

建物周辺気流における CFD 解析の予測精度に関する研究

風向の変化を伴う 2 棟建物モデル周辺気流を対象として

THE VALIDATION FOR THE PREDICTION ACCURACY OF CFD TECHNIQUE
FOR THE FLOWFIELD AROUND BUILDINGS

Analysis for the flowfield around two rectangular buildings model with oblique wind angles

中島弘喜*, 富永禎秀**, 赤林伸一***, 坂口 淳****

Hiroyoshi NAKAJIMA, Yoshihide TOMINAGA, Shin-ichi AKABAYASHI
and Jun SAKAGUCHI

The wind tunnel experiment for two rectangular buildings model with the scale ratio of 2:1:1 in parallel arrangement with oblique wind angles was carried out. The experimental database was used for validation for the prediction accuracy of CFD technique applied for this flowfield. The special attention was paid to the velocity distribution in strong wind region near ground surface for the validation. The CFD analysis with two turbulence models, i.e., the standard $k-\epsilon$ model and the modified $k-\epsilon$ model, was conducted in order to clarify the prediction accuracy of CFD methods in comparison with the experimental database.

Keywords: Flow around buildings, Two Buildings Model, CFD, Wind angles

建物周辺気流, 2 棟建物モデル, CFD, 風向角

1. はじめに

近年、計算機の高速度化、流体の数値計算 (Computational Fluid Dynamics; CFD) 技術の発達や商用 CFD コードの普及に伴い、それを利用したビル風等の建物周辺環境の予測・評価が実務の場で行われるようになってきている^{1,2)}。従来より、建物周辺気流の CFD 予測の精度の検証については、多くの研究が行われているが、ほとんどが建物軸に沿った一つの風向における立方体や直方体の単体建物モデルを対象に行われており、その精度評価も屋上面の剥離流及び後方循環流の再付着距離などに主眼が置かれている場合が多い^{3~8)}。風向 0° における単体建物は、風上面の stagnation や屋上面や側面での剥離流、後方の循環流等が明確に存在し、乱流モデルの構造的な欠陥や問題点を検証するには適した対象である。しかしながら、通常、市街地の風環境評価を行う際には、16 風向について検討することが一般的であり、計画建物に隣接して高層建物が存在する場合や、計画建物が複数存在する場合も多い。このような場合、それぞれの建物からの剥離流、吹き降ろしが重ね合わせられることによって生じる谷間風等により、強い風速の増速域が建物間に生じ大きな問題となる。従って、風向の変化を伴い、かつ複数の建物が存在する建物周辺の流れ場における地表面付近の風速の CFD による予測精度を正確に評価する必要があると考えられ、精度の高い風洞実験

との比較により詳細に検討した例はほとんどないのが現状である。

本研究では、まず 2:1:1 (高さ:幅:奥行き) の直方体モデルが 2 棟並ぶ建物モデルを対象に、風向を $0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ$ とした風洞実験を行い、地表面付近の風速分布を中心とした鉛直分布や流入境界条件等が明確に測定された CFD 解析の精度検証の為に詳細なデータベースを整備する。一般に、建物周辺の風環境の風洞実験では、実験の簡便さからサーミスタ風速計が用いられる場合が多いが、逆流を検出できないため、特に風速が弱く相対的に乱れの大きい領域で、実際よりも平均風速を大きく評価してしまう問題がある⁹⁾。本研究では、逆流を検出できるスプリットファイバースローブを用いて、建物周りの各風速成分の平均値及び変動値を測定し、数値解析結果の検証用データベースとする。このような数値解析結果の検証を意図した詳細な風洞実験データベースは、風向 0° の 2:1:1 角柱モデルを対象とした孟、日比の実験¹⁰⁾、チャンネル流中の立方体周辺流れを対象とした Martinuzzi らの実験¹¹⁾ 以外にはほとんど見られない。さらに、この流れ場を対象に、実務の場で用いられることの多い標準 $k-\epsilon$ モデルと近年提案されている改良型 $k-\epsilon$ モデルを用いた CFD 解析を行い、実験によるデータベースとの比較を行い、特に地表面付近の強風領域の風速分布に着目してその予測精度を検証する。

* 新潟大学大学院自然科学研究科 大学院生・修士(工学)

** 新潟工科大学工学部建築学科 教授・博士(工学)

*** 新潟大学大学院自然科学研究科 教授・工博

**** 県立新潟女子短期大学生活科学科 講師・博士(工学)

Graduate Student, Division of Science and Technology, Graduate School of Niigata Univ., M. Eng.

Prof., Dept. of Niigata Institute of Technology, Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Niigata Univ., Dr. Eng.

Lecturer, Dept. of Human Life and Environmental Niigata Women's College, Dr. Eng.

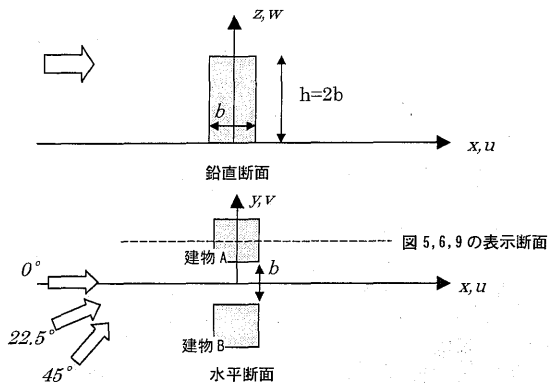


図1 建物モデルの配置と座標系

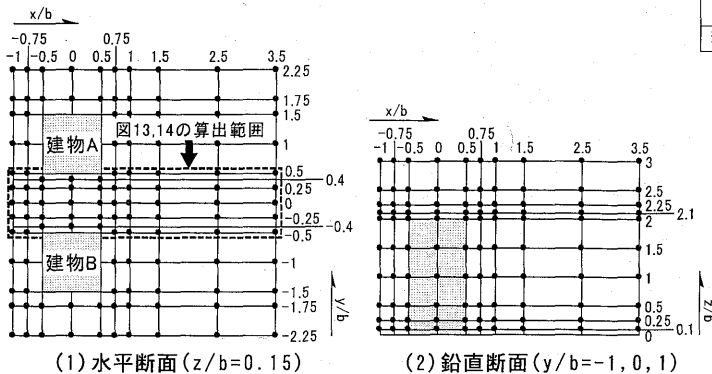


図2 風速の測定位置

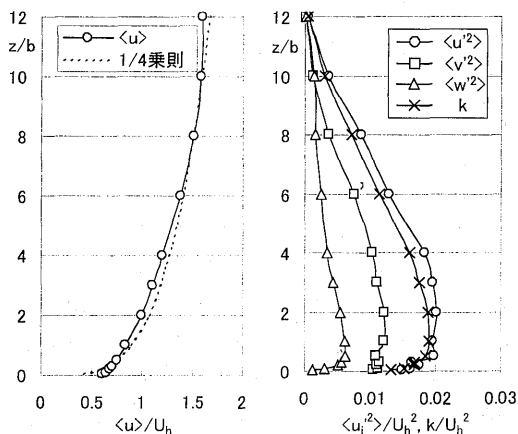


図3 風洞内気流の鉛直プロファイル

2. 風洞実験の概要

2.1 風洞及び模型

風洞実験には、新潟工科大学所有の境界層型風洞（測定部は長さ13.0m、幅1.8m、高さ1.8m）を使用する。対象建物は、建物幅 b を100mmとする2:1:1（高さ：幅：奥行き）の模型を2棟である。図1に、本研究で使用する座標系と記号を示す。文中の諸量は建物幅 b 及び、高さ $h(=2b)$ における流入風速 U_h で無次元化して示す。

2.2 測定方法

風速の測定には、逆流を検出できるスプリットファイバースローブ（DANTEC社製55R55）を用い、風速3成分の平均値とその標準偏差を、平均時間60秒、サンプリング間隔5msecで測定・算出する。スプリットファイバースローブの較正は、タンデム型熱線風速計¹²⁾と同様の方法で行う。

測定位置は、高さ $z/b=0.15$ の位置の水平断面と建物中心及び建物

表1 境界条件

解析領域	流れ方向(x)には、建物中心より風上側に6.3b、風下側に16.3bとする。横方向(y)には、14.14b、高さ方向(z)には11.47bとする。
流入境界	$\langle u \rangle, k$ については、風洞実験値を補間して求めた。 ε は流入面で k の生産項 $P_k = \varepsilon$ を仮定し算出(図3)。
上空境界	法線方向速度をゼロとし、それ以外の諸量は勾配をゼロとした。
側面境界	風向 0° の場合：法線方向速度をゼロとし、それ以外の諸量は勾配をゼロとした。 風向 $22.5^\circ, 45^\circ$ の場合：一方を流入境界、一方を流出境界として扱う。
流出境界	諸量に関して法線方向の勾配をゼロとする。
地表面境界 ¹⁾	z_0 型対数則($z_0=1.1 \times 10^{-3}b$)
建物壁面境界	固体壁として扱い、generalized log lawを仮定した。
メッシュ分割	分割数は $62(x_1) \times 63(x_2) \times 41(x_3)$ 。最小メッシュ幅0.07b。境界に最も近い速度定義点の壁座標は、流入付近で約30、建物屋上で約40。
移流項スキーム	全輸送方程式にQUICKを使用

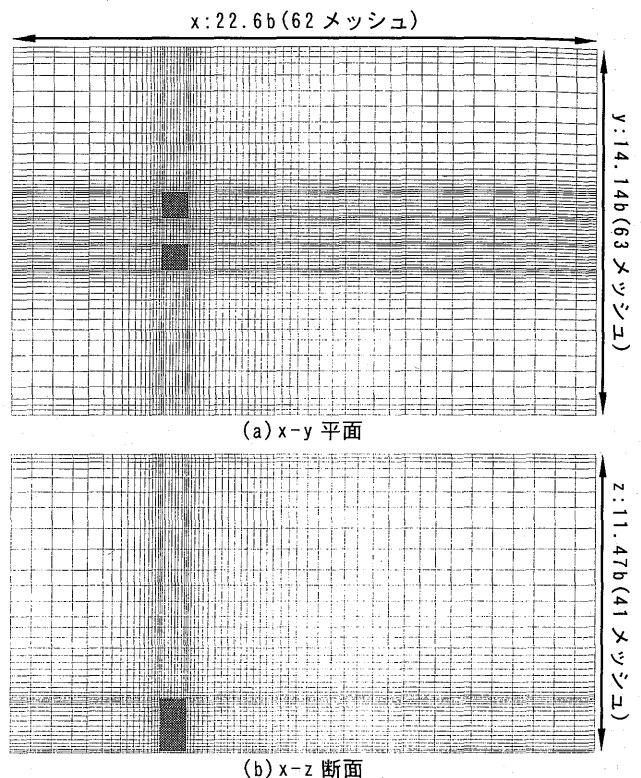


図4 解析領域及びメッシュ分割

表2 比較した乱流モデルの ν_t の計算式

1) 標準 $k-\varepsilon$ モデル

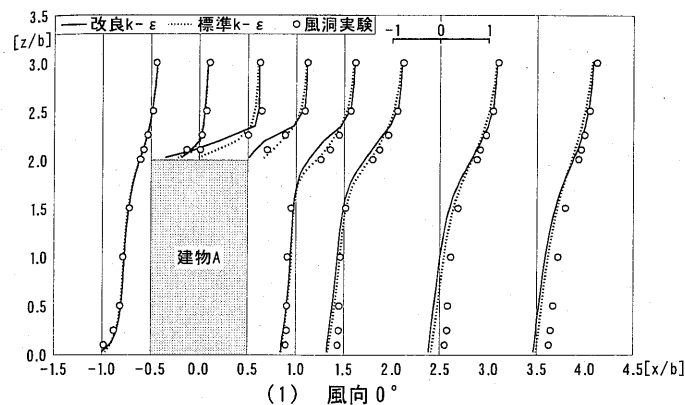
$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \dots (1)$$

2) 改良 $k-\varepsilon$ モデル(Durbinモデル)

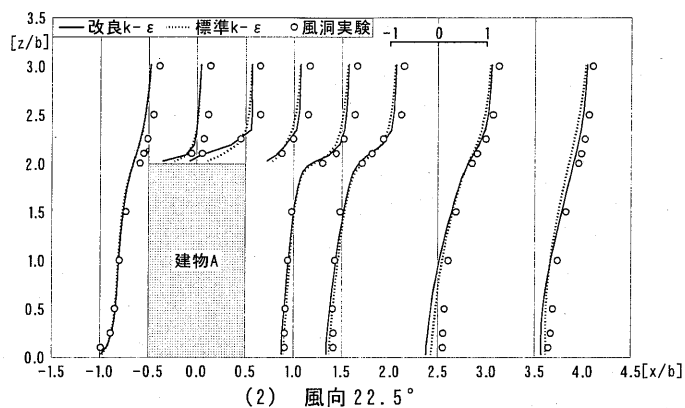
$$\nu_t = C_\mu k T \dots (2), \quad T = \min \left(\frac{k}{\varepsilon}, \frac{1}{C_\mu \sqrt{3S}} \right) \dots (3), \quad S = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2} \dots (4)$$

$$C_\mu = 0.09$$

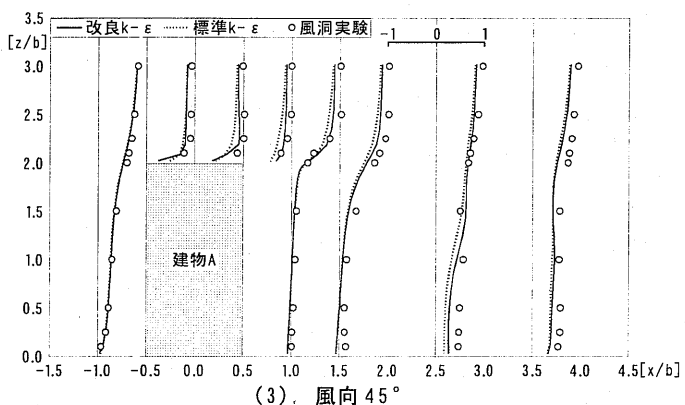
間を通る3つの鉛直断面とする。なお本実験で作成した乱流境界層のスケールは実大気の約1/500であるので、対象建物の高さは100m、水平断面の評価高さは7.5m相当となる。これは一般的な歩行者レベルの評価高さ(1.5~3.0m)よりはやや高いが、風速プローブ及びサポートの大きさ等を勘案し、それらの測定精度への影響がなるべく小さくなるようこの測定高さとした。風向は、x方向を風向 0° として $0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ$ の3風向とする。風速測定位置を図2に示す。



(1) 風向 0°



(2) 風向 22.5°



(3) 風向 45°

図5 <u>の鉛直分布 (y/b=1)

2.3 風洞気流

図3に風洞内気流の平均風速と変動風速の鉛直プロファイルを示す。平均風速は、概ね、べき指数0.25のべき乗則に従っている。実験時の棟高風速は6.24[m/s]である。建物高さ h と流入風速 U_b により求められるレイノルズ数は、約 8.3×10^4 である。

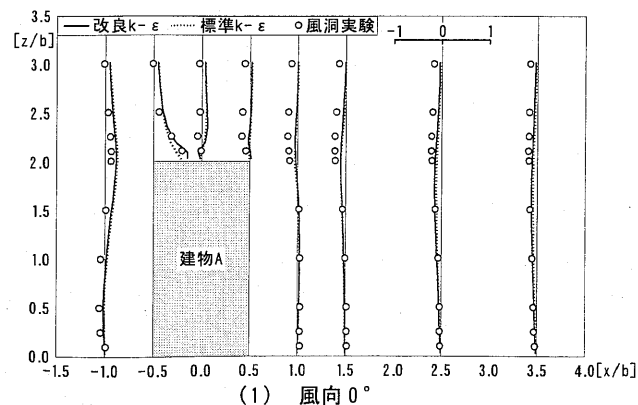
3. CFD 解析の概要

3.1 計算手法

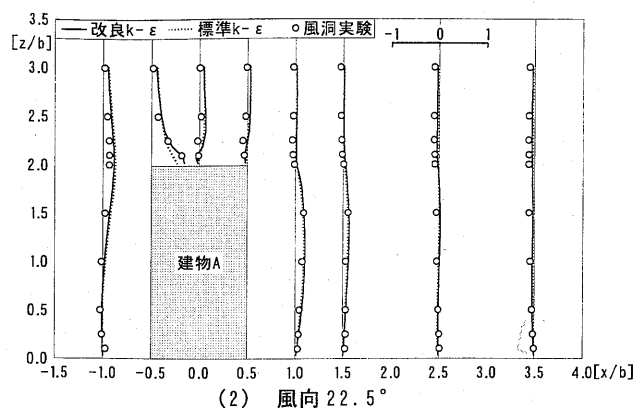
使用した境界条件を表1に示す。境界条件及び解析領域の設定に際しては、文献7で示された検討結果を参考にしながら、いくつかの試計算を行い決定した。解析領域及びメッシュ分割を図4に示す。全てのケースでHSMACに基づく非定常計算を行った。

3.2 乱流モデル

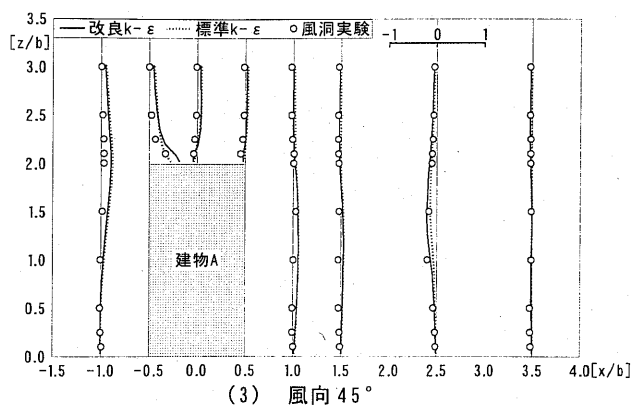
現在、実務レベルで最も一般的に用いられていると考えられる標準 $k-\epsilon$ モデルと改良型の $k-\epsilon$ モデルを2つを比較した。改良型の $k-\epsilon$ モデルについては、最近、いくつかの非線形 $k-\epsilon$ モデルの有



(1) 風向 0°



(2) 風向 22.5°



(3) 風向 45°

図6 <w>の鉛直分布 (y/b=1)

効性も報告されているが^{13,14)}、実用問題への適用という観点では計算負荷の増大が懸念される。本研究では、線形モデルの範囲内での予測精度の評価を行うこととし、既報⁶⁾で単体建物モデル周辺気流における有効性が確認されている、Durbinによる改良 $k-\epsilon$ モデル¹⁵⁾を使用した(以下改良 $k-\epsilon$)。両者のモデルでは、渦動粘性係数 ν_t のモデル化が異なる(表2、注1)。

4. 結果及び考察

4.1 鉛直流れ場の平均風速分布

図5, 6に建物A中心軸上 ($y/b=1$) の鉛直断面 (図1参照) における<u>, <w>の分布を示す。図中の縦の破線は実験における代表的な測定ラインを表しており、この線を原点としてグラフ上部に示すスケールで実験値及び計算結果を表示している。実験においては、風向0°の場合には、建物後方の循環流域で<u>は負の値を示している。当然のことながら、風向が22.5°の場合には、この位置での<u>成分はやや減少し、風向45°で<u>の値はすべて正となる。

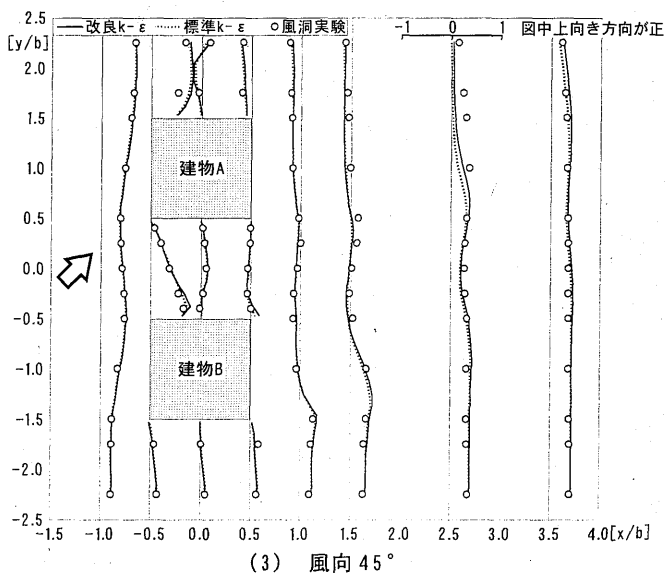
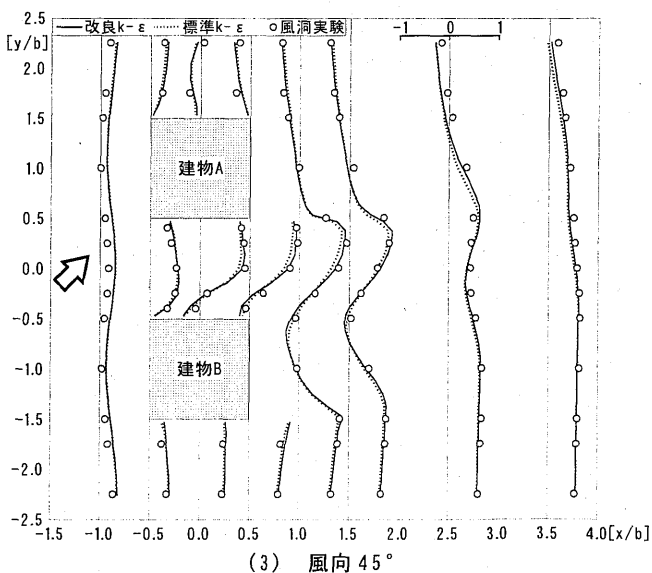
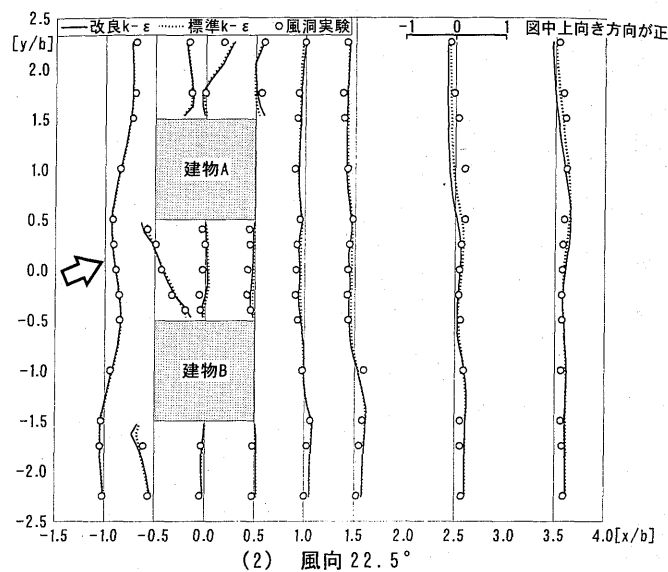
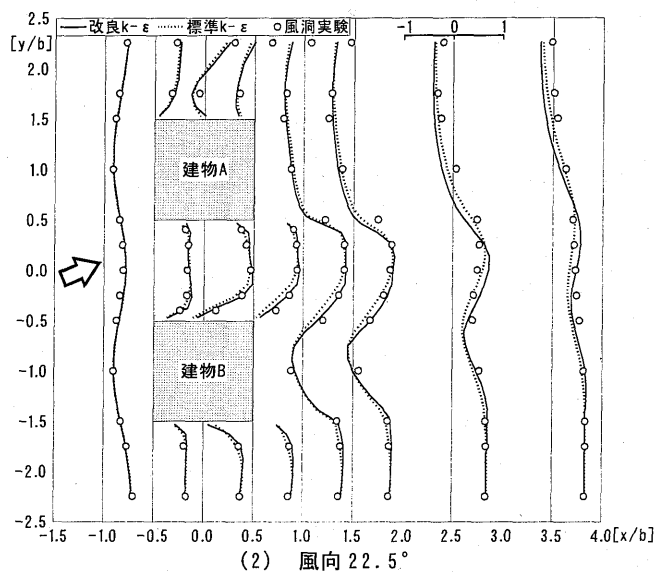
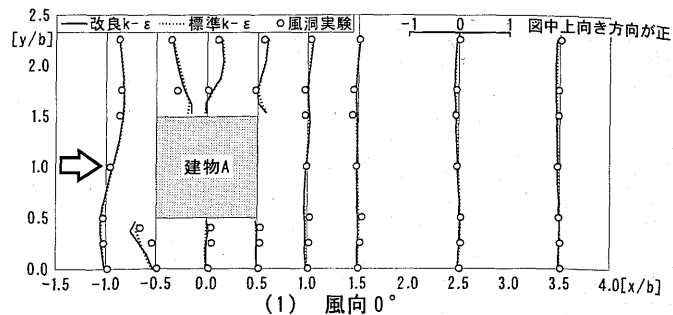
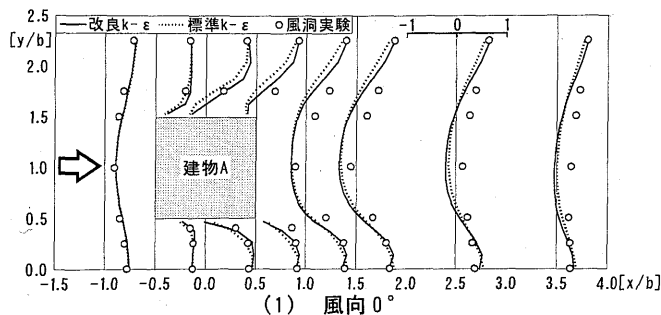


図7 <u>の水平分布($z/b=0.15$)

図8 <v>の水平分布($z/b=0.15$)

一方、 $\langle w \rangle$ は建物風上側前面から建物直上にかけて大きな値を示す以外は、全体的に小さな値を示す。単体建物モデルの場合⁶⁾と同様に、後方の循環流をやや強めに予測する傾向はあるが、全体的に計算結果と実験結果はよく対応しており、ほとんどの領域で乱流モデルによる予測結果の差は小さい。しかし屋上面においては予測精度に顕著な違いが見られ、既報⁸⁾と同様に改良 $k-\epsilon$ の方が実験との対応がよい。

4.2 水平流れ場の平均風速分布

図7, 8に $z/b=0.15$ の水平断面における $\langle u \rangle$, $\langle v \rangle$ の分布を示す。

$\langle u \rangle$ は、いずれの風向でも棟間では最大で1.0(風速増加率で約1.5)程度の非常に強い $\langle u \rangle$ が生じる。風向が 22.5° , 45° と変化すると、棟間に建物Bの角部での剥離に伴う逆流が生じ、風下側の $\langle u \rangle$ が正負に大きく変化する。建物間の強風域においては、全体的にCFDの結果は、実験とよい一致を示すが改良 $k-\epsilon$ は、どの風向でも、棟間の風速を標準 $k-\epsilon$ に比べてやや大きめに予測しており、実験に近づく。なお、風向 0° の場合、建物後方の $y/b=1.5$ 付近で実験と計算の差がやや大きい。同様の傾向は、風向 22.5° の $y/b=2$ の領域でも見られる¹⁸⁾。一方、 $\langle v \rangle$ の値は、いずれの風向でも棟間の

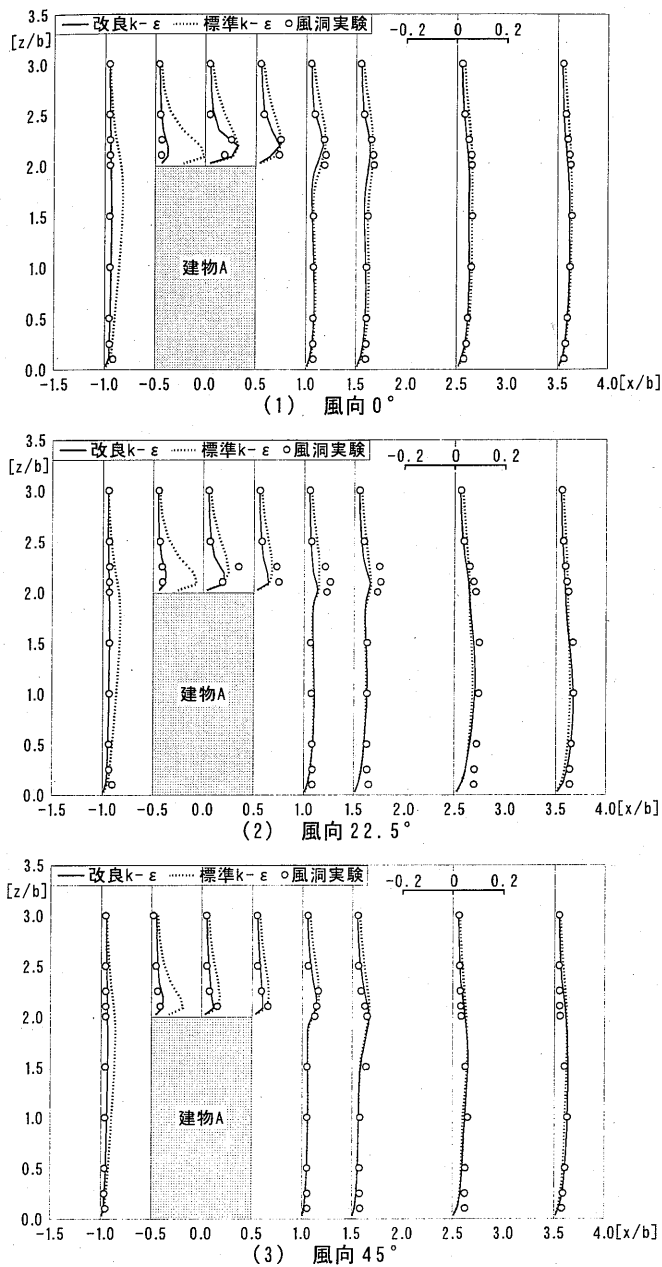


図9 乱流エネルギー(k/U_h^2)の鉛直分布($y/b=1$)

$x/b=-0.5$ の位置では縮流に伴う $\langle v \rangle$ の分布が見られるが、それより風下側では壁面に沿った流れとなり $\langle v \rangle$ の値は非常に小さい。 $\langle v \rangle$ については、いずれの風向でも全体的に計算結果と実験結果はよく対応しており、ほとんどの領域で乱流モデルの違いによる予測結果の差は小さい。

4.3 乱流エネルギーの分布

図9に建物A中心軸上($y/b=1$)の鉛直断面(図1参照)における k の分布を示す。既往の研究と同様に^{4,6)}、標準 $k-\epsilon$ では、建物風上および屋上風上角部付近で k を過大評価している。改良 $k-\epsilon$ ではこの点が大幅に改善されている。この領域を除くと、全体的に計算結果と実験結果はよく対応しており、乱流モデルの違いによる予測結果の差は小さい。この傾向は、図5、6で示した風速の鉛直分布と対応している。図10に、 $z/b=0.15$ の水平断面における k の分布を示す。風向0°の場合、建物間では計算と実験の差異が比較的大きく、特に標準 $k-\epsilon$ では実験に比べてかなり大きめの値を示している。

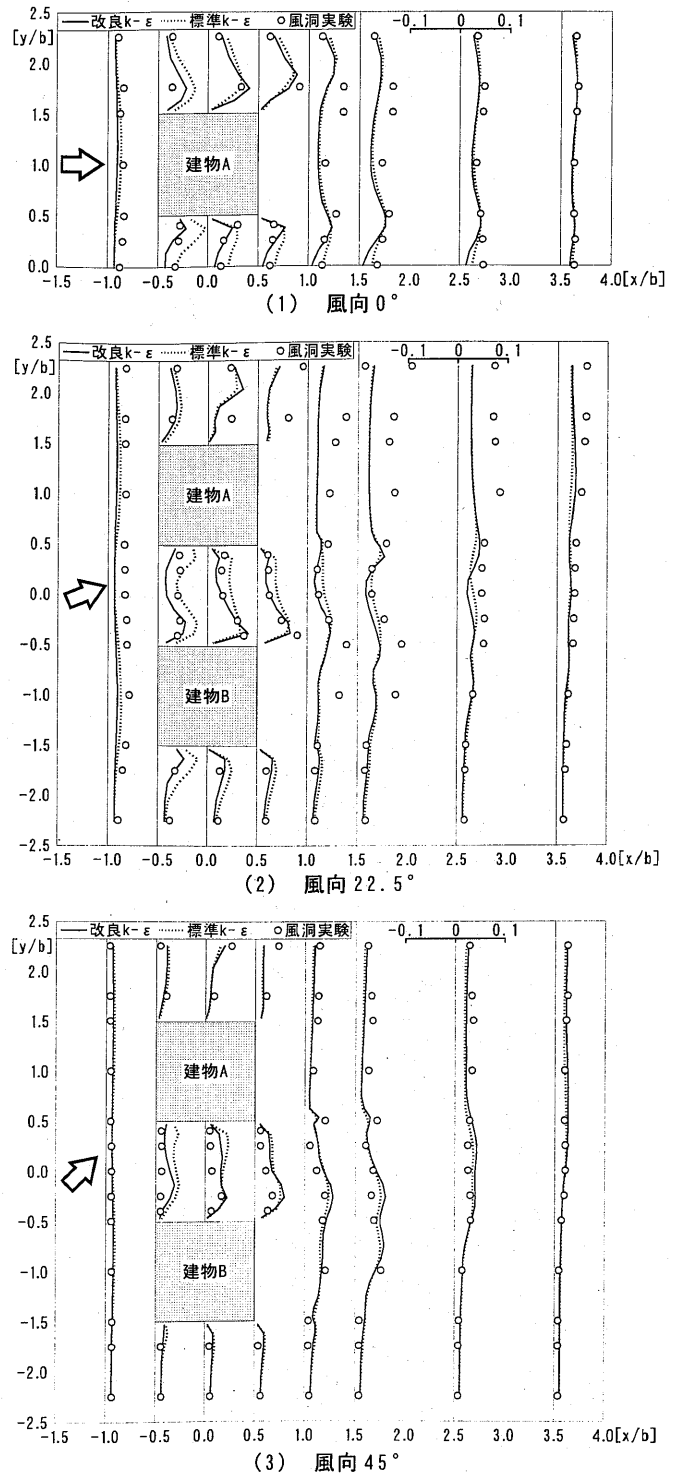


図10 乱流エネルギー(k/U_h^2)の水平分布($z/b=0.15$)

風向22.5°、45°の場合には、建物A側に比べて建物B側で k が大きくなる傾向が見られるが、この傾向が標準モデルでは再現されないが改良 $k-\epsilon$ では再現されている。この領域での k の予測精度が向上したことに対応し、改良 $k-\epsilon$ では、棟間及びより風下側の風速の予測精度が向上したものと考えられる。ただし、風向が22.5°、45°と変化するにつれて、乱流モデルによる差は小さくなる。この理由を以下に示す。

図11, 12は、CFDによる風速ベクトルと k の水平分布を示したものである。風速ベクトルは、実験との対応がよい改良 $k-\epsilon$ の結果の

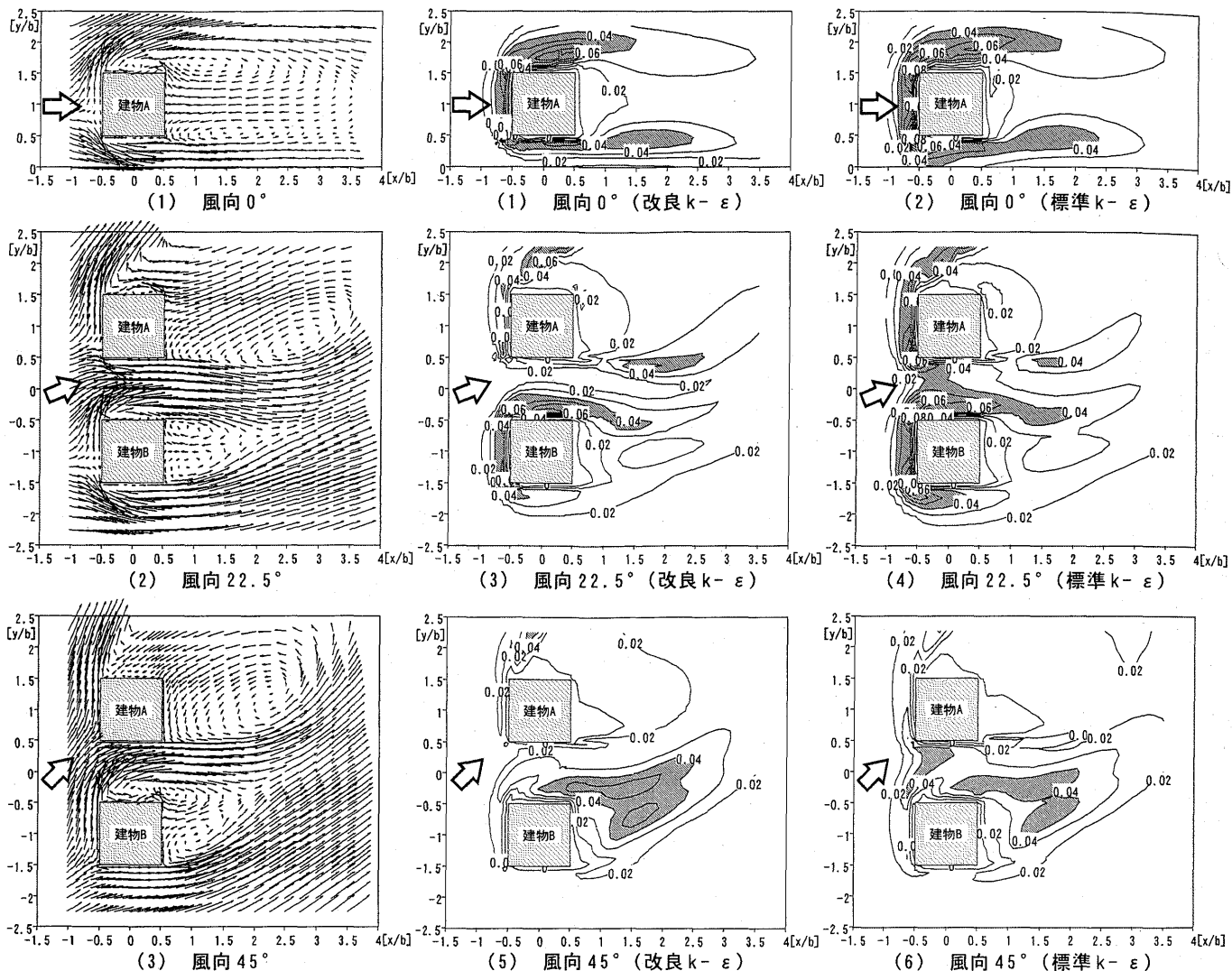


図 11 CFD による風速ベクトルの水平分布
(改良 $k-\epsilon$, $z/b=0.15$)

図 12 CFD による乱流エネルギー (k/U_r^2) の水平分布 ($z/b=0.15$)

み示す。風向 0° の場合、接近流が建物間に流入した時に建物風上角部で強い剥離が発生しないため、この部分の k は実験では大きくない。一方、建物後方の循環流と谷間風により大きなシアが発生する領域で k が大きくなる(図 10(1))。改良 $k-\epsilon$ では、実験に対応する分布が再現されているが(図 12(1))、標準 $k-\epsilon$ では風上壁面の衝突領域で k の過大評価が起きるため、棟間の k の値が改良 $k-\epsilon$ より大きい(図 12(2))。風向 22.5° の場合にも、建物風上及び側面への接近流の衝突によって、標準 $k-\epsilon$ では建物間の k の値が大きくなり、実験との差が大きくなる(図 12(4))。風向 45° の場合は、接近流が壁面に沿って流れるため、角部では剥離は大きくなく、流れが衝突するような領域も見られない。一方、建物後方での側方からの巻き込みによる k のピークが観察される(図 12(5), (6))。乱流モデルによる k の分布の差は比較的小さい。すなわち風向が 0° , 22.5° , 45° と変化するに従い、標準 $k-\epsilon$ における衝突領域での k の過大評価という問題が顕在化せず、モデル間の差が小さくなったものと考えられる。

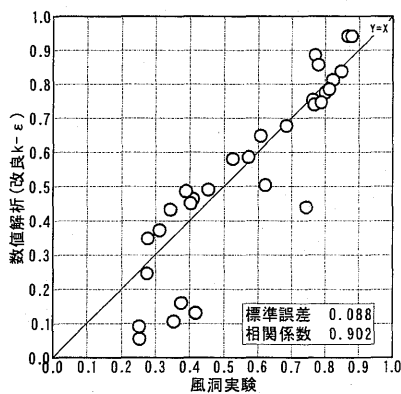
4.4 相関係数、標準誤差による比較

図 13, 14 は、地表面付近 ($z/b=0.15$) における風速のスカラ値の実験値と計算値を比較したものである。ビル風で重要となる強風

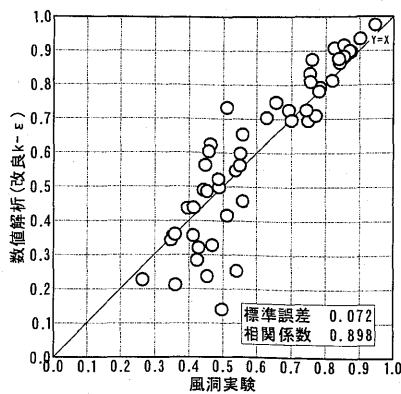
領域に着目するため、 $y/b=-0.5 \sim 0.5$ の範囲に限定して示してある(図 2(1) 参照)。低風速領域でややバラツキがあるがいずれのモデルも相関係数はほぼ 0.9 以上、標準誤差は 0.1 以下であり、高風速域については、概ね $\pm 10\%$ 程度の精度で実験結果を予測している。また風向が 0° , 22.5° , 45° と変化すると、相関係数は大きくなり、標準誤差は小さくなる。この傾向は、文献 16 でも報告されている。この理由としては、主として前述のように接近流が建物壁面に沿う流れになるため、建物前面の剥離流の予測精度が向上するためと考えられる^{注 3)}。またいずれの風向においても、改良 $k-\epsilon$ は標準 $k-\epsilon$ に比べて標準誤差が小さく、また、相関係数が大きくなり、全体的に予測精度が向上している。

5. 結論

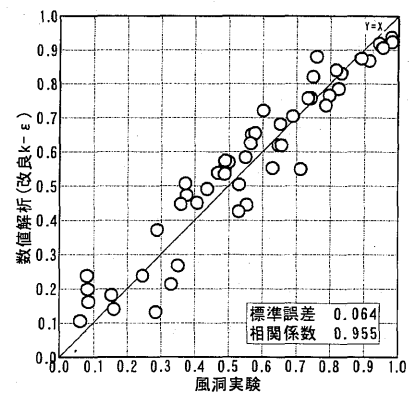
- 1) 直方体が 2 棟並ぶ建物モデルを対象に、風向を 0° , 22.5° , 45° に変化させた風洞実験を行い、地表面付近の速度分布を中心として鉛直分布や流入境界条件等が明確に測定された詳細な実験データベースを整備した。
- 2) このデータベースを対象に、標準 $k-\epsilon$ モデルと Durbin の提案による改良型 $k-\epsilon$ モデルを用いた CFD 解析を行い、特に地表面付近の強風領域に着目して、その予測精度を検討した。



(1) 風向 0°

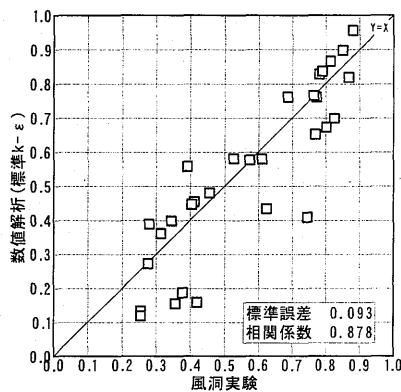


(2) 風向 22.5°

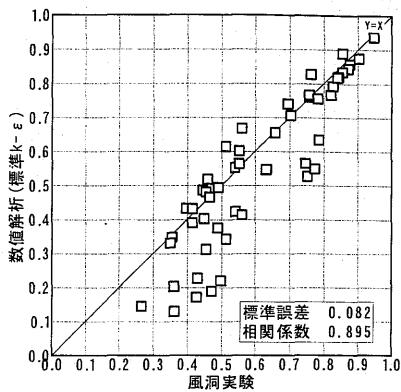


(3) 風向 45°

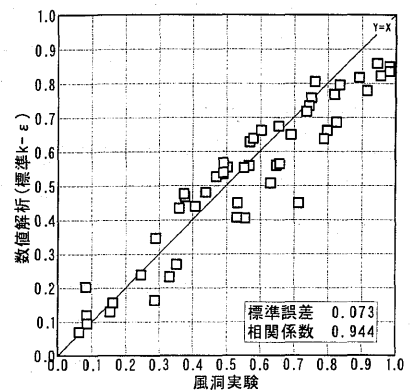
図 13 建物間の強風領域におけるスカラー風速の相関図(改良 $k-\epsilon$, $z/b=0.15$ の水平断面)



(1) 風向 0°



(2) 風向 22.5°



(3) 風向 45°

図 14 建物間の強風領域における風速のスカラー値の相関図(標準 $k-\epsilon$, $z/b=0.15$ の水平断面)

- 3) 今回の対象モデルでは、高風速域における風速のスカラー値については概ね $\pm 10\%$ 程度の範囲で予測できることが分かった。
- 4) また風向が 22.5° , 45° と変化するにつれて、風向 0° に比べ、予測精度が向上する結果となった。これは主として建物前面の剥離流の予測精度が向上するためと考えられる。
- 5) いずれの風向角においても、Durbin の提案による改良 $k-\epsilon$ は高風速領域において標準 $k-\epsilon$ に比べて全体的に予測精度が向上し、その有効性が確認された。
- 6) 実際の市街地風環境の CFD 予測においては、乱流モデルの適否以外にも、建物形状の再現性やメッシュ分割等の諸要因の影響を受けるものと考えられる^[19, 20]。今後は、本研究で明らかとなった基礎的流れ場における CFD の予測精度を踏まえ、形状再現性等の諸要因が予測精度に及ぼす影響について検討を進めていきたいと考えている。

謝辞

本研究における風洞実験の実施において、新潟工科大学学部生の北澤健二君には多大なるご協力を頂いた。また日本建築学会・環境工学委員会・空気環境小委員会の「流体数値計算による風環境評価ガイドライン検討WG(主査:持田灯東北大助教授, 幹事:富永)」での議論から多くの点を参考にさせていただいた。記して謝意を表する。

注1) Durbin モデルの概要^{[6, 15])}

渦粘性係数 ν_t は速度変動スケール $\nu_t = C_\mu \langle u^2 \rangle T$ と時間スケール T を用いて次のようにモデル化される。

$$\nu_t = C_\mu \langle u^2 \rangle T \quad (5)$$

(5) 式において速度変動スケールとして k を、時間スケールとして k/ϵ を用いれば通常の $k-\epsilon$ モデルの ν_t の算出式である次式となる。

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

Durbin は “Realizability” の制約を用いて、時間スケール T に対して次のようなモデル上の制限を示している。

$$T = \min \left(\frac{k}{\epsilon}, \frac{2k}{3 \langle u^2 \rangle C_\mu \sqrt{4S^2}} \right) \quad (7)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right)^2} \quad (8) \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} + \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} \right) \quad (9)$$

(5) 式及び (7) 式の数値変動スケールとして k を採用すれば、次式の様なモデルが導出される。

$$\nu_t = C_\mu k T \quad (10), \quad T = \min \left(\frac{k}{\epsilon}, \frac{1}{C_\mu \sqrt{3S}} \right) \quad (11)$$

既報では^{[6])}、単体の高層建物モデルを対象に標準 $k-\epsilon$ と LK モデル^{[17])}、MMK モデル^{[18])}、Durbin モデルなどの各種改良 $k-\epsilon$ モデルの詳細な比較を行っている。その結果、LK モデルと MMK モデルは、屋上面の剥離流の再現については標準モデルに比べて実験との対応が

大幅に向上するものの、建物後方の循環流を標準 $k-\epsilon$ よりもさらに大きめに予測する傾向があった。一方、Durbin モデルは、モデルの適用範囲が、建物コーナ一部周辺に限定されるため、屋上面については他の改良モデルと同様に改善され、かつ後方循環流については標準 $k-\epsilon$ と同程度の精度となり全体的な予測精度はもっとも優れていた。

注2) この領域は、建物側方を通過する気流の高風速域と後方循環流の低風速域が隣接しているため強いシアが発生し、活発な運動量の輸送が行われている。この運動量の輸送には建物からの渦放出に伴う周期的変動も大きく関与しているものと推察される。今回の解析では標準 $k-\epsilon$ 、改良型 $k-\epsilon$ とともに非定常計算を行なったにも関わらず、周期的変動は明確には再現されなかった。後述するように風向 0° における建物中心や風向 $0^\circ, 22.5^\circ$ における建物側方風下側でCFDが k を小さめに評価しているのは(図10(1), (2))、この周期的な変動成分がCFDで再現されていないためと考えられる。そのためこの領域では $\langle u \rangle$ と実験の対応がやや悪い(図7(1), (2))。なお風向 45° の場合は、その影響を受ける領域が建物間の強風域に含まれたり、今回の測定範囲の外になったため、こうした問題点が顕在化しなかったものと思われる。

注3) その他にも、流れ場の対称性が崩れることによって建物間の強風領域における周期的変動の寄与が相対的に小さくなり、非定常性を再現していない今回の計算手法の問題点が顕在化しなかったことも要因として考えられる。

主な記号

x_i : 空間の3成分 ($i=1$:主流方向(x), $i=2$:横方向(y), $i=3$:鉛直方向(z))

u_i : x_i 方向の風速の3成分 ($i=1$:主流方向(u), $i=2$:横方向(v), $i=3$:鉛直方向(w))

b : 建物幅, h : 建物高さ, U_b : 高さ h における流入風速

k : 乱流エネルギー, ϵ : k の散逸率, ν_t : 渦粘性係数

$\langle f \rangle$: 変数 f の時間平均, f' : 時間平均値からのずれ

参考文献

- 1) 片岡, 川口, 木梨: 電子地図情報を用いた街区の風環境シミュレーション, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D-2), pp.791-792, 2001.9
- 2) 森川, 小野: Rapid Prototyping 手法に基づく建築環境解析設計技術, 日本建築学会熱環境小委員会伝熱WGシンポジウム資料, pp.49-54, 1998
- 3) 村上, 持田, 林, 大和田: $k-\epsilon$ 型2方程式モデルによる建物周辺気流の数値解析 その1, 日本建築学会計画系論文報告集, 第392号, pp.11-21, 1988.10
- 4) 持田, 村上, 林: 立方体モデル周辺の非等方乱流場に関する $k-\epsilon$ モデルとLESの比較, 日本建築学会計画系論文報告集, 第423号, pp.23-31, 1991.5
- 5) 大岡, 持田, 村上, 林: 風洞実験及びLES, DSMとの比較によるASMの精度・問題点の検討, 日本建築学会計画系論文集, 第495号, pp.61-68, 1997.5
- 6) 富永, 持田, 村上, 佐脇: 高層建物周辺気流のCFD解析における各種改良 $k-\epsilon$ モデルの比較, 日本建築学会計画系論文集, 第556号, pp.47-54, 2002.6
- 7) 環境工学委員会・空気環境小委員会・風環境数値計算WG:CFDを利用した高層建物周辺の風環境予測手法の開発, 日本建築学会技術報告集, 第12号, pp.119-124, 2001.1
- 8) 白澤, 持田, 富永他: 建物周辺気流のCFD予測に関するベンチマークテスト(その2) 4:4:1角柱モデルにおける各種改良 $k-\epsilon$ モデルの比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D-2), pp.771-772, 2003.9
- 9) 勝田, 村上, 上原: 建物周辺気流に関する風洞実験の測定器、模型寸法、及び再現性について, 日本建築学会計画系論文報告集, 第232号, pp.141-150, 1975.6
- 10) 孟, 日比: 高層建物周辺の流れ場の乱流計測, 日本風工学会誌, 第76号, pp.55-64, 1998.7
- 11) Murtinuzzi, R., and Tropea, C., The Flow around a Surface Mounted Prismatic Obstacle Placed in a Fully Developed Channel Flow, ASME Journal of Fluid Engineering, vol.115, pp.85-92, 1993
- 12) 村上, 小峯: タンデム型熱線風速計による変動風速の三次元的な測定, 日本建築学会論文報告集, 第297号, pp.59-68, 1980.11
- 13) T.H. Shih, J. Zhu, J.L. Lumley, A new Reynolds stress algebraic equation model, Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 125, pp.287-302, 1995
- 14) Ishihara, T., and Hibi, K.: Numerical study of turbulent wake flow behind a three-dimensional steep hill, Wind and Structures, vol.5, No.2-4, pp.291-300, 2002
- 15) Durbin, P.A.: On the $k-\epsilon$ stagnation point anomaly, Int.J.Heat and Fluid Flow, vol.17, pp.89-90, 1996
- 16) 富田, 富永, 持田他: 建物周辺気流のCFD予測に関するベンチマークテスト(その3) 複合建物モデルにおける各種計算条件が予測精度に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D-2), pp.773-774, 2003.9
- 17) Launder, B.E. & M.Kato: Modelling flow-induced oscillations in turbulence flow around a square cylinder, ASME Fluid Engineering Conference, 1993
- 18) 近藤, 持田, 村上: 改良 $k-\epsilon$ モデルによる2次元モデル周辺気流の数値計算, 第13回風工学シンポジウム論文集, pp.515-520, 1994.12
- 19) 赤林, 中島, 青木他: 中層建物による風環境変化の予測手法に関する研究(その3) 複雑市街地を対象とした数値計算の概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D-2), pp.677-678, 1999.9
- 20) 青木, 赤林, 富永他: 中層建物による風環境変化の予測手法に関する研究(その4) メッシュ分割の差異が予測精度に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D-2), pp.679-680, 1999.9

(2003年9月10日原稿受理, 2003年12月22日採用決定)