

地中熱空調における新たな熱交換杭の施工法 と導入施設での運転状況

山崎 三知朗¹・宮本 重信²

¹福井県雪対策・建設技術研究所 (〒918-8108福井県福井市春日3-303)

²国立大学法人福井大学 産学官連携本部 (〒910-8507福井県福井市文京3-9-1)

杭打ち機を使用して熱交換杭を安価に施工する工法を開発し、地中熱空調を導入した舞鶴若狭自動車道小浜料金所において実施工を行った。この施設における空調の運転状況を計測し冷房期および暖房期の運転効率を検証した結果、空冷式に比べてCOPの値が0.9~1.2上回る結果が得られ、約4割の省エネルギーとなることがわかった。また、3種類の熱交換方式の採熱量についても実測し、基礎杭兼用方式が有利である結果が得られた。

キーワード 地中熱, 空調, 熱交換杭, 省エネルギー, 自然エネルギー

1. はじめに

建物の空調は一般的に空気を熱源とする空冷式が採用されているが、外気に比べて夏冷たく冬温かい地中熱を熱源とすれば、効率が良い空調が可能となり省エネルギーとなる。特に冬季の湿度が高い日本海側においては、空冷式における暖房時の除霜運転での効率低下が地中熱空調では起こらないため更に有利となる。

地中熱を利用するには地中から熱を得るための熱交換を行う設備が必要であり、50~100m程度をボーリングし、熱交換用のU字管を挿入する工法が一般的に行われている。福井県では、熱交換にかかるイニシャルコストを下げするため、図-1に示すように建物基礎杭を熱交換杭として兼用するPIP (Pipe In Pile) 方式を開発し、福井県立図書館などで実用してきた。しかし、基礎杭を兼用するPIP方式では、基礎杭の径、長さおよび本数で得られる熱量が概ね決まるため、必要とする熱量が得られないケースがある。そういった場合に熱交換杭を安価に施工できるよう、杭打ち機を利用してU字管を地中に押し込んで熱交換杭を施工する工法を新たに開発した。

西日本高速道路株式会社が整備する舞鶴若狭自動車道において、小浜インターチェンジに建設される小浜料金所(床面積:約200m²)に地中熱空調が導入されることとなり、新工法での熱交換杭を施工した。また、小浜料金所での運転状況を計測することで、実施設における地中熱空調の効率を実証し、基礎杭を兼用するPIP方式、新工法による熱交換杭2種類を含めて3種類の熱交換杭の採熱量が実際にどの程度であるかについても実測したので、

以下に報告する。

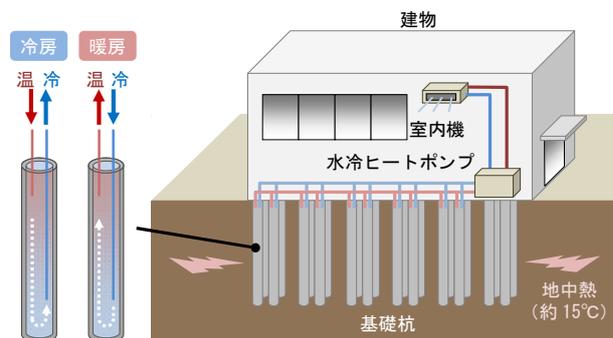


図-1 基礎杭兼用の地中熱空調

2. 新たな熱交換杭の施工

(1) 工法の概要

建物を建築する際に多く利用されるプレボーリング工法の杭打ち機を、熱交換杭の施工にも利用して施工コストを下げる。具体的には、図-2に示すように杭打ち機のオーガにより掘削した後、杭打ち機に取り付けたロッドによりU字管の圧入を行う。詳細な手順としては、①写真-1に示すように掘削径350mm、深さ20mまでスパイラルスクリーで掘削する。②掘削した穴にU字管をスムーズに送り込むことができるよう写真-2に示すガイドを置く。③杭打ち機にはあらかじめ所定の長さのポリエチレン管を巻いたリールが二つ取り付けられており、各リールからポリエチレン管の端部を取り出して、写真-3に示す先

端金具に接続してU字管にする。④写真-4に示すように先端金具をロッドの先端に押し当て、写真-5に示すようにポリエチレン管を送りながら地中へU字管を挿入する。⑤写真-6に示すように、頭部に管の間隔を保持するためのスペーサーを噛ませ、掘削穴を砂で埋め戻して完成である。

ポーリングした後にポリエチレンU字管を挿入する従来工法の施工費が約12,000円/mであるのに対し、この工法によればシングルU字管で約4,000円/mと試算され、約1/3にコストが縮減される。

(2)小浜料金所での施工

小浜料金所では、基礎杭を熱交換杭に兼用するPIP方式のみで地中熱空調を整備する計画であったが、西日本高速道路株式会社との協力により新工法でのU字管も施工する機会を得ることができた。建屋横のスペースにシングルU字管を6本と、U字管を2つ組み合わせて一つの穴に押し込むダブルU字管6本の計2方式12本の熱交換杭を、4m間隔で施工した。施工直後の状況を写真-7に示す。

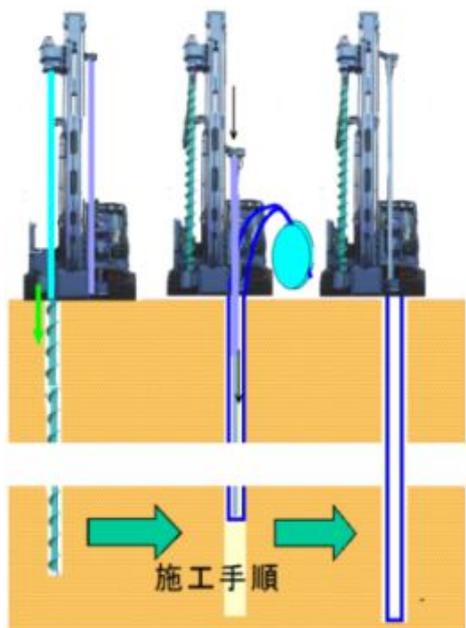


図-2 新たな熱交換杭の施工法



写真-1 スパイラルスクリューによる掘削



写真-2 ガイドの設置



写真-3 先端金具



写真-4 ロッド先端



写真-5 U字管の挿入



写真-6 頭部処理



写真-7 施工直後の状況

統ごとの採熱量の比で按分して求めた流量に調整した。
ここで、小浜料金所の外観を写真-8に、機械室内に設置された水冷ヒートポンプを写真-9に示す。

表-1 料金所の負荷

種別	計算値	設計時の機種	実際の機種
冷房	40.2kW	45kW	63kW
暖房	13.1kW	50kW	69kW

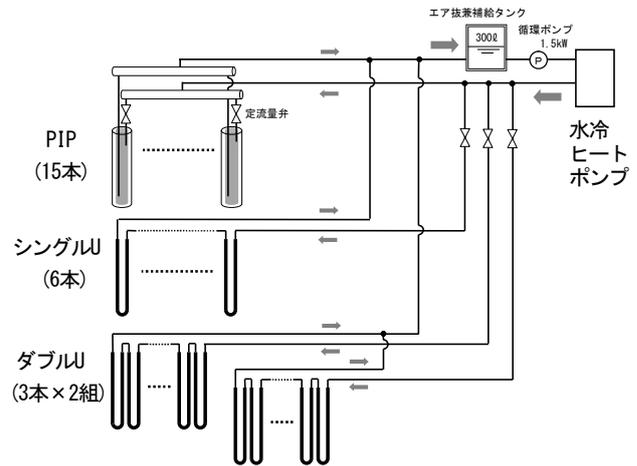


図-3 循環系統

3. 空調設備と計測方法

(1) 設備の概要

小浜料金所は、職員が常駐する料金所と電気設備が設置される電気室があり、床面積が約200m²である料金所が地中熱空調の対象である。料金所における空調負荷は、通常の設備設計と同様に外部からの伝熱負荷や室内に設置される機器からの発熱による負荷などから計算され、表-1に示す負荷が求められた。料金所は電算機器からの発熱があるため、暖房負荷に比べて冷房負荷が大きい。そのため、冷房負荷を基に水冷ヒートポンプの発注仕様が決められた。なお、東日本大震災の影響による納期の関係で、設計に比べて1ランク上の能力のものを実際には設置している。

料金所の地中熱空調の系統図を図-3に、熱交換杭の仕様について表-2に示す。熱交換杭は料金所の基礎杭を兼用するPIP方式を15本、シングルU字管6本、ダブルU字管6本の3系統に分け、循環ポンプからの水はそれぞれの系統に分かれて並列に循環し、各系統から戻った水が合流した後にエア抜きと水の補給を兼ねたタンクを通す系統とした。各系統の流量は、戻りの水温が同じになるようにそれぞれの系統で得られる熱量を想定して初期設定し、もし想定が合っていない場合には運転を行う中で調整することとした。想定する採熱量はこれまでの経験から表-3に示す値とし、水冷ヒートポンプの循環水量を系

表-2 熱交換杭の仕様

項目	PIP (基礎杭)	シングルU字管	ダブルU字管
材質	コンクリート杭 (PHC)	ポリエチレン管	ポリエチレン管
径	φ400~φ450	20A	20A
長さ	23m	20m	20m
本数	15本	6本	6本

表-3 採熱量の想定

種別		PIP (基礎杭)	シングルU字管	ダブルU字管
杭延長	1本あたり	23m	20m	20m
	本数	15本	6本	6本
	合計 (A)	345m	120m	120m
採熱量の想定(B)		70W/m (1.59)	44W/m (1)	55W/m (1.25)
採熱量(A)×(B) (割合)		24.2kW (67%)	5.3kW (15%)	6.6kW (18%)



写真8 料金所建屋



写真9 水冷ヒートポンプ (機械室内)

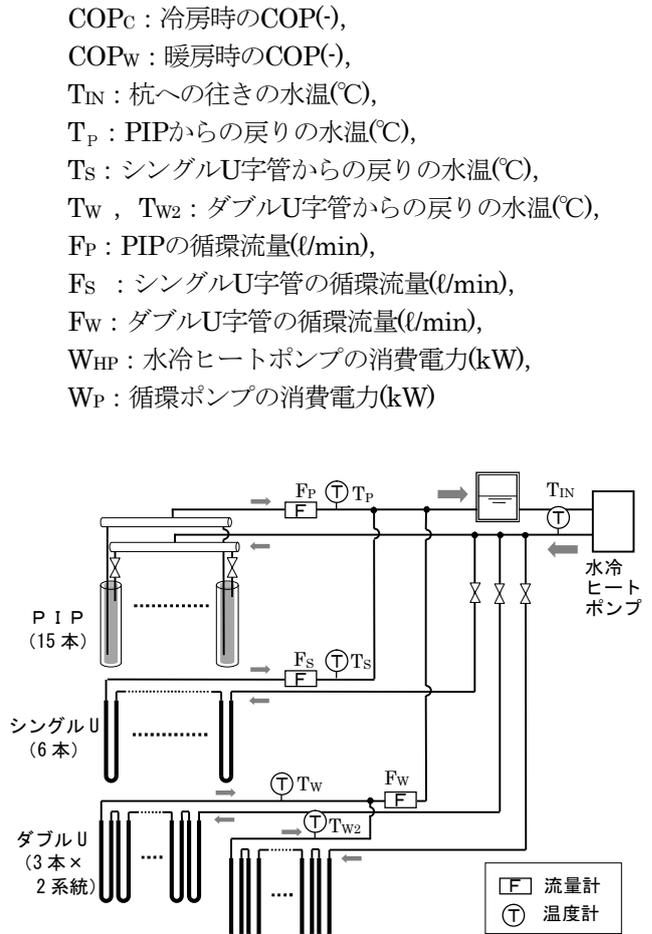


図4 測定箇所

(2) 計測方法

熱交換杭への往きと戻りの温度差と流量から求められる採熱量と機器の消費電力から効率を求める。採熱量は、熱交換杭の方式ごとに計測したいことから、図-4に示す位置に温度センサ (Pt100) および流量計 (電磁流量計) を設置した。また、消費電力は水冷ヒートポンプと循環ポンプを個別に計測できるように電力モータを取り付けた。これらの計測値はデータロガーに1分間隔で保存し、このデータを定期的に回収し採熱量および効率を算出した。

効率は、水冷ヒートポンプと循環ポンプの消費電力量の合計に対する、水冷ヒートポンプの発生熱量の比であるCOPで評価する。式(1)、式(2)にCOPの算定式を示す。冷房時には熱交換杭による放熱量が発生熱量となるが、暖房時は熱交換杭による採熱量に水冷ヒートポンプの消費電力を加えた値が発生熱量となる。

$$\begin{aligned}
 Q_C &= ((T_{IN} - T_P) \times F_P + (T_{IN} - T_S) \times F_S \\
 &\quad + (T_{IN} - (T_W + T_{W2}) / 2) \times F_W) \times 4.186 / 60 \\
 Q_W &= (T_P - T_{IN}) \times F_P + (T_S - T_{IN}) \times F_S \\
 &\quad + ((T_W + T_{W2}) / 2 - T_{IN}) \times F_W) \times 4.186 / 60 + W_{HP} \\
 COP_C &= Q_C / (W_{HP} + W_P) \quad (1) \\
 COP_W &= Q_W / (W_{HP} + W_P) \quad (2)
 \end{aligned}$$

ここで、

- Q_C : 冷房時の発生熱量(kW),
- Q_W : 暖房時の発生熱量(kW),

4. 計測結果

(1) 運転効率

計測を開始した2011年7月9日から2011年8月29日における負荷、電力およびCOPの平均値を表-4の当初の欄に、同期間の日平均負荷とCOPの散布図を図-5に示す。負荷の平均値9.7kW に対しCOPは2.6であり、県立図書館で実測した空冷ヒートポンプ(冷房能力355kW)のCOP2.8と比較して低い結果となった。この原因として2点が考えられる。1点目は低負荷時にはヒートポンプ本体のCOPが低くなることである。負荷の平均値は、設計値の40.2kWを大きく下回る9.7kWで、1時間ごとの平均負荷の最大値でも26.4kWであった。前述したとおり東日本大震災の影響で設置された水冷ヒートポンプの出力は設計よりも更に大きい63kWであったため、平均すると15.4%の能力でしか運転されていない。このようにヒートポンプが低負荷で運転されることでCOPが低い結果となったと考えられる。2点目は設計時の負荷に合わせて選定された循環ポンプの消費電力が、低負荷時には相対的に大きくなるため全体のCOPが下がってしまうことである。負荷の大小に関わらず1.5kWのポンプは一定運転しており、その分の消費電力は常に必要となる。水冷ヒートポンプ

の消費電力は平均して2.2kW程度であり、全体に対する循環ポンプの消費電力は41%を占め、低負荷時にはヒートポンプ本体の消費電力を超えるほどである。

これらの原因に対して、1つ目のヒートポンプの能力が過大であることへの対策は困難であるため、循環ポンプの消費電力についての対策を行った。実負荷が少なく循環水量を減らしても問題が無いことから、循環ポンプの容量を小さくできると判断して1.5kWから0.75kWのものに取り替え、さらに循環ポンプをインバータ制御する改造を行った。杭への往きの水温と還りの水温の温度差が小さい場合には流量を減らしてよいため、温度差が小さい時にはインバータでポンプの回転数を落とし、消費電力を減らすこととした。今回導入したインバータ制御の概要を図-6に示す。調節計により杭への往きと還りの水温の差 ΔT が4℃となるようインバータの周波数を変えてポンプの回転数を制御し、4℃の差がつかない場合には最低限值として設定した50%の周波数で運転する。

これらの改良を行った後の、2011年9月14日から2011年9月30日までの測定結果を表-4の改良後の欄に、日平均負荷とCOPの散布図を図-5に示す。インバータ導入後は負荷が少ない時期となったため、平均負荷4.4kWに対しCOPは3.2であった。しかし、シーズンの平均負荷である8.8kWでのCOPは、得られた図-5の散布図から約4であり、シーズンを通しての効率も4程度の値を示すものと見込まれる。インバータ制御を導入した形でのシーズンを通じた実測については、2012年度に行いCOPを確認する予定である。

次に、暖房の測定結果として、2011年11月1日から2012年3月31日までの平均値を表-5に、日平均負荷とCOPの散布図を図-7に示す。負荷の平均値7.7kWに対しCOPは2.7であり、県立図書館で実測している空冷ヒートポンプのCOPの1.8と比較して0.9上回る数字が得られた。暖房負荷の場合は、1時間ごとの平均値のうち最大値が11.5kWであったことから、設計値の13.1kWは概ね適正と考えられるが、冷房負荷に合わせて選定した機器の実際の出力69kWとは大きくかい離している。

表-4 冷房時の効率 (COP)

種別	負荷(kW)		消費電力 (kW)			COP
	平均	ピーク	HP	ポンプ	合計	
当初	9.7	26.4	2.2	1.5	3.7	2.6
改良後	4.4	18.8	1.2	0.16	1.4	3.2

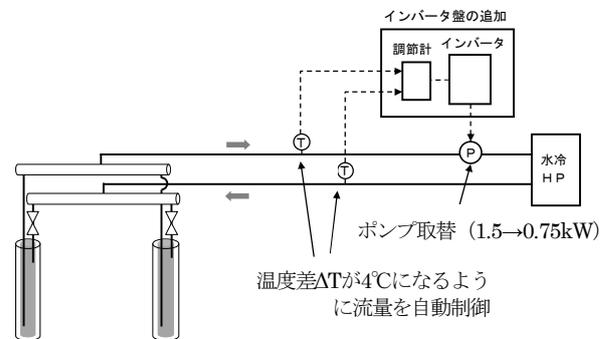


図-6 インバータの導入

表-5 暖房時の効率 (COP)

負荷		消費電力 (kW)			COP
平均	ピーク	HP	ポンプ	合計	
7.7kW	11.5kW	2.7	0.1	2.8	2.7

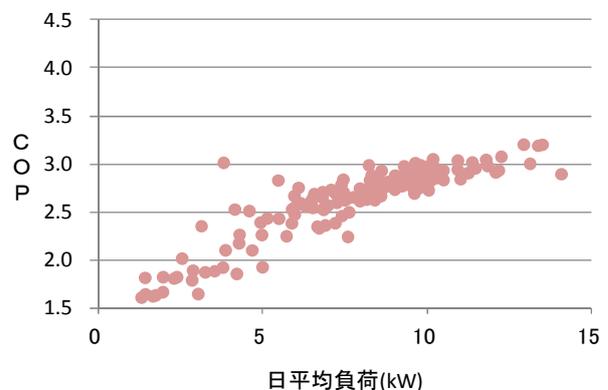


図-7 日平均負荷とCOP (暖房)

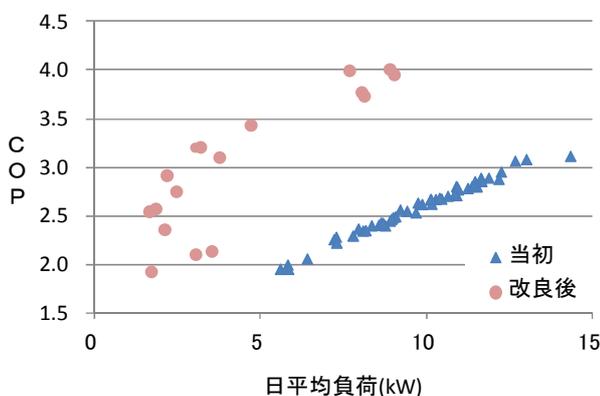


図-5 日平均負荷とCOP (冷房時)

(2) 熱交換杭の方式ごとの採熱量

冷房期の2011年7月9日から2011年9月30日および暖房期の2011年11月1日～2012年3月31日における、PIP、シングルU字管、ダブルU字管の3方式の平均採熱量と1mあたりの平均採熱量を表-6に示す。設計よりも負荷が少なく想定していた採熱量に比べて小さい値であるが、1mあたりの採熱量を比較すると、シングルU字管を1とした場合に1.59と想定していたPIPが実際には約2.0であり、想定以上にPIPの能力が高いことがわかった。

また、1日の中で負荷は変動し、冷房期の場合には昼にピークが現れる。このようなピーク時の採熱量を比較するため、負荷のピークが冷房シーズンで最も大きかった2011年7月14日と、負荷のピークが小さい2011年7月

21日のデータから1mあたりの採熱量を求めた。図-8に1mあたりの採熱量を、図-9シングルU字管を1とした採熱量の比を示す。図-8、図-9に示すとおり、ピークの絶対値の大小に関わらずピークが現れる時間帯はPIPの採熱量が多く、最大でシングルU字管の約2.6倍が得られている。

表-6 採熱量の比較

	平均採熱量	PIP (基礎杭)	シングル U字管	ダブル U字管
冷房	計 8.76kW (100%)	6.16kW (70.3%)	1.09kW (12.5%)	1.51kW (17.2%)
	1mあたり (シングルUを1)	17.9W/m (1.97)	9.1W/m (1)	17.9W/m (1.38)
暖房	計 4.98kW (100%)	3.49kW (70.1%)	0.61kW (12.3%)	0.88kW (17.6%)
	1mあたり (シングルUを1)	10.1W/m (1.98)	5.1W/m (1)	7.3W/m (1.43)
想定値 (再掲) (シングルUを1)		70W/m (1.59)	44W/m (1)	55W/m (1.25)

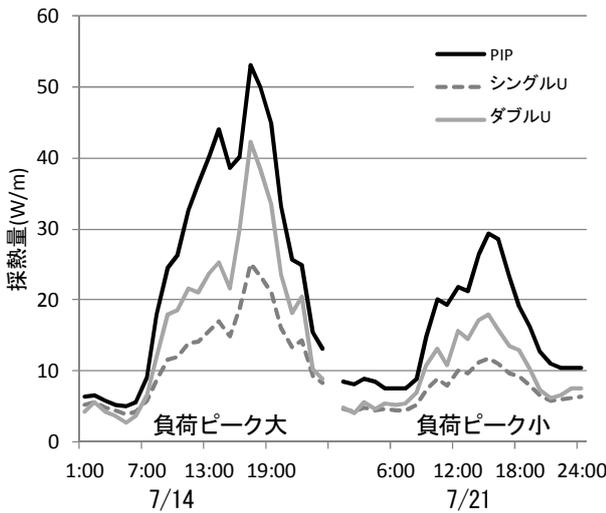


図-8 1mあたり採熱量

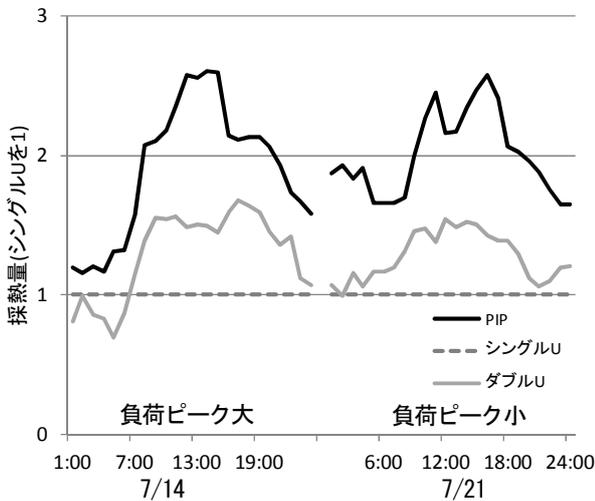


図-9 1mあたり採熱量の比

5. まとめ

杭打ち機による安価な熱交換杭の工法を開発し、小浜料金所へ実施した。ここでの地中熱空調の検証により、冷房期の運転効率インバータの導入により4程度を見込めるようになり、その後の暖房ではCOPは2.7であった。他施設における空冷式の実測値と比べると、COPは0.9~1.2上回り、約4割の省エネルギーが図られた。これによる1年間の電気料金の削減額は、計画よりも負荷が小さいため目標の200,000円には届かなかったものの、83,000円と試算される。また、3種類の熱交換杭における1mあたりの採熱量は、PIPがシングルU字管の約2倍で、PIPが採熱の点では有利であることが確認できた。

最後に、地中熱空調の計画における留意事項を2点述べる。1点目は、循環ポンプの消費電力の影響を減らす方が必要なことである。低負荷時に影響が大きくなるため、今回はポンプをインバータ制御することにより消費電力を抑えた。他の方法として、地中熱空調をベース運転用としてフル運転し、ピークの不足分は空冷でカバーする全体構成にすることもよい。2点目は設計時の負荷計算が過大にならないようにすることである。図-10は、大規模事務所ビルにおける冷暖熱負荷発生頻度の計画値と実測値であるが、このように計画に対して実際は小さい負荷率で運転されている。また、低負荷時にはヒートポンプのCOPが低くなり、これらのことから負荷計算が過大で負荷率が小さいために見込んでいた効率が得られないケースが多いものと考えられる。したがって、負荷を正確に見積もることが重要であり、同様な施設の運転状況を参考にするなどの精査が求められる。

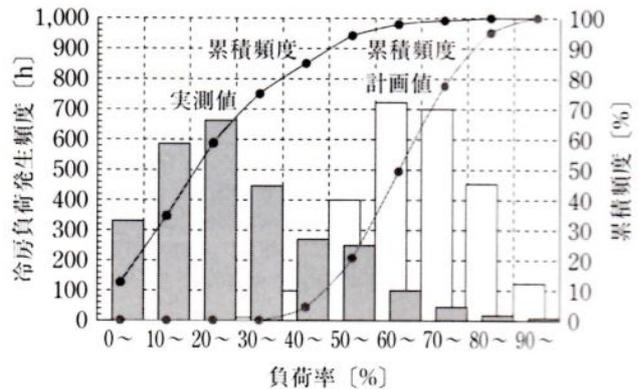


図-10 冷暖熱負荷発生頻度の計画値と実測値¹⁾

謝辞：本研究は、環境省地球温暖化対策技術開発事業で実施された。また、西日本高速道路株式会社には多大な協力をいただいた。記して関係者への謝辞とする。

参考文献

- 1) 社団法人建築設備技術者協会編：設計技術者のためのヒートポンプ空調・給湯システムの実務知識，2010年5月