

京都大学工学部 正 員 白土博通

同 正 員 松本 勝

同 正 員 白石成人

1. まえがき 離散渦点法による流れの数値シミュレーションを行う場合、非粘性渦として粘性の影響が無視できる場合を対象とするか、もしくは渦のコアの時間的成長を取り入れて粘性拡散の効果を間接的に導入する手法が取られることが多い。しかし、空力特性がレイノルズ数により変化する場合や比較的低レイノルズ数の解析には、粘性効果の導入が重要となる[1]。本研究では、各渦点の移動速度をVIC(Vortex-In-Cell)法により求める。VIC法[2]は渦点同志が接近したときの過大な移動速度を避けることが可能であり、また拡散方程式を解くため粘性の影響を直接的に扱うことができる利点を有する反面、空間をメッシュ分割する必要があり、ある大きさの数値粘性を伴う解を与えることが指摘されている。本研究では、各渦点まわりの渦度分布がLamb渦により表されるとみなし、従来型のVIC法により流れ場に導入される数値粘性の定量的評価を試みると共に、数値粘性効果を抑えた手法を示し、レイノルズ数による静止矩形断面周りの流れの変化の再現を試みるものである。

2. VIC法による数値粘性の定量的評価 式(1)で与えられる渦度分布をもつLamb渦は、粘性の影響により空間分布の標準偏差 σ_w （長さの次元を持つ）が式(2)に従って時間的に増加する。

$$\omega(r, t) = \frac{\Gamma}{4\pi\nu t} \exp\left\{-\frac{r^2}{4\pi\nu t}\right\} \quad (1)$$

$$\sigma_w = \sqrt{2\nu t} \quad (2)$$

VIC法による各渦点の誘起速度を決定する計算は、毎時間ステップ(Δt)ごとに実行される。t= Δt におけるLamb渦の渦度場を求め、渦を囲む4つの格子点へ分配し、その渦度を

通常のVIC法による値と比較すれば、VIC法1回の実行による数値粘性の大きさを求めることができる。いま、セル内に1個のLamb渦が存在する場合（図-1）、周囲の4格子点へこのLamb渦の渦度を分配するには図のようにセルの中心（ $\Delta x/2, \Delta y/2$ ）を通る直交2直線で4分割された渦度をそれぞれ最寄りの格子点の渦度とすればよい。この渦度の大きさは、 σ_w とメッシュ寸法との比（ $\sigma_w/\Delta x$ ）に依存する。図-2に $\sigma_w/\Delta x$ を変化させたときのセル内の渦の位置による ω_1 の分配率（ $\omega_1/(\Gamma/\Delta x/\Delta y)$ 、 Γ ：Lamb渦の循環）を示す。

一方、式(3)で表される通常のVIC法による ω_1 の分配率は図-3ようになる。

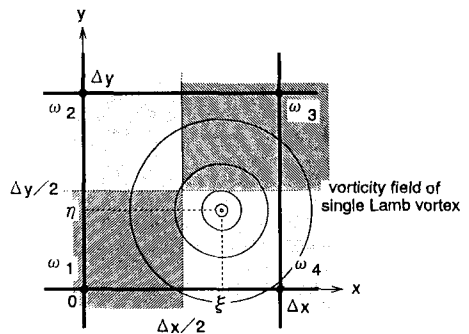
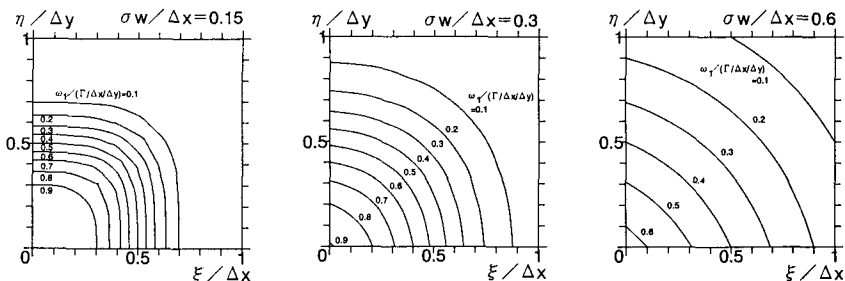


図-1 セル内のLamb渦

図-2 Lamb渦を用いた ω_1 の渦度分配率

$$\omega_1 = \Gamma(1 - \frac{\xi}{\Delta x})(1 - \frac{\eta}{\Delta y})/\Delta x/\Delta y \quad (3)$$

図-2 および図-3 より, VIC法は $\sigma_v/\Delta x=0.3$ となるLamb渦とほぼ同等の拡散状態を与えるものと判断される. 従って, 式(2)から, VIC法を実行することによる付加粘性の大きさは次のように表される.

$$\nu_{num} = \frac{\sigma_v^2}{2\Delta t} = \frac{0.09(\Delta x)^2}{2\Delta t} \quad (4)$$

以上のような付加粘性効果を抑えるため, 本研究では次式の渦度分配を用いた.

$$\omega_1 = \Gamma \{1 - h(\xi - \Delta x/2)\} \{1 - h(\eta - \Delta y/2)\} / \Delta x/\Delta y \quad (5)$$

where, $h(x) = 0 \ (x < 0), \ 0.5 \ (x = 0), \ 1.0 \ (x > 0)$

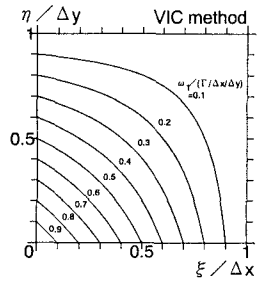


図-3 VIC法による ω_1 の渦度分配率

3. レイノルズ数による空力特性の変化の再現 以上の方法を, 断面辺長比1:2の静止矩形断面(2次元)に適用し, レイノルズ数による流れの変化をシミュレートした. 図-4に非定常揚力の時間変動から求めた

ストローハル数のレイノルズ数による変化を風洞実験値[3]と共に示す. $Re=500$ 付近に見られるストローハル数の不連続が計算でも再現されている. なお, 揚力のスペクトルはストローハル数が不連続となるレイノルズ数近傍で実験値ほどには明確な2つのピークが得られていない. 図-5には計算で得られた流れのパターンの一例を示す. また, 図-6には水素気泡法による同一断面の可視化パターン[4]を示す. 両図を比較すれば,

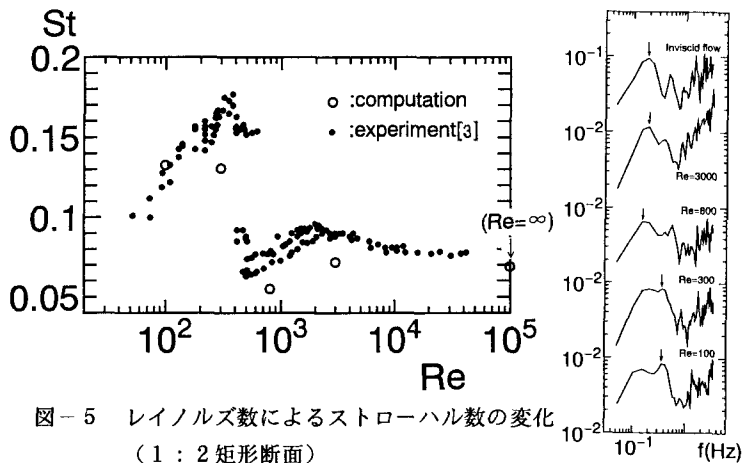


図-5 レイノルズ数によるストローハル数の変化 (1:2矩形断面)

$Re=100$ の計算結果と $Re=8000$ の可視化実験結果とは流れのパターンが異なっており, レイノルズ数による流れの変化が計算結果に現れているものと判断される.

4. まとめ 本手法により, 断面辺長比1:2の静止2次元角柱のストローハル数がレイノルズ数により変化する様子が再現された. しかしながら, 風洞実験結果ほどには明確な渦放出周波数のスペクトルピークは得られておらず, 今後解析上の考え方と実際の流れの両面についてさらに検討が必要と考えられる.

参考文献 [1]T. Sarpkaya, J. of Fluids Eng., Trans. of ASME, vol.111, 1989 [2]J.P.Christiansen, J. of Comp. Phys., vol.13, 1973 [3]岡島 厚, 日本風工学会誌, No.17, 1983 [4]C.Knisely, M.Matsumoto, F.Menacher, J. of Hydr. Eng., ASCE, vol.112, No.8, 1986

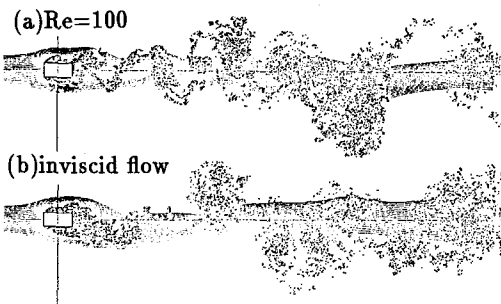


図-6 本手法による断面回りの流れのパターン

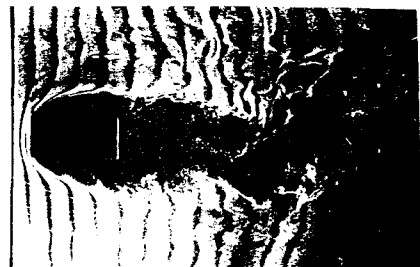


図-7 水素気泡法による流れの可視化 ($Re=8000$) [4]