

正方形角柱まわりの流れの数値計算

黒田 真一
I H I

Numerical Simulation of Flow around a Square Cylinder

by
Shinichi KURODA

ABSTRACT

To predict behavior of such structures as long span bridges in turbulent winds, it is important to evaluate quantitatively the spanwise correlation of fluctuating pressures on their surfaces. However there have not been many instances in which numerical prediction of the spanwise correlation was attempted. In the present paper, prediction of the spanwise correlation of fluctuating pressures on side surfaces of a square cylinder in a smooth flow was done as a try with a grid that has the same spanwise length as a windtunnel model and is relatively fine. The filtered incompressible Navier-Stokes equations are used as governing equations. Smagorinsky model is employed as the subgrid-scale model. The numerical algorithm is based on the method of pseudocompressibility. The convective terms are differenced with a fifth-order upwind scheme. The viscous fluxes are differenced with second-order accurate central differences. To solve the algebraic equations resulting from the implicit time differencing, an unfactored line-relaxation scheme is used. The implicit scheme is second-order in time. The numerical code was verified using a test case of the turbulent channel flows. It is then applied to prediction of the spanwise correlation of fluctuating pressures on a square cylinder. The calculated spanwise correlation agreed well with the experimental results of Vickery (J. Fluid Mech., Vol.25, 1966). In the computation, amplitudes of lift coefficient variations dropped almost to zero intermittently. When the amplitude became very small, the fluctuating pressure on the side surfaces and the separating shear layers had opposite phases in two adjacent regions along the spanwise direction of the cylinder.

1. はじめに

橋梁などの柱状構造物の乱流中での挙動を精度よく予測するには、スパン方向の圧力相関の定量的な評価が重要である。しかしながら、一般にスパン方向の圧力変動については、橋梁断面に限らず矩形断面に関しても必ずしも十分なデータが得られているとは言い難い。また、流れ解析による研究についても矩形柱のスパン方向の圧力相関の定量的な評価の例はあまりない。圧力相関の予測を主目的としたものではないものの、過去の先駆的な研究において正方形角柱のスパン方向圧力相関の評価が試みられた例¹⁾²⁾もあるが、相関係数の定量的な予測精度に関しては必ずしも十分な結果が得られていなかった。精度が十分でなかった理由としては、計算領域がスパン方向に十分とれていなかったことや仮に領域は十分であったとしても格子分割が十分ではなかったといったことがまず考えられる。これらのことは近年の計算機性能の向上によりある程度改善することが可能となった。そこで、特にスパン方向の圧力相関に着目して、一様流中に置かれた静止正方形角柱まわりの流れ計算を行った。

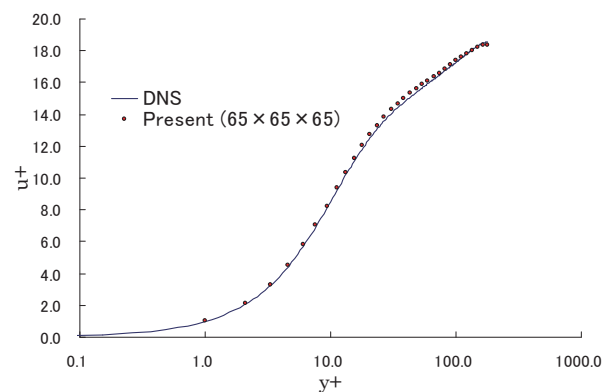
2. 計算手法

非圧縮性 Navier-Stokes 方程式を基礎方程式とし、SGS モデルには標準 Smagorinsky モデルを用いた。Smagorinsky 定数は $C_s=0.1$ とした。計算アルゴリズムは疑似圧縮性解法³⁾に基づき、対流項の差分スキームに 5 次精度風上差分³⁾⁴⁾、粘性項に 2 次精度中心差分、時間積分には 2 次精度の陰解法³⁾を用いた。時間方向の陰的離散化から生ずる代数方程式の解法には unfactored line-relaxation を用いた。

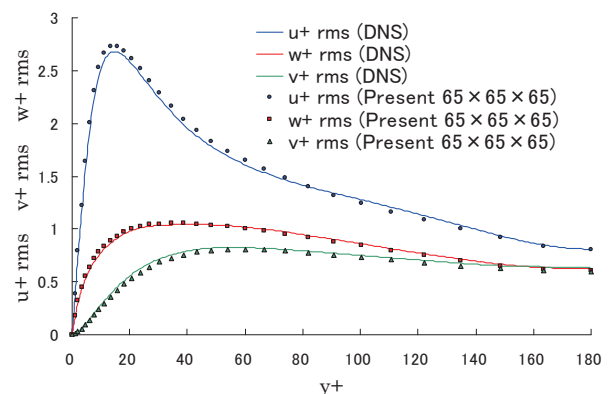
3. チャネル乱流の計算

計算法の精度の確認のためにまずチャネル乱流の計算を実施した。計算領域は、壁間距離 2δ に対し、主流方向 $2\pi\delta$ 、スパン方向 $\pi\delta$ とした。計算格子数は $65 \times 65 \times 65$ で、壁間方向のみ不等間隔とし、壁に接する最小格子幅は $\Delta y^+ = 1$ とした。レイノルズ数は壁面摩擦速度 u_τ とチャネル半幅 δ に

基づき $Re_\tau = u_\tau \delta / \nu = 180$ である。主流方向およびスパン方向に周期境界条件を課し、時間積分間隔 $\Delta t u_\tau / \delta = 0.0001$ 、内部反復 3 回として時間積分を行った。乱流統計量については乱れが十分発達してから 10 万ステップ（無次元時間 20）の時間空間平均を行い算出した。図 1 に平均流速、乱

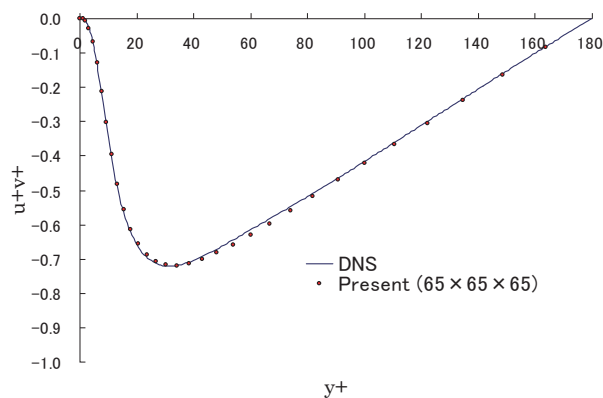


(a) 平均流速分布



(b) 乱れ強さ

図 1 DNS データ⁵⁾との比較 (チャネル乱流, $Re_\tau=180$)



(c) レイノルズ応力

図1 DNSデータ⁵⁾との比較 (チャンネル乱流, $Re_\tau=180$)

れ強さ、レイノルズ応力の分布をDNSデータ⁵⁾と比較して示す。平均流速は対数則域でやや大きめ、乱れ強さについては、主流方向成分がやや大きめで、壁間方向成分はやや小さめの評価となっているが、全体としては比較的にDNSデータとよく一致した結果となっている。

4. 正方形角柱まわりの流れ計算

計算領域の大きさは角柱から遠ざかる方向に正方形角柱の辺長 D の約 30 倍とし、スパン方向に $14D$ とした。図2に軸直角面内の計算格子を示す。格子数は 413 (周方向) \times 201 (径方向) \times 561 (スパン方向) である。壁に接する最小格子の幅は $2 \times 10^{-4} D$ 、スパン方向の分割は等分割とした。流入条件は一様流、迎え角 $\alpha = 0^\circ$ 、レイノルズ数は $Re_D = 1 \times 10^5$ である。スパン方向の境界条件は周期境界条件を用いた。計算は時間積分間隔を $\Delta t U_\infty / D = 0.02$ 、陰的積分の内部反復を 3 回として、無次元時間 600 まで行った。なお、計算には 2 ノード (16 コア) を用いた。

計算結果の空気力係数の時刻歴を図3に、実験結果との比較を表1に示す。表中の実験値は文献1)中に示されている空気力係数の比較の表から採った。全ての係数について本計算結果は実験結果と比較的によく一致している。

図4には表面圧力の周方向分布を実験結果⁶⁾⁻⁸⁾と比較して示す。前面において本計算結果の平均圧力係数は実験結果のそれらとよく一致している。側面および背面での分布については、溝田ら⁶⁾の結果と Lee⁷⁾の結果で若干異なるが、本計算結果は側面において溝田らの結果に、背面においては Lee の結果によく一致している。本計算および Lee の実験結果の背圧が溝田らのそれよりも圧力係数で 0.2 程度高いことは、抗力係数がその分小さい (C_D : 本計算, 2.08; Lee, 2.05; 溝田ら, 2.25) ことと整合している。変動圧力係数については側面および背面において実験結果にかなりばらつきが見られるが、本計算結果は実験結果の傾向を概ね捉えていると言える。Lee の実験との比較では再び背面での分布が比較的に一致がよい。側面での分布に関しては Pocha のそれに近く、側面中央およびその後方では Vickery の結果とも比較的によく一致している。

図3の空気力係数の時刻歴で特徴的なのは $tU_\infty / D = 200$, 300 および 500 付近で揚力変動が非常に小さくなっていることである。これらの時刻における角柱側面での圧力のスパン方向の分布を図5(b)~(d)に示す。比較のために、揚力変動が大きい時刻における圧力分布の例を図5(a)に示す。図5に示した時刻は全て、上側面での負圧が最大になるあたりの時刻から選んだ。図5(a)では、上面側で多少変動が

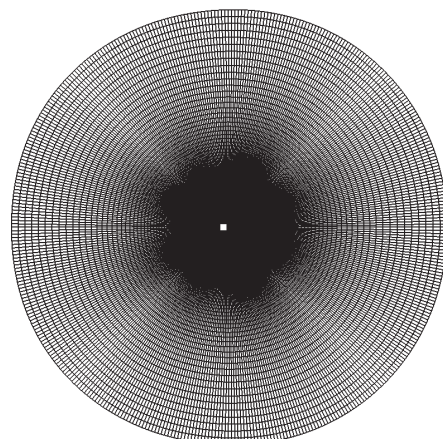
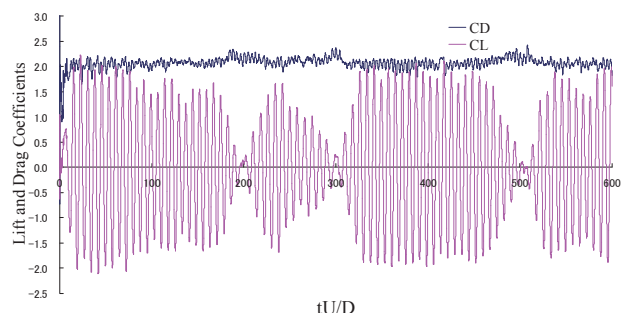
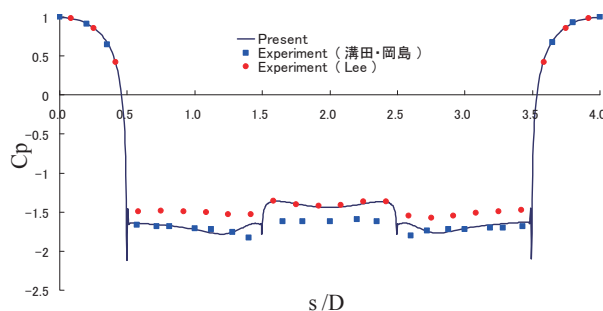
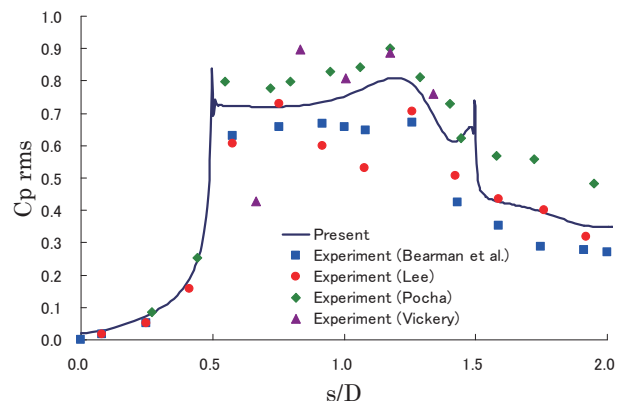
図2 正方形角柱まわりの計算格子 (413 \times 201 \times 561)図3 空気力係数の時刻歴 (正方形角柱, $Re_D=1 \times 10^5$)

表1 空気力係数の比較 (正方形角柱)

	C_D	$C_D \text{ rms}$	$C_L \text{ rms}$	St
本計算	2.08	0.09	1.08	0.13
実験	2.05~2.25	0.11~0.2	0.82~1.4	0.12~0.13

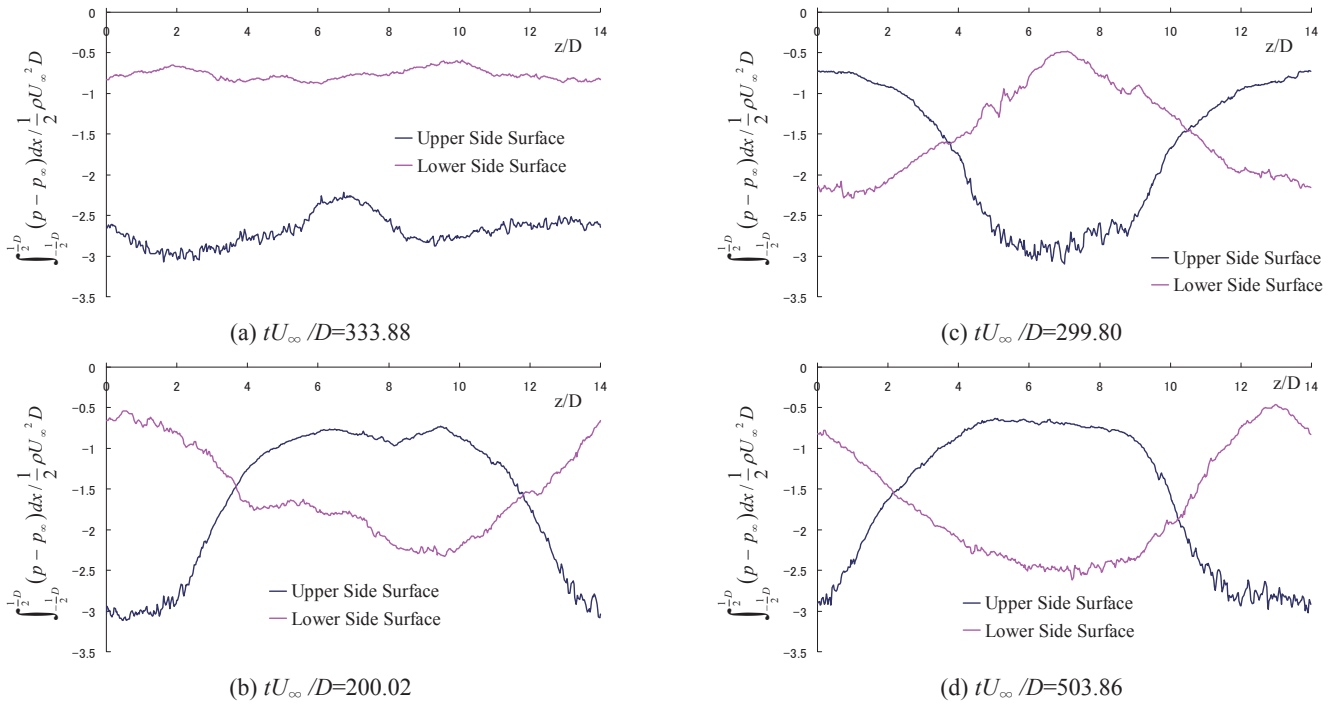
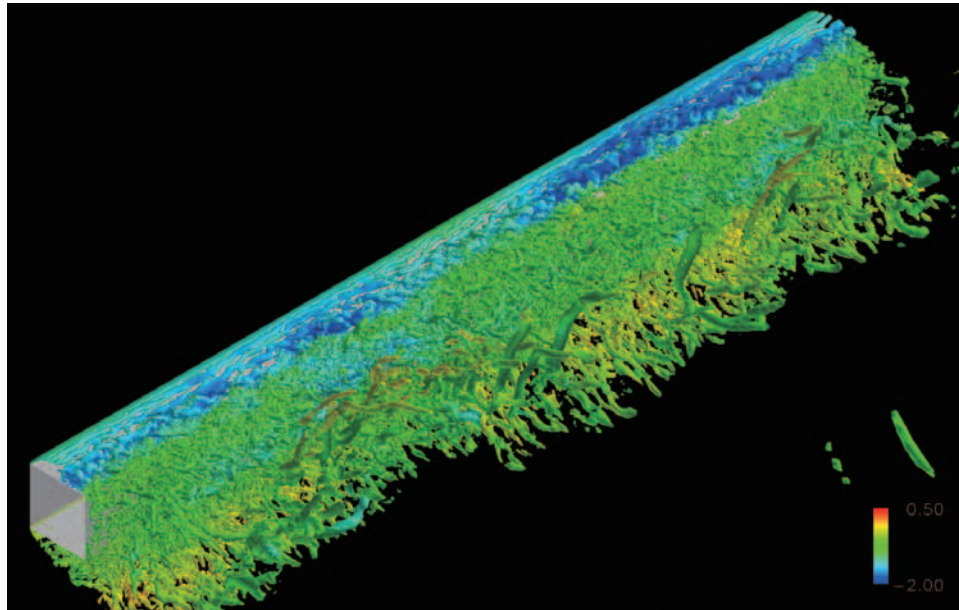
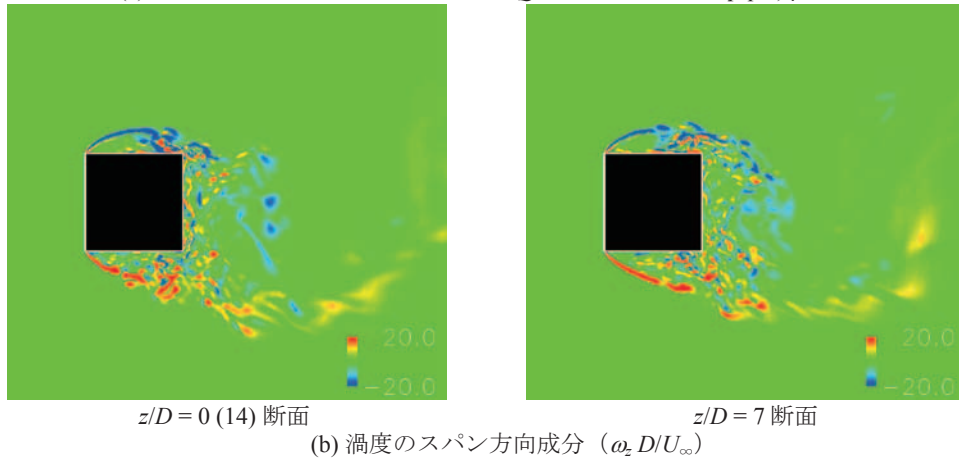


(a) 平均圧力係数



(b) 変動圧力係数

図4 表面圧力の周方向分布の比較 (正方形角柱)

図 5 側面に作用する圧力のスパン方向の分布 (正方形角柱, $Re_D=1 \times 10^5$)(a) 速度勾配の第 2 不変量の等値面 ($QD^2/U_{\infty}^2=40$, 色は $(p-p_{\infty})/\rho U_{\infty}^2$)図 6 正方形角柱まわりの瞬間の流れ場 ($Re_D=1 \times 10^5$, $tU_{\infty}/D=333.88$)

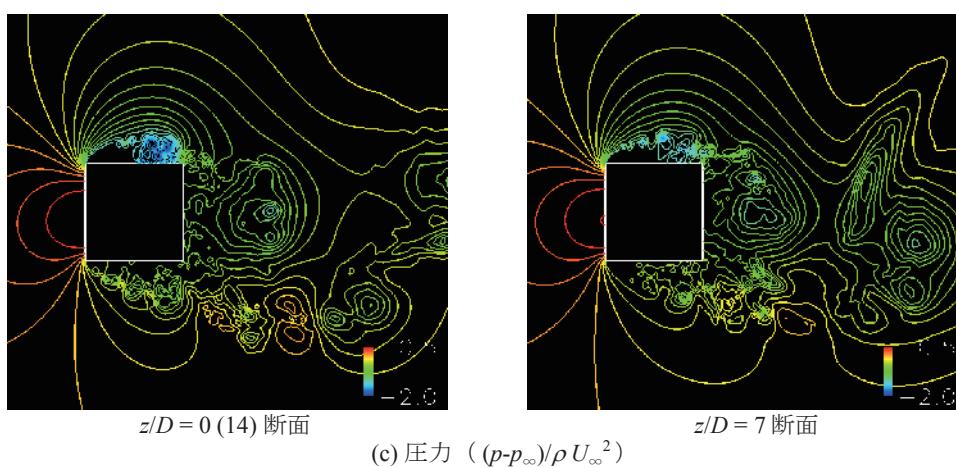
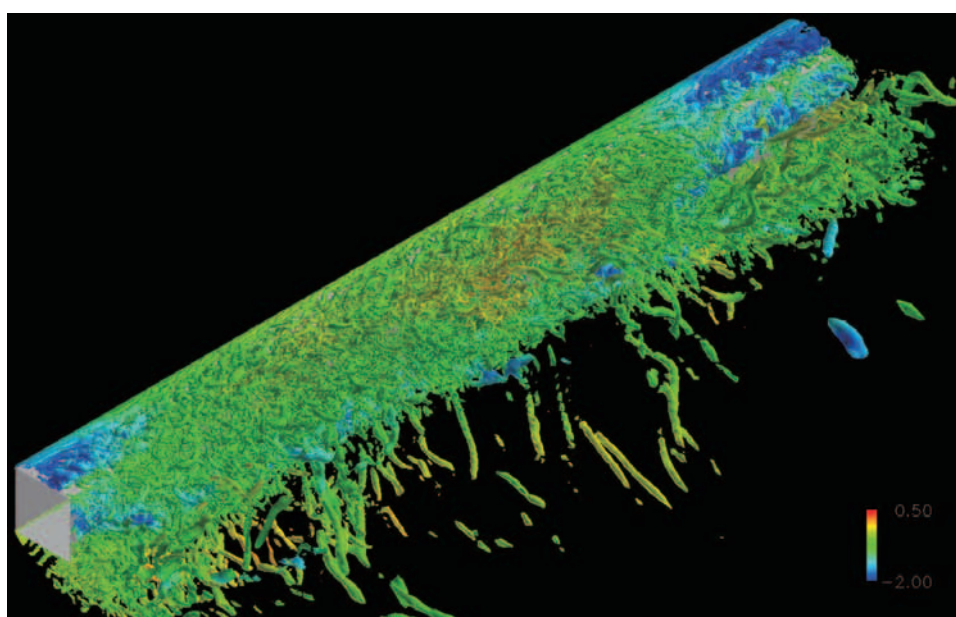


図6 正方形角柱まわりの瞬間の流れ場 ($Re_D=1 \times 10^5$, $tU_\infty/D=333.88$)



(a) 速度勾配の第2不変量の等値面 ($QD^2/U_\infty^2=40$, 色は $(p-p_\infty)/\rho U_\infty^2$)

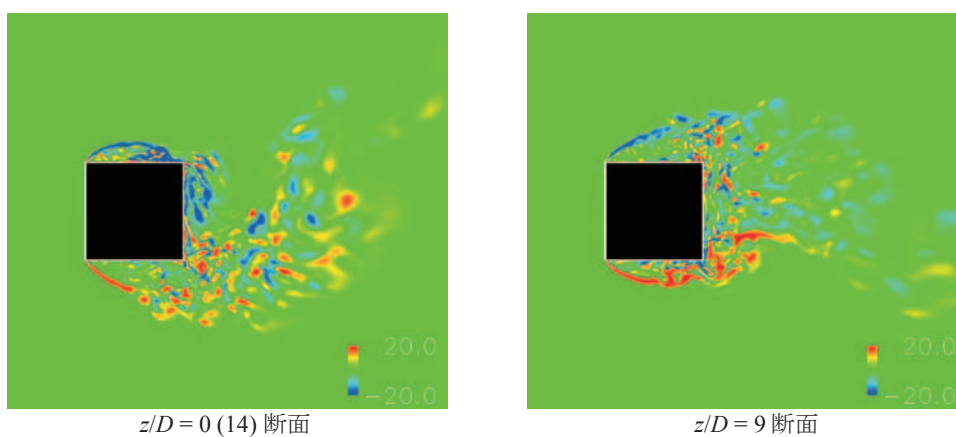
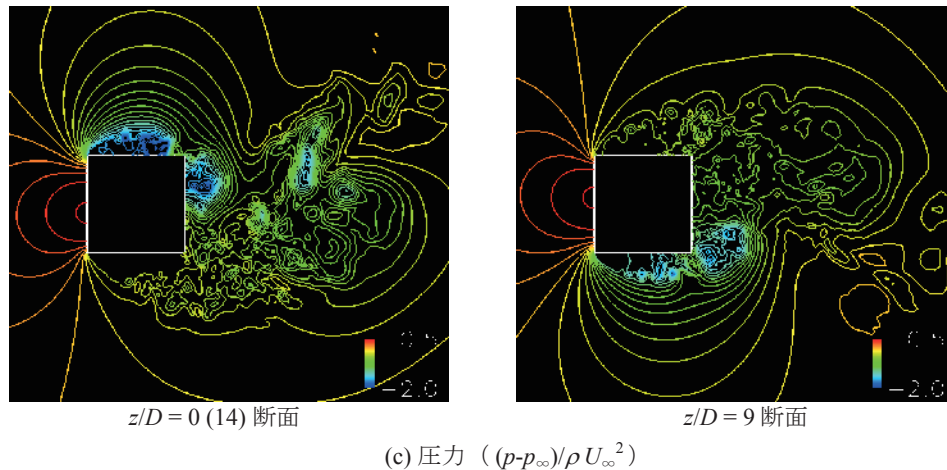


図7 正方形角柱まわりの瞬間の流れ場 ($Re_D=1 \times 10^5$, $tU_\infty/D=200.02$)

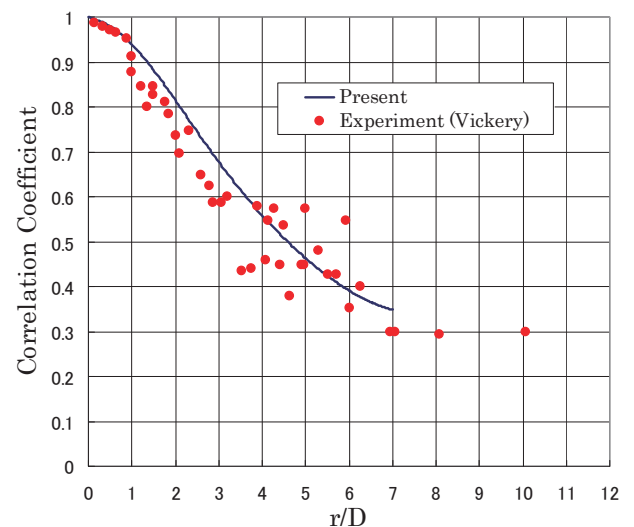
図7 正方形角柱まわりの瞬間の流れ場 ($Re_D=1 \times 10^5$, $tU_\infty/D=200.02$)

見られるものの、上下面ともスパン方向にある程度様な分布を示している。それに対し、図5(b)~(d)では、上下面の圧力差が比較的に大きい領域と比較的に小さい領域が並存している。しかもこれらの領域は圧力変動の位相が互いに反転している。また、これら2つの領域がスパン方向のどこに現れるかは(b)~(d)の時刻で異なっている。このように、互いに位相の反転した2つの領域が存在しているため、側面の負圧が最大となるタイミングでも2つの領域の揚力は互いに打ち消しあい、全体としては揚力がほとんどでないことがわかる(図5のプロットを横軸に沿って積分し、上面での積分値から下面での積分値を差し引き、無次元スパン長14で割って符号を変えれば、その時刻における揚力係数が得られる)。図6、図7には、それぞれ図5(a)、(b)と同時刻における瞬間の流れ場の様子を示す。図6では剥離せん断層や圧力変動の位相が全スパンに亘って概ね揃っているのに対し、図7ではそれらの位相が互いに反転した2つ領域が存在していることが確認できる。また、この時、一方の領域において剥離せん断層が角柱側面および背面の近くに強く巻き込み、他方の領域よりも大きな負圧を生み出している。図3の空気力係数の時刻歴から、揚力変動が小さくなる時($tU_\infty/D=200, 300$ および 500 付近)、抗力係数が若干大きくなっているのが分かるが、これは、これらの時刻に上下側面の圧力差の大きい方の領域で背面近くに強く巻き込む渦が形成されるためである。

最後に、スパン方向の圧力相関の結果を示す。正方形角柱のスパン方向の圧力相関については Vickery⁹⁾が側面中央点での差圧により計測している。本計算では、レイノルズ数、スパン方向長さ(14D)ともに Vickery の実験に合わせ、また、向かい合う側面両面の差圧を用いてスパン方向の相関を算出することも Vickery の実験と同様とした。図8に Vickery の実験結果との比較を示す。本計算では、スパン方向の境界で周期境界条件を用いたため、 $r=7D$ までの相関しかプロットしていないが、計算結果は実験の傾向をよく捉えている。

5. 結論

正方形角柱のスパン方向の圧力相関の予測を試みた。計算結果の圧力相関は実験結果の傾向をよく捉えていた。また、計算結果では剥離せん断層および圧力の変動の位相が互いに反転した領域がスパン方向に並存する状況が間欠的に現れた。今後、この反対位相を持つ領域がスパン方向に隣接して間欠的に現れるメカニズムを明らかにし、そのよ

図8 変動圧力のスパン方向の相関係数の比較
(正方形角柱, $Re_D=1 \times 10^5$)

うな現象とスパン方向圧力相関特性との関連も調べていきたい。

参考文献

- 1) 野澤剛二郎, 田村哲郎: 角柱まわりの複雑乱流場に対するLES適用法の提案とその課題, 土木学会論文集, No.591/I-43, pp.151-161, 1998.
- 2) Tamura, T., Miyagi, T. and Kitagishi, T., "Numerical prediction of unsteady pressures on a square cylinder with various corner shapes," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.74-76, pp.531-542, 1998.
- 3) Rogers, S.E., Kwak, D. and Kiris, C., "Steady and Unsteady Solutions of the Incompressible Navier-Stokes Equations," AIAA Journal, Vol. 29, No. 4, pp.603-610, 1991.
- 4) Rai, M.M., "Navier-Stokes Simulations of blade-vortex interaction using high-order accurate upwind schemes," AIAA Paper 87-0543, 1987.
- 5) <http://murasun.me.noda.tus.ac.jp/turbulence/>
- 6) 溝田武人, 岡島厚: 角柱まわりの時間平均流れに関する実験的研究, 土木学会論文集, No.312, pp.39-47, 1981.

- 7) Lee, B.E., "The effect of turbulence on the surface pressure field of a square prism," J. Fluid Mech., Vol. 69, part 2, pp.263-282, 1975.
- 8) Bearman, P.W. and Obasaju, E.D., "An experimental study of pressure fluctuations on fixed and oscillating square-section cylinders," J. Fluid Mech., Vol. 119, pp. 297-321, 1982.
- 9) Vickery, B.J., "Fluctuating lift and drag on a long cylinder of square cross-section in a smooth and in a turbulent stream," J. Fluid Mech., Vol. 25, pp. 481-494, 1966.