

複雑市街地を対象とした風環境数値解析手法に関する研究

田中美緒
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、立地条件や気象条件によっては中高層建築物の周囲でも生じる可能性があり、日常生活の支障となり得る為、周囲の建物より高い建築物が計画される場合には、周辺の風環境に与える影響を予め検討することが重要である。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、3次元乱流数値解析を行

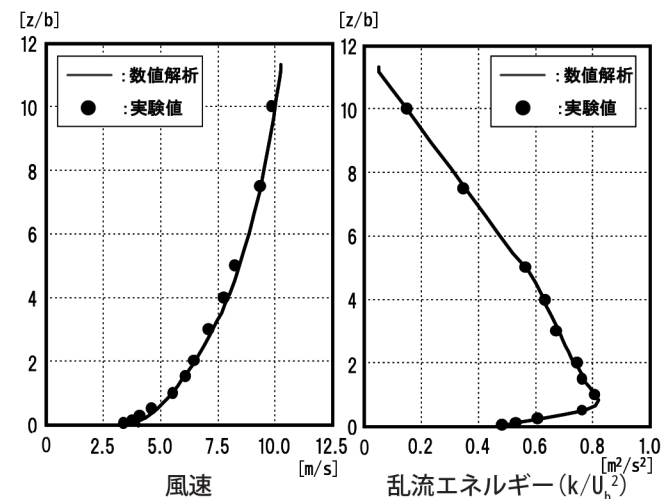


図1 風洞内気流の鉛直分布

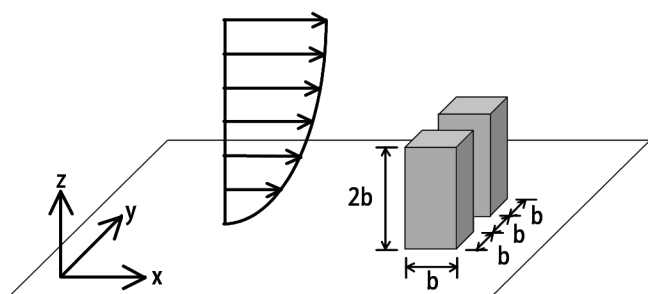


図2 建物モデル

うことで建築物周辺気流を解析する方法も研究されている。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、計画建物が複数存在する場合は殆どである。この場合、建物からの剥離流、吹き降ろしが重な合わさ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。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棟の建物モデルを用い相互の影響により生じる地上面付近の強風域が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、複雑市街地における風環境の数値解析に適した境界条件・乱流モデルを選定する。さらにこの手法を用いて、新潟市の中層建物が存在する市街地を対象とした数値解析を行う。最終的に風洞実験を行わず、数値解析を用いた風環境評価手法を検討することを目的とする。

2 数値解析の精度評価

2.1 解析概要

2.1.1 風洞実験の概要

(1) 測定システム

風速測定には、風速を成分毎に計測する事が可能である

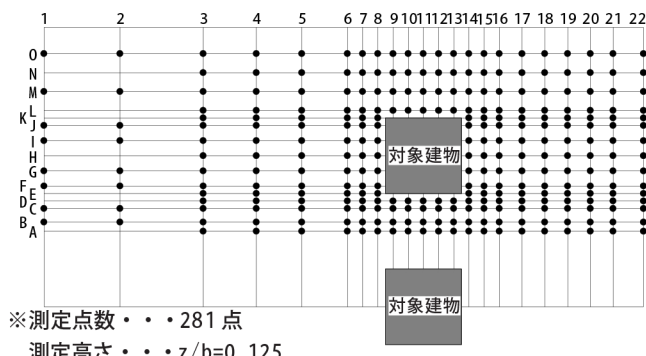


図3 風洞実験における測定位置

スプリットファイバースローブを用いる。サンプリング間隔 10msec, 個数 4096 個(40 秒)で各精度成分の平均値とその標準偏差において、安定した統計量を得る。

(2) キャリブレーション方法

スプリットファイバースローブの較正方法は佐々木, 木谷, Boerner&Leutheusser により提案され、その有効性は木谷, 佐々木の風洞実験により実証されている。本研究では、その方法を改良した日比らの方法^{x1)}に従い、スプリットファイバースローブの較正を行った。

(3) 実験方法

風洞実験には、新潟工科大学所有の境界層型風洞(最大風速 30m/s)を使用する。図 1 に風洞内気流の風速と乱流エネルギー k の鉛直プロファイルを示す。

対象建物は、建物幅を b (10cm)とし、1:1:2(幅:奥行き:高さ)の模型を用いる(図 2 参照)。模型材料には、アクリル板を使用する。

図 3 に測定位置を示す。測定点は 281 点とし、測定高さ $z=0.125b$ とする。スプリットファイバースローブをトラバースに装置に固定し、風向方向(x 方向)に移動させ、ライン毎に測定を行い、 y 方向への移動は、建物模型を移動させて測定を行った。

表 1 各モデルの P_k 及び ν_t の計算式

(1) 標準 $k-\epsilon$ モデル

$$P_k = \nu_t S^2 \quad \dots (1) \quad \nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad \dots (2)$$

(2) LK モデル

$$P_k = \nu_t S \Omega \quad \dots (3) \quad \nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad \dots (4)$$

(3) 改良型 LK モデル

$$P_k = \nu_t S^2 [\Omega / S < 1] \quad \dots (5)$$

$$P_k = \nu_t S^2 [\Omega / S \geq 1] \quad \dots (6)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad \dots (7)$$

(4) MMK モデル

$$P_k = \nu_t S^2 \quad \dots (8) \quad \nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad \dots (9)$$

(5) Durbin モデル

$$P_k = \nu_t S^2 \quad \dots (10) \quad \nu_t = C_\mu k T \quad \dots (11)$$

$$T = \frac{k}{\epsilon} \min \left(1, \frac{1}{C_\mu \sqrt{6}} \frac{1}{\eta} \right) \quad \dots (12)$$

$$\eta = \frac{Sk}{\epsilon} \quad \dots (13)$$

ここで、

$$S = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right)^2} \quad \dots (14) \quad \Omega = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right)^2} \quad \dots (15)$$

$$\sigma_1 = 1.0, \sigma_2 = 1.3, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.09 \quad \dots (16)$$

2.1.2 数値解析の概要

(1) 乱流モデル

本研究の数値解析に用いる乱流モデルは、標準 $k-\epsilon$, LK, 改良型 LK, MMK, Durbin モデルの 5 種類とする。各モデルの P_k 及び ν_t の計算式を表 1 に示す。標準 $k-\epsilon$ 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 k 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 Ω の積でモデル化したものである。また、MMK モデル及び Durbin モデルは、標準 $k-\epsilon$ モデルに対し渦粘性係数 ν_t のモデル化が異なる。

(2) 境界条件

アプローチフローは、風洞実験値を補間して与える。地表面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($Z_0 = 1.39 \times 10^{-3}b$)を用いる。

流入境界の平均風速の鉛直分布は、地表面付近は風洞実験結果の棟高風速を用いる形式の対数則で近似し、上空は指数則(べき指数 $\alpha=0.25$)に従うと仮定する。流入境界の乱流エネルギー k は、風洞実験結果から回帰式を求め算出する。

(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

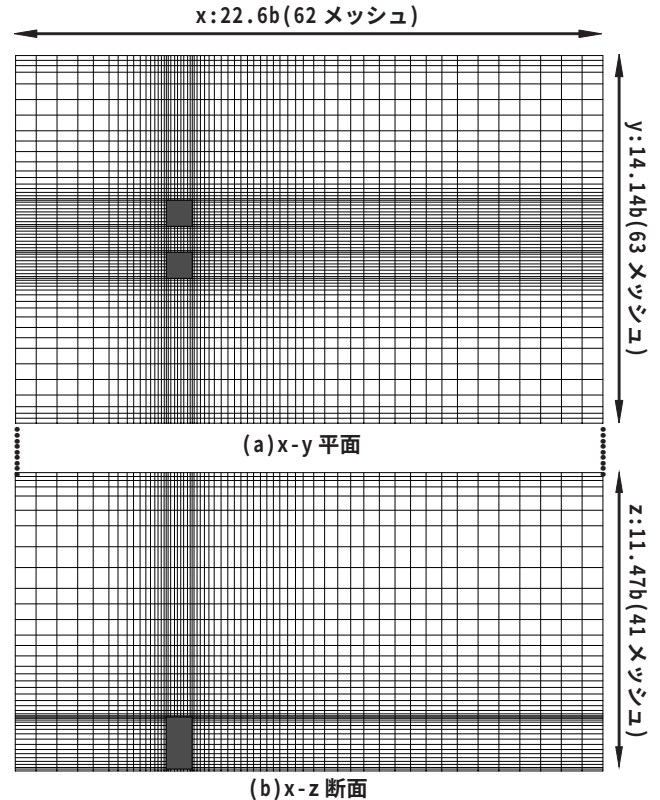


図 4 解析領域及びメッシュ分割

にQUICKスキームを、他は2次精度中心差分を用いる。

(4) 解析領域

図4に解析領域及びメッシュ分割を示す。解析領域は $22.6b(x) \times 14.14b(y) \times 11.47b(z)$ 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。

2.2 風洞実験結果と数値解析結果の比較

2.2.1 スカラー風速の水平分布

風洞実験結果と各種乱流モデルによる数値解析結果の地表面付近($z=0.125b$)のスカラー風速の水平分布を図5に示す。なお、2棟建物モデルにおけるスカラー風速は棟高風速で基準化して示している。いずれの結果も建物からの剥離流や2棟間の縮流による強風域が再現されている。建物外側の剥離による強風域では、標準 $k-\varepsilon$ モデル

が風洞実験結果やその他の乱流モデルによる結果に比べてスカラー風速を0.1程度低く再現している。LK型の改良 $k-\varepsilon$ モデル(LKモデル, 改良型LKモデル, MMKモデル)は強風域の再現が風洞実験結果とほぼ等しく、標準 $k-\varepsilon$ よりも大きめに再現されているが、Durbinモデルはさらに大きい。

2棟間の縮流による強風域では、どの数値解析結果も風洞実験結果よりスカラー風速が0.1程度高く再現されている。また、Durbinモデルは、他の乱流モデルによる結果とは異なり、縮流による強風域でのピークが2つあり、風洞実験結果と同様の形状を再現している。

全体的に5種類の乱流モデルの中でDurbinモデルが最も風洞実験結果に近く再現性に優れている。

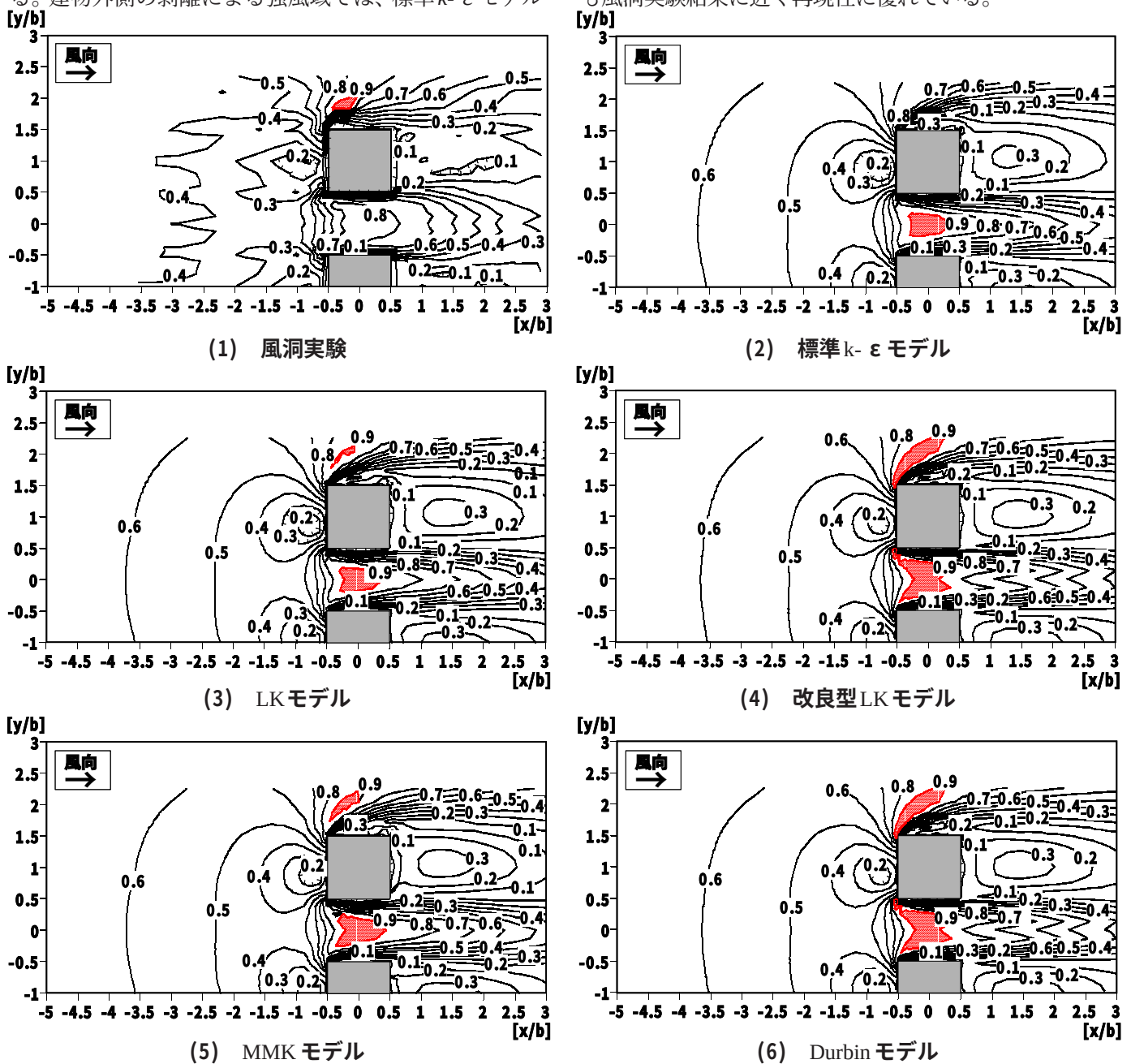


図5 棟高風速で基準化したスカラー風速の水平分布

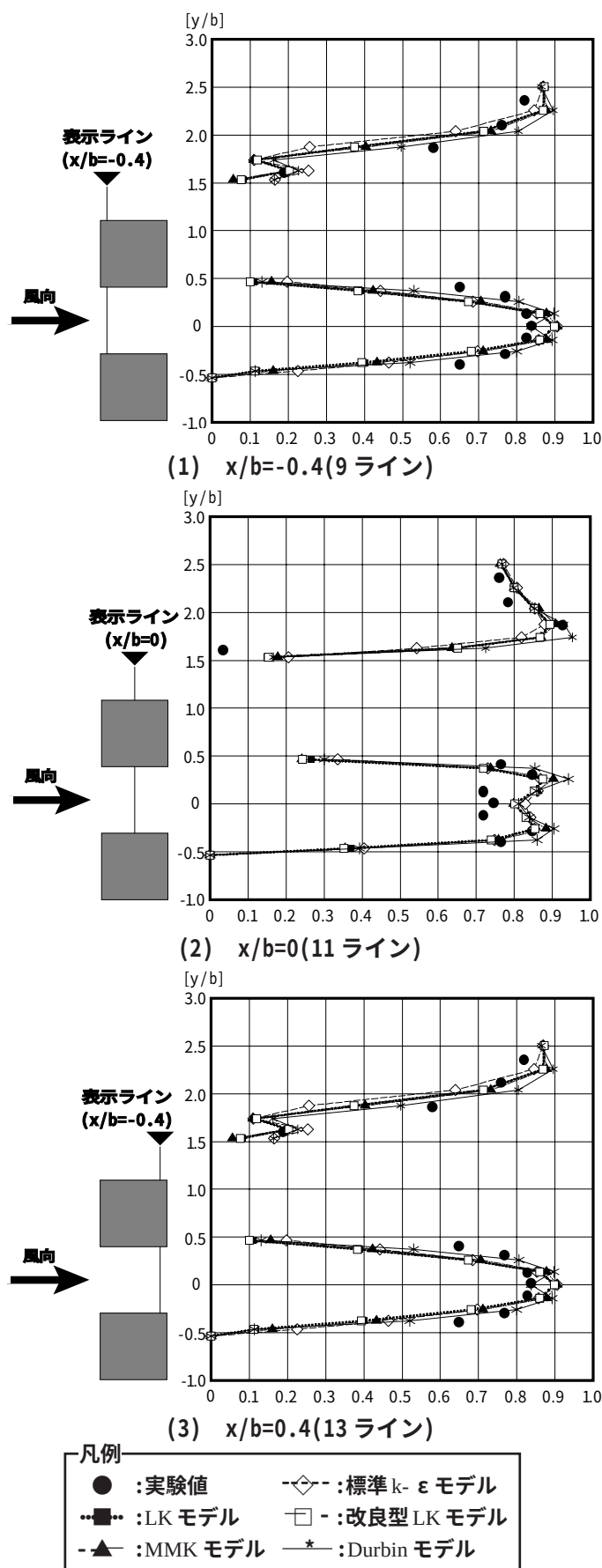


図6 風向に直角方向のラインにおける
スカラー風速の比較($z/b=0.125$)

2.2.2 ライン上での比較

地表面近傍($z=0.125b$)におけるスカラー風速を風向に直角方向のライン($x/b = -0.4, 0, 0.4$)で比較した結果を図6に示す。建物外側の剥離による強風域では、比較したすべてのラインで、数値解析結果は、風洞実験結果よりも大きめに再現されているが、全体的にDurbinモデルが最も実験結果に近い。

2棟間の縮流による強風域では、すべての数値解析結果が中心部の風速を実験に比べて過大に評価しているが、Durbinモデルは、前述のようにピークを2つ持ち、中心部分の風速が弱くなっているため実験に最も近い。

風洞実験結果と数値解析結果は全体的に良く一致している。特に、2棟間の縮流による強風域では、Durbinモデルが最も良好に再現している。

3 複雑市街地における数値解析

3.1 対象地区

図7に複雑市街地における数値解析の対象地区を示す。対象とする地区は、新潟市の中心地より海側の、信濃川河口に近い市街地で、2～3階程度の低層住宅が大半を占めるが、中には10階建てマンションや9階建て集合住宅などの中高層建物も存在する。

3.2 解析概要

複雑市街地における数値解析に用いる乱流モデルは、2棟建物モデルによる解析結果より、5種類の乱流モデルの中で最も良好に再現したDurbinモデルを用いる。境界条件、離散化スキームも、2棟建物モデル(2.1.2(2),(3))と同様とする。

解析領域及びメッシュ分割を図8に示す。解析領域は、 $229m(x) \times 207m(y) \times 250m(z)$ とし、メッシュ分割を $102(x) \times 90(y) \times 35(z)=32,1300$ メッシュとする。



図7 対象地区

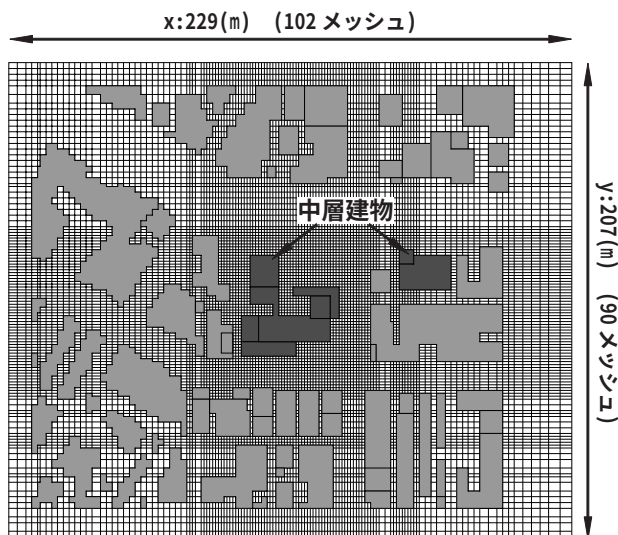


図8 解析領域及びメッシュ分割(x-y平面)

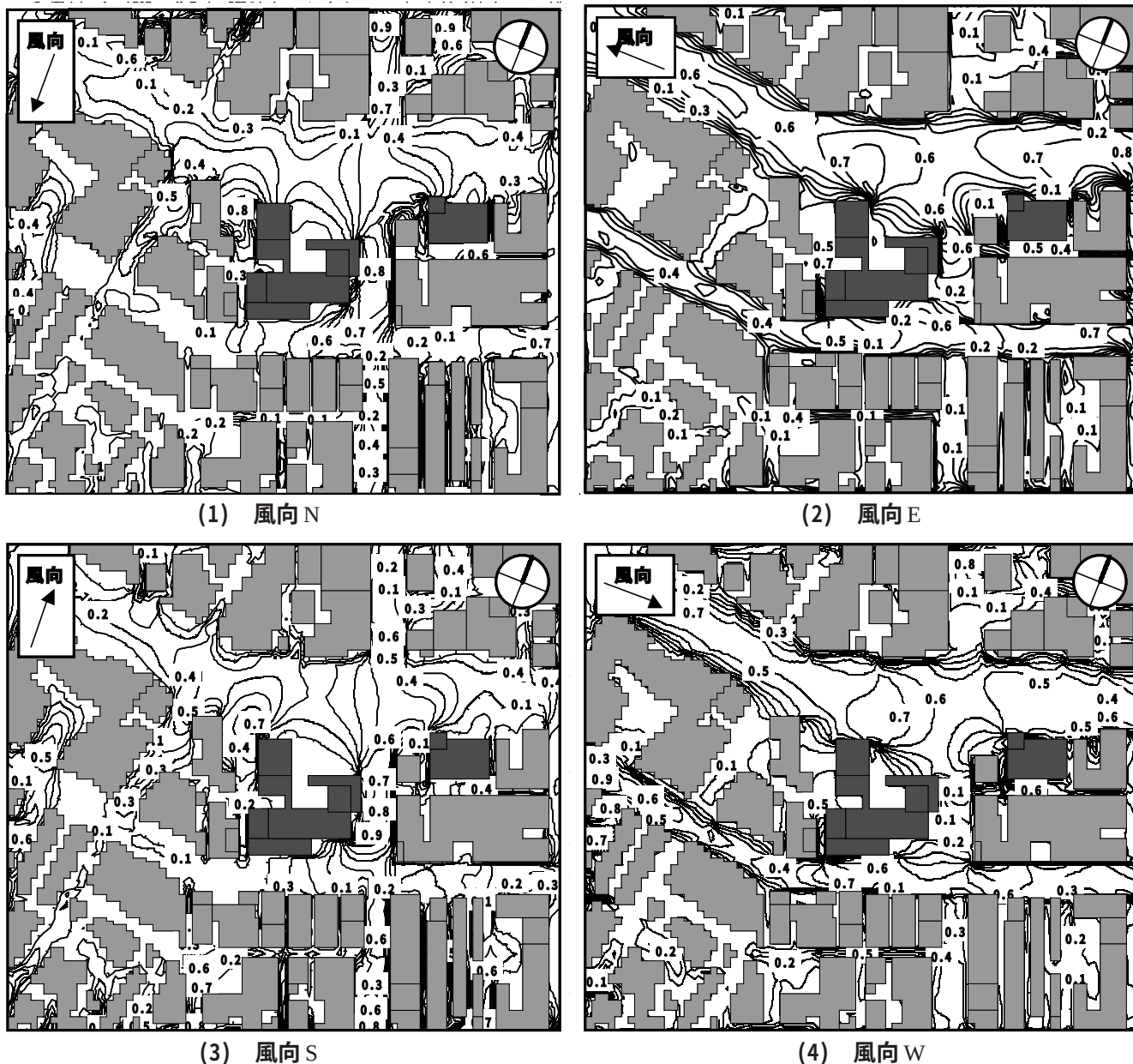


図9 スカラー風速比の水平分布

3.3 解析結果

図9に風向N,E,S,Wの基準風速(地上40m高さ)で基準化したスカラー風速の水平分布を示す。どの風向においても、中層建物からの剥離流による強風域を再現している。風向E,Wでは、中層建物の北側道路で街路風の影響を受けやすくスカラー風速が大きくなっている。全体的に風向Sは、風向Nよりは大きめに再現されているが、中層建物の北側道路で、ほぼ同様の傾向を示している。

4 風環境評価

4.1.1 風環境評価尺度の提案

表2に提案する風環境評価尺度を示す。既往の風環境評価尺度^{文2)}は太平洋側を対象に作成している為、風の強い日本海側には、適していない。その為、本研究では既往の風環境評価尺度に基づいて作成された、日本海側の気

候特性を考慮した風環境評価尺度案^{文3)}を用いて風環境評価を行う。

4.1.2 2棟建物モデルにおける風環境評価

図10に2棟建物モデルにおける風洞実験結果と数値解析結果の風環境評価のランク分布を示す。風洞実験結果は、建物からの剥離による強風域でランク4(ランク外)があるのに対し、数値解析結果では2棟間の縮流による強風域でランク4がある。全体的に、Durbinモデルを用いた数値解析結果は風洞実験結果と同様の傾向を示している。

4.1.3 複雑市街地における風環境評価

図11に複雑市街地における数値解析結果と既往^{文4)}の風洞実験結果の評価尺度の比較を示す。ほとんどの測定点

で、風洞実験結果よりも小さめに評価されており、数値解析結果は風洞実験結果よりも緩めに評価している。

5 まとめ

①標準k-εモデルでは剥離流による強風域を、風洞実験結果や他の数値解析結果よりも0.1程度小さめに計算している。LK型の改良k-εモデル(LKモデル, 改良型LKモデル, MMKモデル)の再現性には、ほとんど差が見られなかった。

相対的に、Durbinモデルは2棟間の縮流による強風域での再現性が最も優れている。

②2棟建物モデルにおける風洞実験結果と数値解析結果の比較は、スカラー風速に多少の違いが生じるが、風環境評価尺度による比較では概ね一致している。

複雑市街地における数値解析結果は、風洞実験結果より小さめに評価している。これは数値解析手における建物のモデル化等が原因であると考えられる。

③今後は、建物モデル化等を更に検討し、数値解析手法を向上させる必要があると考えられる。

表2 提案する風環境評価尺度

強風域による 影響の程度 高さ1.5m	対応する 空間用途の例	評価する強風のレベルと許容される頻度					
		提案する評価尺度			既往の評価尺度		
		10	15	20	10	15	20
		日最大瞬間風速(m/s)			日最大平均風速(m/s)		
ランク1 最も影響を受け やすい用途の場所	住宅地 の商店街	13% (47日)	1.4% (5日)	0.15% (0.5日)	10% (37日)	0.9% (3日)	0.08% (0.3日)
ランク2 影響を受けやすい 用途の場所	住宅地	28% (102日)	5.7% (21日)	1.1% (4日)	22% (80日)	3.6% (13日)	0.6% (2日)
ランク3 比較的影響を受け にくい用途の場所	事務所街	45% (164日)	11% (40日)	2.7% (10日)	35% (128日)	7% (26日)	1.5% (5日)

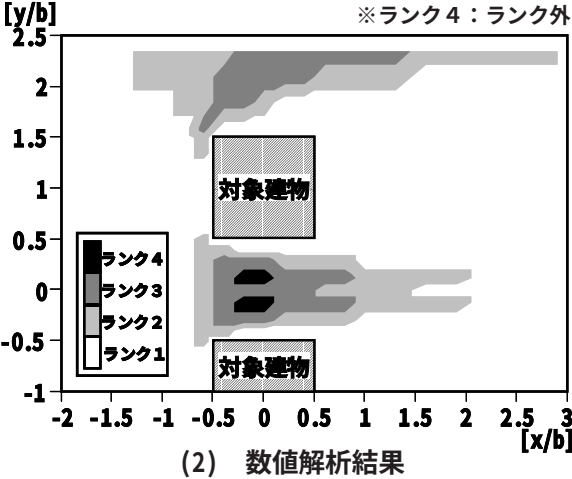
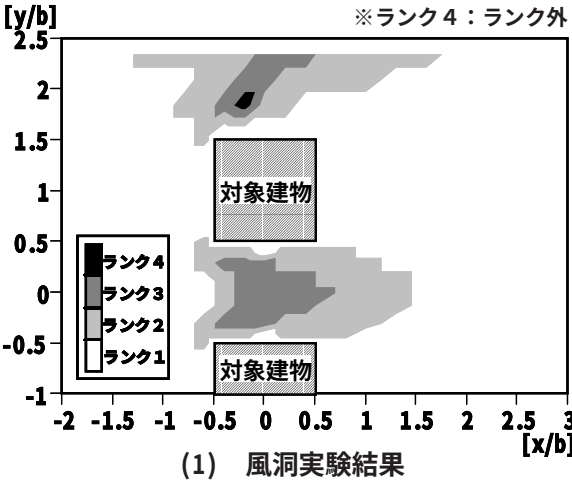


図10 単純モデルにおけるランク分布

参考文献

- [1] 孟、日比:「建物屋上面の流れ場の乱流特性と組織運動」第72号 日本風工学会誌 1997年
- [2] 村上周三:「高層建築物による風害の予測・対策と風洞実験手法について」1983年2月
- [3] 赤林、村上、他「新潟市における風環境の評価方法に関する研究 その6」日本建築学会学術講演梗概集 1997年9月
- [4] 赤林、大阿久、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1」日本建築学会学術講演梗概集 1998年9月
- [5] 富永、村上、他:「RANSモデルによる高層建築物周辺気流のCFD解析 その1」日本建築学会学術講演梗概集 2000年9月
- [6] 佐脇、富永、他:「RANSモデルによる高層建築物周辺気流のCFD解析 その2」日本建築学会学術講演梗概集 2000年9月

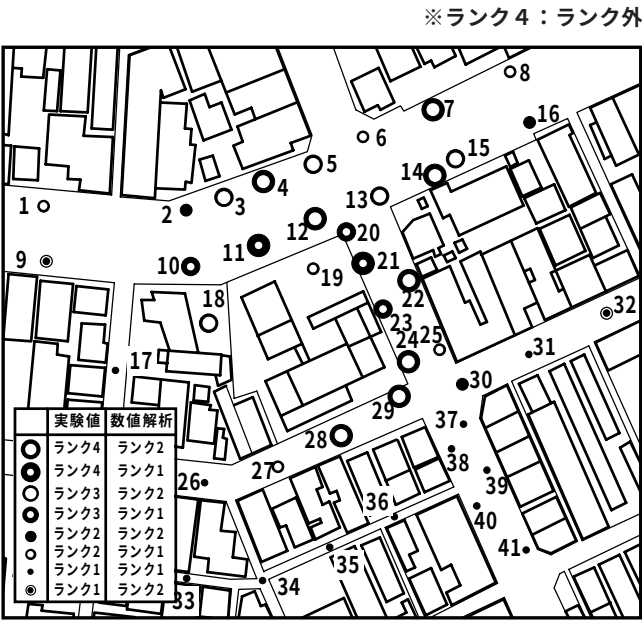


図11 複雑市街地における評価尺度の比較