

Wells-Riley モデルによる換気設備の風量設計と運用に関する検討

高知工科大学 システム工学群 建築・都市デザイン専攻 建築環境工学研究室

換気
運用 Wells-Riley モデル 設計
講義室 大学

学籍番号: 1210161 氏名: 三谷 明日香
指導教員: 田島 昌樹

1. はじめに

換気設備の一般的な風量設計は、対象室で発生する汚染物質の平衡濃度が基準値以下となる風量を必要換気量として定められている¹⁾。この平衡濃度は時間が無限大に経過した定常条件での濃度であることから、後述のザイデル式のように時間を変数とはなっていない。しかしながら、汚染物質として空気感染が考えられるウイルスを想定した場合は、滞在時間が感染リスクの変数となるため、換気設計についても時間の考慮が必要となる²⁾。本研究では、特に大学の講義室を対象とした場合の換気設計と運用について、感染確率が考えられる条件を想定して検討を行った。

2. 研究概要

Melikov³⁾による空気感染に関する論文では、室内感染の現在の理解として、室内環境の異なる建物(住宅、オフィス、学校、病院、航空機客室)では、基本的にジオメトリや室内空間のレイアウト、空気分配方法、供給流量、居住者密度、居住者の行動などによって異なった問題と空気感染の特徴をもっていることに注意しなければならないと述べられている。

一方、完全混合条件での室内の感染確率を求めるためによく知られているのが式(1)のWells-Rileyモデル⁴⁾であり、感染確率を考慮した換気量の設計に有効であると考えられる。また、RudnickとMilton⁵⁾は換気回数の代替指標として呼気による二酸化炭素濃度を利用した式(2)のモデルを提案しており、この式から室内の感染にかかる量子濃度の時間変化を考慮した非定常的検討が可能となる。

$$P = 1 - \exp\left(-\frac{I p q t}{Q}\right) \quad (1)$$

P : 感染確率
 I : 感染者数[人]
 p : 呼吸量[m³/s]
 q : 量子発生量[quanta/s]
 t : 暴露時間[s]
 Q : 外気供給率[m³/s]

$$P = 1 - \exp\left[-\frac{I p q t}{Q} \left\{ -\frac{V}{Q t} \left[1 - \exp\left(-\frac{Q t}{V}\right) \right] \right\}\right] \quad (2)$$

V : 室容積[m³]

本研究では、定常状態での式(1)と非定常状態での式(2)を用いて、風量設計時と運用時の感染確率の検討を行った。また、時間経過に伴う室内CO₂濃度の関係と求められた感染確率を用いることで設計と運用での換気量の考察を行った。感染確率と換気量の検討を行うための指標となる室内CO₂濃度の算出方法は、3章の設計時と運用時の検討でそれぞれ示すこととする。

3. 設計時と運用時の検討

3.1. 風量設計時における検討

感染確率の評価に必要な室内CO₂濃度は定常状態の式(3)のザイデル式⁶⁾から求めた。また、感染確率は式(1)を用いた。

$$C - C_0 = \frac{k}{Q} \quad (3)$$

C : 室内CO₂濃度[m³/m³] C_0 : 外気CO₂濃度[m³/m³]
 k : CO₂発生量[m³/h] Q : 換気量[m³/h]

在室開始から90分後のSARS-CoV2の感染確率と室内CO₂濃度の試算条件を既往研究^{7),8),9)}を参考にして設定し表1に、試算結果を図1に示す。

この条件下で、建築基準法¹⁰⁾に定められている一人当たりの換気量20m³/hを確保した場合、室内CO₂濃度は1400ppmとなり、建築基準法による室内環境基準⁸⁾1000ppmを越えた。建築物衛生法¹¹⁾で定められた条件で一般的に必要なとされる一人当たりの換気量30m³/hを確保した場合、室内CO₂濃度は約1067ppmとなりわずかに1000ppmを超える。しかし、想定人数の最大値で講義室を使用することがほとんどないことを考慮すると許容範囲内である。感染確率についても一人当たりの換気量30m³/hの確保で、座席数81席以上あれば、感染確率を0.1%に抑えることができる。また、座席数が増えると感染確率が下がる。

表1 設計条件

外気CO ₂ 濃度	400ppm ⁷⁾
在室者のCO ₂ 呼出量	0.02 m ³ /h・人 ⁸⁾
感染者数	1人
一人当たりの換気量	20 m ³ /h・人、30 m ³ /h・人
感染者の量子発生量	3.1 quanta/h ⁹⁾
在室者の呼吸量	0.54 m ³ /h ⁹⁾
在室時間	90分

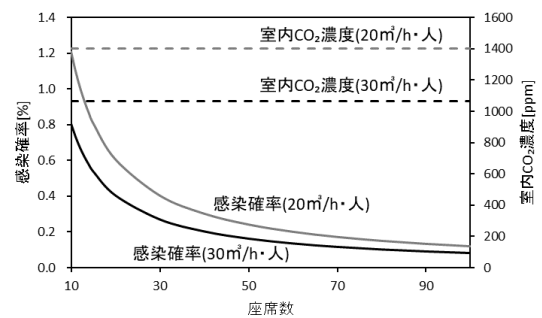


図1 SARS-CoV2における90分講義を想定した座席数に伴う室内CO₂濃度と感染確率(表1の条件)

3.2. 運用時における検討

運用時の感染確率を評価するために非定常状態での換気の基本式⁶⁾である式(4)から室内CO₂濃度を求めた。

$$C - C_0 = (C_1 - C_0)e^{-\frac{Q}{V}t} + \frac{k}{Q}(1 - e^{-\frac{Q}{V}t}) \quad (4)$$

C: 室内の初期CO₂濃度[m³/m³]

設計時の結果から81席以上の講義室(室容積400m³)を対象として、調査した大学の講義室の平均的値である座席密度0.9席/m²とした場合、在室者数は座席使用率100%で教員を一人とすると式(5)より、121人となり、75%で91人、50%で61人、25%で31人となる。

$$0.9 \text{ 席/m}^2 \times \frac{400 \text{ m}^3}{3 \text{ m}} + 1 \text{ 人} = 121 \text{ 人} \quad (5)$$

その他の試算条件を表2に示し、この条件下で一人当たりの換気量20m³/hと30m³/hの風量が確保されているとき、座席使用率ごとの室内CO₂濃度と感染確率の時間変化を図2と図3に示す。また、感染確率が0.1%となる講義時間と室内CO₂濃度を表3に示す。

図2より、一人当たりの換気量20m³/hのとき座席使用率100%でおおよそ1400ppmまで上昇し、75%まで減らしたとしても1000ppmを超えた。図3より、一人当たりの換気量30m³/hで座席使用率100%のとき15分後には1000ppmを上回り、90分後には約1067ppmとなり定常状態となった。

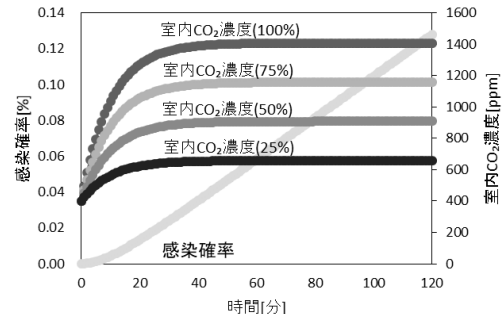
一人当たりの換気量30m³/h確保することで90分の講義が伸びてしまったとしても感染確率は0.1%以下に抑えることができた。室内CO₂濃度が高いときに感染リスクが高くなると予測する人がいるかもしれないが、感染確率を求める際に在室者の人数は影響を受けないため、講義室内に一人感染者がいるならば、室内に他の非感染者が何人いても感染確率は変化しないことに注意しなければならない。

4. おわりに

本研究では、室内CO₂濃度と感染確率から風量設計時と運用時の評価を行った。設計時、運用時ともに一人当たりの換気量30m³/h以上を確保すべきことを確認することができた。感染者一人という本研究の想定の場合、設計時では座席数が多い、すなわち換気量が多い講義室ほど感染確率が低くなる。運用時では、座席使用率は感染確率に直接の影響はなく、窓を開けるなど換気量を増加させることで感染確率を下げるができる。また、一般的に設計で採用される換気量と座席使用率に基づく、感染確率が0.1%の室内CO₂濃度を算定したため、CO₂濃度を測定しながら講義室の運用をする際に参考となる。既往研究¹²⁾より感染者がマスクを使用することで、感染ウイルスに対する量子発生量を布マスクで50%、サージカルマスクで25%、N95マスクで5%まで減少させることができることから、マスクの着用や種類によって、より長い時間感染確率を0.1%以下に保てると考えられる。

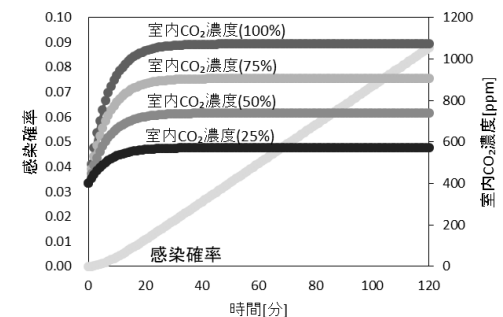
表2 運用時の試算条件

感染者数	1人
感染者の量子発生量	3.1quanta/h ⁹⁾
在室者の呼吸量	0.54m ³ /h ⁹⁾
在室者のCO ₂ 発生量	0.02m ³ /h・人 ⁸⁾
室容積	400m ³ (天井高3m)
初期CO ₂ 濃度	400ppm
外気CO ₂ 濃度	400ppm ⁷⁾



図中の○内は1m²当たり0.9席を100%としたときの座席使用率を示す

図2 SARS-CoV2における換気量20m³/h・人で設計された講義室の室内CO₂濃度と感染確率(表2の条件)



図中の○内は1m²当たり0.9席を100%としたときの座席使用率を示す

図3 SARS-CoV2における換気量30m³/h・人で設計された講義室の室内CO₂濃度と感染確率(表2の条件)

表3 SARS-CoV2における感染確率が0.1%となる講義時間と室内CO₂濃度(表2の条件)

換気量	2400m ³ /h(20m ³ /h・人)				3600m ³ /h(30m ³ /h・人)			
	100%	75%	50%	25%	100%	75%	50%	25%
時間	95分				135分			
CO ₂ 濃度 [ppm]	1408	1158	908	658	1072	906	739	572

<参考文献>

- 1) 空気調和衛生工学会: 空気調和・衛生工学便覧, 第14版, 空気調和設備編, p.134-135(2010)
- 2) 田中俊六他: 最新建築環境工学[改訂4版], 井上書院, p.41(2014)
- 3) Z. T. Ai, A. K. Melikov: Airborne spread of expiratory droplet nuclei between the occupants of indoor environment s: A review(2018)
- 4) C. N. Sze To, C. Y. H. Chao: Review and comparison between the Wells-Riley and dose-response approaches to risk assessment of infectious respiratory diseases(2009)
- 5) S. N. Rudnick, D. K. Milton: Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration(2003)
- 6) 田中俊六他: 最新建築環境工学[改訂4版], 井上書院, p.172-173(2014)
- 7) 国土交通省: 気象庁二酸化炭素濃度の観測結果, https://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/obs/co2_monthhave_ryo.html(2020)
- 8) 空気調和衛生工学会: 空気調和・衛生工学便覧, 第14版, 空気調和設備編, p.141(2010)
- 9) REHVA: COVID19 GUIDANCE version4.0 p.21(2020)
- 10) 田中俊六他: 最新建築環境工学[改訂4版], 井上書院, p.151(2014)
- 11) 田中俊六他: 最新建築環境工学[改訂4版], 井上書院, p.53(2014)
- 12) 倉測隆他: 新型コロナウイルス感染対策としての空調設備を中心とした設備の運用について(改訂二版), 空気調和・衛生工学(2020)