

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
研究分担者	林 基哉	北海道大学 大学院工学研究院	特任教授
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	上席主任研究官

研究要旨

映画館観覧場は天井が高く気積が大きい。空気清浄度を確保するために、換気量を確保することは重要であるが、観客数の増減のある大空間で常に一定量の換気を行うことは省エネルギー上非効率であり、観客数に応じた換気風量のデマンド調整やCO₂濃度制御も行われる。CO₂濃度制御は運転制御が容易な反面、気積が大きいためファン停止時間が長くなる傾向にある。このことが空間気流性状を変化させるとともに、空調機によって作り出される気流も相俟って、汚染物質濃度の高い場所を結果として作り出してしまう可能性がある。本研究では、観客の呼気排出CO₂をトレーサーとする簡易な換気評価法を用いて空気環境を確認するとともに、測定法の課題を明らかにすることを目的とする。

ここでは、2つの映画館を対象として上映中温湿度、CO₂濃度および浮遊微粒子個数濃度を測定・分析した。CO₂の濃度変化に関する微分方程式に実測CO₂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。そして、同定した換気量を観客数で除して一人当たり換気量を算出した結果、30m³/h/人の確保割合は、A映画館は上映時間中の31%、B映画館は48%となった。また、同定した換気量と観客人数および空間湿気容量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。

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、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、浮遊微粒子）の2点である。平時興行中の空気環境の衛生状態は、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せない空調制御が必要である。一方、感染症クラスター感染対策の観点では、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「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。」という規定があり¹⁾、空間内を淀みなく排気すること、また観客席が排気経路に入らないことがリスク低減のためにとっても重要である。また、4D上映のエフェクトに関する衛生管理基準は定められておらず、特に浮遊微粒子の観点での空気環境の実態把握も必要である。

本研究は、特に4D観覧場を有する映画館を対象に、その換気状況とエフェクトに伴う浮遊微粒子濃度との実態を調査し、高天井・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 観覧場を有する映画館を対象に換気状態に関する実測調査を行う。第一に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、及び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た連続測定を行う。

第2に、映画館観覧場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、そうした空間に適した換気評価法もしくは設計法に関する検討が必要である。本研究では、大空間の換気性能評価に関する課題点を整理した。また、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・感染リスク予測

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

映画館観覧場の換気状態・運転方法等の実態を把握するため、エフェクト機能を有する観覧場のある映画館2件（A映画館、B映画館）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回上映している。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

座席数	A 映画館		B 映画館	
	96		106	
上映回	上映時間 (min)	観客 (人)	上映時間 (min)	観客 (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

上映中の温湿度、CO₂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。しかし相対湿度は第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回目の上映で増加している。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回は同一演目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名であった。観客数と絶対湿度に相関関係は認められなかった。平均約2.3g/kgDAの加湿があった。

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みられる。相対湿度、絶対湿度の変化幅が大きいのは第3回目上映時であり、後述するCO₂濃度変化も考慮すると、途中から換気量が増大したことが要因であると推定できる。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. CO₂濃度変化と換気量推定

C1.2.1. A 映画館の CO₂濃度変化

図3にA映画館の8:00~24:00のCO₂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、徐々に濃度上昇していき、第5回終了時には約1000ppmに達する。9~10時の急激な低下は大風量換気が考えられる。1、3、5回目に濃度上昇傾向となるのは、換気量低下と観客数(20名前後と多い点)が原因である。また温度変動、CO₂濃度変動を見る限りA映画館は、VAV制御と考えられる。

C1.2.2. B 映画館の CO₂濃度変化

図4にB映画館の8:00~24:00のCO₂濃度変化を示す。開場時濃度の高さは測定班のセンサー設置の影響である。午前中は徐々に濃度が上昇していき、第2回目上映は観客数が56名ということもあって上映終了時には1000ppmを超える状態になっていた。休憩時には濃度低下するが、第3回目開始とともに再び濃度上昇に転じる。しかし第3回目中盤から濃度低下し、その後の休憩時間で再上昇、第4回目中盤まで濃度減少が続き、その後終了まで700ppm前後で推移する状況であった。これは手動制御が行われていた可能性が高い。

C1.3. 濃度平衡式からの換気量簡易推定

映画館観覧場は、気積大きいことに起因する応答遅れがあるため、濃度応答遅れのある変化をする。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むら²⁾が想定されるが、まずは客席位置における換気量簡易推定を行う。劇場内CO₂濃度C_{in}は外気CO₂濃度C_{out}、呼吸によるCO₂発生量M(m³/h)、呼吸密度ρ_b(kg/m³、呼吸温度35℃と仮定³⁾)、外気密度ρ_{out}(kg/m³)、劇場内空気密度ρ_{in}(kg/m³)、劇場の気積をV(m³)、観客数p(人)、一人当たりの呼気CO₂排出量M(15L/h/person)、外気供給量Q_{in}(m³/h)、室内排気量Q_{out}(m³/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_{out}(m³/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CO₂排出量MからCO₂発生量を算出し、実測したCO₂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映画館の同定結果を図5-1に、B映画館の同定結果を図5-2に示す。

濃度変動を再現する風量で再度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)に示す。B映画館は濃度が急激に下がる9~10時に2000~8000m³/hの大容量換気を行ったと推定され、その後は200~750m³/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。観客数は上映回によって変動しているため、こ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。一人当たり30m³/hの換気量を満たしているのは、A映画館の場合、上映時間全体(705分間)の31%、B映画館の場合、上映時間全体(810分間)の48%であった。なお、この結果は座席位置の濃度(居住域濃度)である。実際の換気風量では設計値通りであったとしても、室内換気効率によって結果は大きく異なる。

C1.4. 推定換気量を用いた絶対湿度変動予測

空気中水分は換気に伴って移動するため、CO₂

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 程度の換気量になると、前述した家具・什器等や空気を含めた湿気容量が無視できなくなる。

水分発生量として、観客の不感蒸泄発湿量を考慮し、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。

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

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。

A 映画館の場合、外調機加湿分は $\Delta X=0\sim 1\text{g/kgDA}$ 、空間湿気容量は空気の 2～4 倍の組み合わせで実測した観覧場内の p 絶対湿度をほぼ再現できることがわかる。B 映画館は、16 時以降の状況を見ると、外調機加湿 $\Delta X=0\sim 0.5\text{g/kgDA}$ 、空間湿気容量は空気の 2～4 倍の組み合わせで最も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。

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、こうしたエフェクトが 60 分間に 10 回あれば合計 1000g/h の加湿になる。

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測定を実施した。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。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増加する時間帯がある。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。 $1.0\mu\text{m}$ 、 $3.0\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ の粒子個数濃度は、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エアロゾルの特徴を示すと考えることができる。また、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てみたのが図 9-1 および図 9-2 である。粒径が小さいほど減衰するのに時間を要しており、空中浮遊していることがわかる。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が明確に確認できず、また粒子個数濃度も高めである。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い。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。

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⁵⁾。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。

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 を下回っている。

C1.6. 4D 上映映画館の環境効果技術

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」⁶⁾、もう一つはアメリカ Media Motion 社の「MX4D」⁷⁾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⁶⁾、MX4D で 10 種類⁷⁾ がある。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、MX4D の場合、「香り」、「風」、「水しぶき」、「エアブラスト」の 4 種類である。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というが、その情報を直接提供していただくことが困難であったため、環境計測時に測定者がエフェクト記録を行った。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図 13-1~4 に示す。

今回は、統計的手法でエフェクトと粒径密度の関係を簡易推定した。具体的な手順を示す。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。なお、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。

A 映画館の第 1 演目のエフェクト「水」の粒径は $3.0\mu\text{m}$ 、 $10.0\mu\text{m}$ 、エフェクト「煙」は $5\mu\text{m}$ で統計的有意差があり、第 2 演目のエフェクト「水」は $0.3\mu\text{m}$ 、エフェクト「煙」は $0.3\mu\text{m}$ 、 $10.0\mu\text{m}$ 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 、 $10.0\mu\text{m}$ 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。

C2. 空調方式別の感染リスク評価および空調負荷の検討

C2.1. 大空間の換気性能評価

映画館は劇場タイプの形式であり、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がある。

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、一定精度で換気量（漏気量含む）を把握することが可能である。一方、劇場タイプのような大空間も濃度むらが生じなければ同様な精度が期待できるが、濃度むらを解消することは難しく、一般には空気齢などの換気効率を前提とすることが求められる²⁾。

C2.2. 感染症対策としての空気質評価と感染リスク予測

観覧場は上演プログラムによって 1 時間以上の滞在となり、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¹⁴⁾第 24 条第 9 項に基づく時短要請に係る施設にリストアップされている。すなわち、劇場や映画館等の興行場の衛生管理基準を検討するうえで、感染症対策は重要である。

感染リスク予測には、Wells-Riley Equation⁸⁾ -
¹⁰⁾が広く利用されている (5) 式。

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

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(m³/h/person)、t:滞在時間(h)、Q:換気量(m³/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、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。中央式空調の場合は、RA率(一般には0.85)をどこまで下げられるかが感染リスクに影響し、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感染性粒子移行率(特にロータリー式の場合は要注意)も加味したリスク予測が求められる。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なども含む)の効果も基準検討には含めて考える必要がある。

吹出口および排気口の位置は、劇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が必要である。現行の空調方式を踏まえながら、①既存建築物の衛生管理基準を考えるとともに、②新規に建設される興行場の空調設備設計に資するガイドラインの策定が必要である。

以上より、空調方式として中央式空調および個別分散空調の2種類について、その特徴に基づいた感染リスク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・感染リスクモデルの概念図を示す。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

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

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

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

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)

映画館、劇場等の大空間で実験的評価を行うことが図14、15に示すモデル構築には欠かせない。なお、図14、図15に示した風向は、一般的な吹出位置を想定したが、実際には天井吹出、天井吸込み(排気)など、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。従って、各々の省エネ性能の把握も必要である。

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、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ため感染リスクを高める危険性がある。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を試算した。

映画館の特徴は、観客席及び観客数が多いため潜熱負荷が大きいことである。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重要である。

C2.3.1. 計算条件

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 1500m² (100人収容、面積密度 1.5m²/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 CO₂ 発生量 15L/h/person

映画館を想定し、2.5時間満席状態、次の幕まで12分間休憩と仮定している。

C2.3.2 一人当たり外気導入量が負荷に与える影響

一人当たりの換気風量 $30\text{m}^3/\text{h}$ は外気導入量であり空調機の吹出風量 (SA) ではない。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。感染リスクを低減させるためには SA を全量 OA とすれば良いが、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。そこで、 $20000\text{m}^3/\text{h}$ を基準として、SA を $3000\text{m}^3/\text{h}$ 、 $7500\text{m}^3/\text{h}$ 、と低減させた場合の顕熱・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 CO_2 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、 CO_2 濃度は上昇し、結果として感染リスクは高まる。衛生環境を確保しつつ省エネ性能を満たすために、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

一人当たりの外気導入量を $30\text{m}^3/\text{h}$ に固定する。そのうえで 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大きくなるが、今回の条件では顕熱負荷、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_2 濃度は外気量が同一のため変わらない。

D. 考察

D1. 映画館場内空気環境測定と換気量・感染リスク予測

実測により、映画館内の換気性状について検討し、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換気量を一定精度で同定することが可能であることを示した。また、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する方法を示した。今回の検討では、空気の有する湿気容量の 2 倍程度の空間湿気容量 (カーペ

ットや座席等のファブリック) を見込むことで、ほぼ妥当な値を算出できることを確認した。

一方、一人当たり $30\text{m}^3/\text{h}$ の換気量確保という観点では、推定した換気量をもとに判定すると、A 映画館は上映時間中の 31%、B 映画館は 48% の時間しか満たしていないことがわかった。

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、統計的に分析しエフェクトと粒径の関係について分析した。

映画館ごとに定格換気風量、吹出位置、排気位置が異なり、また運転方法の考え方も異なることから場内の気流性状にも差異が生じているはずで、その影響は無視できない。浮遊微粒子個数濃度測定は、今回、右前の座席位置での測定であったが、測定位置によっても異なるはずである。特にウイルス等の粒径の小さな粒子が除去されずに空中を漂うのであれば、エアロゾル感染防止の観点から今後より詳細な検討が必要である。

D2. 数値シミュレーションによる検討

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しているが、実際には常に満席状態とは限らないし、換気風量も一定値で制御しているわけではない。つまり CO_2 濃度を測定して基準値を下回っていたとしても空気環境の安全性を担保することにはならない。また、気積の大きな空間は、測定タイミングによっても濃度が異なる。風量設定についても、一人当たり換気量は OA で決めなくてはならないにも関わらず SA 風量で判断してしまう危険性もある。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を念頭に置く必要である。

E. 結論

興行場の空気衛生について、まずは 2 つの 4D 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把握には、興行時に測定を行うことが不可欠である。しかし、換気性状等は CO₂ 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。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) 一部の要素を除き、凡そ興行場法条例準則に定められた空気管理基準を満たしていた。しかし、満員状態での測定ではないため、その実態は設備の稼働状況に依存する。
- 3) 一人当たりを 30m³/h を基準とした換気量は、A 映画館は上映時間中の 31%、B 映画館は 48% が満たすことがわかった。
- 4) 粒子個数濃度の測定結果より、エフェクト時は 1.0, 3.0 および 10.0 μm 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。

こうした感染症対策や設計に資することを含め、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：今回は 2 件の映画館で実態評価を行ったが、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ることが必要である。特に、居住域濃度の影響（つまり空間濃度むらの存在）は高さ方向

の分布や排気口での測定が必要である。

- 2) 感染リスク評価法の構築：以上の検討を踏まえて、映画館（を含めた劇場建築物、興行場）に適する修正 Wells-Riley Equation を構築した。

F. 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

- 1) 本間義規、開原典子、柳宇、林基哉、菊田弘輝、島崎大、戸次加奈江、伊庭千恵美、建築物の空調換気設備と環境衛生の実態その 5 映画館内浮遊微粒子の空間挙動の把握、第 81 回日本公衆衛生学会総会；2022.10.7-9；甲府。P.441.

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・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

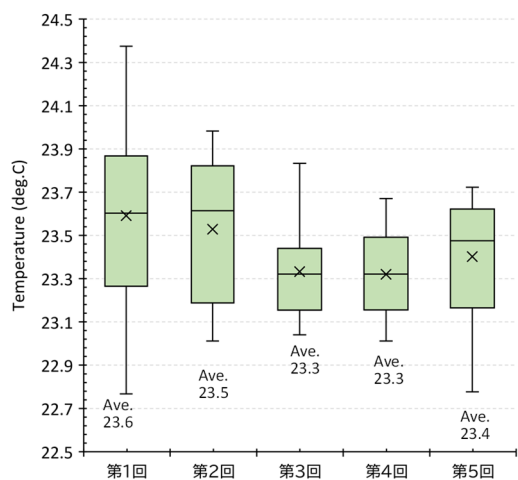


図 1-1 A 映画館の上映回毎の温度統計量

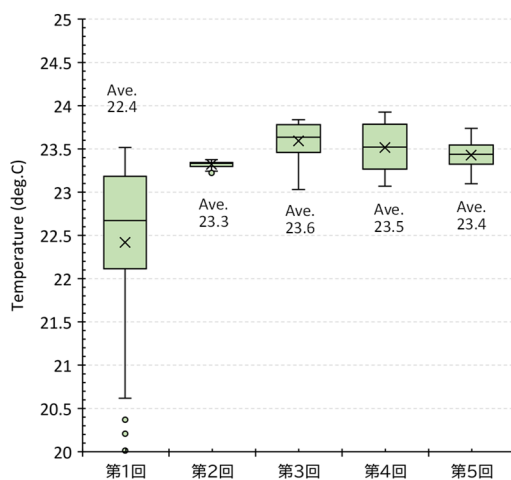


図 2-1 B 映画館の上映回毎の温度統計量

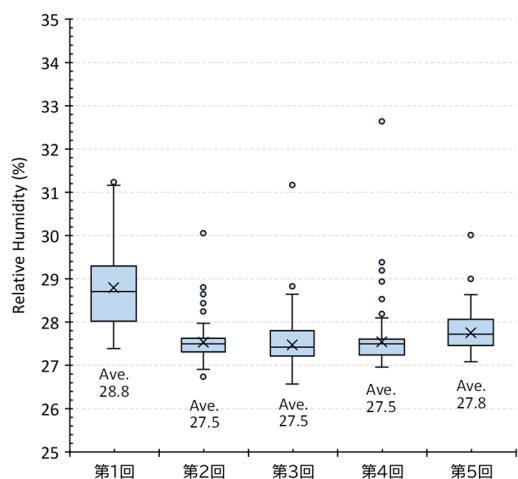


図 1-2 A 映画館の上映回毎の相対湿度統計量

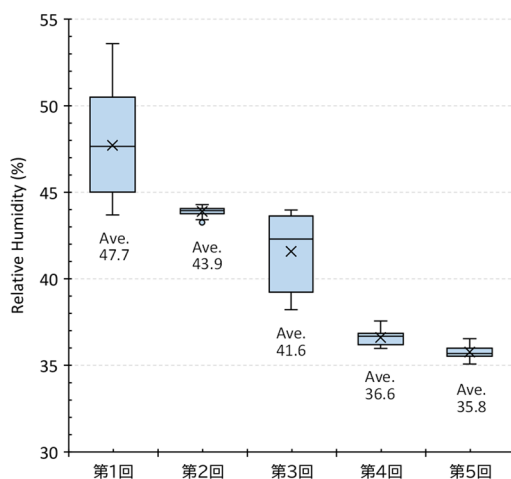


図 2-2 B 映画館の上映回毎の相対湿度統計量

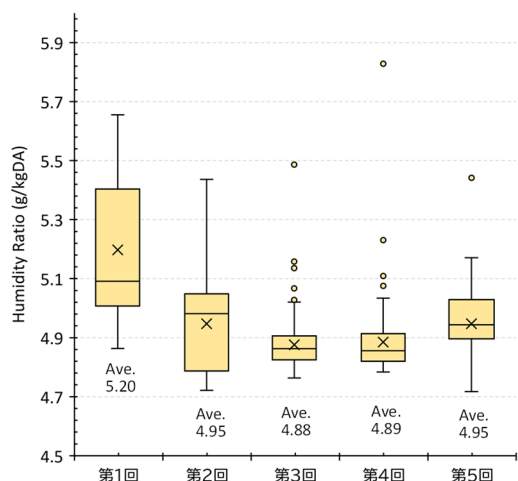


図 1-3 A 映画館の上映回毎の絶対湿度統計量

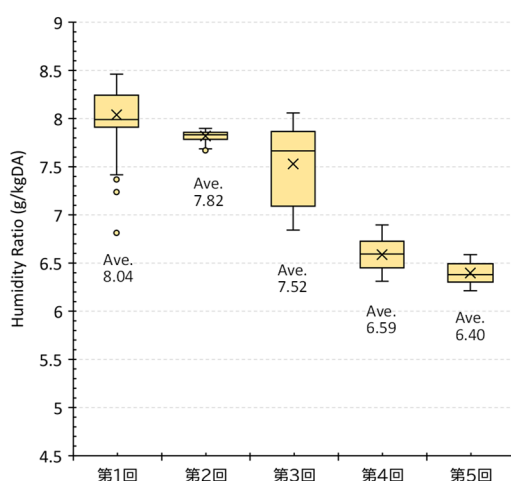


図 2-3 B 映画館の上映回毎の絶対湿度統計量

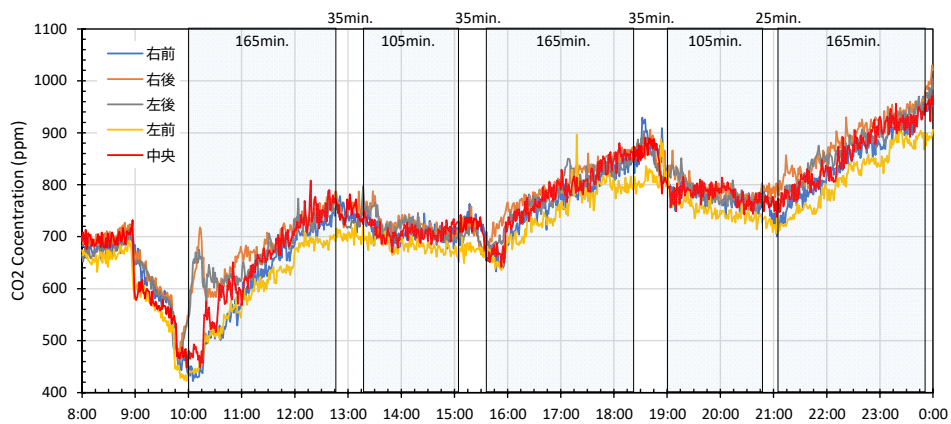


図 3 A 映画館の CO₂ 濃度変化

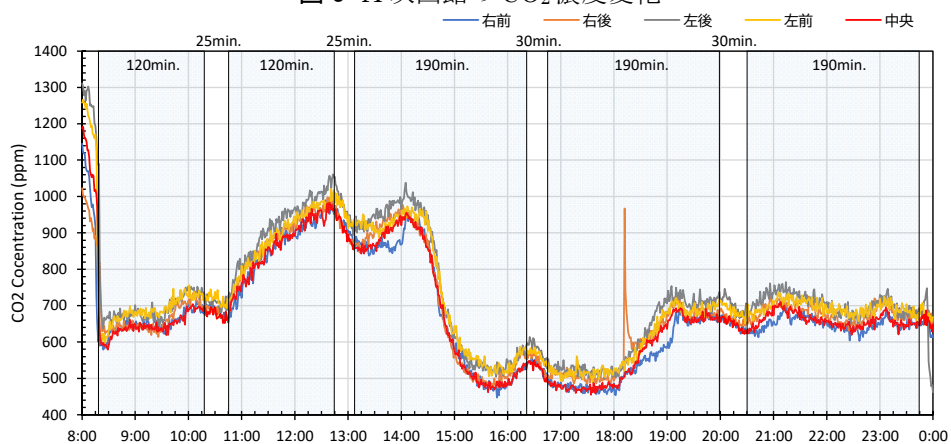


図 4 B 映画館の CO₂ 濃度変化

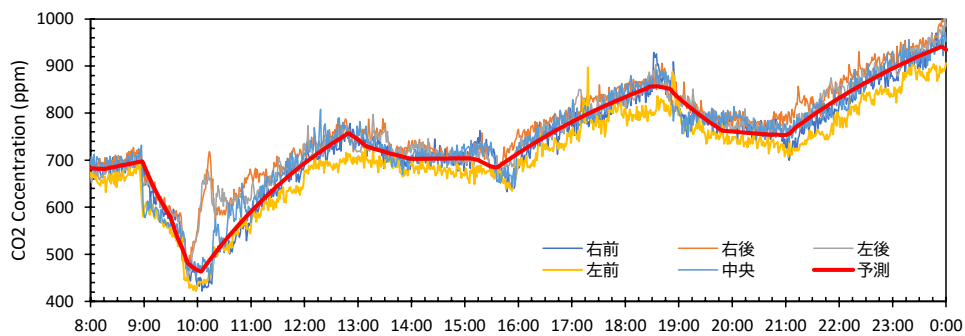


図 5-1 A 映画館の CO₂ 濃度同定結果

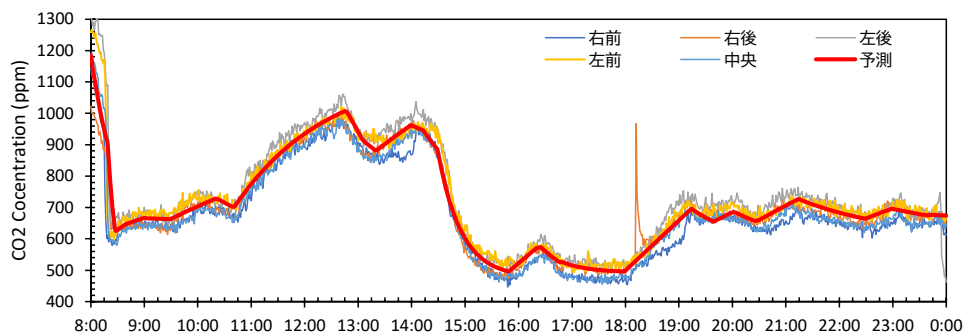


図 5-2 B 映画館の CO₂ 濃度同定結果

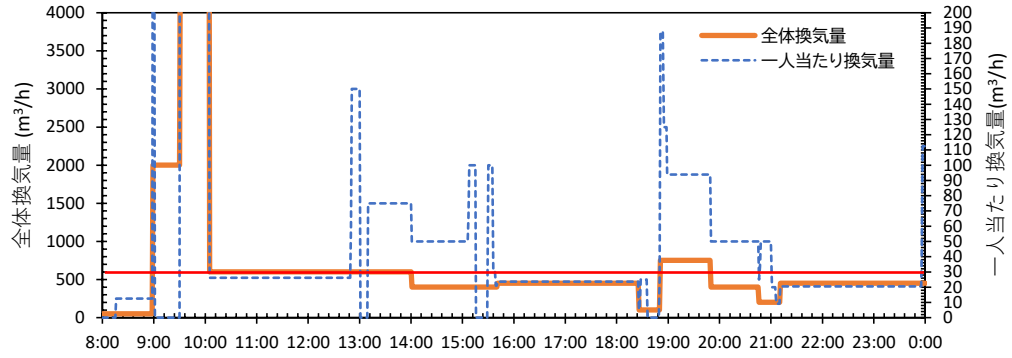


図 6-1 A 映画館の全体換気量および一人当たり換気量推定結果

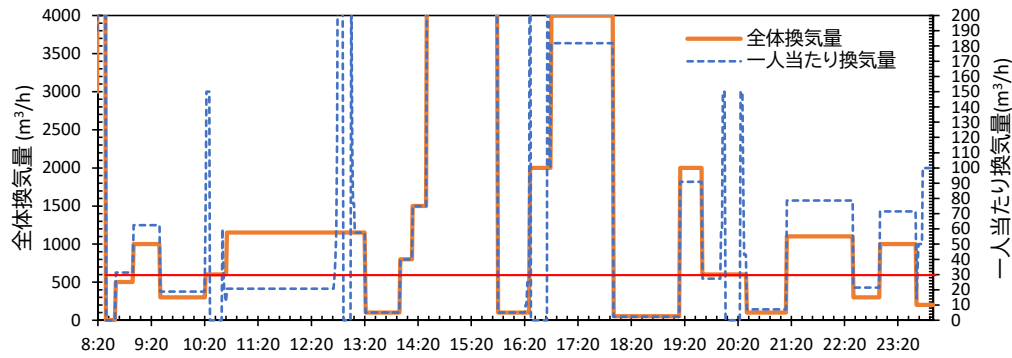


図 6-2 B 映画館の全体換気量および一人当たり換気量推定結果

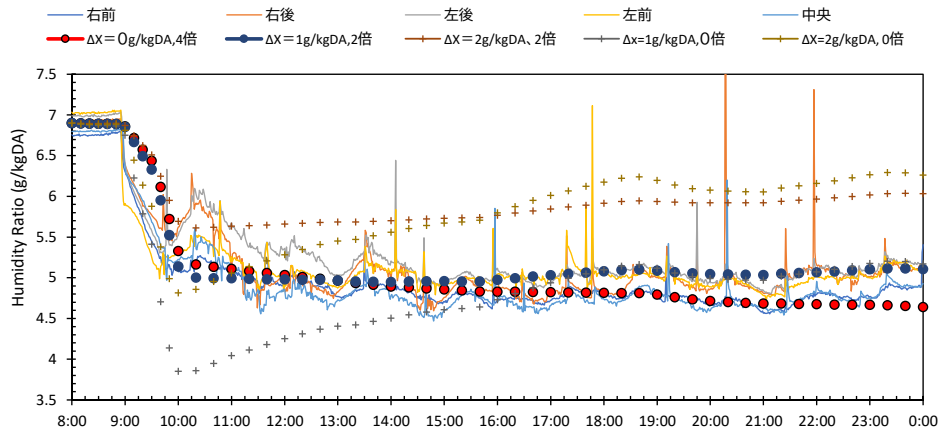


図 7-1 推定換気量を用いた A 映画館の絶対湿度同定結果

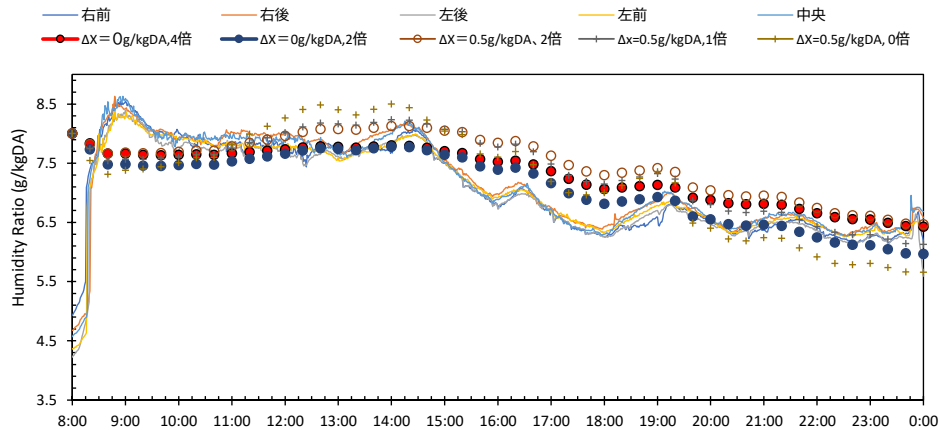


図 7-2 推定換気量を用いた B 映画館の絶対湿度同定結果

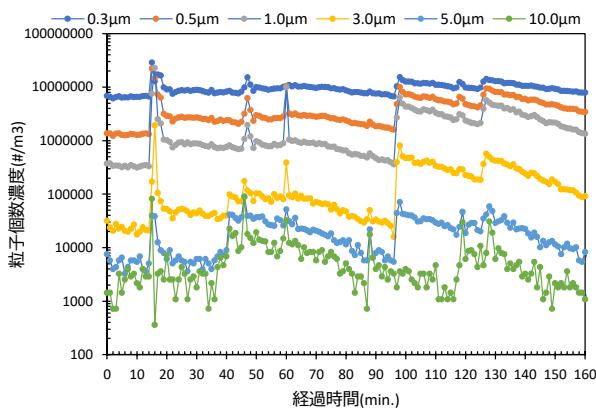


図 8-1 A 映画館第 1 回目の粒子個数濃度

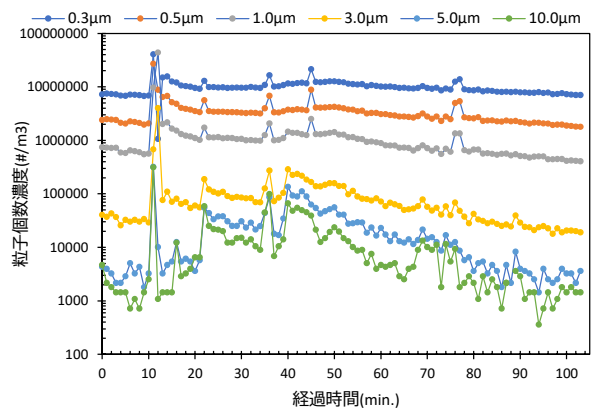


図 8-2 A 映画館第 2 回目の粒子個数濃度

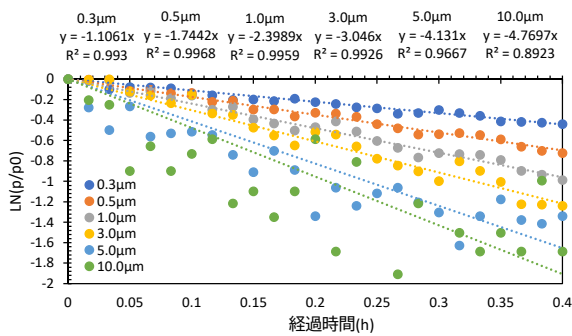


図 9-1 A 映画館第 1 回目 130~160 分の粒子個数濃度減衰

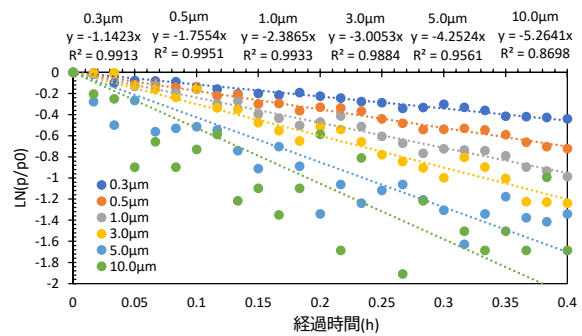


図 9-2 A 映画館第 2 回目 80~100 分の粒子個数濃度減衰

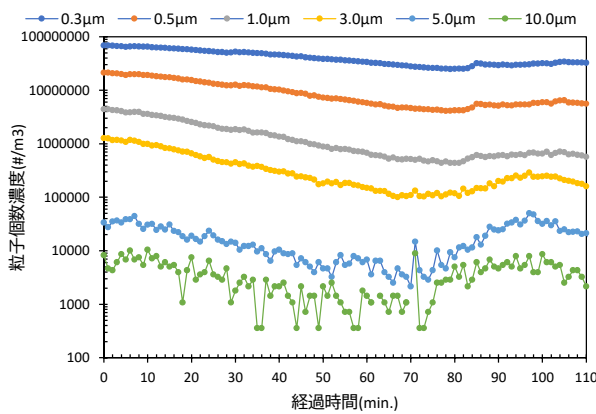


図 10-1 B 映画館第 1 回目の粒子個数濃度

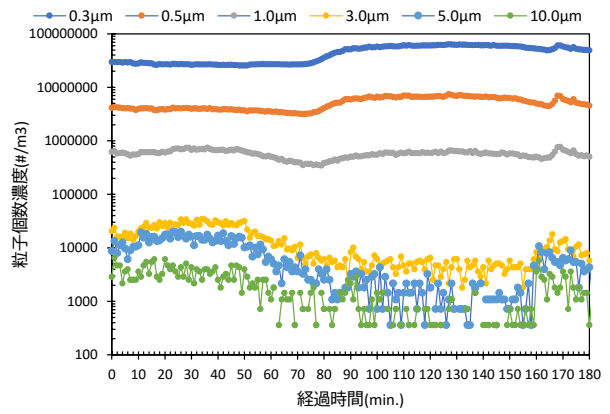


図 10-2 B 映画館第 3 回目の粒子個数濃度

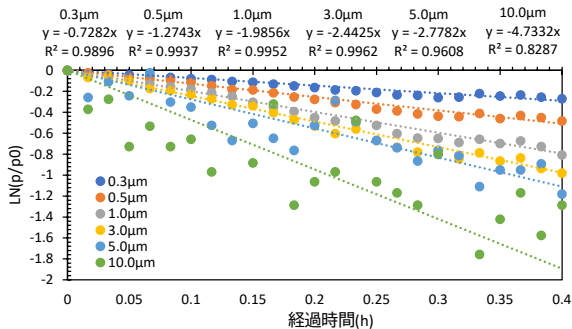


図 11-1 B 映画館第 1 回目 10~40 分の粒子個数濃度減衰

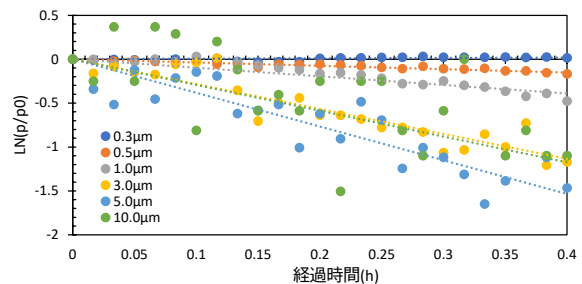


図 11-2 B 映画館第 3 回目 40~70 分の粒子個数濃度減衰

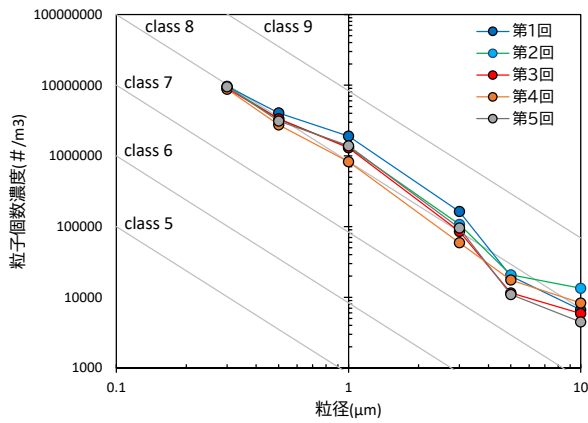


図 12-1 A 映画館の第 1～5 回の清浄度比較

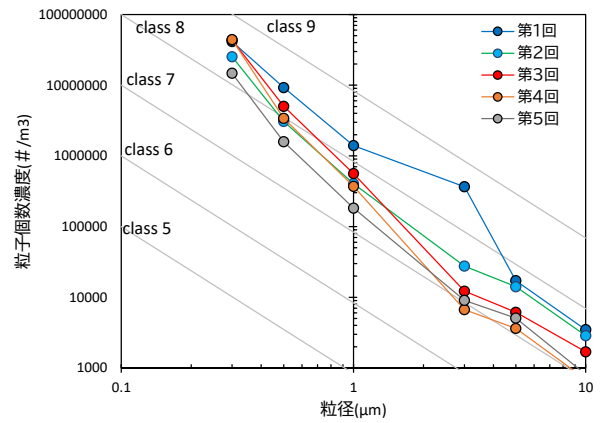


図 12-2 B 映画館の第 1～5 回の清浄度比較

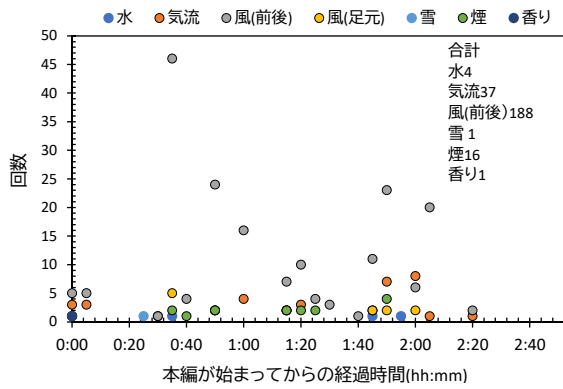


図 13-1 A 映画館第 1,3,5 回目演目のエフェクト記録

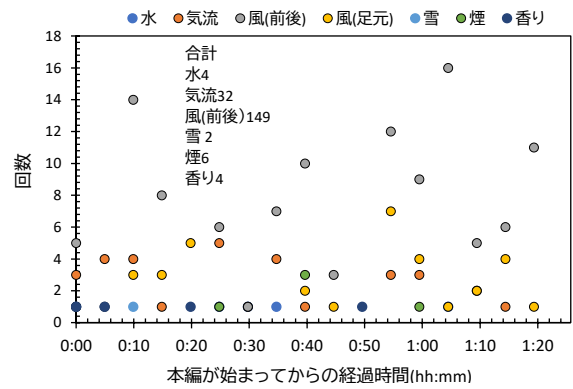


図 13-2 A 映画館第 2,4 回目演目のエフェクト記録

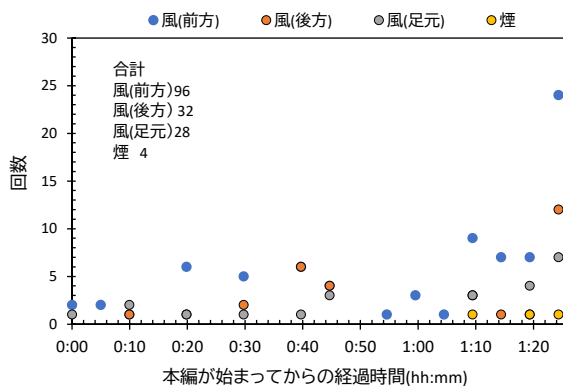


図 13-3 B 映画館第 1,2 回目演目のエフェクト記録

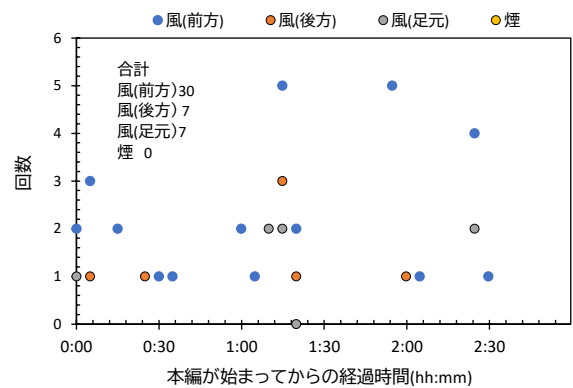


図 13-4 B 映画館第 3,4,5 回目演目のエフェクト記録

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 2-3 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 2-5 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 ***

表 3 SA 風量をパラメータとした負荷比較

ケース	OA 比	SA(m³/h)	一人当たり外気導入量(m³/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 4 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(m³/h)	一人当たり外気導入量(m³/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

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 2-4 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 *

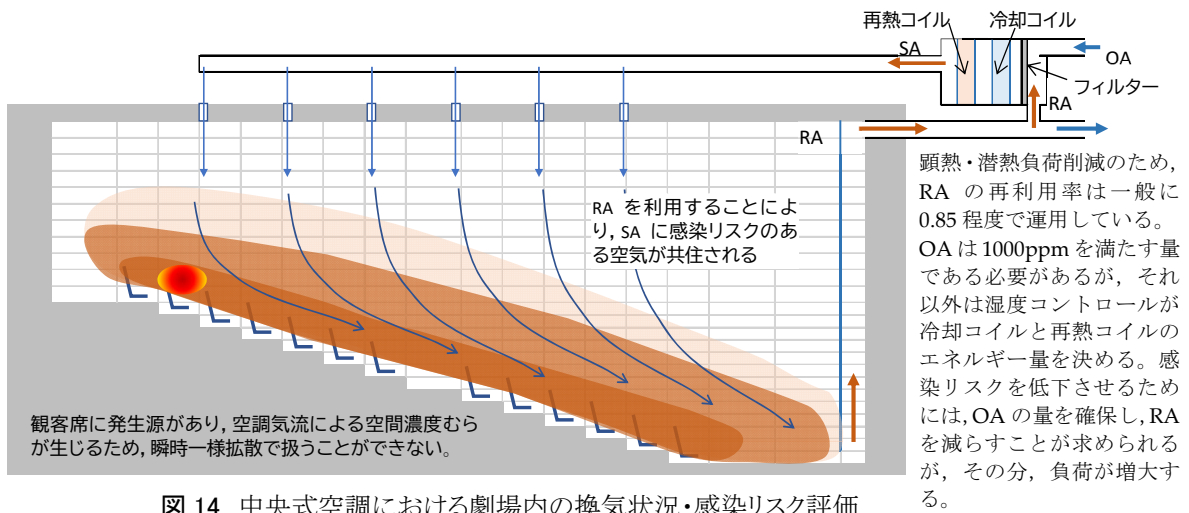


図 14 中央式空調における劇場内の換気状況・感染リスク評価

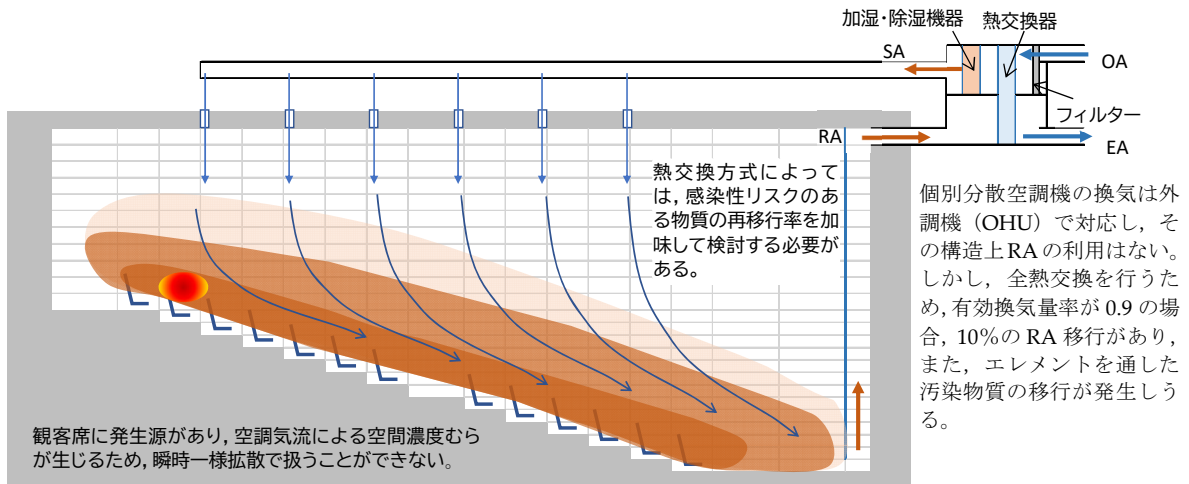


図 15 個別分散空調における劇場内の換気状況・感染リスク評価

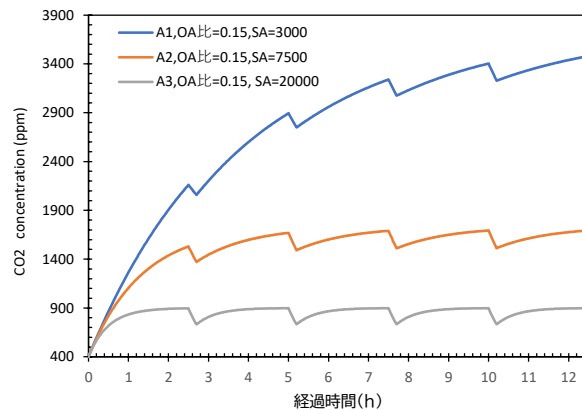


図 16 CO₂ 濃度変化 (A1, A2, A3)