

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」

地下温度環境を考慮した地下水保全

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～

研究期間：平成22年10月～平成28年3月

小松 登志子

埼玉大学大学院 理工学研究科

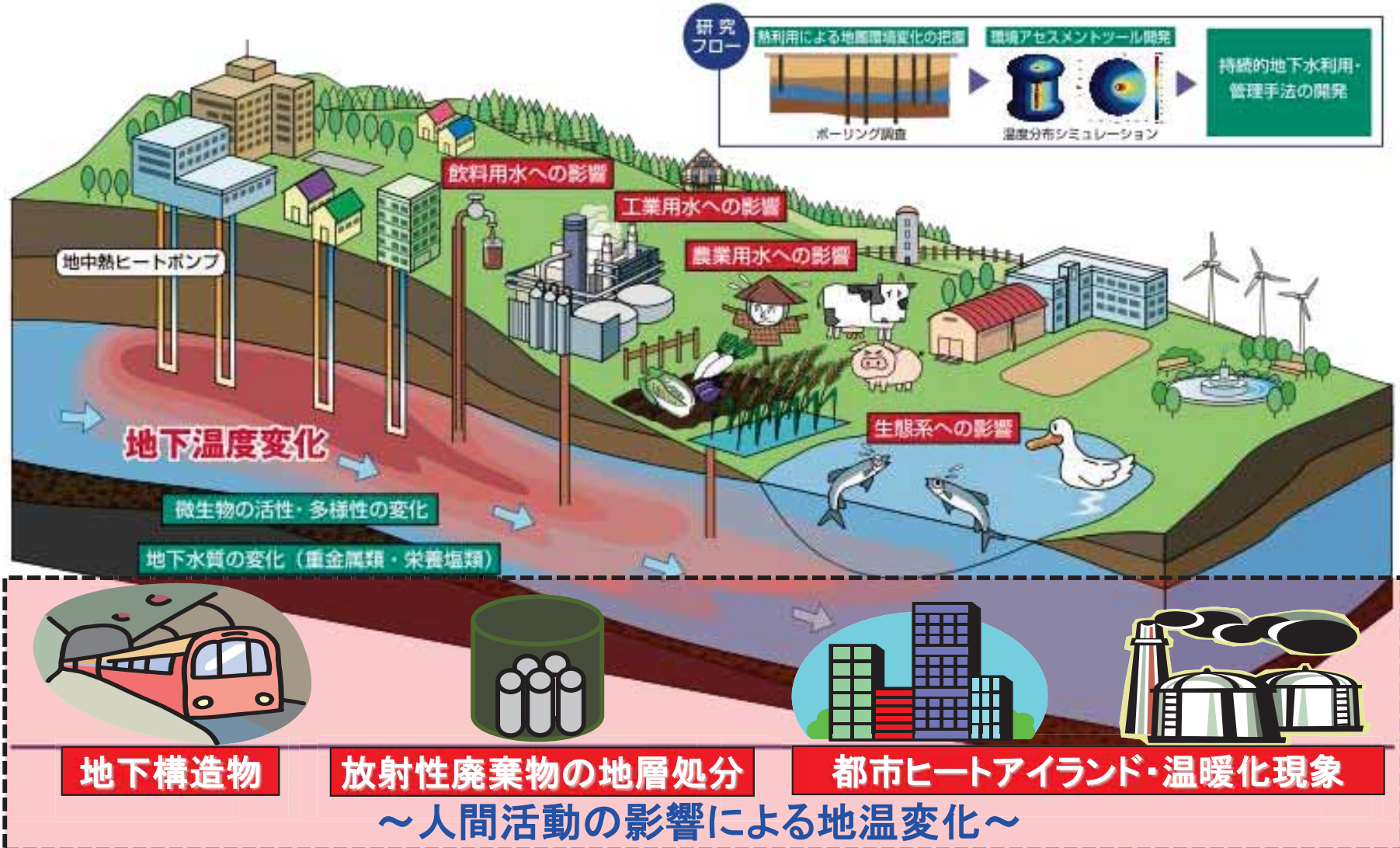
研究プロジェクトの背景・目的

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

地下熱環境を考慮した地下水保全

研究代表者：埼玉大学 小松 登志子

地中熱ヒートポンプなどの地圏熱エネルギー利用による地下の温度変化が地下水中の物質・熱循環および微生物動態に及ぼす影響を明らかにし、その影響を最小限にするための持続可能な地下水利用・管理手法の開発を目指す。



地下温度変化 (日本)

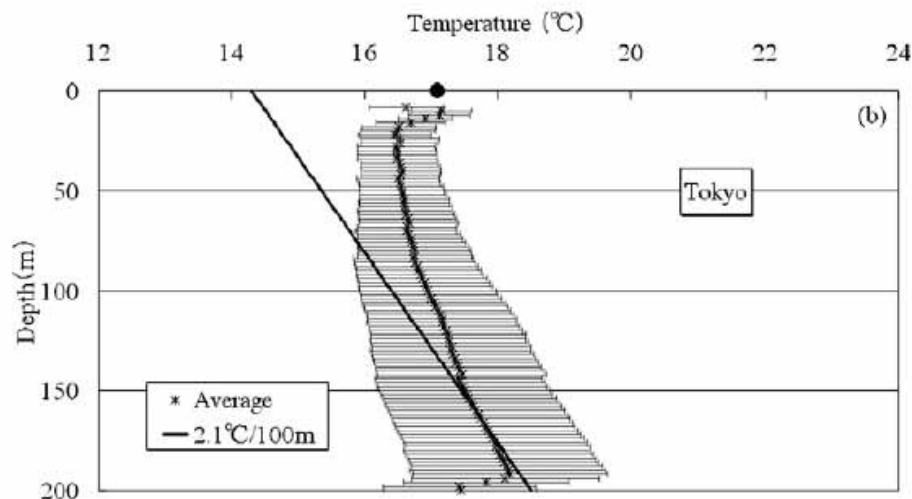
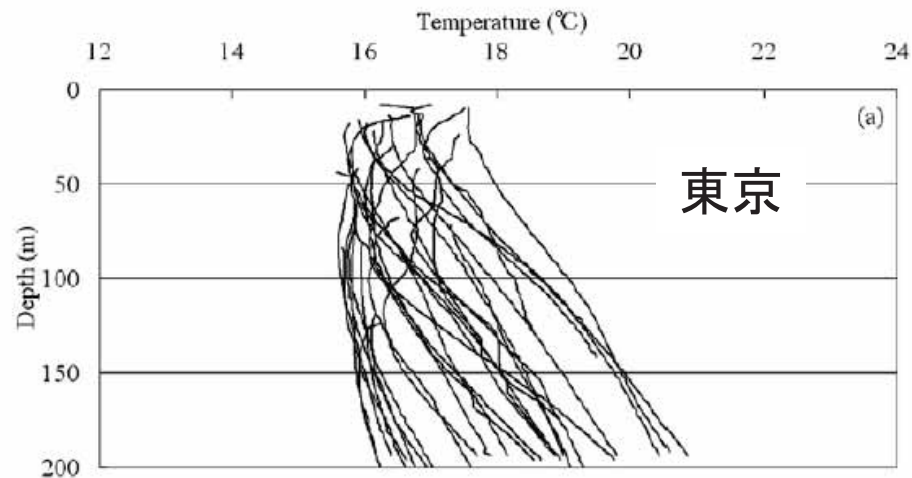


FIG. 2. (a) Observed temperature–depth profiles and (b) average and standard deviation of profiles with estimated “new” surface temperature shown by solid circle and estimated geothermal gradient in Tokyo.

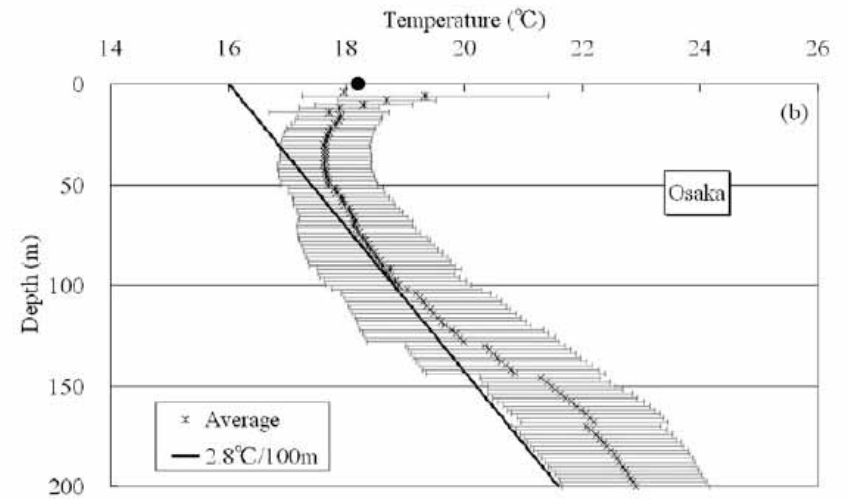
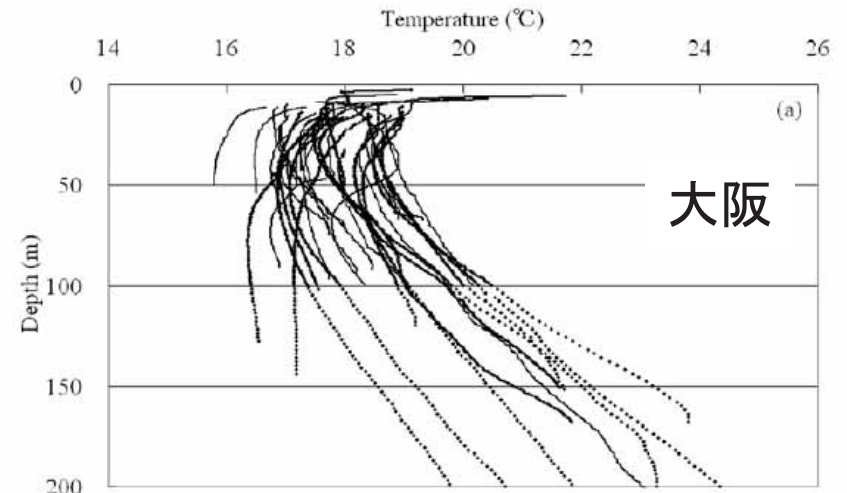
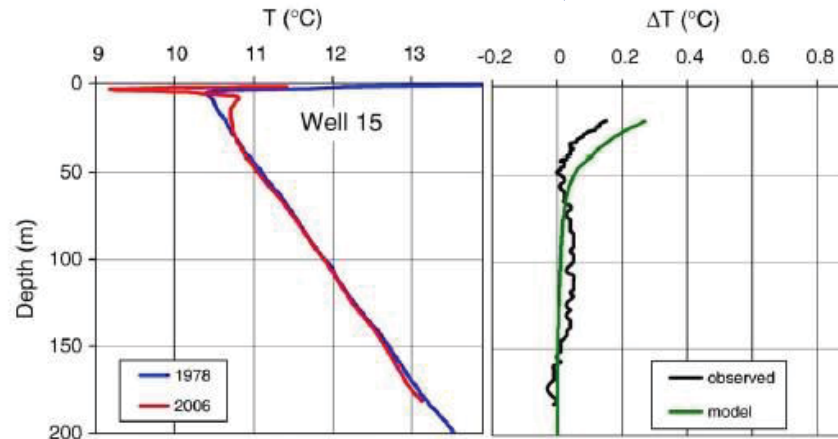


FIG. 3. (a) Observed temperature–depth profiles and (b) average and standard deviation of profiles with estimated “new” surface temperature shown by solid circle and estimated geothermal gradient in Osaka.

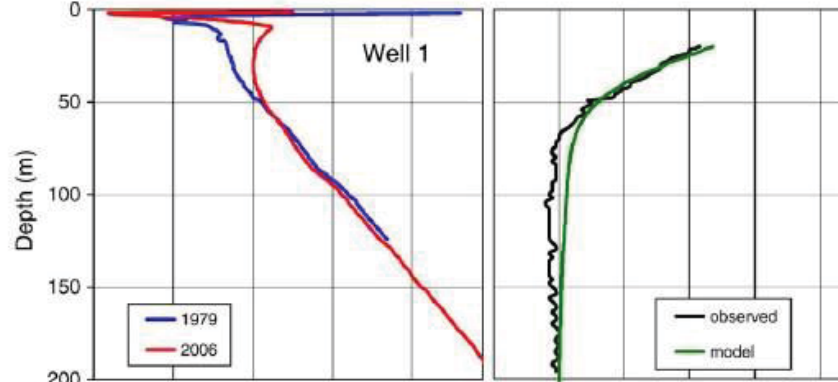
『Taniguchi et al. (2007): Combined effects of urbanization and global warming on subsurface temperature in four Asian cities. *Vadose Zone Journal*』より引用

地下温度変化 (オランダ)

1978 → 2006



1979 → 2006



1977 → 2006

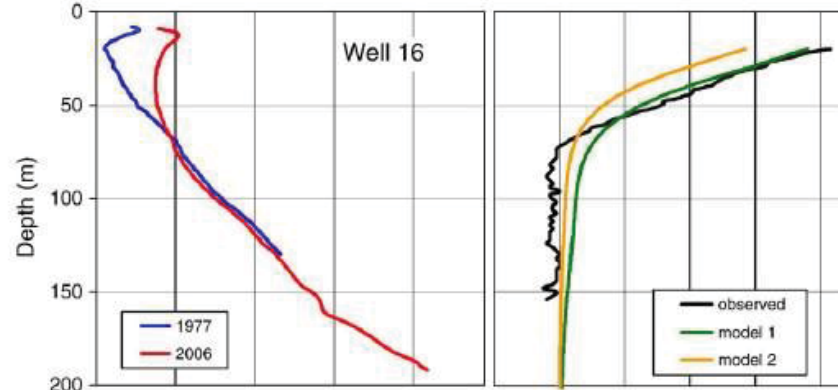


Fig. 3. Results for selected wells 1, 15 and 16. Left: Old and newly obtained temperature–depth profiles. Right: Temperature change for the period covered by the measurements of the two logs. “Observed” represents the difference between the old and the new log with a 0.06 °C instrument correction. Models are discussed in the main text.

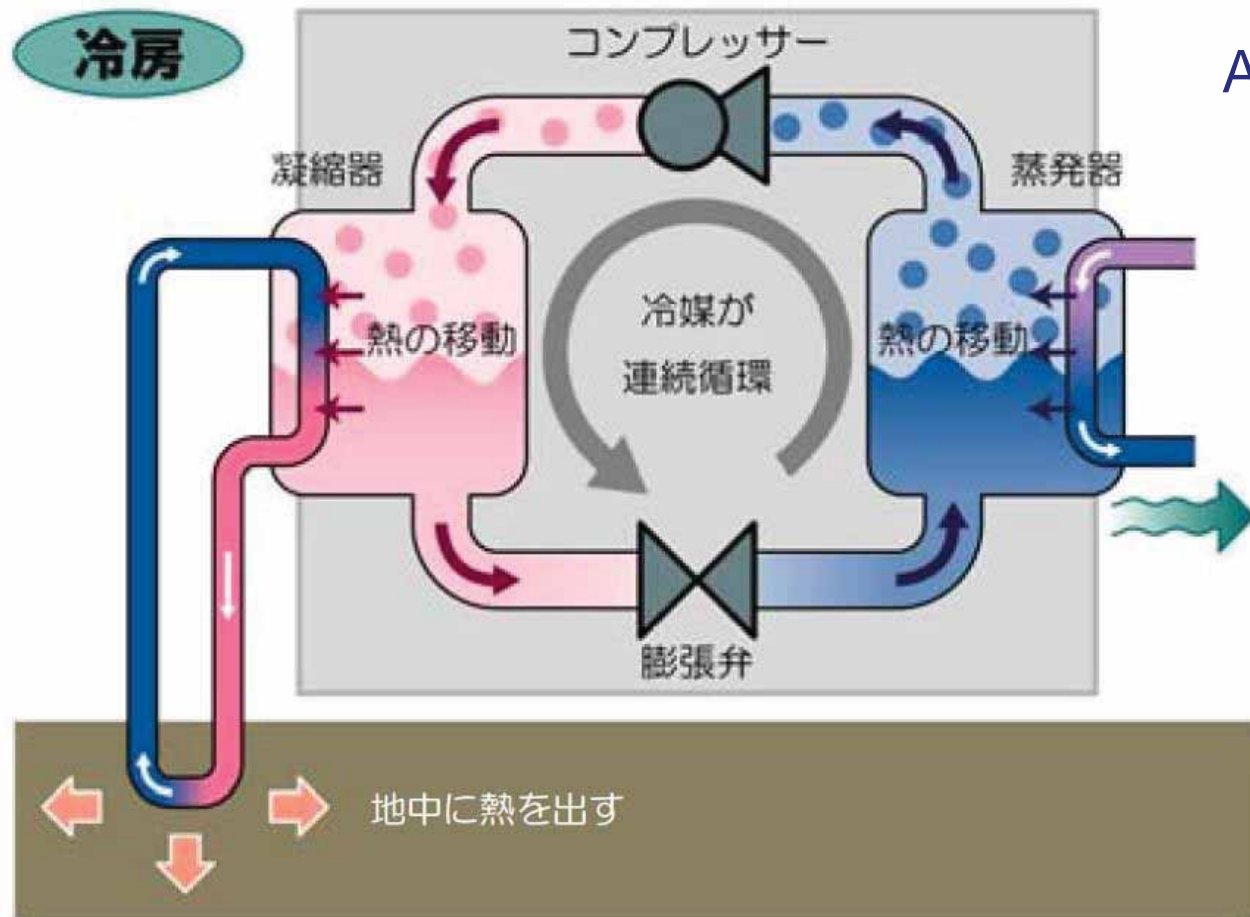
『Kooi (2008): Spatial variability in subsurface warming over the last three decades; insight from repeated borehole temperature measurements in the Netherland. *Earth and Planetary Science Letters*』より引用

地中熱ヒートポンプ(GSHP):冷房利用時

GSHP : Ground Source Heat Pump



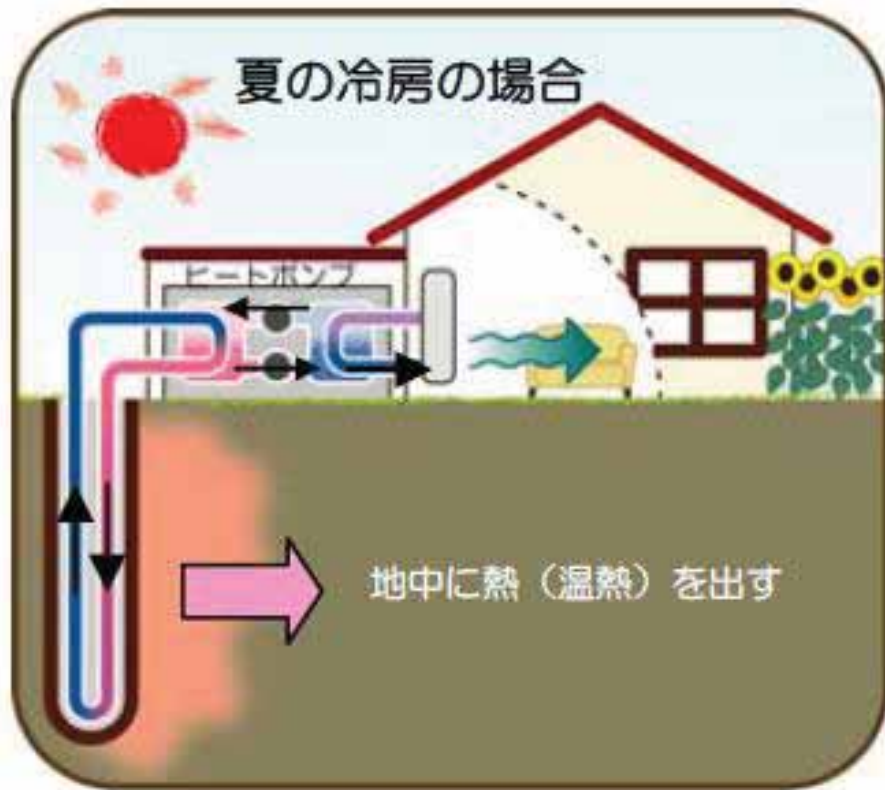
ASHP : Air Source HP
(空気熱源HP)



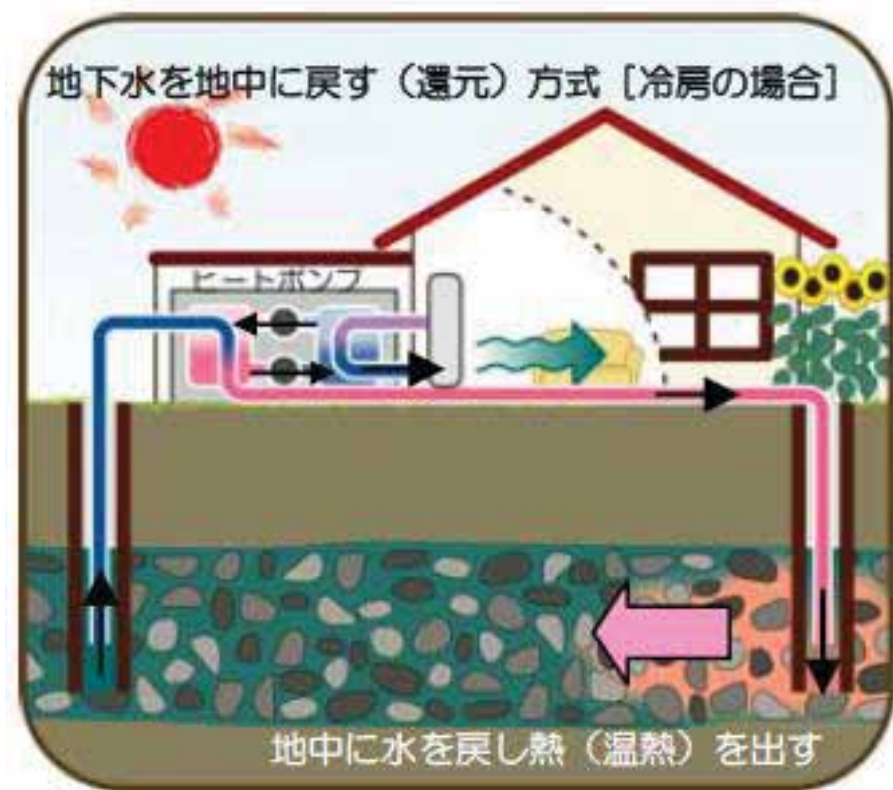
『環境省水・大気環境局(2012):地中熱利用にあたってのガイドライン』から引用

省エネルギーで、CO₂排出量の削減などに寄与

地中熱ヒートポンプ(GSHP)の種類



Closedタイプ



Openタイプ

『環境省水・大気環境局(2012):地中熱利用にあたってのガイドライン』より引用

研究体制

研究代表者 : 埼玉大学大学院 理工学研究科・教授 小松登志子

(1) 埼玉大学 小松グループ

グループリーダー: 埼玉大学大学院 理工学研究科・教授 小松登志子

熱的かく乱が地圏の物質動態に与える影響の解明(参加研究者8名)

(2) 埼玉大学 大西グループ

グループリーダー: 埼玉大学大学院 理工学研究科・教授 大西純一

熱的かく乱が地圏の微生物叢に与える影響の解明(参加研究者5名)

(3) 日本大学 竹村グループ

グループリーダー: 日本大学文理学部 地球システム科学科・准教授 竹村貴人

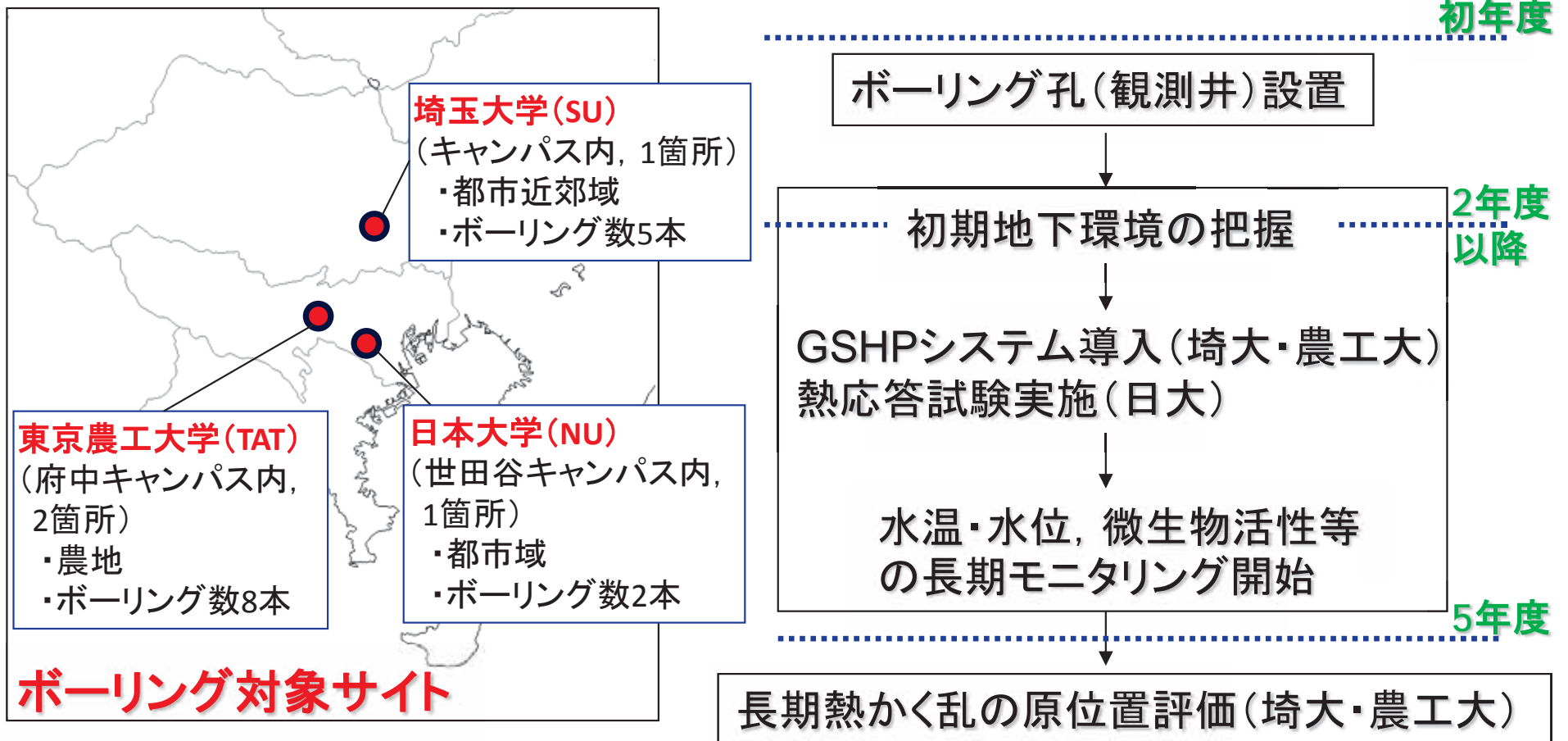
地質要素・地圏熱特性・地下水の相互作用の評価法の確立(参加研究者8名)

(4) 東京農工大学 斎藤グループ

グループリーダー: 東京農工大学大学院 農学研究院・准教授 斎藤広隆

地圏熱・地下水利用のための地圏熱環境シミュレーション解析(参加研究者4名)

実験サイト概要



サイト	対象深度	実証試験	モニタリング項目
埼玉大学	50 m	地中熱ヒートポンプシステム (Closed型)	地温・水位, 微生物活性, 熱応答, 物質(ガス・溶質類)動態(全サイト) +地盤変位(農工大)
東京農工大学	50 m	地中熱ヒートポンプシステム (Closed型, Open型)	
日本大学	70 m	熱応答試験(原位置熱物性値測定 装置開発用)	

研究概要

現場試験(地中熱ヒートポンプシステムの導入と長期観測)

- ・ボーリングコア試料分析
- ・短期熱応答試験, 長期熱負荷試験
- ・地下水モニタリング

室内試験(モデル実験)

- ・温度変化が地盤の物理的, 化学的, 微生物学的, 力学的特性に及ぼす影響を調べるための室内モデル実験を実施

アセスメントツールの構築

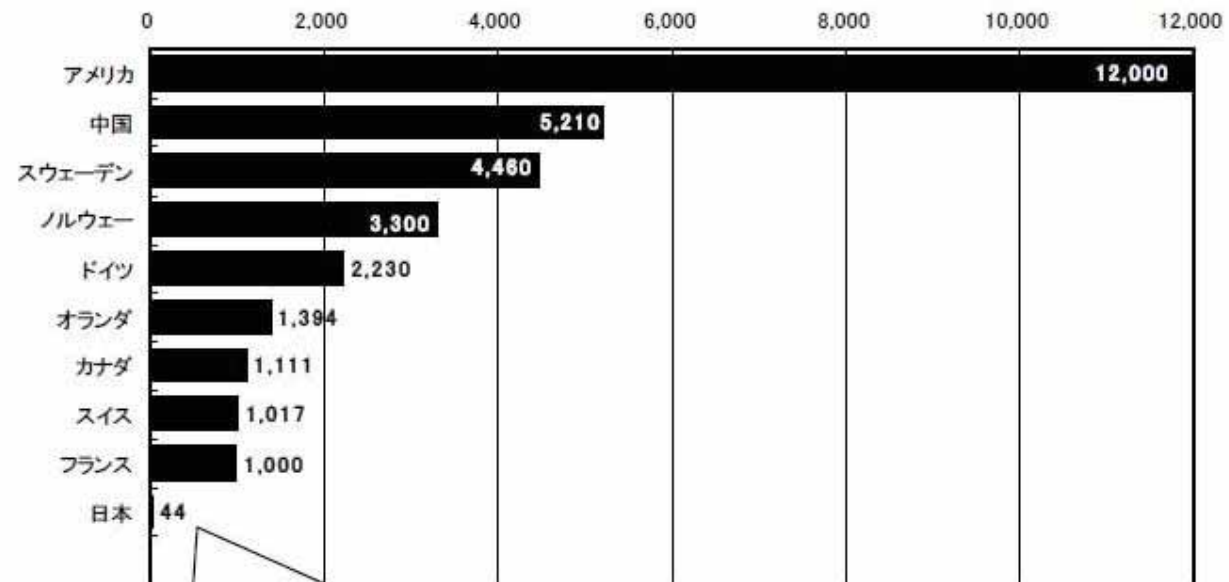
- ・熱, 物質移動パラメーター予測モデルの提案
- ・3次元地質モデルの構築
- ・地層ごとの重金属, 微生物インベントリー作成
- ・水分, 溶質, 熱移動予測モデル/地盤挙動解析モデルの開発

講演内容

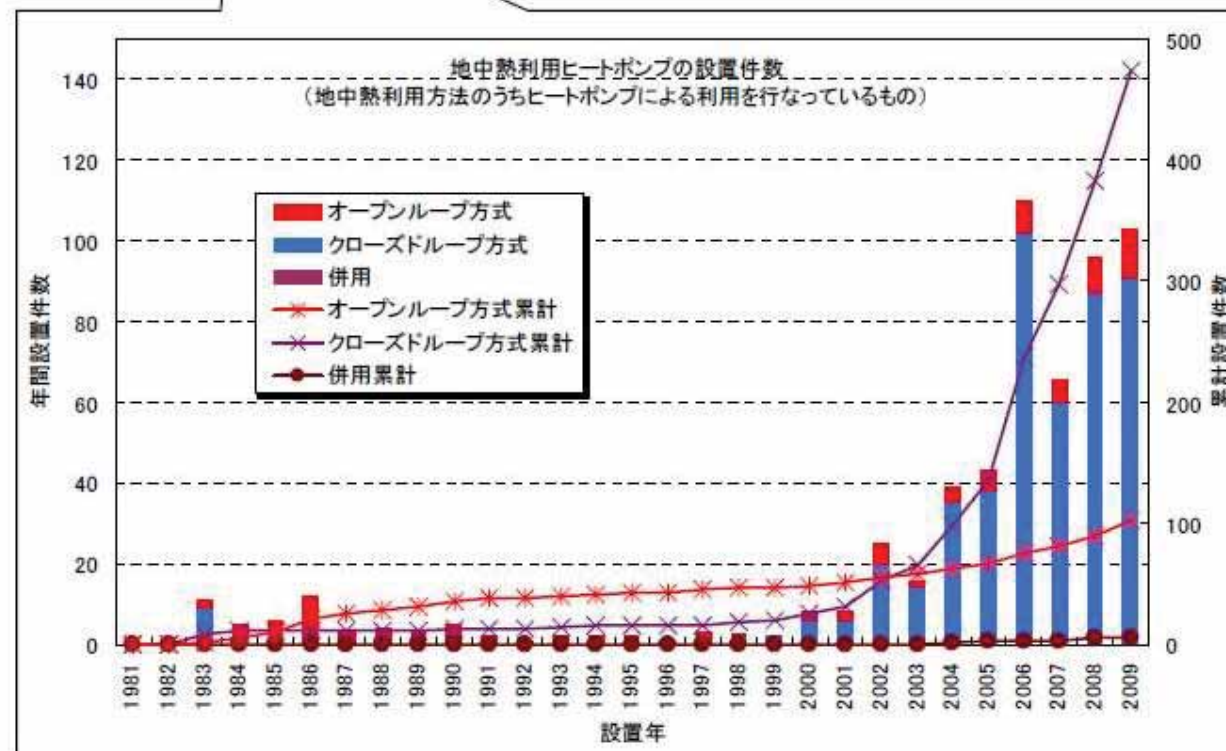
1. 地圏熱エネルギー利用の現状と課題
2. 初期地下環境調査
3. 熱負荷試験による地下水質の変化
4. 室内試験による温度影響の評価
5. 3次元地質構造モデル
6. 熱応答試験の数値解析
7. これまでの結果と今後の予定
8. GSHPに関するガイドラインの例

1. 地圏熱エネルギー利用の現状と課題

GSHPの普及状況



出典:Lund2010に加筆.日本は2009年までの累積



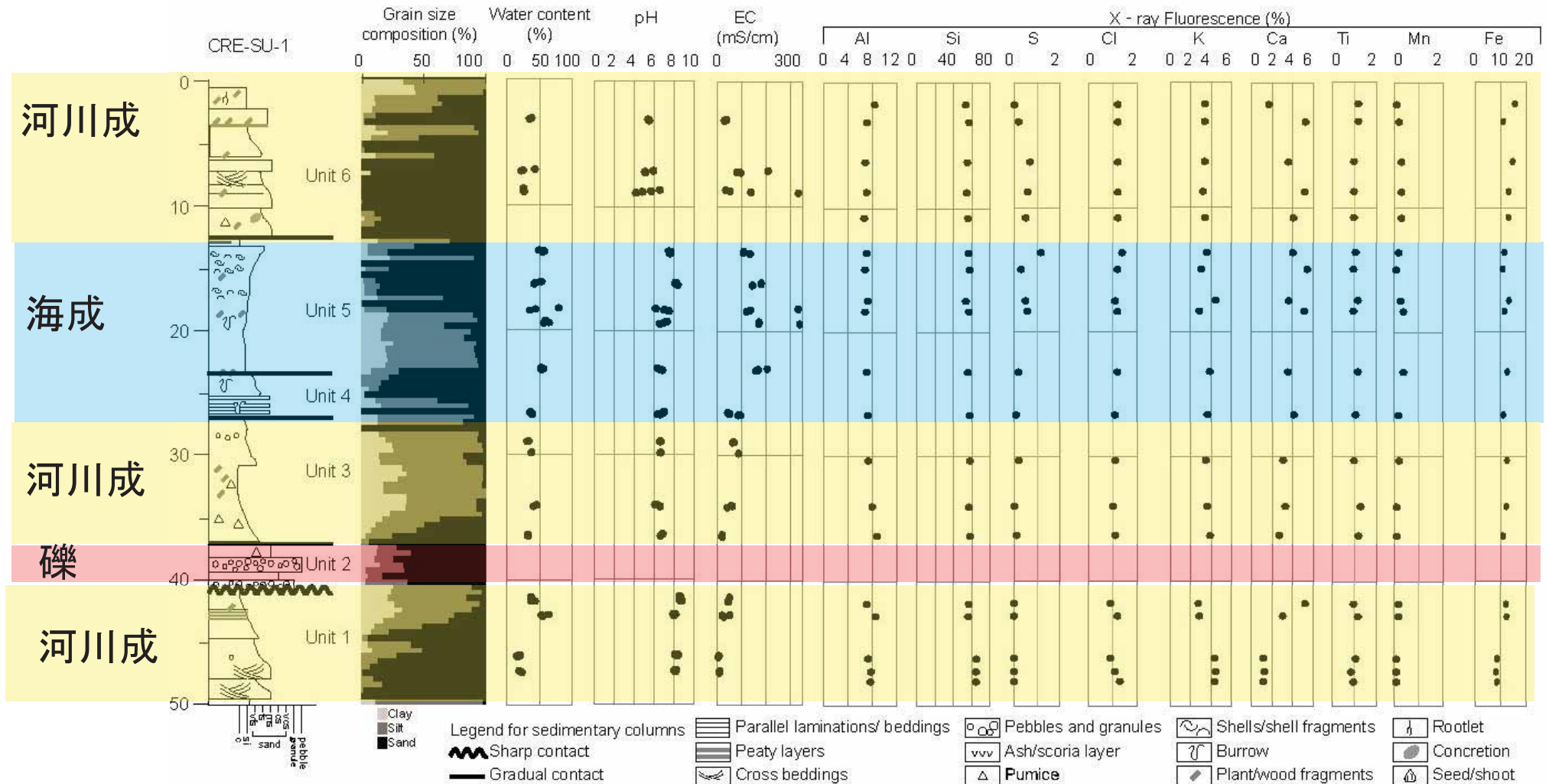
文献調査結果

GSHP利用による地下環境への影響

- GSHPの利用における地温変化の実測例は、数例ではあるが認められるものの、それが誘発する潜在的な環境リスク(物理的・化学的・生物学的リスク)については、**ほとんど研究例が存在しない**ことが分かった。
- GSHP利用時の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、欧州を中心に設定されているが、それらは**科学的な見地からというよりはむしろ、経験的な観点から決定**がなされている。
- 最近の文献(Haehnlein et al., 2010; Bonte et al., 2011)によると、GSHPの利用に伴う環境リスクは、まだ十分に理解されておらず、その持続的な利用に向けては、**今後の科学的な研究が必要**であると、結論付けられている。

2. 初期地下環境調査

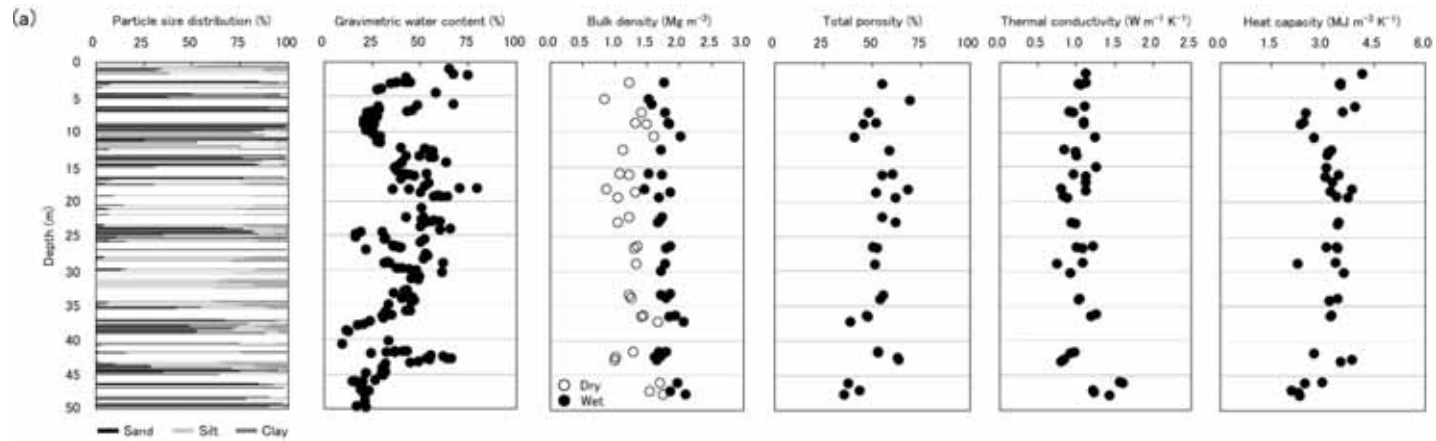
地質環境調査結果 (SU:さいたま市)



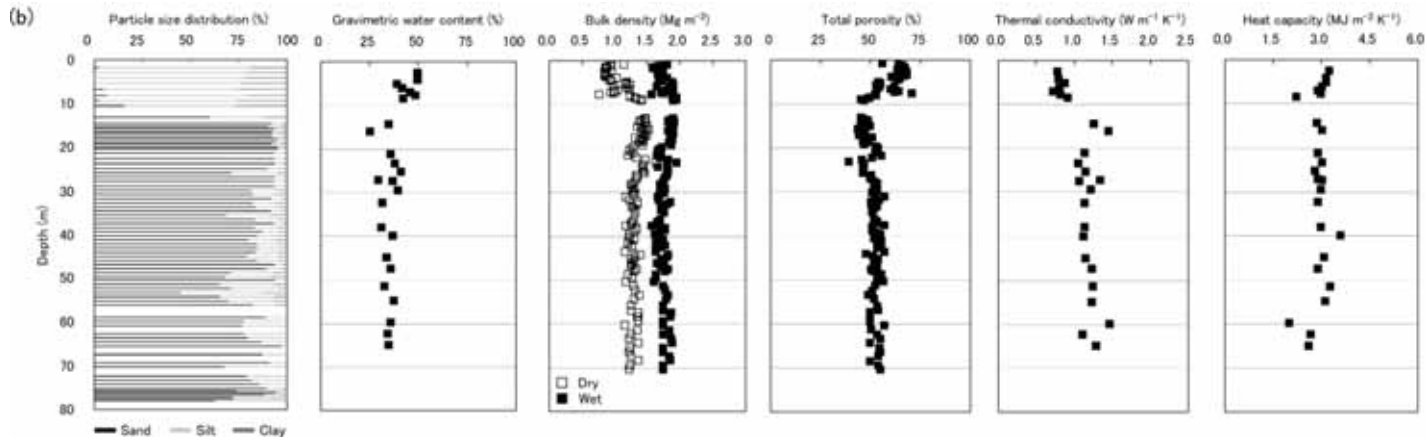
- ・埼玉南部の荒川流域の地盤の典型的なコア
- ・礫より上位がHolocene (完新世: 1万年前)

初期熱物性値測定結果

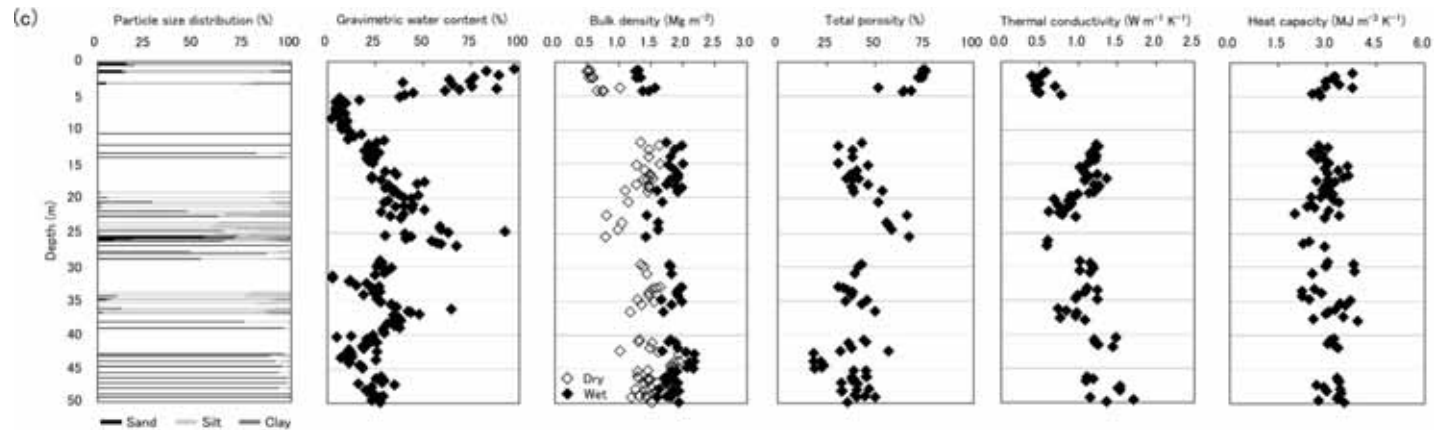
SU



NU

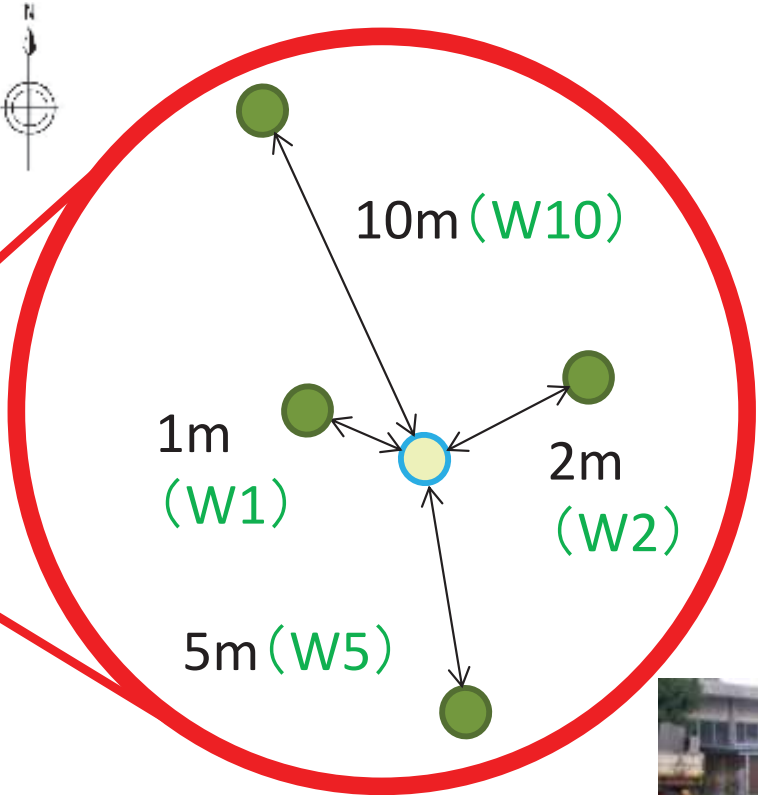


TAT



3.熱負荷試験による地下水質の変化

埼玉大学サイト



- 地中熱交換器 (Uチューブ管)
- 観測井



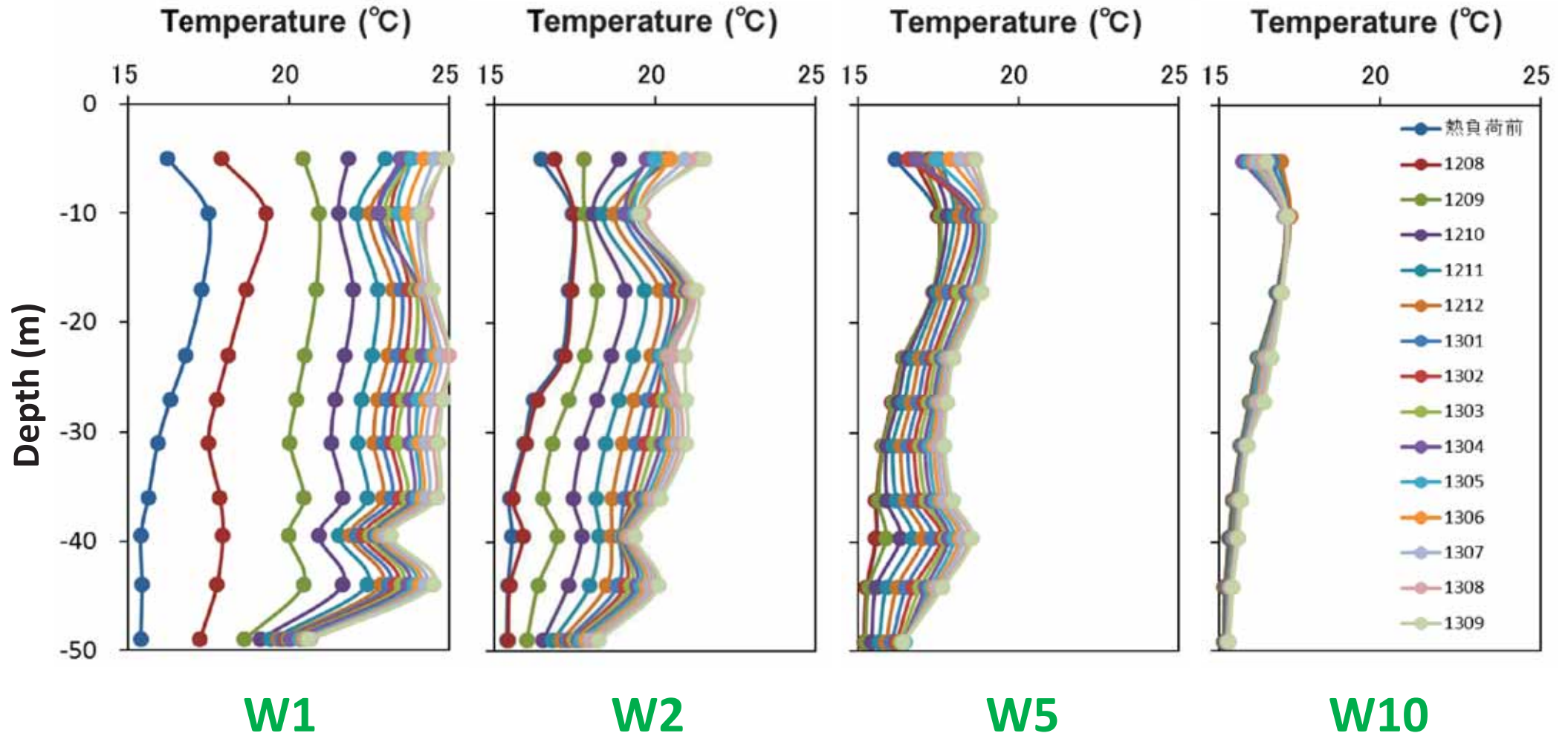
原位置長期熱負荷試験:13ヵ月間 (2012.8.10~2013.9.10)



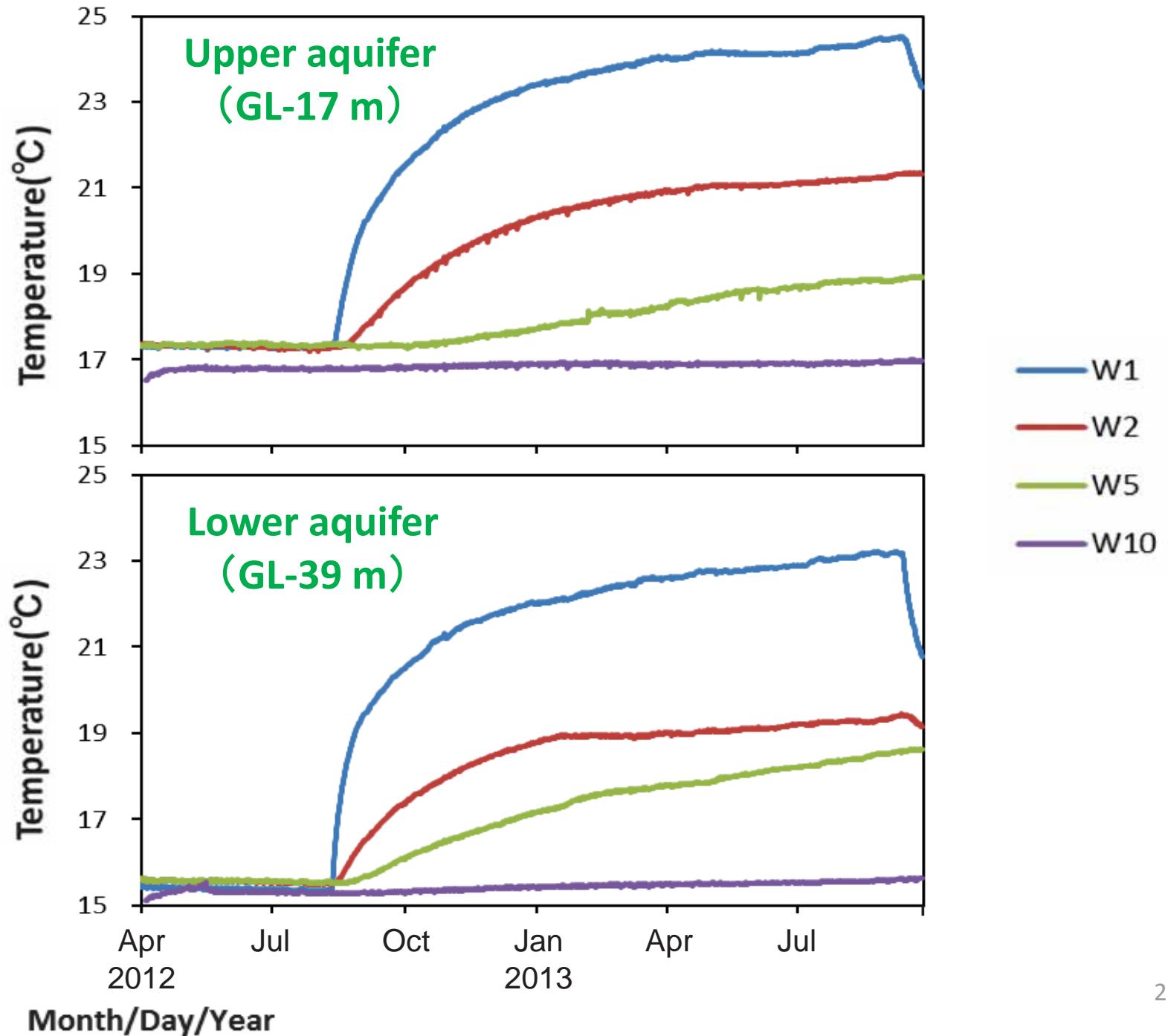
地盤に熱負荷を与え、地温・地下水質の変化を調査
その際、熱負荷の影響が帯水層ごとに異なるのか調査

(農工大では通常のHP稼働条件で実験中)

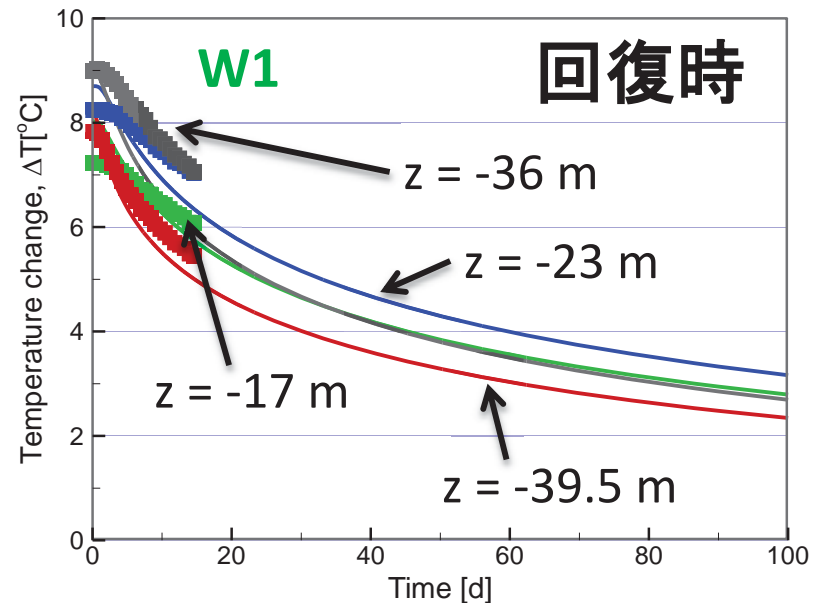
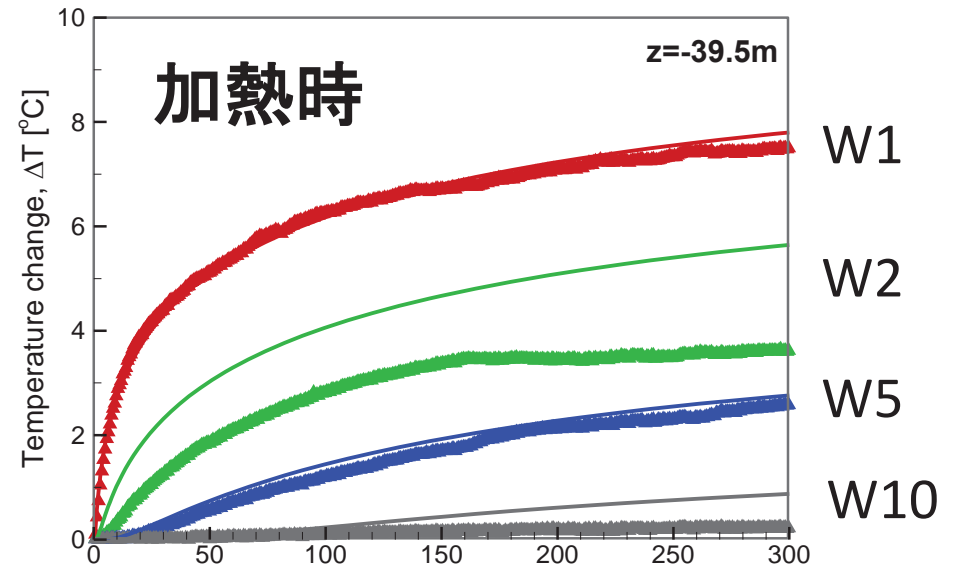
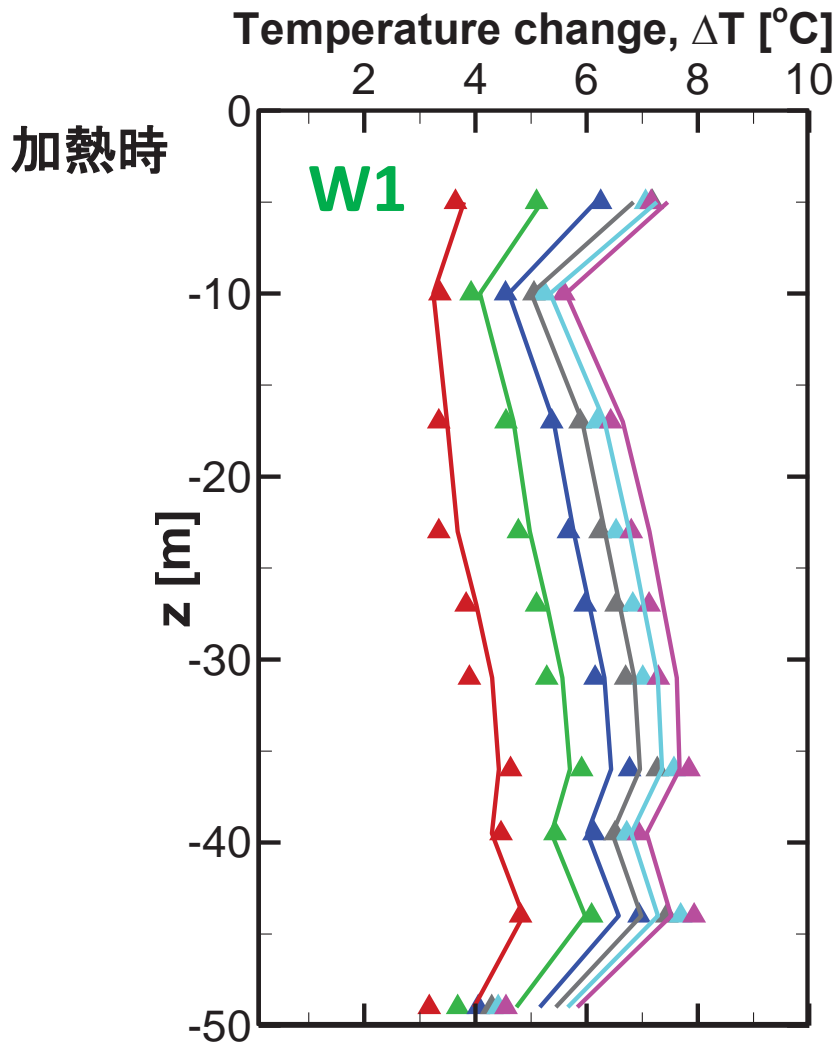
熱負荷試験前後の地温変化



熱負荷試験前後の地温変化(帯水層)



温度変化解析結果 (埼玉大学長期熱負荷試験)

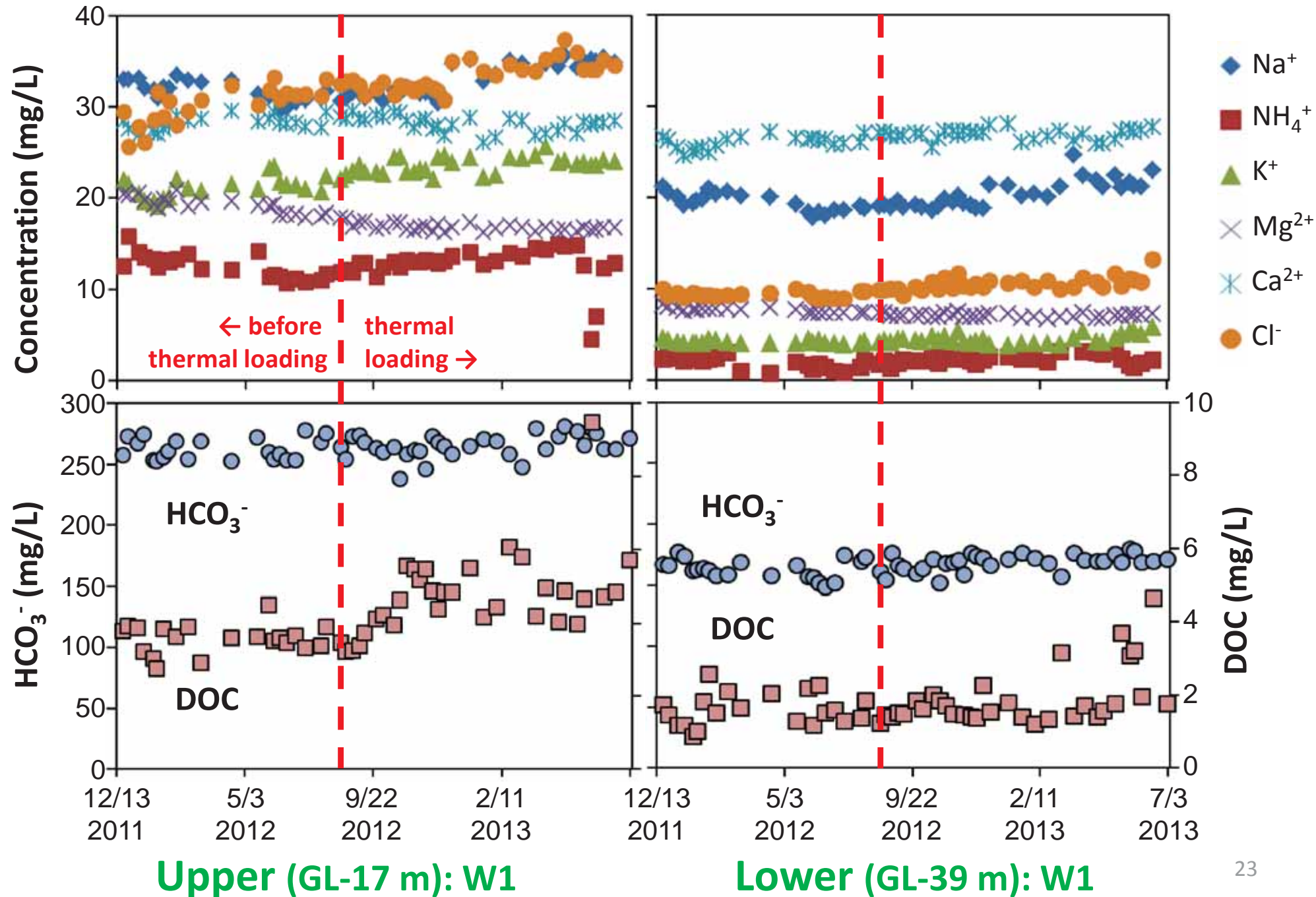


三次元熱伝導

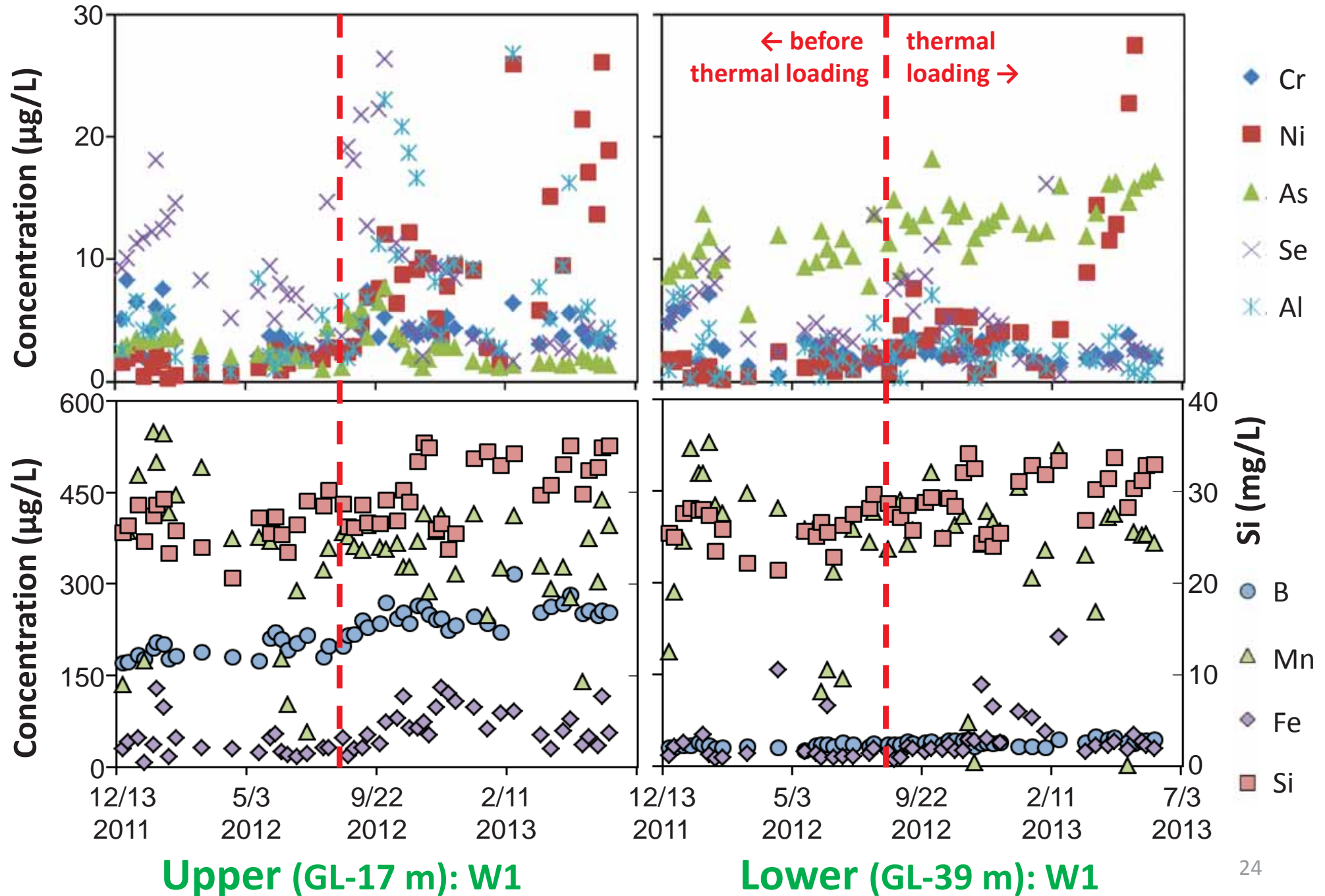
$$C_s \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_s \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_s \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda_s \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \right]$$

Uチューブ壁面: 一定熱フラックス $Q=58 \text{ W/m}$

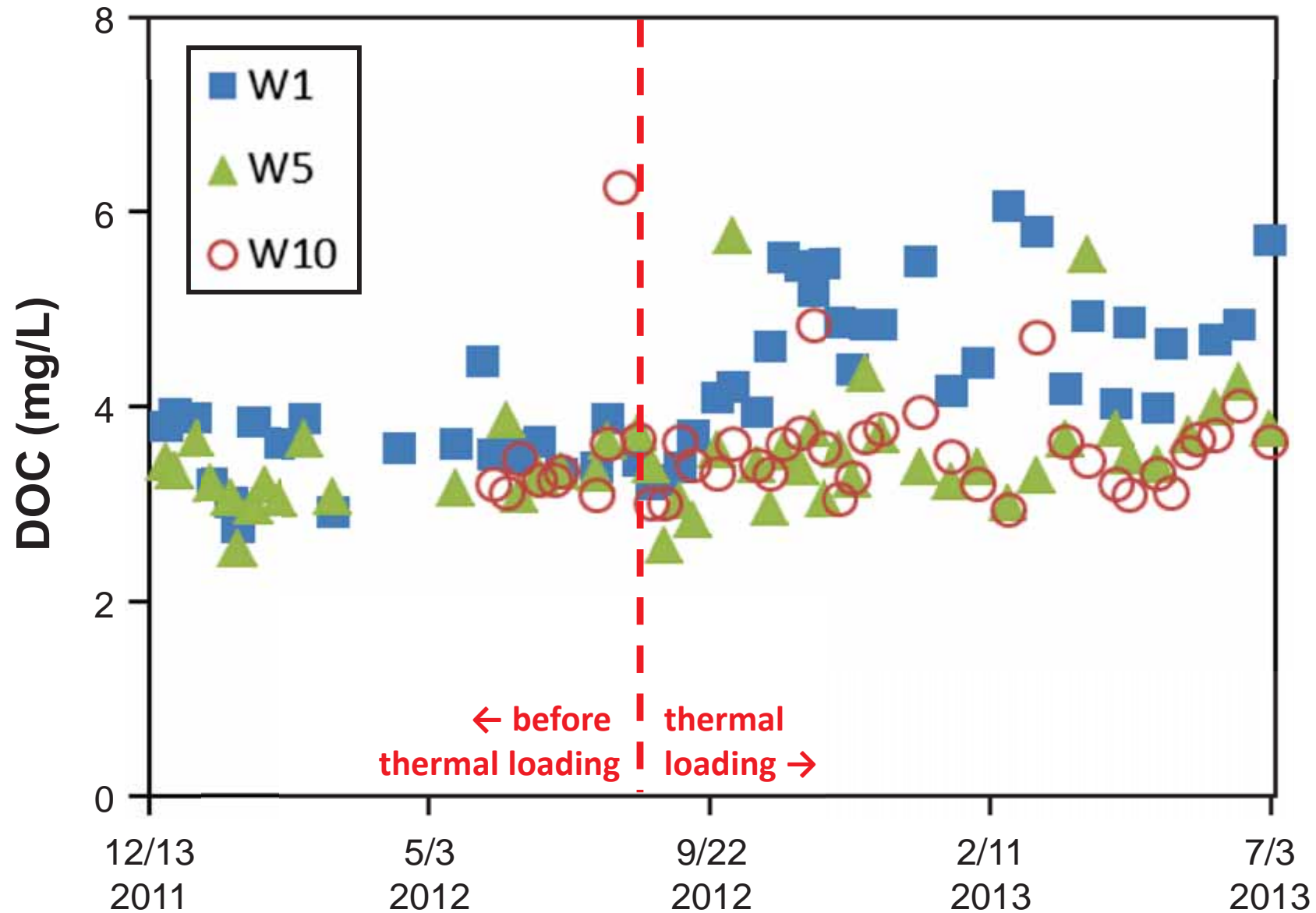
熱負荷試験前後の水質変動(主要イオン, DOC)



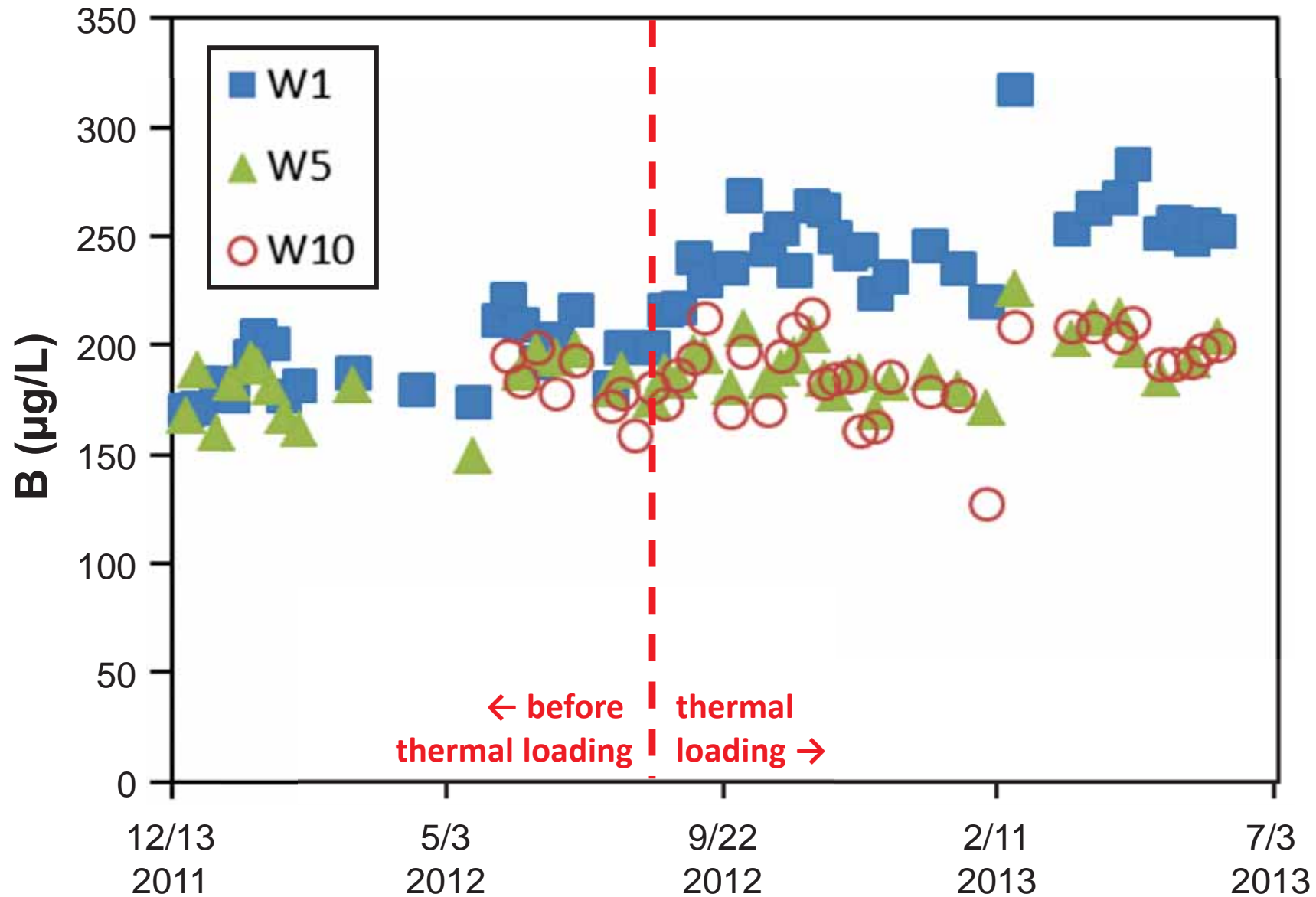
熱負荷試験前後の水質変動(微量元素)



熱負荷試験前後の水質変動 (上部帯水層:DOC)

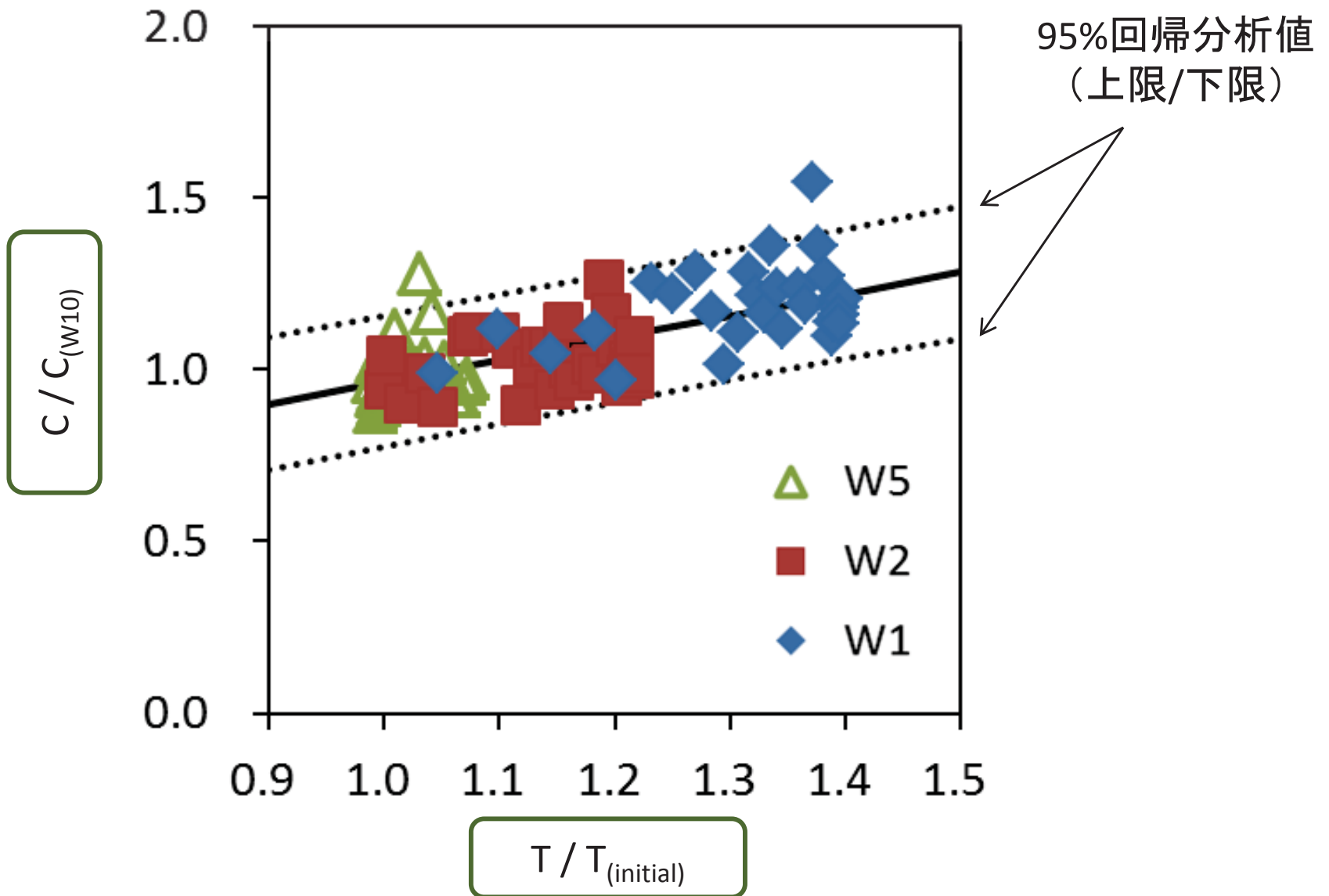


熱負荷試験前後の水質変動 (上部帯水層:ホウ素)



温度上昇率と濃度上昇率の関係性 (上部帯水層:ホウ素)

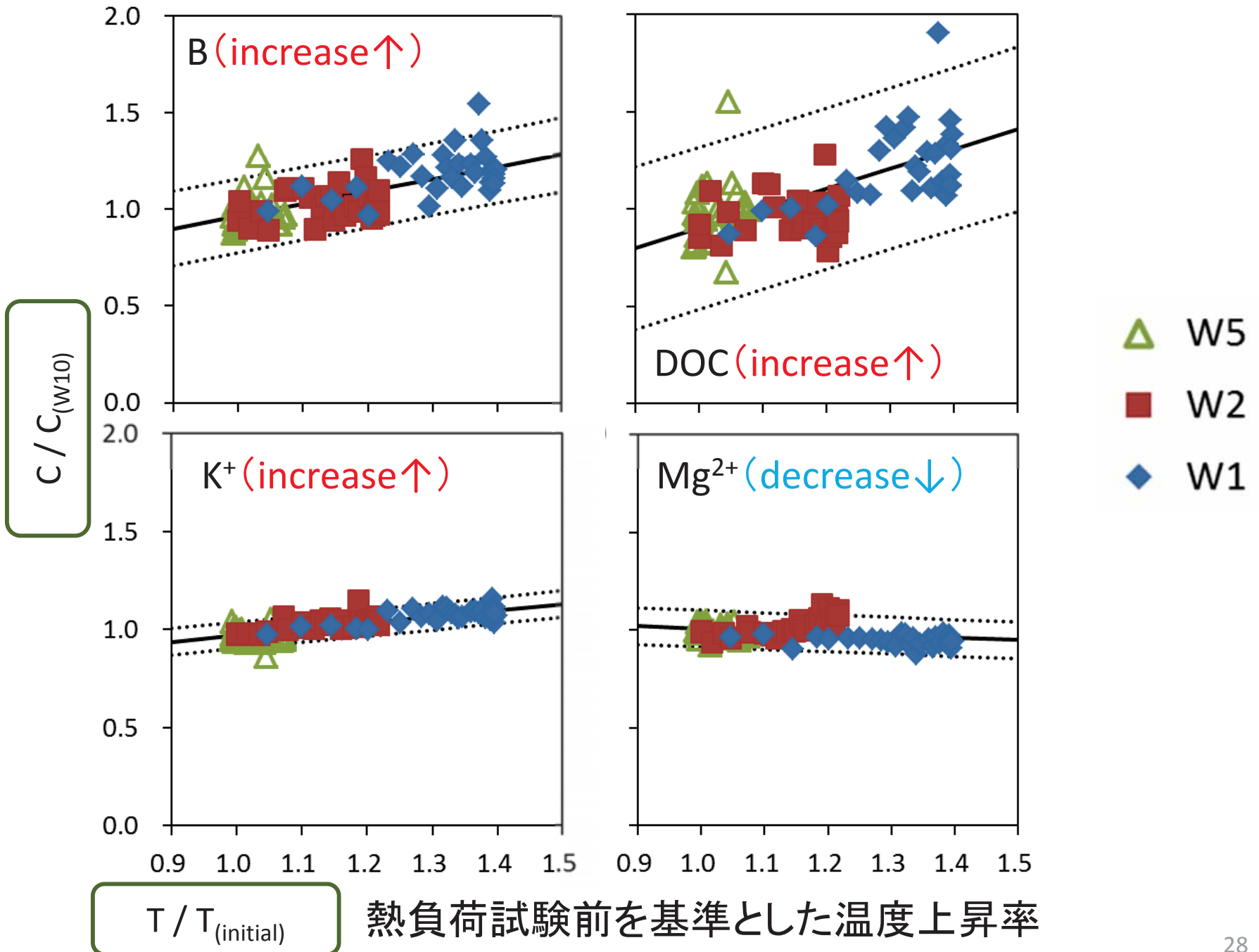
観測井W10を基準とした濃度上昇率



熱負荷試験前を基準とした温度上昇率

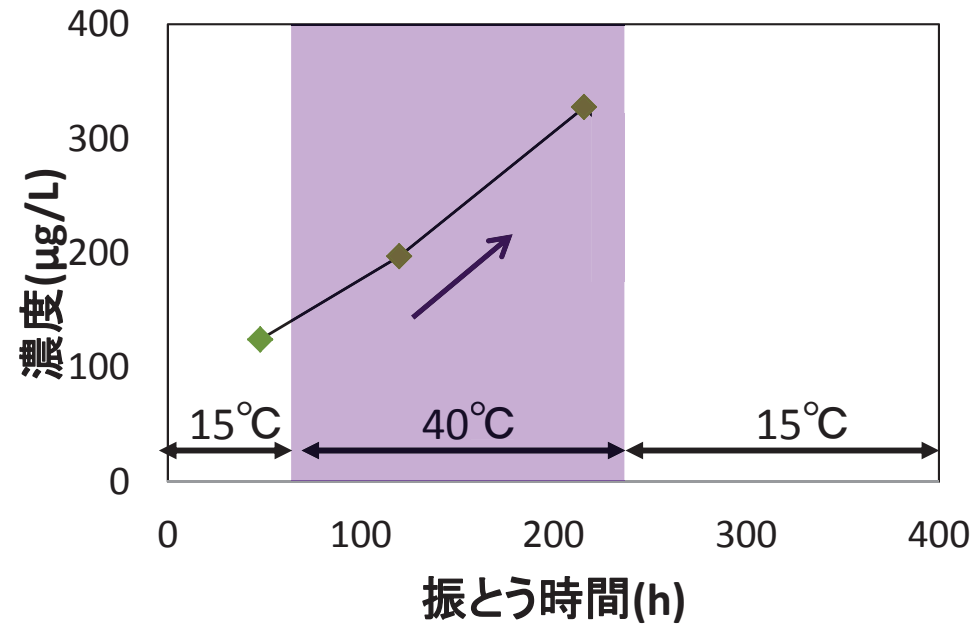
温度上昇率と濃度上昇率の関係性(上部帯水層)

観測井W10を基準とした濃度上昇率



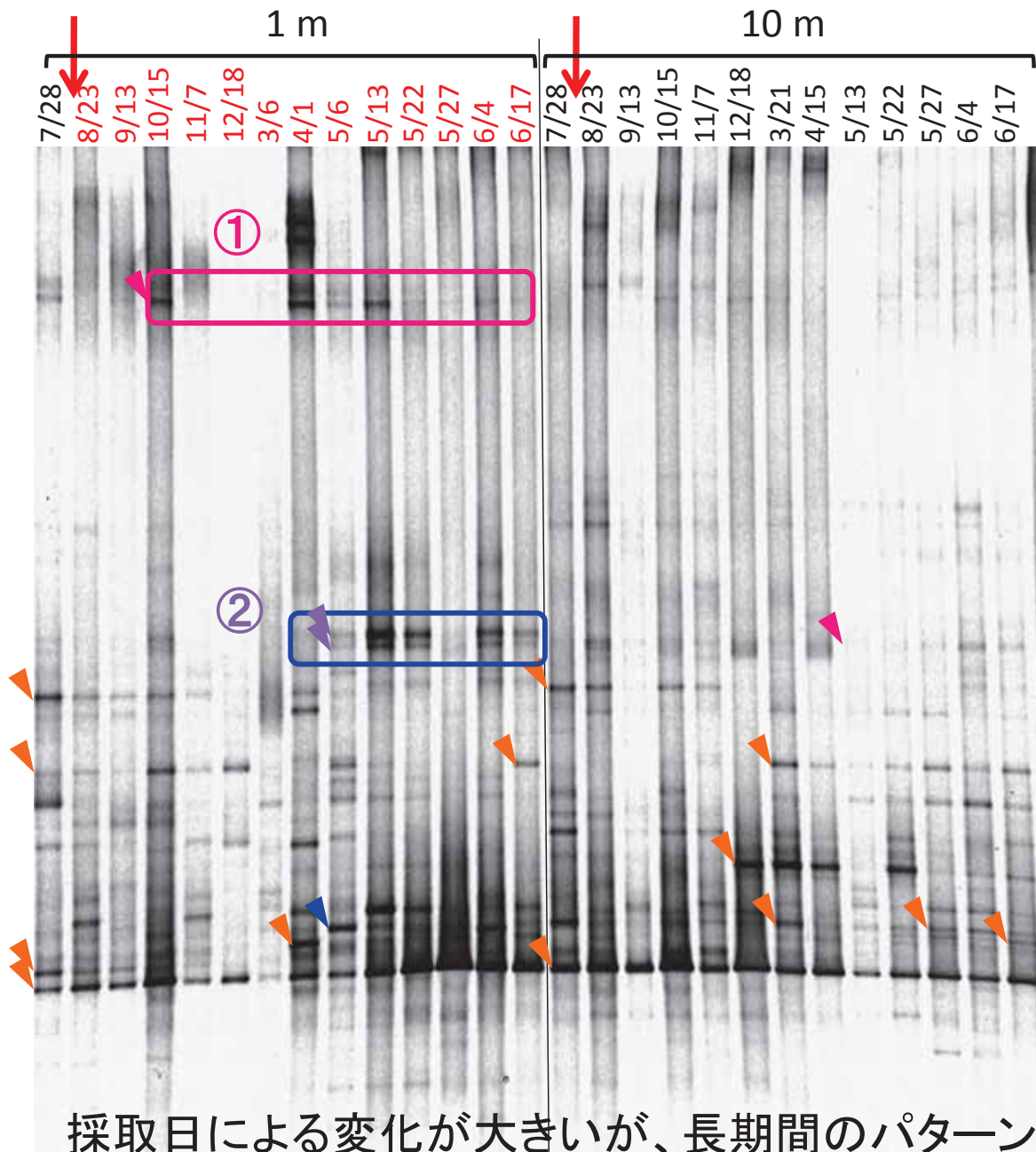
ホウ素溶出試験

ホウ素溶出量の経時変化 (17.55~17.65m深度コア試料)



振とう温度が上がると
B濃度が上昇

地下水の細菌叢変化 (上部帯水層)



▲ Actinobacteria ▲ Bacteroidetes
▲ Firmicutes ▲ β -proteobacteria

1 mの地下水に特徴的なバンド

① *Paludibacter propionigenes*と近縁

- ・ 偏性嫌気性細菌
- ・ プロピオン酸産生

② *Clostridium* sp. と近縁

- ・ 偏性嫌気性細菌
- ・ 脱塩素呼吸菌やメタン生成菌を集積培養した時に共在する未分離細菌とも近縁

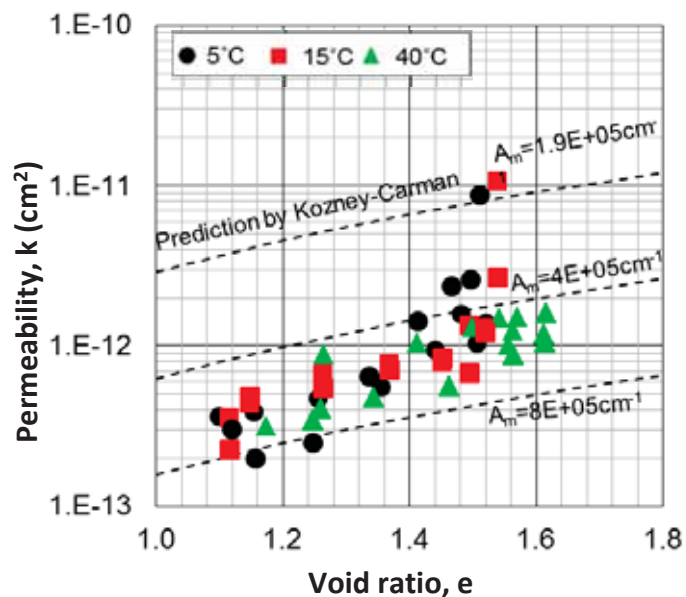
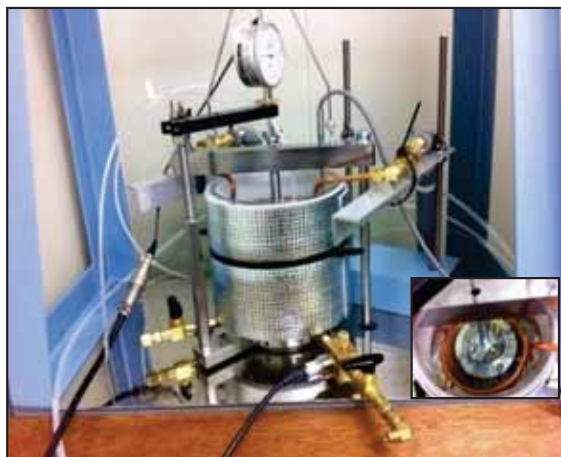
温度上昇に伴って、嫌気性細菌が相対的に増加している。嫌気的環境でメタン生成菌 (古細菌) も増加し、メタンの発生量が上がっている可能性も。

採取日による変化が大きいが、長期間のパターンを比べると変化が確認される

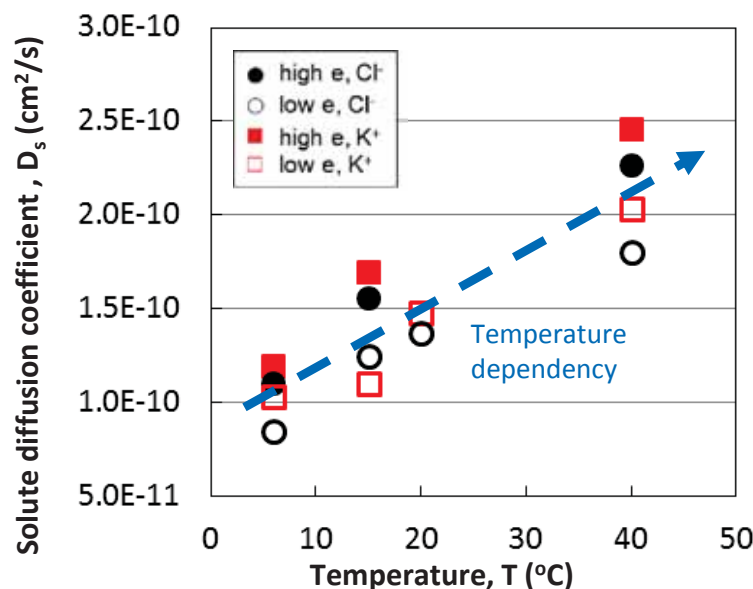
4. 室内試験による温度影響の評価

透水, 溶質拡散, 溶質分散, 吸着・脱離試験結果

透水試験



溶質拡散試験



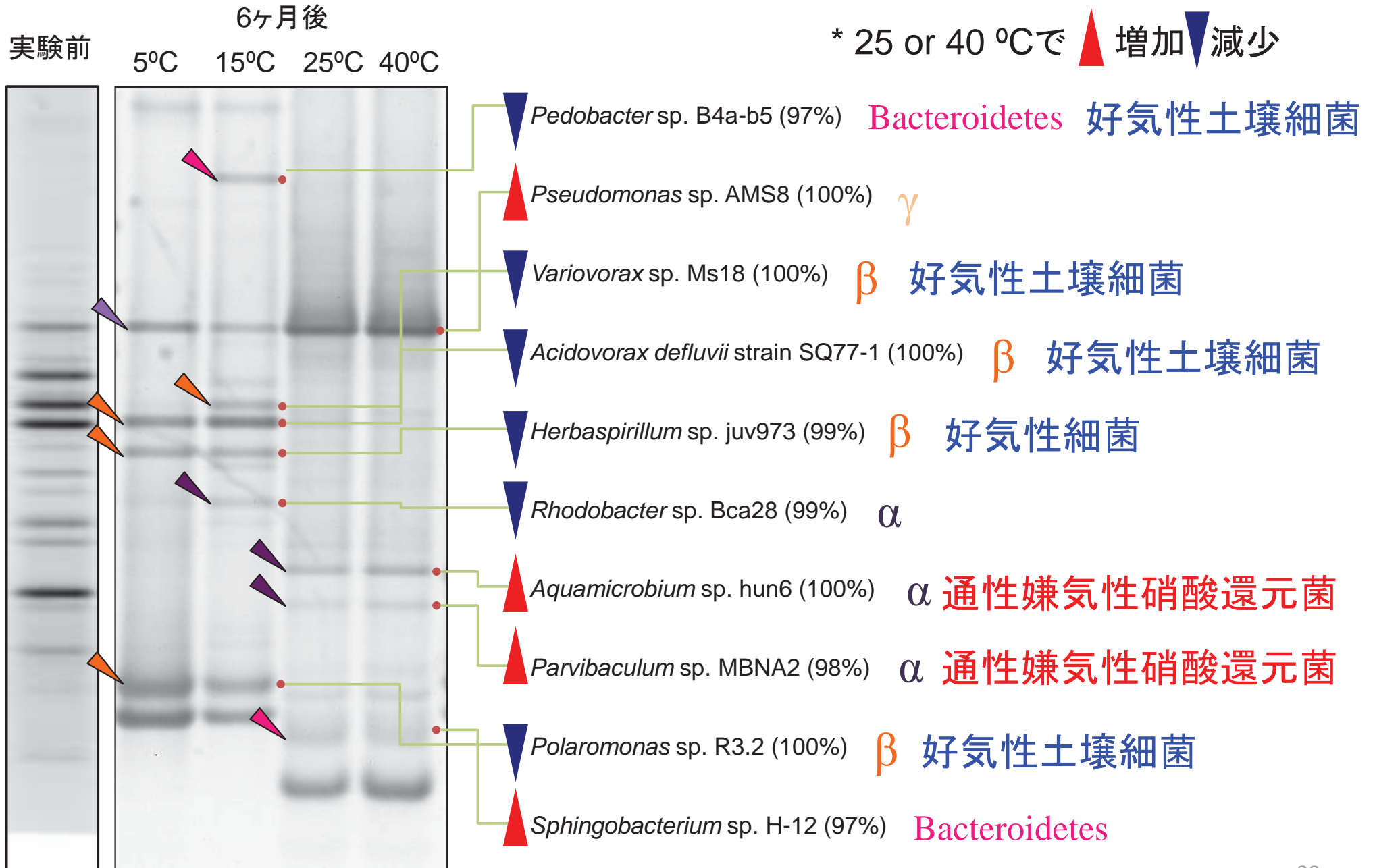
溶質分散試験



吸着・脱離試験

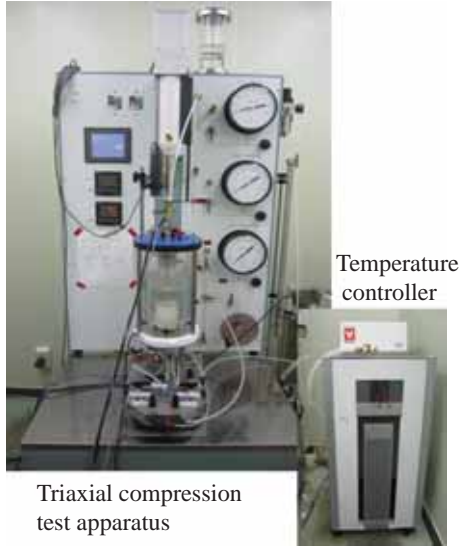


保存コアの解析結果 (TAT 24.9 m)



好気性菌減少, 嫌気性菌増加

地盤力学的特性への温度の影響



Triaxial compression test apparatus

Temperature controller

モデル試料(シルト)を用いた温度調節型三軸圧縮試験

	飽和	不飽和
ピーク強度 (破壊前)	温度上昇とともに減少	温度上昇とともに減少
限界状態強度 (破壊後)	なし	なし
弾性特性	温度上昇とともに膨張し, 下降とともに収縮	温度上昇とともに膨張し, 下降とともに収縮

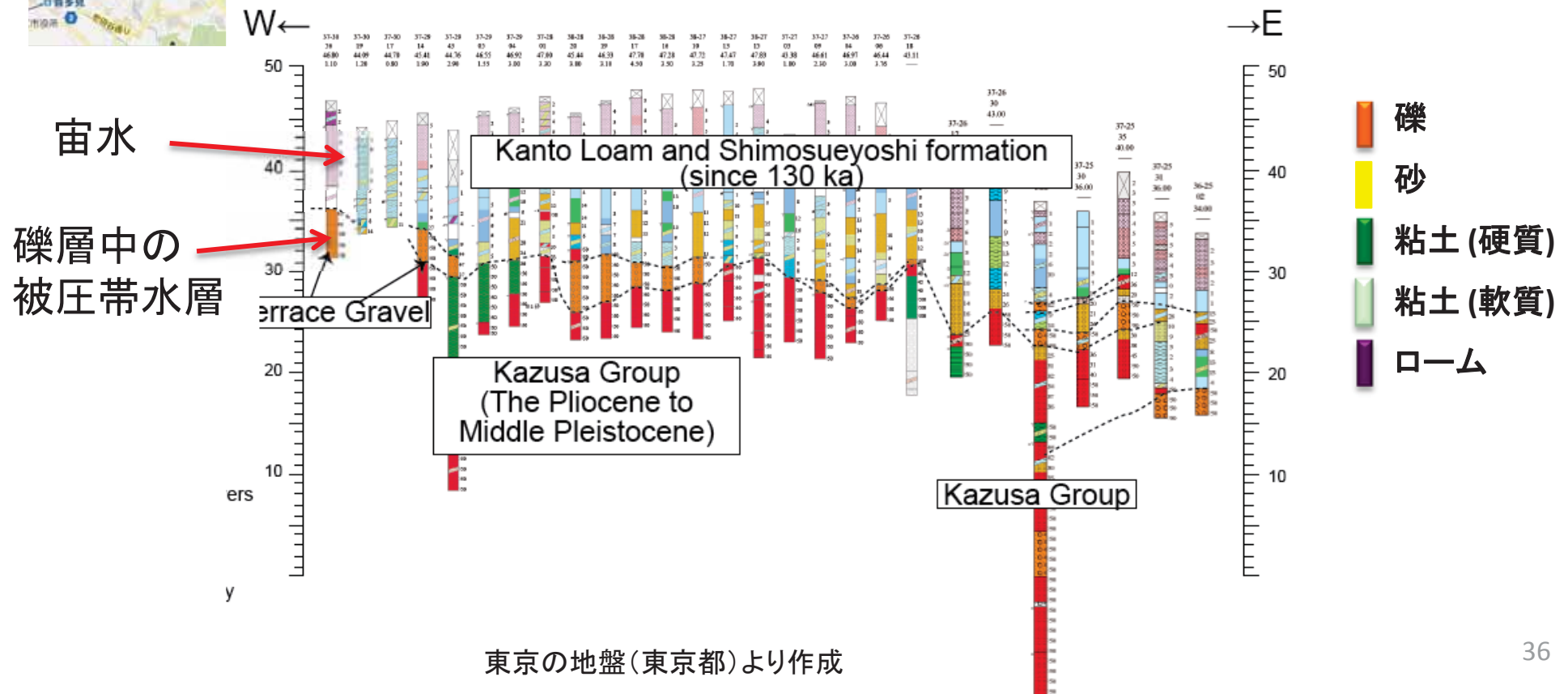
『向後ほか, 不飽和土の力学的挙動への温度の影響とそのモデル化. 農業農村工学会論文集』より引用

5. 3次元地質構造モデル

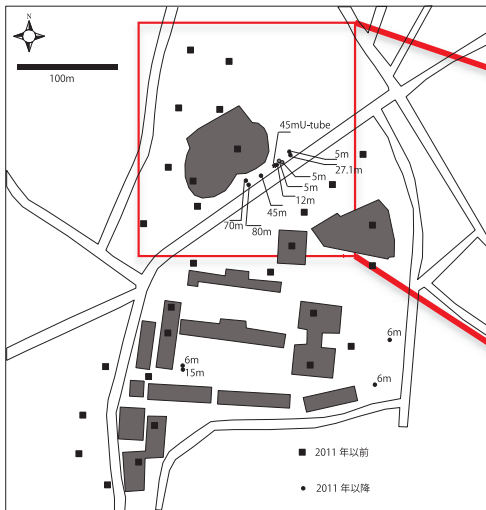
3次元地質構造のモデル化(世田谷北部)

既存ボーリング資料の活用

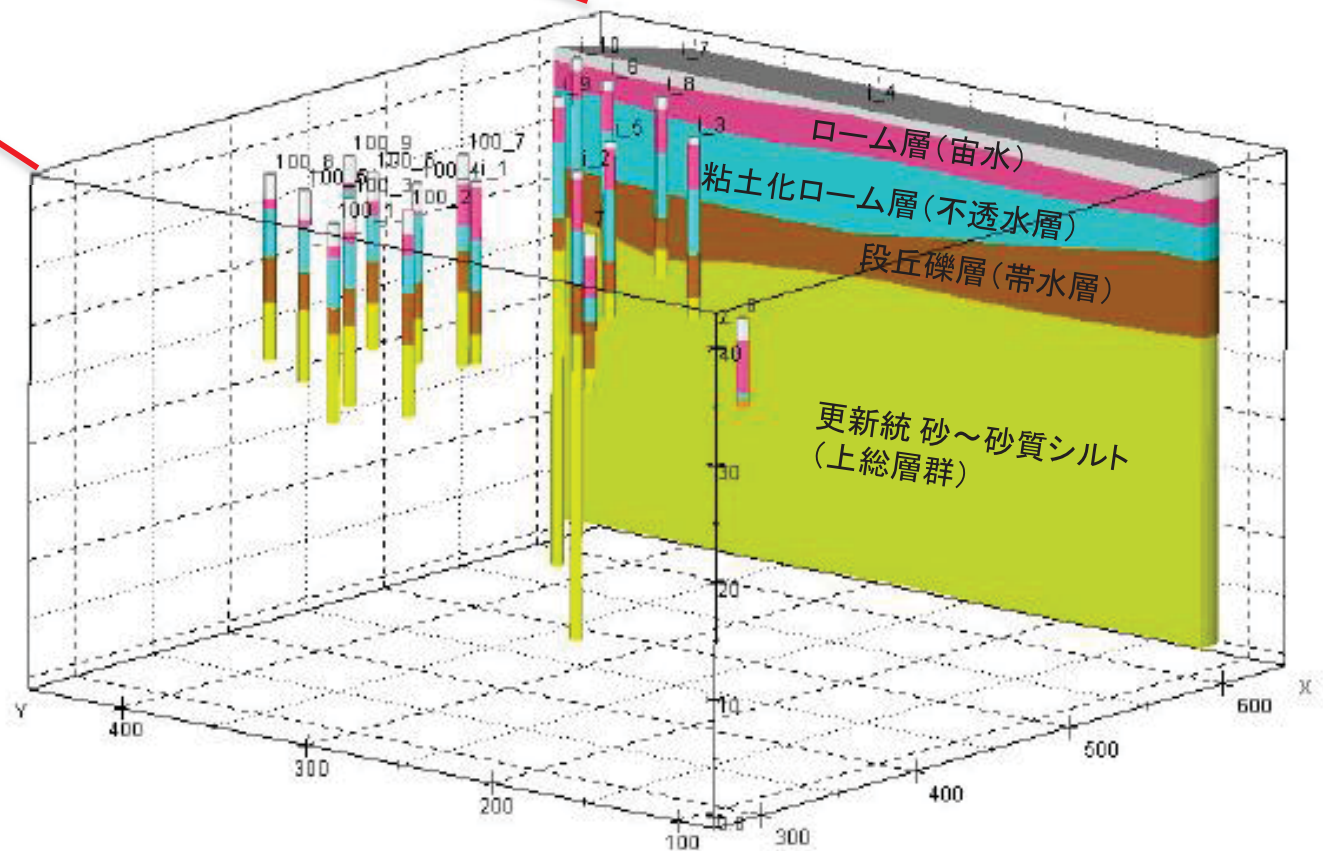
世田谷区・東京都・埼玉県・鉄建公団から入手



3次元地質構造のモデル化(世田谷北部)

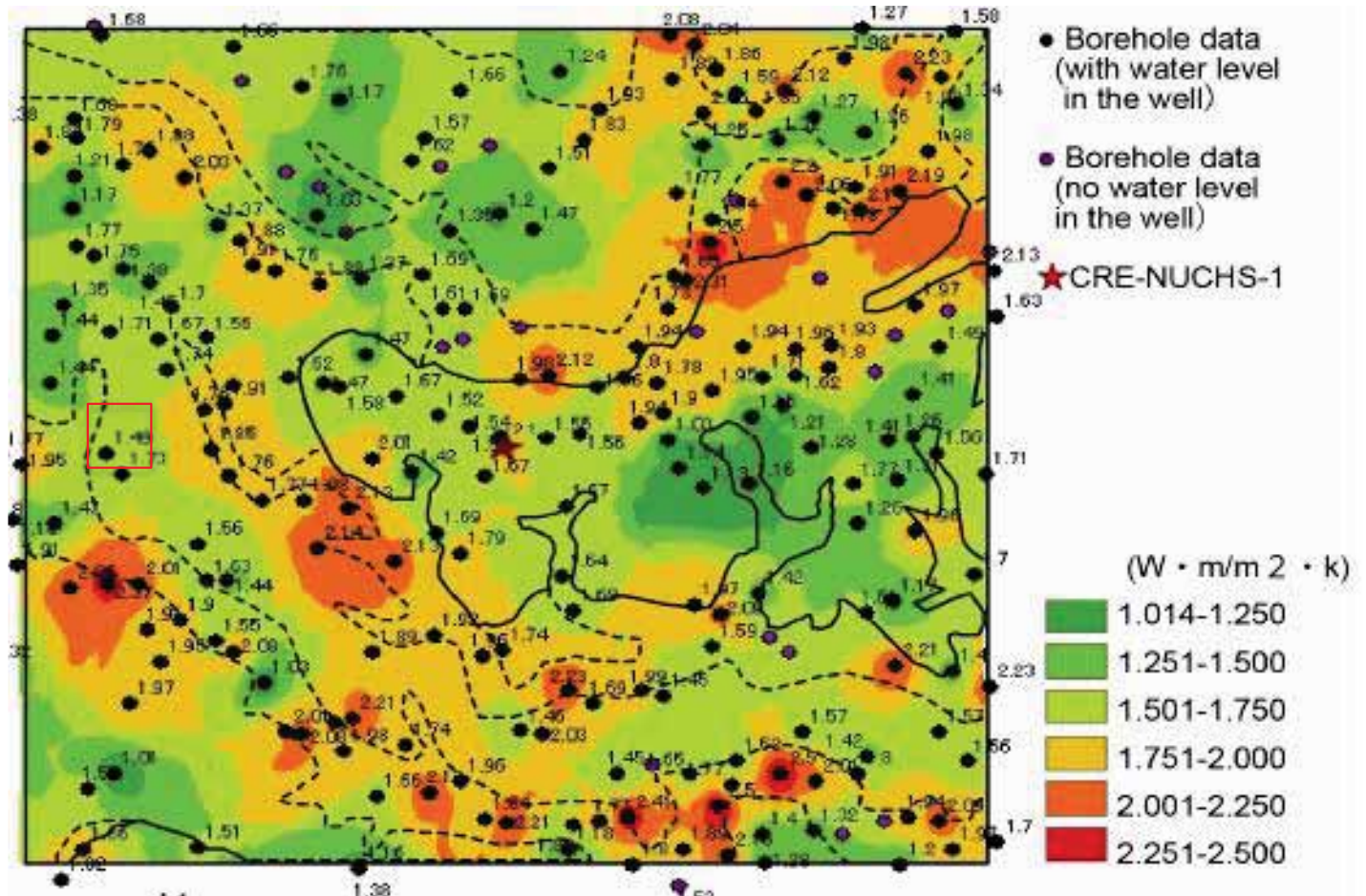


500m × 500m × 45m



地球統計学的手法により, 都市域の地下地質構造を推定
↓
各地層ごとの特徴を抽出

世田谷北部の熱伝導率マップ



東京西部:世田谷近郊5km×5km

ボーリングコアから推定された
地下熱伝導率分布
(世田谷2000点, 他地域5000点)

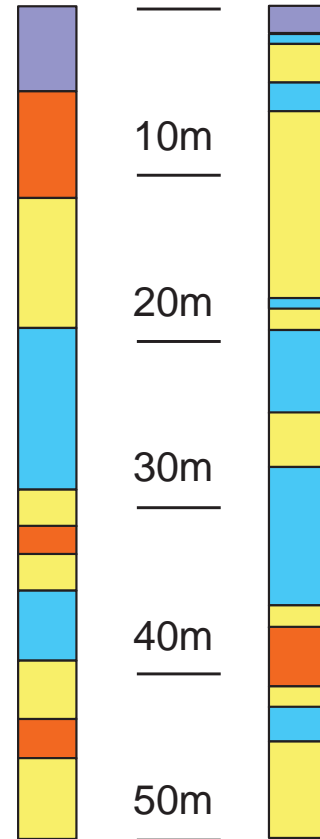
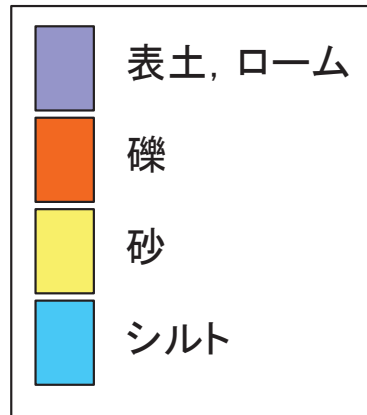
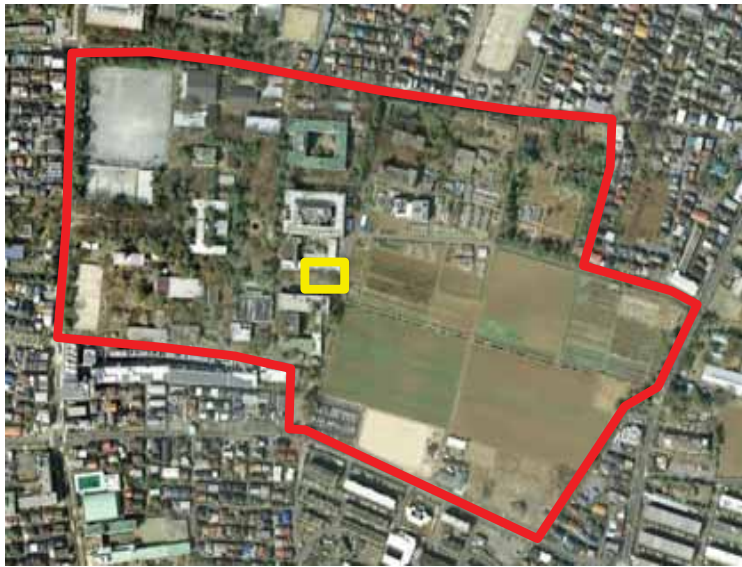


6. 熱応答試験の数値解析

対象地

東京農工大学(TAT)

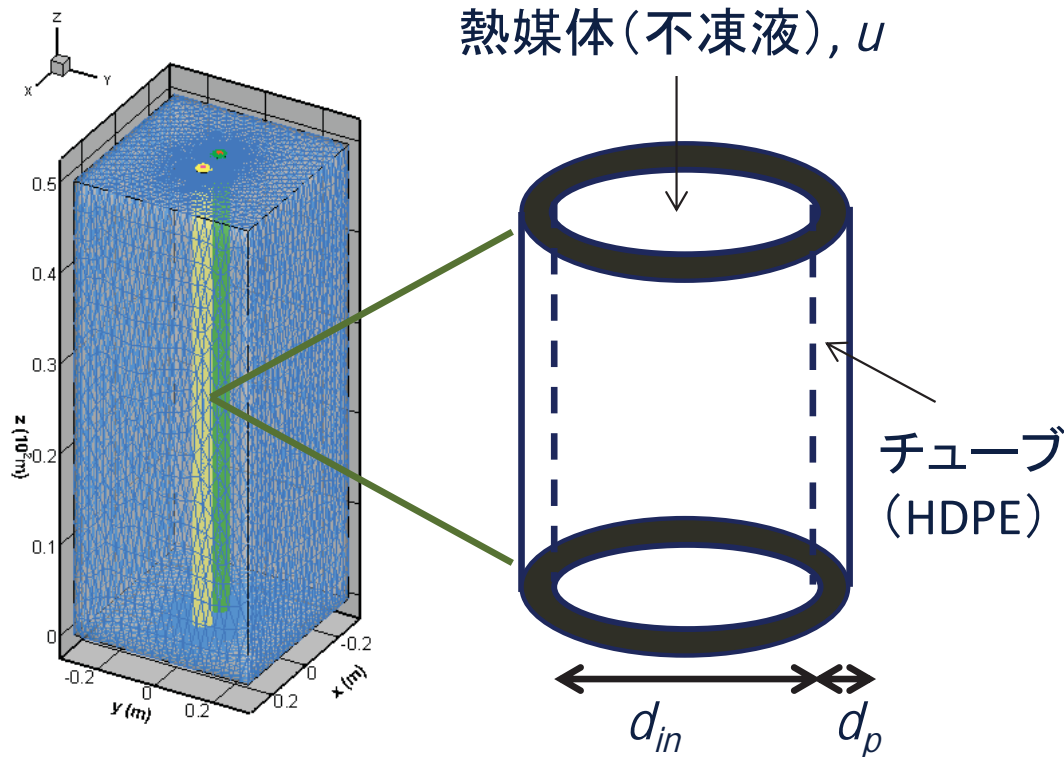
埼玉大学(SU)



3次元熱伝導＋1次元熱移流

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \rho c u \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S$$

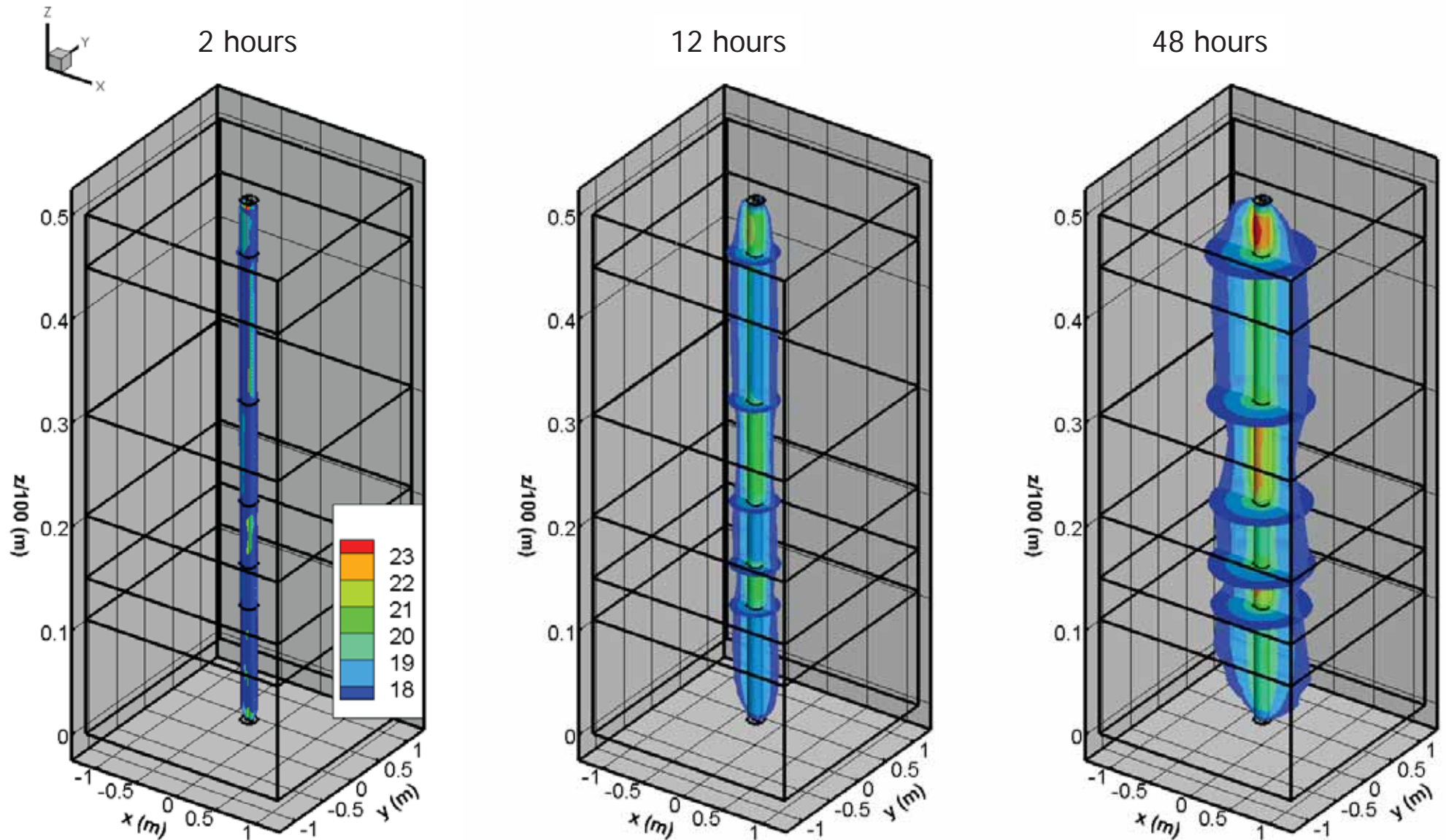
(Tago, 2004; Schiavi, 2009; Christodoulides, et al., 2012)



□ 熱媒体とチューブの間の熱の移動は、熱伝達係数 h_0 を用いて、吸込み・湧出し項 S 中で求める。

□ チューブと地盤の熱の移動は、伝導による移動のみを考慮。

地盤温度変化:二層モデル



7. これまでの結果と今後の予定

これまでの結果のまとめ

- ❖ 各サイトのボーリングコア試料について、粒径分布や含水比、EC、熱伝導率等を測定した。コア中の微生物叢はサイトによって大きく異なっていた。埼玉大学サイトでは、地温分布は深度10 m以深でほとんど季節変動がなく、帯水層中の地下水質についても大きな季節変動は認められなかった。
- ❖ 約40°Cの温水を11ヵ月間連続的に循環させることにより、熱源から1 mの地点で7-8°C程度の地温上昇が確認された。特に上部帯水層（海成の砂層、GL-17m付近）においては、複数の水質成分（ホウ素、DOC、ケイ素、カリウム、マグネシウムなど）に変化が認められた。また、地下水中の微生物叢についても、温度変化の影響と考えられる変化が認められた。
- ❖ 既存の地下地質情報を収集することにより、3次元地質構造について高密度のモデル化が可能となった。
- ❖ 3サイトから得られたコア試料を用いて、室内試験より透水・溶質拡散・溶質分散・吸着脱離試験を実施した。熱物性については、地盤の含水比を関数とする簡便な予測モデルを構築した。
- ❖ 3次元の熱伝導方程式に1次元の移流熱移動方程式を組み合わせ、熱応答試験（TRT）時の熱交換過程および地盤熱物性値の評価を行った。地盤中の熱伝導率分布を定量化する手法としての可能性が示された。

アセスメントツール構築と環境影響評価

Input Data

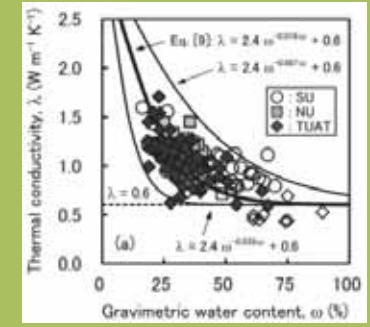
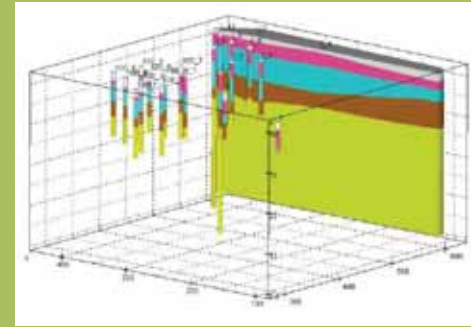
ボーリング孔データを用いた**三次元地下構造情報の取得およびモデル化**

地質要素における水理・熱物性の設定
・ **地質情報に基づく物質・熱輸送係数の予測**

土壌中(有害)化学物質・微生物のインベントリ

三次元地質モデル

物質・熱輸送係数のモデル化



広域での地層分布, ならびに各種物性(熱伝導率, 透水係数, 比貯留率 etc.)を推定

地圏環境シミュレーション

物質・熱連成動態解析

・ 物質・エネルギー移動数値シミュレーション

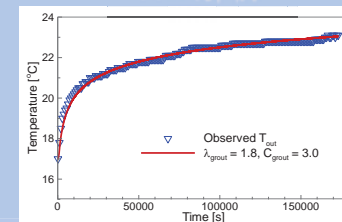
検証

修正

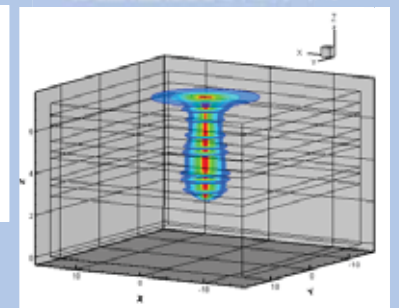
熱応答・物質動態に関する観測データ(TRT試験など)

境界条件設定(ex. 地圏熱利用システム導入)

TRT解析



地盤温度変化予測



Output: 環境影響評価

地下温度分布, 地下水濃度分布(重金属など),
地下微生物変化度分布, 地盤強度リスク分布

地中熱利用ヒートポンプに関する ガイドラインの例

GSHPの設置箇所と地下水保護区域 (オランダ)

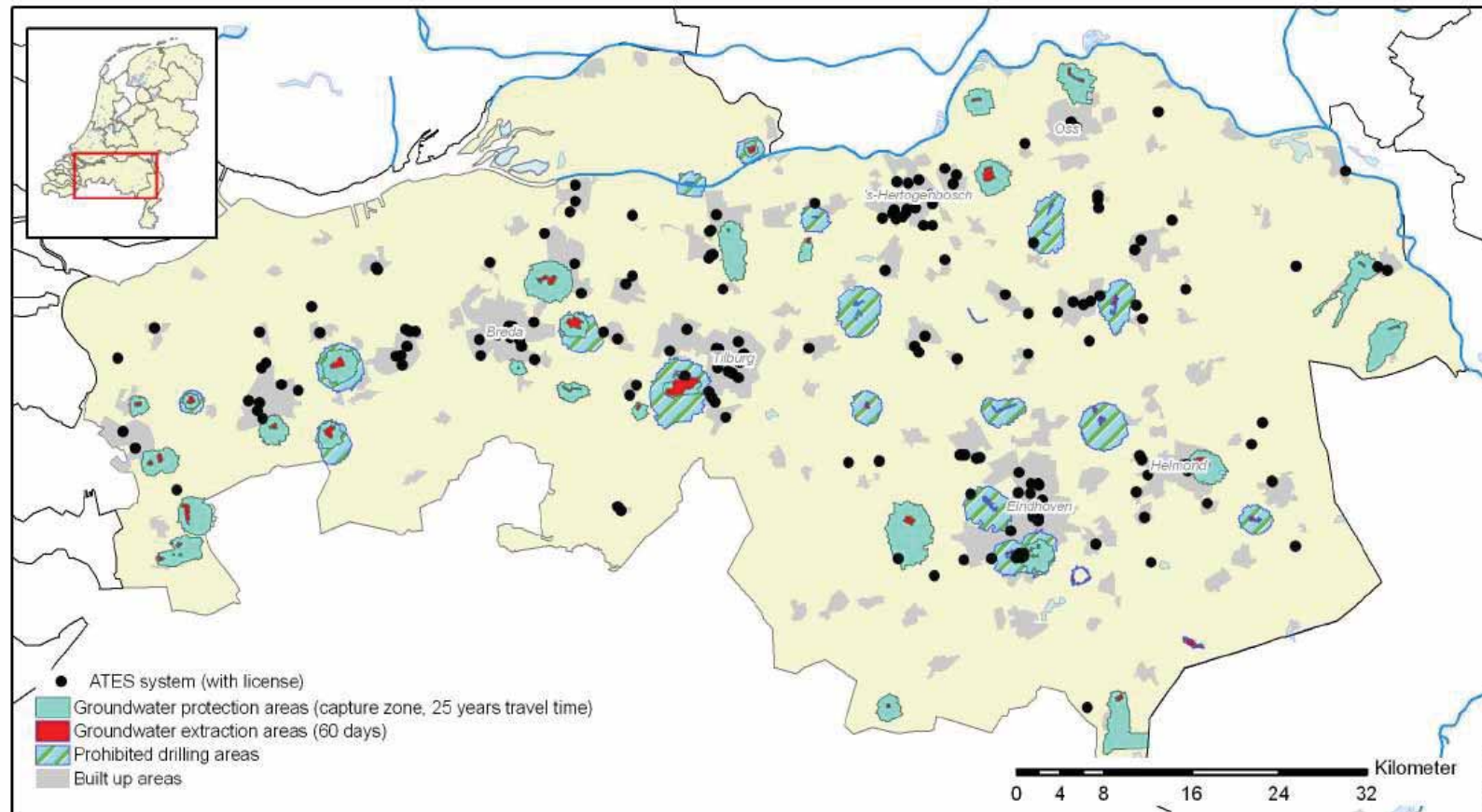


Fig. 2. Map showing the locations of aquifer thermal energy storage (ATES) systems and groundwater protection zones for public supply well fields in the province of Noord-Brabant, the Netherlands. ATES data were sourced from provincial authorities; groundwater protection zones data are courtesy of the National Institute for Public Health and the Environment.

GSHPに関する環境リスク

Table 1. Qualitative overview of risks of low-temperature (< 30°C) underground thermal energy storage on groundwater systems.

Negative effect of underground thermal energy storage	Probability [†]	Consequence [‡]	Risk [‡]
Hydrological impacts			
Changing water levels and fluxes	++	Desiccation, water logging, settlements	±
Changing other well's capture zone	++	Increasing vulnerability, pollution	++
Poorly sealed boreholes	+	Cross-aquifer flow	++
Thermal impacts			
Changing water temperature	++	Temperature, reaction kinetics	+
Chemical impacts			
Mixing processes and chemical reactions	++	Salinity, IMIPO, OMIPO	++
Reactivation of otherwise stable groundwater pollution plumes	±	IMIPO, OMIPO	++
Oxidation of organic matter	±	Nutrients, DOC, color	+
Oxidation of iron sulfides	±	Fe, SO ₄ , As, Ni, Co, Zn	+
Dissolution/precipitation of carbonates	-	Ca, HCO ₃ , Sr	±
Dissolution/precipitation of silicates	-	SiO ₂	±
Leaching from installation materials	±	Cd, Cu, Cr, Ni, Pb, VC	+
Leaking anti-freeze fluids or additives	±	Glycol, biocides, corrosion inhibitors	++
Microbiological impacts			
Introduction or mobilization of pathogens	-	Pathogens	±
Increasing biodegradation rate	±	Nutrients, IMIPO, OMIPO	- or +
Changing microbiological population	+	Unknown	?

[†]Probability of occurrence is small (-), moderate (±), high (+), or almost always (++).

[‡]IMIPO = inorganic micro-pollutants, OMIPO = organic micro-pollutants, DOC = dissolved organic carbon, VC = vinyl chloride.

[§]Probability of risk is negative, resulting in opportunity (-); none (±); low (+), high (++).

GSHP利用における温度規制・推奨値

Table 5

International technical temperature limits for the heat carrier fluid inside the borehole heat exchanger of a GSHP system.

Country	Temperature difference [K]	Temperature maximum [°C]	Temperature minimum [°C]
Austria	±15	35	0 ^a /-5 ^b
Denmark	-	25	2
Germany	±11 ^a /±17 ^b	-	-

^a With weekly mean load.

^b With peak load.

Table 7

International groundwater temperature thresholds for open geothermal systems.

Country	Temperature difference [±K]	Temperature maximum [°C]	Temperature minimum [°C]
Austria	6 ^a	20 ^a	5 ^a
Denmark	-	25 ^a	2 ^a
France	11 ^a	-	-
Germany	6 ^b	20 ^b	5 ^b
Great Britain	10 ^b	25 ^b	-
Liechtenstein	-3/+1.5 ^a	-	-
Netherlands	-	25 ^a	5 ^a
Switzerland	3 ^a	-	-

^a Legally binding.

^b Recommended.

『Haehnlein et al. (2010): International Legal Status of the Use of Shallow Geothermal Energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*』より引用

GSHPの設置最小距離

Table 6
Recommended and legally binding minimum distances for closed and open geothermal systems.

Country	Closed systems	Open systems	Legal status
Austria	2.5 m to the next property line	–	Recommended
China	3–6 m to the next BHE	–	Recommended
Czech Republic	5 m to the next property line	5 m to next property line	Legally binding
Denmark	300 m to drinking water well	–	Legally binding
Finland	30 m to all wastewaters, 20 m to the onsite wastewater treatment system, 5 m to the sewers and water pipes, 20 m to the dug or energy well, 40 m to the bored well, 3 m to the next building, 10 m to the next property line	–	Recommended
Germany	5 m to the next property line, 10 m to the next installation	–	Recommended and state specific
Greece	–	5 m to the neighboring buildings, 20 m to the next power line	Legally binding, if included in permission
Liechtenstein	3 m to the next property line, 6 m to the next installation	–	Recommended
Sweden	10 m to the next property line, 20 m to the next installation, 30 m to the next drinking water well	10 m to the next property line, 20 m to the next installation, 30 m to the next drinking water well	Recommended
Switzerland	3–4 m to the next property line, 5–8 m to the next installation	–	Recommended/Legally binding

『Haehnlein et al. (2010): International Legal Status of the Use of Shallow Geothermal Energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*』より引用

GSHPに関するガイドライン(環境省)

地中熱利用にあたってのガイドライン

環境省水・大気環境局

目次

序 ～本ガイドラインの適用範囲と構成～	1
1. 地中熱利用ヒートポンプの概要	2
1.1 地中熱利用ヒートポンプの仕組み	2
1.2 主な地中熱利用方式	3
1.3 用途	4
2. 地中熱利用ヒートポンプによる省エネ効果等および事例紹介	6
2.1 省エネルギー効果	6
2.2 CO ₂ 排出削減効果	10
2.3 省コスト効果	11
2.4 ヒートアイランド現象の緩和効果	15
3. 地中熱利用ヒートポンプの導入・利用に関する配慮事項	16
3.1 地中熱利用ヒートポンプの導入条件	16
3.2 地中熱利用ヒートポンプの導入および利用における留意点	20
3.3 地中熱利用ヒートポンプにかかるコスト	29
4. 地下水・地盤環境への影響項目とモニタリング方法	32
4.1 どのような影響が考えられるか	34
4.2 モニタリング項目と方法	37
4.3 モニタリングの実例	52
5. モニタリングデータの将来的な活用について	54
参考資料	

官庁施設における 地中熱利用システム導入ガイドライン（案）

国土交通省 大臣官房官庁営繕部 設備・環境課
平成25年10月

出典：国土交通省HP

http://www.mlit.go.jp/gobuild/gobuild_tk6_000063.html#Q3