

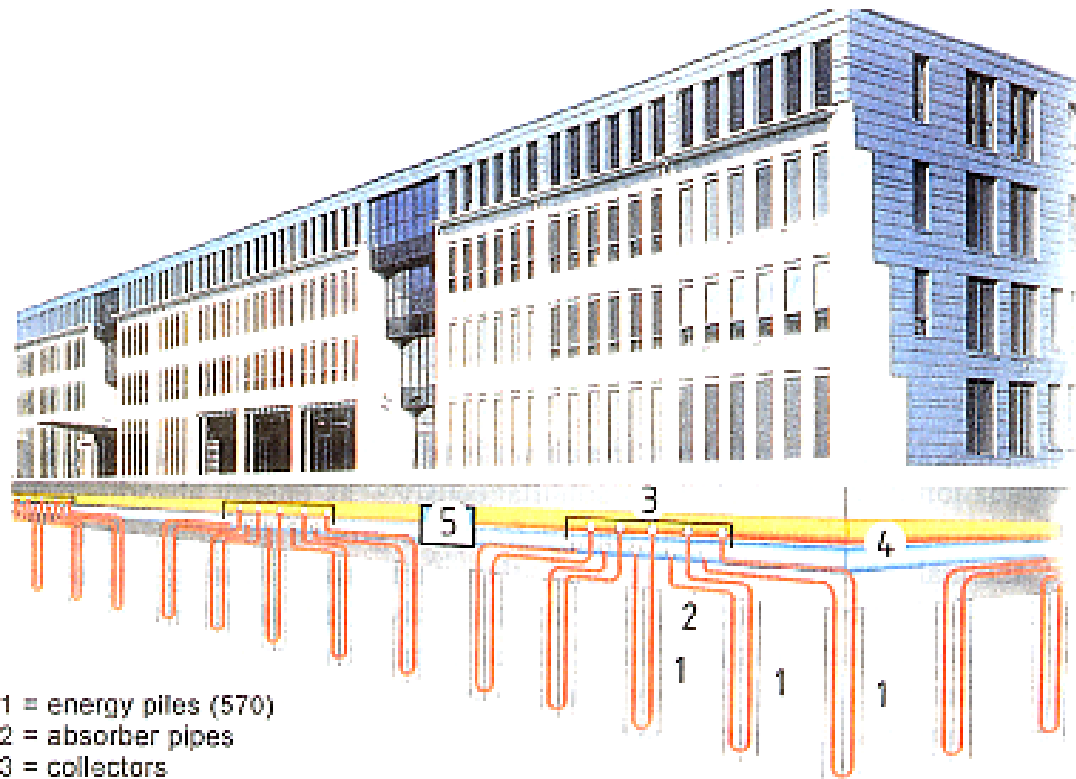
地中熱利用促進協会  
各種杭を利用した地中熱利用シンポジウム  
2007.12.18

# 基礎杭方式地中熱利用システムの 計画と設計方法について

長野克則  
北海道大学大学院工学研究科  
教授  
nagano@eng.hokudai.ac.jp



**建物の基礎杭を地中熱交換器として利用するシステム：  
欧州では“ Energy Pile System ” と呼ばれている  
（ 実施例は1980年代以降 ）**



- 1 = energy piles (570)
- 2 = absorber pipes
- 3 = collectors
- 4 = main pipe
- 5 = heating / cooling centre

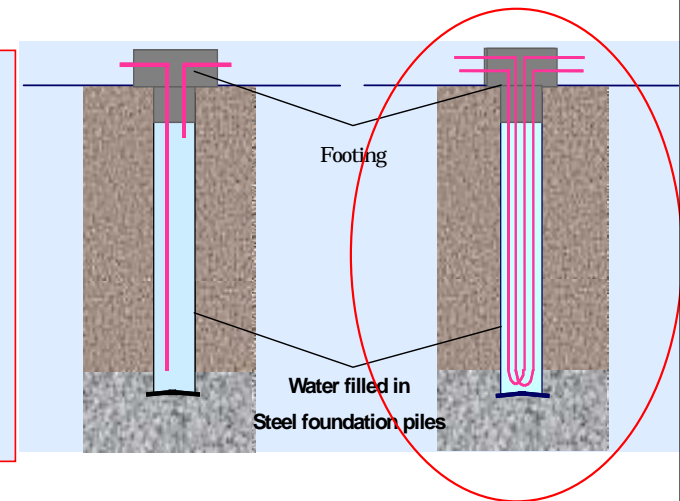
# 建物基礎杭を地中熱交換器とする方法

## 杭の種類

1. 場所打ち杭
2. PHCパイプ(既製コンクリート杭)
3. 回転圧入鋼管杭

## 基礎杭を地中熱交換器とする場合の熱交換の方法

1. 直接: 水封入、封入水の循環
2. 間接: 水封入、Uチューブ間接
3. 間接: セメント封入、Uチューブ間接



# 基礎杭利用地中熱利用システムの計画・設計

## 特に、基礎杭利用地中熱交換器規模の算定

- 基礎杭の種類による採熱量、放熱量の違い
- 杭内部の熱交換仕様はどのように考えればよいのか？
- 永続的に利用できるのか？
- 1mあたり何Wの出し入れが出来るのか？
- どのくらいの間、安定的に出し入れ出来るのか？
- そのための設計条件をどのように設定すればよいのか？

# 1mあたり何Wの出し入れが出来るのか？

- 基礎杭の材料(既成コンクリート、場所打ちコンクリート、鋼管など)
  - 口径(十数cm ~ 2m規模まで)
  - 熱交換方式(モルタル、水間接、水直接)
- 
- 基礎杭の有効熱交換深さ(長さ)
  - 地盤の有効熱伝導率
  - 地下水流れの有無、認められる場合には速度

# Kelvin 卿の線熱源理論

■  $T^* = I(X)$

- $T^*$ : 無次元温度 ( $= 2 \sqrt{t} \sqrt{a} T / q$ )
- $X$ : 無次元時間の逆数 ( $= r / 2 \sqrt{a t}$ )
- $I(X)$ : 無次元温度応答 ( $= \int_0^X e^{-x^2} dx$ )

ここで、

- $q$ : 線源の単位長さあたりの発熱量 (W/m)
- $k$ : 土壌の有効熱伝導率 (W/m/K)
- $T$ : ある位置  $r$ 、ある時間  $t$  の温度 ( )
- $a$ : 土壌の温度伝播率 ( $= k / \rho c_p$ ) ( $1/m^2$ )
- $c_p$ : 土壌の比熱 (kJ/kg/K)
- $\rho$ : 土壌の密度 ( $kg/m^3$ )

## Kelvin の線熱源理論式の近似式

$X \leq 0.3$  :  $I(X) = -0.9945 \ln(X) - 0.2519$

$0.3 < X \leq 1.0$  :  $I(X) = 2.457 \exp(-3.096X)$

$X > 1.0$  :  $I(X) = 7.0 \exp(-4.07X)$

# 住宅用基礎杭地中熱交換器の簡易設計

- Kelvin卿の線熱源理論の応用
- 年間灯油1500Lの暖房(融雪)エネルギー  
= 灯油発熱量1300Lの暖房負荷
- 地中からの採熱量(ヒートポンプのCOPを4.5とすると)  
=  $1300\text{L} \times 8900\text{kcal/L} \times (4.5-1.0)/4.5$   
= 9.0 Gcal
- 暖房期間に平均的に地中からくみ上げる採熱量  
 $9.0\text{ Gcal}/180\text{days}/24\text{h}=2083\text{ kcal/h}$
- 地中熱交換器の1本の有効長さを5m、それを20本、全長は100m
- 暖房期間180日の単位熱交換器長さあたりの採熱量は、  
 $20.8\text{ kcal/m}=25\text{ W/m}$

# 1mあたり25Wを連続地中に投入した場合180 日後の管壁相当位置の温度

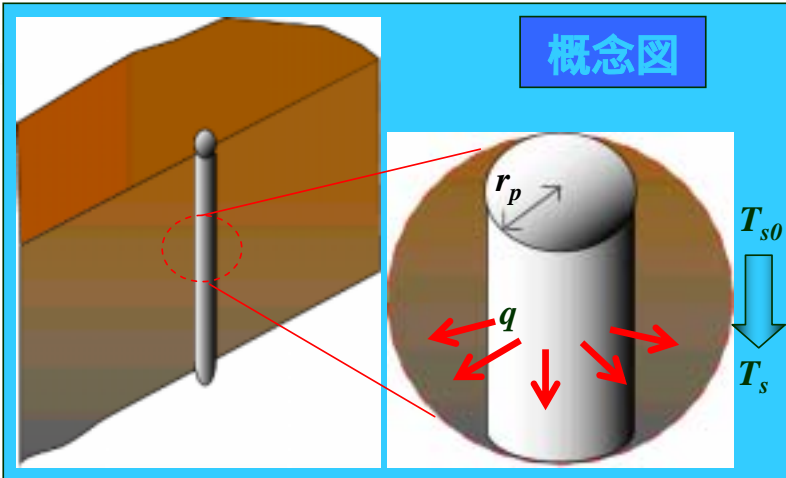
土壌の有効熱伝導率 $2.0\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

土壌初期温度 [ ]	10	10	10
管半径[m]	0.05	0.075	0.1
熱伝導率[W/mK]	2	2	2
熱容量[kJ/m <sup>3</sup> K]	2800	2800	2800
放熱量 [W]	25	25	25
管長さ[m]	1	1	1
期間 [day]	180	180	180
無次元時間 ( $=r/2/(at)^{0.5}$ )	0.00750086	0.01125129	0.01500171
無次元温度応答	4.621	4.222	3.940
管壁相当地点温度 [ ]	19.19	18.40	17.84

初期温度から7.8 の温度変化がある



基礎杭の表面温度変化を精度良く算出するためには、  
**無限円筒表面熱流応答理論**の方が良い。  
 特に時間変化の重ね合わせをするならば線原理論では限界がある。



特長

- 1.理論解を用いているので、短時間での計算が可能。
- 2.熱交換器内部の熱容量が加味できるため、特に基礎杭利用などの管径の大きい熱交換器には有効。

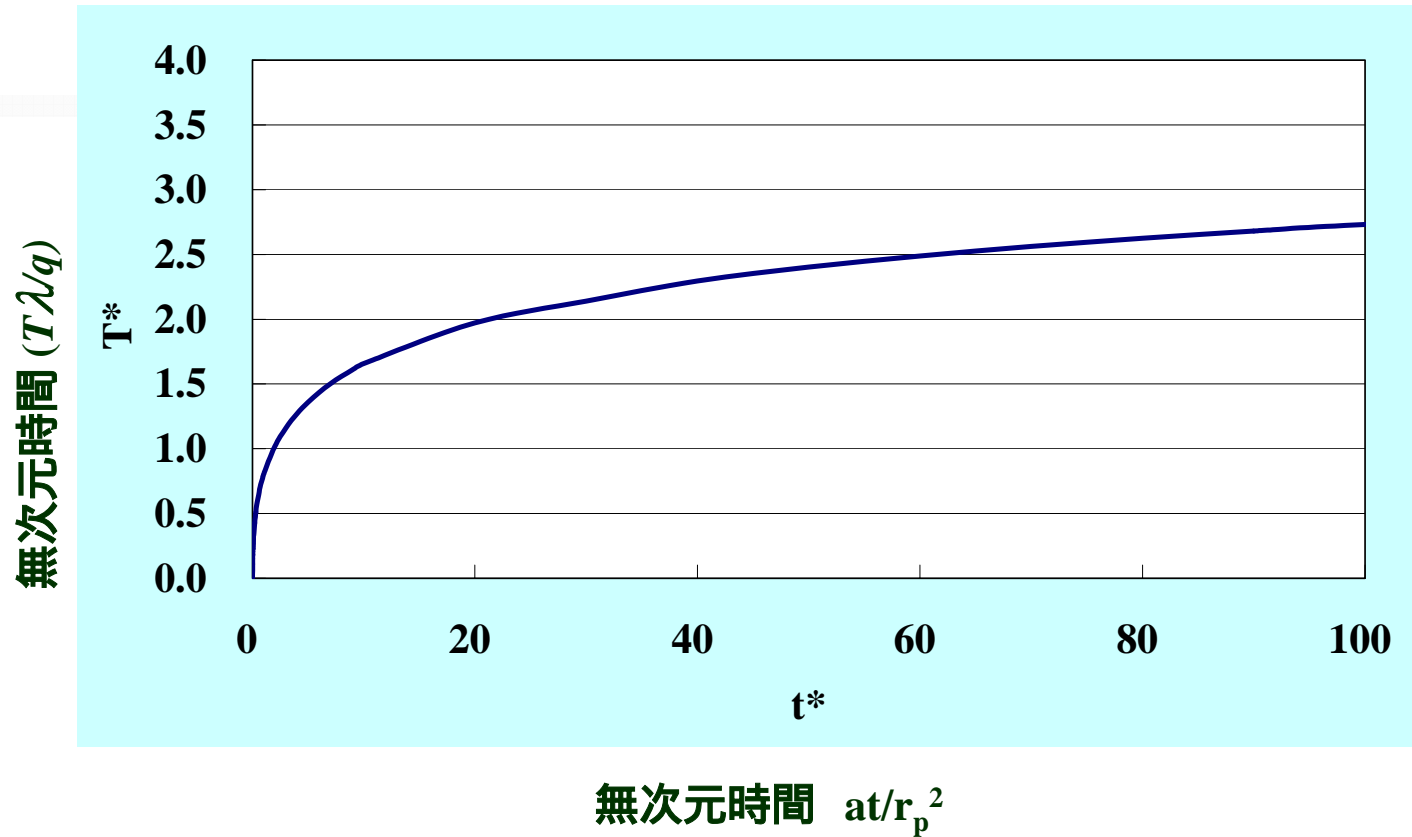
表面熱流 $q$ に対しての、経過時間 $t$ における、管表面 $r = r_p$ の温度 $T_s$

$$T_s \Big|_{r=r_p} = T_{s0} - \frac{2q}{\pi\lambda_0} \int_0^{\infty} (1 - e^{-au^2t}) \frac{J_0(ur)Y_1(ur_p) - Y_0(ur)J_1(ur_p)}{u^2[J_1^2(ur_p) + Y_1^2(ur_p)]} du$$

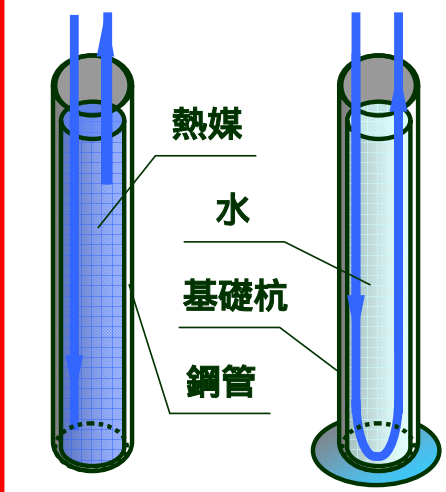
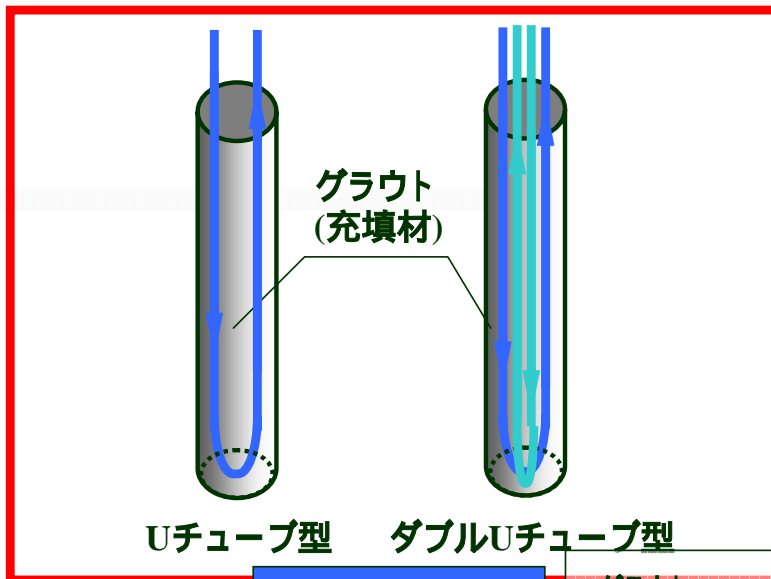
記号  $T$ : 温度 [ ]  $J_x$ :  $x$ 次の第一種ベッセル関数  $Y_x$ :  $x$ 次の第二種ベッセル関数  
 $t$ : 時間 [h]  $r$ : 軸方向距離 [m]  $a$ : 温度伝播率 [m<sup>2</sup>/s]  
 $q$ : 単位面積あたりの熱流 [w/m<sup>2</sup>]  $u$ : 個有値 : 熱伝導率 [W/(m・K)]

添え字  
 $p$ : 熱交換器表面  $s$ : 土壌  
 $s_0$ :  $t=0$ における土壌

# 無限円筒表面熱流応答理論の円筒表面温度の時間変化



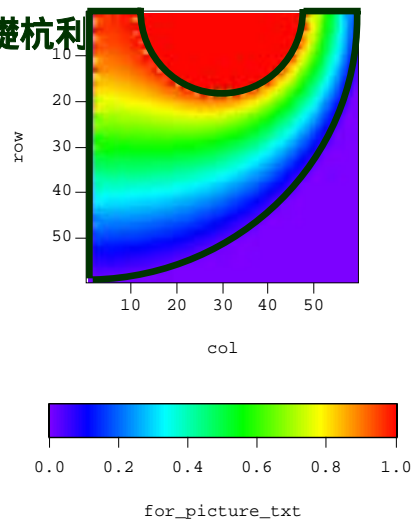
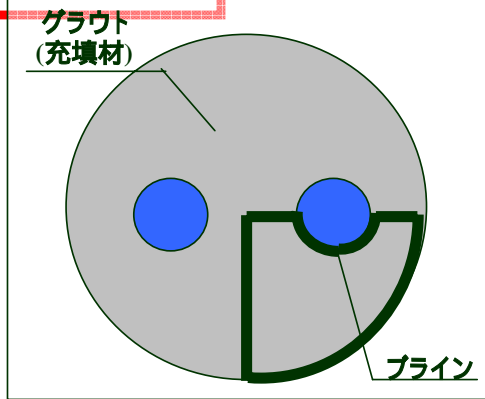
# 地中熱交換器の種類による杭内部の熱抵抗の違い



鋼管井戸型      基礎杭利

内部熱抵抗値  
を境界要素法  
によって算出

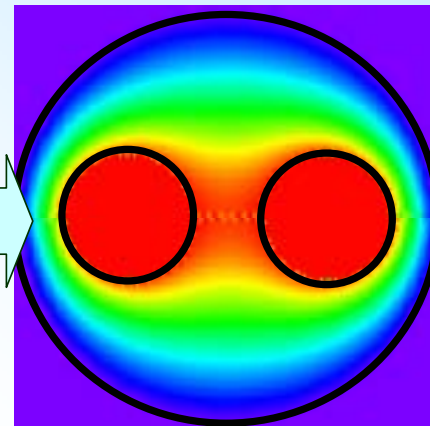
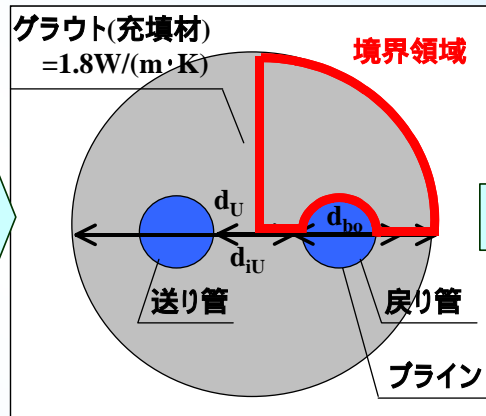
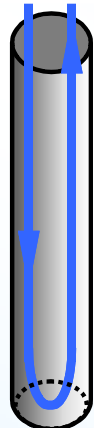
Uチューブ型の計算例(左)  
と計算結果(右)



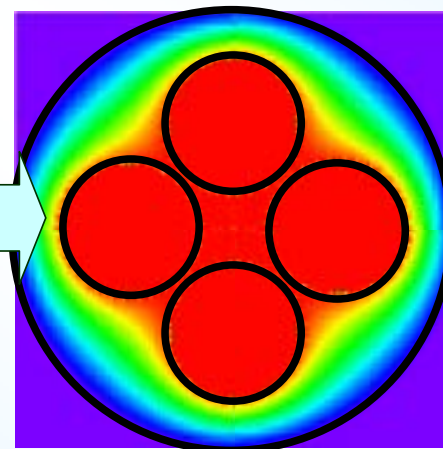
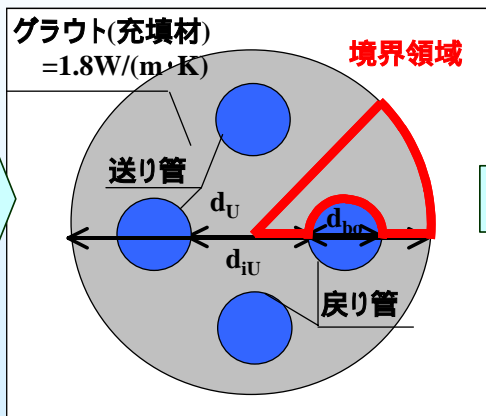
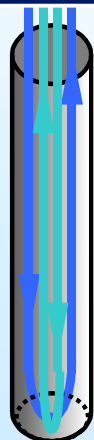
境界条件  
境界、断熱境界  
境界、ポテンシャル境界  
(温度ポテンシャル値境界 =1、境界 =0)

# 境界要素法による地中熱交換器内部熱抵抗計算結果の一例

## シングルUチューブの計算例



## ダブルUチューブの計算例



# 鋼管基礎杭による採熱試験 (北大・新日鐵の共同研究)

鋼管基礎杭を熱交換器として使用した場合の採熱量・放熱量の検討  
内部挿入Uチューブの最適本数、内部水とUチューブとの熱伝達率の把握

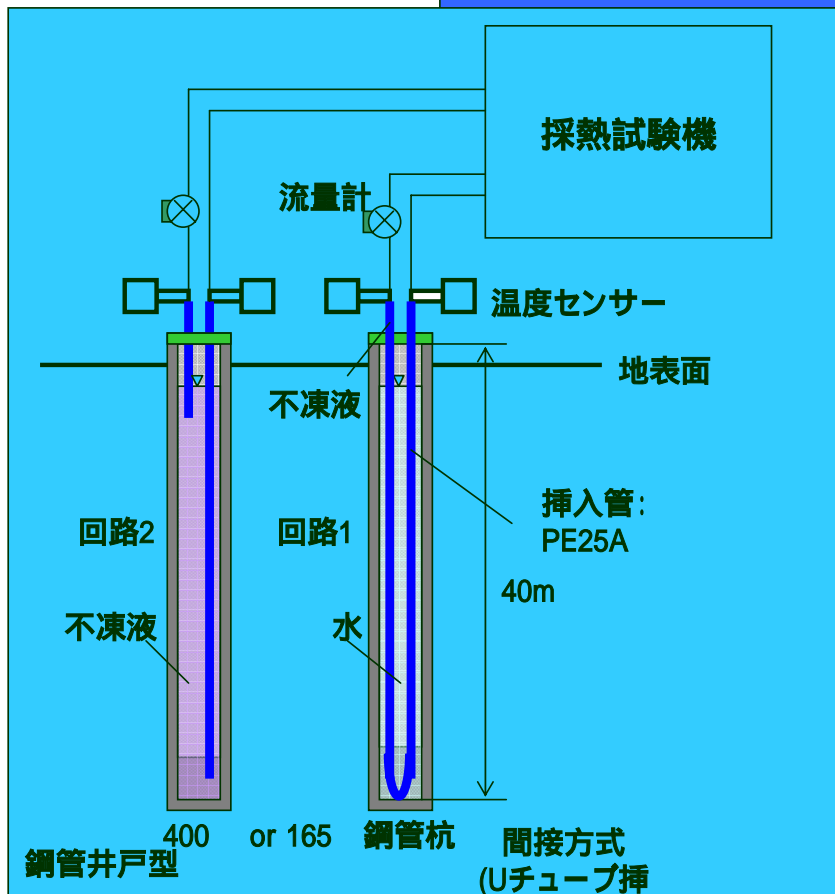
鋼管挿入時



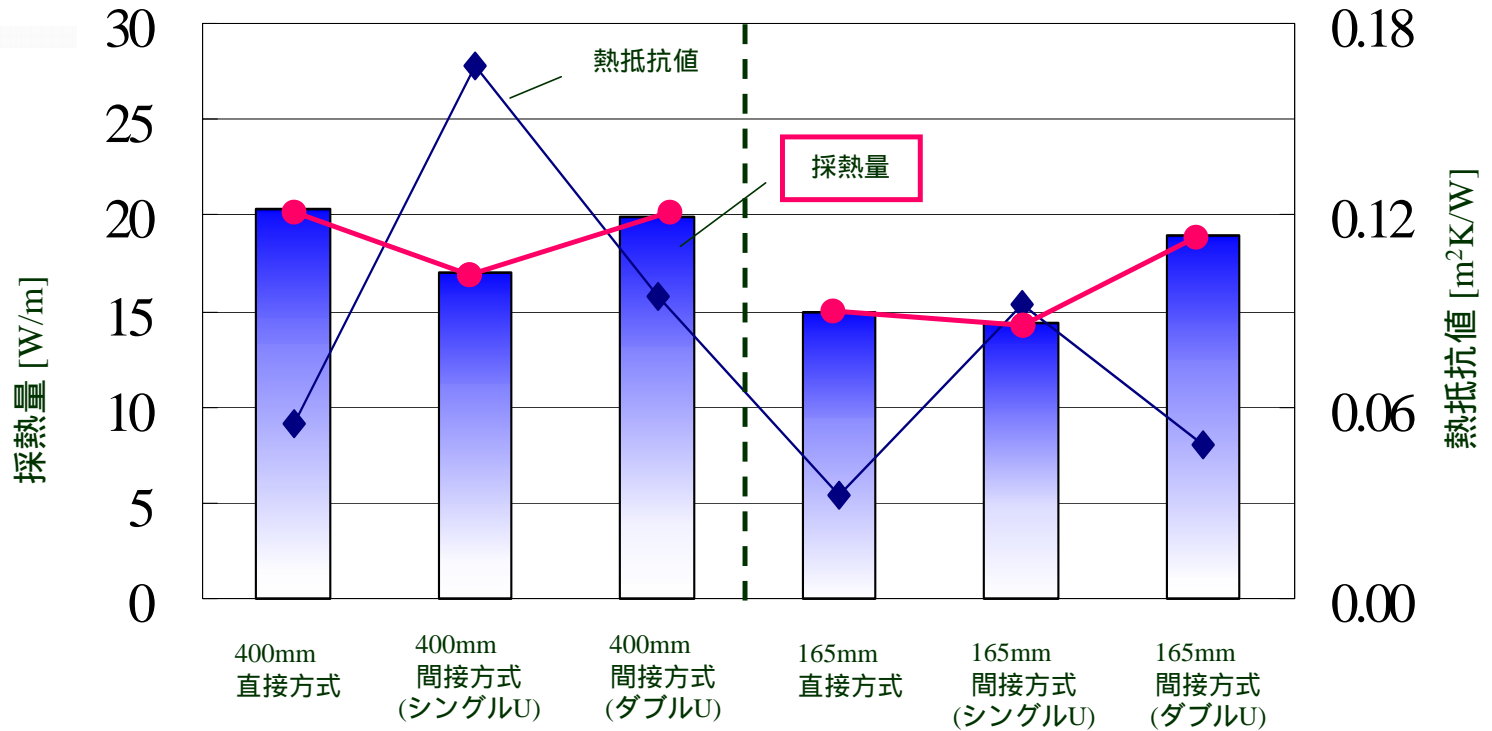
試験装置外観



試験装置系統図

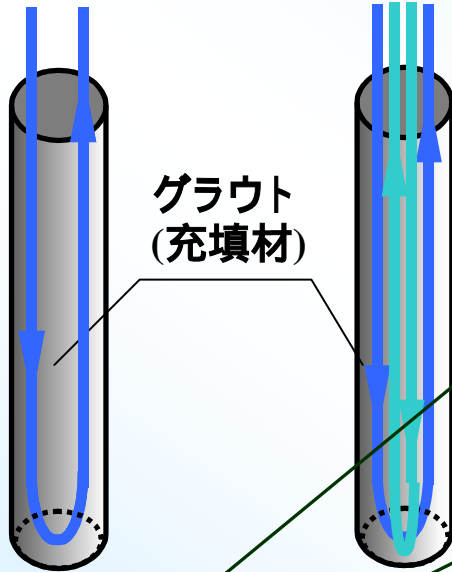


# 鋼管杭内の仕様と鋼管杭口径の違いによる採熱量、熱抵抗値の変化



# 地中熱交換器内部の熱容量を考慮する必要がある

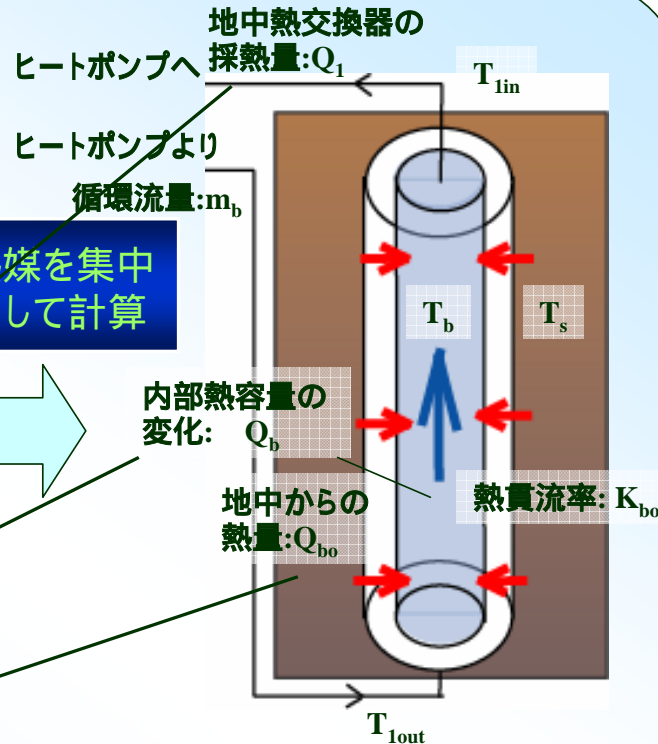
## 地中熱交換器



グラウト  
(充填材)

Uチューブ型    ダブルUチューブ型

内部の熱媒を集中  
常数系として計算



地中熱交換器の  
採熱量:  $Q_1$

ヒートポンプへ

$T_{in}$

ヒートポンプより  
循環流量:  $m_b$

$T_b$

$T_s$

内部熱容量の  
変化:  $Q_b$

地中からの  
熱量:  $Q_{bo}$

熱貫流率:  $K_{bo}$

$T_{out}$

## 地中熱交換器内部熱収支式

$$Q_1 = \Delta Q_b + Q_{bo}$$

$$c_b \rho_b m_b (T_{out} - T_{in}) = c_b \rho_b V_b \frac{dT_b}{dt} + K_{bo-out} A_{bo-out} (T_s|_{r=r_{bo}} - T_b)$$

# 鋼管基礎杭による採熱試験 (北大・新日鐵の共同研究)

鋼管基礎杭を熱交換器として使用した場合の採熱量・放熱量の検討  
内部挿入Uチューブの最適本数、内部水とUチューブとの熱伝達率の把握

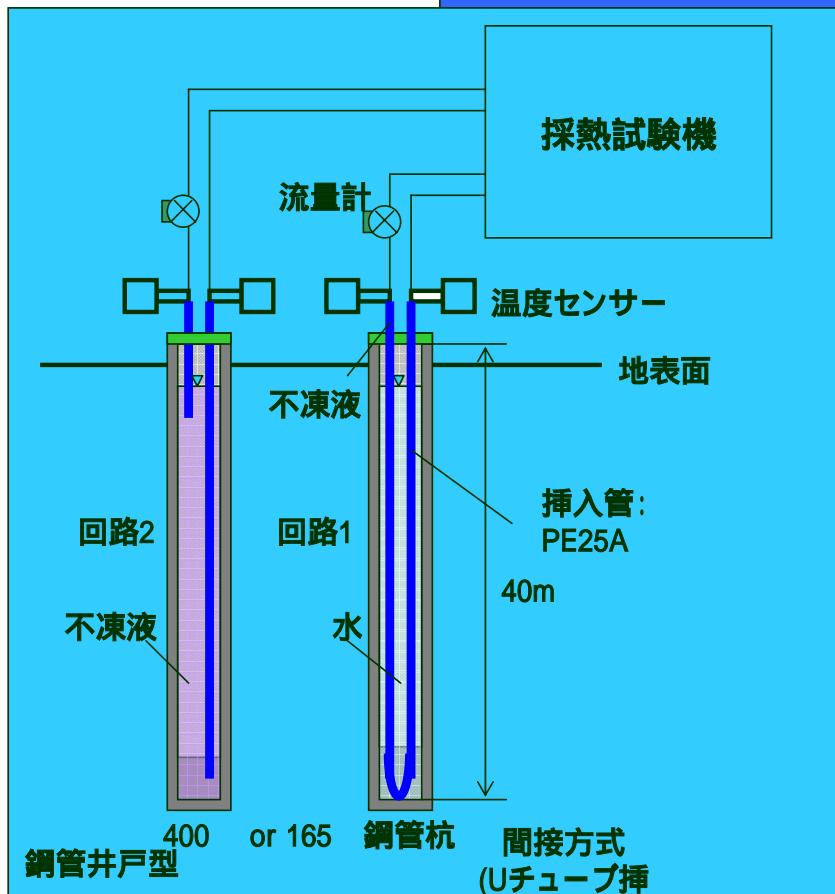
鋼管挿入時



試験装置外観

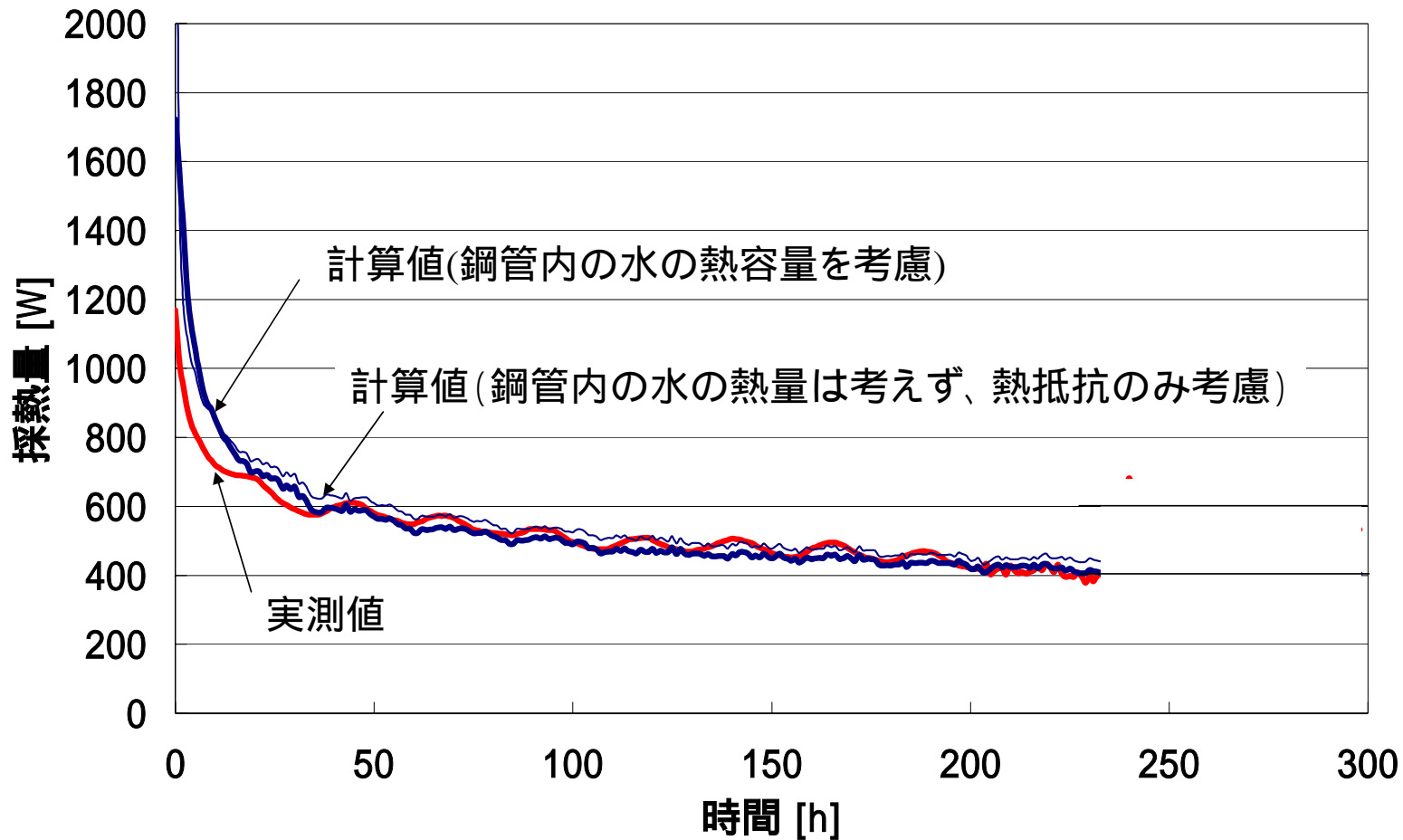


試験装置系統図





口径165 長さ40mの鋼管杭にUチューブを挿入した採熱実験  
周囲土壌温度約9℃、不凍液循環温度2℃



# 間接熱交換方式の設計性能予測ツールの開発

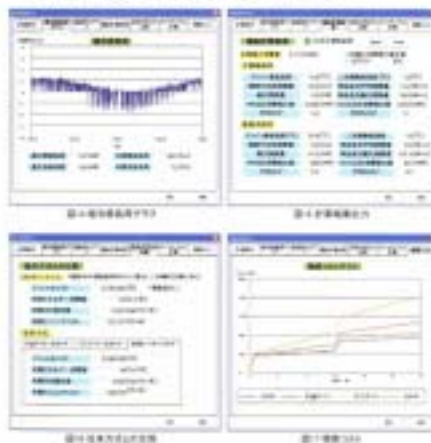
## GSHP設計性能予測ツールの現在までの状況

- 2004年 北海道大学より特許出願(特願：2004-276099\*)
- 2005年 米国特許取得(US Patent：US 7,113,888 B2\*)
- 2006年 日本国内で製品化・販売開始

\* 発明者：長野克則・葛隆夫、  
出願、特許取得は北海道大学  
と新日鉄エンジニアリングの  
二者で共同

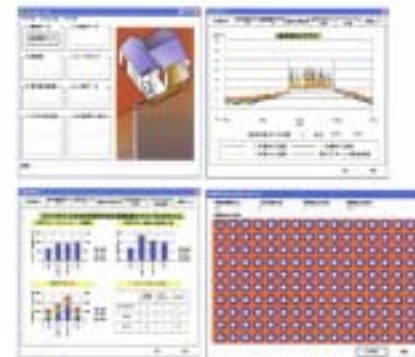
製品化・販売されている  
設計・性能予測ツール  
GroundClub

地中熱源ヒートポンプの温度特性予測や、経済性、  
環境性評価シミュレーションが可能です



地中熱源ヒートポンプシステム性能予測プログラム

ブランドクラブ  
**Ground Club**



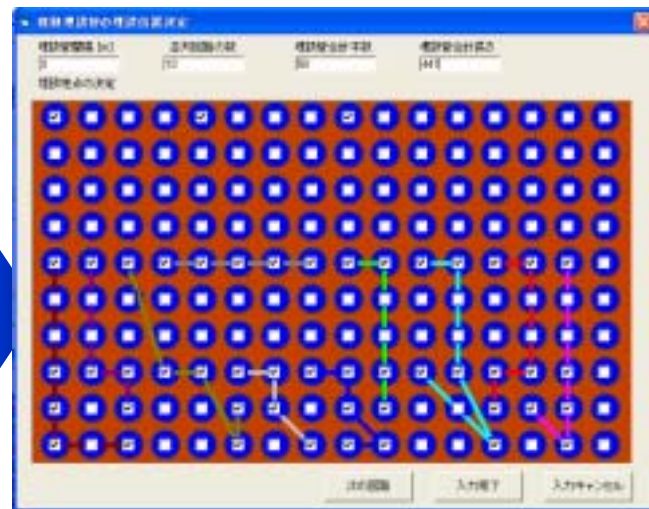
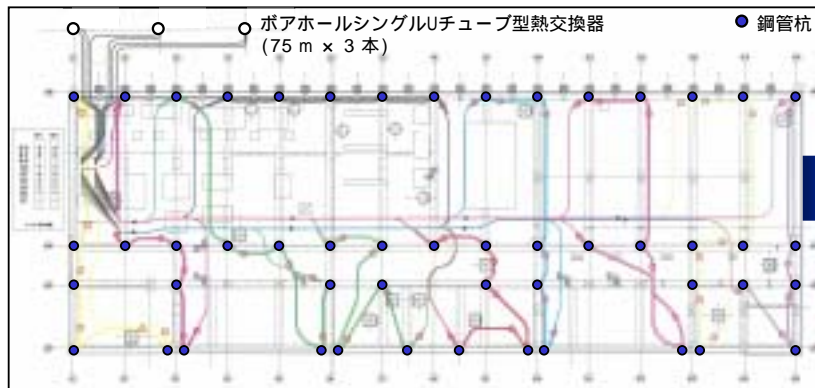
# GSHPシステム設計・性能予測ツールの特長

## 任意配置した埋設管に対する地中温度計算

従来のツール: 予め設定されている配置のみ計算可能

本ツール: 任意配置した埋設管の採放熱に対して、地中温度の計算が可能

複数埋設する地中熱交換器の入力画面の一例



# 長野研究室で本設計ツールを用いて 計画・設計に協力したGSHP実例

## 1. 札幌市立大学(北海道)



2006年4月より運転開始、現在運転中

### システム概要

- 鋼管杭(4.7m × 51本)を地中熱交換器として用いたシステム
- ボアホール地中熱交換器(75m × 3本)も併用
- ヒートポンプ圧縮機容量は20馬力
- GSHPシステムの出力は外調機の負荷に対応

## 2. 病院(関東地方)



2007年12月竣工予定

### システム概要

- PHC杭(20m × 38本)を地中熱交換器として用いたシステム
- ヒートポンプ圧縮機容量は20馬力
- 昼夜間・季節間蓄熱効果を利用したGSHPシステム

## 地下水流れによる採熱量、放熱量の増大効果を組み入れる

### 地下水流れがある場合の増大効果の実証試験、 および半理論的計算手法の開発

- ・地下水流れを有する砂層内採放熱実証実験
- ・模擬地下水流れを有する砂層内のサーマルプローブ法実験による温度応答の検討
- ・地下水流れを有する地中温度の計算手法の開発

### 地下水流れの予測、測定方法開発

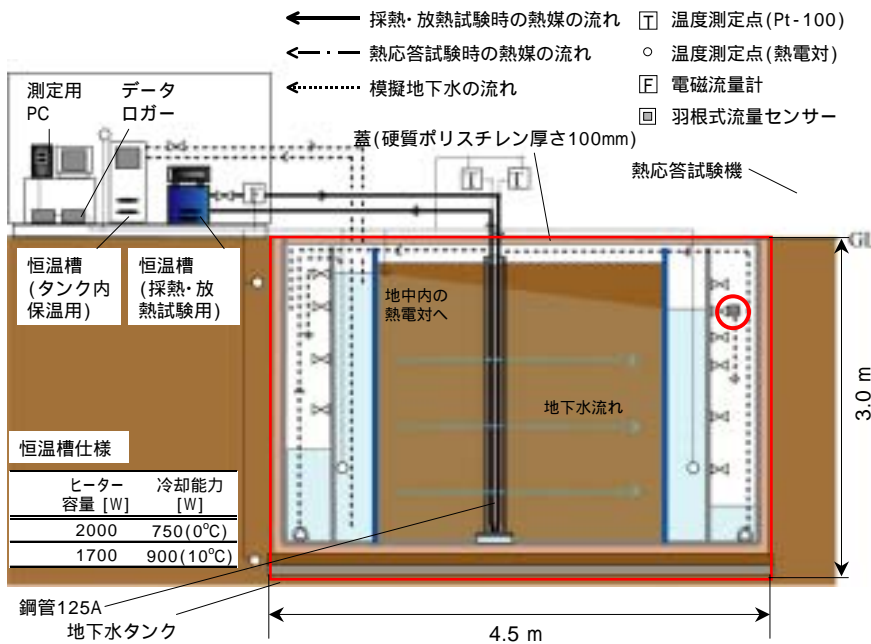
- ・円筒発熱体による地下水流れ予測手法とその実証試験

### 本計算手法の応用

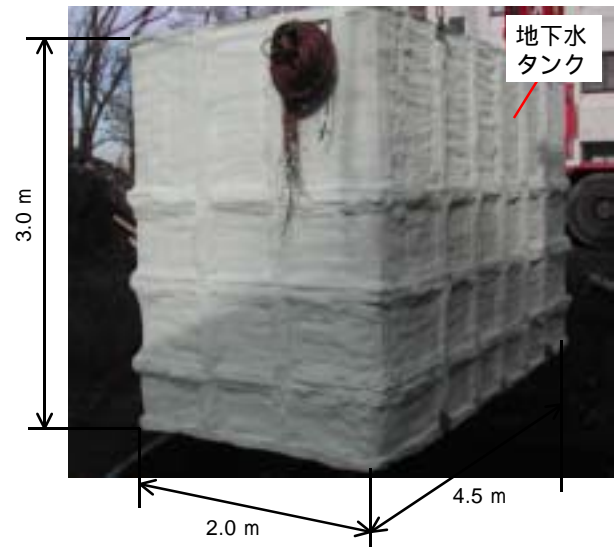
- ・札幌市立大学桑園キャンパスのGSHPシステム設計の実例
- ・地下水流向・流速測定装置の開発

# 地下水流れを有する砂層内採放熱実証実験

## 実証実験系統図



## タンク埋設時



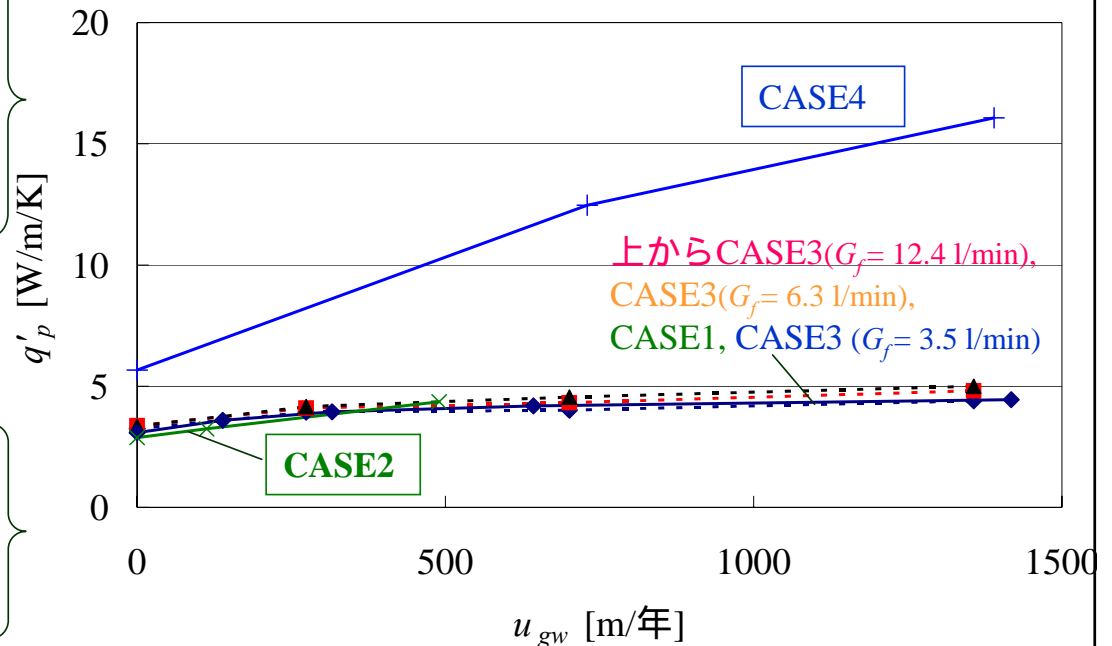
# 地下水流れ場の採熱・放熱実証実験の結果

$q_p'$ : 地下水流速に対する単位長さ、単位温度差あたりの採熱量

CASE1, CASE3: 放熱実験  
シングルUチューブ型  
循環流量 3.5 L/分

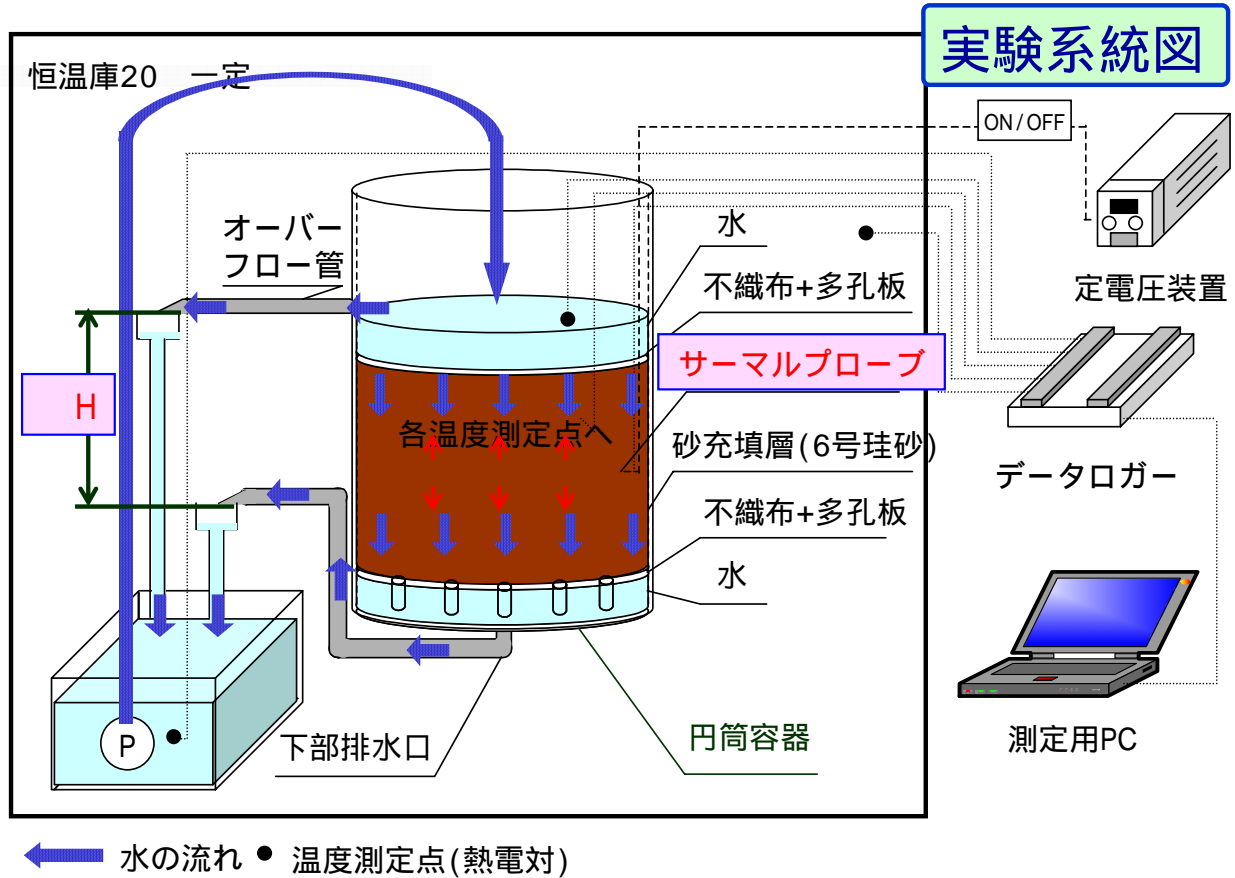
CASE2: 採熱実験  
シングルUチューブ型  
循環流量 3.5 L/分

CASE4: 放熱実験  
二重熱交換器型  
循環流量 12 L/分  
(熱抵抗が小さい場合)



# 地下水流れを有する地中温度応答の検討

## 模擬地下水を有する砂層内のサーマルプローブ法実験

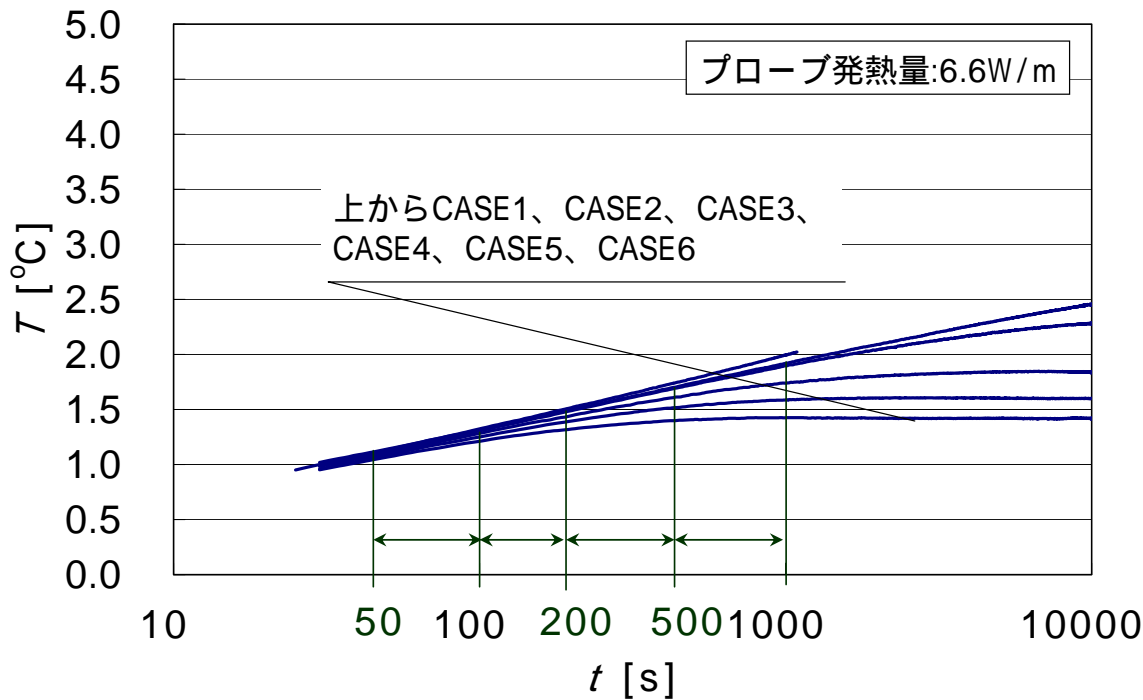




# 地下水流れを有する地中温度応答の検討

## 模擬地下水を有する砂層内のサーマルプローブ法実験

### 実験開始からのプローブ中心部温度変化

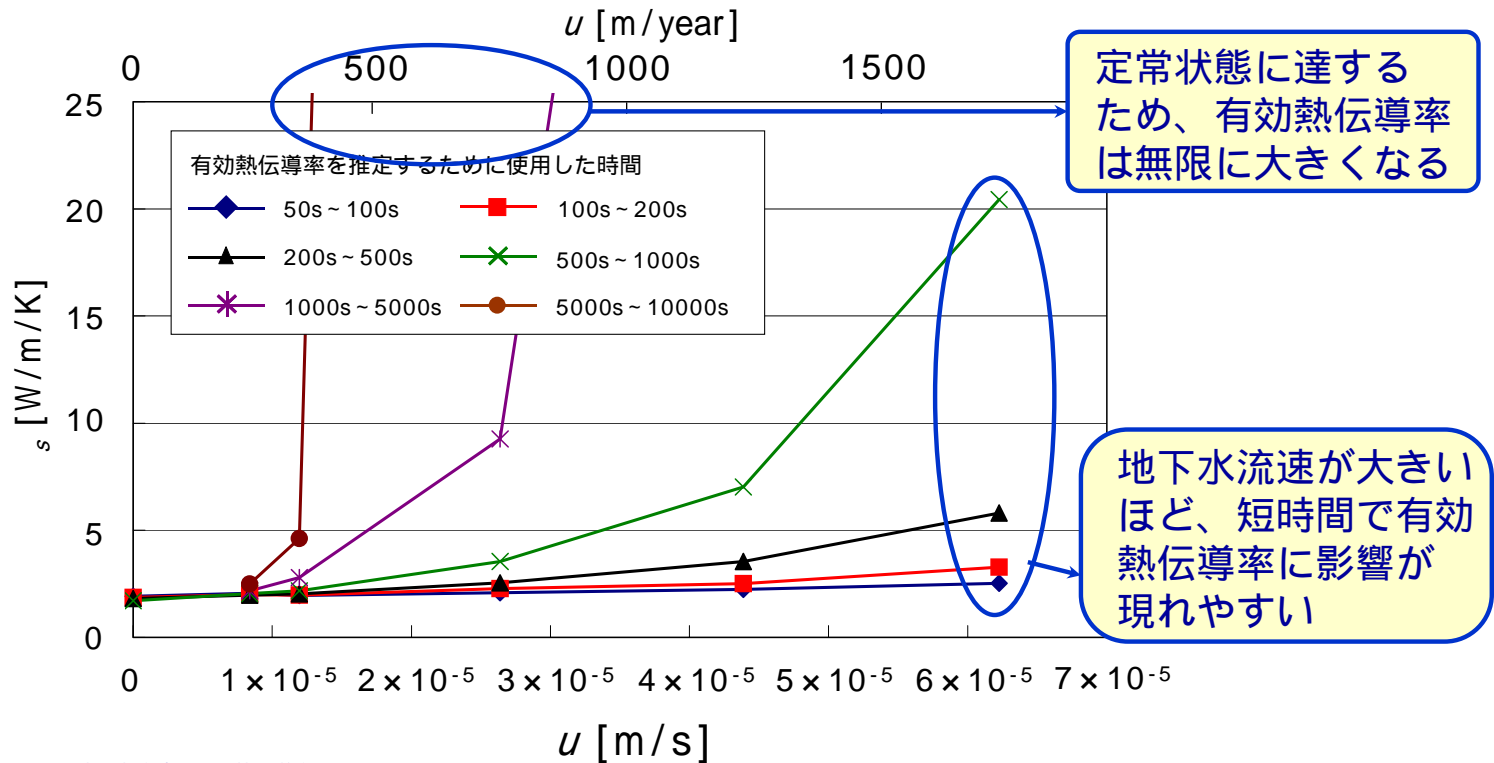


記号  $q'$ : 長さあたりの加熱量 [W/m]、 $T$ : 温度 [°C]、 $t$ : 時間 [s]、 $k$ : 熱伝導率 [W/m/K]

# 地下水流れを有する地中温度応答の検討

## 模擬地下水を有する砂層内のサーマルプローブ法実験

使用データの区間に対して得られる有効熱伝導率の相違



# 地下水流れを有する地中温度計算手法の検討

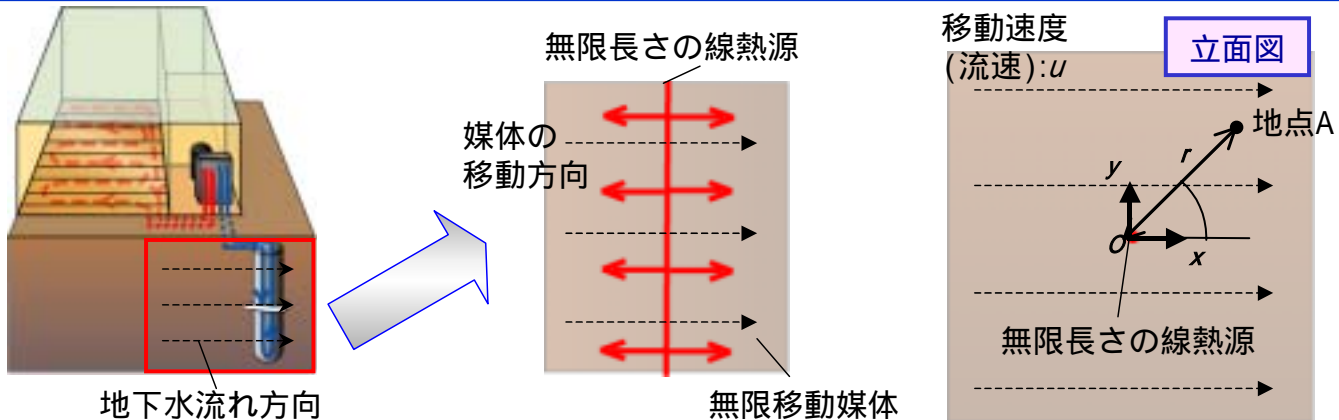
## 地下水流れを有する地中温度計算手法

有効熱伝導率を  
変更して評価

地下水流れを有する場合  
の温度応答を重ね合わせる

応答の計算方法：  
理論計算or数値計算

### 移動線熱源温度応答理論による地下水流れを有する地中温度計算



### 任意の地点Aについての地中温度変化(Diaoら,2005)

$$\Delta T_s = \frac{q'}{4\pi\lambda_s} \int_0^{\frac{4a_s t}{r^2}} \frac{1}{(t-t')} \exp\left(-\frac{\{x-U(t-t')\}^2 + y^2}{4a_s(t-t')}\right) dt' \quad \Rightarrow \quad \Delta T_s = \frac{q'}{4\pi\lambda_s} \exp\left(\frac{Ur}{2a_s} \cos \varphi\right) \int_0^{\frac{4a_s t}{\beta}} \frac{1}{\beta} \exp\left(-\frac{1}{\beta} - \frac{U^2 r^2 \beta}{16a_s^2}\right) d\beta$$

記号  $a$ : 温度伝播率 [ $m^2/s$ ]、 $q'$ : 熱流 [ $W/m^2$ ]、 $r$ : 径方向距離、半径 [ $m$ ]、 $T$ : 温度 [ $^{\circ}C$ ]、 $\lambda$ : 熱伝導率 [ $W/m/K$ ]、 $U$ : 修正地下水流速 ( $=uc_w / w / c_s$ ) [ $m$ ]、 $\varphi$ : ラジアン角度、 $c_w$ 、 $c_s$ : 水と土壌の熱容量 [ $kJ/m^3$ ] 添え字  $s$ : 土壌

# 地下水流れを有する地中温度計算手法の検討

## 地下水流れを有する地中温度計算手法

### 移動線熱源温度応答理論

→長所：短時間での計算が可能

短所：実際の地中熱交換器の様に円筒の場合、表面温度の誤差が大

### 数値解析(差分法、有限要素法等)

→長所：再現性が理論計算より高い

短所：計算時間を要するためツール内への組み込みは困難

理論解析と数値解析の計算結果を比較し、理論解析で計算した温度応答に数値解析の温度応答を得るための補正を行う

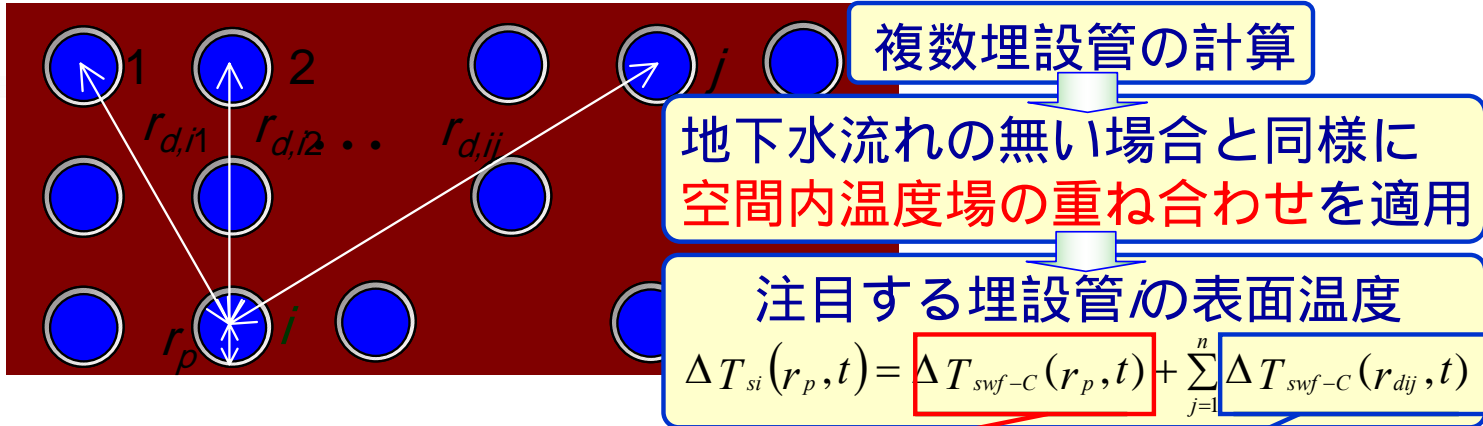
時間、距離、角度に対する補正係数を関数化

2006年 北海道大学と新日鉄エンジニアリング(株)  
により特許出願(特願2006-269222)

かつ理論解析の高速計算を行うことが可能となる

# 地下水流れを有する地中温度計算手法の開発

## 地下水流れを有する地中温度計算手法の開発



### 自身の採熱による温度応答

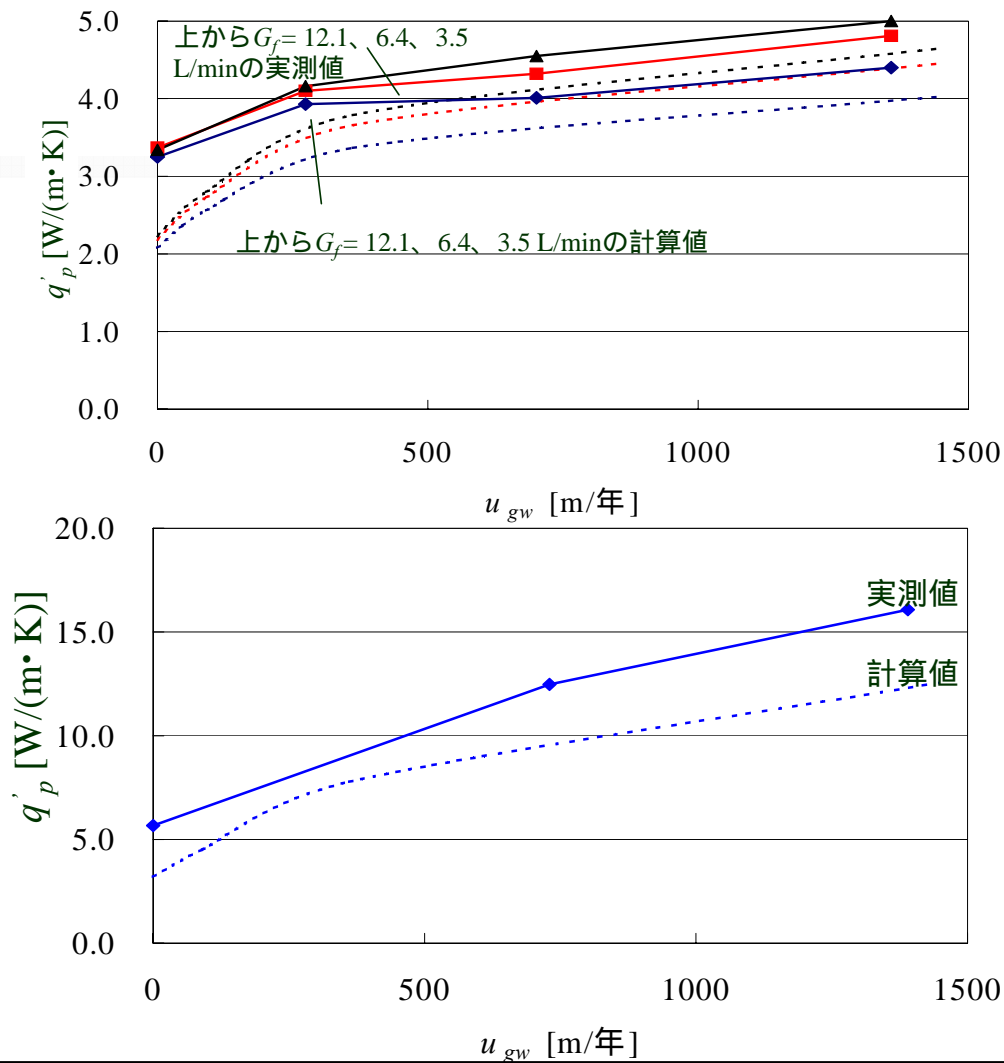
$$\Delta T_{swf-C}^*(1, t^*) = \sum_{\tau^*=0}^{t^*} q^*(t^* - \tau^*) \frac{\partial T_{s-C}^*(1, \tau^*)}{\partial \tau^*} \times C_C(\tau^*)$$

### 周囲の採熱による温度応答

$$\Delta T_{swf-C}^* \Big|_{\varphi=\varphi} (r^*, t^*) \cong \sum_{i=1}^n \Delta T_{swf-Ck}^* \Big|_{\varphi=\varphi} + \sum_{\tau^*=t^*}^{t^*} q^*(t^* - \tau^*) \frac{\partial T_{swf-L}^* \Big|_{\varphi=0} (1, \tau^* r^{*2})}{\partial (\tau^* r^{*2})} C_R C_r C_\varphi$$

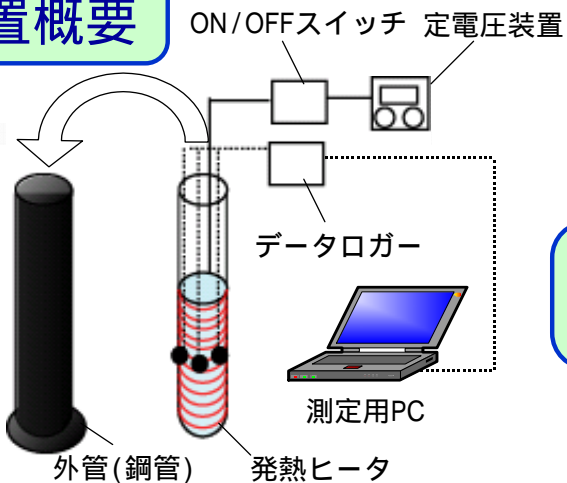
記号  $C_C$ : 地下水流れがある場合の地中温度を得るための補正係数 [-],  $C_R, C_r, C_\varphi$ : 移動線熱源温度応答と数値解析の比較によって得られる補正係数、  
 $T^*$ : 無次元温度 (=  $T_s / r_p / q$ ) [-],  $t^*$ : フーリエ数 (=  $at / r_p^2$ ) [-],  
 $q^*$ : 無次元化した熱流 (=  $q / q_0$ ) [-],  $q_0$ : 単位熱流 (=1) [W/m<sup>2</sup>],  $r^*$ : 無次元距離 [-]

# 地下水流れ場の採放熱実験結果と計算結果の比較

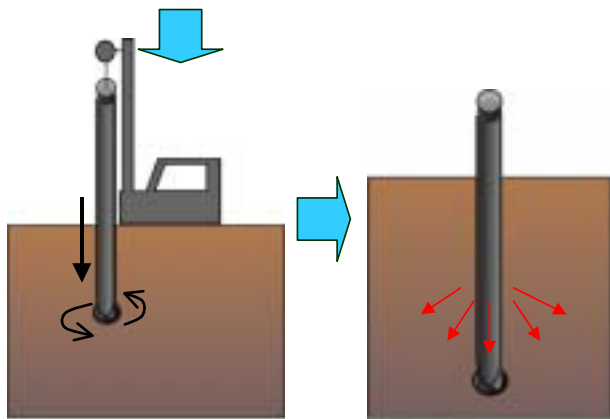


# 地下水の流向・流速測定装置の開発

## 装置概要

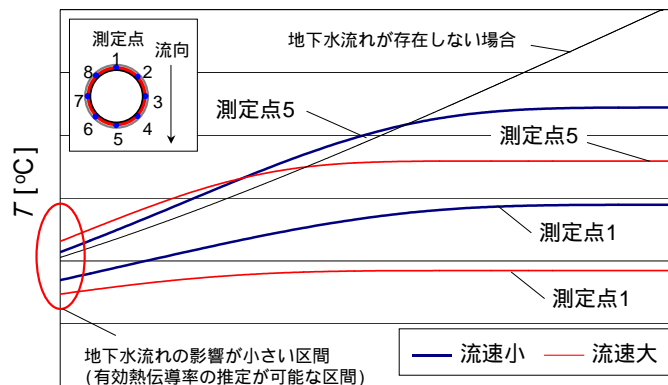
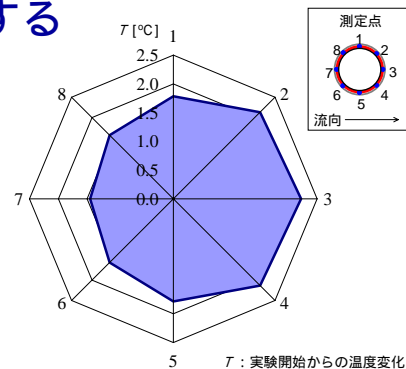


- 温度測定点 (熱電対)



装置を地中に埋設し、一定加熱を行い、温度分布と温度変化の傾向から、地下水流向と流速を推定する

## 温度分布(右)と温度変化(下)



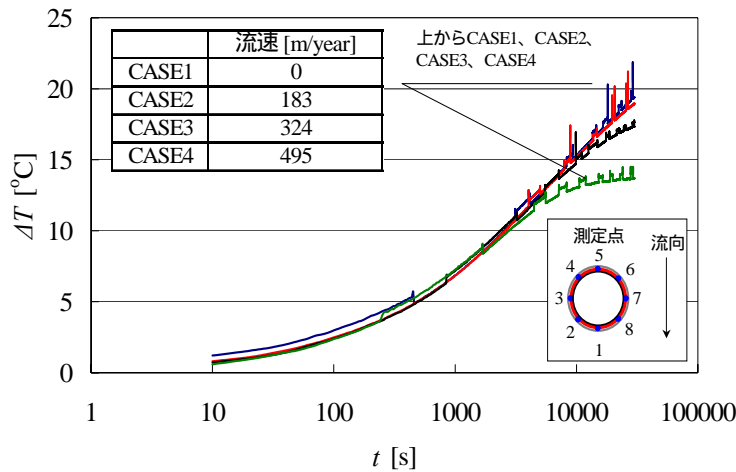
$\text{Ln } t$  [s]

$t$ : 実験開始からの経過時間  
 $T$ : 実験開始からの温度変化

# 地下埋設砂槽を用いた地盤熱特性調査装置試作機の基本特性の把握



地下タンク  
砂槽



温度変化は地下水流速により異なることを確認



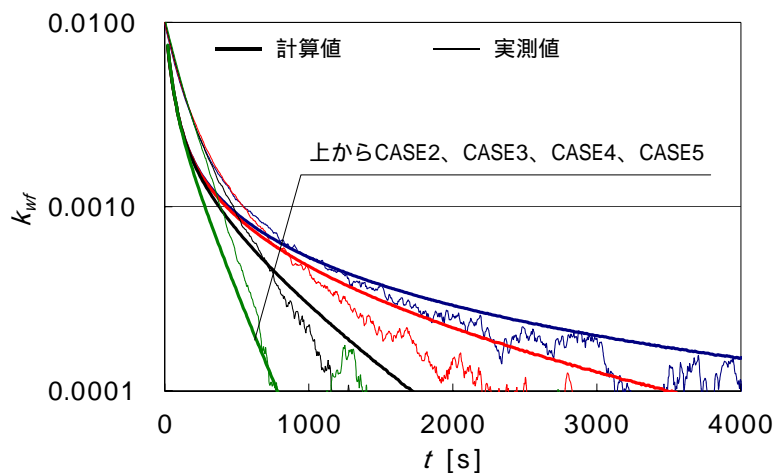
試作調査装置



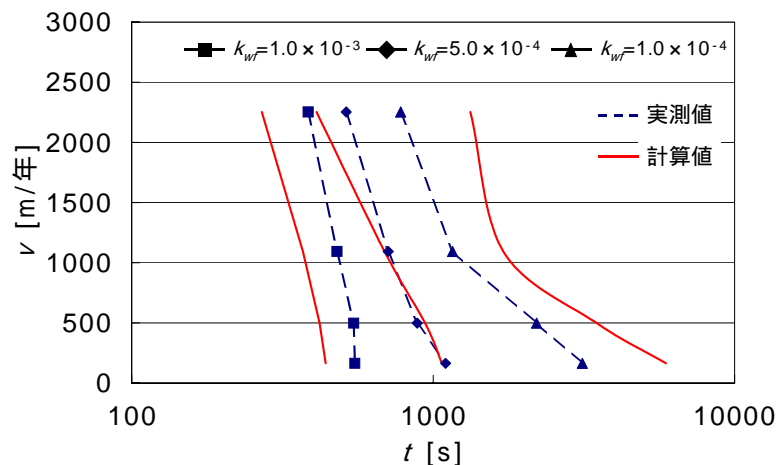
# 地下水流向・流速測定装置の開発

地下水流速の簡易的な推定方法 時間ごとの温度勾配の変化を計算し、温度勾配の到達時間から流速を推定

地下水流速に対する温度勾配の変化の比較



温度勾配の到達時間と地下水流速の関係

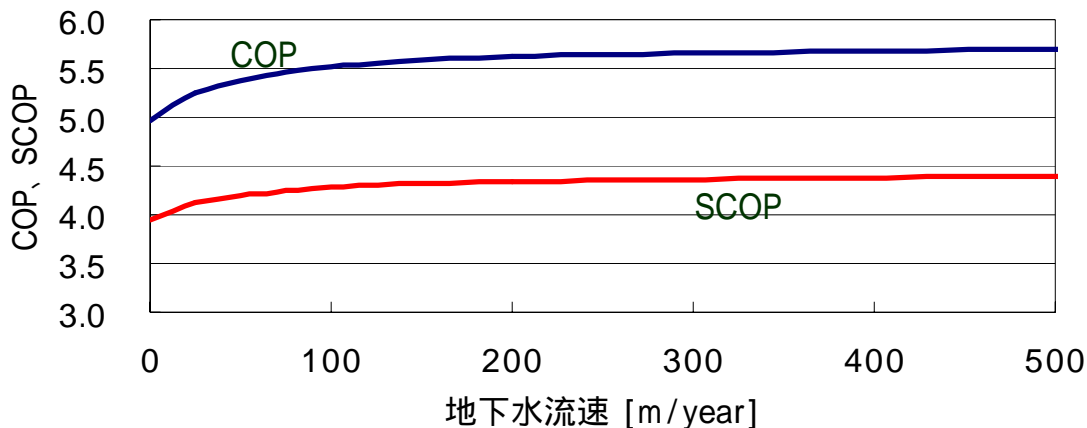


実験により、予め関係式を決定しておくことで、より簡易的に地下水流速を推定することが可能となる。

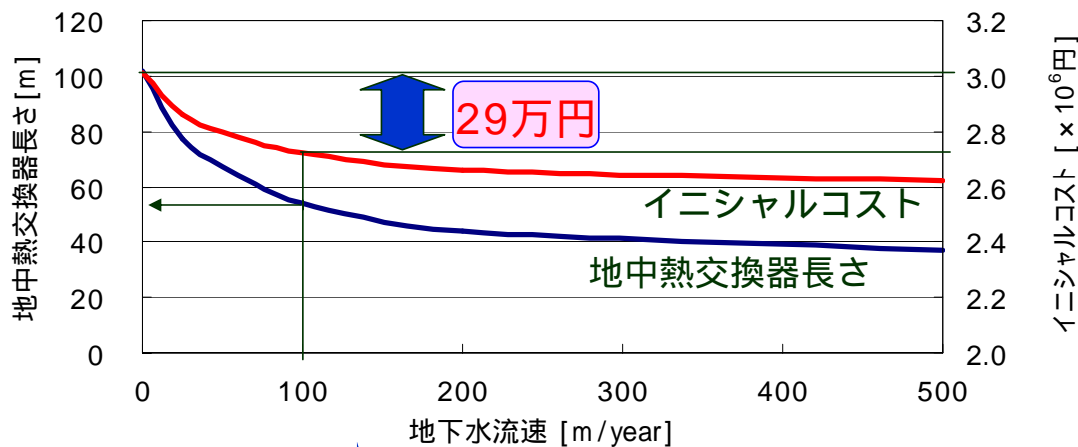
# 住宅GSHPシステムの地下水流れ効果の予測(1)

札幌の高断熱高気密住宅(面積130m<sup>2</sup>)への導入検討例

地中熱交換器長さ一定(100m)の場合の地下水流速に対する暖房期間平均COP、SCOP



地下水流速に対する運転可能最小地中熱交換器長さ

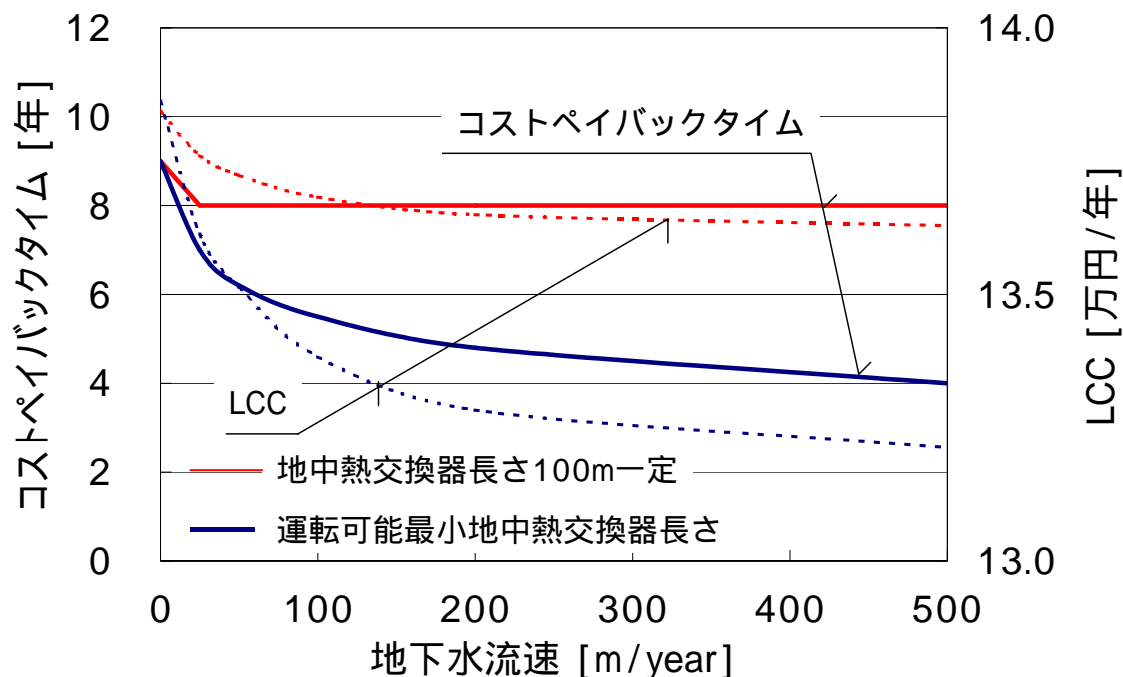


流速0m/yearの場合  $L_p=102$ m

流速100m/yearの場合  $L_p=54$ m

# 住宅GSHPシステムの地下水流れ効果の予測(2)

ライフサイクルコスト (LCC) とコストペイバックタイムの比較(対象システム:灯油ボイラシステム)



地下水流れに応じて地中熱交換器長さを短くすれば、LCC等に地下水流れの効果をもっと有効に反映できる

# 鋼管基礎杭利用地中熱ヒートポンプシステムの計画・設計とコミッショニング

## 札幌市立大学桑園キャンパス高層棟のGSHPシステム

世界初の鋼管基礎杭利用による  
非住宅用GSHPシステム

設計・性能予測ツールを用いた設計  
に基づき、計画・実施設計・施工が  
行われる

2006年冬期より本格的な暖房  
運転を開始

外観



鋼管杭  
埋設時



鋼管杭  
埋設後



Uチューブ挿入後  
の鋼管杭

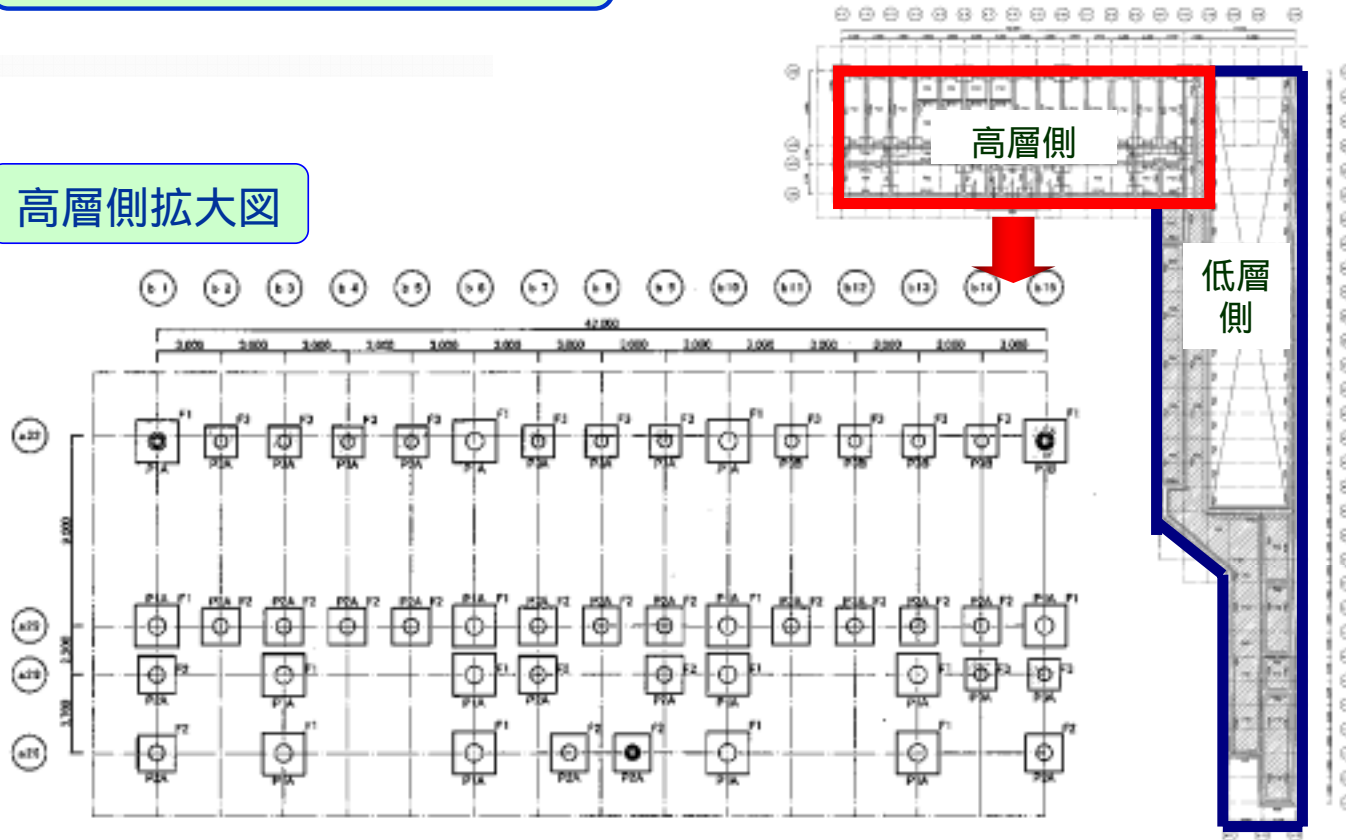


# 鋼管杭(地中熱交換器)の概要

## 地中熱交換器の配置

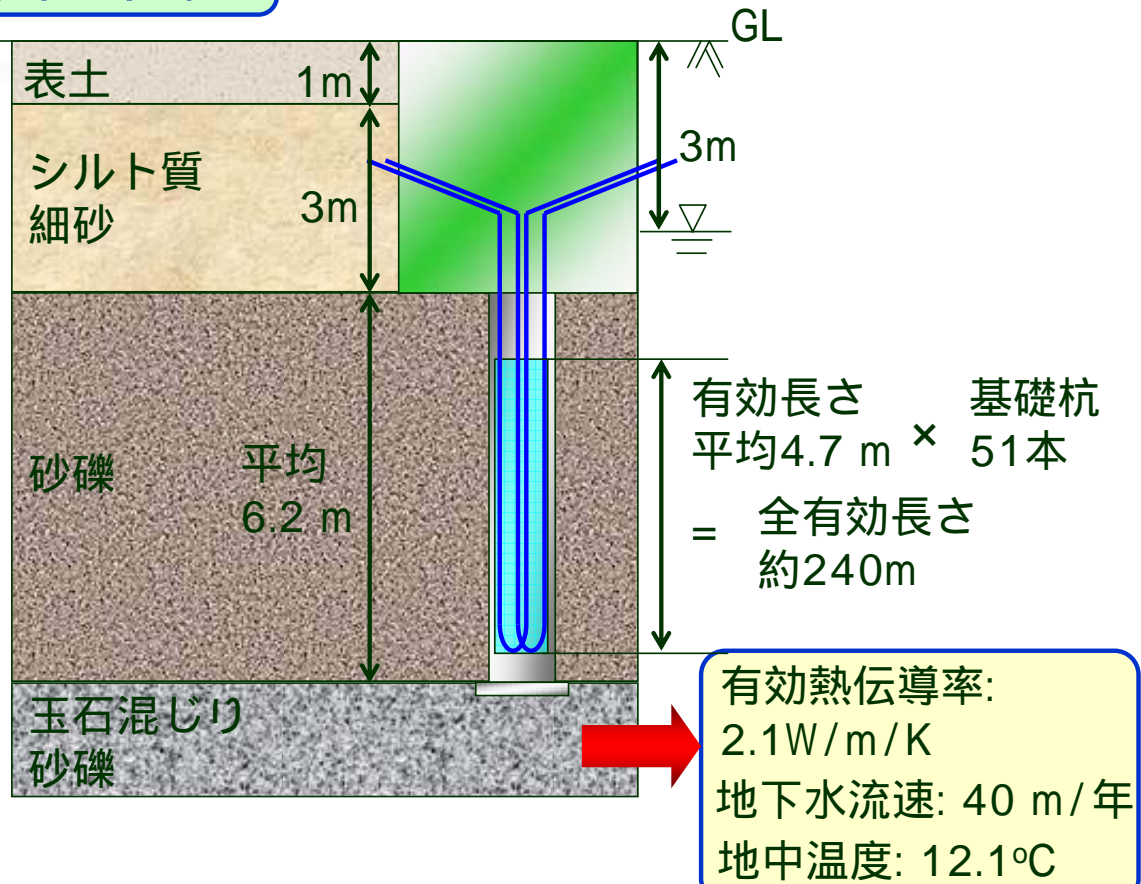
## 建物平面図

## 高層側拡大図



# 鋼管杭(地中熱交換器)の概要

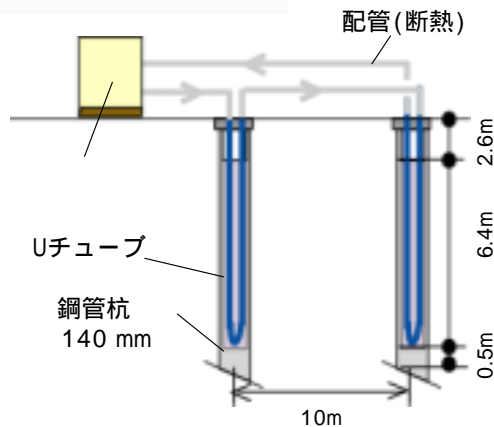
## 地盤柱状図と物性



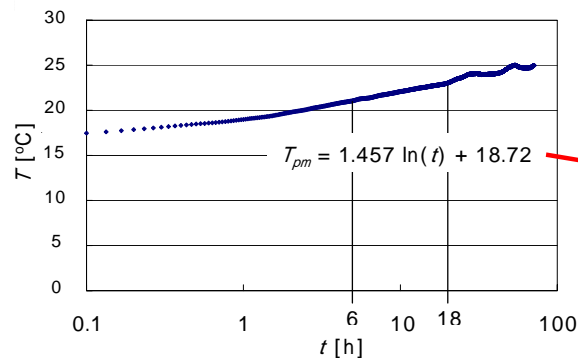
# 地中熱ヒートポンプシステム設計への応用

## 熱応答試験による地中の有効熱伝導率と地下水流速の推定

### 熱応答試験の系統図

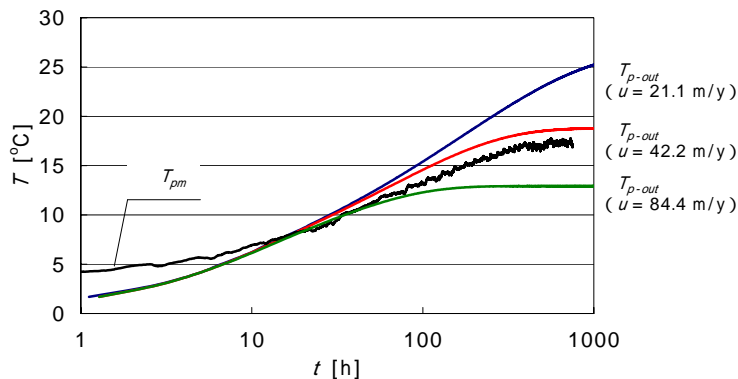


### 地中の有効熱伝導率の推定



有効熱伝導率：  
2.1 W/m/K

### 地下水流速の推定



地下水流速：  
約40 m/year

# 地中熱ヒートポンプシステム設計への応用

## 設計手順

二次側システム：パネルヒータ  
80 以上の高温水が必要

地中熱交換器有効長さ：240m  
建物全負荷を賄うには長さが不足

GSHPシステムの出力を建物の  
外調機負荷に対応(送水温度40 )

制約条件：ヒートポンプの定格出力50 kW  
熱媒温度-2 を長期間下回らないこと  
地中温度の長期的安定  
に対するシステム規模を算定

鋼管杭4.7m × 51本 + ボアホールシングル  
Uチューブ地中熱交換器75m × 3本



# 地中熱ヒートポンプシステム設計への応用

## 計算対象システム概要

暖房期間: 10月1日 ~ 5月31日  
運転時間: 9時 ~ 17時 (土日を除く)

冷房期間: 6月1日 ~ 9月30日  
運転時間: 9時 ~ 17時 (土日を除く)

外調機  
(水-空気熱交換器)  
面積: 1.28m<sup>2</sup>

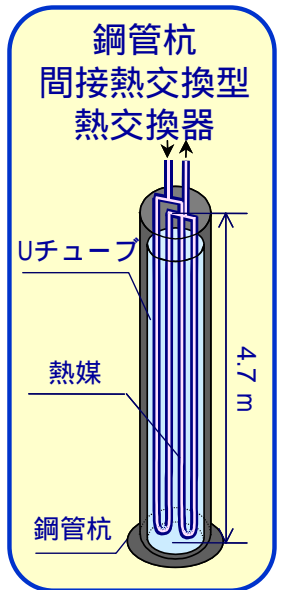
ヒートポンプ  
圧縮機: 20馬力型  
COP(0-35): 4.0

吹出し温度: 22°C

循環ポンプ(定格)  
採熱側: 200l/min、3.7kW  
二次側: 150l/min、1.5kW

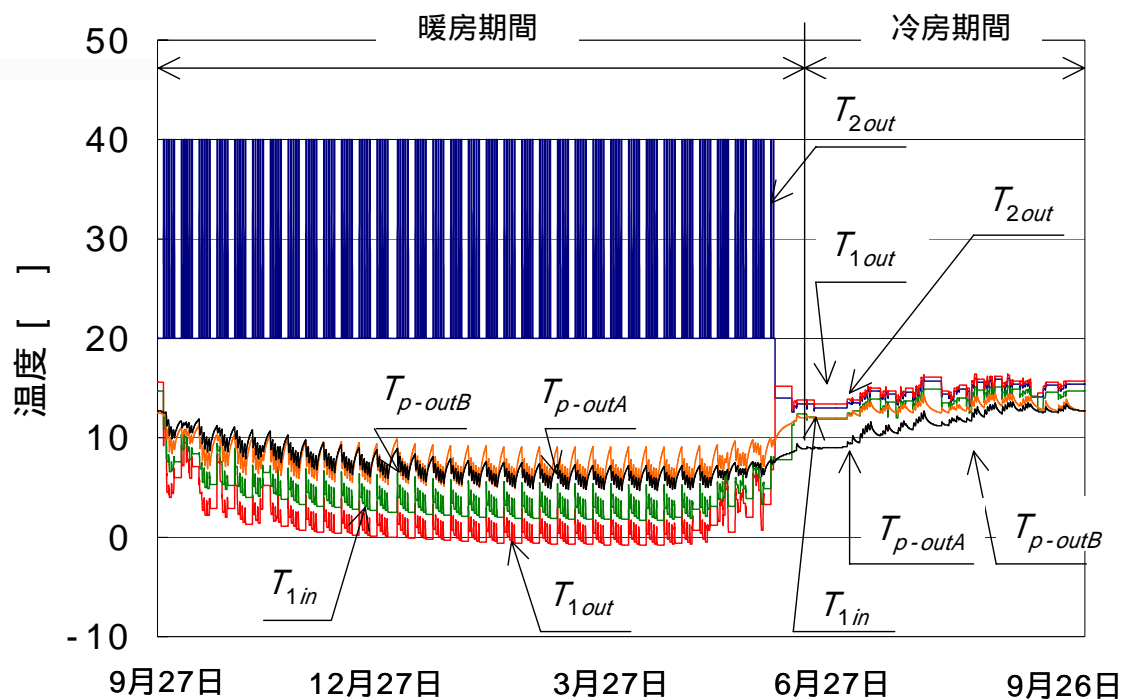
地中熱交換器  
鋼管杭: 約4.7m × 51本  
ボアホールシングル  
Uチューブ型: 75m × 3本

不易層温度: 12.1 °C  
土壌熱容量: 3000 kJ/m<sup>3</sup>  
土壌熱伝導率: 2.1 W/m/K  
地下水流速: 40m/year



# 鋼管規則利用GSHPシステム設計への適用例

## 運転2年目における各部分の温度変化の予測

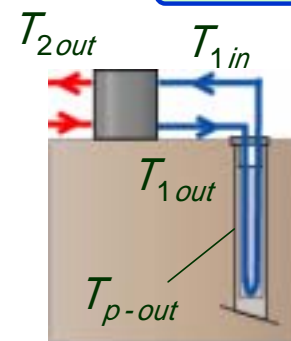


熱媒最低温度: -0.8

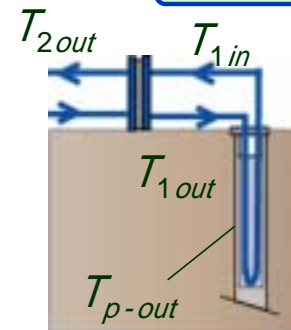
地中温度の長期的安定

長期間のGSHPシステムの運転が可能であることを確認

暖房時

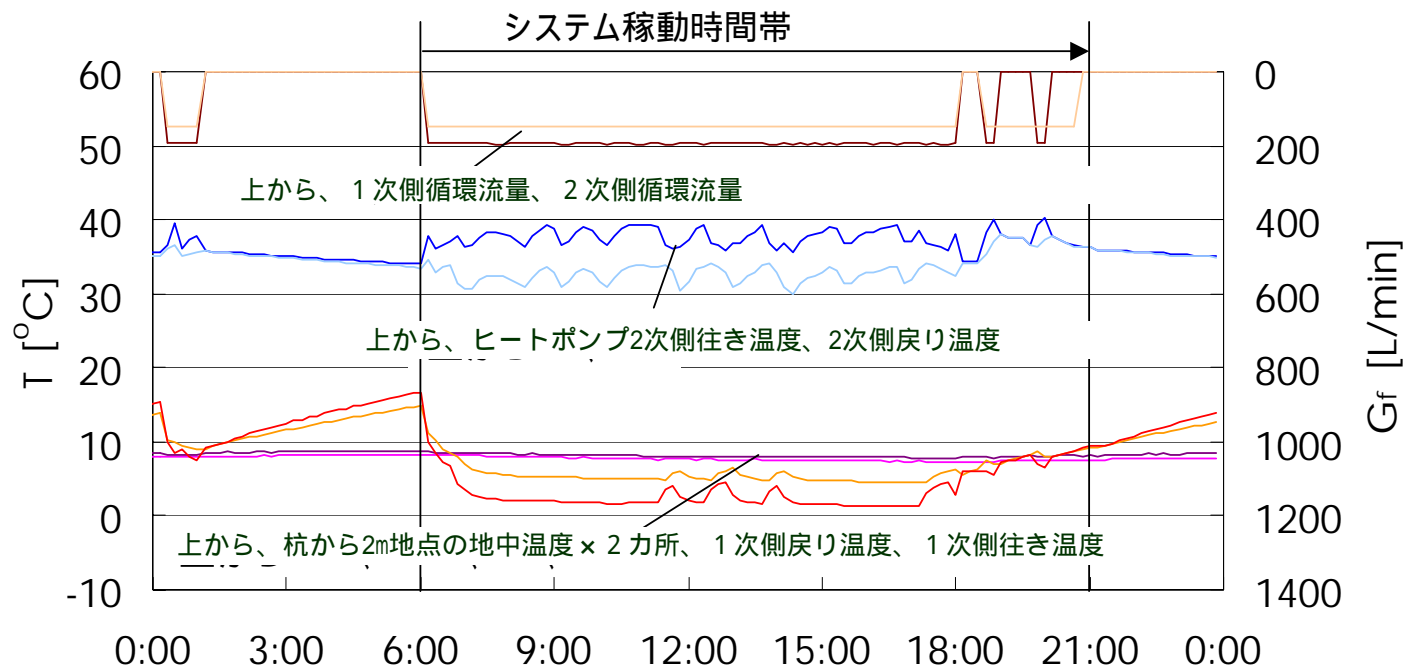


冷房時



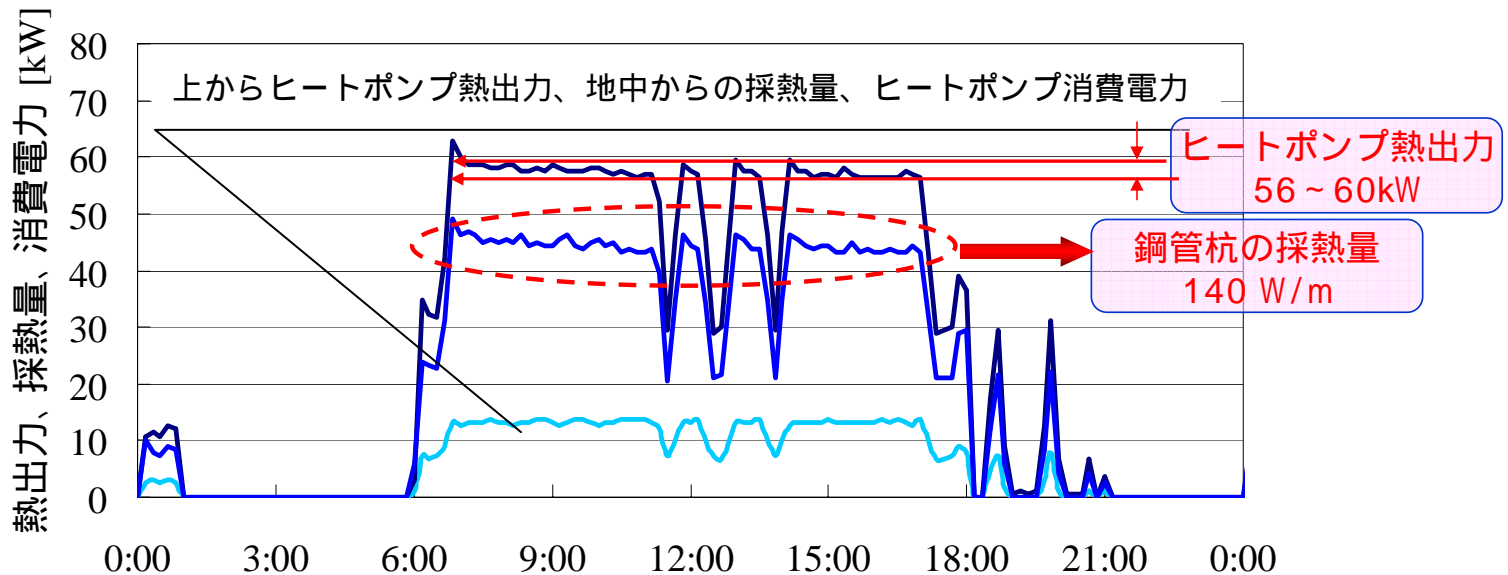
# 1年目の暖房運転データ 2月8日のデータ解析

## 代表日(2月8日)の各部の温度・流量の変化(一次側)



# 1年目の暖房運転データ 2月8日のデータ解析

代表日(2月8日)の出力、消費電力及び地中採熱量



# 1年目の暖房運転データのまとめ(1)

運転期間中(2006.10.12.~2007.4.18)の熱量・消費電力のフロー

-----> 空気の流れ

——> 熱媒(水もしくは不凍液)の流れ

採熱側循環ポンプの消費電力量  
(循環ポンプ1+循環ポンプ3) : 11356 kWh

採熱側還水平均温度 : 8.1  
二次側送水平均温度 : 37.1

地中からの  
採熱量  
: 61692 kWh

GSHPユニット  
の出力  
: 79382 kWh

GSHPユニット

循環ポンプ3

循環ポンプ4

循環ポンプ5

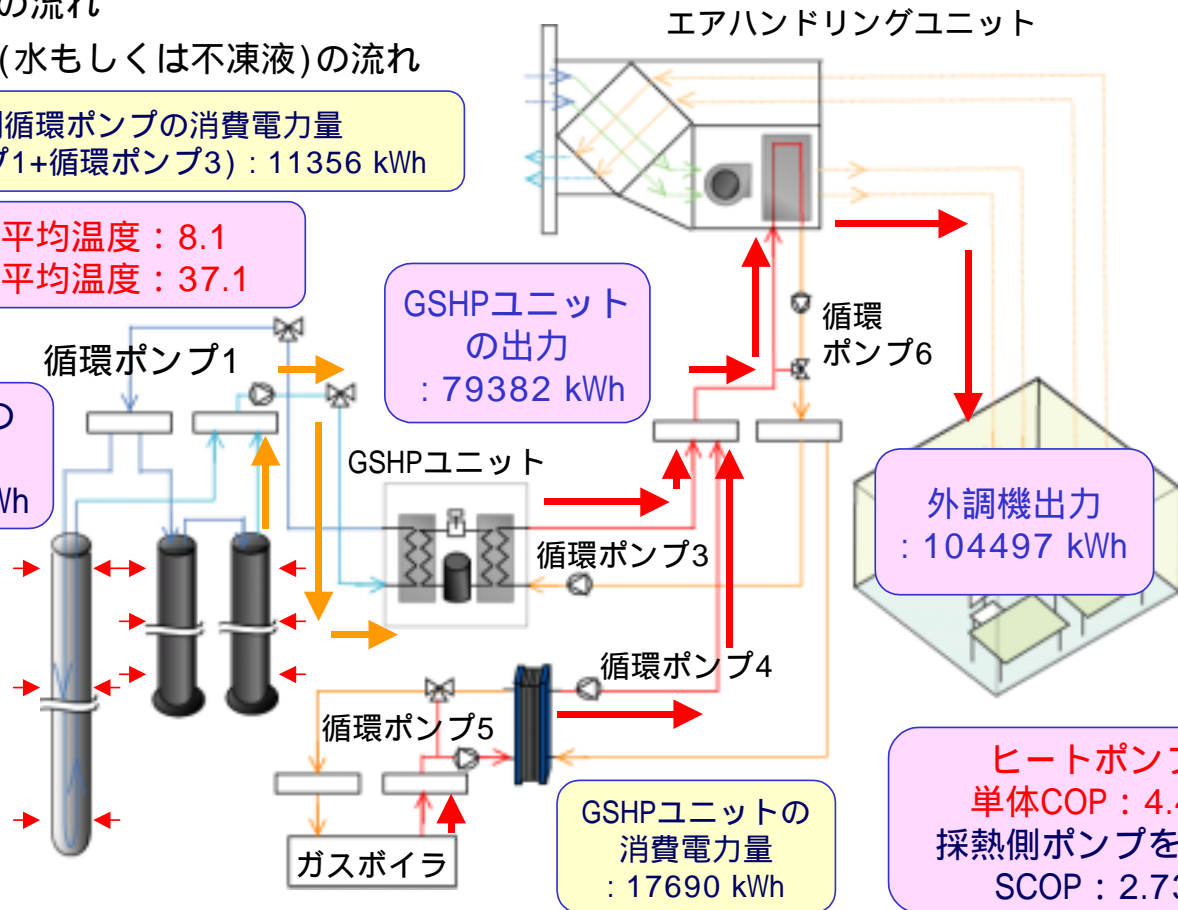
ガスボイラ

GSHPユニットの  
消費電力量  
: 17690 kWh

循環  
ポンプ  
6

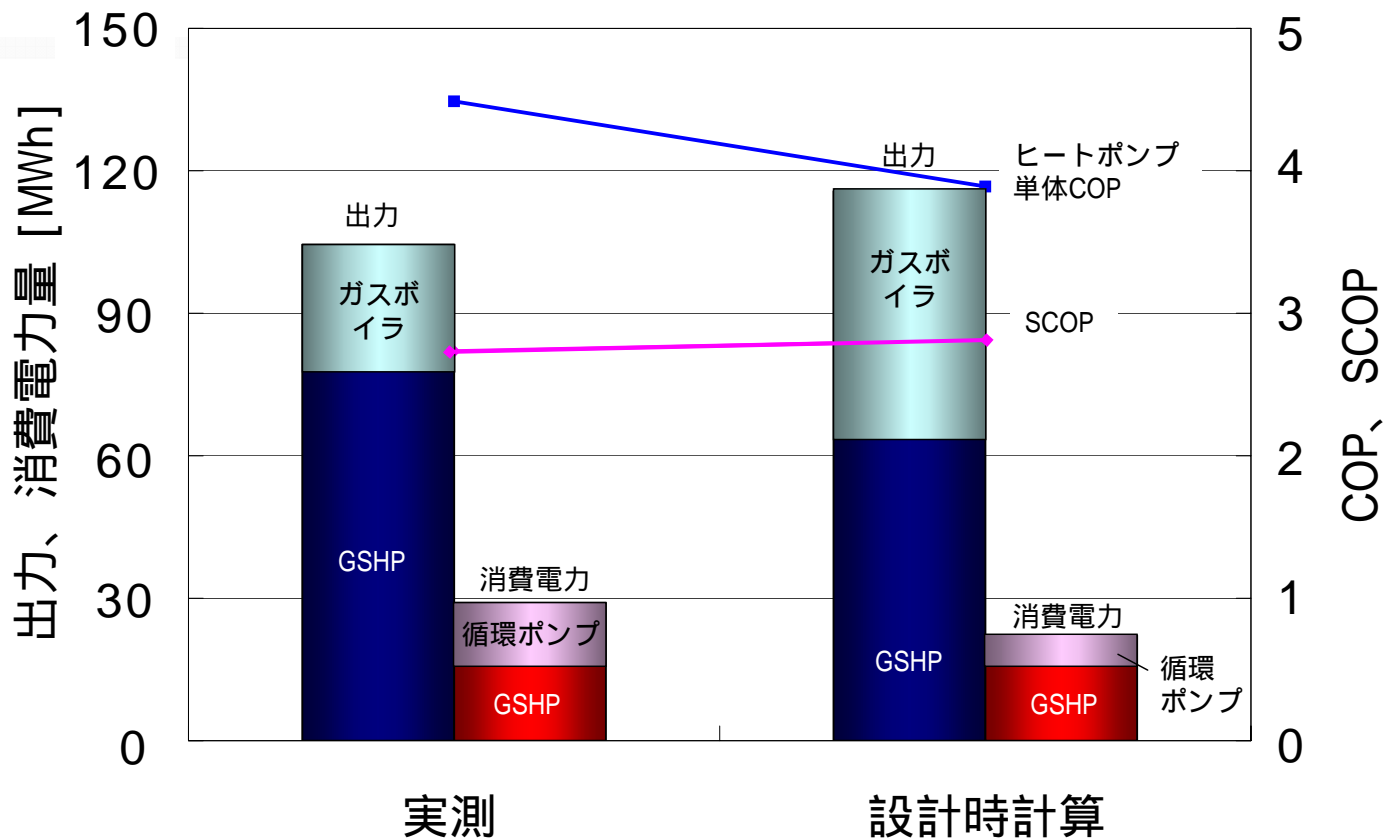
外調機出力  
: 104497 kWh

ヒートポンプ  
単体COP : 4.49  
採熱側ポンプを含む  
SCOP : 2.73



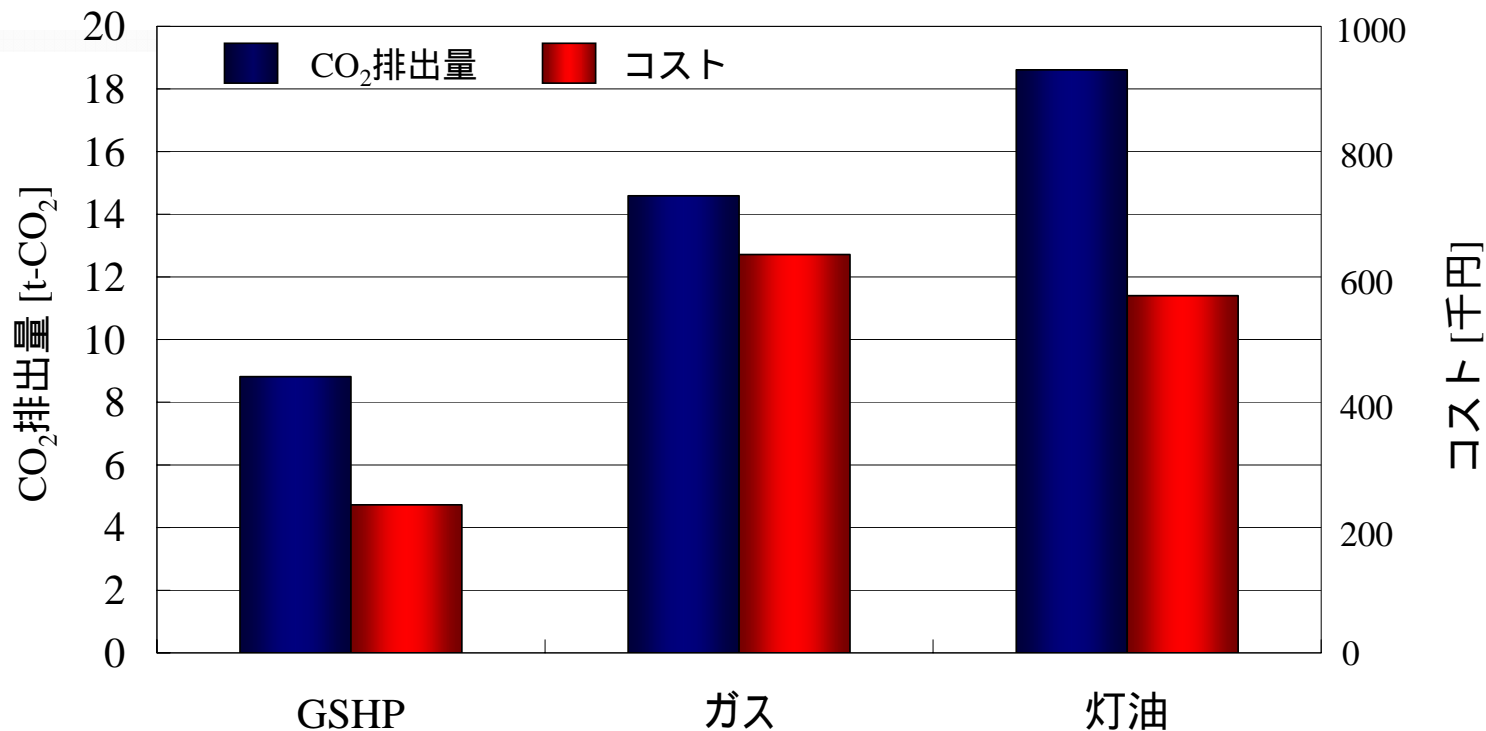
# 1年目の暖房運転データのまとめ(2)

運転期間中(2006.10.12.~2007.4.18)の熱量・消費電力の比較



# 1年目の暖房運転データのまとめ(3)

## CO<sub>2</sub>排出量、ランニングコスト削減効果



ガスシステムと比較したGSHPシステムの削減効果  
CO<sub>2</sub>排出量 40% コスト 60%

# まとめ

当研究室の地中熱利用システムに関する研究成果として、

- 1．地中熱ヒートポンプシステムの性能予測ツールの開発
- 2．地下水流れを有する場合の地中温度の計算手法の開発
- 3．地下水流向・流速推定装置の開発

の概要について紹介した。

これらの成果をもとに1件の米国特許取得、4件の国内特許出願、そのうち紹介した特許を基に設計ツールが民間から頒布

本研究成果の応用例として、

- 1．大規模な建物(特に基礎杭を用いる空港建物など)へのGSHPシステムの導入検討
- 2．地下水流れの大きい都市(扇状地域)でのGSHPシステムの導入検討
- 3．一般的な地下水流向・流速測定技術としての導入などが挙げられる。