

CO₂濃度に基づく感染症対策のCFDを用いた研究事例



DZ18122 大崎 喬

Keywords

CFD CO₂濃度 必要換気量
収容人数 風速 パラメータ分析

1. 背景と目的

厚生労働省がコロナ対策として発表している換気の基準は、機械換気の場合、必要換気量（一人あたり毎時30m³）を確保することとしている。コロナ対策の基準は建築基準法（必要換気量一人あたり毎時20m³）以上の換気を必要としており、その基準を満たしていれば、「換気が悪い空間」には当てはまらないとしている。しかし、コロナ対策として発表している換気の基準の必要換気量を満たしていれば、感染症を確実に予防することができるという根拠があるわけではない。

本研究では、感染症対策をする上での室内の機械換気に主眼を置いて、CFD（Computational Fluid Dynamics）によって解析を行う。そして、コロナ対策として発表している換気の基準、必要換気量30m³/hを守る場合、室内のCO₂濃度は安全値以下になるのかどうかの確認をする。また、CO₂濃度から用途や規模の異なる建築物の室内における空気環境を評価し、またその評価に基づいてどういった要素が室内のCO₂濃度に強く影響を与えているのかを調査する。そして、どの要素を調整することが、より効果的に感染症対策ができるのかを検討することを目的とする。

2. 手法

解析対象建築物のデータ収集を行う。建築図面や設備図面の収集、図面には載っていない細部や建て替え等で図面と違っている箇所があれば現地で対象建築物の計測をする。集めたデータをもとにCADソフトウェアを用い、建築図の3次元化を行う。解析モデルの作成にGRAPHISOFT社のARCHI CAD ver24を用いた。

本研究において、CO₂濃度を空気質の指標にする。室内のCO₂濃度は空気が正常かどうかの指標として扱われる。基本的にCO₂の発生は人間の呼吸によるものであり、室内のCO₂濃度が上昇するのは、空気の流れが滞り、換気が十分に行われていないためである。そのため、CO₂以外のほこりやウイルス等も室内に留まりやすくなる。

今回、解析条件に変数を与え、その変数によってCO₂濃度にどのような変化があるのかを非定常解析を行い、

その結果から検討する。非定常解析により、30分後の結果を求めた。

解析にはMSC社のSTREAMv2021を用いた。ARCHICADで作成したモデルを直接STREAMに取り込むことはできないため、データ受け渡し用にSTLフォーマットを用いた。

解析対象とした2つの居室はいずれもAHUにより換気している。解析データの比較がしやすいように、容積、最大収容人数の比較的小さい会議室と、容積、最大収容人数、天井高の大きいホールを解析対象とした。概要を表1、解析対象の居室の平面図を図2、図3に示す。

本研究において、室内のCO₂濃度に強く影響する要素を換気量、収容人数、吹き出しの風速の3つとする。換気量について、CO₂濃度は外気よりも汚染源の人間が存在する室内の空気のほうが高いため、換気を行うことによってCO₂濃度の低い空気を室内に取り入れ、CO₂濃度を希釈することができる。収容人数について、CO₂の発生源である人間が多ければ多いほど室内のCO₂濃度は上昇する。吹き出しの風速について、室内の空気を攪拌することができるため、室内の空気のCO₂濃度を均一にすることができる。換気量、収容人数、吹き出しの3要素がどれほどの影響を及ぼしているのかを検討するため、

表1 解析対象居室の概要

	会議室	ホール
床面積[m ²]	92	451
天井高[m]	3	7
最大収容人数[人]	28	264

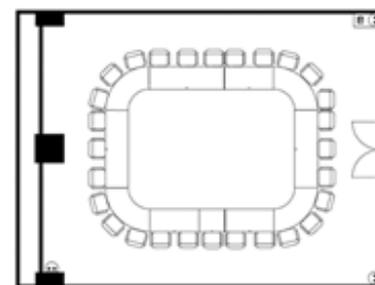


図2 会議室の平面図

3要素に対してパラメータを与える。それぞれの要素に標準値を定め、その標準値よりも大きい値、小さい値を定める。与えた変数を小さいほうから、第1水準値、第2水準値、第3水準値とする。水準値の各値は会議室について、表4、ホールについて、表5に示す。解析条件設定は、比較するための基準である、換気量、収容人数、吹き出しの風速、すべてを第2水準値で設定した解析データを用意し、その解析データから3要素のうち一つを第1水準値、または、第3水準値にしたものをそれぞれ用意する。条件設定の違う解析モデルは合計7つになる。しかし、風量と風速は互いに影響を及ぼすため、換気量、収容人数の値を変動させて解析する場合は、空調の設定で風量を定め、吹き出し口の大きさで風速を調整した。吹き出しの風速の値を変動させて解析する場合は、解析ソフトの条件設定で風速を定め、吹き出しの大きさで風量を調節した。その後、解析結果のデータの抽出をする。そのため、風速に変数を与えた場合の解析は別に行ったため、合計で8つ解析した。

各解析結果から、室内全体と呼吸域のCO2濃度の分布を10ppmずつの間隔ごとにスカラー積分を行い、累積頻度として抽出する。累積頻度のデータを相対度数に変換し、CO2濃度の平均値、中央値を求める。中央値は10ppmごとでデータを取っているため、間を取って1の位を5とした。

解析結果の値から最小二乗法による回帰直線の傾きによって3要素のどれが影響が強く出るのかを比較する。

3. 解析結果

(1) 会議室

会議室の解析結果のCO2濃度のコンター図を図7、室内のそれぞれの解析結果のCO2濃度表9~12、代表として会議室の室内全体の平均値を折れ線グラフにしたものを図17、必要換気量と収容人数が第2水準相対度数の棒グラフを図19、解析結果の値の最小二乗法による回帰直線の傾きを表21に示す。

コンター図を見ると、図中の上面に示された入り口のドアのアンダーカットからも空気の出入りがあるため、入り口付近ではCO2濃度が低くなっている。最も高い数値でも850ppm付近と1000ppm以下であるため、一人当たりの必要換気量が30m³/hで収容人数が14人の条件だと建築物衛生管理基準法は守られていることがわかる。

会議室の各解析結果を見ると、中央値と平均値の差は10ppm前後であるが、一人当たりの必要換気量が第1水準の時は平均値のCO2が中央値のものよりも130ppmほど高い。中央値と平均値ともに必要換気量が20m³/hでもCO2濃度が1000ppmを超えることはなく、収容人数が第二水準値の倍の第3水準値では、1250ppm付近までCO2濃度が

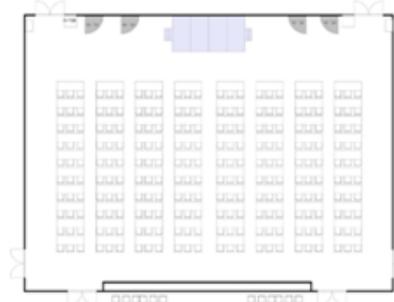


図3 ホールの平面図

表4 会議室の解析条件の水準値

会議室	第1水準値	第2水準値	第3水準値
必要換気量[m ³ /h]	20	30	35
収容人数[人]	10	14	28
風速[m/s]	1.5	2	2.5

表5 ホールの解析条件の水準値

ホール	第1水準値	第2水準値	第3水準値
必要換気量[m ³ /h]	20	30	35
収容人数[人]	88	196	264
風速[m/s]	1.7	2.2	2.8

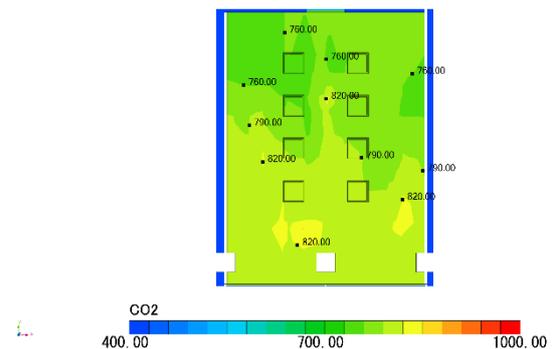


図7 高さ1.5mのCO2濃度

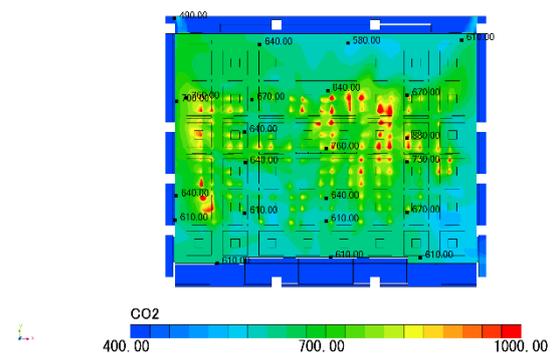


図8 高さ1.5mのCO2濃度

表9 会議室 室内全体の中央値

中央値	第1水準値	第2水準値	第3水準値
必要換気量[m ³ /h]	675	765	755
収容人数[人]	645	765	1255
風速[m/s]	615	515	475

上昇している。棒グラフを見ると、CO₂濃度が750ppm付近と800ppm付近にかけてばらつきがある。人の呼吸によるCO₂濃度の高い空気と室内の低い濃度の空気が攪拌されていることがわかる。回帰直線の傾きを見ると、吹き出しの風速、収容人数、必要換気量の順にCO₂濃度への影響が小さくなっている。

(2) ホールの解析結果

ホールの解析結果のCO₂濃度のコンター図を図8、室内のそれぞれの解析結果のCO₂濃度を室内全体は表13~16、代表としてホールの室内全体の平均値を折れ線グラフにしたものを図18、相対度数の棒グラフを図20、解析結果の値の最小二乗法による回帰直線の傾きを表22に示す。コンター図を見ると、会議室と同様、上の左右の入り口のドアのアンダーカットからも空気の出入りがあるため、入り口付近ではCO₂濃度が低くなっている。最も高い数値1000ppm付近であるため、一人当たりの必要換気量が30m³/hで収容人数が196人の条件だと建築物衛生管理基準法は守られているかどうかはわからない。

ホールの各解析結果を見ると、中央値と平均値の差は20ppm前後で中央値のほうが低い。室内上部のCO₂濃度の低い空気の多くが、呼吸域付近のCO₂濃度の高い空気と混ざり切れていないことが予想される。

中央値と平均値ともに必要換気量が20m³/hでもCO₂濃度が600~650ppm程度であり、1000ppmを超えることはなく、収容人数が第二水準値の倍の第三水準値でも、850ppm付近までCO₂濃度が上昇するが、それでも1000ppmは超えていなかった。

棒グラフを見ると、CO₂濃度が600ppm付近を中心に山なりとなっている。人の呼吸によるCO₂濃度の高い空気と室内の低い濃度の空気が攪拌されていないことがわかる。しかし、室内全体と呼吸域の回帰直線の傾きを比較すると呼吸域のほうが強く風速の影響を及ぼしていることがわかる。

回帰直線の傾きを見ると、呼吸域は会議室と同様に、吹き出しの風速、収容人数、必要換気量の順にCO₂濃度への影響が小さくなる。しかし、室内全体でみると、風速よりも収容人数のほうが影響が強かった。

(3) 会議室とホールの比較

CO₂濃度だけに言及すると、室内全体と呼吸域のCO₂会議室とホールの差はあまりなかったが、棒グラフで見ると、濃度の分布に大きな差がある。会議室とホールの天井高の違いから生じる、吹き出しの風速の影響の大小によるものと思われる。今回、ホールに設定した風速では、室内全体の空気を攪拌することはできていないことが分かった。回帰直線の傾きを見ても、会議室Aの風速のほうがホールの風速よりも強くCO₂濃度の減少に影響を及ぼしていることがわかる。

表10 会議室 室内全体の平均値

平均値	第1水準値	第2水準値	第3水準値
必要換気量[m ³ /h]	806	776	762
収容人数[人]	659	776	1262
風速[m/s]	612	523	486

表11 会議室 呼吸域の中央値

中央値	第1水準値	第2水準値	第3水準値
必要換気量[m ³ /h]	795	765	755
収容人数[人]	635	765	1255
風速[m/s]	595	515	465

表12 会議室 呼吸域の平均値

平均値	第1水準値	第2水準値	第3水準値
必要換気量[m ³ /h]	804	776	760
収容人数[人]	665	776	1270
風速[m/s]	608	534	483

表13 ホール 室内全体の中央値

中央値	第1水準値	第2水準値	第3水準値
必要換気量[m ³ /h]	615	615	625
収容人数[人]	425	615	805
風速[m/s]	635	625	635

表14 ホール 室内全体の平均値

平均値	第1水準値	第2水準値	第3水準値
必要換気量[m ³ /h]	639	637	635
収容人数[人]	445	637	822
風速[m/s]	646	641	646

表15 ホール 呼吸域の中央値

中央値	第1水準値	第2水準値	第3水準値
必要換気量[m ³ /h]	625	625	635
収容人数[人]	435	625	825
風速[m/s]	645	635	635

表16 ホール 呼吸域の平均値

平均値	第1水準値	第2水準値	第3水準値
必要換気量[m ³ /h]	681	660	652
収容人数[人]	459	660	848
風速[m/s]	731	660	654

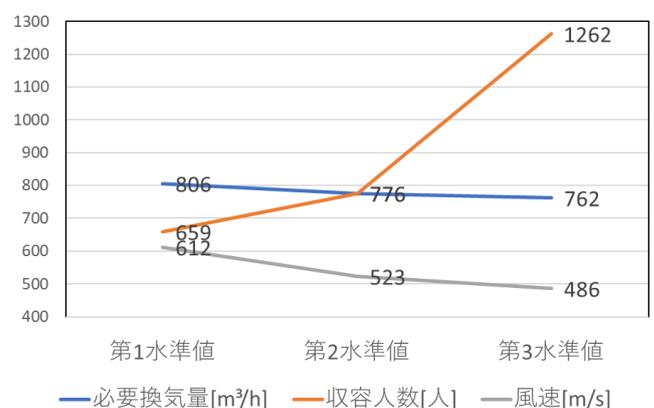


図17 会議室 室内全体の平均値

4. 考察・まとめ

本研究の解析によって、必要換気量30m³/hの条件で、会議室とホールともに建築物衛生管理基準法のCO₂濃度1000ppm以下は守られており、安全な空気質環境であることが確認できた。しかし、必要換気量の違いは収容人数と吹き出しの風速のパラメータ傾向と比較すると、CO₂濃度に対しての影響力はとても小さいものである。これらの結果からすると、感染症対策をする上で、換気量を増やすよりも空調の風速、または収容人数の削減のほうがより効果的に働くはずである。しかし、居住域の風速は、建築基準法やビル管理法では0.5m/s以下にするよう定められているため、天井高の低い居室では、空調の風速によるCO₂濃度の操作は難しい。よって、空調の風速を上げられない場合、収容人数に制限を設けるのがよい。

本研究では各パラメータに水準値を3つ設けたが、最小二乗法でCO₂濃度への影響の強弱を見る場合、一般論として提示するにはデータ数が少ない。今後の課題として、細かに水準値を設定した様々な種類の解析モデルを用意し、そして、最小二乗法の標本数を増やすことで、最終的な結果の信憑性を高めることが必要である。さらには、ホールの解析結果により、天井高が高いと、ある程度以上の風速がなければ室内の空気の攪拌がうまく行われなことが分かった。よって、天井高と風速の関係性も含めて解析モデルの天井高、パラメータの水準値を取る必要もある。そして、空気をうまく攪拌できなかった理由として、容積の大きい居室は吹き出し口の風速が足りていないことだけでなく、吹き出し口の位置や数にも強く影響があると思われる。また、風量を固定したまま、風速を変える場合、吹き出し口の大きさを調整して風速を変えたが、幅を狭くしたことで、空気がいきわたらなくなってしまった空間もあるはずである。よって、長手方向、短手方向のどちらかで調整すべきかも考える必要があると思われる。

参考文献

- 「換気の悪い密閉空間」を改善するための換気の方法
<https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000618969.pdf>
- 冬場における「換気の悪い密閉空間」を改善するための換気の方法
https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_15102.html
- CO₂の可視化による感染症予防の取り組み
http://www.i-s-l.org/shupan/pdf/SE203_5_open.pdf
- 感染症対策としてのCO₂濃度の利用方法を提言
<https://www.keio.ac.jp/ja/press-releases/files/2021/5/6/210506-1.pdf>

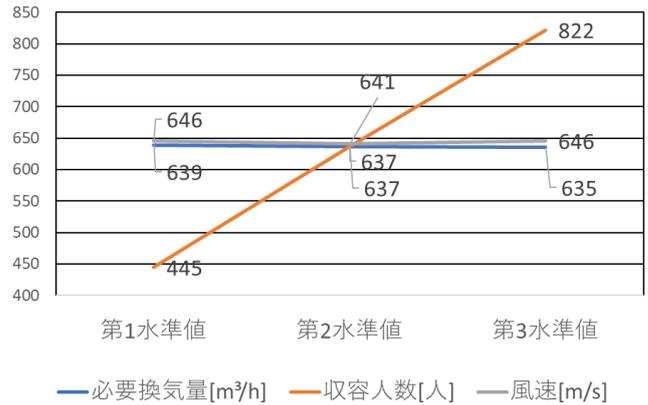


図18 ホール 室内全体の平均値

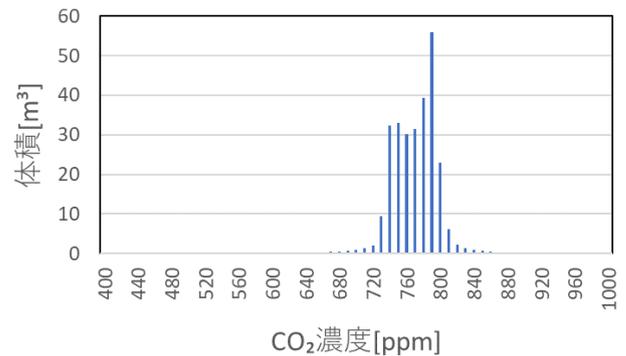


図19 会議室のCO₂濃度分布

必要換気量:30m³/h 収容人数:14人 風速:2m/s

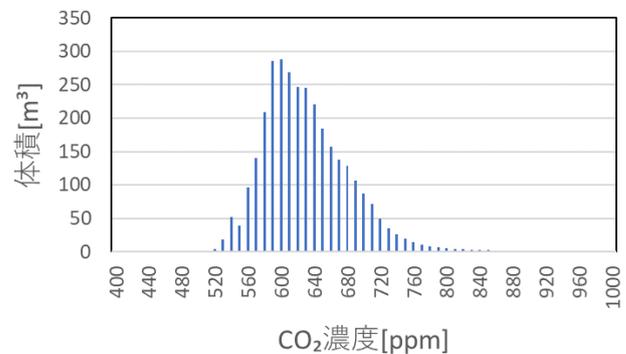


図20 ホールのCO₂濃度分布

必要換気量:30m³/h 収容人数:196人 風速:2.2m/s

表21 会議室のパラメータの傾向

	中央値		平均値	
	室内全体	呼吸域	室内全体	呼吸域
必要換気量[m ³ /h]	5.9	-2.7	-2.9	-2.9
収容人数[人]	34.2	34.6	33.8	34.1
風速[m/s]	-140.0	-130.0	-125.9	-125.6

表22 ホールのパラメータの傾向

	中央値		平均値	
	室内全体	呼吸域	室内全体	呼吸域
必要換気量[m ³ /h]	0.6	0.6	-0.2	-2.0
収容人数[人]	2.1	2.2	2.1	2.2
風速[m/s]	0.5	-8.8	0.9	-68.4