

厚生労働科学研究費補助金（健康安全・危機管理対策総合研究事業）  
分担研究報告書

興行場における衛生的な環境確保のための研究  
映画館内の換気に関する実態とその評価法に関する検討

|       |      |                   |       |
|-------|------|-------------------|-------|
| 研究分担者 | 本間義規 | 国立保健医療科学院         | 統括研究官 |
| 研究代表者 | 開原典子 | 国立保健医療科学院 生活環境研究部 | 主任研究官 |
| 研究分担者 | 林 基哉 | 北海道大学 大学院工学研究院    | 教授    |
| 研究協力者 | 菊田弘輝 | 北海道大学 大学院工学研究院    | 准教授   |

### 研究要旨

本研究では、特に 4D 上映映画館を対象に換気状況と微粒子濃度の実態を調査し、大空間の特徴を考慮した空調・換気設備の評価法について検討することを主な目的としている。

今年度は、2つの映画館を対象に、上映中の温湿度、CO<sub>2</sub>濃度および浮遊微粒子個数濃度の連続的な測定を行った。件数が少ないため、事例的にはなるが、大きい規模、特に映画館のいわゆるシネマコンプレックスの4D等の観覧場は、十分な運転能力を有した設備機器を備え、一定水準以上で維持管理がされているといえる。設備情報やその維持管理方法及び運転スケジュール等の情報の踏まえた分析の必要性や、小規模な施設や種類の異なるものに関する調査の必要性をまとめている。

また、CO<sub>2</sub>の濃度変化に関する微分方程式に実測CO<sub>2</sub>濃度を代入することで、客席位置の相当換気量を逐次同定できることを確認した。空間湿気容量等の物理要素を適切に見込むことで、実測した絶対湿度を概ね再現できることを確認した。さらに粒子個数濃度の測定結果から、水噴霧やスモークなどのエフェクトに応じた粒径を統計的に推定した。また、粒径が小さいほど減衰に時間を要すること等が明らかとなった。

### A. 研究目的

映画館内の空気衛生環境を左右するファクターは、①観客自身の衛生状態（疾患、細菌等の微生物、ウイルス）、②空調機もしくは換気装置によって供給される空気（真菌等の微生物、微粒子）、そして③映画館内での微生物等の増殖可能性の3点である。平時興行中の衛生状態は、定期的な清掃のほか、適切な空調管理が基本であり、そのうえで有害微生物等を持ち込まない、かつ館内で増殖させないための空調制御が必要である。一方、新型コロナウイルス感染症対策の観点では、興行しながらの感染リスクマネジメントが求められ、特に観客席周りの十分な換気と濃度むらを作らない適切な気流形成も重要な確認要素となる。興行場

法第2条、第3条関係基準条例準則の5.空気環境に係る構造設備、ウ（ウ）には、「給気口は、内部に取り入れられた空気の分布を均等にし、かつ、局部的に空気の流れが停滞しないよう良好な気流分布を得るため適当な吹出機能のものを、また排気口は排気を効果的にできる適当な吸引機能のものを、適当な位置に設けること。」という規定がある<sup>1)</sup>。感染症防止の観点からは、室内空気を確実に排出することがリスク低減により重要となる。座席振動、圧縮空気、水噴霧、香り放出などの臨場感を高めるエフェクトに関する衛生管理基準は定められておらず、過去にはなかったそうした設備によってもたらされる空気環境の実態把握も必要である。

本研究では、特に4D上映映画館を対象に換気状況と微粒子濃度の実態を調査し、大空間の特徴を考慮した空調・換気設備の評価法について検討することを主な目的としている。

## B. 研究方法

第1に、4D上映映画館を対象に換気に関する実態調査を行う。まずは温湿度環境が準則を満たしているかどうかを確認すること、またその時の換気量を簡易にシミュレーション推定する方法について検討する。また、水噴霧やスモークなどの環境効果に伴う浮遊微粒子の放出状況、また準則で定める空中落下菌等を確認するため、パーティクルカウンターを用いて測定を行う。

第2に、映画館は床面積に対する座席密度は高い一方で一人当たりの占有気積は大きいという特徴を有しており、そうした空間に対する換気評価法もしくは設計法に関する検討が必要である。今年度はその第一歩として、大空間の換気性能評価に関する課題点を整理した。また、換気量とエネルギー消費性能はお互いに影響し合うため、空調方式（中央式空調か個別分散空調か）の違いや、中央式空調の場合のOA比と潜熱負荷の関係などについても簡単な検討を行った。

## C. 研究結果

### C1. 映画館場内空気環境測定と換気量等予測

#### C1.1. 2つの映画館の温湿度性状および換気性状の実態調査

座席振動、圧縮空気、水噴霧、香り放出などの環境効果機能を有する映画館2件（A映画館、B映画館とする）の空気環境調査を行った。各々の映画館では調査日に2種類の演目を計5回上映しており、最終回まで終日調査した。調査した映画館A、Bの座席数、各回の上映時間ならびに観客数を表1に示す。

表1 実測した2つの映画館の座席数、上映時間・観客数

|     | A 映画館         |           | B 映画館         |           |
|-----|---------------|-----------|---------------|-----------|
| 座席数 | 約 100 席       |           |               |           |
| 上映回 | 上映時間<br>(min) | 観客<br>(人) | 上映時間<br>(min) | 観客<br>(人) |
| 第1回 | 165           | 23        | 120           | 16        |
| 第2回 | 105           | 8         | 120           | 56        |
| 第3回 | 165           | 19        | 190           | 20        |
| 第4回 | 105           | 8         | 190           | 22        |
| 第5回 | 165           | 22        | 190           | 14        |

#### C1.1.1. A 映画館の温湿度測定結果

上映中の館内空気環境を把握するため、温湿度、CO<sub>2</sub>濃度、浮遊微粒子濃度、落下菌・浮遊菌濃度の測定を行った。図1-1~3にA映画館の上映回ごとの温湿度平均値のBox Plot図を示す。温度に関しては各回とも23℃程度であり適切に室温コントロールされている様子が伺える。相対湿度は第1回目の上映を除き30%を下回っており、かつ変動幅が小さい。外れ値はエフェクト(水噴霧)の影響である。絶対湿度も第1回目の上映から高く徐々に減っていき、第5回目の上映で増加する形になっている。第1回、第3回、第5回は同一演目A(上映時間165分)、第2回と第4回が同一演目B(上映時間105分)であり、観客数は第1回目から順に23名、8名、19名、8名、22名である。観客数と絶対湿度に相関関係は認められないこと、また外気に対して平均で約2.3g/kgDAの上昇があり、気積を考慮すると相応の加湿をしていたと考えられる。また、安定した湿度変化の要因は空間湿気容量の影響であると推定される。この点については、換気量も影響することから、換気量推定ののちにさらに検討を加える。

#### C1.1.2. B 映画館の温湿度測定結果

図2-1~3にB映画館の上映回ごとの温湿度平均値のBox Plot図を示す。温度、相対湿度に関しては第1回目上映時の変化幅が大きく、空調立ち上がりに伴う加温および大風量換気の影響が見て取れる。相対湿度、絶対湿度の変化幅が大きい

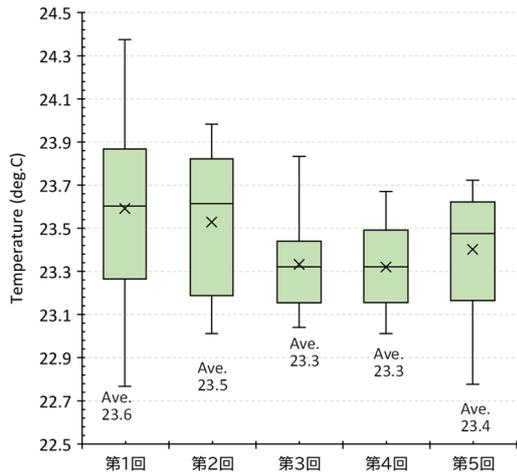


図 1-1 A 映画館の上映回毎の温度統計量

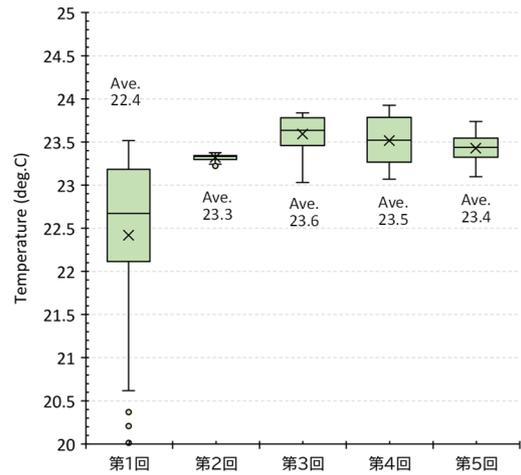


図 2-1 B 映画館の上映回毎の温度統計量

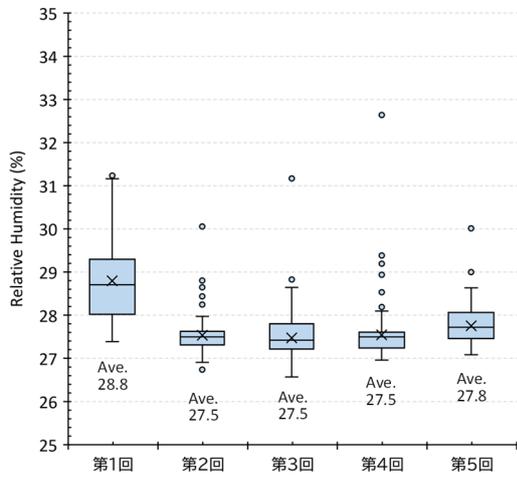


図 1-2 A 映画館の上映回毎の相対湿度統計量

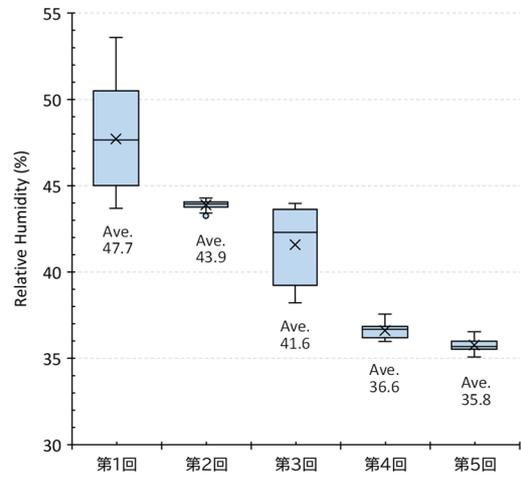


図 2-2 B 映画館の上映回毎の相対湿度統計量

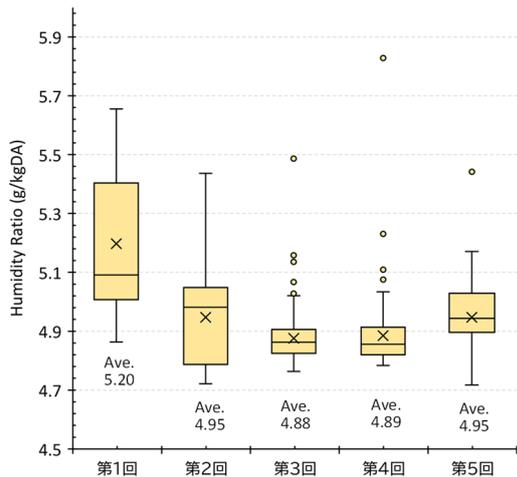


図 1-3 A 映画館の上映回毎の絶対湿度統計量

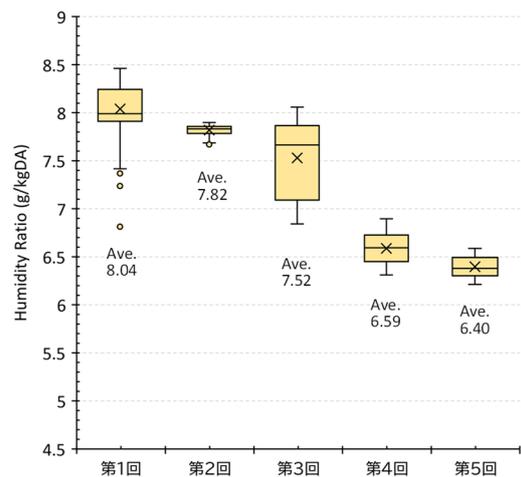


図 2-3 B 映画館の上映回毎の絶対湿度統計量

は第3回目上映時であり、後述するCO<sub>2</sub>濃度変化と合わせてみると、途中から換気量が増大したことが要因であると考えられる。一方、第2、4、5回は特に相対湿度および絶対湿度の変化幅が小さいことが特徴として挙げられる。

## C1.2. CO<sub>2</sub>濃度変化と換気量推定

### C1.2.1. A映画館のCO<sub>2</sub>濃度変化

図3にA映画館の8:00~24:00(16時間)のCO<sub>2</sub>濃度変化を示す。開場時700ppmであった状態から10時にかけて450ppmまで下がり、その後回を追うごとに濃度上昇するなど、1日の中で高い低いの変化はあるものの、第5回終了時まで、約1000ppm以下での管理がなされている。

### C1.2.2. B映画館のCO<sub>2</sub>濃度変化

図4にB映画館の8:00~24:00(16時間)のCO<sub>2</sub>濃度変化を示す。開場時濃度(8:00~8:20)が高いのはその時間帯にセンサーを設置した影響であり、実際にはそこを除いて測定結果を見る必要がある。午前中は徐々に濃度が上昇していき、第2回目は観客数が56名ということもあり第2回目上映終了時には1日のうちで最も濃度が高くなるものの、約1000ppm以下での管理がなされている。休憩時には濃度低下することからも、一定量の換気が得られていることがわかる。その後、第3回目開始とともに再び濃度上昇に転じるものの、第3回目中盤から濃度低下する傾向となり、二酸化炭素濃度による制御が適正に機能している。第5回は、約700ppmに維持されており1日を通して良好な管理がなされているといえる状況であった。

### C1.3. 濃度平衡式からの換気量簡易推定

映画館等の興行場は、大きな気積を有することから、応答遅れのある濃度変化をする可能性がある。この点を考慮して空気容量を考慮した換気量推定を行う。客席は床付近に集中し、そのため発生源も床付近に集中することから、気流状態に伴

う空間濃度の分布<sup>2)</sup>が想定される。空間全体の評価は、空間多点測定もしくは気流解析が必要で、これらの検討は今後の課題とし、まずは客席位置における換気量簡易推定を行う。

劇場内CO<sub>2</sub>濃度C<sub>in</sub>は、外気CO<sub>2</sub>濃度C<sub>out</sub>、呼吸によるCO<sub>2</sub>発生量M(m<sup>3</sup>/h)、呼気密度ρ<sub>b</sub>(kg/m<sup>3</sup>)、呼気温度35℃と仮定<sup>3)</sup>、外気密度ρ<sub>out</sub>(kg/m<sup>3</sup>)、劇場内空気密度ρ<sub>in</sub>(kg/m<sup>3</sup>)、劇場の気積をV(m<sup>3</sup>)、観客数p(人)、一人当たりの呼気CO<sub>2</sub>排出量M(15L/h/person)、外気供給量Q<sub>in</sub>(m<sup>3</sup>/h)、室内排気量Q<sub>out</sub>(m<sup>3</sup>/h)とすると、次に示す常微分方程式で表すことができる。

$$c_{out}\rho_{out}Q_{in} - c_{in}\rho_{in}Q_{out} + p\rho_b M = \rho_{in}V \frac{dc_{in}}{dt} \quad (1)$$

なお、供給される空気は全量外気と仮定すると次式が成り立つ。

$$\rho_{out}Q_{in} = \rho_{in}Q_{out} \quad (2)$$

以上より、室内排気量Q<sub>out</sub>(m<sup>3</sup>/h)は次式で表すことができる。

$$Q_{out} = \frac{1}{\rho_{in}(c_{out} - c_{in})} \cdot \left( \rho_{in}V \frac{dc_{in}}{dt} - p\rho_b M \right) \quad (3)$$

観客数p(人)と一人当たりの呼気CO<sub>2</sub>排出量MからCO<sub>2</sub>発生量を算出し、実測したCO<sub>2</sub>濃度(座席4隅および中央の5か所の居住域濃度平均値)を用いて客席位置換気風量を同定する。A映画館の結果を図5-1に、B映画館の結果を図5-2に示す。

濃度変動に追従するように同定した風量で濃度算出した結果が、図5-1および図5-2の赤太線である。算出した風量および観客一人当たりの換気量を図6-1(A映画館)、6-2(B映画館)に示

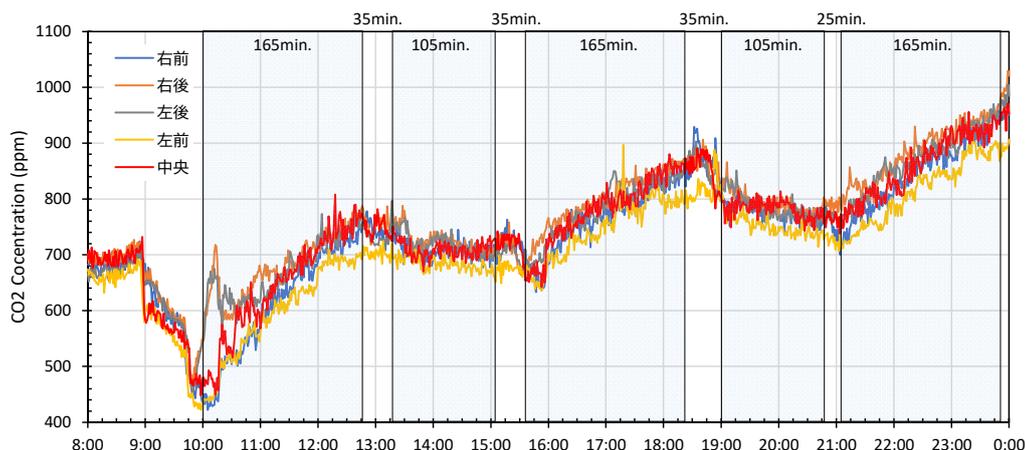


図 3 A 映画館の CO<sub>2</sub> 濃度変化

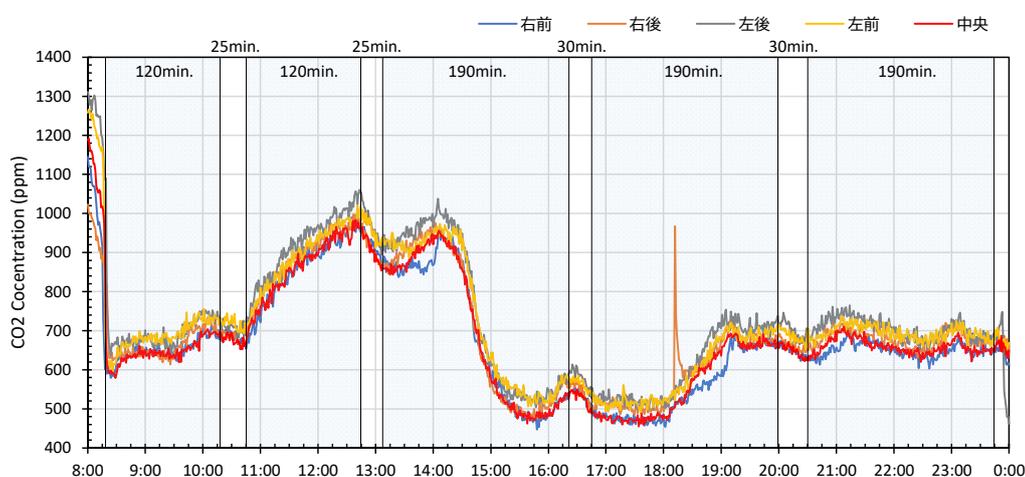


図 4 B 映画館の CO<sub>2</sub> 濃度変化

す。B 映画館は濃度が急激に下がる 9～10 時に 2000～8000m<sup>3</sup>/h の大容量換気を行ったと推定され、その後は 200～750m<sup>3</sup>/h 程度（換気回数で 0.1～0.35ACH）の換気状態であったと推定される。観客数は回によって変動しているのですが、その点を考慮し一人当たり換気量に換算したのが図 6 の点線である。なお、この結果は座席位置の濃度（居住域濃度）である。実際の換気量は、室内換気効率によって異なるため今後は排気位置の濃度を測定し、換気効率（標準化居住域濃度）<sup>4)</sup>として評価することになるが、今後、検討可能となれば、より安全な空間であることが定量的に示されるといえる。

#### C1.4. 推定換気量を用いた絶対湿度変動予測

空気中の湿気（水分）も換気に伴って移動（物質移動）するため、CO<sub>2</sub> と同様にトレーサーとして扱うことができる。一般に 0.5ACH 以上の換気量であれば、空間に存在する椅子やフロアカーペット、壁装などの湿気容量（空間湿気容量）はほぼ無視できるが、0.1～0.35ACH 程度に少なくなると、これら湿気容量が無視できなくなる。水分発生量として、観客の不感蒸発湿量を考慮し、また外調機使用を前提として、①外気給気加湿量で  $\Delta x=1.0, 2.0\text{kg/DA}$  とした場合、および、②空間湿気容量を一質点として組み込み（(4) 式）、空気湿気容量の 0、2、4 倍の 3 水準として試算した。A 映画館、B 映画館の絶対湿度変動の同定結果を各々図 7-1 および図 7-2 に示す。

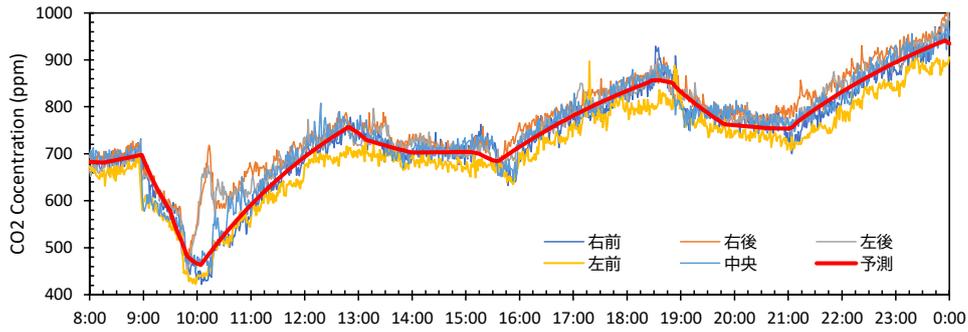


図 5-1 A 映画館の CO<sub>2</sub> 濃度同定結果

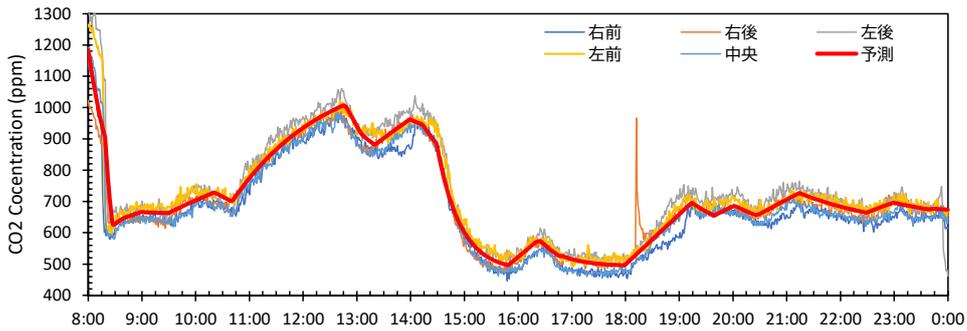


図 5-2 B 映画館の CO<sub>2</sub> 濃度同定結果

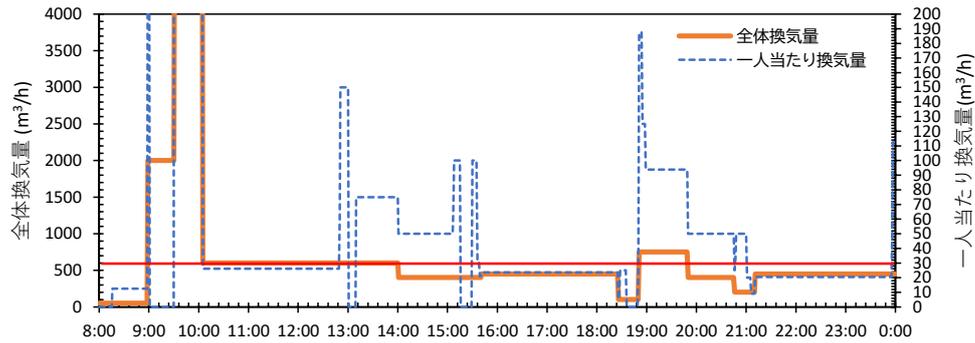


図 6-1 A 映画館の全体換気量および一人当たり換気量推定結果

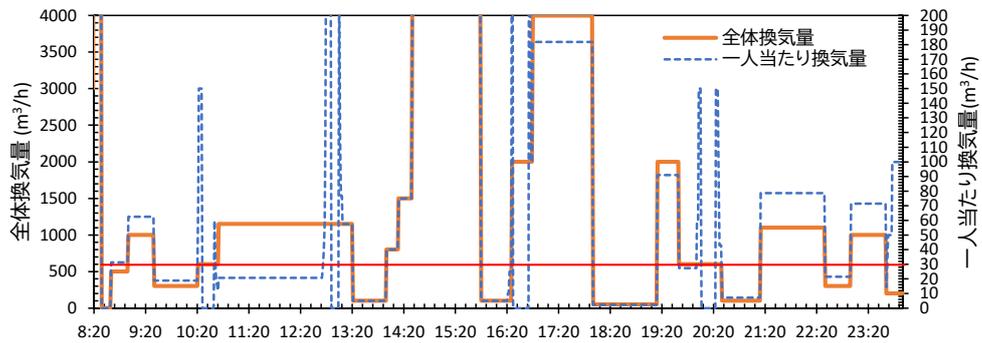


図 6-2 B 映画館の全体換気量および一人当たり換気量推定結果

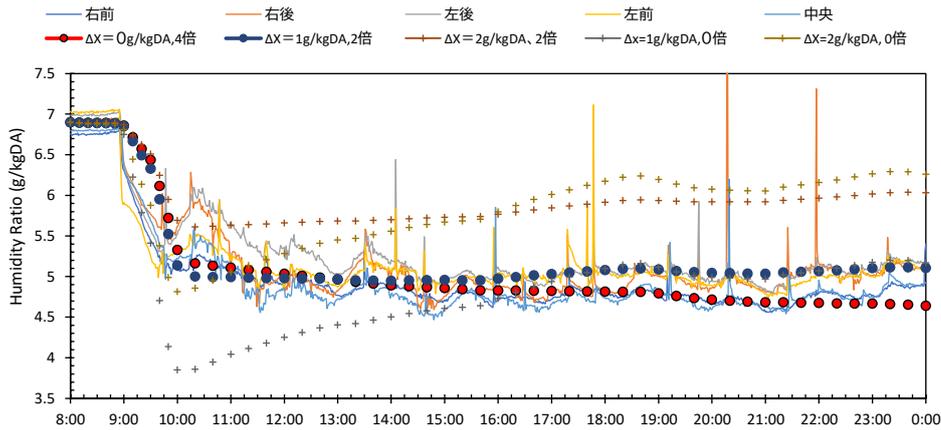


図 7-1 推定換気量を用いた A 映画館の絶対湿度同定結果

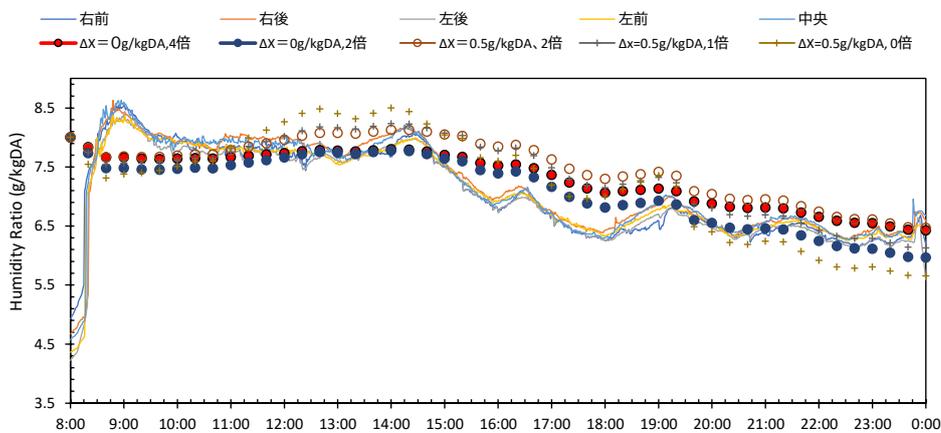


図 7-2 推定換気量を用いた B 映画館の絶対湿度同定結果

見ると、外調機加湿は  $\Delta X=0\sim 0.5\text{g/kgDA}$ 、空間湿気容量は空気の 2~4 倍の組み合わせで当てはまりが良くなる。A・B 映画館は規模的にも内装仕上げもほぼ同じであり、両者の結果を合わせると空間湿気容量は空気湿気容量の 2 倍程度と考えるのが妥当であろう。

$$\begin{aligned}
 X_{out}\rho_{out}Q_{in} - X_{in}\rho_{in}Q_{out} + pW_1 + W_2 \\
 = (\rho_{in}V + C) \frac{dX_{in}}{dt}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

なお、 $X_{out}$  は外気絶対湿度(g/kgDA)、 $X_{in}$  は室内絶対湿度(g/kgDA)、 $W_1$  は一人当たりの不感蒸泄量(40g/h/person に設定)、 $W_2$  は外調機使用を想定した外気給気への加湿量(g/kg)、 $C$  は空間湿気容量(g)である。

この結果を見ると、A 映画館の場合、外調機加湿は  $\Delta X=0\sim 1\text{g/kgDA}$ 、空間湿気容量は空気の 2~4 倍の組み合わせで実測絶対湿度をほぼ再現可能なことがわかる。B 映画館については、前半の絶対湿度の再現性は良くないが、16 時以降の状況を

なお、ここでは外調機加湿（外気に対する加湿給気）としているが、エフェクト（水噴霧）に伴う水分発生量は考慮していない。エフェクトは 1 席 1 回あたり 1mL としても 100 席同時に噴出するとなると 100mL となることから、そうしたエフェクトが 60 分間に 10 回あれば 1000g/h の加湿になる。エフェクトのカウント及び噴出量については詳細データを持ち合わせていないが、もし映画館側よりこれらの詳細情報を得ることができれば、より精度の高い分析が可能となる。

### C1.5. 空中浮遊微粒子の測定結果

A 映画館、B 映画館ともにパーティクルカウンターで空中浮遊微粒子の測定を実施している。パーティクルカウンターは Kanomax Model3889 (6 粒径)を用いた。

図 8-1 および図 8-2 に A 映画館の第 1 回目 (165 分の演目、アニメ映画) および第 2 回目 (105 分の演目、ハリウッド映画) の 2 演目の時系列粒子個数濃度 (片対数表示) を各々示す。演出効果 (エフェクト) により水噴霧およびスモーク等が発生することにより、粒径別粒子個数濃度が変化することがわかる。A 映画館第 1 回目の演目の場合、スタート時の粒子個数濃度に対し、各々  $0.3\mu\text{m}$  : 4.2 倍、 $0.5\mu\text{m}$  : 16.3 倍、 $1.0\mu\text{m}$  : 61.1 倍、 $3.0\mu\text{m}$  : 61.2 倍、 $5.0\mu\text{m}$  : 5.3 倍、 $10.0\mu\text{m}$  : 57.0 倍となった。 $1.0\mu\text{m}$ 、 $3.0\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$  の他の粒径に対し 1 桁オーダーが大きく、エフェクトに伴って放出された粒径の特徴であると考えられる。

図 9-1 および図 9-2 に、エフェクトのない後半 30 分程度の粒子個数濃度からみかけの濃度減衰を算出した。パーティクルカウンターのすぐ隣に測定者が着席していたため、呼気の影響も否定できないが (つまり純粋な濃度減衰ではない)、ただ確かなのは、粒径が小さいほど減衰するのに時間を要する特徴がある。

図 10-1、10-2 に B 映画館第 1 回目および第 3 回目の粒子個数濃度 (片対数表示) を示す。A 映画館と異なり、エフェクト時のピークを明確に捉えることができなかった。

図 11-1 および図 11-2 に減衰していると思われる時間帯の濃度減衰を示す。第 1 回目の演目 (120 分の演目) は A 映画館と類似の変化を示すが減衰するのは遅く、第 3 回目 (190 分の演目) は、粒径の大きな粒子個数濃度の変動が大きい。 $0.5$ 、 $1.0$ 、 $3.0\mu\text{m}$  の粒径は減衰傾向にあるが、 $0.3\mu\text{m}$  は減衰している状況は捉えることができなかった。

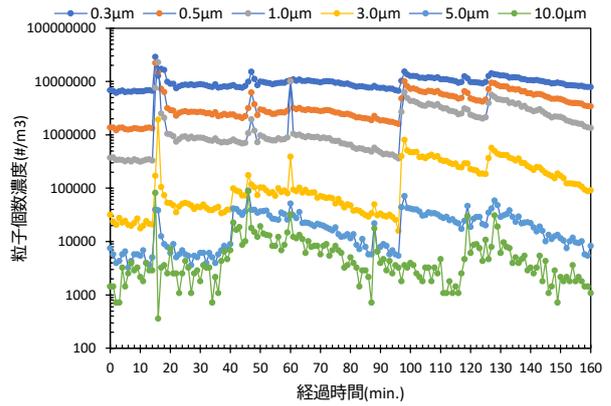


図 8-1 A 映画館第 1 回目の粒子個数濃度

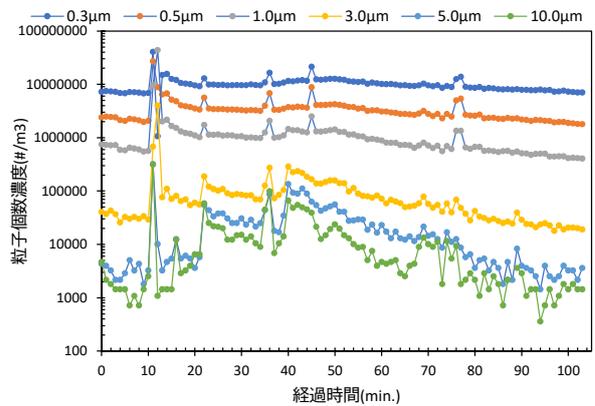


図 8-2 A 映画館第 2 回目の粒子個数濃度

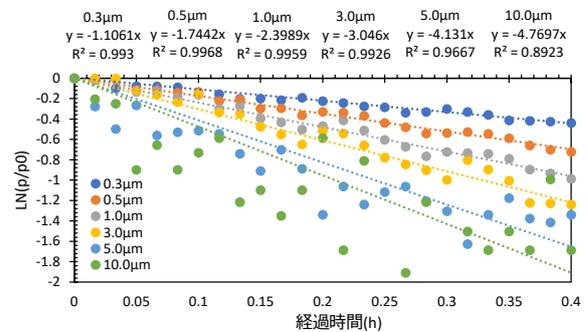


図 9-1 A 映画館第 1 回目 130~160 分の粒子個数濃度減衰

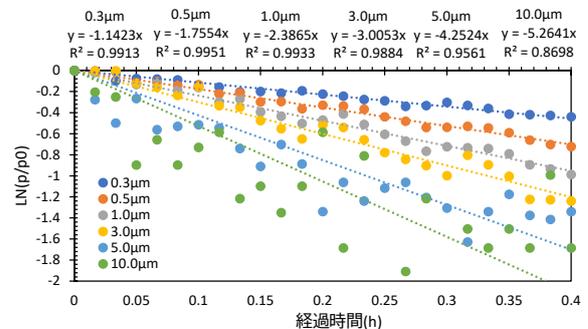


図 9-2 映画館第 2 回目 80~100 分の粒子個数濃度減衰

図 12-1、12-2 に A 映画館、B 映画館の第 1~5 回上映時の平均粒子個数濃度から算出した清浄度 (ISO-14644-1) を示す<sup>5)</sup>。A 映画館は粒径  $5.0\mu\text{m}$  の粒子個数濃度が class8 レベルを下回り、その他の粒径は class8 レベルを超える程度の濃度であることが確認できる。B 映画館は第 1 回目の  $3.0\mu\text{m}$  径および第 1~5 回の  $0.3\mu\text{m}$  の粒子個数濃度が class8 レベルを超えているが、全般的に  $1.0\mu\text{m}$  以上の粒径は class8 を下回ることがわかる。この違いはエフェクト装置の特性 (エフェクト装置には 4DX と MX4D があり、2 つの映画館は異なるエフェクト装置を採用しているためミスト等に差があることが予想されるが詳細は不明である)、を反映している結果なのかもしれない。本来、粒径別に class を判断することはないが、個別に比較することで、清浄度合を判断することは可能と考える。

### C1.6. 4D 上映映画館の環境効果技術

前述したとおり、日本の 4D 上映には 2 社の環境効果技術 (エフェクト) が用いられている。一つは韓国 4DX PLEX 社の「4DX」<sup>6)</sup>、もう一つはアメリカ Media Motion 社の「MX4D」<sup>7)</sup> である。シートひじ掛け若しくは背もたれから風や水、香りなどを放出するエフェクトのほか、劇場内前部もしくは横上部から風や閃光、雪パウダー、フォッグなどのエフェクトがある。また、空気環境には基本的に影響しないと考えられるシート振動がある (ダストなどが舞う可能性はある)。以上のようなエフェクトは 4DX で 12 種類<sup>6)</sup>、MX4D で 10 種類<sup>7)</sup> ある。このうち観客の顔等に直接空気や液水が噴きかかるエフェクトは、4DX では、「香り」、「雨」、「ミスト」、「エア」、「熱風」の 5 種類、MX4D は、「香り」、「風」、「水しぶき」、「エアブラスト」の 4 種類である。

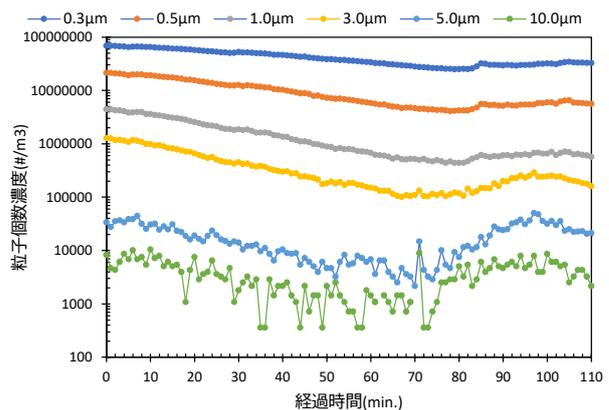


図 10-1 B 映画館第 1 回目の粒子個数濃度

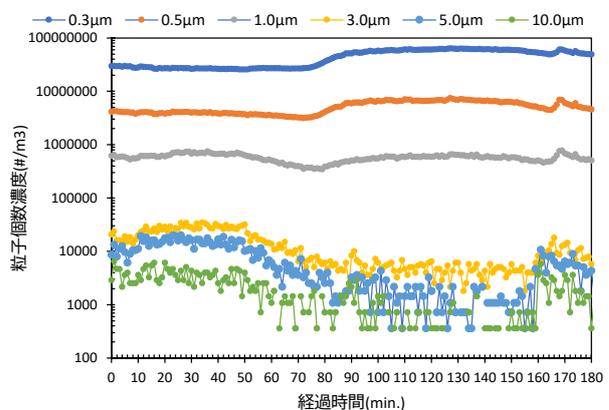


図 10-2 B 映画館第 3 回目の粒子個数濃度

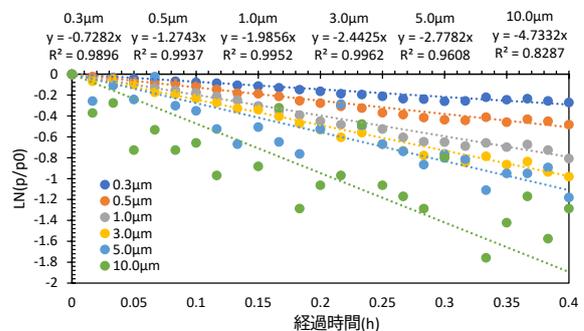


図 11-1 B 映画館第 1 回目 10~40 分の粒子個数濃度減衰

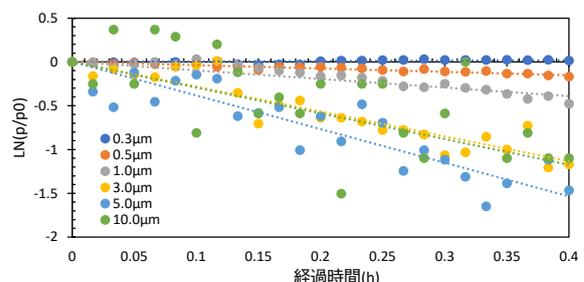


図 11-2 B 映画館第 3 回目 40~70 分の粒子個数濃度減衰

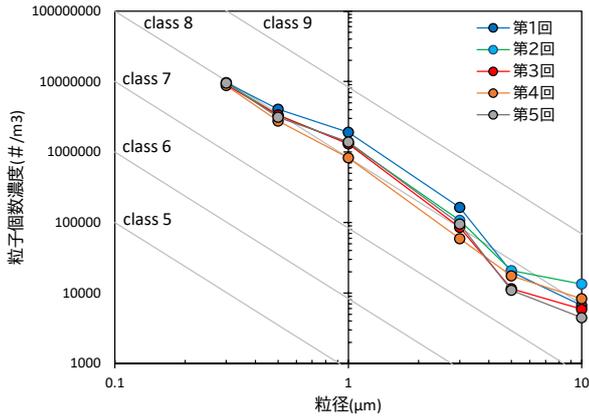


図 12-1 A 映画館の第 1~5 回の清浄度比較

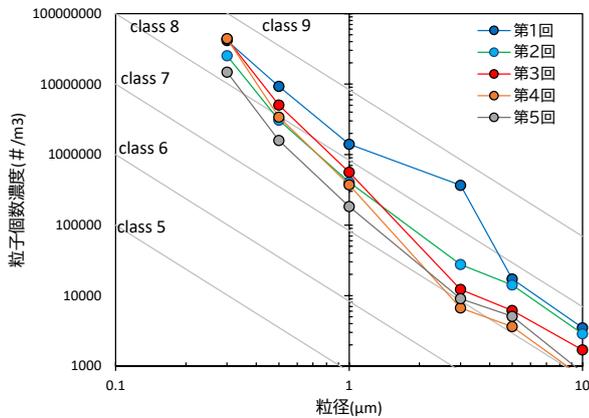


図 12-2 B 映画館の第 1~5 回の清浄度比較

これらのエフェクトのタイミングは 1 秒単位でプログラムされているが、調査では、環境計測と同時に測定者がエフェクトを記録している。

図 13-1~4 に、A・B 映画館の本編が始まってからの経過時間と 5 分刻みのエフェクトの回数を示す。空気中に浮遊する微粒子濃度が物質として放出される水、煙、香りは、いわゆるインパルス応答なので、スペクトル分析等の応用が考えられる。しかし、今回の測定結果は分解能の高いデータではないので、統計的手法でエフェクトと粒径密度の関係を簡易推定する。

まず、各粒子個数密度の 1 分間データのうち、 $\mu + 1.3\sigma$  よりも大きなデータ（全体の 10%）を抽出し、それ以外のデータとで差の検定を実施した。t 検定に先立ち、F 検定を実施している。A 映画館、B 映画館の分析結果を表 2-1~2-6 に示す。な

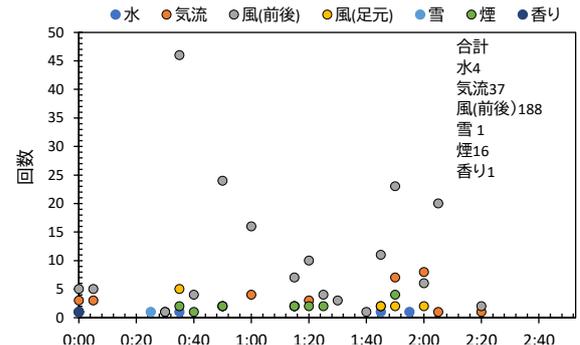


図 13-1 A 映画館第 1,3,5 回目演目のエフェクト記録

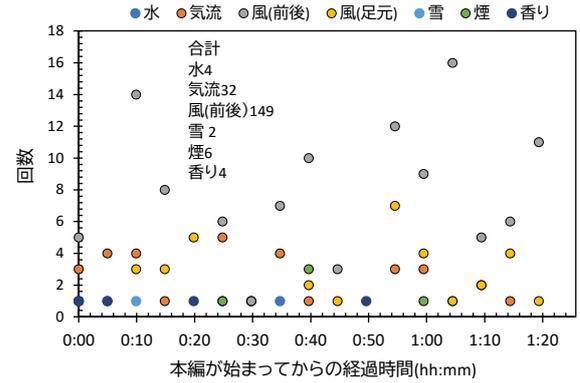


図 13-2 A 映画館第 2,4 回目演目のエフェクト記録

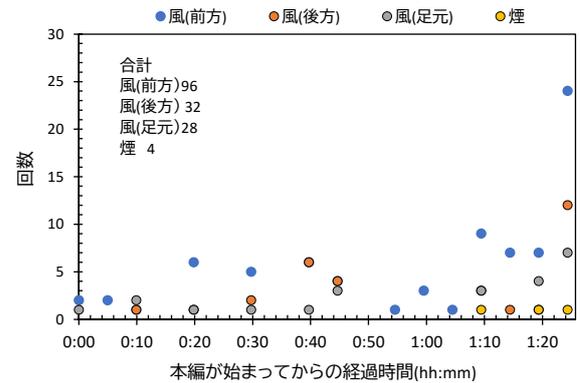


図 13-3 B 映画館第 1,2 回目演目のエフェクト記録

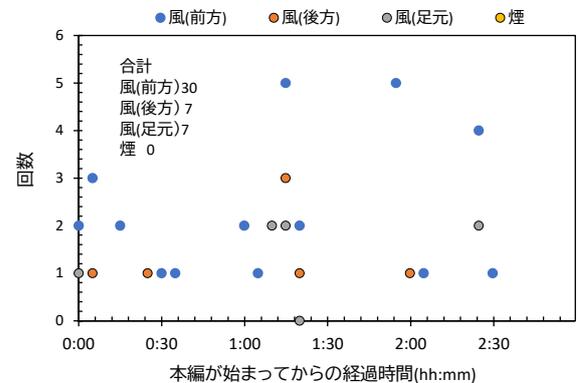


図 13-4 B 映画館第 3,4,5 回目演目のエフェクト記録

お、演目によって発生しなかったエフェクトやデータ欠損のあるエフェクトは分析対象から外している。

結果をみると、A 映画館の第 1 演目のエフェクト「水」の粒径は 3.0 μm、10.0 μm、エフェクト「煙」は 5 μm で統計的有意差があり、第 2 演目のエフェクト「水」は 0.3 μm、エフェクト「煙」は 0.3 μm、10.0 μm で有意差が生じている。A 映画館の第 1 演目、第 2 演目は同一映画館であるため、基本的に同じエフェクト装置を使用しているが、水エフェクトもいくつか種類があり、発生させる位置や量によって差が生じた可能性はある。

B 映画館は第 2 演目のエフェクト「煙」のみの記録で 1.0、3.0、5.0、10.0 μm の粒径で有意差があることが確認できた。B 映画館の煙はスモークジェネレーターが使用されており、そのリキッド成分はプロピレングリコール、脱イオン非界面活性剤、脱イオン水となっている。固定装置での空間内噴霧は、基本的に現場測定しかなく、また、リキッドエアロゾルは空間相対湿度に応じて蒸発に伴う粒径変化も生じることが想定されることから、その場での測定が欠かせない。

なお、暗い劇場内で時間を確認しながら手書きによる記録を行うというプリミティブな作業は困難を極めた。また、マスクをした状態だと香りに気が付かないことがあること、雨なのかミストなのか判別できない等、エフェクトの区別が難しい状況も多かった。今後、正確な発生量と時間のデータが得られれば、スペクトル分析等の手法の応用も考えられ、分析精度の向上が期待できる。

なお、「エア」、熱風など気流に関連するエフェクトは、今回分析対象とはしていないが、これらの要素が物質の輸送にどの程度影響を及ぼすのか等は今後の検討課題である。

## C2. 空調方式別の室内空気環境形成と空調負荷に関する検討

### C2.1. 大空間の換気性能評価

表 2-1 A 映画館 第 1 演目の「水」の統計分析結果

| 水         |           |           |      |          |
|-----------|-----------|-----------|------|----------|
| 粒径        | 上側10%値    | 下側90%値    | 比率   | p値       |
| 0.3um/m3  | 12115917  | 9274991.9 | 1.31 | 0.107    |
| 0.5um/m3  | 6416821.8 | 3709807.1 | 1.73 | 0.116    |
| 1.0um/m3  | 3632573.5 | 1652347.3 | 2.2  | 0.126    |
| 3.0um/m3  | 290484.5  | 144816.37 | 2.01 | 0.028 ** |
| 5.0um/m3  | 28048.3   | 18688.076 | 1.5  | 0.084    |
| 10.0um/m3 | 11510.15  | 5881.5379 | 1.96 | 0.043 *  |

表 2-2 A 映画館 第 1 演目の「煙」の統計分析結果

| 煙         |           |           |      |         |
|-----------|-----------|-----------|------|---------|
| 粒径        | 上側10%値    | 下側90%値    | 比率   | p値      |
| 0.3um/m3  | 11119889  | 9139172.8 | 1.22 | 0.052   |
| 0.5um/m3  | 5097915.9 | 3698734.6 | 1.38 | 0.132   |
| 1.0um/m3  | 2684606.8 | 1638860.5 | 1.64 | 0.133   |
| 3.0um/m3  | 244326.98 | 136279.88 | 1.79 | 0.08    |
| 5.0um/m3  | 28182.975 | 17147.344 | 1.64 | 0.015 * |
| 10.0um/m3 | 9292.525  | 5690.6    | 1.63 | 0.076   |

表 2-3 A 映画館 第 2 演目の「水」の統計分析結果

| 水         |           |           |      |           |
|-----------|-----------|-----------|------|-----------|
| 粒径        | 上側10%値    | 下側90%値    | 比率   | p値        |
| 0.3um/m3  | 13016065  | 9419117.3 | 1.38 | 0.001 *** |
| 0.5um/m3  | 5645494.5 | 3110910.2 | 1.81 | 0.102     |
| 1.0um/m3  | 3867751.5 | 856038.4  | 4.52 | 0.165     |
| 3.0um/m3  | 349939.25 | 65812.4   | 5.32 | 0.137     |
| 5.0um/m3  | 57963.75  | 17070.8   | 3.4  | 0.066     |
| 10.0um/m3 | 35554.25  | 9452.4    | 3.76 | 0.079     |

表 2-4 A 映画館 第 2 演目の「煙」の統計分析結果

| 煙         |           |           |      |         |
|-----------|-----------|-----------|------|---------|
| 粒径        | 上側10%値    | 下側90%値    | 比率   | p値      |
| 0.3um/m3  | 12149819  | 9650116.2 | 1.26 | 0.027 * |
| 0.5um/m3  | 5241183   | 3109016.7 | 1.69 | 0.150   |
| 1.0um/m3  | 3711205.8 | 897783.93 | 4.13 | 0.183   |
| 3.0um/m3  | 322411.75 | 73153.067 | 4.41 | 0.169   |
| 5.0um/m3  | 40007.25  | 21859.2   | 1.83 | 0.114   |
| 10.0um/m3 | 30921.5   | 10687.8   | 2.89 | 0.020 * |

表 2-5 B 映画館 第 2 演目の「煙」の統計分析結果

| 煙         |           |           |      |           |
|-----------|-----------|-----------|------|-----------|
| 粒径        | 上側10%値    | 下側90%値    | 比率   | p値        |
| 0.3um/m3  | 25494939  | 25527254  | 1    | 0.485     |
| 0.5um/m3  | 3168753.7 | 3092989.7 | 1.02 | 0.316     |
| 1.0um/m3  | 450011.2  | 379627.28 | 1.19 | 0.009 *** |
| 3.0um/m3  | 37457.575 | 25038.707 | 1.5  | 0.016 **  |
| 5.0um/m3  | 19833.025 | 10807.453 | 1.84 | 0.001 *** |
| 10.0um/m3 | 4022.35   | 2150.0133 | 1.87 | 0.002 *** |

映画館は建築計画的な観点の分類からは、劇場タイプの形式に属し、床面積に対する一人当たりの占有面積は小さく（つまり密度が高く）、一方で天井が高く気積が大きいという特徴であるといわれている。

空間の換気性能評価には、前述した濃度測定値からの同定ではなく、瞬時一様拡散を仮定した炭酸ガス濃度減衰が一般的である。この方式は、空

間濃度を一定にしたうえで（一様拡散状態）その濃度減衰から Seidel 式で算出する方法である。気積の小さな単室であれば、一定の精度で換気量（漏気量含む）を把握することが可能である。劇場タイプのような大空間では、一般に、空気齢などの換気効率を前提とすることも多い<sup>2)</sup>。特に、個別分散空調システムは、温度に関して“むら”のないように制御される一方、換気に関しては、空気の滞留も起こり得るような吹出口・吸込口位置になっていることも少なくないことが一般的には指摘されており、状況に応じた適切な空気環境・換気性能の評価が求められる。

## C2.2. 濃度分布予測に基づく空気質評価

劇場や映画館は上演プログラムによっては1時間以上の滞在となること、また隣席との距離が近い（密接状態となる）ことから、特措法<sup>10</sup>第24条第9項に基づく時短要請に係る施設となる。興行施設の用途毎に、その特徴を踏まえ、より安全であることを評価することは、経済的にも重要なことである。

予測には、Wells-Riley Equation<sup>8~10)</sup> (5) 式を利用し、興行場の施設の用途の特徴を捉えた評価が可能かを検討する。

$$P = \frac{C}{S} = 1 - e^{-\frac{Iqpt}{Q}} \quad (5)$$

ただし、P:感染確率、C:感染ケース、S:感染可能性のあるケース、I:感染者数(person)、q:クオンタ発生量(Quanta/h)、p:呼吸量(m<sup>3</sup>/h/person)、t:滞在時間(h)、Q:換気量(m<sup>3</sup>/h)

この式に使用される換気量 Q は瞬時一様拡散を前提としており、前述したとおり、気積の大きな

劇場空間にはこのまま適用することができない。中央式空調なのか個別分散式空調なのかによっても値が異なると推定される。中央式空調の場合は、RA 率（一般には 0.85）をどこまで下げられるか、個別分散空調の場合は、OHU の熱交換器の有効換気量率や全熱エレメントの粒子移行率（特にロータリー式の場合は要注意）も加味した予測が求められる。そのほか、空気清浄装置（HEPA フィルター、ULPA フィルターや電子集塵、UVGI など含む）の効果も検討には含めて考える必要があると思われる。

吹出口および排気口の位置は、通常、場内の気流性状に大きく影響する。吹き出し位置と風量を把握した上で空間濃度分布を測定し、その実態を把握するとともに、CFD による気流解析を行うことで様々な状況をシミュレーションできる。

今回の検討では、一般的な空調方式である中央式空調と個別分散空調の2種類について、その特徴に基づいた予測式の検討を行った。

図 14、図 15 に各々中央式空調、個別分散空調の場合の換気状況等の概念図を示す。また、これらを加味した Wells-Riley Equation を各々(6)、(7)式に示す。

中央式空調の場合の修正 Wells-Riley Equation

$$P = 1 - e^{-\frac{I(q+RA\cdot Q)\cdot pt}{Q}} \quad (6)$$

ただし、RA:排気再利用率(0-1)

個別分散空調の場合の修正 Wells-Riley Equation

$$P = 1 - e^{-\frac{I(q+(1-\eta)+\gamma)\cdot Q\cdot pt}{Q}} \quad (7)$$

ただし、η:有効換気量率(0-1)、γ:全熱交換器経由再移行率(0-1)

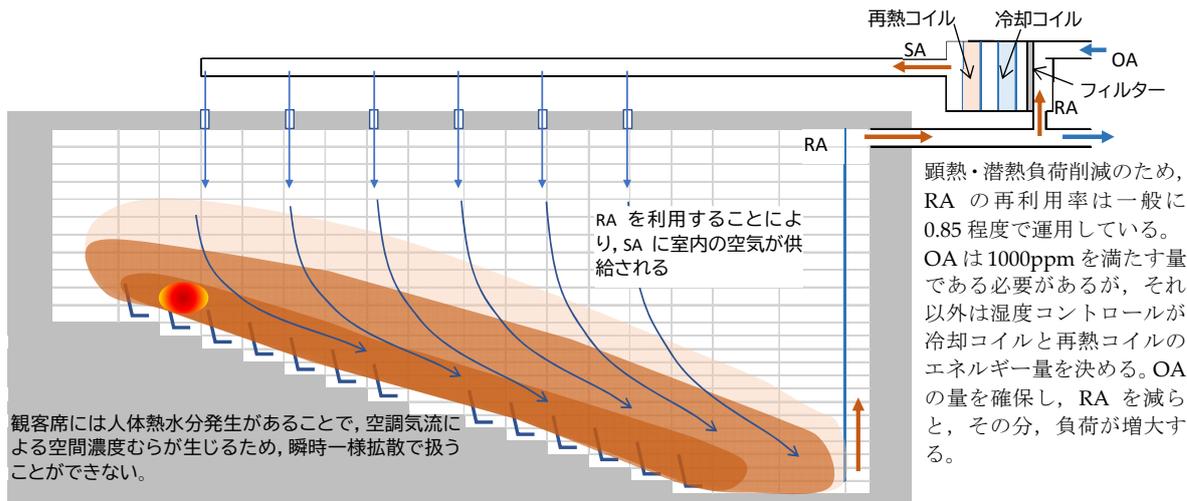


図 14 中央式空調における劇場内の換気状況等評価

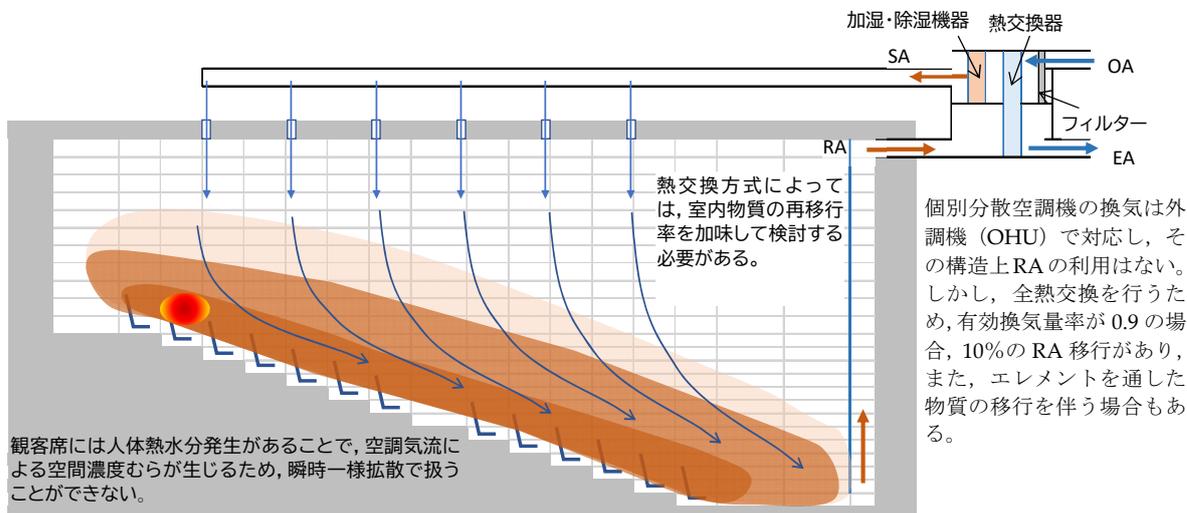


図 15 個別分散空調における劇場内の換気状況等評価

以上のような条件を踏まえた換気状況等を評価可能なモデルを構築することが最終的な目標である。図 14、図 15 に示した風向は、例であり、このほかにも、天井吹出、天井吸込み（排気）等、多様な方法が見られる。また、空調設備の温湿度処理により、同一風量でも、潜熱負荷すなわち運用コストや設備稼働状況にも影響を及ぼし、延いては空気環境にも波及することが想定される。従って、各々の省エネ性能の把握も必要となる。

再熱も必要であるため省エネ性能は高くなく、また、排気空気を再利用する仕組みである。一方、外気処理を分離するビルマルチ等の個別分散方式空調システムは、ヒートポンプの性能によっては省エネになる可能性もある。そこで、制御方法をパラメータとした空調機負荷の試算を行った。

興行場の施設の用途によっては、観客数が多いため、潜熱負荷が大きくなることがある。空調機負荷を低減させるためには外気負荷（特に潜熱負荷）を小さくすることが求められる場合もある。

### C2.3. 外気導入量と負荷との関係

中央式空調で冷却コイルを用いる従来タイプは、

#### C2.3.1. 計算条件

計算条件を以下に示す。

室内 26℃ 50% (10.499 g/kgDA)、外気 33.6℃ 18.1 g/kgDA (54.1%) 東京 (t-h 基準)  
 床面積 1500m<sup>2</sup> (100 人収容、面積密度 1.5m<sup>2</sup>/人)、天井高さ 3、6、9m  
 一人当たり発生熱量 75W、水分発生量 30g/h、呼気 CO<sub>2</sub>発生量 15L/h/person

### C2.3.2. 一人当たり外気導入量が負荷に与える影響

潜熱負荷を削減するため OA と RA を混合するが、一般に OA 比率 (新鮮外気の導入量) は SA 全体の 15%程度であることが多い (すなわち排気空気(RA)を 85%利用) が、SA を全量 OA とする場合もある。この場合、当然のことながら OA が増加すると負荷が大きくなり省エネとならないことが一般的には知られている。そこで、本検討では、20,000m<sup>3</sup>/h を基準として、SA を 3,000m<sup>3</sup>/h、7,500m<sup>3</sup>/h、とした場合の顕熱・潜熱負荷、再熱負荷および除湿量を算出した(図 16)。また空間平均化として、CO<sub>2</sub>濃度も算出した。SA 風量を低減すれば省エネルギーになり騒音問題も解決できるが、空間の CO<sub>2</sub>濃度は上昇することが、一般的にはトレードオフの関係として成り立っている。衛生環境を確保しつつ省エネ性能を満たすためには、観客席まわりの空気流れの工夫が必要であろう。

### C2.3.3. 排気再利用率が外気負荷に及ぼす影響

一人当たりの換気量として外気導入量を固定し、OA 比を変化させた場合について試算した。通常、OA 比が大きくなると冬期であれば顕熱負荷が、夏期であれば潜熱負荷が増えるが、ここでは OA 量が固定のため、顕熱負荷、潜熱負荷、除湿量は同一となる。一方、SA が減ると、当然ながら再熱負荷が大きく減少する。CO<sub>2</sub>濃度は外気量が同一のため変わらない。今回は、外気処理のみを対象として検討を行うため、熱負荷が別途加算される。個別分散空調により外気処理を分離できれば、省

表 2 SA 風量をパラメータとした負荷比較

| ケース | OA 比     | SA(m <sup>3</sup> /h) | 一人当たり外気導入量(m <sup>3</sup> /h/p) |           |
|-----|----------|-----------------------|---------------------------------|-----------|
| A1  | 0.15     | 3000                  | 4.5                             |           |
| A2  | 0.15     | 7500                  | 11.25                           |           |
| A3  | 0.15     | 20000                 | 30                              |           |
| ケース | 顕熱負荷(kW) | 潜熱負荷(kW)              | 再熱負荷(kW)                        | 除湿量(kg/h) |
| A1  | 0.95     | 4.27                  | 11.14                           | 6.79      |
| A2  | 2.36     | 7.84                  | 27.85                           | 12.48     |
| A3  | 6.29     | 17.76                 | 74.28                           | 28.28     |

表 3 OA 風量を固定とし SA 風量をパラメータとした場合の外気負荷比較

| ケース | OA 比     | SA(m <sup>3</sup> /h) | 一人当たり外気導入量(m <sup>3</sup> /h/p) |           |
|-----|----------|-----------------------|---------------------------------|-----------|
| B1  | 0.15     | 20000                 | 30                              |           |
| B2  | 0.5      | 6000                  | 30                              |           |
| B3  | 0.8      | 3750                  | 30                              |           |
| ケース | 顕熱負荷(kW) | 潜熱負荷(kW)              | 再熱負荷(kW)                        | 除湿量(kg/h) |
| B1  | 6.29     | 17.76                 | 74.28                           | 28.77     |
| B2  | 6.28     | 17.76                 | 22.55                           | 28.77     |
| B3  | 6.28     | 17.76                 | 14.23                           | 28.77     |

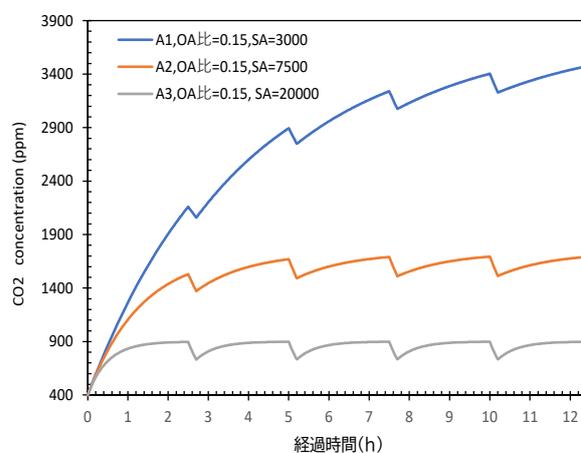


図 16 CO<sub>2</sub>濃度変化(A1,A2,A3)

エネ性能と両立できる可能性がある。

## D. 考察

### D1. 映画館場内空気環境測定

観客席位置 (4 隅および中央) で測定した温湿度および CO<sub>2</sub>濃度変動を事例的に把握した。調査の結果から、室内温度 28℃以下であること、相対湿度は 30~80%を常に保つこと、炭酸ガス濃度は

1500ppm 以下であることを、概ね満たしていることを確認した。さらに、粒子個数濃度の測定結果から、粒径が小さいほど減衰するのに時間がかかることを確認した。また、統計的にエフェクトと粒径の関係について分析した結果、エフェクトに応じて粒径が異なる可能性があることが示された。計測上の課題を整理して次年度につなげる。

## D2. 空調方式別の室内空気の形成に関する評価および空調負荷の検討

今回の試算ケースは、映画館だけではなく劇場、多目的ホール等も含めた大空間施設に最大収容人員が入っている条件でシミュレーションを行った。気積の大きな空間は、測定タイミングによっても濃度を捉えることが難しい。設計時は装置容量や給排気位置を決定するが、運用によって換気性状延いては空気衛生環境に影響を及ぼしうることもあるため、今後の検討から課題を整理したい。

## E. 結論

興行場の空気衛生に関する実態を明らかにするため、まずは2つの映画館（座席振動、圧縮空気、水噴霧、香り放出などのエフェクト機能のある映画館）を対象に空調・換気設備の測定を行い、その実態を明らかにするとともに、観客席における空気環境評価法について検討を進めた。実際の設備運転時における空気環境の実態を把握するためには、興行時に測定を行うことが必要である。しかし、換気性状等はCO<sub>2</sub>の呼気排出があるため、評価になじみにくい。そこで、大空間での呼気排出をトレーサーとする簡易な評価法を検討した結果、観客数および空間容積に伴う濃度の非定常変化を考慮することで居住域の換気量を同定することが可能であることを示した。以下に得られた知見をまとめる。

1) 同定した換気量と観客人数とから映画館内の絶対湿度を再現し、空間湿気容量を適切に見込むことでほぼ実測値に近い値を算出できる

ことを確認した。

- 2) 管理すべき空気環境調整の基準を概ね満たしており、良好な環境形成に努めている。また、多様な状況に対応できる空調設備を備えており、観客数に応じた運用が可能となっている。
- 3) 粒子個数濃度の測定結果から、エフェクト時は1.0、3.0 および10.0  $\mu\text{m}$  の粒子数が増加する傾向にあること、粒径が小さいほど減衰に時間を要することが確認できた。

大空間を対象とした空気環境評価の課題、また、設備運用や省エネルギーに起因する課題について以下の通り整理した。

- 1) 映画館等の実測評価：設備情報（採用している設備や運転、エフェクト付きの映画館は水噴霧量や空気質など）や運用状況の情報を得ながら、映画館の実測例を増やし、その実態を把握することが必要である。特に、居住域濃度の影響は高さ方向の分布や排気口での測定が必要であることから、これらの点の把握に努める。
- 2) 既存興行場の空調設備アンケート調査：基本的には中央式空調と個別分散空調の2パターンであるが、年代ごと、規模ごとに偏りがあると考えられる。また、空調設備は建築的な条件や地域条件、建設年代を反映した特殊解であることが多く、まずは既存興行場の空調設備状況を把握する必要がある。
- 3) 空間濃度性状の実験的把握：事例調査を重ねて実態を把握しつつ有益な知見を得るためにも、測定法の確立が重要である。少ないセンサーで空間濃度を把握する評価手法の開発、CFD等のシミュレーションとの併用などを今後進める。
- 4) 空気の質に関する評価法の構築：以上の検討を踏まえて、施設の用途毎に適する修正Wells-Riley Equationを構築する。

## F. 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

なし

G. 知的財産権の出願・登録状況（予定を含む）

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

<参考文献・引用文献>

- 1) 興行場法第 2 条, 第 3 条関係基準条例準則, 昭和 59 年 4 月 24 日環指発 42 号, 各都道府県知事・各政令市市長宛, 厚生省環境衛生局長通知, 平成 27 年 7 月 31 日健発 0731 第 4 号一部改正
- 2) 空気調和・衛生工学会規格 SHASE-S 115-2017 室内換気効率(規準化居住域濃度)の現場測定法, 公益社団法人 空気調和・衛生工学会 2017
- 3) 米沢義道・伊藤一典・牛山喜久: 呼気温を指標とした体温計測, 医用電子と生体工学第 26 巻第 3 号, 7-13, 1998.9
- 4) 山田義昭・桑原亮一・何平・水谷国男: 換気効率指標の設計応用に関する検討, 一高天井空間における基準化居住域濃度について, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 605-608, 2000.9
- 5) 鍵直樹: 一般室内環境及びクリーンルームの粒子状物質について, 室内環境 vol.23, No.2, 171-179, 2020
- 6) 4DX, <https://www.cj4dx.com/jp/>, 令和 4 年 5 月 24 日閲覧
- 7) MX4D, <http://www.mx-4d.com/>, 令和 4 年 5 月 24 日閲覧
- 8) Rudnick SN, Milton DK: Risk of Indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration, Indoor air 2003, 13, 237-245
- 9) Chenjiyu Liang et. Al.: Is It Safe to Reopen Theaters During the COVID-19 Pandemic? Frontiers in Built Environment, March 2021, Volume 7, Article 637277
- 10) Catherine J. Noakes and P. Andrew Sleight: Applying the Wells-Riley equation to the risk of airborne infection in hospital environments: The importance of stochastic and proximity effects, Indoor Air 2008, 17-22 August 2008, Copenhagen, Denmark - Paper ID: 42
- 11) SHASE-S 115-2017 室内換気効率(規準化居住域濃度)の現場測定法, 公益社団法人 空気調和・衛生工学会
- 12) 佐藤要・倉渕隆・竹内仁哉・吉野一・鳥海吉弘・池村尚也: 高応答性濃度測定機器を用いた動的定常濃度に基づくトレーサガス実験法に関する検討 part1. 定常濃度分布測定, pp.145-148, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集第 4 巻 (2019.9.18~20, 札幌)
- 13) 池村尚也・倉渕隆・竹内仁哉・吉野一・鳥海吉弘・佐藤要: 高応答性濃度測定機器を用いた動的定常濃度に基づくトレーサガス実験法に関する検討 part1. 空気齢分布測定, pp.149-152, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集第 4 巻 (2019.9.18~20, 札幌)
- 14) 宮嶋舞佳・倉渕隆・竹内仁哉・吉野一・井上洋輔・李時桓: 空気循環系における動的定常濃度に基づくトレーサガス実験法(その 4)CFD 解析と実験室実験によるトレーサガス実験法の妥当性検討, pp.25-28, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集第 4 巻 (2016.9.14~16, 鹿児島)
- 15) 池永徹博・絵内正道・荒谷登・林基哉: トレーサガスの濃度むらを利用した熱対流型換気の実測, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸) D-2, pp.609-610, 1992/08
- 16) 新型インフルエンザ等対策特別措置法, (平成二十四年法律第三十一号), 令和三年法律第三十六号による改正

