

水中において水平に回転する弾性アームに 作用する流体力

(第1報 共振時の流体抗力係数と渦発生周期を
求めるための代表速度)

川 島 豪

Fluid Forces on Flexible Arm Rotating Horizontary in Water
(1st report: Fluid Drag Force and Representative Velocity
for Frequency of vortex shedding at Resonance)

Takeshi KAWASHIMA

Abstract

Recently, a digital control problem of flexible mechanical system in robots or large structures has been important, and this problem has actively been studied and solved. Some of results have been turned to practical use. But digital control problem of flexible mechanism system in the sea is not simple for the added mass and the nonlinear fluid drag force, especially, in the case that the subject has the uniformless relative velocity distribution.

In this report, fluid drag forces on flexible clyndric arms rotating horizontary in water were measured with a strain gage pasted on the arm near the clamped end. At first, the fluid drag force coefficients of the arm rotating with constant speed were obtained focusing on the arm at resonance by the vortexes. And the arm representative velocity and position to obtain the frequency of vortex shedding were calculated with the arm natural frequency and the Strouhal number. As a result, it is found that vortexes generated near the arm top affect the arm resonance. Then the fluid drag force coefficients of the arm swinging sinusoidally were obtained, and it is found that the maximum speed of the arm affects the vortex generation.

1. は じ め に

ロボット, 宇宙構造物, 建築構造物などの弾性構造系のデジタル制御問題は, 近年重要性が増し, 研究・開発が盛んに行なわれている。その一部は徐々に実用化されてきている。しかし海洋におけるこの種の問題では, 付加質量や非線形な減衰力となる流体抗力などの流体力が複雑に絡み合い, 制御系の設計を難しくしている。特に弾性回転アームの場合, 流体との相対速度がアームの位置によって変化するため, 付加質量係数や流体抗力係数を一様な流れに垂直におかれた円柱の値で予測してよいのか, 渦の発生周期をどの位置の速

度で予測すべきかなどいろいろな問題がある。この種の問題では石綿¹⁾が流体中で旋回運動する円柱に働く流体力に関して研究しているが弾性アームに関しては無い。

そこで本研究では, 渦により共振している場合を中心に, 水中において水平に一定速度で回転する弾性アームに作用する流体力をアームの付け根付近に貼ったひずみゲージにより測定し, 流体抗力係数を求めた。そして, アームの固有振動数とストローハル数よりアームの代表速度を計算し, 共振時のアームの回転速度より代表速度を計算すべきアームの代表位置を求めた。また, アームを正弦波状に回転させ, そのときの流体抗力係数も測定した。

2. 実験装置・方法

実験装置の概略図を Fig. 1 に示す。タコジェネレータおよびロータリエンコーダ付き 200 W の DC サーボモータを下向きに架台に取り付け、径 22 mm のアルミニウム製の軸を軸継ぎ手を介してモータ軸につなげ、パイプを軸の下端に水平に回転するように取り付けた。そして、このパイプの固定端から 44 mm のところにひずみゲージを水平面内のアームのひずみを検出できるように垂直に貼り、直径 2 m、深さ 80 cm の水槽に沈めて弾性回転アームの模型を作成した。また、データの収集およびサーボモータへの回転速度の指令には、A/D 変換器、アップダウンカウンタ、D/A 変換器を内蔵したパソコンを使用した。動ひずみ計で増幅されたひずみゲージからの信号が A/D 変換器により取り込まれ、アームの変位に関するロータリエンコーダからの信号がアップダウンカウンタにより取り込まれるように測定回路を構成し、そして、D/A 変換器により送り出される速度信号によりサーボモータが回転するようドライバを配線して駆動回路を構成した。ドライバはタコジェネレータによるフィードバック回路を有する速度指令型のものを使用した。

実験はまず、空中においてアームの先端にかけられた荷重とそのときのひずみの関係を荷重を変化させて測定した。そして、アームを先端に集中荷重の作用する単純な片持ちはりと考え、荷重-ひずみ線図の傾きよりアームの縦弾性係数 E を求めた。

次に、水中でアームを一定の速度で回転させ、0.01 秒のサンプリングタイムでアームの変位とひずみを測定した。この実験を回転速度を変えて行い、ひずみと回転速度の関係を求めた。

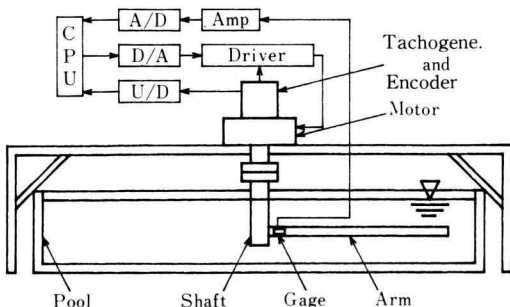


Fig. 1. Schematic illustration of experimental facility

さらに、0.01 秒のサンプリングタイムでアームを $\pi/8$ の振幅で正弦波状に水中で回転させ、アームの変位とひずみを振動数を変えて測定した。

以上の実験を表 1 に示す回転中心からの長さ ($L + \alpha$) が 800 mm と 700 mm のアルミニウム管と回転中心からの長さが 800 mm のステンレス管の 3 本のアームに関して行なった。ただし、 L はアームの固定端からの長さ、 α は回転中心からアームの固定端までの距離で $\alpha = 11$ mm である。

3. 結果および検討

測定された各アームの縦弾性係数を表 1 に示す。アームに使用されている材質の縦弾性係数とほぼ等しい値が得られた。

さらに、ひずみと回転速度との関係を整理したところ、ひずみは回転速度の二乗にほぼ比例することが明らかになった。そこで角速度 ω (rad/s) で回転しているアームを単純な片持ちはりとしてモデル化し、速度の二乗に比例する単位長さ当りの流体抗力

$$f_D(x) = 0.5 C_D \rho_w D \omega^2 (x + \alpha)^2 \quad (1)$$

をアームの固定端からの距離 x (m) における分布荷重として、実験により測定されたひずみより流体抗力係数 C_D を求める式を導いた。

$$C_D = \frac{3\pi E (D^4 - d^4)}{4\rho_w D^2 \omega^2 \{(L + \alpha)^3 (4x - 3L + \alpha) - (x + \alpha)^4\}} \epsilon \quad (2)$$

ここで、 ρ_w は水の密度である。そして、各回転速度における流体抗力係数を計算し、アーム先端における速度に関するレイノルズ数 $Re = \omega(L + \alpha)D/\nu$ (ν : 動粘性係数 (m^2/s)) との関係を求めた。その結果を Fig. 2 ~ 4 に○印で示す。横軸がレイノルズ数 Re 、縦軸が流体抗力係数 C_D である。渦の発生に共振してアームが上下方向に激しく振動するにつれて、流体抗力係数が

表 1. 実験用アームの寸法およびヤング率

材質	長さ L (mm)	外径 D (mm)	内径 d (mm)	線密度 ρ_p (kg/m)	縦弾性係数 E (N/m^2)
アルミ	689	19.0	16.8	0.157	6.33×10^{10}
アルミ	789	19.0	16.8	0.155	6.21×10^{10}
ステン	789	16.0	14.3	0.294	21.0×10^{10}

表2. 代表速度を計算すべきアームの代表位置

材質	長さ (mm) $L+a$	代表位置 (mm) x_r+a	$\frac{(x_r+a)}{(L+a)}$
アルミ	700	704	1.01
アルミ	800	785	0.98
ステン	800	782	0.98

1 付近から 2 近くまで大きくなることが明らかになった。

またこれらの図より、回転アームの速度は位置による異なるが、共振に寄与する渦の発生周期は回転速度に関係していることがわかる。そこで、ストローハル数 St より渦の発生周期を予測するための回転アームの代表速度を計算すべきアームの代表位置 (x_r+a) を次のように求めた。まずアームを単純な片持ちはりとして一次の固有振動数 f_n を次式のように求めた。

$$f_n = (1.8751/L)^2 (EI/\rho_p')^{1/2} / 2\pi \quad (3)$$

ただし、

$$\rho_p' = \rho_p + \rho_w d^2 \pi / 4 + C_m \rho_w D^2 \pi / 4,$$

I は管の断面二次モーメント、 ρ_p' は付加質量を含む管の単位長さ当りの水中での質量である。またここでの計算では、付加質量係数 C_m は理論解析で一般に用いられている値 $C_m=1$ を用いた。さらに、一様流中に垂直におかれた円柱に関するストローハル数

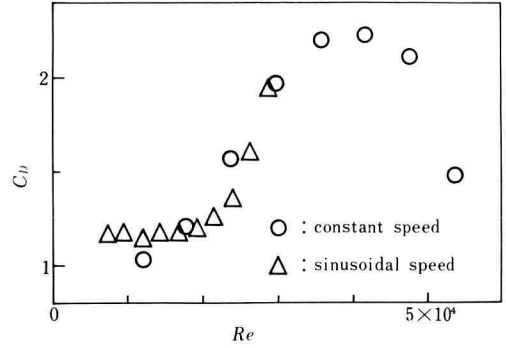
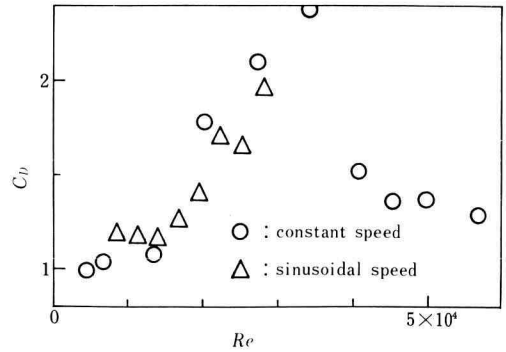
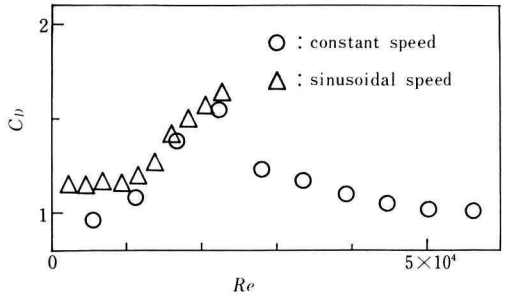
$$St = f_n D / \omega(x_r+a) = 0.21 \quad (4)$$

よりアームの固有振動数に等しい周期で渦が発生させる代表速度 $\omega(x_r+a)$ を求めた。そして、流体抗力係数が最も大きい共振時のアームの回転数 ω を用いてこの代表速度を計算すべき回転アームの代表位置 (x_r+a) を計算した。その結果を表2に示す。各位置での速度が異なる回転アームからどのような形の渦が発生しているかは不明であるが、アームの先端に発生した渦が共振に大きな影響を与えていることが明らかになった。

さらに、アームを正弦波状に回転させたときの実験結果を整理するために、管に作用する単位長さ当りの流体力を

$$f(x) = (\rho_p + \rho_w d^2 \pi / 4 + C_m \rho_w D^2 \pi / 4) \times (x+a) d\omega/dt + f_D(x) \quad (5)$$

と仮定し、アームに生ずるひずみ $\epsilon(t)$ に関する式を導

Fig. 2. Fluid drag force coefficient C_D (700 mm aluminium pipe)Fig. 3. Fluid drag force coefficient C_D (800 mm aluminium pipe)Fig. 4. Fluid drag force coefficient C_D (800 mm stainless steel pipe)

いた。

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) = & \frac{4C_D \rho_w D^2 \{(L+\alpha)^3(4x-3L+\alpha) - (x+\alpha)^4\}}{3\pi E(D^4-d^4)} \\ & \cdot |\omega(t)| \omega(t) \\ & - \frac{16\rho_p D \{(L+\alpha)^2(3x-2L+\alpha) - (x+\alpha)^3\}}{3\pi E(D^4-d^4)} \\ & \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} \end{aligned} \quad (6)$$

そして、付加質量係数 C_m を未知数とし、流体抗力係数 C_D をひずみ $\varepsilon(t)$ とアームの回転速度 $\omega(t)$ の関係より最小自乗法で計算し、アームの先端における最大速度より計算したレイノルズ数 Re との関係求めた。その結果を Fig. 2~4 に△印で示す。アームを一定速度で回転させた場合とほぼ同じ結果が得られ、渦の発生にはアーム先端の最大速度が大きく影響していることが明らかになった。

4. む す び

水中において水平に一定速度で回転する弾性アーム

に作用する流体力が、アームの付け根付近に貼ったひずみゲージにより測定され、渦によりアームが共振している場合を中心に流体抗力係数が求められた。そして、アームの固有振動数とストローハル数より渦の発生周期を求めるためのアームの代表速度が計算され、共振時のアームの回転速度より代表速度を計算すべきアームの代表位置が求められた。その結果、アームの先端に発生した渦がアームの共振に大きな影響を与えていることが明らかになった。また、アームが正弦波状に回転させられ、そのときの流体抗力係数も測定され、アームが正弦波状に回転させられる場合の渦の発生にはアーム先端の最大速度が大きく影響していることも明らかになった。

参 考 文 献

- 1) 石綿, 川口, 神奈川工科大学研究報告 B 理工学編 第 13 号 (1989), 19.