

省エネ性と快適性を両立した執務室の自然換気口制御に関する研究
(その3) 有孔ダクト天井方式における自然換気量に関する上限値制御の必要性検討
Control of Natural Ventilation Opening to Keep Energy
Saving and Thermal Comfort in Office Room
(Part 3) Necessity of Maximum Natural Ventilation Rate Control
in Perforated Ceiling Duct System

○丹羽 剣竜 (大阪大学) 小林 知広 (大阪大学)
山中 俊夫 (大阪大学) 山澤 春菜 (大阪大学)
桃井 良尚 (福井大学) 田中 宏明 (日建設計)
藤井 拓郎 (日建設計) 守 雅俊 (日建設計)

Kenryu NIWA^{*1} Tomohiro KOBAYASHI^{*1} Toshio YAMANAKA^{*1} Haruna YAMASAWA^{*1}
Yoshihisa MOMOI^{*2} Hiroaki TANAKA^{*3} Takuro FUJII^{*3} Masatoshi MORI^{*3}
^{*1}Osaka University ^{*2}University of Fukui ^{*3}Nikken Sekkei

In recent years, the number of office buildings that introduce natural ventilation (NV) is being increased to reduce cooling loads. However, when NV is introduced, indoor thermal comfort depends on the inflow conditions of outdoor air. In order to achieve both energy saving performance and thermal comfort, it is necessary to understand the relation between NV conditions and the indoor environment, and to set the upper limit of the ventilation air volume. In this paper, the indoor environment is evaluated changing NV conditions by using CFD analysis, and propose the necessity of setting the upper limit of ventilation air volume and a prediction method.

1. はじめに

近年、オフィスにおいて冷房負荷低減に効果的な自然換気の導入例が増加している。自然換気時は外気流入条件によっては室内の熱的快適性が低下する懸念があるが、外界条件に応じた自然換気口開度の適切な制御によって省エネ性と熱的快適性の両立が可能と考える。そのような自然換気口制御手法の実現には、制御パラメータと室内熱環境に関する体系的な整備が必要である。本研究では一般的な執務室を想定し、自然換気時の室内外温度差と自然換気量に着目したパラメータ解析をCFD解析により実施することで、熱的快適性が担保された換気回数の上限值設定の必要性検討及び予測法提案を目的とする。本報では有孔ダクト天井方式¹⁾に特に着目し、天井スリット開口及び前報²⁾のペリカウンター方式と比較を行った結果を報告する。

2. CFD 解析モデル

解析対象空間の概要を Fig. 1 に示す。モデルは一般的な執務室を想定し、対称境界面を用いて1 スパン分の領域を解析する手法³⁾を採用する。解析領域は横幅 3.2 m、奥行 14.0 m、高さ 2.8 m とし、自然換気と天井設置した機械換気によるハイブリッド空調を想定する。本報では有孔ダクト天井方式 (Type 3) と天井スリット開口方式 (Type 4) を対象に、ペリカウンター方式 (Type 2) と比較する。なお、Type 2 については前報²⁾で検討した結果を用いる。Type 3 では天井設置した角ダクトに流入した外気がダクト下面の有孔パネルから低風速で流入する方式であり、本来は有孔パネル上で風速分布が生じるが、本報では一様風速による流入を想定して解析を行う。Type 4 では天井面のスリット開口から鉛直下向きに吹き出す方式とする。機械換気設備は、Type 3 では天井有孔ダクトからの低風速の吹き出しを模し、Type 4 ではアネモスタット型吹き出し口 (以下、アネモ) による流入を想定する。

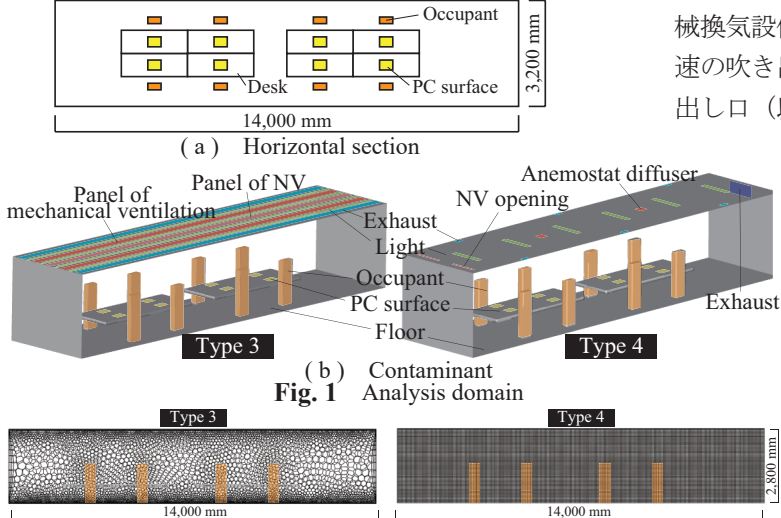


Fig. 2 Mesh layout (vertical section)

Table 2 Internal Heat Generation

Internal occupant
60 [W/person] × 8 [persons] = 480 [W] → 31.9 [W/m ²] at the occupants surface
Heat generation rate
15 [W/m ²] × Floor Area [m ²] = 672 [W] → 700 [W/m ²] at the PC surface
Light
10 [W/m ²] × Floor Area [m ²] = 448 [W] → 160 [W/m ²] on the lights (Type 3) 156 [W/m ²] on the lights (Type 4) → 5.07 [W/m ²] on the floor (Type 3, 4)

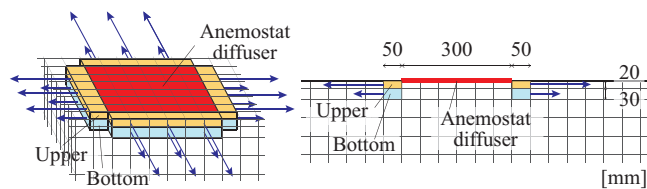


Fig. 3 P.V. surface domain

Table 3 Studied cased in parametric study

To [°C]
14, 16, 18, 20
Q [m³/h] (N [l/h])
50 (0.40), 100 (0.80), 200 (1.59), 300 (2.39), 400 (3.19)

Table 5 Supply air flow rate from mechanical ventilation

To [°C]	14					16					18					20				
Q [m³/h]	50	100	200	300	400	50	100	200	300	400	50	100	200	300	400	50	100	200	300	400
Total supply flowrate from mechanical ventilation [m³/h]	420	360	240	120	0	430	380	280	180	80	440	400	320	240	160	450	420	360	300	240

Table 6 Velocity on P.V. surface

To [°C]	14					16					18					20				
Q [m³/h]	50	100	200	300	400	50	100	200	300	400	50	100	200	300	400	50	100	200	300	400
upper [m/s]	2.87	2.46	1.64	0.82	0.00	2.94	2.59	1.91	1.23	0.55	3.00	2.73	2.18	1.64	1.09	3.07	2.87	2.46	2.05	1.64
bottom [m/s]	0.75	0.65	0.43	0.22	0.00	0.77	0.68	0.50	0.32	0.14	0.79	0.72	0.57	0.43	0.29	0.81	0.75	0.65	0.54	0.43

CFD 解析手法を Table 1、メッシュ分割を Fig. 2 に示す。Type 3 では非構造格子、Type 4 では基本的に 50 mm 等分割の構造格子とする。Type 4 ではアネモ吹き出し気流を P.V. 法にて再現するために天井面から第 1 メッシュを 20 mm、第 2 メッシュを 30 mm で分割する。

内部発熱条件を Table 2 に示す。人体発熱は 1 人当たり 60 W、机上機器及び照明による熱負荷は、それぞれ床面積に対して 15 W/m²、10 W/m² とする。いずれの内部発熱も熱流束を用いて再現し、人体発熱は人体表面、机上機器発熱は机上機器を模した 0.3 m × 0.4 m の面、照明発熱は天井の照明パネルと床面に分けて与える。なお、壁面、天井面、床面は断熱条件とする。

CFD 解析のケースを Table 3 に示す。自然換気時の外気温を 4 条件 (T_o = 14, 16, 18, 20 °C) と自然換気量を 5 条件 (Q = 50, 100, 200, 300, 400 m³/h) とした計 20 条件で解析を行う。自然換気の吹き出し風速を Table 4 に示す。自然換気吹き出し面積は Type 3 では 4.2 m²、Type 4 では 0.2 m² であり、流入境界面での風速規定による一様吹き出しとする。

機械換気の吹き出し風量を Table 5、P.V. 法にて与える風速を Table 6 に示す。機械換気は吹出温度 16 °C の VAV とし、自然換気と機械換気による合計処理熱量が内部熱負荷と等しくなるように、機械換気吹き出し風量を設定する。なお、完全混合時に室温 26 °C を想定する。Type 4 におけるアネモの吹出気流の再現にあたっては長澤・近藤らの手法⁴⁾を簡易化し、Fig. 3 に示すように吹出口を囲う鉛直 2 メッシュ (上から Upper, Bottom とする) に水平方向の風速を与える。

Table 1 CFD analysis condition

	Type 3	Type 4
Turbulence Model	SST k-ω Model	Standard k-ε Model
Algorithm	Coupled	SIMPLE
Discretization Scheme for Advection Term	Second Order Upwind	QUICK
Total Number of Cells	1,382,830	1,004,800
Density	boussinesq	polynomial
Gravity	Y = - 9.80665	

Table 4 Natural ventilation air velocity

Q [m³/h]	50	100	200	300	400
Type 3 [m/s]	0.003	0.007	0.013	0.020	0.026
Type 4 [m/s]	0.069	0.139	0.278	0.417	0.556

3. 室内温度分布

自然換気吹出口を含む鉛直断面における温度コンターを Fig. 4 に示す。Type 2, Type 4 では、領域全体での顕熱処理熱量が等しいにも拘わらず、外気温が低く自然換気量が大きい条件で室下部が低温となった。Type 2 では特にこの傾向が顕著であるが、自然換気の流入空気が低温であるためにペリカウンターから垂れ下がること、Type 4 では自然換気の吹出し気流が壁に沿って下降し床面に拡散していることが原因であると考えられる。一方、Type 3 では内部発熱によるブルームは見られるが、居住域において自然換気による局所的な低温領域はないことが分かる。流入風速が小さいため温度分布に大きな偏りが生じず、自然換気の流入温度及び自然換気量への依存は小さいと考えられる。

4. 室内環境の快適性評価

ADPI は冷房時の室内の快適性を表す指標で、室容積に対する快適空間の体積割合を表す。本報では居住域での評価を意図として床面から高さ 1.8 m までを対象空間とする。なお、快適空間は以下の両条件を満たす空間である。数値が大きいほど快適であり、ASHRAE では 80 % 以上を推奨している⁹⁾。

$$\begin{cases} U_x < 0.35 \text{ [m / s]} \\ -1.7 \leq t_{ed} \leq +1.1 \end{cases}$$

ここで、有効ドラフト温度 t_{ed} は (1) 式で求められる。

(Straub式)

$$t_{ed} = (t_x - t_r) - 7.73(\overline{U_x} - 0.15) \tag{1}$$

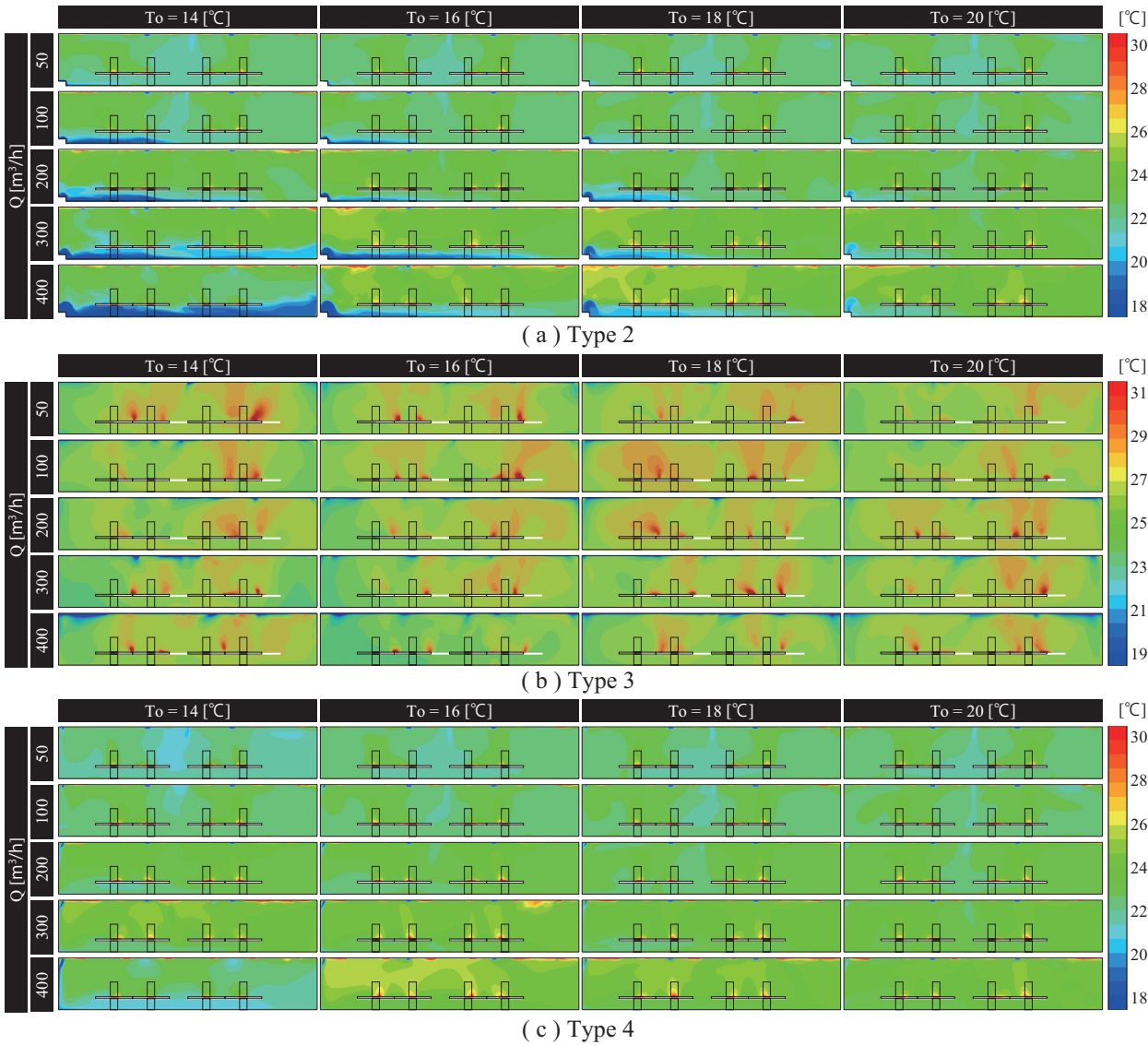


Fig. 4 Temperature contour

CFD 解析により得られる風速は各成分のレイノルズ
平均値であるが、ADPI の算定に用いる風速は無指向
性 (スカラー平均風速) が前提であるため、Popiolek ら⁶⁾
による (2) 式により乱流強度 Tu に基づいて換算を行う。

$$\overline{U}_e = \begin{cases} \overline{V}(1 - 0.044 Tu + 1.195 Tu^2 - 0.329 Tu^3) & \text{if } Tu \leq 1.3 \\ \overline{V}(0.287 + 1.502 Tu) & \text{if } Tu > 1.3 \end{cases} \quad (2)$$

$\overline{U}_e$: 無指向性風速 [m/s]

$\overline{V}$: 有指向性風速 [m/s]

Tu : 乱流強度 [-]

各内外温度差条件での換気回数 N に対する ADPI を
Fig. 5 に示す。Type 2, Type 4 では自然換気による処理
熱量が多い条件ほど ADPI が低下し、80 % を下回
る条件が見受けられるため、内外温度差条件ごとの自
然換気回数の上限値の予測を行う。対して、Type 3
では全ての自然換気条件において ADPI が 80 % 以上で
あり、室内の熱的快適性は室内外温度差・換気回数に
大きく依存しないと考えられるため、自然換気量の上
限值設定の必要は高くないと言える。

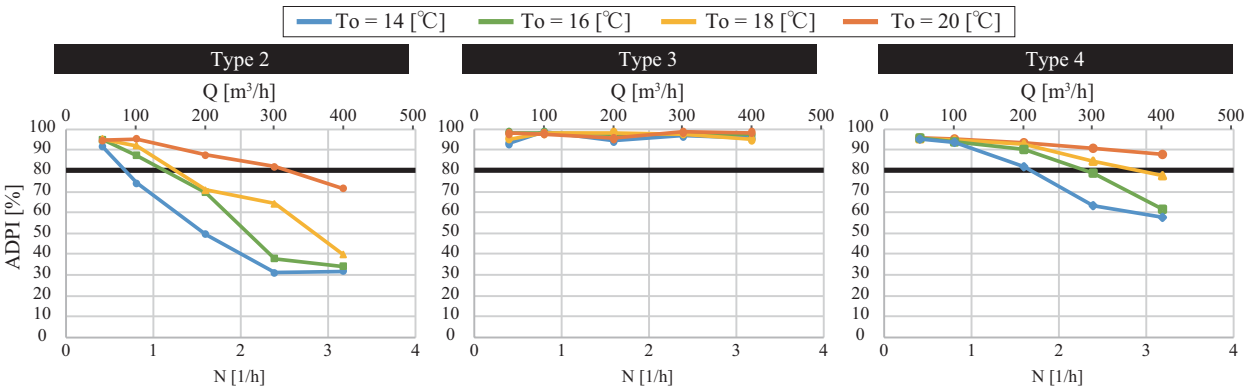


Fig. 5 Relationship between air exchange rate and ADPI

5. 上限換気回数の算出

自然換気時において、熱的快適性を大きく損なわない自然換気による換気回数の最大値を上限換気回数 N_{max} とする。内外温度差の条件ごとに評価指標の基準値 (ADPI = 80 %) を跨ぐ 2 点から線形補間により指標の値が基準値となる時の換気回数を算出し、上限換気回数 N_{max} とする。ADPI = 80% を基準に算定した内外温度差に対する上限換気回数 N_{max} を **Table 7** に示す。なお、Type 4 における外気温 20℃ 条件では全自然換気量条件でも ADPI が 80 % を上回っているため、自然換気量 300 m³/h 及び 400 m³/h の 2 条件から外挿による線形補完を用いて算出する。

解析した内外温度差 4 条件の N_{max} の算出結果から近似曲線を用いて、内外温度差による上限換気回数の関数化を行う。近似式は (3) 式をモデルとし、最小二乗法により定数 a と b を求める。

$$N_{max} = \frac{b}{(T_i - T_o) - a}$$

(3)

上式は $T_i - T_o = a$ と $N_{max} = 0$ に漸近するが、これは内外温度差が a [℃] 以下のときは自然換気回数 N によらず ADPI が 80 % 以上となり、内外温度差が大きいほど上限換気回数 N_{max} が 0 に近づく式表現を意図する。

(4) 式及び (5) 式に Type 2, Type 4 の自然換気方式における上限換気回数 N_{max} の近似式を示す。

$$N_{max} = \frac{6.04}{(T_i - T_o) - 3.61}$$

(for Type 2)

(4)

$$N_{max} = \frac{14.66}{(T_i - T_o) - 3.23}$$

(for Type 4)

(5)

各自然換気方式における内外温度差 $T_i - T_o$ と上限換気回数 N_{max} の関係を **Fig. 6** に示す。

自然換気の換気回数によらず室内の快適性が保たれる内外温度差条件は、既報で示した Type 2 では 3.61℃ 以下、本報で検討した Type 4 では 3.23℃ 以下である。また、例えば上限換気回数 2.0 回/h となる内外温度差条件は Type 2 では 6.6℃、Type 4 では 10.6℃ となる。

前報²⁾による Type 2、本報で検討した Type 4 ではそれぞれ内外温度差に対する自然換気回数の上限値設定の必要性が示されたが、Type 3 では自然換気時の内外温度差及び自然換気回数によらず室内の快適性が保たれる結果となり、上限換気回数の算定は不要であると判断した。有孔ダクト天井方式では低風速での流入によって室内にて静穏な気流場・均一な温度分布が形成されると考えられるため、Type 2 や Type 4 のように自然換気による吹出し気流が局所的に卓越することが少なく、快適な室内環境を提供できると考えられる。

Table 7 Maximum air exchange rate from ADPI

To [℃]	14	16	18	20
Ti - To [℃]	12	10	8	6
Type 2 [m ³ /h] ([l/h])	82.8 (0.66)	141.7 (1.13)	156.8 (1.25)	319.9 (2.55)
Type 4 [m ³ /h] ([l/h])	210.7 (1.68)	289.8 (2.31)	367.5 (2.93)	668.4 (5.33)

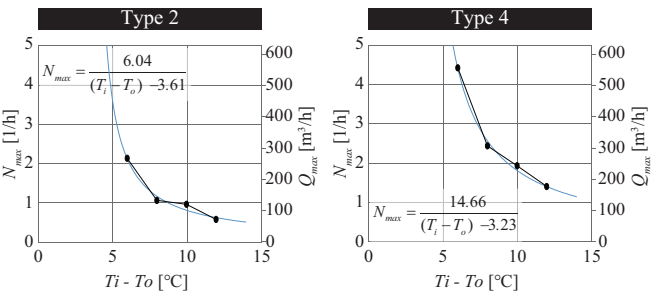


Fig. 6 Maximum air exchange rate

6. まとめ

本報では有孔ダクト天井方式と天井スリット型の自然換気導入時について、内外温度差と自然換気量をパラメータとした CFD 解析を行い、ADPI に基づき自然換気回数の上限値設定の必要性検討を行い、ペリカウンター型と比較した。ペリカウンター型と天井スリット型では、自然換気による処理熱量が大きい条件ほど室内温熱環境が悪化し、内外温度差に対する上限換気回数の設定が好ましいことに対して、有孔ダクト天井方式では外気温が低く、内外差圧が大きい条件で自然換気量が大きい場合であっても室内で極端に不快な分布は形成されず、熱的快適性の低下を防止するために自然換気量を絞る必要性は高くない結果となった。

今後は他の自然換気方式についても同様の検討を行うとともに、新たな室内環境評価指標の検討、体系的なデータの蓄積による予測法の確立が必要である。

- 【記号表】
- To : 外気温 [℃]

Ti : 室内気温 [℃]

Ti - To : 内外温度差 [℃]

Q : 自然換気量 [m³/h]

Q_{max} : 上限自然換気量 [m³/h]

N : 換気回数 [1/h]

N_{max} : 上限換気回数 [1/h]

【参考文献】

1) 丹羽、小林ら：「有孔ダクト天井を用いた自然換気システムの設計手法に関する研究 (その 6)」, 空気調和・衛生工学会大会学術講演文集, 第 4 巻, pp.57-60, 2023.9.

2) 丹羽、小林ら：「省エネ性と快適性を両立した執務室の自然換気口制御に関する研究 (その 2)」, 空気調和・衛生工学会大会学術講演文集, 第 4 巻, pp41-44, 2022.9.

3) 桑山、白石ら：「外断熱建築における躯体蓄熱型放射 + 床吹出システムに関する研究 (第 4 報)」, 日本建築学会学術講演梗概集, No.41652, pp1371-1372, 2016.8.

4) 長澤康弘, 近藤靖史：「数値流体解析における空調天井吹出口のモデリング手法 (その 4)」, 日本建築学会計画系論文集, No.585, pp.27-34, 2004.11

5) ASHRAE:ASHRAE HANDBOOK HVAC Applications SI Edition, 58.6, 2019

6) Z.Popiolek, and A. K. Melikov : Improvement of CFD predictions of air speed turbulence intensity and draught discomfort, Proceedings of Indoor Air 2008, paper 718, 2008