

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4報) ——建物近傍のメッシュ分割および ϵ の境界条件に関する検討——

Study on Diagnostic System for Simulation of Turbulent Flowfield around Building PART IV

——Influence of Mesh Dividing System and Boundary Condition of ϵ ——

村 上 周 三*・持 田 灯*・林 吉 彦**

Shuzo MURAKAMI, Akashi MOCHIDA and Yoshihiko HAYASHI

1. 序

筆者らは、 k - ϵ 型2方程式モデルによる建物周辺気流の数値シミュレーションにおいて、風上隅角部の剥離に大きな影響を持つと考えられる諸条件が予測結果に及ぼす影響について検討した。本報では、前報¹⁾で行った数値実験の中で最も実験との対応のよかった計算条件を基に、建物近傍のメッシュ分割、壁面における ϵ の境界条件に関してさらに改良を加え、風洞実験と詳細に比較した結果について報告する。

2. 風洞実験概要

建物モデルとして1辺20cmの立方体模型を用いた。風洞内基準風速は約6 m/s、 Re 数は約 7×10^4 である。風速測定にはタンデム型熱線風速計を使用した。

表1 基礎方程式

$$\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial X_j} = -\frac{\partial}{\partial X_i} \left(\frac{P}{\rho} + \frac{2}{3} k \right) + \frac{\partial}{\partial X_j} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial U_j}{\partial X_i} + \frac{\partial U_i}{\partial X_j} \right) \right\} \quad (2)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k U_j}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial X_j} \right) + \nu_t S - \epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \epsilon U_j}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial X_j} \right) + C_1 \frac{\epsilon}{k} \nu_t S - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

$$\nu_t = C_D \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

$$\text{ただし } S = \left(\frac{\partial U_j}{\partial X_i} + \frac{\partial U_i}{\partial X_j} \right) \frac{\partial U_i}{\partial X_j}$$

$$\sigma_1 = 1.0, \quad \sigma_2 = 1.3,$$

$$C_D = 0.09, \quad C_1 = 1.44, \quad C_2 = 1.92$$

3. 数値シミュレーション概要

3.1 計算方法

表1に示す 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MAC法のアルゴリズムにより表2の境界条件を用いて解析した。時間差分はAdams-Bashforth, 空間差分は2次精度中心差分を用いた。ただし、 k , ϵ の輸送方程式の移流項差分スキームは1次精度風上差分を使用した。

3.2 計算種類と計算条件(表3参照)

表3に計算種類を示す。case 1はMesh No.1(図1(1))を用いている。Mesh No.1では、建物の風上側隅角部付近のメッシュ分割がかなり細かくなっている

記 号

U_i : 風速の3成分	k_P : 壁面に接するセルの k
i (または x , U) : 主流方向,	ϵ : k の散逸
j (または y , V) : 横方向,	ν_t : 渦動粘性係数
k (または z , W) : 鉛直方向	l : 乱れの長さスケール
Hb : 建物高さ, 風洞実験では20cm	u^* : 摩擦速度
Ub : 建物高さにおける風速	h : 最小メッシュ幅
k : 乱流エネルギー	$(h = Hb/24)$
	h_P : 壁面に接するセルの幅

表2 境界条件

流 入	$U(z), k(z), l(z)$: 風洞実験値 $V(z) = 0, W(z) = 0$
流 出	境界外の圧力 $P=0$ U, k, ϵ : free slip
側 面	上に同じ
上 空 面	上に同じ
地 上 面	$U_t \propto Z^{\frac{1}{4}}, U_n = 0$
建 物 壁 面	k : free slip ϵ : 表3および注1) 参照

*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

研 究 速 報

($h = Hb/24$)。case 2 は Mesh No 2 (図 1 (2)) を用いている。Mesh No 2 は、建物屋上側のメッシュ分割は Mesh No 1 と等しく、建物背面付近のメッシュ分割は Mesh No 1 に比べて細かくなっている。case 3 は、 ϵ の壁面境界条件に Launder & Spalding らの提案した wall function を用いており²⁾、この点が case 2 と異なる。この方法は、壁面に接するコントロールボリューム内の ϵ の平均値を対数則を用いて与えている。なお、流入側境界条件は風洞実験値を使用 ($U \propto Z^{1/4}$ の分布)。また、以下に示す諸量はすべて Ub , Hb で無次元化されている。

4. 数値計算の結果

4.1 平均風速ベクトルの比較 (図 2, 図 3 参照)

今回の計算結果は、case 1 ~ case 3 とともに建物屋上および建物側面の逆流がよく再現されている。特に、建物前面付近のメッシュ分割だけではなく、建物背面付近のメッシュ分割も細かくした case 2, 3 の結果は、case 1 の結果よりも wake が小さくなり風洞実験に近づく。また、 ϵ の壁面境界条件に wall function を用いた case 3

の結果は、建物屋上面の逆流域が case 1, 2 の結果よりも多少広くなり風洞実験の結果に近づく³⁾。

4.2 k の分布の比較 (図 4 参照)

数値計算 (case 1 ~ 3) の結果では、建物屋上面風上側隅角部周辺で k は大きな値を示している。これに対して、風洞実験では、建物屋上面中央付近の再付着域で k は大きくなっており、数値計算結果と分布の傾向は異なっており、今後の改良が必要である。また、case 2, 3 は case 1 に比べ、1) wake 内の k が多少大きく評価されていること、2) 平均風速ベクトルの比較から考えて、wake 内で、case 2, 3 のほうが、case 1 より、拡散的であることを考慮すれば、wake 内の u_r も大きくなっているものと予想される。これは case 2, 3 では case 1 に比べて wake 内のメッシュ分割が細くなるに伴って、wake 内の速度勾配が大きくなり、この結果、wake 内における k の生産が大きくなったためと考えられる。次に wall function を用いた case 3 の結果は、case 2 の結果に比べて建物屋上面の k の値がやや小さくなっており、平均風速ベクトルの比較から考えてこの部分の u_r も小さくなっているものと予想される。

4.3 ϵ の分布の比較 (図 5 参照)

全体の分布に関しては case 1 ~ 3 で大きな差異はないが、case 3 では屋上面付近で case 1, 2 よりも ϵ の値が小さくなっている。case 3 は、case 2 の結果を初期値とし、建物壁面の ϵ の境界条件を type 1 から type 2 に変更したものであり、計算の開始時には建物壁面の ϵ の値は case 2 の約 3 ~ 4 倍になっている (注 2) 参照)。しかし、計

表 3 計算種類

case No	メッシュ分割 (図 1)	壁面 ϵ 境界条件 注 1), 注 2)
case 1	Mesh No 1	type 1
case 2	Mesh No 2	type 1
case 3	Mesh No 2	type 2

注 1) 壁面 ϵ の境界条件

• type 1

$$\epsilon = C_D^{3/4} k_p^{3/2} / l_i$$

$$l_i = \frac{1}{2} \kappa h_p \quad \dots (1)$$

• type 2 (wall function)

$$\epsilon = \frac{1}{2} (C_D^{3/4} k_p^{3/2} / l_i) \cdot \ln(2E y^+) \quad \dots (2)$$

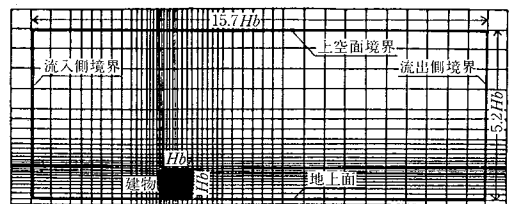
$$\text{ただし, } y^+ = \left(\frac{1}{2} h_p\right) \cdot u^* / \nu$$

$$= \left(\frac{1}{2} h_p\right) \cdot C_D^{1/4} k_p^{1/2} / \nu \quad \dots (3)$$

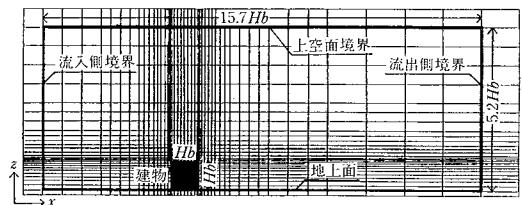
ここで、 $C_D = 0.09$, $E = 9$

(2) 式は壁面近傍で k の生産と k の散逸が等しいという仮定のもとに導かれた式である。

注 2) case 2 の最終結果を用いて、 $Re = 7 \times 10^4$ として、建物壁面に接するセルの壁座標 y^+ を注 1) (3) 式を用いて算出する。建物前面では k_p は約 0.08 で y^+ は約 230、屋上面では k_p は約 0.05 で約 180、後面では k_p は約 0.003 で y^+ は約 50、側面では k_p は約 0.04 で y^+ は約 160 となる。以上を注 1) (2) 式に代入すると、wall function を用いた case 3 では計算の当初は case 2 に比べて ϵ の値は約 3 ~ 4 倍程度となっている。



(1) Mesh No. 1 (Mesh数: $50(x) \times 49(y) \times 28(z) = 68600$, 計算領域 $15.7Hb(x) \times 9.7Hb(y) \times 5.2Hb(z)$)



(2) Mesh No. 2 (Mesh数: $50(x) \times 49(y) \times 28(z) = 68600$, 計算領域 $15.0Hb(x) \times 9.7Hb(y) \times 5.2Hb(z)$)

図 1 メッシュ分割

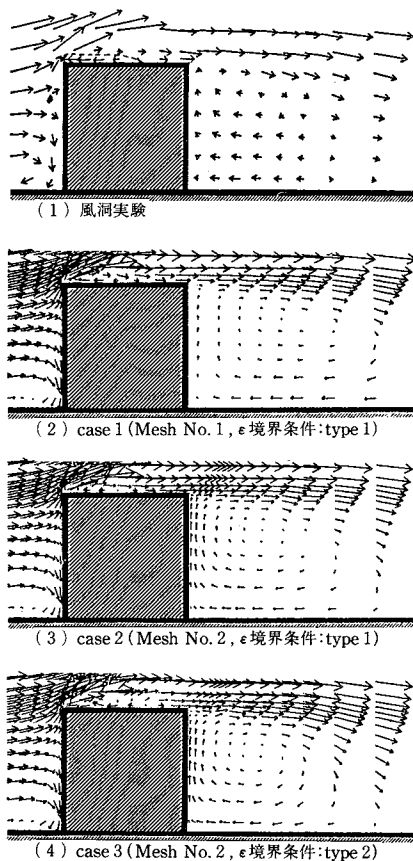
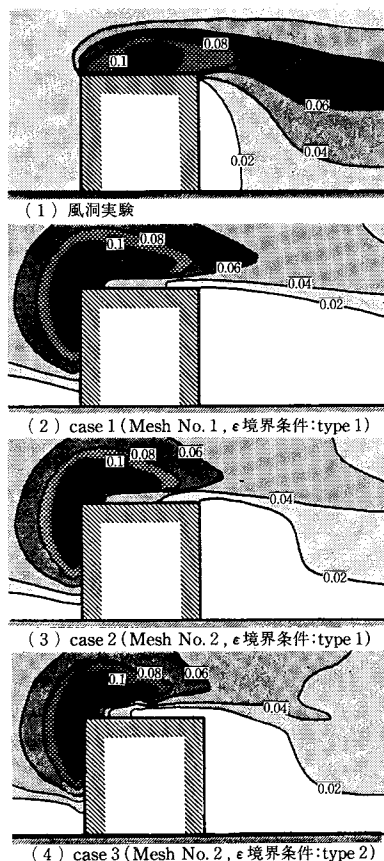
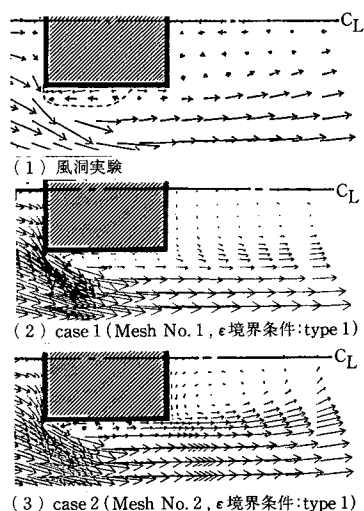


図2 平均風速ベクトルの比較 (建物中心軸上鉛直断面)

図4 k の分布の比較 (建物中心軸上鉛直断面)図3 平均風速ベクトルの比較 (水平断面($z = \frac{1}{2}Hb$))

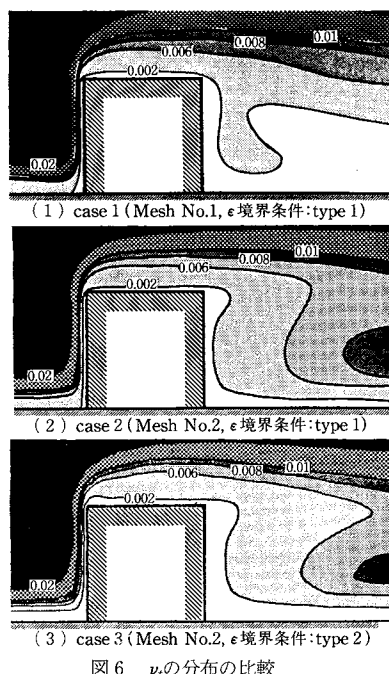
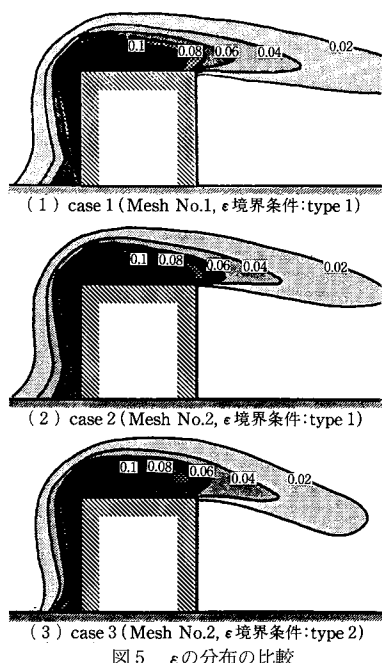
算が進むにつれてその値は減少し、収束解ではcase 2よりも建物壁面付近の ϵ の値は小さくなっている。これは、case 3における ϵ の境界条件では、 k の輸送方程式中で k の生産に対する散逸の割合が大きくなるために、壁面に接する k の値(k_p)がtype 1の場合よりも減少し、結果として注1) (2)式で与えられる建物壁面の ϵ の値はcase 2よりも小さくなったためと考えられる。

4.4 v_t の分布の比較 (図6参照)

case 2, case 3の分布はよく似ており、case 1に比較してwake内の v_t の値が大きい。これは、前述した風速ベクトルの比較や k の比較と対応している。

5. ま と め

①屋上面、側面の逆流 建物屋上面風上隅角部付近のメッシュ分割を細かくした今回の計算結果(case 1～case 3)では、前報における比較的粗いメッシュ分割の計算($h = Hb/6$)において再現できなかった建物屋上面や建物側面の逆流が再現され、風洞実験結果との対



応が格段に向上した。建物周辺気流の数値シミュレーションでは、風上側隅角部付近のメッシュ分割を細かくすることが非常に重要である。

②wake内の気流性状 建物背面のメッシュ分割をcase 1 よりも細かくしたcase 2, 3の結果は、wake内の k の生産が大きく評価され、この部分の k , ν_t がcase 1 よりも大きくなる傾向にあった。この結果、wakeの大きさはcase 1 よりも小さくなり、風洞実験結果に近づいた。

③壁面 ϵ の境界条件 ϵ の壁面境界条件に、Launder & Spaldingらの提案したwall functionを使用したcase 3では、case 2 よりも風上の隅角部や壁面付近で k , ν_t が小さくなり、この部分の逆流域が広がって風洞実験結果に近づいた。壁面の ϵ の境界条件は建物周辺気流に及ぼす影響が大きいのので、今後さらに検討をしていく必要がある。

④ k の分布 いずれの計算結果においても、実験より風上側隅角部周辺の k を大きく、屋上面や側面の再付着域やwake内の k を小さく評価しており、この点に関しては今後の検討が必要である。 (1987年10月8日受理)

参 考 文 献

- 1) 村上, 持田, 大和田, 村上: 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(1), 日本風工学シンポジウム, 1986.12
- 2) B.E.Launder and D.B.Spalding: The Numerical Computation of turbulent Flows, Computer Method in Applied Mechanics and Engineering, Vol.3, 269~289, 1974
- 3) 林, 村上, 持田: 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(2), 日本建築学会関東支部報告集, 1987.7