第 29 回数値流体力学シンポジウム
講演番号 10-2

三次元角柱の空力不安定振動に関する LES 解析

LES of aerodynamic instability of a three-dimensional square cylinder

○ 小野　佳之, (株)大林組技研，東京都清瀬市下清戸 4-640, E-mail, ono.yoshiyuki@obayashi.co.jp
田村　哲郎，東工大，神奈川県横浜市緑区長津田町 4259, E-mail, tamura@depe.titech.ac.jp
Yoshiyuki ONO, Obayashi Corporation4-640 Simokiyoto, Kiyose, Tokyo, Japan
Tetsuro TAMURA, Tokyo Institute of Technology 4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama, Japan

This paper discusses the applicability of the LES method to the flow around a freely oscillating three-dimensional square cylinder in the boundary layer turbulence. There have been many investigations on the applicability of various numerical models to aerodynamic instability-problems of two-dimensional bluff body in smooth flow. On the other hand, there are a few computational investigations for aerodynamic instability-problems of a three-dimensional bluff body, and then the applicability of LES has not been reached to completely understanding. In this research, the computed results are validated through comparison with the previous experiments. Especially, initial conditions which are different between computational approach and experiments are focused on.

1．はじめに

計算機性能の向上に伴い、流体計算の建物まわりの流れへの適用が頻繁に行われるようになり、日本建築学会「建築物荷重指針・同解説（2015）」では、各種評価において風洞実験と同様に数値流体計算による算定について記載された。その中でも、空力不安定振動の評価は、建物の安全性に大きくかかわるものであり、流体計算の適用性を検討しておくことは重要である。

これまで空力不安定振動に関しては、一様流中の二次元物体を対象とした解析結果が多く報告されている。しかしながら、境界層乱流中の三次元物体に関しては,適用事例が必ずしも多くなく､特に、風速数やケース数が少ないなど、空力不安定振動を評価する上での適用性は十分には明らかではない。

一様流中の二次元角柱に関しては多くの風洞実験結果が報告されており、Scruton[1]によれば、減衰が小さい場合には、換算風速付近から渦励振が発生し､風速の増加とともに発散型の振動に移行する。減衰が大きな場合には、発振領域が分離され、換算風速近傍の風速域で渦励振、高風速域で発散型の振動が認められる。一方、河井[2]による境界層乱流中の三次元角柱の応答特性は、減衰によらず換算風速近傍から発散型のような振動となり、高風速域でも減少しないものとなっている。また、Novak らの実験結果[3]では二次元角柱と比較して高風速域で応答変化が緩やかになるという特徴がある。

そこで、本論文では、建築物の空力不安定振動を評価する上での流体計算の適用性を明らかにすることを目的とし、境界層乱流中における自由振動時の三次元角柱まわり流れ解析を行う。

一方、風洞実験と流体計算結果の比較を行う場合、以下の点に注意を要する。一般に、風洞実験では風速を変えながら測定を行い、換算風速が変化した場合の応答特性の評価を行う。解析においては、同様の方法も考えられるが、同じ初期条件（例えば振幅ゼロの静止時の流れ場）のもと、ノード毎に違う換算風速を与えて並列計算により同時に評価を行う方法が合理的である。ただし、既往の実験結果によれば、共振風速を超えたある風速域において、初期値をゼロとした場合には、解が分岐し不安定となることが報告されている[4]。そこで、まず､一様流中の二次元角柱の空力不安定振動解析を行い、上記ゼロスタート時の応答特性を確認した上で、三次元角柱の空力不安定振動発生時の応答特性について考察を行う。

2．解析手法

流体の支配方程式は一般座標で表された非圧縮性の Navier･Stokes 方程式と連続の式である。 Navier-Stokes 方程式、連続の式を時間方向も含めて、物理空間(t, x_1, x_2, x_3)から計算空間$(\tau, \xi^1, \xi^2, \xi^3)$に変換する。アルゴリズムはフラクショナル・ステップ法を用い、時間積分は対流項に三次精度のルンゲクッタ法、粘性項にクランク・ニコルソン法を用いると以下ように記述される。

$$\frac{(J\bar{u}_i^*)^k-(J\bar{u}_i)^{k-1}}{\Delta\tau} = -\gamma_k N(\bar{u}_i,u_{gi})^{k-1} - \delta_k N(\bar{u}_i,u_{gi})^{k-2} + \alpha_k (L(\bar{u}_i^*)^k + L(\bar{u}_i)^{k-1}) \quad (1)$$

$$\frac{(J\bar{u}_i)^k-(J\bar{u}_i^*)^k}{\Delta t} = -\left(\frac{\partial}{\partial\xi^m}\frac{\partial\xi^m}{\partial x_i}\bar{\phi}\right)^k, \quad (k=1,2,3) \quad (2)$$

$$\left(\frac{1}{J}\left(\frac{\partial(J\bar{U}^m)}{\partial\xi^m}\right)\right)^k = 0,\ \ \bar{U}^m = \frac{\partial\xi^m}{\partial x_j}\bar{u}_j \quad (3),(4)$$

$$L(\bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial\xi^m}\left((\frac{1}{\mathrm{Re}}+\nu_{SGS})J\frac{\partial\xi^m}{\partial x_j}\bar{S}_{ij}\right) \quad (5)$$

$$N(\bar{u}_i,u_{gi}) = \frac{\partial}{\partial\xi^m}\left(J(\bar{U}^m-U_g^m)\bar{u}_i\right) \quad (6)$$

ここに、k=1,2,3 、ξ 、 J は、一般曲線座標への変換におけるメトリック、ヤコビアン。$\bar{\phi}$ はスカラーポテンシャル関数。

$$\alpha_1=\frac{4}{15},\ \alpha_2=\frac{1}{15},\ \alpha_3=\frac{1}{6},\quad \gamma_1=\frac{8}{15},\ \gamma_2=\frac{5}{12},\ \gamma_3=\frac{3}{4},\quad \delta_1=0,\ \delta_2=-\frac{17}{60},\ \delta_3=-\frac{5}{12} \quad (7)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial \xi^m}\frac{\partial \xi^m}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial \xi^n}\frac{\partial \xi^n}{\partial x_i}\right)、\quad \nu_{SGS} = 2CJ^{2/3}\left|\bar{S}\right|、 \qquad (8),(9)$$

$$\left|\bar{S}\right| = \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}} \qquad (10)$$

C はダイナミック SGS モデルにおける変数。

対流項に高次精度の補間法を用い、角柱前縁の特異点近傍の不安定性を除去するために小さな数値粘性（0.5）を加える。
解析手法の詳細に関しては文献 5 を参照されたい。

$$\frac{\partial}{\partial \xi} JUu_i = \delta_\xi (JU\bar{u}_i^{\ \xi}) + \alpha_{ND}\, J|U| \frac{u_{i-2} - 4u_{i-1} + 6u_i - 4u_{i+1} + u_{i+2}}{12} \qquad (11)$$

$$\bar{u}_i^{\ \xi} = \frac{-u_{i-3/2} + 9u_{i-1/2} + 9u_{i+1/2} - u_{i+3/2}}{16} \qquad (12)$$

$$\delta_\xi = \frac{f_{i-3/2} - 27f_{i-1/2} + 27f_{i+1/2} - f_{i+3/2}}{24} \qquad (13)$$

次に、三次元角柱のケースの振動解析方法について示す。振動を主流方向 x 軸まわりの 1 自由度とし、振動モードをロッキング振動モードとした場合の支配方程式は以下の通りである。

$$\frac{d^2\varphi(\tau)}{d\tau^2} + \left(\frac{4\pi h}{Vr}\right)\frac{d\varphi(\tau)}{d\tau} + \left(\frac{2\pi}{Vr}\right)^2\varphi(\tau) = \frac{D}{H}\frac{C_{MX}}{2\gamma} \qquad (14)$$

ここに、$\tau = tU_0 / D$、無次元換算風速$Vr = U_0 / nD$

φ	： x 軸まわりの転倒角 φ
C_{MX}	： x 軸まわりの転倒モーメント係数
H	:減衰定数
U_0	:代表風速
B:	:代表長さ（角柱の見附幅）
H	:建物高さ
m*	:単位長さ当たりの質量

ここに、質量比と減衰定数の積はスクルートン(*Sc*)数と呼ばれ、振動特性を決定するパラメータである。

$$Sc = \frac{2m^*}{\rho B^2} 2\pi h \qquad (15)$$

ロッキング振動モードを考慮し、γ は以下ように定義する。

$$\gamma = \frac{m^*}{3\rho B^2} \qquad (16)$$

３．解析モデル

解析モデルは、正方形角柱とし、二次元のケースではスパン方向長さを 4B とした。質量比は 120、スクルートン数は 10、20、30、流入気流は一様流である。
一方、三次元角柱のケースでは河井(1992)が行ったアスペクト比 10 の三次元角柱とする。模型のサイズは見附幅 5cm、高さ 50cm、模型の密度は 120kg/m^3 であることから γ は約 31 となる。

実験は、べき指数 0.3 の境界層乱流中で実施されており、減衰定数が 0.0167、0.0626 のケース、スクルートン数が 19.5 および 73 を対象とする。
流入風は、Lund の方法で滑面上発達させ、その下流にラフネスブロックを設置して作成した。平均風速、および変動風速の鉛直分布を図 1 に示す。

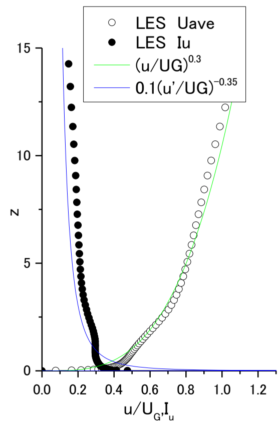


図１　流入風の鉛直分布

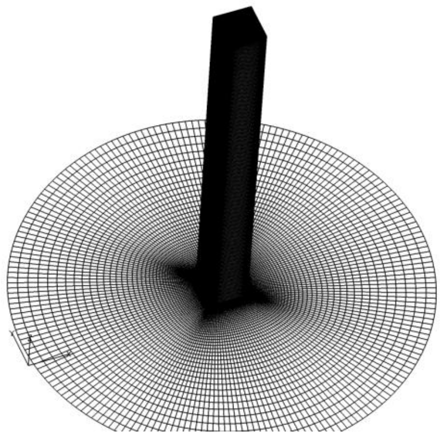


図２　計算格子

４．　計算条件

図 2 に三次元角柱まわりの計算格子を示す。周方向に 200 分割（端部に B/100）とし、鉛直方向に 220 分割、半径方向には、建物表面は 0.1/（Re）$^{1/2}$、角柱表面から 3～4B の範囲において見附幅の 1/5 程度の解像度で分割している。二次元角柱のケースは、三次元角柱の底面の二次元格子を格子幅 B/15 (12) でスパン方向に重ね合わせたものとしている。なお、初期値は全て静止角柱まわりの流れとし、初期変位はゼロとしている。
境界条件は、側面は Free-slip 条件、出口は移流型の流出境界条件であり、角柱表面は移動速度を与える。三次元角柱のケースでは上面境界に Free-slip 条件、下面境界は No-slip 条件とし、流入境界は、図 1 の変動流入風を入力する。一方、二次元角柱の場合は、スパン方向に周期境界条件、流入は一様流 U_0 を与える。

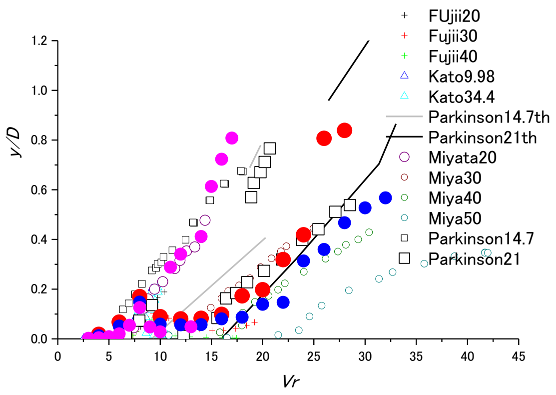


図３　応答振幅の解析結果と実験結果の比較

５．　解析結果

５．１　一様流中の二次元角柱の場合

ここでは、まず、既往の実験結果が多く存在する一様中の二次元角柱の応答特性について、解析結果と実験結果の比較を行う。図３に応答振幅の解析結果の実験結果 [4, 6, 7] との比較を示す。また、Parkinson による準定常理論解 [4] も併せて示す。

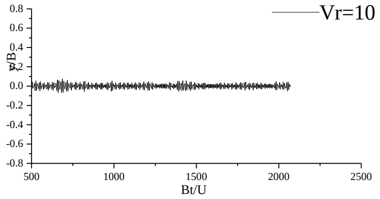
Sc 数が 10 のケースでは、*Vr*=6 付近から発振し始め、そのまま風速の増加とともに応答が増加する発散型の応答性状を示す。*Sc* 数が 20、30 のケースでは、*Vr*=8 付近で渦励振が認められ、振幅が減少した後、*Vr*=15 付近から再び発振し、分離型の応答特性が認められる。Scruton [1] によれば、発散型と分離型が分かれる *Sc* 数は 16 とされており、本計算結果は対応している。既往の風洞実験結果との比較では、*Sc*=10、20 のケースは共に、Parkinson の結果 [4] と対応が見られ、*Sc*=20 のケースにおいて、高風速域で準定常理論の第二分岐線分上に載る点などの対応が見られる。

一方、図 3 を詳しく見ると、Sc=10 の *Vr*=8 から 13 において解の分岐が認められる。

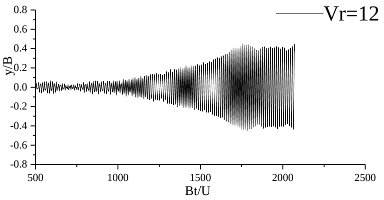
図 4 に解が分岐した不安定な領域の応答振幅の時刻歴波形を示す。*Vr*=10 および 12 においては、大きな振幅は認められず小振幅でランダムに振動しているが、*Vr*=12、14 のケースは小振幅振動が繰り返された後に、振幅が徐々に増大し一定振幅に収束している。

すなわち、ゼロスタートさせた場合には、評価時間内に、瞬間的にある一定振幅に達すると *Vr*=12、14 のような発散型の振動に移行し、一定振幅に満たない場合は *Vr*=10、13 のような小振幅振動が維持されている不安定振動現象 [4] が確認できる。二次元角柱の場合、発散振動に至ると一定振幅に収束する傾向があり、小振幅振動に戻ることはない。

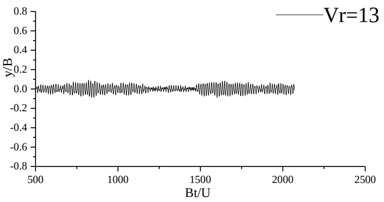
なお、図 5 に示すように、不安定領域を超えたケースでは、比較的早く一定振幅に収束する傾向がある。



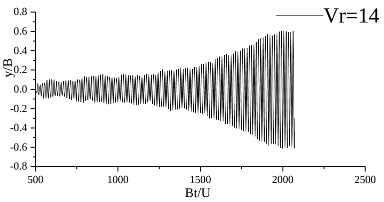
Vr=10



Vr=12

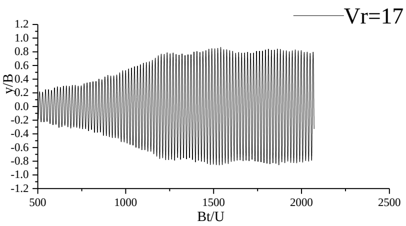


Vr=13

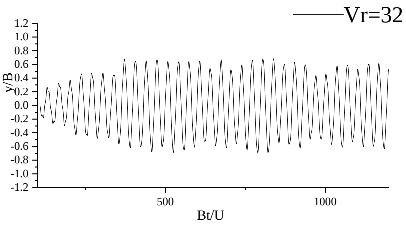


Vr=14

図４　不安定領域の応答変位の時刻歴波形（二次元角柱、*Sc*=10）



Sc=10、*Vr*=17



Sc=30、*Vr*=32

図５　高風速域の応答変位の時刻歴波形（二次元角柱）

５．２　境界層乱流中における三次元角柱の場合

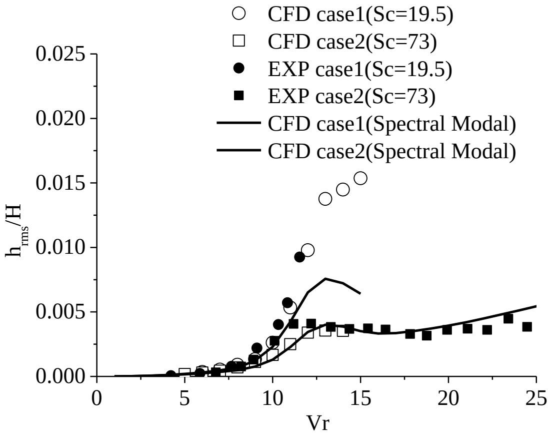


図６　応答の比較

次に、境界層乱流中の三次元角柱の応答特性を実験結果と解析結果の比較を行う。図６に風直交方向の応答の実験結果と解析結果の比較を示す。縦軸は角柱頂部の振動振幅の RMS 値を模型高さで割った無次元振幅、横軸は換算風速を表している。また、静止角柱の変動転倒モーメント係数とパワースペクトル密度から、スペクトルモーダル法で求めた応答振幅も図中に線分で示している。

減衰が大きな Sc=73 のケースでは、風速の増加と共に緩やかに増加し、実験結果、解析結果ともにスペクトルモーダル法で求めた結果とほとんど一致している。すなわち、振動依存風力を受けておらず、境界層乱流中の静止角柱まわりの変動風力による強制振動と同様となっていることが判る。また、河井 [2]の実験結果で認められる高風速域の応答は低周波数域の乱れによる振動であることが確認できる。

一方、減衰が小さな 19.5 のケースでは、換算風速が 8 付近から風速の増加と共に急激に増加し､換算風速が 10 を超えるとスペクトルモーダル法による予測結果を上回り、発散型の振動となっている。実験結果と比較すると、実験で測定されている *Vr*=12 程度までの範囲の応答振幅が実験結果と解析結果と非常に良く対応していることが確認できる。

実験結果が存在しない *Vr*=12 以上の風速では､風速の増加に対し､応答の増加の度合いが緩やかとなっている。これは Novack [3]の実験結果と同様であり、境界層乱流中の三次元角柱の発散型振動の特徴と考えられる。

一様流中の二次元角柱のケースでは初期値をゼロとした場合、共振風速を超えた不安定領域において、風速によって解の分岐が認められた。一方、境界層乱流中の三次元角柱の不安定振動は解の分岐は認められない。これは、乱れなどによる変動風力が作用するため強制振動により振幅が大きくなるためと考えられる。

図７に *Vr*=8～15 における振動振幅の時刻歴波形を示す｡スペクトルモーダル法の結果と対応する *Vr*=8 では､風力による強制振動により､ランダムなの振幅の増減が繰り返し発生した波形となっている。一方、スペクトルモーダル法の結果を上回るケースでは、小振幅振動が生じる時刻と大振幅振動が生じる時刻が入れ替わり、時間方向に不安定な性状を示している。また、風速の増加とともに、大振幅振動が顕著となっている。

初期振幅をゼロとした場合、一様流中の二次元角柱では、ある風速域において、瞬間的にある振幅に達するか否かで解が分岐する。一方、三次元角柱では振動モードの影響を受け、角柱上部がある振幅に達しても、その下部では振幅が小さいため変動空気力が安定せず､応答性状が不安定になるものと考えられる｡風速の増加ともに、ある振幅を超える高さ領域が増加し、大振幅振動が顕著となるものと考えられる。

６．結論

建築物の空力不安定振動を評価する上での流体計算の適用性を明らかにすることを目的とし、境界層乱流中における自由振動時の三次元角柱まわり流れ解析を行った。

三次元角柱の応答特性について実験結果との比較により、解析結果の予測精度を確認した。また、共振風速を超えた風速域における二次元角柱の解が分岐する応答特性を確認すると共に、三次元角柱のケースにおいては、大振幅と小振幅が入れ替わり時刻歴波形が不安定となる現象が認められた。

今後は、非定常空気力特性の検討を行う予定である。

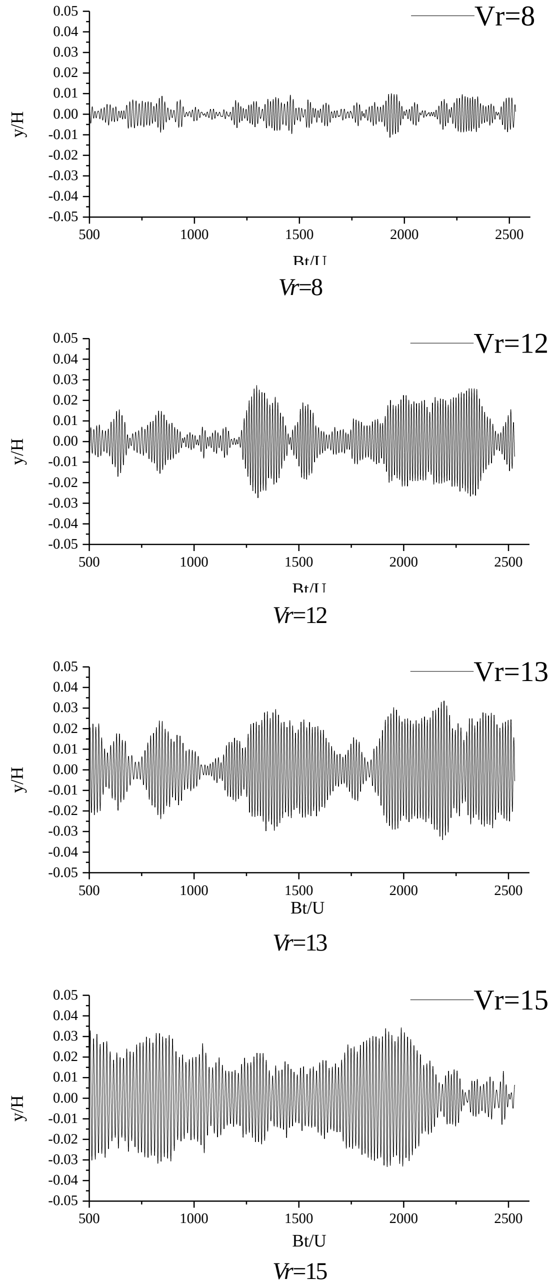


図７　応答変位の時刻歴波形（三次元角柱）

参考文献

[1] C., Scruton, On the wind excited oscillations of stacks, towers and masts, Proc. Int. Conf. Wind Effects on Build and Struct., (1963), 798

[2] 河井宏允、高層建築物の渦励振、ギャロッピング、フラッター、第 12 回風工学シンポジウム(1992)、267

[3] M. Novak, A. Davenport, Aero-elastic instability of prism in turbulent flow, J. of Engineering mechanics division, Proceeding of American Society of Civil Engineers, (1970), 17.

[4] G.,V., Parkinson, Some considerations of combined effects of galloping and vortex resonance, Journal of Wind Eng., Ind., Aerodynamics, 8, (1981), 135. Mech., and applied math, 7-2(1964), 225.

[5] Y., Ono, T., Tamura, Large eddy simulation using a curvilinear coordinate system for the flow around a square cylinder, Wind & Structure, Vol5, No2, (2002), 369-378.

[6] M., Miyazaki and T. Miyata, Effect of turbulence scale on aerodynamic response of rectangular cylinders, Proc. 5th Int. Conf. Wind Effects on Structures, Tokyo (1978), 191.

[7] T. Miyata, M. Miyazaki and H. Yamada, Pressure Distribution measurements for wind induced vibrations of box girder bridges, J. of Wind Eng. Ind. Aero., 14, (1983), 223.