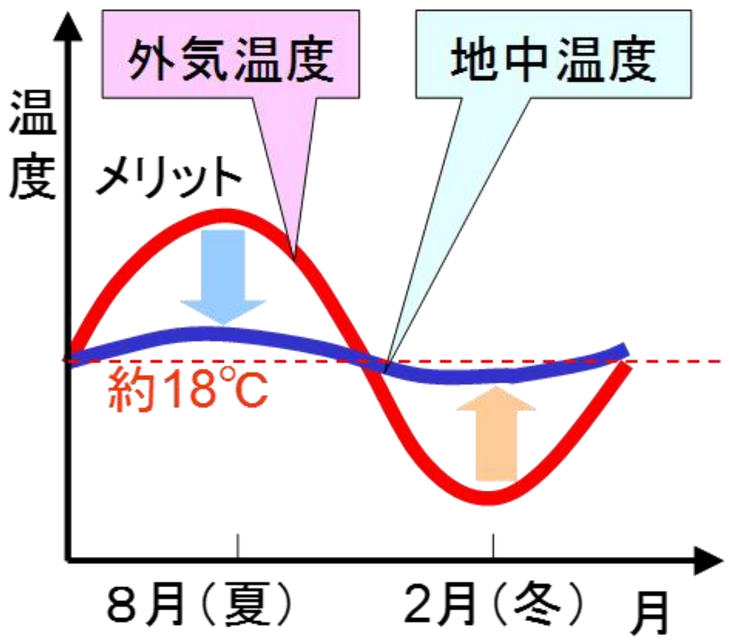
地中熱利用空調システム

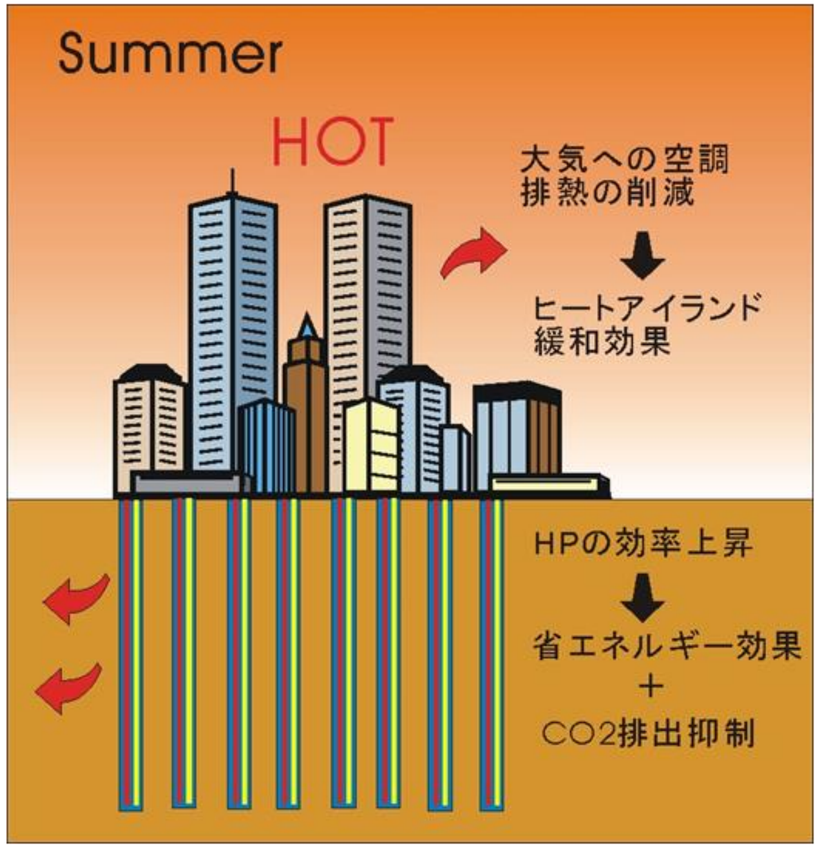
地中熱空調システムの特徴

① 熱源となる土壌の温度は外気に比べ夏季は低温、冬季は高温であるためヒートポンプCOPが高くなり省エネ効果がある。

② 地中熱ヒートポンプを利用するため化石燃料利用を減らしCO2排出量の削減ができる。

③ 冷房時の排熱を大気に放出しないことより、ヒートアイランド現象の緩和効果が期待できる。





しかし、
地中熱交換器設置の初期コスト問題や認識不足などの理由で普及が進んでない。
*掘削コスト例
日本：1～2万円/m、欧米：3～5千円/m

基礎杭利用地中熱空調システム

研究背景

地中熱交換器設置の初期コストを削減するため、**建物の基礎杭(既製杭)を熱交換器として兼用する方式が利用**されている。しかし、都市部での既製杭採用建物の減少している。

➡ **場所うち杭を利用した方式を提案**

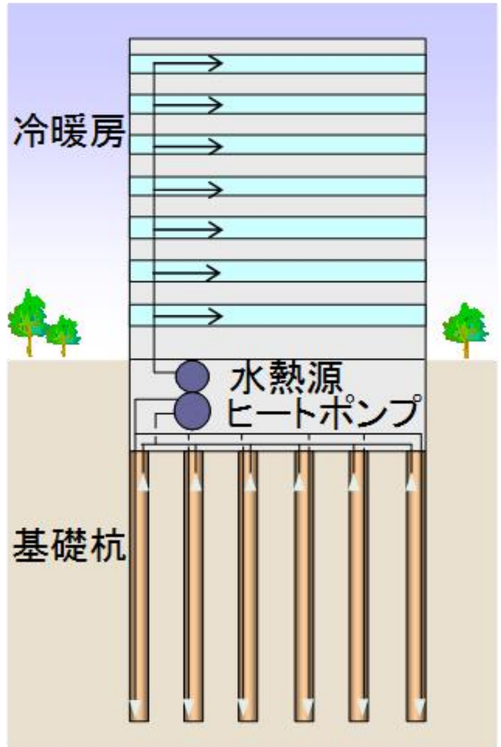
研究概要

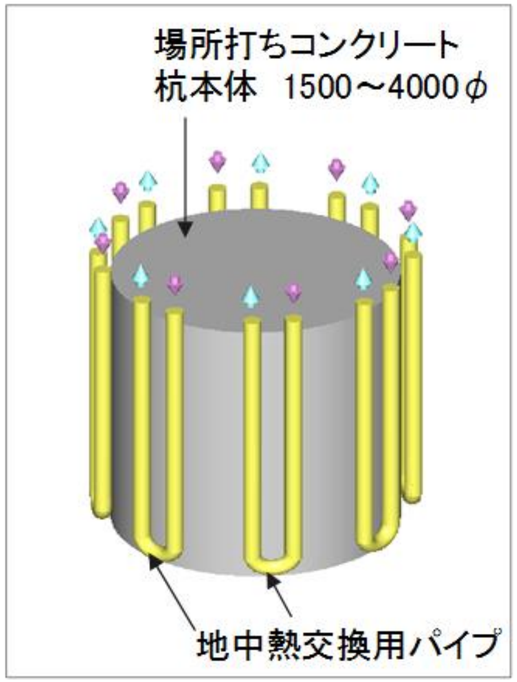
都市部大規模建築への導入を想定し、場所打ち杭の外周部に熱交換用の配管を配置した方式を提案。実大実験装置を千葉実験場内に構築(平成15年5月竣工)し年間冷暖房実験を行う。

東大生研、大成建設㈱の共同研究
－(NEDO助成研究)

実験目標

- 地中熱交換杭の熱特性(地中採放熱量)の把握
- 水冷式ヒートポンプの運転データの収集
- 地中熱移動シミュレーション構築用データ収集





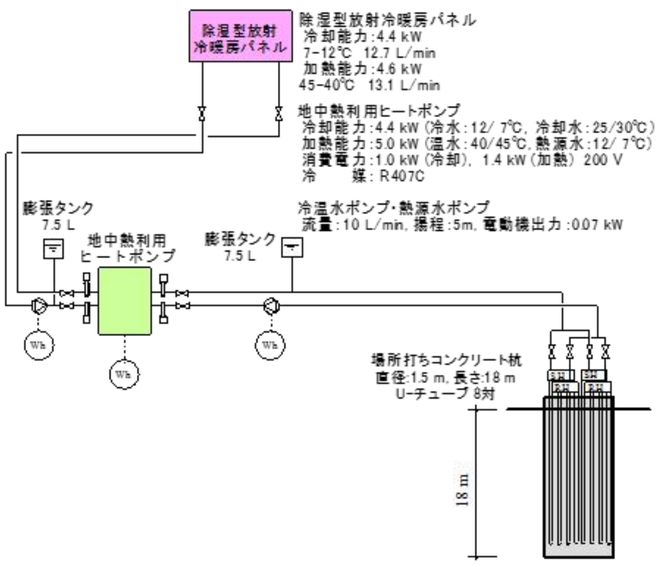
特許出願中(2003-128188,128189)

実験施設の状況

地中熱交換パイプ設置状況

地中熱空調システムの適用例

東大柏キャンパス環境棟



エントランスの冷暖房負荷賄う

前川製作所新本社ビル

冷房負荷17%、暖房負荷31%
地中熱システムが負担

東京スカイツリー（新東京タワー）

場所打ち杭利用地中熱システムを採用し建物冷暖房に利用予定。

地中熱移動数値シミュレーション手法の開発(1)

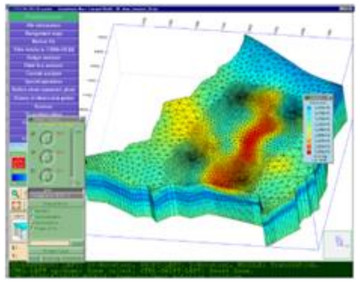
研究目的

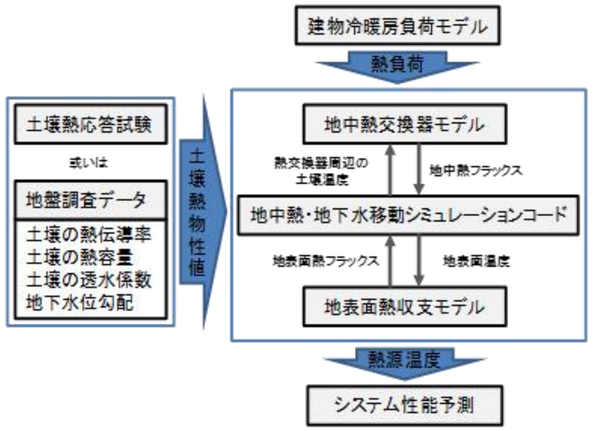
地中熱空調システムの実用化のため、システム導入前に地中採・放熱量の予測を可能とするツールを開発

計算概要

1.FEFLOW

WASY社の3次元地下水・熱移流シミュレーションソフト

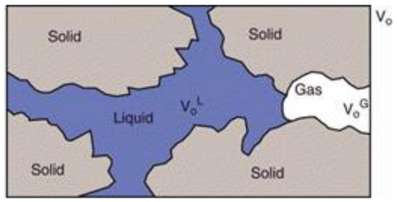




土壌熱水分移動シミュレーションコード

1．質量保存法則

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\varepsilon_\alpha \rho^\alpha\right)+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\varepsilon_\alpha \rho^\alpha v_i^\alpha\right)=\varepsilon_\alpha \rho^\alpha Q_\rho^\alpha$$



2．運動量保存法則

$$v_i^\alpha+\frac{k_{ij}^\alpha}{\varepsilon_\alpha \mu^\alpha}\left(\frac{\partial p^\alpha}{\partial x_j}-\rho^\alpha g_j\right)=0$$

α:液水や気水、土壌固体粒子などの各相, ε:各 α相の体積比率(0≤ ε≤1)、ρ^α: α 相の密度[kg/m³]、μ^α : α相の速度ベクトル[m/s]、k_{ij}^α :浸透テンソル(permeability tensor)[m²]、v_i^α :粘性係数[kg/ms]、Q_ρ^α :質量発生項、Q_T^α :エネルギー発生項、J_{iT}^α :熱フラックス

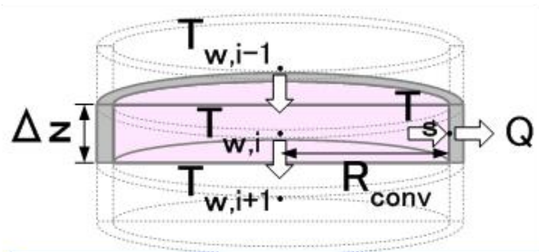
3．エネルギー保存法則

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\varepsilon_\alpha \rho^\alpha E^\alpha\right)+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\varepsilon_\alpha \rho^\alpha v_i^\alpha E^\alpha\right)+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(j_{iT}^\alpha\right)=\varepsilon_\alpha \rho^\alpha Q_T^\alpha$$

U字管内循環水モデル

熱移流拡散方程式

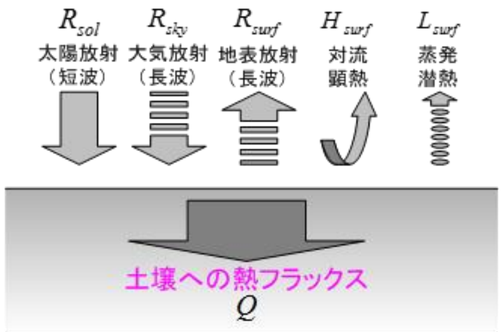
$$\frac{\partial T_w}{\partial t}=-\frac{\lambda_w}{\rho_w C_w}\frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2}-U_w\frac{\partial T_w}{\partial z}+\frac{hP_w}{\rho_w C_w A_w}\left(T_1-T_w\right)$$



T_w:水温度、T_1:杭内壁温度、ρ_w:水密度、C_w:水比熱、λ_w:水熱伝導率、h_w:水の対流熱伝達率、P_w:杭内円周長、A_w:杭内断面積

地表面熱収支モデル

地表面から土壌への熱フラックス $Q=R_{sol}+R_{sky}-R_{surf}-H_{surf}-L_{surf}$



$$R_{sol}=(1-\alpha_s)(J_{dn}\times\sin(h)+J_{sh})$$

$$R_{sky}=\sigma(273.16+T_a)^4(0.526+0.076\sqrt{f})(1-0.062c)$$

$$R_{surf}=\sigma(273.16+T_a)^4(1-0.062c)$$

$$H_{surf}=\alpha_c(T_s-T_a)$$

$$L_{surf}=\beta\times 7\times\frac{133.15}{1000}\alpha_c(f_{sat}(T_s)-T_a)$$

J_{dn}: 地表面の直達日射量、$sin(h)$: 太陽高度角、J_{sh}: は天空日射量、α_s:は地表面の日射放射率(アルベード)、δ:はシュテファン－ボルツマン定数(5.67× 10^{-8}[W/m²K⁴])、f:地表面付近の空気の水蒸気分圧[mmHg]、c: 雲量、T_a: 外気温度、T_s: 地表面温度で、α_c:地表面の対流熱伝達率、β: 蒸発効率(地表面の乾湿の効果を表す係数)、$fsat(Ts)$: Tsでの飽和水蒸気圧

加藤研究室・大岡研究室・菊本研究室
Kato Lab., Ooka Lab., and Kikumoto Lab.

地中熱移動数値シミュレーション手法の開発(2)

より正確な採・放熱量の予測のためには土壌の熱物性値を精度良く把握する必要がある。
しかし、熱応答試験やボア抜き試験は高額であり、導入負担を増加させる。

➡ **通常、基礎設計の際に実施される地盤調査のデータから土壌物性値を推定する方法を提案**

土壌の熱伝導率及び熱容量の推定

土粒子熱伝導率

$$\lambda_s = \lambda_A^{\frac{m}{m+n}} \cdot \lambda_B^{\frac{n}{m+n}}$$

熱容量

$$C = \sum_{i=1}^{n} \rho_i c_i V_i$$

実験式による透水係数の推定

この式は飽和状態における比較的粒径のそろった砂層で地盤調査データから間接的に透水係数求める方法である。

Hazenの式

$$k = C_h (0.7 + 0.03\,t) D_{10}^2$$

Terzaghiの式

$$k = \frac{C_t}{\mu}\left(\frac{n - 0.13}{\sqrt[3]{1 - n}}\right)^2 D_{10}^2$$

Zunkerの式

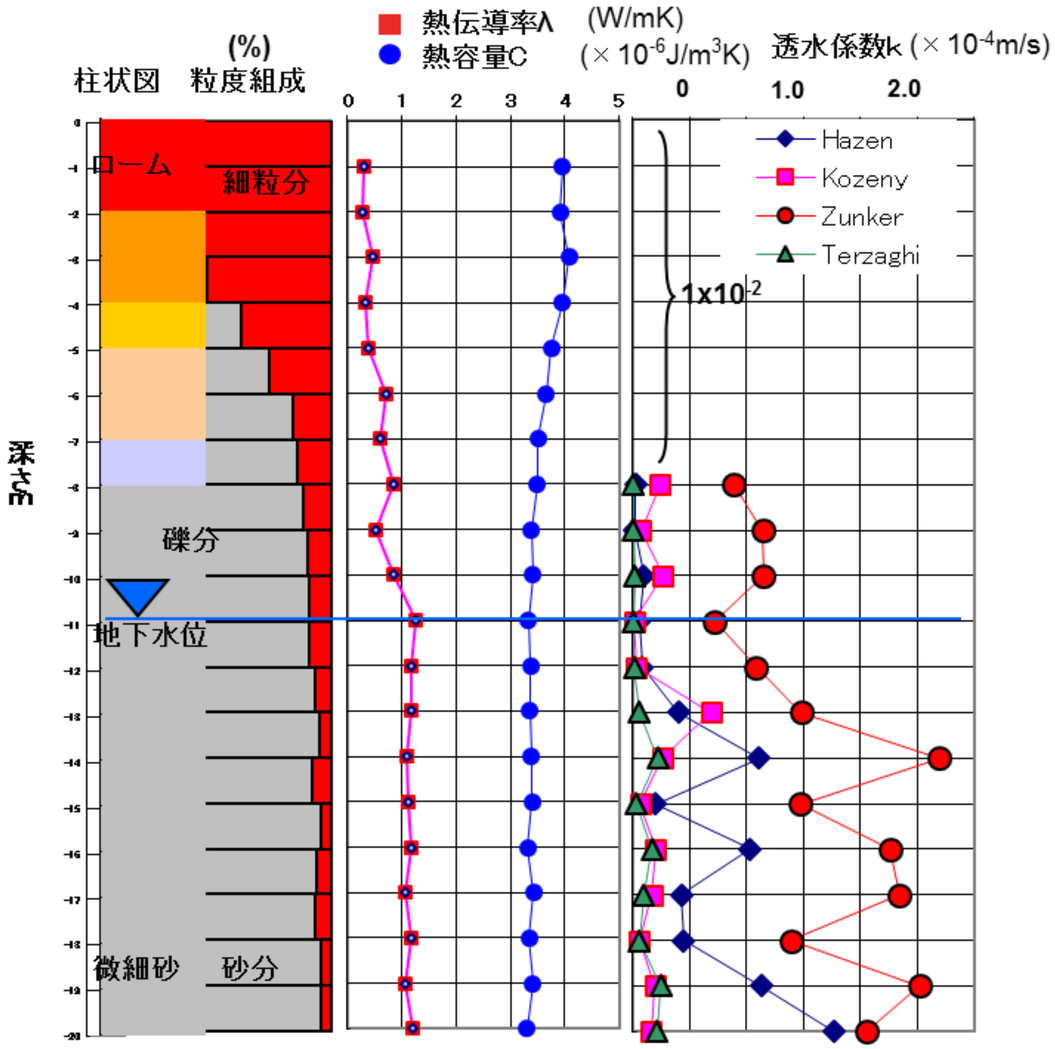
$$k = \frac{C_Z}{\mu}\left(\frac{n}{1 - n}\right)^2 D_W^2$$

Kozenyの式

$$k = \frac{C_k}{\mu}\frac{n^3}{(1-n)^2} D_W^2$$

千葉サイト	間隙率 (-)	含水比 (%)	飽和度 (%)	透水係数 ($\times 10^{-4}$m/s) Zunkerの式	熱伝導率 (W/mK)	熱容量 ($\times 10^{-6}$J/m^{3}K)
表層～7m	0.802	130.0	94.6	(1×10^{-2})	0.35	3.73
7m~11m	0.413	26.2	96.7	1.3	0.77	3.30
11m~20m	0.380	18.9	100	2.1	1.14	3.28

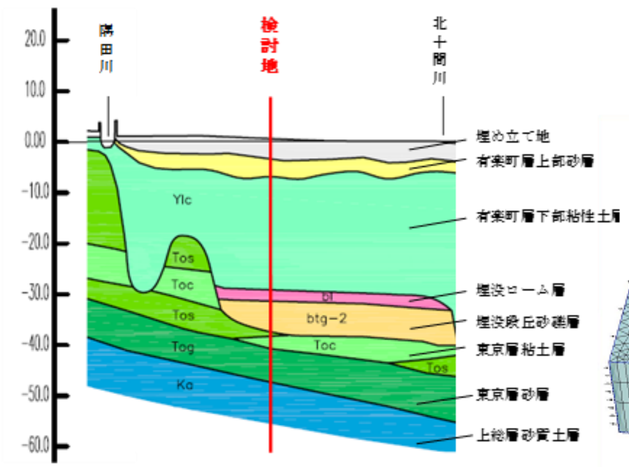
推定結果



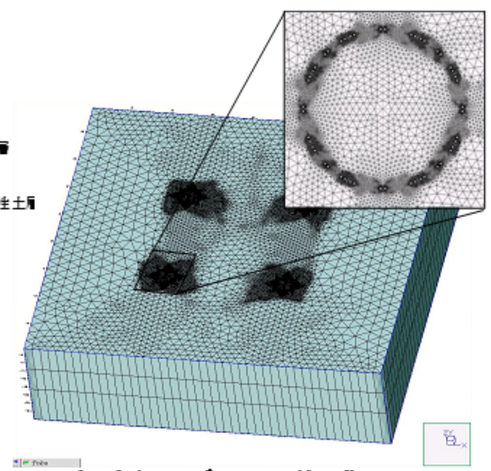
地中熱移動数値シミュレーション手法の開発(3)

実物件への適用

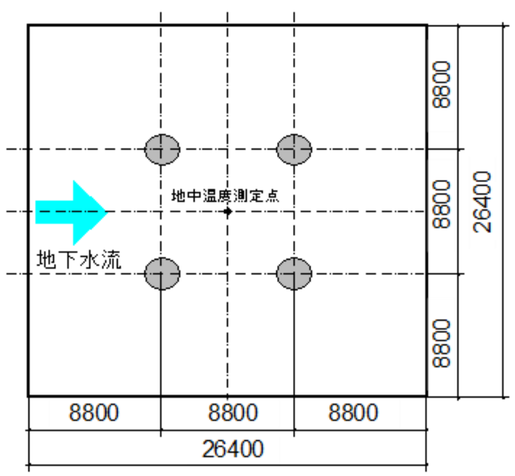
地中熱利用システムの導入を検討している
都内の実物件について検討を行った。



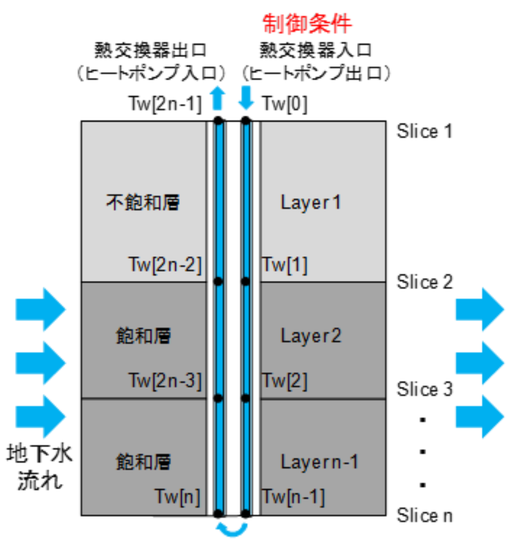
検討地の土壌熱物性値の把握



解析モデルの作成



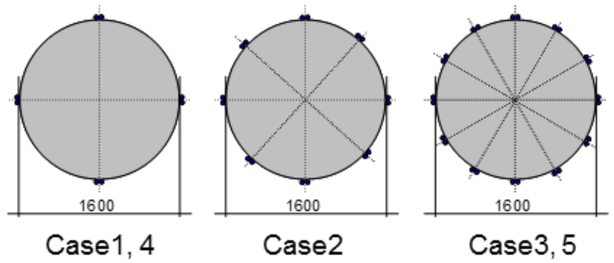
地下水条件、モデルの配置

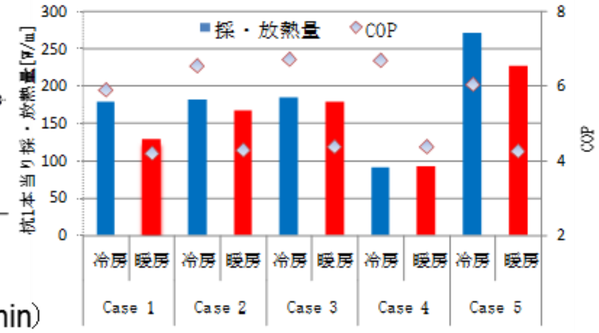


運転制御条件の設定

場所打ち杭型の事例

熱交換器の配置および循環水流量の検討を行った。

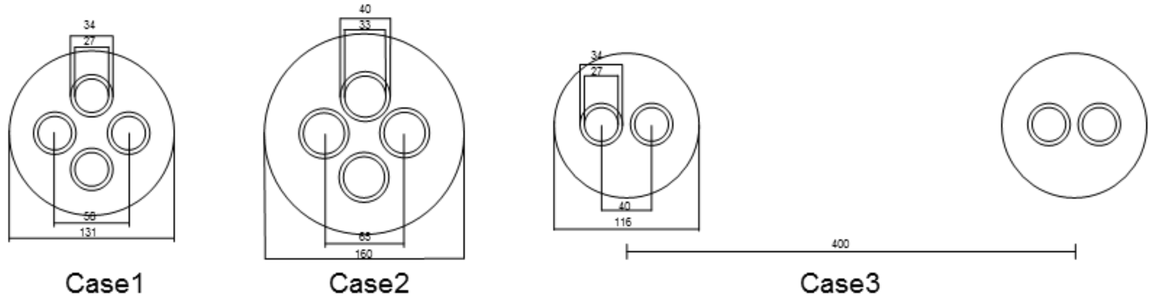




・Case1, 2, 3：杭1本当り流量一定(24.3L/min)
・Case2, 4, 5：U字間1本当り流量一定(3.0L/min)

ボアホール型の事例

熱交換器の形状による採・放熱量の検討を行った。



ケース	設置条件	管径	流量 [L/min]	暖房採熱 [W/m]	冷房放熱 [W/m]
Case1	ダブルUチューブ1本	25A	25	48.2	51.4
Case2	ダブルUチューブ1本	40A	30	64.6	67.4
Case3	シングルUチューブ2本	25A	25	57.9	61.3

地下水循環型空水冷HPシステムの概要

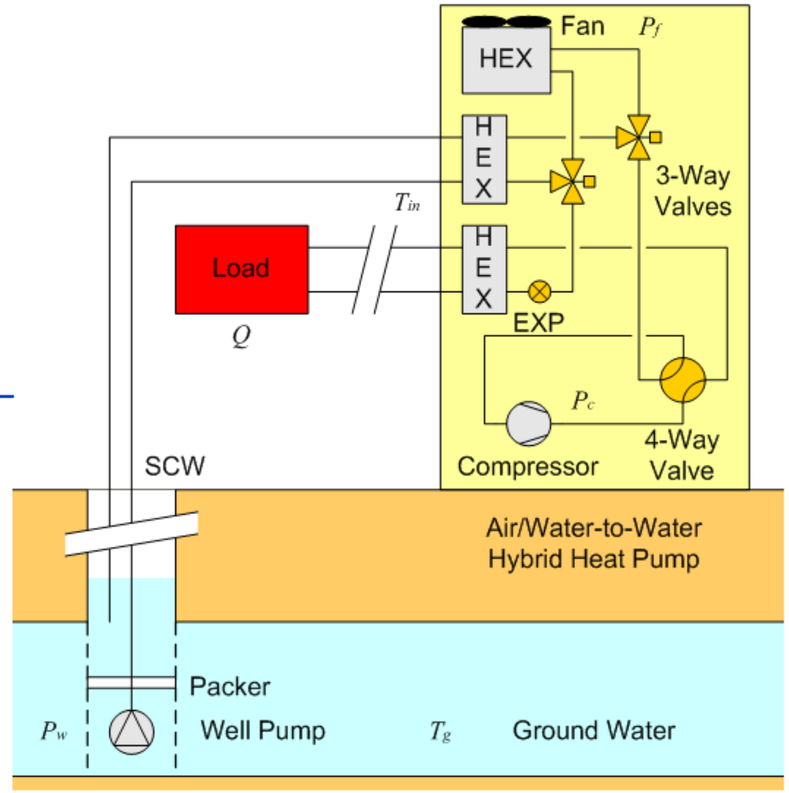
研究背景

＜地下水利用システム実用化の課題＞
・中間期の温度条件で外気熱源利用より不利な場合もある。
・地下水のみで建物空調負荷の全てを賄えないところもある。

➡ **空冷と水冷の中、より良い熱源利用ができるシステムが必要！**

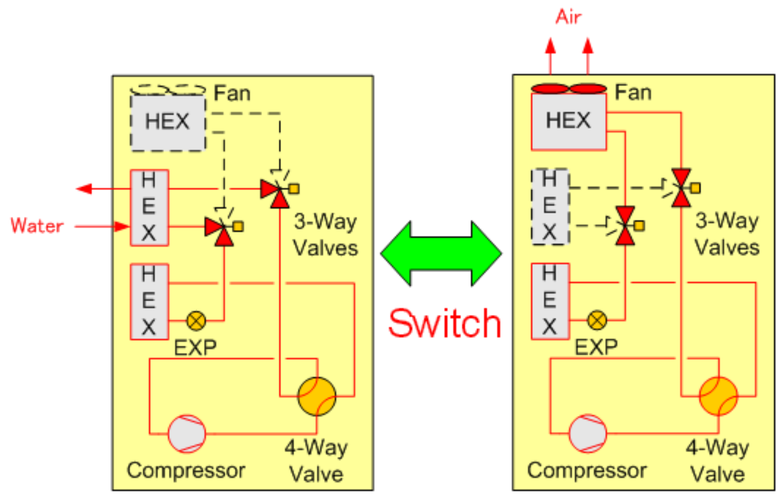
・長期揚水・還元の場合、井戸内目詰まり(Clogging)現状が生じる。
・井戸内目詰まりは逆洗運転により解決できるが、手間がかかる。

➡ **自動逆洗運転が可能なシステムの開発が必要！**



研究目的

有利な熱源選択によるヒートポンプ性能向上のため、空気熱源および地下水熱源を併用し外気温度条件によって切り替えを行う地下水循環型空水冷ヒートポンプシステムの開発を行った。



研究課題

- 高効率な空水冷ヒートポンプの開発
- 安定した地下水循環のための熱利用井の設計・開発
- システム開発のためのフィールド試験
- 地下温度・環境負荷・経済性等のシミュレーション手法の構築
- 防災井戸、既設井戸、工業用水、温泉などの複合利用検討

東大生研、ゼネラルヒートポンプ工業(株)、東邦地水(株)、NEDOの共同研究

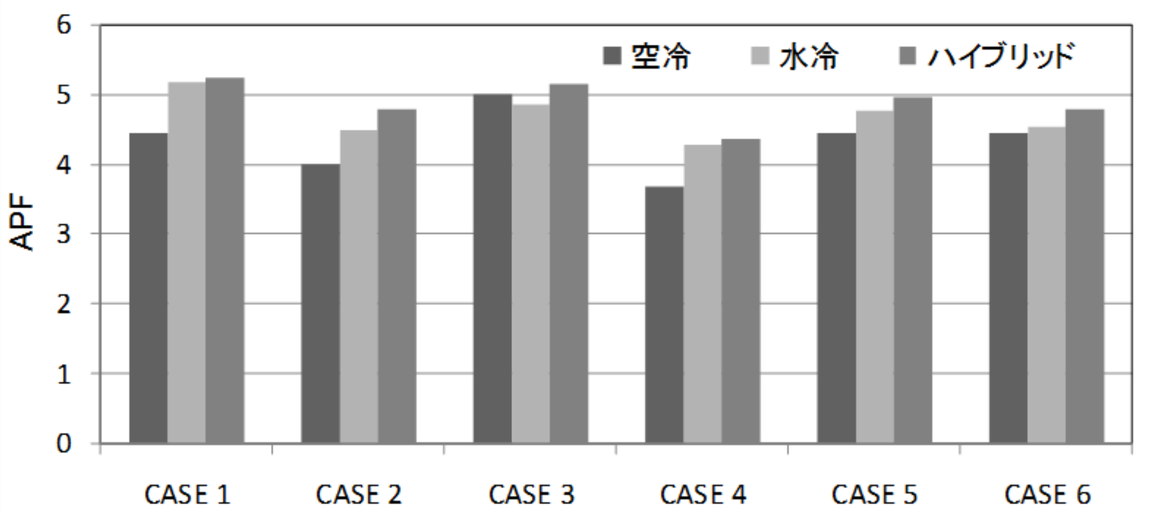
地下水循環型空水冷HPシステムの年間性能計算

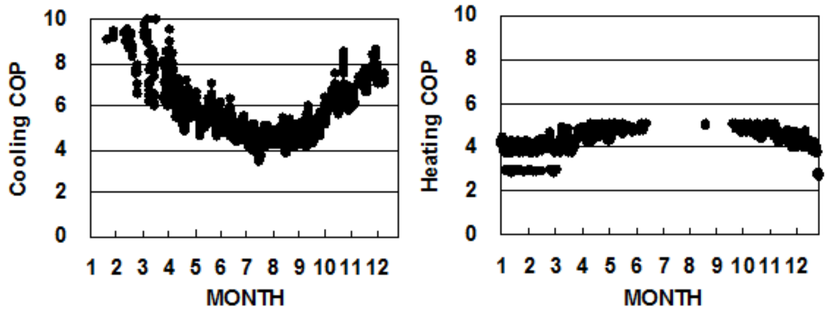
年間性能検討

本開発システムの年間性能を検討するため、建物冷暖房負荷とヒートポンプ冷媒エンタルピー計算による性能予測を行った。

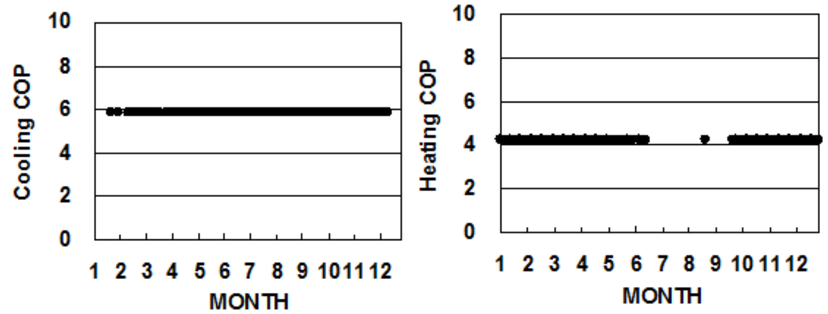
・アメリカNISTの標準冷媒プログラムREFPROPを利用。
・2次側温度：冷房時7～12℃、暖房時40～45℃、冷媒の*PH*線図と冷凍サイクルから算出。
・冷媒温度変数は凝縮後飽和液温度と蒸発後飽和ガス温度のみとし、圧縮機効率は多項式近似の特性曲線を用いる。
・空冷の熱源温度は外気温とし、水冷の熱源温度は地下水温度とする。

ケース	検討地域	冷媒	揚水ポンプ[kW]	ΔT[℃]
CASE 1	東京	R410A	0.8	5
CASE 2	札幌	R410A	0.8	5
CASE 3	那覇	R410A	0.8	5
CASE 4	東京	R407C	0.8	5
CASE 5	東京	R410A	1.6	5
CASE 6	東京	R410A	0.8	10

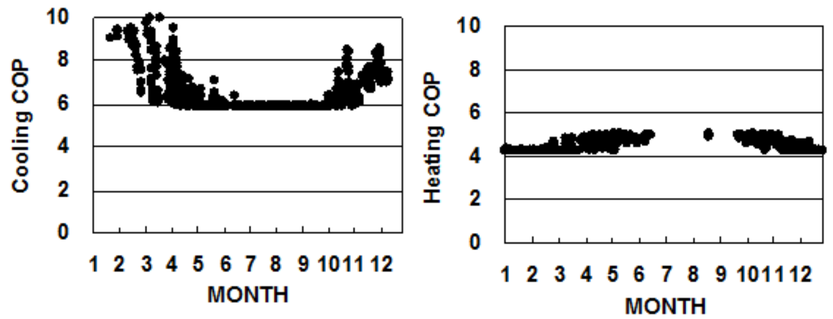




(a) 空冷ヒートポンプ



(b) 水冷ヒートポンプ

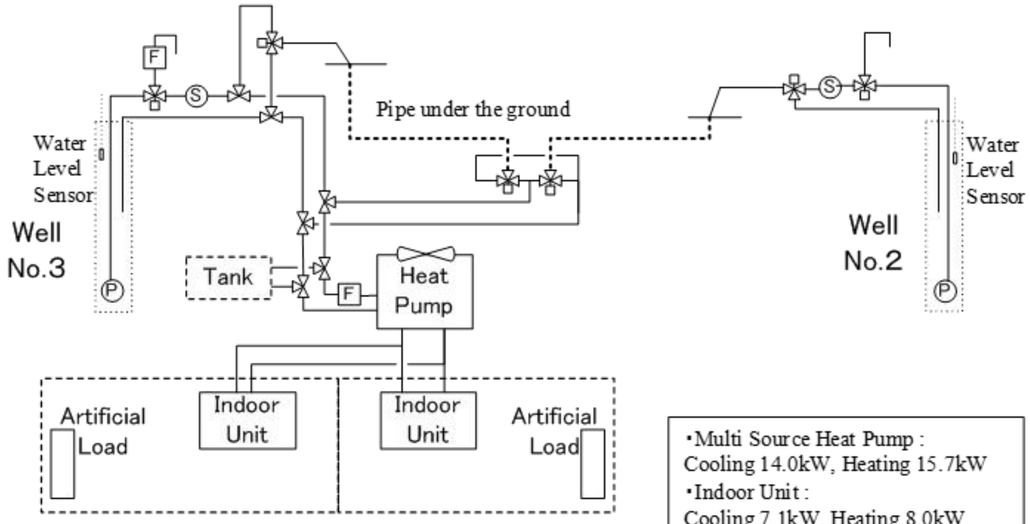


(c) 空水冷ハイブリッドヒートポンプ

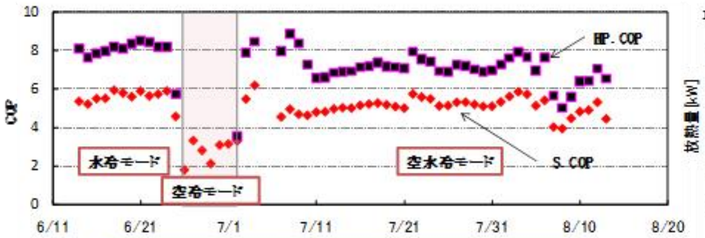
CASE 1のCOP計算例

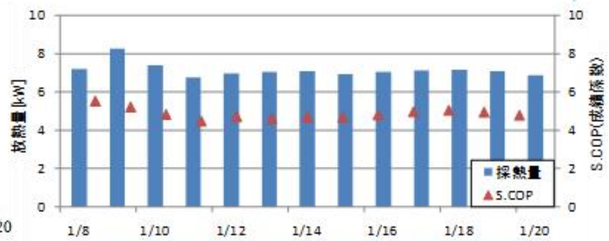
地下水循環型空水冷HPシステムの実験結果

千葉サイト（井戸2本方式）



・Multi Source Heat Pump :
Cooling 14.0kW, Heating 15.7kW
・Indoor Unit :
Cooling 7.1kW, Heating 8.0kW
・Submersible Pump :
Lift 23m, 47 L/min, 600W

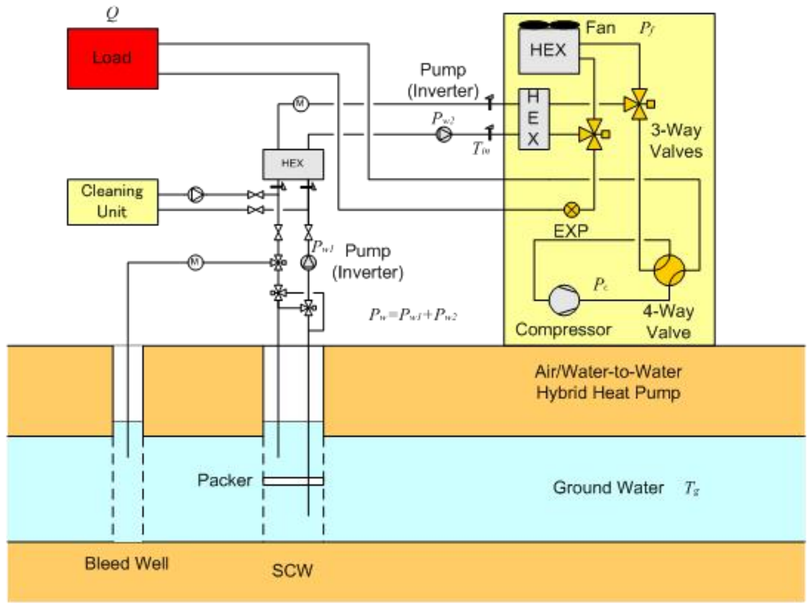


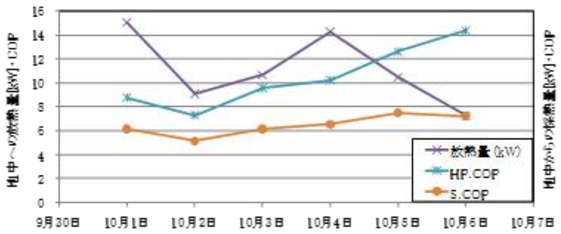


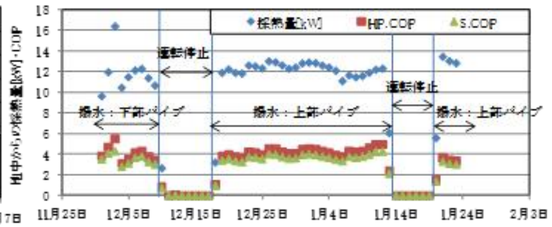
冷房実験結果
- 平均HP.COP：8.0
- 平均S.COP：5.6

暖房実験結果
- 平均HP.COP：5.7
- 平均S.COP：4.9

名古屋サイト（井戸1本方式）







冷房実験結果
- 平均HP.COP：10.5
- 平均S.COP：6.5

暖房実験結果
- 平均HP.COP：4.1
- 平均S.COP：3.6

地下環境への影響評価

地下水利用空調システムの導入が地中温度へ与える影響を定量的に評価するため、地中熱・地下水移動解析モデル（FEFLOW）と地表面熱収支モデルを連成した数値解析手法よりシミュレーションを行った。

解析概要

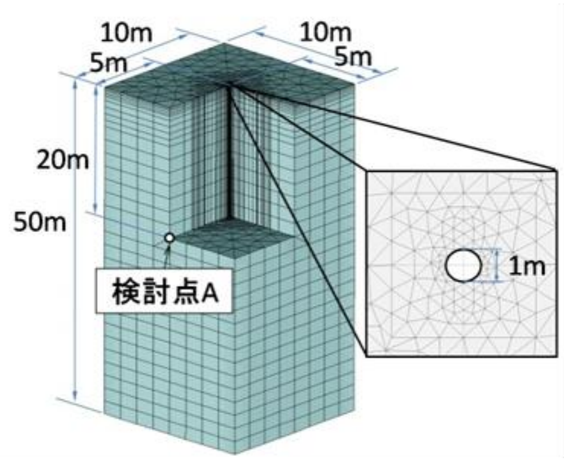
土壌物性条件

間隙率	0.3	透水係数(10^{-4}m/s)	10
固体部熱伝導率 (W/mK)	3.0	固体部熱容量(MJ/m^{3}J)	2.52

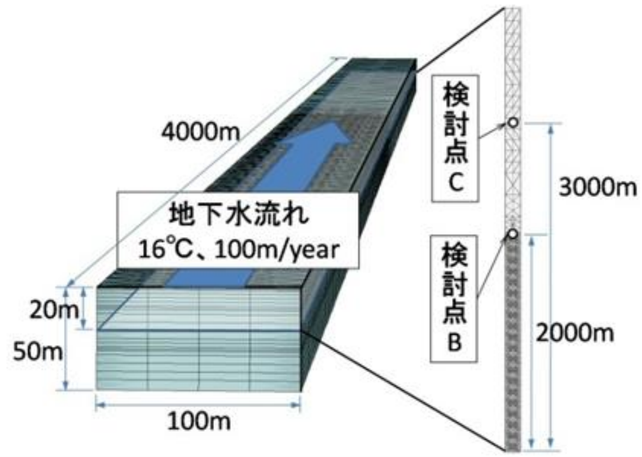
解析ケースにおける冷暖房運転条件

冷暖房運転条件	地下水無し	地下水有り
冷房4ヶ月、暖房4ヶ月	CASE 1	CASE 4
冷房4ヶ月、暖房2ヶ月	CASE 2	CASE 5
冷房2ヶ月、暖房2ヶ月	CASE 3	CASE 6

解析モデル

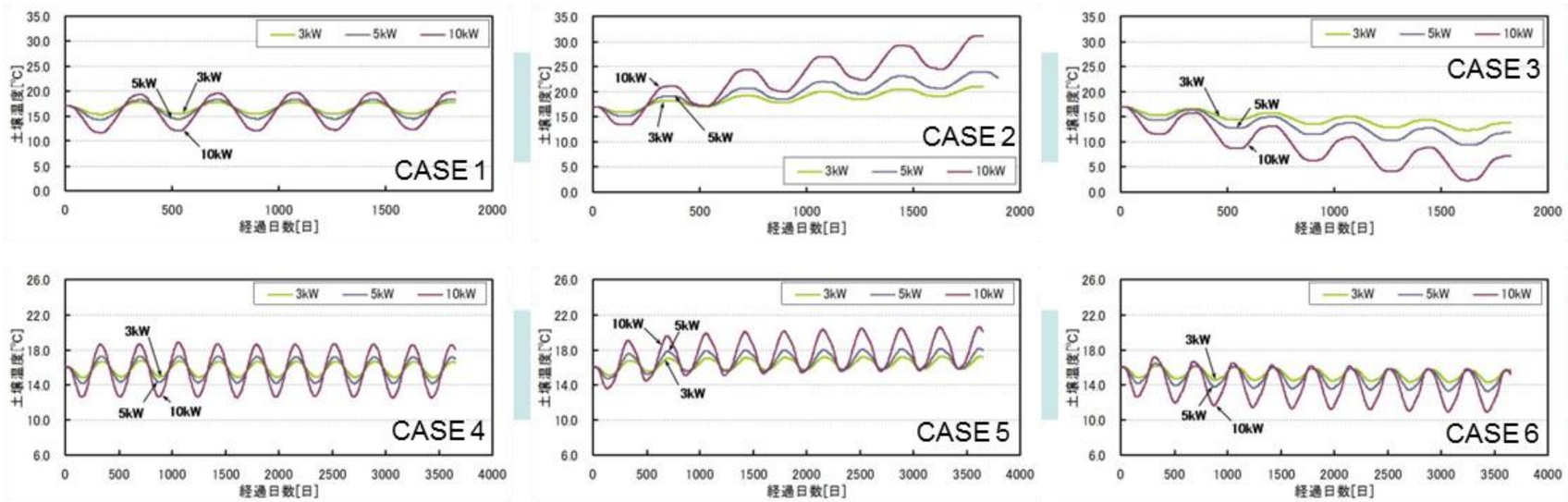


地下水無しの場合



地下水有りの場合

解析結果



地下水流無の場合、冷暖房負荷のバランスを取った運転が必要である。

地下水流有の場合、システム導入条件が100m^{2}当たり3kW であれば、地下環境への影響は小さい。