

換気量の変化が室内温熱環境/空気質分布に与える影響の CFD による評価

Evaluation of the Effect of Ventilation Volume on Indoor Thermal Environment and Air Quality by Using CFD

学生会員 ○佐々木 圭吾 (大阪大学)

正会員 松尾 智仁 (大阪大学)

正会員 嶋寺 光 (大阪大学)

正会員 近藤 明 (大阪大学)

Keigo SASAKI*¹ Tomohito MATSUO*¹ Hikari SHIMADERA*¹ Akira KONDO*¹

*¹ Osaka University

The indoor environment should be properly controlled for the health of residents. In summer and winter, however, enhanced ventilation will make ITE (Indoor Thermal Environment) worse while IAQ (Indoor Air Quality) will improve. This study conducted CFD simulations to evaluate the impacts of ventilation volume on IAQ and ITE, which revealed that the deterioration of ITE due to enhanced ventilation was larger in winter than in summer. This study also conducted simulations to evaluate the impact of adjustment of the air conditioner's inlet temperature and flow rate to offset increased heat load due to enhanced ventilation. When the inlet temperature was adjusted, ITE was improved in summer, but not in winter. When the inlet volume was adjusted, ITE was improved both in summer and winter.

はじめに

人々は約 9 割の時間を室内で過ごす。そのため適切な室内環境品質を構築することは居住者の健康状態向上に不可欠である。室内環境のうち温熱環境と空気質について、換気を強化すると一般に空気質は改善される。しかし夏季と冬季では換気強化により外気負荷が増加し、温熱環境が悪化する。そこで、外気負荷増加を相殺するように空調運転を調節することで、室内環境の改善が期待できる。本研究では実空間を対象として、夏季冬季における換気量の増加が室内温熱環境/空気質に与える影響を CFD シミュレーションによって評価し、また換気量増加時に空調機の吹き出し温度、風量を調節したときの温熱環境の変化を評価し、室内環境の改善可能性の検討を行った。

1. CFD モデル

1.1 モデル概要

本研究では対象空間を大阪大学吹田キャンパス M3 棟 211 講義室とした。(以下 M3-211 と記す) M3-211 のモデル図を図-1 に示す。M3-211 は階段教室であり、床の高さが異なる領域がある。M3-211 には空調機と全熱交換器が各 4 か所ずつ設置されている。本研究では 66 人の学生が在室することを想定した。

図-2 に冷暖房時の空調機、全熱交換器の吹き出し方向、角度を示す。空調機は、水平を 0°として冷房時は 48°、暖房時は 60°下向きに吹き出すよう設定した。全熱交換器の吹き出し方向は吹き出し面を 4 分割し、それぞれが斜めに、水平を 0°として 45°下向きに吹き出すよう設定した。

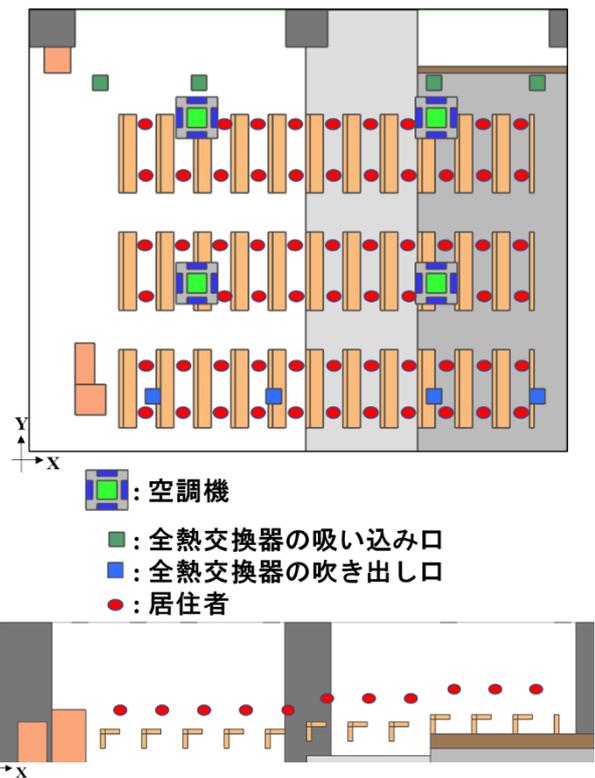


図-1 M3-211 の概要図

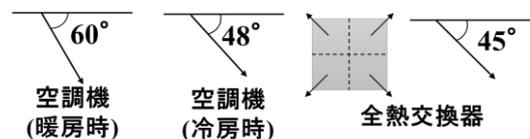


図-2 空調機群の吹き出し方向、角度

1.2 計算条件

CFD 計算には OpenFOAM-4.1 を使用した。非圧縮性流

体を仮定し、温度変化による浮力を考慮するため Boussinesq 近似を導入した。乱流モデルには標準 k-ε モデルを使用した。

表-1 に本研究の計算ケースを示す。夏季冬季で換気量をカタログ値としたケース、換気量を 2 割増加させたケース、外気負荷増加を解消するために 2 通りの空調設定を行ったケースの計 8 ケースを行った。

表-1 計算ケース

換気風量	季節	
	夏季	冬季
カタログ値	SMR00	WTR00
20%増加	SMR20	WTR20
20%増加 (空調機吹き出し温度変更)	SMR20R_IT	WTR20R_IT
20%増加 (空調機吹き出し風量変更)	SMR20R_IV	WTR20R_IV

SMR00 の空調機群の境界条件を表-2、夏季の壁面の境界条件を表-3、WTR00 の空調機群の境界条件を表-4、冬季の壁面の境界条件を表-5 に示す。空調機と全熱交換器の吹き出し風量はカタログ値とし、空調機、全熱交換器各 4 か所の境界条件はそれぞれ統一した。壁面温度は全ての面について統一し、机やいすは全て断熱条件とした。

表-2 空調機群の境界条件 (SMR00)

空調機群	吹き出し風量	吹き出し温度
	[m ³ /h]	[°C]
空調機	750	20
全熱交換器	650	式(1)

表-3 壁面、物体の境界条件 (SMR00)

壁面	境界条件
東, 西, 南, 北, 床, 天井	26 °C
物体	断熱条件

表-4 空調機群の境界条件 (WTR00)

空調機群	吹き出し風量	吹き出し温度
	[m ³ /h]	[°C]
空調機	750	36
全熱交換器	650	式(1)

表-5 壁面、物体の境界条件 (WTR00)

壁面	境界条件
東, 西, 南, 北, 床, 天井	22 °C
物体	断熱条件

全熱交換器の吹き出し温度は式(1)により決定される。式(1)で使用した変数の定義を表-6 に示す。式(1)の外気温は、気象庁より夏季ピークである 8 月、冬季ピークである 2 月の 2022 年度日平均気温の 30 °C、5.5 °C とした。

全熱交換器の交換効率を 0.6 とした。

$$T_{THE_inlet} = \eta T_{room} + (1 - \eta) T_{outlet} \quad (1)$$

表-6 式(1)で使用した変数の定義

変数	定義	単位
T_{THE_inlet}	全熱交換器の吹き出し温度	[K]
T_{outlet}	吸い込み温度	[K]
T_{out}	外気温度	[K]
η	交換効率	[-]

本研究では湿度輸送を考慮していないため、顕熱負荷のみ考慮した。顕熱負荷の計算式を式(2)に示す。式(2)で使用した変数の定義を表-7 に示す。空気密度と比熱については、空気温度が 20 °C の時の値である $c_a = 1.0 \times 10^3$, $\rho_a = 1.2$ とした。

$$Q_{THE_s} = V c_a \rho_a (T_{inlet} - T_{outlet}) \quad (2)$$

表-7 式(2)で使用した変数の定義

変数	定義	単位
Q_s	顕熱負荷	[W]
V	風量	[m ³ /s]
c_a	空気の比熱	[J/kg/K]
ρ_a	空気の密度	[kg/m ³]
T_{inlet}	吹き出し温度	[K]

外気 CO₂ 濃度は 400 ppm とした。居住者一人あたり 20 L/h の CO₂ 排出を、z=0.9 m から-X 方向に行った。また、居住者一人あたり 100W の人体発熱を考慮した。

2. 計算結果

先述したとおり、M3-211 は床の高さが異なる領域が 3 つあるため、その 3 つの領域ごとに居住域を設定し、それぞれの居住域における室内温度、CO₂ 濃度を平均した値を算出した。居住域は床から 1.8 m までの高さの領域を設定した。居住域を図-3 に示す。結果の水平断面図については床から高さ 0.9 m、鉛直断面図については X=5.7 m の結果を示す。



図-3 M3-211 の居住域および呼吸域

2.1 SMR00, SMR20, WTR00, WTR20 の計算結果

図-4 に SMR00, SMR20 の計算結果を示す。温度分布について、全熱交換器の吹き出し口直下の領域で温度上昇がみられた。また、外気は図-4c.d の右下側の机付近まで到達したのち、浮力によって室内上部へ上昇した。CO₂ 濃度分布も全熱交換器の吹き出し口直下の領域で CO₂ 濃度が減少した。表-8 に居住域の平均温度、平均 CO₂ 濃度を示す。SMR00 から SMR20 にかけて、平均温度は約 0.2 °C 上昇し、平均 CO₂ 濃度は約 60 ppm 減少した。

図-5 に WTR00, WTR20 の計算結果を示す。換気量が

増加したとき、室内温度分布は夏季より顕著に変化した。また、CO₂濃度分布について、主に図-5eの上側の領域でCO₂濃度が減少した。表-9に居住域の平均温度、CO₂濃度を示す。WTR00からWTR20にかけて、平均温度は約0.6℃低下した。また、平均CO₂濃度は約80ppm減少した。

夏季においては全熱交換器の吹き出し風の温度が室内空気温度より高いため、外気が吹き出されると、居住域まで到達せずに、浮力によって室内上部へ上昇する。一方、冬季においては全熱交換器の吹き出し風の温度が室内空気温度より低いため、外気が吹き出されると、室内下方を這うように広がる。ゆえに、冬季において外気供給量増加が居住域に与える影響は夏季より大きくなる。そのため、冬季における換気量増加時の居住域平均温度、平均CO₂濃度の変化幅が夏季より大きくなった。したがって、換気量の変化が室内温熱環境/空気質分布に与える影響は、夏季では小さく、冬季では大きいことが示された。

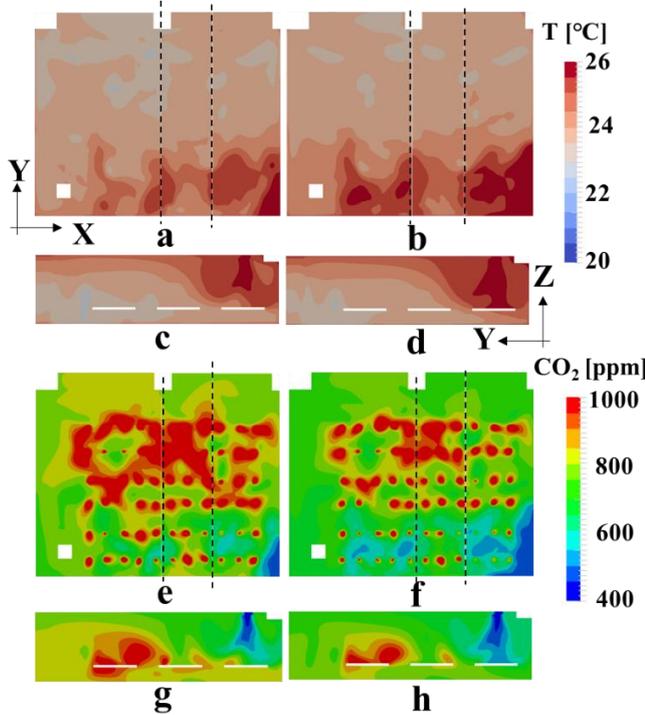


図-4 SMR00 (a,c,e,g) と SMR20 (b,d,f,h) の Z=0.9 m における温度/CO₂濃度分布と X=5.7 m における温度/CO₂分布

表-8 SMR00, SMR20 の居住域平均温度と平均 CO₂濃度

領域	SMR00	SMR20
温度 [°C]	24.1	24.3
CO ₂ 濃度 [ppm]	820	760

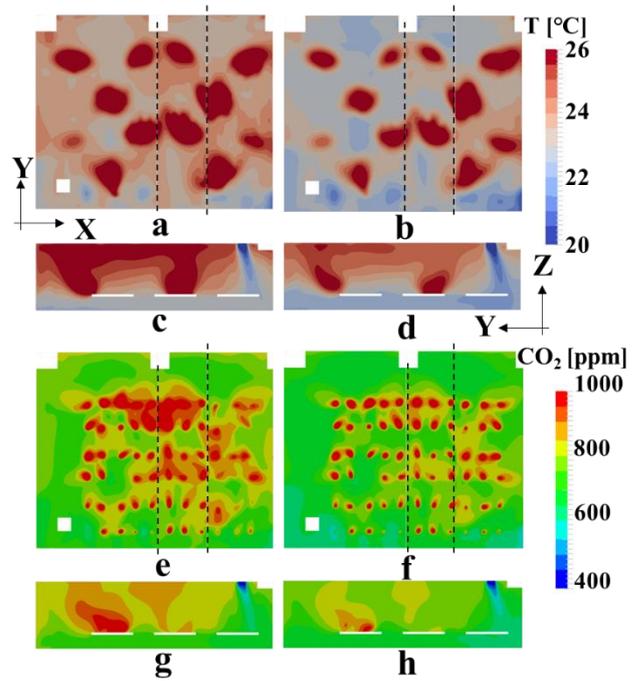


図-5 WTR00 (a,c,e,g) と WTR20 (b,d,f,h) の Z=0.9 m における温度/CO₂濃度分布と X=5.7 m における温度/CO₂分布

表-9 WTR00, WTR20 の居住域平均温度と平均 CO₂濃度

領域	WTR00	WTR20
温度 [°C]	24.7	24.1
CO ₂ 濃度 [ppm]	805	729

2.2 SMR20R_IT/IV, WTR20R_IT/IV の計算条件

SMR/WTR20R_IT では、式(2)を用いて換気量増加時の外気負荷を相殺するような空調吹き出し温度を求めた。ただし、吸い込み温度の変化は無視した。

SMR00 の外気負荷は 1973 W であり、SMR20 の外気負荷は 2471 W であった。増加した外気負荷は 498 W であるため、式(2)より空調吹き出し温度を 0.6 °C 低下させれば良いと求められた。

同様に、冬季で外気負荷の増加分を解消するために空調吹き出し温度を 1.2 °C 上昇させれば良いと求められた。

SMR/WTR20R_IV についても吹き出し温度の変更と同様に式(2)から変更後の風量を算出した。SMR20R_IV では吹き出し風量を 831 m³/h とし、WTR20R_IV では 836 m³/h とした。

2.3 SMR20R_IT/IV, WTR20R_IT/IV の計算結果

図-6 に SMR20R_IT/IV の計算結果を示す。温度分布について、空調機設定を変更しても全熱交換器の吹き出し口直下の領域では温度低下が見られず、それ以外の領域が冷却された。これは全熱交換器の吹き出し口直下の領域には空調機からの気流が届きにくいと考えられる。CO₂濃度分布については、SMR20 より分布の変化はあまり見られなかった。表-10 に居住域の平均温度、平均CO₂濃度を示す。SMR20R_IT/IV の両ケースで、SMR00 まで

の平均温度の低下がみられ、平均 CO₂ 濃度は SMR20R_IT より SMR20R_IV の方が低濃度となった。これらは、SMR20R_IT では、空調機の冷風が浮力によって室内下方へ沈下し SMR20R_IV では、風量の強化によって室内空気の混合が進んだためと考えられる。したがって、夏季における温熱環境悪化を緩和する手法として、吹き出し風量を強化する手法が有効であることが示された。

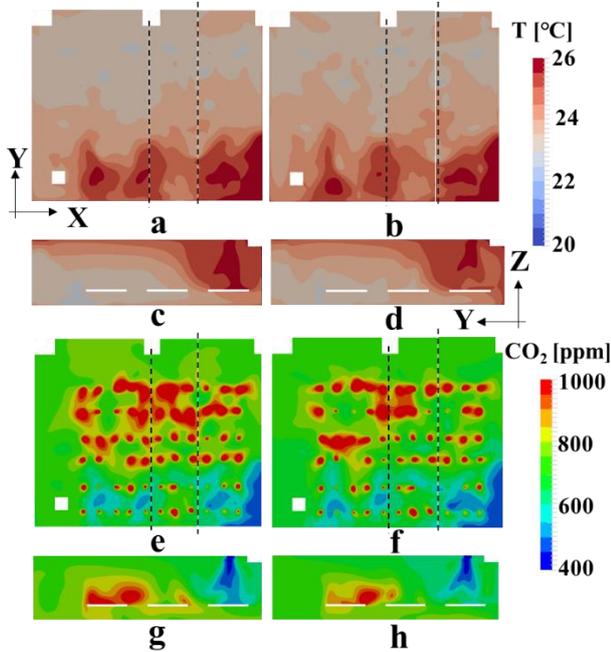


図-6 SMR20R_IT (a,c,e,g)と SMR20R_IV (b,d,f,h)の Z=0.9 m における温度/CO₂ 濃度分布と X=5.7 m における温度/CO₂ 分布
表-10 SMR20R_IT/IV の居住域平均温度と平均 CO₂ 濃度

領域	SMR20R_IT	SMR20R_IV
温度 [°C]	24.1	24.2
CO ₂ 濃度 [ppm]	768	750

図-7 に WTR20R_IT/IV の計算結果を示す。空調吹き出し温度を変更して、低温領域の温度上昇は見られず、空調吹き出し風量を変更すると、WTR00 の温度分布程度までの改善が見られた。表-11 に居住域の平均温度、CO₂ 濃度分布を示す。吹き出し温度を上昇させたとき、居住域平均温度は WTR00 までの改善が見られず、一方、吹き出し風量を強化すると、居住域平均気温は WTR00 程度まで改善がみられた。平均 CO₂ 濃度は WTR20R_IT より WTR20R_IV の方が低濃度となった。これらは、吹き出し温度を上昇させても温度成層により暖気が居住域まで届きにくかったが、風量を強化すると暖気が浮力に逆らい室内空気の混合が進むためだと考えられる。したがって、冬季における温熱環境悪化を緩和する手法としては、空調機の吹き出し風量を強化する方法が有効であることが示された。

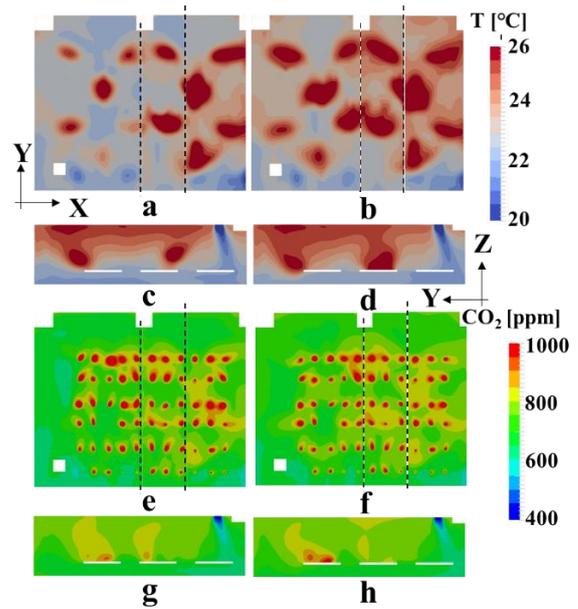


図-7 WTR20R_IT (a,c,e,g)と WTR20R_IV (b,d,f,h)の Z=0.9 m における温度/CO₂ 濃度分布と X=5.7 m における温度/CO₂ 分布
表-11 WTR20R_IT/IV の居住域平均温度と平均 CO₂ 濃度

領域	WTR20R_IT	WTR20R_IV
温度 [°C]	24.4	24.8
CO ₂ 濃度 [ppm]	734	715

3. 結論

本研究ではCFD 計算によって換気量の変化が室内温熱環境/空気質分布に与える影響、換気量増加時に空調機設定を変更したときの温熱環境の変化を評価した。結論を以下にまとめる。

- 1) 夏季で換気量が増加すると、居住域の温度は上昇し、CO₂ 濃度は減少した。冬季で換気量が増加すると、居住域の温度は低下し、CO₂ 濃度は減少した。夏季では外気が浮力によって上昇するため、温熱環境/空気質分布に与える影響は小さかった。冬季では外気が浮力によって居住域へ大きく干渉するため、温熱環境/空気質分布に与える影響は大きかった。
- 2) 夏季において、換気量増加時に空調機の吹き出し温度を下げると、居住域平均温度は SMR00 までの低下が示された。吹き出し風量を強化すると、居住域平均温度は SMR00 までの低下が示された。夏季で吹き出し温度、風量を変更する手段は換気量増加時の温熱環境悪化を緩和するために有効と示された。
- 3) 冬季において、換気量増加時に空調機の吹き出し温度を上昇させたが、居住域平均温度は WTR00 までの上昇が見られなかった。空調機の吹き出し風量を強化すると、居住域平均温度は WTR00 までの上昇が見られた。これは風量強化によって居住域まで暖気が到達したことによるものである。

謝辞: 本研究は JSPS 科研費 21K14303 の助成を受けたものです。