

天井設置された自然換気用有孔ダクトの設計手法に関する研究

(その1) 換気回路網を用いた吹出し風量計算手法

正会員○若狭弥保^{*1} 同 山中俊夫^{*2} 同 小林知広^{*3} 同 桃井良尚^{*4}
同 田中宏明^{*5} 同 藤井拓郎^{*5} 同 守雅俊^{*5}

4. 環境工学 - 13. 空気流動応用 - 1. オフィス等の自然換気・ハイブリッド換気

自然換気, 換気回路網計算, パンチングメタル

1. はじめに

一般的なオフィスにおいて換気空調にかかる消費エネルギーは全体の約 50% に及び¹⁾、自然換気導入による大きな省エネルギー効果が期待される。

その一方で、自然換気が運用される外気温度の下限値を 15°C と設定する場合、ペリカウンターや窓面からの外気流入であれば、吹出風速によってはコールドドラフトによる不快感が懸念される²⁾。また間仕切壁などで隔たれた室空間がある場合、水平方向の自然換気経路確保の為に欄間やパスダクトが必要となり³⁾個室間仕切壁の多い空間による自然換気システムの導入は難しいのが現状である。

そこで本研究では、水平方向の換気経路を室奥まで確保することを目的として、下面部がパンチングメタルで構成された角ダクトを室の天井面に設置した自然換気システムの導入を提案する。本報では、ダクトから執務室内への吹出し風量の予測方法として換気回路網計算を用いたモデルを提案し、この風量予測結果を CFD 解析結果を比較することで最適化を行った後、室内吹出し風量が均等となるパンチングメタルの開孔率分布の算定を行った。

2. 自然換気システム概要

2.1 有孔ダクト

本研究で提案する自然換気システムの概要、ダクトの概念図を図 1、2 に示す。自然換気口から給気

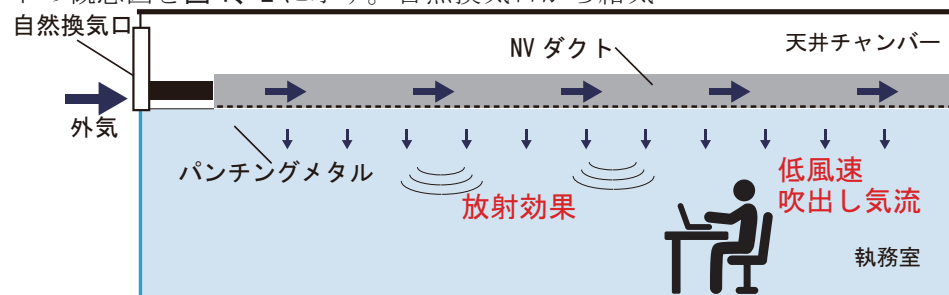


図 1 自然換気システム概要

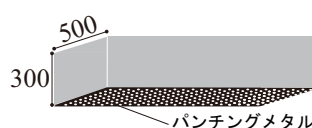


図 2 NV ダクト詳細図

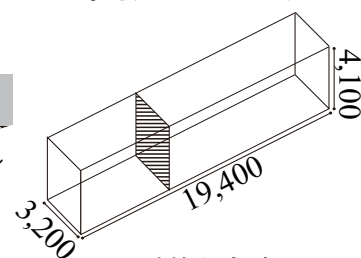


図 3 計算対象空間

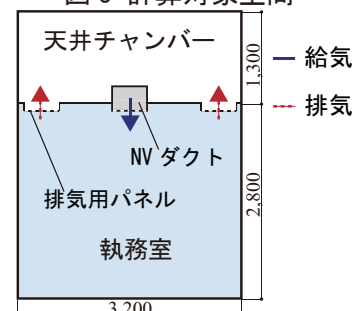


図 4 換気システム

Design Method of Ceiling-Mounted Perforated Metal Duct for Natural Ventilation

(Part1) Prediction Method of Supply Air Flow Rate Distribution with Airflow Network Calculation

WAKASA Miho, YAMANAKA Toshio, KOBAYASHI Tomohiro, MOMOI Yoshihisa
TANAKA Hiroaki, FUJII Takuro, MORI Masatoshi

ある排気パネルから行われ、空気が執務空間から天井チャンバー内へ運ばれる。天井チャンバーに設置されたパスダクトを通じて重力換気が行われるシャフトに誘引され屋上空間で外気へ排気される。

3. 換気回路網計算による吹出し風量の算定手法

3.1 一列法

換気回路網計算では、ある区切られた室や空間を節点、節点同士の間には存在する流動抵抗を枝管として捉え、節点同士を結ぶことにより、換気経路を回路のように表す。本報では、一列法⁴⁾と呼ばれる解法を用いて換気計算を行う。この解法は流れの方向が一方向である一列に並んだ空間の換気量計算をするときに用いられる。一列法では、初めに最上流の節点の圧力を仮定する。仮定値を用いて各節点の圧力、節点間の流量を算出し、下流まで計算を行う。このとき、最下流の節点において流入量と流出量の収支がとれるはずである。この収支式の変数は最初に仮定した圧力であることから、この仮定値の真値を繰り返し計算により求めていく解法である。

3.2 モデル概要

図3で示した計算対象空間内でNVダクト内の給気量と吹出し風量の収支が成り立つと想定してモデルの構築を行った。換気回路網モデルを図5に示す。ダクト内をn分割し、ダクト内に分割領域が一列に並んでいると想定している。本報ではn=500として計算を行った。NVダクトの入口部分の分割領域内の静圧 P_0 を仮定し、繰り返し計算により静圧 P_0 の真値を求める。以下、モデルの基礎式を示す。

①自然換気口から有孔ダクトへ導入される風量 V_0
外気と分割領域内の静圧差から以下の式で求める。

$$V_0 = \alpha_o A_o \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_{out} - P_0|} \quad \dots(1)$$

②有孔ダクトの分割領域からの室内吹出し風量 V_r
パンチングメタルの風圧係数は0と考えて、分割領域と室内の静圧差から式(2)で求める。

$$V_{ri} = \alpha_r A_r \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_{i-1} - P_{room}|} \quad \dots(2)$$

③分割領域から下流側の分割領域へ流入する流量 V

$$V_i = V_{i-1} - V_{ri} \quad \dots(3)$$

④分割領域内の静圧 P

連続する分割領域において全圧の収支式を立てると

$$\left\{ P_i + \frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{V_i}{A_d} \right)^2 \right\} - \zeta \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{V_{i-1}}{A_d} \right)^2 = \left\{ P_{i-1} + \frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{V_{i-1}}{A_d} \right)^2 \right\} \quad \dots(4)$$

となる為分割領域 i における P は以下の式で求める。

$$P_i = P_{i-1} - \frac{\rho}{2 A_d^2} \{ V_i^2 - (1 - \zeta) V_{i-1}^2 \} \quad \dots(5)$$

NVダクトの最も下流側に存在する分割領域 $n-1$ の開孔部は分割領域をつなぐ開口とパンチングメタル内の開孔部だけであるから、以下の収支式が成り立つはずである。

$$E^j(P_0) = -V_{n-1} + V_{rn} = 0 \quad \dots(6)$$

二分法により収支式(6)が成立する P_0 を算定する。

3.3 計算条件

換気回路網計算で用いた各計算条件を表1に示す。また、境界条件として、外気圧を0Pa、室内圧を-10Paと与え、室内圧が一定となるような換気駆動力があるものと仮定している。

パンチングメタルの開孔部で与えられる抵抗係数 ζ_p は比例定数 C 、抵抗値の開孔率 β 、孔径 d_p 、ピッチ l_p を用いて以下の式から求める⁵⁾。

$$\zeta_p = C \cdot (1 - \beta) / \beta^2 \quad \dots(7)$$

$$\beta = \left(\frac{\pi}{2\sqrt{3}} \right) \cdot \left(\frac{d_p}{l_p} \right)^2 \quad \dots(8)$$

ゆえに流量係数 α_r は式(9)で求められる。

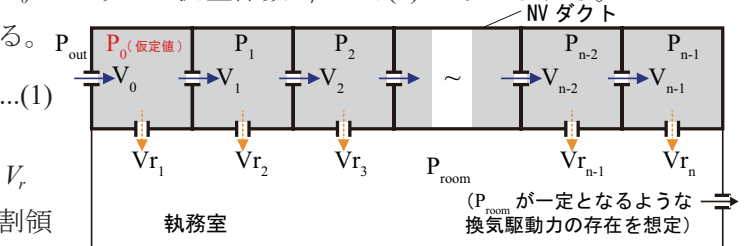


図5 モデル概要図

表1 回路網モデル計算条件

パンチングメタル	$\alpha_d[-]$	0.086	自然換気口	$\alpha_o[-]$	0.65
	$\beta[-]$	0.097		$A_o[m^2]$	0.175
	$d_p[m]$	0.4	NVダクト	$A_d[m^2]$	0.175
	$l_p[m]$	1.22		$P_{out}[Pa]$	0
	$C[-]$	1.604	境界条件	$P_{room}[Pa]$	-10
	$\zeta_p[-]$	152.3		$\rho[kg/m^3]$	1.2
	$A_d[m^2]$	0.081			

$$\alpha_r = \frac{1}{\sqrt{\zeta_p}} \quad \dots(9)$$

分割領域で生じる抵抗値は、NVダクト内表面の摩擦による圧力抵抗 ζ_1 及びパンチングメタルから空気が流出する際に発生する分流抵抗 ζ_2 が考えられるが、抵抗値の推定が難しい。そのため本研究では、 $\zeta=\zeta_1+\zeta_2$ とし、 ζ の値をパラメータとして0.004から0.04の間で8条件変化させて計算を行った。

3.4 計算結果

圧力損失係数 ζ をパラメータとした換気回路網計算モデルによるNVダクト下部面のパンチングメタルの面風速の計算結果を図6に示す。風速は吹出し風量 V_r を分割領域のパンチングメタル面積 A_r で除すことで求めた。 ζ の値が小さければダクトの奥の部分で風速が上昇する傾向が見られた。ダクトの奥でダクト内静圧が上昇した為であると考えられる。

4 CFD解析

4.1 解析空間・解析条件

解析空間のアイソメ図、NVダクトの境界条件を図7に示す。解析条件を表2に示す。換気回路網モデルで計算を行った空間が対称性を持つため、計算負荷軽減を目的として換気回路網モデルと同様の空間を二等分して計算を行った。NVダクト下部面の

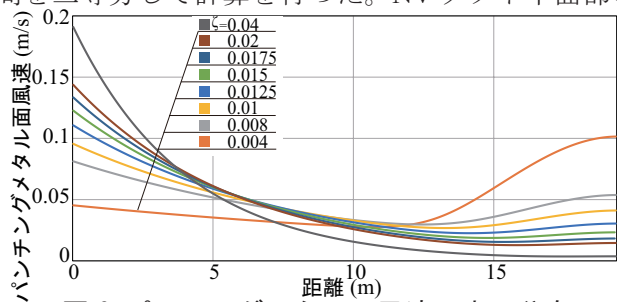


図6 パンチングメタル面風速の水平分布

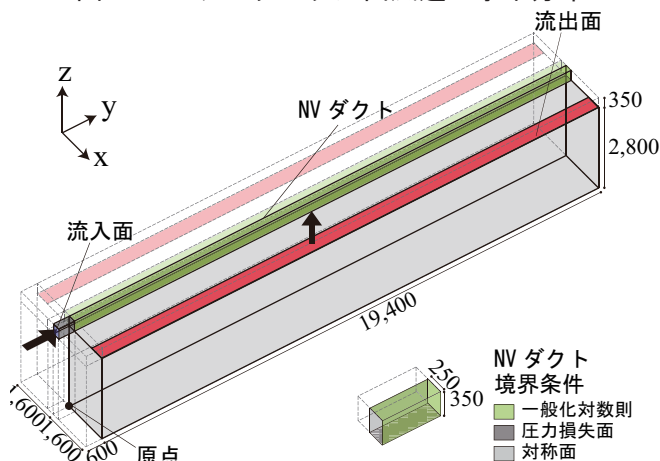


図7 解析対象空間

パンチングメタルの開孔部は計算負荷軽減の為、厚みのない面として圧力損失を与えて計算を行った。圧力損失係数は回路網計算モデルと同一の値とした。対称面、下面部以外のダクト内表面の境界条件は一般化対数則とした。

4.2 回路網計算モデルとCFDの比較

回路網計算モデルにおいて ζ を0.004, 0.01, 0.04としたときに算定された自然換気口からの流入量 V_0 を流入境界として3条件CFD解析を行った。NVダクト内通過風量 V のCFD解析結果を流入量 V_0 で除し無次元化したところ、図8のように、3条件が概ね同様の分布となったことから、この範囲ではダクト内通過風量分布は流入量に依存しないと考えられる。そこで、回路網計算モデル及びCFD解析で得られたダクト内通過風量を自然換気口からの流入量で無次元化して比較を行った。図9に回路網計算で $\zeta=0.01$ として算定した流入量を流入境界としたCFDによる無次元化風量と、回路網計算モデルで算定した無次元化風量の水平分布を重ねて示す。 $\zeta=0.01$ で与えた回路網計算モデルとCFDの結果が概ね一致していることから、以後の検討では $\zeta=0.01$ とした回路網計算モデルを用いることとする。

5. 吹出し風量が一樣となる有孔板の開孔率分布

室内空気質を均一にするには、室内の奥まで新鮮外気が給気されるべきと考えられる。そこで、NV

表2 解析条件

解析ソフト		STREAM V14
乱流モデル		標準k-εモデル
計算アルゴリズム		SIMPLE
離散スキーム		QUICK
境界条件	流入面	流量規定
	流出面	表面圧力
	Xmin	対称面
	Xmax	フリースリップ
パンチングメタル	壁面境界	Ymin, max Zmin, max
	モデリング	対数則
	圧力損失係数	圧力損失
メッシュ数		152.3
		904,400

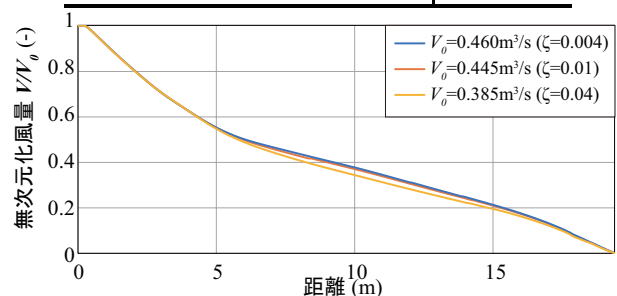


図8 無次元化風量分布 (CFD)

ダクトからの吹出し風量の水平分布が一樣となるパンチングメタルの開孔率分布の予測を行った。

5.1 計算方法

任意の P_0 を代入して、式 (1) を用いて自然換気口から流入する風量 V_0 を算出する。

吹出し風量が一樣であるから、吹出し風量 V_r は V_0 と分割数 $n(=500)$ を用いて以下の式で表される。

$$V_r = V_0/n \quad \dots(10)$$

式 (2) を変形すると、微小区間 i における流量係数 α_r の値は以下の式から得られる。

$$\alpha_{ri} = \frac{V_r}{A_r \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_{i-1} - P_{room}|}} \quad \dots(11)$$

式 (3), (5) を用いて V, P を算出し、上流から順に計算を行い分割領域ごとの開孔率分布を求める。

5.2 計算結果

P_0 の値をパラメータとして $-1\text{Pa} \sim -7.5\text{Pa}$ の間で変化させて算定したパンチングメタルの開孔率、ダクト内の静圧、換気回数を図 10 ～ 12 に示す。但し P_0 の値が -7.65Pa より小さい場合ダクト内と室内

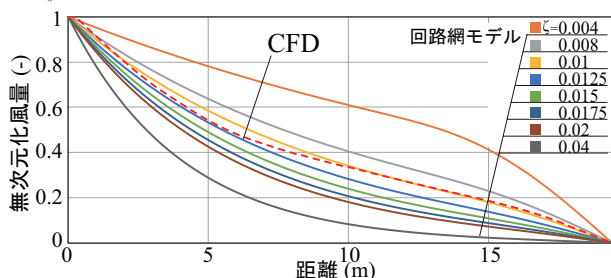


図 9 ダクト内通過風量 V の水平分布

【記号表】

V_0	: 自然換気口から流入風量	$[\text{m}^3/\text{s}]$
V	: ダクト内通過風量	$[\text{m}^3/\text{s}]$
V_r	: 有孔板開孔からの吹出し風量	$[\text{m}^3/\text{s}]$
P	: 微小区間内の静圧	$[\text{Pa}]$
$E(P_0)$	: P_0 を変数とした流量収支式	$[\text{m}^3/\text{s}]$
α_0	: 自然換気口の流量係数	$[-]$
A_0	: 自然換気口の開口面積	$[\text{m}^2]$
α_r	: パンチングメタルの流量係数	$[-]$
β	: パンチングメタルの開孔率	$[-]$
d_p	: パンチングメタルの孔径	$[\text{mm}]$
l_p	: パンチングメタル開孔部の中心距離	$[\text{mm}]$
C	: 比例定数	$[-]$
ζ_p	: パンチングメタル開孔部の圧力損失係数	$[-]$
A_r	: 微小区間におけるダクト下面部の断面積	$[\text{m}^2]$
ζ	: ダクト内で生じる圧力損失係数	$[-]$
A_d	: ダクト断面積	$[\text{m}^2]$
ρ	: 空気の密度	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
P_{out}	: 外気圧	$[\text{Pa}]$
P_{room}	: 室内圧	$[\text{Pa}]$
(添字)		
i	: 微小区間の領域番号	
j	: 繰り返し回数	

- * 1 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 博士前期課程
- * 2 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 教授・博士 (工学)
- * 3 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 准教授・博士 (工学)
- * 4 福井大学学術研究院工学系部門建築建設工学分野 講師・博士 (工学)
- * 5 株式会社日建設計

の静圧が等しくなり吹出し風量が 0 となる分割領域が現れ、解が得られなかった。換気回数は、流入量 V_0 を執務室空間の容積 173.824m^3 で除して求めた。 P_0 が室内圧に近づくほど、開孔率は大きくなる傾向が見られた。吹出し風量がダクト内と室内の静圧差に依存していることが原因であると考えられる。

6. おわりに

本報では有孔ダクト天井を用いた自然換気システムにおける、換気回路網モデルによる吹出し風量分布の算定方法の提案、ダクト吹出し風量の水平分布が均一となるような開孔率の分布を算定を行った。今後は実験を行い圧力損失係数 ζ の真値を取得し、回路網計算モデルの精度向上を図る予定である。

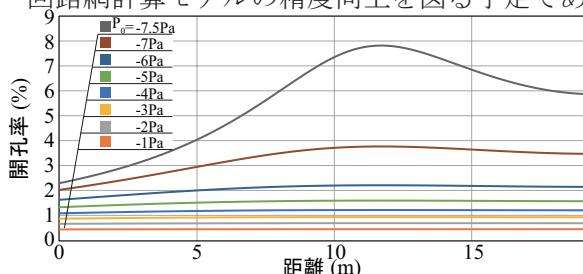


図 10 開孔率 α_r の水平分布

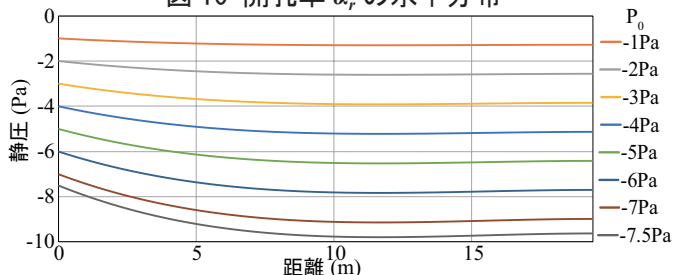


図 11 ダクト内静圧 P の水平分布

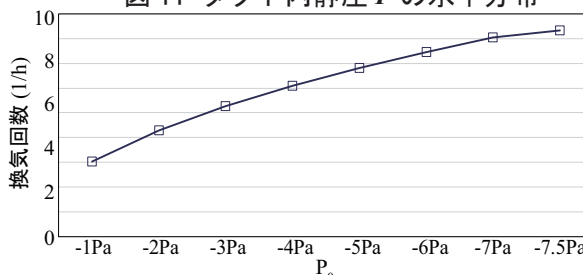


図 12 換気回数

【参考文献】

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁 省エネルギー対策課：ZEB ロードマップ検討委員会における ZEB の定義・今後の施策など (2015), p.5
- 2) 山本佳嗣, 田辺新一：自然換気システムの換気口開放条件に関する研究 (2016), 日本建築学会環境系論文集, pp.375-384
- 3) 日本建築学会：実務者のための自然換気ハンドブック, 技報堂出版 (2013), pp.41-43
- 4) 石原正雄：建築換気設計 (1969), pp.158-159, 朝倉書店
- 5) 日本機械学会：管路・ダクトの流体抵抗 (1993), pp.110-112

Graduate student, Division of Global Architecture, Graduate School of Engineering, Osaka University

Prof., Division of Global Architecture, Graduate School of Engineering, Osaka University, Dr.Eng.

Assistant Prof., Division of Global Architecture, Graduate School of Engineering, Osaka University, Dr.Eng.

Senior Assistant Prof., Dept. of Architecture and Civil Engineering, Graduate School of Eng., University of Fukui, Dr. Eng.

Nikken Sekkei Ltd.