

建物周辺気流の数値シミュレーションの診断システムに関する研究 (第 6 報)

—— k - ϵ モデルにおける建物風上の k の過大評価とモデルの検討——

Study on Diagnostic System for Simulation of Turbulent Flowfield around Building

——Overestimation of k Value around Windward Corner in k - ϵ Model——

村 上 周 三*・持 田 灯*・林 吉 彦**

Shuzo MURAKAMI, Akashi MOCHIDA and Yoshihiko HAYASHI

1. 序

筆者等は k - ϵ 型 2 方程式モデルにより立方体モデル周辺の流れ場を解析し、建物屋上面風上側コーナー部の剝離に影響を持つと考えられる各種条件に着目し、これらが予測結果に及ぼす影響について検討してきた^{1),2),4)}。本報では従来の計算結果で最大の問題点として残されていた建物屋上面風上側コーナー部周辺における k の過大評価に関してそのメカニズムを考察するとともに、モデル化の改良の方法を検討する。

2. 風洞実験概要

模型は 1 辺 20cm の立方体モデル。風洞内基準風速 U_b は約 6 m/s、実験における Re 数 ($U_b \cdot Hb/\nu$) は約 7×10^4 。風速測定にはタンデム型熱線風速計を使用した。

3. 数値解析概要

3.1 計算方法

3 次元 k - ϵ 型 2 方程式モデル^{1),4)}により立方体モデル

| | | |
|--|-------------------------------------|--|
| | 記号 | |
| U_i : 平均風速の 3 成分 | h_1 : 壁面第一セルの幅 | |
| i : 主流方向 | $h_1 = 1/24 Hb$ | |
| j : 横方向 | l : 乱れの長さスケール | |
| k : 鉛直方向 | | |
| Hb : 建物高さ | 風洞実験では、 | |
| 風洞実験では、20cm | $l = C_b^{1/4} U \int R_\tau d\tau$ | |
| U_b : 建物高さにおける風速 | \bar{R}_τ : 変動風速の自己相関係数 | |
| k : 乱流エネルギー | suffix n : 法線方向 | |
| P_k : k の生産項 (表 3 参照) | t : 接線方向 | |
| ϵ : k の散逸 | | |
| ν_t : 渦動粘性係数 | | |
| $\nu_t = k^{1/2} \cdot l = C_D \frac{k^2}{\epsilon}$ | | |

なお、諸量は U_b, Hb で無次元化されている

*東京大学生産技術研究所 付属計測技術開発センター

**東京大学生産技術研究所 第 5 部

周辺の流れ場を MAC 法のアルゴリズムを用いて解析、境界条件を表 1 に示す。流入側の $U(z), k(z)$ の境界条件は風洞実験値を使用²⁾。 $l(z)$ に関しては流入で $P_k = \epsilon$ が成立するように分布を与えている³⁾。メッシュ分割は建物近傍のメッシュ幅を $Hb/24$ とする。メッシュ数は、 $50(X) \times 49(Y) \times 28(Z) = 68,600^{1),4)}$ 。時間差分は Adams-Bashforth、空間差分は 2 次精度中心差分を使用。ただし、 k, ϵ の方程式移流項には QUICK スキームを使用²⁾。

3.2 計算種類

k の生産項 (P_k) の算出に際しては、表 2 に示す 2 種類の方法を用いた。case 1 (表 2 ①式) は通常の k - ϵ モデルの定義どおりであり、case 2 (表 2 ②式) は応力テンソルのノルマル成分に関連する項の寄与分を 0 としている。

4. k - ϵ モデルにおける k の過大評価 (図 1, 図 3)

風洞実験では建物屋上面や側面の再付着域で k は大き

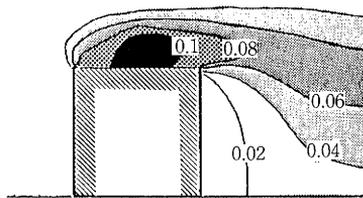
表 1 境界条件

| | |
|------------------|---|
| 流入面 | $U(z), k(z)$: 風洞実験値 ²⁾ $l(z) = 4(C_D k(z))^{1/2} z^{3/4}$ (流入で $P_k = \epsilon$, 注 1 参照) $\nu_t(z) = k(z)^{1/2} l(z)$ $\epsilon(z) = C_D k(z)^{3/2} / l(z)$ $V(z) = 0, W(z) = 0$ |
| 上空面 側面 流出面 | 境界外圧力 = 0 U_i, k, ϵ : free slip |
| 地上面 建物壁面 | U_i : 1/4 乗の power law, $U_n = 0$ k : free slip ϵ : Launder, Spalding 等の wall function ^{3,4)} |

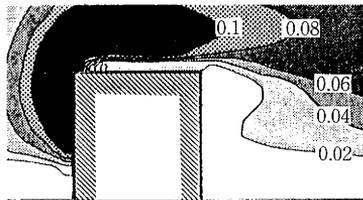
表 2 P_k の評価法

| | |
|--------|---|
| case 1 | $P_k = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$ (定義どおり)① |
| case 2 | $P_k = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - 2\nu_t \left\{ \left(\frac{\partial U_1}{\partial x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial U_2}{\partial x_2} \right)^2 + \left(\frac{\partial U_3}{\partial x_3} \right)^2 \right\}$ (normal 成分を 0 とする)② |

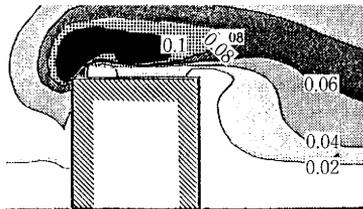
ϵ の輸送方程式の生産項を評価する際も①, ②式をおのおの使用



(1) 風洞実験

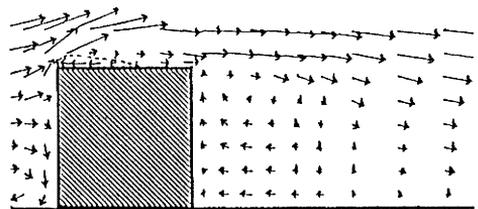


(2) case 1 (P_k : 表 2 ①式)

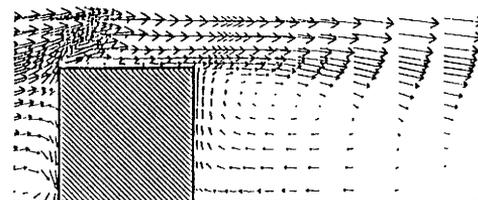


(3) case 2 (P_k : 表 2 ②式)

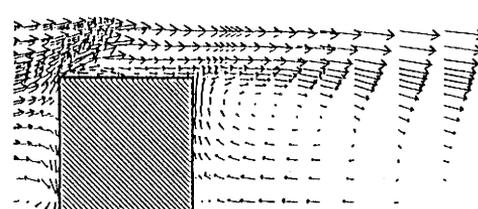
図 1 k の分布 (建物中心軸上鉛直断面)



(1) 風洞実験



(2) case 1 (P_k : ①式)



(3) case 2 (P_k : ②式)

図 2 平均風速ベクトルの分布 (建物中心軸上鉛直断面)

な値を示している(図 1 (1), 図 3 (1)). 一方, 通常の k - ϵ モデル (case 1) の結果では建物の風上側コーナー部周辺で k が非常に大きな値を示しており(図 1 (2), 図 3 (2)), 通常の k - ϵ モデルを用いた場合の k の分布の傾向は明らかに風洞実験の結果と異なる. また, 平均風速ベクトルの比較(図 2, 4)をみると, case 1 では風洞実験で存在していた屋上面の逆流が再現されておらず(図 2 (2)), 側面の逆流域の大きさも実験と比べてかなり小さくなっている(図 4 (2)). これは建物のコーナー部周辺における k の過大評価に伴って, この部分の v_t も過大となり, この領域での拡散が促進された結果, 剥離が発生しにくい状況となったためと考えられる. 筆者等は, 移流項差分スキームや流入境界条件, 壁面および建物コーナー部の境界条件等が風上側コーナー部周辺の流れ場に及ぼす影響を調べるために多くの数値実験を行ってきたが, 風上側コーナー部周辺で k が過大評価される傾向はいずれの計算の場合も一貫して変わらない^{1),2),4)}. これは k - ϵ モデルそのものの基本的な弱点にかかわる問題ではないかと予想される. 以下ではこの点に関してさらに詳しく検討する.

5. 建物風上の k の過大評価のメカニズム (図 5)

図 5 に k の生産に関連する諸量の分布を示す. 図 5 (1)に示すようにcase 1の場合, 風上側コーナー部周辺で P_k が非常に大きな値を示している. 次に, P_k/ϵ の分布(図 5 (2))をみると, 建物の前方で P_k/ϵ の値が 5~10 程度となっており, この領域におけるこの大きな P_k が風洞実験と数値計算における k の分布の不一致の原因であると予想される. この過大に評価された P_k についてさらに詳しく調べると, 図 5 (3)に示すように, P_k のノルマル成分に関連する項は建物の風上側コーナー部周辺で大きくなっており, k の全生産 (P_k) に対するノルマル成分に関連する項の割合は, 建物前方の速度勾配のノルマル成分が大きい領域では 80% 以上となっている(図 5 (4)). これらの分布から判断して, P_k の過大評価の原因はそのノルマル成分が過大に評価されているためであると考えられるが, そのメカニズムは以下のように説明できる.

本来の定義に従えば, k の生産項は,

$$P_k = -u_i u_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$$

これを 2 次元で考えると,

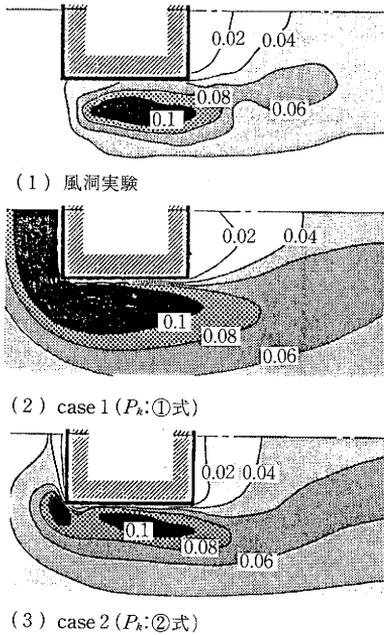


図 3 k の分布 ($z = Hb/2$ の水平断面)

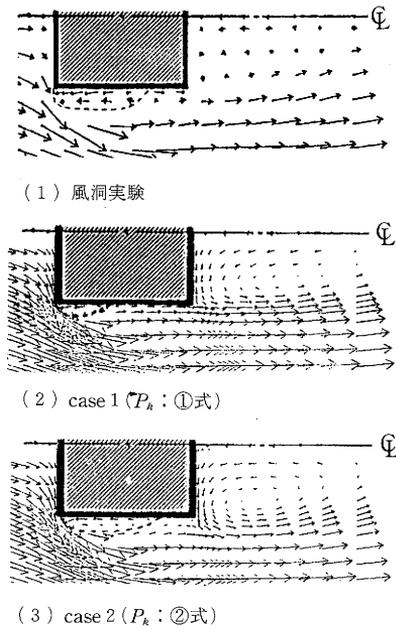


図 4 平均風速ベクトルの分布 ($z = Hb/2$ の水平断面)

$i=j=1$ では、 $-\overline{u_1^2} \frac{\partial U_1}{\partial x_1}$ となり、

$i=j=2$ では、 $-\overline{u_2^2} \frac{\partial U_2}{\partial x_2} = \overline{u_2^2} \frac{\partial U_1}{\partial x_1}$ となる。

したがって、ノルマル成分の和は、

$$-(\overline{u_1^2} - \overline{u_2^2}) \frac{\partial U_1}{\partial x_1} \tag{1}$$

一方、 k - ϵ モデルでは、

$$P_k = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$$

であるが、右辺第 2 項は連続式より 0 となる。これを 2 次元で考えると、

$i=j=1$ では、 $2\nu_t \left(\frac{\partial U_1}{\partial x_1} \right)^2 - \frac{2}{3} k \frac{\partial U_1}{\partial x_1}$ となり、

$i=j=2$ では、 $2\nu_t \left(\frac{\partial U_2}{\partial x_2} \right)^2 - \frac{2}{3} k \frac{\partial U_2}{\partial x_2}$

$$= 2\nu_t \left(\frac{\partial U_1}{\partial x_1} \right)^2 + \frac{2}{3} k \frac{\partial U_1}{\partial x_1}$$

となる。したがって、ノルマル成分の和は、

$$4\nu_t \left(\frac{\partial U_1}{\partial x_1} \right)^2 \tag{2}$$

(1) 式は 2 成分の差となり、(2) 式は和となる。壁際において、 $\overline{u_1} \sim \overline{u_2}$ と仮定すれば、(1) \sim 0。これに対し、(2) は建物直前で $\frac{\partial U_1}{\partial x_1}$ が非常に大きくなるために、かなり大

きな値を持つ。このことから、現状の k - ϵ モデルでは、建物前方の主流方向の速度が急変し速度勾配のノルマル成分が大きい領域で k を過剰に生産することがわかる。

6. ノルマルストレス除去型モデル (case 2) の結果 (図 1 ~ 図 4)

上述の考察に基づき、case 2 では P_k の評価方法を表 2 の①式から②式に変更した。②式ではノルマル成分に関連する項の寄与分を 0 としている^{*)}。 k の分布についてみると、鉛直、水平断面ともに、風洞実験との対応が case 2 (図 1 (3), 図 3 (3)) は case 1 (図 1 (2), 図 3 (2)) に比べて格段に向上している。また、case 1 では再現されなかった屋上面の逆流が再現され (図 2 (3))、側面の逆流域の大きさも case 1 (図 4 (2)) に比べて大きくなり、実験結果とよく一致している (図 4 (3))。以上の結果より、 P_k の評価方法の変更による効果は十分にあったといえる。

7. 結 論

(1) 本研究における通常の k - ϵ モデルの結果 (case 1) では、建物風上側コーナー部周辺の k の分布が過大に評価される傾向にあり、屋上面の逆流も再現されない。

(2) k の生産項中のノルマル成分の寄与を 0 とした計算 (case 2) の結果は、case 1 に比べ k の分布の実験との対

謝 辞

本研究にあたり、英国MANCHESTER大学B.E. Launder教授が1987年に外国人客員研究員として本所に滞在中に多くの有益な御助言をいただいた。また、本所吉沢徹教授、加藤信介助教授との議論から多くの示唆を得た。記して謝意を表す。(1988年10月12日受理)

注1) 流入側境界条件

従来筆者等は、実験におけるインテグラルスケール

$$(=U(z) \int \bar{R}_\tau d\tau) \text{ の分布から } l(z) = C_D^{1/4} U(z) \int \bar{R}_\tau d\tau \text{ として}$$

流入側境界の $l(z)$ の分布を与えてきた。しかし、この条件を採用すると、流入境界付近で $P_k/\epsilon = 4 \sim 25$ 程度の値を示し、 $P_k = \epsilon$ の関係は成立しない。今回の計算では、この不成立が建物屋上風上側コーナー一部周辺における k の過大評価に結びつくことを避けるために、流入側境界で $P_k = \epsilon$ となるように $l(z)$ の分布を与えている。今回の計算では、従来の与え方と比べて、流入の $l(z)$ の値は20~50%となっているが、この変更の影響は小さく、建物風上側の過大な k は解消されていない(図1(2))。以下に今回の流入側境界における $l(z)$ の与え方を示す。流入側境界で、

$$P_k(z) = \epsilon(z). \tag{3}$$

ここで、

$$\epsilon(z) = C_D \frac{k(z)^{3/2}}{l(z)}, \tag{4}$$

$$P_k(z) = k(z)^{1/2} l(z) S(z), \tag{5}$$

ただし、

$$S(z) = \frac{\partial U_i(z)}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i(z)}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j(z)}{\partial x_i} \right)$$

流入側境界で、 $U(z)$ に関しては1/4乗の分布を仮定し、

$$V = 0, W = 0, \frac{\partial}{\partial x} = 0, \frac{\partial}{\partial y} = 0 \text{ とすると、}$$

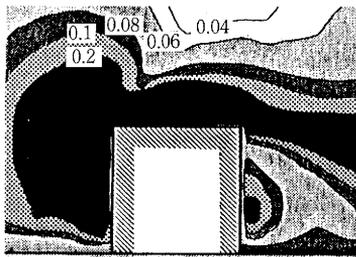
(3), (4), (5)より、流入側境界の $l(z)$ を定めると

$$l(z) = 4(C_D k(z))^{1/2} z^{3/4} \tag{6}$$

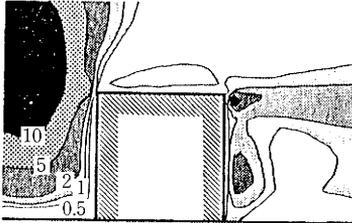
注2) case 2で行った P_k の評価法はテンソルの不変性を満たしていない等、テンソル代数の基本に関して問題を残している。したがって、主流の方向と座標系の方向が大幅に異なるような状況でこれをそのまま適用すれば問題が生じる可能性も十分にある。この点に関しては、今後さらに検討を加えていきたいと考えている。

参 考 文 献

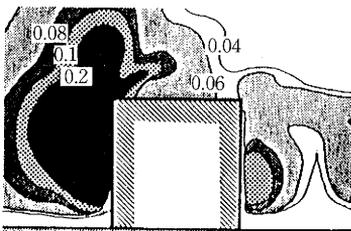
- 1) 村上, 持田, 林, 大和田: $k-\epsilon$ 型2方程式モデルによる建物周辺気流の数値解析(1), 日本建築学会論文報告集, 1988. 10
- 2) 村上, 持田, 大和田, 林: 建物周辺気流の数値シミュレーションの診断システム, 生産研究, 1986. 12
- 3) B.E. Launder, D.B. Spalding: The numerical computation of turbulent flows, Computer methods in applied mechanics and engineering 3, 1974
- 4) 村上, 持田, 林: 建物周辺気流の数値シミュレーションの診断システムに関する研究(4), 生産研究, 1988. 1



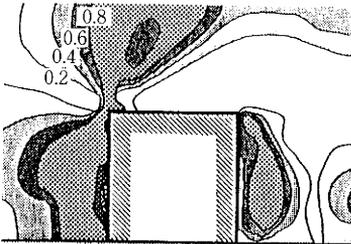
(1) P_k



(2) P_k/ϵ



(3) P_k の normal 成分
(すなわち、表2の①式-②式)



(4) P_k の normal 成分/ P_k
(すなわち、表2の①式-②式)
①式

図5 P_k の分布 (case 1, 建物中心軸鉛直断面)

応が格段に向上し、屋上面の逆流も再現される。
(3)従来の $k-\epsilon$ モデルでは、風上側コーナー一部における k の生産が極めて過大に評価される傾向にある。これは k の生産項のノルマル成分に関連する項が正しく評価されていないことによるものであり、Eddy Viscosity Modelの持つ基本的な欠陥に関連している。コーナー一部の剝離領域の流れの性状を正しく再現するためには、この点に関する新たな P_k の改良が必要である。