The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	PACを用いた膜天井放射空調の冷暖房性能及び設計手法に関する研究
Author(s)	前田, 龍紀
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/96094
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

博士学位論文

PAC を用いた膜天井放射空調の冷暖房性能及び設計手法に関する研究

前田　龍紀

2023 年 12 月

大阪大学大学院工学研究科

目　次

第１章　序論
1.1　本研究の背景・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１
1.1.1　建設業の現状・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１
1.1.2　建築の脱炭素について・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・３
1.2　利用者の快適性に配慮した既往の空調方式・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４
1.2.1　はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４
1.2.2　利用者の快適性に配慮した空調方式の分類・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４
1.2.3　既往の放射空調方式・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４
1.2.4　既往の対流空調方式・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６
1.2.5　既往の併用空調方式・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６
1.3　本研究で対象とする空調方式・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・８
1.3.1　本研究で解決する課題と対策方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・８
1.3.2　本研究で提案する空調システム・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・８
1.3.3　本研究の意義・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・９
1.4　本研究の目的と本論文の構成・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１１
1.4.1　本研究の目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１１
1.4.2　本論文の構成・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１１
参考文献
第２章　本研究で対象とする膜天井材の検討
2.1　本研究で対象とする膜天井・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１５
2.2　本研究で対象とする膜材と天井多孔パネルの比較・・・・・・・・・・・・・・・・１７
2.2.1　はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１７
2.2.2　実験概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１７
2.2.3　測定点・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１８
2.2.4　測定結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１９
2.2.5　乱れのスケール・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２２
2.2.6　まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２３
2.3　CFD 解析による性能検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２４
2.3.1　はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２４
2.3.2　解析概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２４
2.3.3　解析結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２５
2.3.4　まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２６
2.4　本章のまとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２７

第３章　長尺膜天井における冷房実大実験
3.1　はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２８
3.2　実験概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２９
3.2.1　実験室概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・２９
3.2.2　実験条件・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・３０
3.3　実験結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・３２
3.3.1　垂直温度分布・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・３２
3.3.2　膜上下交換空気量・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・３２
3.4　他の放射空調システムとの温熱環境比較・・・・・・・・・・・・・・・・・・・３６
3.5　本章のまとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４０
参考文献

第４章　長尺膜天井における膜上下循環換気実大実験
4.1　はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４２
4.2　膜上下強制循環時の冷房性能・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４３
4.2.1　実験の目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４３
4.2.2　実験室概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４３
4.2.3　実験条件・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４４
4.2.4　実験結果：PAC の運転状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４５
4.2.5　実験結果:鉛直温度分布・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４５
4.2.6　実験結果:グローブ温度・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４７
4.3　外気導入時の冷房性能・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４８
4.3.1　実験の目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４８
4.3.2　実験概要と条件・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４８
4.3.3　実験結果：PAC の運転状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４９
4.3.4　実験結果:鉛直温度分布・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４９
4.3.5　膜表面温度・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・５０
4.4　膜上下交換換気の効果の検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・５１
4.4.1 はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・５１
4.4.2 CO_2 濃度の経時変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・５１
4.4.3 膜上下交換換気・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・５１
4.5　局所平均空気齢による検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・５５
4.5.1 はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・５５
4.5.2 算出方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・５５
4.5.3 膜上からの冷気による局所平均空気齢・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・５８
4.5.4 給気口からの給気による局所平均空気齢・・・・・・・・・・・・・・・・・・・５８

4.6　PACの空調性能の検証・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６０
4.6.1 はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６０
4.6.2 空調負荷とPACの顕熱処理量の算出方法・・・・・・・・・・・・・・・・・６０
4.6.3 PACの顕熱処理量と空調負荷の時系列比較・・・・・・・・・・・・・・・・６２
4.6.4 PACの顕熱処理量と空調負荷の期間平均値比較・・・・・・・・・・・・・・６３
4.7　COPによる省エネルギー性の検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６４
4.7.1 はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６４
4.7.2　COPの算出方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６４
4.7.3　COP算出結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６４
4.8　本章のまとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６６
参考文献

第５章　織物膜天井における冷房実大実験
5.1　はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６８
5.2　膜の有無及び膜材特性が室内熱環境に与える影響・・・・・・・・・・・・・６９
5.2.1　実験の目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６９
5.2.2　実験室概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６９
5.2.3　実験条件・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７０
5.2.4　実験結果：PACの運転状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７０
5.2.5　実験結果:鉛直温度分布・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７２
5.2.6　実験結果:グローブ温度・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７２
5.3　膜上下交換空気量による検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７４
5.3.1　はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７４
5.3.2　膜上下交換空気量の算定結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７４
5.4　局所平均空気齢及び室平均空気齢による検討・・・・・・・・・・・・・・・７６
5.4.1　はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７６
5.4.2　局所平均空気齢の鉛直分布・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７６
5.4.3　室平均空気齢による室全体での冷気分配性能評価指標・・・・・・・・・・７６
5.5　前章で用いた膜材との比較・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７８
5.5.1　はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７８
5.5.2　PACの運転状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７８
5.5.3　鉛直温度分布及びグローブ温度の比較・・・・・・・・・・・・・・・・・７９
5.5.4　膜上下交換空気量の比較・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・８０
5.6　DR(Draught Rate)を用いた快適性の検証・・・・・・・・・・・・・・・・・８１
5.6.1　はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・８１
5.6.2 測定概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・８１

5.6.3 風速分布・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・８１
5.6.4 DR(Draught Rate) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・８２
5.7　PAC の空調性能及び省エネルギー性能の検証・・・・・・・・・・・・・・・・・８４
5.7.1 はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・８４
5.7.2 室内負荷と PAC の顕熱処理量及び COP の算出方法・・・・・・・・・・・・・８４
5.7.3 PAC の顕熱処理量と室内負荷の時系列比較・・・・・・・・・・・・・・・・８５
5.7.4 PAC の顕熱処理量と室内負荷及び COP の期間平均値・・・・・・・・・・・・８６
5.8　本章のまとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・８８
参考文献

第６章　織物膜天井における暖房実大実験
6.1　はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・９０
6.2　実験概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・９１
6.2.1　実験の目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・９１
6.2.2　実験室概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・９１
6.2.3　実験条件・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・９２
6.2.4　実験手順・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・９３
6.3　膜の有無及び膜材特性が室内熱環境に与える影響・・・・・・・・・・・・・・９４
6.3.1　PAC の運転状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・９４
6.3.2　鉛直温度分布・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・９５
6.3.3　グローブ温度・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・９６
6.3.4　CO_2 濃度・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・９６
6.3.5　膜上下循環ファン運転時との比較・・・・・・・・・・・・・・・・・・・９７
6.4　膜の有無及び膜材特性の立上がり時の考察・・・・・・・・・・・・・・・・１００
6.4.1　温度経時変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１００
6.4.2　温度分布の経時変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１００
6.4.3　CO_2 濃度の経時変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１０１
6.5　室内温度分布の予測手法の検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１０３
6.5.1　はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１０３
6.5.2　室内温度分布の計算方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１０３
6.5.3　室内温度分布計算におけるパラメータの設定・・・・・・・・・・・・・１０６
6.5.4　室内温度分布の計算値と実験値の比較・・・・・・・・・・・・・・・・１０８
6.6　PAC の空調性能及び省エネルギー性能の検証・・・・・・・・・・・・・・・・１１２
6.6.1　はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１１２
6.6.2　室内からの流出熱量と PAC の顕熱処理量及び COP の算出方法・・・・・１１２
6.6.3　室内からの流出熱量と PAC の顕熱処理量の時系列比較・・・・・・・・１１３

6.6.4　室内からの流出熱量と PAC の顕熱処理量及び COP の期間平均値・・・・１１４
6.7　本章のまとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１１６
参考文献

第７章　PAC を用いた膜天井放射空調方式の設計手法
7.1　はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１１８
7.2　提案検討する膜天井放射空調方式・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１１９
7.3　冷房時の設計手法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１２２
7.3.1 はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１２２
7.3.2 PAC の空調能力、膜上下循環ファン及び室内負荷処理ファンの設定・・・１２２
7.3.3 膜からの浸み出し冷却熱量と対流・放射冷却熱量の設定・・・・・・・・１２３
7.4 暖房時の設計手法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１２５
7.4.1 PAC の設定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１２５
7.4.2 室内負荷処理用ファンの効果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１２５
7.5 冷房時の被験者実験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１２７
7.5.1 実験の目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１２７
7.5.2 実験室概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１２７
7.5.3 実験方法と分析方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１２８
7.5.4 実験結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１３１
7.6　本章のまとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１３３
参考文献

第８章　総括・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１３５

関連発表論文・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１４２
謝辞・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１４５

第１章　序論

1.1 本研究の背景

1.1.1 建設業の現状

少子化に伴う人口減少の影響により、さまざまな業界で人手不足が問題視されており、建設業においても、人手不足の深刻化が業界全体にとって大きな課題となっている。

人手不足の原因の１つに、労働人口の高齢化が挙げられる。国土交通省が 2021 年 10 月にまとめた報告[1)]から抜粋した**図 1.1.1** 及び**図 1.1.2** によると、2020 年における建設業の就業者数はピーク時の 1997 年と比べて約 28%減少していることがわかる。また、建設業の就労者のうち約 3 割以上が 55 歳以上に対して、29 歳以下の就労者は約 1 割となっており、今後予想されている労働人口の減少だけでなく、高齢化の進行による若年者への技術継承の課題もある。

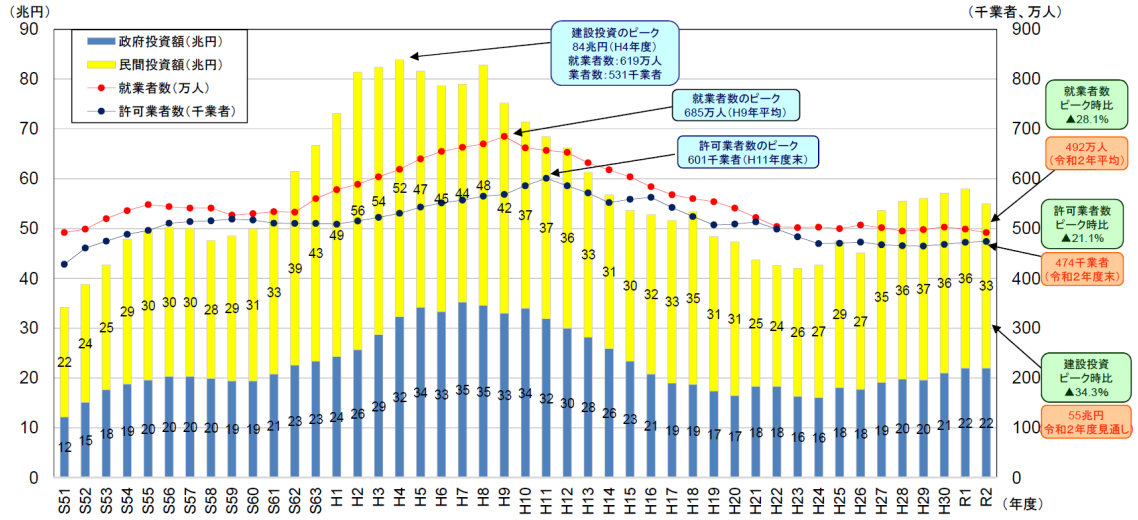


図 1.1.1　建設投資、許可業者数及び就業者数の推移[1)]

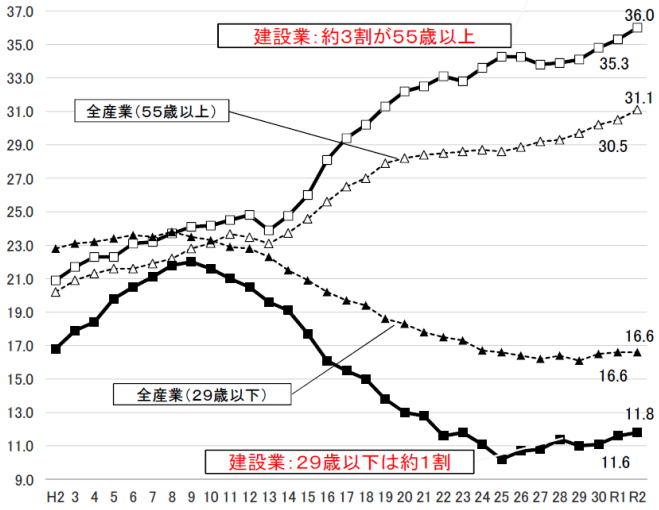


図 1.1.2　全産業と建設業における就業者数のうち高齢者と若年者の割合の推移[1)]

また、建設業の人手不足や高齢化が問題視される一方で、**図 1.1.1** によると 2015 年頃から建設投資額は右肩上がりとなっており、民間が全体の 60%と需要が大きいことがわかる。今後もしばらくは需要が上がり続けると予想されているため、このまま需要と供給のバランスを欠いた状態が続けば、作業者 1 人あたりの負担が増加していくことが課題となる。一方、国土交通省が 2021 年 10 月にまとめた報告 [1)]から抜粋した**図 1.1.3** 及び**図 1.1.4** によると、建設業では、2020 年時点で全産業平均と比較しても年間 360 時間以上の長時間労働が行なわれており、4 週 4 休以下が約 45%程度と常態化し、他産業では一般的となっている週休 2 日を実現できていないことが分かる。このような状況から、建設業では、時間外労働の上限規制に関して 5 年間の猶予が設けられていたが、2024 年度からは猶予期間が満期になり、対策を施さなければ、残業規制により、建設業の生産力はさらに低下することが予想されている。

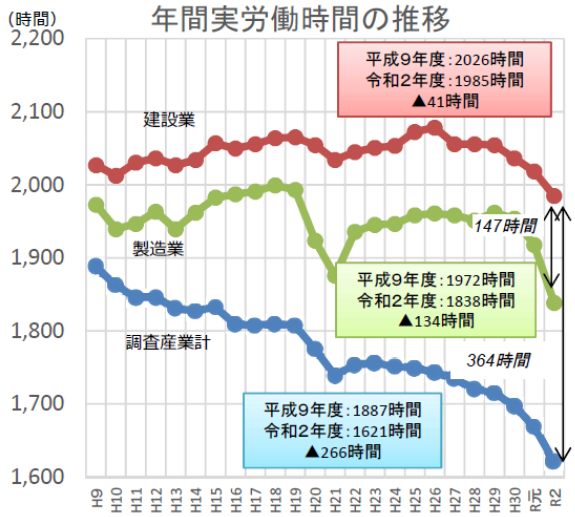


図 1.1.3　建設業、製造業、調査産業全体における年間実労働時間の推移 [1)]

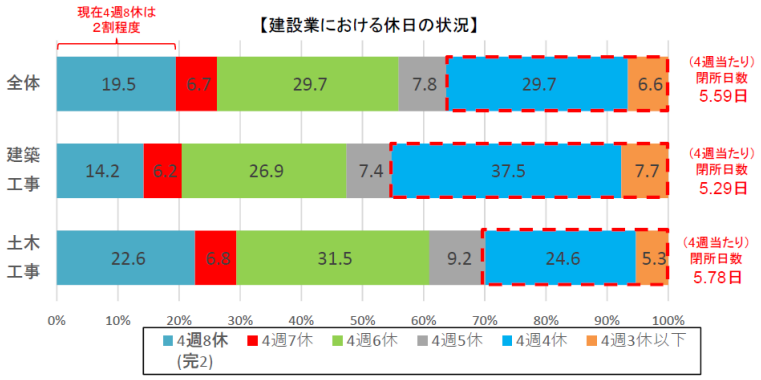


図 1.1.4　2020 年の調査における建設業の 4 週当たりの休日数 [1)]

1.1.2 建築の脱炭素について

2020 年 10 月の 2050 年カーボンニュートラル宣言以降、日本国内では地球温暖化対策推進法が改正されるとともに、「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長連略」の策定など、様々な分野で脱炭素に向けた動きが加速している。建築分野においても建築物省エネ法が改正されたほか、第 6 次エネルギー基本計画にて 2050 年及び 2030 年に目指すべき住宅・建築物の目標が示されている。目標には、住宅・建築物の運用時の CO_2 排出量、つまりオペレーショナルカーボン（Operational Carbon）を削減する旨が含まれている。

このような中で、多くの企業が参加する国際的な温室効果ガス(以下 GHG)排出量削減・目標達成イニシアティブである SBT(Science Based Targets)では、自社自らによる GHG の直接排出(Scope1)、他社から供給された電気・熱の使用に伴う GHG の間接排出(Scope2)だけでなく、Scope1・2 以外の事業者活動に関連する他社の GHG の間接排出 (Scope3)、いわばサプライチェーンでの削減が求められる。**図 1.1.5** に建築物におけるライフサイクルカーボンの枠組みを示す。不動産事業における Scope3 はエンボディドカーボンと呼ばれ、建設時、使用時及び解体時があり、IEA(国際エネルギー機関)によると、建設時が全体排出量の約 3 割[2)]を占めている。従って、削減目標達成のためにはステークホルダーと連携しながら建設時の GHG 排出量を削減していくことが不可欠となっている。この流れを受け、建築にかかわる不動産業界や建設業界の各企業も GHG 排出量削減の中長期目標を設定するなど、具体的な取組みが加速している。そこで、建設時 GHG 排出量の定量的評価が行えるように国土交通省の補助事業により不動産協会が策定した「建設時 GHG 排出量算定マニュアル」では、日本建築学会の「建物の LCA 指針」を活用し、工種や資材別に、資材数量または金額と排出原単位を乗じる「資材数量方式」により、建設時の GHG を算定する手法を示している。つまり、モノやコト自体を削減することで、エンボディドカーボンの削減につながることになる。

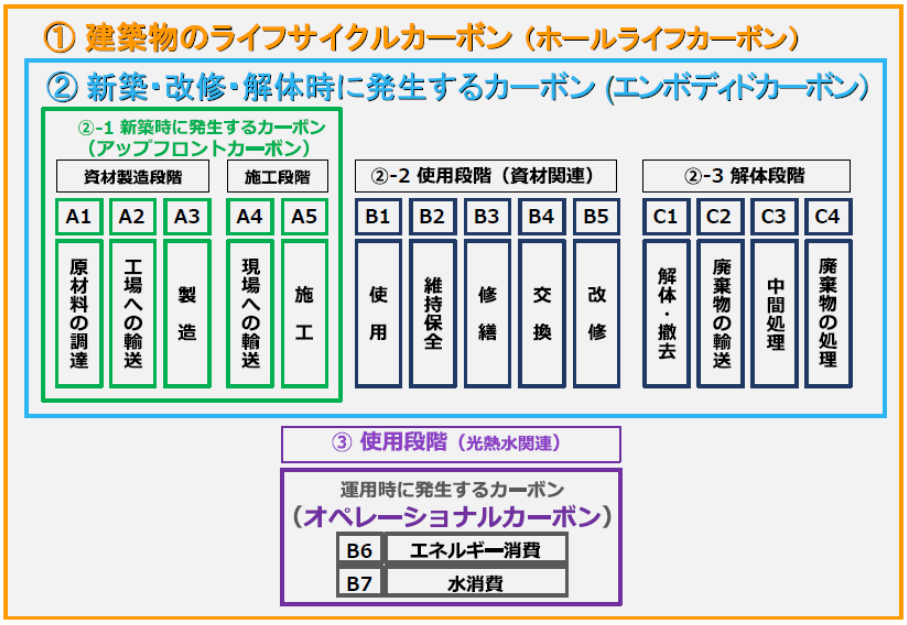


図 1.1.5　ライフサイクルカーボンの枠組み[3)]

1.2 利用者の快適性に配慮した既往の空調方式

1.2.1 はじめに

脱炭素社会の実現において、環境に配慮した建物に対する第三者機関の評価・認証などの客観的な評価は不動産価値を高め、ビルやテナントのブランディングにもつながるため、「CASBEE 建築」、「BELS」などの評価・認証を取得する建築が増えてきている。近年では SDGs や ESG 投資といった社会的要請、人材不足や価値観の多様化への対応のため、環境性能の評価だけでなく、利用者の健康性や快適性など人への影響やウェルビーイングを評価基準とする「WELL 認証」や「CASBEE ウェルネスオフィス」の評価・認証件数が増加している。これらのことから、利用者の快適性への配慮がこれからの建築には必要不可欠となる。

1.2.2 利用者の快適性に配慮した空調方式の分類

利用者の快適性に大きく影響を及ぼすものは空調による温熱環境といえる。今まで、快適な環境を創出するために様々な空調方式の研究・開発・実施・検証が行われてきている。**図 1.2.1** に建築における最も汎用的な天井空調方式に関して、利用者の温熱環境の快適性に配慮した既往方式を分類した。

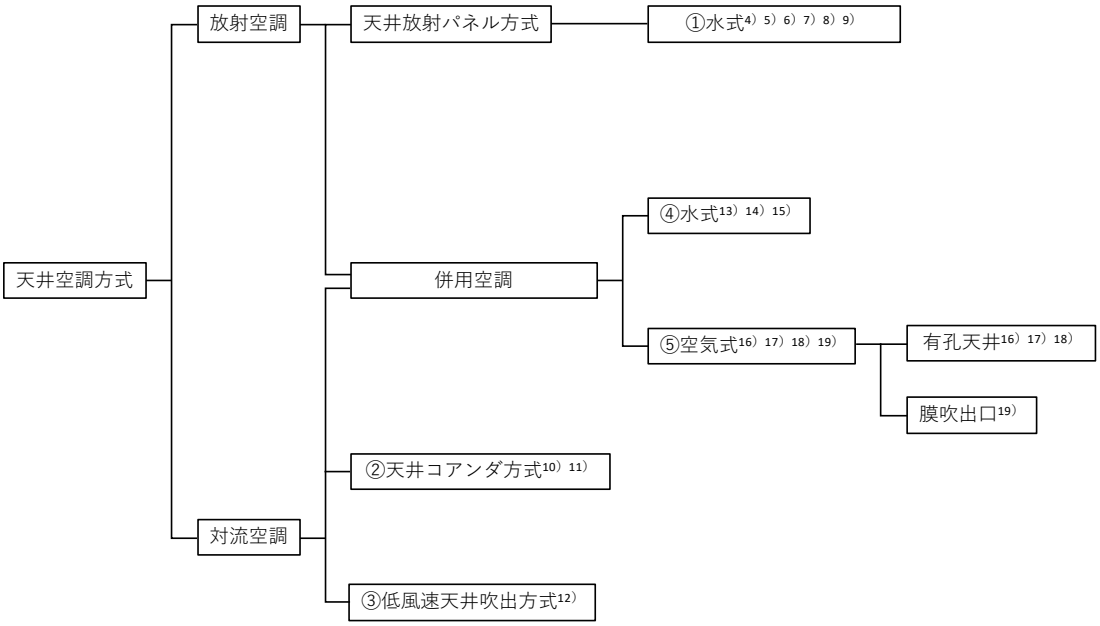


図 1.2.1　利用者の温熱環境の快適性に配慮した既往の天井空調方式の分類

1.2.3 既往の放射空調方式

天井表面温度を調整し、放射により人体や発熱体との吸放熱を行う「放射空調」と、吹出空気温度を調整し、空気にて冷熱と温熱を供給し室内空気温度を調整する「対流空調」に大別される。「放射空調」は「天井放射パネル方式」があり、これらは冷温水を天井面の放射パネルに供給する「水式[4)5)6)]」が採用されており、天井内空気を室内に供給するタスクファン[7)]や床から空調空気を浸み出させ[8)]たり、パーソナルファン[9)]を設けタスク併用空調方式

としている事例もある。**図 1.2.2** 及び**図 1.2.3** 既往の水式放射空調の概要図を示す。快適性は高いが、放射パネルの汎用性と、天井内の水配管からの漏水リスクの課題がある。

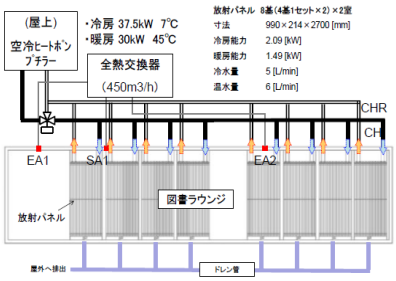
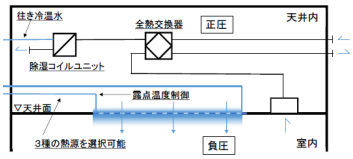
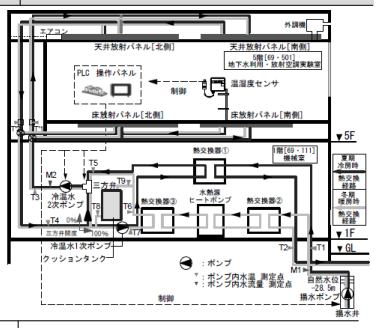
水式放射空調			
	クールヒートトレンチ[4]	熱源選択可能(冷温水・地中熱・太陽熱)[5]	天井放射パネル(地下水利用)[6]
			
対象室 規模	床面積81.9m² 天井高2.7m	床面積約70m²、天井高2.6m、 放射パネルの設置面積 34.56m²	床面積64m²,天井高2.7m
対象室 断熱	記載なし	記載なし	記載なし
空調機器	放射パネル 8基 冷房能力 2.09kW	記載なし	顕熱負荷処理能力 約2.9kW (室温26°C、冷水温度19°C時)
設定温度[°C]	送水温度7°C	設定温度26°C	PMV+0.5になるよう制御
流量 [L/min・m²]	5.0	記載なし	7.8～28.0
風量 [m³/h・m²]	記載なし	記載なし	記載なし
総発熱量 [W/m²]	記載なし	記載なし	記載なし

図 1.2.2　既往の水式放射空調

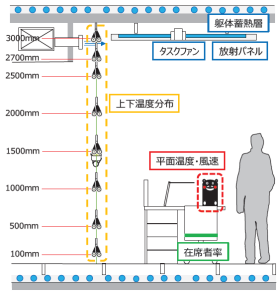
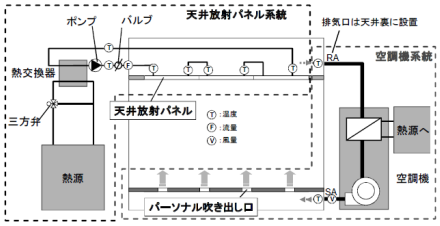
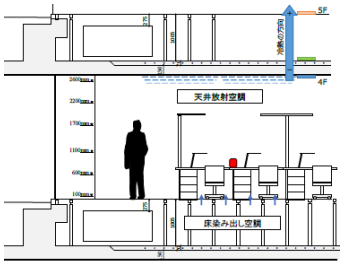
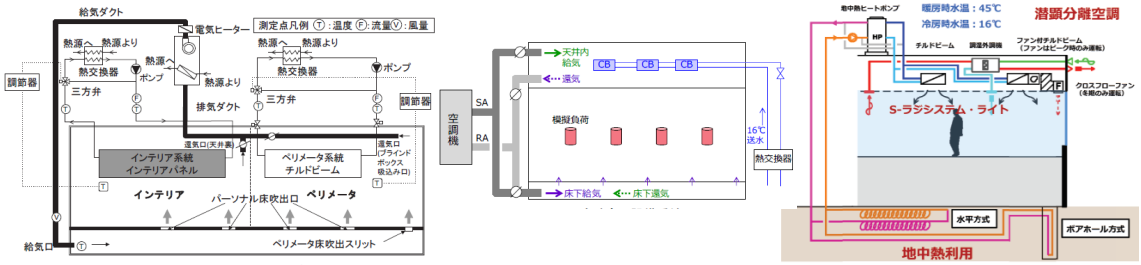
水式放射空調(タスク・アンビエント方式併用)			
	パーソナル気流併用型放射空調[7]	天井放射空調+床染み出し空調併用[8]	天井放射パネル+パーソナル吹出口[9]
			
対象室 規模	床面積約340m² 天井高3.2m	床面積 記載なし、天井高2.7m	床面積66m²,天井高2.7m 天井懐高さ0.8m
対象室 断熱	記載なし	記載なし	石膏ボード+スチレンボード100mm
空調機器	放射パネル+躯体蓄熱 タスクファンを天井面	スラブ表し天井に配管を埋設 床下空間にFCUを埋設	記載なし
設定温度[°C]	27°C	記載なし	28°C(冷水温度16°C)
流量 [L/min・m²]	記載なし	記載なし	記載なし
風量 [m³/h・m²]	記載なし	記載なし	10.0(パーソナル給気温度23°C)
総発熱量 [W/m²]	記載なし	記載なし	72.0

図 1.2.3　既往の水式放射空調（タスク併用方式）

1.2.4 既往の対流空調方式

「対流空調」では、コアンダ効果により空調空気を天井に這わせ、ドラフトレス空間をダクトレス方式にて実現させた「コアンダ方式[10)11)]」がある。どちらも吹出口や空調機が特注機器となるため汎用性がないが、ダクトレスだけでなく、コイルレス、電源レス、配管レスも実現できており省人化・省力化への寄与は期待できる。「低風速天井吹出方式[12)]」は浸み出し空調用のダクト材を用いているが、吹出口への加工が特注となるため、汎用性がない。また、浸み出し量を確保するための静圧が必要となりファン動力の増加が懸念される。

水式併用空調	
放射天井パネル(インテリア) +チルドビーム(ペリメータ)[13)]	チルドビーム+天井パネル(給気)[14)15)]



対象室	規模	床面積65.9m² 天井2.7m,天井懐0.7m	床面積32.4m², 天井高2.8m,天井懐1.2m	床面積32.4m², 天井高3.0m
	断熱	ポリスチレンフォーム（天井150mm, 壁100mm,床100mm）	硬質ポリウレタンフォー100mm	記載なし
空調機器		ペリ：チルドビーム+床吹出スリット インテリ：放射パネル＋床吹出口	パッシブチルドビーム　6台	ファン付きチルドビーム （ファンはピーク時のみ）
設定温度[℃]		インテリア…成行(目標 26℃) 送水温度 16℃、給気温度 20℃	26℃（送水温度16℃,給気温度26℃）	送水温度16℃
流量 [L/min・m²]		パネル 0.6、チルドビーム 1.5	MAX 7.0	記載なし
風量 [m³/h・m²]		記載なし	記載なし	記載なし
総発熱量 [W/m²]		約46.7	50.0	記載なし

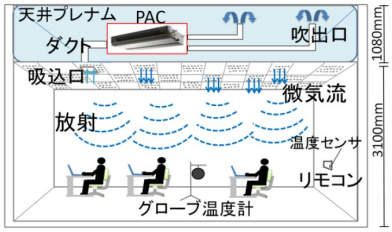
図 1.2.4　既往の水式併用空調

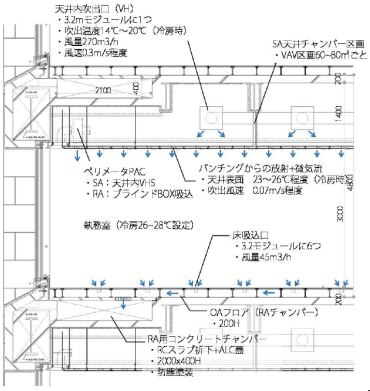
1.2.5 既往の併用空調方式

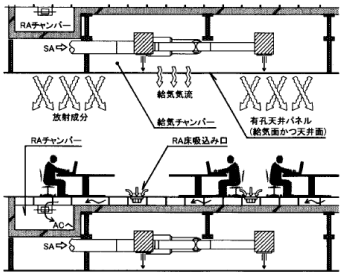
「放射空調」と「対流空調」を取り入れた「併用方式」があり、「水式[13)14)15)]」と、「空気式[16)17)18)19)]」がある。「水式」はチルドビームに冷水を流し、表面温度による「放射空調」とチルドビームで冷却された空気が密度差により下降してくることで「対流空調」との併用となっている。また、既報[13)]ではペリメータをチルドビームによる「併用方式」に床吹出を加え、「天井放射パネル方式」にパーソナルファンを設け、インテリアとペリメータそれぞれに対応し、冷暖対応を可能としている。**図 1.2.4** に既往の水式併用空調の概要図を示す。既報[16)17)18)]では天井材に金属製の有孔天井(パンチングメタル)を貼り、天井内の空気温度を調整し、金属パネル面からの放射と、天井の小孔から密度差で下降してくる天井内の冷気との「併用方式」となっている。なお、既報[19)]では、パンチングメタルではなく、ファブリック膜吹出口により、膜表面からの放射と圧力差にて染み出てくる冷気による「併用方式」となっている。**図 1.2.5** にパンチングメタルを利用した既往の空気式併用空調の概要図を、

図 1.2.6 に膜吹出口を利用した既往の空気式併用空調の概要図を示す。「空気式」についてはパッケージエアコンなどの汎用性の高い機器が利用できるが、天井内に均一に吹出す必要がありダクトが増え、それに伴い搬送動力がかかることと、パンチングメタル(金属天井)の場合は、通常の天井より重量物となり施工性や落下時のリスクがある。

空気式併用空調（パンチングメタル天井）		
天井チャンバー型空気式放射空調（パネル）[16]	全面有孔天井を用いた対流・放射空調[17]	有孔天井を用いた対流・放射空調[18]



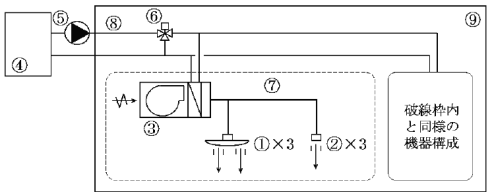




対象室	規模	床面積59.5m², 天井高3.1m （天井懐高さ1.08m）	床面積約3180m², 天井高3.0m	床面積81.92m², 天井高3.0m, 天井懐高さ1.65m
	断熱	記載なし	記載なし	壁→硬質ポリウレタン重鎖両面鋼板 サンドイッチスチールパネル42mm 天井→有孔金属パネル0.5mm
空調機器		PAC2台（冷房能力約119.3W/㎡,吹出口は上向き） パネルは、天井全体に対して開口率約0.3%	インテリア：AHU+単一ダクトVAV ペリメータ：ビル用マルチエアコン	記載なし
設定温度[°C]		25°C	設定温度27°C、SA設定温度19°C、冷水7-15°C	27°C（給気温度14°C）
流量 [L/min・m²]		記載なし	270.0（室温によるVAV制御）	記載なし
風量 [m³/h・m²]		約57.7	記載なし	68.8
総発熱量 [W/m²]		床面積59.5m², 天井高3.1m （天井懐高さ1.08m）	床面積約3180m², 天井高3.0m	床面積81.92m², 天井高3.0m, 天井懐高さ1.65m

図 1.2.5　既往の空気式併用空調（パンチングメタル天井）

空気式併用空調（膜吹出口）
膜放射＋VHS型制気口併用(タスク・アンビエント)[19]



①膜放射ユニット　④空冷チラー　⑦ダクト
②タスク制気口　⑤ポンプ　⑧配管
③ＦＣＵ　⑥三方電磁弁　⑨環境実験室

対象室	規模	床面積102.4m², 天井高3.9m
	断熱	床面 モルタル充填パネル100mm+二重床50mm 壁・天井 ウレタンサンドイッチパネル100mm
空調機器		FCU 2台、膜放射ユニット 6個、VHS型タスク制気口 6個
設定温度[°C]		FCU→冷水温度17°C一定
風量 [m³/h・m²]		膜放射 170.0 (吹出風速 0.018m/s) タスク制気口 170.0
総発熱量 [W/m²]		約50.8

図 1.2.6　既往の空気式併用空調（天井膜吹出口）

1.3 本研究で対象とする空調方式

1.3.1 本研究で解決する課題と対策方法

前項及び前々項より、建設業及び空調システムが有する課題として、労働人口の減少、建設需要の拡大、2024 年度からの残業規制による生産力の低下、高齢化による若手への技術継承不全、オペレーショナルカーボン・エンボディドカーボンの削減、執務者の快適性の確保及び漏水や震災時の落下物へのリスクがあげられる。これらを解決するためには、省人化・省力化、施工性向上、モノをなくす、汎用品や汎用技術の利用、搬送動力削減、快適性(温熱環境、意匠性)向上に対して効果的な対策が必要と考えた。その中で、特に重要視している課題は、「労働人口減少」、「需要拡大」、「生産力低下」、「高齢化」、「エンボディドカーボン削減」、「快適性」であり、これらの効果的な解決策として、「膜天井」と「天井カセット型パッケージエアコン（以降 PAC)」を主要採用手法として設定した。

表 1.3.1 に建設業及び空調システムが有する課題に対し、本研究での採用手法とその効果、解決する課題一覧を示す。施工性が良い、落下時のリスクが小さい、かつ天井カセット型であっても意匠性にも配慮できる「軽量なファブリック製膜天井の採用」、省力化・省人化工法として「PAC をスラブ取付後の楊重組立」ができる対応、省人化省力化かつエンボディドカーボンの削減となる「PAC によるダクトレス」、汎用性が高く、かつファン動力・熱媒搬送動力が小さい「汎用性の高い PAC の採用」、汎用技術で対応が可能な「PAC コントローラーによる自動制御方式」、快適性と漏水リスク低減かつ汎用性も高い「放射と浸出し併用空調」を組み込んだシステムを提案する。

表 1.3.1　建設業及び空調システムが有する課題を解決するための本研究での採用手法

本研究での採用手法	採用効果	建設業及び空調システムの有する課題							
		労働人口の減少	需要の拡大	残業規制による生産力低下	高齢化による技術の継承不全	オペレーショナルカーボンの削減	エンボディドカーボンの削減	執務者の快適性	執務者のリスク(漏水・落下)
軽量なファブリック製**膜天井**	意匠性 省人化省力化 施工性向上 モノをなくす	◎	◎	◎	◎		○	◎	◎
PACをスラブ取付後の楊重組立		◎	◎	◎	◎		○		
PACによるダクトレス		◎	◎	◎	◎		◎		
汎用性の高い**PAC**を採用	汎用品・技術の利用		◎	◎	◎				
PACコントローラーによる自動制御			◎	◎	◎				
PACによるファン動力低減	搬送動力削減					◎			
PAC方式による熱媒搬送動力低減						◎			
膜天井による放射と浸出し併用空調	快適性向上		○	○				◎	◎

1.3.2 本研究で提案する空調システム

本研究では天井カセットを上部スラブに取付け、膜天井からの浸み出しによる対流空調に加え、天井内の熱(冷気または暖気)溜りからの放射空調を行う併用空調方式を提案する。また、天井内の熱溜りを利用し、天井内と室内の交換空気量をファンで制御することで立上がり時間の短縮やパーソナル性にも対応できる方式とした。**図 1.3.1** に本研究における空調方式（以降本システム）の冷房概要図を、**図 1.3.2** に暖房概要図を示す。冷房時に膜上下循環ファンは膜下室内から膜上に、暖房時は膜上から膜下室内に吹出す方式となっている。

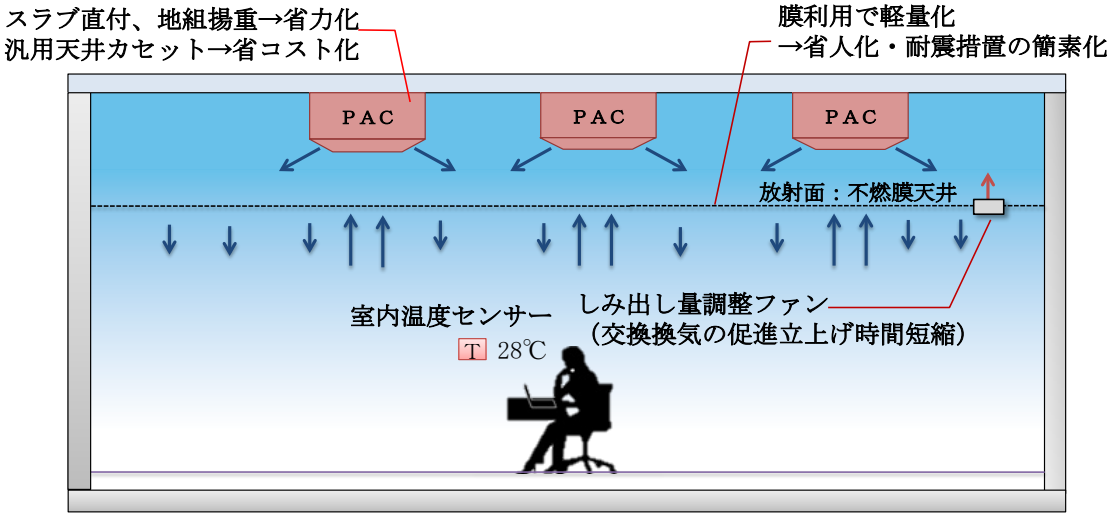


図 1.3.1　本研究で提案する空調システム（冷房時）

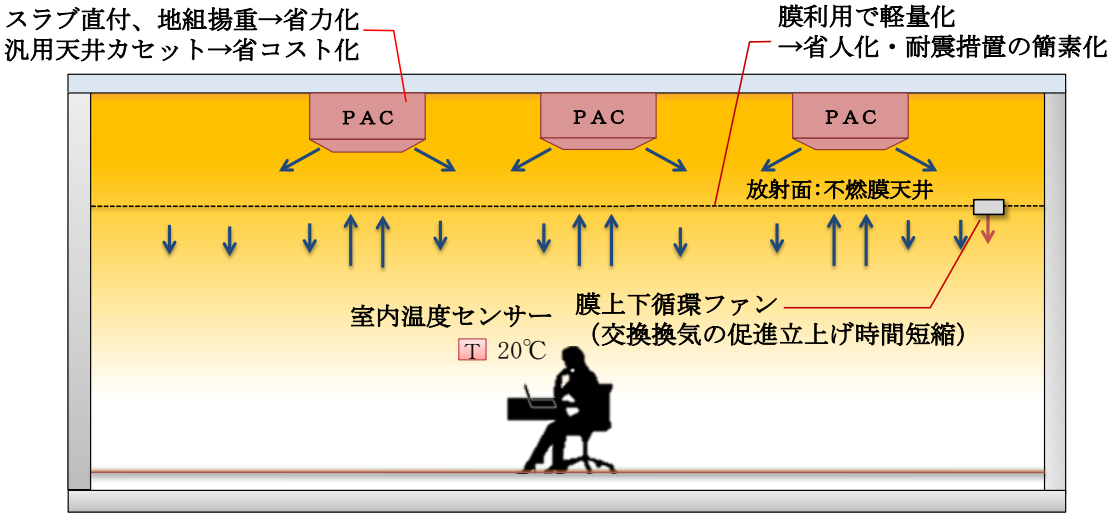


図 1.3.2　本研究で提案する空調システム（暖房時）

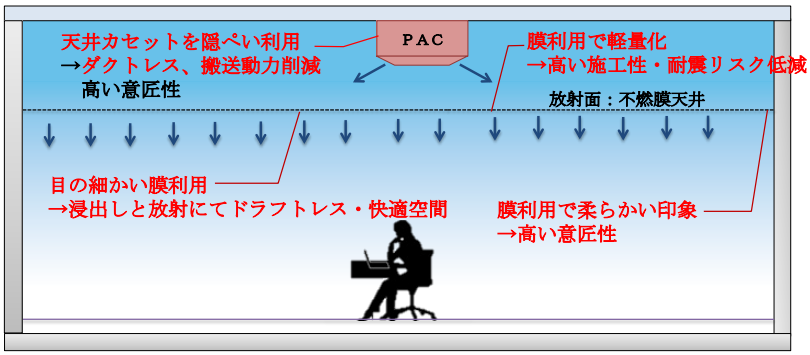
1.3.3 本研究の意義

本研究では、**図 1.2.1** に示すように、膜天井による放射空調と対流空調の併用空調方式は、快適性に配慮した既往の空調方式にあまり類をみない方式で、建設業が今後直面する課題の解決を計ろうというものである。そこで、**図 1.3.3** に本システムと全面有孔天井金属パネル(パンチングメタル)を用いた既往の放射・対流併用空調方式の比較を示す。この図から、本システムのメリットは、「天井カセット方式」でありながら、ドラフトレス空調、快適な温熱環境、高い意匠性を実現できること、「天井カセット方式」であることによる、ダクトレス、搬送動力削減が実現できること、「軽量膜天井」であることによる、耐震リスク低減、高い施工性、高い意匠性が実現できることだと考えており、実際の設計にスペックインできれば今後の空調方式のあり方に対して、何かしらの布石になると考えている。

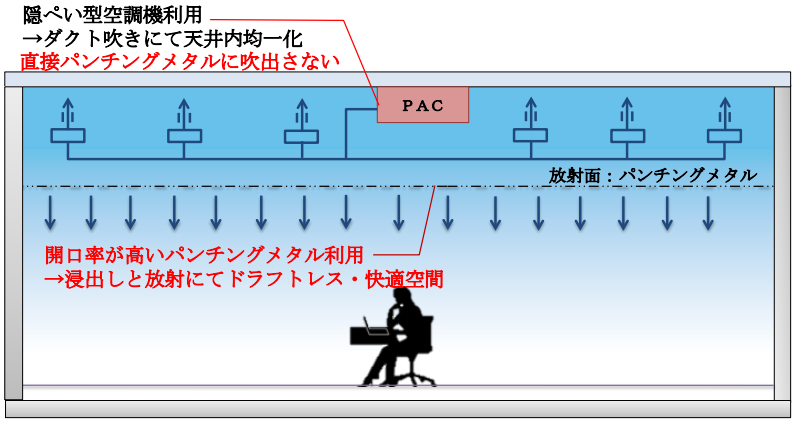
冷房時の既往研究では和田[20]らは、オフィスを対象としたタスク・アンビエント対応の膜放射冷房の熱的快適性や知的生産性について、シミュレーションや実大実験によるアン

ケート調査及び物理環境測定、サーマルマネキンによる定量的な検証を行っている。木幡[21]らは、ファブリック膜吹出口により、膜表面からの放射と圧力差にて染み出てくる冷気による「併用方式」について、膜の通過風速と膜の対流熱伝達率及び放射熱伝達率との関係を測定データから示している。本研究では、建設業が今後直面する課題の解決のため天井カセット方式を用いているところに特異性がある。一方、暖房時の既往研究では、宮下ら[22]が、寒冷地の銀行にて、天井多孔パネルを用いた天井放射暖房時の冬期実測及びアンケート調査を行い、立上がり時は上下温度差が 3℃以上であったと報告している。佐野[23]らは、寒冷地のオフィスを対象とし温水式放射パネル、パンチングメタルによる天井放射暖房及びブリーズラインによる一般暖房方式について、CFD にて検証を行い、温水式放射パネル方式は上下温度差と風速が小さい空間が実現可能と報告している。

以上より、冷房及び暖房時共に、膜天井方式の事例は非常に少なく、本システムは特異性が高い一方で、天井内でのショートサーキット、膜下室内の温熱環境（冷房及び暖房）、室内負荷（冷房及び暖房）の処理性能、PAC 本体の省エネルギー性及び機器保護など、実現に向けた課題が多い。本研究は、これらの課題を実大実験などにより検証し、必要に応じて解決策を提案し、再度検証するという課題探求サイクルによって、設計手法を確立させていくところに意義がある。



(a) 本システム



(b)パンチングメタルを用いた既往の放射･対流併用空調方式

図 1.3.3　本システムと既往の放射・対流併用空調方式の比較

1.4 本研究の目的と本論文の構成

1.4.1 本研究の目的

本研究で提案した空調システムは、既往研究でも事例が少ないため、システムの根幹となる膜材の選定、実大実験などによる各種検証を行い、特性を明らかにし、実際の設計にスペックインできるような提言が必要である。そこで下記の目的を設定した。

① 適切な膜材の選定

② 冷暖房実大実験による特性把握と実用化の検証

- 垂直温度分布、温度経時変化
- 膜の通気特性
- 換気性能の把握
- 立上がり時などの制御方式の検証
- 膜を介した PAC の空調能力の検証
- 通常の天井カセット方式との比較検証
- 膜の冷房能力推定手法の検討
- 暖房時の室内温度分布予測モデルの検討

③ 実験結果と数値シミュレーションモデルによる設計手法の提言

- 具体的な建築、空調、換気、制御計画の提言
- 冷暖房時の設計手法の提言
- 被験者実験による人間心理に基づく生理反応の確認

1.4.2 本論文の構成

本論文は全 8 章にて構成されている。**図 1.4.1** に本論文の構成を示す。

第 1 章では、本研究の背景となる建設業がかかえる課題とこれからの空調システムに求められるニーズについて述べた。また、既往の快適性に配慮した空調方式に関する事例やシを示し、本研究の有意性と対象とする膜天井放射空調方式を提案し、本研究の目的を示した。

第 2 章では、膜天井材に求められる条件を整理し、膜天井として利用可能な各メーカーの膜材から適切な膜材を選定する。そこで選定した膜(長尺膜)と、空調システムとして実績のあるパンチングメタルとの吹出し（浸み出し）性能の冷房時の比較実験を行い、性能の違いを確認する。また、冷房時の気流シミュレーションを行い、膜上での PAC のショートサーキットの影響を確認する。

第 3 章では、2 章と同じ膜材を用いて冷房実大実験を行い、膜からの浸み出しによる通気特性や、負荷変動への追従性、上下温度分布などの温熱環境特性を検証する。また、実験結果と既往放射空調方式との比較を行い、既往研究との差異を確認する。

第 4 章では、膜上下交換空気量と換気方式の検討を行うため、膜上と膜下の空気を強制的にファンで循環させた実大実験を行う。膜上下交換空気量を強制的に増やし、PAC の運転状況や立上がり能力の変化を確認し、制御方式を検討する。また、PAC の顕熱処理量や COP を

算出し、空調性能や省エネルギー性能に対するショートサーキットの影響を検証する。

第 5 章では、2 章で選定したもう一つの膜材（織物膜）を用いて冷房実大実験を行う。この膜は省人化・省力化効果は劣るが、通気流量が大きくシステム天井材にも成型できるため実用性も高い。実験結果から、前章まで用いていた膜材との比較を行う。また、通常の天井カセット方式との比較実験も行い、目論見通りのドラフトレス空間が実現できているか検証する。前章と同様に、PAC の顕熱処理量や COP を算出し、空調性能や省エネルギー性能に対するショートサーキットの影響を検証する。

第 6 章では、5 章と同じ膜材を用いて暖房実大実験を行い、通常の天井カセット方式との比較や、外皮負荷の効率的な除去を目的として、膜上の暖気を強制的に膜下へ降ろした場合の室内温熱環境の検証を行う。その結果から、膜上下循環ファンの運転制御の検討を行う。さらに、暖房時の数値シミュレーションモデルを確立するため、室内温度分布の計算方法について検討する。

第 7 章では，3 章から 6 章までの実大実験結果及び考察から、実プロジェクトの設計に反映できるように、膜天井放射空調方式の建築計画、空調・換気計画を提案する。また、冷房時と暖房時の制御手法を具体的に検討し、各設定値や機器容量の設定方法を示す。さらに、暑い・寒いといった人間心理に基づく生理反応でも、実験結果に基づく物理指標での考察通りの効果が実現できていることを被験者実験にて確認する。

第 8 章では，1 章から 7 章までの総括を述べ、今後の展望について述べる。

1 章　序論
建設業がかかえる課題と空調システムに求められるニーズから本研究で対象とする空調システムを提案

2章　本研究で対象とする膜天井材の検討
膜天井材に求められる条件を整理し、適切な膜材を選定

長尺膜天井での冷房実大実験

3 章　長尺膜天井における冷房実大実験
長尺膜天井における冷房実大実験を行い、
・膜上下交換空気量が小さく負荷追従性が課題
・既往研究と比較し、実用性に問題ないことを確認

4 章　長尺膜天井における膜上下循環換気実大実験
長尺膜天井における冷房実大実験を行い、
・膜上下強制循環の効果は高い
・換気方式は膜下室内での給排気が適切
・空調性能と省エネ性能は問題ないことを確認
・長尺膜天井は耐久性や通気性が実用上の課題
　→2 章で選定したもう1つの膜材の検証に移行

織物膜天井での実大実験

5 章　織物膜天井における冷房実大実験
織物膜天井における冷房実大実験を行い、
・長尺膜天井の実用上の課題が解消
・天井カセット方式と比較しドラフトレス効果が高い
・空調性能と省エネ性能は問題ないことを確認

6 章．織物膜天井における暖房実大実験
織物膜天井における暖房実大実験を行い、
・冷却面に膜上暖気を吹出すことで温熱環境が改善
・天井カセット方式と比較し温度変化が小さく快適
・空調性能と省エネ性能は問題ないことを確認
・室内温度分布推定モデルの基礎式を確立

7 章　PACを用いた膜天井放射空調方式の設計手法
膜天井放射空調方式の建築計画、空調・換気計画を提案し、
・具体的な設備計画・制御方式を提言
・冷暖房時の各設定値や機器容量の設定方法を提言
・実験結果に基づく物理指標での考察結果通りか被験者実験により確認

8 章　総括

図 1.4.1　本論文の構成

参 考 文 献

1)国土交通省不動産建設経済局：最近の建設業をめぐる状況について【報告】，国土交通省,2021.10

2)International Energy Agency for the Global Alliance for Buildings and Construction:2018 Global Status Report Toward a zero-emission efficient and resilient buildings and construction sector, United Nations Environment Programme,2018

3)WBCSD(持続可能な開発のための世界経済人会議):Net-zerobuildings: Where do we stand?,EN15978,2011

4)椎木英理子,林徹夫,野村幸司,藤重俊徳,長孝良,福島逸成,佐藤孝輔,舘景士朗:研修施設における環境配慮技術の計画と実証評価（第 5 報）放射パネル冷暖房の有効性に関する実測調査,空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集,秋田, pp.381-384, 2014.9

5)宮城令,近本智行,李明香,岡本茂,小林陽一：熱源を選択可能な水式天井放射空調の性能検証及び在来空調との比較（その 1）夏期冷房時の結果，日本建築学会学術講演梗概集,環境工学Ⅱ, pp.1249-1250, 2015.9

6)垂水弘夫,神田奈々江:地下水利用・天井放射空調システムに関する実験的研究，日本建築学会技術報告集第 23 巻，第 53 号，pp.195-200, 2017.2

7)香取尚樹,安田光秀,鵜飼真成*,山田正也,花園新太郎,野部達夫:スマートエネルギービルにおける放射空調システムの室内環境と執務者満足度，日本建築学会学術講演梗概集,環境工学Ⅱ,pp989-990,2017.8

8)舘山岳,村松宏,井上瑞紀,青木 亜美,鵜飼真成,富樫英介,野部達夫:新発想ワークプレースによる環境志向オフィス(その 5)放射空調システムの温熱環境の実測評価，日本建築学会学術講演梗概集,環境工学Ⅱ,pp1231-1232,2017.8

9)伊藤清,川島実,荒井義人,鈴木道哉,村上宏次,野部達夫：天井放射空調システムの熱的性能評価実験及び被験者による温熱環境評価実験，日本建築学会技術報告集第 18 巻，第 38 号，pp.243-248, 2012.2

10)清野太希,秋元孝之,坂本裕,五十嵐瞳,岡本直己,平須賀信洋,加藤駿,彭遷瑞,越智翼:ZEB を目指した中規模オフィスビルの計画と検証（第 26 報）竣工後の実建物における変風量コアンダ空調システムの性能検証及び熱的快適性評価,空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集,福島, pp.265-268, 2021.9

11)西川経太,前田龍紀,山崎将吾,森元和也:コアンダ効果を利用したインダクションユニット空調システムの実測評価，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集,オンライン, pp.297-300, 2020.9

12)巽大輝,本田雄樹,前田龍紀,山中俊夫,甲谷寿史,桃井良尚,相良和伸,上田真也:低風速天井吹出し方式による病室の換気・空調設計に関する研究(その 1 ～11)，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集,2014-2017

13)伊藤清,川島実,荒井義人,高橋満博,村上宏次,野部達夫：ペリメータにチルドビームを配置した天井放射空調システムの冷却性能検証, 日本建築学会環境系論文集 Vol.81, No.723, pp.447-455, 2016
14)雨宮沙耶,中村卓司,三浦靖弘,熊野直人,村上宏次,池田真哉,森田英樹,荒井義人：パッシブチルドビームを用いた天井内冷却式放射空調の基礎検討（第 2 報）実大オフィスモデルにおける冷房実験,空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集,大阪, pp.33-36, 2015.9
15)熊野直人:中規模オフィス向け天井放射空調システム「S ラジシステム・ライト」, 公益社団法人ロングライフビル推進協会(BELCA)での WEB 資料,2016.9
16)田村夏美,太田恵大,金子洋介,浮穴朋興,田辺新一：天井チャンバー型空気式放射空調システムの制御方法とその評価,空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 鹿児島, pp.389-392, 2016.9
17)後藤悠,山中俊夫,甲谷寿史,相良和伸,桃井良尚,多良俊宏,福森幹太:全面有孔天井を用いた対流・放射空調を行うオフィスビルにおける室内環境に関する研究（その 2～4）,空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 鹿児島, pp397-408, 2016.9
18)水出喜太郎,後藤悠,平岡秀明,岡崎俊彦,山内洋一:有孔天井を用いた対流・放射冷暖房に関する実験研究(その 1～3),空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集,札幌, pp1899-1910,2012.9
19)木幡悠士,羽山広文,関口圭輔:タスク・アンビエント対応の全空気式放射空調方式に関する研究,日本建築学会環境系論文集 Vol.80,No.710,pp.351-358,2015
20)和田一樹,大宮由紀夫,高橋幹雄,山本泰造,松岡康友,山本麻莉,田辺新一,西原直枝: タスク・アンビエント対応膜放射冷房システムを導入したオフィスにおける実測調査(その 1～5),日本建築学会学術講演梗概集,環境工学Ⅱ,pp1239-1246,2011,pp.923-924,2012
21)木幡悠士,松田千怜,三野洋介,宇田川陽介,羽山広文:全空気式放射空調方式の熱性能に関する研究,日本建築学会環境系論文集 Vol.82,No.740,pp.883-891,2017.10
22)宮下陽 ,葛生恵理子 ,田辺新一：空気式天井放射空調導入建物における暖房時の室内温熱環境評価, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 秋田, pp.461-464, 2014.9
23)佐野誠斗志,白石靖幸,塚見史郎,畑中壮大,高瀬敏洋,小形知裕： 寒冷地における冬季の天井放射冷暖房システムの最適な仕様及び運用条件に関する研究(第 1 報) CFD 解析による各種空調システムを導入した場合の室内温熱環境の比較, 空気調和・衛生工学会論文集

第２章　本研究で対象とする膜天井材の検討

2.1 本研究で対象とする膜天井

本章では本研究で対象とする空調システムにとって最も重要な膜天井材の選定を行う。膜天井材に求められる条件は、建築基準法で定められる内装制限の規定を満たす不燃材であること、膜上の空調空気が浸み出るような空気透過性を有すること、省人化省力化に寄与できる施工方法に対応できることである。**表 2.1.1** に膜天井として利用可能な各メーカーの膜材を示す。各メーカーへのヒアリングも実施、上記 3 つの条件を満足できる 2 種類の膜材（メーカーA と L）を選定した。

表 2.1.1　膜天井と利用可能な膜材一覧

メーカー	用途	材料	不燃性	光透過性 [%]	空気透過性 [cm3/cm2・s]	特徴 （ヒアリング・カタログ）
A		表面材：合成樹脂不織布 基材：ガラス繊維	○	○	○ 29.6	染み出し用不燃ダクトの材料 くるくるローリング施工法対応
B				○		遮熱仕様可能
C		ガラス繊維・パルプが主材	○			吸音性、しなやか ホルムアルデヒドフリー
D	屋内・屋外用	ガラス繊維	○		×	
	屋内用	PVC、ポリエステル				ラッカー塗り仕上げ・艶消し・光沢・半透明の4タイプ
E		ガラス繊維	○	○ 50～70%	×	ガラス繊維を練りこんだ不燃材
F	内膜	ガラス繊維Ｂヤーンにフッ素樹脂PTFEを含浸、焼成	○	○	○ 8～10	吸音性、強靭性が高い セルフクリーニング性
G	テント倉庫	ガラス繊維＋PVC樹脂コーティング	○	○ 18	○ 3.5	
H	内膜	シート：ガラスクロス、レール：ベース材：アルミ、カバー材：PVC樹脂	○			軽い 下地材が少なく施工性がよい
I	内膜	ガラス繊維+PVC樹脂コーティング PVC樹脂+ガラス繊維織物	○	○	○ 22.4	吸音性能高い 和紙風
	内膜	ポリエステル繊維+PVC樹脂コーティング				吸音性能高い 施工性が良い
J	美術館 博物館 講堂 病院ロビー	表面仕上：両面塩化ビニル樹脂系フィルム（内側にガラスクロスを挟んでいる）	○			不燃
K	内膜		○	○		不燃
	内膜					防炎
L	屋内用	ガラス繊維の３軸織物	○	○	○ 140～452	システム天井施工が可能 開口率33～70％で調整可 不織布の有無選択可能 型崩れしにくい 汚れにくい（撥水効果）

１つ目（メーカーA）は浸み出し用不燃ダクト材として利用されているガラス繊維に不織布を張り合わせたもので、ロール状に成型されているためクルクルと伸ばした天井に貼る工法となる。**図 2.1.1** に工法の概要図と施工状況を示す。なおこの膜材は、ガラス繊維と不織布と合わせて不燃材の認定を取得している。

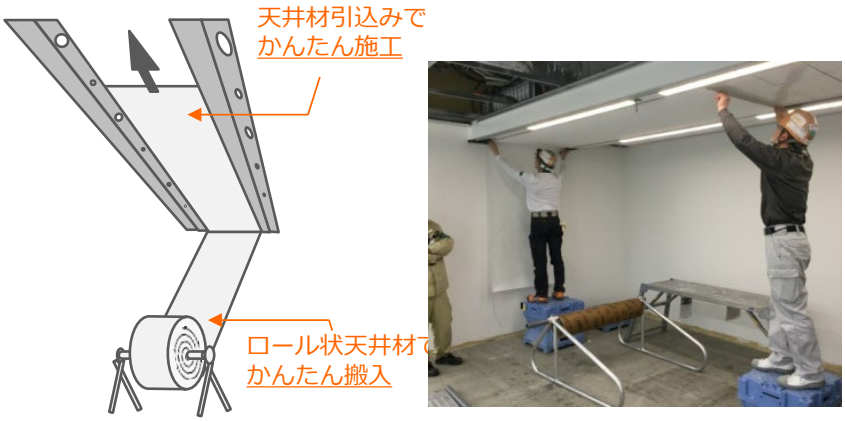


図 2.1.1　浸み出し用不燃ダクト材による膜天井の省人化省力化工法

2 つ目（メーカーL）は建築内装材で利用されているガラス繊維を織物状に編み込んで成型するパネル上のものである。こちらはガラス繊維の織物単体で不燃材の認定を取得しており、不織布を張り付けることで空気透過性を下げ、浸み出し効果をより強くできる等の調整が可能である。

本研究では、まず、1 つ目（メーカーA）のダクト材として実績のある浸み出し用不燃ダクト材について検討を行い、その結果と比較する形で２つ目（メーカーL）のガラス繊維を織物上に編み込んで成型したパネル材について検討を行っていく。なお、1 つ目の膜材を「長尺膜」、2 つ目の膜材を「織物膜」として区別する。

2.2 本研究で対象とする膜材と天井多孔パネルの比較

2.2.1 はじめに

浸み出し放射空調方式で採用されており実績のある天井多孔パネル（パンチングメタル）との浸み出し性能に関する検討を行う。**表 2.2.1** に本研究で対象とする膜材とパンチングメタルの比較表を示す。

表 2.2.1　本研究で対象とする膜材とパンチングメタルの比較表

	本研究で検証する膜		パンチングメタル
	1つ目（メーカーA） 長尺膜	２つ目（メーカーL） 織物膜	
イメージ			
材質	浸み出し用不燃ダクト材	ガラス繊維織物の整形材	小孔のあるアルミパネル
施工方法	長物で張力をかけて貼る	システム天井用パネルで想定 （本報検証時は長物を天井貼付）	システム天井用パネル
汎用性	開口率の変更は不可 不織布は不燃認定上必要	任意の開口率で製作が可能 不織布の有無は選択可能	任意の開口率で製作が可能
実績	浸み出しダクト材で多数あり	建築内装材等で多数あり	浸み出し放射空調として多数あり
開口率	2.6%（メーカー計測値）	網目サイズで調整可能	孔径とピッチで調整可能

今回は１つ目（メーカーA）の浸み出し用不燃ダクト材として利用されているガラス繊維に不織布を張り合わせた膜材を吹出口形状に加工したもの（以降：膜吹出口）とパンチングメタルの浸み出し性能を比較するための実験を行った。通気抵抗は異なっているが、今回は浸み出し風量を合わせて比較を行った。

2.2.2 実験概要

実験は、大阪大学構内の人工気候室で行った。測定室 の平面図、断面図を**図 2.2.1** と **図 2.2.2** に示す。**図 2.2.1** に示す位置に一辺 600mm 角の吹出口を持つ吹出しパネルを 2 つ設置し、1 つあたりの給気量が約 100m^3/h となるように排気量を調整し、全外気運転を行った。排気は、室中央部左側の天井に設置されている φ=125mm の円筒側の排気口 1 ヵ所より排気される。吹出温度を 20° C に設定し、調湿は行わなかった。用いた吹出口の種類は **表 2.2.2** に示す 4 種類とした。また、実験条件を**表 2.2.3** に示す。吹出し口の材質としては、膜吹出口と、パンチングパネルの孔径とピッチが異なる 3 種類を用いて実験を行った。パンチングパネルは全て 45 度角千鳥配置のものを使用した。天井内の冷気を膜下に供給する空調方式となるため、吹出し温度と室内の温度差を 7.5℃とした温度差のある条件と、等温吹出である温度差がない条件を設定した。温度差にある条件では、発熱体としてホットカーペットを 5 枚室内に敷き詰めて 2200W 発熱させた。

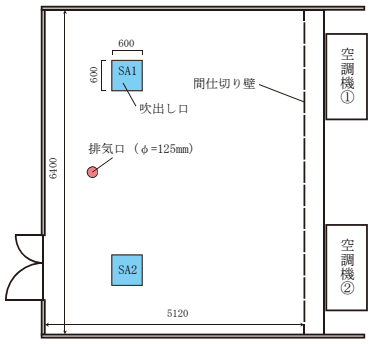


図 2.2.1　実験室の平面図

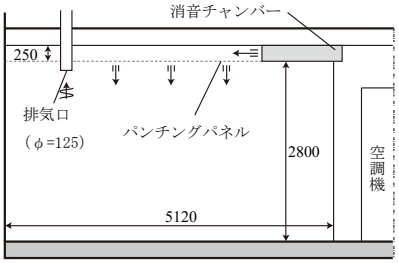


図 2.2.2　実験室の断面図

表 2.2.2　実験で用いた吹出口の仕様

種類	穴径 [mm]	ピッチ [mm]	開口率 [%]	風量 [m3/h]	面風速 [m/s]	穴風速 [m/s]
膜	-	-	-	100	0.077	-
パンチングパネル	3	15	6.28	100	0.077	1.229
	3	10	14.13	100	0.077	0.546
	5	10	39.25	100	0.077	0.197

表 2.2.3　実験条件

実験ケース	種類				温度差[℃]	
	パンチング（穴径、ピッチ）				0	約7.5℃
	膜	3mm,15mm	3mm,10mm	5mm,10mm		
case1	○				○	
case2	○					○(7.31℃)
case3		○			○	
case4		○				○(7.29℃)
case5			○		○	
case6			○			○(7.47℃)
case7				○	○	
case8				○		○（7.67℃）

2.2.3 測定点

風速測定には、超音波式風向風速計(ソニック、DA-700,TR-92T,プローブのセンサー間隔3cm)を用いた。風速測定の平面測定点を **図 2.2.3** に示す。平面は吹出面に対して 3 本のライン上で測定し、各測定は 30mm 間隔で行った。また、断面は吹出面より 15,30,50mm および 100～700mm まで 100mm ごとに測定した。ただし、吹出口から高さ 15,30mm の場合は、超音波風速計が天井面にあたってしまうため、吹出面の中心を x=0,y=0 とすると、測定範囲は L1 では-300～300mm、L2,L3 では-270～270mm とした。測定 1 点につき 17 秒測定し 3 秒間でトラバーサ移動により次の測定点へと移動させるサイクル(サンプング周波数 20Hz)で行っ

た。なお、後に示す結果は、移動の際に器具に揺れが生じるため、17 秒間測定のうち最後の 10 秒の結果を用いた。

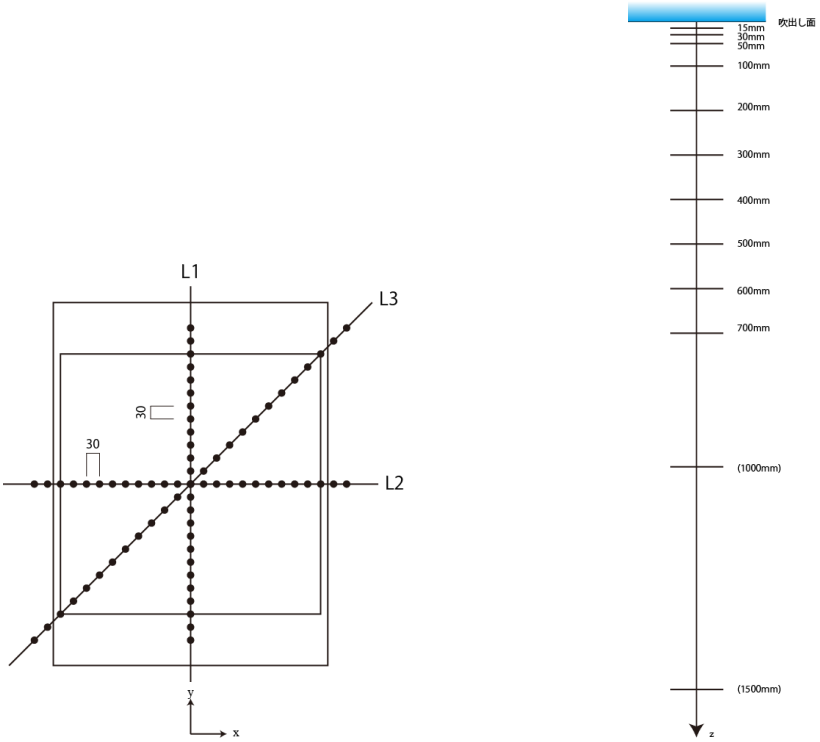


図 2.2.3　測定点（左：平面、右：断面）

2.2.4 測定結果

（1）等温吹出しの場合

case1,3,5,7 の下向き平均風速分布の比較を**図 2.2.4** に示 す。**図 2.2.4** より、いずれの条件においても同一の高さでは L1,L2,L3 で大きな差はなく、吹出面での分布は大きくない。また、開口率が最も小さい case3(孔径：3mm,ピッチ:15mm)の条件では、他の条件に比べて下吹き風速が大きいことがわかる。また、吹出口の端からやや内側に位置する部分で卓越して風速が大きくなっており、周りの空気を巻き込むような気流性状を形成していることが考えられる。

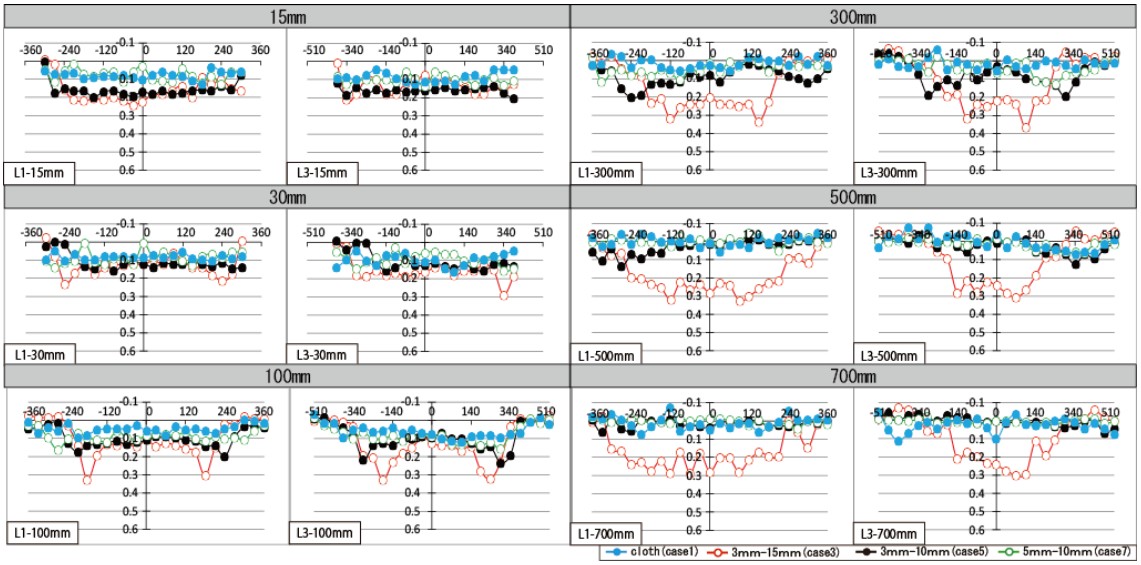


図 2.2.4 case1,3,5,7 における下向き平均風速分布（等温吹出時）

式(1)に運動量を示す。風量が 104m³/h のとき、面風速は 0.080m/s であるが、パンチングの孔部分では風速が 1.28m/s となり、吹出しの運動量の差異に起因すると考えられる。case5(孔径：3mm, ピッチ:10mm)でも同様の傾向が表れているが、吹出面より 500mm 以降は見られず 400mm までの高さで風速が小さくなる。case1(膜吹出し口)では、いずれの高さにおいても最も風速が小さく、分布の差も小さい。最も開口率の大きい case7(孔径:5mm, ピッチ:10mm)では、風速は小さく、case1 と大きな違いは見られない。

$$M = \rho Q^2 / A\eta \qquad (1)$$

M：運動量 [kg・m/s]　A：吹出し面積 [m²]

ρ：密度 [kg/m³]　η：開口率 [-]

Q：流量 [m³/s]

図 2.2.5 に case1,3,5,7 の乱れの強さの比較を示す。**図 2.2.5** より、case1(膜吹出し口)と case7(孔径:5mm, ピッチ：10mm)を比較すると、下向き平均風速では大きな差はなかったが、吹出口からの距離 15mm,30mm の地点では膜吹出口よりもパンチングパネルの方が乱れの強さが大きい。200mm 以降は大きな差はなく、吹出直下では気流性状が異なると考えられる。その他の点では大きな違いが見られなかった。

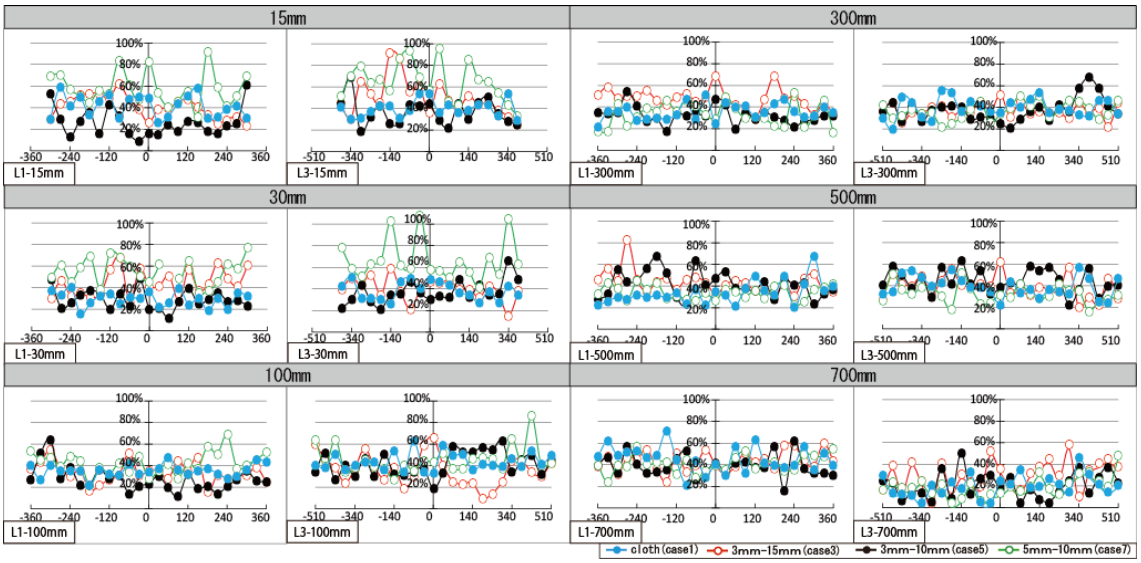


図 2.2.5 case1,3,5,7 における乱れの強さ

（２）温度差のある場合

case2,4,6,8 の下向き平均風速の比較を図 2.2.6 に示す。図 2.2.6 より、いずれの条件においても等温吹出に比べて風速が大きくなっており、これは吹出しの運動量に差異があっても、重力によって運動量が付加されるためと考えられる。また、吹出口の中心付近が吹出口の外側よりも風速が大きく、周りの空気を巻き込んでいると考えられる。開口率が最も小さい case4(孔径：3mm, ピッチ:15mm)の条件では、等温条件と同様に他の条件に比べて下吹き風速が大きい傾向が見られた。また、同一高さで比べたとき、分布の差が大きく吹出空気が直下に落ちず偏っている。case2(膜吹出口),case6(孔径：3mm, ピッチ:10mm),case8(孔径:5mm, ピッチ:10mm)を比較すると、等温条件では違いが見られたが、温度差のある条件では大きな差は表れなかった。

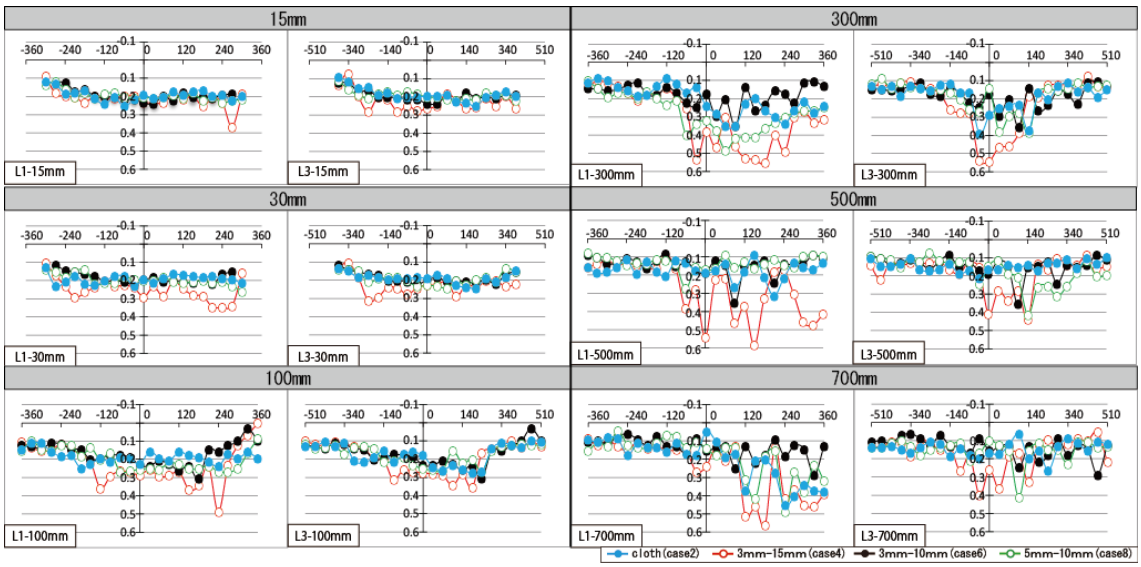


図 2.2.6 case2,4,6,8 における下向き平均風速分布（吹出温度差 7.5℃の時）

図 2.2.7 に case2, 4, 6, 8 の乱れの強さの比較を示す。図 2.2.7 より乱れの強さは、等温条件では違いが見られたが、温度差のある条件では各条件間で大きな差は見られなかった。

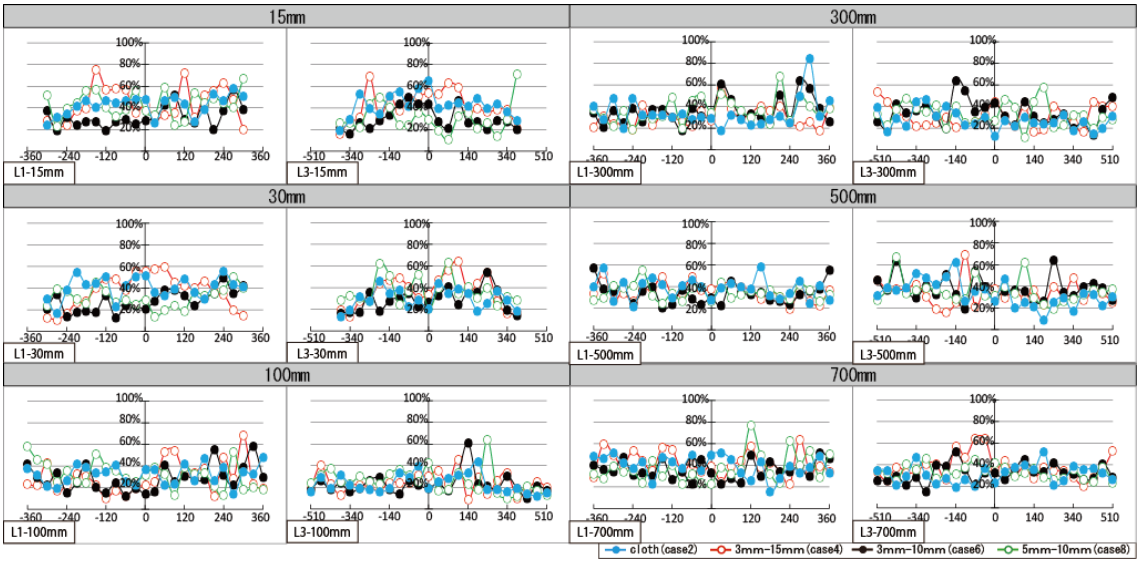


図 2.2.7 case2, 4, 6, 8 における乱れの強さ（吹出温度差 7.5℃の時）

2.2.5 乱れのスケール

図 2.2.8 に温度差のある条件における、吹出口からの距離が 30mm, 700mm の位置での乱れのスケールの比較を示す。 式(2)を用いて各測定点で自己相関係数を算出し、その最初に 0 になる時間差までの積分値に平均風速を乗じ、 乱れの空間スケール(インテグラルスケール)を求めた。図 2.2.8 より、開口率の小さい case3, 4(孔径：3mm, ピッ チ:15mm)の条件で乱れの空間スケールが大きいことがわかる。

$$R(\tau) = \overline{w'(t)w'(t+\tau)}/\overline{w'(t)\hat{}2} \quad (2)$$

$R(\tau)$: 自己相関係数

w': 下向き風速の変動成分

一方で、case1, 2(膜吹出し口)は、他の条件に比べて、吹出直後の高さ 30mm の地点で乱れのスケールは小さいことがわかる。

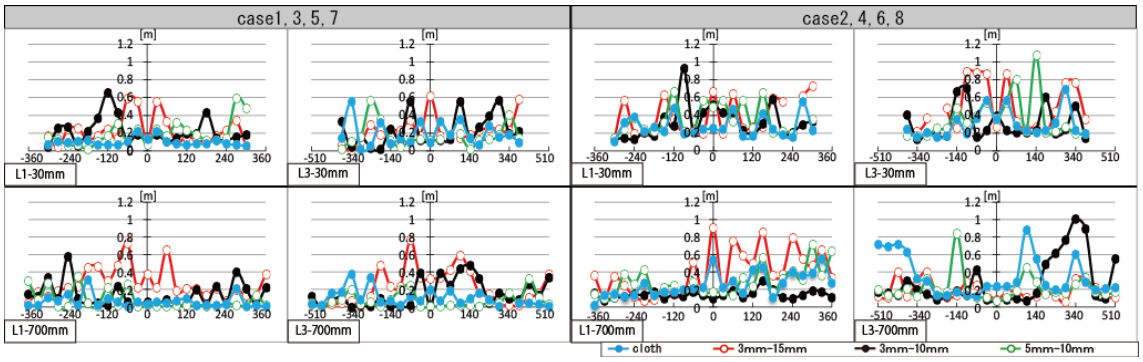


図 2.2.8 各条件における乱れのスケール（吹出温度差 7.5℃の時）

2.2.6 まとめ

本節では、１つ目（メーカーA）の浸み出し用不燃ダクト材として利用されているガラス繊維に不織布を張り合わせた膜材を吹出口形状に加工したもの（膜吹出口）とパンチングメタルの浸み出し性能を風速測定にて比較した。その結果下記知見が得られた。

①いずれの条件においても、開口率の小さい穴径 3mm, ピッチ 15mm のパンチングパネルが下向き平均風速が他の条件と比べ顕著に風速が大きかった。

②上記以外では、どの条件においても吹出し風速については膜吹出口とパンチングパネルの差はみられなかった。

③等温吹出の場合は、乱れの強さが膜吹出口の方が小さい結果となったが、温度差のある吹出しの場合は、膜吹出し口とパンチングパネルの差はみられなかった。

④各測定点で自己相関係数を算出し、その最初に 0 になる時間差までの積分値に平均風速を乗じて算出した乱れのスケールで比較すると、吹出し直後の 30 mmにて膜吹出し口の方が小さくなった。

以上から、同じ風量を浸み出した場合、実績のあるパンチングメタルと比較して、大きな差はないことが分かった。一方、吹出面近傍では膜方式の方が、乱れは小さい可能性が示唆された。

2.3 CFD 解析による性能検討

2.3.1 はじめに

本システムにおいて、膜上でのショートサーキットがどの程度発生し、膜上からの冷気がどの程度浸み出すのか想定ができない。そこで、簡易的な気流シミュレーションを実施し、本システムの事前検討を行った。解析は FlowDesigner 2018 にて実施した。なお、膜上に天井カセットのみを配置した場合と、吸込側にガイドを設けて、ショートサーキットを防止した場合、ガイド下部の膜面に開口を設けて吸込側の抵抗を減らした場合との比較を行うことで、実大実験を行うにあたり、本システムの性状や課題を事前に見出すことを目的としている。

2.3.2 解析概要

図 2.3.1 に解析空間概要図を、**表 2.3.1** に、解析条件を示す。解析モデルは、3600 ㎜グリッドの事務室を 6 スパンで想定し、天井カセット型 4 方向吹出空調機(以下 PAC)をスラブ下に 3 台設置した。PAC 下部には、2.2 節で用いた浸み出し用不燃ダクト材として利用されているガラス繊維に不織布を貼り合わせた膜材を天井 1 面に貼った膜天井を想定した。今回は膜上のショートサーキットと浸み出し気流性状を検討するため、膜天井を開口率が 2.6%の断熱パネルとして設定している。なお、外気取入は天井膜面の吹出口から直接室内に吹出し、排気は天井膜面から直接吸込み排気するものとしている。また、ショートサーキットを防止するために、吸込側にガイドを設けた場合、吸込み側の抵抗を減らすために、ガイド下部の膜面に開口を設けて場合の解析も行う。

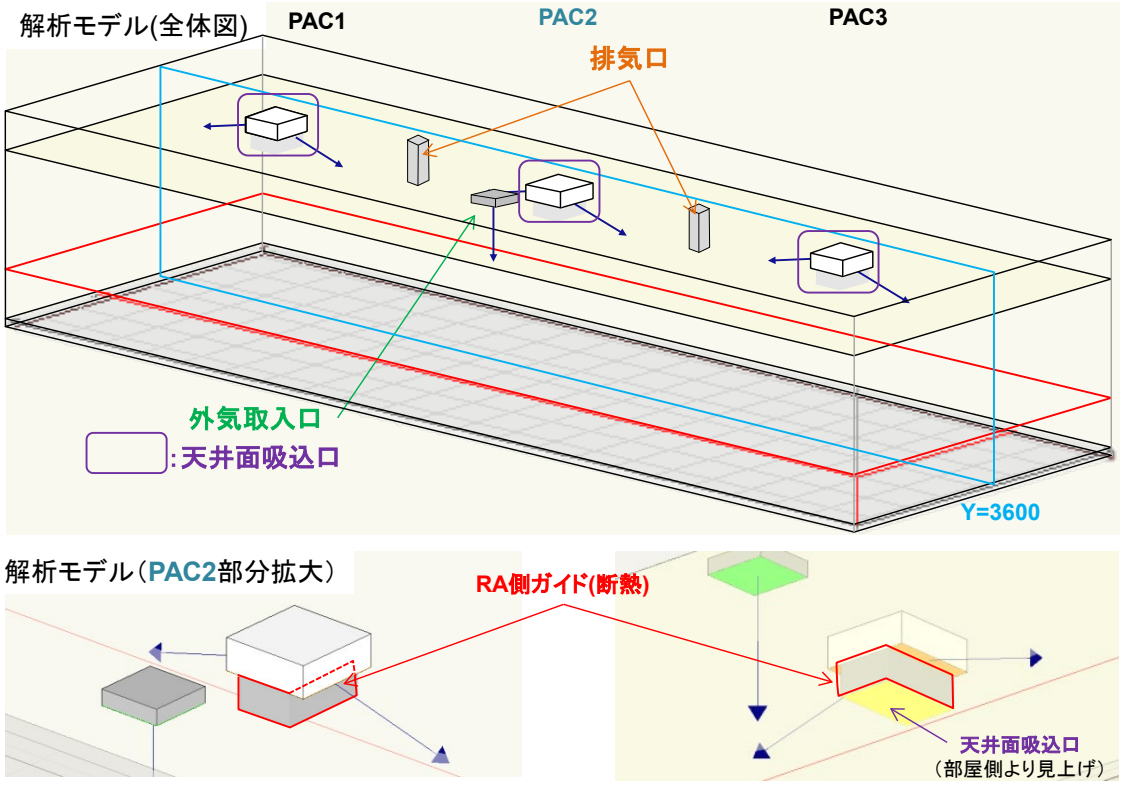


図 2.3.1 解析空間概要図

表 2.3.1 解析条件

解析条件			
室容積[mm^3]	21600×7200×4200	天井膜内初期温度[℃]	28
解析ソフト	Flow Designer 2018	初期室温[℃]	28
乱流モデル	標準k-εモデル	外気導入温度[℃]	20
計算アルゴリズム	SIMPLER	外気流量[CMM]	13
離散スキーム	QUICK	排気流量[CMM]	6.5/ケ
メッシュ数	1,305,897	内部発熱[W/m^2]	5
k-ε値	0.1,1.0	天井面吸込口有効開口率[%]	80(VHSを想定)
外壁境界条件	断熱	PAC仕様	4方向吹出11.2kW
天井膜設定 →"開口パネル"(開口率)	断熱パネル上に、同じ直径の開口が一様に空いているとしてモデル内で表現される。開口率(2.6%)を与えると、天井膜の抵抗係数に変換される。		

図 2.3.2 に解析パターンを示す。膜上に PAC を配置し、下部の膜面に開口を設けて場合(ガイド無(開口有))、ショートサーキットを防止するために、吸込側にガイドを設けた場合(ガイド有(開口有))、膜上に PAC のみ配置した場合(ガイド無(開口無))の 3 パターンで解析を行った。なお、解析は定常解析とした。

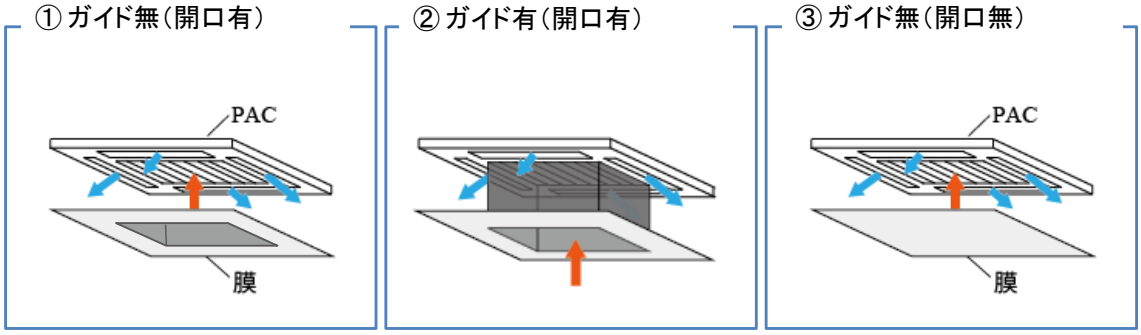


図 2.3.2 解析パターン（PAC 周り概要図）

2.3.3 解析結果

図 2.3.3 に、吸込開口を設けたパターン①・空調機下部にガイドを付加したパターン②・ガイド及び吸込開口を設けないパターン③の気流分布の解析結果を示す。条件①の結果から、PAC まわりのショートサーキットがやや発生してしまっているのに対して、条件②の結果ではショートサーキットが解消されていること分かる。また、条件③の結果からは条件①と比較して、膜上からの浸み出し量がやや少なく、ショートサーキットの発生は多かった。

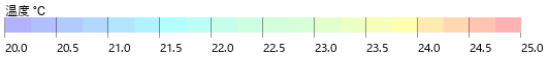
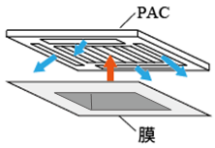
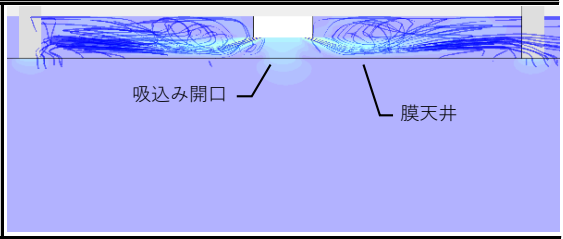
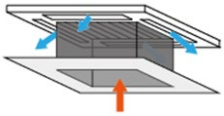
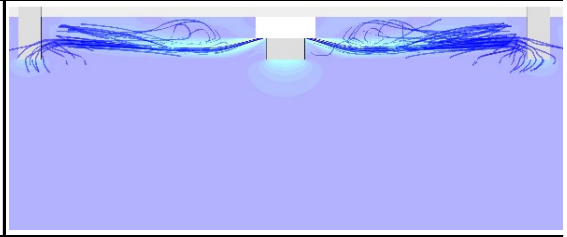
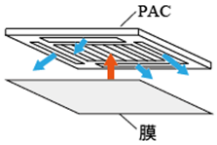
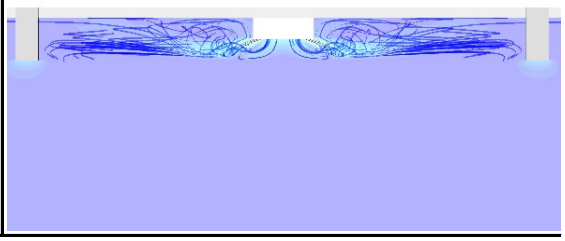
	ガイド	吸込み開口	イメージ図	
①	無	有		
②	有	有		
③	無	無		

図 2.3.3 解析結果

2.3.4 まとめ

本システムにおいて、膜上でのショートサーキットがどの程度発生し、膜上からの冷気がどの程度浸み出すのか想定ができない。そこで、簡易的な気流シミュレーションを実施し、本システムの事前検討を行った。解析は、膜上に PAC を配置し、下部の膜面に吸込み開口を設けた場合、さらにショートサーキットを防止するために、吸込側にガイドを設けた場合、膜上に PAC のみ配置した場合の３パターンで行い、下記結果が得られた。

① 膜上のショートサーキットは、膜上に PAC のみ配置したパターンが最も多く発生し、下部に吸込開口を設けたパターン、吸込側にガイドを設けたパターンの順で多く発生した。

② 膜上からの浸み出し量は、吸込側にガイドを設けたパターンが最も多く、下部に吸込開口を設けたパターン、膜上に PAC のみ配置したパターンの順であった。

一方で、どのパターンでも膜上と膜下の温度に乖離がある結果となったので、膜下空間の室温を快適域に保つための PAC の運転制御方法の確立も課題であることが示された。

2.4 本章のまとめ

膜天井材に求められる条件は、下記の３つである。

① 建築基準法で定められる内装制限の規定を満たす不燃材であること

② 膜上の空調空気が染み出るような空気透過性を有すること

③ 省人化省力化に寄与できる施工方法に対応できること

そこで、数ある膜天井として利用可能な各メーカーの膜材から、上記 3 つの条件を満足できる 2 種類の膜材を選定した。1 つ目は、ダクト材として実績のある浸み出し用不燃ダクト材を用いた膜天井材、２つ目は、ガラス繊維を織物上に編み込んで成型した小孔のような網目のあるパネル材である。今回は、ダクト材として実績があり、ロール状にしたものをクルクルと伸ばして貼る工法が確立されている、１つ目の膜材を用いて下記検討を行い、知見が得られた。

① 浸み出し放射空調として実績のあるパンチングメタルとの吹出し（浸み出し）性能の比較を行った。本来は膜材ごとでの通気抵抗が異なるが、同じ風量での実験を行い、吹出し風速や乱れの強さでは差が見られなかったが、乱れのスケールを用いると、吹出面近傍では膜方式の方が、乱れは小さい可能性が示唆された。

② 簡易な気流シミュレーションによる検討を行った。その結果、膜上でのショートサーキットが発生し、膜上と膜下の温度に乖離が見られた。このことから、膜下空間の室温を快適域に保つための PAC の運転制御方法の確立も課題であることが示された

以上より、膜上のショートサーキットの及ぼす影響や室温制御方法の課題がある一方で、膜上に PAC のみ配置した本システムは、省人化・省力化の観点では魅力的なシステムであるため、以降で実大実験を行い詳細な膜下の温熱環境、空調能力、省エネルギー性能について実測評価を行うこととする。

第３章　長尺膜天井における冷房実大実験

3.1 はじめに

前章において、浸み出し用不燃ダクト材として利用されているガラス繊維に不織布を貼り合わせた膜材を想定した簡易気流シミュレーションにて、膜上でのショートサーキットや、膜材からの浸み出しに関する定性的な特徴を把握した。

本章では、同じ膜材を天井に貼った実験室を構築し、実大実験を行い、膜からの浸み出し量や膜下の温熱環境を定量的に把握する。また、実験結果と他事例の放射空調システムとの比較を行い、本システムの有効性も検証する。

3.2 実験概要

3.2.1 実験室概要

2017 年 11 月 23 日～2018 年 2 月 5 日に夏期を想定した実大実験室における本システムの冷房実験を実施し本システムの温熱環境の検証と他の空調方式との比較検討を行った。

実験室は、内寸 7.0×6.13m の室を壁(グラスウール 50mm、プラスターボード 12.5mm) で区切り、壁の内側空間(以下、対象空間)の内寸は 4.41×4.01m、高さ 3.44m であり、床上 3.14m 高さに浸み出し用不燃ダクトに用いられている布と同様の開口率 2.6%の不燃材の膜を張った。天井懐高さは、300mm としている。PAC は 4 方向天井カセット型(三菱電機株式会社、PLZ-ERP140EF) が 2 台設置されている。PAC は、吸込み口の直上に設置された温度センサーにより運転制御されており、冷房時には設定温度+0.5℃でサーモ ON、-1.5℃でサーモ OFF となる。平面図と測定点、発熱体などの位置を**図 3.2.1** に、断面図と対象空間内の測定点を**図 3.2.2** に示す。

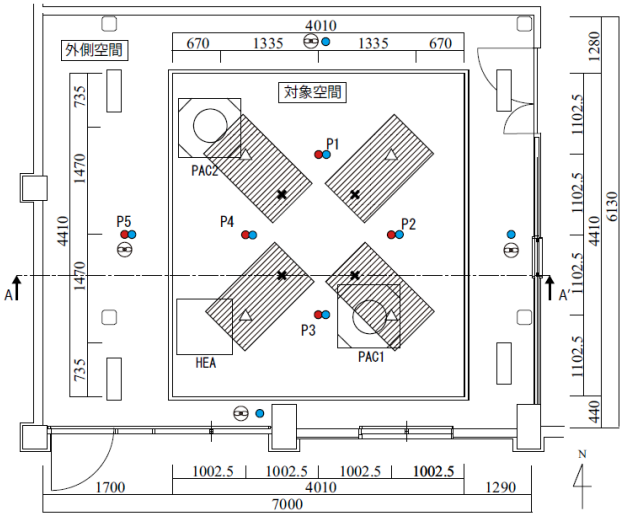


図 3.2.1　実験室平面図

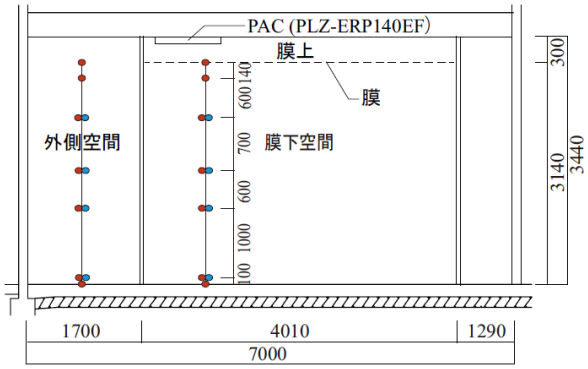
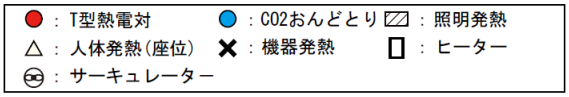


図 3.2.2　実験室断面図



人体発熱としてブラックランプ(53W/個)を床上 0.6m の高さに配置し、機器発熱として、内部に白熱電球(100W/個)を設置し、黒体スプレーで塗装した金属製の箱(237×237×350mm, 厚さ:0.32mm、底は合板)、照明発熱として電気毛布(50W/個)をそれぞれ床上に配置した。総発熱量は 812W としたが、低熱負荷条件(後述の Case2)の総発熱量は白熱電球を除き 412W、高発熱負荷条件(後述の Case6) ではブラックランプの個数を増やし計 1,236W とした。また、冬期に実験を行ったため、外気温が低くなった時にも安定した冷房運転ができるように、壁の外側空間にオイルヒーター(4 台)とサーキュレーター(4 台) を設置した(**図 3.2.1**)。温度測定は T 型熱電対を、**図 3.2.1** 中の P1～P5 のそれぞれ鉛直方向高さに 7 点ずつ設けた。また、各 PAC の吸込み口に各 1 点、吹出し口に各 4 点、膜上に 3 点設けた。壁温度については壁の内外にそれぞれ鉛直方向高さ 3 点ずつ設けた。放射熱流束は長短波放射計(英弘精機、MR-60)を用い膜下空間中央の FL+1100mm の高さで測定した。CO_2 濃度は CO_2 濃度計(T&D、RTR-576)を用い P1～P5 のそれぞれ鉛直方向 4 点ずつ、膜上 3 点、外側の北・東・南で 1 点ずつそれぞれ測定した。

実験は、PAC の運転を開始してから温度や CO_2 濃度の測定を開始し十分に時間がたった後、CO2(1L/min)ガスを PAC の吸い込み口で発生させ、濃度測定を開始した。ガス発生 3 時間後に測定を終了した。

3.2.2 実験条件

膜上空間での PAC のショートサーキットについて検討するため、前章の簡易気流シミュレーションを参考に、ガイド及び吸込み開口を設けないパターン「(a)ガイド無」、PAC 下部にガイドを付加したパターン「(b)ガイド有(膜)」、PAC 下部にガイドに加え吸込み開口を設けたパターン「(c)ガイド有(開口)」の 3 パターンを膜の実験パターンとした。ガイドとして、軽量で施工性の良い不燃性の段ボールダクト(国土交通大臣不燃認定(NM-2085)取得済)を使用した。**図 3.2.2** に実験における膜パターンを、**表 3.2.1** に実験条件を示す。

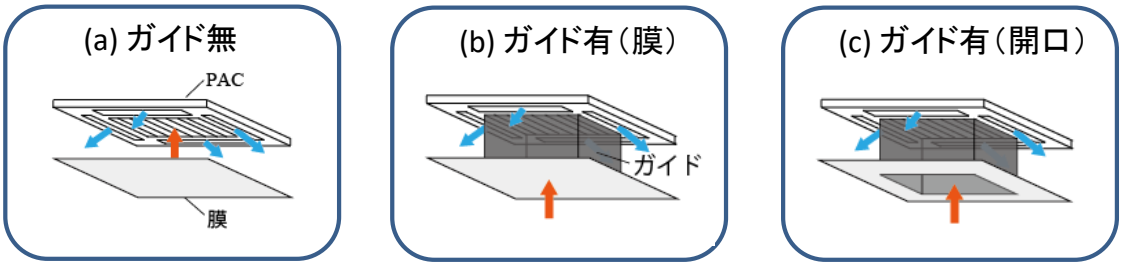
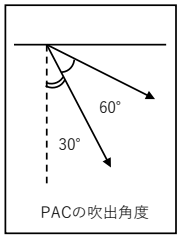


図 3.2.3　実験における膜パターン

表 3.2.1　実験条件

条件		PAC 設定温度[°C]	PAC 吹出し風量[m³/h]	PAC 吹出し角度[°]	総発熱量[W]	ヒーター設定温度[°C] (a)	(b)	(c)
Case1	基準	19	1016×2	60	812	-	14	18
Case2	低熱負荷				412			
Case3	風量最小		717×2		812			
Case4	高温設定	(a)25 (b),(C)22	1016×2				18	
Case5	30° 吹出し	19		30			14	
Case6	高熱負荷			60	1236			



膜の３条件それぞれについてパラメータを変化させ 6 通りの検討ケースを設定し、計 18 ケースの実験を実施した。なお、ガイド有の 2 条件下においては、外気温の影響により PAC の冷房運転ができなかったため、外側空間にヒーターとサーキュレーターをそれぞれ 4 台設置し、外側空間の温度を上昇させて実験を行った。総発熱量は計 812W としたが、低熱負荷条件 Case2 においては機器発熱を除いて計 412W、高熱負荷条件 Case6 ではブラックランプの数を増やし計 1236W とした。計測は、PAC の運転直後から行った。

3.3 実験結果

3.3.1 垂直温度分布

図 3.3.1 に、3 つの膜パターンについて各実験条件下における垂直温度分布を示す。垂直温度分布については、吸込み口の直上に設置した温度センサーで計測した温度と設定温度が頻繁に差異ありと判定されたために PAC がサーモ ON/OFF を繰り返して運転し温度変動が生じたため、日の出前の一周期のデータの平均値を使用した。実験結果から、いずれの膜パターンにおいても膜下の温度分布が均一であり、FL+100mm と FL+1700mm との上下温度差が 3°C 以内という ASHRAE STANDARD55-92 の推奨値を下回る結果になっている。 (c)ガイド有(開口)では、総発熱量や PAC 風量によらず、対象（膜上）空間と膜上空間との温度差が 3℃程度となっているのに対し、(a)ガイド無、(b)ガイド有(膜)では対象空間と膜上空間との温度差は、総発熱量が大きいほうが大きくなる。つまり負荷の大小に応じて PAC の設定温度を可変できかつ負荷変動に追従できる制御が必要であるといえる。一方、PAC 風量が小さくなっても、(a)ガイド無では対象空間の温度は変わらないが、(b)ガイド有(膜)では、対象空間の温度は高くなっている。(a)ガイド無では対流より放射による熱伝達の割合が多いと推察される。なお、PAC の吹出し角度による違いは全パターンで見られなかった。

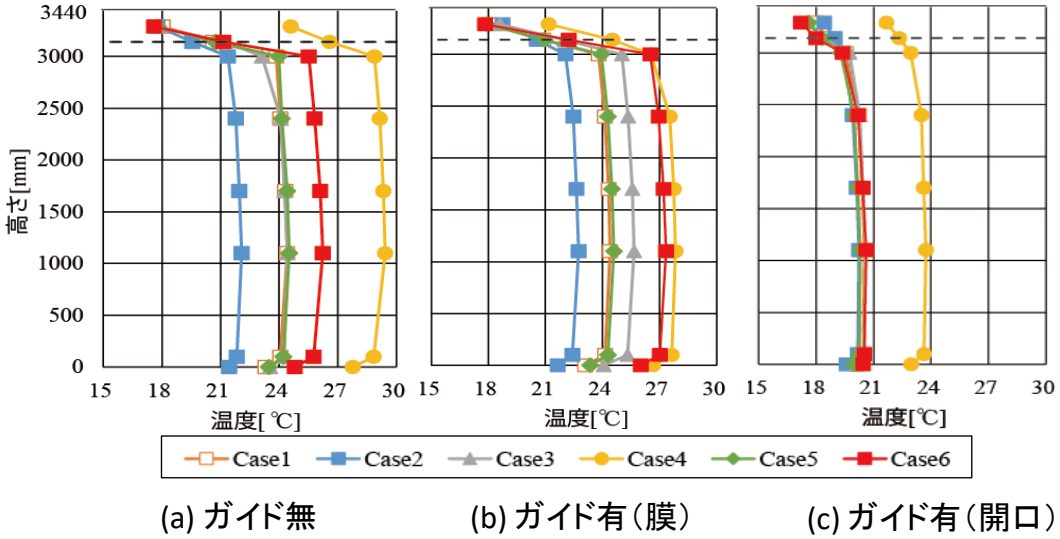


図 3.3.1　各膜パターンにおける垂直温度分布

3.3.2 膜上下交換空気量

図 3.3.2 に膜を通した交換空気量算定のための概要図を示す。膜上空間で CO_2 ガスを発生させたときの CO_2 濃度の収支を考え、膜上・膜下空間の CO_2 濃度を式(1)，(2)を用いて算定し、得られた濃度が一致するように最小二乗法を用いて Q_1～Q_6 を求めた。その際、膜上・膜下空間の流量収支を合わせるため、式(3)，(4)を満たすようにした [1)]。

$$C_a^{n+1} = C_a^n + (C_i^n Q_2 + M - C_a^n Q_1 + C_0^n Q_5 - C_a^n Q_6)\frac{\Delta t}{V_a} \qquad (1)$$

$$C_i^{n+1} = C_i^n + (C_a^n Q_1 + C_0^n Q_4 - C_i^n Q_3 - C_i^n Q_2)\frac{\Delta t}{V_i} \quad (2)$$

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

$$-Q_1 + Q_2 + Q_5 - Q_6 = 0 \quad (4)$$

C_A: 膜上空間 CO_2濃度[-]　　C_O: 外側空間 CO_2濃度[-]
V_A: 膜上空間体積 [㎥]　　ΔT: 測定間隔[h]
C_i: 膜下空間 CO_2濃度[-]　　M: CO_2発生量[㎥/h]
V_i: 膜下空間体積 [㎥]　　N: 時点

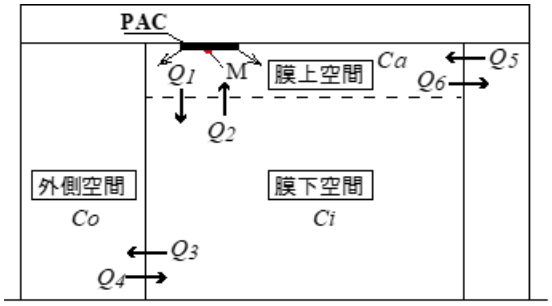


図 3.3.2　交換空気量算定の概要図

図 3.3.3 に、膜の 3 パターンにおける Case1 の CO_2 濃度の計測値と算定値の経時変化を示す。膜上・膜下・外側空間の濃度は、それぞれの空間における各測定点の平均値を用いた。各パターンにおいて、膜上空間濃度と膜下空間濃度の差異を比較すると、(a)ガイド無＞(b)ガイド有(膜)＞(c)ガイド有(開口)の順に小さくなっており、濃度差が小さいほど膜上下の空気が混合していると言える。なお、膜上空間と膜下空間の計測値と算定値は概ね一致していることから空間内に大きな分布がないことが示唆された。

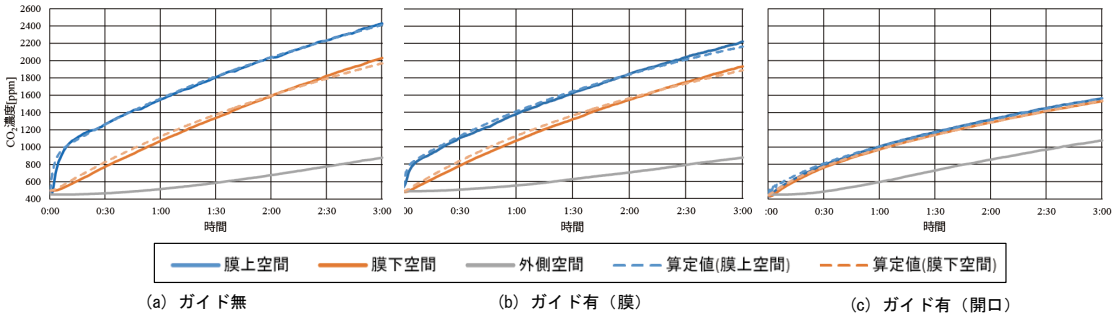


図 3.3.3　各膜パターンにおける CO_2濃度経時変化（Case1）

得られた流量を表 3.3.1 に示す。膜の条件間で比較すると、ガイドを設けることにより流量は 1.3～2 倍に増量し、ガイド下部に開口を設けることで 5.5～7 倍に増量している。これより、膜での圧力損失が大きいため、ガイドの有無よりもガイド下部の膜の有無が交換空気量に与える影響の方が大きくなっていると考えられる。

表 3.3.1　各膜パターンにおける膜上下温度差と膜上下交換空気量

条件		(a) ガイド無			(b) ガイド有(膜)			(c) ガイド有(開口)		
		温度差 [°C]	Q_1 [m³/h]	Q_2 [m³/h]	温度差 [°C]	Q_1 [m³/h]	Q_2 [m³/h]	温度差 [°C]	Q_1 [m³/h]	Q_2 [m³/h]
Case1	基準	6.3	90.3	116.0	6.0	156.1	182.9	2.4	986.9	1016.1
Case2	低熱負荷	3.8	79.9	94.7	4.0	154.8	182.3	1.5	990.6	1019.0
Case3	風量最小	5.0	78.6	101.0	6.9	111.4	132.8	2.9	811.5	850.4
Case4	高温設定	4.7	92.2	106.3	6.3	147.8	178.5	1.9	844.2	1008.8
Case5	30°吹出し	6.5	85.9	106.4	6.3	144.2	175.8	2.3	975.3	1043.5
Case6	高熱負荷	8.2	91.8	120.1	9.2	155.7	187.6	3.0	875.6	1018.7

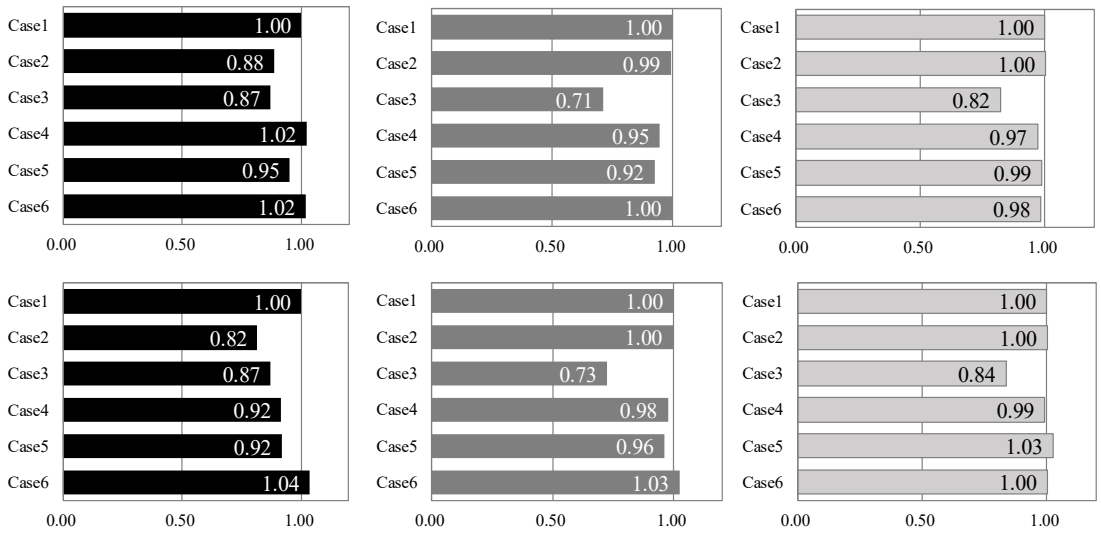


図 3.3.4　各膜パターンにおける Case1 を基準とした膜上下交換空気量の割合

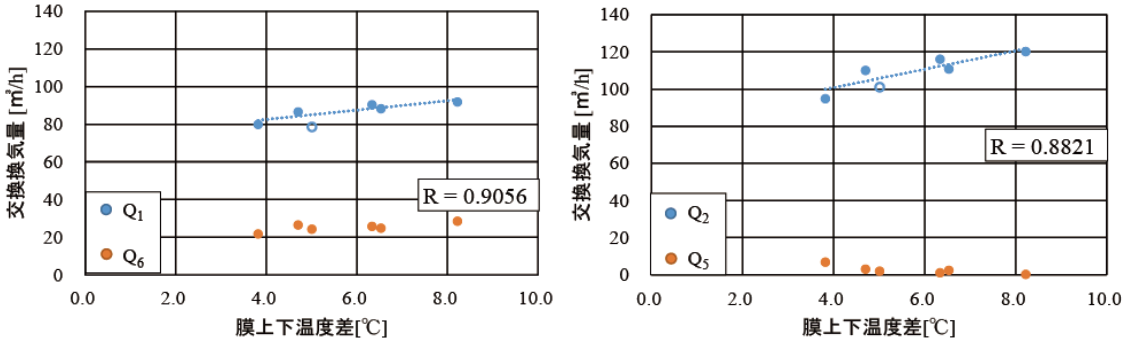


図 3.3.5　(a) ガイド無パターンにおける膜上下温度差と膜上下交換空気量の関係

膜パターン間の比較を行うため、各膜条件の Q_1、Q_2 について Case1 の値を 1 としたときの各膜パターンでの流量の割合を図 3.3.4 に示す。ガイド有の 2 条件では Case3(風量最小)条件のみ流量が小さくなっていることから、PAC のファン動力が交換空気量に与える影響が大きいことがわかり、ガイド有の 2 条件下では、PAC の P-Q 特性により交換空気量が予測できると考えられる。

(a)ガイド無ではCase3以外でも差異が見られたため、交換空気量に影響を与える因子を検討するため、交換空気量と膜上下温度差(=膜上空間の空気温度と膜下空間の空気温度との差異)との相関を検討した。(a)ガイド無におけるQ_1、Q_2それぞれについての相関図を**図3.3.5**に示す。ただし、Case3(風量最小)はPACの設定風量が異なるため、他の5ケースでの相関性を検討した。**図3.3.5**より、Q_1、Q_2ともに決定係数も大きな値をとっており、膜上下温度差と交換空気量との強い相関が見られた。また、他のガイド有2条件では、いずれも相関が見られなかった。これより、(a)ガイド無でのみ、交換空気量は膜上下温度差の一次式によって予測できることが示唆された。

3.4　他の放射空調システムとの温熱環境比較

本節では、本システムの特徴を見出すため、既往の放射空調方式との比較を行う。比較を行うにあたり、1 章で取り上げた既往方式から、今回行った実大実験に類似した条件下で実測が行われていた水式・空気式それぞれ 2 件を抜粋して評価を行った。本システムと各文献における各種仕様及びシステム、実測時の運転条件、垂直温度分布の結果を本システムは表 3.4.1 に、空気式は表 3.4.2、水式は表 3.4.3 に示す。なお、本システムは、(a)ガイド無として、表 3.4.2、表 3.4.3 には各文献の垂直温度分布結果との比較を示している。

表 3.4.1　本システムの仕様と運転条件および垂直温度分布

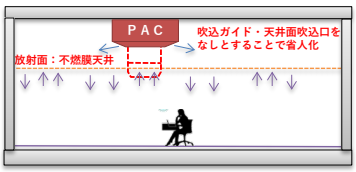
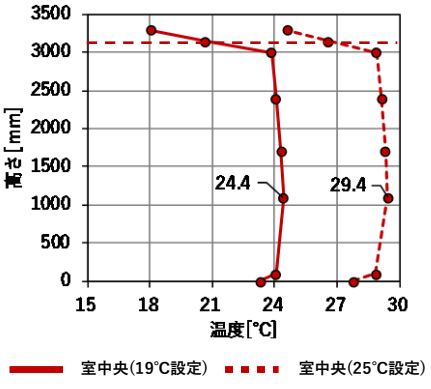
方式		空気式
システム		本システム:(a)ガイド無(実験)
概要図		
仕様	規模	床面積17.7m², 天井高3.44m
	断熱	壁 GW 50mm＋PB 12.5mm
	空調能力	PAC 2台(約1.3kW/m²)
運転条件	設定温度[°C]	PAC 19°C
	風量 [m³/h・m²]	約114.8 (2台)
	流量 [L/min・m²]	—
	総発熱量 [W/m²]	45.9
垂直温度分布実測値 ※グラフ中の破線は天井面を示す		

表 3.4.2　文献から抜粋した空気式放射空調システムの仕様・条件と垂直温度分布（本システム比較）

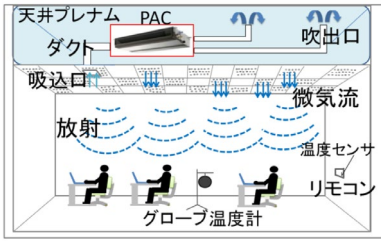
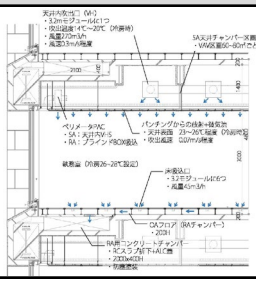
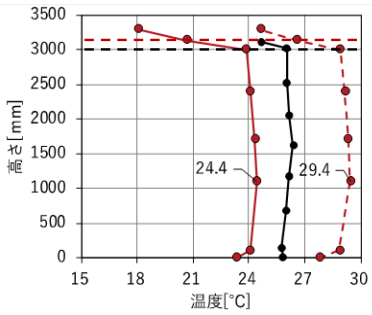
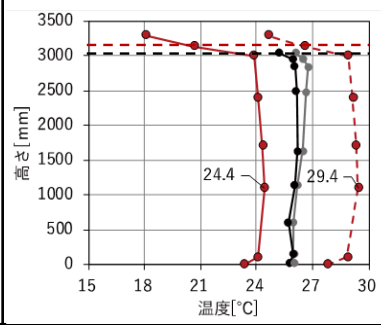
方式		空気式	
システム		1.天井チャンバー型[2)]（実験）	2.全面有孔天井[3)]（実物件）
概要図			
仕様	規模	床面積 59.5m²,天井高3.1m 天井懐高さ1.08m	床面積3180m², 天井高3.0m
	断熱	記載なし	記載なし
	空調能力	PAC2台(120W/m², 上向き吹出) 天井に対しパネル開口率約0.3%	インテリア：AHU+単一ダクトVAV ペリメータ：ビル用マルチエアコン
運転条件	設定温度[°C]	25°C	設定温度27°C、SA設定温度19°C 送水温度7-15°C
	風量 [㎥/h・㎡]	記載なし	270.0（室温によるVAV制御）
	流量 [L/min・㎡]	-	-
	総発熱量 [W/㎡]	約57.7	記載なし
垂直温度分布による本システムとの比較 ※グラフ中の破線は天井面を示す			
		室中央(本システム,19°C設定) 室中央	室中央(本システム,25°C設定) ペリメータ

表 3.4.3　文献から抜粋した水式放射空調システムの仕様・条件と垂直温度分布(本システム比較)

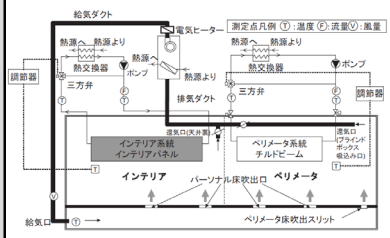
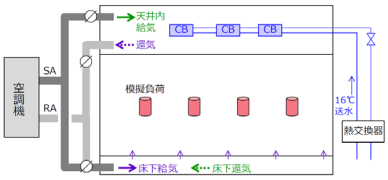
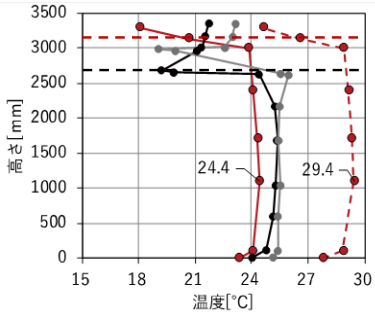
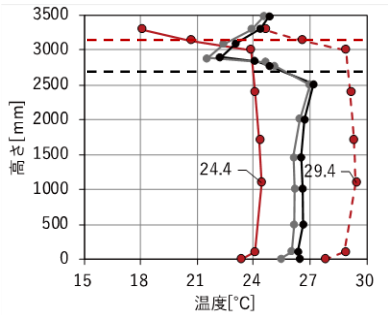
方式		水式	
システム		3.放射天井パネル+チルドビーム[4] (実験)	4.チルドビーム+天井パネル[5] (実験)
概要図			
仕様	規模	床面積65.9m², 天井2.7m 天井懐0.7m	床面積32.4m², 天井高2.8m 天井懐1.2m
	断熱	ポリスチレンフォーム (天井150mm,壁100mm,床100mm)	硬質ポリウレタンフォー100mm
	空調能力	インテリア：放射天井パネル ペリメータ：チルドビーム	パッシブチルドビーム　6台
運転条件	設定温度[°C]	インテリア…成行(目標 26°C) 送水温度 16°C、給気温度 20°C	26°C (送水温度16°C,給気温度26°C)
	風量 [㎥/h・㎡]	記載なし	最大 7.0
	流量 [L/min・㎡]	パネル 0.6、チルドビーム 1.5	記載なし
	総発熱量 [W/㎡]	約46.7	50.0
垂直温度分布による本システムとの比較 ※グラフ中の破線は天井面を示す			
		室中央(本システム,19°C設定) 室中央	室中央(本システム,25°C設定) ペリメータ

表 3.4.1 の結果から、PAC の設定温度と天井内（膜上）温度、対象（膜下）空間の実現温度の乖離状況が、－1～0℃、4.5～5.5℃であることが分かる。PAC 本体の運転制御は、機器保護の観点から PAC 吸込み温度と設定温度の差にて行われなければならない。本システムにおける PAC 吸込み温度は天井内（膜上）温度となるため、室温との乖離を把握したシステム制御が必要であることが言える。

表 3.4.2、**表 3.4.3** の結果から、対象（天井下）空間の垂直温度分布については各システムともに上下温度差はほぼ見られない。また、天井内（膜上）温度と対象（膜下）空間の実現温度の乖離状況は、空気式では非常に小さく、水式では大きいことが分かる。空気式では天井からの浸み出しによる対流成分の影響が大きく、水式では放射成分の影響が大きいと考えられる。以上より、本システム室内温度分布は、既往の空気式放射空調システムと差が見られず実用性に問題はないことが示唆された。

3.5 本章のまとめ

本章では、前章で用いた浸み出し用不燃ダクト材として利用されているガラス繊維に不織布を貼り合わせた膜材（長尺膜天井材）を天井に貼った実験室を構築し、膜からの浸み出し量や膜下の温熱環境を定量的に把握する目的で実大実験を行った。その結果下記知見と課題を得た。

① 垂直温度分布の結果から、いずれの膜パターンにおいても膜下（対象）空間の上下温度差がなく均一であり良好な温度分布が確認できた。

② 垂直温度分布の結果から、本システムを想定している (a)ガイド無では対象空間と膜上空間との温度差が、総発熱量に応じて大きくなる。つまり負荷の大小に応じて PAC の設定温度を可変できかつ負荷変動に追従できる制御が必要であることが分かった。

③ 膜上下交換空気量の算出結果から、ガイドを設けることにより流量は 1.3～2 倍に増量し、ガイド下部に開口を設けることで 5.5～7 倍に増量している。これより、膜での圧力損失が大きいため、ガイドの有無よりもガイド下部の膜の有無が交換空気量に与える影響の方が大きくなっていることが示唆され、(a)ガイド無では、立ち上がり時など膜上下交換空気量を増やす方法を検討する必要がある。

④ 膜上下交換空気量と膜上下温度差の相関から、(a)ガイド無でのみ、交換空気量は膜上下温度差の一次式によって予測できることが示唆された。

本システムの有効性を検証するため、実大実験で得られた結果と他事例の放射空調システムとの比較を行い、下記知見と課題が得られた。

⑤ 本システムでは、天井内（膜上）温度、対象（膜下）空間の実現温度の乖離状況が、4.5～5.5℃と高くなっている。PAC 本体の運転制御は、機器保護の観点から PAC 吸込み温度と設定温度の差にて行われなければならない。本システムにおける PAC 吸込み温度は天井内（膜上）温度となるため、室温との乖離を把握したシステム制御が必要であることが分かった。

⑥ 既往の放射空調システムでは、天井内温度と対象空間の実現温度の乖離状況は、空気式では非常に小さく、水式では大きいことが分かる。このことから、空気式では天井からの浸み出しによる対流成分の影響が大きく、水式では放射成分の影響が大きいと考えられる。また、本システムの室内温度分布は、既往の放射空調システムと差が見られず実用性に問題はないことが示唆された。

以上より、本システムは、膜上下交換空気量が小さいことによる負荷変動への追従性のなさや、膜上下温度差が高い前提での PAC 運転制御の開発などの課題はあるものの、室内温度分布は、既往の放射空調システムと差が見られず実用性に問題はないことが示唆された。以降では、実用的なシステムとすべく、膜上下交換空気量を増やす方法や、換気方式の検討を行う。合わせて、汎用性も持たせるため、放射効果、空調負荷処理性能や省エネルギー性能の検証も行う。

参 考 文 献

1）蔵永真理，山中俊夫，前田龍紀，北風晴都：PAC を用いた膜放射天井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，pp.255-262，2019

2）田村夏美,太田恵大,金子洋介,浮穴朋興,田辺新一：天井チャンバー型空気式放射空調システムの制御方法とその評価,空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，鹿児島，pp.389-392，2016.9

3）後藤悠,山中俊夫,甲谷寿史,相良和伸,桃井良尚,多良俊宏,福森幹太:全面有孔天井を用いた対流・放射空調を行うオフィスビルにおける室内環境に関する研究（その 2～4）,空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，鹿児島, pp397-408, 2016.9

4）伊藤清,川島実,荒井義人,高橋満博,村上宏次,野部達夫：ペリメータにチルドビームを配置した天井放射空調システムの冷却性能検証，日本建築学会環境系論文集 Vol.81, No.723, pp.447-455, 2016

5）雨宮沙耶,中村卓司,三浦靖弘,熊野直人,村上宏次,池田真哉,森田英樹,荒井義人：パッシブチルドビームを用いた天井内冷却式放射空調の基礎検討（第 2 報）実大オフィスモデルにおける冷房実験,空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集,大阪, pp.33-36, 2015.9

第４章　長尺膜天井における膜上下循環換気実大実験

4.1 はじめに

前章にて PAC を設置した室に膜を貼り、実大実験による検証を行った。その結果、膜からの浸み出しによる交換空気量は少なく、負荷変動への追従性の課題はあるものの、膜下室内の上下温度差が 3℃以内と均一な温度分布が実現できている。また、既往の水式放射空調システムに近い温熱性能であることもわかった。そこで、本章では実用的なシステムとして確立すべく、膜上下交換空気量を増やす方法と換気方式の検討を行うために、膜上と膜下の空気を強制的にファンで循環させた場合と、外気取入を想定した場合の実大実験を実施した。合わせて、汎用性も持たせるため、放射効果、PAC の運転安定性や空調負荷処理性能及び省エネルギー性能の検証も行った。

4.2　膜上下強制循環時の冷房性能

4.2.1 実験の目的

膜上下交換換気を促進し、立ち上がり時の能力アップを目指した小型軸流ファンを用いた膜上下強制循環実験(以下、循環実験)を行い、得られた温熱環境特性の結果について報告する。

4.2.2 実験室概要

2018 年 11 月 13 日～2018 年 11 月 22 日に夏期を想定した冷房実験を行った。実験室は、前章と同様に、対象空間は内寸 4.41m×4.01m、高さ 3.44m であり、床上 3.14m の高さに浸み出し不燃性ダクトに用いられる布と同様の不燃性の膜を貼っているが、本章では、**図 4.2.1** に示す膜上下交換ファン(三洋電機、109P1348S101、以下循環ファン)4 台を膜表面に設置し実験を行った。なお、循環ファンの風向きは上向き運転で実験を行う。平面図を**図 4.2.2**、断面図を**図 4.2.3** に示す。発熱体は、前章と同様に、人体発熱としてブラックランプ(53W/個)を床上 0.6m の高さに、機器発熱として白熱電球(100W/個)、及び電気毛布(50W/個)を各々床上に配置し、総発熱量は 812W とした。

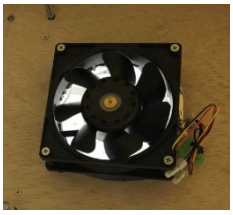


図 4.2.1　循環ファン

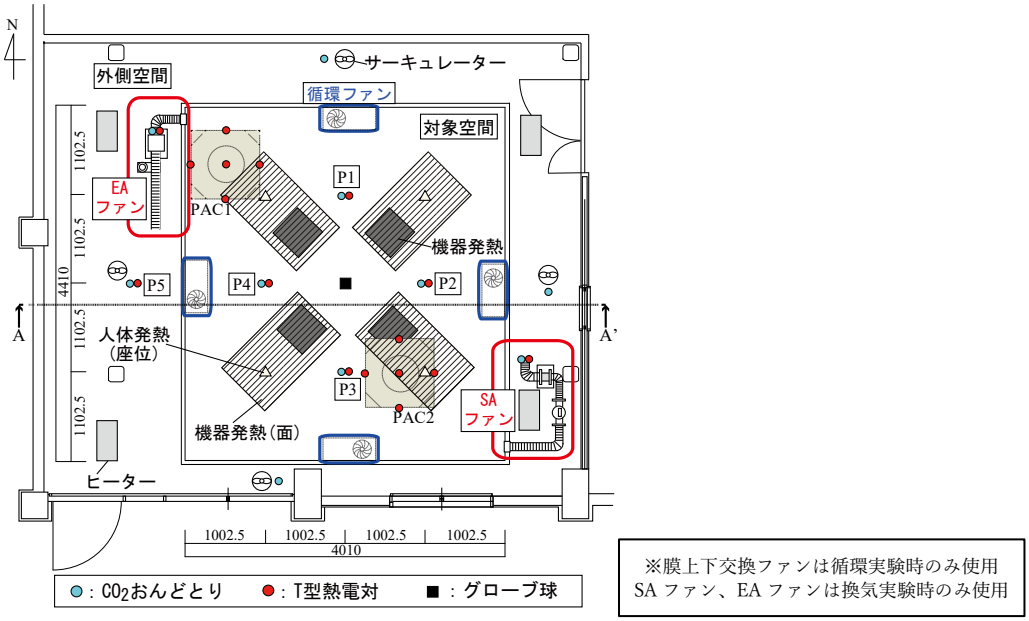


図 4.2.2　実験室平面図[mm]

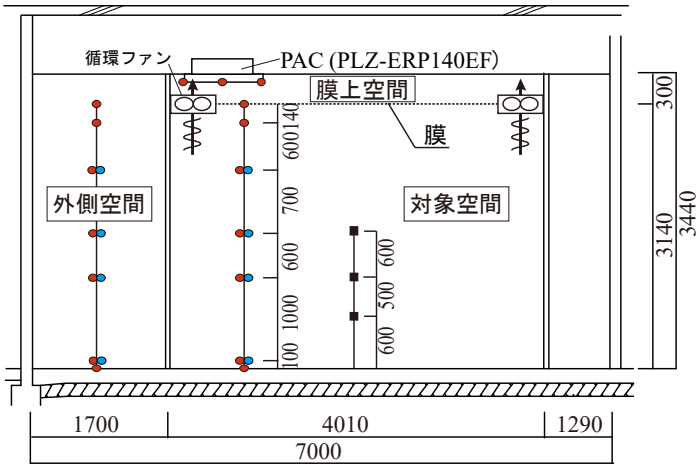


図 4.2.3　A-A' 断面図[mm]

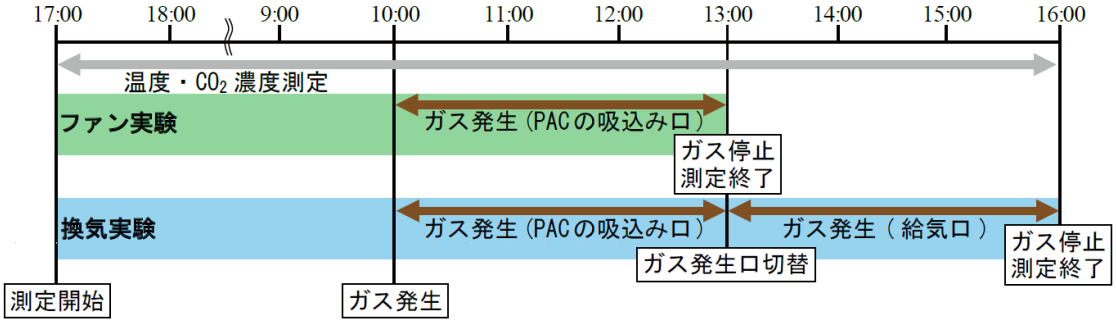


図 4.2.4　測定手順の概要

温度測定点は**図 4.2.2** 中の P1～P5 で鉛直方向に 7 点(**図 4.2.3**) と膜上に 3 点設けた。また、PAC の吸込口に 1 点、4 箇所の吹出口に 1 点ずつの 4 点で PAC の吸込・吹出温度(4 箇所平均値)を計測している。グローブ温度測定点は、**図 4.2.2** 中の対象空間中央の鉛直方向に 3 点設けた。

実験は PAC の運転開始と同時に温度の測定を開始し、定常状態を確認後、CO_2 ガス(1L/min)を PAC の吸込み口から発生させ、CO_2 濃度測定を開始し、ガス発生開始 3 時間後に測定を終了した。測定手順の概要を**図 4.2.4** に示す。

4.2.3 実験条件

循環ファンによる膜下空間の循環回数を 0 回/h、4 回/h、8 回/h の 3 条件、PAC の設定温度を 19℃、22℃の 2 条件を設け、計 6 ケース(**表 4.2.1**)の実験を行った。ここで循環回数とは、循環ファンの風量を膜下空間の容積 55.5m3 で除して求められる、膜下空間の空気が循環ファンによって単位時間に入れ換わる回数のこととする。PAC の吹出し風量は 1 台当たり 1016m^3/h、吹出し角度は天井面から 30°とした。

表 4.2.1　各ケースにおける交換空気量(循環実験)

条件	ファン		PACの設定温度[℃]
	循環回数[回/h]	風量[m3/h]	
CaseL-0	0	0	19
CaseL-230	4	230	
CaseL-460	8	460	
CaseH-0	0	0	22
CaseH-230	4	230	
CaseH-460	8	460	

4.2.4 実験結果：PAC の運転状況

図 4.2.5 に循環ファンによる循環回数 0 及び 8 回/h 条件についての定常状態確認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 がサーモ ON/OFF を繰り返して運転したためと考えられる。なお図中の点線は PAC の設定温度を表している。

PAC の設定温度条件間で比較すると、PAC のサーモ ON/OFF 運転による温度の周期的な変動について、周期の長さは、設定温度 19℃で短くなっており、PAC がより多くの熱を処理していることがわかる。また、どの条件においても膜下温度が上昇していないことから、内部発熱に見合った空調能力があると考えられる。図 4.2.5 中の網掛け部は、外気変動が小さく天候の影響が小さい日の出前の 1 周期のデータを示しており、図 4.2.6 に示す鉛直温度分布は、この網掛け部の 1 周期のデータを平均した値を使用している。

4.2.5 実験結果:鉛直温度分布

図 4.2.6 に PAC の設定温度 19℃、22℃条件で比較した鉛直温度分布を、表 4.2.2 に膜下と膜表面及び膜上との温度差を示す。いずれの条件でも温度分布は均一であり、FL+100mm と FL+1700mm との上下温度差が 3℃以内[11]という推奨値を下回っており、室内は快適な温度分布と言える。条件間で比較すると、循環回数が多いほど膜下空間の空気温度が低く、冷房効果があると考えられる。また、膜上・膜下空間の空気温度差が小さいことから膜上下の空気が混合していると考えられる。膜下と膜表面の温度差は循環ファンの運転の有無で温度差が変わっていることが分かる。

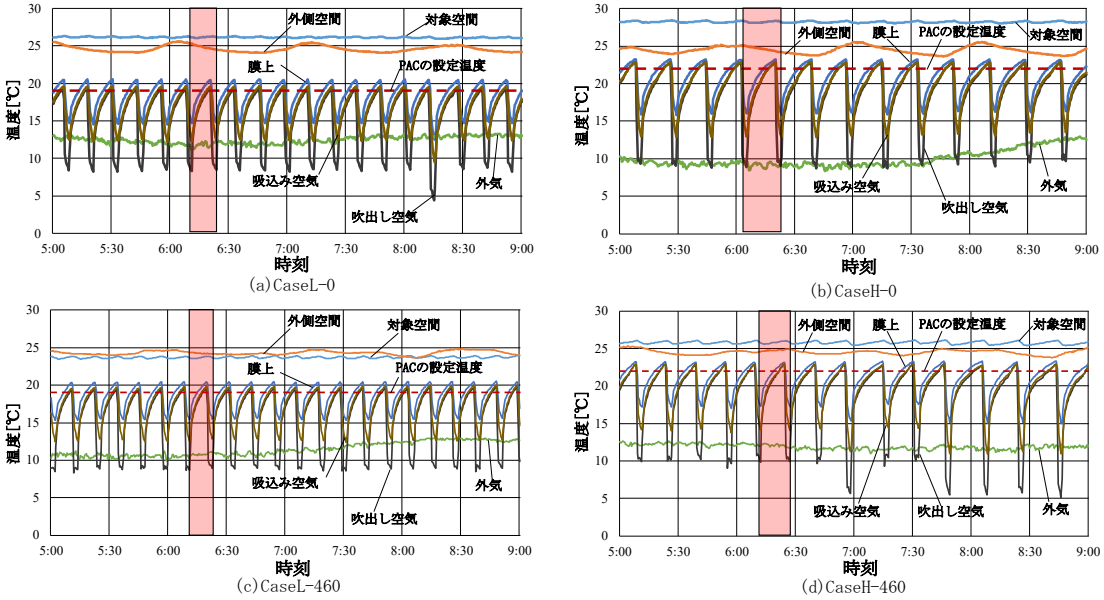


図 4.2.5 温度経時変化(循環実験)

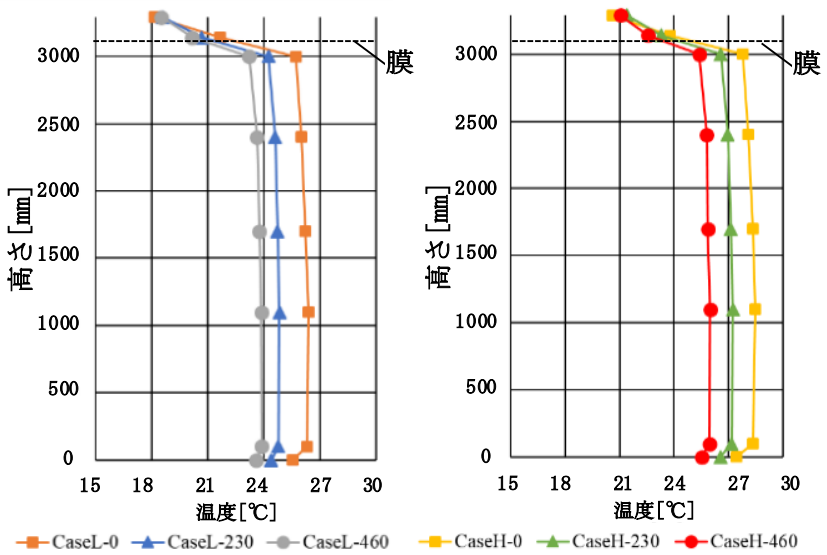


図 4.2.6 鉛直温度分布

表 4.2.2 膜下と膜表面及び膜上の温度差(循環実験)

	平均値[℃]		
	膜下温度	膜表面・膜下温度差	膜上・膜下温度差
CaseL-0	26.2	4.7	8.0
CaseL-230	24.6	4.1	6.1
CaseL-460	23.7	3.9	5.2
CaseH-0	28.2	4.7	7.6
CaseH-230	27.0	4.1	5.6
CaseH-460	25.8	3.8	4.7

4.2.6 実験結果:グローブ温度

図 4.2.7 に PAC の設定温度 19℃条件におけるグローブ温度と空気温度の鉛直分布の比較を示す。まず、ケース間でグローブ温度を比較すると、CaseL-0、CaseL-230、CaseL-460 の順でグローブ温度が低くなっており、循環回数が多いほど、グローブ温度が低いことがわかる。また、全ケースを通して、高い位置ではグローブ温度が低く、低い位置ではグローブ温度が高くなっており、室上部では膜からの冷放射、室下部では発熱体からの放射熱による影響が大きいことが考えられる。

空気温度とグローブ温度の大小が入れ替わる高さを破線で図中に示した。循環ファンによる循環回数 0 回/h 条件では、4 回/h、8 回/h 条件と比較して、低い位置で大小の入れ替わりが起こっていることが分かる。循環回数 0 回/h 条件は対流による冷却効果が相対的に低いと考えられる。

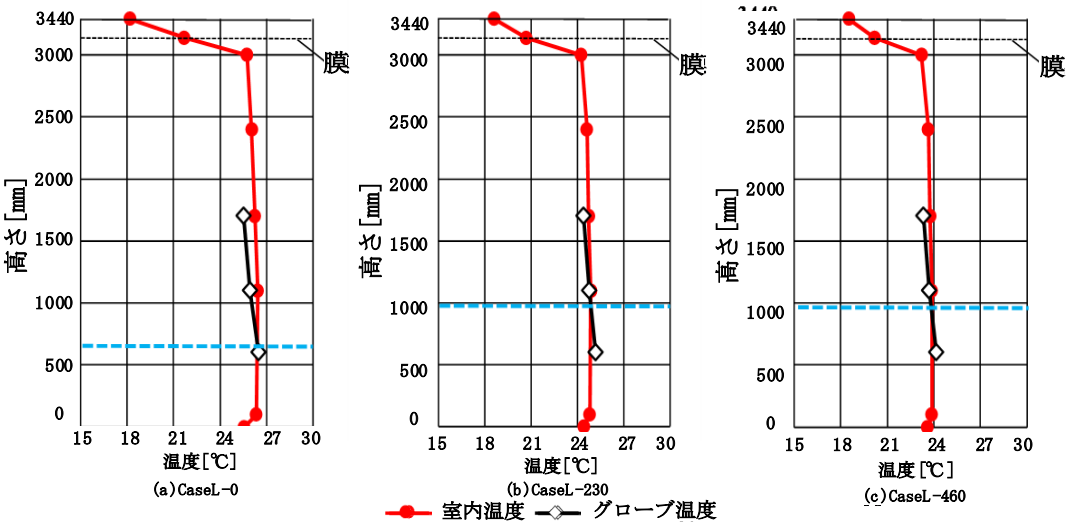


図 4.2.7　グローブ温度の鉛直温度分布（PAC の設定温度 19℃ ）

4.3 外気導入時の冷房性能

4.3.1 実験の目的

給排気はそれぞれ膜上と膜下の組合せが考えられる。そこで本報では給排気位置による換気による温熱環境への影響を評価するため、給気を膜上と膜下で切換え、排気は膜下の上部か下部で切換える実験(以下、換気実験)を行った。なお給気温度については、外調機あるいは直膨式全熱交換器による熱処理後の給気を想定し、室温と同程度の温度で設定した。

4.3.2 実験概要と条件

実験は 2018 年 12 月 17 日～2019 年 1 月 9 日に行った。実験室は循環実験と同様であり、加えて給気口、給気ファン（富士電機、TURBO BLOW:VCP062P）及び排気口、排気ファン(三菱電機、BFS-15SUA)をそれぞれ 2 個ずつ新設した。平面図を循環実験と同様の**図 4.2.2**、断面図は**図 4.3.1** に示す。

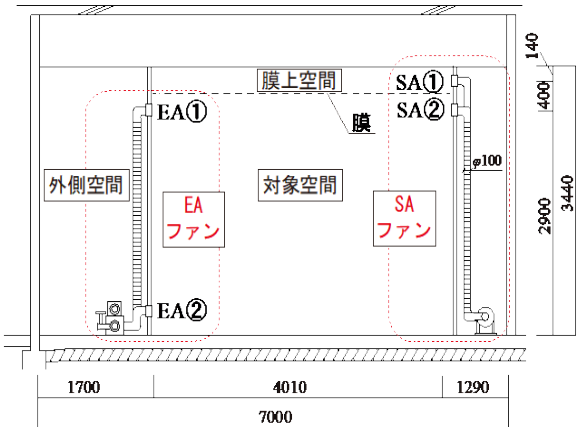


図 4.3.1 実験室断面図[mm]

表 4.3.1 実験条件(換気実験)

条件	給水口位置	排気口位置	給排気量 [㎥/h]
CaseAu-50	SA①(膜上)	EA①(膜下・上部)	50
CaseAu-100			100
CaseAu-150			150
CaseAl-50		EA②(膜下・上部)	50
CaseAl-100			100
CaseAl-150			150
CaseIu-100	SA②(膜上)	EA①(膜下・上部)	100
CaseIl-100		EA②(膜下・上部)	100

A：膜上給気　*I*：膜下給気
u：膜下上部排気　*l*：膜下空間下部排気

温度測定点を循環実験と同様で**図 4.2.2** および**図 4.2.3** に示す。実験条件は給気口・排気口の位置及び給排気量をパラメータとし、計 8 条件の実験を行った(**表 4.3.1**)。いずれの条

件でも PAC の設定温度 19℃、吹出し角度は天井面から 30° の角度で、吹出風量は 1 台当たり 1016 ㎥/h とした。給気温度を室温と同じ温度帯とするため、外側空間の空気を対象空間内に流入し、対象空間の空気を外側空間に排出し、新鮮外気を導入せずに換気性能の検討を行った。

実験は循環実験と同様に、PAC の運転開始と同時に温度の測定を開始し、定常状態を確認後、CO2 ガス(1L/min)を PAC の吸込み口から発生させ、CO2 濃度測定を開始し、ガス発生開始 3 時間後に測定を終了した。なお今回の実験においては、PAC の吸込み口からガス発生後、発生口を給気口に切替え、給気口からのガス発生も同様にして行った。

4.3.3 実験結果：PAC の運転状況

図 4.3.2 に膜上給気、膜下上部排気についての定常状態確認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おり、循環実験同様に PAC がサーモ ON/OFF を繰り返して運転していることが確認される。なお図中の点線は PAC の設定温度を表している。

条件間で比較すると、換気風量が大きいほど PAC がサーモ ON/OFF を繰り返す周期が短くなっており、PAC がより多くの負荷を処理していることがわかる。**図 4.3.2** 中の網掛け部は、外気変動が小さく天候の影響が小さい日の出前の 1 周期のデータを示しており、**図 4.3.3** に示す鉛直温度分布は、この網掛け部の 1 周期のデータを平均した値を使用している。

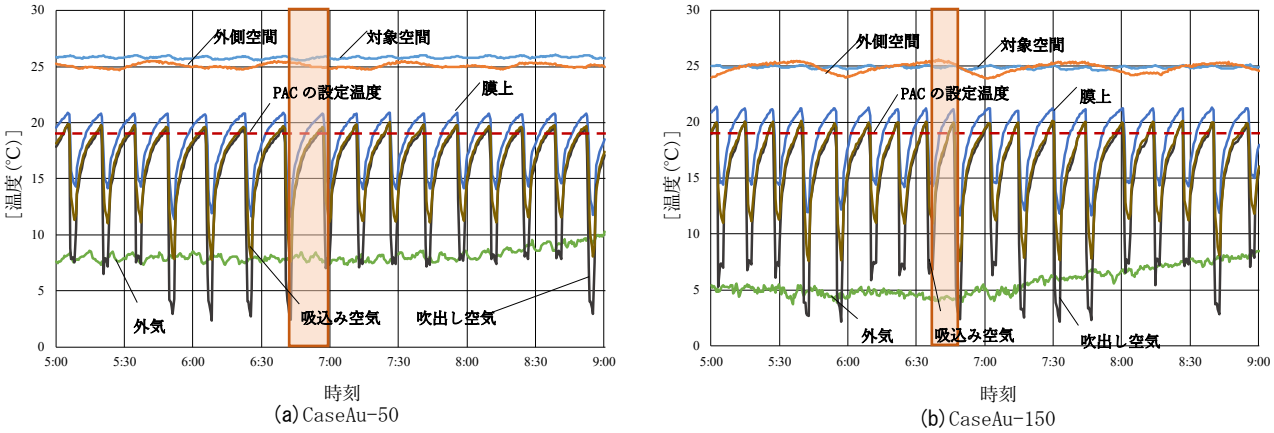
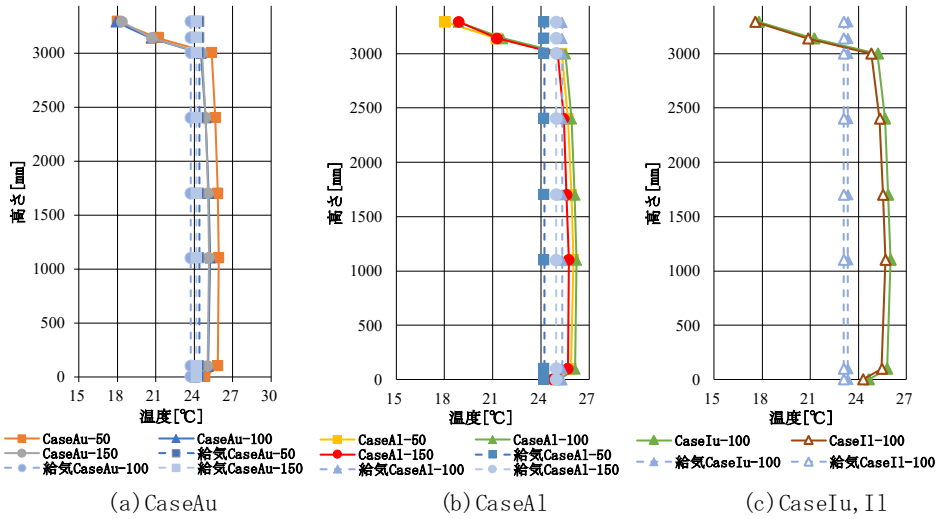


図 4.3.2 温度経時変化(換気実験)

4.3.4 実験結果：鉛直温度分布

図 4.3.3 に各ケースの鉛直温度分布と給気温度を示す。いずれの条件でも温度分布が均一であり、FL+100mm と FL+1700mm との上下温度差が 3℃以内 [11] という推奨値を下回っており、室内は快適な温度分布と言える。

条件間で比較すると、膜上給気の場合は給排気量が大きいほど膜下空間の空気温度が低く、冷房効果があると考えられる。また**図 4.3.3** (c)より膜下給気の場合は排気口の高さによる温度分布への影響は小さいと考えられる。



(a)CaseAu　(b)CaseAl　(c)CaseIu,Il

図 4.3.3 給気温度と鉛直温度分布(換気実験)

4.3.5 実験結果：膜表面温度

表 4.3.2 に各条件下の膜下と膜表面温度を示す。外気量 50 m^3/h での実験時の膜下と膜表面温度の温度差が 4.5℃に対し、各条件下での温度差が外気量 150m3/h で 4.2℃となり外気導入量に伴う放射効果への影響は小さいと考えられる。

表 4.3.2 膜下と膜表面の温度差(換気実験)

	平均値[℃]		
	膜下温度	膜表面温度	温度差
CaseAu-50	25.7	21.2	4.5
CaseAu-100	25.0	20.6	4.3
CaseAu-150	24.9	20.7	4.2
CaseAl-50	25.8	21.2	4.5
CaseAl-100	26.0	21.6	4.3
CaseAl-150	25.5	21.3	4.2
CaseIu-100	25.7	21.2	4.5
CaseIl-100	25.4	20.9	4.5

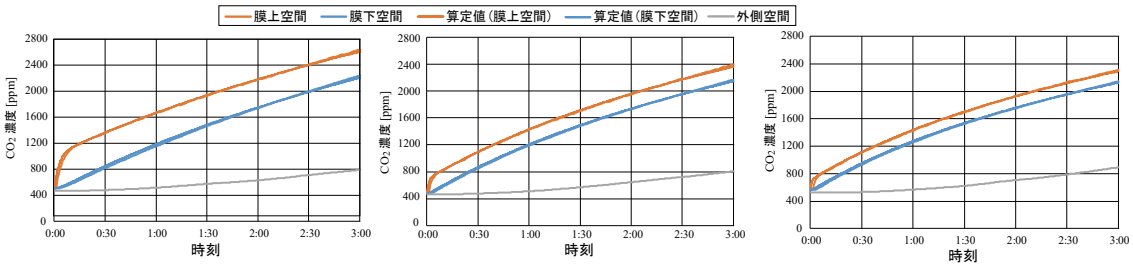
4.4 膜上下交換換気の効果の検討

4.4.1 はじめに

本節では、循環実験と換気実験の CO_2 濃度の計測結果から、膜を通した交換空気量を算出した結果について考察し、本システムの空気循環性能、換気性能を検証する。

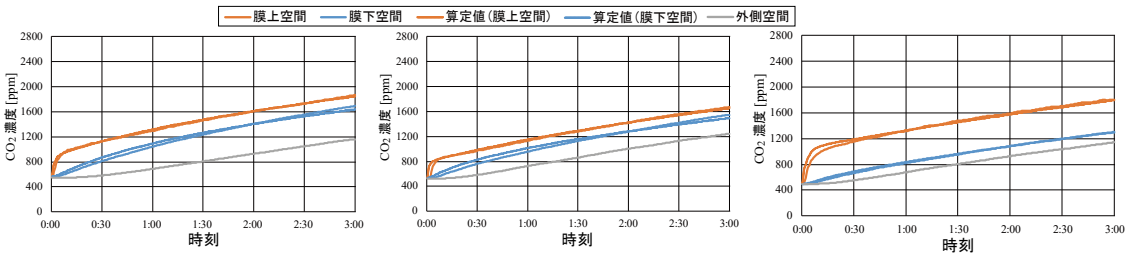
4.4.2 CO_2 濃度の経時変化

図 4.4.1 に循環実験における(a)CaseL-0、(b)CaseL-230(4 回/h 条件)、(c)CaseL-460(8 回/h 条件)の CO_2 濃度経時変化を、**図 4.4.2** に換気実験における膜上給気条件の(d)CaseAl-50(膜上給気、換気量 50 m^3/h)、(e)CaseAl-100(膜上給気、換気量 100 m^3/h)と、(f)CaseIl-100(膜下給気、換気量 100 m^3/h)についての CO_2 濃度経時変化を示す。なお図中の各算定値は、次項にて算出方法を示す。膜上の CO_2 濃度から膜下の CO_2 濃度を引いた値を比較すると、循環実験においては CaseL-0＞CaseL-230＞CaseL-460 の順に、循環回数が多くなるほど小さくなっていることがわかり、濃度差が小さいほど、膜上下の空気が混合していると考えられる。換気実験においては CaseIl-100＞CaseAl-50＞CaseAl-100 の順に小さくなっており、膜上給気で給排気量が大きいほど、膜上下の空気がより混合していると考えられる。



(a)CaseL-0　　(b)CaseL-230　　(c)CaseL-460

図 4.4.1 CO_2 濃度経時変化(循環実験)



(d)CaseAl-50　　(e)CaseAl-100　　(f)CaseIl-100

図 4.4.2 CO_2 濃度経時変化(換気実験)

4.4.3 膜上下交換換気

膜上下交換空気量の算定方法 3.3.3 節と同様に、膜上空間で CO2 ガスを発生させたときの CO_2 濃度の収支から、膜上・膜下空間の CO2 濃度を式(1)，(2)を用いて算定し、得られた濃度が一致するように最小二乗法を用いて Q_1～Q_6 を求めた。その際、膜上・膜下空間の

流量収支を合わせるため、式(3)，(4)を満たすようにした。ただし、換気実験においては Q_5 又は Q_4 は各ケースの給気量、Q_3 は各ケースの排気量として固定した。**図 4.4.3** に概要図を示す。

$$C_a^{n+1} = C_a^n + (C_i^n Q_2 + M - C_a^n Q_1 + C_0^n Q_5 - C_a^n Q_6)\frac{\Delta t}{V_a} \quad (1)$$

$$C_i^{n+1} = C_i^n + (C_a^n Q_1 + C_0^n Q_4 - C_i^n Q_3 - C_i^n Q_2)\frac{\Delta t}{V_i} \quad (2)$$

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

$$-Q_1 + Q_2 + Q_5 - Q_6 = 0 \quad (4)$$

C_a:膜上空間CO_2濃度[-]　　C_i:膜下空間CO_2濃度[-]

C_o:外側空間CO_2濃度[-]　　M：CO_2発生量[m3/h]

V_a:膜上空間体積[m3]　　V_i:膜下空間体積[m3]

Δt:測定間隔[h]

-下付き文字-

a：膜上空間　*i*：膜下空間　*o*：外側空間　*n*：時点

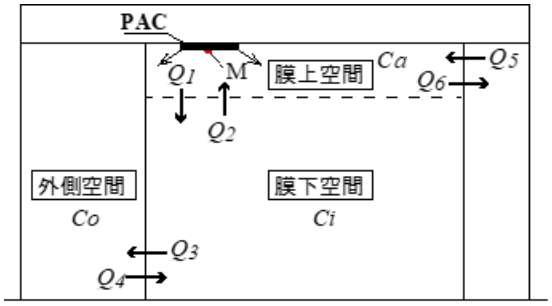


図 4.4.3　交換空気量算定の概要図

表 4.4.1 に循環実験における交換空気量 Q_1～Q_6 を示す。CaseL-230, CaseH-230 ではファンの風量と Q_2 が概ね一致しているが、CaseL-460, CaseH-460 ではファンの風量よりも Q_2 が小さい結果となった。これは、膜上容積(5.3m^3)に対して大きい流量(460m^3/h)がファンを通して流入し、流入した空気が膜の空気抵抗により膜上空間に溜まり、膜上空間が高圧になることで、ファンの能力が設定値より低下している可能性が考えられる。ファンの静圧設定の配慮が必要であることが示唆された。

また、ケース間の比較を行うため、各ケースでの Q_1, Q_2 の流量を**図 4.4.4** に示す。循環回数 0 回/h 条件と比較すると、循環回数 4 回/h で流量は 2.5～2.7 倍に増量し、循環回数 8 回/h で約 4 倍に増量しており、循環回数が多いほど交換空気量が大きくなっており、ファンが交換空気量に与える効果が大きいことがわかる。

表 4.4.1　交換空気量の算定結果（循環実験）

条件	ファン 循環回数 [回/h]	ファン 風量 [m3/h]	PACの設定温度 [°C]	流量 [m3/h] Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6
CaseL-0	0	0	19	**82.5**	**89.5**	0.0	7.0	12.2	19.2
CaseL-230	4	230		**216.7**	**237.1**	0.0	20.4	4.1	24.5
CaseL-460	8	460		**320.3**	**348.8**	0.0	28.5	0.0	28.5
CaseH-0	0	0	22	**83.5**	**92.9**	0.0	9.4	10.0	19.4
CaseH-230	4	230		**209.4**	**230.5**	0.0	21.1	3.5	24.6
CaseH-460	8	460		**319.0**	**349.6**	0.0	30.6	0.0	30.6

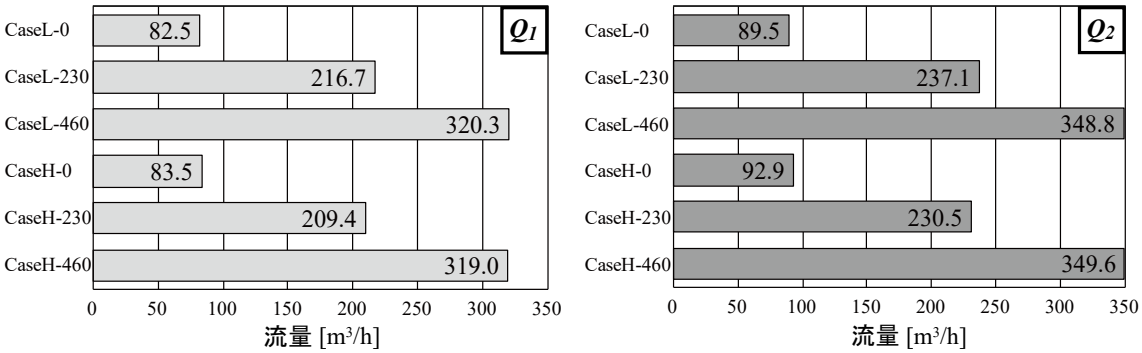


図 4.4.4　各 Case における Q_1 及び Q_2 の算定結果（循環実験）

表 4.4.2 に、換気実験における交換空気量 Q_1～Q_6 を、図 4.4.5 に各ケースでの Q_1、Q_2 の流量を示す。図中の破線は、循環実験での CaseL-0（無換気状態）での交換空気量 Q_1（=82.5m³/h）を示している。膜上給気条件の CaseAu と CaseAl においては、無換気状態の交換空気量に各条件で設定した給排気量を足し合わせた値に近しい値となっており、膜上給気・膜下排気の場合では給排気ファンによる交換空気量の増加が明確にみてとれる。また、排気口の高さの違いが交換空気量に与える影響は小さいと考えられる。一方、膜下給気条件の CaseIu と CaseIl においては、交換空気量は無換気条件よりも小さく、換気による交換空気量の増加は確認できなかった。以上から、膜上給気・膜下排気とした換気方式では、対象（膜下）空間の換気量を維持しつつ、膜上下交換空気量を増やすことができることが示唆された。

表 4.4.2　交換空気量の算定結果（換気実験）

	給気口位置	排気口位置	給排気量 [Nm3/h]	流量[m3/h] Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6
CaseAu-50	SA①	EA①	50	**130.2**	**110.9**	44.8	25.5	54.5	35.1
CaseAu-100			100	**162.6**	**94.6**	104.0	35.9	108.7	40.6
CaseAu-150			150	**212.9**	**110.4**	172.1	69.6	163.3	60.8
CaseAl-50		EA②	50	**129.7**	**106.6**	44.8	21.7	54.4	31.4
CaseAl-100			100	**167.2**	**90.9**	104.0	27.7	109.3	33.0
CaseAl-150			150	**226.5**	**91.4**	172.1	37.0	163.7	28.6
CaseIu-100	SA②	EA①	100	**65.4**	**70.0**	104.0	108.5	37.1	41.7
CaseIl-100		EA②	100	**64.8**	**69.3**	104.0	108.4	37.8	42.3

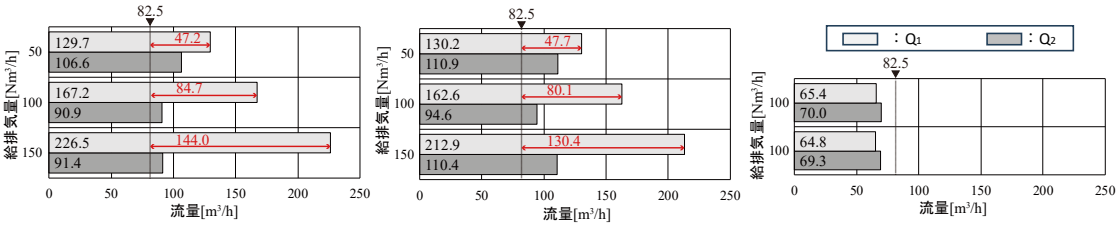


図 4.4.5　各 Case における Q_1 及び Q_2 の算定結果（換気実験）

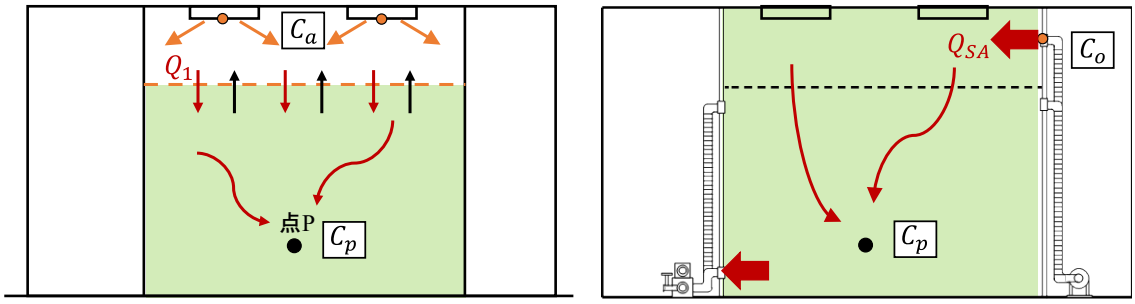
4.5 局所平均空気齢による検討

4.5.1 はじめに

本節では、循環実験と換気実験の CO_2 濃度の計測結果から、局所平均空気齢を算出した結果について考察し、本システムの空気循環性能、換気性能を検証する。

4.5.2 算出方法

本システムでは膜上空間から膜を通して流入する冷気の膜下空間への分配性能を評価するため、膜下空間の各測定点での局所平均空気齢を算出した。PAC の吸込口より発生させたトレーサーガスが膜を通して膜上空間から膜下空間に流入し、再び膜上空間に戻るため、膜下空間へ流入する CO_2 濃度は時々刻々と変化する。そこで、本報ではパルス解析[1)]を用いた空気齢算出を試みた。膜上空間から $C_a(t)$ のガスが膜下空間へ流入したとき、各測定点での単位パルスに対する濃度応答を $R_p(t)$ とすると、(式(5))と表せる。$C_a(t)$ 及び $C_p(t)$ が測定より既知であるため、$R_p(t)$ を(式(7))と仮定し最小二乗法により $R_p(t)$ を求め、(式(8))より局所平均空気齢 τ_p を算出した。また換気実験では、給気口からのトレーサーガス発生時においても、同様にして検討した。この際、トレーサーガスの定常発生に加えて、排気された CO_2 が還気により再び給気されるため、給気口でのトレーサーガスのパルス発生を仮定した上で、定常発生時のステップアップ濃度変化から、パルス発生に対する各測定点での局所平均空気齢を算出した(式(6))。加えて、名目換気時間を算出した。膜上の冷気による名目換気時間については(式(9))、給気による名目換気時間については(式(10))を用いた。また、室の空間平均的な空気分配性能を表わすために、平均空気交換効率[2)]を算出した(式(11))。**図 4.5.3** に膜上からの冷気による空気齢と給気口からの給気による空気齢の算出概要図を示す。



(a)膜上からの冷気による空気齢　　(b)給気口からの給気による空気齢

図 4.5.1　空気齢の算出概要図

$$C_p(t) = \int_0^{\infty} M(t-\tau) R_p(t) d\tau \qquad \cdots (5)$$

$$C_{p1}(t) = \int_0^{\infty} Q_1 C_a(t-\tau) R_p(t) d\tau \qquad \cdots (5')$$

$$C_{p2}(t) = \int_0^{\infty} Q_{SA} C_{SA}(t-\tau) R_p(t) d\tau \quad \cdots \ (6)$$

$$R_p(t) = \mathrm{b}e^{-c(t-a)} \quad \cdots \ (7)$$

（ただし、t<a の時、$R_p(t)=0$）

$$\tau_p = \frac{\int_0^{\infty} t R_p(t) dt}{\int_0^{\infty} R_p(t) dt} \quad \cdots \ (8)$$

$$\tau_{n1} = \frac{V_i}{Q_1} \quad \cdots \ (9)$$

$$\tau_{n2} = \frac{V_i + V_a}{Q_{SA}} \quad \cdots \ (10)$$

$$\varepsilon_a = \frac{\tau_n}{2\tau_p} \quad \cdots \ (11)$$

$Rp(t)$:インパルス応答関数[1/m3]

$C_p(t)$:点PにおけるCO2濃度[-]　　C_{SA}:給気CO2濃度[-]

Q_1:下向き交換空気量[m3/min]　　Q_{SA}:給気量[m3/min]

τ_p：局所平均空気齢[min]　　$M(t)$：CO2発生量[m3/min]

τ_n：名目換気時間[min]　　ε_a：平均空気交換効率[-]

局所平均空気齢の鉛直分布の冷気によるものを、循環実験については**図 4.5.2**、換気実験については**図 4.5.3** に、給気によるものを**図 4.5.4** に示す。また空気齢の平均値、名目換気時間、平均空気交換効率及び局所空気齢の標準偏差については**表 4.5.1**、**表 4.5.2** 及び**表 4.5.3** に示す。

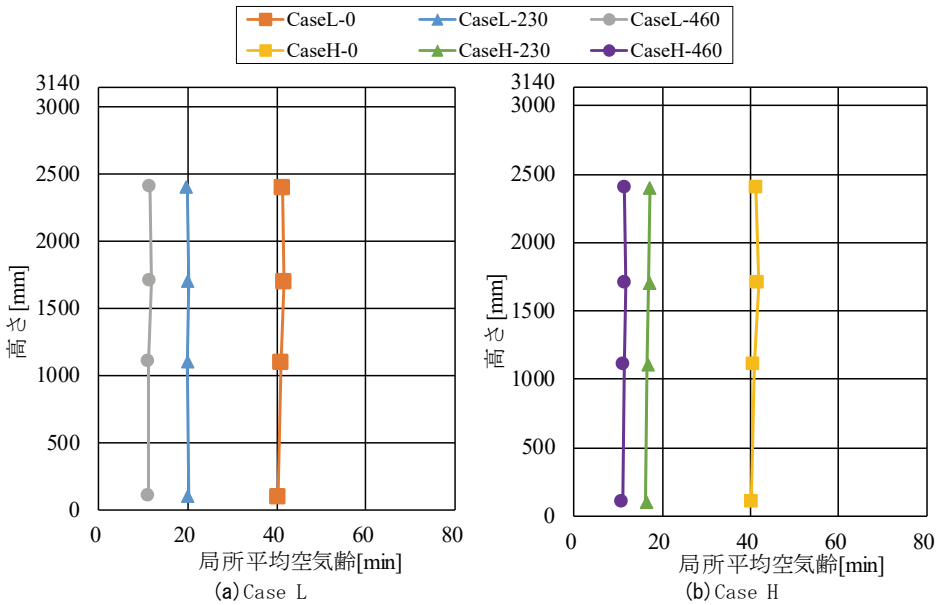


図 4.5.2　PAC 設定温度条件毎の膜上からの冷気による局所平均空気齢の鉛直分布（循環実験）

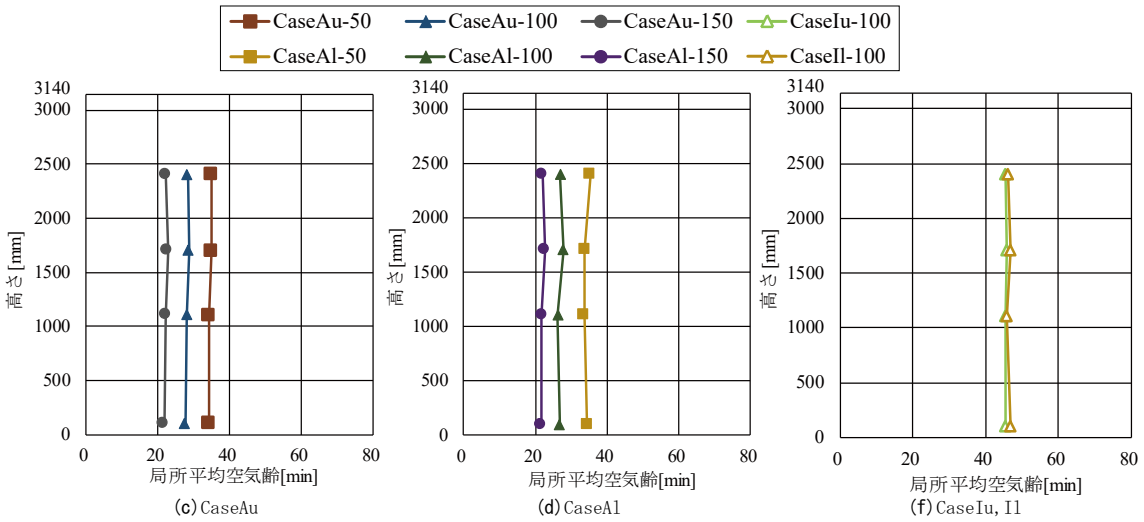


図 4.5.3　給排気パターン毎の膜上からの冷気による局所平均空気齢の鉛直分布(換気実験)

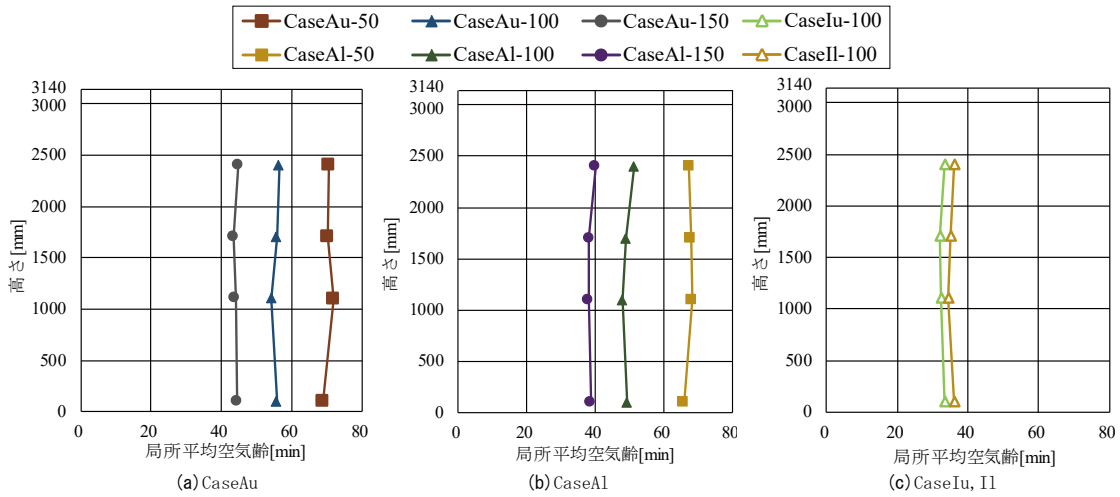


図 4.5.4　給排気パターン毎の給気口からの給気による局所平均空気齢の鉛直分布(換気実験)

表 4.5.1　膜上からの冷気による局所平均空気齢 (循環実験)

	空気齢(冷気)の平均値[min]	名目換気時間[min]	平均空気交換効率[-]	局所空気齢の標準偏差
CaseL-0	41.11	40.40	0.49	0.70
CaseL-230	20.02	15.38	0.38	2.13
CaseL-460	11.51	10.40	0.45	0.46
CaseH-0	41.04	39.89	0.49	1.03
CaseH-230	16.82	15.91	0.47	0.66
CaseH-460	11.35	10.44	0.46	0.55

表 4.5.2　膜上からの冷気による局所平均空気齢（換気実験）

	排気口での局所平均空気齢 [min]	空気齢(冷気)の平均値[min]	名目換気時間[min]	平均空気交換効率 [-]	局所空気齢の標準偏差
CaseAu-50	33.68	34.57	24.25	0.35	0.84
CaseAu-100	27.52	28.17	19.13	0.34	0.66
CaseAu-150	25.88	22.52	14.36	0.32	0.57
CaseAl-50	35.15	34.35	24.31	0.35	2.06
CaseAl-100	25.59	26.85	18.27	0.34	0.88
CaseAl-150	20.61	21.90	13.42	0.31	0.65
CaseIu-100	41.81	45.50	52.83	0.58	0.70
CaseIl-100	45.59	46.45	53.53	0.58	0.98

表 4.5.3　給気口からの給気による局所平均空気齢（換気実験）

	排気口での局所平均空気齢 [min]	空気齢の平均値 [min]	名目換気時間[min]	平均空気交換効率 [-]	局所空気齢の標準偏差
CaseAu-50	69.89	70.36	67.02	0.48	1.73
CaseAu-100	55.60	55.53	33.58	0.30	2.72
CaseAu-150	41.51	44.08	22.35	0.25	2.33
CaseAl-50	68.44	67.37	67.05	0.50	1.42
CaseAl-100	51.66	49.44	33.40	0.34	2.52
CaseAl-150	39.50	38.83	22.30	0.29	2.39
CaseIu-100	33.10	32.84	33.63	0.51	1.29
CaseIl-100	29.10	35.44	33.66	0.47	1.63

4.5.3 膜上からの冷気による局所平均空気齢

循環実験においては、ファンによる循環回数が多いほど、空気齢が小さく、冷気が早く室内下部まで到達していることがわかる。また、全ケースで標準偏差が小さく、平均空気交換効率が約 0.5 の結果となっていることから、完全混合状態が実現され、各測定点に対して一様に気流が届いていることが確認できた。

換気実験の膜上給気条件においては、排気口での空気齢が名目換気時間よりも大きくなっている。これは、膜上空間(5.3m^3)に対して大きい流量を給気しているため、膜上空間が高圧となり、ファンの能力が設定値よりも低下している可能性が高く、このことが原因と考えられる。

4.5.4 給気口からの給気による局所平均空気齢

平均空気交換効率が膜上給気条件での給気量 50m^3/h 及び膜下給気条件では約 0.5 の値で

あるが、膜上給気条件での給気量 100m^3/h、150m^3/h では 0.5 より小さい結果となった。これは膜の空気抵抗により対象（膜上）空間で滞留域が生じていることが要因と考えられる。

また、膜下給気条件では空気齢が最も小さく、空気交換効率も 0.5 程度となっており、換気効率としては対象（膜下）空間に直接給気する方が換気性能は高いことが示唆された。

4.6 PAC の空調性能の検証

4.6.1 はじめに

本システムでは膜上の PAC にて、膜を介して空調負荷を処理する。これは、膜上下交換換気による対流熱と膜表面からの放射熱及び伝達熱による処理となる。そこで、対象空間（膜下）の内部発熱と貫流熱及び給排気による熱の合計を室内負荷とし、PAC の顕熱処理量を比較し、空調性能の検証を行う。

4.6.2 空調負荷と PAC の顕熱処理量の算出方法

図 4.6.1 および**図 4.6.2** に本報での空調負荷算出における測定点と負荷の考え方を示す。**図 4.6.1** において、空調負荷を膜下室内の人体発熱と機器発熱の合計値、壁面からの貫流熱の合計値（式(13)）、外部空間からのみなし外気負荷（式(14)）の合計値（式(12)）として設定した。なお、壁面からの貫流熱は、壁面の表裏で各 9 点ずつ計測した表面温度と壁面の熱コンダクタンス λ/L を 0.655[W/(㎡・K)]として求めた。大半が機器と人体による内部発熱となる。PAC の顕熱処理量は、あらかじめ計測した吹出風量に固定し、計測した吸込温度と吹出し温度から求めた。（式(4)）なお、PAC の吹出風量 Q_{pac} を 1 台当たり 1016 ㎥/h とした。

$$q_r = q_H + \sum q + q_v \qquad \cdots\cdots(12)$$

$$q = \frac{\lambda(T_o - T_i)}{L} S_w \qquad \cdots\cdots(13)$$

$$q_v = c_p \rho Q_v (\theta_o - \theta_e) \div 3600 \qquad \cdots\cdots(14)$$

$$q_{pac} = c_p \rho Q_{pac} (\theta_r - \theta_s) \div 3600 \qquad \cdots\cdots(15)$$

ここに、

q_r：	室内負荷	[W]
q_H：	内部発熱	[W]
q_v：	外気負荷	[W]
q：	東西南北各壁面からの貫流熱	[W]
q_{pac}：	PAC の顕熱処理量	[W]
Q_{pac}：	PAC の吹出風量	[㎥/h]
T_i：	室内側 9 点の壁面温度の平均値	[℃]
T_o：	室外側 9 点の壁面温度の平均値	[℃]
θ_r：	PAC の吸込空気温度	[℃]
θ_s：	PAC の吹出空気温度	[℃]
c_p：	空気の定圧比熱(=1,006)	[J/(kg・K)]
ρ：	空気の密度(=1.2)	[kg/㎥]
L：	壁厚	[m]
λ：	壁の熱伝導率	[W/(m・K)]

S_w：　東西南北各壁面の面積　［㎡］

Q_v：　外気量　［㎥/h］

θ_o：　外気給気温度　［℃］

θ_e：　排気温度　［℃］

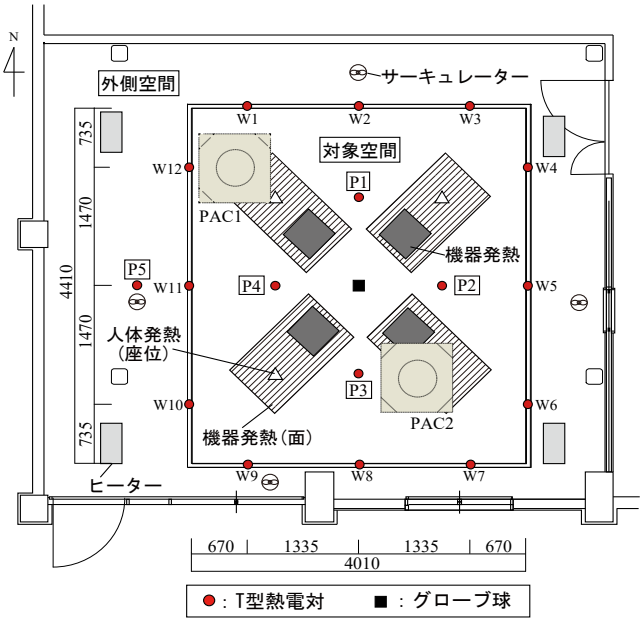


図 4.6.1　空調負荷算出における測定点（平面図）

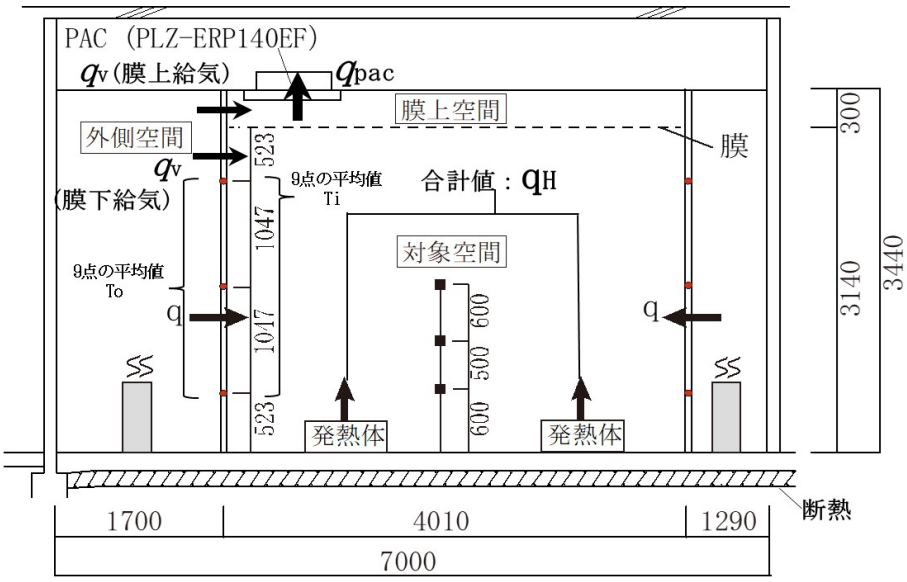


図 4.6.2　空調負荷算出における測定点と負荷の考え方（断面図）

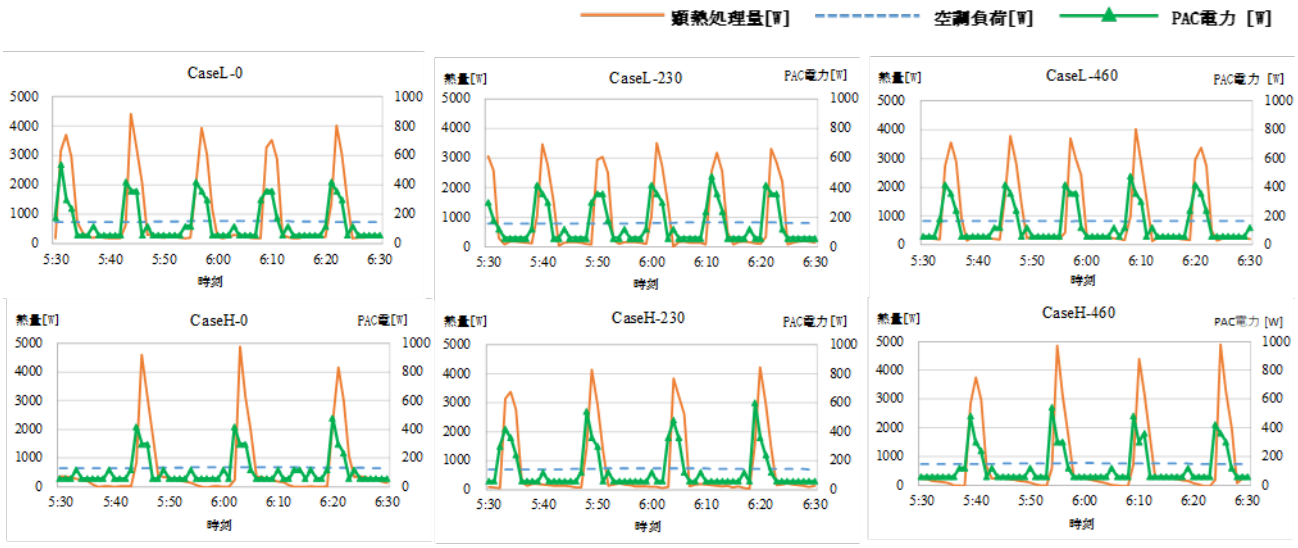


図 4.6.3　空調負荷と顕熱処理量と PAC 消費電力の 1 分毎の時系列変化（循環実験）

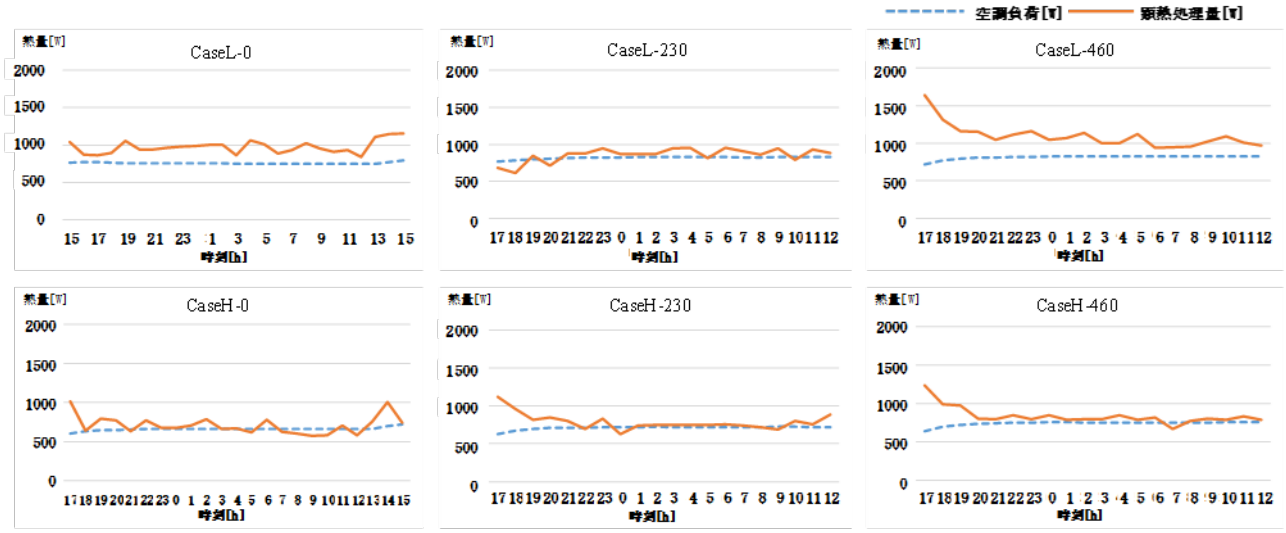


図 4.6.4　空調負荷と顕熱処理量（循環実験）

4.6.3 PAC の顕熱処理量と空調負荷の時系列比較

図 4.6.3 に循環実験における空調負荷と顕熱処理量と PAC 電力の 1 分毎の時系列データを示す。この結果より PAC のハンチング運転が発生していることが分かる。図 4.6.4 に循環実験における PAC 顕熱処理量と空調負荷の 1 時間積算値の時系列変化を示す。この結果より、1 時間積算値で見ると空調負荷に対して PAC 顕熱処理量の過度な過不足が見られない。また、PAC 顕熱処理量は膜上設定温度が低い場合と循環風量が大きい場合に増加することが分かる。このことから、PAC の設定温度や循環ファンの制御を適切に行うことで立上りも含めて過不足のない空調能力が得られることが示唆された。なお、PAC が実際に処理している顕熱には、天井スラブからの貫流熱、側壁面からの貫流熱も含まれているが、実験の都合上天井スラブからの貫流熱は計測できていない。側壁面は面積が小さく断熱も行っているため大きな影響はないと想定されるため、天井スラブからの貫流熱の影響が考

えられる。

図 4.6.4 より、定格能力 12.5kW に対して負荷率が非常に小さいことが分かる。実験室に設置された既存の PAC を用いたためである。この結果より、実験で与えた内部発熱に対して定格能力が 12.5kW と非常に大きい条件下であったが、空調負荷に対して過大な顕熱処理量となっていないことが分かる。以上より PAC 能力を適正に選定し負荷率を上げることで、ハンチング運転を低減できることが示唆された。

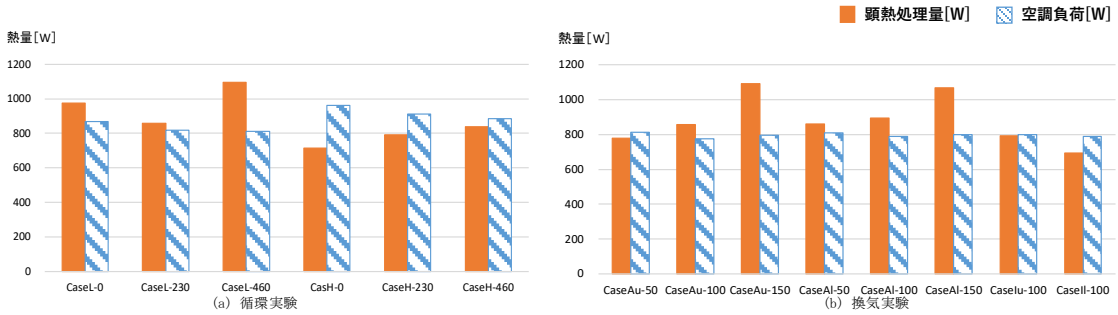


図 4.6.5　空調負荷と顕熱処理量の期間平均値

表 4.6.1　各条件における空調負荷の内訳

(a) 循環実験

	空調負荷平均値 (W)					
	CaseL-0	CaseL-230	CaseL-460	CaseH-0	CaseH-230	CaseH-460
内部発熱	812	812	812	812	812	812
壁面貫流熱	-55	-7	1	-150	-101	-73
合計	757	805	813	662	711	739

(b) 換気実験

	空調負荷平均値 (W)							
	CaseAu-50	CaseAu-100	CaseAu-150	CaseAl-50	CaseAl-100	CaseAl-150	CaseIu-100	CaseIl-100
内部発熱	812	812	812	812	812	812	812	812
壁面貫流熱	-24	4	-5	-21	-7	-2	-46	-43
外気負荷	-22	-33	-22	-24	-29	-16	-60	-65
合計	767	783	785	767	777	794	706	704

4.6.4 PAC の顕熱処理量と空調負荷の期間平均値比較

図 4.6.5 に循環実験及び換気実験における空調負荷と顕熱処理量の期間平均値を、**表 4.6.1** に各条件における空調負荷の内訳を示す。冬期実験のため外側にヒーターを設置しているが、壁面貫流熱は概ね冷熱となっている。つまり内部発熱が外部空間に逃げた残りの負荷が空調負荷となっている。循環実験においては PAC の設定温度が低い、循環風量が大きいほど顕熱処理量が増加する。換気実験においては、膜上に外気を多く導入するほど顕熱処理量が増加している。一方、膜下より膜上に給気した方が顕熱処理量は増加している。これは循環実験と同様に膜上下の交換空気量が増えたためと考えられる。一方、膜上と膜下の温度差を 5[K]、膜上と膜下の循環風量を 230[m^3/h]とすると、391[W]の冷熱が膜上から供給されるが、循環風量が増加に対して、PAC の顕熱処理量はそこまで変化していないことが分かる。また、**図 4.2.4** から循環風量が増減しても、定常状態では膜下温度の下降・上昇が見られないことから、膜を介しても、負荷に見合った空調能力が得られていると考えられる。今後、内部発熱を変化させる実験や、通常の天井カセット方式との比較にてさらなる検証を行っていく。

4.7 COP による省エネルギー性の検討

4.7.1 はじめに

前章にて、膜上でのショートサーキットが課題となった。ショートサーキットによる問題は、PAC の運転の安定性と省エネルギー性があげられる。PAC の運転の安定性は前項にて PAC 能力を適正に選定し負荷率を上げることで、ハンチング運転を低減できることが示唆された。そこで本項では、PAC の COP を算出し、省エネルギー性能の検討を行う。

4.7.2 COP の算出方法

図 4.7.1 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（前述式（15））。次に計測した PAC の消費電力量で除して COP を算出した。（式（16））なお消費電力量には室内機ファンも含まれている。

$$COP_{pac} = \frac{q_{pac}}{W_{pac}} \qquad (16)$$

ここに、

COP_{pac}:　PAC の COP　[-]

W_{pac}:　PAC 電力(室外機+室内機)　[W]

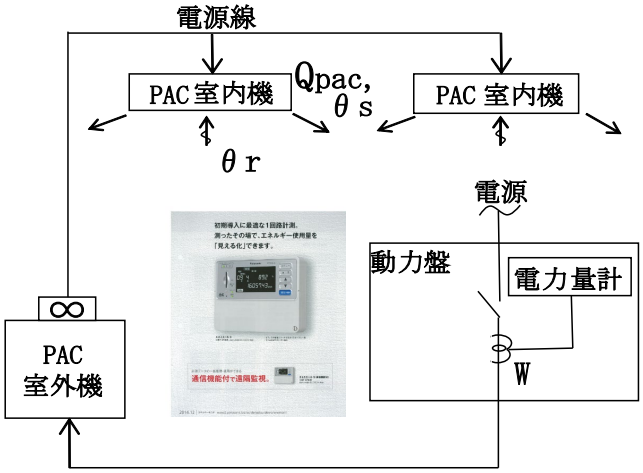


図 4.7.1　PAC の電力計測概要

4.7.3 COP 算出結果

図 4.7.2 に循環実験における PAC の COP の時系列変化を示す。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 12 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 4.7.1** に示す。これらの結果から、今回の実験で得られた COP は外気温と負荷率が低い環境であったが、5 から 6 程度の値となった。また、実験条件に近い外気温及び負荷率でのメーカー計算値(**表(参考資料)**)と比較し、遜色のない値であることを確認しているが、通常の天井カセット方式（膜なし）との比較を今後実施する予定である。

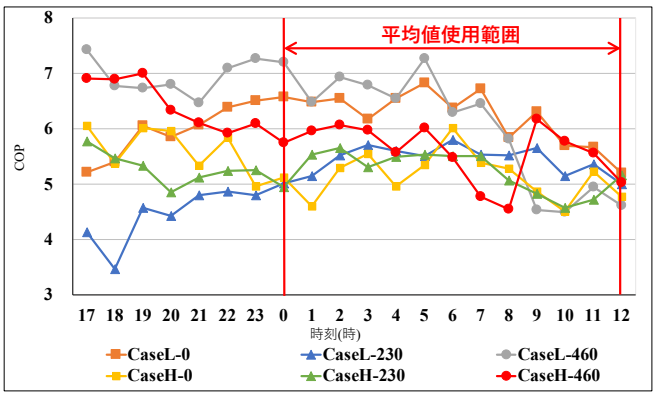


図 4.7.2　PAC の COP の時系列データ

表 4.7.1　PAC の COP 算出結果（平均値）と機器仕様値

(a)：循環実験

	PACの設定温度[℃]	ファンによる循環風量[m3/h]	顕熱処理量[kw]	消費電力[kw]	負荷率[-]	COP[-]	外気温度[℃]
CaseL-0	19	0	1.0	0.2	0.1	6.2	13.1
CaseL-230		230	0.9	0.2	0.1	5.5	14.0
CaseL-460		460	1.0	0.2	0.1	6.3	13.0
CaseH-0	22	0	0.7	0.1	0.1	5.2	12.4
CaseH-230		230	0.8	0.2	0.1	5.2	15.4
CaseH-460		460	0.8	0.1	0.1	5.5	12.2
PAC（冷房）	仕様書定格値(全熱処理量)		12.5	4.0	1.0	3.1	35.0
	仕様書中間値(全熱処理量)		5.7	1.0	0.5	5.8	29.0

(b)：換気実験

	給気口位置	排気口位置	給排気量[m3/h]	顕熱処理量[kW]	消費電力[kW]	負荷率[-]	COP[-]	外気温度[℃]
CaseAu-50	SA①（腰上）	EA①（上部）	50	0.82	0.16	0.07	5.19	9.52
CaseAu-100			100	0.78	0.16	0.06	4.93	8.41
CaseAu-150			150	0.99	0.18	0.08	5.58	8.09
CaseAl-50		EA②（下部）	50	0.86	0.17	0.07	5.21	9.32
CaseAl-100			100	0.98	0.18	0.08	5.57	11.41
CaseAl-150			150	1.09	0.19	0.09	6.00	10.86
CaseIu-100	SA②（腰下）	EA①(上部)	100	0.79	0.14	0.06	5.82	3.61
CaseIl-100		EA②(下部)	100	0.72	0.14	0.06	5.27	6.69

表（参考資料）　PAC のメーカーによる COP 計算値（参考資料）

PLZX-ERP140EF　COP想定値													
				100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%
	35℃	能力	1.00	12.50	11.25	10.00	8.75	7.50	6.25	5.00	3.75	2.50	1.25
		消費電力	1.00	3.99	3.12	2.46	1.95	1.53	1.20	0.89	0.68	0.54	0.33
		COP		3.13	3.60	4.07	4.48	4.89	5.20	5.64	5.55	4.67	3.82
	30℃	能力	1.08	13.50	12.15	10.80	9.45	8.10	6.75	5.40	4.05	2.70	1.35
		消費電力	0.93	3.71	2.90	2.28	1.82	1.43	1.12	0.82	0.63	0.50	0.30
		COP		3.64	4.18	4.73	5.20	5.68	6.04	6.55	6.44	5.42	4.44
	25℃	能力	1.07	13.38	12.04	10.70	9.36	8.03	6.69	5.35	4.01	2.68	1.34
		消費電力	0.88	3.51	2.75	2.16	1.72	1.35	1.06	0.78	0.60	0.47	0.29
		COP		3.81	4.38	4.95	5.45	5.94	6.32	6.86	6.74	5.68	4.65
	20℃	能力	1.09	13.63	12.26	10.90	9.54	8.18	6.81	5.45	4.09	2.73	1.36
		消費電力	0.83	3.31	2.59	2.04	1.62	1.27	1.00	0.74	0.56	0.44	0.27
		COP		4.11	4.73	5.35	5.88	6.42	6.83	7.41	7.28	6.13	5.02
	15℃	能力	1.10	13.88	12.49	11.10	9.71	8.33	6.94	5.55	4.16	2.78	1.39
		消費電力	0.80	3.19	2.50	1.96	1.56	1.23	0.96	0.71	0.54	0.43	0.26
		COP		4.35	5.00	5.65	6.22	6.78	7.22	7.82	7.69	6.48	5.30
	※各負荷特性は想定値となります。												

4.8 本章のまとめ

本章では、前章での課題を受け、本システムを実用的な空調システムとして確立すべく、膜上下交換空気量を増やす方法と換気方式の検討を行うために、膜上と膜下の空気を強制的にファンで循環させた循環実験と、外気取入を想定した場合の換気実験を実施した。これらの実験結果から空気齢を算出し、換気性能の検証を行った。さらに、汎用性を検討するため、PAC 周りの計測も行い、PAC の運転安定性、空調負荷処理性能及び省エネルギー性能の検証も行った。その結果、下記知見と課題が得られた。

① 循環実験の結果から、循環風量を大きくするほど膜下室温が低くなるが、どの条件においても FL+100mm と FL+1700mm との上下温度差が 3℃以内となった。

② 循環実験の結果から循環回数が 0 回/h の場合に、室温と放射温度がより低い位置で大小の入れ替わりが起こっており、対流による冷却効果が相対的に小さいと考えられる。

③ 換気実験の結果から、循環実験と同様に、膜上給気の場合は換気風量が増えるほど膜下室温が低くなった。

④ 換気実験の結果から膜下室温程度まで処理した外気を膜上に導入しても、膜下室内温熱環境に影響がないことが分かった。

⑤ 循環実験における交換空気量の算出結果から、循環回数 0 回/h 条件と比較すると、循環回数 4 回/h で流量は 2.5～2.7 倍に増量し、循環回数 8 回/h で約 4 倍に増量しており、循環回数が多いほど交換空気量が大きくなった。一方、循環回数 4 回/h の条件ではファンの風量と膜上への算出風量が概ね一致したが、循環回数 8 回/h の条件ではファンの風量よりも小さい結果となった。これは、膜上容積(5.3m^3)に対して大きい流量(460m^3/h)がファンを通して流入し、流入した空気が膜の空気抵抗により膜上空間に溜まり、高圧になることで、ファンの能力が設定値より低下している可能性が示唆された

⑥ 換気実験における交換空気量の算定結果から、膜上給気条件においては、無換気状態の交換空気量に各条件で設定した給排気量を足し合わせた値に近しい値となっており、膜上給気・膜下排気の場合では給排気ファンによる交換空気量の増加が明確にみてとれ、排気口の高さの違いが交換空気量に与える影響も小さいことが分かった。

⑦ 換気実験における交換空気量の算定結果から、膜下給気条件においては、交換空気量は無換気条件よりも小さく、換気による交換空気量の増加は確認できなかった。

⑧ 循環実験における空気齢の算出結果から、ファンによる循環回数が多いほど、空気齢が小さく、冷気が早く室内下部まで到達していることがわかる。また、全ケースで平均空気交換効率が約 0.5 の結果となっていることから、完全混合状態が実現され、各測定点に対して一様に気流が届いていることが確認できた。

⑨ 換気実験における空気齢の算出結果から、膜下給気条件では空気齢が最も小さく、

空気交換効率も0.5程度となっており、換気効率としては対象（膜下）空間に直接給気する方が換気性能は高いことが示唆された。

⑩ 空調負荷とPACの顕熱処理量の結果から、実験で与えた内部発熱に対してPACの定格能力が12.5kWと非常に大きい条件下であったため、サーモON/OFFのハンチング運転が見られたが、膜を介していても発熱負荷に見合った空調能力が得られていることが分かった。また、膜上下交換空気量が大きいほどPACの顕熱処理量が大きくなった。このことから、PACの設定温度や循環ファンの制御を適切に行うことで安定した運転ができ、過不足のない空調能力が得られることが示唆された。

⑪ 膜天井内の小空間で運転するPACのCOPの期間平均値は外気温と負荷率が低い環境であったが5から6程度の値となり、メーカーによる計算値（参考資料）と比べても遜色のない結果であった。

以上より、本システムは、膜上下交換空気量をファンにて強制的に増やせる仕掛けを設けることで、水式の放射空調と同じ温熱環境を維持しつつ、PACの安定運転や立上がり能力の確保の可能性が示された。一方で、膜の抵抗にて膜上が正圧になってしまうことが課題として浮き出てきた。そこで、次章では、本研究で提案したもう一つの通気流量が大きい織物膜材にて実大実験を実施する。合わせて、通常の天井カセット方式との比較、開口率の異なる膜天井での検証も行う。

参 考 文 献

1)本田雄樹,山中俊夫,甲谷寿史,桃井良尚,相良和伸,上田真也,前田龍紀:低風速天井吹出し空調による病室の室内環境に関する研究－室内温度・汚染質濃度分布及び換気性能に関する検討－,空気調和・衛生工学会論文集, No.238, pp.19-24

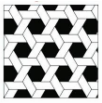
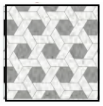
2)「改訂5版　空気調和ハンドブック」,井上宇市(2008),丸善株式会社,pp.388-389

第５章　織物膜天井における冷房実大実験

5.1 はじめに

3章にてPACを設置した室に膜を貼り、実大実験による冷房時の検証を行った。その結果、膜からの浸み出しによる交換空気量は少なく、負荷変動への追従性の課題はあるものの、膜下室内の上下温度差が 3℃以内と均一な温度分布が実現できている。また、既往の水式放射空調システムに近い温熱性能であることもわかった。そこで、4章では実用的なシステムとして確立すべく、膜上下交換空気量を増やす方法と換気方式の検討を行うために、膜上と膜下の空気を強制的にファンで循環させた場合と、外気取入を想定した場合の実大実験を実施した。合わせて、汎用性も持たせるため、放射効果、PACの運転安定性や空調負荷処理性能及び省エネルギー性能の検証も行った。その結果、膜上下交換空気量をファンにて強制的に増やせる仕掛けを設けることで、水式の放射空調と同じ温熱環境を維持しつつ、PACの安定運転や立上がり能力の確保の可能性が示された。一方で、膜の抵抗にて膜上が正圧になってしまうことが課題として浮き出てきた。さらに、実験を重ねていく中で、膜材の耐久性、膜天井内のメンテナンス性など実用化への課題も見えてきた。そこで、前章の課題を解決するために、今まで用いていた膜材よりも通気流量が大きく（抵抗が小さく）、浸み出し放射空調として実績のあるパンチングメタルと同等の使い勝手となりうる膜材にて実大実験を行った。**表 5.1.1** に今まで用いた膜と本章で用いる膜の比較表を示す。本章で用いる膜材は不織布の有無で２パターン設定し、各天井方式による違いと、今まで用いていた膜材との比較を検証する。

表 5.1.1　放射空調用天井材の特徴

	本章で検証する膜（織物膜）		前章まで用いた膜（長尺膜）
	膜（不織布なし）	膜（不織布あり）	
イメージ			
材質	ガラス繊維織物の整形材	左記に不織布を貼り付けた整形材	浸み出し用不燃ダクト材
施工方法	システム天井用パネルで想定 （本章検証時は長物を天井貼付）		長物で張力をかけて貼る
点検口	システム天井と同等		ファスナー等の開口で対応
耐久性	10年程度前から建築内装材等で多数実績あり		経年で張力が弱まる
通気流量 ［$cm^3/(cm^2 \cdot s)$］	452	140	29.6

5.2 膜の有無及び膜材特性が室内熱環境に与える影響

5.2.1 実験の目的

膜の無い天井カセット方式と網目が小孔となっている織物状の多孔膜、そこに不織布を貼り小孔を塞いだ膜を用いた 2 パターンの膜天井空調方式について冷房時の実大実験を行い、熱環境特性、膜の交換空気量及び空調性能の比較を行う。本章では温熱環境特性の結果について報告する。

5.2.2 実験室概要

実験は 2019 年 10 月 14 日～2020 年 1 月 27 日に行った。ただし、本実験は夏期を想定した冷房実験である。実験室は、今までの実験と同様に、内寸 7.0m×6.13m の室を壁(グラスウール 50mm、プラスターボード 12.5mm)で区切り、壁の内側空間(以下、対象空間)は室内、外側空間は屋外を想定し、対象空間は内寸 4.41m×4.01m、高さ 3.44m であるが、本章では、膜あり条件においては、床上 3.14m の高さにガラス繊維を織物上に編み込んで成型した不燃性の膜を貼り実験を実施した。平面図を**図 5.2.1**、断面図を**図 5.2.2** に示す。発熱体は、前章と同様に、人体発熱としてブラックランプ(53W/個)を床上 0.6m の高さに、機器発熱として白熱電球(100W/個)、及び電気毛布(50W/個)を床上に配置し、総発熱量は 812W とした。

温度測定点は**図 5.2.2** 中の P1～P5 で鉛直方向に 7 点と膜上に 3 点設けた。また、PAC の吸込口に 1 点、4 箇所の吹出口に 1 点ずつの 4 点で PAC の吸込・吹出温度(4 箇所平均値)を計測している。グローブ温度測定点は、**図 5.2.1** 中の対象空間中央の鉛直方向に 3 点設けた。CO_2 濃度は P1～P5 で鉛直方向に 4 点、膜上に 3 点、外側空間の北、東、南で 1 点ずつ測定した。

実験は、前章と同様に PAC の運転を開始してから温度や CO_2 濃度の測定を開始し十分に時間がたった後、CO_2(1L/min)ガスを PAC の吸い込み口で発生させ、濃度測定を開始した。ガス発生 3 時間後に測定を終了した。

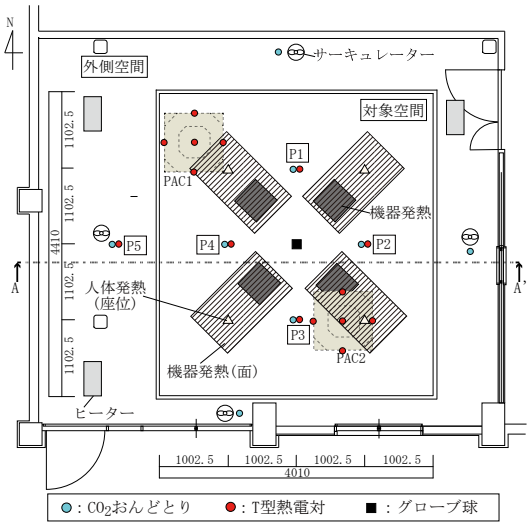


図 5.2.1　実験室平面図[mm]

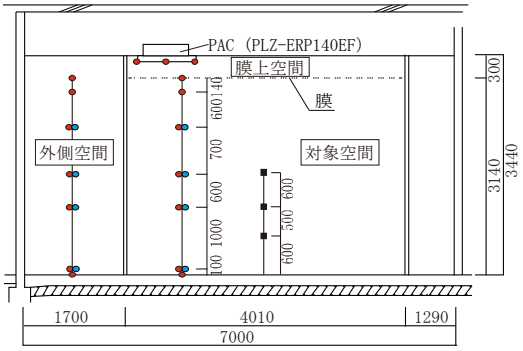


図 5.2.2　A-A 断面図[mm]

5.2.3 実験条件

膜を敷設しなかった条件（以下、膜なし）および膜に不織布を貼った条件（以下、膜（不織布あり））と貼らない条件（以下、膜（不織布なし））の計 3 条件を設定し、表-2 に示す PAC の設定（設定温度、吹出風量、吹出角度）や内部発熱量に関する 6 条件を組み合わせ、計 18 ケースの実験を行った。なお吹出角度は天井水平面からの吹出角度である。膜の材質はガラス繊維で編まれた三軸織物(SG-1003:サカセアドテック社)を用いて、膜(不織布なし)は通気流量が 452cm^3/cm^2/s、膜(不織布あり)は通気流量が 140cm^3/cm^2/s である。3、4 章で用いた膜(以下、長尺膜)の通気流量は 29.6cm^3/cm^2/s であったので、どちらの膜も長尺膜よりも通気流量が大きくなっている。なお、通気流量[cm^3/cm^2/s]は JIS L 1096 A 法のフラジール形法より、125Pa 下で測定した。また、膜なし条件の PAC 設定温度は、対象空間の温度が膜の敷設時と近い値になるように、膜あり条件よりも PAC 設定温度を 5℃ずつ高くした。

表 5.2.1　実験条件

<table>
<tr><th colspan="2" rowspan="2">条件</th><th rowspan="2">前報名称</th><th colspan="2">PAC設定温度[℃]</th><th rowspan="2">PAC
吹出風量
[m^3/h]</th><th rowspan="2">PAC
吹出角度
[°]</th><th rowspan="2">総発熱量
[W]</th></tr>
<tr><th>膜なし</th><th>膜(不織布なし)
膜(不織布あり)</th></tr>
<tr><td>Case1</td><td>基準</td><td>CaseL-0</td><td rowspan="3">24</td><td rowspan="3">19</td><td rowspan="2">1016×2</td><td rowspan="4">30</td><td>812</td></tr>
<tr><td>Case2</td><td>低熱負荷</td><td>CaseL-0-2</td><td>412</td></tr>
<tr><td>Case3</td><td>風量最小</td><td>CaseL-0-3</td><td>712×2</td><td rowspan="4">812</td></tr>
<tr><td>Case4</td><td>高温設定</td><td>CaseH-0-4</td><td>27</td><td>22</td><td rowspan="3">1016×2</td></tr>
<tr><td>Case5</td><td>60° 吹出</td><td>CaseL-0-5</td><td rowspan="2">24</td><td rowspan="2">19</td><td>60</td></tr>
<tr><td>Case6</td><td>高熱負荷</td><td>CaseL-0-6</td><td>30</td><td>1236</td></tr>
</table>

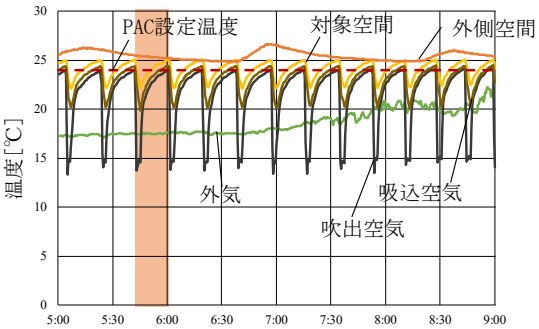
5.2.4 実験結果：PAC の運転状況

図 5.2.3 に各条件の Case1 について、定常状態確認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 がサーモ発停を繰り返して運転したためと考えられる。なお図中の点線は PAC の設定温度を表している。

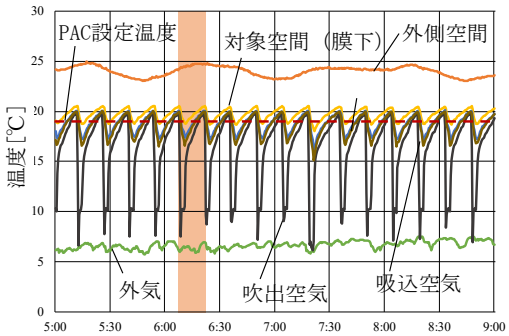
(b)膜(不織布なし)では、PAC のサーモ発停回数が(a)膜なしと比較して多くなっている。これは PAC の設定温度が 19℃と低く壁面貫流熱等の室内負荷が大きくなるためだと考えら

れる。一方、(c)膜(不織布あり)では、PAC のサーモ発停回数は(a)膜なしと同程度となっている。また、対象空間の温度も変動の違いは見られるものの 24℃と概ね同等になっている。このことから、(c)膜(不織布あり)において、膜を介していても PAC の設定温度を適切に設定できれば、通常の天井カセット方式と同等の室内温度に制御できることが示唆された。

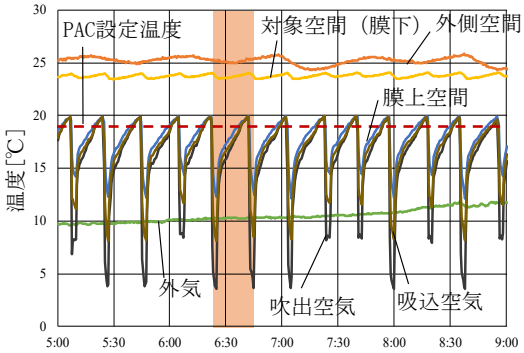
次に対象空間の温度について、(a)膜なし及び(b)膜(不織布なし)では対象空間の温度が PAC の吸込温度と一致しているが、(c)膜(不織布あり)では全く異なる挙動を見せた。さらに、(a)膜なしで対象空間の温度が 3℃程度の幅を持って変化していることに対して、(c)膜(不織布あり)では 0.7℃程度に抑えられており、温度変化の少ない空間を作り出すことができていることが分かる。なお、(b)膜(不織布なし)では対象空間の温度変化の幅は 2.6℃程度となっており、(a)膜なしと比較して大きな差異とはなっていない。



(a) 膜なし　Case1



(b) 膜(不織布なし)　Case1



(c) 膜(不織布あり)　Case1

図 5.2.3　温度経時変化

5.2.5　実験結果：鉛直温度分布

図 5.2.4 に各ケースの鉛直温度分布を示す。この鉛直温度分布は、外気変動が小さく天候の影響を受けにくい日の出前の 1 周期のデータを平均した値を使用した(図 5.2.3 中の網掛けで示す)。全条件を通して、FL+100mm と FL+1700mm 間での温度差が ASHRAE55 と ISO7730 で推奨している 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、対象空間が十分冷えていることがわかる。

次に、ケース間での比較を行うと、(a)膜なし及び(b)膜(不織布なし)では、PAC の設定温度を変更した Case4　以外の 5　ケースについて、分布が概ね一致していることが分かる。一方で、(c)膜(不織布あり）においては、Case1 では 24.0℃、Case2 では 22.1℃, Case6 では 26.4℃（いずれも高さ 1100mm の数値、以下共通）となっており、PAC 設定温度が同じであっても、対象空間の内部発熱量の違いによって鉛直温度分布に差異がみられることが分かる。このことから、(a)膜なし及び(b)膜(不織布なし)では対象空間の熱負荷発生量に応じて PAC が運転して室温を制御できているが、(c)膜(不織布あり）　では、対象空間の室内負荷の違いによって、対象空間の温度が変わってしまうことが示唆されている。

また、(c)膜(不織布あり）において、Case1 と Case5 では大きな差異は見られないことから PAC 吹出角度が鉛直温度分布に及ぼす影響は少ない一方で、Case3 では 25.8℃、Case4 では 26.4℃となっており、Case1 と比較して鉛直温度分布に差異がみられる。

以上のことより、(c)膜(不織布あり）では、内部発熱などの熱負荷が刻々と変化していく対象空間において安定した温度を保つために、運転制御方法を構築する必要があり、その方法として PAC 吹出風量や PAC 設定温度の操作、膜上空気の膜下への強制循環が考えられる。また、(b)膜(不織布なし)の結果は 3 章で示した空気式の有孔天井（パンチングメタル）による空気式放射空調方式と似た温度プロフィールとなっていることもわかる。

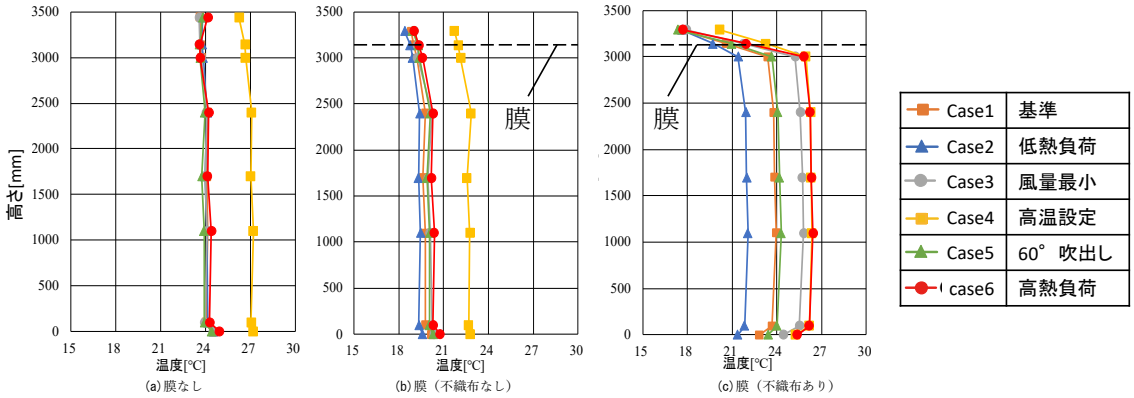


図 5.2.4　膜条件ごとの垂直温度分布

5.2.6 グローブ温度

図 5.2.5 に各膜条件の Case1 のグローブ温度を示す。全ケースを通して、高い位置ではグローブ温度が低く、低い位置では高くなっており、室上部では膜からの冷放射、室下部では

発熱体からの放射熱の影響が大きいと考えられる。

(a)膜なしでは、膜からの放射効果は得られないため、室下部で発熱体からの放射熱の影響が確認出来る。(b)膜(不織布なし)では、温度帯の差はあるが(a)膜なしとほぼ同じ分布となり、対流成分による熱処理の割合が大きく、膜による冷放射効果は小さいと示唆される。一方で、(c)膜(不織布あり)では室上部でグローブ温度が空気温度よりも低く、これは膜の冷放射による影響と考えられる。また、(c)膜(不織布あり)では、床面温度が空気温度より低く、(a)膜なし及び(b)膜(不織布なし)と比較しても膜による冷放射効果が大きいと考えられる。従い、(c)膜(不織布あり)では膜の冷放射による快適性の向上が期待できる。

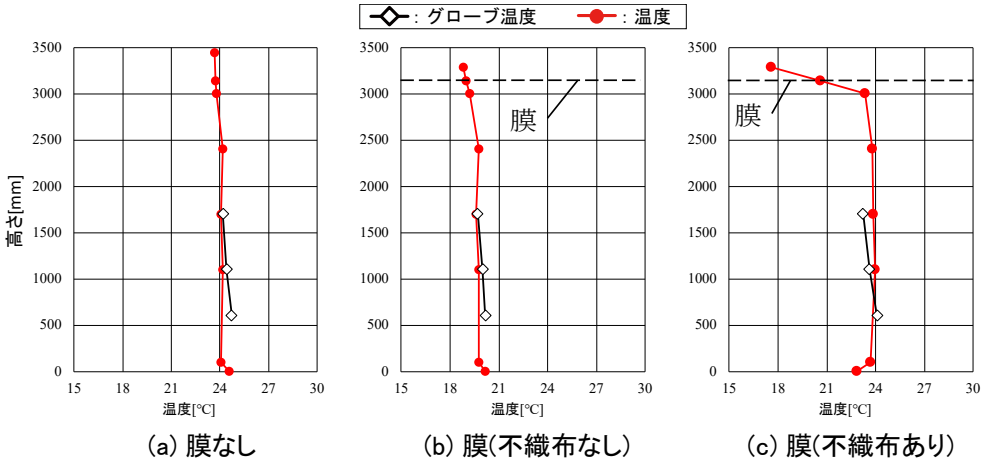


図 5.2.5　グローブ温度と鉛直温度分布（CASE１）

5.3　膜上下交換空気量による検討

5.3.1 はじめに

本節では、CO_2濃度の計測結果から、膜を通した交換空気量を算出した結果について考察し、本システムの空気循環性能、換気性能を検証する。なお、交換空気量の算出方法は3章、4章と同様としているため、本章では算定結果と考察のみとする

5.3.2 膜上下交換空気量の算定結果

表 5.3.1 に膜上下交換空気量の算定結果を示す。不織布が有ることで膜上下交換空気量が 20%以下になっていることが分かる。前章の結果も踏まえると、膜（不織布あり）において、膜上と膜下の空気を強制循環させることで、膜下の冷却能力向上が可能であることを示唆している。

膜（不織布なし）では条件による違いは見られないが、膜（不織布あり）ではPAC吹出角度を 60° とした Case5 の交換空気量は、Case1 との差は見られず吹出角度が交換空気量に与える影響は小さいと考えられる。一方で、Case1(PAC風量: 1016m^3/h)とCase3(PAC風量: 712m^3/h)を比較すると、PAC風量と Q_1、Q_2が概ね等しい割合で減少しており、PAC風量が交換空気量に与える影響は大きいと考えられる。

Case3以外でもケース間で差異が見られるため、交換空気量に影響を与える因子を検討すべく、交換空気量と膜上下温度差（=膜上空間の空気温度と対象空間の空気温度との差）との相関を検討した。膜(不織布あり)条件下でのQ_1、Q_2それぞれについての相関図を**図 5.3.1** に示す。ただし、Case3(PAC風量: 712m^3/h)はPACの設定風量が異なるため、他の５ケースでの相関を検討した。3章の結果では、膜上下温度差が大きくなるほど交換空気量が多くなる正の相関が見られたが、本実験結果では Q_1、Q_2 共に膜上下温度差と正の相関はあるものの、相関係数は共に0.38と低かった。この結果より、本章で用いた膜（不織布あり）では、膜上下温度差から膜上下交換空気量を算出する場合の精度に影響することが分かった。

表 5.3.1　各 Case における交換空気量

条件			流量 [m^3/h]					
			Q1	*Q2*	*Q3*	*Q4*	*Q5*	*Q6*
膜（不織布なし）	Case1	基準	1105.9	1105.9	0.0	0.0	28.2	28.2
	Case2	低熱負荷	1105.5	1105.5	0.0	0.0	28.7	28.7
	Case3	風量最小	1110.8	1110.8	0.0	0.0	24.8	24.8
	Case4	高温設定	1103.7	1103.7	0.0	0.0	28.3	28.3
	Case5	60° 吹出し	1107.2	1107.2	0.0	0.0	27.6	27.6
	Case6	高熱負荷	1107.5	1107.5	0.0	0.0	26.9	26.9
膜（不織布あり）	Case1	基準	202.6	204.6	0.0	2.0	25.6	27.6
	Case2	低熱負荷	223.2	228.5	0.0	5.3	25.1	30.3
	Case3	風量最小	136.4	142.5	0.0	6.1	16.1	22.2
	Case4	高温設定	216.9	222.0	0.0	5.1	20.4	25.6
	Case5	60° 吹出し	205.9	211.3	0.0	5.5	20.9	26.4
	Case6	高熱負荷	239.7	246.6	0.0	6.9	20.0	26.9

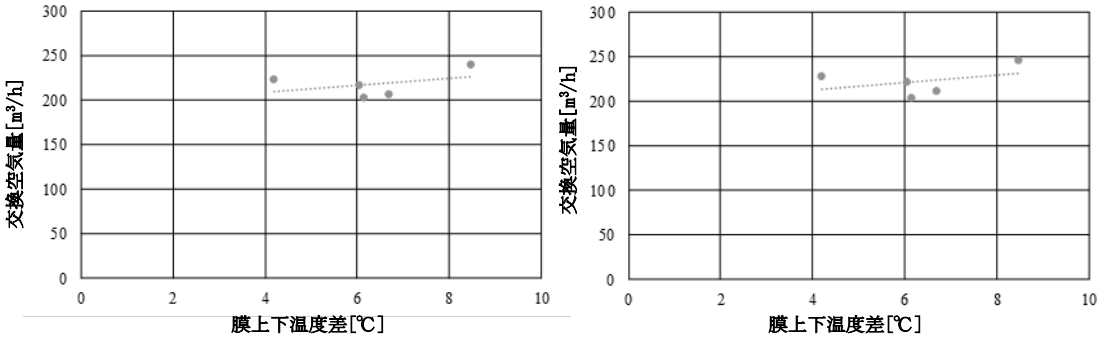
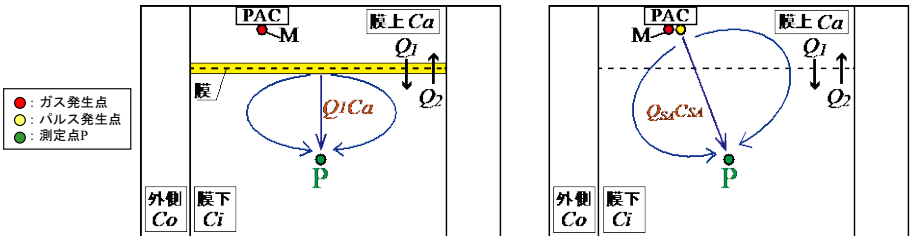


図 5.3.1　膜(不織布あり)条件における膜上下温度差と膜上下交換空気量の相関

5.4　局所平均空気齢及び室平均空気齢による検討

5.4.1 はじめに

本節では、前章と同様に、CO_2濃度の計測結果から、局所平均空気齢を算出した結果について考察し、本システムの空気循環性能を検証する。本章では膜上からの冷気による空気齢に加え、PAC 吹出口からの吹出空気による空気齢を算出し、空気循環性能を検証する。**図 5.4.1** に膜上からの冷気による空気齢と PAC 吹出口からの吹出空気による空気齢の算出概要図を示す。なお、算出方法は前章と同様のため省略する。

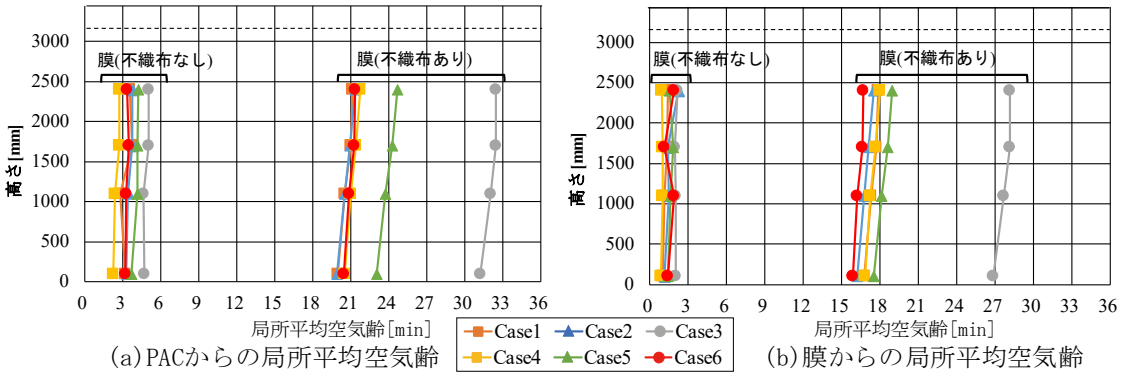


(a)膜上からの冷気による空気齢　　(b)PACからの給気による空気齢

図 5.4.1　空気齢の算出概要図

5.4.2 局所平均空気齢の鉛直分布

図 5.4.2 に膜(不織布なし)及び膜(不織布あり)における各条件での PAC・膜からの局所平均空気齢 鉛直分布を示す。PAC・膜からの空気齢は全条件において、均一な鉛直分布であり、冷気が室下部まで到達していることがわかる。ケース間で比較すると、膜(不織布なし)ではケース間の差異は小さいが、膜(不織布あり)では Case3(風量最小)のみが大きな値となっている。これより、PAC の吹出風量が空気齢に与える影響が大きいと考えられる。また、膜(不織布あり)では、床面付近の測定点で局所平均空気齢が若干小さくなっている。これは、初めに壁近傍を伝って下降した冷気がいち早く、室中央に集まり、測定点に到達している可能性が示唆される。



(a)PACからの局所平均空気齢　　(b)膜からの局所平均空気齢

図 5.4.2　膜（不織布なし）と膜（不織布あり）における局所平均空気齢

5.4.3 室平均空気齢による室全体での冷気分配性能評価指標

表 5.4.1 に膜(不織布なし)及び膜(不織布あり)における各条件での室平均空気齢と室空気交換効率の算定結果を示す。(旧)は前章まで用いた膜の結果である。室平均空気齢を膜の

条件間で比較すると、膜(不織布あり)では、膜(不織布なし)の倍の値であることから、不織布の有無が冷気分配性能に与える影響は大きいと示唆される。

次に、室空気交換効率の結果から、膜(不織布あり)の膜からの空気齢では、いずれのケースも約 0.5 であることから、完全混合状態が実現され、各測定点に一様に冷気が行き届いていることが確認できた。

また、膜からの空気齢 Case1(基準)を前章の循環実験と本実験の膜（不織布あり）を比較すると、空気齢が半分以下となっており、冷気分配性能の大幅な改善がみられた。

表 5.4.1　膜（不織布なし）と膜（不織布あり）における室平均空気齢と室空気交換効率

		室平均空気齢[min] (赤字) 名目換気時間[min]	室空気交換効率[-]
PACからの空気齢	Case1	1.8 / 3.3	0.27
	Case2	1.8 / 3.6	0.25
	Case3	2.5 / 4.9	0.26
	Case4	1.8 / 2.5	0.36
	Case5	1.8 / 4.1	0.22
	Case6	1.8 / 3.3	0.27
膜からの空気齢	Case1	1.2 / (3.0)	(1.25)
	Case2	1.6 / (3.0)	(0.96)
	Case3	2.0 / (3.0)	(0.74)
	Case4	0.9 / (3.0)	(1.62)
	Case5	1.6 / (3.0)	(0.96)
	Case6	1.6 / (3.0)	(0.95)

0　2　4　6　8　10 [min]

(b)膜（不織布あり）

		室平均空気齢[min] (赤字) 名目換気時間[min]	室空気交換効率[-]
PACからの空気齢	Case1	1.8 / 20.7	0.04
	Case2	1.8 / 20.7	0.04
	Case3	2.6 / 32.0	0.04
	Case4	1.8 / 21.2	0.04
	Case5	1.8 / 23.9	0.04
	Case6	1.8 / 21.0	0.04
膜からの空気齢	Case1	18.0 / 17.4	0.52
	Case2	16.4 / 16.9	0.48
	Case3	26.8 / 27.7	0.48
	Case4	16.8 / 17.4	0.48
	Case5	17.7 / 18.3	0.48
	Case6	15.2 / 16.3	0.47
	Case1(旧)	40.4 / 41.1	0.49

0　10　20　30　40 [min]

5.5 前章で用いた膜材との比較

5.5.1 はじめに

膜材の違いによる冷房性能への影響の検討を行うため、3 章と本章の実験結果の比較を行った。3 章での実験（以下、長尺膜実験）の条件を**表 5.5.1** に示す。長尺膜実験では、交換換気をより促すため、同じ実験室内に小型軸流ファン(三洋電機、109P1348S101、以下ファン)4 台を膜表面に設置し、ファンの風向きを上向き運転で実験を行っている。ここで CaseL-0 はファン風量が 0m^3/h で本報における Case1 と同じ実験条件、CaseL-460 はファン風量が 460m^3/h で本章における Case1 に対し、強制的に膜上下の空気を交換している条件となっている。また、長尺膜の通気流量は 29.6cm^3/cm^2/s であり、本報よりも通気性は低い材料となっている。なお、長尺膜も表面に不織布が貼られていることから膜（不織布あり）との比較を行う。

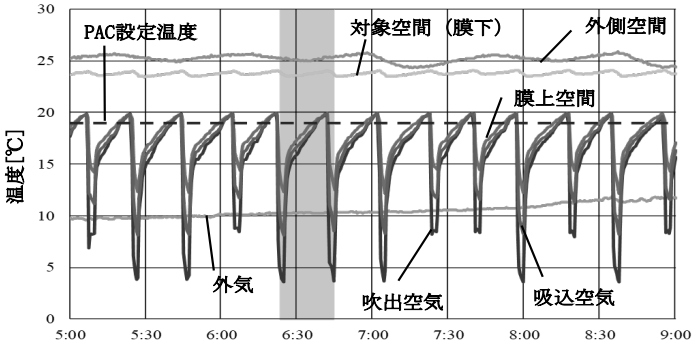
表 5.5.1　長尺膜実験条件

条件	ファン		PAC 設定温度[℃]	PAC吹出し風量[m^3/h]	PAC吹出し角度[°]	総発熱量[M]
	循環回数[回/h]	風量[m^3/h]				
CaseL-0	0	0	19	1016×2	30	812
CaseL-460	8	460				

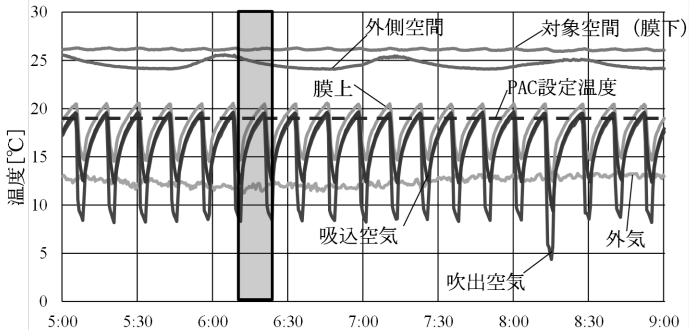
5.5.2 PAC の運転状況

図 5.5.1 に長尺膜実験と膜（不織布あり）Case1 の定常状態確認後における各部の温度経時変化を示す。膜（不織布あり）Case1 と比較すると、本章での膜（不織布あり）の方が、PAC のサーモ発停の回数が少なくなっている。これは、PAC 運転時において、本章の膜(不織布あり)の方がより通気性が高く、膜全面で膜上下の空気が交換されていることにより、対象空間の室内発熱の処理量が増えることで、次の運転までの時間が伸びたと考えらえる。

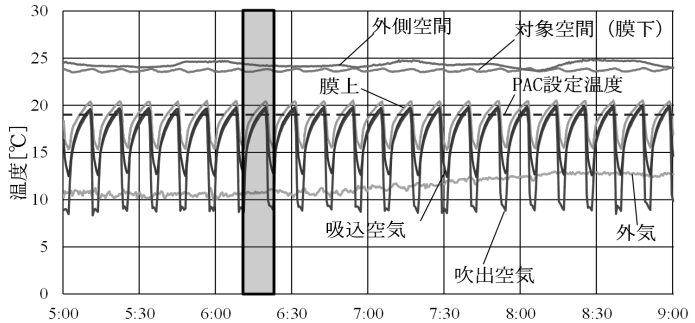
以上より、本章の膜(不織布あり)を用いることで、対象空間の温度変化を抑えつつ PAC のサーモ発停回数が減り、機器寿命など PAC への悪影響を抑えることができ、長尺膜よりも実用性が高まったといえる。



(a) 本実験 Case1



(b) 長尺膜 CaseL-0（循環ファン停止）



(c) 長尺膜 CaseL-460（循環ファン 460 ㎥/h）

図 5.5.1　本実験と長尺膜実験における温度経時変化

5.5.3 鉛直温度分布及びグローブ温度の比較

図 5.5.2 に鉛直温度分布及びグローブ温度の比較について示す。いずれも高い位置では室温に対してグローブ温度が低く、また床面温度は空気温度よりも低くなっており、どちらも膜からの冷放射の効果が得られていることがわかる。ここで、空気温度とグローブ温度の大小が入れ替わる交点の高さを破線で図中に示した。内部発熱は床面付近で発生しているため、この交点が低い方が発熱体から膜への放射熱量が高いと言える。言い換えると、(c)CaseL-460 よりも(a)膜(不織布あり)の方が冷放射効果大きいと言える。

以上から、長尺膜より本報の膜(不織布あり)の方が、膜上下交換空気量を増大させつつ、冷放射効果による快適性も維持できることが示唆された。

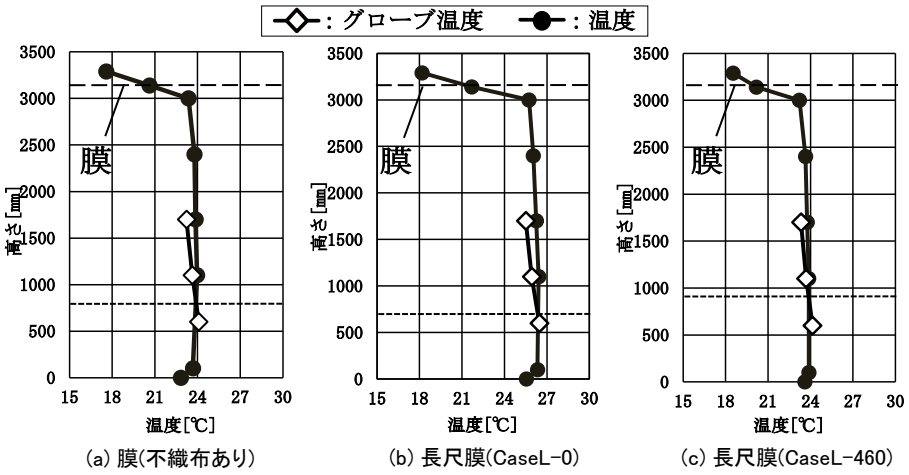


図 5.5.2　長尺膜と本章の膜における鉛直温度分布とグローブ温度

5.5.4 膜上下交換空気量の比較

表5.5.2に膜上下交換空気量の比較結果を示す。長尺膜実験(CaseL-0)のQ1、Q2が約80m³/hに対し、本報の膜（不織布あり）は約200m³/hとなっており、本報の膜（不織布あり）の方が、交換空気量が約2.5倍増大していることがわかる。図-10において、(b)CaseL-0よりも(a)膜（不織布あり）の方が温度は低い。これは、交換空気量の差による対流成分による熱処理の割合が、(a)膜（不織布あり）の方が高いためと考えられる。また、(c)CaseL-460は、交換換気をより促すためにファンを稼働しており、(a)膜(不織布あり)よりも交換空気量が大きい値を示しているが、図-10の結果から鉛直温度分布は (a)膜(不織布あり)の結果と大差なく、ファンが無くとも同等の室内冷房効果が得られていることがわかる。

本システムでは、空調の立ち上り時や大きな負荷変動が生じた際にファンによる膜上下強制換気が必要となる。上記より、本報の膜（不織布あり）を用いることで長尺膜に比べ、ファン運転時間だけでなくファン台数も削減できる可能性を有しており、省エネルギー・省コストの観点からも実用性が高まったと言える。

表 5.5.2　膜上下交換空気量の比較

	流量[m³/h]					
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
膜（不織布あり） Case1	202.6	204.6	0.0	2.0	25.6	27.6
長尺膜実験 CaseL-0	82.5	89.5	0.0	7.0	12.2	19.2
長尺膜実験 CaseL-460	320.3	348.8	0.0	28.5	0.0	28.5

5.6 DR(Draught Rate)を用いた快適性の検証

5.6.1 はじめに

本空調システムのメリットは空気式浸み出し放射空調方式でありながら水式放射空調のドラフトレス空間が実現できるうることである。また本章では、前章まで用いていた膜材よりも通気抵抗が小さい膜材を採用していることもあり、ドラフト環境について、室内の風速分布の結果からDR値(Draught Rate)を算出し、室内の快適性を検証する。

P.O.Fangarら[1)]により提案されたDraught Rateは、ドラフト抑止効果の評価指標として、居住者のドラフトに対する不満足者率を表す指標で、式(1)により求める。

ISO 7730[2)]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。

$$DR = (34 - tp)(Up - 0.05)^{0.62}(0.37UpTu + 3.14) \quad \cdots(1)$$

DR：Draught Rate [%]　　tp：局所温度[℃]

Up：平均スカラー風速[m/s]　　Tu：乱れの強さ[%]

5.6.2 測定概要

風速測定は超音波風速計(DA-700 型,TR-92T 型プローブ：株式会社パナソニック)を用いて、定常状態を確認後に行った。測定間隔は10[Hz]、測定時間は1分間に設定した。測定点は**図5.6.1**に示す18点を設け、測定高さは1.1mに固定した。膜なし条件では測定点番号1～9の9点で測定した。

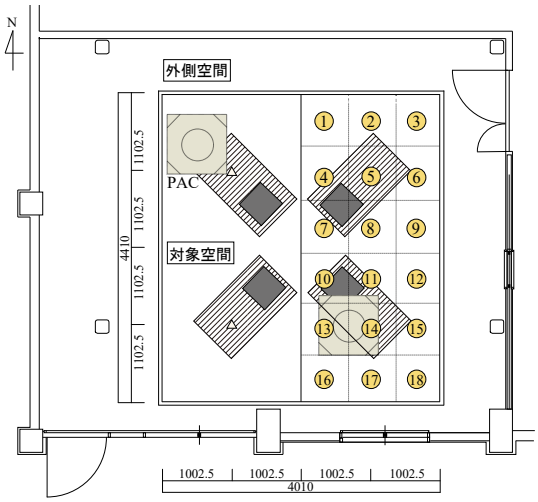


図5.6.1 風速測定平面図[mm]

5.6.3 風速分布

図5.6.2に高さ1.1mにおける、下向きを正とした鉛直方向の風速分布を示す。青い部分は下向き気流、赤い部分は上向き気流を表している。また、膜の2条件の分布図下部にある黒枠の四角形は南東に位置するPACを示す。

(a)膜なしでは下向き気流、膜ありの(b)及び(c)の 2 条件では上向き気流が発生していることがわかる。下向き気流は PAC からの吹出し気流、上向き気流は発熱体のプルームに起因するものだと考えると、ドラフトの原因となる PAC の吹出気流を膜設置により緩和できていることが示唆された。

PAC の吹出し角度の違いでケース間比較すると、膜なし条件では大きな違いが見られた。Case1(基準・30° 吹出し)では、PAC から遠くに位置する壁際の測定点②で下向き気流が大きく、分布図全体的に下向き気流が確認できる。一方で、Case5(60° 吹出し)では PAC 近くに位置する測定点⑧で下向き気流が大きく、PAC から遠くなるほど上向き気流が大きくなる分布となり、測定範囲内で風速の差が大きいことがわかる。よって、PAC の設定条件により風速分布に大きな差が生じるため、状況に応じた PAC の設定が必要である。また、膜の 2 条件ではケース間で大きな差は見られなかった。

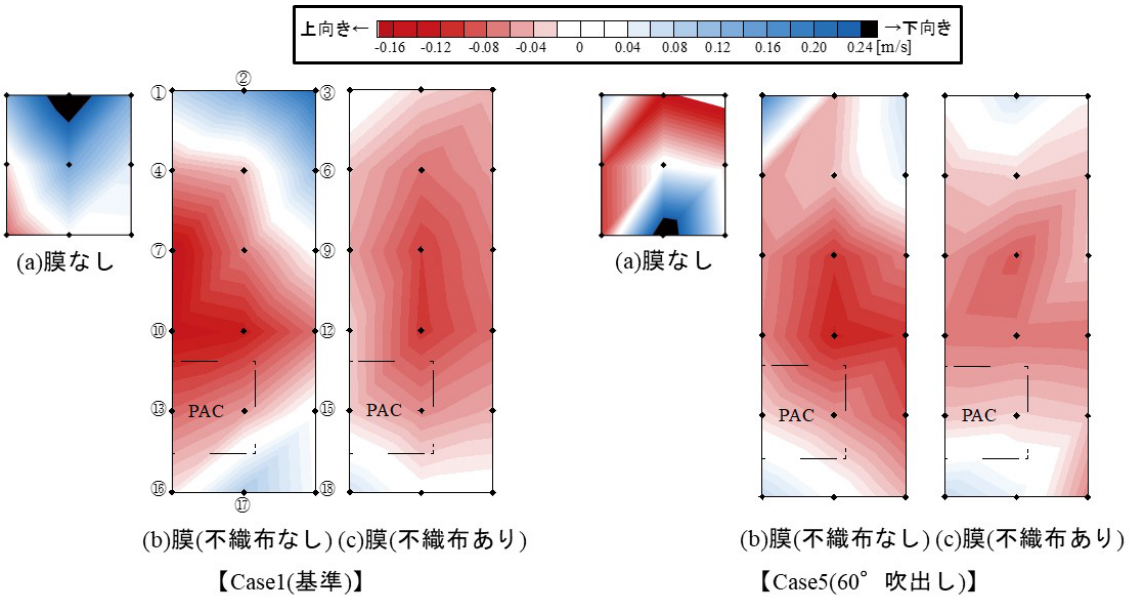


図 5.6.2 風速測定結果

5.6.4 DR(Draught Rate)

図 5.6.3 に DR の大きさをバブルの面積で表現した算出結果を示す。また、温度によるパラメータの影響をなくし、風速のみで DR 評価をするために、tp=24℃に固定して DR 評価を行った。この時、高さ 1.1mにおける温度が 24℃に近いケースである、(a)膜なし,(c)膜(不織布あり)では Case1、(b)膜(不織布なし)では Case4 の風速データを採用した。

膜の条件間で比較すると、(c)膜(不織布あり)ではドラフト環境が改善され、多くの測定点がカテゴリ A 評価となった。また、測定点間での差は小さく、局所的なドラフトの発生は抑制されている。一方で、(a)膜なし、(b)膜(不織布なし)ではカテゴリ B 及び C 範囲にあり、測定点②、③は DR≧30%で局所的に高リスクとなる箇所が発生した。**図 5.6.2** の風速分布においても同様の傾向がみられた。これは 30° で吹出された冷気が壁近傍を伝って下降

し、影響を及ぼしていると考えられる。

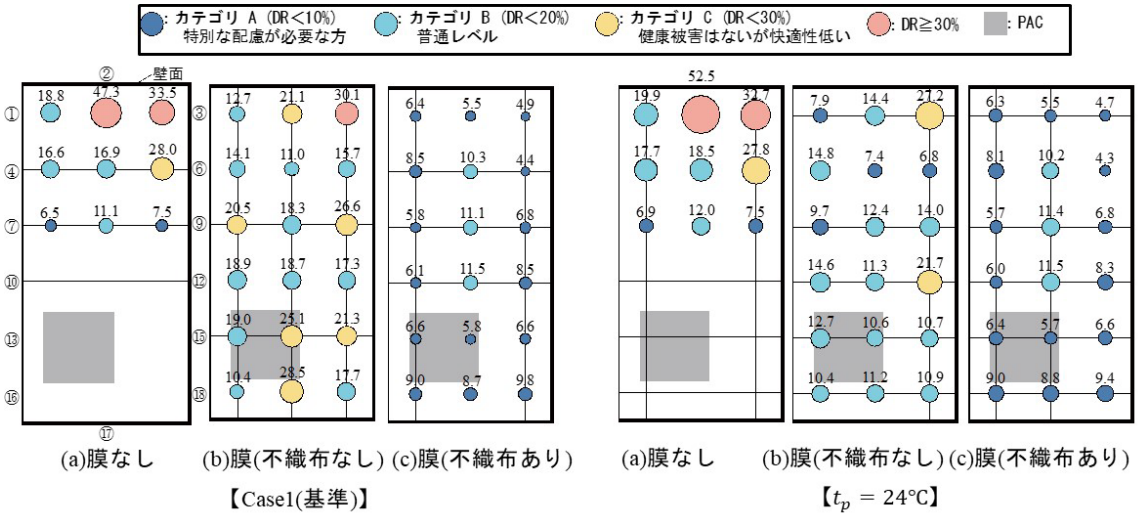


図 5.6.3　DR 算定結果

5.7 PAC の空調性能及び省エネルギー性能の検証

5.7.1 はじめに

本システムでは膜上の PAC にて、膜を介して空調負荷を処理する。これは、膜上下交換換気による対流熱と膜表面からの放射熱及び伝達熱による処理となる。そこで、前章と同様に、対象空間（膜下）の内部発熱と貫流熱及び給排気による熱の合計を室内負荷とし、PAC の顕熱処理量を比較し、空調性能の検証を行う。

5.7.2 室内負荷と PAC の顕熱処理量及び COP の算出方法

図 5.7.1 および図 5.7.2 に本報での室内負荷算出における測定点と負荷の考え方を示す。対象（膜下）空間の室内負荷は式（2）に示すように対象空間内の内部発熱と各東西南北の 4 壁面からの貫流熱の合計値の和として求めた。なお、各東西南北の壁面からの貫流熱は、式（3）に示すように壁面の表裏で各 9 点ずつ計測した表面温度の平均値の差から壁面の熱コンダクタンス λ/L を 0.655[W/(㎡・K)]として求めた。PAC の顕熱処理量は、式（4）に示すようにあらかじめ計測した吹出風量に固定し、計測した吸込温度と吹出温度から求めた。なお、室内負荷の算出においては、前章にあった換気負荷が今回不要であったが、COP については前章と同様の算出方法のため省略している。

$$q_r = q_H + \sum q \qquad \cdots\cdots(2)$$

$$q = \frac{\lambda(T_o - T_i)}{L} S_w \qquad \cdots\cdots(3)$$

$$q_{pac} = c_p \rho Q_{pac}(\theta_r - \theta_s) \div 3600 \qquad \cdots\cdots(4)$$

ここに、

q_r：	室内負荷	[W]
q_H：	内部発熱	[W]
q：	東西南北各壁面からの貫流熱	[W]
q_{pac}：	PAC の顕熱処理量	[W]
Q_{pac}：	PAC の吹出風量	[㎥/h]
T_i：	室内側 9 点の壁面温度の平均値	[℃]
T_o：	室外側 9 点の壁面温度の平均値	[℃]
θ_r：	PAC の吸込空気温度	[℃]
θ_s：	PAC の吹出空気温度	[℃]
c_p：	空気の定圧比熱(=1,006)	[J/(kg・K)]
ρ：	空気の密度(=1.2)	[kg/㎥]
L：	壁厚	[m]
λ：	壁の熱伝導率	[W/(m・K)]
S_w：	東西南北各壁面の面積	[㎡]

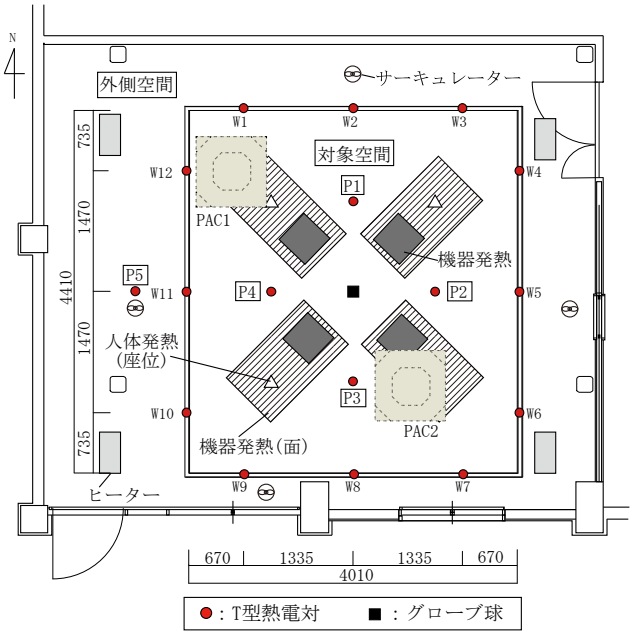


図 5.7.1　室内負荷算出における測定点[mm]

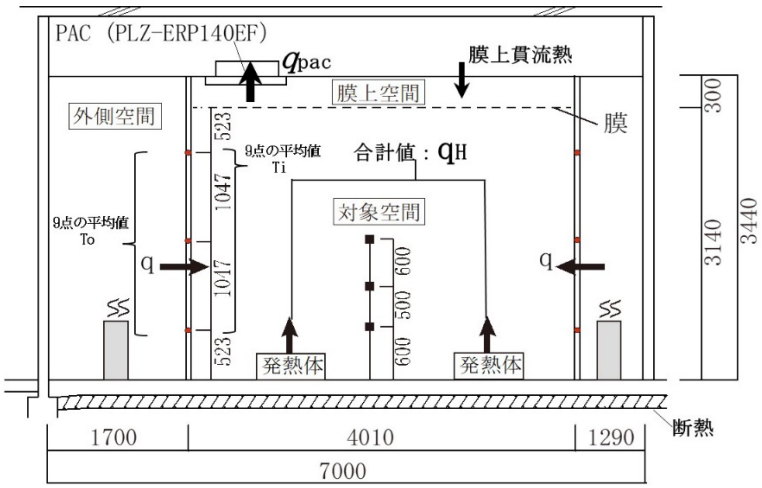
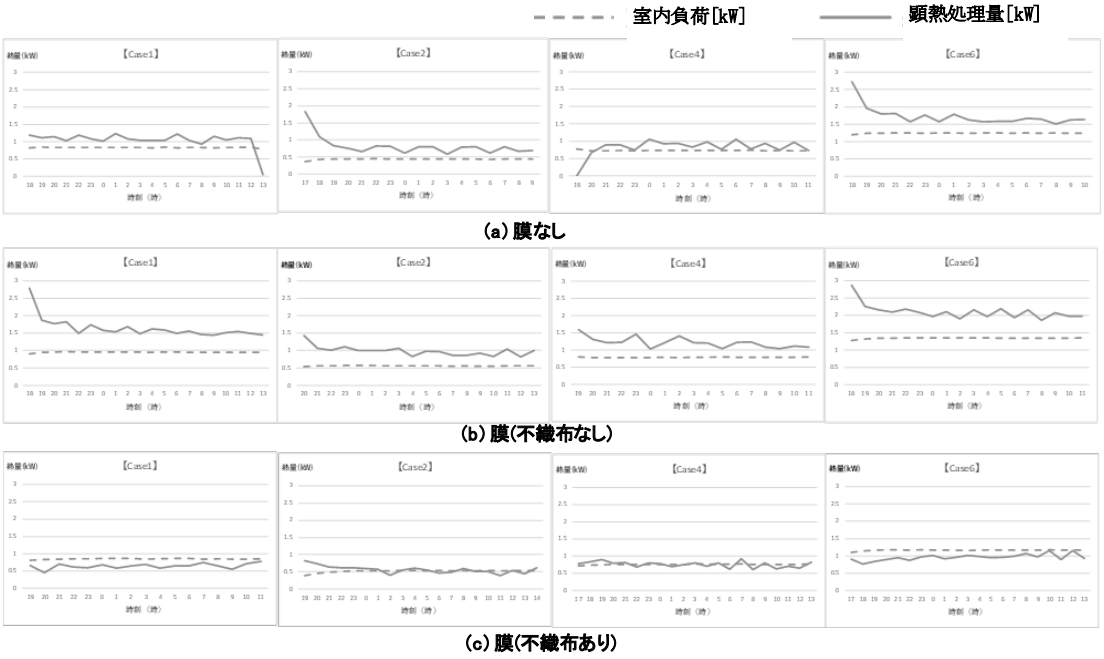


図 5.7.2　室内負荷算出における測定点と負荷の考え方[mm]

5.7.3 PAC の顕熱処理量と室内負荷の時系列比較

膜の有無、不織布の有無における室内負荷と PAC 顕熱処理量の挙動を検証するため、**図 5.7.3** に各条件での Case1、Case2、Case4、Case6 での室内負荷と PAC の顕熱処理量の 1 時間毎の時系列変化を示す。この結果より、どの天井膜条件においても、Case1 と比べて、低内部発熱条件である Case2 では PAC の顕熱処理量が小さく、高内部発熱条件である Case6 では PAC の顕熱処理量が大きくなっている。(a)膜なしでは当然の結果であるが、(b)膜（不織布なし)、(c)膜（不織布あり）において、膜を介していても、PAC の顕熱処理量が室内負荷の大小に追従していることが分かる。また、(a)膜なし Case１と、(c)膜（不織布あり）Case１の室内負荷と室温（図-5 参照）は 24℃とほぼ同等となっているが、**図 5.7.3** の PAC 顕熱処理量は(c)膜（不織布あり）Case１の方が小さくなっている。



(a) 膜なし

(b) 膜(不織布なし)

(c) 膜(不織布あり)

図 5.7.3　室内負荷と顕熱処理量の Case 毎の時系列変化

5.7.4 PAC の顕熱処理量と室内負荷及び COP の期間平均値

表 5.7.1 に各条件における室内負荷とその内訳、PAC の顕熱処理量と COP、PAC の顕熱処理量と室内負荷の差及び膜上空間からその上部天井裏への貫流熱（以下、膜上貫流熱）の期間平均値（安定している 0 時から 10 時までの 11 時間の平均値）を示す。表 5.7.1 の結果より、全体的に壁面貫流熱は小さく室内負荷の大半が内部発熱となっていることから夏期のインテリア想定での実験を再現できている。

また、表 5.7.1 の結果より、膜なし及び膜（不織布なし）において、PAC の顕熱処理量と室内負荷の差（q_{pac} - q_r）が正の値となっており室内負荷に対して PAC の顕熱処理量が過剰となっている。一方、膜（不織布あり）においては、PAC の顕熱処理量と室内負荷の差（q_{pac} - q_r）が負の値となっており PAC の顕熱処理量が不足気味となっている。これは、図-4 を参照すると、対象（膜下）空間内で、膜なしにおいては、PAC のサーモ ON 中の 15℃程度の冷たい空気が、膜あり（不織布なし）においては、常時 19℃前後の空気が隙間風等により外側空間に漏洩したと推察できる。次に、参考値として中心一点のみ計測していた膜上空間の上部天井裏の温度を用いて、断熱の施されていない膜上空間からの膜上貫流熱を算出した。なお膜上貫流熱は、天井裏と膜上との温度差と天井材（ブラスターボード:9 mm）の熱貫流率 6.44[W/(㎡・K)]から求めた。表 5.7.1 の結果より、膜上貫流熱はほぼ負の値となっており膜上空間に上部から冷熱が供給されている傾向にあると言える。このことから、膜（不織布あり）においては、膜上貫流熱をこの不足分に補填しているような状態になっている。

以上より、膜を介していることで、対象（膜下）空間の目標温度に対する低温側への変

動が小さくなり、それに伴い発生しうる室内負荷を小さくできることが示唆された。

次に PAC の COP に着目すると、各膜パターンで PAC 風量が小さい Case3 が最も高くなっていることがわかる。また、全条件をみると負荷率が高い条件で COP が高い傾向にある。今回の実験は風量をサーモ ON/OFF 時に常時一定としており、COP にはファン電力が含まれていることを踏まえると、ファン電力が COP に与える影響が非常に大きいといえる。膜（不織布あり）の COP は 4 から 7 程度となっており膜なしと比較して COP が小さくなっているが、これは膜（不織布あり）のサーモ OFF 時間が長い、つまりファンのみの運転時間が長くなり、結果として負荷率が低くなったためと考えられる。PAC の適切な選定と制御にて同等の省エネルギー性能を目指す必要が示された。

表 5.7.1　室内負荷と顕熱処理量及び COP の期間平均値

天井膜	実験条件	PACの設定温度[℃]	Q_{pac}:PACの循環風量[m^3/h]	q_H:内部発熱[kw]	Σq:壁面貫流熱[kw]	q_r:室内負荷[kw]	q_{pac}:PACの顕熱処理量[kw]	q_{pac} - q_r:処理量と負荷の差[kw]	膜上貫流熱[kw]	PAC 負荷率[-]	PAC COP[-]	外気温[℃]
膜なし	Case1	24	1016×2	0.812	0.02	0.83	1.08	0.25	-0.07	0.09	7.25	18.9
	Case2			0.412	0.03	0.44	0.72	0.28	-0.02	0.06	5.43	19.9
	Case3		712×2	0.812	0.01	0.82	0.99	0.17	-0.09	0.08	9.28	16.8
	Case4	27	1016×2		-0.08	0.73	0.91	0.18	-0.15	0.07	7.13	19.0
	Case5	24			0.02	0.83	1.03	0.20	-0.07	0.08	6.93	17.1
	Case6			1.236	0.00	1.24	1.62	0.38	-0.06	0.13	8.57	18.8
膜（不織布なし）	Case1	19	1016×2	0.812	0.14	0.95	1.54	0.59	-0.08	0.12	10.79	7.1
	Case2			0.412	0.13	0.54	0.94	0.40	-0.07	0.08	7.98	8.4
	Case3		712×2	0.812	0.14	0.95	1.38	0.43	-0.09	0.11	12.33	8.8
	Case4	22	1016×2		0.03	0.84	1.16	0.32	-0.24	0.09	9.50	6.9
	Case5	19			0.13	0.94	0.96	0.02	-0.13	0.08	6.86	7.3
	Case6			1.236	0.11	1.35	2.03	0.68	-0.12	0.16	12.62	8.6
膜（不織布あり）	Case1	19	1016×2	0.812	0.04	0.85	0.64	-0.21	-0.11	0.05	4.20	10.5
	Case2			0.412	0.13	0.54	0.53	-0.01	-0.05	0.04	4.40	6.0
	Case3		712×2	0.812	0.00	0.81	0.88	0.07	0.00	0.07	7.58	10.2
	Case4	22	1016×2		-0.05	0.76	0.74	-0.02	-0.12	0.06	5.45	9.3
	Case5	19			0.04	0.85	0.57	-0.28	0.01	0.05	3.84	7.6
	Case6			1.236	-0.07	1.17	1.00	-0.17	-0.08	0.08	6.13	7.8

5.8 本章のまとめ

本章では、前章で浮き出てきた、膜の抵抗の高さ、耐久性、メンテナンス性といった実用化への課題を解決するために、今まで用いていた膜材よりも通気流量が大きく（抵抗が小さく）、浸み出し放射空調として実績のあるパンチングメタルと同等の使い勝手となりうる膜材にて実大実験を行った。合わせて天井カセット方式との比較も行い、下記知見と課題が得られた。

① 温熱環境の結果から、膜(不織布あり)では、膜なしと膜(不織布なし)に比べ、温度変化の少ない空間となっていること、膜による冷放射効果が大きいことが示された。

② 温熱環境の結果から、膜(不織布あり)では、外乱に対して、対象（膜下）空間の温度を保つために、PAC 吹出風量や PAC 設定温度の操作、膜上空気の膜下への強制循環などの運転制御方法を構築する必要があることが分かった。

③ 膜上下交換空気量の結果から、不織布が有ることで膜上下交換空気量が 20%以下になることが分かった。

④ 交換空気量と膜上下温度差の相関をみると、前章までの長尺膜とは異なり相関係数が低く、本章で用いた膜（不織布あり）では、膜上下温度差から膜上下交換空気量を算出する場合の精度に影響することが示唆された。

⑤ 空気齢の算出結果より、PAC・膜からの空気齢は全条件において、均一な鉛直分布であり、冷気が室下部まで到達していることがわかった。また、膜(不織布あり)では PAC の吹出風量が空気齢に与える影響が大きいことが示唆された。

⑥ 前章の長尺膜実験との比較から、本章での膜材は、膜上下交換空気量と空調能力の増大、PAC のサーモ発停回数の減少など実用性が高まった上に、膜の冷放射効果による快適性も維持できることが示唆された。

⑦ 膜からの空気齢の算出結果から、本章の膜（不織布あり）は前章の膜に比べ、空気齢が半分以下となっており、冷気分配性能の大幅な改善がみられた。

⑧ 居住者のドラフトに対する不満足者率を表す指標である Draught Rate の算出結果から、膜なし及び膜（不織布なし）では局所的に高リスクとなる箇所が発生していた一方、膜(不織布あり)ではドラフト環境が改善され、多くの測定点が最も快適側の評価となった。また、測定点間での差は小さく、局所的なドラフトの発生は抑制されていることが分かった。

⑨ 室内負荷と PAC の顕熱処理量の結果から、膜（不織布あり）では、膜を介していても PAC にて室内負荷に応じた熱処理が行われていることが示された。

⑩ PAC の COP の結果から、膜（不織布あり）では 4 から 7 程度と、膜なしと比較して COP が小さくなった。この原因は膜（不織布あり）のサーモ OFF 時間が長い、つまりファンのみの運転時間が長くなり、結果として負荷率が低くなったためと考えられ、PAC の適切な選定と制御にて同等以上の省エネルギー性能を目指す必要性が示された。

以上より、本研究で提案したもう一つの通気流量が大きい織物式膜材にて実大実験を実施した結果、前章までの課題が解決された。合わせて、通常の天井カセット方式との比較を行うことで、目論見通りのドラフトレス空間が実現できた。一方で、PAC の設定温度の適切な制御や、外乱の影響、立上がり時などのため膜上下交換換気量を負荷に合わせて増大させる設備及びその制御など設計手法としての課題が明確になった。次章では同じ膜材により暖房時の実大実験を行い、暖房性能について検証する。

参 考 文 献

1) Fanger.P.O, A.K.Melikov, H.Hanzawa and J.Ring: Air Turbulence and Sensation of Draught, Energy and Buildings, 12(1988) pp21-39, 1988

2) ISO 7730: Moderate thermal environment-Determination of the PMV and PPD incides and specifi cation of the conditions for thermal comfort, International Organization for Standardization, 2005

第６章　織物膜天井における暖房実大実験

6.1 はじめに

4 章では実用的なシステムとして確立すべく、膜上下交換空気量を増やす方法と換気方式の検討を行うために、膜上と膜下の空気を強制的にファンで循環させた場合と、外気取入を想定した場合の実大実験を実施した。合わせて、汎用性も持たせるため、放射効果、PAC の運転安定性や空調負荷処理性能及び省エネルギー性能の検証も行った。その結果、膜上下交換空気量をファンにて強制的に増やせる仕掛けを設けることで、水式の放射空調と同じ温熱環境を維持しつつ、PAC の安定運転や立上がり能力を確保できうる可能性が示された。一方で、膜の抵抗にて膜上が正圧になってしまうことが課題として浮き出てきた。さらに、実験を重ねていく中で、膜材の耐久性、膜天井内のメンテナンス性など実用化への課題も見えてきた。そこで、4 章の課題を解決するために、今まで用いていた膜材よりも通気流量が大きく（抵抗が小さく）、浸み出し放射空調として実績のあるパンチングメタルと同等の使い勝手となりうる膜材にて実大実験を行った。その結果、空調立上がり時等に対応できる制御の必要性など設計手法に関する課題はあるが、冷房時には安定した温熱環境が実現できるなど、前章までの課題が解決され、実用的な空調システムとなりうることを示した。合わせて、通常の天井カセット方式との比較を行うことで、目論見通りのドラフトレス空間が実現できたことを確認した。そこで、本章では、暖房性能に関して、前章と同じ膜材を用いて実大実験を行い、通常の天井カセット方式との比較や、外皮負荷の効率的な除去を目的として、膜上の暖気を強制的に膜下へ降ろした場合の室内温熱環境の検証を行った。さらに、本システムの暖房時の数値シミュレーションモデルを確立するため、室内温度分布の計算方法についても検討する。

6.2 実験概要

6.2.1 実験の目的

前章と同様に、膜の無い天井カセット方式と網目が小孔となっている織物状の多孔膜、そこに不織布を貼り、孔を塞いだ膜を用いた 2 パターンの膜天井空調方式について暖房時の実大実験を行い、温熱環境特性、膜の交換空気量及び空調性能の比較を行う。

6.2.2 実験室概要

実験は 2020 年 11 月 4 日～ 2020 年 12 月 25 日に行った。ただし、本実験は冬期を想定した暖房実験である。実験室は、今までと同様で内寸 7.0m×6.13m の室を壁(グラスウール 50mm、プラスターボード 12.5mm)で区切り、壁の内側空間(以下、対象空間)は室内、外側空間は屋外を想定している。対象空間は内寸 4.41m×4.01m、高さ 3.44m であり、膜あり条件において床上 3.14m の高さに織物による不燃性の膜を張った。対象空間内には PAC (三菱電機株式会社、PLZ-ERP140EF:1 台の室外機に 2 台の室内機を接続)が 2 台設置されている。PAC は吸込口の直上に設置された温度センサーにより運転制御されており、暖房時は設定温度-0.5℃でサーモ ON、+1.5℃でサーモ OFF となる。平面図を**図 6.2.1**、断面図を**図 6.2.2** に示す。

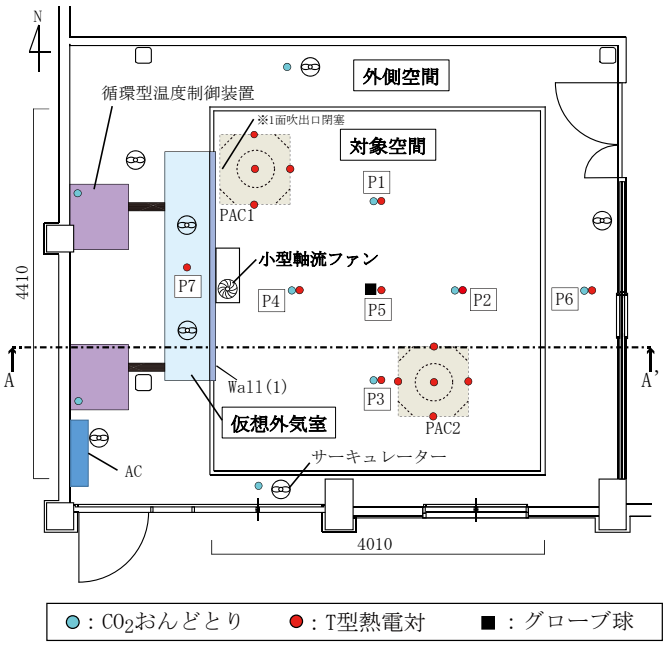


図 6.2.1　実験室平面図[mm]

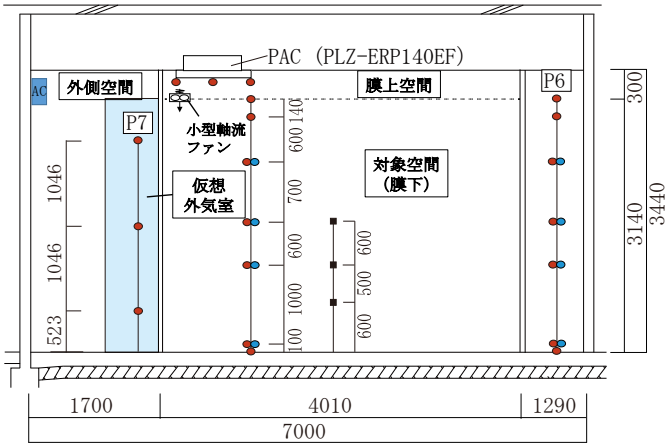


図 6.2.2　A-A’ 断面図[mm]

本実験では、暖房負荷としてガラス窓を模した冷却壁 Wall(1) を設置した。冷却壁はプラスターボード 12.5mm とし、他の壁面より断熱性が低くなっている。冷却壁の外側に仮想外気室を造作し、ダクトにより循環型温度制御装置（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。今回は冷却壁面からの影響を検証するため、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） を運転することで、循環型温度制御装置の排熱処理をしながら、対象空間と同温になるようにした。

温度測定点は**図 6.2.2** 中の P1 から P6 に鉛直方向 7 点を設けて測定を行った。また、各 PAC の吸込口に 1 点、吹出口に 4 点、膜上（膜なしは天井面）に 3 点設けた。壁温度は、冷却壁面を除く 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。CO_2 濃度は CO_2 濃度計（T&D、RTR-576）を用いて、P1～P4, P6 で鉛直方向 4 点、膜上 3 点、外側空間の北 1 点・南 1 点・西 2 点で測定した。いずれの測定項目も測定間隔 30 秒で測定を行った。

6.2.3 実験条件

前章の冷房実大実験と同様に、膜を敷設しない「膜なし：以下 PO 条件」、膜に不織布を貼らない「膜（不織布なし）：以下 MO 条件」、不織布を貼った「膜（不織布あり）：以下 MF 条件」の 3 パターンの実験を行った。

パラメータは PAC 設定温度と仮想外気室の温度差として 3 条件を設定した。表-1 に今回の実験条件を示す。この中で、「CaseMF-ファン」条件は、外皮負荷の効率的な処理と暖房の立上がり時間の短縮を目的として、窓を模した冷却壁面上部から膜上の暖気を強制的に吹き降ろす想定で設定した条件で、膜表面に小型軸流ファン（三洋電機、109P1348S101、230CMH、以下循環ファン）を設置し、膜上空間の暖房気流を対象(膜下)空間へ約 4[回/h]の換気回数

となる 230[㎥/h]の風量を送り込んで実験を行った。なお、今回の暖房実験では、PAC 吹出角度及び吹出風量が与える影響は小さいと考えられるため、吹出角度を水平面から 60°、吹出風量はあらかじめ測定した風量(1,032[㎥/h]、1,016[㎥/h])で固定させている。また、実験室内での発熱量はなしとしている。

表 6.2.1　実験条件

天井膜	実験条件	PACの設定温度[℃]	仮想外気室の設定温度[℃]	PACと仮想外気室の設定温度差[℃]	実験名称
膜なし	Case1	28	8	20	CasePO-1
	Case2	22	8	14	CasePO-2
	Case3	22	14	8	CasePO-3
膜（不織布なし）	Case1	28	8	20	CaseMO-1
	Case2	22	8	14	CaseMO-2
	Case3	22	14	8	CaseMO-3
膜（不織布あり）	Case1	28	8	20	CaseMF-1
	Case2	22	8	14	CaseMF-2
	Case3	22	14	8	CaseMF-3
	Case1	28	8	20	CaseMF-ファン

6.2.4 実験手順

実験室を冷やすために、前日の夕方から PAC と AC の冷房運転(設定温度 19℃)を開始し、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、立上がり運転時の濃度変化をみるために PAC 暖房運転を開始したと同時に、PAC 吹出口から CO_2 を発生させ、CO_2 濃度測定を開始し、発生開始 3 時間後に CO_2 発生を停止した。**図 6.2.3** に測定手順の概要を示す。

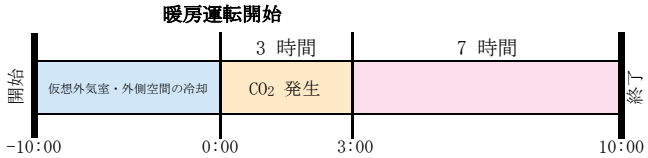


図 6.2.3　測定手順の概要

6.3 膜の有無及び膜材特性が室内熱環境に与える影響

6.3.1 PAC の運転状況

図 6.3.1 に各条件の Case1 について、PAC 暖房運転開始後から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 がサーモ 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 時間後の対象空間の温度は、CasePO-1 が約 28℃、CaseMO-1 が約 25℃、CaseMF-1 が約 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、暖房気流が対象空間まで到達しにくいことで、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。膜を設置する場合は、対象空間の温度制御方法の検討が必要となる。なお、CasePO-1、CaseMO-1 において、PAC のサーモ ON/OFF の間隔が変化している。これは、外気温が 10℃程度以上となると PAC が能力セーブ運転に切替わり、加熱時間が長くなる。その結果、サーモ ON/OFF の間隔が長くなっている。

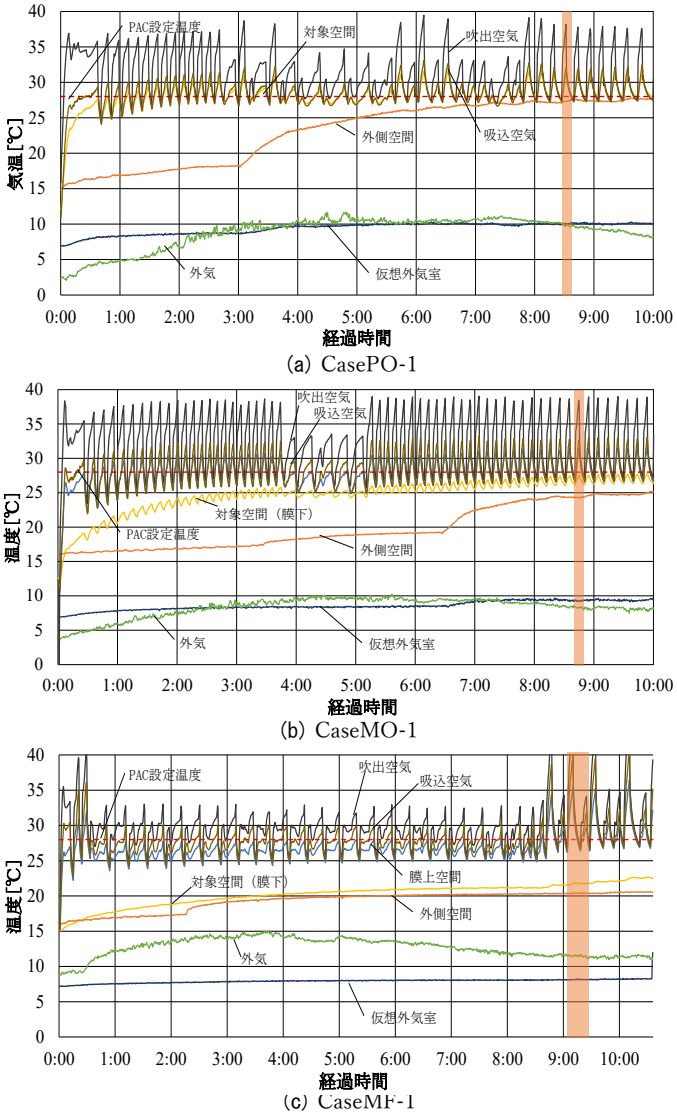


図 6.3.1　温度経時変化

6.3.2 鉛直温度分布

図 6.3.2 に各条件の鉛直温度分布（定常時の PAC 一周期分のデータ平均、**図 6.3.1** の網掛範囲）を示す。PO 条件では、FL+100m と FL+1700mm 間での温度差が ASHRAE STANDARD5513）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、室全体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[1)]にて示されているように、室下部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、下部まで到達しにくいためと考えられる。また、MF 条件は MO 条件に比べて FL+100mm から 1700mm 間の鉛直温度分布への影響が少ない。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ためと考えられる。

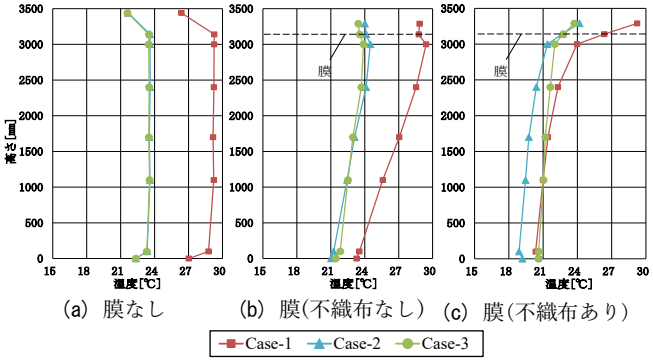


図 6.3.2　定常時の鉛直温度分布

それぞれの条件におけるグラフの傾きに着目すると、MO 条件及び 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 の順に膜と仮想外気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、膜と仮想外気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。次に、PAC 設定温度が同じである Case2 と Case3 において、CaseMO-2 と CaseMO-3 での FL+1100mm の温度は大きな違いがない一方、CaseMF-2 と CaseMF-3 での同じ FL+1100mm の温度は、約 1.5℃異なる。PAC 設定温度が同じであっても、膜の通気抵抗の大小によって、仮想外気室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。なお、仮想外気室の設定温度が同じである Case1 と Case2 に関して、CasePO-1 と CasePO-2 では、FL+1100mm の温度が約 6℃異なり PAC 設定温度差と同等であることに対し、CaseMO-1 と CaseMO-2 での差は約 3℃、CaseMF-1 と CaseMF-2 での差は約 1.5℃となっている。PAC 設定温度変更による室内環境の変化幅が、膜の有無・通気性能に大きく影響される。以上の結果より、膜が設置されている場合に熱負荷が刻々と変化していく対象空間において安定した温度を保つためには、暖房時の鉛直温度分布（室内温度成層）について解析モデルを構築して検討を行い、PAC の運転制御方法を構築する必要性が見いだせた。

表 6.3.1 に図 6.3.2 と同じ PAC のサーモ ON/OFF 1 周期内での温度変化幅を示す。CasePO-1 では、1 周期の間で FL+1100mm において最大と最小の差が 3.5℃である一方、CaseMO-1 及び CaseMF-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 のサーモ ON/OFF の 1 周期内における温度変化が少ない膜下温熱環境を作り出せていることを示している。

表 6.3.1　鉛直温度分布

(a) CasePO-1

高さ [mm]	温度			
	最大値 [℃]	最小値 [℃]	最大最小差 [℃]	標準偏差 [-]
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) CaseMO-1

高さ [mm]	温度			
	最大値 [℃]	最小値 [℃]	最大最小差 [℃]	標準偏差 [-]
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) CaseMF-1

高さ [mm]	温度			
	最大値 [℃]	最小値 [℃]	最大最小差 [℃]	標準偏差 [-]
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

6.3.3 グローブ温度

図 6.3.3 に各条件の Case1 のグローブ温度を示す。CaseMO-1 及び 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、グローブ温度より空気温度の方が高いことから、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、CaseMF-1 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。

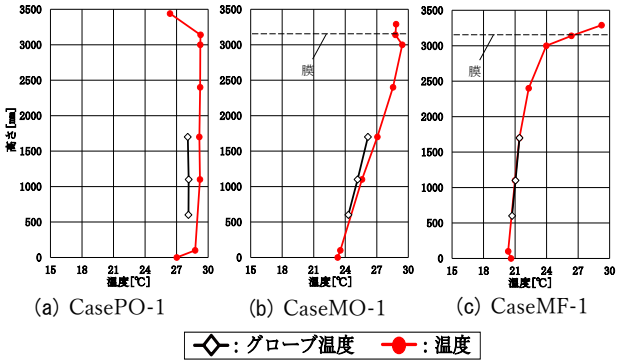


図 6.3.3　グローブ温度と鉛直温度分布

6.3.4 CO_2 濃度

図 6.3.4 に各条件での CO_2 濃度算定結果と測定値の経時変化を示す。算定方法は前章までと同様であるため省略している。図 6.3.4 の結果から測定値と算出値が一致しておらず、算出精度が低いことがわかる。これは算出に用いた CO_2 濃度は鉛直方向に平均していることが

原因であると考えられる。暖房時においては、特に上下温度分布を考慮する必要があり、上下成層を考慮した予測モデルが必要であることが示唆された。

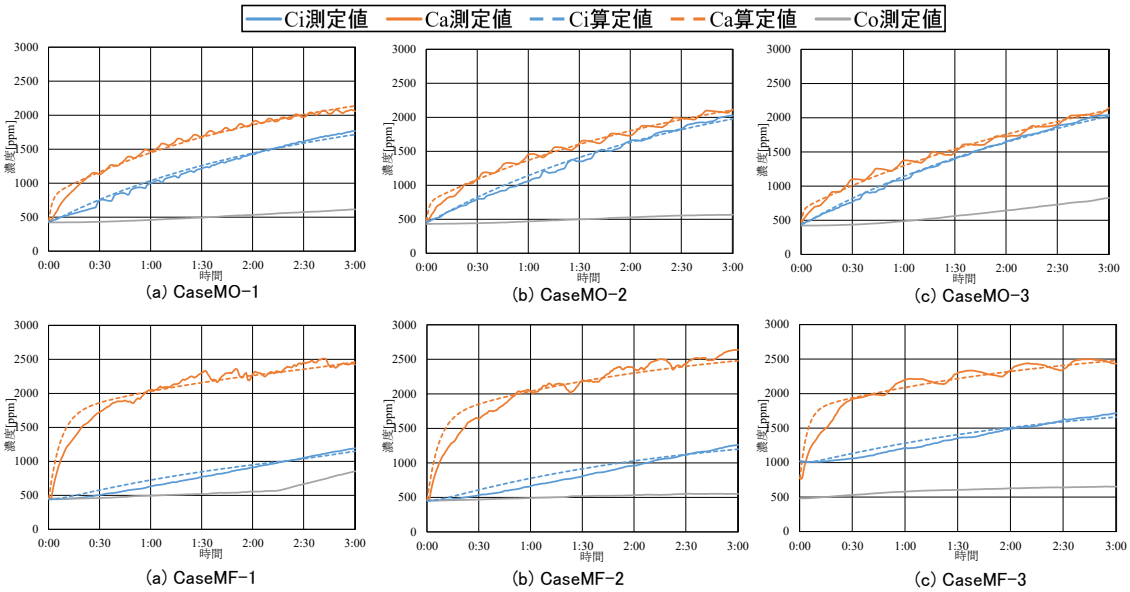


図 6.3.4　各条件における CO2 濃度算定結果と測定値の経時変化

6.3.5 膜上下循環ファン運転時との比較

前項では、CaseMF-1 において、暖房気流が対象空間まで到達せず、対象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、膜表面に循環ファンを設置し、膜上空間の暖気を対象空間の冷却壁面側へ吹出す CaseMF-ファン条件にて、温熱環境の改善を試みた。実験条件は、CaseMF-1 と同条件とした。

図 6.3.5 に CaseMF-1 と CaseMF-ファンの温度経時変化を示す。CaseMF-ファンでは、PAC のサーモ ON/OFF 頻度が多くなっている。これは、膜上空間の暖気が膜下に送り込まれることで温度が下がりやすくなっているためと考えられる。次に、CaseMF-ファンでは、対象空間の温度が CaseMF-1 に比べて高くなっており、設定温度 28℃に対して、室内温度は 22～24℃となっている。循環ファンにより膜上空間の暖気が膜下へ送り込まれ、対象空間の温度が上がっていることがわかる。

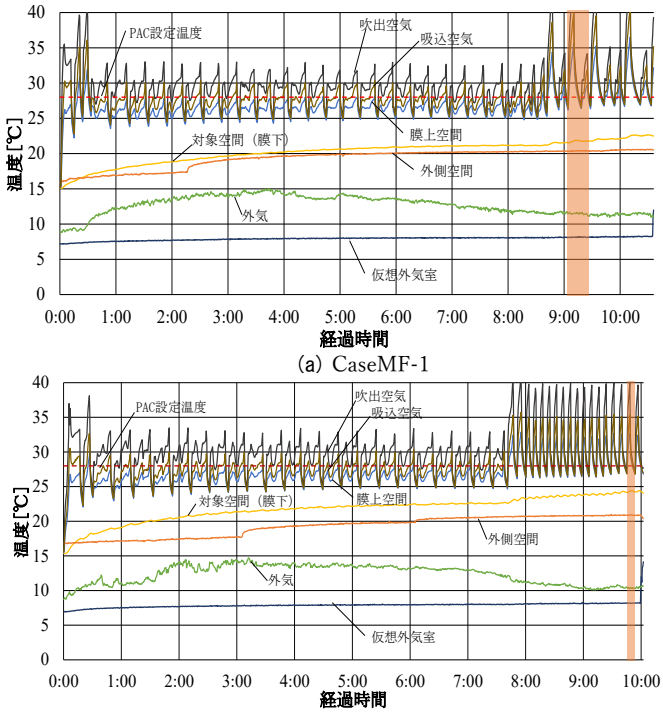


図 6.3.5　温度経時変化

図 6.3.6 に CaseMF-1 と CaseMF-ファンの鉛直温度分布、**表 6.3.2** に PAC のサーモ ON/OFF の 1 周期内での温度変化幅を示す。CaseMF-ファンでは、鉛直温度分布での温度差が小さくなっており。暖気を対象空間の冷却壁面に吹出すことで、冷却壁面からの冷気流の影響を抑制し、良好な空間が形成できたと考えられる。また、周期内の対象空間での温度変化は、CaseMF-1 と CaseMF-ファンで大差はない。サーモ ON/OFF の 1 周期内での温度変化が少ない環境は、循環ファンがあっても形成されている。

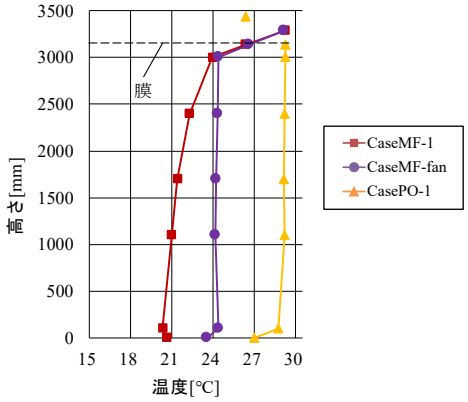


図 6.3.6　鉛直温度分布比較

表 6.3.2　PAC の ON/OFF　1 周期における温度変化幅（CaseMF-ファン）

高さ [mm]	温度			
	最大値 [℃]	最小値 [℃]	最大最小差 [℃]	標準偏差 [-]
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

図 6.3.7 に CaseMF-1 と CaseMF-ファンにおける CO_2 濃度算定結果と測定値の経時変化を示す。この結果から CaseMF-ファンでは測定値と算出値が一致していることが分かり、対象（膜下）空間に膜上からの空気が均一に循環していることが示唆された。また、ファン風量が 230[m³/h]に対して、下向き空気量の算定値が 221[m³/h]とほぼ同等であり、既報[1)]では、換気回数 4[回/h] 程度では室下部まで暖気が行き届かず、上下温度分布が均一にならないことが示されているが、膜上から冷却壁面に直接吹き降ろされた暖気によって、低温の下降流が減り、均一な温熱環境が形成されたと考えられる。

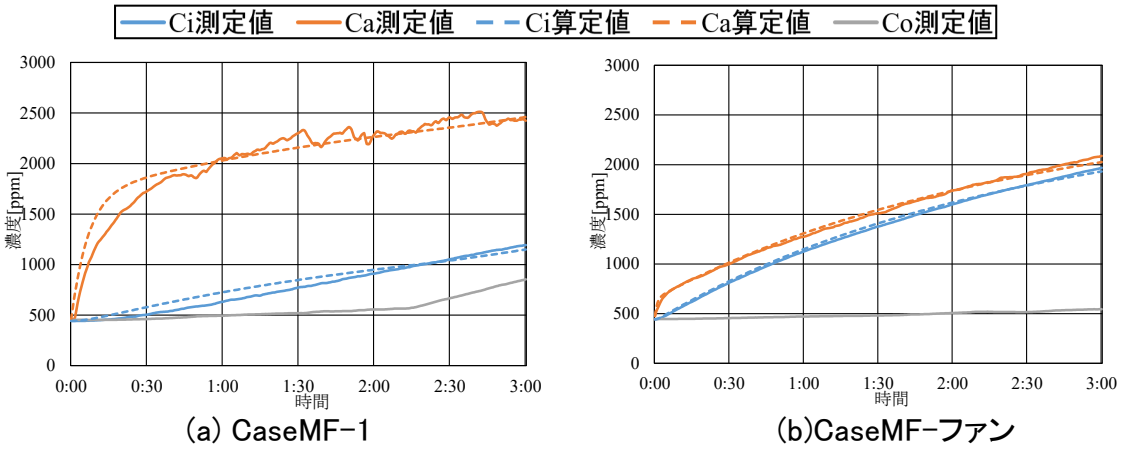


図 6.3.7　CO_2 濃度の測定値と算定値の経時変化

以上から、循環ファンにより、負荷の大きさや位置に応じて、膜上空間の暖気を対象(膜下)空間に送り込むことで、良好な環境に改善できることが示唆され、外皮負荷が大きい際に循環ファンを運転させるなど、制御方法の工夫により実用的な空調システムとなりうることが示唆された。

6.4 膜の有無及び膜材特性の立上がり時の考察

6.4.1 温度経時変化

図 6.3.1 及び図 6.3.5 において対象空間の暖房開始時からの温度変化を各条件で比較すると、CaseMF-1 では緩やかに温度上昇し、4 時間後も PAC 設定温度に到達していない。一方で CasePO-1 及び CaseMO-1 では、温度が急激に上昇し、PAC 吹出し温度・吸込み温度と連動して温度変化しながら、4 時間後には PAC 設定温度に近い温度になった。これより、膜の通気性が立上がり時間に及ぼす影響は大きいことが考えられる。膜上の暖気を強制的に膜下へ降ろす CaseMF-ファンは、CaseMF-1 と比べ、対象（膜下）空間の温度は、初期値は同等であるにも関わらす、どの時刻でも高くなっていることが分かる。つまり循環ファンを運転することで立上がり時間を短縮できると言える。

6.4.2 温度分布の経時変化

図 6.4.1 に CasePO-1、CaseMO-1、CaseMF-1 の PAC 暖房運転開始後 3.5 時間の各高さでの温度変化を示す。CasePO-1 では膜上の温度変化と対象空間の FL+3000 ㎜から FL+100 ㎜まで同じ挙動となっていることが分かる。CaseMO-1 では対象空間の FL+2400 ㎜までは同じ挙動だが、対象空間の FL+1700 ㎜ではわずかに影響を受けて、対象空間の FL+1100 ㎜では影響を受けていないことが分かる。CaseMF-1 では対象空間最上段の FL+3000 ㎜ではわずかに影響を受けているが、対象空間の FL+2400 ㎜より下部では影響を受けていないことがわかる。従って、膜上からの通気量が直接影響を及ぼしている高さは、CaseMO-1 で FL+1700 ㎜、CaseMF-1 で最上部の FL+3000 ㎜までであると推察できる。以上から、MF 条件を再現する数値シミュレーションモデルにおいては、膜上からの通気量を最上部だけに与えても問題ないと言える。

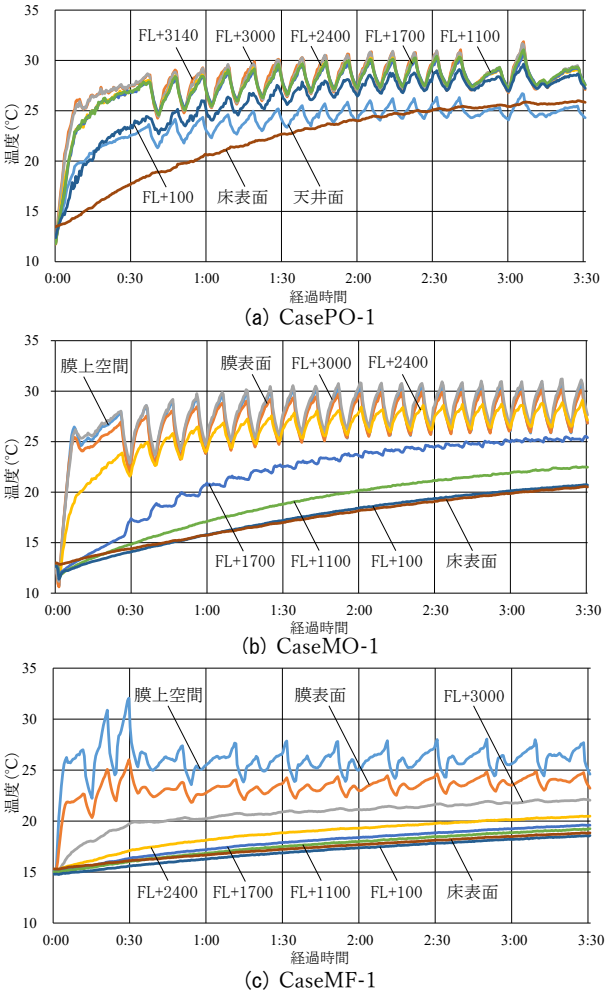


図 6.4.1　垂直温度経時変化

6.4.3 CO_2濃度の経時変化

図 6.4.2 に各条件での Case1 の立上がり時の CO2 濃度経時変化を測定高さごとに平均した値を示す。各条件間で膜上下の濃度差を比較すると、CasePO-1、CaseMO-1、CaseMF-1 の順で濃度差が小さくなっており、濃度差が小さいほど膜上下の空気がより混合していると考えられる。

CaseMO-1 の立上がり時では、測定高さ FL+2400mm、1700mm、100mm、1100mm の順に濃度が高くなっている。これは、室上部の FL+2400mm 及び 1700mm では膜上からの暖気、室下部の FL+100mm に、上部に溜まった暖気が冷却壁面に沿った下降気流と混合して降りてきたものと考えられる。また、FL+1100mm までは膜上の暖気が到達していないことから対象空間の上部にも熱が溜まり、温度勾配が大きくなったと考えられる。

CaseMF-1 の立ち上がり時では、高さが FL+100mm、FL+1100 mm 及び+2400mm、FL+1700mm の順に濃度が高くなった。これは、膜からしみ出した暖気が、膜下最上部にて冷却壁面に沿った下降気流と混合して逸早く室下部に到達した可能性が示唆される。また、最上部のみにし

か膜上からの暖気が到達していないことで、居住域である FL+1700mm 以下で温度勾配が少ない空間を実現できていると思われる。

以上から、MF 条件を再現する数値シミュレーションモデルにおいては、冷却壁面の下降流（誘引流）の影響と最上部の膜上下交換空気量について考慮する必要がある。

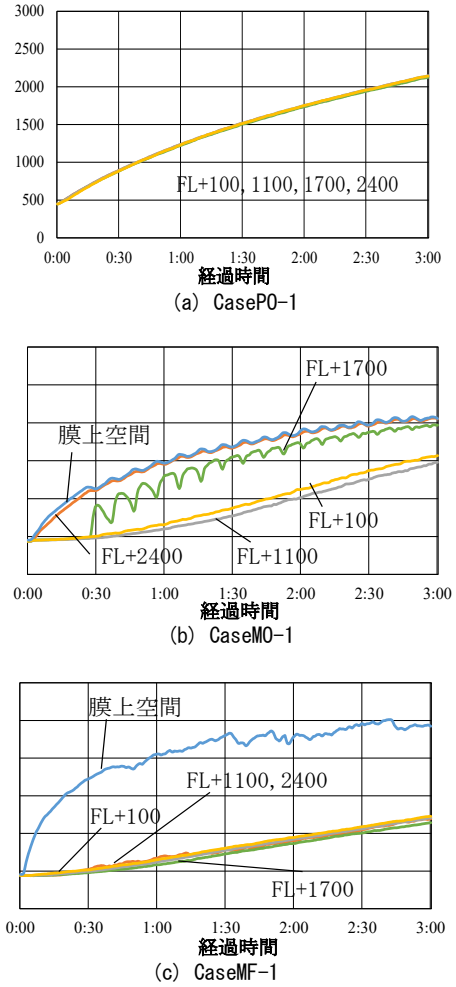


図 6.4.2　CO_2 濃度経時変化

6.5 室内温度分布の予測手法の検討

6.5.1 はじめに

前節までの考察から、本システムのターゲットとしている膜（不織布なし）条件（MF 条件）について評価する上で、室内温度成層と、冷却面からのコールドドラフトの影響を再現する必要性が示唆された。そこで、本節では、本システムの暖房時の評価を行うため、基礎的な数値計算手法を提案し、境界条件を実測値で与えた数値計算の結果と実測値と比較し、数値シミュレーションの基本モデルを確立させる。

6.5.2 室内温度分布の計算方法

MF 条件を再現する数値シミュレーションモデルを確立するため、室内温度分布の計算方法について検討する。**図 6.5.1** に計算におけるブロック分割とエアフローを示す。前章の考察から、冷却面近傍に下降流が発生していることが想定されたため、乱流境界層が形成される壁面境界層と室内側に分割し、それぞれを上下にブロック分割している。これらブロックごとの風量収支式から各ブロックに出入りする風量を算出し、各ブロックの非定常熱収支式から各ブロック温度を算出する。なお、室温分布の再現性を検証するため、冷却壁面の室内側表面温度、膜表面温度、床表面温度及び膜上温度は実験結果を用い、膜上下交換空気量と乱流熱拡散係数は固有のパラメータとして設定している。なお、冷却壁面以外の壁面と室温との温度差は 0.1℃から 0.2℃程度と小さいため下降流や貫流熱は考慮していない。

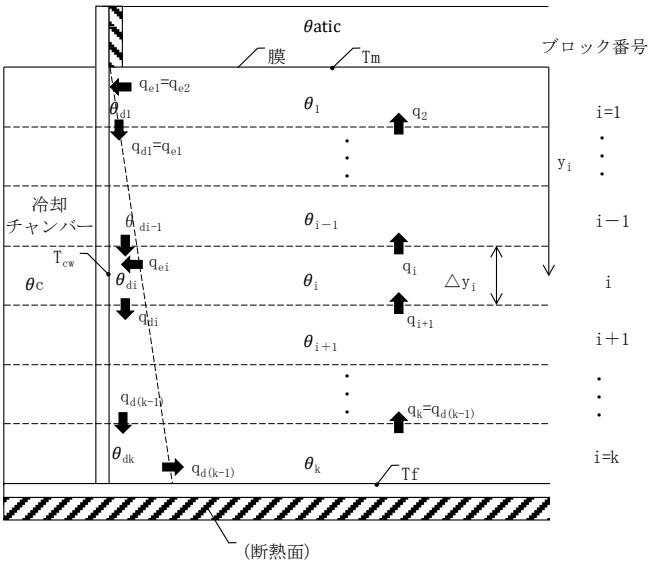


図 6.5.1　計算におけるブロック分割とエアフロー

壁面に沿った自然対流場での壁面境界層に生じる下降流は次式で求められる。[2)]

$$q_d = 0.0028\,|\Delta T|^{\frac{2}{5}}\,y^{\frac{6}{5}}\,B_W \qquad (1)$$

上式を下方向 y の関数として表現すると次式となる。

$$q_d(y) = 0.0028\,|\Delta T(y)|^{\frac{2}{5}}\,y^{\frac{6}{5}}\,B_W \qquad (2)$$

自然対流場での壁面に沿った下降流に誘引される乱流境界層への流量は次式で求められ

る。

$$q_e(y) = \frac{dq_d(y)}{dy}\Delta y \qquad (3)$$

(3)式より、

$$q_e(y) = \left(0.00112\left|\frac{d\Delta T(y)}{dy}\right||\Delta T(y)|^{-\frac{3}{5}}y^{\frac{6}{5}}B_W + 0.00336|\Delta T(y)|^{\frac{2}{5}}y^{\frac{1}{5}}B_W\right)\Delta y \qquad (4)$$

(4)式を差分化すると

$$q_{ei} = \left(0.00112\left|\frac{\Delta T_i - \Delta T_{i-1}}{y_i - y_{i-1}}\right||\Delta T_i|^{-\frac{3}{5}}y_i^{\frac{6}{5}}B_W + 0.00336|\Delta T_i|^{\frac{2}{5}}y_i^{\frac{1}{5}}B_W\right)\Delta y_i \qquad (5)$$

ここで、

$$\Delta T_i = \theta_i - T_{cw} \qquad (6)$$

とする。

自然対流場での壁面に沿った流れにおけるヌッセルト数は次式で求められる。[3)]

$$Num_i = 0.0214(Grx_iPr)^{\frac{2}{5}} = 0.0214\left(\frac{g\beta|\Delta T_i|{y_i}^3}{\nu^2}Pr\right)^{\frac{2}{5}} \qquad (7)$$

一方、ヌッセルト数は対流熱伝達率を使うと、

$$Num_i = \frac{\alpha c_i y_i}{\lambda} \qquad (8)$$

と表され、(7)式と(8)式より

$$\alpha_{c_i} = 0.0214\left(\frac{g\beta|\Delta T_i|{y_i}^3}{\nu^2}Pr\right)^{\frac{2}{5}}\frac{\lambda}{y_i} \qquad (9)$$

を得る。

壁面境界層及び室内側の各ブロックにおける風量収支式は、次式となる。

$$q_{i+1} = q_i + q_{ei} \qquad (10)$$

ここで、最上段においては、膜上下交換空気量は収支がとれているので、

$$q_{di=1} = q_{ei=1} = q_{i=2} \ , q_{ei=0} = 0 \qquad (11)$$

が成立する。また最下段は

$$q_{di=k} = q_{ei=k} = 0 \qquad (12)$$

となり、(10) 式から(12) 式より

$$q_i = \sum_1^{i-1} q_{ei} \qquad (13)$$

が導かれる。

ここで、壁面境界層の各ブロックにおいて、ある時刻の室温 θ_i^n が既知であれば、次式の熱収支式を解くと θ_{di} が求められる。

$$C_p\rho q_{di-1}\theta_{di-1} + C_p\rho q_{ei}\theta_i^n + \alpha_{c_i}\Delta T_i B_W \Delta y_i = C_p\rho q_{di}\theta_{di} \qquad (14)$$

次に、ある時刻の室温 θ_i^n に対し、⊿t 経過後の室温を θ_i^{n+1} とすると室内側の各ブロックにおける熱収支から、次式にて θ_i^{n+1} が求められる。

$$\frac{C_p\rho A\Delta y_i(\theta_i^{n+1}-\theta_i^n)}{\Delta t} = \{C_p\rho q_{i+1}\theta_{i+1}^n + \frac{C_p\rho a_t}{\Delta y_i}(\theta_{i+1}^n-\theta_i^n)A\} - \{C_p\rho q_{ei}\theta_i^n + C_p\rho q_i\theta_i^n + \frac{C_p\rho a_t}{\Delta y_i}(\theta_i^n-\theta_{i-1}^n)A\} \quad (15)$$

最上段は膜との熱伝達と膜上下交換空気量があるため次式となる。

$$\frac{C_p\rho A\Delta y_i(\theta_i^{n+1}-\theta_i^n)}{\Delta t} =$$

$$\{C_p\rho q_{i+1}\theta_{i+1}^n + \frac{C_p\rho a_t}{\Delta y_i}(\theta_{i+1}^n-\theta_i^n)A + C_p\rho q_m\theta_{atic} - \{C_p\rho q_{ei}\theta_i^n + C_p\rho q_i\theta_i^n + \alpha_m(\theta_i^n-T_m)A + C_p\rho q_m\theta_i^n\} \quad (16)$$

最下段は床面との熱伝達があるため次式となる。

$$\frac{C_p\rho A\Delta y_i(\theta_i^{n+1}-\theta_i^n)}{\Delta t} = \{C_p\rho q_{di-1}\theta_{di}^n + \alpha_f(T_f-\theta_i^n)A\} - \{C_p\rho q_{ei}\theta_i^n + C_p\rho q_i\theta_i^n + \frac{C_p\rho a_t}{\Delta y_i}(\theta_i^n-\theta_{i-1}^n)A\} \quad (17)$$

ここに、

k:	ブロック分割数(=6)	[-]
i:	ブロック番号	[-]
Δt:	計算タイムステップ(=0.1)	[s]
θ_{di}:	乱流境界層の各ブロック温度	[K]
θ_i:	室内側の各ブロック温度	[K]
θ_{atic}:	膜上温度	[K]
T_f:	床表面温度	[K]
T_{cw}:	冷却面表面温度	[K]
T_m:	膜表面温度	[K]
ΔT_i:	室内側ブロック温度と冷却面の温度差	[K]
q_i:	室内側ブロック間の上昇流量	[m³/s]
q_{di}:	壁面境界層のブロック間の下降流量	[m³/s]
q_{ei}:	室内側から壁面境界層への誘引流量	[m³/s]
q_m:	膜上下交換空気量	[m³/s]
α_{ci}:	冷却壁面室内側の対流熱伝達率	[W/(m²・k)]
Num_i:	各ブロックのヌッセルト数	[-]
Grx_i:	各ブロックのグラスホフ数	[-]
y_i:	膜表面から各ブロック中心までの距離	[m]
Δy_i:	各ブロックの高さ	[m]
Bw:	室の奥行(=4.41)	[m]
A:	室面積 (=17.68)	[m²]
λ:	空気の熱伝導率(=0.02514)	[W/(m・K)]
ν:	空気の動粘性係数(=0.00001516)	[m²/s]
β:	空気の熱膨張係数(=0.00341)	[1/K]
ρ:	空気の密度(=1.204)	[kg/m³]

Cp:	空気の定圧比熱(=1006)	[J/(kg・K)]
Pr:	プラントル数(=0.7309)	[-]
g:	重力加速度(=9.8)	[m/s^2]
a_t:	空気の乱流熱拡散係数	[㎡/s]
α_m:	膜の局所対流熱伝達率(=2)	[W/(㎡・k)]
α_f:	床の局所対流熱伝達率(=4)	[W/(㎡・k)]

6.5.3 室内温度分布計算におけるパラメータの設定

今回の計算において、膜上下交換空気量と乱流熱拡散係数を固有のパラメータとして設定している。まずこのパラメータの設定について検討する。

図 6.5.2 に CaseMF-1、CaseMF-2 及び CaseMF-3 の PAC 暖房運転開始後 3.5 時間の各高さで測定した温度変化を示す。CaseMF-1 と比べると、CaseMF-2 及び CaseMF-3 の方が、最上段の FL+3000 ㎜において膜上温度の影響を受けており、膜上下交換空気量が大きいことが示唆された。これは、CaseMF-1 の温度勾配が他の条件に比べて大きいことから、上昇気流が強く、PAC の吹出気流による膜下への通気量が小さくなったと考えられる。一方、既報[4)]では上下温度分布の実測値と計測値の比較において、乱流熱拡散係数を 0 ㎡/s から 0.008 ㎡/s 程度で計算し、0.001 ㎡/s 程度が最も実験値との整合が良かったと報告している。

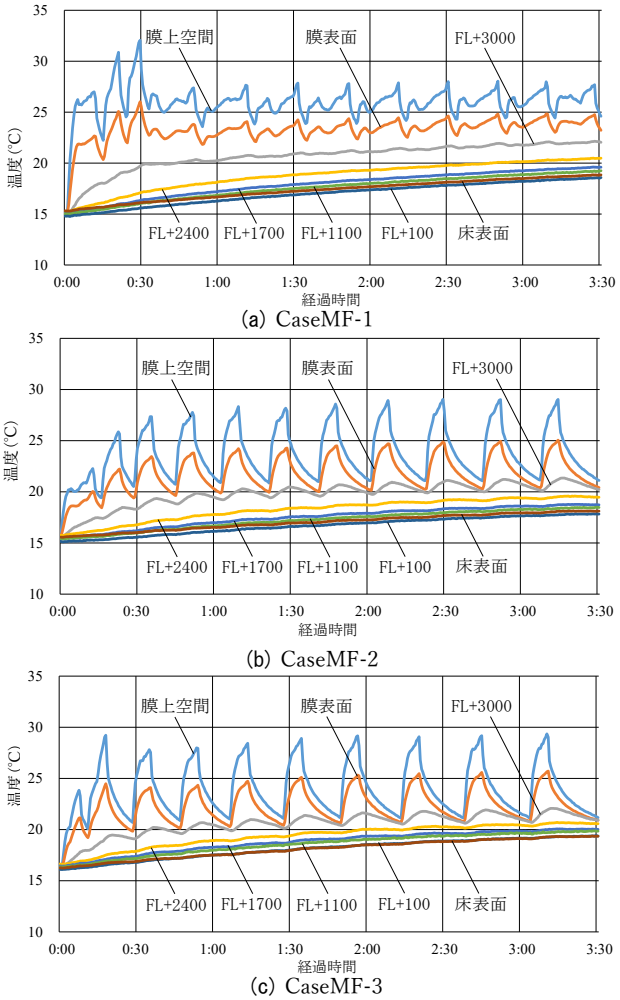


図 6.5.2 CaseMF における垂直温度分布の経時変化

これを参考にし、**図 6.5.3** に CaseMF-1、CaseMF-2 及び CaseMF-3 における定常状態での実験値と乱流熱拡散係数を 0.001 ㎡/s、膜上下交換空気量（通気量）を 0 ㎥/h、0.01 ㎥/h、0.02 ㎥/h とした場合の計算値との比較を示す。この結果から、CaseMF-1 では 0.01 ㎥/h、CaseMF-2 及び CaseMF-3 では 0.02 ㎥/h の場合に最上部温度が実測値と近くなっており、図-10 及び図-13 の膜上下交換空気量の大小の考察と合致した。

一方で、中間層は整合していないため、**図 6.5.4** に CaseMF-1、CaseMF-2 及び CaseMF-3 における定常状態での実験値と、膜上下交換空気量（通気量）を 0.02 ㎥/h、乱流熱拡散係数を 0.001 ㎡/s、 0.002 ㎡/s、0.003 ㎡/s とした場合の計算値との比較を示す。この結果から、全条件において、乱流熱拡散係数を 0.003 ㎡/s とした場合の計算値が実測値と概ね一致していることが分かる。本実験のように、温度成層が形成されブロック間の空気移動が小さくなる場合に乱流熱拡散係数の影響が大きくなることからも、妥当な値と考えられる。

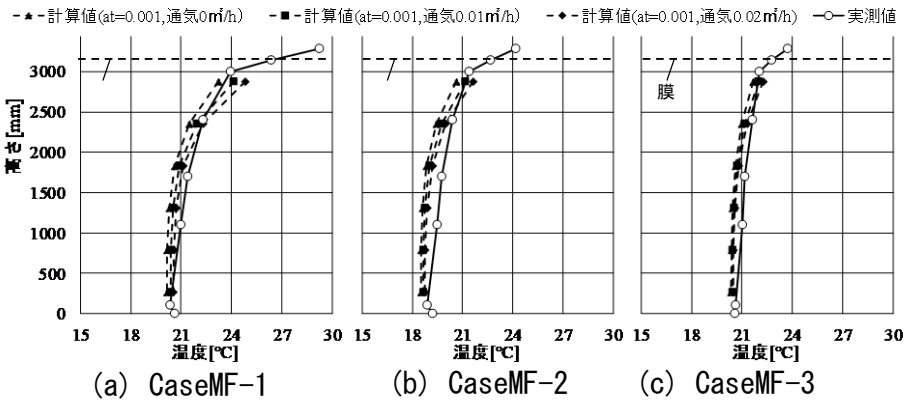


図 6.5.3 膜上下交換空気量を変化させた場合の計算値と実測値比較

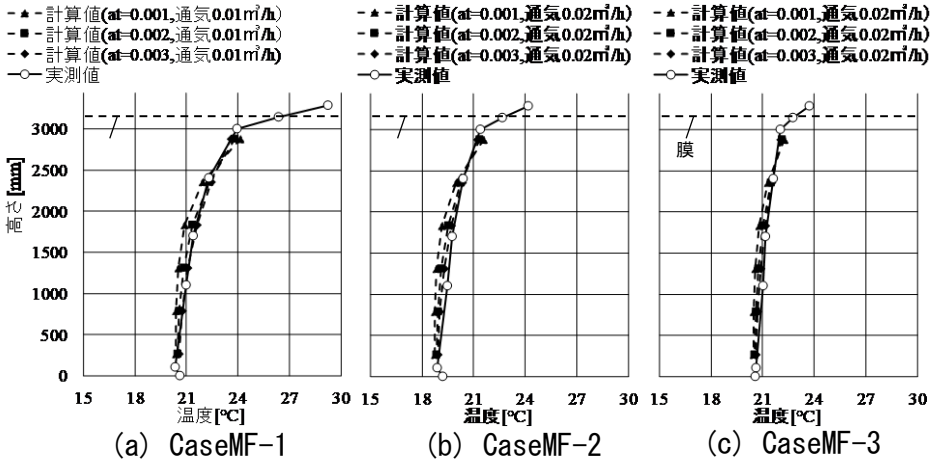


図 6.5.4 乱流熱拡散係数を変化させた場合の計算値と実験値比較

6.5.4 室内温度分布の計算値と実験値の比較

冷却壁面の室内側表面温度、膜表面温度、床表面温度及び膜上温度の実験結果を用いて本報での計算手法にて時系列計算を実施した。このとき、実験データは 30 秒毎、計算のタイムステップは 0.1s であることから、実験結果を線形補間し、計算を行った。**図 6.5.5** に CaseMF-1、CaseMF-2 及び CaseMF-3 における実験値と計算値の時系列温度分布の比較を示す。なお、図中の実測値を実線、計算値を破線で示し、計算値はブロック中心高さを表現している。なお、パラメータとしている乱流熱拡散係数は 0.003 ㎡/s、膜上下交換空気量は CaseMF-1 では 0.01 ㎥/h、CaseMF-2 及び CaseMF-3 では 0.02 ㎥/h として計算している。この結果から、CaseMF-2 及び CaseMF-3 では立上がり時はやや計算値の方が高くなっているものの、それまでの時間帯では最上ブロックの再現性が比較的劣っている。本計算において、最上段ブロックと最下段ブロックの再現性が重要となるため、**図 6.5.6** に実測と計算の最上段ブロックと最下段ブロックの高さが揃うように分割数を 12 とした計算値と実測値との時系列温度分布の比較を示す。この結果から、**図 6.5.5** と比べ最上段ブロック(FL+3000 ㎜)

の再現性が向上していることが分かり、最下段ブロック(FL+100 mm)、上段ブロック(FL+2400 mm)においても高い再現性が見られる。一方で、中段ブロック(FL+1700 mm及び FL+1100 mm)の再現性は他と比べると劣ってはいるが、最上段、最下段及び上段ブロックの再現性が高ければ中段の差異はあまり影響しないと考えている。このことから算出したい高さにブロック分割数を調節することで精度の高い計算結果が得られることが分かる。一方、本報にてパラメータとした通気量に関しては、今回の温熱計算にガス濃度計算を組込み、CO_2濃度測定値と同定を行い求めていくことが今後の課題と考えている。

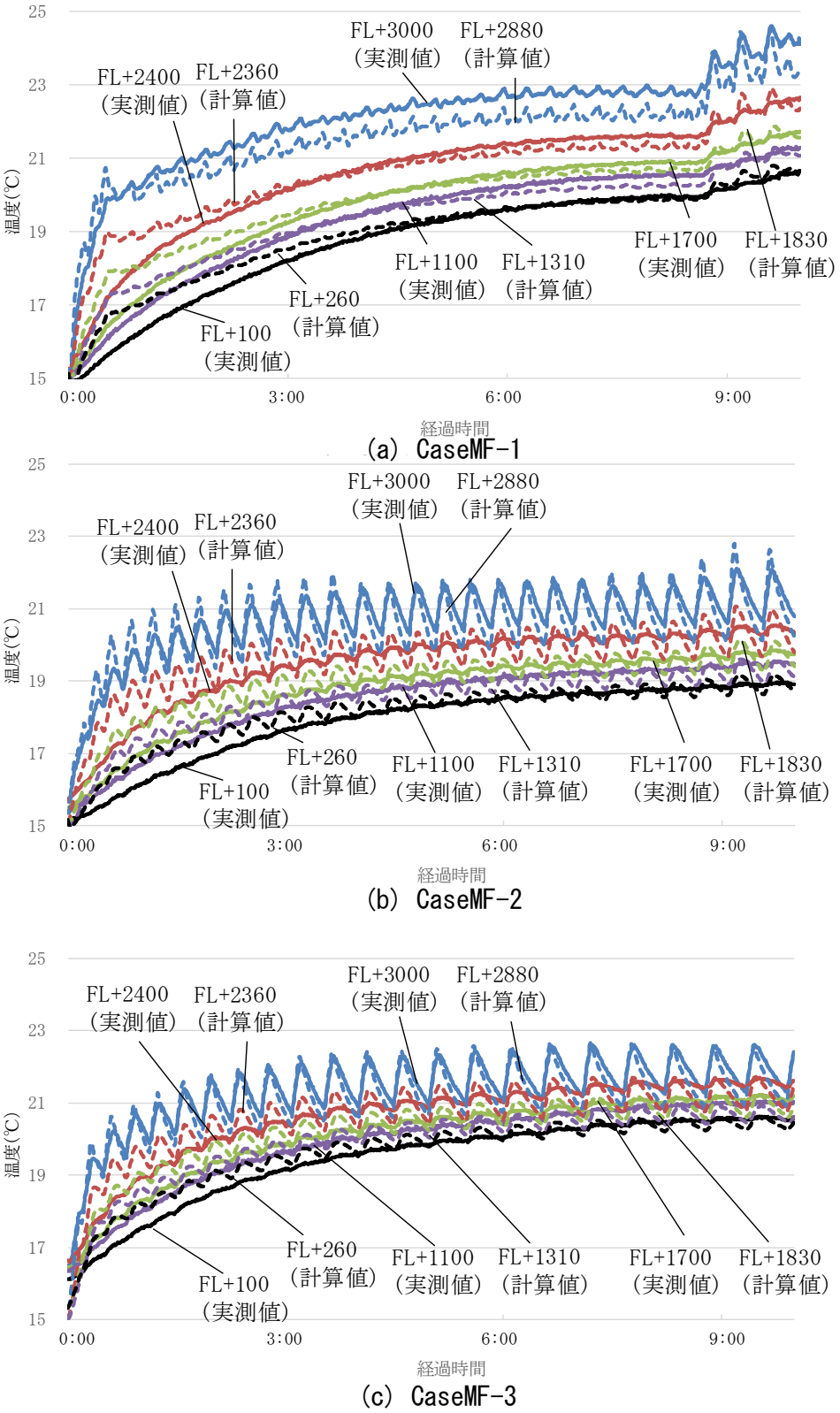


図 6.5.5 垂直温度の計算値と実測値の時系列比較

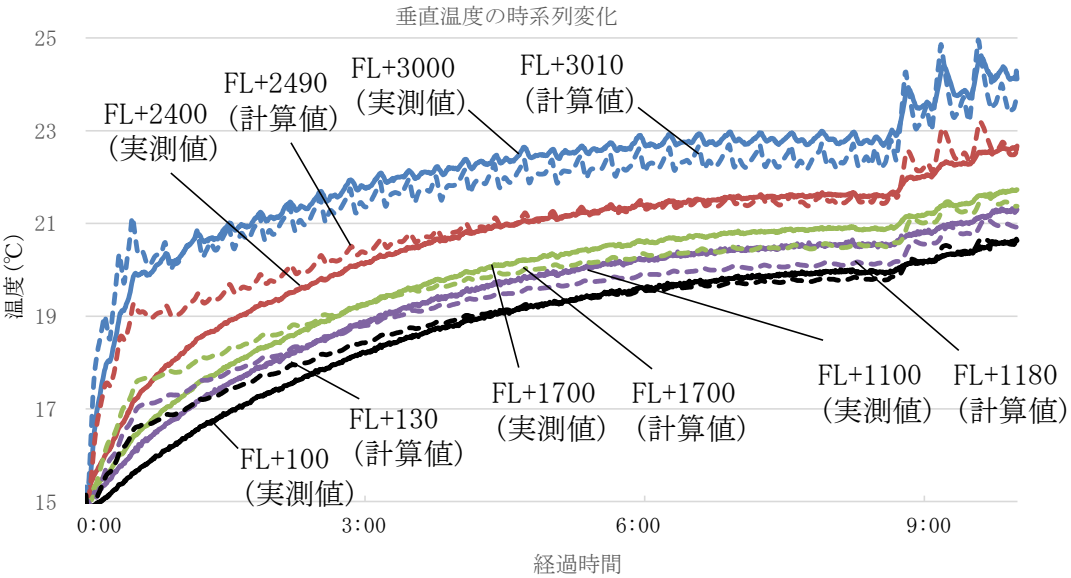


図 6.5.6 CaseMF-1 の計算値(ブロック分割数 12)と実測値の時系列比較

6.6 PACの空調性能と省エネルギー性能の検証

6.6.1 はじめに

本システムでは膜上のPACにて、膜を介して空調負荷を処理する。これは、膜上下交換換気による対流熱と膜表面からの放射熱及び伝達熱による処理となる。そこで、冷房実大実験と同様に、対象空間（膜下）からの流出熱量とPACの顕熱処理量を比較し、熱損失特性や、過度な加熱などが発生していないかの空調性能の検証を行う。合わせて PAC が膜上に設置していることから、COPを算出し、省エネルギー性能の検証も行う。

6.6.2 室内からの流出熱量とPACの顕熱処理量及びCOPの算出方法

図6.6.1に対象空間からの流出熱量の考え方と冷却面である仮想外気室の測定点を示す。仮想外気室への流出熱は9分割して算出した流出熱（式(18)）の合計値（式(19)）とした。同様に外部空間への流出熱を 4 面毎、9 分割の表面温度で計算した流出熱 q の合計値（式(20)）で求めた。膜上から天井への流出熱は膜上と天井内測定温度差に天井の熱貫流率を与えて設定した（式(21)）。PAC の顕熱処理量は、吹出風量と計測した吸込温度と吹出温度から求めた。(式(22))

熱コンダクタンスλ/L を仮想外気室では 17.54[W/(㎡・K)]、外部空間は 0.655[W/(㎡・K)]、U を 6.44[W/(㎡・K)] とした。実験中PAC室内機の吹出風量はあらかじめ測定した風量 (Q_{pac1}=1,032[㎥/h]、Q_{pac2}=1,016[㎥/h]で固定させている。COPは前章までと同様にPACの顕熱処理量をPAC電力消費量で除して算出している。

$$q_o,\ q = \frac{\lambda(T_i - T_o)}{L} S_w \qquad (18)$$

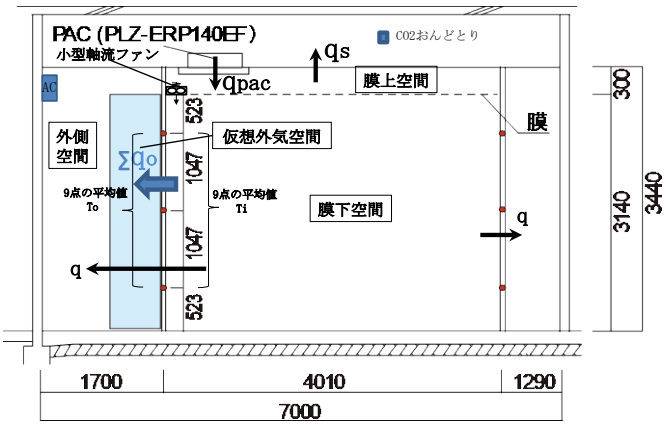
$$q_s = U(\theta_a - \theta_{so}) S_s \qquad (19)$$

$$q_{pac} = \{c_p \rho Q_{pac1}(\theta_{s1} - \theta_{r1}) + c_p \rho Q_{pac2}(\theta_{s2} - \theta_{r2})\} \div 3600 \qquad (20)$$

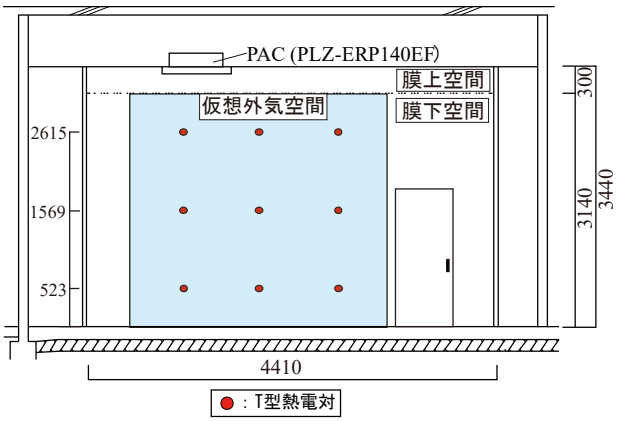
ここに、

q_o:	仮想外気室(外皮)への流出熱	[W]
q :	東西南北各壁面への流出熱	[W]
q_s :	膜上から天井への流出熱	[W]
q_{pac} :	PACの顕熱処理量	[W]
$Q_{pac1,2}$:	PACの吹出風量	[㎥/h]
T_i:	室内側9点の壁面温度の平均値	[℃]
T_o:	室外側9点の壁面温度の平均値	[℃]
$\theta_{r1,2}$:	PACの吸込空気温度	[℃]
$\theta_{s1,2}$:	PACの吹出空気温度	[℃]
c_p:	空気の定圧比熱(=1,006)	[J/(kg・K)]

ρ：	空気の密度(=1.2)	[kg/m³]
L：	壁厚	[m]
λ：	壁の熱伝導率	[W/(m・K)]
S_w：	東西南北各壁面の面積	[m²]
U：	膜上と天井の熱貫流率	[W/(m²・K)]
θ_{so}：	天井上温度	[℃]
θ_a：	膜上温度	[℃]
S_s：	天井面積	[m²]



(a) 流出熱量の考え方



(b) 仮想外気空間の測定点

図 6.6.1　流出熱量の考え方と測定点

6.6.3 室内からの流出熱量と PAC の顕熱処理量の時系列比較

図 6.6.2 に、条件毎の PAC 顕熱処理量と室内流出熱量の時系列変化を示す。どの条件においても、暖房開始直後は流出熱量よりも PAC 顕熱処理量が大きくなっている。これは暖房開始まで冷却していた蓄冷分を処理する、つまり室温の立上がり勾配が高いほど大きくなっていると考えられる。その後安定してくると、「CaseMO-1」を除いて PAC 顕熱処理量と流出熱量は概ね一致している。CaseMO 条件、特に「CaseMO-1」では垂直温度勾配が高いため、

室上部及び膜上での浮力が高くなり膜上側面からの熱損失が大きくなり熱バランスが取れていない可能性が考えられる。この結果から、今回の暖房実験では「膜なし」及び「膜（不織布あり）」における熱バランスは概ね取れていることが分かる。なお、実験終了前の数時間、膜上流出熱量がない部分はデータ不備のため欠損となっている。

また、CaseMF-ファンの結果から、「膜（不織布あり）」において、膜上下循環ファン(循環回数は約 4 回/h)を併用すると立上がりの顕熱処理量が大きくなることが分かる。

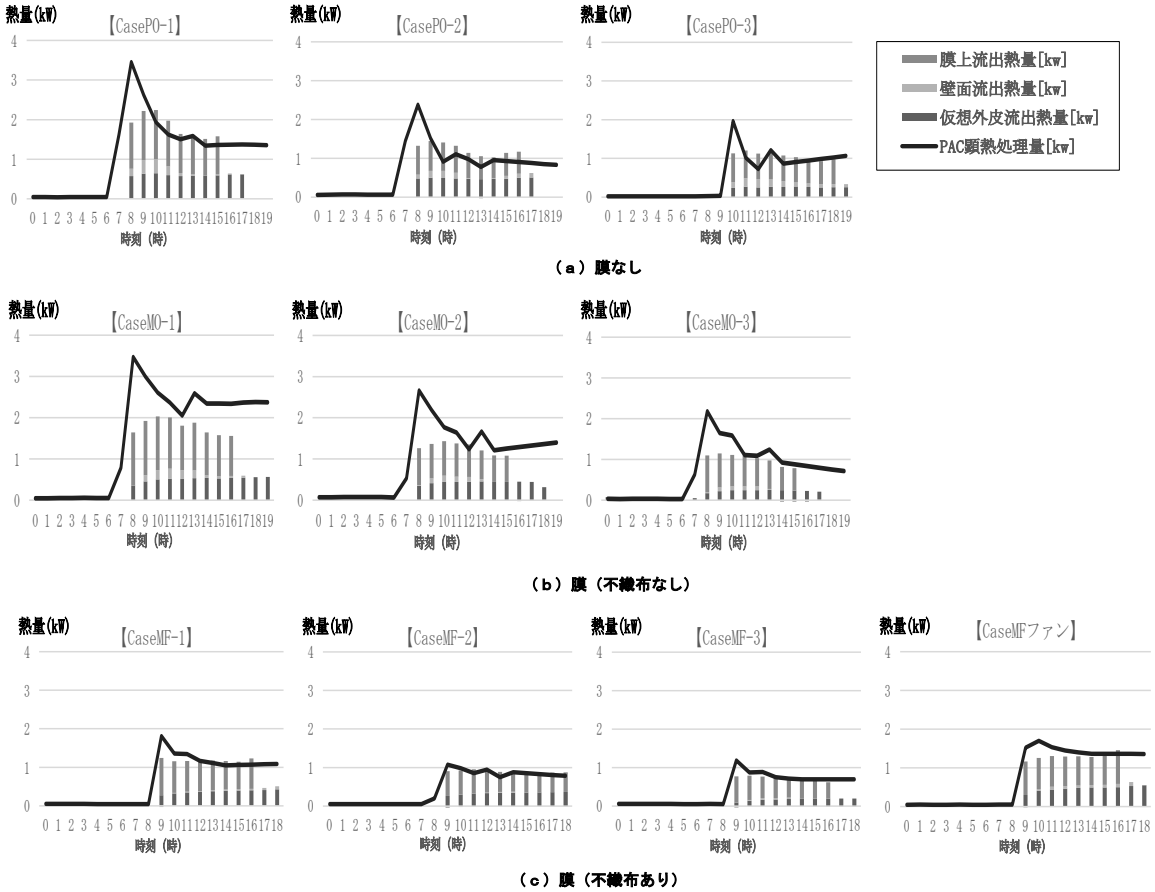


図 6.6.2　顕熱処理量と流出熱量の時刻別変化

6.6.4 室内からの流出熱量と PAC の顕熱処理量及び COP の期間平均値

表 6.6.1 に対象空間の暖房を開始した時刻から膜上流出熱量が欠損するまでの時刻で平均化した各流出熱量と PAC 顕熱処理量及び外気温を示す。この結果から「膜（不織布なし）」以外は流出熱の合計値と PAC 顕熱処理量が概ね一致しており実験における熱収支がとれていることが前項同様に確認できた。また、全条件とも仮想外気空間への流出熱よりも膜上空間への流出熱が多くなっており、暖房時においては膜上空間との断熱性能が重要である。次に「膜（不織布あり）」は最も通気抵抗が大きい膜であるが、膜下の仮想外気空間からの流出熱を膜上の PAC にて膜を介していても適切に処理できていると言える。

次に PAC の COP に着目すると、各膜パターンでの傾向はあまりみられず、PAC 設定温度が高く負荷率が低い条件で COP が低くなる傾向にある。今回の実験は風量をサーモ ON/OFF 時に常時一定としており、COP にはファン電力が含まれていることを踏まえると、冷房時と同様にサーモ OFF 時のファン電力が COP に与える影響が非常に大きいといえる。膜（不織布あり）の COP が 2 から 4 程度となっており他の膜パターンと比較して COP が小さくなっているが、これも冷房時と同様に、膜（不織布あり）のサーモ OFF 時間が長い、つまりファンのみの運転時間が長くなり、結果として負荷率が低くなったためと考えられる。
PAC の適切な選定と制御にて同等の省エネルギー性能を目指す必要がある。

表 6.6.1 PAC 顕熱処理量、COP、室内熱流出量の計算結果（暖房運転時平均値）

天井膜	実験条件	PACの設定温度[℃]	仮想外気の設定温度[℃]	q_{pac}:PACの顕熱処理量[kw]	W_{pac}:PACの消費電力[kw]	負荷率[-]	PAC COP[-]	外気温度[℃]	q_o:仮想外皮流出熱量[kw]	Σq:壁面流出熱量[kw]	q_s:膜上流出熱量[kw]	$q_o+\Sigma q+q_s$:合計流出熱量[kw]	q_{pac} - ($q_o+\Sigma q+q_s$):処理量と流出熱の差[kw]
膜（不織布あり）	Case1（CaseMF-1）	28	8	1.21	0.55	0.09	2.21	13.4	0.37	0.01	0.74	1.12	0.10
	Case2（CaseMF-2）	22	8	0.87	0.26	0.06	3.34	13.6	0.33	-0.01	0.53	0.85	0.02
	Case3（CaseMF-3）	22	14	0.79	0.22	0.06	3.61	13.8	0.17	0.02	0.51	0.71	0.08
	CaseMFファン	28	8	1.44	0.55	0.10	2.63	13.0	0.46	0.05	0.71	1.22	0.22
膜（不織布なし）	Case1（CaseMO-1）	28	8	2.44	0.66	0.17	3.67	9.0	0.52	0.17	1.11	1.81	0.63
	Case2（CaseMO-2）	22	8	1.49	0.33	0.11	4.54	7.6	0.43	0.11	0.74	1.28	0.22
	Case3（CaseMO-3）	22	14	1.09	0.27	0.08	3.96	7.8	0.24	0.08	0.70	1.02	0.07
膜なし	Case1（CasePO-1）	28	8	1.61	0.55	0.11	2.94	9.9	0.61	0.20	0.90	1.71	-0.10
	Case2（CasePO-2）	22	8	0.98	0.24	0.07	4.01	10.7	0.48	0.10	0.54	1.12	-0.14
	Case3（CasePO-3）	22	14	0.97	0.30	0.07	3.27	9.2	0.24	0.18	0.55	0.97	0.00
PAC（暖房）	仕様書定格値（全熱処理量）			14.00	3.59	1.00	3.90	7.0					
	仕様書中間値（全熱処理量）			6.30	1.03	0.45	6.12	7.0					
	低温モード（全熱処理量）			13.50	5.93	0.96	2.28	2.0					

6.7 本章のまとめ

本章では、暖房性能に関して、前章の冷房実大実験と同じ膜材を用いて暖房実大実験を行い、通常の天井カセット方式との比較や、外皮負荷の効率的な除去を目的として、膜上の暖気を強制的に膜下へ降ろした場合の室内温熱環境の検証を行った。さらに、本システムの暖房時の数値シミュレーションモデルを確立するため、室内温度分布の計算方法についても検討し、下記知見が得られた。

① 垂直温度分布の結果から、膜があることで、上部が高く下部が低い温度勾配が生じた。また、不織布を貼った膜の方が温度勾配は小さくなることも分かった。

② 膜があることで、PAC のサーモ ON/OFF にて生じる居住域の温度変化が、小さくなることが分かった。

③ 膜上下循環ファンを設けることで、温度勾配がなく、PAC のサーモ ON/OFF にて生じる居住域の温度変化が小さい温熱環境を創れること、暖房の立上がり時間の短縮ができることが分かった。

④ CO_2 濃度算定結果と測定値の比較から膜上下循環ファンを運転する条件のみで測定値と算出値が一致していたことから、膜上から対象（膜下）空間の冷却壁面に直接吹き降ろされた暖気によって、低温の下降流が減り、均一な温熱環境が形成されたと考えられる。

⑤ 立上がり時の垂直温度経時変化から、不織布を貼った膜では、膜上からしみ出した暖気が最上部までしか直接影響を及ぼしておらず、条件間で影響度合いが異なることが分かった。

⑥ 立上がり時の CO_2 濃度経時変化から、不織布を貼った膜では、仮想外気室の下降気流により、室下部に逸早く膜上の暖気が到達することが分かった。

⑦ 不織布を貼った膜について、冷却面に沿った下降気流を算出し、風量・熱収支を解く計算方法にて、実測値との高い再現性が見られた。

⑧ 実験中の PAC 顕熱処理量と流出熱量の結果から、暖房時は、膜上から天井への流出熱が大きく、天井面の断熱性が重要であることが分かった。

⑨ 膜上下循環ファン(循環回数は約 4 回/h)を併用すると立上がりの顕熱処理量が大きくなることが分かった。

⑩ 冷房時と同様に暖房時においても、室内負荷と PAC の顕熱処理量の結果から、膜（不織布あり）では、膜を介していても PAC にて室内負荷に応じた熱処理が行われていることが示された。

⑪ PAC の COP の結果から、膜（不織布あり）では 2 から 4 程度と、膜なしと比較して COP が小さくなった。この原因は、冷房時と同様に、膜（不織布あり）のサーモ OFF 中でのファンのみの運転により負荷率が低くなったためと考えられ、PAC の適切な選

定と制御にて同等以上の省エネルギー性能を目指す必要性が示された。

以上より、本研究で提案した織物式膜材にて冷房に引き続き暖房時の実大実験を実施した結果、膜上下循環ファンを負荷に合わせて運転させることで、良好な温熱環境が得られることが分かった。一方で、本報にてパラメータとした通気量に関しては、今回の温熱計算にガス濃度計算を組込み、CO_2濃度測定値と同定を行い求めていくことが今後の課題と考えている。次章では、本章までで得られた知見にて冷房時、暖房時それぞれの設計手法の提言を行う。

参 考 文 献

1)伊藤尚寛,横井睦己,中原信生：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

2)Peter V.Nielsen:DISPLACEMENT VENTILATION -theory and design,Aalborg University,1993

3)甲藤好郎:伝熱概論,㈱養賢堂,pp.135,1964

4)戸河里敏,荒井良延,三浦克弘:大空間における上下温度分布の予測モデル大空間の空調・熱環境計画手法の研究 その1,日本建築学会計画系論文報告集, 第 427 号,pp.9-19,1991

第７章　PAC を用いた膜天井放射空調方式の設計手法

7.1 はじめに

4 章では実用的なシステムとして確立すべく、膜上下交換空気量を増やす方法と換気方式の検討を、5 章及び前章では、膜材の抵抗、耐久性、膜天井内のメンテナンス性など実用化への課題を解決するために、織物式の膜材にて冷房及び暖房実大実験を行い、空調立上がり時等に対応できる制御の必要性など設計手法に関する課題はあるが、冷房時だけでなく暖房時においても安定した温熱環境が実現でき、実用的な空調システムとなりうることを示した。そこで、3 章から 6 章までの実大実験結果及び考察内容を駆使して、本研究で提案した 2 つの膜材の中で、実用性が示されたガラス繊維織物の成型材(織物膜)による膜天井放射空調システムの設計手法を検討する。また、本システムはインテリア空間の年間冷房ゾーンでの適用が可能であるが、汎用性を鑑みて、ペリメータ空間も有するような冷暖切替ゾーンでの適用を目指し、設計手法を検討していく。

7.2 提案検討する膜天井放射空調方式

図 7.2.1 に本章で提案検討する膜天井空調方式の概要を示す。建築計画としては、膜上天井面の区画と断熱を行っている。設備計画としては、立上がり時などに膜上からの冷気の浸み出し量を増やすための膜下室内から膜上への循環ファンを設置する。また、膜天井だけでは膜下室内の負荷処理ができない場合は、膜下室内負荷処理のため膜上空気を吹出す室内負荷処理ファンを設けた。換気計画は、実験結果から換気効率を重視し、外調機で処理した外気を、膜下室内に直接供給し、膜下室内から排気する計画とした。

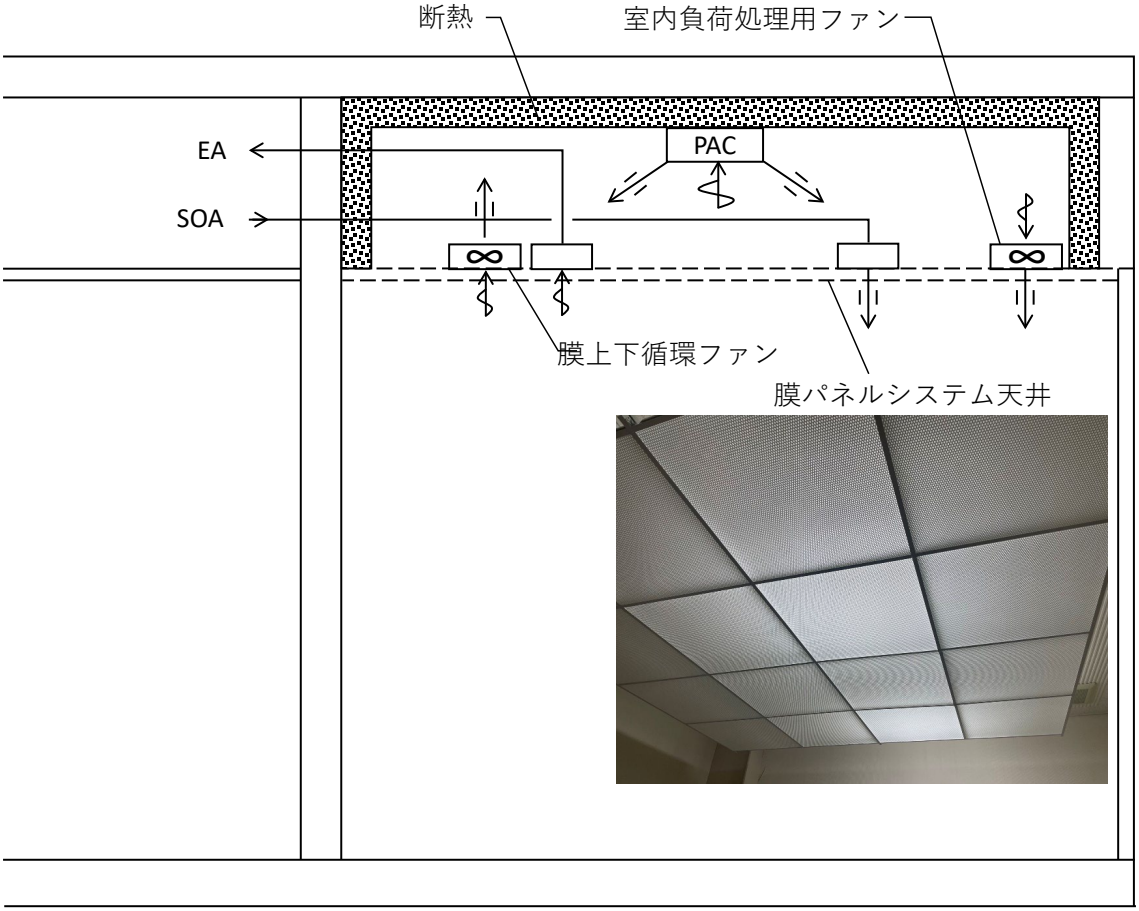
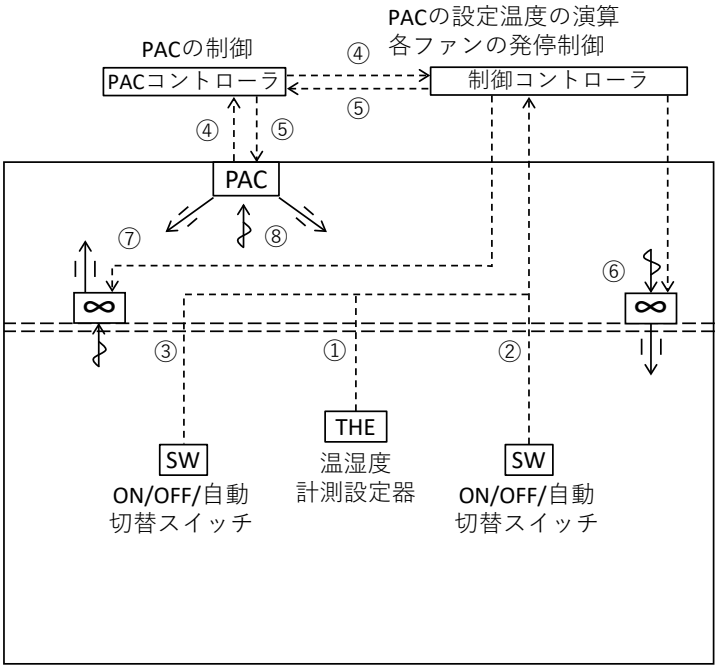


図 7.2.1　本章で提案検討する膜天井空調方式の概要図



①室内温湿度の状態計測値(θi、RHi)、設定値(θisp、RHisp)の読込
②負荷処理用ファンの運転モード読込(ON/OFF/自動)
③膜上下循環ファンの運転モード読込(ON/OFF/自動)
④PACの設定温度(θPACsp)の読込
⑤PACの設定温度(θPACsp)の制御
⑥負荷処理用ファンの発停制御
⑦膜上下循環ファンの発停制御
⑧PAC機器本体の吸込温度によるサーモON/OFF制御

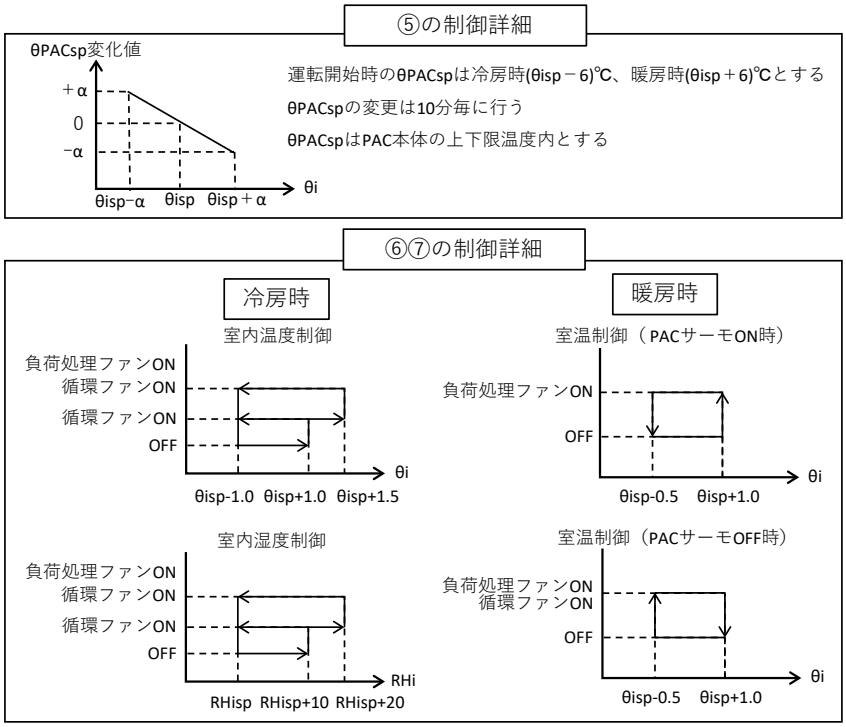


図 7.2.2　本章で提案検討する膜天井空調方式の制御システム概要図

図 7.2.2 に制御システム概要図を示す。PAC は膜上でのショートサーキットありきの運転となるため、機器保護の観点から、機器本体に内蔵された吸込温度によるサーモ ON/OFF 制御を活かした上で、室内温度設定器の設定値と測定値の差の大小で温度制御を行う方式とした。具体的には、室温設定値と室温測定値の差に応じて、PAC 本体の設定温度を変更、つまり膜上温度を変更させる。また、実大実験の結果から、PAC のファン動力が COP に与える影響が大きいことが示されたことから、サーモ OFF 時は PAC のファンは OFF とする設定にする。ただし、除塵など清浄度の確保が必要な場合はサーモ OFF 時でもファンを ON とする。

冷房時においては、PAC 本体の設定温度を変更しても、室温測定値が室温設定値に到達しなれば循環ファンを運転させる制御とした。なお、室内負荷処理用のファンは、循環ファン運転時において、室温が設定値に至らない場合に運転させる制御とした。こうすることで立上がり時や室内負荷の大きい場合にのみ室内負荷処理用のファンを運転させることができる。一方、本システムでは、潜熱の適切な負荷処理も重要な課題となっている。そこで、室内相対湿度が設定値を超えた場合も同様に、循環ファンと室内負荷処理用のファンを運転させる制御を組み込んでいる。

暖房時においては、PAC 本体の設定温度を変更しても、室温測定値が室温設定値に到達しなれば外皮負荷処理用のファンを運転させる制御とした。一方、本システムでは、PAC がサーモ OFF していても室内発熱等により室温が上昇する可能性も想定される。その際、外皮負荷処理用のファンだけでなく循環ファンを運転させることで、プルームで天井付近に上昇してきた室内発熱を循環ファンから天井内経由で室内負荷処理に利用する、いわば排熱回収運転を行う制御を組み込んでいる。

循環ファン及び室内負荷処理用ファンの風量は清浄度を確保するための除塵目的として病院の一般病室等に用いられている 6[回/ｈ][1)]以上が必要と考えている。また、膜上を陽圧にする必要があるため、循環ファンの風量を室内負荷処理用ファンの風量より若干高くしておく必要がある。

7.3 冷房時の設計手法

7.3.1 はじめに

本システムでは膜上空間にて PAC が製造した冷熱にて、膜から膜下室内への放射・対流熱伝達と、膜上空間からの浸み出し冷気供給によって膜下室内の負荷処理が行われる。本システムでは、この冷熱にて照明・人体・機器発熱分が除去できれば良いと考えていたため、本研究では、これらの発熱量を 45.9[W/㎡]と昨今の一般的な事務所ビルの内部発熱と同等かやや大きい程度で設定し実験を行っている。また、室内温度分布は安定していることからも、冷房時は実大実験結果を用いて設計手法の検討を行う。

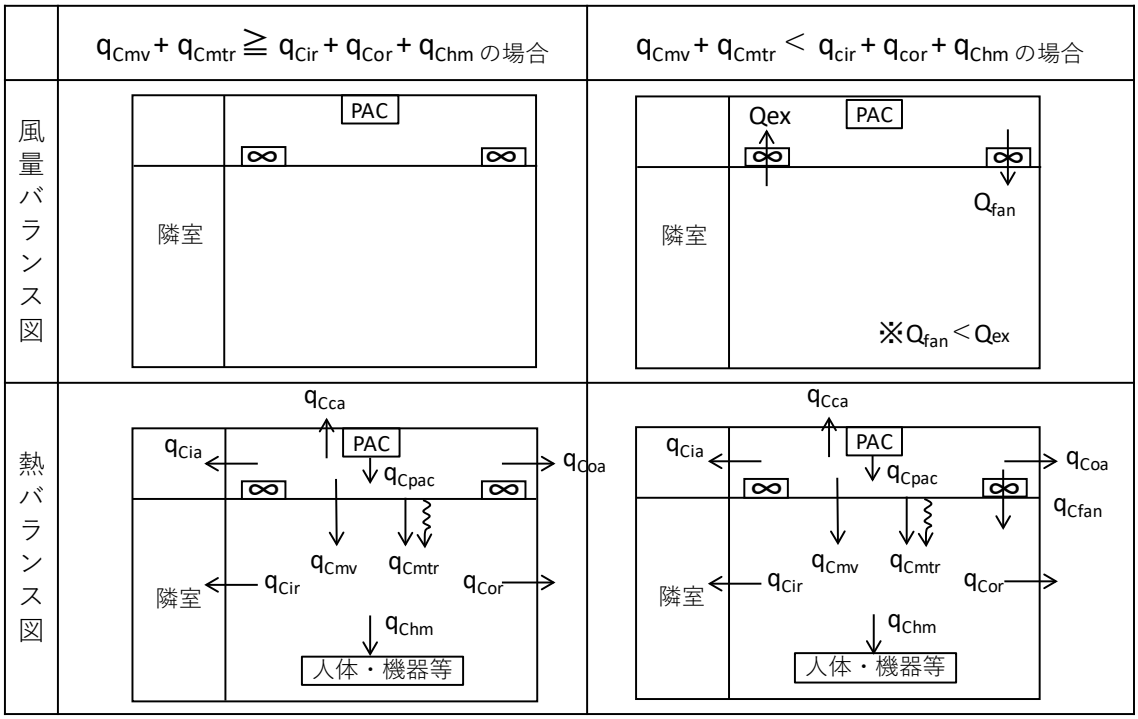


図 7.3.1　冷房時の風量バランス及び熱バランスの考え方

7.3.2 PAC の空調能力、膜上下循環ファン及び室内負荷処理ファンの設定

図 7.3.1 に、冷房時の風量バランスと熱バランスの考え方を示す。膜下室内の冷房負荷を膜からの冷熱供給量で処理できる場合（$q_{Cmv}+q_{Cmtr} > q_{Cir}+q_{Cor}+q_{Chm}$ の場合）、室内負荷処理ファンによる運転は不要となり、PAC の必要冷却能力は下記の式で表せる。

$$q_{Cpac} = q_{Cmv} + q_{Cmtr} + q_{Cia} + q_{Coa} + q_{Cca} \qquad (1)$$

膜からの冷熱供給量で冷房負荷を処理できない場合（$q_{Cmv}+q_{Cmtr} < q_{Cir}+q_{Cor}+q_{Chm}$ の場合）、膜上から膜下室内への冷熱供給量を増加させるために、室内負荷処理ファンを運転させる必要があるので、PAC の必要冷却能力は下記の式となる。

$$q_{Cpac} = q_{Cmv} + q_{Cmtr} + q_{Cia} + q_{Coa} + q_{Cca} + q_{Cfan} \qquad (1')$$

ここで、

$$q_{Cfan} = q_{Cir} + q_{Cor} + q_{Chm} - q_{Cmv} - q_{Cmtr} \qquad (2)$$

となるため、負荷処理ファン風量は次式となる。

$$Q_{fan} = \frac{q_{Cfan}}{C_p \rho \Delta t_{sp}} \quad (3)$$

ただし、膜からの浸み出し冷熱供給量を確保するため、膜上天井内を若干陽圧に保つ必要がある。つまり、室内負荷処理ファンの風量より、膜上下循環ファンの風量の方を若干大きく設定($Q_{ex} > Q_{fan}$)する必要がある。

ここに、

q_{Cpac}:	PAC の必要冷却能力	[W]
q_{Cmtr}:	膜からの対流・放射冷却熱量	[W]
q_{Cmv}:	膜からの浸み出し冷却熱量	[W]
q_{Cia}:	膜上隣室冷却負荷	[W]
q_{Coa}:	膜上外皮冷却負荷	[W]
q_{Cca}:	膜上上部冷却負荷	[W]
q_{Cir}:	膜下室内隣室冷却負荷	[W]
q_{Cor}:	膜下室内外皮冷却負荷	[W]
q_{Cfan}:	負荷処理ファンによる室内冷却熱量	[W]
Q_{ex}:	膜上下循環ファンの風量	[m³/s]
Q_{fan}:	室内負荷処理ファンの風量	[m³/s]
ρ:	空気の密度(=1.204)	[kg/m³]
C_p:	空気の定圧比熱(=1006)	[J/(kg・℃)]
Δt_{sp}:	膜上下設定温度差	[℃]

7.3.3 膜からの浸み出し冷却熱量と対流・放射冷却熱量の設定

膜からの浸み出し冷却熱量は膜からの浸み出し風量 Q_{mv} を用いて次式で表される。

$$q_{Cmv} = C_p \rho \Delta t_{sp} Q_{mv} \quad (3)$$

次に、膜からの対流・放射冷却熱量は、膜の総合熱伝達率 α_{cm} を用いて次式で表される。

$$q_{Cmtr} = \alpha_{cm}(\theta_{rsp} - T_m) S_m \quad (4)$$

ここに、

Q_{mv}:	膜からの浸み出し風量	[m³/s]
α_{cm}:	膜の総合熱伝達率	[W/(m²・℃)]
θ_{rsp}:	室内設定温度	[℃]
T_m:	膜表面温度	[℃]
S_m:	膜面積	[m²]

表 7.3.1 に 5 章での実大冷房実験の PAC 顕熱処理量、膜上から上部への貫流熱、その差分となる膜上から膜下室内への供給冷熱、膜上から膜下室内への浸み出し風量(Q_{mv})、この浸

み出し風量に膜上・室内温度差を乗じて算出した膜からの浸み出し冷却熱(q_{Cmv})、これを膜上から膜下室内への供給冷熱から差し引いた、膜からの対流・放射冷却熱(q_{Cmtr})、これと膜表面と室内温度差から求めた膜の総合熱伝達率(α_{cm})を示す。なお、Case5(吹出角度が 30℃)については、PAC からの吹出冷気が膜面に直接あたることで膜上空間全体にいきわたらないことにより、膜上から膜下室内への伝達熱が低くなったと考えられる。この結果から、式(3)における膜からの浸み出し風量(Q_{mv})は 200 ㎥/h を膜面積で除した 11 ㎥/(h・㎡)程度に膜面積を乗じて設定すれば良いことが分かる。また、式(4)における膜の総合熱伝達率(α_{cm})は、多少ばらつきはあるものの、6～7W/(㎡ ℃)程度で設定すれば良いことが分かる。また、膜上・室内温度差と膜表面・室内温度差の関係から次式となり、式(4)と組み合わせることで膜からの対流・放射冷却熱(q_{Cmtr})が設定できる。

$$\theta_{rsp} - T_m \fallingdotseq \frac{1}{2}\Delta t_{sp} \qquad (5)$$

以上より、冷房時においては実大実験結果を用いた各設計値の設定方法を示した。なお、膜上・室内温度差の設定値(Δt_{sp})は実験結果より 6℃程度が望ましい。

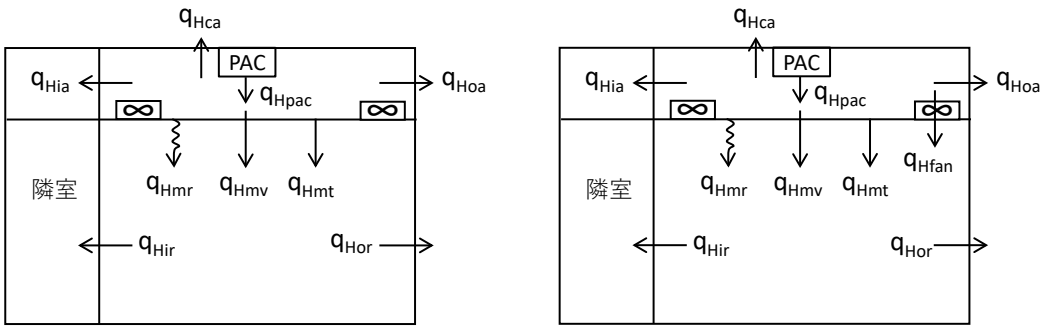
表 7.3.1　5 章における実大冷房実験の膜からの浸み出し風量と膜の総合熱伝達率

天井膜	実験条件	PACの設定温度[℃]	PACの循環風量[m3/h]	総発熱量[kW]	PAC顕熱処理量[kW]	膜上から上部への貫流熱[kW]	膜上から膜下への冷却熱[kW]	膜上・室内温度差[℃]	膜表面・室内温度差[℃]	Q_{mv}:膜上から室内への風量[㎥/h]	q_{mv}:膜からの浸み出し冷却熱[kW]	q_{mtr}:膜からの対流・放射冷却熱[kW]	α_{cm}:膜の総合熱伝達率[W/(㎡ ℃)]
膜 不織布あり	Case1	19	1016×2	0.812	0.64	-0.11	0.75	6.15	3.11	203	0.42	0.33	6.04
	Case2			0.412	0.53	-0.05	0.59	4.20	2.11	223	0.31	0.27	7.27
	Case3		712×2	0.812	0.88	0.00	0.88	7.63	3.82	136	0.35	0.53	7.89
	Case4	22	1016×2		0.74	-0.12	0.86	6.04	2.94	217	0.44	0.42	8.07
	Case5	19			0.57	0.01	0.56	6.69	3.07	206	0.46	0.10	1.84
	Case6			1.236	1.00	-0.08	1.08	8.47	4.24	240	0.68	0.40	5.36

7.4 暖房時の設計手法

7.4.1 PAC の設定

図 7.4.1 に、暖房時の熱バランスの考え方を示す。6 章にて検証した数値シミュレーションの基本モデルに各種熱収支計算を組込み、次式にて PAC の必要加熱能力を設定する。



(a)モデル計算による垂直温度分布が良好な場合　　(b)モデル計算による垂直温度分布が良好でない場合

図 7.4.1　暖房時の熱バランスの考え方

$$q_{Hpac} = q_{Hmr} + q_{Hmv} + q_{Hmt} + q_{Hia} + q_{Hoa} + q_{Hca} \tag{6}$$

ただし、シミュレーションによる垂直温度分布が好ましい結果でない場合は、負荷処理ファンを設け、風量を設定し次式にて PAC の必要加熱能力を設定する。

$$q_{Hpac} = q_{Hmr} + q_{Hmv} + q_{Hmt} + q_{Hia} + q_{Hoa} + q_{Hca} + q_{Hfan} \tag{6'}$$

ここに、

q_{Hpac}：　PAC の必要加熱能力　　[W]
q_{Hmr}：　膜からの放射加熱量　　[W]
q_{Hmv}：　膜からの浸み出し加熱量　　[W]
q_{Hmt}：　膜からの熱伝達量　　[W]
q_{Hia}：　膜上隣室加熱負荷　　[W]
q_{Hoa}：　膜上外皮加熱負荷　　[W]
q_{Hca}：　膜上上部加熱負荷　　[W]
q_{Hir}：　膜下室内隣室加熱負荷　　[W]
q_{Hor}：　膜下室内外皮加熱負荷　　[W]
q_{Hfan}：　負荷処理ファンによる室内加熱量　　[W]

なお、この場合、負荷処理ファンからの吹出気流がどのブロックまでどの程度の風量が到達するのかを予測するサブモデルの組み込みが課題となる。

7.4.2 室内負荷処理用ファンの効果

図 7.4.2 に、6 章における暖房実大実験の膜（不織布あり）での室内負荷処理用ファンの運転の有無（CaseMF-1、CaseMF-ファン）による定常時の鉛直温度分布を示す。なお、ファンの風量は室内循環回数が 4 回/h となる 230 ㎥/h としている。この結果から、ファンの運

転の有無で膜上、膜表面温度と FL+3000 mmの温度は差がないことが分かる。また、CaseMF-ファンでは、FL+3000 mmの温度で垂直温度分布が安定していることがわかる。**図 7.4.3** に、CaseMF-1 と CaseMF-ファンの垂直温度分布の経時変化を示す。この結果において、最上段の FL+3000 mmの温度を比較すると、PAC 運転開始して 2 時間後ぐらいまで、CaseMF-1 の方が高くなっていることが分かる。これは CaseMF-ファンでは PAC 運転開始後から垂直温度分布差がほとんどなく、最下部まで加熱されている一方で、CaseMF-1 では勾配のある温度成層が形成され FL+3000 mmだけが高くなったと考えられる。

一般的に室内の除塵のため、空調による室内空気循環回数を 6 回/h 以上とすることが求められるが、実験においては、室内負荷処理ファンの循環回数が 4 回/h 程度にて、良好な室内垂直温度分布が実現できた。壁面からの冷却下降流の強弱に影響されるものではあるが、この結果は、室内負荷処理ファンの能力設定の参考になるものと考えている。

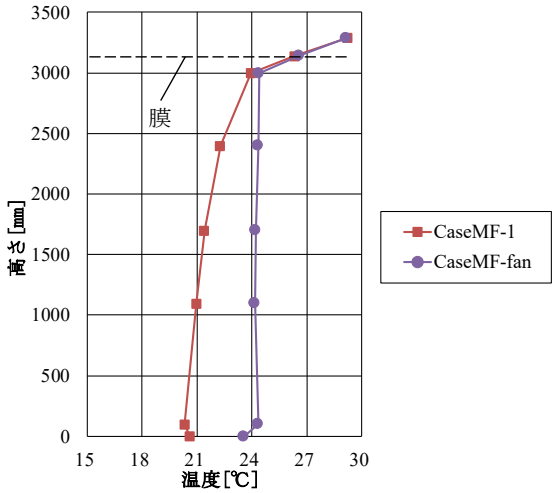


図 7.4.2　6 章における実大暖房実験の鉛直温度分布

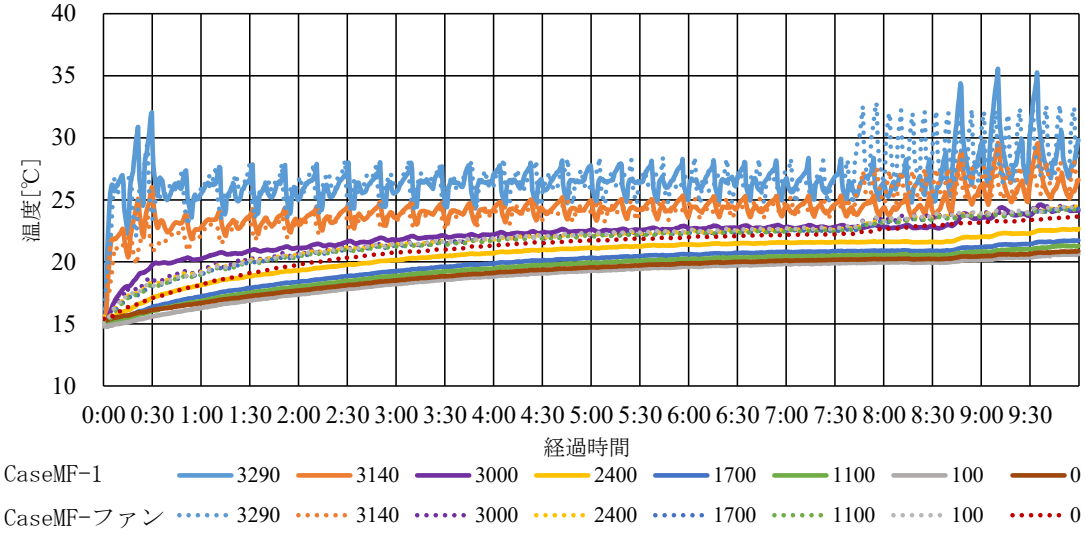


図 7.4.3　CaseMF-1 と CaseMF-ファンにおける垂直温度の分布の時系列変化

7.5 冷房時の被験者実験

7.5.1 実験の目的

本システムについて、測定データに基づく物理指標を用いて検証を行ってきたが、設計図にスペックインする上で、暑い・寒い・快適といった人間心理に基づく生理反応でも、物理指標での考察通りの効果が実現できていることが必要となる。そこで今回は、実大実験を実施した実験室にて、アンケート調査を用いた被験者実験を行い本システムの有用性を検証することを目的としている。なお、今までの実験と同様に、通常の天井カセット方式と比較することで、本システムの有用性を検証した。

7.5.2 実験室概要

実験は 2021 年 9 月 1 日～2021 年 9 月 27 日に行った。実験室は、今までの実験と同様に、内寸 7.0m×6.13m の室を壁(グラスウール 50mm、プラスターボード 12.5mm)で区切り、壁の内側空間(以下、対象空間)は室内、外側空間は屋外を想定し、対象空間は内寸 4.41m×4.01m、高さ 3.44m であるが、本章では、5 章と同様に、床上 3.14m の高さにガラス繊維を織物上に編み込んで成型した不燃性の膜を貼り実験を実施した。平面図と被験者配置の考え方を**図 7.5.1** に示す。室内に 4 人掛けのデスクを配置し、5 章の DR(Draught Rate)の結果から、天井カセット方式(膜なし)と膜あり方式で差が見られる位置に被験者を配置した。発熱体は、パソコンを模擬したヒーター(50W/個)を机上に 4 個、被験者が座らない位置に人体発熱としてブラックランプ(53W/個)を床上 0.6m の高さに 4 つ配置した。なお、被験者入室後は被験者位置のブラックランプは消灯した。

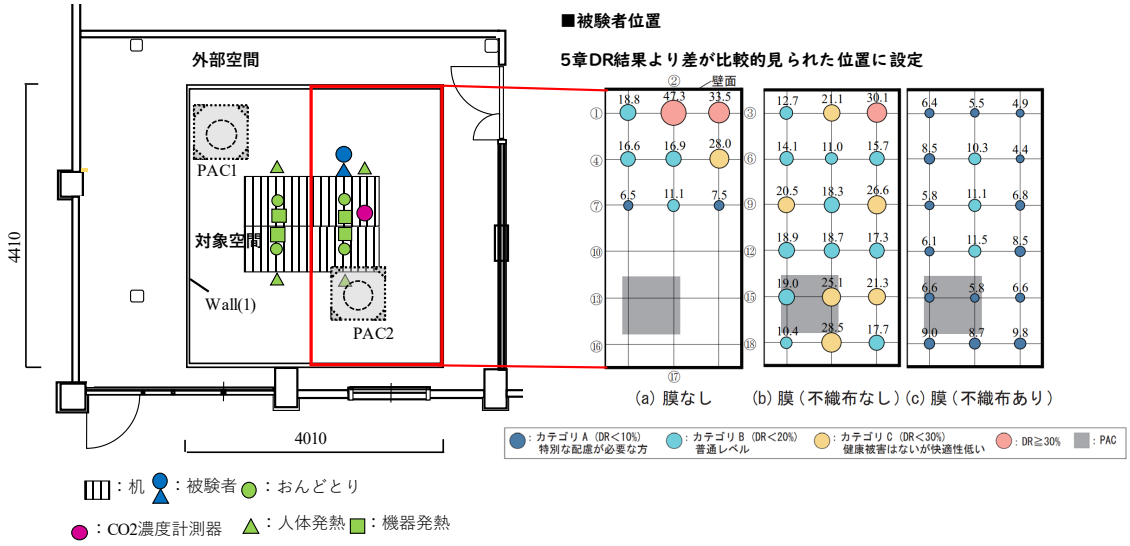


図 7.5.1　被験者実験における平面図と被験者配置の考え方

温度測定点は**図 7.5.1** に示すデスク上部に 4 点おんどとりを設けた。なお、机上に CO_2 濃度測定器を設定しているが、実験期間において感染症蔓延期であったことから、1000ppm を超えないように実験を行うために設置した。

実験は、膜を敷設しない天井カセット方式（以下、膜無し）と膜(不織布あり)を敷設した本方式（以下、膜有り）の 2 条件で行った。

7.5.3 実験方法と分析方法

実験は、膜を敷設しない天井カセット方式（以下、膜なし）と膜(不織布あり)を敷設した本方式（以下、膜有り）の 2 パターンで行った。実験条件は、どちらも室内温度が 26℃程度にするため PAC の設定温度を膜なしでは 26℃、膜ありでは 21℃とした。PAC 風量と吹出角度はそれぞれ 1016 ㎥/h、60° とした。また、被験者には事前に連絡をし、着衣量が 0.5clo に揃うようにした。

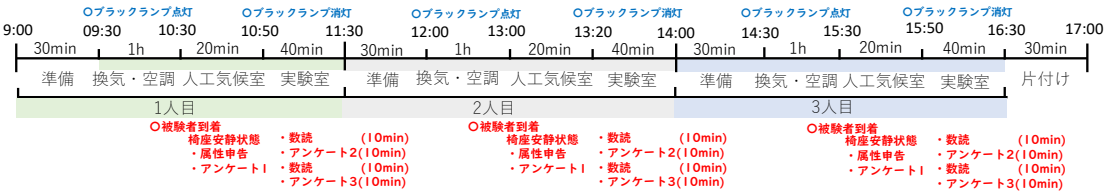


図 7.5.2　実験スケジュール

表 7.5.1　被験者実験における属性申告アンケート

	項目	選択肢
1	被験者番号	
2	性別	男性 / 女性
3	年齢	10代以下 / 10代 / 20代 / 30代 / 40代 / 50代 / 60代以上
4	職業	会社員 / 学生 / その他
5	身長	～150cm以下 / 150～160cm / 160～170cm / 170～180cm / 180cm～
6	体重	～40kg以下 / 40～50kg / 50～60kg / 60～70kg / 70～80kg
7	暑がり/寒がり	寒がり / やや寒がり / どちらでもない / やや暑がり / 暑がり
8	空調の好き/嫌い	嫌い / やや嫌い / どちらでもない / やや好き / 好き
8	昨夜の睡眠時間	～3時間以下 / 3～5時間 / 5～7時間 / 7～9時間 / 9時間～
9	直前の食事	しっかり食べた / 少し食べた / 食べていない
10	今日の体調	良好 / 普通 / 不調
11	今日の服装	例：靴下、長袖Yシャツ、ベスト、長ズボン 例：靴下、長袖Yシャツ、ベスト、スカート
12	夏の 通常業務時の服装	例：靴下、長袖Yシャツ、ベスト、長ズボン 例：靴下、長袖Yシャツ、ベスト、スカート
13	作業時における 光環境の好み	自然光 / 人工照明
14	作業時における 光環境の好み	明るい / 暗い

表 7.5.2　被験者実験における快適性申告アンケート

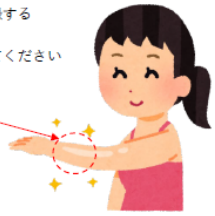
項目			選択肢
1	全身温冷感	実験室内の温熱環境を どのように感じるか	1.5　1.0　0.5　0.0　0.5　1.0　1.5 寒い　涼しい　やや涼しい　どちらでもない　やや暖かい　暖かい　暑い
2	冷温熱放射感	実験室内で冷温熱放射感を 感じたか	0　1　2　3 感じない　やや感じる　感じる　非常に感じる
3	どこから放射 を感じたか	実験室内のどこから 冷温熱放射を感じたか	0　1　2　3　4　5　6 感じない　天井　床　西壁　東壁　南壁　北壁
4	気流感	実験室内で気流を 感じたか	0　1　2　3 感じない　やや感じる　感じる　非常に感じる
5	温度の快適感	実験室内は熱的に 快適か不快か	-3　-2　-1　0　1　2　3 非常に不快　不快　やや不快　どちらでもない　やや快適　快適　非常に快適
6	気流の快適感	実験室内は気流的に 快適か不快か	-3　-2　-1　0　1　2　3 非常に不快　不快　やや不快　どちらでもない　やや快適　快適　非常に快適
7	予測温度	実験室内の温度を 何℃程度だと感じたか	20　21　22　23　24　25　26　27　28　29　30
8	上腕温度	上腕温度が何℃か	入室・退室ごとに上腕温度を計測して記録する 実験中、長そでの方は肘まで腕まくりしてください ここをはかります  入室時　　退室時
9	作業効率	1時間の作業をどれだけ 進められたか	0　1　2　3 進まない　やや進んだ　進んだ　非常に進んだ
10	受容率	気流を弱くしたいか 強くしたいか	-1　0　1 弱くしたい　どちらでもない　強くしたい
11	受容率	温度を上げたいか 下げたいか	-1　0　1 下げたい　どちらでもない　上げたい

図 7.5.2 に実験スケジュールを示す。被験者にはまず実験室の隣にある人工気候室にて 26℃、50～60%RH の空間に 20 分滞在してもらう。その間にアンケート 1（属性申告、空調快適性申告）の記入を行ってもらう。その後実験室に入室し、作業として数独を 10 分間実施後、アンケート 2(空調快適性申告)に回答してもらう。入室 20 分経過後に再度数独 10 分間実施し、アンケート 3(空調快適性申告)に回答してもらい、入室 40 分経過後に終了となる。なお実験中は換気ができないので、感染症蔓延期であったことから室内の CO_2 濃度に考慮し、被験者毎に換気・空調の時間を設けた。

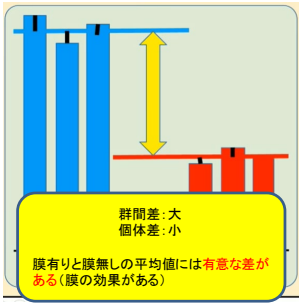
次に、**表 7.5.1** に属性申告アンケート、**表 7.5.2** に快適性申告アンケートを示す。属性申告内容については既報[2)]、快適性申告内容については既報[3)]を基に作成した。今回検定方法として、空調快適申告の Case 内（実験室 10 分経過と 30 分経過）においては T 検定を用いた。空調快適申告の Case 間（膜の有無）においては被験者属性に差が生じ、平均値での有意な検定ができないと判断できるため、割合による検定である χ 二乗検定を用いた。**図 7.5.3**、**図 7.5.4** にそれぞれ T 検定と χ 二乗検定の概要を示す。

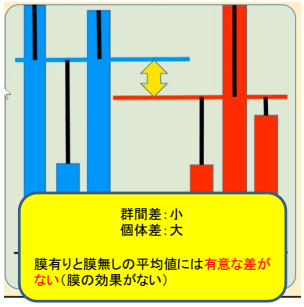
■T検定

・平均値を対象とした検定手法

・二つの群間での平均値の有意差の有無を確かめることが出来る

⇒たまたま、偶然、という結果を取り除くことが可能





①帰無仮説（知りたい事実と反対の主張）を設定

「膜有りと膜無しは平均値に有意差がない」と仮定

②判断基準としての有意水準（一般的に0.05）を設定

③t値を算出し、そこからt分布を用いて得られたデータの希少性を表すP値を算出

④P値＜有意水準であれば、その帰無仮説は起こりずらいと判断できる
（膜有りと膜無しで有意差が生じる）

図 7.5.3　T 検定の考え方

■ χ 二乗検定

・カテゴリカルデータ（質的データ）を対象とした検定手法

・二つの変数間での関連の有無を確かめることが出来る

⇒たまたま、偶然、という結果を取り除くことが可能

膜の有無が関係ないとき、きっとこうなるだろう

実験室30分経過時の膜の有無と全身温冷感アンケート結果

全身温冷感	膜無し	膜有り	合計[人]
暑い	0	0	0
暖かい	0	0	0
やや暖かい	0	0	0
どちらでもない	1	3	4
やや涼しい	2	6	8
涼しい	6	1	7
寒い	1	0	1
合計[人]	10	10	20

左表を基にした期待度数

全身温冷感	膜無し	膜有り	合計[人]
暑い	0.0	0.0	0
暖かい	0.0	0.0	0
やや暖かい	0.0	0.0	0
どちらでもない	2.0	2.0	4
やや涼しい	4.0	4.0	8
涼しい	3.5	3.5	7
寒い	0.5	0.5	1
合計[人]	10	10	20

二つの表がどの程度異なるかを数値的に判断する

①元データと期待度数の違いを下記の式を使って計算して合計算出（χ二乗値）

$$\Sigma \frac{(\text{元データ}-\text{期待度数})^2}{\text{期待度数}}$$

②χ二乗値の大小を統計的仮説検定を用いて判断

χ二乗値 ⇨ P値

χ二乗値大きいとP値が小さくなる

③一般的にP値が0.05よりも小さければχ二乗値が十分大きく膜の有無が関係あるといえる

図 7.5.4　χ 二乗検定の考え方

7.5.4 実験結果

図 7.5.5 に主な被験者属性を示す。男女比率は、膜の有無での実験で変化はなかったが、膜無しの方が寒がりの人が 1 人少なく、空調の嫌いな人が 1 人多かった。なお、被験者は全員 20 代であった。

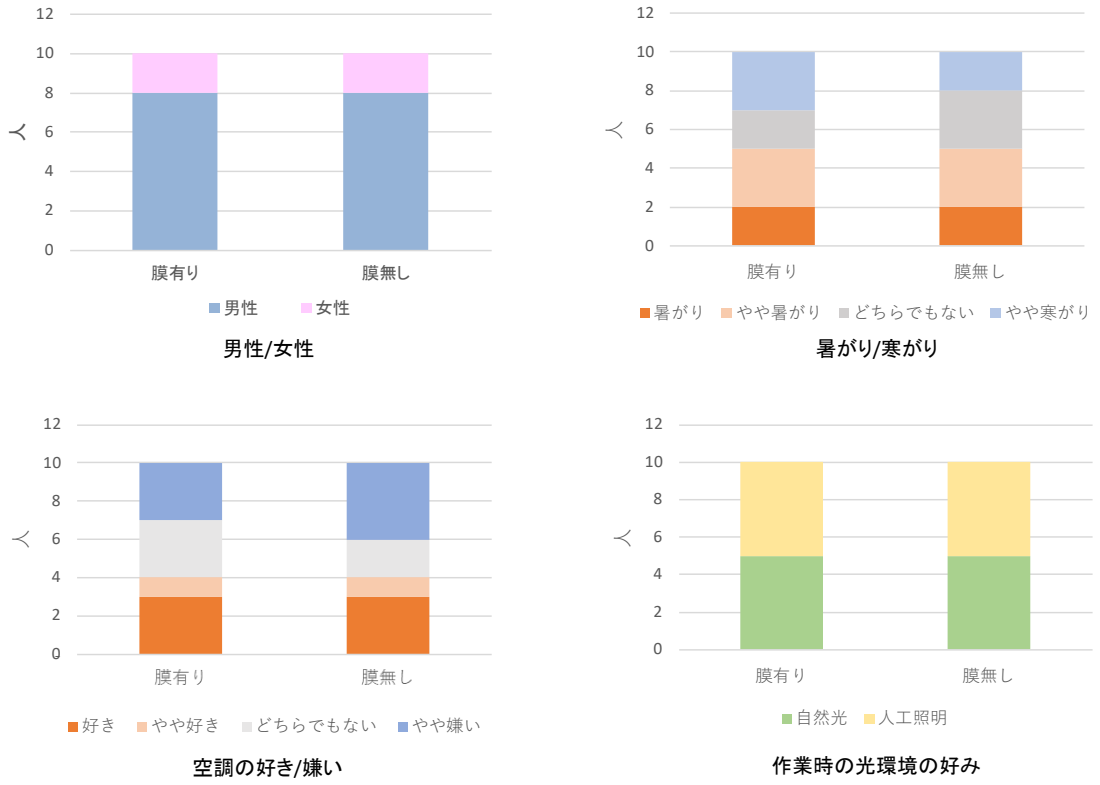


図 7.5.5　被験者属性アンケート結果

図 7.5.6 に人工気候室、実験室入室後 10 分後、30 分後（アンケート 1、2 及び 3）の結果を集計した空調快適申告の平均値を示す。今回 T 検定を行った結果、Case 内（実験室 10 分経過と 30 分経過）においては有意差を確認できなかった。この結果から、膜の有無それぞれの条件で、時間経過による被験者の心理に変化が生じなかったことが分かる。一方、Case 間（膜の有無）において χ 二乗検定を行った結果、気流感の実験室 10 分経過時と 30 分経過時で有意差が生じた。このことから膜有りのほうが膜無しに比べ気流感を感じにくいことがわかる。また、気流の受容率においても実験室 30 分経過時において膜の有無で有意差が生じた。この結果から、膜無しの場合は時間経過に伴い気流の受容率を弱くしたい傾向が示唆されたが、膜有りの場合は時間が経過しても気流の受容率に変化が生じないことが示唆された。

以上より、5 章で得られた DR(Draught Rate)の分布通りの温冷感となっており、暑い・寒い・快適といった人間心理に基づく生理反応は、実験で得られた物理指標での考察とが一致していることが分かった。

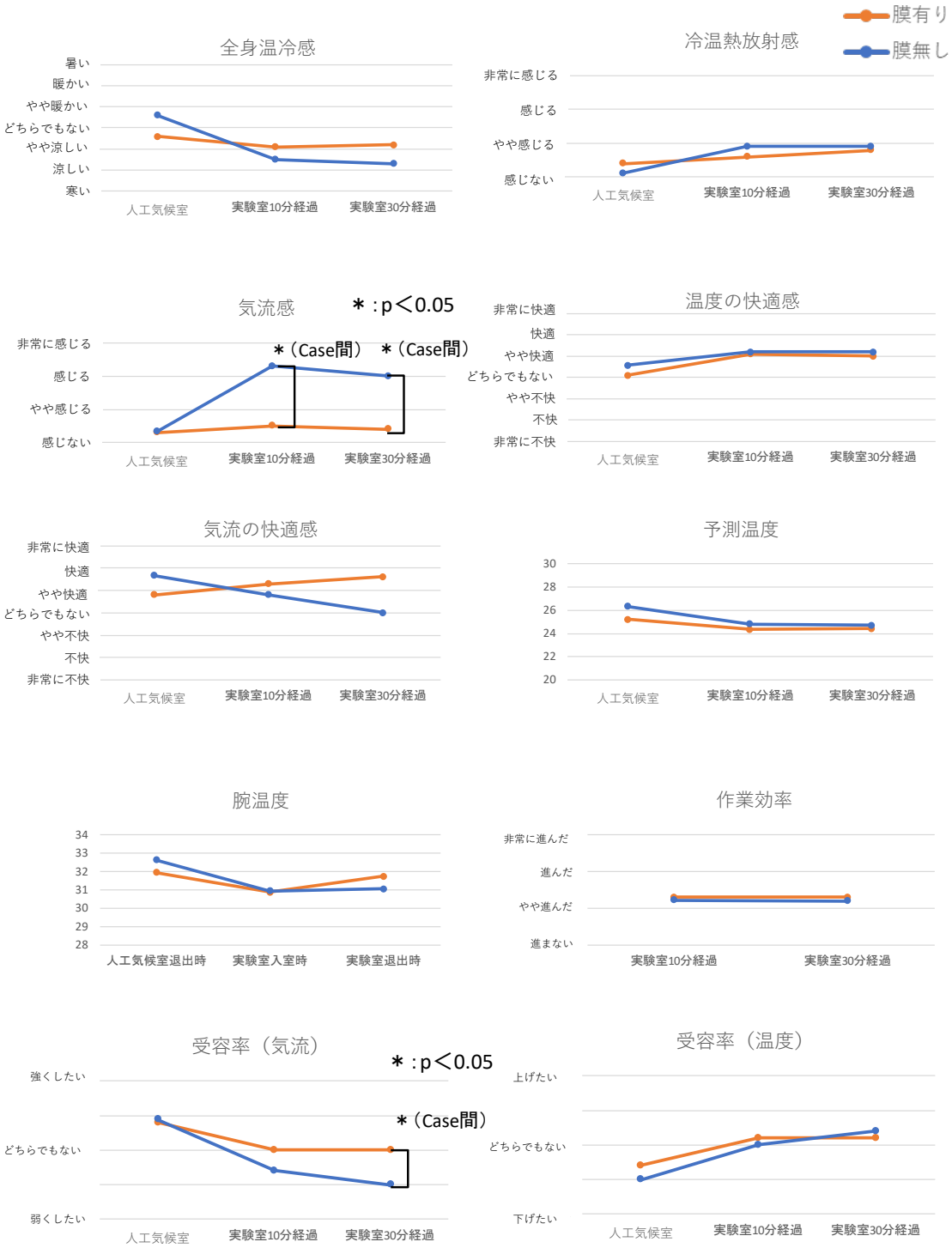


図 7.5.6　快適性申告アンケート結果

7.6 本章のまとめ

本章では、本研究で提案した２つの膜材の中で、実用性が示されたガラス繊維織物の成型材による膜天井放射空調システムについて、インテリアゾーンへの適用だけではなく、汎用性を鑑みて、ペリメータ空間も有するような冷暖切替ゾーンでの適用を目指し、設計手法の検討を行った。3 章から 6 章までの実大実験結果及び考察内容を駆使して検討を行った結果、下記の設計提案や知見を得た。

① 建築計画では、膜上天井面の区画と断熱を行う。

② 設備計画では、具体的な設計方針を示した。要点は以下としている。

・立上がり時などに膜上からの冷気の浸み出し量を増やすため、膜下室内から膜上への循環ファンを設置する。

・換気効率を重視し、外調機で処理した外気を膜下室内に直接供給し、膜下室内から排気する計画とする。

・膜下室内負荷の処理と、立上げ時の膜下室内負荷処理のため膜上空気を吹き出す吹出口とファンを設ける。

③ 制御計画では、具体的な制御システム図を示した。要点は以下としている。

・PAC は膜上でのショートサーキットありきの運転となるため、機器保護の観点から、機器本体に内蔵された吸込温度によるサーモ ON/OFF 制御を活かした上で、室内温度設定器の設定値と測定値の差の大小で温度制御を行う方式とする。

・冷房時において立上がり時等は、対流空調主体、安定時は放射空調主体とすべく、PAC 本体の設定温度を変更しても、室温測定値が室温設定値に到達しなれば循環ファンを運転させる制御とする。なお、室内負荷処理用のファンは、循環ファン運転時において、室温が設定値に至らない場合に運転させる制御とする。こうすることでファン動力を最低限とする。

・冷房時において本システムでは、潜熱の適切な負荷処理も重要な課題であるため、室内相対湿度が設定値を超えた場合も同様に、循環ファンと室内負荷処理用のファンを運転させる。

・暖房時においては、PAC 本体の設定温度を変更しても、室温測定値が室温設定値に到達しなれば外皮負荷処理用のファンを運転させる。一方、PAC がサーモ OFF していても室内発熱等により室温が上昇する場合は、室内負荷処理用のファンだけでなく循環ファンを運転させることで、プルームで天井付近に上昇してきた室内発熱を循環ファンから天井内経由で外皮負荷処理に利用する、いわば排熱回収運転を行う。

④ 冷房時の風量及び熱バランス図から、PAC の必要冷却能力や室内負荷処理ファンの風量を算出する方法を示した。そのパラメータである膜からの浸み出し風量と膜の総合熱伝達率の設定参考値を実大実験結果から導いた。なお、膜上下設定温度差は実大実験結果から 6℃程度での設定が望ましく、室内から膜上への循環ファン及び室内負荷処理用ファンは除塵など清浄度の確保のため 6 回/h の循環回数が必要である。

⑤ 暖房時の熱バランス図から、PAC の必要加熱能力の算出方法を示した。その中で、室内負荷処理ファンが必要となる場合は、第 6 章で検証した数値シミュレーションの基本モデルに、吹出風量がどのブロックまで到達するかを求める手法を組み込む必要がある。一方、暖房実大実験結果から、室内負荷処理ファンの風量が、循環回数が 4 回/h であれば良好な温熱環境が実現できることを示し、室内の除塵目的からも 6 回/h 以上の循環回数が必要となる。

⑥ 設計図にスペックインする上で、暑い・寒い・快適といった人間心理に基づく生理反応でも、物理指標での考察通りの効果が得られるか、実大実験を実施した実験室にてアンケートによる被験者実験を行った。その結果、通常の天井カセット方式に比べ、膜がある方が、気流感を感じにくく、実験入室 30 分経過時において天井カセット方式では気流を弱くしたい傾向が示唆され、冷房実大実験の DR(Draught Rate)の分布通りの温冷感となっていることが分かった。

以上より、本研究で提案した膜天井放射空調システムを実際の設計にスペックインするため、具体的な建築・設備・制御計画を示し、今までの実大実験や数値シミュレーションの検討内容から、冷房時、暖房時それぞれの設計手法の提言が行えた。一方で、本研究で提案した数値シミュレーションモデルを汎用的に利用できるように空調用熱負荷計算ソフトに組み上げていくことが今後の課題となる。

参 考 文 献

1)一般社団法人日本医療福祉設備協会：病院設備設計ガイドライン(空調設備編)　病院空調設備の設計・管理指針　HEAS-02-2013, 一般社団法人日本医療福祉設備協会, pp. 20, 2013
2)本郷太郎, 水出喜太郎, 山田一樹, 三浦貴広, 一ノ瀬雅之, 福留伸高, 厨まり子:微気流を併用した放射冷暖房を行うオフィスの温熱環境に関する実験研究(第 3 報)熱的快適性に関する被験者実験, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集,秋田, pp.425-428, 2014.9
3)服部恭努, 垂水弘夫：クールビズ/ウォームビズ空調のための地下水利用・放射空調実験室における被験者試験 温冷感申告値解析による放射空調・対流空調の比較検討, 日本建築学会北陸支部研究報告集, pp.104-107, 2017.7

第８章　総括

建築において、在室者の快適性、運用時に加え建設時の脱炭素、建設業の労働人口・時間の減少に対応するための省人化・省力化工法が重要課題とされている。このような背景から、水配管だけでなくダクトが不要で搬送動力も小さい天井カセット型パッケージエアコン(以降 PAC)が採用されることが多い一方で、快適性や意匠性が課題とされている。そこで本研究では、これらの課題解決を目指し軽量膜天井に着目し、PAC を上部スラブに取付け、膜天井からの浸み出しによる対流空調に加え、天井内の熱（冷気または暖気）溜りからの放射空調を行う膜天井放射空調方式を提案し、

①膜天井材の選定と実験による検証

②冷暖房実大実験による特性把握と実用化の検証

③実験結果と数値シミュレーションモデルによる設計手法の提言

を実施した。本論文は以下の 8 章にてまとめている。

1 章では、建設業及び空調システムが有する課題として、労働人口の減少、建設需要の拡大、2024 年度からの残業規制による生産力の低下、高齢化により若手への技術継承不全、オペレーションカーボンの削減、エンボディドカーボンの削減、執務者の快適性の確保、漏水や震災時の落下物へのリスクがあげられる。これらを解決するため、省人化・省力化、施工性向上、モノをなくす、汎用品や汎用技術の利用、搬送動力削減、快適性(温熱環境、意匠性)向上が実現できる空調システムとして、天井カセット型パッケージエアコン(以降 PAC)を上部スラブに取付け、膜天井からの浸み出しによる対流空調に加え、天井内の熱（冷気または暖気）溜りからの放射空調を行う併用空調方式（以降本システム）を提案した。また、天井内の熱溜りを利用し、天井内と室内の交換空気量をファンで制御することで立上がり時間の短縮やパーソナル性にも対応できる方式とした。

2 章では本システムにとって最も重要となる膜天井材について、数ある膜材から、2 種類を選定した。1 つ目は、ダクト材として実績のある浸み出し用不燃ダクト材を用いた膜天井材(長尺膜)、２つ目は、ガラス繊維を織物上に編み込んで成型した小孔のような網目のあるパネル材(織物膜)である。2 章では、ダクト材として実績があり、ロール状にしたものをクルクルと伸ばして貼る省人化省力化工法が確立されている、１つ目の膜材(長尺膜)を用いて下記検討を行い、知見が得られた。

（１）浸み出し放射空調として実績のあるパンチングメタルとの吹出（浸み出し）性能の比較を行った。本来は膜材ごとでの通気抵抗が異なるが、同じ風量での実験を行い、吹出し風速や乱れの強さでは差が見られなかったが、乱れのスケールを用いると、吹出面近傍では膜方式の方が、乱れは小さい可能性が示唆された。

（２）簡易な気流シミュレーションによる検討を行った。その結果、膜上でのショートサーキットが発生し、膜上と膜下の温度に乖離が見られた。このことから、膜下空間の室温を快適域に保つための PAC の運転制御方法の確立も課題であることが示された。

３章では、２章で用いた膜材を天井に貼った実験室を構築し、膜からの浸み出し量や膜下の温熱環境を定量的に把握する目的で実大実験を行った。さらに、実大実験で得られた結果と他事例の放射空調システムとの比較を行い、下記知見と課題が得られた。

（１）垂直温度分布の結果から、いずれの膜パターンにおいても膜下（対象）空間の上下温度差がなく均一であり良好な温度分布が確認できた。

（２）垂直温度分布の結果から、本システムを想定している (a)ガイド無では対象空間と膜上空間との温度差が、総発熱量に応じて大きくなる。つまり負荷の大小に応じて PAC の設定温度を可変できかつ負荷変動に追従できる制御が必要であることが分かった。

（３）膜上下交換空気量の算出結果から、ガイドを設けることにより流量は 1.3～2 倍に増量し、ガイド下部に開口を設けることで 5.5～7 倍に増量している。これより、膜での圧力損失が大きいため、ガイドの有無よりもガイド下部の膜の有無が交換空気量に与える影響の方が大きくなっていることが示唆され、(a)ガイド無では、立ち上がり時など膜上下交換空気量を増やす方法を検討する必要がある。

（４）本システムでは、天井内（膜上）温度、対象（膜下）空間の実現温度の乖離状況が、4.5～5.5℃と高くなっている。PAC 本体の運転制御は、機器保護の観点から PAC 吸込み温度と設定温度の差にて行われなければならない。本システムにおける PAC 吸込み温度は天井内（膜上）温度となるため、室温との乖離を把握したシステム制御が必要であることが分かった。

（５）本システムの有効性を検証するため、実大実験で得られた結果と既往の放射空調システムとの比較を行った結果、本システムの室内温度分布は、既往の放射空調システムと差が見られず実用性に問題はないことが示唆された。

４章では、本システムを実用的な空調システムとして確立すべく、膜上下交換空気量を増やす方法と換気方式の検討を行うために、膜上と膜下の空気を強制的にファンで循環させた循環実験と、外気取入を想定した場合の換気実験を実施した。これらの実験結果から空気齢を算出し、換気性能の検証を行った。さらに、汎用性を検討するため、PAC 周りの計測も行い、PAC の運転安定性、空調負荷処理性能及び省エネルギー性能の検証も行った。その結果、下記知見と課題が得られた。

（１）循環実験の結果から、循環風量を大きくするほど膜下室温が低くなるが、どの条件においても FL+100㎜と FL+1700㎜との上下温度差が 3℃以内となった。

（２）循環実験の結果から循環回数が 0 回/ｈの場合に、室温と放射温度がより低い位置で大小の入れ替わりが起こっており、対流による冷却効果が相対的に小さいと考えられる。

（３）循環実験における交換空気量の算出結果から、循環回数 0 回/h 条件と比較すると、循環回数 4 回/h で流量は 2.5～2.7 倍に増量し、循環回数 8 回/h で約 4 倍に増量してお

り、循環回数が多いほど交換空気量が大きくなった。一方、循環回数 4 回/h の条件ではファンの風量と膜上への算出風量が概ね一致したが、循環回数 8 回/h の条件ではファンの風量よりも小さい結果となった。これは、膜上容積(5.3m^3)に対して大きい流量(460m^3/h)がファンを通して流入し、流入した空気が膜の空気抵抗により膜上空間に溜まり、高圧になることで、ファンの能力が設定値より低下している可能性が示唆された

（4）循環実験における空気齢の算出結果から、ファンによる循環回数が多いほど、空気齢が小さく、冷気が早く室内下部まで到達していることがわかる。また、全ケースで平均空気交換効率が約 0.5 の結果となっていることから、完全混合状態が実現され、各測定点に対して一様に気流が届いていることが確認できた。

（5）換気実験における空気齢の算出結果から、膜下給気条件では空気齢が最も小さく、空気交換効率も 0.5 程度となっており、換気効率としては対象（膜下）空間に直接給気する方が換気性能は高いことが示唆された。

（6）空調負荷と PAC の顕熱処理量の結果から、実験で与えた内部発熱に対して PAC の定格能力が 12.5kW と非常に大きい条件下であったため、サーモ ON/OFF のハンチング運転が見られたが、膜を介していても発熱負荷に見合った空調能力が得られていることが分かった。また、膜上下交換空気量が大きいほど PAC の顕熱処理量が大きくなった。このことから、PAC の設定温度や循環ファンの制御を適切に行うことで安定した運転ができ、過不足のない空調能力が得られることが示唆された。

（7）膜天井内の小空間で運転する PAC の COP の期間平均値は外気温と負荷率が低い環境であったが 5 から 6 程度の値となり、メーカーによる計算値（参考資料）と比べても遜色のない結果であった。

以上 4 章では、本システムは、膜上下交換空気量をファンにて強制的に増やせる仕掛けを設けることで、水式の放射空調と同じ温熱環境を維持しつつ、PAC の安定運転や立上がり能力の確保の可能性が示された。一方で、膜の抵抗にて膜上が正圧になってしまうことが課題として浮き出てきた。

5 章では、膜の抵抗の高さ、耐久性、メンテナンス性といった実用化への課題を解決するために、今まで用いていた膜材よりも通気流量が大きく（抵抗が小さく）、浸み出し放射空調として実績のあるパンチングメタルと同等の使い勝手となりうる本研究で選定した 2 つ目の織物式膜材にて実大実験を行った。合わせて天井カセット方式との比較も行い、下記知見と課題が得られた。

（1）温熱環境の結果から、膜(不織布あり)では、膜なしと膜(不織布なし)に比べ、温度変化の少ない空間となっていること、膜による冷放射効果が大きいことが示された。

（2）温熱環境の結果から、膜(不織布あり)では、外乱に対して、対象（膜下）空間の温度を保つために、PAC 吹出風量や PAC 設定温度の操作、膜上空気の膜下への強制循環などの運転制御方法を構築する必要があることが分かった。

（３）空気齢の算出結果より、PAC・膜からの空気齢は全条件において、均一な鉛直分布であり、冷気が室下部まで到達していることがわかった。また、膜(不織布あり)ではPACの吹出風量が空気齢に与える影響が大きいことが示唆された。
（４）前章の旧膜実験との比較から、本章での膜材は、膜上下交換空気量と空調能力の増大、PACのサーモ発停回数の減少など実用性が高まった上に、膜の冷放射効果による快適性も維持できることが示唆された。
（５）膜からの空気齢の算出結果から、本章の膜（不織布あり）は前章の膜に比べ、空気齢が半分以下となっており、冷気分配性能の大幅な改善がみられた。
（６）居住者のドラフトに対する不満足者率を表す指標であるDraught Rateの算出結果から、膜なし及び膜（不織布なし）では局所的に高リスクとなる箇所が発生していた一方、膜(不織布あり)ではドラフト環境が改善され、多くの測定点が最も快適側の評価となった。また、測定点間での差は小さく、局所的なドラフトの発生は抑制されていることが分かった。
（７）室内負荷とPACの顕熱処理量の結果から、膜（不織布あり）では、膜を介していてもPACにて室内負荷に応じた熱処理が行われていることが示された。
（８）PACのCOPの結果から、膜（不織布あり）では4から7程度と、膜なしと比較してCOPが小さくなった。この原因は膜（不織布あり）のサーモOFF時間が長い、つまりファンのみの運転時間が長くなり、結果として負荷率が低くなったためと考えられ、PACの適切な選定と制御にて同等以上の省エネルギー性能を目指す必要性が示された。
以上 5 章では、本研究で提案したもう一つの通気流量が大きい織物式膜材にて実大実験を実施した結果、前章までの課題が解決された。合わせて、通常の天井カセット方式との比較を行うことで、目論見通りのドラフトレス空間が実現できた。一方で、PACの設定温度の適切な制御や、外乱の影響、立上がり時などのため膜上下交換換気量を負荷に合わせて増大させる設備及びその制御など設計手法としての課題が明確になった。

6章では、暖房性能に関して、前章の冷房実大実験と同じ膜材を用いて暖房実大実験を行い、通常の天井カセット方式との比較や、外皮負荷の効率的な除去を目的として、膜上の暖気を強制的に膜下へ降ろした場合の室内温熱環境の検証を行った。さらに、本システムの暖房時の数値シミュレーションモデルを確立するため、室内温度分布の計算方法についても検討し、下記知見が得られた。
（１）垂直温度分布の結果から、膜があることで、上部が高く下部が低い温度勾配が生じた。また、不織布を貼った膜の方が温度勾配は小さくなることも分かった。
（２）膜があることで、PACのサーモON/OFFにて生じる居住域の温度変化が、小さくなることが分かった。
（３）膜上下循環ファンを設けることで、温度勾配がなく、PACのサーモON/OFFにて生じる居住域の温度変化が小さい温熱環境を創れること、暖房の立上がり時間の短縮ができることが分かった。

（４）CO_2濃度算定結果と測定値の比較から膜上下循環ファンを運転する条件のみで測定値と算出値が一致していたことから、膜上から対象（膜下）空間の冷却壁面に直接吹き降ろされた暖気によって、低温の下降流が減り、均一な温熱環境が形成されたと考えられる。
（５）立上がり時の垂直温度経時変化から、不織布を貼った膜では、膜上からしみ出した暖気が最上部までしか直接影響を及ぼしておらず、条件間で影響度合いが異なることが分かった。
（６）立上がり時のCO_2濃度経時変化から、不織布を貼った膜では、仮想外気室の下降気流により、室下部に逸早く膜上の暖気が到達することが分かった。
（７）不織布を貼った膜について、冷却面に沿った下降気流を算出し、風量・熱収支を解く計算方法にて、実測値との高い再現性が見られた。
（８）実験中のPAC顕熱処理量と流出熱量の結果から、暖房時は、膜上から天井への流出熱が大きく、天井面の断熱性が重要であることが分かった。
（９）膜上下循環ファン(循環回数は約4回/h)を併用すると立上がりの顕熱処理量が大きくなることが分かった。
(10) 冷房時と同様に暖房時においても、室内負荷とPACの顕熱処理量の結果から、膜（不織布あり）では、膜を介していてもPACにて室内負荷に応じた熱処理が行われていることが示された。
(11) PACのCOPの結果から、膜（不織布あり）では2から4程度と、膜なしと比較してCOPが小さくなった。この原因は、冷房時と同様に、膜（不織布あり）のサーモOFF中でのファンのみの運転により負荷率が低くなったためと考えられ、PACの適切な選定と制御にて同等以上の省エネルギー性能を目指す必要性が示された。

以上 6 章では、本研究で提案した織物式膜材にて冷房に引き続き暖房時の実大実験を実施した結果、膜上下循環ファンを負荷に合わせて運転させることで、良好な温熱環境が得られることが分かった。一方で暖房時には、循環ファンが運転している場合、温度成層が形成さないので数値モデルによる設計手法の提案が今後の課題である。

7章では、本研究で提案した２つの膜材の中で、実用性が示されたガラス繊維織物の成型材による膜天井放射空調システムについて、インテリアゾーンへの適用ではなく、汎用性を鑑みて、ペリメータ空間も有する冷暖切替ゾーンでの適用を目指し、設計手法の検討を行った。3章から6章までの実大実験結果及び考察内容を駆使して検討を行った結果、下記の設計提案や知見を得た。
(１)建築計画では、膜上天井面の区画と断熱を行う。
(２)設備計画では、具体的な設計方針を示した。要点は以下としている。

・立上がり時などに膜上からの冷気の浸み出し量を増やすため、膜下室内から膜上への循環ファンを設置する。
・換気効率を重視し、外調機で処理した外気を膜下室内に直接供給し、膜下室内か

ら排気する計画とする。

・膜上からの室内負荷の処理と、立上げ時の膜下室内負荷処理のため膜上空気を吹き出す吹出口とファンを設ける。

(3)制御計画では、具体的な制御システム図を示した。要点は以下としている。

・PAC は膜上でのショートサーキットありきの運転となるため、機器保護の観点から、機器本体に内蔵された吸込温度によるサーモ ON/OFF 制御を活かした上で、室内温度設定器の設定値と測定値の差の大小で温度制御を行う方式とする。

・冷房時において立上がり時等は、対流空調主体、安定時は放射空調主体とすべく、PAC 本体の設定温度を変更しても、室温測定値が室温設定値に到達しなれば循環ファンを運転させる制御とする。なお、室内負荷処理用のファンは、循環ファン運転時において、室温が設定値に至らない場合に運転させる制御とする。こうすることでファン動力を最低限とする。

・冷房時において本システムでは、潜熱の適切な負荷処理も重要な課題であるため、室内相対湿度が設定値を超えた場合も同様に、循環ファンと室内負荷処理用のファンを運転させる。

・暖房時においては、PAC 本体の設定温度を変更しても、室温測定値が室温設定値に到達しなれば室内負荷処理用のファンを運転させる。一方、PAC がサーモ OFF していても室内発熱等により室温が上昇する場合は、室内負荷処理用のファンだけでなく循環ファンを運転させることで、プルームで天井付近に上昇してきた室内発熱を循環ファンから天井内経由で室内負荷処理に利用する、いわば排熱回収運転を行う。

(4)冷房時の風量及び熱バランス図から、PAC の必要冷却能力や室内負荷処理ファンの風量を算出する方法を示した。そのパラメータである膜からの浸み出し風量と膜の総合熱伝達率の設定参考値を実大実験結果から導いた。なお、膜上下設定温度差は実大実験結果から 6℃程度での設定が望ましく、室内から膜上への循環ファン及び室内負荷処理用ファンは除塵など清浄度の確保のため 6 回/h の循環回数が必要である。

(5)暖房時の熱バランス図から、PAC の必要加熱能力の算出方法を示した。その中で、室内負荷処理ファンが必要となる場合は、第 6 章で検証した数値シミュレーションの基本モデルに、吹出風量がどのブロックまで到達するかを求める手法を組み込む必要がある。一方、暖房実大実験結果から、室内負荷処理ファンの風量が、循環回数が 4 回/h であれば良好な温熱環境が実現できることを示し、室内の除塵目的からも 6 回/h 以上の循環回数が必要となる。

(6)設計図にスペックインする上で、暑い・寒い・快適といった人間心理に基づく生理反応でも、物理指標での考察通りの効果が得られるか、実大実験を実施した実験室にてアンケートによる被験者実験を行った。その結果、通常の天井カセット方式に比べ、膜がある方が、気流感を感じにくく、実験入室 30 分経過時において天井カセット方式では気流を弱くしたい傾向が示唆され、冷房実大実験の DR(Draught Rate)の分布通りの温冷感となっ

ていることが分かった。

以上７章では、本研究で提案した膜天井放射空調システムを、実際の設計にスペックインするための具体的な建築・設備・制御計画を示し、今までの実大実験や数値シミュレーションの検討内容から、冷房時、暖房時それぞれの設計手法の提言が行えた。

本研究で対象とした膜天井放射空調システムは、実験による課題抽出と実験による課題解決を繰り返し行った結果、実際のプロジェクトに対して適用の見通しが立ち、室内温熱環境快適性と、建設業の重要課題である省人化・省力化、建設段階の脱炭素の両立に貢献できると考えられる。

一方で、７章で示したように、本研究で提案した数値シミュレーションモデルを汎用的に利用できるように空調用熱負荷計算ソフトにどのように組み込んでいくか、本研究で示した設計手法で実際のプロジェクトに導入し、期待通りの効果が得られているか検証を行い示していくことが今後の展開にむけた課題となる。

関連発表論文

空気調和・衛生工学会論文集

タイトル	発表者	発表誌	発表年月	関連章
低風速天井吹出し空調による病室の室内環境に関する研究－室内温度・汚染質濃度分布及び換気性能に関する検討－	本田雄樹,山中俊夫,甲谷寿史 桃井良尚,相良和伸,上田真也 前田龍紀	空気調和・衛生工学会論文集 Vol.45,No.238, pp.19-24	2017年1月	4章 5章
PACを用いた膜天井放射空調の冷暖房性能に関する研究　第１報―冷房時における室内温度分布及び省エネ性・空調性能の検討	前田龍紀,山中俊夫,小林知広 袁継輝,崔ナレ,蔵永真理 上村芙美子,新宮浩丈	空気調和・衛生工学会論文集 Vol.45,No.284,pp.1-9	2020年11月	4章
PACを用いた膜天井放射空調の冷暖房性能に関する研究(第２報) 冷房時に膜の有無及び膜材特性が室内熱環境・空調性能に与える影響	前田龍紀,山中俊夫,小林知広 袁継輝,崔ナレ,上村芙美子 新宮 浩丈,安江楽人	空気調和・衛生工学会論文集 Vol.47,No.307,pp.1-9	2022年10月	5章
PACを用いた膜天井放射空調の冷暖房性能に関する研究(第３報) 暖房時における室内温熱環境及び予測数値モデルの検討	前田龍紀,山中俊夫,小林知広 崔ナレ,上村芙美子,新宮 浩丈 安江楽人	空気調和・衛生工学会論文集	投稿中	6章

日本建築学会環境系論文集

タイトル	発表者	発表誌	発表年月	関連章
PACを用いた膜放射天井空調の冷房性能に関する実験的研究	蔵永真理 ,山中俊夫,前田龍紀 北風晴都	日本建築学会環境系論文集 Vol.84,No.757,pp.255-262	2019年3月	3章

空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集

タイトル	発表者	発表誌	発表年月	関連章
低風速天井吹出し方式による病室の換気・空調設計に関する研究(その11)　吹出し口の材質・開口率が吹出し気流に及ぼす影響	前田龍紀,山中俊夫,甲谷寿史 桃井良尚,相良和伸,上田真也	空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 , pp.117-120	2017年9月	2章
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3）空調方式の概要と実大冷房実験による温度分布の検討	前田龍紀,山中俊夫,蔵永真理 北風晴都,中野諒	空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集 , pp.409-412	2018年9月	3章
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4）冷房時における膜を通した交換換気量及び冷気の分布特性	北風晴都,山中俊夫,蔵永真理 前田龍紀,中野諒	空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集 , pp.413-416	2018年9月	3章
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5）膜を通した交換換気を考慮した伝熱モデルと膜の伝熱特性	蔵永真理,山中俊夫,北風晴都 前田龍紀,中野諒	空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集 , pp.417-420	2018年9月	3章
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8）膜上下交換ファン実験と外気導入換気実験による温熱環境の検討	新宮 浩丈,山中俊夫,小林知広 袁継輝,崔ナレ,前田龍紀 蔵永真理,上村芙美子,小林佑輔	空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集 , pp.329-332	2019年9月	4章
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9）膜上下交換換気の効果及び空気齢の検討	上村芙美子,山中俊夫,小林知広 袁継輝,崔ナレ,前田龍紀 蔵永真理,小林佑輔,新宮浩丈	空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集 , pp.333-336	2019年9月	4章
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	前田龍紀,山中俊夫,小林知広 袁継輝,崔ナレ,蔵永真理 上村芙美子,小林佑輔,新宮浩丈	空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集 , pp.337-340	2019年9月	4章

空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集（つづき）

タイトル	発表者	発表誌	発表年月	関連章
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	安江楽人,山中俊夫,小林知広 袁継輝,崔ナレ,前田龍紀 上村芙美子,新宮浩丈	空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.251-254	2020年9月	5章
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）グローブ温度及び膜上下交換空気量の同定	新宮浩丈,山中俊夫,小林知広 袁継輝,崔ナレ,前田龍紀 上村芙美子,安江楽人	空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.255-258	2020年9月	5章
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	上村芙美子,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	空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.259-263	2020年9月	5章
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	前田龍紀,山中俊夫,小林知広 袁継輝,崔ナレ,上村芙美子 新宮浩丈,安江楽人	空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.261-264	2020年9月	5章
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18）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	安江楽人,山中俊夫,小林知広 崔ナレ,前田龍紀,新宮浩丈	空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.161-164	2021年9月	6章
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19）膜の通気性能が暖房時立ち上がり運転における室内温熱環境に及ぼす影響	新宮浩丈,山中俊夫,小林知広 崔ナレ,前田龍紀,安江楽人	空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.165-168	2021年9月	6章
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20）暖房時の省エネ性及び顕熱処理量の検証	前田龍紀,山中俊夫,小林知広 崔ナレ,新宮浩丈,安江楽人	空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.169-172	2021年9月	6章

日本建築学会大会学術講演梗概集

タイトル	発表者	発表誌	発表年月	関連章
PACを用いた膜天井放射空調における室内環境特性に関する研究（その3）空調方式の概要及びＣＦＤによる気流解析	前田龍紀,山中俊夫,蔵永真理 北風晴都,中野諒,曾根辻歩	日本建築学会大会学術講演梗概集,環境工学Ⅱ，pp.801-802	2018年9月	3章
PACを用いた膜天井放射空調における室内環境特性に関する研究（その4）実大冷房実験時による室内熱環境と膜を通した交換換気に関する検討	北風晴都,山中俊夫,蔵永真理 前田龍紀,中野諒,曾根辻歩	日本建築学会大会学術講演梗概集,環境工学Ⅱ，pp.803-804	2018年9月	3章
PACを用いた膜天井放射空調における室内環境特性に関する研究（その5）膜を通した交換換気を考慮した伝熱モデルの構築	蔵永真理,山中俊夫,北風晴都 前田龍紀,中野諒,曾根辻歩	日本建築学会大会学術講演梗概集,環境工学Ⅱ，pp.805-806	2018年9月	3章
PACを用いた膜天井放射空調における室内環境特性に関する研究（その7）小型軸流ファンによる膜上下交換換気の効果検証	新宮浩丈,山中俊夫,小林知広 袁継輝,崔ナレ,前田龍紀 蔵永真理,上村芙美子,小林佑輔, 中野諒	日本建築学会大会学術講演梗概集,環境工学Ⅱ，pp.829-830	2019年9月	4 章
PACを用いた膜天井放射空調における室内環境特性に関する研究（その8）外気導入を想定した室における冷房性能の検討	上村芙美子,山中俊夫,小林知広 袁継輝,崔ナレ,前田龍紀 蔵永真理,小林佑輔,新宮浩丈 中野諒	日本建築学会大会学術講演梗概集,環境工学Ⅱ，pp.831-832	2019年9月	4 章
PACを用いた膜天井放射空調における室内環境特性に関する研究（その9）省エネ性と負荷処理性能及び放射効果の検証	前田龍紀,山中俊夫,小林知広 袁継輝,崔ナレ,蔵永真理 上村芙美子,小林佑輔,新宮浩丈 中野諒	日本建築学会大会学術講演梗概集,環境工学Ⅱ，pp.833-834	2019年9月	4 章
PPACを用いた膜天井放射空調における室内環境特性に関する研究（その10）膜上下空間の気流性状予測のためのCFD 解析手法に関する検討	蔵永真理,山中俊夫,小林知広 袁継輝,崔ナレ,前田龍紀 上村芙美子	日本建築学会大会学術講演梗概集,環境工学Ⅱ，pp.835-836	2019年9月	4 章

日本建築学会大会学術講演梗概集（つづき）

タイトル	発表者	発表誌	発表年月	関連章
PACを用いた膜天井放射空調における室内環境特性に関する研究（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	安江楽人,山中俊夫,小林知広 袁継輝,崔ナレ,前田龍紀 上村芙美子,新宮浩丈	日本建築学会大会学術講演梗概集,環境工学1,pp.1403-1404	2020年9月	5章
PACを用いた膜天井放射空調における室内環境特性に関する研究（その13）グローブ温度及び膜上下交換空気量の同定	新宮浩丈,山中俊夫,小林知広 袁継輝,崔ナレ,前田龍紀 上村芙美子,安江楽人	日本建築学会大会学術講演梗概集,環境工学1,pp.1405-1406	2020年9月	5章
PACを用いた膜天井放射空調における室内環境特性に関する研究（その14）局所平均空気齢による冷気分配性能評価	上村芙美子,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	日本建築学会大会学術講演梗概集,環境工学1,pp.1407-1408	2020年9月	5章
PACを用いた膜天井放射空調における室内環境特性に関する研究（その15）省エネ性及び負荷処理性能の検証	前田龍紀,山中俊夫,小林知広 袁継輝,崔ナレ,上村芙美子 新宮浩丈,安江楽人	日本建築学会大会学術講演梗概集,環境工学1,pp.1409-1410	2020年9月	5章
PACを用いた膜天井放射空調における室内環境特性に関する研究（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	安江楽人,山中俊夫,小林知広 崔ナレ,前田龍紀,上村芙美子 新宮浩丈	日本建築学会大会学術講演梗概集,環境工学1,pp.1427-1428	2021年9月	6章
PACを用いた膜天井放射空調における室内環境特性に関する研究（その17）冷気分配性能及びドラフト感評価	新宮浩丈,山中俊夫,小林知広 崔ナレ,前田龍紀,上村芙美子 安江楽人	日本建築学会大会学術講演梗概集,環境工学1,pp.1429-1430	2021年9月	6章
PPACを用いた膜天井放射空調における室内環境特性に関する研究（その18）暖房時の省エネ性及び顕熱処理量の検証	前田龍紀,山中俊夫,小林知広 崔ナレ,上村芙美子,新宮浩丈 安江楽人	日本建築学会大会学術講演梗概集,環境工学1,pp.1431-1432	2021年9月	6章

謝辞

大阪大学教授山中俊夫先生には、本論文の審査にあたり快く主査の労をお執り下さり、また長年にわたり本研究を暖かく見守り、常にご指導とご鞭撻を賜りました。ここに謹んで感謝の意を表します。

大阪大学教授下田吉之先生、大阪大学准教授小林知広先生には、本論文の校閲の労をお執り下さり、本論文をまとめるにあたり、種々の有益なご助言とご指導を賜りましたことに対して、深く感謝の意を表します。

本研究は、大阪大学山中研究室との共同研究に端緒を発し、山中俊夫先生、小林知広先生、大阪公立大学准教授袁継輝先生（当時大阪大学）及び東洋大学助教崔ナレ先生（当時大阪大学）のご指導の下、取り組んだ研究の内容を取りまとめたものです。

故大阪大学教授甲谷寿史先生には、共同研究開始前からもご指導賜ったのはもちろんのこと、共同研究の内容を、学位論文とすることを進めて頂いたことが、本研究のはじまりでした。謹んで感謝申し上げます。

本研究は、蔵永真理さん、上村芙美子さん、北風晴都さん、本田雄樹さんが修士論文や卒業論文として携わり、昼夜を問わず惜しみないご協力を下さった賜物であり、感謝の念に堪えません。

また、(株)竹中工務店天雲伸一さん、新宮浩丈さん、安江楽人さん、小林佑輔さん、中野諒さんには、技術開発活動や実大実験のみならず日常生活においても、種々のご温情とご配慮を賜ったことに厚くお礼申し上げます。

最後に、大阪大学、竹中工務店の皆様はじめ関係各位に感謝申し上げます。ありがとうございました。

2023 年 12 月

前田　龍紀