流線形枠による流れに平行な網地の抵抗の測定

王 尔光, 松田 皎

(1987 年 8 月 12 日受理)

Measurements of the Drag of Plane Netting set Parallel to a Water Flow in a Streamlined Frame

Er-guang Wang*¹ and Ko Matuda*²

By using a specially designed streamline frame, the drag of netting parallel to a water flow was measured at a range of values of mesh angle ϕ , i.e. the half angle between two adjacent bars. The friction drag coefficient C_f of netting parallel to a flow based on the area of netting varies considerably with the ratio of twine diameter D to bar length L , i.e. D/L , and the mesh angle, while it decreases very slightly with increase the Reynold's number based on the length of netting. At constant mesh angle, C_f increased linearly with the ratio D/L . The drag coefficient C_f was found to be constant over a range of either D or L , when both the ratio D/L and the mesh angle ϕ were kept constant. Varying the mesh angle ϕ for the same netting, C_f decreased slightly with increasing ϕ up to angles between 20° and 30° , but above 30° C_f increased considerably with ϕ . From these experimental results, excepting angles below 20° , the following formula for friction drag coefficient C_f was derived

$$C_f = 0.11 \sqrt{(D/L) \tan \phi}.$$

前報¹⁾において著者らは、流れに平行な網地の抵抗測定法に関して、流線形のストラットを組合せた網枠を用いる新しい方法を提案した。この方法によると網地抗力に及ぼす後流の影響が極めて小さいことを明かにした。さらに、従来の円柱方形枠を用いた場合と比較して計測精度ははるかに高まることが確かめられた。

本研究では、この流線形枠を用いて、種々の網地の縮結角をいろいろ変えたものについて、網地面を流れに平行に置いた場合の抗力を計測し、得られた結果から、抵抗係数に関する実験式を求めた。

実験方法

実験は網糸直径 (D)、脚長 (L)、 D/L 、縮結角 (ϕ) および結節種類の 5 シリーズに分けて実施した。実験に用いた網地材料の諸特性範囲はそれぞれ、網糸直径は 0.36-1.90 mm、脚長は 5.1-45.9 mm、 D/L は 0.04-0.12、縮結角は 10° - 80° であった。使用した網地材料はナイロン、ポリエチレンおよびポリエステル の 3 種類であるが、今回の実験では材料間の比較は特に行わなかった。また結節は蛙又と無結節とで比較した。

本実験に使用した材料の詳細を Table 1 に示す。ここで網糸直径 D と脚長 L の値は、それぞれ 20 個所の計

測値の平均値であるが、網地を枠に取付けた後湿潤状態において、直径は光学的方法により、また脚長は物差により計測した。網地の枠への取付は、計測中の網地の変形を避けるため、強く張ったことから、JIS 基準による値より直径は約 5% 小さく、脚長は約 11% 大きくなった。

網地の網糸密度 α 、抗力係数 C_D および摩擦係数 C_f は前報¹⁾ の定義に従い、次式により算出した。

$$\alpha = \left(\frac{D}{L} \right) \frac{1}{\sin \phi \cos \phi} \quad (1)$$

$$C_D = \frac{2R}{\rho \alpha S V^2} \quad (2)$$

$$C_f = \frac{2R}{\rho S V^2} \quad (3)$$

ここで、 R は網地の抗力で全抗力より枠の抗力を差引いた値である。 S は網地面積、 V は流速、 ρ は水の密度である。

抗力と流速の計測方法を Fig. 1 に図示する。抗力は動ひずみ型三分力検力計を用いて、デジタルポルトメータで検出した。その計測値はペンレコーダに記録して 5 分間の平均値を用いた。流速はプロベラ式流速計を網枠の上流 50 cm、水深 30 cm の位置に置いて計測したが、抗力計測時は計測値への影響を避けるため水面上に引き

*¹ 大連水産学院 (Dalian College of Fisheries, Dalian, China).

*² 東京水産大学 (Tokyo University of Fisheries, Konan 4, Minato, Tokyo 108, Japan).

Table 1. Characteristics of the netting used and the mean values of drag coefficient measured in the experiment.

Netting No.	Twine diameter D (mm)	Bar length L (mm)	Ratio of D/L	Mesh angle ϕ (deg)	Mesh factor α	Kind of knot	Twine materials	Mean value of C_f	Mean value of C_D
230	0.36	5.95	0.0605	45	0.121	SB	PA	0.0253	0.2091
245	0.38	4.02	0.0940	45	0.188	SB	PA	0.0336	0.1786
330	0.41	5.86	0.0704	45	0.141	SB	PA	0.0276	0.1959
415	0.45	11.60	0.0388	45	0.078	SB	PA	0.0220	0.2836
228	0.49	6.25	0.0780	45	0.157	SB	PA	0.0309	0.1972
430	0.49	6.02	0.0814	45	0.163	SB	PA	0.0308	0.1893
432	0.47	5.63	0.0835	45	0.167	SB	PA	0.0302	0.1809
435	0.47	5.10	0.0925	45	0.185	SB	PA	0.0333	0.1798
628	0.59	6.15	0.0956	45	0.183	SB	PA	0.0346	0.1811
630	0.60	5.81	0.1033	45	0.207	SB	PA	0.0349	0.1692
2410	1.16	18.1	0.0641	45	0.128	SB	PA	0.0287	0.2239
2422	1.20	12.0	0.1010	45	0.200	KL	PA	0.0367	0.1835
1610	1.00	17.2	0.0581	45	0.116	KL	PES	0.0242	0.2081
1417	0.91	9.19	0.0990	45	0.198	KL	PES	0.0330	0.1666
6090	1.90	45.9	0.0410	45	0.083	KL	PES	0.0227	0.2745
911	0.70	16.2	0.0432	10	0.253	SB	PE	0.0200	0.0794
911	0.70	16.0	0.0437	20	0.136	SB	PE	0.0150	0.1100
911	0.70	16.2	0.0433	30	0.100	SB	PE	0.0164	0.1636
911	0.70	16.3	0.0429	45	0.086	SB	PE	0.0235	0.2741
911	0.70	15.9	0.0439	60	0.102	SB	PE	0.0332	0.3265
911	0.70	15.8	0.0440	70	0.138	SB	PE	0.0440	0.3201
911	0.70	15.7	0.0446	80	0.261	SB	PE	0.0591	0.2265
930	0.70	6.05	0.1157	20	0.360	SB	PA	0.0330	0.0918
930	0.69	6.01	0.1148	30	0.263	SB	PA	0.0310	0.1168
930	0.70	5.92	0.1187	45	0.238	SB	PA	0.0422	0.1176
930	0.70	6.06	0.1156	60	0.267	SB	PA	0.0493	0.1848
930	0.70	6.02	0.1163	70	0.362	SB	PA	0.0593	0.1640

SB=sheet bend, KL=knotless, PA=polyamide, PES=polyester and PE=polyethylene.

Fig. 1. Schematic diagram of measuring system. The current meter is lifted above the water surface during drag measurement.

上げた。流速は 10 分間の平均値を用いた。実験はすべての網地に対して、流速を 20-130 cm/s の範囲で 10 cm/s ごとに 12 段階に変えて実施した。実験は東京水産大学回流水槽（観測部長さ 7 m, 水路幅 1.45 m, 水深 1.2

m) で、1986 年 1 月から 3 月にかけて実施した。この期間、水温は約 9-10°C であった。

結果および考察

摩擦係数 C_f とレイノルズ数 R_L との関係 摩擦係数 C_f と網長さを基準とするレイノルズ数 R_L との関係をみる。 R_L は前報¹⁾の定義により

$$R_L = \frac{l_n V}{\nu} \quad (4)$$

で表わす。ここで l_n は流れ方向の網地長さ、 ν は水の動粘性係数である。

網長さを変化させた場合の C_f の変化については、一部前報¹⁾に報告したように、網地長さによって著しい差異は認められなかったことから、今回の実験はすべて網長さは 1 m に統一した。

Fig. 2 に各種網地および縮結角に対する C_f と R_L との関係を示す。図中、数字は網地番号、カッコ内は縮結角 ϕ の値である。ここで網地 No. 911 (45) の場合は、網地長さ 44 cm および 72 cm の資料を含む。

Fig. 2. Relation between the friction drag coefficient C_f and Reynold's number R_l . The number against each line indicates the number of the netting sample and the number in parentheses is the mesh angle ϕ , i.e. the half angle between two adjacent bars.

Fig. 3. Relation between the drag coefficient C_D and the Reynold's number R_d . The number against each line indicates as Fig. 2.

Fig. 2 より、 C_f の値は網地の種類、縮結角により大きく変化するが、レイノルズ数 R_l に対してはその変化は小さいことがわかる。ここで C_f が R_l の指数関数 R_l^n に比例すると仮定して、最小自乗法により n の値を求めると、 n の範囲は -0.197 から $+0.080$ で、それらの平均値は $n = -0.073$ であった。

Revin²⁾ は、長さの異なる流れに平行な網地の抗力測定より、抵抗係数が網地長さの -0.14 乗に比例することを報告している。このことは、流れに平行な網地の抗力が、網地長さには比例せず、わずかながら抵抗係数が網地長さに応じて減少することを意味している。彼の得た値は、本研究の記号を用いると $n = -0.14$ に相当すると考えられるので、今回得られた結果は、 n の絶対値と

してはその約半分となる。しかし、両者の実験を行った R_l 数範囲も異なることから、直接の比較は困難である。

抗力係数 C_D とレイノルズ数 R_d との関係 抗力係数 C_D の場合は、前報¹⁾ に従いレイノルズ数として網糸直径 D を基にした

$$R_d = \frac{D V}{\nu} \quad (5)$$

を用いた。実験により得られた C_D と R_d との関係は Fig. 3 に示す。ここで数字、記号などは Fig. 2 に準ずる。この場合も前項と同様、網地種類、縮結角による差異は大きい、 C_D の R_d による変化は極めて小さい。 C_f の場合と同様に、 C_D を R_d の指数関数とみなして、指数 n の値を求めると、それらは -0.190 から $+0.081$

Fig. 4. Relation between the drag coefficient C_D or C_f and the bar length L , when the mesh angle $\phi=45^\circ$ and D is nearly constant.

Fig. 5. Relation between the drag coefficient C_D or C_f and the twine diameter D , when $\phi=45^\circ$ and L is nearly constant.

の範囲で、平均は $n=-0.080$ であった。この値は C_f の場合とほぼ等しい結果である。

以上の結果より、 C_f および C_D ともに、レイノルズ数による変化は極めて小さいことから、以後の解析では、レイノルズ数による変化は無視して、各場合の平均値を用いる。これら C_f および C_D の平均値を Table 1 に示す。

網糸直径が一定のときの抵抗係数の脚長による変化
網糸直径 D がほぼ同じでかつ縮結が一定の網地において、脚長 L のみが変化するような網地の間で、 C_f 、 C_D がどのように変化するかを調べた。Fig. 4 は C_f 、 C_D と L との関係である。直径 D は $0.45-0.49\text{ mm}$ の範囲にあるが、実際は同一デニール同一本数で構成されている網糸であることからこれらを同一と見なすと、 D および ϕ が等しい場合、 C_D は L の増大に対しほぼ直線的に増大するのに対し、 C_f は減少の傾向を示している。

脚長一定のときの抵抗係数の網糸直径による変化 は

Fig. 6. Relation between the drag coefficient C_D or C_f and the bar length L or the twine diameter D , when $\phi=45^\circ$ and the ratio D/L is nearly constant.

ば脚長および縮結が一定の網地で、網糸直径のみを変えた場合の C_f 、 C_D の変化を調べた。Fig. 5 は C_f 、 C_D の直径 D に対する変化である。この場合も脚長 L は $5.8-6.0\text{ mm}$ の範囲であるが、これらを同一とみなすと、 L および ϕ が一定の場合は、 C_f は D に対しほぼ直線的に増加するのに対し、 C_D は D と共に減少傾向を示す。

D/L が一定のときの抵抗係数の脚長、網糸直径による変化
ほぼ D/L が一定な網地を選び、 $\phi=45^\circ$ に張った場合の、網糸直径 D または脚長 L による C_f 、 C_D の変化を調べた。 C_f 、 C_D と L または D との関係を Fig. 6 に示す。図から明かなように、いずれの場合も、 D/L および ϕ が一定の場合は C_f 、 C_D の値は共に L 、 D には関係なく一定値をとる。

以上の結果より、流れに平行な網地の抗力を検討する場合は、 L または D の値よりむしろそれらの比 D/L の値が重要な意味をもつものと考えられる。

抵抗係数と D/L との関係
縮結角を一定値 45° に保った場合の C_f 、 C_D と D/L との関係について検討し、Fig. 7 に示すような結果を得た。同図に見るように C_f と D/L との間にはほぼ直線的な関係が認められる。最

Fig. 7. Relation between the drag coefficient C_D or C_f and the ratio D/L when $\phi=45^\circ$.

Fig. 8. Relation between the friction drag coefficient C_f and the mesh factor α (the ratio of twine area to the area of netting). The number against each point indicates the mesh angle ϕ .

Fig. 9. Relation between the drag coefficient C_D and the mesh factor α . The number against each point indicates as Fig. 8.

小自乗法により C_f と D/L との関係を求めると

$$C_f = 0.012 + 0.23 \left(\frac{D}{L} \right) \quad (6)$$

が得られる。

一方 C_D と D/L との間には、双曲線的な関係が認められる。この関係は上で求めた (6) 式と、 ϕ が 45° という条件のもとで得られる C_f と C_D との関係式 $C_f = 2(D/L)C_D$ とから、次式が得られる。

$$C_D = 0.12 + 0.0061 \left(\frac{L}{D} \right) \quad (7)$$

抵抗係数と網地の網糸密度 α との関係 ここでは $\phi=45^\circ$ の場合も含めて、それ以外の縮結角の場合の抵抗係数と α との関係を調べる。

Fig. 8 は C_f と α との関係を示す。ここで、●印は $\phi=45^\circ$ の場合で、○印はその他の場合で、それぞれの ϕ の値を数字で示した。前項で述べたように、 C_f は α の増加に対しほぼ直線的に増大し、 ϕ の値と共に、これらの直線は C_f の増す方向に移動する。

C_D と α との関係を Fig. 9 に示す。ここで、記号および数字は Fig. 8 に準ずる。前項で述べたように、 $\phi=45^\circ$

Table 2. Comparison of the friction drag coefficient C_f between the knotted and knotless nettings

Netting No.	Twine materials	Ratio of D/L	Kind of knot	Mean value of C_f
911	polyethylene	0.0429	sheet bend	0.0235
6090	polyester	0.0410	knotless	0.0227
230	polyamide	0.0605	sheet bend	0.0253
1610	polyester	0.0581	knotless	0.0242
628	polyamide	0.0956	sheet bend	0.0346
1417	polyester	0.0990	knotless	0.0330
630	polyamide	0.1033	sheet bend	0.0349
2422	polyester	0.1000	knotless	0.0367

Fig. 10. Relation between the drag coefficient C_D or C_f and the mesh angle ϕ . The numbers in the legend indicate the number of the netting sample.

の場合は C_D は α の増加と共に双曲線的に減少するが、それ以外の ϕ についても $\phi=45^\circ$ と同様の傾向が見られる。図に示した点線は $\phi=45^\circ$ の曲線にならって引かれたものであるが、これらの曲線は ϕ の増大とともに C_D が増大する方向に移動する傾向が見られる。しかし、 $\phi=45^\circ$ 以外は実験数が少いため明確なことは言えない。

抵抗係数と縮結角との関係 縮結角 ϕ を変化させる実験は、ナイロンとポリエチレンの2種類の網地で実施した。ナイロン網地 (No. 930) では $\phi=20^\circ-70^\circ$ 、ポリエチレン網地 (No. 911) では $\phi=10^\circ-80^\circ$ の範囲で行った。Fig. 10 はその結果で、点線は C_f 、実線は C_D を表わしている。

C_f は、 ϕ が小さいときは、 ϕ の増加と共に多少減少するが、 ϕ が $20^\circ-30^\circ$ を超えると急激に増大する傾向が見られる。一方、 C_D については、 ϕ の増加と共に増大するが、 ϕ が $50^\circ-60^\circ$ 付近を頂点として急に減少する。実験

数は少ないが、両者とも二本の曲線が類似の傾向を示していることから、その他の網地についても同様の傾向が予測される。

以上の結果より、網地が流れに平行に置かれた場合、縮結角の網地抗力に及ぼす影響は極めて大きいことがわかる。このことは、縮結の相違による抗力係数の差異はほとんど認められないという、流れに直角に置かれた場合の網地の抵抗特性³⁾ とくに異なる点である。流れに平行の場合、抗力係数 C_D が縮結によって大きく変化するという事は、網糸相互の影響、とくに前の糸が後の糸に及ぼす後流の影響が ϕ によって異なることに起因するものと考えられる。

また、摩擦係数 C_f が、とくに ϕ が $20^\circ-30^\circ$ より大きい場合、 ϕ と共に増大するのは、 ϕ が増大すると網糸と流れとのなす迎角が増大し網地表面の粗さが増大するためと考えられる。また ϕ が $20^\circ-30^\circ$ より小さい場合かえて C_f が増加するのは、 ϕ が極端に小さいと糸と糸または結節と結節とが重なり合い、それだけ網地の表面粗度が大きくなり、この効果は ϕ が小さいほど大きいためと考えられる。

結節の摩擦係数に及ぼす影響 結節の有無による摩擦係数 C_f の変化を調べるため、 D/L のほぼ等しい4組の蛙又と無結節網地とについて C_f を比較した。いずれの場合も縮結角は $\phi=45^\circ$ とした。Table 2 は比較した4組の網地の D/L 、結節および得られた C_f の平均値である。

この表で、4例中3例は蛙又網地の C_f の平均値が大きい。しかし、蛙又と無結節の C_f の平均値の差は小さく、いずれも $\pm 5\%$ の範囲にある。表に見るように、いずれの組合せも D/L の値に多少の差が存在するので、これを (6) 式を用いて補正した結果、表の上欄2例は C_f の値が接近した ($\pm 2\%$ 以内) が、下欄2例は逆に差が増大した ($\pm 7.5\%$ 以内)。以上のように、結節の有無によって C_f の値に顕著な差異は認められないという一応の結果を得たが、いずれの組合せも結節や D/L ばか

Fig. 11. Relation between the friction drag coefficient C_f and $(D/L) \tan \phi$. The numbers against the points indicate the mesh angle ϕ . The points without the number show the values when $\phi = 45^\circ$.

りでなく網糸材料も異にしているため、今回の実験結果のみから結論を出すことには無理があるように考えられる。

流れに平行な網地の抵抗係数の実験式 結節、網糸材料による影響を無視すると、 C_f および C_D はいずれも D/L 、縮結角 ϕ およびレイノルズ数の関数として表わせ、さらにレイノルズ数による変化を無視できる場合は、 D/L および ϕ のみの関数として表わせると考えられる。

Tauti⁴⁾ の平面網地の抵抗式によれば、結節の影響をを無視すると、流れに平行な網地の抵抗係数は $(D/L) \tan \phi$ に比例する。また、小長谷・川上⁵⁾ は、Suzuki・Matuda⁶⁾ と同様、後流理論から実験式を導き抵抗係数が $(D/L) \tan \phi$ の関数となることを示した。これらの知見より、流れに平行な網地の抵抗係数と $(D/L) \tan \phi$ との間には、密接な関係が予測される。

Fig. 11 は今回の実験結果を基に、 C_f と $(D/L) \tan \phi$ との関係を両対数で図示したものである。ここで、○、△ および □ 印は網地材料で、それぞれナイロン、ポリエチレンおよびポリエステルを表わしている。また、印の右側の数字は縮結角 ϕ の値で、数字のない印は $\phi = 45^\circ$ を示している。ポリエチレンの $\phi = 10^\circ$ 、およびナイロンの $\phi = 20^\circ$ の、縮結角のとくに小さな2点を除くと、点はほぼ一本の直線上に並ぶように見える。上述の特別な2点を除いて、最小自乗法により回帰式を求めると

$$C_f = 0.112 \left(\frac{D}{L} \tan \phi \right)^{0.504} \quad (8)$$

が得られる。(8) 式の指数は $1/2$ に近いので、実用的見地からこの指数を $1/2$ として、改めて最小自乗法により

その比例定数を求めると、次式が得られる。

$$C_f = 0.11 \sqrt{\frac{D}{L} \tan \phi} \quad (9)$$

Fig. 11 の実線はこの (9) 式を表わしている。

また、抗力係数 C_D は、(1)-(3) 式を参照すると、(9) 式より

$$C_D = 0.11 \frac{\sin \phi}{\sqrt{\alpha}} \quad (10)$$

が得られる。これら (9) および (10) 式による C_f および C_D の推定誤差は、上述の特別な2点を除けば、いずれも $\pm 15\%$ 以内に含まれる。

以上の結果より、縮結角 ϕ が 25° 以上であれば、式 (9) および (10) は流れに平行な網地抵抗の計算に実用上使用可能と考えられる。

本研究の遂行に当り、終始実験に協力いただいた東京水産大学学生小林 聡および長谷川修一の両君に謝意を表す。

文 献

- 1) 松田 俊, 王 尔光: 日水誌 **53**, 1407-1412 (1987).
- 2) A. S. Revin: *Trans. VNIRO*, **41**, 66-82 (1959).
- 3) 宮崎芳夫: 東水大研報, **50**, 125-134 (1964).
- 4) M. Tauti: *Nippon Suisan Gakkaishi*, **3**, 1-4 (1934).
- 5) 小長谷庸夫, 三上太左英: 日水誌, **37**, 944-947 (1971).
- 6) O. Suzuki and K. Matuda: *Nippon Suisan Gakkaishi*, **31**, 579-584 (1965).