

LESによる建物周辺気流の数値予測 (第9報) ——立方体周辺の乱流流れ場に関するk-εモデルとの比較——

Numerical Prediction of Air Flow around Building by means of LES
—— Comparison with k-ε Model concerning Turbulent Statistics ——

村 上 周 三*・持 田 灯*・林 吉 彦**
Shuzo MURAKAMI, Akashi MOCHIDA and Yoshihiko HAYASHI

1. 序

従来筆者らはk-εモデルにより立方体モデル周辺の流れ場を解析し、k-εモデルが精度良く予測しえない点として、①立方体モデル風上コーナー部の乱流エネルギーkの過大評価、および②モデル後方の循環流域内のkの過小評価について指摘してきた^{1,2)}。本報では立方体モデル周辺の流れ場をLarge Eddy Simulation (以下LES) を使って解析し、k、kの生産項P_k、レイノルズストレス等の分布を調べ^{3,4)}、k-εモデルや風洞実験^{1,2)}と比較した結果を示し、k-εモデルの構造上の問題点に関して考察する^{3,4,5)}。

2. 数値計算の概要

2.1 LES 計算領域は、15.7H_b(x)×9.7H_b(y)×5.2H_b(z)。メッシュ数は、60(x)×49(y)×35(z)=102,900。ただし、立方体モデルに接するメッシュ幅h_zはH_b/24 (k-εモデルの解析と同じ)。流れの主流方向、横方向には周期境界条件を使用。図1に流入側境界条件を示す^{2,3)}。壁面境界には対数則を基にした3層モデルを使用^{3,6)}。上空面境界条件、差分スキームは文献6)と同じ。まず平板境界層の計算を約5万step行った後に、粗いメッシュで立方体モデル周辺気流の計算を約20万stepまで進め、さらにメッシュを細かくして約30万stepまで計算を実行。約25~30万step (t*=150~180)の結果を用いて統計量を算出した^{3,4)}。なお、諸量はH_b、<u_b>で無次元化されている。

2.2 k-εモデル 前報²⁾のcase 1と同じ。

3. 計算結果

3.1 kと平均風速ベクトルの分布 (図2, 図3) 既報^{1,2)}で指摘したように、k-εモデルの結果は立方体モデル風上コーナー部のkを過大に、またモデル後方の循環流域内のkを過小に評価する (図2(3))。この結果、モデルの屋上面で逆流が発生せず、モデル後方の循環流の大きさや、循環流内の風速の絶対値が大きく計算される

(図3(3))。これに対して、LESのkの分布は実験とよく対応し (図2(2)) 剥離域や立方体モデル背後の循環流内の平均風速の値も実験とよく対応している (図3(2))。 **3.2 P_k (図4)** k-εモデルは、風上コーナー部を中心にかなり広い領域でP_kが大きな値を示す (図4(2))。LESもコーナー部でP_kが大きい³⁾、その領域はk-εモデルよりかなり狭い (図4(1))。また、LESは立方体モデル後方の循環流域上部のfree shear layerおよびモデル前面下部でP_kが比較的大きな負の値を示しており (図4(1))、この点がP_kが必ず正となるk-εモデルと

- 記 号
- u_i : 風速3成分
 - <f> : 変数fの時間平均
 - f̄ : 変数fの格子平均
 - f' : 時間平均値からのずれ
 - f' = f̄ - <f̄>
 - (実験では、f' = f - <f>)
 - H_b : 建物高さ
 - u_b : 建物高さにおける風速
 - t* : 無次元時間、
t* = t × <u_b> / H_b
 - k : 乱流エネルギー = 1/2 <u_i'u_i'>
 - <u_i'u_j'> : レイノルズストレス
 - P_k : kの生産項^{3,5)}
 - P_{kn} : P_k中のノルマルストレスに
関連する項^{3,5)}
 - P_{ks} : P_k中のシアーストレスに
関連する項^{3,5)}

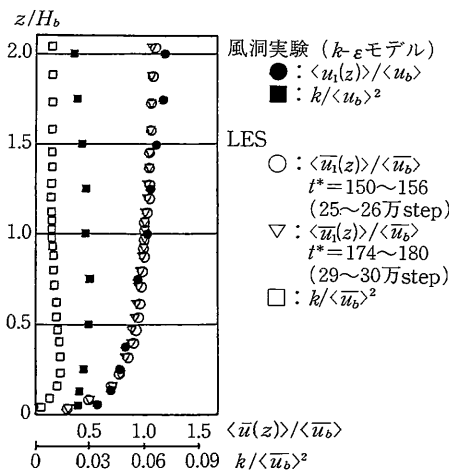
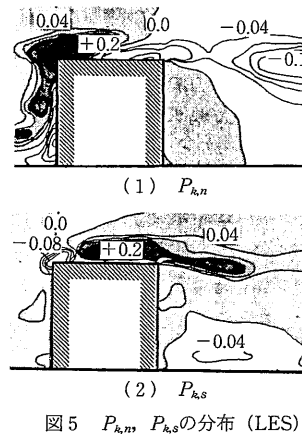
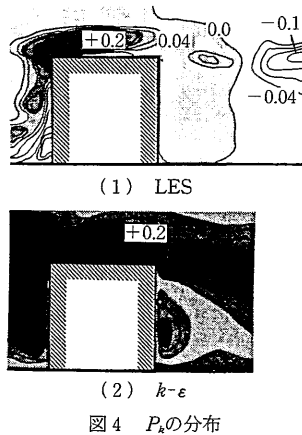
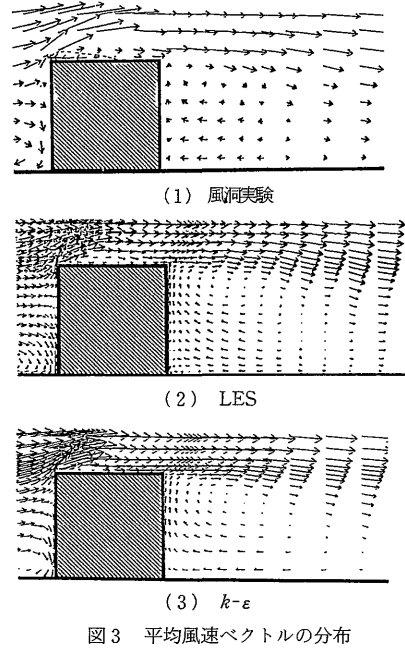
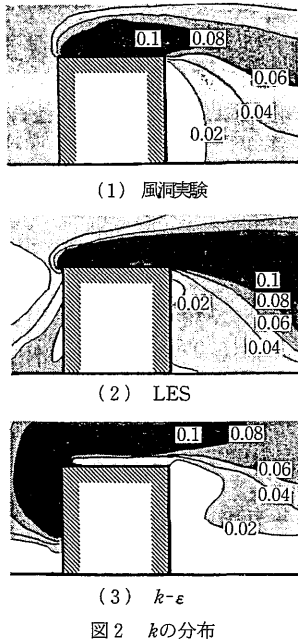


図1 流入側境界条件

*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



大きく異なる²⁵⁾。

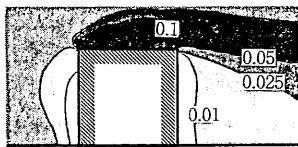
3.3 $P_{k,n}$, $P_{k,s}$ (図5) 立方体モデルの風上コーナ部では、 $P_{k,n}$ が大きな値を示す(図5(1))。 $\partial\langle u_1 \rangle / \partial x_1$ が大きな負になるため $P_{k,n}$ 中の $-\langle u_1' u_1' \rangle \partial\langle u_1 \rangle / \partial x_1$ が大きな正の値を示すことによる²⁶⁾。また、この部分では $P_{k,s}$ ($-\langle u_1' u_3' \rangle (\partial\langle u_1 \rangle / \partial x_3 + \partial\langle u_3 \rangle / \partial x_1)$) は負の値となる。これは、立方体モデル風上コーナ部のごく近傍では、 $\langle u_1' u_3' \rangle > 0$ 、かつ $\partial\langle u_1 \rangle / \partial x_3$ 、 $\partial\langle u_3 \rangle / \partial x_1$ もともに正になることによる。次に、屋上面の再付着点後方から循環流域上方の free shear layer では、 $\partial\langle u_1 \rangle / \partial x_1$ 、 $\partial\langle u_1 \rangle / \partial x_3$ がともに比較的大きな正の値を示すため、 $P_{k,n}$ 中の $-\langle u_1' u_1' \rangle \partial\langle u_1 \rangle / \partial x_1$ が負に、また、 $P_{k,s}$ 中の $-\langle u_1' u_3' \rangle \partial\langle u_1 \rangle /$

∂x_3 が比較的大きな正の値となる²⁷⁾。 $P_{k,n}$ (図5(1))、 $P_{k,s}$ (図5(2))の分布はこれらを反映し、結局、 P_k の分布(図4(1))をみると、風上コーナ付近では $P_{k,n}$ の影響が強く、屋上面中央付近では $P_{k,s}$ の影響が強く、比較的大きな正の値を示している。一方、循環流域上部の free shear layer では $P_{k,n}$ の影響が強く、比較的大きな負の値を示し、立方体モデル直前でも P_k が負となる領域がある²⁸⁾。また、これらのほかに $P_{k,s}$ はモデルの風上コーナ部上方で負となる領域が存在する²⁹⁾。以上のように、LESの場合、 $P_{k,n}$ 、 $P_{k,s}$ がおのおの負となる領域があり、この結果、 P_k の分布においてもモデル前面下部の循環流域やモデル後方の循環流域上方の free shear layer で値が負と

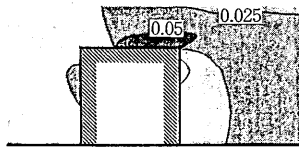
研究速報
なる領域が存在する。この点がLESとEddy Viscosity Modelに基づく $k-\epsilon$ モデルとの著しい相違点であり、 $k-\epsilon$ モデルを立方体等のbluff body周辺の流れ場へ適用する際の大きな問題点となる。

3.4 ノルマルストレスの比較 (図6～図11) 風洞実験の結果は、立方体モデルの風上側から屋上面にかけては $\langle u_1'u_1' \rangle$ が非常に大きな値を示し (図6(1))、モデル後方では $\langle u_2'u_2' \rangle$ が相対的に大きな値を示す (図7(1))。LESの結果は $\langle u_3'u_3' \rangle$ 中の風上角部の風洞実験に現れないピークを除き (図8(2))、風洞実験におけるこのような各成分の分布の相対的特徴をおおむね再現している。 $\langle u_i'u_i' \rangle = -2\nu_t \partial \langle u_i \rangle / \partial x_i + 2/3k$ (ただし、この場合は縮約をとらない) で算出される $k-\epsilon$ モデルの結果は k の不一致 (図2(3))の影響により各成分ともに風上角部周辺で大きな値を示し、モデル後方の循環流域内の値を過小に評価し、分布の傾向は実験と大きく異なる。図9～11ではノルマルストレスの異方性を検討するために、ノルマルストレスの各成分と $2/3k$ (3成分の平均値)との差を示す。屋上面では $\langle u_1'u_1' \rangle$ が大きな正の値を示

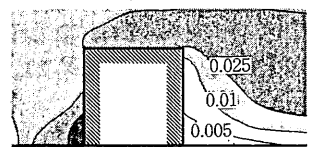
し (図9)、循環流域内では $\langle u_1'u_1' \rangle$ 、 $\langle u_3'u_3' \rangle$ は負となる領域が広く (図9、図11)、ここでは $\langle u_2'u_2' \rangle$ が比較的大きな正の値を示す (図10)。これに対し、 $k-\epsilon$ モデルは立方体モデル後流の中心軸上で $\partial \langle u_2 \rangle / \partial x_2 = 0$ であるため、 $\langle u_2'u_2' \rangle = -2\nu_t \partial \langle u_2 \rangle / \partial x_2 + 2/3k$ はほとんど $2/3k$ と等しく、図10に示す数値はほとんど0となる。このことにより $k-\epsilon$ モデルはLESに比べて立方体モデル後流における $\langle u_2'u_2' \rangle$ を過小に、従って鉛直断面内の横方向への運動量拡散を小さく評価することがわかる。これはLESではカルマン渦の影響を再現しているために $\langle u_2'u_2' \rangle$ が増加するのに対して、 $k-\epsilon$ モデルではこの3次元wakeに特有の秩序的乱流構造が再現されていないためであると思われる。LESがカルマン渦の影響をとらえていることは風速変動のスペクトルをみるとわかる。図12(1)は風洞実験の結果であるが、wake内で u_2 成分にはシャープなピークが存在しており、これはカルマン渦の発生により風速が横方向に変動していることを示している。図12(2)はLESの結果であるが、おおむねこの傾向を示している。この差が図3で示したように、 $k-\epsilon$ モ



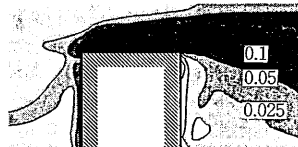
(1) 風洞実験



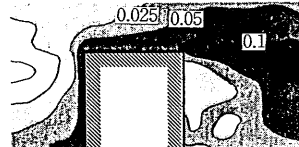
(1) 風洞実験



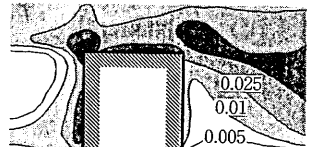
(1) 風洞実験



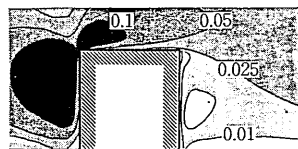
(2) LES



(2) LES

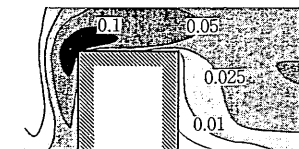


(2) LES



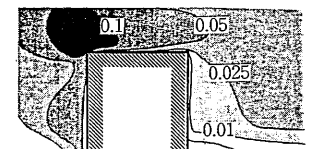
(3) $k-\epsilon$

図6 $\langle u_1'u_1' \rangle$ の分布



(3) $k-\epsilon$

図7 $\langle u_2'u_2' \rangle$ の分布



(3) $k-\epsilon$

図8 $\langle u_3'u_3' \rangle$ の分布



図9 $\langle u_1'u_1' \rangle - \frac{2}{3}k$ (LES)

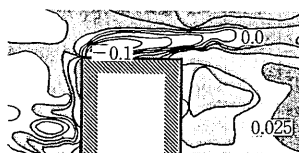


図10 $\langle u_2'u_2' \rangle - \frac{2}{3}k$ (LES)

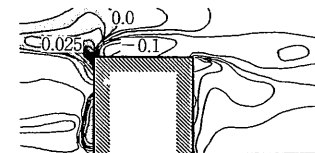


図11 $\langle u_3'u_3' \rangle - \frac{2}{3}k$ (LES)

研究速報

デルで鉛直面内の循環流の大きさや循環流内の風速絶対値を大きく評価する主要な原因の1つであると推察される。

4. ま と め

(1) LESによる k の分布は k - ϵ モデルに比べて実験との対応が格段によく、その結果、剥離部や立方体モデル背後の循環流域内の平均風速ベクトルも k - ϵ モデルに比べて実験とよく対応する。(2) LESの結果ではモデル前面下部や循環流域上部のfree shear layerにおいて P_k が負となる領域が存在する。 k - ϵ モデルではこのような負の P_k を表現することは不可能であり、この点は立方体等のbluff body周辺の流れ場へ適用する際の問題の1つである。(3) モデル屋上面の k の大きな領域に対しては、 $\langle u_1' u_1' \rangle$ が支配的な影響をもち、モデル後方の循環流域内の k の値に関しては $\langle u_2' u_2' \rangle$ が大きく寄与している。LESの結果はこのようなノルマルストレスの分布の特徴を捉えているが、 k - ϵ モデルでは、この傾向を十分に再現しえない。(4) 現状の k - ϵ モデルの結果は、モデル周辺の乱流場の再現に関して、いくつかの問題点を示している。これらはEVMそのものに起因しており、単純なEVMに立

脚したモデル化を採用するかぎりその解決は容易ではないと思われる。(1989年10月5日受理)

注1) 本報で示すLESの結果から算出される k や $\langle u_i' u_i' \rangle$ の分布はサブグリッドの寄与分は考慮していない。サブグリッドの寄与する割合は建物近傍において大きな値を示すが最大でも10%程度。

注2) 平均風速の分布はかなりよく実験と一致。 k に関しては実験より小さい値しか得られなかった。この点に関しては今後の課題とした。

注3) 本計算では、主流方向の圧損 ($\Delta p / \rho \langle u_b^2 \rangle$) は0.014。

注4) 25~26万step (図1中の○) と29~30万step (図1中の▽) の流入側平均風速プロファイルはほとんど一致しているので25万step以降は定常と判断。

注5) 建物中心軸上では流れの対称性から $\partial \langle u_i \rangle / \partial x_i = 0$ ($i \neq 2$)、 $\langle u_2 \rangle = 0$ である。また、本計算では、建物中心軸上で $\partial \langle u_2 \rangle / \partial x_2$ は全般に非常に小さくほぼ0とみなせるので、

$$P_k = -\underbrace{\langle u_1' u_1' \rangle \frac{\partial \langle u_1 \rangle}{\partial x_1}}_{P_{k,n}} - \underbrace{\langle u_3' u_3 \rangle \frac{\partial \langle u_3 \rangle}{\partial x_3}}_{P_{k,n}} - \underbrace{\langle u_1' u_3 \rangle \frac{\partial \langle u_1 \rangle}{\partial x_3}}_{P_{k,s}} - \underbrace{\langle u_3' u_1 \rangle \frac{\partial \langle u_3 \rangle}{\partial x_1}}_{P_{k,s}} \quad (1)$$

LESの場合、(1)より P_k を算出。また、 k - ϵ モデルの場合、

$$P_k = 2 \nu_t \left\{ \underbrace{\left(\frac{\partial \langle u_1 \rangle}{\partial x_1} \right)^2}_{P_{k,n}} + \underbrace{\left(\frac{\partial \langle u_3 \rangle}{\partial x_3} \right)^2}_{P_{k,n}} \right\} + \nu_t \left(\frac{\partial \langle u_1 \rangle}{\partial x_3} + \frac{\partial \langle u_3 \rangle}{\partial x_1} \right)^2 \quad (2)$$

(2)から、 k - ϵ モデルは常に $P_{k,n} > 0$ 、 $P_{k,s} > 0$ 。したがって、常に、 $P_k > 0$ 。

注6) LESの結果は建物前方や角部周辺で $P_{k,n}$ は比較的大きな値を示すので(図5(1))、前報(文献1, 2)の $P_{k,n}$ を0とするモデルは $P_{k,n}$ の過小評価につながる。

注7) 建物コーナー部ごく近傍を除き、 $\langle u_1' u_3' \rangle < 0$ (文献5))。

注8) この領域は前面にぶつかった流れが上下に発散するため $\partial \langle u_2 \rangle / \partial x_3$ が大きな正となり、 $-\langle u_3' u_3 \rangle \partial \langle u_3 \rangle / \partial x_3$ が負となり、この影響で $P_{k,n}$ 、 P_k ともに負となる。

注9) 角部近傍では、剥離により発生した $\langle u_3 \rangle$ 成分が x_1 方向に移動するに従って徐々に小さくなるために $\partial \langle u_3 \rangle / \partial x_1 < 0$ 。この部分の上空では角部付近の速度増加が解消していくため $\partial \langle u_1 \rangle / \partial x_3 < 0$ 。これらの影響でこの部分で $\{\partial \langle u_3 \rangle / \partial x_1 + \langle u_1 \rangle / \partial x_3\} < 0$ 。また、 $\langle u_1' u_3' \rangle < 0$ (注7, 文献5))であるので $-\langle u_1' u_3' \rangle \{\partial \langle u_3 \rangle / \partial x_1 + \partial \langle u_1 \rangle / \partial x_3\}$ は負となる。

参 考 文 献

- 1) 村上, 持田, 林: k - ϵ モデルによる建物風上の k の過大評価とモデルの改良, 風工学シンポジウム, 1988, 12
- 2) 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 (第6報), 生産研究, 1989, 1
- 3) S. Murakami, A. Mochida, Y. Hayashi: Scrutinizing the k - ϵ turbulence model by means of LES for turbulence structure around cube, International symposium on computational fluid dynamics Nagoya, 1989, 8
- 4) 林, 村上, 持田: LESによる建物周辺気流の数値予測 (第7報), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1989, 10
- 5) 持田, 村上, 林: LESによる建物周辺気流の数値予測 (第8報), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1989, 10
- 6) 持田, 村上, 日比: LESによる街区周辺の流れ場の数値解析と風洞実験 (その4), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1988, 10

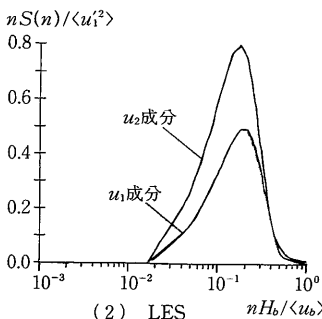
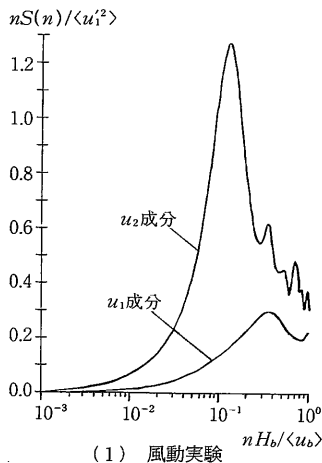


図12 風速変動のスペクトル