

興行場における衛生的な環境確保のための研究  
COVID-19 の影響を踏まえた興行場の換気対策

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
研究協力者	菊田 弘輝	北海道大学 大学院工学研究院	
研究協力者	山岸 拓也	国立感染症研究所	
研究協力者	黒須 一見	国立感染症研究所	

研究要旨

興行場の室内空気環境の特徴を踏まえ、COVID-19 の浮遊飛沫（エアロゾル）感染対策に関するエビデンス整理、浮遊飛沫感染リスクの分析を行った。換気性状と感染リスクの関係は定量的に把握出来ていない。CO<sub>2</sub> 濃度は換気量に左右され、エアロゾル濃度と関係する。温湿度は、インフルエンザウイルスの不活化に影響するとされている。特定建築物の室内空気環境は、2000 年以降に CO<sub>2</sub> 濃度の上昇傾向、冬期相対湿度の低下傾向があり、感染防止の観点で好ましくない。

感染リスクは、建築物、空調換気設備、維持管理、空気清浄やマスクなどの感染対策、感染者の行為や症状、被感染者の行為、滞在時間等の影響を受けるが、換気量が少なく、行為の代謝量が多い場合に感染リスクが高くなる。興行場では用途によって異なる行為があり、感染リスクに大きな幅がある。興行場においては、用途に応じた換気対策が必要である。

エアロゾル感染に関するエビデンスとして、政府機関による換気に関する啓発、夏期の熱中症、冬期の寒さ対策を踏まえた換気対策、WHO 等の国外情報等の建築環境対策と関連する知見を整理した。これらの知見は、今後のパンデミック時の空調換気運転のあり方、建築設備の設計と維持管理に関する課題を示した。

特定建築物の興行場に分類されるアイスアリーナにおける空調換気性状と COVID-19 集団感染との関連性、エアロゾル感染対策の立案と効果検証を行った。アイスアリーナには、氷の維持、結露や曇りの防止、霧の発生防止に配慮した設計が行われ、特有の空調換気設備と運転制御が行われている。アイスリンク内で選手などから発生したウイルスが冷氣溜まり中で蓄積し、透明防護パネルがない選手ベンチから流出して客席に拡散することを確認した。

興行場の用途、空調換気性状は多様であるため、感染リスクにも大きな差がある。多様性を踏まえた空調換気設備の設計と運転制御、感染対策が必要である。

A. 研究目的

2019 年 11 月に中国武漢市で「原因不明のウイルス性肺炎」が確認され、2020 年 3 月 11 日に WHO はパンデミック相当との認識を示した。我が国では、2 月 3 日に横浜港に寄港したクルーズ船で多数の感染者が確認され、その後、屋形船、ス

ポーツジム、病院など様々な場所でクラスター感染が発生した。厚生労働省は、2 月 25 日に「クラスター対策班」を設置し、3 月 1 日にクラスター感染に共通する条件として「換気が悪く、人が密に集まって過ごすような空間、不特定多数の人が接触する恐れが高い場所」を挙げ、換気対策の必

要性を世界に先駆けて示した<sup>1)</sup>。6月17日に「熱中症予防に留意した『換気の悪い密閉空間』を改善するための換気について」<sup>2)</sup>を示し、11月27日に「冬場における『換気の悪い密閉空間』を改善するための換気の方法」<sup>3)</sup>を示し、必要換気量を満たしているかを確認する方法として、室内の二酸化炭素濃度の測定を挙げた。

1970年に制定された「建築物における衛生的環境の確保に関する法律（建築物衛生法）」では、室内の二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）濃度基準値が1000ppmとされており、特定建築物においては室内濃度の定期測定が行われ、その適合に向けて自治体が監視指導を行っている<sup>4)</sup>。CO<sub>2</sub>濃度の基準はCO<sub>2</sub>自体の人体影響によって定められているものではない。CO<sub>2</sub>と共に発生する様々な空気汚染物質の人体影響を踏まえて、室内の空気環境を総合的に維持するための指標として定められている。従って、換気量を確保しこの基準値を持たすことで、新型コロナウイルスの感染をどの程度まで抑制できるかは明らかになっておらず、今後の調査研究が必要となっている。また、建築用途によって、COVID-19の感染リスクが異なると考えられるが、これまで建築用途を考慮した対策に関する研究は少ない。本研究では、興行場の室内空気環境の特徴を踏まえて、適切な換気対策を実施することを目標に、以下の研究を行った。

#### **A1. 浮遊飛沫感染に関するエビデンス整理**

室内空間中の飛沫の挙動と感染、室内環境とエアロゾル感染の関係、国内外の対策の動向に関するエビデンスを整理する。

#### **A2. 興行場における浮遊飛沫感染リスクの分析**

A.1.に基づいて、浮遊飛沫感染機序を想定した上で、興行場内でも行為を設定して、COVID-19の感染リスクを想定する手法を策定する。さらに、室内空気環境の指標であるCO<sub>2</sub>濃度と感染リスクの関係に関する試算を行う。

#### **A3. 浮遊飛沫感染対策に関するエビデンス整理**

2022年度までの国内におけるCOVID-19に対する建築環境対策と関連する知見を整理した。

#### **A4. 集団感染と浮遊飛沫感染対策に関する調査**

特定建築物の興行場に分類されるアイスアリーナにおける空調換気性状とCOVID-19集団感染との関連性、エアロゾル感染対策の立案と効果検証を行った。アイスアリーナには、氷の維持、透明防護ガラスの結露や曇りの防止、霧の発生防止などの特有の設計条件があり、特有の空調換気設備と運転制御が行われている。アイスアリーナ特有の換気性状と大規模集団感染の関係に関する調査と換気対策効果に関する検証を行った。

### **B. 研究方法**

#### **B1. 浮遊飛沫感染に関するエビデンス整理**

COVID-19に与える、室内環境の影響に関する国内外の文献、厚生労働省「新興・再興感染症のリスク評価と危機管理機能の実装のための研究」等、国土交通省「ポスト COVID-19における空調・換気・通風計画のあり方検討委員会」等、日本建築衛生管理教育センター「新型コロナウイルス対策検討委員会」による調査研究による知見、国内学会（日本公衆衛生学会、日本建築学会、空気調和・衛生工学会、臨床環境医学会等）、海外の調査研究（世界保健機関 WHO、米国疾病予防センターCDC、欧州空調・換気設備学協会 REHVA 等）の見解を収集し整理した。

以上の知見に基づいて、換気と湿度の関係性、エネルギー消費等の関連要因を踏まえた考察を行い、COVID-19をはじめ従来のインフルエンザ等の感染症対策のための室内湿度基準の考え方について検討した。最後に、建築物衛生法の空気環境基準に基づく換気空調設備の設計や維持管理における新興・再興感染症への対応のために必要となる研究課題を抽出した。

## B2. 興行場における浮遊飛沫感染リスクの分析

室内環境中の感染対策の基本である換気及び空気清浄による浮遊飛沫濃度の抑制に注目した分析例を以下に紹介する。図 1-1 に、建築設備・維持管理と空間拡散感染の関係を示したフローを示す。建築設備の設計・施工、維持管理の状況が、換気量、捕集効率、室内温湿度に影響し、さらにはウイルスの減少率に影響する。温湿度の影響は、ウイルスの感染力低下（不活化）の速度に影響すると考えられるが、その程度は研究の過渡にあり定量的な評価はできない。市中感染の状況、在室密度や行為などの建物利用の状況等が、室内空間中の感染者数に影響する。また、感染者の症状やマスク利用によって、ウイルスの放出量が増える。ウイルスの減少率と放出量から、室内濃度を求めることができる。被感染者が吸引するウイルスの量は、この室内濃度とマスクの利用によって算出される。そして、感染の有無については、被感染者の体調等の感染しやすさ（被感染性）の影響を受けると考えられる。このフローを用いて、被感染者数を算出するためには、様々な関係性に関する定量化が必要であり、条件及び関係性を仮定すればウイルス吸引量を算出することは可能である。ここでは、空間拡散感染に関する状況がある程度明らかになっている広州のレストランの事例を基準に、作業レベルや室用途によってウイルス吸引量がどのように変化するか試算した結果を紹介する。この試算ではウイルス量を RNA 数で表現する。インフルエンザウイルスは 8 つの RNA を持っており、コロナウイルスは 1 つの RNA を持っ

ている。従って、新型コロナウイルスの場合、RNA 数はウイルス数と一致する。

室内の CO<sub>2</sub> 濃度は、CO<sub>2</sub> 発生量と換気量から算出することができる。ただし、これらが変化する場合にも濃度も変化することになるが、空間の大きさによってその変化の速度が異なる。従来、空間内瞬時一様拡散を仮定すれば、ザイデル式等によって濃度計算が可能である。発生量及び換気量に変化がないと、時間経過とともに換気による CO<sub>2</sub> の出入りが均衡して安定濃度に近づくことになる。人体からの CO<sub>2</sub> の発生量は、活動レベルによって変化する。従って、室内での発生量は、在室人数や室用途によって異なる。室内燃焼がない場合や、厨房のレンジフード等によって燃焼ガスが発生場所から速やかに排出される場合には、室内での CO<sub>2</sub> 発生源は人体のみであると考えられる。また、CO<sub>2</sub> 量は換気によって削減されるが、空気清浄機によって削減されることはない。

CO<sub>2</sub> の発生量は、在室者数と活動レベルの影響下にあるのに対して、RNA 発生量は、感染者数と活動レベルの影響下にあると考えられる。なお、活動量は呼吸量に関係し、さらに RNA 発生量に関係すると考えられる。一般に大きい室では、在室人数が多いことが想定され、設計換気量が大きくなっている。しかし、感染者数は感染状況や建築用途によって異なると考えられる。具体的には、クラスター感染の場合には、初期の感染者数は少ないが、時間経過とともに多くなり RNA 発生量が多くなることになる。

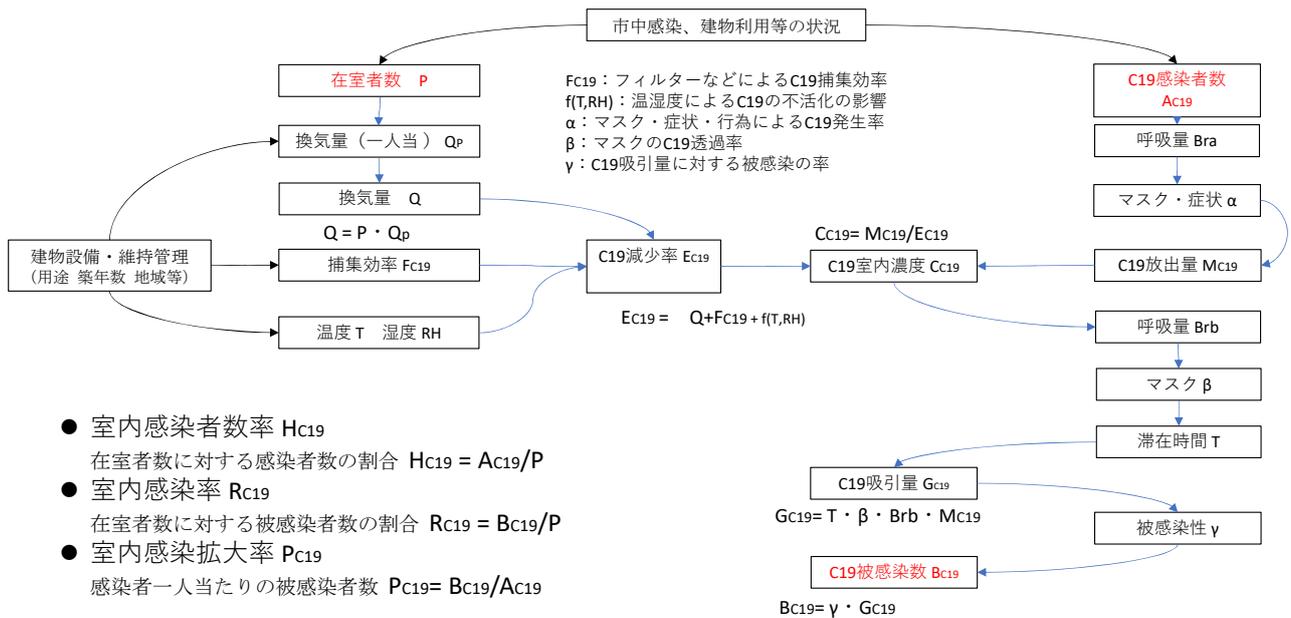


図 1-1 建築設備の設計施工・維持管理と空間拡散感染の関係

### B3. 浮遊飛沫感染対策に関するエビデンス整理

COVID-19 に与える、室内環境の影響に関する国内外の文献、厚生労働省「新興・再興感染症のリスク評価と危機管理機能の実装のための研究」等、国土交通省「ポスト COVID-19 における空調・換気・通風計画のあり方検討委員会」等、日本建築衛生管理教育センター「新型コロナウイルス対策検討委員会」による調査研究による知見、国内学会（日本公衆衛生学会、日本建築学会、空気調和・衛生工学会、臨床環境医学会等）、海外の調査研究（世界保健機関 WHO、米国疾病予防センターCDC、欧州空調・換気設備学協会 REHVA 等）の見解を収集し整理した上で、我が国の COVID-19 に対する建築環境対策を時系列で整理し、その概要をまとめた。

### B4. 集団感染と浮遊飛沫感染対策に関する調査

大規模な COVID-19 集団感染が発生したアイスアリーナを対象とした、2022 年 2 月～3 月に行われた冬期の集団感染発生時の換気性状に関する調査とエアロゾル対策効果の検証を行った。

### C. 研究結果

#### C1. 浮遊飛沫感染に関するエビデンス整理

##### C1.1. 浮遊飛沫（エアロゾル）感染の機序

室内環境中でのウイルス感染の経路は、図 1-2 に示すように多様である。新型コロナウイルスの感染者からのウイルス発生量には、オーダーレベルのばらつきがあり、人体に侵入した後の感染の機序に不明な点が多い。従って、空調換気性状と感染の関係を定量的に評価することは非常に難しい。

図 1-3 に示すように、室内空気中のウイルスを含む飛沫(エアロゾル)は多様な挙動を示す。飛沫の粒径は、0.3μm 程度からその 1000 倍程度まで幅があると考えられる。大きな飛沫は重力落下するが、微小飛沫は、空気中に浮遊し続ける。また、微小飛沫の水分蒸発は速く、より軽くなり、より浮遊しやすくなる。また、空調換気等による室内気流の影響も受ける。このような状況を踏まえ、気流移動による風下での感染「風下感染」と空間拡散飛沫による感染「空間拡散感染」と仮に表現した。室内では「風下感染」と「空間拡散感染」が同時に発生していると考えられる。室内気流に変化がなく、人の位置関係が一定であると「風下感染」

のリスクが高まり、換気量が少ないと空間内の浮遊飛沫濃度が高くなり「空間拡散感染」のリスクが高まる。さらに、高濃度の室から室間移動し他室の感染リスクを高めると考えられる。

空間拡散感染の対策として、換気による浮遊飛沫の排出、空気清浄機等による浮遊飛沫の捕集が

挙げられる。これらは、室内の浮遊飛沫濃度を低減し被感染者へのウイルス到達を抑制する方法である。いずれの場合も、感染者の近傍での排出と補修が効果的であるが、室内空間内での感染者の位置を特定することは難しいため、空間内の平均濃度を下げることが対策の基本である<sup>5) -17)</sup>。

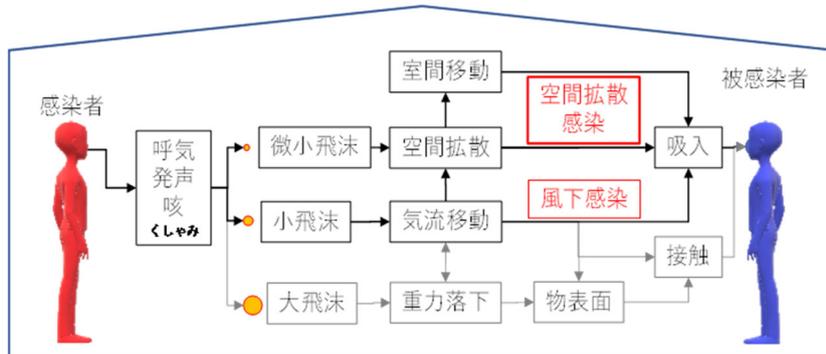


図 1-2 室内環境中の飛沫の挙動と感染経路

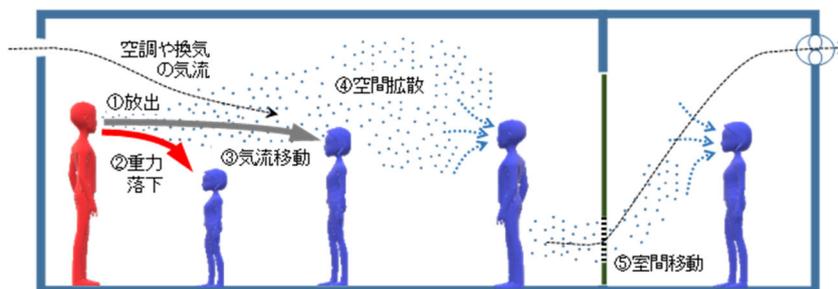


図 1-3 室内空気中の飛沫の挙動

日本における新型コロナウイルスの感染拡大の初期には、感染対策に必要な情報が不足し、温湿度の影響については、インフルエンザなどのそれ以前のウイルス感染に関する知見を参考にする必要があった。インフルエンザウイルス感染者から放出されるウイルス量は感染者によってオーダーレベルの差がある<sup>8)</sup>。また、インフルエンザウイルスに対しても、ウイルスを含む飛沫が人体に侵入した後の挙動や感染に関する機序には不明な点が多い。感染者から放出される飛沫の挙動は粒径によって異なるが、その挙動の違いがどれほど感染に影響するのか、という最も重要な点についても明らかになっていない。感染者の隔離施設につ

いては、空気感染を防ぐための換気等の基準<sup>9)-16)</sup>があったが、この基準を満たす建築物は極めて少なく、感染予防の条件とすること不可能であった。

初期にクラスター感染が発生した屋形船、レストラン、スポーツジムの室内環境の特徴として、人の密度が高いことに加え、換気が悪く、鍋料理や運動による水蒸気発生が多いことが挙げられた(図 1-4)。人が多く運動や発声が多いと水蒸気発生量が多くなり湿度が高くなる。換気量が少ないと水蒸気排出量が少なく湿度が高くなる。ウイルスや二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)も同様に発生量が多くなり、換気量が少ないと濃度が高くなる。従って、湿度やCO<sub>2</sub>濃度が高い室内環境は、ウイルス濃度が高

くなる特性を持つ。また、被感染者が運動や発声などで呼吸量が多くなると、ウイルスの吸引量が多くなり、感染リスクが高まると考えられる。

湿度がインフルエンザウイルスの感染に与える機構は明らかになっていない<sup>18)</sup>。インフルエンザウイルスに関する実験では、湿度が低いと空気中のウイルスの生存時間（感染力の持続時間）が長

くなる。また、湿度が高い場合も生存時間が長くなる。気道粘膜の維持のために低湿度を避ける必要があるが、ウイルスの生存時間の点では高湿度も避ける必要があることを示唆している。クラスター感染が発生した空間では、ウイルス濃度が高いことに加え湿度が高いことによって感染リスクが2重に高められた可能性が否定できなかった。

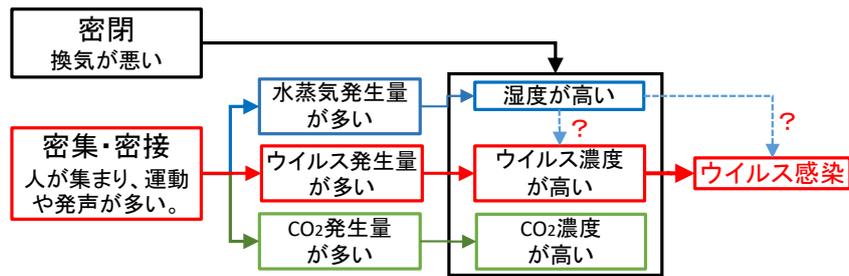


図 1-4 クラスター感染空間の室内空気環境の特性

### C1.2. 室内空気環境とウイルス感染

これまでに、温湿度とインフルエンザウイルスの気中生存率に関する実験、室内空間での挙動や気中濃度の予測が試みられている。J.H.Hemmes 他は、気中ウイルスの死滅率の変化を測定し、湿度の影響を調べ、インフルエンザウイルスの死滅速度は、相対湿度 15-40%の場合に対して、50~90%では顕著に速いことを示した<sup>19)</sup>。また、G.J.Harper は、気中ウイルスの生存時間を測定し、相対湿度が 34~36%の場合より 50~51%の場合の方が顕著に短いことを示した<sup>20)</sup>。この結果を受け、Jeffrey Sharman 他は、絶対湿度の重要性を指摘し<sup>21)</sup>、倉渕他は絶対湿度と生存率の関係性を整理して大略的に絶対湿度倍増で生存率が 1/10 になるとした<sup>22)</sup>。F. L. Schaffer 他は、インフルエンザウイルスは、50~80%RH で非常に不安定であることを示し<sup>23)</sup>、Anice C.他は、動物曝露実験で 20°Cの条件では低湿と高湿の場合に感染伝搬力が高いことを示した<sup>24)</sup>。

1970 年に施行された建築物衛生法の建築物環境衛生管理基準では、相対湿度の範囲を 40~70%としている。相対湿度の下限値の検討においては、

インフルエンザウイルスの感染抑制が要因として挙げられている。冬期の相対湿度維持に必要なエネルギー消費、設備容量などの観点も配慮され、インフルエンザウイルス感染抑制に必要な最低限の相対湿度が設定されたと考えられる<sup>25)</sup>。「ビルディングの環境衛生基準に関する研究」(小林陽太郎他)では、基準値の概念としては、理想値、目標値、推奨値、許容最低限度といった各段階があることを示し、相対湿度については単独に設定する意味は少ないとしつつ、推奨値を 55~70%とし許容限度の例として 35~70%を示した<sup>26)</sup>。2003 年の建築物衛生法関連政省令改正に先んじた 2002 年 7 月の建築物衛生管理検討会(吉澤晋他)においては、「現時点では、主としてインフルエンザウイルス生存時間の観点から基準値を引下げることを合理化する科学的知見は得られていないので、基準値を改訂するには至らない。温湿度条件とインフルエンザウイルスの生存時間の関係についての再現試験が行われており、この結果が得られ次第、相対湿度の基準値を再検討することが適当である」とされた<sup>25)</sup>。

2017~2019 年に行われた厚生労働科学研究「建

築物衛生管理基準の検証に関する研究<sup>27)</sup>では、湿度基準の検証のために、湿度がインフルエンザウイルスの感染に与える影響に関するエビデンス収集と検討が行われた。低温、乾燥状態ではインフルエンザウイルスの感染リスクが増大することが疫学研究で報告され、感染リスクは絶対湿度の低下率と強く関係していることが示唆された。また、鳥インフルエンザウイルスの不活性化実験では、絶対湿度が大きく関係している。以上から、相対湿度の下限値を40%より低くする妥当性は現時点ではないとされた。

新型コロナウイルスに関する研究は、途上にある。温湿度がエアロゾル中のウイルスによる感染に与える影響は、エアロゾルの空気中の挙動への影響、物体に付着したエアロゾルへの影響、人体内における挙動及び感染への影響等が考えられる。

エアロゾルの空気中の挙動については、咳等によるエアロゾルの挙動の再現実験や気流解析等が行われている。既往の研究では、空気中のエアロゾル中の水分蒸発による粒径の縮小によってエアロゾルの到達距離が長くなることが示されている<sup>28)</sup>。従って、粒径が小さく質量が小さいエアロゾルは、より長く空气中を浮遊することになる<sup>29)</sup>。室内空气中のエアロゾル中のウイルスの活性は、相対湿度が70%の時に高くなることが報告されている<sup>30)</sup>。一方、人工唾液を用いたエアロゾル中のウイルスの活性は、相対湿度が68~88%の場合よりも40~60%の場合の方が高いとする報告がある<sup>31)</sup>。

物体に付着したエアロゾルへの影響については、温度が24~35°C、相対湿度が20~80%の範囲で実験が行われ、相対湿度が高いとウイルスの活性が低下すること示されている<sup>32)</sup>。

人体内における挙動及び感染への影響については、低温低湿の環境によって人体のウイルス感染防御

機能が低下することが従来知られている<sup>33),34)</sup>。

温湿度がエアロゾル中のウイルスに与える影響については不明な点が多い。インフルエンザウイルスに関する研究においても、感染力を測定したエアロゾルの粒径分布、時間経過とともに生じる物理的变化が十分に把握されていない。また、実際の環境中でのエアロゾルの挙動、物理的变化を踏まえた、感染力の把握を行う必要がある。現在、実環境中のエアロゾルの物理的变化に関する研究、BSL3施設におけるチャンパー内のエアロゾルの感染力の実験が行われている。このような実験結果を検証し、実環境における温湿度の影響を早急に解明することが望まれる。

室内空気環境が、エアロゾルの粒径変化や空气中挙動に与える影響については、物理学的研究が従来行われている。前述の通り、人体から放出される飛沫の粒径には一定の中があるため、粒径ごとの挙動に留意する必要がある。室内空気中では飛沫中の水分が蒸発し粒径が減少することが知られている。表1-1に、飛沫の水分蒸発の粒径変化を示し、図1-5には同表をグラフで示したものを示す。粒径が小さいほど粒径変化速度が大きくなることを示している。図1-6には、粒径変化速度( $dr/dt$ )の近似式を用いて、初期粒径10 $\mu$ mの場合の粒径変化を試算した結果を示す。実際には、室内空気の温湿度によって最終粒径が決まると考えられるが、この試算結果は10 $\mu$ mの飛沫は5秒以内に最終粒径になることを示している。最終粒径については、相対湿度50%以下では元の飛沫の大きさの40%程度、相対湿度90%では元の飛沫の大きさの50%程度になるとされている<sup>37)</sup>。飛沫中の水分の率については、症状や体内の発生場所などによって異なると考えられるため、今後の研究と新たな知見が望まれる。

表 1-1 飛沫の水分蒸発と粒径変化<sup>34), 35), 36)</sup>

Evaporation time $T_e$ (sec)	Initial diameter $r_0$ ( $\mu\text{m}$ )	Decrease rate $dr/dt$ ( $\mu\text{m}/\text{sec}$ )	Reference
0.001	1	17.20	1)
0.08	10	5.64	1)
0.8	20	4.03	2)
1.3	40	2.88	1)
2	50	2.59	3)
24	200	1.32	3)

1) W. C. Hinds, *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, John Wiley & Sons (1982).  
 2) Morawska L et al.: Size distribution and sites of origin of droplets expelled from the human respiratory tract during expiratory activities. *Journal of Aerosol Science*. 40, 256–269. (2009)  
 3) Xie X et al.: How far droplets can move in indoor environments – revisiting the Wells evaporation–falling curve. *Indoor air*. 17: 211–225. (2007)

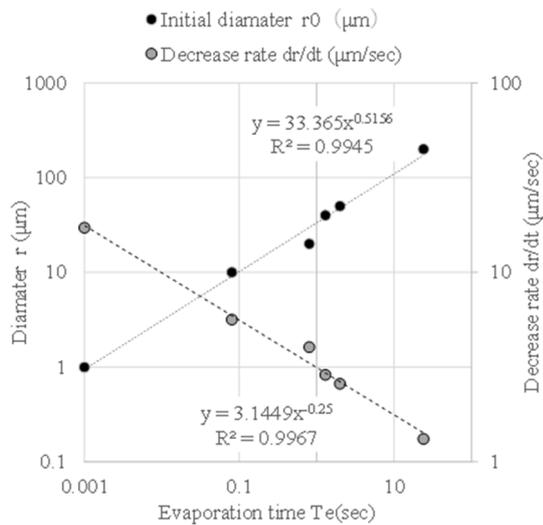


図 1-5 飛沫の粒径と蒸発時間(表 1 をグラフ化)

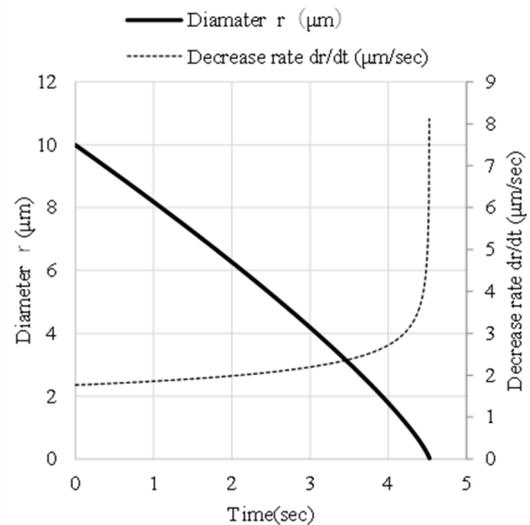


図 1-6 飛沫粒径の変化(初期粒径 10 $\mu\text{m}$ )

粒径によって、落下速度が異なると共に、浮遊性状にも影響することが知られている。図 1-7 は、温湿度が浮遊飛沫数の変化に与える影響に関する実験<sup>38)</sup>のである。本実験では、不活化した新型コロナウイルスの懸濁液をステンレス製のチャンバー内に噴霧した後の浮遊飛沫(エアロゾル)数の推移を、パーティクルカウンター(KANOMAX Model3889)で測定した。浮遊飛沫(エアロゾル)数は、粒径によって異なる推移を示した。粒径 0.5 $\mu\text{m}$  以上の数は概ね初期より減少するが、粒径 0.3 $\mu\text{m}$  以下の数は約 3.5 時間(210 分)にわたって次第に増加した後に緩やかに減少した。この現象の原因には、A:飛沫からの水分蒸発による粒径

の減少、B:飛沫の分裂による粒径の減少、C:重力沈降や静電気による表面への吸着などが考えられる。なお、この実験では静電気防止スプレーによって静電気の影響を抑えている。また、予備実験でチャンバー内に表面結露が発生した場合に急激に浮遊飛沫(エアロゾル)数が減少したことから、表面結露が発生しないようにチャンバー天井部の温度低下を抑えるために保冷剤下部を断熱した。

同図右に、初期の飛沫数に対する 6 時間(360 分)後に浮遊している飛沫数の比(エアロゾル数比)を示す。エアロゾル数比は、絶対湿度 AH(温度及び相対湿度)の影響を受けることが示された。温度 20 $^{\circ}\text{C}$ の場合、相対湿度が 40~70RH%のエア

ロゾル数比が大きくなることとなった。絶対湿度 AH が低い場合には  $0.3\mu\text{m}$  の比率が小さく、絶対湿度 AH が高い場合には  $0.3\mu\text{m}$  の比率が比較的大きい。このような絶対湿度の影響に関する仮説としては、絶対湿度 AH が低いことによって、静電気による吸着効果が顕著となって特に粒径が小さい浮遊飛沫（エアロゾル）の数が減少した。また、絶対湿度 AH が高いことによって、浮遊飛沫からの水分蒸発による粒径減少や分裂が抑制され

ること、部分的な表面の濡れによって吸着が促進されたことによって、浮遊飛沫（エアロゾル）数が減少したことが考えられた。本実験は、小型のチャンバー（約  $0.2\text{ m}^3$ ）を用いて行われたため、実際の室内空間での挙動と異なる可能性があるが、温湿度が浮遊飛沫（エアロゾル）の挙動に影響することを示した。また、温湿度と感染力との関係については、今後の実験の成果が望まれる。

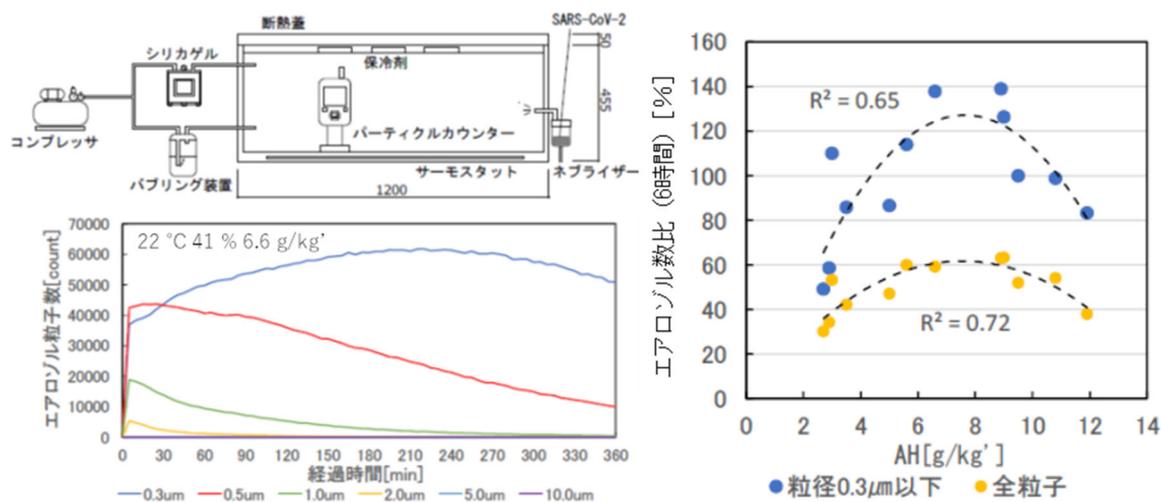


図 1-7 温湿度が浮遊飛沫数に与える影響に関するチャンバー実験<sup>38)</sup>

建築空間内での浮遊飛沫の挙動に関する測定例は少ない。冬期暖房時（室内温度  $21^\circ\text{C}$ 、室内相対湿度  $13\%$ ）に、教室内でネブライザーから浮遊飛沫を放出し、換気扇、空気清浄機の効果を測定した例<sup>39)</sup>を以下に示す。本実験は、発生後のエアロゾル数の変化の状況が、新型コロナウイルスの懸濁液の場合と比較的近い、経口補水液（OS-1）を用いて実施された。図 1-8 に、放出開始後の浮遊飛沫数をパーティクルカウンター（KANOMAX Model3889）で測定した全粒径合計値を示す。同図右上のグラフは換気扇を停止した場合の結果であるが、浮遊飛沫（エアロゾル）は 5 分程度で空間内に拡散し、その数は少なくとも 60 分間にわたって全く減少しなかった。同図右下に、換気扇を運転した場合を示すが、発生終了後に浮遊飛沫数は減少し、外気濃度に近づく変化を示した。空気

清浄機を運転した場合も、同様の減少がみられた。この実験では、冬期暖房時の低湿度環境においては、浮遊飛沫は空気と同様の挙動を示し、換気量及び空気清浄機の相当換気量に対応した濃度減少が生じることが確認された。

図 1-9 に、教室で換気扇を停止した状態での浮遊飛沫（エアロゾル）数の粒径ごとの推移を示す。合計値（ $0.3\mu\text{m}$ 、 $0.5\mu\text{m}$ 、 $1.0\mu\text{m}$ ）は、60 分間にわたり大きな変化はないが、 $0.3\mu\text{m}$  は増加するとともに、 $0.5\mu\text{m}$  と  $1.0\mu\text{m}$  は減少した。前述の浮遊飛沫（エアロゾル）中の水分蒸発による秒単位の粒径変化に比べると、本実験の変化が大幅に遅いことから、水分蒸発とは別の原因で粒径の小さな浮遊飛沫（エアロゾル）が増加している可能性がある。原因の候補としては、大きな飛沫が分裂して小さな飛沫を発生させたことが考えられる。

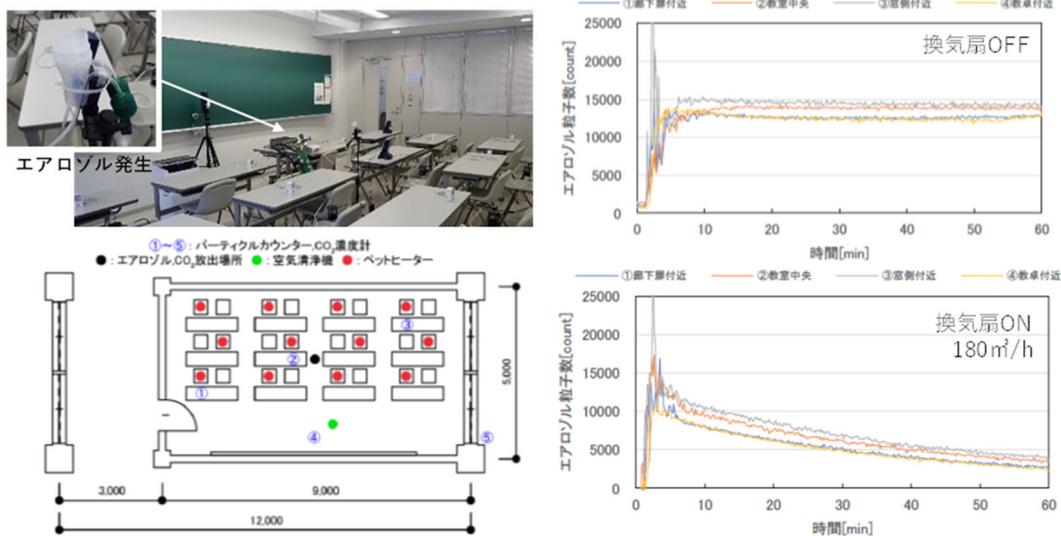


図 1-8 換気及び空気清浄機を用いた教室の浮遊飛沫数に関する実験<sup>39)</sup>

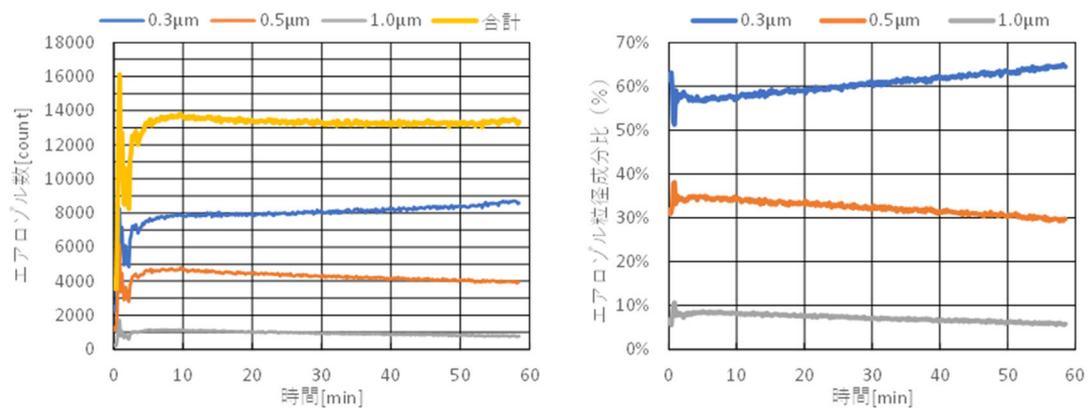


図 1-9 浮遊飛沫の粒径別の推移(教室・換気扇 OFF)<sup>39)</sup>

### C1.3. 建築物の室内空気環境の実態

日本では、1960年代の建築物の大型化や高層化に伴って、建築物の衛生環境の悪化に伴う健康影響が指摘された<sup>40)</sup>。1970年に「建築物における衛生環境の確保に関する法律（建築物衛生法）」が制定され、空調、給水等について建築物環境衛生管理基準が定められた<sup>41)</sup>。建築物衛生法では、興行所、百貨店、集会場、図書館、博物館、美術館、遊技場、店舗、事務所、学校、旅館の特定用途に使用される建築物を「特定建築物」とし、自治体による立入検査等の監視指導対象としている。また、1980年代には米国において建材などの化学物質

によるシックビル症候群が発生し、その対策として材料や換気の基準が検討された。日本では、2003年の建築基準法改正、いわゆるシックハウス対策法において、ホルムアルデヒド等の化学物質の使用制限、換気設備の設置義務が求められることとなった。建築物衛生法についても、制定後の建築物の省エネルギー化、シックハウス問題等の建築物に係る状況の変化に対応するため、2002年に政省令改正が行われ特定建築物の対象、空調・換気設備の対象、空気環境の管理項目の追加などの見直しが行われた。建築物衛生法に基づく建築物衛生管理は、ビルメンテナンス業、自治体、衛生

管理に関する教育研究組織による他国に類を見ない組織的な体制によって支えられている。日本では、住宅におけるシックハウス症候群が顕在化した。大型の建築物においてシックビル症候群が顕在化しなかった要因として、建築物衛生法に基づく換気確保が挙げられている。

建築物衛生法の建築物衛生管理基準では、室内の浮遊粉じん、一酸化炭素、二酸化炭素、湿度、相対湿度、気流、ホルムアルデヒドに関する基準値を設けている。一酸化炭素は、燃焼や喫煙によって発生し、中毒など人体に有害な影響をもたらすことを踏まえて、基準値が 10ppm となっている。二酸化炭素は、それ自体が人体に与える影響のみによって基準値が定められていない。二酸化炭素とともに発生する人体からの臭気、燃焼ガス中の汚染物質の影響を想定した総合指標として、二酸化炭素濃度を国際基準に準じて 1000ppm としている。空気調和・衛生工学規格では、人体から発生する二酸化炭素量に基づき、1人あたりの必要換気量を約 30m<sup>3</sup> 毎時とし、居室の在室密度に応じた必要換気量を示している。相対湿度の基準は、前述のインフルエンザ等の感染症の対策の他に、カビ、ダニの繁殖によるアレルギー疾患の予防等を踏まえて、40～70%とされている。

これらの基準への適合は、測定業者による定期的測定によって確認され、自治体の立入検査によ

って指導が行われている。全国の自治体の立入検査結果は、行政報告例として集計され概況が公表されている。図 1-10 に空気環境の基準に対する不適率 (Nonconformity rate Rnc%) を示す。湿度、温度、二酸化炭素濃度は不適率が高く 1999 年度以降に継続的な上昇が見られる。また、湿度は 2011 年度から 2014 年度に一時的な上昇が見られる。空気環境の不適率の上昇要因として、1999 年の省エネルギー法改正にともなう換気量、設定温湿度の調整、個別空調の普及、2011 年の東日本大震災後の節電に伴う設定温度の調整の影響の可能性が伺える。したがって、このような変化が特定建築物だけではなく建築物全般で起きている可能性は否定できない。二酸化炭素の不適率の上昇は、換気が不足している建築物の増加を意味していると考えられる。また、相対湿度の不適率の増加は、主に冬期の低湿度の増加によるものであり、加湿の能力不足が広がっていることを示している。二酸化炭素の不適率増加は、ウイルス感染のリスクが上昇していることを示していると考えられる。また、相対湿度の不適率の増加は、従来のインフルエンザの感染リスクが高まっていることを示している。しかし、新型コロナウイルスの場合は、前述のように相対湿度の感染力への影響は不明である。

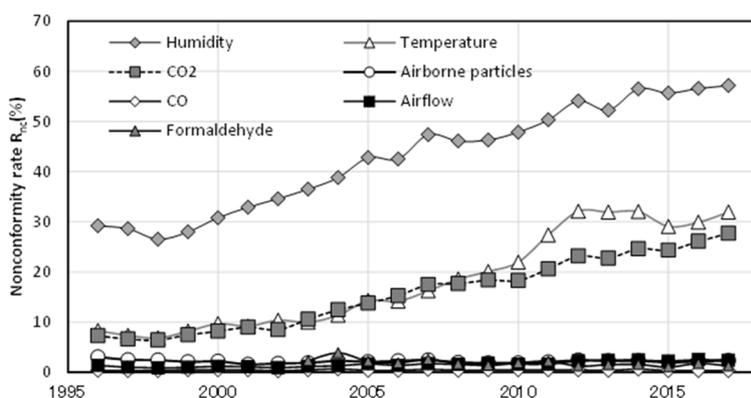


図 1-10 特定建築物における空気環境の不適率

高齢者施設等福祉施設は、健康ハイリスクの入居者が利用する建築物である。上記の建築物衛生法の特定建築物は不特定多数の利用者を想定しているために、福祉施設については、保健所などの自治体が立入検査などで空気環境を調査することはない。このため、保健所などはインフルエンザ等の感染症対策の観点で、温湿度等の適切な維持、換気の必要性などの、室内空気環境に関する啓発を行ってきた。しかし、立入検査や行政指導に必要な法的根拠が明確ではないために、室内空気環境に関する情報収集が十分に行われておらず、実態が把握されていなかった。このような状況の中で、2012年から国立保健医療科学院を中心に大学などの研究機関によって、建築・空調設備、維持管理体制、室内空気環境等の実態に関する調査が行われている<sup>42)~44)</sup>。

従来のインフルエンザの感染対策では、冬期に換気量を確保し湿度を維持することが求められている。換気量を増やすと水蒸気排出量が増え加湿負荷が増大してしまう。このため、換気量を適正に制御して湿度を維持することが必要となる。インフルエンザの空気感染予防のためには気中インフルエンザウイルス濃度の低減が必要である。このためには湿度を維持して気中インフルエンザウイルスの生存率を低下させ、換気量を確保して気中インフルエンザウイルス濃度を希釈することが必要である(図1-11)。しかし、これらの方法は換気による熱損失及び加湿のためのエネルギー消費を増大させることとなる。効率的にエネルギーを使用してインフルエンザ空気感染予防を行うためには、換気量及び加湿量の最適設定が必要となる。しかし、新型コロナウイルスの感染予防に適した湿度域が従来のインフルエンザの場合と異なる可能性は否定できない。

図1-12に、国内の特別養護老人ホームの冬期室内環境の測定結果を示す。図中の左に示す室内温度は、ほとんどの時間に25~26℃の範囲にあり、

建築物衛生法の基準(17~28℃)を満たしている。しかし、相対湿度はほとんどの時間に40%以下になっており、上記基準(40%以上)を満たしていない。同図右に示す1人当り換気量は、CO<sub>2</sub>濃度基準(1000ppm)を満たす30 m<sup>3</sup>/人をほとんどの場合超えている。この図の一人当たり換気量は、CO<sub>2</sub>濃度から算出したものである。CO<sub>2</sub>濃度が1000ppmよりも十分低いことからこのような結果となった。換気量が多い理由は、換気設備の風量が大きいこと、泄処理時の臭気対策のための窓開け、インフルエンザ等の感染症対策のための窓開けによる考えられた。暖房によって室温が比較的高めに維持されているとともに換気量が多いため、相対湿度が低くなっていると考えられた。すべての施設で、インフルエンザ等の集団感染の防止、皮膚の乾燥防止のために、多数の加湿器が用いられ湿度維持が試みられていたが、上記の原因によって低湿度になっていた。このような状況は、以下のような問題点と関係していると考えられた。加湿器への給水、清掃が職員の負担になっている上、加湿器内のレジオネラ等の細菌汚染による感染リスクが発生している。窓開けによる空気の流れの変化によって、個室で発生する臭気が廊下に流出し、施設全体に臭気を広げており、職員に精神的負担をもたらしている。このように湿度や換気の制御が十分にできていない状況は、新型コロナウイルス感染症の集団感染の制御の観点からも問題である。特に空気の流れが計画されていない状況は、浮遊飛沫(エアロゾル)感染の対策を計画することを困難にしている。

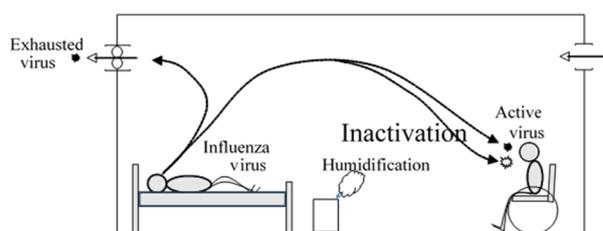


図1-11 室内のインフルエンザウイルスの挙動

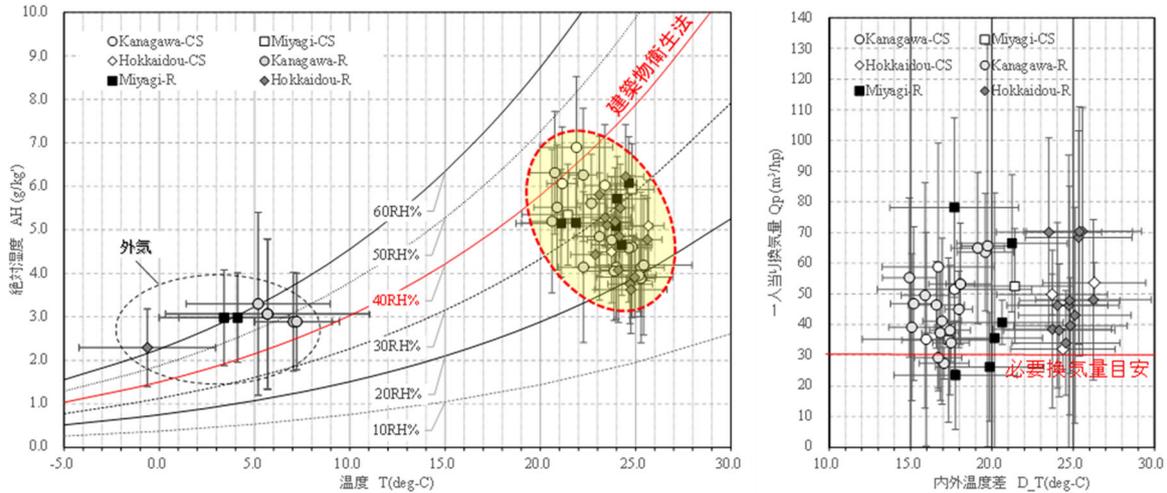


図 1-12 国内の高齢者施設(特別養護老人ホーム)の室内空気環境

## C2. 興行場における浮遊飛沫感染リスクの分析

はじめに、作業レベルを考慮したウイルス RNA 吸引数に関する試算を行った。作業レベルによって呼吸量が増え、CO<sub>2</sub> 排出量及びウイルス排出量が増え、室内における作業レベル、滞在時間、在室人数、感染者数、呼吸量を想定し、ウイルス RNA 吸引数を試算した。広州のレストランの事例については、多人数がテーブルで飲食した状況から安静時よりも多くの呼吸量を設定した。感染者から放出される RNA 数には大きな幅があるため、呼気 10L 中の RNA 数を既往の研究<sup>8)</sup>に基づいて、平均値 (Mean) を 250 とし最大値 (Max) を 2500 とした。また、室内感染者数を 1 名と仮定した。マスクの効果については、既往研究及び実際の着用実態を踏まえ RNA 透過率 50% とした。広州のレストランの事例<sup>46), 47)</sup>では、滞在時間 1.5 時間、在室者数 21 名、感染者数 1 名、呼吸量 1 m<sup>3</sup>/h と想定した。安静や中作業の場合に、RNA 数が広州レストランの事例に対してどの程度の比になるかを算出した結果を図 1-13 に示す。図中のプロットのラベルは、作業レベル・在室者一人当たりの換気量を示している。図中の安静 30 (作業レベルが安静で一人当たり換気量が 30 m<sup>3</sup>/(h・人)) の場合、広州レストランに対する RNA 吸引数比は、マスクなし Mean

(マスクなしで RNA 発生量が平均レベル) の場合で 0.09 である。中作業 30 の場合は、マスクなし Mean の RNA 吸引数比は、2.42 となる。マスクありの場合は、それぞれ 0.02、0.6 となる。

また、換気量が 60 になると、RNA 吸引数比は 30 の場合の 0.5 になる。同図の横軸に安定 CO<sub>2</sub> 濃度を示す。同図は、安定 CO<sub>2</sub> 濃度が高い場合 (換気量が少ない場合、CO<sub>2</sub> 発生量が多い場合、これら両方の場合) に、RNA 吸引比が大きくなる傾向があることを示している。しかし、安定 CO<sub>2</sub> 濃度の場合でも、マスクの有無及び RNA 発生量によって、RNA 吸引数比に大きな差が生じている。このことから、CO<sub>2</sub> 濃度は換気の不足や空間拡散感染リスクを推察する参考にはなるが、CO<sub>2</sub> 濃度によって個々の室内における空間拡散感染のリスクを定量的に判断することは難しいと考えられる。

表 1-2 試算に用いた数値

	滞在時間	在室人数	感染者数	呼吸量
広州事例	1.5 h	21 人	1 人	1.00 m <sup>3</sup> /h
安静	3.0 h	10 人	1 人	0.45 m <sup>3</sup> /h
中作業	3.0 h	10 人	1 人	2.40 m <sup>3</sup> /h
マスク効果：ウイルスの50%が通過				

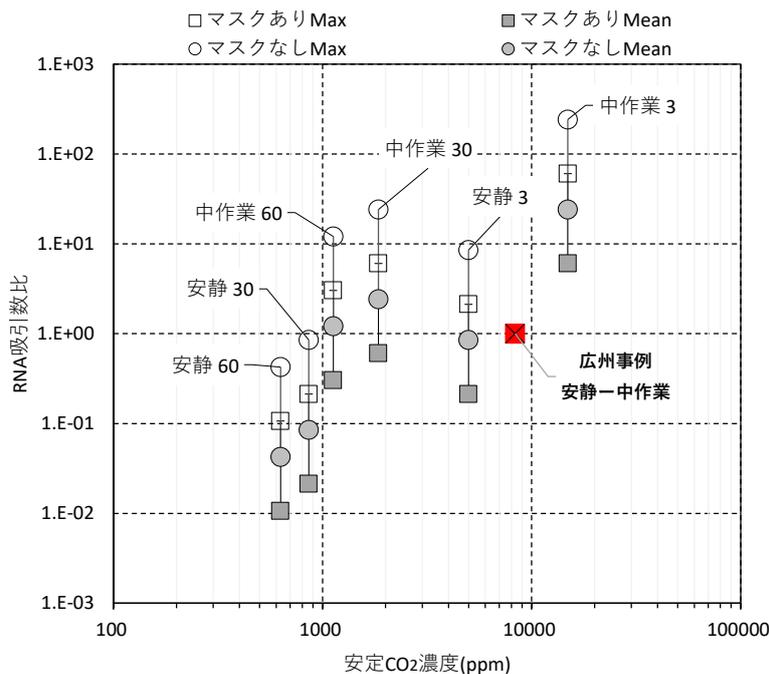


図 1-13 作業レベルを考慮したウイルスRNA吸引数比に関する試算結果

次に、室用途を考慮したウイルス RNA 吸引数比に関する試算を行った。室用途によって、作業レベル、在室時間等の条件が想定できる。図 1-14 に、病室等（病院の病室、高齢者施設等の福祉施設の寝室）、事務室、教室（大学等の講義室）、住宅、飲食店を例に、感染者が 1 人の場合の RNA 吸引数比を試算した結果を示す。図中のプロットのラベルは、用途・在室時間・マスクの有無（M:マスクあり,-:マスクなし）・在室者一人当たりの換気量を示している。例えば、「学校 8M30」は、学校で在室時間 8 時間、マスクあり、一人当たり換気量 30  $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{人})$  の場合を示す。なお、在室者数は、病室等 4 人、事務室 100 人、教室 40 人、住宅 4 人、飲食店 20 人として試算している。また、呼吸量は、病室等 0.45、事務室 0.6、教室 0.6、住宅 0.45、飲食店 1.0 ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) として試算している。病室等では、在室時間が長い上マスクなしを想定しているために、一人当たり換気量が 30 の場合の RNA 発生量が平均値 (Mean) の RNA 吸引数比は 1.7 で、1.0 (広州事例) より大きい。また、これまでのクラスター感染が発生した病院で測定された換気量

に近い場合 (1 人当たり換気量が 1.0 の場合と 5.0 の場合)<sup>48)</sup>には、RNA 吸引数比がそれぞれ 10.2、51.0 と非常に大きくなった。住宅も在室時間が長いとともにマスクなしを想定しているために、一人当たり換気量が 30 の場合の RNA 吸引数比は 0.85 であり、1.0 (広州事例) に近い。事務室と教室では、マスクありと想定している。一人当たり換気量が 30 の場合の RNA 吸引数比は、事務室で 0.01、教室で 0.03 と比較的小さくなった。事務室の方が教室より小さくなった理由は、在室人数が多いことである。より小規模で在室者数が少ない事務室の場合、在室者数に対する感染者数の率が高くなるため RNA 吸引数比が大きくなる。飲食については、一人当たり換気量が 30 の場合の RNA 吸引数比は、在室時間が 1 時間の場合に 0.07、4 時間の場合に 0.28 となった。なお、基準とした広州事例ではクラスター感染に相当する感染が発生しているため、RNA 吸引数比が 1.0 では感染抑制が期待できないと考えられる。

横軸の安定  $\text{CO}_2$  濃度との関係を見ると、安定  $\text{CO}_2$  濃度が高いと RNA 吸引数比が高い傾向が大

略的にはみられるが、同一の安定 CO<sub>2</sub>濃度においても、RNA 吸引数比には 102 以上の開きがある。この幅の要因には、在室時間、作業レベル、マスクの有無、RNA 発生量がある。CO<sub>2</sub>濃度だけでなく、これらの要因にも配慮することが重要である。

今回の試算は、新型コロナウイルスの初期の集団感染事例（広州事例）を基準にしている。その後に発生している変異株の感染力はより高い場合がある。この場合には、より高いレベルの空間拡散感染対策が必要であると考えられる。

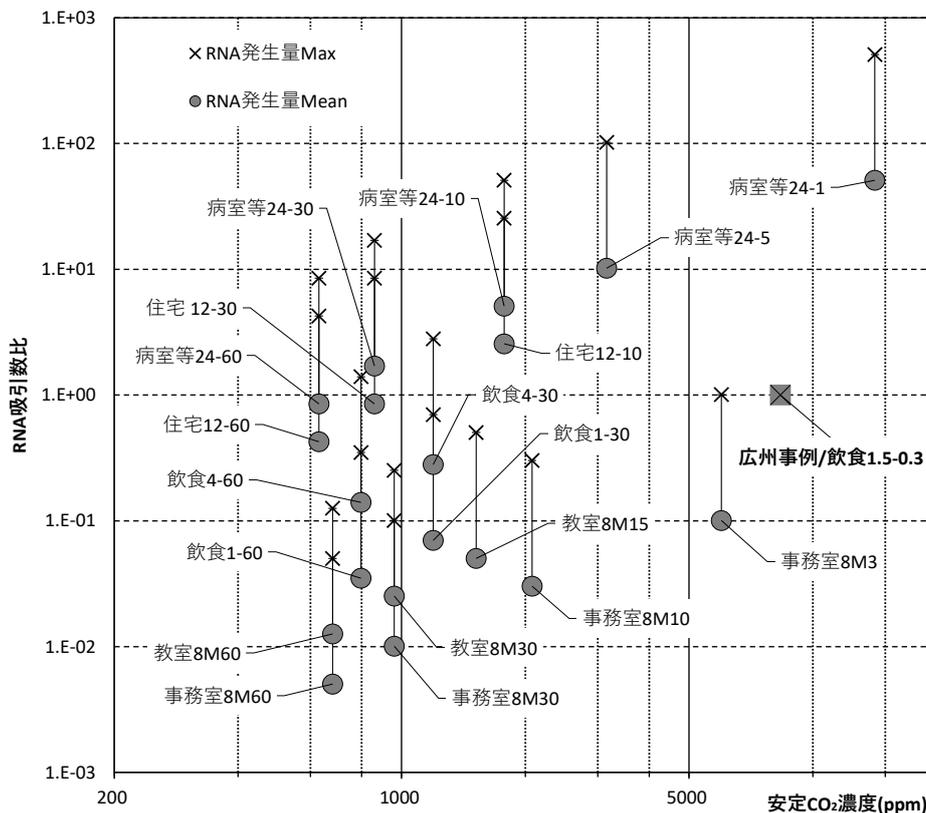


図 1-14 室用途を考慮したウイルス RNA 吸引数比に関する試算結果

興行場における行為は多様であるため、既往のエビデンスでは正確に、代謝量、呼吸量を想定することは難しい。入手可能な資料を参考<sup>49)</sup>に、興行場における主な行為による代謝量を想定した。表 1-3 に、興行場における主な行為と観客の代謝量、代謝量から算出した呼吸量をします。さらに、在室者に占める行為者の率（行為者率）を想定し、一人当たり換気量が 30 m<sup>3</sup> / (h・人) の場合の行為者及び観客の呼吸吸引量を示す。呼吸吸引量は以下の式のように、呼吸量と換気量から算出した室内空気中の呼吸の濃度に呼吸による吸引量を乗じて算出したものである。なお、α=0.45 とし、βは

100%、50%、10%、5%の場合について、呼吸吸引量を算出した。β=100%の場合は、観客がいない場合に相当する。この状況は、映画館、遊戯施設、ライブハウスのように観客がすべて行為者である施設、観客席がなく競技の練習をする施設で見られる状況であると考えられる。βが小さい場合は、行為者に対して観客が多い場合に相当する。音楽ホール、劇場、競技場（スポーツ施設）で見られる状況であると考えられる。

$$M_{ra} = \alpha \cdot MET \cdot \dots \cdot \text{式 1}$$

$M_{ra}$ : 呼気発生量 (Release rate of respiratory air)

$\alpha$  : 呼吸量換算係数

(Ratio of respiratory air rate toward MET)

$MET$ : 代謝量 (Metabolic equivalent)

$Q_p$ : 一人当たりの換気量

(Ventilation rate a person)

$$S_{ra-play} = M_{ra-play} \cdot C_{ra} \cdot \dots \cdot \text{式 3}$$

$$C_{ra} = \frac{\beta \cdot M_{ra-play} + (1 - \beta) \cdot M_{ra-view}}{Q_p} \cdot \text{式 2}$$

$S_{ra-play}$  : 行為者の呼気吸引量

(Player's suction rate of respiratory air)

$C_{ra}$  : 呼気濃度

(Respiratory air concentration)

$M_{ra-play}$  : 行為者からの呼気発生量

(Release rate of respiratory air from player)

$M_{ra-view}$  : 観客からの呼気発生量

(Release rate of respiratory air from viewer)

$\beta$  : 在室者数に対する行為者の割合

(Rate of number of players toward number of people in a space)

$$S_{ra-view} = M_{ra-view} \cdot C_{ra} \cdot \dots \cdot \text{式 4}$$

$S_{ra-view}$  : 行為者の呼気吸引量

(Viewer's suction rate of respiratory air)

表 1-3 に示すように、施設及び行為の種類、行為者の率によって、行為者及び観客の呼気吸引量は大きく異なる。また、呼吸量が多い行為者の方が観客よりも呼気吸引量が多くなる。

表 1-3 興行場における行為の想定と呼気吸引量

施設	行為	METs		呼吸量 (m <sup>3</sup> /h)				室内平均呼吸量 (m <sup>3</sup> /h)				行為者の呼気吸引比 (対安静)				観客の呼気吸引量比 (対安静)				引用文献 1) の記述		
		行為者	観客	行為者	観客	100%	50%	10%	5%	100%	50%	10%	5%	100%	50%	10%	5%					
映画館	映画	1.5	1.5	1.5	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	映画を見る	
	4 Dx	2.5	2.5	1.5	1.13	1.13	0.68	1.13	0.90	0.72	0.70	6.3	5.0	4.0	3.9	3.8	3.0	2.4	2.3	2.3	楽な労力	
遊戯施設	ゲーム	2.3	5.0	1.5	1.04	2.25	0.68	1.64	1.16	0.77	0.72	13.3	9.4	6.3	5.9	5.5	3.9	2.6	2.4	2.4	アクティブビデオゲーム: 楽な労力-ブートキャンプトレーニング	
	ダンス	3.0	7.8	1.5	1.35	3.51	0.68	2.43	1.55	0.85	0.76	29.2	18.6	10.2	9.2	8.1	5.2	2.8	2.5	2.5	社交ダンス-ディスコ	
音楽ホール	クラシック等	2.3	2.3	1.5	1.04	1.04	0.68	1.04	0.86	0.71	0.69	5.3	4.4	3.6	3.5	3.5	2.9	2.4	2.3	2.3	チェロ演奏-指揮	
ライブハウス	ロック等	5.5	5.5	1.5	2.48	2.48	0.68	2.48	1.58	0.86	0.77	30.3	19.3	10.5	9.4	8.3	5.3	2.9	2.6	2.6	マーチングバンド: 早いペース	
劇場	演劇・歌舞伎等	5.0	5.0	1.5	2.25	2.25	0.68	2.25	1.46	0.83	0.75	25.0	16.3	9.3	8.4	7.5	4.9	2.8	2.5	2.5	教会でスピリチュアルダンスを踊る	
	バレエ	5.0	6.8	1.5	2.25	3.06	0.68	2.66	1.67	0.87	0.77	34.8	21.8	11.4	10.1	8.9	5.6	2.9	2.6	2.6	リハーサル-公演	
競技場 スポーツ施設	バレーボール	3.0	6.0	1.5	1.35	2.70	0.68	2.03	1.35	0.81	0.74	20.3	13.5	8.1	7.4	6.8	4.5	2.7	2.5	2.5	全般-試合	
	バスケットボール	4.5	8.0	1.5	2.03	3.60	0.68	2.81	1.74	0.89	0.78	39.1	24.2	12.3	10.9	9.4	5.8	3.0	2.6	2.6	練習-試合	
	バドミントン	5.5	5.5	1.5	2.48	2.48	0.68	2.48	1.58	0.86	0.77	30.3	19.3	10.5	9.4	8.3	5.3	2.9	2.6	2.6	練習	
	テニス	4.5	8.0	1.5	2.03	3.60	0.68	2.81	1.74	0.89	0.78	39.1	24.2	12.3	10.9	9.4	5.8	3.0	2.6	2.6	ダブルス-シングルス	
	卓球	4.0	4.0	1.5	1.80	1.80	0.68	1.80	1.24	0.79	0.73	16.0	11.0	7.0	6.5	6.0	4.1	2.6	2.4	2.4	全般	
	柔道・剣道	5.3	10.3	1.5	2.39	4.64	0.68	3.51	2.09	0.96	0.82	60.8	36.3	16.6	14.2	11.7	7.0	3.2	2.7	2.7	2.7	武術: 初心者-ほとほとのペース
	体操	3.8	3.8	1.5	1.71	1.71	0.68	1.71	1.19	0.78	0.73	14.4	10.1	6.6	6.1	5.7	4.0	2.6	2.4	2.4	2.4	全般-試合
	水泳	4.8	4.8	1.5	2.16	2.16	0.68	2.16	1.42	0.82	0.75	23.0	15.1	8.8	8.0	7.2	4.7	2.7	2.5	2.5	2.5	背泳ぎ-バタフライ
	アイスホッケー	8.0	10.0	1.5	3.60	4.50	0.68	4.05	2.36	1.01	0.84	81.0	47.3	20.3	16.9	13.5	7.9	3.4	2.8	2.8	2.8	全般-試合
	スケート	7.0	7.0	1.5	3.15	3.15	0.68	3.15	1.91	0.92	0.80	49.0	29.8	14.4	12.4	10.5	6.4	3.1	2.7	2.7	2.7	スケート一般
カーリング	4.0	4.0	1.5	1.80	1.80	0.68	1.80	1.24	0.79	0.73	16.0	11.0	7.0	6.5	6.0	4.1	2.6	2.4	2.4	2.4	全般	
基準施設	安静 (MET=1)	1.0	1.0	1	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	Met= 1 (安静)

1) 国立健康・栄養研究所 中江、田中、宮地、改訂版『身体活動のメッツ (METs) 表』 2012年4月11日改定

出展 2011 Compendium of Physical Activities: A Second Update of Codes and MET Values. Ainsworth BE, Haskell WL, Herrmann SD, Meckes N, Bassett DR Jr, Tudor-Locke C, Greer JL, Vezina J, Whitt-Glover MC, Leon AS. Med Sci Sports Exerc. 2011, 43(8):1575-1581.

図 1-15 に、表 1-3 に示す行為者と観客の呼気吸引量の試算結果を示す。行為者については、B 場大きいほど、呼気吸引量が大きくなる。行為ごとに見ると、アイスホッケー、スケート、柔道・剣道、テニスバスケットボードの順に多い。映画、4 Dx、クラシック等は比較的少ない。ただし、同図に示す基準施設・安静 (MET=1) の場合に比べると、いずれも大きい。一人当たり換気量を  $30 \text{ m}^3 / (\text{h} \cdot \text{人})$  としおり、安静 (MET=1) の場合の行為者の呼気吸引量は、 $0.45 \text{ m}^3/\text{h}$  となる。また、この条件での室内  $\text{CO}_2$  濃度は建築物衛生法の基準値  $1000\text{ppm}$  になると考えられる。従って、試算対象の興行場及び行為では、いずれもこの  $\text{CO}_2$  濃度基準を満たさないと考えられる。すなわち、興行場では、呼吸量が安静時よりも大きくなるため、事務所などを想定した必要換気量を満たす換気設計

では、 $\text{CO}_2$  濃度基準を満たさないことがこの計算で確認できる。また、浮遊飛沫及びウイルスの RNA については、呼吸量が多いことによって呼気量と吸引量がともに増加することで、呼気吸引量が 2 重に増加することになる。これによって、代謝量及び呼吸量が大きい行為については、浮遊飛沫及びウイルス RNA の吸引量が顕著に増加することとなる。なお、呼吸量とウイルス RNA の脳出量の関係、ウイルス吸引量と感染リスクの関係は不明であるため、今後の研究によって明らかにされることが望まれる。今後は、施設の用途 (行為) に応じた、呼気の発生と吸引の時間を考慮して、浮遊飛沫及びウイルス RNA による感染リスクの分析を行う必要がある。また、室内環境によって影響される可能性がある浮遊飛沫の挙動と感染力の変化の考慮が望まれる。

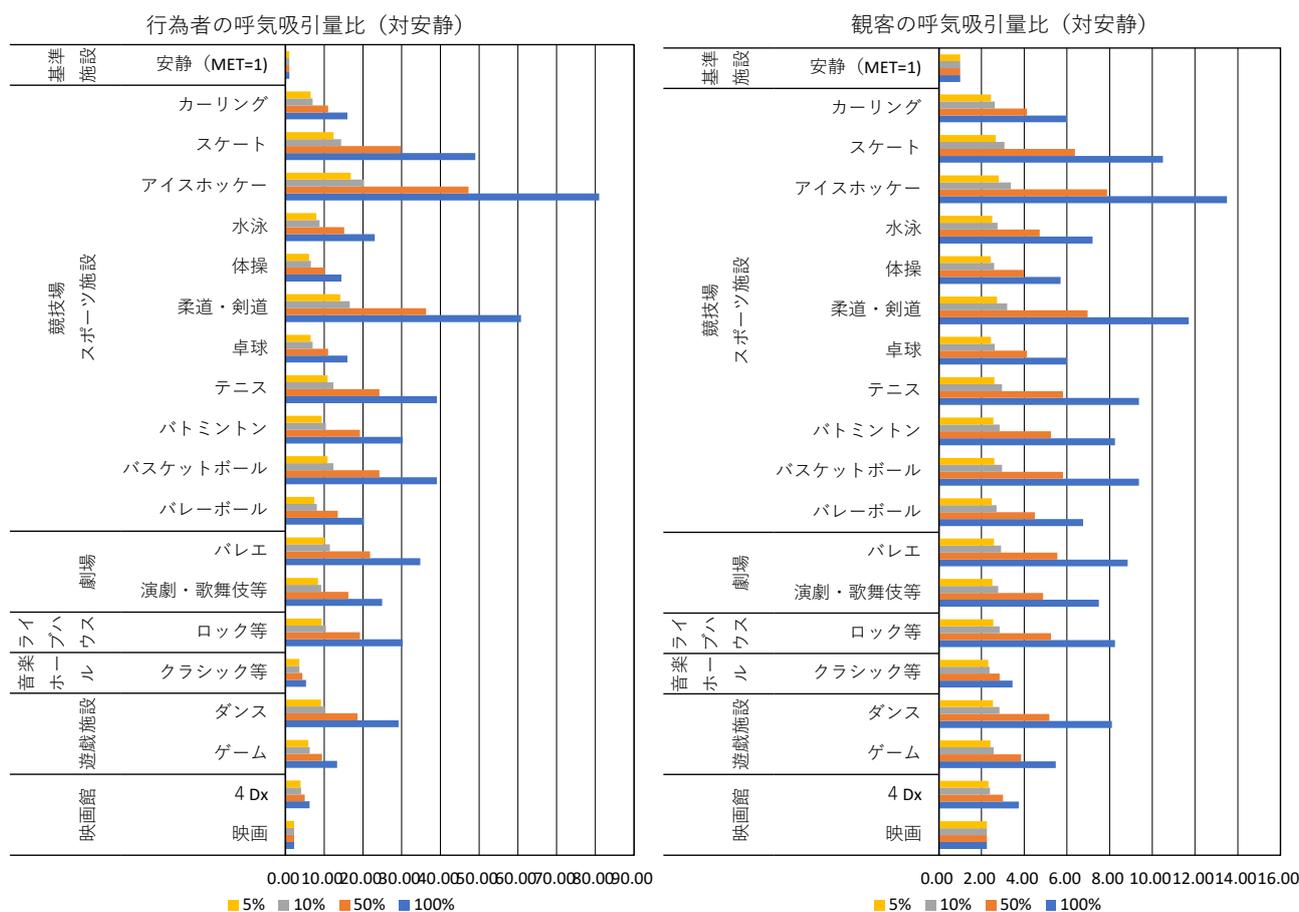


図 1-15 興行場における呼気吸引量比 (対安静) の試算結果

### C3. 浮遊飛沫感染対策に関するエビデンス整理

2020年1月から、日本における新型コロナウイルス感染症(COVID-19)のクラスター感染が発生し始め、3年以上にわたって感染拡大の波が繰り返されている。感染拡大当初は、新型コロナウイルスの感染経路は、インフルエンザの場合と同様に、接触感染と飛沫感染であると想定し、通常生活での感染リスクは高くないとしていた。しかし、初期のクラスター感染の状況から浮遊する飛沫による感染の可能性を検討し、2020年3月には換気が悪い密閉空間をクラスター感染の要因として挙げ、換気の確保を求めた<sup>1),2),3)</sup>。上記の換気対策の基礎となった調査等について、以下に概要を示す。

#### C3.1. 商業施設等における「換気の悪い密閉空間」を改善するための換気について(2020年3月30日)<sup>4)</sup>

新型コロナウイルス感染症対策専門家会議の「新型コロナウイルス感染症対策の見解」(2020年3月9日及び3月19日公表)、集団感染が確認された場所で共通する3条件が示されている。

新型コロナウイルス厚生労働省対策本部では、この見解を踏まえ、リスク要因の一つである「換気の悪い密閉空間」を改善するため、多数の人が利用する商業施設等において推奨される換気方法をまとめた。

(ア) 機械換気については、建築物衛生法に基づく必要換気量(一人あたり毎時30m<sup>3</sup>)が確保できていることを確認すること。必要換気量が足りない場合は、一部屋あたりの在室人数を減らすことで、一人あたりの必要換気量を確保すること。

(イ) 窓開け換気については、換気回数を毎時2回以上(30分に一回以上、数分間程度、窓を全開する。)とすること。空気の流れを作るため、複数の窓がある場合は二方向の壁の窓を開放すること。窓が一つしかない場合はドアを開けること。

#### C3.2. 厚生労働省新型コロナウイルス感染症対策アドバイザーボード(2020年7月30日)

新型コロナウイルス感染症は、「飛沫感染」及び「接

触感染」が主たる感染経路と考えられてきたが、わが国においては、2月に基本方針を策定した頃から、いわゆる「3密」の条件における「飛沫感染」や「接触感染」では説明できない感染経路を指摘し、対策に取り組んできた。「3密」と「大声」に関連する感染経路として、最近になっていわゆる「マイクロ飛沫感染」が世界的にも重要と認識されている。様々な状況証拠から「3密」と「大声」の環境においては、「飛沫感染」や「接触感染」に加えて、「マイクロ飛沫感染」が起こりやすいものと考えられている。一方で、屋外を歩いたり、感染対策がとられている店舗での買い物や食事、十分に換気された電車での通勤・通学で、「マイクロ飛沫感染」が起きる可能性は限定的と考えられる。

#### C3.3. 新型コロナウイルス感染症予防のための夏期における室内環境対策-建築衛生分野の研究者からの報告-(2020年5月20日)<sup>46)</sup>

新型コロナウイルスに関連した最新のエビデンスの収集・整理に基づいて、夏期冷房時の換気対策についてまとめた。現時点でのエビデンスからは、換気量等の具体的な基準値を示すことが難しいため、状況に応じて推奨される空調・換気の対策を示している。今回の取りまとめ内容以外に留意すべきことも含めて、以下のような推奨と注意喚起が必要であると考えている。

##### 【すべての室内空間について】

- i. 新型コロナウイルスの感染防止のためには、換気の確保が必要である。
- ii. 窓等の開放は換気に有効であり、より大きくより長く開放することが望まれる。
- iii. 夏期には、熱中症対策など健康維持のために冷房が必要である。(冬期には、ヒートショック対策など健康維持のために暖房が必要である。)
- iv. 一般のエアコンでは換気が行えないため、機械換気及び窓等の開放が必要である。
- v. 窓等の開放時には、虫や鼠などの衛生動物に対する対策が必要である。

### 【空調・換気設備を有する場合】

- vi.設備の維持点検によって、設計換気量が得られることを確認する。
- vii.1人当たりの換気量を確保するために、在室人数を制御する。また、在室時間を短くする。
- viii.空調・換気設備の調整による換気効果の向上、空気清浄機の利用、冬期の加湿器の利用などの対策については、建物用途、空調・換気設備、使用状況に応じた検討が必要である。

### C3.4. 冬場における「換気の悪い密閉空間」を改善するための換気について(2020年11月27日)

3)

厚生労働省新型コロナウイルス感染症対策推進本部では、外気温が低い環境下において、新型コロナウイルス感染症のリスク要因の一つである「換気の悪い密閉空間」を改善するための換気と、室温の低下による健康影響の防止をどのように両立するかについて、推奨される方法をまとめた。

① 機械換気について、機械換気設備が設置された商業施設等は、機械換気設備等の外気取り入れ量等を調整することで、必要換気量（一人あたり毎時30m<sup>3</sup>）を確保しつつ、居室の温度及び相対湿度を18℃以上かつ40%以上に維持する。機械換気設備が設置されていない商業施設等、または、機械換気設備等が設けられていても換気量が十分でない商業施設等は、暖房器具を使用しながら窓を開けて、居室の室温18℃以上かつ相対湿度40%以上を維持しつつ、適切に換気を行う必要がある。

② 窓開け換気について、居室の温度及び相対湿度を18℃以上かつ40%以上に維持できる範囲内で、暖房器具を使用しながら、一方向の窓を常時開けて、連続的に換気を行うこと。また、加湿器を併用することも有効である。

③ 居室の温度及び相対湿度を18℃以上かつ40%以上に維持しようとする、窓を十分に開けられない場合は、窓からの換気と併せて、可搬式の空気清浄機を併用することは換気不足を補うために有効であること。空気清浄機は、HEPAフ

ィルタによるろ過式で、かつ、風量が5m<sup>3</sup>/min程度以上のものを使用すること。人の居場所から10m<sup>2</sup>程度の範囲内に空気清浄機を設置し、空気のおよびを発生させないように外気を取り入れる風向きと空気清浄機の風向きを一致させること。

④ 換気の確認については、換気が必要換気量を満たしているかを確認する方法として、室内の二酸化炭素濃度を測定し、その値が1000ppmを超えないことを監視することも有効である。ただし、窓開け換気に加えて空気清浄機を併用する場合、二酸化炭素濃度測定は空気清浄機の効果を評価することができず、適切な評価方法とはならない。

### C3.5. 新型コロナウイルス(SARS-CoV-2)の感染経路について 国立感染症研究所(掲載日:2022年3月28日)<sup>17)</sup>

SARS-CoV-2は、感染者の鼻や口から放出される感染性ウイルスを含む粒子に、感受性が曝露されることで感染する。その経路は主に3つあり、①空中に浮遊するウイルスを含むエアロゾルを吸い込むこと(エアロゾル感染)、②ウイルスを含む飛沫が口、鼻、目などの露出した粘膜に付着すること(飛沫感染)、③ウイルスを含む飛沫を直接触ったか、ウイルスが付着したものの表面を触った手指で露出した粘膜を触ること(接触感染)、である<sup>7),8)</sup>。また、感染者との距離が近いほど(概ね1-2メートル以内)感染する可能性が高く、距離が遠いほど(概ね1-2メートル以上)感染する可能性は低くなる<sup>8),9)</sup>。特に換気が悪い環境や密集した室内では、感染者から放出された感染性ウイルスを含む粒子が空中に漂う時間が長く、また距離も長くなる。こうした環境に感染者が一定時間滞在することで、感染者との距離が遠いにもかかわらず感染が発生した事例が国内外で報告されている<sup>50)-53)</sup>。

### C3.6. 緊急提言(20220714)における換気対策<sup>54)</sup>

#### C3.6.1. 2つのエアロゾル感染への対策

これまでの換気対策では、換気によって空气中

のエアロゾルを排出するために、換気量を確保することが求められたが、この提言では、以下に示すエアロゾル感染の特性を考慮して効率的な換気の実施を求めている。

感染者から放出されるウイルスを含むエアロゾルは、 $1\mu\text{m}$  以下の微小なものから  $100\mu\text{m}$  を超えるものまで含まれている。大きなエアロゾルは、重力によって落下するが、落下しないエアロゾルは空气中に浮遊する。空气中で水分が蒸発して秒単位の速さで縮小してより浮遊しやすくなる。エアロゾルは咳やくしゃみなどの放出速度が速い場合は前方に飛ぶが、小声での会話やマスク着用時など放出速度が低い場合は、室内気流に乗って運ばれる。特に気流が弱い室内では人体発熱による上昇気流に乗る。しかし、多くの場合は空調や換気等によって気流があるため、その気流に乗って移動する。

このため、感染者の風下では、小さい粒径ばかりではなく大きな粒径のエアロゾルも伝搬する。それに対して、距離が大きい場所では大きな粒径は落下し、小さなエアロゾルは拡散によって薄められる。しかし、換気が悪い場合には、拡散したエアロゾルが空間内で蓄積され、距離にかかわらずエアロゾル濃度が高くなる。このようなエアロゾルの挙動を考慮して、A 大きなエアロゾルが伝搬する風下での感染と B 換気の悪い空間でのエアロゾルの拡散充満による感染の双方に対処する必要がある。

### C3.6.2. エアロゾル感染対策のための効果的な換気方法

エアロゾル感染対策のための効果的な換気方法として、上記の A の対策として空気の流れに配慮すること、上記の B の対策として換気量の確保が必要である。室内でエアロゾル発生が多いエリアから排気し、その反対側から外気を取り入れることで、風下での感染雄リスクを抑えると同時に、室内のエアロゾル濃度を効率的に抑制することが出来る。このような空気の流れを作るために、厨

房換気扇や扇風機を用いて排気し、反対側の窓やドアを利用する。このような空気の流れが作れない場合には、空気清浄機でエアロゾルを捕集する必要がある。

従来指摘されている通り、夏期や冬期には外気の流入による室内環境の悪化に注意する必要がある。室内温湿度、CO<sub>2</sub> 濃度をモニターして、暖冷房、換気を調整することが必要である。

### C3.6.3. 空気の流れを阻害しない飛沫防止対策

飛沫感染防止のために、特にマスクが使用できない場合には飛沫防止境界（パーティションやカーテン等）が必要である。しかし、高いパーティションや天井からのカーテンなどによって、空気の淀みが発生してエアロゾルの濃度が高くなる。空気の淀みが生じないように、パーティションの高さを低くし、空気の流れに沿う方向に設置する必要がある。

### C3.6.4. 施設の特性に応じた留意点

高齢者施設、学校、保育所等の特性に応じた留意点の中で、高齢者施設については空気の流れに関する留意点が以下のように示された。

- ① 望ましい空気の流れは、“エアロゾルを発生させる人⇒ファン(サーキュレータ・扇風機)⇒排気口(換気扇(排気)・窓+ファン)”。ファンはエアロゾルを発生させる人の風下側に設置し、その間には立ち入らないこと。(介護の場合は、介護者(マスク着用)⇒被介護者⇒扇風機⇒排気口[排気扇や窓])
- ② マスクを着用していない有症状者に対し、食事、入浴、口腔介助のように飛沫が飛散する介護を行う場合、フェイスシールドとマスクの二重使用による飛沫対策を行うとともに、大量に発生するエアロゾルに対応できるよう、局所的な換気対策を実施。
- ③ 空気がスムーズに流れるように、ファンの強さや位置を調整。(空気が流れる方向を、スモークテスター、線香、ティッシュや糸などを利用して確認。)

④ 二酸化炭素濃度測定器を設置することにより、更衣室、脱衣所、職員休憩室の換気の状態を常に確認するとともに、必要に応じて同時に利用する人数を制限。

#### C4. 集団感染と浮遊飛沫感染対策に関する調査

アイスアリーナは、建築物衛生法の特定建築物の特定用途の中の興行場に分類される。これまでのアイスアリーナの空気環境に関する研究では、整氷車の排気ガスによる空気汚染対策等が検討されている<sup>55)-60)</sup>。アイスリンクでは、氷の安定や霧の防止を重視した空調換気設備と運用が求められ<sup>61)</sup>、密度が高い冷気がアイスリンク上に停滞することで、換気量が少なくなることが指摘されている。米国ではアイスホッケーの試合に伴う新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) のクラスターの報告がある。<sup>62)</sup> 日本では、2021年の夏期に行われた全国高等学校選抜アイスホッケー大会で、事前合宿ばかりではなくアイスアリーナで感染が発生した。このため、アイスアリーナの換気性状の測定が行われ、防護パネルに囲まれたアイスリンクの冷気溜まりが確認された。<sup>63)</sup>

2022年1月に釧路アイスアリーナでアイスホッケーの試合が行われ、COVID-19の大規模なクラスターが発生した。釧路アイスアリーナ、日本アイスホッケー連盟、北海道、釧路保健所、国立感染症研究所が感染状況に関する調査を行った結果、アイスリンクから客席までの比較的大きな距離を隔てた感染経路が確認され、浮遊飛沫による感染 (エアロゾル感染)<sup>64)-66)</sup>の可能性が指摘された。エアロゾル感染対策の立案のために、北海道大学工学研究院環境空間デザイン学研究室が協働し、換気性状とエアロゾル拡散性状の測定、対策立案と効果検証が、2022年2月～6月に行われた。調査及び検証を踏まえた対策が、対象施設で行われるとともに、日本アイスホッケー連盟の対策に随時反映された。<sup>67), 68)</sup>

#### C4.1. クラスター事例の概要

##### 1) COVID-19 クラスターの概要

2022年1月15日及び16日に北海道釧路市の釧路アイスアリーナで行われたアジアリーグアイスホッケーの試合が開催され、選手及び関係者、大会運営の関係者、観客によるCOVID-19のクラスターが発生した。

図2-1に示すように、選手及びチーム関係者が発症した後、観客及び大会関係者の発症が増加した。陽性者172の内、観客は102名(59%)を占めた。選手42名中の陽性者は42名(100%)、チーム関係者17名中の陽性者は13名(76%)、大会関係者(アイスリンク上)14名中の陽性者は5名(36%)、大会関係者(アイスリンク外)62名中の陽性者は10名(16%)、観客867名中の陽性者は102名(12%)であった。ゲノム解析では、オミクロン株(B.1.1.529系統)と一致した。

図2-2に示すように、観客の来場者数に対する陽性者数の比は、1月15日、16日の両日に共通した偏りが見られた。西側(J,A,B,C)は11～29%であり、特に西側中央席は24～29%で顕著に高かった。北側及び東側(D,E,F)は0～6%で比較的低かった。東側と南側(H,G)は7～12%で比較的高かった。南側(I)は0%で低かった。

アイスリンク上では、選手同士の接触、選手と大会関係者の接近があったが、観客と選手及びチーム関係者の間には接触及び接近はなかったと考えられた。複数の選手及びチーム関係者の発症は比較的早いことから、試合の時点で感染源となっていたと考えられた。アイスリンク上の選手から発生したウイルスを含むエアロゾルがアイスリンクから客席に流れたことで、観客が感染した可能性が指摘された。<sup>69)</sup>

なお、アイスホッケーの試合は、20分のピリオド(Period)を15分の休憩を挟んで3回(1P, 2P, 3P)行なう計約2時間であり、休憩時間に整氷車(電気式)による作業が行われる。<sup>70)</sup>

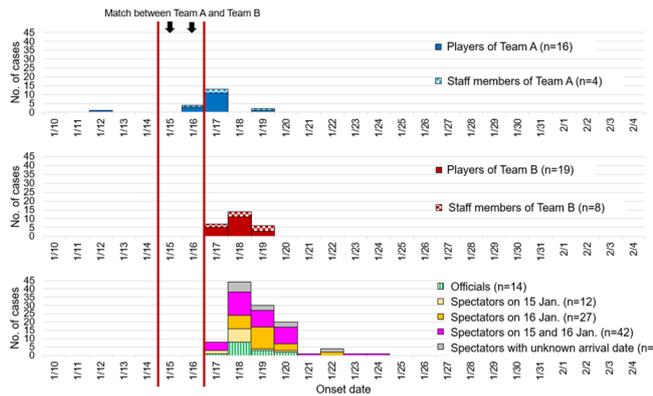


図 2-1 The number of the infected

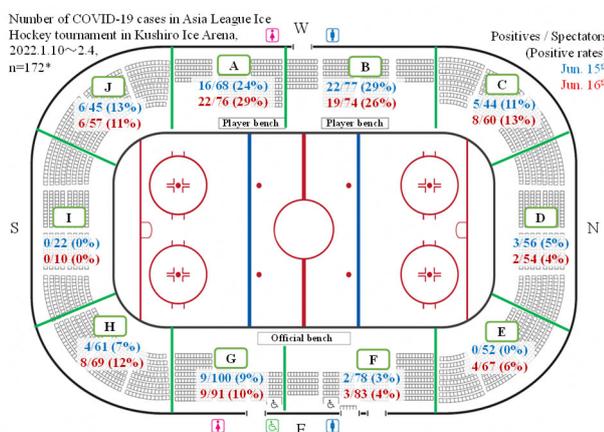


図 2-2 The distribution of the infected

## 2) 釧路アイスアリーナの建築・設備の概要

釧路アイスアリーナは、建築面積 6663 m<sup>2</sup>、延床面積 7564 m<sup>2</sup>、収容人数 3739 人(固定席 2539 人、立見 1200 人)、鉄筋コンクリート造の施設である。図 2-3 に示すように、アイスホッケーアイスリンク 1 面 (60m×30m) を有する。

アイスリンクの西側に選手ベンチ、東側にオフィシャルベンチがある。アイスリンクはアイスパックから観客を守るための透明の防護パネルで囲まれている。アイスリンク周囲のパネルの氷表面からの高さは、全周にある腰壁状の不透明のパネルは 107cm、東側 (サイドライン) の透明防護パネルは 180cm、南側及び北側 (エンドライン) の透明防護パネルは 240cm である。<sup>16)</sup>

図 2-4 に示すように、西側の選手ベンチ部分 (図 2-2 の A,B) には防護パネルが無い。同図に示すようにアイスリンク内の冷気は、選手ベンチから流出することがスモークを用いて可視化されている。一方、オフィシャルベンチの南側 (図 2-2 の G、F) は、防護パネルがある。ただし、オフィシャルベンチ付近の (図 2-2 の G,F) のゴール収納部分には開口部があるが、試合時には閉鎖されている。開口部には隙間があるが、スモークの可視化ではこの部分からの冷気の流出は見られなかった。

図 2-5 に示すように、空調機 (AHU2 台) が 2 階北側に設置されている。図 2-5 及び図 2-6 に示すように、アイスリンクの西側と東側の天井付近の 2 本のダクト (900Φ) につながる各ダクト 9ヶ所の円形給気口 (350Φ) からアイスリンク中央側に向け、斜め下方に給気される。2 階通路の北側に 2 つの還気口があり、空調機につながっている。天井付近に排気ファンが 6 台ある。空調換気的设计値は、以下の通りである。外気量は 12000(m<sup>3</sup>/h) で、給気風量は 42000(m<sup>3</sup>/h) である。排気量は、12000(m<sup>3</sup>/h) である。外気量は必要換気量 30 m<sup>3</sup>/(h・人) の 400 人分である。

試合が行われた両日の外気条件は、図 2-7 に示すように 15 日の午後は北風が夜にかけて強くなり、16 日の午後は特に強くなかった。また、図 2-8 に示すように測定時のサーモカメラ (testo 883) によるアリーナ内の表面温度 (3 月 1 日 13:28) は、給気口 15℃、天井面 8℃、客席 5℃、アイスリンク表面 -2℃ で、上下に大きな温度差がある。このような上下温度差は、クラスター発生時も同様であったと考えられる。



図 2-3 Inside of Kushiro Ice Arena

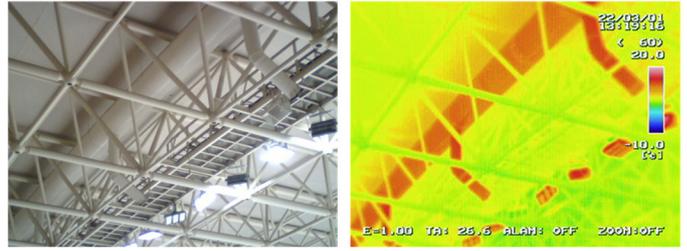


図 2-6 Air supply ports and temperature



図 2-4 Cold airflow from the rink to the player bench

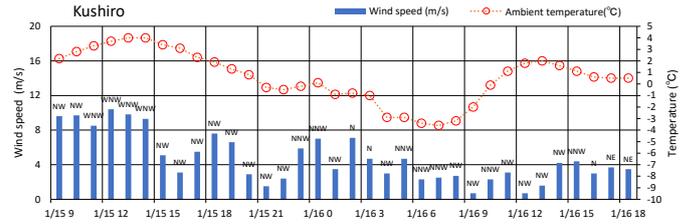


図 2-7 Climate condition at the cluster

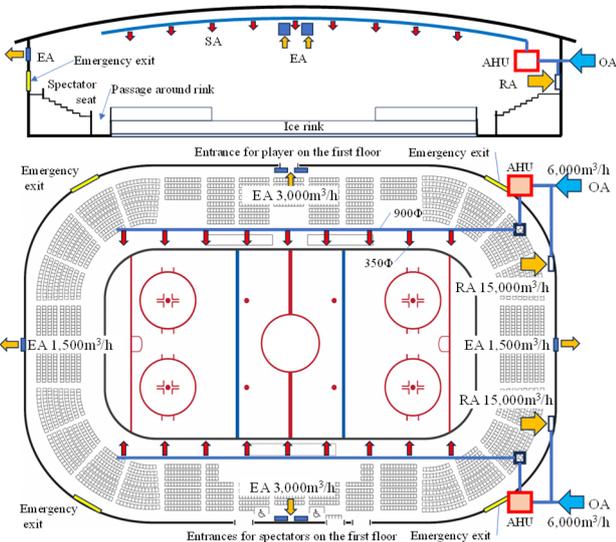


図 2-5 Air conditioning and ventilation facilities of the arena

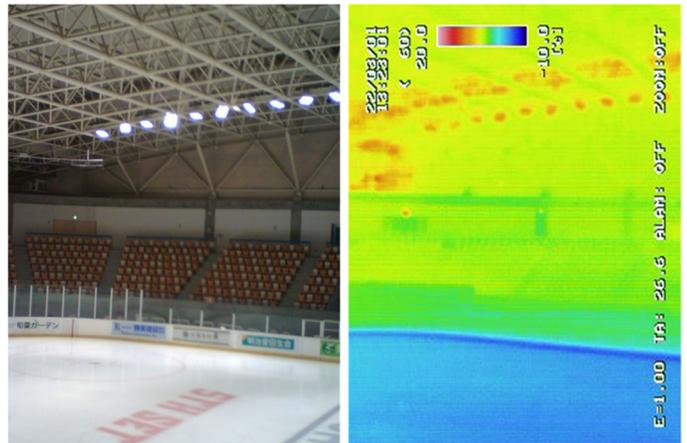


図 2-8 Thermos-camera image of the inside of the arena

## C4.2. 空調換気性状の調査

### 1) 調査の概要

調査は、2022年2月～3月に行われた。建物及び空調換気設備に関する調査を行い、換気性状及びエアロゾル拡散性状に関する以下の測定を行った。

#### (ア)換気性状

アイスアリーナの換気性状を把握するために、アイスリンク内でボンベからCO<sub>2</sub>を発生させ、アイスリンク内、客席等の濃度 (T&D TR-72) を測

定し、各測定点の濃度減衰から換気回数を算出した<sup>17)</sup>。

#### (イ)エアロゾル拡散性状

試合時の選手の運動によるエアロゾル拡散性状を確認するために、アイスリンク内でスモークジェネレータ (Sharelife 400W,ANTARI FLR-5) からパーティクルを発生させた。アイスリンク内に広がった後に、図 2-9 に示す練習試合を行った。各所のパーティクル濃度 (ワッティー株式会社 HYPM PM2.5 センサー,0.3~10.0 $\mu$ m)を測定し、クラスター発生時のエアロゾル拡散性状に関する基礎データとした。



図 2-9 Reproduction of the ventilation characteristic at the cluster by a period game

### C4.3. 換気性状の測定と結果

#### (ア)換気性状

アイスリンク内に向けてボンベから CO<sub>2</sub> を発生させ、各所の高さ 1.6m の濃度が概ね 1000ppm 以上になった 5 分間で、計 14 kg を発生させた。その後の濃度推移から換気回数を算出した。測定はクラスター発生時の空調換気設備運転を再現し、室内温度が安定している状況で実施した。図 2-10 及び図 2-11 に示すように、温湿度・CO<sub>2</sub>濃度測定器 (T&D TR-72) を設置して連続測定 (10 秒間隔) を行った。なお、図 2-12 に示すように、測定時 (3 月 1 日の 12 時~15 時) は、南西の風が強かった。

アイスリンクの換気性状について、以下の結果が得られた。図 2-13 に示すように、アイスリンクの温度は高さ 0.6m と 2.8m で約 2°C の差があった。選手ベンチは、南側ではアイスリンクの 1.6m に近い温度であるが、北側は比較的高かった。オフィシャルベンチ、西側の通路は 6~7°C で比較的高かった。客席は、7°C 程度で比較的高かった。CO<sub>2</sub>濃度は、図 2-14 に示すように、発生停止時 (0.1hour) にアイスリンク中央の高さ 0.6m で 2000ppm に達したが、アイスリンク中央の高さ 2.8m では 700ppm 程度であった。アイスリンク内の測定点全体を通じ、高さ 1.6m が 0.6m よりも濃度が低く推移した。図 2-15 に示すように、選手ベンチはアイスリンクの高さ 1.6m と比較的近い濃度で、南側が北側よりも概ね高く推移した。オフィシャルベンチと西側の通路は、選手ベンチよりも低く推移した。西側客席は、アイスリンク、選手ベンチ、通路よりも低く推移し、800ppm 以下であった。このように、アイスリンクの低層 (0.6m)、中層 (1.6m) と選手ベンチ、西側通路、西側客席の順で、濃度が高く推移した。

図 2-16 に、CO<sub>2</sub>濃度減衰 (0.25~0.45 hour) から算出した換気回数を示す。同一の大空間内で不均一となっている状況で、各測定点への CO<sub>2</sub>の流入と流出の差によって生じる CO<sub>2</sub>濃度減少から算出したものである<sup>17)</sup>。アイスリンクの高さ 0.6m の換気回数 (1/h) は東が 2.3 で最も高く、その他は 1.2~1.4 であった。アイスリンクの高さ 1.6m の換気回数は 0.8~1.4 で、高さ 0.6 と同程度であった。高さ 2.8m の換気回数は 0.5 であり、0.6m 及び 1.6m よりも小さかった。選手ベンチは、1.4 と 2.1 であり、アイスリンクの高さ 0.6m 及び 1.6m と大きく異ならなかった。オフィシャルベンチは 0.9 であり、アイスリンクの 1.6m と同程度であった。西側の通路は北が 0.4 で南が 1.6 であり、南側が大きかった。この傾向は選手ベンチと同様であった。客席は、0.0~0.3 であり、小さかった。図 2-14 及び図 2-15 に示す濃度推移を踏まえると、

アイスリンク内の空気は、特に南側の選手ベンチを介して、通路、客席に流れ、客席ではある程度停滞したと考えられた。

#### (イ)エアロゾル拡散性状

選手の運動によるエアロゾル拡散性状を確認するために、アイスリンクの南側と北側でスモークジェネレータからパーティクルを発生させた後に、プロリーグの選手が練習試合を行った。以上の条件で、各所のパーティクル濃度（重量濃度）をPMセンサーで測定した。なお、測定時の外気温は2.0℃、アリーナ内の温度は、アイスリンク高さ0.6mが4.0℃、2.8mが6℃、選手ベンチが4.5℃、客席は5.0～6.0℃程度で上下温度差があった。

図2-17に、スモーク発生開始後のパーティクル濃度の推移を示す。スモークの発生に伴って、西側の南入口、選手ベンチで濃度が上昇し、続いて西側の中央入口の濃度が上昇した。なお、選手ベンチ南側は初期にデータの欠損があった。客席では、0.1hour以降に濃度のピークが見られ、0.2hour以降に濃度の減少が見られた。

スモークを停止し、同図の0.27hourから20分間(0.33hour)練習試合が行われた。なお、練習試合中はアイスリンク内のパーティクル濃度の測定は出来なかった。図2-18に、練習試合中の濃度減衰から算出した換気回数を示す。選手ベンチ及び西側通路の換気回数は、0.9～1.6であり、練習試合が行われなかった場合のCO<sub>2</sub>による換気回数(0.4～2.1)と大きく異ならなかった。しかし、客席の換気回数は、1.1～1.6であり、CO<sub>2</sub>による換気回数(0.0～0.3)よりも顕著に大きくなった。この差の要因として、選手の動きが気流及びエアロゾル拡散に影響し、アイスリンクから客席へのエアロゾルの拡散が早いとともに客席での濃度減衰が早くなった可能性が考えられた。



図2-10 Measurements of CO<sub>2</sub> and particles in ice rink

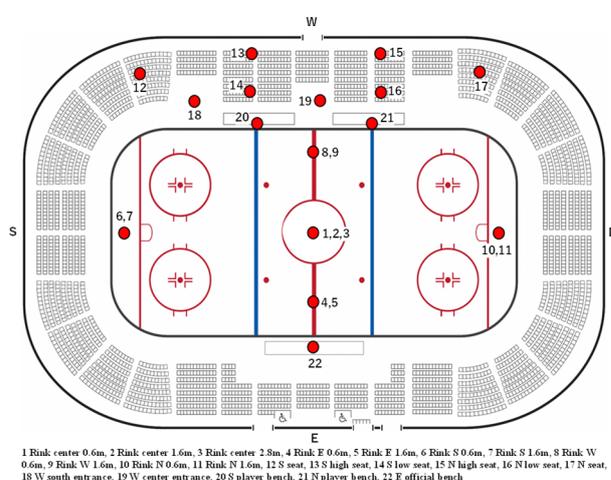


図2-11 Measurement points

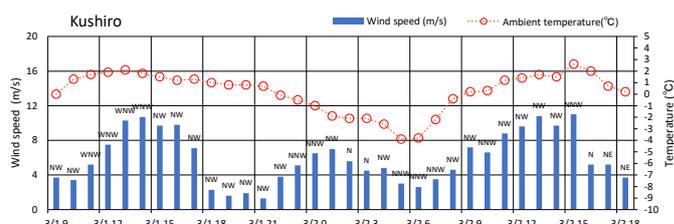


図2-12 Outside conditions of measurements

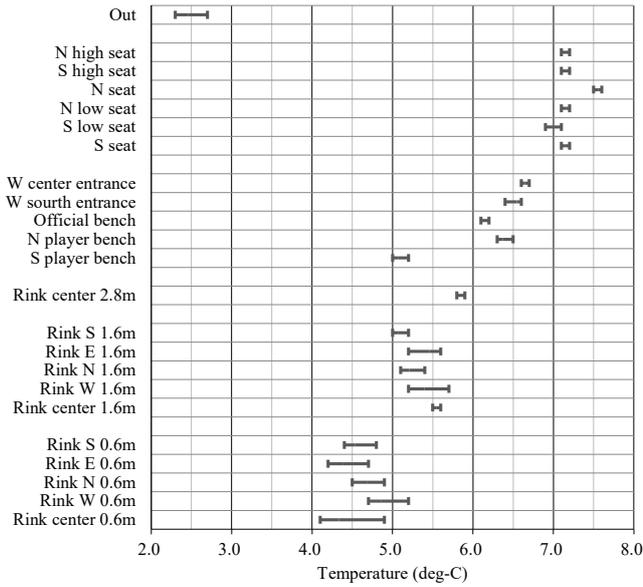


Figure 2-13 Temperatures of measurements (13:00~13:36)

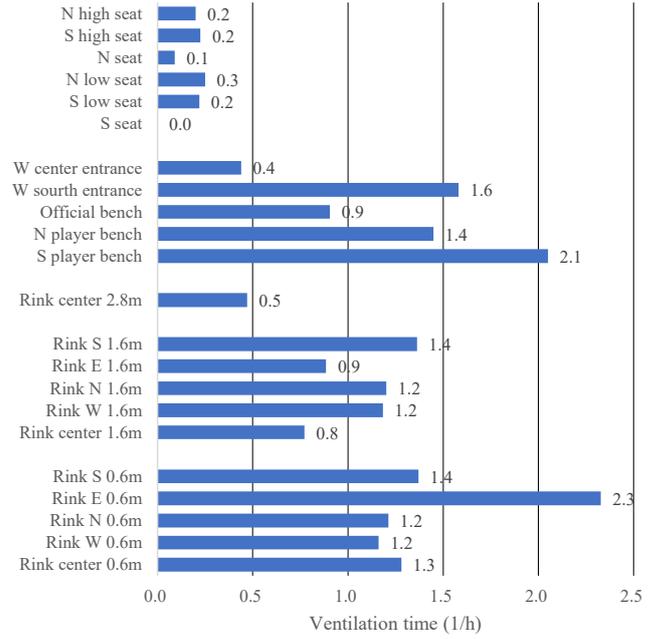


Figure 2-16 Ventilation times using CO<sub>2</sub> concentration decay

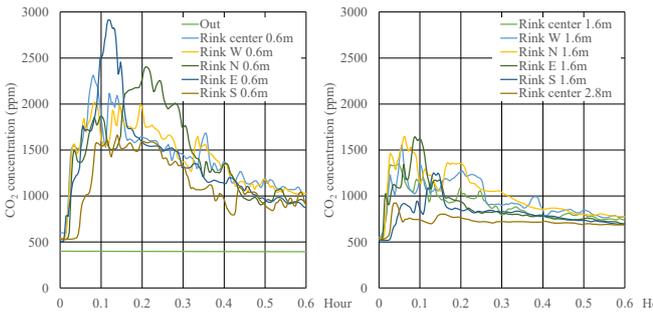


Figure 2-14 CO<sub>2</sub> concentrations in ice rink

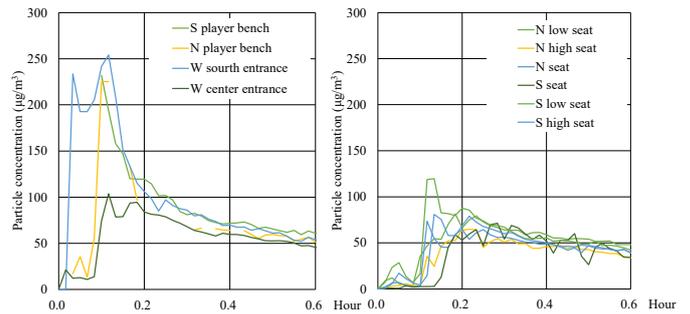


Figure 2-17 Particle concentrations of training game

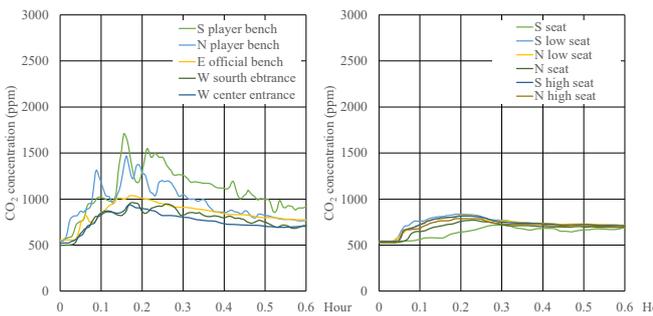


Figure 2-15 CO<sub>2</sub> concentrations in player benches and audience seats

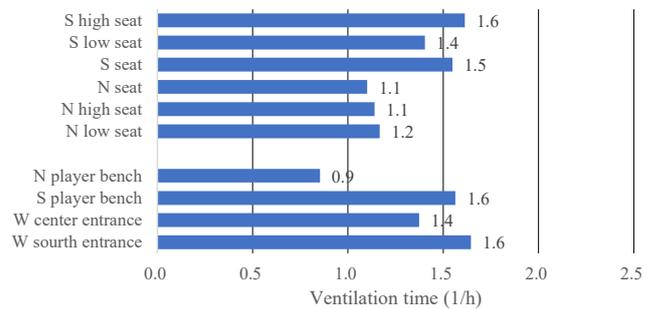


Figure 2-18 Ventilation times particle concentration decay

#### C4.4. クラスター発生時の CO<sub>2</sub> 濃度及びウイルス濃度の試算

ウイルスを含むエアロゾルによる感染（エアロゾル感染）のリスクは不明な点が多い。<sup>72)~86)</sup> 以下のような仮定に基づいてウイルス濃度及び吸引量を試算し、エアロゾル感染が指摘された広州のレストランにおける事例<sup>81), 87), 88)</sup>と比較した。

感染者からのウイルス放出量には大きな幅があるとされ、<sup>89, 90)</sup>代謝量や咳の有無によって大きく変わる。代謝量も運動量によって変わり、アイスホッケーの試合は運動が激しく代謝量は安静時の10倍に及ぶ可能性がある。<sup>91)</sup> ウイルス吸引量はマスクの効果、呼吸量の影響を受ける。呼吸量は代謝量の影響を受ける。なお、クラスター発生時には、選手、レフリー、観客のほとんどはマスクをしていなかった。

対象のクラスターでは、選手から放出されたウイルスを含むエアロゾルが客席に到達し、観客が吸引することで感染した可能性が指摘されている。また、西側客席の感染率が他の席に比べて顕著に高いとともに、アイスリンクから西側客席へのエアロゾルの拡散が確認されているため、西側客席に注目した。

アイスリンクで発生した CO<sub>2</sub> 及びパーティクルをウイルスのトレーサーとし、アイスリンク上の選手・レフリー及び西側客席の観客のウイルス吸引量を試算した。トレーサーが単位量発生した場合の濃度応答  $r(t_i)$  が既知となれば、図 2-19 に示すように任意の発生パターンに対する濃度  $C(t_i)$  を、単位応答の積み上げ(畳み込み積分)によって算出することが出来る。外気濃度を  $C_{out}$  とすると、任意の発生  $m(t_i)$  がある場合の濃度  $C(t_i)$  を、以下のように示すことが出来る。

$$C(t_i) = \sum_{k=0}^{i-1} \{m(t_{i+k}) \cdot r(t_{i+k})\} + C_{out} \cdots \cdots 1$$

図 2-20 に、CO<sub>2</sub> 発生時の濃度変化を示す。同図の Space1 は、アイスリンク内、選手ベンチ、西側

通路を含む、アリーナの低層で比較的濃度の高い空間としている。Space2 は、西側観客席である。それぞれの空間内の測定点の平均値を Space1(Measured)とした。また、この後半の 20 分間の濃度減衰曲線を延長した濃度を Space1(predicted) とした。同様に、Space2(measured)、Space2(predicted)とした。

Space1 の濃度が上昇した後に Space2 の濃度が上昇してピークを示し、その後減衰した。減衰は、Space1 の方が Space2 よりも早くなった。クラスター発生時の試合における 3 ピリオドと休憩の計 2 時間の Space1 と Space2 の濃度を算出した。図 2-21 は、この間の選手からの発生パターンである。表 2-1 に示すように、CO<sub>2</sub> の発生量は、選手の代謝量が大きい (10.0 Mets) ことを想定し、一人当たりの発生量を 0.132 m<sup>3</sup>/(h・人)とし、アイスリンク内の選手 22 人から 2.90 m<sup>3</sup>/h の CO<sub>2</sub> 発生があると仮定した。

図 2-22 は、アイスリンク内で発生した CO<sub>2</sub> による Space1 及び Space2 の濃度推移である。いずれの空間でもピリオドの時間に濃度が上昇し、第 3 ピリオド終了時に最も高くなった。なお、選手は休憩時には、この空間の外にある控室に移動するため、CO<sub>2</sub> の発生はないとした。実際には、アイスリンク外の観客などからも CO<sub>2</sub> が発生するため、より高濃度になったと考えられる。

表 2-1 に示すように、安静時の呼気中のウイルス量を 244(copies/10L)と仮定し、選手の代謝量 (10.0 Mets) を考慮して、ウイルス発生量を 2440(copies/10L)とした。この発生量は、呼気中のインフルエンザウイルスの RNA 数<sup>20)</sup>を参考にしたものである。インフルエンザウイルス中の RNA 数が 8 で、新型コロナウイルスの RNA 数が 1 であることを考慮して、呼気中のウイルス RNA 数 (copies) を設定した。この仮定は、ウイルスの吸引量を広州レストランの事例 (表 2-1 の A cluster case in a restaurant)<sup>18), 19)</sup>に対して相対的に比較するために設定したもので、感染リスクを定量す

るものではない。以上の設定に基づいて、アイスリンク内で  $1930.5 \times 10^3$  (copies/h) のウイルス発生を仮定した。

図 2-23 は、アイスリンク内の選手の半数にあたる計 22 人から発生したウイルスによる、Space1 及び Space2 のウイルス濃度の推移である。ウイルス濃度の推移は CO<sub>2</sub> 濃度の場合と類似し、第 3 ピリオド終了時に最高濃度になった。選手及びレフリーが吸引するアイスリンク内で 216 (copies/m<sup>3</sup>)、観客が吸引する客席で 151 (copies/m<sup>3</sup>) に達した。

図 2-24 は、Space1 の選手及びレフリーと Space2 の観客のウイルスの吸引量を示す。選手及びレフリーは試合中のみに吸引量が増加する推移となり、観客の吸引量は、休憩時を含めて連続的に増加した。選手及びレフリーの吸引量は  $452$  (copies $\times 10^3$ ) となり、観客の吸引量は  $115$  (copies $\times 10^3$ ) となった。

広州レストランのクラスター事例をモデルに、空間内の約半数が感染した吸引量を試算すると、吸引時間 1.5 時間、換気量 3.0 m<sup>3</sup>/(h・人)、代謝量 1.5 Mets、感染者 1 名、空間内人数 21 人とすると、同様の算出方法による吸引量は 113 (copies $\times 10^3$ ) となる。従って、選手及びレフリーの感染リスクは非常に高かった可能性があると考えられる。また、西側客席の観客の感染リスクは否定できない状況であったと考えられる。また、広州レストランの事例は武漢株であったが、釧路アイスアリーナのクラスターはオミクロン株によるものであったため、より感染リスクが高かった可能性があると考えられる。

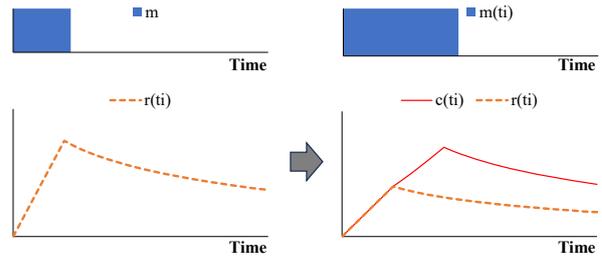


図 2-19 Concentration-response and integration

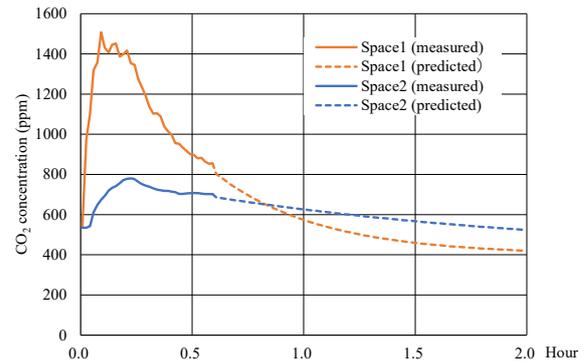


図 2-20 CO<sub>2</sub> concentration responses

表 2-1 Release of CO<sub>2</sub> and virus

CO <sub>2</sub>	Release (m <sup>3</sup> /h)
Players*	2.90
Virus (SARS-CoV-2)	Release (copies/h) $\times 10^3$
Players **	1930.5
A cluster case in a restaurant ***	13.16

\* 22 players on the ice rink, Mets 10, Respiration of a player 3600 l/h

\*\* 22 players on the ice rink are infected, Mets 10,

RNA of respiration 1950/8 (copies /10L) , Respiration of a player 3600 l/h

\*\*\* spectators, Mets 1.5, Respiration of a spectator 540 l/h

\*\*\* A person is infected, Mets 1.5, Ventilation rate a parson 3 (m<sup>3</sup>/hp)

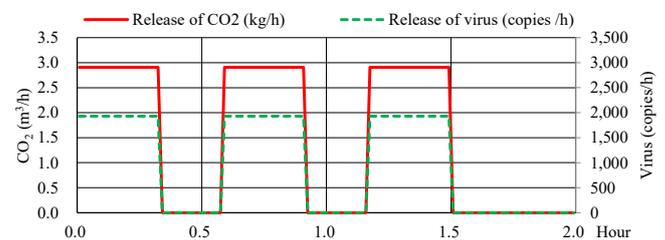


図 2-21 Release pattern of CO<sub>2</sub> and virus

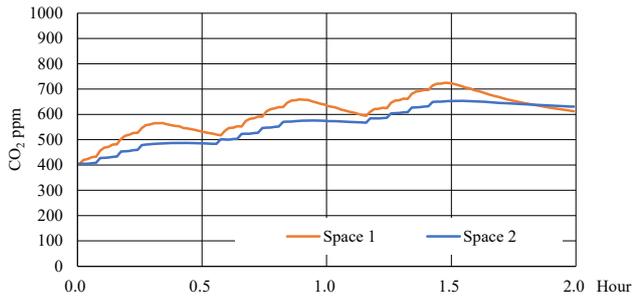


図 2-22 Predicted CO<sub>2</sub> concentrations

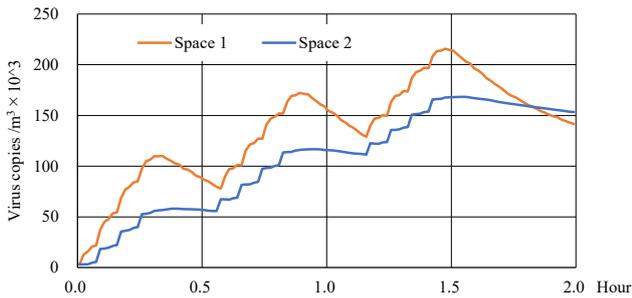


図 2-23 Predicted virus concentrations

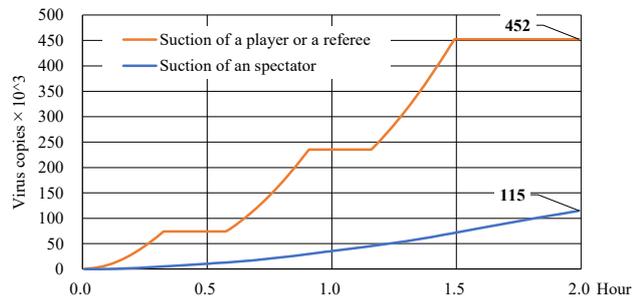


図 2-24 Predicted suction rates of virus

#### C4.5. エアロゾル感染対策の検証

アイスリンクから客席へのエアロゾルの拡散を抑制することでクラスターを防止する方法を検討し、以下の対策案を作成した。図 2-25 及び図 2-26 に示すように、選手出入口の一つにファンを設置（図中の Exhaust fan、以後は対策ファンと記す）し、アリーナ空間の下層に停滞する冷気を排出することで、アイスリンクから客席へのエアロゾルの上昇を抑制する。

対策案の効果を検証するために、表 2-2 に示す 4 条件のエアロゾルの拡散性状の測定を行った。

対策ファンの運転の有無に加えて、外気の入力の必要性を確認するために 2 階非常口の開放の有無を条件に加えた。なお、対策ファン停止時は、対策ファンを設置したドアを閉鎖して、通気を止めた。

図 2-27 に示すように、アイスリンク中央でスモークジェネレータからパーティクルを高さ 0.8m で発生させ、図 2-28 に示す測定点のパーティクル数（カノマックス パーティクルカウンター Model 3889）を測定した。同図に示すように、スモークは水平方向に広がり、図 2-4 に示すように選手ベンチに流出した。測定時の外気条件は、図 2-29 に示すように風が強く、2 階非常口を開放した条件では、開口部の気流に影響したと考えられた。

図 2-30～図 2-33 に、スモークによる可視化を行った結果を示す。条件 1 では、図 2-30 に示すようにスモークは下層に広がりながら南側の選手ベンチから流出するとともに、アイスリンクの北側に広がった後に全体に広がった。選手ベンチ裏に設置された対策ファンの影響によって、南側に流れた可能性が伺える。条件 2 では、図 2-31 に示すように条件 1 と同様に主にアイスリンクの北側に広がったが、条件 1 よりもスモークの希釈が早く進んだ。クラスター発生時の条件である条件 3 では、図 2-32 に示すように、条件 1 よりも高くスモークが広がり、同様にアイスリンクの北側に広がった。さらに、選手ベンチから流出し、北側の選手ベンチの裏にある客席（図 2-2 の B）の 4 段目まで目視できる程度に上昇した。また、南側の選手ベンチの裏にある客席（図 2-2 の A）の 2 段目まで目視できる程度に上昇した。条件 4 では、図 2-33 に示すように、条件 3 の条件で残った客席のスモークが次第に透明になった。

スモーク停止後 16 分後の画像を比較すると、アイスリンクのスモークの状況は以下のようになった。条件 1 ではアイスリンク全面で低層に残った。条件 2 はアイスリンク全面で少ない。条件 3 と条

件 4 では北側に残った。客席については、条件 3 では明らかにスモークが残ったが、条件 1、条件 2、条件 4 では、客席のスモークは確認できなかった。以上の可視化実験の結果から、クラスター発生時の条件（条件 3）では、アイスリンク上のエアロゾルは西側客席の少なくとも中段まで上昇したと考えられる。対策ファンはアイスリンク上のエアロゾルの客席への上昇を抑制すること、非常口の開放は客席のエアロゾルを希釈する効果が期待されることが示された。

図 2-34 及び図 2-35 に、測定点のパーティクル濃度の推移を示す。この濃度は、パーティクル粒径  $1\mu\text{m}$  以上  $10\mu\text{m}$  以下の合計値である。いずれの測定点でも小粒径の比率が高く、 $1\mu\text{m}$  未満のパーティクルは測定限界を一時超えた。このため、 $1\mu\text{m}$  以上のパーティクル濃度を用いて分析を行った。

図 2-34 に示す通路の濃度は、選手ベンチのある西側の通路では、スモーク発生後に次第に上昇した。対策ファンを運転している条件 1 と条件 2 の場合の濃度上昇に対して、対策ファンを停止している条件 3 と条件 4 の場合の濃度上昇は顕著に大きかった。オフィシャルベンチのある東側の通路では、上昇がほとんど見られなかった。対策ファンの有無によらず、アイスリンク内のエアロゾルは東側 客席へほとんど流れていないことが確認された。

図 2-35 に示す客席の濃度は、対策ファンを運転している条件 1 と条件 2 では比較的強く推移したが、対策ファンを停止している条件 3 と条件 4 では、顕著に高くなった。

条件 1 では、スモーク発生後に西側の南客席の下で濃度上昇が見られた。条件 2 では、西側の南客席の下が若干高い状況が続き、西側の北客席の下、西側の北客席の上、西側の南客席の上でも若干の濃度上昇が見られた。条件 3 では、いずれの客席でも濃度上昇が見られた。その中では西側の北客席の上の濃度上昇が遅かった。条件 4 では、

客席の上では高い状況が続いたが、客席の下では低下傾向が見られた。また、いずれの測定点でも変動が大きく、非常口の開口を介して外部の強風の影響があったと考えられる。濃度推移の状況は、スモークの可視化結果と概ね整合している。

図 2-29 に示すように、測定時（3月19日の12時～14時）は、北東から北北東の風が強かった。非常口を開放している条件 2 と条件 4 では、主に東側の非常口の開口部から外気が流入したと考えられる。外部風の影響による濃度変動が発生したと考えられる。

図 2-36 に、対策ファン運転時のスモーク発生後の平均濃度と標準偏差を示す。対策ファンに近い西側通路の濃度が比較的高くなった。また、条件 1 よりも条件 2 の濃度が高く、非常口の開放によるアリーナ内の気流変化が影響した可能性が考えられた。図 2-37 に、対策ファン停止時のスモーク発生後の平均濃度と標準偏差を示す。条件 3 と条件 4 の平均濃度に大きな差はないが、非常口の開放によってむしろ濃度が上昇した。条件 2 の場合と同様に、非常口の開放によるアリーナ内の気流変化が影響した可能性が考えられた。

表 2-3 に、各条件の結果の概要を示す。同表の基準化濃度は、条件 3,4 のスモークの発生時間が条件 1,2 の場合の 1.5 倍であるため、条件 1,2 の平均濃度を 1.5 倍に修正したものである。基準化濃度は、対策ファンの運転によって顕著に低くなった。また、非常口を開放した条件 2,4 の濃度は、閉鎖時に比べて若干高くなった。クラスター発生時の条件に近い、条件 3 と比較すると、基準化濃度は、条件 1 では 7%、条件 2 では 29%、条件 4 では 112%となり、対策ファンの効果が確認される一方、外気取入れ効果の不安定性が確認された。以上の結果から、対策ファンによる排気はアイスリンク上のエアロゾルの客席への拡散を抑制する効果を持つことが期待できると考えられた。対策ファンの排気のためには給気のための開口が必要であるが、強風時には外気流入によるアリーナ内

の気流変動が生じ、エアロゾルの拡散に影響する可能性がある。外気取入れの方法や外気条件の配慮が望まれること示唆された。

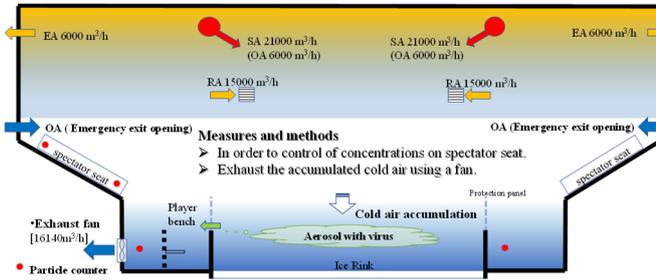


図 2-25 Ventilation measures and exhaust fan

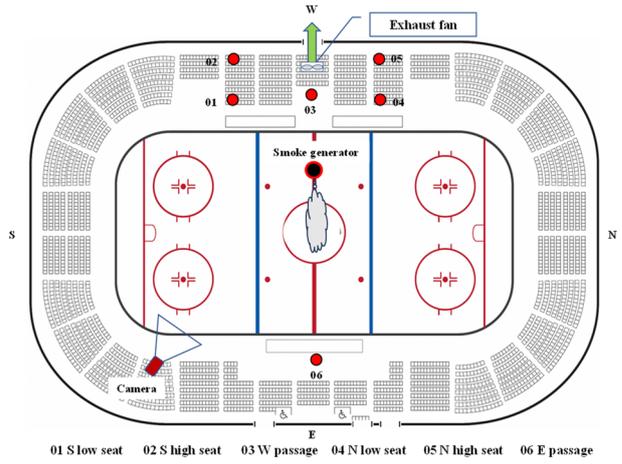
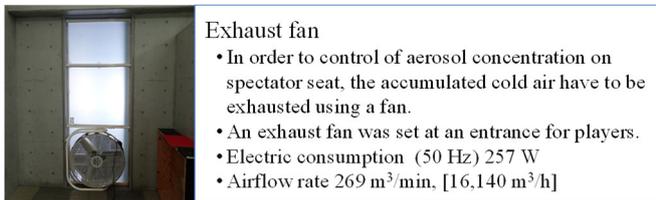


図 2-28 Measurement points of particle



Exhaust fan

- In order to control of aerosol concentration on spectator seat, the accumulated cold air have to be exhausted using a fan.
- An exhaust fan was set at an entrance for players.
- Electric consumption (50 Hz) 257 W
- Airflow rate 269 m<sup>3</sup>/min. [16,140 m<sup>3</sup>/h]

図 2-26 Exhaust fan to improve ventilation

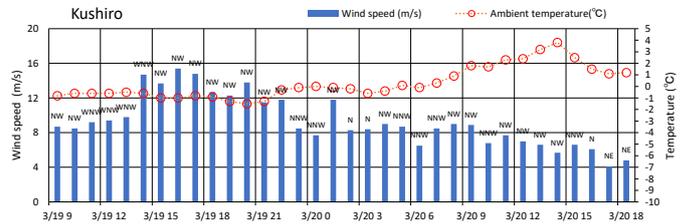


図 2-29 Outside conditions of measurements

表 2-2 Conditions of measurements to evaluate ventilation

	Condition 1	Condition 2	Condition 3*	Condition .
Exhaust fan**	ON	ON	OFF	OFF
Emergency exit ***	close	open	close	open

\*Condition 3 is the most similar condition of cluster case  
 \*\*Exhaust fan on the first floor behind the player bench, 1,6140 m<sup>3</sup>/h  
 \*\*\*Emergency exit on the second floor (open area :4 exit ×1.0 m<sup>2</sup>=4.0 m<sup>2</sup>)



図 2-27 Release of particle and diffusion

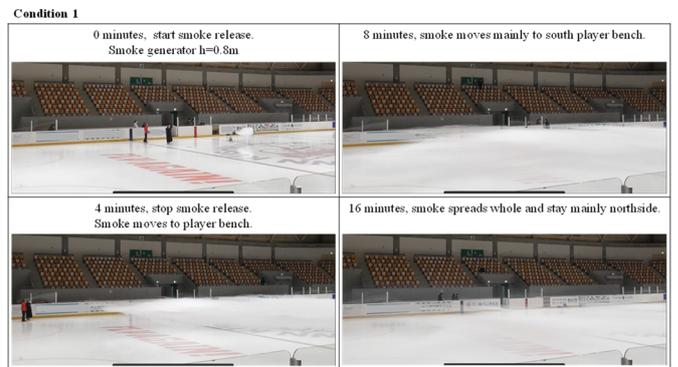


図 2-30 Visualization using smoke on condition 1

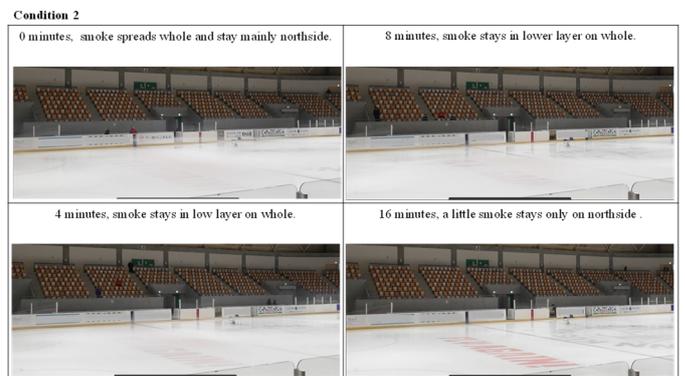


図 2-31 Visualization using smoke on condition 2

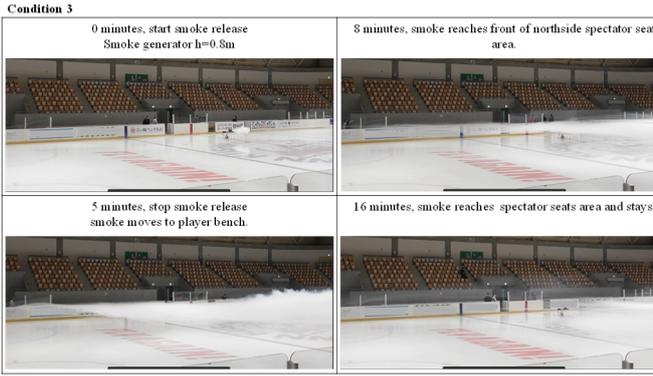


图 2-32 Visualization using smoke on condition 3

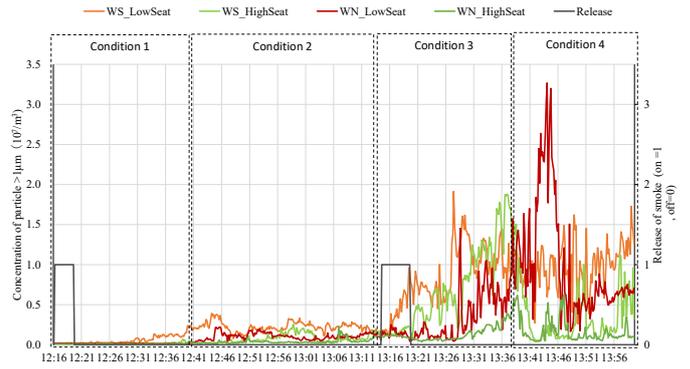


图 2-35 Particle concentrations of audience seats

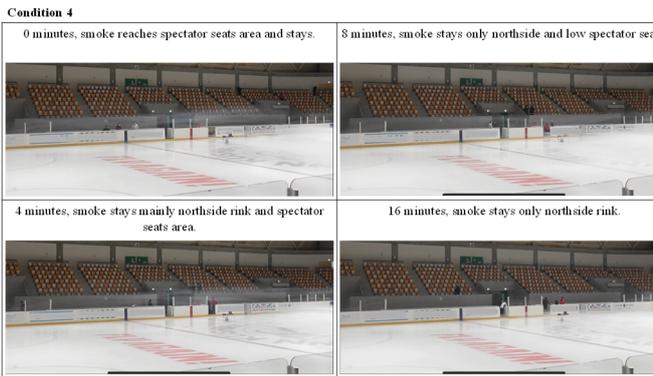


图 2-33 Visualization using smoke on condition 4

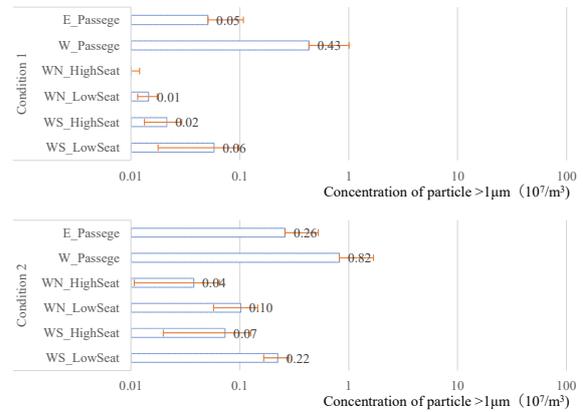


图 2-36 Particle concentrations of condition 1,2

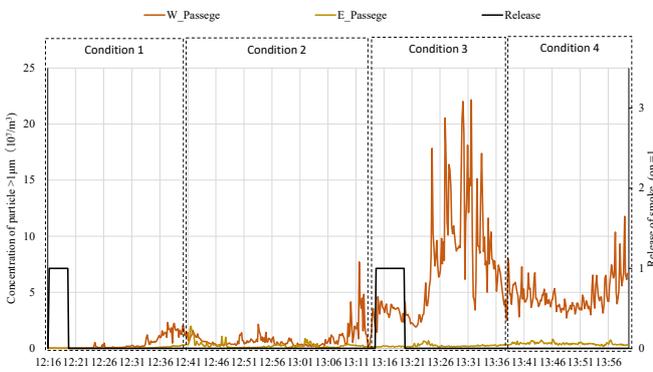


图 2-34 Particle concentrations of passages

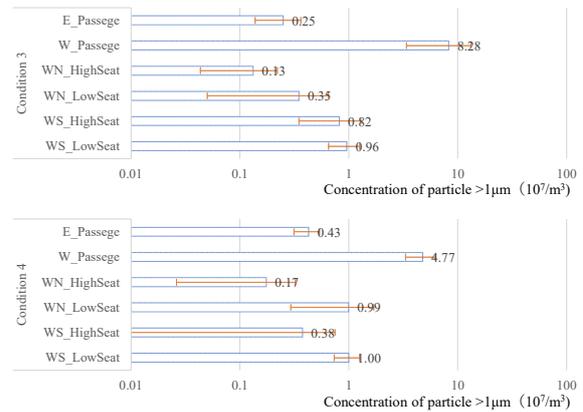


图 2-37 Particle concentrations of condition 3,4

表 2-3 Effect of exhaust fan

	Condition 1	Condition 2	Condition 3	Condition 4
Average concentration*	0.03	0.11	0.57	0.64
Normalized concentration**	0.04	0.16	0.57	0.64
Ratio to condition 3***	7%	29%	100%	112%

\*Concentration of particle >1 $\mu$ m (10<sup>7</sup>/m<sup>3</sup>)

\*\*Normalized using release time (condition 1,2= 4min,condition3,4=6min)

\*\*\* Condition 3 is the most similar condition of cluster case

## D. 結論

### D1. 浮遊飛沫感染に関するエビデンス整理

#### 浮遊飛沫 (エアロゾル) 感染の機序

従来の感染症の感染経路には、接触感染、飛沫感染、空気感染があるが、近年パンデミックが憂慮されてきたインフルエンザウイルスについては、空気感染の可能性は低いとされてきた。新型コロナウイルスについては、これまでの感染事例から、室内空気中の浮遊飛沫 (エアロゾル) による感染の可能性が指摘され、換気対策が求められた。国内外で、浮遊飛沫 (エアロゾル) 感染の対策が講じられたが、換気性状と感染リスクの関係は定量的に把握することが出来ていない。このため、現実的に可能な換気対策を講じてきた。

#### 室内空気環境とウイルス感染

室内空気環境の指標である二酸化炭素については、換気量に左右されるため、空気中の浮遊飛沫の濃度と関係する。温湿度については、インフルエンザに関する研究によって、ウイルスの不活化速度に影響するとされている。絶対湿度が高い場合と低い場合に、不活化速度が低下するとされており、建築物衛生法の温度及び湿度の基準は、一定の妥当性があると考えられている。しかし、新型コロナウイルスについては、空気中の浮遊飛沫及びウイルスに関する研究が過渡であり、その影響の機序に関する結論が得られていない。

#### 建築物の室内空気環境の実態

建築物の室内空気環境に関する既往の調査結果によると、二酸化炭素濃度が 2000 年以降高い傾向があり、浮遊飛沫 (エアロゾル) 感染対策の観点で好ましくない。同様に、冬期の相対湿度が顕著

に低い傾向があり、インフルエンザウイルスの感染防止の観点で好ましくない。

### D2. 興行場における浮遊飛沫感染リスクの分析

浮遊飛沫 (エアロゾル) 感染のリスクは、建築物、空調換気設備、維持管理、空気清浄やマスクなどの感染対策など、多数の要因の影響を受ける。また、感染者の行為や症状、被感染者の行為、滞在時間などによって、被感染者が吸引するウイルス RNA 量が変わり、感染リスクの程度を規定すると考えられる。主には、換気量が少なく、行為の代謝量が多い場合に感染リスクが高くなると考えられる。興行場では、施設用途によってさまざまな行為を想定する必要がある。行為に伴う代謝量を想定すると、感染リスクに大きな幅がある。しかし、換気設計ではこのような幅が考慮されていないため、代謝量が多い行為が行われる興行場では、浮遊飛沫 (エアロゾル) 感染のリスクが高くなっていると考えられる。興行場においては、用途に応じた換気対策が必要であると考えられる。

### D3. 浮遊飛沫感染対策に関するエビデンス整理

COVID-19 パンデミックに際し、政府機関によって換気の必要性が啓発された。夏期の熱中症、冬期の寒さ対策を踏まえた換気対策を示すなど、WHO 等の国外の情報、国内のクラスター調査の知見を踏まえ、日本独自の対策が発信された。また、感染抑制に必要な換気量、空気の流れに関する定量的な知見が非常に少ないと共に、変異株の流行の影響に関する定量的な推定も困難である中、国立感染症研究所はエアロゾル感染に関する整理を行い、政府の新型コロナウイルス感染症対策分科会は、エアロゾル感染対策として、空気の流れを考慮した効率的な換気方法を示した。これらの対応は、今後の新興再興感染症への対策に影響し、パンデミック時の空調換気運転のあり方、建築設備の設計と維持管理に関する課題を提起した。

### D4. 集団感染と浮遊飛沫感染対策に関する調査

クラスター発生時の換気性状については、CO<sub>2</sub> をトレーサーとしてアイスリンク内と客席の換気

回数を示した。クラスター発生時のエアロゾル拡散性状については、スモークを用いて練習試合時の選手の運動の影響を確認した。また、換気性状の測定結果に基づいて、アイスリンク内の選手及びレフリー、西側の客席の観客の感染リスクに関する試算を行い、選手等から観客へのエアロゾル感染の可能性を示した。

しかし、実際のクラスター発生時と測定及び分析の条件には、以下の相違点が挙げられる。実際のクラスター発生時には、休憩時に整氷車が使用され、整氷作業に伴うアイスリンク内空気の攪拌があったと考えられる。また、選手及び観客等の出入りによって出入口での通気やアリーナ内の気流変化が発生したと考えられる。従って、実際のクラスター発生時には、アイスリンクの冷氣溜まりから客席へのエアロゾルの移動、客席での拡散は、本測定及び分析の結果よりも顕著であった可能性がある。

エアロゾル感染対策の検証では、アイスリンク内空気の客席への拡散を抑制するために、西側の低層に排気ファンを設置した。スモークを用いた検証を行い、有意な効果を確認した。

しかし、試合中の選手の運動、整氷作業、観客の移動などによる空気の攪拌が、対策ファンの効果に一定の影響を及ぼす可能性がある。

本研究は、特定建築物の興行場に分類されるアイスアリーナにおける空調換気性状と COVID-19 クラスターとの関連性、エアロゾル感染対策の立案と効果検証を行った。アイスアリーナには、アイスリンクの氷の維持、透明防護ガラスの結露や曇りの防止、霧の発生防止などの特有の条件がある。このため、アイスリンク上の空気の安定維持を優先した、空調換気設備と運転制御が行われている。このような特有の空調換気性状の下で、アイスリンク内で選手などから発生したウイルスが冷氣溜まり中で蓄積する。さらに、透明防護パネルがない選手ベンチから流出して客席に拡散する

ことで、観客を含めた大きなクラスターが発生した。

興行場の用途、空調換気性状は多様であるため、感染リスクにも大きな差があると考えられる。このような多様性を踏まえた空調換気設備の設計と運転制御、感染対策が必要であることを、釧路アイスアリーナにおける COVID-19 クラスターの調査分析の結果は示したと考えられる。

#### <謝辞>

厚生労働省の新型コロナウイルス感染症対策本部、クラスター対策班、国立感染症研究所、国立保健医療科学院、北海道総合研究機構、自治体・保健所等の新型コロナウイルス感染症対策関係の皆様、日本建築学会、空気調和・衛生工学会、日本臨床環境医学会、建築環境・省エネルギー機構等の新型コロナウイルス感染症対策関係の委員会各位からご助言ご協力をいただいた。記して謝意を表す。また、北海道大学工学研究院 環境空間デザイン学研究室 菊田弘輝、同研究室の学生、大学院生、北海道釧路保健所、北海道保健福祉部、北海道立衛生研究所、国立感染症研究所 の各位によって実施された。また、釧路市、釧路市スポーツ振興財団、日本アイスホッケー連盟、釧路アイスホッケー連盟、アジアリーグアイスホッケー ジャパン オフィス および両チーム関係者の協力があった。記して謝意を表す。

## F. 研究発表

1. 論文発表
  - 1) Motoya Hayashi, State of Poor Ventilation and Indoor Air Environment in Buildings - Environmental Hypersensitivity from Perspective of a Building Environmental Hygiene Researcher -, Indoor Environment, Vol25, No1, pp.1-8, 2022.
  - 2) Takashi Kurabuchi, U. Yanagi, Masayuki Ogata, Masayuki Otsuka, Naoki Kagi, Yoshihide Yamamoto, Motoya Hayashi and Shinichi Tanabe, Operation of air-conditioning and sanitary equipment for SARS-CoV-2 infectious disease control. Japan Architectural Review, 4, 423-434, 2021. <https://doi.org/10.1002/2475-8876.12238>
  - 3) Motoya Hayashi, U Yanagi, Yoshinori Honma, Yoshihide Yamamoto, Masayuki Ogata, Koki Kikuta, Naoki Kagi, Shin-ichi Tanabe ; Ventilation Methods against Indoor Aerosol Infection of COVID-19 in Japan ;Atmosphere 14(1) 150-150, 2023.01.10
  - 4) 林基哉, 環境工学からの情報発信-予期せぬ事態に専門家がとるべきスタンスとは(<連載> コロナ備忘録), 日本建築学会建築雑誌,p36-39,2023.01
  - 5) 林基哉, 建築物環境衛生研究者からみた環境過敏症 建築物の換気不良と室内空気環境の実態,室内環境 25,p33-40,2022
  - 6) 林基哉, 【特集】 COVID-19 を振り返る 日本政府による新型コロナウイルス感染症のエアロゾル感染対策, 空気清浄 60 巻 5 号, 2023. 01.31
  - 7) 赤松大成,森太郎,林基哉,羽山広文, 新型コロナウイルス感染症流行下の寒冷地の学校教室における室内環境と換気代替手法の評価, 日本建築学会環境系論文集 Vol.803 p43-49,2023.01
  - 8) 金勲,阪東美智子,小林健一,下ノ 菌慧,鍵直樹,柳宇,菊田弘輝,林基哉, 接待を伴う飲食店における室内環境と感染症対策 (その1) : 建築設備の概要及びコロナ禍における換気運用と感染状況,日本建築学会環境系論文集 Vol.806 p300-306,2023.04
  - 9) Kosuke Minakuchi, Koki Kikuta, Hisashi Hagiwara, Kenji Miyazaki, and Motoya Hayashi, Effective Method to Collect Indoor Floating Aerosols Using Cooling Equipment, Atmosphere, 2023.11.
  - 10) 山田裕巳,本間義規,阪東美智子,林基哉; 宿泊施設の衛生的環境に関する実態調査 住宅宿泊事業法施行期の長崎・京都・大阪における室内環境調査; 日本建築学会環境系論文集 813,p.857-868,2023.11.
  - 11) 浅岡凌,海塩渉,鍵直樹,林基哉,澤地孝男,上野貴広; 新型コロナウイルス感染症蔓延時のオフィスにおける室内環境質の実態 (その1) : 室内環境の2時点比較および感染症対策との関連;日本建築学会環境系論文集 808,p.547-555,2023.06.
2. 学会発表
  - 1) 山崎佑基,菊田弘輝,玉村壮太,林基哉,室内環境が新型コロナウイルスの空気感染に与える影響に関する実験法,日本建築学会大会梗概集,2021.9
  - 2) 松永崇孝,菊田弘輝,吉住佳子,林基哉, 学校教室を対象とした新型コロナウイルス感染症対策における換気と空気清浄の効果検証 ,日本建築学会大会梗概集,2021.9
  - 3) 川崎嵩,菊田弘輝,林基哉,阪東美智子,長谷川兼一,澤地孝男, 新型コロナウイルス感染下における居住リテラシーに関するWEB調査 その2 冬期の調査結果,日本建築学会学術講演

梗概集,p901-902,2022.07

- 4) 尾方壮行,山本佳嗣,鍵直樹,林基哉,田辺新一,デスクパーティションが呼吸器エアロゾル粒子への曝露に与える影響,日本建築学会学術講演梗概集,p1331-1332,2022.07
- 5) 金勲,阪東美智子,小林健一,下ノ菌慧,鍵直樹,柳宇,菊田弘輝,林基哉,接待を伴う飲食店における換気と室内環境 感染症対策に関する実態調査,日本建築学会学術講演梗概集,p1355-1358,2022.07
- 6) 山本直輝,菊田弘輝,長谷川麻子,林基哉,新型コロナウイルス感染症のクラスター感染が発生したコールセンターの空気環境,日本建築学会学術講演梗概集,p1547-1548,2022.07
- 7) 赤松大成,森太郎,五宮光,林基哉,羽山広文,換気方式の異なる室内空間における換気効率の比較,日本建築学会学術講演梗概集,p2093-2094,2022.07
- 8) 浅井 敦人,柳宇,開原典子,本間義規,島崎大,戸次加奈江,伊庭千恵美,林基哉,映画館における室内空気質実態に関する調査研究 第1報 4Dと2D映画館における生菌と浮遊微粒子の測定結果,日本建築学会学術講演梗概集,p1393-1394,2023-07
- 9) 柳宇,開原典子,本間義規,島崎大,戸次加奈江,伊庭千恵美,浅井敦人,林基哉,映画館における室内空気質実態に関する調査研究 第2報 4Dと2D映画館付着細菌叢の解析結果,日本建築学会学術講演梗概集,p1395-1396,2023-07
- 10) 開原典子,柳宇,本間義規,島崎大,伊庭千恵美,戸次加奈江,林基哉,映画館における室内空気質実態に関する調査研究 第3報 観覧場内の温湿度及び二酸化炭素濃度の測定,日本建築学会学術講演梗概集,p1397-1398,2023-07
- 11) 松永崇孝,菊田弘輝,林基哉,換気と空

気清浄によるエアロゾル除去性能の評価,日本建築学会学術講演梗概集,p1561-1562,2023-07

## 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>

- 1) 厚生労働省,“商業施設の管理権限者へ向けて「換気の悪い密閉空間」を改善するための換気の方法”, 2020.04.03
- 2) 厚生労働省,“熱中症予防に留意した『換気の悪い密閉空間』を改善するための換気について”, 2020.06.17
- 3) 厚生労働省,“冬場における『換気の悪い密閉空間』を改善するための換気の方法”, 2020.11.27
- 4) 厚生労働省,“建築物における衛生的環境の確保に関する法律(昭和45年法律第20号)”, 2015.3.20
- 5) Li, Y., et al. (2007) “Role of Ventilation in Airborne Transmission of Infectious Agents in the Built Environment: A Multidisciplinary Systematic Review.” *Indoor Air* 17 (1): 2–18.
- 6) Menzies D et al. (2000) Hospital ventilation and risk for tuberculous infection in Canadian health care workers. *Annals of Internal Medicine*, 133(10):779–789.
- 7) Quin H, Li Y, Sun H, Nielsen PV, Huang X, Zheng X (2010) Particle removal efficiency of the portable HEPA air cleaner in a simulated hospital ward. *Build. Simul.* Vol.

- 3, No.3 pp.215-224.
- 8) Kevin P Fennelly, Particle sizes of infectious aerosols: implications for infection control, *THE LANCET Respiratory Medicine* VOLUME 8, ISSUE 9, P914-924, SEPTEMBER 01, 2020.
  - 9) ASHE (2013) Literature Review: Room Ventilation and Airborne Disease Transmission. Edit. Memarzadeh F. Chicago.
  - 10) Bloch AB et al.(1985) Measles outbreak in a pediatric practice: airborne transmission in an office setting. *Pediatrics*, 75(4):676–683.
  - 11) CDC (2003). Guidelines for environmental infection control in health-care facilities. *Morbidity and Mortality Weekly Report*, 52 (RR-10).
  - 12) WHO (2009) Natural ventilation for infection control in health-care settings. WHO Press Geneva.
  - 13) WHO (2014) Infection prevention and control of epidemic- and pandemic-prone acute respiratory infections in health care. World Health Organization, Geneva.
  - 14) Gesellschaft für Aerosolforschung, “GAeF position paper on understanding the role of aerosol particles in SARS-CoV-2 infection” (2020); [https://ae00780f-bbdd-47b2-aa10-e1dc2cdeb6dd.filesusr.com/ugd/fab12b\\_0b691414cfb344fe96d4b44e6f44a5ab.pdf](https://ae00780f-bbdd-47b2-aa10-e1dc2cdeb6dd.filesusr.com/ugd/fab12b_0b691414cfb344fe96d4b44e6f44a5ab.pdf)
  - 15) World Health Organization (WHO), “Coronavirus disease (COVID-19): How is it transmitted?” (2021); [who.int/news-room/q-a-detail/coronavirus-disease-covid-19-how-is-it-transmitted](https://www.who.int/news-room/q-a-detail/coronavirus-disease-covid-19-how-is-it-transmitted).
  - 16) S. Centers for Disease Control and Prevention (CDC), “Scientific brief: SARS-CoV-2 transmission” (2021); [www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/science/science-briefs/sars-cov-2-transmission.html](https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/science/science-briefs/sars-cov-2-transmission.html).
  - 17) 国立感染症研究所（掲載日：2022年3月28日），新型コロナウイルス（SARS-CoV-2）の感染経路について（[niid.go.jp](https://www.niid.go.jp/niid/)）
  - 18) Thomas P. Weber, Nikolaos I. Stilianakis, Inactivation of influenza A viruses in the environment and modes of transmission: A critical review, *Journal of infection* 57. pp.261-373, 2008
  - 19) Hemmes JH, Winkler K, Kool SM. Virus survival as a seasonal factor in influenza and poliomyelitis. *Antonie Van Leeuwenhoek*. 1962; 28: 221–33.
  - 20) G.J.Harper, Airborne micro-organism : Survival tests with four virus J.Hyg ; pp.479-486, 1961.
  - 21) Jeffrey Sharman, Melvin Kohn : Absolute humidity modulates influenza survival, transmission, and seasonality *PNAS* vol.106 no9; pp.3243-3248, March 3 2009.
  - 22) 倉渕隆,小笠原岳,熊谷一清,浅利雄太郎:インフルエンザの感染に影響するインフルエンザウイルス生存率と絶対湿度の関係について,空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 1339-1343, 2009.9
  - 23) F.L.Shaffer, M.E.Soergel and D.C.Straube, Survival of airborne influenza virus: Effects of propagating host, relative humidity, and composition of spray fluids, *Arch Virol*.1976;51(4):263-73. doi: 10.1007/BF01317930.
  - 24) Anice C. Lowen, Samira Mubareka, John Steel1, Peter Palese ,Influenza Virus Transmission Is Dependent on Relative Humidity and Temperature, *PLoS*

Pathogens · November 2007

- 25) 「建築物環境衛生管理に関する調査研究」平成 22 年度研究報告書, 財団法人ビル管理教育センター, 2011
- 26) 小林陽太郎他, 「ビルディングの環境衛生基準に関する研究」昭和 40 年度厚生科学研究報告書, 昭和 41 年 3 月
- 27) 林基哉他, 「建築物衛生管理基準の検証に関する研究」平成 29 年度厚生労働科学研究報告書, 2020 年 3 月
- 28) Rosti ME, Olivieri S, Cavaiola M, Seminara A, Mazzino A, 2020. Fluid dynamics of COVID-19 airborne infection suggests urgent data for a scientific design of social distancing. *Nature research, Scientific Reports*, (2020) 10:22426. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80078-7>
- 29) Zhao L, Qi YH, Luzzatto-Fegiz P, Cui Y, and Zhu YY, 2020. *Nano Lett.* 2020, 20, 7744–7750. <https://dx.doi.org/10.1021/acs.nanolett.0c03331>
- 30) Dabisch P, Schuit M, Herzog A, Beck K, et al, 2020. The influence of temperature, humidity, and simulated sunlight on the infectivity of SARS-CoV-2 in aerosols, *Aerosol Science and Technology*, <https://doi.org/doi:10.1080/02786826.2020.1829536>
- 31) Smither SJ, Eastaugh LS, Findlay JS, Lever MS, 2020. Experimental aerosol survival of SARS-CoV-2 in artificial saliva and tissue culture media at medium and high humidity, *Emerging Microbes & Infections*, 9:1, 1415-1417. <https://doi.org/10.1080/22221751.2020.1777906>
- 32) Biryukov J, Boydston JA, Dunning RA, Yeager JJ, Wood S, Reese AL, Ferris A, Miller D, Weaver W, Zeitouni NE, Phillips A, Freeburger D, Hooper I, Ratnesar-Shumate S, Yolitz J, Krause M, Williams G, Dawson DG, Herzog A, Dabisch P, Wahl V, Hevey MC, Altamura LA. Increasing Temperature and Relative Humidity Accelerates Inactivation of SARS-CoV-2 on Surfaces. *American Society for Microbiology*. 2020; 5(4): e00441-20. <https://msphere.asm.org/content/5/4/e00441-20>
- 33) Moriyama M, Hugentobler WJ, Iwasaki A, 2020. Seasonality of Respiratory Viral Infections. *Annual Review of Virology*, 7:83–101. <https://doi.org/10.1146/annurev-virology-012420-022445>
- 34) W.C.Hinds, *Aerosol Technology: Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles*, John Wiley & Sons (1982).
- 35) Morawska L et al.: Size distribution and sites of origin of droplets expelled from the human respiratory tract during expiratory activities. *Journal of Aerosol Science*. 40, 256–269. (2009)
- 36) Xie X et al.: How far droplets can move in indoor environments – revisiting the Wells evaporation–falling curve. *Indoor air*. 17: 211–225. (2007)
- 37) Yang W and Marr LC: Dynamics of Airborne Influenza A Viruses Indoors and Dependence on Humidity. *PlosOne*, 6: e21481. (2011)
- 38) 山崎佑基, 菊田弘輝, 玉村壮太, 林基哉, 室内環境が新型コロナウイルスの空気感染に与える影響に関する実験法, 日本建築学会大会梗概集, 2021.9
- 39) 松永崇孝, 菊田弘輝, 吉住佳子, 林基哉, 学校教

- 室を対象とした新型コロナウイルス感染症対策における換気と空気清浄の効果検証 ,日本建築学会大会梗概集,2021.9
- 40) Furuya Shousuke:Building Maintenance Low, Teikokuchiho-gyoseigakkai, pp.15-19, 1971 (in Japanese) 古谷章介:ビル管理法, 帝国地方行政学会,pp.15-19,1971
- 41) Ministry of health, labour and welfare : Act on environmental health in buildings, 2015.3.20 (in Japanese) 厚生労働省“建築物における衛生的環境の確保に関する法律 (昭和 45 年法律第 20 号)”, 2015.3.20
- 42) 金勲, 阪東美智子, 林基哉, 大澤元毅. 高齢者施設のおい環境と対策に関する全国調査, 日本建築学会環境系論文集 2018.4;83(746):393-401.
- 43) 開原典子, 林基哉, 金勲, 大澤元毅, 阪東美智子, 小林健一, 本間義規, 巖爽, 菊田弘輝, 羽山広文, 特別養護老人ホームの温熱環境に関する実態調査, 日本建築学会環境系論文集, Vol.83 No.745, 2018.3 ; pp.267-276.
- 44) 林基哉,本間義規,巖爽,菊田弘輝,羽山広文,加用現空,鈴木信恵,開原典子,金勲,阪東美智子,小林健一,大澤元毅. 寒冷地の高齢者施設における室内生活環境の年間特性 フィンランド・エスポー及び北海道・札幌における室内温熱空気環境の実態. 日本建築学会環境系論文集. 2019 ; 84 (761) : 699-708.
- 45) M HAYASHI, K KOBAYASHI, H KIM, N KAIHARA, The state of the indoor air environment in buildings and related tasks in Japan. J. Natl. Inst. Public Health, 69 (1).69-72. 2020.  
<https://www.niph.go.jp/journal/data/69-1/202069010008.pdf>
- 46) M Hayashi et al. Measures against COVID-19 concerning Summer Indoor Environment in Japan. Japan Architectural Review, 3, 608–620, 2020.  
<https://doi.org/10.1002/2475-8876.12183>
- 47) K Kurabuchi et al. Operation of air-conditioning and sanitary equipment for SARS-CoV-2 infectious disease control. Japan Architectural Review, 4, 423–434, 2021. <https://doi.org/10.1002/2475-8876.12238>
- 48) 厚生労働省,“新型コロナウイルス感染症の治療を行う場合の換気設備について”, 2021.04.07
- 49) 国立健康・栄養研究所 中江、田中、宮地、改訂版『身体活動のメッツ (METs) 表』 2012年4月11日改定
- 50) Jang S, et al. Cluster of Coronavirus Disease Associated with Fitness Dance Classes, South Korea. Emerg Infect Dis. Aug 2020;26(8):1917-20.
- 51) Cai J, et al. Indirect Virus Transmission in Cluster of COVID-19 Cases, Wenzhou, China, 2020. Emerg Infect Dis. 2020 Jun;26(6): 1343-5.
- 52) Katelaris AL, et al. Epidemiologic Evidence for Airborne Transmission of SARS-CoV-2 during Church Singing, Australia, 2020. Emerg Infect Dis. 2021 Jun;27(6):1677-80.
- 53) Toyokawa T, et al. Transmission of SARS-CoV-2 during a 2-h domestic flight to Okinawa, Japan, March 2020. Influenza Other Respir Viruses. 2021 Oct 3.
- 54) Motoya Hayashi, U Yanagi, Yoshinori Honma, Yoshihide Yamamoto, Masayuki Ogata, Koki Kikuta, Naoki Kagi, Shin-ichi Tanabe ; Ventilation Methods against Indoor Aerosol Infection of COVID-19 in Japan; Atmosphere 14(1) 150-150, 2023.01.10

- 55) Dong-Won Yoon; Kiyoung Lee; Yukio Yanagisawa; John D. Spengler Paul Hutchinson. Surveillance of indoor air quality in ice skating rinks. "Environment International Volume 22, Issue 3", 309-314, 1996.
- 56) Philip Demokritou; Qingyan Chen; Chunxin Yang; John Spengler. THE IMPACT OF VENTILATION ON AIR QUALITY IN INDOOR ICE SKATING ARENAS." Design and operation of HVAC systems, 407-412, 2000.
- 57) H. Guo; S.C. Lee and L.Y. Chan. Indoor air quality in ice skating rinks in Hong Kong. Environmental Research 94, 327–335, 2004.
- 58) Yukiko Abe; Yasushi Kondo and Yasuhiro Nagasawa. Measurement and CFD Simulation on Air Quality in Indoor Ice Skating Arena, The Society of Heating, Air-Conditioning Sanitary Engineers of Japan No94, 2004.
- 59) Health Canada. Best practices for improving air quality in ice arenas, <https://www.canada.ca/en/health-canada>, 2021.
- 60) United states Environmental Protection Agency. Indoor Air Quality and Ice Arenas, <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/indoor-air-quality-and-ice-arenas>, 2024.
- 61) ASHRAE, ASHRAE Handbook-Registration 1998. Chapter34-"Ice Rink", 1988.
- 62) David Atrubin; Michael Wiese; Becky Bohinc. An Outbreak of COVID-19 Associated with a Recreational Hockey Game — Florida, June 2020, Centers for Disease Control and Prevention, Weekly / October 16, 2020 / 69(41);1492–1493, 2020.
- 63) National Institute of Infectious Diseases. Case of Novel Coronavirus Infection (COVID-19) at the National High School Selection Ice Hockey Tournament, (IASR Vol. 42 p227-228: 2021.10), <https://www.niid.go.jp/niid/ja/2019-ncov/2488-idsc/iasr-news/10667-500p02.html>, 2021. (In Japanese).
- 64) World Health Organization (WHO). Coronavirus Disease (COVID-19) How Is It Transmitted? 2021, Available online: <https://www.who.int/news-room/q-a-detail/coronavirus-disease-covid-19-how-is-it-transmitted> (accessed on 30 December 2023).
- 65) National Institute of Infectious Diseases. Infection Routes of SARS-CoV-2. 28 March 2022. Available online: <https://www.niid.go.jp/niid/ja/2019-ncov/2484-idsc/11053-covid19-78.html> (accessed on 1 October 2022). (In Japanese).
- 66) Motoya Hayashi; U Yanagi; Yoshinori Honma; Yoshihide Yamamoto; Masayuki Ogata; Koki Kikuta; Naoki Kagi; Shin-ichi Tanabe. Ventilation Methods against Indoor Aerosol Infection of COVID-19 in Japan, Atmosphere 14(1), 2023.
- 67) Japan Ice Hockey Federation. "Japan Ice Hockey Federation Tournament Novel Coronavirus Infection Response Manual (Spectator Version)", 2022.
- 68) National Institute of Infectious Diseases. Case of COVID-19 at the Asian League Ice Hockey Tournament, IASR Vol. 43,143-145: June 2022.
- 69) Japan Ice Hockey Federation.

- "Generalization of various measures against new coronavirus infections in JIHF projects", 2023.
- 70) International Ice Hockey Federation. "2018-2022 Official International Rules of Ice Hockey", International Ice Hockey Federation, 2018.
- 71) SHASE, SHASE102-2003, Ventilation requirement for acceptable indoor air quality, 2003.
- 72) World Health Organization. COVID-19 Cases WHO COVID-19 Dashboard. Available online <https://data.who.int/dashboards/covid19/cases?n=c> (accessed on 4 March 2024).
- 73) Doremalen, N.van; Bushmaker, T.; Morris, D.H.; Holbrook, M.G.; Gamble, A.; Williamson, B.N.; Tamin, A; Harcourt, J.L.; Thornburg, N.J.; Gerber, S.I.; et al. Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1. *N Engl J Med.* 2020, 382, 1564–1567, 2020.
- 74) Stadnytskyi, V.; Bax, C.E.; Bax, A.; Anfinrud, P. The airborne lifetime of small speech droplets and their potential importance in SARS-CoV-2 transmission. *PNAS.* 2020, 117(22), 11875–11877, doi:10.1056/NEJMC2004973, 2020.
- 75) Smither, S.J.; Eastaugh, L.S.; Findlay, J.S.; Lever, M.S.; Experimental aerosol survival of SARS-CoV-2 in artificial saliva and tissue culture media at medium and high humidity. *Emerging Microbes & Infections* 2020, 9(1), 1415–1417, doi:10.1080/22221751.2020.1777906, 2020.
- 76) Schuit, M.; Ratnesar-Shumate, S.; Yolitz, J.; Williams, G.; Weaver, W.; Green, B.; Miller, D.; Krause, M.; Beck, K.; Wood, S.; et al. Airborne SARS-CoV-2 Is Rapidly Inactivated by Simulated Sunlight. *The Journal of Infectious Diseases* 2020, 222(4), 564–571, 291 doi:10.1093/INFDIS/JIAA334, 2020.
- 77) Vuorinen, V.; Aarnio, M.; Alava, M.; Alopaeus, V.; Atanasova, N.; Auvinen, M.; Balasubramanian, N.; Bordbar, H.; Erästö, P.; Grande, R.; et al. Modeling aerosol transport and virus exposure with numerical simulations in relation to SARS-CoV-2 transmission by inhalation indoors. *Safety Science* 2020, 130, 104866, doi:10.1016/J.SSCI.2020.104866, 2020.
- 78) Miller, S.L.; Nazaroff, W.W.; Jimenez, J.L.; Boerstra, A.; Buonanno, G.; Dancer, S.J.; Kurnitski, J.; Marr, L.C.; Morawska, L.; Noakes, C. Transmission of SARS-CoV-2 by inhalation of respiratory aerosol in the Skagit Valley Chorale superspreading event. *Indoor Air* 2021, 31(2), 314–323, doi:10.1111/INA.12751, 2021.
- 79) Lewis, D. Superspreading drives the COVID pandemic—and could help to tame it. *Nature* 2021, 590(7847), 544–546, doi:10.1038/D41586-021-00460-X, 2021.
- 80) Azimi, P.; Keshavarz, Z.; Laurent, J.G.C.; Stephens, B.; Allen, J.G. Mechanistic transmission modeling of COVID-19 on the *Diamond Princess* cruise ship demonstrates the importance of aerosol transmission. *PNAS.* 2021, 118(8), e2015482118, doi:10.1073/pnas.2015482118, 2021.
- 81) Li, Y.; Qian, H.; Hang, J.; Chen, X.; Cheng, P.; Ling, H.; Wang, S.; Liang, P.; Li, J.; Xiao, S.; et al. Probable airborne transmission of SARS-CoV-2 in a poorly

- ventilated restaurant. *Build Environ.* 2021, 196, 107788, doi:10.1016/J.BUILDENV.2021.107788, 2021.
- 82) Dai, H.; Zhao, B. Association of the Infection Probability of COVID-19 with Ventilation Rates in Confined Spaces. *Build Simul* 2020, 13, 1321–1327, doi:10.1007/s12273-020-0703-5, 2020.
- 83) Li, B.; Cai, W. A Novel CO<sub>2</sub>-Based Demand-Controlled Ventilation Strategy to Limit the Spread of COVID-19 in the Indoor Environment. *Build. Environ.* 2022, 219, 109232, doi:10.1016/J.BUILDENV.2022.109232, 2022.
- 84) Burridge, H.C.; Fan, S.; Jones, R.L.; Noakes, C.J.; Linden, P.F. Predictive and Retrospective Modelling of Airborne Infection Risk Using Monitored Carbon Dioxide. *Indoor and Built Environment* 2022, 31(5), 1363–1380, doi:10.1177/1420326X211043564, 2022.
- 85) Peng, Z.; Jimenez, J.L. Exhaled CO<sub>2</sub> as a COVID-19 Infection Risk Proxy for Different Indoor Environments and Activities. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 2021, 8(5), 392–397, doi:10.1021/acs.estlett.1c00183, 2021.
- 86) Santarpia, J.L.; Rivera, D.N.; Herrera, V.L.; Morwitzer, M.J.; Creager, H.M.; Santarpia, G.W.; Crown, K.K.; Brett-Major, D.M.; Schnaubelt, E.R.; Broadhurst, M.J.; et al. Aerosol and Surface Contamination of SARS-CoV-2 Observed in Quarantine and Isolation Care. *Sci. Rep.* 2020, 10, doi:10.1038/s41598-020-69286-3, 2020.
- 87) Motoya Hayashi; U Yanagi; Kenichi Azuma; Naoki Kagi; Masayuki Ogata; Shoichi Morimoto; Hirofumi Hayama; Taro Mori; Koki Kikuta; Shin-ichi Tanabe; Takashi Kurabuchi; Hiromi Yamada; Kenichi Kobayashi; Hoon Kim; Noriko Kaihara. Measures against COVID-19 concerning Summer Indoor Environment in Japan, *Japan Architectural Review Volume 3, Issue 4, 2020.*
- 88) Huang, C.; Wang, Y.; Li, X.; Ren, L.; Zhao, J.; Hu, Y.; Zhang, L.; Fan, G.; Xu, J.; Gu, X.; et al. Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China. *The Lancet* 2020, 395, 497–506, doi:10.1016/S0140-6736(20)30183-5, 2020.
- 89) Kevin P Fennelly, Particle sizes of infectious aerosols: implications for infection control. *Lancet Respir Med*, <https://doi.org/10.1016/2020>, 2020.
- 90) Yuan Liu et al. Aerodynamic analysis of SARS-CoV-2 in two hospitals, <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2271-3>, 2020.
- 91) Ainsworth BE; Haskell WL; Herrmann SD; Meckes N; Bassett DR Jr; Tudor-Locke C; Greer JL; Vezina J; Whitt-Glover MC; Leon AS. Compendium of Physical Activities: A Second Update of Codes and MET Values., *Med Sci Sports Exerc.*1575-1581, 2011