

天吊形 PAC を用いた分割型膜天井空調方式に関する研究 (その 5) 実大実験による冷房空調時の室内環境の検討

Study on Membrane Ceiling Air-Conditioning System Using Ceiling Suspended PAC (Part5) Examination of Indoor Environment Using the Full-scaled Mock-up Room under Cooling

学生会員 ○淀野修司 (大阪大学) 技術フェロー 山中 俊夫 (大阪大学)
 正会員 小林 知広 (大阪大学) 正会員 袁 継輝 (豊橋技術科学大学)
 正会員 崔 ナレ (大阪大学) 正会員 伊藤彰悟 (元大阪大学)
 Shuji YODONO*¹ Toshio YAMANAKA*¹ Tomohiro KOBAYASHI*¹
 Narae CHOI*¹ Keiki EN*² Shogo ITO*¹
 *¹ Osaka University *² Toyohashi University of Technology

With the declining birthrate and aging of society, intellectual productivity is important in people's activities. Membrane ceiling air conditioning is an air conditioning method that can improve intellectual productivity. Further, there is a split-type membrane ceiling air conditioning as a method that can be expected to improve the cooling performance of the membrane ceiling. In this paper, DR and membrane upper and lower exchange air amount are examined in order to establish the design method of the split type membrane ceiling air conditioning.

1. はじめに

既存の天吊形パッケージエアコン (PAC) 下部に布の膜を張り、PAC の課題を解消し快適性を高める新空調方式、膜天井空調方式がある¹⁾。本研究は分割型膜天井空調方式(膜を分散配置し、天井裏空間との換気による対流の促進を図る空調方式)の導入された室を対象に実験を行い、設計手法の確立を目指す。図1にシステム概念図を示す。既報²⁾では、夏期・冷房運転の当空調方式が導入された室を対象に CFD 解析を行い膜敷設率(室床面積に対する膜敷設面積の比)をパラメータに、室内環境の検討を行った。その結果、膜敷設率が増加すると、ドラフト環境が改善される一方、膜上下換気量、以下(膜上下交換空気量)が減少する傾向が得られ、室内環境の改善は見られた一方冷房性能の悪化が示唆された。本報では、実大実験室による夏期想定冷房実験を行った結果から本空調方式の性能について検討する。

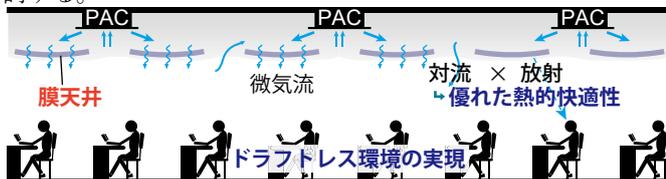


図1 膜天井空調概念図

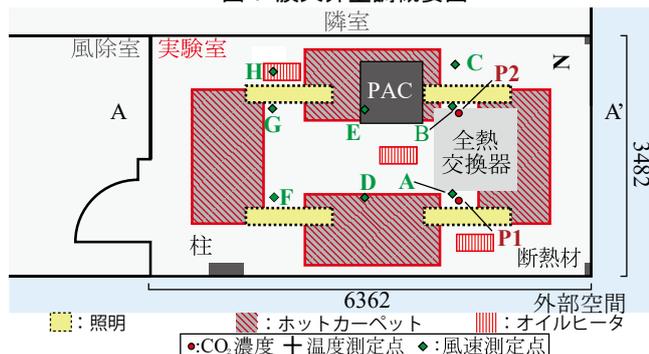


図2 実験室平面図

2. 実験概要

2.1 実験室構成

夏期を想定した冷房実験を2020年2月5日～13日に行った。実験室平面図を図2に、断面図を図3に示す。実験室内寸は3.5m×6.4m×4.1mである。室の北・東面はコンクリート製の外壁で、400mm厚さのスタイロフォームを貼付した。(FL～FL+3.5m)天井は断熱とし、その他の壁、柱は非断熱であり、風除室、隣室は非空調とした。室内には4方向吹出しPAC (PLZ-ZRP140EFF; 三菱電機株式会社)(以下、PAC)が1台導入され、吹出し角度：俯角30°、設定温度：19℃(下限値)、風量：強(599[m³/h]×4)で運転する。温度制御は吸込み温度で制御される。室内発熱は、ホットカーペット(225W/枚)×4枚、オイルヒータ(1.2kW/台)×3台の計4.5kWとした。膜は60cm角で、FL+2.6mに設置する。グリッ

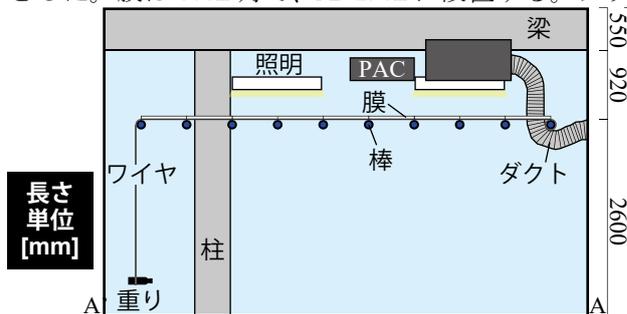


図3 実験室断面図

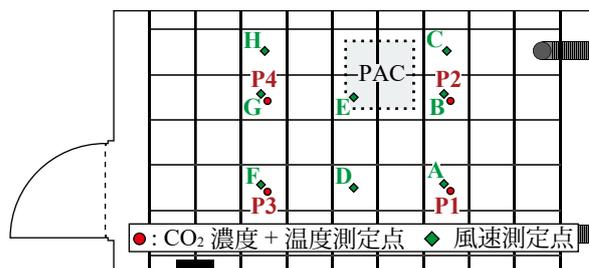


図4 測定点 (平面)

表 1 実験条件

Case	PO	MF			MO		
		1	2	3	1	2	3
膜敷設率	0%	32%	66%	100%	32%	66%	100%
膜敷設図							
膜の性質	-	不織布 あり 通気性: 140[cm ³ /cm ² ・s] (差圧: 125[Pa]の場合)			不織布 なし 通気性: 452[cm ³ /cm ² ・s] (差圧: 125[Pa]の場合)		

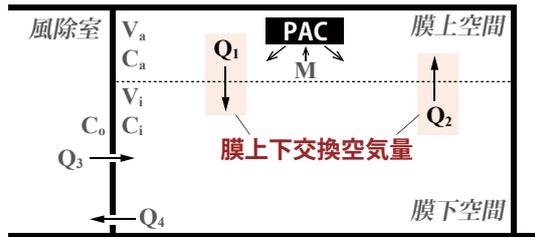


図 6 空気交換の概略図

ド外の部分は、ビニールシートとした。室北側のグリッド両端部は、設備配管用のダクトが通っており（図 3）、膜が敷設できないため南両端部も含め目張りを行った。膜は最大で 41 枚が敷設可能である。測定点の平面配置、鉛直配置を図 4、図 5 に示す。空気温度測定は T 型熱電対、CO₂ 濃度測定は CO₂ 濃度測定器 (RTR-576、T&D) で行い、図 5 中の P1~P4 の測定ポールに設置した。加えて PAC 吹出し口 4 点 + 吸込み口 1 点に熱電対を設置し、吸込み口 1 点、実験室扉位置に CO₂ 濃度測定器を設置した。壁面・床・天井温度も同じく T 型熱電対を用い、黒体スプレーにより放射率を 0.93 相当としたアルミテープにより接着した。風速測定は超音波風速計 (DA700 型、TR-92T 型プローブ；株式会社ソニック) で サンプルング間隔：10Hz、各測定点 1 分間の測定を、点 A~H の高さ 1.1m で行った。

2.2 実験条件

実験条件を表 1 に示す。パラメータは①膜敷設率、②膜の種類とする。膜の材質はガラス繊維で編まれた三軸織物 (SG シリーズ；サカセ・アドテック株式会社) に、①織物 + 不織布 (以下、MF 膜)、②織物のみ (以下、MO 膜) の 2 種類である。膜の通気性 (表 1) は JIS-L 1096A に従い測定された。ただし、膜前後の差圧が 150Pa の条件である。また、膜表面温度を測定するため、表 1 図中の 3 点、膜下側に T 型熱電対を貼り付けた。

2.3 実験手順

発熱体と PAC の運転を開始した後、躯体温度を含めた室内温度が定常に達したと判断した後、速やかに実験室内に入室し、風速測定を行った。その後速やかに退室し、CO₂ ガスを PAC 吸込み口で 3L/min で発生させ、1 時間経過後に発生を止め、測定を終了した。

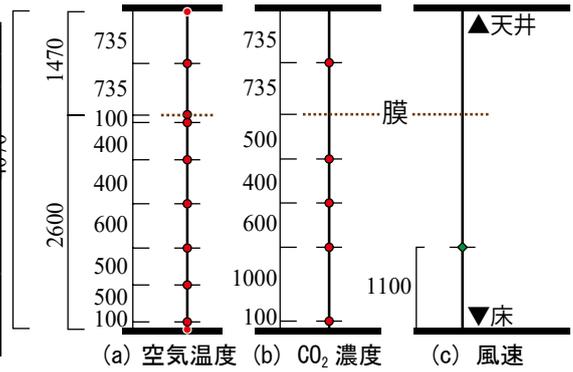


図 5 測定点 (鉛直面)

3. 評価指標

3.1 膜上下交換空気量

膜敷設率を変化させることで膜上下の交換空気量 (以下膜上下交換空気量) の変化が見られる。膜上下交換空気量が増加することで空調性能の増加が見られ、減少することで空調性能の悪化が考えられる。図 6 に交換空気量の算定概要図を示す。膜上空間での CO₂ ガス発生を想定し、膜上空間 (式 1)・膜下空間 (式 2) での CO₂ 濃度収支式を立てた。なお、その際は流量収支 (式 3) (式 4) を満たすものとし、理論値と測定値から最小二乗法により Q1~Q4 を同定した。

$$C_i^{n+1} = C_i^n + (C_a^n Q_1 - C_i^n Q_2 + C_o^n Q_3 - C_i^n Q_4) \frac{\Delta t}{V_i} \quad (1)$$

$$C_a^{n+1} = C_a^n + (M - C_a^n Q_1 + C_i^n Q_2) \frac{\Delta t}{V_a} \quad (2)$$

$$Q_1 - Q_2 + Q_3 - Q_4 = 0 \quad (3)$$

$$Q_1 - Q_2 = 0 \quad (4)$$

3.2 名目換気時間

名目換気時間 (換気回数の逆数) を、Case-P0 は (式 5)、他 Case では (式 6) により算出した。

$$\tau_{n1} = \frac{V_i + V_a}{Q_{SA}} \quad (5)$$

$$\tau_{n2} = \frac{V_i}{Q_1} \quad (6)$$

3.3 DR (Draft Risk)

ドラフト抑止効果の評価指標として、P. O. Fanger ら³⁾ により提案された DR を用いる。ドラフトによる居住者の不満足者率を表す指標は (式 7) で求められる。ENISO 7730 では DR<10% でカテゴリ A、DR<20% でカテゴリ B、DR<30% でカテゴリ C と定められている。

$$DR = (34 - t_p)(\bar{U}_p - 0.05)^{0.62} (0.37\bar{U}_p Tu + 3.14) \quad (7)$$

4. 結果と考察

4.1 鉛直温度分布

図 7 に Case MF-2,3 の温度経時変化を示す。室の冷房負荷に対して機器容量が過剰であったため PAC のハンチングが見られた。ハンチング周期は Case MF-3 のみ 14 分と他の

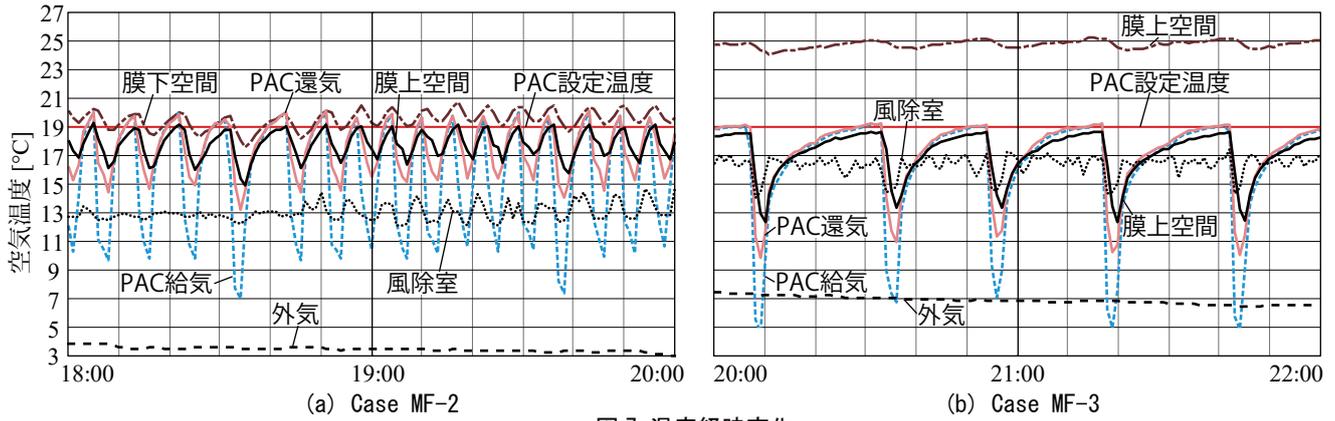


図7 温度経時変化

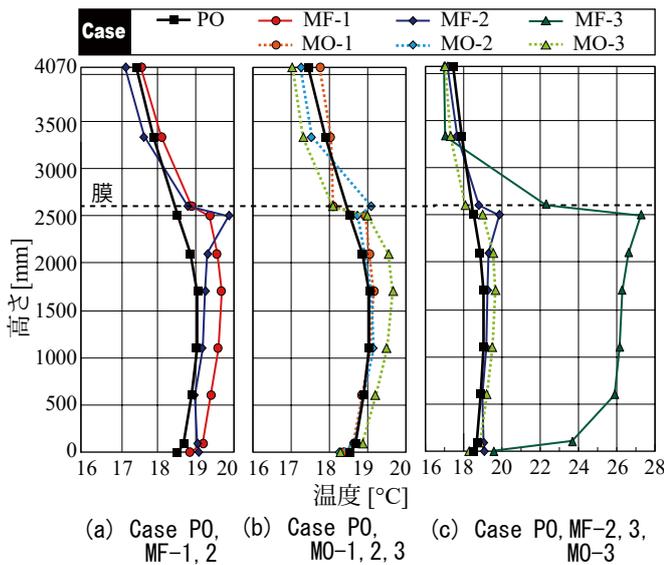


図8 鉛直温度分布

Caseより高い。これは膜上下の通気抵抗が大きく、居住空間の熱の滞留が原因と考えられる。このことから膜敷設率を100%にしたCaseMF-3膜では冷房効率が悪化していることが示唆された。

図8にハンチング周期で平均化した鉛直温度分布を示す。Case MF-3以外は概ねCase P0と変わらず居住域温度が設定温度(19°C)相当になった。一方でCase MF-3は26°C程度と高くなった。MF膜は通気抵抗が大きく、膜下空間の熱負荷が十分に処理出来なかったと考えられる。またCase MF-1, 2では温度分布が改善され、膜を分割することによる冷房性能向上効果が示唆された。

4.2 風速分布

図9にCase P0, MF1~3の平均スカラー風速を示す。膜敷設率が大きいほど風速が小さくなるが、G, Hでは風速が大きくなった。このように局所的な風速の増加が現れることから、膜敷設の際には空調機と膜の位置関係を考慮しなければならない。

図10に測定点A, B, F, Gにおける鉛直方向の風速を上向きを正として示す。膜敷設率を増加するほど、下向き風速が減少した。下向き風速はPACの吹き下ろし気流と考えると、ドラフトの原因となるPAC吹き出し気流を膜により緩和できていることが示唆される。膜が敷設されていない

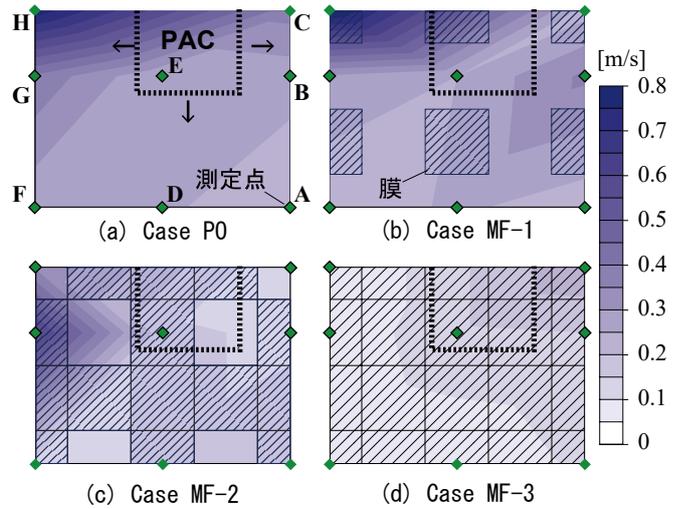


図9 平均スカラー風速分布

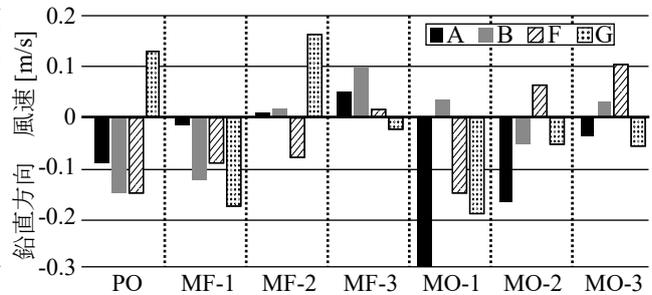


図10 鉛直方向の風速分布

Case P0と比べて膜敷設したMF膜、MO膜のほうが下向き風速が小さくなった。また、膜敷設率を増加させていく毎に下向き風速が小さくなっていることから、膜敷設率の増加によってドラフトが改善されていることが示唆された。しかし、Case MO-1のA点のように局所的に下向き風速が増加したことから、膜の設置する位置を考慮する必要があると考えられる。

4.3 DR (Draught Rate)

図11に測定点A, B, F, Gにおける高さ1.1mのDR評価結果を示す。平均値から、Case P0ではDRは約60%程度と大きな数字となったが、膜敷設率の増加につれDRは低い値となっていく、Case MF-3膜ではAカテゴリ、Case MO-3ではカテゴリBの範囲にDRが収まった。このことから膜敷設率を大きくすることによって室内環境が改善されたと

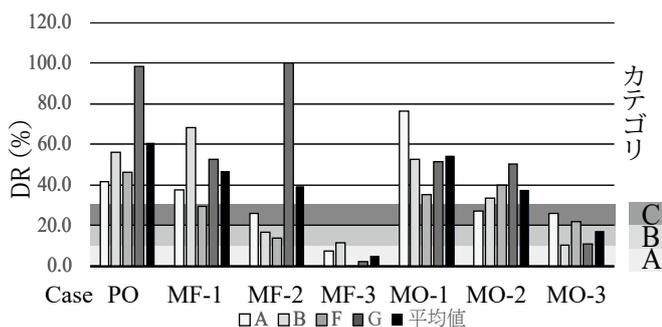
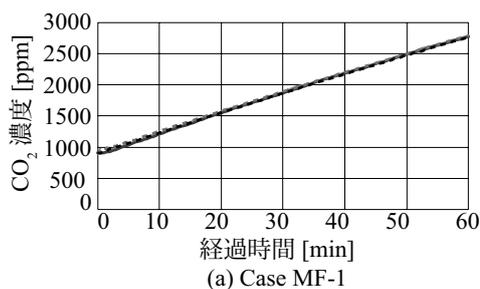


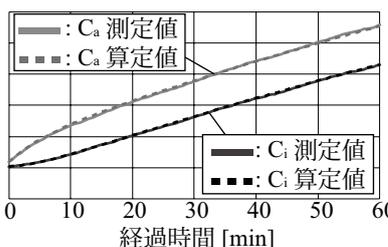
図 11 ドラフト率 (DR)

表 2 膜上下交換空気量と名目換気時間

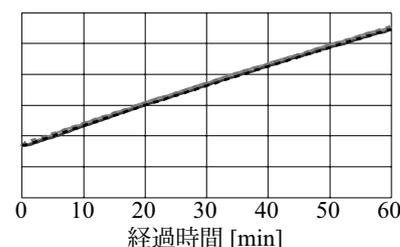
Case	PO	MF			MO		
		1	2	3	1	2	3
膜上下交換空気量 [m ³ /h]	2,716	4,551	4,520	189	2,160	4,580	3,070
名目換気時間 τ_n [min]	2.2	0.8	0.8	18.3	1.6	0.8	1.1
対象空間	膜上 + 膜下	膜下空間					



(a) Case MF-1



(b) Case MF-3



(c) Case MO-3

図 12 CO₂ 濃度経時変化

考えられる。今回の DR の検討では測定した室温を使って算出しているため、室温の違いが DR の違いに大きく影響を受けていると考えられる。しかし室温は室内熱負荷と設定温度によって影響を受けるので、図 11 に示す結果がそのまま、各条件でのドラフト防止性能の優劣を示すものとは限られないことに注意したい。

4.4 膜上下交換空気量と名目換気時間

膜上下交換空気量、名目換気時間を表 2 に、Case MF-1、Case MF-3、Case MO-3 の膜上部・下部空間の CO₂ 濃度経時変化を図 12 に示す。Case MF-3 では、CO₂ 濃度変化に膜上下空間に差がでたが、他条件は Case MF-1、MO-3 同様、膜上下の濃度の差異がほとんど見られなかった。よって、Case MO-3 も含め、CO₂ ガスが膜上空間も含めた室内空間全体で瞬時一様拡散に近い挙動を示したと考えられる。このことから、これらの条件ではトレーサーガス法による膜上下交換空気量の正確な推定は困難であると考えられる。Case PO に比べ、Case MF-3 の名目換気時間 (トレーサーガス法で算出した膜上下交換空気量を膜下の容積で除したものは、換気対象の体積が異なるため純粋な比較はできないが、非常に長い時間となった。よって膜上空間だけに外調機や換気設備が導入される場合、換気量不足による空気質悪化が懸念される。しかし、通気性に優れた膜の変更や敷設率の調整により、交換空気量を増加させ、上記の課題について解決可能と考えられる。

5. おわりに

本研究は夏季を想定した実大実験を行い、分割型膜天井空調の冷房性能の検討を DR、膜上下交換空気量の視点から行った。不織布付きの膜を 100% で設置すると DR の抑制効果が見られ、ドラフトレスな室内環境を作ることができた

反面、膜上下交換空気量が少なく、冷房性能の低下が懸念された。このことから膜の敷設率を大きくするにつれてドラフトの改善はみられるが空気質に問題が生じることがわかった。このことから、本空調の冷房性能に対する解決策として膜敷設率を減らす、膜の種類を変えるが挙げられる。

今後の展望として、暖房運転時の室内環境・空調性能の検討や外調機を運転し、空気齢等を用いた室内の空気質評価、空調機と膜敷設率の関係をパラメータとした検討があげられ、さらなる性能検討を行っていく所存である。

記号

C : CO ₂ 濃度	[-]	DR : Draft Risk	[%]
Q : 流量	[m ³ /h]	t : 温度	[°C]
T_u : 乱流強度	[%]	τ_n : 名目換気時間	[min]
U : 平均スカラー風速	[m/s]	V : 体積	[m ³]
M : 発生量	[m ³]		

略字

a : Attic Space	i : Indoor Space	o : Outdoor	p : Point
SA : PAC 給気	PO : PAC Only	MF : Membrane and Fabric	
MO : Membrane Only			

参考文献

- 1) 蔵永真理、山中俊夫、前田龍紀、北風春都 : PAC を用いた膜天井放射空調の冷房性能に関する実験的研究、日本建築学会環境系論文集 Vol.84 No.757、pp255-262、2019.3
- 2) S.Ito, T.Yamanaka, T. Kobayashi, J.Yuan, N.Choi : Cooling Performance of Air-Conditioning System with Ceiling Suspended Packaged Air Conditioning Unit over Divided-Type Membrane Ceilings in Large Classroom, The 40th AIVC - 8th Tight Vent & 6th venticool Conference, Ghent, 2019
- 3) Fanger, P.O., A.K.Melikov, H.Hanzawa and J.Ring ; Air Turbulence and Sensation of Draught, Energy and Buildings, 12(1988) pp.21 - 39, 1988
- 4) ISO 7730 ; Moderate thermal environment-Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort, International Organization for Standardization, 2005