

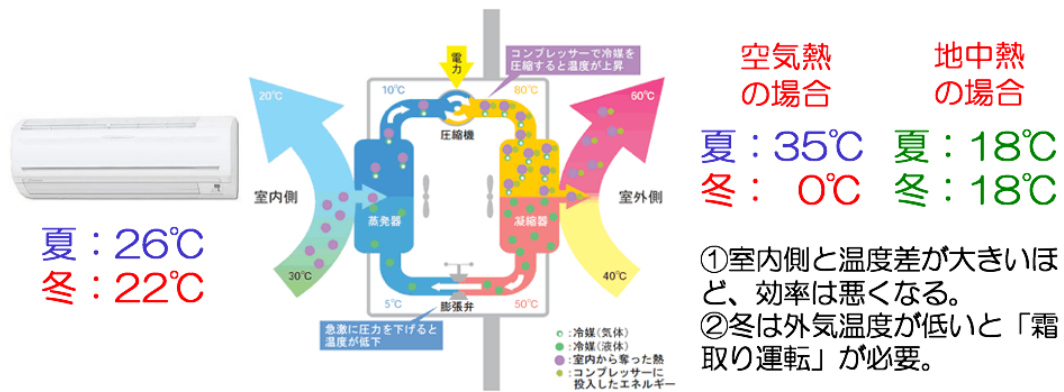
第4章 地中蓄熱による対策技術

4.1 目的

4.1.1 検討の目的と概要

地中熱利用システムは、政府のエネルギー基本計画（平成26年4月）では「再生可能エネルギー熱等」の1つとして位置付けられており、民生部門の年間エネルギー消費量削減及びヒートアイランド抑制に資する技術として期待されている。また、地盤より年間をとおして安定した温度の熱をとることができるため、真夏・真冬時の空調効率を高めることができ、電力ピーク対策としても有効である。

地中熱利用システムの実動特性やエネルギー効率については主として大学等において研究ベースで様々な検討が行われており、例えば東京大学・大岡らの「場所打ち杭を用いた地中熱利用空調システムの普及・実用化に関する研究」¹⁾、北海道大学・長野らの「現場打ち基礎杭を利用した地中熱ヒートポンプシステムに関する研究 浅層採熱管の導入可能性について」²⁾が具体的な成果の例として挙げられる。また、これらの研究成果は実務の世界にも反映されつつあり、例えば、国土交通省大臣官房官庁営繕部は平成25年10月に「官庁施設における地中熱利用システム導入ガイドライン(案)」(<http://www.mlit.go.jp/common/001016159.pdf>)を公表、特定非営利活動法人地中熱利用促進協会は「地中熱ヒートポンプシステム施工管理マニュアル」を作成するなど、普及のための準備が整いつつある。図4-1に地中熱ヒートポンプの特徴を示す。



<http://automoney.sakura.ne.jp/ohas/350/ent678.html>

図4-1 地中熱ヒートポンプの特徴

一方で、地中熱利用システムについては、現在の省エネルギー基準の評価ロジックでは評価することができない。地中熱利用システムだけに限らないが、ある技術を省エネ基準で評価するためには、評価の確からしさを客観的に担保するための根拠が必要になる。地

中熱利用システムについては、実態としての性能（システムとしての実動効率（熱交換にはポンプ動力が必要）や地盤温度への影響（経年変化や季節間蓄熱効果など）について未だ不明瞭な点がある。今後、地中熱利用システムが普及するためには、これらを明らかにするとともに、エネルギー消費性能評価手法を開発し、この手法の確からしさを検証することが必要である。

そこで、本章では、地中熱利用システムの中でも地中熱ヒートポンプを対象を絞り、次のステップで研究を行い、性能の実態を明らかにする。

① 観測：地中熱ヒートポンプの性能実証実験

地中熱ヒートポンプと空冷ヒートポンプを設置して、実動特性を計測し、それぞれの運転特性を明らかにする。また、地盤採熱量や地中内の温度分布を分析する。

② 計算：地中熱の蓄採熱に関する数値解析

地中の温度・水分の三次元分布、地中熱ヒートポンプによる蓄採熱量を計算するプログラム（以下、「地中熱ポテンシャル計算プログラム」とする。）を開発する。また、観測データを入力して、推定精度を検証する。

なお、地中熱の蓄採熱量を推定するプログラムとして、「GroundClub（グラウンドクラブ、地中熱源ヒートポンプシステム性能予測プログラム）」が市販されている。しかし、このプログラムは設計者が容易に使えるよう簡易化されたツールであり、地盤の熱特性（熱伝導率、密度、比熱）を深さ毎に詳細に入力することができず、解析対象エリア全体の平均値しか入力できない。また、地下水流の影響を考慮して熱交換量を算出することができない。これらの要素が蓄採熱量に与える影響は小さくないため、本研究では、これらの影響を踏まえて解くことができる新たなプログラムを開発した。

③ 評価：システムシミュレーションによるケーススタディ

地中熱ポテンシャル計算プログラムと建築物・設備システムのエネルギー消費量計算プログラムを連成させたシステムシミュレーション（以下、「システムシミュレーション」とする。）を開発し、実建築物に地中熱ヒートポンプを採用した場合のエネルギー消費量削減効果を推定する。設計の方法により、ピーク電力削減効果にどの程度の差が生じるかを定量的に明らかにする。

これらの検討の結果、実証実験の結果を踏まえた信頼性の高いシステムシミュレーションを整備することができ、地盤の性状（土質、地下水位等）と蓄採熱量の関係、地中熱ヒートポンプ導入効果等についての検討が容易に行えるようになる。

4.1.2 地中熱利用システムの全体像と本検討で対象とするシステム

図4-2に地中熱利用システムを分類した表を示す。本章では、間接方式のヒートポンプシステムを対象とし、中でも普及が進んでおり採用事例の多いクローズループの垂直埋設型（ボアホール、シングルUチューブもしくはダブルUチューブ）を対象を限定する。

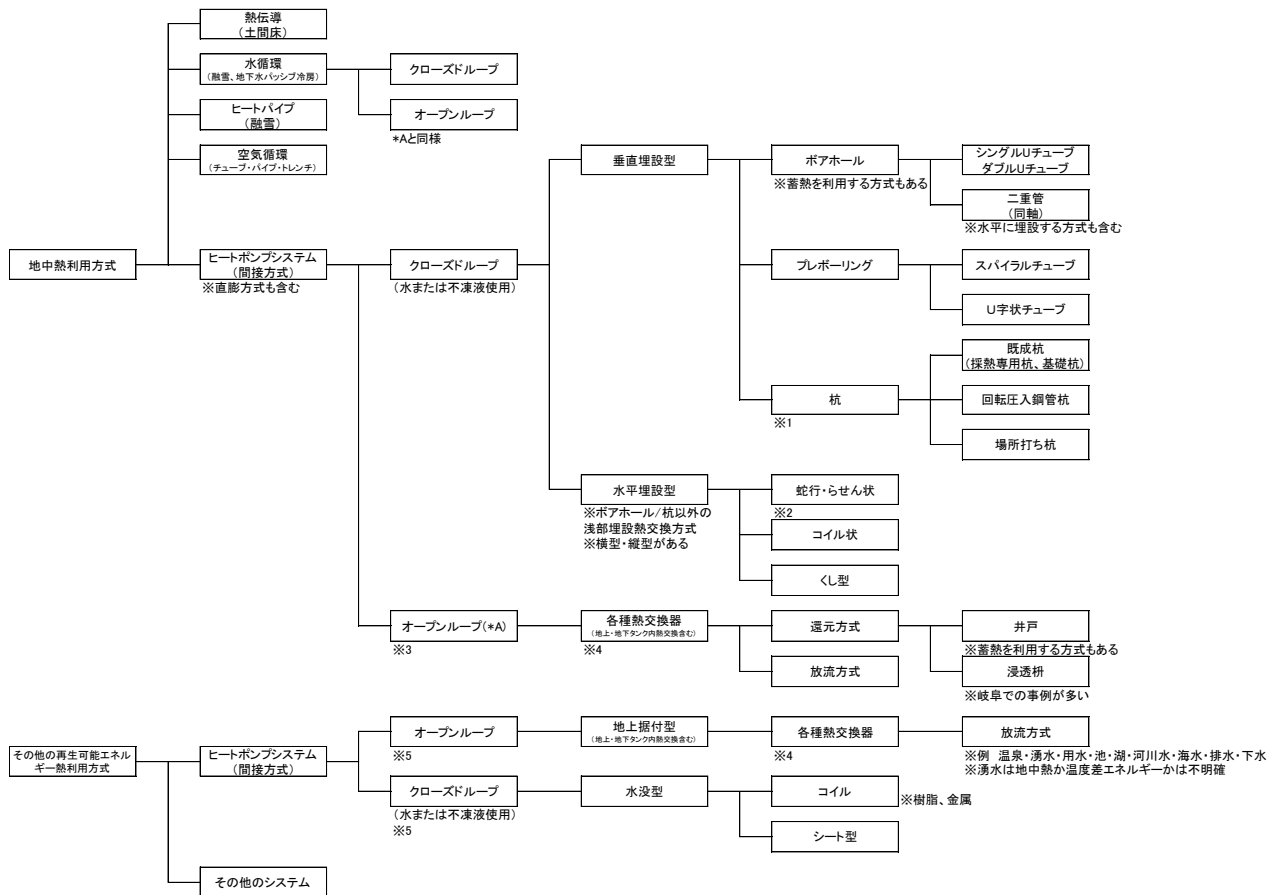


図4-2 地中熱利用システムの分類

4.2 地中熱ヒートポンプの性能実証実験

4.2.1 実証実験の目的

地中熱ヒートポンプのエネルギー消費性能の実態を明らかにするために実証実験を行う。ここでは、特に他のシステムとの比較を通して性能実態を明らかにすることを目的とし、地中熱ヒートポンプと空気熱利用ヒートポンプ（空冷ヒートポンプ）を併設して、同時に様々な負荷をかけた場合の供給除去熱量、効率、運転特性の差を観察する。これらの結果より、地中熱ヒートポンプの省エネルギー効果、電力ピーク対策効果を明らかにする。さらに、地中熱交換杭の蓄採熱量および地中内の温度分布について整理する。

4.2.2 実験施設の概要

本研究では、国立研究開発法人建築研究所の設備実験棟 1 階屋上に設置した 2 棟のユニットハウス（東棟、西棟）を利用して実証実験を実施した。実証実験のユニットハウスは、幅 3.04m、奥行 3.04m、高さ 2.44m の床面積 9.24m²、南面に幅 1.68m、高さ 0.98m の窓がある。東棟（以下、空気熱室）は空冷ヒートポンプパッケージエアコン（直膨式、以下、ASHP）を、西棟（以下、地中熱室）は地中熱ヒートポンプパッケージエアコン（直膨式、以下、GSHP）を設置した。表 4-1 に実験施設の概要を、写真 4-1～写真 4-7、図 4-3～図 4-4 に実証実験の状況を示す。

表 4-1 実験施設の概要

| | |
|-----------------------------------|---|
| ユニットハウスの仕様 (空気熱室、地中熱室 共通仕様) | 形 式：プレハブユニットハウス 寸 法：幅 3.04m×奥行 3.04m×高さ 2.44m 床面積： 9.24 m ² その他：南面ガラス窓 |
| 外壁の仕様 | 外壁：複合版外壁 (U 値 0.77W/m ² ・K)、硬質ウレタンフォーム+ロックウール断熱材 30mm 屋根：折板屋根天井付 (U 値 0.92W/m ² ・K)、硬質ウレタンフォーム断熱材 20mm 床：合板床 (U 値 0.67W/m ² ・K)、ビーズ法ポリスチレン断熱材 45mm |
| 窓の仕様 | 南面：フロート板ガラス 3mm シングル(アルミサッシ) 1.68m×0.98m |
| (東棟・空気熱室) | 空調設備：空冷ヒートポンプパッケージエアコン (直膨式) (ASHP) |
| (西棟・地中熱室) | 空調設備：地中熱ヒートポンプパッケージエアコン (直膨式) (GSHP) |

(地中熱ヒートポンプパッケージエアコン用地中採熱仕様)

| | |
|----------|--|
| ボアホールの仕様 | 掘削口径：φ179mm 掘削深度：50.95m 掘削方式：特殊振動工法 掘削概況：ボアホール区間全体を通して掘削循環水の著しい逸水が断続的に見られ地下水が豊富で地下水流速も早い |
| 地中埋設管の仕様 | 仕 様：Uチューブ (ダブル方式) 高密度ポリエチレン管 (PE100) 外径 34.0mm、厚さ 3.5mm、内径 27.0mm 挿入長さ：50.70m (ボアホール内に挿入) 配管埋設後ボアホールを 1 号珪砂で充填 |



(全景)

(ボアホールから配管立上部分)

写真4-1 実験施設 (全体外観)



(地中熱ヒートポンプ室外機)

(空冷ヒートポンプ室外機)

写真4-2 実験施設 (ユニットハウス-南面)



写真 4 - 3 実験施設（地中埋設管設置状況）



写真 4 - 4 実験施設（窓面（外側-南面））



写真 4 - 5 実験施設（窓面（室内側））

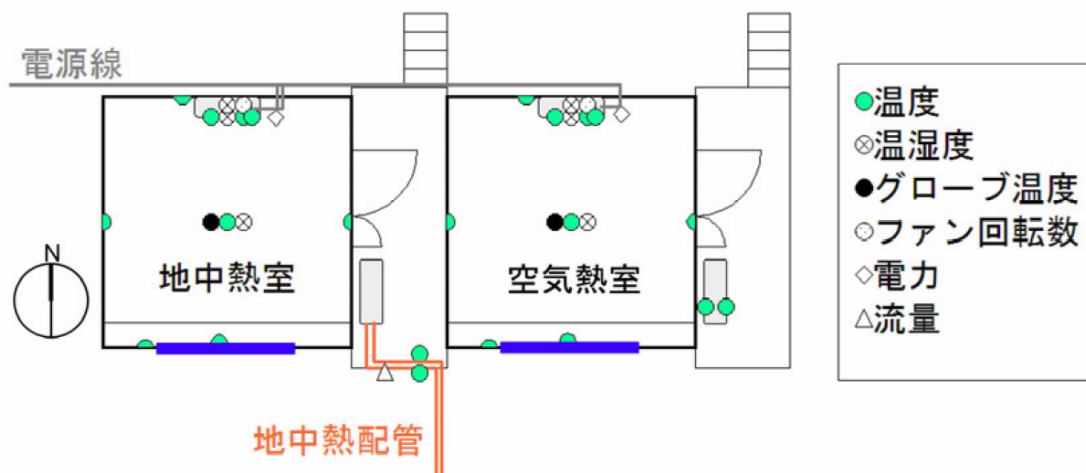
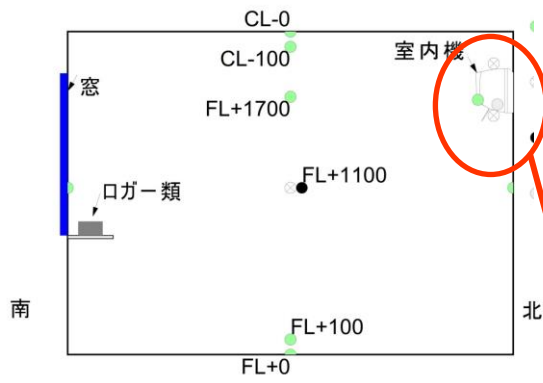


図 4-3 測定ポイント（全体平面）



写真 4-6 測定ポイント（室内状況）



(断面図)



(室内機)



(室内機には熱処理量を計測するためのセンサー類を設置)

写真 4-7 測定ポイント (断面・室内状況)

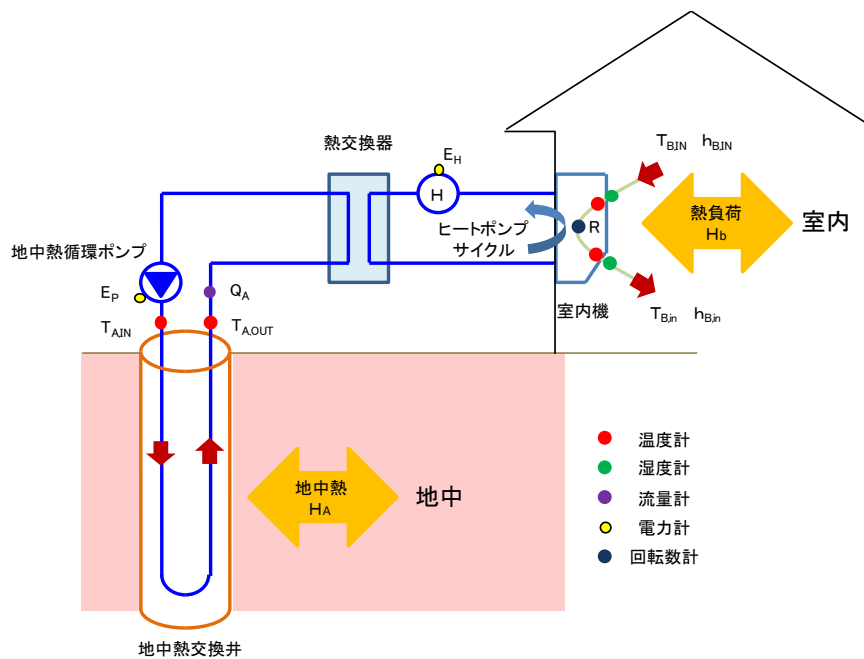


図 4-4 測定ポイント (地中熱利用システム)

4.2.3 実験計画

空気熱利用のヒートポンプと地中熱利用のヒートポンプ空調を比較するため、各室の熱負荷及びエネルギー消費効率の測定を行った。実験期間は2014年6月～2015年2月である。実験は、冷房と暖房について分けて行い、表4-2に示すように運転モードや負荷発生量を切り替えて行った。実験期間中の外気温度の状況を図4-5～図4-6に示す。

表4-2 実験スケジュール

| | 時季 | 想定負荷 | 設定温度 | 換気扇換気量 [m ³ /h] | 日射遮蔽 | ヒーター | 運転モード | 実施期間 | | | 外気温 |
|------|-----|---------|------|-------------------------------|------|--------|-------|--------|--------|------|---------|
| | | | | | | | | | | | |
| 冷房実験 | 夏期 | 低負荷 | 26℃ | 0 | 有 | OFF | 連続冷房 | 6月10日 | 8月4日 | 55日間 | 20℃～30℃ |
| | | 高負荷 | 26℃ | 360 | 有 | OFF | 連続冷房 | 8月6日 | 9月25日 | 49日間 | 15℃～35℃ |
| | 中間期 | 低負荷 | 24℃ | 0 | 無 | OFF | 連続冷房 | 10月10日 | 10月27日 | 17日間 | 10℃～25℃ |
| | | 高負荷 | 24℃ | 0 | 無 | 1.6 kW | 連続冷房 | 10月29日 | 11月6日 | 8日間 | 5℃～20℃ |
| | | 中負荷 | 24℃ | 0 | 無 | 1.0 kW | 連続冷房 | 11月8日 | 11月16日 | 8日間 | 5℃～15℃ |
| 暖房実験 | 中間期 | 低負荷 | 24℃ | 0 | 有 | OFF | 連続暖房 | 11月18日 | 11月30日 | 12日間 | 0℃～20℃ |
| | 冬期 | 低負荷 | 20℃ | 0 | 有 | OFF | 連続暖房 | 12月2日 | 12月16日 | 14日間 | -5℃～15℃ |
| | | 中負荷 | 20℃ | 360 | 有 | OFF | 連続暖房 | 12月18日 | 1月5日 | 18日間 | -5℃～10℃ |
| | | 中負荷(間欠) | 20℃ | 360 | 有 | OFF | 間欠暖房 | 1月7日 | 1月25日 | 18日間 | -5℃～10℃ |
| | | 高負荷 | 26℃ | 360 | 有 | OFF | 連続暖房 | 1月27日 | 2月20日 | 24日間 | -5℃～10℃ |

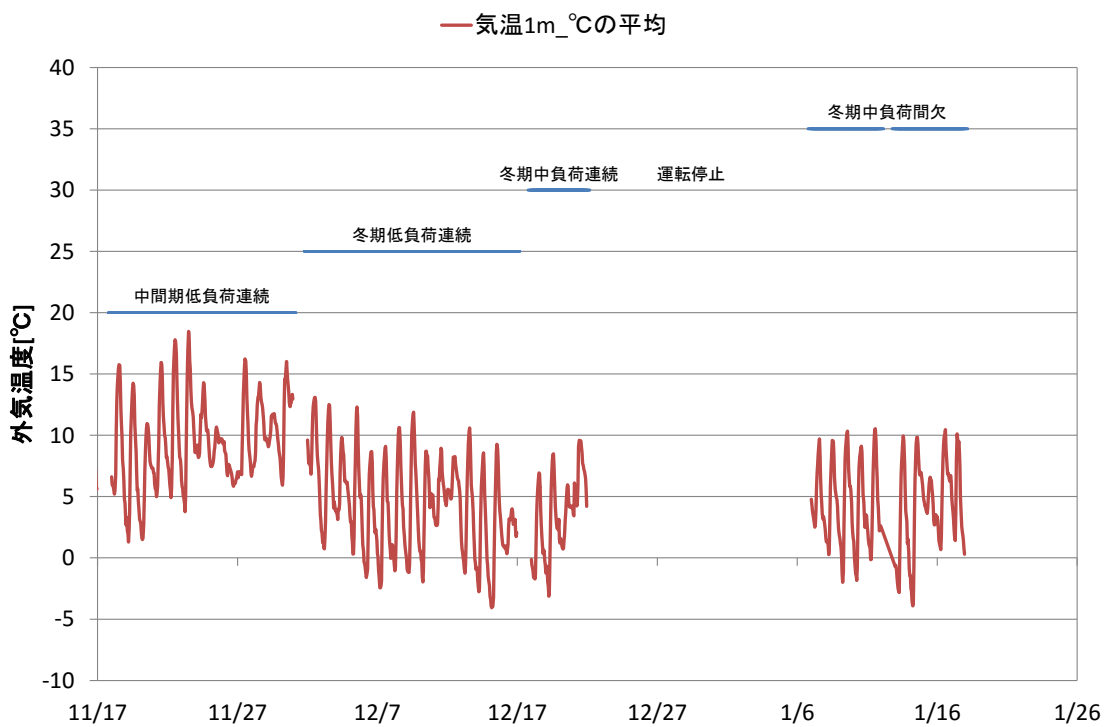
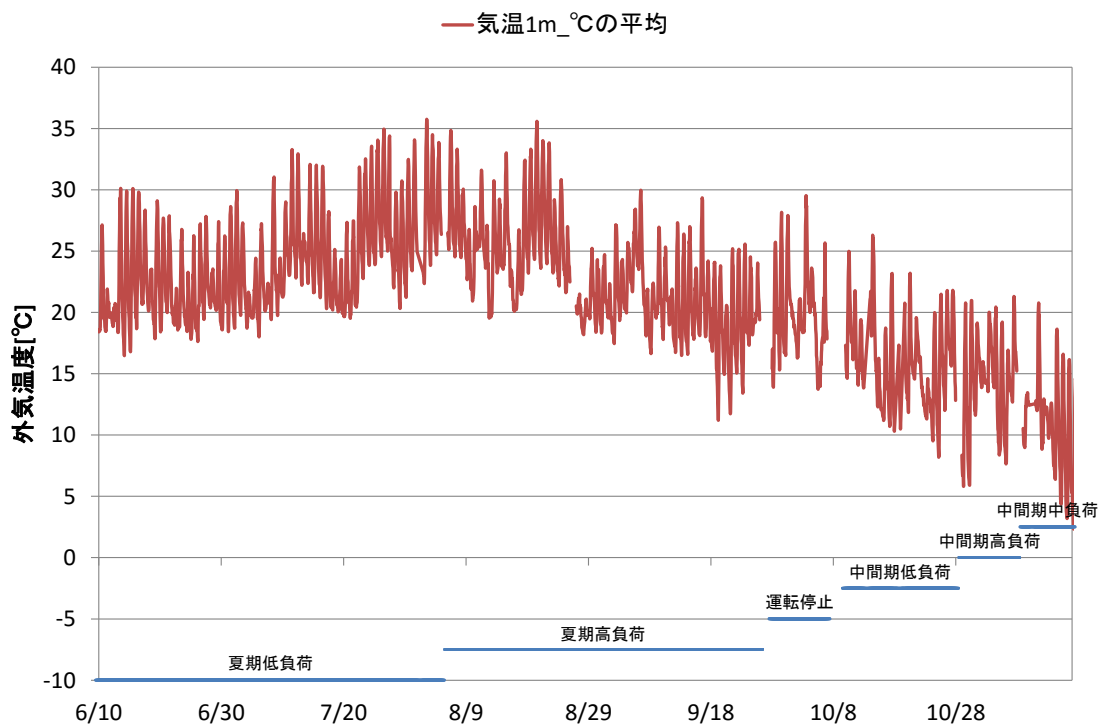


図 4 - 5 冷房実験時・暖房実験時の外気温推移

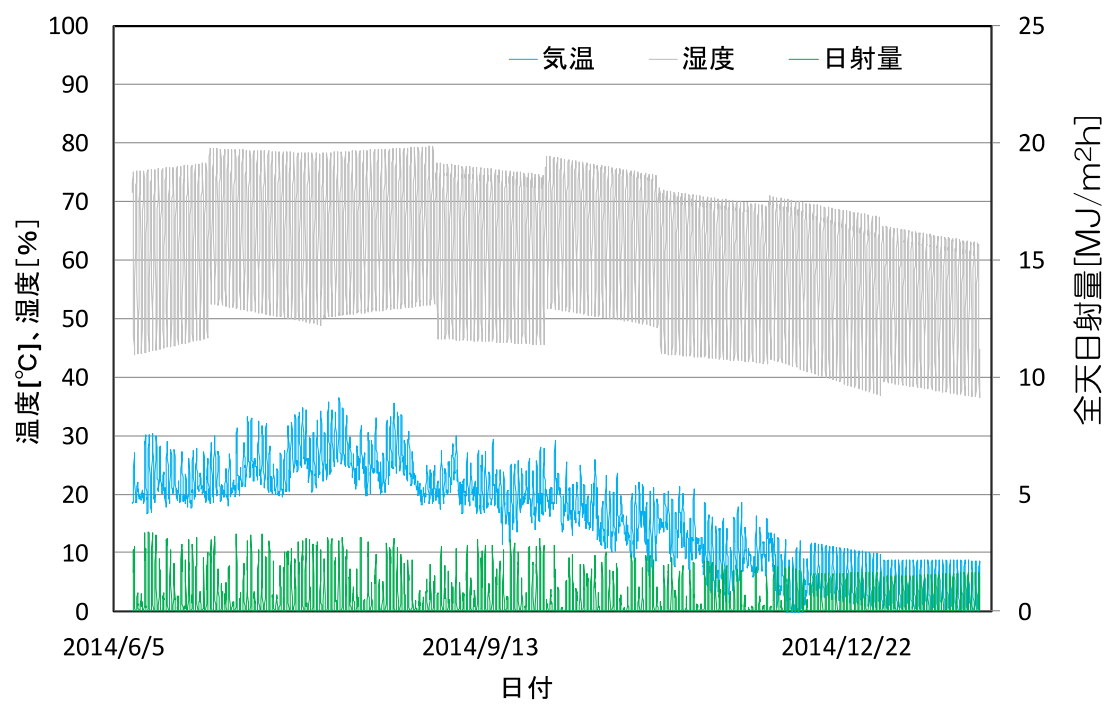


図 4 - 6 冷房実験時・暖房実験時の日射量推移

実験開始前に、地盤の熱特性を調査するためのサーマルレスポンス試験及び冷房時のファン回転数と吹出風量の関係式の作成を実施した。それぞれの概要を以下に示す。

(1) サーマルレスポンス試験の結果の概要

2012年3月8～14日にかけてサーマルレスポンス試験を行い、土壌の熱伝導率は8.17 W/(m・K)と推定された。地下3～14mにおいて、熱伝導率が局所的に大きな値となることが判った。図4-7にサーマルレスポンス試験の結果を示す。

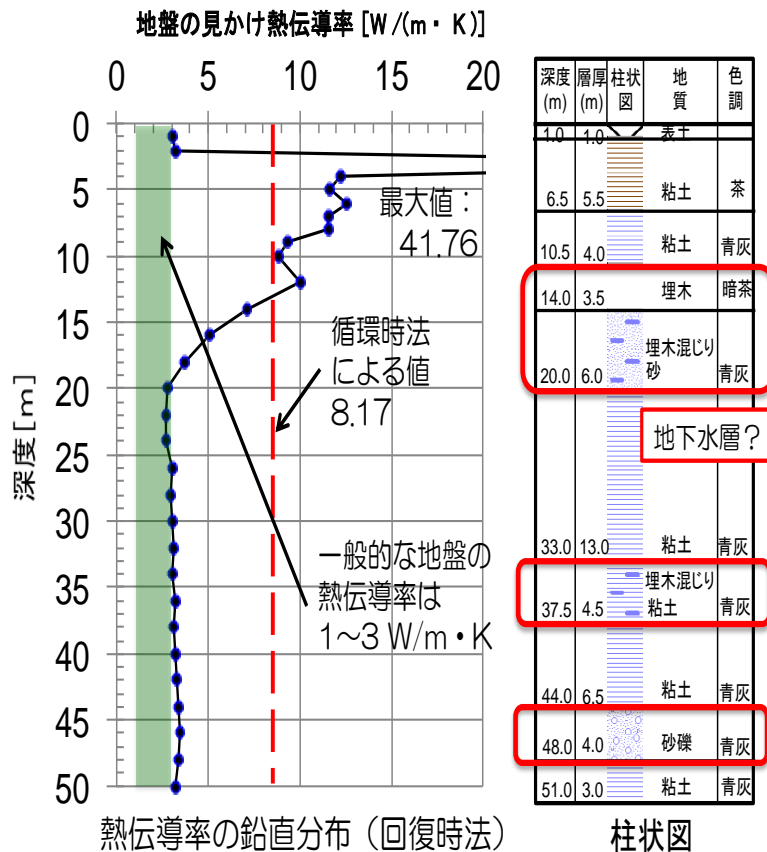


図4-7 サーマルレスポンス試験の結果

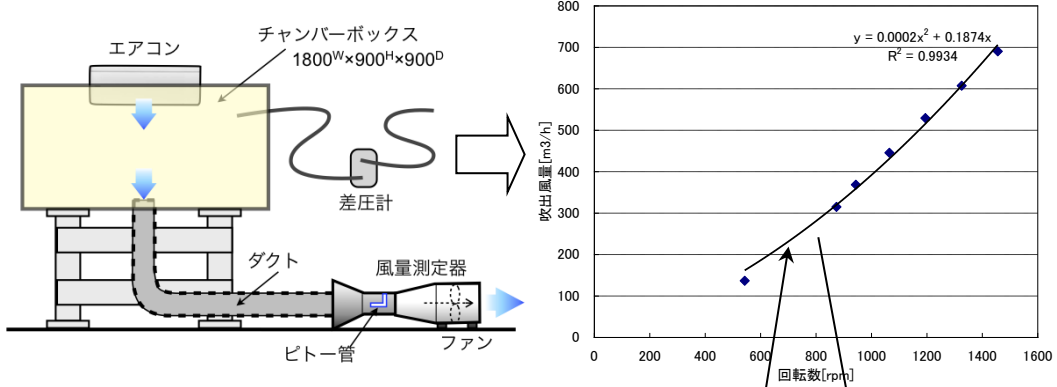
(2) 冷房時のファン回転数と吹出風量の関係式作成の概要

チャンバー内と室内(風量測定器が置かれた空間)との間の圧力差が0となる様にファンの風量を調整し、圧力補償法により予め室内機ファン回転数と吹出風量の関係式を求めた。測定は2014年10月7～8日の2日間行った。測定時間間隔は、差圧は10秒、回転数は0.1秒とした。風量は風量測定器による10秒間平均値を使用した。

図4-8に測定概要を、図4-9にファン回転数と吹出風量の関係を示す。

事前実験

1. 圧力補償法により予め室内機ファン回転数と吹出風量の関係式を求める。



本実験

2. 吹出/吸込温湿度とファン回転数からエンタルピー差と吹出風量を得る。

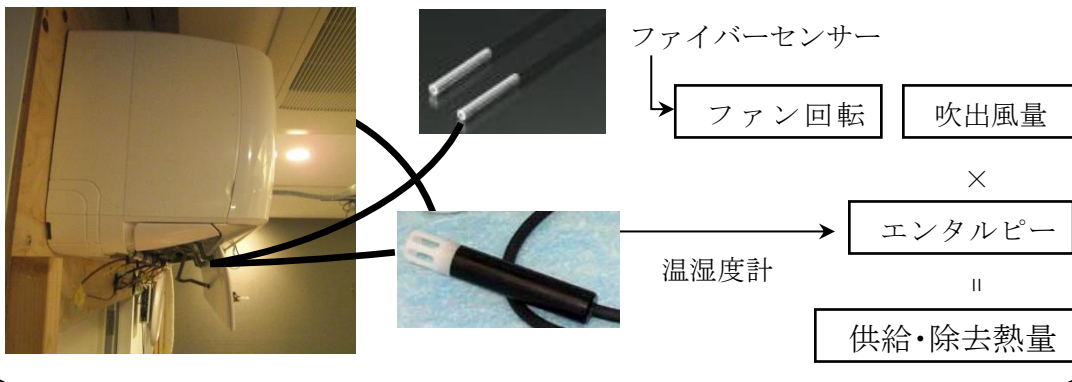


図 4-8 測定概要

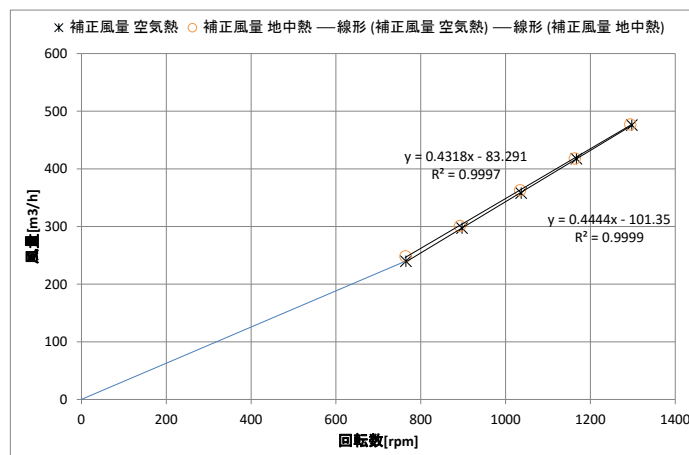


図 4-9 ファン回転数と吹出風量の関係

4.2.4 夏期の実験結果

夏期の実験による計測結果を図4-10～図4-19に示す。得られた知見を以下に示す。

- ① 夏期（外気温度が高い条件）においては、空冷ヒートポンプよりも地中熱ヒートポンプの方が効率（ $COP = \text{生成熱量} / \text{消費電力}$ ）は良い。特に、外気温度が高く処理熱量（負荷率）が小さい場合に差が大きくなる。「夏期冷房低負荷時」の実験において、外気温35度、負荷率30%の場合、地中熱ヒートポンプのCOPは空冷ヒートポンプの1.5倍となった。最大電力が出現する条件（＝外気温が高い）において効率差が大きくなるので、地中熱ヒートポンプはピーク電力削減に有効な技術であることが判る。
- ② 一方、中間期（外気温度が低い条件）においては、地中熱ヒートポンプよりも空冷ヒートポンプの方が効率は良い。中間期においては、採熱還温度（地盤からの還り冷水温度）よりも外気温度の方が低くなり、外気と熱交換を行う空冷ヒートポンプの方が効率は良くなる。
- ③ 空冷ヒートポンプと地中熱ヒートポンプでは、潜熱（湿気）の処理量が異なる。夏期実験においては、空冷ヒートポンプの方が顕熱比（顕熱処理量／全熱処理量）は小さい。つまり、潜熱処理量が大きい。室内湿度を絶対湿度で比較すると、やや空冷ヒートポンプ室の方が低い傾向が見られる。ただし、これは湿度センサーの計測精度が影響している可能性もある。

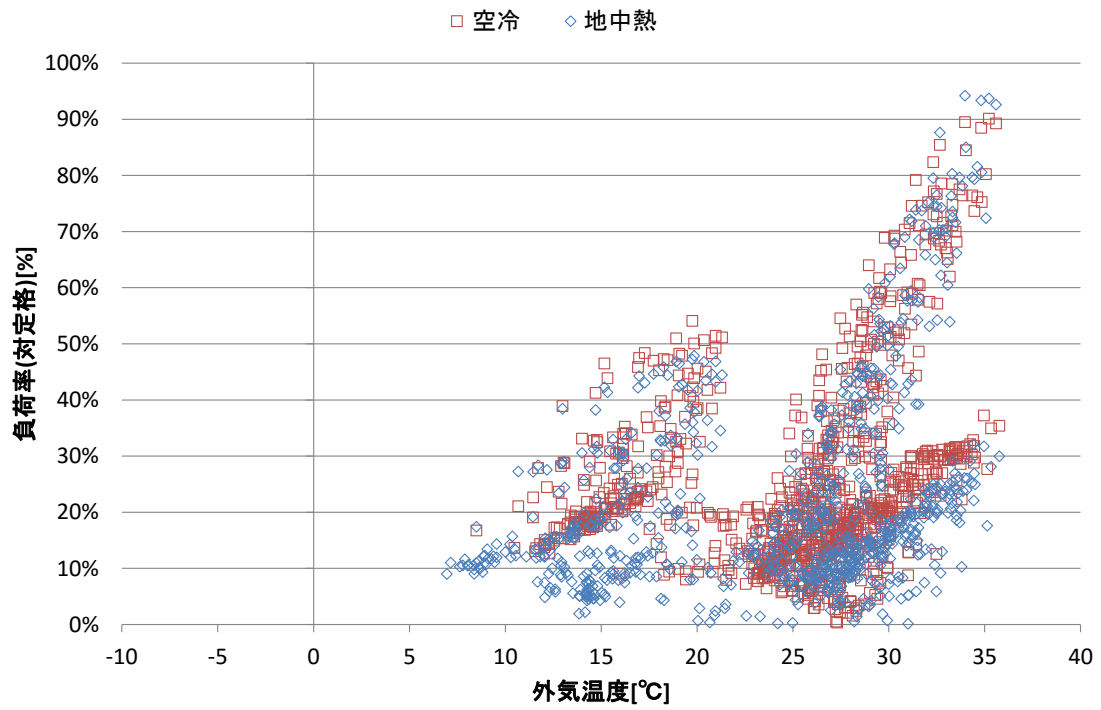


図4-10 負荷率と外気温度

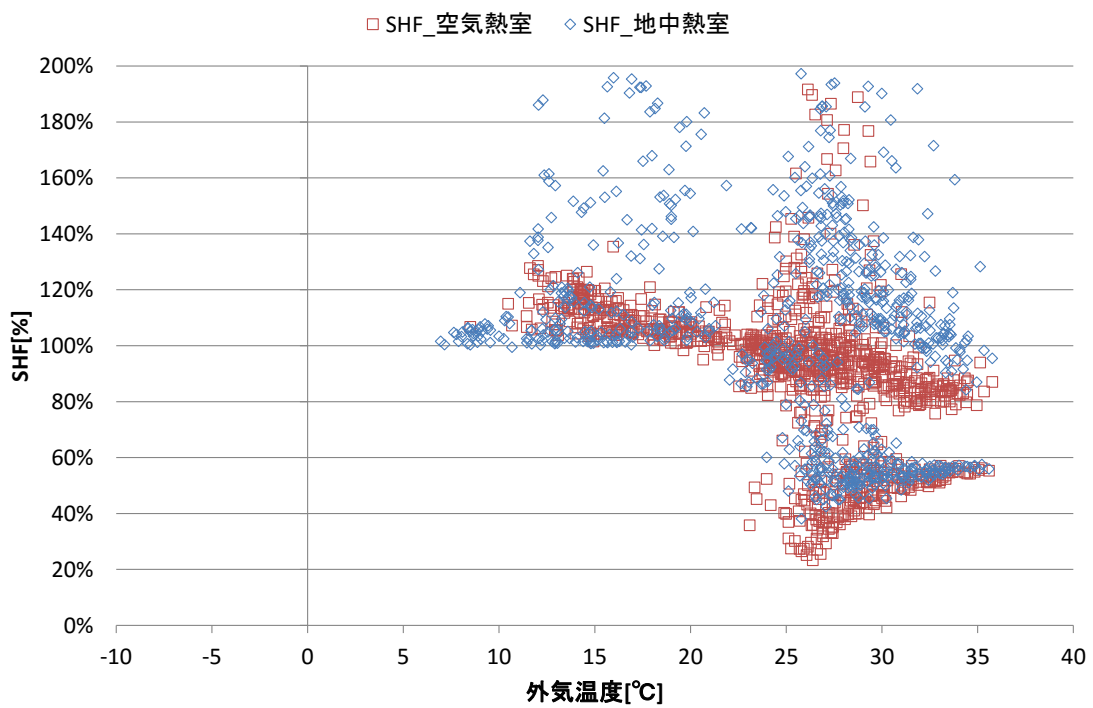


図4-11 顕熱比 (SHF) と外気温度

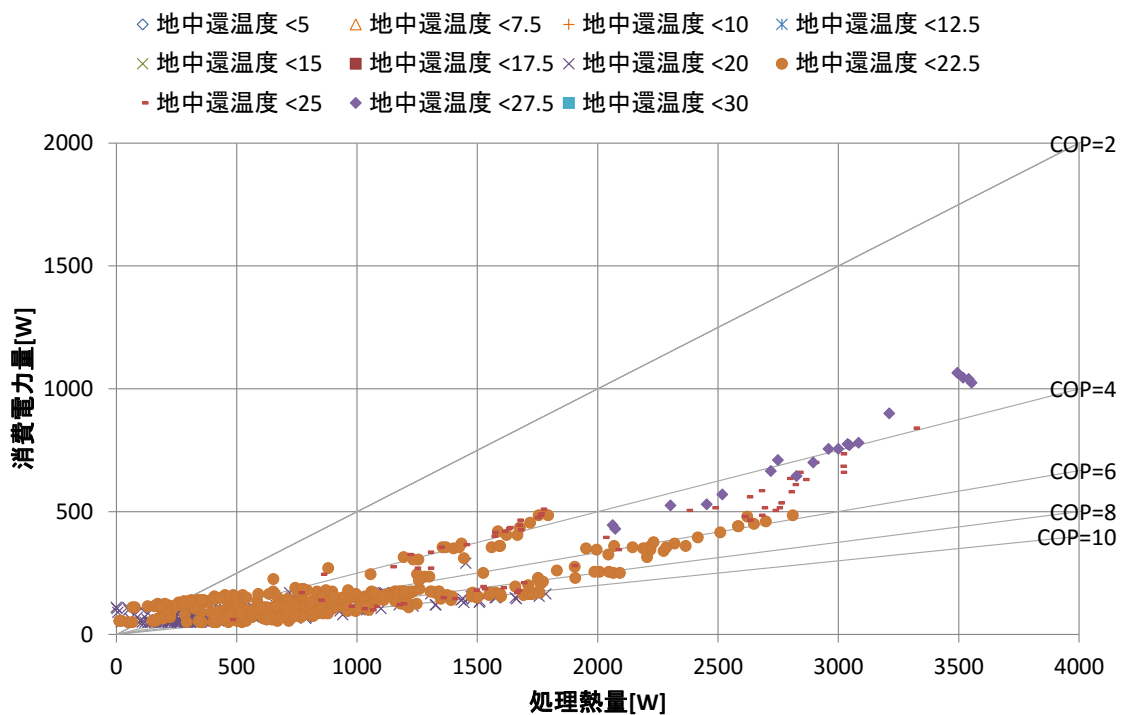


図 4 - 1 2 消費電力と処理熱量(地中熱)

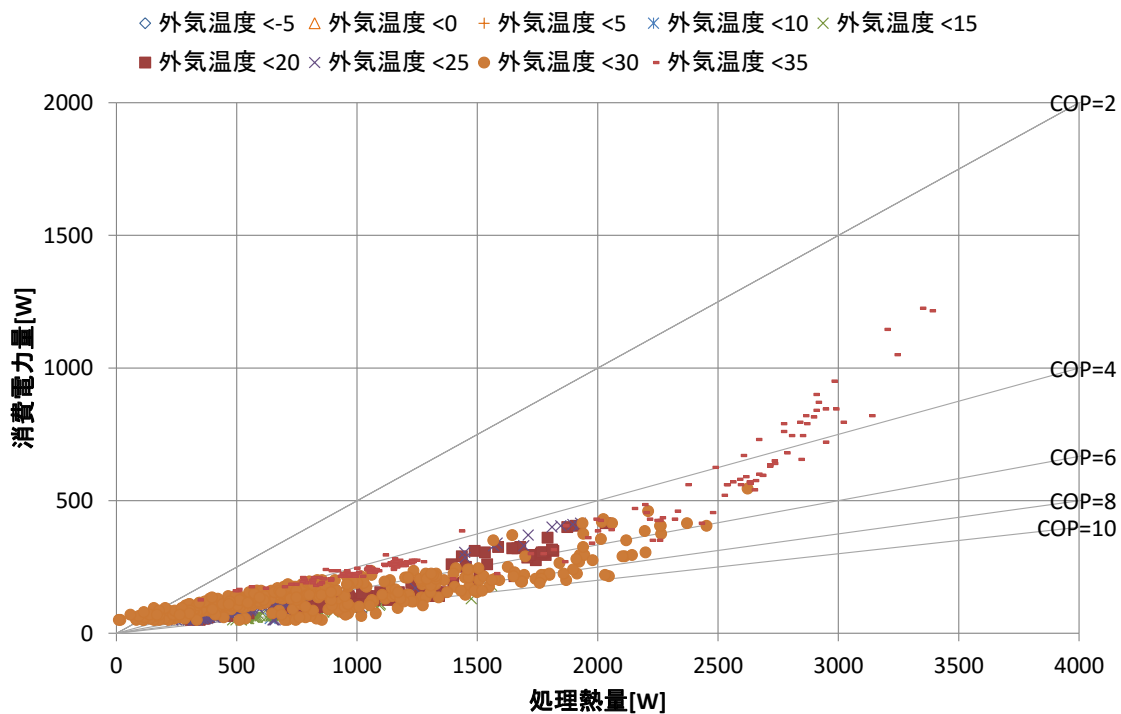


図 4 - 1 3 消費電力と処理熱量(空冷)

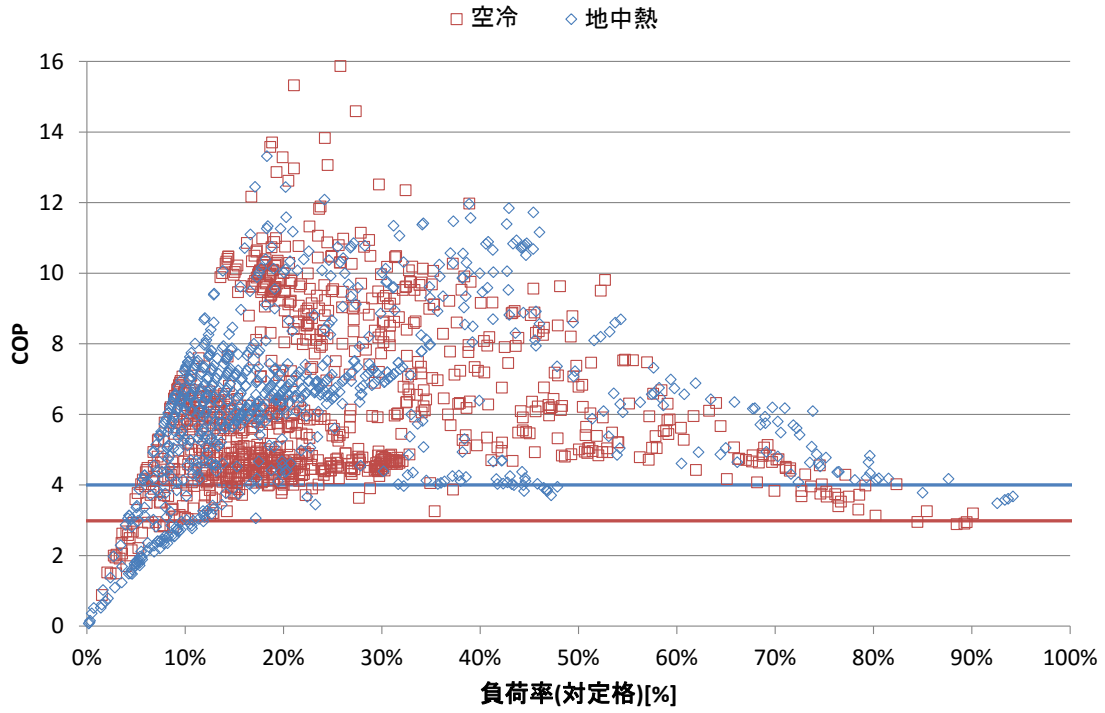


図 4 - 1 4 COP と負荷率

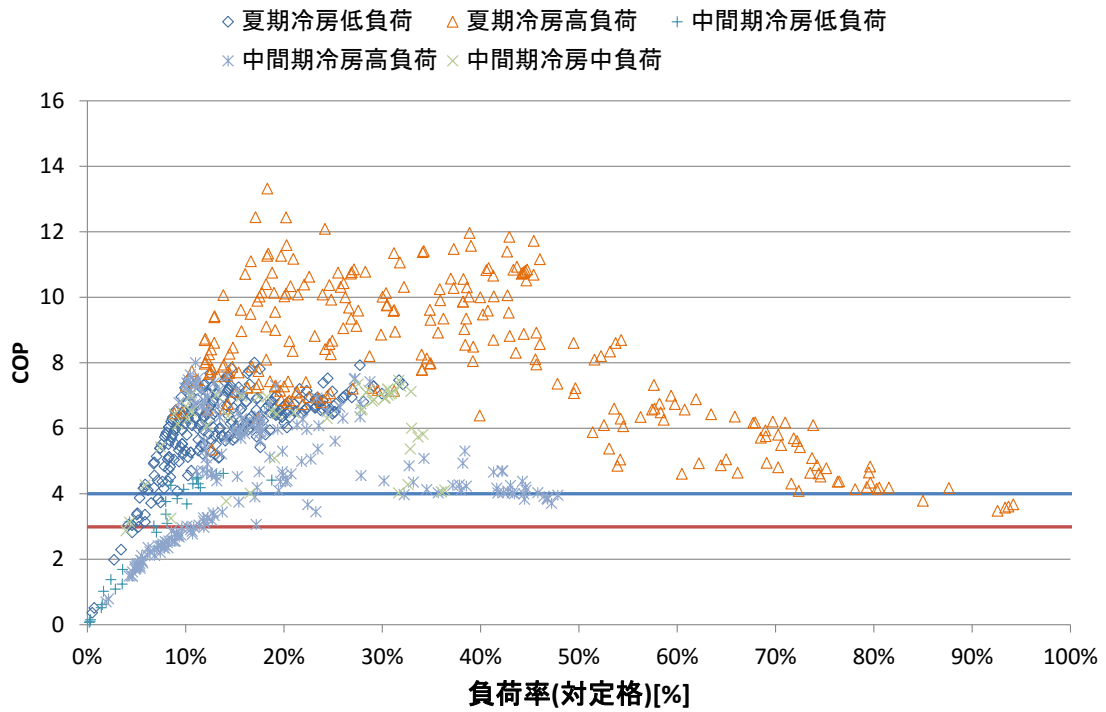


図 4 - 1 5 COP と負荷率(地中熱)

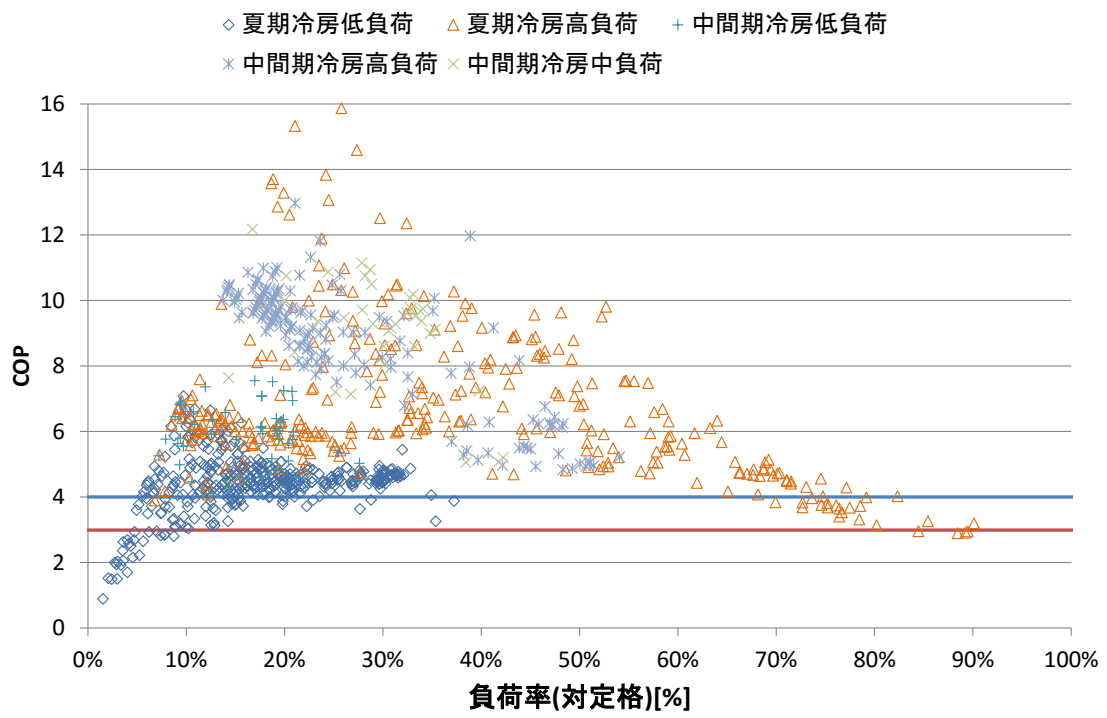


図 4 - 1 6 COP と負荷率(空冷)

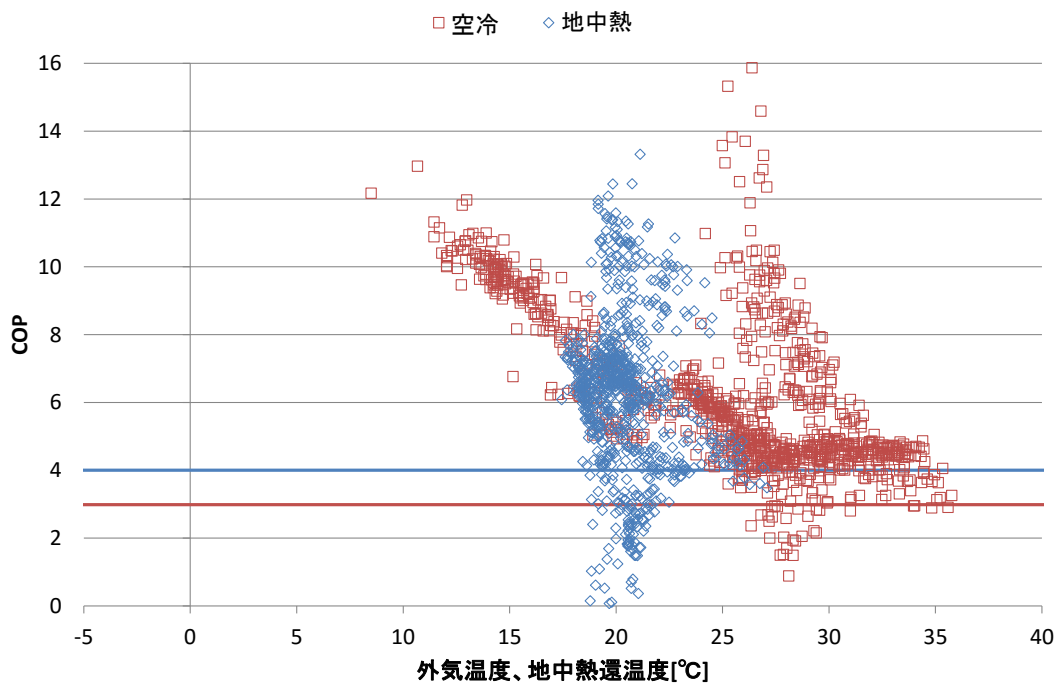


図 4 - 1 7 COP と外気・地中熱温度(冷房)

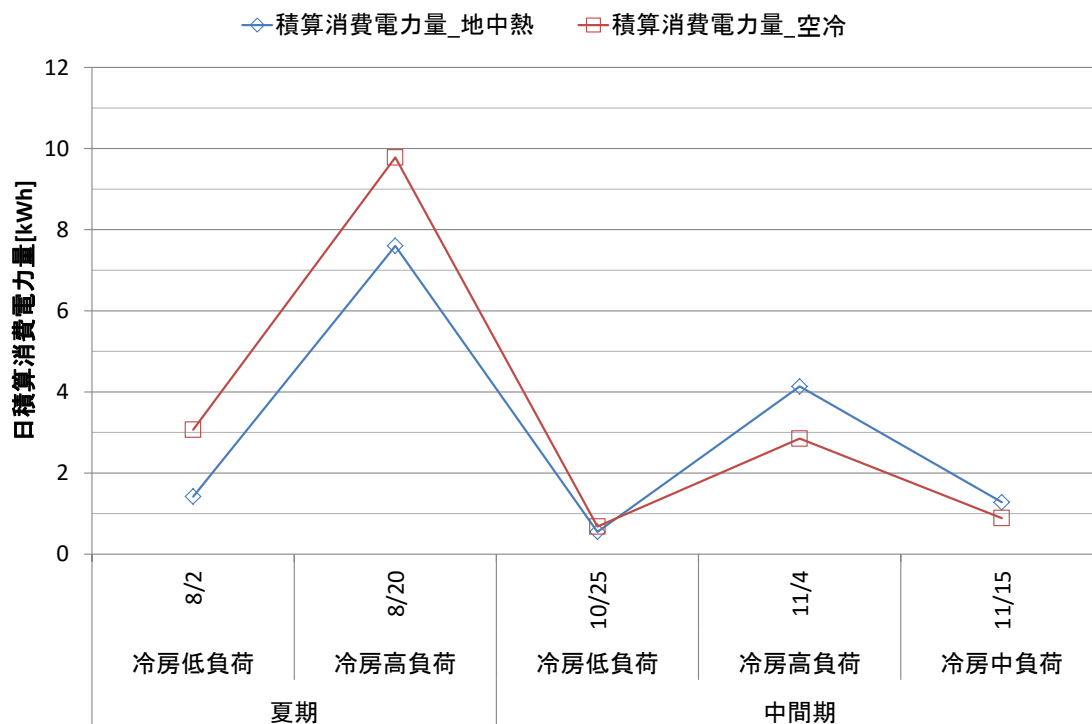


図 4 - 1 8 積算消費電力量

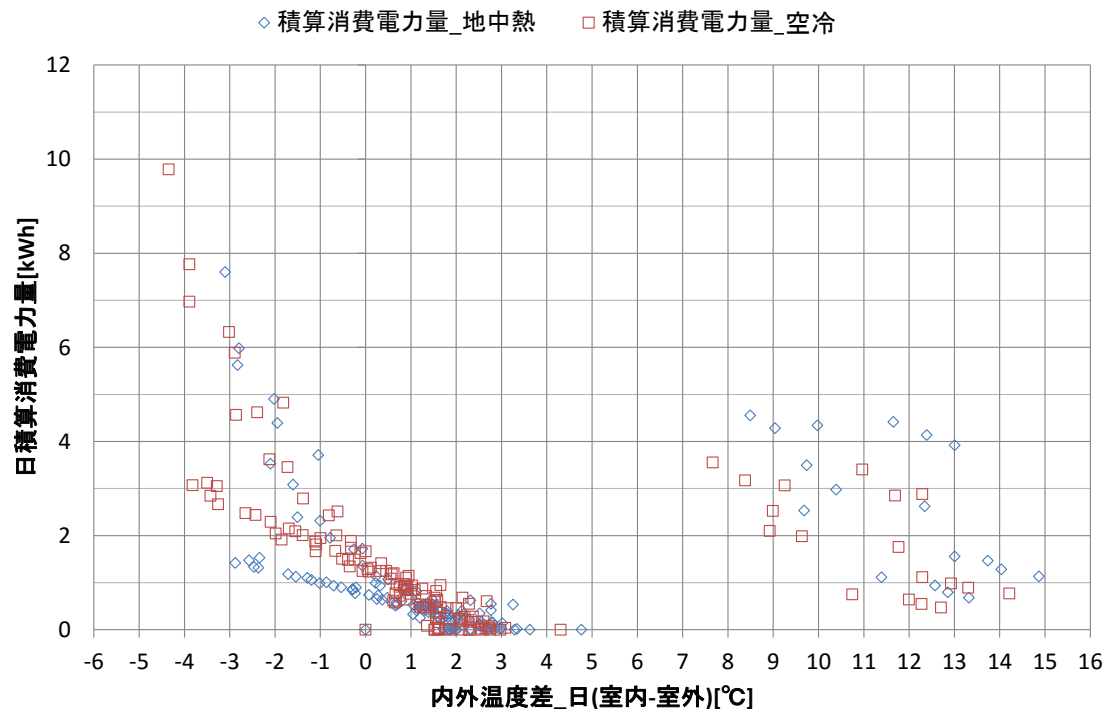


図 4 - 1 9 COP と内外温度差の相関(冷房全ケース)

図4-20に高負荷時の代表日(8/20)のピークカット効果((空気熱の消費電力量-地中熱の消費電力量)/地中熱の消費電力量)を示す。処理熱量自体は空気熱の方が大きい、ピーク電力は約25%の差が見られた。図4-21に処理熱量と消費電力量の相関図を示す。空気熱の最も処理熱量の大きいプロットに注目するとピークカット効果は16%であった。

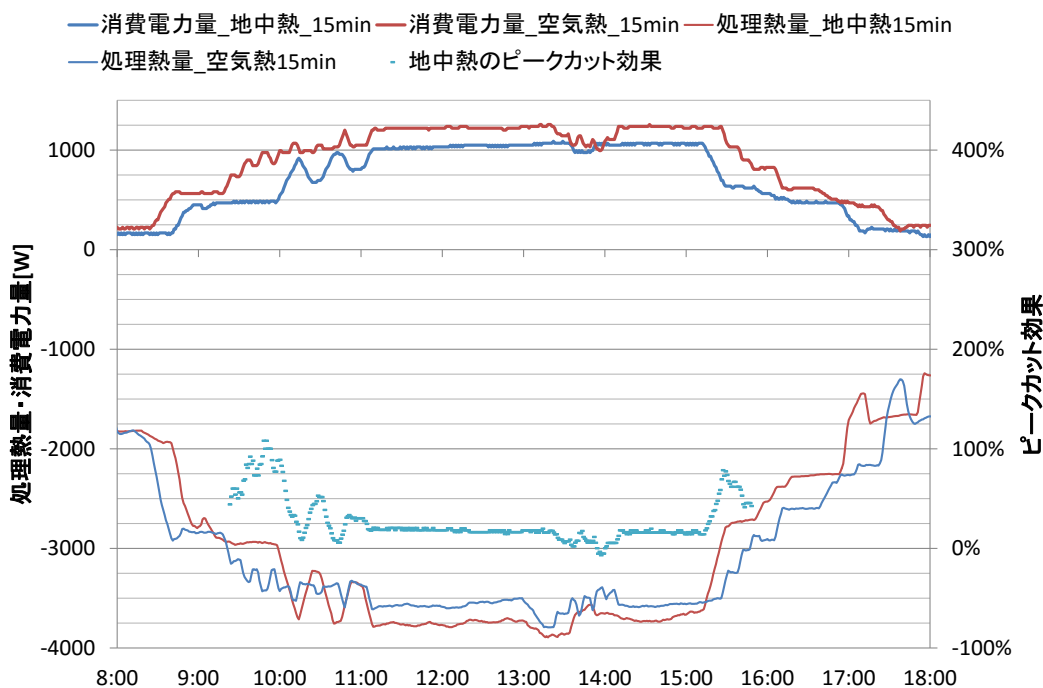


図4-20 消費電力量と処理熱量(15分移動平均値)(冷房)

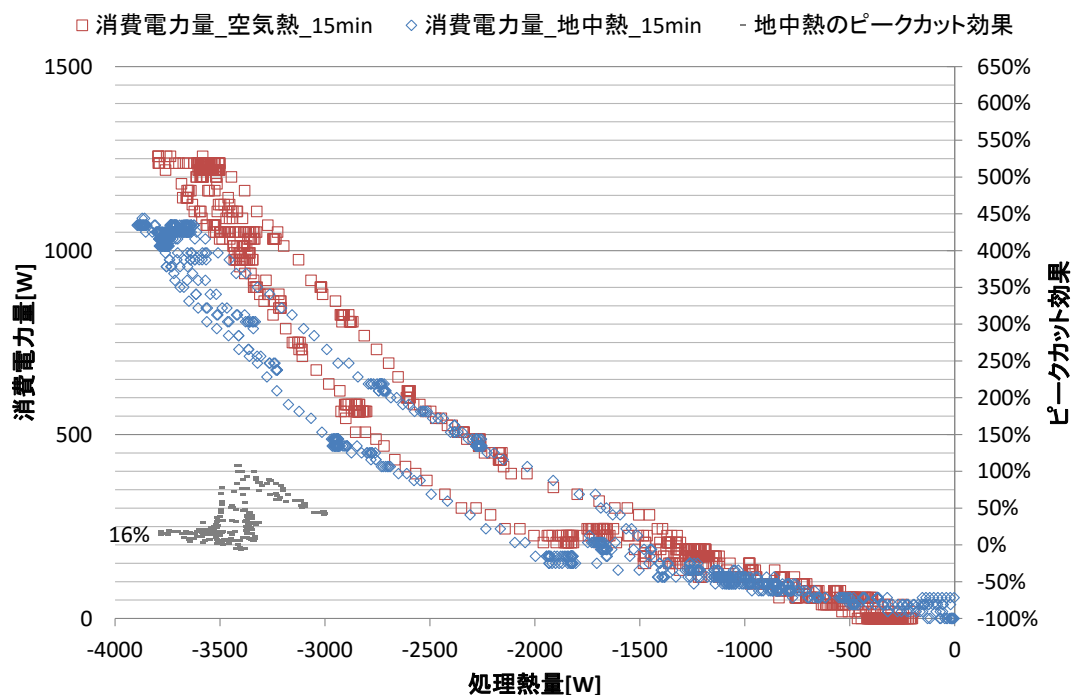


図4-21 消費電力量と処理熱量の相関(15分移動平均値)(冷房)

4.2.5 冬期の実験結果

冬期の実験による計測結果を図4-22～図4-29に示す。得られた知見を以下に示す。

- ① 外気温度、負荷率によらず、空冷ヒートポンプよりも地中熱ヒートポンプの方が効率は良い。特に、外気温度が低く処理熱量が小さい場合に差が大きくなる。「冬期暖房低負荷連続」時の実験において、外気温-5℃、負荷率20%の場合、地中熱ヒートポンプのCOPは空冷ヒートポンプの1.7倍となった。
- ② 今回の実験条件においては、必ず外気温度よりも採熱還温度の方が高いため、地中熱ヒートポンプの方が効率は良い結果となった。

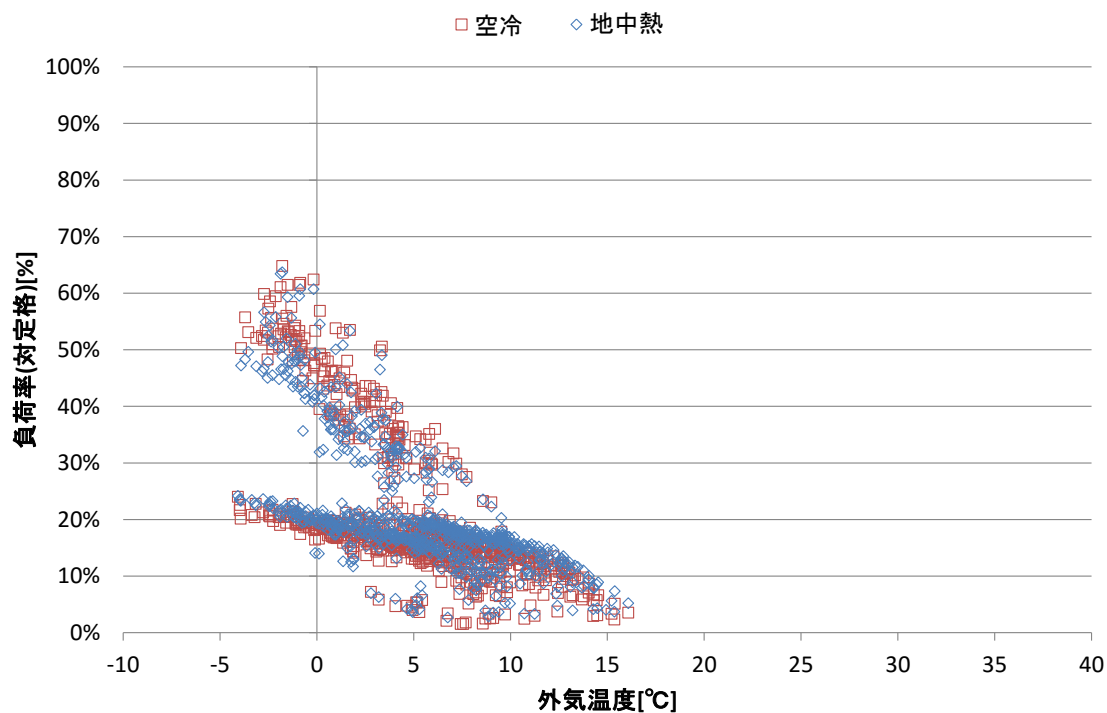


図4-22 負荷率と外気温度

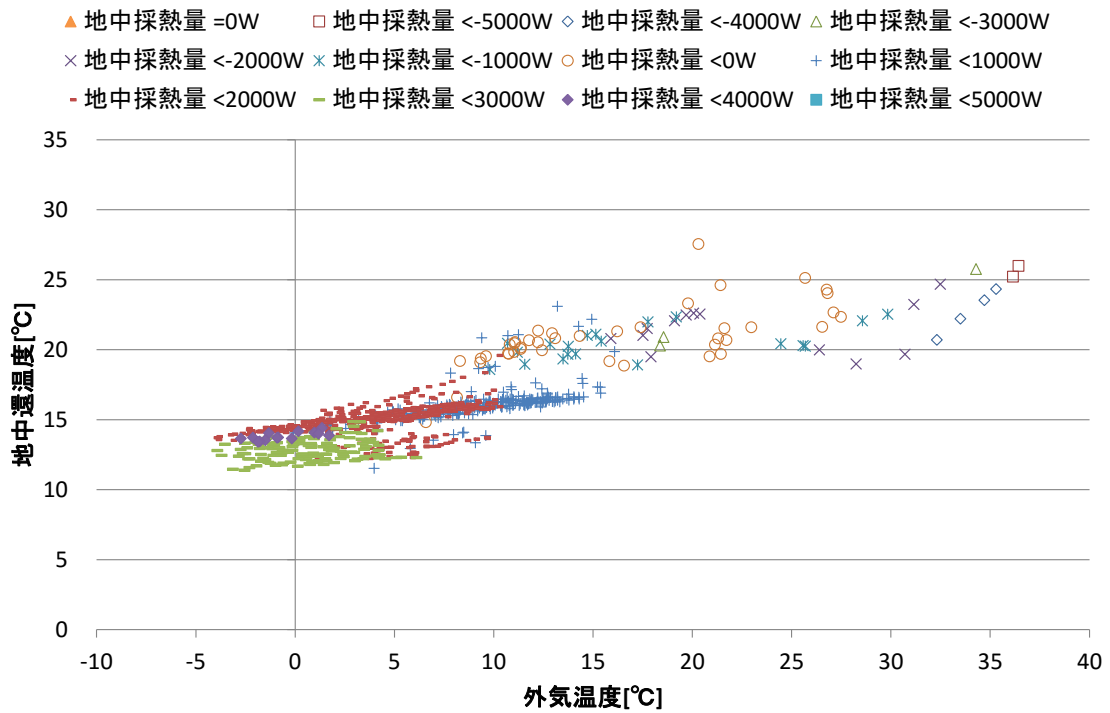


図 4 - 2 3 採熱還温度と外気温度

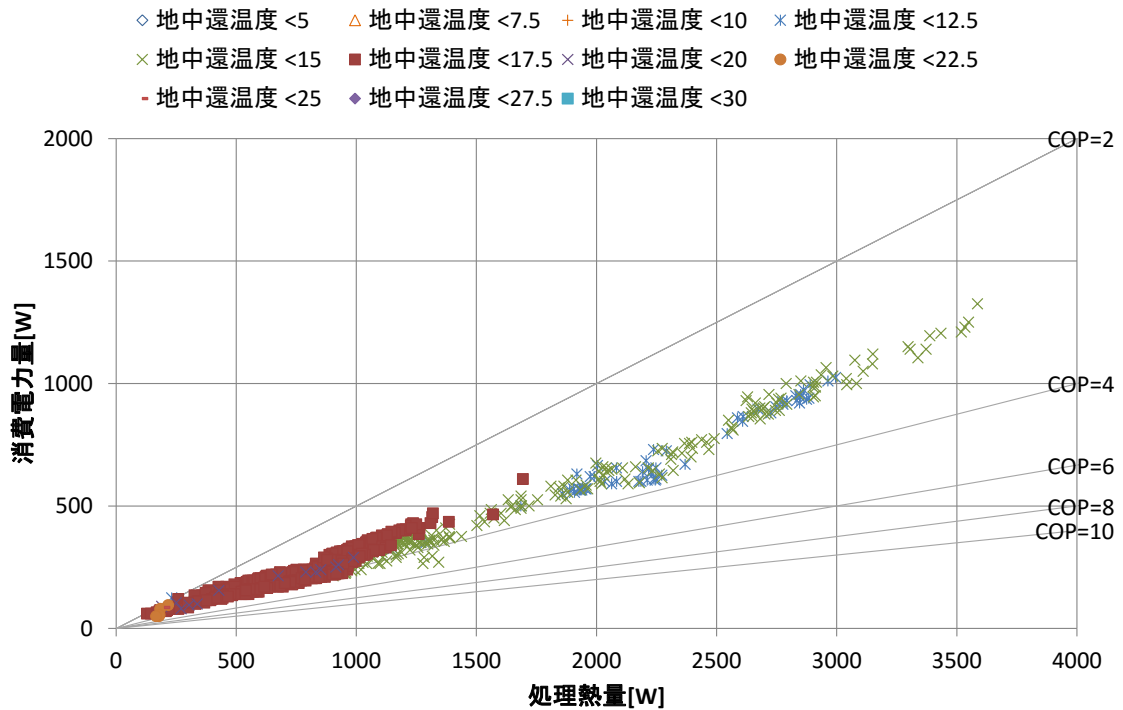


図 4 - 2 4 消費電力と処理熱量(地中熱)

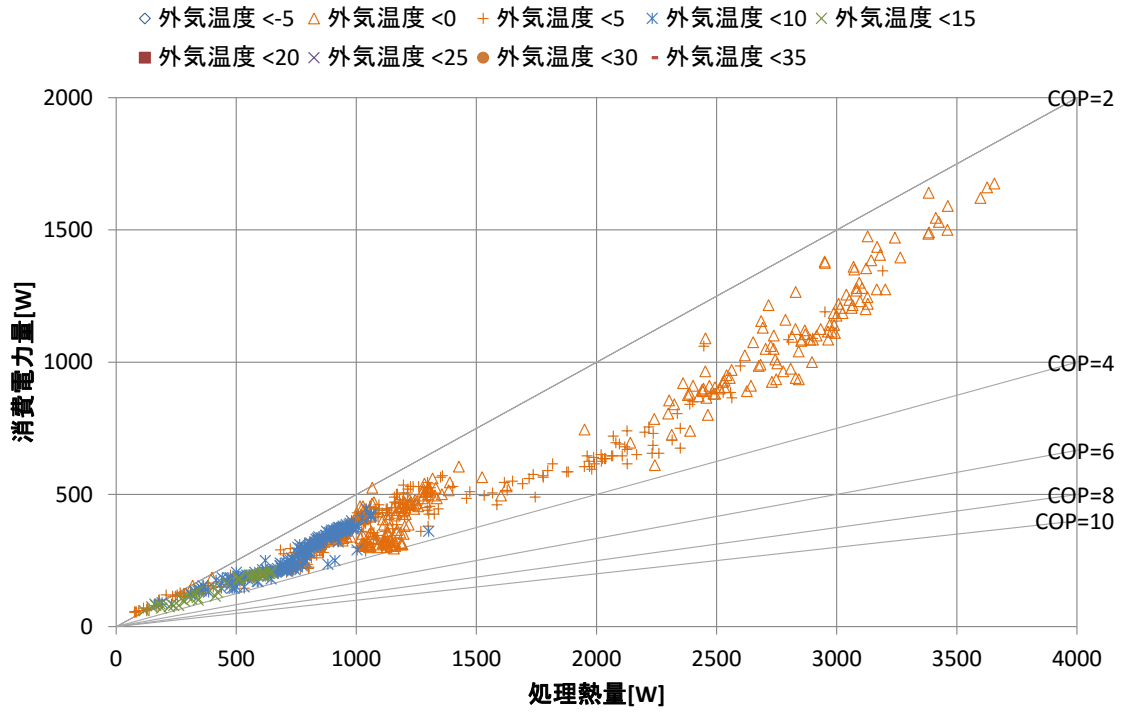


図 4 - 2 5 消費電力と処理熱量(空冷)

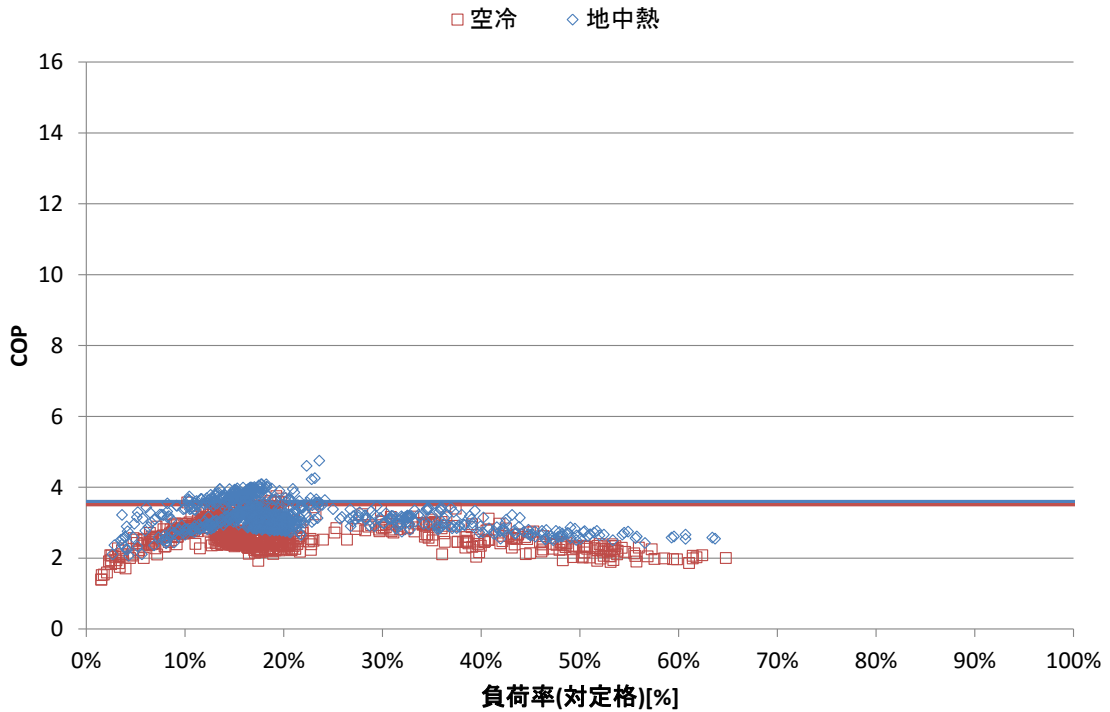


図 4 - 2 6 COP と負荷率

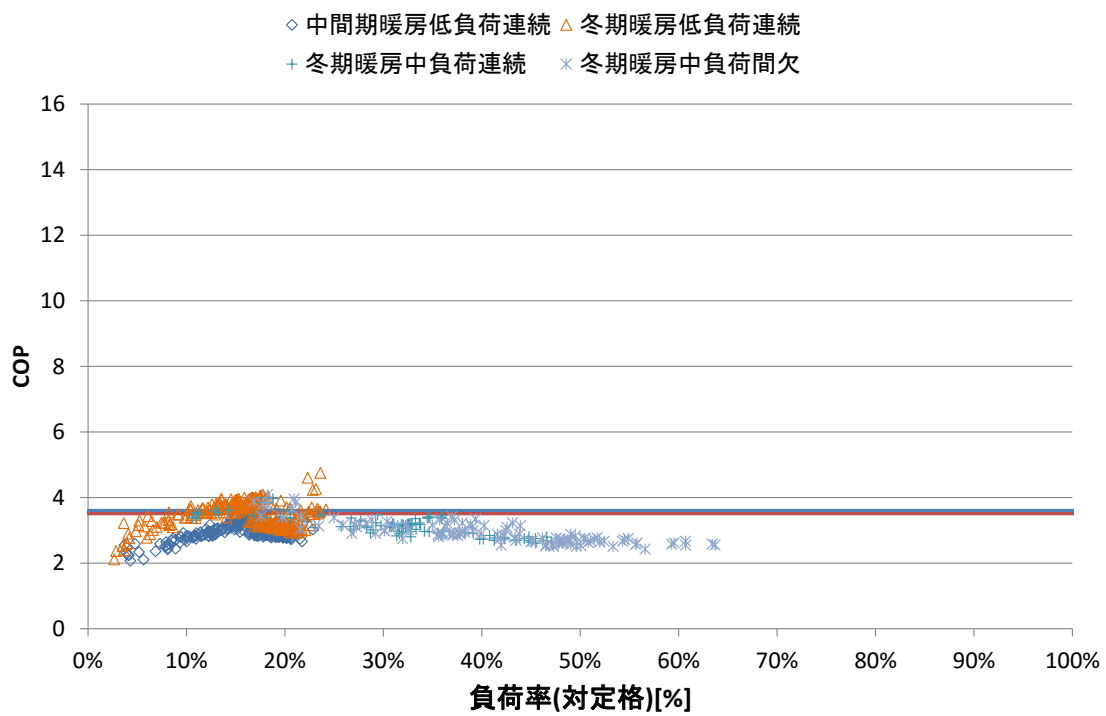


図 4 - 2 7 COP と負荷率(地中熱)

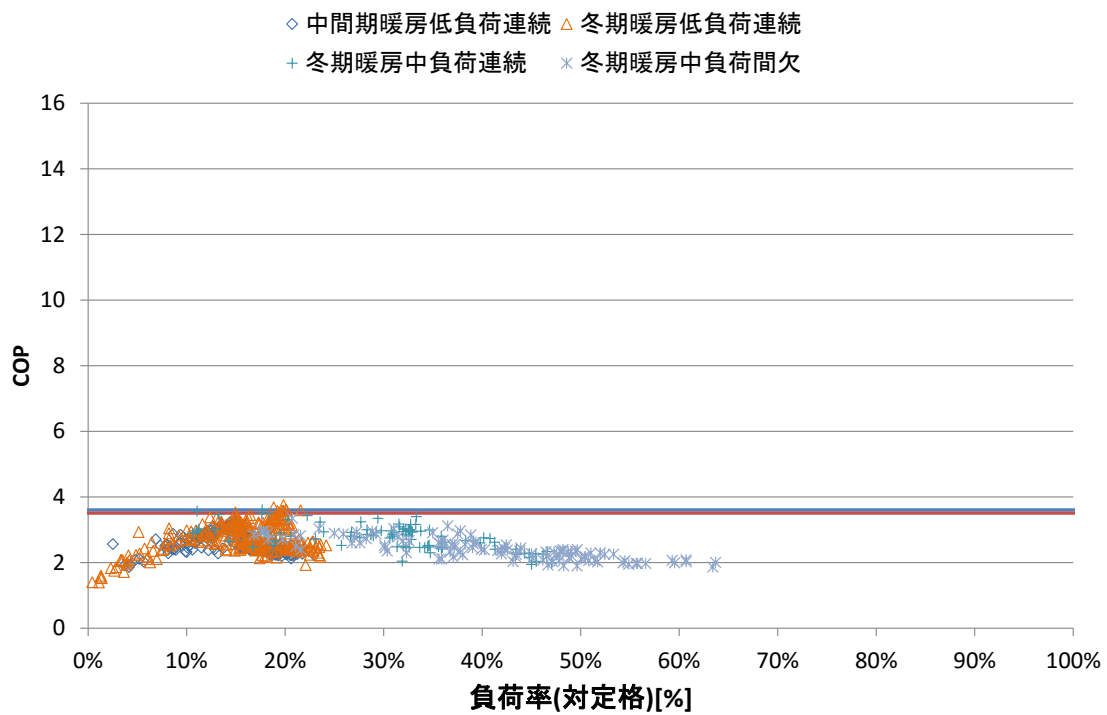


図 4 - 2 8 COP と負荷率(空冷)

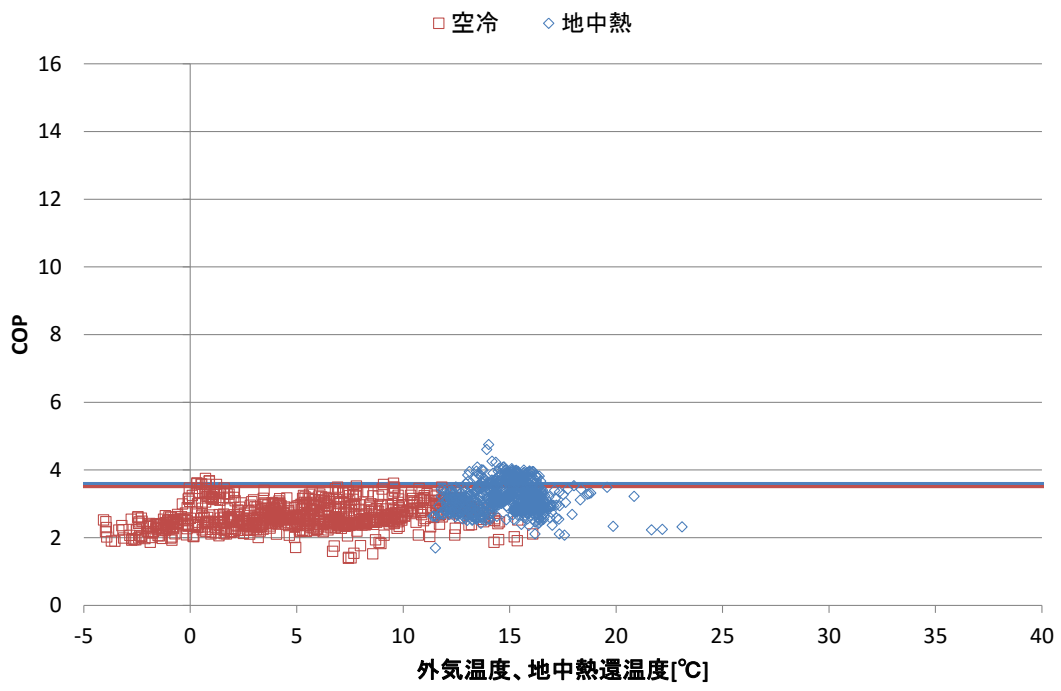


図 4 - 2 9 COP と外気・地中熱温度 (暖房)

図4-30に中負荷間欠時の代表日(1/14)のピークカット効果（(空気熱の消費電力量-地中熱の消費電力量)/地中熱の消費電力量）を示す。処理熱量自体は空気熱の方が大きい
が、ピーク電力はバラツキがあるものの10~60%程度の差が見られた。図4-31に処理
熱量と消費電力量の相関図を示す。空気熱の最も処理熱量の大きいプロットに注目すると
ピークカット効果は27%であった。

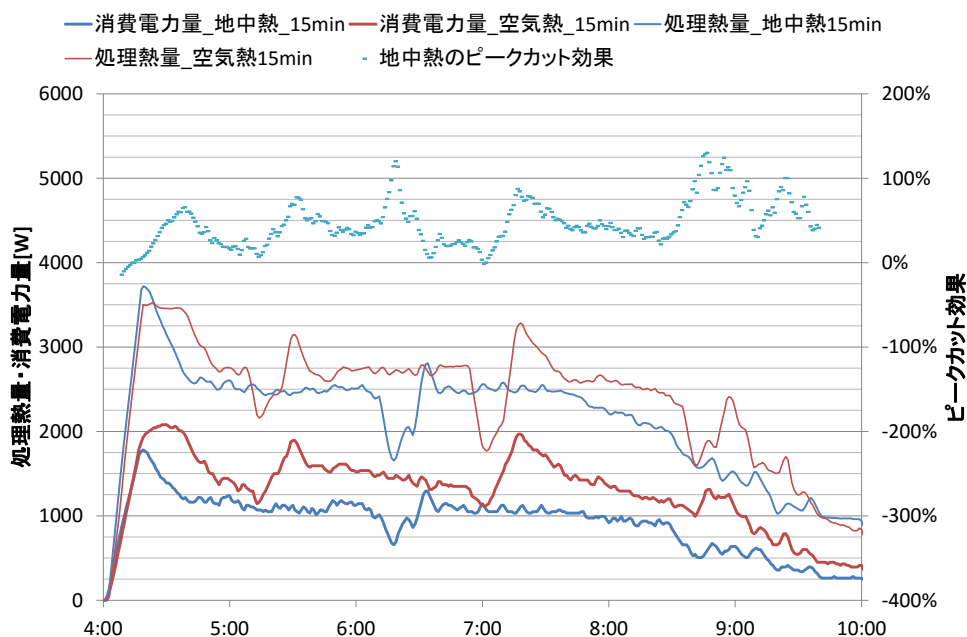


図4-30 消費電力量と処理熱量(15分移動平均値)(暖房)

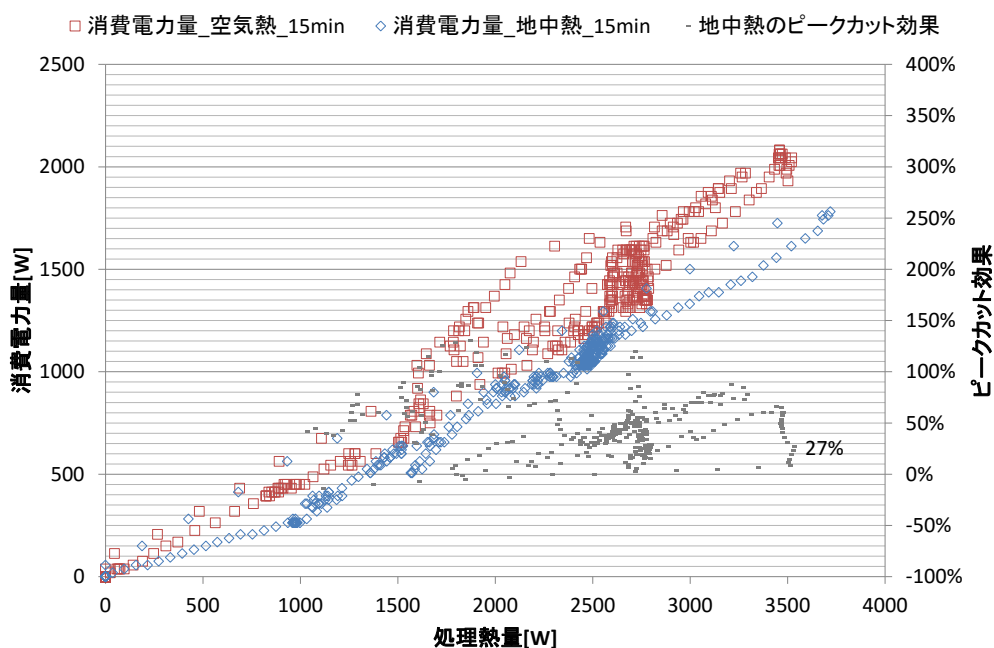


図4-31 消費電力量と処理熱量の相関(15分移動平均値)(暖房)

4.2.6 地盤温度の変化

図4-32に実験期間中の地中温度の変動を示す。地中温度は冷房にやや上昇、暖房にやや下降傾向になるものの異常な蓄熱効果は見られない。空調停止時には速やかに温度は回復することを確認した。

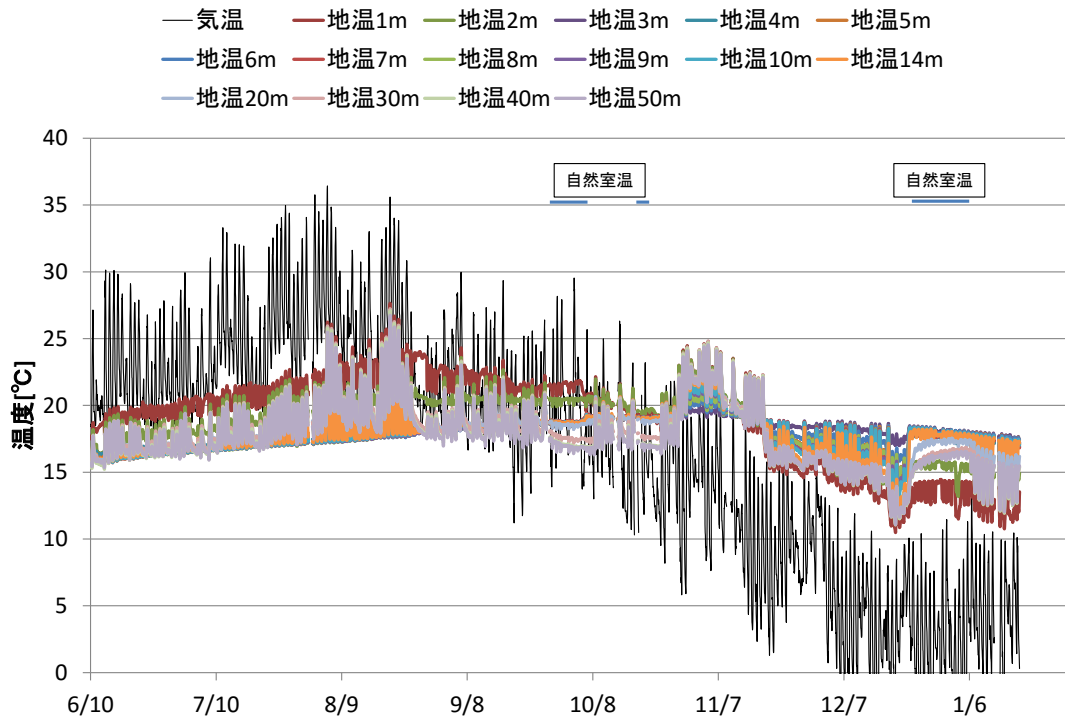


図4-32 地中温度の変動(全期間)

4.3 地中熱の蓄採熱に関する数値解析

4.3.1 地中熱ポテンシャル計算プログラムのアルゴリズム及び入力パラメータ

地中温度の挙動は、地中内の熱伝導および地下水流動に伴う熱移動に支配されるほか、大気境界層を通じた顕熱・潜熱形態による地表面熱収支および降水・降雪などによる地表面水収支にも依存する。年間不易層の深さは10m程度といわれており、地中熱ヒートポンプシステムに代表される地中熱利用システムは主として不易層より深い層の地中熱を利用する。したがって本件プログラムの代表的な解析対象は地表～地下100m程度になると考えらる。地下水の流れ場は地表面から不透水層上部までの不圧帯水層と不透水層下部から下の被圧帯水層に分けて考えることができ、このうち不圧帯水層は、地下水面から下の飽和地下水、地表付近の不飽和地下水および飽和／不飽和境界付近の毛管水帯に区分できる固体・液体・気体の三相が混在する複雑な流れ場(多孔質混相流)となる。

(1) 非等温不飽和地下水流れの基礎方程式

【水分の輸送方程式】

水分の輸送方程式は次のように表される。

$$\rho_w \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_T \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + g \frac{\partial K}{\partial z} \quad (4.1)$$

ここで、 ρ_w : 水の密度[kg/m³]、 θ : 体積含水率[m³/m³]、 T : 土壌温度[°C]、 g : 重力加速度[m/s²]である。また、 D_θ, D_T は拡散係数[kg/(m・s)]で、

$$D_\theta = D_{\theta\ell} + D_{\theta v}, \quad D_T = D_{T\ell} + D_{Tv} \quad (4.2)$$

と定義される。液水フラックス q_ℓ [kg/(m²・s)]および水蒸気フラックス q_v [kg/(m²・s)]はそれぞれ次のように表される。

$$q_{\ell,j} = -D_{\theta\ell} \frac{\partial \theta}{\partial x_j} - D_{T\ell} \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (4.3)$$

$$q_{v,j} = -D_{\theta v} \frac{\partial \theta}{\partial x_j} - D_{Tv} \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (4.4)$$

それぞれの拡散係数は次のように表される。

$$D_{\theta\ell} = K \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \quad (4.5)$$

$$D_{T\ell} = \eta K \frac{\Psi}{\tau} \cdot \frac{\partial \tau}{\partial T} \quad (4.6)$$

$$D_{\theta v} = D^* \frac{p_{vs}}{R_v T} \cdot \frac{\partial h}{\partial \theta} \quad (4.7)$$

$$D_{Tv} = D^* \frac{\gamma}{R_v T} \left(h \frac{\partial p_{vs}}{\partial T} + p_{vs} \frac{\partial h}{\partial T} \right) \quad (4.8)$$

$$K = K_s S^\ell \left[1 - (1 - S^{1/m})^m \right]^2 \quad (4.9)$$

$$D^* = \zeta \phi D_a \frac{P}{P - p_v} \quad (4.10)$$

ここで、 K : 不飽和透水係数 [$\text{kg} \cdot \text{s} / \text{m}^3$]、 K_s : 飽和透水係数 [$\text{kg} \cdot \text{s} / \text{m}^3$]、 S : 飽和度 [-]、 Ψ : 水分ポテンシャル [J / kg]、 τ : 表面張力 [N / m]、 p_{vs} : 飽和水蒸気圧 [Pa]、 R_v : 水蒸気の気体定数 [$\text{J} / (\text{kg} \cdot \text{K})$]、 h : 相対湿度 [Pa / Pa]、 D^* : 多孔媒体中の水蒸気拡散係数 [$\text{kg} / (\text{m} \cdot \text{s})$]、 ζ : 空隙流路の屈曲率 [-] (=0.66)、 ϕ : 体積含空率 [m^3 / m^3]、 D_a : 大気中の水蒸気拡散係数 [$\text{kg} / \text{m} \cdot \text{s}$]、 P : 全圧 [Pa] (=1atm)、 p_v : 水蒸気圧 [Pa]である。

【熱の輸送方程式】

$$\rho_s C_s \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(L \cdot D_w \frac{\partial \theta}{\partial x_j} \right) \quad (4.11)$$

$$\rho_s C_s = (1-n)\rho_b C_b + \theta \rho_w C_w \quad (4.12)$$

ここで、 n : 空隙率 [m^3 / m^3]、 ρ_b : 固体の密度 [kg / m^3]、 C_b : 固体の熱容量 [$\text{J} / (\text{kg} \cdot \text{K})$]、 C_w : 水の熱容量 [$\text{J} / (\text{kg} \cdot \text{K})$]、 L : 水の蒸発潜熱 [J / kg]である。

(2) 非等温飽和地下水流れの基礎方程式

【水分の輸送方程式】

$$n_e \frac{\partial h_L}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{g}{\rho_w} K_s h_L \frac{\partial h_L}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{g}{\rho_w} K_s h_L \frac{\partial h_L}{\partial y} \right) \quad (4.13)$$

ここで、 n_e : 有効空隙率 [m^3 / m^3]、 h_L : 地下水位 [m]である。

【熱の輸送方程式】

$$\rho_s C_s \left[\frac{\partial T}{\partial t} + u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (4.14)$$

$$u_j = \frac{g}{\rho} K_s \frac{\partial h_L}{\partial x_j} \quad (4.15)$$

(3) 熱交換井の基礎方程式

1次元の非圧縮性流れ場を仮定するので、管内流速は入口流速 u_{in} [m/s]で一様流れとなる。温度に関する方程式は次のようになる。

$$\rho_c C_c \left[\frac{\partial T_c}{\partial t} + u_{in} \frac{\partial T_c}{\partial x} \right] = \frac{2\pi \bar{h}_c}{A_c} (T - T_c) \quad (4.16)$$

ここで、 ρ_c : 循環液の密度 [kg/m³]、 C_c : 循環液の熱容量 [J/(kg·K)]、 T_c : 循環液の温度 [°C]、 A_c : 管路断面積 [m²]である。また、 \bar{h}_c は有効熱伝達係数 [W/(m·K)]で、

$$\frac{1}{\bar{h}_c} = \frac{1}{r_{in} h_{in}} + \frac{\log(r_{out}/r_{in})}{\lambda_c} \quad (4.17)$$

となる。ここで、 h_{in} : 循環液と管内壁との熱伝達係数 [W/(m²·K)]、 λ_c : 管壁の熱伝導係数 [W/(m·K)]、 r_{in}, r_{out} : 管の内径、外径 [m]である。

(4) 輸送係数

飽和透水係数

【Campbell 公式】

$$K_s = 4 \times 10^{-3} (1.3/\rho_b)^{1.3b} \exp(-6.9m_c - 3.7m_s) \quad (4.18)$$

ここで、 m_s, m_c はシルト分、粘土分の含量率 [kg/kg]である。

【Hazen 公式】

$$K_s = 116 \cdot d_e^2 (0.7 + 0.03T) \quad (4.19)$$

ここで、 d_e は粒径加積曲線における 10%有効径である。

【Kozeny 公式】

$$K_s = \frac{g}{5\nu \cdot M_s^2} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \quad (4.20)$$

ここで、 n : 空隙率、 M_s : 土粒子の比表面積 (= 表面積 / 体積) である。

【Terzaghi 公式】

$$K_s = A \frac{\mu_0}{\mu} \left(\frac{n-0.13}{\sqrt[3]{1-n}} \right)^2 d_e^2 \quad (A = 460 \sim 800) \quad (4.21)$$

(5) 熱伝導係数

混合固相の熱伝導係数は、加重平均、加重調和平均、加重幾何平均にいずれかにより計算することができる。

【加重平均】

$$\lambda = \frac{\sum m_i \lambda_i}{\sum m_i} \quad (4.22)$$

【加重調和平均】

$$\lambda = \frac{\sum m_i}{\sum \frac{m_i}{\lambda_i}} \quad (4.23)$$

【加重幾何平均】

$$\lambda = \prod \lambda_i^{\alpha_i} \quad \left(\alpha_i = \frac{m_i}{\sum m_i} \right) \quad (4.24)$$

以上で、 m_i は固体第*i*成分の体積である。

固液混相の熱伝導係数は、相加平均、調和平均、相乗平均にいずれかにより計算することができる。

【相加平均】

$$\lambda = (1-n)\lambda_s + \theta\lambda_w \quad (4.25)$$

【調和平均】

$$\lambda = \frac{1-n+\theta}{(1-n)/\lambda_s + \theta/\lambda_w} \quad (4.26)$$

【相乗平均】

$$\lambda = \lambda_s^{1-n} \cdot \lambda_w^\theta \quad (4.27)$$

(6) 地表面熱収支式

表面熱収支式は次のように表される。

$$S_n + L_a + R_L + R_S + H + E + G = 0 \quad (4.28)$$

各項の意味と内容は次のようになる。

S_n : 正味全天日射量

正味全天日射量 S_n [W/m²] は地表面に吸収される正味の全天日射量で、地表面アルベト (反射率) α を用いて次のように表される。

$$S_n = (1 - \alpha) S_g \quad (4.29)$$

ここで、 S_g は全天日射量 [W/m²] で、直達日射量 S_d [W/m²] と天空 (散乱) 日射量 S_s [W/m²] との和である。

$$S_g = \omega_d S_d + \omega_s S_s = \omega_d S_{d\perp} \cos \psi + \omega_s S_s \quad (4.30)$$

ただし、 $S_{d\perp}$: 法線面直達日射量 [W/m²]、 ψ : 直達光と表面との成す角 [rad.] である。また、 ω_d : 日向率、 ω_s : 天空率である。観測値がない場合などでは、法線面直達日射量 $S_{d\perp}$ および天空日射量 S_s はそれぞれ Bouguer 式および Berlage 式で評価されることが多い。

Bouguer 式 :

$$S_{d\perp} = I_0 P^{1/\sin h} \quad (4.31)$$

Berlage 式 :

$$S_s = 0.5 I_0 \sin h \frac{1 - P^{1/\sin h}}{1 - 1.4 \cdot \log P} \quad (4.32)$$

ここで、 I_0 : 太陽定数 [W/m²]、 P : 大気透過率、 h : 太陽高度 [rad.] である。

太陽方位ベクトル (S_x, S_y, S_z) は次のように表される。

$$\begin{aligned} S_x &= -\cos \delta \sin \gamma \\ S_y &= \cos \phi \sin \delta - \sin \phi \cos \delta \cos \gamma \\ S_z &= \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \gamma \end{aligned} \quad (4.33)$$

ここで、 ϕ : 緯度 [rad.]、 δ : 赤緯 [rad.]、 γ : 時角 [rad.] である。したがって、水平な地表面の場合、

$$\cos \psi = S_z = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \gamma \quad (4.34)$$

となる。

(7) 数値計算法

(a) 非等温不飽和地下水流れの計算法

簡単のため1次元の場合で説明する。2次元以上の場合も要領は同じである。直角座標系を用いて有限差分法により離散化する。時間積分はEuler陽解法、拡散項は2次精度衷心差分で離散化する。

$$\begin{aligned} \rho_w \Delta x_i \cdot \frac{\theta^{n+1} - \theta^n}{\Delta t} = D_{\theta,i+1/2} \cdot \frac{\theta_i^n - \theta_i^n}{\Delta x_{i+1/2}} - D_{\theta,i-1/2} \cdot \frac{\theta_i^n - \theta_{i-1}^n}{\Delta x_{i-1/2}} \\ + D_{T,i+1/2} \cdot \frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta x_{i+1/2}} - D_{T,i-1/2} \cdot \frac{T_i^n - T_{i-1}^n}{\Delta x_{i-1/2}} \end{aligned} \quad (4.35)$$

$$\begin{aligned} \rho_s C_s \Delta x_i \cdot \frac{T^{n+1} - T^n}{\Delta t} = \lambda_{i+1/2} \cdot \frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta x_{i+1/2}} - \lambda_{i-1/2} \cdot \frac{T_i^n - T_{i-1}^n}{\Delta x_{i-1/2}} \\ + L \left(D_{\theta,i+1/2} \cdot \frac{\theta_i^n - \theta_i^n}{\Delta x_{i+1/2}} - D_{\theta,i-1/2} \cdot \frac{\theta_i^n - \theta_{i-1}^n}{\Delta x_{i-1/2}} \right) \end{aligned} \quad (4.36)$$

式(4.35)および式(4.36)にEuler陰解法を適用すると、係数是对称行列となるためICCG法により計算することができる。ただし、 θ, T の2成分が連成するため 2×2 ブロック小行列を成分にもつICCG法を適用する必要がある。係数行列を成分表示すると次のようになる。

$$\begin{aligned} A_0(1,1) &= \frac{\rho_w \Delta x_i}{\Delta t} + \frac{D_{\theta,i+1/2}}{\Delta x_{i+1/2}} + \frac{D_{\theta,i-1/2}}{\Delta x_{i-1/2}} \\ A_0(1,2) &= \frac{D_{T,i+1/2}}{\Delta x_{i+1/2}} + \frac{D_{T,i-1/2}}{\Delta x_{i-1/2}} \\ A_0(2,1) &= L \left(\frac{D_{\theta,i+1/2}}{\Delta x_{i+1/2}} + \frac{D_{\theta,i-1/2}}{\Delta x_{i-1/2}} \right) \\ A_0(2,2) &= \frac{\rho_s C_s \Delta x_i}{\Delta t} + \frac{\lambda_{i+1/2}}{\Delta x_{i+1/2}} + \frac{\lambda_{i-1/2}}{\Delta x_{i-1/2}} \\ A_{-1}(1,1) &= -\frac{D_{\theta,i-1/2}}{\Delta x_{i-1/2}}, \quad A_{-1}(1,2) = -\frac{D_{T,i-1/2}}{\Delta x_{i-1/2}} \\ A_{-1}(2,1) &= -L \cdot \frac{D_{\theta,i-1/2}}{\Delta x_{i-1/2}}, \quad A_0(2,2) = -\frac{\lambda_{i-1/2}}{\Delta x_{i-1/2}} \end{aligned} \quad (4.37)$$

$$(4.38)$$

(b) 非等温飽和地下水流れの計算法

有効空隙率は次のように計算される。

$$n_e = \frac{\sum n_{e,k} dh_k}{\sum dh_k} \quad (4.39)$$

ここで、 dh_k は層厚で次のように定義される。

$$dh_k = \min[\Delta z_k, h_L - z_{k-1/2}] \quad (4.40)$$

式(4.13)のx方向の体積フラックスは次のように離散化される。

$$\left(\frac{g}{\rho_w} K_s h_L \frac{\partial h_L}{\partial x} \right)_{i+1/2} = \frac{g}{\rho_w} \sum K_{s,k} dh_k \frac{h_{L,i+1} - h_{L,i}}{\Delta x_{i+1/2}} \quad (4.41)$$

温度の計算は通常の移流・拡散方程式となるため、Euler 陰解法を適用する場合は前処理付き BiCGstab 法で計算できる。

(c) 熱交換井の計算法

式(4.16)の移流項を1次精度風上差分により有限差分法で離散化すると次のようになる。

時間刻みに対する制約を緩和するため Euler 陰解法で取り扱う。

$$\rho_c C_c \left[\frac{T_c^{n+1} - T_c^n}{\Delta t} + u_{in} \frac{T_{c,i}^{n+1} - T_{c,i-1}^n}{\Delta x} \right] = \frac{2\pi \bar{h}_c}{A_c} (T - T_c^{n+1}) \quad (4.42)$$

係数行列を成分表示すると次のようになる。

$$\begin{aligned} a_{-1} &= -\frac{u_{in}}{\Delta x}, \quad a_{+1} = 0 \\ a_0 &= \frac{1}{\Delta t} + \frac{u_{in}}{\Delta x} + \frac{2\pi \bar{h}_c}{\rho_c C_c A_c} \end{aligned} \quad (4.43)$$

(d) 表面熱収支式の計算法

表面熱収支式は、 n 時刻レベルの固体表面温度 T_G^n を未知数とした次のような非線形方程式になる。

$$S_{n\downarrow} + L_{a\downarrow} - \varepsilon \sigma (T_G^n)^4 + h(T_a - T_G^n) + L\beta h_q [q_a - q_G(T_G^n)] + k_g \frac{T_{g,1}^n - T_G^n}{\Delta z/2} = 0 \quad (4.44)$$

式(4.44)は Newton 法により解く。

$$\begin{aligned} \left[4\varepsilon \sigma (T_G^n)^3 + h + L\beta h_q \frac{\partial q_G}{\partial T_G} + \frac{2k_g}{\Delta z} \right] \Delta T_G^n = \\ S_{n\downarrow} + L_{a\downarrow} - \varepsilon \sigma (T_G^n)^4 + h(T_a - T_G^n) + L\beta h_q [q_a - q_G(T_G^n)] + k_g \frac{T_{g,1}^n - T_G^n}{\Delta z/2} \end{aligned} \quad (4.45)$$

図4-33に地中熱ポテンシャル計算プログラムの計算フローを示す。プログラムでは地盤モデルに基づいて実気象条件、熱源機器との採熱水条件から地中熱交換器の水温、熱量が計算できる。

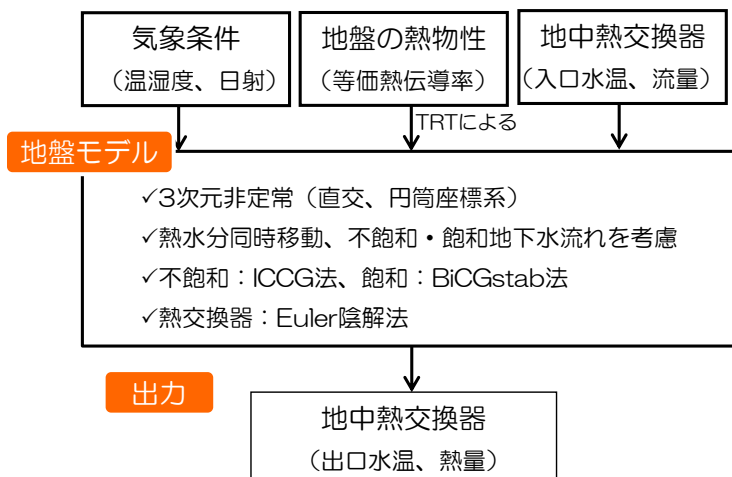


図4-33 地中熱ポテンシャル計算プログラムの計算フロー

4.3.2 実証実験結果の再現性の確認

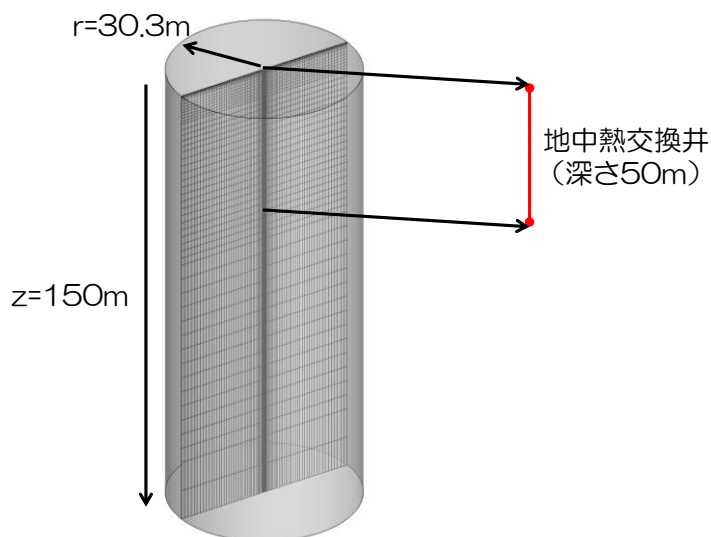
(1) 計算条件

地中熱交換井の計算モデルは円筒座標系の計算格子として、**図4-34**の通りとし、地中埋設配管は**図4-35**、**図4-36**に示す仕様とした。

比較は、次の2ケースについて、地中循環水の出口温度、地中温、冷・暖房電力の挙動を比較した。

ケース1：往温度を与える計算

ケース2：空調負荷を与える計算



円筒座標系の計算格子

X方向 45 分割 ($r=0\sim 30.3\text{m}$)

Z方向 56 分割 ($z=-150\sim 0\text{m}$)

時間刻み：900 秒

地盤：円筒軸対象 2 次元熱伝導 (45×56)

熱交換井：1 次元移流・熱伝達 (250 分割)

図4-34 円筒座標系の計算格子

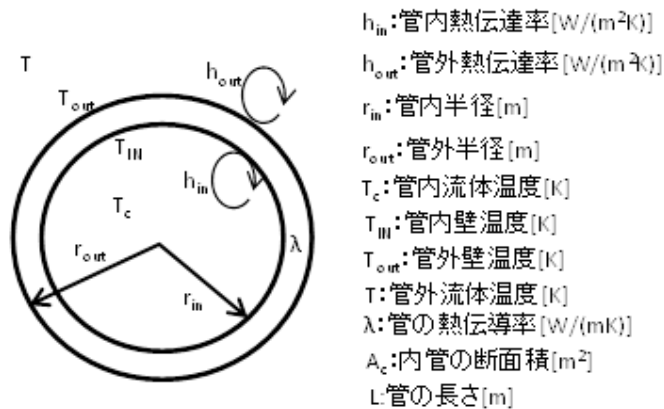


図4-35 地中埋設配管の計算モデル

有効熱伝達係数

$$\frac{1}{h_c} = \left[\frac{1}{r_{in} h_{in}} + \frac{\ln \frac{r_{out}}{r_{in}}}{\lambda} + \frac{1}{r_{out} h_{out}} \right]$$

管の断面積 A_c の管路が 1m 長さ当たり交換する熱量を 2π で除した量

管内の熱伝達の関係式 (記号略)

$$R_e > 10^4, \quad Nu = \frac{\frac{f}{2} R_e P_r}{1.07 + 12.7 \sqrt{\frac{f}{2}} (P_r^{\frac{2}{3}} - 1)}$$

$$R_e \leq 10^4, \quad Nu = \frac{\frac{f}{2} (R_e - 1000) P_r}{1 + 12.7 \sqrt{\frac{f}{2}} (P_r^{\frac{2}{3}} - 1)}$$

□検討条件

- 管密度 $\rho_{s} = 955$
- 管比熱 $cp_s = 1.89d3$
- 管熱伝導率 $lmd_s = 0.495$
- ブライン密度 $\rho_l = 1050.0$
- ブライン比熱 $cp_l = 3709.0$
- ブライン熱伝導率 $lmd_l = 0.42$
- ブライン粘性係数 $vis_l = 5.680d-3$
- 熱交換井の設置位置 $xy = 0, 0$
- 熱交換井の深さ $depth = 50$
- 管の内径 $diam = 27d-3$
- 管の厚み $thick = 3.5d-3$
- 分割数 $ndiv = 250$

図4-36 地中埋設配管の仕様

(2) 往温度を与える計算（ケース1）の比較

地中循環水の出口温度（日平均）の比較を図4-37に示す。比較期間のRMS値（二乗平均平方根）は 1.37°C となり、シミュレーション結果の方が温度が低めとなっている。同期間の地中温度（深さ1m）の比較を図4-38に示す。8月～9月（冷房高負荷）、12月～1月（暖房高負荷）の期間は概ねシミュレーション結果と実験値は合致しているが、中間期の軽負荷時期は差違が見られる。地中温度の深さ別RMS値を表4-3に示す。全データのRMS値は 1.5°C であった。

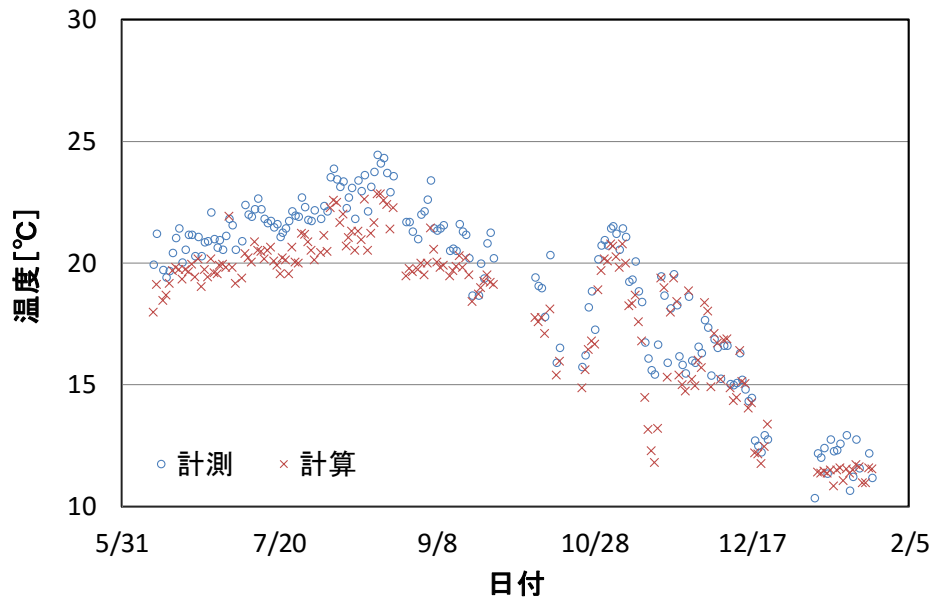


図4-37 地中循環水出口温度（日平均）の比較（2014年7月25日～2014年8月3日）

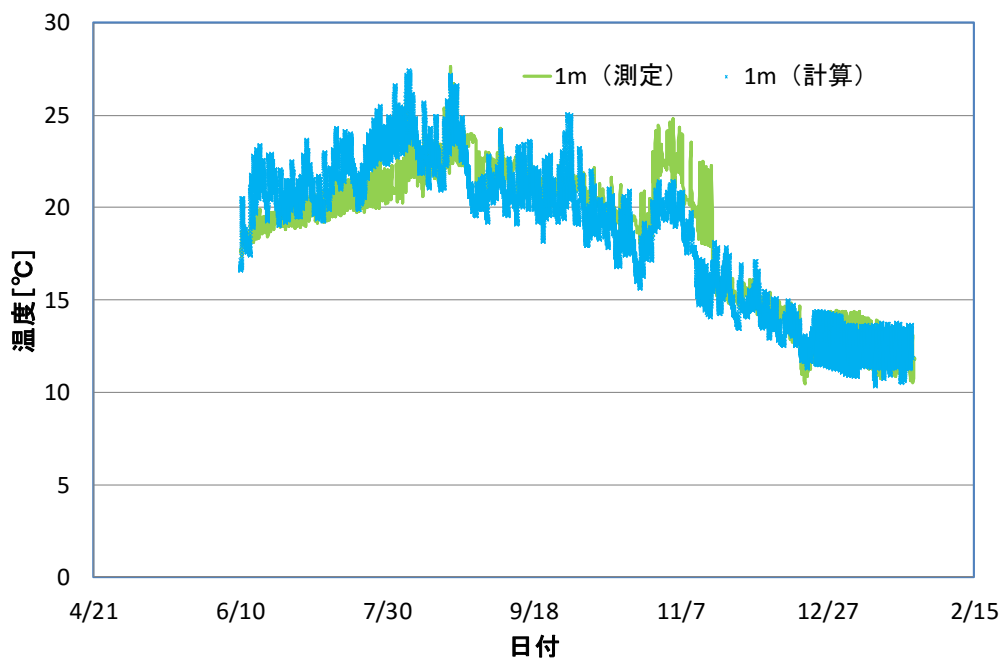


図 4-38 深さ 1 m の地中温度挙動 (2014 年 6 月 10 日～2015 年 1 月 27 日)

表 4-3 シミュレーション結果と実験値の RMS 比較

| 項目 | RMS[°C] |
|-------|---------|
| 地温1m | 1.474 |
| 地温2m | 1.450 |
| 地温3m | 1.272 |
| 地温4m | 0.936 |
| 地温5m | 0.994 |
| 地温6m | 1.143 |
| 地温7m | 1.277 |
| 地温8m | 1.297 |
| 地温9m | 1.395 |
| 地温10m | 1.402 |
| 地温14m | 1.553 |
| 地温20m | 2.127 |
| 地温30m | 2.010 |
| 地温40m | 1.765 |
| 地温50m | 2.142 |
| 全データ | 1.527 |

(3) 空調負荷を与える計算の比較 (ケース 2) の比較

地中循環水の出口温度の比較を図 4-39 に示す。地中循環水の出口温度は空調機の運転時は低温となり停止後は上昇している。空調 (冷暖房) 電力の比較を図 4-40～図 4-41 に示す。空調 (冷暖房) 電力は、シミュレーション結果の方が実験値よりやや小さな値となるが、変化傾向は同じであり電力の差も小さい。

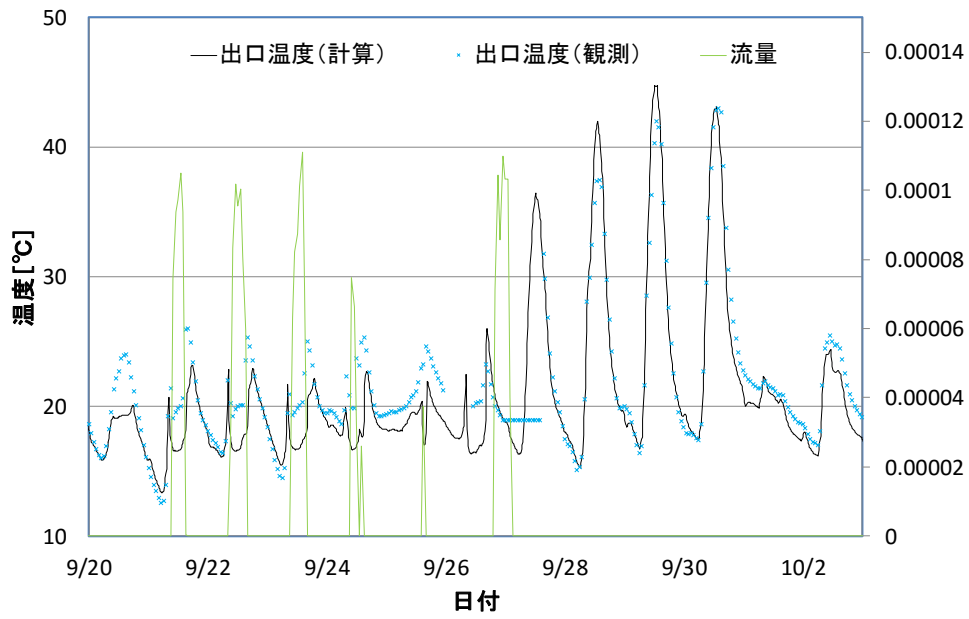


図 4-39 地中循環水出口温度の比較 (2014年9月20日~2014年10月2日)

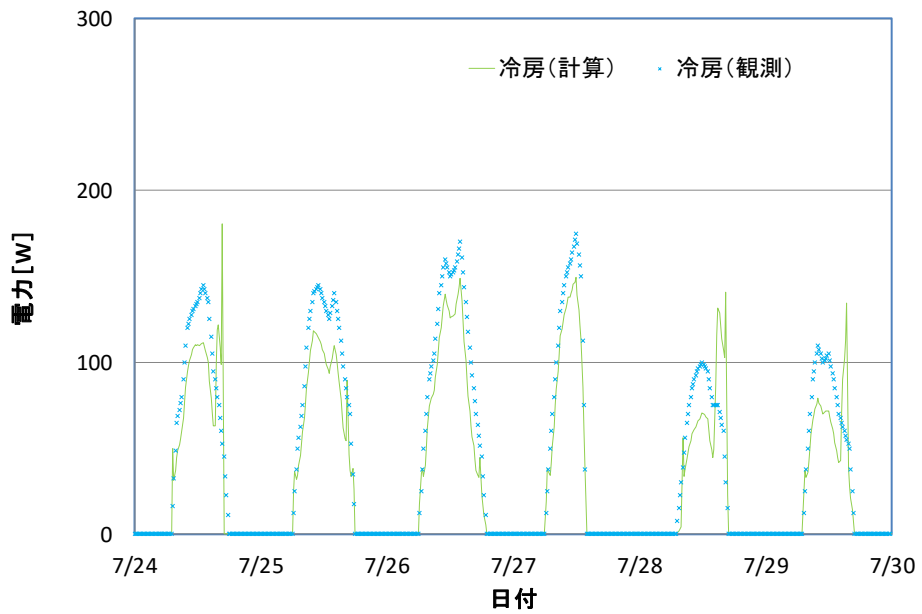


図 4-40 夏期冷房電力の比較 (2014年6月30日~2014年7月30日)

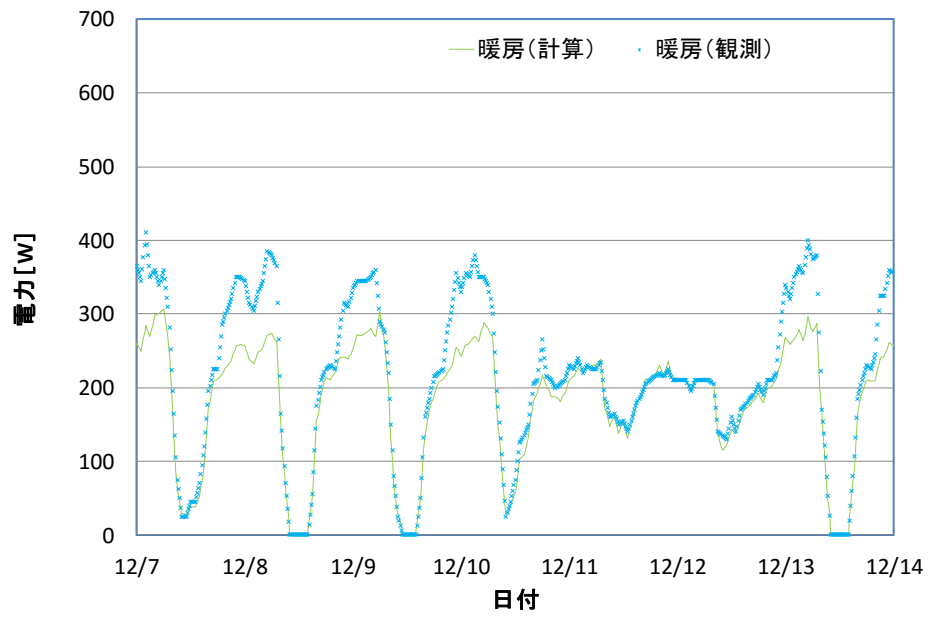


図 4 - 4 1 冬期暖房電力の比較 (2014 年 12 月 7 日~2014 年 12 月 14 日)

4.3.3 既往プログラムとの比較

地中熱ポテンシャル計算プログラムと市販の「GroundClub（グラウンドクラブ、地中熱源ヒートポンプシステム性能予測プログラム）、ゼネラルヒートポンプ工業(株)」³⁾を用いて、同一の計算条件にて得られる計算結果を比較した。図4-42に地中熱交換井のモデルの計算条件を示す。なお、地中熱ポテンシャル計算プログラムと異なり、「GroundClub（グラウンドクラブ）」では、地盤の熱特性（熱伝導率、密度、比熱）を位置毎に詳細に入力することができず、解析対象エリア全体の平均値しか入力できない。また、地下水流の影響を考慮して熱交換量を算出することができない。ここでは、地中熱ポテンシャル計算プログラムにおいても地盤の熱特性は解析対象エリア全体の平均値を入力し、地下水流もないものとして、計算結果の比較を行った。

年 数 : 7年計算
地中熱交換井本数 : 9本 (75m)
負 荷 : 熱負荷計算による (地域: 岡山)

検討モデルの設定

- ・3次元直交座標系
- ・計算領域: 80m×80m×200m
- ・メッシュ分割: 50×50×18
- ・時間刻み: 900秒

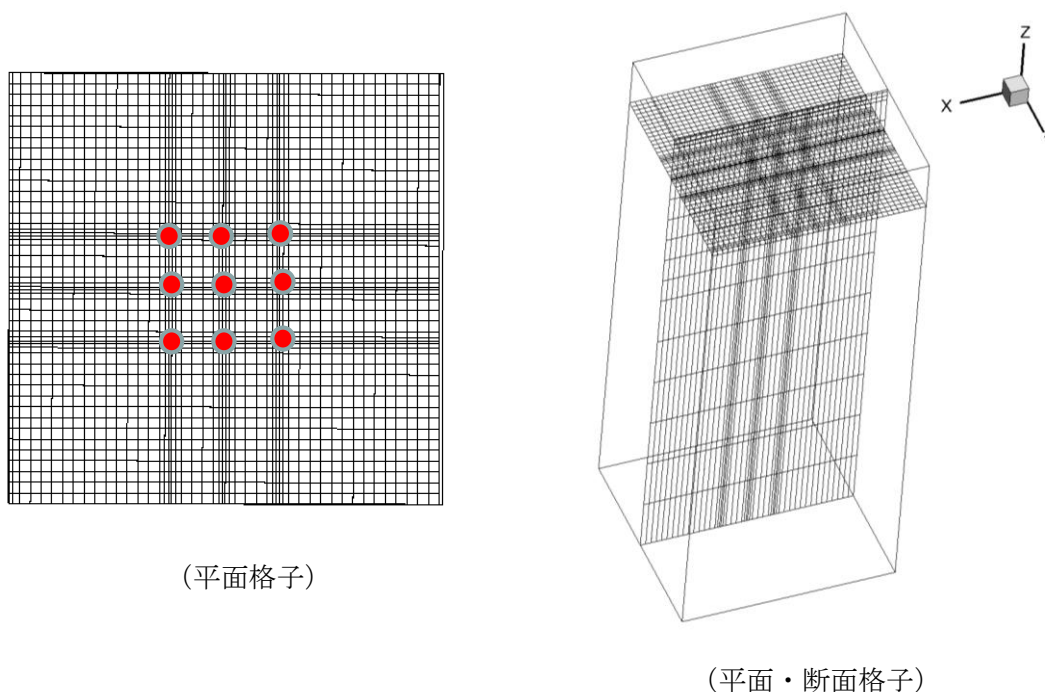


図4-42 地中熱交換井のモデル

地中熱ポテンシャル計算プログラムと「GroundClub (グラントクラブ)」による7年目の出口温度（冷房・暖房期間）挙動を比較した。7年目の出口温度の比較を図4-43、図4-44に示し、地中熱ポテンシャル計算プログラムによる地盤への蓄採熱量検討結果を表4-4に示す。出口温度は、冷房・暖房期間ともに地中熱ポテンシャル計算プログラムがやや低い温度傾向となっているが変化の傾向は一致している。冷房と暖房のバランスからは地盤に蓄熱傾向が見られる。冷房、暖房の期間における冷房負荷より算出した地盤への蓄・採熱量は一致しない。しかし、各年の蓄・採熱量の総量値（表中、蓄熱と記載）としては整合が取れている。このような整合性は、グラントクラブによる計算では見られなかった。

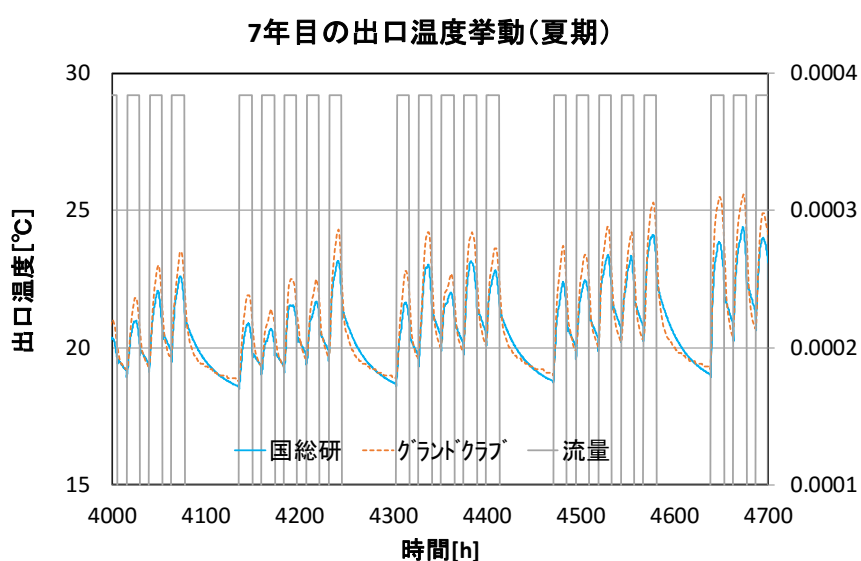


図4-43 出口温度の挙動（冷房期間）（4000-4700 時間、ジュリアンアワー）

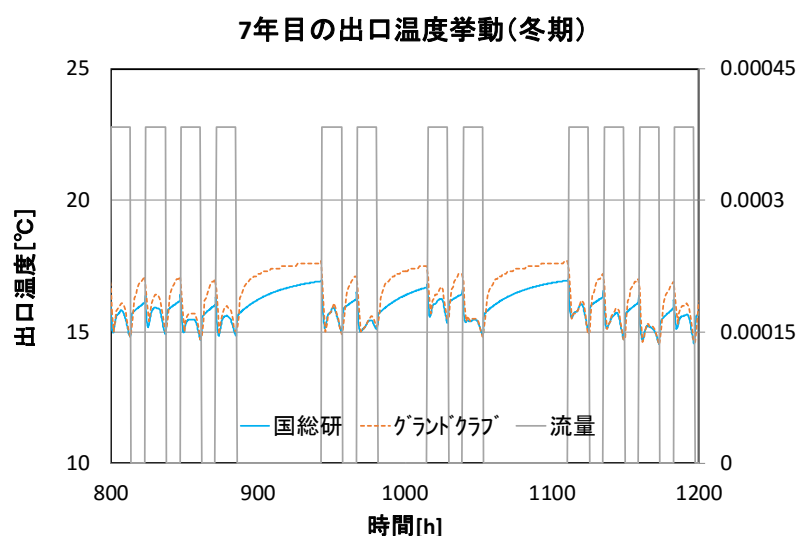


図4-44 出口温度の挙動（暖房期間）（800-1200 時間、ジュリアンアワー）

表4-4 地中熱ポテンシャル計算プログラムによる地盤への蓄採熱量

(出口・入口温度差を熱量換算)

| 国総研 | 出入口温度差 | | |
|-----|-----------|---------|----------|
| | 地盤熱量[kWh] | | |
| | 冷房時 | 暖房時 | 蓄熱 |
| 1年目 | 26424.84 | 7496.60 | 18928.24 |
| 2年目 | 26420.22 | 7501.64 | 18918.58 |
| 3年目 | 26420.75 | 7501.62 | 18919.13 |
| 4年目 | 26422.19 | 7500.73 | 18921.46 |
| 5年目 | 26423.60 | 7499.74 | 18923.86 |
| 6年目 | 26425.13 | 7498.91 | 18926.23 |
| 7年目 | 26426.55 | 7498.07 | 18928.48 |

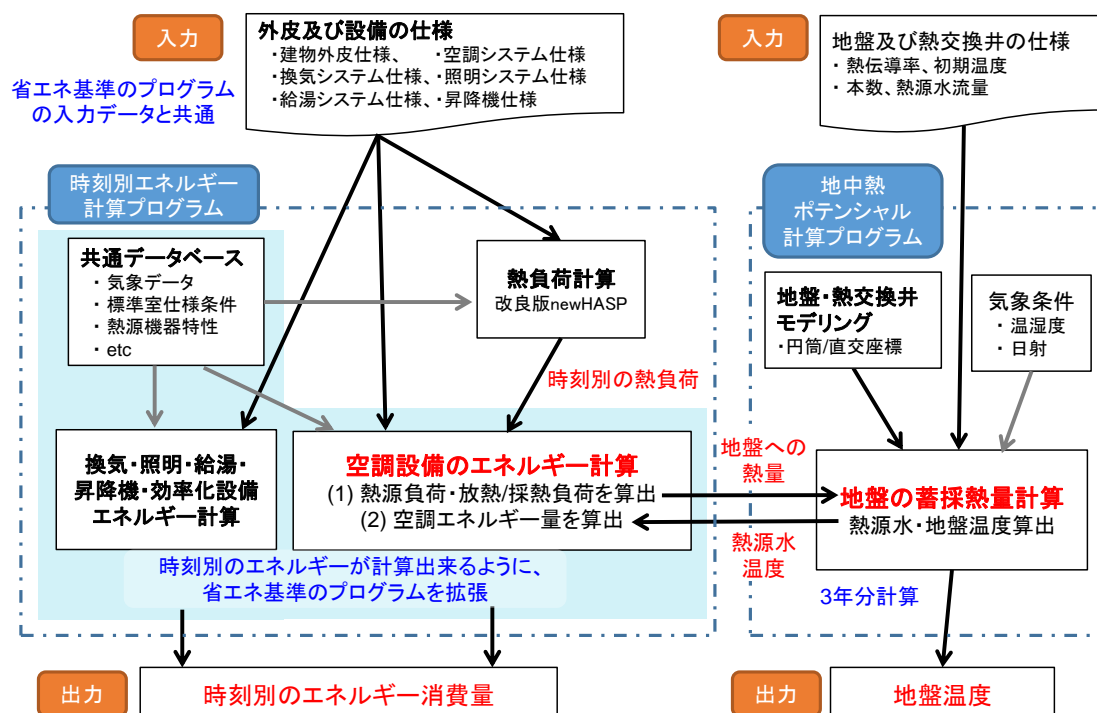
(空調負荷より熱量換算 (付与条件))

| 付与条件 | 空調負荷±電力 | | |
|------|-----------|---------|----------|
| | 地盤熱量[kWh] | | |
| | 冷房時 | 暖房時 | 蓄熱 |
| 2年目 | 28454.58 | 9795.55 | 18659.03 |
| 3年目 | 28500.78 | 9823.85 | 18676.93 |
| 4年目 | 28532.48 | 9842.05 | 18690.43 |
| 5年目 | 28560.68 | 9855.45 | 18705.23 |
| 6年目 | 28581.08 | 9871.85 | 18709.23 |
| 7年目 | 28598.88 | 9881.45 | 18717.43 |

4.4 システムシミュレーションによるケーススタディ

4.4.1 建築物・設備システム・地盤を連成したシミュレーションシステムの開発

「地中熱ポテンシャル計算プログラム」と建築物・設備システムのエネルギー消費量計算プログラムを連成させたシステムシミュレーション(時刻別エネルギー計算プログラム)を開発する。図4-45にシステムシミュレーションの計算フローを示す。



◆地中熱利用システムの計算手順

- 1) 外皮・設備仕様を入力（省エネ基準プログラムの入力ファイルを利用）
 - ・上記ファイルを csv データにした後、xlm ファイル化
- 2) 空調設備計算（手順①）[1回目]
 - ・時刻別エネルギー計算プログラムを実行
 - ・CSV データ、データベースより newHASP 入力ファイルを自動作成、熱負荷計算を実行
 - ・熱負荷計算結果より空調設備エネルギー計算が行われ、熱源負荷（冷暖房負荷）、放熱/採熱負荷を算出し、熱源水熱量データをファイル出力
- 3) 地盤の蓄採熱量計算（手順②）
 - ・地盤、熱交換井の仕様（初期温度、井本数、熱源水流量、格子データ等）と熱源水熱量出力ファイル名を入力し、地中熱ポテンシャル計算プログラムを実行
 - ・気象条件、熱源水熱量データから地盤温度、熱源水温度を算出しファイルを出力
- 4) 空調設備計算（手順③）[2回目]
 - ・時刻別エネルギー計算プログラムを再度実行
 - ・熱源水温度（熱源機入口）より空調設備エネルギーの再計算が行われ、時刻別エネルギー消費量をファイル出力

図4-45 システムシミュレーションの計算フロー

4.4.2 計算ケース

システムシミュレーションを用いて地中熱ヒートポンプ空調方式と空冷ヒートポンプ空調方式の電力消費量及び一次エネルギー消費量を比較検証する。比較検証は、気候条件が大きくことなる代表として4地区と、建物使用形態の異なる4建物用途とする。

(1) 試算地域

試算地域は、「平成25年省エネルギー基準（以下、省エネルギー基準）」で判断基準としている表4-5に示す4地区とする。熱負荷計算及び一次エネルギー計算に用いる気象データは、拡張アメダス気象データ（（一社）日本建築学会）⁴⁾における標準年データ（1981～1995年）とする。

表4-5 試算地域

| 地域 | 試算地域 | 年間平均気温 |
|--------|--------------------|--------|
| ① 寒冷地 | (2 地域) 代表地域：北海道岩見沢 | 7.5℃ |
| ② 準寒冷地 | (3 地域) 代表地域：岩手県盛岡 | 10.2℃ |
| ③ 温暖地 | (6 地域) 代表地域：岡山県岡山 | 15.7℃ |
| ④ 蒸暑地 | (8 地域) 代表地域：沖縄県那覇 | 22.7℃ |

(2) 試算建物の概要

試算建物は「省エネルギー基準」の基準値算定用モデル建物とした。なお、共同住宅（共用部）は独自のモデルを想定する。建物の外皮仕様（外壁・窓仕様）は、「省エネルギー基準」の地域区分の基準設定仕様とした。

表4-6 試算建物の用途と規模

| 建物用途 | 建物規模 |
|------------|--|
| 事務所 | テナントオフィスビル 延床面積：約10,000 m ² 、RC造、地上7階、地下0階 ※平日の昼間のみ使用される熱負荷傾向 |
| 商業施設（物販店舗） | 大規模物販店舗用途 延床面積：10,000 m ² 、S造、地上3階、地下1階 ※土日の休日使用があり売場は内部発熱が大きい熱負荷傾向 |
| 共同住宅（共用部） | タワー型共同住宅（共用部） 延床面積：10,000 m ² 、SRC造、地上14階、地下1階 ※管理事務室、集会場等は昼間のみ使用、ホールは終日使用となる熱負荷傾向 ※検討はB1～1階部分の共用部のみ地中熱利用の対象とし、2～14階部分は空冷ヒートポンプの対象とする。 |
| 福祉施設（病院） | 総合病院 延床面積：5,000 m ² 、RC造、地上3階、地下1階 ※病室等は終日使用となり昼間と夜間負荷が発生する熱負荷傾向 |

試算建物の平面図・断面形状は付録に示す。

(3) 空調方式

試算建物の空調設備の仕様は「省エネルギー基準」の基準設定仕様に準拠するものとし、空調熱源方式は事務所、物販店舗、福祉施設（病院）は中央空調方式、共同住宅（共用部）はパッケージ形エアコン方式とした。

表 4-7 試算建物の主要空調方式

| | |
|------------|--|
| 事務所 | 熱源方式：中央空調方式 (事務室、更衣室、休憩室、ロビー、EV ホール) ・空調機方式（定風量方式） ・外気カット制御、全熱交換機制御（定格全熱交換効率 60%） |
| 商業施設（物販店舗） | 熱源方式：中央空調方式 (売場、荷さばき場、事務室) ・ファンコイルユニット＋外調機方式 (更衣室等) ・空調機方式（定風量方式） ・外気カット制御、全熱交換機制御（定格全熱交換効率 60%） |
| 共同住宅（共用部） | 熱源方式：パッケージ形エアコン方式 (管理人室、集会室、ロビー等) ・EHP 屋内機＋空調換気扇方式 ・全熱交換機制御（定格全熱交換効率 60%） ※試算では B1～1 階部分の共用部のみ地中熱利用の対象とし 2～14 階部分は空冷ヒートポンプの対象とする。 |
| 福祉施設（病院） | 熱源方式：中央空調方式 (病室、診察室等) ・ファンコイルユニット＋外調機方式 (事務室、更衣室等) ・空調機方式（定風量方式） ・外気カット制御、全熱交換機制御（定格全熱交換効率 60%） |

(共通仕様)

- ・二次側冷温水ポンプは、“2 台設置”とし“台数制御＋VWV 制御(変流量時最小流量比 60%)”、“冷温水往還温度差 7K”とする。
- ・空調二次側は、空冷ヒートポンプ空調方式と地中熱ヒートポンプ空調方式の差違はないものとする。

(4) 空調熱源の方式

比較は地中熱ヒートポンプ空調方式（地中熱利用システム）と空冷ヒートポンプ空調方式（標準システム）とし、建物の空調熱源方式は表 4-8 の通りとする。なお、標準システムは、「省エネルギー基準」の基準設定として計算する。

表 4-8 空調熱源の方式

| 空調方式 | 空冷ヒートポンプチラー方式 (標準システム) | 地中熱ヒートポンプ空調方式 (地中熱利用システム) |
|-----------------------------|--------------------------------|--|
| 中央空調方式 (事務所, 商業施設, 福祉施設) | ・ 空気熱を利用し二次側に冷温水を供給 | ・ 地中採熱・放熱運転により二次側に冷温水を供給 |
| パッケージ形エアコン方式 (共同住宅) | ・ 空気熱を利用し屋内機側に冷却・加熱冷媒(液・ガス)を供給 | ・ 地中採熱・放熱運転により屋内機側に冷却・加熱冷媒(液・ガス)を供給 |
| 地中採熱方式 | ---- | ・ 地中熱交換井戸方式(垂直形ボアホール方式) ・ クローズドループ方式 ・ ダブルUチューブ方式 (埋設深さ 100m/本) |

(共通仕様)

- ・ 中央空調方式の熱源機器は、“2 台設置”とし“台数制御”運転とする。
- ・ 中央空調方式の地中熱利用システムは、地中採熱利用が困難になる場合や現実性を考慮し全ての熱負荷を地中熱利用方式とせず、時間最大負荷の 50%は空冷ヒートポンプチラー方式とする複合システムの構成とする。

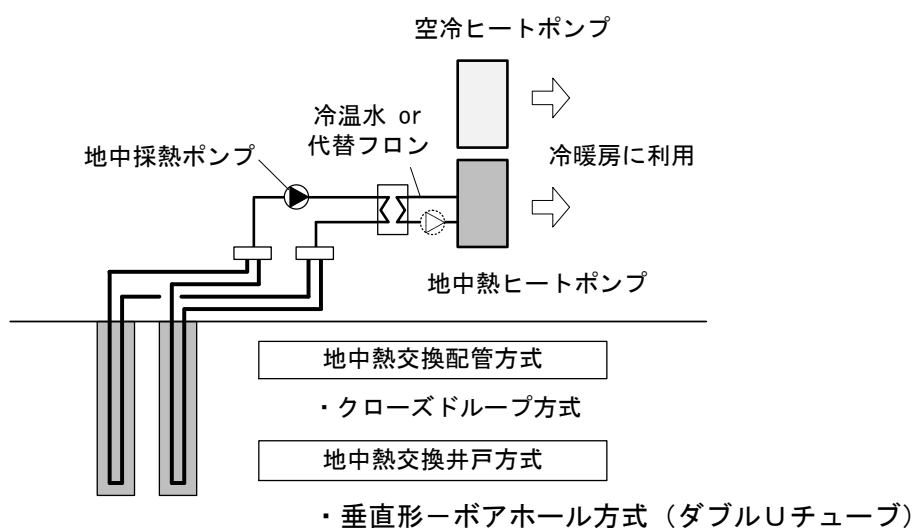


図 4-4 6 試算の地中熱利用システムの概要構成

(5) 空調条件

年間の冷暖房運転モードと各室用途の空調条件は「省エネルギー基準」の標準室仕様に準拠する。

(室内温湿度設定条件)

冷房： 26℃、50% 暖房： 22℃、40% 中間期：24℃、50%

(6) 各建物の時間最大負荷

試算建物の時間最大負荷は、「省エネルギー基準」の基準設定仕様に準拠する外壁・窓ならびに室仕様から、国土交通省大臣官房官庁営繕部設備・環境課監修の「建築設備設計基準 平成 21 年版」(以下、建築設備設計基準)の計算方法に倣い算定した。各試算建物の時間最大負荷を表 4-9 に示し、建物の外皮断熱仕様を表 4-10 に示す。

表 4-9 試算建物の時間最大負荷

| 建物用途 | 地域 | 時間最大負荷 | | 備考 |
|----------------|------------|------------|------------|--------|
| | | 冷房 [kW] | 暖房 [kW] | |
| 事務所 | 寒冷地 (2地域) | 510 | 437 | |
| | 準寒冷地 (3地域) | 553 | 450 | |
| | 温暖地 (6地域) | 614 | 366 | |
| | 蒸暑地 (8地域) | 634 | 196 | |
| 商業施設 (物販店舗) | 寒冷地 (2地域) | 1,322 | 1,124 | |
| | 準寒冷地 (3地域) | 1,455 | 1,094 | |
| | 温暖地 (6地域) | 1,614 | 848 | |
| | 蒸暑地 (8地域) | 1,701 | 372 | |
| 共同住宅 (共用部) | 寒冷地 (2地域) | 30.4 | 40.7 | 1F部分のみ |
| | 準寒冷地 (3地域) | 34.2 | 39.8 | |
| | 温暖地 (6地域) | 41.3 | 33.3 | |
| | 蒸暑地 (8地域) | 40.3 | 14.5 | |
| 福祉施設 (病院) | 寒冷地 (2地域) | 313 | 464 | |
| | 準寒冷地 (3地域) | 361 | 457 | |
| | 温暖地 (6地域) | 427 | 361 | |
| | 蒸暑地 (8地域) | 468 | 171 | |

表 4-10 試算建物の断熱仕様

| 建物種別 | 地域 | 外皮仕様 | | 窓仕様 |
|----------------|------|------------|-------|------------------------------------|
| | | 断熱材厚さ [mm] | | |
| | | 外壁 | 屋根 | |
| 事務所 | 寒冷地 | 50mm | 100mm | 複層 (空気層6mm) 透明+透明 8mm |
| | 準寒冷地 | 25mm | 50mm | 複層 (空気層6mm) 透明+透明 8mm |
| | 温暖地 | 25mm | 50mm | 単層 透明 8mm |
| | 蒸暑地 | - | 25mm | 単層 透明 8mm |
| 商業施設 (物販店舗) | 寒冷地 | 30mm* | 100mm | 複層 (空気層6mm) 透明+透明 8mm |
| | 準寒冷地 | 15mm* | 50mm | 複層 (空気層6mm) 透明+透明 8mm |
| | 温暖地 | 15mm* | 50mm | 単層 透明 8mm |
| | 蒸暑地 | - | 25mm | 単層 透明 8mm |
| 共同住宅 (共用部) | 寒冷地 | 90mm | 130mm | 複層 (空気層6mm) Low-E (高日射遮蔽型)+透明 10mm |
| | 準寒冷地 | 70mm | 100mm | 複層 (空気層6mm) 熱反シルバー+透明 6mm |
| | 温暖地 | 40mm | 95mm | 単層 透明 3mm |
| | 蒸暑地 | 15mm | 95mm | 単層 高性能熱線反射 (可視光透過率40%) 6mm |
| 福祉施設 (病院) | 寒冷地 | 50mm | 100mm | 複層 (空気層6mm) 透明+透明 8mm |
| | 準寒冷地 | 25mm | 50mm | 複層 (空気層6mm) 透明+透明 8mm |
| | 温暖地 | 25mm | 50mm | 単層 透明 8mm |
| | 蒸暑地 | - | 25mm | 単層 透明 8mm |

断熱材は押出法ポリスチレンフォーム保温板1種
*印は吹付け硬質ウレタンフォームA種1

(7) 試算ケース

建物用途と地域ごとに、空冷ヒートポンプ空調方式（標準システム）と地中熱ヒートポンプ空調方式（地中熱利用システム）を試算する。

試算ケースを表 4-12 に示す。地中熱利用システムでは、地中熱ヒートポンプチラーを優先的に運転する。なお、事務所（温暖地）では、熱源機の優先運転方法を変えたケースを試算する。地中熱ヒートポンプチラーによる地中採熱のパターンを表 4-11 に示す。

加えて、地中熱交換井の単位熱交換能力を 30W/m とした時の効果を、福祉施設（病院）（蒸暑地）で効果を試算する。

①地中熱ヒートポンプチラー優先運転

地中熱ヒートポンプチラーをベース運転とし、負荷が増加した場合に空冷ヒートポンプチラーが運転する方式。地中採熱を最大限に利用できるが地盤の状況に影響を受けやすい。

②空冷ヒートポンプチラー優先運転

空冷ヒートポンプチラーをベース運転とし、負荷が増加した場合に地中熱ヒートポンプチラーが運転する方式で地中温度の利用効果の高い外気条件時に地中熱ヒートポンプチラーを運転する。地中採熱は消極利用とはなるものの、建物負荷の少ない時期に地中温度は回復し地中熱利用効果を高めることが可能。

表 4-11 地中採熱パターン

| | 負荷パターン | |
|-----------------------|--------------------------|-----------------------------|
| | 昼間のみ空調（間欠空調運転） | 終日空調 |
| 地中熱ヒートポンプチラーの 運転形態 | 昼間：地中採熱運転 夜間：地中温度回復状態 | 昼間・夜間：地中採熱運転 ただし夜間負荷は小さい |
| 対象建物 | 事務所 商業施設（物販店舗） | 福祉施設（病院） 共同住宅（共用部） |

表 4-12 試算ケース

| 建物用途 | 地域 | ケースNO. | システム名 | 優先運転熱源機 |
|----------------|------|-----------|------------------------------|--------------------------------|
| 事務所 | 寒冷地 | O-C-1 | 標準システム | 空冷HPチラー |
| | | O-C-2 | 地中熱利用システム | 地中熱HPチラー |
| | 準寒冷地 | O-L-1 | 標準システム | 空冷HPチラー |
| | | O-L-2 | 地中熱利用システム | 地中熱HPチラー |
| | 温暖地 | O-M-1 | 標準システム | 空冷HPチラー |
| | | O-M-2 | 地中熱利用システム | 地中熱HPチラー |
| | | O-M-3 | 地中熱利用システム | 空冷HPチラー |
| | 蒸暑地 | O-H-1 | 標準システム | 空冷HPチラー |
| O-H-2 | | 地中熱利用システム | 地中熱HPチラー | |
| 商業施設 (物販店舗) | 寒冷地 | S-C-1 | 標準システム | 空冷HPチラー |
| | | S-C-2 | 地中熱利用システム | 地中熱HPチラー |
| | 準寒冷地 | S-L-1 | 標準システム | 空冷HPチラー |
| | | S-L-2 | 地中熱利用システム | 地中熱HPチラー |
| | 温暖地 | S-M-1 | 標準システム | 空冷HPチラー |
| | | S-M-2 | 地中熱利用システム | 地中熱HPチラー |
| | 蒸暑地 | S-H-1 | 標準システム | 空冷HPチラー |
| | | S-H-2 | 地中熱利用システム | 地中熱HPチラー |
| 住宅(共用部) | 寒冷地 | H-C-1 | 標準システム | 空冷HPパッケージ |
| | | H-C-2 | 地中熱利用システム | 地中熱HPパッケージ(1F)、空冷HPパッケージ(2F以上) |
| | 準寒冷地 | H-L-1 | 標準システム | 空冷HPパッケージ |
| | | H-L-2 | 地中熱利用システム | 地中熱HPパッケージ(1F)、空冷HPパッケージ(2F以上) |
| | 温暖地 | H-M-1 | 標準システム | 空冷HPパッケージ |
| | | H-M-2 | 地中熱利用システム | 地中熱HPパッケージ(1F)、空冷HPパッケージ(2F以上) |
| | 蒸暑地 | H-H-1 | 標準システム | 空冷HPパッケージ |
| | | H-H-2 | 地中熱利用システム | 地中熱HPパッケージ(1F)、空冷HPパッケージ(2F以上) |
| 福祉施設(病院) | 寒冷地 | B-C-1 | 標準システム | 空冷HPチラー |
| | | B-C-2 | 地中熱利用システム | 地中熱HPチラー |
| | 準寒冷地 | B-L-1 | 標準システム | 空冷HPチラー |
| | | B-L-2 | 地中熱利用システム | 地中熱HPチラー |
| | 温暖地 | B-M-1 | 標準システム | 空冷HPチラー |
| | | B-M-2 | 地中熱利用システム | 地中熱HPチラー |
| | 蒸暑地 | B-H-1 | 標準システム | 空冷HPチラー |
| | | B-H-2 | 地中熱利用システム | 地中熱HPチラー |
| B-H-3 | | 地中熱利用システム | 地中熱HPチラー ※熱交換井本数2倍(30W/mで設計) | |

表中表記：地中熱ヒートポンプチラー（地中熱 HP チラー）
 空冷ヒートポンプチラー（空冷 HP チラー）
 地中熱ヒートポンプパッケージ（地中熱 HP パッケージ）
 空冷ヒートポンプパッケージ（空冷 HP パッケージ）

(8) 試算建物の熱源機器仕様

各試算ケースの熱源機器の容量は、時間最大負荷に対し建築設備設計基準の補正係数を加えて選定した。試算ケースの熱源機器の諸元を表4-13～表4-14に示す。

(機器選定の共通条件)

- ・中央空調方式の熱源機器の能力は製品のラインナップによる能力特性の差違等が大きく生じないように建物最大負荷に対し90kWの整数倍能力とする仮想熱源機器とする。
- ・熱源機器の性能特性は、空冷ヒートポンプチラーは「省エネルギー基準」の基準設定仕様と同等とし、地中熱ヒートポンプチラー・パッケージは、メーカー性能値とし図4-47に示す。

(熱源機器の仕様条件)

①中央空調方式 (事務所、商業施設(物販店舗)、福祉施設(病院))

(空冷ヒートポンプチラー)

冷房 : 外気 35°CDB, 冷水 7-12°C、暖房 : 外気 7°CDB, 温水 45-40°C

COP : 冷房 3.24、暖房 3.41 (基準設定仕様値)

(地中熱ヒートポンプチラー)

冷房 : 熱源水 32-37°C, 冷水 7-12°C、暖房 : 熱源水 25-20°C, 温水 45-40°C

COP : 冷房 4.86、暖房 6.92 (メーカー仕様値)

②パッケージ形エアコン方式 (共同住宅(共用部))

(空冷ヒートポンプパッケージ)

冷房 : 外気 35°CDB, 吸込 27°CDB/19°CWB、暖房 : 外気 7°CDB, 吸込 20°CDB

COP : 冷房 3.24、暖房 3.24 (基準設定仕様値)

(地中熱ヒートポンプパッケージ)

冷房 : 熱源水 32-37°C, 吸込 27°CDB/19°CWB、暖房 : 熱源水 25-20°C, 吸込 20°CDB

COP : 冷房 3.84、暖房 4.32 (メーカー仕様値)

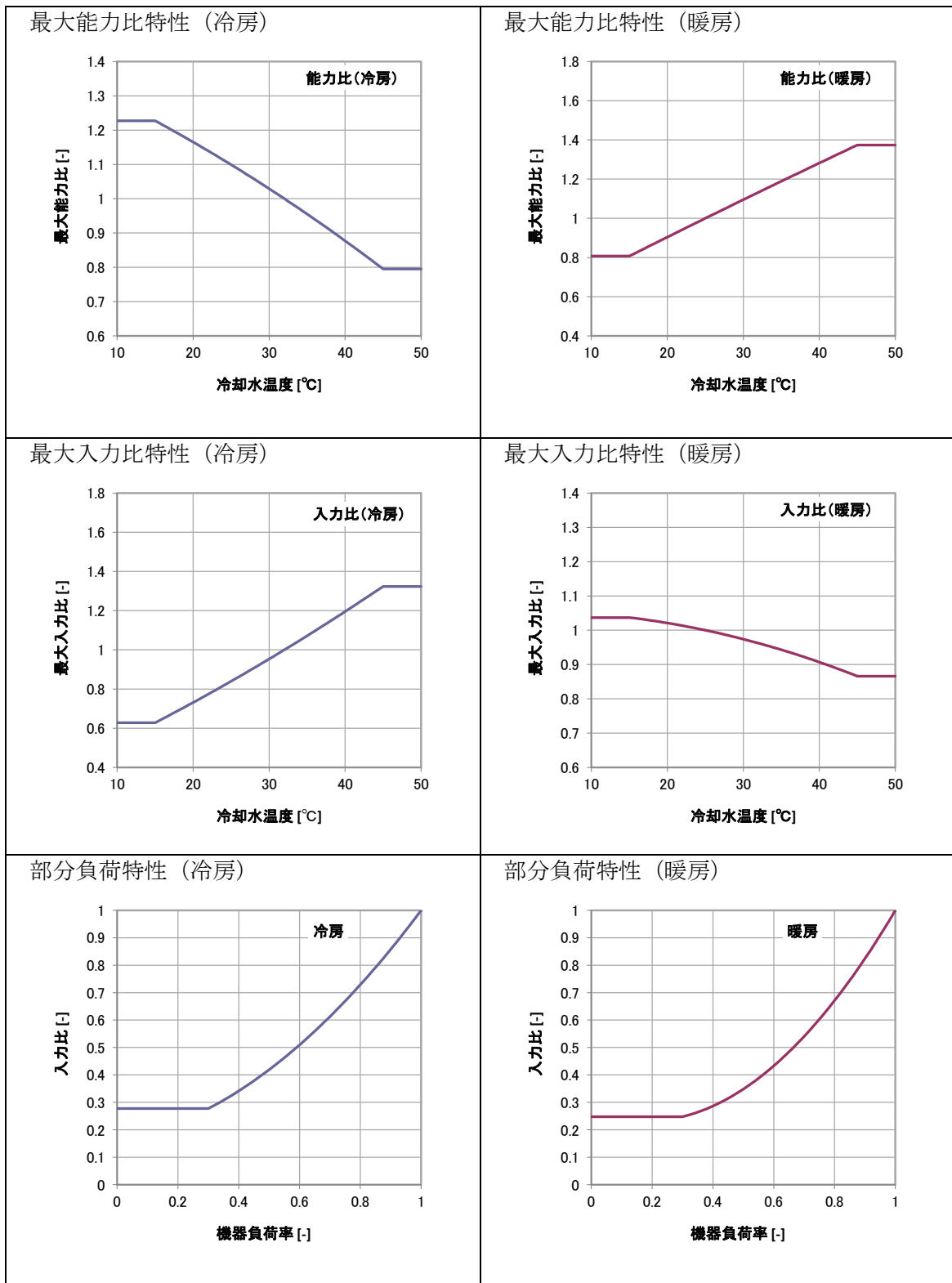


図 4-47 熱源機器の性能特性 (地中熱ヒートポンプチラー・パッケージ)

表 4-1-3 熱源機器の諸元 (事務所、商業施設)

| 建物用途 | 地域 | システム名 | ケースNO. | 機器名 | 冷房 | | | | 暖房 | | | | 熱交換弁本数 ※100m/本 | | | | | |
|---------------|----------------|--------------------------|--------|----------|----------|------------|------------|------|-------|-----------|------|-------|-------------------|-----------|------|--------|------------|---|
| | | | | | 運転単位 | 冷房能力 kW | 消費電力 kW | COP | 熱源機本体 | ポンプ kW | COP | 熱源機本体 | | ポンプ kW | COP | 熱源システム | | |
| 事務所 | 寒冷地 (2地域) | 標準システム | O-C-1 | 空冷HPチラー | 1番目 | 450 | 139 | 3.24 | 5.5 | 3.11 | 番目 | 450 | 132 | 3.41 | 5.5 | 3.27 | — | |
| | | | O-L-1 | 空冷HPチラー | 2番目 | 450 | 139 | 3.24 | 5.5 | 3.11 | 2番目 | 450 | 132 | 3.41 | 5.5 | 3.27 | | |
| | 標準寒冷地 (3地域) | 地中熱利用システム (地中熱HP優先運転) | O-C-2 | 地中熱HPチラー | 1番目 | 360 | 74 | 4.86 | 16.5 | 3.98 | 番目 | 360 | 52 | 6.92 | 16.5 | 5.26 | 寒冷地:72本 | |
| | | | O-L-2 | 空冷HPチラー | 2番目 | 450 | 139 | 3.24 | 5.5 | 3.11 | 2番目 | 450 | 132 | 3.41 | 5.5 | 3.27 | 標準寒冷地:72本 | |
| | 温暖地 (6地域) | 標準システム | O-M-1 | 空冷HPチラー | 1番目 | 450 | 139 | 3.24 | 5.5 | 3.11 | 番目 | 450 | 132 | 3.41 | 5.5 | 3.27 | — | |
| | | | O-H-1 | 空冷HPチラー | 2番目 | 450 | 139 | 3.24 | 5.5 | 3.11 | 2番目 | 450 | 132 | 3.41 | 5.5 | 3.27 | | |
| | 標準暑地 (8地域) | 地中熱利用システム (地中熱HP優先運転) | O-M-2 | 地中熱HPチラー | 1番目 | 450 | 93 | 4.84 | 20.5 | 3.96 | 番目 | 450 | 65 | 6.92 | 20.5 | 5.26 | 温暖地:90本 | |
| | | | O-H-2 | 空冷HPチラー | 2番目 | 450 | 139 | 3.24 | 5.5 | 3.11 | 2番目 | 450 | 132 | 3.41 | 5.5 | 3.27 | 標準暑地:106本 | |
| | 商業施設 (物販店舗) | 寒冷地 (2地域) | 標準システム | O-M-3 | 空冷HPチラー | 1番目 | 450 | 139 | 3.24 | 5.5 | 3.11 | 番目 | 450 | 132 | 3.41 | 5.5 | 3.27 | — |
| | | | | S-C-1 | 地中熱HPチラー | 2番目 | 900 | 232 | 3.88 | 26.0 | 3.49 | 2番目 | 900 | 197 | 4.57 | 26.0 | 4.04 | |
| | 標準寒冷地 (3地域) | 標準システム | 標準システム | S-C-1 | 空冷HPチラー | 1番目 | 900 | 306 | 3.24 | 11 | 3.12 | 番目 | 900 | 289 | 3.43 | 11 | 3.30 | — |
| | | | | S-C-2 | 空冷HPチラー | 2番目 | 900 | 306 | 3.24 | 11 | 3.12 | 2番目 | 900 | 289 | 3.43 | 11 | 3.30 | |
| 標準暑地 (8地域) | 標準システム | 標準システム | S-L-1 | 地中熱HPチラー | 1番目 | 810 | 167 | 4.85 | 33 | 4.05 | 番目 | 810 | 116 | 6.98 | 33 | 5.44 | 寒冷地:162本 | |
| | | | S-L-2 | 空冷HPチラー | 2番目 | 900 | 306 | 3.24 | 11 | 3.12 | 2番目 | 900 | 289 | 3.43 | 11 | 3.30 | | |
| 温暖地 (6地域) | 標準システム | 標準システム | S-M-1 | 空冷HPチラー | 1番目 | 900 | 473 | 3.81 | 44.0 | 3.48 | 番目 | 900 | 405 | 4.44 | 44.0 | 4.01 | — | |
| | | | S-M-2 | 空冷HPチラー | 2番目 | 900 | 306 | 3.24 | 11 | 3.12 | 2番目 | 900 | 289 | 3.43 | 11 | 3.30 | | |
| 標準暑地 (8地域) | 標準システム | 標準システム | S-H-1 | 地中熱HPチラー | 1番目 | 1080 | 185 | 4.86 | 33 | 4.13 | 番目 | 900 | 129 | 6.98 | 33 | 5.56 | 標準寒冷地:180本 | |
| | | | S-H-2 | 空冷HPチラー | 2番目 | 900 | 306 | 3.24 | 11 | 3.12 | 2番目 | 900 | 289 | 3.43 | 11 | 3.30 | | |

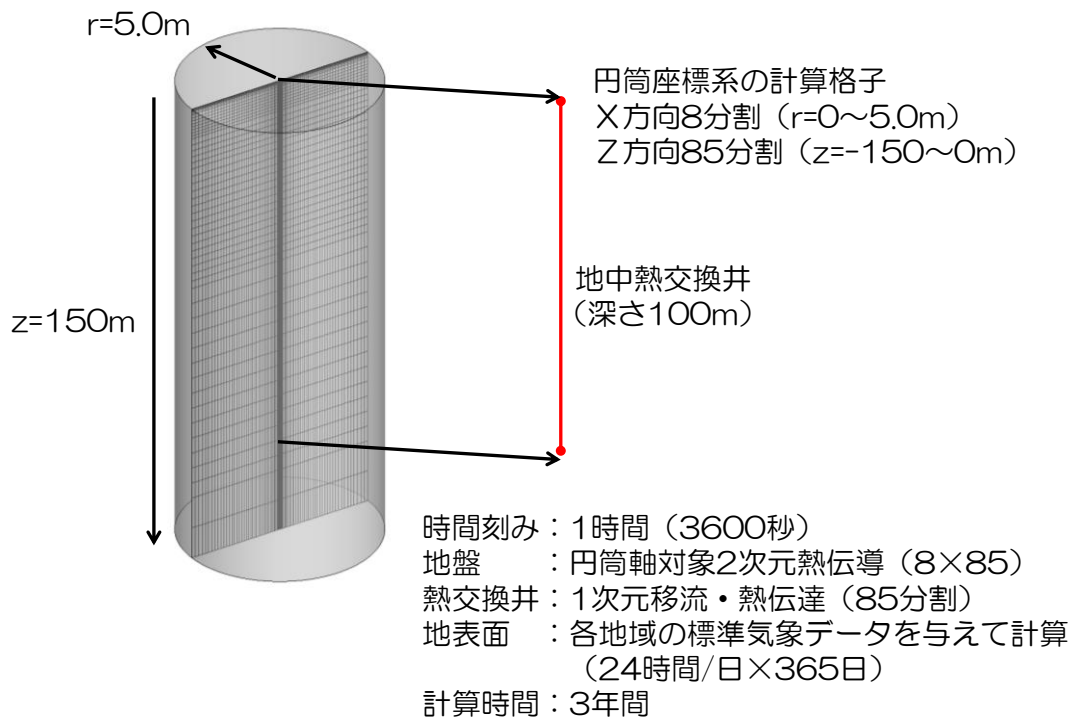
表 4-1-4 熱源機器の諸元 (共同住宅 (共用部)、福祉施設 (病院))

| 建物用途 | 地域 | システム名 | ケースNO. | 機器名 | 冷房 | | | | 暖房 | | | | 熱交換機本数 | | | | |
|---------------|--------------------------|--------------|-----------------|----------------|-----------------|------------|------------|--------------|-----------|---------------|------|------------|--|---------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| | | | | | 運転単位 | 冷房能力 kW | 消費電力 kW | 熱源機本体 COP | ポンプ kW | 熱源システム COP | 運転単位 | 暖房能力 kW | 消費電力 kW | 熱源機本体 COP | ポンプ kW | 熱源システム COP | ※100m ² /本 |
| 共同住宅 (共用部) | 寒冷地 (2地域) | 標準システム | H-O-1 | 空冷HP/パッケージ(IF) | 1番目 | 28 | 864 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 熱交換機本数 ※100m ² /本 | |
| | | | 2番目 | 22.4 | 691 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | | | |
| | | | 1番目 | 45 | 1389 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | | | |
| | 計 | | 95.4 | 2944 | 3.24 | 0 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | | | | |
| | 地中熱利用システム (地中熱HP優先運転) | H-O-2 | 地中熱HP/パッケージ(IF) | 1番目 | 28 | 7.3 | 3.84 | 3.84 | 1.5 | 3.18 | 3.18 | 3.18 | 3.18 | 3.18 | 3.18 | | 寒冷地:12本 |
| | | 2番目 | 22.4 | 5.8 | 3.86 | 3.86 | 1.5 | 3.07 | 3.07 | 3.07 | 3.07 | 3.07 | 3.07 | 3.07 | | | |
| | | 1番目 | 45 | 1389 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | | | |
| | 計 | | 95.4 | 2699 | 3.53 | 3 | 3.18 | 3.18 | 3.18 | 3.18 | 3.18 | 3.18 | 3.18 | 3.18 | | | |
| | 福祉施設 (病院) | 寒冷地 (3地域) | 標準システム | H-L-1 | 空冷HP/パッケージ(IF) | 1番目 | 22.4 | 691 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | | 標準冷地:12本 温暖地:12本 蒸暑地:12本 |
| | | | | H-M-1 | 空冷HP/パッケージ(IF) | 2番目 | 22.4 | 691 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | | |
| | | | | H-H-1 | 空冷HP/パッケージ(2F~) | 1番目 | 45 | 1389 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | | |
| | | 計 | | 89.8 | 2771 | 3.24 | 0 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | | | |
| 蒸暑地 (8地域) | | H-L-2 | 地中熱HP/パッケージ(IF) | 1番目 | 22.4 | 5.8 | 3.86 | 3.86 | 1.5 | 3.07 | 3.07 | 3.07 | 3.07 | 3.07 | 標準冷地:12本 温暖地:12本 蒸暑地:12本 | | |
| | | H-M-2 | 地中熱HP/パッケージ(IF) | 2番目 | 22.4 | 5.8 | 3.86 | 3.86 | 1.5 | 3.07 | 3.07 | 3.07 | 3.07 | 3.07 | | | |
| | | H-H-2 | 空冷HP/パッケージ(2F~) | 1番目 | 45 | 1389 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | 3.24 | | | |
| 計 | | | 89.8 | 2549 | 3.52 | 3 | 3.15 | 3.15 | 3.15 | 3.15 | 3.15 | 3.15 | 3.15 | 3.15 | | | |
| 福祉施設 (病院) | | 寒冷地 (2地域) | 標準システム | B-O-1 | 空冷HP/チラー | 1番目 | 450 | 139 | 3.24 | 5.5 | 3.11 | 3.11 | 3.11 | 3.11 | 3.11 | 標準冷地:72本 温暖地:54本 | |
| | | | | B-L-1 | 空冷HP/チラー | 2番目 | 450 | 139 | 3.24 | 5.5 | 3.11 | 3.11 | 3.11 | 3.11 | 3.11 | | |
| | | | | 計 | | 900 | 278 | 3.24 | 11.0 | 3.11 | 3.11 | 3.11 | 3.11 | 3.11 | 3.11 | | |
| | | 蒸暑地 (3地域) | B-O-2 | 地中熱HP/チラー | 1番目 | 360 | 74 | 4.86 | 4.86 | 16.5 | 3.98 | 3.98 | 3.98 | 3.98 | 標準冷地:72本 温暖地:54本 | | |
| | B-L-2 | | 空冷HP/チラー | 2番目 | 450 | 139 | 3.24 | 3.24 | 5.5 | 3.11 | 3.11 | 3.11 | 3.11 | | | | |
| | 計 | | | 810 | 213 | 3.80 | 22.0 | 3.45 | 3.45 | 3.45 | 3.45 | 3.45 | 3.45 | | | | |
| | 温暖地 (8地域) | B-M-1 | 空冷HP/チラー | 1番目 | 270 | 83 | 3.25 | 3.25 | 3.7 | 3.11 | 3.11 | 3.11 | 3.11 | 標準冷地:72本 温暖地:54本 | | | |
| | | B-L-1 | 空冷HP/チラー | 2番目 | 270 | 83 | 3.25 | 3.25 | 3.7 | 3.11 | 3.11 | 3.11 | 3.11 | | | | |
| | | 計 | | 540 | 166 | 3.25 | 7.4 | 3.11 | 3.11 | 3.11 | 3.11 | 3.11 | 3.11 | | | | |
| | 蒸暑地 (8地域) | B-M-2 | 地中熱HP/チラー | 1番目 | 270 | 56 | 4.82 | 4.82 | 11.2 | 4.02 | 4.02 | 4.02 | 4.02 | 標準冷地:72本 温暖地:54本 | | | |
| | | B-L-2 | 空冷HP/チラー | 2番目 | 270 | 83 | 3.25 | 3.25 | 3.7 | 3.11 | 3.11 | 3.11 | 3.11 | | | | |
| | | 計 | | 540 | 139 | 3.88 | 14.9 | 3.51 | 3.51 | 3.51 | 3.51 | 3.51 | 3.51 | | | | |
| 蒸暑地 (8地域) | B-H-1 | 空冷HP/チラー | 1番目 | 360 | 111 | 3.24 | 3.24 | 5.5 | 3.09 | 3.09 | 3.09 | 3.09 | 標準冷地:72本 温暖地:54本 蒸暑地:72本(60W/m) 蒸暑地:144本(30W/m) | | | | |
| | B-L-1 | 空冷HP/チラー | 2番目 | 360 | 111 | 3.24 | 3.24 | 5.5 | 3.09 | 3.09 | 3.09 | 3.09 | | | | | |
| | 計 | | 720 | 222 | 3.24 | 11.0 | 3.09 | 3.09 | 3.09 | 3.09 | 3.09 | 3.09 | | | | | |
| 蒸暑地 (8地域) | B-H-2 | 地中熱HP/チラー | 1番目 | 360 | 74 | 4.86 | 4.86 | 16.5 | 3.98 | 3.98 | 3.98 | 3.98 | 標準冷地:72本 温暖地:54本 蒸暑地:72本(60W/m) 蒸暑地:144本(30W/m) | | | | |
| | B-L-2 | 空冷HP/チラー | 2番目 | 360 | 111 | 3.24 | 3.24 | 5.5 | 3.09 | 3.09 | 3.09 | 3.09 | | | | | |
| | 計 | | 720 | 185 | 3.89 | 22.0 | 3.48 | 3.48 | 3.48 | 3.48 | 3.48 | 3.48 | | | | | |

(9) 地中熱交換井の仕様

建物の地中熱交換井の設置本数は、概ね建物の建築面積相当に埋設可能な本数とする(埋設間隔 5m、埋設深さ 100m/本)。また、単位長さ当たりの熱交換量は 60 W/m (官庁施設における地中熱利用システム導入ガイドライン (案) による標準値) として選定する。地中熱交換井の地盤モデルを図 4-48 に示し、地中内計算の諸条件及び熱交換井の諸条件を表 4-15 ~ 表 4-16 に示す。

なお、地中熱交換井の設計方法の違いが地中熱利用システムの効率に影響を及ぼすと考えられることから、病院 (蒸暑地) では、熱交換量は 30W/m として本数を 2 倍とした場合も試算する。



地盤モデル：熱交換井深さ 100m に対して周囲地盤を半径 5m×深さ 150m をモデリング

(円筒座標系 X 方向 8 分割×Z 方向 85 分割)

熱のみ計算 (熱水分同時移動計算は行わない)

深さ方向の地温勾配は考慮しない

図 4-48 地盤モデルと計算条件

表 4 - 1 5 地中内計算の諸条件

| 項目 | 設定内容 |
|---------|--|
| 初期温度 | 各地域の年間平均気温 寒冷地 : 7.5℃ 準寒冷地 : 10.2℃ 温暖地 : 15.7℃ 蒸暑地 : 22.7℃ |
| 側面境界 | 断熱、断水 |
| 大気状態 | 拡張アメダス気象データ (日本建築学会) における標準年データ (1981~1995年) |
| 地盤の熱伝導率 | 2W/(m・K) |

表 4 - 1 6 熱交換井の諸条件

| 項目 | 設定内容 |
|-----------|---|
| タイプ | ダブルUチューブ |
| 内径 | 27 mm |
| 厚さ | 3.5 mm |
| 管壁の密度 | 955 kg/m ³ |
| 管壁の比熱 | 1,890 J/(kg・K) |
| 管壁の熱伝導係数 | 0.495 W/(m・K) |
| 挿入長 | 100m |
| 循環液仕様 | ナイブライン : 33wt% (エチレングリコール 25wt%相当) |
| 循環液の密度 | 1,037 kg/m ³ |
| 循環液の比熱 | 3,798 J/(kg・K) |
| 循環液の熱伝導係数 | 0.495 W/(m・K) |
| 循環液の粘性係数 | 2.3e-3 Pa・s |
| 循環時流量 | 熱交換量 60W/m の場合 : 19 L/min 熱交換量 30W/m の場合 : 9.5 L/min |
| 循環時熱源水熱量 | 熱負荷計算結果より熱量で与える |
| 計算間隔 | 1 時間 (3600 秒) |
| 計算時間 | 3 年間 |
| 分割数 | 85 分割 |

(10) その他設備の仕様

その他建物設備仕様は同一とし、省エネルギー基準の基準設定仕様に準じたものとして試算した。表4-17にその他建築設備仕様を示す。

なお、建物の電力量は、省エネルギー基準の判定に用いている「空調」、「換気」、「照明」、「昇降機」の合計とし、一次エネルギー消費量は、「空調」、「換気」、「照明」、「昇降機」、「給湯」の合計として比較する。なお、給湯は燃焼（都市ガス）方式によるものとし電力量の集計には含まない。

表4-17 その他建築設備仕様

| 設備 | 設備仕様 |
|-------|--|
| 照明設備 | 「省エネルギー基準」での基準設定仕様 主として、Hf 照明器具 |
| 換気設備 | 「省エネルギー基準」での基準設定仕様 各室換気量、ダクト全静圧は設定仕様に準拠 |
| 昇降機設備 | 「省エネルギー基準」での基準設定仕様 VVVF 制御方式、回生電力なし |
| 給湯設備 | 「省エネルギー基準」での基準設定仕様 給湯器はガス給湯器 |

4.4.3 考察

計算結果を表4-18～表4-19及び図4-49～図4-52に示す。また、電力ピーク削減効果及び省エネルギー効果を建物用途別に整理したものを図4-53～図4-54に示す。さらに、代表的なシステムの計算結果の詳細を図4-55～図4-69に示す。得られた知見を次に示す。

- ① 事務所、商業施設（物販店舗）、福祉施設（病院）では、地中熱ヒートポンプチラーを採用することにより空冷ヒートポンプチラーに比べて熱源効率が向上し、電力ピーク削減効果及び省エネルギー効果の両方が得られた。地中熱ヒートポンプチラーによる電力ピーク削減効果及び省エネルギー効果は蒸暑地では5%程度、温暖地～寒冷地では10～20%程度であった。なお、熱源設備のエネルギー消費量が建物全体に占める割合は、商業施設（物販店舗）、福祉施設（病院）、事務所の順に大きいため、電力ピーク削減効果及び省エネルギー効果も商業施設（物販店舗）、病院、事務所の順に高くなった。
- ② 一方、共同住宅（共用部）では、他の建物用途とは異なり、電力ピーク削減効果及び省エネルギー効果は殆ど得られなかった。共同住宅（共用部）には地中熱ヒートポンプパッケージが導入されると想定したが、他の建物用途で想定した地中熱ヒートポンプチラーと比べると現在市販されている地中熱ヒートポンプパッケージの効率が低いことが原因である。地中熱ヒートポンプパッケージの単体効率は空冷ヒートポンプパッケージよりは高いものの、地盤との熱交換のために必要なポンプを含めたシステム効率で比較すると空冷ヒートポンプパッケージとほぼ同じとなる。今後、より高効率な地中熱ヒートポンプパッケージが開発されれば、電力ピーク削減効果及び省エネルギー効果が得られるであろう。
- ③ 地域別の電力ピーク削減効果は、寒冷地・準寒冷地、温暖地、蒸暑地の順に高くなった。これは、寒冷地・準寒冷地においては、夏期だけではなく冬期の電力ピーク削減効果も高く、これが年間の削減効果に大きく寄与しているからである。逆に、蒸暑地では冬期の暖房負荷が極めて小さいため、他の地域と比較すると電力ピーク削減効果は小さい。
- ④ 空冷ヒートポンプチラーと地中熱ヒートポンプチラーが併設される場合において、地中熱ヒートポンプチラーを優先して運転するケース（ケースNO.：0-M-2）と空冷ヒートポンプチラーを優先して運転するケース（ケースNO.：0-M-3）とを比較すると、地中熱ヒートポンプチラーを優先して運転する方が電力ピーク削減効果及び省エネルギー効果は2～3倍高くなった。（図4-57、図4-63～図4-65）
- ⑤ 冷房負荷と暖房負荷が同程度であるケース（寒冷地・準寒冷地の事務所・物販店舗）では、3年間運転を続けたとしても地盤温度の上昇は見られなかった。一方、暖房

負荷がない蒸暑地においては、地盤温度は年々上昇し、特に 24 時間空調運転される病院では大きく上昇する結果となった。(図 4-59～図 4-62、図 4-68)

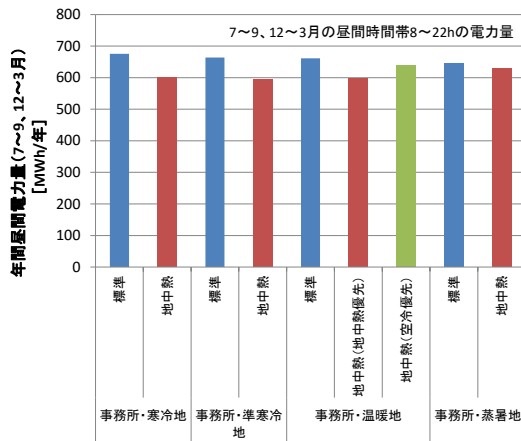
- ⑥ 蒸暑地での病院において、熱交換井の本数を 74 本 (60W/m 相当) とした場合は電力ピーク削減効果及び省エネルギー効果は得られないが 144 本 (30W/m 相当) とすると効果が期待できることが判った。電力ピーク削減効果及び省エネルギー効果は熱交換井をどのように設計するかによっても大きく変化する。(図 4-69)

表 4-1-18 試算結果一覧 (事務所、商業施設)

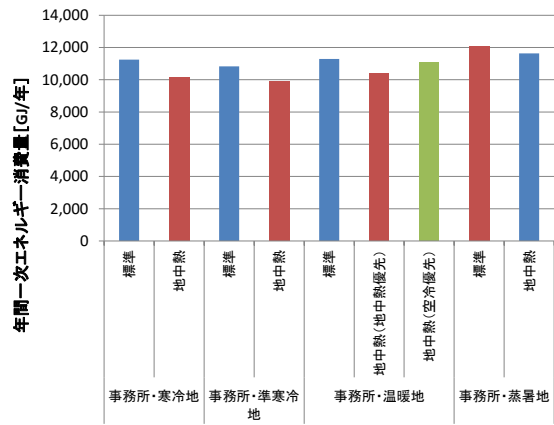
| 建物種別 | 気候区分 | NO | 設備システム | 電力ピーク削減 | | | 省エネルギー | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|------------------------------|---------------|---------------|----------------------------|----------|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|------------|------------|----------|
| | | | | 最大日 昼間 (8~22h) kWh/日 | 最大日 — | 電力ピーク 削減率 % | 電力消費量 | | 電力消費量 | | 電力消費量 | | 電力消費量 | | 電力消費量 | | 電力消費量 | | 電力消費量 | | 電力消費量 | | | | |
| | | | | | | | 削減率 % | 削減率 % | 削減率 % | 削減率 % | 削減率 % | 削減率 % | 削減率 % | 削減率 % | 削減率 % | 削減率 % | 削減率 % | 削減率 % | 削減率 % | 削減率 % | 削減率 % | 削減率 % | 削減率 % | 削減率 % | 削減率 % |
| 事務所 (約10,000㎡) | 寒冷地 (2)地域 | 0-C-1 | 標準 (省エネ基準相当) | 6,786 | 1月13日(火) | 0.0% | 675,806 | 0.0% | 328,247 | 301,906 | 73,629 | 413,650 | 17,487 | 1,134,928 | 100.0% | 3,203,692 | 2,946,601 | 718,713 | 4,037,225 | 170,668 | 170,668 | 170,668 | 11,247,428 | 100.0% | |
| | | 0-C-2 | 地中熱 (省エネ基準相当) | 5,990 | 1月13日(火) | 11.3% | 599,356 | 11.3% | 213,945 | 301,906 | 73,629 | 413,650 | 17,487 | 1,020,626 | 89.9% | 2,088,105 | 2,946,601 | 718,713 | 4,037,225 | 170,668 | 170,668 | 170,668 | 10,131,540 | 90.1% | |
| | 準寒冷地 (3)地域 | 0-L-1 | 標準 (省エネ基準相当) | 6,865 | 1月5日(月) | 0.0% | 683,622 | 0.0% | 299,000 | 299,510 | 73,629 | 413,650 | 17,487 | 1,093,255 | 100.0% | 2,820,637 | 2,923,218 | 718,713 | 4,037,225 | 170,668 | 170,668 | 170,668 | 10,830,806 | 100.0% | |
| | | 0-L-2 | 地中熱 (省エネ基準相当) | 6,041 | 1月5日(月) | 12.0% | 593,656 | 10.8% | 193,250 | 299,510 | 73,629 | 413,650 | 17,487 | 997,536 | 91.2% | 1,886,123 | 2,923,218 | 718,713 | 4,037,225 | 170,668 | 170,668 | 170,668 | 9,896,293 | 91.4% | |
| | 温暖地 (5)地域 | 0-W-1 | 標準 (省エネ基準相当) | 6,535 | 7月24日(金) | 0.0% | 681,042 | 0.0% | 325,314 | 312,479 | 73,629 | 413,650 | 17,487 | 1,142,569 | 100.0% | 3,175,064 | 3,049,799 | 718,713 | 4,037,225 | 170,668 | 170,668 | 170,668 | 11,288,657 | 100.0% | |
| | | 0-W-2 | 地中熱 (省エネ基準相当) | 5,858 | 7月24日(火) | 10.4% | 597,594 | 9.0% | 230,001 | 312,479 | 73,629 | 413,650 | 17,487 | 1,047,256 | 91.7% | 2,244,809 | 3,049,799 | 718,713 | 4,037,225 | 170,668 | 170,668 | 170,668 | 10,358,402 | 91.8% | |
| | 蒸暑地 (8)地域 | 0-H-1 | 標準 (省エネ基準相当) | 7,388 | 7月21日(火) | 0.0% | 646,067 | 0.0% | 395,476 | 322,339 | 73,629 | 413,650 | 17,487 | 1,222,500 | 100.0% | 3,859,856 | 3,146,024 | 718,713 | 4,037,225 | 170,668 | 170,668 | 170,668 | 12,039,479 | 100.0% | |
| | | 0-H-2 | 地中熱 (省エネ基準相当) | 7,148 | 7月21日(火) | 3.3% | 629,389 | 2.0% | 354,455 | 322,339 | 73,629 | 413,650 | 17,487 | 1,181,569 | 96.6% | 3,459,480 | 3,146,024 | 718,713 | 4,037,225 | 170,668 | 170,668 | 170,668 | 11,639,109 | 96.7% | |
| | 商業施設 物販店舗相当 (約10,000㎡) | 準寒冷地 (3)地域 | S-C-1 | 標準 (省エネ基準相当) | 12,623 | 12月19日(土) | 0.0% | 1,223,590 | 0.0% | 1,288,825 | 452,652 | 137,287 | 798,301 | 36,670 | 2,713,535 | 100.0% | 12,576,983 | 4,417,884 | 1,338,918 | 7,791,417 | 357,897 | 357,897 | 357,897 | 27,008,031 | 100.0% |
| | | | S-C-2 | 地中熱 (省エネ基準相当) | 9,876 | 12月19日(土) | 21.8% | 1,442,742 | 16.3% | 863,889 | 452,652 | 137,287 | 798,301 | 36,670 | 2,288,709 | 84.3% | 8,431,560 | 4,417,884 | 1,338,918 | 7,791,417 | 357,897 | 357,897 | 357,897 | 22,862,608 | 84.7% |
| 商業施設 (約10,000㎡) | 準寒冷地 (3)地域 | S-L-1 | 標準 (省エネ基準相当) | 10,372 | 2月24日(火) | 0.0% | 1,626,970 | 0.0% | 1,113,510 | 443,455 | 137,287 | 798,301 | 36,670 | 2,329,222 | 100.0% | 10,867,855 | 4,328,122 | 1,338,918 | 7,791,417 | 357,897 | 357,897 | 357,897 | 25,177,228 | 100.0% | |
| | | S-L-2 | 地中熱 (省エネ基準相当) | 8,347 | 1月30日(金) | 19.5% | 1,254,787 | 22.9% | 617,866 | 443,455 | 137,287 | 798,301 | 36,670 | 2,033,278 | 80.4% | 6,027,443 | 4,328,122 | 1,338,918 | 7,791,417 | 357,897 | 357,897 | 357,897 | 20,336,515 | 80.8% | |
| | 温暖地 (5)地域 | S-W-1 | 標準 (省エネ基準相当) | 10,455 | 7月24日(金) | 0.0% | 1,535,106 | 0.0% | 1,074,761 | 443,403 | 137,287 | 798,301 | 36,670 | 2,400,421 | 100.0% | 10,489,668 | 4,327,612 | 1,338,918 | 7,791,417 | 357,897 | 357,897 | 357,897 | 24,727,569 | 100.0% | |
| | | S-W-2 | 地中熱 (省エネ基準相当) | 8,897 | 8月23日(日) | 14.9% | 1,269,316 | 17.3% | 696,295 | 443,403 | 137,287 | 798,301 | 36,670 | 2,112,455 | 84.8% | 6,800,716 | 4,327,612 | 1,338,918 | 7,791,417 | 357,897 | 357,897 | 357,897 | 21,038,417 | 85.1% | |
| | 蒸暑地 (8)地域 | S-H-1 | 標準 (省エネ基準相当) | 10,242 | 7月22日(火) | 0.0% | 1,400,374 | 0.0% | 1,137,513 | 453,372 | 137,287 | 798,301 | 36,670 | 2,363,143 | 100.0% | 11,102,128 | 4,424,914 | 1,338,918 | 7,791,417 | 357,897 | 357,897 | 357,897 | 25,339,570 | 100.0% | |
| | | S-H-2 | 地中熱 (省エネ基準相当) | 9,920 | 8月22日(土) | 3.1% | 1,229,314 | 5.1% | 960,888 | 453,372 | 137,287 | 798,301 | 36,670 | 2,416,328 | 94.3% | 9,699,214 | 4,424,914 | 1,338,918 | 7,791,417 | 357,897 | 357,897 | 357,897 | 23,906,656 | 94.3% | |

表 4-19 試算結果一覧（共同住宅（共用部）、福祉施設（病院））

| 建物種別 | 気候区分 | NO | 設備システム | 電力ピーク削減 | | | | 省エネルギー | | | | | | | | | | | 一次エネルギー量 | | | | | | | | | | |
|---------------------------|---------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|-----------|------------|--------|--|
| | | | | 電力ピーク削減 | | 電力ピーク削減 | | 電力消費量 | | 熱源 | | 二酸化炭素 | | 換気 | | 照明電力 | | 昇降機 | | 結露 | | 合計 | | 一次エネルギー消費量 | | | | | |
| | | | | 最大日 kWh/日 | 最大日 kWh/日 | 削減率 % | 削減率 % | 削減率 % | 削減率 % | 削減率 % | 削減率 % | 削減率 % | 削減率 % | 削減率 % | 削減率 % | 削減率 % | 削減率 % | 削減率 % | 削減率 % | 削減率 % | 削減率 % | 削減率 % | 削減率 % | 削減率 % | 削減率 % | 削減率 % | | | |
| 共同住宅 共用部 (約10,000㎡) | 寒冷地 | H-C-1 | 標準 (省エネ基準相当) | 最大日 | 637 | 2月19日(木) | 110,700 | 0.0% | 電力ピーク削減率 | 0.0% | 熱源 | 50,178 | 17,310 | 100,304 | 127,789 | 0 | 255,581 | 100.0% | 電力消費量 | 489,735 | 168,947 | 978,967 | 1,247,225 | 0 | 22,115 | 2,906,990 | 100.0% | | |
| | | | | 昼間(8~22h) | 635 | 1月13日(火) | 111,382 | -0.6% | 二酸化炭素 | 17,310 | 100,304 | 127,789 | 0 | 296,672 | 100.4% | 換気 | 168,947 | 978,967 | 1,247,225 | 0 | 22,115 | 2,917,634 | 100.4% | | | | | | |
| | 温暖地 | H-C-2 | 標準 (省エネ基準相当) | 最大日 | 623 | 1月15日(月) | 109,002 | 0.0% | 電力ピーク削減率 | 0.0% | 熱源 | 40,291 | 16,981 | 100,304 | 127,789 | 0 | 285,365 | 100.0% | 電力消費量 | 393,238 | 165,730 | 978,967 | 1,247,225 | 0 | 20,731 | 2,805,891 | 100.0% | | |
| | | | | 昼間(8~22h) | 627 | 1月15日(月) | 109,863 | -0.8% | 二酸化炭素 | 16,981 | 100,304 | 127,789 | 0 | 286,403 | 100.4% | 換気 | 165,730 | 978,967 | 1,247,225 | 0 | 20,731 | 2,816,025 | 100.4% | | | | | | |
| | 蒸暑地 | H-H-1 | 標準 (省エネ基準相当) | 最大日 | 598 | 2月23日(月) | 105,928 | 0.0% | 電力ピーク削減率 | 0.0% | 熱源 | 36,985 | 17,495 | 100,304 | 127,789 | 0 | 282,574 | 100.0% | 電力消費量 | 360,873 | 170,754 | 978,967 | 1,247,225 | 0 | 17,526 | 2,775,445 | 100.0% | | |
| | | | | 昼間(8~22h) | 589 | 2月23日(月) | 106,688 | -0.7% | 二酸化炭素 | 17,495 | 100,304 | 127,789 | 0 | 284,070 | 100.3% | 換気 | 170,754 | 978,967 | 1,247,225 | 0 | 17,526 | 2,790,054 | 100.5% | | | | | | |
| | 福祉施設 病院相当 (約5,000㎡) | 寒冷地 | B-C-1 | 標準 (省エネ基準相当) | 最大日 | 595 | 7月21日(火) | 97,566 | 0.0% | 電力ピーク削減率 | 0.0% | 熱源 | 29,949 | 16,974 | 100,304 | 127,789 | 0 | 275,017 | 100.0% | 電力消費量 | 292,366 | 165,671 | 978,967 | 1,247,225 | 0 | 13,365 | 2,697,514 | 100.0% | |
| | | | | | 昼間(8~22h) | 590 | 7月21日(火) | 98,406 | -0.9% | 二酸化炭素 | 16,974 | 100,304 | 127,789 | 0 | 277,036 | 100.7% | 換気 | 165,671 | 978,967 | 1,247,225 | 0 | 13,365 | 2,717,213 | 100.7% | | | | | |
| | | (2)地城 | B-C-2 | 標準 (省エネ基準相当) | 最大日 | 4,281 | 12月19日(土) | 514,876 | 0.0% | 電力ピーク削減率 | 0.0% | 熱源 | 616,468 | 139,111 | 139,883 | 241,732 | 18,192 | 1,455,384 | 100.0% | 電力消費量 | 6,016,724 | 1,357,720 | 1,365,254 | 2,359,302 | 177,552 | 2,101,803 | 13,378,444 | 100.0% | |
| | | | | | 昼間(8~22h) | 3,183 | 1月13日(火) | 421,992 | 25.6% | 二酸化炭素 | 139,111 | 139,883 | 241,732 | 18,192 | 941,488 | 81.3% | 換気 | 1,357,720 | 1,365,254 | 2,359,302 | 177,552 | 2,101,803 | 11,290,818 | 84.4% | | | | | |
| | | (3)地城 | B-H-1 | 標準 (省エネ基準相当) | 最大日 | 3,732 | 1月15日(月) | 478,386 | 0.0% | 電力ピーク削減率 | 0.0% | 熱源 | 530,887 | 137,589 | 139,883 | 241,732 | 18,192 | 1,068,083 | 100.0% | 電力消費量 | 5,179,610 | 1,342,869 | 1,365,254 | 2,359,302 | 177,552 | 1,974,000 | 12,398,527 | 100.0% | |
| | | | | | 昼間(8~22h) | 2,996 | 1月15日(月) | 395,586 | 19.7% | 二酸化炭素 | 137,589 | 139,883 | 241,732 | 18,192 | 898,849 | 84.2% | 換気 | 1,342,869 | 1,365,254 | 2,359,302 | 177,552 | 1,974,000 | 10,748,802 | 86.7% | | | | | |
| | | | | | 標準 (省エネ基準相当) | 2,938 | 2月23日(月) | 412,800 | 0.0% | 電力ピーク削減率 | 0.0% | 熱源 | 371,678 | 138,132 | 139,883 | 241,732 | 18,192 | 909,616 | 100.0% | 電力消費量 | 3,627,579 | 1,348,165 | 1,365,254 | 2,359,302 | 177,552 | 1,688,375 | 10,566,227 | 100.0% | |
| | (6)地城 | B-H-2 | 標準 (省エネ基準相当) | 最大日 | 2,397 | 2月23日(月) | 353,027 | 18.4% | 電力ピーク削減率 | 14.5% | 熱源 | 276,680 | 138,132 | 139,883 | 241,732 | 18,192 | 84,626 | 89.6% | 電力消費量 | 2,700,481 | 1,348,165 | 1,365,254 | 2,359,302 | 177,552 | 1,688,375 | 9,639,129 | 91.2% | | |
| 昼間(8~22h) | | | | 2,773 | 7月21日(火) | 369,586 | 0.0% | 電力ピーク削減率 | 0.0% | 熱源 | 379,132 | 140,460 | 139,883 | 241,732 | 18,192 | 919,399 | 100.0% | 電力消費量 | 3,700,333 | 1,370,891 | 1,365,254 | 2,359,302 | 177,552 | 1,998,331 | 10,271,663 | 100.0% | | | |
| (8)地城 | B-H-2 | 標準 (省エネ基準相当) | 最大日 | 2,832 | 7月21日(火) | 371,800 | -2.1% | 電力ピーク削減率 | -0.6% | 熱源 | 388,007 | 140,460 | 139,883 | 241,732 | 18,192 | 938,273 | 102.1% | 電力消費量 | 3,884,547 | 1,370,891 | 1,365,254 | 2,359,302 | 177,552 | 1,998,331 | 10,455,877 | 101.8% | | | |
| | | | 昼間(8~22h) | 2,668 | 7月21日(火) | 351,284 | 3.8% | 電力ピーク削減率 | 5.0% | 熱源 | 351,287 | 140,460 | 139,883 | 241,732 | 18,192 | 891,544 | 97.0% | 電力消費量 | 3,428,566 | 1,370,891 | 1,365,254 | 2,359,302 | 177,552 | 1,998,331 | 9,999,896 | 97.4% | | | |
| | | | 標準 (省エネ基準相当) | 2,668 | 7月21日(火) | 351,284 | 3.8% | 電力ピーク削減率 | 5.0% | 熱源 | 351,287 | 140,460 | 139,883 | 241,732 | 18,192 | 891,544 | 97.0% | 電力消費量 | 3,428,566 | 1,370,891 | 1,365,254 | 2,359,302 | 177,552 | 1,998,331 | 9,999,896 | 97.4% | | | |

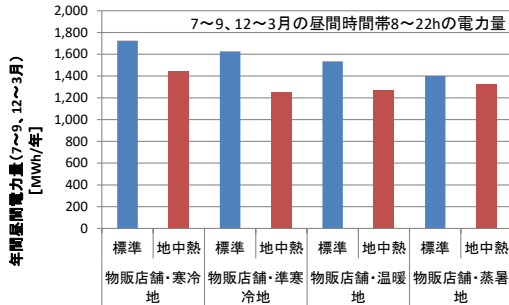


(年間昼間電力量)

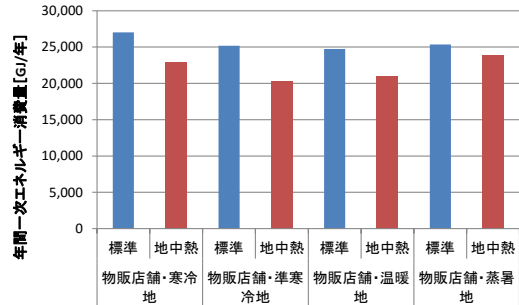


(年間一次エネルギー消費量)

図4-49 年間昼間電力量と年間一次エネルギー消費量（事務所）

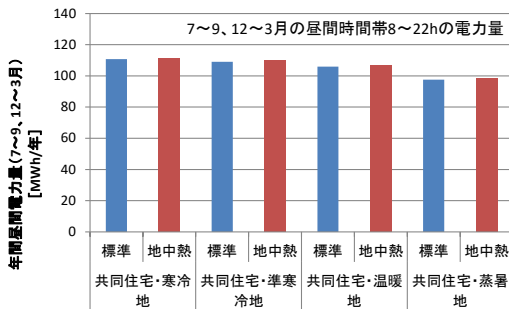


(年間昼間電力量)

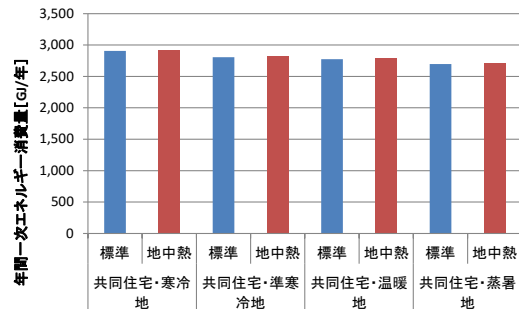


(年間一次エネルギー消費量)

図4-50 年間昼間電力量と年間一次エネルギー消費量（商業施設（物販店舗））

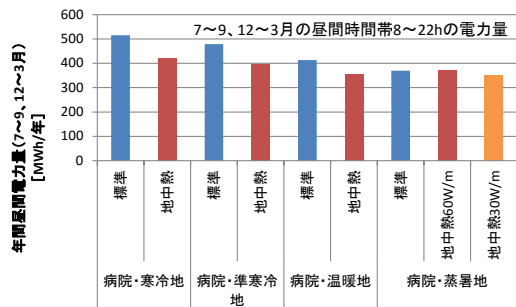


(年間昼間電力量)

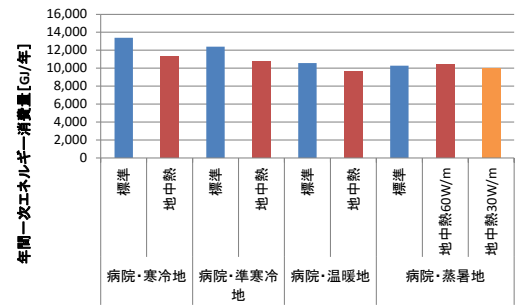


(年間一次エネルギー消費量)

図4-51 年間昼間電力量と年間一次エネルギー消費量（共同住宅（共用部））

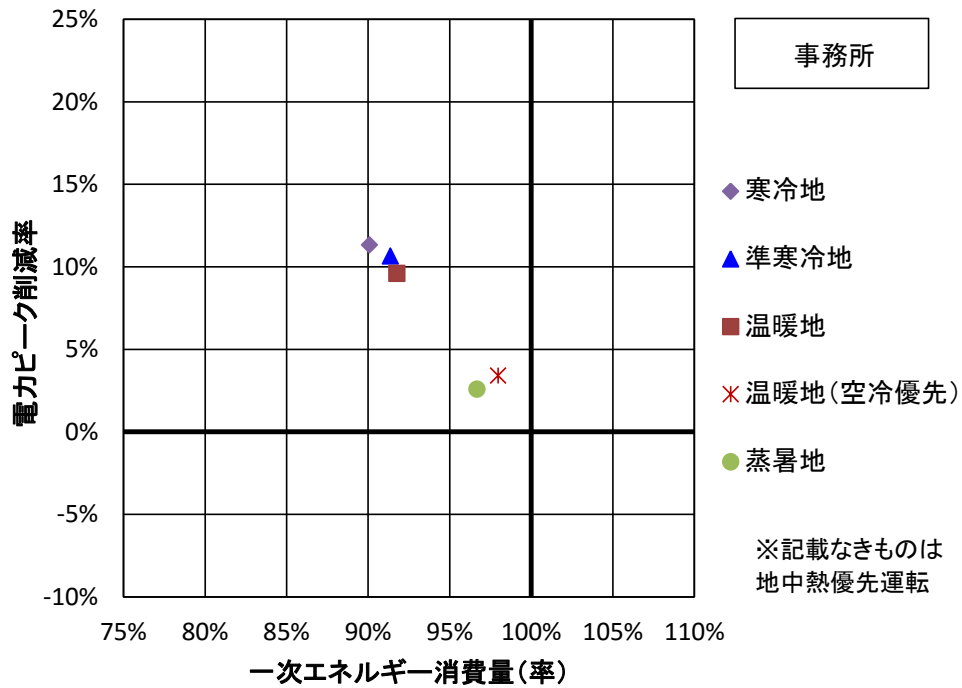


(年間昼間電力量)

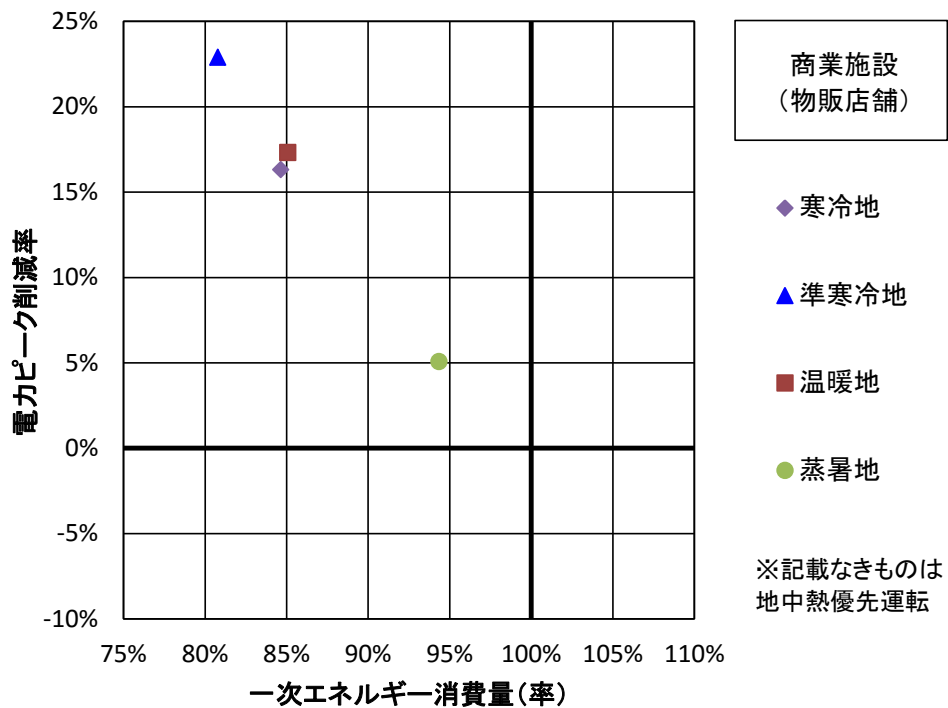


(年間一次エネルギー消費量)

図4-52 年間昼間電力量と年間一次エネルギー消費量（福祉施設（病院））

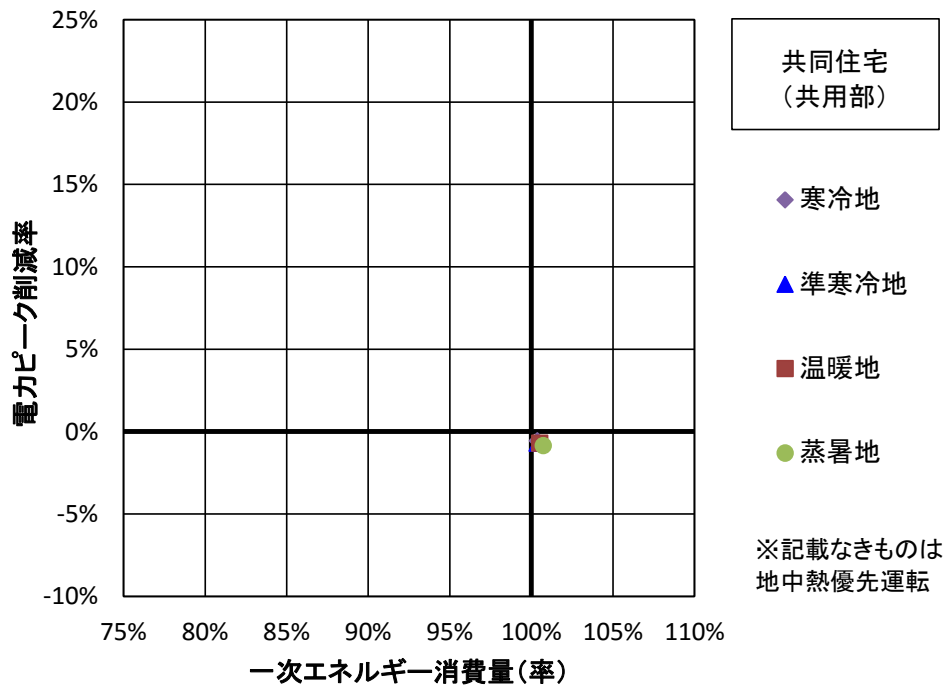


(事務所)

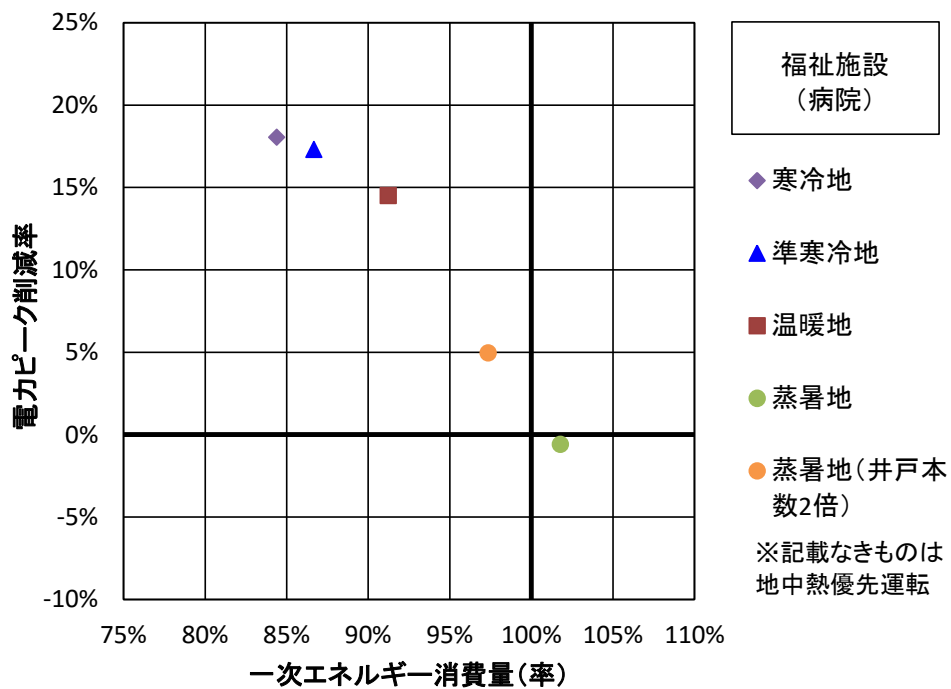


(商業施設 (物販店舗))

図 4-53 電力ピーク削減及び省エネルギー効果 (1)

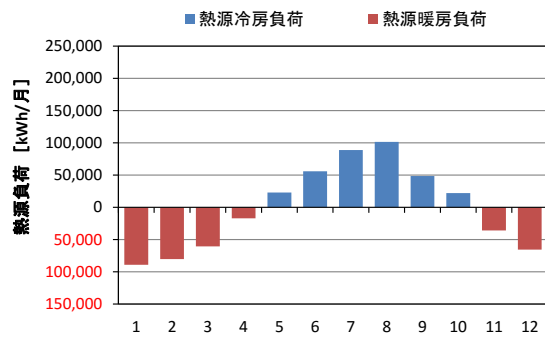


(共同住宅 (共用部))

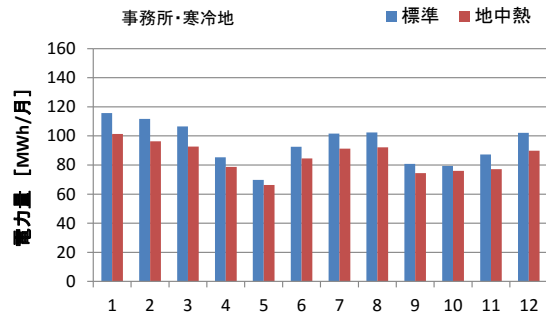


(福祉施設 (病院))

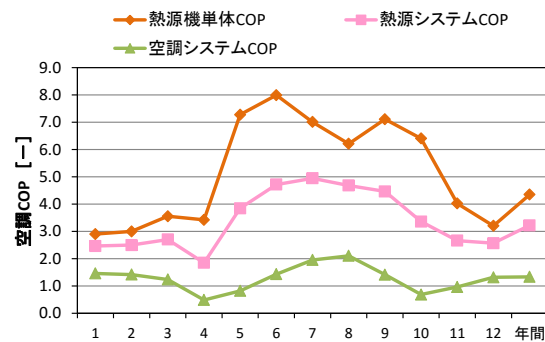
図 4-5-4 電力ピーク削減及び省エネルギー効果 (2)



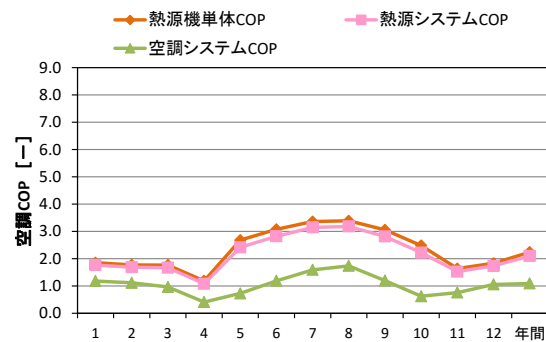
(月別冷暖房負荷 (熱源負荷))



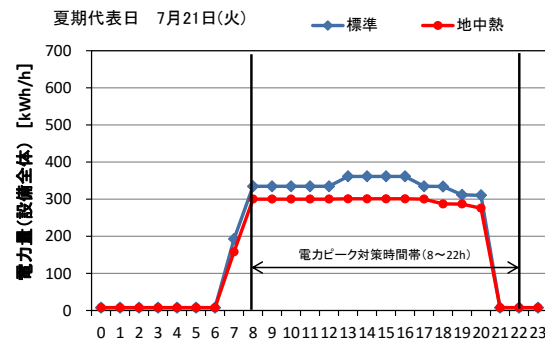
(月別電力量 (空調))



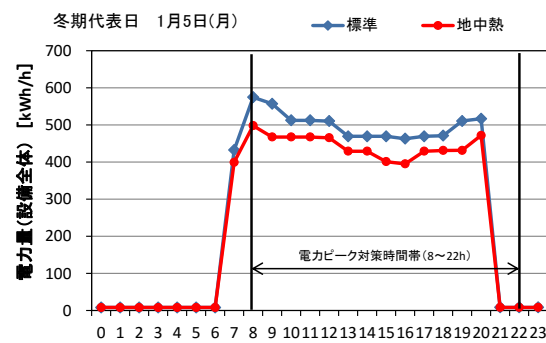
(地中熱利用システム月別・COP)



(標準システム月別・COP)

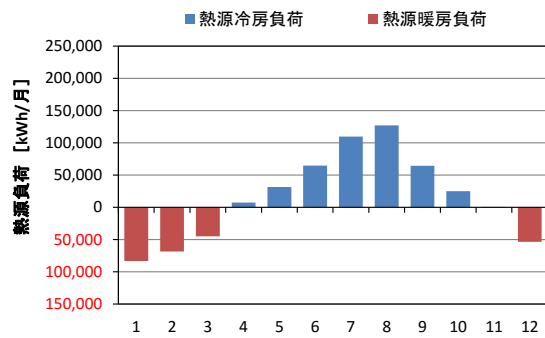


(時刻別電力量 (夏期代表日))

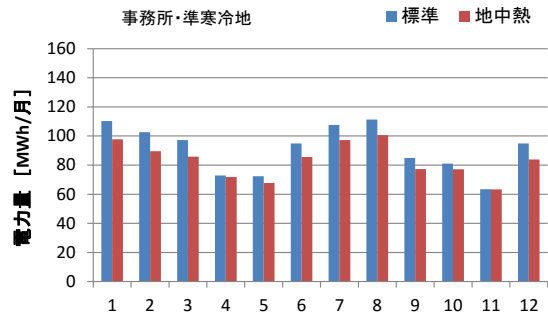


(時刻別電力量 (冬期代表日))

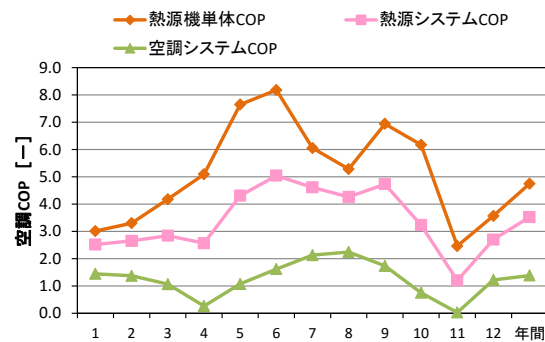
図4-55 事務所(寒冷地)の運転状態



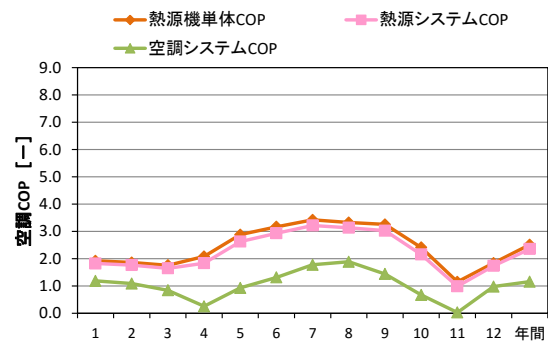
(月別冷暖房負荷 (熱源負荷))



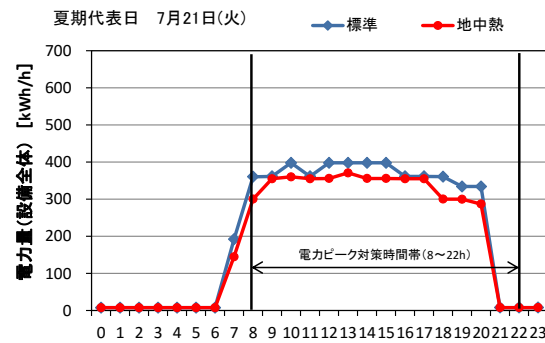
(月別電力量 (空調))



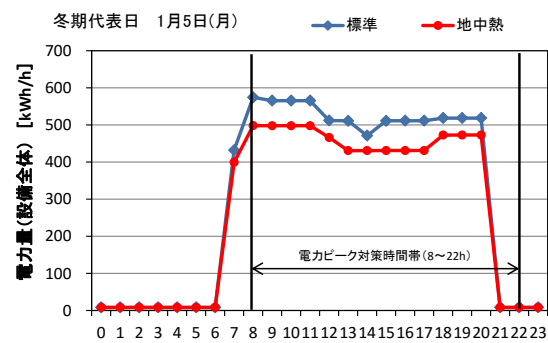
(地中熱利用システム月別・COP)



(標準システム月別・COP)

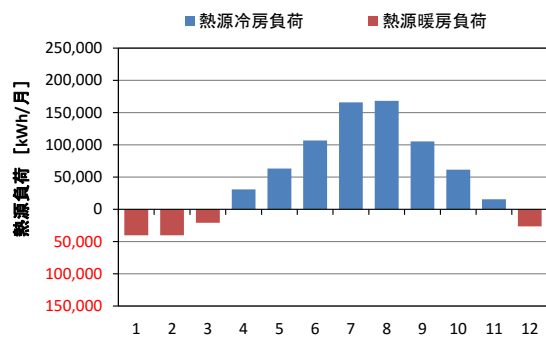


(時刻別電力量 (夏期代表日))

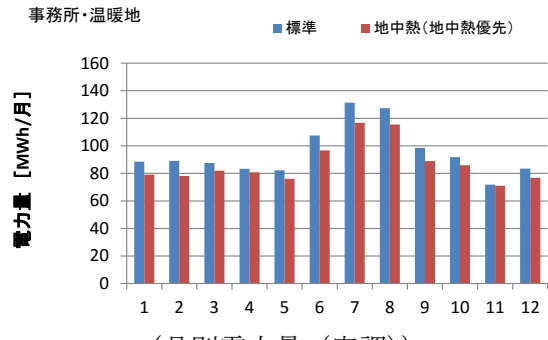


(時刻別電力量 (冬期代表日))

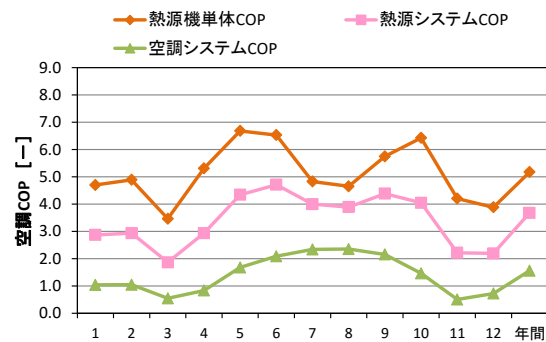
図4-56 事務所 (準寒冷地) の運転状態



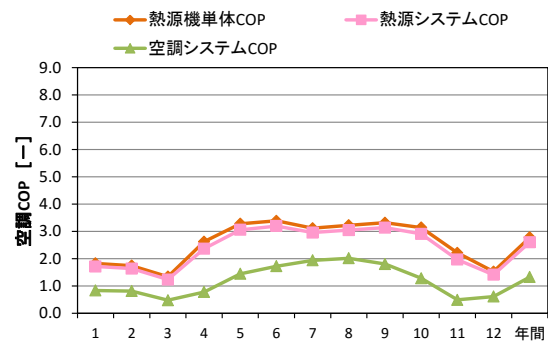
(月別冷暖房負荷 (熱源負荷))



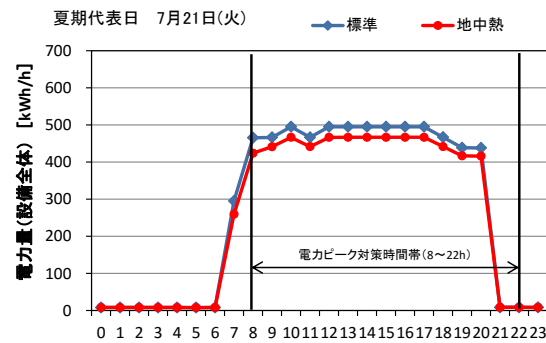
(月別電力量 (空調))



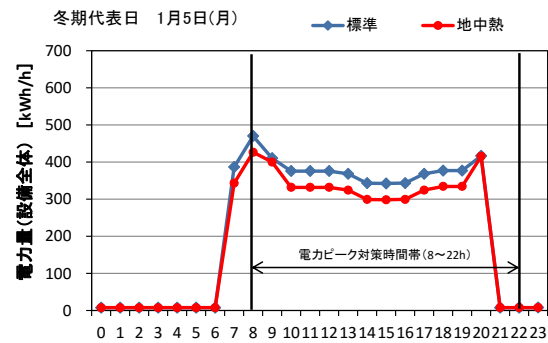
(地中熱利用システム月別・COP)



(標準システム月別・COP)

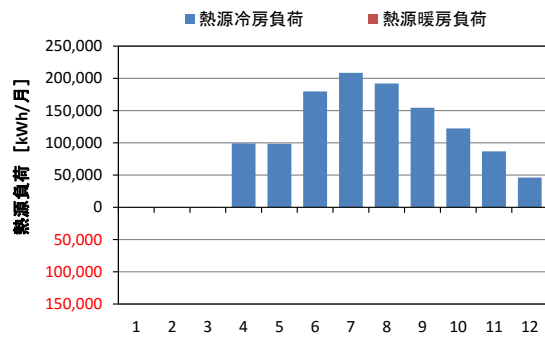


(時刻別電力量 (夏期代表日))

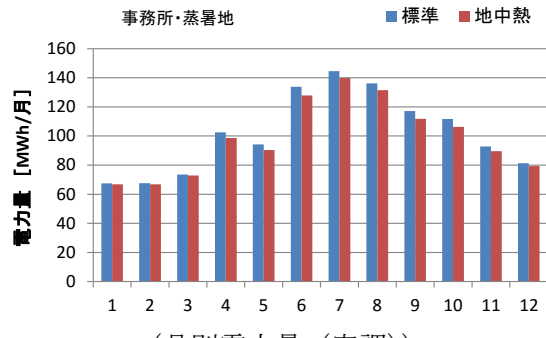


(時刻別電力量 (冬期代表日))

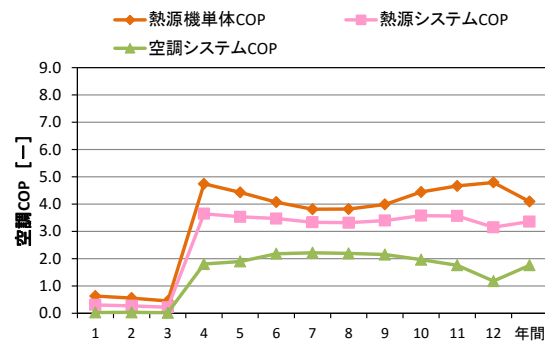
図4-57 事務所(温暖地)の運転状態



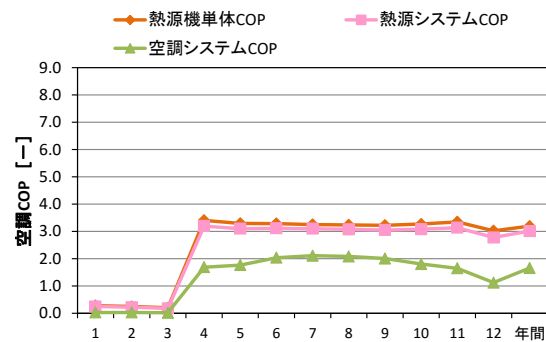
(月別冷暖房負荷 (熱源負荷))



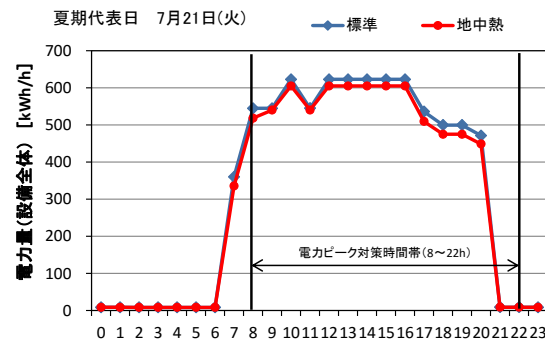
(月別電力量 (空調))



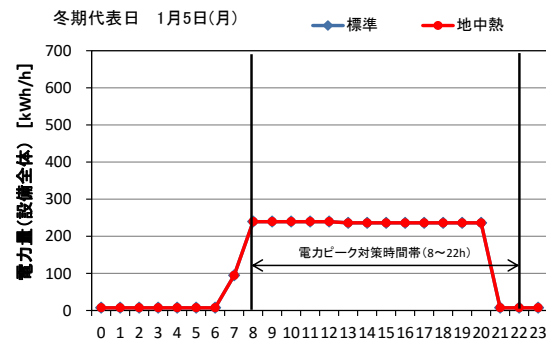
(地中熱利用システム月別・COP)



(標準システム月別・COP)



(時刻別電力量 (夏期代表日))



(時刻別電力量 (冬期代表日))

図4-58 事務所 (蒸暑地) の運転状態

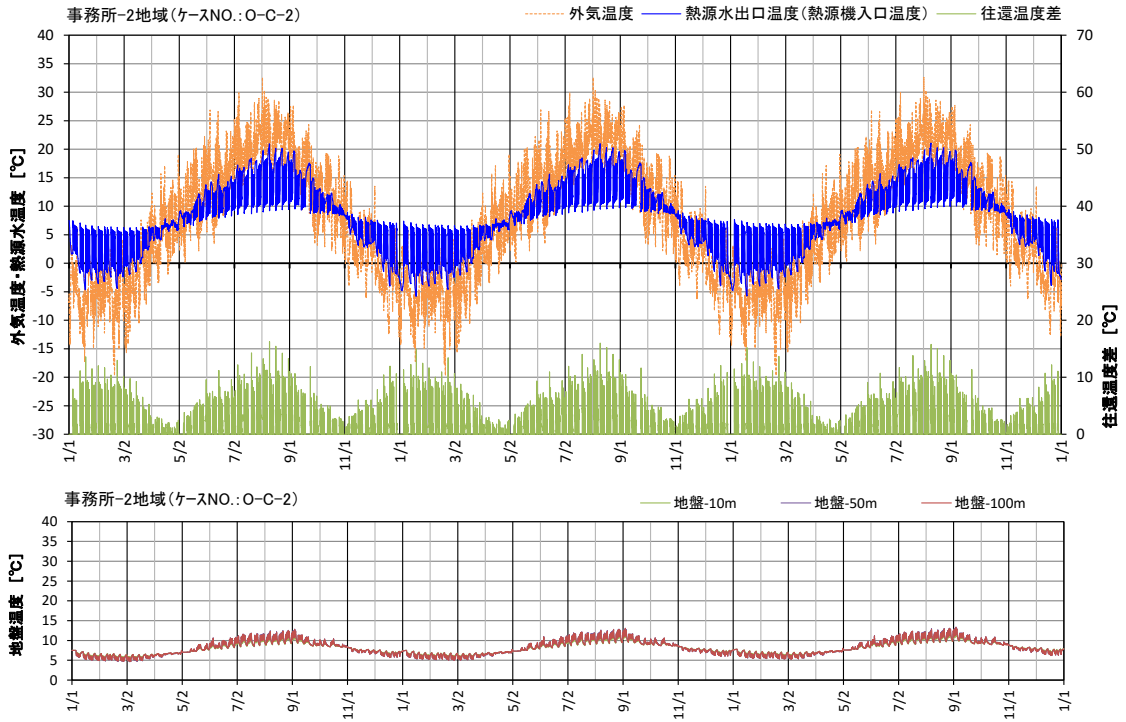


図4-59 事務所（寒冷地）地中温度の状態（3年間）

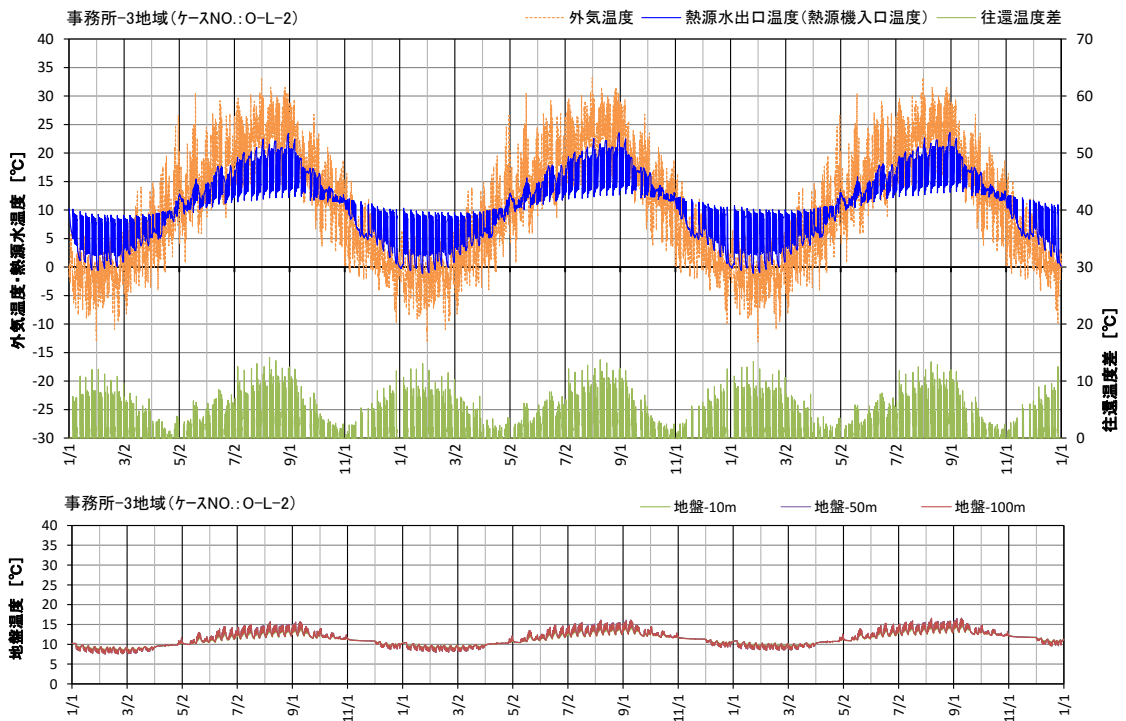


図4-60 事務所（準寒冷地）地中温度の状態（3年間）

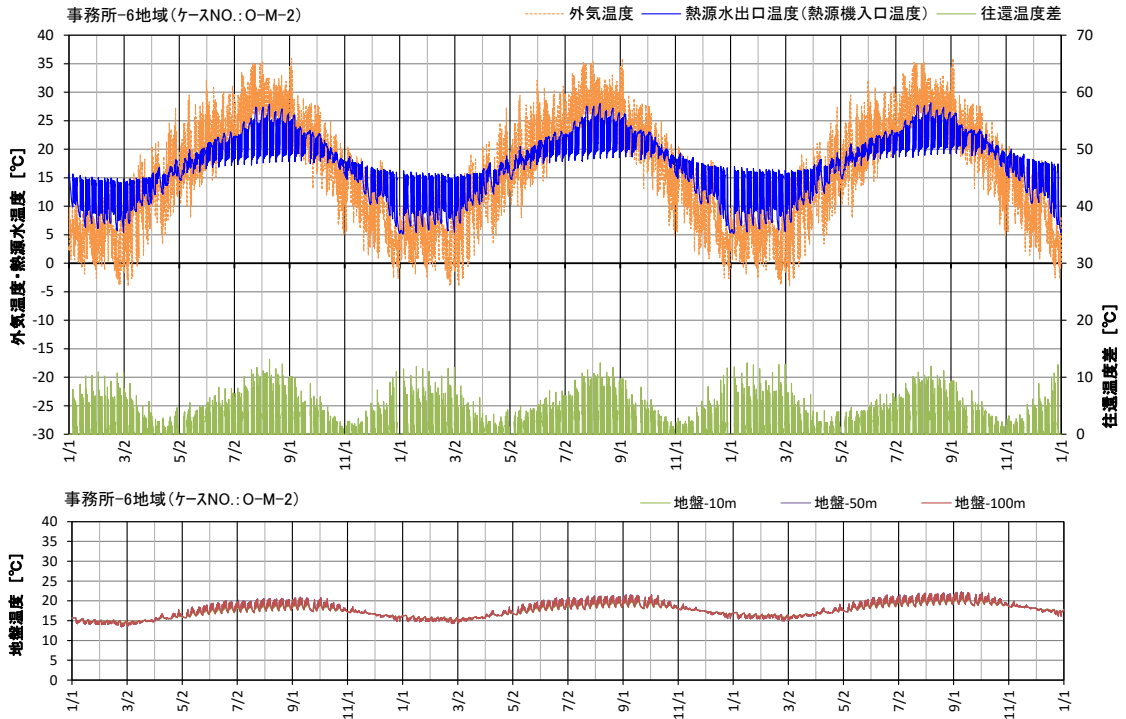


図4-61 事務所(温暖地)地中温度の状態(3年間)

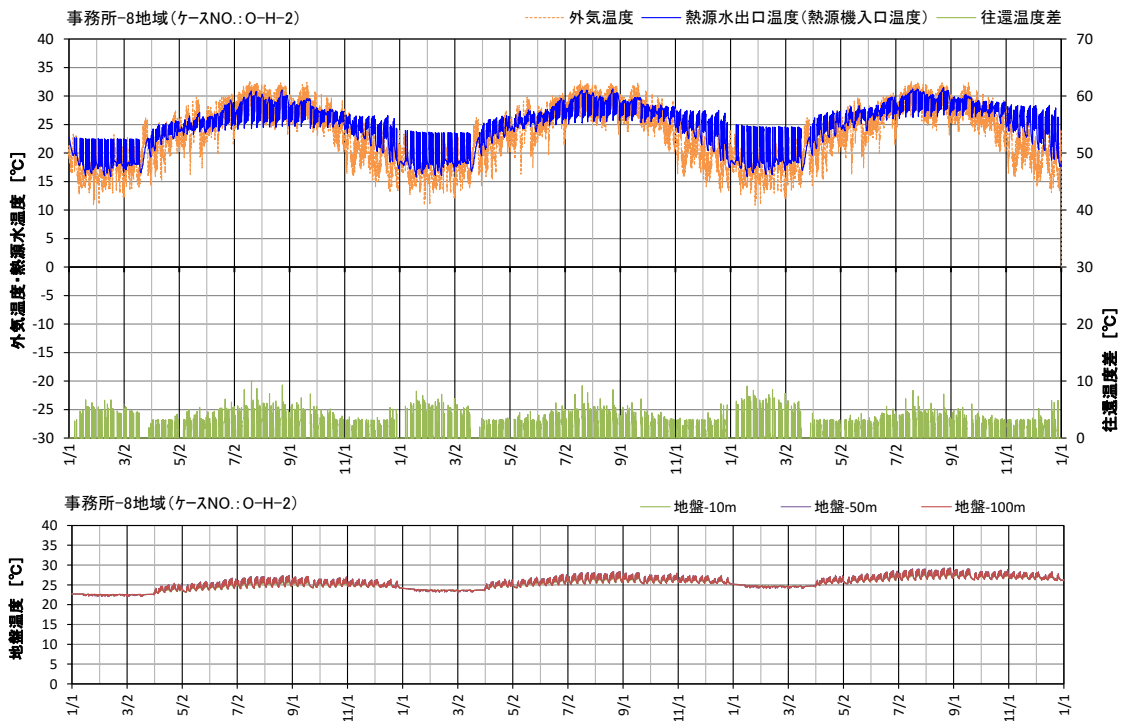
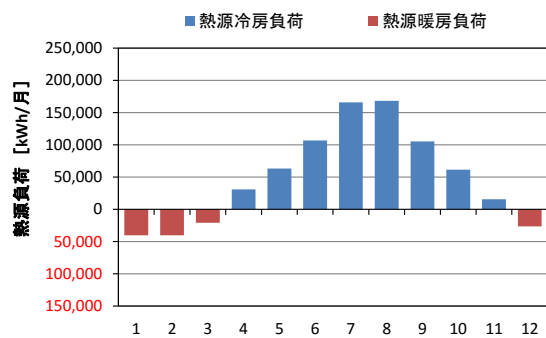
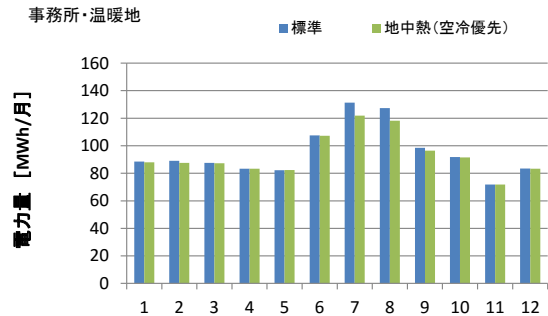


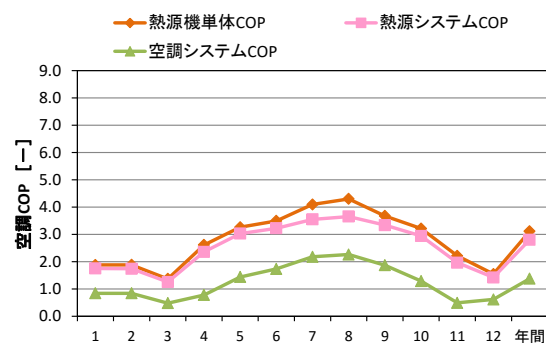
図4-62 事務所(蒸暑地)地中温度の状態(3年間)



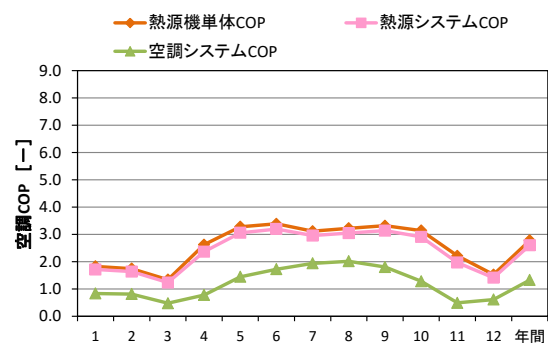
(月別冷暖房負荷 (熱源負荷))



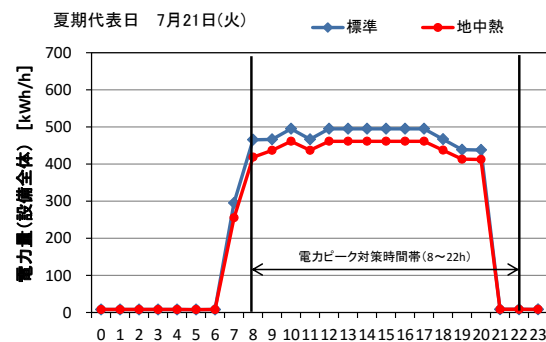
(月別電力量 (空調))



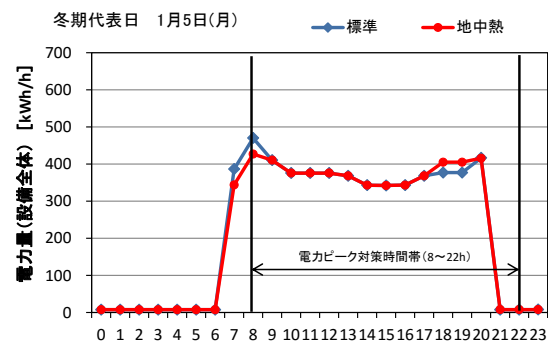
(地中熱利用システム月別・COP)



(標準システム月別・COP)



(時刻別電力量 (夏期代表日))



(時刻別電力量 (冬期代表日))

図4-63 事務所(温暖地)の運転状態(空冷ヒートポンプチラー優先運転)

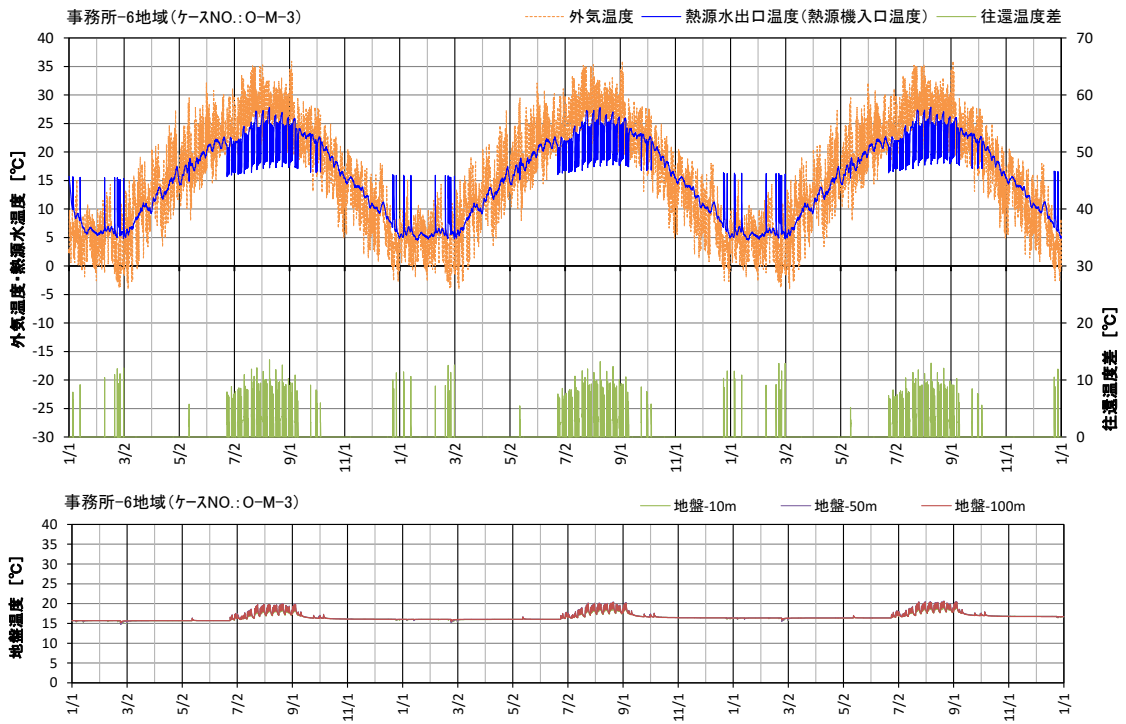


図4-64 事務所(温暖地)地中温度の状態(3年間)(空冷ヒートポンプチラー優先運転)

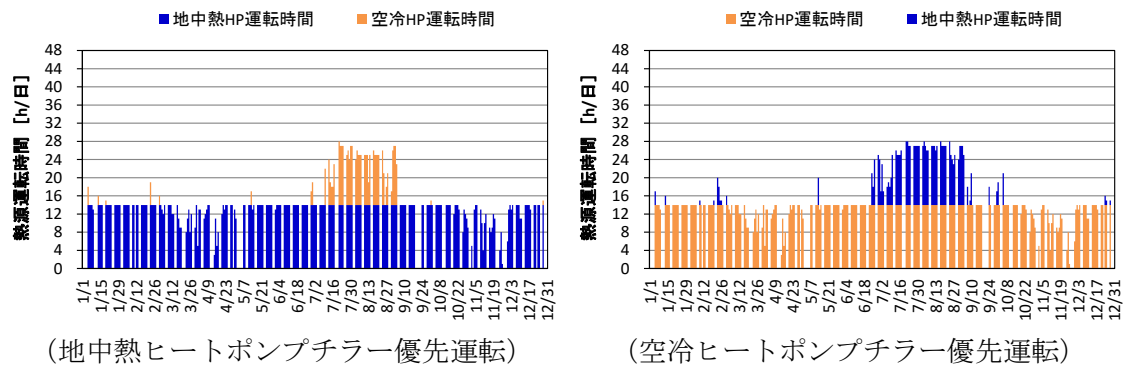
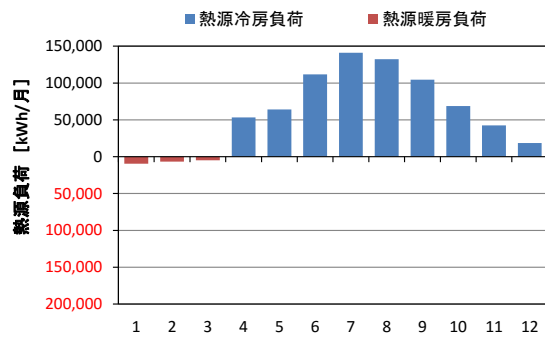
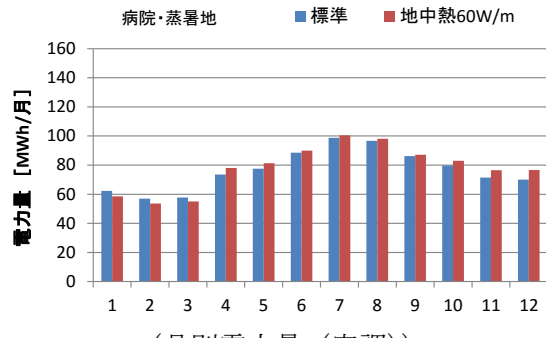


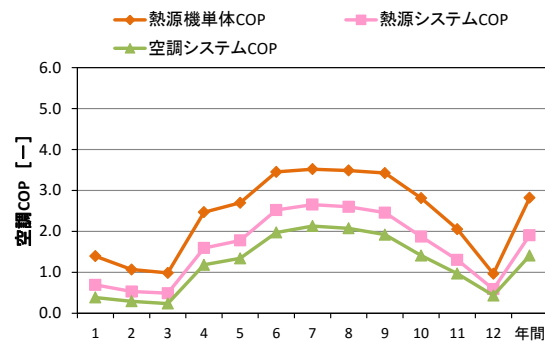
図4-65 事務所(温暖地)の運転状態(熱源運転時間)



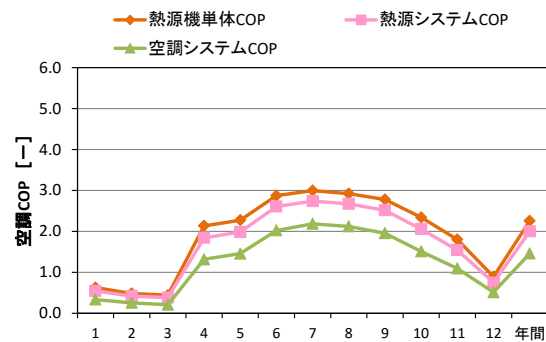
(月別冷暖房負荷 (熱源負荷))



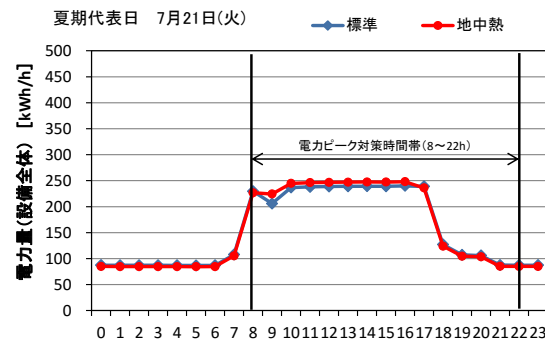
(月別電力量 (空調))



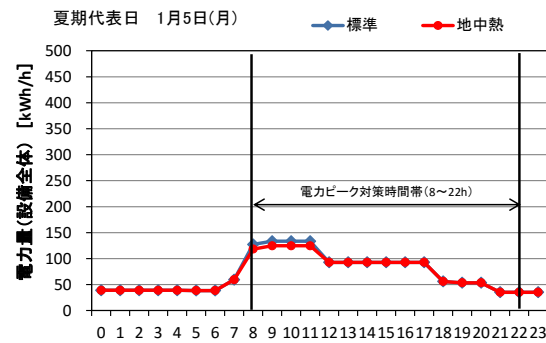
(地中熱利用システム月別・COP)



(標準システム月別・COP)

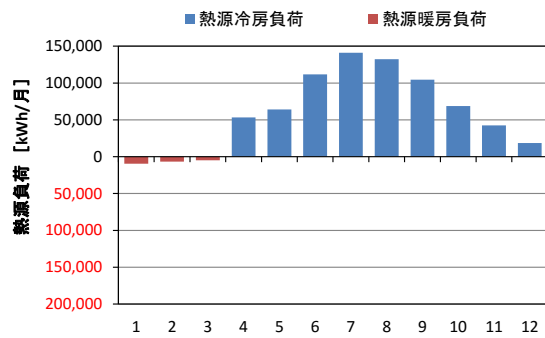


(時刻別電力量 (夏期代表日))

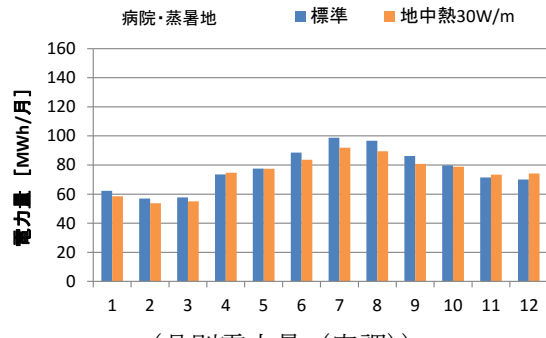


(時刻別電力量 (冬期代表日))

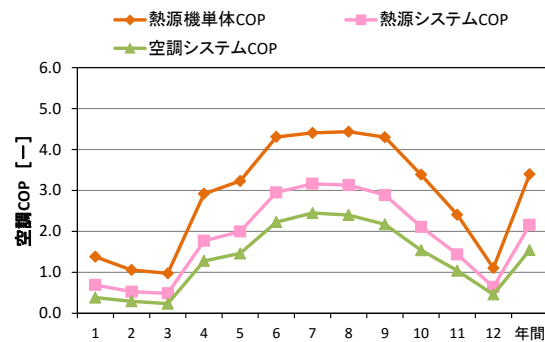
図4-66 福祉施設(病院)(蒸暑地)の運転状態
(地中熱交換井の単位熱交換量 60W/m の場合)



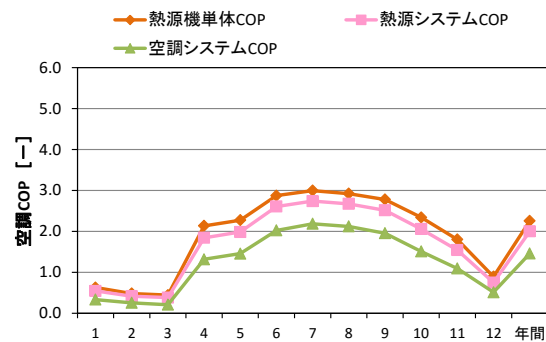
(月別冷暖房負荷 (熱源負荷))



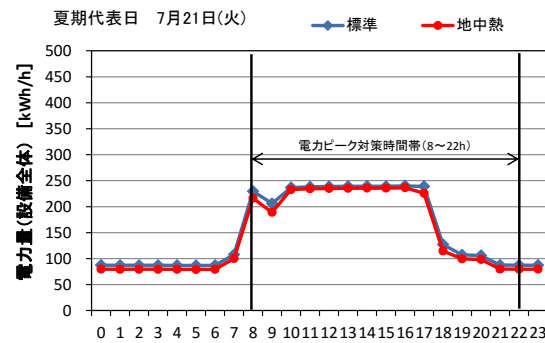
(月別電力量 (空調))



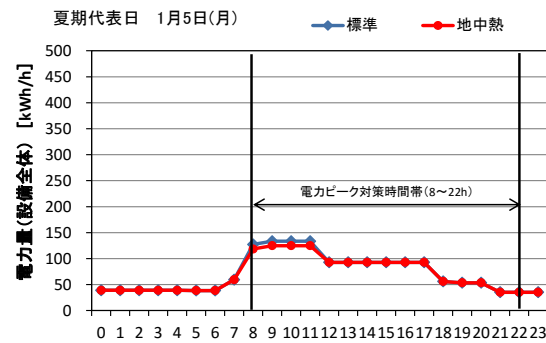
(地中熱利用システム月別・COP)



(標準システム月別・COP)



(時刻別電力量 (夏期代表日))



(時刻別電力量 (冬期代表日))

図4-67 福祉施設(病院)(蒸暑地)の運転状態
(地中熱交換井の単位熱交換量 30W/m の場合)

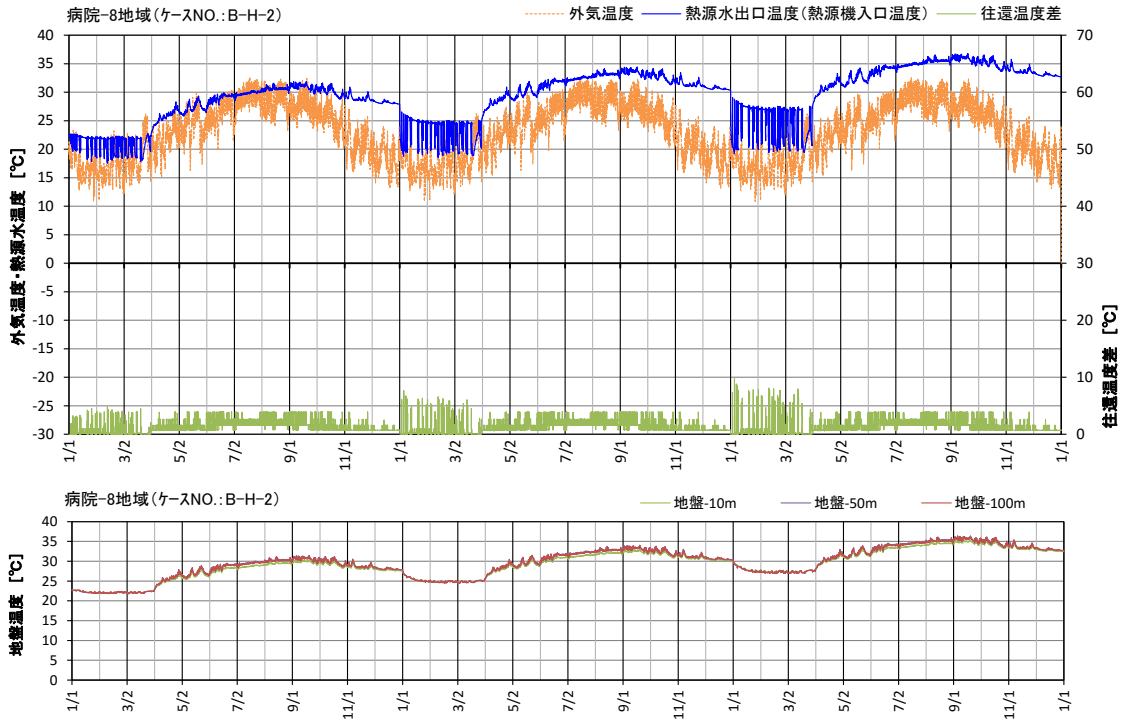


図4-68 福祉施設（病院）（蒸暑地）の地中温度の状態（3年間）
 （地中熱交換井の単位熱交換量 60W/m の場合）

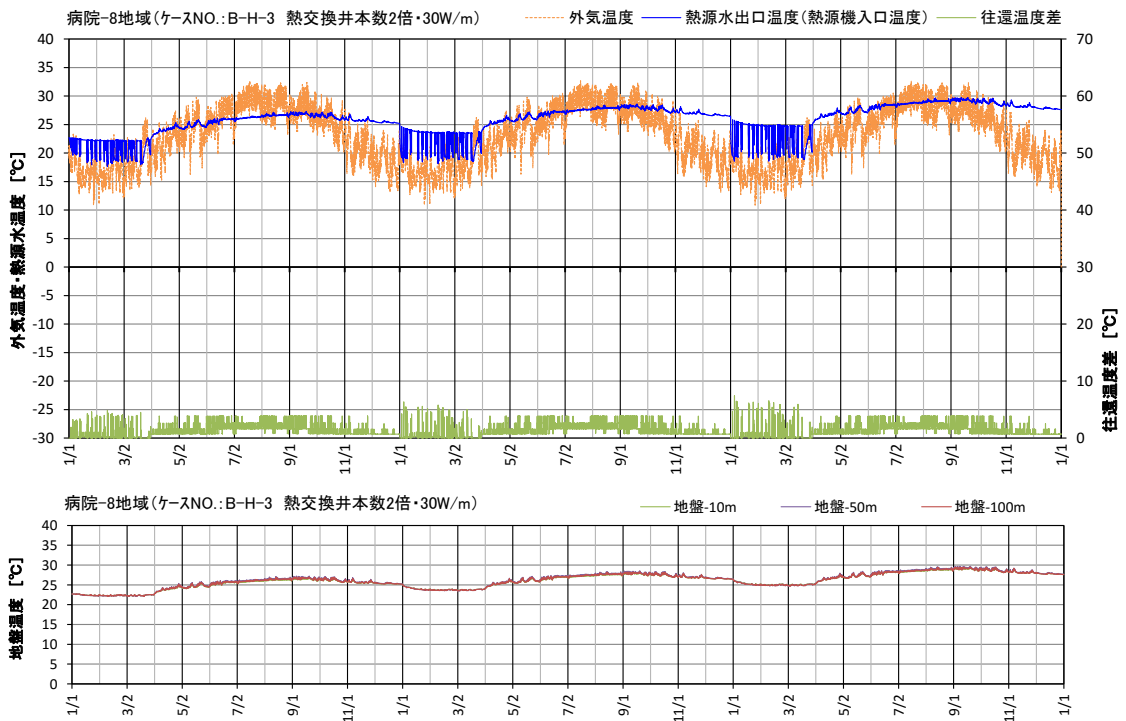


図4-69 福祉施設（病院）（蒸暑地）の地中温度の状態（3年間）
 （地中熱交換井の単位熱交換量 30W/m の場合）

4.5 省エネルギー基準等への反映のための検討

4.5.1 地盤モデルの簡易化

地中熱ポテンシャル計算プログラムにおける試算結果より、地盤からの熱源水戻り温度の推定を行う。外気温の変動と熱源水戻り温度の変動は似ている。そこで、暖房運転時の地中熱交換器からの日平均還水温 $\theta_{w,H,d}$ [°C]、および冷房時の地中熱交換器からの日平均還水温 $\theta_{w,C,d}$ [°C]を式(4.46)、(4.47)で求める。

$$\theta_{w,H,d} = k_H (\theta_{oa,d} - \theta_{oa,H,ave}) + (\theta_{oa,a} + \theta'_{w,H}) \quad (4.46)$$

$$\theta_{w,C,d} = k_C (\theta_{oa,d} - \theta_{oa,C,ave}) + (\theta_{oa,a} + \theta'_{w,C}) \quad (4.47)$$

ここで、 $\theta_{oa,d}$ は日平均外気温[°C]である。また、 $\theta_{oa,H,ave}$ 、 $\theta_{oa,C,ave}$ 、 $\theta_{oa,ave}$ は暖房期、冷房期、年間の平均外気温[°C]であり、地域毎に定まる値とする(表4-20)。

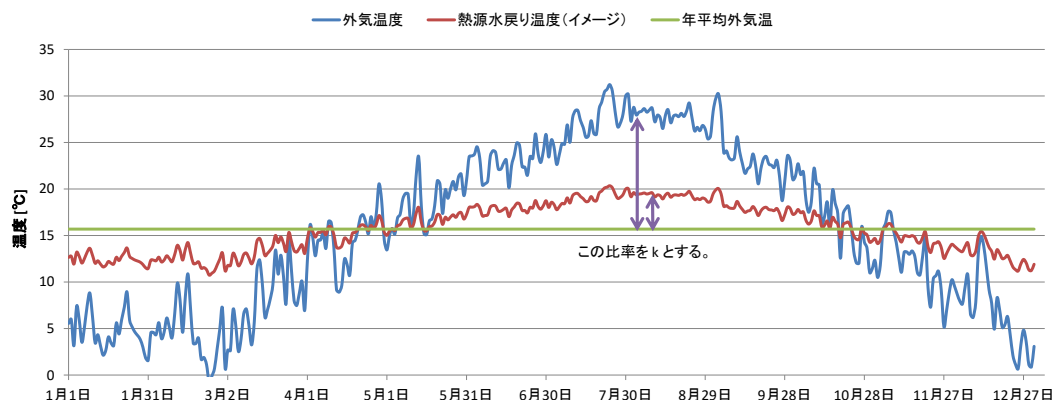


図4-70 地盤からの熱源水戻り温度の推定方法

表4-20 年間、暖房期、冷房期平均外気温

| 地域区分 | 1地域 | 2地域 | 3地域 | 4地域 | 5地域 | 6地域 | 7地域 | 8地域 |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 年間平均外気温 $\theta_{oa,ave}$ [°C] | 5.8 | 7.5 | 10.2 | 11.6 | 13.3 | 15.7 | 17.4 | 22.7 |
| 暖房期平均外気温 $\theta_{oa,H,ave}$ [°C] | -3.0 | -0.8 | 0.0 | 1.1 | 3.6 | 6.0 | 9.3 | 17.5 |
| 冷房期平均外気温 $\theta_{oa,C,ave}$ [°C] | 16.8 | 17.0 | 18.9 | 19.6 | 20.5 | 22.4 | 22.1 | 24.6 |

また、 $\theta'_{w,H}$ 、 $\theta'_{w,C}$ は暖房期および冷房期の期間平均還水温と年間平均外気温の差であり、係数 k_H 、 k_C とともに、地中熱交換器のタイプ(タイプ1~5)、暖房期と冷房期の日積算空調負荷の期間最大値からなる比 R_Q から求まる係数である(式(4.48)~(4.51))。

$$\theta'_{w,H} = a_H R_Q + b_H \quad (4.48)$$

$$\theta'_{w,C} = a_C R_Q + b_C \quad (4.49)$$

$$k_H = c_H R_Q + d_H \quad (4.50)$$

$$k_C = c_C R_Q + d_C \quad (4.51)$$

ここで、式(4.48)~(4.51)の a_H 、 b_H 、 c_H 、 d_H 、 a_C 、 b_C 、 c_C 、 d_C は地中熱交換器のタイプ(タ

イプ1~5)に応じて定まる定数であり、表4-21の値を用いる。

R_Q は暖房期の日積算空調負荷の期間最大値 $Q_{AC,ahu,h,i,d}^{MAX}$ と、冷房期の日積算空調負荷の期間最大値 $Q_{AC,ahu,c,i,d}^{MAX}$ からなる比であり、式(4.52)で求める。

$$R_Q = \frac{\left| Q_{AC,ahu,c,i,d}^{MAX} \right| - \left| Q_{AC,ahu,h,i,d}^{MAX} \right|}{\left| Q_{AC,ahu,c,i,d}^{MAX} \right| + \left| Q_{AC,ahu,h,i,d}^{MAX} \right|} = \frac{Q_{AC,ahu,c,i,d}^{MAX} + Q_{AC,ahu,h,i,d}^{MAX}}{Q_{AC,ahu,c,i,d}^{MAX} - Q_{AC,ahu,h,i,d}^{MAX}} \quad (4.52)$$

表4-21 係数 $a_H, b_H, c_H, d_H, a_C, b_C, c_C, d_C$

| タイプ | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----|-------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 暖房時 | a_H | 8.0278 | 13.0253 | 16.7424 | 19.3145 | 21.2833 |
| | b_H | -1.1462 | -1.8689 | -2.4651 | -3.0910 | -3.8325 |
| | c_H | -0.1128 | -0.1846 | -0.2643 | -0.2926 | -0.3474 |
| | d_H | 0.1256 | 0.2023 | 0.2623 | 0.3085 | 0.3629 |
| 冷房時 | a_C | 8.0633 | 12.6226 | 16.1703 | 19.6565 | 21.8702 |
| | b_C | 2.9083 | 4.7711 | 6.3128 | 7.8071 | 9.1480 |
| | c_C | 0.0613 | 0.0568 | 0.1027 | 0.1984 | 0.2490 |
| | d_C | 0.2178 | 0.3509 | 0.4697 | 0.5903 | 0.7154 |

4.5.2 簡易地盤モデルを利用したケーススタディ

図4-71に示す事務所ビル（鉄筋コンクリート造、地上3階、延べ面積 300m²）を対象に、試算を行った。外皮仕様は平成25年基準の基準設定仕様とし、階高は3.5m、天井高は2.5m、窓面積は30%とした。

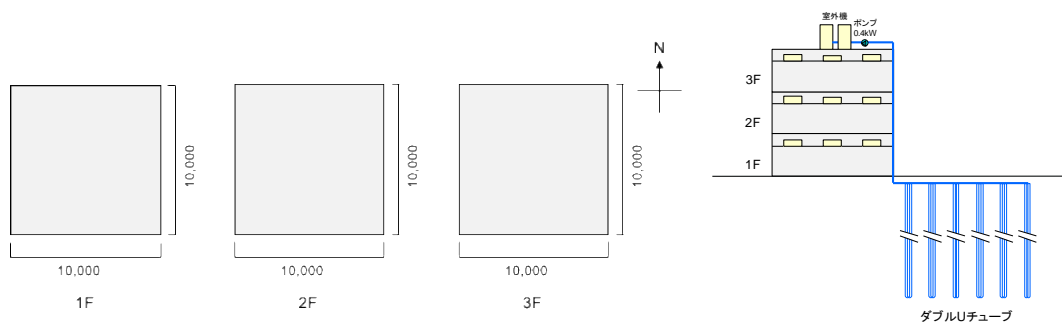


図4-71 試算対象事務所ビル（左：平面図、右：立面図）

表4-22に示すケース1~6までを想定して試算を行った。地域は省エネルギー基準における寒冷地（2地域）、温暖地（6地域）、蒸暑地（8地域）について試算をした。実際には地域によって室外機、室内機の容量は変えるべきであるが、今回は簡単のため全ての地域で同じ容量の室外機、室内機が設置されるとして計算を行った。

表4-22 試算ケース一覧

| ケース | タイプ | 室外機 | 室内機 | 地中熱交換器タイプ | 地盤熱伝導率 | 地中熱チューブ長さ |
|------|-----------|--|---|-----------|--------|-----------|
| ケース1 | 空冷ヒートポンプ | 冷房 67kW 消費電力 21.00kW | 冷房5.6kW 冷房時消費電力 0.04kW × 9台 暖房6.3kW 暖房時消費電力0.04kW × 9台 | - | - | - |
| | | 暖房 75kW 消費電力 19.70kW | | | | |
| ケース2 | 地中熱ヒートポンプ | 冷房 56kW 消費電力 13.94kW | | タイプ5 | 1.7 | 600m |
| | | 暖房 63kW 消費電力 14.84kW | | | | |
| ケース3 | 地中熱ヒートポンプ | | | タイプ3 | 1.7 | 600m |
| ケース4 | 地中熱ヒートポンプ | 冷房 28kW 消費電力 6.97kW 暖房 31.5kW 消費電力 7.42kW | 冷房能力2.8kW 冷房時消費電力 0.03kW × 9台 暖房能力3.2kW 暖房時消費電力0.03kW × 9台 | タイプ4 | 1.7 | 500m |
| ケース5 | 地中熱ヒートポンプ | | | タイプ2 | 1.7 | 700m |
| ケース6 | 地中熱ヒートポンプ | | | タイプ1 | 1.7 | 800m |

結果を図4-72に示す。図の縦軸はBEI/AC（算出された一次エネルギー消費量を省エネ基準の基準一次エネルギー消費量で除した値）である。図より、寒冷地、温暖地においては、地中熱ヒートポンプのBEI/ACは空冷ヒートポンプよりも1割ほど小さくなる（省エネであると評価される）ことが分かる。蒸暑地においては、熱交換チューブを長くすれば、空冷ヒートポンプと同等の性能が得られることが分かる。なお、この評価結果は単なる一例であり、建物の負荷の想定や地盤の熱伝導率、他の省エネ技術との組み合わせによって結果は変わるため、それぞれの建物の条件に応じて評価をすることが重要である。

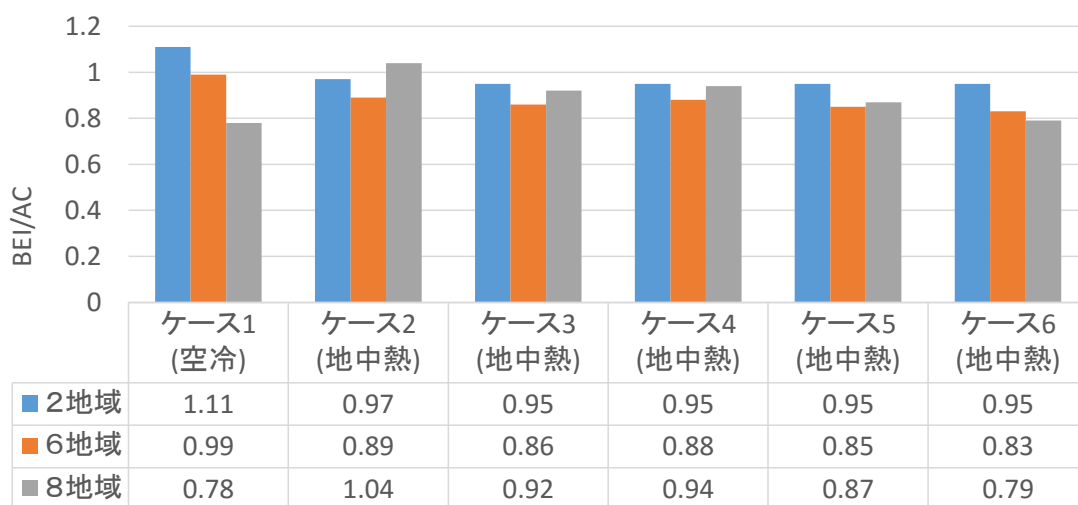


図4-72 簡易地盤モデルによる試算結果 (BEI/AC)

4.6 まとめ

本章では、地中熱利用システムの1つとして地中熱ヒートポンプに着目し、そのエネルギー消費特性の実態を「観測」、「解析」、「評価」の3つのアプローチから明らかにした。

まず、「観測」として、一対の試験室に地中熱ヒートポンプと空冷ヒートポンプをそれぞれ設置し、エネルギー消費特性の比較を行った。得られた知見を次に示す。

- ① 夏期（外気温度が高い条件）においては、空冷ヒートポンプよりも地中熱ヒートポンプの方が効率（COP＝生成熱量／消費電力）は良い結果となった。特に、外気温度が高く処理熱量（負荷率）が小さい場合に差が大きくなった。一方、中間期（外気温度が低い条件）においては、地中熱ヒートポンプよりも空冷ヒートポンプの方が効率は良い場合も見られた。
- ② 冬期においては、外気温度、負荷率によらず、空冷ヒートポンプよりも地中熱ヒートポンプの方が効率は良い結果となった。特に、外気温度が低く処理熱量が小さい場合に差が大きくなった。
- ③ 今回の実験条件においては、夏期ピーク電力の削減効果は約16%、冬期ピーク電力の削減効果は約27%と推定された。

次に、「解析」として、地中の温度・水分の三次元分布、地中熱ヒートポンプによる蓄採熱量を計算する「地中熱ポテンシャル計算プログラム」を開発し、地中熱の蓄採熱量に関する数値解析を行った。観測データを入力して推定精度を検証した結果、開発したプログラムはRMS（二乗平均平方根）値1.5℃の精度で地盤からの還水温度を推定できることが判った。

最後に「評価」として、上述の地中熱ポテンシャル計算プログラムと省エネルギー基準で採用されている建築設備システムのエネルギー消費量算出プログラムを結合したシミュレーションシステムを新たに開発し、地中熱ヒートポンプの導入効果を定量的に示した。得られた知見を以下に示す。

- ① 中央熱源方式で地中熱ヒートポンプチラーを採用することにより、空冷ヒートポンプチラーに比べてピーク時の電力消費量及び年間のエネルギー消費量は蒸暑地では5%程度、温暖地～寒冷地では10～20%程度削減されることが判った。
- ② 地域別の電力ピーク削減効果は、寒冷地・準寒冷地、温暖地、蒸暑地の順に高くなることが判った。これは、寒冷地・準寒冷地においては夏期だけではなく冬期の電力ピーク削減効果も高く、これが年間の削減効果に大きく寄与しているからである。
- ③ 導入効果は地域や建物用途によって異なるだけではなく、どのようなシステムを設計するか（地中熱利用システムで賄う空調負荷の割合、冷房負荷と暖房負荷のバラ

ンス、他熱源と組み合わせる場合に運転の優先順位、熱交換井の利用可能深さや想定熱交換量等)によっても異なることが判った。より大きな電力ピーク削減効果及び省エネルギー効果を得るためには、年間の空調負荷の傾向をしっかりと抑え、熱交換井の仕様を十分に検討することが重要である。

また、本研究で得られた詳細な解析モデルを省エネルギー基準の評価法に適用するための方法の提案を行った。省エネルギー基準の評価方法においては、エネルギー消費量算出ロジックの確からしさだけでなく、設計時に入手できる情報のみで評価をすること、プログラムに入力するパラメータについて設計者が確たる根拠を示せること、教育ツールとしての役割も持つため、判りやすく簡潔なロジックであることが求められる。これらの要求に応えるべく、簡易な地盤熱応答モデルを開発し、いくつかのケーススタディを行った。

参考文献

- 1) 関根賢太郎、大岡龍三、横井睦己、柴芳郎、黄錫鎬、南 有鎮：場所打ち杭を用いた地中熱利用空調システムの普及・実用化に関する研究、第1報-実験による熱特性の把握とフィージブルスタディ、空気調和・衛生工学会論文集、Vol.107、pp. 1-11、2006.2
- 2) 若山尚之、葛隆生、長野克則、佐藤信孝：現場打ち基礎杭を利用した地中熱ヒートポンプシステムに関する研究 浅層採熱管の導入可能性について、空気調和・衛生工学会論文集、Vol.189、pp. 21-28、2012.12
- 3) 葛隆生、長野克則、武田清香：地中熱ヒートポンプシステム設計・性能予測ツールの開発とその応用、日本冷凍空調学会年次大会講演論文集、pp479-482、2006.9
- 4) 日本建築学会編集：拡張アメダス気象データ、2005.8