

LESを用いた乱流境界層中における3次元角柱まわりの数値解析

丸山勇祐*・丸山 敬

*前田建設工業(株)

要 旨

建築物周りの非定常乱流場の解析手法としてLESが使われるようになってきている。その際、耐風設計等の実用問題に用いるには流入境界条件の与え方が重要な問題となってくるが、その影響を調べるために本報では人工的に生成した変動風を流入条件として用い、1:1:0.5直方体周りの流れ場の計算をLESを用いて行った。計算結果から変動風を流入として用いた場合の問題点や計算格子を変えた場合の違いについて考察を行った。

キーワード：LES, 流入変動風, 乱流境界層, 1:1:0.5直方体

1. はじめに

近年、計算機の発達にともなって建築物周りの気流性状の数値解析が盛んに行われるようになり、建築物の耐風設計に数値解析が用いられるようになってきた。風によって物体に働く抗力や揚力、空力不安定振動の原因となる非定常空気力などは物体周りのフローパターンによって大きく変化する。物体周りに形成されるフローパターンは接近流の気流性状の影響を強く受けるので、建築物周りの流れ場を数値解析によって予測する際には、接近流の気流性状の与え方が重要な問題となってくる。現在行われている鈍い物体周りの数値計算では、一様流を流入としたものや周期境界条件を用いて乱流場を発達させたものが多く、風洞実験や実際の市街地のように乱れた接近流を流入変動風に用いた計算はほとんど行われていない。しかし耐風設計用の圧力分布を知るためには、自然風と同じ乱流性状をもつ変動風を流入条件として数値計算を行う必要がある。

流入境界面において、与えられた乱流統計量を満た

すような変動風速場を発生させる方法には、上流域の乱流場を直接計算する方法と、乱数等を用いて変動風速波形を生成する方法が挙げられる。このとき、前者の方法で目標となる統計量をもった乱流場を任意に発生させるのは困難なことが多く、また計算自体が不可能な場合がある。後者の方法としては、乱流構造の情報を計算点間の空間相関として取り込んで風速変動を生成する方法(岩谷, 1982)や、測定波を条件として含む風速変動を条件付確率場としてシミュレートする方法(Kameda et al., 1992; 星谷, 1993; 岩谷, 1996)が挙げられる。本報では後者の測定波を条件とする方法を用いてラフネス上に発達した乱流境界層の計算を行った筆者等の結果(丸山ら, 1996)を流入条件とし、その下流に1:1:0.5の3次元角柱をおいた場合の乱流場の計算をLESを用いて行った。

2. LESによる計算

2.1 流入境界面における風速変動

今回の計算で用いる流入境界面における風速変動は、

文献（丸山ら，1996）と同じくFig.1に示すような風洞内に発達した境界層乱流である。6×6×6cm³の立方体粗度ブロックを千鳥状に敷き詰めたラフネスの風下側後縁である流入境界面1における風速変動を人工的に生成し、それを流入境界条件として、乱流境界層の計算を領域1でLESを用いて行い、領域1の風下側境界面である流入境界面2における計算結果を保存した。今回の計算ではFig.1のように床面に配置された $x \times y \times z = 0.12 \times 0.12 \times 0.06 \text{ m}^3$ の3次元角柱(1:1:0.5直方体、代表長さ $D=0.12 \text{ m}$)を含む、領域2を解析対象とした。この領域2は、角柱の中心から主流方向（x軸方向）の上流側に5D、下流側に10D、主流直角水平方向（y軸方向）に±6D、高さ方向（z軸方向）に床面から5Dの範囲をもつ $x \times y \times z = 1.8 \times 1.44 \times 0.6 \text{ m}^3$ の領域で、領域1(0.8×0.48×0.7m³)に比べ、y方向に約3倍の長さをもつ。そこで、流入境界面2における変動風速を与えるにあたり、領域1で計算された結果をy方向に3回繰り返して並べた。このとき領域1ではy方向に周期境界条件を用いて計算しているので、接合面における流れの連続性は保たれている。領域2の流入面における計算格子点での値は、各時間ステップにおいて時空間方向に直線補間して求めた。計算に用いた流入境界面2中央付近での流入変動風速の時刻歴波形の例をFig.2に、流入変動風速の統計量(1/400秒×512ステップ)の1例をFig.3に示す。

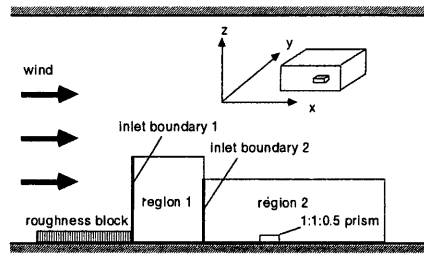


Fig.1 Region of calculation

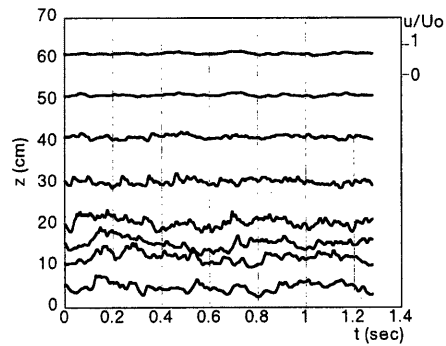


Fig.2 Inflow fluctuations ; u-component

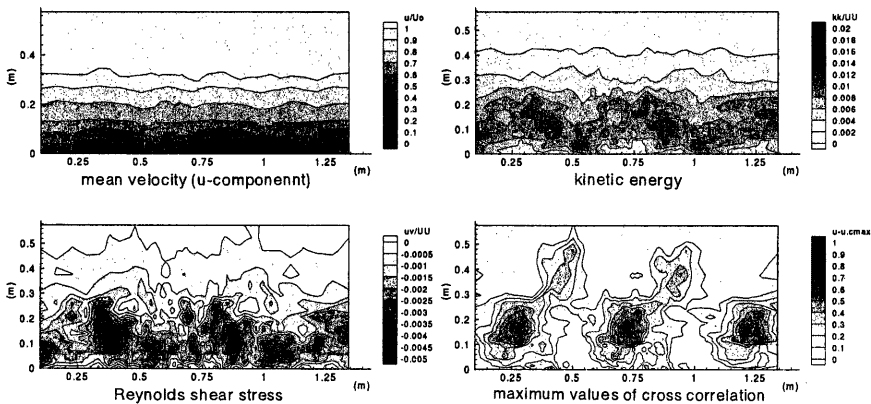


Fig.3 Distributions of statistics at the inlet boundary

2.2 計算格子および境界条件

領域 2 において計算に用いた格子分割は、Fig. 4, Fig. 5 に示す 2 種類とした。Fig. 4 では流入面から角柱周りまで、x 軸方向に 1cm の等間隔とし、また z 軸方向には高さ 1D 付近まで、y 軸方向には角柱中心から両側に 1D の範囲まで 1cm の等間隔とし、他の部分では角柱から遠ざかるにつれて広がる不等間隔とした。x, y, z 軸方向にそれぞれ 94, 29, 64 分割で、全格子点数は 174464 点である。この格子を用いた計算を A-Type とする。角柱上流および角柱周りで格子分割を 1cm の等間隔としたのは、流入変動風速の高周波成分が、角柱のある所まで減衰しないようにするためである。ちなみに、流入変動風を生成した領域 1 では、x, y 軸方向に 1cm の等間隔、z 軸方向に床面付近で最小 1cm の不等間隔格子を計算に用いている。Fig. 5 では Fig. 4 と同様の格子分割を行い、角柱エッジ付近および床面で最小間隔が 0.3mm になるようさらに細かく不等間隔に格子分割を行ったものである。x, y, z 軸方向にそれぞれ 106, 48, 74 分割で、全格子点数は 376512 点である。この場合を B-Type とする。これは数値計算による角柱エッジ付近の剥離に伴う渦の構造が格子分割によりどのように変化するかを比較するためである。上方および下流側の流出境界面では移流境界条件、すなわち $\partial u_i / \partial t + C \partial u_i / \partial x = 0$ とするよう各風速成分

の値を与えた。ただし、C は平均流出風速である。床面境界および物体壁面境界は Non-slip 条件、y 軸方向には周期境界条件を用いた。

2.3 計算手法

用いた計算コードはドイツ・カールスルーエ大学で開発されたもので、乱流モデルとしては Germano ら (1990) による DynamicSGS モデルを用いている。ナビエ・ストークス方程式は曲線座標系による物体適合格子を用いた有限体積法により離散化され、変数配置は各変数が格子の中心に置かれるレギュラーメッシュ系を用いている。対流項の離散化は 2 次精度の中心差分、時間積分は運動量方程式を Runge-Kutta 法、圧力の Poisson 方程式を Stone (1983) の陰解法で行っている。また、レギュラーメッシュ変数配置に起因する計算時の振動をおさえるために、セル表面の流速に対して Rhie (1983) らによる運動量の内挿を行っている。この計算コードの詳細および計算例は文献等 (Breuer and Rodi, 1994; 1996) を参照されたい。

計算時の風速は計算領域上部の基準風速 U_0 で 5.8 (m/s)、直方体の見つけ幅 $D = 0.12$ (m) を代表長さとしたときのレイノルズ数 Re は約 46000 である。計算は 1 ステップ 1/3200 秒で行い、4096 ステップの計算が CRAY T94 で約 6 ~ 7 時間であった。計算は京都大学

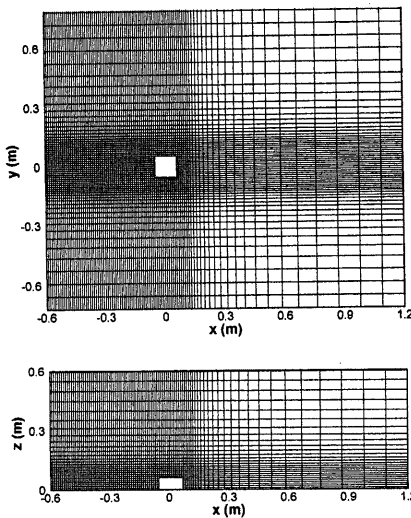


Fig. 4 calculation mesh (A-type)

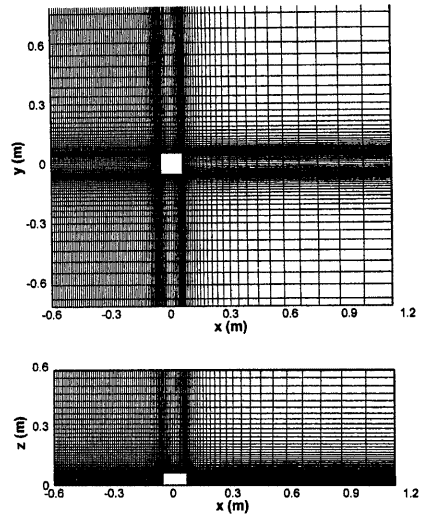


Fig. 5 calculation mesh (B-type)

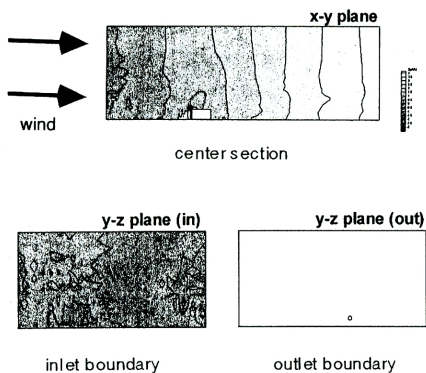


Fig.6 Spatial pressure gradient

化学研究所スーパーコンピュータラボラトリーで行った。

3. 計算結果および考察

3.1 流入変動風を用いた場合の圧力補正

流入境界面に風速変動を与えたときに、解析領域での流入量と流出量に食い違いが見られるため主流（ x 軸）方向には瞬時瞬時に圧力勾配の発生がみられた。Fig.6はある瞬間の解析領域中央断面（ x - y 断面）および流入境界面（ y - z 断面），流出境界面（ y - z 断面）の圧力分布である。上流から下流にかけてほぼ直線的に圧力が変化しているのが見られる。これは計算のために領域を区切ったため流入面での風速の変化が流出面と一致していないことによって起こると思われる。流入面での風速の時間的な変化 $\partial u/\partial t$ と釣り合うようにナビエ・ストークス方程式の圧力項 $\partial P/\partial x$ が変化することにより解析領域内圧力勾配が起こるのである。また流入および流出のどちらの面においても面内での圧力変化は主流方向に比較して顕著ではなく、流入風速変動による圧力勾配は主流（ x 軸）方向にのみ起きている。Fig.7は流入変動風速の時間微分（ $\partial u/\partial t$ ）と流出境界と流入境界の圧力差（ $\partial P/\partial x$ ）の時刻歴である。 $\partial u/\partial t$ と $\partial P/\partial x$ には負の相関がみられる。この圧力勾配は実際の風洞実験等では起こらないものであるので、圧力の値の補正を行った。流入面と流出面の中央断面上の点を代表点として流入面と流出面の圧力差を求め、直線補間により各計算点での圧力勾配による変化量をだした。それを各点の圧力の瞬間値からひくことにより補正を行った。

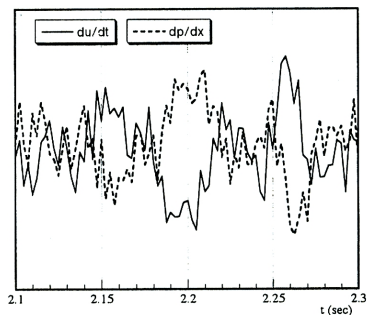


Fig.7 Relation between $\partial u/\partial t$ and $\partial P/\partial x$

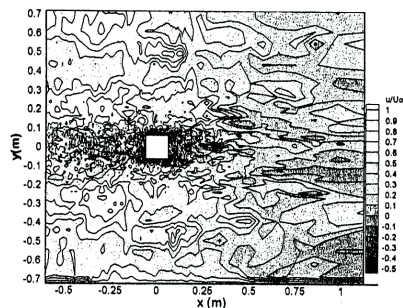


Fig.8 Instantaneous velocity contour (u-component)

3.2 計算結果（A-Type）

計算は一樣流場から始め、流入境界面で与えた風速変動の影響が角柱周りまで充分に伝わり、かつ解析領域内が十分に乱れた状態になるまで進めた。Fig.8は風速分布（ u 成分）の瞬間値である。風速は基準風速 U_0 で無次元化してある。流入で用いた変動風の影響が解析領域全体に伝わっているのが確認できる。上流部では同じ変動風を3つ並べて流入としているため y 軸方向に同じような風速分布が3つ見られるが、角柱付近では、周期性はほとんどなくなる。Fig.9は計算結果と風洞実験結果（日本建築学会編，1994）の角柱表面の平均風圧係数のコンターである。またFig.10は角柱屋根面中央断面での風圧係数を計算結果について表したものである。圧力は流入境界面2における角柱頂部の高さを基準点とし、その基準点での速度圧で無次元化した。角柱表面の平均風圧係数は実験で得られた結果と比較し、風上面ではよく似た値になってい

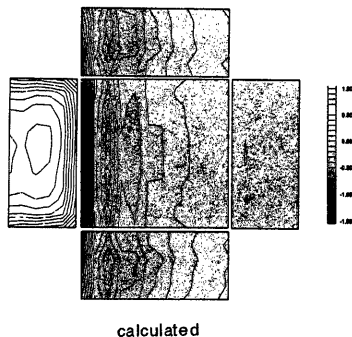
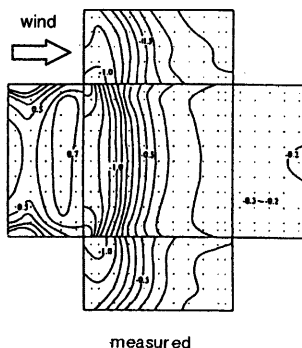


Fig.9 Measured and calculated pressure distribution on the surface of prism

るが、屋根面および側面では負圧がやや小さくなっている。実験結果では屋根面の負圧が最も大きくなるのは上流端部よりやや下流側にあるが、計算結果では上流端部にのみとても強い負圧のピークが見られる。実験で負圧のピークが見られる位置は上流端部に剥離した流れが渦を形成することによるものであるが、今回の計算でそれが見られなかったのは剥離に伴う渦の形成がとらえられていなかったことによるものであると思われる。また実験結果と比較して負圧がやや小さくなっているのも渦が明確に形成されていないことによると思われる。これは次の章で示すように格子を細かくした場合に改良されることから、角柱付近の格子分割が粗いことが原因となっている。また上流端部付近に圧力の値が振動しているのが見られる。この振動は圧力が急変する端部付近で大きい。これはレギュラーメッシュ変数配置に起因するものと考えられ、スタッガード変数配置を用いる等、今後の改良が必要である。Fig.11は渦らしきものが移流するときの角柱屋根面の圧力分布の変化を0.02secごとに表したものである。Fig.12はFig.11と同時に角柱周りの風速分布（u成分）である。屋根面の圧力分布を見ると大きな負圧の領域が風上側から風下側に移動していくのが見られる。また強い負圧の上流側には負圧の弱くなる部分が見られるが、風速分布では風速の低い部分と高い部分の境目に一致している。このように流入で与えた風速変動の影響が角柱表面の圧力分布にも影響を与えていることが確認できた。

3.3 計算結果（B-Type）

角柱エッジ付近の格子分割を細かくした場合（B-

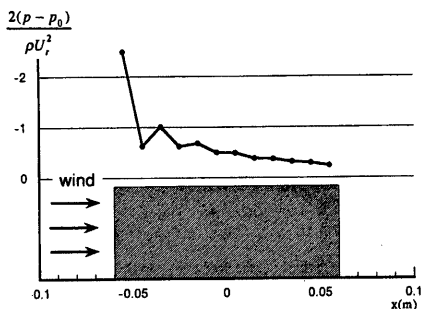


Fig.10 Pressure distribution on the center line of roof surface (A-type)

Type) の計算結果についてA-Typeの結果と比較しながら考察する。Fig.13は角柱表面の平均風圧係数のコンター、Fig.14は角柱屋根面中央断面での風圧係数を表している。A-Typeに比較して圧力の振動は小さくなっている。また実験値と比較して、負圧のピークの位置がほぼ一致している。風上側端部で負圧が急激に大きくなる傾向はB-Typeにおいても見られる。端部からやや下流側に負圧が大きくなりA-Typeのように急に負圧が小さくならないのは剥離に伴って発生する渦が計算においても再現されているためと思われる。このことはFig.15に示す屋根面の圧力分布の変化からも推測される。風上側端部から少し離れた位置に定定的に負圧の大きい領域が見られる。ときに負圧の大きい部分が左右に寄ったり、風下側に移動したりするが、ほぼ負圧のピークが見られる位置を中心に動いており、この付近に定定的な渦が常に形成されていると予測される。また負圧の大きい位置が動くのは流入で与えた乱れの影響ではないかと思われる。

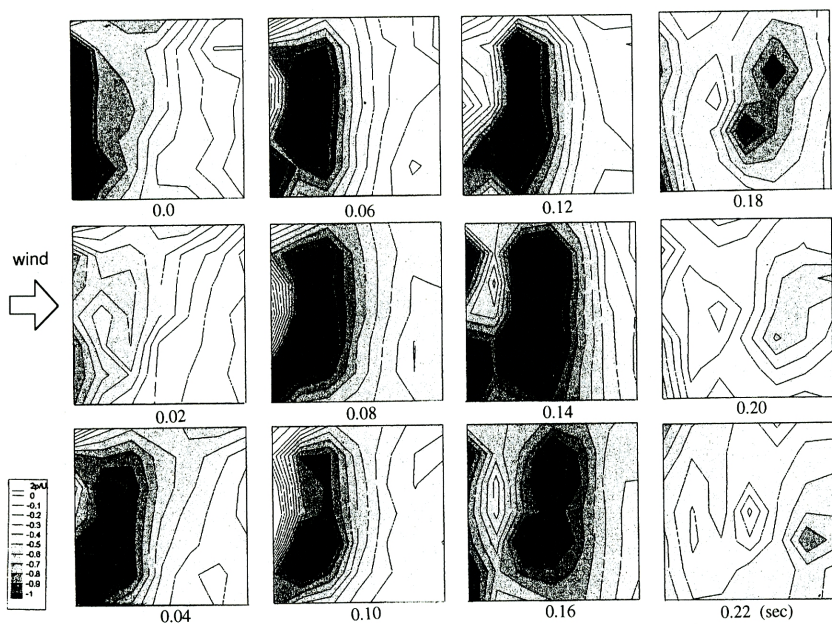


Fig.11 Instantaneous pressure contours (0.02 sec step ; A-type)

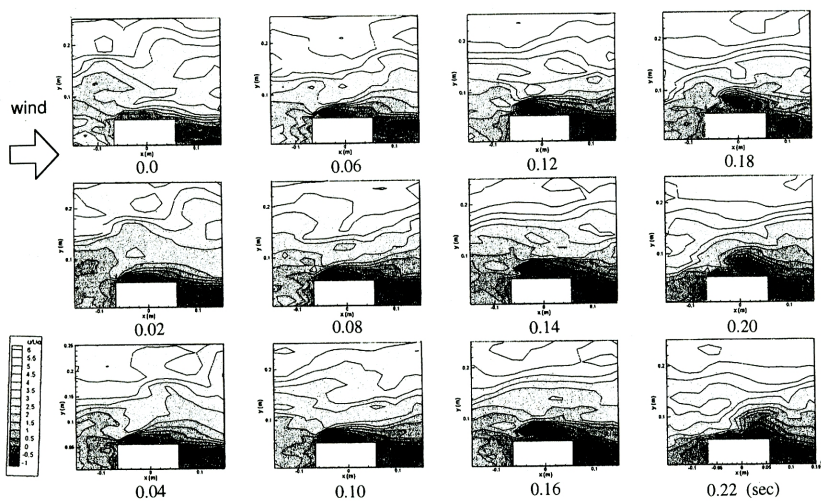


Fig.12 Instantaneous velocity contours (0.02 sec step ; A-type)

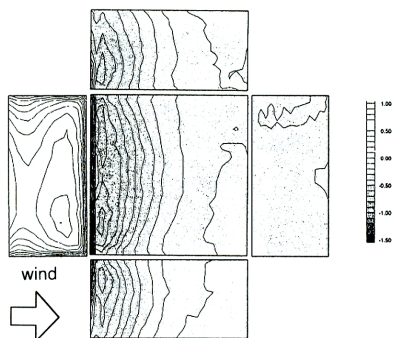


Fig. 13 Calculated pressure distribution on the surface of prism (B-type)

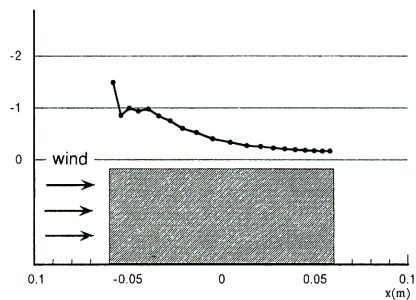


Fig. 14 Pressure distribution on the center line of roof surface (B-type)

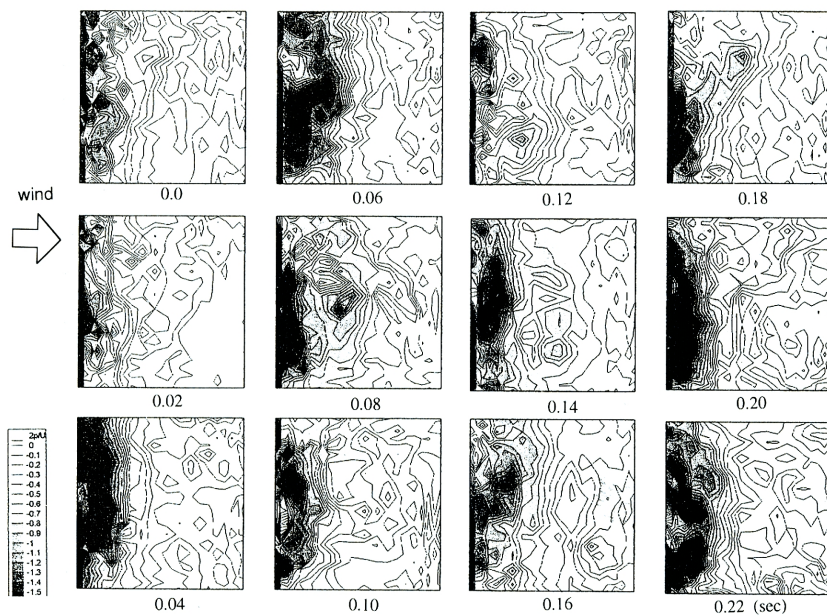


Fig.15 Instantaneous pressure contours (0.02 sec step ; B-type)

4. まとめ

人工的に発生させた風速変動場を用いて、高レイノルズ数流れ場における1:1:0.5直方体周りの数値解析をLESを用いて行った。計算結果よりえられた知見を以下に示す。

- 1) 変動風速を流入条件とする高レイノルズ数乱流場のLESを用いた計算例を示し、実用計算の可能性を示した。
- 2) 直方体表面の圧力の値に流入変動風を用いた影響を確認することができた。
- 3) 直方体周りの格子分割の影響は、剥離に伴う渦の発生に出ていた。格子分割を密にすることにより物体周りの渦を再現することが可能であると思われる。

今回の計算手法では物体のエッジ付近で数値的振動が発生していたが、変数配置等を変えることによりこの振動をおさえることが今後の課題である。

謝 辞

本研究は文部省科学研究費の補助を得て行われた。また、数値計算は京都大学化学研究所スーパーコンピュータラボラトリーにおいて行われた。

参考文献

岩谷祥美 (1982) : 任意のパワースペクトルとクロススペクトルをもつ多次元の風速変動のシミュレーション, 日本風工学会誌 第11号, pp.5-18.

岩谷祥美 (1996) : 実測データを組み込んだ多次元風速変動のシミュレーション, 日本風工学会誌, 第69号, pp. 1-13.

日本建築学会耐風設計資料小委員会編 (1994) : 流体計算と風荷重評価

星谷勝 (1993) : 条件付き確率場のシミュレーション理論, 土木学会論文集, No.459/I-22, pp. 113-118.

丸山敬, 丸山勇祐, W.ロディ, 平岡久司 (1996) : 人工的に発生させた流入気流を用いたLESによる乱流境界層の計算, 第14回風工学シンポジウム, pp.217-222.

Breuer, M. and Rodi, W. (1994) : Large-Eddy Simulation of Turbulent Flow through a Straight Square Duct and a 180° Bend, Proc. of the First ERCOFTAC Workshop on DNS and LES, Guildford, Surrey, U.K.

Breuer, M. and Rodi, W. (1996) : Large-Eddy Simulation for complex turbulent flows of practical interest, in Flow Simulation with High-Performance Computers II, ed. E.H.Hinschel, Notes on Numerical Fluid Mechanics, vol.52, pp.258-274.

Germano, Massimo., Piomelli, Ugo., Moin, Parviz., Cabot, William H. (1990) : A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model, Center for Turbulence Research, Proc. of the Summer Program, Stanford University.

Kameda, H. and Morikawa, H. (1992) : An interpolating stochastic process for simulation of conditional random fields, Probabilistic Eng. Mech., Vol.7, pp. 243-254.

Stone, H.L. (1983) : Iterative solution of implicit approximations of multidimensional partial differential equations, SIAM J. on Num. Anal., vol.5, pp.530-558.

Rhie, C.M., Chow, W.L. (1983) : A numerical study of turbulent flow past an isolated airfoil with trailing edge separation, AIAA J., vol.21, pp.1225-1532.

Numerical Calculation of Flow around a 3D Prism in the Turbulent Boundary Layer using Large Eddy Simulation

Yuusuke MARUYAMA* · Takashi MARUYAMA

*Maeda Corporation

Synopsis

This report presents the result of LES of flow around a 3D prism (1:1:0.5 rectangular-prism) in turbulent boundary layer at high Reynolds number. The inflow wind fluctuations conditioned by the experimental data were generated artificially. The turbulent flows with two different meshes were examined. The characteristics of turbulences and the pressure distribution on the surface of prism was effected by the inflow turbulence and the mesh configurations.

Keywords : LES, generated inflow, turbulent boundary layer, 3D prism