

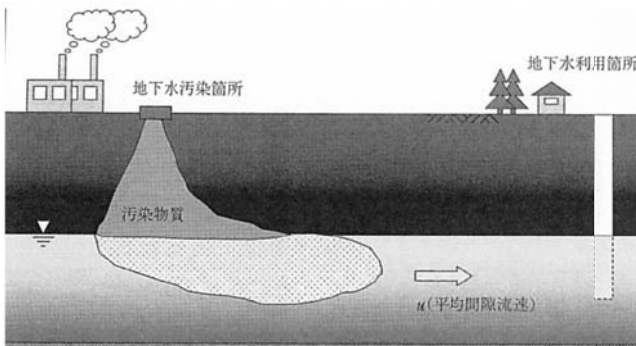
# 地盤の水理調査計画の考え方

2019年10月18日（金）  
竹内真司（日本大学）

「現場実験から把握する地下水の実流速（その3）」 廃炉地盤工学委員会講習会（於 日本大学文理学部）



## 地下水環境の適切な理解に必要なこと



- 帯水層の特定と広がり
  - 水みちの抽出
  - 透水特性
  - 流向・流速
  - トレーサの移行特性 など
- 孔、試験区間の適切な配置

地下水のトレーサ試験（日本地下水学会、2009）より

## トレーサ試験を適切に実施するために・・・

### ●試験サイトの水理地質構造の把握

➤地質分布

➤水理特性（対象区間（帯水層など）の深度、厚さ、広がり、透水性、流向・流速・・・）

## 人材育成の観点で重要なこと

### ●計画策定の際の調査手順、適用する調査手法に関する判断根拠を明確すること

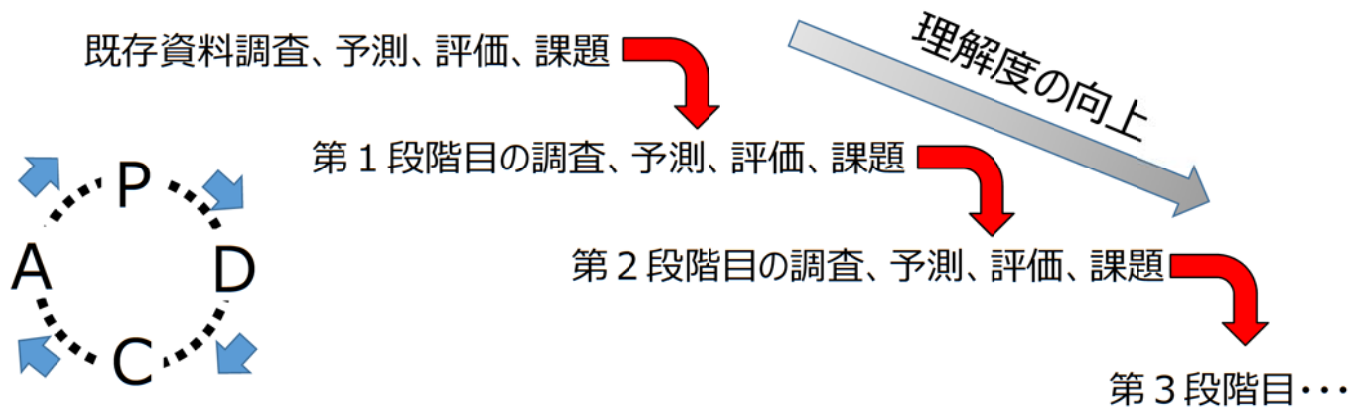
➤手順の妥当性

➤手法の妥当性

\* 実施可能な予算、時間etc.の中で

# 計画策定の基本的考え方（段階的調査）

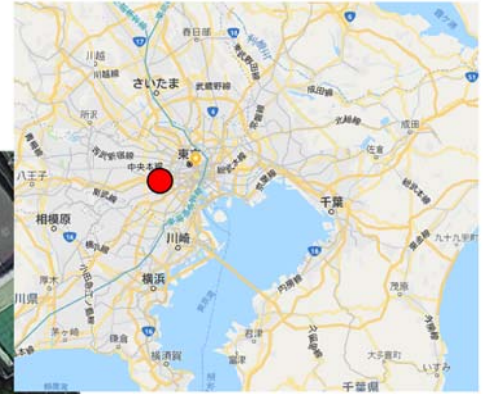
1. 既存資料調査、場の予測、評価、課題の抽出
2. 第1段階目の現地調査、予測、評価、課題の抽出
3. 第2段階目の現地調査、予測、評価、課題の抽出
4. 第3段階目...



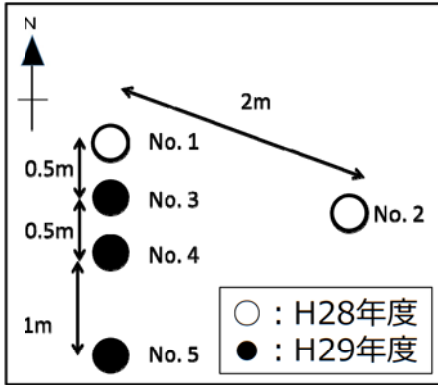
## 地下水環境推定のための調査目的と内容

- 帯水層の深度の特定
  - ・ ボーリング：コア観察、高透水性区間の確認
  - ・ 電気検層：比抵抗分布、帯水層の確認
- 地下水流動方向の推定
  - ・ 流向・流速測定：自然状態での流向・流速の推定
- 地下水流動層の推定
  - ・ フローメータ検層：流量の推定
  - ・ 温度検層：水みち箇所の推定
- 透水性の推定
  - ・ 水理試験（揚水試験）
- 帯水層の広がり
  - ・ 掘削応答（孔掘削中の観測孔への水圧応答観測）
- 物質移行パラメータ（実流速、有効間隙率、分散長など）の推定
  - ・ トレーサ試験

# 試験サイト



日本大学文理学部  
(東京都世田谷区)



Google Mapに加筆

7

## 調査内容 (H28年度)

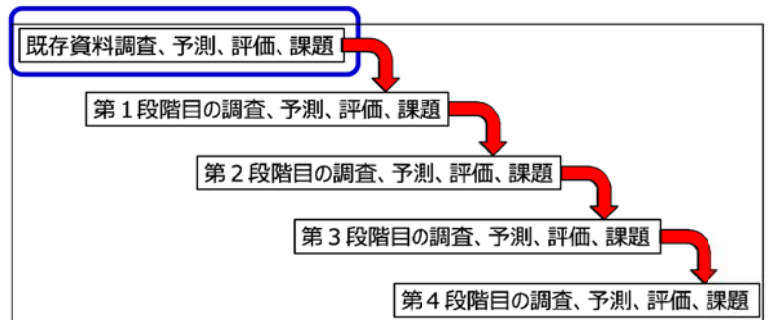
目的：ボーリング配置、帯水層（トレーサ試験対象層）の決定

### ●既存情報調査

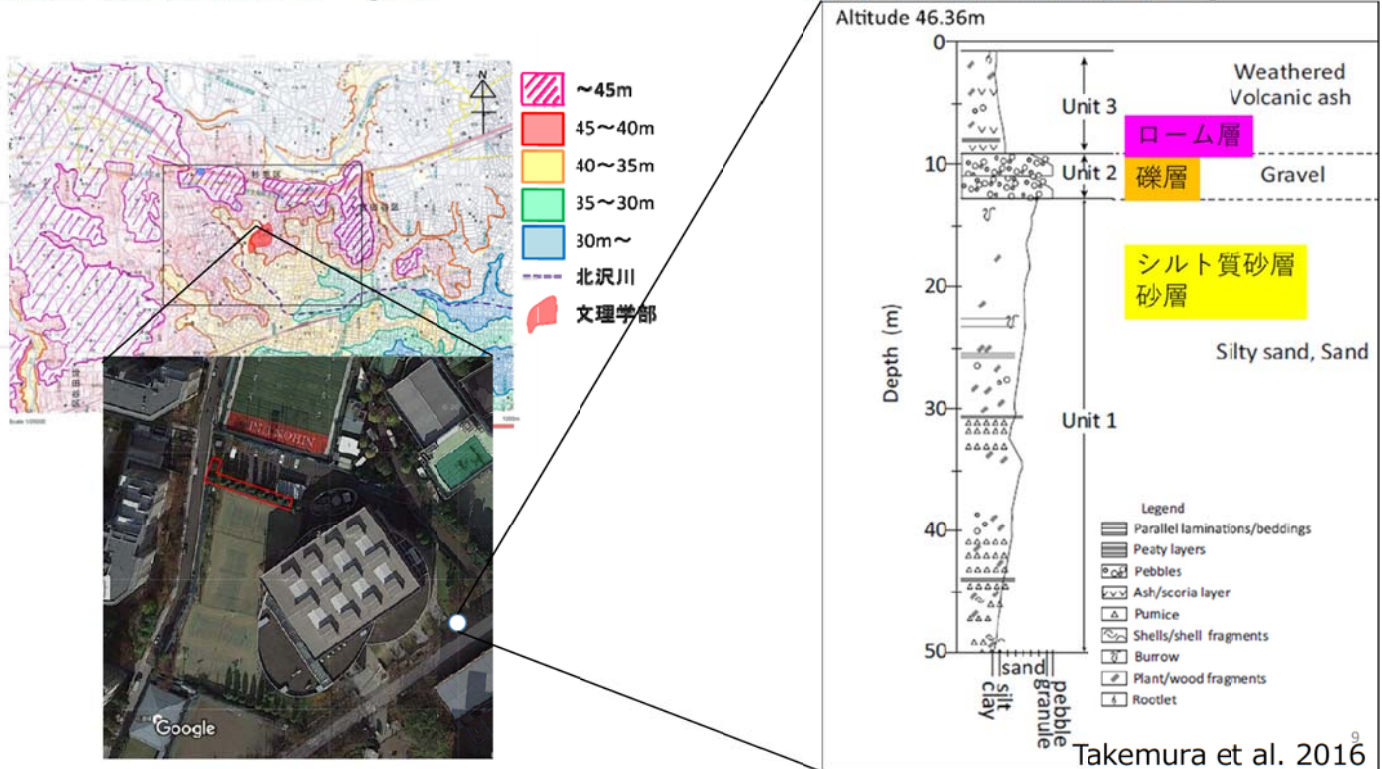
- 第1段階目の調査
- ボーリング掘削（深度約18m：砂礫層の下位（砂層）まで）
  - 孔内検層（電気検層、フローメータ検層）
  - 流向・流速測定
  - 孔内検層（電気検層）
  - 透水試験（揚水試験）



第2段階（H29年度）調査へ



# 既存情報調査（試験サイト周辺の地形と地質柱状図）



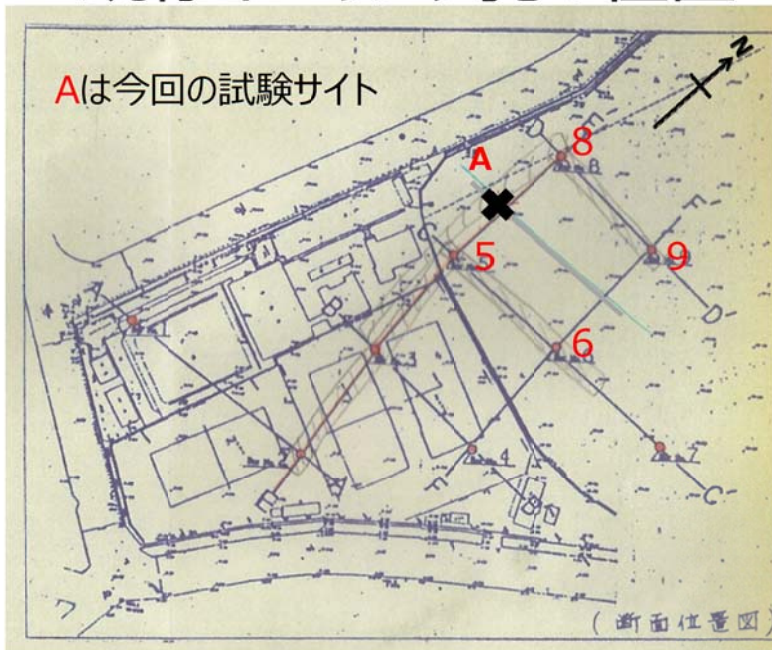
# 今昔マップ



明治42年(1909年)

今昔マップ on the web

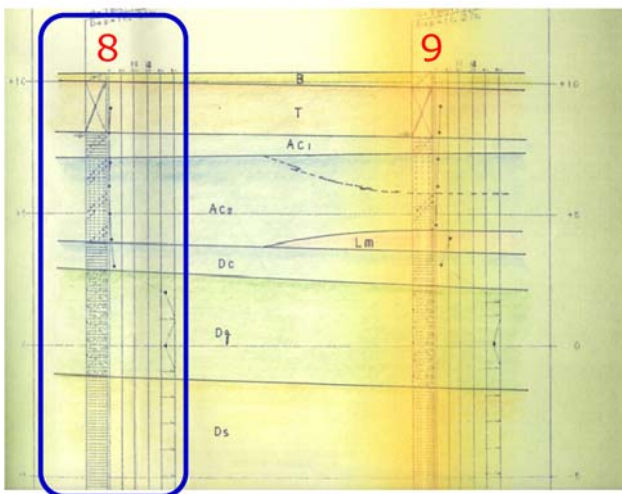
# 既存ボーリング孔の位置



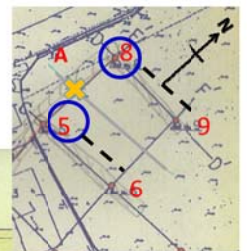
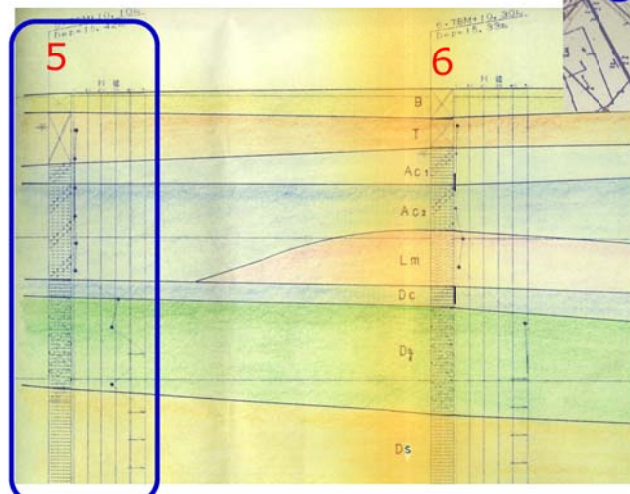
日本大学創立100周年記念館建設に伴う地質調査 (1988)

11

## 8孔～9孔間、および5孔～6孔間の地質断面図



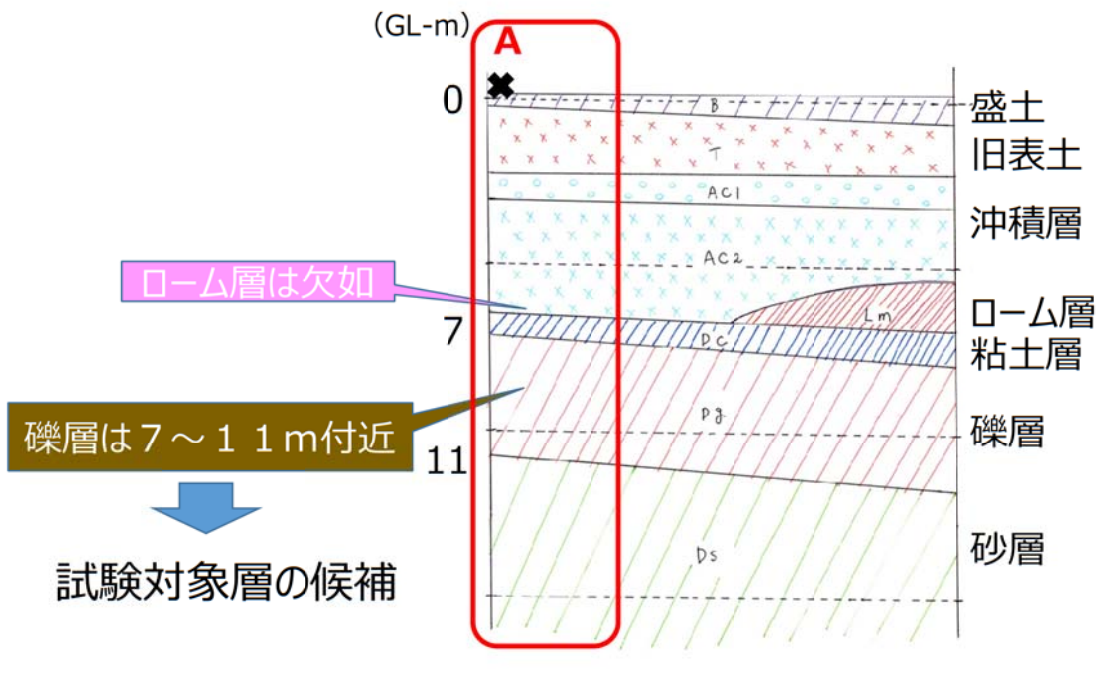
日本大学創立100周年記念館建設に伴う地質調査 (1988)



- 5孔、8孔と同様な地質分布？
- ローム層は欠如（ローム層は東側に分布？）
- 下位に礫層（帯水層？）が存在

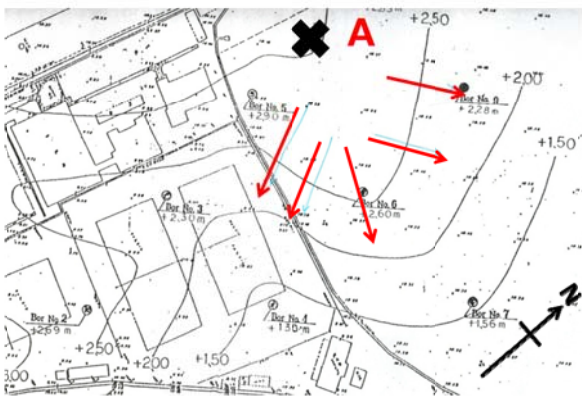
12

# サイトの地質予測

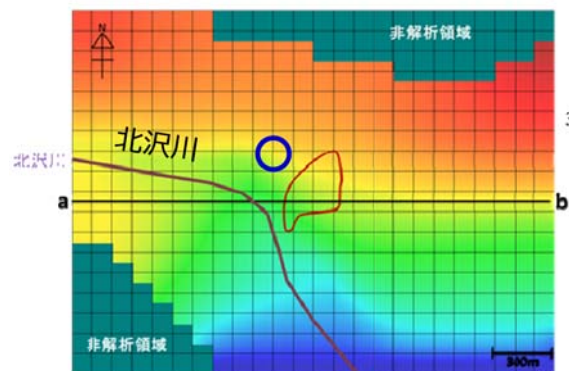


13

# 地下水流向予測



日本大学創立100周年記念館建設に伴う地質調査 (1988)



竹内・戸嶋 (2017)

- 地形勾配
  - 地表面のコンター (基準点からの高さ)
  - ➔ 北東~東~南東?

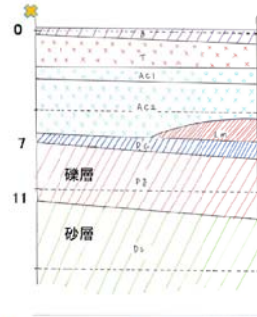
- 地下水流動解析
- ➔ 南?

14

# 既存情報に基づく地質環境の予測結果

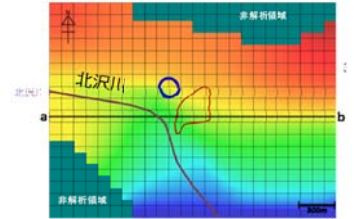
## ●地質

- 深度10m前後に礫層（厚さ約4m）が存在
- その上位に粘土～シルト層、下位は砂層
- 帯水層は、礫層と下位の砂層と推定



## ●地下水流動

- 北東～南東方向（地形勾配）、あるいは南方向（地下水流動解析）



- 初年度（H28年度）は、東西方向に約20m（砂層まで）2孔掘削を計画

- 各孔での孔内調査

# 既存情報に基づく地質環境の予測結果

## ●地質

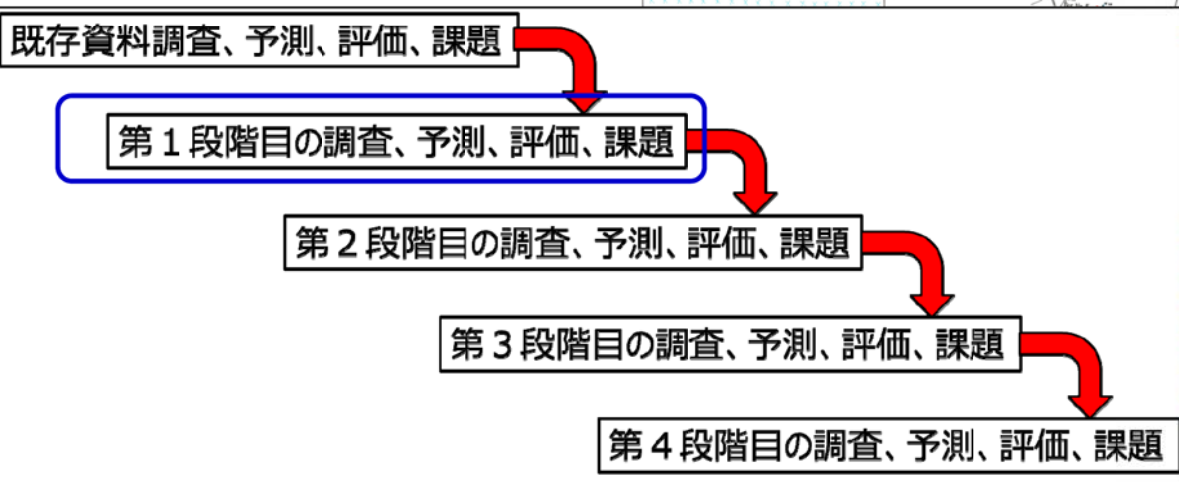
- 浸透層
- 帯水層

## ●地下

- 地質

## ●初年

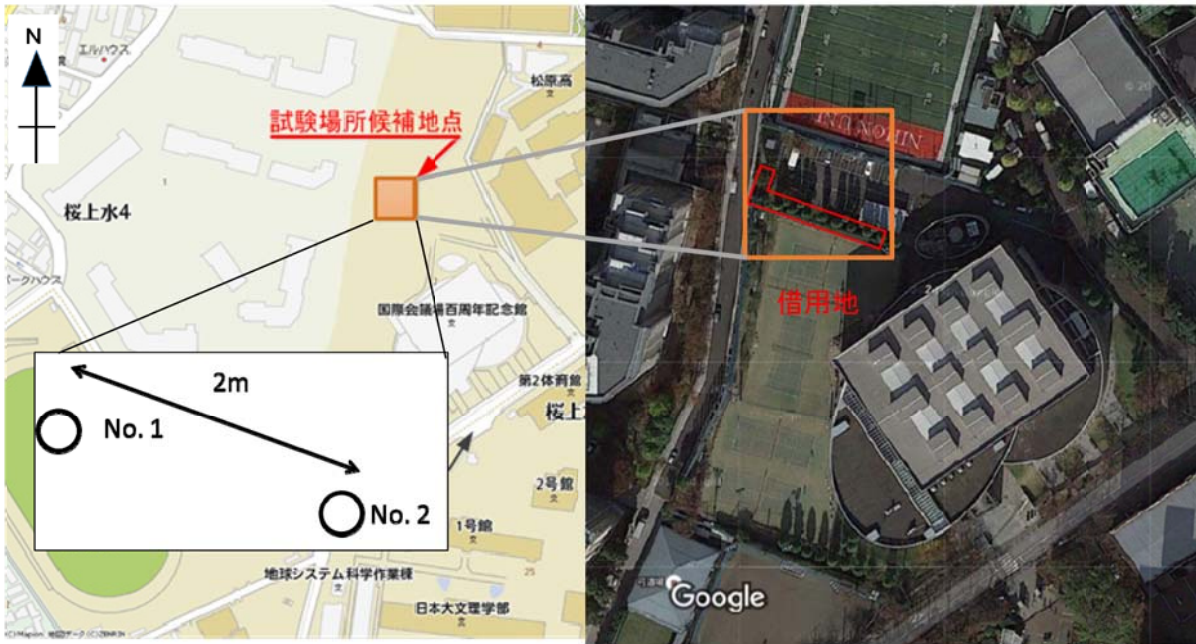
- 各孔での孔内調査





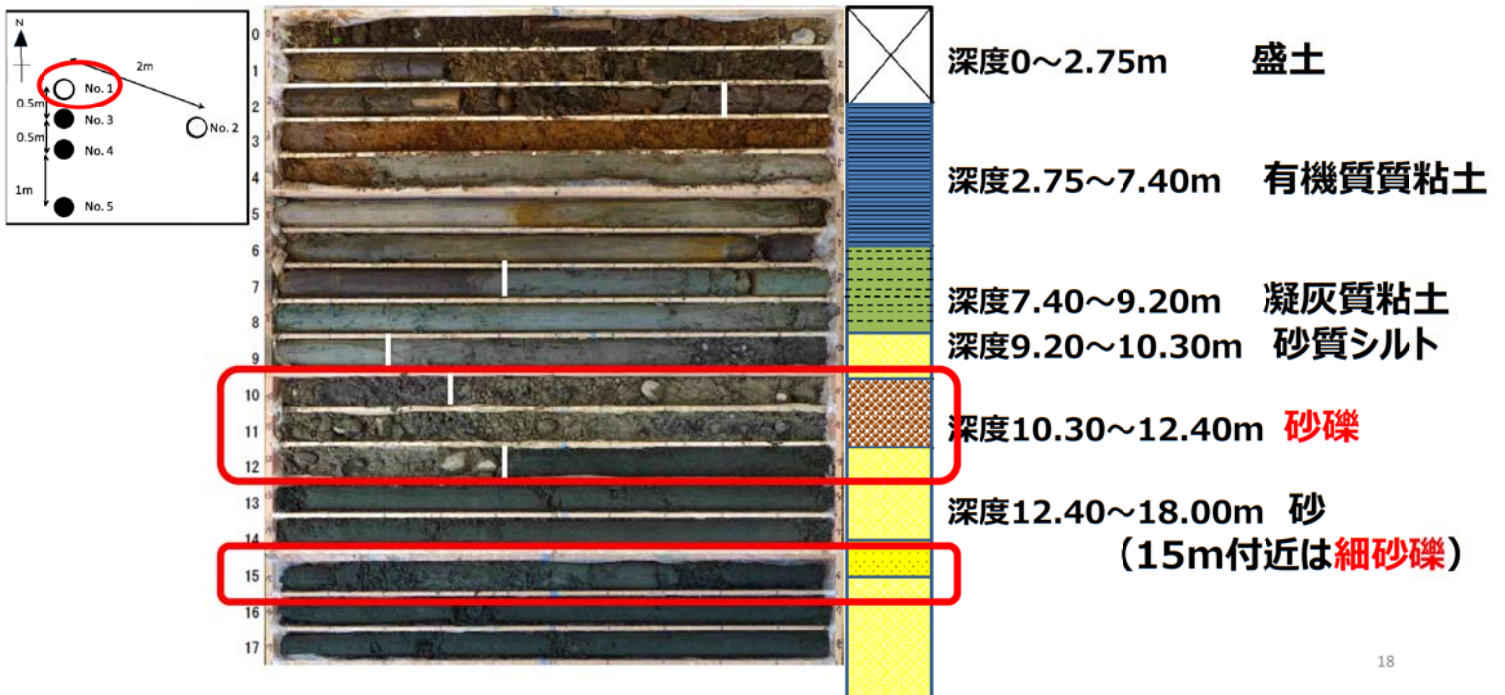
H28年度

# ボーリング孔位置



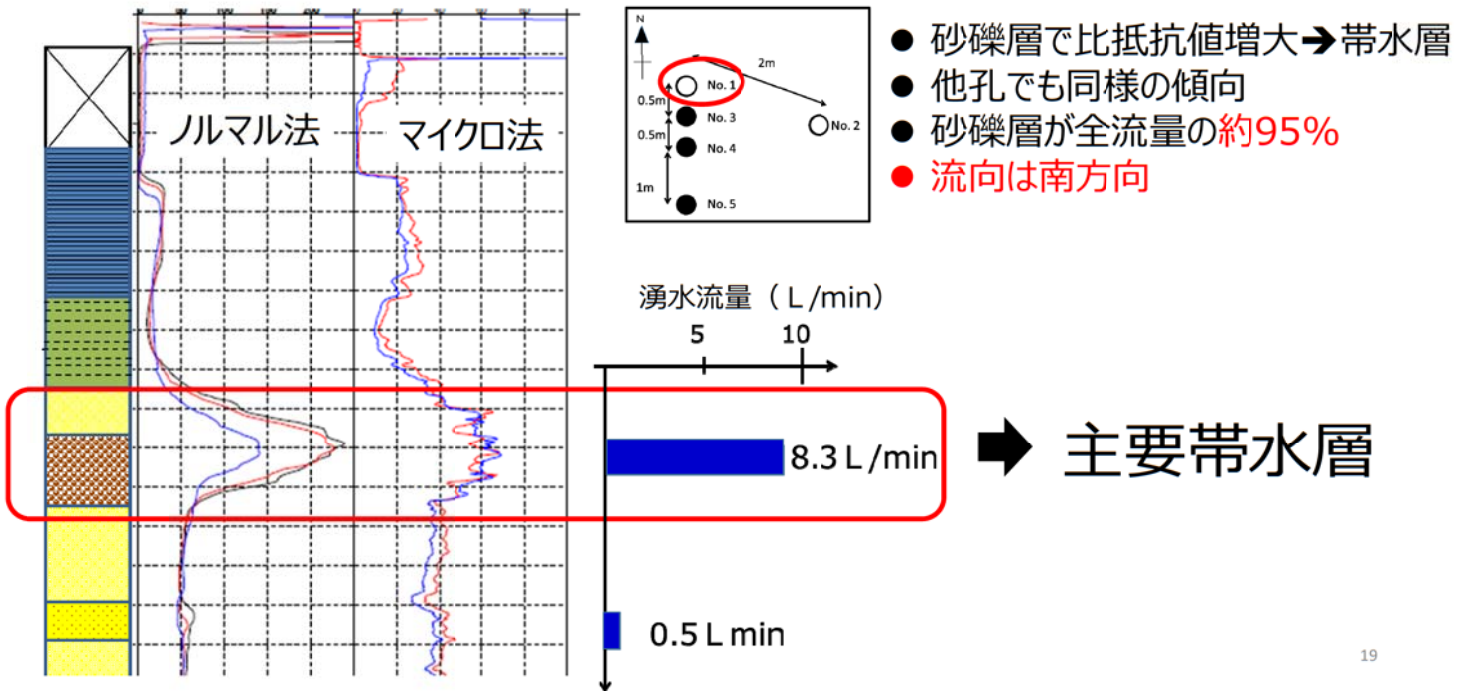
H28年度

# 地質分布 (No. 1 孔)



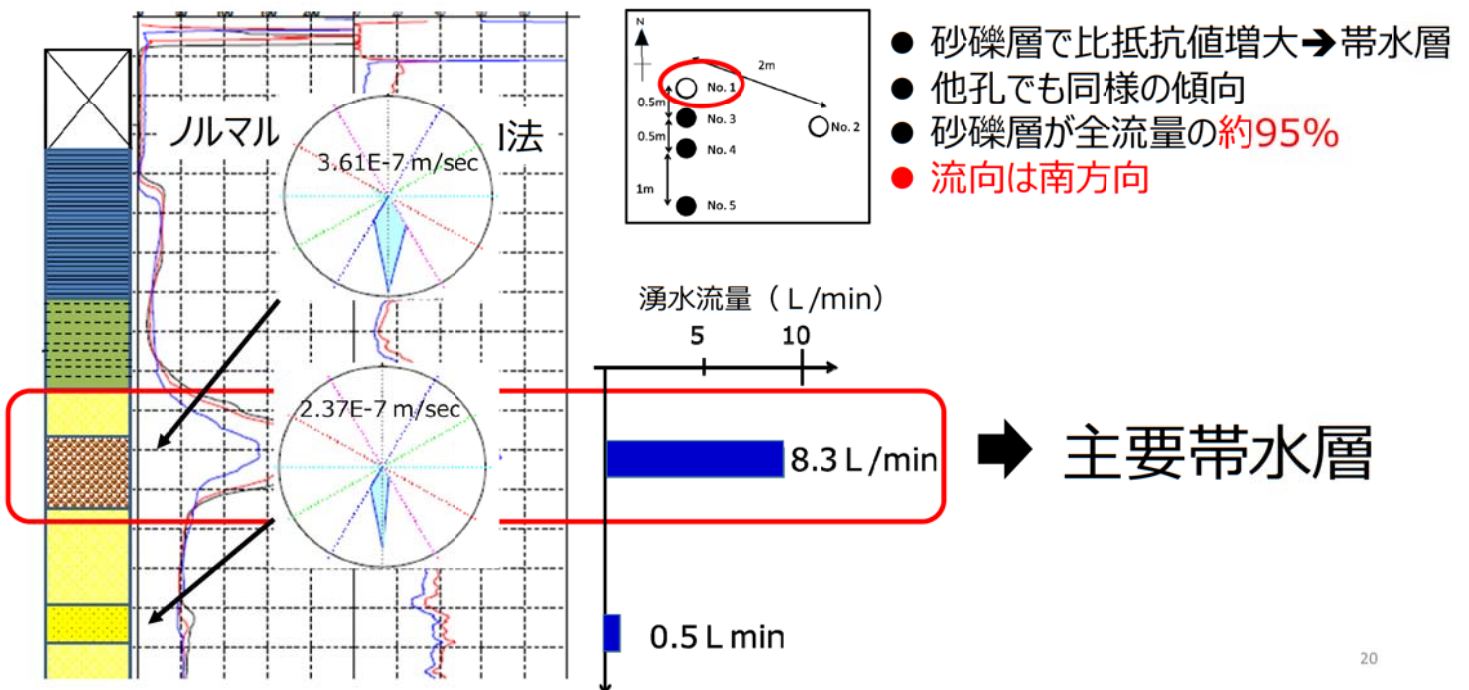
H28年度

# 電気検層・フローメータ検層・流向流速測定 (No.1孔)



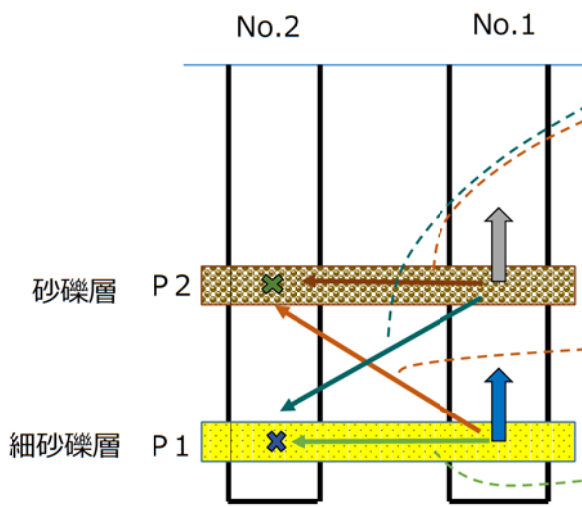
H28年度

# 電気検層・フローメータ検層・流向流速測定 (No.1孔)

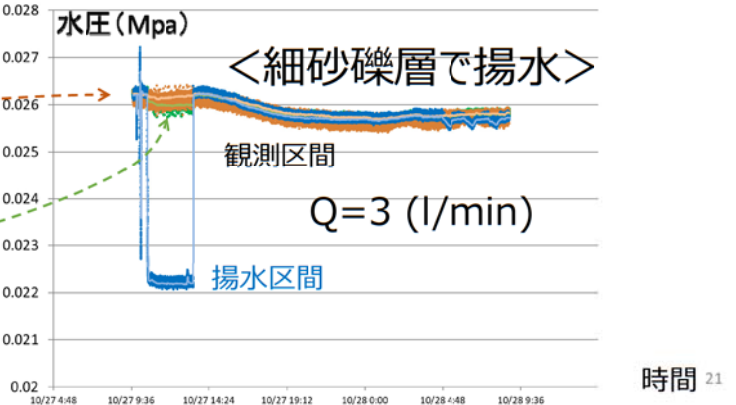
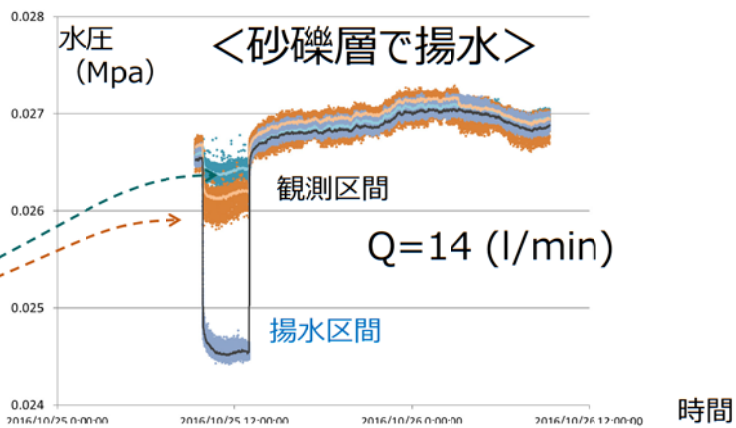


H28年度

# 揚水時の応答



砂礫層と細砂礫層は水理的に連結

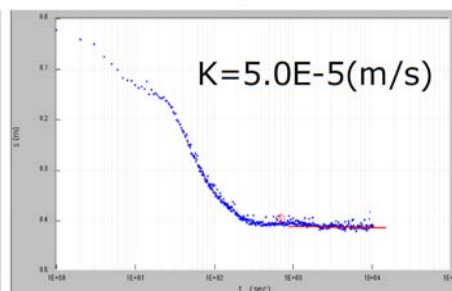
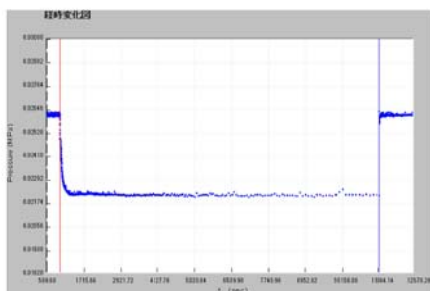
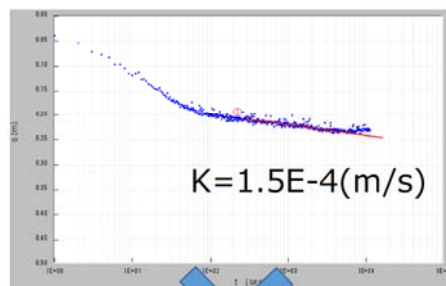
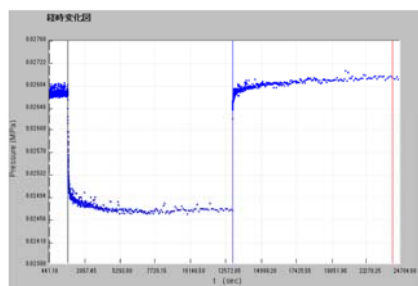
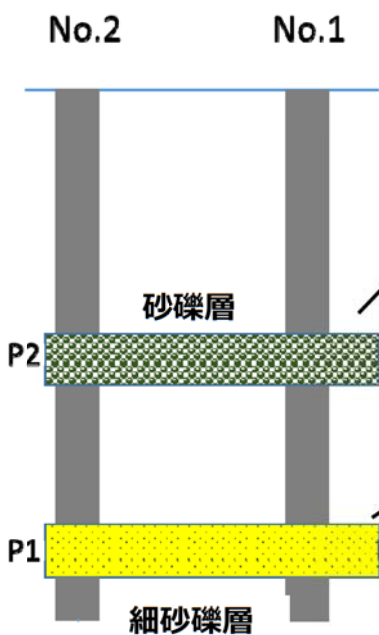


H28年度

# 揚水試験

圧力変化図

Cooper-Jacobによる  
透水係数評価結果



# 第2段階目の調査 —H28年度の結果に基づくH29年度計画—

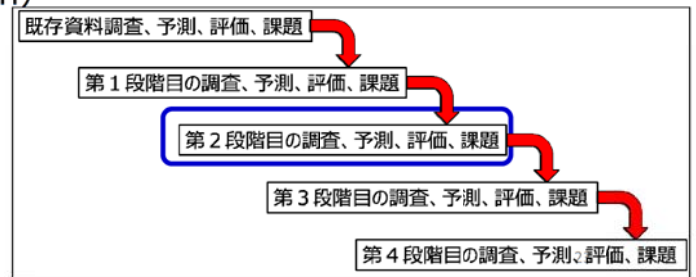
## ●H28年度の主な結果

- 帯水層の特定：砂礫層
- 地下水の流向：南方
- ダルシー流速は $1E-7$  (m/s)オーダー

## 試験対象層の決定

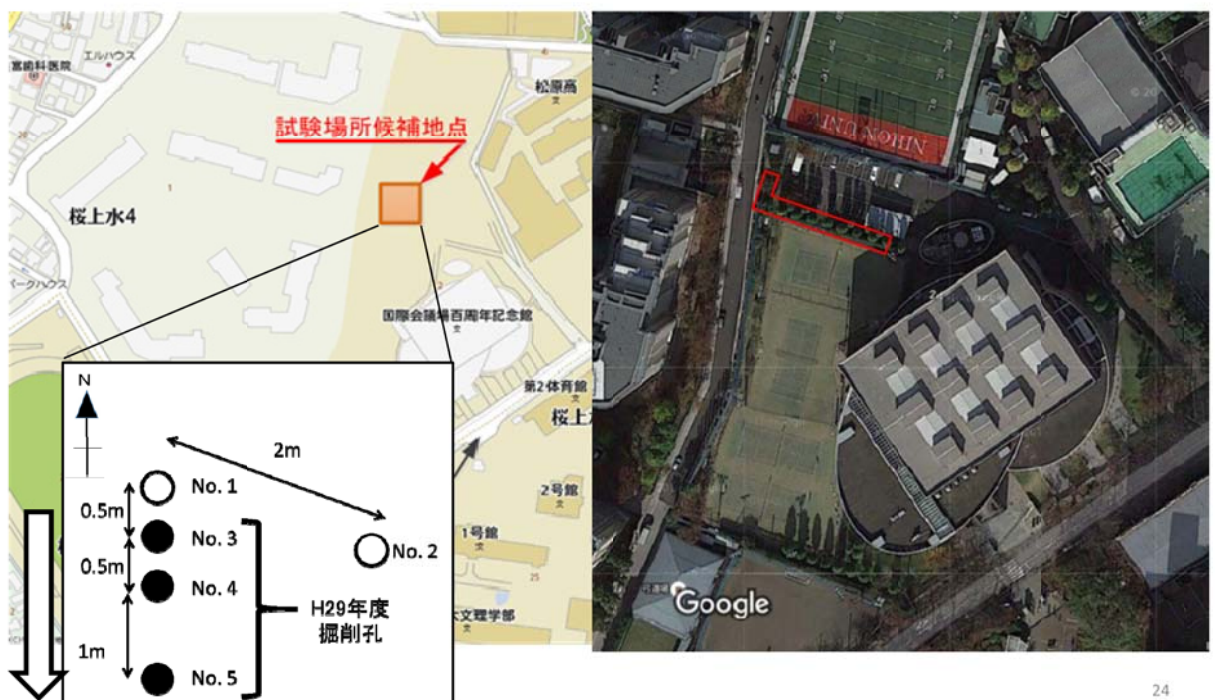
## ●H29年度の調査計画の概要

- 南北方向（流れの方向）にボーリング孔を配置
  - ➔（H28のNo.1孔から南方へ3孔・ノンコア掘削）
- ボーリング掘削深度は砂礫層まで（深度約13.5m）
- 電気検層（砂礫層の分布確認）
- 流向・流速測定
- 揚水試験
- 予備的トレーサ試験



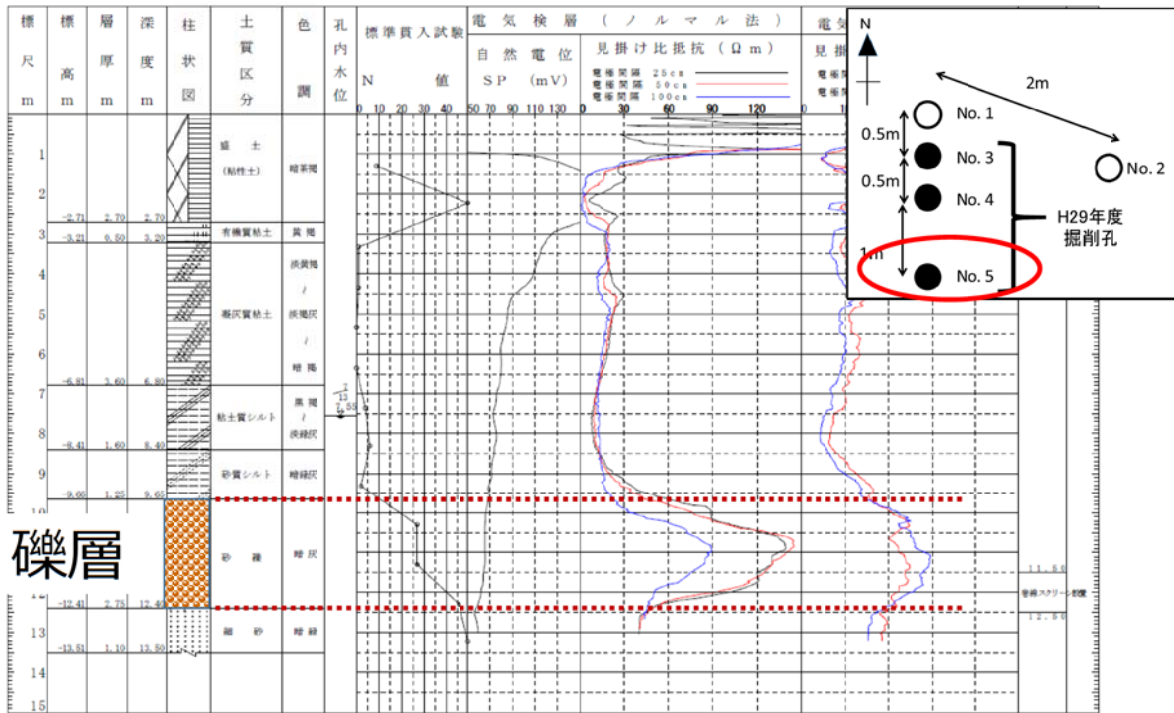
H29年度

## 掘削孔の配置(南方向に3孔)



H29年度

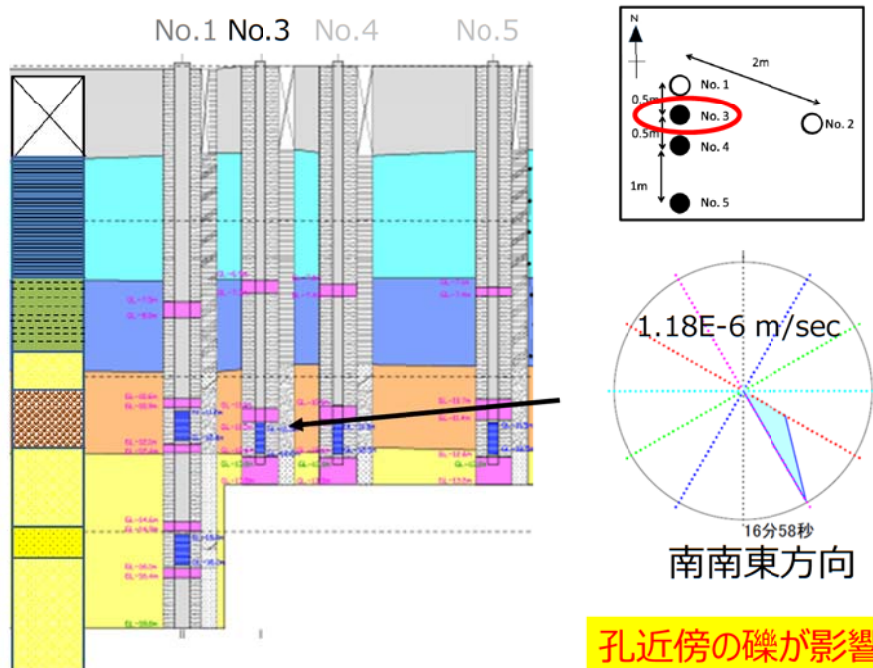
# 電気検層 (No.5)



25

H29年度

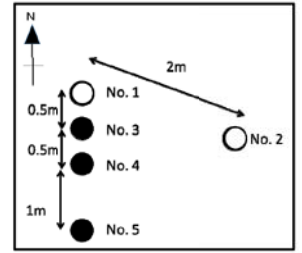
# 流向流速測定 (No.3孔)



26

H29年度

# 揚水試験

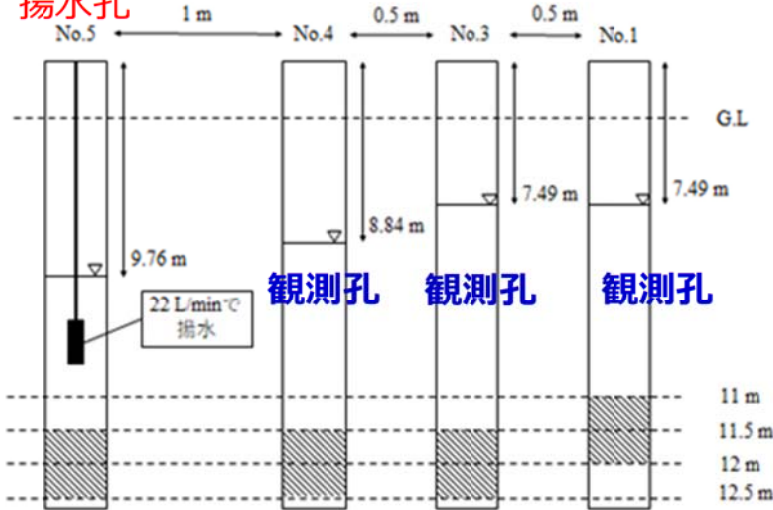


22L/min

テームの式

$$T = \frac{Q}{2\pi(\Delta h)} \ln\left(\frac{R}{r_w}\right)$$

揚水孔



- $T$  : 透水量係数
- $Q$  : 揚水量
- $R$  : 揚水井戸から観測井戸までの距離
- $r_w$  : 揚水井戸半径
- $\Delta h$  : 水頭差

- =2.06 E-4 (m/s) : No.5-No.4孔間
- =2.21 E-4 (m/s) : No.5-No.3孔間
- =2.18 E-4 (m/s) : No.5-No.1孔間

H29年度

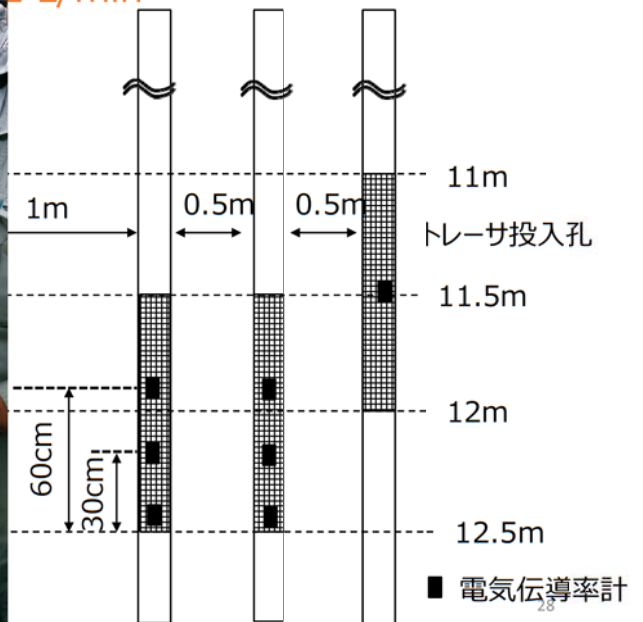
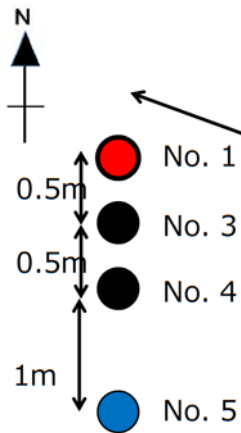
## 予備的トレーサ試験 (孔およびセンサーの配置)

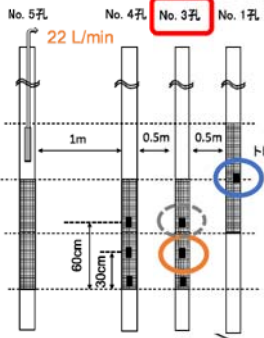
揚水孔

No. 5孔

No. 4孔 No. 3孔 No. 1孔

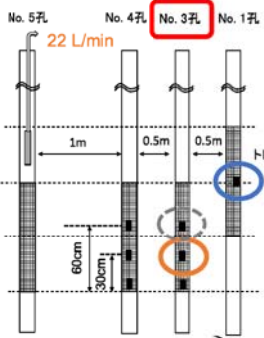
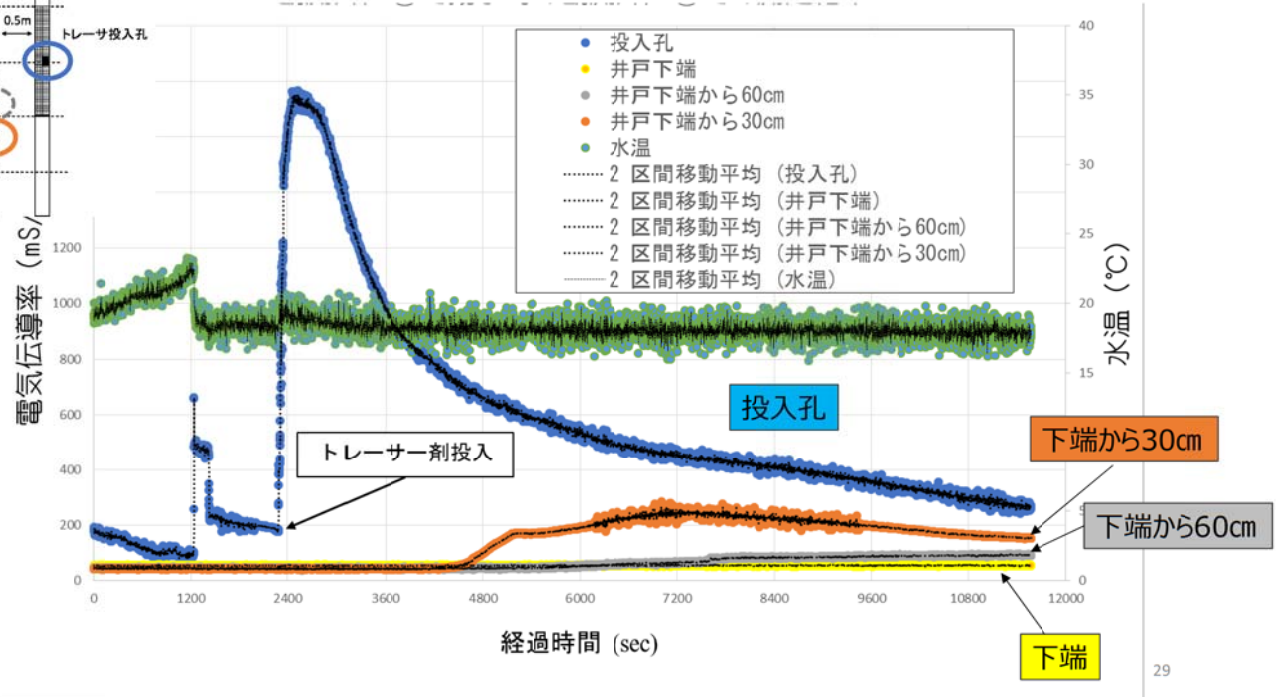
2 L/min





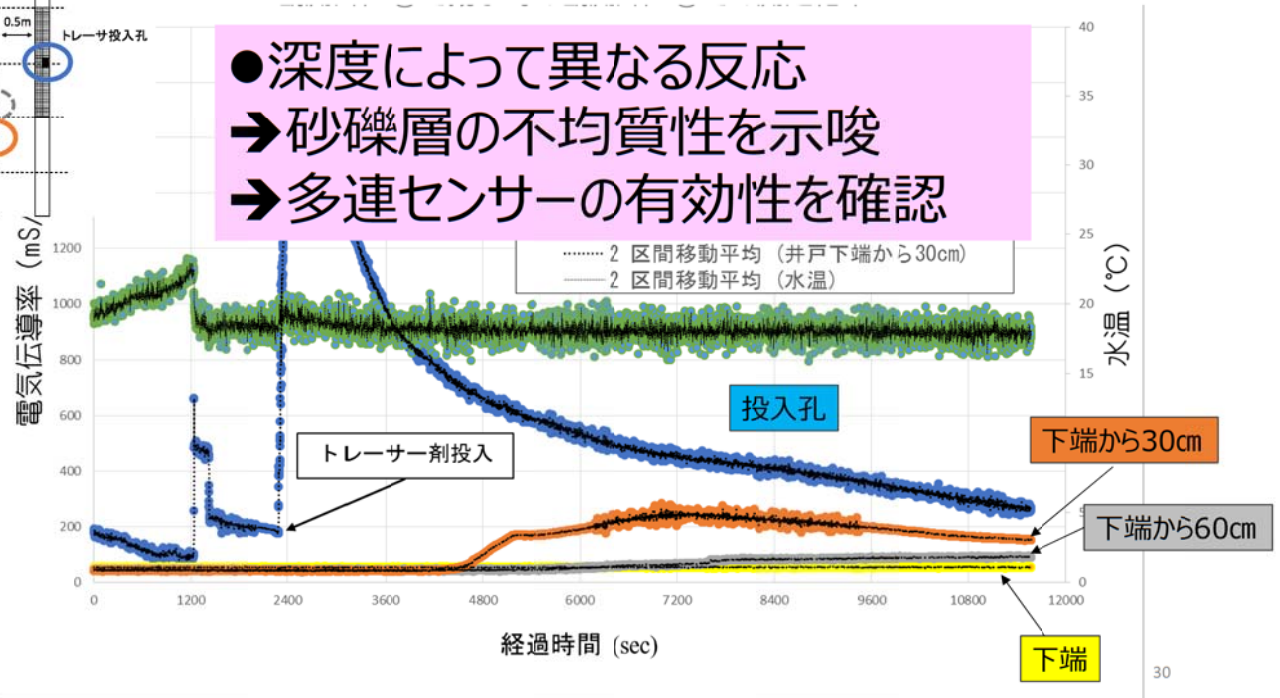
# トレーサ試験結果 (No. 3 孔)

H29年度



# トレーサ試験結果 (No. 3 孔)

H29年度



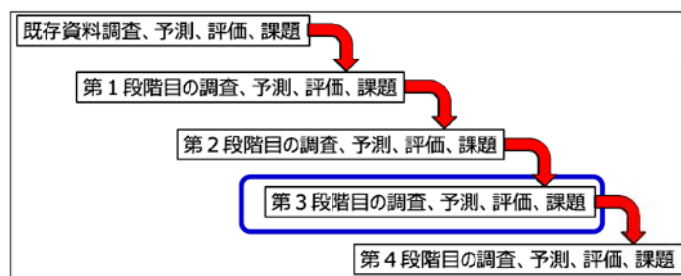
# 第3段階目の調査 —H29年度までの成果とH30年度の実施内容—

## ○H29年度までの成果

- 追加3孔で帯水層(砂礫層)の分布を確認
- No. 3孔での砂礫層の流向は南南東(概ね南方向)
- トレーサ試験により、砂礫層内部の不均質性を確認**

## ○H30年度の実施内容

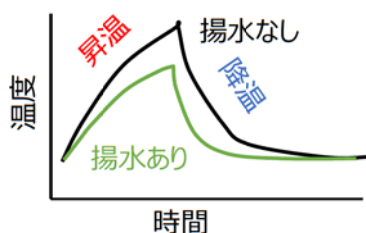
- 礫層内での**温度検層**による  
詳細な水みちの同定



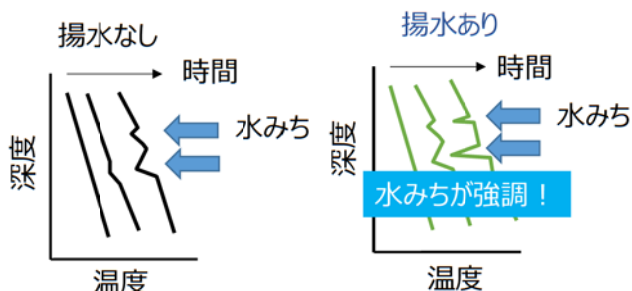
## 温度検層による水みち同定

- 地下水との温度差をつけることで水みち同定が容易に
- ➔ヒーターによる加熱+多連センサーによる計測
- 水みち箇所は**相対的に低温度**
- 揚水の場合は自然状態より低温

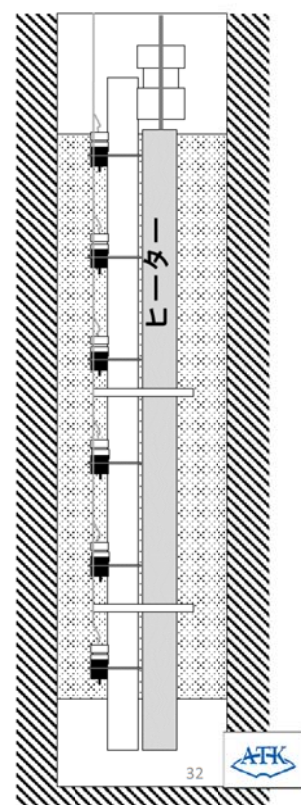
### ●個別センサーの温度変化



### ●孔ごとの温度プロファイル



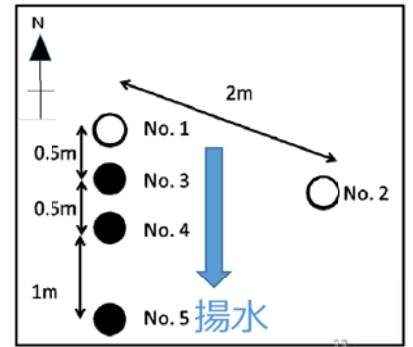
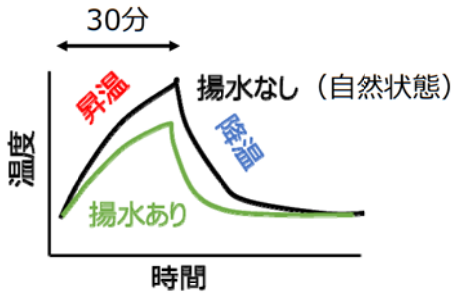
\* 装置は(株)アサノ大成基礎エンジニアリングが開発



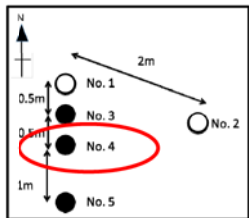


# 温度検層の実施方法・整理方法

1. 自然状態（揚水なし）で30分間加熱→冷却
2. 揚水状態（@No.5孔）で30分間加熱→冷却



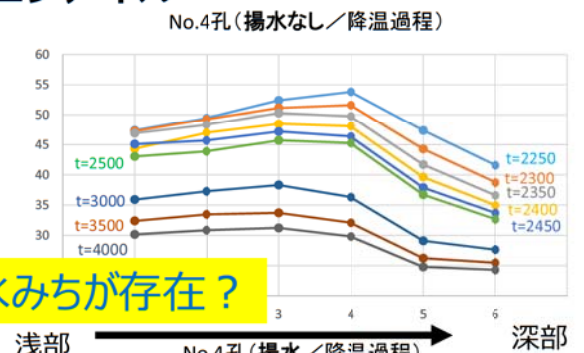
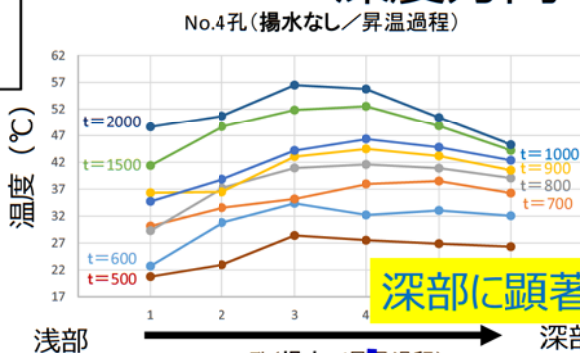
- センサーごとの温度変化
- 深度方向の温度プロファイル
  - 自然状態と揚水状態の比較



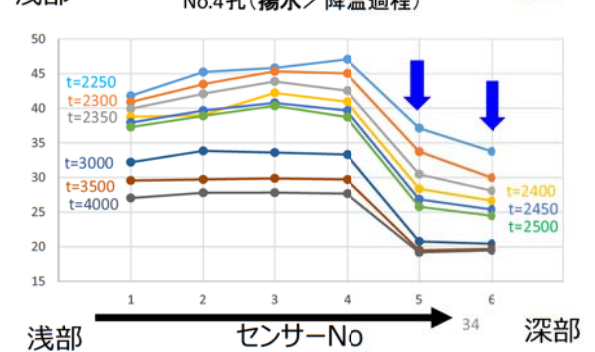
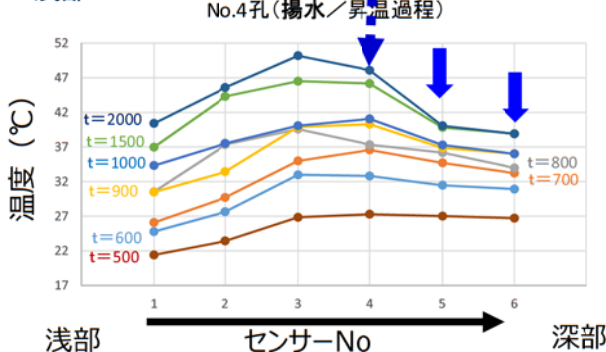
## 温度検層結果の例（No.4） -深度方向のプロファイル-

H30年度

揚水なし  
(自然状態)



揚水あり



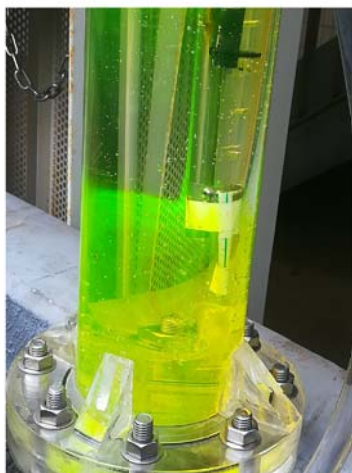
H30年度

## 対流の確認

- 透明アクリル管による対流観察
- 底部にウラニウムを入れ、加熱
- 水はヒーターのごく近傍を高速で上昇
- その後、対流により混合



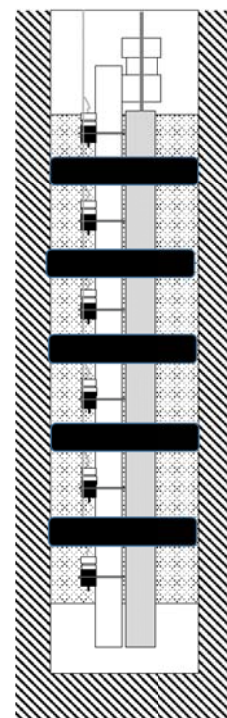
パッカーによる区間閉鎖



H30年度

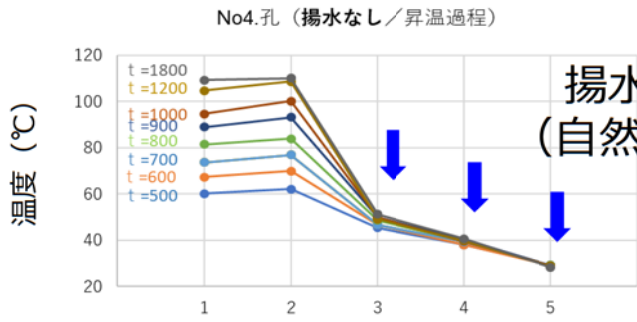
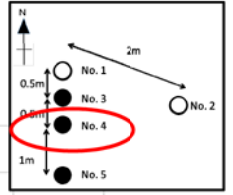
## 温度検層の改良

- センサー間にスポンジパッカーを設置

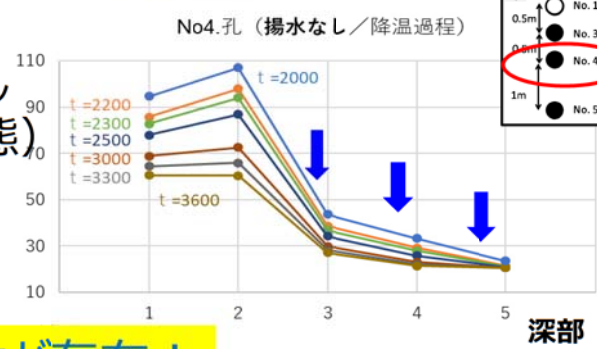


H30年度

# 温度検層結果 (パッカー設置) No.4



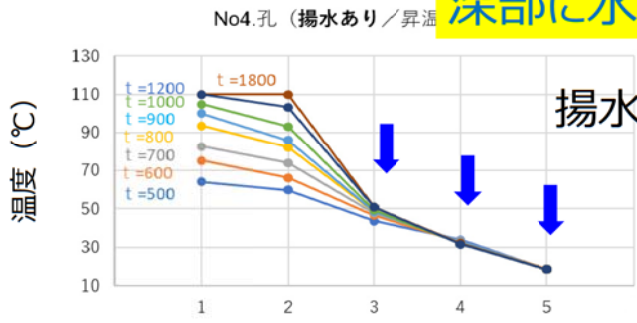
揚水なし  
(自然状態)



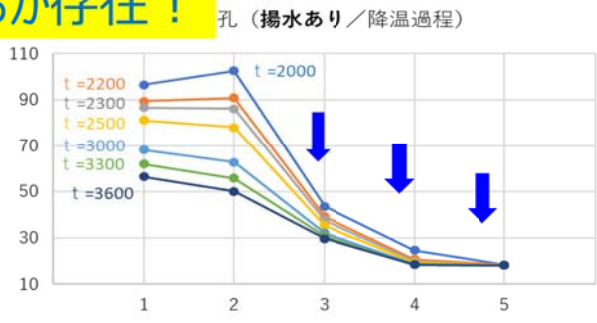
浅部

深部

深部に水みちが存在!



揚水あり



浅部

センサー-No

深部

浅部

センサー-No

深部

37

H30年度

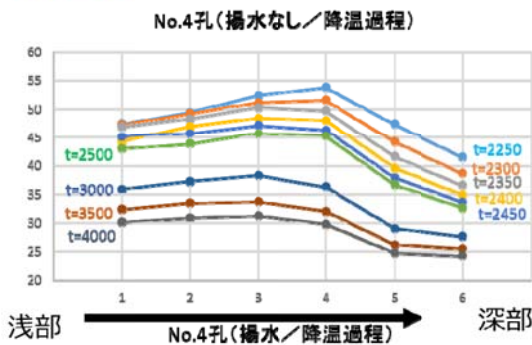
## パッカーの有無の比較

パッカーなし

パッカーあり

揚水なし

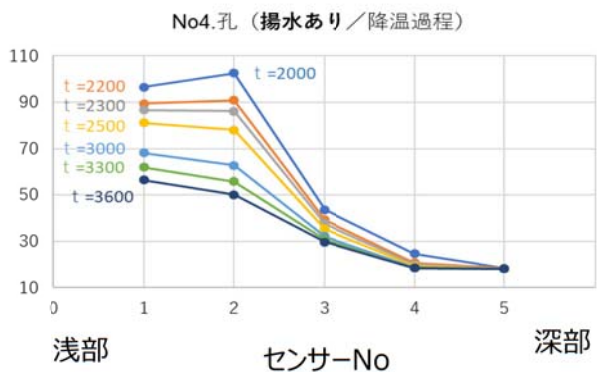
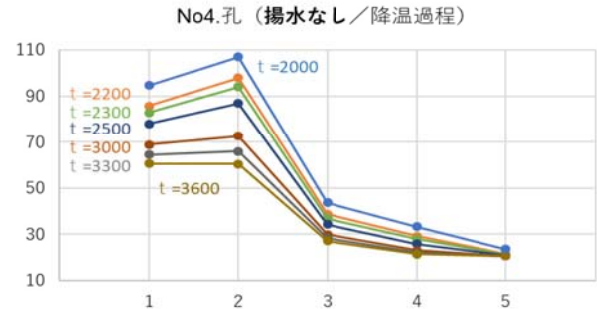
温度 (°C)



浅部

深部

No.4.孔 (揚水 / 降温過程)



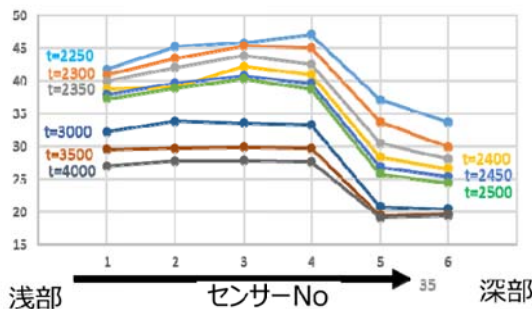
浅部

センサー-No

深部

揚水あり

温度 (°C)



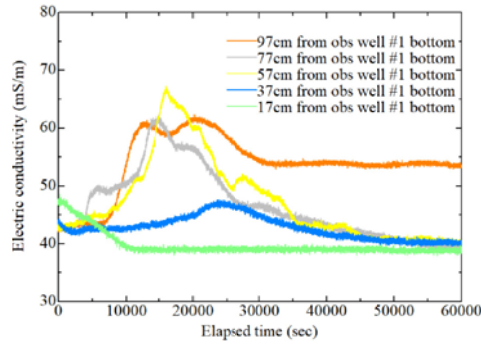
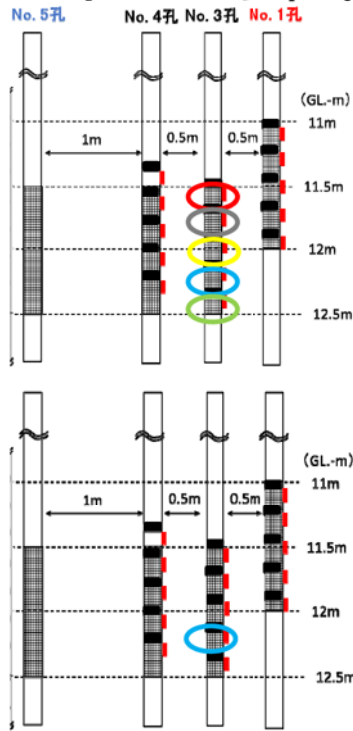
浅部

深部

センサー-No

H30年度

# トレーサ試験結果の一例 (No. 3孔)



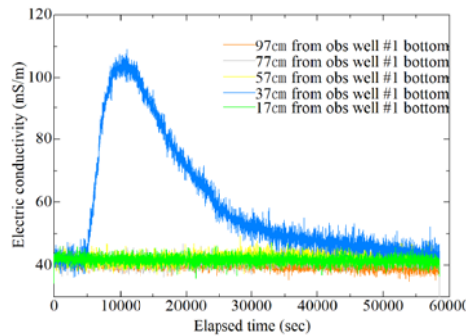
パッカーの有無の比較

パッカー無し

57cm

77cm

97cm



パッカー有り

37cm

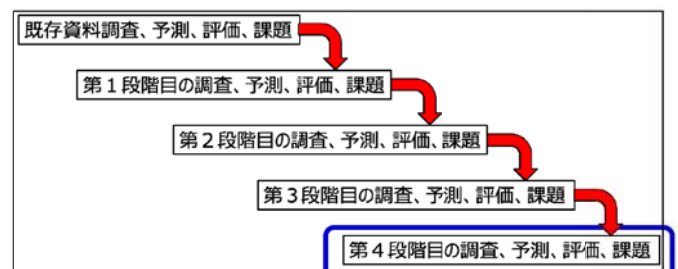
## 第4段階目の調査 —H30年度の成果とR1年度の実施内容—

### ○H30年度の成果

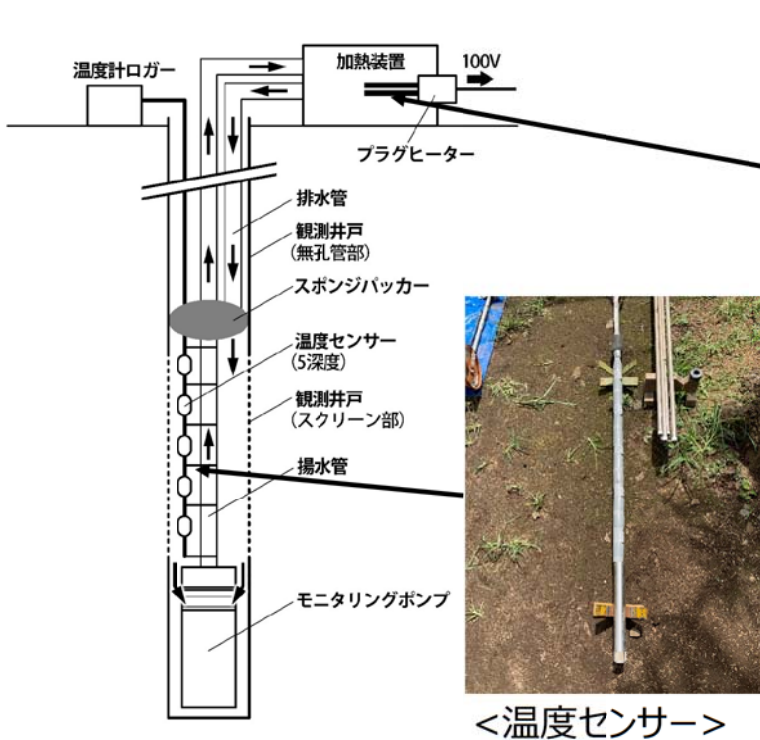
- 加温式温度検層により、詳細な水みちを確認
- パッカーにより、明瞭な水みち確認が可能
- **パッカー固定のため、測定区間に制約**

### ○R1年度の実施内容

- 循環式温度検層による  
連続的な水みちの把握



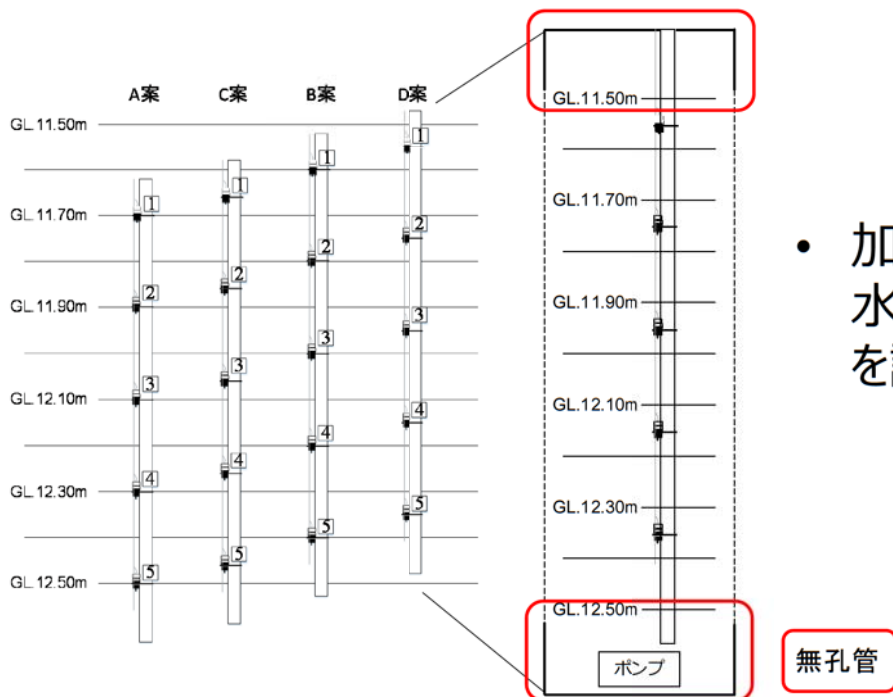
# 循環式温度検層（概要）



<加熱タンク>

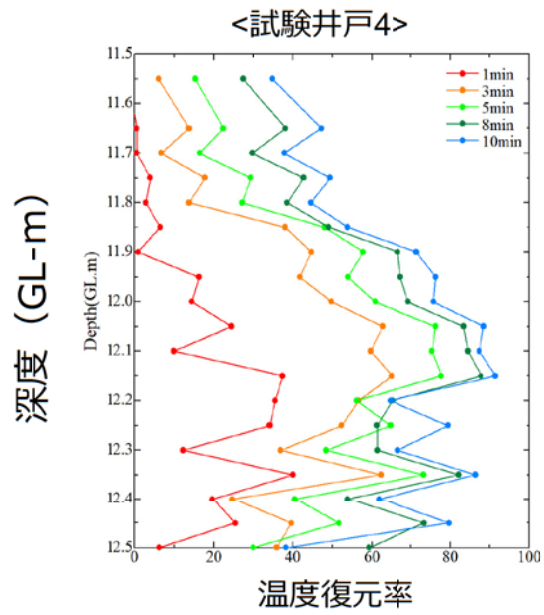
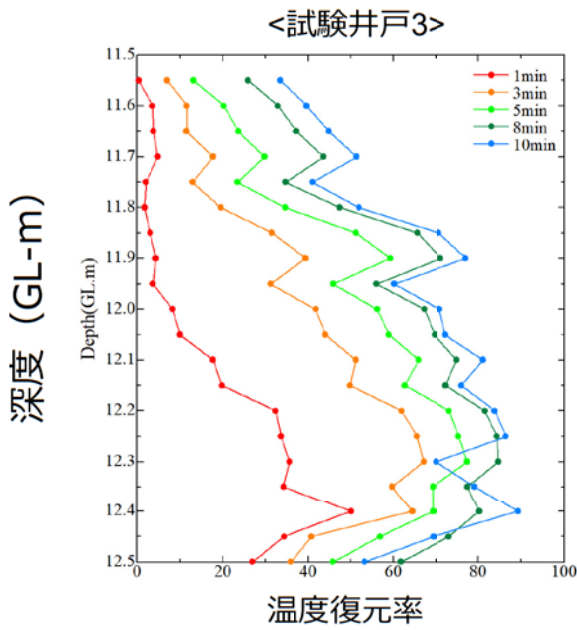
- 加熱タンク内での温水作成
- ポンプによる循環
- 温度計を5か所に20cm間隔で設置
- 区間をずらし詳細な水みちを把握

# 循環式温度検層（測定方法）



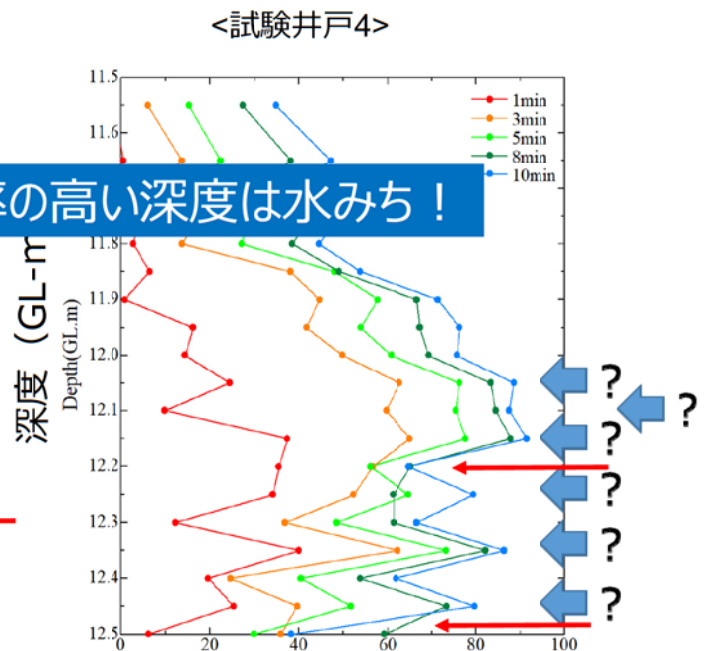
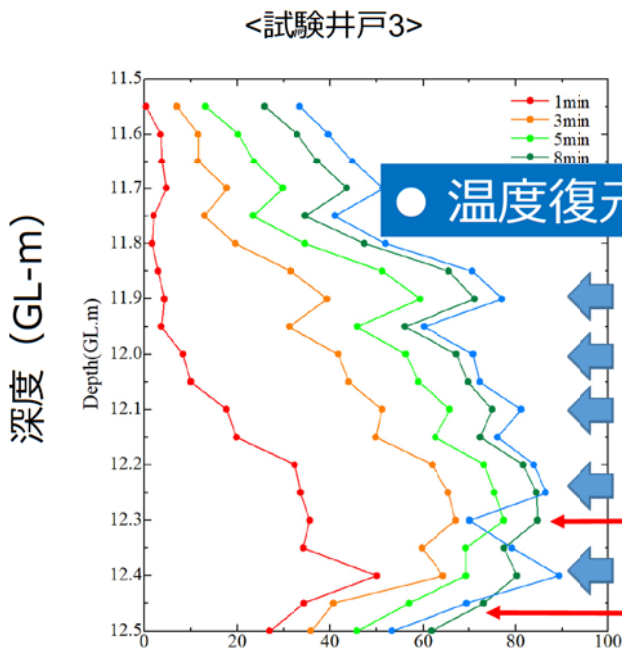
- 加熱後、揚水孔で揚水しながら温度変化を計測（5cmごと）

# 試験結果の例



- 水みち：温度復元率が高い深度
- 復元率の逆転→対流？

# 試験結果の例



- 温度復元率の逆転現象は対流の影響？

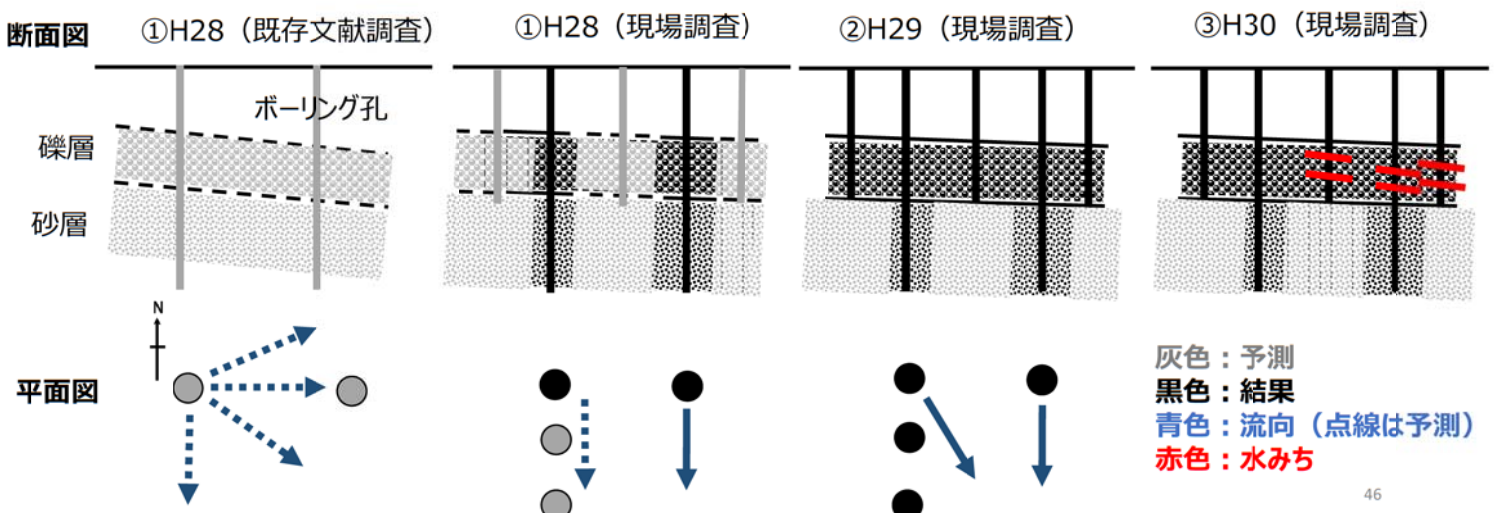
# これまでの実施結果に対する評価

- 対象層の設定（砂礫層で良かったのか？）：段階的なアプローチにより砂礫層の不均質性を理解
- トレーサ：地下水密度とほぼ同等に調整可能であることを確認
- 温度検層：加熱により効果的に水みちを検出可能
- パッカーの設置：効果絶大！
- 循環式温度検層：詳細な水みち検出が可能！ 対流の影響も？
- 揚水方法：可能揚水量の増加→場の変化（細粒成分をくみ上げ？）
- トレーサ試験：適切な場の理解により取得された物質移行パラメータにより、信頼性のある将来予測が可能

45

## 段階的アプローチの成果のイメージ

- 年度ごとに、計画、調査、予測評価、課題抽出を繰り返す → 理解度が向上



46

## まとめ

- 段階的アプローチにより効率的に理解度が向上
- 地下環境を合理的に理解するための調査手法を例示
  - 既存資料に基づく水理地質構造の予測 → ボーリング掘削
  - 孔内調査（電気検層、水理試験、水みち検層（温度検層、フローメータ検層、流速・流量計測など） → 詳細な水理地質構造の理解 → **トレーサ試験へ**
- パッカーによる遮水が重要（温度検層、トレーサ試験）
- 人材育成の機会を提供（手、足、頭を動かす訓練の場）
  - 調査、解析、結果の解釈、次段階の計画策定

47

## 課題

- 礫層の不均質性の理解（どこまで詳細把握が必要か？）
- 1 Fサイトへの適用方法の検討
  - 対象層の特性（厚い帯水層中に薄い難透水層 → 地下水環境の不均質性の理解）
  - 被ばく線量管理下での効率的な調査手法 etc.
- 効果的・継続的な人材育成の方法

48





# 成果の公開

## 地盤工学会誌 (2019.10)

