

機械換気と外気処理による省エネルギー効果の評価

松尾, 康介

九州大学大学院総合理工学府総合理工学専攻機械・システム理工学メジャー

<https://hdl.handle.net/2324/7178767>

出版情報：九州大学, 2023, 修士, 修士
バージョン：
権利関係：



令和 5 年 度

修 士 論 文

機械換気と外気処理による省エネルギー効果の評価

九州大学大学院総合理工学府
総合理工学専攻
機械・システム理工学メジャー
熱エネルギー変換システム学研究室

松 尾 康 介

指導教員 宮 崎 隆 彦

提出年月日 令和 6 年 2 月 6 日

目次

本論文で扱う記号.....	iii
本論文で扱う添字.....	v
第1章 序論.....	1
1.1 本研究の背景.....	1
1.2 外気処理空調機とは.....	4
1.3 空調負荷.....	5
1.3.1 空調負荷算出の目的.....	5
1.3.2 空調負荷の種類.....	5
1.3.3 空調負荷の決定.....	7
1.4 従来の研究.....	11
1.5 本研究の目的.....	11
1.6 本論文の構成.....	12
第2章 実験装置および実験方法.....	13
2.1 実験装置.....	13
2.1.1 外気処理空調機.....	13
2.1.2 温湿度・二酸化炭素濃度センサー.....	19
2.1.3 センサー校正結果.....	21
2.2 実験方法.....	23
2.2.1 実験対象の体育館.....	23
2.2.2 測定方法.....	24
第3章 実験結果.....	26
3.1 温熱環境評価.....	26
3.1.1 温熱環境の6要素.....	26
3.1.2 PMV と PPD.....	31
3.2 温熱環境評価結果.....	35
3.2.1 冷房使用時の温熱環境評価結果.....	35
3.2.2 暖房使用時の温熱環境評価結果.....	37
第4章 外気処理空調機システム解析.....	39
4.1 システムモデル.....	39

4.1.1 熱交換器.....	41
4.1.2 圧縮機	45
4.1.3 膨張弁	47
4.1.4 制御システム.....	49
4.2 システムモデルの妥当性の検証.....	51
4.3 基礎関係式.....	55
4.3.1 熱交換器系.....	55
4.3.2 圧縮機系.....	56
4.3.3 送風機系.....	58
4.3.4 断熱効率とポリトロップ指数の関係	60
4.4 システム解析結果と考察.....	61
4.4.1 同冷房熱負荷における消費電力解析	62
4.4.2 同暖房熱負荷における消費電力解析	65
4.4.3 放熱側熱交換器の室内空気導入時の解析	68
4.4.4 放冷側熱交換器の室内空気導入時の解析	71
第5章 総括.....	73
謝辞	74
参考文献	76
付録 A PMV および PPD 計算プログラム	78
付録 B 冷房実験の測定値	83
付録 C 暖房実験の測定値	95

本論文で扱う記号

記号	名称	単位
q	負荷	W
c	比熱	J/(kgK)
γ	空気の密度	kg(DA)/m ³
T, t	温度	°C
A	量	m ³ /h
r	水の蒸発潜熱	J/g
x	絶対湿度	g/kg(DA)
n	換気回数	回/h
B	容積	m ³
h	エンタルピー	J/kg
W	仕事率	kW
I	熱抵抗	clo
Qt	着衣時の熱損失	W/m ²
f	表面積	m ²
F	形態係数	-
C	顕熱損失量	W/m ²
ℓ	潜熱損失量	W/m ²
K	衣服を通る顕熱損失量	W/m ²
M	代謝量	W/m ²
P	全圧	Pa
R	放射熱損失量	W/m ²
v	速度	m/s
H	人体の熱負荷	W/m ²
α	人体の対流熱伝達率	W/(m ² K)
ϕ	相対湿度	%
PMV	PMV	-
PPD	PPD	%

記号	名称	単位
Q	交換熱量，熱負荷	kW
ρ	密度	kg/m ³
V	体積流量	m ³ /s
m	質量流量	kg/s
COP	成績係数	-
η	効率	-
E	消費電力	kW
La	送風機空気動力	kW
L	送風機軸動力	kW
p	ポリトロープ指数	-

本論文で扱う添字

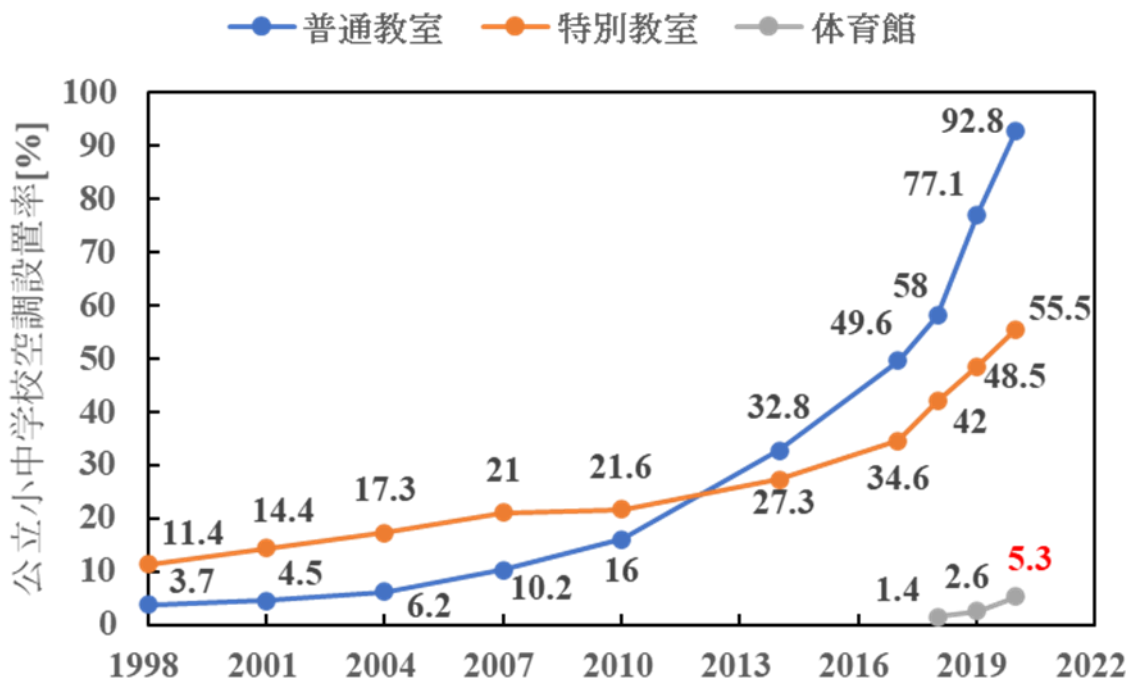
添字	名称
AC	空調機
S	室内顕熱
L	室内潜熱
F	送風機発熱
D	ダクト熱
OS	外気顕熱
OL	外気潜熱
O	外気の全熱
p	定圧
v	定積
g	すき間風
oa	外気
a	皮膚表面から環境（裸体時）
t	皮膚表面から環境（着衣時）
cl	着衣
o	作用
s	皮膚
r	放射
i	周壁・天井・床面
pi	周壁・天井・床面と人体
co	対流
re	呼吸
d	不感
sw	発汗
w	水蒸気
ar	相対
ref	冷媒

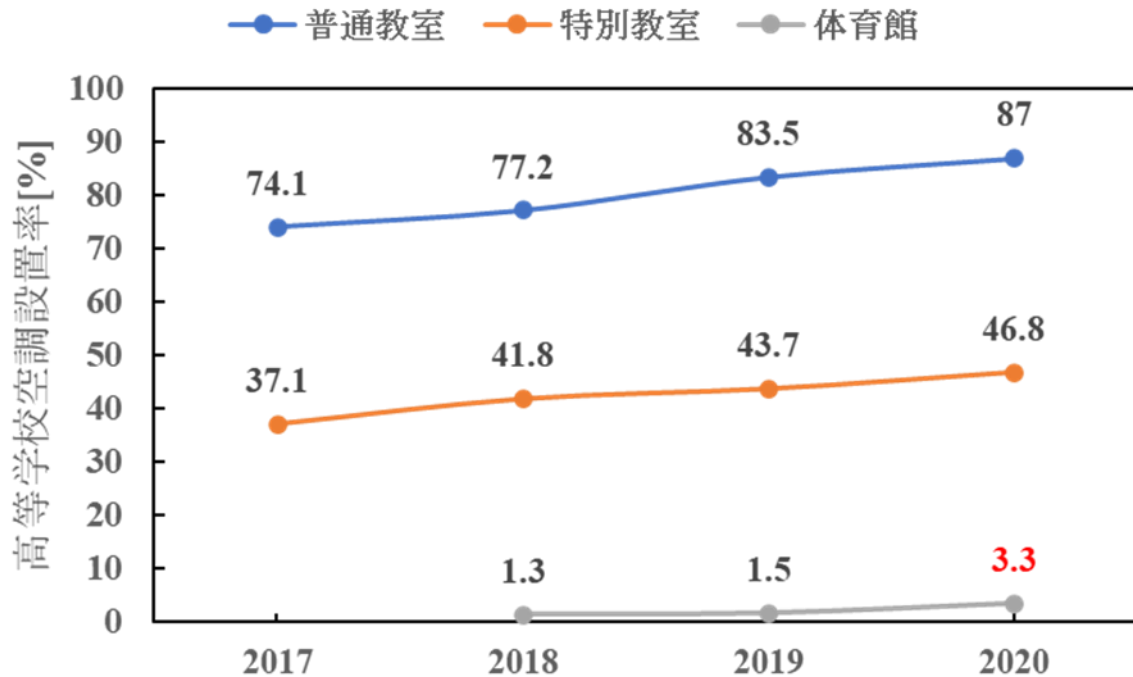
添字	名称
cs	冷熱源
ws	温熱源
in	入口
out	出口
meas	測定値
calc	計算値
evap	蒸発器
cond	凝縮器
sycle	サイクル
system	システム
cool	冷房
heat	暖房
ideal	理想
c	断熱
m	機械
comp	圧縮機
blower	送風機
sum	合計

第1章 序論

1.1 本研究の背景

近年，地球温暖化や都市部におけるヒートアイランド現象により，人々の生活は様々な影響を受けている．特に夏期においては，健康に影響を及ぼすほどの猛暑となり，学校施設においても体育の授業，学校行事，部活動等で熱中症が発生している．こうした中，国や各自治体は学校施設の空調設備の整備に取り組んできたが，体育館の空調設備については未だ発展途上であり，文部科学省が発表している空調設置率のデータによると，小中学校では約 5%^[1]，高等学校では約 3%^[2]である．図 1.1 は公立中学校における空調設置率の推移を示す．図 1.2 は高等学校における空調設置率の推移を示す．

図 1.1 公立中学校における空調設置率の推移^[1]

図 1.2 高等学校における空調設置率の推移^[2]

体育館は体育の授業や地域のクラブ活動におけるスポーツ施設としての利用のほか、学校においては、入学式や卒業式、文化祭、全校集会といった各種学校行事、また、災害が起こった際の避難所、昨今においては新型コロナウイルスのワクチン接種会場等、多様に活用される空間である。避難所としての役割や熱中症予防を考えると、昼夜問わず一定の環境が求められるので、冷暖房設備の導入を視野に入れつつ、温熱環境の改善を検討することが重要であると考えられる。このような現実があり、体育館のような大規模空間に大型の空調機器設備の導入の動きがある。

体育館に空調を設置するメリットは大きく 2 点考えられ、1 点目は夏場の活動が行いやすくなる点、2 点目は災害時の過ごしやすい避難場所が提供できる点である。

1 点目において、夏場、体育館のような密閉空間での活動は熱中症のリスクを常に抱えている。実際、中学校や高等学校で発生する熱中症事例のうち運動時によるものが 7 割を占めている。熱中症は温度と湿度が高い環境下で発症するリスクが増大する症状である。体育館に空調設備が整っていれば、運動するのに適切な温度と湿度を維持できるため、熱中症のリスクを大きく下げることができる。また、空調設備が整っているかどうかで、部活動のパフォーマンスに影響を与える場合も考えられる。例えば、空調設備が整備されていない体育館の場合、熱中

症を防ぐために負荷の大きいトレーニングを制限したり、練習時間や時間帯に制約をかけたリしなければならない。もちろん、空調が効いている施設内であったとしても、過度な運動をおこなえば熱中症のリスクはあるが、それでも空調設備がある場合とない場合とでは練習を実施するにあたって大きな違いがある。空調が効いていれば、多くの練習時間を確保でき、快適な空間で練習すれば、トレーニングの効率や効果も大きくなりうる。

2点目において、体育館は大地震や台風、豪雨による水害時など災害が発生した際の避難場所としても利用される。しかしながら、夏場は温度や湿度が上昇しやすく、避難者のなかには幼児や高齢者といった体力のない人も含まれるため、夏場の避難場所では熱中症のリスク要因が増大してしまう。慣れない環境での避難生活で疲弊している人も多いと考えられるので、なるべく過ごしやすい環境を提供することが重要である。避難場所となる体育館に空調が整備されていれば、まず避難者の心理的・肉体的な不安を和らげることができる。また、熱中症の予防にも役立ち、日常の生活になるべく近い環境を提供することにもなるので、避難者の精神衛生にも寄与する。

また、体育館は広い面積だけでなく高さもあるため、非常に広大な空間である。そのような大空間に空調を設置する場合、十分な効果を得るためには大型の空調機器設備を導入しなければならない。もちろんそのような空調システムは大規模であるので、設置するだけでも高コストとなる。また、体育館は断熱性が確保されておらず、冷暖房効率が悪いので空調効果を得られるのは難しい。大型の空調機器設備を用いることで、省エネルギー性問題も考えられる。

そこで、以上のような問題を解決するために、換気空調システムを用いた外気処理空調機の導入が検討されている。外気処理空調機は機械換気が可能な点、多少の温度調節が可能な点、設備コストを低く抑えることが可能な点など、様々な利点がある。

以上より、我々は外気処理空調機の導入によって、どれほど快適性が向上し、エネルギー消費量を抑え、換気可能な空間が創造できるか学術的な立場から検証を行う。

1.2 外気処理空調機とは

外気処理空調機とは外気負荷を処理するための空調機のことである。一般的な空気調和機はそれ単体では換気不可能であるため、換気の際窓を開けて換気を行わなければならない。その結果、夏場は高湿な熱気が入り部屋が暑くなり、冬場は乾燥した冷気が入り寒くなる。一方で、外気処理空調機は一般的なエアコンとは違い、空調利用時の換気の際、外気を導入する。しかしながら、そのままだと夏は暑い空気、冬は冷たい空気を取り込むため、空調システムの大きな負荷となる。そこで、主の空調機が取り入れる前に、外気をある程度の状態まで冷暖房や加湿などの処理を行うために、用いられている^[3]。

外気処理空調機は全ての空調機に備わっているのではなく、ある程度の規模と換気量が必要であると想定される場所に用いられている。また、外気処理空調機を用いることで、室内を正圧に保つことが可能であり、室内に外気が入りにくくなるので、衛生面が重要視されている場所にも用いられている。導入例としては、食品工場、給食センター、病院、オフィスビル、機械工場などが挙げられる。

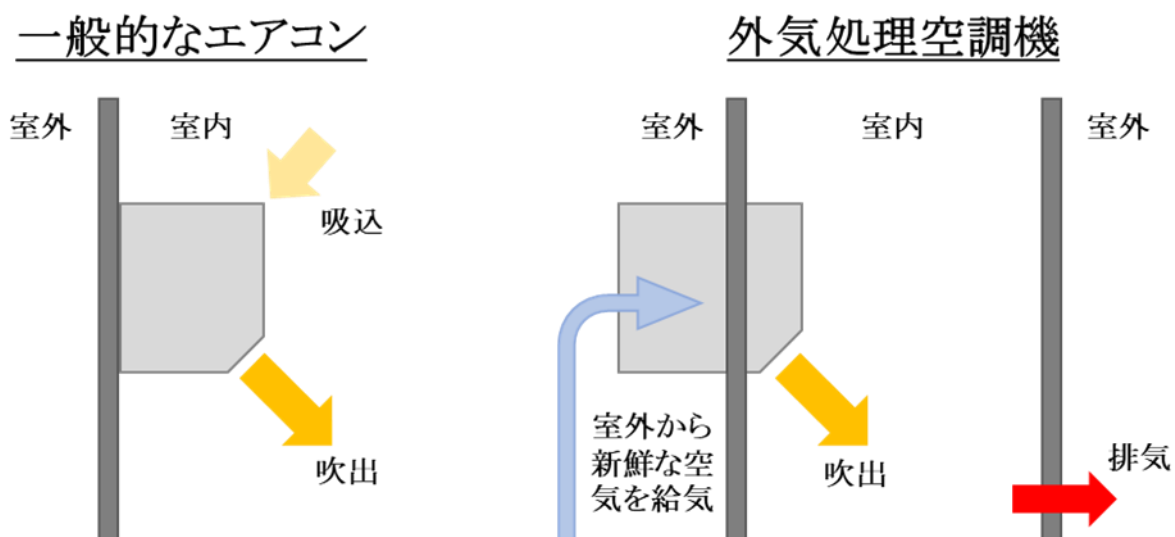


図 1.3 一般的な空調と外気処理空調機との比較^[4]

1.3 空調負荷

1.3.1 空調負荷算出の目的

建物の空調設備を計画・設計するにあたって、基礎となるのは、空調対象の熱負荷の大きさである。空調負荷で見込む熱負荷とは、冷房負荷としては冷却負荷・除湿負荷、暖房負荷としては加熱負荷、加湿負荷がある。これらを総称してそれぞれ、冷房負荷、暖房負荷と呼ぶ。熱負荷を計算する第一の目的は、空調設備および熱源設備の装置容量を決定することであり、“最大熱負荷計算”あるいは“設計用熱負荷計算”と呼ぶ。第二の目的は、空調設備、熱源設備の運転のために必要なエネルギーを求めることである^[5]。

1.3.2 空調負荷の種類

一般に「熱負荷」と呼ばれているものには、室内負荷、外気負荷、空調機負荷、熱源負荷の4種類がある。

(I) 室内負荷

室内を一定の温湿度に保っているときに室外から流入してくる熱と室内で発生する熱を熱取得と称し、室外へ流出する熱を熱損失という。次に、その室をその温湿度に保つために、取り除くべき熱量または供給すべき熱量を室内負荷というが、熱取得や、熱損失とは異なる値となる。例えば、冷房の場合、窓ガラスを通して、室内に流入する日射は、その時点では、前述の熱取得ではあるが、全部がすぐに室内の負荷にならず、その一部は建物躯体に吸収され、蓄熱された後に時間遅れを伴って室内熱負荷となるからである。また、間欠空調で装置を停止中に室温が変動した後に起動する際には予熱負荷や予冷負荷が別に加わる。この場合、この予熱負荷、予冷負荷のほかに室温を変化させるための負荷（蓄熱負荷）を加えたものを室内負荷という^[5]。

(II) 外気負荷

室内環境を維持するために強制的に室内に導入する外気を取り入れ外気という。この取り入れ外気を室内条件まで処理する負荷を外気負荷という。外気負荷は空調機負荷の一部と考える^[5]。

(III) 空調機負荷

前述の室内負荷，外気負荷のほかに送風機発熱，ダクトでの熱損失や漏洩損失などを加えたものが空調機にかかる負荷であり，空調機負荷という^[5]。

(IV) 熱源負荷

建物全体において，冷凍機やボイラなどの熱源にかかる負荷を熱源負荷という．この熱源負荷は，各系統の装置の時刻別負荷の合計に配管での熱損失，搬送用ポンプからの発熱負荷，間欠運転による機器配管などの蓄熱負荷を加えたものである^[5]。

1.3.3 空調負荷の決定

今回，簡易的に空調負荷を算出するために，時刻によって変化し，複雑な計算が必要な室内負荷や，熱源負荷は考慮せず，外気負荷と空調機負荷のみで空調負荷を計算する．

空調機負荷を構成する要素としては室内負荷 (q_S, q_L)，外気負荷 (q_{OL}, q_{OS})，送風機・ダクトでの熱負荷 (q_F, q_D) が挙げられる．

冷房時は式(1.1)で空調機負荷が計算される．単独の室を対象とする場合，式(1.1)で計算した冷房負荷がそのまま空調機負荷となる．しかしながら，多数の室が一つの送風系統となっている場合は，個々の室の冷房負荷の最大値の合計がそのまま空調装置の負荷とならない．これは，その送風系統の負荷が最大となる時刻と個々の室のそれとが必ずしも一致しないこと，またそれぞれの室の顕熱比が同じではなく，各室の負荷によって決定される送風状態点が少しずつ異なることによる．今回は単独の室である体育館を用いた為，冷房負荷がそのまま空調機負荷となる．

$$q_{AC} = q_S + q_L + q_F + q_D + q_{OS} + q_{OL} \quad (1.1)$$

暖房時は式(1.2)で空調機負荷が計算される．単独の室を対象とする場合，冷房負荷と同様に式(1.2)で計算した暖房負荷がそのまま空調機負荷となる．

$$q_{AC} = q_S + q_L + q_D + q_{OS} + q_{OL} \quad (1.2)$$

$$q_S = \frac{c_p \gamma \Delta t A_g}{3600} \quad (1.3)$$

$$q_L = \frac{r \gamma \Delta x A_g}{3600} \quad (1.4)$$

$$A_g = nB \quad (1.5)$$

表 1.1 すき間風による換気回数

建築構造	換気回数 n [回/h]	
	暖房時	冷房時
コンクリート造 (大規模建築)	0~0.2	0
コンクリート造 (小規模建築)	0.2~0.6	0.1~0.2
洋風木造	0.3~0.6	0.1~0.3
和風木造	0.5~1.0	0.2~0.6

今回は体育館なので、コンクリート造（大規模建築）とし、換気回数は $n=0$ とする。
ゆえに、室内顕熱負荷、室内潜熱負荷は 0 となるとする。

また、外気処理を単独に行う場合の外気冷房負荷はエンタルピー差を利用した式(1.6)を用いる。

$$q_o = q_{os} + q_{oL} = \frac{\gamma \Delta h_{oa}}{3600} \quad (1.6)$$

OA (35 °C, 45 %, 77.43 kJ/kg) → SA (14 °C, 85 %, 35.49 kJ/kg) より、出入り口エンタルピー差は、41.9 kJ/kg となる。また外気量は、10000[m³/h]であるので、外気の全熱負荷は以下の通りとなる。

$$q_o = q_{os} + q_{oL} = \frac{1.2 \times (77.43 - 35.49) \times 10000}{3600} = 139.78 \cong 140[\text{kW}]$$

搬送系の負荷としては、送風機の発熱と給気ダクトからの熱損失がある。冷房負荷計算においては考慮するが、暖房負荷計算では給気ダクトからの熱損失と送風機発熱が相殺すると考え、一般的には無視する。

送風機によって空気を搬送する際に与えられるエネルギーは最終的には熱に変化するので、顕熱負荷として見込む必要がある。送風機動力が決定している際には式(1.7)で送風機発熱負荷を計算する。

$$q_F = 1000E \quad (1.7)$$

今回用いた送風機の給気ファン1台における定格出力は7.5[kW]、放熱ファンにおける定格出力は0.72[kW]であるので送風機発熱負荷は以下の通りとなる.

$$\begin{aligned} q_F &= 1000 \times (7.5 \times 1 + 0.72 \times 2) = 8940[W] = 8.940[kW] \\ &\cong 9.0[kW] \end{aligned} \quad (1.9)$$

ダクトにおける熱損失 q_D は冷房負荷のみ考慮し、室内顕熱負荷に対して、一般的には2%程度見込む. 今回室内顕熱負荷 q_S は $q_S = 0$ としたので、 $q_D = 0$ となる.

以上より、今回用いた外気処理空調機では体育館のような大規模空間を空調するのに $140+9.0=149\cong150[kW]$ 程度か、それ以上の負荷処理能力が必要であるが、実測した消費電力は36[kW]であり、約1/4程度の負荷処理能力で運転を行っている.

1.4 従来の研究

大規模空間における外気処理空調機の導入に関する研究はこれまでもなされており、外気処理空調がもたらす快適性、換気効果、省エネルギー性が実験的に検証されている。

快適性について、冷房運転時、快適性に関するアンケート結果によって快適性を評価した結果、86%~96%の滞在者が外気処理空調がつくる室内環境を満足に感じていることが分かり、体育館内の温熱環境が改善されていることが検証された。

また、換気効果について、冷房運転時、体育館にスモークを満たす換気性検証実験を行い、約1時間で換気が完了したことが検証された。

また、省エネルギー性について、冷房運転時、在室者の直接的に感じる快適度を維持しながら、空調負荷が約150kWの体育館に対し、約36kWの消費電力で外気処理空調が行えていることが消費電力測定により検証された。

1.5 本研究の目的

本研究では、機械換気と同時に最低限の外気処理を行うシステムである外気処理空調機によって、大規模な空調設備を使わずに室内環境を制御する技術の開発を目指す。本章1.4にもある通り、従来研究では、外気処理空調機の冷房運転時の快適性、換気効果、省エネルギー性について実験的に検証されているが、冷房運転時および暖房運転時の温熱環境評価指標を用いた快適性の評価は行われていない。また、外気処理空調機の消費電力に関する最適運転を考えるにあたり、外気処理空調機のシステム解析は、必要不可欠である。そこで本研究では、はじめに、冷房運転および暖房運転を行う外気処理空調機が作りだす室内環境の快適度を、温熱環境評価指標であるPMVおよびPPDを用いて評価し、次に、外気処理空調機のシステム解析を行い、温熱環境評価の結果を踏まえ、外気処理空調機の最適運転への手がかりを見つける。

1.6 本論文の構成

本論文は本章を含め、全 5 章、謝辞、参考文献、付録から構成され、以下にその概要を示す。

第 1 章では、本研究の研究背景及び外気処理空調、大空間を空調する際の空調機の負荷処理能力、従来の研究について纏め、本研究の目的を述べた。

第 2 章では、外気処理空調機に関する実験装置および実験方法について纏める。

第 3 章では、温熱環境評価手法について述べ、更に、その実験結果について纏める。

第 4 章では、外気処理空調のシステム解析手法についてについて述べ、更に、様々な条件でシステム解析を行い、その結果と考察を纏める。また、第 3 章で示した温熱環境評価結果を用いて、外気処理空調機の最適運転について考察する。

第 5 章では、本研究の結論を述べ、総括する。

第2章 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

2.1.1 外気処理空調機

今回導入した外気処理空調機は昭和鉄工製の「立形ルーフトップ外気処理機」である（図 2.1, 図 2.2）。これは、換気と快適性を追求した機械換気設備であり、換気と多少の冷暖房効果のある温湿度調節を施すことで、費用を抑え、さらに省エネルギー性も考慮されていることが特徴である。また、片流れ給気のため、室内を正圧にすることが可能であり、良い空気質を維持することも可能である。加えて、建物のすき間からのゴミやほこり、菌などの侵入を防ぐことができ、冬期は外気が侵入しないため、室内の湿度を高く維持することが可能となる。中間期は外気冷房が可能となるので、空調負荷を軽減することが可能である。表 2.1 に設備機器概要を示す。また、図 2.3 には外気処理空調機の装置概要を示す。



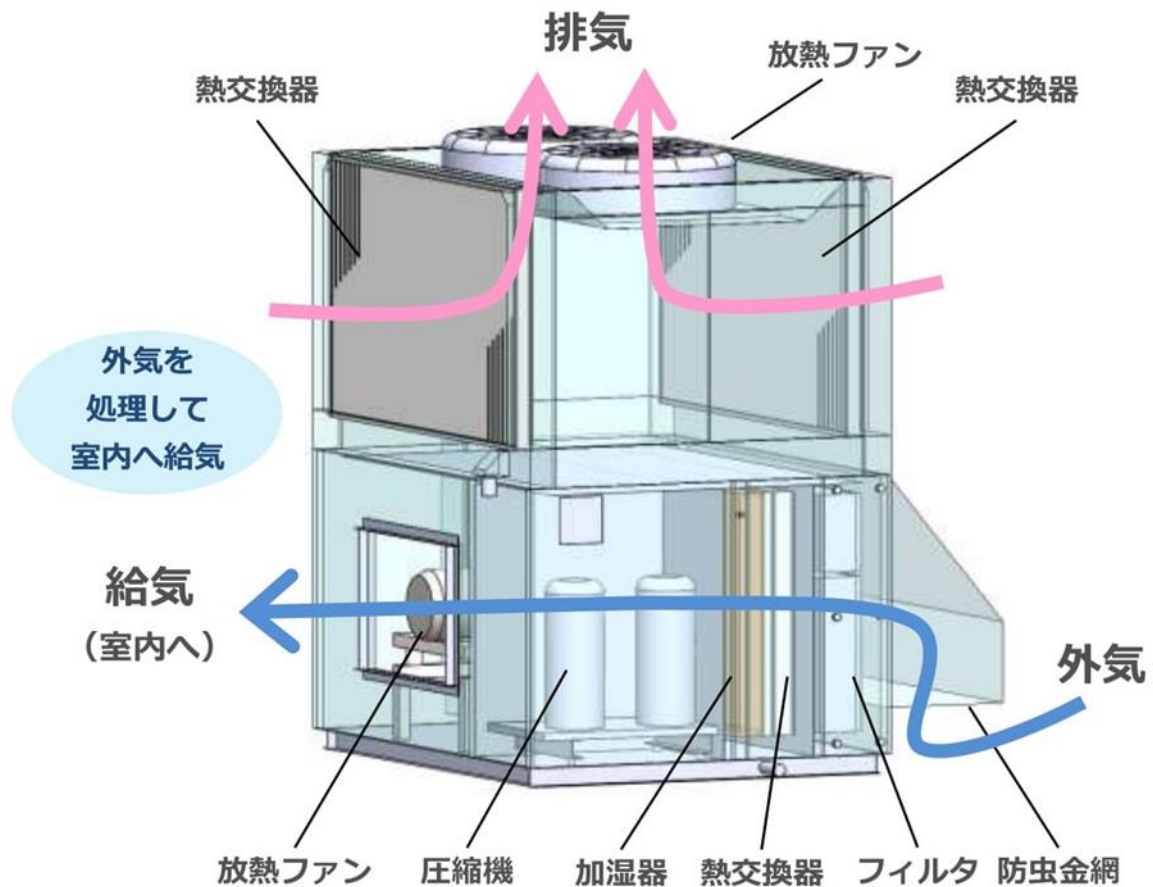
図 2.1 外気処理空調機^[6]



図 2.2 給気・熱回収ダクト^[6]

表 2.1 設備機器概要^[8]

立形ルーフトップ外気処理機（CRF-10001GM）			
外調機	冷房性能	冷房能力（kW）	97.0
		COP	3.28
	暖房性能	暖房能力（kW）	65.9
		COP	3.78
圧縮機		タイプ	スクロール式圧縮機
		定格出力（kW）	33.1
送風機	給気ファン	風量（m ³ /h）	10000
		定格出力（kW）	7.5 × 1
	放熱ファン	風量（m ³ /h）	24700
		定格出力（kW）	0.72 × 2
冷媒		R410A（HFC）	
電源		3 相 200V（60Hz）	

図 2.3 外気処理空調機の装置概要^[8]

冷房時は外気を蒸発器で冷却除湿し，室内に給気する．このとき，室内と同等のエンタルピーまで外気を処理して給気する．図 2.4 には冷房時の外気処理空調機の運転モードを示す．また，図 2.5 には冷房時の外気処理空調機の空気線図の動きを示す．

暖房時は凝縮器で加熱し，気化式加湿器で加湿した空気を室内に給気する．このとき，ビル管理法の DB（乾球温度）22℃の RH（相対湿度）40%時の絶対湿度と同等の絶対湿度で給気する．図 2.6 には暖房時の外気処理空調機の運転モードを示す．また，図 2.7 には暖房時の外気処理空調機の空気線図の動きを示す．

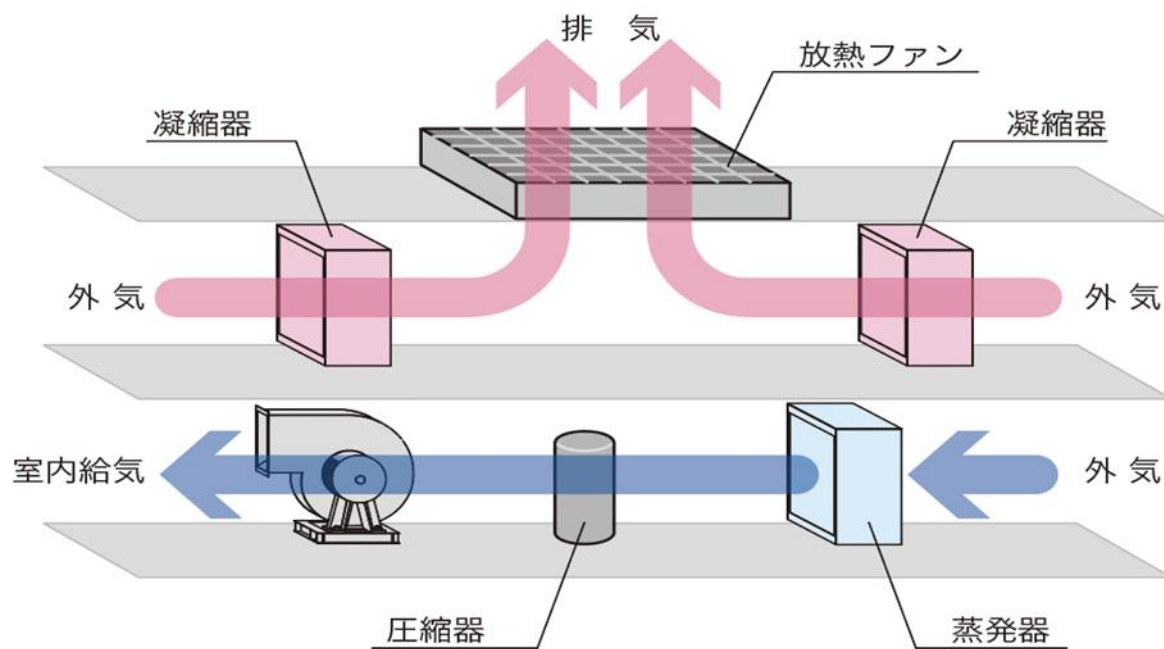


図 2.4 冷房時の運転モード^[7]

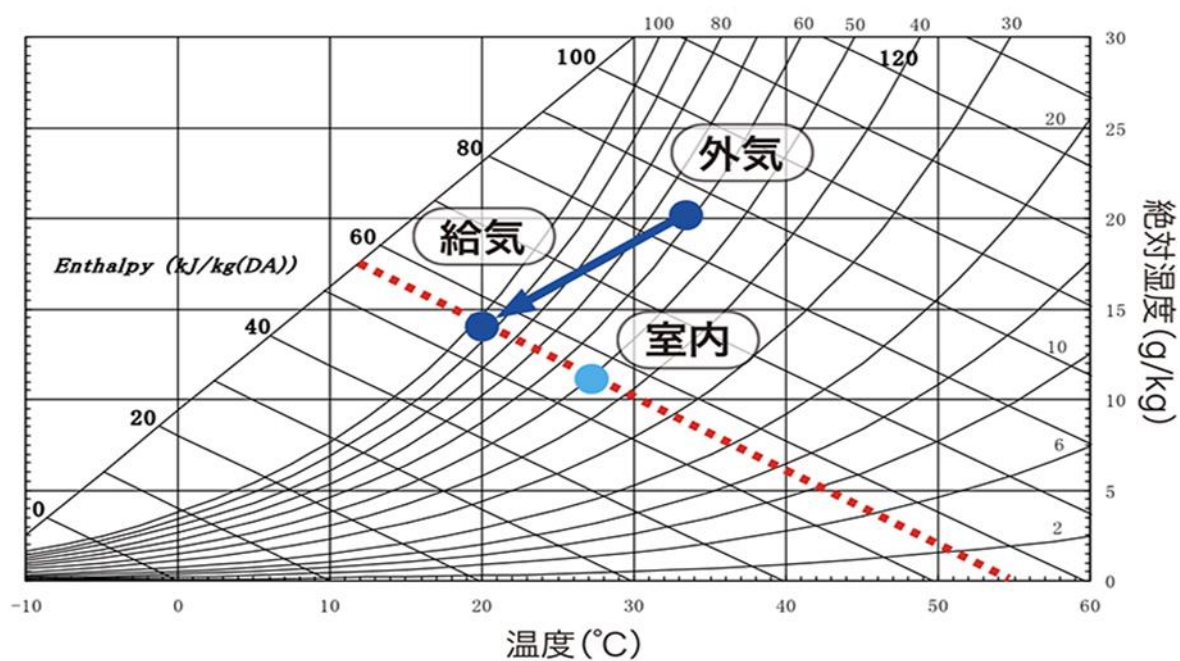


図 2.5 冷房時の空気線図^[7]

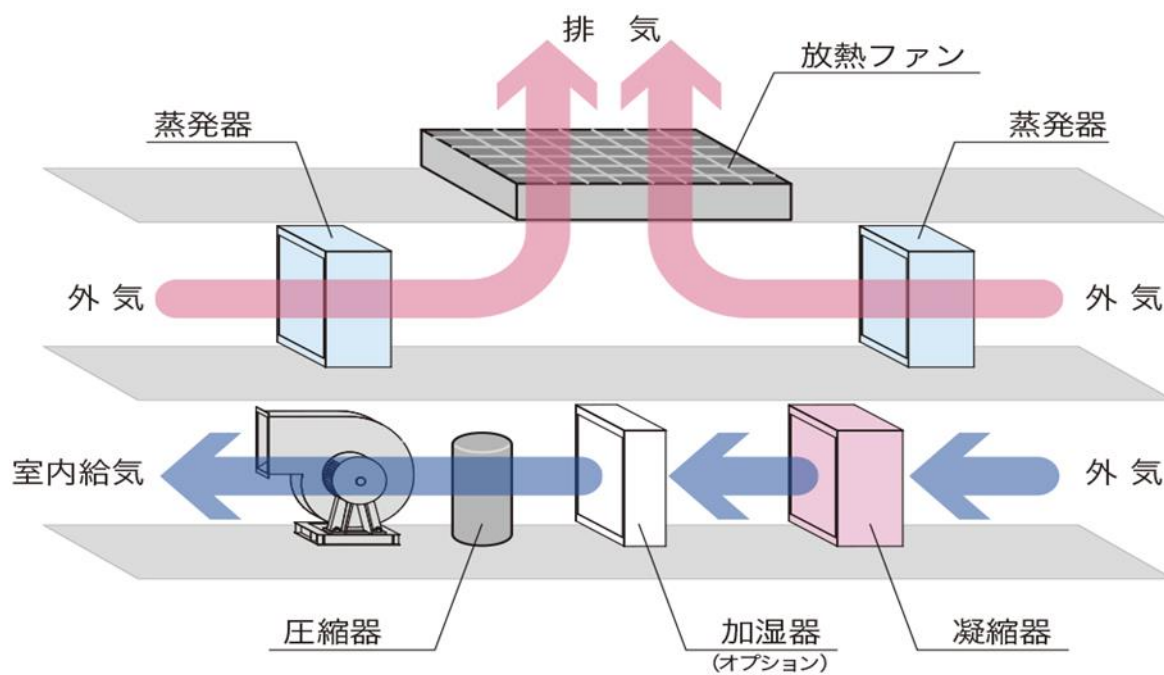


図 2.6 暖房時の運転モード^[7]

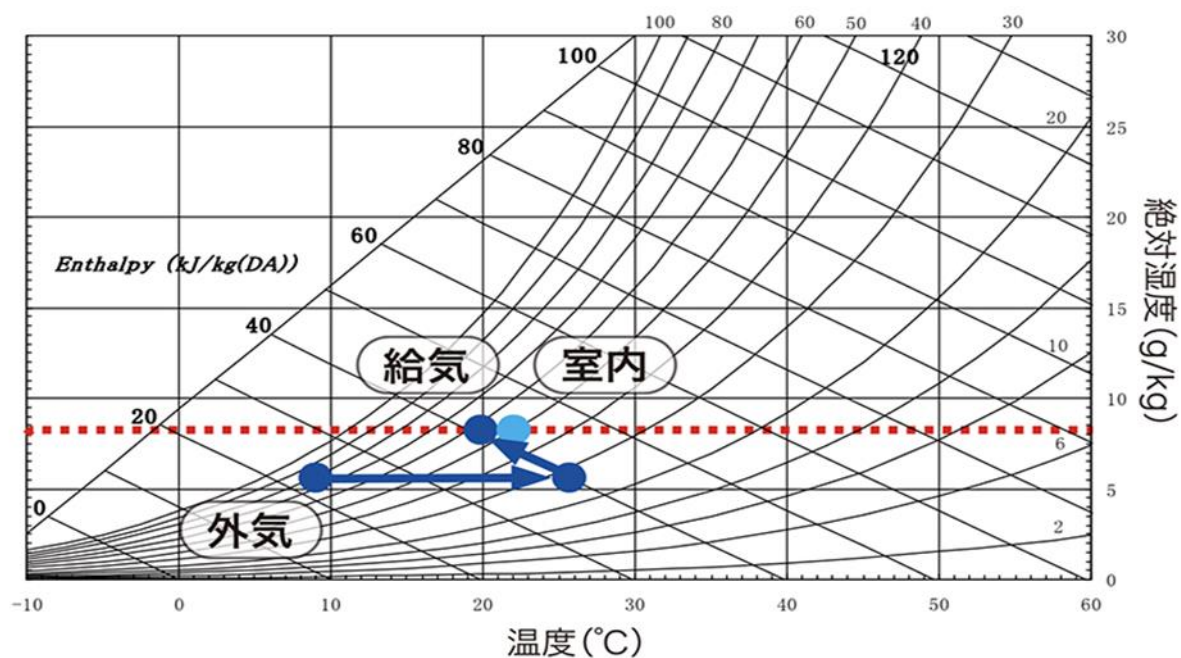


図 2.7 暖房時の空気線図^[7]

本研究で使用した外気処理空調機の電源はデマンドアップによる電気料金増加を避けるため、石油燃料による発電機で供給される。その結果、自己完結で運転可能なため、災害が起こった際、停電が発生しても、体育館が避難所として利用可能となる。図 2.8 は今回設置されている電源供給の発電機を示す。



図 2.8 電源供給の発電機^[6]

2.1.2 温湿度・二酸化炭素濃度センサー

温湿度センサーとして Bosch Sensortec 社の BME280 (図 2.9) を, 二酸化炭素センサーとして Sensirion 社の SDC41 (図 2.10) を用いた. また, マイクロコントローラとして Espressif Systems 社の ESP32 (図 2.11) を用いた. ESP32 は Wi-Fi と Bluetooth を内蔵する低コスト, 低消費電力なマイクロコントローラである. 指定された Wi-Fi が備わっている環境であれば, 測定者はその場にいらなくてもセンサーを設置するだけで, 測定できるという利点が挙げられる.

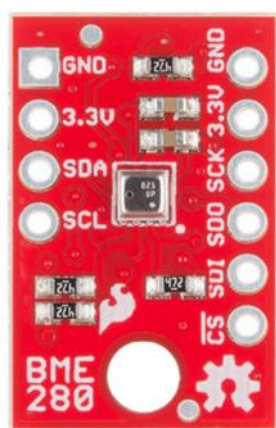


図 2.9 温湿度センサー(BME280)^[9]



図 2.10 CO₂ 濃度センサー(SDC41)^[10]



図 2.11 マイクロコントローラ (ESP32) ^[11]

図 2.12 には今回作成した温湿度・二酸化炭素濃度複合センサーを示す。センサーの中にはバッテリーを備え付けており、外から USB によって充電できるように設計した。また、図 2.13 にはセンサーの概略図を示す。今回作成したセンサーは I2C (Inter-Integrated-Circuit) というデータ通信技術を使用している。I2C は Philips Semiconductors 社が開発した通信規格である。I2C では、SDA (Serial Data) と SCL (Serial Clock) の 2 本の通信線を使用して通信を行う。SDA はデータ用の通信線であり、SCL はクロック用の通信線である^[12]。また、図 2.13 中の GND (Ground) は接地を表し、VIN は電源を表す。

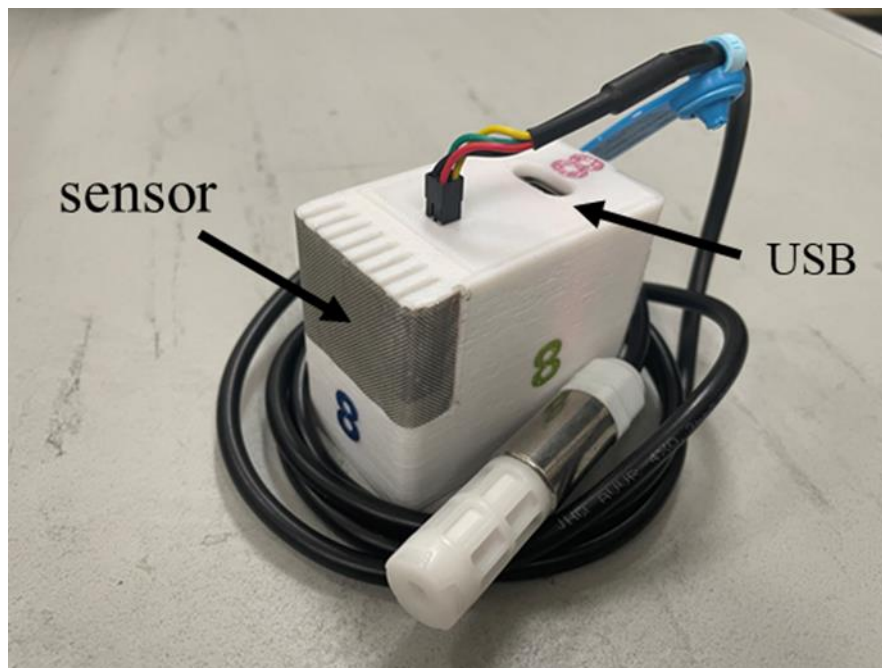


図 2.12 温湿度・二酸化炭素濃度複合センサー

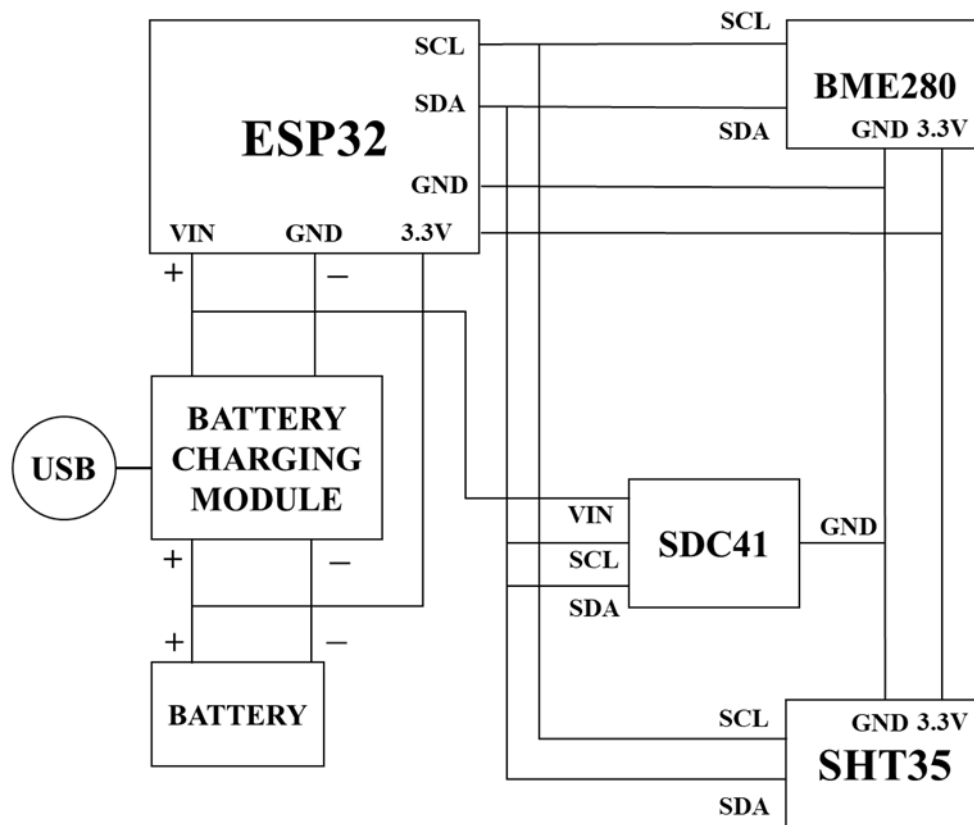


図 2.13 センサー概略図

2.1.3 センサー校正結果

表 2.2 は今回用いた温湿度・二酸化炭素濃度複合センサーにおける各要素の校正結果を示す。校正方法は図 2.14 に示すような断熱材に囲まれた箱の中に今回作成した温湿度・二酸化炭素濃度センサーと testo を入れて testo の数値を基にして、温湿度・二酸化炭素濃度センサーの値を testo の値に近づける方法である。温度に関しては, testo の値に限りなく近づくように, センサーの値との差を取り, 正確な値に近づけた。湿度と二酸化炭素濃度に関しては, testo の値を x 軸にセンサーの値を y 軸として線形一次近似で校正した。

表 2.2 校正結果

温度	$\pm 0.2^{\circ}\text{C}$
湿度	$\pm 1.0\%$
二酸化炭素濃度	$\pm 80\text{ppm}$



図 2.14 校正実験

2.2 実験方法

2.2.1 実験対象の体育館

実験対象とした体育館は福岡県宇美町にある宇美町住民福祉センターである（図 2.15，図 2.16）。平面 $27\text{m} \times 32.5\text{m}$ （ステージなし），天井高 9.5m のバレーボールやバスケットボールのコートとして 2 面使えるような一般的な体育館である。使用用途としては，宇美町住民のスポーツ施設や成人式や，イベント会場，災害時の避難施設，ワクチン接種会場（2021 年度）が挙げられる。図 2.17 には外気処理空調機が設置されているときの体育館の 1 列に並んだ給気口を示す。給気口を体育館ステージ向かって左側の天井角に，排気口を体育館ステージ向かって右側の床レベルに設置することで，大空間である体育館でも効率よく空気の入れ替えが可能となるように設置されている。



図 2.15 体育館外観



図 2.16 体育館内観



図 2.17 体育館に 1 列に並んだ給気口^[6]

2.2.2 測定方法

図 2.12 のセンサーを体育館の平面方向に 5 箇所，上下方向に 3 箇所設置して各地点における温度湿度分布，二酸化炭素濃度分布を測定する．図 2.18 は体育館に設置したセンサーの設置位置を示す．また，プログラミングにより，測定した値を図 2.19 や図 2.20 のようにパソコン上にリアルタイムで表示したり，グラフを作成したりすることも可能となる．その結果，センサーが設置された各地点の温湿度・二酸化炭素濃度の高低を明らかにすることができ，効率よく空調したり，換気したりすることが可能となる．

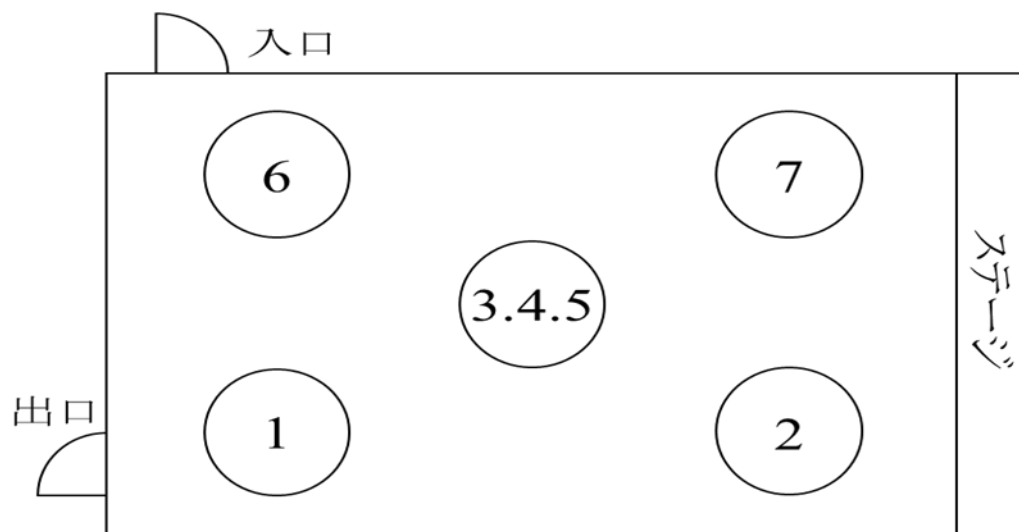


図 2.18 センサー設置位置

表 2.3 センサー設置位置

Sensor name	設置位置（ステージ向かって）	床からの高さ
Module1 (#1)	体育館右後	1.5m
Module2 (#2)	体育館右前	1.5m
Module3 (#3)	体育館中央	0.5m
Module4 (#4)	体育館中央	1.5m
Module5 (#5)	体育館中央	2.0m
Module6 (#6)	体育館左後	1.5m
Module7 (#7)	体育館左前	1.5m

九州大学 熱エネルギー変換システム研究室(<https://tecs-lab.kyushu-u.ac.jp/>)

ESP32 Experiment Station 1

Date: 2021-12-24 13:36:52

温度[℃]	湿度[%]	圧力[hPa]	CO2濃度[ppm]	Battery[V]
14.71	51.29	1011.40	444.00	4.182

ESP32 Experiment Station 2

Date: 2021-12-24 13:37:03

温度[℃]	湿度[%]	圧力[hPa]	CO2濃度[ppm]	Battery[V]
14.71	50.86	1010.85	625.00	4.303

ESP32 Experiment Station 3

Date: 2021-12-24 13:37:04

温度[℃]	湿度[%]	圧力[hPa]	CO2濃度[ppm]	Battery[V]
14.62	50.92	1010.34	496.00	4.170

ESP32 Experiment Station 4

Date: 2021-12-24 13:37:01

温度[℃]	湿度[%]	圧力[hPa]	CO2濃度[ppm]	Battery[V]
15.10	49.69	1009.90	465.00	4.220

ESP32 Experiment Station 5

Date: 2021-12-24 13:36:58

温度[℃]	湿度[%]	圧力[hPa]	CO2濃度[ppm]	Battery[V]
14.65	50.66	1009.82	512.00	4.168

ESP32 Experiment Station 6

Date: 2021-12-24 13:36:59

温度[℃]	湿度[%]	圧力[hPa]	CO2濃度[ppm]	Battery[V]
14.98	51.41	1009.92	439.00	4.189

ESP32 Experiment Station 7

Date: 2021-12-24 13:36:55

温度[℃]	湿度[%]	圧力[hPa]	CO2濃度[ppm]	Battery[V]
14.88	51.73	1009.73	495.00	4.170

ESP32 Experiment Station 8

Date: 2021-12-24 13:36:47

温度[℃]	湿度[%]	圧力[hPa]	CO2濃度[ppm]	Battery[V]
24.64	37.67	1008.53	1896.00	4.297
26.04	36.68		(External)	

ESP32 Experiment Station 9

Date: 2021-12-24 13:36:59

温度[℃]	湿度[%]	圧力[hPa]	CO2濃度[ppm]	Battery[V]
15.03	47.64	1008.82	453.00	4.161
14.08	54.37		(External)	

図 2.19 リアルタイム測定値表示

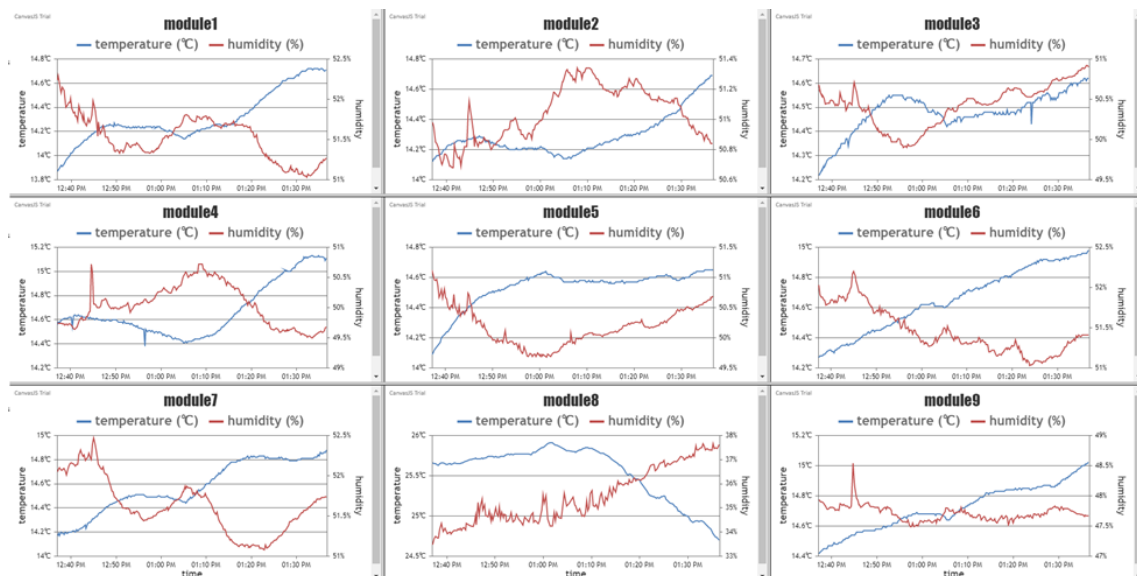


図 2.20 リアルタイムグラフ

第3章 実験結果

3.1 温熱環境評価

3.1.1 温熱環境の6要素

空調の目的は、室内の温湿度、気流、塵埃、臭気などの環境条件を最適な状態に制御し、保健用空調では在室者の健康を保護し、快適な空気環境を提供し、産業用空調では生産物の品質管理や機械類の機能維持を目指す。WHOによれば、健康とは病気や障害がないだけでなく、肉体的・精神的・社会的に安寧な状態である。したがって、空調技術者は環境要素を調整するだけでなく、在室者の特性も考慮する必要がある。人体と環境との熱交換に影響を与える要素を、温熱環境要素と呼ぶ。人体の熱的快適感に影響する主要素は活動量、着衣量、空気温度、放射温度、気流、湿度である。

(a) 活動量

安静にしているときと忙しくしているときでは、暑さや寒さの感じ方はずいぶんに変化する。人体は活動量が増えるほど消費するエネルギーは大きくなる。つまり、多くの熱を体の中で発生させる必要があるということである。この発生熱量を代謝量という。

人体の代謝量は met (Metabolic Equivalent : メット) という単位で表される。1met は椅座安静状態の代謝量で 58.15W/m^2 である。単位体表面積あたりで表される。表 3.1 には様々な活動の代謝量を示す。代謝量が大きいと夏はより暑く感じるようになり、冬は寒さをあまり感じなくなる。一方で、代謝量が小さいと夏は暑さをあまり感じなくなり、冬はより寒さを感じるようになる。

表 3.1 様々な活動の代謝量^[13]

活動量	met
寝床時	0.7
安静時	0.8
椅座静位	1.0
起立時	1.2
歩行時 (3.2 km/h)	2.0
歩行時 (4.8 km/h)	2.6
歩行時 (6.4 km/h)	3.8
読書・椅座静位	1.0
タイプ・ワープロ	1.1
歩き回る	1.7
物を運ぶ・持ち上げる	2.1
自動車運転	1.0~2.0
調理	1.6~2.0
掃除	2.0~3.4
縫物	1.8
ダンス	2.4~4.4
テニス	3.6~4.0
バスケットボール	5.0~7.6

(b) 着衣量

着衣量（クロ値）とは着衣の断熱・保温性を示す指標である．つまり，着ている服の種類や量のことである．皮膚表面の温度が下がるほど寒いと感じるが，服を着ていると皮膚表面から熱が逃げにくくなり，皮膚表面温度が上がり，暖かく感じる．1.0clo は $0.155(\text{m}^2\cdot\text{K})/\text{W}$ である．クロ単位は 1941 年に米国のギャggi（Gagge）によって提案された^[14]．図 3.2 に皮膚表面—着衣—環境の顕熱移動の概略図を示す．皮膚面から着衣外表面までの熱抵抗が， I_{cl} すなわち基礎着衣熱抵抗である．着衣外表面から環境までの熱抵抗を含め，皮膚面から環境までの熱抵抗 I_t をクロ値と呼ぶ場合もある． f_{cl} は，着衣面積比である．熱抵抗は裸体時の体表面積を基準に定義されており，着衣時に表面積が増加することにより，見かけ上熱抵抗が減少する．表 3.2 には様々な衣服の組み合わせによるクロ値を示す．

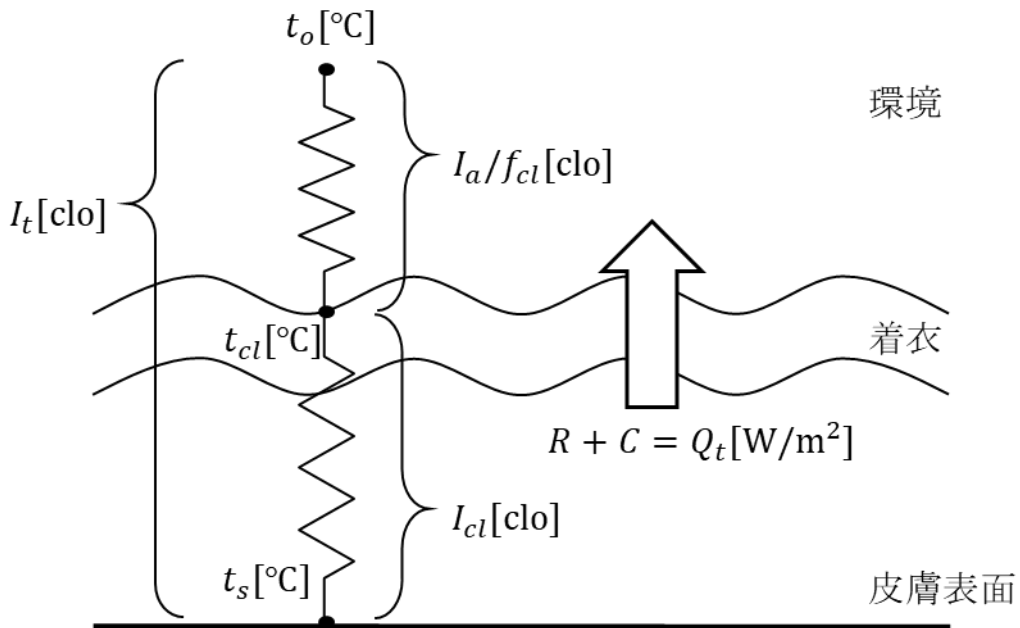


図 3.1 皮膚表面—着衣—環境面の顕熱移動（田辺新一）

表 3.2 様々な衣服の組み合わせによるクロ値^[15]

着衣組み合わせ	$I_{cl}[\text{clo}]$
パンティ・Tシャツ・ショーツパンツ・薄地ソックス・サンダル	0.30
パンティ・ペチコート・ストッキング・袖付き薄地ドレス・サンダル	0.45
ショーツ・半袖シャツ・薄地ズボン・薄地ソックス・靴	0.50
パンティ・ストッキング・半袖シャツ・スカート・サンダル	0.55
ショーツ・シャツ・薄地ズボン・ソックス・靴	0.60
パンティ・ペチコート・ストッキング・ドレス・靴	0.70
肌着・シャツ・ズボン・ソックス・靴	0.75
肌着・セータ・ズボン・長ソックス	0.80
パンティ・ペチコート・シャツ・スカート・厚手膝下ソックス・靴	0.90
ショーツ・半袖シングレット・シャツ・ズボン・Vネックセータ ・ソックス・靴	0.95
パンティ・シャツ・ズボン・ジャケット・ソックス・靴	1.00
パンティ・ストッキング・シャツ・スカート・ベスト・ジャケット	1.00
パンティ・ストッキング・ブラウス・ロングスカート・ジャケット・靴	1.10
肌着・半袖シングレット・シャツ・ズボン・ジャケット・靴	1.10
半袖半ズボン下つなぎ肌着・シャツ・ズボン・ベスト・ジャケット ・コート・ソックス・靴	1.60

(c) 空気温度

我々が「暑い」「寒い」と感じるときに真っ先に気にかけるのがこの空気温度である。すなわち、温度計で示される温度のことである。

(d) 放射温度

放射温度とは壁や天井, 床, 家具などから直接伝わる熱のことであり, 赤外線によって伝わる. また, 放射環境を表現するために, 平均放射温度 (MRT : Mean Radiant Temperature) という概念がよく用いられる. 平均放射温度とは, 実際の不均一な放射場において在室者が周囲環境と放射熱交換を行うのと同量の放射熱交換を行うような, 均一温度の仮想閉鎖空間の表面温度である. 平均放射温度には人体と周囲との形態係数が考慮されている式(3.1)に平均放射温度の定義を示す. 平均放射温度が室温よりも高いときは周囲から受ける熱放射の影響を感じ, 逆に室温よりも低いときは涼しさを感じる. 放射による熱の移動には空気の有無は関係せず, 真空でも伝わる.

$$t_r = \sqrt[4]{\sum F_{pi}(t_i + 273)^4} - 273 \quad (3.1)$$

(e) 気流

気流とは空気の動きのことである. 人体が動いている場合はその動きを含めた相対気流として定義される. 気流は, 体感に与える影響が大きく, 特に夏の涼感, 冬季の寒さ感覚には大きな影響がある.

(f) 相対湿度

湿度は空気中の水分量のことであり, 「じめじめして暑い」「からっとしていて気持ちがいい」という表現があるように我々の暑さの感じ方や健康面に大きな影響を与える. 梅雨の時期の高湿な空気は皮膚をべたつかせ, 単なる暑さ以上に不快感を与える. また, エアコンの温風などで乾燥した部屋にいと, のどや鼻の粘膜が乾きやすくなり, 健康面に悪影響を及ぼしたり, 静電気の問題が生じ不快感を与えたりする.

3.1.2 PMV と PPD

(A) PMV

PMV (Predicted Mean Vote : 予測平均温冷感尺度) はデンマーク工科大学のファンガー教授により提案された室内の温熱環境評価指標であり, 熱的中立に近い状態の人体の温冷感を予測する指標である^[16]. この PMV は温熱環境要素の 3.2 における温熱環境の 6 要素を用いて決定される. 1994 年には ISO7730 で規定されて室内空間の温熱指標の国際基準となり, アメリカ合衆国を除く多くの国でこの指標が採用されている. アメリカ合衆国ではアメリカ空調学会 (ASHRAE) が 1971 年に規定した SET* (Standard New Effective Temperature : エス・イー・ティー・スター標準有効温度) が標準になっている^[17].

快適方程式は人体の熱的中立温度を予測するものである. 熱的中立になるためには熱平衡が保たれるとともに, 平均皮膚温と皮膚からの蒸発熱損失量がある適当な範囲に入る必要がある. 快適方程式においては, 式(3.2), (3.3)に示すように熱的中立時の平均皮膚温と皮膚からの蒸発熱損失量が代謝量の関数になるとしている. これによって, 熱平衡式は 6 要素のみで表現され, 人体に関する熱平衡式は式(3.4)のように表現される. また各々の要素は式(3.5)から式(3.10)のように表現される^[18].

$$t_s = 35.7 - 0.028(M - W) \quad (3.2)$$

$$\ell_{sw} = \begin{cases} 0.42(M - W - 58.15), & M - W > 58.15 \\ 0, & M - W < 58.15 \end{cases} \quad (3.3)$$

$$(M - W) - \ell_d - \ell_{sw} - \ell_{re} - C_{re} = K = R + C_{co} \quad (3.4)$$

$$\ell_d = 3.05 \times 10^{-3} \{5733 - 6.99(M - W) - P_w\} \quad (3.5)$$

$$\ell_{re} = 1.7 \times 10^{-5} M (5867 - P_w) \quad (3.6)$$

$$C_{re} = 1.4 \times 10^{-3} M (34 - t_a) \quad (3.7)$$

$$K = \frac{t_s - t_{cl}}{0.155 I_{cl}} = \frac{35.7 - 0.028(M - W) - t_{cl}}{0.155 I_{cl}} \quad (3.8)$$

$$R = 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} \{(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4\} \quad (3.9)$$

$$C_{co} = f_{cl} \alpha (t_{cl} - t_a) \quad (3.10)$$

快適方程式において、人体に対する対流熱伝達率としてウインスロー（Winslow）による式(3.11)を使用した。また、着衣面積比は式(3.12)を使用した。これら一連の式を満たす条件として熱的中立を仮定する。

$$\alpha = \begin{cases} 2.38|t_{cl} - t_a|^{0.25}, & 2.38|t_{cl} - t_a|^{0.25} > 12.1\sqrt{v_{ar}} \\ 12.1\sqrt{v_{ar}}, & 2.38|t_{cl} - t_a|^{0.25} < 12.1\sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad (3.11)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 0.2I_{cl}, & I_{cl} < 0.5clo \\ 1.05 + 0.1I_{cl}, & I_{cl} \geq 0.5clo \end{cases} \quad (3.12)$$

また、水蒸気圧としてテテン（Tetens）による式(3.13)を使用した^[19]。

$$P_w = 6.11 \times 10^{\frac{7.5 \times t_a}{t_a + 237.3}} \times \varphi \quad (3.13)$$

PMV は人体の熱負荷 H に基づき算出される。式(3.6)の左辺から右辺を引いて式(3.14)のように人体の熱負荷が求められる。

$$H = (M - W) - \ell_d - \ell_{sw} - \ell_{re} - C_{re} - R - C_{co} \quad (3.14)$$

また、式(3.8)~(3.11)中の着衣外表面温度は式(3.15)で求められる。

$$\begin{aligned} t_{cl} = & 35.7 - 0.028(M - W) \\ & - 0.155I_{cl}[3.96 \times 10^{-8}f_{cl}\{(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4\} \\ & + f_{cl}\alpha(t_{cl} - t_a)] \end{aligned} \quad (3.15)$$

以上より PMV は式(3.16)で算出される。

$$PMV = H\{0.303 \exp(-0.036M) + 0.028\} \quad (3.16)$$

表 3.3 には PMV の各温熱環境要素の提要範囲と温冷感尺度を示す。PMV は均一な環境を想定して算出された指標であり，局部温冷感には対応していない。局部温冷感は実際の環境で必ず存在するため，PMV による制御だけでは個人の要望への対応が難しいことが課題として挙げられる。また，本来暑い寒いといった温熱感覚は個人で異なる。温熱環境が同一でも，人間の温熱感覚は個人差，男女差，年齢差によって異なり平均的には，女性より男性の方が，また高齢者より若者の方が暑く感じる人が多いといわれている。

表 3.3 PMV の各温熱環境要素の提要範囲と温冷感尺度^[20]

PMV 適用範囲		PMV の 7 段階温冷感尺度	
PMV	$-3 < \text{PMV} < +3$	+3	暑い
活動量	0.8~4.0met	+2	暖かい
着衣量	0~2clo	+1	やや暖かい
空気温度	10~30℃	0	中立
放射温度	10~40℃	-1	やや涼しい
気流	0~1.0m/s	-2	涼しい
湿度	30~70%	-3	寒い

(B) PPD

PMV には PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied : 予測不満足者率) が対応付けられている。PPD は人間がある暑い寒いという状態の時に何%の人が総環境に不満足か表す指標である。PPD が高いほど、その環境に不満を感じる人の割合が多いことが予測される。

PMV=0 のとき、その環境に不満を感じる人の割合は 5%と予測され、PMV=±3 のとき、その環境に不満を感じる人の割合は 99%と予想される。PPD は PMV を算出した後、式(3.17)から算出される^[13]。式(3.17)は 1300 人に及ぶ申告実験に基づいて求められた。図 3.2 に PMV と PPD の関係を示す。ISO の標準では、PMV は±0.5 以下、PPD は 10%以下となるように温熱環境を推奨している。

$$PPD = 100 - 95\exp(-0.03353PMV^4 - 0.2179PMV^2) \quad (3.17)$$

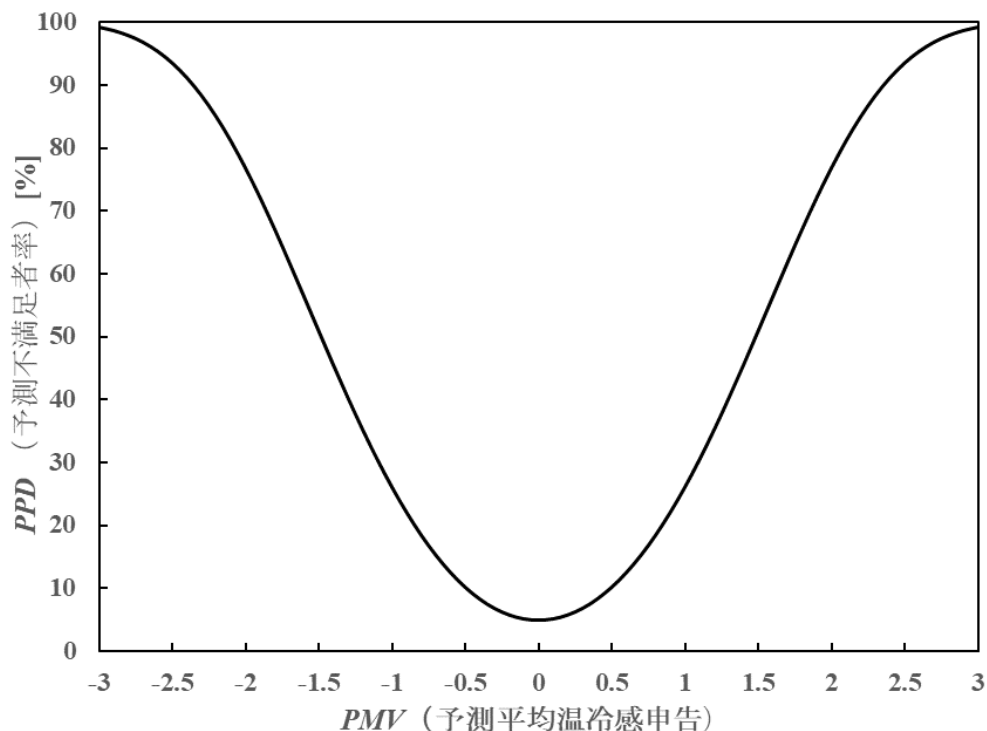


図 3.2 PMV と PPD の関係^[20]

3.2 温熱環境評価結果

3.2.1 冷房使用時の温熱環境評価結果

2021年6月26日に新型コロナウイルスのワクチン接種会場となった宇美町住民福祉センターにおいて、外気処理空調の冷房運転時の温熱環境調査を行った。図3.3に外気温度 $T_{oa.meas}[^{\circ}\text{C}]$ と外気湿度 $\phi_{oa.meas}[\%]$ の時間推移を示す。また、表3.4にPMVおよびPPD算出に必要な温熱環境の6要素である活動量[met]、着衣量[clo]、空気温度[$^{\circ}\text{C}$]、放射温度[$^{\circ}\text{C}$]、風速[m/s]、相対湿度[%]について纏める。また、図3.4に体育館中央、床面からの高さ0.5m地点のPMVおよびPPDの時間推移を示す。

活動量について、心拍数や呼吸数が安定し、筋肉の収縮や運動はほとんど行われていない状態を想定し、1.0[met]とする。これは具体的に、座っているだけや寝ている状態などの非常に軽い活動しか行われていない状態を指す。

着衣量について、温暖な気候や室内での活動、あるいは軽い運動に適した着衣を想定し、0.6[clo]とする。これは具体的に、比較的薄手の衣類を着用している状態を示す。

気流について、風速計でセンサーの各箇所の風速を測定し、その値を用いる。

放射温度について、体育館の容積は広大であり、体育館中心のセンサーを用いた為、放射による人体への影響は0とみなし、放射温度と空気温度は近似して計算した。放射温度は空気温度と同じ値とした場合、PMVの快適範囲を再度検討する必要がある^[21]が、今回は厳密なPMVの快適範囲が本研究の主旨ではない為割愛する。

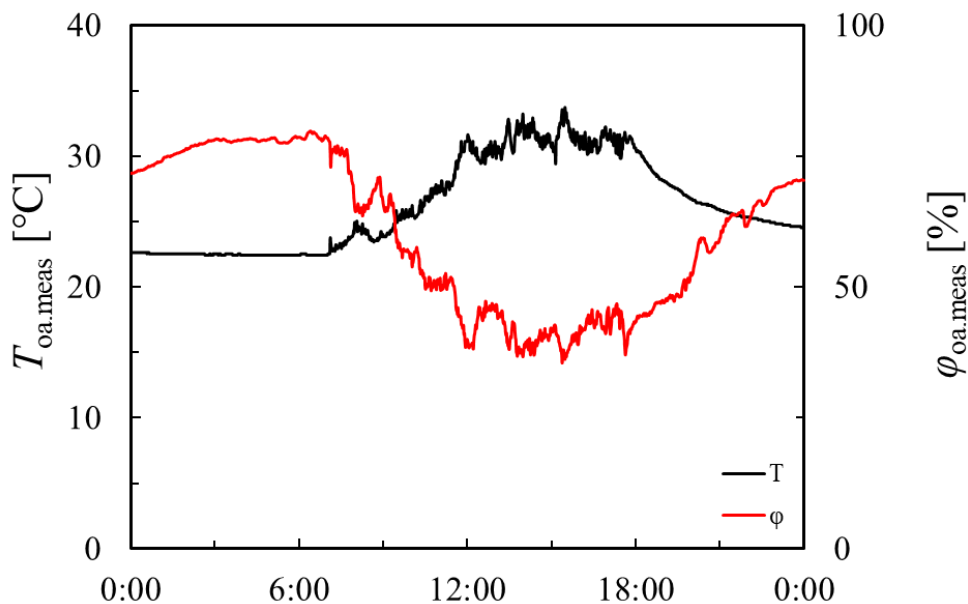


図3.3 外気温度と外気湿度の時間推移（夏季）

表 3.4 温熱環境の 6 要素 (夏季)

Item	Sign	Unit	Value
(a) 活動量	AL	met	1.0
(b) 着衣量	CLO	clo	0.6
(c) 空気温度	TA	°C	T_{meas}
(d) 放射温度	TR	°C	T_{meas}
(e) 気流	VA	m/s	V_{meas}
(f) 相対湿度	RH	%	ϕ_{meas}

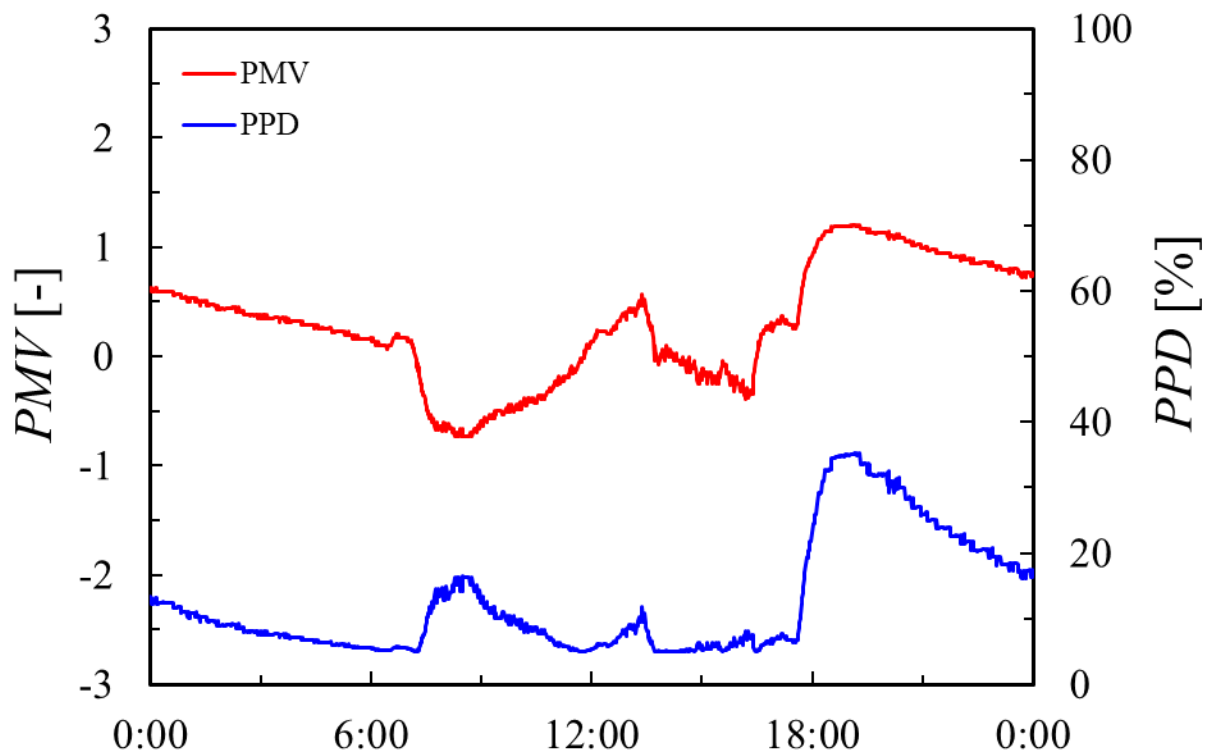


図 3.4 PMV と PPD の時間推移 (夏季)

3.2.2 暖房使用時の温熱環境評価結果

2023年2月6日に冷房運転実験と同所、宇美町住民福祉センターにおいて、外気処理空調の暖房運転時の温熱環境調査を行った。図3.5に外気温度 $T_{\text{oa.meas}}[^{\circ}\text{C}]$ と外気湿度 $\phi_{\text{oa.meas}}[\%]$ の時間推移を示す。また、表3.5にPMVおよびPPD算出に必要な温熱環境の6要素である活動量[met]、着衣量[clo]、空気温度[$^{\circ}\text{C}$]、放射温度[$^{\circ}\text{C}$]、風速[m/s]、相対湿度[%]を纏める。また、図3.6に体育館中央、床面からの高さ0.5m地点のPMVおよびPPDの推移を示す。

活動量について、心拍数や呼吸数が安定し、筋肉の収縮や運動はほとんど行われていない状態を想定し、1.0[met]とする。これは具体的に、座っているだけや寝ている状態などの非常に軽い活動しか行われていない状態を指す。

着衣量について、やや寒冷的な屋内での一般的な活動やオフィスでの作業など適した着衣を想定し、1.6[clo]とする。これは具体的に、ウールやフリース、軽量の合成繊維などの薄手のセーターやジャケット、軽量のコートを着用している状態を示す。

気流について、風速計でセンサーの各箇所の風速を測定し、その値を用いる。

放射温度について、本論文3.2.1と同様に、放射温度は空気温度と同じ値とした。

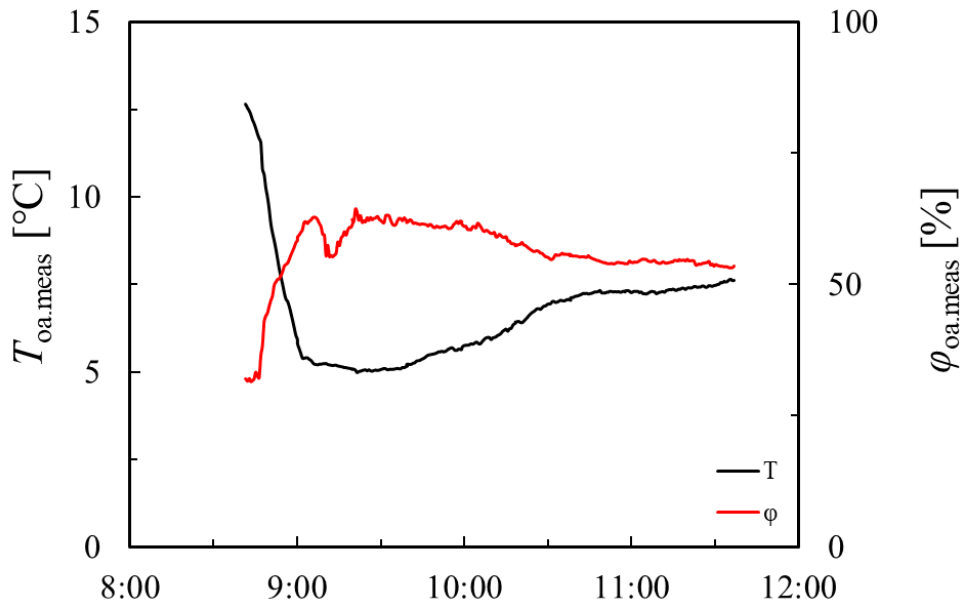


図 3.5 外気温度と外気湿度の時間推移（冬季）

表 3.5 温熱環境の6要素（夏季）

Item	Sign	Unit	Value
(a) 活動量	AL	met	1.0
(b) 着衣量	CLO	clo	1.6
(c) 空気温度	TA	°C	T_{meas}
(d) 放射温度	TR	°C	T_{meas}
(e) 気流	VA	m/s	V_{meas}
(f) 相対湿度	RH	%	ϕ_{meas}

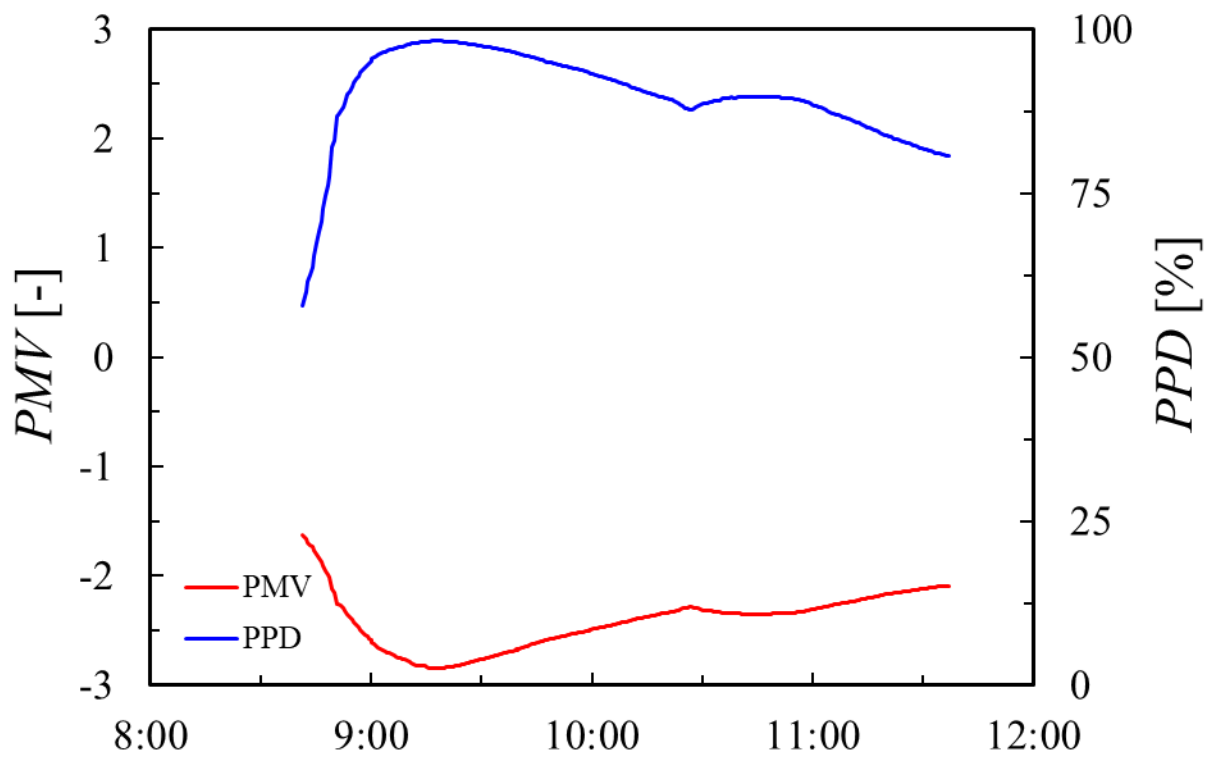


図 3.6 PMV と PPD の時間推移（夏季）

第4章 外気処理空調機システム解析

4.1 システムモデル

本項では、本章で行う外気処理空調機のシステム解析で使用する外気処理空調機のシステムモデルについて説明する。モデルの作成は、アメリカ合衆国の MathWorks 社が開発した、MATLAB 及び Simulink というソフトウェアツールを使って行う^[20.1]。

MATLAB は数値計算ソフトウェアであり、行列演算、プロット、アルゴリズム開発、データ解析などのための豊富な関数とツールを提供し、科学技術分野の研究や開発、産業アプリケーションなどで広く使用されている高い柔軟性と拡張性を備えたプログラミング言語であり、数値計算やデータ処理、機械学習、画像処理、シグナル処理などの幅広い領域で利用されている。また、Simulink はモデリング、シミュレーション、および実装のためのソフトウェアである。システムやプロセスの動作をモデル化し、それらのモデルをシミュレーションして設計や解析を行うことができ、制御システム、シグナル処理、画像処理、通信システムなど、さまざまな分野で広く利用されている。

本サイクルは両熱源流体に湿り空気である外気、冷媒に R410A を用いたヒートポンプサイクルである。表 4.1 にその概要を纏める。また、図 4.1 に外気処理空調機のシステム概略図を示す。

本項の節では外気処理空調機のシステムを構成する機器である熱交換器、圧縮機、膨張弁、制御システムについて説明する。

表 4.1 外気処理空調機のシステム概要

Item	Sign	Value
冷媒	ref	R410A
冷熱源	cs	湿り空気
温熱源	ws	湿り空気

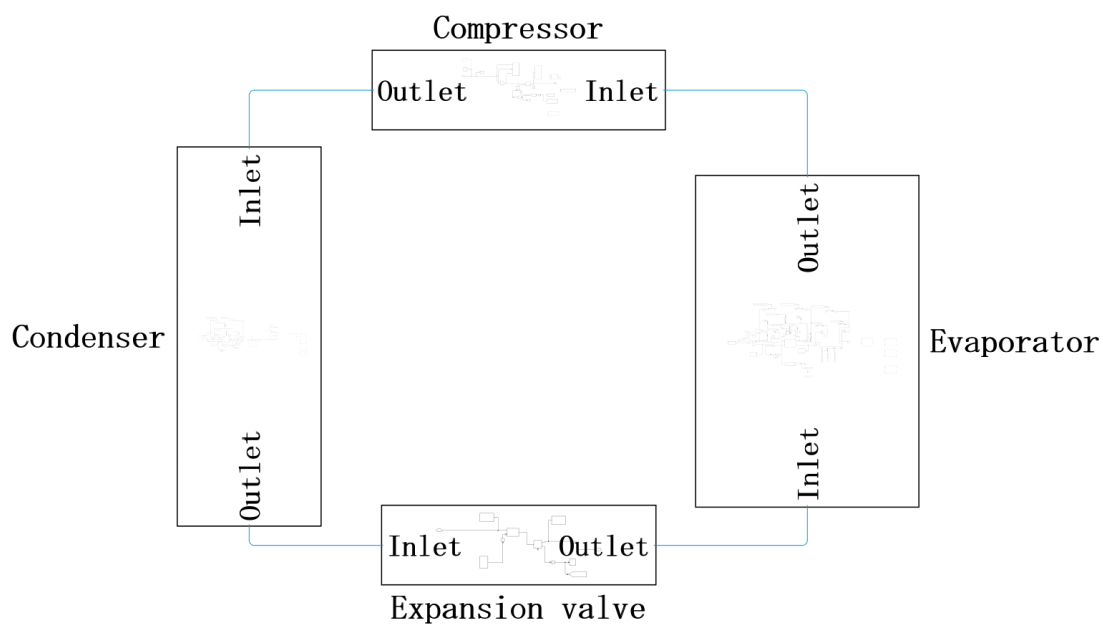


図 4.1 外気処理空調機のシステム概略図

4.1.1 熱交換器

(i) 蒸発器および凝縮器

空調機システムにおける蒸発器と凝縮器は熱交換器の中核を成す部位であり、冷却循環プロセスにおいて重要な機能を果たしている。蒸発器は外部から吸引された空気や水と冷媒が熱交換を行い、冷媒が液体から気体へ変化する領域である。この過程により周囲の媒体が冷却され、室内温度の制御が達成される。凝縮器は対照的に、圧縮機によって圧縮された冷媒の熱が外部に排出され、冷媒が再び液体状態に変化する領域である。凝縮器における熱の放出は、外部環境への熱の排出とともに、システムの全体的な熱効率向上に寄与する。蒸発器と凝縮器はそれぞれの機能において特有の熱交換特性を有し、これらの特性はシステムの性能やエネルギー効率に影響を与える。そのため、これらの熱交換器の設計や材料の選定に関する研究が、空調機システムの効率的な運用および環境への影響軽減に寄与している。

ここでは、冷媒と熱源の2重管熱伝達をモデル化している^[22]。2重管熱交換器は、熱伝達効率を最大化するために設計された熱交換装置であり、多くの工業プロセスや空調システムで広く利用されている。このデバイスは、2つの平行な管が一体となり、それぞれが異なる流体を通すことで熱伝達が行われる。通常、一方の管には熱源からの熱媒体が流れ、もう一方の管には冷却媒体が逆方向に流れる。素材は熱伝導率が高い銅を使用している。また、表 4.1.1.(i) に概要を纏め、図 4.1.1.(i)に概略図を示す。

表 4.1.1.(i) 蒸発器および凝縮器の概要

Item	Unit	Value
冷媒	—	R32
冷熱源	—	湿り空気
温熱源	—	湿り空気
パイプ長さ	m	50×10
冷媒パイプ内径	m	0.1504
冷媒パイプ外径	m	0.1904
冷媒パイプ厚さ	m	0.02
熱源パイプ内径	m	2
熱源パイプ外径	m	—
熱伝導率	W/(Km)	398

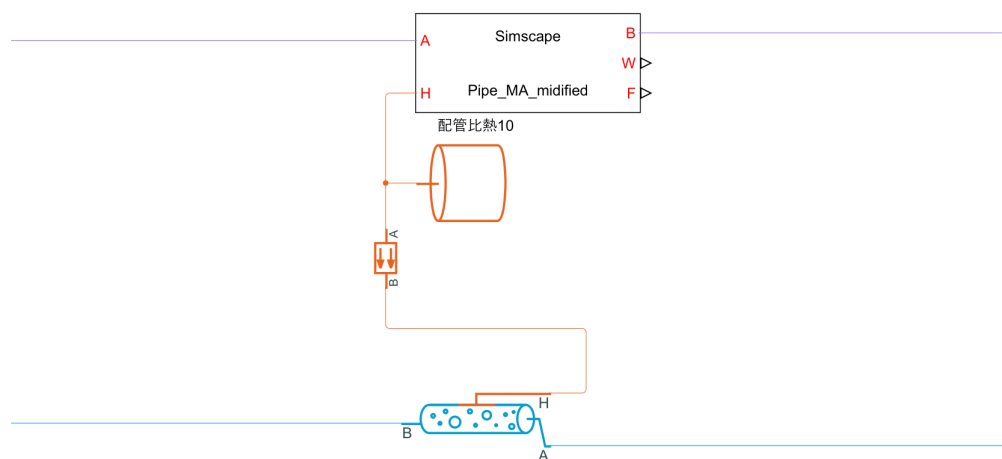


図 4.1.1.(i) 蒸発器および凝縮器の概略図

(ii) ダクト

蒸発器または、凝縮器から出た湿り空気は、ダクトを通過して、室内に給気される。ここでは、長さ、断面積の違う配管 3 つからなるダクトをモデル化している^[22]。にそれぞれダクト 1、ダクト 2、ダクト 3 とする。また、長さ、断面積を除くパラメータは等しいものとする。このダクト内の湿り空気は、通過する過程で、粘性摩擦損失や、パイプ壁との対流熱伝達などの影響を受け、圧力と温度が圧縮率と熱容量に基づいて変化する。また、湿った空気の体積が飽和に達すると、液体の水が凝縮する。また、表 4.1.1.(ii)に概要を纏め、図 4.1.1.(ii)に概略図を示す。

表 4.1.1.(ii) ダクトの概要

Item	Unit	Value
冷熱源	—	湿り空気
温熱源	—	湿り空気
ダクト1長さ	m	15.9
ダクト1断面積	m	0.30191
ダクト2長さ	m	3.8
ダクト2断面積	m	0.16619
ダクト3長さ	m	8.89
ダクト3断面積	m	0.15205
ダクトの厚さ	m	0.001
ダクトの熱伝導率	W/Km	398
断熱材の厚さ	m	0.016
断熱材の熱伝導率	W/Km	0.1

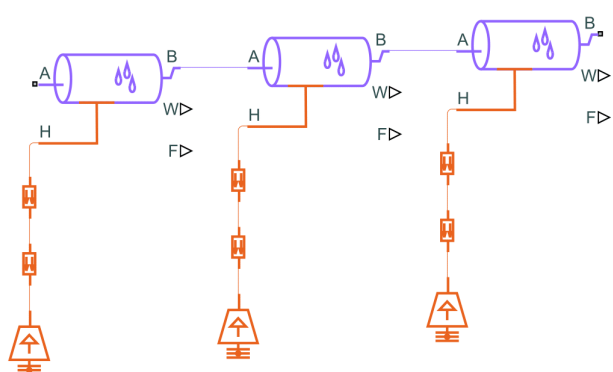


図 4.1.1.(ii) ダクトの概略図

4.1.2 圧縮機

空調機における圧縮機は、冷媒の循環において中心的な機能を果たす重要な装置である。圧縮機は、低圧の蒸発器から気化した冷媒を吸引し、高い圧力および温度に圧縮することで、冷媒を高温・高圧のガス状態に変換する。このガス状態の冷媒は、次に凝縮器に送られ、熱を放出して液体状態に変わり、室内やシステムに蓄えられた熱を効果的に排出する。圧縮機によるこのサイクルにより、空調機は室内の温度を制御し、快適な環境を提供する。圧縮機の性能や効率は、空調システム全体のパフォーマンスに直結しており、その選定や運転制御の最適化はエネルギー効率向上に寄与する重要な要素である。

ここでは、蒸発器と凝縮器を繋ぐ圧縮機をモデル化している^[23]。また、二相流体ネットワーク内の往復ピストン、回転スクリュー、回転ベーン、スクロールなどの容積式圧縮機を表す。ポート R とポート C は、それぞれコンプレッサー シャフトとケーシングに関連する機械的回転保存ポートである。ポート C に対してポート R が正回転すると、二相流体はポート A からポート B に流れる。また、表 4.1.2 に概要を纏め、図 4.1.2 に概略図を示す。

表 4.1.2 圧縮機の概要

Item	Unit	Value
変位量	cm ³ /rev	11
冷媒入口断面積	m ²	1.7766×10^{-2}
冷媒出口断面積	m ²	1.7766×10^{-2}

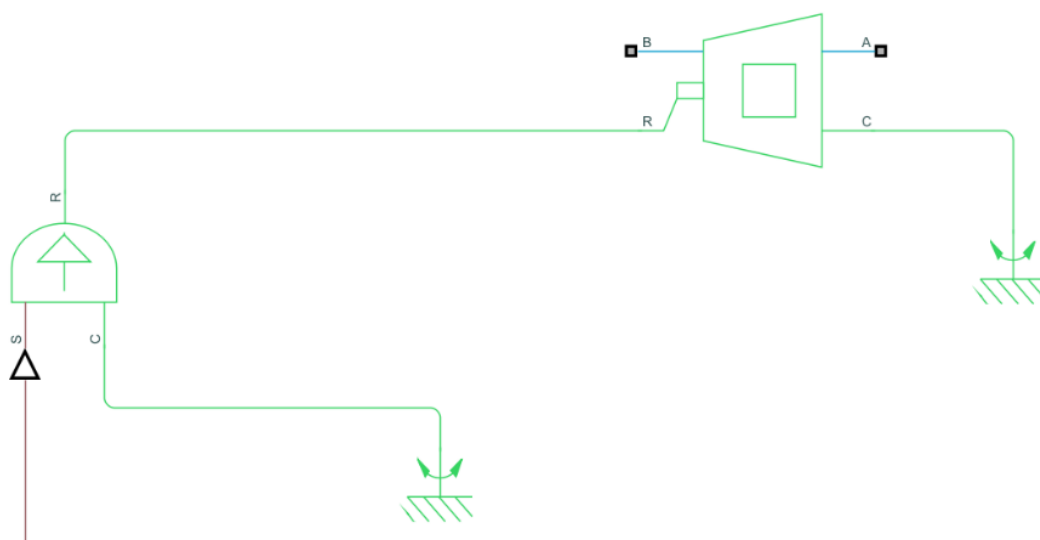


図 4.1.2 圧縮機の概略図

4.1.3 膨張弁

膨張弁は空調システムにおいて冷媒の制御に重要な役割を果たす装置である。高圧の冷媒を取り込んだ後、膨張弁は急激な膨張を引き起こし、これによって冷媒の圧力が低下し、同時に温度が急激に低下する。この効果的な温度制御により、蒸発器への冷媒供給が可能となり、空調システムは室内環境を適切な温度に維持する。膨張弁は通常、可変な開口部を備えており、温度や圧力の変動に応じて冷媒の流量を調整する。これにより、蒸発器での効率的な熱交換が実現し、システムは安定した性能を提供する。そのため、膨張弁の適切な設計と操作は、空調システムの性能向上とエネルギー効率の確保に不可欠である。

ここでは、凝縮器と蒸発器を繋ぐ膨張弁をモデル化している^[24]。二相流体ネットワークにおけるバルブやオリフィスなどの流路面積の局所的な減少による圧力降下をモデル化している。ポート A と B は制限の入口と出口を表している。ポート AR での入力物理信号は制限エリアを指定している。また、表 4.1.3 に概要を纏め、図 4.1.3 に概略図を示す。

表 4.1.3 膨張弁の概要

Item	Unit	Value
最小制限面積	m ²	8.55×10^{-12}
最大制限面積	m ²	6.93×10^{-4}
端子 A における断面積	m ²	1.78×10^{-2}
端子 B における断面積	m ²	1.78×10^{-2}
流量係数	—	0.64
層流の圧力比	—	0.999

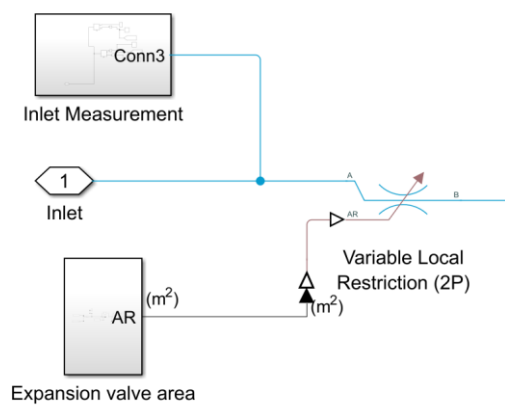


図 4.1.3.(a) 膨張弁の概略図

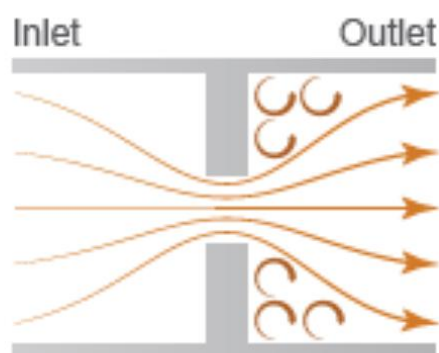


図 4.1.3.(b) ローカル制限の回路図

4.1.4 制御システム

ここでは、制御システムをモデル化している^[25]。PI制御は、プロポーショナル（P）制御と積分（I）制御を組み合わせることで、制御システムの安定性と迅速な応答を実現する手法である。P値は制御出力を目標値との偏差に比例して変化させ、システムの初期応答を改善する一方で、I値は偏差の積分を用いて制御出力を調整し、定常状態での偏差を抑制する。この組み合わせにより、PI制御は幅広い制御課題に適用可能であり、システムの性能を向上させる重要な手法となっている。本モデルで使用する補償器の式を次式に示す。また、表 4.1.4 に概要を纏め、図 4.1.4 に概略図を示す。

$$P = I \frac{1}{s}$$

表 4.1.4.(a) 過熱度を制御する場合

Item	Sign	Value
比例項	P	1.0×10^{-6}
積分項	I	1.0×10^{-6}

表 4.1.4.(b) 圧縮機周波数を制御する場合

Item	Sign	Value
比例項	P	1.0×10^{-5}
積分項	I	1.0×10^{-5}

表 4.1.4.(c) 供給体積流量を制御する場合

Item	Sign	Value
比例項	P	1.0×10^{-7}
積分項	I	1.0×10^{-7}

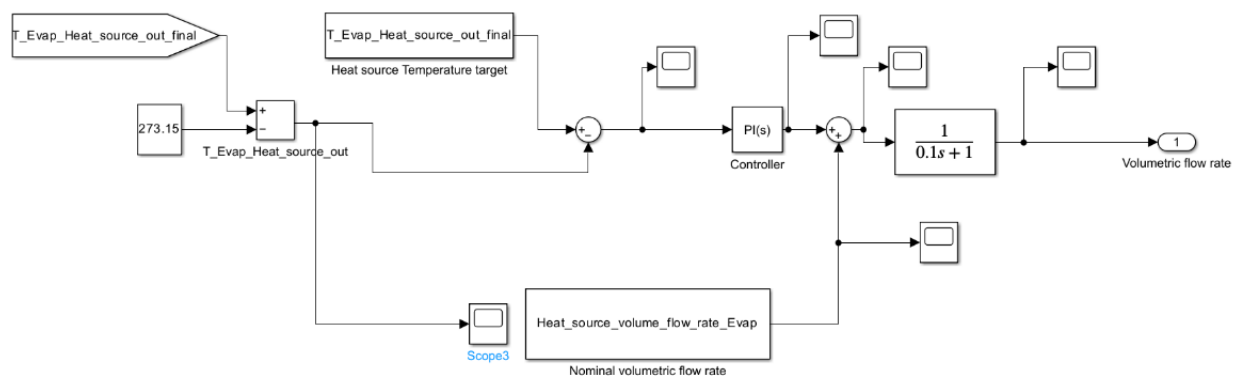


図 4.1.4 制御システムの概略図

4.2 システムモデルの妥当性の検証

この節では、本論文 4.1 で作成した外気処理空調のシステムモデルの妥当性の検証を行う。ここでは、外気処理空調の冷房運転時の実測した冷熱源出口温度 $T_{cs.out.meas}[^{\circ}C]$ と、外気処理空調のシステム解析で求めた冷熱源出口温度 $T_{cs.out.calc}[^{\circ}C]$ の比較を行う。また、冷房運転時の実測した冷熱源出口湿度 $\phi_{cs.out.meas}[\%]$ と、外気処理空調のシステム解析で求めた冷熱源出口湿度 $\phi_{cs.out.calc}[\%]$ の比較を行う。表 4.2.1 に代表的な時刻の冷熱源出口測定温度 $T_{cs.out.meas}[^{\circ}C]$ 、冷熱源出口測定湿度 $\phi_{cs.out.meas}[\%]$ を纏める。

表 4.2.2 に外気処理空調機のシステム解析の入力条件を纏める。冷房熱負荷を外気温度によらず一定の 97 kW（ヒートポンプ容量 100 %）とし、冷熱源入口温度、温熱源入口温度、冷熱源入口湿度、温熱源入口湿度に、時刻 8:00, 10:00, 12:00, 14:00, 16:00, 17:00 の測定した外気温度または、外気湿度の値をそれぞれ用いる。

また、図 4.2.1 に冷熱源入口測定温度 $T_{cs.in.meas}[^{\circ}C]$ 、冷熱源出口測定温度 $T_{cs.out.meas}[^{\circ}C]$ 、冷熱源出口計算温度 $T_{cs.out.calc}[^{\circ}C]$ の比較を示す。また、図 4.2.2 に冷熱源入口測定湿度 $\phi_{cs.in.meas}[\%]$ 、冷熱源出口測定湿度 $\phi_{cs.out.meas}[\%]$ 、冷熱源出口計算湿度 $\phi_{cs.out.calc}[\%]$ の比較を示す。また、システム解析の結果、時刻 8:00, 10:00, 12:00, 14:00, 16:00, 17:00 の圧縮機消費電力 $E_{comp}[kW]$ は、それぞれ約 25.7, 26.9, 29.6, 29.9, 29.0, 28.4 kW であった。

表 4.2.1 代表的な時刻の出口温度と出口湿度の測定値

Time	$T_{cs.out.meas} [^{\circ}C]$	$\phi_{cs.out.meas} [\%]$
2021/6/26 8:00	24.8	64.4
2021/6/26 10:00	25.4	56.0
2021/6/26 12:00	31.6	39.5
2021/6/26 14:00	31.6	38.1
2021/6/26 16:00	30.5	42.6
2021/6/26 17:00	31.2	45.9

表 4.2.2 入力条件（妥当性の検証）

Item	Sign	Unit	Value
冷房熱負荷	$Q_{\text{ref.evap}}$	kW	97.0
冷熱源入口温度	$T_{\text{cs.in}}$	°C	$T_{\text{oa.meas}}$
温熱源入口温度	$T_{\text{ws.in}}$	°C	$T_{\text{oa.meas}}$
冷熱源入口湿度	$\phi_{\text{cs.in}}$	%	$\phi_{\text{oa.meas}}$
温熱源入口湿度	$\phi_{\text{ws.in}}$	%	$\phi_{\text{oa.meas}}$
冷熱源体積流量	V_{cs}	m ³ /s	10000/3600
温熱源体積流量	V_{ws}	m ³ /s	24700/3600
断熱効率	η_{c}	—	0.75

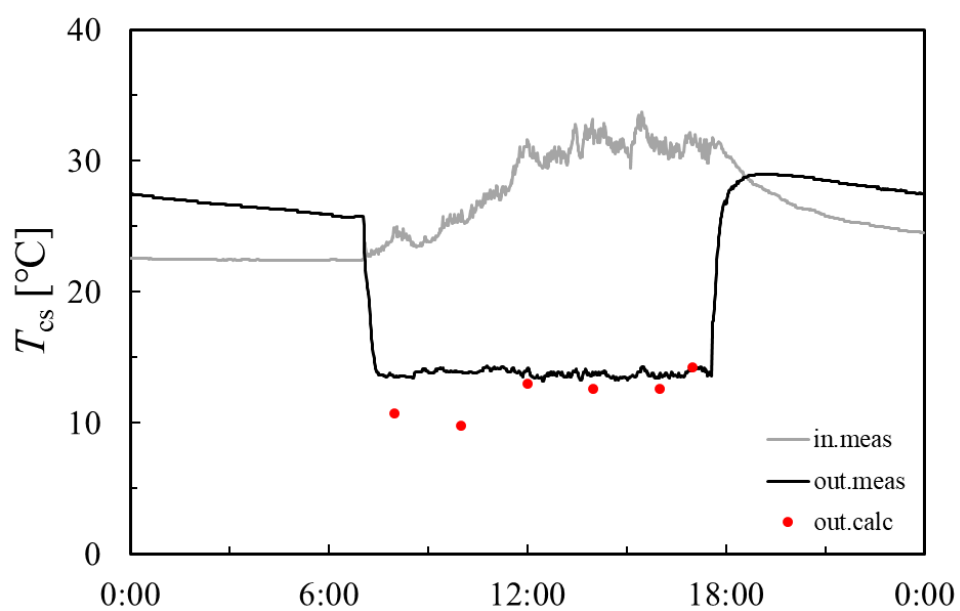


図 4.2.1 測定温度と計算温度の比較

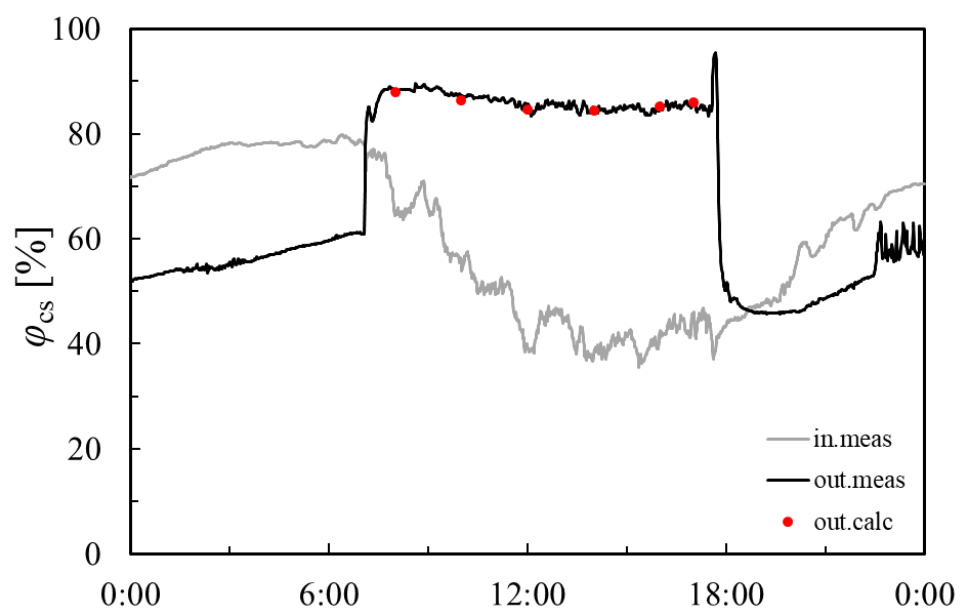


図 4.2.2 測定湿度と計算湿度の比較

図 4.2.1 より，時刻 8:00 と 10:00 では，測定された外気温度が計算した値と大きく異なっていた．これは，外気温が比較的低かったため，空調システムの運転中にヒートポンプ容量を調整していたことに起因している．この調整により，冷房熱負荷の誤差が大きくなった．また，時刻 12:00～17:00 では，外気温が高かったため，空調システムは冷房空調にかかる熱負荷を最大にして運転した．その結果，測定値と計算値の差が小さくなった．

図 4.2.2 より，測定された湿度と計算された湿度がおおよそ一致していることが示されている．これは，システムモデルが，蒸発器やダクトを含む熱交換や結露などの要素を適切にモデル化していることを示している．

以上のように，実際の測定値とモデル化された値を比較した結果，本論文 4.1 で作成された外気処理空調システムのモデルが妥当であると結論付けられる．そして，本論文 4.4 では，このモデルを使用し，システム解析を行う．

4.3 基礎関係式

本節の項では，主な外気処理空調のシステムを構成する機器に関する基礎関係式について纏める．

4.3.1 熱交換器系

熱交換器（蒸発器および凝縮器）の交換熱量に関する式を式(4.1)から式(4.4)に示す．

$$Q_{cs.evap} = (\rho V)_{cs} c_p (T_{cs.in} - T_{cs.out}) \quad (4.1)$$

$$Q_{ref.evap} = m_{ref} (h_{ref.evap.out} - h_{ref.evap.in}) \quad (4.2)$$

$$Q_{ws.cond} = (\rho V)_{ws} c_p (T_{ws.out} - T_{ws.in}) \quad (4.3)$$

$$Q_{ref.cond} = m_{ref} (h_{ref.cond.in} - h_{ref.cond.out}) \quad (4.4)$$

ヒートバランス（冷媒と両熱源がそれぞれ授受する熱量）は等しいものとする以下のように表される．

$$Q_{ref.evap} = Q_{cs.evap}$$

$$Q_{ref.cond} = Q_{ws.cond}$$

4.3.2 圧縮機系

圧縮機のサイクル成績係数に関する式を式(4.5)から式(4.7)に示す.

$$W_{ref.comp} = Q_{ref.cond} - Q_{ref.evap} \quad (4.5)$$

$$COP_{cycle.cool} = \frac{Q_{ref.evap}}{W_{ref.comp}} \quad (4.6)$$

$$COP_{cycle.heat} = \frac{Q_{ref.cond}}{W_{ref.comp}} \quad (4.7)$$

また, 圧縮機の諸効率に関する式を式(4.8)から式(4.10)に示す.

$$\eta_c = \frac{h_{cond.in.ideal} - h_{evap.out}}{h_{cond.in.real} - h_{evap.out}} \quad (4.8)$$

$$\eta_{comp} = W_{ref.comp} / W_{comp} \quad (4.9)$$

$$\eta_{m.comp} = W_{ref.comp} / E_{comp} \quad (4.10)$$

但し, 本論文の中では, $\eta_{comp} = 1.0$ として, $W_{ref.comp} = W_{comp}$ とする.

また，圧縮機のシステム成績係数に関する式を式(4.11)，式(4.12)に示す．

$$COP_{system.cool} = \frac{Q_{cs.evap}}{E_{comp}} \quad (4.11)$$

$$COP_{system.heat} = \frac{Q_{ws.cond}}{E_{comp}} \quad (4.12)$$

4.3.3 送風機系

送風機の動力は，風量・圧力に比例する．圧力の低い場合（圧力比 1.03 以下），空気動力 La [kW]および軸動力 L [kW]と送風機効率 η_{blower} [-]の関係を式(4.13)に示す^[26]．

$$La = (V_{cs}, V_{ws}) \times P_{blower} / (1 \times 10^3) \quad (4.13)$$

また，送風機の諸効率に関する式を式(4.14)，式(4.15)に示す^[20.1]．

$$\eta_{blower} = La/L \quad (4.14)$$

$$\eta_{m.blower} = L/E_{blower} \quad (4.15)$$

本研究で用いる外気処理空調の設備機器概要（表 2.1 参照）より，外気処理空調機の定格出力の場合，送風機消費電力などのパラメータを表 4.3 に纏める．

表 4.3 外気処理空調の定格運転時の各パラメータ

Item	Sign	Unit	Value
送風機消費電力	E_{blower}	kW	7.5
送風機機械効率	$\eta_{m,blower}$	—	0.9
送風機効率	η_{blower}	—	0.9
給気体積流量	V	m ³ /s	10000/3600

これらを式(4.13)から式(4.15)に代入し，送風機全圧 P_{blower} [Pa]を求めると，以下の通りとなる．

$$P_{blower} = 2187$$

以上より，本研究で使用する外気処理空調機の熱源体積流量 V [m³/s]と送風機消費電力 E_{blower} [kW]の関係は，式(4.16)の通りとなる．また，以降，送風機の消費電力は式(4.16)を用いて求める．

$$E_{blower} = 2.7 \times (V_{cs}, V_{ws}) \quad (4.16)$$

4.3.4 断熱効率とポリトロップ指数の関係

断熱過程において、ポリトロップ指数と断熱効率は、空気の圧縮性や変化する熱力学的条件を考慮する際に重要なパラメータとなる。ポリトロップ指数は、物質がポリトロップ変化を経る際の状態変化を表す指数であり、状態監視項目と呼ばれる。特に、空気や他の流体が空調プロセスで圧縮や膨張を経る際の状態変化を理解するために使用される。理想気体におけるポリトロップ指数 p は式(4.17)のように、定積比熱 c_v と定圧比熱 c_p の比で表される。

$$p = \frac{c_p}{c_v} \quad (4.17)$$

また、一般的な気体や流体において、ポリトロップ変化を表す方程式は式(4.18)のように表される。

$$PV^p = \text{const} \quad (4.18)$$

また、理想気体において、ポリトロップ指数と断熱効率 η_c の関係は式(4.19)のように表される。

$$\eta_c = 1 - \frac{1}{p} \quad (4.19)$$

これらの関係から分かるように、ポリトロップ指数が高いほど、断熱効率も高くなり、気体の比熱比が大きいほど、同じ温度差での断熱効率が向上する。また、入力熱源と排熱の温度差に直接依存しない形でポリトロップ指数と断熱効率が関連している。

本論文では、外気処理空調機のシステム解析において、ポリトロップ指数を調整することで、断熱効率を目標値に近づけるようにしている。本論文第4章で行う外気処理空調機のシステム解析において、断熱効率の目標値は、すべての解析において0.75としている。

4.4 システム解析結果と考察

ここで，本節の項で用いる外気処理空調機の総消費電力 E_{sum} [kW]に関する式を式(4.20)に示す．また，表 4.4 に外気処理空調の各消費電力について纏める．

$$E_{sum} = E_{comp} + E_{blower} \quad (4.20)$$

表 4.4 外気処理空調の消費電力

Item	Sign	Unit
圧縮機消費電力	E_{comp}	kW
送風機消費電力	E_{blower}	kW
外気処理空調機の総消費電力	E_{sum}	kW

4.4.1 同冷房熱負荷における消費電力解析

表 4.4.1.(a)を条件に冷房運転時の外気処理空調機のシステム解析を行った．目標とその目標値，またそれに対応する制御対象を表 4.4.1.(b)に纏める．本解析は，冷房熱負荷 $Q_{\text{ref.evap}}[\text{kW}]$ を一定とし，供給する湿り空気の体積流量 $V_{\text{cs}}[\text{m}^3/\text{s}]$ と供給する湿り空気の温度 $T_{\text{cs.out}}[^\circ\text{C}]$ を変化させたとき，圧縮機消費電力 $E_{\text{comp}}[\text{kW}]$ ，送風機消費電力 $E_{\text{blower}}[\text{kW}]$ ，総消費電力 $E_{\text{sum}}[\text{kW}]$ がどのように変化するか解析を行う．解析結果を表 4.4.1.(c)と図 4.4.1 に示す．

表 4.4.1.(a) 入力条件（解析 4.4.1）

Item	Sign	Unit	Value
冷熱源入口温度	$T_{\text{cs.in}}$	$^\circ\text{C}$	33.7
温熱源入口温度	$T_{\text{ws.in}}$	$^\circ\text{C}$	33.7
冷熱源入口湿度	$\phi_{\text{cs.in}}$	%	36.2
温熱源入口湿度	$\phi_{\text{ws.in}}$	%	36.2
温熱源体積流量	V_{ws}	m^3/s	24700/3600
圧縮機機械効率	$\eta_{\text{m.comp}}$	—	0.9
断熱効率	η_{c}	—	0.75
送風機機械効率	$\eta_{\text{m.blower}}$	—	0.9
送風機効率	η_{blower}	—	0.9

表 4.4.1.(b) 目標値と制御対象（解析 4.4.1）

目標	目標値	単位	制御対象
過熱度	10.0	$^\circ\text{C}$	冷媒圧縮機出口温度
冷房熱負荷	97.0	kW	圧縮機周波数
冷熱源出口温度	14,16,18,20,22	$^\circ\text{C}$	冷熱源体積流量

表 4.4.1.(c) 解析結果

$T_{cs.out}$ [°C]	V_{cs} [m ³ /s]	E_{sum} [kW]	ΔE_{sum} [%]
14	2.59	37.9	0.00
16	3.29	36.4	-4.03
18	4.68	35.9	-5.32
20	5.50	36.1	—
22	6.51	37.1	—

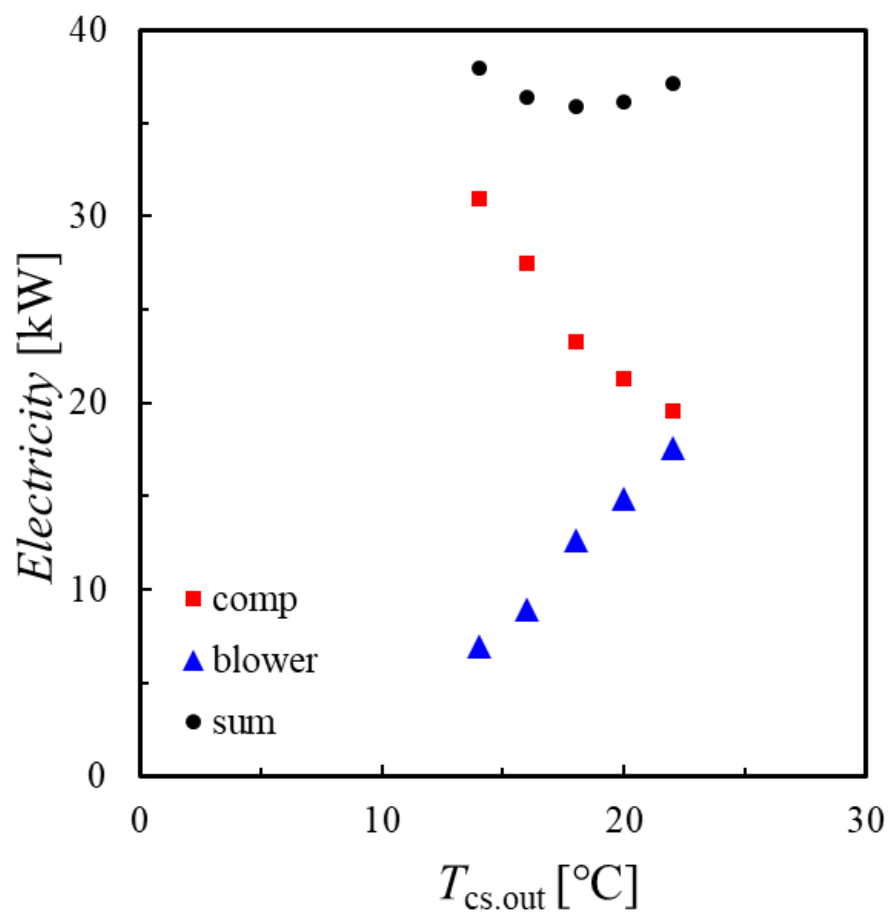


図 4.4.1 解析結果

図 4.4.1 より，同じ冷房熱負荷 97.0kW において，総消費電力 E_{sum} は，供給温度 $T_{\text{cs.out}}$ が約 18°C，供給流量 V_{cs} が約 4.68m³/s のとき最小値をとることが分かる．特に，図 3.4 に示す通り，冷房実験時の PMV はおおよそ -1~+1 と，やや快適な空間がつくられていたが，冷房実験時の冷房時供給温度を 14.3°C から約 18°C に上げ，供給体積流量を 2.78m³/s から 4.68m³/s に上げて運転すれば，室内の快適度はやや低下し，多少不快になる可能性があるが，総消費電力 E_{sum} を約 5.32% 低減させることが期待できる．

4.4.2 同暖房熱負荷における消費電力解析

表 4.4.2.(a)を条件に暖房運転時の外気処理空調機のシステム解析を行った。目標とその目標値、またそれに対応する制御対象を表 4.4.2.(b)に纏める。本解析は、暖房熱負荷 $Q_{\text{ref.cond}}[\text{kW}]$ を一定とし、供給する湿り空気の体積流量 $V_{\text{ws}}[\text{m}^3/\text{s}]$ と供給する湿り空気の温度 $T_{\text{ws.out}}[^\circ\text{C}]$ を変化させたとき、圧縮機消費電力 $E_{\text{comp}}[\text{kW}]$ 、送風機消費電力 $E_{\text{blower}}[\text{kW}]$ 、総消費電力 $E_{\text{sum}}[\text{kW}]$ がどのように変化するか解析を行う。解析結果を表 4.4.2.(c)と図 4.4.2 に示す。

表 4.4.2.(a) 入力条件（解析 4.4.2）

Item	Sign	Unit	Value
冷熱源入口温度	$T_{\text{cs.in}}$	$^\circ\text{C}$	5.77
温熱源入口温度	$T_{\text{ws.in}}$	$^\circ\text{C}$	5.77
冷熱源入口湿度	$\phi_{\text{cs.in}}$	%	61.08
温熱源入口湿度	$\phi_{\text{ws.in}}$	%	61.08
冷熱源体積流量	V_{cs}	m^3/s	24700/3600
圧縮機機械効率	$\eta_{\text{m.comp}}$	—	0.9
断熱効率	η_{c}	—	0.75
送風機機械効率	$\eta_{\text{m.blower}}$	—	0.9
送風機効率	η_{blower}	—	0.9

表 4.4.2.(b) 目標値と制御対象（解析 4.4.2）

目標	目標値	単位	制御対象
過熱度	10.0	$^\circ\text{C}$	冷媒圧縮機出口温度
暖房熱負荷	65.9	kW	圧縮機周波数
温熱源出口温度	22,24,26,28,30	$^\circ\text{C}$	温熱源体積流量

表 4.4.2.(c) 解析結果

$T_{ws.out}$ [°C]	V_{ws} [m ³ /s]	E_{sum} [kW]	ΔE_{sum} [%]
22	2.92	18.2	0.00
24	2.58	18.0	-1.41
26	2.31	17.9	-1.64
28	2.09	18.0	—
30	1.90	18.2	—

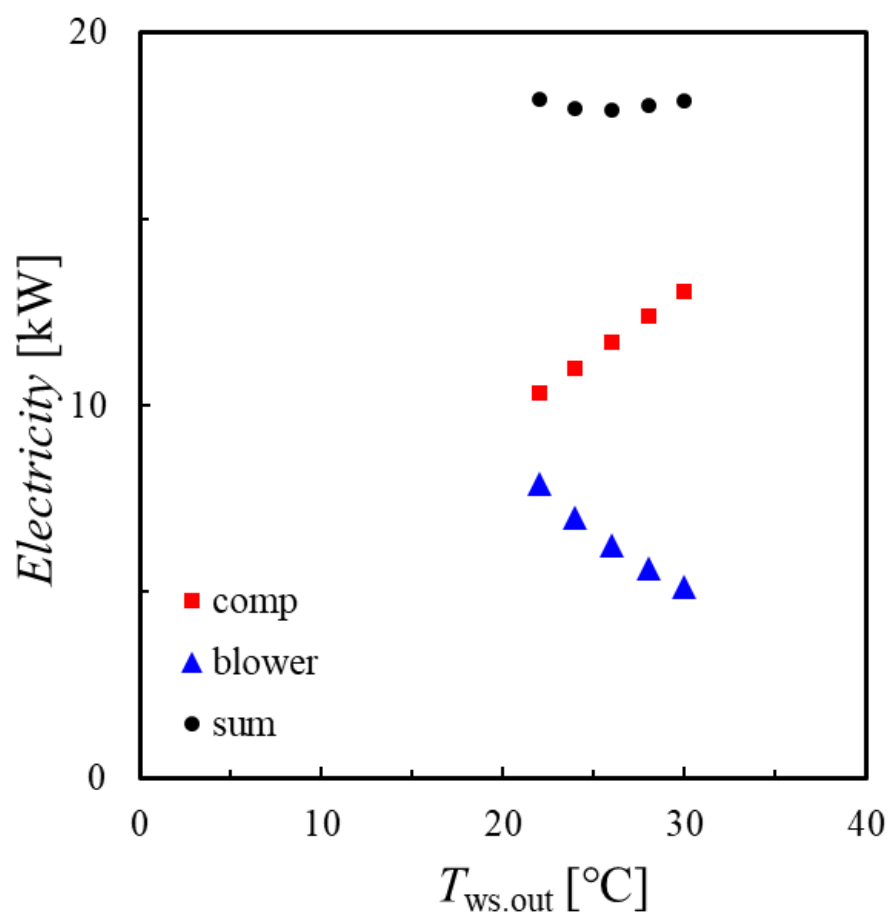


図 4.4.2 解析結果

図 4.4.2 より、同じ暖房熱負荷 65.9kW において、総消費電力 E_{sum} は、供給温度 $T_{\text{ws.out}}$ が約 26°C、供給流量 V_{ws} が約 2.31m³/s のとき最小値をとることが分かる。特に、図 3.6 に示す通り、暖房実験時の PMV はおおよそ -3~-2 と、室内空間は快適度の低い空間がつくられていたが、暖房実験時の暖房時供給温度を 22.3°C から約 26°C に上げ、供給流量を 2.78m³/s から 2.31m³/s に下げて運転すれば、室内の快適度の上昇に加え、総消費電力 E_{sum} を約 1.64% の低減が期待できる。

4.4.3 放熱側熱交換器の室内空気導入時の解析

表 4.4.3.(a)を条件に冷房運転時の外気処理空調機のシステム解析を行った．目標とその目標値，またそれに対応する制御対象を表 4.4.3.(b)に纏める．本解析は，冷房熱負荷 $Q_{\text{ref.evap}}[\text{kW}]$ を一定とし，放熱側熱交換器の入口温度 $T_{\text{ws.in}}[^\circ\text{C}]$ を変化させたとき，冷房システム $\text{COP}[-]$ がどのように変化するか解析を行う．この解析は，放熱側の熱源に，一度冷やした室内空気を一部利用するという状況を想定している．放熱側熱交換器に一度冷やされた室内空気の一部を使った場合，室内温度は上昇し，室内温熱環境の快適度は低下すると予測される．解析結果を図 4.4.3 に示す．

表 4.4.3.(a) 入力条件（解析 4.4.3）

Item	Sign	Unit	Value
冷熱源入口温度	$T_{\text{cs.in}}$	$^\circ\text{C}$	33.7
温熱源入口温度	$T_{\text{ws.in}}$	$^\circ\text{C}$	34,32,30,28,26
冷熱源入口湿度	$\phi_{\text{cs.in}}$	%	36.2
温熱源入口湿度	$\phi_{\text{ws.in}}$	%	36.2
冷熱源体積流量	V_{cs}	m^3/s	10000/3600
温熱源体積流量	V_{ws}	m^3/s	24700/3600
圧縮機機械効率	$\eta_{\text{m.comp}}$	—	0.9
断熱効率	η_{c}	—	0.75

表 4.4.3.(b) 目標値と制御対象（解析 4.4.3）

目標	目標値	単位	制御対象
過熱度	10.0	$^\circ\text{C}$	冷媒圧縮機出口温度
冷房熱負荷	97.0	kW	圧縮機周波数

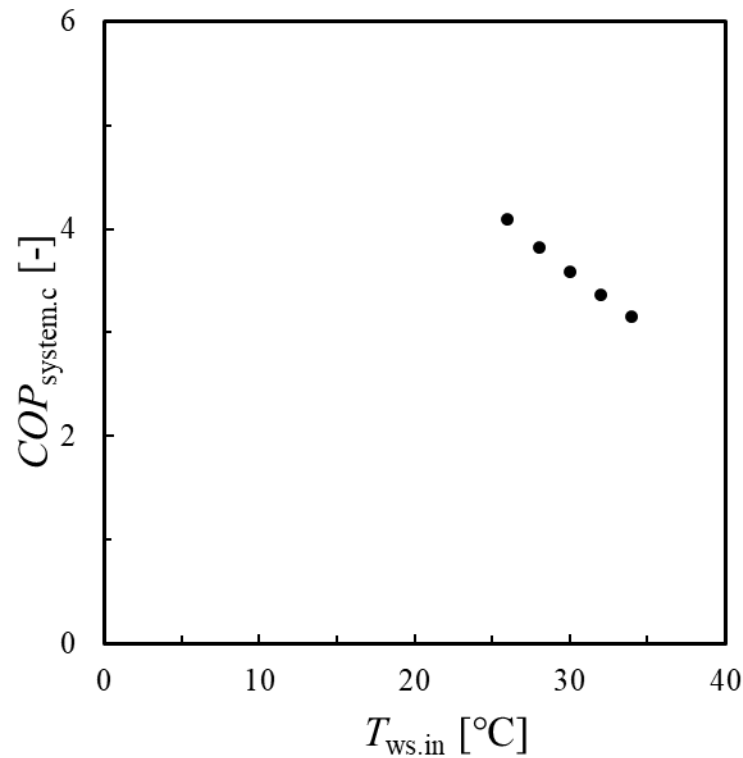


図 4.4.3 解析結果

図 4.4.3 より，室内空気の一部を使った場合，室内温度は上昇し，室内環境の快適度は低下すると予測されるが，冷房システム COP は上昇することが分かる．具体的には，表 4.4.3.(c)に示す通り，冷房使用時，放熱側熱交換器の入口温度 $T_{ws.in}$ を 2~8°C 下げると，冷房システム COP は約 6~30% 上昇する．特に，冷房実験時，図 3.4 に示す通り，PMV はおおよそ -1~+1 と，室内空間は十分快適な空間がつくられており，多少の不快感が許容できるのであれば，室内空気の一部を放熱側熱交換器に取り込むことで，圧縮機消費電力 E_{comp} の低減が期待できる．

表 4.4.3.(c) 解析結果

$T_{ws.in}$ [°C]	$\Delta T_{ws.in}$ [°C]	$COP_{system.cool}$ [-]	$\Delta COP_{system.cool}$ [%]
34	0	3.15	+0.00
32	-2	3.36	+6.65
30	-4	3.58	+13.71
28	-6	3.82	+21.36
26	-8	4.10	+30.05

4.4.4 放冷側熱交換器の室内空気導入時の解析

表表 4.4.4.(a)を条件に暖房運転時の外気処理空調機のシステム解析を行った．目標とその目標値，またそれに対応する制御対象を表 4.4.4.(b)に纏める．本解析は，暖房熱負荷 $Q_{\text{ref.cond}}[\text{kW}]$ を一定とし，放冷側熱交換器の入口温度 $T_{\text{cs.in}}[^\circ\text{C}]$ を変化させたとき，暖房システム COP[-]がどのように変化するか解析を行う．この解析は，放冷側の熱源に，一度温めた室内空気を一部利用するという状況を想定している．放冷側熱交換器に一度温められた室内空気の一部を使った場合，室内温度は低下し，室内温熱環境の快適度は低下すると予測される．解析結果を図 4.4.4 に示す．

表 4.4.4.(a) 入力条件（解析 4.4.4）

Item	Sign	Unit	Value
冷熱源入口温度	$T_{\text{cs.in}}$	$^\circ\text{C}$	6,8,10,12,14
温熱源入口温度	$T_{\text{ws.in}}$	$^\circ\text{C}$	5.77
冷熱源入口湿度	$\phi_{\text{cs.in}}$	%	61.08
温熱源入口湿度	$\phi_{\text{ws.in}}$	%	61.08
冷熱源体積流量	V_{cs}	m^3/s	24700/3600
温熱源体積流量	V_{ws}	m^3/s	10000/3600
圧縮機機械効率	$\eta_{\text{m.comp}}$	—	0.9
断熱効率	η_{c}	—	0.75

表 4.4.4.(b) 目標値と制御対象（解析 4.4.4）

目標	目標値	単位	制御対象
過熱度	10.0	$^\circ\text{C}$	冷媒圧縮機出口温度
暖房熱負荷	65.9	kW	圧縮機周波数

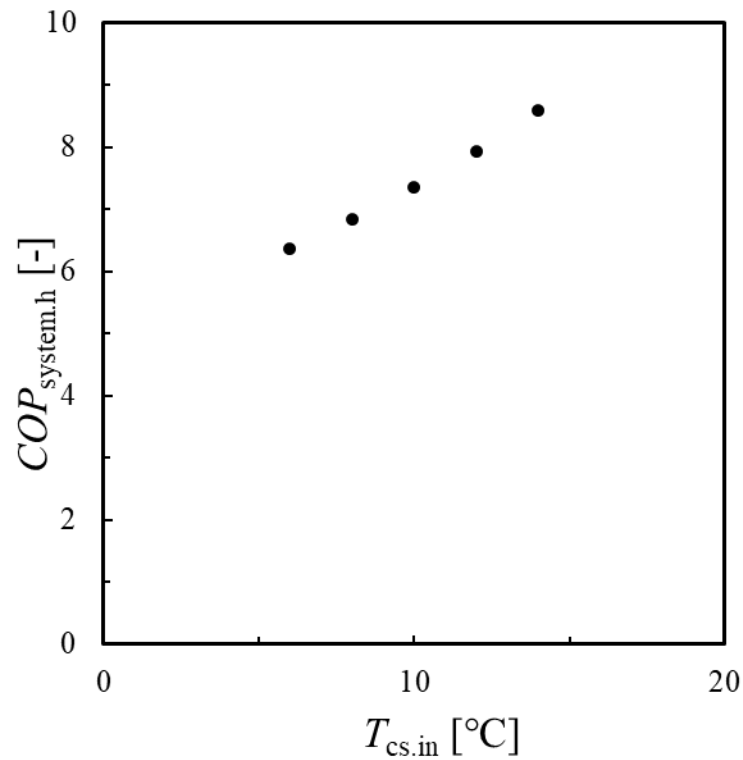


図 4.4.4 解析結果

図 4.4.4 より，室内空気の一部を使った場合，室内温度は低下し，室内環境の快適度は低下すると予測されるが，暖房システム COP は上昇することが分かる．具体的には，表 4.4.4.(c)に示す通り，暖房時の場合，放冷側熱交換器の入口温度を 2~8℃上げると，暖房システム COP は約 7~35%上昇する．

表 4.4.4.(c) 解析結果

$T_{cs.in} [^{\circ}C]$	$\Delta T_{cs.in} [^{\circ}C]$	$COP_{system.heat} [-]$	$\Delta COP_{system.heat} [\%]$
6	0	6.37	+0.00
8	+2	6.83	+7.26
10	+4	7.35	+15.41
12	+6	7.93	+24.40
14	+8	8.60	+35.03

第5章 総括

本研究では、大規模な空調設備を必要とせずに室内環境を制御する技術を開発することを目指し、機械換気と同時に最低限の外気処理を行う外気処理空調機を用いた。本論文では、外気処理空調機が作り出す空間を温熱環境評価指標を用いて評価し、システム解析と温熱環境評価結果を通じて、快適性とシステムの消費電力の観点で外気処理空調機の最適運転の指標を明らかにした。以下に、その内容を要約する。

- 1) 夏季（6月）と冬季（2月）に体育館で、外気処理空調機の冷房実験および暖房実験を行い、測定した室内環境データから、温熱環境評価指標である PMV と PPD を算出し、室内の快適度を評価した。夏季の冷房実験では、PMV はおおとそ-1~+1 であり、十分快適な空間がつけられていることが分かった。また、冬季の暖房実験では、PMV はおよそ-3~-2 であり、快適度が低い空間がつけられていることが分かった。
- 2) 外気処理空調機のシステム解析を行い、同熱負荷において、熱源の供給温度と供給流量が送風機を含むシステム全体の消費電力に与える影響を明らかにした。また、実測した温熱環境を踏まえながら、外気処理空調機の最適な供給温度と供給流量を示した。
- 3) 外気処理空調機のシステム解析を行い、一度処理された室内空気を放熱側熱交換器あるいは放冷側熱交換器に利用することで、室内の快適度は多少低下するが、システム COP は上昇することを定量的に示した。

今回は数値流体力学解析（CFD 解析）を行うことができなかったが、今後 CFD 解析を使用することで、外気処理空調機がつくる室内環境の流れの速度、圧力、温度などのパラメータに関する詳細な情報を得ることができるようになる。これにより、室内の快適度や、供給温度、供給風量、風向などのバランスについてより具体的に考えることができるようになり、外気処理空調機の最適運転条件を見つける上で大きな手助けになると考えられる。例えば、異なる運転条件や設定における室内の空気流れや温度分布をシミュレーションすることで、効率的な運転パラメータや設定値を特定し、エネルギー効率の向上や快適性の確保につながる可能性がある。

謝辞

九州大学大学院総合理工学研究院 宮崎 隆彦 教授には、本研究の遂行に当たり、的確な助言に加え、丁寧なご指導、ご鞭撻を賜りました。また、本論文を執筆するにあたっても多くのご指導、ご鞭撻を賜りました。深く感謝の意を表し、心から深く御礼申し上げます。

九州大学大学院総合理工学研究院 Kyaw Thu 准教授には、多くの助言や熱心なご鞭撻を賜り、研究の遂行に大きくご貢献をして頂きました。深く感謝の意を表し、心から御礼申し上げます。

九州大学大学院総合理工学府 高田 信夫 技術専門職員には、本研究の遂行にあたり、環境整備や、装置、機器の技術的なご指導、ご鞭撻を賜りました。心から御礼申し上げます。

修士2年 中津 秀彬さん、溝部 幸輝さんには、休日を含め夜遅くまで研究に関する議論など多くのご協力を頂きました。また、著者の同期の同僚ながら、研究活動を含め様々なことに対する模範を著者に示して頂きました。深く感謝の意を表し、心から御礼申し上げます。

九州大学大学院総合理工学府機械・システム理工学メジャー宮崎研究室に所属する、František Mikšik さん、Chairunnisa さん、Mansoor Abdul Aziz さん、Duha Hammad さん、Motaz Mabrok Mohamed Salama さん、Zhaosheng Yang さん、Yu Hao さん、Seo Sang Won さん、Marco Reyes Lao さん、Haoulomou Pepe さん、Sannan Salabat Butt さん、Xuetao Liu さん、Denis Mutebi さん、Mojtaba Purjam さん、陳 昊楠さん、Yang Cheng さん、You Cheng さん、Li Guangyao さん、柴 甲子さん、Zhao Peng さん、Wu Yitong さん、Fujita Daido さん、江口 順紹さん、盧 琛さん、Alaa Itaiwi さん、邢峻溪さん、周盈辛さん、Isha Sameen さん、有馬 太希さん、磯永 隆志さん、工藤 徳人さん、脇上 敦史さん、永瀬 太希さん、藤本 大樹さんには、多大なるご助言およびご協力を頂きました。心より御礼申し上げます。

令和4年度 九州大学大学院総合理工学府を修了された川喜田 幹太さん、前城 裕太さん、郡 光春さん、伊藤 大芽さん、益守 航さんには、多大なるご助言およびご協力を頂きました。心より御礼申し上げます。

研究室秘書 大和 裕理さんには、事務的な手続きの他、公私に渡り親切な御助言を賜るとともに御激励をいただきました。深く感謝の意を表し、心より御礼申し上げます。

本研究は2021年度~2022年度に昭和鉄工株式会社様との共同研究「屋内運動場における換気システムの有効性の調査」として実施した内容を含む。特に、環境計測は宇美町住民福祉センター体育館（福岡県糟屋郡宇美町）をお借りして実施した。共同研究の機会を与えていただいた昭和鉄工株式会社様、ならびに、実測の場をご提供いただいた福岡県宇美町の関係各位

のご協力に深く謝意を表します.

最後に, 遠く離れた場所から著者の学生生活を温かく見守り, 様々な状況で支え続けてくれた家族に, 心から感謝致します.

参考文献

- [1] 文部科学省:令和 2 年度公立学校施設の空調(冷房)設備の設置状況について(小中学校).
- [2] 文部科学省:令和 2 年度公立学校施設の空調(冷房)設備の設置状況について(高等学校).
- [3] 株式会社ニットー冷熱製作所.<https://nitto-reinetsu.com/word>
- [4] ダイキン株式会社.https://house.daikinproshop.jp/useful/select/1126_1.html
- [5] 空気調和・衛生工学会 : 空気調和設備 計画設計の実務の知識, オーム社, (2010), pp.89~90, 98~101, 107~109.
- [6] コロナウイルス対策と快適性を目指した外気処理機体育館の換気モニタリング開始,昭和鉄工株式会社.
<https://www.showa.co.jp/blog/2021/07/26/122>
- [7] 立形ルーフトップ外気処理機,ケアフレッシュ,昭和鉄工株式会社.
<https://www.showa.co.jp/product/temperature/heatpumpseries/carefresh.html>
- [8] 技術資料,昭和鉄工株式会社.
https://www.showa.co.jp/dcms_media/other/carefresh_technicaldata.pdf
- [9] Bosch Sensortec: BME280-datasheet, (2021).
- [10] Sensirion: SCD41-datasheet, (2021).
- [11] ESP-WROOM-32: <https://ht-deko.com/arduino/esp-wroom-32.html>
- [12] I2C の概要と仕組み,衛星ラボ.<https://eiseilab.com>
- [13] ASHRAE: ASHRAE Handbook, Fundamentals, (2005), pp.29~47.
- [14] A.P.Gagge: Science, (1941), pp.428~430.
- [15] B.W.Olsen: 繊維と工業, (昭和 61), p.17.
- [16] P.O.Fanger: Thermal Comfort, (1970), Danish Technical Press.
- [17] Akihiko EMI, Hiroyuki YONEMOTO: 快適性評価 PMV,(2010)
- [18] 空気調和・衛生工学便覧~基礎編~, pp.329~333
- [19] R.N.C.Anyadike: Assessment of various formulae for the computation of saturation vapour pressures over liquid water, (1984).
- [20] 公益社会法人 日本冷凍空調学会,PMV と PPD の指標.

- [21] 原本賢一.空気温度から平均放射温度を近似した場合の PMV の誤差と快適範囲の検討.空気調和・衛生工学会論文集.2006,No.109
- [22] MathWorks. “Pipe (MA)” . mathworks.com.
<https://jp.mathworks.com/help/simscape/ref/pipema.html>
- [23] MathWorks. “Positive-Displacement Compressor (2P)” . mathworks.com.
<https://jp.mathworks.com/help/hydro/ref/positivedisplacementcompressor2p.html>
- [24] MathWorks. “Local Restriction (2P)” . mathworks.com.
<https://jp.mathworks.com/help/simscape/ref/localrestriction2p.html>
- [25] MathWorks. “PID 制御とは?” . mathworks.com.
<https://jp.mathworks.com/discovery/pid-control.html>
- [26] 日本冷凍空調学会.冷凍空調便覧 I 巻基礎編.日本印刷株式会社,2010,p.155

付録 A PMV および PPD 計算プログラム

本プログラムを実行すると、別シートの一行に羅列している AL, CLO, TA, TR, VA, RH の 6 つの数値データを読み取り、PMV と PPD の算出を行い、同じ行の最後の列に PMV と PPD を並べて書き込む。その計算と書き込みは各行の数値データに対して行われ、それを最後の行まで続ける。ここで、AL, CLO, TA, TR, VA, RH はそれぞれ活動量[met], 着衣量[clo], 空気温度[°C], 放射温度[°C], 風速[m/s], 相対湿度[%]である。

本プログラムは、Kazuhiro Fukuyo. “PMV and PPD Calculation” . March 12th, 2021. <http://ds0.cc.yamaguchi-u.ac.jp/~fukuyo/pmv-calculation.html> を一部参考に行っている。

Private Sub CommandButton1_Click()

Dim inputRow As Integer

Dim outputRow As Integer

' シート 1 からの入力データ

AL = Sheet1.Cells(2, 2).Value

CLO = Sheet1.Cells(3, 2).Value

TA = Sheet1.Cells(4, 2).Value

TR = Sheet1.Cells(5, 2).Value

VA = Sheet1.Cells(6, 2).Value

RH = Sheet1.Cells(7, 2).Value

' シート 2 からのデータを取得

Dim dataSheet As Worksheet

Set dataSheet = ThisWorkbook.Sheets("Sheet2")

' シート 2 のデータが入っている列の数 (AL, CLO, TA, TR, VA, RH)

Dim numColumns As Integer

numColumns = 6

```
' シート 2 のデータが入っている行の数
Dim numRows As Integer
numRows = dataSheet.Cells(Rows.Count, 1).End(xlUp).Row

' ループして各行のデータを処理
For inputRow = 1 To numRows
    ' シート 2 からデータを取得
    AL = dataSheet.Cells(inputRow, 1).Value
    CLO = dataSheet.Cells(inputRow, 2).Value
    TA = dataSheet.Cells(inputRow, 3).Value
    TR = dataSheet.Cells(inputRow, 4).Value
    VA = dataSheet.Cells(inputRow, 5).Value
    RH = dataSheet.Cells(inputRow, 6).Value
```

```
'
'
'*****
' 外部仕事 W=0 [W/m²]とする.
'*****
' PMV 計算準備
'
    M = AL * 58.15
    LCL = CLO
    W = 0
'    PA = (RH / 100 * Exp(18.6686 - 4030.18 / (TA + 235))) / 0.00750062
    PPK = 673.4 - 1.8 * TA
    PPA = 3.2437814 + 0.00326014 * PPK + 2.00658 * 0.000000001 * PPK * PPK * PPK
    PPB = (1165.09 - PPK) * (1 + 0.00121547 * PPK)
    PA = RH / 100 * 22105.8416 / Exp(2.302585 * PPK * PPA / PPB) * 1000#
    EPS = 0.00001
    MW = M - W
'
'FCL=着衣表面積/裸体表面積の比
    FCL = 1# + 0.2 * LCL
    If LCL > 0.5 Then FCL = 1.05 + 0.1 * LCL
'衣服表面温度 TCL の初期値設定
    TCL = TA
    TCLA = TCL
    NOI = 1
' 着衣表面温度の計算
```

BBB:

$$TCLA = 0.8 * TCLA + 0.2 * TCL$$

$$HC = 12.1 * \text{Sqr}(VA)$$

$$\text{If } 2.38 * \text{Sqr}(\text{Sqr}(\text{Abs}(TCL - TA))) > HC \text{ Then } HC = 2.38 * \text{Sqr}(\text{Sqr}(\text{Abs}(TCL - TA)))$$

$$TCL = 35.7 - 0.028 * MW - 0.155 * LCL * (3.96 * 0.00000001 * FCL * ((TCLA + 273) ^ 4 - (TR + 273) ^ 4) + FCL * HC * (TCLA - TA))$$

$$NOI = NOI + 1$$

If NOI > 150 Then GoTo AAA

If Abs(TCLA - TCL) > EPS Then GoTo BBB

'PMV の計算

$$PM1 = 3.96 * 0.00000001 * FCL * ((TCL + 273) ^ 4 - (TR + 273) ^ 4)$$

$$PM2 = FCL * HC * (TCL - TA)$$

$$PM3 = 0.303 * \text{Exp}(-0.036 * M) + 0.028$$

$$PM4 = 0$$

$$\text{If } MW > 58.15 \text{ Then } PM4 = 0.42 * (MW - 58.15)$$

$$PMV = PM3 * (MW - 3.05 * 0.001 * (5733 - 6.99 * MW - PA) - PM4 - 1.7 * 0.00001 * M * (5867 - PA) - 0.0014 * M * (34 - TA) - PM1 - PM2)$$

'PRINT PMV

If Abs(PMV) > 3 Then GoTo AAA

GoTo CCC

AAA:

PMV = 999990.999

PPD = 100#

GoTo DDD

CCC:

PPD = 100 - 95 * Exp(-0.0335 * PMV ^ 4 - 0.2179 * PMV ^ 2)

,

Sheet1.Cells(9, 2).Value = PMV

Sheet1.Cells(10, 2).Value = PPD

DDD:

' 結果をシート 2 に書き込み

outputRow = inputRow ' 同じ行に結果を書き込む場合

dataSheet.Cells(outputRow, numColumns + 1).Value = PMV

dataSheet.Cells(outputRow, numColumns + 2).Value = PPD

Next inputRow

End Sub

付録 B 冷房実験の測定値

付録 B では、2021 年 6 月 26 日に行った外気処理空調機の冷房実験で測定した、外気 (outside air ; OA) と、体育館中央高さ 0.5m 地点 (Point 3) の温湿度データを示す。

Time	OA		Point 3	
	T[°C]	φ[%]	T[°C]	φ[%]
2021/6/26 7:30	22.9	76.6	23.8	66.0
2021/6/26 7:31	23.3	76.3	23.7	66.0
2021/6/26 7:32	23.3	76.1	23.6	66.5
2021/6/26 7:33	23.2	75.5	23.6	66.7
2021/6/26 7:34	23.1	75.8	23.5	67.0
2021/6/26 7:35	23.4	75.7	23.5	66.8
2021/6/26 7:36	23.4	75.0	23.4	66.9
2021/6/26 7:37	23.3	75.8	23.5	67.3
2021/6/26 7:38	23.5	75.6	23.5	67.5
2021/6/26 7:39	23.2	76.0	23.4	67.8
2021/6/26 7:40	23.4	76.1	23.3	67.3
2021/6/26 7:41	23.4	76.3	23.4	67.6
2021/6/26 7:42	23.5	75.7	23.4	67.9
2021/6/26 7:43	23.5	75.0	23.2	67.5
2021/6/26 7:44	23.6	73.8	23.2	67.7
2021/6/26 7:45	23.8	71.9	23.1	67.4
2021/6/26 7:46	23.6	71.7	23.2	68.2
2021/6/26 7:47	23.6	72.1	23.3	68.0
2021/6/26 7:48	23.7	71.9	23.2	67.7
2021/6/26 7:49	23.7	72.1	23.2	67.4
2021/6/26 7:50	23.8	71.8	23.1	67.2
2021/6/26 7:51	23.8	71.4	23.1	67.6
2021/6/26 7:52	23.8	70.3	23.2	68.1

Time	OA		Point 3	
	T[°C]	φ[%]	T[°C]	φ[%]
2021/6/26 7:53	23.8	70.0	23.2	67.5
2021/6/26 7:54	23.9	69.6	23.2	67.5
2021/6/26 7:55	24.0	69.5	23.2	67.0
2021/6/26 7:56	24.3	67.6	23.2	67.0
2021/6/26 7:57	24.1	66.5	23.1	66.7
2021/6/26 7:58	24.9	65.3	23.2	66.7
2021/6/26 7:59	24.5	64.6	23.3	66.6
2021/6/26 8:00	24.8	64.4	23.3	66.1
2021/6/26 8:01	24.6	64.8	23.3	66.0
2021/6/26 8:02	24.9	65.3	23.3	65.8
2021/6/26 8:03	25.0	64.6	23.1	66.1
2021/6/26 8:04	24.2	64.8	23.2	66.0
2021/6/26 8:05	24.2	65.9	23.2	66.0
2021/6/26 8:06	24.4	65.5	23.2	66.0
2021/6/26 8:07	24.6	64.8	23.3	65.4
2021/6/26 8:08	24.4	64.4	23.2	65.2
2021/6/26 8:09	24.3	64.2	23.2	65.3
2021/6/26 8:10	24.3	65.1	23.2	65.3
2021/6/26 8:11	24.4	64.3	23.2	64.9
2021/6/26 8:12	24.5	64.9	23.2	64.9
2021/6/26 8:13	24.0	65.2	23.1	64.8
2021/6/26 8:14	24.4	64.7	23.2	64.8
2021/6/26 8:15	24.8	63.6	23.2	64.6

付録 B 冷房実験の測定値

84

Time	OA		Point 3	
	T[°C]	φ[%]	T[°C]	φ[%]
2021/6/26 8:16	24.2	64.2	23.1	64.4
2021/6/26 8:17	24.1	65.2	23.0	64.5
2021/6/26 8:18	24.2	65.7	23.1	64.7
2021/6/26 8:19	24.2	64.4	23.0	64.6
2021/6/26 8:20	24.2	64.8	23.1	64.4
2021/6/26 8:21	24.4	64.9	23.1	64.6
2021/6/26 8:22	24.0	64.9	23.0	64.4
2021/6/26 8:23	24.0	65.6	23.0	64.7
2021/6/26 8:24	24.0	65.7	23.1	64.8
2021/6/26 8:25	24.1	65.7	23.1	64.4
2021/6/26 8:26	24.3	65.6	23.2	64.6
2021/6/26 8:27	24.0	65.0	23.1	64.7
2021/6/26 8:28	23.9	65.8	23.0	64.6
2021/6/26 8:29	23.8	66.6	23.2	64.2
2021/6/26 8:30	23.6	66.8	23.0	64.0
2021/6/26 8:31	23.8	66.7	23.0	64.4
2021/6/26 8:32	23.8	66.0	23.0	64.4
2021/6/26 8:33	23.7	66.2	23.0	64.6
2021/6/26 8:34	23.5	67.0	23.0	64.5
2021/6/26 8:35	23.6	67.6	23.0	64.6
2021/6/26 8:36	23.5	67.8	23.0	64.7
2021/6/26 8:37	23.6	68.2	23.0	64.6
2021/6/26 8:38	23.5	68.5	23.0	64.6
2021/6/26 8:39	23.4	68.6	23.0	64.6
2021/6/26 8:40	23.5	68.7	23.0	64.6
2021/6/26 8:41	23.5	68.4	23.0	64.7
2021/6/26 8:42	23.5	68.8	23.1	64.7

Time	OA		Point 3	
	T[°C]	φ[%]	T[°C]	φ[%]
2021/6/26 8:43	23.5	68.8	23.1	64.7
2021/6/26 8:44	23.5	69.3	23.1	64.3
2021/6/26 8:45	23.5	69.8	23.0	64.2
2021/6/26 8:46	23.6	69.6	23.1	64.2
2021/6/26 8:47	23.7	70.3	23.1	64.2
2021/6/26 8:48	23.5	70.9	23.2	64.1
2021/6/26 8:49	23.7	70.7	23.2	64.2
2021/6/26 8:50	23.6	70.9	23.2	64.1
2021/6/26 8:51	23.7	70.8	23.2	64.3
2021/6/26 8:52	23.8	71.0	23.2	64.5
2021/6/26 8:53	23.9	70.1	23.1	64.4
2021/6/26 8:54	24.2	68.7	23.3	64.3
2021/6/26 8:55	24.2	67.4	23.2	64.0
2021/6/26 8:56	23.9	67.3	23.2	64.2
2021/6/26 8:57	23.8	67.3	23.2	64.0
2021/6/26 8:58	24.0	66.7	23.3	64.1
2021/6/26 8:59	23.9	66.0	23.4	64.0
2021/6/26 9:00	23.9	65.5	23.4	63.8
2021/6/26 9:01	23.8	65.1	23.4	63.6
2021/6/26 9:02	23.8	64.6	23.4	63.4
2021/6/26 9:03	23.8	64.4	23.3	63.4
2021/6/26 9:04	23.8	64.7	23.4	63.3
2021/6/26 9:05	23.8	65.2	23.5	63.2
2021/6/26 9:06	23.9	65.0	23.5	63.0
2021/6/26 9:07	24.0	64.9	23.5	62.9
2021/6/26 9:08	24.1	64.5	23.5	62.6
2021/6/26 9:09	24.0	65.0	23.4	63.0

付録 B 冷房実験の測定値

85

Time	OA		Point 3	
	T[°C]	φ[%]	T[°C]	φ[%]
2021/6/26 9:10	24.1	65.2	23.5	62.5
2021/6/26 9:11	24.1	66.0	23.5	62.6
2021/6/26 9:12	24.0	67.4	23.5	62.7
2021/6/26 9:13	24.0	67.5	23.6	62.6
2021/6/26 9:14	24.2	67.8	23.5	62.6
2021/6/26 9:15	24.3	67.6	23.5	62.6
2021/6/26 9:16	24.2	66.9	23.5	63.0
2021/6/26 9:17	24.2	66.2	23.5	62.9
2021/6/26 9:18	24.3	65.6	23.6	62.6
2021/6/26 9:19	24.4	65.7	23.6	62.3
2021/6/26 9:20	24.5	66.1	23.5	62.4
2021/6/26 9:21	24.5	65.3	23.5	62.3
2021/6/26 9:22	24.8	64.2	23.7	62.4
2021/6/26 9:23	24.7	63.7	23.6	62.5
2021/6/26 9:24	24.7	62.7	23.7	62.5
2021/6/26 9:25	24.9	60.4	23.7	62.5
2021/6/26 9:26	24.9	61.0	23.7	62.1
2021/6/26 9:27	25.8	59.8	23.7	62.2
2021/6/26 9:28	25.3	58.5	23.7	62.2
2021/6/26 9:29	24.9	59.1	23.7	62.5
2021/6/26 9:30	25.1	58.8	23.7	62.2
2021/6/26 9:31	25.2	57.5	23.7	62.0
2021/6/26 9:32	25.2	57.9	23.7	62.1
2021/6/26 9:33	25.2	58.4	23.7	62.1
2021/6/26 9:34	25.1	58.4	23.6	61.9
2021/6/26 9:35	25.5	57.7	23.6	61.9
2021/6/26 9:36	25.2	57.0	23.6	61.6

Time	OA		Point 3	
	T[°C]	φ[%]	T[°C]	φ[%]
2021/6/26 9:37	25.1	57.1	23.6	61.6
2021/6/26 9:38	25.6	57.2	23.7	61.4
2021/6/26 9:39	25.6	56.6	23.7	61.3
2021/6/26 9:40	25.9	55.6	23.8	60.9
2021/6/26 9:41	25.7	56.6	23.8	60.5
2021/6/26 9:42	25.5	56.9	23.7	60.6
2021/6/26 9:43	25.6	57.3	23.8	60.5
2021/6/26 9:44	25.2	56.9	23.9	60.3
2021/6/26 9:45	25.3	57.0	23.7	60.4
2021/6/26 9:46	25.4	56.9	23.8	60.3
2021/6/26 9:47	25.3	56.9	23.7	60.3
2021/6/26 9:48	25.9	56.8	23.8	60.2
2021/6/26 9:49	25.5	57.0	23.9	60.1
2021/6/26 9:50	25.6	56.8	23.9	60.0
2021/6/26 9:51	25.6	57.2	23.8	60.0
2021/6/26 9:52	25.4	56.7	23.8	60.2
2021/6/26 9:53	25.3	56.9	23.7	60.2
2021/6/26 9:54	25.4	56.7	23.8	60.1
2021/6/26 9:55	25.6	56.6	23.8	59.9
2021/6/26 9:56	25.9	55.9	23.8	59.9
2021/6/26 9:57	25.6	55.5	23.9	59.9
2021/6/26 9:58	25.8	56.4	23.8	59.7
2021/6/26 9:59	25.4	56.3	23.9	59.6
2021/6/26 10:00	25.4	56.0	23.9	59.6
2021/6/26 10:01	26.2	53.9	23.8	59.7
2021/6/26 10:02	25.8	54.5	23.9	59.6
2021/6/26 10:03	25.5	54.7	24.0	59.2

付録 B 冷房実験の測定値

86

Time	OA		Point 3	
	T[°C]	φ[%]	T[°C]	φ[%]
2021/6/26 10:04	25.4	55.3	23.8	59.2
2021/6/26 10:05	25.4	56.1	23.8	59.3
2021/6/26 10:06	25.3	56.7	23.9	59.2
2021/6/26 10:07	25.2	56.8	24.0	59.1
2021/6/26 10:08	25.3	56.8	24.0	58.8
2021/6/26 10:09	25.4	56.7	24.0	58.7
2021/6/26 10:10	25.3	57.3	24.1	58.6
2021/6/26 10:11	25.4	57.6	23.9	58.7
2021/6/26 10:12	25.5	56.9	24.0	58.6
2021/6/26 10:13	25.5	56.7	23.9	58.8
2021/6/26 10:14	25.5	56.2	24.0	58.7
2021/6/26 10:15	25.6	55.7	23.9	58.8
2021/6/26 10:16	25.8	55.4	24.1	58.7
2021/6/26 10:17	26.2	53.4	24.1	58.2
2021/6/26 10:18	26.0	53.6	24.1	58.1
2021/6/26 10:19	26.6	52.5	24.0	58.1
2021/6/26 10:20	26.1	52.9	24.0	58.3
2021/6/26 10:21	25.9	52.5	24.0	58.2
2021/6/26 10:22	25.7	53.2	24.0	58.2
2021/6/26 10:23	26.4	52.5	24.1	57.9
2021/6/26 10:24	26.1	52.1	24.0	58.0
2021/6/26 10:25	26.1	52.7	24.1	58.0
2021/6/26 10:26	26.3	51.7	24.0	58.0
2021/6/26 10:27	26.2	51.8	24.0	57.6
2021/6/26 10:28	26.8	51.8	24.0	57.7
2021/6/26 10:29	26.9	49.9	24.0	57.5
2021/6/26 10:30	26.8	49.6	24.0	57.4

Time	OA		Point 3	
	T[°C]	φ[%]	T[°C]	φ[%]
2021/6/26 10:31	26.6	50.4	24.1	57.3
2021/6/26 10:32	26.7	50.6	24.2	57.0
2021/6/26 10:33	26.7	50.0	24.2	57.0
2021/6/26 10:34	26.9	50.1	24.2	56.9
2021/6/26 10:35	26.9	50.3	24.2	56.6
2021/6/26 10:36	26.5	50.9	24.1	56.7
2021/6/26 10:37	26.5	51.9	24.1	56.6
2021/6/26 10:38	26.6	51.7	24.2	56.6
2021/6/26 10:39	26.6	51.8	24.2	56.6
2021/6/26 10:40	27.0	51.2	24.1	56.5
2021/6/26 10:41	27.4	49.6	24.2	56.6
2021/6/26 10:42	27.5	49.3	24.2	56.6
2021/6/26 10:43	27.1	50.2	24.1	56.4
2021/6/26 10:44	26.8	50.7	24.2	56.4
2021/6/26 10:45	27.5	49.9	24.2	56.4
2021/6/26 10:46	27.3	50.1	24.2	56.4
2021/6/26 10:47	27.5	50.8	24.3	56.4
2021/6/26 10:48	27.3	51.3	24.3	56.3
2021/6/26 10:49	27.1	50.8	24.3	56.5
2021/6/26 10:50	27.6	50.5	24.3	56.2
2021/6/26 10:51	27.4	50.3	24.3	56.7
2021/6/26 10:52	27.8	50.1	24.4	56.2
2021/6/26 10:53	27.4	49.5	24.3	56.3
2021/6/26 10:54	27.1	50.4	24.3	56.3
2021/6/26 10:55	27.3	51.4	24.4	56.0
2021/6/26 10:56	27.3	51.5	24.4	56.2
2021/6/26 10:57	27.4	51.1	24.4	56.1

付録 B 冷房実験の測定値

87

Time	OA		Point 3	
	T[°C]	φ[%]	T[°C]	φ[%]
2021/6/26 10:58	27.7	50.5	24.5	55.9
2021/6/26 10:59	27.4	50.6	24.5	55.8
2021/6/26 11:00	27.2	51.4	24.6	55.6
2021/6/26 11:01	27.6	51.7	24.6	55.7
2021/6/26 11:02	27.7	49.4	24.6	55.7
2021/6/26 11:03	27.6	49.7	24.6	55.7
2021/6/26 11:04	28.1	50.0	24.5	55.9
2021/6/26 11:05	28.0	49.5	24.6	55.7
2021/6/26 11:06	27.3	50.4	24.7	55.7
2021/6/26 11:07	27.5	49.7	24.5	56.0
2021/6/26 11:08	27.4	49.9	24.6	55.8
2021/6/26 11:09	27.2	50.8	24.5	56.1
2021/6/26 11:10	27.0	52.0	24.6	55.9
2021/6/26 11:11	27.2	52.2	24.6	55.8
2021/6/26 11:12	27.0	52.2	24.6	55.7
2021/6/26 11:13	27.3	52.6	24.7	55.6
2021/6/26 11:14	27.8	51.2	24.7	55.7
2021/6/26 11:15	28.0	49.6	24.6	55.7
2021/6/26 11:16	28.0	50.0	24.7	56.0
2021/6/26 11:17	27.8	50.4	24.7	55.5
2021/6/26 11:18	27.9	50.9	24.7	55.7
2021/6/26 11:19	27.6	51.3	24.7	55.7
2021/6/26 11:20	28.0	50.9	24.7	55.5
2021/6/26 11:21	27.4	51.4	24.7	55.6
2021/6/26 11:22	27.9	51.4	24.8	55.3
2021/6/26 11:23	27.7	51.8	24.8	55.5
2021/6/26 11:24	27.7	51.9	24.7	55.6

Time	OA		Point 3	
	T[°C]	φ[%]	T[°C]	φ[%]
2021/6/26 11:25	27.8	51.6	24.9	55.6
2021/6/26 11:26	27.8	51.7	24.9	55.4
2021/6/26 11:27	27.7	51.4	24.9	55.3
2021/6/26 11:28	28.0	50.8	25.0	55.3
2021/6/26 11:29	28.1	50.3	24.8	55.5
2021/6/26 11:30	28.2	50.3	24.8	55.3
2021/6/26 11:31	28.6	50.1	24.9	55.5
2021/6/26 11:32	28.3	49.4	24.9	55.5
2021/6/26 11:33	28.9	48.7	24.8	55.6
2021/6/26 11:34	29.1	47.6	24.9	55.4
2021/6/26 11:35	29.5	46.0	24.9	55.4
2021/6/26 11:36	29.6	45.5	24.9	55.1
2021/6/26 11:37	29.4	45.3	25.0	55.3
2021/6/26 11:38	29.0	44.8	25.0	55.0
2021/6/26 11:39	29.4	46.1	25.1	54.8
2021/6/26 11:40	29.7	44.4	25.1	54.6
2021/6/26 11:41	29.6	44.7	25.1	54.6
2021/6/26 11:42	30.1	44.6	25.2	54.2
2021/6/26 11:43	30.0	44.3	25.1	54.4
2021/6/26 11:44	29.9	44.4	25.2	54.2
2021/6/26 11:45	30.1	44.4	25.2	54.3
2021/6/26 11:46	31.1	43.0	25.2	54.2
2021/6/26 11:47	30.6	42.7	25.2	54.1
2021/6/26 11:48	30.6	42.7	25.4	53.9
2021/6/26 11:49	30.4	42.1	25.3	53.6
2021/6/26 11:50	30.3	42.5	25.4	53.5
2021/6/26 11:51	30.6	42.7	25.4	53.3

付録 B 冷房実験の測定値

88

Time	OA		Point 3	
	T[°C]	φ[%]	T[°C]	φ[%]
2021/6/26 11:52	30.3	40.9	25.6	53.1
2021/6/26 11:53	30.5	41.2	25.5	52.9
2021/6/26 11:54	31.1	39.5	25.5	52.9
2021/6/26 11:55	31.1	38.5	25.5	52.8
2021/6/26 11:56	31.1	38.7	25.5	52.5
2021/6/26 11:57	31.1	39.3	25.6	52.2
2021/6/26 11:58	31.1	40.0	25.6	52.1
2021/6/26 11:59	31.1	40.0	25.7	51.9
2021/6/26 12:00	31.6	39.5	25.7	51.9
2021/6/26 12:01	31.5	39.3	25.7	51.7
2021/6/26 12:02	31.4	38.5	25.7	51.6
2021/6/26 12:03	31.2	38.4	25.7	51.7
2021/6/26 12:04	31.2	38.7	25.8	51.3
2021/6/26 12:05	30.4	38.8	25.8	51.1
2021/6/26 12:06	30.5	38.9	25.9	51.0
2021/6/26 12:07	30.5	39.0	25.8	50.8
2021/6/26 12:08	30.4	39.0	25.9	50.5
2021/6/26 12:09	30.2	39.3	26.0	50.5
2021/6/26 12:10	30.6	39.2	26.0	49.9
2021/6/26 12:11	31.1	38.4	26.0	49.9
2021/6/26 12:12	30.2	38.2	26.0	49.8
2021/6/26 12:13	30.2	39.8	26.0	49.5
2021/6/26 12:14	30.4	40.8	26.0	49.4
2021/6/26 12:15	30.5	41.1	26.0	49.5
2021/6/26 12:16	30.5	42.0	26.0	49.5
2021/6/26 12:17	30.0	42.8	26.0	49.4
2021/6/26 12:18	30.6	42.0	26.0	49.4

Time	OA		Point 3	
	T[°C]	φ[%]	T[°C]	φ[%]
2021/6/26 12:19	30.6	42.2	26.0	49.5
2021/6/26 12:20	29.9	43.5	26.0	49.5
2021/6/26 12:21	29.7	44.0	26.0	50.0
2021/6/26 12:22	29.9	44.6	26.0	50.2
2021/6/26 12:23	29.7	45.6	26.0	50.3
2021/6/26 12:24	29.7	46.2	26.0	50.4
2021/6/26 12:25	29.6	45.5	25.9	50.6
2021/6/26 12:26	29.6	46.1	25.9	50.9
2021/6/26 12:27	29.5	44.7	25.9	51.0
2021/6/26 12:28	29.4	45.2	25.9	51.1
2021/6/26 12:29	29.6	45.1	25.9	51.1
2021/6/26 12:30	29.6	44.3	25.9	51.1
2021/6/26 12:31	29.9	43.8	25.9	51.4
2021/6/26 12:32	30.3	43.6	26.0	51.4
2021/6/26 12:33	29.5	44.1	26.0	51.4
2021/6/26 12:34	29.5	45.1	26.0	51.3
2021/6/26 12:35	29.8	46.0	26.0	51.6
2021/6/26 12:36	30.5	44.3	26.1	51.6
2021/6/26 12:37	29.4	45.8	26.0	51.7
2021/6/26 12:38	29.6	47.3	26.0	51.9
2021/6/26 12:39	30.2	47.1	26.0	52.2
2021/6/26 12:40	30.6	45.3	26.0	52.4
2021/6/26 12:41	30.3	45.9	26.1	52.3
2021/6/26 12:42	30.0	46.0	26.2	52.4
2021/6/26 12:43	30.2	46.0	26.2	52.3
2021/6/26 12:44	30.5	46.0	26.2	52.6
2021/6/26 12:45	30.8	45.6	26.2	52.5

付録 B 冷房実験の測定値

89

Time	OA		Point 3	
	T[°C]	φ[%]	T[°C]	φ[%]
2021/6/26 12:46	30.1	46.1	26.2	52.8
2021/6/26 12:47	30.5	46.4	26.2	52.9
2021/6/26 12:48	30.7	45.7	26.3	52.8
2021/6/26 12:49	31.1	45.5	26.3	52.8
2021/6/26 12:50	30.8	45.6	26.3	52.8
2021/6/26 12:51	30.3	46.3	26.4	52.5
2021/6/26 12:52	30.2	46.9	26.3	52.8
2021/6/26 12:53	29.9	46.5	26.3	52.9
2021/6/26 12:54	30.4	46.6	26.4	52.9
2021/6/26 12:55	30.4	46.5	26.3	53.4
2021/6/26 12:56	30.8	45.7	26.2	53.5
2021/6/26 12:57	30.5	45.8	26.4	53.5
2021/6/26 12:58	31.1	45.7	26.4	53.3
2021/6/26 12:59	30.9	45.4	26.4	53.6
2021/6/26 13:00	30.1	46.3	26.4	53.6
2021/6/26 13:01	29.8	46.7	26.5	53.5
2021/6/26 13:02	30.6	46.4	26.5	53.5
2021/6/26 13:03	30.7	45.2	26.5	53.3
2021/6/26 13:04	30.7	44.0	26.4	53.3
2021/6/26 13:05	30.2	44.7	26.4	53.5
2021/6/26 13:06	30.7	44.4	26.5	53.3
2021/6/26 13:07	30.3	44.6	26.4	53.2
2021/6/26 13:08	30.2	45.0	26.4	53.2
2021/6/26 13:09	30.5	44.3	26.5	53.2
2021/6/26 13:10	30.3	44.4	26.4	53.1
2021/6/26 13:11	29.9	44.8	26.4	53.0
2021/6/26 13:12	29.7	45.1	26.3	53.2

Time	OA		Point 3	
	T[°C]	φ[%]	T[°C]	φ[%]
2021/6/26 13:13	30.0	45.5	26.5	52.7
2021/6/26 13:14	30.2	45.2	26.5	52.7
2021/6/26 13:15	30.9	43.8	26.5	52.8
2021/6/26 13:16	30.9	43.2	26.6	52.6
2021/6/26 13:17	30.6	43.0	26.7	52.5
2021/6/26 13:18	30.8	43.4	26.7	52.4
2021/6/26 13:19	31.0	42.9	26.6	51.9
2021/6/26 13:20	31.1	42.4	26.7	51.7
2021/6/26 13:21	31.4	41.3	26.7	51.6
2021/6/26 13:22	31.5	40.8	26.7	51.8
2021/6/26 13:23	31.7	41.2	26.9	51.8
2021/6/26 13:24	32.3	39.4	26.6	51.9
2021/6/26 13:25	32.2	39.6	26.7	51.6
2021/6/26 13:26	32.7	38.8	26.6	51.6
2021/6/26 13:27	32.8	39.3	26.8	51.0
2021/6/26 13:28	32.4	38.2	26.6	51.2
2021/6/26 13:29	32.5	38.1	26.5	51.4
2021/6/26 13:30	31.7	39.6	26.4	51.4
2021/6/26 13:31	31.4	40.3	26.4	51.4
2021/6/26 13:32	31.1	40.6	26.4	51.3
2021/6/26 13:33	30.8	40.3	26.2	51.4
2021/6/26 13:34	30.6	41.4	26.1	51.5
2021/6/26 13:35	30.4	42.6	26.2	51.4
2021/6/26 13:36	30.3	43.4	26.1	51.4
2021/6/26 13:37	30.2	42.8	26.0	51.4
2021/6/26 13:38	30.6	42.4	26.1	51.2
2021/6/26 13:39	30.3	43.1	26.0	51.6

付録 B 冷房実験の測定値

90

Time	OA		Point 3	
	T[°C]	φ[%]	T[°C]	φ[%]
2021/6/26 13:40	30.9	42.7	25.8	51.5
2021/6/26 13:41	31.5	41.4	25.8	51.2
2021/6/26 13:42	31.6	40.3	25.2	51.6
2021/6/26 13:43	31.7	39.9	25.6	51.9
2021/6/26 13:44	32.1	37.6	25.3	52.1
2021/6/26 13:45	32.4	37.4	25.3	52.4
2021/6/26 13:46	32.7	36.8	25.4	52.2
2021/6/26 13:47	32.4	37.7	25.2	52.2
2021/6/26 13:48	31.7	38.0	25.2	52.5
2021/6/26 13:49	31.6	38.6	25.2	52.6
2021/6/26 13:50	31.9	38.0	25.1	52.3
2021/6/26 13:51	32.4	37.4	25.3	52.2
2021/6/26 13:52	31.8	37.9	25.2	52.0
2021/6/26 13:53	32.2	37.8	25.4	52.1
2021/6/26 13:54	32.1	38.1	25.4	51.4
2021/6/26 13:55	32.5	37.5	25.3	51.2
2021/6/26 13:56	32.5	37.3	25.5	51.0
2021/6/26 13:57	32.8	37.1	25.4	51.3
2021/6/26 13:58	33.2	36.7	25.4	50.9
2021/6/26 13:59	32.5	37.4	25.2	51.2
2021/6/26 14:00	31.6	38.1	25.4	51.3
2021/6/26 14:01	31.3	39.1	25.4	51.2
2021/6/26 14:02	32.3	38.7	25.6	51.0
2021/6/26 14:03	32.3	38.5	25.5	50.8
2021/6/26 14:04	31.8	39.5	25.5	50.8
2021/6/26 14:05	31.8	39.0	25.4	51.3
2021/6/26 14:06	31.8	39.5	25.3	51.5

Time	OA		Point 3	
	T[°C]	φ[%]	T[°C]	φ[%]
2021/6/26 14:07	31.7	39.5	25.4	51.4
2021/6/26 14:08	31.4	39.9	25.5	51.2
2021/6/26 14:09	32.4	39.7	25.4	51.5
2021/6/26 14:10	32.3	38.0	25.3	51.6
2021/6/26 14:11	31.7	39.3	25.3	51.5
2021/6/26 14:12	31.4	40.2	25.4	51.2
2021/6/26 14:13	32.0	39.2	25.4	51.4
2021/6/26 14:14	32.5	37.1	25.3	51.6
2021/6/26 14:15	32.2	37.8	25.2	51.7
2021/6/26 14:16	32.4	38.4	25.2	51.7
2021/6/26 14:17	32.0	38.6	25.3	51.6
2021/6/26 14:18	31.8	39.3	25.4	51.7
2021/6/26 14:19	32.9	39.4	25.3	51.1
2021/6/26 14:20	32.1	37.8	25.2	51.8
2021/6/26 14:21	32.6	37.4	25.2	51.8
2021/6/26 14:22	32.1	37.0	25.2	52.0
2021/6/26 14:23	31.9	37.4	25.2	51.7
2021/6/26 14:24	31.8	38.3	25.2	51.6
2021/6/26 14:25	31.3	39.7	25.1	51.7
2021/6/26 14:26	31.7	39.9	25.1	51.6
2021/6/26 14:27	31.2	39.6	25.2	51.9
2021/6/26 14:28	31.8	38.8	25.3	51.6
2021/6/26 14:29	31.2	39.6	25.1	51.5
2021/6/26 14:30	31.5	39.3	25.1	51.5
2021/6/26 14:31	31.7	39.7	25.2	51.5
2021/6/26 14:32	31.0	40.5	25.1	51.6
2021/6/26 14:33	31.0	40.7	25.2	51.7

付録 B 冷房実験の測定値

91

Time	OA		Point 3	
	T[°C]	φ[%]	T[°C]	φ[%]
2021/6/26 14:34	31.0	41.1	25.1	51.3
2021/6/26 14:35	30.7	41.8	24.9	52.0
2021/6/26 14:36	31.0	41.2	25.1	52.0
2021/6/26 14:37	31.4	40.5	25.1	51.9
2021/6/26 14:38	31.0	39.8	25.2	51.9
2021/6/26 14:39	30.9	39.7	25.3	51.5
2021/6/26 14:40	30.5	41.1	24.9	51.7
2021/6/26 14:41	31.0	41.2	24.9	52.0
2021/6/26 14:42	31.5	40.2	25.1	51.8
2021/6/26 14:43	30.9	40.3	25.0	52.0
2021/6/26 14:44	30.9	40.9	25.0	51.7
2021/6/26 14:45	30.7	42.1	25.1	51.7
2021/6/26 14:46	31.5	41.1	25.0	51.7
2021/6/26 14:47	31.1	41.1	25.2	51.8
2021/6/26 14:48	30.9	40.8	25.1	51.8
2021/6/26 14:49	31.6	40.5	25.0	51.9
2021/6/26 14:50	31.0	40.9	25.0	51.9
2021/6/26 14:51	31.3	40.8	24.8	52.3
2021/6/26 14:52	31.7	40.0	24.7	52.3
2021/6/26 14:53	31.2	39.8	24.6	52.7
2021/6/26 14:54	31.6	40.5	24.8	52.2
2021/6/26 14:55	31.5	40.8	24.6	52.5
2021/6/26 14:56	31.0	40.7	24.8	52.4
2021/6/26 14:57	31.0	42.0	24.7	52.8
2021/6/26 14:58	30.7	42.2	24.9	52.4
2021/6/26 14:59	30.9	41.5	24.8	52.3
2021/6/26 15:00	30.6	41.9	24.7	52.7

Time	OA		Point 3	
	T[°C]	φ[%]	T[°C]	φ[%]
2021/6/26 15:01	31.0	41.4	25.0	52.4
2021/6/26 15:02	30.7	41.5	25.0	52.4
2021/6/26 15:03	30.3	42.0	24.8	52.2
2021/6/26 15:04	30.4	42.3	24.9	52.3
2021/6/26 15:05	30.4	42.6	24.9	52.1
2021/6/26 15:06	30.3	42.8	24.9	52.3
2021/6/26 15:07	30.2	42.7	24.9	52.1
2021/6/26 15:08	29.4	42.3	24.9	51.8
2021/6/26 15:09	31.2	41.0	24.6	52.0
2021/6/26 15:10	31.2	41.1	24.9	51.8
2021/6/26 15:11	31.5	40.7	24.8	51.7
2021/6/26 15:12	31.3	40.6	24.8	51.7
2021/6/26 15:13	31.5	40.7	24.9	51.5
2021/6/26 15:14	31.4	40.3	24.9	51.4
2021/6/26 15:15	32.2	39.5	24.9	51.4
2021/6/26 15:16	32.1	39.4	24.7	51.3
2021/6/26 15:17	32.5	38.8	24.6	51.9
2021/6/26 15:18	32.5	38.5	24.8	51.5
2021/6/26 15:19	32.5	37.8	24.8	51.7
2021/6/26 15:20	32.7	38.2	24.8	52.0
2021/6/26 15:21	33.2	37.0	24.7	52.0
2021/6/26 15:22	33.5	35.5	24.8	51.9
2021/6/26 15:23	32.4	37.0	24.6	52.1
2021/6/26 15:24	32.8	36.6	24.8	51.8
2021/6/26 15:25	32.3	38.0	24.8	51.9
2021/6/26 15:26	33.5	36.6	24.7	51.7
2021/6/26 15:27	33.1	36.5	24.6	51.6

付録 B 冷房実験の測定値

92

Time	OA		Point 3	
	T[°C]	φ[%]	T[°C]	φ[%]
2021/6/26 15:28	33.7	36.2	24.9	51.8
2021/6/26 15:29	33.2	37.1	24.8	51.3
2021/6/26 15:30	33.1	36.9	24.8	51.6
2021/6/26 15:31	33.3	36.7	25.0	51.8
2021/6/26 15:32	32.6	37.5	25.0	51.5
2021/6/26 15:33	32.5	37.4	25.1	51.5
2021/6/26 15:34	32.7	37.8	25.2	51.6
2021/6/26 15:35	32.6	38.0	25.1	51.4
2021/6/26 15:36	32.3	38.0	25.1	51.0
2021/6/26 15:37	31.8	38.4	25.1	51.2
2021/6/26 15:38	32.1	38.8	25.1	51.3
2021/6/26 15:39	31.6	39.0	25.1	51.3
2021/6/26 15:40	31.4	39.2	24.9	51.1
2021/6/26 15:41	31.7	39.0	24.9	51.3
2021/6/26 15:42	31.2	39.8	24.9	51.0
2021/6/26 15:43	31.2	40.5	24.9	51.4
2021/6/26 15:44	31.1	40.8	24.9	50.9
2021/6/26 15:45	31.8	40.0	24.9	50.9
2021/6/26 15:46	32.0	39.6	24.6	51.4
2021/6/26 15:47	31.0	41.0	24.7	51.9
2021/6/26 15:48	31.8	40.9	24.7	51.9
2021/6/26 15:49	31.4	39.8	24.8	51.5
2021/6/26 15:50	30.8	39.8	24.8	51.6
2021/6/26 15:51	31.0	39.9	24.7	51.5
2021/6/26 15:52	31.1	41.3	24.5	51.9
2021/6/26 15:53	31.2	40.1	24.4	51.7
2021/6/26 15:54	31.8	39.7	24.6	51.9

Time	OA		Point 3	
	T[°C]	φ[%]	T[°C]	φ[%]
2021/6/26 15:55	31.5	39.1	24.6	51.8
2021/6/26 15:56	31.3	39.0	24.8	51.9
2021/6/26 15:57	31.5	39.5	24.7	51.7
2021/6/26 15:58	31.1	40.4	24.6	51.6
2021/6/26 15:59	30.6	41.8	24.6	51.7
2021/6/26 16:00	30.5	42.6	24.6	51.9
2021/6/26 16:01	31.5	41.1	24.6	51.7
2021/6/26 16:02	30.9	41.7	24.4	52.0
2021/6/26 16:03	30.7	42.3	24.6	52.6
2021/6/26 16:04	31.2	41.5	24.6	52.0
2021/6/26 16:05	30.8	41.6	24.5	51.7
2021/6/26 16:06	31.5	42.0	24.7	52.0
2021/6/26 16:07	30.5	42.0	24.4	52.1
2021/6/26 16:08	31.0	41.9	24.5	52.6
2021/6/26 16:09	30.5	41.9	24.3	53.0
2021/6/26 16:10	31.2	41.8	24.3	52.9
2021/6/26 16:11	31.8	41.9	24.3	52.6
2021/6/26 16:12	30.8	42.5	24.2	52.8
2021/6/26 16:13	30.9	42.7	24.4	52.9
2021/6/26 16:14	30.5	43.6	24.5	52.7
2021/6/26 16:15	30.4	44.0	24.4	52.9
2021/6/26 16:16	30.1	44.1	24.2	53.3
2021/6/26 16:17	30.5	44.2	24.4	53.0
2021/6/26 16:18	30.2	44.7	24.3	53.2
2021/6/26 16:19	31.4	43.8	24.4	53.9
2021/6/26 16:20	31.4	43.0	24.4	53.6
2021/6/26 16:21	31.2	43.3	24.4	53.2

付録 B 冷房実験の測定値

93

Time	OA		Point 3	
	T[°C]	φ[%]	T[°C]	φ[%]
2021/6/26 16:22	31.1	43.0	24.3	53.4
2021/6/26 16:23	30.9	43.2	24.3	53.9
2021/6/26 16:24	30.3	44.3	24.8	53.9
2021/6/26 16:25	30.4	45.1	24.9	53.5
2021/6/26 16:26	30.3	45.7	25.0	52.5
2021/6/26 16:27	31.1	44.1	25.2	52.7
2021/6/26 16:28	31.1	43.5	25.2	52.6
2021/6/26 16:29	30.7	43.8	25.3	52.3
2021/6/26 16:30	30.9	42.8	25.4	52.2
2021/6/26 16:31	31.3	42.2	25.5	52.0
2021/6/26 16:32	30.9	42.7	25.7	51.9
2021/6/26 16:33	30.8	43.4	25.6	51.8
2021/6/26 16:34	31.0	43.5	25.6	51.4
2021/6/26 16:35	31.2	42.9	25.7	51.7
2021/6/26 16:36	30.6	43.8	25.8	51.4
2021/6/26 16:37	30.2	45.1	25.9	51.1
2021/6/26 16:38	30.2	45.4	25.9	51.1
2021/6/26 16:39	30.3	44.7	25.9	51.5
2021/6/26 16:40	30.6	44.4	25.9	51.3
2021/6/26 16:41	30.4	44.6	26.0	51.0
2021/6/26 16:42	30.5	44.4	26.0	51.0
2021/6/26 16:43	30.7	44.8	26.0	51.0
2021/6/26 16:44	30.7	44.6	26.0	51.1
2021/6/26 16:45	31.5	43.5	26.1	50.9
2021/6/26 16:46	31.5	42.7	26.1	51.0
2021/6/26 16:47	31.8	42.3	26.1	51.2
2021/6/26 16:48	31.9	42.0	26.1	51.0

Time	OA		Point 3	
	T[°C]	φ[%]	T[°C]	φ[%]
2021/6/26 16:49	31.4	42.0	26.1	50.9
2021/6/26 16:50	31.6	42.5	26.0	50.7
2021/6/26 16:51	31.9	41.9	26.1	50.6
2021/6/26 16:52	31.7	42.0	26.2	50.4
2021/6/26 16:53	32.0	41.6	26.2	50.1
2021/6/26 16:54	32.2	41.4	26.2	50.2
2021/6/26 16:55	32.2	41.1	26.2	50.1
2021/6/26 16:56	31.7	41.7	26.0	50.3
2021/6/26 16:57	31.4	43.8	26.2	50.1
2021/6/26 16:58	31.3	45.2	26.1	50.1
2021/6/26 16:59	31.2	45.6	26.2	50.2
2021/6/26 17:00	31.2	45.9	26.2	49.9
2021/6/26 17:01	31.3	46.1	26.2	49.8
2021/6/26 17:02	31.7	43.9	26.2	49.9
2021/6/26 17:03	31.7	42.2	26.3	49.8
2021/6/26 17:04	31.8	41.6	26.2	50.0
2021/6/26 17:05	32.0	41.0	26.2	49.8
2021/6/26 17:06	31.5	41.9	26.2	49.6
2021/6/26 17:07	31.2	42.7	26.2	49.7
2021/6/26 17:08	31.1	44.2	26.2	49.5
2021/6/26 17:09	31.1	44.1	26.3	49.5
2021/6/26 17:10	31.2	44.8	26.4	49.2
2021/6/26 17:11	31.0	45.1	26.4	49.1
2021/6/26 17:12	30.8	45.8	26.3	49.2
2021/6/26 17:13	31.7	44.9	26.3	49.2
2021/6/26 17:14	31.4	44.5	26.3	49.5
2021/6/26 17:15	31.0	45.4	26.2	49.5

付録 B 冷房実験の測定値

94

Time	OA		Point 3	
	T[°C]	φ[%]	T[°C]	φ[%]
2021/6/26 17:16	31.2	45.1	26.3	49.4
2021/6/26 17:17	30.2	46.5	26.3	49.4
2021/6/26 17:18	30.2	46.6	26.3	49.2
2021/6/26 17:19	30.5	46.8	26.2	49.0
2021/6/26 17:20	31.6	45.6	26.2	49.2
2021/6/26 17:21	31.0	44.7	26.2	49.1
2021/6/26 17:22	30.1	45.0	26.2	49.0
2021/6/26 17:23	30.4	45.8	26.2	48.9

Time	OA		Point 3	
	T[°C]	φ[%]	T[°C]	φ[%]
2021/6/26 17:24	30.8	45.3	26.2	48.9
2021/6/26 17:25	31.6	42.1	26.2	48.8
2021/6/26 17:26	29.8	43.6	26.2	48.9
2021/6/26 17:27	29.8	44.7	26.2	48.6
2021/6/26 17:28	29.8	45.4	26.2	48.7
2021/6/26 17:29	30.1	44.9	26.1	48.8
2021/6/26 17:30	31.3	43.3	26.2	48.6

付録 C 暖房実験の測定値

付録 C では、2023 年 2 月 6 日に行った外気処理空調機の暖房実験で測定した、外気 (outside air ; OA) と、体育館中央・高さ 0.5m 地点 (Point 3) の温湿度データを示す。

Time	OA		Point 3	
	T[°C]	φ[%]	T[°C]	φ[%]
2023/2/6 8:41	12.6	32.0	12.2	35.7
2023/2/6 8:42	12.5	31.6	12.0	35.9
2023/2/6 8:42	12.5	31.6	12.0	35.9
2023/2/6 8:42	12.4	32.1	11.9	35.7
2023/2/6 8:42	12.5	31.6	12.0	35.9
2023/2/6 8:42	12.4	32.1	11.9	35.7
2023/2/6 8:43	12.3	31.5	11.8	35.9
2023/2/6 8:44	12.2	31.7	11.7	36.1
2023/2/6 8:44	12.1	32.0	11.5	37.2
2023/2/6 8:45	12.0	33.3	11.3	37.0
2023/2/6 8:45	11.8	32.5	11.1	37.3
2023/2/6 8:46	11.7	32.2	11.0	37.8
2023/2/6 8:46	11.6	36.4	10.8	38.0
2023/2/6 8:47	10.8	38.3	10.5	38.7
2023/2/6 8:48	10.6	42.9	10.4	39.0
2023/2/6 8:48	10.3	44.0	10.2	37.8
2023/2/6 8:49	10.0	44.5	9.7	40.7
2023/2/6 8:49	9.7	45.8	9.5	41.3
2023/2/6 8:50	9.2	46.9	9.0	42.7
2023/2/6 8:51	9.0	47.8	9.0	42.6
2023/2/6 8:51	8.8	49.8	8.9	42.6
2023/2/6 8:52	8.5	50.4	8.8	42.6
2023/2/6 8:52	8.2	50.9	8.7	41.5

Time	OA		Point 3	
	T[°C]	φ[%]	T[°C]	φ[%]
2023/2/6 8:53	8.0	51.1	8.4	44.2
2023/2/6 8:54	7.7	51.6	8.3	44.7
2023/2/6 8:54	7.5	52.4	8.2	44.7
2023/2/6 8:55	7.3	53.4	8.1	44.9
2023/2/6 8:55	7.1	53.8	7.9	45.5
2023/2/6 8:56	7.0	54.0	7.8	45.6
2023/2/6 8:57	6.9	54.7	7.7	45.9
2023/2/6 8:57	6.7	55.6	7.6	46.3
2023/2/6 8:58	6.5	56.3	7.5	46.8
2023/2/6 8:58	6.3	57.1	7.4	47.0
2023/2/6 8:59	6.1	58.0	7.3	47.5
2023/2/6 9:00	5.9	58.4	7.2	47.6
2023/2/6 9:00	5.8	59.0	7.1	47.9
2023/2/6 9:00	5.7	59.4	7.0	48.4
2023/2/6 9:01	5.5	59.9	6.9	48.4
2023/2/6 9:01	5.4	60.4	6.9	48.5
2023/2/6 9:02	5.4	61.8	6.8	48.7
2023/2/6 9:03	5.4	61.9	6.7	49.0
2023/2/6 9:03	5.4	61.6	6.7	49.3
2023/2/6 9:04	5.4	62.0	6.6	48.8
2023/2/6 9:04	5.3	62.2	6.6	49.3
2023/2/6 9:05	5.3	62.7	6.5	49.7
2023/2/6 9:06	5.2	62.8	6.5	49.8

付録 C 暖房実験の測定値

96

Time	OA		Point 3	
	T[°C]	φ[%]	T[°C]	φ[%]
2023/2/6 9:06	5.2	62.7	6.4	50.1
2023/2/6 9:07	5.2	62.3	6.4	50.1
2023/2/6 9:08	5.2	61.6	6.3	50.3
2023/2/6 9:08	5.2	61.0	6.3	51.6
2023/2/6 9:09	5.2	59.5	6.2	52.1
2023/2/6 9:09	5.2	59.4	6.2	52.2
2023/2/6 9:10	5.3	55.4	6.1	53.1
2023/2/6 9:11	5.2	57.5	6.1	53.4
2023/2/6 9:11	5.2	55.3	6.0	53.4
2023/2/6 9:12	5.2	55.5	6.0	53.5
2023/2/6 9:12	5.2	55.3	6.0	53.7
2023/2/6 9:13	5.2	55.6	5.9	53.9
2023/2/6 9:14	5.2	55.9	5.9	53.9
2023/2/6 9:14	5.2	58.1	5.9	54.7
2023/2/6 9:15	5.2	57.4	5.9	54.6
2023/2/6 9:15	5.2	58.8	5.8	54.6
2023/2/6 9:16	5.2	59.2	5.8	53.7
2023/2/6 9:17	5.1	60.0	5.8	53.9
2023/2/6 9:17	5.1	59.4	5.8	53.9
2023/2/6 9:18	5.1	60.4	5.8	53.9
2023/2/6 9:18	5.1	60.9	5.8	54.2
2023/2/6 9:19	5.1	60.9	5.8	54.0
2023/2/6 9:20	5.1	62.0	5.8	54.0
2023/2/6 9:19	5.1	62.4	5.8	53.9
2023/2/6 9:20	5.1	61.9	5.9	54.1
2023/2/6 9:20	5.1	64.3	5.9	54.2
2023/2/6 9:21	5.0	63.7	5.9	54.3

Time	OA		Point 3	
	T[°C]	φ[%]	T[°C]	φ[%]
2023/2/6 9:22	5.0	62.2	5.9	54.3
2023/2/6 9:22	5.0	63.1	5.9	54.0
2023/2/6 9:23	5.1	61.8	5.9	53.8
2023/2/6 9:23	5.1	62.1	6.0	53.9
2023/2/6 9:24	5.1	61.9	6.0	53.8
2023/2/6 9:25	5.0	62.7	6.0	53.8
2023/2/6 9:25	5.1	62.2	6.1	53.6
2023/2/6 9:26	5.0	62.7	6.1	53.5
2023/2/6 9:26	5.0	62.3	6.1	53.4
2023/2/6 9:27	5.1	62.6	6.2	53.4
2023/2/6 9:28	5.1	62.6	6.2	53.5
2023/2/6 9:28	5.1	62.9	6.2	53.3
2023/2/6 9:29	5.1	62.3	6.2	53.4
2023/2/6 9:30	5.1	62.2	6.3	53.2
2023/2/6 9:30	5.1	62.2	6.3	53.2
2023/2/6 9:30	5.1	61.9	6.3	52.6
2023/2/6 9:31	5.1	61.8	6.3	53.1
2023/2/6 9:31	5.1	63.1	6.4	52.9
2023/2/6 9:32	5.1	63.2	6.4	52.9
2023/2/6 9:33	5.1	63.1	6.4	53.0
2023/2/6 9:33	5.1	62.2	6.5	53.0
2023/2/6 9:34	5.1	61.5	6.5	52.8
2023/2/6 9:34	5.1	61.3	6.5	52.8
2023/2/6 9:35	5.1	61.4	6.5	52.7
2023/2/6 9:36	5.1	62.1	6.6	52.7
2023/2/6 9:36	5.1	62.6	6.6	52.6
2023/2/6 9:37	5.1	62.5	6.6	52.7

付録 C 暖房実験の測定値

97

Time	OA		Point 3	
	T[°C]	φ[%]	T[°C]	φ[%]
2023/2/6 9:37	5.1	62.1	6.6	52.5
2023/2/6 9:38	5.1	62.7	6.7	52.6
2023/2/6 9:39	5.2	62.3	6.7	52.6
2023/2/6 9:39	5.2	62.0	6.7	52.4
2023/2/6 9:39	5.2	61.8	6.8	52.4
2023/2/6 9:39	5.2	62.0	6.8	52.3
2023/2/6 9:40	5.2	62.3	6.8	52.2
2023/2/6 9:41	5.2	62.1	6.9	52.1
2023/2/6 9:41	5.3	61.6	6.9	52.0
2023/2/6 9:42	5.3	61.7	6.9	51.9
2023/2/6 9:42	5.3	61.6	7.0	51.8
2023/2/6 9:43	5.3	61.5	7.0	51.8
2023/2/6 9:44	5.3	61.4	7.0	51.7
2023/2/6 9:44	5.4	61.5	7.0	51.9
2023/2/6 9:45	5.4	61.5	7.1	51.7
2023/2/6 9:45	5.4	61.4	7.1	52.1
2023/2/6 9:46	5.5	61.3	7.1	52.0
2023/2/6 9:47	5.5	61.1	7.2	52.2
2023/2/6 9:47	5.5	61.4	7.2	52.1
2023/2/6 9:48	5.5	61.3	7.2	51.9
2023/2/6 9:48	5.5	60.9	7.2	51.8
2023/2/6 9:49	5.5	60.8	7.3	51.7
2023/2/6 9:50	5.6	61.1	7.3	51.5
2023/2/6 9:50	5.6	60.9	7.3	51.8
2023/2/6 9:51	5.6	60.8	7.3	51.4
2023/2/6 9:51	5.6	61.0	7.4	51.4
2023/2/6 9:52	5.6	61.0	7.4	51.2

Time	OA		Point 3	
	T[°C]	φ[%]	T[°C]	φ[%]
2023/2/6 9:53	5.6	61.1	7.4	51.1
2023/2/6 9:53	5.6	60.9	7.4	51.1
2023/2/6 9:54	5.7	60.6	7.5	51.2
2023/2/6 9:54	5.7	60.7	7.5	51.2
2023/2/6 9:55	5.7	60.8	7.5	50.9
2023/2/6 9:56	5.7	61.4	7.5	50.9
2023/2/6 9:56	5.6	61.6	7.5	51.0
2023/2/6 9:57	5.6	62.0	7.6	51.2
2023/2/6 9:57	5.7	61.6	7.6	51.1
2023/2/6 9:58	5.7	62.1	7.6	51.1
2023/2/6 9:59	5.7	61.9	7.6	50.9
2023/2/6 9:58	5.6	61.8	7.6	50.7
2023/2/6 9:59	5.7	61.3	7.7	50.6
2023/2/6 10:00	5.8	61.0	7.7	51.1
2023/2/6 10:00	5.8	61.1	7.7	51.3
2023/2/6 10:01	5.8	60.5	7.7	50.9
2023/2/6 10:01	5.8	60.5	7.8	50.9
2023/2/6 10:02	5.8	60.4	7.8	51.2
2023/2/6 10:03	5.8	61.0	7.8	50.8
2023/2/6 10:03	5.8	61.0	7.8	51.0
2023/2/6 10:04	5.9	60.7	7.8	50.8
2023/2/6 10:04	5.8	61.7	7.9	50.9
2023/2/6 10:05	5.8	61.4	7.9	50.8
2023/2/6 10:06	5.8	60.9	7.9	50.9
2023/2/6 10:06	5.9	60.3	7.9	51.0
2023/2/6 10:07	5.9	60.1	8.0	51.0
2023/2/6 10:07	6.0	60.3	8.0	51.0

付録 C 暖房実験の測定値

98

Time	OA		Point 3	
	T[°C]	φ[%]	T[°C]	φ[%]
2023/2/6 10:08	6.0	60.2	8.0	51.0
2023/2/6 10:09	6.0	59.9	8.0	50.8
2023/2/6 10:09	5.9	59.7	8.1	51.3
2023/2/6 10:10	6.0	59.7	8.1	51.5
2023/2/6 10:10	6.0	59.9	8.1	51.4
2023/2/6 10:11	6.0	59.0	8.1	51.4
2023/2/6 10:12	6.1	59.2	8.2	51.2
2023/2/6 10:12	6.1	59.5	8.2	51.1
2023/2/6 10:13	6.1	59.3	8.2	50.8
2023/2/6 10:13	6.2	59.0	8.2	50.8
2023/2/6 10:14	6.2	58.9	8.3	50.5
2023/2/6 10:15	6.2	59.1	8.3	50.7
2023/2/6 10:15	6.2	58.3	8.3	50.5
2023/2/6 10:16	6.2	58.3	8.3	50.4
2023/2/6 10:16	6.3	57.8	8.3	50.3
2023/2/6 10:17	6.3	57.8	8.4	50.3
2023/2/6 10:18	6.4	57.6	8.4	50.5
2023/2/6 10:18	6.4	57.6	8.4	50.2
2023/2/6 10:18	6.4	57.4	8.4	50.1
2023/2/6 10:18	6.4	57.5	8.4	50.2
2023/2/6 10:19	6.5	57.6	8.4	50.0
2023/2/6 10:20	6.4	57.7	8.5	50.0
2023/2/6 10:20	6.4	58.0	8.5	50.1
2023/2/6 10:21	6.5	57.5	8.5	50.3
2023/2/6 10:21	6.5	57.4	8.5	49.9
2023/2/6 10:22	6.6	57.2	8.5	50.2
2023/2/6 10:23	6.6	56.9	8.6	50.1

Time	OA		Point 3	
	T[°C]	φ[%]	T[°C]	φ[%]
2023/2/6 10:23	6.7	56.6	8.6	50.0
2023/2/6 10:24	6.7	56.4	8.7	49.9
2023/2/6 10:24	6.7	56.3	8.7	49.6
2023/2/6 10:25	6.8	56.3	8.7	49.3
2023/2/6 10:26	6.8	56.4	8.7	48.8
2023/2/6 10:26	6.8	56.3	8.7	48.4
2023/2/6 10:27	6.8	56.0	8.7	48.4
2023/2/6 10:27	6.8	55.9	8.6	48.4
2023/2/6 10:28	6.9	55.6	8.6	48.6
2023/2/6 10:29	6.9	55.3	8.6	49.8
2023/2/6 10:29	6.9	55.2	8.5	51.0
2023/2/6 10:30	7.0	55.1	8.5	51.3
2023/2/6 10:30	7.0	54.8	8.5	51.9
2023/2/6 10:31	7.0	54.8	8.5	51.8
2023/2/6 10:32	7.0	55.1	8.5	51.7
2023/2/6 10:32	7.0	55.7	8.5	51.4
2023/2/6 10:33	7.0	55.5	8.5	50.8
2023/2/6 10:33	7.0	55.5	8.5	50.6
2023/2/6 10:34	7.1	55.7	8.4	50.7
2023/2/6 10:35	7.0	55.9	8.4	50.7
2023/2/6 10:35	7.0	55.7	8.4	50.8
2023/2/6 10:36	7.1	55.8	8.4	50.8
2023/2/6 10:36	7.1	55.7	8.4	50.4
2023/2/6 10:37	7.1	55.7	8.4	50.4
2023/2/6 10:38	7.1	55.7	8.4	50.5
2023/2/6 10:37	7.1	55.5	8.4	50.5
2023/2/6 10:38	7.1	55.5	8.4	50.5

付録 C 暖房実験の測定値

99

Time	OA		Point 3	
	T[°C]	φ[%]	T[°C]	φ[%]
2023/2/6 10:39	7.1	55.4	8.4	50.6
2023/2/6 10:39	7.2	55.4	8.4	50.6
2023/2/6 10:40	7.2	55.4	8.4	50.4
2023/2/6 10:40	7.2	55.3	8.4	50.4
2023/2/6 10:41	7.2	55.2	8.4	50.5
2023/2/6 10:42	7.2	55.3	8.4	50.5
2023/2/6 10:42	7.3	55.3	8.4	50.5
2023/2/6 10:43	7.2	55.2	8.4	50.4
2023/2/6 10:43	7.3	55.2	8.4	50.4
2023/2/6 10:44	7.2	55.5	8.4	50.5
2023/2/6 10:45	7.2	55.1	8.4	50.3
2023/2/6 10:45	7.3	55.0	8.4	50.5
2023/2/6 10:46	7.3	54.9	8.4	50.5
2023/2/6 10:46	7.3	54.7	8.4	50.4
2023/2/6 10:47	7.3	54.6	8.4	50.4
2023/2/6 10:48	7.3	54.5	8.4	50.4
2023/2/6 10:48	7.3	54.4	8.4	50.4
2023/2/6 10:49	7.3	54.3	8.4	50.3
2023/2/6 10:49	7.3	54.1	8.4	50.3
2023/2/6 10:50	7.3	54.1	8.4	50.5
2023/2/6 10:51	7.3	54.0	8.4	50.5
2023/2/6 10:51	7.3	53.9	8.4	50.4
2023/2/6 10:52	7.3	53.9	8.4	50.4
2023/2/6 10:52	7.3	54.0	8.4	50.3
2023/2/6 10:53	7.3	53.9	8.4	50.3
2023/2/6 10:54	7.3	54.0	8.4	50.3
2023/2/6 10:54	7.3	54.2	8.4	50.3

Time	OA		Point 3	
	T[°C]	φ[%]	T[°C]	φ[%]
2023/2/6 10:55	7.3	54.2	8.5	50.2
2023/2/6 10:55	7.3	54.1	8.5	50.3
2023/2/6 10:56	7.3	54.1	8.5	50.3
2023/2/6 10:57	7.3	54.0	8.5	50.1
2023/2/6 10:57	7.3	53.9	8.5	50.0
2023/2/6 10:57	7.3	53.9	8.5	49.9
2023/2/6 10:58	7.3	53.9	8.6	49.8
2023/2/6 10:58	7.3	54.0	8.6	49.8
2023/2/6 10:59	7.3	54.5	8.6	49.7
2023/2/6 10:59	7.3	54.2	8.6	49.7
2023/2/6 11:00	7.3	54.1	8.7	49.6
2023/2/6 11:01	7.3	54.3	8.7	49.7
2023/2/6 11:01	7.3	54.2	8.7	49.5
2023/2/6 11:02	7.3	54.3	8.7	49.5
2023/2/6 11:02	7.3	54.5	8.7	49.4
2023/2/6 11:03	7.3	54.7	8.8	49.3
2023/2/6 11:04	7.2	54.8	8.8	49.3
2023/2/6 11:04	7.2	54.8	8.8	49.4
2023/2/6 11:05	7.2	54.8	8.8	49.3
2023/2/6 11:05	7.3	54.5	8.8	49.2
2023/2/6 11:06	7.3	54.4	8.9	49.2
2023/2/6 11:07	7.3	54.3	8.9	49.3
2023/2/6 11:07	7.3	54.5	8.9	49.2
2023/2/6 11:08	7.3	54.6	8.9	49.2
2023/2/6 11:08	7.2	54.2	8.9	49.1
2023/2/6 11:09	7.3	54.1	9.0	48.9
2023/2/6 11:10	7.3	54.0	9.0	49.0

付録 C 暖房実験の測定値

100

Time	OA		Point 3	
	T[°C]	φ[%]	T[°C]	φ[%]
2023/2/6 11:10	7.3	54.1	9.0	48.9
2023/2/6 11:11	7.3	54.3	9.0	48.8
2023/2/6 11:11	7.3	54.1	9.1	48.9
2023/2/6 11:12	7.3	54.0	9.1	48.8
2023/2/6 11:13	7.3	54.1	9.1	48.7
2023/2/6 11:13	7.4	54.2	9.1	48.7
2023/2/6 11:14	7.4	54.3	9.1	48.7
2023/2/6 11:14	7.4	54.3	9.2	48.6
2023/2/6 11:15	7.4	54.6	9.2	48.7
2023/2/6 11:16	7.3	54.6	9.2	48.6
2023/2/6 11:16	7.4	54.5	9.2	48.7
2023/2/6 11:17	7.4	54.7	9.2	48.6
2023/2/6 11:17	7.4	54.7	9.2	48.5
2023/2/6 11:17	7.4	54.6	9.3	48.4
2023/2/6 11:18	7.4	54.6	9.3	48.5
2023/2/6 11:18	7.4	54.7	9.3	48.5
2023/2/6 11:19	7.4	54.5	9.3	48.3
2023/2/6 11:20	7.4	54.8	9.3	48.3
2023/2/6 11:20	7.4	54.5	9.4	48.3
2023/2/6 11:21	7.4	54.5	9.4	48.4
2023/2/6 11:21	7.4	54.6	9.4	48.2
2023/2/6 11:22	7.4	54.5	9.4	48.2

Time	OA		Point 3	
	T[°C]	φ[%]	T[°C]	φ[%]
2023/2/6 11:23	7.4	53.7	9.4	48.2
2023/2/6 11:23	7.4	53.7	9.4	48.1
2023/2/6 11:24	7.4	53.9	9.4	48.1
2023/2/6 11:24	7.4	53.8	9.5	48.1
2023/2/6 11:25	7.5	54.0	9.5	48.2
2023/2/6 11:26	7.5	54.0	9.5	48.1
2023/2/6 11:26	7.4	54.1	9.5	48.2
2023/2/6 11:27	7.4	54.2	9.5	48.0
2023/2/6 11:27	7.5	54.4	9.5	47.9
2023/2/6 11:28	7.5	53.7	9.6	47.9
2023/2/6 11:29	7.5	53.9	9.6	48.0
2023/2/6 11:29	7.5	53.5	9.6	47.9
2023/2/6 11:30	7.5	53.8	9.6	47.9
2023/2/6 11:30	7.5	53.6	9.6	47.9
2023/2/6 11:31	7.5	53.5	9.6	47.9
2023/2/6 11:32	7.6	53.5	9.6	47.8
2023/2/6 11:32	7.6	53.4	9.7	47.7
2023/2/6 11:33	7.6	53.4	9.7	47.7
2023/2/6 11:33	7.6	53.4	9.7	47.6
2023/2/6 11:34	7.6	53.3	9.7	47.6
2023/2/6 11:35	7.6	53.2	9.7	47.6
2023/2/6 11:35	7.7	53.2	9.7	48.3