

自動制御エアカーテンシステムの開発

ーエアカーテンの吹出風向が熱遮断性能に与える影響に関する研究ー

Development of Automated Air Curtain System

- Study on the Effect of Airflow Direction on Thermal Shielding

Performance of Air Curtain -

神長侑磨* 岩下将也*

要 旨

室内外の熱分離手法の一つにエアカーテンがある。その熱遮断性能を高めるには吹出角度の適切な設定が重要だが、その知見は少ない。本研究では CFD（数値流体力学）解析と実験を行い、空間温度が高い方へ吹出角度を調整することにより約 10%程度の熱遮断性能が向上することを確認した。さらに、エアカーテンの風向を室内外の温度差に応じて自動制御する機構を開発し、実験検証を行った結果、エアカーテンを稼働しない場合と比べ 30 分間で約 8%の空調消費電力量を削減できた。

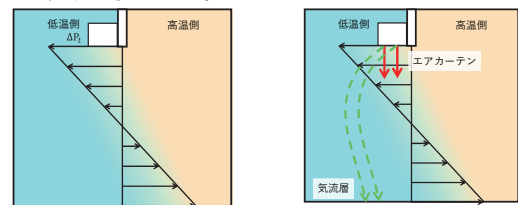
キーワード：エアカーテン シーリング効率 CFD 解析 実験室実験 熱遮断性能 温度差

1. まえがき

商業施設、物流倉庫、工場などの入口開口部は来客や車両の通行のために開放状態で運用されることが多い。この状態では、外気侵入により室内の快適性や冷暖房効率が低下する問題が生じる。特に、物流倉庫や工場のトラックパースは開口面積が大きく、外気侵入の影響が大きい。この対策として、開口部に送風し、室内外の境界面に気流の壁を形成して空気の流入出を抑えるエアカーテンがある。エアカーテンの熱遮断性能を高めるためには、風量や設置位置に加え、吹出角度を適切に設定する必要がある。例えば、図-1 (a) に示すように、冷房時には、温かい外気は冷房空気よりも軽いため上方に移動し、開口部上部では屋外側の圧力が高く、下部では低くなる。この圧力差により、図-1 (b) のようにエアカーテン気流の壁が湾曲し、外気侵入が容易になる。このため、エアカーテンの吹出角度を圧力の対抗方向に傾けることで気流の湾曲を軽減し、熱遮断性能を向上させることが考えられるが、室内外の温度差と最適な吹出角度の関係に関する知見はまだ不足している。また、開口部上の高所に設置したエアカーテンの吹出角度を室内外の温度差に応じて変更することは実用的に困難である。

本報では、大開口を持つ空間を対象に、室内外の温度差と吹出角度を様々に変化させ、CFD 解析を行い、実験を通じて熱遮断性能を定量的に評価し、これらの関係

性を明らかにした。さらにエアカーテンの風向を室内外の温度差に応じて自動的に調整するシステム（写真-1）を開発し、このシステムの使用が空調の消費電力量を削減する効果も検証した。



(a) 開口周辺の温度差による圧力分布 (b) 圧力により湾曲するエアカーテン気流

図-1 温度差による空気の流れの模式図

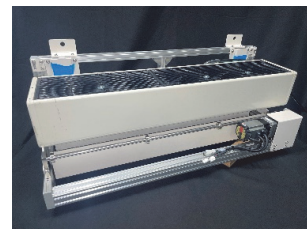


写真-1 自動制御エアカーテンシステム (GK2509S 対応)

2. 熱遮断性能の評価手法

本研究では、熱遮断性能を CFD 解析、実験ともに式 (1) で表されるシーリング効率²⁾ η (t) により評価する。

*技術本部技術研究所環境研究グループ

$$\eta(t) = \left(1 - \frac{T(t) - T_{ini}}{T_0(t) - T_{ini}} \right) \times 100 (\%) \quad (1)$$

ここで、 $T(t)$: エアカーテン稼働時の室内平均温度 (°C)、 $T_0(t)$: エアカーテン非稼働時の室内平均温度 (°C)、 T_{ini} : 室内空間の平均初期温度 (°C)、 t : 空気混合開始後の時間 (s) である。

3. 解析による評価

3.1 解析条件

図-2に示す 8m×8m×8m の密閉空間を対象として CFD 解析を行う。この空間は厚さ 0.1m の間仕切壁により模擬室内空間と模擬屋外空間に二分されている。間仕切壁の中央部には開口があり、上部にはエアカーテンを室内側に設置する。エアカーテンの形状は図-3のように上面を吸込口、下面を吹出口とし、風量は 1060m³/h で一定とする。空間平均温度の算出点は図-4に示す 18点である。室内外の初期温度に差を与え 180秒間の非定常解析を行い、室内外の空気の混合による空間平均温度の変化を算出する。解析条件は表-1に示す通りである。なお、本解析モデルは次章で述べる実験空間を模擬したものである。

3.2 解析ケース

解析パラメータを表-2に示す。暖房を想定した場合と冷房を想定した場合のそれぞれで解析する。暖房想定時では、室温の初期値を 20°Cとし、外気温度を 10~16°Cの間を 1°C刻みで変化させる。冷房想定時では室温の初期値を 25°Cとし、外気温を 29°C~35°Cの間を 1°C刻みで変化させる。吹出角度は屋外側への傾きを正とし、暖房時は -20° ~0°、冷房想定時は 0° ~20° の間の 10° 刻みで変化させる。今回と同様の条件で事前に行った解析では、30° 以上でシーリング効率が低下したため、この範囲に設定した。エアカーテン非稼働での解析も各外気温で行う。解析ケース数はこれらのパラメータを元にして合計 56 ケースとなる。

3.3 解析結果

冷房想定時で外気温 35°C時の解析開始 180秒後の温度分布図 (X=4m) を図-5に示す。(a) のエアカーテン非稼働時では室内外の温度差により開口上部で上昇流が生じ室内に外気が侵入している。また、本解析空間は断熱・密閉されているために、解析 180秒後では室内側下部の居住域の室温が低く見えるが、時間が経過するにつれて温熱環境が悪化すると予測される。(b) の下方垂直に吹出した場合は、遮断効果は得られているものの温度差による側圧によってエアカーテン層が湾曲している。

(c)、(d) のように屋外側に吹出角度を傾けると、エアカーテン層が室内外の境界部に形成される。図-6は初期室温からの解析開始 180秒間の温度変化、図-7は

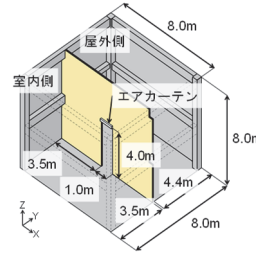


図-2 解析領域

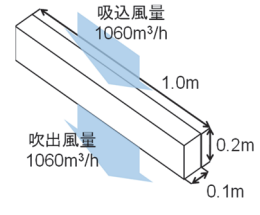


図-3 エアカーテン詳細

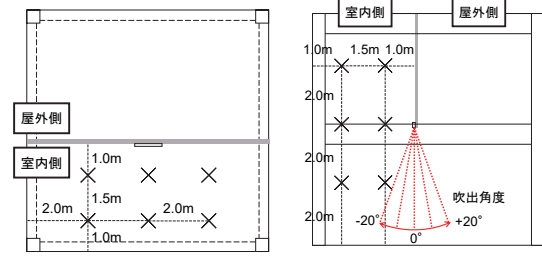


図-4 空間平均温度の算出点

表-1 解析条件

解析領域	8.0m (X) × 8.0m (Y) × 8.0m (Z)
解析格子数	1,481,544 114 (X) × 114 (Y) × 114 (Z)
乱流モデル	標準 k-ε モデル
計算条件	非定常 (180秒間、Δt: クーラン数 < 1)
境界条件	フリースリップ壁、断熱条件
エアカーテン形状	1.0m (X) × 0.1m (Y) × 0.2m (Z) 吹出・吸込口: 1.0m (X) × 0.1m (Y)
吹出風量	1060m³/h

表-2 解析パラメータ

パラメータ種	冷房想定時	暖房想定時
初期室温 (°C)	25	20
初期外気温 (°C)	29、30、31、32、 33、34、35	10、11、12、 13、14、15、16
吹出角度 (°)	0、10、20、 非稼働	-20、-10、 0、非稼働
解析ケース数	7×4=28	7×4=28

シーリング効率の時間変化である。エアカーテン稼働時は非稼働時よりも室温変化が小さくなり、180秒後のシーリング効率は、吹出角度が 20° の時に最も高く

(53.1%)、0° の場合 (39.1%) に比べ、14.0%向上している。エアカーテンの吹出角度を傾けることで、エアカーテン層を室内外の境界部に形成することができ、熱遮断性能が高まることが示された。

各ケースの解析開始 180 秒後シーリング効率を表-3 にまとめる。各ケースの初期外気温から初期室温を引いた相対値を「初期相対外気温」とし、初期相対外気温ごとにシーリング効率を示す。また各初期相対外気温で最もシーリング効率の高い値を黄色背景で示す。相対外気温が低いほど室内側に、相対外気温が高いほど屋外側に吹出角度を傾けるとシーリング効率が向上する傾向が確認できる。

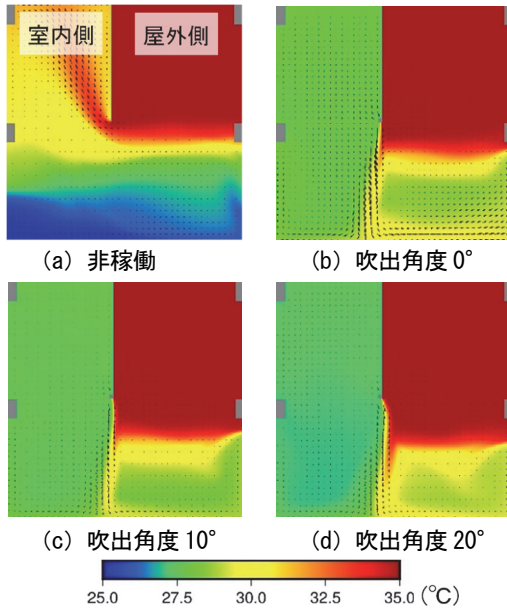


図-5 解析開始 180 秒後の温度分布図 (冷房想定時 外気温 35°C)

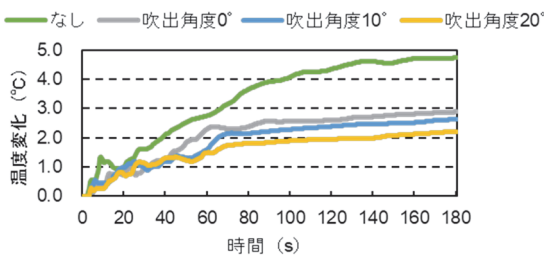


図-6 初期室温からの温度変化 (冷房想定時 外気温 35°C)

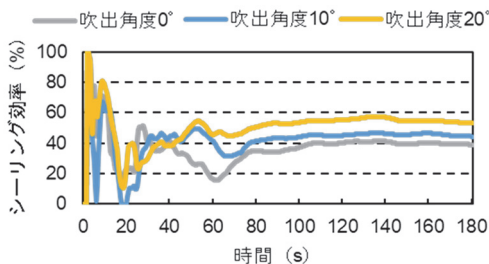


図-7 シーリング効率の時間変化 (冷房想定時 外気温 35°C)

表-3 初期相対外気温・吹出角度別シーリング効率 (解析開始 180 秒後)

(a) 暖房想定時 (室温 20°C)

吹出角度 (°)	初期相対外気温 (°C)						
	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4
-20	12.2	19.6	27.1	32.4	36.0	40.9	48.5
-10	-1.4	4.2	14.4	26.3	40.8	50.1	55.7
0	-12.9	-9.1	-4.1	4.0	16.9	39.1	52.7

(b) 冷房想定時 (室温 25°C)

吹出角度 (°)	初期相対外気温 (°C)						
	+4	+5	+6	+7	+8	+9	+10
0	65.1	67.8	54.7	48.7	51.4	38.9	39.1
10	73.5	75.9	64.9	58.6	61.9	52.5	44.4
20	72.2	78.5	71.1	66.8	65.9	56.6	53.1

4. 実験による評価

4.1 実験条件

ここまで解析により室内外の温度差と吹出角度がシーリング効率に与える影響を確認してきたが、次に実験により評価し、実空間で運用可能かを検証する。

実験空間を図-8に示す。8m×8m×8mの空間を室中央で間仕切り、模擬屋外空間、模擬室内空間に分けた。間仕切りの平面中央には、開口高さ4mの開閉扉を設置した。なお、躯体蓄熱の影響を小さくするため、実験室内の梁柱部を除く壁部、床、天井、間仕切り、開口扉には断熱材を設置した。各空間には熱電対を16点設置し、空間温度を計測した。

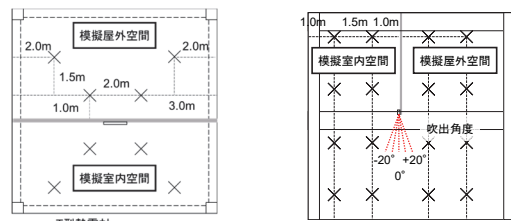


図-8 実験空間



写真-2 実験写真 (左) と風向調整板 (右)

エアカーテンの風向調整方法を写真-2に示す。既製品（三菱電機、GK2509S 定格風量 1060m³/h）のエアカーテンの下部に、風向調整板を備え付け、板の角度を変更することにより風向を調整した。実験で得られた室内平均温度から、解析と同様にシーリング効率を算出し、エアカーテンの熱遮断性能を評価した。

実験パラメータを表-4に示す。初期相対外気温度を冷房想定時として+4~+10℃、暖房想定時として-7~-4℃の間で調整する。

4.2 実験結果

初期相対外気温度+7℃、-7℃の場合における吹出角度別の扉解放後の温度変化を図-9に示す。エアカーテンなしの場合に比べて、エアカーテンがある場合の方が、温度の時間変化が小さくなっており、エアカーテンによる

熱遮断性能の効果が確認できた。また、垂直に吹き出すより、温度が高い側の空間に角度をつけて吹出したほうが向上する傾向が見られた。これは解析で示した結果と同様である。初期相対外気温度を変えた他の実験ケースにおいても同様の結果となった。

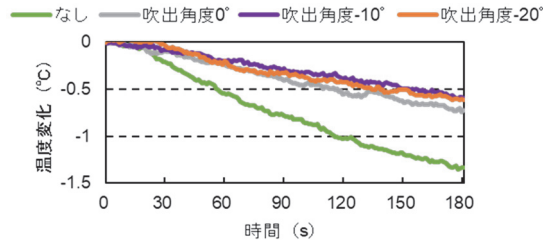
これらの温度推移を元に、シーリング効率の時間推移を示したものを図-10に示す。シーリング効率は、扉解放後は温度変化に応じて大きく上下するものの、概ね3分で安定している。また、下方垂直で吹き出すよりも、温度が高い側に向かって吹き出す方が、シーリング効率が向上している。

すべての実験ケースにおける180秒後のシーリング効率を表-5、表-6に示す。参考として、解析で得られたシーリング効率を下段に付す。また、各初期相対外気温度で最大のシーリング効率を、実測値は赤字下線で、解析値は青字下線で示す。

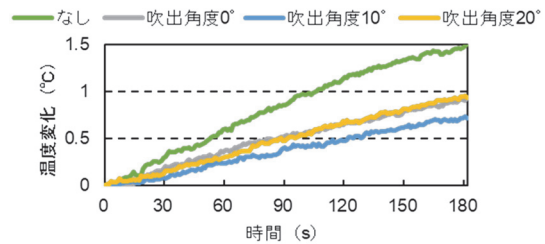
実測と解析値を比較すると、暖房想定時では最大で約48point 差があり、全体として乖離が見られる。一方冷房想定時は全体として10point ほどの差であり、比較的良好な対応がみられた。この差の原因としては、躯体蓄

表-4 実験パラメータ

パラメータ種	冷房想定時	暖房想定時
初期相対外気温度 (°C)	+4、+6、+7、+8、+9、+10	-7、-6、-5、-4
吹出角度 (°)	0、10、20、非稼働	-20、-10、0、非稼働
ケース数	6×4=24	4×4=16

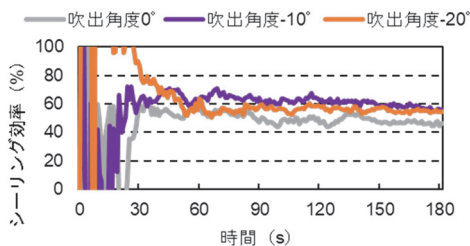


(a) 初期相対外気温度 -7℃

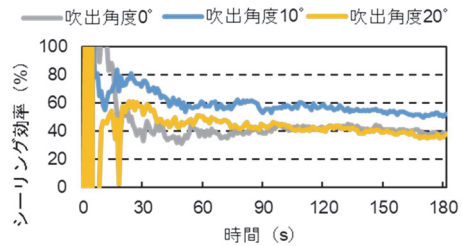


(b) 初期相対外気温度 +7℃

図-9 扉解放後3分までの室温変化



(a) 初期相対外気温度 -7℃



(b) 初期相対外気温度 +7℃

図-10 扉解放後3分までのシーリング効率

表-5 暖房想定時のシーリング効率

角度 (°)		初期相対外気温度 (°C)			
		-7	-6	-5	-4
-20	実測	54.5	74.3	70.5	<u>70.1</u>
	解析	<u>32.4</u>	36	40.9	48.5
-10	実測	<u>56.5</u>	<u>76.6</u>	<u>73.4</u>	56.4
	解析	26.3	<u>40.8</u>	<u>50.1</u>	<u>55.7</u>
0	実測	44.3	65.1	61.3	51.3
	解析	4	16.9	39.1	52.7

表-6 冷房想定時のシーリング効率

角度 (°)		初期相対外気温度 (°C)					
		+4	+6	+7	+8	+9	+10
0	実測	-56.6	9.4	38.9	41.1	24.6	6.8
	解析	65.1	54.7	48.7	51.4	38.9	39.1
10	実測	<u>62.2</u>	<u>51.2</u>	<u>50.3</u>	<u>57.6</u>	37.2	25.1
	解析	<u>73.5</u>	64.9	58.6	61.9	52.5	44.4
20	実測	16.1	24.7	35.6	57.3	<u>63.2</u>	<u>39.5</u>
	解析	72.2	<u>71.1</u>	<u>66.8</u>	<u>65.9</u>	<u>56.6</u>	<u>53.1</u>

熱の影響が考えられる。暖房想定時は実測値が解析値よりもシーリング効率が高く、冷房想定時は反対の傾向があった。これは断熱されていない柱梁が外部からの熱により温められ、室内の加熱源となった可能性がある。本実験は外気温が 20℃以上の暖かい時期に行われたため、暖房想定時に蓄熱の影響をより強く受け、暖房を保持させるように働いたと考えられる。

実測結果全体の傾向では、0° 垂直吹出と比較して、温度が高い側に吹出角度をつけたケースのほうが、シーリング効率は向上する結果となり、解析で得られた傾向と一致している。

5. 自動制御エアカーテンシステム

5.1 自動制御エアカーテンシステムの構成

これまでの評価結果を基に、自動制御エアカーテンシステムを開発した。システムの構成図を図-11 に示す。このシステムは、既成のエアカーテンに風向調整ブレードとその角度を変更するモーターを追加し、制御盤に接続された温度センサで室内外の温度を計測するものである。制御盤に設置された温度センサが室内外の温度をリアルタイムで測定し、そのデータを基に吹出角度が自動的に調整される構造となっている。これにより、外気温の変動に対応して最適な角度で風を吹き出し、外気の侵入を効果的に抑制することが可能となる。相対外気温と吹出角度の関係を図-12 に示す。相対外気温が 9℃以上で吹出角度 20°、9℃未満 4℃以上で吹出角度 10°、4℃未満 -4℃より大きい場合は垂直下方吹出と

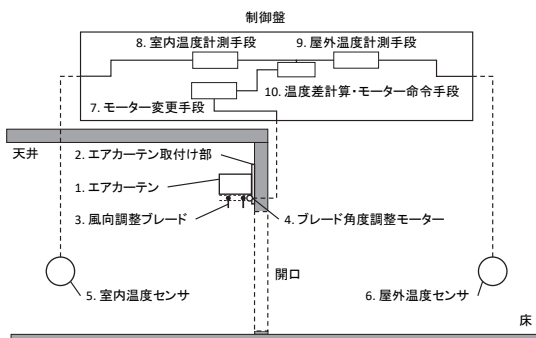


図-11 自動制御エアカーテンシステムの構成

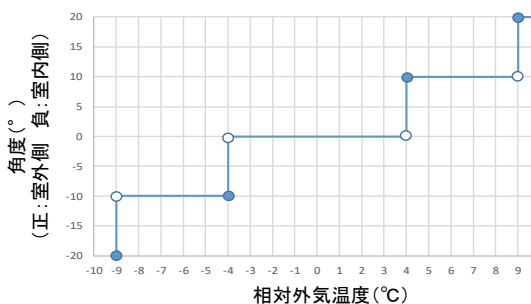


図-12 相対外気温と吹出角度の設定

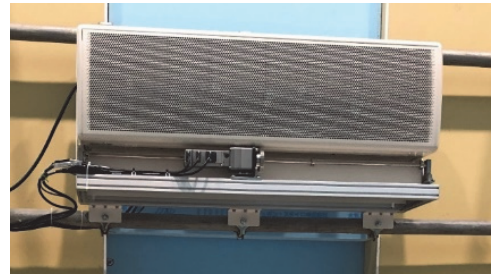


写真-3 自動制御エアカーテンシステム (MK5010TA 対応)

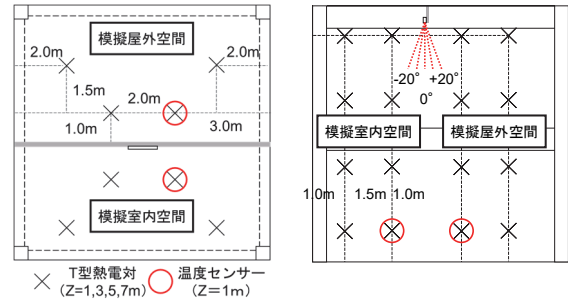


図-13 実験空間

表-7 実験条件

パラメータ種	条件
空調設定温度 (°C)	模擬室内側: 24°C 模擬屋外側: 18°C
吹出角度 (°)	非稼働、自動制御
ケース数	1×2 (各3回実施)

相対外気温に応じて 10° 刻みで変更する。

本研究では、様々な開口高さに対応するため、異なる定格風量を持つ三菱電気製のエアカーテン GK2509S (写真-1)、MK5010TA (写真-3) の2種類に取付可能な機構を製作した。

5.2 性能検証実験の概要

自動制御エアカーテンシステムによる室内空調保護性能と省エネルギー性を検証するため、第4章で使用した実験空間で検証実験を実施した。図-13 に示す実験空間は、空冷ヒートポンプ式のパッケージエアコンにより空調されている。この室内機は暖房能力 14.0kW、定格暖房消費電力 4.05kW である。室外機は、圧縮機が 2.8kW、ファンが 0.39kW の出力を持つ。室中央の開口部は高さ 6m に設定し、第4章とは異なる条件を採用した。開口上部には自動制御機構を追加した既製エアカーテン (MK5010TA、定格風量 3700m³/h、定格消費電力 0.43kW) を設置した。自動制御用の温度センサは図-13 に示された位置の高さ 1m 地点に配置した。

実験条件を表-7に示す。実験は3月25日～4月2日の中間期に実施した。模擬室内空間を 24℃設定で暖房し、模擬室外空間は 18℃設定で冷房をした。模擬室内の平均室温が 24℃付近に達した時点で、開口部を開放し、30 分間の温度変化と空調の消費電力を計測した。

実験はエアカーテン非稼働と自動制御エアカーテンを使用するパターンの2ケースを各3回行い、その平均値を用いて評価した。

5.3 性能検証実験の結果

図-14は、各ケースを3回実施した結果の30分間の模擬室内16点の空間平均室温の推移を示している。エアカーテン非稼働のケースでは、扉解放後に5分ほどで室温が約1.5℃低下している。一方、自動制御エアカーテンシステムを使用した場合は、30分間の間の温度低下が1℃以下に抑えられている。このことから、自動制御システムの空調保護効果が明確に見取れる。

図-15は、30分間の模擬室内側空調機の消費電力の瞬時値である。自動制御エアカーテンを使用した場合、すべての時刻で消費電力がエアカーテン非稼働時と比較して下回っている。特にエアカーテンを使用しないケースでは、平均室温が上昇している実験開始後10分から

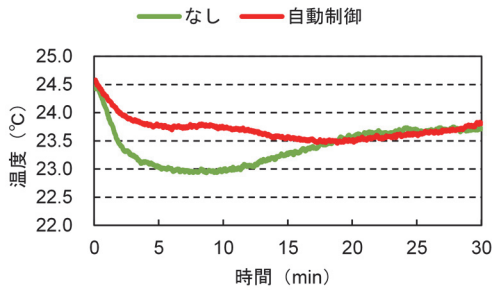


図-14 30分間の模擬室内側平均温度 (各ケース3回の平均)

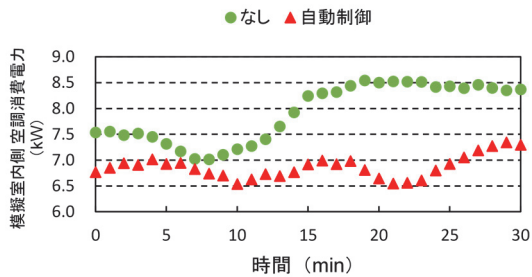


図-15 30分間の模擬室内側消費電力瞬時値 (各ケース3回の平均)

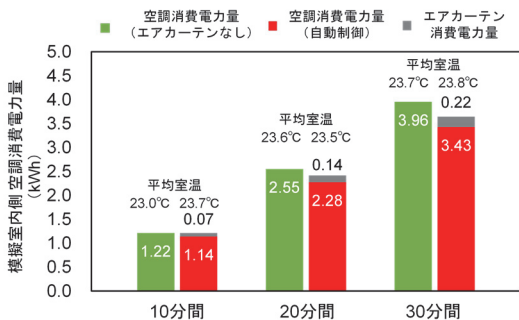


図-16 模擬室内側空調の消費電力量 (各ケース3回の平均)

20分の間に消費電力も増加している。

図-16は実験中における10分毎の模擬室内側空調機の消費電力量の各ケース3回の平均値である。自動制御エアカーテンを使用した場合の消費電力量には、エアカーテンの消費電力量も含まれている。実験開始後の最初の10分間は、エアカーテン非稼働の場合は、1.22kWh、自動制御エアカーテンを使用した場合は、計1.21kWhと消費電力量はほぼ同じである。エアカーテン非稼働のパターンでは10分から20分の間に消費電力が増加し、全体の消費電力量で両パターン間に0.13kWhの差が生じている。30分間でみると、自動制御エアカーテンを使用した場合は使用しない場合に比べて、エアカーテンの消費電力量を含め約0.3kWh (約8%)の消費電力量を削減できている。

6. まとめ

本研究では、エアカーテンの吹出角度がその熱遮断性能に及ぼす影響をCFD解析と実験によって評価した。その結果から、空間平均温度が高い方向へ吹出角度を傾けることにより熱遮断性能が向上することを確認した。

この結果に基づき、室内外の温度差に応じて吹出角度を自動的に調整する機構を開発した。このシステムの熱遮断性能と省エネルギー性の検証実験を実施し、エアカーテン非稼働の場合と比較して、約8%の空調消費電力量の削減を確認した。

7. あとがき

本研究により、エアカーテンの効果的な使用方法に関する知見を得ることができた。地球温暖化の進行とともに、将来的には高温多湿な外部環境がさらに顕著になると予測されており、このような状況下では、エアカーテンによる空調保護が室内の快適性を維持し、消費電力を削減する上でより一層重要となる。

今後も引き続き、この成果の普及に取り組み、エアカーテンの適用事例を増やしていくことを目指す。そして、さらなるエアカーテンに関する知見を集積し、持続可能な建築環境の実現を推進していく。

【参考文献】

- 1) 空気調和・衛生工学会編、「空気調和・衛生工学便覧 (第14版)、3巻、pp.212-215、2010
- 2) 田中優汰、近藤靖史、「建物出入りに設置するエアカーテンの効率化に関する研究」、日本建築学会環境系論文集 第86巻 第790号、pp.899-908、2021.12