

PAC を用いた膜天井放射空調の冷暖房性能に関する研究
(その 16) 暖房時において外皮負荷が定常時室内熱環境に及ぼす影響
Cooling and Heating Performance of Ceiling Radiant Membrane Air Conditioning System
with PAC

(Part16) Effect of the Perimeter Zone Heat Load on Steady-State Indoor Thermal
Environment under Heating Condition

○安江 楽人 (竹中工務店) 山中 俊夫 (大阪大学)
小林 知広 (大阪大学) 崔 ナレ (大阪大学)
前田 龍紀 (竹中工務店) 上村 芙美子 (大阪大学)
新宮 浩丈 (竹中工務店)

Rakuto YASUE *1 Toshio YAMANAKA *2 Tomohiro KOBAYASHI *2 Narae CHOI *2

Tatsunori MAEDA *1 Fumiko KAMIMURA *2 Hirotake SHINGU *1

*1Takenaka Corporation *2Osaka University

The authors propose a new air conditioning system combining PAC and membrane ceiling. In the previous study, the air flow rate through membrane was small. Therefore, in this study, the heating performance verification experiments were conducted in an experimental room where the membrane with low flow resistance are installed to increase the air flow rate through membrane. We obtained the knowledge about steady-state indoor thermal environment under heating condition.

1. はじめに

近年、建設業において省力化・省人化は重要な課題である。本研究では、省エネルギー性と快適性を両立させた放射空調に、ダクト工事を不要とする天井カセット方式を用いた新たな空調方式を提案し、実大実験と実測によりその効果を検証する。

既報¹⁾では、夏季の利用を想定した冷房実験を行い、その効果を検証した。本報では、冬季の利用を想定して

行った暖房実験結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 実験室概要

実大実験を 2020 年 11 月 4 日～ 2020 年 12 月 25 日に行った。平面図を Fig.1、断面図を Fig.2 に示す。実験室は既報¹⁾と同様で、加えて暖房負荷として冷却壁面 Wall(1) を設置した。冷却壁面（プラスターボード

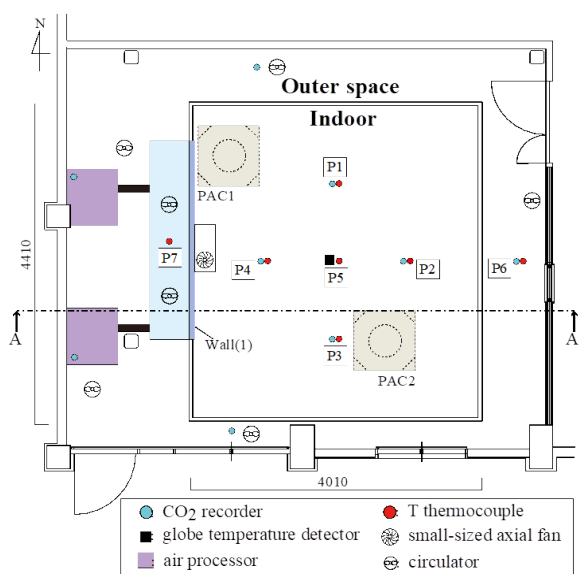


Fig.1 Plan of experiment room [mm]

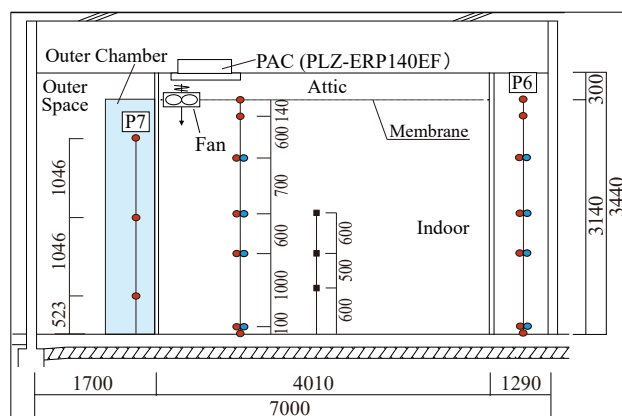


Fig.2 A-A' cross section [mm]

12.5mm) は他の壁面より断熱性が低くなっている。冷却壁面の外側に仮想外気室を建設し、ダクトにより循環型温制御装置 (C-750MVK-A) と仮想外気室を接続し、仮想外気室への給気温度を制御することで Wall(1)を冷却した。仮想外気室内はファンにより攪拌し、空気温度を均一にしている。実験室の外側空間は、ルームエアコン (三菱電機株式会社、MSZ-GV3620-W、以下 AC) を使用することで、循環型温度制御装置の排熱処理をしながら、膜下空間と同温になるように空調した。

2.2 測定点

各測定項目と測定点を Fig.1、Fig.2 に示す。温度測定には T 型熱電対を使用し、測定点は Fig.2 の P1~P6 に鉛直方向 7 点を設けて測定を行った。ただし、後述する膜なし条件 (PO 条件) では、天井面を加えた鉛直方向 8 点で測定した。また、各 PAC の吸込み口に 1 点、吹出し口に 4 点、膜上に 3 点設けた。壁温度は、Wall(1)を除く 3 壁面の内外それぞれを水平方向に 3 分割、鉛直方向に 3 分割した区画の中心を測定点とし、1 つの壁につき計 9 点で温度測定を行った。P7 は、壁温度の測定点と同様の鉛直高さ 3 点で測定した。室中央では黒球の中に熱電対を挿し込み、グローブ温度の測定を鉛直方向 3 点で行った。いずれの測定項目も測定間隔 30 秒として測定を行った。

2.3 実験条件

実験条件を Table 1~3 に示す。膜が室内環境に与える影響を検討するため、実験のパラメータとして、膜なし (PO 条件)、不織布無し膜 (MO 条件)、不織布有り膜 (MF 条件) の 3 条件設定した。各膜材の仕様は既報¹⁾と同様である。加えて、PAC 設定温度と仮想外気室の室温差をパラメータとして 3 条件設定し、計 9 条件の実験を行った。今回の暖房実験では、PAC 吹出し角度・吹出し風量が与える影響は小さいと考えられることから、上記 2 項目は全条件で Table 3 に示す設定とした。また、実験室内での発熱量はなしとした。

2.4 実験手順

実験室を冷やすために、前日夕方から PAC と AC の冷房運転 (設定温度 19°C) を開始、同時に温度・グローブ温度の測定を開始し、実験当日の朝に PAC 暖房運転を開始した。また本実験では、CO₂ 濃度測定も実施しており、その実験手順については次報²⁾にて報告する。

3. 実験結果

3.1 PAC の運転状況

Fig.3 に各条件の Case1 について、PAC 暖房運転開始後の各部の温度経時変化を示す。温度は周期的に変動しているが、これは PAC が ON-OFF を繰り返して運転したためと考えられる。時間経過後に着目すると、約 5

Table 1 The Characteristics of membrane

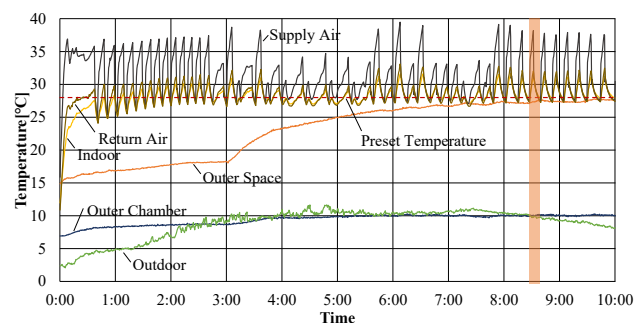
	Kind of Membrane	Permability [cm ³ /cm ² /s] (Air Flow rate at 125Pa)	Materials
CasePO	PAC Only	-	-
CaseMO	Membrane Only	452	Glass fiber
CaseMF	Membrane and Fabric	140	Glass fiber, Nonwoven fabric

Table 2 Set temperature in each case

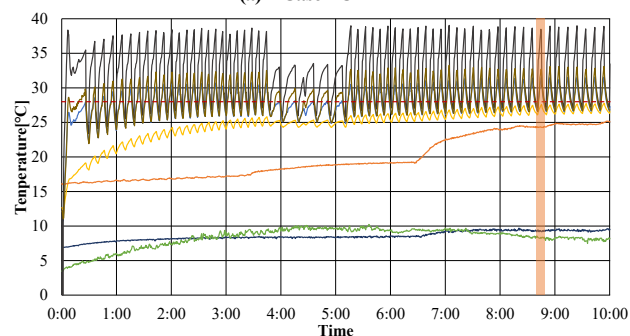
	Preset Indoor Temperature [°C]	Outer Chamber Temperature [°C]	Temperature difference between PAC and Outer Chamber[°C]
Case1	28	8	20
Case2	22	8	14
Case3	22	14	8

Table 3 Conditions of experiments

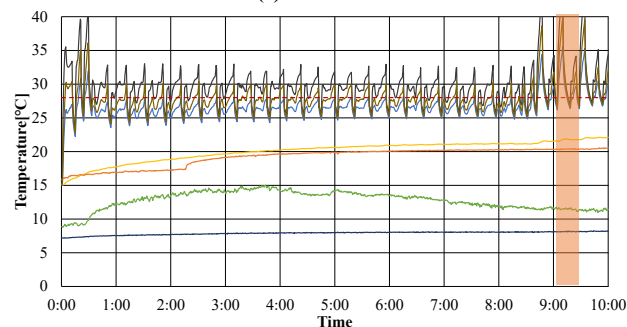
Condition	
Airflow Rate of PAC [m ³ /h]	1016+1002
Angle of supply [°]	60
Total Heat Generation [W]	0



(a) Case PO-1



(b) Case MO-1



(c) Case MF-1

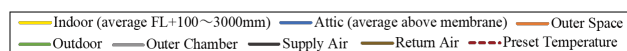


Fig.3 Change of temperature (Case 1)

時間後の室内温度・膜下温度は、CasePO-1：約 28℃、CaseMO-1：約 25℃、CaseMF-1：約 21℃となっている。PAC の設定温度は、全て 28℃である。膜の通気抵抗により、暖房気流が膜下空間まで到達しないことで、室内温度が設定温度まで達していないことが考えられる。膜が設置される場合における、膜下温度制御方法の検討が必要であることが示されている。なお、同じ条件内でもこの PAC の ON-OFF の温度振れ幅が変化しているときがある。例えば、CasePO-1 で実験開始後 3:40～5:20 の間では、温度振れ幅は他の時間に比べて小さい。この間、外気温が約 10℃よりも高くなっており、振れ幅が大きい時、外気温は約 10℃より下回っている。外気温が低い時に早く設定温度に到達させようと室外機が能力を大きく出す運転となり、外気温によって温度振れ幅に変化が出ると考えられる。

3.2 鉛直温度分布

Fig.4 に各ケースの鉛直温度分布（定常時の PAC 一周期のデータ平均、Fig.3 内の橙範囲）を示す。PO 条件では、FL+100mm と FL+1700mm 間での温度差が ASHRAE55³⁾ 推奨の 3℃以内となっている。また、均一な鉛直温度分布を形成しており、膜下空間が十分暖めら

れていることがわかる。これは、室容積に対して PAC 容量・吹出風量が大きく、換気回数が約 33 回/h 程度となることから、既報⁴⁾にて示されているように、床下まで暖気が行き届いて空気交換が大きく行われるためだと考えられる。一方、MO 条件では鉛直温度分布が高さによって顕著に異なっている。これは、上部のみ暖房気流が到達し、下部は到達しにくいとめと考えられる。また、MF 条件は、MO 条件に比べて FL+100～1700 間の鉛直温度分布への影響が小さい。MF 条件では、膜の通気抵抗が大きいことから、さらに暖房気流が下部へ到達しにくいとめと考えられる。暖房気流の到達高さについては CO₂ 濃度の測定結果から示唆できると考えられ、次報²⁾にて報告する。

それぞれの Case におけるグラフの傾きに注目すると、MO 条件・MF 条件では、Case1>Case2>Case3 の順に傾きが小さくなり、鉛直温度分布の高さによる差異が少なくなる傾向となっている。これは、Case1>Case2>Case3 の順に膜と仮想外部室との温度差が小さくなることに対応している。膜の通気性能が変わっても、膜と仮想外部室との温度差が鉛直温度分布へ与える影響の傾向は同じであることが分かる。また、設定温度が同じである Case2

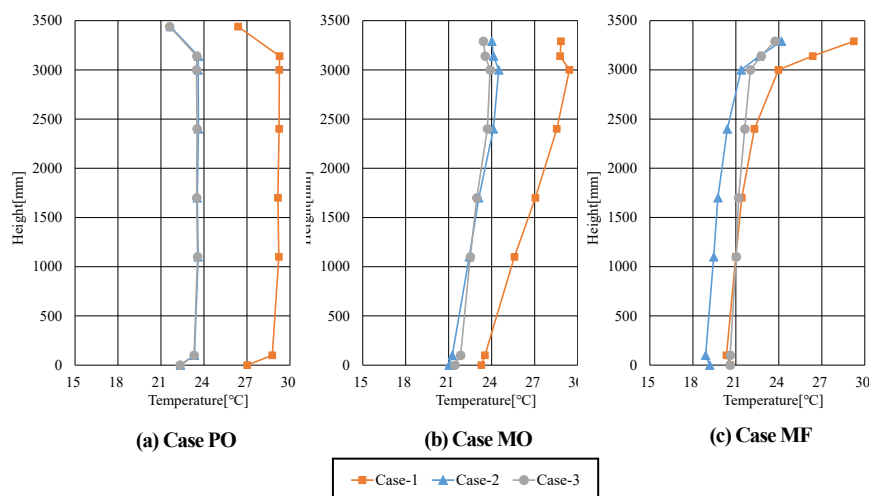


Fig.4 The vertical distribution of temperature

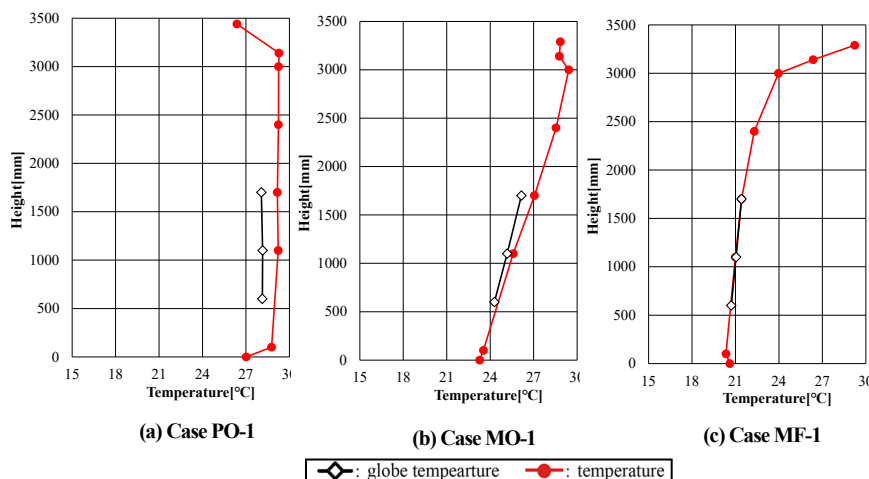


Fig.5 Vertical distribution of temperature and globe temperature (Case 1)

Table 4 The difference of indoor temperature on the period between PAC on and off

Height [mm]	Temperature[°C]			
	MAX	MIN	Δt (MAX-MIN)	Standard Deviation
3290	27.7	25.6	2.1	0.65
3140	32.3	27.5	4.8	1.42
3000	31.9	27.5	4.3	1.34
2400	31.2	28.0	3.2	0.99
1700	30.8	28.0	2.9	0.89
1100	31.3	27.8	3.5	1.04
100	30.2	27.8	2.4	0.74
0	27.2	26.8	0.4	0.11

(b) Case MO-1

Height [mm]	Temperature[°C]			
	MAX	MIN	Δt (MAX-MIN)	Standard Deviation
3290	31.5	26.6	5.0	1.57
3140	31.2	26.6	4.6	1.46
3000	32.1	27.3	4.8	1.47
2400	29.9	27.3	2.6	0.82
1700	27.4	26.6	0.8	0.19
1100	25.9	25.3	0.5	0.17
100	23.6	23.5	0.1	0.03
0	23.3	23.2	0.1	0.02

(c) Case MF-1

Height [mm]	Temperature[°C]			
	MAX	MIN	Δt (MAX-MIN)	Standard Deviation
3290	35.6	26.4	9.2	2.79
3140	29.6	24.8	4.8	1.49
3000	24.4	23.5	0.9	0.30
2400	22.3	22.0	0.3	0.10
1700	21.4	21.2	0.2	0.07
1100	21.0	20.8	0.2	0.06
100	20.3	20.2	0.2	0.06
0	20.6	20.5	0.2	0.05

と Case3 において、CaseMO-2 と CaseMO-3 での FL+1100 の温度は大きな違いがない一方、CaseMF-2 と CaseMF-3 での同じ FL+1100 の温度は、約 1.5℃異なる。PAC 設定温度が同じであっても、膜の通気性能の大小によって、仮想外部空間からの冷熱に対する追従性が異なることが示唆されている。

Table 4 に Fig.3 と同じ PAC の ON-OFF 1 周期内での温度変化幅を示す。PO-1 では、1 周期の間で FL+1100 において最大と最小の差が 3.5℃である一方、MO-1・MF-1 ではそれぞれ 0.5℃・0.2℃となっている。これは、膜があることで PAC の ON-OFF 周期内における温度変化が小さい膜下温熱環境を作り出していることを示している。

3.3 グローブ温度

Fig.5 に各条件の Case1 のグローブ温度を示す。CaseMO-1・CaseMF-1 において、高い位置ではグローブ温度が高いことから、室上部では温められた膜からの放射効果による影響が大きいことが考えられる。膜の条件間で比較すると、MO 条件・PO 条件では、グローブ温度 < 空気温度であることから、暖房負荷の冷却面からの冷放射による影響が大きいことが考えられる。一方、MF 条件では、グローブ温度と空気温度が概ね近い値であることと、床面温度が直近の空気温度よりも高いことから、膜からの熱放射による効果が大きいことが示唆される。

3.4 ファン実験との比較

前項では、MF 条件において、暖房気流が膜下空間まで到達せず、膜下空間の温度が低い状態になっていることが示唆された。そこで、膜表面に小型軸流ファン（三洋電機、109P1348S101、230CMH、以下ファン）を設置し、膜上空間の暖房気流を膜下空間へ送り込むことを試みた。実験条件は、CaseMF-1 と同条件である。

Fig.6 に温度経時変化を示す。CaseMF-ファンでは、PAC の ON-OFF 頻度が多くなっている。これは、膜上空間の温度が下がりやすくなっているためと考えられる。次に、MF-ファンでは、膜下温度が MF-1 に比べて高くなって

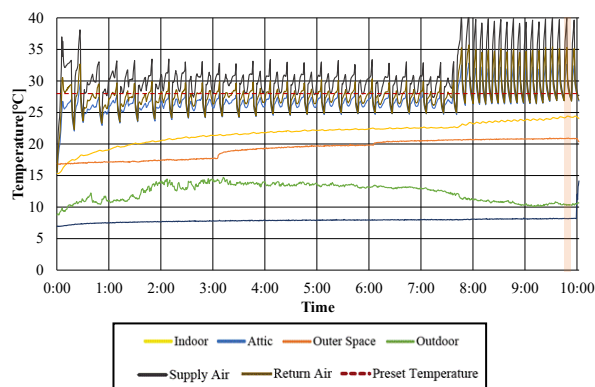


Fig.6 Change of temperature (Case MF-fan)

おり、設定温度 28℃に対して、室内温度は 22～24℃となっている。ファンにより膜上空間の暖気が膜下空間へ送り込まれて膜下空間が暖かくなっている。ただし、設定温度 28℃には達していないため、MF-1 と同様、温度制御方法の開発が必要と考えられる。

続いて、Fig.7 に鉛直温度分布、Table 5 に PAC の ON-OFF 1 周期内での温度変化幅を示す。MF-ファンでは、鉛直温度分布での温度差が少なく、PO-1 と同様の傾向を示す。暖気を膜下空間へ送り込むことで、良好な空間が形成できている。また、周期内の温度変化は、MF-1 と MF-ファンで膜下空間では大きな違いはない。ON-OFF 周期内での温度変化が少ない環境は、ファンありでも形成できることが示唆されている。よって、小型ファンにより膜上空間の暖房気流を膜下へ送り込むことにより、鉛直温度分布の温度差が少なく、時系列での温度変化も少ない良好な環境を形成できることが考えられる。

4. まとめ

本報では、PAC を用いた膜天井放射空調方式において、膜の通気性能が暖房定常時の室内温度分布に与える影響を検討し、知見を得た。次報では立ち上がり時の結果および CO₂ 濃度測定結果を報告する。

謝 辞

本研究は大阪大学との共同研究であり関係者各位に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 安江、山中、小林、袁、崔、前田、上村、新宮：PAC を用いた膜天井放射空調の冷暖房性能に関する研究（その 12）～（その 15）空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 2020. 9
- 2) 上村、山中、小林、崔、前田、新宮、安江：PAC を用いた膜天井放射空調の冷暖房性能に関する研究（その 17），空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, 2021. 6 掲載予定
- 3) ASHRAE STANDARD55-92：Environmental Condition for Human Occupancy
- 4) 伊藤、横井、中原：暖房空間の温度分布特性とその評価-空調空間の熱的特性に関する研究第 1 報-, 日本建築学会計画系論文報告集 pp37～47, 1987. 12

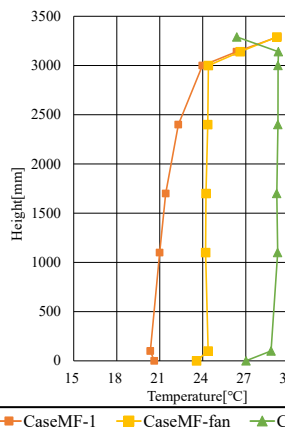


Fig.7 The vertical distribution of temperature

Table 5 The difference of indoor Temperature on the period between PAC on and off (Case MF-fan)

Height	Temperature[°C]			
	MAX	MIN	Δ t (MAX-MIN)	Standard Deviation
3290	32.6	26.8	5.8	1.91
3140	28.1	25.5	2.6	0.84
3000	24.6	24.2	0.4	0.12
2400	24.5	24.2	0.3	0.08
1700	24.3	24.1	0.3	0.08
1100	24.3	24.1	0.3	0.09
100	24.5	24.2	0.4	0.09
0	23.6	23.5	0.1	0.04