



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	RC造戸建の外断熱住宅における躯体蓄熱型冷房システムに関する性能評価：床冷房の可能性と問題点
Author(s)	菊田, 弘輝; 絵内, 正道; 羽山, 広文 他
Citation	日本建築学会環境系論文集, 73(626), 463-470 https://doi.org/10.3130/aije.73.463
Issue Date	2008-04-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/50463
Rights	日本建築学会
Type	journal article
File Information	AIJ.626.463-470.pdf



RC造戸建の外断熱住宅における躯体蓄熱型冷房システムに関する性能評価 －床冷房の可能性と問題点－

PERFORMANCE EVALUATION ON THERMAL STORAGE COOLING SYSTEM FOR EXTERNAL INSULATED DETACHED HOUSES BUILT FROM REINFORCED CONCRETE － Possibility and problems of a floor cooling －

菊田 弘輝*, 絵内 正道**, 羽山 広文***, 宮坂 敏一****

*Koki KIKUTA, Masamichi ENAI, Hirofumi HAYAMA
and Toshikazu MIYASAKA*

The aim of this study is to verify the usefulness of thermal storage cooling system for external insulated detached houses built from reinforced concrete. After actual survey of model houses built in Saitama prefecture in the hottest summer season, COP of heat pump (primary side) including that of circulation pump (secondary side) was concretely estimated, and also the performance of this system, such as a floor cooling system by using water as the thermal medium, was evaluated. At once, the evaluation of thermal comfort and humidity management when this system was introduced was practiced, and also the possibility and problems of a floor cooling for highly insulated buildings in the future were revealed.

Keywords: External insulated houses built from reinforced concrete, Thermal storage cooling system, Performance evaluation, System coefficient of performance, Evaluation of thermal comfort, Humidity management

RC造外断熱住宅, 躯体蓄熱型冷房システム, 性能評価, システム成績係数, 快適性評価, 湿度管理

1. はじめに

COP13(2007年12月)におけるバリ・ロードマップが採択され, 地球温暖化への取り組みが一層高まる中, 我が国における温室効果ガスの排出量の削減は急務である。特に, 住宅分野における排出量の削減に向けて, 外断熱先進国である欧米諸国の外断熱工法(RC造)ならびに外張断熱工法(木造)について, 我が国も一層積極的に取り組む必要がある^{1)~2)}。更に, 躯体蓄熱に関わる熱容量を考慮すると, 外断熱工法であることが望ましいと考えられる。

これまで, 著者らはRC造戸建の外断熱住宅における躯体蓄熱型暖房システムの有用性を検証してきた³⁾。本暖房システムは寒冷地や準寒冷地の戸建住宅を中心に, 集合住宅や医療福祉施設や保育施設等にも採用されてきた。しかし, エアコン(空気方式)が普及している温暖地において, 躯体蓄熱型冷房システム(水方式)の有用性を検証している研究は少ない。一般的に「床冷房」と呼称される近年の研究動向として, 被験者実験による快適性評価⁴⁾, 吸放熱応答の推定法⁵⁾, 対流・放射・総合熱伝達率の定量評価^{6), 7)}等が挙げられる。また, 実建物の一例として, 2005年の愛・地球博開催に合わせて建設された志段味循環型モデル住宅(D棟)が挙げられる⁸⁾。

以上, 床冷房の関心が徐々に高まってきたものの, 現在抱えている幾つかの問題点(水方式の冷房能力に対する懸念, 躯体の表面結露

に対する懸念等)を解決しなければならず, その解決策を実建物から明らかにすることは, 非常に有意義である。更に, 欧米諸国よりも外断熱の実績が乏しい我が国にとって, RC造外断熱住宅と躯体蓄熱型冷房システムの制御手法との関連を検証することは, 外断熱の普及に繋がると予想される。

本論の目的は, RC造戸建の外断熱住宅における躯体蓄熱型冷房システム(以下, 本システム)の有用性を検証することである。具体的には, 水方式の冷房能力に対する懸念の解消に重点を置き, 1次側のヒートポンプ熱源機(以下, HP熱源機)や2次側の循環ポンプ(以下, 循環P)単体としてではなく, 住宅全体としての本システムの性能評価を行うことである。同時に, 躯体の表面結露に対する懸念の解消に重点を置き, 本システムの快適性評価や湿度管理の検証と併せて, 今後の高断熱建物における床冷房の可能性と問題点を実建物から明らかにすることである。

2. 調査対象

関東地域の中でも比較的温暖な埼玉県鶴ヶ島市と越谷市に立地するRC造戸建の外断熱住宅2件(以下, A住宅とB住宅)を調査対象とする。測定期間は2004年8~9月(A住宅)と2005年8~9月(B住宅)である。参考として埼玉県さいたま市の気象データを図1に示す。

* 北海道大学大学院工学研究科 助教・博士(工学)

** 北海道大学大学院工学研究科 教授・工博

*** 北海道大学大学院工学研究科 准教授・博士(工学)

**** ロングホーム(株)(当時)

Assis. Prof., Graduate School of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.

Prof., Graduate School of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.

Assoc. Prof., Graduate School of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.

LONGHOME Co., Ltd.

調査対象の住宅概要を表1、外観を写真1、1階平面図兼配管敷設図を図2、冷房・除湿機器の概要を表2、床スラブ断面詳細図を図3に示す。南窓採光として計画され、地階・1階・2階の3層で構成されたA住宅とB住宅の延床面積は約170[m²]である。断熱仕様の特徴は、断熱厚60～100[mm]程度、屋根スラブのみ内断熱、各階天井に

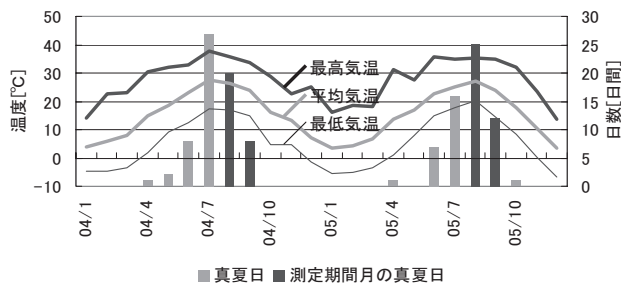


図1 埼玉県さいたま市の気象データ

表1 調査対象の住宅概要

住宅概要		
名称	A住宅	B住宅
所在地	埼玉県鶴ヶ島市高倉	埼玉県越谷市蒲生寿町
構造	RC造外断熱(屋根スラブのみ内断熱)	
階数	地階・1階・2階・ペントハウス(PH)	地階・1階・2階
建築面積	66.96[m ²]	76.40[m ²]
延床面積	167.87[m ²]	183.18[m ²]
最高の軒高	7700[mm]	7200[mm]
最高の高さ	8000[mm]	7440[mm]
建ぺい率	43.24≤60	42.68≤60
容積率	108.42(地階・1階・2階)≤160	68.22(1階・2階)≤200
断熱仕様[mm]		
外壁	ケイ酸カルシウム 厚5 + EPS 厚55	ケイ酸カルシウム 厚8 + EPS 厚52
天井(最上階)	ケイ酸カルシウム 厚5 + EPS 厚55	ケイ酸カルシウム 厚5 + EPS 厚100
天井	ケイ酸カルシウム 厚5 + EPS 厚55	
熱橋補強	パーティクルボード 厚9 + EPS 厚20	
その他	断熱ドア・ペアガラス	



写真1 外観(左:A住宅(南東), 右:B住宅(北東))

表2 冷房・除湿機器の概要

HP熱源機				
名称	A住宅		B住宅	
設置台数	熱交換ユニット(1台)・室外機(2台)		熱交換ユニット(1台)・室外機(1台)	
設置場所	屋上階(屋外)		地階(室内)	
電源	単相200[V](50[Hz])			
冷却能力	6.0[kW]		4.6[kW]	
消費電力	2.5[kW]		1.5[kW](圧縮機のみ)	
冷媒	R410A		R407C	
熱交換器	アルミフィン(空気熱交換器)・プレート式(水熱交換器)			
エアコン・除湿機				
設置台数	エアコン(2台)		エアコン(1台)	除湿機(2台)
設置場所	地階	1階	1階	地階・2階
電源	100[V]	200[V]	100[V]	100[V]
冷却能力	1.8[kW]	4.0[kW]	2.2[kW]	0[kW]
除湿能力	1.0[L/h]	2.3[L/h]	1.3[L/h]	10[L/day]
消費電力	495[W]	1120[W]	385[W]	20～400[W]

断熱材が張られていること等である。本システムは顕熱処理を対象とし、具体的には、HP熱源機で温冷水が生成され、床スラブに埋設された架橋ポリエチレン管(配管内径:13A, 配管埋設深さ:160[mm], 配管ピッチ:150[mm])を通じて、循環Pで各階に送水され、輻射暖冷房が行われる仕組みである。エアコンかつ除湿機は潜熱処理を対象とし、本システムとの併用運転が想定されている。

A住宅では、最上階(屋外)に市販製品のHP熱源機(圧縮機のインバータ制御有)が導入されている。三方弁による定流量方式を軸に、三方弁を境に1次側(水温(往):7[℃], 水温(還):12[℃])と2次側(水温(往):20[℃], 水温(還):25[℃])が計画されている。1次側の

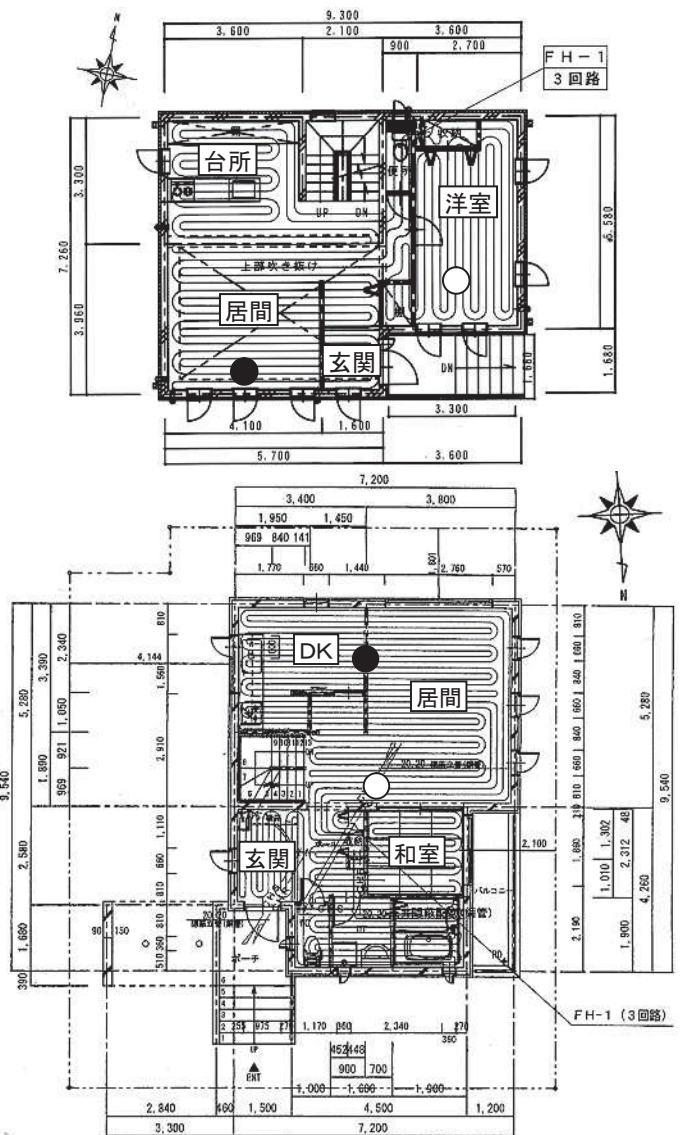


図2 1階平面図兼配管敷設図(上:A住宅, 下:B住宅)

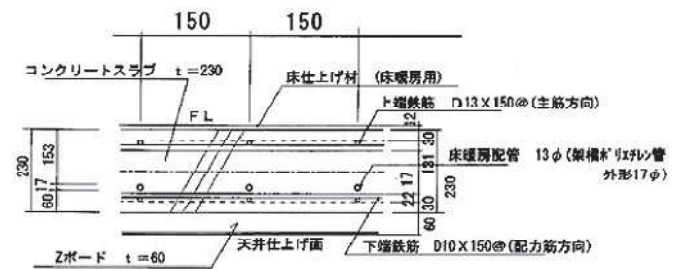


図3 床スラブ断面詳細図

冷水の一部はペントハウス内の室内ユニットに、2次側の冷水は床冷房に用いられるため、1次側送水時(室内ユニット)かつ2次側非送水時(床冷房)の室外機は通常の2台ではなく1台で運転される。

B住宅では、地階(屋内)に室内機と室外機をコンパクト化した試作機のHP熱源機(圧縮機のインバータ制御無)が導入されている。三方弁による定流量方式を軸に、三方弁を境に1次側(水温(往):7[℃],水温(還):12[℃])と2次側(水温(往):18[℃],水温(還):23[℃])が計画されている。

計測項目を表3に示す。B住宅のHP熱源機は試作機の構成上、HP熱源機と循環Pの消費電力は個別に計測できず、2次側の送水温度と送水流量は個別に計測できた。上下温度は生活域における冷氣層の形成有無を判断するため、FLから0.75[m]間隔に設定した。B住宅のみ日射計(英弘精機株式会社、ネオ日射計、MS-61)が屋上に設置され、水平面全天日射量を計測し、最終的に直散分離(ブーガの式と永田の式)によって各方位に入射する日射量を推定した。

表3 計測項目

電力・送水関係		
名称	A住宅	B住宅
電力消費量	HP熱源機(1次側)	HP熱源機(1次側)+循環P(2次側)
	循環P(2次側)	
	エアコン(地階,1階)	エアコン(1階)
送水温度 送水流量	1次側(全体)	除湿機(地階,2階)
	2次側(全体)	2次側(全体,1階,2階)
温湿度・日射関係		
温湿度	外気温湿度	
	室内温湿度(地階,1階,2階:FL+1.10[m],図2の●)	
温度	上下温度(1階,2階:FL+0.75,1.50,2.25[m],図2の○)	
	床表面温度(地階,1階,2階:FL+0.00[m],図2の●)	
	外壁表面温度(南壁,西壁)	
日射量	水平面全天日射量	

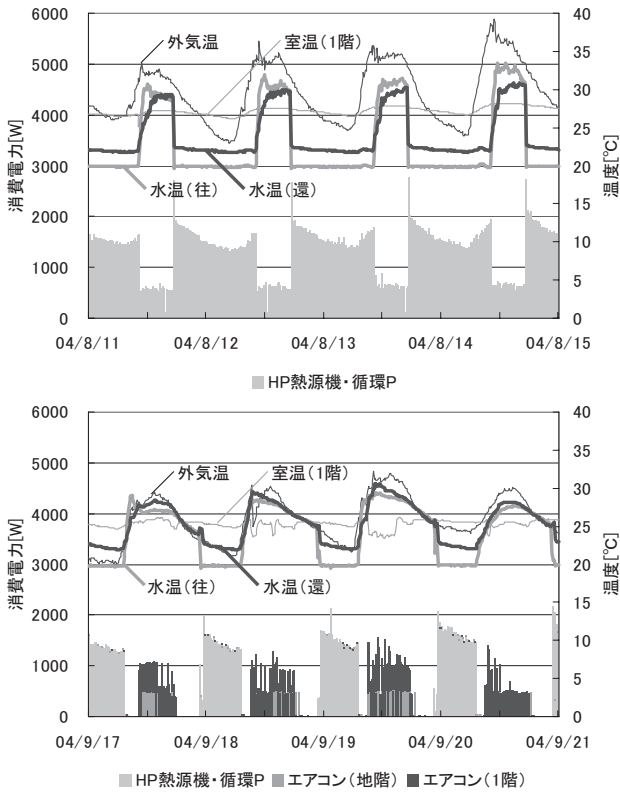


図4 A住宅の消費電力と温度の推移(上:CASE1,下:CASE2)

3. 解析結果

3.1 解析 CASE とその特徴

解析CASEを表4、消費電力と温度の推移を図4、図5に示す。計測項目の中で、電力・送水関係に着目し、本システムの制御手法における代表的な4つの解析CASEを検証した。水温(往)と水温(還)は2次側の送水温度、往還温度差は2次側を指すものとする。A住宅のCASE1(04/8/11~14)では、夕方から翌午前までの17時間に渡って床冷房が行われた。CASE2(04/9/17~20)では、安価な深夜電力を利用した夜間運転による躯体蓄冷が行われた。更に、日中もエアコンが運転されたため、04/9/19の室温は約2.0[℃]低下し、エアコンの消費電力が日積算電力消費量(冷熱源)の約40[%]を占めた。

B住宅のCASE3(05/8/21~24)では、連続的に24時間に渡って床冷房が行われた。ただし、床スラブの表面結露が懸念されたため、地階のみ送水が控えられた。また、HP熱源機の定格運転のON-OFF制御は、三方弁を用いたHP熱源機の入口温度(12[℃])一定制御であったため、HP熱源機の発停が断続的に繰り返されて頻繁に循環Pのみで運転された。CASE4(05/9/18~21)では、安価な深夜電力を利用した夜間運転による躯体蓄冷が行われた。更に、エアコンは除湿冷房運転ではなく、湿度だけを下げる除湿再熱運転であったため、ほぼ除湿機としての機能であった。

表4 解析 CASE

躯体蓄熱型冷房システム				
名称	A住宅		B住宅	
解析CASE	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
解析日	04/8/11~14	04/9/17~20	05/8/21~24	05/9/18~21
送水時刻	17:20~翌10:20	22:40~翌7:10	0:00~翌0:00	23:00~翌7:00
送水時間	17時間運転	8時間半運転	24時間運転	8時間運転
送水温度	20[℃]		18[℃]	
送水流量	16.28[L/min]		10.20[L/min]	

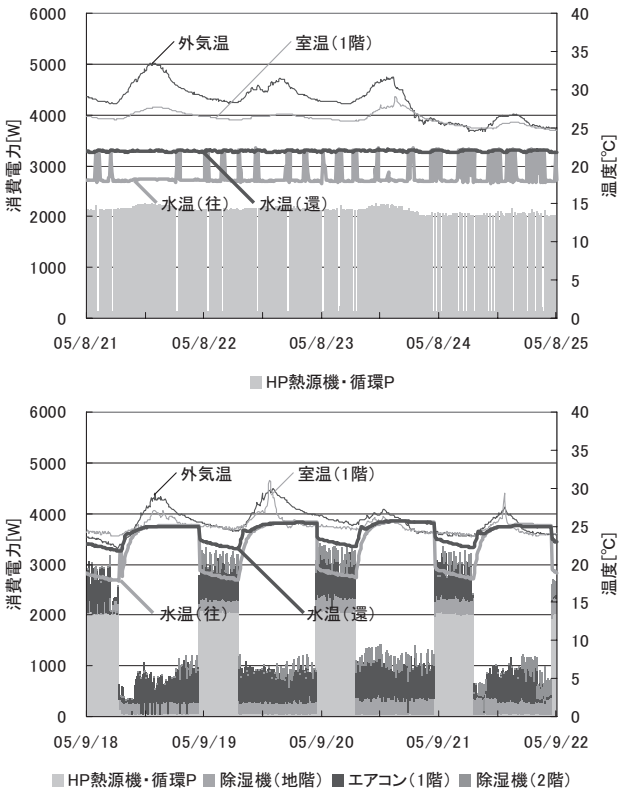


図5 B住宅の消費電力と温度の推移(上:CASE3,下:CASE4)

3.2 HP 熱源機の発停問題

CASE3 で発生した HP 熱源機の発停問題を検証した。B 住宅(1 階床スラブ)の床面積当りの冷却能力と除去能力の推移を図6に示す。冷却能力とは、床スラブに入力した実際の「冷却量」を W/m^2 に換算したものである(式1)。そのため、エアコンの冷却能力は含まれていない。除去能力とは、室内空気と床表面の間の熱伝達(総合熱伝達率 $\alpha = 9.0 [W/m^2 \cdot K]$)の強さを表し、床スラブから出力した実際の「冷却量」すなわち顕熱の「除去量」を W/m^2 に換算したものである(式2)。

冷却能力=比重×比熱×送水流量×往還温度差/床面積 (1)

除去能力=総合熱伝達率×(室温-床表面温度)/床面積 (2)

冷却能力と除去能力を時系列で取り扱った場合、冷却能力が $20 [W/m^2]$ 程度となったのに対し、除去能力は常時変動を繰り返し、CASE4 の 05/9/19 に最高で約 $60 [W/m^2]$ となった。

夜間運転による躯体蓄冷を考慮し、瞬時値ではなく積算値で検証した。B 住宅(1 階床スラブ)の冷却量 Q と除去量 P の関係を表5に示す。1 階の送水流量は $4.921 [L/min]$ であった。CASE3 の 05/8/21 と 05/8/24 を鑑みると、05/8/24 のような外気温が低い場合、三方弁を用いた HP 熱源機(圧縮機のインバータ制御無)の入口温度 ($12 [^{\circ}C]$) 一定制御で 24 時間運転を想定したとしても、過剰冷却(冷却量 Q/ 除去

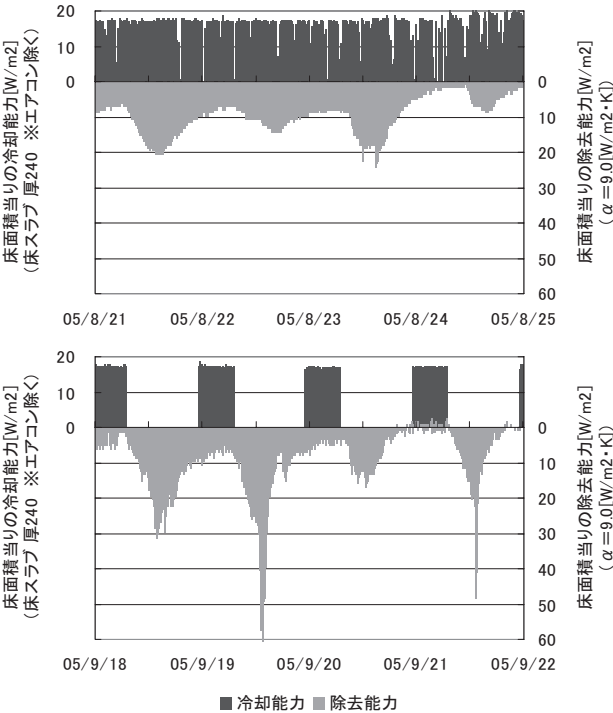


図6 B 住宅(1 階床スラブ)の床面積当りの冷却能力と除去能力の推移(上:CASE3, 下:CASE4)

表5 B 住宅(1 階床スラブ)の冷却量 Q と除去量 P の関係

CASE3 (1階床スラブ)	発停頻度 (HP熱源機)	運転時間 (循環Pのみ)	冷却量Q [Wh/m ² ・day]	除去量P [Wh/m ² ・day]	Q/P [-]
05/8/21	6[回]	110[min]	382.9	307.5	1.2
05/8/22	13[回]	210[min]	353.3	247.1	1.4
05/8/23	17[回]	270[min]	332.2	281.7	1.2
05/8/24	30[回]	480[min]	302.9	92.5	3.3
CASE4 (1階床スラブ)	発停頻度 (HP熱源機)	運転時間 (循環Pのみ)	冷却量Q [Wh/m ² ・day]	除去量P [Wh/m ² ・day]	Q/P [-]
05/9/18	0[回]	0[min]	130.6	277.4	0.5
05/9/19	0[回]	0[min]	134.6	330.9	0.4
05/9/20	0[回]	0[min]	132.3	144.3	0.9
05/9/21	0[回]	0[min]	135.0	118.1	1.1

量 $P > 1.0$) に伴い、HP 熱源機の定格運転の ON-OFF 制御では非効率的な発停が繰り返された。CASE3 の実質的な HP 熱源機の運転時間は 2/3 の約 16 時間であった一方、夜間運転を行った CASE4 の発停頻度はゼロであった。従って、床冷房時における HP 熱源機の発停問題の主要因として、過剰冷却が推察できるため、HP 熱源機の高効率化に繋がる部分負荷対応の圧縮機のインバータ制御を最低限駆使する必要がある。その上で更に、住宅においても床表面温度制御の下限値設定や特に流量制御の各階設定が簡易かつ有効な制御手法となると考えられる。

3.3 夜間運転による躯体蓄冷の性能評価

三方弁を用いた定流量方式にとって重要な往還温度差を検証した。送水時における往還温度差の頻度分布を図7に示す。夜間運転による躯体蓄冷の方が、短時間での床冷房となるため、往還温度差は大きくなった。ただし、CASE4 の往還温度差の大半は $4.0 [^{\circ}C]$ 以上に達したが、同じ夜間運転を行った CASE2 は $2.0 \sim 3.0 [^{\circ}C]$ となった。その要因として、当然住宅の違いや熱負荷の違いがあると同時に、送水温度の違い (CASE2: $20 [^{\circ}C] > \text{CASE4}: 18 [^{\circ}C]$) や送水流量の違い (CASE2: $16.28 [L/min] > \text{CASE4}: 10.20 [L/min]$) が挙げられる。

床面積当りの平均冷却能力を図8に示す。配管長から床スラブへの伝熱面積 M を算出した結果、A 住宅は $50.18 [m^2]$ (地階 $383 [m] + 1$ 階 $354 [m] + 2$ 階 $203 [m]$)、B 住宅は $40.94 [m^2]$ (1 階 $387 [m] + 2$ 階 $380 [m]$) となった。更に、躯体蓄冷の対象となる床面積 N を算出した結果、A 住宅は $161.83 [m^2]$ (PH 除く)、B 住宅は $122.12 [m^2]$ (地階除く) となった。伝熱面積 M/ 床面積 N の関係では、B 住宅の方が約 16 [%] (A 住宅: 0.31, B 住宅: 0.36) 大きく、床面積当りの平均冷却能力も B 住宅の方が約 33 [%] (A 住宅: $15 [W/m^2]$ 前後, B 住宅: $20 [W/m^2]$ 前後) 大きくなった。しかし、ここで重要なのは、外断熱における断熱材の厚さやコンクリート躯体の熱容量の増加によって、夜間運転による躯体蓄冷が可能となり、高い冷却能力が得られた、ということである。

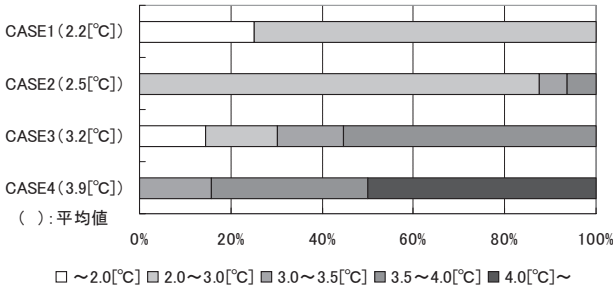


図7 送水時における往還温度差の頻度分布

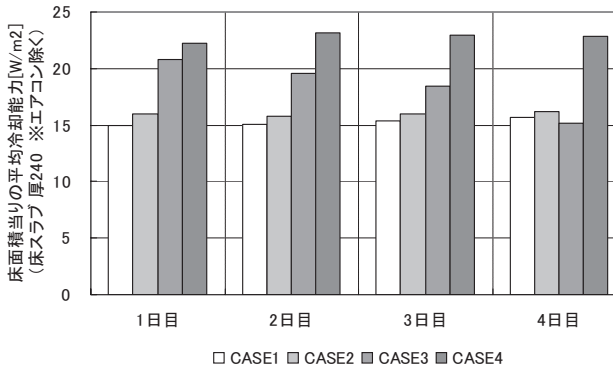


図8 床面積当りの平均冷却能力

本システムによる安価な深夜電力を利用した夜間運転は、外断熱におけるコンクリート躯体の熱容量を積極的に活用した省エネ性の向上に繋がる制御手法の1つとなる。ただし、夜間運転時における冷却不足(冷却量 Q /除去量 $P < 1.0$)の可能性は当然懸念されるが、送水温度自体を下げて冷却能力を増しても、結果的にCOPの低下や躯体の表面結露を招く恐れがある。従って、水方式の搬送動力が比較的少ないこと等も考慮すると、夜間運転時における冷却不足に対し、送水時間の調整も制御手法の1つとして望ましいと考えられる。

3.4 住宅全体としての本システムの性能評価

システム成績係数と内外温度差の関係を図9を示す。システム成績係数(SCOP)とは、1次側のHP熱源機や2次側の循環P単体としてではなく、断熱・気密性能の優れた住宅を対象に、熱源系と搬送系を組み合わせた住宅全体としての本システムの成績係数を表す。室温は約24～27[℃]の範囲内で安定していたため、内外温度差は外気温の動静に対応していたと仮定すると、比較的低い外気温で夜間運転を行ったCASE2の平均SCOPは1.9として得られ、内外温度差との間で高い負の相関が得られた。床スラブの表面結露が懸念されたために地階の送水を控えていたB住宅では、A住宅に比べてSCOPが大幅に低下していた。しかし、夜間運転を行ったCASE4の平均SCOPは1.4として得られ、同様に内外温度差との間で高い負の相関が得られた。尚、1次側の計測も可能であったA住宅では、日単位(4日間)だけではなく時間単位(4日間×24時間)に渡って詳細に検証した。

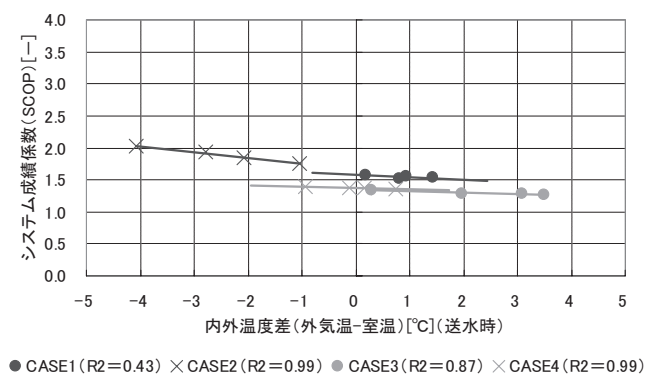


図9 システム成績係数と内外温度差の関係

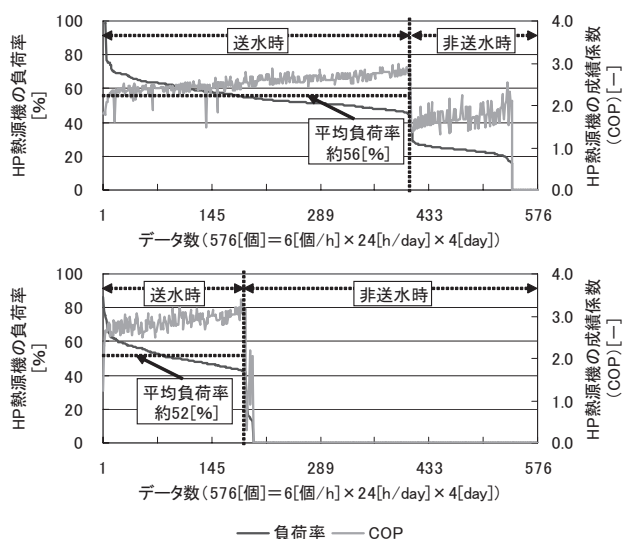


図10 A住宅のHP熱源機の負荷率と成績係数の関係
(上: CASE1, 下: CASE2)

A住宅のHP熱源機の負荷率と成績係数の関係を図10, HP熱源機の成績係数と外気温の関係を図11に示す。1次側の送水流量は23.72[L/min]であった。HP熱源機の負荷率を大きい順から並べ替えると、負荷率の低下に伴い、COPは上昇傾向を示した。その後、急激に低下した負荷率は非送水時を表し、40[%]以下の低負荷率(非送水時)を除いたHP熱源機の平均負荷率(送水時)は、約56[%](CASE1)と約52[%](CASE2)となった。HP熱源機のCOPはカタログ値の2.4(室内:27[℃], 室外35:[℃], 入口温度:12[℃], 出口温度:7[℃])を上回り、CASE1の平均COPは2.6(最大COPは2.8)として、CASE2の平均COPは2.8(最大COPは3.1)として得られ、外気温との間で高い負の相関が得られた。

A住宅のCOPとSCOPの関係を図12に示す。図12の関係は、図9の日単位を時間単位に置き換えても、十分に高い負の相関(CASE1: $R^2 = 0.70$, CASE2: $R^2 = 0.49$)が得られたため、図11の時間単位のCOPと図9の時間単位のSCOPを重ね合わせたものである。熱源系だけではなく搬送系も加味した場合、 R^2 が0.60を超える正の相関が得られた本システムのCOPとSCOPとの間で、35～40[%](CASE1 > CASE2)の相違があることが明らかになった。その要因として、本システムで用いられる三方弁や循環Pまたは配管やヘッダー等の断熱状況とそれらが置かれている周辺環境に関連する施工時による影響、ならびに2次側の送水流量(16.28[L/min])に比べて1次側の送水流量(23.72[L/min])の方が約1.5倍多く、1次側の循環水量に関連する運用時による影響が挙げられる。しかし、ここで重要なのは、通常のHP熱源機のCOP表示が、最大出力時のCOPであったとしても、本システムのような床冷房を計画・設計する場合、負荷率を考慮した平均出力時のCOPの入手の方が、あるいは住宅全体としてのSCOPの目安の方が有益な情報となるであろう、ということである。

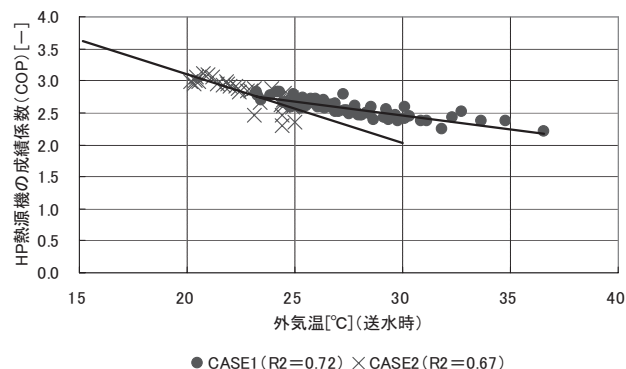


図11 A住宅のHP熱源機の成績係数と外気温の関係

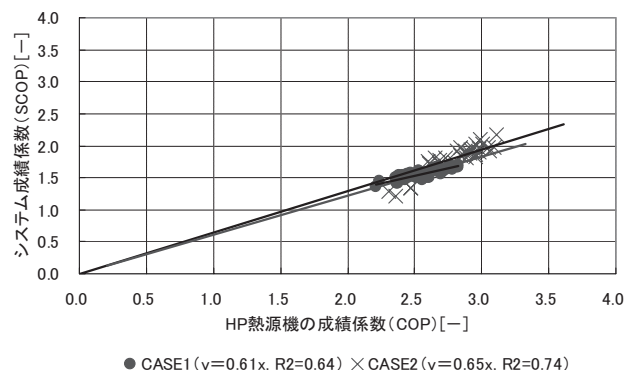


図12 A住宅のCOPとSCOPの関係

3.5 本システムの快適性評価の検証

計測項目の中で、温湿度・日射関係に着目し、温度特性や温度むらを検証し、本システムの快適性を総合的に評価した。A住宅(1階)の外壁表面温度の推移を図13に示す。CASE2に比べて太陽高度が高い時期であったCASE1では、南壁よりも西壁の方が外壁表面温度(室外)は高く、最高で55[℃]以上に達していた。その一方、外壁表面温度(室内)は多少の時間遅れを生じながらも、室温とほぼ同じ値で推移し、外断熱における断熱・気密性能の優れた住宅であったと判断できる。

各階の温度特性(日平均・日最高)を表6に示す。地階は1階と比較して窓面積が小さく、2階は1階と比較して吹抜空間が有り、外皮面積も大きいので、各階の温度特性に偏りが生じていた。中でもCASE1では、2階の日平均室温は28.8[℃]に達し、地階の日平均室温よりも約4[℃]高目に推移していた。また、送水を控えていたB住宅のCASE3よりも送水を行っていたA住宅のCASE1の方が、地階の温度特性は2～3[℃]程度低く、A住宅の床表面温度は約22[℃]まで冷えていた。夜間運転を行ったCASE2とCASE4では、1階の日平均室温は約25[℃]で、床表面温度との温度差は1～1.5[℃]程度であった。従って、各階の温度特性を踏まえた上で、今後本システムを採用する場合、各階の流量制御、断熱材の設置位置、屋根スラブも含めた配管の埋設位置等について事前に計画し、各階に対して冷房能力をどの程度配分するかを予め把握しておくことが重要であると考えられる。

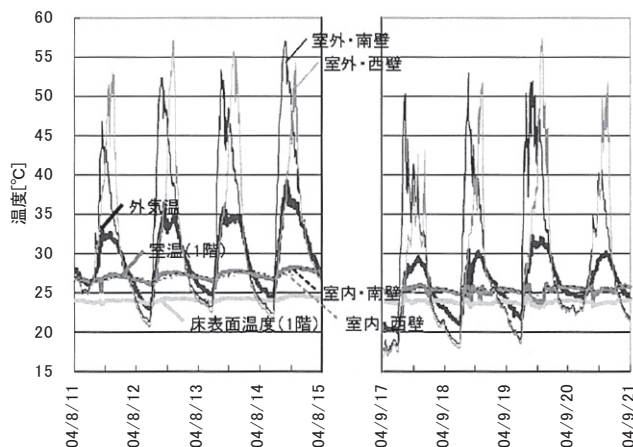


図13 A住宅(1階)の外壁表面温度の推移(左: CASE1, 右: CASE2)

12:00の垂直温度分布を図14に示す。垂直温度分布が不均一になると不快さを感じる恐れがあることから、ISO-7730では、踝(FL+0.1[m])と頭(FL+1.1[m])との温度差を3[℃]以内に収めることを推奨している。CASE1では、2階の上下温度差が屋根スラブの内断熱等の影響によって、推奨値を大幅に上回っていた。1階の上下温度差は概ね推奨値に収まっていたが、天井に断熱材が張られていたため、天井域の温度はやや高かった。夜間運転を行ったCASE2とCASE4では、運転停止から5時間経過した垂直温度分布も十分に安定し、垂直温度分布の不均一による不快さは生じず、4日間のFL[m]～FL+2.25[m]における垂直温度分布の傾向はほぼ一致していた。ただし、過剰冷却であったCASE3の05/8/24(冷却量Q/除去量P=3.3)では、垂直温度分布の上下温度差が1[℃]前後であったため、生活域における冷氣層の形成は天井域まで及んでいたと推測される。

快適性にはライフスタイルや年齢・性別等の諸要因が影響を及ぼすため、本システムの快適性評価は困難であるが、今回指標としてPMVとPPDを用いて検証した。ISO-7730では、 $-0.5 < PMV < +0.5$ と $PPD < 10[\%]$ を推奨している。温熱6要素からPMV(予想平均申告)を算出し、PPD(予想不満足者率)($= 100 - 95 \times \exp(-(0.0353 \times PMV^4 + 0.2179 \times PMV^3))$)を推定した。

PMVの推移を図15、図16に示す。A住宅の場合、地階の全日や1階の夜間は推奨値に収まっていたが、2階の日中は「やや暖かい」状況となった。エアコン運転時は「どちらでもない」状況となったが、ライフスタイル(生活域: 日中(1階)→夜間(2階), 着衣量: 0.75[clo]→0.5[clo])等を考慮すると、本システムの単独運転でも十分に快適性評価は高いと考えられる。ただし、B住宅の場合、PMVは安定せず、度々急上昇していたため、その対策を検証した。

B住宅(1階)の1時間当りの窓面に入射する日射量と温度の推移を図17に示す。窓面に入射する日射量は積み上げグラフである。高断熱を可能とするRC造外断熱住宅の室温は、外壁からの熱貫流よりも

表6 各階の温度特性(日平均・日最高)

		CASE1		CASE2		CASE3		CASE4	
		日平均	日最高	日平均	日最高	日平均	日最高	日平均	日最高
2階	室温[℃]	28.8	31.1	26.5	28.6	28.1	29.8	27.0	28.4
	床表面温度[℃]	24.6	25.2	24.0	24.5	25.4	26.1	25.3	25.9
1階	室温[℃]	27.2	28.2	25.3	26.2	26.3	29.0	25.0	31.0
	床表面温度[℃]	24.1	24.5	23.8	24.7	25.2	26.4	24.0	24.4
地階	室温[℃]	24.8	25.4	24.1	25.2	27.0	28.0	24.5	25.3
	床表面温度[℃]	22.0	22.4	22.3	22.9	25.2	25.6	23.5	23.6
室外	外気温[℃]	29.6	39.2	26.0	32.2	28.5	33.3	25.6	29.9
	水平面全天日射量[W/m ²]					104.8	560.5	94.1	485.1

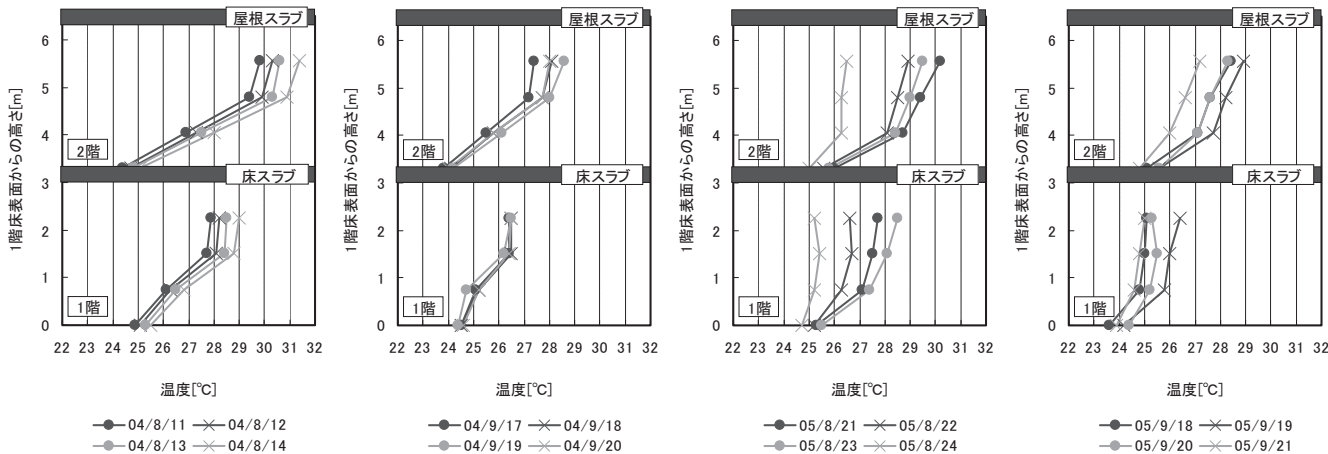


図14 12:00の垂直温度分布(左から順に、CASE1, CASE2, CASE3, CASE4)

窓面へ透過した日射量に大きく左右される。東窓+西窓+北窓よりも南窓の方が窓面に入射する日射量は多く、CASE3に比べて太陽高度が低い時期であったCASE4では、1階の室温変動が日射量の増減と対応していた。尚、図17の「窓面に入射する日射量」は、表6の水平面全天日射量を直散分離した「各方位から入射する日射量」と「各方位の有効窓面積」を乗じた値であるため、「遮蔽係数」を乗じれば、最終的に「窓面へ透過した日射量」となる。

B住宅(1階)の相対湿度とPPDの関係を図18に示す。温暖地では、湿度管理を目的にエアコンや除湿機等が各室に設置され、除湿による快適性の向上が図られるが、相対湿度の低下に伴い、PPDは上昇していた。従って、先ず室温を上げないための工夫(窓の日射遮蔽や屋根スラブの断熱強化等)を徹底し、PPDを下げるのが先決である。ただし、相対湿度が70[%]以上に及んでいた実態は無視できず、床冷房時における本システムの湿度管理を検証する必要がある。

3.6 本システムの湿度管理の検証

躯体の表面結露に対する懸念として、床冷房の結露問題を検証した。B住宅のサーモカメラによる温度分布を写真2、B住宅(1階)の消費電力と重量絶対湿度の推移を図19に示す。この温度分布は、住宅が竣工した直後、地階に送水を行っていた試験運転の段階(8月上旬)

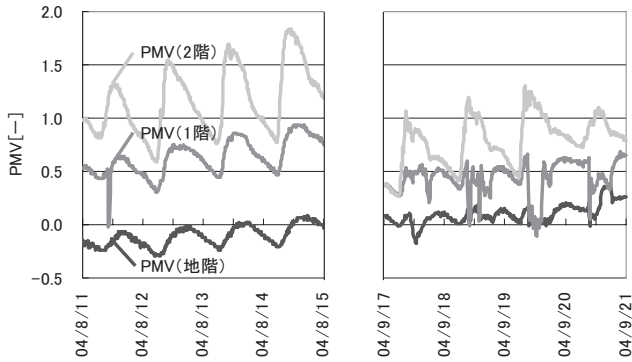


図15 A住宅のPMVの推移(左:CASE1, 右:CASE2)

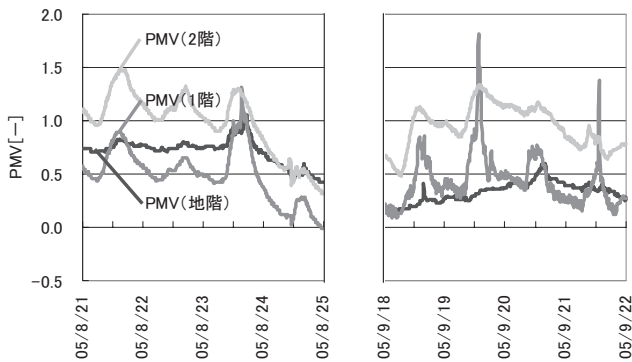


図16 B住宅のPMVの推移(左:CASE3, 右:CASE4)

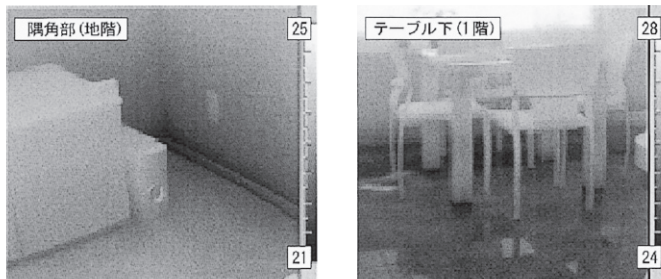


写真2 B住宅のサーモカメラによる温度分布

に撮影されたものである。降雨時の湿気の多い日には、地階の隅各部に部分的な表面結露が生じていたため、8月(CASE3)と9月(CASE4)の段階では送水を控えていた。1階のテーブル下を中心に表面結露は生じていなかったが、他の部分に比べて冷えている様子が伺えた。また、施工水を多く含んでいるB住宅では、エアコンの除湿再熱運転がある程度の除湿効果を発揮したことから、室内の重量絶対湿度は室外よりも低下していた。

床表面温度と露点温度の関係を図20、図21に示す。2階よりも1階、1階よりも地階の順に、結露発生の危険度が高くなる状況となり、床表面温度は露点温度に近接していた。しかし、温暖地での高湿度条件(露点温度の最高値:約25[°C])にも関わらず、床表面温度は露点温度を常時下回ることなく、除湿機の設置後では、1階・2階の床表面温度を多少下げても、結露発生領域(床表面温度<露点温度)に入らないことが確認された。

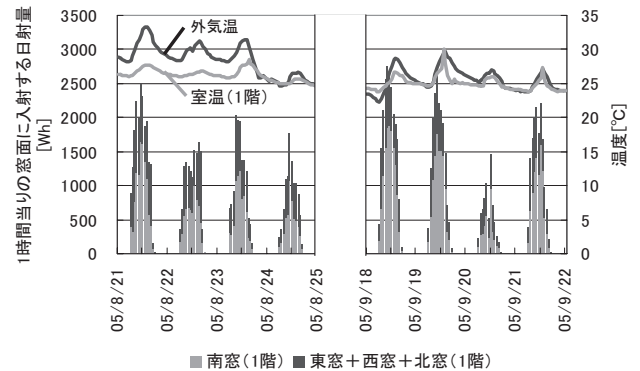


図17 B住宅(1階)の1時間当りの窓面に入射する日射量と温度の推移(左:CASE3, 右:CASE4)

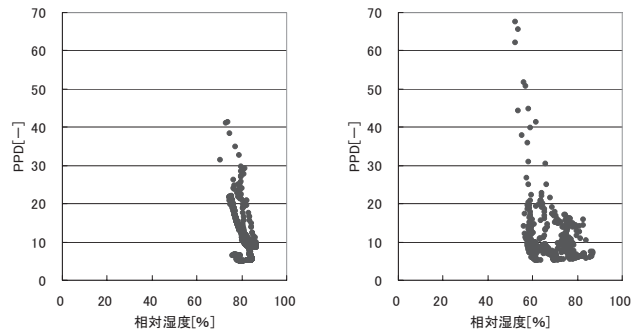


図18 B住宅(1階)の相対湿度とPPDの関係(左:CASE3, 右:CASE4)

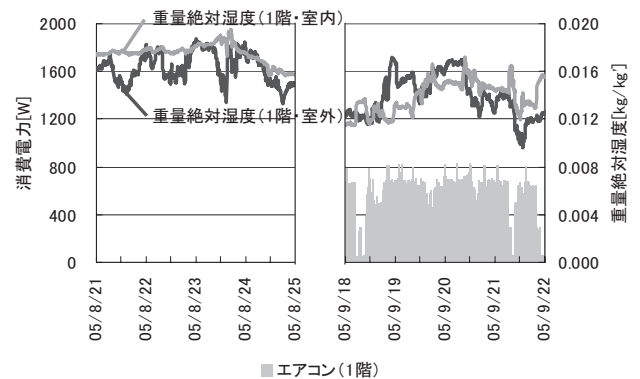


図19 B住宅(1階)の消費電力と重量絶対湿度の推移(左:CASE3, 右:CASE4)

床冷房の結露問題は殆ど心配ないが、除湿に要する消費電力は冷房に要する消費電力に匹敵するほどの多量消費であったため、本システムを採用する際に、必ずしも湿度管理が除湿機との併用運転で解決できる訳ではない。従って、本システムによる顕熱処理と併せて、潜熱処理として重量絶対湿度の管理もきちんと配慮しなければならず、省エネ性と快適性の向上に繋げるためには、これまで以上に高効率かつ低価格を目標とした除湿機の開発が、今後の課題となるであろう。

4. まとめ

RC造戸建の外断熱住宅における躯体蓄熱型冷房システムの有用性を検証し、住宅全体としての本システムの性能評価を行うと同時に、本システムの快適性評価や湿度管理の検証と併せて、床冷房の可能性と問題点を明らかにした。以下に、得られた成果をまとめる。

- 1) 本システムの制御手法における代表的な4つの解析CASEを検証し、HP熱源機(圧縮機のインバータ制御、入口温度一定制御)と循環P、ならびにエアコンと除湿機における基本的な特徴をまとめた。
- 2) 床冷房時におけるHP熱源機の発停問題の主要因として、過剰冷却が推察できるため、部分負荷対応の圧縮機のインバータ制御を最低限駆使し、床表面温度制御の下限值設定や特に流量制御の各階設定が簡易かつ有効な制御手法となると示唆した。
- 3) CASE4の往還温度差の大半は4.0[℃]以上に達し、外断熱における断熱材の厚さやコンクリート躯体の熱容量の増加によって、夜間運転による躯体蓄冷が可能となり、高い冷却能力が得られた。
- 4) HP熱源機の平均負荷率は約55[%]となり、そのCOPはカタログ値の2.4を上回り、CASE1の最大COPは2.8として、CASE2の最大COP3.1として得られ、外気温との間で高い負の相関が得られた。

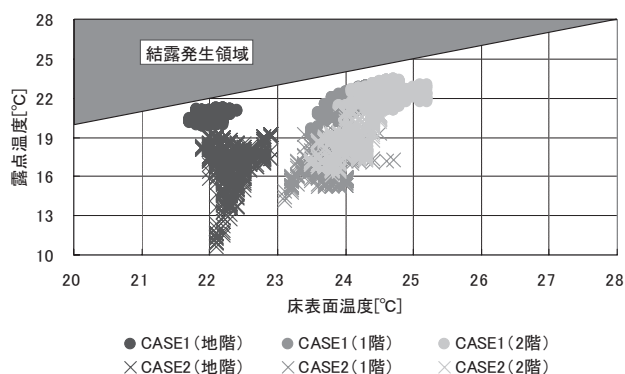


図 20 A 住宅の床表面温度と露点温度の関係

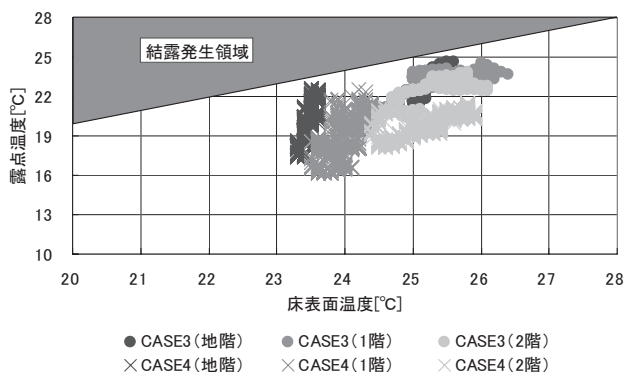


図 21 B 住宅の床表面温度と露点温度の関係

5) 比較的低い外気温で夜間運転を行ったCASE2の平均COPは2.8かつ平均SCOPは1.9として得られ、本システムのCOPとSCOPとの間で、35～40[%](CASE1>CASE2)の相違があることを明らかにした。

6) 今後本システムを採用する場合、各階の流量制御、断熱材の設置位置、屋根スラブも含めた配管の埋設位置等について事前に計画し、各階に対して冷房能力をどの程度配分するかを予め把握しておくことが重要であると示唆した。

7) 夜間運転を行ったCASE2とCASE4では、運転停止から5時間経過した垂直温度分布も十分に安定し、過剰冷却であったCASE3では、生活域における冷氣層の形成は天井域まで及んでいることが分かった。

8) PMVとPPDを用いて検証し、ライフスタイル(生活域:日中(1階)→夜間(2階)、着衣量:0.75[clo]→0.5[clo])等を考慮すると、本システムの単独運転でも十分に快適性評価は高いと示唆した。

9) 床表面温度は露点温度に近接していたが、常時下回ることなく、除湿機の設置後では、1階・2階の床表面温度を多少下げても、結露発生領域に入らないことを確認した。

以上、水方式の冷房能力に対する懸念の解消として、安価な深夜電力を利用した夜間運転を優先し、平均出力時のCOPあるいは住宅全体としてのSCOPを踏まえた上で、送水温度ではなく送水時間を調整することが効果的である。また、躯体の表面結露に対する懸念の解消として、床冷房の結露問題は殆ど心配ないが、省エネ性と快適性の向上に繋げるためには、より一層室温(窓の日射遮蔽や屋根スラブの断熱強化等)と重量絶対湿度(除湿機の開発)の管理を図ることが効果的である。本報で検証した床冷房の問題点のように、これから1つずつ着実に解決していけば、今後の高断熱建物における床冷房の可能性も一段と高まるであろう。

謝辞

本調査の推進にあたって、卒業生の吉川真弓氏(札幌市役所)、埼玉県実測での関係諸氏(施工者:株式会社ワカバヤシ、ロングホーム株式会社)、また西尾晃氏(三菱電機株式会社)、加藤愛一郎氏(三菱電機株式会社)には多大なご協力を頂いた。記して感謝する。

参考文献

- 1) 荒谷登, 絵内正道, 鈴木憲三, 福島明他: RC造外断熱工法ハンドブック 2003年度版, 北海道外断熱建築協議会
- 2) 外断熱工法技術マニュアル検討委員会: よくわかる! 外断熱工法 北海道における外断熱RC建築の普及に向けて, 北海道建設部建築指導課, 平成17年3月
- 3) 菊田弘輝, 絵内正道, 羽山広文, 森太郎, 宮坂敏一: 外断熱住宅の躯体蓄熱型暖房システムに関する研究, 日本建築学会環境系論文集, No. 589, pp. 37-42, 2005. 3
- 4) 秋元孝之ら: 工業化住宅における床冷房に関する研究 その1～3, 日本建築学会大会学術講演梗概集 環境工学II, pp. 1195-1200, 2005. 9
- 5) 小林愛子, 郡公子: 配管埋設型床冷暖房における吸放熱応答の推定法に関する研究 第2報 吸熱応答・放熱応答の推定法の検討と提案, 日本建築学会環境系論文集, No. 579, pp. 9-13, 2004. 5
- 6) 長谷川弘, 赤林伸一, 坂口淳: 放射環境における対流・放射・総合熱伝達率の測定結果と床冷房時の結露防止手法に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, No. 601, pp. 21-28, 2006. 3
- 7) 岡本孝美, 百家裕季, 天川章史, 中村泰人: 立方体正味放射計を用いた床冷房室内の周壁熱流束に関する実験的研究, 日本建築学会環境系論文集, No. 613, pp. 41-47, 2007. 3
- 8) ARCHITECTURAL BODY, <http://www.architectural-body.com/ja/products/shidami/>, (参照 2007. 12. 21)
- 9) 菊田弘輝, 絵内正道, 羽山広文: 外断熱住宅における躯体蓄熱型冷房システムによる床冷房の可能性と問題点, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp. 1825-1828, 2007. 9

(2007年3月30日原稿受理, 2007年12月18日採用決定)