

1. まえがき: 近年、陸上及び海洋構造物は複雑多様化しつつあり、これらの物体まわりの流況を予測することが必要とされるようになってきている。そして、特にこのような構造物まわりの渦発生を含む流体現象の解明が大きな課題となっている。本研究では、一様流中及び流体内に1つの渦糸を置いた場合の円柱まわりの流況をわき出し分布法によって求め、解析解と比較することでこれらの流況に対するわき出し分布法の適用性を検証し、さらに任意形状物体として一様流中の正方形形状まわりの流況についても検討してみた。そして、これらの結果を応用して複数渦糸モデルによる一様流中の正方形形状まわりの後流渦の数値シミュレーションを行なった。

2. わき出し分布法による流体内の表示

1) 複素速度ポテンシャルの表示: 流体内に物体がある場合、その流況の複素速度ポテンシャル W は物体のない場合の流況の複素速度ポテンシャル W_0 と物体の存在によって誘起される流況のそれ W_1 の和で与えられる。そして、わき出し分布法によるならば上述の W_1 は(1)式のように表示できる。

$$W_1(z) = \frac{1}{2\pi} \oint_C D(z) \log(z-Z) dZ \quad (1)$$

ここに、 $D(Z)$ は物体表面上の点 $Z(=X+iY)$ におけるわき出しの強さであり、 $z(=x+iy)$ はポテンシャルを求めようとする点の座標である。

2) わき出し分布関数 $D(X,Y)$ の決定: 任意形状物体まわりの流況の複素速度ポテンシャル W による流況は、物体表面における条件(物体が物体中に透過しない)を満足すべきであり、これを式で示すと(2)式となる。

$$U_{\alpha}(\alpha) n_x + V_{\alpha}(\alpha) n_y = -\frac{1}{2} D(\alpha, \beta) - \frac{1}{2\pi} P.V. \oint_C D(\alpha, \gamma) \frac{(x-X)\alpha_x + (y-Y)\alpha_y}{\sqrt{(x-X)^2 + (y-Y)^2}} dC(\alpha, \gamma) \quad (2)$$

ここに、 $U_{\alpha}(\alpha)$ は流体内において物体がない場合の物体表面位置 (α, β) に誘起される x 軸方向の速度、 $V_{\alpha}(\alpha)$ はその y 軸方向の速度であり、 n_x は物体表面より流体内にのびる単位法線複素数 n の x 軸方向成分で、 n_y はその y 軸方向成分である。そして、わき出し分布関数 $D(X,Y)$ は(2)式により決定されることになる。

3) 方程式の数値化: 任意形状物体を対象にする時、(2)式の積分方程式は、解析的に取り扱うことが困難となるので物体の断面曲線を長さ $4C_j$ の線素分 N 個に区分して、方程式を数値化して解いた。

4) 算定結果: まず最初に上記の手法の妥当性を検証するため解析解の知られている円柱まわりの流速分布をわき出し分布法により求めてみた。これを示すのが図1、図2である。図1は一様流中の円柱まわりの流速分布を示しており、解析解とわき出し分布法による算定流速とはよく一致しているのがわかる。図2は、半径 10cm の

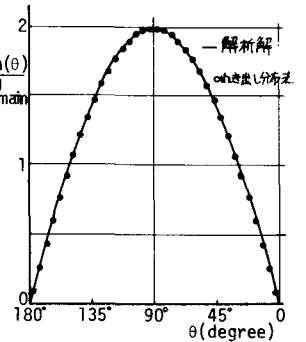


図1: 一様流中の円柱まわりの流速分布

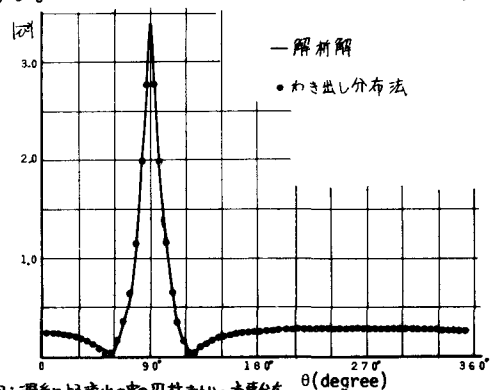


図2: 渦糸による流中の円柱まわりの流速分布

円柱表面より 2cm 離れた所に循環 $\Gamma=20\text{cm}^2/\text{s}$ の単一の渦糸を置いた場合の円柱表面の流速分布を示すもので、解析解とめき出し分布法による算定流速とは全体的によく一致している。なお、用いた円の分割数は、 $N=72$ を採用した。以上のことよりめき出し分布法による物体まわりの流速の算定がほぼ可能であると言えよう。次に、正方ひし形柱の角を小さくする曲率半径を有する円弧でモデル化し、一様流中の正方ひし形柱まわりの流速分布をめき出し分布法で求めた。これを示すのが図3である。図よりひし形の角で流速は主流速の4倍になり、流速の場所的な変化もこの角付近で最も大きくなる、ということがわかる。なお、全線素分數 $N=40$ 、角を近似する円弧の曲率半径 $r=1.0\text{mm}$ を用いた。

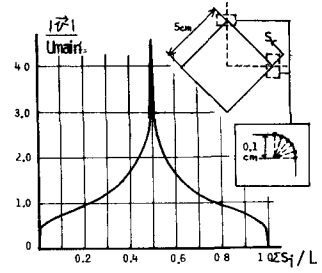


図3: 一様流中の正方ひし形柱まわりの流速分布

3. 後流渦の数値シミュレーション: 前述のめき出し分布法による物体まわりの流速の表示法と複数渦糸モデルを用いて、一様流中の正方ひし形柱まわりの後流渦の数値シミュレーションを行なう、とする。

1) 渦糸の運動方程式: 几个の渦糸を含む非定常流中に任意形状物体が置かれていると仮定した場合、渦糸の運動が他の渦糸からしか影響を受けないことより、 m 番目の渦糸の運動学的な方程式は、(3)、(4)式で求められる。

$$\frac{d\mathbf{x}_m}{dt} = \mathbf{U}_{\infty}(\mathbf{x}_m, \mathbf{y}_m) + \sum_{k=1}^n \frac{\Gamma_k}{2\pi} \frac{-(y_m - y_k)}{(x_m - x_k)^2 + (y_m - y_k)^2} + \sum_{j=1}^N D(\alpha_j, \gamma_j) \frac{(x_m - x_j)}{(x_m - x_j)^2 + (y_m - y_j)^2} \Delta C_j \quad (3)$$

$$\frac{d\mathbf{y}_m}{dt} = \mathbf{V}_{\infty}(\mathbf{x}_m, \mathbf{y}_m) + \sum_{k=1}^n \frac{\Gamma_k}{2\pi} \frac{(x_m - x_k)}{(x_m - x_k)^2 + (y_m - y_k)^2} + \sum_{j=1}^N D(\alpha_j, \gamma_j) \frac{(y_m - y_j)}{(x_m - x_j)^2 + (y_m - y_j)^2} \Delta C_j \quad (4)$$

ここに、 (x_m, y_m) は m 番目の渦糸の位置である。

2) 渦糸の循環の推定の決定: 渦糸の循環の推定は、境界層理論に基づく $\partial\Gamma/\partial t = 0.5 U_0^2$ より(5)式で与えられる。

$$\Gamma(t) = 0.5 U_0^2 \Delta t \quad (5)$$

ここに、 U_0 は $(t - \Delta t)$ の瞬間ステップにおいて発生した渦糸の初期位置より主流側に壁面より渦糸までの距離分だけ離れた地点の流速を用いた。

3) 渦糸の発生位置の決定: はく離点の確定している物体を対象とする時、渦糸の初期位置は、はく離点における物体表面上の流速を0とするように渦糸を置くというKutta条件⁹⁾が利用でき、これを用いて渦糸の発生位置を決定した。

4) 算定結果: 前述の手法に基づいて一様流中の正方ひし形柱まわりの後流渦の数値シミュレーションを行なった。これを示すのが図4である。図において、●は負の循環を有する渦糸の位置を示し、×は正の循環を有するものを示す。なお、正方ひし形の全線素分數は $N=52$ で、非対称渦を発生させるため渦糸の発生するはく離点に相当するひし柱の角を図に、上側では曲率半径 $r=0.9\text{mm}$ の円弧で、下側では曲率半径 $r=1.0\text{mm}$ の円弧で近似した。図4より、渦のはき出しが物体の上下より交互に行なわれているのがわかり、上記してきたような手法に基づき、後流渦を含む任意形状物体まわりの流速をあらわすことが可能と考えられる。しかし、算定モデルにおいて流体力学的な乱数の効果は十分考慮されていないので、今後これらのことを実験的な検討を含めて、考慮していきたい。

【参考文献】 1) 今井功、流体力学(前編)、昭和48、11、P291。

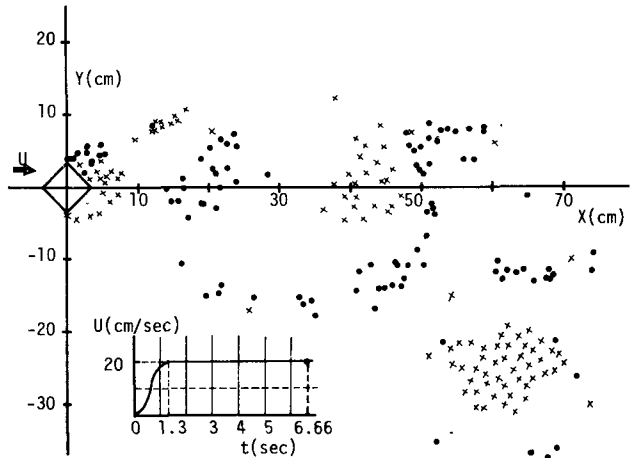


図4: 静止よりはじまる定常流中の正方ひし形柱まわりの渦糸の分布図