

平成 21 年 6 月 3 日現在

研究種目： 若手研究 (B)
 研究期間： 2006 ~ 2008
 課題番号： 18760440
 研究課題名 (和文) CFD による通風気流構造解明に関する研究

研究課題名 (英文) Study of the cross-ventilation air flow structure with CFD.

研究代表者

遠藤 智行 (ENDO TOMOYUKI)
 関東学院大学・工学部・講師
 研究者番号： 90385534

研究成果の概要：通風現象を把握する上で重要な境界条件となる建物周辺気流構造の再現精度についての検討では、Durbin リミタを組み込んだ改良型 $k-\epsilon$ モデルを用い、格子分割にレイヤーメッシュとマルチブロック法を適用することに良好な結果を得られた。また、街区を想定した風圧係数及び建物周辺気流の再現精度について検討を行った。室内側の検討として、室内通風シミュレータの精度検証を実施するとともに、開口部通過時の流管内全圧・動圧・静圧の変動を詳細に把握することを可能とした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,300,000	0	1,300,000
2007年度	500,000	0	500,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
総計	2,300,000	150,000	2,450,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築環境・設備

キーワード：空気環境

1. 研究開始当初の背景

世界各国における異常気象・国内における水不足の問題等、現在の地球環境に異変が生じ始めている。京都議定書による温室効果ガス削減目標には未だほど遠く、各界において様々な省エネルギー手法に注目が集まる中、全消費エネルギーの多くを占める建築業界における役割は非常に大きいものとなっている。近年、住宅における自然エネルギー利用の一つとして、通風利用を叫ぶ声が再燃しており、通風研究の第3次世代と言っても過言でない程、論文発表や学会活動が活発に行われている。通風研究においては、気流が開口部を通過する際に起きる圧力変化の様相・室内への拡散が十分でない場合における

流出側開口部の換気駆動力の選定（干渉係数の導入）・室内における気流の流管形状・流出側開口部から流出する気流と屋外気流との衝突による静圧変化の影響等、実に様々な問題点・疑問点が未だ解決されぬまま取り残されている。現在行われている通風研究には、このような通風気流構造解明を試みるものが見られない。

2. 研究の目的

本研究課題では開口部を流入する気流の詳細分析を最終目的とするが、開口部到達気流について正確な再現が可能でないと、そもそも通風気流の基礎理論の構築に着手できないと考えられることから、本研究課題にお

いては、最初に建物周辺気流の CFD による再現から着手する。CFD による屋外気流の予測が完了次第、開口部・室内の分析へと着手する。まずは気流が開口部を通過する際に生じる全圧損失について検討する。従来、開口部を通過する気流は縮流する際に開口部断面内において、全圧損失が生じないとされていたが、筆者らのこれまでの研究によると、開口部通過時における圧力変化の可能性が示唆されており、この点について LES による詳細な検討を実施したいと考える。開口部通過時の気流性状の分析と並行して室内側における分析も行う。

3. 研究方法

(1) 建物周辺気流予測の精度向上

格子再分割による改善効果

研究代表者らのこれまでの研究により、単純形状建物においては Durbin リミタを組み込んだ改良型 $k-\epsilon$ モデルが有効であることがわかっている。ただし、同モデルを複雑形状建物に適用した際には、屋根棟部における再現精度が著しく低下することが判明している。まずは、これらの再現精度向上のための格子分割手法について検討する。

計算概要

計算対象建物は既往研究同様の図 1 のものとした。アプローチフローは 1/4 乗則に従うものとし、既往研究の風洞実験時のものを再現した。なお、風向は 0 度のみとした。ここでは自動生成された建物近傍の格子に手動での細分割を施し、分割の際には明確な基準等は設けず、CFD の知識に精通していない者が一般に行くと想定されるような単純な分割とした。建物近傍の格子を図 2 に示し、計算条件を表 1 に示す。

(2) マルチブロック法による改善効果

上記に置いて、格子を極細かくすることによる効果が見られた。ここでは境界適合性が良く、街区などへの拡張も容易なマルチブロック法を用いる事により、高精度且つ効率よく解析を進める事が可能な格子作成方法について検討を行う。

計算概要

計算領域は図 1 のとおりである。解析空間を複数のブロックに分け、ブロック毎に六面体メッシュを生成するマルチブロック法と、壁第一メッシュ寸法を管理しやすいレイヤーメッシュを併用する方法を用いた。棟部分のメッシュ形状を、建物表面に沿って棟部分で折り曲げた case1、屋根面に平行にメッシュを交差的に組んだ case2 で検討した(図 3)。メッシュ分解能が計算解に及ぼす影響を把握するため、表 2 に示す 3 種類のメッシュ寸法で検討した。分割②は分割①を一樣に細分割、分割③は分割②の棟部分のみを y^+ の制

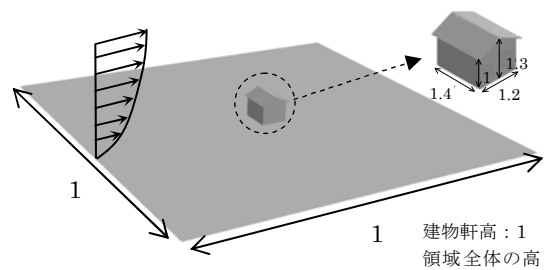


図 1 計算対象領域及び建物

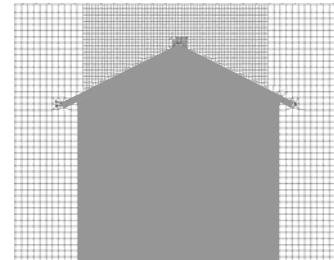


図 2 建物周辺の計算格子

表 1 計算条件

乱流モデル ($k-\epsilon$)	標準, Durbin($\alpha=0.65, 0.8, 1.0$), RNG	
アルゴリズム	SIMPISO	
差分スキーム	U,V,W	QUICK
	k, ϵ	MARS
流入境界	風洞実験値	
流出境界	諸量の勾配 0	
壁面境界	領域天井面・側面	滑面
	領域床面・建物壁面	壁関数
総セル数	1,484,091	

表 2 分割種類

分割	①	②	③
壁からのメッシュ寸法	0.04	0.02	0.005
y^+ の最小値	40	20	5

	①粗めのメッシュ	② y^+ を考慮し細分割	③棟付近を更に細分割
case1			
case2			

図 3 メッシュ分割方法

約を無視してさらに細分割したものとする。乱流モデルには、Durbin リミタ($\alpha=0.8$)を組み込んだ改良型 $k-\epsilon$ モデルを用いた。

(3) 周期境界条件の適用に関する検討

市街地の再現には多数の建物のモデリン

グが必要となり計算負荷が膨大となる。ここでは、現実的な街区を簡素にモデル化するための基礎的な検討を目的とし、改良 $k-\epsilon$ モデルに基づく解析と実験との比較を行う。

風洞実験概要 実験は東京工芸大学の風洞を使用した。周期境界条件の検証を目的に、測定対象模型と同一形状の模型を前後左右の隣棟間隔を一定(軒高 H_b の 2 倍)とし、均等に配置する(図 3)。測定対象建物模型は図 1 同様であるが、簡素化のため陸屋根とした。検討する風向角は 0° 、 22.5° 、 45° とした。風向角毎に測定位置における鉛直風速分布を熱線風速計により測定し、建物壁面及び屋根面の風圧分布を多点圧力計により測定した。基準高さは軒高の約 5.5 倍(325mm)とし、基準風速は 10.7m/s に設定した(図 4)。風圧は基準風速を $1/4$ 乗則に従って換算した軒高の位置での風速を用いた速度圧で基準化し、風圧係数を算出した。

計算概要 計算領域と計算条件をそれぞれ図 5、表 3 に示す。風向角 0° の場合は、対称半領域のみを対象に計算を行い、流れの直角方向には対称境界条件を適用する。流入・流出側側面には通過風量を与えて周期境界条件を適用し、風向角が 0° 以外の場合、通過風量を成分分解して与える。計算アルゴリズムは SIMPLE 法と PISO 法を用いた。乱流モデルは、Durbin リミタを組み込んだ改良 $k-\epsilon$ モデル及び、RNG モデルとした。

(4) 室内通風気流予測の精度検証

室内通風環境を簡易的に予測可能な室内通風シミュレータについて、屋根面に開口部を設置した際の検討を行う。

計算概要

対象は図 1 の住宅モデルの 2 階部分とする。検討を行った開口パターンを図 7 に示す。風向角は 0° 、 45° 、 90° を想定した。比較対象のために、図 8 に示すような従来の領域全体を対象とする計算を実施した(従来法)。屋外気流解析結果を室内気流解析の境界条件として適用する際に必要となる局所相似モデルの概要と、単純開口の $Pr^*-\alpha$ 関係図を表 4、図 9 に示す。計算フローを図 10 に示す開口部を持たないシールドモデルを用いた建物周辺部の気流解析を行い、開口部位置の P_w (風圧)、 P_t (接線方向動圧) と壁面に沿って流れる風向角を取得する。その結果から局所相似モデルに基づき、(1)式より各開口部の Pr^* を算出する。得られた Pr^* から(2)式より各開口部の α を算出する。連続条件を満たす各開口部の Q を算出し、CFD の境界条件に設定して室内気流解析を行う。境界条件には Q から算出した法線方向風速と、屋外解析で得た風向に接線方向風速を開口面に一様に与えることとする。

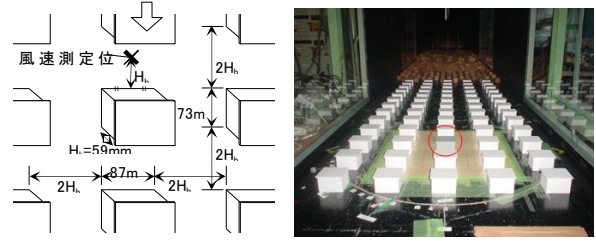


図 4 建物配置状況

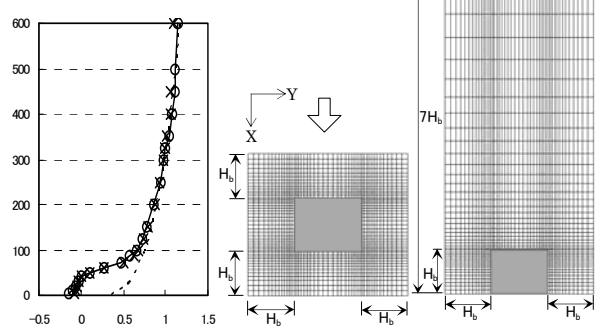


図 5 風速分布

図 6 計算領域

表 3 計算条件

風向角	0°	22.5°	45°
乱流モデル($k-\epsilon$)	Durbin ($\alpha=0.5, 0.65, 0.8, 1.0$), RNG	Durbin ($\alpha=0.8$)	
差分スキーム	U,V,W k, ϵ	QUICK UD	
上空境界条件	速度の法線成分、諸量の法線方向の勾配 0		
床面・建物壁面境界条件	壁開数		
総セル数	40090	80180	

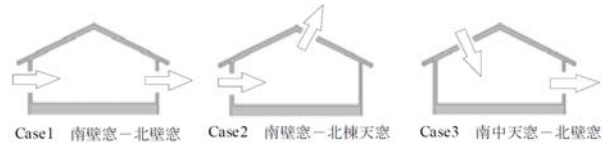


図 7 開口ケース

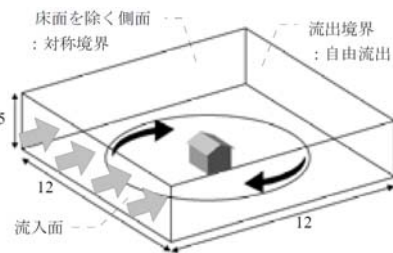


図 8 従来法の計算領域

表 4 局所相似モデル

$Pr^* = \frac{Pr - P_w}{P_t} \dots(1)$	Pr : 室内圧 P_w : 壁面風圧 $= C_w \frac{\rho}{2} U^2$
$\alpha = f(Pr^*) \dots(2)$	P_t : 接線方向動圧 $= C_t \frac{\rho}{2} U^2$ α : 流量係数

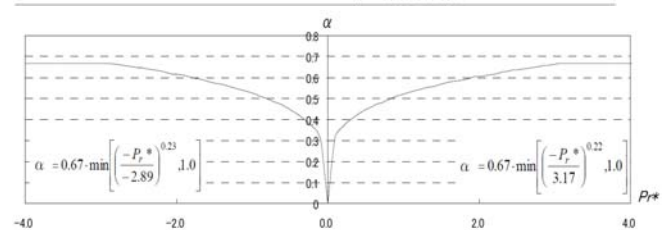


図 9 単純開口の $Pr^*-\alpha$ 関係図

(5) 通風気流の圧力損失機構に関する研究

ここでは、通風時の気流性状について、流管解析を行う事で、その圧力変動の詳細について検討する。

計算概要

計算は図 11 に示すような開口部周辺のみを風洞測定胴内に露出している形状を対象とした。最下部より空気を吸引することにより、上部開口部から通風を模擬した気流が進入することとなる。風向のある現象を再現するために、吸引量を変化させた (表 5)。

4. 研究成果

(1) 建物周辺気流予測の精度向上

図 12 に風圧係数分布の一例を示す。未だ風圧係数に若干の差異が見られるが、屋根面頂上部付近の負圧が大きく改善されていることがわかる。また、壁面・屋根面における対称性も良好に再現されている。表 6 に風洞実験値からの標準偏差を示す。既報では頂上部付近においても他の部分と同様の密度で格子が自動生成されていたため、風洞実験値との対応が非常に乏しかったが、細分割することにより、標準偏差が 1/4~1/6 程度へと減少し、非常に良好な対応を示す結果となった。屋根面以外の面においても、ほぼ全ての乱流モデルで結果が改善された。全体の評価では、既報同様に Durbin モデル ($\alpha=0.8$) が最も良好な値を示したが、RNG モデルも概ね良好な結果となった。

(2) マルチブロック法による改善効果

風速ベクトル結果

棟付近の風圧係数予測精度に影響の大きい屋根面に注目すると、case1 の場合は棟を通過後も気流は屋根面に付着し流れ、剥離が棟を越えた位置で生じている。これに対して case2 では、棟部分で実験同様に剥離し、風速ベクトルの方向も実験と概ね対応した。

乱流エネルギー結果

実験では、k の高い領域が、風上屋根面の勾配に沿って上昇し、下流に行くにつれて水平に広がる傾向があり、ピークは棟よりもやや高い風下地点で発生している。case1 では k の高い領域がほぼ棟と同じ高さで水平に広がり、ピーク点も実験と近い位置で生じた。

風圧係数結果

風洞実験との比較を図 13 (最上段から、分割①、分割②、分割③の結果) に示す。最も粗い分割①について、屋根面を除く他の面の風圧係数分布は case1 では概ね実験値と対応しており、case2 及び細分割を施したモデルともほとんど差がない。一方、屋根面での風圧係数は実験と比べ全体的に低く、特に棟付近で極端な負圧が生じ、剥離が再現されていない。これに対し、case2 では、棟付近の極端な負圧がなく、屋根面風圧の予測精度に

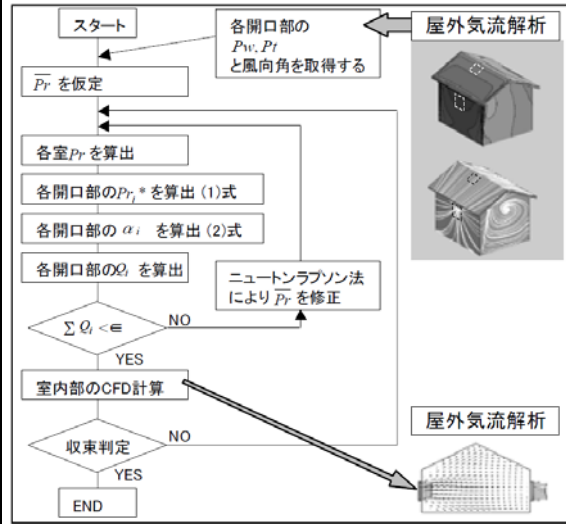


図 10 計算フロー

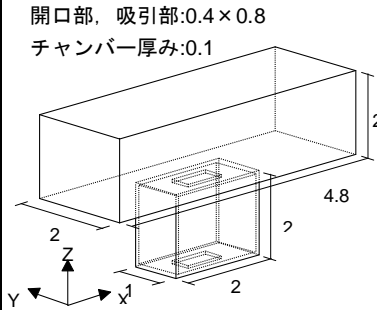


図 11 計算対象

表 5 吸引ケース

吸引量	吸引量
case0	0.0
case1	0.04
case2	0.08
case3	0.12
case4	0.20
case5	0.28
case6	0.40
case7	0.56

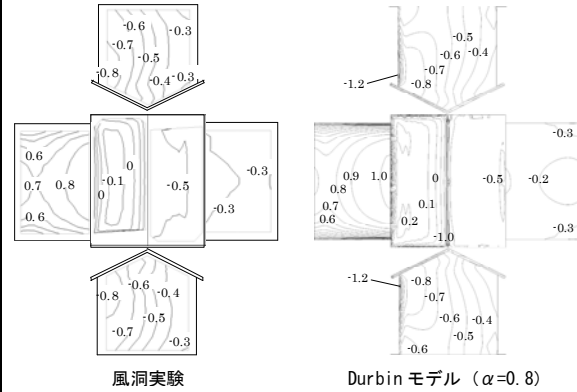


図 12 風圧係数分布の一例

表 6 標準偏差のまとめ

	標準	Durbin			RNG
		0.65	0.8	1.0	
正面	0.287	0.096	0.105	0.149	0.164
後面	0.067	0.073	0.070	0.067	0.072
側面	0.091	0.136	0.072	0.074	0.110
屋根面	0.148	0.074	0.079	0.106	0.095
全体	0.155	0.098	0.080	0.101	0.109

関し著しい改善が見られ、他の壁面において風圧係数は実験と比べ全体的に低く、特に棟付近で極端な負圧が生じ、剥離が再現されていない。これに対し、case2 では、棟付近の極端な負圧がなく、屋根面風圧の予測精度に関し著しい改善が見られ、他の壁面においても実験と良好な対応を示している。分割②にした場合、特に case1 の棟部分で改善が見られるものの、case2 に比べて精度は劣る。分割③では case1 の棟付近の精度が、大幅に改善され、case2 と遜色のない解となった。結果、case2 では、分割①の段階で十分な精度の解が得られている。棟付近の気流の流れに沿ってメッシュが配置されること、棟付近でメッシュの変形がない事などが原因と見られる。

(3) 周期境界条件の適用に関する検討

アルゴリズムによる結果はそれほど、大きくなかったが、SIMPLE 法では、収束しない計算条件のものもあった。PISO 法での風圧係数結果を乱流モデル別に比較すると、Durbin リミタ ($\alpha=0.65$) 以外は概ね、実験との対応は良好であった。風向角別の結果では、風上面における値が 0.1 程度高いという事以外は概ね良好な対応を見せた。

(4) 室内通風気流予測の精度検証

室内の風速ベクトル分布を図 14 に示す。全域 CFD の風向角 0° では、流入開口が中央から若干東側にずれた位置にあることから、流入後時計回りの旋回流が見られるが、領域分割法では開口部の境界条件に屋外解析から得た接線方向風速を与えているために同様の旋回流が再現できている。全域 CFD の風向角 45° では屋外風向に概ね平行して流入し、風向角 90° では、屋外の循環気流の影響で流入風向が西に傾いているが、領域分割法でも若干流入角は浅いものの同様の流入風向が再現できている。誤差は Pt の予測精度の影響と考えられる。図 15 に case3 の風向角 0° の結果を示す。全域 CFD の風向角 0° によれば天窓から法線方向よりやや北に傾いた方向に流入し、床に到達して拡散する様相となっているが、領域分割法でも概ね同様の気流構造が再現できている。その他の計算条件についても概ね対応した。

(5) 通風気流の圧力損失機構に関する研究

図 16 に、開口面からの法線方向距離の関数として、流管内での圧力・流断面積の変化の様相を示す。比較を容易にするため、ここでは開口部到達時の動圧 $P_N + P_t$ を基準圧力差、室内圧 P_R を基準圧力とする。この操作により、開口到達全圧 P_T は全圧損失係数を表すこととなる。また、図 17 では case2、case6 において、推定した流管形状をチャンパー開口中

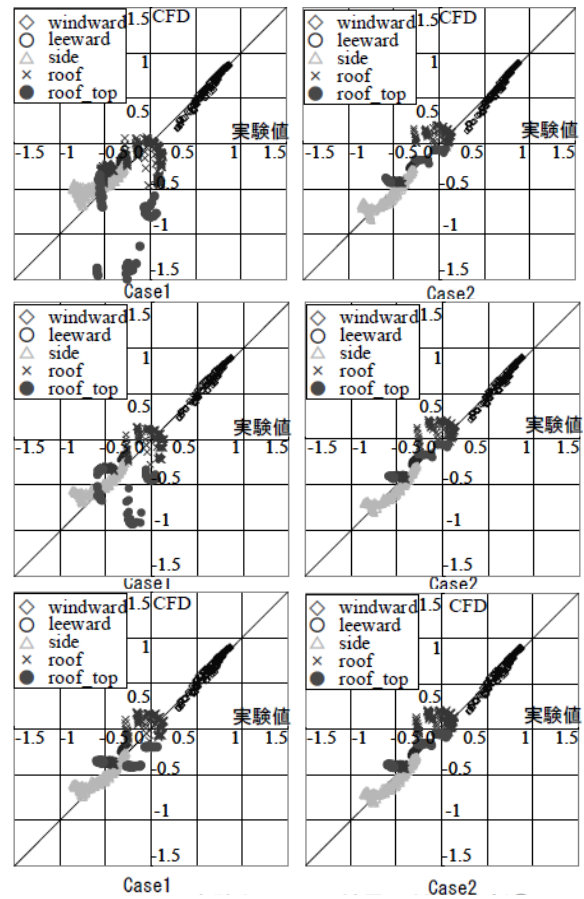


図 13 風圧係数の比較

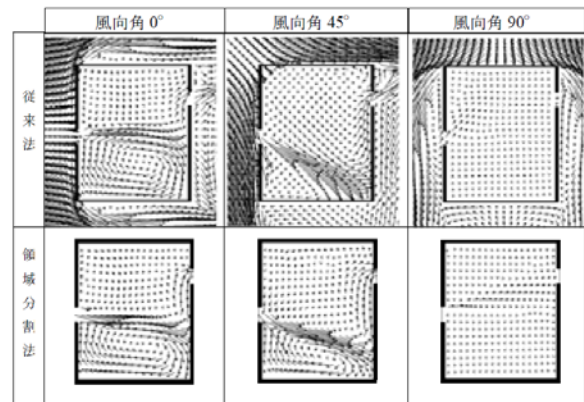


図 14 室内風速ベクトルの比較 (case1)

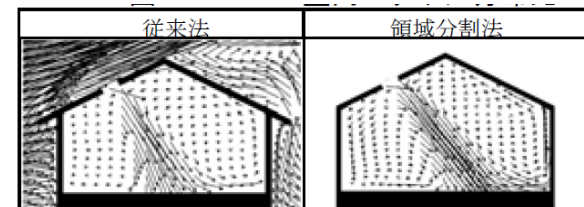


図 15 室内風速ベクトルの比較 (case3)

心鉛直断面における乱流エネルギーの生産項 P_k の空間分布上に重ねて示す。開口部通過時に流管形状の変化とともに断面積が縮小しており、縮流が生じていることが確認される。 P_t が小さく、概ね開口面法線方向に流入する場合、 P_t は下流に向かって穏やかに減少

するが、 P_N はこの縮流に伴い一旦増加し、その後緩やかに減少している。開口部静圧は、その半分が P_N の増加に転換され、流管内部に大きな P_k の分布が確認されることから、残りが乱流エネルギー生産に消費されている。一方、 P_t が大きい場合 ($|PR^*| < 1$)には、開口を通過する短い距離の間に流れの方向転換と U_t の減速による静圧取得が生じた。このプロセスにおいても全圧の低下が確認された。開口部通過後は、通風量が大きい場合と同様に縮流による P_N の増加が生じ、 P_S がこの過程で消費されている。図18に開口面での P_t 、 P_N 、 P_S を同様の基準化により求め、 P_R^* の関数として示す。 P_R^* が0に近くなると、流れの方向転換が生じることに関連し、 P_N に対し P_S が大きくなる傾向が見られ、これが流量係数低下の原因となる。

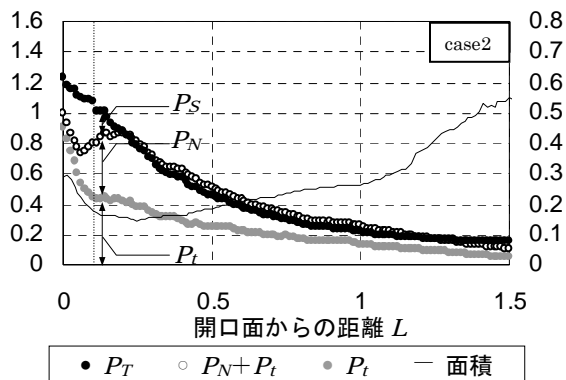


図16 流管内の圧力と断面積の推移

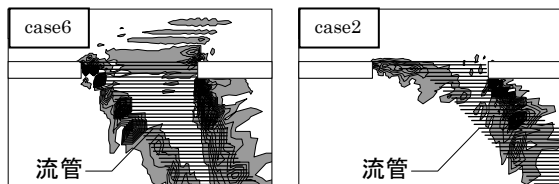


図17 流管形状と乱れの生産 (■... $P_k > 0$ の領域)

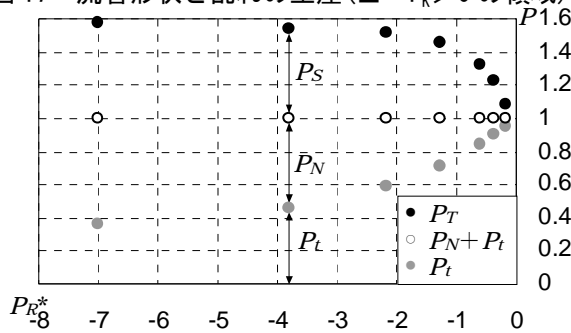


図18 流入開口での各圧力と P_R^* の関係

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① Tomoyuki Endo, Takashi Kurabuchi,

Toshihiro Nonaka, Yuiko Kadowaki and Masaaki Ohba, Numerical analysis of wind pressure distribution on a building in densely settled urban area by using CFD, Proceedings of Roomvent 2007, 査読有, vol. 1, 2007, pp. 253-261

[学会発表] (計5件)

①野中俊宏 他、CFDによる周期境界条件を用いた市街地建物の風圧係数分布予測に関する検討 その2 様々な住宅形状及び建蔽率における検討、日本建築学会大会、2008年9月19日、広島大学

②河内悠磨 他、領域分割法を用いた数値シミュレーションによる通風室内気流予測に関する研究、日本建築学会大会、2008年9月19日、広島大学

③門脇由以子 他、CFDによる周期境界条件を用いた市街地建物の風圧係数予測に関する検討、日本建築学会大会、2007年8月31日、福岡大学

④川瀬智文 他、CFDによる建物風圧係数分布の予測精度に関する研究 その4 複雑形状建物のための効率的な格子形状の検討、日本建築学会大会、2007年8月31日、福岡大学

⑤遠藤智行 他、CFDによる建物風圧係数分布の予測精度に関する研究 その3 格子再分割による改善効果、日本建築学会大会、2006年9月8日、神奈川大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

遠藤 智行 (ENDO TOMOYUKI)

関東学院大学・工学部・講師

研究者番号：90385534

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし