

離散渦法による楕円柱まわりの流れ場の解析

鳥取大学	正員	神部 俊一
鳥取大学大学院	学生員	○加藤 孝志
下関市役所		佐藤 広紹
矢作建設(株)		中村 光伸

1. はじめに

実用的な水中橋梁の断面寸法と施工される海域での潮流の流速を考慮に入れると、レイノルズ数は 10^7 を超える。このような高レイノルズ数領域において鈍頭物体に作用する流体力を如何に算定するかは工学的に重要で、現在研究が進められている問題である。数値解析法の中で離散渦法は計算手法が比較的簡単であり、高レイノルズ数領域の流れの計算に適していることから、非定常流の解析にしばしば利用されている。そこで本研究では、楕円柱体の水中橋梁への利用を念頭において、潮流の作用下にある楕円柱体まわりの剥離を伴う流れ場を離散渦法を用いて解析し流体力を算定したので報告する。

2. 特異点法を用いた定式化

2次元非圧縮非粘性流体の渦なし流れを支配する

次の基礎方程式を解けば流れ場と圧力場が求まる。

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} q^2 = F(t) \quad (2)$$

ここに、 Φ 、 p 、 ρ および q は、それぞれ、速度ポテンシャル、圧力、密度および流速であり、 $F(t)$ は時間 t の任意の関数である。また、 Φ は物体表面における次の不透過条件を満たす必要がある。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \quad (3)$$

ここに、 n は物体表面の外向き法線方向を表わす。ここで、ラプラスの方程式(1)の基本解である渦糸を物体表面に分布させて物体まわりのポテンシャル流れを表わすことを考える。すると、流れ場全体を表わす複素速度ポテンシャル f は、一様流と物体表面に分布させた渦糸および剥離剪断層を近似する渦列の複素速度ポテンシャルを重ね合わせることで次式により表示できる。

$$f = U e^{-i\alpha} z + i \sum_j \frac{\Gamma_j}{2\pi} \log(z - z_j) + i \sum_k \left\{ \frac{\Gamma_{Ak}}{2\pi} \log(z - z_{Ak}) + \frac{\Gamma_{Bk}}{2\pi} \log(z - z_{Bk}) \right\} \quad (4)$$

ここに、 U は主流の一様流速、 α は迎え角であり、添字 A, B は物体の表面から発達する上下の剥離剪断層を表わす。

3. 解析方法

図-1に示すように物体表面を N 個の線要素に分割し、各要素の中間点 $z_{c,j}$ において式(3)の境界条件を適用すると、未知量 Γ_j に関する N 元の連立一次方程式が得られる。また、ケルビンの定理によれば流れ場全体で循環の総和が零でなければならない。したがって、

$$\sum_j \Gamma_j + \sum_k (\Gamma_{Ak} + \Gamma_{Bk}) = 0 \quad (5)$$

この場合、 N 個の未知量 Γ_j を決定するための式の数は $N+1$ 個となり、未知量の数より方程式の数が1つ

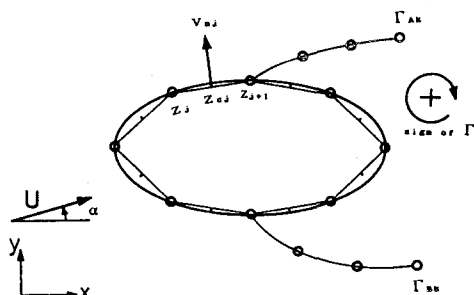


図-1 渦点と制御点

だけ多くなる。そこで本研究では、この問題を回避するためにすべての要素の中間点 $Z_{e,j}$ において法線速度 ε を新たに未知量に加え、 $N+1$ 元の連立方程式を解いて Γ_j を決定する¹⁾。したがって、式(3)の条件式は次のように書き替えられる。

$$v_{n,j} = \frac{\partial \Phi}{\partial n} \bigg|_{Z=Z_{e,j}} = \varepsilon \quad (6)$$

後流に放出された渦糸が、ある時刻 t において位置 Z_s にあるとき、渦糸の複素速度 $\bar{q}(z_s) = u_s - i v_s$ と複素速度ポテンシャル f との間の関係式は次のようになる。

$$\frac{df}{dz} \bigg|_{Z=Z_s} = u_s - i v_s \quad (7)$$

したがって、渦糸の時間的移動は、式(7)の関係をを用いて次式によって求めることができる。

$$z_s(t + \Delta t) = z_s(t) + q \Delta t \quad (8)$$

4. 数値解析例

図-2に示すように一様流中にある楕円柱まわりの流れ場を本解析法を用いて解析した。計算条件は、一様流速を $U=1.35\text{m/s}$ 、長径を $a=10\text{m}$ 、厚み比を $k=a/b=2.0$ 、海水の温度 10°C における動粘性係数を $\nu=1.31 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ 、渦糸の移動時間間隔を $\Delta t=0.25$ 秒とした。このときレイノルズ数は $Re=1.03 \times 10^7$ となった。

円形断面の場合、レイノルズ数が極超臨界領域($Re > 2 \times 10^5$)では、層流境界層が最低圧力点直後で乱流境界層に遷移し、 $\theta=115^\circ$ 付近で乱流剥離を起こすことが知られている²⁾。本研究では、ジュコフスキー変換を用いて、この円柱の剥離点を楕円柱に写像し、この点を剥離点として離散渦法による計算を実施した。

計算結果のフローパターンを図-3に示す。また、抗力係数 C_D および揚力係数 C_L の時間的変動を図-4に示す。

5. おわりに

今回取り扱った楕円柱断面については、剥離位置、放出渦の減衰率など不確定なパラメーターが多くあり、この問題を如何に合理的に解決するかは、今後に残された課題である。しかし、それらのパラメーターを適切に選ぶことで、流れ場を精度よく表現でき、各時間ごとの物体に作用する力の近似値を算出することができる。これらのことから、水中橋梁に作用する流体力を算定するのに、この手法は少なからず有効であると期待できる。

【参考文献】

- 1) 林 正徳, 麻生 茂: パネル法と離散渦法を用いた剥離流の数値シミュレーション, 日本航空宇宙学会誌 第34巻 第390号(1986年7月) pp.350-355.
- 2) 稲室隆二, 足立武司: うず放出モデルを用いたはく離を伴う非定常流れの一解法, 日本機械学会論文集 52巻 476号(昭61-4) pp.1600-1606

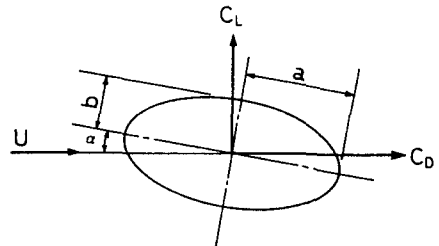


図-2 解析モデル



図-3 フローパターン

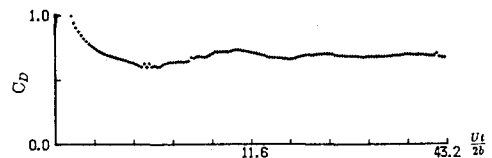


図-4 a) 抗力係数 C_D の時間変化

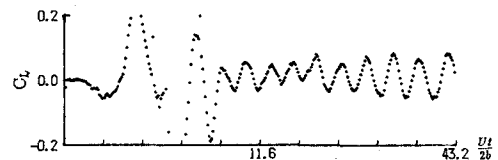


図-4 b) 揚力係数 C_L の時間変化