

PVT・ヒートポンプ暖冷房換気給湯システム搭載住宅の温熱環境改善に関する研究
 吹出口の気流特性を考慮した床下ダクト計画の検討
**Research on Improvement the Thermal Environment of Houses by Using Air Conditioning
 and Hot-Water Supplying System Utilizing PVT Air Collector & Heat Pump for Houses.
 Examine of Underfloor duct Planning in Considerations of airflow at air outlets.**

学生会員 ○西島 葵 (東京理科大学)
 正会員 前 真之 (東京大学)
 正会員 相曾 一浩 (OMソーラー)

正会員 高瀬 幸造 (東京理科大学)
 正会員 盧 炫佑 (OMソーラー)

Aoi NISHIJIMA*¹ Kozo TAKASE*¹ Masayuki MAE*² Hyunwoo ROH*³ Kazuhiro AISO*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 examined the effect of outlet conditions on the thermal environment.

1. 研究背景

現在、全館空調システムが普及・注目され、室内空間の温熱環境や省エネルギー向上を目指した検討が必要とされている。そのため、本研究では給湯・暖房負荷の削減が期待できる太陽エネルギーを用いた Photovoltaic thermal collectors (以下、PVT)・ヒートポンプ(以下、HP)活用全館空調システム(以下、本システム)を対象とした。

2. 研究概要

図1、表1に本システムの概要、定格能力、図2に室内ユニット構造、図3に暖房時に使用される各部位の名称を示す。本システムは主居室に設置されたりモコンセンサが感知した室内温度に応じて、熱負荷を処理するための吹出風量と送風温度が制御される。暖房運転では主にBシステムから床下に暖気を送り、床スリットから室内に吹き出す床下ダクト式暖房を採用している。これまでの研究で、基礎スラブや基礎壁については床下ダクト式暖房に有効な基礎断熱仕様様が明らかになっている¹⁾。また、床スリットについても検討が進められている状況である²⁾。しかし、まだ着目されていないダクト吹出口は吹出風量への影響が大きいと考えられるため、吹出口形状による温熱環境への影響について検討を行う必要がある(図4)。吹出口に設置するものとして風向調整板が挙げられる。直進型では横方向に暖気が伝わりにくく床下空間での温度むらが生じていた。風向調整板を設置することで、暖気を拡散させることができると過去の実測結果よりわかっている(図5)。以上より本研究では風向調整板を採用し、ダクト吹出口の気流特性を考慮した実験と吹出口形状の違いによる床下ダクト計画の検討を行う。

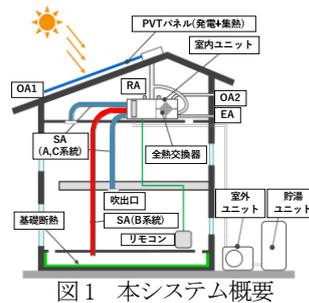
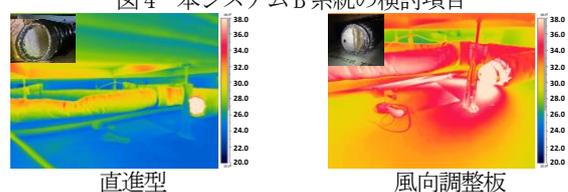
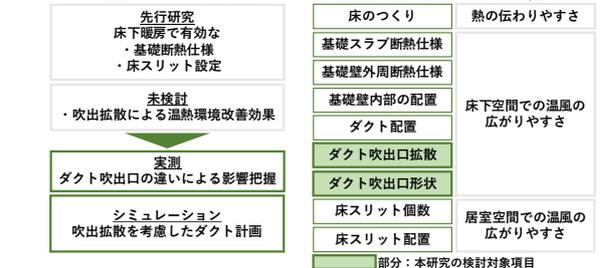
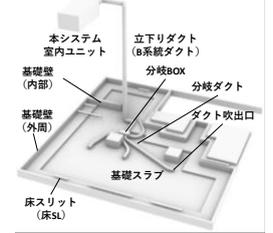
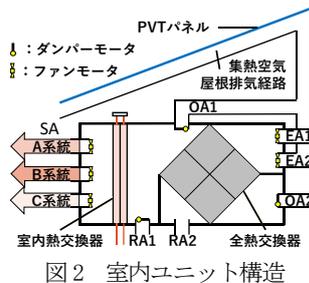


表1 本システム概要

暖房	定格暖房標準能力[kW]	4.0
	定格暖房標準消費電力[kW]	0.905
	定格暖房低温能力[kW]	4.7
	定格暖房低温消費電力[kW]	1.700
換気	エネルギー消費効率COP[-]	4.42
	定格換気風量[m ³ /h]	200
	定格消費電力[W]	65
	温度交換効率[%](冬)	90
給湯	全熱交換効率[%](冬)	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



3. 対象住宅における実測

3.1 実測概要

冬期暖房時の温熱環境などの実態把握のため、冬期実測調査を行った。実測データの利用期間は2023年12月とした。本研究で評価対象とした物件は滋賀県彦根市に位置する平屋モデルハウスである(表2)。床下暖房のみで熱負荷を処理するために、必要な風量を確保できるように分岐前のダクト径の大きさや空調機の設置位置などを工夫した。また、物件の用途上、主に人が集まるLDKへ全体風量の2/3程度の暖気を供給するように床下ダクト計画を行った。ヒアリングからルーム1、ルーム2の室内温度が低く、想定よりも暖気が供給されなかったことが明らかになり、コの字型で複雑なプランは床下暖房において不利になると推察された。温熱環境改善策として、角度45°とした風向調整板を2023年12月20日に設置した。よって、比較・検討日程は実測作業日を除いた12月1日～19日を風向調整板なし、12月21日～31日を風向調整板ありとする。温熱環境を把握するために居室空間と床下空間に計測器を設置し、計測した。同時にシステム運転状況や消費電力量などを確認するためにHEMSデータを用いた。図6に平面図と計測点、表3に詳細計測項目、表4にHEMSデータの主な計測内容を示す。また、風向調整板の圧力損失は径150mmのダクト3m相当のものであることを事前に確認している。

3.2 実測結果

風向調整板による影響を把握するため、外気温度の日変動と平均外気温度が類似していた12月3日(風向調整板なし)と12月27日(風向調整板あり)を比較する(図7)。

図8の結果より、調整板ありでは吹出風量が1割程度減少し、ピーク時の供給熱量が2.0kW程度小さく抑えられ、日中や夜間に生じていたサーモオフの回数も減少していた。また、室内温度差が調整板なしでは10°C程度あるのに対し、調整板ありでは6°C程度になり温度むらが改善された。床下空間においても同様に調整板ありの場合で温度差が小さくなり、温度むらが改善された(図9,10)。

風向調整板を採用することで圧力損失により吹出風量は減少するが、床下に満遍なく暖気が拡散され供給熱量や室内温度、床下温度の変動が小さくなり安定した制御ができることが確認できた。

3.3 風量測定

冬期実測日の風向調整板を設置する前に床下ダクトの風量測定を行った。B系統のみ稼働させ、設定温度を30°C、吹出風量を強に設定した。測定結果を図11に示す。各ダクトの吹出口では平均して100~260 m³/hの風量であった。最もダクト長さが長く曲がり角が多い寝室へ伸びているダクト⑥の吹出風量が少なかったことから、ダクトの長さ、曲がり角による圧力損失の大きさが風量に影響していると推測される。

表2 実測対象物件

	A邸		所在地	滋賀県彦根市
			地域区分	5地域 A4 H2
			床面積(m ²)	平屋 112.4
			q値(W/K)	137.4
			UA値(W/m ² K)	0.32
			ηAC値	1.8
			PVTパネル積載量(kW)	2.1
			積載屋根勾配	4寸



図6 平面図と計測点

表3 詳細計測項目

記録間隔	1分
計測内容	リビング・外気温湿度
	傾斜日射量
	各居室温度 (主に寝室、子供室)
	非居室温度 (主に脱衣所、洗面室)
	可視・熱画像
	床スリット温度

表4 HEMS 計測内容

記録間隔	10分
計測内容 (その他約190項目)	リモコン室内温度
	外気温
	OA,SA,RA湿度
	設定温度
	運転状態 (太陽熱集熱、HP暖房)
	システム消費電力
	買電量、売電量、発電量

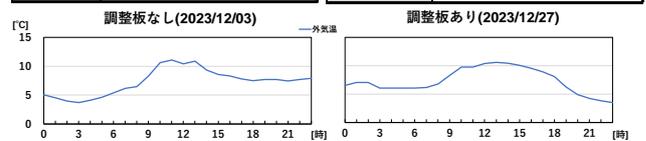


図7 外気温度推移

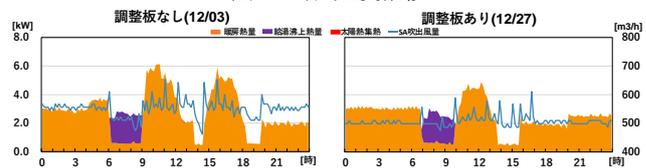


図8 供給熱量と吹出風量

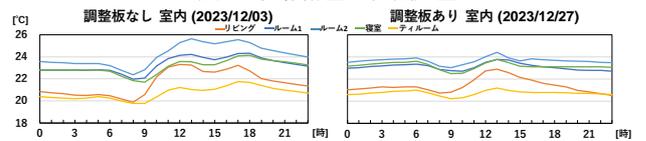


図9 室内温度推移

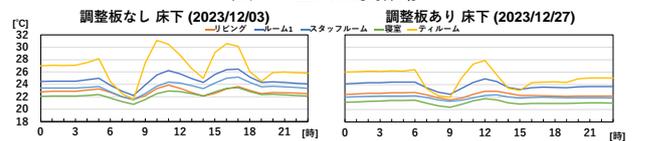


図10 床下温度推移



図11 風量測定結果

4. 風向調整板付きダクト吹出口の気流特性再現実験

4.1 実験概要

6章に行うシミュレーションに際して、より実際に近い状況を再現するために、吹出口の気流特性に関する実験を東京大学工学部 1号館地下実験室にて等温風速計測実験を行った。吹出口形状を図12、測定機器を図13、それぞれの配置など実験風景を図14に示す。風向調整板の角度を本物件と同様に45°とし、等温吹出条件でダクト吹出口の水平吹出気流の風速を風速計で測定した。測定点間隔は進行方向、水平方向ともに10cmとし、測定機器からおもりをたらし、測定点と一致させながら三脚を移動させた。測定パターンは吹出風量100m³/h、150m³/h、200m³/hの3パターンで行った。

4.2 実験結果

風向調整板を設置した200m³/hの結果を例として図15に示す。太文字で示している数字は測定点の通り番号であり、吹出口からの距離×10cmを示す。今回は0.5m/sを基準に到達距離を判断している。なお、到達距離とは吹出口中心から最も遠い0.5m/sの測定点の距離とし、実験風量の到達距離から近似式を求めた(表5)。

200m³/hの実験結果において、到達距離が進行方向と水平方向で二分されているが、どちらも近似式では違いがなかったため進行方向に伸びている測定点を採用する。

4.3 実住宅の風向調整板付きダクト吹出風速分布再現

以降で行うシミュレーション検討のために、モーメント法³⁾を使用し、実測結果に基づき本物件の床下ダクトの吹出風速分布を再現する加速度を求めた。汎用CFDソフトFlowDesigner2022を用いて吹出口部分に加速度を設定してCFD解析を行った。メッシュの分割方法は壁前セルを75mmのメッシュで分割、他の領域を等比率1.1で分割した。吹出風速分布の再現にあたって、対称性を考慮して片側のみの斜め吹出とした。実測で測定した半分の風量を設定し、進行方向及び水平方向に加速度を与えた(図16)。表6にCFD解析概要、表7に本物件の各吹出風量、吹出風速、近似式による計算到達距離、その到達距離を満たす加速度を示す。

5. シミュレーション検討に関する条件設定

熱負荷計算概要を表8に示す。気象データは標準年拡張アメダス2010年版を使用した。熱負荷計算エンジンEESLISMを内蔵した木造戸建て住宅用省エネ検討ソフト「ホームズ君省エネ診断エキスパート(OM版)」から最大処理熱量3134Wを求めた。CFD概要を表9、吹出風量の一覧を表10に示す。気象データは1月の最低気温を使用し、吹出風量は次章に示す床下ダクト計画の検討パターンでの床下ダクト長さや圧力損失から求めた。以下の計算式(1)に合計ダクト風量、目標室内温度22°Cを代入し、検討パターンごとの吹出温度を求めた。



図12 風向調整板 図13 測定機器 図14 実験風景

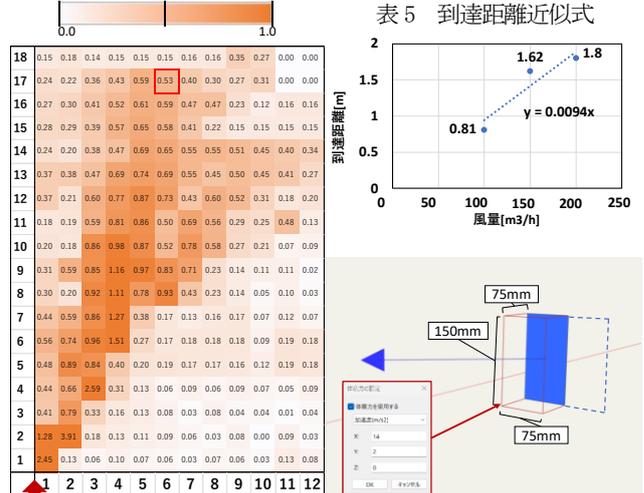


図15 調整板200m³/h結果

図16 解析領域

表5 到達距離近似式

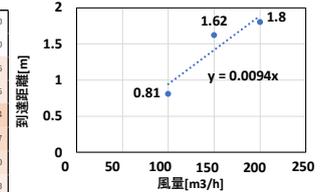


表6 実住宅再現CFD概要

CFD解析ソフト	FlowDesigner2022	収束判定条件	(定常)1.0×10 ⁻³ ~3.0
解析内容	風速	内部発熱条件	内部発熱なし
解析領域(x,y,z)	5m,5m,2.5m	解析手法	SIMPLEC
流体モデル	標準k-εモデル	流出条件	表7 設定風量に示す。
流入乱流条件	$k=(U/10)^2$ $\epsilon=(0.09^{3/4}) \times (k^{3/2})/D$ U:ネック風速 D:吹出口幅	流入条件	

表7 計算到達距離・加速度一覧

吹出口番号	実測結果	設定風量	吹出速度	計算到達距離	加速度	
	m ³ /h	m ³ /h	m/s	m	進行方向	水平方向
①	258.30	129.15	2.03	2.76	50	70
②	148.50	74.25	1.17	1.46	30	5
④	103.70	51.85	0.82	0.96	14	1
⑥	99.40	49.70	0.78	0.88	14	2

表8 熱負荷計算解析概要

熱回路計算ソフト	ホームズ君[省エネ診断エキスパート] Ver4.31B	
気象データ	標準年拡張アメダス(2010年版)	
暖房	期間	10月29日~4月30日
	設定温度	24時間室温22°C
	スケジュール	連続運転
生活熱・換気	『住宅事業主の判断の基準における エネルギー消費量計算方法の解説』 を参考に作成	
漏気	なし	

表9 CFD解析概要

CFD解析ソフト	FlowDesigner2022	収束判定条件	(定常)1.0×10 ⁻³ ~3.0
解析内容	温度、速度、輻射、快適性	内部発熱条件	内部発熱なし
総メッシュ数	約120万	境界温度条件	外気温:0.2°C(1月の最低外気温)
数値解法	流速-圧力補正:SIMPLEC 差分スキーム:QUICK	流入条件	Case1 499.2m ³ /h Case2 354.5m ³ /h Case3 495.5m ³ /h
乱入条件	標準k-εモデル	流出条件	Case1 499.2m ³ /h 40.8°C Case2 354.5m ³ /h 48.5°C Case3 495.5m ³ /h 40.97°C
流入乱流条件	$k=(U/10)^2$ $\epsilon=(0.09^{3/4}) \times (k^{3/2})/D$ U:ネック風速 D:吹出口幅		

$$H = \left(\frac{Q}{3600} \right) \times C_p \times \rho \times (T - t) \cdots (1)$$

H:処理熱量[W] Q:合計ダクト吹出風量[m³/h] ρ:空気密度[kg/m³]=1.2
 Cp:定圧比熱[J/kg・K]=1000 T:吹出温度[°C] t:目標室温[°C]=22

また、シミュレーションを行う際には、4章で行った吹出風速分布再現のための加速度を各風量に適用し、風向調整板設置時の吹出の気流特性を考慮している。

6. CFDを用いた床下ダクト計画検討

6.1 床下ダクト計画検討

検討パターンを表11に示す。CFD上での現状を把握するため、本物件と同じ状況のものをCase1とする。また、吹出風量計算時に分岐BOXまでの圧力損失が大きいたことが分かった。本システムにおけるSAの接続口はΦ150mmであるために、現状の実物件では室内ユニットからB系統の分岐BOXまでの立下りダクトの径をΦ200mmに拡張して施工することとされている。Case2では、立下りダクトをΦ150mmとして施工した場合の影響を把握することとした。Case3では風向調整板を設置し、圧力損失を考慮してダクト長さを短縮させた時の影響を把握する。ダクト長さはダクトの本数や長さによって床下空間をゾーニングし、各吹出口がそれぞれのゾーンに入っているように吹出口①を1m、⑥を3m短縮させた(図17)。Case3での立下りダクトの径はΦ200mmとする。

6.2 シミュレーション結果

シミュレーション結果を表11に示す。表内数字はゾーニングした領域の平均温度を示す。Case2の結果より立下りダクト径が細いことで室内温度が1°C程度下がった。床下では温熱環境には影響は少ないが、Case1よりも風量が小さく吹出温度が10°C程度高いことが要因で消費電力量に大きな影響があると推察する。Case3ではダクト長さ短縮による温熱環境への影響は小さいが、風向調整板設置によって暖気が拡散され室内の温度むらが小さくなった。図18,19,20よりCase2ではCase1より床スリット風量が小さいことから床下温度は同程度だが室内へ暖気が供給されていないことが分かる。Case3では風向調整板の設置により暖気が外周部まで届き、床表面、室内ともに温度差が2.5°C程度まで小さくなった。

7. 総括

- 風向調整板を設置することで、圧力損失が増え吹出風量が約1割小さくなったが、暖気拡散により各居室の日変動が約3°C改善した。
- 実験から近似式を作成し、風量から算出した到達距離を満たす加速度を与えることで気流特性を考慮した実挙動に近いダクト吹出の再現ができた。
- 立下りダクト径の太さで温熱環境への影響は小さいが、吹出風量が小さくなり吹出温度が高くなってしまいうため消費電力量への影響が大きいと考えられる。
- 風向調整板の設置より外周部まで暖気が届き、室内へ暖気が安定して供給できることを確認した。

表10 吹出風量設定(m³/h)

検討パターン	吹出口						合計風量
	①	②	③	④	⑤	⑥	
Case1	171.8	93.0	48.0	64.6	75.7	46.1	499.2
Case2	124.3	65.6	34.6	46.7	51.7	31.6	354.5
Case3	152.6	98.4	47.3	63.7	82.9	50.6	495.5

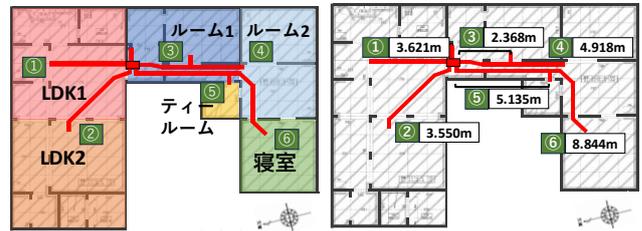


図17 床下ゾーニングと各ダクト長さ(Case1)

表11 検討パターンと解析結果

	Case1 現状	Case2	Case3
検討パターン			
立下りダクト径	Φ200mm	Φ150mm	Φ200mm
風向調整板	なし	なし	あり
床下ダクト長さ	現状	現状	①1m ⑥3m 短縮
室内温度	LDK1: 20.6°C, LDK2: 21.6°C, ルーム1: 20.7°C, ルーム2: 21.4°C, ティールーム: 22.0°C, 寝室: 23.2°C	LDK1: 19.9°C, LDK2: 20.5°C, ルーム1: 20.2°C, ルーム2: 20.8°C, ティールーム: 21.5°C, 寝室: 22.5°C	LDK1: 20.7°C, LDK2: 21.5°C, ルーム1: 21.2°C, ルーム2: 20.4°C, ティールーム: 22.8°C, 寝室: 21.1°C
床下温度	LDK1: 29.8°C, LDK2: 29.1°C, ルーム1: 26.8°C, ルーム2: 27.6°C, ティールーム: 33.6°C, 寝室: 28.8°C	LDK1: 30.9°C, LDK2: 29.6°C, ルーム1: 27.8°C, ルーム2: 28.3°C, ティールーム: 35.7°C, 寝室: 29.6°C	LDK1: 28.8°C, LDK2: 30.0°C, ルーム1: 27.9°C, ルーム2: 26.6°C, ティールーム: 34.5°C, 寝室: 27.7°C

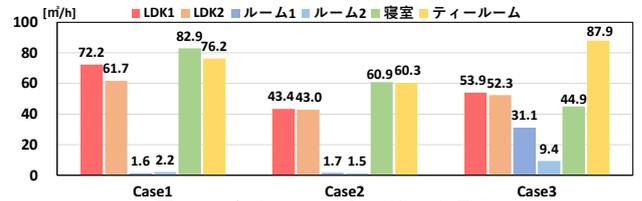


図18 各ケースの床スリット風量

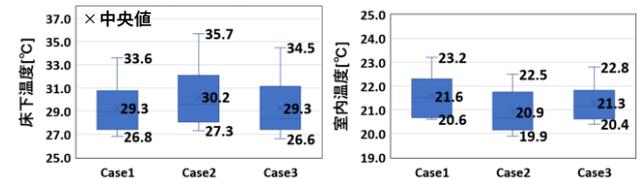


図19 床下温度、室内温度分布

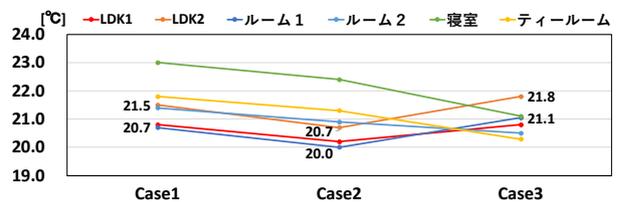


図20 床表面温度分布

参考文献

- 1) 杉山安奈, 屋根空気式 PVT パネルを利用した床下ダクト式暖房住宅に関する検討: 費用対効果の高い基礎断熱仕様の検討, 2023 年度日本建築学会技術報告集
- 2) 潘鴻静, 太陽エネルギー活用型ヒートポンプ暖冷房換気給湯システムによる自立性向上に関する研究 その7 実住宅におけるダクト設計および吹出風量・室内温熱環境の検証, 2023 年度日本建築学会大会
- 3) 孫路寧, CFD 解析による住宅用全館空調の快適性評価に関する研究(その2): Momentum 法における拡散吹出気流・斜め吹出気流の再現手法, 2022 年度日本建築学会技術報告集