

換気システム及びオゾンによる

室内のインフルエンザウイルス除染過程に関する数値解析 Numerical Simulation on Decontamination Process of Influenza Virus by Ozone and Ventilation System in Indoor Space

- 笠井 友貴, 東理大院, 東京都葛飾区新宿 6-3-1, 4518547@ed.tus.ac.jp
福留 功二, 東理大, 東京都葛飾区新宿 6-3-1, kfukudome@rs.tus.ac.jp
山本 誠, 東理大, 東京都葛飾区新宿 6-3-1, yamamoto@rs.kagu.tus.ac.jp
坂本 和之, IHI, 東京都江東区豊洲 3-1-1, sakamoto0999@ihi-g.com
Tomoki Kasai, Graduate School, Tokyo University of Science, 6-3-1 Nijuku, Katsushika-ku, Tokyo
Koji Fukudome, Tokyo University of Science, 6-3-1 Nijuku, Katsushika-ku, Tokyo
Makoto Yamamoto, Tokyo University of Science, 6-3-1 Nijuku, Katsushika-ku, Tokyo
Kazuyuki Sakamoto, IHI Corporation, Toyosu IHI Building, 1-1, Toyosu 3-chome, Koto-ku, Tokyo

Influenza is a type of infectious disease and a big matter of concern in the world. The total number of deaths significantly increases during the year when influenza is prevalent. It is important to study decontaminating technique of infectious disease virus to prevent air infection. In the present study, we simulated the process of decontamination in the room contaminated by infectious disease virus with ventilation system and ozone. The rooms which have 4 different types of air supply and exhaust opening were simulated using CFD with the chemical reaction model. As a result, the effectiveness of ventilation system and ozone on decontamination processes were clarified. In addition, the decontamination effect by the floor blowing / ceiling suction method is higher than the other ventilation system. Moreover, decontamination effect by ozone is low in comparison to the ventilation.

1. 緒言

インフルエンザ(Influenza)は、インフルエンザウイルスを病原とする気道感染症の一種であり、咳や高熱、食欲不振などの症状を引き起こす。例年推定 1000 万人が感染し、感染者が比較的多い年は、インフルエンザおよび肺炎などの合併症による死亡者数が顕著に増加することが明らかになっている¹⁾。

インフルエンザはインフルエンザウイルスに感染することによって発症する。これまで、感染経路は主に接触感染と飛沫感染が考えられてきたが、近年、感染者の呼気に含まれるインフルエンザウイルスが空气中に長時間滞在することによる空気感染リスクの存在が確認された²⁾。従って、これまで重要視されてきた飛沫感染と接触感染へのインフルエンザの予防対策だけでは不十分な可能性が指摘されている。空気感染への予防対策として、室内の換気や酸化作用のあるオゾン等による殺菌が注目されている。

以上の背景から、本研究では、感染者から吐き出されたインフルエンザウイルスに汚染された室内空間の除染システムのシミュレーション技術の構築を目的とする。インフルエンザの空気感染対策として、換気システム及びオゾンガスを使用する除染手法について各種物理現象のモデル化と数値計算により検討し、除染過程への影響調査を行った。

2. 数値計算

除染過程では除染ガス及び除染対象であるインフルエンザウイルスの輸送・分解等の様々な現象が生じる。種々の輸送現象は流れ場及び濃度場を解くことで再現する。分解現象は後述の分解反応モデルにより再現を行う。

流れ場は 3 次元非圧縮性層流場と仮定する。支配方程式は、混合気体に対する連続の式、運動量および濃度場の輸送方程式である。流れ場と各種濃度場は相互に影響を及ぼすため、Two-Way Coupling 法により計算を行う。流れ場の式である連続の式とナビ

エ・ストークス方程式及び濃度場の式である化学種保存方程式に Two-Way Coupling 法を用いている。除染ガスの濃度変化による密度変化の影響は、低マッハ数近似により考慮する。圧力と速度のカップリングには、低マッハ数近似を適用した HSMAC 型圧力解法を用いる。なお、離散化には有限差分法を用い、時間進行法にはクラック・ニコルソン法、対流項には Yee-Harten の TVD スキーム³⁾、その他の項には二次精度中心差分を適用する。

分解反応モデルは、除染ガスであるオゾンと除染対象は 1 対 1 で化学反応を起こすものとする。このとき、化学反応を二次反応と仮定すると以下で示される。

$$W = KC_{O_3}C_{Target} \quad (1)$$

ここで、反応速度を W [mol/m³/s]、反応速度定数を K [m³/mol/s]、モル濃度を C [mol/m³]とする。また、添字 O_3 、Target はそれぞれオゾン、除染対象を表す。また、化学反応ではインフルエンザウイルス及びオゾンガス以外の分解反応後の生成物は無視する。式 (1)により算出される反応速度 W を検査体積及び時間に関して積分することによって、インフルエンザウイルスの総分解量を得る。

3. 計算対象および計算条件

インフルエンザ感染者の呼気に含まれるインフルエンザウイルスによって汚染された室内について、換気システムと除染ガスにより除染するシミュレーションを行う。除染対象はインフルエンザウイルス A (H1N1)型、除染ガスはオゾンとする。各物性値は、田中らの実験⁴⁾を参照した。計算対象室内における換気方式は図 1 に示す 4 ケース(Case 1 : 置換換気方式, Case 2 : 天井吹出・天井吸込方式, Case 3 : 床吹出・天井吸込方式, Case 4 : 天井 4 方向吹出・天井吸込方式)とする。また、図 2 に示すように、感染者を模擬した物体を計算領域の中心に物体を配置した。感染者を模擬し感染者の口は開口状態とし、Gupta ら⁵⁾による男性の平均化開口

面積に基づき、寸法を 5 mm×24 mm としている。

本研究では、一つのウイルスの感染力を測定することは技術的に不可能であり、感染力を有するウイルス総数を計測することが困難であることを考慮し、感染力価という値で感染力の数値化を行った。感染力価 1 TCID₅₀/m³ をウイルス 1 粒子であると仮定している。初期状態では計算領域内にインフルエンザウイルスが存在しないものとし、感染者を模した物体の上部の流入口から呼吸を模した流れに乗って感染力価 1.41×10⁴ TCID₅₀/m³ のインフルエンザウイルスが投入される。

給気口の流入流量は 70.0 m³/h とし、物体上部流入口の流入流量は 0.480 m³/h とする⁵⁾。この給気口からの投入大気へのオゾン投入の有無で比較を行う。またオゾン投入を行う場合、オゾンの影響を明らかにするため流入大気中のオゾン濃度を室内環境基準⁶⁾の 0.1, 1.0, 5.0 ppm でそれぞれ行った。インフルエンザウイルスの投入時間は 5 min とし、5 min 経過後インフルエンザウイルスの投入を停止する。その後、30 min の除染計算を開始し、オゾン投入有りの場合はこのときオゾン投入を開始する。従って、計算時間は合計で 35 min となる。環境温度は 25.0 °C とする。

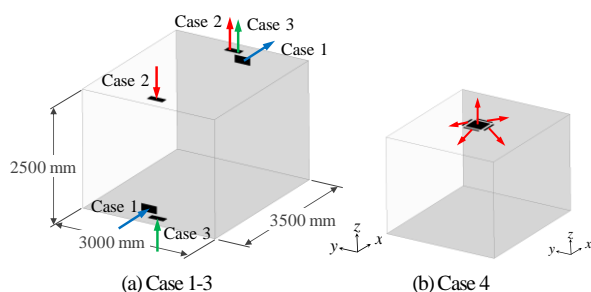


Fig. 1 Computational domain and ventilation system.

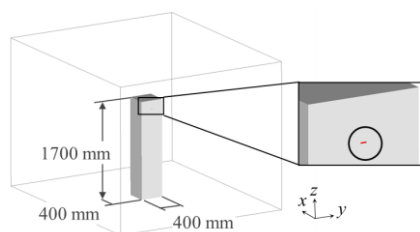


Fig. 2 Simplified infected person and the open mouth (red point).

4. 結果と考察

室内に残留するインフルエンザウイルス感染力価を図 3 に示す。ただし、感染力価は合計投入感染力価を基準とし、ウイルス投入終了時 (5min) 及び除染計算終了時 (35 min) における残留率として示す。ここで、オゾンガスの濃度は 0.1ppm で投入した。ウイルス投入終了時において、既に換気方式により残留率に差異が生じている。特に、Case 3 は残留率が比較的低いことがわかる。また、ウイルス投入後に換気のみ及び換気及びオゾンガスの投入を行った場合でも Case3 が最もウイルス残留率が低いことがわかる。Case3 以外の換気方法では、ウイルス投入時では、ケース間にあまり差異が見られない。ただし、Case2 は Case1 や Case4 に比べ換気を行うことでウイルス残留率が約 5% 減少している。

図 4 に室内における、時間経過 1 min, 5 min 後のインフルエンザウイルス感染力価の可視化図を示す。図 4(c)より、流入口から給気された空気によって排気口のある天井へと感染力価 (すなわち、ウイルス) が吹き上げられ、室内に拡散することなく、ウイルスが計算領域外へ流出することがわかる。よって、排気口の設置位置に起因して、他の換気方式に比べ Case3 の残留率が低くなる。一方、その他の換気方式では、流入口からの空気がウイルス

に衝突の後、排気口へと直接流れず室内全体にインフルエンザウイルス感染力価が広がってしまっていることがわかる(図 4(a-b,d))。そのため、室内の空気を排気する時間がかかるため、Case3 に比べ残留率の減少が小さくなったと考えられる。

図 5 にオゾン投入時から 15 min, 30 min 後の室内のオゾン濃度を示す。除染計算終了時、オゾン投入の有無による残留率の差異はほとんど見られない。全ての換気方式で、オゾン濃度が室内全体で次第に上昇する。しかしながら、オゾン投入がない場合を基準としたオゾン投入がある場合の除染計算終了時における残留率は、全ての換気方式において 1.0% 程度の低下に留まっている。これは、環境基準濃度であるオゾンガス濃度 0.1ppm では室内オゾン濃度が上昇しないことが要因として挙げられる。除染計算終了時、室内オゾン濃度は全換気方式において約 0.04~0.05 ppm であり、それ以前はさらに低い濃度であることがわかる。

図 6 に、Case1 において、オゾンガスを 0, 0.1, 1.0, 5.0 ppm で投入した場合の感染力価残留率を示す。オゾンガス濃度が 1.0 ppm までは換気のみを行った場合と 3% 以上で差異はなく、著しい除染効果の上昇が見られない。一方、オゾンガス濃度を 5.0 ppm で投入することによって、インフルエンザウイルス残留率を抑制できることがわかった。

図 7 に、オゾンガスを 0.1, 1.0, 5.0 ppm で投入した場合のオゾン濃度の時間変化を示した。オゾンガス濃度 0.1, 1.0 ppm では、オゾン濃度がほぼ収束しているのに対して、オゾン濃度 5.0 ppm では収束が見られず、さらに除染時間を長くすることでオゾンによる除染の効果を高められる可能性がある。しかしながら、オゾンガスを 5.0 ppm で室内に投入すると最終的なオゾン濃度が約 4 ppm となる。オゾン濃度 4 ppm とは環境基準の 40 倍もの濃度であるため、人体への影響が無視できず、除染の仕方を工夫する必要がある。

5. 結言

本研究では、インフルエンザウイルスによって汚染された室内を計算対象とし、除染過程のモデル化及び数値解析を行った。

4 つの換気システムとオゾンガスの濃度を変化させ、換気システム及びオゾンガスの影響を調査した。得られた知見は以下の通りである。

- インフルエンザウイルス除染計算において、床吹出・天井吸込方式による除染効果が他の換気システムよりも高い。
- インフルエンザウイルス除染計算において、換気と比較して、オゾンによる除染効果は弱い。
- インフルエンザウイルス除染計算において、オゾン濃度 5.0 ppm では著しい除染効果が確認できた。

引用文献

- (1) 国立感染症研究所, インフルエンザ過去 10 年との比較グラフ, (2019)
- (2) J. Yang, M. Grantham, M. Pantelic, *et al.*, Infectious virus in exhaled breath of symptomatic seasonal influenza cases from a college community, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2018, 115 (5), 1081-1086
- (3) 牛島省ら, 非圧縮流体計算における C-HSMAC 法と SOLA 法の収束特性, *土木学会論文集 No. 747/II-65*, 197-202 (2003), 11
- (4) 田中浩ら, インフルエンザウイルスのオゾンガスによる不活化, *IHI 技報*, 2009, 49 (2), 74-77.
- (5) Gupta JK, *et al.*, *Indoor Air*, **20**, (2010), pp. 31-39.
- (6) 日本産業衛生学会, *産衛誌*, **60**, (2018), 116-148.

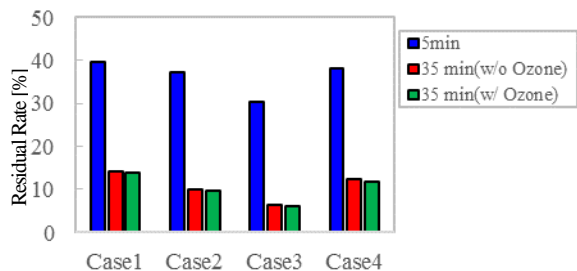


Fig. 3 Residual Influenza virus infectious titer. (Ozone gas 0.1 ppm)

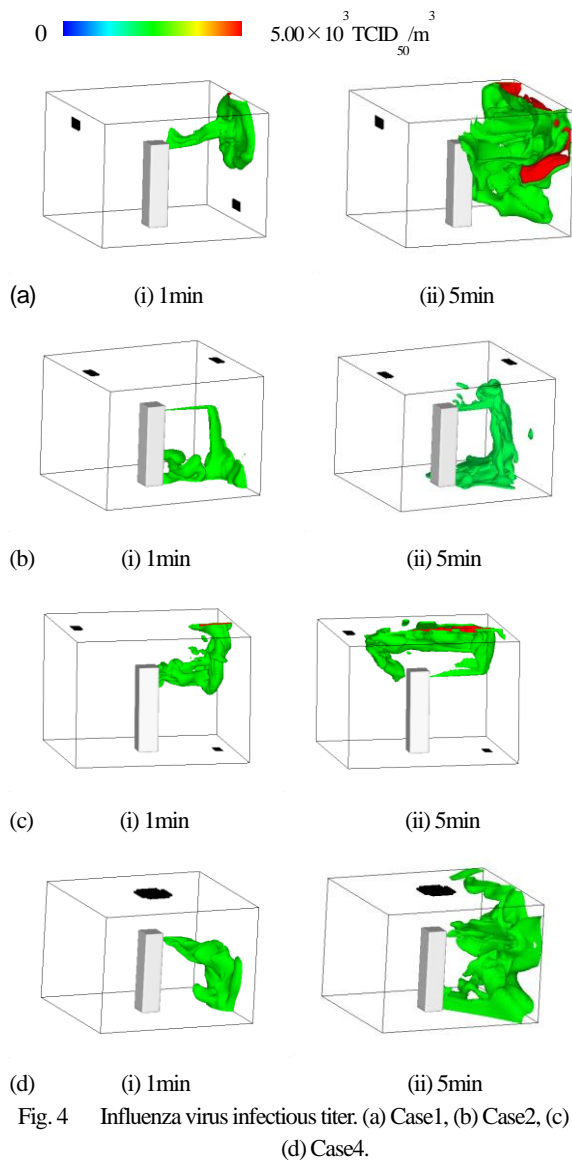


Fig. 4 Influenza virus infectious titer. (a) Case1, (b) Case2, (c) Case3, (d) Case4.

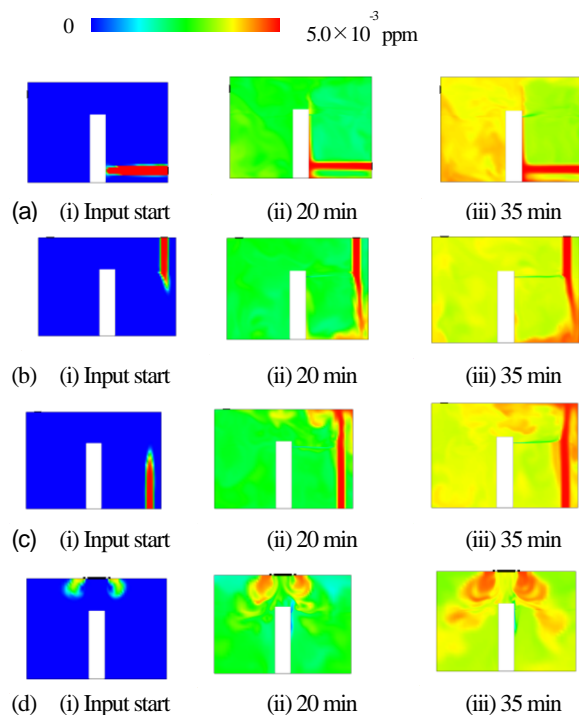


Fig. 5 Ozone concentration field(x-z coordinate axes). (a) Case1, (b) Case2, (c) Case3, (d) Case4.



Fig. 6 Residual Influenza virus in each concentration of Ozone gas for Case1.

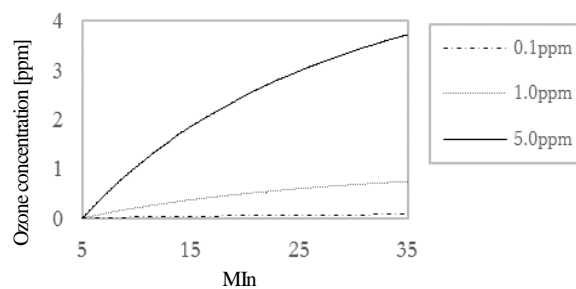


Fig. 7 Ozone concentration in each concentration of Ozone gas for Case1.