

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2) 等分布吹出しとなる開孔率分布の計算手法

Design Method of Natural Ventilation System with Perforated Metal Duct Ceiling (Part2) Calculation Method of Rate Distribution

学生会員 ○若狭 弥保 (大阪大学) 技術フェロー 山中 俊夫 (大阪大学)
正会員 小林 知広 (大阪大学) 正会員 桃井 良尚 (福井大学)
正会員 田中 宏明 (日建設計) 正会員 藤井 拓郎 (日建設計)
正会員 守 雅俊 (日建設計)

Miho WAKASA^{*1} Toshio YAMANAKA^{*1} Tomohiro KOBAYASHI^{*1} Yoshihisa MOMOI^{*2}

Hiroaki TANAKA^{*3} Takuro FUJII^{*3} Masatoshi MORI^{*3}

^{*1} Osaka University ^{*2} Fukui University ^{*3} Nikken Sekkei Ltd.

In this study, Perforated Metal Duct Ceiling, the ceiling-mounted rectangular ducts are proposed for installing natural ventilation system in high-rise buildings. Its bottom surface is made of perforated metal, so fresh outdoor air passes through the ducts and the air gradually supplied to the room below at low velocity. In this paper, the authors developed the air flow network model to predict supply air flow rate distribution. Distribution of open area of perforated metal to take supply air into the room uniformly was developed as well. These results were compared with CFD for validation.

1. はじめに

一般的なオフィスで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省エネルギー効果が期待される。しかし外気温度 15℃ 以下での自然換気運用時、吹出風速が大きい場合生じるコールドドラフトへの懸念²⁾や間仕切壁などで隔たれた室の多い空間では水平方向の自然換気経路確保の為欄間やバスダクトが必要となり³⁾自然換気システムの導入が現状難しいことなどが課題である。

本研究では、新鮮外気を室の奥まで導入するために、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システムの導入を提案する。本報では、前報⁴⁾で示したパンチングメタルの開孔率が一律である場合の吹出し風量の予測モデルをもとに、室内吹出し風量の水平分布が均一となるようなパンチングメタルの開孔率分布の算定を行い、算出された開孔率を有するダクトの CFD モデルの解析を行った結果を示す。

2. 自然換気システム概要

本研究で提案する自然換気システムの概要図、対象空間における換気手法の断面図を図 1、2 に示す。自然換気口から流入した外気は幅 500mm×高さ 350mm、全長 17,600mm の角ダクト (以下、NV ダクト) を通り室の奥まで運ばれる。NV ダクトの下面部はパンチングメタル

で構成されており、低風速で室内へ給気される。排気は図 2 の両端の排気パネルから行われる。本システム導入の利点は主に 3 つ挙げられる。

- ・ドラフトリスク抑制による自然換気可能期間の拡大
- ・冷却されたパンチングメタルからの放射効果
- ・間仕切り壁を有する室空間への自然換気導入の可能性

本システムはオフィスの執務室で利用を想定している。執務室には幅 1,600mm、奥行 17,600mm、高さ 2,800mm の空間が等間隔に並んでいるものとしてこれを計算対象空間とし、NV ダクト内で流量収支がとれると想定した。

3. 換気回路網計算による吹出し風量の算定手法

3.1 吹出し風量予測モデル

本研究では大空間の中に並んだ幅 3,200mm、高さ 2,800mm、奥行 17,600mm (容積 157.7m³) の空間 1 区切りを抽出し、この計算対象空間内で給排気量の収支が成り立つと想定する。換気回路網モデルを図 3 に示す。有孔ダクト内部を n 個 (=500 とした) の微小区間で区切り、この微小区間を節点とし、節点間に生じる抵抗を枝として考える。

本モデルは一系列法⁵⁾と呼ばれる手法を基に構築した。ダクトの入口部分の微小区間内の静圧 P_i を仮定値とし、繰り返し計算により静圧 P_i の真値を求める。

以下、モデルの基礎式を示す。

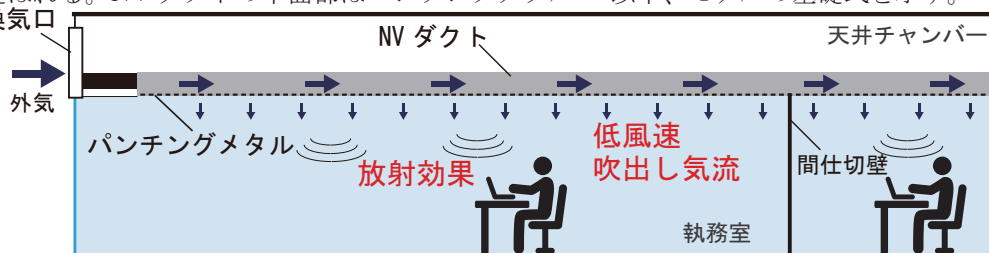


図 1 システム概要図

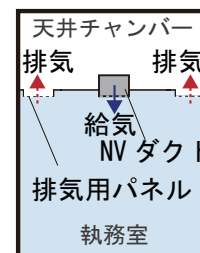


図 2 換気手法

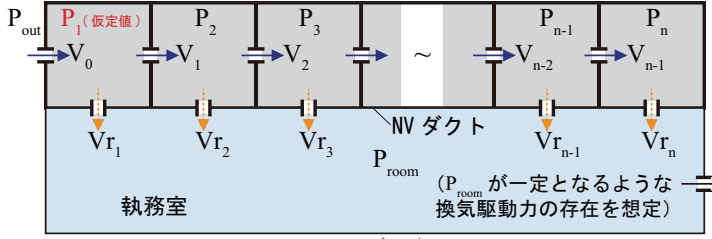


図3 モデル概要図

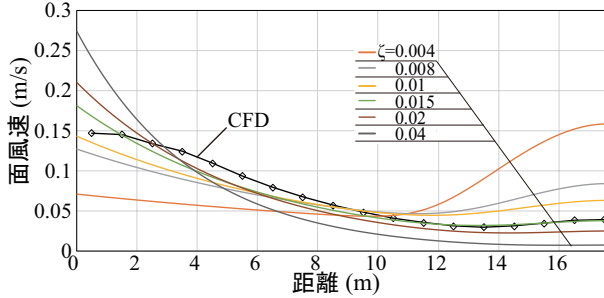


図4 吹出し面風速 V_r/A_r

①自然換気口から有孔ダクトへ導入される風量 V_0

$$V_0 = \alpha_o A_o \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_{out} - P_1^j|} \quad (1)$$

②有孔ダクトの微小区間からの室内吹出し風量 V_r

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

③微小区間から下流側の微小区間へ流入する流量 V

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

④微小区間内の静圧 P

連続する微小区間において全圧の収支式を立てると、

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

となる為、微小区間 i における静圧は以下の式で求める。

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

有孔ダクトの最も下流側に存在する微小区間 n の開口部は微小区間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、収支式 $E^j(P_i)$ が成り立つ。

$$E^j(P_1) = -V_{n-1} + V_{rn} = 0 \quad (6)$$

二分法を用いて、収支式 (6) が成立する仮定値 P_1 の真値を算定する。

3.2 計算条件の設定

換気回路網計算で用いた各計算条件を表 2, 3 に示す。境界条件として、外気圧を 0Pa、室内圧を -20Pa と与えた。

開孔率は 9.7% と設定した。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。⁶⁾

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

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

ゆえに流量係数 α_r は以下の式で求められる。

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

表 1 有孔板計算条件

β [-]	0.097
C [-]	1.4
d_p [m]	0.4
l_p [m]	1.22
ζ_p [-]	134.8
α_r [-]	0.086

表 2 モデル計算条件

自然換気口	α_o [-]	0.65
	A_o [m ²]	0.175
NVダクト	A_d [m ²]	0.175
境界条件	P_{out} [Pa]	0
	P_{room} [Pa]	-20
	ρ [kg/m ³]	1.2
パンチングメタル	α_r [-]	0.086
	A_r [m ²]	0.018

ダクト内表面の摩擦による圧力抵抗値 ζ_l は、摩擦損失係数 λ 、微小間隔 l 、ダクトの等価直径 d を用いて以下の通り求められる。

$$\zeta_l = \lambda \frac{l}{d} \quad (10)$$

微小区間で生じる抵抗値として、ダクト内表面の摩擦による圧力抵抗 ζ_l のほかに、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_s 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、 $\zeta = \zeta_l + \zeta_s$ とし、 ζ の値をパラメータとして 0.004 から 0.04 の間で 6 条件変化させて計算を行った。前報⁴⁾ではモデル計算と同一の開孔率 9.7% に相当する圧力損失を与え、ダクト内の壁面境界を一般化対数則とした場合の CFD 解析の結果を行った。図 4 に吹出し面風速における比較結果を示す。モデルの面風速は風量 V_r を微小区間のダクト下面積 A_r で除して求めた。ダクト通過風量 V をダクト風上での風量 V_0 で無次元化して比較を行ったところ $\zeta=0.01$ 程度でモデル計算結果と CFD 解析結果が最も一致したため、 $\zeta=0.01$ として以後計算を行うこととした。

4. 均一吹出しとなる有孔板開孔率の算定手法

図 4 より、前章で構築したモデルでは、窓面付近と室の奥で吹出風量に最大 3 倍程度の差があると予測された。新鮮空気を室全体に均一に供給による室内の気流分布が均質化が望まれる。そのため吹出し風量の水平分布が均一となるようパンチングメタルの開孔率に分布をつけることとし、この開孔率の算出手法を提案する。

4.1 均一吹出しモデル

ダクト内の風上側の最端部の圧力 P_i を代入し V_0 を求めることで、各微小区間からの吹出し風量 V_r は V_0/n ($n=500$ とした) と表せる。式 (2) を変形することで微小区間 i の流量係数 α_{ri} は、以下の式で得られる。

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

α_{ri} を式 (7) ~ (9) により逆算して開孔率 β を求める。各微小区間 i 内の流量 V 、静圧 P は式 (5), (6) で求める。

4.2 計算条件

本モデルでは、圧力 P_i の値を入力する必要がある。そのため、前章で示した吹出し風量予測モデルにおいて外気圧を 0Pa としたとき、室内圧が -10, -20, -30Pa、開孔

表 3 計算条件

		室内圧 (外気圧 0Pa)		
		-10Pa	-20Pa	-30Pa
開孔率	3.6%	1a	2a	3a
	2.5%	1b	2b	3b

表 4 各条件における P_i

Case	1a	2a	3a
P_i [Pa]	-7.53	-15.07	-22.60
Case	1b	2b	3b
P_i [Pa]	-6.36	-12.72	-19.08

表 5 有孔板計算条件

(a) 開孔率 3.6%		(b) 開孔率 2.5%	
β [-]	0.036	β [-]	0.025
C [-]	1.4	C [-]	1.4
d_p [m]	0.3	d_p [m]	0.3
l_p [m]	1.50	l_p [m]	1.50
ζ_p [-]	1039.9	ζ_p [-]	2181.2
α_r [-]	0.031	α_r [-]	0.021

率 3.6, 2.5% 一定とした際に算出された 6 条件の P_i の値を代入した。なお、 P_i と室内圧の差が本条件よりも小さくなると、室内とダクト内の圧力差が 0 となる場所が生じ、 α_{ri} が計算上モデル計算が出来なかった。計算条件、各条件で外気圧 0 としたときの P_i の値、パンチングメタルの計算条件を表 3 ~ 5 に示す。

4.3. 計算結果

均一吹出し風量モデルで得られた開孔率、ダクト内静圧分布、吹出し面風速、換気回数の計算結果を図 5 ~ 8 に示す。ダクトの 10m 付近で開孔率が最大となる。前報⁴⁾では開孔率が一定であるとき、室内とダクト内の圧力差が 10m 付近で最小であった。これにより開孔率が上昇したと示唆される。また、Case1a, 1b, 1c と 2a, 2b, 2c の開孔率の算定結果がそれぞれ一致しており、室内外圧力差が開孔率分布に影響を与えないことがわかった。

5. CFD 解析

前章 Case2a, 2b で算定されたパンチングメタルの開孔率と同程度の圧力損失を CFD モデルに与えて解析を行った。

5.1 解析空間・解析条件

解析空間のアイソメ図、有孔ダクト部の境界条件を図 9 に示す。解析条件を表 6 に示す。計算負荷を軽減することを目的として、対称性のある換気回路網モデルの対象空間と同一の空間を二分した空間を、解析対象空間とした。メッシュ間隔は、有孔ダクト部分では 25mm の等間隔、執務空間では 50mm の等間隔とした。対称面、ダクト下面部以外のダクト内表面の境界面は一般化対数則とした。CFD モデリングにあたって、ダクト下面部のパンチングメタルの開孔部を実際に再現する場合、膨大な計算負荷がかかる。そのためパンチングメタルを厚みのない面として圧力損失を与え、計算を行った。前章の Case2a, 2b の 2 条件における開孔率算定結果の 1.6m ごとの平均値を式 (7) ~ (9) を用いて圧力損失係数に換算して与えた。この圧力損失面には、流れ方向に垂直な成分のみを整流して通過させる抵抗を仮定している。CFD モデルに与えた開孔率を図 10 に示す。また、モデルの Case2a, 2b において算定された流量をそれぞれの流入面に規定した。

5.2 解析結果

Case2a, 2b におけるダクト内通過風量、吹出し面風速の解析結果を Case ごとに図 11, 図 12 に示す。均一吹出しモデルの Case2a, 2b で算定された結果及び均一吹出しモデルの Case2a, 2b で得られた開孔率を 3 章の吹出し風

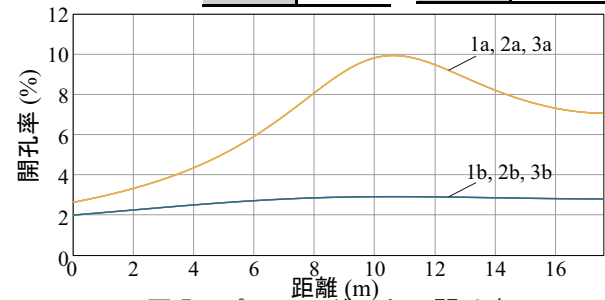
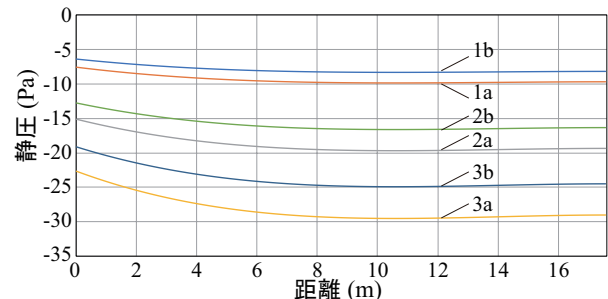
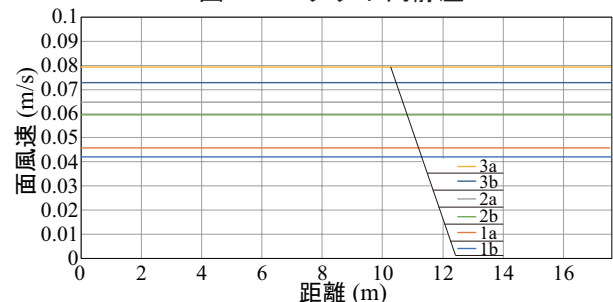
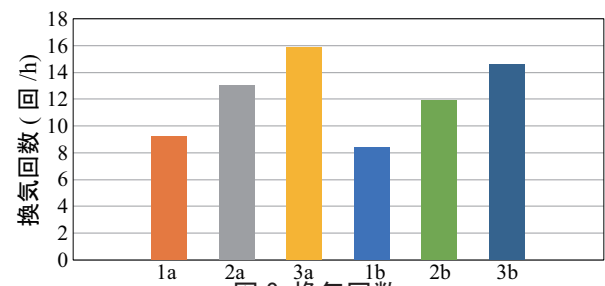
図 5 パンチングメタル開孔率 β 図 6 NV ダクト内静圧 P 図 7 吹出し面風速 V_r/A_r 

図 8 換気回数

量予測モデルに与えて再計算を行った結果もそれぞれ重ねて示している。CFD 上ではパンチングメタルを圧力損失面としており、またモデルと CFD において、ダクト内壁面の境界条件が異なっており完全に再現はできていないため、差異が生じているが、モデルの妥当性がある程度確認された。吹出し風量予測モデルでは、均一吹出しとなる筈の開孔率分布を入力して再計算したが、吹出風量分布が均一にならなかった。計算過程で誤差が生じていることが原因であると考えられる。

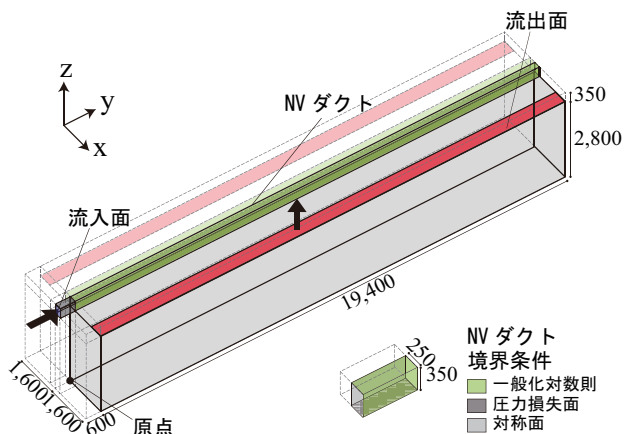


図9 CFD 解析対象空間

表6 CFD 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
	壁面境界	Xmin	対称面
		Xmax	フリースリップ
		Ymin,max Zmin,max	一般化対数則
パンチングメタルのモデリング		圧力損失	
メッシュ数		823,004	

【添字】

- i : 分割区間の区間番号
 j : 繰り返し回数
 n : ダクトの分割数

【記号表】

V_0	: 自然換気口からダクトへの流入風量	[m ³ /s]
V	: ダクト内通過風量	[m ³ /s]
V_r	: 有孔板開孔からの吹出し風量	[m ³ /s]
P	: 微小区間内の静圧	[Pa]
$E(P_i)$	: P_i を変数とした流量収支式	[m ³ /s]
α_o	: 自然換気口の流量係数	[-]
A_o	: 自然換気口の開口面積	[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	[mm]
l_p	: パンチングメタル開孔部の中心距離	[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	[m ²]
ζ	: ダクト内における圧力損失係数	[-]
A_d	: ダクト断面積	[m ²]
ρ	: 空気密度	[kg/m ³]
P	: 外気圧	[Pa]
P_{room}^{out}	: 室内圧	[Pa]

【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: Z E B ロードマップ検討委員会における Z E B 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) 若狭弥保, 山中俊夫, 小林知広: 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1) 吹出し風量分布の計算手法, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集 (2020)
- 5) 石原正雄: 建築換気設計 (1969), pp.158-159, 朝倉書店
- 6) 日本機械学会: 管路・ダクトの流体抵抗 (1993), pp.110-112

6. おわりに

本報では吹出し風量が均一となる開孔率分布の算定を行った。この結果、ダクト内の風上側最端の圧力 P_i の値によって開孔率分布が変化することがわかった。今後は P_i の真値取得を行っていく。

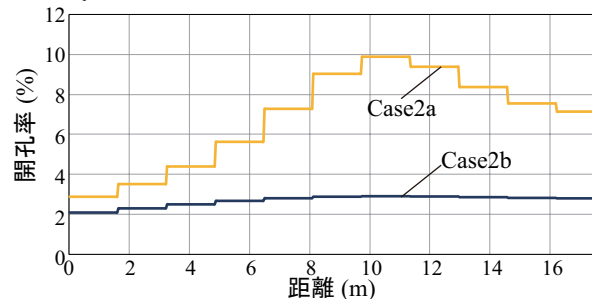
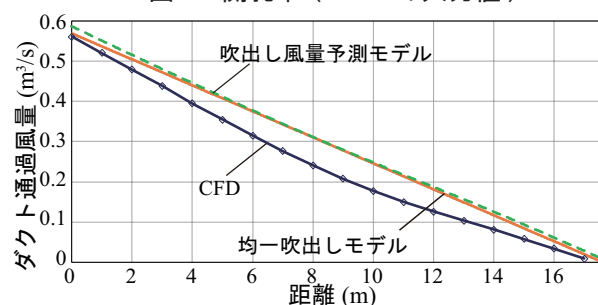
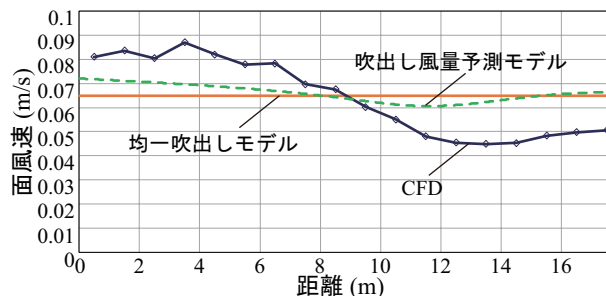


図10 開孔率 (CFD への入力値)

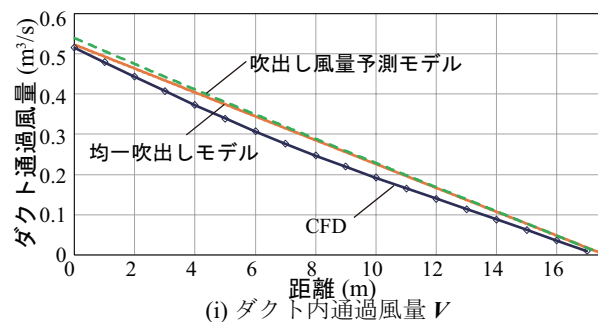


(i) ダクト内通過風量 V

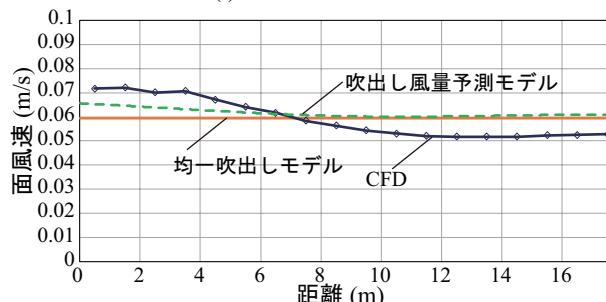


(ii) 吹き出し面風速 V_r/A_r

図11 モデルと CFD の比較 (Case2a)



(i) ダクト内通過風量 V



(ii) 吹き出し面風速 V_r/A_r

図12 モデルと CFD の比較 (Case2b)