

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

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気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。

A. 研究目的

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>1) - 6)</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>7)</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>8)</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>9)</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>10) - 12)</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>13)</sup>、<sup>14)</sup>。

## B. 研究方法

2022年2月～3月に行われた冬期のクラスター発生時の実態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. クラスタ事例の概要

#### C1.1. COVID-19 クラスタの概要

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>15)</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>16)</sup>。

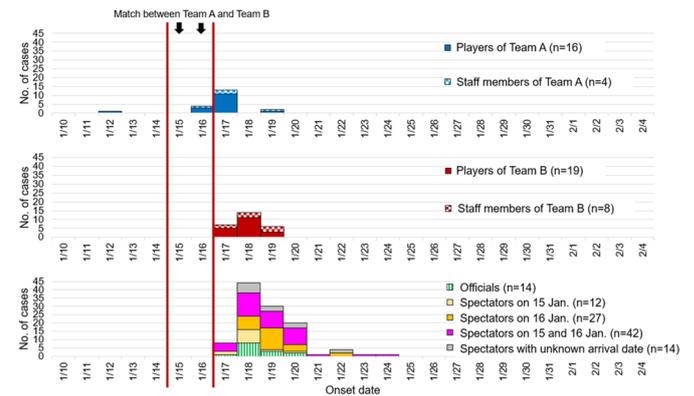


図1 The number of the infected

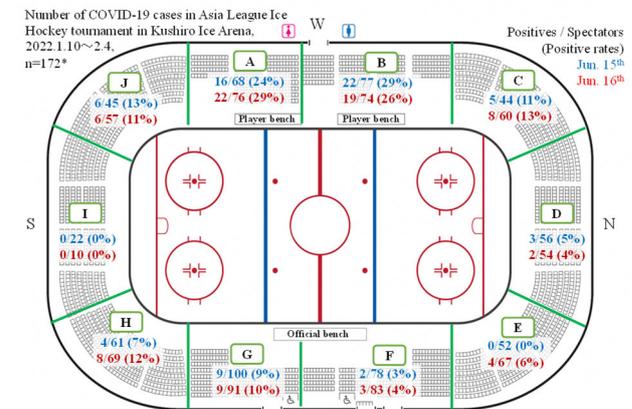


図2 The distribution of the infected

#### C1.2. 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㎡、延床面積7564㎡、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4に示すように、西側の選手ベンチ部分（図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5及び図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3 Inside of Kushiro Ice Arena



図4 Cold airflow from the rink to the player bench

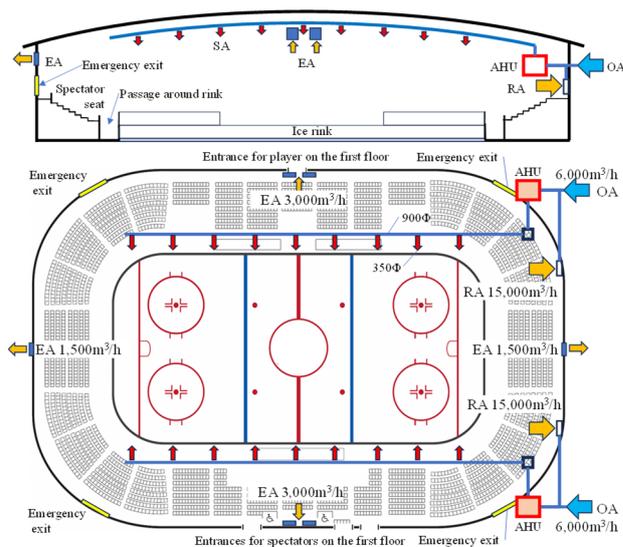


図5 Air conditioning and ventilation facilities of the arena

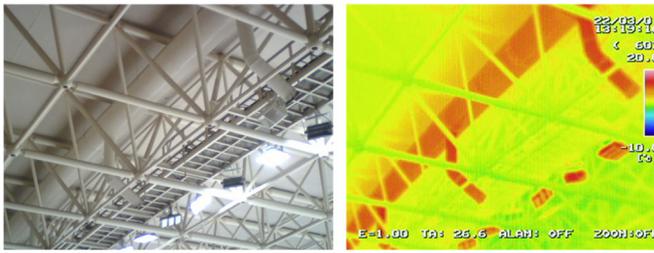


図 6 Air supply ports and temperature

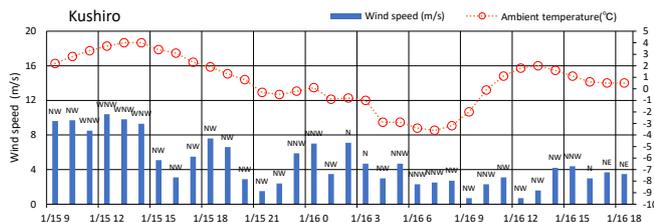


図 7 Climate condition at the cluster

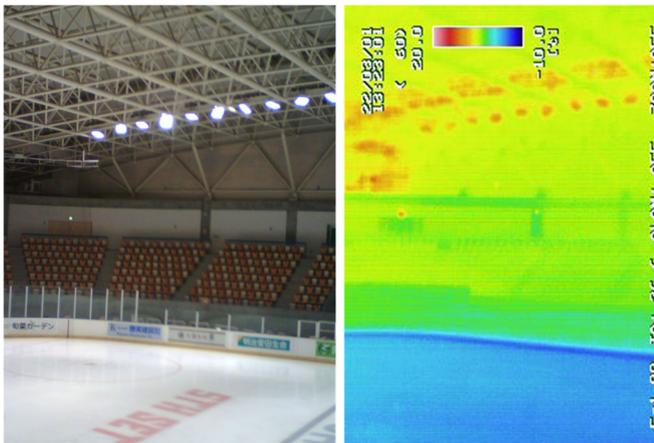


図 8 Thermos-camera image of the inside of the arena

## C2. 空調換気性状の調査

### C2.1. 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。

#### (1) 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>。

#### (2) 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, 0.3~10.0μm) 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 9 Reproduction of the ventilation

characteristic at the cluster by a period game

## C3. 換気性状の測定と結果

### (1) 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14kg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10及び図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 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 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 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 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 14 及び図 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。

## (2) エアロゾル拡散性状

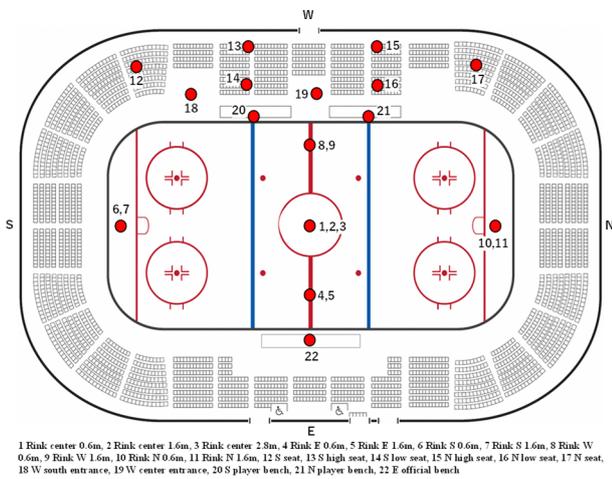
選手の運動によるエアロゾル拡散性状を確認するために、アイスリンクの南側と北側でスモークジェネレータからパーティクルを発生させた後に、プロリーグの選手が練習試合を行った。以上の条件で、各所のパーティクル濃度(重量濃度)を PM センサーで測定した。なお、測定時の外気温は 2.0°C、アリーナ内の温度は、アイスリンク高さ 0.6m が 4.0°C、2.8m が 6°C、選手ベンチが 4.5°C、客席は 5.0~6.0°C 程度で上下温度差があった。

図 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。

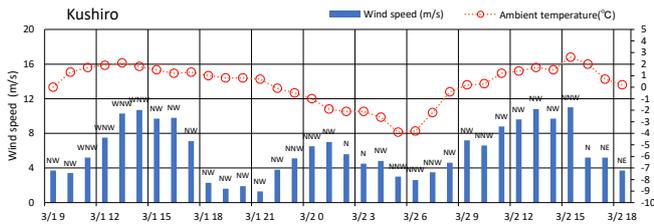
スモークを停止し、同図の 0.27hour から 20 分間(0.33 hour) 練習試合が行われた。なお、練習試合中はアイスリンク内のパーティクル濃度の測定は出来なかった。図 18 に、練習試合中の濃度減衰から算出した換気回数を示す。選手ベンチ及び西側通路の換気回数は、0.9~1.6 であり、練習試合が行われなかった場合の CO<sub>2</sub> による換気回数(0.4~2.1) と大きく異ならなかった。しかし、客席の換気回数は、1.1~1.6 であり、CO<sub>2</sub> による換気回数(0.0~0.3) よりも顕著に大きくなった。この差の要因として、選手の動きが気流及びエ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。



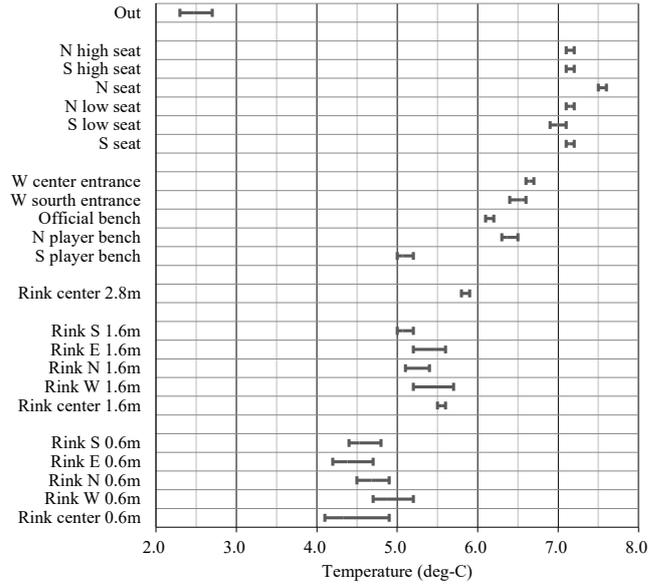
☒ 10 Measurements of CO<sub>2</sub> and particles in ice rink



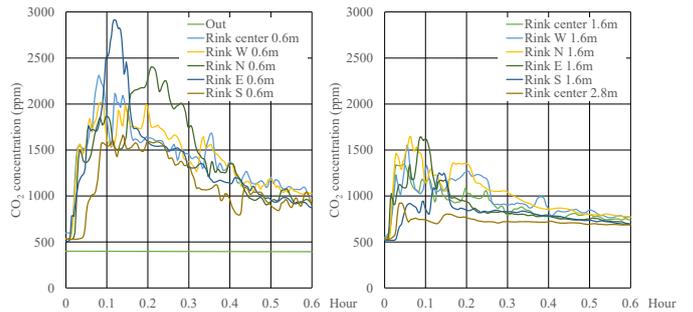
☒ 11 Measurement points



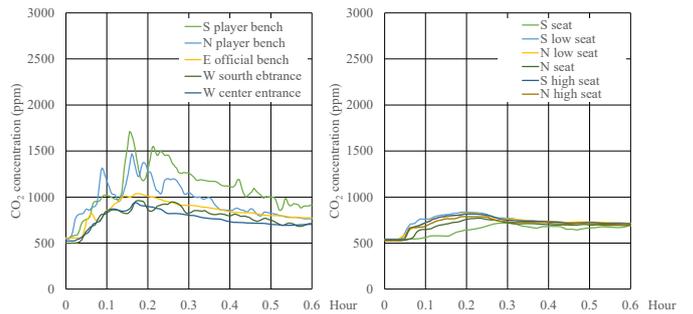
☒ 12 Outside conditions of measurements



☒ 13 Temperatures of measurements (13:00~13:36)



☒ 14 CO<sub>2</sub> concentrations in ice rink



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

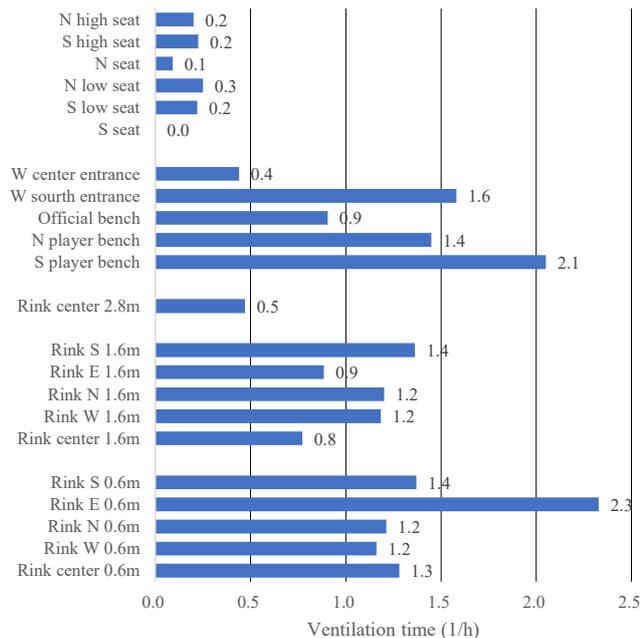


図 16 Ventilation times using CO<sub>2</sub> concentration decay

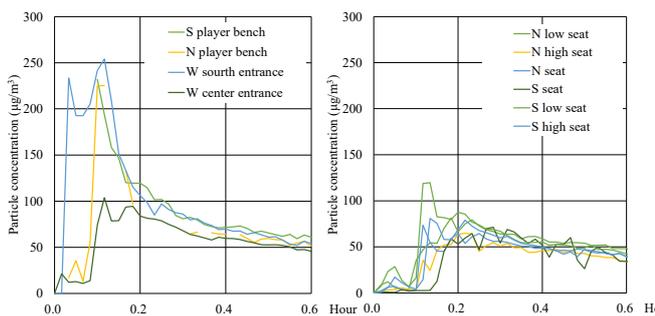


図 17 Particle concentrations of training game

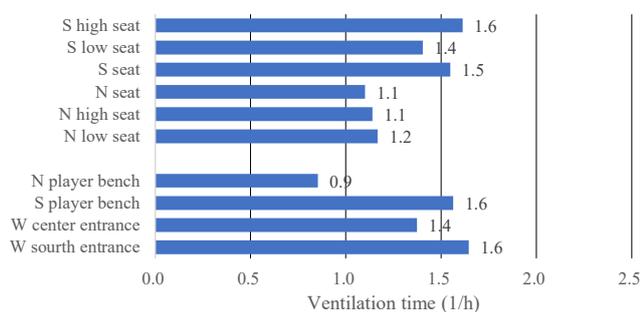


図 18 Ventilation times particle concentration decay

#### C4. 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>18) - 32)</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>27), 33), 34)</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>35), 36)</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>37)</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 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。

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

図 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、その後に減衰した。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21は、この間の選手からの発生パターンである。表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1930.5×10<sup>3</sup>(copies/h)のウイルス発生を仮定した。

図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×10<sup>3</sup>)となり、観客の吸引量は115(copies×10<sup>3</sup>)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、同様の算出方法による吸引量は113(copies×10<sup>3</sup>)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。

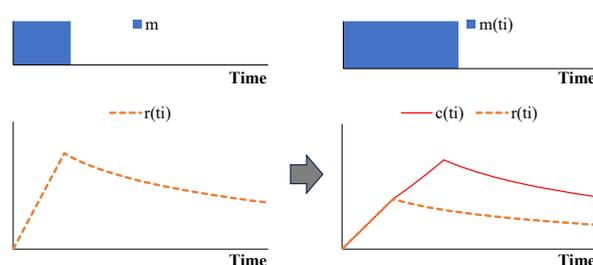


図19 Concentration response and integration

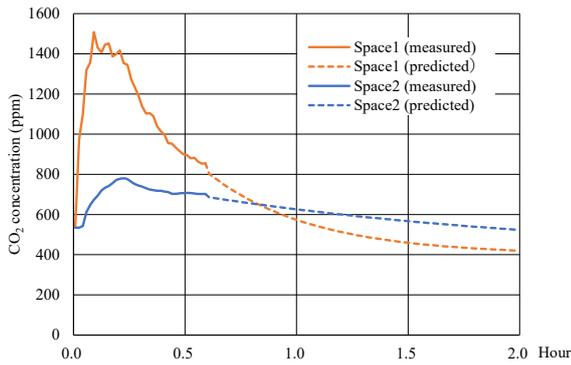


図 20 CO<sub>2</sub> concentration responses

表 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) × 10 <sup>3</sup>
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 person 3 (m<sup>3</sup>/hp)

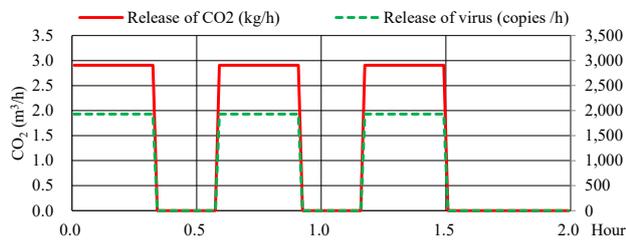


図 21 Release pattern of CO<sub>2</sub> and virus

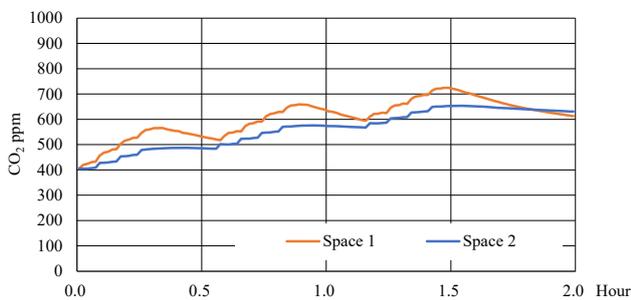


図 22 Predicted CO<sub>2</sub> concentrations

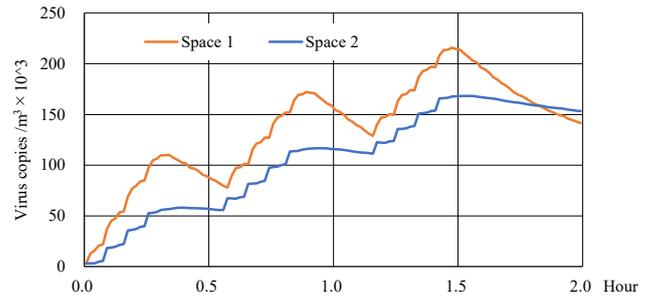


図 23 Predicted virus concentrations

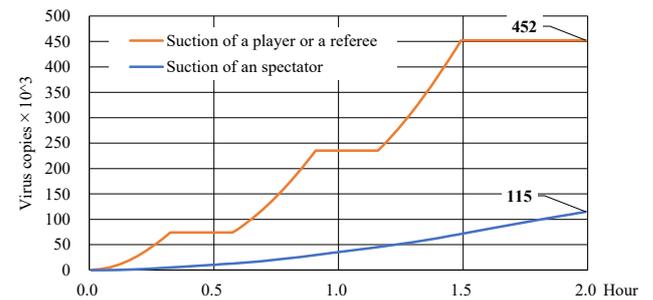


図 24 Predicted suction rates of virus

## C5. 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 25 及び図 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 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、外気の取入れ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 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ーからパーティクルを高さ 0.8m で発生させ、図 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 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 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 30～図 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 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 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 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 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 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 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 34 及び図 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 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 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 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 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 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 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。

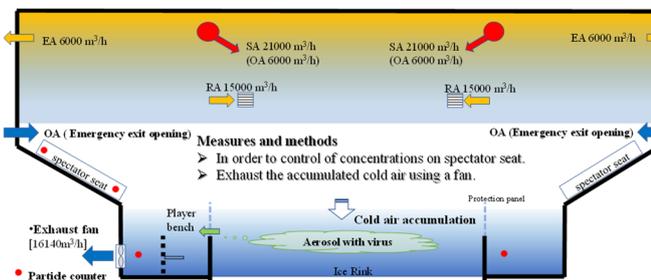


図 25 Ventilation measures and exhaust fan

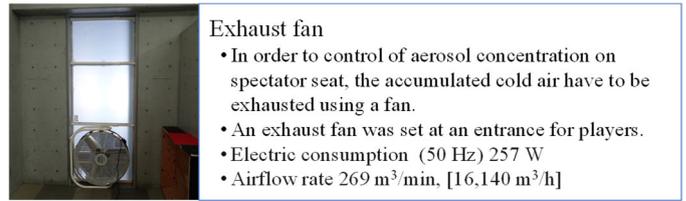


図 26 Exhaust fan to improve ventilation

表 2 Conditions of measurements to evaluate ventilation

	Condition 1	Condition 2	Condition 3*	Condition 4
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 m³/h

\*\*\*Emergency exit on the second floor (open area :4 exit ×1.0 m²=4.0 m²)



図 27 Release of particle and diffusion

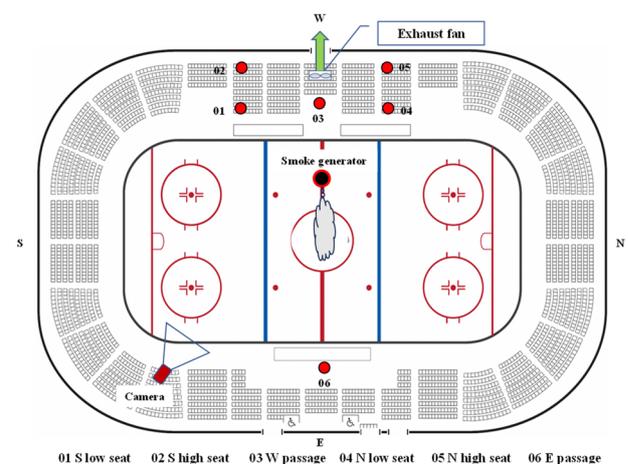
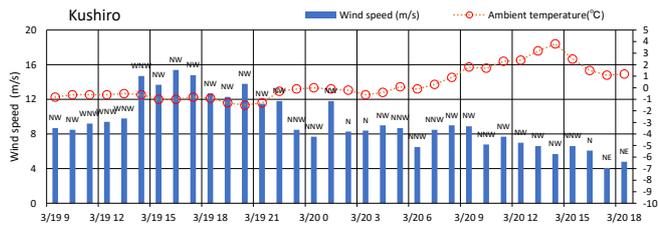
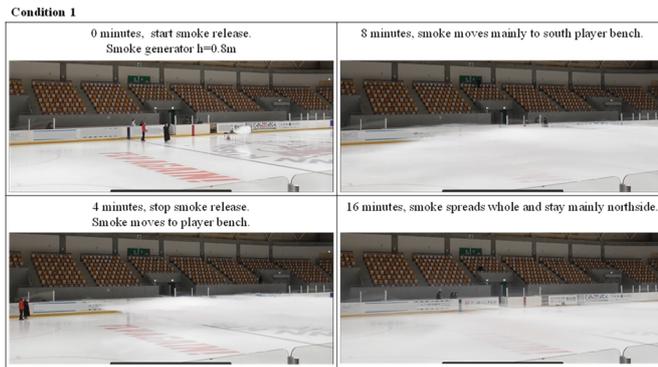


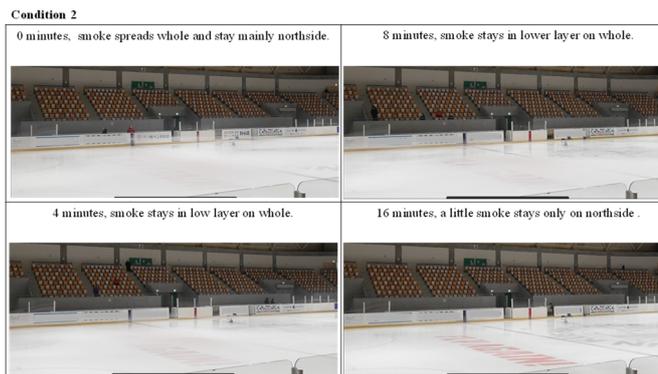
図 28 Measurement points of particle



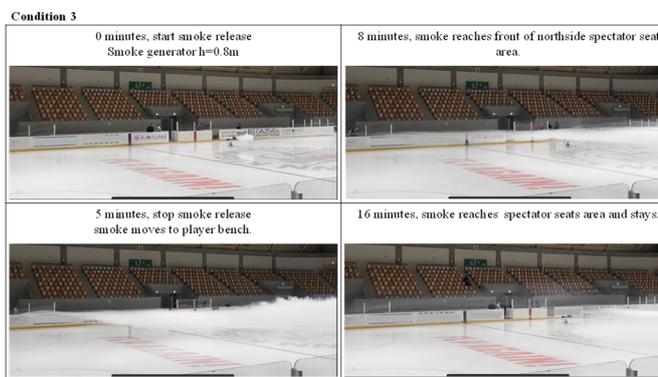
☒ 29 Outside conditions of measurements



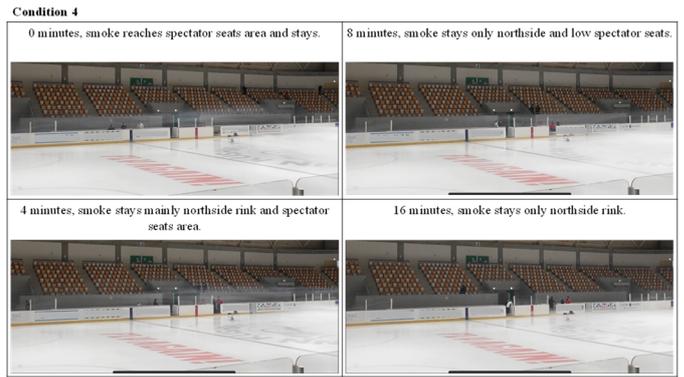
☒ 30 Visualization using smoke on condition 1



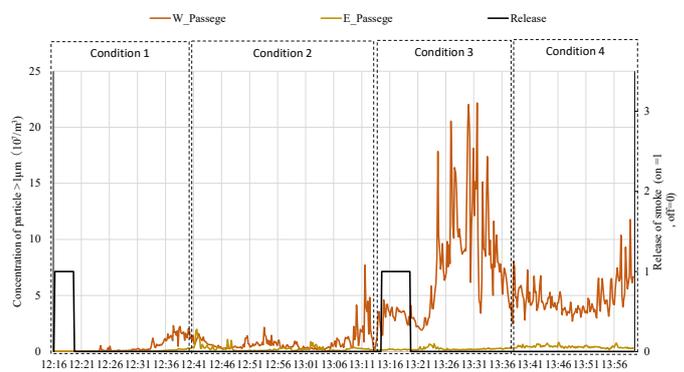
☒ 31 Visualization using smoke on condition 2



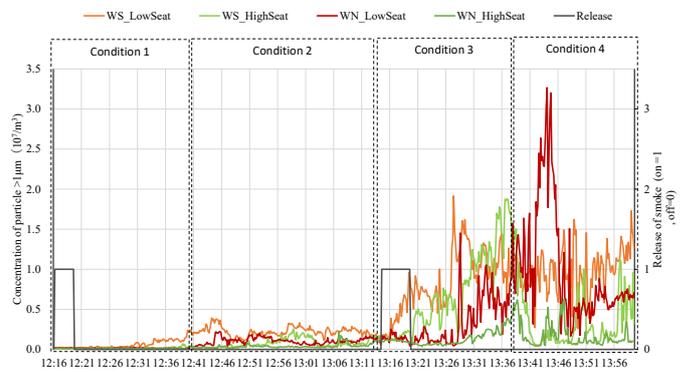
☒ 32 Visualization using smoke on condition 3



☒ 33 Visualization using smoke on condition 4



☒ 34 Particle concentrations of passages



☒ 35 Particle concentrations of audience seats

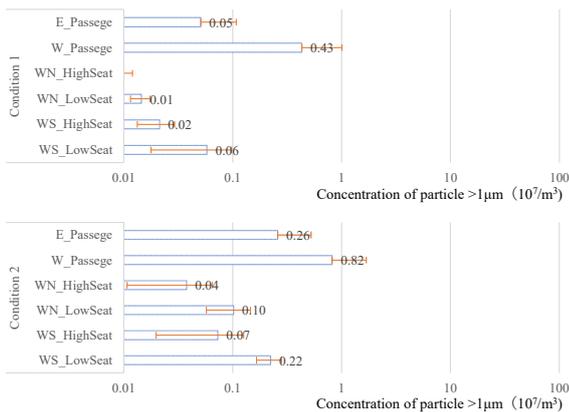


図 36 Particle concentrations of condition 1,2

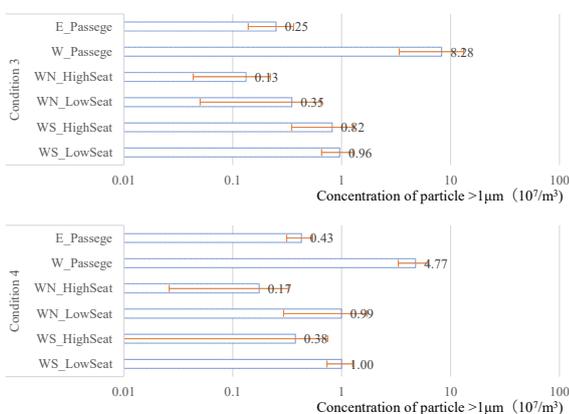


図 37 Particle concentrations of condition 3,4

表 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 ( $10^7/m^3$ )

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

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

## D. 結論

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

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。

本研究は、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) Kosuke Minakuchi, Koki Kikuta, Hisashi Hagiwara, Kenji Miyazaki, and Motoya Hayashi, Effective Method to Collect Indoor Floating Aerosols Using Cooling Equipment, *Atmosphere*, 2023.11.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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 p.300-306, 2023.04.
- 5) 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), p.150-150, 2023.01.10.
- 6) 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 p.43-49, 2023.01.

- 7) 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, P.4-9, 2023

## 2. 学会発表

- 1) 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
- 2) 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,p1395-1396, 2023-07
- 3) 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
- 4) 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) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) Health Canada. Best practices for  
improving air quality in ice arenas,  
<https://www.canada.ca/en/health-canada>,  
2021.
- 6) 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](https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/indoor-air-quality-and-ice-arenas), 2024.
- 7) ASHRAE, ASHRAE Handbook-  
Registration 1998. Chapter34-"Ice Rink",  
1988.
- 8) 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.
- 9) 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).
  - 10) 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).
  - 11) 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).
  - 12) 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.
  - 13) Japan Ice Hockey Federation. "Japan Ice Hockey Federation Tournament Novel Coronavirus Infection Response Manual (Spectator Version)", 2022.
  - 14) National Institute of Infectious Diseases. Case of COVID-19 at the Asian League Ice Hockey Tournament, IASR Vol. 43,143-145: June 2022.
  - 15) Japan Ice Hockey Federation. "Generalization of various measures against new coronavirus infections in JIHF projects", 2023.
  - 16) International Ice Hockey Federation. "2018-2022 Official International Rules of Ice Hockey", International Ice Hockey Federation, 2018.
  - 17) SHASE, SHASE102-2003, Ventilation requirement for acceptable indoor air quality, 2003.
  - 18) 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).
  - 19) 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.
  - 20) 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.
  - 21) 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.
  - 22) 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.
- 23) 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.
- 24) 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.
- 25) 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.
- 26) 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.
- 27) 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.
- 28) 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.
- 29) 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.
- 30) 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.
- 31) 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.
- 32) 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.
- 33) 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.

- 34) 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.
- 35) Kevin P Fennelly, Particle sizes of infectious aerosols: implications for infection control. *Lancet Respir Med*, <https://doi.org/10.1016/2020>, 2020.
- 36) Yuan Liu et al. Aerodynamic analysis of SARS-CoV-2 in two hospitals, <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2271-3>, 2020.
- 37) 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