

円柱背後の渦流の数値シミュレーションに関する再検討

荒谷建設コンサルタント 正会員 ○大前 満 鳥取大学工学部 正会員 松見吉晴 瀬山 明

1. まえがき：従来、物体背後の渦流を含めた流況を予測する方法として、渦糸近似法が有効な手法として使われているが、その際に問題となる実際の流れでみられるような渦の時間的な減衰、さらには計算ステップの増大に伴う計算時間の増長については十分に解決されているとは言い難い。そこで本研究では、上述した問題の解決法の第一段階として渦糸の時間的な減衰を考慮するとともに、主に計算時間の短縮化を図るために渦糸群の合体を導入した計算手法の確立化を目指した。本研究では、一様流中に設置された鉛直円柱背後のカルマン渦を対象に計算を行い、この計算手法の妥当性を渦の配置及び渦の発生周期及び円柱に作用する流体力について、従来のカルマン渦列の結果と比較検証した。

2. 基礎式：流速 U の一様流中に半径 a の円柱と任意の点 $z_1, z_2, \dots, z_m$ に循環強さ $\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_m$ (左回りを正) なる渦糸がある場合、流れの複素速度ポテンシャル $f(z)$ は次式により与えられる。

$$f(z) = U \left(z + \frac{a^2}{z} \right) - i \sum_{j=1}^n \kappa_j \log(z - z_j) + i \sum_{j=1}^n \kappa_j \log \left(z - \frac{a^2}{z_j} \right) \quad (1)$$

また、 j 番目の渦糸の移動速度は X, Y 方向の速度成分をそれぞれ u_j, v_j とすると次式により与えられる。

$$u_j - i v_j = \frac{d}{dz} \left(f - i \kappa_j \log(z - z_j) \right) \Big|_{z=z_j} \quad (2)$$

渦糸の時間的な減衰効果については、中村らの結果¹⁾を用いて次式で表示している。

$$\kappa_j = \kappa_{0j} \exp(-\alpha t_j) \quad (3)$$

ここに、 κ_{0j} ：渦糸の初期循環強さ、 t_j ：各渦糸が発生してから経過時間、 α ：無次元減衰係数である。一方、円柱に作用する流体力の抗力 F_T 及び揚力 F_L は抗力係数 C_D 及び揚力係数 C_L でもって表示すると次式のようになる。

$$C_D = \frac{F_T}{\frac{1}{2} \rho d U^2} = \frac{\int_0^{2\pi} P \cos \theta d\theta}{\frac{1}{2} \rho d U^2} \quad (4)$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho d U^2} = \frac{\int_0^{2\pi} P \sin \theta d\theta}{\frac{1}{2} \rho d U^2} \quad (5)$$

ここに、 P ：円柱表面上の圧力で、式(1)及び圧力方程式より求める。

3. 計算方法：本計算はマイクロコンピュータを用いて FORTRAN 文法で行い、計算の手順は図-1のフローチャートに示すとおりである。本研究では円柱表面の境界層を近似するために、図-2に示すように円柱から δ だけ離れた同心円上を m 等分し、各等分された円弧上の中点に循環強さ $\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_m$ の渦糸を配置して境界層を近似させた²⁾。これらの渦糸の循環強さは次のように決定される。すなわち、円柱表面では流体の速度がいたるところ 0 である条件(式(6))と、円柱は回転していない条件(式(7))により作られる m 元一次連立方程式を解くことにより求められる。

$$\phi(P_1) = \phi(P_2) = \dots = \phi(P_m) \quad (6)$$

$$\kappa_1 + \kappa_2 + \dots + \kappa_m = 0 \quad (7)$$

ただし、 $\phi(P_j) = \text{Real}[f(P_j)]$ である。

次に、計算を行う際に設定した条件としては、①境界層の厚さ $\delta = 0.05$ ②時間ステップ $\Delta t = 0.2 (U=1.0$ のとき) ③境界層を近似する渦糸の数を 64 個 ④剥離点を $\theta = \pm 90^\circ$ に固定し、時間ステップ毎に渦糸を 1 個ずつ発生 ⑤減衰係数 α は予備計算により 0.025 を採用した。

渦糸を合体させる方法は、図-3及び図-4に示す2種類の方法を用いた。図-3は手動により合体させる方法で、各計算ステップ毎にディスプレイ上にグラフィック化される渦パターンを見ながら渦糸群が独立し始めたと思われるときに、この渦糸群を包絡する円を入力し、1つの渦に合体させる方法である。図-4は、図-3をプログラム化したもので、これは手動による方法によって明らかになった渦糸群が独立し始める位置及び合体させる

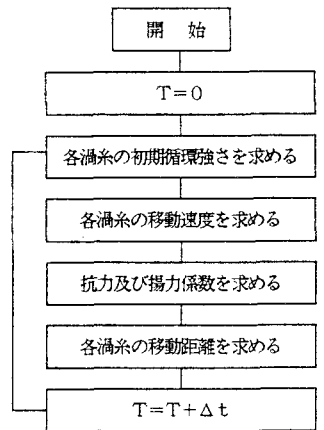


図-1 計算手順

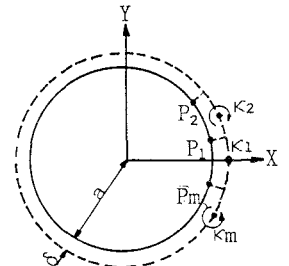


図-2 境界層を近似する渦糸の発生位置

渦糸の個数をもとに、図中の実線で示すような位置と合体させる渦糸の個数を予め与え、この位置を越えて流下する渦糸の個数が計算開始時に決定した個数を越えたときに合体させるという方法である。ここで注意しなければならない点は、自動的に合体させる場合、渦糸群に異符号の循環強さを持つ渦糸が多く含まれると、合体後の渦が不自然な位置に現れる可能性があり、この方法は合体させる渦糸の個数の初期設定に注意する必要がある。しかしながら、現在の所、この初期設定の渦糸の個数については、手動による結果を参照する必要がある。

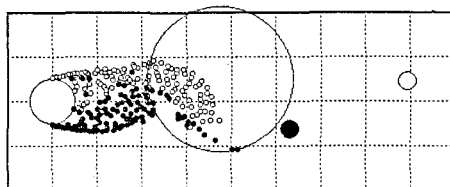


図-3 手動による合体方法

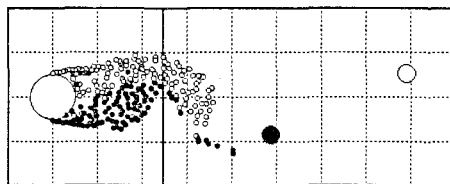


図-4 自動による合体方法

4. 計算結果：図-5及び図-6は渦糸の合体を行わなかった場合と渦糸の合体を行った場合のシミュレーション結果を示したもので、図中白丸及び黒丸はそれぞれ負及び正の循環強さの渦糸の位置を表す。まず、渦糸の合体による

計算時間の短縮は、同一時間ステップまで計算するのに渦糸を合体させないときの約30%短縮することができた。そして、両者の計算結果を比較すると、図-5に見られる渦パターンの特徴を図-6の結果はよく再現していることがわかる。次に、表-1及び表-2は図-6の計算結果を従来のカルマン渦列の特性（渦の配置）と比較したものである。これらの表より、両者の値はほぼ一致している。また、渦の発生周期については、揚力の変動が渦の発生周期を示すことから、 C_D 及び C_L の時間変動を示した図-7の C_L より Strouhal数が約0.17となり、カルマン渦列の特徴を再現していることが確認できる。さらに、図-7より C_D は0.8程度の値を示し、従来の定常流中での値1.0と比較して十分な結果を得ている。以上のことより、流速 $U=1$ 、半径 $a=1$ の場合に対しては本計算手法の妥当性が確認できる。なお、他の計算結果は講演時に発表する。

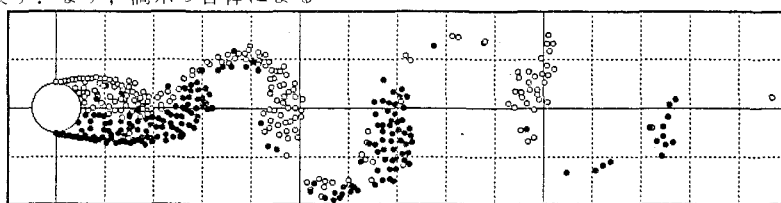


図-5 合体させない場合

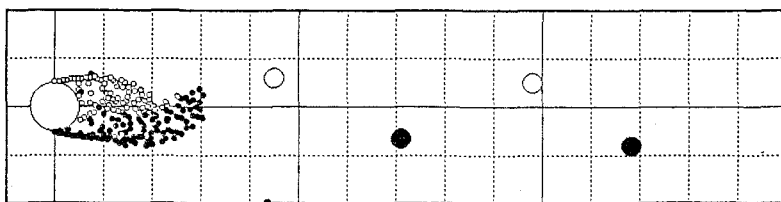


図-6 合体させた場合

では、揚力の変動が渦の発生周期を示すことから、 C_D 及び C_L の時間変動を示した図-7の C_L より Strouhal数が約0.17となり、カルマン渦列の特徴を再現していることが確認できる。さらに、図-7より C_D は0.8程度の値を示し、従来の定常流中での値1.0と比較して十分な結果を得ている。以上のことより、流速 $U=1$ 、半径 $a=1$ の場合に対しては本計算手法の妥当性が確認できる。なお、他の計算結果は講演時に発表する。

Reynolds number	x/a	h/ℓ
94	10	0.19
	14	0.23
	20	0.22
	24	0.22

h: 2つの渦列の間隔
 ℓ : 渦同士の間隔
 表-1 Schaeferら³⁾による実験結果

Reynolds number	x/a	h/ℓ
100	9.6	0.19
	14.4	0.24
	19.6	0.24
	24.8	0.28

表-2 本研究による計算結果

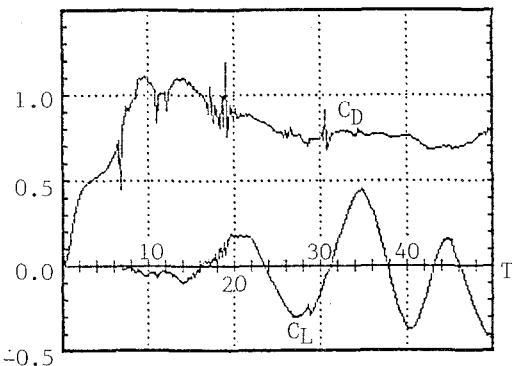


図-7 抗力及び揚力係数の変動グラフ

参考文献 1) 中村孝幸・久保達郎・福島隆史：カーテン防波堤まわりのはく離流れと作用波力の特徴について、第34回海講，pp.407～410，1987 2) Kunio Kuwahara：Study of Flow past a Circular Cylinder by an Inviscid Model, J. Phys. Soc. Jap. Vol.45, pp.292～297, 1978 3) John W.Schaefer・Salamon Eskinazi：An analysis of the vortex street generated in a viscous fluid, J. Fluid Mech. vol.6 pp.241～260, 1958