

振動流場における魚礁部材に作用する流体力

Fluid Force Acting on Artificial Reef Segment in Oscilating Flow

糸刈 長敬*・瀬戸 雅文**・中村 充**

Chokei Itosu, Masabumi Seto and Makoto Nakamura

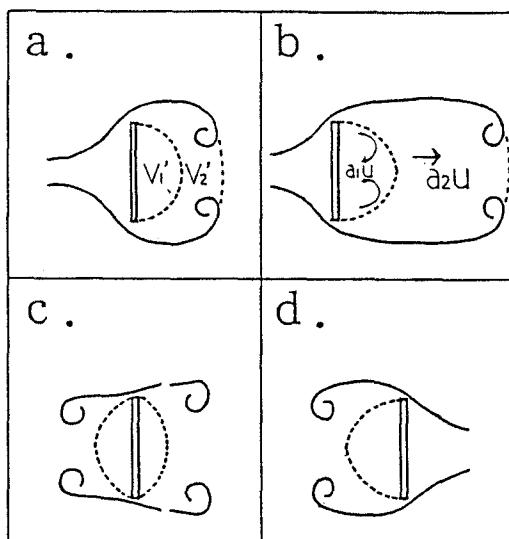
A theory for fluid force in oscilating flow is developed by using the concept of wake momentum change. The drag force component is introduced theoretically and the characteristics of the drag coefficient C_D are investigated. The coefficient C_D is given as $C_D = \alpha / (Kc^{1-n})$ in case of $Kc < Kc_0$, $C_D = C_{D0}$ in case of $Kc \geq Kc_0$, $n = 1 - \log(\alpha / C_{D0}) / \log(Kc_0)$, $\alpha = \alpha_0 (H/L)^m$, where $Kc (= u_m T/B)$ is K-C number, u_m ; maximum velocity of wave orbital motion, T ; wave period, B ; width of square plate, C_{D0} ; drag coefficient in case of steady flow, H ; wave height, L ; wave length. Model tests show that $\alpha_0 = 18.5$, $m = 0.28$, $Kc_0 = 10$ and $C_{D0} = 1.12$.

Keywords : Fluid force, Drag force, Wake Virtual mass

1. はじめに

流体中の物体の受ける力に関する研究は、多くの分野で古くから研究され、波を対象とした流体力も Morison-O'Brien¹⁾をはじめ多くの研究がある。流体力発生機構は流体と物体との間の粘性に起因する抗力（摩擦抵抗と圧力抵抗）と流れや物体が非定常運動を行なうことによって生じる慣性流体力（付加質量力、仮想質量力）とである。多くの場合、前者は実測によって抗力係数が議論され、後者はポテンシャル理論によって求めることが行なわれている。しかし、この現象は物体周囲の流れの状況、特に後流域の形式に大きく支配される。このため抗力についてはレイノルズ数の関数として、慣性流体力は測定とは異なるがポテンシャル流として扱われている。瀬戸らは²⁾慣性流体力をポテンシャル流として扱うことの非現実性に着目し、平板の背後に生じる反流域を付着後流域と定義し、その発達によって生じる慣性流体力を含めて仮想質量力を求めて普遍定数係数を求めている。またカルマンは物体の下流側に生じ、流下する剥離渦によって持ち去られる運動量から、粘性によらずに（剥離渦の発生は粘性によるが発生した後は非粘性：完全流体として扱う）抗力を求めることを試みた。本研究ではカルマンにならって流下後流の運び去る運動量が抗力を形成し、瀬戸らによる付着後流による運動量変化は慣性流体力に関与するとして検討する。特に本研究では振動流場で瞬間的に加速度が零となるときの抗力が定常流場における抗力とどのように異なるか、定常流場と同等と扱えるための条件はどのようなものかについて理論および実験によって検討する。

2. 理論



----- 付着後流 ———— 自由後流

図-1 板の前後面に生じる後流の模式図

容積 V の物体が流速 u の流体中を速度 U で運動する。このとき生じる後流は図-1に示すように付着後流 V_1' と自由後流 V_2' が生じる。 V_1' は物体 V と運動を共にする容積であり、 V_2' は物体から剥離して流下する周辺流体容積である。この運動によって周辺流体に与える運動量 M は、

$$M = C_w \rho (V + V_1' + V_2') (U - u) \quad (1)$$

ここに、 C_w ；付加質量係数に相当する係数、 ρ ；流体密度である。現象が非定常であれば、この M の変化の反作用として慣性流体力（付加質量力） F_1 を生じる。

$$F_1 = -C_w \rho \{ (V + V_1' + V_2') (\dot{U} - \dot{u}) + (U - u) (\dot{V}_1' + \dot{V}_2') \} \quad (2)$$

また、 V, V_1', V_2' にはその排除水容積が一般流 u と異なった運動となっていることから非定常流体力として、

$$F_2 = \rho (V + a_1 V_1' + a_2 V_2') \ddot{u} \quad (3)$$

*正会員 東京水産大学海洋生産学科(108 東京都港区港南4-5-7)

**正会員 福井県立大学生物資源学科

が発生する。ここに、 a_1, a_2 は無次元定数で a_1 は V_1' 内流れが反流速をもっていることから、 $a_1 > 1$ であり、これについては瀬戸らにより正方形板の場合 $a_1 = 1.56$ が得られている²⁾。 a_2 は V_2' 内流れが順流であることから、 $a_2 < 1$ である。 a_2 は後述のように非定常現象における抗力の形成に関与する。よって、この物体に作用する全慣性流体力 F は、

$$F = F_1 + F_2 \\ = \rho \{ (C_w + 1)V + (C_w + a_1)V_1' + (C_w + a_2)V_2' \} \dot{u} \\ + C_w \rho (\dot{V}_1' + \dot{V}_2') u - C_w \rho (V + V_1' + V_2') \dot{U} - C_w \rho (\dot{V}_1' + \dot{V}_2') U \quad (4)$$

従来の取扱いでは後流域を考えないから(4)式で $V_1' = V_2' = 0$ とおいて、慣性流体力は $C_w = C_{MA}$ であるから、

$$F = \rho (C_{MA} + 1) V \dot{u} - C_{MA} \rho V \dot{U} \quad (5)$$

であり、 $C_{MA} + 1 = C_M$ を仮想質量係数、 C_{MA} を付加質量係数と呼んで研究されている。

本研究は静止構造物に対する波力を対象として検討する。このとき、

$$U = \dot{U} = 0 \quad (6)$$

ここで、付着後流 V_1' および自由後流 V_2' の長さをそれぞれ ℓ_1, ℓ_2 として、

$$V_1' = K_1 A \ell_1, \dot{V}_1' = K_1 A \dot{\ell}_1, V_2' = K_2 A \ell_2, \dot{V}_2' = K_2 A \dot{\ell}_2 = K_2' A u^n \quad (7)$$

とおく。ここに、 A ；物体の流れ方向射影面積、 K_1, K_2 ；無次元形状係数（ V_1', V_2' が垂体の場合 $1/3$ 、柱体の場合 1 ）、 K_2' ； $\dot{\ell}_2 \propto u^n$ とおいたための有次元係数、 ℓ_1 については瀬戸らの詳細な研究があり、 $\ell_1 = 0 \sim 2.7B$ 、 $\dot{\ell}_1 = 1.94 u^{1/2}$ 、 B ；板の幅、 $\dot{\ell}_2$ は u の関数であり、その n 値として本研究でその値を検討する。(6),(7)の条件を(4)式に代入して

$$F = \rho \{ (C_w + 1)V + (C_w + a_1)K_1 A \ell_1 + (C_w + a_2)K_2 A \ell_2 \} \dot{u} + C_w \rho (K_1 A \dot{\ell}_1 + K_2 A u^n) u \\ = \rho \{ \{ (C_w + 1)V + (C_w + a_1)K_1 A \ell_1 \} \dot{u} + C_w K_1 A u \dot{\ell}_1 \} + \frac{1}{2} C_D' A \rho u^n u \quad (8)$$

ここに、 $C_D' = 2 K_2' \{ C_w + a_2 + \frac{K C_w}{n+1} \}$ 、 K ；流速 u に関する無次元積分定数である。

(8)式の右辺第1項は仮想質量力であり、第2項が抗力である。(8)式の仮想質量項について、瀬戸らは辺長 B の正方形板について、 $V = 0$ 、 $A = B^2$ 、 $K_1 = 2/3$ （付着後流形状を拋物面体として）、 $a = 1.56$ （後流の平板反流速比）として C_w は、 Re 数によらない普遍定数 0.8 を得ている。従って、本研究では(8)式第2項の抗力 F_D について主として検討する。

波運動について

$$F_D = \frac{1}{2} C_D' A \rho |u^n| u = \frac{1}{2} C_D A \rho |u| u \quad \left. \begin{aligned} C_D &= \frac{C_D'}{u^{1-n}} = \frac{\alpha}{\left[\frac{u_m T}{B} \right]^{1-n}} = \frac{\alpha}{K_c^{1-n}} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ここに、 u_m ；波の最大軌道水平流速、 T ；波周期、 K_c ；クーリガン・カーペンター数である。(9)式の第3式の表現はモリソン・オブライエンに準じた表式になっている。

3. 実験

実験は図-2に示すように、長さ28m、幅1m、深さ1.5mの波浪水槽を用い、受圧板は厚さ0.5cm、辺長 $B = 30$ cmの正方形アクリル板をステンレス製支持棒に取り付け、支持棒には歪ゲージをはり2組のブリッジボックスで支持棒の2ヶ所の歪を測定し、曲げモーメント成分を相殺して推力のみが測定されるようにしてある。また、アクリル板中心線上の上流側に容量式波高計および電磁流速計を設置して、波高、流速、波力を同時に測定した。図-3にビジコダによる記録の1例を示す。更に、アクリル板前後面に生じる後流を可視化するために、ウォーターブルーを定水頭ノズルから流し込んだ。設定波は周期 $0.8 \sim 3.2$ 秒の範囲で 0.1 秒毎に変化させ、各周期毎に波高を $2, 4, 6$ cmの3段階に変化させた。水深は 80 cmとし80ケースについて実験を行った。

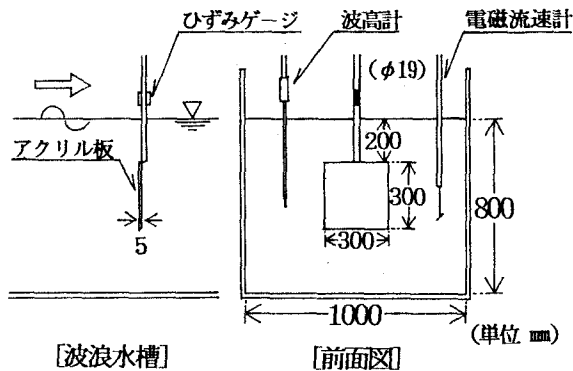


図-2 水理実験装置

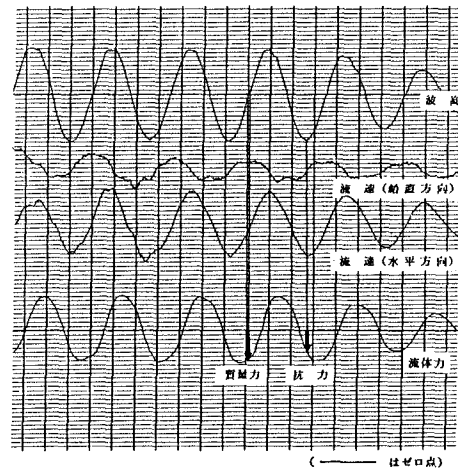


図-3 質量力の読み取り方

4. 実験結果とその考察

抗力および仮想質量力は図-3に示すように波の峰、および谷の位相で加速度零であり、これに対応する流体力を抗力とする。また、流速零で質量力だけが存在するとして抗力、質量力成分を分離する。実験結果を図-4に示す。図では波高 H は媒変数で示してある。これを波形勾配で無次元表示したものが図-5である。

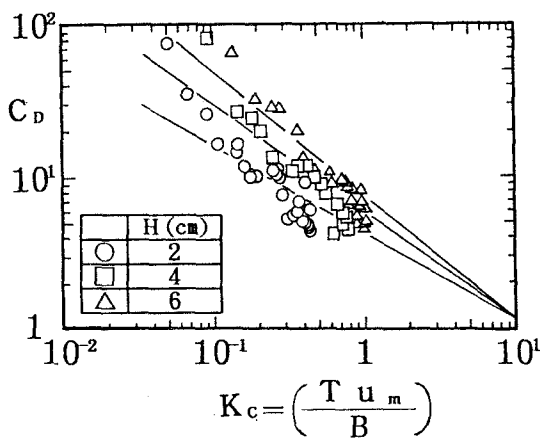


図-4 C_D の K_c 数による変化 (波高値で整理)

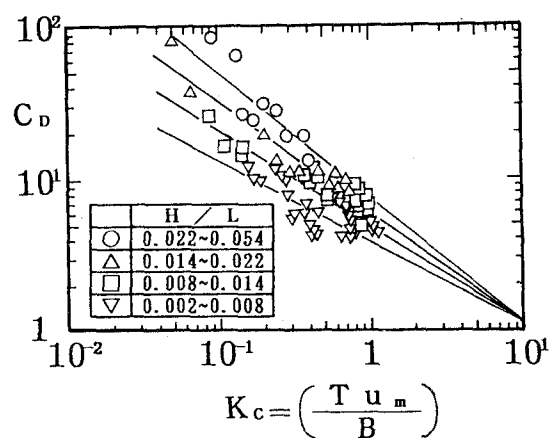


図-5 C_D の K_c 数による変化 (波高値で整理)

若干のバラツキはあるものの、図中の各線はほぼ1点に集まる。このときの K_c 数を K_{c0} (≈ 10.0) とすれば、 $K_{c0} \leq K_c$ に対し C_D は定常流下の C_D を用いてよいことが判る。 $K_c < K_{c0}$ に対し C_D は(9)式から

$$\ell_n C_D = \ell_n \alpha - (1 - n) \ell_n K_c \quad (10)$$

であり、両対数方眼上で右上がりの直線となり、実測値は(10)式の関係を満足することが判る。

K_{c0} に対応する C_D 値を C_{D0} で示すと、

$$n = 1 - \frac{\ell_n \frac{\alpha}{C_{D0}}}{\ell_n K_{c0}} \quad (11)$$

で求められる。また、 α は(10)式で $K_c = 1$ における C_{D1} で示される。 α と H/L の関係を図示すれば、図-6となる。図-6から、

$$\ell_n \alpha = \ell_n \alpha_0 + m \ell_n (H/L) \quad (12)$$

$$\alpha = \alpha_0 \left[\frac{H}{L} \right]^m$$

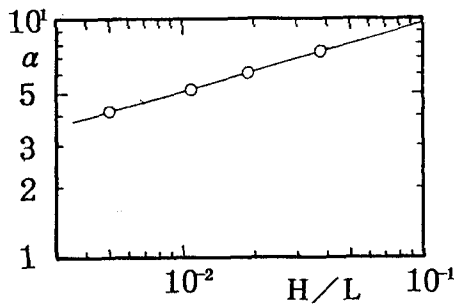


図-6 α と波形勾配との関係

なる関係がある。正方形板では図-6より

$$m=0.28, \quad \alpha_0=18.5$$

である。従って、実験における波形勾配 H/L を与えれば(12)式より α が、(11)式より n が求まり(9)式より K_c 数による抗力係数 C_D が計算される。

(K_{c0}, C_{D0}) = (10, 1.12) として(12), (11), (9)式より求めた計算値と実験値を対比したのが図-7である。ここに $C_{D0}=1.12$ は定常流における抗力係数である。計算値は実験値とよく一致していることが判る。

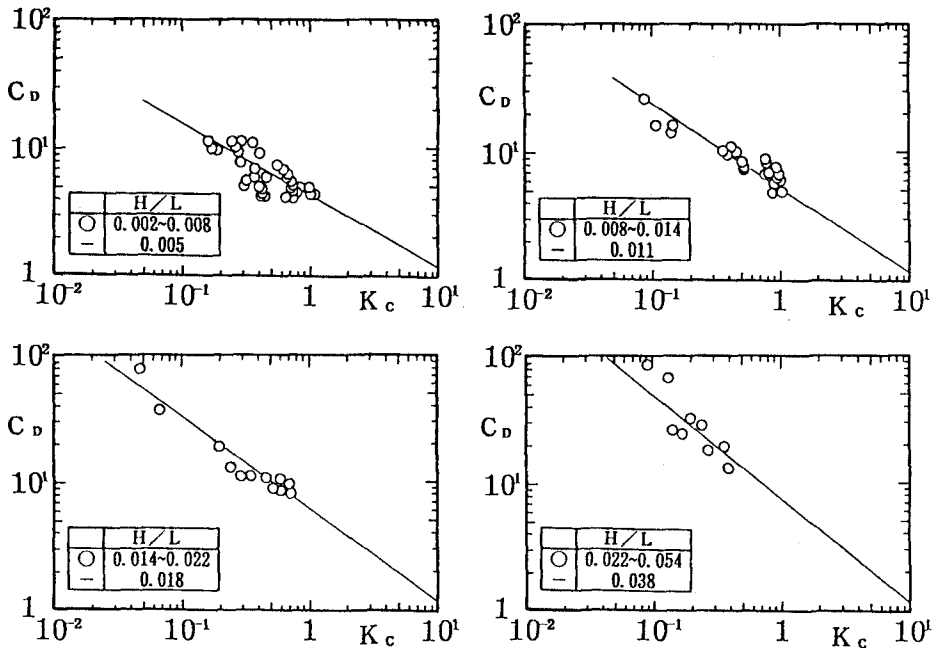


図-7 理論計算値と実験値との比較 ○：実験値 —：理論値

5. おわりに

振動流下の抗力について後流の現象を考慮した理論と実験から検討を試みた。抗力をMorison式と同型で与えた場合(9)式の抗力係数は $C_D = \alpha / K_c^{1-n}$ で与えられる。ここに、 K_c はクーリガン・カーペンタ数に相当する数であり、流速 u を B/T で無次元化したもので振動流の特性が含まれている。振動流中で生じる最大抗力に対する α は実験式(12)で示され、これを用いて自由後流の発達速度 u^n に関する n が(11)式で求められる。 n は1より小さい実数で、 $n=1$ は定常流となる。 α 、 n より振動流場における抗力係数が(9)式で求まる。

本実験で行なった正方形板の抗力については、 $\alpha_0=18.5$ 、 $m=0.28$ 、 $K_{c0}=10$ 、 $C_{D0}=1.12$ である。

$K_c = u_m T / B > K_{c0}$ で C_D は定常流の値 C_{D0} になり、正方形板でこの値が10ということは相当大的な構造板でない限り、定常流による抗力係数を用いてよいことになる。逆に定常流の抗力係数を用いることができないのは構造体が非常に大きい場合、あるいは水深が比較的大で $u_m T$ が小さい場合には定常流の抗力係数を用いることは危険側の扱いとなることに注意しなければならない。今後の問題として、ここでは α を実験式で与えたが、この理論的検討や正方形板以外の各種材料について同様の検証を行う必要がある。

最後に、当時東京水産大学学生、川島賢二君(現、東京都庁)には実験に御協力頂いた。また、東京水産大学学生、巻口範人君より図面作成、論文校正など多大な御協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Morison, J.R., Johnson, J.W., O'Brien, M.P., and Schaaf, S.A. 1950. The force exerted by surface waves on piles. Petroleum Trans., AIME, 189: 149~154.
- 2) 瀬戸雅文、糸淵長敬、中村充、田北博司, 1991. 平板背後に形成される後流域より発生する質量力, 海岸工学論文集, 38: 666~670.