通風気流場を対象とした CFD 解析の精度検証

Accuracy Verification of CFD for Cross-Ventilated Flow Field

小林知広*1、甲谷寿史*2 Tomohiro KOBAYASHI, Hisashi KOTANI

*1 立命館大学理工学部 建築都市デザイン学科 Dept. of Architecture and Urban Design, Ritsumeikan University, *2 大阪大学大学院工学研究科 地球総合工学専攻 Dept. of Architectural Eng., Osaka University

キーワード:通風 (Cross-Ventilation)、風洞実験 (Wind Tunnel Test)、標準 k-ε モデル (Standard k-ε Model)、応力方程式モデル (Reynolds Stress Model)、LES (Large Eddy Simulation)

1.はじめに

自然通風時の自然換気量予測時には、開口の種類で定まる流量係数に基づいた有効開口面積の直列 結合値と、開口を有しない建物模型の実験等から得られる風圧係数を入力値として換気の式を用いる。 この手法は、大開口の通風時には換気量が過小評価されることや、開口面に気流が斜めから流入する 場合には換気量が過大に評価されるという問題点が指摘されている^{1,2)}。これらの問題は、流速が開口 の前後で十分に小さくなることを前提としてベルヌーイの式に基づく換気の式を静圧差と固定値で与 えられる流量係数で表記するために生じ、この手法は実際の通風現象を表していないと言える。開口 を通過する気流の流量を予測するためには、流路である流管内で実際に生じるエネルギー損失に基づ いた予測手法³⁾を用いることが適切と考えられるが、流管内部の気流性状の詳細はこれまでに明らか にされていない。流管の性状を定量的に明らかにすることは、風洞実験では困難であるため数値流体 力学(以降、CFD)が有効と考えられるが、その際実験との比較により解析精度を確認する必要がある。 しかし風洞実験により静圧や風速を測定する場合、測定点の気流特性に基づいて適切な測定手法を選 択する必要がある。そこで、これまでに筆者らは比較的簡易な形状を有する室模型を用いて数種の風 洞実験とCFD解析を行い、風速・静圧・乱流統計量に関する解析精度検証を行ってきた^{4,5)}。本稿で はその一部を抜粋し、風洞実験による測定の手法とCFD解析の精度検証を紹介する。

2. 風洞実験概要

2.1 流管中心線における流体量測定

実験は測定洞長さ9.5m、高さ1.8m、幅1.8mの回流式風洞で行った。実験に用いた模型は図1に 示す9室の単室から構成された建物とし、中央の1室のみ対面開口が開放されている状況を想定し た。開口を通り抜ける流管の基本的な性状を明らかにするために、模型は風洞中央に設置して10m/ sの一様流にさらし、流管内部の風速と静圧の測定を行う。この際、風洞内風速の設定は模型の風上 600mm、風洞壁面より300mmの位置に設置したピトー管により設定し、風洞内基準静圧もピトー管 位置の静圧を採用した。図2に示す通り、測定は比較的容易な開口部の中心線上で行い、トラバーサ



に設置したアームに取り付けた I 型熱線流速計(0251R-T5 型、 ϕ 0.5µm タングステン、KANOMAX 社)または静圧管により X=-150mm から 1,000mm まで 10mm 間隔で風速と静圧の測定を行った。但し、 開口の前後 50mm の範囲は 5mm 間隔で測定した(図3)。実験条件は開口寸法 L とし、15、30、45、 60、90mm の 5 条件を設定した。図4 にプローブヘッドの形状を示す。静圧管は自作のものを使用し、 先端から 9.0mm の位置に測定孔を 4 カ所設けている。測定点が流管の中心線であるため、平均風速は プローブに平行となる。図5 に静圧管を 2°毎に回転させたときの指向特性を示す。ここで、縦軸は各 風向における静圧読み値とプローブが気流に平行な場合(0°)の静圧読み値との差をアプローチフロー の速度圧で無次元化した誤差率であり、静圧 ±10°の範囲であれば誤差率は概ね 2% 以内に収まる。静 圧測定は微差圧計(MP-45、Validyne 社)を用いて 100Hz、30 秒間を行い、風速は後に乱流エネルギー を算出するために 1.0kHz で 30 秒間測定を行った。



2.2 PIV を用いた建物外側の流れ場の測定

室外側の定性的な流れ場を測定するために、前節と同様の模型を用いて Particle Image Velocimetry (以降、PIV)による測定を行った。PIV とはレーザー光を用いて気流の可視化を行い、微小な時間 間隔で2枚の画像を撮影し、トレーサの移動量から流速を測定する手法である。可視化は煙発生機 (KANOMAX 社、8304)で発生させた煙を風洞上流部に注入することで行った。光源にはダブルパル スNd:YAG レーザー(NEWWAVE RESEARCH、DPIV-N50)を用い、風洞側面から中央の水平断面を 投影し、上部に設置した CCD カメラ(LaVision 社、ImagerIntense)により撮影した(図 6)。撮影は 4.0 Hz で 25 秒間行い、1 回の撮影で 200 µs の間隔で 2 枚の画像を撮影し、1 回の測定で 100 組 200 枚の 画像を撮影した。撮影領域は 625 mm×471 mm としたが、模型の奥行きに対して見付面積が比較的大 きいことから後流の複雑な気流場も広い領域に渡って形成されると考えられるため、図7に示すよう

に模型周辺と後流域の2つの領域において測定を行った。画像 処理には Davis 7.2(LaVision 社)を使用し、カメラとレーザー の制御もこれによった。また、風速算定には FFT 相互相関法⁶⁰ を用いた。ここでは、統計的信頼性と空間分解能の両者を向上 させるために再帰的相関法⁷⁰を用いており、瞬時の速度場を計 算するための相互相関係数分布の算出回数は3回とした。**表1** に PIV 測定概要をまとめて記す。



表1 PIV 測定概要

Camera Frame Size	625 mm × 471 mm 1,376 pixel × 1,040 pixel
Program	Davis 7.2
Algorithm	FFT Cross-Correlation Method (Recursive Correlation Method)
Interrogation Window Size	Pass 1 : 64 pixel × 64 pixel Pass 2 : 32 pixel × 32 pixel Pass 3 : 32 pixel × 32 pixel
Overlap	50 %
Total Numver of Vectors	5,590 (86×65)
Time Interval of Pulse	200 µs
Sampling Frequency	4.0 Hz
Sampling Time	25 seconds
Laser Output	50 mJ / Pulse
Seeding Size	0.3 - 1.0 μm



図7 PIV 測定範囲

2.3 建物周辺の風速及び静圧分布の測定

2.3.1 実験目的

前節では建物周辺の定性的な気流場に着目した測定を目的としたが、本節では建物周辺の圧力分布 とその解析精度に着目した測定を行う。また、風速測定は測定箇所の気流性状に応じて適切な測定手 法を選択する必要があると言え、PIV 測定に関しても測定範囲の中で測定精度が高い箇所と低い箇所 が混在する可能性があるため、測定精度が低下する箇所の確認とそのデータを補う目的で、5 孔ピトー 管を用いて静圧・風速・風向の同時測定を行う。

2.3.2 プローブの較正実験

図8に本研究で用いた5孔ピトー管のプローブを示す。プローブ先端の球形センサは外径4.0 mm であり、センサは5つの静圧測定孔(以下、静圧孔)を有する。図中の静圧孔1から4は球の中心か ら測定孔0を通る軸に対して45°に配置されている。5孔ピトー管の作動原理としては、微差圧計を 用いて静圧孔1から4における圧力の読み値が同じ値を示すようプローブを3次元で回転させた場合 に静圧孔0を通る軸が速度ベクトルの方向と一致するというものである⁸⁾。このときの静圧孔0にお ける圧力の読み値に基づいて流速を算出することができる。この手法は測定精度が高く、実験データ の処理も非常に簡易ではあるが、センサをプローブごと回転させる必要があるため、縮小模型や測定 機器に接触する等の問題があり採用は難しい。このような背景の中でWright⁹⁾はプローブを回転させ ず、かつ比較的容易な較正手法を提案した。本研究ではこの較正手法を用いて測定を行う。



この手法では、まず5つの圧力の読み値から風向を算出する。風向は**図9**に示す頂角 ϕ と夾角 δ により定まる。頂角は風向ベクトルとX軸のなす角であり、夾角は風速ベクトルのYZ成分とXY面のなす角である。各静圧孔における圧力の読み値から風向、風速、静圧を求めるにあたり、Wrightは以下の式で表される3つのパラメータ(角度係数 K_v 、速度係数 K_v 、圧力係数 K_v)を提案した。

$$K_{\varphi} = \left[1 - \sum_{n=1}^{4} (p_0 - p_n) / 2 \left\{\sum_{n=1}^{4} (p_0 - p_n)^2\right\}^{1/2}\right]^{1/2}$$
(1)

$$K_{V} = \left[\rho V^2 \left\{\sum_{n=1}^{4} (p_0 - p_n)^2\right\}^{-1/2}\right]^{1/2}$$
(2)

$$K_{V} = 2(p_0 - p_s) / \rho V^2$$
(3)

ここで、 p_0 は静圧孔0の、 p_n は静圧孔1から4における圧力の読み値である。Vはスカラー流速で、 p_s はプローブ設置位置の静圧である。5つの圧力読み値から頂角、夾角、流速、静圧を得るためには 関係式がもう一つ必要となるが、夾角δが以下の式で与えられる。

$$\tan \delta = -(p_2 - p_4)/(p_1 - p_3)$$

(4)

式(1)から式(3)の3つのパラメータは頂角 ϕ により概ね定まり夾角 δ によっては大きく変化しないことが示されており⁹、あらかじめ較正実験により角度係数、速度係数、圧力係数の較正曲線を ϕ の関数として与えることで風向、風速、静圧の同時測定が可能となる。

このプローブを風洞中央で10 m/sの一様流にさらし、アームに取り付けた分度器により水平方向 にのみ管を回転させてδを90°に固定し、 ϕ を±90°の範囲で2°ずつ変化させて各静圧孔において圧 力を測定した。圧力の測定には微差圧計(MP45及びDP103(バリダイン社))を用いて100 Hz で 60 秒間行った。また、圧力係数算出のため、風洞中央に設置したJIS型ピトー管(LK-1S、岡野製作所) で測定点の静圧も別途測定した。これらの結果から得られた角度係数、速度係数、圧力係数を、それ ぞれ4次式、6次式、4次式で近似を行った較正曲線と併せて図10に示す。この較正曲線を用いて次 節に示す風向、風速、静圧の測定実験を行う。



2.3.3 5 孔ピトー管を用いた静圧・風向・風速の同時測定

前述の実験と同様に建物モデル(開口寸法Lは45mm)を風洞の中央に設置し、10 m/sの一様流下 で実験を行った。測定点は図11に示す中央の水平断面上に設定した。模型の側面(剥離領域)では センサがアプローチフローに正対するよう設置したが、逆流が生じている可能性もあるため、黒塗り プロット位置では風向120°に正対する状態でも測定を行った。また、風上側の測定点では壁面に沿う 気流でも測定ができるよう風向15°に正対するよう回転させて測定を行った。風向算定は角度係数の 較正曲線に基づいて頂角φが±75°の範囲で行った。図12に実験時の風洞断面を示す。風洞内基準静 圧はピトー管とし、測定は較正実験と同様の微差圧計を用いて100 Hz で 60 秒間行った。



3. 実験を再現した CFD 解析の概要

3.1 解析領域及び解析手法

風洞実験を再現した CFD 解析を行った。ここでは解析結果に大きく影響すると考えられる乱流モデルに関して、標準 k- ϵ 2 方程式モデル(以降、SKE)、応力方程式モデル(Reynolds Stress Model、以降、RSM)、Large Eddy Simulation(以降、LES)の3種を用いて解析を行った。なお、RSM は Launder ら¹⁰⁾の提案に基づくLRR モデルを使用したが、乱流拡散項は等方性の渦粘性近似により簡易化したモデルを用いた。LES では Smagorinsky-Lilly モデルを用い、Smagorinsky 定数は 0.1 として与えた。解析概要を表2及び表3に示す。解析対象空間は風洞の断面を再現し、模型の風上側に 1,000mm、後流域は 4,000mm とした。なお、RANS モデルである SKE 及び RSM では計算負荷を軽減するため対称面を 2 面設けて空間の 1/4 のみ解析を行った。RANS モデルの計算に用いたメッシュレイアウトを図

13 に示す。また LES を用いた解析においては、SKE の解析結果を初期条件として行った。解析空間の大きさは RANS と同様としたが、非定常計算であるため、解析領域は設定した解析空間全体とした。計算時間間隔は 0.0001 秒 (10 kHz) として合計 2.3 秒間の計算を行った。図 14 に全計算期間内の流入開口、流出開口、後流域の 3 点における主流成分の風速と静圧の変動を示す。この結果から、8,000 タイムステップ (0.8 秒)までの結果を SKE からの移行期間とみなして助走計算とし、本計算は 15,000 タイムステップ (1.5 秒)とした。後述する LES の時間平均値は本計算 1.5 秒間の平均とする。



図 13 CFD における解析領域とメッシュレイアウト (RANS)

3.2 境界条件

RANS を用いた解析における流入境界条件は、実験に基づき平均風速 U=10.0m/s、乱流強度 I=1.0%、乱れの長さスケール $\Lambda=126$ mm(風洞の水力直径の 0.07 倍)として与え、SKE において k と ϵ の流入境界条件は以下の式に基づいた値を適用した。

$$k = \frac{3}{2} (U \cdot I)^2$$
 (5) $\varepsilon = C_D^{3/4} \frac{k^{3/2}}{\Lambda}$ (6)

RSM におけるレイノルズ応力の流入境界条件は以下の式で与えた。

$$\overline{u'_i u'_i} = \frac{2}{3}k \quad (i = 1, 2 \ 3) \tag{7}$$
$$\overline{u'_i u'_j} = 0 \quad (i, j = 1, 2, 3) \tag{8}$$

一般に、LES を用いた解析では変動する流入境界条件の作成が重要となるが、本研究で解析対象とし た風洞実験ではラフネスや格子などにより乱れを作成しておらず、アプローチフローは乱れの少ない 一様流であるため、主流方向の流速成分を10.0 m/sの固定値として与えた。流出境界条件は全解析条 件において圧力規定とし、後流域を長く設けていることから圧力分布は大きくないと判断してゲージ 圧 0Pa を一様に与えた。壁面境界条件は対象面を free-slip 条件とし、RANS 解析において風洞及び模 型の壁面は一般化対数則を適用した。一方、LES を用いた解析では Werner & Wengle¹¹⁾による linearpower law 型の 2 層モデルを適用した。

4. 風洞実験と CFD の比較による解析精度検証

4.1 流管中心における速度と圧力の比較

図15に風洞実験とCFDから得られたL=15,45,90mm条件における中心線上の静圧、風速、乱流 エネルギーを示す。ここで、静圧と風速はそれぞれ最も風上側の全圧とアプローチフローの風速で基 準化して表している。また、CFDの静圧は、風洞実験でピトー管を設置した位置の静圧を基準として 表記し、基準静圧の位置を一致させている。静圧の分布性状は風上側の衝突域で気流がよどみ、ベルヌー イの式に基づいて速度圧が静圧に変換されて上昇し、開口を通過する際に低下した後に風下側で緩や かに上昇する。風上側ではどの乱流モデルも実験結果と良く一致しているが、室内部においては SKE が静圧を過大評価していることがわかる。これは SKE は流入後に室内で流速があまり上昇しないため 静圧が速度圧に変換されていないことを表し、その原因の一つとして、速度勾配に応じて生成される 乱流エネルギーを過大評価する点があげられる。風下側の静圧は SKE は実験と比較して高い圧力を示 しているが、RSM と LES では比較的実験に近い結果が得られた。

風速に関しては、前述の通り SKE が室内で過小評価されるが、RSM と LES では実験と良く一致し たと言える。風下側に着目すると、実験と CFD で大きな差異が見られるが、これは実験では I 型熱線 流速計を用いているため風速 2 成分の絶対値として出力することに対して、CFD では主流成分のみを 正負で評価するためであり、逆流が存在すると考えられる Wake 内部では厳密に比較することは難し いが、RSM は拡散して流速が低下する点が後側にずれている傾向が見られる。これは RSM が剥離域 や後流域のサイズを過大評価することを示しており、これまでに大岡ら¹²⁾ が示した傾向と一致する。 SKE と LES の後流域の平均風速は概ね一致しているが、これらの解析結果の精度を検証するため、 LES の瞬時値に基づいて熱線流速計で出力される瞬時値を以下の式に基づいて再現する。

 $V_{LES-hotwire} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$

(9)

これは I 型熱線流速計の出力がワイヤーに直交する瞬時風速 2 成分の合成ベクトルと仮定するもので あるが、このように LES で熱線出力を再現した瞬時値に本計算期間内で時間平均を施した結果を図中 に LES-Hotwire として記載しているが、この結果を見ると LES は実験と良く一致したと言え、主流成



分の平均風速が似た傾向を示す SKE においても後流域の風速に関しては解析精度は比較的良いと考え られる。また、乱流エネルギーを比較すると、前述の通り SKE では流入前後で過剰に生成されており、 これは一般に言われる通り、通常の渦粘性モデルでは速度勾配が大きい場合に乱流エネルギーの生産 項が大きくなるためである¹³⁾。また、このような乱流エネルギーの過剰生成を抑制する改良型 *k*-ε モ デルも複数提案されており^{14,15)}、今後それらのモデルを適用した際の解析精度の検証も課題と言える。 RSM では流れ場に対応して乱流エネルギーのピークも後流側にシフトしているが、その値としては実 験値と概ね同程度の結果が得られた。熱線を再現した LES の結果は開口が大きくなった際に若干過小 に評価しているが、実験結果と比較的良く一致する結果が得られた。

4.2 建物周辺の気流場の解析精度検証

図16にPIVとCFDにより得られた建物モデル周辺の風速ベクトルを示す。ここで、PIVの風速 ベクトルは縦横ともに1/4に省略して示しているため、表示ベクトル数は全体の1/16である。また、 CFD 解析結果のベクトル表示点はメッシュレイアウトに関わらず、PIVと合わせて表示する。なお、 PIVは4.0Hz、25秒間の時間平均値であり、LESは10kHz、1.5秒間の時間平均値である。PIVの測 定結果において、剥離角度に開口条件による大きな差異は見られないことや、後流域で建物斜め後方 に形成される大きな渦による逆流が生じて室からの流出気流と衝突していることがわかる。また、気 流は衝突後に風上側に向かって流れ、剥離流と合流して風下側または後流の渦へと流れている様子が わかる。室内のPIV測定結果に関しては、Z方向に対称となっていないが、これは後流側かつZが正 の方向からレーザーが照射され、2枚のアクリル板を透過していることが影響したと考えられ、この ため室内のPIV測定に関しては精度が低下すると言える。PIV測定とCFD解析の結果を比較すると、 RSMでは建物斜め後方の渦が再現されておらず、剥離域の大きさを過大に評価している。これは、流



図 16 PIV と CFD から得られた建物周辺の風速ベクトル

管中心線の風速で見られた後流域の過大評価と一致する。RSM を用いると剥離領域を過大評価すると は必ずしも言えないが、大岡ら¹²⁾や村上¹³⁾も同様の結果を示している通り、現在一般に用いられる RSM のモデリング手法では同様の傾向が得られると考えられる。一方で、RSM は6種のレイノルズ 応力の輸送方程式を解いているため、原理的には合理的なモデルと言え、レイノルズ応力の輸送方程 式中のモデリング手法やモデル定数を改良することにより、精度の向上を期待することができると考 えられる。また、SKE で得られた気流場は RSM と比較すると傾向は実験に近いと言えるが、剥離域 の大きさや剥離流の角度は実験とやや異なる。LES の解析結果は L=90 mm の条件でのみ X=500 mm より後流での逆流が生じておらず実験結果と一致しないが、その他の開口条件の気流場では実験結果 と定性的には良く一致したと言える。これらの結果から、建物モデル周辺の気流場の性状としては、 RSM の解析精度が最も低く、SKE、LES では比較的良い結果が得られたと言える。本節では建物モデ ル周辺の定性的な気流のパターンに着目した検証を行ったが、次節では測定手法の信頼性を含め、速度・ 圧力分布に関してより定量的な検証を行う。

4.3 建物周辺の圧力分布及び速度分布の解析精度検証

4.3.1 建物モデル風上側の解析精度

図 17 に L=45mm の建物モデルで 5 孔ピトー管と CFD により得られた建物モデル風上側(X=-30, -60, -90 mm)における静圧、スカラー風速、風向を示す。ここで、スカラー風速と風向に関しては PIV 結果も併せて示す。風速はアプローチフローの風速で基準化し、静圧は同時測定したピトー管の 速度圧で無次元化した後に X=0 mm、Z=432 mm (壁面からの距離(Z')が 240 mm)での無次元全圧 で基準化を行った。静圧は SKE のみ過小に評価しているが、RSM と LES の結果は実験結果と良く一 致している。スカラー風速に関しては、3 種の CFD 結果は概ね一致したが、PIV と 5 孔ピトー管の結 果には差異が見られる。このため、測定箇所により各測定手法の精度が低下すると考えられるが、PIV に関しては模型付近はレーザーシートがアクリル板を透過してトレーサを可視化するため影が発生す ることに加え、模型上部が写り込むという問題点があるため、X=-30mm のライン上では測定精度が低 下したと考えられる。一方、X=-60、-90mm のライン上の PIV 結果は誤差を生む要因が無く信頼性が 高いと考えられ、この領域ではどの CFD 解析結果も良く一致したと言える。5 孔ピトー管のスカラー 風速は X=-90 mm では CFD より小さくなるが、X=-30 mm では CFD と良く一致し、風向に関しては



図 17 PIV と CFD から得られた建物風上側の静圧・スカラー風速・風向

模型付近で CFD 結果と異なる。このように 5 孔ピトー管の風向と風速の精度が風上側で悪くなったこ との最も大きな原因は圧力勾配と言える。つまり、角度係数・速度係数・圧力係数の較正曲線は一様 な圧力分布の中で得られたことに対して、衝突域ではそもそも 5 つの測定孔周辺の静圧に分布がある ためである。それにも関わらずこの領域で静圧が CFD 結果と良く一致した理由としては、(3) 式で表 される圧力係数算出に周囲 4 点の静圧孔の測定値は用いられず、中央の 1 点のみの静圧で決定される ため、センサヘッド周辺の圧力分布が重要でなくなるためと言える。このため、衝突域では 5 孔ピトー 管は静圧測定の精度は高く、風向・風速に誤差を生じ、PIV では透過や写り込みの影響が見られる壁 面のごく近傍以外の風向・風速は精度良く測定することができると言える。その上で風上側の CFD 解 析精度に関しては、静圧は SKE のみ精度が少し低く、風向とスカラー風速はどの乱流モデルでも良い 結果が得られたと言える。

4.3.2 建物モデル側方の解析精度

同様に、図18に建物モデル側方の結果を示す。ここで、5 孔ピトー管のプローブ角度で0°と120° が存在する点では、予め PIV 結果と比較して適切な測定結果を選択した。静圧に関しては、前述の理 由により5 孔ピトー管の測定結果は信頼できるものと言え、RSM の結果が実験結果と最も良く一致し た。SKE と LES では値はやや異なるものの、傾向は良く再現できている。スカラー風速に関しては、 X=0mm のラインのみ5 孔ピトー管と PIV の結果で大きな差異が見られる。ここでは PIV の測定精度 が低下したと考えられ、その理由としては、建物の角部周辺であることから Interrogation Window 内 部で平面的な速度分布が大きくなり空間分解能が不足している可能性があげられる。この領域の PIV 測定精度を向上させるためには、局所的に Interrogation Window のサイズを小さくすることが有効と 考えられる。その他の測定ライン上では 2 つの実験結果は概ね一致しているため測定結果の信頼精度 は高いと考えられる。剥離域内部では乱れの影響で5 孔ピトー管の風向算定精度がわずかに低下した



図18 PIV と CFD から得られた建物側方の静圧・スカラー風速・風向

ものの、平均化時間を比較的長く設定したため、平均風向の算定結果に及ぼした誤差は大きくない。 以上より、建物モデル側方に関しては X=0mm の PIV 結果と剥離域内部の5 孔ピトー管による風向 算定結果を除いて測定結果の信頼性は高いと考えられる。その上で CFD 解析結果を見ると、RSM と LES では実験と良く一致するが、SKE では等方性の渦粘性近似を用いていることにより乱流拡散が大 きくなり速度勾配を小さく評価したと考えられる。また、風向に関しては 90°をまたいで大きく変化 する位置は剥離域の渦中心と考えられるが、SKE ではその位置が壁面に近い位置に見られる。このた め、SKE では風速ベクトルは定性的に良く合っていたものの、剥離域内部の逆流領域のサイズを過小 に評価していることがわかり、それに対して RSM、LES では実験と概ね一致していることがわかる。

5.まとめ

本稿では、比較的簡易な建物モデル内外の通風気流場を対象とした風洞実験とCFD解析を行うことで解析精度を検証した。ここではCFDの乱流モデルに関して、渦粘性モデル、応力方程式モデル(RSM)、 Large Eddy Simulation(LES)と3段階に変化させ、それぞれにおいて一般に用いられるモデリング 手法を採用して建物内外の圧力及び風速を比較した。渦粘性モデルの中で今回用いた標準k-εモデル (SKE)では、気流場は概ね実験と一致するものの、風速・静圧共に詳細な分布は実験結果とは異なる 傾向となる。RSMでは概して傾向は実験結果と良く一致するものの、剥離域を過大評価する等、明ら かに実験とは異なる結果が得られる領域があることが示された。LESでは実験と比較して差異が目立 つ箇所はなく、最も精度の良い解析結果が示された。本研究で採用したもの以外にも乱流モデルは多 数存在し、適切なモデルは解析対象の性状や着目する位置によっても異なると言える。また、実際の 解析の際は、求められる解析精度と許容される計算負荷に応じて解析手法を選択する必要がある。

参考文献

- 1) 石原正雄:「建築換気設計」,朝倉書店,1969.
- 2) 倉渕隆,大場正昭:「風洞実験とLESを併用した通風時の乱流構造解明に関する研究(3)通風の局所相似性に基づく通風量 と流入角の計算法に関する提案」,日本建築学会大会学術講演梗概集,D2,pp.645-646,2001.9.
- 3) Murakami S., Kato S., Akabayashi S., Mizutani K., Kim Y.D. : [¬]Wind Tunnel Test on Velocity-Pressure Field of Cross-Ventilation with Open Windows J, ASHRAE Transactions, Volume 97, Part1, pp.525-538, 1991.
- 4) 小林知広,相良和伸,山中俊夫,甲谷寿史,武田尚吾,西本真道:「通風時の建物周辺気流に関する風洞実験及び CFD 解析精度の検証」日本建築学会環境系論文集,第74巻,第638号,pp.481-488,2009.4.
- 5) 小林知広, 甲谷寿史, 山中俊夫, 相良和伸, 桃井良尚, 浅井香里:「Wind Tunnel Test and Numerical Simulation for Pressure and Velocity Field around Cross-Ventilated Building」日本建築学会環境系論文集, 第 76 巻, 662 号, 2011.4 掲載予定.
- 6) Willert C.E. and Gharib M. : [Digital Particle Image Velocimetry] Experiments in Fluids, Vol. 10, No. 4, pp.181-215, 1991.
- 7) Hart D.P.: [[]Super-Resolution PIV by Recursive Local-Correlation], Journal of Visualization, Volume 3, Number 2, pp.187-194, 2000.
- 8) ポフ:「機械工学における空気力学実験法」,朝倉書店,1969.
- 9) Wright M.A.: [[]The evaluation of a simplified form of presentation for five-hole spherical and hemispherical pitometer calibration data], *Journal of Physics E. Scientific Instruments*, Volume 3, Number 5, pp. 356-362, 1970.
- 10) Launder B.E., Reece G.J., and Rodi W. : [[]Progress in the development of a Reynolds-stress turbulence closure], *Journal of Fluid Mechanics*, Volume 68, pp.491-511, 1975.
- 11) Werner H., Wengle H. : [[]Large-Eddy Simulation of Trubulent Flow Over and Around a Cube in a Plate Channel], *Proceedings of 8th Symposium on Turbulent Shear Flows*, pp.155-168, 1993.
- 12) 大岡龍三, 村上周三, 持田灯:「<u,'u,'> 輸送方程式中の圧力歪相関項, wall reflection 項, 乱流拡散項に関する各種モデルの 評価」, 日本建築学会計画系論文集, 第 504 号, pp.55-61, 1998.2.
- 13) 村上周三:「CFD による建築・都市の環境設計工学」, 東京大学出版会, 2000.
- 14) Kato M., Launder B.E.: [[]The modelling of turbulent flow around stationary and vibrating square cylinder], Proceedings of 9th Symposium on Turbulent Shear Flows, Paper, 10-4, 1-6, 1993.
- 15) 村上周三, 持田灯, 近藤宏二:「改良 k-e モデルによる 2 次元建物モデル周辺気流の数値計算」, 生産研究(東京大学生産技術研究所所報), 第47巻, 第2号, pp.29-33, 1995.

謝辞

本研究を推進するにあたり、大変有益なご助言を頂いた大阪大学の山中俊夫教授、相良和伸教授、桃井良尚助教に深謝致しま す。実験及び解析に際して多大なるご尽力を頂いた浅井香里氏(東京大学大学院生、当時大阪大学卒論生)に感謝致します。また、 必要機器の貸し出しに加え、多くのご助言を賜った日本カノマックス株式会社の田中康恵氏、塩崎康弘氏に感謝致します。なお、 本研究の一部は日本学術振興会平成 21 年度科学研究費補助金(特別研究員奨励費 20-912、研究代表者:小林知広)によった。