

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15) 膜天井の負荷処理性能及び空調能力の検討

Cooling and Heating Performance of Ceiling Radiant Membrane Air Conditioning System with PAC
 (Part15) Study of Removing Heat Loads Performance and Air conditioning Capacity

正会員 ○前田 龍紀 (竹中工務店) 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 (大阪大学)
 正会員 崔 ナレ (大阪大学) 学生会員 上村 芙美子 (大阪大学)
 正会員 新宮 浩丈 (竹中工務店) 正会員 安江 楽人 (竹中工務店)

Tatsunori MAEDA*1 Toshio YAMANAKA*2 Jihui YUAN *3 Narae CHOI *2

Fumiko KAMIMURA *2 Hirotake SHINGU *1 Rakuto YASUE *1

*1Takenaka Corporation *2Osaka University *3 Toyohashi University of Technology

In this research, a new air conditioning system combining PAC and membrane ceiling is proposed. This paper showed the removing heat loads performance and air conditioning capacity of this air conditioning system, using sensible heat quantity PAC and supply air volume from membrane ceiling

1. はじめに

前報^{1,2,3)}では省力化・省人化効果の高い天井カセット方式と膜天井を組合せた空調方式の実大実験について、

三軸織物の不燃膜を用いた実験結果について報告した。本報では、上記実験で得られたPACの顕熱処理量、COPから本空調方式の負荷処理性能と省エネ性について報告する。なお実験方法は前報¹⁾を参

照している。

2. COPの算出方法

図-1にCOPを算出するための計測概要を示す。まず、PAC室内機の吸込温度と吹出温度と吹出風量を計測し、顕熱処理量を算出する(式1)。次に計測したPACの消費電力量で除してCOPを算出した(式2)。

$$Q_{pac} = c_p V (\theta_r - \theta_s) \times 2 \quad (1)$$

$$COP = Q_{pac} / W \quad (2)$$

Q_{pac} : 顕熱処理量[W] θ_r : 吸込み空気温度[°C]

c_p : 空気の容積比熱[J/m³°C] (=0.34) θ_s : 吹出し空気温度[°C]

V : 換気量[m³/h] (=1016[m³/h]) W : PAC電力(室外機+室内機)[W]

上式より処理負荷は顕熱のみとなっているが消費電力には潜熱処理分及び室内機ファンも含まれているため、

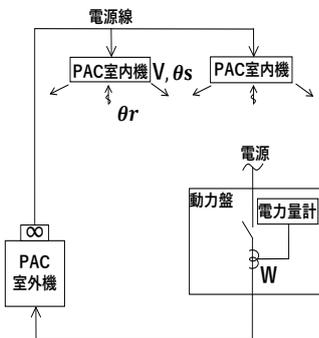


図-1 計測概要

表-1 COP算出結果と処理過不足熱量 (平均値)

天井膜	実験条件	PACの 設定温度[°C]	PACの 循環風量[m³/h]	総発熱量 [kw]	PAC顕熱処 理量[kw]	消費電力 [kw]	負荷率 [-]	COP [-]	外気温度 [°C]	空調負荷 [kw]	負荷処理過 不足[kw]	膜上負荷 [kw]
膜なし	Case1	24	1016×2	0.812	1.08	0.15	0.09	7.25	18.9	0.79	0.28	-0.07
	Case2			0.412	0.72	0.13	0.06	5.43	19.9	0.38	0.34	-0.02
	Case3		712×2	0.99	0.11	0.08	9.28	16.8	0.81	0.18	-0.09	
	Case4	27	1016×2	0.812	0.91	0.13	0.07	7.13	19.0	0.90	0.01	-0.15
	Case5	1.03		0.15	0.08	6.93	17.1	0.80	0.24	-0.07		
	Case6	24		1.236	1.62	0.19	0.13	8.57	18.8	1.23	0.39	-0.06
膜 (不織布なし)	Case1	19	1016×2	0.812	1.54	0.14	0.12	10.79	7.1	0.67	0.87	-0.08
	Case2			0.412	0.94	0.12	0.08	7.98	8.4	0.29	0.65	-0.07
	Case3		712×2	1.38	0.11	0.11	12.33	8.8	0.68	0.70	-0.09	
	Case4	22	1016×2	0.812	1.16	0.12	0.09	9.50	6.9	0.79	0.38	-0.24
	Case5	0.96		0.14	0.08	6.86	7.3	0.68	0.28	-0.13		
	Case6	19		1.236	2.03	0.16	0.16	12.62	8.6	1.12	0.90	-0.12
膜 (不織布あり)	Case1	19	1016×2	0.812	0.64	0.15	0.05	4.20	10.5	0.77	-0.13	-0.11
	Case2			0.412	0.53	0.12	0.04	4.40	6.0	0.29	0.24	-0.05
	Case3		712×2	0.88	0.12	0.07	7.58	10.2	0.82	0.06	0.00	
	Case4	22	1016×2	0.812	0.74	0.14	0.06	5.45	9.3	0.86	-0.12	-0.12
	Case5	0.57		0.15	0.05	3.84	7.6	0.78	-0.20	0.01		
	Case6	19		1.236	1.00	0.16	0.08	6.13	7.8	1.31	-0.31	-0.08
PAC (冷房)	仕様書定格値 (全熱処理量)				12.50	3.99	1.00	3.13	35.0			
	仕様書中間値 (全熱処理量)				5.70	0.98	0.46	5.83	29.0			

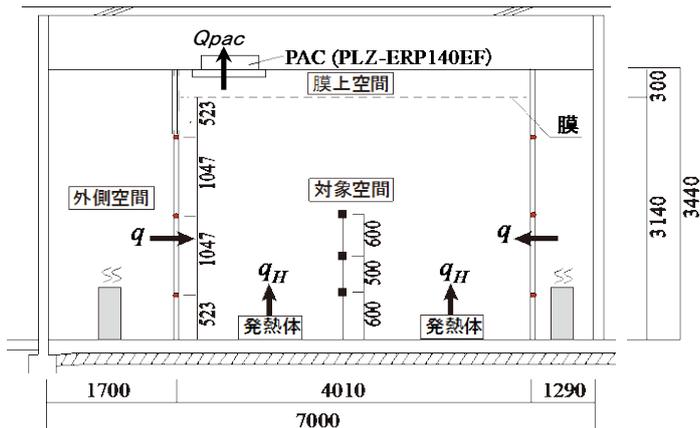
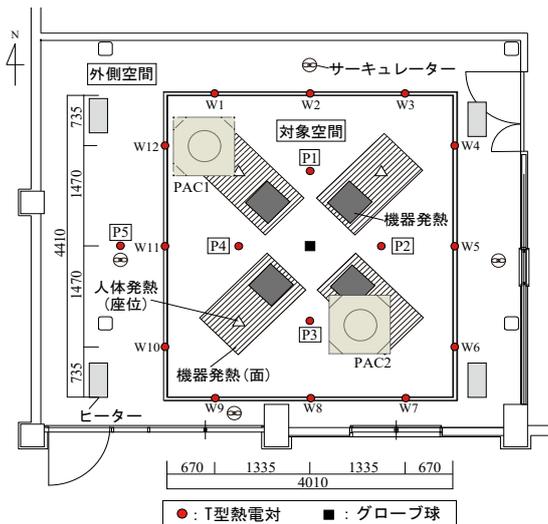


図-2 空調負荷算出における測定点と負荷の考え方 (左:平面図、右:断面図)

一般的な機器単体 COP よりも低い値となる。なお、実験中 PAC 室内機の吹出風量は固定させている。

3. COP 算出結果

実験開始直後は各 CASE でばらつきがみられるため、安定した0時から10時で平均化した結果とPACの定格値と中間値の仕様書の値を表-1に示す。「膜なし」より「膜(不織布なし)」の方が顕熱処理量の値が大きくなっている。これは「膜なし」の設定温度の方が5℃高いためである。一方、負荷率が低い条件の方がCOPは低い。これは、負荷率が高い条件と低い条件が同程度の消費電力となっているためである。今回の実験条件においては、室内機のファンの消費電力が支配的であると推測できる。

4. PAC 顕熱処理量と空調負荷

図-2に本報での熱フロー図と計測概要を示す。空調負

荷を内部発熱と外部空間からの貫流熱(式3)の合計値(式4)として設定した。

$$q = Sw(\theta_i - \theta_o) \frac{L}{\lambda} \quad (3)$$

$$QL = qH + \sum q \quad (4)$$

QL : 空調負荷[W] q_H : 発熱負荷(812[W]) L : 壁厚[mm]

λ : 壁の熱伝導率 [W / m · K] ($\frac{L}{\lambda} = 1.553[\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}]$)

q : 壁の壁面からの貫流負荷 [W] θ_i : 室内側の壁面温度 [°C]

θ_o : 室外側の壁面温度 [°C]

S_w : 壁面面積 [m²]

図-3に各膜条件におけるCASE1、2、4、6のPAC 顕熱処理量と空調負荷の時系列変化を示す。PAC 顕熱処理量は空調負荷が高い条件にて増加することが分かる。一方、「膜(不織布なし)」と「膜(不織布あり)」の結果から、不織布がないと空調負荷に対して過剰な顕熱処理量

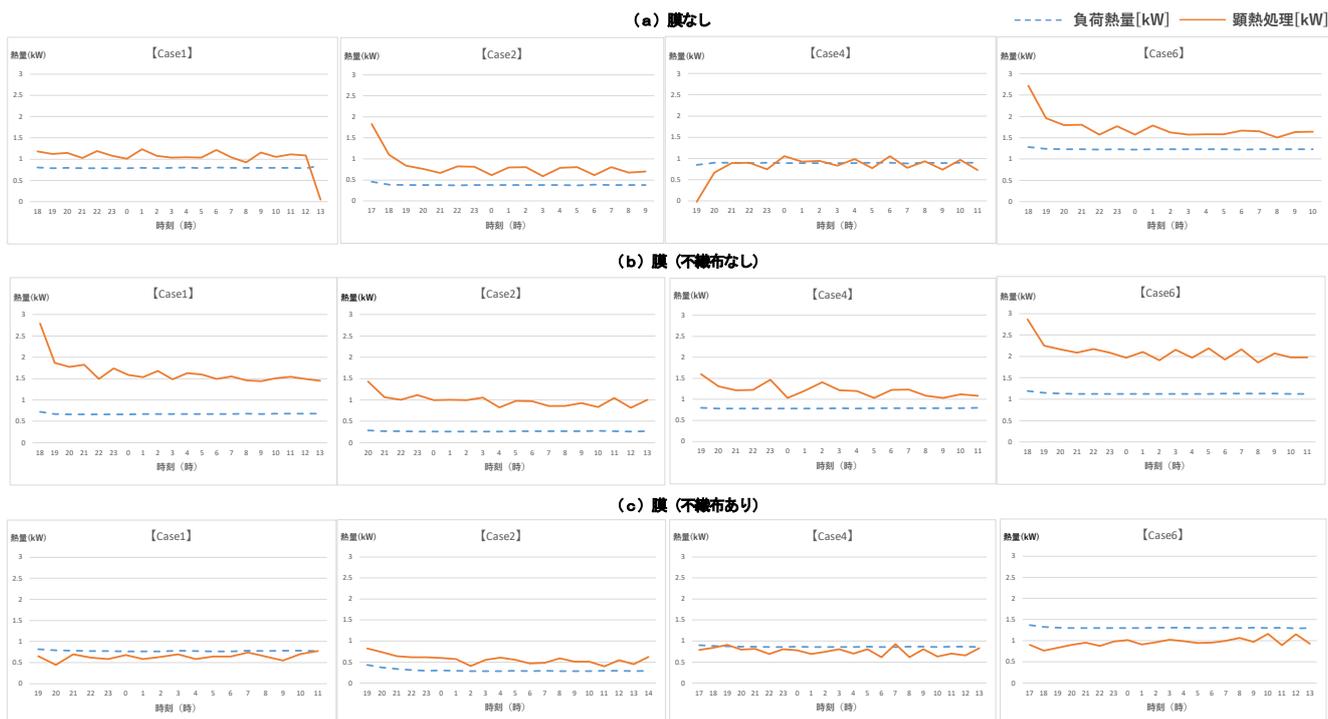


図-3 室内負荷と顕熱処理量の時刻別変化

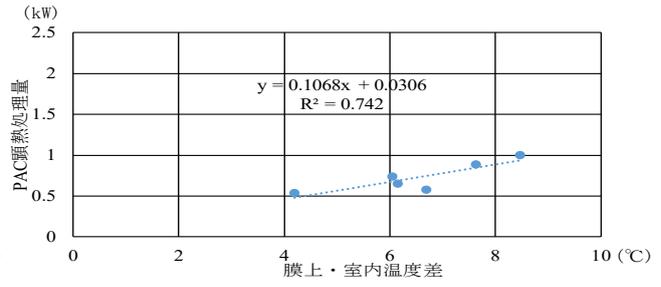


図-4 PAC 顕熱処理量と膜上・室内温度差の関係 (左: 膜 (不織布なし)、右: 膜 (不織布あり))

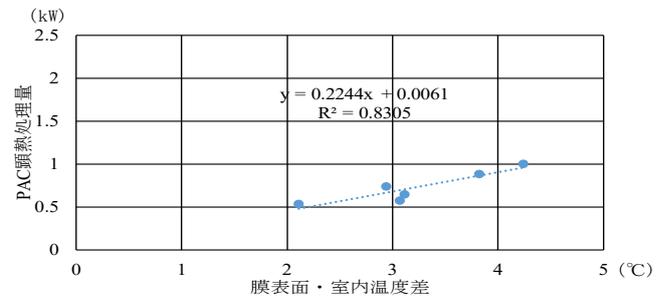
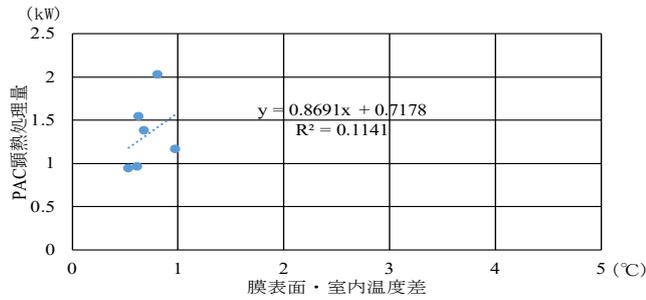


図-5 PAC 顕熱処理量と膜表面・室内温度差の関係 (左: 膜 (不織布なし)、右: 膜 (不織布あり))

となり、不織布があるとやや不足気味の顕熱処理量となっている。

表-1に各条件における顕熱処理量と空調負荷の過不足分と膜上とその天井裏間の貫流熱(膜上負荷)を示す。この貫流熱は、天井裏と膜上との温度差と天井材(プラスターボード:30mm)の熱貫流率 $4W/m^2 \cdot k$ として求めた。表-1の結果より、「膜(不織布あり)」での不足分が貫流熱で補填されている傾向がある。不織布を介して移動する熱量が不明ではあるが、不織布を介すことで過剰な熱処理が発生していない可能性が示唆された。

5. PAC 顕熱処理量と膜上下温度差の関係

図-4に、膜(不織布なし)と膜(不織布あり)の2条

件における顕熱処理量と膜上・室内温度差の関係を示す。顕熱処理量と膜上・室内温度差の相関係数は、膜(不織布なし)で0.28、膜(不織布あり)で0.86となった。この結果より、膜(不織布あり)の条件においては、膜上設定温度と室内設定温度の差で顕熱処理量の推定が可能であることが示唆された。

図-5に、膜(不織布なし)と膜(不織布あり)の2条件における顕熱処理量と膜表面・室内温度差の関係を示す。顕熱処理量と膜表面・室内温度差の相関係数は、膜(不織布なし)で0.34、膜(不織布あり)で0.91となった。この結果より、膜(不織布あり)の条件においては、膜表面からの輻射による熱処理が膜表面・室内温度

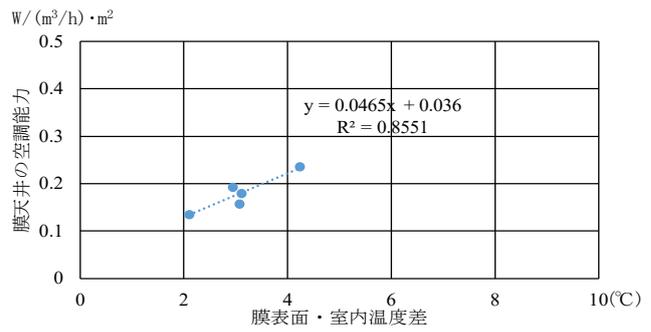
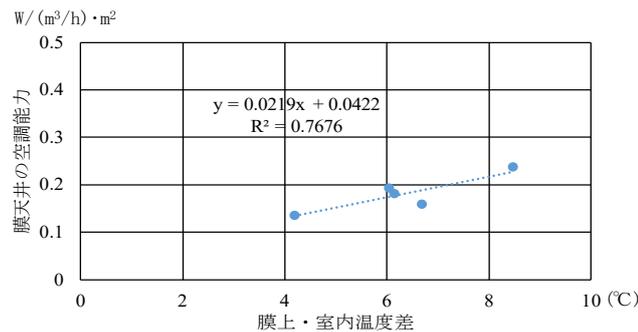


図-6 膜天井の空調能力と膜上下温度差の関係 (左: 膜上・室内温度差、右: 膜表面・室内温度差)

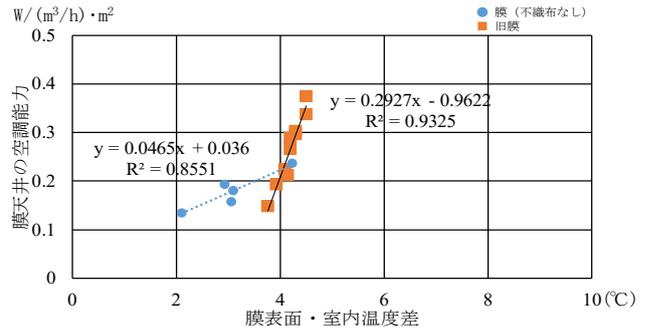
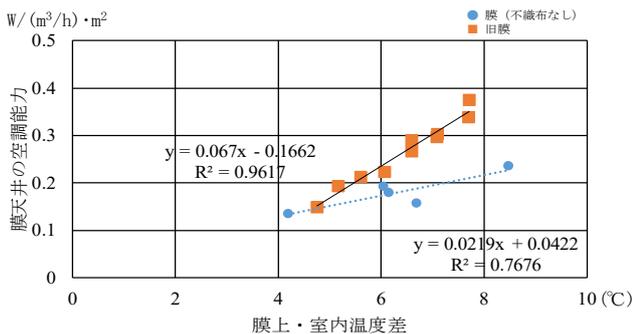


図-7 通気流量が異なる膜天井の空調能力の比較 (左: 膜上・室内温度差、右: 膜表面・室内温度差)

表-2 旧膜ファン実験及び本実験における膜天井の空調能力

天井膜	実験条件	PACの 設定温度[°C]	PACの 循環風量[m3/h]	総発熱量 [kW]	PAC顕熱処 理量[kW]	膜上から室内への 風量[m3/h]	膜上・室内 温度差[°C]	膜表面・室内 温度差[°C]	膜天井の空調能力 [W/(m3/h)・m2]
膜 (不織布なし)	Case1	19	1016×2	0.812	1.54	1106	0.82	0.63	0.08
	Case2			0.412	0.94	1105	0.89	0.53	0.05
	Case3			0.812	1.38	1111	0.90	0.68	0.07
	Case4	22	1016×2	0.812	1.16	1104	1.11	0.98	0.06
	Case5			0.96	1107	0.98	0.62	0.05	
	Case6			1.236	2.03	1108	1.11	0.81	0.10
膜 (不織布あり)	Case1	19	1016×2	0.812	0.64	203	6.15	3.11	0.18
	Case2			0.412	0.53	223	4.20	2.11	0.13
	Case3			0.812	0.88	136	7.63	3.82	0.36
	Case4	22	1016×2	0.812	0.74	217	6.04	2.94	0.19
	Case5			0.57	206	6.69	3.07	0.16	
	Case6			1.236	1.00	240	8.47	4.24	0.24
旧膜	CaseL-230	19	1016×2	0.812	0.86	217	6.06	4.09	0.22
	CaseL-460				1.09	320	5.16	3.93	0.19
	CaseH-230				0.79	209	5.60	4.15	0.21
	CaseH-460	22	1016×2		0.84	319	4.75	3.76	0.15
	CaseAu-50				0.78	130	7.69	4.50	0.34
	CaseAu-100				0.86	163	7.08	4.30	0.30
	CaseAu-150	19	1016×2		1.09	213	6.59	4.20	0.29
	CaseAl-50				0.86	130	7.70	4.50	0.38
	CaseAl-100				0.90	167	7.09	4.30	0.30
	CaseAl-150				1.07	226	6.59	4.20	0.27

PAC風量が異なるため散布図からは除外している

差に応じて行われていることが示唆された。一方、膜（不織布なし）においては、温度差も小さく相関もみられないことから膜表面からの輻射による熱処理以上に、膜からの浸み出しによる熱処理が支配的になっていると思われる。

6. 膜天井の空調能力の検討

膜天井の空調能力はPAC 顕熱処理量を膜上から膜下への風量（前報³⁾における交換空気量）と膜面積で除したもので定義した。図-6に膜天井の空調能力と膜上・室内温度差と膜表面・室内温度差との関係を示す。空調能力と膜上・室内温度差、膜表面・室内温度差の相関係数はそれぞれ、0.88と0.92となっており、天井膜からの吹出し風量と膜上・室内温度差または膜表面・室内温度差から空調能力を推定できることが示唆された。なお図6では、膜（不織布あり）の条件を対象とし、CASE3はPACの吹出し風量が他条件と異なっているため除いている。

7. 空気通過率が異なる膜天井の空調能力の比較

前報¹⁾にて開口率の異なる膜（旧膜）で実施した実験結果との比較を行った。本報でも同様に、前章で算出した膜天井の空調能力の比較を行った。ここで、本報での膜（不織布あり）の通気流量は140 (cm³/cm²・s)、旧膜の通気流量は29.6 (cm³/cm²・s)となっている。表-2に既報⁴⁾の旧膜ファン実験と本実験におけるPAC 顕熱処理量、膜からの吹出し風量、膜上・室内温度差、膜表面・室内温度差と膜天井の空調能力を示す。図-7に膜天井の空調能力と膜上・室内温度差と膜表面・室内温度差との比較を示す。旧膜における空調能力と膜上・室内温度差、膜表面・室内温度差の相関係数はそれぞれ、0.98と0.97と高い値となっている。図-7の空調能力と膜上・室内温度差の関係より、膜上・室内温度差が約4.5°C以上で旧膜の空調能力の方が本報での膜（不織布あり）より高くなる。これは、温度差が小さい場合は通気流量の大きい膜（不織布あり）による対流空調の効果が大きくなるが、温度差が大きくなると少ない風量でもある程

度の対流空調の効果に加え、膜面からの輻射空調の効果が大きくなることを示唆している。また、空調能力と膜表面・室内温度差の関係からも通気流量の小さい旧膜では、温度差に対する空調能力増加率が大きいことも分かる。以上より、実現できる膜上下の温度差に応じて適切な通気流量の膜を選択する必要があることが分かった。

8. まとめ

本報では既報⁴⁾で対象とした膜よりも通気流量が大きい2種類の膜を用いて、省力化・省人化効果の高い天井カセット方式と膜天井を組合せた空調方式の実大実験を行った。その結果から下記知見を得た。

- (1) 不織布がある膜は、空調負荷に対して過不足の少ない負荷処理が可能であることが示唆された。
- (2) 不織布がある膜は、PACの顕熱処理量と膜上下温度差の相関が高い
- (3) 不織布のある膜の単位面積・単位通過風量当たりのPAC 顕熱処理量（膜天井の空調能力）は膜上下温度差との相関が非常に高い
- (4) 既報⁴⁾で対象とした膜（旧膜）と本報で用いた膜（不織布あり）の空調能力を算出した

今後は暖房時の検証を行っていく。

【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) 安江楽人、山中俊夫、小林知広、袁継輝、崔ナレ、前田龍紀、上村美英子、新宮浩丈: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)膜の通気抵抗が冷房時の室内鉛直温度分布に与える影響、空気調和衛生工学会大会学術講演論文集2020.9掲載予定
- 2) 新宮浩丈、山中俊夫、小林知広、袁継輝、崔ナレ、前田龍紀、上村美英子、安江楽人: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13)グループ温度及び膜上下交換空気量の同定、空気調和衛生工学会大会学術講演論文集2020.9掲載予定
- 3) 上村美英子、山中俊夫、小林知広、袁継輝、崔ナレ、前田龍紀、新宮浩丈、安江楽人: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14)冷気分配性能及びドラフト感評価、空気調和衛生工学会大会学術講演論文集2020.9掲載予定
- 4) 前田龍紀、山中俊夫、小林知広、袁継輝、崔ナレ、前田龍紀、蔵永真理、上村美英子、小林佑輔、新宮浩丈: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10)省エネ性と負荷処理性能及び放射効果の検討、空気調和衛生工学会大会学術講演論文集2019.9掲載