

表面渦度分布法に基づく任意形状物体に作用する流体力の算定法

愛媛大学工学部

正 員 中村孝幸

パシフィック コンサルタンツ (株) 正 員 ○久保達郎

若築建設 (株)

津野 修

1. まえがき：近年、振動流や波動流を対象として任意形状物体まわりの流れの解析が、わき出し分布法や表面渦度分布法¹⁾を用いて精力的に推められてきている。本研究は、物体表面上の渦層を表現するのに適している表面渦度分布法を採用し、従来十分に明らかにされていないこの解析法に基づく物体まわりの圧力分布や慣性力等の流体力の算定法について明らかにするものである。

2. 表面渦度分布法による算定法の概略：図-1に示すように無限流体中に任意断面を有する2次元物体が固定されており、これに一樣な非定常流れが作用する場合を考える。流体は非粘性、非圧縮性流体とする。この場合、物体まわりの複素速度ポテンシャル W_T は、表面渦度分布法によるならば式(1)のように表示できる。

$$W_T(x, y) = \{ \Phi_0(x, y) + i \Psi_0(x, y) \} + \{ \Phi_v(x, y) + i \Psi_v(x, y) \} \\ = \{ \Phi_0(x, y) + i \Psi_0(x, y) \} + \oint_S \gamma(X, Y) \{ G_p(x, y; X, Y) + i G_s(x, y; X, Y) \} dS(X, Y) \quad (1)$$

ここに Φ 、 Ψ は各々速度ポテンシャルおよび流れ関数を、下添字0、vは各々主流および物体の存在により現れる流れの量を表す。また $\gamma(X, Y)$ は物体表面上の点 (X, Y) における渦度強さ、 S は物体の断面曲線、 (x, y) は W_T を求めようとする点、 G_p 、 G_s はそれぞれ無限流体中の渦糸の速度ポテンシャル及び流れ関数を示すGreen関数を表し、式(2)、(3)で定義されるものである。

$$G_p(x, y; X, Y) = \tan^{-1} \{ (y-Y)/(x-X) \} / (2\pi) \quad (2)$$

$$G_s(x, y; X, Y) = -\log R / (2\pi) \quad (3)$$

$$(\text{ただし } R = \{(x-X)^2 + (y-Y)^2\}^{1/2})$$

そして式(1)中の未知関数 γ は、主流並びに表面渦度による流れの両者により物体の断面曲線の内側に誘起される接線方向速度が0であるという境界条件を用いて決定できる。この決定方程式は、図-1に示すように断面曲線を微小線素分の集合で近似し、各線素分内で一樣な渦度分布を仮定する中央点近似法を採用すると、式(4)のようになる。

$$\oint_S \gamma(X_j, Y_j) \cdot \delta_{ij} = -(U_{main} \cdot x_{s1} + V_{main} \cdot y_{s1}) \quad (i=1, 2, \dots, M) \quad (4)$$

ここに、 (U_{main}, V_{main}) は主流の流速ベクトル成分で、 δ_{ij} は式(5)で定義されるものである。

$$\delta_{ij} = \oint_{S_{ij}} \{ (x_i - X) y_{s1} - (y_i - Y) x_{s1} \} / (2\pi R^2) ds(X, Y) \quad (5)$$

また、 (x_{s1}, y_{s1}) は点*i*における線素分の単位接線ベクトル成分である。なお、式(5)の右辺の被積分関数は逆数型の特異関数になっているため、算定点 (x_i, y_i) が渦度をおく点 (X_j, Y_j) に近い場合には単に ΔS_j を乗ずる数値積分による算定では大きな誤差を生じる可能性があり、注意する必要がある。本研究では、この算定誤差を考慮して $R_{ij} < 3\Delta S_j$ の場合には、線素分 ΔS_j にわたる解析的な積分を行う方法を採用した。さらに鋭い隅角部をもった物体に対しても中央点近似法で精度よく算定できるようにするため $i=j$ の特異点の場合についてはLewis²⁾と同様に物体の断面曲線の曲率の効果をも考慮する算定法を採用している。

3. 物体に作用する流体力：(1)流体力の算定法；物体表面上の圧力 P は圧力方程式を介して求められる。

$$P(x, y) = -\rho \cdot \partial \Phi_T(x, y) / \partial t - \rho \{ u(x, y)^2 + v(x, y)^2 \} / 2 \quad (6)$$

ここに ρ は流体密度、 $\Phi_T = \Phi_0 + \Phi_v$ 、 (u, v) は物体表面上に誘起される流速ベクトル成分で式(4)より求めた γ を用いて算定できる。また、式(6)の右辺第1項は、式(1)を用いて次のように与えられる。

$$\partial \Phi_T(x, y) / \partial t = U_{main} \cdot x + V_{main} \cdot y + \oint_S \gamma_j \cdot g_{ij} \quad (7)$$

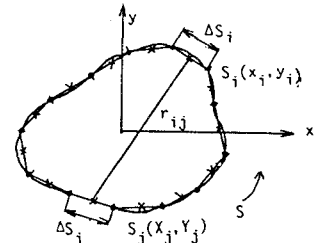


図-1 物体断面曲線の線素分への分割法および座標系

ここに、上付きの・は時間微分を、 g_{ij} は式(8)で定義されるものである。

$$g_{ij} = \int ds_j \tan^{-1}\{(y_i - Y)/(x_i - X)\} / 2\pi \, ds(X, Y) \quad (8)$$

なお g_{ij} の算定に当たり速度ポテンシャルの一価性を考慮してi点とj点とが一致するときのみ角度にして π だけの不連続性を許すが、その他の断面曲線上の点 (X_j, Y_j) に対しては g_{ij} の値が連続的に変化するように逆正接関数の主値範囲を与える必要があり、注意すべきである。

一方、式(8)における未知関数 φ_i は、前述した式(4)を時間微分した式(9)を解いて決定できる。

$$\begin{aligned} \rho \varphi_i \cdot \delta_{ij} = & -(\dot{U}_{Main} \cdot X_{Si} + \dot{V}_{Main} \cdot Y_{Si}) \\ & \quad (i=1, 2, \dots, M) \end{aligned} \quad (9)$$

また流体力Fは、上で求めたPを物体まわりに積分して算定できる。

(2)算定結果；以上の算定法に基づき、振動流中の物体に作用する非定常流体力を物体形状として円柱、矩形、平板、の3種類を対象にして求めてみた。そして算定法の妥当性を検証する目的から式(5)の δ_{ij} において曲率を考慮する場合としない場合の両算定を行い、解析解との比較を行って見た。図-2(a)~(c)は、上述した各種物体まわりの流体加速度に基づく圧力分布の算定結果を示す。これらの図より圧力分布の算定結果は、曲率を考慮すれば物体形状にかかわらず解析解にほぼ一致していることがわかる。そして特に、鋭い隅角部をもつ平板に対しては曲率を考慮した算定が是非必要になる

ものと言えよう。一方、表-1は、物体に作用する直方向力 F_x の算定結果を慣性係数 C_M で示す。そして表中には、解析結果及び本算定法より求めた φ を用いて非定常ブラジウスの公式により求めた C_M についても併せ示してある。この表より、表面渦度分布法に基づく本算定結果は圧力の場合と同様、解析結果とほぼ一致していることがわかる。また従来、算定が困難であった平板のような薄肉部材に対しても曲率を考慮した算定を行えばほぼ妥当な結果が得られるものと言えよう。

4. 結語：表面渦度分布法に基づき任意形状の物体まわりの圧力分布および流体力を算定するには、速度ポテンシャルの一価性や物体の断面曲線の曲率を考慮することなどが判明した。

(参考文献) 1) 中村孝幸, "薄肉部材まわりの波浪境界値問題に関する解析法", 第30回海工論文集, pp410~414, 1983.
2) 堀江隆二, "渦点法における物体に作用する流体力の一様式化", 日本航空宇宙学会誌, 第33巻, 第383号, pp728~734, 1985.

Exact Solution	—
Numerical Solution	曲率有 ○
	曲率無 ▲

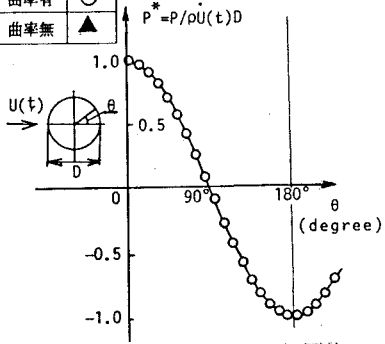


図-2 (a) 円柱

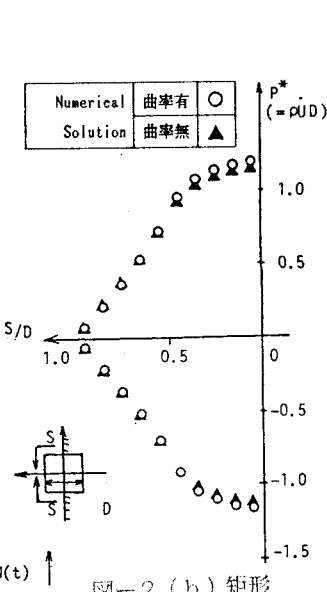


図-2 (b) 矩形

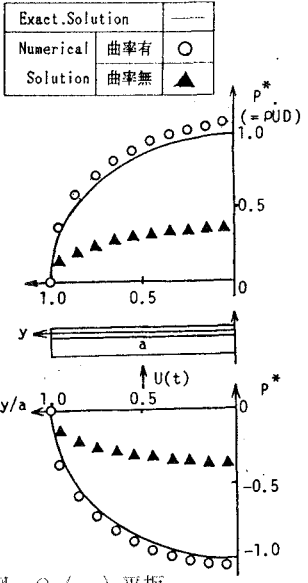


図-2 (c) 平板

図-2 物体まわりの圧力分布

表-1 各種物体の慣性係数 C_M の算定結果

物体形状	曲率	慣性係数 C_M		
		渦度分布	Blasius	解析解
円柱	考慮	1.981	1.972	2.000
	無視	1.963	1.936	2.000
矩形	考慮	2.178	2.180	2.190
	無視	2.106	2.065	2.190
平板	考慮	1.078	1.078	1.000
	無視	0.367	0.345	1.000