

2022年度成果報告会

プログラムNo.7

再生可能エネルギー熱利用にかかるコスト低減技術開発/低コスト化のための共通基盤技術開発/見かけ熱伝導率の推定手法と簡易熱応答試験法および統合型設計ツールの開発・規格化

発表者:長野克則

提案法人名:(国)北海道大学、(国)秋田大学、(国研)産業技術総合研究所

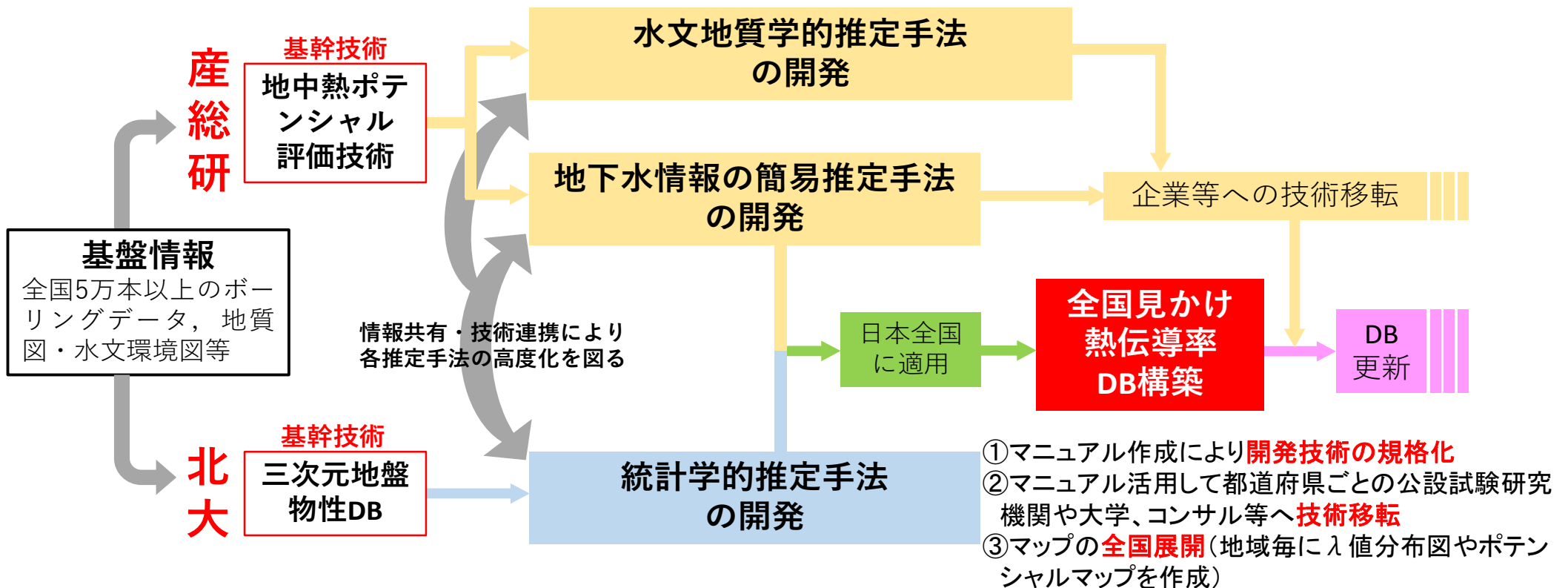
再委託先:(一社)全国さく井協会、(国)京都大学

共同実施:(学法)工学院大学、(学法)静岡理工科大学、(国)広島大学、
(公)日本地下水学会、(学法)金沢大学、(学法)東京海洋大学

問い合わせ先
国立大学法人北海道大学
E-mail: nagano@eng.hokudai.ac.jp
TEL: 011-706-6285

① 見かけ熱伝導率の推定手法の開発・規格化

わが国に賦存する地下水流れ効果を設計に反映させることで、
地中熱システムの適正化を図るべく、見かけ熱伝導率の推定技術を開発・規格化する

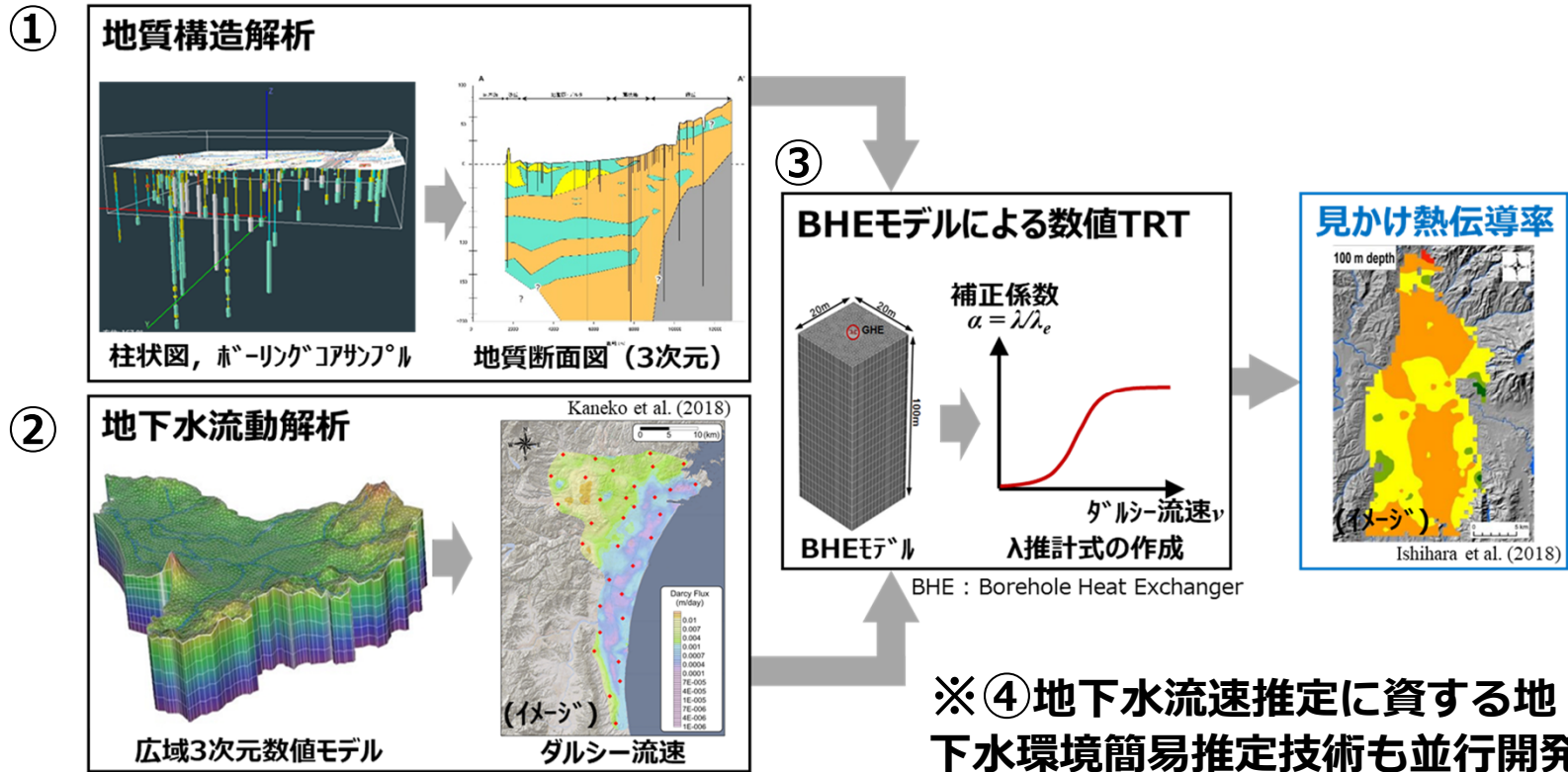


①見かけ熱伝導率の推定手法の開発・規格化(北大・金沢大・産総研)

産総研の担当

(1) 水文地質学的知見に基づき地質・地下水情報から見かけ熱伝導率 λ を推定

水文地質学的推定手法



研究開発項目

- ①有効熱伝導率の推定 : オールコアボーリング・地質構造解析・熱応答試験 (検証用)
- ②地下水流速の推定 : 地域性を考慮した数値モデリング技術の開発
- ③ λ 推定式の作成 : 数値TRTにより地下水流速を変数として見かけ熱伝導率を推定
- ④地下水環境簡易推定 : AI解析による地下水面等高線等の簡易推定技術開発

(2) オープンループシステムの実証実験に基づく

最適な地中熱利用形態の判定技術開発

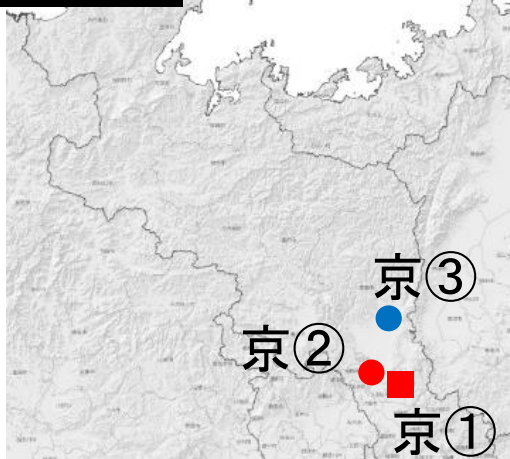
①見かけ熱伝導率の推定手法の開発・規格化(北大・産総研)

見かけ熱伝導率の推定技術:地質構造解析、数値解析モデル構築(産総研)

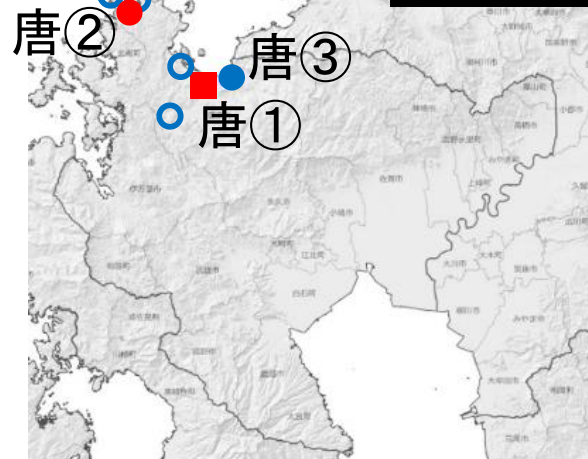
オールコアボーリング・熱応答試験の実施状況 ※本年度中に全て終了

地域	調査地点		オールコア	TRT	備考
京都盆地	京①	京大宇治キャンパス	済	済	熱媒循環方式
	京②	京大宇治川オープンラボラトリ	-	済	熱媒循環方式
	京③	京大上加茂試験地	-	済	ケーブル方式
唐津地域	唐①	佐賀県立唐津東中学・高校	済	済	熱媒循環方式
	唐②	唐津市上場商工会本所敷地内	-	済	熱媒循環方式
	唐③	佐賀県立虹の松原学園	-	済	ケーブル方式
	※独自予算により唐津市内4地点で追加実施		-	済	ケーブル方式
沖縄本島	沖①	名護市21世紀の森公園	済	済	熱媒循環方式
	沖②	名護市羽地地区センター	-	済	熱媒循環方式
	沖③～⑥	那覇市、糸満市、沖縄市、西原町	-	済	ケーブル方式

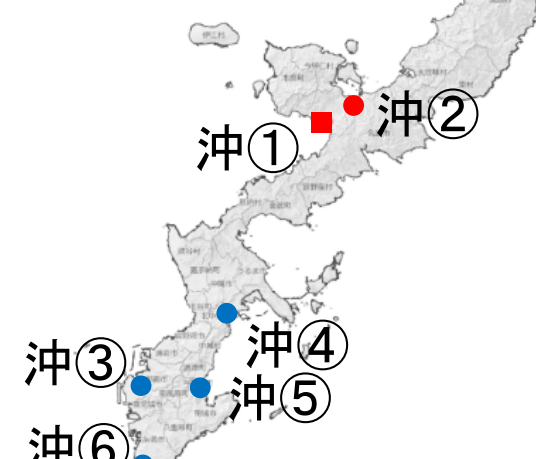
京都府



佐賀県



沖縄県



■: TRT(熱媒循環) & オールコア ●: TRT(熱媒循環) ●: TRT(ケーブル) ○: TRT(ケーブル:独自予算)

①見かけ熱伝導率の推定手法の開発・規格化(北大・産総研)

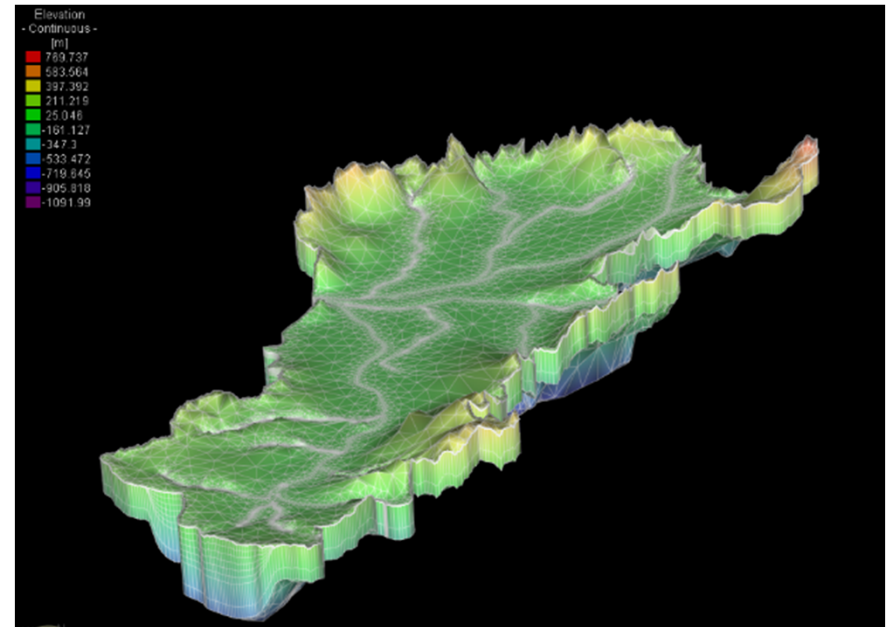
見かけ熱伝導率の推定技術:地質構造解析、数値解析モデル構築(産総研)

数値解析の進捗状況

- 京都盆地、名護平野モデルの数値解析を実施中
- 唐津地域の数値モデルを構築中

①京都盆地モデル

- 担当: 京都大学
- 地質構造解析の成果を踏まえFEFLOWで京都盆地の水理地質モデル作成(右図)
- 地下水流動解析と熱構造解析を実施中



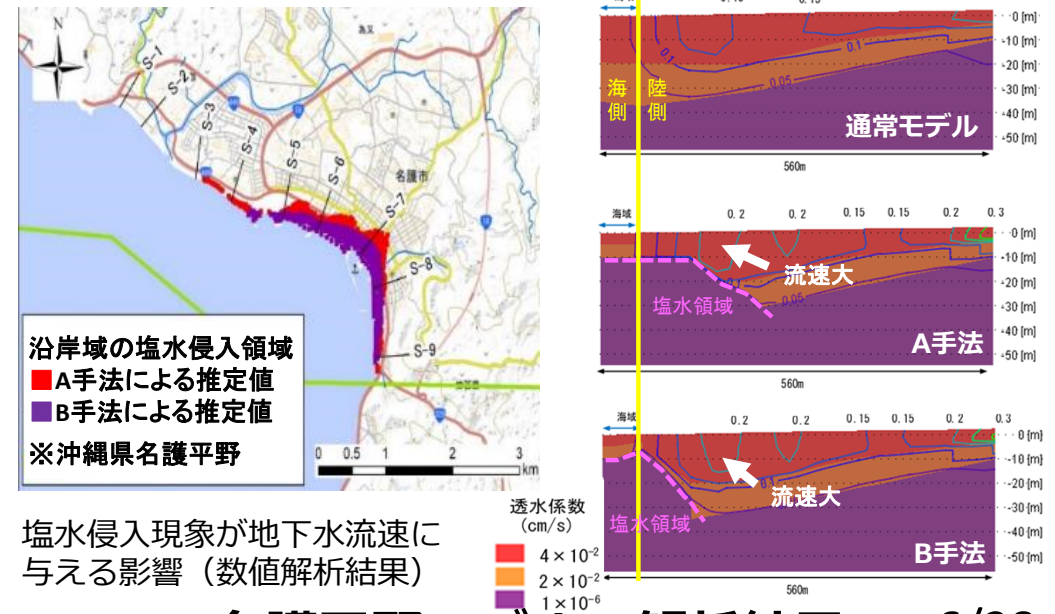
構築した京都盆地モデル

②名護平野モデル

- 担当: 産総研
- 島嶼特有の地下水賦存形態となる淡水レンズを想定した水理地質モデル作成
- 塩水侵入現象を考慮した数値モデルにおいて、沿岸陸域部の地下水流速は増大傾向を示す

③唐津地域モデル

- 担当: 産総研
- 水理地質モデルを作成中(本年度中に完成予定)



塩水侵入現象が地下水流速に与える影響(数値解析結果)

名護平野モデルの解析結果

①見かけ熱伝導率の推定手法の開発・規格化(北大・産総研)

見かけ熱伝導率の推定技術:地質構造解析、数値解析モデル構築(産総研)

地下水環境簡易推定技術開発の概要

背景・目的

- ・地下水流速の評価はコスト高
- ・地下水流速を決定するために重要な情報となる地下水面等高線の簡易推定が有用

開発内容

入手が容易な**国土基盤情報**&**AI技術**による**簡易推定技術**を開発

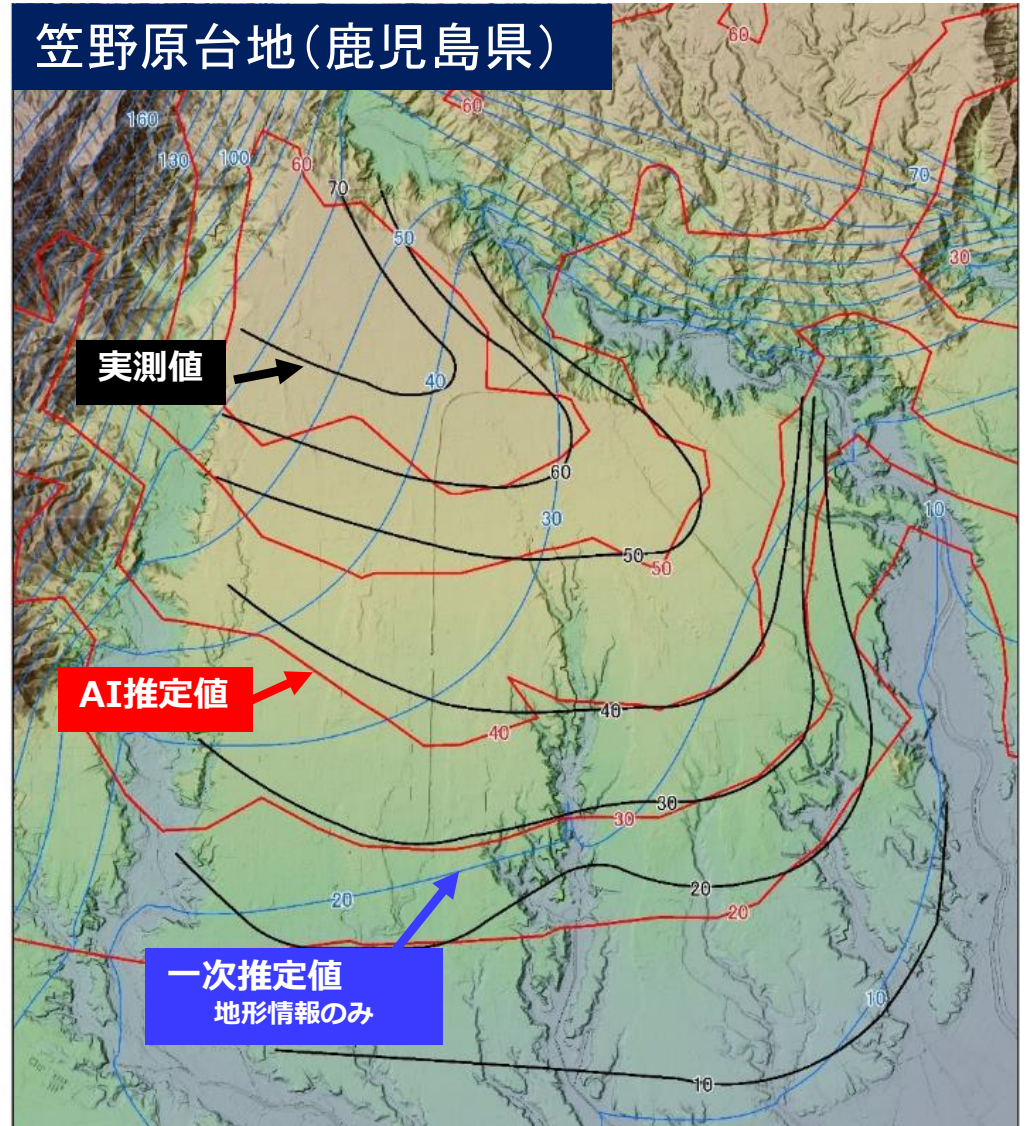
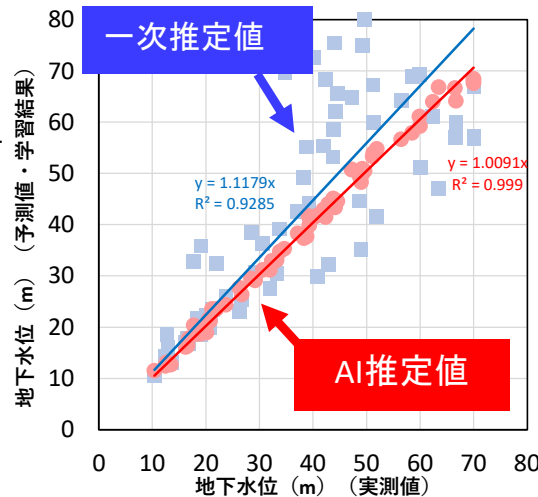
進捗状況

予察的検討の実施

- ・地形地質の特徴が明瞭&地下水情報量が多い8地域(12データ)を選定
- ・検討対象地域ごとにニューラルネットワークワークによるAI推定モデルを作成

成果

AI解析により**実測値**の**再現性向上**を確認
※現在モデル改良中



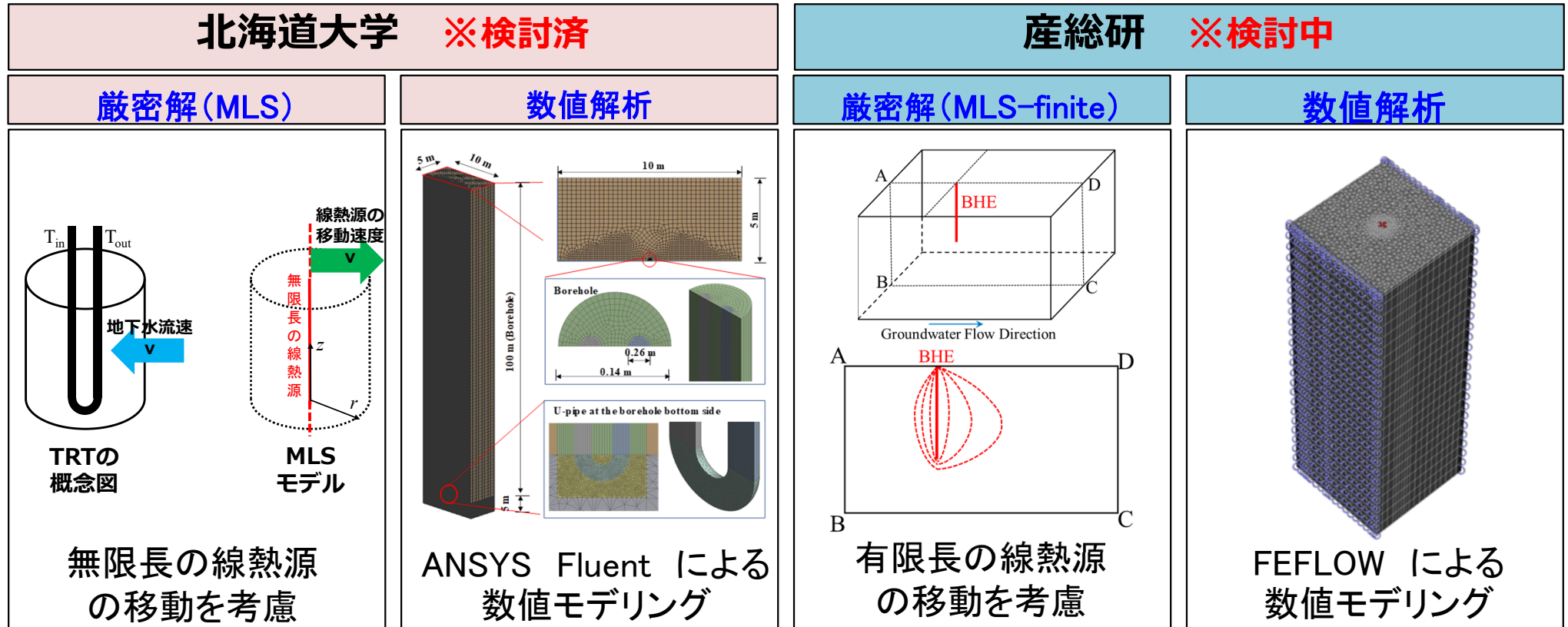
AI解析による地下水等高線の再現状況

①見かけ熱伝導率の推定手法の開発・規格化(北大・産総研)

見かけ熱伝導率の推定技術:地質構造解析、数値解析モデル構築(産総研)

数値TRTに基づく見かけ熱伝導率推定式の作成

- 4つの手法による数値TRTの結果から、最適な応答曲面を決定



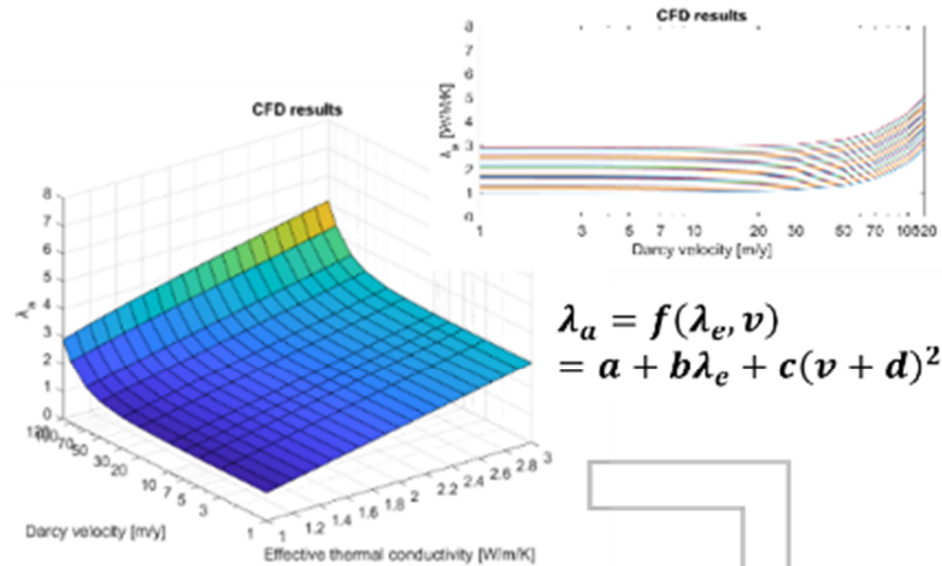
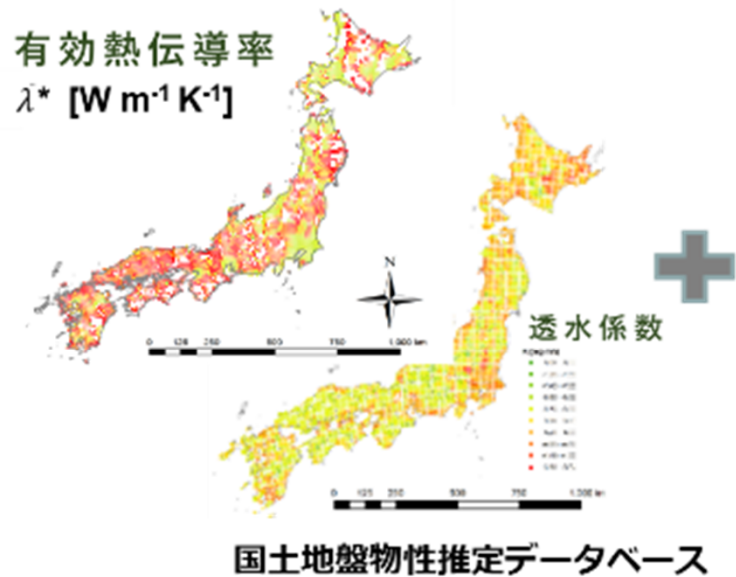
最適な応答曲面の決定

見かけ熱伝導率推定式の作成

① 見かけ熱伝導率の推定手法の開発・規格化(北大・産総研)

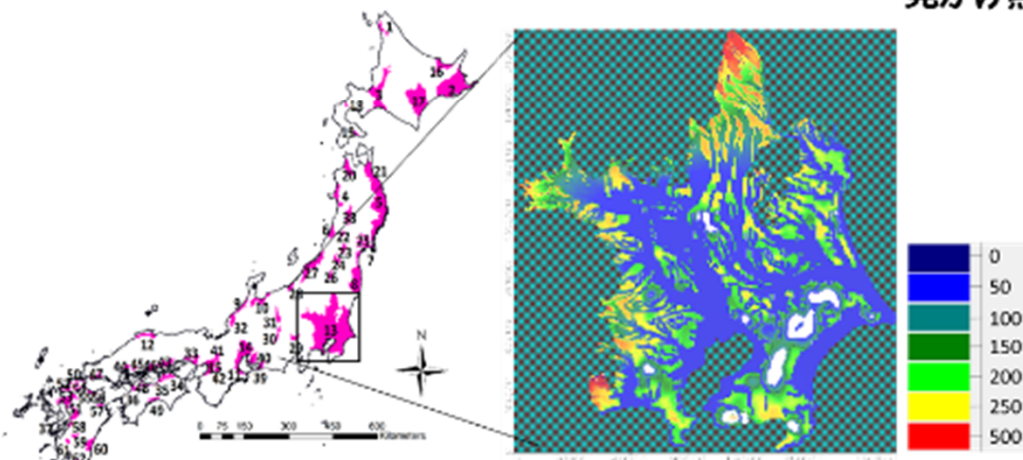
・北大と共同研究先の金沢大

既往NEDO研究委託(2013~2018)で開発した地盤物性DBに、地下水シミュレーションを組み合わせ、数値TRTによる応答局面による変換により見かけ熱伝導率を推定する



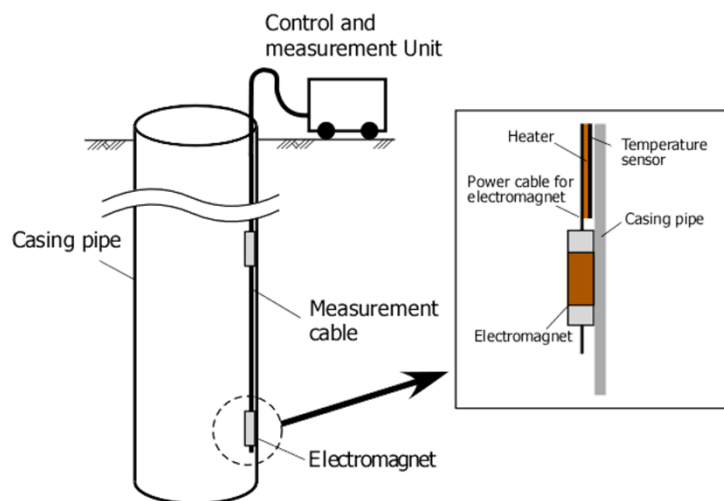
有効熱伝導率・ダルシー流速と見かけ熱伝導率の関係

見かけ熱伝導率データベース



② 簡易熱応答試験法(TRT)の開発・規格化 (北大・秋田大)

- ・大口径の水井戸の簡易TRT(秋田大)
- ・大深度のBHEに適用可能なTRT装置および周期加熱法による簡易TRT(北大)
の開発と規格化 →TRTにかかるコストや時間の削減を目指す



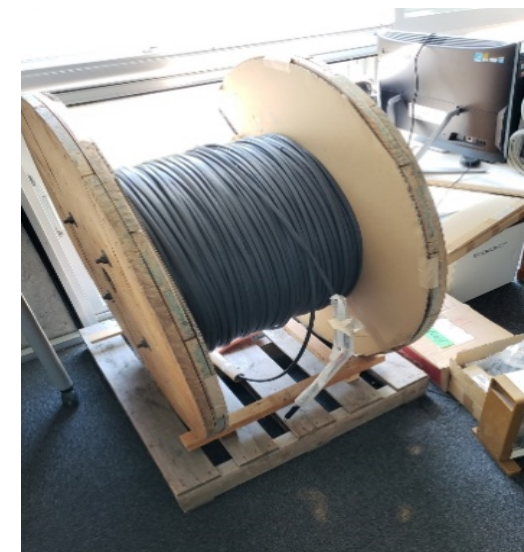
大口径水井戸に適用可能な
TRT装置の設置イメージ

秋田大学



大深度BHE対応
周期加熱法のためのTRT試験機

北海道大学



発熱ヒーター一体光ファイバー
ケーブル

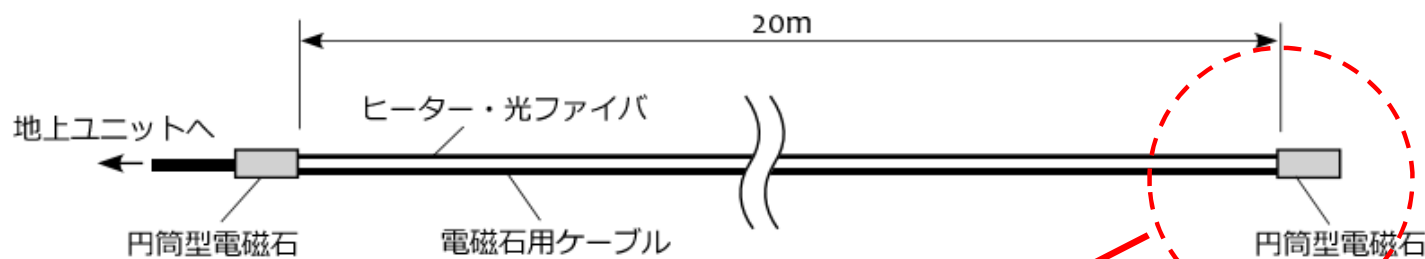
北海道大学

② 簡易熱応答試験法(TRT)の開発・規格化 (北大・秋田大)

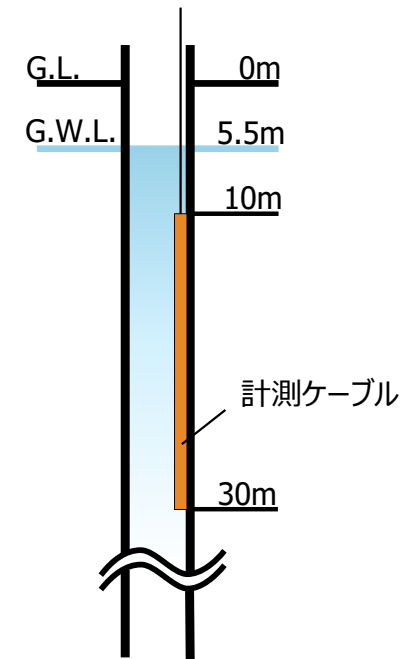
井戸の管壁に密着する電磁石付ヒーターユニットを用いたTRT (秋田大学)

背景: 従来のTRTは熱交換井として仕上げられた井戸でしか実施できない。

開発目的: 本装置は鋼管が設置された水井戸であればTRTの実施が可能であるため、TRTコストの削減および土壌熱伝導率データの拡充が期待できる。



改良した計測ケーブル (上) と円筒型電磁石 (下)

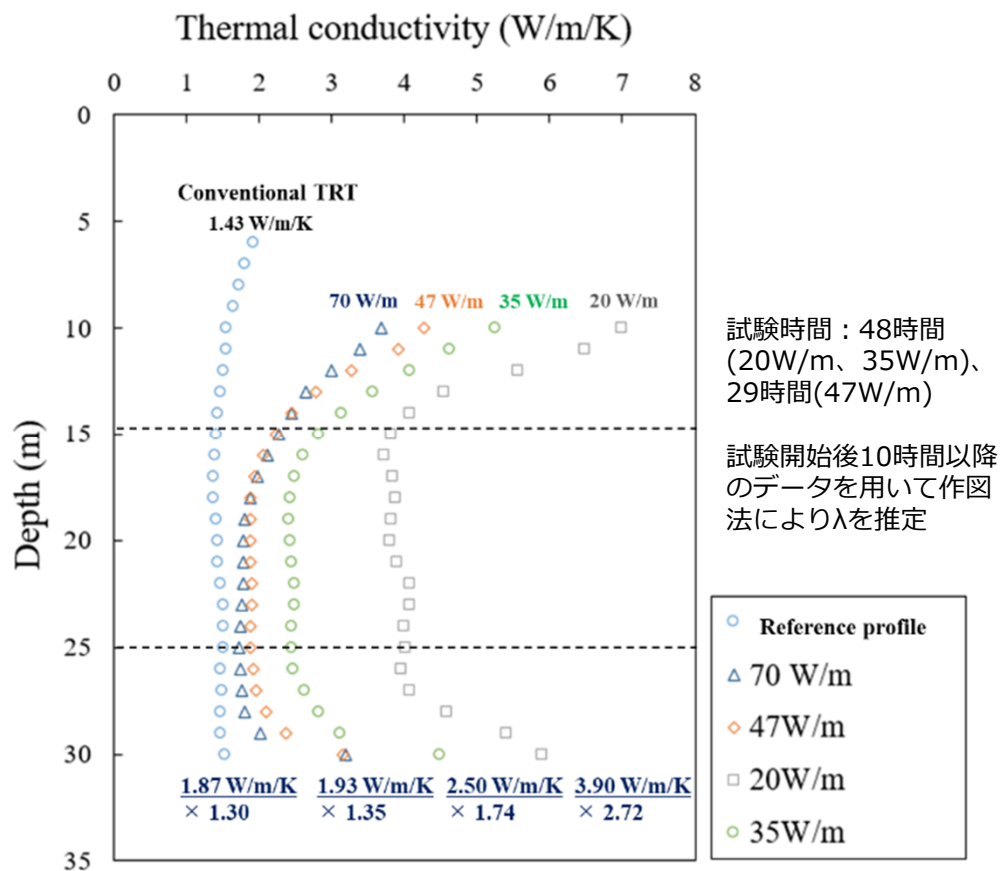


現場試験における
計測ケーブルの設置状況

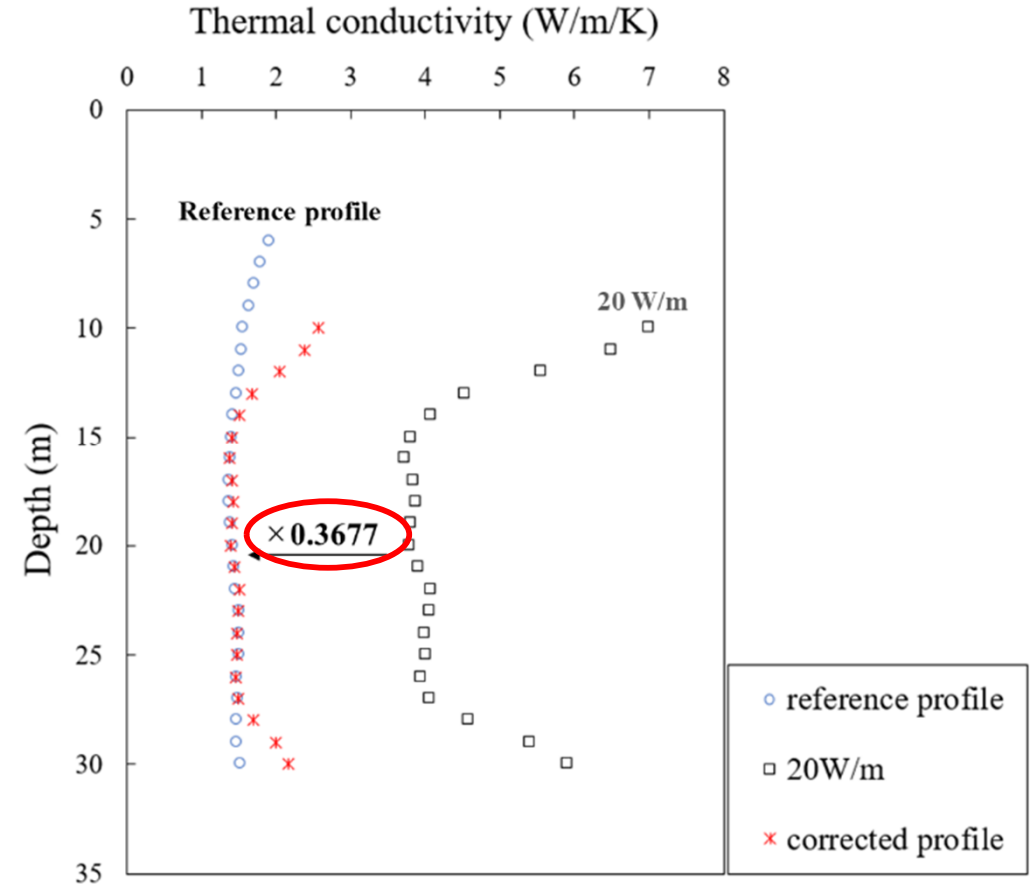
2022年度は、20mに延長した計測ケーブルの両端に円筒型電磁石を設置した改良型の装置を製作し、秋田大学構内の試験井で現場試験を行った。

② 簡易熱応答試験法(TRT)の開発・規格化 (北大・秋田大)

井戸の管壁に密着する電磁石付ヒーターユニットを用いたTRT (秋田大学)



見かけ熱伝導率プロファイルの比較



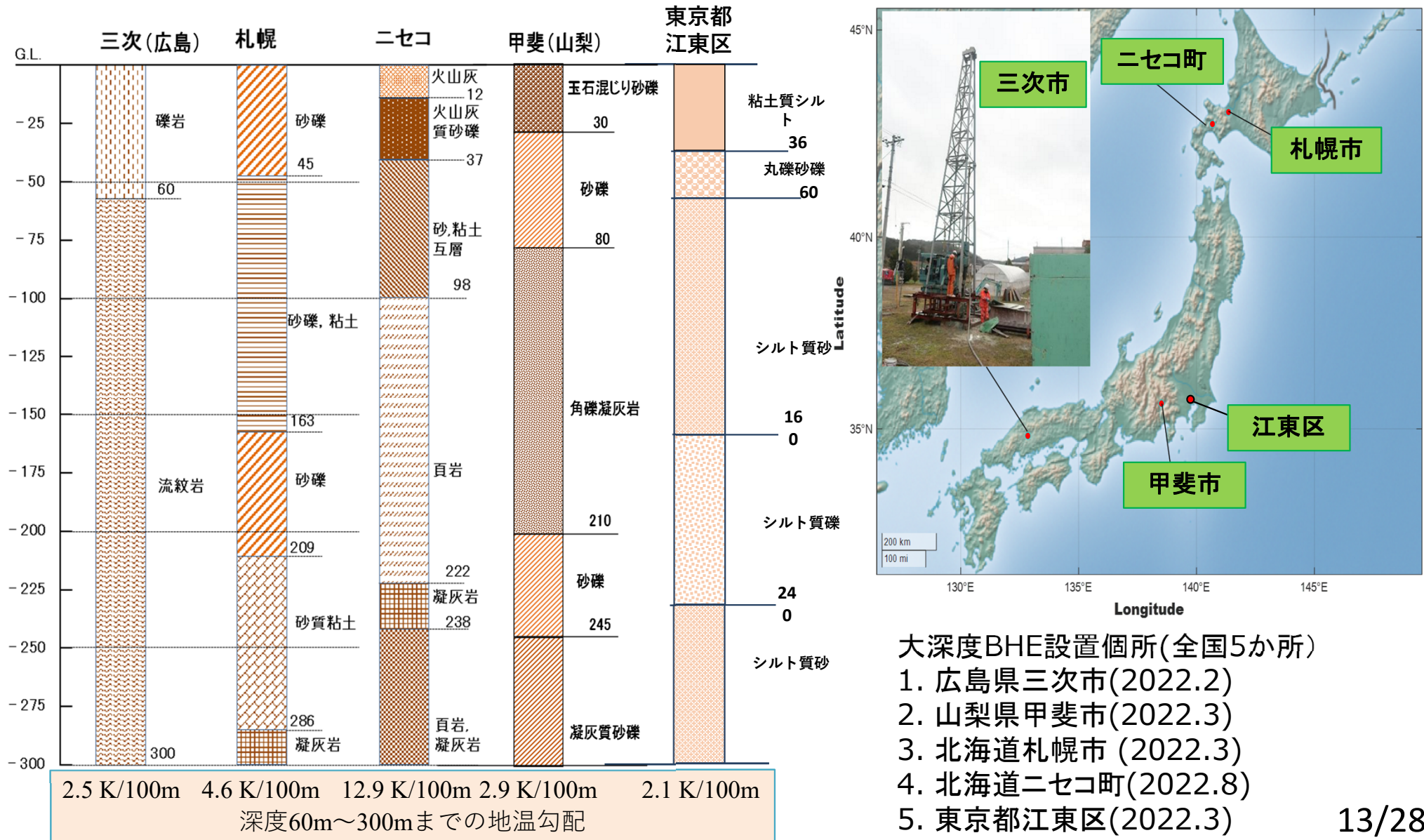
簡易型TRTにより推定された熱伝導率プロファイルの補正

- ・実験から得られた加熱中央部の見かけ λ は従来型TRTによる λ より高い値を示した。
- ・低熱負荷時の場合、見かけの λ の値は高くなる傾向
- ・20W/mの低熱負荷時、従来型TRTによる熱伝導率プロファイルと一致する傾向

② 簡易熱応答試験法(TRT)の開発・規格化 (北大・秋田大)

周期加熱法による迅速TRT技術の開発と規格化 (北大)

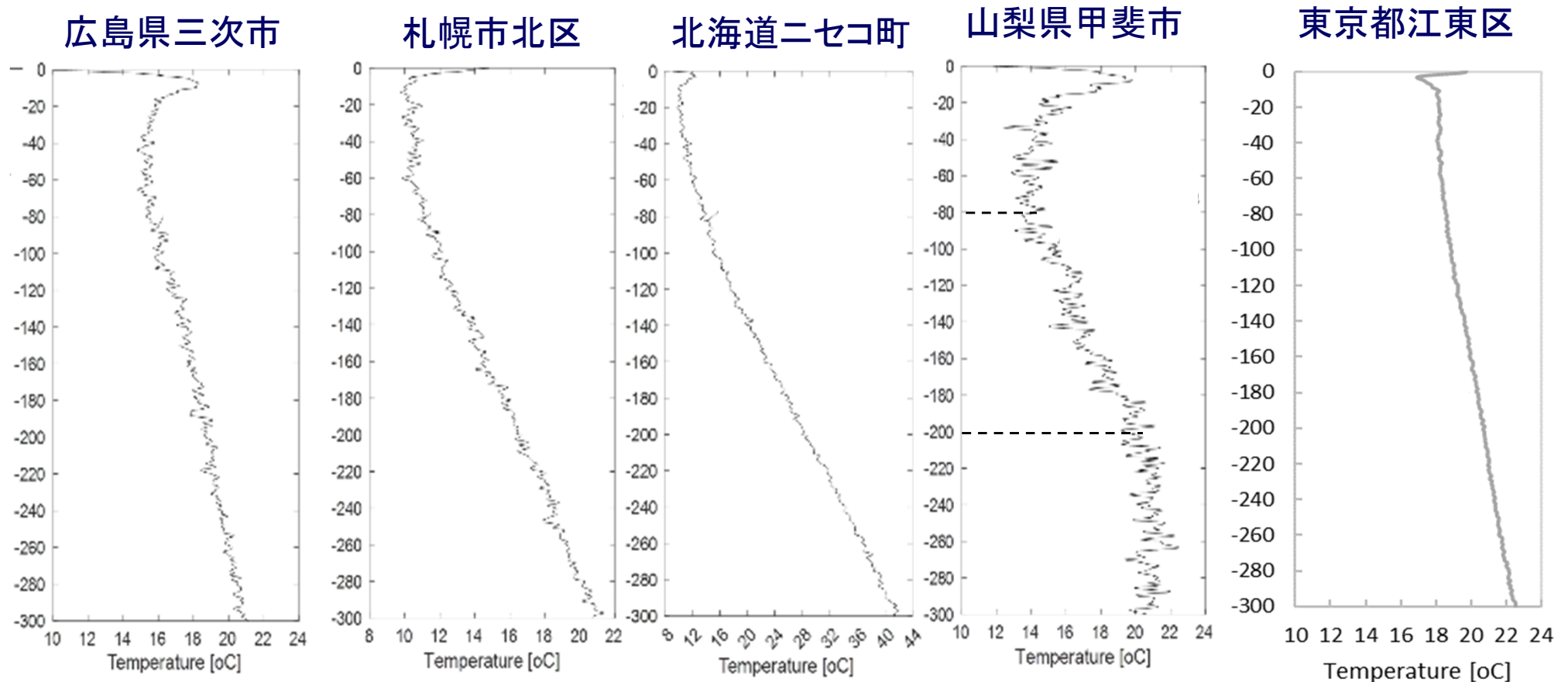
- 広島県三次市: 堅硬な基盤(白亜系流紋岩類)が分布するはダウンザホール法で掘削(約10日)
- 他4か所: 未固結もしくは第三系のその他地域では、ロータリー法により掘削(約20日)



② 簡易熱応答試験法(TRT)の開発・規格化 (北大・秋田大)

周期加熱法による迅速TRT技術の開発と規格化 (北大)

試験地の自然地中温度分布と温度勾配



2.50 K/100m
(深度80m以上)

4.50 K/100m
(深度80m以上)

12.50 K/100m
(深度80m以上)

5.00 K/100m
(深度80-200m)

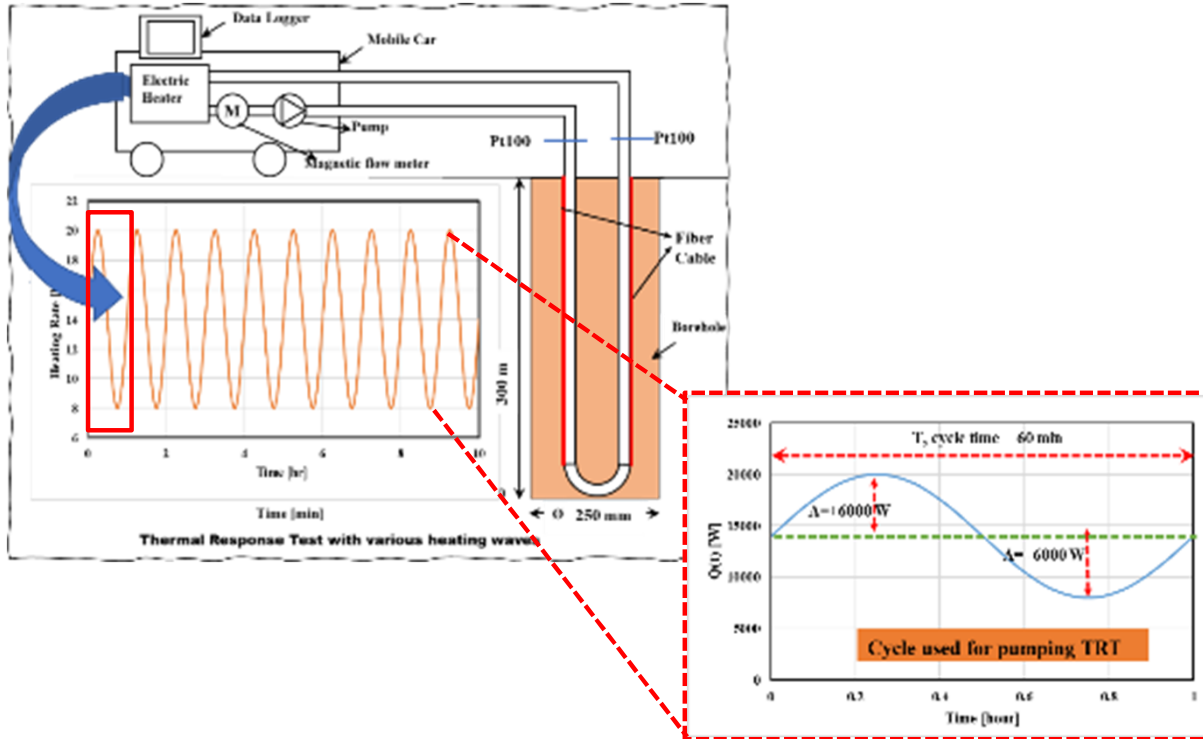
1.83K/100m
(深度80m以上)

深度20~80m、200~300mに
地下水流れ

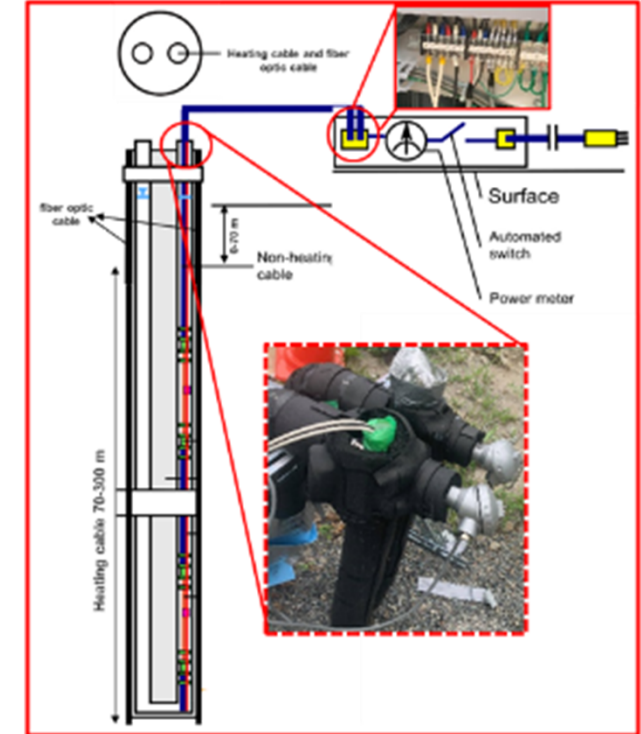
② 簡易熱応答試験法(TRT)の開発・規格化 (北大・秋田大)

周期加熱法による迅速TRT技術の開発と規格化 (北大)

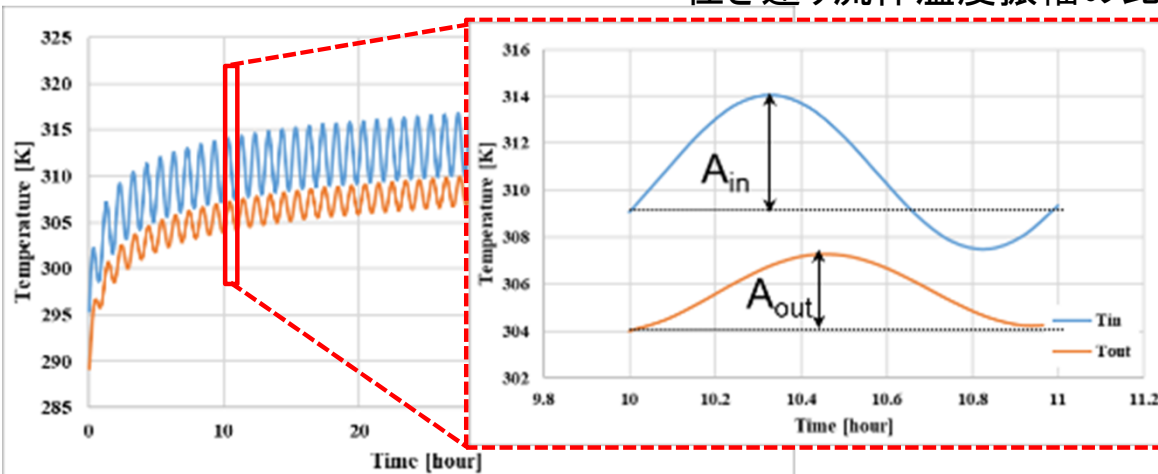
1. 周期加熱可能な熱応答試験機



2. 光ファイバー一体型ヒーターケーブル



行き還り流体温度振幅の比: A_{out}/A_{in}



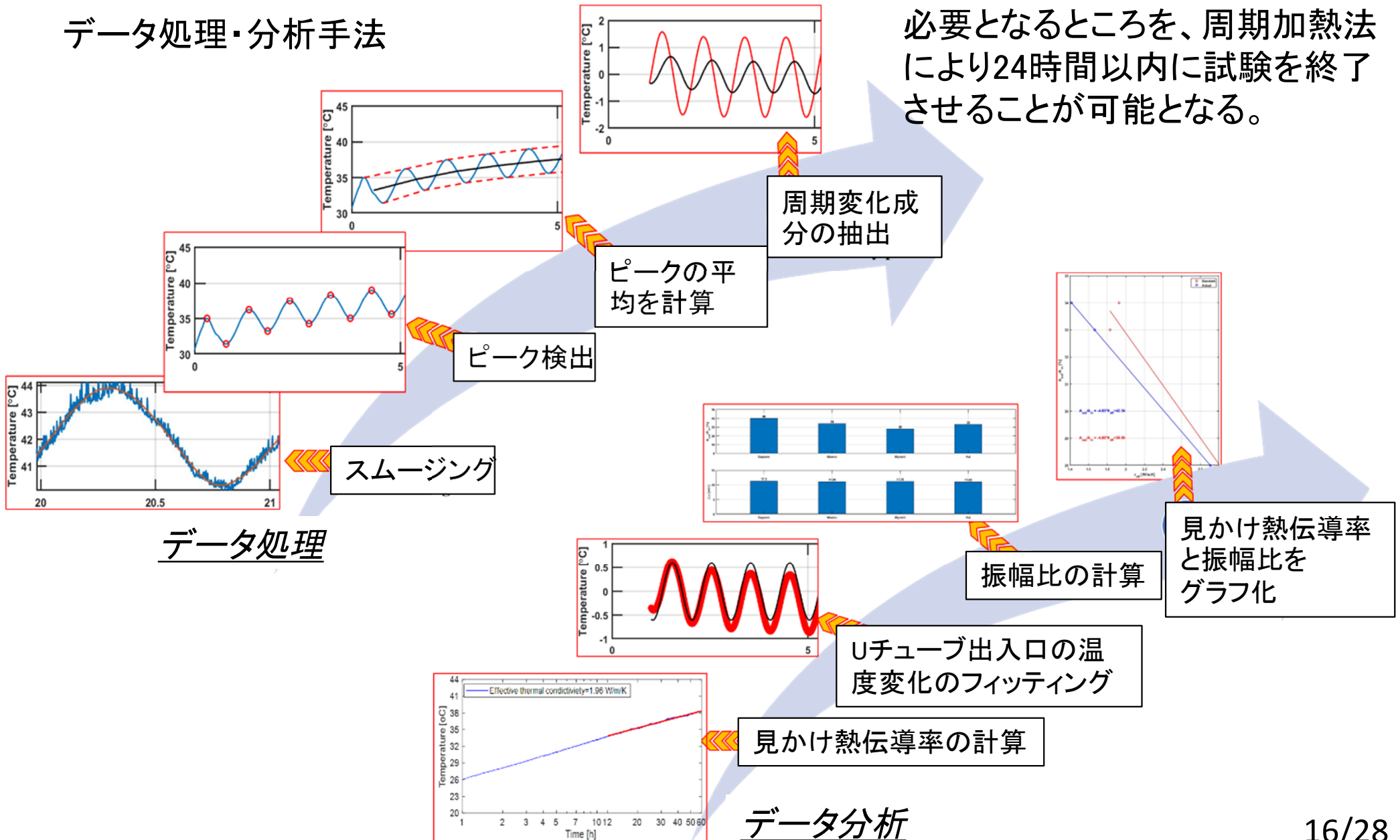
- ① 各サイクルでの供給温度(A_{in})の振幅を計算
- ② 各サイクルでの戻り流体温度(A_{out})の振幅を計算
- ③ 振幅比(A_{out}/A_{in})を計算
- ④ 振幅比と有効熱伝導率の関係

② 簡易熱応答試験法(TRT)の開発・規格化 (北大・秋田大)

周期加熱法による迅速TRT技術の開発と規格化 (北大)

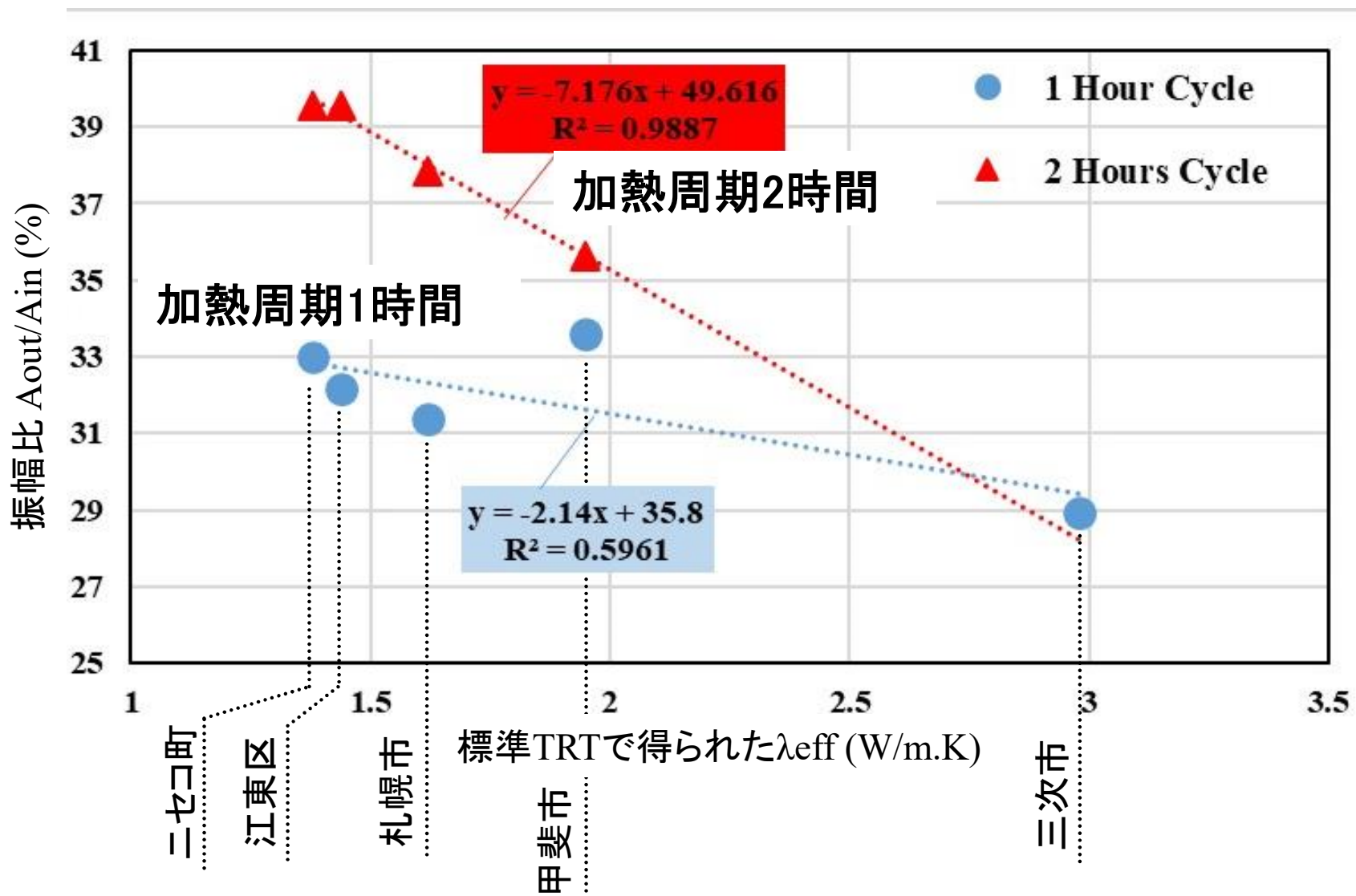
データ処理・分析手法

従来のTRTでは長時間の試験が必要となるところを、周期加熱法により24時間以内に試験を終了させることが可能となる。



② 簡易熱応答試験法(TRT)の開発・規格化 (北大・秋田大)

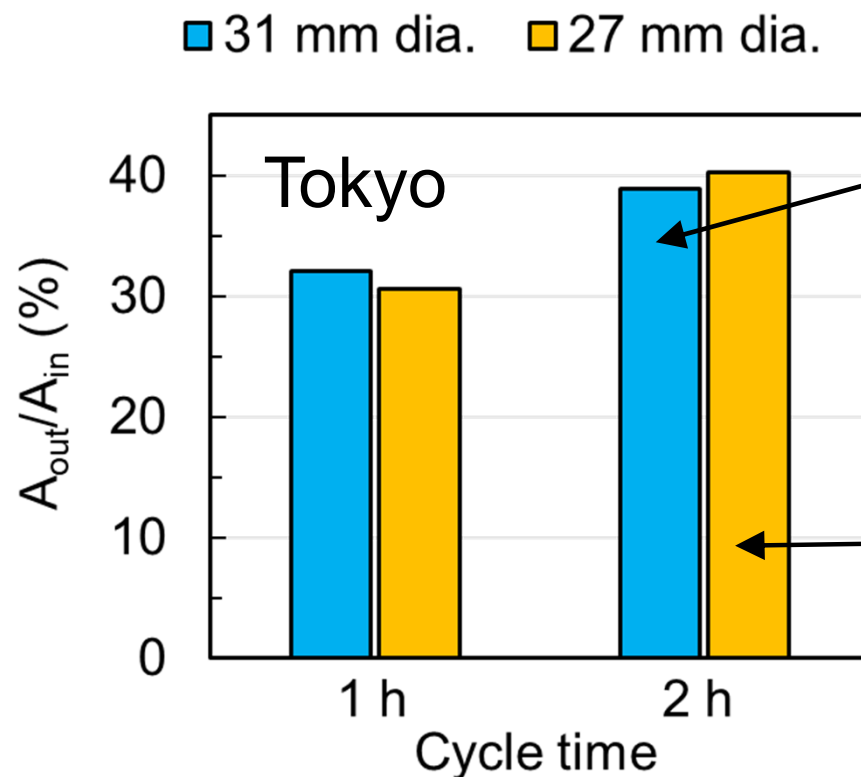
周期加熱法による迅速TRT技術の開発と規格化 (北大)



② 簡易熱応答試験法(TRT)の開発・規格化 (北大・秋田大)

周期加熱法による迅速TRT技術の開発と規格化 (北大)

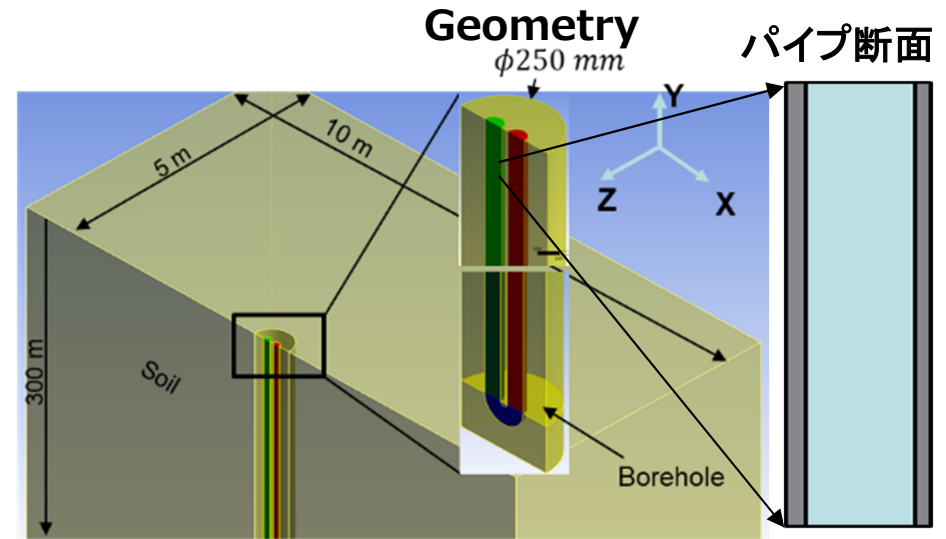
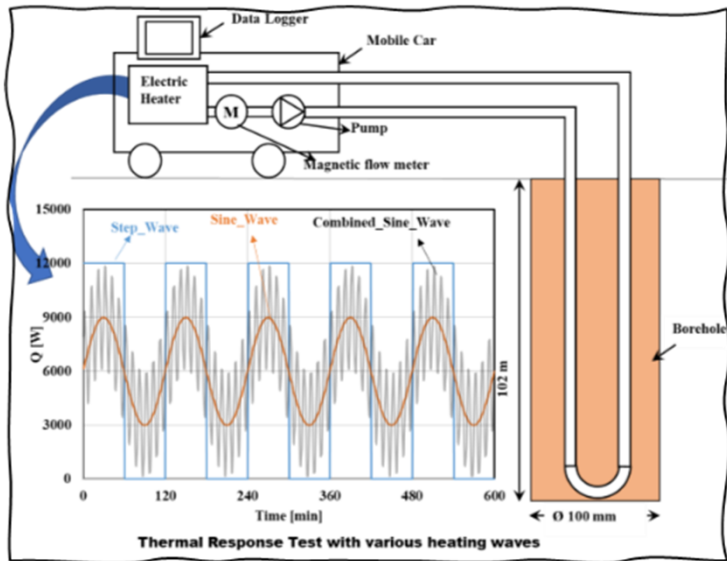
- ・異なるパイプ径でほぼ等しい振幅比となった
- ・加熱サイクル時間は振幅比に影響する。
周期2時間の方が感度が良い



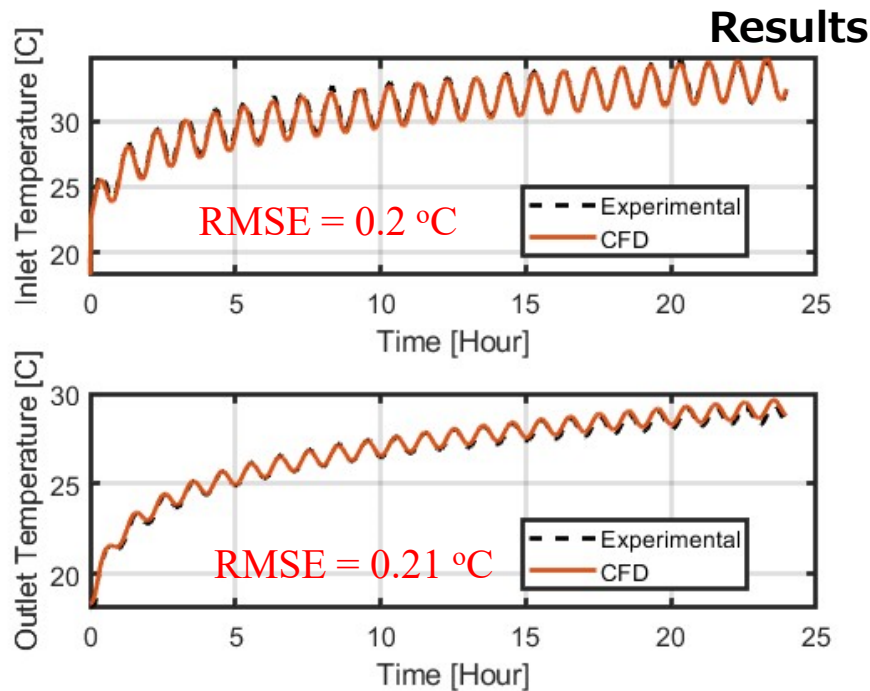
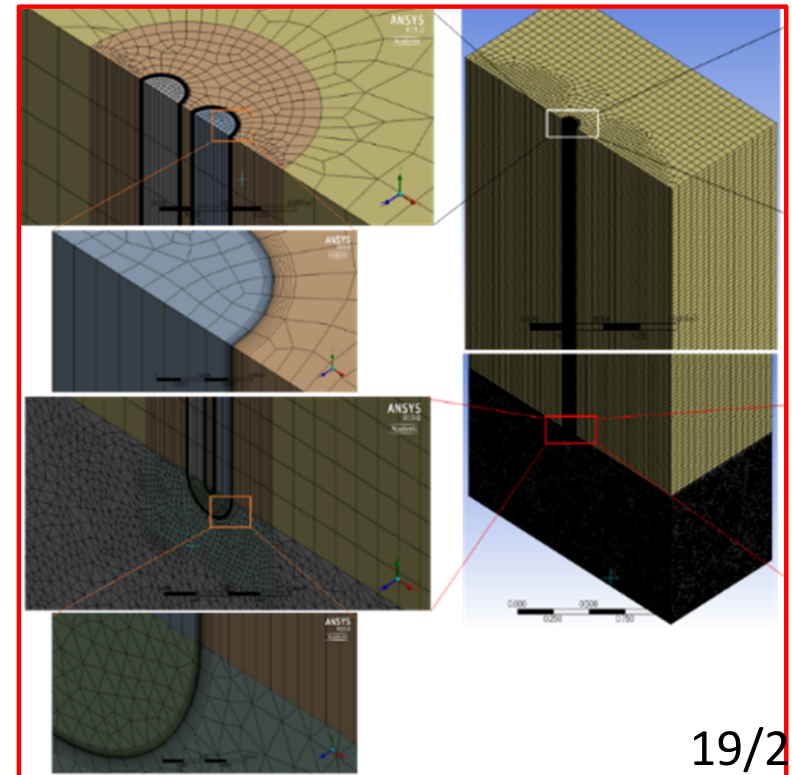
パイプ径は振幅比にあまり影響を与えない。
加熱サイクル時間を1hから2hに長くすることで高感度化が可能。

② 簡易熱応答試験法(TRT)の開発・規格化 (北大・秋田大)

周期加熱法による迅速TRT技術の開発と規格化 (北大)

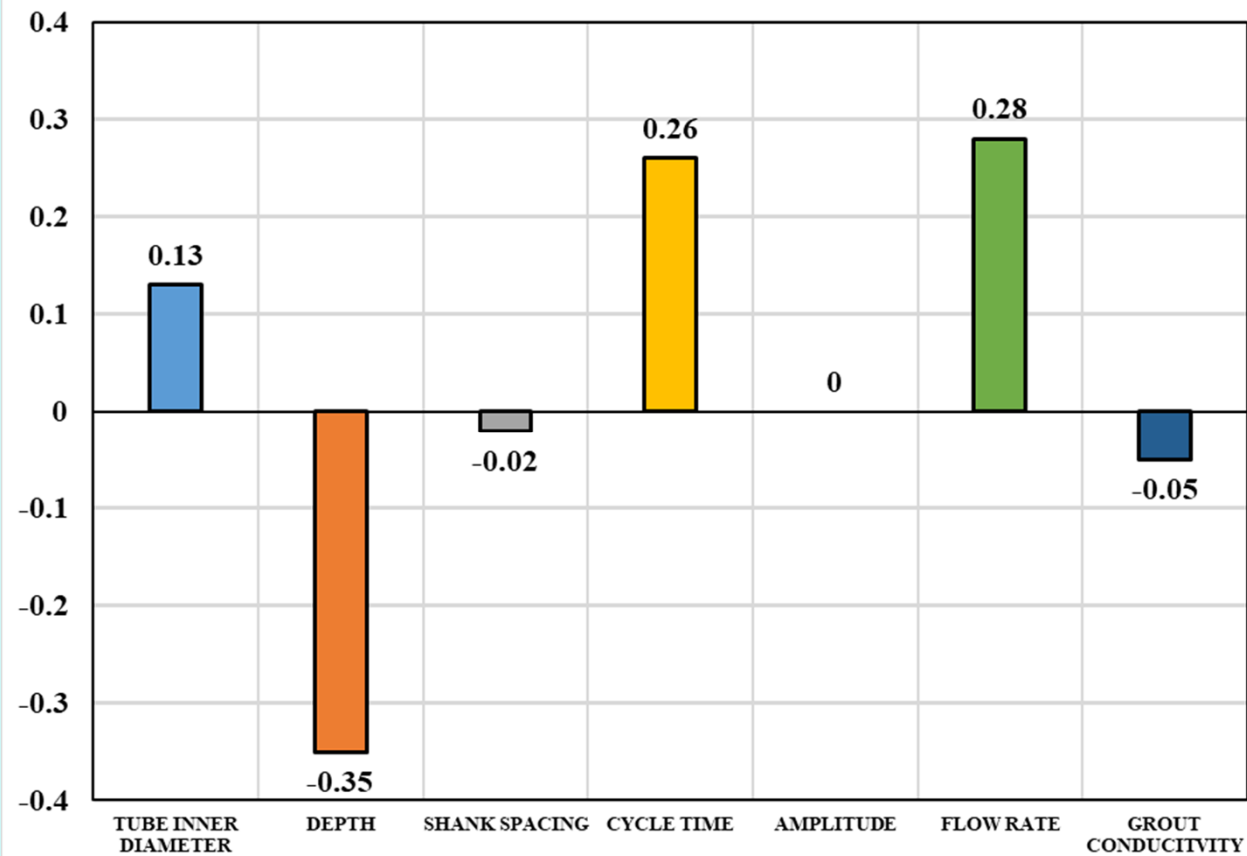


Mesh

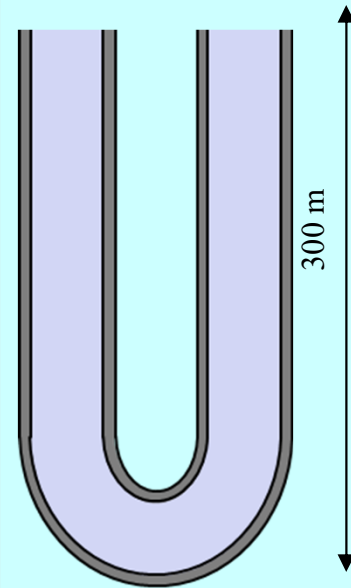


② 簡易熱応答試験法(TRT)の開発・規格化 (北大・秋田大)

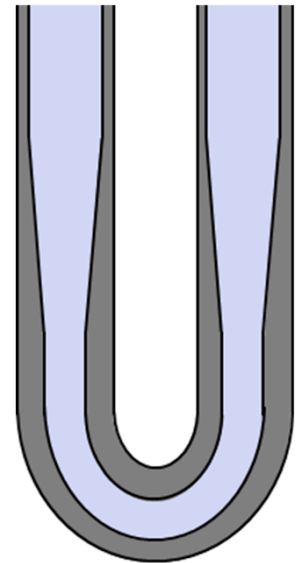
周期加熱法による迅速TRT技術の開発と規格化 (北大)



CFD用の簡素化されたモデル



実際のチューブ



今後の予定

より精度の高いパラメータ解析を行うために、

- ・実際に使用しているパイプ径をCFDに反映する。
- ・地盤を多層モデル化する。

地下水流れ・異なる地質条件による影響をCFDにより検証する。

③ 統合型設計ツールの開発・規格化(北大)

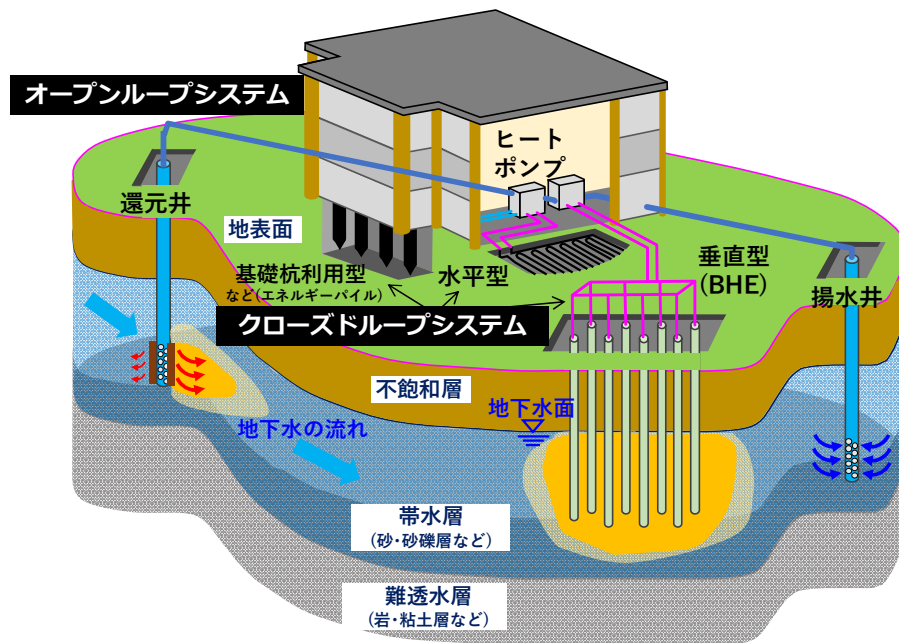
建物・空調設備との連成シミュレーションの作成と 設計ツールとWebプログラムなどとの連携方法の確立

統合型設計ツール(建物・空調設備との連成計算)の開発

昨年度までの実施内容：建築・空調・地中熱の連成計算手法の開発

本年度の実施内容：計算手法を適用するための入出カインターフェースの開発

統合型設計ツール全体イメージ

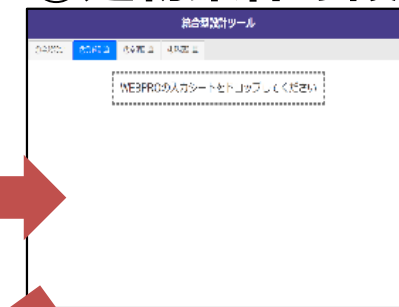


統合型設計ツール条件入力の流れ

① 全体設定



② 建物条件の設定



③ 空調計算の条件設定

設備名	能力	運転時間	運転モード	運転曜日	運転時刻	運転曜日	運転時刻	運転曜日	運転時刻
空調機	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
空調機	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
空調機	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
空調機	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
空調機	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
空調機	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
空調機	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
空調機	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
空調機	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
空調機	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000

④ 地中熱・熱源計算の条件設定



ユーザーインターフェースの特長

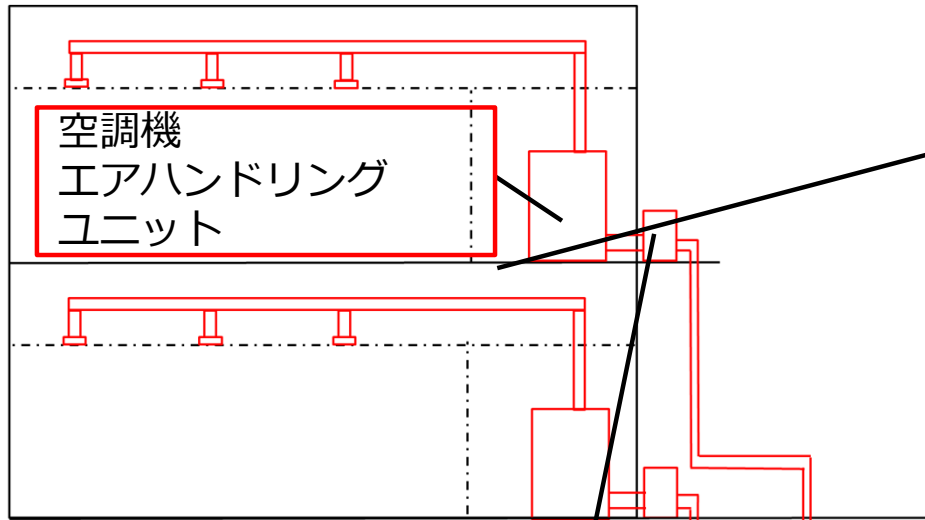
- Web版地中熱設計ツールと同様、Webサイトにアクセスすることで、インターネットブラウザでの利用が可能、ソフトウェアのインストールが不要
- 建築条件の入力は、一次エネルギー消費量計算プログラム (通称WEBPRO)のエクセル入力シートを用いて行うため、設備設計者であれば容易に入力が可能

③ 統合型設計ツールの開発・規格化(北大)

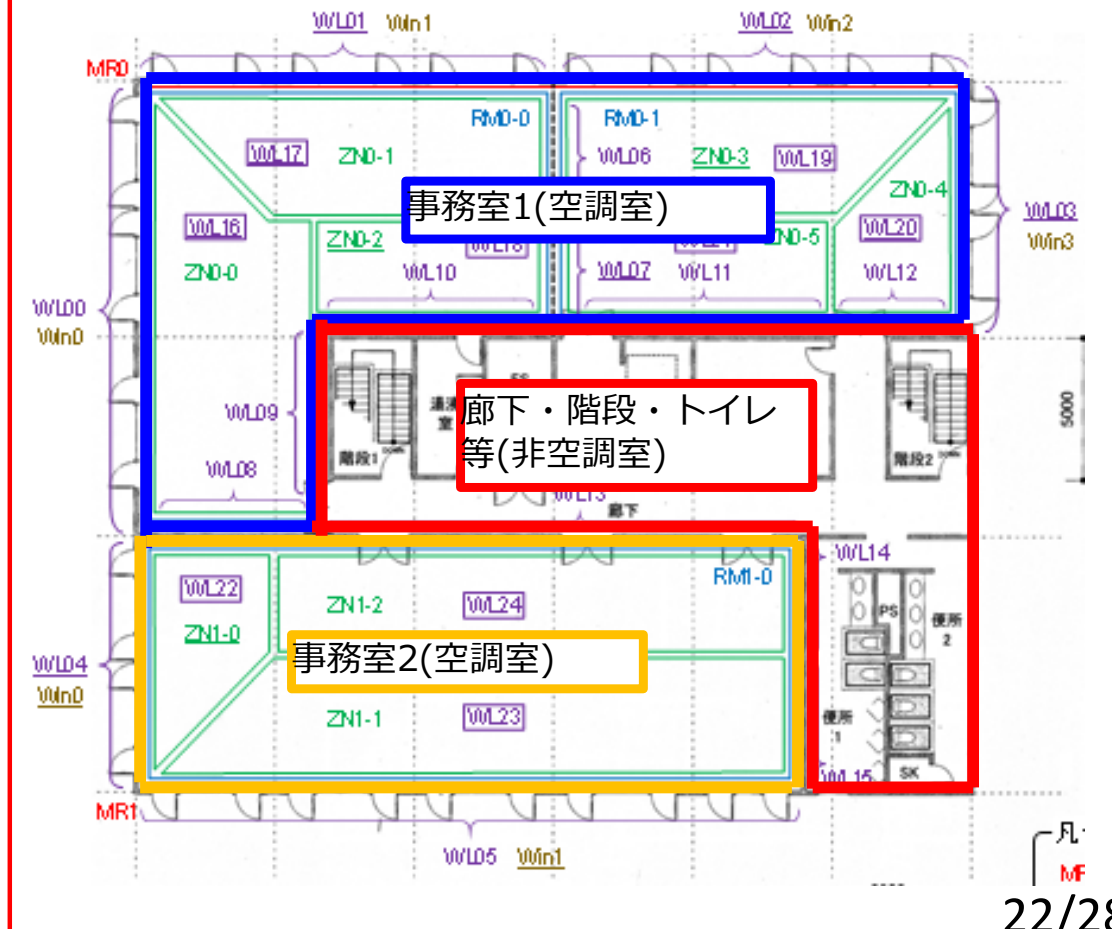
建物・空調設備との連成シミュレーションの作成と 設計ツールとWebプログラムなどとの連携方法の確立

統合型設計ツールの建築・空調・地中熱の連成計算に必要な入出力ユーザー インターフェースおよび計算例

省エネ法のモデル建物法で用いられる標準オフィスビルの1フロア(5,000m²)を対象として、建物・空調機と地中熱の連成計算を実施



建物条件(平面図)



熱源機・地中熱計算条件

- ・ヒートポンプ：定格出力140 kW
- ・地中熱交換器長さ×本数：100m×20本
- ・熱交換器種類：ボアホールシングルUチューブ
- ・初期地中温度：17℃
- ・地盤の有効熱伝導率：1.5 W/(m・K)
- ・地盤の比熱：2.0 kJ/(kg・K)
- ・地盤の密度：1500 kg/m³

③ 統合型設計ツールの開発・規格化(北大)

建物・空調設備との連成シミュレーションの作成と 設計ツールとWebプログラムなどとの連携方法の確立

統合型設計ツールの建築・空調・地中熱の連成計算に必要な入出力ユーザー
インターフェースおよび計算例

① 全体設定

- 緯度経度情報、住所情報、計算年数（GCAと同じ）、計算開始月日を入力
- 緯度経度の入力は、地図（panning、zooming可能）をクリックするか、住所から緯度経度を取得ボタンを押して入力

地図情報は国土地理院GISサービスを利用、
<https://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/sokuchikijun40025.html> 等参照

② 建物条件の設定

ドロップ

WEBPRO
入カシート
(エクセル)



建物条件をエクセル
シートに入力

③ 統合型設計ツールの開発・規格化(北大)

建物・空調設備との連成シミュレーションの作成と 設計ツールとWebプログラムなどとの連携方法の確立

統合型設計ツールの建築・空調・地中熱の連成計算に必要な入出力ユーザー
インターフェースおよび計算例

③空調計算の条件設定画面

統合型設計ツール

①全般設定 ②負荷計算 ③空調計算 ④熱源計算

ZONE-ID	空調ZONE	床面積	階高	天井高	熱源	空調機器	冷房能力(kW)	設計容量(kW)	台数	全熱交換	外気量(m³/h)
AC_000	1F_ショールーム1	61.57	6.5	5.8	FCU	FCU(冷2.25kw4.02kW)	2.254.02	2.254.02			
AC_001	1F_ショールーム2	17.02	3.4	2.7	FCU	FCU(冷2.25kw4.02kW)	2.254.02	2.254.02			
AC_002	1F_SR付UB	3.49	3.4	2.7	FCU	FCU(冷2.25kw4.02kW)	2.254.02	2.254.02			
AC_003	1F_SRHWC	1.83	3.4	2.7	FCU	FCU(冷2.25kw4.02kW)	2.254.02	2.254.02			
AC_004	1F_レボセンズ・総務	28.05	3.4	2.7	FCU	FCU(冷2.25kw4.02kW)	2.254.02	2.254.02			
AC_005	1F_納戸	8.50	3.4	2.7	FCU	FCU(冷2.25kw4.02kW)	2.254.02	2.254.02			
AC_006	1F_北控室	3.01	3.4	2.7	FCU	FCU(冷2.25kw4.02kW)	2.254.02	2.254.02			
AC_007	1F_WC(一般)	1.74	3.4	2.7	FCU	FCU(冷2.25kw4.02kW)	2.254.02	2.254.02			
AC_008	1F_WC(障害者)	3.68	3.4	2.7	FCU	FCU(冷2.25kw4.02kW)	2.254.02	2.254.02			
AC_009	2F_会議室1	34.99	3.1	2.4	FCU	FCU(冷2.25kw4.02kW)	2.254.02	2.254.02			
AC_010	2F_会議室2	17.00	3.1	2.4	FCU	FCU(冷2.25kw4.02kW)	2.254.02	2.254.02			
AC_011	2F_小ホール・型機	26.05	3.1	2.4	FCU	FCU(冷2.25kw4.02kW)	2.254.02	2.254.02			
AC_012	2F_北控室	5.46	3.1	2.4	FCU	FCU(冷2.25kw4.02kW)	2.254.02	2.254.02			
AC_013	2F_商談室1	13.38	3.1	2.4	FCU	FCU(冷2.25kw4.02kW)	2.254.02	2.254.02			
AC_014	2F_商談室2	12.15	3.1	2.4	FCU	FCU(冷2.25kw4.02kW)	2.254.02	2.254.02			
AC_015	2F_両控室3	12.80	3.1	2.4	FCU	FCU(冷2.25kw4.02kW)	2.254.02	2.254.02			
AC_016	2F_物入	2.25	3.1	2.4	FCU	FCU(冷2.25kw4.02kW)	2.254.02	2.254.02			
AC_017	2F_WC(一般)	1.68	3.1	2.4	FCU	FCU(冷2.25kw4.02kW)	2.254.02	2.254.02			
AC_018	2F_WC(障害者)	3.36	3.1	2.4	FCU	FCU(冷2.25kw4.02kW)	2.254.02	2.254.02			
AC_019	3F_小ホール	82.69	3.0	2.4	FCU	FCU(冷2.25kw4.02kW)	2.254.02	2.254.02			

空調機を選定し入力



④地中熱および熱源計算の条件設定画面

統合型設計ツール

①全般設定 ②負荷計算 ③空調計算 ④熱源計算

熱源ポンプ設定
HP熱源水出口設計温度 [°C]
2.0
熱媒水流体
エチレングリコール
温度 [Vol%]
30.0
凍結温度 [°C]
-15.7
一次ポンプ設計温度差 [°C]
5.0
プライム比重 [kg/m³]
1052.0
プライム比熱 [kJ/kgK]
3.583
一次ポンプ流量 [l/min]
34.1
機器配管圧力損失 [mAg]
4.0
一次ポンプ効率
0.5
一次ポンプ消費電力 [W]
30.0

地中熱交換器
熱交換器種類: ボアホール
地表面条件: 温度境界条件
Uチューブ本数
1本
熱交換器長さ [m]
100.0
ボアホール外径 [m]
0.12
ヒートポンプから熱交換器までの平均距離 [m]
20.0
グラウト
有効熱伝導率 [W/m·K]
2.0
Uチューブ
外径 [m]
0.034
内径 [m]
0.027
間隔 [m]
30.0

埋設管地点
合計本数
1
埋設管合計長さ [m]
100
並列回路の数
1
埋設管間隔 [m]
10.0
埋設管位置
行列指定する [] 行: 1 列: 1 クリア

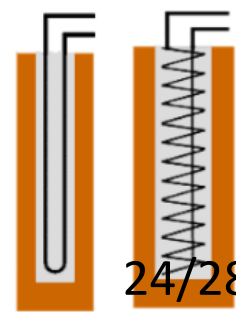
地盤データ
地盤密度 [kg/m³]
地盤比熱 [kJ/kgK]
地盤熱伝導率 [W/mK]
初期地盤温度 [°C]
地盤データベースで初期化

ヒートポンプや地中熱交換器の入力



- ②建築条件の設定画面でWEBPRO入力シートをドロップしアップロードすると空調エリアごとの条件設定項目が表示され、エリアごとに空調の条件を設定する

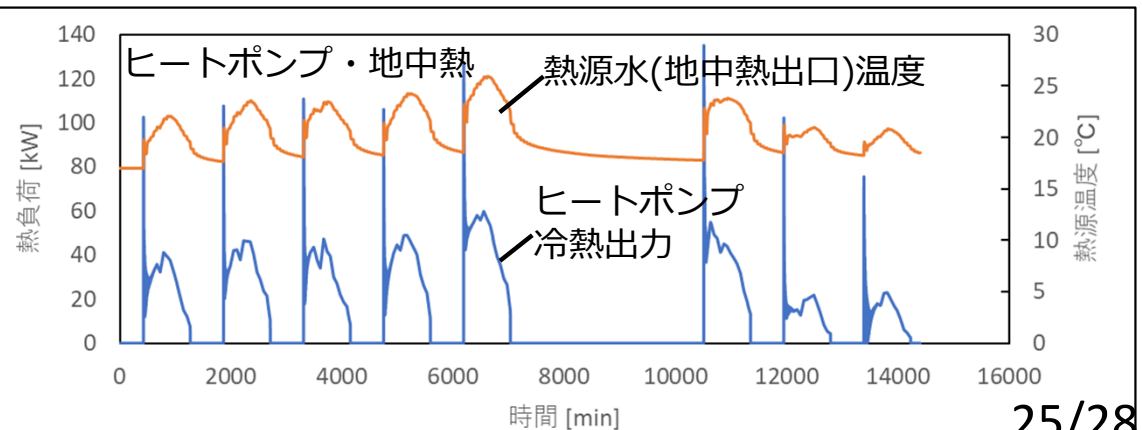
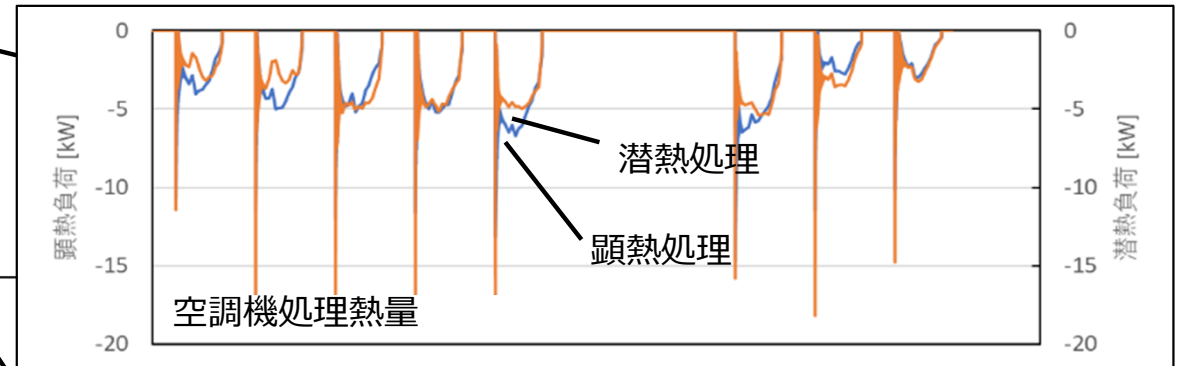
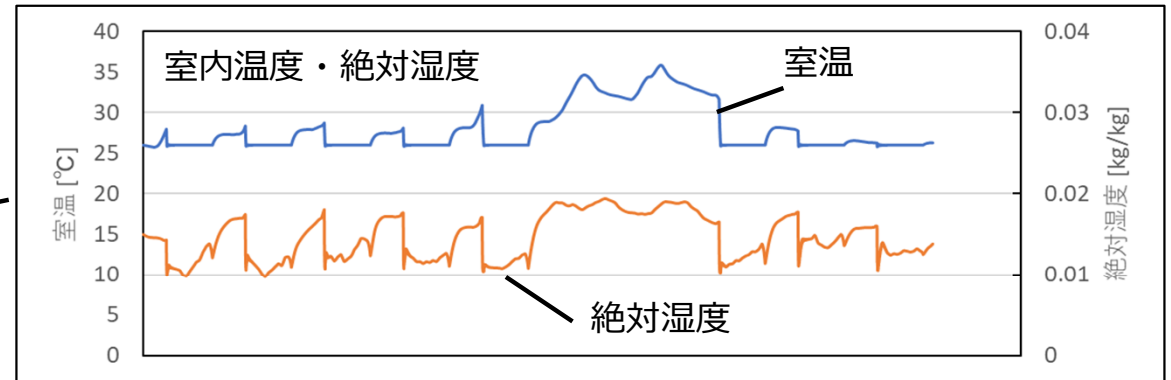
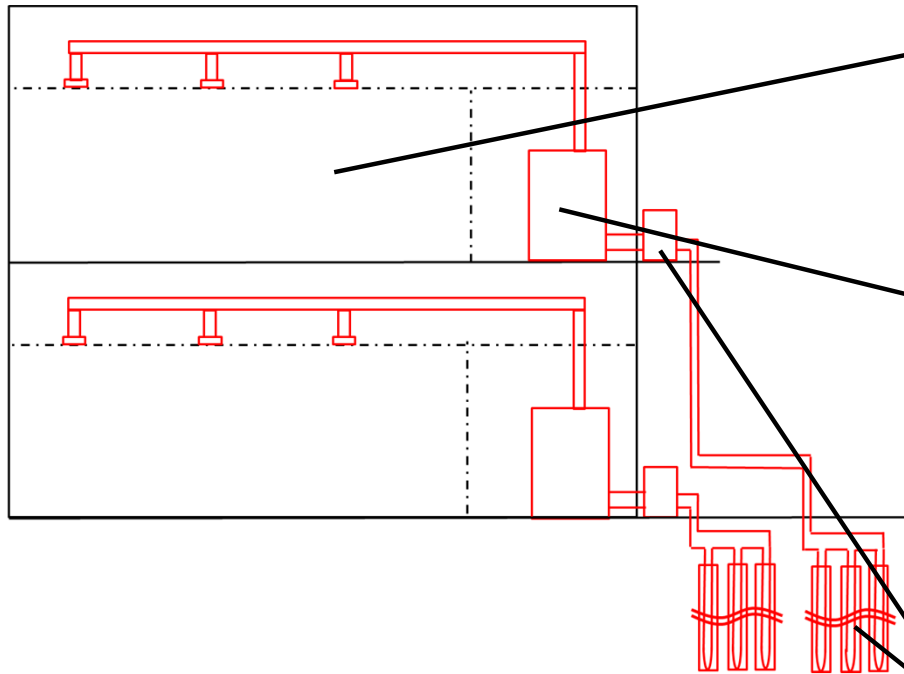
- 昨年度開発したWeb版設計ツールと同様、全体設定画面で地点設定を行うと、設定地点に応じて地盤データベースから地盤データを自動取得
- 計算実行ボタンを押すとサーバー側で計算プログラムを実行する



③ 統合型設計ツールの開発・規格化(北大)

建物・空調設備との連成シミュレーションの作成と 設計ツールとWebプログラムなどとの連携方法の確立(北大)

統合型設計ツールの建築・空調・地中熱の連成計算に必要な入出力ユーザー
インターフェースおよび計算例
結果の出力



③ 統合型設計ツールの開発・規格化(北大)

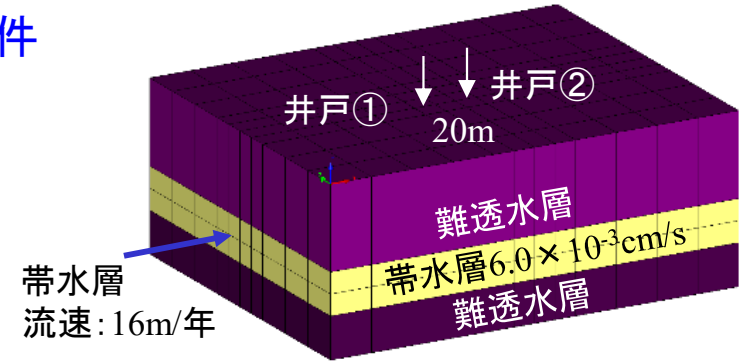
オープンループシステムの設計ツールの開発

1.1 節点数と解析時間の関係を整理するための解析条件

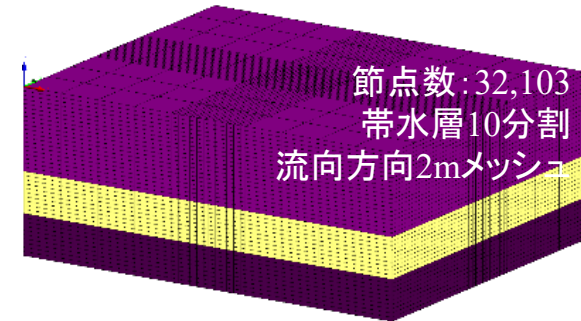
節点数と解析時間の関係を整理するために要素分割を変えた約50ケースの解析を実施

【解析条件】

- ✓ 解析時間刻み: 60分, 1日
- ✓ 帯水層厚25m、帯水層流速16m/y
- ✓ 解析時間3年(0.5年で揚水-注水を切り替え)
- ✓ 夏場注水30°C(井戸①)、冬場注水10°C(井戸②)
- ✓ 注水-揚水量30m³/日

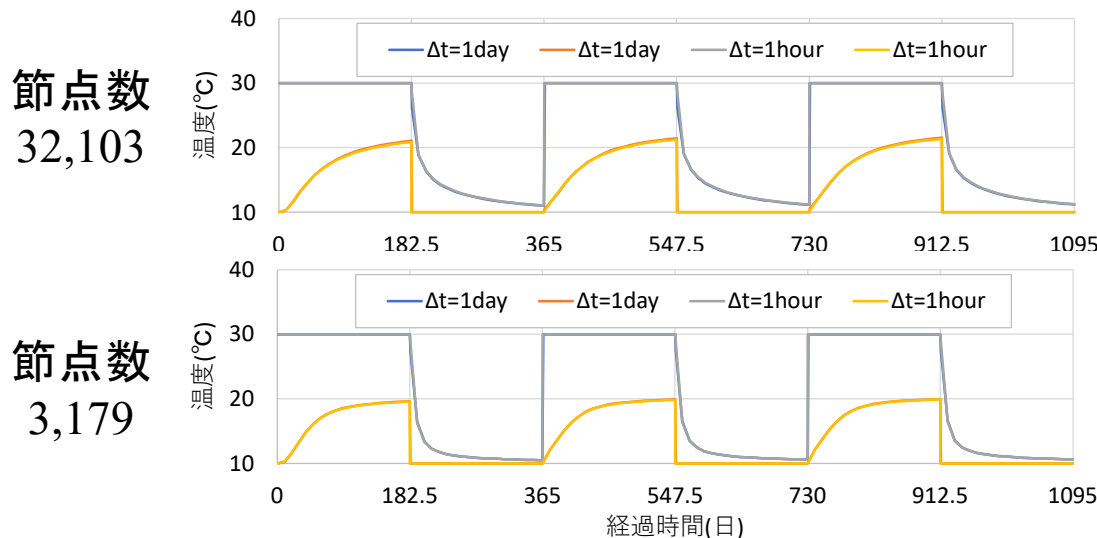


上: 解析条件、下: 要素分割例

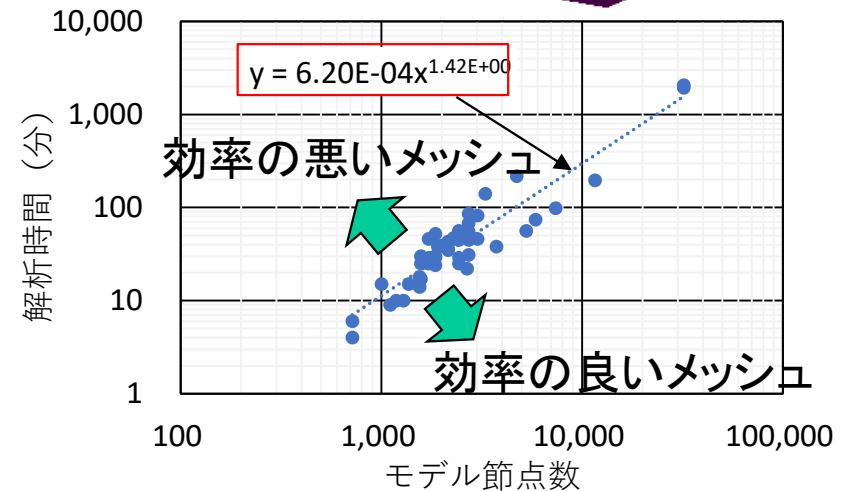


1.1 時間刻みの影響および節点数と解析時間の関係

- ✓ 時間刻みの影響は小さい
- ✓ 近似式より上のプロットは計算コストが悪い?



時間刻みの影響



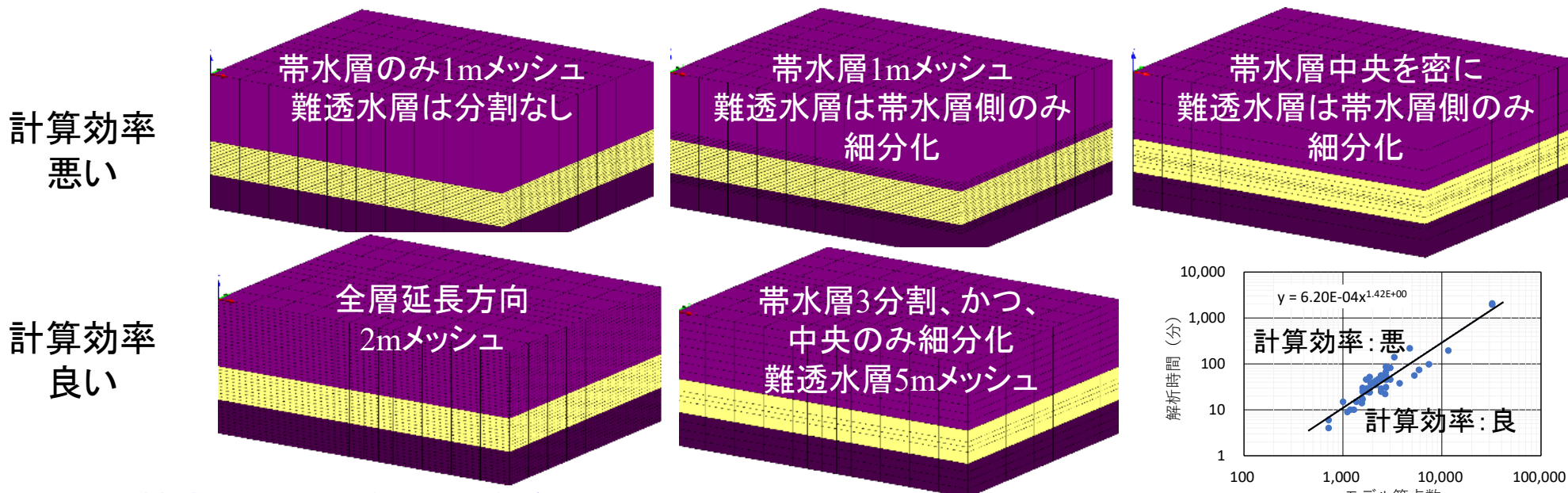
モデル節点数と解析時間の関係 26/28

③ 統合型設計ツールの開発・規格化(北大)

オープンループシステムの設計ツールの開発

1.2 計算効率の良し悪しに関する傾向の整理

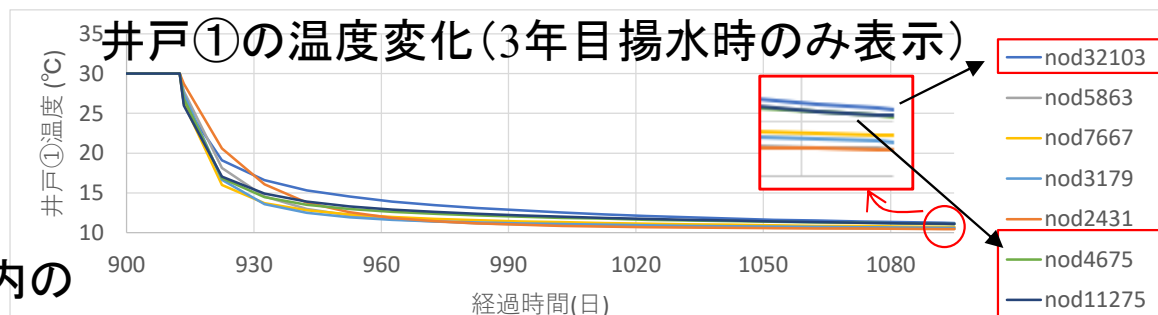
- ✓ 計算効率が悪いメッシュは帯水層を細分化し、難透水層は偏りのある分割をした場合。
- ✓ 計算効率が良いメッシュは、要素形状に偏りが少ない。



1.2 精度に関する検証(現在進行中)

✓ 32,103節点モデルの結果を正として節点数を減じても同様の成果が得られるメッシュ形状を探索 (nod●●は節点数)

✓ 最終時間の温度はnod4675やnod11275が整合した。これらのケースは流向方向にメッシュを細分化したケースである。なお、最終時間の温度は帯水層内の蓄熱の影響と考えられる。



Nod32103の計算時間:140分、nod4675の計算時間:6分

成果・進捗概要

①見かけ熱伝導率の推定手法の開発・規格化:

- ・各地域でオールコアサンプリング、TRTを本年度に完了
- ・広域3次元地下水流動解析モデルを作成中
- ・数値TRTにより統計学的推定における応答局面を計算

②簡易熱応答試験法(TRT)の開発・規格化:

- ・既存の水井戸・大口径の水井戸に適用可能な簡易TRT装置の開発・改良、実証
- ・全国5か所で周期TRTを行い、周期加熱による迅速TRTの有効性を確認

③統合型設計ツールの開発の開発・規格化:

- ・WEBPRO、クラウド版GSHP設計ツールを活用し、建築・空調・地中熱の連成計算を行う設計ツールの開発を実施
- ・オープンループシステムの設計ツールでは、節点数・時間刻みと解析時間の関係を調査し、計算効率を整理。制度の検証
- ・検証用GSHPシステムを全国14か所に設置し、BEMSのデータと簡易計測装置のデータを比較