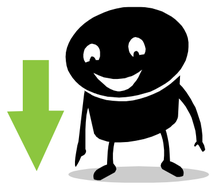
熱応答試験(TRT: Thermal Response Test)の概要

◆1．地中熱交換器設計の難点

GSHP設計での未知パラメータ
- 土壌の熱伝導率
- 土壌の初期温度
- 土壌の熱容量
- 地中熱交換井の熱抵抗
- 自然対流の影響

熱応答試験（TRT）の実施を通して設計パラメータを推定



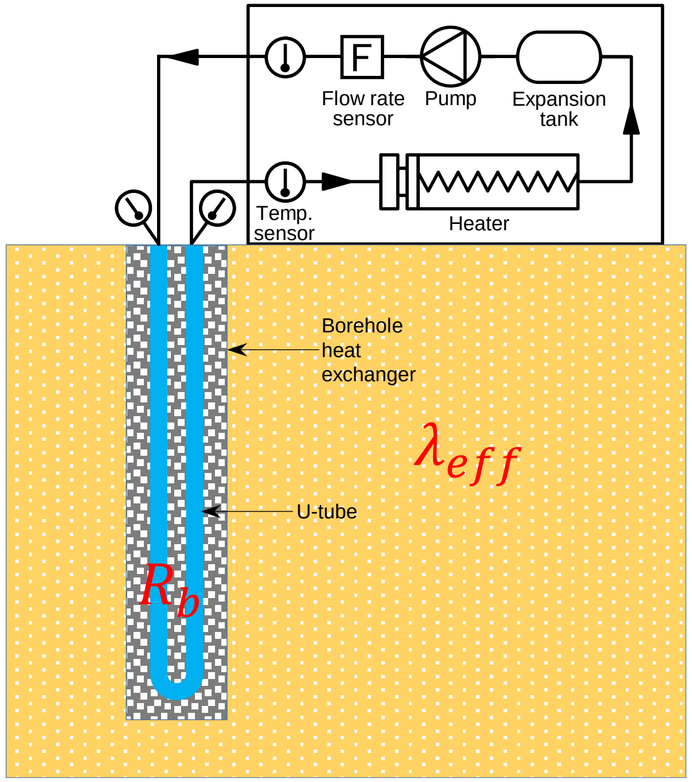
実験基準不備
- 最小実験時間
- 装置設定条件

外乱混入
- 外気影響、地下水流動

→コスト増加、性能悪化

✓ **外乱考慮推定法開発**
✓ **自然対流の影響解明**
✓ **測定基準提示**

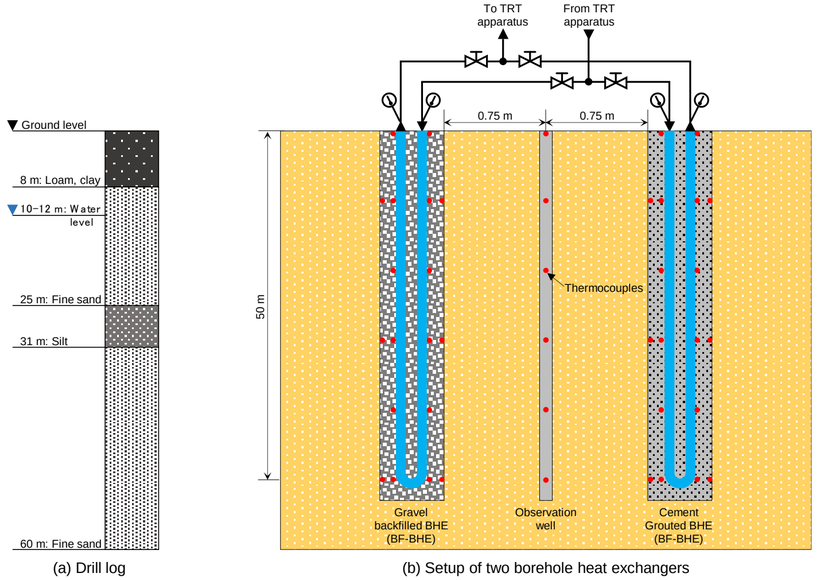
◆2．熱応答試験とは？



Schematic of TRT setup

熱応答試験とは、地中熱交換器に一定の熱量を与え、その熱応答データから地中の空間平均有効熱伝導率 λ_{eff} と、地中熱交換器の熱抵抗 R_b を逆推定する試験法であり、GSHPの設計に必要な情報である。

◆3．実験施設の概要



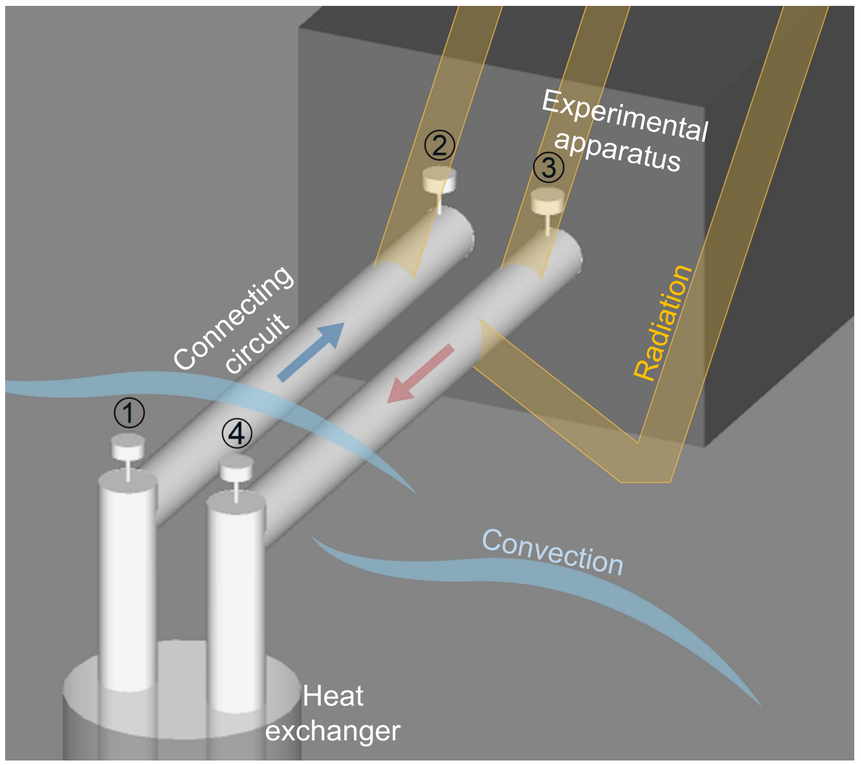
Schematic of ground heat exchangers and drill log of experimental site

Picture of experimental setup

地中熱利用ヒートポンプ（GSHP）の設計パラメータ逆推定に関する研究

外乱の影響を考慮できるTRT推定法の開発

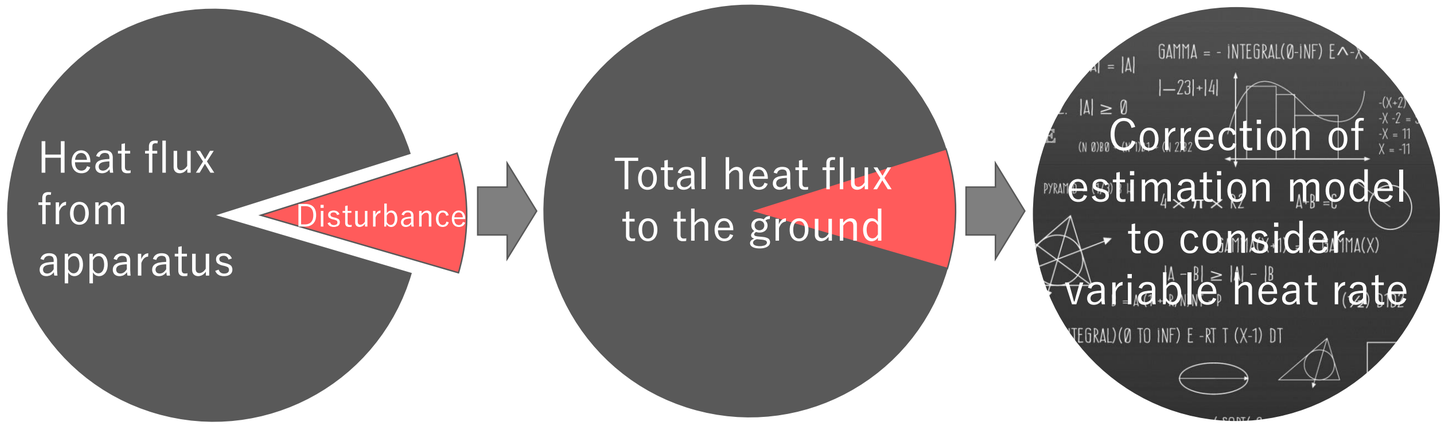
◆１．熱応答試験（TRT）の外乱要素



Heat exchange between aboveground TRT setup and outdoor environment (flow sequence 1→2→3→4)

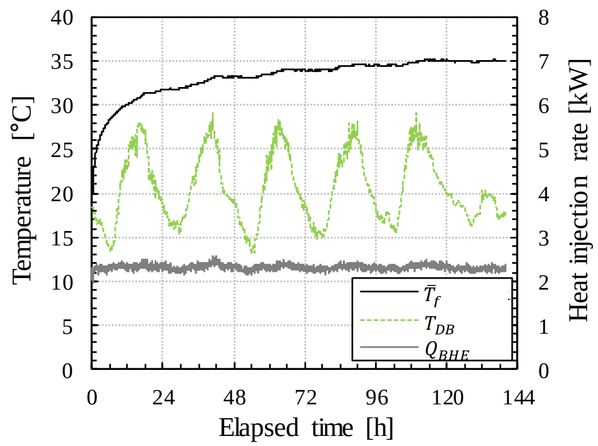
◆２．開発TRT解析法の原理

外乱により変動する注入熱量率は除去する対象として認識されるが、それは既知の境界条件であり、変動する熱流率を考慮できるように推定モデルを修正すれば、外乱に関する分析がなくても綺麗に推定できる

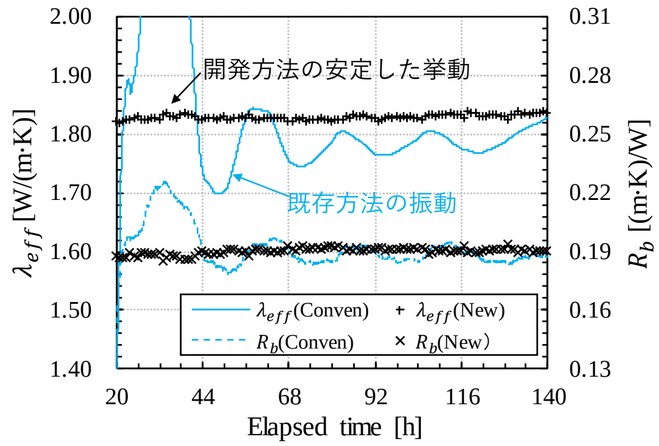


New idea to consider disturbed thermal response test data in parameter estimation

◆３．開発TRT解析法の既存推定法との比較



Disturbed thermal response test data



Comparison between conventional and new estimation methods

地中熱利用ヒートポンプ（GSHP）の設計パラメータ逆推定に関する研究

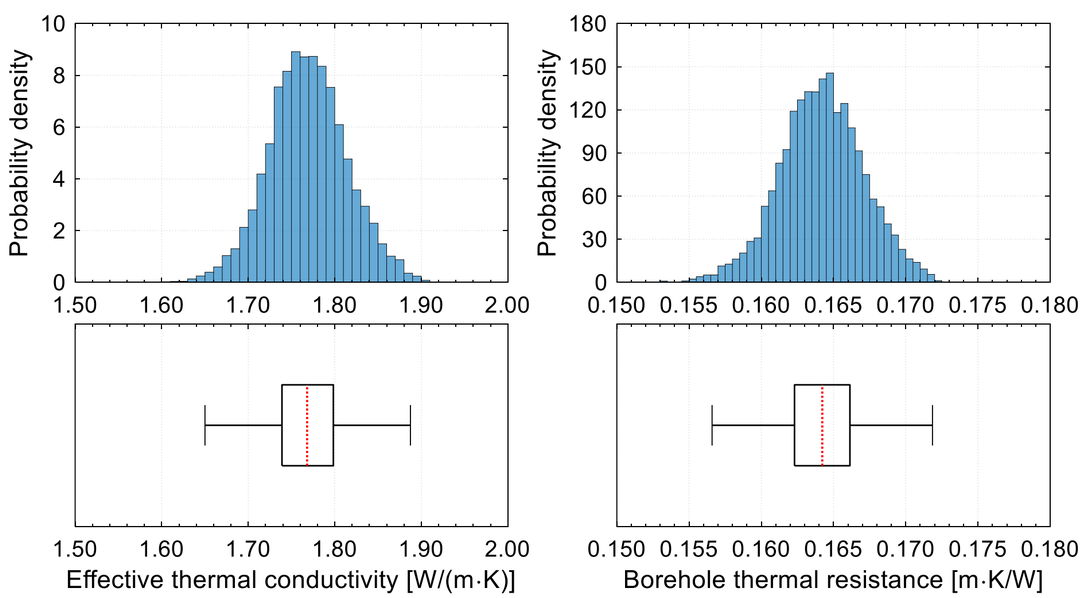
ベイズ統計学に基づいたTRT推定法の開発

◆ 1．ベイズ定理

$$\underbrace{P(\theta|d)}_{Posterior} \propto \underbrace{P(\theta)}_{Prior} \times \underbrace{P(d|\theta)}_{Likelihood}$$

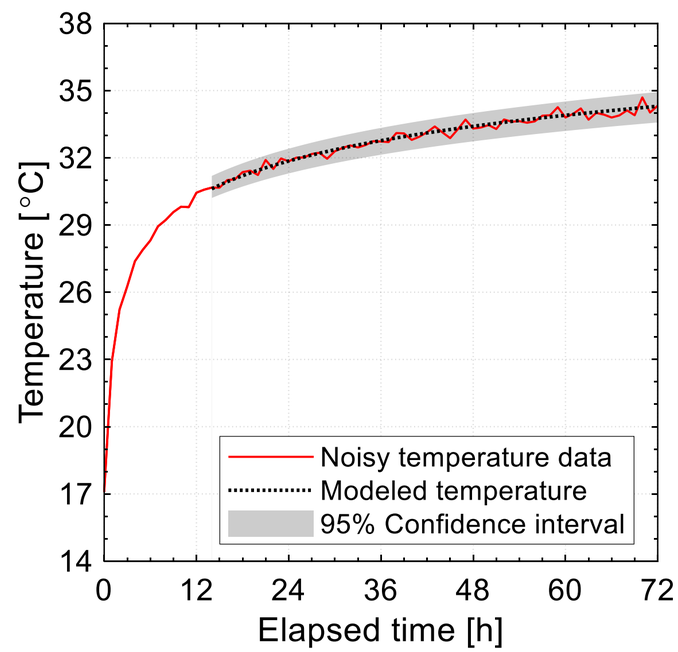
- ベイズ推論で未知パラメータ(θ)を確率変数として扱うので推定されるのは、ある一点の値ではなく確率分布(事後確率分布)
- 事前確率分布(Prior)：対象問題に関する事前知識、経験、直観などが反映できる確率分布
- 尤度(Likelihood)：データに基づいて更新される確率であり、適切なモデリングによりあらゆる不確かさの考慮ができる

◆ 2．推定された事後確率分布

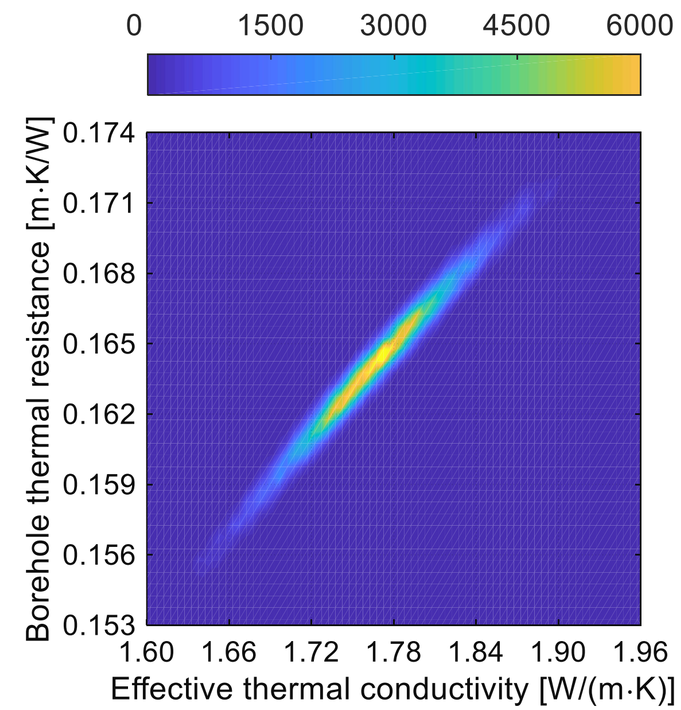


◆ 3．ベイズ推論の長所

- 外乱により乱れた温度応答データを用いて推定を行ったときに、推定された未知パラメータの確率分布から様々な統計的インデックスの抽出ができる（標準偏差、最尤値、平均値など）
- 推定されたパラメータの確率分布から信頼区間を評価し、推定された不確かさが、実際に外乱により変動している実験データをカバーしているのかを確認できる
- 複数パラメータの結合確率分布を作成し、相関関係と最も信頼できるパラメータの組み合わせを確認できる



Measured temperature, modeled temperature, and uncertainty range using 95% credible intervals of estimates

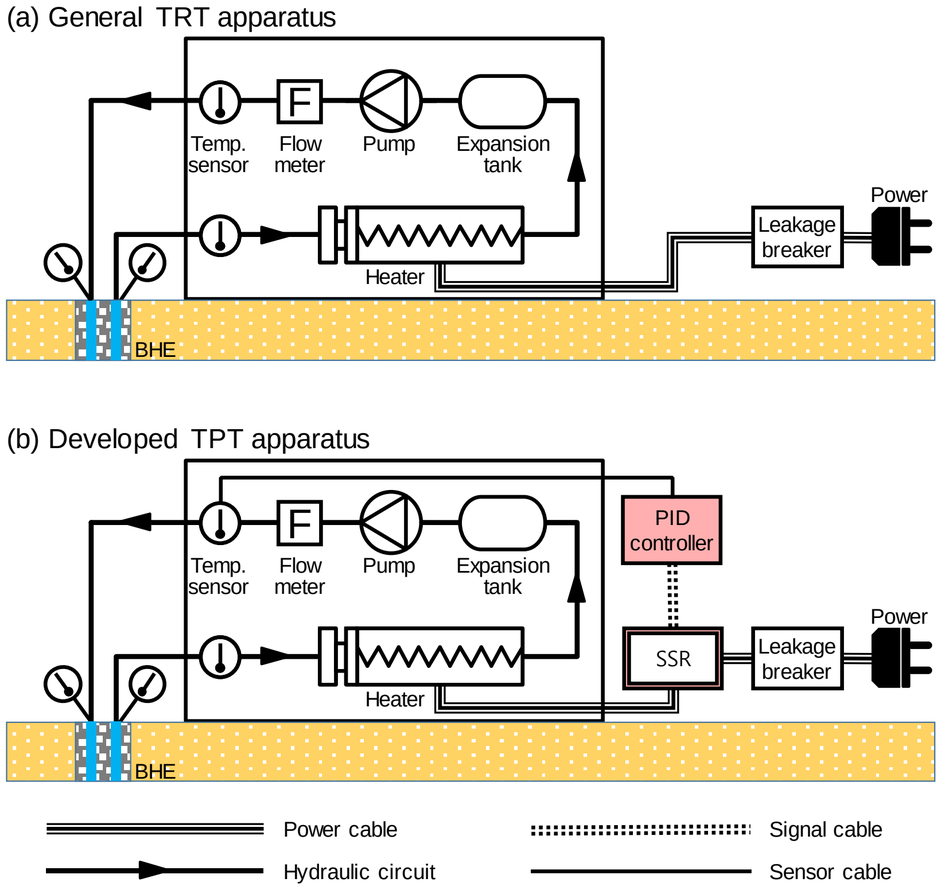


Joint probability distribution of GSHP design parameters

安価な熱性能試験装置の開発とベイズ推論の適用

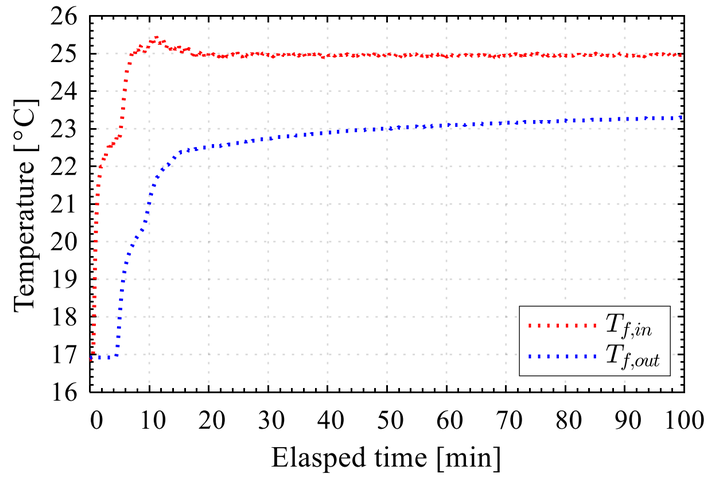
◆ 1．熱性能試験（TPT）と研究背景

- TPTは新しく開発した地中熱交換器の性能を確認するための試験であり、一定入口温度を実験境界条件として持つ
- 既存のTPT装置は水タンクと複雑な制御が必要
- 提案したTPT装置は既存のTRT装置にPID制御器とソリッドステートリレー（SSR）を追加するだけで実験がTPT実験が可能

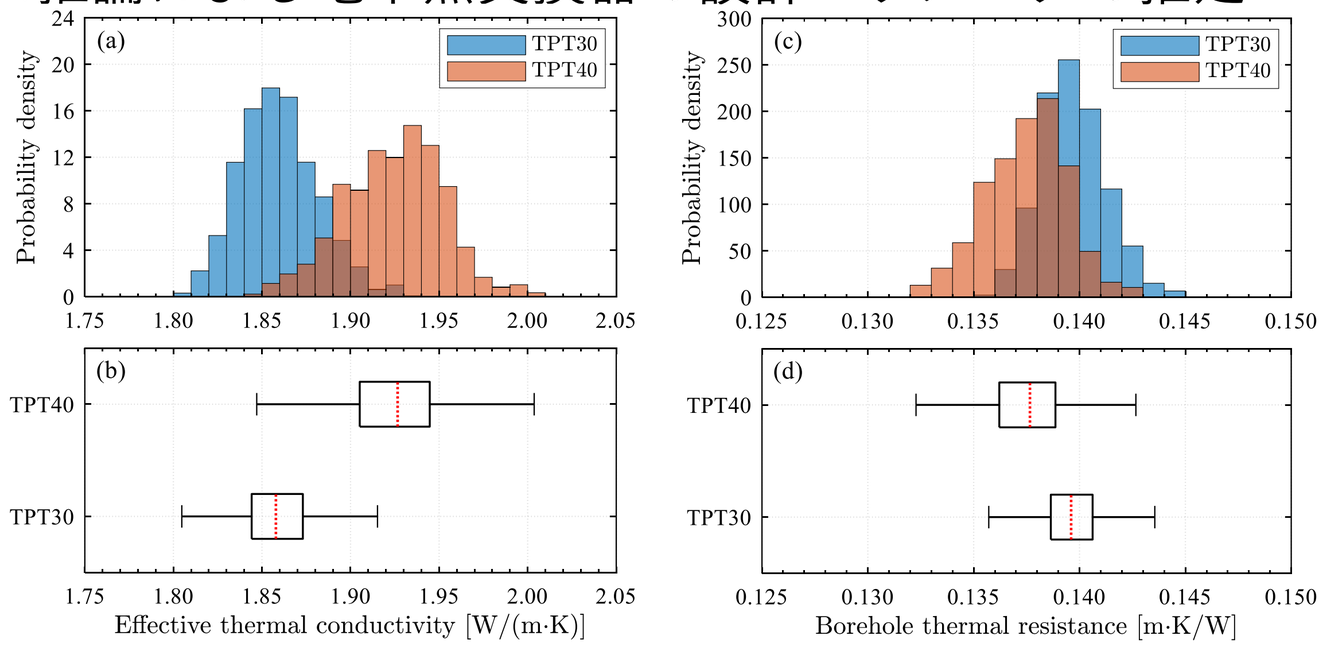


◆ 2．開発TPT装置の制御性能確認

- 入口温度を25 °Cに設定し、5秒間隔の測定を行った結果、初期温度の17 °C付近から設定温度に到達するまでのライズタイムは7分
- 設定温度に到達した直後のオーバーシュートは0.44 °C
- 実験開始13分後には設定温度と入口温度の差は0.2 °C以下となり、1時間後には0.1 °C以下の誤差を持つ



◆ 3．TPTデータ（設定温度30 °C, 40 °C）を用いたベイズ推論による地中熱交換器の設計パラメータの推定



Bayesian inference of GSHP design parameters using two TPT datasets