

## 基礎杭利用地中熱空調システムの実用化研究

Practical Use Research of Geothermal Water Chilling Unit Using Foundation Pile

梅田正浩

### 要旨

基礎杭を利用した地中熱空調システムのシミュレーションソフトをより正確に使いやすく汎用性の高いものとするべく研究を行った。

熱源機器である水熱源ヒートポンプの性能特性の解析を進め、このシステムが稼働中である県立図書館の実測値と合わせて検証した結果、システム初期状態での特性と、実際の運転状態の効率を把握することができた。

**キーワード：**地中熱、空調、基礎杭、水熱源ヒートポンプ、シミュレーション

### 1. はじめに

建物の基礎杭を地中熱の熱交換器として利用する基礎杭利用地中熱空調システムは、専用の熱交換器を地中に設置する場合に比べて初期費用を低減でき、更に空気熱源ヒートポンプより省エネルギーである。

現在このシステムの導入を建物の設計時に検討する際、専用のシミュレーションプログラムを用いている。この研究では、このプログラムに改良を加えて精度と汎用性を高めることとした。

### 2. 热源機器の能力算定式などの改良

シミュレーションプログラムは、地中熱の熱交換部と熱源機器である水熱源ヒートポンプによる出力部を組み合わせて、冷房、暖房のそれぞれの運転を行ったときの期間の能力などを算出するものである。出力や消費電力を算定するために水熱源ヒートポンプの技術資料から解析した特性式が組み込まれている。しかし、この結果と実測した数値には差異があるため、機器の製造会社の協力を得て新たに性能などの特性式を算定し、実測値を用いて検証を行った。

### 3. 使用範囲

このシステムで使用している水熱源ヒートポンプは汎用品を用いており、冷温水と熱源水（杭循環水）の温度と流量について製造会社より使用限界と性能を明示できる範囲が公表されている。これらの熱源機器は、その決められた範囲内で使用することが原則であるが、このシステムでは地中熱を使うことと、諸事情<sup>①</sup>によ

り杭循環水流量を制限しなければならないことから、流量と温度がこれらの範囲を超えて推移することがある。出力170kWクラスの機器の例を図-1、図-2に示す。

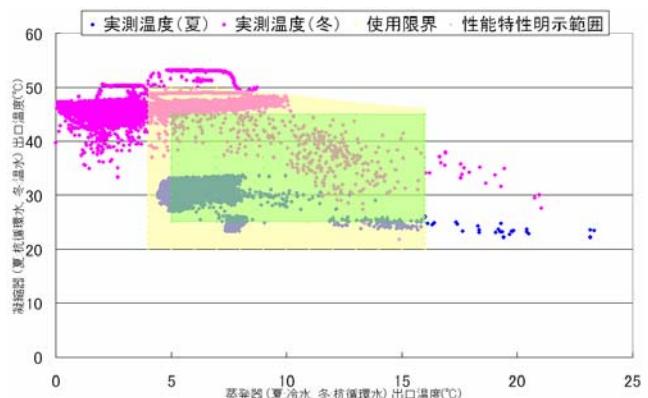


図-1 温度の使用範囲

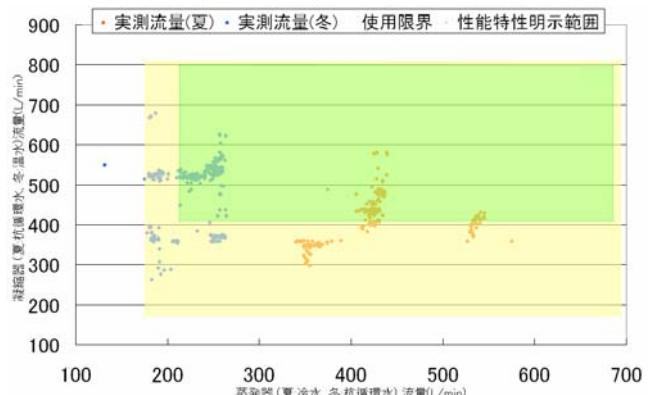


図-2 流量の使用範囲

これら範囲外の能力についても、今回の特性式により予測を行い、異常な加熱や凍結など機器が稼働できない状態になる時にはその時点でのシミュレーション画

面上に警告を出し、条件を変更して再度計算することとした。

#### 4. 部分負荷運転

この施設で使用している水熱源ヒートポンプは冷温水の温度により、停止を含めて4段階の運転制御を行っている。また深夜蓄熱運転の間、熱源機器の入口水温を三方弁で制御することにより定格運転を長く続けられるようにしている。建物の空調に用いる熱源は、ヒートポンプに限らず定格出力時に最も効率が上がるよう作られているため、この方法が優れているのだが、蓄熱槽が満蓄になる運転終了間際などには図-3、図-4のように能力を下げた部分負荷運転になることもある。

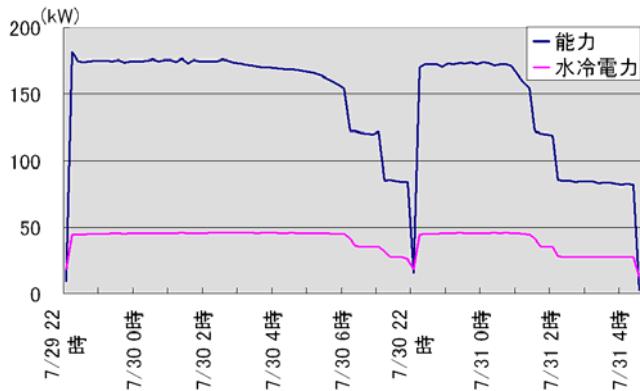


図-3 冷房時の部分負荷運転

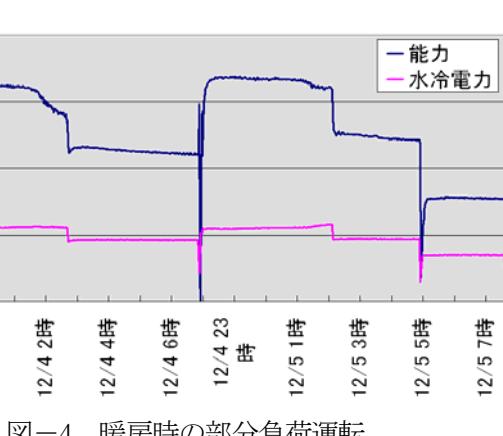


図-4 暖房時の部分負荷運転

このような部分負荷での運転は蓄熱方式以外の運転形態の場合にも多くみられる。しかし現在の空調の設計においてはこの定格出力値のみを用いることが多いことと、熱源機器の能力特性式を算出するためのデータベースが定格出力時を基に作製されていることなど

から、解析に用いる運転時の実測値も、図-5、図-6に示すうちの定格出力時のものを用いることとした。

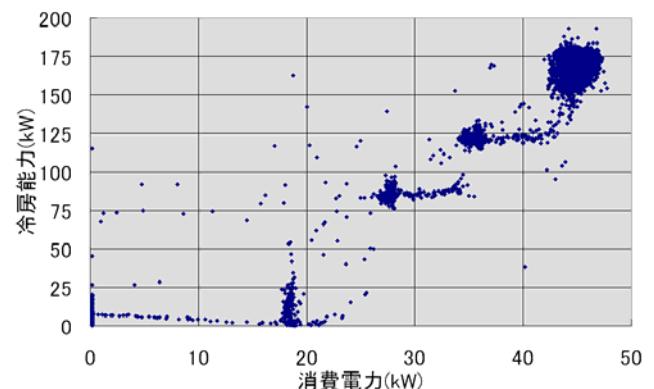


図-5 冷房時の入力・出力

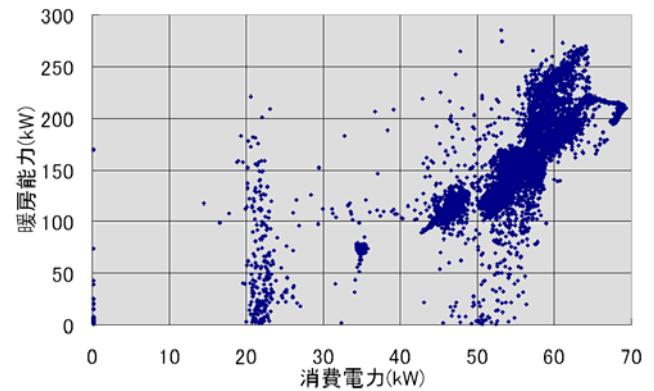


図-6 暖房時の入力・出力

#### 5. 補給水による影響

この施設に設置したシステムでは地中の熱交換器である杭からの漏水があるため、杭循環水系統に水道水を補給しており、その量を測定している。冷房時と暖房時の代表的な一日のその変化を図-7、図-8に示す。

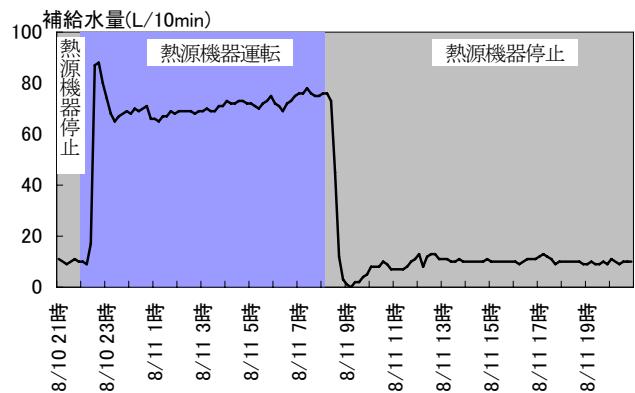


図-7 冷房時の補給水量

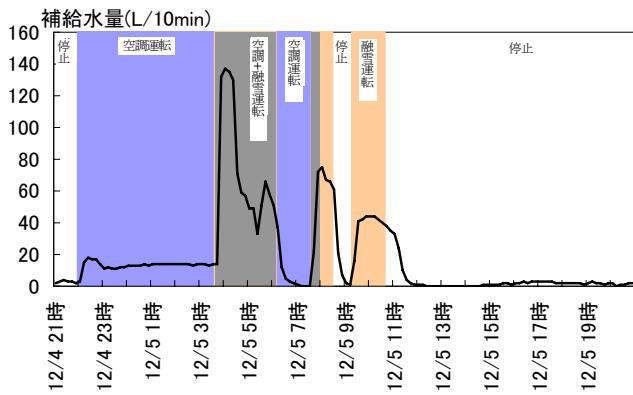


図-8 暖房時の補給水量

補給水は建物の2階にある補給水槽（容量2m<sup>3</sup>）に一旦貯留し、配管で杭循環水系統に接続されており、漏水量に補給水量が追いつかない場合に、この水槽が一種の緩衝装置になっている。このため、補給水量は杭循環水ポンプが起動中している夜間に最大となるが、停止後もしばらくその状態が続いた後に徐々に少くなり、ポンプが停止している日中に最小となる。また、この施設では地中熱を空調以外に融雪にも利用しているため、冬季は空調に加えて融雪用のポンプが起動すると補給水量が多くなる。

2003年、2004年と2005年の一年を通じたこの補給水量の変化を図-9に示す。

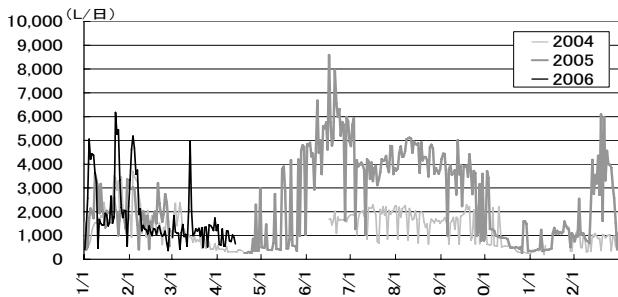


図-9 補給水量の変化（通年）

空調や融雪の運転をする期間に多くなり、中間期に少なくなることがわかる。2005年の夏季から補給水量が増大しているが、この原因は冬季から夏季への運転切り替え時に、各杭の流量変更と入口、出口の弁の切り替えを怠ったために杭にかかる水圧が増大し、杭先端部からの漏水が大きくなつたのが原因と見られる。

補給水には水道水を用いているが、この施設ではその量が多いため、その水温と量がシステムで作る熱量に与える影響を検討した。

補給水槽から杭循環水へ接続する配管内に温度プローブを取り付け、流量と合わせて測定した。2005年6月からの補給水の温度と杭循環水の温度を対比したグラフを図-10に、その影響度を示すグラフを図-11に示す。

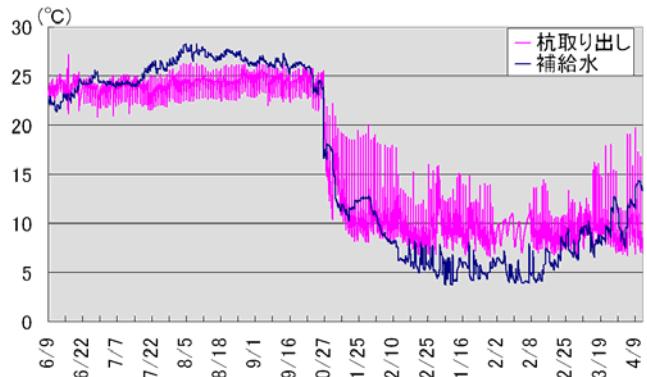


図-10 補給水の温度

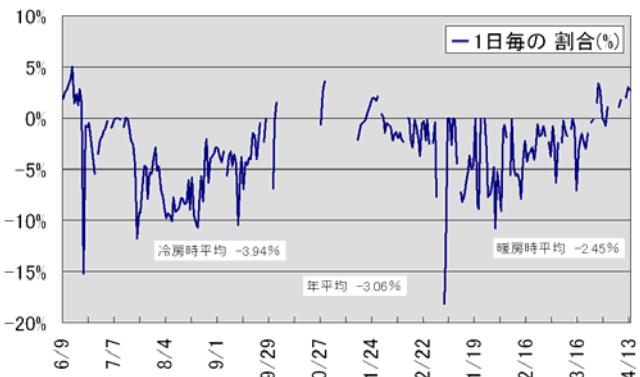


図-11 補給水による杭循環水への影響度

これらの図はいずれも機器が運転している状態のものである。補給水と杭からの取り出し温度を比較すると、冷房時には補給水の方が高いことが多く、暖房時には補給水の方が低いことが多いことがわかる。従って補給水は冷房時、暖房時ともに杭循環水からの熱量を減じる影響があり、その値は-10%を下回ることもあるが、年平均で約-3%であった。

## 6. ヒートポンプの特性式の検証

本システムで使用する水熱源ヒートポンプの能力特性の解析を機器の製造会社と進めて、シミュレーションプログラムに取り込む特性式の精度を高める作業を行った。

ここから得られた特性式は、

冷却時：

$$\text{能力} F = 122.56 + 4.823 \times X_0 + 0.03396 \times X_1 + (-1.484) \times X_2 + 0.02996 \times X_3$$

$$\text{消費電力} P = 24.44 + 0.5570 \times X_0 + 0.003452 \times X_1 + 0.6665 \times X_2 + (-0.01361) \times X_3$$

X0:蒸発器入口水温 X1:蒸発器流量 X2:凝縮器水温

X3:凝縮器流量

となつた。

また、この結果から冷温水や杭循環水の温度や流量が能力や消費電力に及ぼす影響が分かった。表-1に170kW、60Hzの機器の相関係数を示す。(蒸発器には夏は冷水、冬は杭循環水が通る)

表-1 相関係数

	蒸発器		凝縮器	
	入口温度	流量	入口温度	流量
能力	0.873	0.376	-0.478	0.114
消費電力	0.358	-0.033	0.834	0.008

この機器の場合、蒸発器、凝縮器ともに温度が能力や消費電力に与える影響が大きく、流量は能力に関して影響があることが分かる。この施設では、冷温水の入口温度は例年期間を通じてほぼ同じであるが、杭循環水の温度は期間内で変動しており、2005年の実測値は、冷水入口温度が10.9°C、温水入口温度が42.5°C、杭循環水入口温度は夏季に10.0~26.5°C、冬季に6.5~21.0°Cの間で推移していた。

この施設では、夏季には210本の杭を使い、その底部の冷えた水を機器に通した後、杭の上部に戻している。また冬季には86本の杭を暖房に、残りの124本は融雪に使い、夏季とは逆に杭の上部の温かい水を機器に通した後、杭の底部に戻している。蒸発器と凝縮器の流量は、これらの切り替え作業や冷温水出口温度の微調整に伴い、手動または他の要素により変動している。これまでの流量の変化について、冷房時のものを図-12に、暖房時のものを図-13に示す。

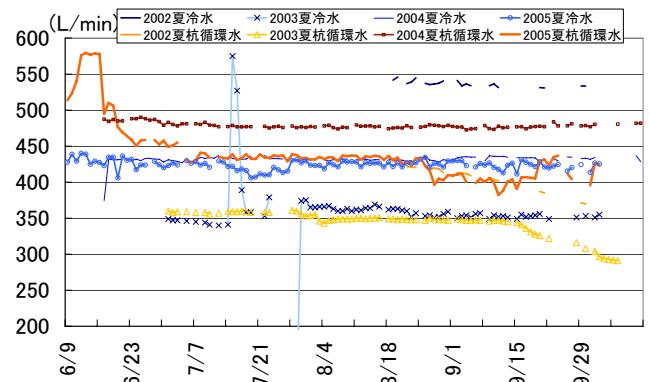


図-12 冷房時の流量

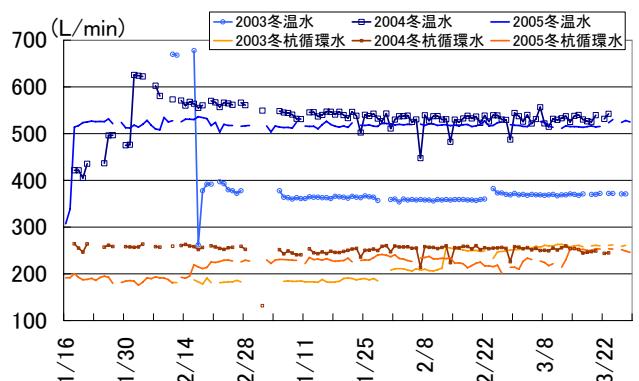


図-13 暖房時の流量

極端な値を無視しても、冷房時の冷水で350~430L/min、杭循環水で340~480L/min、暖房時の温水で360~540L/min、杭循環水で200~260L/minの間でほぼ推移していることが分かる。そこで今回得られた特性式にこれらの値を入れ、能力などに与える影響をみた。図-14に冷房時の能力の差、図-15にその時の消費電力の差を、図-16に暖房時の能力の差、図-17にその時の消費電力の差を示す。

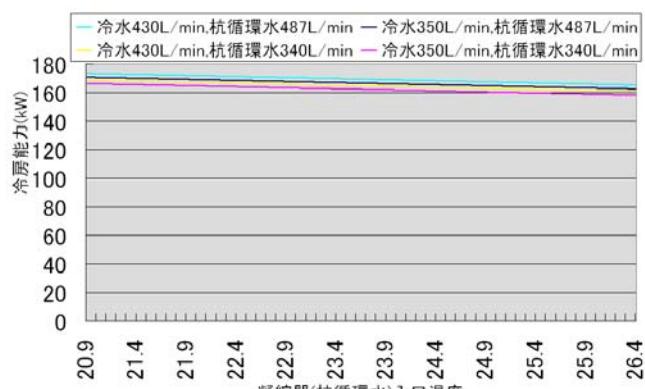


図-14 流量と冷房能力

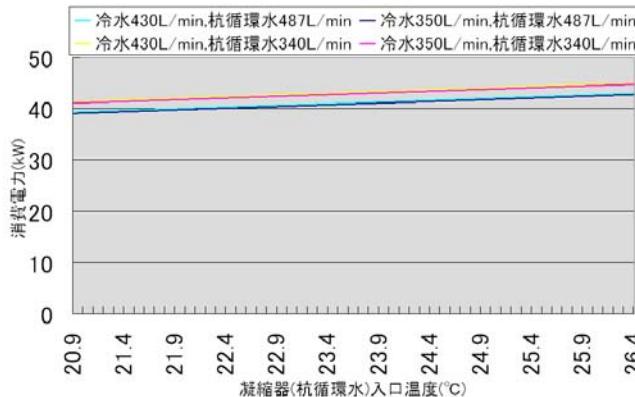


図-15 流量と冷房時の消費電力

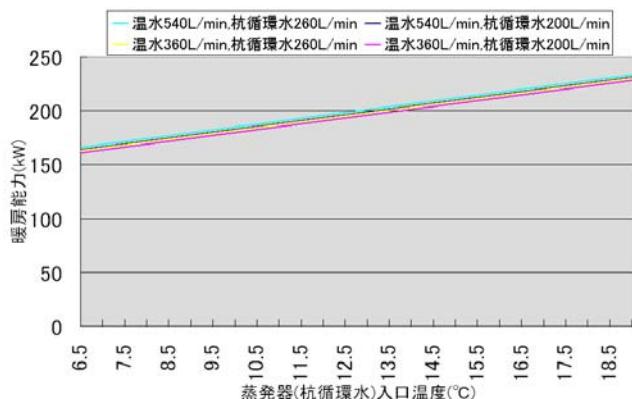


図-16 流量と暖房能力

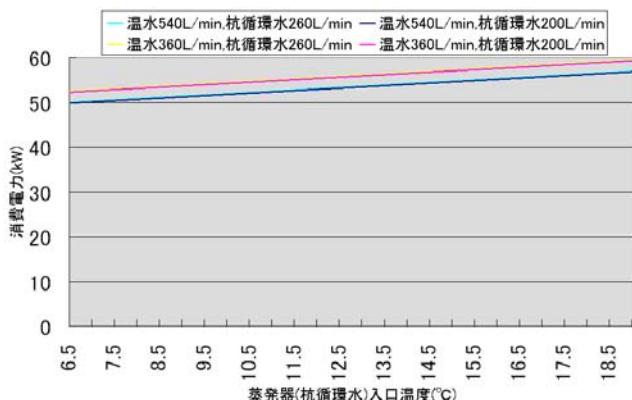


図-17 流量と暖房時の消費電力

流量の違いにより、冷房時には能力で約4.4%、消費電力で約5.6%の差が、暖房時には能力で約2.7%、消費電力で約5.0%の差が出ることが分かった。これらの結果から、流量が変化するような環境においては、能力算定を慎重に行う必要があると思われる。

## 7. 実測値の検証

解析に用いたのは2005年6月9日から同年10月3日ま

での夏季（冷房時）、2005年10月27日から2006年4月13日までの冬季（暖房時）のものである。定格出力時の値を用いるために、図-5、図-6のうち、冷房時のデータは能力150kW以上、消費電力40kW以上のもの、暖房時のデータは能力100kW以上、消費電力50kW以上のものを採用了。

これらの値と、解析した特性式とを比べた結果の冷房時のものを図-18に、暖房時のものを図-19に示す。

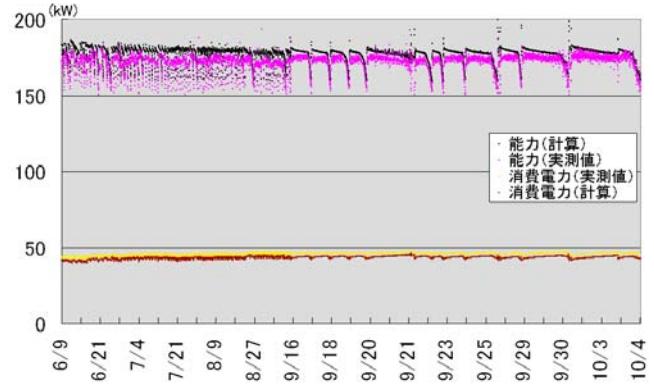


図-18 冷房時の能力と消費電力

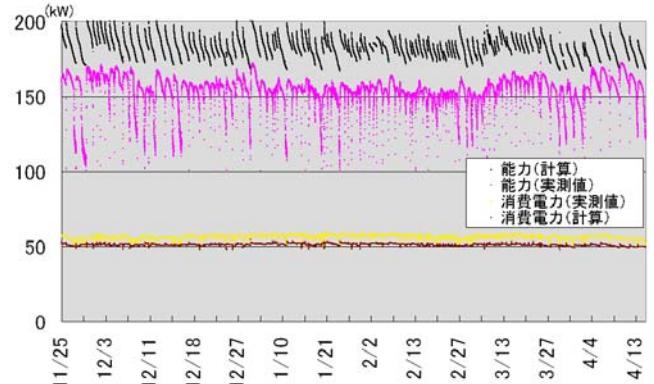


図-19 暖房時の能力と消費電力

計算結果に対して実測値は、冷房時に能力は約3%減、消費電力は約5%増、暖房時に能力は約15%減、消費電力は約9%増となった。この原因には、まず前述の補給水による影響が考えられる。夏には杭から送られる冷えた水に温かい補給水が入り、冬にはその逆となり効率が低下する。

また循環水の水質の変化により、ヒートポンプの熱交換器が汚れて伝熱効率が低下することがある。更にこの施設では、杭からのスケールが多く発生する<sup>②</sup>こともあり、効率の低下につながったと考えられる。定常状態である部分での特性のカーブは非常に似たもの

となっており、効率低下のない初期状態の特性は取り込めていると思われる。

暖房時の能力の低下が大きい理由としては、冷房時に比べて使用する杭の本数が少ないことが挙げられる。この施設では、夏季に210本を冷房に、冬季には86本を暖房、124本を融雪に使用しているため、地中との熱交換容量が冬季の方が少ない。これにより、3. で述べたように杭循環水の温度が運転時間内に極端に下がり、水熱源ヒートポンプの運転許容範囲の下限近くになることがある。このような状態では、解析した特性式での計算結果から外れてしまうため、各運転時の終了間際で能力の実測値と大きくずれたと考えられる。

使用する杭の本数とヒートポンプの能力のバランスがとれしており、杭からのスケール析出を抑止すれば、今回解析した特性式に近い能力となると思われる。

## 8. まとめ

基礎杭利用地中熱空調システムのシミュレーションプログラムの精度と汎用性向上のために、このシステムが持つ能力変化につながる要素の把握と特性式の解明を行った。

その結果、補給水量、流量変化や部分負荷の影響が大きいことや、実際の運転では効率低下も起こりうことから、設計時の詳細な能力算定が重要であることが分かった。

## 9. 謝辞

最後に、本研究にあたり協力いただいた竹内正紀福井大学教授、(株)ダイキン環境・空調技術研究所、ダイキン空調北陸㈱に深く謝意を表するものである。

## 参考文献

- ①加賀久宣・宮本重信：兼用熱交換杭（基礎杭）の漏水対策について、福井県雪対策・建設技術研究所年報「地域技術」第16号, pp. 45-50, (2003)
- ②梅田正浩・竹内正紀・宮本重信：基礎杭利用地中熱空調システムの研究開発（その3）－実証化施設の稼働2年目の運転実績について－, 福井県雪対策・建設技術研究所年報「地域技術」第17号, pp. 1-6, (2004)