

神戸大学大学院自然科学研究科 学生員 ○永井 史保
神戸大学大学院自然科学研究科 正会員 中山 昭彦

1. はじめに

構造物や橋梁などの鈍頭物体を過ぎる流れは、剥離、再付着、カルマン渦などの現象を伴う複雑乱流場であり、流体力により物体が振動する場合には渦励振、ギャロッピングなどの空力不安定振動が生じ更に複雑な連成問題となる。この種の問題を数値計算で取り扱う際には様々な問題があるが、近年、コンピュータの大容量高速化に伴い角柱周りの流れにおいて LES などの 3 次元計算が多くなされている。そこで、本研究では、LES を 2 次元正方形角柱周りの流れに適用し、振動角柱周りの流れと空力特性の 3 次元数値シミュレーションを行い、角柱の応答特性、振動角柱周りの流れ場の再現を試みた。

2. 解析手法

本計算は図-1 に示すような計算領域において、流れ直角方向に弾性支持された正方形断面剛体角柱周りの流れの計算である。 U_0 は x_1 方向の一様流入速度、 Y^* は角柱の無次元振幅、 D は角柱の一辺である。振動する物体周りの流れ場を解くために、次式に示すような標準 Smagorinsky モデル¹⁾に基づく LES を導入した 3 次元非圧縮 Navier-Stokes 式と連続の式を用いた。

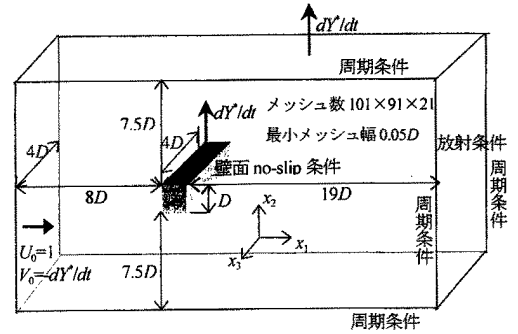


図-1 計算領域

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} + \frac{d^2 Y^*}{dt^2} \delta_{ij} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\bar{p} + \frac{2}{3} k_s \right) + (\nu + \nu_t) \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial \nu_t}{\partial x_i} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

ただし、添字 ij は 1, 2, 3 と変化し x_1, x_2, x_3 方向を表す。 $\bar{u}_i$, $\bar{p}$ は x_i 方向の流速、圧力の格子平均で、 ρ は流体の密度、 k_s はサブグリッド乱流エネルギー、 ν は動粘性係数、 ν_t は渦動粘性係数、 δ_{ij} はクロネッカーの記号である。計算メッシュを角柱の位置に対して固定し、計算領域全体が角柱も含めて移動する移動座標を取り扱っているため、式(1)の左辺に角柱の加速度項を慣性力として加えている。 x_2 方向の流入速度を $V_0 = -dY^*/dt$ とすることで、振動角柱に対する相対速度をゼロとしている。

差分スキームは対流項に 3 次風上差分、その他の空間項は中心差分とし、時間には Adams-Bashforth 法、圧力解法は HSMAC 法を用いた。計算格子はスターガードメッシュ系を用いており、メッシュ数は $101 \times 91 \times 21$ 、最小メッシュは $0.05D$ 、 Re 数は 22000 とした。

一方、角柱振動は式(2)に示す 1 自由度振動系の振動方程式に支配される。

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

ただし、 S_c は質量減衰パラメーター、 γ_d は密度比であり、 C_L は揚力係数である。式(2)より無次元風速 V_R を変化させて応答特性を調べる。

3. 解析結果ならびに考察

図-2 に S_c , γ_d をそれぞれ 34.4, 254 とした場合での $V_R=10$ (初期 $0.3D$ で加振) と $V_R=30$ の角柱変位と揚力係数の時系列波形の一部を示す。 $V_R=10$ では振幅が 0.4, $V_R=30$ では 0.2 に達しており、それぞれ渦励振とギャロッピングの状態となっている。図-2 の波形をスペクトル解析した結果として、図-3 に $V_R=10$ (初期 $0.3D$ で加振) と $V_R=30$ の変位と揚力係数のパワースペクトルを示す。 $V_R=10$ では揚力係数の振動数、すなわちカルマン渦発生周波数が

Shiho NAGAI and Akihiko NAKAYAMA

角柱振動数に同期し渦励振の現象を捉えられていることが分かる。また、 $V_R=30$ では角柱振動数が小さくなり、高風速でのギャロッピングの特徴が再現できている。

次に静止角柱と振動角柱の流れ場の比較を行う。図-4に主流方向変動風速の2乗平均コンターラインを示す。渦励振の状態である $V_R=10$ では、角柱後流と角柱側面付近の2カ所において変動成分が最大となっており、また、静止角柱と比較すると角柱振動方向に向かって広い範囲にわたり変動成分が分布している。これは、角柱の振動に伴って角柱付近の乱れ成分が増大し、その影響が角柱後流にも大きく及んでいる様子を表している。図-5に x_1 , x_3 方向の瞬時渦度等値面を示す。角柱スパン方向にリブ状構造をもつ渦が x_1 方向の渦度等値面である。静止角柱では比較的規則的な渦の配置を示しており、リブもほぼ等間隔となっている。これに対し、振動角柱では特に角柱背後において乱れが複雑になり、後流においても x_1 , x_3 方向ともに渦構造がランダムな配置となる。これらの結果から振動角柱においては3次元的に乱れが助長されていくため、角柱振動方向である x_2 方向には計算領域や境界条件の設定など十分な検討が必要であると思われる。

4. おわりに

Smagorinsky モデルを用いた標準的な LES 計算法により振動する角柱周りの流れの数値解析を行った。結果、振動角柱が流れに及ぼす影響をうまく再現し、渦励振やギャロッピングなど周知の空力振動特性が再現できた。

[参考文献] 1) 中山昭彦, 永井史保, 野田博: LES による角柱の振動応答解析, 応用力学論文集, Vol.1, pp.633-640, 1998.

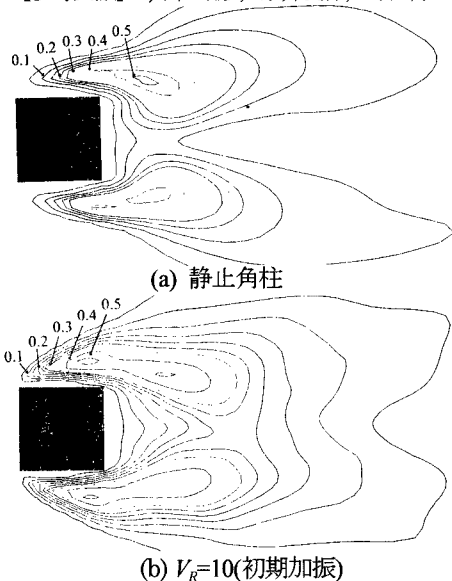


図-4 主流方向変動風速2乗の平均コンター

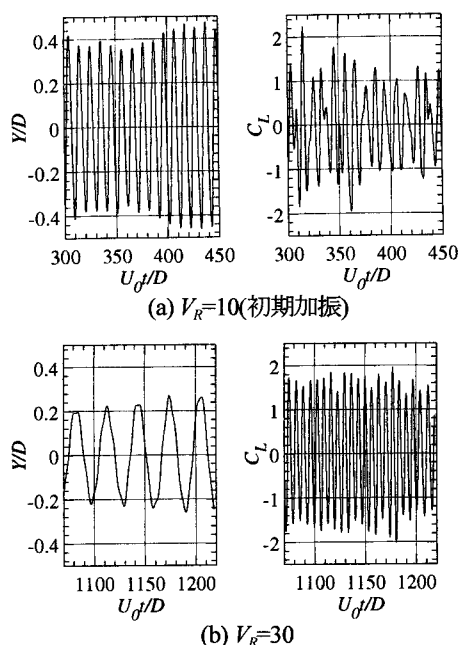


図-2 変位と揚力係数の時系列波形

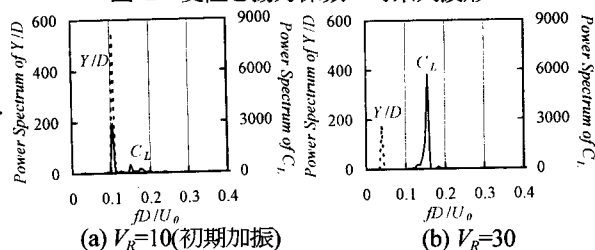


図-3 変位と揚力係数のパワースペクトル

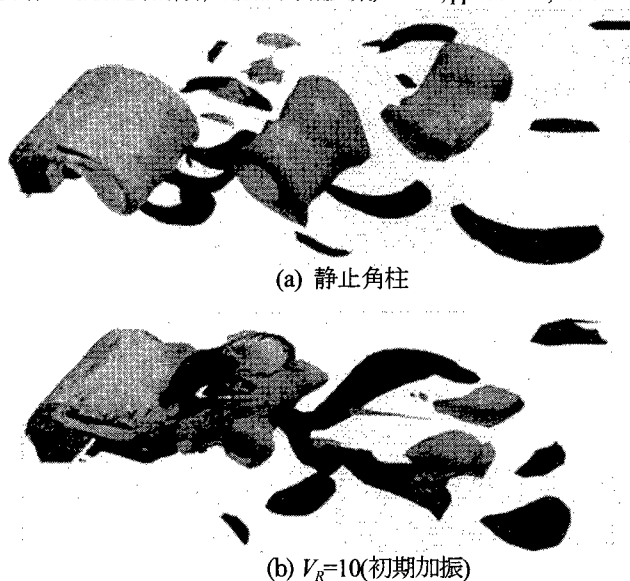


図-5 x_1 , x_3 方向の瞬時渦度等値面