

石川島播磨重工業(株) 正 員 村田 眞司
 徳島大学工学部 正 員 宇都宮英彦
 徳島大学工学部 正 員 長尾 文明

1. まえがき 渦点法において、物体に作用する流体力およびモーメントを求める際に複素速度ポテンシャル f を用いて効率良く求めることが出来るBlasiusの公式が一般に用いられている。しかし、非定常流に拡張されたBlasiusの第2公式により物体に作用するモーメントを計算する際に、物体表面に沿う積分項が計算式中に残り、特異点分布法を併用した場合におけるこれらの処理が非常に困難になる。そこで、モーメントの定義にもどり、物体周りの流れの角運動量の変化を流れを表す渦点の位置と強さから求めることによりモーメントを求めることを試みた¹⁾。本研究では、このモーメントの計算式の物理的意味を示すとともに、この計算式の動的状態への適用性について、ねじれ1自由度振動する矩形($B/D=2.0$)断面に作用する空気力を渦点法を用いて求め、実験値と比較することにより検討する。

2. モーメントの計算式の物理的意味

本解析では、定常流におけるBlasiusの公式を新たに非定常流に拡張したEq. (1)を用いてモーメントを計算した。

$$M = \rho \operatorname{Re} \left\{ \sum_{k=1}^N \Gamma_k z_k \frac{dz_k}{dt} - U e^{-i\alpha} \sum_{k=1}^N \Gamma_k z_k \right\} \quad (1)$$

Eq. (1)において、 ρ : 密度、 Γ : 循環、 z : 渦点の座標、 U : 一様流速、 α : 迎え角、 N : 流体中に存在する全渦点個数を意味している。そこで、Eq. (1)の右辺の物理的意味を理解するために、各項をさらに具体的に計算した結果を次に示す。

① 右辺第1項について

$$\begin{aligned} \rho \operatorname{Re} \left(\sum_{k=1}^N \Gamma_k z_k \frac{dz_k}{dt} \right) &= \rho \sum_{k=1}^N \Gamma_k \left(x_k \frac{dx_k}{dt} + y_k \frac{dy_k}{dt} \right) = \sum_{k=1}^N \rho \Gamma_k \frac{1}{2} \frac{d}{dt} (x_k^2 + y_k^2) \\ &= \sum_{k=1}^N \frac{\Gamma_k / s_k}{2} (\rho s_k) \frac{d}{dt} (x_k^2 + y_k^2) = \sum_{k=1}^N \frac{\Gamma_k / s_k}{2} \frac{d}{dt} \{ (\rho s_k) (x_k^2 + y_k^2) \} = \sum_{k=1}^N \frac{\omega_k}{2} \frac{dI_k}{dt} = \sum_{k=1}^N \Omega_k \frac{dI_k}{dt} \end{aligned} \quad (2)$$

② 右辺第2項について

$$\begin{aligned} \rho \operatorname{Re} \left(U e^{-i\alpha} \sum_{k=1}^N \Gamma_k z_k \right) &= \rho U \sum_{k=1}^N \Gamma_k (x_k \cos \alpha + y_k \sin \alpha) = \rho \sum_{k=1}^N \Gamma_k \{ x_k (U \cos \alpha) + y_k (U \sin \alpha) \} \\ &= \rho \sum_{k=1}^N \Gamma_k \left(x_k \frac{dx_k}{dt} + y_k \frac{dy_k}{dt} \right) = \sum_{k=1}^N \frac{\Gamma_k / s_k}{2} \frac{d}{dt} \{ (\rho s_k) (x_k^2 + y_k^2) \} = \sum_{k=1}^N \frac{\omega_k}{2} \frac{dI_{k1}}{dt} = \sum_{k=1}^N \Omega_k \frac{dI_{k1}}{dt} \end{aligned} \quad (3)$$

式の変形において、 ω_k : 渦度、 $\Omega_k (=1/2 \omega_k)$: 渦点の角速度、 $s_k (= \Gamma_k / \omega_k)$: 渦点の断面積を表し、また、 z_k を渦点の座標、 ρs_k を渦点の質量と考えると、 $\rho s_k (x_k^2 + y_k^2)$ は渦点の慣性モーメント I_k を意味している。

ところで、流れの場に渦点しか存在しないとき、渦点は互いに生じ合う誘起速度により角速度 Ω が一定の回転運動(重心が回転中心)をするため、渦点の慣性モーメント I_{k2} 及び、角運動量 $I_{k2} \Omega$ は、時間に関係のない不変量であった²⁾。しかし、一様流が流れの中に新たに加わると、流れの状況は一変し、一様流速成分 U の影響を受けて渦点が後方に押し流され、結果的に渦点の回転中心からの距離が微妙にずれることになる。このずれにより渦点の慣性モーメント I_2 が変動しモーメントが生じるものと考えられる。

したがって、Eq. (2), (3) より得られるEq. (4)は、流れ全体の慣性モーメント I_k から一様流速による回転中心からの距離のずれ(慣性モーメント I_{k1}) を引くことにより、渦点の慣性モーメント I_{k2} の変動量を求めることを示している。

$$M = \sum_{k=1}^N \Omega_k \frac{d}{dt} (I_k - I_{k1}) = \sum_{k=1}^N \Omega_k \frac{dI_{k2}}{dt} \quad (4)$$

また、単位時間当たりの運動量の変化量が力と定義されるように、モーメントは単位時間当たりの角運動量の変化量として定義され、渦点の慣性モーメント I_2 及び渦点の角速度 Ω を用いてEq. (5)のように表される。

$$M = \sum \frac{d}{dt}(I_2 \Omega) = \sum \frac{dI_2}{dt} \Omega + \sum I_2 \frac{d\Omega}{dt} = \sum \frac{dI_2}{dt} \Omega \quad (\because \frac{d\Omega}{dt} = 0) \quad (5)$$

以上のことから、Eq. (4), (5)が同じ式になり、結局のところ、Eq. (1)は、渦点の角運動量（慣性モーメント）の変化率を計算することによってモーメントを求めることに他ならないと考えられる。

3. ねじれ振動中の物体に作用する空気力の推定

Fig. 1に解析断面の渦励振応答図³⁾を示す。この図において、横軸は風速を断面の固有振動数 f と桁高 D で基準化した無次元風速 U_r であり、縦軸はねじれ振幅を表している。本研究では、ねじれ渦励振のピーク応答値付近の無次元風速 $U_r = 7.87$ において図中●印にて示した解析ポイントを設け、加振振幅($A_m = 3 \sim 16(\text{deg})$)の変化に伴う空気力の変化を渦点法によって求めた。モーメント係数 C_M の振動変位に対する位相差をスペクトル解析(F.F.T)により求めた結果をFig. 2に示す。ねじれ振幅 A_m が8～9(deg)で位相差の符号が変化しており、位相差が正では励振力、負では減衰力として物体に作用していることがわかる。

Fig. 3に加振振幅 $A_m = 6, 8, 9, 16(\text{deg})$ におけるモーメント係数 C_M の履歴曲線を示す。図より加振振幅 $A_m = 9, 16(\text{deg})$ のとき、 C_M が反時計回りに変化し流体力が減衰力となるのに対し、加振振幅 $A_m = 6, 8(\text{deg})$ のとき、 C_M が時計回りに変化し流体力が励振力になっていることがわかる。さらに、この履歴曲線の囲む面積に位相差 β を $\sin \beta$ として乗じたモーメント係数 C_M の速度比例成分 C_{M1} を用いて、振動1サイクルにおいて物体に作用する空気力の仕事量 W_ϕ を求め、実際の構造減衰仕事 W_δ と比較した図をFig. 4に示す。図より、数値解析によって得られた物体に作用する空気力の仕事量 W_ϕ が、実際の風洞実験における構造諸元から求められる構造減衰仕事 W_δ と一致する振幅が常振幅となり、実験結果と良く対応している。

4. まとめ

渦点によって流れが精度良く再現されているならば、その流れを表す渦点の位置と渦点の循環を用いて物体まわりの角運動量の変化を計算することにより、簡単に物体に作用するモーメントを定量的に精度良く求めることができるものと考えられる。さらに、構造減衰による減衰力を考慮することにより、ねじれ渦励振応答も推定できる。

<参考文献>

- 1) 尾立, 他 : 第12回 風工学シンポジウム論文集、1992
- 2) 今井 : 流体力学（前編）、裳華房
- 3) 白石, 松本, 他 : Bluffな構造断面の空力不安定振動特性と防振対策に関する研究、
京都大学防災研究所、年報 第26号

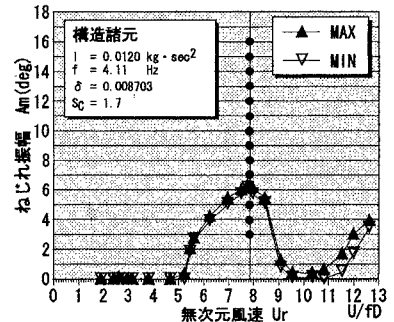


Fig. 1 B/D=2.0(矩形) 渦励振風速応答図

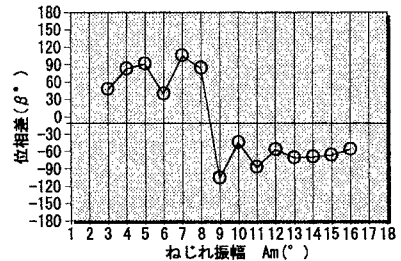


Fig. 2 C_M の振動変位に対する位相差

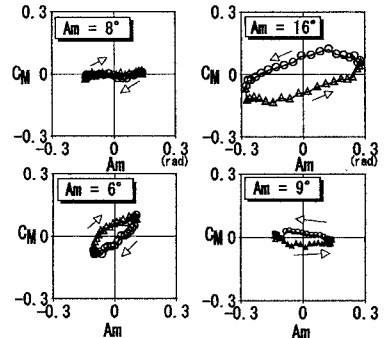


Fig. 3 モーメント係数 C_M の履歴曲線

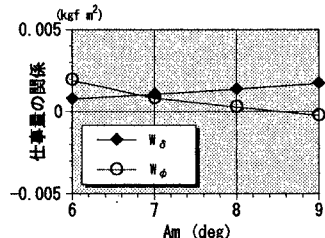


Fig. 4 空気力による仕事と構造減衰仕事