

PVT・ヒートポンプ暖冷房換気給湯システムによる住宅のエネルギー自立性向上 に関する研究

冬期床下暖房時の省エネ性および快適性向上のための検討

Research on Improving the Energy Independence of Houses by Using Air-Conditioning and Hot-Water Supplying System Utilizing PVT Air Collector & Heat Pump for Houses Examination for Improving Energy Saving and Comfort in case of Using Underfloor Heating in Winter

学生会員 ○石倉 侃介 (東京理科大学) 正会員 高瀬 幸造 (東京理科大学)
正会員 前 真之 (東京大学) 正会員 盧 炫佑 (OM ソーラー)

Kansuke ISHIKURA*¹ Kozo TAKASE*¹ Masayuki MAE*² Hyunwoo ROH*³

*¹ Tokyo Univ. of Science *² The Univ. of Tokyo *³ OM Solar

This study shows about PVT air collector and heat pump system for domestic air conditioning ventilation and hot water supply in houses. The authors studied the design method of air conditioning in order to improve the indoor comfortable environment. This article shows examination for improving energy saving and comfort in case of using underfloor heating in winter.

1. はじめに

2050年カーボンニュートラルの実現にむけ、住宅分野において大幅な省CO₂化、省エネルギーが求められている。このCO₂削減目標を達成するには、断熱性能の向上や高効率設備の使用に加えて、太陽熱利用・太陽光発電といった再生可能エネルギーの十分な活用が望まれる。そうした中で、年間の一次エネルギー消費量収支がゼロになるZEHが普及してきた。しかし、冬期においては、多くの時間で太陽光パネルによる発電量より消費量が上回ってしまうという課題がある。また、冬期の住宅内におけるヒートショックが原因と考えられる事故が増加しているなど、単なる省エネ性能向上だけではなく、健康かつ快適な居住環境実現の両立が求められている。

こうした背景を踏まえ、本研究では、給湯・暖房負荷の削減が期待される、また部屋間温度差の少ないPVT・ヒートポンプ(以下、HP)暖冷房換気給湯システム(以下、本システム)の検討を行った。本システムは冬期に床下も利用した暖房を行うが、床下暖房における温風経路に関する明確な設計法は定められていない。そこで本研究では、床下温風経路計画に関する指針の提案を行うために、床下ダクト・基礎立上りに関する検討を行った。

2. システム概要

図1に本システム概要、表1に本体システム能力概要を示す。本システムは全館空調システムの1つであり、屋根面に設置されたPVTで太陽光発電及び太陽熱集熱・夜間放射冷却を利用しながら、1台のHPによる暖冷房を

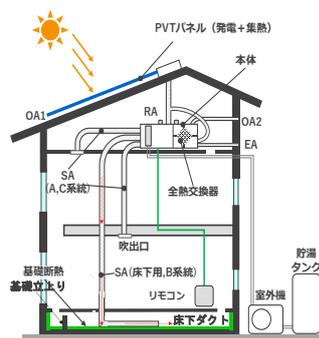


図1: 本システム概要

表1: 本体システム能力

定格冷房能力[kW]	4.0
定格冷房消費電力[kW]	1.115
エネルギー消費効率	3.59
定格暖房能力[kW]	4.0
定格冷房標準消費効率[kW]	0.905
定格暖房低温能力	4.70
定格暖房低温消費電力[kW]	1.700
エネルギー消費効率	4.00
定格換気風量[m ³ /h]	200
定格消費電力[W]	65
温度交換効率[%](夏期/冬期)	80/90
全熱交換効率[%](夏期/冬期)	75/85
タンク容量[L]	370
冬期高温消費電力[kW]	1.35
中間期標準消費電力[kW]	1.06

表2: 対象物件概要

	No.1		No.2	
所在地	東京都町田市		静岡県富士市	
地域区分	6地域 A3 H4		6地域 A3 H5	
床面積	1階	60.8	1階	57.95
(m ² , 2階は吹抜け面積含まない)	2階	50	2階	51.34
外皮表面積(m ²)	315.5		315.2	
q値(W/K)	146.5		132.1	
U _A 値(W/m ² K)	0.47		0.42	
ηAC値	1.2		1.4	
家族構成	夫婦2人+子供1人		夫婦2人+子供2人	
太陽光パネル発電容量	5.8kW		5.8kW	

行う。給湯も一体化しており、冷房時の排熱や余熱集熱を給湯に使用する。また、本体に第一種全熱交換換気機能を内蔵しており、各居室に換気口を設けず、24時間換気が可能である。小屋裏に本体を設置し、外部から取り込んだ空気を本体内の熱交換器で加熱または冷却し、吹出口系統からダクトを通じてA・B・C系統の3つの送風ファン(A・C系統は暖冷房兼用、B系統は床下暖房時のみ使用)

によって各室内空間に供給され、階段や吹抜けを通り本体へ戻り、住戸全体を循環する。各ファンの回転数を個別に制御することはできるが、吹出口ごとの風量を制御することができない定風量型方式で、主居室のメインリモコンに内蔵されたセンサで計測した居室温度を基に吹出口温度を制御するシステムである。

2-1 暖房期の運転モード

暖房期は、主にBシステムを使用し、床下に暖気を送り床スリットから室内に吹き出す。晴天時は、PVTによる太陽集熱により暖房を行い、集熱量が不足する場合はHPで補う。夜間・曇天時はHP暖房を行う。また、HP暖房とHP給湯沸き上げを同時に併用することは出来ない。

3. 冬期実測概要

3-1 物件概要

冬期暖房時の温熱環境の実態把握のため、冬期実測調査を行った。2019年1月以降に施工した新築戸建て住宅で、本システムを搭載した物件のうち、床下横引きダクトの改修が行われた物件(No.1)と床下横引きダクトがなく基礎立上りの多い物件(No.2)の2物件を対象とした。対象物件概要は表2に示す。いずれも、省エネルギー地域区分の6地域に位置し、2階建て吹抜け型である。断熱性能は、HEAT20が定めるG2グレードの高断熱高気密住宅で、屋根には発電容量が5.8kWの太陽光パネルを搭載しており、家電分の消費電力を含めた年間のネット・ゼロ・エネルギーを目標に設計されている。

3-2 実測概要

本研究では、空間の温度ムラや熱損失などを評価するため、無線式温湿度ロガーや熱流センサを用いて各物件の必要箇所に計測器を設置し詳細実測を行った。No.1、No.2の計測点概要を図2~図5に示す。記録間隔は1分とする。また、システムの設定室温・運転モードは、国土交通省「サステナブル建物先導建物等先導事業(省CO2先導型)」の一環として計測された本システム搭載住宅のHEMSデータを扱った。表3にHEMSデータ概要を示す。

3-3 風量計測概要

本システム搭載住宅の各室の熱負荷を処理できるだけの風量が出ているか確認するため、通常の使用時を想定した条件のもと、各室の吹出口風量計測を行った。

4. 床下横引きダクトを考慮した検討(対象物件No.1)

4-1 実測結果

2020年1月2月において、A・B・C系統ダクトを併用し居室温度の高い2/26を代表日とする。2020/2/26の実測の結果を図6~図8に示す。一日中、部屋間や時間による温度差が小さいことが確認できる。また、床下ダクト吹出口温度の高い7・21時台では、書斎のスリット温度が他の床スリット温度に比べ、低くなることを確認できた。理由として、書斎の床スリット①が床下横引きダクト吹出

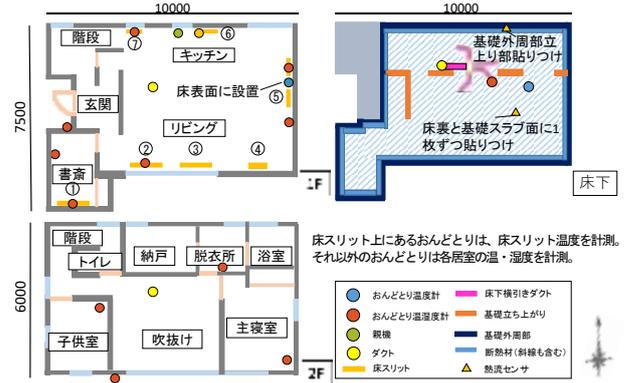


図2：平面図計測点概要(No.1)

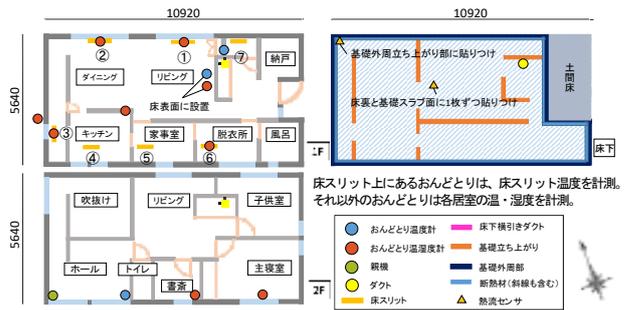


図3：平面図計測点概要(No.2)



図4：断面図計測点概要(No.1)



図5：断面図計測点概要(No.2)

表3：HEMSデータ概要

記録間隔	10分
主な計測内容 (その他約190項目)	リモコン室内温度(リビング室温)・外気温
	OA,SA,RA温湿度・設定温度
	運転状態(例：HP冷房、太陽熱+HP暖房など)
	システム消費電力、買電量・売電量・発電量

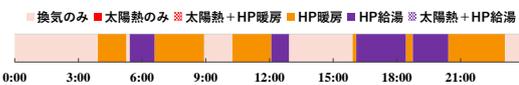


図6：運転モード(No.1)

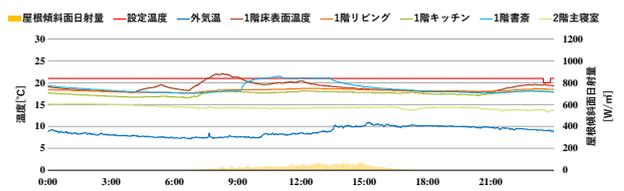


図7：日射量・各温度(No.1)

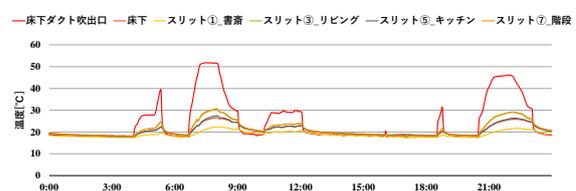


図8：スリット温度・各温度(No.1)

口から最も距離が遠いため、暖気が届きにくいからと考えられる。

4-2 冬期風量実測結果

床下の吹出口から離れている書斎と階段下の床スリット①・⑦の吹出風量がほかの床スリットにくらべ、20 m³/h程度小さいことが確認できた(図9)。

4-3 シミュレーション概要

実測結果から書斎の床スリット①の吹出温度・風量ともに小さいことが分かった。そこで対象物件 No.1 では2021年3月に床下横引きダクトが書斎方向に延長された。改修後の冬期実測データはまだ取得できていないため、居室空間の温熱環境がどのように改善されるか、CFD上の結果を示し、そこから床下温風経路計画に関する指針の提案を行う。改修後の床下空間平面図と延長ダクトの仕様を図10に示す。

本検討では改善効果をはっきりと示すため、代表日において、床下ダクト吹出口温度の最も高まる7:30を解析対象日時とし、定常計算を行った。解析条件は表4に示す。また、放射伝熱も考慮に入れるため、放射解析を行った。境界条件は表5に示す。土壌温度設定は、本検討の解析とは別に縦100m×横100m×高さ10mの土壌の側面と底面を標準年拡張アメダス2010年版の年平均気温、地表面を解析日時の外気温を設定し、解析を行った。そこから中央部を取り出し、本検討の解析領域内における土壌温度設定とした。

また、本研究における実態把握をする上で、整合性の検証を行う。整合性検証用のデータとして、各床スリット風量・室温・床スリット温度の実測データを用いた。実測結果と解析結果の比較を図11、表6に示す。解析結果の室温は部屋全体の平均温度である。

実測データと解析結果の最大の差は、風量比において9%、温度差において床スリット⑦で12.3℃となった。温度差が大きくなった原因として1、2Fからの排水配管が集中して床スリット⑦の周辺を通っており、吹出気流に干渉し実測値が低くなったが、解析ではこれらを反映できていないことが原因と考えられ、今後の検討を要す。また、1F居室空間における温度差は4℃程度に収まることが確認できた。今回は、検討上十分な精度であると判断し、以後のCFD解析において、このモデルを採用した。

4-4 シミュレーション結果

改修前・後の温度分布を図12・13、温度差を表7に示す。改修後、書斎方向にも暖気が届いていると確認できた。また改修前に比べ改修後では、書斎の床スリット温度は6.6℃上昇し、書斎全体の平均温度は1.5℃上昇している。また、改修前はリビングと書斎の温度差は1.5℃あるのに対し、改修後は温度差が0.7℃となり、部屋間温度差が減少し温熱快適性が向上していると確認できた。

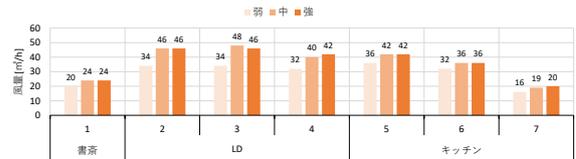


図9：各スリット風量 (No.1)

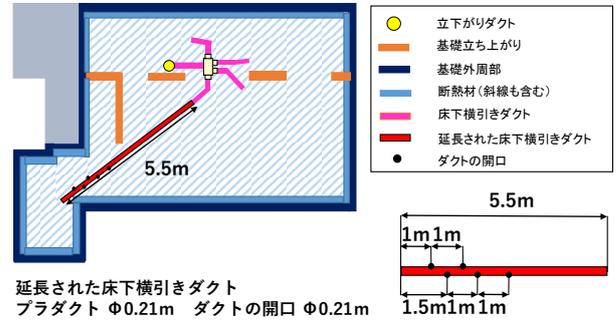


図10：改修後の床下平面図と延長ダクト仕様 (No.1)

表4：解析条件 (No.1)

解析ソフト	FlowDesigner2021
解析内容	温度・速度、対流・放射連成解析
乱流モデル	標準k-εモデル
解析領域	16m×14m×8m
メッシュ数	約3000万メッシュ
内部発熱	853W
収束判定	(定常)1×10 ^{-3.5}
解析対象日時	2020/2/26 AM7:30
外気温	7.5℃ (解析対象日時の実測データ)
流入条件	床下ダクト吹出口
流出条件	RA吸込口

表5：境界条件 (No.1)

部材	プロパティ			
	パネル種類	U値(W/m²・K)	λ(W/m・K)	疑似厚み(m)
天井	形状モデル	0.2	0.06	0.29
外壁	形状モデル	0.36	0.06	0.16
床/基礎	形状モデル	0.48	0.06	0.12
外気に接する床	形状モデル	0.25	0.06	0.23
玄関	形状モデル	0.95	0.06	0.05
屋根	形状モデル	0.25	0.06	0.23
窓	形状モデル	1.51	0.0141	各窓ごとに設定

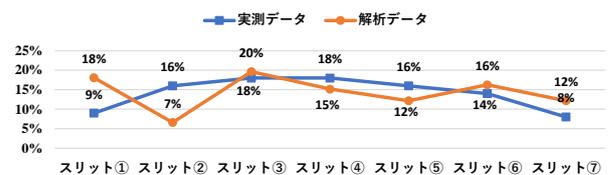


図11：全体の風量に対する各スリット風量比 (No.1)

表6：実測データと解析結果の温度差 (No.1)

	床下	床表面温度	1F_リビング	1F_書斎
実測データ	25.5	20.9	18	17.8
解析結果	27	22	21.5	20.0
温度差	-1.5	-1.1	-3.5	-2.2
実測データ	スリット①_書斎	スリット③_リビング	スリット⑤_キッチン	スリット⑦_階段
実測データ	21.4	29.4	26	28.9
解析結果	19.3	29.6	37.0	41.2
温度差	2.1	-0.2	-11.0	-12.3

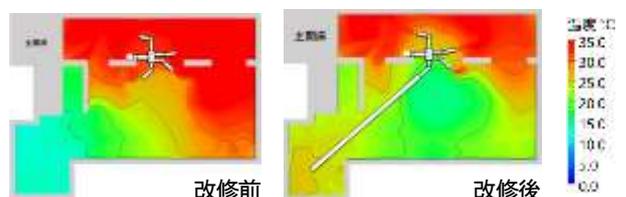


図12：改修前・後の床下温度分布比較 (GL+0.2m, No.1)

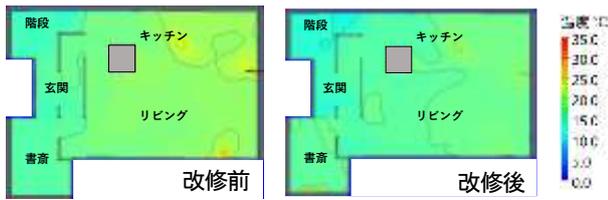


図 13 : 改修前・後の温度分布比較 (1FL+1.1m, No. 1)

表 7 : 改修前・改修後の部屋全体の平均温度比較

	床下	床表面温度	1F_リビング	1F_書斎
改修前モデル	27	22	21.5	20.0
改修後モデル	30.5	22.3	20.8	21.5
	2F_主寝室	スリット①_書斎	スリット②_リビング	スリット③_リビング
改修前モデル	18.7	19.3	25.3	29.6
改修後モデル	17.9	25.9	25.6	28.5
	スリット④_リビング	スリット⑤_キッチン	スリット⑥_キッチン	スリット⑦_階段
改修前モデル	34.3	37.0	39.3	41.2
改修後モデル	36.0	33.4	38.6	40.8

5. 基礎立上り位置を考慮した検討 (対象物件 No. 2)

5-1 実測結果

2020年1月～2月の実測期間において、最低外気温を記録した2月10日を代表日とした。代表日の実測結果を図11～図13に示す。主居室のリビングにおいて、設定温度の25°Cで保たれると確認できた。また、室温温度差が小さく快適性が保たれていることが確認できる。また、床スリット②・③の温度が他のスリット温度に比べ、低くなることが確認できた。理由として、床スリット②・③周辺に基礎立上りがあり暖気が届きにくいことが考えられる。

5-2 シミュレーション概要

床スリット②への暖気が該当箇所の基礎立上り (図17参照) によって止められていると予想される。また、該当箇所の上部1・2階に壁がないため、構造的に必要性が低く、該当箇所は束で代用可能と考えた。そこで立下がりダクト吹出風量・温度が同じ条件で、現状モデルと基礎立上りを束で代用したモデル (以下、改善提案モデル) で解析を行い、居室への熱量・床下熱損失を比較し、省エネ性の検討を行った。

解析対象日時は、B系統のみを使用し、外気温・床下ダクト吹出口温度・各室温が安定している2020年2月7日午前3時の実測データに基づき、定常解析を行った。放射伝熱も考慮に入れるため、放射解析を行った。解析条件は表8、境界条件は表9に示す。土壌温度は、4章と同様の設定である。

5-3 シミュレーション結果

解析結果を図17、図18に示す。図17では、床スリット②まで暖気が十分に到達しているとわかる。また図18より、該当箇所の基礎立上りを無くすことで居室空間への熱量が増え、7%程度の暖房能力向上が可能であった。

6. 総括

PVT・ヒートポンプ暖冷房換気給湯システムを搭載した住宅における冬季床下暖房時の省エネ性および快適性向上のための検討を行った。4章では、実測物件No.1において床下横引きダクトの検討を行った結果、床下横引きダクト吹出口から距離の離れた床スリットにダクトを

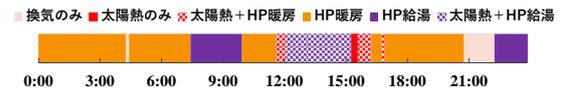


図 14 : 運転モード (No. 2)

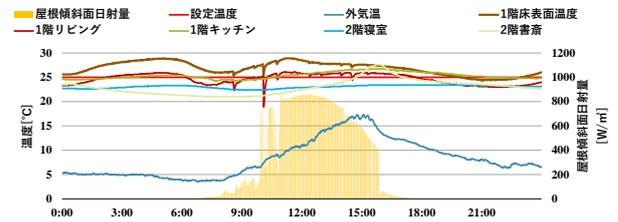


図 15 : 日射量・各温度 (No. 2)

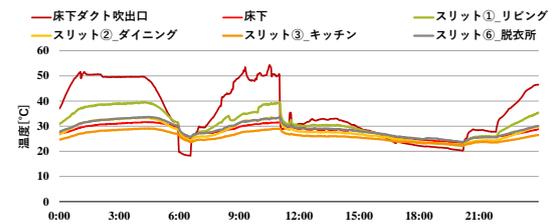


図 16 : スリット温度・各温度 (No. 2)

表 8 : 解析条件 (No. 2)

解析ソフト		FlowDesigner2021
解析内容	温度・速度・対流・放射連成解析	
乱流モデル	標準k-εモデル	
解析領域	16m×14m×8m	
メッシュ数	約3000万メッシュ	
内部発熱	853W	
収束判定	(定常)1×10 ⁻³	
解析対象日時	2020/2/26 AM7:30	
外気温	7.5°C (解析対象日時の実測データ)	
流入条件	立下がりダクト吹出口	326m ³ /h (OMX本体のSA風量、HEMSデータ)
流出条件	RA吸込口	51.8°C (解析対象日時のおんどりデータ)
		326m ³ /h

表 9 : 境界条件 (No. 2)

部材	パネル種類	プロパティ		疑似厚み
		U値(W/m ² ・k)	λ(W/m・k)	
天井	形状モデル	0.29	0.12	0.4m
外壁	形状モデル	0.39	0.12	0.29m
床/基礎	形状モデル	0.46	0.12	0.04m
外気に接する床	形状モデル	0.39	0.12	0.29m
屋根	形状モデル	0.29	0.12	0.4m
窓	形状モデル	1.23	0.0141	各窓ごとに設定

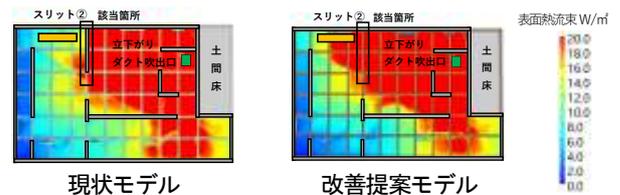


図 17 : 床下空間から居室への表面熱流束 (No. 2)

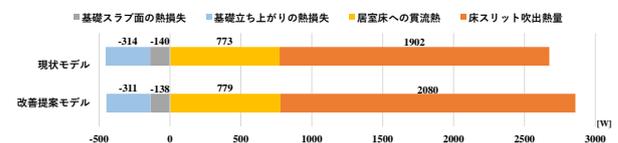


図 18 : 熱流比較 (No. 2)

延長することで居室空間の温熱環境が改善されたことが確認できた。5章では、実測物件No.2において基礎立上り位置の検討を行った結果、床スリット周辺の基礎立上りを束で代用することで、床下空間の温風の流が改善され、より効率的な床下暖房となることが分かった。

今後、これらの検討を踏まえ、床下温風経路計画に関する指針を示し、知見を整備する予定である。