

PVT・ヒートポンプ暖冷房換気給湯システムを採用した住宅の冬季温熱環境向上  
 に関する研究  
 標準住宅モデルおよび実住宅を対象とした CFD による床下ダクト計画の改善検討  
**Research on Improvement of winter Thermal Environment in Houses by Using Air  
 Conditioning and Hot-Water Supplying System Utilizing PVT Air Collector & Heat Pump for  
 Houses.**  
**Improvement of Underfloor duct Planning by CFD for Standard House and Actual House.**

学生会員 ○杉山 安奈 (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)  
 Anna SUGIYAMA\*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 comfort in case of using underfloor heating in winter.

1. はじめに

近年、年間の一次エネルギー消費量収支がゼロになる ZEH が普及する中、省エネ性能の向上だけでなく健康快適な住環境との両立も求められる。こうした背景から、太陽エネルギー活用による暖房負荷削減や部屋間温度差の少ない温熱環境の実現が期待できる 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(図1,表1)。

本システムは冬期において床下暖房も利用しており、図2に示したいずれかの方法で温風を床下空間に送風している。しかし、基礎立上りなどの影響があるため床下空間における気流の分布を予測するのは難しく、床下ダクト空調の温風経路に着目した明確な設計手法は定められていない。

そこで本研究では、設計者や施工者のための指針提案を目的とし、標準住宅モデルおよび実住宅を対象とした床下ダクト計画の改善検討を行った。

2. 床下温風経路設計法

2-1 シミュレーション検討に関する条件設定

シミュレーションに用いる建物モデルには、比較的平面形状が整形で基礎構造が簡易的なパッシブ標準プランを使用する(図3)。建物モデル概要を表2、平面図を図4に示す。省エネルギー基準地域区分を6地域、外皮性能はU<sub>A</sub>値を0.46(W/m<sup>2</sup>K)(HEAT20 G2 レベル)、η<sub>AC</sub>値を1.9とした。また、床下空間の中央部にBシステムの吹出口が位置するよう立下りダクトを通し、床スリットの大きさは各空間の窓面積に合わせ変更している。

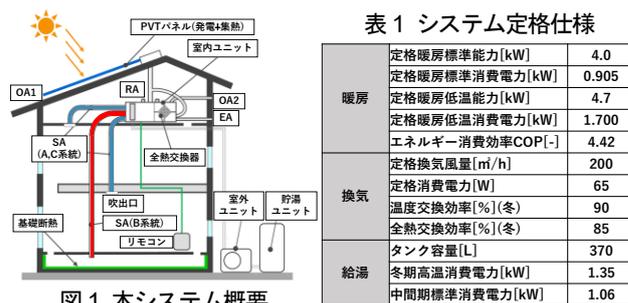


図1 本システム概要



[立下りダクト]



[横引きダクト]

図2 床下ダクト写真



図3 パッシブ標準プラン

表2 建物モデル概要

建物モデル	パッシブ標準プラン
構造種別	木造2階建て
屋根方式・勾配	切妻・4寸
軒長さ(mm)	600(全方位)
所在地	東京都23区(6地域)
断熱方式	屋根断熱 大壁充填・外張断熱 基礎断熱
U <sub>A</sub> 値/η <sub>AC</sub> 値	0.46/1.9
PVTパネル(kW)	8.2



図4 パッシブ標準プラン平面図

熱負荷計算ソフトには宇田川による熱負荷計算プログラム EESLISM を内蔵しているホームズ君 Ver4.24E、CFD 解析には FlowDesigner2022 を用いた。表 3 に CFD 解析条件、表 4 に境界条件を示す。気象データは標準年拡張アメダス気象データ(2010 年版)東京を用いた。解析対象日は最低外気温を記録した 1 月 2 日とした。CFD 解析では放射伝熱も考慮に入れるため、放射解析を行った。SA 温度(床下吹出温度)は COP が最も高く HP(ヒートポンプ)が高効率で運転できる 35.2℃とし、床下吹出風量はダクトの圧損計算より 534 m<sup>3</sup>/h とした。SA 温度を低くすることで、床下温度が低くなると考えられるため、最低限達成すべき床下空間の目標温度を 29.7℃とした。

## 2-2 事前検討

床下空間から暖気の影響を受けやすい床スリットのある部屋を主な検討対象室とし、各部屋のピーク暖房負荷より算出した風量を目標風量とした。図 5 に床下平面図および床下吹出風量・各床スリットの目標風量を示す。解析の結果、立上りにより外周部まで暖気が行き渡っておらず、中央部との温度むらが生じていることが確認できた。また、床スリット風量は目標風量の半分程度であった(図 6)。このことから、床スリット風量が温熱環境に関係していると確認できた。

## 2-3 床下ダクト長さ検討

暖気が行き渡っていない外周部に着目し、吹出口 3,4 の床下ダクトを伸ばし床スリット風量および温熱環境を確認する(図 7)。吹出口と床スリットの位置関係より、吹出口 3 は 2m、吹出口 4 は 1m までとし、0.5m 間隔で伸ばした。解析の結果、吹出口 3 の床下ダクトを伸ばすにつれ、和室の床スリット風量が増加し、暖気も広がっていることが確認できた。Case1,5 ではキッチンまで暖気が行き渡っており、床下ダクトと床スリットの位置関係および吹出口風量の変化が関係していると考えられた。

図 8 に Case0 を含めた作用温度体積割合を示す。22℃~23℃の部分を快適性の高い空間とする。全ケースにおいて 60%程度の体積割合を占めており、床下ダクトを用いることで温度むらが改善され、床下空間における床下ダクトの重要性が分かった。また、Case1 においては 70%以上の割合を占めており Case0 と比べ最も改善された。

各床スリット風量結果を目標風量で割り平均した数値を目標風量達成率とし、作用温度が 22~23℃の空間内での体積割合との関係を示す(図 9)。本報では Case1 が目標風量達成率が高く、快適性の高いケースとなり、平面形状が整形で基礎構造が簡易的な場合、床下ダクトを 0.5m 伸ばすだけでも外周部まで暖気が行き渡ることが確認できた。

床スリット風量に伴い、温熱環境が変化することから各部屋のピーク負荷に合わせた風量分配は有効である可能性が示唆され、次章以降では 3 章での検討を踏まえ、複雑な平面形状の実住宅における床下ダクト計画を行う。

表 3 解析条件

解析ソフト	FlowDesigner2022
解析内容	温度/速度/放射
解析領域[m]	10.01×6.37×7.5
メッシュ数	約900万メッシュ
収束判定	1×10 <sup>-3.5</sup>
解析対象日時	1/2 7:00
外気温度	-0.5℃
流入条件	床下吹出風量 534m <sup>3</sup> /h
	SA温度 35.2℃
流出条件	床下吸込風量 534m <sup>3</sup> /h

表 4 境界条件

部材/材質	熱抵抗 [m <sup>2</sup> ·K/W]	外表面熱伝達率 [W/m <sup>2</sup> ]	内表面熱伝達率 [W/m <sup>2</sup> ]
外壁	グラスウール 2.56	19.9	自動計算
屋根	グラスウール 7.69	19.9	自動計算
窓	Low-Eガラス 0.43	19.9	自動計算
内壁	杉板 0.27	自動計算	自動計算
床	杉板 0.53	自動計算	自動計算
基礎立上り	コンクリート	自動計算	自動計算
断熱材	押出ポリスチレンフォーム3種bA	2.86	自動計算



図 5 床下平面図および床下吹出風量・各床スリット目標風量

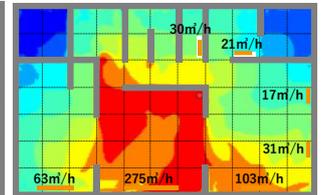


図 6 床スリット風量結果と床下温度分布[Case0]

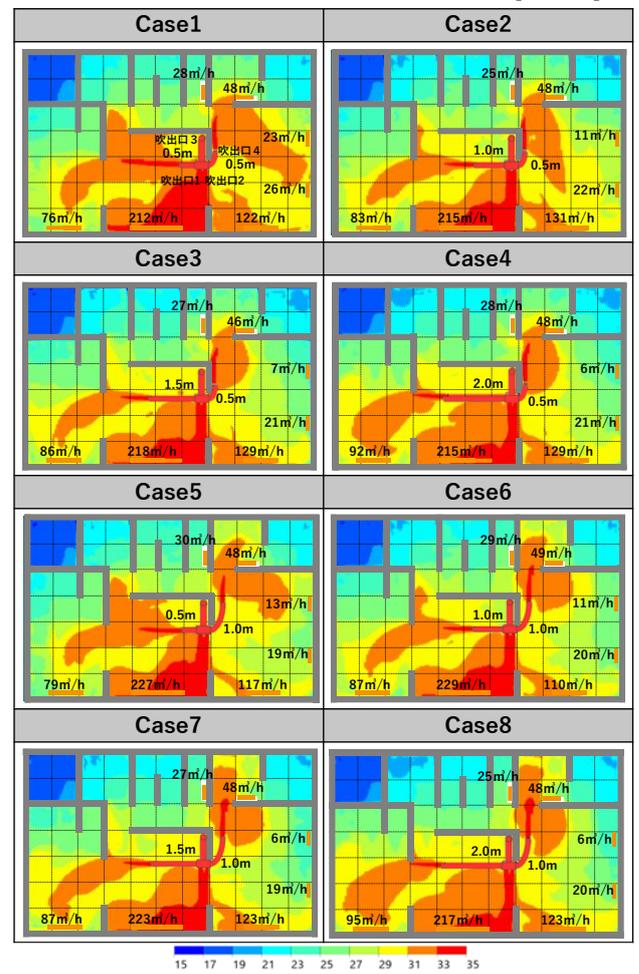


図 7 各ケースの床下平面図および床スリット風量結果・床下温度分布

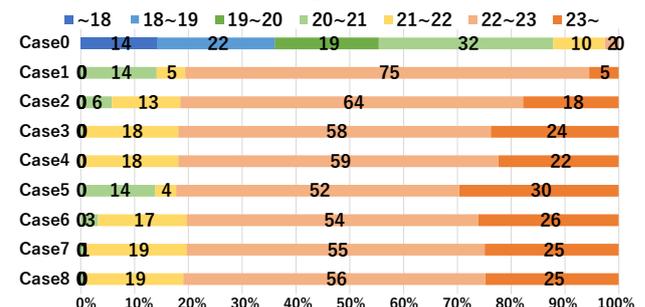


図 8 作用温度体積割合

### 3. 本システム搭載住宅における冬期実測

#### 3-1 実測概要

ここでは、複雑な平面形状で基礎立上りの多いN邸を対象とし、冬期暖房時の温熱環境実態把握のため、冬期実測調査を行った(表3)。省エネルギー地域区分6地域に位置した平屋である。断熱性能は、HEAT20が定めるG2グレードの高断熱高气密住宅で、屋根には発電容量が7.38kWの太陽光パネルを設置しており、7.04kWhの蓄電池が搭載されている。空間の温度むらや熱損失などを評価するため各物件の必要箇所に計測器を設置し詳細実測を行った。また、システムの設定室温・運転モードは、国土交通省「サステナブル建築物等先導事業(省CO<sub>2</sub>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。

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。計測機器は、小型風量計TABmaster mini Model 6750を用いた。

#### 3-2 実測結果

図10に計測点概要を示す。代表日はB系統のみを使用している2022年3月23日とした。明け方および夕方(6時~11時、17時~19時)で、暖房運転となりSA温度が高くなった。同時刻のCOPは夕方の方が高いことからSA温度が低いほど効率が高くなると推測できた(図11,12,13)。

温熱環境に着目すると、各室の温度は18℃付近で推移し、部屋間の温度差は4℃程度であった(図14)。図15に2021年10月10日にN邸で行った風量計測時の各床スリット風量結果を示す。スリット⑧と⑨では、風量が小さく床下ダクト吹出口が向いていないことが原因として考えられた。また、主寝室にあるスリット⑩では風量が他のスリットと比べ大きいのに対し室温は低いことから、部屋の負荷が関係していると考えられた。

### 4. CFDを用いた床下温風経路の提案

#### 4-1 解析概要

表4に解析条件、表5に境界条件を示す解析対象日は実測で用いた代表日とし実測データに基づき、定常解析を行った。床下吹出風量はダクトの圧損計算より466m<sup>3</sup>/hとし、床下吹出温度は風量と負荷より算出し41.0℃とした。また、本研究の実態把握をする上で整合検証を行う。整合検証用のデータとして、各床スリット風量・室温の実測データを用いた。実測データと解析結果の最大の差は、風量比では和室にあるスリット④の19%、温度差においても和室の5.7℃となった。和室においての差が大きくなった原因として吹出口と床スリット位置が近いことにより、床スリット風量が大きくなりそれに伴って、室温も高くなったと考えられた。今回は、リビングにおける温度差が2℃程度となっているため、検討上十分な精度であると判断し、検討を行った。

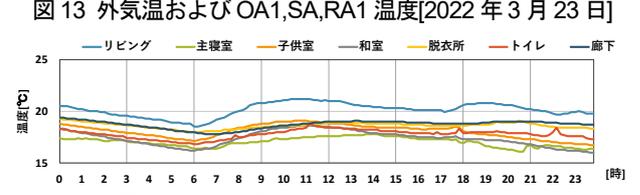
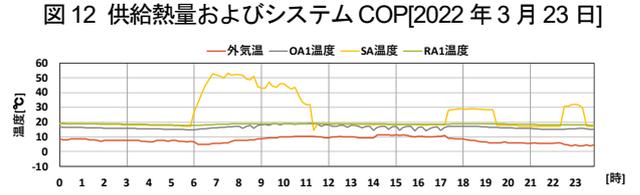
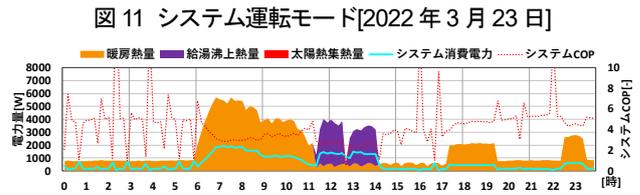
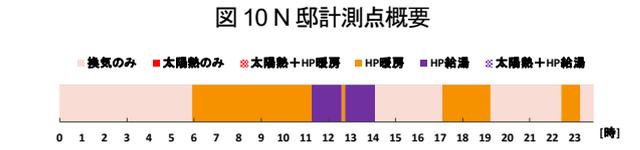
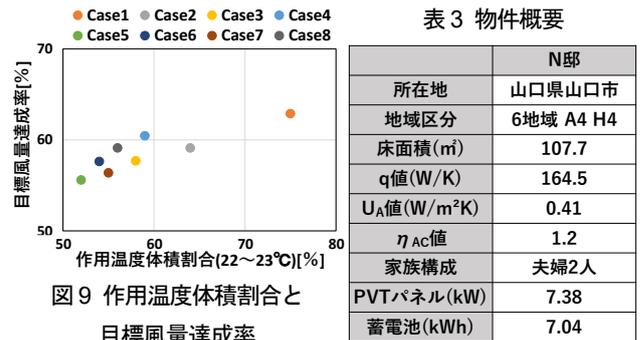


表4 解析条件

解析ソフト	FlowDesigner2022
解析内容	温度/速度/放射
解析領域[m]	10.01×6.37×7.5
メッシュ数	約500万メッシュ
収束判定	1×10 <sup>-6</sup> ~3.5
解析対象日時	3/23
外気温度	7.9℃
流入	床下吹出風量 466m <sup>3</sup> /h SA温度 41.0℃
流出	床下吸込風量 466m <sup>3</sup> /h

表5 境界条件

部材/材質	熱抵抗 [m <sup>2</sup> ·K/W]	外表面熱伝達率 [W/m <sup>2</sup> ]	内表面熱伝達率 [W/m <sup>2</sup> ]
外壁	グラスウール 2.63	19.9	自動計算
屋根	グラスウール 5.00	19.9	自動計算
窓	Low-Eガラス 0.43	19.9	自動計算
内壁	杉板 0.27	自動計算	自動計算
床	桧 0.37	自動計算	自動計算
基礎立上り	コンクリート	自動計算	自動計算
断熱材	押出ポリスチレンフォーム3種bA	2.08	自動計算

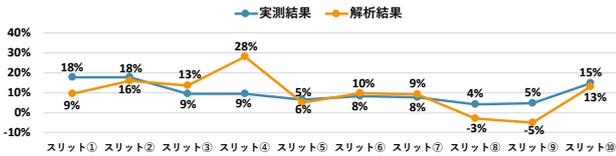


図16 全体の風量に対する各床スリット風量比

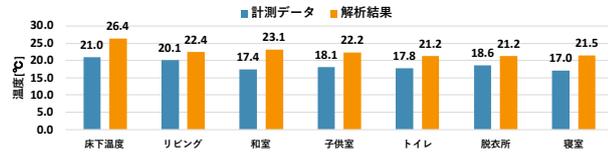


図17 計測データと解析結果の温度差

3章と同様に各部屋のピーク負荷より目標風量を算出する(表6)。スリット⑧,⑨では、吹出口1の吹出口方向が南向きとなっていることで風量が小さいと考え、吹出口方向を床スリットのある北向きに変更した<sup>1)</sup>。吹出口3,4では床下ダクトを短くし、吹出口2では床下ダクトを伸ばし、暖気が広がるよう角度45°の風向調整板を用いた(図18)<sup>2)</sup>。以上の点を考慮し床下平面図を図19に示す。

#### 4-2 解析結果

図20,21より吹出口1の吹出口方向を北向きに変更したことで、トイレ,脱衣所にも暖気が行き渡っていることを確認できた。トイレの床下平均温度は8.2°C、居室空間では1.7°C上昇し、リビングとの温度差は1.2°Cから0.4°Cに減少した。リビングではスリット①にも暖気が行き渡っていることが確認できた。寝室における床下平均温度は3.6°C減少し、基礎立上りにより吹出口2の暖気が遮られていることが原因として考えられた。図22より床下平均温度の差は10.8°Cから6.1°C、居室空間では2.8°Cから1.7°Cに減少し、温熱快適性が向上していると確認できた。

図23より各スリットにおいて改善提案モデルとしたことで目標風量に値が近づいていることが確認できた。現状モデルにおいて逆流が発生していたスリット⑧,⑨では暖気が行き渡ったことにより風量が目標風量に近づいた。

#### 5. 総括

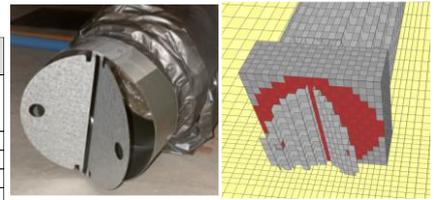
PVT・ヒートポンプ暖冷房換気給湯システムを採用した住宅におけるCFDを用いた冬季床下暖房時の床下温風経路の改善検討を行った。平面形状と基礎構造が単純な標準住宅モデルでは各部屋のピーク負荷に合わせた風量分配は有効である可能性が示唆され、床下ダクトをわずかに伸ばすだけでも外周部まで暖気が行き渡ることが確認できた。複雑な平面形状である実住宅N邸では、基礎立上りの影響により、床下ダクト長さを長くする必要があり、ダクト形状も複雑であった。しかし、標準プランと同様の手法により目標風量を算出し、吹出口と床スリットの位置関係や吹出口の風向などを改善することによって、床下空間の温度むらが減少し温熱環境が向上された。

#### 参考文献

- 1) 石倉侃介 他：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, 空気調和・衛生工学会大会環境系論文集, 2022年

表6 風量比較

スリット番号	必要風量 m³/h	解析結果 m³/h
スリット①	222	188
スリット②	94	137
スリット③	40	24
スリット④	44	64
スリット⑤	8	57
スリット⑥	13	-15
スリット⑦	32	-24
スリット⑧	12	62



[実物写真]

[解析モデル]

図18 風向調整板のイメージ

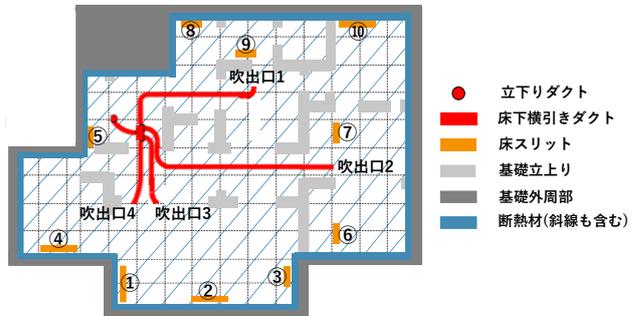


図19 改善提案モデルの床下平面図

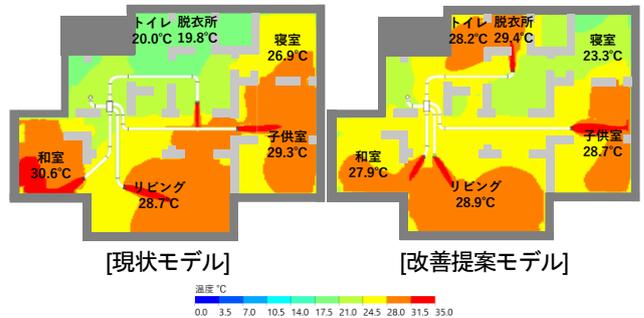


図20 床下温度分布比較(GL+0.45m)

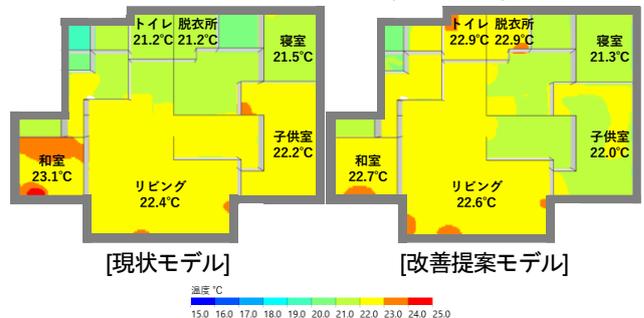


図21 空間温度分布比較(1FL+1.1m)

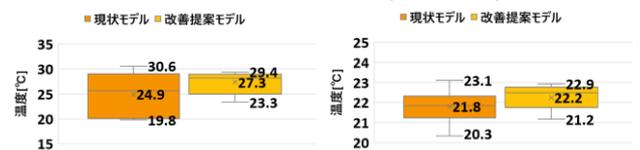


図22 温度分布比較(左:床下 右:居室)

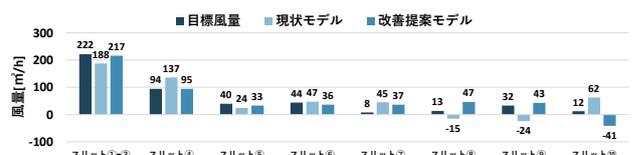


図23 風量比較

- 2) 大日向 鴻静 他：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住宅のエネルギー自立性向上に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集, 2023年