風洞実験およびCFDを併用した通風時の開口条件や主風向が異なる場合における建物内外の気流性状に関する研究

STUDY ON AIR FLOW CHARACTERISTICS OF CROSS-VENTILATION IN AND AROUND BUILDINGS FOR VARIOUS CONDITIONS OF OPENINGS AND DIFFERENT ANGLES OF APPROACHING WIND USING WIND TUNNEL EXPERIMENT AND CFD SIMULATION

飯野 由香利*, 倉 渕 隆**, 小林 信行***, 嵐 口 晃 宏****

*Yukari IINO, Takashi KURABUCHI, Nobuyuki KOBAYASHI
and Akihiro ARASHIGUCHI*

Air flow characteristics of cross-ventilation in and around 5 types of building models were examined in this paper. The examination cases of cross-ventilation were changed by the conditions of the openings and the angles of the approaching wind. Both methods of wind tunnel experiment and numerical simulation were employed. The air flow characteristics were discussed from the following 5 viewpoints: ventilation rate, main air flow path, wind pressure coefficient distribution, air velocity distribution and coefficient of pressure loss. The following findings were obtained: 1) The difference of wind pressure coefficient among models is within 0.2, even though the conditions of the openings were different and overall flow exhibits no substantial change around the building when the angle of approaching wind was 0°. The air flow passing through the windward opening ran downward. The coefficients of pressure loss of windward and leeward openings were not different. 2) The ventilation rate in 0 ~ 45° angles of approaching wind was decreased in small amount and pressure coefficient was decreased with the increase of the angle of approaching wind by every 22.5°. The air flow keeping approaching wind direction ran straight after entering the windward opening.

keywords: cross-ventilation, condition of opening, angle of approaching wind, air flow characteristics, wind tunnel experiment, computational fluid dynamics
通風, 開口条件, 風向角度, 気流性状, 風洞実験, 数値流体力学

1. はじめに

夏季に蒸暑気候となる地域での冷房のない居室では、通風が冷却手段の一つとなる。居住者にとって、効果的に通風を得ることは快適性の向上に大いに貢献すると考えられる。しかし、効率的に通風を得る方法やよい通風環境を形成する手法は、通風時の気流性状が十分把握されていないことから、明確には示されていない。

通風時の気流性状の解明の方法としては、風洞実験と数値シミュレーションがある。風洞実験は多大な時間と労力を要する上に、主風向の特定できない空間における静圧測定や全圧測定などは困難である。一方、数値シミュレーションには、乱流モデルが持つ問題点があるのに加えて不用意に適用すると差分スキームに伴う数値的エラーや格子分割の粗密などが解に重要な影響を与えうる¹⁾。しかし、数値シミュレーションでは詳細な空間分布が得られることに加え、任意の地点の全圧・静圧・動圧の算出が可能であることなどの利点があり、現段階では風洞実験と相補的に利用するのが得策と考えられる。建物内外の気流性状をいずれかの手法のみで解明することは困難であることから、両者の問題点を考慮しながら如何に併用するかが当面の課題となる。

通風時の気流性状に関する既往研究^{1)~10)}の中で実験的検討を主体とした研究では、開口位置や開口面積の相違や間仕切りの有無な

どの開口条件に着目したものが多く、検討項目も通風量、通気輪道、風圧力および圧力損失係数など多岐に渡っている。一方、数値シミュレーションを適用した研究では実験との対応をみることや現象の把握などに留まっている。特に、通風量の算出に関しては、すきま風を対象にした換気量計算法との相違点や問題点が指摘されているものの、その計算方法は確立されていない。また、通風現象を解明するには、通風量や通気輪道、風圧力および圧力損失係数などの個々の観点から検討するのみならず、これら相互の関連性を考察して総括的に捉えることが重要であると考ええる。

本研究では、以上を背景とし、単室で風上側および風下側壁面のほぼ中央に開口がある建物模型を用いて、開口条件の相違と主風向角度が異なる場合における通風時の建物内外の気流性状を、風洞実験と現在最も一般的に利用されているk-ε乱流モデルに基づく数値シミュレーションを併用して、通風量、通気輪道、風圧係数分布、および風速分布の観点から考察する。さらに、得られた知見に基づいて圧力損失係数や換気量計算法について再検討する。

2. 風洞実験と数値シミュレーションの概要

2-1 風洞実験および建物模型の概要

本研究では、東京工芸大学工学部所属の境界層風洞（高さ1.2m ×

* 東京理科大学 嘱託補手・工修

** 東京理科大学 助教授・博士(工学)

*** 東京工芸大学 教授・工博

**** 東京理科大学 大学院生

Research Assoc., Science University of Tokyo, M. Eng.
Assoc. Prof., Science University of Tokyo, Dr. Eng.
Prof., Tokyo, Institute of Polytechnics, Dr. Eng.
Graduate Student, Science University of Tokyo

幅1m)において、①壁面風圧、②通風量、③模型内平均風速分布の測定、および④可視化実験を行った。アプローチフローは1/4乗則に従う風速分布とした。建物外部の風速測定にはサーミスタ型風速計を用いた。

本研究で設定した建物模型は図1に示すように外形寸法は模型高さ(以下Hbとする。実寸15cm)を基準にした1(高さ):2(幅):2(奥行き)の単室模型で、壁面の厚さは1/20 Hb(0.75cm)である。5種類の模型は建物内外の気流性状に大きく影響すると考えられる開口の有無や開口面積といった開口条件の相違に着目して作成した。MAS模型は外壁面の風圧力を捉えることを目的とした開口がない模型である。SS模型とLL模型はS開口(0.2Hb×0.4Hb)またはL開口(0.4Hb×0.8Hb)を風上側の壁面と風下側の壁面(以下、風上・風下面と称する)の中央に設けた模型で、LS模型は風上面にL開口を風下面にS開口を設けたものである。これらの模型は倉渕ら²⁾が数値シミュレーションで取り扱った建物モデルと同一形状である。さらに、KY0模型は学校の教室と廊下を模擬したものである。教室や廊下に設置されているほとんどの開口は引き違い窓や戸であることから、窓の半面が一律同じ側に開放されるとした。

測定点位置、測定点列の名称と測定点の番号、および測定時の主風向を図2に示す。風圧測定点の内訳は、風上・風下面の内外壁の中心軸列で5点以上、中心軸列以外の各々の列に5点、屋上面の中心軸上に7点、天井面や床面の中心軸上に5点、各開口近傍に数点とした。なお、側面の測定に関しては、風向を変えた際の風上・風下面の測定により代用できることから省略した。4種類の各々の実験で使用した建物模型と主風向角度を表1に示す。

2-2 実験方法

a. 壁面風圧測定 境界層外部のピトー管静圧を基準圧力として用い、基準動圧は模型がない状態の模型高さでの風速から求めた。模型高さおよび同風速に基づくRe数は約67,000とした。主風向角度に関しては、気流の主方向と建物模型の開口部法線方向が一致した場合を風向0°とし、両者の成す角度を風向角度とした。風向0°でMAS、SS、LL、LS模型を対象に開口条件の相違による風圧係数の差を、MAS、SS、KY0模型を用いて風向0~90°間に22.5°ずつ異なる場合における風圧係数の相違を検討した。

b. 風下側開口での通風量測定 風下側の開口(以下、風下開口と称する)の風下側の地点において通風量評価のための平均風速測定を行った。風下開口がS開口とL開口の場合には風下開口を仮想的に1cm×1cmの正方形に、KY0模型の開口の場合には0.9cm×0.75cmの長方形に分割し、これらの分割領域の中心点にサーミスタ型風速計を設置して平均風速を測定した。通風量は測定した平均風速と風下開口面積との積から求めた。風速測定点数は、S開口(SS、LS模型)で18点、L開口(LL模型)で72点、KY0模型で3開口の合計で150点である。

c. 建物内風速分布 通気輪道を把握するための模型内平均風速分布を測定した。LL模型とSS模型内の高さ方向と通気方向1.5cm毎の位置に指向性がほぼ無視できることを予め確認した熱式流速計プローブを設置して時間平均風速を測定した。風向は0°と45°に限定した。図3に測定点の位置を示す。測定点数は主風向0°で113点、主風向45°で30点となる。

d. 可視化実験 全模型を対象に、螺旋状に巻いた針金を風上開口

図1 建物模型

図2 主風向と風圧係数測定位置

表1 各実験での使用模型と主風向角度

風圧係数測定	MAS 0~90° SS 0~67.5° LL 0°, LS 0° KY0 0~90°
風下開口通風量	SS 0~45° LL 0°, LS 0° KY0 0~45°
模型内風速分布可視化実験	SS 0°, 45° LL 0°, 45° MAS 0°, SS 0° LL 0°, LS 0° KY0 0°

図3 模型内平均風速の測定位置

直前に設置し、流動パラフィンを常時流して5秒毎にスライダックで電圧を上げて発煙させる流動パラフィンミスト法で可視化した。

2-3 数値シミュレーションの概要

数値シミュレーションでは壁厚も含め風洞実験と同一の模型を対象とした。全体の格子分割は図4に示す80(x)×80(y)×39(z)となり、模型部での格子分割は40(x)×40(y)×20(z)となる。MAS模型とKY0模型、および風向22.5~90°でのSS模型の場合の計算は全領域で行い、風向0°でのLL、LS模型およびSS模型の場合には対称性を考慮して半領域のみを計算した。なお数値シミュレーションにおける風向は、流入境界での水平面内の2方向風速成分として、風向角度に応じた流入風速のベクトル成分を与えることにより変化させた。

軒高高さで基準化した流入境界における平均風速、乱れの長さスケールおよび乱れの統計量の鉛直分布を図5に示す。これは風速分布を既知として鉛直方向以外の微分を0としてk-ε輸送式の解を数値的に求めたものである。計算領域の上空面、側面、流出境界条件は圧力型境界条件とし、壁面や地表面および床面は1/4乗則の仮定に基づく壁関数で処理した。

乱流モデルは標準k-ε乱流モデルを用いた。通風のような流れ場のエネルギー収支が重要な流れにおいては運動方程式移流項の差分スキームの適否が数値シミュレーション結果に与える影響は大きいと考えられる。そこで本研究では、LL模型のエネルギー収支につ

いて、いくつかの差分スキームを用いてその影響について検討した。結果を表2に示す。室内エネルギー損失を流入・流出開口部における全圧差で定義した場合、その主要成分は乱流エネルギーの粘性散逸の空間積分値であり、両者の比(②/①)は数値的なエネルギー散逸の大きさにより影響を受ける。数値粘性が小さい差分スキームほど両者の比は1に近くなり、通風量も多い。但し、中心差分の場合、物理的に不合理なwiggleが避け難いこと、QUICKの結果と大きな差はないことからQUICKを以下の解析に用いることとした。また、結果の詳細を省略するが、 k と ϵ の輸送方程式の移流拡散項については、係数の非負条件を満たす数種類のスキームをテストしたが大差なかった。これらの中では最も数値粘性が小さいと考えられるPLDS(べき乗法)を用いることにした。なお、その他の差分スキームは中心差分を用いた。

次に、メッシュ分割が数値シミュレーション結果に及ぼす影響について検討した。図6にLLモデルの風上開口と風下開口間の半領域のメッシュ分割が異なる4つのケースを表す。ケース4を基準にすると、ケース1は3軸のメッシュを、ケース2は風上開口部のみのY軸とZ軸のメッシュを、ケース3は風上開口のエッジ部の3軸のメッシュを2分の1に分割した場合である。最もメッシュの細かいケース1を基準として表3に示す通風量、平均風速および乱れの統計量を比較すると、渦動粘性係数についてはメッシュ分割による差はない。ケース2とケース4の乱れの統計量の割合は類似しており、風上開口の乱流エネルギーと粘性散逸率が8割とやや低めであることを除くと、これらのケースとケース1との差は1割程度となる。また、ケース3では通風量や平均風速が15%高い。このように、今回検討した範囲のメッシュでは数値解は未だメッシュに依存していると考えられるものの、その違いは概して小さく、問題点を把握しつつ注意深く用いていこうとする本研究の主旨では、ケース4のメッシュで十分と判断した。

3. 気流性状の解析方針に関する検討

風洞実験結果と数値シミュレーション結果との対応関係について通風量、通気輪道、風圧係数の3つの観点から検討し、建物内外の気流性状を解析する方針について考察する。

3-1 通風量、通気輪道、風圧係数からみた対応関係

風洞実験と数値シミュレーションで求めた通風量を表4に示す。通風量は建物高さでの平均風速と建物高さで基準化した。各モデルの数値シミュレーションによる通風量と風洞実験の通風量とを比較すると、LLモデルを除き前者は後者の8~9割程度である。通風のよう開口部付近で主流方向の流れの加減速が大きい場合には、通風量の相違の一要因として、 k - ϵ モデルにおける法線応力の評価精度の問題が挙げられる。概して、両者による各モデルの通風量の大小の順序は一致することから、数値シミュレーションは少なくとも大局的な通風の様相を捉えていると見なしうる。

図7と図8は、主風向角度が 0° と 45° の場合におけるSSモデルとLLモデルの中心軸上鉛直断面でのスカラー平均風速分布を示す。平均風速の分布については、軒高高さでのアプローチフローの平均風速で基準化したスカラー平均風速で考察する。主風向 0° での両者の結果を比較すると、実験では両模型内に流入した気流は風上開口通過直後に下降するのに対し、数値シミュレーションではSS模型内

図4 格子分割

図5 平均風速、乱れの長さスケール、乱れの統計量の鉛直分布

表2 差分スキームを変化させた場合における数値シミュレーションによるエネルギー保存性と通風量の比較(運動方程式をQuick一定)

差分スキーム	中心	QUICK	PLDS	ハイリット	一次風上
①全圧差に基づく室内エネルギー損失	0.0374	0.0361	0.0359	0.0358	0.0359
②室内の乱流エネルギー消散率の合計	0.0326	0.0299	0.0275	0.0282	0.0239
②/①(%)	87.0	82.8	76.6	78.8	66.6
風上・風下開口での通風量	0.195	0.191	0.182	0.182	0.176

図6 LLモデルの風上開口から風下開口間の半領域におけるメッシュ分割の種類(4ケース)

表3 メッシュ分割のケース毎にみた開口部における半領域での通風量、平均風速および乱れの統計量

メッシュ分割	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
乱流統計量	風上開口風下開口	風上開口風下開口	風上開口風下開口	風上開口風下開口
メッシュ分割	10×53×53	86×63×49	86×44×43	80×42×39
通風量	0.091 1.000	0.095 1.051	0.104 1.141	0.096 1.053
平均風速	0.567 1.000	0.596 1.051	0.647 1.141	0.598 1.053
乱流エネルギー	0.075 1.000	0.058 0.779	0.073 0.974	0.066 0.887
粘性散逸率	0.189 1.000	0.064 0.721	0.170 0.899	0.132 0.698
渦動粘性係数	0.003 1.000	0.002 0.667	0.003 1.000	0.003 1.000

※渦動粘性係数=Cd*(乱流エネルギー)

※長さスケール=Cd*(乱流エネルギー)^{2/3}/粘性散逸率

各乱流統計量の下段: ケース1を基準にした場合の割合

表4 風洞実験と数値シミュレーションによる通風量

模型	SS			LS	LL	KYO		
風向	0°	22. 5°	45°	0°	0°	0°	22. 5°	45°
風洞実験	0. 0459	0. 0448	0. 0419	0. 0645	0. 1928	0. 3046	0. 2905	0. 2198
数値シミュレーション	0. 0398	0. 0368	0. 0274	0. 0584	0. 1912	0. 2497	0. 2320	0. 1779
	(87)	(82)	(65)	(91)	(99)	(82)	(80)	(81)

※通風量は建物模型高さでの風速、高さで基準化

※()内は風洞実験での通風量に対する数値シミュレーションでの通風量の割合(%)

での気流は緩やかに下降し、LL模型内の気流はほぼ直進してそのまま風下開口より流出する。また平均風速をみても、実験では風上開口流入直後0.7と高風速であるものの、奥行き中央の中心高さ地点においてはLL模型で0.25、SS模型で0.2と減速するのに対して、数値シミュレーションではLL模型で0.6、SS模型で0.4で奥行き中央地点まで高風速が維持される。このように、通気輪道をみても数値シミュレーションは流れの様相を十分に再現できていない。一方、

風向45°の通気輪道は実験と数値シミュレーションとともに開口の大きさにかかわらず直進する。

なお、LL 模型での実験による通風量が数値シミュレーション結果と99%と見かけよく合う理由は、 $k-\epsilon$ モデルの不備により通風量が過小評価される分と実験での気流の下降によるエネルギー損失がほぼ見合ったためと考えられる。他ケースでは数値シミュレーションは通風量を実験より過小に評価しているが、特にSS45°の場合、通気輪道が同様な傾向を示しているにもかかわらず、数値シミュレーションによる通風量は65%となっている。

次に、風圧係数の対応関係について検討する。各模型の風向毎にみた各面での風圧係数の平均と各面測定点の数値シミュレーションによる風圧係数から実験で得られた風圧係数を差し引いた差の平均と標準偏差を表5に示す。風向を変えても大半は0.11以内の相違に収まる。実験による風圧係数の方が大きい。乱流モデルの不備を考慮すると、風圧係数については実験と数値シミュレーションは比較的良く対応すると思われる。MAS 模型とSS 模型およびLS 模型と同様に両者の風圧係数は良く対応する。風向が67.5°と90°の場合には外壁面や屋上面で0.1以上の差がある。開口面積が大きく通気輪道も複雑な様相を呈すると考えられるKYO 模型の場合においても差の平均は0.183以内に収まり、風上面の端部に位置する点における数値シミュレーションによる風圧係数は実験値よりかなり大きい傾向がある。

以上、風洞実験と数値シミュレーションによる結果との対応関係を考慮した結果、通風量や通気輪道は十分に再現できておらず、風圧係数は局所的な対応は良くないものの全体的な分布の傾向は捉えていることから、以降の解析では通風量、通気輪道、風圧係数は主に実験結果を用いて考察し、実験で得られない等風速分布や風速ベクトルや全圧・動圧・静圧等については妥当な範囲で数値シミュレーションによる結果を補足的に活用することにより建物内外の気流性状を把握することとする。

3-2 風洞実験と数値シミュレーションの結果を併用した気流性状の把握

上述した解析方針に基づいて、開口のない建物（MAS 模型）の外壁面における風圧力を風圧係数分布から把握すると共に、数値シ

ミュレーションによる建物外部の風速分布との関係を考察することにより建物外部周辺の気流性状を解明することを試みる。図9にMAS 模型の各面の対称片面における実験による風圧係数分布（図中、四角内の数値）と数値シミュレーションによる風圧係数分布および数値シミュレーションで求めた壁近傍の風速ベクトルと等風速線図を示す。風上面の風圧係数分布（図中a）をみると、正圧であり床面より0.8Hb付近の高さでの風圧係数は概ね0.8程度と最大となり、この付近がよどみ点となる。よどみ点より上部では建物の頂端部に向って風圧係数が急激に小さくなり、下部では下に行くほど風圧係数が小さくなるものの、最下端では風圧係数がやや大きくなる。風速ベクトル図からもよどみ点において気流は上下に分流し、上昇流は頂端部に達し、下降流は壁沿いに下方や斜め下方向に流れ、最下

図7 実験と数値シミュレーションによる主風向0°でのSSとLL模型内の平均風速分布

図8 模型内風速測定と数値シミュレーションによるLL模型とSS模型内の平均風速分布

表5 各風向における模型毎の風洞実験と数値シミュレーションによる風圧係数の差の平均と標準偏差

模型	角度	風上面		風下面		屋上	天井	床	模型	角度	風上面		風下面		屋上	天井	床	間仕切り		
		外壁	内壁	外壁	内壁						外壁	内壁	風上側	風下側						
MAS	0°	0.471	—	-0.1736	—	-0.475	—	—	SS	22.5°	0.469	0.133	-0.2882	0.141	-0.5237	0.143	0.143	—	—	
		0.053	—	-0.025	—	0.075	—	—			-0.005	-0.024	-0.021	0.004	0.005	-0.007	-0.01	—	—	
		0.098	—	0.033	—	0.165	—	—			0.089	0.017	0.037	0.048	0.162	0.01	0.012	—	—	
SS	0°	0.334	0.240	-0.1866	0.256	-0.5044	0.247	0.271		45°	0.325	-0.054	-0.454	-0.0518	-0.47	-0.065	-0.064	—	—	
		-0.061	-0.013	0.069	0.019	0.052	-0.017	0.026			0.026	-0.014	-0.003	0.043	-0.023	-0.023	-0.023	—	—	
		0.105	0.012	0.068	0.021	0.147	0.015	0.026			0.094	0.04	0.087	0.05	0.157	0.018	0.01	—	—	
LL	0°	0.437	0.258	-0.1667	0.327	-0.4466	0.273	0.335		67.5°	-0.0087	-0.2776	-0.5855	-0.2753	-0.3104	-0.271	-0.275	—	—	
		-0.021	—	-0.003	—	0.095	—	0.083			-0.004	-0.002	—	0.001	-0.004	—	—	—		
		0.128	0.016	0.028	0.081	0.161	0.032	0.064			0.111	0.036	0.129	0.037	0.096	0.029	0.008	—	—	
LS	0°	0.486	0.684	-0.1835	0.670	-0.484	0.672	0.7		KYO	0°	0.599	0.317	-0.1821	0.257	-0.4046	0.359	0.348	0.449	0.233
		0.043	-0.027	-0.02	-0.007	0.068	-0.045	0.087				0.031	0.028	-0.016	-0.046	-0.076	-0.054	-0.052		
		0.122	0.028	0.064	0.06	0.159	0.025	0.029				0.087	0.031	0.028	0.067	0.171	0.139	0.041	0.042	0.026
MAS	22.5°	0.402	—	-0.2717	—	-0.514	—	—	22.5°		0.214	-0.0563	-0.3683	-0.0678	-0.3506	0.163	0.171	0.065	-0.1024	
		-0.008	—	-0.013	—	0.063	—	—			—	-0.032	-0.079	-0.034	—	—	-0.027	-0.056		
	0.098	—	0.037	—	0.15	—	—	—	0.152		0.08	0.046	0.055	0.28	0.111	0.049	0.047	0.023		
	45°	0.275	—	-0.442	—	-0.4479	—	—	45°		0.214	-0.0563	-0.3641	-0.0678	-0.3837	-0.0796	-0.0442	0.065	-0.1025	
		-0.053	—	0.034	—	0.033	—	—			—	-0.032	-0.096	-0.05	-0.027	-0.056	0.038	-0.088	-0.085	
	0.112	—	0.05	—	0.173	—	—	—	0.152		0.08	0.104	0.106	0.047	0.022	0.139	0.057	0.023		
	67.5°	0.006	—	-0.5316	—	-0.3003	—	—	67.5°		-0.0174	-0.2347	-0.3669	-0.1943	-0.1689	-0.2262	-0.2063	-0.1054	-0.2192	
		—	—	-0.042	—	—	—	—			—	-0.034	0.02	-0.036	0.034	—	-0.005	0.017	0.073	0.015
90°	0.097	—	-0.114	—	0.091	—	—	90°	0.086		0.045	0.059	0.038	0.109	0.063	0.007	0.123	0.024		
	-0.3396	—	-0.3242	—	-0.3029	—	—		—	-0.3576	-0.3491	-0.3259	-0.3183	-0.1938	-0.313	-0.32	-0.2915	-0.2758		
	—	—	—	—	0.085	—	—		—	0.016	0.034	0.04	0.061	—	0.012	0.068	0.089	0.097		
		0.099	—	0.1	—	0.026	—	—			0.085	0.027	0.095	0.111	0.066	0.098	0.019	0.022	0.038	
上段：風圧係数の平均値 中段：差の平均値（網掛け：0.1以上の差） 下段：差の標準偏差

図9 風洞実験と数値シミュレーションによるMAS模型の各面および周辺の風圧係数分布と風速分布および全圧分布

端で地面の影響により循環流が生じている様相が把握できる。また、風上面の下方端部では急激に風圧係数は減少し、負圧になっている。風速ベクトル図から、この部分での気流は斜め方向から加速しており、動圧が大きくなっている。図中(e)はMAS模型の風上面における全圧の等値線(模型高さでの動圧で基準化)を示す。アプローチフロー(建物高さの1.3倍の距離の前方地点)における全圧分布を点線で、風上面での全圧分布を実線で表す。端部ではやや小さくなるものの各高さにおいてほぼ一様である。風速分布をみると負圧地点では極端に加速され風速が0.8～1に達しており、同一高度のアプローチフローの速度より大きい。全圧はほとんど変わらないにも関わらず、動圧にかなりの差があることから、両端下部では静圧が負圧になるまで低下したと考えられる。

一方、風下面での風圧係数(図中b)は高々-0.2程度で分布は小さく、ほぼ一様である。屋上を通った気流は風下面後方で逆流して循環流を生じるが風下面の中心軸下部に達した後には上方、上方斜め、および横方向に分岐している。さらに、側面や屋上面での風圧係数(図中cとd)は風上面での剥離の影響を受けて、最大-1.1と-0.8となる。側面での風圧係数は風下側ほど小さくなる。

以上、開口がないMAS模型の外壁面における風圧力や壁面周辺での気流性状を風洞実験と数値シミュレーションを併用することにより解明した1例を示した。以下、開口条件の相違や主風向の相違による建物内外の気流性状の変化について検討する。

4. 開口条件の異なる建物内外の気流性状の把握

4-1 開口条件の異なる建物での通風量、通気輪道、風圧力の様相

開口が壁面中央に位置し、風上・風下面の開口面積率が4%と16%であるSS、LS、LL模型、およびMAS模型を用いて風向0°の場合における各建物模型の実験で得られた通風量、通気輪道、風圧係数分布について考察する。表4より、各建物模型の通風量の多い順はLL、LS、SS模型である。SS模型を基準とした場合、LL模型とLS模型の通風量はSS模型の通風量の4.10倍と1.42倍である。これは換気量計算で求められる4倍、1.37倍と多少異なる。図7でのSS模型とLL模型内風速測定結果をみると、LL模型の風上開口での平均風速はSS模型のそれより0.15速く、風上開口を通過した気流は徐々に減速して緩やかに下降するのに対して、SS模型の場合には急

激に減速して下降する。このように開口条件により多少の相違はみられるが、室内空間における気流の様相の変化は大略一致する。

SS、LS、LL模型、およびMAS模型の中心軸上鉛直断面の風圧係数を図10に示す。各外壁面における各模型の風圧係数の差は0.2以内に収まる。MAS、SS、およびLS模型の風上面の風圧係数はほとんど変わらない。LL模型の風上面での風圧係数は他模型の風圧係数より0.18小さい。一方、天井面や床面での風圧係数は概ね均一である。LS模型の場合には0.7前後となり、他模型の風圧係数の0.2～0.4と比べると大きい。

4-2 開口条件の異なる建物内外の気流性状

数値シミュレーションにより求めた風速分布を踏まえて実験結果を検討することにより、開口条件の異なる建物模型内外の気流性状を明らかにする。MAS模型に対する他の模型の平均風速と風速ベクトルとの差を中心軸上鉛直断面で表したのが図11である。実験と数値シミュレーションによる風圧係数の分布の対応関係が良いことから、模型外部の気流性状は概ね再現されていると考えられる。建物外部の気流性状の差はLL模型の風上開口周りや風下開口流出後の気流にみられるものの、その他の外部空間には大きな差はなく、局所的な範囲に限定されている。これは開口条件が異なるにも関わらず壁面や屋上での風圧係数の差が小さいという知見と共通する。一方、LL模型の風上開口前の気流の風速は速く、開口周辺の気流にも影響を与えている。これは多量のアプローチフローが開口から流入して風上開口付近での気流の勢力が相対的に小さくなったことから、LL模型の開口周辺の風圧係数が他の模型よりやや小さくなったためと考えられる。

一方、建物模型内部の気流性状については、実際の気流の様相変化が再現されていないものの、その特性は開口条件によって大きく異なることが予想される。LS模型ではSS模型と同様に流入気流の急激な下降が認められる。

以上、開口条件の相違による建物内外の気流性状の相違を整理すると、①建物外部の気流性状は風下開口の後部などの局所的な空間で多少変化するものの、その他の外部空間では大局的な相違はないこと、②建物内部では流入気流が下降して動圧が消失し、風下開口で再加速して流出する気流の様相変化がみられること、および③通風量は当然ながら開口面積が大きいほど大きく、これが開口部や建

物内気流の風速に大きな影響を与えることが明らかになった。

4-3 開口条件の異なる建物における開口部での圧力損失係数

次に、換気量計算法の原点に立ちかえり、開口部前後の全圧差に着目して開口条件の相違による風圧力差について実験結果を用いて考察する。風向 0° の場合には、換気量計算法および全圧差は以下の式(1)と式(2)で表せる。式(2)は開口前後を通過する流管前後の全圧差が開口部を通過する平均風速に基づく動圧に比例し、下流側で動圧がなくなるという仮定に基づく。

$$Q = \alpha A \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta P} \quad \dots (1) \quad Q: \text{通風量 (m}^3/\text{s)} \quad A: \text{開口面積 (m}^2)$$

α : 流量係数 ΔP : 開口部前後の全圧差(N/m²)

$$\Delta P = P_{\text{風上}} - P_{\text{風下}} = \zeta \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q}{A} \right)^2 \quad \dots (2) \quad \zeta: \text{圧力損失係数}$$

$$\text{風上開口前後の全圧差} \quad \Delta P = P_{\text{up}} - P_r = \zeta \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q_{\text{up}}}{A_{\text{up}}} \right)^2 \quad \dots (3)$$

$$\text{風下開口前後の全圧差} \quad \Delta P = P_r - P_{\text{dn}} = \zeta \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q_{\text{dn}}}{A_{\text{dn}}} \right)^2 \quad \dots (4)$$

P_{up} : 風上壁面全圧 P_r : 天井面と床面の静圧の平均

P_{dn} : 風下壁面全圧

今回は式(2)を風上、風下の各開口部に適用した式(3)、(4)を用いて各開口部における圧力損失係数の算出を試みた。なお、式(4)では風下開口での上流側の全圧として室内静圧を用いているが、これは風上開口から流入した気流は床方向に下降して運動量が拡散し、し

かる後に風下開口部付近にて再加速する様相が実験的に確かめられているので、通風気流の動圧による影響は無視できると考えたためである。なお、風上開口での上流側の圧力や風下開口での下流側の圧力としては、MAS 模型における開口部相当地点中心の壁面風圧を用い、図9の(e)に示したように、風上面の壁面風圧はアプローチフローの全圧に近似するとした。風上開口での下流側の圧力としては室内への通風を自由空間への噴流として捉えて開口部より十分隔離して動圧が仮想的に消失した地点の全圧（即ち静圧）の近似値と考え、風下開口での上流側の圧力としては前述したように動圧による影響はないと考えて室内静圧を用いた。

図12は各模型の風上・風下開口での圧力損失係数を表す。風下開口での圧力損失係数は1.5程度で開口条件の相違による差はない。SS 模型とLL 模型の場合、風上と風下開口での圧力損失係数はほとんど変わらない。LS 模型の場合には、風上開口での圧力損失係数が見かけ上小さい理由として、風上面の風圧と室内での全圧との差が小さいために建物内外の圧力差が小さくなり、相対的に測定誤差が過大評価されたためと考えられる。なお、流量係数は0.9前後となり、隙間風を対象に常用される0.6～0.7より大きい。

5. 主風向が異なる場合における建物内外の気流性状の把握

主風向が 22.5° ずつ変化した場合における建物内外の気流性状の相違を把握する。

5-1 主風向が異なる場合における各建物での通風量、通気輪道、および風圧力の様相

SS 模型と KYO 模型において主風向が $0 \sim 45^\circ$ 間に 22.5° ずつ変化した場合の風下開口での通風量を表4に示す。風向角度が大きくなるに伴い減少する傾向がみられる。SS 模型の場合、風向 0° での通風量を基準にすると、風向 22.5° で3%、風向 45° で9%減少する。これは赤林らの研究⁵⁾で『風向が $0 \sim 45^\circ$ まで変化しても通風量は殆ど減少しない』という知見とも一致する。一方、KYO 模型で風向 0° での通風量を基準にした場合の風向 22.5° と 45° の通

図10 開口条件が異なり風向 0° の場合における中心軸上鉛直断面の風圧係数

図12 各模型の風上・風下開口での圧力損失係数

建物模型内の気流分布はSS、LL、LS模型内の気流分布に相当する。

図11 MAS 模型と他模型との気流分布の差

風量は5%と28%減少する。

一方、通気輪道についてみると、図8に示す風向45°でのSS模型とLL模型内の通気輪道と風向45°のSS模型での数値シミュレーションによる通気輪道を見ると、両者とも直進している。これは風向0°の場合に、流入気流が下降する現象と異なる。

次に、SS模型の中心軸上鉛直断面と風上面の中央高さでの水平面の風圧係数分布を図13に表す。いずれの面においても風圧係数は風向角度が増加するほど小さくなる。風向0°と22.5°での内外壁面の風圧係数は近似しているが、風向45°と67.5°での風圧係数とはおよそ0.3と0.5小さい。室内の風圧係数分布は一樣であり、風向45°や67.5°では負圧となる。

5-2 主風向が異なる場合における建物内外の気流性状

主風向が風上面に正対しない場合における気流特性について、数値シミュレーションによる風速分布図を参照して検討する。図14は各主風向でのSS模型の風上面における風速分布を表す。風向0°～22.5°では鉛直方向の気流成分が大きい、風向が45°以上になると壁に沿った水平成分が卓越する。風向0°の場合において通気輪道が下降するのは風上開口に流入する鉛直成分の影響があると考えられ、風向45°の場合には流入気流の鉛直成分は非常に小さい。

図15は各風向におけるSS模型の中央高さでの風速分布の水平面を示す。いずれの風向でも流入気流はアプローチフローの方向を維持して直進し、側壁に到達後、緩やかに風向を風下開口に転じて加速して流出する様相がみられる。風向22.5°の場合、室内気流は反時計回りの循環流となり、循環の中心が室中央に認められる。これらの気流性状の様相から、風向45°での通気輪道が直進すること、および風向角度が大きくなるに伴い風圧係数が小さくなることが裏付けられる。

5-3 主風向が異なる場合における開口部における圧力損失係数

5-1と5-2で把握した気流特性を踏まえて、換気量計算法に用いるいくつかのパラメータについて考察し、主風向角度(ω)が異なる場合における風上・風下開口での圧力損失係数について検討する。

風上開口から流入する気流はアプローチフローの風向を概ね維持することから、風向角度が大きくなると流断面積が小さくなると考えられ、動圧を風量/開口面積で与えられる風速を用いて求めることにより誤差が生じる可能性がある。従って、風上開口からの流入方向がアプローチフローの風向に一致したとした場合、風上側の開口面積Aは流入気流の流断面積をアプローチフローに正対する面に投影した面積に相当する $a=A\cos\omega$ …(5)となることが考えられる。これを相当流断面積と称することとする。

また、風向0°の場合には風上面の風圧はアプローチフローの全圧に近似するとしたが、0°以外の風向の場合には異なるのが自然である。そこで、SS模型を対象に風上・風下開口での圧力損失係数について検討する。図16は風向0°～45°までについて室内圧を基準にした風上開口と風下開口での圧力を開口部の動圧に基づいて求めた無次元圧を表す。風上面の圧力としては、風向角度によって変化する壁面風圧と、アプローチフローの各高さ毎に数値的に計算したアプローチフロー全圧(一定)の両方を示し、風下面の圧力としては壁面風圧を用いた。風下開口での無次元圧は、風向が45°になるとやや大きくなるもののほとんど変わらない。風上面圧力を壁面風圧とすると、風上開口での無次元圧力は風下開口での

図13 SS模型の風向毎にみた風圧係数分布

図14 SS模型の風上面での風向毎にみた風速分布

図15 風向毎にみた中心高さでの平均風速水平面 (SS模型)

無次元圧力とほぼ等しく一定である。一方、アプローチフロー全圧とした場合の無次元圧力は風向角度が大きくなると増加する。

さらに、開口面積および風上面の風圧の取り方の妥当性を検討するために、式(6)～式(9)に基づいてこれらのパラメータを変えた場合における圧力損失係数を計算することを試みる。図17に主風向毎の各計算結果を表す。アプローチフロー全圧と開口面積Aの場合における圧力損失係数は、風向角度が大きくなるに伴い増加し、風向0°と45°との圧力損失係数の差は1.4もある。壁面全圧で開口面積Aの場合には圧力損失係数はやや大きくなる傾向がある。アプローチフロー全圧で相当流断面積とした場合の圧力損失係数はほぼ一定である。このように開口部に作用する全圧と、開口部を通過する通風気流の代表風速に関し、同時に風向角度による補正を行った結果、計算された圧力損失係数の風向による変化が相対的に小さくなったことや、圧力損失係数そのものが風向角度の違いにより大きく変化するとは考え難いことから、この計算方法の妥当性が間接的に示されていると思われる。しかし、この方法の物理的な妥当性については今後の検討を要する。

$$\text{アプローチフロー全圧、開口面積A} \quad \Delta P = P_w - P_r = \zeta \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q}{A} \right)^2 \quad \dots (6)$$

$$\text{アプローチフロー全圧、相当流断面積} A \cos \omega \quad \Delta P = P_w - P_r = \zeta \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q}{A \cos \omega} \right)^2 \quad \dots (7)$$

$$\text{風上壁面全圧、開口面積A} \quad \Delta P = P_{wp} - P_r = \zeta \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q}{A} \right)^2 \quad \dots (8)$$

$$\text{風上壁面全圧、相当流断面積} A \cos \omega \quad \Delta P = P_{wp} - P_r = \zeta \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q}{A \cos \omega} \right)^2 \quad \dots (9)$$

P_w : アプローチフロー全圧

6. まとめ

外形寸法が同一で開口条件の異なる5種類の建物模型を用いて、開口条件が異なり、主風向角度を22.5°ずつ変えた場合における通風時の建物内外の気流性状について、風洞実験と数値シミュレーション結果を併用して考察した結果、以下の知見を得た。

- 1) 風洞実験と数値シミュレーションを併用して総合的に検討することにより、風上面において負圧点が生じる理由を明らかにした。
- 2) 風上・風下面のほぼ中央に開口が位置し、主風向角度が0°で開口条件が異なる場合における建物外部の気流性状は、風下開口の後部で多少変化するものの、その他の外部空間では大局的な相違はない。また、建物内部においては、流入気流が下降して動圧が消失し、風下開口付近で再び加速して流出する。通風量は開口面積が大きいほど当然ながら大きい。また、開口条件による各面の風圧係数の差は0.2以内に収まる。さらに、風上・風下開口における圧力損失係数は1.5程度でほぼ一定となる。
- 3) 主風向が異なる場合、SS模型における風向0～45°の通風量は殆ど変わらない。いずれの風向でもアプローチフローの風向を概ね維持して流入し直進し、側壁に衝突した後に再加速して流出する。さらに、これらの気流性状を踏まえて、風上面の圧力と開口面積の捉え方について再検討し、アプローチフロー全圧と風向0°時の開口面積の他に、風上壁面全圧や相当流断面積を想定した場合における圧力損失係数についての考察を試み、修正に関する可能性を指摘した。

なお、今後の課題として、主風向の相違による通風量と圧力損失係数の関係に関する定量的解明が挙げられる。

図16 風上面での全圧が異なる場合における各主風向毎にみた室内圧を基準とした風上・風下開口での無次元圧力

図17 各主風向での風上面の全圧と開口面積を変化した場合の圧力損失係数

謝辞

本研究の風洞実験では、東京工芸大学小林研究室の当時4年生の方々および東京理科大学の五十嵐勝君には多大なご協力を得た。また、差分スキームによるエネルギー保存性に関する全般的な解析で東京大学当時4年生の山本明君にご協力を得た。ここに記して深謝の意を表します。

論文に関連する既発表文献

1. 飯野由香利、倉淵隆、小林信行、風口晃宏、五十嵐勝: 風洞実験およびCFDによる開口条件の異なる建物内の通風性状に関する基礎的検討 通風時の室内気流空間分布の予測・評価手法に関する検討 その1、1997年度日本建築学会関東支部研究報告集、pp. 333～336、1998年3月
2. 飯野由香利、倉淵隆、小林信行、風口晃宏: 開口条件とアプローチフローの主風向が変化した場合における通風時建物内外の気流性状に関する検討 通風時の室内気流空間分布の予測・評価手法に関する検討 その2、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 573～574、1998年9月

参考文献

- 1) 日本建築学会 耐風設計資料小委員会: 流体計算と風荷重評価流量計算と風荷重評価シンポジウム資料、pp. 87～226、1994年
- 2) 倉淵隆、鎌田元康: Multi-Mesh法を用いた通風時建物内外気流の同時解析、日本建築学会計画系論文報告集、第426号、pp. 1～11、1991年
- 3) 村上周三、小林信行、他2名: 住宅の自然通風に関する実験的研究(その1)実測と風洞模型実験による天窓の通風効果を中心として、日本建築学会計画系論文報告集、第4372号、pp. 10～20、1987年
- 4) 村上周三、赤林伸一、他4名: 住宅の換気・通風に関する実験的研究(その1～その5、その8～その10)、日本建築学会大会学術講演梗概集、1983～1988年、1990年
- 5) 赤林伸一、村上周三、他3名: 住宅の換気・通風に関する実験的研究 その6 通風時の開口の流量係数αに関する基礎的検討、およびその7 開口部周辺の風圧分布、風圧変動が換気量に及ぼす影響に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 629～632、1989年
- 6) 渡辺哲也、片山忠久、他3名: 通風時における室内気流分布の数値シミュレーション(その3と4)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 485～486、1989年
- 7) 何平、片山忠久、他3名: 単室モデルの通風量に関する数値シミュレーションによる基礎的検討、日本建築学会計画系論文報告集、第474号、pp. 47～55、1995年
- 8) 清田誠良、関根毅: 模型壁面の開口部圧力損失に関する実験的研究(続報)、日本建築学会計画系論文報告集、第398号、pp. 47～57、1989年
- 9) 佐藤陽子、藤井修二、他3名: 数値解析を用いた通風特性に関する研究(その1)開口条件及びレイノルズ数による流量係数の比較、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 51～52、1994年
- 10) 金永徳、村上周三、加藤信介、他3名: 通風量算出モデルに関する基礎的研究その1～その5、1990年度日本建築学会関東支部研究報告集、pp. 45～64、1990年
- 11) 平山 嵩、小本曾定彰、他3名: 換気の理論的考察、建築学大系22 室内環境計画、彰国社

(1998年7月14日原稿受理、1999年1月27日採用決定)