

太陽熱利用型ヒートポンプ暖冷房換気給湯システムの住宅への導入に関する研究 (第2報) CFD による室内快適性を改善する手段に関する検討

Study on PVT Air Collector & Heat Pump System for Domestic Air Conditioning Ventilation and Hot Water Supply in House

Part2. Research on methods to improve indoor comfort by CFD

学生会員 ○孫 路寧 (東京大学) 学生会員 大平 豪士 (東京大学)
 学生会員 真島 繁 (東京大学) 正会員 前 真之 (東京大学)
 正会員 高瀬 幸造 (東京理科大学) 正会員 盧 炫佑 (OM ソーラー)

Luning SUN *¹ Tsuyoshi OHIRA *¹ Shigeru MAJIMA*¹ Masayuki MAE *¹

Kozo TAKASE*² Hyunwoo ROH*³

*¹ The University of Tokyo *² Tokyo University of Science *³ OM Solar

This study is about a suggestion of air conditioning system on ways to improve thermal comfort in a house equipped with a solar heat utilization heat pump air conditioning ventilation water heater system. We studied the number and configuration of outlets, as well as the piping methods within the foundation in order to improve the indoor comfortable environment.

1. はじめに

背景・目的

本報では、戸建住宅に太陽熱利用型ヒートポンプ暖冷房換気給湯システム(以下本システム)を搭載することを想定した検討を行う。室内の温熱環境を改善するため、本システムの冷房と暖房の設計を検討した。2章で冷房時において、吹出口の個数と配置について、検討を行った。3章で暖房時において、室内の温熱環境を改善するため、床下のダクト方式について、提案した。

2. 冷房の検討

2-1 熱負荷計算による解析対象日時の選定

冷房の検討では、一般化するために、多くの実測物件に見られたような南面に大開口を持つ標準住宅モデル¹⁾を用いて検討を行った。平面図は図1に示す。本システムの導入戸で推奨されているHEAT20 G1の断熱仕様を表1に示す。

ここでは、住宅事業者の判断基準をもとに、ESSLISMを用いてこのモデルの負荷計算を行う(表2)。本システムの最大顕熱処理熱量は2000Wを超えないようにするため、外付けブラインドの可否を検討した。CFD解析対象日時は冷房ピーク負荷時(8/5 13:00)を用いる。この時点での部屋別冷房負荷を図2に示す。実測により、本システムの最大風量は600m³/hである。部屋別冷房顕熱負荷を見ると(図2)、1階のAシステムの負荷は2階のCシステムの約2倍であるため、今回の検討において両システムの風量比をA系統(400m³/h):C系統(200m³/h)=2:1と仮定する。

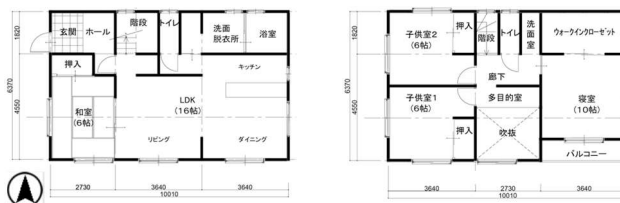


図1 標準住宅モデル平面図(左:1F 右:2F)

表1 部位別断熱仕様

断熱仕様/位置	仕様	λ (W/mK)	断熱厚み(mm)	U値(W/m ² K)
屋根 充填	GW16K	0.045	200	0.29
外壁 充填	GW16K	0.045	100	0.46
開口部 窓	LOW-E複層ガラス	-	-	1.9
ドア	ハニカムフラッシュ構造	-	-	4.65
べた基礎	立ち上がり(室内側)	押出法ポリスチレンフォーム保温板 3種	0.028	100
	基礎床上下周(500mm)	押出法ポリスチレンフォーム保温板 3種	0.028	50
	(基礎断熱)	基礎床下全面	押出法ポリスチレンフォーム保温板 3種	0.028

表2 熱負荷計算条件

熱負荷計算のための条件			
使用ツール	EESLISMを計算エンジンとする熱負荷計算ツール	補助冷暖房	停止
建物モデル	標準住宅モデル	生活熱	照明 年間総発熱量:2791kWh 家電 年間総発熱量:2170kWh 水蒸気 年間総発熱量:27kg
気象データ	拡張アメダス標準年データ(東京)	換気	局所換気 179m ³ 24時間換気 1289m ³ 窓間開通風 行わない
計算期間	1/1~12/31	η AC値	1
計算間隔	1時間		
家族構成	4人(夫婦+子2人)		
住宅の属性	木造住宅、延床面積112.6m ²		
設定温度	冷房時: 27°C(60%)		
住宅モデルUA値	0.51W/m ² ・K		

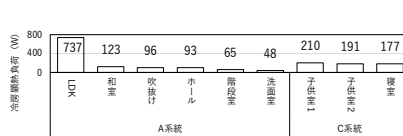


図2 部屋別冷房顕熱負荷(8/5 13:00)

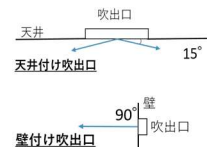


図3 吹出口気流性状

表3 CFD解析条件

解析コード	FlowDesigner2020	日射条件	直達日射量:725W/m ² 散乱日射量:213W/m ²
流体モデル	標準k-εモデル 吹出口設定はMOMENTUM法によるモデル化	風量	A系統:和室100m ³ /h、LDK300m ³ /h C系統:200m ³ /h (66.7/66.7/66.7)
メッシュ数	3080700	流入条件	吹出口個数の検討時:17°C 天井吹出15° 吹出口配置の検討時:17°C 壁吹出90°(A系統) (角度は加速度で設定) 天井吹出15°(C系統)
数値解法	流速-圧力補正:SIMPLEC 差分法:風上1次	流出条件	600m ³ /h
解析対象日時	8/5(休日) 13:00(冷房顕熱ピーク負荷)	外気条件	人体発熱:1人分(顕熱のみ,60W) 家電発熱:201.9W(HEAT20で想定)
収束判定条件	(定常) 1.0 × 10 ⁻⁵	内部発熱	



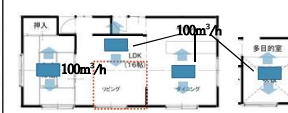
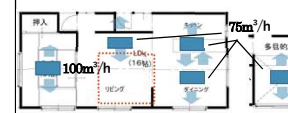
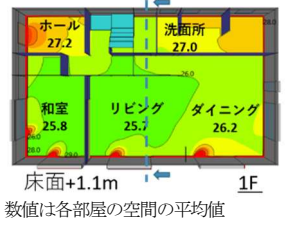
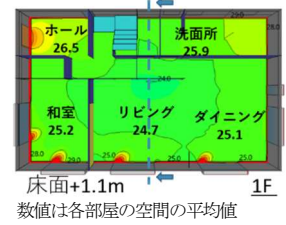
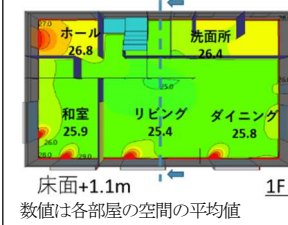
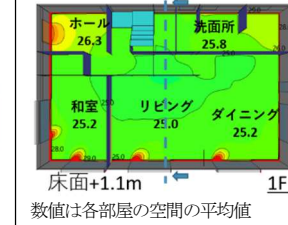
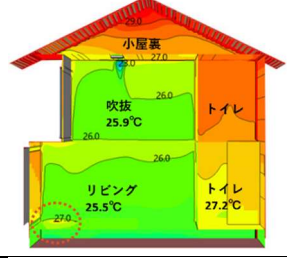
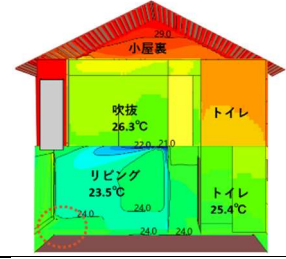
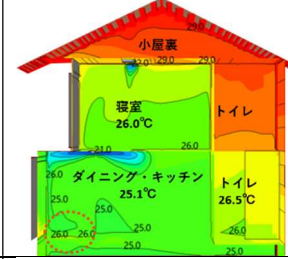
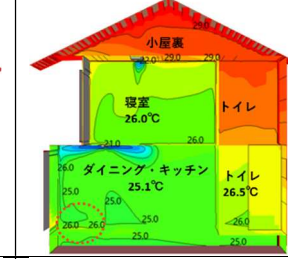
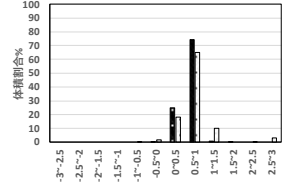
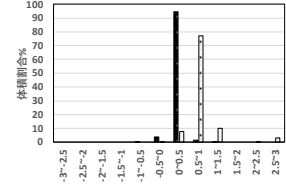
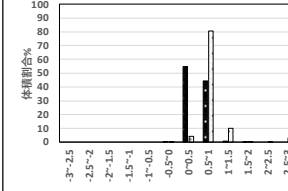
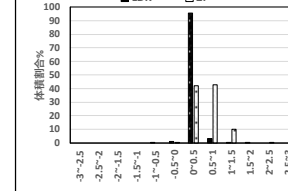
ケース	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4
吹出口配置イメージ(A 系統)	 A 系統吹出口 2 つ	 A 系統吹出口 3 つ	 A 系統吹出口 4 つ	 A 系統吹出口 5 つ
平均放射温度(°C)	 床面+1.1m 数値は各部屋の空間の平均値	 床面+1.1m 数値は各部屋の空間の平均値	 床面+1.1m 数値は各部屋の空間の平均値	 床面+1.1m 数値は各部屋の空間の平均値
空気温度(°C)LDK 部分	 吹抜 26.0°C リビング 25.9°C トイレ 27.2°C	 吹抜 26.3°C リビング 23.5°C トイレ 25.4°C	 吹抜 26.0°C ダイニング・キッチン 25.1°C トイレ 26.5°C	 吹抜 26.0°C ダイニング・キッチン 25.1°C トイレ 26.5°C
PMV の体積割合	 PMV が-0.5~0.5 の割合:24.9% LDK 温度の標準偏差:0.27	 PMV が-0.5~0.5 の割合:98.3% LDK 温度の標準偏差:0.27	 PMV が-0.5~0.5 の割合:55% LDK 温度の標準偏差:0.23	 PMV が-0.5~0.5 の割合:96.7% LDK 温度の標準偏差:0.23
特徴	各部屋の平均温度の差が大きい・AC 系統が暖房する場合、不快になりやすい	温度ムラがある・風速が 0.25m/s を超える場所があり気流感がある・平均放射温度と室内空気温度の温度差が 3°C 以上となる	温度ムラが少ない・平均放射温度と室内空気温度の温度差を 1°C 以内に抑えられる・気流感がない	ダイニングとキッチン部分が冷えすぎ・風速が 0.25m/s を超える場所があり気流感がある

図 4 冷房吹出口の個数の検討結果

2-2 吹出口の個数の検討

2-2-1 解析条件

FlowDesigner2020 を使用し、吹出口の到達距離を CFD で再現するために、MOMENTUM 法²⁾を用いて、各吹出口を設定し、室内快適性の検証を行った。解析条件は表 3 に示す。ここでは天井付け吹出口(図 3)を検討対象とする。A 系統吹出口の数が 2~5 の 4 つのケースを作成し、結果の比較を行う。

2-2-1 解析結果

結果を図 4 に示す。ケース 1 の場合は、床面から 1.1m のところの窓側の平均放射温度が室内温度と比べると約 5°C 高くなった。空気温度の断面図から、各部屋の平均温度の差が約 1.7°C であることがわかる。ケース 2 の場合、吹抜部分の平均放射温度と空気温度の差が 3°C 以上になることを確認できた。ケース 3 では、吹抜の天井吹出口から吹き出す冷気が吹抜を通して、LDK 空間に届き、リビングの天井吹出口とともにリビング部分の負荷を処理する。温度ムラが少なく、平均放射温度と空気温度の差を

1°C 以内に抑えられた。ケース 4 では、ダイニング・キッチン部分の吹出口距離が短いため、冷え込むという問題がある。以上より、ケース 3(A 系統全体吹出口個数が 4 つ)の場合に室内温熱環境が最も快適だと考えられる。しかし、この場合にも窓側の平均放射温度が高い。窓側の温熱環境を改善するために、吹出口の配置の検討を行った。

2-3 吹出口の配置の検討

上記の検討結果より、ケース 3 の場合でも、窓側の平均放射温度が高くなってしまっていることがわかる。窓側の放射温度環境を改善するため、吹出口の配置のケーススタディを行う。1 階の天井の段差を利用すると、壁吹出の施工がしやすいことと、吹出口の到達距離が長いので、A 系統は壁付け吹出口を用いて各方向の窓に吹き出すように変更する(図 5)。このようにして、平均放射温度が 26~28°C に収まるよう解析を行う。

図 6 に解析結果を示す。日射の影響による窓側の温度の上昇を約 2°C に抑えられ、平均放射温度は 26~28°C に収まった(図 6)。吹き出す冷気が窓面に沿って床表面に落ち

たため、床と窓の表面温度が下がったからである。1階各部屋の作用温度が25.5~27.5℃に収まった(図7)。また、図8に示すように、居住域の風速が0.25m/s以下に抑まった。以上より、この案により窓側の放射温度を下げられることを確認した。

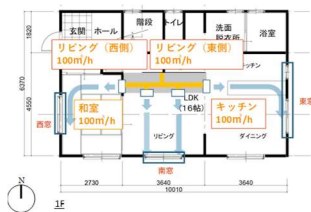


図5 吹出口配置

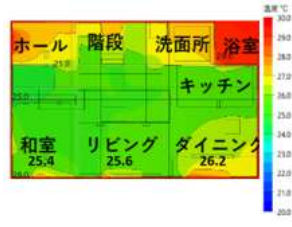


図6 平均放射温度(床面+1.1m)

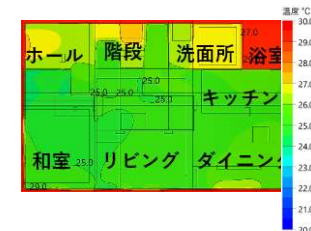


図7 作用温度(床面+1.1m)

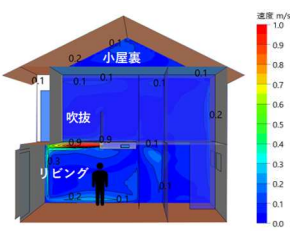


図8 風速分布

3. 暖房の検討

3-1 検討条件

暖房の検討は本システムを搭載した、冬季の実測物件のC邸を対象に行う。C邸は吹抜を有する2階建の戸建住宅である(図9、赤いところは立下りダクトの位置である)。システムがB系統で運行する場合、暖かい気流が1階のスリットから室内に流入し、対流の形で室内に放熱する。そして、床の表面温度も高いので、放射の形で室内に放熱する。室内の温熱環境を改善するため、CFD解析

を行い、室内快適性の検証を行った。土壌温度について、深さ10mよりも深い地点の温度は、四季の気温変化によらず一定でありその地域の年平均気温にほぼ等しくなっている³⁾。そのため、土壌温度は地下10mのところ(15℃)として設定する。

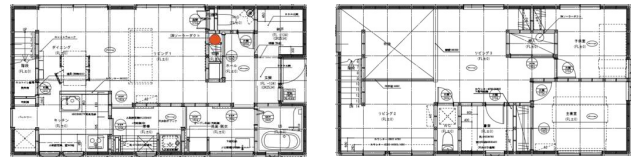


図9 D邸平面図(左1F右2F)

3-2 吹き出し温度に関する検討

冬季の寒い日において、B系統で暖房をつける場合、適切な吹き出し温度を探すため、以下検討を行った。解析日時は暖房負荷が上位10%の日時(12/21 9:00)とした。システムが最大風量、最大能力で運行する場合、立下りダクトの吹き出し温度が33℃である。ここでは、立下りダクトの吹き出し温度が33℃、32℃、31℃、30℃の4つのケースを作成して、最適な吹き出し温度を探す。解析条件は表4に示す。

表4 CFD解析条件

解析コード	FlowDesigner2020	日射条件	直達日射量:152W/m ² 散乱日射量:131W/m ²
流体モデル	高レイノルズ数型標準k-εモデル 乱流強度10% 長さスケール比0.07	流入条件	B系統 600m ³ /h 33℃/32℃/31℃/30℃
メッシュ数	6479928	流出条件	600m ³ /h
数値解法	高速-圧力補正:SIMPLEC 差分法:風上1次	土温度	15℃(深さ10m)
解析対象日時	12/21 9:00(上位10%暖房ピーク負荷)	内部発熱	人体発熱:1人分(顕熱のみ,60W) 家電発熱:369W(HEAT20で想定) 照明:153W(HEAT20で想定)
収束判定条件	(定常) 1.0×10 ⁻⁵		
外気条件	外気温:9.9℃ 外気風速:0.1m/s(疑似無風)		

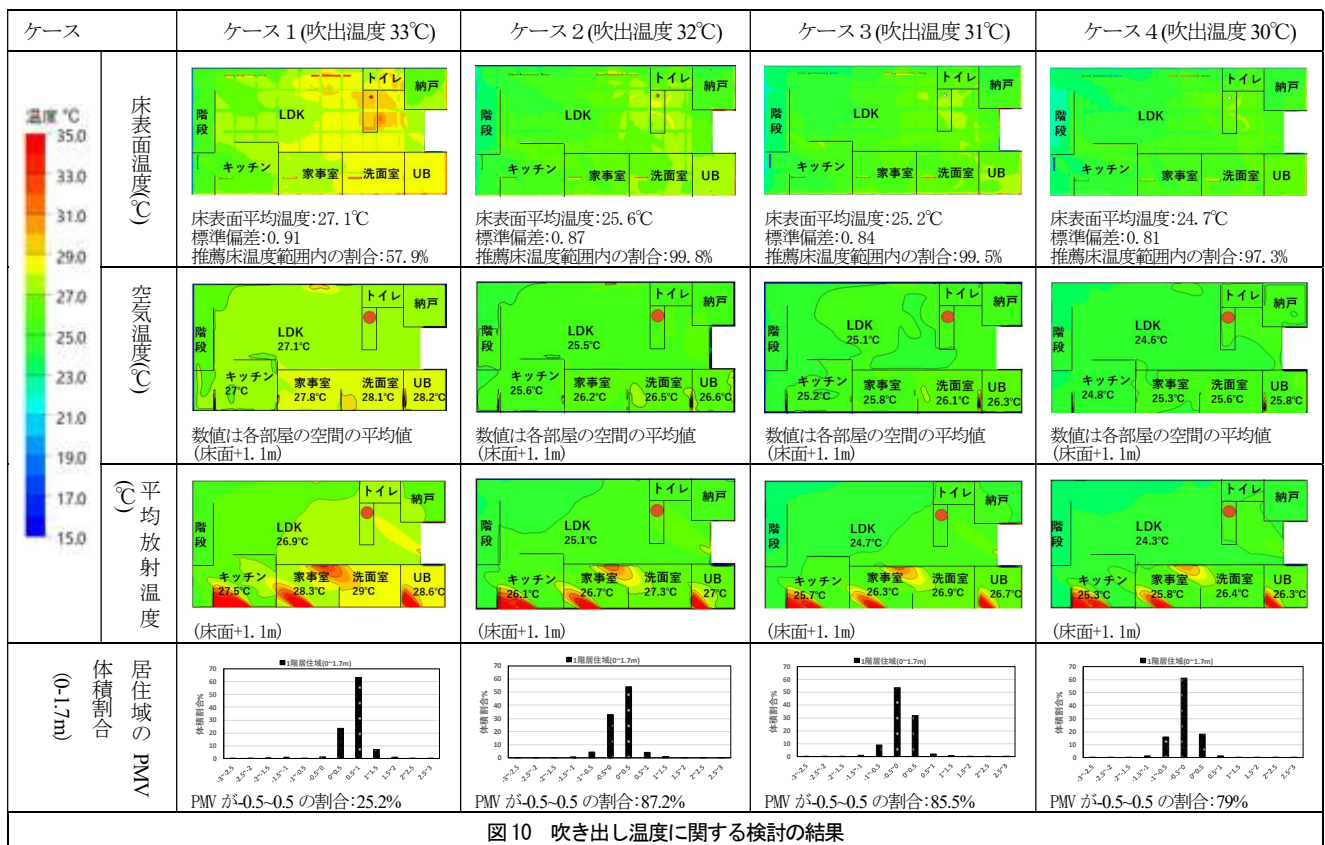


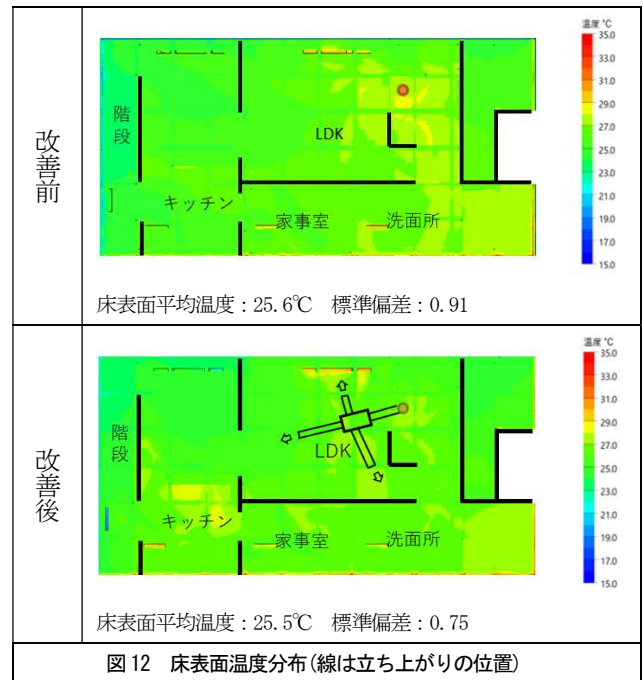
図10 吹き出し温度に関する検討の結果

結果を図10に示す。ケース1の場合には、吹き出し温度が高すぎたため、立下りダクトの周辺の床表面温度も高くなってしまった。その結果、立下りダクトの周辺の平均放射温度が高く、1階の居住域PMVが-0.5~0.5となる割合が25.2%であった。また、全体的に床表面が熱くなっており、床表面温度の温度ムラも大きい。ケース2とケース3の場合は、1階の居住域PMVが-0.5~0.5となる割合が高く、平均放射温度も24℃~28℃に収まった。ケース4では居住域PMVを見ると、少々寒く感じられることがわかる。立下りダクトの吹き出し温度が下がるのに伴って、床表面の温度ムラが少なくなっていた。以上の4つのケースの結果を比較すると、ケース2(吹き出し温度が32℃)の場合には、1階の居住域快適率が一番高くなり、87.2%である。各室の平均温度の差が見られず、1階の床表面温度の99.8%が木質床材の推薦床温度範囲内²⁾に収まるため(23℃~28℃)、ケース2が最適な吹出温度である。

3-2 床下分岐ダクトに関する検討

上記の検討より、ケース2においても床表面の最大温度の差が6.4℃となっており、床表面の温度ムラが大きい。本システムは暖房時に床下に暖気を送り込むが、基礎立ち上がりにより暖かい空気が届きにくい部屋が存在することが、主な要因として挙げられる。これを改善すべく提案として、吹き出し気流を必要のところに吹き出すように、床下分岐ダクトを作った(図12)。床面の温度ムラを改善するため、同じ解析条件で解析を行う。

解析結果を図12に示す。結果を見ると、床下の気流分布がさらに均一になったので、立下りダクトの周辺の床表面温度が高すぎるとい現象が見られなくなった。具体的には、改善後の床表面の最大温度の差が5.2℃になり、1.2℃下がった。そして、温度の標準偏差を見ると、温度の散らばりが小さく、ほとんど平均温度の25.5℃付近に分布していることがわかる。さらに1階の床表面温度の99.8%が木質床材の推薦床温度範囲内³⁾(23℃~28℃)に収まった。以上より、床表面温度の差を改善する効果を確認した。



4. 総括

本研究では、本システムを搭載した住宅について、室内の温熱環境を改善する目的で、吹出口と床下のダクト方式の適切な配置計画についてCFD解析を用いて検討を行った結果以下の知見を得た。

(1)本検討により、A、C系統で冷房をつける場合には、壁付けグリルタイプ吹出口を用いて窓方向に吹き出すと、窓側の放射温度を下げる効果がある。

(2)暖房時において、床下分岐ダクトを採用すると、1階の床表面温度の差及び室内の温熱環境を改善できる。

今後は吹出口の種類とモデルを拡張して、室内の温熱環境を改善するために、検証を進めたい。また、B系統で暖房をつける場合、圧力損失により分岐ダクトの風量バランスが室内の温熱環境に大きな影響を与えるので、床下分岐ダクトのレイアウトについても検討したい。

[参考文献]

- 1) 山本遼子 他 : 空気式太陽熱集熱システムを採用した戸建住宅に関する研究 第6報 空気調和・衛生工学会学術講演論文集 2017.9
- 2) 「次世代 CFD パーツの開発および BIM による空調設備設計統合手法」委員会報告書、空気調和・衛生工学会換気設備委員会 BIM・CFD パーツ開発応用小委員会、2018 年
- 3) 「節電に貢献する地中熱の利用」地中熱利用促進会、2011 年
- 4) 「HEAT20 設計ガイドブック+Plus」2020 年を見据えた住宅の高断熱化技術開発委員会 2016
- 5) 「快適な温熱環境のしくみと実践」空気調和・衛生工学会、2019 年