

窓開け換気による感染対策が行われた講義室の室内環境の実態調査

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  
 学籍番号：1220145 氏名：前田 明穂  
 温熱環境 感染症 熱中症  
 実測調査 講義室 大学 指導教員：田島昌樹

1. はじめに

2020年より、厚生労働省は新型コロナウイルスの感染対策として密閉、密集、密接の3密が同時に起こることがないように呼び掛けている<sup>[1]</sup>。大学でも、窓開け換気による感染対策を行いながら講義が行われているが、外気が室内へ侵入することで、夏期では室内空気温度の上昇により在室者の熱中症への危険性が高まり、冬期では室内空気温度の低下により在室者が不快感を抱くことが懸念される。本研究では、夏期と冬期の実測を行い、講義室の室内温熱環境および感染確率について明らかにすることを目的とする。

2. 研究概要

窓開け換気による感染対策が行われた講義室の室内温熱環境および感染確率を把握することを目的として、対面で講義が行われた講義室の屋内外で実測を行った。なお、講義中の空調の設定および開口部開閉操作は担当教員の判断により行われていた。

2.1. 温熱環境に関する評価項目

夏期冬期の講義室内の温熱環境評価指標として日常生活における熱中症予防指針の温度基準である WBGT と総合的快適指標である PMV を用いた。

(1) WBGT

日本気象学会では WBGT を4段階の温度基準に分け熱中症予防指針を示している<sup>[2]</sup>。WBGT25℃以上は中程度以上の生活活動で熱中症の危険性があるとされる熱中症警戒域であり、本研究では WBGT25℃以上を熱中症の危険性があるものとした。WBGT 算出式は式(1)に示す Yaglou の式を用いた。

$$WBGT = 0.7WB + 0.3TG \quad (1)$$

WB: 湿球温度[℃]      TG: 黒球温度[℃]

(2) PMV

PMV は熱的快適性に関する4要素に加え、Met 値と clo 値を加えた総合的快適指標<sup>[3]</sup>である。快適推奨域として -0.5 < PMV < 0.5 とされている。PMV 算出のための着衣量、代謝量はそれぞれ ISO9920<sup>[4]</sup>と「身体運動のメッツ (METs) 表」<sup>[5]</sup>の数値を用いた。実測時では受講者の身体の高さに相当する机上での実測データを用いて算出した。

2.2. 感染に関する評価項目

感染確率評価指標として、室内 CO<sub>2</sub>濃度と Wells-Riley モデルより算出した感染確率を評価項目とした。感染確率算出には CO<sub>2</sub>濃度の実測値より算出した換気量を用いた。

(1) CO<sub>2</sub>濃度

室内 CO<sub>2</sub>濃度算出には式(2)に示す単室の換気に関する微分方程式を用い、実測データと比較を行った。対象講義室の換気量 Q は SHASE の連続発生 (供給)法<sup>[6]</sup>を用いて算出し、CO<sub>2</sub>呼出量は既往研究<sup>[7][注1]</sup>の CO<sub>2</sub>呼出量推定式を用いて算出した。

$$\frac{dC_i}{dt}V_i = \sum P_{CO_2i} + Q_{io}(C_0 + C_i) \quad (2)$$

$C_i$ : i 室の室内濃度[m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]       $C_0$ : 外気濃度[m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]  
 $P_{CO_2i}$ : CO<sub>2</sub>呼出量[m<sup>3</sup>/h]       $Q$ : 外気導入量[m<sup>3</sup>/h]  
 $t$ : 時間[h]       $V$ : 室の空気容積[m<sup>3</sup>]

(2) 感染確率

完全混合条件で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(3)の Wells-Riley モデル<sup>[9]</sup>である。算出時に必要な呼吸量及び量子発生量は新型コロナウイルスのデルタ株の数値を REHVA<sup>[10]</sup>より参照し用いた。

$$P = 1 - \exp\left(-\frac{I p q t}{Q}\right) \quad (3)$$

$P$ : 感染確率       $I$ : 感染者数[人]  
 $p$ : 呼吸量[m<sup>3</sup>/s]       $q$ : 量子発生量[quanta/s]  
 $t$ : 暴露時間[s]       $Q$ : 外気供給率[m<sup>3</sup>/s]

表1 感染確率算出に用いた推定値

感染者数	$I$	1人
在室者の呼吸量	$p$	0.54m <sup>3</sup> /h
感染者の量子発生量	$q$	5quanta/h
滞在時間	$t$	90分

3. 測定概要

講義室の屋内外に測定器(表2)を設置し、実測を行った。講義室内では机上に測定器を複数点設置し、測定値の差異が小さいことを確認の上、代表点として講義室中央部に近い測定器のデータを用いて分析を行った。夏期では34講義(#S1~#S34)、冬期では14講義(#W1~#W14)の実測データをもとに分析を行った(表3)。実測時では開口部の開閉状態、受講者数、活動内容について記録を行った。

表2 使用測定器

	主な測定内容	使用測定器	測定間隔
①	WBGT・温湿度	HI-2000SD	60s
②	CO <sub>2</sub> 濃度・温湿度	RTR500BW	20s
③	CO <sub>2</sub> 濃度	KNS-CO <sub>2</sub> S・RVR-52	20s
④	風速	CLIMOMASTER Mode 16501series(プロープ:Model6542)	20s

表3 実測概要

期間	講義室名(床面積)	受講者数	講義数	講義 ID
夏期 9/8~9/24	L01(77m <sup>2</sup> )	5	15	#S1~ #S34
	L02(68m <sup>2</sup> )	2	15	
	L03(123m <sup>2</sup> )	14	4	
冬期 11/4~12/23	L04(150m <sup>2</sup> )	20~26	7	#W1~ #W14
		25~33	7	

# 卒業論文概要

## 4. 夏期室内環境

### 4. 1. 温熱環境の評価

図1に屋内外で測定した WBGT の実測結果を示す。屋外 WBGT では熱中症警戒域である 25℃を上回る講義が見られ、最大値は 30.4℃であった。室内 WBGT はすべての講義において熱中症警戒域 25℃を下回る結果となった。

各講義の屋外と室内の WBGT について開口部開閉ごとに色分けしたものを図2に示す。開口部が開放された講義では屋内外の WBGT は比例関係にあり、閉鎖された講義では屋外 WBGT が高くなっても室内 WBGT はほぼ一定値を示した。開口部開放時の回帰直線より、屋外 WBGT が 30℃を上回ると室内 WBGT は熱中症警戒域である 25℃を超えることが予測され、在室者の熱中症に対する危険性を抑えるため、開口部を閉鎖することが必要だと考えられる。

気象庁<sup>[11]</sup>による過去30年間(1991年~2021年)の5月から10月の気象データを用いて屋外 WBGT を算出した。算出には通常観測気象要素を用いた小野の式<sup>[12]</sup>を用いた。屋外 WBGT が 25℃を上回る時間は過去30年間の各年に400時間以上存在し、屋外 WBGT が 30℃を上回る時間は30年間で合計16時間であった。屋外 WBGT が 30℃を上回る時間は少ないが、図2で示したように、在室者が熱中症警戒域に属する可能性があり、注意する必要がある。

図3に外気温度と PMV の関係を示す。PMV が -1.0 を下回り、快適推奨域から大きく外れている講義は、降雨時のため外気温度が低い条件で開口部が開放されていたことが原因だと考えられる。開口部を閉鎖した場合、外気温度に差があっても室内 PMV はほぼ一定値を示す傾向がみられた。開口部を開放した場合の回帰直線より、外気温度が高くなると PMV も増加傾向にあり、室内 PMV が快適推奨域を満たす外気温度は 22.2℃から 27.9℃であった。

以上より、室内 WBGT が熱中症警戒域 25℃を上回る講義はなかったが、PMV では快適推奨域を超える講義が存在し、熱的快適性向上のため開口部閉鎖の操作が必要だと考えられる。

### 4. 2. 感染確率の算出

各講義の平均室内 CO<sub>2</sub>濃度と換気回数の算出結果を図4に示す。実測対象すべての講義では、建築物衛生法で定められている室内 CO<sub>2</sub>濃度 1000ppm を下回っていた。実測結果のうち開口部が閉鎖された講義は開放された講義と比べて換気回数が小さく、室内 CO<sub>2</sub>濃度も高くなっている。

在席率別室内 CO<sub>2</sub>濃度の算出結果を図5に示す。実測のうち後述する再生産数が高い講義(#S23)の換気量および CO<sub>2</sub>呼出量を用いて在席率別の室内 CO<sub>2</sub>濃度を算出した。実測時の在席率は11%であり、室内 CO<sub>2</sub>濃度は低く抑えられている。在席率が75%の場合は基準値 1000ppm を超える結果となった。

各講義の室内 CO<sub>2</sub>濃度と再生産数を図6に示す。再生産数は式(3)に示す Wells-Riley モデルに非感染者数を乗じたものである。算出式を式(4)に示す。日本疫学会では、再生産数  $R < 1$  の場合、感染の流行は広がらないとしている<sup>[13]</sup>。

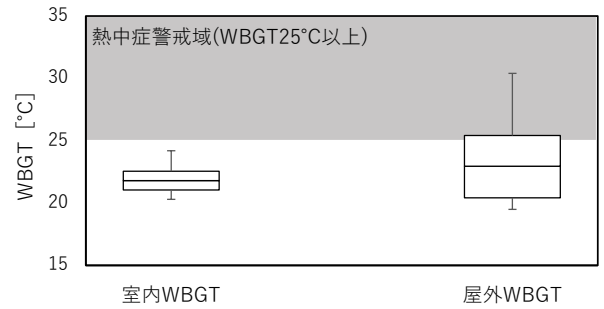


図1 実測時の WBGT

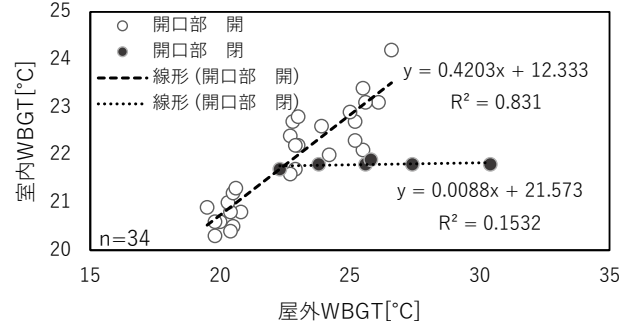


図2 各講義の屋外と室内の WBGT の関係

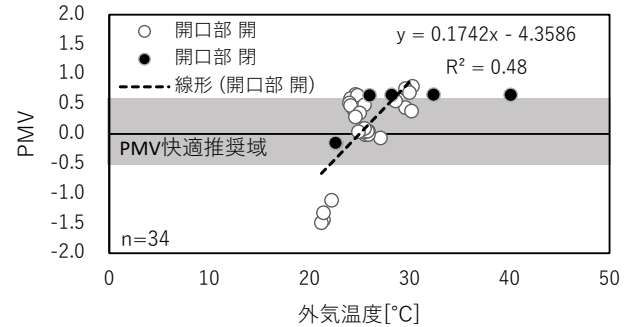


図3 外気温度と PMV

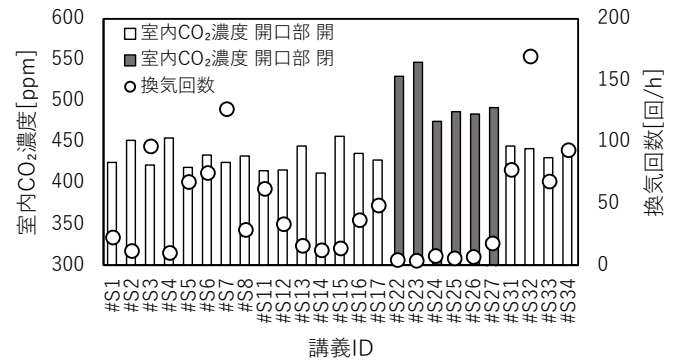


図4 各講義の室内 CO<sub>2</sub>濃度と換気回数

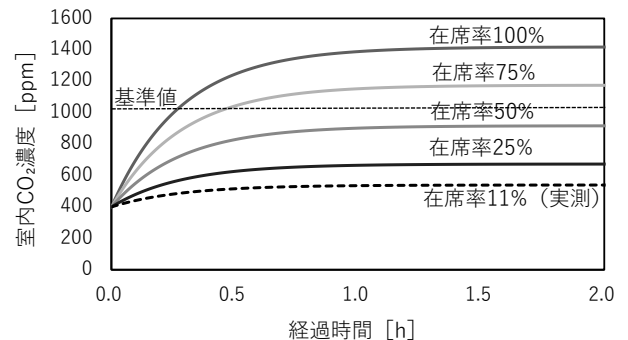


図5 在席率別室内 CO<sub>2</sub>濃度 (#S23 の講義条件における算出結果)

## 卒業論文概要

開口部を閉鎖することで再生産数の値は大きくなり、ほとんどの講義で閉鎖時の方が大きな値となった。開口部を開放した講義の最大再生産数は 0.006、閉鎖した講義では 0.021 であった。

$$R = P \times (x - 1) \quad (4)$$

$R$ : 再生産数[-]       $P$ : 一人当たりの感染確率[-]

$x$ : 在籍者数[人]

1 講義 90 分間滞在した場合の換気量と在席率別の再生産数の算出結果を図 7 に示す。再生産数が最も高かった講義(#S23)の  $\text{CO}_2$ 呼出量を用いて算出を行った。実測時(#S23)と同じ換気量がある条件で在席率が 100%であった場合の再生産数は 0.227 に上昇した。

### 4. 3. 夏期室内環境に関するまとめ

- (1) 屋外 WBGT が  $30^\circ\text{C}$  を上回る状況下で開口部を開放し講義を実施した場合に、室内 WBGT が熱中症警戒域  $25^\circ\text{C}$  以上になる可能性がある。
- (2) 新型コロナウイルス感染症の再生産数について、開口部開放時は 0.01、開口部閉鎖時には 0.03 を下回り、在席率の制限、換気量の増加により再生産数を低く抑えることができる。
- (3) 夏期における講義室は、常時窓の開放を基本としつつも屋外 WBGT が  $30^\circ\text{C}$  を上回る場合は可能な限り開口部を閉鎖することで再生産数を低く抑えることと熱中症への危険性を低下させることが可能となる。

## 5. 冬期室内環境

### 5. 1. 温熱環境の評価

図 8 に屋内外で測定した WBGT の実測結果を示す。室内、屋外ともに熱中症警戒域 WBGT  $25^\circ\text{C}$  を下回る結果となった。

冬期の温熱環境評価として PMV に加え上下温度差について検討を行った。ASHRAE<sup>[14]</sup>による上下温度差は、在室者のくるぶしの高さと頭の高さの温度差を指し、 $3^\circ\text{C}$  以内にすることが推奨されている。PMV および上下温度差の実測結果を図 9、10 に示す。測定した講義室は南北に開口部があり、南側開口部は常に開放されていたため、北側開口部がすべて閉鎖されている場合を片側開口部閉とした。PMV の算出結果よりほとんどの講義が快適推奨域を満たしていた。しかし、冬期にもかかわらず快適範囲の上限である  $\text{PMV}=0.5$  を上回る講義もあった。上下温度差についてはほとんどの講義で  $3^\circ\text{C}$  以上となっていることから、室内空気温度が高めに運用されていたものと考えられる。

### 5. 2. 感染確率の算出

各講義の平均室内  $\text{CO}_2$ 濃度と換気回数の算出結果を図 11 に示す。実測対象すべての講義で、建築物衛生法の基準値である室内  $\text{CO}_2$ 濃度  $1000\text{ppm}$  を下回る結果となった。冬期の実測では片側開口部が常に開放されていたため、開口部開閉による  $\text{CO}_2$ 濃度の大きな違いは見られなかった。

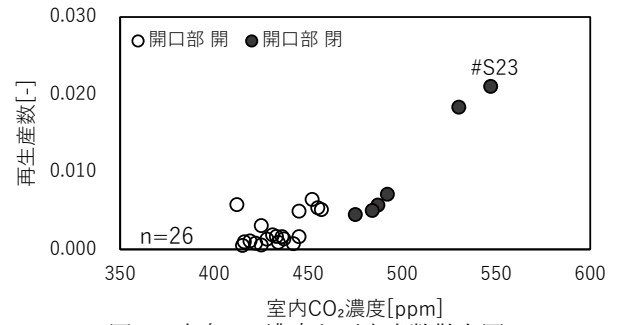


図 6 室内  $\text{CO}_2$ 濃度と再生産数散布図

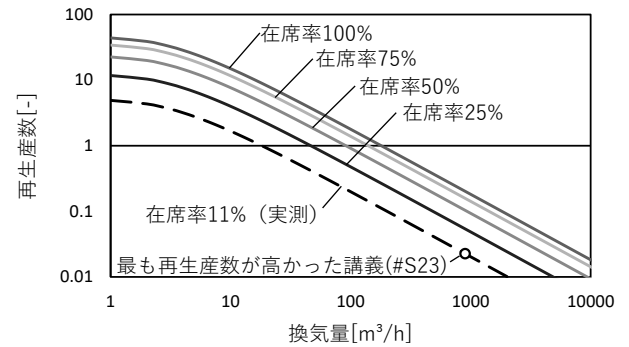


図 7 在席率別の換気量と再生産数 (#S23 の講義条件における算出結果)

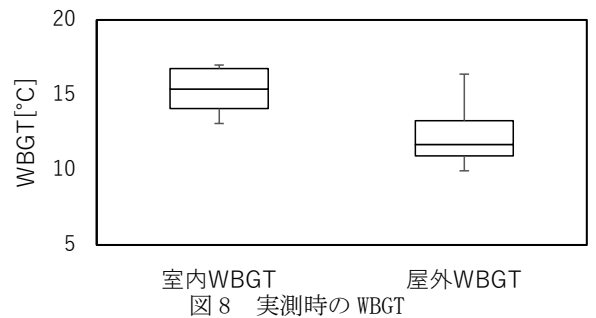


図 8 実測時の WBGT

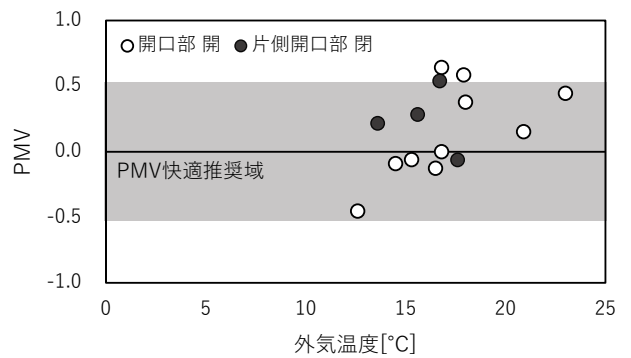


図 9 外気温度と PMV

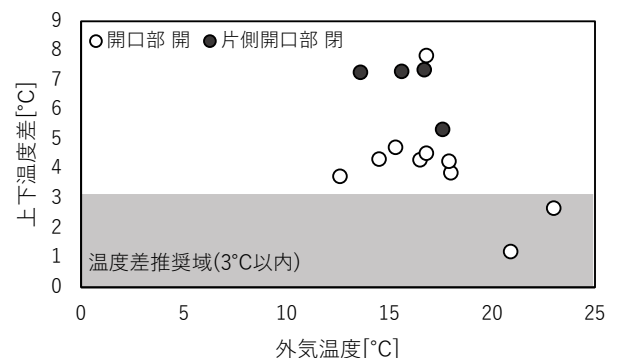


図 10 外気温度と上下温度差

卒業論文概要

在席率別室内CO<sub>2</sub>濃度の算出結果を図12に示す。実測において最も再生産数が高かった講義(#W14)の条件を用いて算出を行った。冬期の実測した講義ではいずれかの開口部が常に開放されていたため、在席率100%の場合でも基準値1000ppmを下回る結果となった。

各講義の室内CO<sub>2</sub>濃度と再生産数を図13に示す。開口部閉による再生産数の違いは大きくは見られなかった。常にいずれかの開口部が開放された講義室では在席率が70%を上回る場合でも再生産数は夏期の閉鎖時と同様に0.03を下回る結果となった。

1講義90分間滞在した場合の換気量と在席率別の再生産数の算出結果を図14に示す。#W14と同じ換気量を得た条件下で在席率を25%まで削減した場合の再生産数は0.009程度に抑えることが可能である。

5.3. 冬期室内環境に関するまとめ

- (1) 暖房設備利用によりほとんどの講義で机上の高さでのPMVについては快適推奨域を満たしており、上下温度差については推奨域である3°C以内を超える結果となった。
- (2) いずれかの開口部が常に開放されていた講義室では在席率が70%を超えた場合でも再生産数は0.03を下回る。
- (3) 片側開口部を開放した場合でも感染対策に寄与しており、暖房設備利用により室内温熱環境は快適推奨範囲に属していた。より熱的快適性を向上させるため、足元の空気温度の低下にも注意する必要があると考えられる。

6. おわりに

夏期、冬期の実測より、すべての講義で感染症が広まるとされる再生産数R=1を下回る結果が得られ、感染対策のための窓開け換気の効果があることが把握された。しかし、温熱環境評価において快適推奨範囲を満たさない講義も存在したため、開口部の開閉の操作、冷暖房設備の利用により室内環境の快適性を向上させる必要がある。

[注1] 文献[7] 二酸化炭素呼出量算出式  
 日本人の体重、身長、性別、年齢といった個人属性および活動量にもとづいたCO<sub>2</sub>呼出量の推定式  

$$P_{CO_2} = 1.601 \times 10^{-4} (60.63 \times A_D \times Met \times C_a \times C_g)$$

$$P_{CO_2}: CO_2 \text{呼出量} [m^3/h] \quad A_D: \text{体表面積} [m^2]$$

$$A_D = 0.007246 \times W^{0.425} \times H^{0.725}$$

$$W: \text{体重} [kg] \quad H: \text{身長} [cm]$$

$$Met: \text{エネルギー代謝率}$$

$$C_a: \text{年齢係数 (18~29 歳基礎代謝量}^{[8]} \text{に対する比)}$$

$$C_g: \text{性別係数 (男性 1.00 女性 0.73)}$$

<参考文献>

[1]厚生労働省:3つの密を避けるための手引き!:<https://www.kantei.go.jp/jp/content/000062771.pdf>: (参照2022.2.7) [2]日本生気学会:「日常生活における熱中症予防指針」Ver.3確定版 [3]最新建築環境工学[改訂4版]p60 [4]ISO 9920:Ergonomics of the thermal environment-Estimation of thermal insulation and water vapour resistance of a clothing ensemble [5]国立健康・栄養研究所;改訂版「身体活動のメッツ(METs)表」 [6]空気調和衛生工学会規格:SHASE-S116-2003:トレーサガスをを用いた単一空間の換気量測定法 [7]田島ら:換気測定のための在室者の二酸化炭素呼出量の推定:日本建築学会,第81巻,第728号,885-892,2016 [8]「日本人の食事摂取基準」策定検討会:日本人の食事摂取基準(2020年版)「日本人の食事摂取基準」策定検討会報告書:P74,令和元年12月

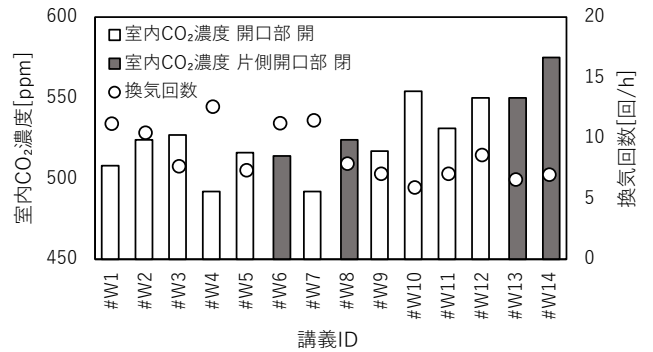


図11 平均室内CO<sub>2</sub>濃度と換気回数

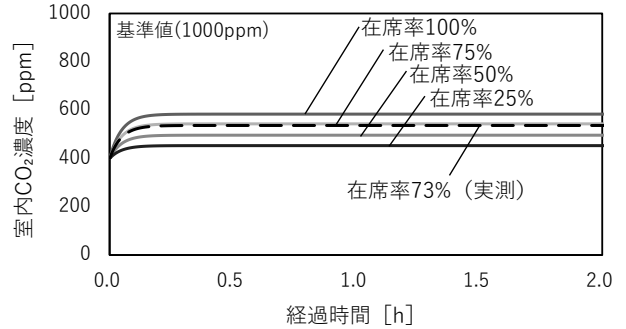


図12 在席率別室内CO<sub>2</sub>濃度 (#W14の講義条件における算出結果)

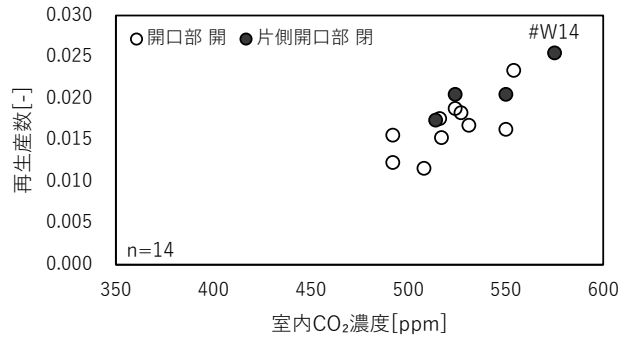


図13 室内CO<sub>2</sub>濃度と再生産数

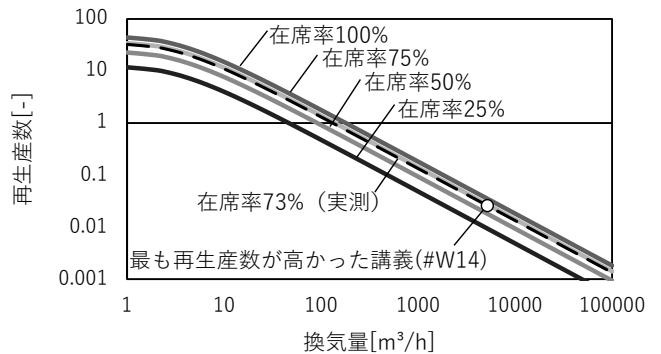


図14 在席率別の換気量と再生産数

[9]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) [10]REHVA COVID 19 GUIDANCE version4.1:Page23 Table3 [11]国土交通省気象庁過去の気象データ:<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/>(参照:2022.2.8) [12]小野ら:通常観測気象要素を用いたWBGT(湿球黒球温度)の推定:日生気誌 50(4):147-157,2014 [13]一般社団法人日本疫学会:新型コロナウイルス関連情報特設サイト:<https://jeaweb.jp/covid/glossary/index.html>: (参照2022.2.7) [14]ASHRAE Standard 55-2020: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy