

一様流中に置かれた正方形角柱の空力特性と表面風圧に関する数値予測

NUMERICAL STUDY OF AERODYNAMIC FORCE AND SURFACE PRESSURE
OF SQUARE PRISM IN A UNIFORM FLOW

岡 新一¹⁾ 石原 孟²⁾・ 藤野 陽三³⁾
Shinichi OKA¹⁾ Takeshi ISHIHARA²⁾ Yozo FUJINO³⁾

ABSTRACT

In this study, aerodynamic properties of square prism with respect to various angles of attack were predicted utilizing computational fluid dynamics in which LES turbulence model was employed. The results met well with experiments in time average aerodynamics properties, drag force coefficients, lift force coefficients, and surface pressure coefficients for all cases examined here. Regarding fluctuations, which is important when aeroacoustics is of interest, predictions were quantitatively comparable with experiments in the vicinity of 0 degree attack angle, however, the predictions were overestimated for the rest of the cases though qualitative agreement can be observed to some extent. In conclusion, this numerical approach successfully predicts mean aerodynamic properties of square prism, but, further investigation is necessary for predicting fluctuation properties.

Key Words: aerodynamic force, rectangular cylinder, separated flow, CFD, LES

1. はじめに

一様流中に置かれた矩形柱の空力特性を明らかにすることは、高層建築物や橋梁によく見られる矩形断面を持つ構造物のギャロッピング振動問題や空力音の問題を扱う上で重要である。

既往の研究¹⁾²⁾から、矩形柱の空力特性は断面の辺長比と迎角により複雑に変化することが分かっており、断面前面で剥離した流れが再付着するとき空力特性(抗力, 揚力, モーメント)は急変することが知られている。

最近、数値解析による矩形柱の空力特性を予測する研究が数多くなされており一定の成果が得られている。例えば、平野ら³⁾は断面辺長比 2:1 の矩形柱に対して、LES を用いた数値予測を行い平均抗力, 平均揚力, 及びストロークハル数について精度の高い再現性を示した。ただし、変動抗力, 変動揚力については言及されていない。LES は小さな渦をモデル化し大規模渦について直接計算を行うため乱流の 3 次元性や非定常性を捉えることが可能であり、今後、矩形柱における空力特性を予測するための有力な手法の一つとして期待される。

正方形角柱については、迎角 0° のときの空力特性について多くの研究がなされているが迎角を変化させた例はほとんど無い。例えば、田村ら⁴⁾は DNS を用いて抗力と揚力の平均値については実験結果を精度高く再現しているが、変動値については議論されていない。また、Taylor ら⁵⁾は渦法(Vortex method)を用いて変動値の予測も試みたが実験値とは良く一致しては無い。正方形角柱について種々の迎角の変化に着目し、空力音の音源や乱流相関長の評価⁶⁾などで重要となる変動値も含め実験値と比較した例はほとんどない⁷⁾。

そこで、本研究では、一様流中に置かれた正方形角柱を対象に種々の迎角における空力特性及び圧力の空間分布を LES による数値解析により調べ空気力と風圧力の平均値, 変動値, 及び圧力について風洞実験で得られている結果と比較検討した。

1) フルーエント・アジアパシフィック(株) (〒163-0650 東京都新宿区西新宿 1-25-1 新宿センタービル 50F)

2),3) 東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 助教授, 教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

2. 数値モデル

2.1 基礎方程式

本計算では、空間的なフィルタリング操作を施した非圧縮性 Navier-Stokes 方程式を用いて LES 計算を行った。LES は格子サイズ以下の小さな渦はモデル化し、大規模渦について直接計算を行うため、乱流現象の非定常性を捉えることができる。LES の支配方程式は、非定常項を含むナビエ・ストークスの式に対しモデル空間（物理的空間）においてフィルターをかけることで得られる。

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

ここで、 \bar{u}_i 、 \bar{p} はフィルター平均化された流速・圧力を表し、 ρ は流体の密度、 μ は流体の粘性係数を表す。また、 τ_{ij} は、次式にて定義されるサブグリッドスケールのレイノルズ応力である。

$$\tau_{ij} \equiv \overline{\rho u_i u_j} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j$$

フィルターをかけて得られたサブグリッドスケールのレイノルズ応力は未知量であるため、本計算では以下の渦粘性モデルを用いた。

$$\tau_{ij} = -2\mu_t \bar{S}_{ij} + \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij}$$

ここで、 μ_t は乱流粘性係数、 \bar{S}_{ij} は解像スケールのひずみ速度テンソルである。

2.2 Smagorinsky モデル

サブグリッドスケールの乱流粘性係数 μ_t に Smagorinsky モデル⁸⁾を用いる。 L_s はサブグリッドスケールでの混合長さで、 $|\bar{S}| \equiv \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}}$ である。 L_s は次式を用いて計算する。

$$\mu_t = \rho L_s^2 |\bar{S}|, \quad L_s = \min(\kappa d, C_s V^{1/3})$$

ここで、 $\kappa=0.42$ であり、 d は最も近い壁までの距離、 V は計算格子の体積である。 C_s は Smagorinsky 定数で境界層の場合 $C_s=0.1$ であるが本解析では円柱を対象とした既往の研究⁹⁾から $C_s=0.032$ を用いた。

2.3 数値解法

本解析は、コロケート格子に基づく有限体積法を用いて行った。支配方程式の離散化は、対流項に 2 次精度中心差分、非定常項には 2 次精度陰解法をそれぞれ用い、離散化した方程式の数値解法には半陰解法の SIMPLE 法を適用した。計算には FLUENT¹⁰⁾を使用した。

3. 解析条件と空気力の定義

3.1 解析条件

図 1 に計算領域と使用した格子を示す。本計算では、正方形角柱の一边 $D=1\text{cm}$ 、スパン方向の長さ $L=1\text{cm}(=1D)$ のモデル

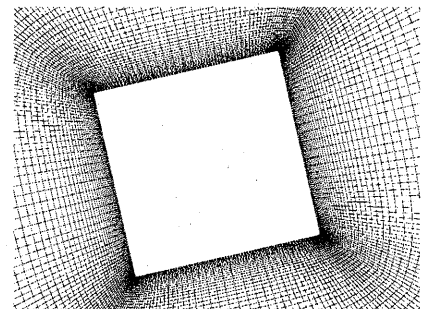
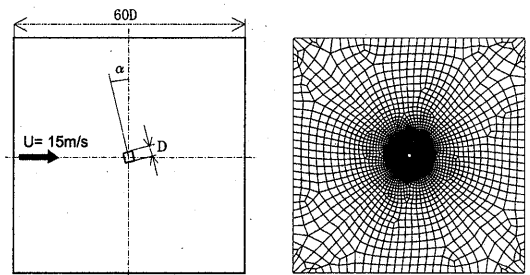


図 1 計算領域と格子分割図(迎角 $\alpha=14^\circ$)

を使用し、解析領域は一辺 60D の正方形とした。入口は一様流を与え風速 $U=15\text{m/s}$ とした。角柱表面のせん断応力は次式で示す粘性低層での応力・ひずみの関係から求めた。

$$\frac{\bar{u}}{u_\tau} = \frac{\rho u_\tau y}{\mu}$$

ここで、 u_τ はせん断速度、 y は壁からの距離である。

出口側は自由流出、側面壁及び上下下面壁境界は対称境界条件を用いた。迎角については、風向に対して垂直になる状態を迎角 0° と定義し、反時計回りを正とする。メッシュ分割については、正方形一辺は隅角部が細くなるように 62 分割、スパン方向を 10 分割とした。半径方向には角柱表面近傍が細くなるように配置した。総格子数は約 17.5 万である。

表 1 に解析に用いたパラメータを示す。計算は迎角 $0^\circ, 2^\circ, 6^\circ, 8^\circ, 10^\circ, 12^\circ, 13^\circ, 14^\circ, 18^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ の 12 ケースについて実施した。

表 1. 解析パラメータ

Reynolds 数	10^4
Smagorinsky 定数 C_s	0.032
無次元時間	0.03 D/U
スパン方向格子分割数 N	10
総格子数	17500×10

3.2 風圧係数と無次元空気力の定義

(1) 風圧係数

風圧係数 C_p と変動風圧係数 C_{pi}' の定義を次式に示す。

$$C_p = \frac{p - p_{ref}}{\frac{1}{2} \rho U_{ref}^2}, \quad C_{pi}' = \sqrt{(C_{pi} - \bar{C}_{pi})^2}$$

ここで、 p_{ref} は基準圧力であり、流入境界最下端でスパン方向中心の点の圧力値を用いた。 $\rho = 1.225\text{kg/m}^3$ は基準密度で、 $U_{ref} = 15\text{m/s}$ は基準風速であり流入風速とした。角柱壁面 i 番目の格子の平均風圧係数 \bar{C}_{pi} は、無次元時間 $tU/D=100$ から 300 までを時間平均した後、スパン方向の平均をとった。ただし、 $\alpha=45^\circ$ のケースについては抗力・揚力係数の時系列波形が安定した $tU/D=600$ から 800 をとり時間平均した。時間平均については C_d, C_l の場合も同様である。

(2) 抗力係数と揚力係数

平均抗力・揚力係数 (C_d, C_l) 及び変動抗力・揚力係数 (C_d', C_l') は次式で定義する。

$$C_d = \sum_i C_{pi} A_i \cos \beta_i / A$$

$$C_l = \sum_i C_{pi} A_i \sin \beta_i / A$$

$$C_d' = \sqrt{\left(\sum_i (C_{pi} - \bar{C}_{pi}) A_i \cos \beta_i / A \right)^2}$$

$$C_l' = \sqrt{\left(\sum_i (C_{pi} - \bar{C}_{pi}) A_i \sin \beta_i / A \right)^2}$$

ここで、 A_i は角柱表面の i 番目の格子の面積、 $A=DL$ である。 β_i は迎角 α の時の i 番目の格子が属する面の法線と風方向とのなす角度である。

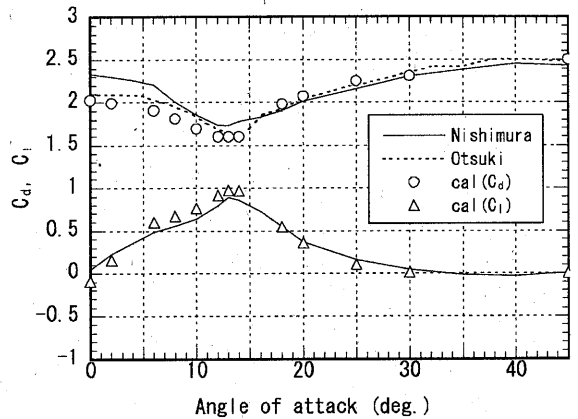


図 2 平均抗力・揚力係数の迎角による変化

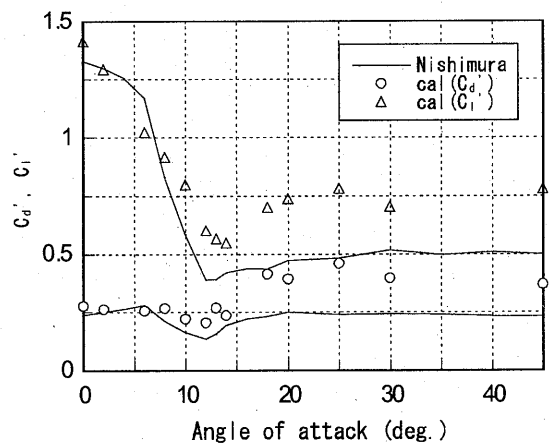


図 3 変動抗力・揚力係数の迎角による変化

4. 解析結果

本研究では、まず平均抗力係数、平均揚力係数、変動抗力係数、変動揚力係数を求め、次に流れの流線を求め、最後に風圧分布を求めた。これらの結果を風洞実験^{1),2)}の値と比較した。

4.1 平均と変動空気力

図2に平均抗力係数 C_d と平均揚力係数 C_l の計算結果を示す。図に示すように迎角の変化に伴う C_l の値は $\alpha=0^\circ$ から $\alpha=14^\circ$ までは直線的に上昇し、 $\alpha=14^\circ$ から緩やかに減少するが $\alpha=30^\circ$ 以上はほぼ一定である。計算結果は実験値とよく一致している。

C_d の値については、 $\alpha=0^\circ$ から $\alpha=12^\circ$ までは緩やかに下降し、 $\alpha=12^\circ$ から $\alpha=14^\circ$ はほぼ一定で、 $\alpha=14^\circ$ から $\alpha=30^\circ$ まで上昇し、 $\alpha=30^\circ$ 以上では緩やかに上昇する。 C_d についても実験値とよく一致しているが、 $\alpha=0^\circ$ では西村らの実験値がよりやや小さい。

図3に変動抗力係数 C_d' と変動揚力係数 C_l' の計算結果を示す。図に示すように、 C_l' は、 $\alpha=0^\circ$ から $\alpha=8^\circ$ までは急激に減少し、 $\alpha=12^\circ$ から緩やかになっている。 $\alpha=14^\circ$ を越えると上昇に転じ、 $\alpha=20^\circ$ 以降はほぼ一定となる。しかし、実験ではこのような急激な上昇はみられず、計算結果は実験より大きくなっている。

C_d' については、 $\alpha=0^\circ$ から $\alpha=8^\circ$ までほぼ一定でその後 $\alpha=12^\circ$ まで緩やかに減少する。定量的には実験値より若干大きい傾向はよく合っている。 $\alpha=13^\circ$ から上昇し、 $\alpha=20^\circ$ 以降はほぼ一定となる。しかし、実験では $\alpha=14^\circ$ を越えたところで急激な上昇はみられず、計算結果は実験より大きくなっている。

以上のことから分かるように C_d' , C_l' も迎角 14° を越えると実験値より大きくなる傾向が見られる。これは後述するように背面における変動風圧係数の過大評価によるものである。

4.2 流れのパターン

図4に時間平均流線を示す。ここでは、 $\alpha=0^\circ, 8^\circ, 14^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ の代表的な6ケースを選んだ。以後、風圧係数についても同様のケースについて示す。

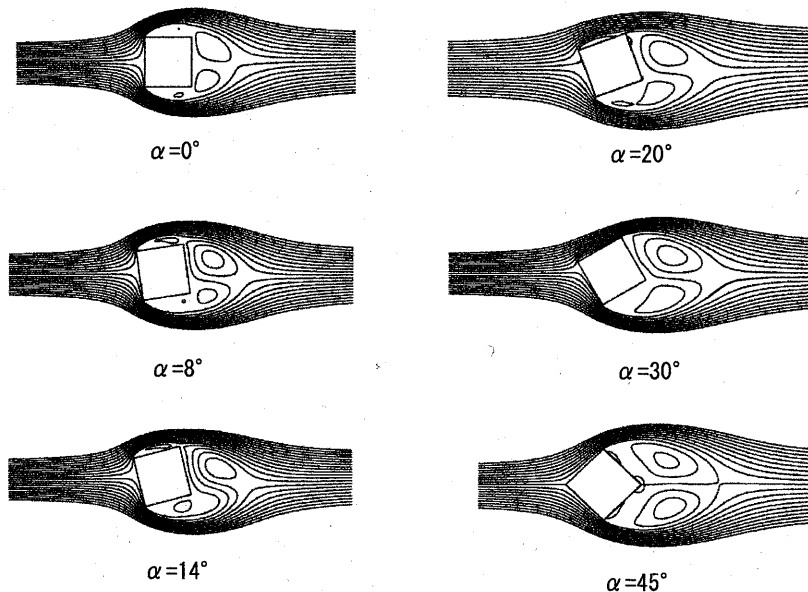


図4 各迎角での時間平均流線

図に示すように、 $\alpha=0^\circ$ では流れは前縁で剥離し、側面に再付着せず完全剥離となり、角柱の背後に2つの渦を形成している。 $\alpha=8^\circ$ では上下面で剥離渦が形成されるが、上面の剥離渦は小さく、下面の剥離渦が大きい。また、角柱の背後には非対称な渦が形成されている。ここでは、上の渦が大きく、下の渦が小さい。 $\alpha=14^\circ$ では、角柱の背後にまとまった一つの渦が形成されている。 $\alpha=20^\circ$ になると、上面に平均的な再付着が見られる。前縁のところで剥離泡が形成されている。角柱の背後に再び2つの渦が形成されている。 $\alpha=30^\circ$ では、前縁付近の剥離泡が小さくなり、上面の剥離せん断層は常時付着して面に沿って流れ、後縁で剥離している。 $\alpha=45^\circ$ では流れは後縁で剥離している様子が見られる。前縁の剥離泡は見られず上面に沿って流れている。角柱の背後に一对の渦が形成されている。

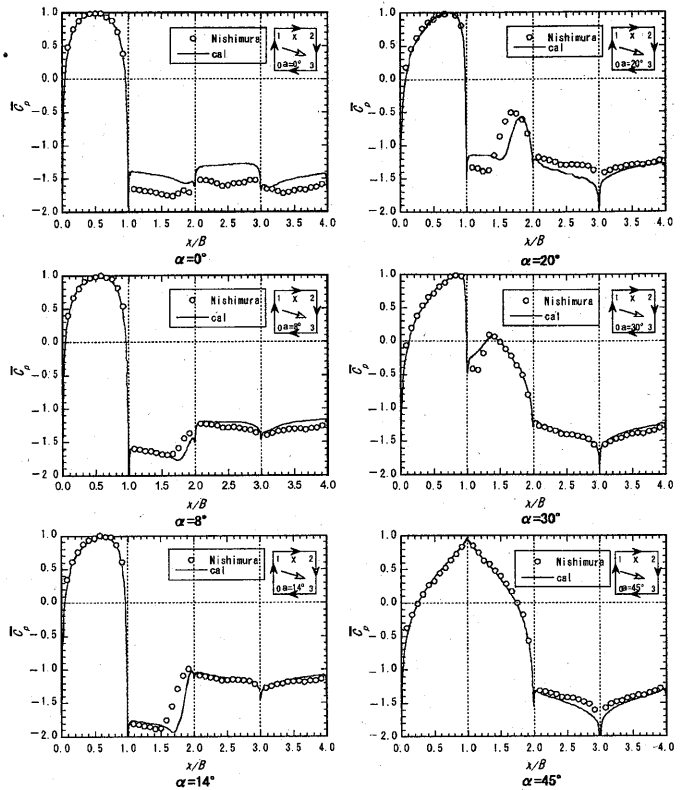


図5 各迎角における平均風圧係数 \bar{C}_p

4.3 平均と変動風圧分布

図5に平均風圧係数 \bar{C}_p の分布を示す。図に示すように、上面の風圧の値は $\alpha=0^\circ$ から迎角が大きくなるにしたがって減少し、 $\alpha=14^\circ$ で最小になる。 $\alpha=20^\circ$ では上面後縁付近で圧力回復によるピークが現れ、この位置で剥離せん断層の再付着が発生していると推測される。 $\alpha=30^\circ$ になると、上面でのピーク最大値は正になり、常時再付着していると思われる。また、上面前縁付近で剥離泡が発生していると思われる負圧領域が小さくなっている。 $\alpha=45^\circ$ では前縁での剥離が全く無くなり背面の風圧が小さくなっている。

平均風圧係数については全体的に風洞実験結果とよく一致している。 $\alpha=0^\circ$ では背面の風圧が実験に比べると計算の方が小さく、これは C_d の計算値が実験値より低くなる原因となっている。

図6に変動風圧係数 C_p' を示す。図に示すように、上面においては迎角が大きくな

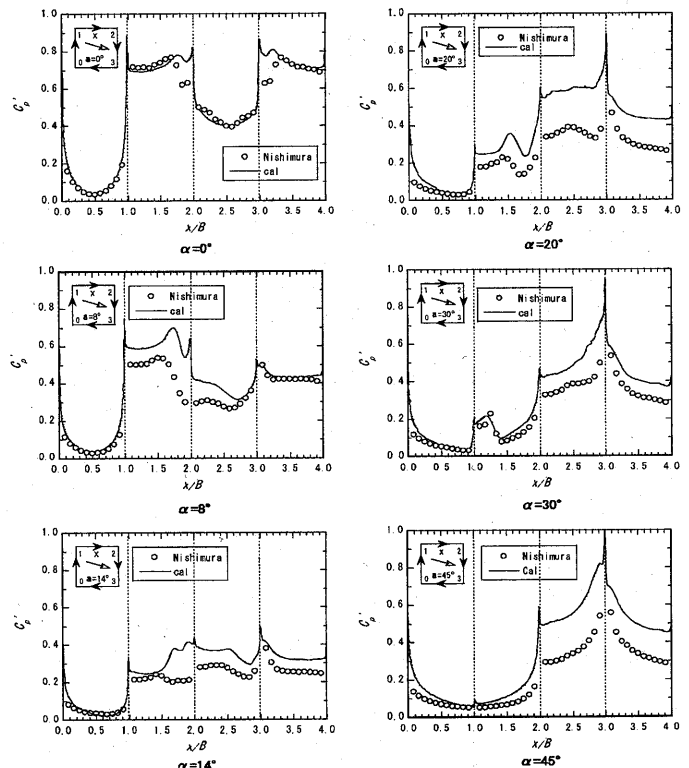


図6 各迎角における変動風圧係数 C_p'

るにしたがって変動値は減少している。 $\alpha=0^\circ$ の値は他の迎角の場合と比べると実験値と合っており、 $\alpha=8^\circ$ では計算値がやや大きい値を示しているが、定性的には一致している。しかし、 $\alpha=14^\circ$ では上面後縁付近では、実験値が減少しているのに対し、計算では増大しており、変動風圧の値も過大に評価している。 $\alpha=20^\circ$ では、上面でピークが見られそこで再付着が生じていると思われる。背面風圧については計算値は実験値より大きくなっている。これは、 C_d 、 C_l が実験値より過大に評価している原因と思われる。同様なことは $\alpha=30^\circ$ と $\alpha=45^\circ$ についても言える。林ら¹¹⁾は、スパン方向の長さが変動空気力に与える影響について、スパン長さを $L=2D$ から $L=4D, 8D$ に長くした場合 C_l の値が 1.39-0.96 まで下がったことを示した。したがって、 L を長くした計算により、本計算で過大評価した変動値は改善される可能性がある。

5. まとめ

一様流中に置かれた正方形角柱の空力特性及び表面風圧分布を、種々の迎角に対して、LES 乱流モデルを用いた数値計算により予測し、風洞実験で得られている結果と比較した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 平均空気力（抗力係数、揚力係数）については $\alpha=0^\circ$ 付近では C_d 値に計算値は実験値より少し小さいが他の角度においては C_d 、 C_l ともに実験値とよく一致した。
- 2) 変動空気力については、 $\alpha=0^\circ$ から $\alpha=12^\circ$ では C_l 及び C_d ともに実験結果に近い値を得たが、その他のケースについては、 $\alpha=20^\circ$ を越えると、定性的に実験の傾向を捉えているものの、定量的には実験値と比べ過大評価した結果を得た。
- 3) 平均風圧係数については $\alpha=0^\circ$ で僅かにずれが見られるがいずれの角度についても実験結果と一致した。
- 4) 変動風圧係数については $\alpha=0^\circ$ 付近では実験結果に近い結果が得られたが、 $\alpha=20^\circ$ を超えるケースにおいては背面風圧係数の値が実験値より大きくなっている。これが C_d 、 C_l が過大に評価される理由である。
- 5) 本数値予測手法により、正方形角柱の空力特性及び風圧分布の平均値については精度高く予測できることができた。つまり、スパン方向の長さ $L=1D$ でも揚力勾配を精度良く予測できるため、ギャロッピング等の振動問題に適用することが可能である。一方、変動値については現段階では精度が不十分で更に検討する必要がある。

謝辞：本研究では（財）日本建築総合試験所西村宏昭氏から正方形角柱に関する風洞実験データの提供を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 大築志夫，藤井邦雄，鷺津久一郎，大屋昭男：一様流中におかれた2次元静止矩形柱の空気力3分力特性と圧力分布について，第5回構造物の耐風性に関するシンポジウム，pp.169-176，1978。
- 2) 西村宏昭，谷池義人：二次元静止正方形角柱の変動空気力特性，第16回風工学シンポジウム論文集，pp.255-260，2000。
- 3) 平野廣和，丸岡晃，渡辺茂：断面辺長比2:1矩形柱の風の傾斜角による空力特性に関する数値流体力学，構造工学論文集，Vol.48A，pp.971-978，2002。
- 4) Tamura, T., Ohta, I., and Kuwahara, K.: On the reliability of two-dimensional simulation for unsteady flows around a cylinder-type, J. of Wind Eng. and Indus. Aerodyn., vol 35, pp. 275-298, 1990.
- 5) Taylor, I., Vezza, M.: Calculation of the flow field around a square section cylinder undergoing forced transverse oscillations using a discrete vortex, J. of Wind Eng. and Indus. Aerodyn., vol 82, pp.271-291, 1999.
- 6) 中藤誠二，木村吉郎，藤野陽三，小川隆申，石原孟：種々の辺長比を持つ矩形柱から発生する空力音特性，土木学会論文集，No.696，I-58，pp.145-155，2002。
- 7) 浅川匡，石原孟，藤野陽三，正方形角柱から発生する空気力と空力音の数値予測，土木学会第56回年次学術講演会，pp.766-767，2001。
- 8) Smagorinsky, J, General Circulation Experiments with the Primitive Equations. I. The Basic Experiment. *Month. Wea. Rev.*, 91:99-164, 1963.
- 9) Ma, X., Karamanos, G-S, and Karniadakis, G.E Dynamics and low-dimensionality of a turbulent near wake, *J. Fluid Mech.*, vol 410, pp. 29-65, 2000.
- 10) FLUENT 6 Users Guide, Flunet Inc., 2002.
- 11) 林健一，大屋裕二：臨界断面を有する二次元矩形柱の周囲流れに関する数値解析的研究，第16回風工学シンポジウム論文集，pp.179-184，20