

複数建物周辺における風環境数値解析の予測精度に関する研究

F 9 9 G 5 5 3 E 中島 弘喜
 指導教官 赤林 伸一 助教授

1 研究目的

近年、都市部では超高層建築物が数多く建設されており、これらの建築物によって発生する風環境問題、いわゆるビル風は無視できないものとなっている。ビル風は超高層建築物の周囲にだけ生じるものではなく、立地条件や気象条件によっては中高層建築物の周囲にも生じる可能性がある。日本海沿岸部では特に冬季の季節風が強く、雪の降る気候条件であるために、通常の市街地でビル風が問題とならないような中低層建築物でも風害が起こる可能性が高くなる。特に、周囲の建物に比較して3～4倍以上高い建築物が計画される場合には、周囲の風環境に与える影響を検討する必要がある。

これらの風環境を予測する方法として、従来は実測調査や風洞実験が行われるのが主流であった。しかし、実測調査では建設前後に

長期間の風環境の測定が必要である。風洞実験は結果の信頼性は高いが、対象模型の相似条件や風洞実験設備の準備に多額の費用と時間がかかり、更に実験条件に制約があるなどの短所がある。

一方、コンピュータを用いて風環境を解析する方法も研究されている。この方法は、3次元乱流数値解析を行うことで建築物周辺気流を解析するものである。数値解析の利点は計算条件を任意に設定することが可能で、風洞実験では再現できない条件下でも解析が可能である。現在、様々な乱流モデルや計算手法が検討されており実用化の段階を迎えている。

市街地の風環境評価を行う際には、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が殆どである。この場合、それぞれの建物からの剥離流、吹き降ろしが重ね合わさる

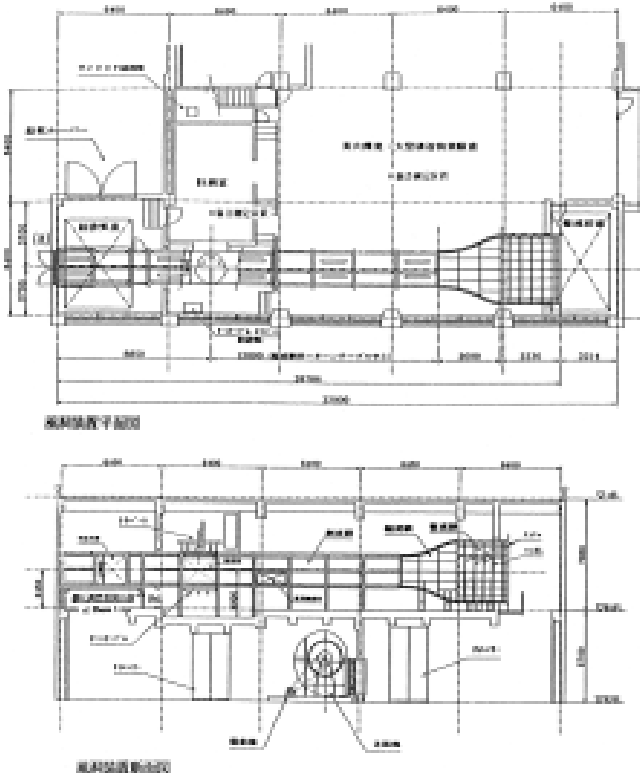


図1 実験風洞

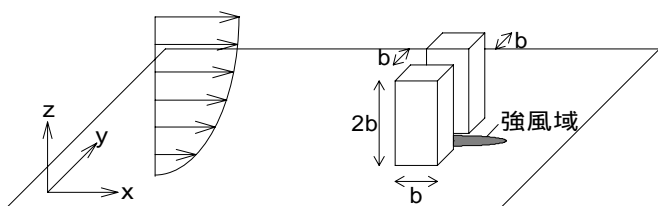
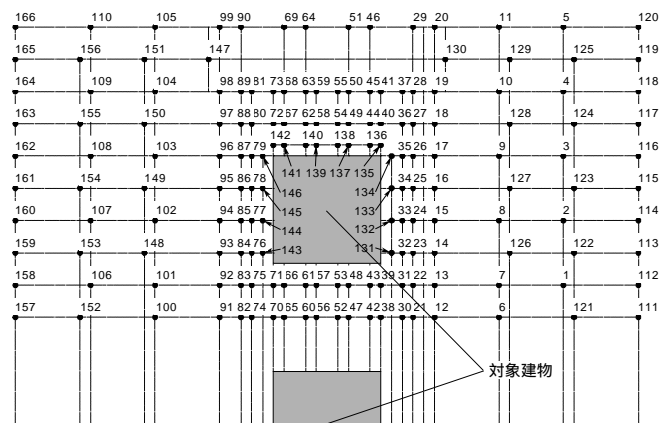
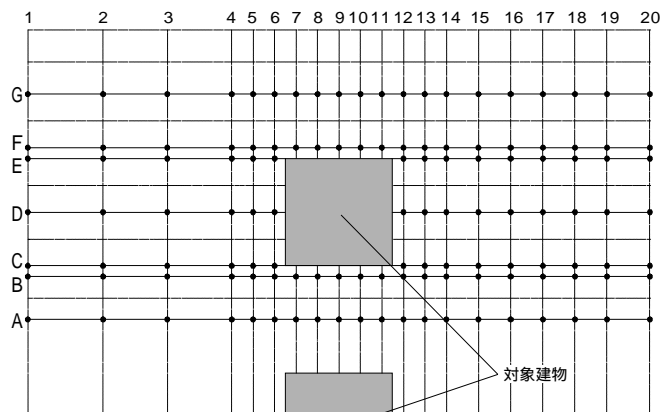


図2 建物モデル



図中の数字は、測定点番号を示す
 測定点数・・・116点

(a)実験1



測定点数・・・125点

(b)実験2

図3 風洞実験における測定位置

ことによって生じる谷間風等により、風速の強い増速域が建物間に生じ大きな問題となる。しかし、現在行われている風環境数値解析の研究の多くは建物が単体の場合を対象としたものであり、建物屋根面上空での逆流の評価などに主眼が置かれ、地上面付近の流れ場や複数の建物を対象とした研究例は極めて少ない。

本研究では、2棟の建物モデルを対象とし相互の影響により生じる地上面付近の強風域が5種類の乱流モデルを用いた既往の数値解析手法によってどの程度の精度で再現されるかを風洞実験結果と比較することにより明らかにし、数値解析の精度を評価することを目的とする。

2 風洞実験

2.1 実験方法

風洞実験には、新潟工科大学所有の風洞実験装置(図1, 最大風速30m/s)を使用する。対象建物は、建物幅を**b**(10 cm)とする1:1:2(幅:奥行き:高さ)の模型を2棟用いる(図2参照)。

風速測定位置を図3に示す。風洞実験には、サーミスタ型の多点風速計を用いた計測(以下実験1)とスプリットファイバースコープを用いた計測(以下実験2)の2種類を行う。実験1は、スカラー風速を多くの測定点で同時に計測することが可能である。一方、実験2は、風速を各成分(x, y, z方向)毎に測定を行うことが可能でベクトル量として計測し、更に応答性も良いため風速の乱れ成分(乱流エネルギー)を算出できるが、一回の測定で一測定点の成分しか計測する事が出来ない。

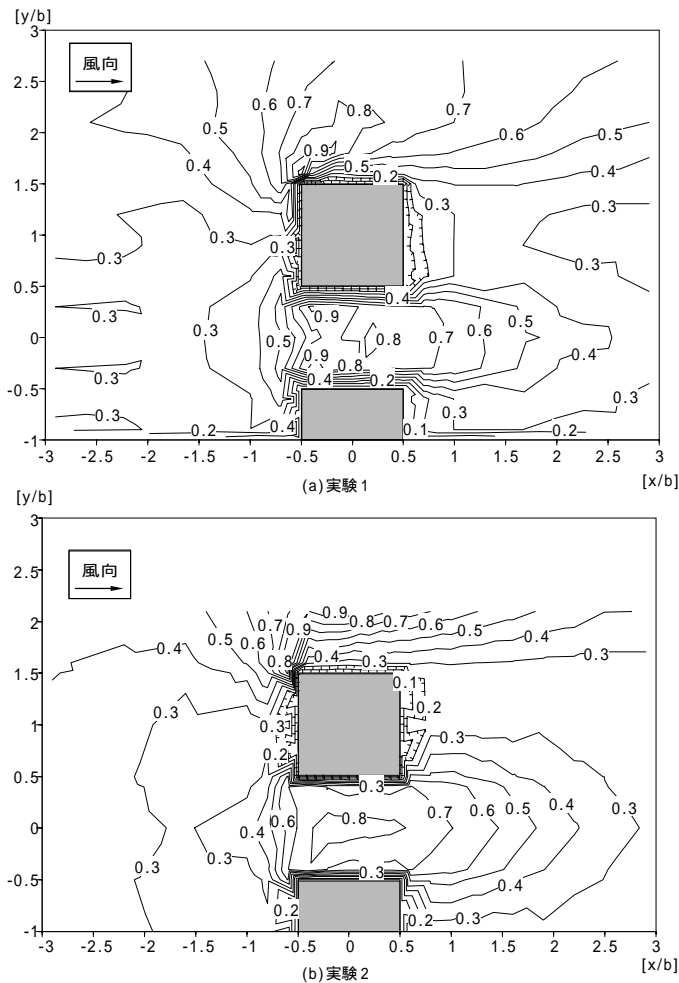


図4 風速比の水平分布(z/b=0.125)

2.2 風洞実験結果

実験1(サーミスタ型の多点風速計)、実験2(スプリットファイバースコープ)の棟高風速を基準風速とする高さ0.125bにおける風速比の水平分布を図4に示す。どちらの実験結果も2棟間の縮流や建物からの剥離流による強風域を再現している。しかし、実験1は風上側の風速比を実験2より0.1程度小さめに再現しており、2棟間の縮流部分の風速比は実験2より0.1程度大きめに再現している。剥離流による強風域では、両者の結果が良く一致している。

3 数値解析

3.1 解析概要

計算ケース、基礎方程式と各種乱流モデルをそれぞれ表1, 2に示す。既往の数値解析手法による5種類の乱流モデルは、鉛直断面の流れ場の解析を目的として研究・開発されたモデルである。標準

表1 計算ケース

	case1	case2	case3	case4	case5
乱流モデル	標準k-モデル	LKモデル	改良型LKモデル	MMKモデル	Durbinモデル

表2 基礎方程式と各種乱流モデル

(1) 基礎方程式

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_i \rangle \langle u_j \rangle}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\langle P \rangle + \frac{2}{3} k \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \rho \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \right\}$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k \langle u_j \rangle}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k -$$

$$\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho \frac{\partial}{\partial x_j} \right) + C_1 \frac{P_k}{k} - C_2 \frac{k^2}{k}$$

(2) 標準k-モデル

$$P_k = \rho S^2, \quad \rho = C_\mu \frac{k^2}{k}$$

(3) LKモデル

$$P_k = \rho S \Omega, \quad \rho = C_\mu \frac{k^2}{k}$$

(4) 改良型LKモデル

$$P_k = \rho S^2 \quad (\Omega/S > 1 \text{ の場合})$$

$$P_k = \rho S \Omega \quad (\Omega/S \leq 1 \text{ の場合}), \quad \rho = C_\mu \frac{k^2}{k}$$

(5) MMKモデル

$$P_k = \rho S^2$$

$$\rho = C_\mu^* \frac{k^2}{k}, \quad C_\mu^* = C_\mu \frac{\Omega}{S} \quad \left(\frac{\Omega}{S} < 1 \text{ の場合} \right)$$

$$\rho = C_\mu^* \frac{k^2}{k}, \quad C_\mu^* = C_\mu \quad \left(\frac{\Omega}{S} \geq 1 \text{ の場合} \right)$$

ここで、

$$S = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right)^2}, \quad \Omega = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right)^2}$$

$$\rho_1 = 1.0, \quad \rho_2 = 1.3, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.09$$

(6) Durbinモデル

$$P_k = \rho v_i S^2, \quad v_i = C_\mu \overline{v^2} T$$

ここで、

$$T = \min \left(\frac{k}{k_0}, \frac{2k}{3v_i^2 C_\mu} \sqrt{\frac{3}{8S^2}} \right)$$

k -モデルは主流方向が大きく変化する場所で乱流エネルギーの生産項 P_k を過大評価してしまうことが従来より指摘されているのに対し、LKモデル及び改良型LKモデルは、生産項 P_k のモデル化が異なる。この2つのモデルは、ノルマル成分の過大評価を防ぐために、変形速度 S の2乗の項を変形速度 S と無次元化した渦度の積でモデル化したものである。また、MMKモデル^{※1}及びDurbinモデルは、標準 k -モデルに対し渦粘性係数 ν_t のモデル化が異なる。本研究では、これら5種類の乱流モデルを用いて地表面付近の流れ場の再現精度を検討する。

3.2 境界条件

アプローチフローは、風洞実験値を補間して図5の様に与えた。地表面の境界の摩擦応力は粗度長 Z_0 を含む形式の対数則より与える。ここで Z_0 の値には風洞実験の流入風速分布から推定される値 ($Z_0=1.39 \times 10^{-3}b$) を用いている。

流入境界の平均風速の鉛直分布は、棟高風速 v_0 を用いる形式の対

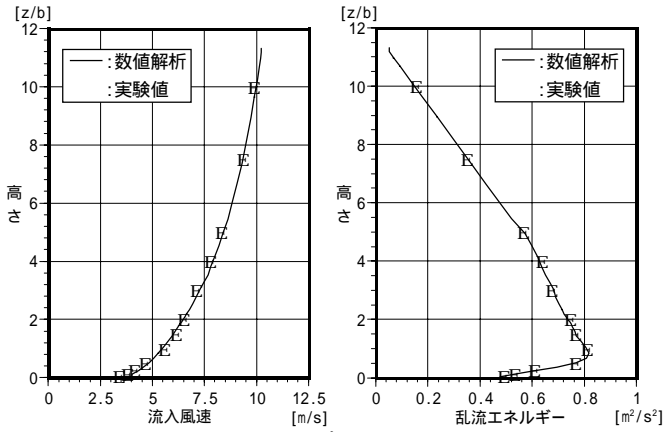


図5 流入プロファイル

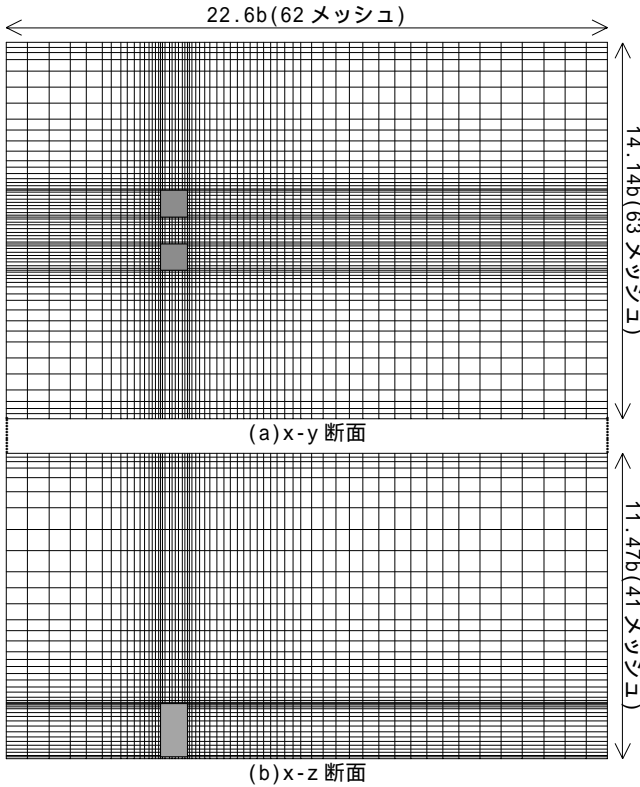


図6 解析領域及びメッシュ分割

数則で近似し、上空は指数則(べき指数 =0.25)に従うと仮定する。流入境界の乱流エネルギーは、風洞実験結果から回帰式を求め、これにより算出する。

3.3 離散化スキーム

時間には1次精度の後退差分、空間については、移流項にQUICKを、他は2次精度中心差分を用いる。

3.4 解析領域

解析領域及びメッシュ分割を図6に示す。解析領域を $22.6b(x) \times 14.14b(y) \times 11.47b(z)$ とし、メッシュ分割を $62(X) \times 63(Y) \times 41(Z)=160,146$ メッシュとする。

4 数値解析結果

棟高風速 ($z/b=2$) で基準化した地表面付近 ($z/b=0.125$) の風速比の水平分布をそれぞれ図7~11に示す。いずれの数値解析結果も建物からの剥離流や2棟間の縮流による強風域を再現している。case1(標準 k -モデル)に対し case2~5は、剥離流による強風域で風速比を0.1程度大きめに計算しており、特に case5(Durbinモデル)が最も大きく計算している。また、建物後流域においても同様の結果となっている。2棟間の縮流による強風域における再現の形状は、case5が他の解析結果に対し特に異なる。しかしながらいずれのモデルも地表面付近の風速を対象として改良されたモデルではないため相対的には乱流モデルによる大きな差異は見られない。

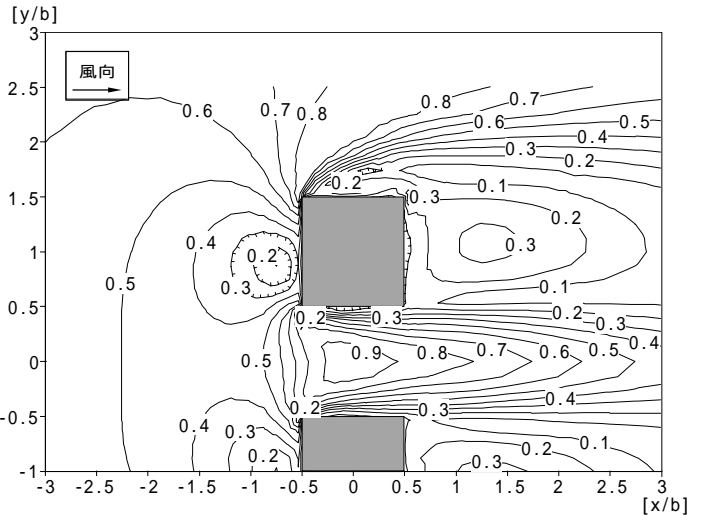


図7 case1(標準 k -モデル)の風速比の水平分布

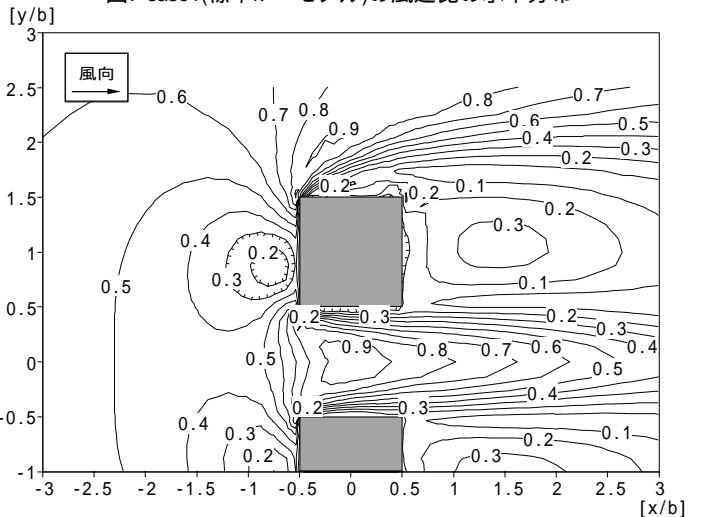


図8 case2(LKモデル)の風速比の水平分布

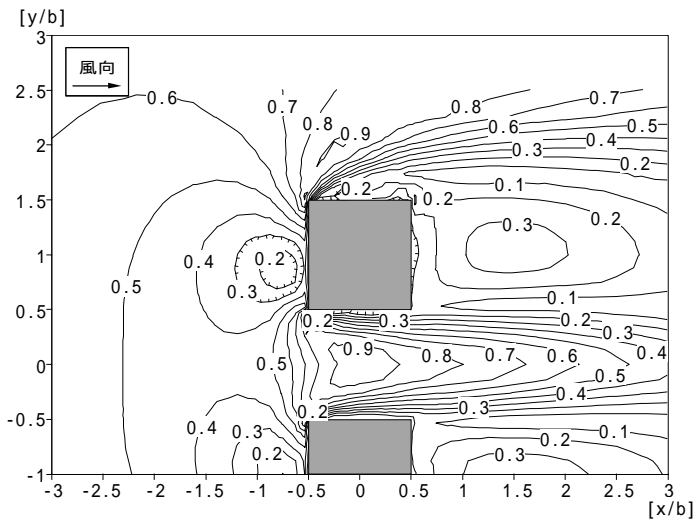


図9 case3(改良型LKモデル)の風速比の水平分布

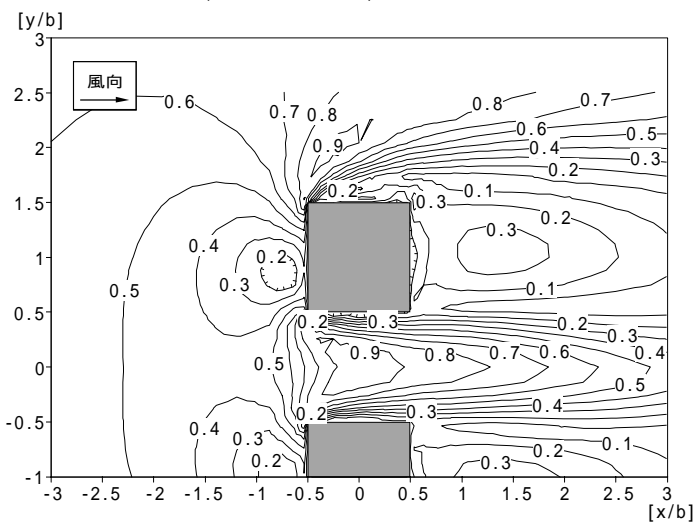


図10 case4(MMKモデル)の風速比の水平分布

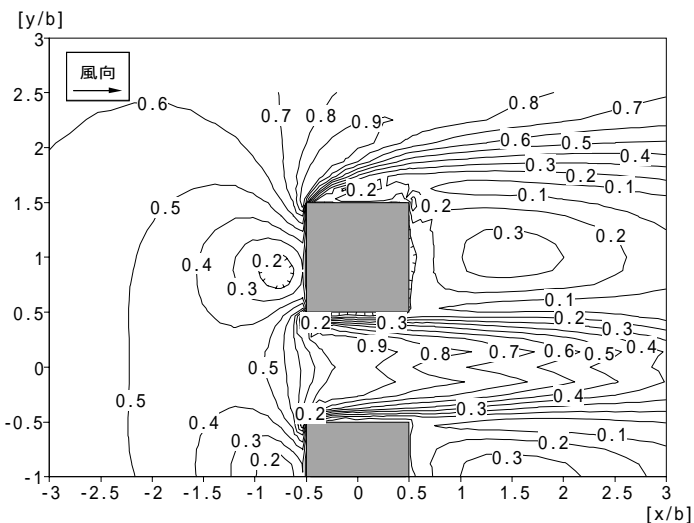


図11 case5(Durbinモデル)の風速比の水平分布

5 数値解析結果と風洞実験結果の比較

地表面付近 ($z/b=0.125$) における棟高風速で基準化した風速比の数値解析結果と風洞実験結果(実験1)の比較を図12~16に、数値解析結果と風洞実験結果の違いが2割以上の領域で建物周辺を分類した結果を図17に示す。建物風上側(領域)では、いずれの数値

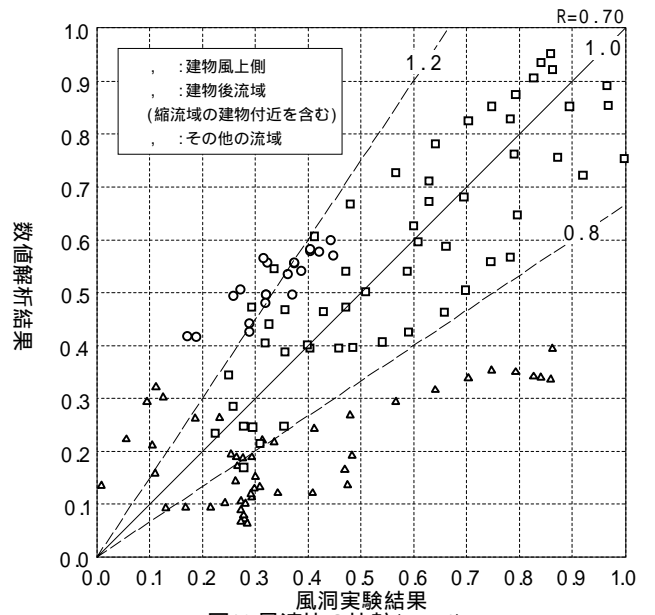


図12 風速比の比較(case1)

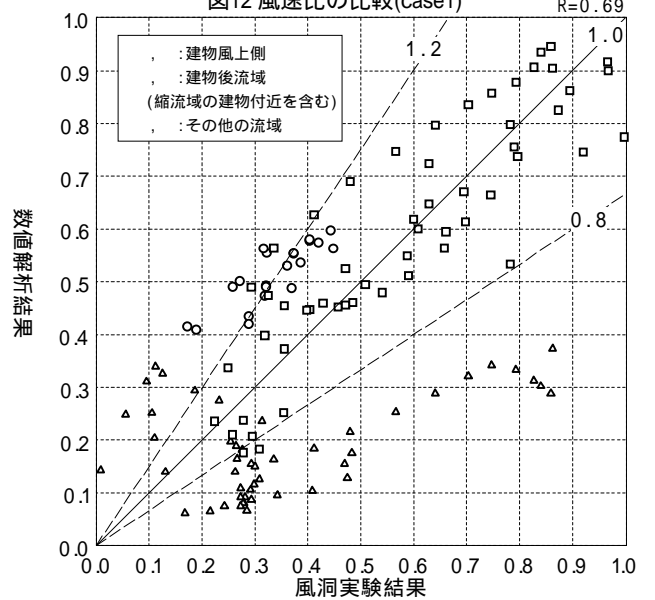


図13 風速比の比較(case2)

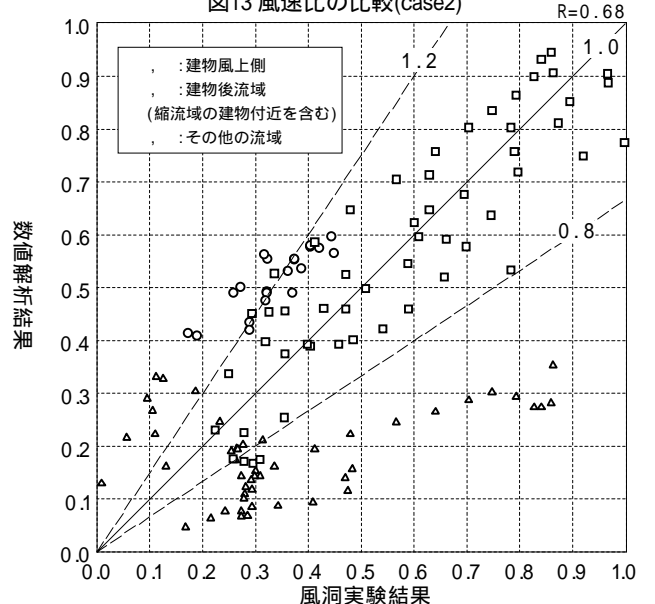


図14 風速比の比較(case3)

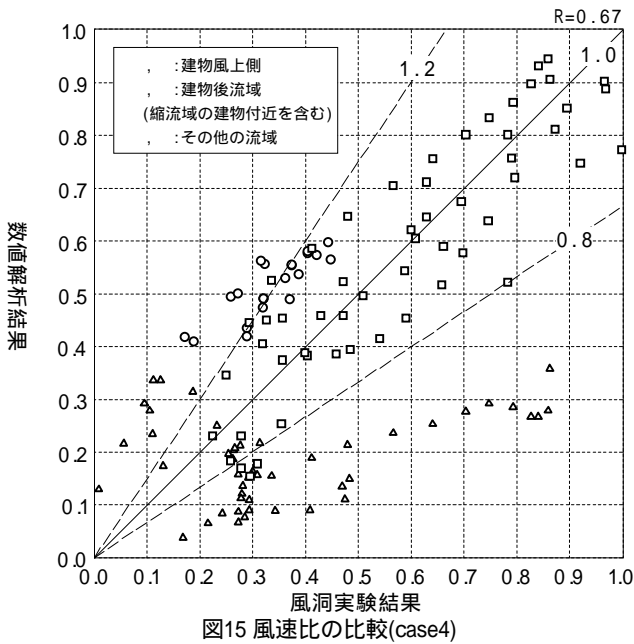


図15 風速比の比較(case4)

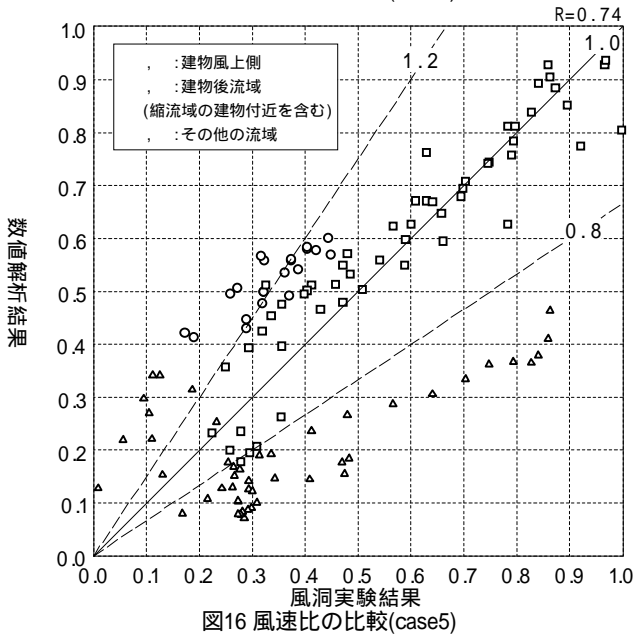
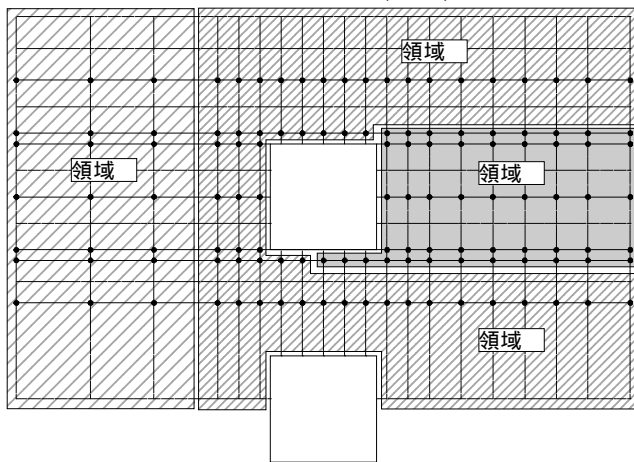


図16 風速比の比較(case5)



- 領域 : 風洞実験結果と数値解析結果の相違が2割程度の領域
- 領域 : 風洞実験結果と数値解析結果の相違が2割を超える領域
- 領域 : 風洞実験結果と数値解析結果の相違が2割を越えない領域

図17 風速比比較の領域分割図

解析でも風洞実験結果より2割程度数値解析結果の方が大きめになっているのに対し、建物後流域(縮流域の建物付近を含む(領域))では両者の相違が極めて大きく数値解析の方が小さめに計算されている。またその他の領域(領域)では、どの数値解析結果も比較的風洞実験結果と一致している。5ケースの数値解析の中では、case5(Durbinモデル)が最も相関係数の値が高く相対的に再現性に優れている。

棟高風速で基準化した風下方向の地表面付近($z/b=0.125$)の風速比を数値解析と風洞実験(実験1)で比較した結果を図18に示す。表示ライン(図3参照)は、 $y/b=0$ (Aライン), 0.4 (Bライン), 0.5 (Cライン), 1.0 (Dライン), 1.5 (Eライン), 1.6 (Fライン), 2.1 (Gライン)である。どの表示ラインにおいても建物風上側では、どの数値解析結果も風洞実験結果より0.2程度風速比を大きめに計算しているが建物付近では、両者の結果がほぼ一致している。逆に建物後流域では、建物からの剥離流や棟間の縮流による強風域の影響を受けない表示ライン(B,C,E,Fライン)での数値解析結果は、風洞実験結果より風速比を小さめに計算している。Dラインでは、建物後流域で風速比が増加し $x/b=1.5$ 付近でピークを示しており数値解析より風洞実験の方が風速比を小さめに再現している。また、A,Gラインでは、建物後流域における風速比を比較的良好に再現している。全体的には、風速比が小さい流域ほど数値解析結果と風洞実験結果の相違は、大きくなる。これらの数値解析結果の中でcase5が相対的に最も再現性に優れている。

2棟間の縮流域の建物付近(Bラインの $x/b=-0.5 \sim 0.5$ 付近)で数値解析結果と風洞実験結果が大きく異なるのは、低風速域から強風域までの範囲が狭いために風洞実験で測定点を設ける際の極わずかな設置のズレが風速比の再現に大きな影響を与えていることが原因の1つであると考えられる。

また、風速比が小さい流域ほど数値解析結果と風洞実験結果の相違が大きくなるのは、風速の乱れ成分(乱流エネルギー)が発生しやすいために安定した風速の計算や測定を行えないことも原因の1つであると考えられる。

6 まとめ

既往の数値解析手法で乱流モデルに標準 $k-\epsilon$ モデル,LKモデル,改良型LKモデル,MMKモデル,Durbinモデルを用いた5ケースで2棟の建物モデルを対象に相互の影響により生じる地上面付近の強風域がどの程度の精度で再現されるかを風洞実験結果と比較した。

風洞実験では、実験1,2ともに2棟間の縮流や建物からの剥離流による強風域を再現している。両者の結果は、低風速域での再現性に若干の差異が認められるが、建物からの剥離流による強風域では、両者の結果は比較的良く一致している。

数値解析結果と風洞実験結果の比較では、強風域の再現は比較的両者の結果が良く一致しているのに対し、弱風域の再現は風速が低風速であるほど精度が低くなる傾向が見られる。

既往の数値解析手法で相対的に最も再現性に優れている乱流モデルは、Durbinモデルであるが、5種類のモデルの再現精度に大きな差異は、認められない。

今後は、風洞模型実験の測定点数を増加させるなどの測定方法を考慮し、低風速域の風速、風向や乱流エネルギー等について詳細に比較し数値解析手法の精度を更に検討する必要がある。また、風速

の乱れの性状を更に検討・把握し、既往の数値解析手法に用いられてきた乱流モデルを更に改良を加え、境界条件を正確に設定することが数値解析精度の向上につながると考えられる。

参考文献

- [1]近藤、村上、持田：「改良-モデルによる建物モデル周辺気流の数値計算」第8回数値流体力学シンポジウム論文集 1994年
- [2]持田、村上、他：「改良-モデルを用いた低層建物モデル壁面風圧力のモデル壁面風圧力の数値解析」生産研究第48巻 1996年2月
- [3]持田、富永、他：「高層建物周辺の地表近くの気流分布の数値解析 その1」日本建築学会学術講演梗概集 1999年9月
- [4]風工学研究所編：「新・ビル風の知識」鹿島出版会、1989年9月

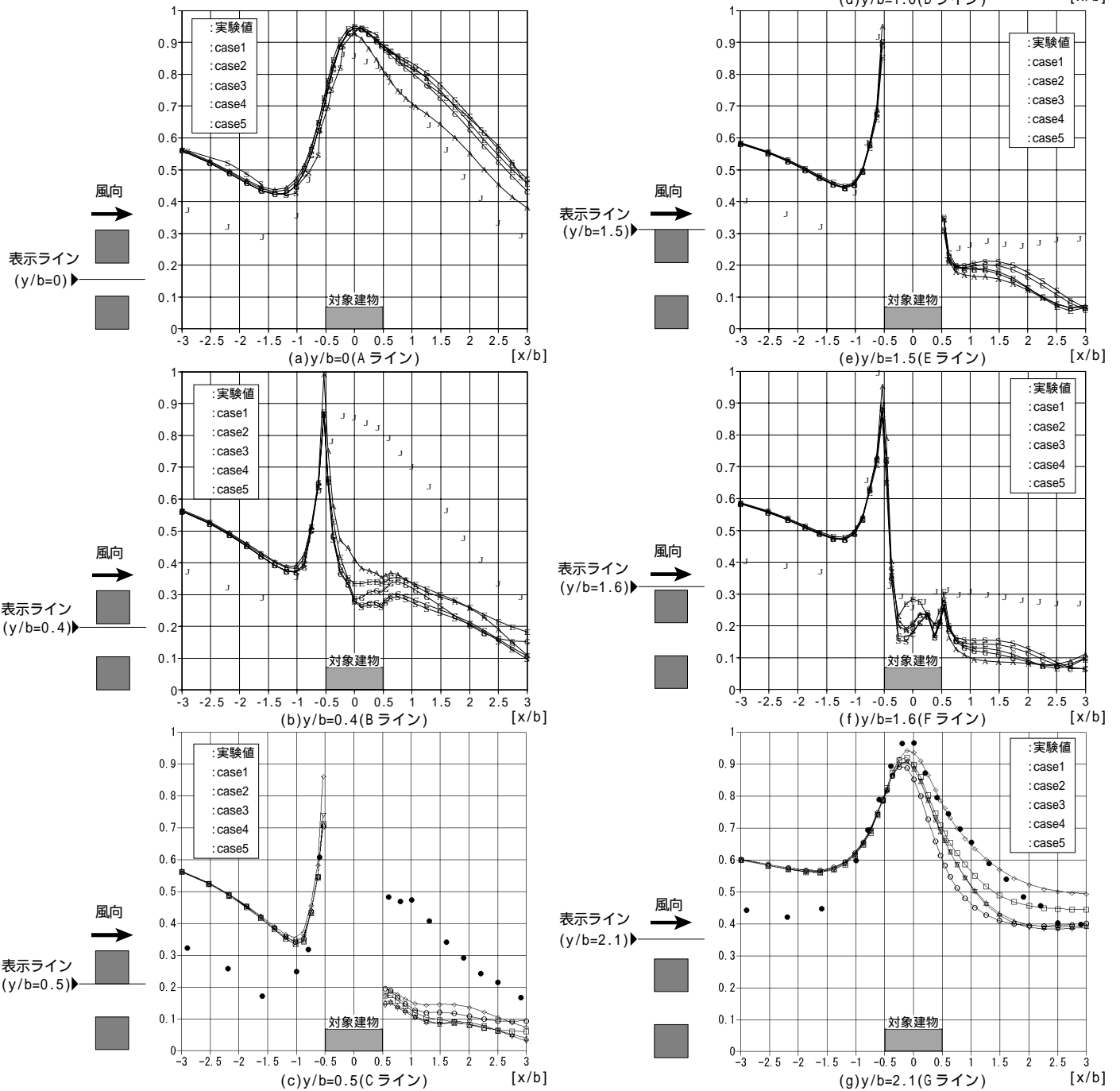


図18 風向方向における風速比のライン上の比較(z/b=0.125)