

# 公共施設向け感染対策システム

Infection Control System for Public Facilities

櫛原 勉  
Tsutomu Ichihara

長浜 英雄  
Hideo Nagahama

劉 斐  
Fei Liu

福本 訓明  
Noriaki Fukumoto

永谷 吉祥  
Yoshiharu Nagatani

高柳 哲也  
Tetsuya Takayanagi

## 要 旨

公共施設内でのインフルエンザ集団感染を抑制するための、新しいコンセプトに基づく感染対策システムを提案した。感染源となるインフルエンザウイルスの発生箇所を推定するため、咳（せき）とその方向を検知する咳検知マイクの開発を行った。また、空間内の微粒子挙動のシミュレーションにより、気流によるウイルス希釈効果を調べ、高濃度微粒子をわずか15秒で高速希釈できることを確認した。さらに、希釈への乱流効果を調べるために格子ボルツマン法による新しい乱流解析ソフトの開発を行った。気流によるウイルス希釈を実現するための、咳検知マイク、送風機、回転台、空気清浄機からなる感染対策システムを開発した。

## Abstract

A new concept in infection control solutions is proposed to suppress influenza outbreaks in public facilities. We developed a new microphone that detects a cough and its direction to estimate the location of the suspected influenza virus that could cause infection. Moreover, the virus dilution effect by the air flow was investigated by computational fluid dynamics coupled with particles, and it was confirmed that the particles could be rapidly diluted in just 15 s. In addition, we developed new turbulence analysis software based on the Lattice Boltzmann Method to investigate the turbulence effect. We also developed an infection control system consisting of a cough detection microphone, an electric fan, a turntable, and an air purifier. We proposed a new infection control system by airflow dilution.

## 1. はじめに

近年、公共施設内でのインフルエンザ集団感染がニュースなどで報道され、大きな社会問題となっている。手洗い、うがいやマスク着用など、従来の対策だけでは効果が不十分であり、新しい対策が必要と考えられる。インフルエンザへの感染は、感染者の咳などで放出されたウイルスを健康な人が鼻や口から吸い込み、粘膜細胞で増殖することが原因と言われている[1][2]。感染者が咳をすると、その周辺約1 mの範囲に高濃度のウイルスが漂い[3]、1回の咳により放出されるウイルスは数万個程度であることが報告されている[4]。特に、インフルエンザ感染者の近傍で作業を行う医療・衛生・介護の従事者や、介護施設の共用スペースなど狭い範囲に長時間複数の人が滞在する場合などでは、咳により発生する高濃度ウイルスを換気や空気清浄機により清浄化するまでに吸引してしまうリスクが高い。

現状、インフルエンザウイルス吸引量の増加に伴い感染率および発症率が增大すること[5]、換気量が感染率と強い相関関係があること[6]、すなわち換気による希釈が感染リスク低減に効果があることがわかっている。しかし、環境中にどの程度インフルエンザウイルスが存在すれば感染および発症するのかは、明らかになっていない。そのため、インフルエンザの感染率がどの程度低下する

かという絶対値の評価は困難であるが、環境中から吸引するインフルエンザウイルスの量を低減することで感染リスクの低減を期待することについて、相対的な評価は可能である。

1つの対策案として、ウイルスを早期に発見して感染を防ぐためのウイルスセンサの開発も行われている[7]。しかしながら、応答性、サイズ、価格などを考慮すると、実用化にはまだ時間が掛かると思われる。

そこで、筆者らは咳の発生箇所を検知することで、高濃度ウイルスの発生箇所を推定し、強制気流を用いたウイルス希釈によってウイルス吸引量を減らすことで集団感染を抑制する、より小型、低価格で高速応答なシステムを開発した。

## 2. 咳検知マイク

咳が発生した方向を検知するために、MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) マイクアレイの開発を行った。まず、500回の咳音をサンプリングし、混合正規分布 (GMM: Gaussian Mixture Model) を用いて咳音モデルを作成した。マイクの入力信号からメル周波数ケプストラム係数 (声道特性を表す特徴量) を抽出し、咳音モデルとの尤度 (ゆうど) 差を計算することで、咳音の識別を行った。咳検出精度の評価結果を第1表に示す。騒音の

第1表 咳検知精度

Table 1 Cough detection accuracy

項目	咳検知精度	
	騒音対策なし	騒音抑圧／モデル化
騒音なし [%]	96.0	96.8
騒音あり [%]	28.7	95.7

ない環境では、90%を超える検知精度が得られた。

今回、実環境として介護施設での使用を想定し、実際の介護施設内において咳検知精度評価を行った。実環境においては、換気扇などさまざまな機器の定常的な騒音や、テレビやドライヤーなどの非定常な騒音など、咳音とはほぼ同等レベルのさまざまな騒音が発生していることがわかった。実環境での評価を行ったところ、咳検知精度は28%に低下した。

実環境での咳検知精度を向上させるため、騒音抑制処理により定常騒音の影響を除く検討を行った。さらに、テレビやドライヤーなどの騒音モデルも作成し、尤度差から咳音と騒音の区別を行った。これにより、騒音がある実環境においても、咳検知精度90%を維持することが可能となった。

咳の方向検知を行うため、MEMSマイクアレイへの入力信号の時間差情報から音源方向モデルを作成した。8個のMEMSマイクを、150 mm × 110 mm × 30 mmのマイクBOXに同心円状に等間隔に実装した。各マイク信号の時間差情報を抽出し、モデルとの類似度から方向推定を行った[8]。これにより、咳が発生した方向を検知することが可能となった。

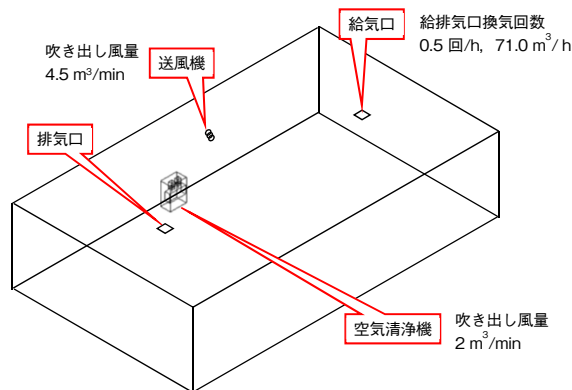
### 3. 強制気流によるウイルス希釈

#### 3.1 シミュレーションによる希釈効果検証

実験的には検証の難しいウイルスの希釈ダイナミクスをCFD (Computational Fluid Dynamics) -微粒子連成計算により検証した。連成時にはCFDで計算した流速を用いて微粒子に働く抗力を計算している。咳から発生する微粒子はサブミクロンの微小粒子から粒径100 μmを超える粗大粒子まで幅広い粒径分布をもつ[9]が、粗大粒子は速やかに重力沈降する。このため、本稿では粗大粒子を除いた粒径2 μm以下の微粒子を対象とした。

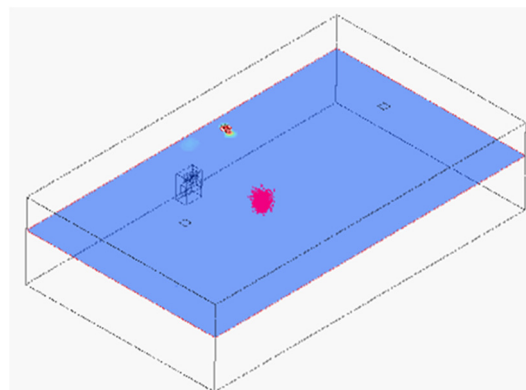
ここではまず、介護施設の食堂やリビングルームを想定した空間で計算を行った(第1図)。部屋の中央で咳が発生したとし10 cm<sup>3</sup>の空間内に10000個の微粒子を発生させた。そして、送風機(風量4.5 m<sup>3</sup>/min)の希釈気流の有無による微粒挙動変化を比較した。いずれのケースでも換気扇(風量：71 m<sup>3</sup>/h、換気回数：0.5回/h)および1台

の空気清浄機(風量：2 m<sup>3</sup>/min)を稼働させている。乱流モデルとしては、k-eモデルを使用し、計算は有限体積法による熱流体解析ソフトを用いた。



第1図 解析モデル  
Fig. 1 Analysis model

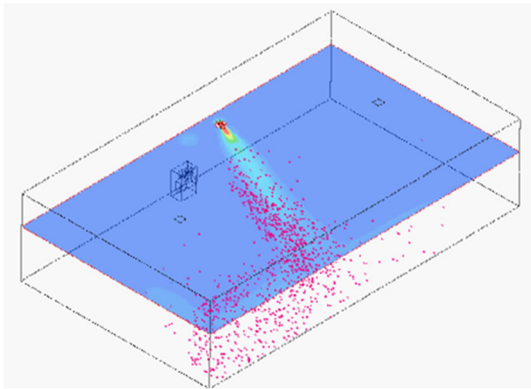
第2図に希釈気流を発生させなかった場合の15秒後の微粒子分布を示すが、換気や空気清浄機による誘引気流のみでは微粒子はあまり拡散せず、直径約1 mの範囲内に収まっていることがわかる。このため、この高濃度ウイルスを吸入することで感染確率が高まることが懸念される。



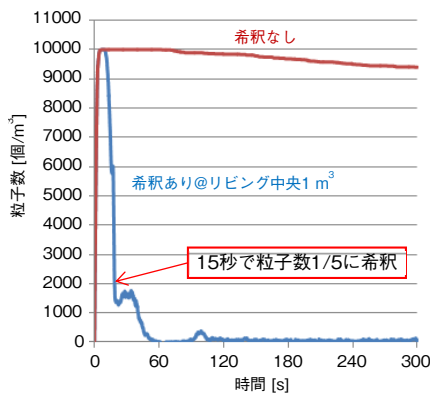
第2図 微粒子の挙動(希釈なし)  
Fig. 2 Behavior of fine particles without dilution

一方で、第3図に希釈気流を発生した場合の結果を示すが、高濃度ウイルスが速やかに希釈されていることがわかる。また、この風量では部屋の隅に送風機を設置した場合でも部屋の隅まで十分に気流が到達している様子が確認できる。より定量的に比較するために、部屋の中央における1 m<sup>3</sup>内の微粒子数の時間変化を求めた。

結果を第4図に示す。希釈気流なしでは300秒後でも約



第3図 微粒子の挙動 (希釈あり)  
Fig. 3 Behavior of fine particles with dilution



第4図 気流希釈の効果  
Fig. 4 Dilution effect on the density of fine particles

に希釈されていることがわかる。

ここでは、希釈気流による感染リスクの相対的リスク低減効果を見積もるために、希釈の有無によるウイルス曝露(ばくろ)量の比較を行った。ここでは発生したウイルスを呼吸により吸い込むと仮定し、ウイルス濃度を数値積分することで曝露量を見積もった。咳発生の5秒後から約3分間の高濃度ウイルスへの曝露量を希釈あり/なしで比較を行った。

結果、希釈ありでは希釈なしに比べて、曝露量が92%低減されていることがわかった。このため、本システムによって相対的に感染確率の低減効果が期待できる。

ただし、本解析は比較的解析空間が広く、計算負荷の関係上、乱流を平均化したモデルであるk-ε法を用いている。したがって、LES (Large Eddy Simulation) などのより高度なモデルを適用すれば乱流効果を含めた高精度な希釈ダイナミクスの予測ができる可能性がある。

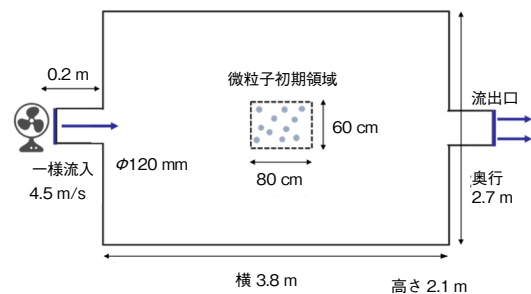
### 3.2 乱流シミュレーション

筆者らは乱流の平均化を必要としない乱流解析手法と

して、格子ボルツマン法をベースとした高精度乱流解析ソフトの開発を行っている。通常のCFDでは乱流域において、乱流モデルなしでは十分な空間解像度がない限り、計算が発散する。しかし、Cascade型衝突演算子を用いた格子ボルツマン法(以下、Cascaded Lattice Boltzmann Method: CLBM) [10][11]を用いることで、乱流域においても極めて数値安定に計算することができる。このため、CLBMでは乱流を陽にモデル化せずとも、有限格子幅がフィルターとして作用し、陰的なLES計算を行うことができ、乱流効果を考慮することができる (Implicit LES [12])。

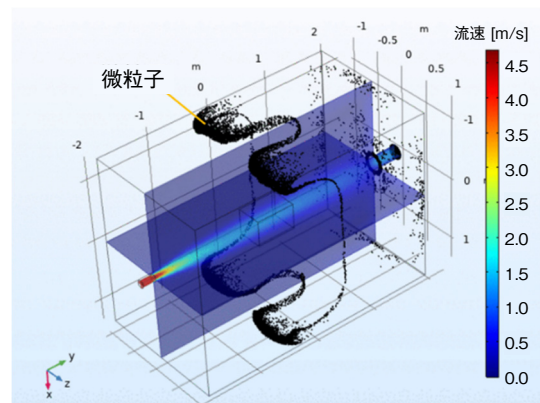
ここでは、CLBMと微粒子を弱連成で計算し、乱流効果による微粒子ダイナミクスへの影響を見積もった。計算は第5図に示すような6畳の空間の中央付近に粒径2μmの微粒子を20000個配置し、行った。送風機の風速は4.5 m/sの一樣流入としている。

ここでは乱流効果の有無を比較のために、同じ条件でk-εモデルを用いた計算も行った。計算に際しては、有限要素法を用いている。



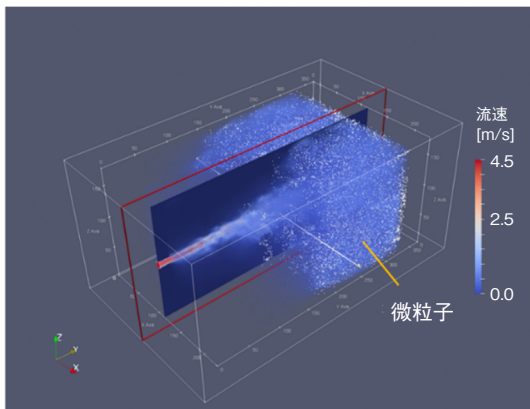
第5図 ジオメトリ  
Fig. 5 Simulation geometry

第6図、第7図にk-ε法およびCLBMにおける流速絶対値の流速分布および微粒子位置のスナップショット結果を



第6図 流速分布および微粒子分布 (k-ε法)  
Fig. 6 Airflow distribution and particle distribution (k-ε model)

示す。第6図では流れが乱流化せず、これによって微粒子の分布に若干の偏りがある。一方で、第7図を見ると明らかとなっており、CLBMでは送風機から約1m以降に乱流に遷移しており、乱流効果によって空間内に均質に微粒子が拡散していることがわかる。高精度の計算は計算負荷が高いため、長時間の微粒子の振る舞いを見るには適さない。計算精度や対象の時間スケールを考慮して、両手法を上手く使い分けることが重要である。



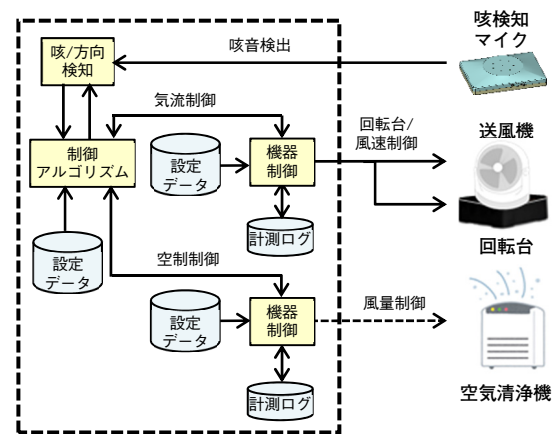
第7図 流速分布および微粒子分布 (CLBM)  
Fig. 7 Airflow distribution and particle distribution (CLBM)

#### 4. 気流希釈システム

第2章で述べた咳検知マイクを用いて、咳の発生方向から高濃度ウイルスの位置を推定し、その方向に気流をもって希釈するシステムの開発を行った。システム構成を第8図に示す。咳検知マイク、送風機、送風方向を制御する回転台、および空気清浄機からなる。なお、送風機1台につき咳検知マイク1台を使用する。

制御ソフトは、咳検知マイクからの信号を元に咳の有無と方向を検知する処理部、検知結果に基づいて機器制御を行う処理部、送風機の風速と送風方向を制御する処理部、空気清浄機の風量を制御する処理部、および、設定データと計測ログを記録するメモリー部からなる。

システム動作の一例について述べる。システムは壁際に設置することを想定した。咳のない定常状態では、送風機は弱運転とし、180°の首振りを行う。空気清浄機も弱運転とする。咳音を検知すると、送風機をその方向へ向けるよう回転台を制御し、同時に送風機の風量を上げる。より高い希釈効果を得るために、±30°に範囲を絞った首振り運転を行った。なお、咳検知マイクの角度分解能を上げることで、首振り角度を狭めてさらに希釈効果を高めることも可能である。希釈したウイルスの回収効



第8図 システム構成  
Fig. 8 Configuration of the airflow dilution system

果を高めるため、空気清浄機は強運転とする。30秒経過後、定常状態の弱運転、180°首振りに戻す。空気清浄機も弱運転に戻す。

気流希釈効果が得られる範囲は、マイクの検知性能と送風機の送風距離を考慮して3 mとした。部屋のサイズが異なる場合は、サイズに応じて咳検知マイク、送風機、回転台のセットを増減すればよい。目安として、第1図(40畳程度)程度の部屋であれば2セットでよい。空気清浄機は部屋のサイズに応じた台数を用いる。実環境でのシステム評価も行い、1セットで半径3 mの範囲をカバーできることを確認した。

#### 5. まとめ

本稿では、咳の発生方向を検知することで高濃度ウイルスの発生箇所を推定し、送風機の風により発生する乱流効果を利用して高濃度ウイルスを高速希釈するシステムについて述べた。また、LBMによる新たなシミュレーション手法を開発することで、乱流効果を考慮することが可能となった。気流によるウイルス希釈という、新しいコンセプトの感染対策ソリューションの提案を行った。

今後、さまざまな施設への展開を考え、機器の一体化や設備化などの検討を行っていく必要がある。さらに、場所による咳発生頻度の違いを解析することで、空間全体の最適な制御に繋(つな)がることも期待できる。これらの組み合わせにより、より良いシステムの提案に繋げていく。

#### 参考文献

[1] 山本勝彦, “インフルエンザの基礎知識とその背景,” 名古屋学芸大学健康・栄養研究所年報, 第4号, pp. 47-64, Dec. 2010.

- [2] J. Yan et al., "Infectious virus in exhaled breath of symptomatic seasonal influenza cases from a college community," PNAS, vol. 115, no. 5, pp. 1081-1086, 20184.
- [3] J. Tang et al., "Coughing and Aerosols," The New England Journal of Medicine, e19, Oct. 2008.
- [4] W. Yang et al., "Concentrations and size distributions of airborne influenza A viruses measured indoors at a health centre, a day-care centre and on aeroplanes," Journal of the Royal Society Interface, vol. 8, issue 61, pp. 1-9, 2011.
- [5] R. Alford et al., "Human Influenza Resulting from Aerosol Inhalation," Experimental Biology and Medicine, vol. 122, issue 3, pp. 800-804, 1966.
- [6] Y Li et al., "Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment - a multidisciplinary systematic review," Indoor Air, vol.17, issue 1, pp. 2-18, 2007.
- [7] C. Kuroda et al., "Development of a dielectrophoresis-assisted surface plasmon resonance fluorescence biosensor for detection of bacteria," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 57, no. 5, pp. 1-5, 2018.
- [8] 徳田肇道 他, "全方位ネットワークマイクシステムの開発," パナソニック技報, vol. 61, no. 2, pp.13-18, 2015.
- [9] W. G. Lindsley et al., "Quantity and size distribution of cough-generated aerosol particles produced by influenza patients during and after illness," Journal of Occupational and Environmental Hygiene, vol. 9, issue 7, pp. 443-449, 2012.
- [10] M. Geier et al., "Cascaded digital lattice Boltzmann automata for high Reynolds number flow," Physical Review E vol. 73, issue 6, pp. 066705-1, 2006.
- [11] M. Geier et al., "A factorized central moment lattice Boltzmann method," The European Physical Journal Special Topic, vol. 171, issue 1, pp. 55-61, 2009.
- [12] A. Pasquali, Ph.D. dissertation, "Enabling the cumulant lattice Boltzmann method for complex CFD engineering problems," Technical University of Braunschweig, 2017.

## 執筆者紹介



櫛原 勉 Tsutomu Ichihara  
ライフソリューションズ社 技術本部  
Engineering Div., Life Solutions Company  
博士 (工学)



長浜 英雄 Hideo Nagahama  
ライフソリューションズ社 技術本部  
Engineering Div., Life Solutions Company



劉 斐 Fei Liu  
ライフソリューションズ社 技術本部  
Engineering Div., Life Solutions Company



福本 訓明 Noriaki Fukumoto  
ライフソリューションズ社 技術本部  
Engineering Div., Life Solutions Company



永谷 吉祥 Yoshiharu Nagatani  
ライフソリューションズ社 技術本部  
Engineering Div., Life Solutions Company



高柳 哲也 Tetsuya Takayanagi  
テクノロジー本部  
マテリアル応用技術センター  
Institute for Material Application,  
Technology Div.