

LESによる角柱の振動応答解析

Analysis of a Vibrating Square Cylinder Using a Large-Eddy Simulation Technique

中山 昭彦*・永井史保**・野田 博***

Akihiko NAKAYAMA, Shiho NAGAI and Hiroshi NODA

*正会員・教授・神戸大学大学院自然科学研究科（〒657-8501兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1）

**学生会員 神戸大学大学院自然科学研究科（〒657-8501兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1）

***正会員・研究員・三井建設技術研究所（〒270-01千葉県流山市駒木518-1）

A large eddy simulation technique has been applied to the analysis of the aeroelastic response of a square cylinder placed in a uniform flow. The method uses a conventional eddy-viscosity model for the subgrid stresses and the grid resolution is a moderate one that can be handled by workstations but represents the three dimensionality of large-scale motion. The present simulation is found to accurately predicts the occurrence of vortex excitation and galloping. Particularly galloping is predicted at higher velocity than two-dimensional simulations and is closer to experimental observation. It is shown that the three-dimensional effects are important for accurate prediction of galloping.

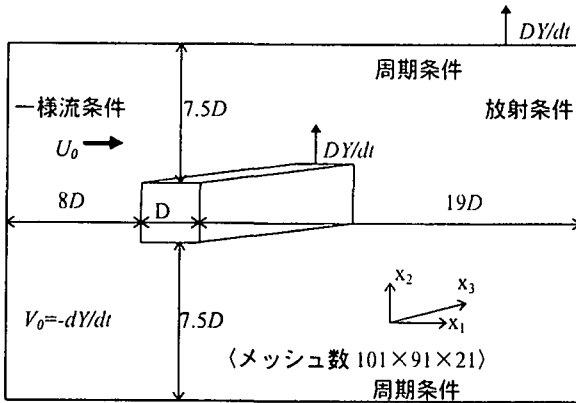
Keywords: large-eddy simulation, aeroelastic vibration, square cylinder, vortex shedding, galloping

1. はじめに

構造物や橋梁などの鈍頭物体をすぎる流れは剥離、再付着また後流渦の放出などの現象を伴い解析は容易でない。特に、物体が流体力により運動する場合は相互作用による渦励振、ギャロッピングなどの現象も起こし、更に多様な連成問題になる。数値計算を行うにも種々の問題はあるが、近年計算機の大容量化と高速化に伴い、流体運動の数値計算が急速に進歩し、いくつかの方法で予測計算がなされている。2次元層流計算は以前からもなされており、渦放出なども実験に近い結果が得られている（Nakamura et al.^{1)））。乱流の場合、Franke & Rodi^{2)）により非定常レイノルズ平均式に標準k-εモデルと壁関数を用いた計算が行われたが、渦放出は計算されていない。また、非定常性は計算されても実験値と大きく異なる結果になる（Okajima et al.^{3)）報告もある。その後Franke & Rodi^{2)）の計算で渦放出が起こらなかった理由として、等方性渦粘性モデルは角柱前面で過剰な乱流エネルギーの生成が起こるためである事が指摘されたため、加藤^{4)）は乱流エネルギー過剰生成を押さえる改良k-}}}}}

ε乱流モデルを用いて計算した。結果は渦放出が確認されるのみならず、渦励振の初期振動依存性など実験値にかなり近い計算結果が得られている。しかし、ギャロッピングの発生は実験より低い速度比で起こることなどが分かり、3次元非定常流計算を用いなければ改善出来ないと思われる点も指摘されている。

3次元非定常流計算であるラージエディシミュレーション（LES）法には多量の記憶容量や、計算速度を必要とするので本格的応用はまだなされていない。静止角柱周りの流れはテストケースとしていろいろな方法による計算が報告されている。弾性支持された角柱周りの流れの計算例は岡島ら^{5)）により報告されているが、振動応答特性についての結果は出されていない。サブグリッド乱流応力モデルを用いない風上差分法では伊藤・田村^{6)）により応答特性が計算され、角柱/流体の質量比を風洞実験で用いられる現実的な値にとれば実験値に近い結果が得られると報告されている。しかしこれは正方形断面角柱についてではなく、長方形断面の場合のみである。従って、3次元LES法で正方形断面角柱の振動応答が如何に予測されるかはまだ明らかではない。}}

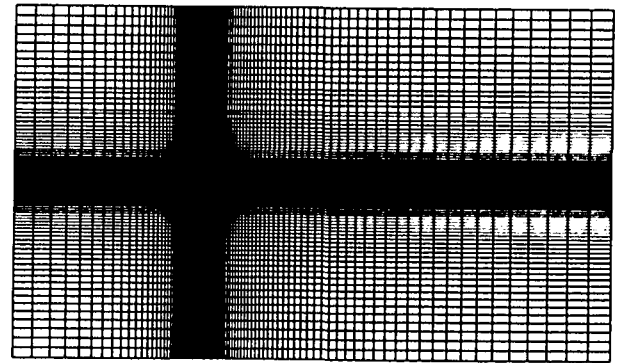


図－１ 計算領域と座標の定義

本研究では３次元LESシミュレーション法を用い、流れ直角方向に弾性支持された角柱の応答特性を求め、２次元解析、実験結果などと比較することにより、その有用性を検討する。サブグリッド応力モデルには精度の面では必ずしも最良ではないが、より一般的に広く用いられているSmagorinskyモデルを用いる。本研究ではサブグリッド応力モデルの精度を調べるのではなく３次元シミュレーションが２次元計算に比べ如何に効果的であるかを調べる事を主目的とする。また実際の工学的応用を考え、高レイノルズ数で、しかもワークステーションレベルの計算機で計算可能な程度の格子数でのシミュレーションについての検討を行う。結果は正方形断面以外の計算にもあてはまるものである。

２．LES計算法

本シミュレーションは図－１に示すように、速度 U_0 の一様流の直角方向に運動を許すバネとダッシュポットにより支持された一辺 D の正方形断面剛体角柱の周りの流れの計算である。境界条件などの設定が簡単になるため、流体の運動方程式には角柱に固定された座標系 $(x_1, y, z) = (x_1, x_2, x_3)$ で書かれたものを用いる。この場合、 x_1 方向速度成分及び圧力の格子平均を $\langle u_i \rangle$, $\langle p \rangle$ とし、サブグリッド応力に渦粘性モデルを用いると、連続式及び運動方程式は



図－２ 計算格子

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} &= 0 \\ \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{d^2 Y}{dt^2} \delta_{i2} &= \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} (\langle p \rangle + k_G) + \frac{\partial}{\partial x_i} (v + v_i) \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) & \end{aligned} \quad (1)$$

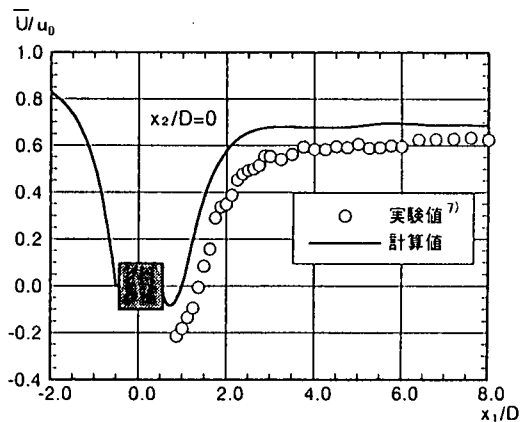
となる。ここで、 Y は時間の関数で角柱の平衡位置からの変位、 ρ は流体の密度、 v と v_i はそれぞれ動粘性係数と渦動粘性係数、 k_G はサブグリッド乱流エネルギーである。本計算では v_i , k_G に Smagorinsky モデル

$$\begin{aligned} v_i &= (C_s)^2 \left[\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \right]^{1/2} \\ k_G &= \frac{v_i^2}{(C_k \Delta)^2} \\ \Delta &= (\Delta_1 \Delta_2 \Delta_3)^{1/3} \end{aligned} \quad (2)$$

を用い、モデル定数の値は $C_s=0.13$, $C_k=0.094$ とした。ここで Δ_1 , Δ_2 , Δ_3 は x_1 , x_2 , x_3 方向の格子間隔である。(1) 式中 Y の項は振動座標での相対加速度である。角柱の運動方程式は Y について書くの 1 自由度振動方程式

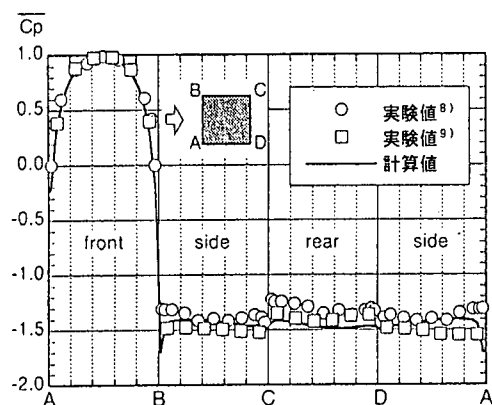
$$\frac{\ddot{Y}}{D} + \frac{Sc}{\gamma_d V_R} \frac{\dot{Y}}{D} + \left(\frac{2\pi}{V_R} \right)^2 \frac{Y}{D} = 2 \frac{C_L}{\gamma_d} \quad (3)$$

になる。ここで、 Sc は質量減衰パラメーター、 γ_d は角柱と流体の密度比、 V_R は無次元速度 $U_0/f_0 D$, f_0 は角柱の固有振動数、 C_L は瞬時揚力係数である。

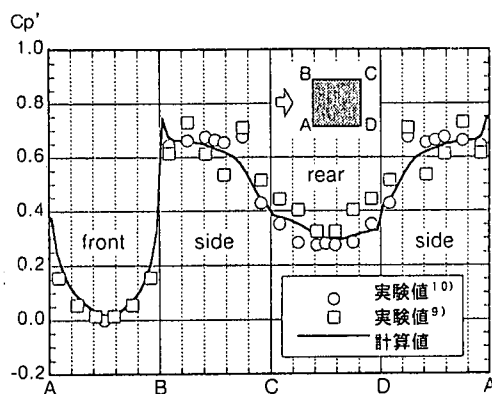


図－3 静止角柱後中心面流での平均流速

(a) 平均圧力分布

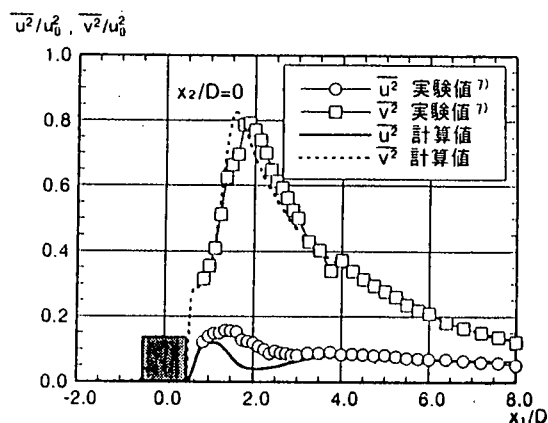


(b) 変動圧力分布



図－4 静止角柱表面の平均圧力及び変動圧分布

静止座標から見た境界条件は上流端一様流、流れ直角方向には周期境界条件、下流端は放射条件としている。



図－5 静止角柱後流での乱流強度

る。角柱に固定された座標では上流端での流入は流れ直角方向 (x_2 方向) については角柱の振動方向と逆の $-dy/dt$ とすることで、角柱表面では振動座標に対する相対速度ゼロとしている。

数値解法は速度成分についてはAdams-Bashforth法を用いた差分陽解法、圧力はHSMAC法に基づいた反復法である。粘性項は2次中心差分を用いているが、移流項は風上化しなければ長時間に渡る安定な計算が不可能であったため、3次風上差分 (UTOPIA) を用いている。各時間ステップで流体計算をし、角柱上下面の圧力を積分することにより角柱にかかる流体力 C_L を算定する。これを用いて振動方程式(3)をEulerの方法で積分される。計算領域は図－1に示す通りで、角柱より上流に8D下流に19D振動方向に16D、角柱軸方向に4Dの領域である。計算格子は図－2に示してあるように不等間隔の直交格子で101×91×21のメッシュである。最小格子幅は角柱表面で1/20Dである。計算は時間ステップ0.005無次元時間で行った。

本計算法の検証として、一般的検証ケースとされている固定角柱についての計算を行った。計算条件は実

表－1 計算に用いられたパラメーターの値

	Re	Sc	γ_d	V_R
3D LES, case1	22,000	34.4	254	5-30
2D LES, case2	22,000	34.4	287	5-20
3D LES, case3	22,000	34.4	254	20
3D LES, case4	22,000	34.4	287	20

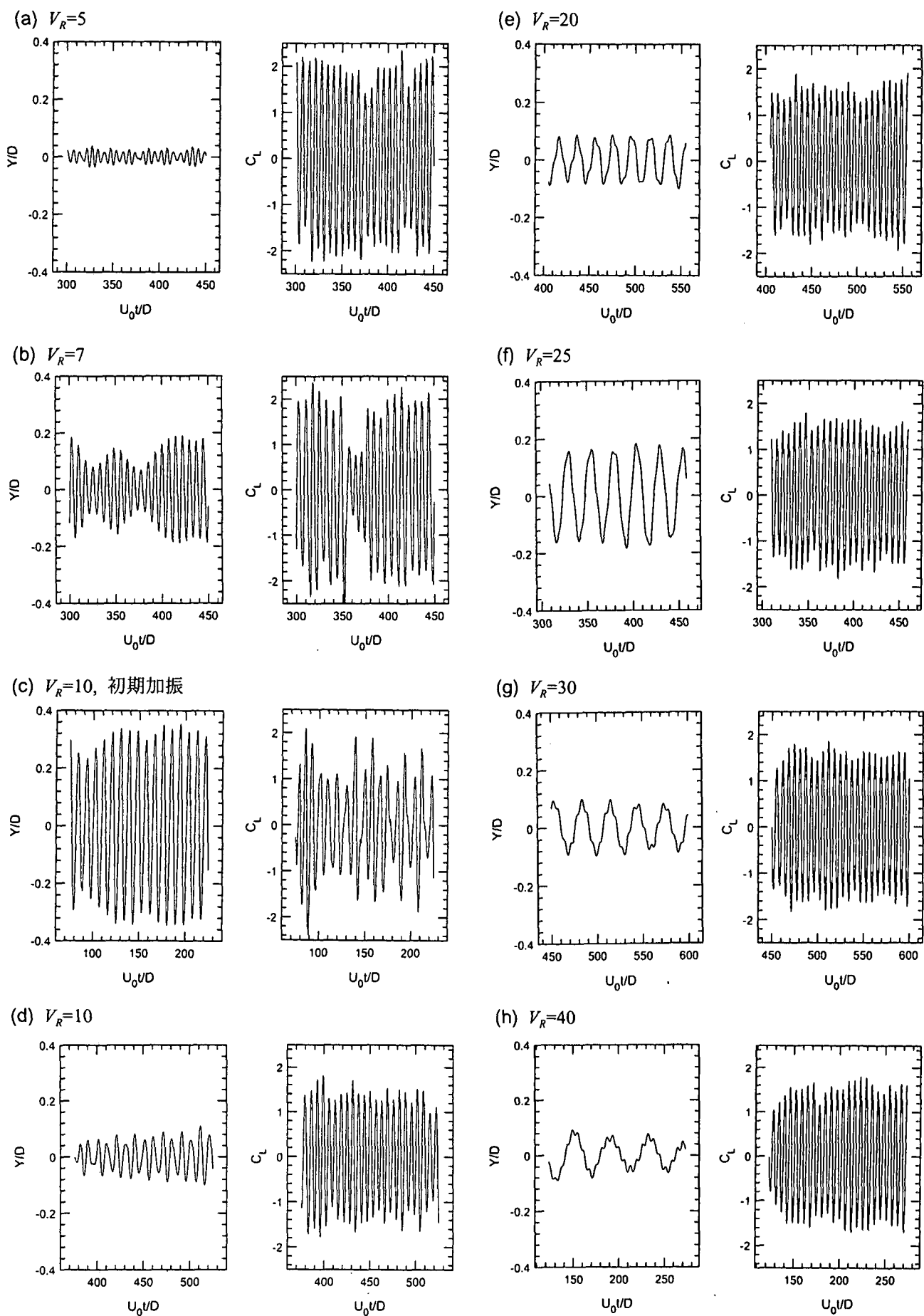
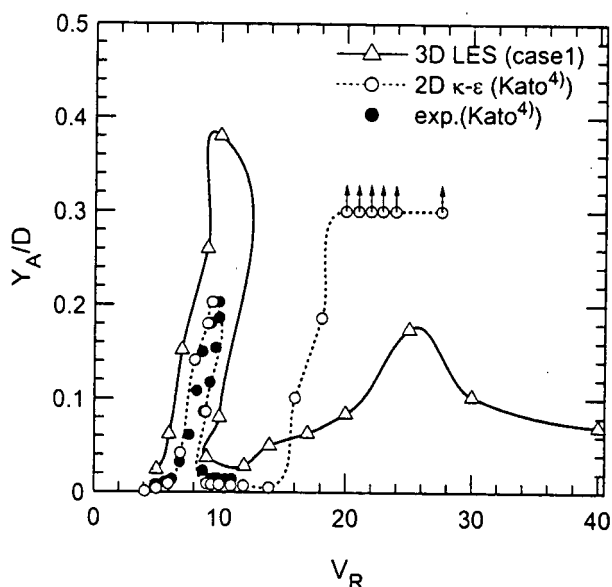


図-6 角柱の変位と揚力係数の時系列



図一七 応答振幅

験結果との比較のため U_o と D で定義されるレイノルズ数 Re は22,000としてある。結果は図一3、図一4に示し、実験値と比較してある。図一3は角柱後流の中心面内での最小平均速度 U_c の分布をLyn et al.⁷⁾の実験結果と比較してある。この平均速度分布は実験値に比べ過大に計算され、逆流域は過小になっているが、他のLES計算においても同様な傾向が見られ、特に本計算法が劣っているとは言えない。図一4に、角柱の運動には重要になる、角柱表面の平均圧力と変動圧力分布を示し、実験値と比較してある。図は平均圧力と変動圧のRMS値を上流の動圧 $1/2\rho U_o^2$ で除した圧力係数

$$\begin{aligned} \overline{C_p} &= \frac{\overline{\langle p \rangle} - p_o}{1/2\rho U_o^2} \\ C_p' &= \frac{[\overline{(\langle p \rangle - \overline{\langle p \rangle})^2}]^{1/2}}{1/2\rho U_o^2} \end{aligned} \quad (4)$$

としてプロットされている。ここで、 p_o は流入面での圧力で、上付横線は時間平均を意味する。平均圧力は実験に比べ、背面で若干大きくなっているものの、側面の値は実験値を良好に予測しているのが分かる。変動圧力についても実験値と良く合っており、空力振動のシミュレーションに重要な圧力分布の予測性能が良いと言える。図一5は角柱下流中心線での2方向乱れ強度の分布である。これらについても本計算結果は実験値を非常によく再現しており、振動シミュレーションには適切な方法であると言える。

3. 振動角柱応答の計算結果

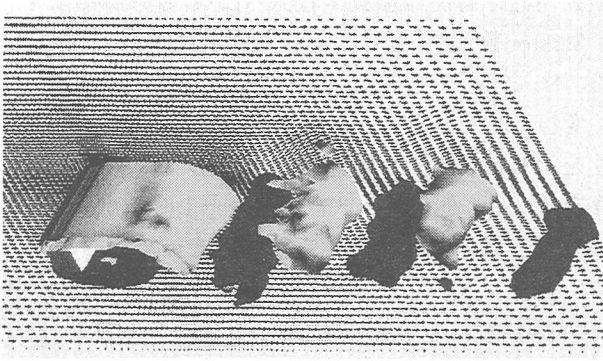
振動角柱の応答は振動方程式(3)からも分かるように、Scruton数 Sc 、速度比 V_R 、と質量比 γ_d により決まる。Scruton¹¹⁾によれば $Sc=16$ を境に応答特性は大きく変わるが、本研究では渦励振が起こる微妙な応答特性を示す粘りの大きい、 $Sc=34.4$ のケースについて計算を行った。他のパラメータは表一1に示す通り、既往の実験などと比較のできる値にとってある。

3.1 応答特性

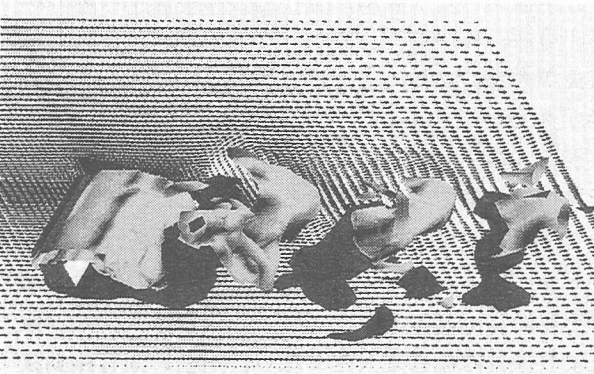
図一6にcase1のパラメータを用い、 $V_R=5,7,10,20,25,30,40$ の場合の角柱の変位と揚力係数の時系列波形を示す。変位、揚力とも複数のモードが存在したり不規則な要素もあるが、一応周期的な変動になっている。 C_L の振幅は1と2の間で変化はあまりないが振動振幅は V_R の値により大きく変化する。 $V_R=5$ では振幅は0.1D以下であるが、 V_R が7から増大する。 $V_R=25$ では振幅と共に波長が大きくなり、ギャロッピングに移行するのうかがえる。これらは全て初期静止からの計算である。加藤⁴⁾は $V_R=10$ 付近の応答は初期状態に依存する事を指摘し、計算でも再現できる事を示した。そこで本計算でも初期加振を与えた条件でも計算を行った。図一6(c)は、 $V_R=10$ の場合、初期 $x_z/D=0.3$ の位置から計算を始めたものである。加藤の結果と同様初期加振により振幅は極めて大きくなり、角柱の固有振動数はStrouhal数と一致し、渦奨励振が計算されている。 $V_R=25$ 以上では渦放出周期のモードを持つ振動成分が増加し、最大振幅は幾分押さえられる傾向が見られる。この領域では、後で詳しく説明するように質量比の影響が大きくなると共に、3次元計算と2次元モデルの差が顕著になる。

図一7はこれらのシミュレーション結果より最大応答振動振幅 Y_A の計算結果を加藤⁴⁾の2次元計算、実験結果と比較したものである。 $V_R=9$ 付近で振幅は一旦増加するが、 $V_R=10$ から20程度で再び増加するまでは小さい振幅となるパターンは良く再現出来ている。本計算での質量比は加藤の実験の値より若干小さく、 $V_R=9$ 付近の渦励振の振幅は大きめであるが、 V_R がさらに大きい領域で、加藤の計算では $V_R=15$ あたりでギャロッピングが発生しているのに対し、本計算では $V_R=20$ 付近で振幅が増加し始めている。これはScrutonの実験¹¹⁾に近い。2次元計算では渦放出による周期性は過大評価されるのが原因の一つと考えられると指摘されているが、本3次元計算では、角柱軸方向(x_z 方向)に平均化されギャロッピング発生が抑制されてい

(a) 静止角柱、 $V_R=20$



(b) 振動角柱、 $V_R=20$

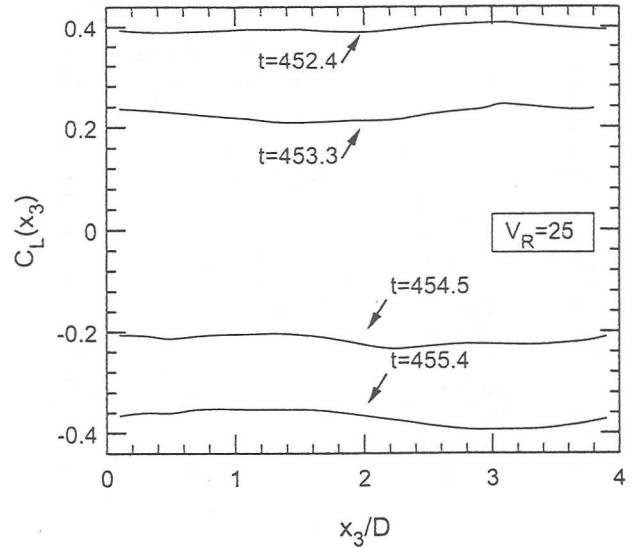


図一 8 固定角柱、振動角柱後流での等渦度面
と見られる。

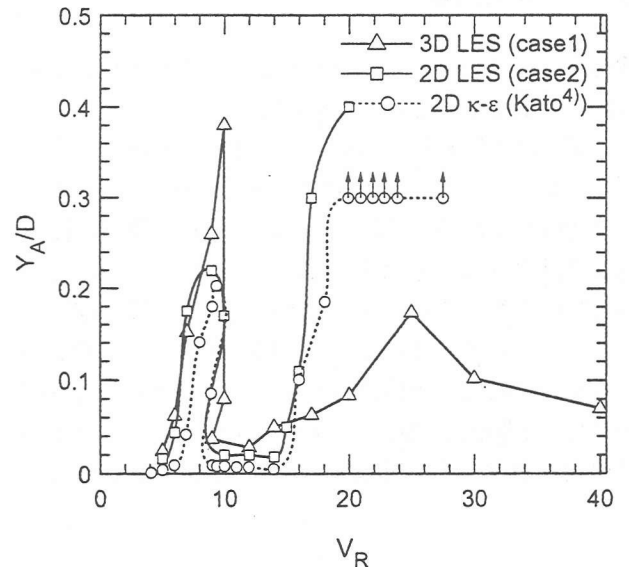
3.2 流れの3次元性の考察

上のように、振動応答解析で、2次元解析と3次元解析では差が見られた。またTamura et al.¹²⁾、持田ら¹³⁾も指摘しているように、2次元解析にはいくつかの問題があるので、ここでは少しその原因を詳しく考察する。図一 8は流れの状況を表す流速ベクトル及び渦度分布を等渦度面として表したものである。渦度正の値及び負の値の等値面を表している。図一 8(a)は静止角柱の場合で図一 8(b)は $V_R=20$ の時の振動角柱の場合である。静止角柱の場合の渦放出は角柱軸方向に一樣で2次元であるのに対し、振動角柱の後流では渦が乱され、小スケールの乱れが誘発され3次元性が助長されているのが分かる。

この3次元性は揚力に影響を与えているかを見るために、 $V_R=25$ のときの揚力係数の角柱軸方向分布を



図一 9 揚力係数の角柱軸方向分布

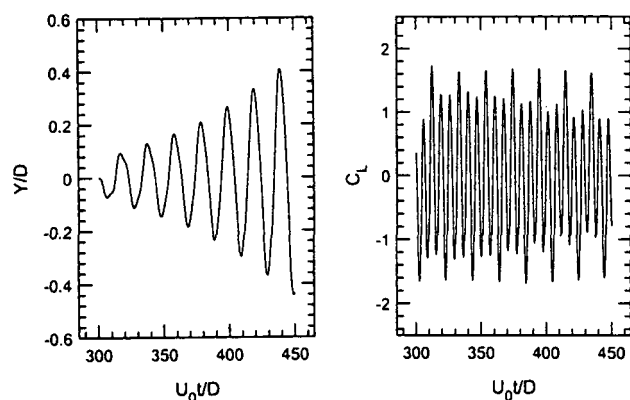


図一 10 2次元LESと3次元LESによる応答振幅
の比較

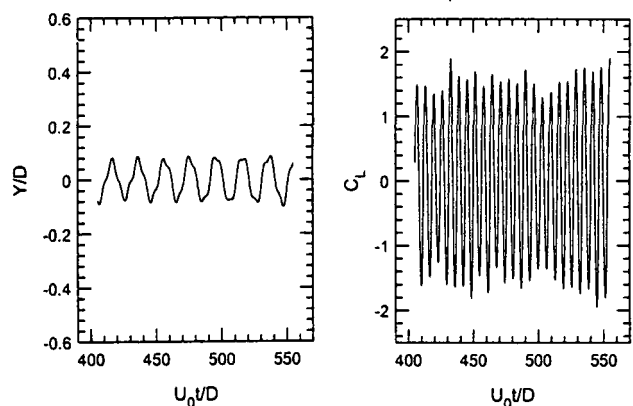
図一 9に示す。 C_L の平均が最大、最小になる時間及び中間の値をとる時間での x_3 方向の変化をプロットしたものである。 $C_L(x_3)$ は $4D$ の幅の約1/2程度のスケールで変化しており、全振幅の20%ほど変化している。

次に実際同じ計算法で2次元計算を行った場合どのような結果が得られるか角柱軸方向のグリッド数を3とし、case2のパラメーターを用いて実質2次元の計算を行った。図一 10はcase2の2次元計算による応答振幅をcase3の3次元計算結果及び加藤⁴⁾の2次元 $k-\epsilon$ モデル計算の結果とを比較したものである。本2次元LESシミュレーションは加藤の2次元計算結果によく似ており、 $V_R=18$ からギャロッピングが始まるのに対し、3次元計算では $V_R=25$ 辺りで振幅が上がる程度

(a) 2次元LES結果、 $V_R=20$



(b) 3次元LES結果、 $V_R=20$



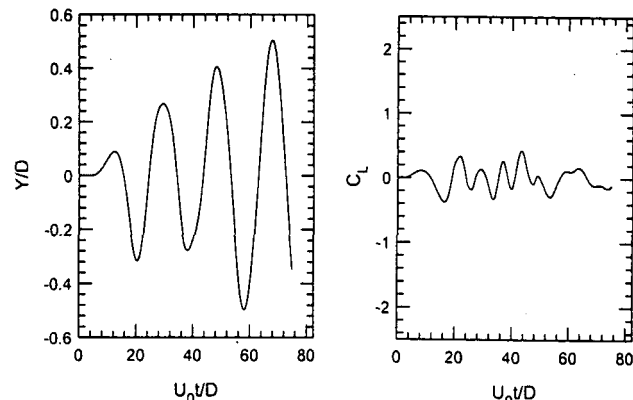
図ー1 1 $V_R=20$ での2次元LESと3次元LESによる変位と揚力の時系列

である。 $V_R=20$ での2次元計算及び3次元計算による変位と揚力の時系列を図ー1 1に示す。この V_R の値では3次元LESの無次元振幅は0.15程度であるのに対し、2次元LESでは0.3を越え完全にギャロッピングになっていることが分かる。

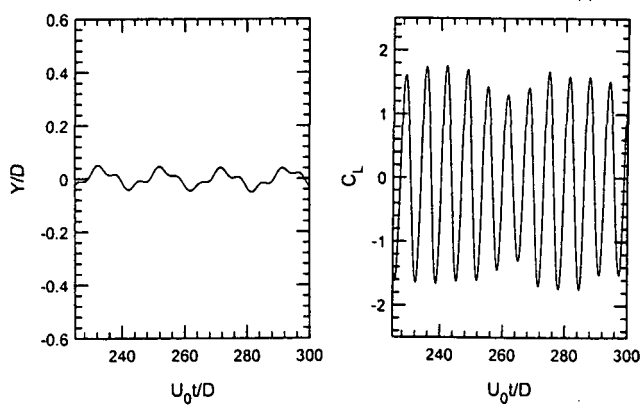
3.3 質量比の影響

流れの3次元性以外に物体と流体の質量比の差が応答特性に影響を与えることは良く指摘されている⁹⁾。本研究でも質量比を小さく与えた計算を行ってその影響を調べた。図ー1 2(a)はcase3に示す $\gamma_d=30$ の結果である。図ー6(e)と比較して分かるように $\gamma_d=254$ ではギャロッピングは起きないが、 $\gamma_d=30$ に下げると3次元計算でも、2次元LES同様振幅が大きく増大し、ギャロッピング状態になっていると言える。逆に γ_d を相対的にはわずかではあるが、増加させると(case4)、図ー1 2(b)に見られるように、渦放出周期と同じ周期の振動成分が増えるが、全体の振幅は減少する傾向を示す。この領域では質量比に大きく影響されることが分かる。

(a) $\gamma_d=30$



(b) $\gamma_d=287$



図ー1 2 $V_R=20$ での3次元LESによる変位と揚力の時系列

4. おわりに

ラージエディシミュレーション法を一様流中に置かれた角柱の空気力学的振動のシミュレーションに応用し、応答特性の再現性を調べた。渦励振、ギャロッピングの起きる高Scruton数について、速度比による応答変化特性は良好に予測されることが示された。また2次元計算に比べ、3次元LES法により実験により近い結果が得られた。この原因の一つとして振動する角柱の後流は3次元性の強い渦列流となっているため、流れの3次元性を反映する計算法がより良いと考えられる。

参考文献

- 1) Nakamura, Y., Ohya, Y., Osono, S. and Nakayama, R.: Experimental and numerical analysis of vortex shedding from elongated rectangular cylinders at low Reynolds numbers 200-10³, *J. Wind Eng. and Ind. Aerody.* Vol.65, pp.301-308, 1996.

- 2) Franke, R. and Rodi, W.: Calculation of vortex shedding past a square cylinder with various turbulence models, *Proc. 8th Symposium on Turbulent Shear Flows*, pp. 10.4.1-10.4.6, 1993.
- 3) Okajima, A., Ueno, H. and Sakai, H.: Numerical simulation of laminar and turbulent flows around rectangular cylinders, *J. Wind Eng. and Ind. Aerody.* **63**, pp.180-181, 1994.
- 4) 加藤真志：修正生産項 $k-\varepsilon$ を用いた静止・振動角柱周りの二次元流れ解析、土木学会論文 集 No.577/I-41, pp. 217-230, 1997.
- 5) 岡島厚、小垣哲也、易東来、LESによる静止及び振動角柱周りの流れの解析、第8回数値流体力学 シンポジウム講演論文集、pp. 237-240, 1994.
- 6) 伊藤喜、田村哲郎、3次元流体解析による角柱の空力弾性特性、日本流体力学会年会'97講演論文 集、pp. 49-50, 1997.
- 7) Lyn, D.A., Einav, S., Rodi, W. and Park, J.H.: A laser Doppler velocimetry study of ensemble-averaged characteristics of the turbulent near wake of a square cylinder, *J. Fluid Mech.*, **304**, pp.285-319, 1995.
- 8) 大築志夫、藤井邦雄、鷺津久郎、大屋昭男：一様流中におかれた2次元静止矩形柱の空力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.169-175, 1978.
- 9) Lee, B.E.: The effect of turbulence on the surface pressure field of a square section, *J. Fluid Mech.*, **69**, pt.2, pp.263-282, 1975.
- 10) Bearman, P.W. and Obasaju, E.D.: An experimental study of pressure fluctuations on fixed and oscillating square-section cylinders, *J. Fluid Mech.*, **119**, pp.297-321, 1982.
- 11) Scruton, C.: On the wind excited oscillations of stacks, towers and masts, *Proc. Int. Conf. Wind Effects on Buildings and Structures*, pp.798-833, 1963.
- 12) Tamura, T., Ohta, I. and Kuwahara, K.: On the reliability of two-dimensional simulation for unsteady flows around a cylinder-type structure, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **35**, pp.275-298, 1990.
- 13) 持田灯、村上周三、坂本成弘：LESによる2次元角柱に作用する変動圧力と流れの3次元構造の解析—2次元計算と3次元計算の比較、日本建築学会構造系論文報告集、第453号、pp.47-55, 1993.

(1998年4月24日受付)