

# 日射を考慮した住宅の冷房吹出口の配置手法の提案

随伴変数法を用いた CFD 逆解析の活用

# THE PROPOSAL OF LAYOUT METHOD FOR COOLING OUTLETS IN A RESIDENTIAL HOUSE WITH THE CONSIDERATION OF SOLAR HEAT GAIN

Utilization of CFD inverse analysis using adjoint variable method

劉 行 ——— \* 1 前 真之 ——— \* 2  
高瀬幸造 ——— \* 3 谷口景一郎 ——— \* 4  
孫 路寧 ——— \* 5 盧 炫佑 ——— \* 6  
桃瀬一成 ——— \* 7 池島 薫 ——— \* 8

Hang LIU ——— \* 1 Masayuki MAE ——— \* 2  
Kozo TAKASE ——— \* 3 Keiichiro TANIGUCHI — \* 4  
Luning SUN ——— \* 5 Hyunwoo ROH ——— \* 6  
Kazunari MOMOSE — \* 7 Kaoru IKEJIMA ——— \* 8

キーワード：

CFD 逆解析, 随伴変数法, 室内温熱環境の改善, 吹出口配置, 日射

Keywords:

CFD Inverse analysis, Adjoint variable method, Improvement of indoor thermal environment, Arrangement of cooling outlets, Solar radiation

A quantitative guideline on the optimal design of a cooling air outlet is important to guide the design of the residence. There are many studies on the indoor thermal environment of ducted cooling air outlet using CFD, but few of them include empirical analyses. This research carried out an inverse analysis that takes solar radiation into consideration in order to study the effective arrangement of air outlets that can achieve a comfortable indoor thermal environment during cooling. The results showed that the inverse analysis using CFD is effective while designing the indoor thermal environment and can be used in practice.

## 1. はじめに

住宅の高気密化・高断熱化に伴い、セントラル空調は近年増加している傾向が見られる。セントラル空調・個別空調に限らず、住宅の空調制御は給気を室内に均一拡散させることが要求されている。昨今の気候変動の影響に加え、冷房吹出口からの冷気が人体に直接当たることによる不快感の増大や、部屋ごとの日射熱取得の状況が異なる場合には各吹出口での空調出力調整が難しい等の問題があり、冷房時の室内温熱環境に関する研究は、より重要になるとと思われる。

セントラル空調における室内温熱環境に関する先行研究は多岐にわたり、数値流体計算（以下 CFD）を用いた研究も多く見られる。特に冷房吹出口の研究はこれまでに多くなされているが、それらの多くが吹出口形状、噴流性状の分析<sup>1)2)</sup>、吹出口の開発<sup>3)</sup>や CFD におけるモデリング手法<sup>4)</sup>に関するものである。藤田ら<sup>5)</sup>は通過熱量と PMV の推移を指標として、異なる形状の吹出口による気流の性状について考察を行った。近藤ら<sup>6)</sup>はアネモ型吹出口を対象として実大実験を行い、実験結果を基礎データとして PV 法及び BOX 法を適用した場合の解析を行った。一方で、吹出口の特性を考慮した配置計画を検討した研究報告は少ない。

また、CFD を用いて風速、温度を解析する際、望ましい結果を求め

るために、試行錯誤で計算の初期温度等の条件設定についての検討を繰り返して行う場合が多く、検討の効率が悪いなどのデメリットがある。このような状況を鑑みると、冷房吹出口の最適設計に関する定量的な指針が提案できると効率的な空調設計の手助けとなるであろう。望ましい結果を導く条件を探る手法(CFD 逆解析)の一つとして随伴変数法が挙げられる<sup>5)6)7)8)9)</sup>。遺伝的アルゴリズム(GA)<sup>10)11)</sup>などを用いた大域的最適化法とは異なり、随伴変数法は差分法などを用いた勾配型最適化法であり、探索精度及び計算速度の向上を図ることができ、設計変数をわずかに変化させてより良い解を導く、局所最適解を探る手法である。

CFD の逆解析手法を用いた吹出口の設計手法に関する先方研究は幾つかあり<sup>5)6)12)13)</sup>、桃瀬・池島<sup>5)6)</sup>は設定領域の温度を目標値に近づけることを目的として、各吹出口の温度、速度や壁面の熱流束の最適化を行った。しかし、検討対象は簡単な立方体で構成されており、戸建て住宅のような複雑なプランを対象とした検討例は見られない。

本報告では、設計段階において CFD 逆解析を用いた室内温熱環境の検討が、より良い空調計画の実現にとって有効であることを確認し、これを設計手法として提案することを目的とする。セントラル空

<sup>1)</sup> 東京大学大学院工学系研究科 学術支援専門職員・修士 (工学) (〒113-8656 文京区本郷 7-3-1)

<sup>2)</sup> 東京大学大学院工学系研究科 准教授・博士 (工学)

<sup>3)</sup> 東京理科大学理工学部建築学科 講師・博士 (工学)

<sup>4)</sup> 東京大学大学院工学系研究科 特任助教・修士 (工学)

<sup>5)</sup> 東京大学大学院工学系研究科 大学院生・修士 (工学)

<sup>6)</sup> OM ソーラー(株) 取締役・技術部長・博士 (工学)

<sup>7)</sup> (株)アドバンスドナレッジ研究所 取締役・博士 (工学)

<sup>8)</sup> (株)アドバンスドナレッジ研究所 代表取締役・博士 (工学)

<sup>9)</sup> Project Academic Support Staff, Grad. School of Eng., The Univ. of Tokyo, M. Eng.

<sup>10)</sup> Assoc. Prof., Graduate School of Eng., The Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

<sup>11)</sup> Junior Assoc. Prof., Faculty of Sci. and Tech., Tokyo Univ. of Sci., Dr. Eng.

<sup>12)</sup> Project Assist. Prof., Graduate School of Eng., The Univ. of Tokyo, M. Eng.

<sup>13)</sup> Grad. Student, Grad. School of Eng., The Univ. of Tokyo, M. Eng.

<sup>14)</sup> Director, OM Solar Inc., Dr. Eng.

<sup>15)</sup> Director, Advanced Knowledge Laboratory Inc., Dr. Eng.

<sup>16)</sup> Representative Director, Advanced Knowledge Laboratory Inc., Dr. Eng.

調を搭載する戸建て住宅を対象に日射を考慮した逆解析を用いて、冷房時に快適な室内温熱環境を実現するための吹出口の配置等の検討を行う。

## 2. 実測によるシステム搭載住宅の温熱環境の現状把握

### 2.1 システム概要

本報告の研究対象(図1)は暖房、冷房、換気、給湯を一つのシステムで賄う「ヒートポンプ一体型空気集熱式太陽熱システム」(以下本システム)を利用した住宅である。夏期には夜間の外気導入を行うと共に、冷房排熱を給湯沸き上げに利用するヒートポンプで冷房運転を行う。また、通年で熱交換換気を行っている。室内からのリターン空気を室内排気と熱交換した新鮮外気と混合した後、ヒートポンプで冷やされた冷気はダクトを介して各居室に供給される。

本システムは、実運転の際に各居室の供給風量がシステムのSA温度の下限値と各居室の熱負荷から導かれる必要風量を満たすように、ダクトの長さや限られたスペースを用いた経路について注意深く検討する必要がある。また、居室間熱負荷の偏在化により、各居室の温度差が生じ得ることに注意が必要である。

### 2.2 本システム搭載住宅の温熱環境実測

#### 2.2.1 実測概要

本システムを搭載した実住宅の冷房運転時の温熱環境を把握するため、HEAT20のG1相当の断熱性能<sup>14)</sup>が確保されている5地域の住宅を対象として実測を行った。表1に評価対象物件の概要、図2平面図および吹出口設置位置を示す。対象の住宅は茨城県つくば市にある延床面積132㎡の木造2階建ての住宅(モデルハウス)である。各居室の天井に本システムの吹出口は設置されており、2階ロフトの吹出口は壁に設置されている。また、トイレ及び浴室に関しては本システムとは別に通常時は不使用の局所排気用ファンが設置されている。

#### 2.2.2 実測結果及び考察

測定項目は外気温、各居室温度、各吹出口(SA)温度、吸込口(RA)温度とし、1分間隔で測定した。図2に計測点、表2に実測条件、表3に各吹出口実測風量を示す。設定温度を27℃とし、24時間の連続冷房運転に設定されている。今回調査した住宅における本システムの自動運転時総風量は500㎡/h程度で、冷房能力の調整可能な項目は設定温度のみである。2019年3月から実測が始まり、同年度の内、外気温が最も高く、日射量が多い夏季の8月9日を代表日として分析を行った。

図3にシステムの運転状況を示す。冷房負荷の大きい日中ではRA温度が概ね27℃に対して、SA温度が15℃~18℃で制御されている。冷房負荷が小さい夜間から朝にかけて夜間外気取り込み運転を行う。外気温が最高温度の35.5℃になった時でも、居住域室温は、吸込口(RA)温度及び主居室温度と等しく約25℃~27℃に維持できており、居住者が要求する温熱環境水準を概ね満足していると思われる。

図4に各居室の室温の経時変動を示す。居室温度の変動は小さく、25℃~27℃範囲以内にとまっていることが示された。図5に居室以外の部屋の室温の経時変動を示す。居室以外の部屋の室温はおよそ28℃であることが確認できた。夜間に内部発熱が小さいため、外気と還気を混合するダンパが制御され吹出口(SA)温度は周期的に変動するが、室内温度にはあまり影響しないことが確認できた。しかし、各居室の吹出口温度が同じでも、日射の影響等で居室と非居室間の温度差は最大3℃程度あることも明らかとなった。

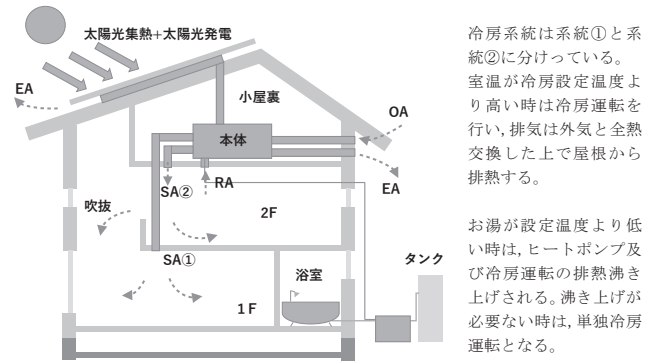
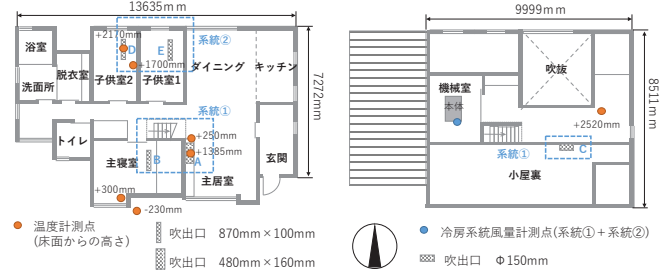


図1 研究対象とするセントラル空調のシステム図(冷房)

表1 評価対象概要

省エネ地域区分	5地域(つくば市)	基礎断熱	押出法ポリスチレンフォーム 立ち上がり部100mm 土間部50mm
日射量地域区分	A3/H2		
建築面積(㎡)	109	PV容量(kW)	8.7
延床面積(㎡)	132	$\eta_{AC}$	1.4
$U_A(W/m^2 \cdot K)$	0.34		



※1階吹出口は全て天井に設置、2階ロフト吹出口は壁に設置

図2 物件図面及び吹出口設置位置(左:1階 右:2階)

表2 実測条件

代表日	最高外気温度	日積算日射量	空調設定温度	冷房自動運転時風量
8月9日	35.5℃	22.4MJ/㎡	27℃	500㎡/h程度

表3 各吹出口実測風量

系統 記号	系統①			系統②	
	A	B	C	D	E
場所	主居室	主寝室	2Fロフト	子供室1	子供室2
風量[㎡/h]	136	108	129	68	68

※各吹出口の記号は図2に示す。

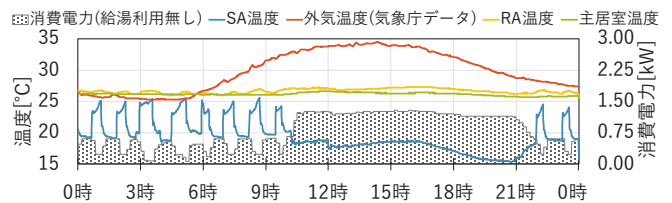


図3 システムの運転状況(2019年8月9日)

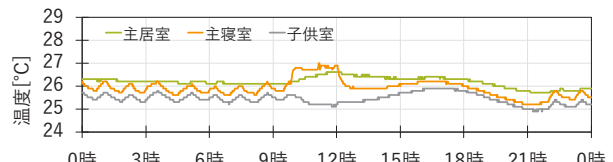


図4 各居室の室温の経時変動(2019年8月9日)



図5 居室以外の部屋の室温の経時変動(2019年8月9日)

以上より、今回調査した住宅においては、各居室温度が25℃～27℃内に収まっているが、室間の温度差が生じていることを確認した。このような温度差を解消するには、各部屋の日射や内部発熱等の取得熱を考慮した熱負荷の変動に対応して、各吹出口での変風量制御が望ましい。しかし、今日の住宅向けのセントラル空調システムの多くは、その施工、コストの制約から、各吹出口の風量比を細かく制御可能な仕様ではない。このような事情から、住宅用セントラル空調システム利用時における温熱環境の快適性の担保には、各室の熱負荷のばらつきや温度分布を考慮し、吹出口の配置を設計段階で検討することが有効である。また、近年で広く普及しつつある高断熱住宅においては日射遮蔽のより慎重な検討も重要である。

### 3. 熱負荷計算とCFD(順解析)による温熱環境の再現

吹出口の検討を行うため、実際の温熱環境を再現する必要がある。非定常熱負荷計算ツールのホームズ君「省エネ診断エキスパート」<sup>注1)</sup>を用いて、熱負荷計算結果をCFD境界条件に反映した解析を行った。なお、今回のCFD解析においては、顕熱負荷のみを計算し、潜熱負荷を考慮しない。

#### 3.1 熱負荷計算

実測データから得られた代表日の妥当性を検証するため、ホームズ君で熱負荷計算を行った。表4に各部位の断熱性能、表5に各居室の窓性能を示す。日射遮蔽は実際の状況と合わせて主居室の和障子を考慮し計算を行う。対象建物がモデルハウスであるため、発熱無しとした。使用した熱負荷計算ツールでは、気象庁で公開している2019年3月～2020年2月のアメダスデータを用いて、各窓面の日射熱取得量と1時刻刻みの年間熱負荷を計算した。その結果、冷房顕熱負荷の結果からも8月9日が冷房ピーク負荷発生日であることが確認され、12時にピーク負荷時が生じることが分かった。図4に示したように12時頃に居室間温度差が最も大きくなる原因は、南側にある主居室、主寝室が日射の影響を受けたためであると考えられる。

#### 3.2 CFD解析概要

今回の解析は南側にある主居室を対象として行うため、日射の影響を考慮して実測データから室間温度差が最も大きい12時を対象とした。日射を考慮したCFD解析を行うため、熱負荷計算結果が必要となり、冷房顕熱負荷と日射熱取得量をCFD境界条件に反映した。表6にCFDの解析条件、図6に解析モデルを示す。日射を境界条件として与えるにあたり、気象データは気象庁で計測しているつくばの水平面全天日射量を宇田川の式<sup>16)</sup>で直散分離した日射量データを利用し、CFDの日射解析(輸送方程式)<sup>17)</sup>を用いる。また、各吹出口のは表3で得られている風量を設定し、先に求めた冷房負荷をシステム全体で設定することで、吹出口温度がイタレーション毎に自動的に求められる設定とした。吹出口の気流性状の再現に当たっては、カタログ値から各風量条件の到達距離を計算し、CFDとの誤差が10%以内に収まることを事前に把握して、モデル化の妥当性を確認した。

窓面と外壁の断熱性能の設定方法については、室内外表面間の熱抵抗と同じ熱抵抗となる厚み無しの面として作成した。熱伝達率については、室外側を23W/(㎡・K)とし、室内側熱伝達率はCFDで自動的に算出した。更に、開口部の設定ではガラスの日射透過率、吸収率、反射率を設定し、窓に当たる日射については透過分、反射分と吸収分に分け、ガラスに吸収された日射熱の一部が再放熱成分として室内

表4 各部位熱性能

部位	屋根	天井	外壁	床/土間床・基礎	間仕切り壁
熱抵抗(㎡・K/W)	6.25	0.24	2.56	2.33	0.27

表5 各居室の窓性能<sup>15)</sup>

	主居室	主寝室	子供室	居室以外(例)
窓サイズ W(mm)×H(mm)	2480×1860	1620×1560	900×1450	580×1980
南面		南面	北面	南面
U値(W/㎡・K)	1.27	1.68	1.11	1.42
η値	0.27	0.48	0.27	0.27
フレーム仕様	木製サッシ		アルミ樹脂サッシ	
ガラス種類	ペア・高断熱複層ガラス	Low-E複層ガラス クリア・アルゴンガス入り	トリプルガラス アルゴンガス入り	トリプルガラス アルゴンガス入り
ガラス日射透過率	0.208	0.369	0.208	0.208

表6 CFD解析条件

解析コード	FlowDesigner2020	
解析対象	速度・温度・輻射(輸送方程式)・日射(輸送方程式)	
乱流モデル	標準k-εモデル	
壁関数	対数則+Spalding則	
数値解法の設定	流速-圧力補正SIMPLEC、風上1st-order	
メッシュ数	5264710 (構造メッシュ)	
解析対象日時	8月9日12時 定常解析	
境界条件	外気	外気温: 35.5℃、外部風: 0.1m/s(疑似無風)
	流入条件	吹出風量: 表3に示した各吹出口風量
		乱流強度10% 長さスケール比0.2
		吹出温度: 自動計算
	流出条件	509㎡/h
	空調処理熱量	1640W(熱負荷計算)
	太陽位置	太陽高度69.6° 太陽方位10.3°
地物反射	法線面直達日射量	571W/㎡
	散乱日射量	304W/㎡
	地物反射	考慮しない

※吹出口でのk値,ε値の算出式  
 $k$ 値  $k = 3/2(U_{in}k_{in})^2$   
 $\epsilon$ 値  $\epsilon = C_{\mu}^{3/4}k^3/L_{in} = 0.1643k^3/(2L_{in})$   
 $k_{in}$ : 乱流強度  $U_{in}$ : 吹出口流速(m/s)  
 $L_{in}$ : 長さスケール(m)  $L_r$ : 長さスケール比(単位無し)  $L_d$ : 吹出口の代表長さ  
 $C_{\mu} = 0.09$

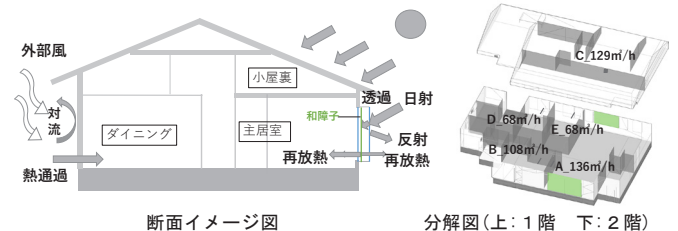


図6 解析モデル

※緑色部分は和障子付きの主居室とダイニングの窓である。

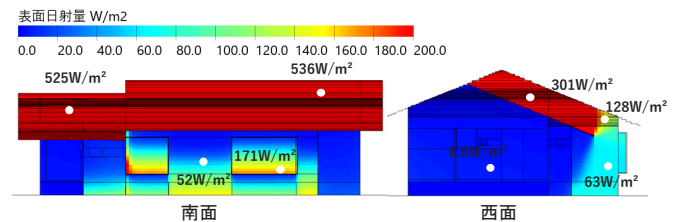


図7 表面日射量分布

表7 窓表面温度と窓近傍の空気温度

	主居室	主寝室	子供室	居室以外
窓表面温度	35℃～45℃	35℃～43℃	34℃～35℃	33℃～34℃
窓近傍空気温度	29℃～34℃	29℃～33℃	25℃～28℃	27℃～28℃

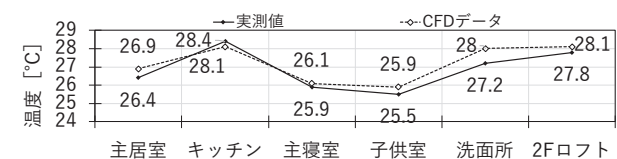


図8 実測値とCFD解析結果の比較

側に放出されるものとした。再放熱成分を再現するため、熱負荷計算で得られた開口部を透過した日射熱取得量をCFDにガラス面の発熱量として入力した。また、室内建具は閉めた状態で解析した。

### 3.3 CFD解析結果

図7に日射解析による表面日射量、表7に窓表面温度と窓近傍空気温度を示す。主居室と主寝室の窓近傍の空気温度結果より、南側窓を透過した日射熱の一部を和障子が吸収して室内側に放熱する影響が認められ、窓近傍の空気温度が37℃～40℃と高くなる傾向が見られた。子供室の窓は北に面しているため、窓の表面温度が南側より約10℃低かった。北側の室内空気温度が25℃～28℃であり、日射の影響が少ないため、窓近傍の空気温度と部屋の平均温度との違いは見られなかった。

実測での各室温計測点について、CFD解析での計算結果と実測値はほぼ一致することを確認した(図8)。図9に室内温度分布を示す。床面から離れた1.1mでの断面における室内温度分布を示しており、図中の数値は各室の平均温度を表す。主居室、ダイニング、キッチンに大きな温度ムラは生じず、約27℃となった。一方、子供室と主居室の温度が26℃程度であることに對し、洗面所と2階の温度が28℃以上となり、室間での温度差があることが確認された。CFD解析による、平均温度の解析結果は実測と同様に各居室の温度が25℃～27℃の範囲内に収まり、居室以外の部屋の温度が28℃程度になったことが確認できた。

図10にCFD解析結果のPMV体積割合を示す。1階でのPMVは0.6～0.6に収まる割合が77%となったことが確認できた。一方、図11に示す居室の有効ドラフト温度(EDT)<sup>18)</sup>が-1.5℃～1℃の範囲内に入っていた。また、室内風速は概ね0.1m/s以下であり、ASHRAE Standard 55に定められた不快でない風速範囲となるため、多くの居住者(成人)によって快適と感じる環境を実現できることを確認した。

## 4 日射を考慮した逆解析による吹出口の配置に関する検討

### 4.1 随伴変数法による逆解析の概要

本報告では、住宅冷房時の室内温度差を低減するために吹出口の配置を逆解析で探り、優先度順に「位置感度」を感度分布として算出する。ここで扱う位置感度についての詳細な理論概要は参考文献<sup>5)~9)</sup>に記述する。

逆解析の有効性と効率性を検証するため、4つのケースを想定し比較を行った。ケース1からケース3までは第3章より得られた結果に基づき、試行錯誤で前段階の結果を改善するため、吹出口の位置修正を試みた。ケース1,2,3では順解析のみを吹出口位置を経験則で決めるのに対して、ケース4は逆解析を行い、感度分布に示された指針から吹出口位置を決める。逆解析の初期値は図9に示す順解析の温度結果に表したように各居室の温度差を低減するため、室内における評価領域(主居室)床面から高さ1.7mまでの範囲の平均温度の目標値を27℃と設定した。解析条件は表8に示す。なお、上記のケース1,2,3は「試行錯誤」から得られた望ましい結果である。

### 4.2 日射を考慮した逆解析の結果

図12に位置感度分布の結果を示す。室内温熱環境を均一にするため、吹出口位置を調整する優先順位は主居室、2階ロフト、主寝室、子供室とした。位置感度は優先度を表し、感度値が大きいほど優先度が高くなる。また、矢印の向きにより各吹出口位置を移動すべき方向が

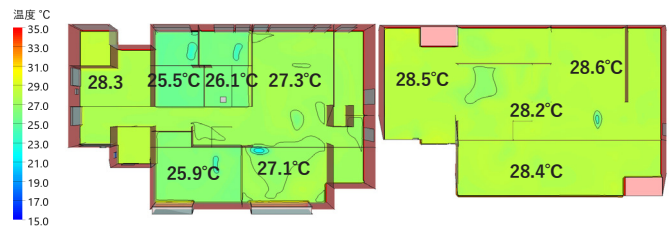


図9 CFD解析の温度分布(左:1階 右:2階)

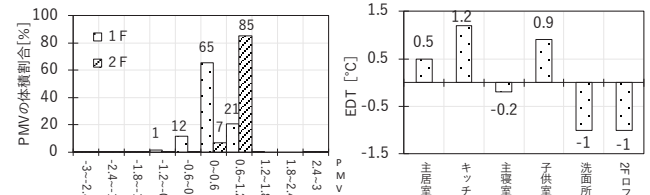


図10 PMVの体積割合

図11 有効ドラフト温度

※PMVの体積割合の対象は1Fと2F全体の床面から高さ1.7mの2つの空間

表8 逆解析の解析条件

初期値	順解析で計算した結果(図9)
メッシュ数	4816065 (構造メッシュ)
目標値(主居室空間平均)	27℃(温度)、0.0m/s(風速)
目標変化量	5%
終了条件(変化率)	0.50%

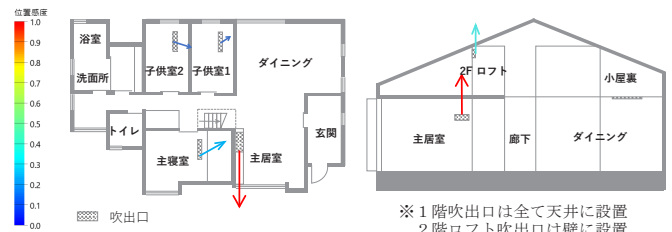


図12 位置感度感度分布結果

示されている(天井吹出口の移動はすべて平面方向のみである)。窓近傍の空気温度は日射の影響により高かったため、主居室の吹出口位置は南窓近傍に移動すべきことが示された。日射の影響を正しく考慮し、有効な改善方針を示すことができた。

図13に検討ケース条件と結果を示す。ケース1とケース2では、主居室とダイニング部分の温度ムラが大きく、西側洗面所部分の温度が28℃以上となり、現状より温度が高くなる場所も見受けられた。ケース3ではケース1,2より温度ムラが大きいため、試行錯誤は必ずしも住宅全体の温熱環境を改善させることができていないわけではないことがわかった。ケース4は感度分布に示された方向に吹出口位置を変更した結果である。ケース4では、1階全体の温度分布は25℃～27℃になる割合は65.3%となり、PMVは-0.6～0.6に収まる割合が78.7%となった。ケース1と比べケース4は、温度が25℃～27℃に収まる割合が16.7%を増加し、PMV-0.6～0.6の範囲内になる割合が45.8%増加した。ケース4の各居室の温度差が少なく、建物全体の温熱環境が均一になる傾向が見られた。これらの結果より、随伴変数法を用いた逆解析の有効性が確認できた。

ケース1,2,3の試行錯誤は第3章の現状結果から分析し、変更条件が検討を行う個人の経験に依存される可能性があり、膨大なケースを試し、再度最適案を探る必要がある。ただし、必ずしも毎回の結果

ケース	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4
初期値	図 9 に示した結果	ケース 1 の結果	ケース 2 の結果	図 9 に示した結果
変更点	子供室 2 の吹出口を西側に移動	子供室 2 の吹出口を東側に移動	子供室 2 の吹出口を東側に移動	—
	主寝室吹出口を西側に移動	子供室 1 の吹出口を西側に移動	子供室 1 の吹出口を東側に移動	
	2 階ロフト吹出口を下に 50mm 移動	主寝室の吹出口を東側に移動	主寝室の吹出口を室のドア側に移動	
	—	主居室の吹出口を東側に移動	主居室の吹出口を南窓側に移動	
目的	主居室の温度ムラと居室間の温度差を低減させ、西側部分の温度を下げるため	各居室間と居室と非居室間の温度差を低減させるため	主居室、ダイニング、子供室 2 の温度ムラ、各居室間と居室と非居室間の温度差を低減させるため	室内温度を均一させるため、各居室間と居室と非居室間の温度差と温度ムラを低減させるため
解析時間	2 時間 10 分 (順解析)	2 時間 20 分 (順解析)	2 時間 5 分 (順解析)	6 時間 50 分 (順解析+逆解析)
温度分布結果 (1F)				
PMV 分布結果 (1F)				
PMV の体積割合 (1F、2F)				

図 13 検討ケース条件と結果

※解析時間はパソコンの性能に依存する。今回使ったパソコンの性能は Intel Core i7 7700 3.6GHz 4 Core, DDR4 PC4-19200 64GB, Windows 10 Pro 64bit である。

果が良くなるわけではなく、悪化する可能性もある。また、「試行錯誤」で得られた改善案は最も良い結果であることを判断することはできず、より良い改善案がある可能性も存在する。また、試行錯誤の回数を重ねることによって、計算時間が逆解析の数倍以上かかることもある。逆解析は、CFD 解析を実行する個人の経験によらずに設計の方向性が示されるという点において、時間的効率性の点でも有効である可能性が高い。

## 5. まとめ

本報告では、本システムを搭載する住宅の冷房時に各居室の温度差を低減することを目的とし、随伴変数法を用いた CFD 逆解析を活用した冷房吹出口の配置計画に関する検討を行った。主な結論を以下に示す。

- ① 逆解析結果に従って吹出口の位置を変更することで、各居室の温度差が少なくなり、快適範囲が増加することが確認できた。
- ② 日射を考慮した逆解析により算出された感度を参考する温度ムラを効果的に低減させる吹出口の配置が可能となり、解析する

個人の熟練度等に依らずにより適切な計画を提案可能になると考えられる。

一方で、今回の検討対象とした住宅では、主居室の南側にある窓の日射取得が冷房時の室内温熱環境に影響する主な要因となるため、最も居室間温度差が大きくなる昼間の 1 時刻のみについて定常解析を行った。別の住宅の設計時においても日射量等の外界気象条件の経時的な変化が各室の熱負荷や温熱環境にどれほどの影響を与えるかについて事前に年間気象データを用いた非定常熱負荷シミュレーションで確認し、その結果によっては、吹出口配置提案のための非定常 CFD 解析も有効と考えられるが、非定常解析において逆解析が適用できるのかの検証も行う必要がある。また、本報で示した吹出口配置手法をより多くの住宅で適用するためには、より多様な吹出口種類、日射遮蔽等の CFD 上での再現や、暖房時の適切な吹出口の配置等計画手法についても検証する必要がある。

## 謝辞

本報告の解析対象については、OM ソーラー株式会社と伊礼智設計

室から提供戴いた図面を使用させて頂いた。また、(株)アドバンスドナレッジ研究所の多くの方々に多大なるご協力を頂いた。ここに記して、謝意を示す。

#### 注

<sup>(注1)</sup>ホームズ君「省エネ診断エキスパート」は宇田川研究室が開発した EESLISM を計算エンジンとして、「平成 28 年省エネ基準」に対応した住宅の外皮性能、日射量の計算、非定常熱負荷計算を行えるソフトウェアである。

#### 参考文献

- 1)藤田理緒:吹出口の違いによる局所冷却性能の評価,立命館大学大学院,理工学研究科,2012年度修士論文梗概
- 2)NAGASAWA Y., et al.: FACTORS OF AIRFLOW DISTRIBUTION FROM SYSTEM CEILING AIR DIFFUSERS AND ITS UNSTRUCTURED FINE ELEMENTS CFD SIMULATION, Development of airflow data for CFD simulation with an air diffuser model and its application (Part 1), Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 77, No. 672, pp. 55-64, 2012. 2 (in Japanese)  
長澤康弘, 近藤靖史: システム天井用吹出口の吹出気流性状に影響を与える要因の整理と非構造格子系 CFD 解析による検討, 空調用吹出口の CFD モデリングのための吹出気流データの整備とその適用(その 1), 日本建築学会環境系論文集, 第 77 巻, 第 672 号, pp. 55-64, 2012. 2
- 3)病院用拡散型空調吹出口の開発(その 1), 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp. 125-128, 2018. 9
- 4)KONDO Y., et al.: MODELING OF AIR DIFFUSER INSTALLED AT CEILING FOR CFD SUMULATION, Experiments and numerical simulation on complex air diffuser at isothermal condition (Part1), Journal of Architecture and Planning (Transactions of AIJ), Vol. 67, No. 577, pp. 65-72, 2002. 7 (in Japanese)  
近藤靖史, 長澤康弘, 張本和芳, 守屋賢志: 数値流体解析における空調用天井吹出口のモデリング手法 等温実大実験と数値シミュレーション(その 1), 日本建築学会計画系論文集, 第 67 巻, 第 577 号, pp. 65-72, 2002. 7
- 5)安倍恒平, 桃瀬一成, 木本日出夫: 随伴数値解析を利用した自然対流場の最適化, 日本機械学会論文集(B編) 70 巻 691 号, pp. 167-174, 2004. 3
- 6)桃瀬一成, 池島薫: 感度解析に基づく熱対流場設計支援システムの開発, 変分法に基づく感度解析, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp. 403-406, 2006. 9
- 7)池島薫, 桃瀬一成: 感度解析に基づく熱対流場設計支援システムの開発, システムの概要と応用例, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp. 407-410, 2006. 9
- 8) MASHIMO A., et al.: PROPOSAL OF DESIGN METHOD TO OPTIMAL ARRANGEMENT OF TREES FOR WIND VELOCITY REDUCTION, Study about utilizing reverse simulation for CFD using the adjoint variable method, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 80, No. 715, pp. 803-813, 2015. 9 (in Japanese)  
眞下茜ほか 5 名: 風速低減を目的とした樹木の最適配置に関する設計手法の提案, 随伴変数法を用いた CFD 逆解析の活用に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 80 巻, 第 715 号, pp. 803-813, 2015. 9
- 9)MASHIMO A., et al.: PROPOSAL OF DESIGN APPROACH FOR DETERMINING THE OPTIMAL ARRANGEMENT OF PARTITION WALLS IN A STATION BUILDING TO REDUCE WIND VELOCITY IN WINTER AND PROMOTE HEAT REMOVAL IN SUMMER, Study about utilizing reverse simulation for CFD using the adjoint variable method, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 81, No. 721, pp. 307-317, 2016. 3 (in Japanese)  
眞下茜ほか 5 名: 冬季の風速低減および夏季の排熱促進を目的とした駅舎内間仕切り壁の最適配置に関する設計手法の提案, 随伴変数法を用いた CFD 逆解析の活用に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 81 巻, 第 721 号, pp. 307-317, 2016. 3
- 10)金泰延, 加藤信介, 村上周三: 室内温熱環境の CFD 逆問題解析による最適設計手法の開発, 吹出口位置及び形状の違いが室内環境に及ぼす影響, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp. 1345-1348, 2000. 8
- 11)加藤信介, 金泰延, 村上周三: 室内温熱環境の CFD 解析による最適設計手法の開発: 遺伝的アルゴリズムを組み込んだ 2 段階型最適設計, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp. 69-72, 2001. 8
- 12)長谷川翔也, 河野良坪, 中川純: 逆解析を用いた空調吹き出し口の最適風向決定法の改良, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp. 229-232, 2017
- 13)長谷川翔也ほか 4 名: 逆解析を用いた空調吹き出し口最適風向決定法の確立, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1073-1074, 2016. 8
- 14)温暖地版 自立循環型住宅への設計ガイドライン, 一般財団法人建築環境・省エネルギー機構, 2015. 8
- 15)[https://www.bizlixil.com/service/law/energysaving/products/windows\\_doors-28.html#tub02](https://www.bizlixil.com/service/law/energysaving/products/windows_doors-28.html#tub02), 2020.5.8
- 16)UDAGAWA M., et al.: THE ESTIMATION OF DIRECT SOLAR RADIATION FROM GLOBAL RADIATION, Journal of Architecture and Planning (Transactions of AIJ), No. 267, pp. 83-90, 1978. 5 (in Japanese)  
宇田川光弘, 木村健一: 水平面全天日射量観測値よりの直達日射量の推定, 日本建築学会論文報告集, 第 267 号, pp. 83-90, 1978. 5
- 17)Advances in Numerical Heat Transfer, Volume 2, Chapter4: Finite-Volume Method for Radiation Heat Transfer, 2009.1
- 18)ASHRAE Standard 55 (Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy), 2017

[2020 年 2 月 5 日原稿受理 2020 年 4 月 28 日採用決定]