、更新統(沖積層)の非海成層で濃度上昇が確認され、1℃の温度上昇に対して0.7 µg/L程度の濃度上昇が見られた(表 3-14-1)。このように、ホウ素とヒ素は温度上昇に伴う濃度の増大が確認されているため、地圏熱利用時にはホウ素とヒ素が堆積物もしくは間隙水に含まれる地層には注意を払うべきである。研究項目 1-1 および 3-1 から、ホウ素は堆積物としては堆積年代・堆積環境に関わらず存在しているものの、特に完新統(沖積層)

海成層、関東ローム層、上総層群非海成層で高濃度のものが存在することが分かった。また、間隙水中のホウ素は更新統上総層群の海成層と関東ローム層に高い濃度で存在していた。ヒ素は堆積物としては非海成層に比べて海成層の含有量の方が高いが、更新統上総層群の非海成層の一部でも含有量の高い箇所が出現する。また、間隙水については海成、非海成に関わらず沖積層と更新統上総層群の非海成層で存在していた。これらの出現状況を、研究項目 3-1 の有害化学物質インベントリを元に表 3-14-2 にまとめた。ここで、各元素の出現状況は、出現頻度が高いものから順番に○、△<sup>+</sup>、△、×と 4 段階で表示した。ホウ素、ヒ素ともに堆積物と間隙水でのその出現状況が異なるが、堆積物中でのホウ素、ヒ素の存在形態が不明であることから、その全てが必ずしも地下水に可溶性であるとはいえない。従って、地下水管理を考える場合、間隙水にホウ素、ヒ素を含んでおろかつ堆積物にも含まれている地層に関して注意を払うべきである。このような条件を満たす地層は、表 3-14-2 より、ホウ素に関しては完新統(沖積層)の海成層と更新統上総層群の海成層と関東ローム層であり、ヒ素に関しては沖積層の海成層・非海成層である。ここで、ヒ素に関して、更新統下総層群については堆積物の測定データが少ないことから堆積物中にヒ素が検出されなかった可能性がある。

地圏熱利用時に対象となる深度はおおよそ 100 m 以浅であることから、ホウ素・ヒ素に関して注意を払うべき地層は、沖積層の海成層・非海成層、更新統上総層群の海成層と関東ローム層である。研究項目 2-1 の 3 次元地質モデルによる既存のコア試料からの推定によれば、埼玉県南部については低地部全域、東京については、低地部全域と台地部(丘陵部)のほぼ全域がこれらの地層となる。このうち、ホウ素・ヒ素ともに堆積物および間隙水で高い出現状況となる完新統(沖積層)の海成層に限ると、完新統(沖積層)の地層厚が 50 m ほどとなる東京湾岸部が対象となり、ホウ素・ヒ素に関して十分な注意を払うべきである。ホウ素およびヒ素は、それぞれ 1000 µg/L と 10 µg/L の地下水環境基準が設定されており、本研究成果より、1°C の温度上昇に対してホウ素は 9.0 µg/L 程度、ヒ素は 0.7 µg/L 程度の濃度上昇を示す地層も存在することから、東京湾岸部のような高濃度にそれらが賦存する地域では、特に注意を要する。中でもヒ素については、地下水環境基準がごく低濃度に規定されていることから、1~2°C 程度のわずかな温度上昇によっても重大な環境への影響が想定される。

次に、地下温度変化による微生物叢変化の観点から提案される地下水利用・管理手法について次のように整理した。

本研究成果から得られた温度変化と存在量の変化の間に相関が見られた微生物種を表 3-10-1 にまとめた(研究項目 2-3)。沖積層の海成層、非海成層の両方において、温度が上昇すると好気性微生物が減少し嫌気性微生物が増加する傾向が見られた。地下水中の溶存酸素濃度には変化が見られないことから、堆積物の粒子間隙などの微環境において嫌気化が進んだものと考えられる。特に好氣的メタン酸化菌が減少すること、同地層には *Methanobacteria* 綱や *Methanomicrobia* 綱のメタン生成アーキアが多く含まれることから、メタンの発生量が増加する可能性が考えられる。一方、非海成の更新統上総層群では温度上昇によって好気性従属栄養バクテリアが増加した。堆積物中や地下水中に病原性をもつ好気性微生物が含まれていた場合、温度上昇に伴ってそれらが増加する危険が予想されることから、病原性微生物(あるいは一般細菌数、大腸菌数)について地圏熱利用前の調査と利用期間中のモニタリングを行うべきである。

沖積層の海成・非海成層では、地下水中の *Pseudoxanthomonas* 属バクテリアの存在量が温度上昇に伴って増加した。この属の中には五価のヒ素(ヒ酸)を土壌粒子への吸着・結合性が低い三価のヒ素(亜ヒ酸)に還元するものが知られているため、地下水中のヒ素濃度を上昇させる可能性が考えられる。実際に更新統(沖積層)の非海成層の地下水ではヒ素濃度の上昇が確認されており(研究項目 1-3)、生物的な作用が関与した可能性がある。海成層では濃度上昇こそ認められなかったものの堆積物中には含有されていることから(表 3-14-2)、ヒ素還元菌が最初から多く含まれる場所では温度上昇によってヒ素濃度が急激に上昇する危険性も考えられる。本研究では堆積物中から *Pseudoxanthomonas* 属バクテリアは検出されなかったが、ヒ素還元能をもつ微生物は他にも数属が知られており、ヒ素濃度が高い地層においてはヒ素還元菌の存在量にも注意を払う必要がある。

図 3-14-1 にアセスメントツール(研究項目 2-4)を活用した地圏熱利用を考慮した地下水利用・

管理手法提案へのフローを示す。3次元地質モデルとインベントリを参照することで、地圏熱利用を想定した地下水管理手法として、任意の化学物質(対象は堆積環境によって異なる)の濃度が、ある地点で何%上昇しないような運転を目指すためのヒートポンプ設計または運転期間の設定等を行うことが可能となった。国外の既存の地圏熱利用に関するガイドラインは地下温度または熱交換器内循環液温度に特化したものであったが(斎藤・小松, 2014), 本研究の成果から化学物質に着目したガイドライン作成に向けたプラットフォームを構築することができた。開発したアセスメントツールを活用する上で必要な物質輸送係数を表 3-14-3 にまとめ、各物質輸送係数に関する同定方法や取り扱い方について次のように整理した。

- ・ 熱伝導率, 体積熱容量, 透水係数, 溶質拡散係数: 既存の予測モデルにより地質情報(粒径組成や間隙率)によって推定可能。例えば熱伝導率・体積熱容量: de Vries (1963); Johansen (1975); Saito et al. (2014), 透水係数: Kozeny (1929), 溶質拡散係数: Millington and Quirk (1960, 1961), Hamamoto et al. (2012)
- ・ 熱分散長, 溶質分散長: スケール依存性を有し地質情報から推定することが難しいため, シミュレーション対象サイトでの原位置トレーサー試験(TRT 試験含む)から推定するか, 既存の文献データを利用する必要がある。
- ・ 分配係数: 異なる温度環境下で, 対象物質(地下水成分)の地盤への吸着特性に関するバッチ試験を実施するなどし, ファント・ホッフ式に用いるパラメータを同定する必要がある。
- ・ 透水係数, 溶質拡散係数については温度依存性を有するため(研究項目 2-2), 温度変化に伴う水の粘性係数変化を考慮したパラメータとして扱う。

さらに, アセスメントを実施する上での留意事項として次の点を挙げた。

- ・ 熱移動解析を行う上で, 支配的な流向, 流速を決める水頭勾配の傾向について把握する必要がある。そのため, 対象サイトまたはその付近での地盤内の水理特性(帯水層の存在深度や各帯水層の水圧状態)を既存データもしくは井戸設置による原位置観測データから入手する必要がある。
- ・ 温度環境の違いが地盤の力学特性を表すいくつかのパラメータに影響を与えることが室内試験から観測された(研究項目 1-7)。しかしながら, 地圏熱利用で想定する温度範囲では地圏熱利用による地盤力学特性に関する環境影響評価を行う必要性は小さいと考えられる。
- ・ 上記を踏まえたうえで, 地圏熱の利用形態(大規模, 冷房のみ, 暖房のみ, 冷暖両方)を明確にし, 境界条件として適切に組み込む。

研究プロジェクト全体としての今後の課題として, 以下が挙げられる:

- ・ 原位置での熱負荷試験は, 当初の計画に基づいて二つのサイトで実施した。今後は, 異なる堆積年代・堆積環境から成る地質が分布する地域で, 地下の温度変化が地下水中の水質成分ならびに微生物叢に及ぼす影響を検討する必要がある。これによって, どの地質ではどのような成分や微生物が影響を受けるか, より一般的な知見を得ることが可能となる。
- ・ DNA を用いて検出されたバクテリアやアーキアの多くはその代謝機能や生態が不明であり, このような未知微生物についての基礎的な生理・生態学的研究の蓄積が必要である。
- ・ 3次元地質モデルで対象としている地域と深度は限定的であるため, 今後, 対象領域を広げていく必要がある。また, インベントリの作成箇所も3地点であるため今後, 同様のフォーマットで収集することでより精度の高いものとなると期待できる。
- ・ アセスメントツールに必要なパラメータの内, 特に分配係数や形状係数といった対象物質(地下水成分)や対象地層に依存するパラメータについては, 文献データも少なく, より簡便な推定方法の開発が今後期待される。
- ・ 地盤強度の温度依存性が大きいことが要素試験などを通して予想される地域については, 本研究で開発した水・熱・溶質連成モデルに加えて, 力学特性を考慮したモデルも合わせた物質・熱・力学連成モデルについても検討が必要となる。

表 3-14-1 地温変化によって影響を受けた地下水水質項目の一覧

測定項目	温度上昇過程*	温度低下過程*	濃度変化量(mg/L or µg/L)/1°C上昇**		決定係数
<b>完新統沖積層(海成層)</b>					
Li	+	-	0.07	µg/L	0.36
B	+	-	8.16	µg/L	0.71
Si	+	-	0.53	mg/L	0.50
DOC	+	-	0.15	mg/L	0.25
Na <sup>+</sup>	+	-	0.17	mg/L	0.25
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	+	-	0.19	mg/L	0.46
K <sup>+</sup>	+	-	0.42	mg/L	0.82
Mg <sup>2+</sup>	-	+	-0.15	mg/L	0.61
Sr	-	※	-1.79	µg/L	0.26
Cl <sup>-</sup>	+	※	0.13	mg/L	0.21
<b>更新統沖積層(非海成層)</b>					
Li	+	※	0.02	µg/L	0.51
Si	+	※	0.33	mg/L	0.28
As	+	※	0.68	µg/L	0.79
Sr	-	※	-1.21	µg/L	0.25
K <sup>+</sup>	+	※	0.10	mg/L	0.46
Ca <sup>2+</sup>	-	※	-0.19	mg/L	0.69

\*(+:濃度上昇, -:濃度低下, Δ:変化なし, ※:未検討)

\*\* (現場試験は、初期温度+14°C程度までの観測であるため、14°C程度の温度上昇まで有効)

表 3-14-2 堆積年代と堆積環境の違いによるホウ素と砒素の出現状況(出現頻度が高いものから順番に○, Δ+, Δ, ×と4段階で表示)

		海成層		非海成層			
		完新統(沖積層)	更新統(上総層群)	更新統(沖積層)	更新統(下総層群)	関東ローム層	更新統(上総層群)
ホウ素	堆積物	Δ+	Δ	Δ	Δ	Δ+	Δ+
	間隙水	Δ	○	×	×	○	×
砒素	堆積物	○	○	Δ	×	Δ+	○
	間隙水	Δ	×	○	○	×	×

表 3-14-3 アセスメントツールの活用上で必要な物質輸送係数

物質輸送係数	
熱移動	縦・横熱分散長, 熱伝導率・体積熱容量
水移動	透水係数
溶質移動	縦・横溶質分散長, 溶質拡散係数 液-固相間の分配係数(任意温度) ファン・ホッフ式パラメータ

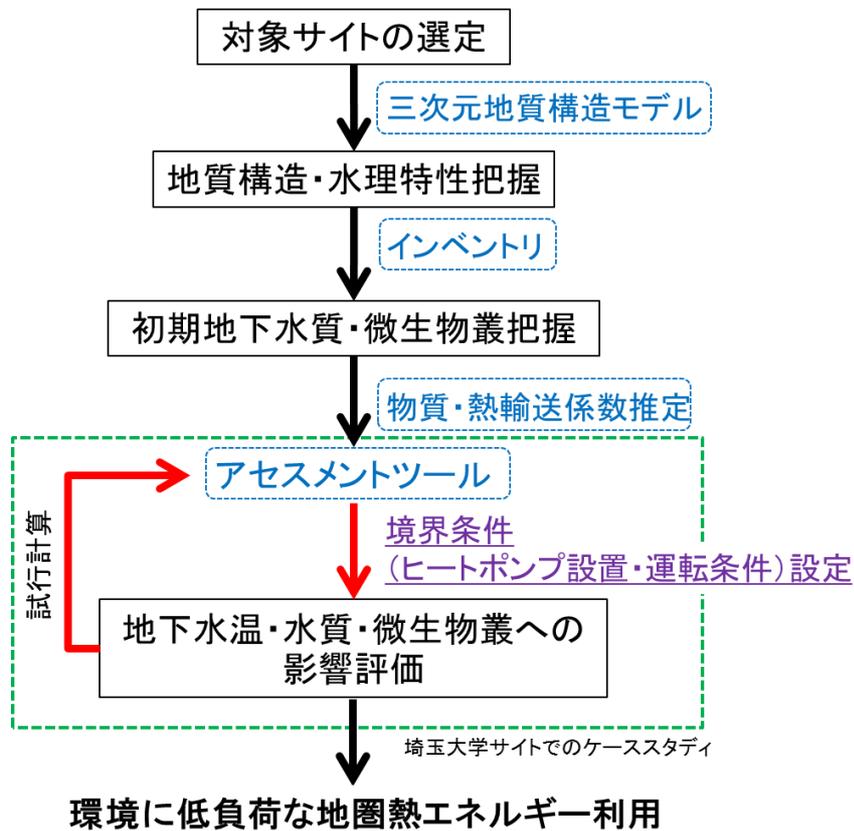


図 3-14-1 地下水利用・管理手法決定のためのフロー

#### § 4. 成果発表等

##### 1. 原著論文発表 (国内(和文)誌 14 件、国際(欧文)誌 28 件)

1. Hamamoto, S., Moldrup, P., Kawamoto, K., and Komatsu, T. Organic matter fraction dependent model for predicting the gas diffusion coefficient in variably saturated soils, *Vadose Zone Journal*, 11(1), DOI: 10.2136/vzj2011.0065, 2012.
2. Hamamoto, S., Moldrup, P., Kawamoto, K., and Komatsu, T. Maxwell's law based models for liquid and gas phase diffusivities in variably-saturated soil, *Soil Science Society of America Journal*, 76(5), 1509-1517, 2012.
3. Rouf, M. A., Hamamoto, S., Kawamoto, K., Sakaki, T., Komatsu, T., and Moldrup, P. Unified measurement system with suction control for measuring hysteresis in soil-gas transport parameters, *Water Resources Research*, 48(2), W02506, DOI: 10.1029/2011WR010615, 2012.
4. Dissanayaka, D. M. S. H, Hamamoto, S., Kawamoto, K., Komatsu, T., and Moldrup, P. Thermal properties for peaty soils: Effects of liquid phase impedance factor and shrinkage, *Vadose Zone Journal*, 11(1), DOI: 10.2136/vzj2011.0092, 2012.
5. Naveed, M., Hamamoto, S., Kawamoto, K., Sakaki, T., Takahashi, M., Komatsu, T., de Jonge, L. W., Lamande, M., and Moldrup, P. Gas dispersion in granular porous media under air-dry and wet conditions, *Soil Science Society of America Journal*,

- 76(3), 845-852, 2012.
6. Kotake, T., Hamamoto, S., Saito, T., Komatsu, T., Ohnishi, J., and Tsumuraya, Y. Characterization of alkali-soluble polysaccharides in deep subsoil layers, *Soil Science Plant Nutrition*, 59(6), 871-876, 2013.
  7. 笹沼公美, 濱本昌一郎, 川本健, 榊利博, 小松登志子, 脱水・吸水過程が不飽和砂質土の通気係数に与える影響, *土木学会論文集 C*, 69(3), 378-385, 2013.
  8. 向後雄二, 斎藤広隆, Win Win Pyone, 不飽和土の力学的挙動への温度の影響とそのモデル化, *農業農村工学会論文集*, 81(5), 45-53, 2013.
  9. Moldrup, P., Deepagoda T.K.K.C., Hamamoto, S., Komatsu, T., Kawamoto, K., Rolston, D. E., and de Jonge, L. W. Structure-dependent water-induced linear reduction model for predicting gas diffusivity and tortuosity in repacked and intact soil, *Vadose Zone Journal*, 12(3), DOI: 10.2136/vzj2013.01.0026, 2013.
  10. Naveed, M., Hamamoto, S., Kawamoto, K., Sakaki, T., Takahashi, M., Komatsu, T., Moldrup, P., Lamandé, M., Wildenschild, D., Prodanović, M., and de Jonge L.W. Correlating gas transport parameters and X-ray computed tomography measurements in porous media, *Soil Science* 178(2), 60-68, 2013.
  11. 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, 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*, 122, 472-492, 2013.
  12. 鴨志田剛久, 濱本昌一郎, 川本健, 榊利博, 小松登志子, 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*, 124, 11-16, 2013.
  13. Mon, E. E., Hamamoto, S., Kawamoto, K., Komatsu, T., and Moldrup, P. Temperature effects on geotechnical properties of kaolin clay: Simultaneous measurements of consolidation characteristics, shear stiffness, and permeability using a modified oedometer, *Journal of Geological Sciences*, 1(1), 1-10, 2013.
  14. Saito, T., Hamamoto, S., Mon, E.E., Komatsu, T., Takemura, T., Saito, H., and Moldrup, P., Thermal properties of deep boring core samples from the Kanto district, central Japan: Development of predictive models for thermal conductivity and diffusivity, *Soils and Foundations*, 54(2), 116-125, 2014.
  15. Naveed, M., Moldrup, P., Arthur, E., Holmstrup, M., Nicholaisen, M., Tuller, M., Herath, L., Hamamoto, S., Kawamoto, K., Komatsu, T., Vogel, H.J., and de Jonge, L.W. Simultaneous loss of soil biodiversity and functions along a copper contamination gradient: When soil goes to sleep, *Soil Science Society of America Journal*, 78(4), 1239-1250, 2014.
  16. 斎藤広隆, 斎藤健志, 向後雄二, 濱本昌一郎, Per Moldrup, 小松登志子, 熱応答試験の実施時間の短縮がみかけ熱伝導率推定に与える影響: 数値的研究, *土壌の物理性*, 128, 11-20, 2014.
  17. 船引彩子, 納谷友規, 斎藤広隆, 竹村貴人, 東京都府中市で掘削されたボーリングコア CRE-TAT-1 および CRE-TAT-2 の堆積相と堆積環境, *堆積学研究*, 73(2), 1-16, 2014.
  18. Deepagoda, T.K.K.C., Jones, S.B., Tuller, M., de Jonge, L.W., Kawamoto, K., Komatsu, T. and Moldrup, P. Modeling gravity effects on water retention and gas transport characteristics in plant growth substrates, *Advances in Space Research*, 54(4), 797-808, 2014.
  19. Rashid, H.M.A., Kawamoto, K., Saito, T., Komatsu, T., Inoue, Y. and Moldrup, P. Temperature effect on geotechnical and hydraulic properties of bentonite hydrated with inorganic salt solutions, *International Journal of GEOMATE*, 8(1), 1172-1179, 2015.
  20. 植村杏太, 高野洋一, 竹村貴人, 世田谷区における地下地盤情報に基づく再生可能エネルギーとしての地中熱のポテンシャル評価, *都市社会研究*, 7, 153-161, 2015.
  21. Sakaguchi, I., Inoue, Y., Nakamura, S., Kojima, Y., Sasai, R., Sawada, K., Suzuki, K., Takenaka, C. and Katayama, A. Assessment of soil remediation technologies by

- comparing health risk reduction and potential impacts using unified index, disability-adjusted life years, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17, 1663-1670, 2015.
22. Hamamoto, S., Kawamoto, K., Takemura, T., Kimura, K., Komatsu, T. and Oda, M. Geotechnical properties of Kanto alluvial soils based on geochemical survey, *Journal of Geological Sciences*, 2(1), 1-7, 2015.
  23. Deepagoda, T.K.K.C., de Jonge, L.W., Kawamoto, K., Komatsu, T. and Moldrup, P. The Water-induced linear reduction gas diffusivity model extended to three pore regions, *Vadose Zone Journal*, 14(10), DOI:10.2136/vzj2015.04.0051, 2015.
  24. Iwasaki, T., Kuroda, S., Saito, H., Tobe, Y., Suzuki, K., Fujimaki, H., and Inoue, M., Monitoring infiltration process seamlessly using array ground penetrating radar, *Agricultural and Environmental Letters*, 1:16002, DOI:10.2134/aerl2016.01.0002, 2016.
  25. Mon, E. E., Hamamoto, S., Kawamoto, K., Komatsu, T. and Moldrup, P. Temperature effects on solute diffusion and adsorption in differently-compacted kaolin clay, *Environmental Earth Science*, 75:562, 2016.
  26. Hamamoto, S., Dissanayaka, S., Kawamoto, K., Nagata, O., Komatsu, T. and Moldrup, P. Transport properties and pore-network structure in variably-saturated Sphagnum peat soil, *European Journal of Soil Science*, 67, 121-131., 2016.
  27. Thuyet, D.Q., Saito, H., Saito, T., Moritani, S., Kohgo, Y., and Komatsu, T. Multivariate analysis of trace elements in shallow groundwater in Fuchu in western Tokyo Metropolis, Japan, *Environmental Earth Sciences*, 75:559, 2016.
  28. Saito, T., Hamamoto, S., Ueki, T., Ohkubo, S., Moldrup, P., Kawamoto, K. and Komatsu, T. Temperature change affected groundwater quality in a confined marine aquifer during lot-term heating and cooling, *Water Research*, 94, 120-127, 2016.
  29. Hamamoto, S., Moldrup, P., Kawamoto, K., Sakaki, T., Nishimura, T., and Komatsu, T. Pore network structure linked by X-ray CT to particle characteristics and transport parameters, *Soils and Foundations*, 2016. (in press)
  30. Takemura, T., Sato, M., Chiba, T., Uemura, K., Ito, Y. and Funabiki, A. Effect of sedimentary facies and geological properties on thermal conductivity of Pleistocene volcanic sediments in Tokyo, central Japan. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2016. (in press)

〈Proceedings〉

31. 竹村貴人, 船引彩子, 原翔悟, 秋葉義彦, 伊東良晴, 環境地質学的なアプローチによる地温上昇が与える地下環境への影響評価, 第 10 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 19-22, 2013.
32. 濱本昌一郎, 斎藤健志, 植木崇, 立石佳祐, 松倉重雄, 小松登志子, 地盤への熱負荷が地温・地下水水質に与える影響, 環境地質学的なアプローチによる地温上昇が与える地下環境への影響評価, 第 10 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 11-18, 2013.
33. 金木厚憲, 竹村貴人, 市村智, 船引彩子, 濱本昌一郎, 斎藤健志, 関東ローム層における地温上昇に伴う溶出元素の特徴に関する実験的研究, 第 10 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 15-18, 2013.
34. Azad, M., 是枝晋, 濱本昌一郎, 斎藤広隆, 竹村貴人, 濱本昌一郎, 大西純一, 関東南部地下帯水層土壌に含まれる真正細菌叢の網羅的解析, 第 10 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 23-26, 2013.
35. 斎藤広隆, 武藤啓, Dang Quoc Thuyet, 向後雄二, 地盤熱応答の数値解析, 第 10 回環境地盤工学シンポジウム論文集, 27-32, 2013.
36. 向後雄二, 四津徹, 斎藤広隆, 不飽和土の力学的挙動への温度の影響, 第 10 回環境地盤工学シンポジウム論文集, 33-38, 2013.

37. 伊東良晴, 藤森裕基, 名古屋啓太, 竹村貴人, 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, 2013.
38. Mon, E. E., Hamamoto, S., Kawamoto, K., Oda, M., and Komatsu, T. Effect of temperature change on shear modulus of kaolin clay in the secondary compression stage, 18th Southeast Asian Geotechnical & Inaugural AGSSEA Conference, 29-31, 2013.
39. Thuyet, D.Q., Saito, H., Muto, H., Saito, T., Matsukura, S., and Moritani, S. Evaluation of trace elements in groundwater in Fuchu, Tokyo, Proceedings of Hydrology and Water Resources Symposium 2014, 151-158, 2014.
40. Takemura, T., Funabiki, A., Ito, Y., Hamamoto, S. and Saito, T. Effect of thermal change by ground source heat pump on groundwater and geoenvironment in the late pleistocene terrace area, Tokyo, Japan, Proceedings of the IAEG (International Association for Engineering Geology and the Environment) XII Congress, 1201-1204, 2014.
41. Ueki, T., Saito, T., Hamamoto, S., Sakaguchi, I., Arai, K., Kawamoto, K., Moldrup, P. and Komatsu, T. Effects of subsurface temperature increase on groundwater quality in alluvial sediment of Arakawa Low-land, Japan, Proceedings of the 5th International Conference on Sustainable Built Environment, 16-21, 2014.
42. Saito, T., Ueki, T., Ohkubo, S., Hamamoto, S., Kawamoto, K., Moldrup, P. and Komatsu, T. In-situ thermal disturbance affected groundwater quality in a marine sediment aquifer (Saitama, Japan), Proceedings of the 3rd International Symposium on Advances in Civil and Environmental Engineering Practices for Sustainable Development, 201-205, 2015.

## 2. その他の著作物(総説、書籍など)

1. 斎藤広隆, 濱本昌一郎, 小松登志子, 地中熱利用と地盤環境, 農業機械学会誌, 74(1), 20-25, 2012.
2. Saito, T., Hamamoto, S., Komatsu, T., Ohnishi, J., Takemura, T., and Saito, H. 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, p5, 2012.
3. Saito, T., Hamamoto, S., and Komatsu, T. Effects of long-term thermal loading in a ground source heat pump system on groundwater quality, Proceedings of the 40<sup>th</sup> International Association of Hydrogeologists Congress, Paper 270, p4, 2013.
4. 竹村貴人, 濱本昌一郎, 大西純一, 中尾有利子, 伊東芳夫, 地温変化が地盤環境に及ぼす影響と評価, 地盤工学会誌, 62(2), 42-49, 2014.
5. 斎藤健志, 小松登志子, 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(1), 15-25, 2014.
6. 濱本昌一郎, 西村拓, R.J. Millington and J. P. Quirk 著「多孔質媒体中の物質移動」, 土壌の物理性, 128, 39-46, 2014.
7. 竹村貴人, 植木岳雪, 遠藤邦彦, 安田進, 東京の地盤, 2013 年版関東の地盤—増補地盤情報データベースと地盤モデル付—(2014 年版)—, 2014.
8. 竹村貴人, 中里勝芳, 田島丈雄, 高野洋一, 地中熱利用のための地盤条件の抽出と熱及び水力による独立電源型システムの開発, 日大文理学部自然科学研究所紀要, 49, 111-118, 2014.
9. Saito, T., Ueki, T., Hamamoto, S., Thuyet, D.Q., Saito, H., Moldrup, P., Kawamoto, K., and Komatsu, T. Changes in groundwater temperature and quality during

in-situ, long-term thermal loading and natural cooling in two confined aquifers in Kanto Area of Japan. Proceedings of the IWA (International Water Association) World Water Congress & Exhibition 2014, 21-26, 2014.

### 3. 国際学会発表及び主要な国内学会発表

(1) 招待講演 (国内会議 3 件、国際会議 2 件)

〈国内〉

1. 小松登志子(埼玉大学理工学研究科), 地下温暖化による地下環境への影響, 都市域の地下温暖化と地中熱エネルギー研究報告会, 大阪, 平成 24 年 11 月 15 日.
2. 大西純一(埼玉大学理工学研究科), 関東平野地下帯水帯の微生物のサーベイ-脱窒菌に着目して, 熊本大学・埼玉大学 CREST 合同ワークショップ「地下水帯水層中での脱窒菌の振る舞い」, 熊本, 平成 24 年 11 月 17 日.
3. 小松登志子(埼玉大学理工学研究科), パネルディスカッション～地下熱利用でエコ社会の実現を～, 第 1 回地下水・地下熱資源強化活用シンポジウム, 富山, 平成 26 年 8 月 21 日.

〈国際〉

4. Toshiko Komatsu (埼玉大学理工学研究科), Thermal disturbances in the subsurface environment and groundwater conservation, JSPS Workshop on Water and Urban Environment, Lyon, France, 2012.6.19.
5. Toshiko Komatsu (埼玉大学理工学研究科), Effects of geo-thermal disturbance on subsurface environment and groundwater quality, International Conference on Sustainable Built Environment 2012, Special Session Water and Waste Management, Kandy, Sri Lanka, 2012.12.13.

(2) 口頭発表 (国内会議 48 件、国際会議 8 件)

〈国内〉

1. 濱本昌一郎(埼玉大学理工学研究科), 小松登志子, 竹村貴人, 大西純一, 斎藤広隆, 地圏熱の攪乱による地下水環境リスク評価に向けた研究プロジェクト紹介, 第 46 回地盤工学研究発表会, 神戸, 平成 23 年 7 月 5 日～7 日.
2. 森谷慈宙(東京農工大学農学研究院), 斎藤広隆, 向後雄二, 濱本昌一郎, 竹村貴人, 大西純一, 小松登志子, 地中熱ヒートポンプシステムの利用に関する環境影響評価～府中市における地下水・地盤環境特性～, 地下水学会秋季講演会, 広島, 平成 23 年 10 月 20 日～22 日.
3. 斎藤健志(埼玉大学理工学研究科), Mon, E.E., 濱本昌一郎, 竹村貴人, 斎藤広隆, 大西純一, 小松登志子, 地中熱ヒートポンプシステムの利用に関する環境影響評価～さいたま市における地下水・地盤環境特性～, 地下水学会秋季講演会, 広島, 平成 23 年 10 月 20 日～22 日.
4. Mon, E.E. (埼玉大学理工学研究科), 濱本昌一郎, 斎藤健志, 川本健, 小松登志子, Temperature effects on hydro-mechanical characteristics of Kaolinite, 日本地球惑星連合大会, 幕張, 平成 24 年 5 月 20 日～25 日.
5. 斎藤健志(埼玉大学理工学研究科), Mon, E.E., 濱本昌一郎, 竹村貴人, 斎藤広隆, 大西純一, 川本健, 小松登志子, The groundwater quality and pore water composition of alluvial deposit in Arakawa Lowland, Japan, 日本地球惑星連合大会, 幕張, 平成 24 年 5 月 20 日～25 日.
6. 森谷慈宙(東京農工大学農学研究院), 斎藤広隆, 武藤啓, 向後雄二, Numerical analysis of fate and transport of leaked heat exchanger fluids in borehole, 日本地球惑星連合大会, 幕張, 平成 24 年 5 月 20 日～25 日.

7. 梁瀬勇太(埼玉大学理工学研究科), 坪井浩昭, 濱本昌一郎, 川本健, 竹村貴人, 小田匡寛, 埼玉県南東部における沖積粘土の力学的性質に堆積環境が及ぼす影響, 第 47 回地盤工学研究発表会, 八戸, 平成 24 年 7 月 14 日~16 日.
8. Pyone Win Win(東京農工大学農学研究院), 南野浩清, 森谷慈宙, 斎藤広隆, 向後雄二, 不飽和土の力学的特性に対する温度依存性について, 農業農村工学会全国大会, 北海道, 平成 24 年 9 月 18 日~20 日.
9. 森谷慈宙(東京農工大学農学研究院), 斎藤広隆, 武藤啓, 向後雄二, 地中熱ヒートポンプシステムによる地温変化, 農業農村工学会全国大会, 北海道, 平成 24 年 9 月 18 日~20 日.
10. 向後雄二(東京農工大学農学研究院), Win Win Pyone, 斎藤広隆, 森谷慈宙, 不飽和土の力学的挙動への温度依存性とそのモデル化, 不飽和土研究会 2012 年研究発表会, 東京, 平成 24 年 9 月 24 日~25 日.
11. 笹沼公美(埼玉大学理工学研究科), 濱本昌一郎, 川本健, 榊利博, 小松登志子, 排水・吸水過程における不飽和砂質土のガス輸送係数, 第 9 回地盤工学会関東支部発表会 (Geo-Kanto 2012), 東京, 平成 24 年 10 月 5 日.
12. 嶋志田剛久(埼玉大学理工学研究科), 濱本昌一郎, 川本健, 榊利博, 小松登志子, 砂の熱特性: 土粒子の粒径・形状及び石英含有率による影響, 第 9 回地盤工学会関東支部発表会 (Geo-Kanto 2012), 東京, 平成 24 年 10 月 5 日.
13. 小松登志子(埼玉大学理工学研究科), 地下熱利用と地下水保全, 平成 24 年第 4 回地下熱利用とヒートポンプシステム研究会兼第 10 回研究発表会, 東京, 平成 25 年 3 月 6 日.
14. Saito, H.(東京農工大学農学研究院), Thuyet, D.Q., Muto, H., Kohgo, Y., Hamamoto, S., and Komatsu, T. Numerical simulation of heat exchange process during thermal response test, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張, 平成 25 年 5 月 19 日~24 日.
15. Mon, E. E.(埼玉大学理工学研究科), Hamamoto, S., Kawamoto, K., Komatsu, K., and Moldrup, P., Temperature effects on the solute diffusion process in kaolin clay, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張, 平成 25 年 5 月 19 日~24 日.
16. 斎藤健志(埼玉大学理工学研究科), 濱本昌一郎, 植木崇, 立石佳祐, 松倉重雄, 小松登志子, 長期熱負荷試験に伴う地下温度および地下水水質の変化, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張, 平成 25 年 5 月 19 日~24 日.
17. Thuyet, D. Q.(東京農工大学農学研究院), Muto, H., Moritani, S., and Saito, H. Simulation of ground heat exchange in subsurface soil, 日本砂丘学会第 59 回全国大会, 東京, 平成 25 年 7 月 4 日.
18. 大島寛之(埼玉大学理工学研究科), 坪井浩昭, 濱本昌一郎, 川本健, 竹村貴人, 小田匡寛, 埼玉県南東部沖積粘土の微細間隙構造とせん断剛性に関する研究, 第 48 回地盤工学会研究発表会, 富山, 平成 25 年 7 月 25 日.
19. 四津徹(東京農工大学農学研究院), 斎藤広隆, 向後雄二, 不飽和土の力学的挙動への温度の影響, 第 48 回地盤工学会研究発表会, 富山, 平成 25 年 7 月 25 日.
20. 小池拓也(埼玉大学理工学研究科), 濱本昌一郎, 川本健, 小松登志子, 榊利博, 異なる砂試料を用いたマイクロフォーカス X 線 CT による間隙構造解析及び物質移動係数測定, 第 48 回地盤工学会研究発表会, 富山, 平成 25 年 7 月 25 日.
21. 新屋陽理(埼玉大学工学部), Ei Ei Mon, 濱本昌一郎, 川本健, 小松登志子, 二次圧密時の温度変化が粘土の圧密特性およびせん断剛性に与える影響, 第 48 回地盤工学会研究発表会, 富山, 平成 25 年 7 月 25 日.
22. 濱本昌一郎(埼玉大学理工学研究科), 斎藤健志, 植木崇, 立石佳祐, 松倉重雄, 小松登志子, 地盤への熱負荷が地温・地下水水質に与える影響, 第 10 回環境地盤工学シンポジウム, 東京, 平成 25 年 9 月 17 日.
23. 金木厚憲(日本大学大学院), 竹村貴人, 秋葉義彦, 志村智, 船引彩子, 濱本昌一郎, 斎藤健志, 関東ローム層における温度上昇に伴う溶出元素の特徴に関する実験的研究, 第 10 回環境地盤工学シンポジウム, 東京, 平成 25 年 9 月 17 日.
24. 竹村貴人(日本大学文理学部), 船引彩子, 原翔吾, 秋葉義彦, 伊藤良晴, 環境地質学的な

- アプローチによる地温上昇が与える地下環境への影響評価, 第 10 回環境地盤工学シンポジウム, 東京, 平成 25 年 9 月 17 日.
25. Azad, M. (埼玉大学理工学研究科), 是枝晋, 斎藤広隆, 竹村貴人, 濱本昌一郎, 大西純一, 関東南部地下帯水層土壤に含まれる真正細菌叢の網羅的解析, 第 10 回環境地盤工学シンポジウム, 東京, 平成 25 年 9 月 17 日.
  26. 斎藤広隆 (東京農工大学農学研究院), 武藤啓, Thuyet, D.Q., 向後雄二, 地盤熱応答の数値解析, 第 10 回環境地盤工学シンポジウム, 東京, 平成 25 年 9 月 17 日.
  27. 向後雄二 (東京農工大学農学研究院), 四津徹, 斎藤広隆, 温度変化による不飽和土の力学的挙動, 第 10 回環境地盤工学シンポジウム, 東京, 平成 25 年 9 月 17 日.
  28. 植木崇 (埼玉大学理工学研究科), 栗原由衣, 斎藤健志, 濱本昌一郎, 川本健, 小松登志子, 荒川低地沖積層の間隙水組成に温度変化が与える影響, 第 10 回地盤工学会関東支部発表会 Geo Kanto2013, 東京, 平成 25 年 10 月 4 日.
  29. 栗原由衣 (埼玉大学理工学研究科), 植木崇, 濱本昌一郎, 斎藤健志, 川本健, 小松登志子, 温度変化が土壤中重金属の存在形態に与える影響, 第 10 回地盤工学会関東支部発表会 Geo Kanto, 東京, 平成 25 年 10 月 4 日.
  30. 有原萌恵 (埼玉大学理工学研究科), 濱本昌一郎, 川本健, 小松登志子, 地盤内の溶質分散特性の温度依存性に関する研究, 第 10 回地盤工学会関東支部発表会 Geo Kanto, 東京, 平成 25 年 10 月 4 日.
  31. 竹村貴人 (日本大学文理学部), 船引彩子, 秋葉義彦, 竹内真司, 東京都世田谷区における更新世堆積物の熱伝導率の特徴と熱応答特性, 平成 25 年度日本応用地質学会研究発表会, 名古屋, 平成 25 年 10 月 25 日.
  32. 大久保智司 (埼玉大学理工学研究科), 大西純一, Muhammad Azad, 須田互, 斎藤広隆, 竹村貴人, 濱本昌一郎, 小松登志子, 関東平野における地下圏の細菌群集構造解析, 第 8 回日本ゲノム微生物学会年会, 東京, 平成 26 年 3 月 7 日~9 日.
  33. Muto, H. (東京農工大学農学研究院), and H. Saito, Geostatistical interpolation of thermal properties of boring core samples, 日本地球惑星科学連合大会, 横浜, 平成 26 年 4 月 28 日~5 月 2 日.
  34. 坂口巖 (埼玉大学理工学研究科), 望月秀俊, 片山新太, 粕渕辰昭, 川本健, 小松登志子, 土壤水分特性曲線に基づいた熱伝導率の温度依存性のモデル化, 環境科学会 2014 年会, つくば, 平成 26 年 9 月 18 日~19 日.
  35. 伊東良晴 (日本大学大学院総合基礎科学研究科), 土屋梢, 芝山侑子, 杉本隆之, 名越篤史, 藤森裕基, 竹村貴人, 鈴木俊之, 辻井哲也, 岡田きよみ, TG-IR を用いた硫黄含有環境試料分析, 第 50 回記念熱測定討論会, 大阪, 平成 26 年 9 月 28 日~30 日.
  36. 有原萌恵 (埼玉大学理工学研究科), 濱本昌一郎, 川本健, 小松登志子, 温度変化が飽和多孔質体中の溶質移動特性に与える影響, 第 11 回地盤工学会関東支部発表会, 東京, 平成 26 年 10 月 3 日.
  37. 植木崇 (埼玉大学理工学研究科), 斎藤健志, 濱本昌一郎, 坂口巖, 新井和乃, 川本健, 小松登志子, 温度変化が荒川低地完新世堆積物からの重金属類溶出と存在形態に与える影響, 第 11 回地盤工学会関東支部発表会, 東京, 平成 26 年 10 月 3 日.
  38. 斎藤健志 (埼玉大学理工学研究科), 植木崇, 濱本昌一郎, 川本健, 小松登志子, 荒川低地地下帯水層の温度変化が地下水水質に与える影響, 日本地下水学会 2014 年秋季講演会, 熊本, 平成 26 年 11 月 6 日.
  39. Ueki, T. (埼玉大学理工学研究科), Saito, T., Hamamoto, S., Kawamoto, K., and Komatsu, T. Effects of temperature environment in dissolution and chemical forms of heavy metals of sediment in Arakawa lowland, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張, 平成 27 年 5 月 24 日~28 日.
  40. Yamada, K. (東京農工大学農学研究院), Thuyet, D.Q., Sakaguchi, I. and Saito, H. Impact of injecting heated water into aquifer on groundwater quality, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張, 平成 27 年 5 月 24 日~28 日.

41. Bandai, T. (東京大学大学院農学生命科学研究科), Hamamoto, S., Imoto, H., Nishimura, T. and Komatsu, T. Effects of particle size and thermal properties on thermal dispersion characteristics in porous media, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張, 平成 27 年 5 月 24 日～28 日.
42. 上田義勝(京都大学生存圏研究所), 徳田陽明, 二瓶直登, 濱本昌一郎, 小川雄一, 杉山暁史, ナノ・マイクロ粒子および微細気泡の水中の挙動に関する研究, 日本混相流学会混相流シンポジウム, 高知, 平成 27 年 8 月 4 日～6 日.
43. 濱本昌一郎(東京大学農学生命科学研究科), 二瓶直登, 上田義勝, 西村拓, 多孔質媒体内の微細気泡挙動に関する基礎的研究, 第 50 回地盤工学研究発表会, 札幌, 平成 27 年 9 月 1 日～3 日.
44. 万代俊之(東京大学農学生命科学研究科), 濱本昌一郎, 井本博美, 西村拓, 粒径および熱物性が飽和多孔質媒体内の熱分散現象に与える影響, 第 50 回地盤工学研究発表会, 札幌, 平成 27 年 9 月 1 日～3 日.
45. 山崎琢平(東京大学農学生命科学研究科), 井本博美, 濱本昌一郎, 西村拓, 土壌パイプが降雨流出応答に与える影響の実験的検討, 平成 27 年度農業農村工学会大会講演会, 岡山, 平成 27 年 9 月 1 日～4 日.
46. 坂口巖(埼玉大学理工学研究科), 望月秀俊, 斎藤健志, 川本健, 小松登志子, ボーリングコアサンプルの熱伝導率の温度依存性, 環境科学会 2015 年会, 大阪, 平成 27 年 9 月 7 日～8 日.
47. 大久保智司(埼玉大学理工学研究科), 斎藤健志, 小松登志子, 大西純一, 地下温度変化が地下水中の微生物群集に与える影響, 第 9 回日本ゲノム微生物学会若手の会, 八王子, 平成 27 年 9 月 29 日～30 日.
48. 釧持将人(埼玉大学理工学研究科), 斎藤健志, 濱本昌一郎, 川本健, 小松登志子, 地下水水質に対する地下温度上昇の影響, 第 12 回地盤工学会関東支部発表会 GeoKanto2015, 東京, 平成 27 年 10 月 9 日.  
斎藤健志(埼玉大学理工学研究科), 釧持将人, 宮坂加理, 坂口巖, 川本健, 小松登志子, 原位置長期加熱試験中の地下温度・地下水水質変化, 日本地下水学会 2015 年秋季講演会, 福井, 平成 27 年 10 月 22 日～24 日.

〈国際〉

49. Hamamoto, S. (埼玉大学理工学研究科), Developments of unified predictive models for solute and gas diffusivities in variably-saturated soil, The Seventh Asian Young Geotechnical Engineers Conference, Tokushima, Japan, 2012.9.12-14.
50. Moldrup, P. (オルボー大学 Department of Biotechnology, Chemistry and Environmental Engineering), Chamindu, D.T.K.K., Komatsu, T., Kawamoto, K., Hamamoto, S., de Jonge, L.W., and Rolston, D.E. Predicting the soil-gas diffusion coefficient: universal water-induced linear reduction (U-WLR) model for repacked and intact soil, 2012 ASA-CSSA-SSSA International Annual Meetings, Cincinnati, U.S.A., 2012.10. 21-24.
51. Mon, E.E. (埼玉大学理工学研究科), Hamamoto, S., Saito, T., Kawamoto, K., and Komatsu, T. Thermo-mechanical characteristics of a clay, Annual International Conference on Geological and Earth Sciences, Singapore, 2012.12.3-4.
52. Thuyet, D.Q.(東京農工大学農学研究院), Saito, H., Muto, H., Saito, T., Matsukura, S., and Moritani, S. Evaluation of trace elements in groundwater in Fuchu, Tokyo, Hydrology & Water Resources Symposium 2014, Perth, Australia, 2014.2.24-27.
53. Takemura, T. (日本大学文理学部), Funabiki, A., Ito, Y., Hamamoto, S. and Saito, T. Effect of thermal change by ground source heat pump on groundwater and geoenvironment in the late pleistocene terrace area, Tokyo, Japan. IAEG (International Association for Engineering Geology and the Environment) XII Congress, Torino, Italy, 2014.9.15-19.

54. Saito, T. (埼玉大学理工学研究科), Ueki, T., Hamamoto, S., Thuyet, D.Q., Saito, H., Moldrup, P., Kawamoto, K. and Komatsu, T. Changes in groundwater temperature and quality during in-situ, long-term thermal loading and natural cooling in two confined aquifers in Kanto Area of Japan, IWA World Water Congress & Exhibition 2014, Lisbon, Portugal, 2014.9.21-26.
55. Ueki, T. (埼玉大学理工学研究科), Saito, T., Hamamoto, S., Sakaguchi, I., Arai, K., Kawamoto, K., Moldrup, P. and Komatsu, T. Effects of subsurface temperature increase on groundwater quality in alluvial sediments of Arakawa Lowland, Japan, 5th International Conference on Sustainable Built Environment, Kandy, Sri Lanka, 2014.12.12-15.
56. Saito, T. (埼玉大学理工学研究科), Ueki, T., Ohkubo, S., Hamamoto, S., Kawamoto, K., Moldrup, P. and Komatsu, T. In-situ thermal disturbance affected groundwater quality in a marine sediment aquifer (Saitama, Japan). International Symposium on Advances in Civil and Environmental Engineering Practice for Sustainable Development, Galle, Sri Lanka, 2015.3.9.

(3)ポスター発表 (国内会議 56 件、国際会議 26 件)

〈国内〉

1. 船引彩子(日本大学文理学部), 千葉崇, 納谷友規, 植木岳雪, 竹村貴人, 東京都世田谷区で掘削されたボーリングコア CRE-NUCHS-1 の堆積相と堆積物性, 日本第四紀学会 2011 年大会, 東京, 平成 23 年 8 月 26 日~27 日.
2. 竹村貴人(日本大学文理学部), 船引彩子, 小松登志子, 濱本昌一郎, 斎藤広隆, 大西純一, 東京都世田谷区で掘削した更新統ボーリングコアの熱, 水理特性と地質要素, 平成 23 年度日本応用地質学会研究発表会, 札幌, 平成 23 年 10 月 27 日.
3. 森谷慈宙(東京農工大学農学研究院), 武藤啓, 斎藤広隆, 向後雄二, 濱本昌一郎, 竹村貴人, 大西純一, 小松登志子, 地中熱ヒートポンプシステムの熱交換井周囲における環境測定, 土壌物理学学会 2011 年大会, 札幌, 平成 23 年 10 月 28 日.
4. Pyone Win Win (東京農工大学農学研究院), 南野浩清, 斎藤広隆, 向後雄二, 濱本昌一郎, 竹村貴人, 大西純一, 小松登志子, 温度制御条件下における三軸圧縮および透水試験, 土壌物理学学会 2011 年大会, 札幌, 平成 23 年 10 月 28 日.
5. Azad, M. (埼玉大学理工学研究科), 是枝晋, 斎藤広隆, 竹村貴人, 濱本昌一郎, 大西純一, 小松登志子, 関東平野の地下帯水層土壤に含まれる真正細菌叢の網羅的解析(1), 微生物研究会, 松戸, 平成 23 年 11 月 12 日.
6. 船引彩子(日本大学文理学部), 千葉崇, 納谷友規, 植木岳雪, 森谷慈宙, 斎藤広隆, 濱本昌一郎, 小松登志子, 竹村貴人, 東京都府中市で掘削されたボーリングコア CRE-TAT-1 および CRE-TAT-2 の堆積相と堆積物物性, 日本堆積学会, 長崎, 平成 23 年 12 月 17 日.
7. 竹村貴人(日本大学文理学部), 小松登志子, 濱本昌一郎, 大西純一, 斎藤広隆, 船引彩子, 地盤情報の活用ー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への適用ー, 第 19 回地質調査総合センターシンポジウム「社会ニーズに応える地質地盤情報ー都市平野部の地質地盤情報をめぐる最新の動向ー」, 東京, 平成 24 年 1 月 31 日.
8. 船引彩子(日本大学文理学部), 高野洋一, 竹村貴人, 濱本昌一郎, 小松登志子, 東京都世田谷区~杉並区における地質条件を反映した地下の熱伝導率と地下水流動の検討, 日本地理学会 2012 年春季学術大会, 東京, 平成 24 年 3 月 28 日~29 日.
9. Dissanayaka, D.M.S.H. (埼玉大学理工学研究科), 濱本昌一郎, 川本健, 小松登志子, Heat and mass transport characteristics in differently-decomposed peaty soils at variably-saturated conditions, 日本地球惑星連合大会, 幕張, 平成 24 年 5 月 20 日~25 日.
10. 船引彩子(日本大学文理学部), 高野洋一, 竹村貴人, 濱本昌一郎, 小松登志子, Geothermal property and groundwater flow estimated from the lithology in the late

Pleistocene terrace area, Tokyo, Japan, 日本地球惑星連合大会, 幕張, 平成 24 年 5 月 20 日～25 日.

11. 武藤啓(東京農工大学農学研究院), 斎藤広隆, 森谷慈宙, 向後雄二, Numerical analysis of changes in ground temperature caused by ground source heat pump system using HYDRUS, 日本地球惑星連合大会, 幕張, 平成 24 年 5 月 20 日～25 日.
12. 鴨志田剛久(埼玉大学理工学研究科), 濱本昌一郎, 川本健, 榊利博, 小松登志子, 単粒・団粒構造を有する土壌の熱物性: 粒径および形状による影響, 日本地球惑星連合大会, 幕張, 平成 24 年 5 月 20 日～25 日.
13. 笹沼公美(埼玉大学理工学研究科), 濱本昌一郎, 川本健, 小松登志子, 榊利博, ガス・熱輸送係数に土壌水分ヒステリシスが及ぼす影響, 日本地球惑星連合大会, 幕張, 平成 24 年 5 月 20 日～25 日.
14. 鴨志田剛久(埼玉大学理工学研究科), 濱本昌一郎, 川本健, 榊利博, 小松登志子, 単粒・団粒構造を有する土壌の熱伝導特性: 粒径および形状による影響, 第 18 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, 埼玉, 平成 24 年 6 月 14 日～15 日.
15. 笹沼公美(埼玉大学理工学研究科), 濱本昌一郎, 川本健, 小松登志子, 榊利博, 土壌水分ヒステリシスがガス輸送係数に及ぼす影響, 第 18 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, 埼玉, 平成 24 年 6 月 14 日～15 日.
16. 竹村貴人(日本大学文理学部), 伊東良晴, 藤森裕基, 船引彩子, 地下浅部の温度上昇に伴う地質要素への影響評価- 上総層群における事例, 平成 24 年度日本応用地質学会研究発表会, 新潟, 平成 24 年 11 月 1 日.
17. 金木厚憲(日本大学大学院), 竹村貴人, 船引彩子, 秋葉義彦, 堆積物の構成元素とその間隙水の水質- 世田谷区における上総層群での例, 平成 24 年度日本応用地質学会研究発表会, 新潟, 平成 24 年 11 月 1 日.
18. 船引彩子(日本大学文理学部), 竹村貴人, 濱本昌一郎, 小松登志子, 東京都世田谷区～杉並区における地質条件を反映した地下水面と地下水流動の検討, 平成 24 年度日本応用地質学会研究発表会, 新潟, 平成 24 年 11 月 1 日.
19. Hu, Q. (Texas Univ.) and Hamamoto, S., Using complementary approaches to characterizing pore structure of natural rock, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張, 平成 25 年 5 月 19 日～24 日.
20. 鴨志田剛久(埼玉大学理工学研究科), 濱本昌一郎, 川本健, 榊利博, 小松登志子, 砂および団粒土の熱特性: 粒径・粒子形状・土壌構造の影響, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張, 平成 25 年 5 月 19 日～24 日.
21. 笹沼公美(埼玉大学理工学研究科), 濱本昌一郎, 川本健, 榊利博, 小松登志子, 砂質土の土壌水分ヒステリシスがガス・熱輸送係数に及ぼす影響, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張, 平成 25 年 5 月 19 日～24 日.
22. 黒田卓也(埼玉大学理工学研究科), Subedi, S., 川本健, Mueller, K., Clothier, B.E., 平舘俊太郎, 濱本昌一郎, 小松登志子, Modified TR model for soil water repellency characteristics curves for volcanic ash soils in Japan and New Zealand, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張, 平成 25 年 5 月 19 日～24 日.
23. 栗原由衣(埼玉大学理工学研究科), 濱本昌一郎, 川本健, 小松登志子, 温度変化が間隙水組成および土壌中重金属の存在形態に与える影響, 第 19 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, 京都, 平成 25 年 6 月 13 日～14 日.
24. 小池拓也(埼玉大学理工学研究科), 濱本昌一郎, 川本健, 小松登志子, 榊利博, 粒子形状・粒径・締固め度の違いが土壌の間隙構造および物質輸送係数に与える影響, 第 19 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, 京都, 平成 25 年 6 月 13 日～14 日.
25. 植木崇(埼玉大学理工学研究科), 立石佳祐, 斎藤健志, 濱本昌一郎, 川本健, 小松登志子, 地下水温変化が地下水水質に与える影響, 第 19 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, 京都, 平成 25 年 6 月 13 日～14 日.
26. 有原萌恵(埼玉大学理工学研究科), 濱本昌一郎, 川本健, 小松登志子, 温度変化が地盤

- 内の溶質分散特性に与える影響, 第19回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, 京都, 平成25年6月13日~14日.
27. 大西純一(埼玉大学理工学研究科), Muhammad Azad, 大久保智司, 斎藤広隆, 竹村貴人, 濱本昌一郎, 小松登志子, 関東平野の地下帯水層土壌に含まれる真正細菌叢の網羅的解析, 第29回日本微生物生態学会大会, 鹿児島, 平成25年11月23日~25日.
  28. 大久保智司(埼玉大学理工学研究科), 斎藤健志, 濱本昌一郎, 大西純一, 小松登志子, 地下水中の微生物叢に対する地下温度上昇の影響, 第29回日本微生物生態学会大会, 鹿児島, 平成25年11月23日~25日.
  29. 斎藤健志(埼玉大学理工学研究科), 植木崇, 松倉重雄, 濱本昌一郎, 竹村貴人, 小松登志子, 荒川低地(さいたま市)における地質・地下水環境特性, 第3回同位体環境学シンポジウム, 京都, 平成25年12月17日~18日.
  30. 大久保智司(埼玉大学理工学研究科), 大西純一, Muhammad Azad, 須田瓦, 斎藤健志, 斎藤広隆, 竹村貴人, 濱本昌一郎, 小松登志子, 関東平野南部における地下堆積物中の細菌群集構造, 日本地球惑星科学連合大会, 横浜, 平成26年4月28日~5月2日.
  31. Saito, T. (埼玉大学理工学研究科), Ueki, T., Hamamoto, S., Moldrup, P., Ohkubo, S., Kawamoto, K. and Komatsu, T. Effects of in-situ, long-term thermal loading on groundwater quality in marine sediments of Arakawa Lowland, Japan, 日本地球惑星科学連合大会, 横浜, 平成26年4月28日~5月2日.
  32. 斎藤健志(埼玉大学理工学研究科), 植木崇, 濱本昌一郎, 川本健, 小松登志子, 荒川低地地下帯水層への長期的熱負荷と自然放冷過程における地下水温・水質変化, 第20回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, 和歌山, 平成26年6月19日~20日.
  33. 植木崇(埼玉大学理工学研究科), 栗原由衣, 斎藤健志, 濱本昌一郎, 川本健, 小松登志子, 荒川低地地完新世堆積物の重金属の存在形態とその溶出特性に温度変化が与える影響, 第20回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, 和歌山, 平成26年6月19日~20日.
  34. 濱本昌一郎(東京大学農学生命科学研究科), 川本健, 小松登志子, Per Moldrup, 不飽和土壌の溶質・ガス拡散係数の統合的予測モデルの構築, 農業農村工学会大会講演会, 新潟, 平成26年8月26日~8月28日.
  35. 石橋咲耶(東京大学農学生命科学研究科), 濱本昌一郎, 井本博美, 西村拓, 炭酸カルシウム及び有機物を用いた塩類土壌の修復に関する研究, 農業農村工学会大会講演会, 新潟, 平成26年8月26日~8月28日.
  36. 山崎琢平(東京大学農学生命科学研究科), 井本博美, 濱本昌一郎, 西村拓, 土壌パイプが降雨流出応答に及ぼす影響, 2014年度土壌物理学会大会, 福島, 平成26年10月25日.
  37. 大久保智司(埼玉大学理工学研究科), 斎藤健志, 江上亮太, 林大和, 柳沼孟, 小松登志子, 大西純一, 地下温度変化による地下水中の微生物群集への影響, 環境微生物系学会合同大会2014, 浜松, 平成26年10月22日~24日.
  38. 高野洋一(日本大学大学院総合基礎科学研究科), 竹村貴人, 地下の熱環境の視点から見た地中熱ヒートポンプの影響, 日本応用地質学会平成26年度研究発表会, 福岡, 平成26年10月29日~30日.
  39. 植村杏太(日本大学文理学部自然科学研究所), 竹村貴人, 関東平野南部における段丘離水層準付近に分布する粘土質堆積物の物性, 日本応用地質学会平成26年度研究発表会, 福岡, 平成26年10月29日~30日.
  40. 大久保智司(埼玉大学理工学研究科), 斎藤健志, 江上亮太, 林大和, 柳沼孟, 小松登志子, 大西純一, 地下水中の微生物群集に対する地下温度変化の影響, 第9回日本ゲノム微生物学会年会, 神戸, 平成27年3月6日~8日.
  41. Yamasaki, T. (東京大学農学生命科学研究科), Imoto, H., Hamamoto S. and Nishimura, T. Soil pipe effect on rainfall-runoff process, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張, 平成27年5月24日~28日.
  42. Kenmochi, M. (埼玉大学理工学研究科), Ueki, T., Saito, T., Hamamoto, S.,

- Kawamoto, K., Moldrup, P. and Komatsu, T. Effects of temperature change in a marine subsurface aquifer on groundwater quality, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張, 平成 27 年 5 月 24 日～28 日.
43. Arihara, M. (埼玉大学理工学研究科), Hamamoto, S., Kawamoto, K., Nishimura, T. and Komatsu, T. Temperature Dependency on Solute Transport Parameters in Porous Media at Saturated Condition, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張, 平成 27 年 5 月 24 日～28 日.
  44. 斎藤健志(埼玉大学理工学研究科), 申基澈, 中野孝教, 小松登志子, 多重検出器型 ICP 質量分析計によるホウ素同位体比測定の検討, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張, 平成 27 年 5 月 24 日～28 日.
  45. 斎藤健志(埼玉大学理工学研究科), 植木崇, 濱本昌一郎, 川本健, 小松登志子, 温度変化が地球化学的特性の異なる堆積物中微量元素の存在形態に及ぼす影響, 第 21 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, 福岡, 平成 27 年 6 月 18 日～19 日.
  46. 釦持将人(埼玉大学理工学研究科), 植木崇, 斎藤健志, 川本健, 小松登志子, 濱本昌一郎, 地下帯水層の長期的温度変化が地下水水質に及ぼす影響, 第 21 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, 福岡, 平成 27 年 6 月 18 日～19 日.
  47. 大久保智司(埼玉大学理工学研究科), 斎藤健志, 小松登志子, 大西純一, 地下温度変化が地下水中の微生物群集に与える影響, NGS 現場の会第4回研究会, つくば, 平成 27 年 7 月 1 日～3 日.
  48. 大西純一(埼玉大学理工学研究科), 大久保智司, 斎藤健志, 小松登志子, Effect of temperature change on microbial community structure in groundwater during long-term thermal loading experiments, 第 30 回日本微生物生態学会大会, 土浦, 平成 27 年 10 月 17 日～20 日.
  49. 濱本昌一郎(東京大学農学生命科学研究科), 二瓶直登, 上田義勝, 西村拓, 流速およびガス種の違いが多孔質媒体内の微細気泡挙動に与える影響, 2015 年度土壌物理学学会大会, 佐賀, 平成 27 年 10 月 24 日.
  50. 万代俊之(東京大学農学生命科学研究科), 濱本昌一郎, 井本博美, 西村拓, 小松登志子, 粒径および熱物性が飽和多孔質体中の熱分散現象に与える影響, 2015 年度土壌物理学学会大会, 佐賀, 平成 27 年 10 月 24 日.
  51. Thuyet, D.Q. (東京大学農学生命科学研究科), 辰野宇大, 井本博美, 濱本昌一郎, 西村拓, 有機コロイドによる放射性 Cs 移動促進に関する研究, 2015 年度土壌物理学学会大会, 佐賀, 平成 27 年 10 月 24 日.
  52. 山崎琢平(東京大学農学生命科学研究科), 井本博美, 濱本昌一郎, 西村拓, 土壌パイプが地下水形成に及ぼす影響, 2015 年度土壌物理学学会大会, 佐賀, 平成 27 年 10 月 24 日.
  53. 斎藤健志(埼玉大学理工学研究科), 釦持将人, 宮坂加理, 上島雅人, 川本健, 小松登志子, 長期的な地下水温変化が地下水中の溶存成分に及ぼす影響, 第 5 回同位体環境学シンポジウム, 京都, 平成 27 年 12 月 25 日.
  54. 斎藤健志(埼玉大学理工学研究科), 釦持将人, 道下雄志, 松本光平, 上島雅人, 川本健, 小松登志子, 長期的な地下温度変化が地下水水質に与える影響の定量的評価, 第 50 回日本水環境学会年会, 徳島, 平成 28 年 3 月 16 日～18 日.
  55. 上島雅人(埼玉大学理工学研究科), 地盤の有効利用と環境保全, 第 5 回超異分野学会(関西), 京都, 平成 28 年 3 月 19 日.
  56. Kenmochi, M. (埼玉大学理工学研究科), Saito, T., Kawamoto, K. and Komatsu, T. Change in Groundwater Quality during the Long Term Thermal Loading and Cooling, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張, 平成 28 年 5 月 22 日～26 日.

〈国際〉

57. Moritani, S. (東京農工大学農学研究院), Saito, H., Kohgo, Y., Hamamoto, S., Takemura, T., Ohnishi, J., Kawamoto, K., and Komatsu, T. Characterization of soil

- thermal, hydrological, and mechanical properties at Musashino fluvial terrace in Fuchu, Japan, AGU Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., 2011.12. 6.
58. Saito, T. (埼玉大学理工学研究科), Mon, E. E., Hamamoto, S., Tanimoto, K., Takemura, T., Saito, H., Ohnishi, J., Kawamoto, K., and Komatsu, T. Pore water and groundwater quality; its relation to the latest Pleistocene to Holocene sedimentary facies in central Japan, AGU Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., 2011.12.6.
  59. Mon, E. E. (埼玉大学理工学研究科), Saito, T., Hamamoto, S., Takemura, T., Saito, H., Ohnishi, J., Kawamoto, K., and Komatsu, T. Geothermal characteristics of the latest Pleistocene to Holocene sediments in Japan and their correlations with geophysical properties, AGU Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., 2011.12.6.
  60. Ito, Y. (日本大学大学院), Fujimori, H., and Takemura, T. Thermal behavior of the absorption water in clay mineral, The 2012 International Conference on Chemical Thermodynamics (ICCT2012), Brazil, 2012.8.5-10.
  61. Saito, T. (埼玉大学理工学研究科), Hamamoto, S., Takemura, T., Saito, H., Ohnishi, J., and Komatsu, T. Pore water and groundwater chemistry coupled with geological and microbiological investigations in Arakawa Lowland and Musashino Upland, central Japan, 39<sup>th</sup> International Association of Hydrogeologists Congress, Niagara Falls, Canada, 2012.9.16-21.
  62. Ito, Y. (日本大学大学院), Fujimori, H., and Takemura, T. Thermal behavior of the absorption water in drilled-core from Setagaya, Tokyo, Japan, 15<sup>th</sup> International Congress on Thermal analysis and Calorimetry (ICTAC2012), Osaka, 2012.9.24-27.
  63. Saito, H. (東京農工大学農学研究院), Morintai, S., Muto, H., and Kohgo, Y. Numerical analysis of heat exchange processes for ground source heat pump, ASA, CSA, and SSSA International Annual Meeting, Cincinnati, U.S.A., 2012.10.21-24.
  64. Saito, H. (東京農工大学農学研究院), Muto, H., Moritani, S., Kohgo, Y., and Komatsu, T. Numerical analysis of heat exchange processes for the ground source heat pump system, AGU Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., 2012.12.3-7.
  65. Sasanuma, K. (埼玉大学理工学研究科), Hamamoto, S., Kawamoto, K., Sakaki, T., and Komatsu, T. Gas and heat transport parameters for sands during drying and wetting processes in the capillary water zone, AGU Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., 2012.12. 3-7.
  66. Kamoshida, T. (埼玉大学理工学研究科), Hamamoto, S., Kawamoto, K., Sakaki, T., Komatsu, T., and Hu, Q. Effects of particle size and shape, and soil structure on thermal properties of non-aggregated and aggregated soils, AGU Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., 2012.12. 3-7.
  67. Saito, T. (埼玉大学理工学研究科), Hamamoto, S., and Komatsu, T. Effects of long-term thermal loading in a ground source heat pump system on groundwater quality, 40<sup>th</sup> International Association of Hydrogeologists Congress, Perth, Australia, 2013.9.15-20.
  68. Hamamoto, S. (埼玉大学理工学研究科), Koike, T., Kawamoto, K., Komatsu, T., Moldrup, P., and Sasaki, T. Pore structure analysis by micro focus X-ray CT for sands with different size fractions and particle shape, and mass transport parameters, Poster #2510, ASA, CSSA, & SSSA International Annual Meetings, Tampa, U.S.A., 2013.11.3-6.
  69. Hamamoto, S. (埼玉大学理工学研究科), Koike, T., Kawamoto, K., Komatsu, T., and Moldrup, P. Pore structure analysis using micro focus X-ray CT for different sandy soils and link to mass transport parameters, H31E-1225, AGU Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., 2013.12.10-13.
  70. Thuyet, D.Q. (東京農工大学農学研究院), Muto, H., Saito, T., Matsukura, S., Moritani, S., Saito, H., and Komatsu, T. Effect of ground source heat pump system on the subsurface soil temperature and groundwater quality in Fuchu, Tokyo, AGU

- Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., 2013.12.10-13.
71. Saito, H. (東京農工大学農学研究院), Hamamoto, S., Moldrup, P., and Komatsu, T. Determining in-situ thermal conductivity of coarse textured materials through numerical analysis of thermal response test, AGU Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., 2013.12.10-13.
  72. Hamamoto, S. (東京大学農学生命科学研究科), Arihara, M., Kawamoto, K., Nishimura, T. and Komatsu, T. Temperature dependency of solute transport characteristic in soils at saturated condition, P1-223, 20<sup>th</sup> World Congress of Soil Science, Korea, 2014.6.9.
  73. Ito, Y. (日本大学大学院総合基礎科学研究科), Sugimoto, T., Fujimori, H., Nagoe, A. and Takemura, T. Thermal behavior of boiling and melting of adsorbed water in clay minerals, International Conference of Chemical Thermodynamics and the SAICChE National Conference (ICCT SAICChE Conference 2014), Durban, South Africa, 2014.7.27-8.1.
  74. Saito, H. (東京農工大学農学研究院), D.Q. Thuyet and Kohgo, Y. Numerical evaluation of alternative ground source heat exchanger configuration and operation, 2<sup>nd</sup> International Conference on Arid Land Studies (ICAL2), Samarkand, Uzbekistan, 2014.9.10-14.
  75. Hamamoto, S. (東京大学農学生命科学研究科), Arihara, M., Kawamoto, K., Nishimura, T., Komatsu, T. and Moldrup, P. Effects of temperature on solute transport parameters in differently-textured soils at saturated condition, AGU Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., 2014.12.15-19.
  76. Ito, Y. (日本大学大学院総合基礎科学研究科), Sugimoto, T., Fujimori, H., Nagoe, A. and Takemura, T. Thermal behavior of water confined in micro porous of clay mineral at additional pressure, AGU Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., 2014.12.15-19.
  77. Ueda, Y. (京都大学生存圏研究所), Tokuda, Y., Ogawa, Y., Sugiyama, A., Naoto, N. and Hamamoto, S. Effects on the interfaces between fine particle and pure water, 9<sup>th</sup> International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flow, Sapporo, 2015.9.23.
  78. Sakaguchi, I. (埼玉大学理工学研究科), Mochizuki, H., Katayama, A., Kasubuchi, T., Saito, T., Kawamoto, K. and Komatsu, T. For developing of an alternative model on temperature dependence of soil thermal conductivity, International Symposium on EcoTopia Science, Nagoya, 2015.11.27-29.
  79. Bandai, T. (東京大学農学生命科学研究科), Hamamoto, S., Imoto, H., Nishimura, T. and Komatsu, T. Experimental study on the validation of thermal equilibrium assumption between solid and liquid phases in convective heat flow in porous media, AGU Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., 2015.12.14-18.
  80. Hamamoto, S. (東京大学農学生命科学研究科), N. Nihei, Y. Ueda, and T. Nishimura. Effects of flow velocity and particle size on transport of ultrafine bubbles in porous media, AGU Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., 2015.12.14-18.
  81. Saito, H. (東京農工大学農学研究院), Saito, T., Hamamoto, S and Komatsu, T. Modeling temperature dependence of trace element concentrations in groundwater using temperature dependent distribution coefficient, AGU Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., 2015.12.14-18.
  82. Takemura, T. (日本大学文理学部), Uemura, K., Akiba, Y. and Ota, M. In situ study of the effect of ground source heat pump on shallow ground-water quality in the late Pleistocene terrace area of Tokyo, Japan, AGU Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., 2015.12.14-18.

#### 4. 知財出願

(1)国内出願 (0 件)

(2)海外出願 (0 件)

(3)プログラムの著作物

①なし

(4)データベースの著作物

①なし

## 5. 受賞・報道等

(1)受賞

1. 第 46 回地盤工学研究発表会優秀論文発表者賞, 濱本昌一郎, 平成 23 年 7 月 5 日, 濱本昌一郎, 小松登志子, 竹村貴人, 大西純一, 斎藤広隆, 地圏熱環境の攪乱による地下水環境リスク評価に向けた研究プロジェクト紹介.
2. \* Soil Science Society of America, Soil Physics Division Early Career Award, Shoichiro Hamamoto, 2013.12.6.
3. 第 10 回地盤工学会関東支部発表会 Geo Kanto2013 優秀発表賞, 植木崇, 平成 25 年 10 月 4 日, 植木崇, 栗原由衣, 斎藤健志, 濱本昌一郎, 川本健, 小松登志子, 荒川低地沖積層の間隙水組成に温度変化が与える影響.
4. 第 50 回地盤工学研究発表会優秀論文発表者賞, 万代俊之, 平成 27 年 9 月 1 日~3 日, 万代俊之, 濱本昌一郎, 井本博美, 西村拓, 粒径および熱物性が飽和多孔質媒体内の熱分散現象に与える影響.
5. 日本地下水学会 2015 年秋季講演会 若手優秀講演賞, 斎藤健志, 平成 27 年 10 月 22 日~24 日, 斎藤健志, 釘持将人, 宮坂加理, 坂口巖, 川本健, 小松登志子, 原位置長期加熱試験中の地下温度・地下水質変化.

(2)マスコミ(新聞・TV等)報道

1. AERA, 竹村貴人「液状化大国ニッポン」(埼玉県における海成粘土の分布についてコメント), 平成 23 年 7 月 4 日発行.
2. 水道産業新聞, 小松登志子「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」, 平成 23 年 9 月 29 日発行.
3. 日本水道新聞, JST/CREST 革新的水利用の創出へ, 連載第 11 回, 小松登志子「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」, 平成 23 年 10 月 6 日発行.
4. JST News, ようこそ私の研究室へ 55, 小松登志子「ヒートポンプシステム利用による地下環境への影響を解明する」p14~15, 平成 23 年 10 月 7 日発行.
5. 埼玉新聞サイ・テクこらむ知と技の発信, 小松登志子「地圏熱かく乱と地下水保全」, 平成 23 年 11 月 23 日発行.
6. インタビュー記事, Maxims News LLC, Sustainable Groundwater Management in Response to the Increasing Popularity of Geo-Thermal Heat Pumps, Exclusive Interview with Prof Toshiko Komatsu of Saitama University, by Marisha Wojciechowska – Shibuya (Maxims News Network), 平成 24 年 6 月 5 日発行.  
(<http://www.maximsnews.com/news20120514KomatsuCREST11205140803.htm>)
7. 朝日新聞デジタル版, 竹村貴人「液状化、遺跡にも痕跡 安土桃山時代の地震でも 京都」(海成粘土の解説), 平成 24 年 10 月 7 日発行.
8. 埼玉大学サイ・テクこらむ収録集, 埼玉大学理工学研究科「理学・工学の散歩道 I」, 小松登

- 志子「地圏熱かく乱と地下水保全」, p104~105, 平成 24 年 11 月 15 日発行.
9. 日刊建設工業新聞, 「アジア都市の地下温暖化研究グループ 大阪平野で地下水温上昇」, 小松登志子, 研究成果報告会で研究発表, 平成 24 年 11 月 20 日発行.
  10. 日本水道新聞, 日本下水道新聞共同編集「水の未来・50 年後の姿 水環境と技術の未来像」, 小松登志子, CREST 研究紹介, 平成 25 年 1 月 24 日発行.
  11. 環境新聞, 「地中熱 HP の地下環境影響評価 普及促進へ議論進深化を」, 第 2 回研究課題シンポジウム, 平成 25 年 9 月 4 日発行.
  12. 水道産業新聞, 「地中水管理手法の研究を紹介」, 第 127 回水道技術懇話会, 平成 25 年 12 月 13 日発行.
  13. 埼玉新聞サイ・テクこらむ知と技の発信, 斎藤健志「地下が熱くなるとどうなる?」, 平成 27 年 7 月 22 日発行.
  14. 埼玉大学サイ・テクこらむ収録集, 埼玉大学理工学研究科「理学・工学の散歩道Ⅲ」, 斎藤健志「地下が熱くなるとどうなる?」, p144~145, 平成 28 年 3 月 31 日発行.

### (3) その他

#### a. CREST シンポジウム

1. 第 1 回研究課題シンポジウム「地下水は地球を温暖化から救う? ~温暖化緩和に向けた地中熱利用と地下水・地盤熱環境~」埼玉大学環境科学研究センター主催 日時:平成 23 年 11 月 18 日(金) 13:30~16:30 場所:埼玉大学総合研究棟 1 階 シアター教室 (参加者 70 名)
2. 第 2 回研究課題シンポジウム「地下温度環境の変化と地下水保全」科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業主催 日時:平成 25 年 8 月 28 日(水) 13:00~16:45 場所:アルカディア市ヶ谷 私学会館 (参加者 81 名)

#### b. その他

1. 濱本昌一郎, 小松登志子, 川本健, 「地盤内物質・熱動態解明と環境リスク評価ー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に向けた研究プロジェクト紹介ー」, 第 9 回埼玉大学産学官交流会テクノカフェ, 埼玉大学, 平成 23 年 3 月 8 日.
2. 小松登志子, 「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」, 第 10 回埼玉大学産学交流テクノカフェ「芽生える好奇心」, 埼玉大学, 平成 23 年 11 月 7 日.
3. 小松登志子, 土壌内における熱・物質移動に関する研究「地下で温暖化が起ると, どうなる? ~熱汚染の視点から地下水保全を考える~」, 埼玉大学広報誌「樺」特別号, 平成 23 年 4 月 1 日.
4. 竹村貴人, 「研究紹介」, 栄冠めざして SPECIAL 理工・情報・生命・環境系学部 特集号, 河合塾, 平成 23 年 4 月.
5. 竹村貴人, 「地圏空間の利用」, 日本大学広報特別版 研究者だより, 平成 23 年 10 月.
6. 小松登志子, 「地下で温暖化が起こると, どうなる? ~地下の温度変化が地下水環境に与える影響を考える~」, 平成 23 年度埼玉県創造的異業種交流大会講演会, 埼玉, 平成 24 年 2 月 20 日.
7. 小松登志子, 「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」(全体構想, 埼玉大学グループ研究成果), 埼玉大学研究紹介フェア, 平成 24 年 3 月 16 日.
8. 竹村貴人, 「研究紹介」, 日本大学 教育・研究ガイドブック, 平成 24 年 10 月.
9. 小松登志子, 地中熱利用が地下環境に与える影響, 第 13 回埼玉大学産学交流会テクノカフェ(埼玉県産学連携支援ネットワーク会議セミナー), 埼玉大学, 平成 25 年 3 月 7 日.
10. 濱本昌一郎, 「地中熱利用と地盤環境リスク」, 平成 25 年度エコプローブ総会, 山梨, 平成 25 年 6 月 7 日.
11. 小松登志子, 「地下温度変化が地下水に与える影響~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～」，信州大学 RISTEX 研究プロジェクト「水資源の保全をエネルギー利用に関する公開勉強会」，長野，平成 25 年 11 月 22 日。
12. 小松登志子，「地下温度環境を考慮した地下水保全」，第 127 回水道技術懇話会，東京，平成 25 年 12 月 4 日。
  13. 小松登志子，研究紹介発表「Sustainable groundwater management systems under enhanced geo-thermal energy usage」，National cooperative for the disposal of radioactive waste, Wettingen, Switzerland, 平成 26 年 5 月 7 日。
  14. 小松登志子，「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」，第 1 回地中熱ヒートポンプ技術開発研究会 次世代住宅産業プロジェクト推進事業・埼玉県産業振興公社主催，新都心ビジネス交流プラザ，平成 26 年 5 月 16 日。
  15. NPO 法人地下水・地下熱資源強化活用研究会 (AGREA) 熱応答試験 (TRT)・解析講習会「地中熱関連の研究トピック」，日本大学文理学部百周年記念館，平成 26 年 6 月 19 日。
  16. 小松登志子，研究紹介発表「CREST 研究課題：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」，農業環境技術研究所，平成 26 年 8 月 6 日。
  17. 一般社団法人日本応用地質学会「環境地質研究部会」“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—地質モデルの作成と利用について—”，日本応用地質学会，平成 26 年 10 月 20 日。
  18. 一般社団法人地盤工学会関東支部「東京の地盤，新・関東の地盤 —増補地盤情報データベースと地盤モデル付—(2014 年版)に関する講習会 ～地盤モデルおよび地震応答解析に関する演習付～」，一般社団法人地盤工学会，平成 26 年 10 月 31 日。
  19. 小松登志子，文部科学省大臣官房審議官磯谷桂介氏 (研究開発局担当) 埼玉大学視察，研究紹介発表「CREST 研究課題：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」，埼玉大学，平成 27 年 1 月 21 日。
  20. 平成 26 年度埼玉県 NPO 基金助成事業「地中熱で実現する環境未来都市セミナー」第 3 回地下熱利用と地下水環境，研究紹介発表「CREST 研究課題：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」，埼玉大学，平成 27 年 1 月 29 日。
  21. 一般社団法人地盤工学会関東支部「関東地域における地盤情報の社会的・工学的活用法の検討委員会」“地下水のモデル化と地中熱のプロジェクトについて”，一般社団法人地盤工学会，平成 27 年 3 月 6 日。
  22. 熱応答試験と地中熱利用に役立つ地下水シミュレーション講習会 (NPO 法人地下水・地下熱資源強化活用研究会) TRT 施設見学・実習 (TRT の見学，装置の解説，研究設備見学等)，日本大学，平成 27 年 7 月 7 日。

## 6. 成果展開事例

### (1) 実用化に向けての展開

- 本研究で確立した微生物叢解析技術を用いて，効率的で高品質な堆肥作製技術を株式会社アイル・クリーンテックと共同研究を行った。また，株式会社太陽油化との共同研究で廃油・汚泥処理の微生物叢を解析中である。
- 本研究で行われた，無酸素コアの採取方法について，その技術的課題の発展を民間企業 1 社と共同で検討・研究中。
- 本研究で用いた温度制御型三軸圧縮試験機の温度制御法や体積変化測定法の実用化に関して，坂田電機株式会社と検討中。
- 本研究で実施している長期熱負荷試験時の地下水モニタリング手法をもとに，環境に低負荷な地中熱利用ヒートポンプシステムの開発に向けて株式会社アグリクラスターと共同研究中。
- 本研究で行われた，気泡水コアサンプリング工法について，その技術的課題に関して中央開

発株式会社と共同研究中。

- 平成 25 年度再生可能エネルギー熱利用高度複合システム実証事業[再生可能エネルギー熱利用高度複合システム案件形成調査事業](一般社団法人新エネルギー導入促進協議会)において日本大学文理学部エコキャンパスプロジェクト(学校法人 日本大学)が採択され、地圏熱利用のポテンシャル評価を 3 次元地質構造モデルを用いて行った。
- 平成 25 年度補正予算 再生可能エネルギー熱利用加速化支援対策事業(学校法人 日本大学)が採択され、地圏熱導入と環境評価に関してのサポートを行っている。

## (2) 社会還元的な展開活動

- 本プロジェクトの研究成果を公開シンポジウム(計 2 回)として一般に公開した。また、第 10 回環境地盤工学シンポジウムにて本研究課題に関する特別セッションを企画した。
- 本研究で収集した東京都および埼玉県地質データを活用し、その成果の一部が書籍(関東の地盤, 地盤工学会編 2013 年出版)にまとめられて、出版された。
- 「地中熱利用にあたってのガイドライン(平成 27 年 3 月改訂版)環境省水・大気環境局」について、株式会社建設技術研究所 蛸原雅之氏・渡邊暁人氏から取材の依頼があり、ガイドラインの一部について修正・加筆などのコメントをした。当初計画していた地中熱ヒートポンプシステム利用の独自のガイドラインの作成までには至らなかったが、環境省「地中熱利用にあたってのガイドライン(平成 27 年 3 月改訂版)」に本研究成果の一部が採用された意義は大きい。

### <ガイドラインへの更新案>

(ガイドライン p35) 地中熱利用ヒートポンプによる地下水・地盤環境への影響は「環境負荷の発生」⇒「環境状態の変化」まである程度把握できているものの、「環境影響として発現」する事象の定量化や「環境状態の変化」との因果関係を十分把握できていません。どの程度の環境負荷があれば、環境の状態が変化し、地下水・地盤環境への影響が生じるのかを明らかにし、安心して普及促進を図るためには、継続的なデータ蓄積・分析が有用です。

このような、環境影響を及ぼす可能性がある技術を使用する点から、特に出力規模の大きな施設等を導入する場合には、モニタリングにより地下水・地盤環境への影響に配慮することが、環境共有資源である地下水・地盤環境の持続可能な利用において求められます。(ガイドラインの記述)

本研究では、長期熱負荷試験において、温度上昇による化学物質の濃度上昇、微生物叢の変化があることが明らかとなった。データの蓄積・分析を行い、アセスメントツール構築により将来予測できるようになった。

### (ガイドライン p38) 2) 地下水水質への影響

地中の温度と地下水水質の関係について、温度変化に伴い地下水水質および土壌の重金属等の吸着特性が変化するという研究事例もありますが<sup>31</sup>、現時点で地中熱利用に起因する大きな水質事故等は報告されていません。

なお、地下水温や水質の変化による地下の微生物生態系への影響については、現時点では知見が十分ではなく、今後考慮すべき留意点として研究が始められています<sup>32</sup>。

(ガイドラインの記述)

本研究では、長期熱負荷試験において、温度上昇による化学物質の濃度上昇(ホウ素, ヒ素など)が認められた。温度変化により影響される特定微生物群も見出した。

(ガイドライン p46) (参考 2)クローズドループ方式における地下水水質のモニタリング  
ただし、地中熱交換井とは別に採水用の井戸の設置など、継続的な観測には手間やコストが発生すること、現時点で大きな影響等が報告されていないことから、環境基準値に対して十分に余裕のある現場、あるいは温度変化が小さいと予想される施設でモニタリングを行う必要性は低いと考えられます。

(参考 3)測定すべき水質項目

クローズドループの熱負荷と各種水質項目との関連を調査した研究例としては、DOC、ケイ素、カリウム、アンモニウム、ナトリウム等の項目で、地中温度の上昇に伴う土壌からの溶出量の増加が確認されています<sup>33</sup>。

使用開始後は、簡易に計測が可能な水温、pH、電気伝導率を定期的に計測して大きな変化がないことを確認し、大きく変動した場合、再調査を行います。また DOC(溶存酸素濃度)や ORP(酸化還元電位)等も簡易に計測が可能であり、金属イオンの溶出状況等を把握するための計測項目として適しています。(ガイドラインの記述)

参考 2, 参考 3 の上記部分は、既に本研究の成果が取り入れられている。

### (3)他分野への波及効果

- IBM リサーチアイランド研究所の水道ネットワークを研究しているグループと、地温が水道管内の温度および水質に与える影響に関して、CRESTの成果を応用する共同研究が進み、その成果を IBM Journal of Research and Development に投稿中。

## § 5. 研究期間中の活動

### 1. 主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
23年7月3日	日本大学地球システム科学科シンポジウム	日本大学	2人 (日大G)	研究紹介発表
23年7月3日	日本大学文理学部資料館展示会「地球温暖化時代におけるヒートアイランド現象」	日本大学文理学部	1人(日大G)	全体計画展示(・企画展「地球温暖化時代のヒートアイランド」展示期間1ヶ月)
23年8月28日・29日	地下熱利用とヒートポンプシステム研究会	北海道ニセコ町	1人(小松TL)	研究会兼見学会への参加、研究打ち合わせ
23年10月8日	埼玉大学男女共同参画室・With You さいたま共催講座	With You さいたま	1人(大西GL)	「人類の現在と将来」に関する一般向け講演
23年11月5日	CREST キックオフミーティング	アキバホール	9人	研究内容発表

23年11月18日	埼玉大学環境科学研究センター主催シンポジウム	埼玉大学	20人(シンポ全体70人)	CREST 研究シンポジウム主催, 研究内容発表
24年1月28日	「彩の国環境大学修了生の会」講演会	With You さいたま	1人(大西 GL)	講演「地球は持続できるか」
24年1月31日	産総研地質調査総合センター第19回シンポジウム	日本大学	87人	プロジェクト紹介
24年2月20日	講演 (埼玉県中小企業団体中央会主催異業種交流会)	JACK 大宮	1人(小松 TL)	CREST 研究内容に関する研究紹介講演
24年6月26日	高校出張講義	私立西武学園文理高等学校校	総勢50人(大西 GL)	「生命と地球の共進化」
24年9月18日	中学出張講義	都立小平第1中学校	総勢40人(大西 GL)	「実験:裸の細胞を取り出してみよう」
24年10月19日	高校出張講義	県立鹿沼高等学校	総勢50人(大西 GL)	「生命が地球環境を創った」
24年11月17日	熊本大 CREST 嶋田チームとの合同ワークショップ「地下水帯水層中での脱窒菌の振る舞い」開催	熊本大学	総勢 約30人	研究成果発表
24年11月30日	高校出張講義	県立上尾高等学校	総勢50人(大西 GL)	「理学部・自然科学の目的と人類の課題」
25年5月16日	産業技術総合研究所吉岡先生訪問	産業技術総合研究所	5名	研究打ち合わせ
25年5月30日	「地下熱利用オープンシステムの現状と課題」講演会	スウェーデン大使館	4名	CREST 研究内容に関する研究紹介講演
25年6月8日	平成25年度成果報告会	JST東京本部別館	8名参加	成果報告会発表
25年6月21日	日本応用地質学会シンポジウム	東京大学柏キャンパス	総勢100人(竹村 GL)	「東日本大震災後の応用地質学・新たな課題としての廃棄物処理と放射能汚染」にて研究紹介
25年7月8日	「地下熱利用とヒートポンプ研究会」参加	日健設計総合研究所N SRIホール	1名(小松 TL 参加)	CREST 研究内容に関する研究会参加
25年7月20日	日本大学文理学部科学実験・文化フェア	日本大学文理学部	全体来場数約800人(竹村 GL)	地圏熱利用に関する説明を小学生および親に行った
25年8月5日	高校出張講義	県立岩槻高等学校	50人(大西 GL)	「生命と地球の共進化」

25年8月28日	第2回研究課題シンポジウム「地下温度環境の変化と地下水保全」	アルカディア市ヶ谷	81名	研究成果発表
25年9月17日	第10回環境地盤工学シンポジウム	日本大学文理学部	10名	本研究課題に関する特別セッション企画
25年10月1・2日	第2回「地下熱利用とヒートポンプ研究会」参加	日本大学工学部他	1名 (小松 TL 参加)	CREST 研究内容に関する研究会参加
26年6月24日	サイトビジット	東京農工大学	20人	研究発表・討論
27年6月13日	平成27年度成果報告会	JST 東京本部別館	8人	研究成果発表
27年12月12日	事後評価会	JST 東京本部	8人	研究打ち合わせ

§ 6. 最後に



図 6-1 農工大農学 3 号館恒温室に設置した地中熱ヒートポンプシステム



図 6-2 温度制御型三軸圧縮試験機(農工大)

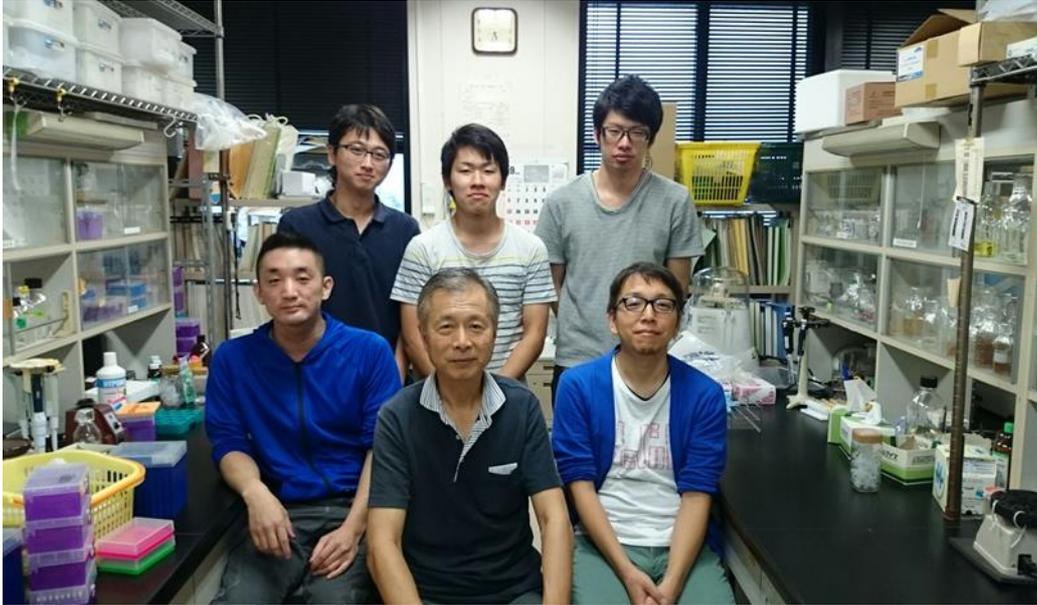


図 6-3 埼大グループ・大西班メンバー



図 6-4 埼大グループメンバー(熱負荷実験現場サイトにて, 採水日)



図 6-5 熱負荷実験現場サイト(埼大)

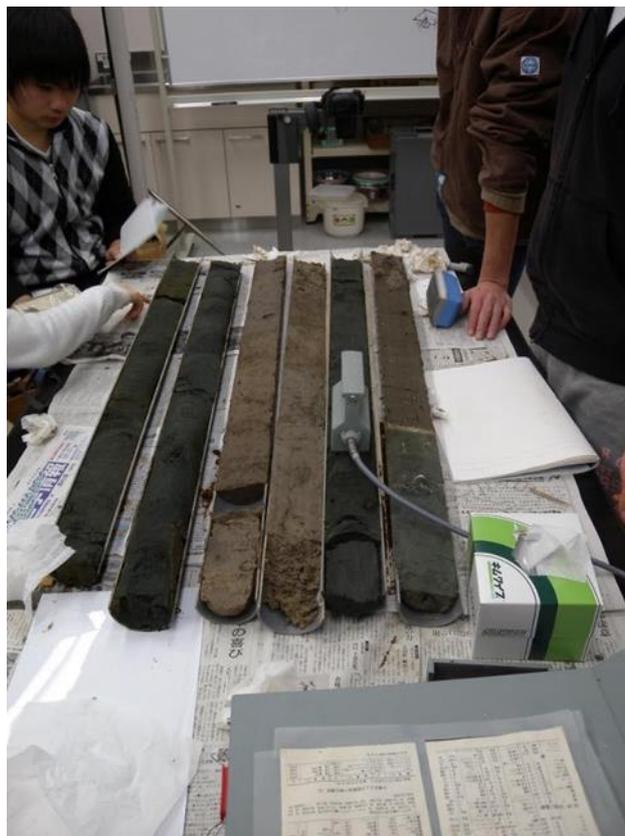


図 6-6 コア試料での熱伝導率測定 1(日大グループ)



図 6-7 コア試料での熱伝導率測定 2(日大グループ)