実在住宅における温水ヒートポンプ熱源を利用した 潜熱蓄熱式床暖房システムの効果的な運転に関する研究

その1 システムの概要と実測による評価

STUDY ON THE EFFECTIVE USE OF FLOOR HEATING SYSTEM, USING HEAT PUMPS AND PCM IN HOUSES

Part 1 Summary of the system and evaluation by survey

高瀬 幸造^{*1}, 前 真之^{*2}, 赤嶺 嘉彦^{*3}, 河野 良坪^{*4}
佐藤 誠^{*5}, 坂本 雄三^{*6}

*Kozo TAKASE, Masayuki MAE, Yoshihiko AKAMINE,
Ryohei KONO, Makoto SATOH and Yuzo SAKAMOTO*

Nowadays, many heating system is adapted in Japanese houses, such as air-conditioner, floor heating system, panel heating system, and so on.

In these systems, the need of floor heating is increasing by residents selecting open-plan houses. But, there are a few studies on floor heating, using heat pump, which uses less energy than other heating systems. We have been developing the floor heating system, using low temperature hot water and stocking heat energy in PCM, and keeping inner thermal environment stable in houses which are well-insulated and airtight. We

have been measuring and evaluating two houses using this system. In conclusion, both houses kept inner temperature stable between 17°C and 24°C during heating period using floor heating in a short time every day. It is shown that making hot water in low temperature, using with air-conditioner, and operating low power at starting time of heating contribute to low energy consumption.

Keywords : Floor Heating System, Phase Change Material(PCM), Heat Pump,

Air-Conditioner, Well-Insulated and Airtight Houses, Energy Consumption

床暖房システム, 潜熱蓄熱材, ヒートポンプ, エアコン, 高断熱・高気密住宅, エネルギー消費量

1. はじめに

住宅における暖房方式は多様化してきている。対流式では、ファンヒーターなどの開放型暖房機器が 1970 年代以降、幅広く普及した。近年急速に高効率化が進んでいる、ヒートポンプ（以下、HP）式エアコンによる対流式暖冷房については、実験室実験により COP=5 程度の高い効率となっていることが細井らによって実証されている¹⁾。エアコン暖房の省エネルギー性能についての優位性が示され、温暖地では今後主流の暖房方式になると考えられる。

一方、対流式の暖房を用いた際、空調機から吹き出した暖気が部屋の上部に集まってしまうという課題も挙げられる。高断熱住宅であつても特に天高が高い居室では、窓面や上階からのコールドドラフト対策等の課題もあり、足元の冷えが指摘される場合も多い。その対策として、床暖房方式を採用する事例も多く見られる。室内で靴を脱ぐ生活が中心の日本人にとって、床面が発熱（低温やけど防止のため、表面温度は 30°C 程度が上限）することで、足裏を直に暖めて頭寒足熱を実現する床暖房は合理性がある。また、室内全体の放射環境も良好なものとなり、気流感が小さいことから快適性や健康性が高いとされている。以上の背景から、新築集合住宅の半数以

上に温水床暖房が採用され、既存住宅のリフォームでも採用される例が増えている²⁾。床暖房に関する研究は、田辺らや倉瀬らの研究グループにより、実験・CFD を用いた温熱環境・快適性に関する各種検討が行われている^{3), 4)}。三浦ら⁵⁾は、燃焼式熱源利用の温水床暖房の特徴を踏まえ、人工気候室内の実大実験住宅において、熱源（従来型ガス温水器、潜熱回収型ガス温水器）、配管の断熱の有無等について検討を行った結果を基に、床暖房システムの効率の推定を行っている。乾式温水床暖房パネルについては、清水によるパネル構造と放熱量の関係に関する研究⁶⁾がある。これらの床暖房に関する研究は、人工気候室内に置かれた実験室実験での快適性に関する検討例が多く、実際の住宅における運用状況を踏まえて快適性・省エネ性に着目した例は少ない。

また、エアコンやファンヒーター等の対流式暖房設備は、設置位置の自由度が高いうえに、吹き出し温度・風量を可変とすることで投入熱量をある程度自由に制御できるが、床暖房はパネルを床内部に施工するために一度施工すると改修が困難であり、表面温度の調整のみで室内投入熱量を制御するため、適切な設計・運用が難しいという側面がある。

本論文は、日本建築学会大会学術講演会において発表した論文^{5), 6)}に基づき、さらに検討を加えたものである。

^{*1} 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻
大学院生・修士(工学)

Graduate Student, Dept. of Architecture, Grad. Sch. of Eng., the Univ. of Tokyo, M. Eng.

^{*2} 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻
准教授・博士(工学)

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Grad. Sch. of Eng., the Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

^{*3} 独立行政法人建築研究所 研究員・博士(工学)

Research Engineer, Building Research Institute, Dr. Eng.

^{*4} 大阪工業大学工学部建築学科 講師・博士(工学)

Lecturer, Osaka Institute of Technology, Dr. Eng.

^{*5} 佐藤エネルギーリサーチ 代表取締役・博士(工学)

CEO, Satoh Energy Research Co., Ltd., Dr. Eng.

^{*6} 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 教授・工博

Prof., Dept. of Architecture, Grad. Sch. of Eng., the Univ. of Tokyo, Ph. D.

さらに床暖房は快適性が高い反面、エアコンと比較した場合に、消費エネルギーが増加する傾向にあるが、近年ではエネルギー効率の高い温水 HP 熱源機の導入も進んでいる。以上の背景から、本研究では、温水 HP の有効利用を目的とした潜熱蓄熱式床暖房システムを考案した。本システムの主旨・概要は以下の通りである。

- ・ 熱源に温水 HP を使用し、エネルギー効率を高めるため、低い送水温度かつ適正な負荷率を維持した運用
- ・ 深夜電力利用によるランニングコスト削減および昼間の消費電力量の削減
- ・ 潜熱蓄熱材（以下、PCM）を用いることで温水 HP 停止時の室温・床温度を維持し、立ち上がりの遅さを補う

本システムを 2 件の戸建住宅に採用することとし、設計段階に検討を行ったうえで、2009 年春の竣工後から 2011 年春まで 2 年間の実測を行った。温水 HP は、外気条件や温水温度等によって効率が変化するため、暖房期間を通した長期的な評価を行った。また、1 年目の室内温熱環境およびエネルギー消費量等の把握を行ったうえで、2 年目は熱源の更新（市販品の温水 HP の更新に合わせた、運用方法改善と熱源機制御基盤の変更）とその評価を行っている。

2. 住宅における床暖房システムの分類

図 1 に示した通り、熱源・パネル・仕上材を組み合わせることで床暖房システムが構成されるが、ここでは住宅において最も一般的な乾式パネルを用いた場合について熱源別に解説する。

図 1 床暖房システムの構成要素

図 2 では各床暖房方式の構成例を示している。各方式で共通するのは、床温度を一定に保つ制御が必須となっている点である。電気ヒーター式では床温度によって通電の有無を制御する方法、温水式床暖房では配管戻り温度や床温度によって各系統の熱動弁の開閉を制御する方法がある。これらは床温度が一定に保たれる一方で、室温が成り行きになる。また、室温センサを用いた場合、室温制御も可能であるが、日射取得時等により室温が上昇した際には床温度が低くなる可能性がある。なお、床温度制御・室温制御ではセンサが適切な位置に設置されていることが重要である。

図 2 各床暖房方式の構成例（左：電気ヒーター式、中央：燃焼式熱源式、右：温水 HP 熱源式）

2-1. 電気ヒーター式

床パネル内に電熱線あるいはシートヒーターを内蔵し、床温度を感知して発熱量の制御を行う床暖房方式である。

- ・ 長所：安価なインニシャルコスト。蓄熱を行うことで深夜電力利用により低ランニングコストでの運転が可能。立ち上がり早く、キッチンや洗面所等の局所暖房に適する。
- ・ 短所：1 次エネルギー消費量が多いため、省エネルギーの観点からは主暖房としては不適。

2-2. 燃焼式温水熱源式（ガス・灯油）

ガス・灯油を燃焼させて温水を得る。出力調整については、行き温度を 70～80℃、60℃の 2 段階に切り替えるのが一般的である。さらに潜熱回収型熱源機ではより低温の 40℃の送水が可能である。

- ・ 長所：高温送水が可能のために立ち上がり早い。潜熱回収型熱源機利用の場合には、40℃まで温水行き温度を下げ、安定した流量での送水を行うことで、熱源機の排熱回収効率が高い省エネルギーな運転が可能。
- ・ 短所：燃焼式熱源機の効率には上限があるため、潜熱回収型熱源機でも 90%程度が上限となる。燃料単価が高価な場合には、比較的高ランニングコストとなる。

2-3. 温水 HP 熱源式

温水 HP は行き温度 30～40℃程度で高いエネルギー効率を示す。一方で、行き温度の上限は 50～60℃程度のため、立ち上がりが遅い。熱源の出力調整は、温水行き温度制御または戻り温度制御のいずれも可能であるが、負荷の変動に対しては戻り温度制御のほうが安定。

- ・ 長所：大気を熱源とする HP 式のため、電気ヒーター式に比べて高い効率での運転が可能。1 次エネルギー換算において、燃焼式熱源機の効率を上回る可能性がある。深夜電力利用によって、低ランニングコストでの運用が可能。
- ・ 短所：温水行き温度の上限があるため、立ち上がりが遅く、間欠運転には不適。

本研究で考案した床暖房システムでは、市販の温水 HP 熱源を使用した。温水 HP の仕様を表 1 に示す。熱源出力については戻り温度制御とし、熱動弁の開閉に関しては各系統の戻り温度制御とし、床温度・室温制御は行わなかった。

3. 本システムの床パネル概要

2-3. に示した温水 HP の特徴を踏まえ、PCM 利用による潜熱蓄熱式床暖房パネルを考案した。温水 HP と PCM による潜熱蓄熱を組み合わせた際の利点として、以下が挙げられる。

- ① 30～40℃の低温温水利用により、立ち上がりから蓄熱完了に至るまで、適切な負荷率で高効率な運用が可能
- ② 暖房が特に不要な深夜時間帯での立ち上がりは遅いが、朝の運転停止時には必要十分量の蓄熱量を確保
- ③ 一日を通じて床内部温度が安定し、日中の運転停止時にも暖房効果を得ることが可能

両物件で使用した PCM 物性値を表 2 に示す。これはメーカーカタログ値および、DSC（示差走査熱量測定：Differential Scanning Calorimetry）による。特に相変化温度 32℃の PCM では、潜熱蓄熱により、コンクリートの 10 倍程度の蓄熱量を得ることができる。

また、低温温水利用でも床表面温度を高く維持することを意図し、熱伝導率が高く薄い仕上材を用いることとした。

4. 評価対象物件の設計時における検討

4-1. 両物件の建物概要

東京都練馬区の T 邸（次世代省エネルギー基準の地域区分：Ⅳ地域）および長野県長野市の B 邸（Ⅲ地域）の 2 件に本システムを採用した。T 邸、B 邸の建物概要を表 3 に示す。T 邸は、木造 2 階建ての一室空間の住宅である（図 3）。B 邸は、1 階はピロティ状の外部空間、2 階に一室空間の居住スペースがある（図 4）。

設計時には、基本設計・断熱仕様を決定した上で、温水 HP 能力・PCM 熱容量を検討した。検討にあたっては、文献 7 を参考とした。記号一覧を注 1) に示す。

まず熱損失係数 Q 値から、建物側の暖房負荷を簡易検討した。この際に用いた計算 Q 値⁸⁾は、T 邸は $Q = 2.42 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ 、B 邸は $Q = 2.23 \text{ W/m}^2$ であり、当該地域の次世代省エネルギー基準を満たす性能であった。

両物件の配管系等を図 5, 6 に、両物件の床パネル断面構成を図 7, 8 に示す。PCM の潜熱蓄熱効果を最大限利用するために、むらなく熱を伝えて PCM を溶かすことが可能と思われる、径 2.3mm・配管ピッチ 20mm のスダレ状の配管を採用した。床パネルの基本的な構成は両物件ともに共通で、木根太の間に PCM・配管を施工し、その上に仕上材を載せている。

配管の上下には、厚さ 20mm（幅：根太間寸法、長さ：10～40cm 程度）のアルミパックにより封入された PCM を設置した。上側は 23℃あるいは 32℃で相変化する PCM を、下側は 32℃で相変化する PCM を設置した。なお、T 邸では夏期に 20℃強の冷水行き温度による床冷房を行う計画であったために、配管上側全面にて 23℃で相変化する PCM を使用した（図 5, 7）。B 邸においては、昼間に直達日射が十分に当たるダイニングの窓辺付近の床面において日射熱を効率よく蓄熱するため、上側のみ 23℃で相変化する PCM を使用した（図 6, 8）。また、23℃で相変化する PCM を使用することで、床内部が冷えた際に 20℃程度で安定する効果を期待した。

パネル下部は床下への放熱ロスを抑えるため、十分な厚さの断熱材を施工した。T 邸では、床下通気となっている 1 階床下はポリスチレンフォーム 65mm、2 階床下は 20mm とした。B 邸では、1 階がピロティ状の外部空間のために、床下はグラスウールとポリスチレンフォームを併用して 300mm 以上の断熱材厚さを確保した。

床仕上材は、T 邸ではフレキシブルボード（セメント板） $t=16.5\text{mm}$ （熱抵抗値 $=0.042 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ ）とした。B 邸ではフレキシブルボード $t=8\text{mm}$ ＋シナ合板 $t=5.5\text{mm}$ （合計熱抵抗値 $=0.063 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ ）を基本と

表 1 本研究で用いた HP 熱源仕様

電源		単相 200V 50/60Hz
暖房	冷媒	R410A
	定格出力 / 消費電力	6.3 kW / 1485 W
	エネルギー消費効率 COP	4.24
	制御・温度調節	戻り温度制御 設定温度は 23℃～50℃の範囲で 1℃刻みに設定 (メーカー推奨範囲: 30℃～40℃)
冷房 (T 邸のみ)	定格出力 / 消費電力	3.8 kW / 1131 W
	エネルギー消費効率 COP	4.24
	制御・温度調節	行き温度制御 設定温度は 7℃～22℃の範囲で 1℃刻みに設定
	タイマー予約運転設定方法	30 分刻みで運転・停止を設定可能

※ カタログ記載定格能力および定格 COP の測定条件は、以下の通り。

暖房：外気温 7℃ (DB), 6℃ (WB)、循環熱媒は水道水で 12L/min、戻り温度 25℃設定時
冷房：外気温 35℃ (DB), 24℃ (WB)、循環熱媒は水道水で 12L/min、行き温度 15℃設定時
なお、本研究で対象とした 2 物件とも、凍結防止のため循環熱媒はメーカー推奨品の
不凍液（エチレングリコール 50%希釈液）を使用。

表 2 本システムで用いた PCM 物性

		PCM(相変化23℃)	PCM(相変化32℃)
比熱 [kJ/kgK]	固相	1.9	1.9
	液相	2.9	2.9
密度 [kg/m ³]	固相	1200	1390
	液相	1200	1410
蓄熱量 [MJ/m ³]		106 (15～25℃)	252 (25～35℃)
熱伝導率 [W/mK]	固相	0.19	0.19
	液相	0.20	0.22

※ 蓄熱量は DSC より算出し、その他はカタログ値を参考にした

表 3 両物件の建物概要

	T 邸	B 邸
所在地	東京都練馬区	長野県長野市
次世代省エネ基準地域区分	Ⅳ地域	Ⅲ地域
Q 値(計算値／補正基準値)	2.42／2.89 [W/m ² K]	2.23／2.72 [W/m ² K]
構造	木造 2 階建	木造 2 階建
延床面積	86 [m ²]	73 [m ²]
居住人数・在宅状況	2 人／日中不在	2 人／日中在宅

図 3 T 邸 平面図

図 4 B 邸 平面図

※ 1 階はピロティ空間のため、床下は全て外気となっている。

し、和室の寝室では仕上材に床暖房用畳 $t=15\text{mm}$ （熱抵抗値は不明）を使用した。さらに、熱伝導率が低く熱が伝わりにくいと想定される根太上の仕上材にも熱を伝えるため、仕上材裏面全体に熱伝導率の高いアルミシートを施工した。

4-2. 設計時の PCM 蓄熱量の検討

ここでは熱容量を考慮せずに、計算 Q 値より想定された定常状態

の熱負荷を考えた。このとき、建物の暖房熱負荷 W は、

$$W = Q \times A \times (T_i - T_o) / 1000$$

であり、以下になる。

$$T \text{ 邸: } W = 3.16 \text{ kW}, B \text{ 邸: } W = 3.35 \text{ kW}$$

(外気温 T_o は、当該敷地における拡張アメダスデータ⁹⁾標準年の月平均値の最低値とし、T 邸では 1 月の 4.8℃、B 邸では 1 月の -0.6℃と設定した。 T_i は、定常時の室温として 20℃と仮定した。)

また、24 時間での暖房に必要な熱量 q は、

$$T \text{ 邸: } q = 273 \text{ MJ}, B \text{ 邸: } q = 290 \text{ MJ}$$

である。

次に、床暖房のみで暖房負荷をまかなう際の投入熱量を考える。計算に用いた検討モデル概要は、図 9,10 の通りである。

屋外配管等における熱損失を無視した場合、HP 熱源の供給熱量 W_{th} は、

$$W_{th} = W_{up} + W_{down}$$

であり、パネル配管層の温度 T_p 、放熱面積(A_1, A_2)とパネル上下の熱抵抗値 R_{up}, R_{down} 等から算出して上下放熱量が求まる。

また、室内投入熱量は、 W_{other} を補助暖房での熱量とすると、

$$W = W_{up} + W_{other}$$

であるが、床暖房のみの運転を仮定しているため、 $W_{other} = 0$ とすると、図 9,10 における配管層温度 T_p は、

$$T \text{ 邸: } T_p = 43.3^\circ\text{C}, B \text{ 邸: } T_p = 49.0^\circ\text{C}$$

となる。さらに、床表面温度 T_f を求めると、

$$T \text{ 邸: } T_f = 30.2^\circ\text{C}, B \text{ 邸: } T_f = 31.7^\circ\text{C}$$

である。ここで、両物件ともに床表面温度は低温やけどを起こさない上限温度である 30℃強となっていることから、これ以上の高温での温水利用は不要である。この際の HP 熱源供給熱量を計算すると、

$$T \text{ 邸: } W_{th} = 3.65 \text{ kW}, B \text{ 邸: } W_{th} = 3.44 \text{ kW}$$

となる。以上より、温水 HP は表 1 に仕様を示した機種を両物件とも 1 台ずつ使用し、床暖房利用に必要な能力に足るものと判断した。

最後に、両物件の PCM 配置を踏まえ、想定した日積算暖房負荷に対する PCM の熱容量を試算した結果を表 4 に示す。ここで、家具や内部仕上材等による蓄熱については、PCM による蓄熱に比べて少ないものとし、考慮には入れていない。深夜のみの運転で一日の暖房負荷をまかなうために、 C/q が 100%程度となることを設計時の目標としている。

T 邸では、PCM の蓄熱量 (25℃から 35℃の範囲で PCM が温度変化した際、各 PCM の顕熱・潜熱変化分の合計) は $C = 180 \text{ MJ}$ 、 $C/q = 65.9\%$ である。床冷房のために配管上側に熱容量の小さい相変化温度 23℃の PCM を使用したことで熱容量は小さいが、南面開口からの日射取得による暖房負荷低減のため実際には q がより小さくなるものと想定し、目標の 2/3 程度の熱容量とした。

B 邸では、敷地・建物形状による影響のために日射取得による暖房負荷低減効果は小さいものとし、上下共 32℃で相変化する PCM を主に使用することとし、 $C = 300 \text{ MJ}$ 、 $C/q = 100\%$ 程度とした。

5. 実測による本システムの評価

5-1. 両物件の測定概要

T 邸、B 邸ともに、2009 年春の竣工直後から、居住状態でのデータを測定した。表 5 に各測定における評価内容を示す。1 年目では、

図 5 T 邸 床暖房敷設範囲

図 6 B 邸 床暖房敷設範囲

図 7 T 邸 床パネル断面構成

図 8 B 邸 床パネル断面構成

図 9 T 邸 検討モデル

図 10 B 邸 検討モデル

両物件の長期測定結果により本システムの全暖房期間を通じた評価を行うとともに、運用上の改良点を挙げた。また、T 邸の短期測定計測により、床パネルの蓄放熱量を把握した。1 年目の長期測定結果に基づき、2 年目では熱源機の更新を行い、改善効果を評価した。

測定に当たっては、室温・床表面温度を測定することによる室内温熱環境の把握、温水行き戻り温度・循環流量・消費電力量を測定することによる温水 HP の性能把握、床内部温度を測定することによる PCM 温度変化の把握を行い、本システムの性能評価を行うこととした。各室温（図 3,4 を参照）・床表面温度・床内部温度・熱源周り（表 6）等、測定を行った。なお、床暖房以外の暖房設備として、両物件ともエアコンを 1 台ずつ備えており、消費電力量を測定した^{注 2)}。その他測定点は、既報^{10),11)}参照とする。

5-2. T 邸の長期測定結果（1 年目）

図 11 に、各月ごとの温水 HP の運転状況と室温等の日平均値を示す。温水 HP の温水行き温度は 35℃から 45℃程度、温水戻り温度は 30℃から 40℃での運用を行っていた。12 月中旬以降は、外気温の低下に加えて温水行き温度が 40℃台まで上がっており、消費電力量の増加、エネルギー消費効率 COP の低下が見られた。なお、 COP の算出にあたっては、1 分毎の温水 HP 供給熱量を消費電力量（2 次エネルギー）で除した値を使用した^{注 3)}。また、暖房期間を通じて、室温は 20℃前後、床表面温度は 30℃弱であった。

図 12 にて、図 11 の室温と床表面温度の関係を示す。室温が 23℃以上、あるいは 20℃以下となる時期には、床暖房時の推奨範囲¹²⁾に収まらなかったものの、実測期間を通して居住者からは寒い等の感想は得られず、概ね良好な室内環境を形成できていたものと判断できる。なお、4-2. において設計検討での想定日積算暖房エネルギー q は、273MJ/日となっていたが、実測期間を通じて、温水 HP による供給熱量は 90~150MJ/日であった。これは常に室温を 20℃に維持する想定としていたこと、日射取得を考慮しなかったことによる。

また図 13 に、温水 HP 運転時の外気温と COP の関係を示す。定格値の測定条件では温水戻り温度 25℃であったが、実運用では 30℃以上の温水戻り温度での運用となったために定格値に比べて COP が低下していた。

5-3. B 邸の長期測定結果（1 年目）

図 14 に示すように、12 月から 2 月に外気温が 0℃程度まで低下した。そのため、床暖房のみでの暖房時には温水行き温度 40℃以上の運転とし、深夜時間帯以外にも必要に応じて床暖房運転を行っていた。その結果、12 月以降は消費電力量が増加傾向にあった。一方、室温は 20℃を下回る傾向にあった。

このように、2010 年 2 月上旬まで床暖房運転を基本とし、極力エアコンを使用しない状態での運用を行なったところ、消費電力量が増大したため、2010 年 2 月中旬以降は温水 HP の温水戻り設定温度を 31~35℃に下げ、エアコンも併用することとした。

温水 HP はリモコンのタイマー予約にて、午前 4 時から 8 時までの起床時間帯と、夕方 16 時から夜 23 時までの、朝夕 2 回の運転を基本とした。エアコンは 20℃台前半の設定温度とし、居住者が必要に応じて運転・停止することとした。図 15 は図 14 の床温度と室温

表 4 PCM 蓄熱容量の検討結果

項目	単位	T 邸	B 邸
想定熱負荷 W	kW	3.16	3.35
想定日積算暖房エネルギー q	MJ	273	290
PCM蓄熱容量 C (25℃から35℃変化時)	MJ	180	300
C/q (熱負荷に対するPCM熱容量)	%	65.9	103.4
PCM敷設範囲	m ²	31.6	24.8
PCM総重量	ton	1.6	1.7

表 5 本研究における測定評価内容

実測スケジュール		評価項目
1年目	長期測定 2009年11月~2010年3月	T・B邸 室内環境、HP熱源運転状況、熱源エネルギー効率
	短期測定 2009年12月22日~2009年12月28日	T邸 床上放熱量の把握、床表面温度分布
2年目	長期測定 2010年11月~2011年3月	T・B邸 室内環境、HP熱源運転状況、熱源エネルギー効率 (熱源更新の効果を評価)

表 6 熱源周り測定点

測定項目	測定点数	使用センサー	データ記録間隔
HP温水熱源 温水行き・戻り温度	各1点	シーエス熱電対(T型)	2秒
HP温水熱源 室外機 吸出・吹出温度	各1点	熱電対(T型)	
各系統 温水行き・戻り温度	各1点ずつ	シーエス熱電対(T型)	
各系統 温水循環流量	各1点	キーエンス社製 FD-M10AY(T邸) 愛知時計社製 ND10-N(B邸)	
温水HP熱源機・エアコン 消費電力量	各1点	三菱電機社製 UPM100

図 11 T 邸 1 年目の温水 HP 運転状況と室温・床表面温度

図 12 T 邸 1 年目 床温度・室温

図 13 T 邸 1 年目 外気温・COP

の関係を示しているが、室温については床暖房時の推奨温度を満たしていなかった。一方で、床表面温度は推奨範囲である 24℃以上を確保されていた。なお、居住者からは、快適性に関する不満は特に申告されなかった。また、図 14 より暖房負荷は 100~180MJ 程度^{注 4)}であり、設計検討時の想定と比較し、1/3~2/3 程度となった。これは T 邸と同様に、実現室温が想定室温よりも低くなったこと、実際には日射取得があることなどが原因である。

図 16 では、2009 年 11 月から 2010 年 2 月上旬までの「温水 HP 床暖房のみ」での運用と、2010 年 2 月中旬以降に「温水 HP 床暖房とエアコン併用」にて運用した際の、それぞれの日平均消費電力量（温水 HP とエアコンの合計値）の比較を示している。床暖房とエアコンを併用した場合、床暖房のみと比較して 1/2 程度の消費電力量での運用が可能となった。これは、床暖房のみで運用した際には、暖房負荷をまかなうために、温水行き温度 40℃以上の高温送水となり温水 HP の効率が低下し、消費電力が増大したことによる。これに対して、温水 HP の設定温度を下げた適度に足元を暖めつつ、エアコンを併用することで、省エネルギーな運用が可能となることが示された。

図 14 B 邸 1 年目の温水 HP 運転状況と室温・床表面温度

図 15 B 邸 1 年目床温度・室温

図 16 B 邸外気温・消費電力量

5-4. T 邸 1 年目の短期測定による室内放熱量の把握

5-4-1. 短期測定概要

床パネルからの放熱状況を把握するため、2009 年 12 月 22 日から 12 月 28 日まで、居室の床面に 31cm 角の熱流センサを設置（設置位置は図 3 参照）し、床面から室内への放熱量の測定を行った。設置当日の夜から温水 HP の温水戻り設定温度を 2 日毎に変更しながら合計 6 日分のデータを取得した。表 7 に示したとおり、短期測定を開始した 12 月 22 日以降は、2 日ずつ温水戻り温度設定を変更し、毎晩 23 時から翌朝 7 時までの間、深夜電力による床暖房運転を行った。なお、短期測定前は、1 週間以上連続して温水戻り温度を 38℃設定とし、深夜運転のみとした。また、各日とも「補助暖房なし」・「日射取得なし（終日ブラインド締め切り）」とした。

表 7 T 邸短期実測期間の HP 運転スケジュール

HP運転時間帯	温水戻り温度設定値
12月22日 23:00~12月23日 7:00	38℃
○ 12月23日 23:00~12月24日 7:00	
12月24日 23:00~12月25日 7:00	35℃
○ 12月25日 23:00~12月26日 7:00	
12月26日 23:00~12月27日 7:00	31℃
○ 12月27日 23:00~12月28日 7:00	

※ ○印を評価対象とした

5-4-2. 短期測定期間の実現温熱環境

図 17 に各日運転状況を示す。温水戻り温度設定を変更した直後の運転では、その翌日の運転と比べて消費電力量が少なくなる傾向があった。前日に高い設定温度で運転した際には、PCM の蓄熱が翌日の運転開始まで相当量繰り越されるものと判断し、以降では設定温度を変更した翌日のデータを解析した。

図 17 T 邸短期実測期間の運転状況

図 18~20 に、各設定温度での運用時の時系列グラフを示す。温水 HP の挙動に関しては、図 19,20 から立ち上がり時に温水行き温度が高い状態で 1~2 時間程度運転されていた。また、各条件ともに 5 時以降には温水戻り温度は設定温度に到達していたことがわかる。本来想定していた運転では、深夜での蓄熱運転のため立ち上がり時に高温での送水は不要であることが課題として挙げられた。

PCM 温度については、いずれの設定温度の場合にも、運転停止中の午後に 30℃弱で長時間安定する傾向が見られた。これは、潜熱蓄熱による効果とともに、昼間の外気温上昇によって室温が上昇し、床から室内への放熱が抑制されたためである。また、室温については、夜間に内部発熱の影響で温度が上昇していた場合もあったが、

図 18 2009 年 12 月 23 日 23:00 より温水戻り温度 38℃設定

図 19 2009 年 12 月 25 日 23:00 より温水戻り温度 35℃設定

図 20 2009 年 12 月 27 日 23:00 より温水戻り温度 31℃設定

図 21 短期測定時の床表面温度と室温 (30 分毎にプロット)

一日を通して日較差が小さく、非常に安定した温度変動となった。

図 21 において、30 分毎に床表面温度と室温をプロットしたグラフを示す。温水戻り温度 38℃設定時は、深夜の平均気温が 5℃を下回る寒い日であった。そのため、運転開始時から翌朝の停止時まで床温度は上昇し続けたが、室温は下がり続け推奨範囲の枠外となった。なお、日中の運転停止時には外気温の上昇とともに室温も上昇し、推奨範囲に収まっていた時間帯もあった。温水戻り温度 35℃設定時には、床暖房運転時も日中の停止時も、床暖房時の室温と床表面温度の推奨範囲に収まっていた時間が長かった。温水戻り温度 31℃設定時は、床表面温度は推奨範囲の下限値の 24℃を下回っていることが多く室温も比較的低かったが、日中に外気温が上昇した際には床表面温度が 22℃強で維持されていた。この際、PCM 温度は 25℃程度であったことから、相変化温度 32℃の PCM の大部分が固相、23℃の PCM は大部分が液相であったと推定され、潜熱利用が十分でなかった可能性がある。以上より、B 邸と同様に外気温が低く暖房負荷が大きい日や、温水戻り温度 30℃程度での運用では、暖房負荷をエアコン等の他暖房機器にも分担させることが必要といえる。

次に図 22 にて、温水 HP 供給熱量、測定された時間帯別 (23 時～翌日 7 時、翌日 7 時～23 時) の床上放熱量、これらの差分から推定された未放熱量 (放熱ロスと、床上に放熱しきれず床内に残った熱量の合計) の割合を示す。一日を通じた放熱率 (温水 HP 供給熱量に対する、床上放熱量の割合) は、70%前後であり、深夜の放熱量と日中の放熱量は、各設定温度において同程度であった。日中の運転停止時にも、蓄熱した床パネルからの放熱による暖房効果があったといえる。三浦らの研究⁷⁾では、ガス温水熱源機・配管断熱有・高断熱住宅における定常時の放熱率は、外気温 5℃以下の条件で 75～80%程度であった。昼間の放熱時に、PCM に蓄熱した熱の床下等への損失があることを考えると、本システムでは、床下の断熱強化、薄く熱伝導率の高い仕上材、屋外配管への断熱を採用したことによって、床下・配管等での放熱ロスが抑えられているといえる。

図 22 温水 HP 供給熱量と時間帯別床上放熱量

図 23 1 階寝室 (東側) の熱画像 (2009 年 12 月 25 日)

図 23 に 2009 年 12 月 25 日の熱画像による床温度分布を示す。7 時の温水 HP 停止後から 23 時まで床面は他の部位よりも高温に維持されていた。なお、PCM バック直上部に比べ、バックが途切れている部位、熱伝導率が低い木根太の上の仕上材表面では最大で 5℃程度低くなっており、温度むらの点から木造住宅において実装可能な軽く熱が伝わりやすいパネル構成の更なる改良の余地がある。

5-5. 熱源器の更新による改善効果 (2 年目)

5-5-1. 熱源周りの改善点

1 年目において、本システムの実運用での評価を行った結果、ある程度の蓄熱暖房効果が認められ快適性も確保されていたが、立ち上がりの熱源出力等については課題があった。そこで、2010 年 11 月～2011 年 3 月の 2 年目の実測にあたって、製造メーカーの協力の下、温水 HP の制御基盤およびリモコンを市販の最新機種に更新した。以下の 3 点について改良点があったため、これらの改良・改善点について評価を行なった。

- ① 温水戻り温度の設定方法変更 (2 段階の温度設定が可能となることで、立ち上がり時の高出力運転を防ぐ)
- ② 外気温が低温条件下での効率改善
- ③ 部分負荷効率の改善

なお、②、③の改善については、往き温度に応じて熱源機圧縮機からの冷媒吐出温度制御を最適化^{注 6}することで実現されている。

本論文では、①、②について、以下に実測結果を報告する。

5-5-2. 運転時における段階的な出力制御による運用改善

1 年目の実測結果より、5-4-2. に示したように、蓄熱開始の立ち上がり時に高出力運転となることが判明した。そこで 2 年目は両物件ともに、①に示した変更により、立ち上がり時の出力を抑えつつ、段階的に設定温度を上げることで蓄熱完了時に PCM 温度を相変化温度域まで温めることが可能な運転とした。図 24 に両物件での温水戻り温度設定の変更内容を挙げる。T 邸では運転開始の 23 時から 3 時まで温水戻り温度設定 30℃で予熱を行った後、運転停止する 7 時まで温水戻り温度を 35℃設定とした。B 邸についても、1 年目の使用時間を鑑みて、段階的に設定温度を上げた。

図 24 両物件での温水戻り温度の設定方法 (実線は運転時間帯)

この改善効果として、まず図 25 に T 邸における 2 年目の居住状態での運用状況を示す。2 月にかけて温水往き・戻り温度の上昇が

見られたが、その他の時期には温水往き温度 35～40℃程度、温水戻り温度 30～35℃程度での運用となっていた。

図 26 において、図 25 の床表面温度と室温の関係を示す。日平均室温は 19℃以上を維持できたものの、温水戻り温度の設定値を下げたために床表面温度が 1 年目よりも低下しており、推奨範囲⁽¹²⁾から外れる時期もあった。また、消費電力の日平均値を比較した図 27 において、1 年目よりも 2 年目のグラフの傾きが緩やかになっていることから、2 年目に温水戻り温度の設定方法変更により、消費電力が小さく抑えられたことが確認された。なお、1 年目は午前 8 時までの運転であったのに対して、2 年目は午前 7 時までの運転であったために、消費電力量を運転時間で除した平均消費電力の日平均値を用いた。

※1 月下旬は 1 階のみ送水としたため、床温度が低く、消費電力量・供給熱量が小さい

図 25 T 邸 2 年目の温水 HP 運転状況と室温・床表面温度

図 26 T 邸 2 年目 床表面温度・室温 図 27 T 邸 外気温・消費電力

次に、B 邸における 2 年目の運用状況を図 28 に示す。1 年目と比較して、冬期を通して温水往き・戻り温度が 30℃台で安定していたこと、エアコンの併用を積極的に行ったことによるエアコンの暖房

負荷分担分の増加が見られた。図 29 では、1 年目の図 15 と比較して、床表面温度が低くなっている傾向があったが、居住者からは快適感に関しての不満は申告されなかった。また、図 30 では、1 年目の床暖房・エアコン併用時と比較して消費電力量の削減は見られなかった。これは、1 年目のエアコン併用時には温水戻り温度を常に 30℃ 程度と低く設定していたこと、2 年目は外気温が低い日が多く、温水 HP を連続運転する日があったことによる。

図 28 B 邸 2 年目の温水 HP 運転状況と室温・床表面温度

図 29 B 邸 2 年目 床温度・室温

図 30 B 邸 外気温・消費電力量

5-5-3. 外気温が低温条件下での HP 熱源効率改善

②の改善内容として、1 年目と 2 年目の両物件における温水 HP 運転時の COP を図 31 に示す。ここでは、図 11,14,25,28 にて示した、各期間の外気温と COP の日平均値を用いた。

両物件ともに、2 年目のグラフの傾きは 1 年目よりも小さくなっているものの、切片が大きくなり、冬期の外気温が低い条件下では、全体的に基盤交換後の 2 年目に COP が向上する傾向であった。なお、B 邸においては、夕方等の外気温が高い時間帯での運転や長時

間連続運転による低負荷時に、頻繁に熱動弁が開閉して断続運転となったため、T 邸と比較して効率が低下したものと推測される。

次報にて、③の部分負荷効率の改善効果やその他の熱源特性についても、更なる分析を行なう予定である。

図 31 1 年目・2 年目の温水 HP エネルギー消費効率 COP 比較

6. まとめ

本研究では、温水 HP と PCM 利用潜熱蓄熱式パネルを組み合わせた床暖房システムを考案し、2 軒の木造戸建住宅において設計段階における検討および居住後のシステム評価を行なった。設計段階では、暖房負荷と熱源機の能力および床パネルの想定温度・PCM 蓄熱容量について簡易な検討を行ない、仕様を決定した。また、竣工後の実測から、以下の知見を得た。

・1 年目（2009 年 11 月～2010 年 3 月）の実測結果

- ① T 邸においては、本システムで想定した深夜電力利用のみで、一日中安定した室内環境を形成していた。
- ② 外気温が低く暖房負荷が大きい B 邸においては、温水 HP 床暖房だけでなくエアコンを適切に併用することで、快適性を確保しつつ消費エネルギー量の少ない運用が可能であった。
- ③ T 邸での短期測定により、温水 HP が停止している日中にも蓄熱した床パネルからの放熱が十分量あり、本システムの妥当性を確認した。

・2 年目（2010 年 11 月～2011 年 3 月）の実測結果

2 年目の熱源機更新により、以下の改善効果が認められた。

- ④ 温水戻り温度の設定値を段階的に上げる運転とした結果、T 邸においては 1 年目より省エネルギーな運転となった。一方、B 邸においては 1 年目の 2 月以降に 30℃ 程度の低温での設定としていたために、消費電力量の削減は見られなかった。
- ⑤ 両物件ともに、熱源機の制御基盤の更新により、外気温が低温条件下での HP 熱源のエネルギー消費効率向上が認められた。

実測結果より、本システムの実運用における温熱環境およびエネルギー消費量は把握できたものの、本論文では補助暖房の扱いや窓からの日射取得に関する考察は十分に示せていない。次報では、温水 HP について、本報で示していない実測データにより詳細な機器特性の把握を行う。また、床パネルの構成の検討・PCM による蓄熱効果の更なる定量的な把握を行い、温水 HP と床パネルとの組み合わせを考慮した最適な運用方法について検証予定である。

謝辞

本研究の実施にあたって、実測にご協力いただいた居住者の皆様、両住宅の設計者の皆様、メーカー・施工業者様には、甚大なるご協力を賜りました。感謝の意をこめて、ここに記させていただきます。

本研究は、国土交通省 住宅・建築関連先導技術開発助成事業採択課題「ヒートポンプと日射利用による快適性の高い省エネ型蓄熱式床暖房の研究開発」（H20～H22 年度。東京電力株式会社、株式会社建築環境ソリューションズと協同）における研究開発事業の一環として行われた。

注

注 1) 4 章にて用いた記号について、以下に記号一覧を示す。

Q : 計算 Q 値 [W/m² K]

A : 延床面積 [m²]

T_i : 室温 [°C]

T_o : 外気温 [°C]

W : 想定熱負荷 [W]

q : 想定日積算暖房エネルギー [MJ]

T_c : 床下空気温度 [°C]

W_{th} : HP 製造熱量 [W]

W_{up} : 室内投入熱量 [W]

W_{down} : 外気に接する床からの下面放熱量 [W]

R_{up1}, R_{up2} : 1 階, 2 階配管から床上空気までの熱抵抗 [m² K/W]

R_{down1}, R_{down2} : 1 階, 2 階配管から床下空気までの熱抵抗 [m² K/W]

T_p : 配管層温度 [°C]

T_f : 床表面温度 [°C]

A_1, A_2 : 1 階, 2 階の放熱面積 [m²]

W_{other} : 補助暖房による投入熱量 [W]

C : PCM 蓄熱容量

注 2) B 邸のエアコンは、屋外機が温水 HP とは別のルームエアコンであり、定格冷房能力 4kW、定格暖房能力 5kW のものを 1 台使用している。また、T 邸は 2009 年 12 月にエアコン設置工事を行なったが、主に冷房用として使用しており、本論文ではエアコン不使用日データを用いた。

注 3) COP については、デフロスト（除霜）運転に入った際のデータを除いた上で、1 分ごとに算出している。 COP の算出は、以下の通りとした。
 $COP = \text{循環流量} \times \text{循環液比熱} \times (\text{温水行き温度} - \text{温水戻り温度})$

注 4) エアコンの室内供給熱量に関しては測定を行っていないが、ここでは供給熱量の目安として、 $COP = 3.5$ と仮定し、エアコン消費電力量に乗ずることで算出した。

注 5) 1 年目の基盤において、圧縮機からの冷媒吐出温度を目標温度 70°C として制御していた。2 年目に使用した基盤では、温水行き温度に応じて、冷媒吐出温度が異なる目標温度となる制御に変更された。

参考文献

- 1) 細井昭憲 他: 実測に基づくルームエアコンディショナの COP 算出方法
ルームエアコンディショナの冷暖房 COP およびエネルギー消費量に関する研究 その 2, 日本建築学会環境系論文集, Vol.75, No.654, pp.741-747, 2010.8
- 2) 田辺新一・倉淵隆・秋元孝之+BL 暖房委員会: 床暖房読本, 風土社, 2009
- 3) 大森敏明 他: 建物の断熱性能と暖房方式が室内温熱環境と室内投入熱量に与える影響, 日本建築学会環境系論文集, Vol.76, No.661, pp.231-238, 2011.3
- 4) 倉淵隆 他: 換気負荷のある居室での床暖房時や温風暖房時における温熱・気流環境と温熱環境評価および室内投入熱量の空間分布, 日本建築学会環境系論文集, Vol.76, No.661, pp.317-324, 2011.3
- 5) 三浦尚志 他: 定常状態における温水床暖房のエネルギー消費量の推定法, 日本建築学会環境系論文集, Vol.73, No.626, pp.487-494, 2008.4
- 6) 清水則夫: 床暖房システムの放熱量に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, No.516, pp.61-68, 1999.2

- 7) 床暖房設計・施工マニュアル編集委員会編: 床暖房設計・施工マニュアル, オーム社, 2005
- 8) 財団法人 建築環境・省エネルギー機構: 住宅の省エネルギー基準の解説 第 3 版, 2010
- 9) 日本建築学会: 拡張アメダス気象データ 1981-2000, 2005
- 10) 洪田周平 他: ヒートポンプと日射利用による快適性の高い省エネ型蓄熱式床暖房の研究開発 その 6 潜熱蓄熱式床暖房システムを用いた住宅における測定概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (D-2), pp.1097-1098, 2010
- 11) 高瀬幸造 他: ヒートポンプと日射利用による快適性の高い省エネ型蓄熱式床暖房の研究開発 第 7 報 潜熱蓄熱式床暖房システムを用いた住宅における実測結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (D-2), pp.1099-1100, 2010
- 12) 床暖房のアメニティ評価に関する研究委員会: 床暖房のアメニティ評価に関する研究報告書, 空気調和・衛生工学会, 1994.9

(2011 年 6 月 10 日原稿受理, 2011 年 12 月 9 日採用決定)