

境界層流中の 1:1:2 直方体周辺流れの数値解析
Durbin 型の改良 k- モデルの予測精度に関する検討
CFD Analysis of flowfield around a high-rise building
- Prediction accuracy of the modified k- models proposed by Durbin

富永禎秀, 新潟工大, 柏崎市藤橋 1719, tominaga@abe.niit.ac.jp
持田灯, 東北大, 仙台市青葉区荒巻字青葉 06, mochida@sabine.pln.archi.tohoku.ac.jp
村上周三, 東大生研, 目黒区駒場 4-6-1, murakami@cc.iis.u-tokyo.ac.jp
佐脇哲史, 新潟工大, 柏崎市藤橋 1719, sawaki@cc04.cc.niit.ac.jp
Yoshihide TOMINAGA, Niigata Institute of Tech., Fujishashi 1719, Kashiwazaki, 945-1195 Japan
Akashi MOCHIDA, Tohoku Univ., Aoba 06, Sendai, 980-8579 Japan
Shuzo MURAKAMI, I.I.S., Univ. of Tokyo, Roppongi 7-22-1, Minato-ku, 106-8558 Japan
Satoshi SAWAKI, Niigata Institute of Tech., Fujishashi 1719, Kashiwazaki, 945-1195 Japan

<Abstract> The flowfield around a high-rise building model placed within a turbulent boundary-layer was analyzed using various k- models. Results of these analyses were compared with experimental data. In the cases of revised k- models, the flowfield near the front corner of building model corresponded well to the experimental results. However the recirculation region behind the building model was predicted to be larger by the revised k- models compared to the results of the standard k- model. Among the computations using various turbulence models compared here, the result with the Durbin's revised k- model showed the best agreement with the experiment. The reason of the improvement by Durbin's model was discussed in detail.

1. 序

既報¹⁾では、境界層流中に置かれた 1:1:2 直方体周辺流れを対象に、標準 k-、Launder-Kato(LK)型の改良 k-、RNG 型の k-、Durbin の提案による改良 k-、応力方程式モデルの各種 RANS モデルを適用し、その予測精度を比較した。その結果、改良型の k- モデルは、全般に角柱後方の循環流域を実験や標準 k- に比べて広めに評価する傾向であったが、Durbin の提案による改良 k-²⁾はこの点が改善されており、最も実験との対応が優れていた。

本報では、既報の計算結果に、筆者らが LK モデルに改良を加えたモデル (MMK モデル) 及び Durbin 型の改良 k- モデル中の定数を変化させたモデルを追加し、Durbin のモデルが他の改良 k- に比べて予測精度が優れていた理由について、諸量を比較しながら考察する。

2. 数値計算の概要

2.1 対象流れ場

Fig. 1 に示すような境界層流中の 1:1:2 (幅:奥行き:高さ)の直方体周りの流れを対象とする。この流れ場に関する詳細な風洞実験結果が石原, 日比により報告されている³⁾。

2.2 計算ケース

筆者らの開発したコードによる各種 k- モデル (標準 k-、LK⁴⁾、改良 LK⁶⁾、MMK⁵⁾、Durbin モデル²⁾)を比較した。各改良 k- モデルの P_k 及び τ_{ij} の計算式を Table 1 に示す。

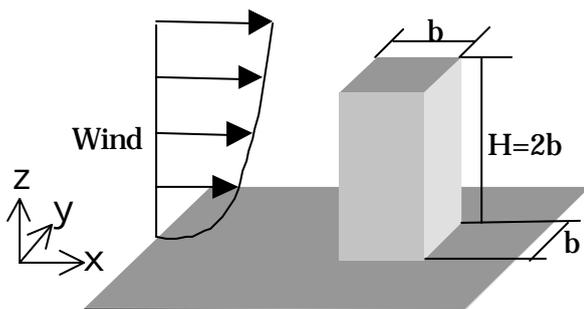


Fig.1 Flowfield analyzed

また境界条件を Table 2 に示す。全てのケースで HSMAC に基づく非定常計算を行った。ただし今回の解析では周期的変動は一切再現されなかった^{注)}。

2.3 比較した乱流モデルの概要

1) LK 及び改良 LK モデル

Launder & Kato による改良 k- モデル⁴⁾ (以下 LK モデル; Table 1(2)式)では、 $\beta < 1$ の領域では、標準 k- の場合に Table 1 (1) 式で評価される P_k の値を減じ、単純なせん断流れのように $\beta = 1$ となる流れでは、Table 1 (1) 式と同じになる。しかしながら $\beta > 1$ の領域では、Table 1 (2) 式を用いると標準 k- の場合 (Table 1(1)式) より P_k が過大となる。筆者らは、これを避けるために Table 1 (2) 式の適用範囲を $\beta < 1$ の領域に限定し、 $\beta = 1$ の場合は 通例の P_k の算定式 (Table 1(1)式) を用いるという方法を採用し、これを改良 LK モデルと称している (Table 1(3), (4)式)。

2) MMK モデル

LK モデル及び改良 LK モデルでは、レイノルズ応力は通例の EVM で近似し、 P_k のみを修正しているため、モデル化の一貫性に欠ける。これに対して、筆者らは、EVM 中の渦動粘性係数 τ_{ij} を β の関数とするモデル (Table 1(8), (9)式) を提案している (MMK モデル)⁵⁾。このモデルの場合、 P_k の算定式 (Table 1(5)式) は、標準 k- と同じ形であるが、

$\beta = 1$ の場合は、 τ_{ij} を Table 1(9)式で与えるため、最終的な P_k の評価は改良 LK モデルによるもの (Table 1(4)式) と同じとなる。

3) Durbin によるモデル

Durbin は著者らの提案した MMK モデルと同様に、 P_k ではなく τ_{ij} に修正を施す新しい改良型の k- モデルを提案している²⁾。その概要を以下に示す。

レイノルズストレスは、渦粘性近似により以下のように表現できる。

$$\langle u_i u_j \rangle = -2 \tau_{ij} S_{ij} + \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (14)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad (15)$$

さらに渦粘性係数 ϵ_t は次のようにモデル化される。

$$\epsilon_t = C_\mu \langle u^2 \rangle T \quad (16)$$

$\langle u^2 \rangle$: 速度変動スケール

T: 時間スケール

(16) 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/Ω を用いれば通常の $k-\epsilon_t$ モデルの ϵ_t の算出式である次式となる。

$$\epsilon_t = C_\mu \frac{k^2}{\Omega} \quad (17)$$

Durbin は“ realizability ”の制約 $2k \geq \langle u^2 \rangle \geq 0$ 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。

$$T = \min \left(\frac{k}{\Omega}, \frac{2k}{3 \langle u^2 \rangle C_\mu} \sqrt{\frac{3}{4S^2}} \right) \quad (18)$$

$$S = \sqrt{2S_{ij}^2} \quad (19)$$

(16) 式及び (18) 式の数値変動スケール $\langle u^2 \rangle$ として k を採用すれば、次式の様なモデルが導出される。

$$\epsilon_t = C_\mu k T \quad (20)$$

$$T = \min \left(\frac{k}{\Omega}, \frac{a}{C_\mu \sqrt{3S}} \right) \quad (21)$$

既報¹⁾では、(21) 式の a を 1 としていたが、文献 2) によれば、 a は 1 以下の経験定数を探ることが出来るとされている。本報では、 $a=0.5$ としたモデルを新たに計算し、それを Durbin2 と称す。

3. 結果及び考察

3.1 各種改良 k-モデルの比較

1) 屋上及び後方床面の再付着距離

(Table 3)

屋上及び後方床面の再付着距離を Table 3 に示す。従来より指摘してきたように⁸⁾、今回の計算条件でも標準 k-モデルでは実験で観察される屋上面の逆流が再現されない。これに対して改良型の k-モデル、すなわち LK、改良 LK、MMK、2つの Durbin モデルの全てのケースで屋上付近の逆流は再現されるが、全体的には実験よりやや広めとなる傾向にある。屋上面上の逆流の大きさ (X_R) に関しては、改良 LK と MMK が最も実験との対応がよい。一方、後方循環流の再付着距離 (X_F) を比較すると、すべてのモデルにおいて実験より大きめに評価しているが^{注)}、改良型 k-モデルの方が標準 k-モデルよりさらに過大評価となる傾向にある。LK に比べて改良 LK と MMK は X_F を短めに評価しており実験との対応がやや改善される。改良型の k-モデルの中では、Durbin が X_F を短く評価し、最も実験に近い。Durbin では Table 1 (13) 式の数値定数 α を 1.0 としていたが、これを 0.5 とした Durbin2 は、 $\alpha=1.0$ の場合に比べて屋上面の再付着距離が非常に大きくなり、実験とは離れる

Table 1 Modeling of P_k and ϵ_t

	P_k	ϵ_t
標準 k-	$\epsilon_t S^2$ (1)	$C_\mu k^2 / \Omega$ (7)
LK	$\epsilon_t S \Omega$ (2)	
改良 LK	$\epsilon_t S^2$ [$\Omega/S \geq 1$] (3) $\epsilon_t S \Omega$ [$\Omega/S < 1$] (4)	
MMK	$\epsilon_t S^2$ (5)	$C_\mu k^2 / \Omega$ [$\Omega/S \geq 1$] (8) $C_\mu k^2 / \Omega \cdot \Omega/S$ [$\Omega/S < 1$] (9)
Durbin	$\epsilon_t S^2$ (6)	$C_\mu k T$ (10) (13) 式の $\alpha=1.0$
Durbin2	$\epsilon_t S^2$ (6)	$C_\mu k T$ (10) (13) 式の $\alpha=0.5$
$S = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)^2}$ (11), $\Omega = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)^2}$ (12), $T = \min \left(\frac{k}{\Omega}, \frac{a}{C_\mu \sqrt{3S}} \right)$ (13)		

Table 2 Boundary condition

解析領域	流れ方向 (x_1) には、建物中心より風上側に 5.5b、風下側に 15b とする。高さとは幅は、実験を行った風洞の測定断面と同一 ($13.75b(x_2) \times 11.25b(x_3)$)
流入境界	$\langle u \rangle, k$ については、風洞実験値 ²⁾ を補間して求めた。は流入面で k の生産項 $P_k = \epsilon_t S^2$ を仮定し算出 (Fig.2)
側面・上空境界	固体壁として扱い、generalized log law を仮定した。
流出境界	諸量に関して法線方向の勾配ゼロとする。
地表面境界 ⁷⁾	z_0 型対数則 ($z_0=1.8 \times 10^{-4}m$)
建物壁面境界	側面・上空境界と同様とする。
メッシュ分割	分割数は $60(x_1) \times 45(x_2) \times 39(x_3)$ 。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 20、建物屋上で約 35。
移流項スキーム	全輸送方程式に QUICK を使用

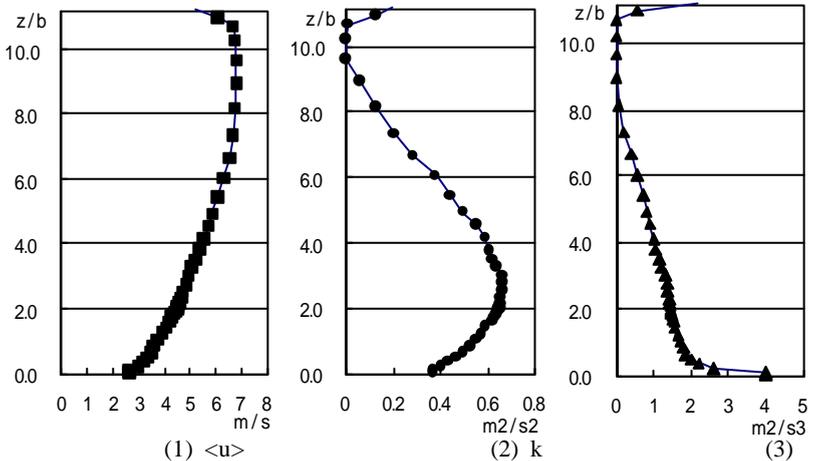
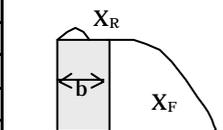


Fig.2 Inflow profiles

Table 3 Reattachment lengths

	X_R	X_F
Experiment ³⁾	0.52b	1.42b
Standard		2.70b
LK	0.58b	3.19b
Modified LK	0.53b	3.11b
MMK	0.52b	3.09b
Durbin	0.63b	2.70b
Durbin2	0.97b	3.23b



傾向にある。また、後方床面の再付着距離も、比較したモデル中で最も長くなった。

2) スカラー風速の分布 (Fig.3,4)

中心断面におけるスカラー風速の分布を Fig.3 に示す。屋上面の上方で見られる風速 5m/s の等値線に注目すると、実験及び 2 つの Durbin モデルではこの等値線が建物風上コーナーまで到達しているのに対して、他の改良 k- では到達していない。すなわち 2 つの Durbin モデルでは建物風上コーナーでの剥離が他の改良 k- モデルに比べて強く、正確に再現されている。

建物後方循環流域内においては、全てのモデルの床面近傍で、実験にはない風速 1m/s 以上の領域が観察され、この部分での逆流が大きいことを示している。これは、Table 3 で見られた全てのモデルにおいて建物後方の再付着距離 (X_f) が過大評価されていることと対応している。なお Durbin2 では、建物後方床面近傍で Durbin では表れない 1.5m/s 以上の領域が観察され、この部分での逆流の過大評価の傾向がさらに強い。

Fig.4 に建物後方におけるスカラー風速の鉛直分布を示す (LK, MMK は省略)。この位置では全てのケースにおいて分布の傾向が実験と異なっている。標準 k- と Durbin はほぼ一致しており、再付着距離の結果と対応している。Durbin2 は、他のモデルより全体に風速のピークが上に移っている。z/b=1 付近では実験にやや近づいているが、より地表面に近い領域では、逆に実験から離れる傾向にある。

3) 乱流エネルギー k の分布 (Fig.5,6)

中心断面における乱流エネルギー k の分布を Fig.5 に示す。また Fig.6 に建物後方における k の鉛直分布を示す (LK, MMK は省略)。全ての改良型 k- では、標準 k- で見られた建物風上コーナー部での k の過大評価が改善されている。建物屋上部分においては、LK、改良 LK は実験に比べて k の値が小さすぎるが、この点が MMK では改善されている。しかし LK、改良 LK、MMK 共に、k のピーク的位置は標準 k- と同様に建物風上コーナー部に存在し、この点は実験と異なる。屋上面付近の k の分布性状は 2 つの Durbin モデルが最も実験に近い。

建物後方循環流域では、全ての計算ケースにおいて k が実験に比べて小さめの値を示している。また全ての計算ケースの地表面付近で k が急激に減少している点が、実験とは異なる。Durbin2 が他のモデルに比べてこの領域で k の値がやや大きめで実験に近づく。

3.2 Durbin モデルの予測精度に関する検討

これまでに示したように、今回比較した改良型 k- モデルの中では、Durbin モデル中の定数を 1.0 としたケース (Table 1 の Durbin) が全体的に実験との対応が最も優れていた。以下では、標準 k-、改良 LK、Durbin、Durbin2 の 4 つのモデルを詳細に比較することにより、Durbin で予測精度が向上した理由について検討する。

1) 乱流エネルギー k の分布 (Fig.5,6,9(1))

Fig.5 (1), (3), (5) に示したように Durbin、Durbin2 と

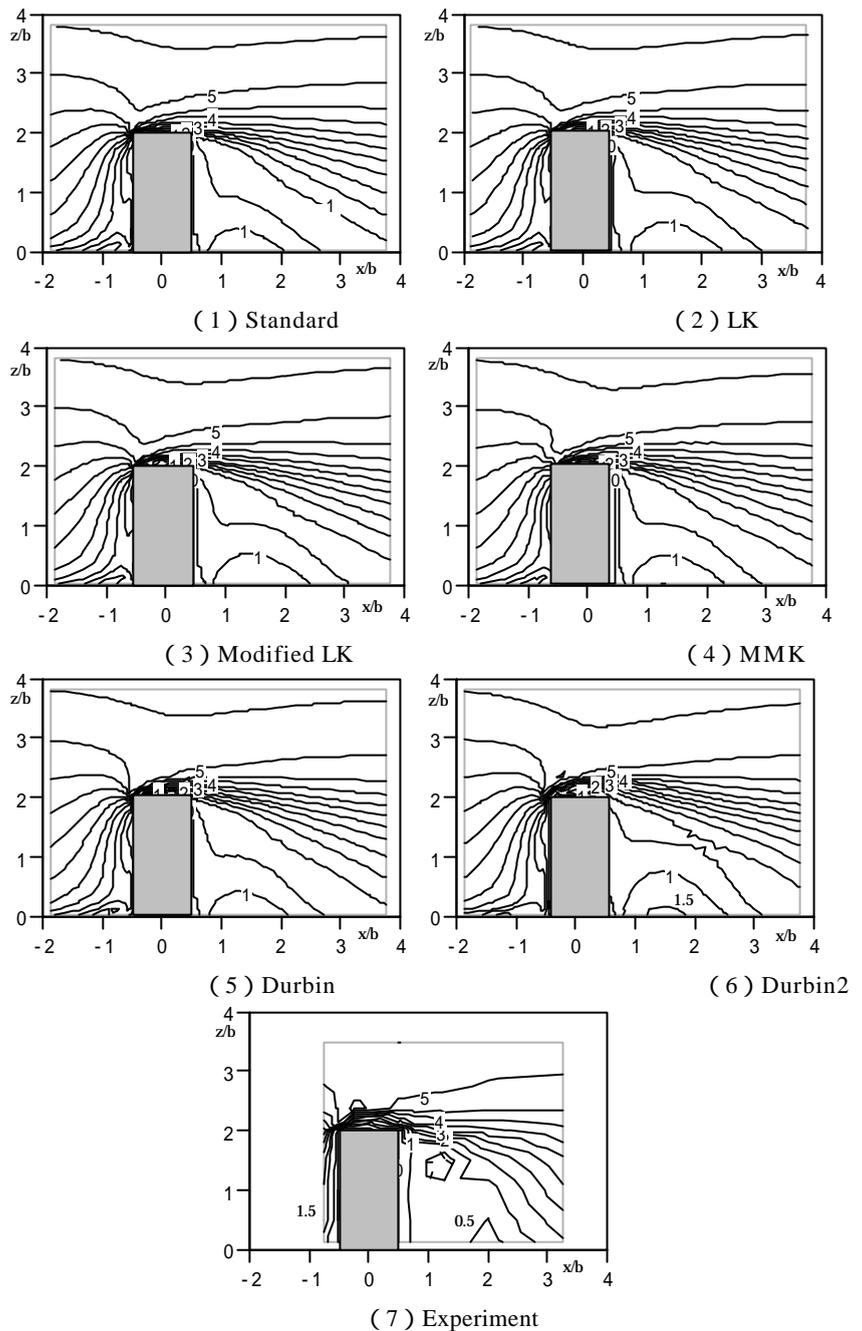


Fig.3 Distribution of scalar velocity (m/s)

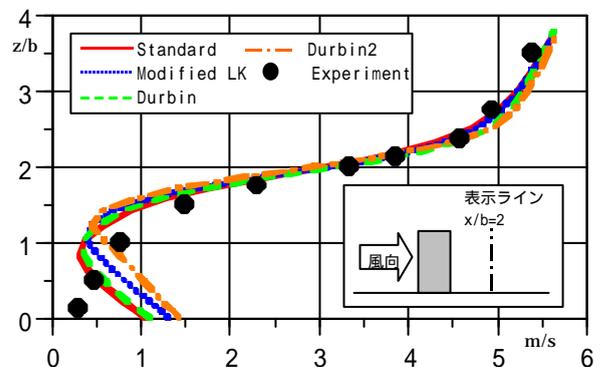


Fig.4 Vertical distribution of scalar velocity behind building (x/b=2)

改良LKでは標準k-で見られる建物風上コーナーでのkの過大評価を大幅に改善する。しかし、屋上面上でのkの主流方向の分布 (Fig.9(1)) を詳細に観察すると、実験値のピークの位置や大きさが、Durbinでは正確に再現されているのに対して、改良LKは屋上面上でkを実験より過小に評価しており、実験とは大きく異なる。

Durbin2では、Durbinに比べて建物風上コーナー部から屋上面上にかけてkの値が小さめとなる。一方、後方循環流域を比較すると逆にDurbinよりやや大きな値となっている。

2) 乱流エネルギーの生産項 P_k の分布 (Fig.7, 9(2))

鉛直断面における乱流エネルギーの生産項 P_k の分布を Fig.7 に示す。改良LKと2つのDurbinモデルの分布性状にそれほど大きな違いは見られない。しかし、屋上面上の水平分布を比較すると (Fig.9(2)) kの分布と同様に、2つのDurbinモデルは屋上付近で P_k が比較的大きなピークを持つものに対して、標準k-と改良LKでは屋上付近のピークはかなり小さい。一方、標準k-では、かねてより指摘してきたように¹⁾、建物風上コーナー前方に P_k のピークが生じており、これがこの部分の同モデルのkの過大評価の原因となっている。2つのDurbinモデルではこのような異常な建物風上コーナー前方の P_k のピークは生じていない。また改良LKは全体に値が小さい。この P_k の違いが前述のkの分布の違いとなって現れたと考えられる。

Durbin2では、Durbinと比較して、風上コーナー部における P_k のピーク値はやや大きくなるものの、屋上面付近では全体に低い値となっており、前述のkの分布と対応している。また建物後方循環流域においては、kの分布と同様にDurbin2の方がDurbinに比べて P_k の値がやや大きい (Fig.7(3), (4))。

3) 渦粘性係数 ϵ_t の分布 (Fig.8, Fig.9(3))

渦粘性係数 ϵ_t の鉛直断面における分布を Fig.8 に示す。2つのDurbinモデルは他のモデルに比べて建物風上コーナー部における ϵ_t の値をかなり小さめに評価している。これは、この部分では Strain rate scale の S が非常に大きくなるため、Table 1 (13) 式で計算される時間スケール T が小さくなり、その結果、Table 1 (10) 式で計算される ϵ_t が小さめに評価されたものである。屋上面上の水平分布で ϵ_t を比較すると (Fig. 9 (3))、標準k-と改良LKでは、2つのDurbinモデルに比べて、建物風上コーナー前方で非常に大きな値となる。2つのDurbinモデルでは、この部分での大きな ϵ_t が抑えられたため、Fig.3 で示したように、この部分の剥離が強めに評価されたものと考えられる。Durbin2では、Durbinに比較して、kや P_k の分布と同様、風上コーナー部付近における ϵ_t の値が小さい。

Fig.10 は建物後方循環流域における ϵ_t の鉛直分布である。この領域では、Durbin2が他のモデルに比べて ϵ_t の値がやや大きめとなり、風速やkの分布と対応している。

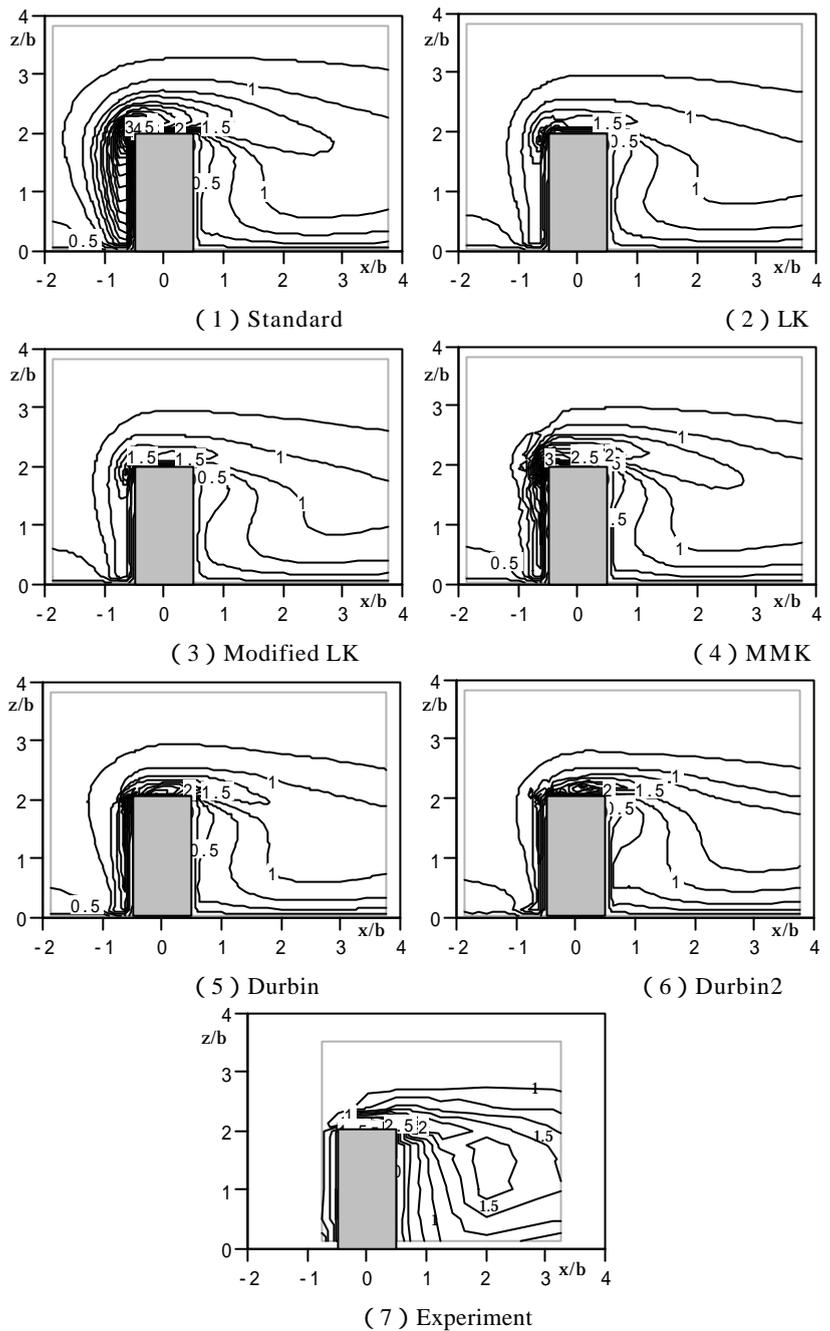


Fig.5 Distribution of k (m²/s²)

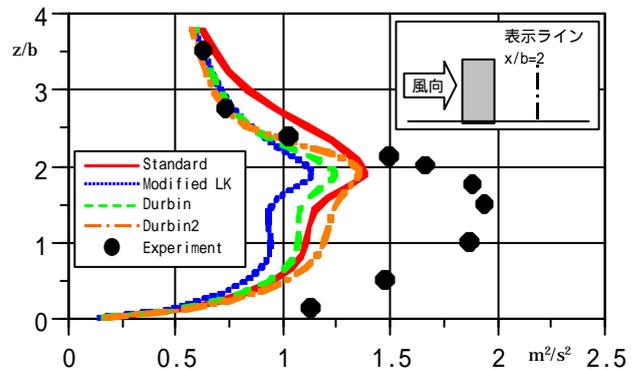


Fig.6 Vertical distribution of k behind building (x/b=2)

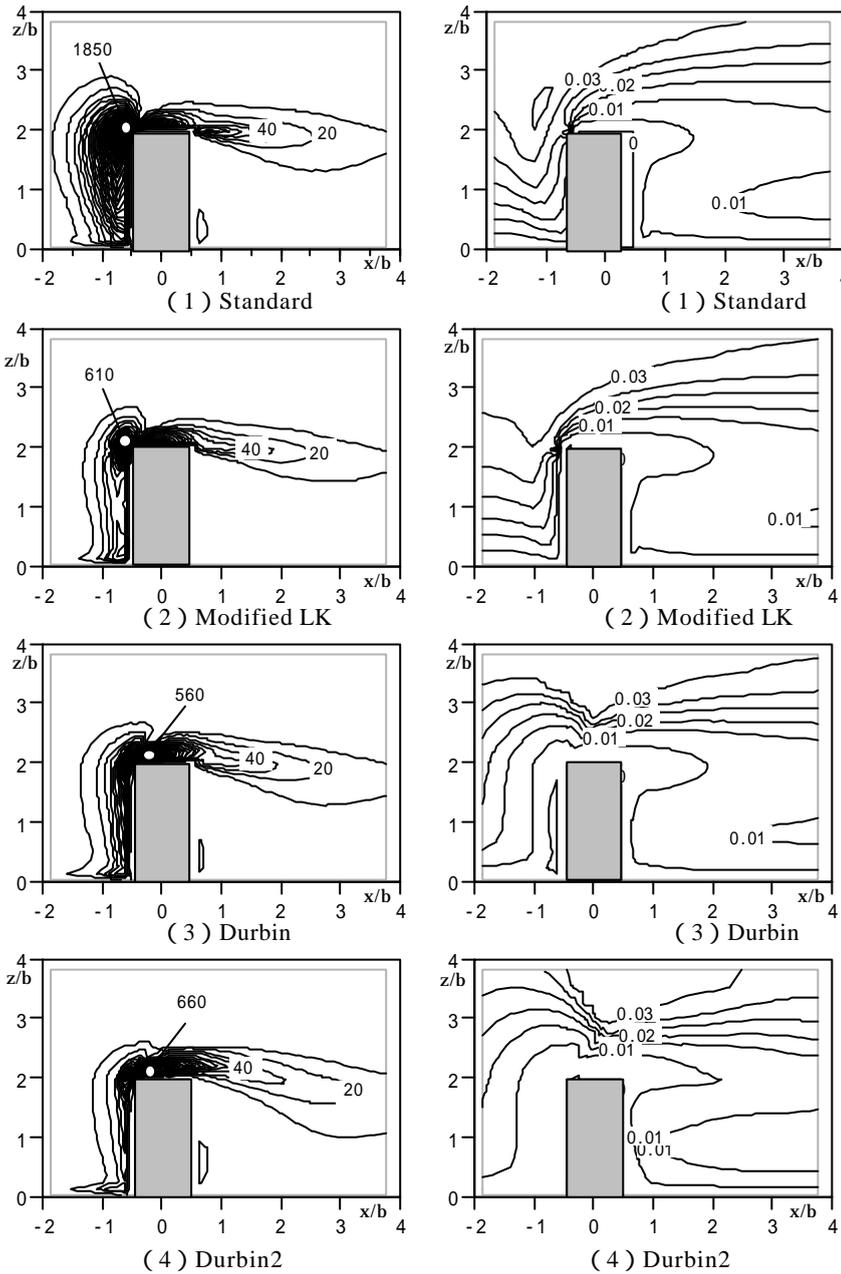


Fig.7 Distribution of P_k

Fig.8 Distribution of t

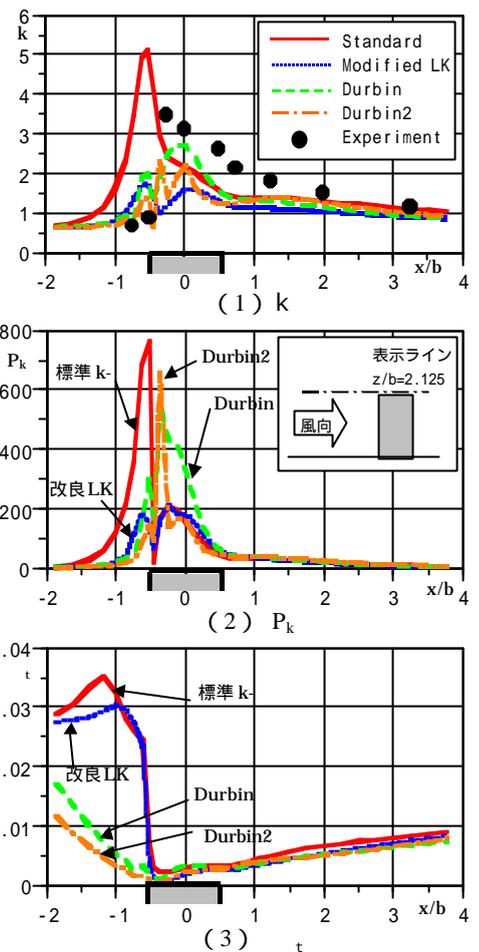


Fig.9 Horizontal distribution of k , P_k and t above building ($z/b=2.125$)

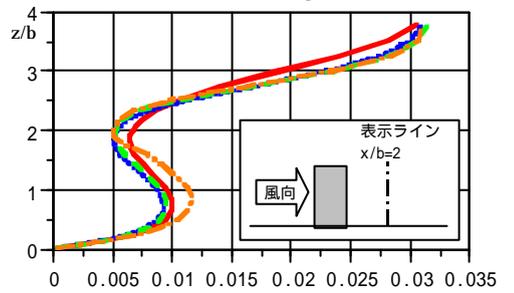


Fig.10 Vertical distribution of t behind building ($x/b=2$)

4) タイムスケールTの分布 (Fig.11)

2つのDurbinモデルで計算されたTの分布を Fig.11 に示す。このタイムスケールは、Table 1 (13)式において、標準 k^- に対応するタイムスケール k^- (以下 T_{k^-} と称す) と Realizability の制約に基づくタイムスケール $a/c_m \sqrt{3S}$ (以下 T_{Durbin} と称す) の小さい方が各領域において選択された結果算出されるものである。建物風上コーナー部から下流側にかけてTの小さい領域が存在している。Durbin2では、タイムスケールの算出式 (Table 1 (13)式) に0.5という定数をかけているため、Durbinに比べて全体的に小さい。特に屋上面では、Durbin2は、Durbinに比べてタイムスケールがかなり小さく評価されているために、 t が小さくなり、結果的にこの部分の剥離が過大評価されたため、屋上面の再付着距離が実験よりもかなり大きくなったものと考えられる。

次にRealizabilityの制約に基づくタイムスケールが適用されている範囲を明らかにする目的で、 T_{k^-} と T_{Durbin} の比を示したものを Fig.12 に示す。Durbinのモデルではこの比が

1 以下 ($T_{Durbin}/T_{k^-} < 1$: で表示) の領域において、Realizabilityの制約に基づくタイムスケールが用いられることになる。逆にこの比が1を超える領域では、Durbinモデルにおいても標準 k^- が適用されていることになる。

Durbinでは、1以下の領域が風上コーナー部より前方に限られているのに対して、Durbin2では、屋上面や後方循環流域にまで及んでいる。Durbinでは、風上コーナー部近くを除くと、結果的に標準 k^- が適用されていることになるため、後方循環流域の最付着距離などの予測結果が Durbin と標準 k^- でほぼ同じであったものと考えられる。一方、Durbin2では T_{Durbin} の適用範囲が建物後方にも及んでおり、後方循環流域での風速や k の分布については、予測精度に部分的には若干の改善が見られた。しかしながら、建物後方循環流の再付着距離が過大に評価されたのは、屋上面付近でTが過剰に

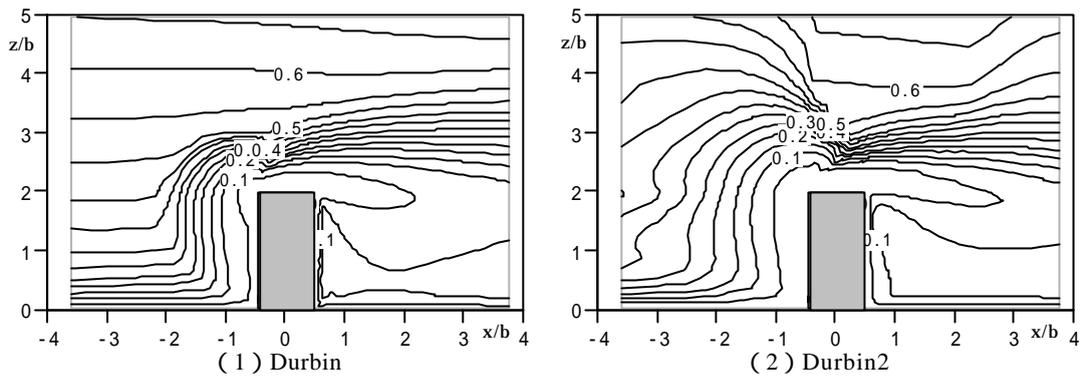


Fig.11 Vertical distribution of time scale by Durbin's model

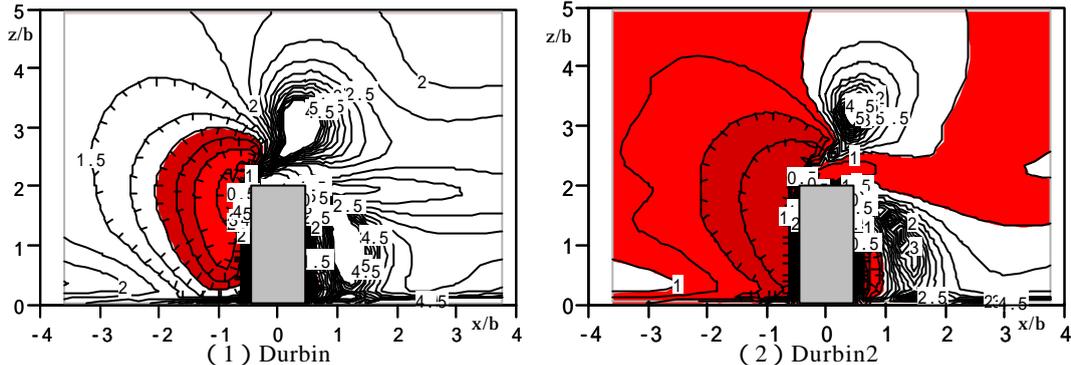


Fig.12 Ratio of time scales (T_{Durbin}/T_{k-})

小さく評価されたことによる剥離の過大評価の影響が建物後方に及んだものと考えられる。

4. 結論

境界層流中に置かれた高層建物モデル周辺の気流を各種改良 $k-$ モデルを用いて解析し、実験結果との比較により、その予測精度を検証した。改良型の $k-$ モデルの場合、標準 $k-$ に比べて屋上面の剥離流の予測精度が、大幅に向上する。しかしいずれの改良 $k-$ モデルも建物後方の循環流を標準 $k-$ よりさらに広めに評価する傾向にある。改良型 $k-$ モデルの中では、建物後方の循環流の過大評価が他の改良 $k-$ モデルよりも少ない Durbin($=1.0$) が全体的に最も実験との対応に優れていた。しかし、 0.5 とした Durbin2 では、Realizability の制約に基づくタイムスケールが適用される領域が広くなり、屋上面及び建物後方の再付着距離が Durbin に比べ大きくなり、実験との対応が悪くなるという問題が生じた。最適な 0.5 の選択に関しては、今後さらに検討したい。

謝辞 本計算は、日本建築学会・環境工学委員会・空気環境小委員会の「風環境数値計算WG(主査：持田，幹事：富永)」の活動の一環として行われたものである。計算条件の設定に際して貴重な情報をご提供頂いた、東京大学・石原助教授、前田建設工業(株)・義江博士をはじめとする関係各位に記して謝意を表す。

注) 後方循環流の広さを正しく予測するためには、渦放出に伴う周期的変動を正確に再現することが重要と考えられる。Launder-Kato の 2次元角柱の計算では、この周期的変動がよく再現されている⁴⁾。本研究で対象とした流れ場においても、実現象では渦放出に伴う周期的変動が発生していると考え

られるが、今回の解析では、標準 $k-$ 、改良型 $k-$ 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。RANS モデルによる 3次元物体周りの流れの解析における周期的変動の再現性については、今後詳しく検討していきたい。

参考文献

- 1) 大岡，飯塚，成：高層建物周辺気流のCFD解析 - 各種RANSモデルの地表面付近の風速予測精度に関する検討 -，第13回数値流体力学シンポジウム論文集，B10-6(1999)
- 2) Durbin, P. A.: On the $k-$ stagnation point anomaly, Int. J. Heat and Fluid Flow, vol.17, pp89-90(1996)
- 3) 石原，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，pp55-64(1998)
- 4) Launder, B. E. & M. Kato: Modelling flow-induced oscillations in turbulence flow around a square cylinder, ASME Fluid Engineering Conference(1993)
- 5) 近藤，持田，村上：改良 $k-$ 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)
- 6) 近藤，村上，持田：改良 $k-$ モデルによる建物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，pp. 363-366(1994)
- 7) 義江：高層建物周辺気流のCFD解析，日本建築学会大会学術講演梗概集(環境工学)(中国)，pp.675-676(1999)
- 8) 持田，村上，林：立方体モデル周辺の非等方乱流場に関する $k-$ 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)