

波と流れが共存する場における平面網地の流体力

誌名	日本水産学会誌
ISSN	00215392
巻/号	5711
掲載ページ	p. 2039-2043
発行年月	1991年11月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



波と流れが共存する場における平面網地の流体力^{*1}

傳 恩波, 梨本勝昭, 山本勝太郎, 平石智徳

(1991年5月24日受付)

Fluid Force on Plane Nets in Wave and Water Flow

En-Bo Fu,^{*2,3} Katsuaki Nashimoto,^{*2} Katsutarō Yamamoto,^{*2}
and Tomonori Hiraishi^{*2}

To know the drag coefficient and the added mass coefficient of plane nets in wave and water flow, the fluid force action on the plane nets were measured in a large fluid dynamical towing tank, the drag and added mass coefficients were calculated. The main results were as follows:

The drag coefficients and the added mass coefficients were derived from the wave and water flow which coexisted simultaneously. The relation between the drag coefficient and Reynolds number is shown along the same curve which were obtained in wave only and water flow only. The relation between added mass coefficient and KC number is also expressed along the same curve in wave only. In case of wave and water flow, the KC number becomes large, and so the mass force cannot be disregarded when calculating the fluid force acting on plane nets in wave and water flow that coexist simultaneously.

前報¹⁾において著者らは規則波中における平面網地に作用する波力について報告した。しかし、実際の海洋では単純に波だけが存在することは稀で、多くの場合は波と流れが共存する。したがって、波と流れが同時に網漁具に作用する時の流体力を正確に算定する必要がある。

波と流れが共存する場においては、波の水粒子速度と流れの水粒子速度とは相乗効果があるので、単純に波による力と流れによる力を加えたものより大きくなることが考えられる。波と流れが共存する場における流体力に関する研究は堀川ら²⁾の円柱に関する報告があるが網漁具に関するものは少なく、平面網地に作用する流体力を算定するための抗力係数と付加質量係数がまだ十分に明らかにされていない。そこで、本研究では平面網地を規則波中で曳航して流体力を測定し、波と流れが共存する場合の平面網地の抗力係数および付加質量係数を求めた。

流体力の算定式

Fig. 1 のように静止状態の水面を xy 平面とし、 x 軸を波および流れの方向にとり鉛直上向きに z 軸をとると、 $x=0$ の位置で波および流れに直角に設置した平面

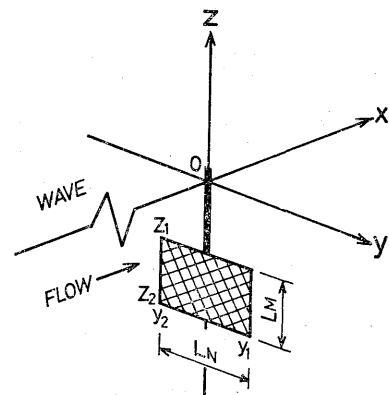


Fig. 1. Three dimensional coordinates and testing net set perpendicular to the wave direction and water flow.

網地の微小部分 $dydz$ に作用する水平方向 (x 軸方向) の流体力 dF は Morison 式³⁾ によって次式で表される。ただし、網地にあたる水粒子の速度は波による水粒子速度と流れによる水粒子速度とのベクトル和で与えられるものとする。

*1 平成2年度日本水産学会春季大会(東京)において口頭発表した。

*2 北海道大学水産学部 (Faculty of Fisheries, Hokkaido University, Hakodate 041, Japan).

*3 現住所: 北海道立工業技術センター (Present address: Hokkaido Industrial Technology Center, Hakodate 041, Japan).

$$dF = \frac{1}{2} \rho C_{HD} \lambda (u+U) |u+U| dy dz + \rho (C_{HM} + 1) l_d \frac{\partial(u+U)}{\partial t} dy dz \quad (1)$$

ここに

ρ : 水の密度

C_{HD} : 水平方向の抗力係数

λ : 網地面積中に占める網糸面積の割合

u : 波による水平方向の水粒子速度

U : 流れの速度

C_{HM} : 水平方向の付加質量係数

l_d : 見掛け上の網地の厚さ

$\frac{\partial(u+U)}{\partial t}$: 波による水平方向の水粒子速度

したがって、網地全体に作用する流体力 F は (1) 式を積分することによって求められる。ただし、(1) 式は絶対値 $|u+U|$ の項を含むから単純には積分することができず、次の二つの場合に分けて計算する必要がある。

1. 定常流が十分大きくどの位相 σt においても全水深にわたって $u+U$ が同符号となる場合には $(u+U)|u+U| = \text{sgn}(U)(u^2 + 2uU + U^2)$ となり、網地に作用する水平方向の全流体力は次式であたえられる。

$$F = \text{sgn}(U) \left[\frac{1}{2} \rho C_{HD} \lambda \int_{y_2}^{y_1} dy \int_{z_2}^{z_1} (u^2 + 2uU + U^2) dz + \rho (C_{HM} + 1) l_d \int_{y_2}^{y_1} dy \int_{z_2}^{z_1} \frac{\partial(u+U)}{\partial t} dz \right] \quad (2)$$

ここに、 $\text{sgn}(U)$ は U の符号を表す。

(2) 式の u に微小振幅波理論による浅海波の水粒子の速度と加速度を代入し、この定積分を求め整理すると次式を得る。

$$F = \text{sgn}(U) \left[\frac{1}{2} \rho C_{HD} L_N \lambda \left[\frac{\pi^2 H^2}{2T^2 \sinh^2(kh)} \times \left[\frac{1}{k} \sinh[k(h+z)] \cosh[k(h+z)] + (h+z) \right]_{z_2}^{z_1} \sin^2(\sigma t) - 2U \frac{\pi H}{T \sinh(kh)} \left[\frac{1}{k} \sinh[k(h+z)] \right]_{z_2}^{z_1} \times \sin(\sigma t) + U^2 L_M \right] - \frac{2\rho\pi^2 H (C_{HM} + 1) L_N l_d}{T^2 \sinh(kh)} \cos(\sigma t) \times \left[\frac{1}{k} \sinh[k(h+z)] \right]_{z_2}^{z_1} \right] \quad (3)$$

ここに

T : 波の周期

H : 波高

h : 水深

σ : 角振動数

k : 波数

L_N, L_M : 平面網地の長さと同幅

2. 定常流がそれほど大きくなくある位相 σt において水粒子速度の方向が逆転する水深が存在しその上下で

$u+U$ が異符号となる場合には、網地に作用する流体力は次式で表される。

$$F = \text{sgn}(U) \left[\frac{1}{2} \rho C_{HD} \lambda \int_{y_2}^{y_1} dy \left[\int_{z_2}^j (u^2 + 2uU + U^2) dz + \text{sgn}(u) \int_j^{z_1} (u^2 + 2uU + U^2) dz \right] + \rho (C_{HM} + 1) l_d \int_{y_2}^{y_1} dy \int \frac{\partial(u+U)}{\partial t} dz \right] \quad (4)$$

ここに j は水粒子速度 $u+U$ が逆転する z の値であり、次式で与えられる。

$$j = \frac{1}{k} \ln [p + \sqrt{p^2 - 1}] - h \quad (5)$$

ここに

$$p = \frac{UT \sinh(kh)}{\pi H \sin(\sigma t)}$$

(4) 式を計算し整理すると次式のようにになる。

$$F = \text{sgn}(U) \left[\frac{1}{2} \rho C_{HD} L_N \lambda \left[\frac{\pi^2 H^2}{2T^2 \sin^2(kh)} [A]_{z_2}^j + \text{sgn}(u) [A]_j^{z_1} \sin^2(\sigma t) - 2U \frac{\pi H}{T \sin(kh)} \left[[B]_{z_2}^j + \text{sgn}(u) [B]_j^{z_1} \right] \sin(\sigma t) + U^2 \left[[z]_{z_2}^j + \text{sgn}(u) [z]_j^{z_1} \right] \right] - \frac{2\rho\pi^2 H (C_{HM} + 1) L_N l_d}{T^2 \sinh(kh)} [B]_{z_2}^{z_1} \cos(\sigma t) \right] \quad (6)$$

ここに

$$A = \frac{1}{k} \sinh[k(h+z)] \cosh[k(h+z)] + (h+z)$$

$$B = \frac{1}{k} \sinh[k(h+z)]$$

である。(3) 式と (6) 式は $\sin(\sigma t)$ が 0 となる時には C_{HD} を含む項は消えて C_{HM} を含む項が残り、逆に $\cos(\sigma t)$ 項が 0 となる時には C_{HD} を含む項が残る。したがって、この時の波力を測定すればこれらの関係を利用して波と流れが同時に作用する時の平面網地の抗力係数および付加質量係数が求められる。

材料および方法

実験は北海道大学水産学部の大型水理実験水槽 (長さ 50 m, 幅 3.5 m, 深さ 1.8 m, フラッター型の規則波発生装置付き) で行った。Fig. 2 に示すように水路上縁のルール上を自走する台車に取り付けた三分力検出計の下に網地を張った枠を支持棒を介して波の進行方向に直角に設置した。また、容量式波高計をこの網地のすぐ側と網地から 1.36 m 離れたところに設置した。この二つの波高計で記録した波形の位相差から波長を読み取った。実験時の水深は 1.26 m であった。

実験時の波の周期を 1.1~2.2 秒までの 5 段階に設定

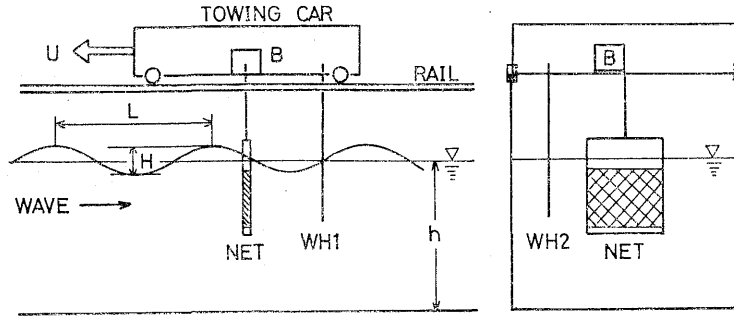


Fig. 2. Large fluid dynamic towing tank.
 WH 1,2: Wave height sensors.
 B: 3-Component balance.

した。測定は各周期ごとに台車の曳航速度（台車の曳航速度を流速と呼ぶ）を 20, 30, 40 cm/s に変化させた。波高は 9.2~26.1 cm, 波長は 254~661 cm の範囲で行った。使用した波および流速の諸元を Table 1 に示す。

実験に使用した平面網地は Table 2 に示す直径 d と脚長 l の異なる 5 種類の貫通式無結節網地である。これらの網地に縮結 2.93 割を入れ網目を正方形に開き、前報¹⁾ で使用した網枠に大きさ $50 \times 50 \text{ cm}^2$ の網地を張り付けて、波の進行方向および流れに直角に設置した。網地に作用する流体力は三分力検出計を使って測定した。データの処理は HP-82901 コンピュータを使用した。網地に作用する流体力を測定する前に、枠と支持棒に作用する流体力を測定し実際の測定ではこの分を差引いて網地に作用する流体力とした。

また、水槽で波を起こさない状態で網地を曳航して流体力を計測しこれから抗力係数を求め、波と流れが共存する場で求めた抗力係数と比較した。

結果および考察

平面網地について測定するのに先立って本測定の基本的な考え方や実験装置の適合性を検討するために、直径 11 cm の球体を使用して波と流れが共存する場合の流体力を計測し球の付加質量係数を求めた。その結果得られた付加質量係数 C_{AM} と KC 数との関係を Fig. 3 に示

Table 1. Experimental condition of wave and water flow

Period T (s)	Wave length L (cm)	Wave height H (cm)	Wave steepness H/L ($\times 10^{-2}$)	Current speed U (cm/s)
1.1	254	26.1	10.3	20
				30
				40
1.3	280	23.9	8.5	20
				30
				40
1.5	312	20.3	6.5	20
				30
				40
1.8	540	16.5	3.1	20
				30
				40
2.2	661	9.2	1.4	20
				30
				40

す。ここに KC 数は次式で求めた。

$$KC = \frac{(u_{max} + U)T}{D} \quad (7)$$

u_{max} : 球の中心の深さにおける波による水粒子速度の最大値

D : 球の直径

図から明らかなように波と流れが共存する場合には KC 数が大きくなると付加質量係数 C_{AM} は小さくなる

Table 2. Details of knotless nets (Japanese type) used in experiments

No.	Diameter of twine d (mm)	Mesh size $2l$ (mm)	d/l	Volume (cm ³)	Materials
1	6.4	70	0.18	271.6	Polyethylene
2	5.4	90	0.12	150.3	"
3	1.5	28	0.11	37.5	Polyester
4	1.7	44	0.08	27.4	"
5	1.7	76	0.05	15.7	"

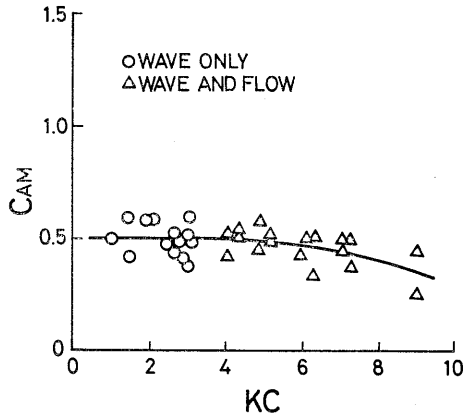


Fig. 3. Relationship between the added mass coefficient (C_{AM}) of sphere and KC number in wave only and in wave and flow.

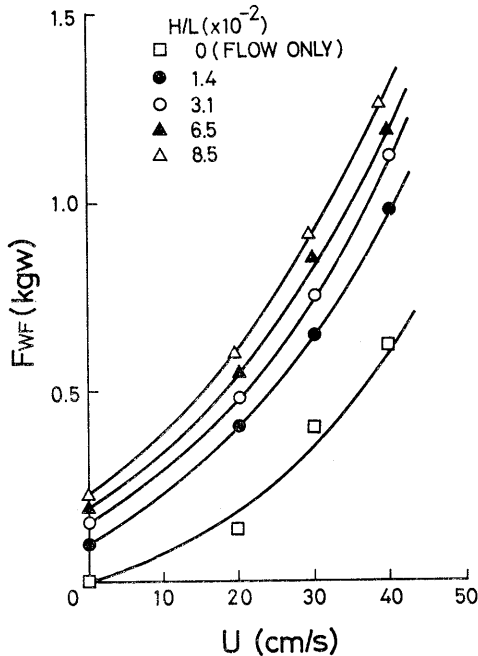


Fig. 4. Relationship between fluid force acting on plane net (No. 3) and the velocity of water flow.

傾向を示すが、波だけの場合にはほぼ 0.5 となっておりポテンシャル理論による値と良く一致する。したがって、本研究の計算式や実験装置には問題がないものと考えた。

Fig. 4 は平面網地 No. 3 について実測した流体力を波形勾配別に示したものである。流体力は流速が増加すると大きくなり、波のある場合はない場合よりも大きく、また波形勾配が大きいほど大きくなる。この事は他

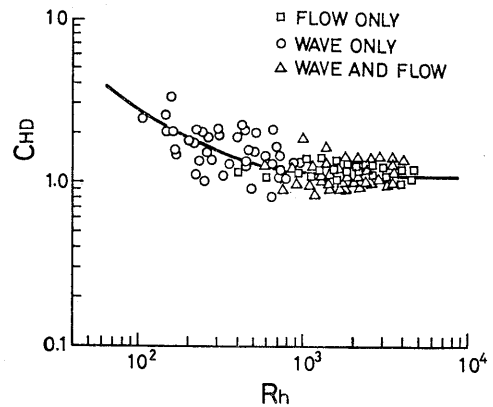


Fig. 5. Relationship between drag coefficient (C_{HD}) and Reynolds number (R_h) on plane net in flow only, wave only and in wave and flow.

の 4 つの網地についても同じであった。

抗力係数 C_{HD} 抗力係数 C_{HD} とレイノルズ数 R_h との関係を図 5 に示す。図中の □ 印は流れのみの場合で、平面網地を曳航方向に直角に設置し一定の速度で曳航した時の抗力係数である。○ 印は波のみの場合である。実験におけるレイノルズ数の値は波のみの場合がほぼ $10^2 \sim 10^3$ の範囲にあり、また流れのみの場合はその主たる範囲が $10^3 \sim 5 \times 10^3$ にあったので、両者の重なる部分は少ないが、図から明らかなように、両者の抗力係数はレイノルズ数に対して一続きの連続した値をとるものを見ることができる。波と流れが共存する場合の抗力係数は、(3) 式および (6) 式において $\cos(\sigma t) = 0$ となる時に質量力項が 0 となることから求め、この結果を図中に △ 印で示した。ただし、この場合のレイノルズ数は次式により求めた。

$$R_h = \frac{(u_m + U)h_e}{\nu} \quad (8)$$

$$u_m = \frac{1}{L_M} \int_{z_2}^{z_1} u_{z \max} dz \quad (9)$$

$$h_e = \frac{S_1(1-\phi)}{4l} \quad (10)$$

ここに、 ν は水の動粘性係数、 S_1 は網地 1 目の面積、 $u_{z \max}$ は深さ z の位置の波による水粒子速度の最大値、 ϕ は 1 目に占める網糸面積の割合である。

同図から、波と流れが共存する場合の抗力係数 C_{HD} は、その実験値が波のみの場合および流れのみの場合と同じ曲線上に分布し、これら三つの抗力係数は一つの $C_{HD}-R_h$ 曲線で表される事が分かる。

付加質量係数 C_{HM} 波と流れが共存する場合の付加質量係数 C_{HM} は、(3) 式および (6) 式において $\sin(\sigma t) = 0$ となる時には U^2 の項と質量力項だけが残り、さら

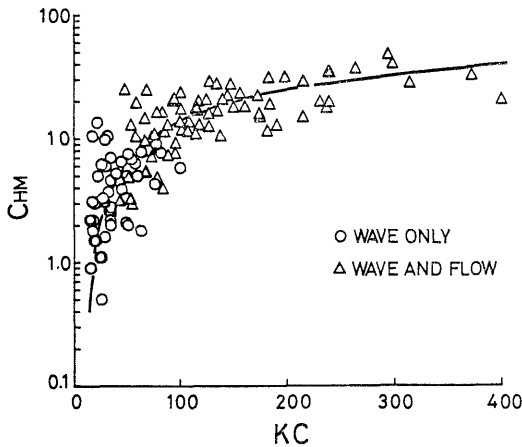


Fig. 6. Relationship between added mass coefficient (C_{HM}) and KC number on plane net in wave only and in wave and flow.

に U^2 の項を引くと質量力だけとなることから求めた。なお、 U^2 の項の値は全流体力を一周期にわたり平均する事によって求めこの値を $\sin(\sigma t)=0$ となる時の流体力から減じて質量力とした。Fig. 6 に付加質量係数 C_{HM} と KC 数との関係を示す。ここに KC 数は次式により求めた。

$$KC = \frac{(u_m + U)T}{h_e} \quad (11)$$

図から分かるように、波と流れが共存する場合の付加質量係数は波のみの場合の付加質量係数とほぼ同じ $C_{HM}-KC$ 曲線上にある。前報¹⁾ では本報とは異なる小型の造波水槽を使用して波のみの場合の付加質量係数を求めた。この結果と本報の結果を一緒にして同一図面に描いたのが Fig. 7 である。図から明らかのように、前報¹⁾ の結果も同じ $C_{HM}-KC$ 曲線上に乗り水槽の違いは見られなかった。また、同図に描いた Keulegan and Carpenter⁴⁾ が求めた円柱と平板の $C_{HM}-KC$ 曲線と比較すると、平面網地の付加質量係数はこの曲線とほぼ同じ変化傾向を示す事が分かる。

これまで平面網地に作用する流体力を算定する時はほとんどの場合質量力を無視して計算するのが普通であるが、本研究の結果から KC 数が大きい場合には付加質量係数も大きくなるので質量力を無視する事ができない。

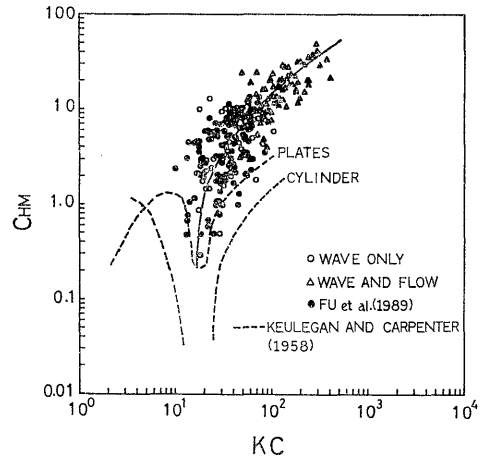


Fig. 7. Relationship between added mass coefficient (C_{HM}) and KC number on plane net in wave only and in wave and flow. Dark circles represent the results of Fu *et al.* (1989). Broken lines represent the results of plate and cylinder by Keulegan and Carpenter (1958).

特に、波と流れが共存する場合の KC 数は波のみの場合より遙かに大きくなる。例えば、網糸の直径 3 mm、目合 60 mm とし、波の周期を 10 秒、波長を 150 m、波高を 3 m、水深を 40 m、潮流速を 1.5 ノットとした場合の KC 数を試算すると 2.77×10^3 となり、Fig. 7 からこの時の付加質量係数を推定すると 100 近くになる。したがって、波と流れが共存する場における平面網地に作用する流体力を算定する時には質量力を十分考慮しなければならない。

文 献

- 1) 傅 恩波, 佐藤 修, 梨本勝昭, 山本勝太郎: 日水誌, **55**, 65-70 (1989).
- 2) 堀川清司, 水口 優, 北沢 修, 柳本泰伴: 第 23 回海岸工学講演論文集, 39-44 (1976).
- 3) J. R. Morison, J. W. Johnson and M. P. O'Brien: *Proc. 4th. Conf. on Coastal Engineering*, 340-370 (1958).
- 4) G. H. Keulegan and L. H. Carpenter: *J. of Res. National Bureau of Standards*, **60**, 423-440 (1958).