

平面網地の流体抵抗に関する基礎的研究^{*1}

今 井 健 彦

Fundamental Studies of the Fluid Dynamical Resistance on the Plane Netting

Takehiko IMAI^{*2}

Abstract

To determine the fluid dynamical coefficients for plane netting, the following studies were carried out in the water circulating tank of Faculty of Fisheries, Kagoshima University and in the towing tank of Faculty of Fisheries, Hokkaido University.

As a rule coefficients for fluid dynamical resistance of netting depend on the projective areas, and therefore it becomes necessary to determine the experimental equations for the areas towards various attack angles.

In these studies, the minimum unit of the netting fabric is termed as a "Netting element". At the elementary fabric a horizontal cutting is made at the respective intermediate points of the four knotted legs. The shape of a netting element is to be shown in the form "X".

The netting used in these studies are "Weaver's knot netting" and the "twisted knotless netting" which are most familiar in the Japanese fisheries.

Basing on the two sets of tank-experiments made on the two kinds of the netting, the following results were obtained :

1) In the case of towing tank experiments the normal force coefficient and the tangential force coefficient are proved to be independent of the Reynolds number with in the range from 6×10^2 to 3×10^3 ; and in the case of the circulating tank experiments they are proved to be so with the range from 8×10^2 to 3×10^3 .

2) The edge effect of the netting is not depending on mesh numbers when the value of $2ij/(i+j)$ is larger than 6.0. In this case, "i" is the mesh numbers counted to the twinewise direction and "j" is the counted to the normal direction, on the netting piece used.

3) Concerning knotless netting, the derived experimental equations of the normal force and of the tangential force are well coincided with the experimental data in the range of the attack angle $4\theta < \theta \leq 90^\circ$, and concerning Weaver's knot netting. They are coincided with the experimental data in the range of the attack angle $6\theta < \theta \leq 90^\circ$. In this case, the adopted θ is $\theta \doteq \sin^{-1}(d/2l \cos \phi)$.

^{*1} : 北海道大学審査学位論文 (Thesis submitted for the Degree of Doctor of Fisheries Science at Hokkaido University, September 1985).

^{*2} : 鹿児島大学水産学部漁具学講座 (Laboratory of Fishing Gear Science, Faculty of Fisheries, Kagoshima University, Shimoarata-4 Kagoshima City 890 Japan).

The value of the coefficients from the towing tank experiments is bigger than that of the circulating tank experiment, and the reason is assumed to be due to the generated eddies of paddle wheels of water circulating tank.

And the value of the fluid dynamical resistance on the Weaver's knot netting is bigger than that of the knotless netting, the reason is supposed to be due to the difference in the constructions of the nettings.

記 号 表

C_D	: 網地抵抗の抗力係数
C_L	: 網地抵抗の揚力係数
C_N	: 網地抵抗の法線分力係数
C_{N1}	: 網糸投影面積を代表面積とした網地抵抗の法線分力係数
C_{N2}	: 迎角の正弦関数を媒介変数とした網地抵抗の法線分力係数
C_T	: 網地抵抗の接線分力係数
C_{T1}	: 網糸投影面積を代表面積とした網地抵抗の接線分力係数
C_{T2}	: 迎角の余弦関数を媒介変数とした網地抵抗の接線分力係数
D	: 網地抵抗の抗力成分
d	: 網糸太さ
f	: 結節長さ
h	: ハイドロウリック・ミーンデプス
i	: 網地片の横方向の網目数
j	: 網地片の縦方向の網目数
L	: 網地抵抗の揚力成分
l	: 脚長 (目合の $\frac{1}{2}$)
m	: 正弦関数の指数
N	: 網地抵抗の法線分力
n	: 余弦関数の指数
R	: 網地の抵抗
r	: 相関係数
$Re_{(d)}$: 網糸直径を代表長さとしたレイノルズ数
$Re_{(h)}$: ハイドロウリック・ミーンデプスを代表長さとしたレイノルズ数
$S_{(90)}$: 迎角が 90° の場合の網地の全投影面積
$S_{B\theta}$: 迎角が θ の場合の網地の網糸投影面積
$S_{(90)}$: 迎角が 90° の場合の網素子の全投影面積
$S_{b\theta}$: 迎角が θ の場合の網素子の網糸投影面積
$S_{k\theta}$: 迎角が θ の場合の結節1個の網糸投影面積
$S_{l\theta}$: 迎角が θ の場合の網素子1個の脚の網糸投影面積

T	: 網地抵抗の接線分力
U	: 相対運動速度
'	: 無結節網地
"	: 蛙又結節網地
ε	: 投影面上の見かけの縮結角
θ	: 迎角 (相対運動方向と網地面の成す角)
Θ	: 投影面上の脚が互いに接する迎角
Θ^*	: 投影面上の結節が互いに接する迎角
λ	: 網地の投影面積の理論式を補正する係数
ρ	: 水の密度
ϕ	: 縮結角 (2脚の展開角の $\frac{1}{2}$)

目 次

第1章 網地の投影面積	176
第1節 網地の全投影面積	177
1. 1. 1. 網地模型の全投影面積	
1. 1. 2. 無結節網地の全投影面積	
1. 1. 3. 蛙又結節網地の全投影面積	
1. 1. 4. 網地の全投影面積の考察	
第2節 網糸投影面積	180
1. 2. 1. 網糸投影面積を求める実験方法	
1. 2. 2. 網地模型の網糸投影面積	
1. 2. 3. 無結節網地の網糸投影面積	
1. 2. 4. 蛙又結節網地の網糸投影面積	
1. 2. 5. 網糸投影面積に関する考察	
第2章 網地の単純模型の流体抵抗	197
第1節 網素子の抵抗	197
2. 1. 1. 供試網素子および実験方法	
2. 1. 2. 網素子の抵抗測定結果	
2. 1. 3. 網素子の抵抗に関する考察	
第2節 網地模型の抵抗	203
2. 2. 1. 供試模型および実験方法	
2. 2. 2. 網地模型の抵抗測定結果	
2. 2. 3. 網地模型の抵抗に関する考察	
第3章 網地の流体抵抗	211
第1節 レイノルズ数異なる場合の網地抵抗	211
3. 1. 1. 供試網地および実験方法	
3. 1. 2. 異なるレイノルズ数における網地の抵抗	

3. 1. 3. 異なるレイノルズ数における網地抵抗の考察	
第2節 網目数が異なる場合の網地抵抗	215
3. 2. 1. 供試網地および実験方法	
3. 2. 2. 網目数が異なる網地の抵抗	
3. 2. 3. 網目数が異なる網地抵抗の考察	
第3節 目合および網糸太さの異なる場合の網地抵抗	223
3. 3. 1. 供試網地および実験方法	
3. 3. 2. 目合および網糸太さの異なる網地の抵抗	
3. 3. 3. 目合および網糸太さの異なる網地抵抗の考察	
第4章 総合考察	234
第5章 結 論	238
SUMMARY	242
謝 辞	245
文 献	245
付 録	248
I. 実験に使用した水槽の概要	
II. 実験装置および実験方法の概要	

有限な長さの繊維を撚り合わせて、必要な長さの撚り糸を作り網を編む技術が有史以前に存在していたことは網目模様の土器が出土していることから明らかであり、当時の網は天然繊維であったために、降水量の多い我が国ではその形を止めていないが、沈子として用いられたと推定される石器等の出土により、網は漁撈手段の一つとして古くから用いられていたことが裏づけられている。

松井ら¹⁾は、ペルー海岸地帯から出土した B. C. 4000年から B. C. 400年と推定される漁網について報告している。これらの漁網素材は綿または Junco と呼ばれる植物繊維および Llana や Picuna の毛を素材としており、「一つ結び結節」、「変形本目結節」が主であり、「本目結節」および「蛙又結節」の網地も存在していたことを明らかにした。

網漁具は釣漁具に比べ濃密群を形成する魚種に対しては有効な漁撈手段であるが、その漁業形態から考えて漁具費、人件費、および漁具運用費等をより多く必要とする資本型漁業であるために、時代の経過と共に発達しその重要性を増してきた。

漁網が受ける流体抵抗の研究は、漁業に関心の高い先進諸国でのみ行われており我が国では諸国に先駆けて、寺田ら²⁾により行われた。内法が91.2cmの網枠に、横目数と縦目数が等しい網地を張り、舟艇で曳航して抵抗測定した後、水槽でビブロスコープ*を用いて実験を行い、網地抵抗は相対運動方向に垂直な面上の網糸投影面積に比例し、かつ相対運動速度の2乗と、相対運動速度のそれぞれの関数の和であることを示した。

* Vibroscope : 音叉の振動を時間軸とした記録計

田内ら³⁾は、1辺の長さが1 mの方形網枠または、底面が1 m²の切妻屋根型網枠に網地を張り、水中で自由落下させてその終速度から網地抵抗 R を求め $R=kU^2$ であることを明らかにした。この場合比例係数 k は速度 U に依存せず網地の構造、縮結および迎角による係数とし、脚長 l (目合の $\frac{1}{2}$ の長さ) に対する網糸直径 d の比率 d/l の関数であるとした。

三宅⁴⁾は縮結を変えた網地について実験を行い、縮結が抵抗係数に及ぼす影響を明らかにした。

田内⁵⁾は田内ら³⁾、三宅⁴⁾の実験を検討して、i) 結節と脚は互いに独立して流体抵抗を受ける。ii) 各脚に働く力は、縦軸に垂直であり、その大きさは運動方向に垂直な面の網地の全投影面積に比例する、と仮定して網地抵抗の理論式を立てた。

藤田ら⁶⁾は漁網を格子状に張り水中を等速度運動させ平面網地が受ける流体抵抗 R と迎角 θ について実験を行った。この場合 θ は $0 \sim 90^\circ$ の範囲の 15° 毎であった。なお、横糸の流体抵抗 R_T は圧力抵抗 P と摩擦抵抗 F の合力として表している。この場合田内⁵⁾に従い圧力抵抗を $P=R_{90}\sin\theta$ とし、 $F \ll P$ と考えて摩擦抵抗を、 $F=F_{90}\cos^2\theta$ とした。また、縦糸の抵抗 R_L は縦糸相互の干渉が起らない迎角の範囲では $R_L=R_{90}$ であると仮定している。導いた実験式は、迎角が $35^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ の範囲では実測値と良く一致したことを報告している。

宮本ら⁷⁾は種々の無結節網地を1 m²の正方形網枠に張り、曳航水槽で網地抵抗の実験を行った。この場合迎角 θ は 90° であり、2脚の展開角の半角 (以後縮結角と称し ϕ で表す) を 45° としてそれぞれの係数を求め、撚り式無結節網地、本目結節網地、蛙又網地についてそれぞれの抗力を求める実験式を導いた。

更に、宮本ら⁸⁾は前述の方法で縮結角 ϕ を変えて実験を行い、 $R=k_\phi U^2$ と考えて係数 k_ϕ を求め $k_\phi=C\exp\{-\tau(s_{90}/s_{\phi 90})\}$ であることを示した。但し、 s_{90} は網目の全正射影面積で $s_{\phi 90}$ は、迎角 90° の網糸投影面積、 τ は係数である。

野村ら⁹⁾は宮本ら⁸⁾の実験を受け継ぎ種々の材質の網地について実験を行い、網地抵抗は相対運動速度の2乗に比例し、その係数は、レイノルズ数が 3×10^2 以上の範囲ではほぼ一定となり、 d/l が等しい時には繊維の素材に依存せず、むしろ繊維の形状により差が生じることを示した。

宮崎・高橋¹⁰⁾および宮崎¹¹⁾は、網地やロープについて風洞または水槽実験に基づく一連の研究を行った。網地を張った網枠を相対運動方向に直角に設置して抗力係数を求めてレイノルズ数との関係、縮結の影響、結節の相違による影響について調べた。この場合ハイドロリック・ミーンデプス*を代表長さとしたレイノルズ数 $Re_{(h)}$ を用いている。実験の結果、縮結の影響および結節の相違は抵抗係数に影響をおよぼさないことを報告している。

宮崎¹²⁾は更に研究を進め、迎角 θ を変えて抗力成分 D および揚力成分 L を測定して、任意の迎角の場合の抗力係数 C_D 、揚力係数 C_L 、法線分力係数 C_{N0} および接線分力係数 C_{T0} を表す実験式を導いた。

大沢ら¹³⁾は高精度の網地抵抗測定装置を開発して、撚り式貫通型無結節網地の迎角を 15° から 90° の範囲の 15° 毎に設定して抗力係数 C_D と d/l および揚力係数 C_L と d/l の関係を図示している。

* Hydraulic mean depth : $h=2l^2\cos\phi\sin\phi/4l$

更に大沢ら¹⁴⁾は d/l の異なる蛙又結節網地、撚り式無結節網地、およびラッセル式無結節網地について実験を行った。この場合、縮結角 ϕ は 45° 設定迎角は $0 \sim 90^\circ$ の範囲の 10° 毎と 45° の10段階を与えている。なお、実験速度は $0.4 \sim 0.6 \text{ m/s}$ の3段階であった。測定値を資料処理して、抗力係数 C_D と d/l および揚力係数 C_L と d/l の関係を図示した。その結果迎角が $50^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ の範囲の抗力係数は、蛙又結節網地 $>$ ラッセル網地 $>$ 無結節網地の順であることを示した。但し、揚力係数については、網地による明確な差異を見出していない。

FRIDMAN, A. L.¹⁵⁾ はソビエト連邦共和国における BARANOV, F. I. とその後継者達の網地抵抗に関する一連の研究を“THEORY AND DESIGN OF COMMERCIAL FISHING GEAR” (原本“ТЕОРИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОРУДИЙ ПРОМЫШЛЕННОГО РЫБОЛОВСТВА”) に綜述している。BARANOV, F. I. はソ連国で最も早くから網地の抵抗の研究に着手しこの分野の多くの研究者を育成した。彼は、種々の網地を金属製の網枠に張り等速落下運動から網地抵抗を、 $R_{(90)} = 75 l_d d U^{1.75}$ で表わした。但し、 l_d は結節を除く網糸全長である。また、迎角が 0° の網地抵抗を、 $R_{(0)} = 1.8 l^{-0.2} S U^{1.75}$ で表わした。この場合 l は運動方向の網地の長さである。

POPOV, B. A. は、BARANOV, F. I. の研究を更に展開し、流れの中に任意の迎角 θ で設置された網地が受ける抗力 D および揚力 L を表わす実験式を導いた。

DANILOV, Yu. A. は、円柱と各種の撚り糸の流体抵抗を測定し、両者の差は主に網糸の表面状態即ち、撚り数、繊維の太さ、毛羽立ち等に基づく境界層の乱れによることを示した。

FRIDMAN, A. L. ・ Yu. A. DANILOV は、同じポリアミド糸で7種の目合の網地を作り、網地の抵抗係数 C_D と網糸直径を代表長さとしたレイノルズ数 $Re_{(d)}$ の関係を調べ、 $4 \times 10^2 < Re < 5 \times 10^3$ の範囲では C_D におよぼすレイノルズ数の影響は少なく、網地抵抗は2乗則に近づくことを示した。

ドイツ連邦共和国では、風洞を用いた平面網地の研究が行われ中層トロール網の開発に貢献した。STENGEL, H. ・ A. FISCHER¹⁶⁾ は、目合や網糸太さの異なるポリアミド蛙又結節網地について迎角や縮結を変えて風洞実験を行い、それぞれの抗力係数および揚力係数の特性を図示した。KORITZKY, H. H.¹⁷⁾ は、目合の大きな網地の抗力成分 D および揚力成分 L を表わす実験式を導いた。

TAKENOUCHI, Y.¹⁸⁾ は、網を様な薄膜と見做して網地に働く張力は網目一目については一様であり、結節に働く抵抗は脚に比べ無視し得る位小さいと仮定して微分方程式を導いている。

KAWAKAMI, T.¹⁹⁾ は、長さ $2s$ 、網丈が h の長方形網地の両端の間隔を $2y$ として一定速度 v で曳網したときの網成と網地の張力分布を理論的に示し、各網地にかかる力の釣合いの方程式を導いた。この場合結節が受ける抵抗を無視し、田内の抵抗則に従うと仮定して接線分力成分と法線分力成分を表わす理論式を導き、SIMPSON の $\frac{1}{2}$ 則を用いて計算した結果を付表に示した。また、KAWAKAMI, T.²⁰⁾ は、曳網の単純模型を作り曳網抵抗に関する理論式を立て、これらの式は実験値と良く合うことを示した。更に、KAWAKAMI, T. ・ K. NAKASAI²¹⁾ は、4枚仕立の2艘曳網模型について実験を行い理論値と実験値がほぼ等しいことを示した。

FUJITA, H.²²⁾ は、格子状に仕立てた長方形の網を様な流れの中に設置して、その抵抗を

測定し解析を加えた。

谷口²³⁾²⁴⁾²⁵⁾²⁶⁾²⁷⁾²⁸⁾²⁹⁾は、各種の囊網について川上の理論を応用した近似式を立て、実験値と比較した。これらの実験結果から、囊網の使用網地量と網口面積を一定にすると、それらの抵抗は網型の相違に依存しないことを明らかにした。小山³⁰⁾は、規模の異なる12種のトロール漁具の曳網抵抗を測定し、曳網抵抗の概算式を実験的に導いた。この実験式は設計図から読み取ったトロール網の最大幅と最大長さの積を代表面積とし、袖先から身網後端までの間に使用されている網地の d/l の平均値を代表値とした。MacLENNAN, D. N.³¹⁾は4枚仕立てのトロール網12種について実験を行い、曳網抵抗は網糸面積に比例する実験式を示した。また、曳網については、川上³²⁾の綜述がある。

これらの研究の他に、相対運動方向に平行に設置した網地の抵抗について SUZUKI, O.・K. MATSUDA³³⁾や、小長谷³⁴⁾等の研究がある。

平面網地の流体抵抗に関する研究は約70年にわたり多くの研究者により展開され、前述のように種々の実験式が導かれてきた。然しこれらの実験式は、いずれも普遍性のある抵抗係数を明確に示すに至っていない。また任意の迎角における網地抵抗については、迎角90°の測定値または予測値等を入力しなければならない。網地は複雑な形状をしている然り糸または編み糸で構成されている。その上複雑な形状をしている結節または結節部がある。そのために、従来の研究では抵抗係数を計算する場合の代表面積は脚を円柱と見做して概算し、目の大きな網地では結節部の面積の増分は無視し得る位小さいとした場合や、 d の関数として結節面積を考える場合などがあるが充分検討されていない。なお実測値に基づいた網地面積に関する有効な実験式は導かれていない。

網漁具設計の基本となるべき網地の流体抵抗を表わす実験式の計算値が実験値と必ずしも一致しなかったのは、代表面積の精度が低いためと推定し、この点を実験的に修正することにした。

従来網地構成の最小単位は、長さ l の2脚とその先端部の結節または結節部で構成されたV字形の構造物と考えられてきた。流体力学的観点からは寧ろ長さ l の2脚がその中心で交差し、その交差部に結節または結節部をもつX字形の構造物と考えた方が合理的であることから、これを用いることにし「網素子 Element of netting」と称することにした。この概念は、網地面積の実験式を導くにも好都合であった。即ち、横目数が i 目、縦目数が j 目の網地は $2ij$ 個の網素子と、 $i+j$ 個の端部の結節から構成され则认为することができる。従って網素子の面積および結節または結節部の面積を表わす実験式を導くことができる。試験網地片（供試網地）の面積は容易に求めることができる（今井³⁵⁾³⁶⁾参照）。

一定の相対速度で運動している安定した形状の網漁具が受ける流体抵抗は、その漁具の微少面が受ける抵抗の和と考えることができる。従って端の影響の無い平面網地の流体抵抗特性を明らかにすることにより、網漁具の任意の部分または、網漁具全体が受ける流体抵抗を予め試算することが可能となる。

網漁具を構成する網地の目合は、対象魚種の魚体周長または網地に対する行動習性により決定され、網糸太さは、通常の漁撈作業中に受ける最大の応力により決定される。これらの網地についてそれぞれの使用条件を与えることにより網漁具各部の抵抗値を算出できる。なお、それらの和を求めることにより網漁具が受ける抵抗を試算することが可能となる。即ち、

今までの漁具設計とは異なり、基礎設計値に基づいた網地配置が可能となる。また、網漁具の補強に用いられる索具や、種々の目的で用いられる副漁具等の主要寸法についても予め決めることができる。そのためには、抵抗係数の値は普遍性を持ったものでなければならない。言い換えると、結節の形状、網糸直径、目合など網地の構造に関する要因や、縮結、迎角、相対速度等網地の使用に関する要因を入力することにより、網地抵抗の予測値を得ることができなければならない。

従来の研究では、種々の代表面積が用いられており、それらを表す近似式は実測値と比較検討されることなく抵抗係数の計算に用いられてきた。また、供試網地の網目数が抵抗係数に及ぼす影響について検討した研究はなく、レイノルズ数についても充分検討されていない。なお、網杵前縁の後流の影響について配慮した研究は見当らない。

この研究では、まずレイノルズ数が網地の抵抗係数に影響を及ぼさない範囲を明らかにし、次いでその範囲内で網端の影響を無視できる供試網地の網目数を明らかにした。更にこれらの条件下において種々の目合、網糸太さの異なる供試網地について種々の迎角を与えて実験を行い、2子撚り式貫通型無結節網地と、3子撚り糸を用いた一重蛙又結節網地について法線分力係数および接線分力係数の特性を解明し、それらの実験式を導くことを目的とした。法線分力、接線分力について解析することにしたのは第2章第1節に後述するように計算上の問題に基づいている。

この研究は主に鹿児島大学水産学部大型回流水槽で行った実験に基づいており、その一部は北海道大学水産学部大型水理実験水槽で行った曳航実験に基づいている。網杵は Fig. II-2 および Fig. II-4 に示すように丸鋼棒をコの字型に曲げて作製し、その両端に直径0.4mm (前者) または0.7mm (後者) のステンレス線を張ったものを用いた。流れの前縁に張ったステンレス線の後流の影響を無視するために、比較的に太い網糸で編網された網地を用いた。実験装置および実験方法の概要については付録IIに示した。

第1章 網地の投影面積

非圧縮性粘性流体である水の中を、一定速度で相対運動する物体が受ける抵抗は、レイノルズ数が小さい場合は粘性力が大きく働くために流体の粘性係数、物体の長さおよび運動速度に比例し (ストークスの流体抵抗則: Stork's law of resistance), レイノルズ数の大きい場合は粘性力より慣性力が大きく作用するために流体の密度、物体の代表面積、及び運動速度の2乗に比例する (ニュートンの流体抵抗則: Newton's law of resistance) ことが明らかにされている。

漁具設計では、通常の漁撈作業中に遭遇する相対速度の最大値における流体抵抗を基準とすることから、この研究ではニュートンの流体抵抗則が適用されるレイノルズ数の範囲について行った。従来の研究では代表面積に種々の面積の近似式が用いられてきたことから、網地面積を実験的に再検討した。

寺田²⁾は、脚長 l の2本の網糸が互いに交差した構造物を円柱に置き替えてその正射影面積を求め、目算で結節投影面積の増分を出し、それらの和 (網糸投影面積) を代表面積とした。三宅⁴⁾は、網地の見取り図から網糸投影面積を求めた。TAUTI, M.³⁾は、網目の孔を

含む網目1目の投影面積（網目の全投影面積）を $l^2 \sin 2\phi$ で表わし、代表面積とした。宮本⁷⁾は、脚数と結節数の比率は2:1として脚の投影面積を、 $d(l-\alpha d)$ 結節の投影面積を βd^2 で表わしている。この場合係数 α および β の値は明らかにされていない。宮崎・高橋¹⁰⁾は、迎角90°における網目の全投影面積と、その網糸投影面積 $2dl$ の比率を媒介変数として網地の流体抵抗を解析している。即ち、網糸の重なり部分の倍の面積を結節に相当する面積と仮定している。STENGEL, H.・A. FISCHER¹⁶⁾は、ポリアミド一重蛙又結節網地の結節投影面積を、直径が $3d$ の相当円で表わし、KORITZKY, H.H.¹⁷⁾は、宮崎・高橋¹⁰⁾と同様、網糸投影面積を $2dl$ で表わした。

流体中を相対運動している物体の流体抵抗係数は、一般的には正射影面積を代表面積として求められる。まず田内⁵⁾に従い、網目の孔を含む網目の正射影面積（全投影面積 Total projective area of a netting: S_{90} ）を代表面積として解析した。投影面上に網目の孔が現れない迎角の小さな場合を除き、流体は網目を自由に通過することから S_{90} を代表面積に選ぶと、目合、網糸太さ、結節等の影響を含んだ抵抗係数となった。これらの影響を除くために、第2章第1節に示す網素子模型の実験結果から、網地の全投影面積 S_{90} に対する任意の迎角 θ の網糸投影面積 $S_{B\theta}$ の比率（以後、見掛の空隙率 Apparent solidity of mesh）を媒介変数として解析することにした。

第1節 網地の全投影面積

網地は複雑な形状をしている為に、前述のように種々の方法で投影面積は近似されている。これらの近似式は実測値と比較検討されることなく代表面積として用いられてき。これらの式を用いて算出した抵抗係数は、代表面積の誤差を含んだ値であり、網地毎に異なった値を示すことになり網地抵抗の実験式は普遍性の無いものとなった。

細い糸で大きい目合に編網されている横方向の網目数が i 個、縦方向の網目数が j 個の ($i \times j$ 目) の網地の場合、全投影面積 S_{90} は、

$$S_{90} = l^2 \sin 2\phi \{ij + (i-1)(j-1)\}$$

で近似できるが、太い網糸で小さい目合に編まれた網目数の少ない供試網地については、外周の網糸中心線より外側の面積を考慮する必要がある (Fig. 1-2 参照)。相対運動方向を x 軸とし、この軸に直交する水平軸を y 軸、同垂直軸を z 軸として $y-z$ 面に平行に設置した網地の $y-z$ 面上への全投影面積について実験して検討を加えた。

1. 1. 1. 網地模型の全投影面積

直径 d 、脚長 l の円柱を縮結角 ϕ で組み合わせて構成した網地模型の結節部の中心を結んだ4本の線で囲まれる網目1個の全投影面積 s_1 は次式で示される (Fig. 1-1 参照)。

$$s_1 = 2l^2 \sin \phi \cos \phi = l^2 \sin 2\phi \quad (1-1)$$

網幅方向の網目数（以後横目数）が i 個、網丈方向の網目数（以後縦目数）が j 個の網地の菱形の網目 s_1 の数は $\{ij + (i-1)(j-1)\} = (2ij - i - j + 1)$ 個であり、Fig. 1-2 に示す網地模型外周の脚の中心線の内側の面積 S_1 は次式で与えられる。

$$S_1 = (2ij - i - j + 1) l^2 \sin 2\phi \quad (1-2)$$

一方網地模型外周の中心線より外側の1脚の面積 s_2 は $(dl/2)$ でありその数は $4i + 4(j-1)$

$=4(i+j-1)$ 個である。なお、網地模型の4隅に塗り潰して示した $(d^2/4)\sin 2\phi$ の面積が残る (Fig. 1-2 参照)。従って脚の中心線より外側の面積 S_2 は次式で与えられる。

$$S_2 = 2(i+j-1)dl + d^2/\sin 2\phi \quad (1-3)$$

これらの結果、網地模型の全投影面積 S_{90} は (1-2) および (1-3) 式の和として次式で表わすことができる。

$$S_{90} = (2ij - i - j + 1)l^2 \sin 2\phi + 2(i+j-1)dl + (d^2/4)\sin 2\phi \quad (1-4)$$

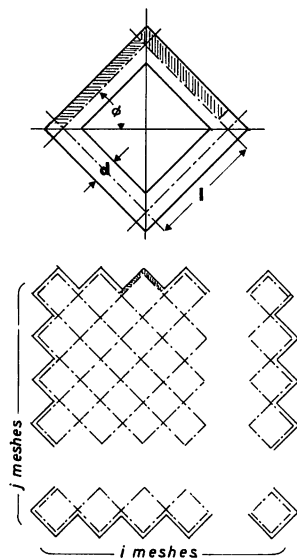


Fig. 1-1. Schematic drawing shows total projective area of a netting piece composed of $i \times j$ meshes, at an attack angle 90° .

i : Mesh numbers along the twinwise direction

j : Mesh numbers along the normal direction

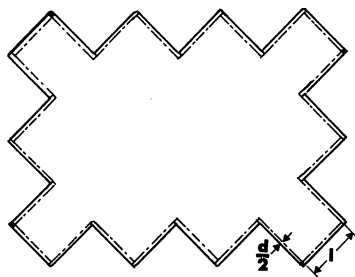


Fig. 1-2. Schematic drawing shows the projective area of the outer portion of the centerline denoting the chain line, concerning the edged netting twine.

1. 1. 2. 無結節網地の全投影面積

無結節網地の場合、外周の脚の中心線の外側の面積 S'_2 は網地模型の場合と同様に (1-2) 式で表わすことができる。直径0.3mmのステンレス線を電流で加熱して供試網地を切り取り、結節部を炎で焼き固めた。そのために1. 2. 3. に後述する結節面積の増分 $\Delta S_{K(90)}$ は供試網地外周の結節部には現われない。2子撚り糸の脚を円柱で近似すると網地外周の脚の中心線より外側の面積は (1-3) 式となる。従って、無結節網地の場合は網地模型について導いた (1-4) 式を準用できる。

1. 1. 3. 蛙又結節網地の全投影面積

蛙又結節網地の場合も電流で加熱したステンレス線で、結節に沿って脚を切断し、炎で焼き固めて結節が解けないように処置した網地を使用した。従って供試網地片の外周には $2(i+j)$ 個の結節がある (Fig. 1-3 参照)。

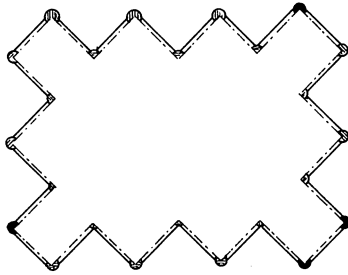


Fig. 1-3. Schematic drawing shows projective area of the outer portion from the center line denoting chain line, concerning the edged netting twine. Shadow marked knots forming a pair show projective area of one knot; and the black marked knots do not form a pair.

蛙又結節網地試験片の外周にある脚の中心線の内側の面積 S''_1 は網地模型について導いた (1-2) 式で表わすことができる。この場合は脚の中心線の外側の面積 S''_2 に網地外周の結節投影面積 S''_3 を加えなければならない。1. 2. 4. に後述するように脚に沿った結節の長さ f の平均値は次式で表わすことができる。

$$\bar{f} = 3.03d \quad (1-21)$$

なお、迎角90°の場合の蛙又結節1個の投影面積 $S_{K(90)}$ は次式となる。

$$S_{K(90)} = 6.08d^2 \quad (1-23)$$

従って網地外周の中心線外側の1脚の面積 s''_2 は次式で与えられる。

$$s''_2 = (d/2)(l - \bar{f}) = (d/2)(l - 3.03d)$$

またその数は $4(i+j-1)$ 個であることから中心線外側の脚の面積 S''_2 は次式となる。

$$S''_2 = 2d(i+j-1)(l - 3.03d) \quad (1-5)$$

Fig. 1-3 に示すように、網地外周にある結節部分は同じ斜線で示す凸部と凹部の1組の結節で1個の結節面積 $S_{K(90)}$ を形成する。その数は、 $2[(i-1)+(j-1)] = 2(i+j-2)$ 個である。

更に、塗り潰して示した組み合わせることのできない4個の結節部分が残る。それらの面積は、次式となる。

$$2s''_{k(90)}(\frac{1}{2} + \phi/180) + 2s''_{k(90)}(1 - \phi/180) = 3s''_{k(90)}$$

即ち、結節3個の面積と等しい。従って網地外周にある結節部分の投影面積 S''_3 は次式で与えられる。

$$S''_3 = 2(i+j-2) + 3s''_{k(90)} = 6.08(2i+2j-1)d^2 \quad (1-6)$$

これらの結果 $i \times j$ 目の蛙又結節網地の全投影面積は (1-2)、(1-5) および (1-6) 式から次式で与えられる。

$$s''_{k(90)} = (2ij - i - j + 1)l^2 \sin 2\phi + 2d(i+j-1)(l - 3.03d) + 6.08(2i+2j-1)d^2 \quad (1-7)$$

1. 1. 4. 網地の全投影面積の考察

従来の研究では細い網糸で編まれた網地を対象とした研究が多く、外周の網糸中心線外側の面積は内側に比べ無視できる位小さいと考えられてきた。漁船が大型化し機械化した今日、比較的太い網糸の網地が用いられるようになった。これらの網地から水槽に合った大きさの供試網地を切り取って用いる場合、外周の網糸中心線外側の面積は網目数が少ない場合は無視できない大きさとなる (Fig. 1-3 参照)。特に第3章2節で検討した網目数の異なる場合の網地抵抗では前述の面積の誤差が混入し解析が困難となることが予測された。これらの理由から (1-4) および (1-7) 式を導き、これらの式を代表面積として抵抗係数を求めた。

(1-4) 式の第3項は結節1個の面積であるために網糸が太く、目合が小さく、かつ網目数の少ない場合以外は無視できる。無結節網地の全投影面積を求める実験式は網地模型について導いた (1-4) 式を適用した。外周の網糸中心線の外側の面積は比較的小さいことから、この場合は実測した面積と比較していない。その理由は補正係数を導いても有効数値に影響をおよぼさないと判断したからである。蛙又結節網地の全投影面積は第2節の実験結果を (1-4) 式に代入して導いた。この場合も前述と同じ理由から実測値との比較を行っていない。

第2節 網糸投影面積

第2章第1節の網素子拡大模型について行った実験で示すように、網地の全投影面積を代表面積として抵抗係数を求めると、目合、網糸太さ、結節または結節部の形状等の影響を含むことになり、網地毎に異なった値を示した。これらの影響を取り除くために、見掛けの空隙率、 $S_{B\theta}/S_{(90)}$ を用いることにした。そのために任意の迎角 θ における網糸実質投影面積 (以後網糸投影面積と稱す) $S_{B\theta}$ を求めることが必要となった。

網地の網糸投影面積を求める実験式を導くために、2子撚り式貫通型無結節網地 (以後無結節網地) および3子撚り糸を用いた一重蛙又結節網地 (以後蛙又結節網地) から、試験網地片を切り取った。この場合、外周にある結節の中央部を切断することが望ましいが、結節の崩れを防ぐために外周の結節または結節部を残して脚を切断し炎で焼き固めて用いた。

この研究では網地は網素子 (Element of netting) の集合と考えている。この場合網素子とは、ある結節又は結節部の周りの4本の脚をその中心で切断したX形状の構造物と定義した。任意の迎角における網素子の投影面積を幾何学的に検討して式を立て実測値と比較した。この式が成立するのは隣接する脚の投影が互いに接する迎角 θ より大きい範囲であり、 θ

より小さい迎角の場合は網地全体について立てた幾何学的式と実測値を比較検討した。まず、第2章で用いた塩化ビニル丸棒を組み合わせた網地模型について式を導き、実測値と比較した。次いで無結節網地および蛙又結節網地について実験を行い網地模型で実証した式と比較し検討を加えた。

1. 2. 1. 網糸投影面積を求める実験方法

供試網地をコの字型網枠に張り、網枠の z 軸が垂直になるように網枠受け金具を固定台に取り付け、網枠支持棒に指針を、網枠支持棒の受け金に分度器を取り付けた迎角設定装置を作った。網地面の延長線上に約10m離して望遠レンズ(500mm)を装備した写真機(35mm版)を設置し、この場合を迎角 0° とした。実験装置の模式図を Fig. 1-4 に示した。それぞれの供試網地について種々の迎角(主に 5° 毎)を与えて、物指、番号札と共に撮影し、写真フィルムをマイクロ・リーダー・プリンタで B4 版に拡大複写した。迎角が大きく、投影面上に網目の孔が現れる迎角の範囲については、レンズの収差に基づく測定誤差を除くために物指付近の網目を選び4脚と2結節の面積をプランメータで測定し、実測値の $\frac{1}{2}$ を網素子の投影面積とした。

迎角の小さな範囲では結節や脚の重なりが不鮮明であったために、B5版の印画紙に網地全体をプリントしてその面積を測定した。縮尺比は中央の網目付近に設置した物指を基準として算出した。なお、面積測定の偶然誤差を除くために3回以上測定を行い近似した3個の平均値を測定値とした。実験方法を較正するために同じ実験装置を用いて2cm間隔の格子板を撮影した。

1. 2. 2. 網地模型の網糸投影面積

長さ l の2本の円柱を組み合わせた網素子の結節部中心を通る z 軸を回転軸として任意の迎角 θ を設定した場合について網素子の下半分を Fig. 1-5 に描いた。即ち、網素子の面と x - z 面のなす角(迎角)が θ となるように設置した場合について、その脚と投影面 y - z 面上の脚の投影(斜線で示した)の関係を示している。Fig. 1-5 において、脚および脚の投影の中心線とが作る三角形 $\triangle ABC$ の $\angle ABC$ を δ で表わすと、 δ は次式で与えられる。

$$\delta = \cos^{-1}(\cos\phi \cdot \cos\theta) \quad (1-8)$$

なおこの場合、 y - z 面上における網素子の投影の見掛けの縮結角 ϵ は次式となる。

$$\epsilon = \sin^{-1}(\sin\phi/\sin\delta) \quad (1-9)$$

脚長 l 、網糸直径 d 、縮結角 ϕ の網素子が迎角 θ で設置されている場合、投影面上の網素子の脚長は $l\sin\delta$ 、円柱が交差した結節部の面積は $d^2/\sin 2\epsilon$ である。したがって、網素子1個の網糸投影面積 $s_{b\theta}$ は幾何学的に次式となる。

$$s_{b\theta} = 2dl\sin\delta - d^2/\sin 2\epsilon \quad (1-10)$$

網目1個の網糸面積と網素子の関係を Fig. 1-6 に示した。図中に縦線または横線で示した部分の面積がそれぞれ等しいことから、網目1個の網糸投影面積は網素子2個の面積に相当している。なお、 $i \times j$ 目の網地は $2ij - i - j$ 個の \times 形状の網素子と $2(i+j)$ 個の V 形状の端部で構成されている。2個の端部の面積は1個の網素子面積 $s_{b\theta}$ と結節面積 $s_{k\theta}$ の

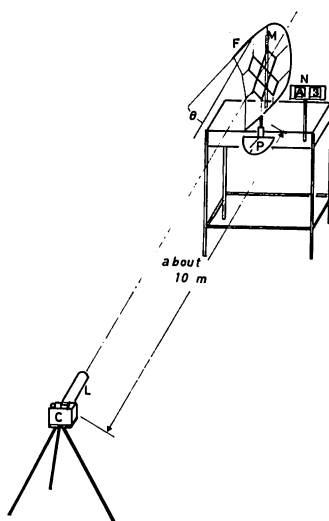


Fig. 1-4. Schematic drawing shows an experimental equipment for getting the projective area of a netting at an attack angle θ .

C : Motor driving camera (Nikkon F-3)	M : Measure
F : \square -shaped netting frame	N : Numbering plate
L : Telephoto-lens (500mm)	P : Protractor and angle pointer
	θ : Attack angle

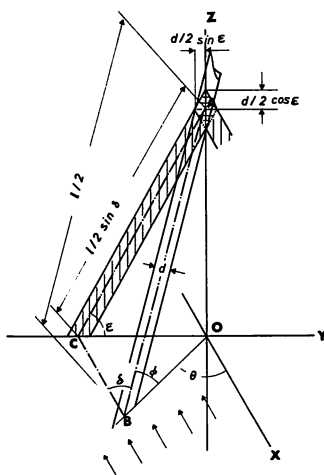


Fig. 1-5. Schematic drawing shows a projective area of a lower leg composed with a netting element at an attack angle θ .

d : Diameter of a cylinder or a twine	ϵ : Apparent hanging angle on a projected plane
l : Length of a leg (half length of mesh size)	ϕ : Hanging angle (half angle of divergence)
X, Y, Z : Coordinate	θ : Attack angle

和に相当する。従って、 $i \times j$ 目の網地模型の投影面積は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} S_{Bo} &= 2ijS_{bo} + (i+j)S_{ko} \\ &= 2ij(2dl\sin\delta - d^2/\sin 2\epsilon) + (i+j)d^2/\sin 2\epsilon \end{aligned} \quad (1-11)$$

但し (1-11) 式は、投影面上の隣接する 2 脚が互いに接し合う場合の迎角 θ (投影面上の網目の孔が消失する迎角) より大きい場合だけ成立する。この迎角 θ は Fig. 1-7 に示すように脚長 l 、網糸直径 d 、縮結角 ϕ に依存しており θ は微小であることから次式で表わすことができる。

$$\theta \doteq \sin^{-1}(d/2l\cos\phi) \quad (1-12)$$

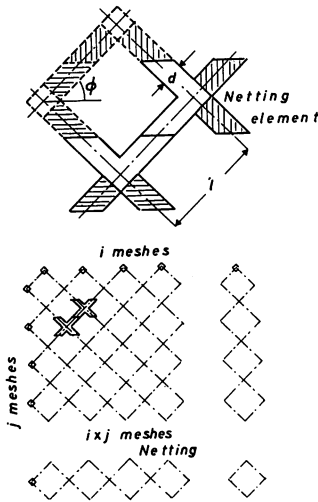


Fig. 1-6.

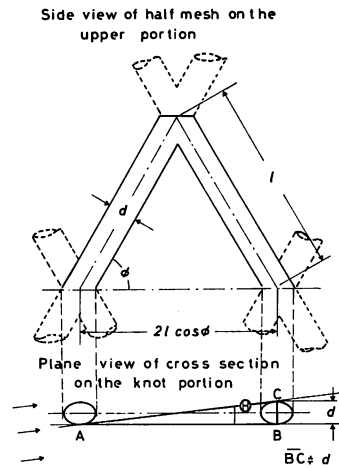


Fig. 1-7.

Fig. 1-6. Explanation of a netting element, the smallest construction element of netting, which is composed with two legs crossed on the hanging angle ϕ , concerning a netting models. Square mark shows remainder of the knot portion.

Fig. 1-7. Schematic drawing shows the attack angle θ in the case when adjacent two legs were touched each other, on the projective plane.

d : Diameter of a cylinder or a twine

l : Length of a leg

ϕ : Hanging angle

θ : Attack angle in case when adjacent two legs were touched each other on the projected plane.

設定迎角が $0^\circ \leq \theta \leq \theta$ の範囲、即ち投影面上に網目の孔が現れない場合の網糸投影面積を幾何学的に求めた。Fig. 1-8 において、脚の重なりにより形成される横線で示した菱形 1 個の面積は、 $l^2 \sin 2\phi \sin \theta$ であり $i \times j$ 目の網地模型に現れる菱形の数は、 $2ij - i - j + 1$ 個である。縦線で示した三角形 1 個の面積は前者の $1/2$ であるから、 $(l^2/2) \sin 2\phi \sin \theta$ であ

りその数は $2(i-1)$ 個である。左下がりの斜線で示した網地の前端の脚1個の面積は $dl\sin\delta$ でその数は, $2j$ 個, 左下がりの斜線で示した最前列の半楕円形の結節部面積は上下合わせて, $\pi(d^2/4)\cos\phi$ であり, 最前列の結節部の陰になる面積比率を (θ/Θ) と仮定すると, その面積は $\pi(d^2/4)\cos\phi(\theta/\Theta)$ で示すことができその数は $(i-1)$ 個である。従って $0^\circ \leq \theta \leq \Theta$ の迎角の範囲の網糸投影面積 $S_{B\theta}$ は次式となる。

$$S_{B\theta} = j\{2(i-1)l^2\sin 2\phi\sin\theta + 2dl\sin\delta\} + \pi(d^2/4)\cos\phi\{1 + (i-1)\theta/\Theta\} \quad (1-13)$$

(1-13) 式に $\theta=0^\circ$ を代入すると次式を得る。

$$S_{B(0)} = 2jdl\sin\phi + \pi(d^2/4)\cos\phi \quad (1-14)$$

(1-8) 式から $\cos\delta = \cos\phi\cos\theta$

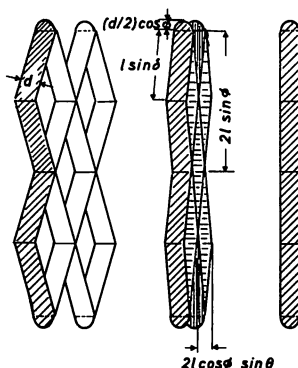


Fig. 1-8. Schematic drawing shows projective area of the netting model at the attack angle, $\theta < \Theta \leq 90^\circ$, $0^\circ < \theta \leq \Theta$ and $\theta = 0^\circ$

直径1.1cmの塩化ビニル丸棒を脚長6.0cm, 縮結角 45° となるように組み合わせた M_{16} 網地模型の迎角を 0° , 2° , 4° , 6° , 8° , 10° , 12° および 16° , 18° , 30° , 45° , 60° , 75° , 90° とした場合の写真から求めた網糸面積の実測値 $S_{B\theta m}$ と, 幾何学的に求めたこれらの実験式 $S_{B\theta c}$ の値を比較して $\theta < \Theta \leq 90^\circ$ の場合を Fig. 1-9 に, $0^\circ \leq \theta \leq \Theta$ の場合を Fig. 1-10 に示した。

$\theta < \Theta \leq 90^\circ$ の場合 $S_{B\theta m} = \lambda_\theta S_{B\theta c}$ として回帰直線式を求め, $\lambda_\theta = 1.025 \approx 1$ を得た。この場合の相関係数は0.998であり7個の資料について t 検定を行い0.01水準で有意な結果を得た。

$0^\circ \leq \theta \leq \Theta$ の場合も同様に処理して $\lambda_\theta = 0.988 \approx 1$ となった。相関係数は0.999であり7個の資料について t 検定を行い0.01水準で有意であった。

1. 2. 3. 無結節網地の網糸投影面積

無結節網地の脚は2子右捻り糸で作られており, 結節部は4本の片子糸が互いに組み合っているために Fig. 1-11 に示す塗り潰した部分が存在する点が網地模型と異なっている。

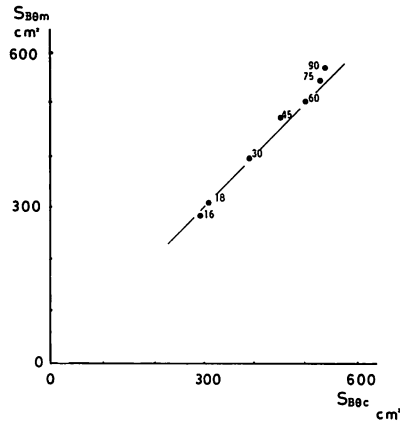


Fig. 1-9. Relationship between the calculated projective area and the measured area, at the range of an angle, $\theta < \theta \leq 90^\circ$, on the netting model M_{16} , consisting of vinyl-chloride cylinder with 1.1 cm diameter and 6 cm leg-length.

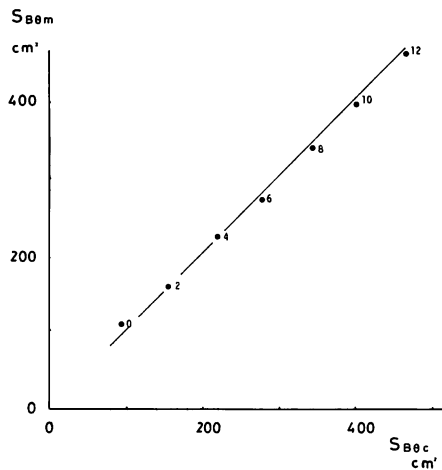


Fig. 1-10. Relationship between the calculated projective area and the measured area, at the range of an attack angle, $0^\circ \leq \theta \leq \theta$ on the netting model M_{16} .

従って網地模型について導いた (1-11) 式および (1-13) 式を実験的に修正して網糸投影面積の近似式とし、網糸投影面積の測定値と比較して補正係数を求めることにより無結節網地の網糸投影面積を算出する実験式を導くことにした。

供試網地に目合および網糸直径の異なる 7 種の網地を用い、縮結角を 45° として迎角を設定した場合と、第Ⅶ網地について縮結角を 6.5° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° の 6 段階与えた場合について 1. 2. 1. に示す方法で写真撮影し、その面積を測定した。

供試網地の主要目を Table 1-1 に示した。撚り式無結節網地の編網機は網糸の太い網地を作りにくい構造であることと、大きい応力が加わると大破する特性があるために、網漁具では応力の小さな部分に使う傾向がある。そのために比較的細い網糸の無結節網地しか入手できず d/l 値は0.023~0.088に止まった。

Fig. 1-11 に無結節網地の網素子を示した。この場合の結節部は円柱を交差した網地模型より構造上広い面積を示した。この増分は片子糸の太さに依存しており、片子糸の太さは網糸直径と直接関連していることから、二等辺三角形で近似し網糸直径の関数で表わした。この図に黒く塗り潰した二等辺三角形で示した結節部の増分を式で表わすために、結節部拡大写真の2脚間の長さ $2\eta\sin 45^\circ$ を測定し網糸直径との関係を求め0.66 d を得た。これらの結果 η は次式で示すことができた。

$$\eta = (0.33d / \sin 45^\circ) \div 0.47d$$

従って、迎角 90° における結節1個の投影面積の増分 $\Delta s'_{k(90)}$ は次式となる。

$$\Delta s'_{k(90)} = 2\eta^2 \sin 2\phi$$

この面積は全体に比べ微小であることから片子糸の太さを無視して平面で近似すると迎角 θ における結節部1個の投影面積の増分 $\Delta s'_{k\theta}$ は次式となる。

$$\Delta s'_{k(90)} = 0.44d^2 \sin 2\phi \sin \theta \quad (1-15)$$

これらの結果 $\theta < \theta \leq 90^\circ$ の迎角の範囲における無結節網素子の投影面積を表わす式は(1-10)式と(1-15)式の和として次式で与えられる。

$$s'_{b\theta} = 2dl \sin \delta - d^2 / \sin 2\epsilon + 0.44d^2 \sin 2\phi \sin \theta \quad (1-16)$$

縮結角 45° となるように網枠に張った第Ⅰ~Ⅶ網地において網素子の網糸投影面積の実測値 $s'_{b\theta m}$ と、それらに対応する計算値 $s'_{b\theta c}$ の関係を最小自乗法を用いて回帰直線式を求め $\lambda_\theta = 1.099$ を得た。また、第Ⅶ網地の縮結を6段階変えた場合についても(1-16)式は成

Table 1-1. Principal dimensions of the sampled knotless-netting.

Netting	d (cm)	l (cm)	d/l	ϕ (deg.)	θ (deg.)	Materials
I	0.35	15.00	0.023	45	0.95	PVD
II	0.29	6.08	0.048	45	1.93	PES
III	0.31	5.84	0.053	45	2.15	PE
IV	0.39	6.11	0.064	45	2.59	PE
V	0.09	1.31	0.069	45	2.78	PE
VI	0.46	6.04	0.076	45	3.09	PE
VII	0.22	2.50	0.088	45	3.57	PE
VII *	0.22	2.50	0.088	6.5	2.45	PE
VII *	〃	〃	〃	15	2.61	〃
VII *	〃	〃	〃	30	2.91	〃
VII *	〃	〃	〃	45	3.57	〃
VII *	〃	〃	〃	60	5.04	〃
VII *	〃	〃	〃	75	9.73	〃

ϕ : Hanging angle

θ : Attack angle noted when the adjacent legs were touched on a projected plane.

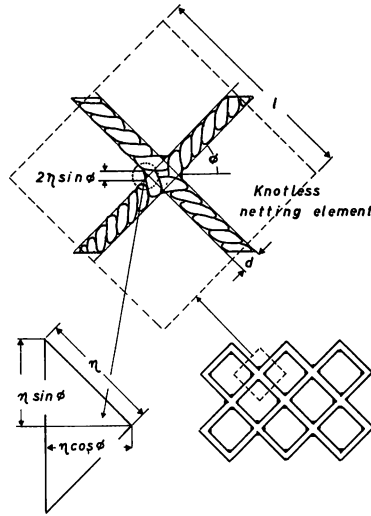


Fig. 1-11. Schematic drawing shows a twisted knotless netting element. Black portion shows an increased projective area of the crossing part on the knotless netting.

d : Diameter of a twine

l : Length of a leg

ϕ : Hanging angle

η : Length of black portion along the composed netting twine

立したことから、 $\theta < \theta \leq 90^\circ$ の迎角の範囲の資料を一括して処理し補正係数を求め直し、 $\lambda_\theta = 1.106$ を得た。

これらの結果前述の迎角の範囲における無結節網素子の網糸投影面積は次式で示される。

$$s'_{b\theta} = 1.11(2dl\sin\delta - d^2/\sin 2\varepsilon + 0.44d^2\sin 2\phi\sin\theta) \quad (1-17)$$

実験式を導く過程で設定した仮定を検証するために、無結節網素子の実測値と(1-17)式で算出した計算値の関係を Fig. 1-12 に示した。両者の相関係数は0.983であり109個の資料について t 検定を行い、0.01水準で有意な結果を得た。

供試網地を網枠に張り付ける際に結節部が崩れることを防止するために切断部を炎で焼き固めたので、外周凸部の結節部の外側には結節部の増分は表れない。従って $\theta < \theta \leq 90^\circ$ の迎角の範囲における無結節網地の網糸投影面積 $S'_{b\theta}$ を表わす実験式は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} S'_{b\theta} &= 2ij s'_{b\theta} + (i+j)(d^2/\sin 2\varepsilon - \Delta s'_{k\theta}/2) \\ &= 2.22ij(2dl\sin\delta - d^2/\sin 2\varepsilon + 0.44d^2\sin 2\phi\sin\theta) \\ &\quad + (i+j)(d^2/\sin 2\varepsilon + 0.22d^2\sin 2\phi\sin\theta) \end{aligned} \quad (1-18)$$

投影面上に網目の孔が現われない $0^\circ \leq \theta \leq \theta$ の迎角の範囲では、結節部の増分は脚と重なり合うために配慮する必要はない。従って網地模型について導いた(1-13)式をそのまま準用できる。 $i+j$ 目数の無結節網地について写真から測定した値と(1-13)式を用いた計算値から補正係数を求め $\lambda_\theta = 0.837$ を得た。

これらの結果 $0^\circ \leq \theta \leq \Theta$ の迎角の範囲における無結節網地の網糸投影面積を表わす実験式は次式となる.

$$S'_{B\theta} = 0.84 \{ j \{ (2i-1) l^2 \sin 2\phi \sin \theta + 2dl \sin \delta \} + \pi (d^2/4) \cos \phi [1 + (i-1)(\theta/\Theta)] \} \quad (1-19)$$

$\theta=0^\circ$ の場合は, (1-19) 式は次式となる.

$$S'_{B(0)} = 0.84 \{ 2jdl \sin \phi + \pi (d^2/4) \cos \phi \} \quad (1-20)$$

前述の迎角の範囲における68個の資料について実測値と計算値の関係を Fig. 1-13 に示した. 両者の相関係数は0.960であり, t 検定を行った結果0.01水準で有意であった.

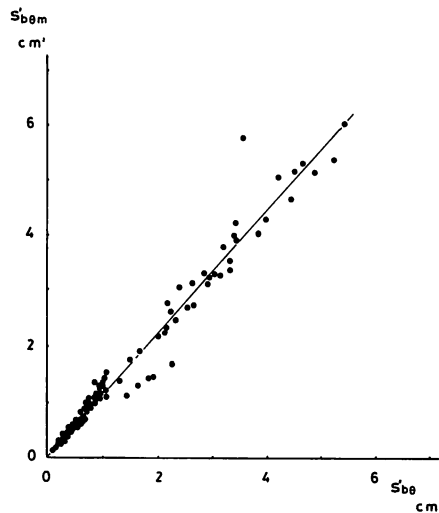


Fig. 1-12. Relationship between the calculated projective area and the measured area, at the range of attack angle, $\theta < \theta \leq 90^\circ$, on the knotless netting samples I ~ VII.

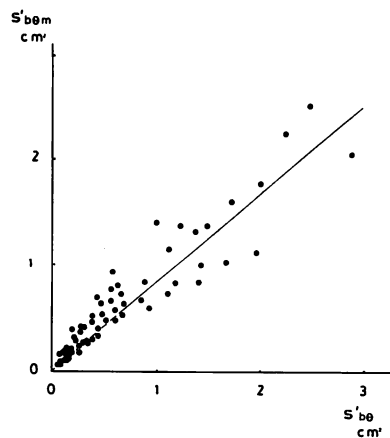


Fig. 1-13. Relationship between the calculated projective area and the measured area, at the range of attack angle, $0^\circ \leq \theta \leq \Theta$ on the knotless netting samples I ~ VII.

1. 2. 4. 蛙又結節網地の網糸投影面積

蛙又結節網地の任意の迎角 θ における投影面積の実験式を導くために、 d および l の異なった 6 種の蛙又結節の縮結角を 45° とした場合と、第 XIII 網地の縮結角を 6 段階変えた場合について実験を行った。この場合与えた縮結角は、無結節網地と同様 6.5° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、および 75° であった。供試網地の主要目を Table 1-2 に示した。

Table 1-2. Principal dimensions of the sampled Weaver's knot-netting.

Netting	d (cm)	l (cm)	d/l	ϕ (deg.)	θ (deg.)	θ^* (deg.)	Materials
XI	0.17	5.78	0.030	45	1.22	3.68	PE
XII	0.26	4.45	0.058	"	2.37	7.18	"
XIII	0.21	2.50	0.084	"	3.40	10.33	"
XIV	0.42	4.50	0.093	"	3.78	11.48	"
XV	0.63	4.56	0.138	"	5.60	17.02	"
XVI	0.70	4.55	0.153	"	6.24	18.97	"
XIII *	0.21	2.50	0.084	6.5	2.42	7.34	PE
XIII *	"	"	"	15	2.49	7.56	"
XIII *	"	"	"	30	2.78	8.43	"
XIII *	"	"	"	45	3.40	10.32	"
XIII *	"	"	"	60	4.81	14.62	"
XIII *	"	"	"	75	9.29	28.41	"

θ^* : Attack angle noted when the adjacent knots were touched on a projected plane.

蛙又結節網地の場合も迎角が $\theta < \theta \leq 90^\circ$ の範囲と $0^\circ \leq \theta \leq \theta$ に分けて解析した。蛙又結節は無結節網地の結節部に比べて大きく、投影面上に網目の孔が現れる迎角の範囲内でも隣接する結節の投影は互いに重なり合う場合がある。従って、この迎角の範囲を更に結節が重なり合わない迎角の範囲 ($\theta^* < \theta \leq 90^\circ$) と、結節が互いに重なり合う迎角の範囲 ($\theta < \theta \leq \theta^*$) に区別しなければならなかった。

蛙又結節の網素子の模式図を Fig. 1-14 に示した。脚の面積を求める実験式を導くために、図に示すように脚に沿った結節長さ f_1 および f_2 をノギスで測定してその平均値 f を求めた。結節長さの測定値と設定迎角の関係を Fig. 1-15 に示した。網糸太さが増すと f の値はかなり変動したが、それらの平均値 f を求め網糸直径 d との関係を Fig. 1-16 に示した。 f 値は d が 0 のときは理論的に 0 であることから原点を通る直線で近似し次式を得た。

$$f = 3.03d \quad (1-21)$$

Fig. 1-14 に直径が f の円を破線で示した。蛙又結節をこの円で置き替えて、投影面上の隣接する 2 結節が互いに接し合う迎角 θ^* を幾何学的に求め次式で表わした (Fig. 1-17 参照)。

$$\theta^* = \sin^{-1}(f/2l \cos \phi) = \sin^{-1}(1.52d/l \cos \phi) \quad (1-22)$$

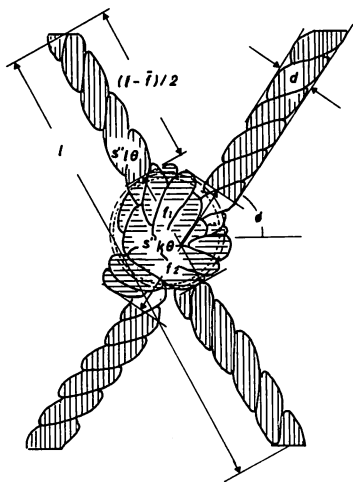


Fig. 1-14.

Fig. 1-14. Schematic drawing shows a Weaver's knot netting element. The outer circle shows corresponding to an average knot-length and inner circle shows corresponding amount of a knot area.

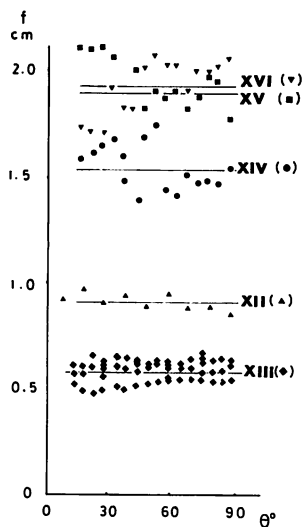


Fig. 1-15.

Fig. 1-15. Relationship between the attack angle and the measured value on the Weaver's knot-length along each leg. Roman numerals show netting samples XII ~ XVI.

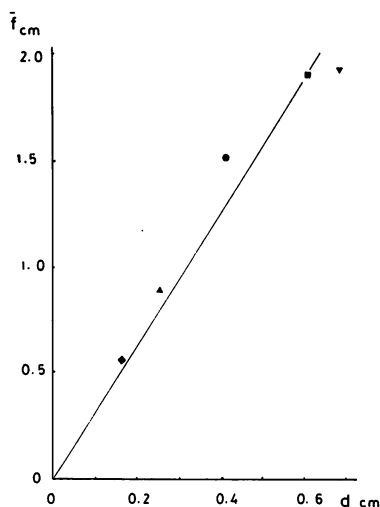


Fig. 1-16.

Fig. 1-16. Relationship between the diameter and the Weaver's knot length along each leg, on the netting sample XII ~ XIV.

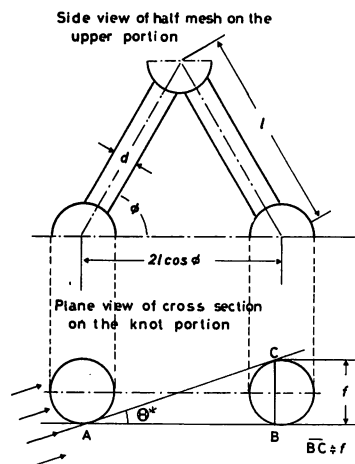


Fig. 1-17.

Fig. 1-17. The upper drawing shows side-view of upper half mesh and the lower shows plane-view of cross-section of knot at the attack angle, θ^* in the case when adjacent two knots were touched each other, on the projective plane.

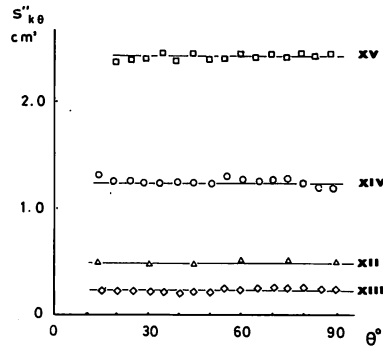


Fig. 1-18. Relationship between the respective attack angles, $\theta^* < \theta \leq 90^\circ$ and the measured projective area on the Weaver's knot. Roman number show netting samples.

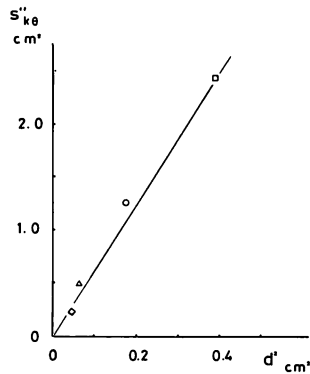


Fig. 1-19. Relationship between the square value of twine diameter and the mean value of projective area concerning XII ~ XV netting samples.

前述の仮定に基づいて導いた (1-22) 式に比べ, 1. 1. 1. で説明した方法で実測した値は若干大きい, θ^* は面積の実験式の選択に関与するものであるから実用上差し支えないと考えた. 即ち, $\theta \leq \theta^*$ の迎角の範囲では第 2 列目以降の結節は, 第 1 列目の結節の陰に隠れると考えてよい.

まず, $\theta^* < \theta \leq 90^\circ$ の迎角の範囲の結節投影面積を測定し, 設定迎角との関係を Fig. 1-18 に示した. 結節形状は複雑であるにもかかわらず, この迎角の範囲ではほぼ一定であった. それぞれの網地について求めた結節投影面積の平均値 $s''_{k\theta}$ と網糸直径の自乗値との関係を求め Fig. 1-19 に示した. この場合も $d = 0$ の場合 $s''_k = 0$ であることから原点を通る直線式として次式で表わした.

$$s''_{k\theta} = 6.08d^2 \div \pi(1.4d)^2 \quad (1-23)$$

即ち, 蛙又結節の投影面積は Fig. 1-14 に点線で示す, 直径 $2.8d$ の相当円の面積となる.

一方, $0^\circ \leq \theta \leq \theta^*$ の迎角の範囲では $\theta=0^\circ$ の時は $s''_{k\theta^*}=0$ であり, $\theta=\theta^*$ のときは $s''_{k\theta^*}=s''_{k\theta}$ であることから投影面積の減少率は (θ/θ^*) に比例すると仮定した. 即ちこの範囲の結節投影面積は次式で与えられる.

$$s''_{k\theta^*}=6.08d^2(\theta/\theta^*) \quad (1-24)$$

次に投影面上に網目の孔が現れる場合 ($\theta < \theta \leq 90^\circ$) の結節部を除く脚の投影面積について検討した. 投影面上の結節長を除く脚の長さ l_θ は, 投影面上の脚長 $l \sin \delta$ から脚に沿って計った結節長の平均値 \bar{f} を差し引いた長さである. 即ち, 次式で与えることができる.

$$l_\theta = (l \sin \delta - 3.03d)$$

従って網素子の結節を除く脚の網糸投影面積 $s''_{l\theta c}$ を表わす式は次の式で与えられる.

$$s''_{l\theta c} = 2d(l \sin \delta - 3.03d) \quad (1-25)$$

一方, 脚の投影面積の実測値 $s''_{l\theta m}$ は, 網素子の網糸投影面積 $s''_{b\theta m}$ から結節投影面積 $s''_{k\theta}$ を差し引いた値である. この迎角の範囲の結節投影面積は, θ に依存しないので $s''_{l\theta m}$ は次式で与えられる.

$$s''_{l\theta m} = s''_{b\theta m} - 6.08d^2 \quad (1-26)$$

この迎角の範囲では (1-25) 式で求めた脚の投影面積は, 実測値に比べ幾分大きい値を示した. 両者の関係を表わす回帰直線式を最小自乗法を用いて次のように導いた.

$$s''_{l\theta m} = 0.84s''_{l\theta c} \quad (1-27)$$

この場合相関係数は0.829であり, 51個の資料について t 検定を行った結果0.01水準で有意であった (Fig. 1-20 参照). 従って網素子の網糸投影面積は (1-25) 式と (1-27) 式の和として次式で与えられる.

$$\begin{aligned} s''_{b\theta c} &= s''_{l\theta m} + s''_{k\theta} \\ &= 0.84[2d(l \sin \delta - 3.03d)] + 6.08d^2 \end{aligned}$$

縮結角を 45° とした XI ~ XVI 網地および縮結角を $15^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ と与えた XIII 網地の網糸投影面積の実測値と比較した結果 $\lambda''_\theta = 1.037$ を得た. 従ってこの迎角の範囲における網素子の網糸投影面積は次式となる.

$$s''_{b\theta} = 1.04[0.84[2d(l \sin \delta - 3.03d)] + 6.08d^2] \quad (1-28)$$

この場合相関係数は0.989であり, 129個の資料について t 検定を行った結果0.01水準で有意であった (Fig. 1-21 参照). 従って投影面上の結節が互いに接する迎角より大きい範囲 $\theta^* < \theta \leq 90^\circ$ では $i \times j$ 目の蛙又結節網地の投影面積は次式で表わすことができる.

$$\begin{aligned} S''_{b\theta} &= 2ij s''_{b\theta} + (i+j) s''_{k\theta} \\ &= 2.08ij[1.68d(l \sin \delta - 3.03d)] + 6.08d^2(2.08ij + i + j) \end{aligned} \quad (1-29)$$

投影面上に網目の孔が現われ, かつ隣接する結節が互いに重なり合う迎角の範囲 $\theta < \theta \leq \theta^*$ における第2列目以後の網素子の投影面積は結節の遮蔽率を (θ/θ^*) と仮定すると次式となる.

$$s''_{b\theta^*c} = 0.84[2d(l \sin \delta - 3.03d)] + 6.08d^2(\theta/\theta^*) \quad (1-30)$$

網素子網糸面積の実測値と (1-30) 式の計算値を比較して, 補正係数 $\lambda''_\theta = 1.212$ を得た. 従って, 網素子の網糸投影面積を表わす実験式は次式で与えられる.

$$s''_{b\theta^*} = 2.03d(l \sin \delta - 3.03d) + 7.36d^2(\theta/\theta^*) \quad (1-31)$$

なお, 前述の迎角の範囲の蛙又網素子の実測値と (1-31) 式の相関係数は0.984であり,

13個の資料について t 検定を行った結果0.01水準で有意であった (Fig. 1-22 参照).

迎角が $\theta < \theta \leq \theta^*$ の範囲の $i \times j$ 目数の網地の第1列目の結節数は $2j+1$ 個, 第2列目以後の結節は $2ij+i-j-1$ 個である. この内 $2ij$ 個の結節は網素子に含まれるので網端部の重なり合う結節数は $i-j-1$ 個である. 従って, この迎角の範囲の蛙又結節網地の網糸投影面積 $S''_{B\theta^*}$ は次式となる.

$$\begin{aligned} S''_{B\theta^*} &= 2ijs''_{b\theta^*} + (i-j-1)s''_{k\theta}(\theta/\theta^*) + (2j+1)s''_{k\theta} \\ &= 2ij\{2.03d(l\sin\delta - 3.03d)\} + 7.36d^2(\theta/\theta^*) \\ &\quad + 6.08d^2\{(i-j-1)(\theta/\theta^*) + 2j+1\} \\ &= 4.06ijd(l\sin\delta - 3.03d) \\ &\quad + 6.08d^2\{2.42ij + i-j-1)(\theta/\theta^*) + 2j+1\} \end{aligned} \quad (1-32)$$

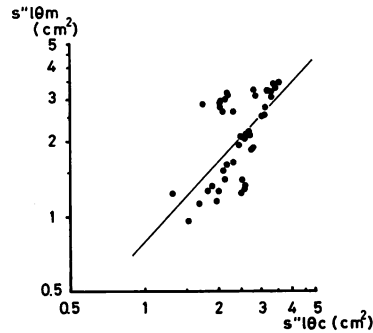


Fig. 1-20. Relationship between the calculated projective areas of the leg and the measured areas concerning the Weaver's knot netting element.

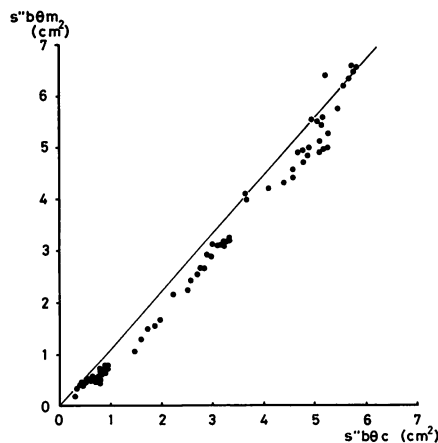


Fig. 1-21. Relationship between the calculated projective area of the netting element and the measured area, at the range of attack angle, $\theta^* < \theta \leq 90^\circ$, on the Weaver's knot netting XI ~ XVI.

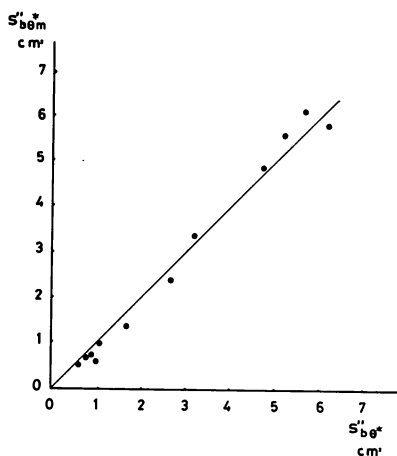


Fig. 1-22. Relationship between the calculated projective area of the netting elements and the measured area, at the range of attack angle, $\theta < \theta \leq \theta^*$, on the Weaver's knot netting XI ~ XVI.

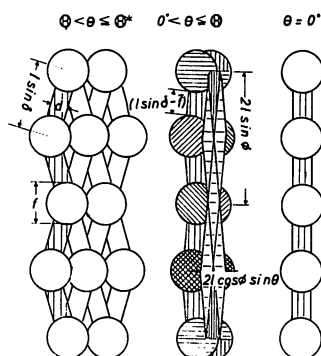


Fig. 1-23. Schematic drawing shows projective areas of Weaver's knot netting, at the attack angles, $\theta < \theta \leq \theta^*$, $0^\circ < \theta \leq \theta$, $\theta = 0^\circ$. Shadow marked knot forming a pair, shows a projective area of one knot; and the mesh marked knot shows remainder of the pairs. And the vertically striped knot shows a projective area of the hinder knot.

投影面上に網目の孔が現れない迎角の範囲 $0^\circ \leq \theta \leq \theta$ における蛙又網地の模式図を Fig. 1-23 に示した。この図は Fig. 1-8 に示す網地模型の外周に $6.08d^2$ の面積をもつ円を $2j+1$ 個と $6.08d^2(\theta/\theta^*)$ の面積を $i-j$ 個取り付けたものである。同じ斜線および横線で示した最前列の結節と最後列の結節は互いに補い合い 1 組で 1 個の結節面積となる。網丈方向の端の結節数は $2j+1$ 個で奇数となる。即ち、残った 1 組の面積の和は結節面積の相当円より若干大きい値となるが、その増分は全体に比べ微小であるためにこの場合無視することにして結節 1 個とした。縦線で示した第 2 列目以後の結節投影の遮蔽率を、 θ/θ^* と仮定した。なおその数は上端、下端共に $i-1$ 個である。

脚が重なり合って形成される菱形1個の面積は $l^2 \sin 2\phi \sin \theta$ でその数は $2ij - i - j + 1$ 個, 同三角形の面積は菱形の $\frac{1}{2}$ であり, その数は $2(i-1)$ 個, 第1列目の結節を除く脚の投影面積は $d(l \sin \delta - 3.03d)$ でその数は $2j$ 個である. この模式図の面積は幾何学的に次式で示すことができる.

$$S''_{B\theta C} = (2ij - j)l^2 \sin 2\phi \sin \theta + 2jd(l \sin \delta - 3.03d) + 6.08d^2\{2j+1\} + (i-1)(\theta/\theta^*) \quad (1-33)$$

網地試験片の網糸投影面積の実測値と (1-33) 式の計算値を比較して補正係数 $\lambda''_{\theta} = 0.88$ を得た. 即ち, 幾何学的に導いた (1-33) 式と補正係数の積として $0^\circ \leq \theta \leq \theta$ における蛙又結節網地の網糸投影面積の実験式を次のように表わした.

$$S''_{B\theta} = 0.88[(2ij - j)l^2 \sin 2\phi \sin \theta + 2jd(l \sin \delta - 3.03d) + 6.08d^2\{2j+1\} + (i-1)(\theta/\theta^*)] \quad (1-34)$$

なお, (1-34) 式に $\theta = 0^\circ$ を代入すると次式となる.

$$S''_{B(0)} = 0.88[2jd(l \sin \delta - 3.03d) + (2j+1)6.08d^2] \quad (1-35)$$

この迎角の範囲内の蛙又結節網地の網糸投影面積の実測値 $S'_{B\theta m}$ と (1-34) 式で求めた $S''_{B\theta}$ の関係を Fig. 1-24 に示した. 両者の相関係数は 0.946 であり 9 個の資料について t 検定を行ない 0.01 水準で有意な結果を得た.

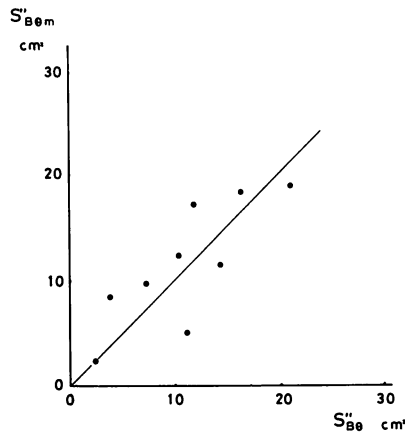


Fig. 1-24. Relationship between the calculated projective area and the measured area, at the range of attack angle, $0^\circ \leq \theta \leq \theta$ on the Weaver's knot nettings.

1. 2. 5. 網糸投影面積に関する考察

網地抵抗の研究では第1章で示した全投影面積 $S_{(90)}$ を代表面積とする場合と, 迎角 θ が 90° の場合の網糸投影面積を代表面積とする場合がある. 後者の場合は, 網糸太さが網糸投影面積におよぼす影響を考慮せず迎角 θ が 90° の場合の値を代表面積としている. 即ち, 迎角が小さくなると結節や脚の投影が重なり合う. その程度は目合, 網糸太さ, 縮結角に依存するために, これらの影響を受けた網地の抵抗係数が示されてきた. その結果抵抗係数は網

地毎に異なった値を示しその抵抗特性を明らかにすることができなかった。

この研究では網地構成の最小単位を網素子と考え、網地模型の網素子の投影面積を幾何学的に検討して式を立て、実測値と比較する方法で網地の投影面積の実験式を導いた。網素子は流体抵抗に関する網地構成の最小単位として立てた概念であるが、網糸投影面積の計算にも有益であった。即ち、網素子について面積を求めることにより、容易にその面積を算出できるようになった。網目の投影が消失する迎角の範囲では、供試網地全面について幾何学的な式を立て、実験値と比較した。網地投影面積の実測値は、写真の面積をプランメータで測定して求めた。500mmレンズを用いて撮影したがレンズの収差は除去することができなかった。然し格子板を被写体にした実験の結果測定面積は実面積と一致した。なお、網地模型について行った測定結果は、Fig. 1-9 および Fig. 1-10 に示すように計算値と良く一致した。これらの結果から、導いた実験式 (1-11) および (1-13) は有効であることが分かった。なお、網糸投影面積の測定方法が有効であることも裏づけることができた。

無結節網地については網地模型の式の結節部を実験的に修正した近似式と、網糸投影面積の実測値を比較して補正係数を導き、近似式を実験的に修正した。この場合も投影面上の網目の孔が消失する迎角 θ より大きい場合と小さい場合に分けて実験式を導いた。供試網地の目合、網糸太さが異なり縮結角が一定の網地の迎角を変えた場合と、同一網地の縮結角を変えて種々の迎角を与えた場合について実験を行い θ より大きい迎角では (1-18) 式、 θ より小さな迎角では (1-19) 式を導いた。これらの式は任意の網地 (l および d) について任意の網目形状、迎角 (ϕ および θ) を与えた場合の網糸投影面積を求める実験式である。

網地模型の式は円柱について立てたものであり、撚り糸で編網されている網地とは差異があることから、実験値と比較して式を補正した。無結節網地の補正係数は、 $\theta < \theta \leq 90^\circ$ の迎角の範囲では1.11、 $0^\circ \leq \theta \leq \theta$ の範囲では0.84であった。

蛙又結節網地については、 $\theta^* < \theta \leq 90^\circ$ の範囲では1.04であり、 $\theta < \theta \leq \theta^*$ の範囲では1.21、 $0^\circ \leq \theta \leq \theta$ の範囲では0.88であった。

投影面上の結節面積を求める実験式を導くためには複雑な形状をした蛙又結節を単純形状に近似した方が便利である。そのために写真の物指し近傍の結節を拡大し4個の結節をプランメータで測定した。これらの値は θ^* より大きい迎角では、迎角に依存しない結果を得、網糸直径との関係を (1-23) 式で表わすことができた。投影面上に網目の孔が現れる場合の脚の網糸投影面積は (1-27) 式で求めることができる。(1-23) 式から結節を直径が $2.8d$ の円で置き替えて、(1-26) 式で求めた実験値と比較した。この場合脚の長さが実際より長くなるために実験値より大きな値を示した。Fig. 1-14 に示す通り蛙又結節の脚の長さは脚長 l (目合の $\frac{1}{2}$) から結節長さ f を差し引いたものであることから脚の面積を求めるためには、結節形状はむしろ直径が f の円で置き替えた方が妥当である。このようにして求めた各迎角の f 値は迎角により若干の差があったが、網地毎の f の平均値 \bar{f} を用いることにした (Fig. 1-15 および Fig. 1-16 参照)。これらの差は Fig. 1-14 に示すように測定した結節長さ f_1 および f_2 の値が迎角により差があったためである。近似式 (1-25) で求めた計算値と実測値を比較すると、Fig. 1-20 に示すように計算値が僅かに大きくなった。両者の関係を回帰直線式で表わし係数0.84を得た。その理由は無結節網地

の場合と同様に網糸の外接円の直径を用いて計算したためと考えている (Fig. 1-16 参照).

STENGEL, H.・A. FISCHER¹⁶⁾ がどのような方法で実験し, 蛙又結節の投影面積を直径 $3d$ の相当円で表わしたかについては明らかにされていないが (1-21) 式は STENGEL, H.・A. FISCHER¹⁶⁾ とほぼ等しい値を示している. 投影面上の結節が互いに接する迎角 θ^* を求める場合についても蛙又結節は直径 $2.8d$ の球で置き変えるより, 直径 $3.03d$ の球で置き変えた場合の方が実験値に近い. 但し, 実験値は後者と仮定して求めた θ^* 値より若干大きく表れる場合が多かったが θ^* は計算過程で実験式を選択させることが目的であることから f を用いて差し支えないと考えた.

導いたこれらの実験式に任意の蛙又結節網地の網糸太さ, 目合, 縮結および迎角を代入することにより, その網地の網糸投影面積を求めることができる. これらの実験式を導く過程で設定した仮定や近似が妥当であることを確かめるために, 実測値に対応する計算値を求めた検定を行った結果, いずれの実験式の場合も 0.01 水準で有意であった. 即ち, 導いた実験式はいずれも充分実用に耐えることが裏付けられた.

第2章 網地の単純模型の抵抗

第1節 網素子の抵抗

2. 1. 1. 供試網素子および実験方法

網地抵抗の基礎実験として, 網地構成の最小単位である網素子を研究対象として, 実験方法や解析方法について検討を加えることにした.

この実験は Fig. 2-1 に示すように網素子拡大模型 1 個を研究対象とした. 従って, 迎角が小さな場合でも網素子相互の干渉が生じないために, 網地の基本的な流体抵抗特性を把握できる. 供試網素子は直径 1.0cm のポリエチレン 3 子右捻りロープで構成されている. 電流で加熱した細いステンレス線で長さ 40cm, 若しくは長さ 20cm にロープを切断し, それらの中央部を幅 1.0cm, 深さ 0.5cm に切り取り, 互いに交差させて接着した無結節網素子模型と, その中心に直径 4.5cm の木製球を取り付けた結節網素子模型の 4 種である. 前者の d/l は 0.025, 後者は 0.050 であった.

網素子模型の中心がコの字型網枠の中心に一致し, かつ, 脚の 2 等分線が流軸に一致するようにナイロン・テグス 1 号で強く張り付けた. いずれの場合も 2 脚の展開角の半角 (縮結角 ϕ) を 45° とした. 網素子模型を取り付けた網枠を抵抗検出器にセットピンで装着して, 迎角を $0 \sim 90^\circ$ の範囲で 5° 毎に与えて網素子が受ける流体抵抗の抗力および揚力を同時に測定した. 実験装置および実験方法の詳細を付録 II に示した. この場合の実験流速は 0.53 m/s であり, 水温 18°C で網糸直径を代表長さとしたレイノルズ数は 5×10^3 であった.

2. 1. 2. 網素子の抵抗測定結果

網素子が受ける流体抵抗の抗力と迎角および揚力と迎角の関係を Fig. 2-2 に示した. 抗力は迎角 0° で或る値を示し, 迎角が 90° で最大値を示した. 一方揚力は迎角が 0° と 90° で 0, 迎角 45° 付近で最大値を示した. 即ち, それぞれ両者の関係は次式で表わすことができる.

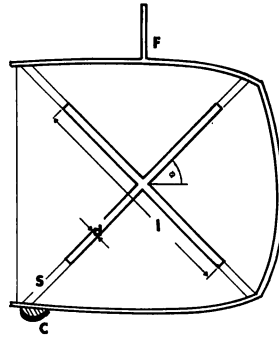


Fig. 2-1. Schematic drawing shows the braced up condition of an enlarged knotless netting element on the \sqcap -shaped netting frame.

C : Compensating lead

d : Diameter of twine (1.0cm)

F : \sqcap -shaped netting frame (Steel rod; dia. 0.8cm)

l : Length of leg (20 or 40cm)

S : Nylon leader (dia. 0.16mm)

$$D = D_0 + I_0 \sin^a \theta \quad (2-1)$$

$$L = I_L \sin^b \theta \cos^c \theta \quad (2-2)$$

流れと平行に置かれた網素子が受ける抵抗 D_0 は $\theta=0^\circ$ の網素子投影面積が受ける圧力抵抗と網素子表面積が受ける摩擦抵抗に基づいており、それぞれ別の媒介変数に支配されることが予測される。更に、Fig. 2-2 に示すように、目合および結節又は結節部の形状により抵抗に差異が生じる。網地の抵抗はその他網糸直径、縮結角、表面粗度等に関連した多くの媒介変数に支配される。従って、(2-1) 式の第1項と第2項はそれぞれ別の媒介変数を導くことが必要となり、それぞれの媒介変数を見出す為の実験を行わなければならない。(2-2) 式は単項であるために前者に比べ比較的取扱い易いが、未知数が3個あるために資料処理は複雑となる。

Fig. 2-3 に示すように網素子の流体抵抗 R は抗力 D と揚力 L のベクトル和であると共に、法線分力 N と接線分力 T のベクトル和でもある。

$$R = D + L = N + T \quad (2-3)$$

任意の迎角 θ で設置された網素子の法線分力 N および接線分力 T は、Fig. 2-3 から次式として表わすことができる。

$$N = D \sin \theta + L \cos \theta \quad (2-4)$$

$$T = D \cos \theta - L \sin \theta \quad (2-5)$$

(2-4) 式は $\theta=0^\circ$ で $N_0=0$ 、 $\theta=90^\circ$ で $N_{90}=D_{90}$ であり、(2-5) 式は $\theta=0^\circ$ で $T_0=D_0$ 、 $\theta=90^\circ$ で $T_{90}=D_{90}=0$ となる。

藤田・横田⁶⁾は漁網を格子状に網枠に張って実験を行い、ストークスの流体抵抗則からニュートンの流体抵抗則に移移するのは、網糸直径を代表長さにとったレイノルズ数が $4.5 \times 10^2 \sim 7.5 \times 10^2$ の範囲であることを報告している。

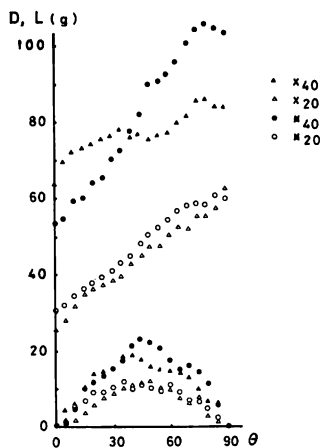


Fig. 2-2. Relationship between the respective attack angles and the measured drag forces; between the attack angles and the lift forces.

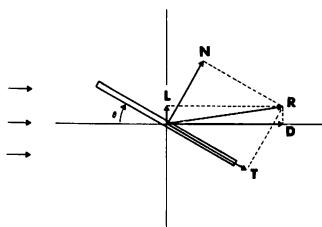


Fig. 2-3. Components of fluid-dynamical netting resistance at an attack angle θ .

D : Drag force R : Fluid dynamical resistance
 L : Lift force T : Tangential force
 N : Normal force θ : Attack angle

網素子の実験では 5×10^3 となるように流速を与えたことからこの場合ニュートンの抵抗則を適用できると推定した。このように考えると、網素子抵抗の法線分力および接線分力は、次式で表わすことができる。

$$N = (C_N/2) \rho s_{(90)} U^2 \quad (2-6)$$

$$T = (C_T/2) \rho s_{(90)} U^2 \quad (2-7)$$

従ってそれぞれの抵抗係数は、次式となる。

$$C_N = 2N / (\rho s_{(90)} U^2) \quad (2-8)$$

$$C_T = 2T / (\rho s_{(90)} U^2) \quad (2-9)$$

この場合 $s_{(90)}$ は、網素子 1 個の全投影面積であり、Fig. 1-11 に点線で囲んで示すように、それぞれの脚に平行でかつ脚の中間を通る 4 本の線で囲まれる面積である。網素子は長さ l の網糸が縮結角の倍角 2ϕ で交差した構造物であり、この場合 ϕ を 45° としたことから、 $s_{(90)} = l^2$ である。

(2-8) 式で求めた各網素子の法線分力係数と迎角の関係を Fig. 2-4 に, (2-9) 式で求めた各網素子の接線分力係数と迎角の関係を Fig. 2-5 に示した. 脚長が20cmの無結節網素子および同結節網素子の各抵抗係数は, 脚長が40cmの各網素子より大きな値を示した. この場合結節の有無と各抵抗係数の関係は明らかにできなかった.

これらの結果前者を正弦関数, 後者を余弦関数として次式のように仮定した.

$$C_N = N / \sin^a \theta \quad (2-10)$$

$$C_T = T / \cos^b \theta \quad (2-11)$$

なお, (2-10) 式および (2-11) 式は未知数が2個であることから重回帰法を用いることができ, (2-10) 式の C_N と a , (2-11) 式の C_T と b を最小自乗法を用いることにより容易に求めることができる.

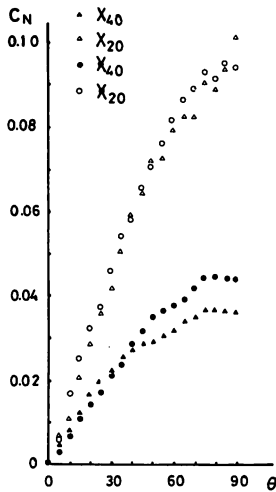


Fig. 2-4.

Fig. 2-4. Relationship between the attack angle and the coefficient of normal force concerning netting element models. The coefficient C_N is based on the total projective area l^2 .

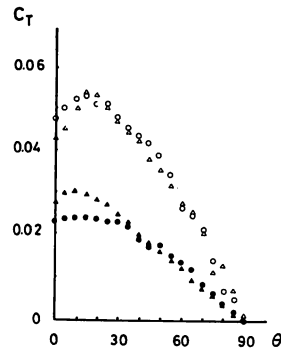


Fig. 2-5.

Fig. 2-5. Relationship between the attack angle and the coefficient of tangential force concerning netting element models. The coefficient C_T is based on the total projective area l^2 .

これらの各抵抗係数は後述の多くの媒介変数に支配されているが, いずれの抵抗係数も, 基本となる網地の抵抗係数と網地抵抗を支配する媒介変数の積の形として表わすことができるものと仮定した.

$$C_N = C_{Nn} \{ f_{(Re)}, f_{(l,j)}, f_{(d,l)}, \dots, f_n \} \quad (2-12)$$

$$C_T = C_{Tn} \{ f_{(Re)}, f_{(l,j)}, f_{(d,l)}, \dots, f_n \} \quad (2-13)$$

資料処理上の理由から, この研究では法線分力係数および接線分力係数を求め, これらの抵抗係数を支配する種々の媒介変数を見出すことにした.

漁網の抵抗係数を支配する媒介変数は、レイノルズ数 Re 、迎角 θ 、縮結角 ϕ 、網糸直径 d 、目合 $2l$ 、結節形状、網糸形状、網目数 ij …等であり、これらの要因が互いに関連し合い複雑に影響をおよぼし合っていることが予測される。この研究ではできるだけ要因を少なくして実験を行うことにより与えた条件下での抵抗特性を明らかにし、更に別な条件下での抵抗特性を調べるにより網地の抵抗特性を順次明らかにすることを試みたものである。即ち、この節の実験は網目数、網糸直径、レイノルズ数、縮結角、網糸を等しくして脚長および結節の形状を変えて実験を行ったことになる。

Fig. 2-4 および Fig. 2-5 に示す脚長の効果を除去するために網素子の全投影面積 s_{90} に対する網糸投影面積 $s_{b\theta}$ の比率を見掛の空隙率 (Apparent solidity of mesh) として媒介変数とした。この場合の法線分力係数 C_{N1} および接線分力係数 C_{T1} は次式で定義される。

$$C_{N1} = C_N(s_{90}/s_{b\theta}) = 2N/\rho s_{b\theta} U^2 \quad (2-14)$$

$$C_{T1} = C_T(s_{90}/s_{b\theta}) = 2T/\rho s_{b\theta} U^2 \quad (2-15)$$

但し、投影面上に網目の孔が現れる迎角の範囲における無結節網素子の投影面積は第1章第1節に示す (1-10) 式を用いた。結節の代わりに中央部に直径4.5cmの球を取り付けた結節網素子の場合は、(1-26) 式を応用してそれぞれ次式として与えた。

$$s'_{b\theta} = 2dl \sin \delta - d^2/\sin^2 \epsilon \quad (1-10)$$

$$s'_{b\theta} = 2d(l \sin \delta - 2.25) + \pi(2.25d)^2 \quad (2-16)$$

幾何学的に導いたこれらの式の第1項は脚の投影面積であり、第2項は結節部または結節を表わす球の面積である。この場合、脚長40cmの網素子モデルの脚の投影が互いに接する迎角 θ は約 1° であり、脚長20cm網糸直径1cmの場合の θ は約 2° であった。一方、設定迎角は 5° 毎としたので、 $5^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ の迎角の範囲では (1-10) 式および (2-16) 式を、 $\theta=0^\circ$ の場合は次式を用いた。

$$s''_{b0} = dl \sin \phi \quad (2-17)$$

$$s''_{b0} = d(l - 4.5) \sin \phi + 5.06 \pi d^2 \quad (2-18)$$

この場合供試網素子は1個であるため2列目以後の結節との重なりは考慮する必要はない。それぞれの網素子について見掛の空隙率を求め、迎角との関係を Fig. 2-6 に示した。これらの値を (2-14) 式および (2-15) 式に代入して法線分力係数および接線分力係数を求め迎角との関係を、Fig. 2-7 および Fig. 2-8 に示した。それぞれの両者の関係を次式で表わし、それぞれの重回帰曲線式を求めた。

$$C_{N1} = C_{N2} \sin^m \theta \quad (2-19)$$

$$C_{T1} = C_{T2} \cos^n \theta \quad (2-20)$$

その結果指数 m , n はいずれも1で近似できることが分り、次式として再び重回帰曲線式を最小自乗法を用いて求め、それぞれの式を Fig. 2-7 および Fig. 2-8 に示した。

$$C_{N1} = C_{N2} \sin \theta \quad (2-21)$$

$$C_{T1} = C_{T2} \cos \theta \quad (2-22)$$

C_{N2} の値はいずれも0.9、 C_{T2} の値は無結節網素子で0.8、結節網素子で0.6であった。但し、 $\theta=0^\circ$ の場合の C_{T2} の値は特異でありいずれも大きく現われた。この迎角を除くと導いた実験式はいずれも実験値と良く一致した。これらの結果から網素子の法線分力は、いずれの場合も次式で与えられる。

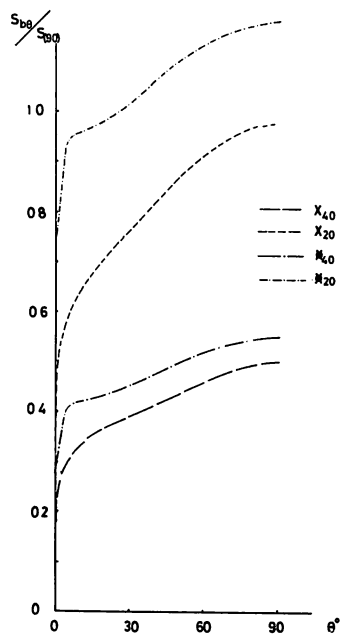


Fig. 2-6. Relationship between the attack angle θ and the apparent solidity of mesh concerning the enlarged netting element models.

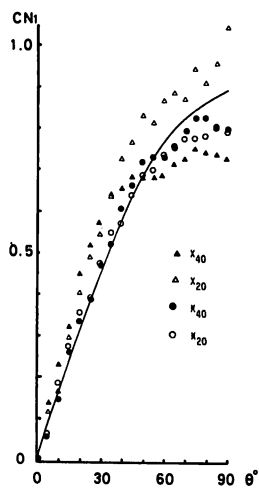


Fig. 2-7.

Fig. 2-7. Relationship between the attack angle and the normal coefficient based on the parameter of the apparent solidity of mesh.

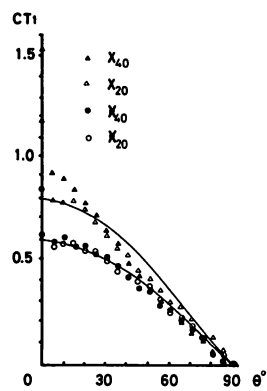


Fig. 2-8.

Fig. 2-8. Relationship between the attack angle and the tangential coefficient based on the parameter of the apparent solidity of mesh.

$$\begin{aligned}
 N &= (C_N/2)\rho S_{(90)}U^2 = (C_{N1}/2)(S_{b\theta}/S_{(90)})\rho S_{(90)}U^2 \\
 &= (C_{N2}/2)\rho S_{b\theta}U^2 \sin\theta = 0.45\rho S_{b\theta}U^2 \sin\theta
 \end{aligned}
 \tag{2-23}$$

なお、接線分力は、

$$\begin{aligned}
 T &= (C_T/2)\rho S_{(90)}U^2 = (C_{T1}/2)(S_{b\theta}/S_{(90)})\rho S_{(90)}U^2 \\
 &= (C_{T2}/2)\rho S_{b\theta}U^2 \cos\theta
 \end{aligned}
 \tag{2-24}$$

となる。即ち、無結節網素子の場合は、

$$T = 0.4\rho S_{b\theta}U^2 \cos\theta \tag{2-25}$$

蛙又結節網素子の場合は、

$$T = 0.3\rho S_{b\theta}U^2 \cos\theta \tag{2-26}$$

与えられる。

2. 1. 3. 網素子の抵抗に関する考察

網地の単純化模型として網素子拡大模型4種の迎角を変えて一定流速の下で抵抗測定した。網地の抵抗は一般に抗力と揚力として検出され、殆どの場合抗力係数 C_D および揚力係数 C_L が求められている。

この節で行った実験は網地構成の最小単位である網素子1個を供試材料とすることにより解析の方法を確立して、網素子相互の干渉のない抵抗特性を明らかにすることを目的としている。その結果法線分力係数を正弦関数で、接線分力係数を余弦関数で表わすことができた。無結節網地の片子糸の数は2子であるのに対し、網素子拡大模型に用いたロープは3子であり結節部の形状もかなり異なっている。結節網素子については網糸の構造は等しいが結節の代わりに用いた球はロープの直径が1cmであったのに対し直径4.5cmであり、(1-23)式で求めた値より2.6倍大きい投影面積を示している。また、導いたこれらの抵抗係数は、脚の端部に作用する流れの影響を含みかつ網素子相互の干渉の影響を含んでいない。そのため導いた実験式はそのまま網地に適用することはできない。然し、網素子拡大模型について行ったこの実験から網地の流体抵抗特性の概略を把握でき、解析方法を確立できた。

第2節 網地模型の抵抗

前節で行った網素子の抵抗に関する実験式は、網素子相互の干渉のない場合であり、脚の端の効果を含むものであることから網地抵抗の予備実験として網地模型についてその流体抵抗特性を明らかにすることを試みた。この節では平面網地は平板に孔が明いた構造物と考え、平面網地模型および平板孔明き模型の流体抵抗特性を調べ検討を加えた。また、平板孔明き模型用の平板についても実験を行った。

2. 2. 1. 供試模型および実験方法

実験に用いたM型網地模型は、直径2.1cm若しくは1.1cmの塩化ビニル丸棒で構成されており、脚長が3cmまたは6cm、縮結角が45°となるように組み合わせた構造物で、脚長3cmの M_{23} , M_{13} 模型の目数は10×10目、脚長6cmの M_{26} , M_{16} 模型では5×5目であった(Table 2-1 参照)。

Table 2-1. Principal dimensions of netting models and attack angle noted when the mesh holes were faded out on a projected plane.

Netting model	Hole dia. or leg length (cm)	Thickness (cm)	θ' or θ (deg.)	Hole numbers	Mesh numbers	Remarks
P ₂₁	1.1	2.1	43.7	181	—	Plate
P ₁₁	1.1	1.1	26.6	181	—	〃
P ₁₂	2.1	1.1	14.7	181	—	〃
M ₂₃	3.0	2.1	29.7	181	100	Mesh
M ₂₆	6.0	2.1	14.3	41	25	〃
M ₁₃	3.0	1.1	15.0	181	100	〃
M ₁₆	6.0	1.1	7.5	41	25	〃

θ' : Attack angle noted when a drilled hole was faded out.

θ : Attack angle noted when a mesh hole was faded out.

M₂₃ 模型および M₁₃ 模型に相当する面積の塩化ビニル方形板 (厚さ2.1cm若しくは1.1cm) の前縁と後縁を半円形に削り平板模型 P₁₁, P₂₁ とした. これらの抵抗測定を行った後, M₂₃ の網目の孔に相当する直径1.1cmの孔を P₂₁ に, M₁₃ の網目に相当する直径2.1cmの孔を P₁₁ に明けて孔明き平板模型 P₂₁, P₁₂ とした, P₁₂ の製作過程で P₁₁ に直径1.1cmの孔を明けた P₁₁ を製作し, これらの抵抗特性を調べた. 供試模型の概要を Fig. 2-9 に示した. これらの模型の上辺中央に直径10mmの丸鋼材を垂直に取り付けて模型の支持棒とした. 従って, 流れに垂直に設置された模型の空隙率 ($S_{B/90}/S_{90}$) は, $M_{13} \div M_{26} \div P_{12}$, $M_{23} \div P_{21}$ である. 網地模型と孔明き平板模型の空隙率を等しくする計画であったが網地模型を先に作ったために, 網目の孔の面積に一致するドリルの刃がなく空隙率には僅かな差があった.

これらの模型を付録Ⅱに示す抵抗検出器に取り付けて, 90°~0°の範囲で5°毎に迎角を設定して実験を行った. 丸棒の直径または板厚を代表長さとしたレイノルズ数の範囲は Table 2-2 に示すように, $1.5 \times 10^3 \sim 1.4 \times 10^4$ であった. 網地模型の全投影面積は (1-4) 式で, 網糸投影面積は迎角により (1-11) 式若しくは (1-13) 式を用いて求めた. 平板模型は1辺の長さが L であるために 0°を除く任意の迎角 θ における投影面積 $S_{P\theta}$ は次式となる.

$$S_{P\theta} = L^2 \sin \theta \quad (2-27)$$

但し, 迎角が 0°の場合は次式で与えられる.

$$S_{P(0)} = dL \quad (2-28)$$

孔明き平板の場合は, 孔の前縁と後縁が接する迎角 θ' を次式で求めた (Fig. 2-10 参照).

$$\theta' = \tan^{-1}(d/2a) \quad (2-29)$$

但し, $2a$ は孔の直径である. 迎角が $0^\circ < \theta \leq \theta'$ の範囲では (2-27) 式を, $\theta = 0^\circ$ の場合は (2-28) 式を適用して投影面積を求めた. なお, 迎角が $\theta' < \theta \leq 90^\circ$ の範囲における網目の孔の投影面積は, Fig. 2-10 に斜線で示すように平板の表面と裏面の2個の楕円が互いに重なり合った部分である. 従って, 図から次の式を得る.

$$b = a \sin \theta \quad (2-30)$$

$$c = a \sin \theta - (d/2) \cos \theta \quad (2-31)$$

Table 2-2. Dimensions of the netting models ; fixed flow velocity and Reynolds number.

Netting model	Hole dia. or leg length (cm)	Thickness (cm)	$S_{(90)}$ (m) ²	Velocity (m/s)	Reynolds number
P ₁	—	1.1	0.178	0.230	2×10^3
P ₂	—	2.1	0.195	0.120	2×10^3
P ₂₁	1.1	2.1	0.195	0.123	2×10^3
P ₁₁	1.1	1.1	0.178	0.233	2×10^3
P ₁₂	2.1	1.1	0.178	0.233	2×10^3
M ₂₃	3.0	2.1	0.187	0.214	5×10^3
〃	〃	〃	〃	0.266	5.6×10^3
〃	〃	〃	〃	0.407	1×10^4
〃	〃	〃	〃	0.569	1.4×10^4
M ₂₆	6.0	2.1	0.171	0.114	2.8×10^3
〃	〃	〃	〃	0.270	5×10^3
〃	〃	〃	〃	0.286	7×10^3
〃	〃	〃	〃	0.570	1.4×10^4
M ₁₃	3.0	1.1	0.176	0.275	2.9×10^3
〃	〃	〃	〃	0.387	5×10^3
〃	〃	〃	〃	0.569	7.3×10^3
M ₁₆	6.0	1.1	0.180	0.114	1.5×10^3
〃	〃	〃	〃	0.286	3.7×10^3
〃	〃	〃	〃	0.387	5×10^3

$S_{(90)}$: Total projective area of the model.

今、2個の楕円の交点を $A(x, y)$ とすれば次式が成立する.

$$y = b - c = (d/2)\cos\theta \quad (2-32)$$

この式を楕円の式に代入して x を求めると次式を得る.

$$x = \{a^2 - (d^2/4)\cot^2\theta\}^{1/2} \quad (2-33)$$

扇形 AOM の面積 A_1 は公式より次式となる.

$$A_1 = \pi ab/4 - (ab/2)\cos^{-1}(x/a) \quad (2-34)$$

故に、ACM の面積 A_2 は次式で得ることができる.

$$A_2 = A_1 - xy/2 = \pi ab/4 - (ab/2)\cos^{-1}(x/a) - xy/2 \quad (2-35)$$

迎角 θ における孔の投影面積 A_θ は ACM の4倍であるから次式となる.

$$\begin{aligned} A_\theta &= 4A_2 = \pi ab - 2ab\cos^{-1}(x/a) - 2xy \\ &= a^2\sin\theta \left[\pi - 2\cos^{-1}\{[a^2 - (d^2/4)\cot^2\theta]^{1/2}/a\} \right] \\ &\quad - (d/2)\cos\theta \{a^2 - (d^2/4)\cot^2\theta\}^{1/2} \end{aligned} \quad (2-36)$$

孔明き平板模型には10×10目の網地模型に対応させるために、181個の孔があることから $\theta' < \theta \leq 90^\circ$ の迎角の範囲での、孔を除く投影面積 $S_{p\theta}$ は次式となる.

$$S_{p\theta} = L^2\sin\theta - 181A_\theta \quad (2-37)$$

それぞれの模型について前述の投影面積の式を用いて網素子拡大模型の場合と同様に法線分力係数および接線分力係数を求めることにした.

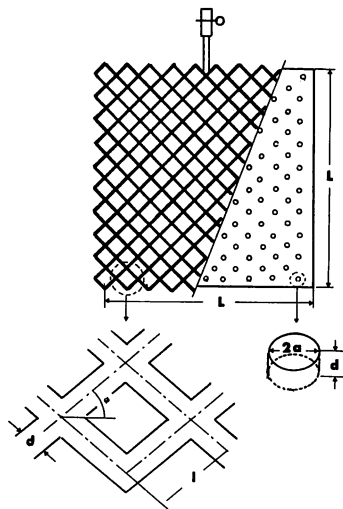


Fig. 2-9. Schematic drawing shows a mesh model, and a drilled plate model, with their dimensions represented in the Table 2-1.

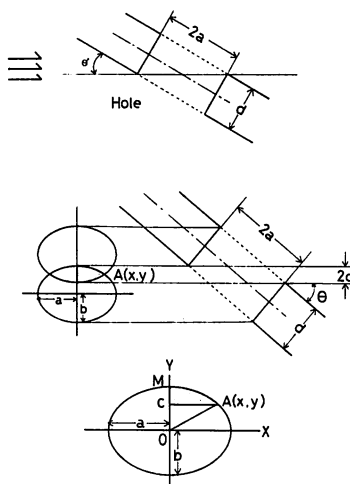


Fig. 2-10. Explanation of the attack angle θ' and the projective hole area concerning the drilled hole plate model.

2. 2. 2. 網地模型の抵抗測定結果

流れの中に設置された物体の周りの流れの形状はレイノルズ数に依存しており、単純な形状をした物体では流速の自乗に比例する範囲があることが明らかにされている。即ち、このようなレイノルズ数の範囲ではそれらの物体の抗力係数はレイノルズ数の影響を受けない。前述の理由からこの範囲内で網地模型について実験を行った。回流水槽の常用流速は

0.2~0.7m/sであるために網糸としては実在しない太い塩化ビニル丸棒を用い比較的大きいレイノルズ数で実験することにした。この場合網地では丸棒の直径 d を、孔明き平板模型および平板では板厚 d を代表長さとした。

それぞれの模型について導いた実験式の C_{N2} とレイノルズ数の関係を Fig. 2-11 に示した。実験時のレイノルズ数は $1.5 \times 10^3 \sim 1.4 \times 10^4$ でありその間の C_{N2} の値はほぼ一定であった。平板および孔明き平板模型の場合は P_{12} 模型を除きいずれも幾分大きい値を示した。

網地模型、孔明き平板模型の測定値を (2-14) 式および (2-15) 式で資料処理し、それぞれの模型について法線分力係数および接線分力係数を求め、これらの抵抗係数と迎角の関係を図示した。Fig. 2-12 は平板の場合、Fig. 2-13 は孔明き平板の場合、Fig. 2-14 a~d は網地模型の場合である。

平板 P_1 , P_2 の法線分力係数は迎角が $25 \sim 30^\circ$ 付近にピークを持つ 3 次曲線的形状を示した。孔明き平板 P_{11} , P_{21} 模型は $\theta = 25^\circ$ でピークが現れた。然し、孔の大きい P_{12} 模型は正弦曲線的形状を示した。網糸直径に対する脚長の比率 d/l 値の最も大きい M_{23} 模型では、 $\theta = 25^\circ$ 付近にピークが出現したが、他の M_{26} , M_{13} および M_{16} では正弦曲線的形状を示した。これらの結果投影面上の網目の孔が消失する迎角 θ または θ' が小さいときには C_{N1} は正弦関数として表わすことができ、 25° より大きい場合は平板の特徴であるピークが出現することが明らかとなった。接線分力係数については、いずれも迎角が 0° の場合に大きい値を示した。然し、 θ または θ' より大きい迎角の範囲では余弦曲線で表わすことができた。

網漁具に用いられる漁網の脚長は網糸直径より桁違いに大きいために、一般に θ は数度であることから、法線分力係数は正弦関数で接線分力係数は余弦関数で表わしても良いと考えた。これらの結果に基づいて、それぞれの実験値を (2-19) および (2-20) 式で資料処理した。実験結果を Table 2-3 および Fig. 2-14 a~d に示した。

Table 2-3. Results of the regression concerning the experimental equation (2-19) and (2-20), for the mesh models.

Mesh model	$Re(d)$	C_{N2}	m	r	C_{T2}	n	r
M_{23}	5.0×10^3	1.754	0.259	0.868	0.463	1.165	0.906
〃	5.6×10^3	1.622	0.097	0.877	0.396	1.710	0.885
〃	1.0×10^4	1.682	0.061	0.473	0.571	2.082	0.979
〃	1.4×10^4	1.564	0.144	0.579	0.601	2.080	0.983
M_{26}	2.8×10^3	1.359	0.245	0.892	0.471	1.044	0.950
〃	5.0×10^3	1.332	0.254	0.917	0.583	1.734	0.967
〃	7.0×10^3	1.187	0.157	0.809	0.349	1.304	0.835
〃	1.4×10^4	1.259	0.155	0.889	0.788	2.957	0.944
M_{13}	2.9×10^3	1.543	0.284	0.932	0.516	1.904	0.984
〃	5.0×10^3	1.488	0.256	0.886	0.631	1.858	0.963
〃	7.3×10^3	1.423	0.174	0.645	0.614	1.700	0.995
M_{16}	1.5×10^3	1.128	0.408	0.915	0.340	1.342	0.877
〃	3.7×10^3	0.973	0.225	0.927	0.594	1.777	0.956
〃	5.0×10^3	1.232	0.454	0.979	0.668	1.194	0.980

r : Coefficient of correlation

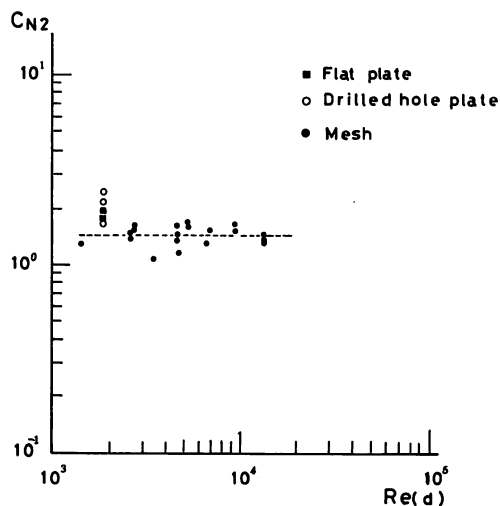


Fig. 2-11. Relationship between the Reynolds number based on a twine diameter and the normal coefficient at 90 degree of attack angle concerning mesh model, drilled plate and flat plate.

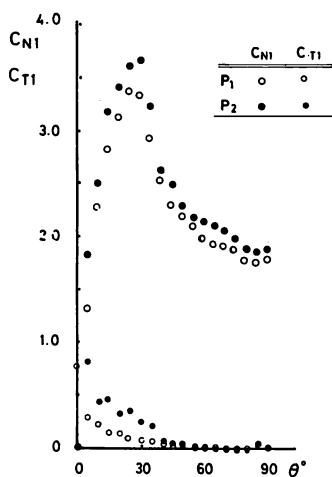


Fig. 2-12.

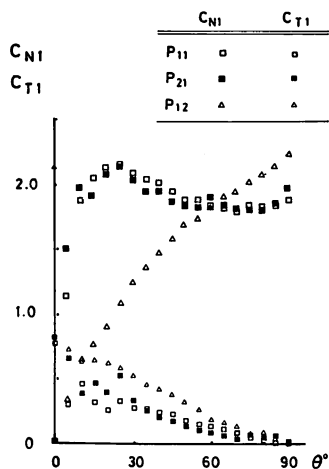


Fig. 2-13.

Fig. 2-12. Relationship between the attack angle and the normal coefficient : between the attack angle and the tangential coefficient, on the flat plate models P_1 , P_2 . Large symbol mark shows normal coefficient and small one shows tangential coefficient.

Fig. 2-13. Relationship between the attack angle and the normal coefficient (large mark); between the attack angle and the tangential coefficient (small mark), on the three drilled plate models.

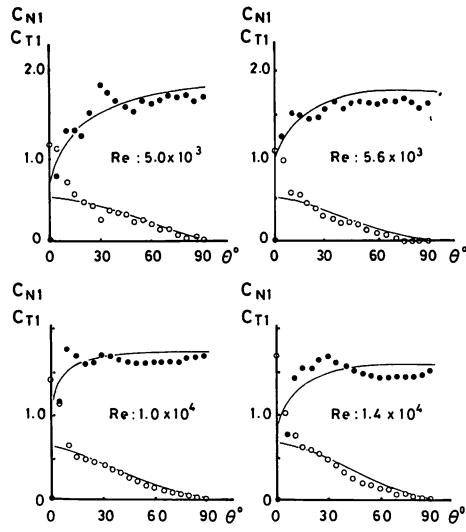


Fig. 2-14-a. Relationship between the attack angle and the normal coefficient ; between the attack angle and the tangential coefficient, concerning the M_{23} mesh model of the respective Reynolds number. A black dot shows a value of the normal coefficient and white one shows tangential coefficient.

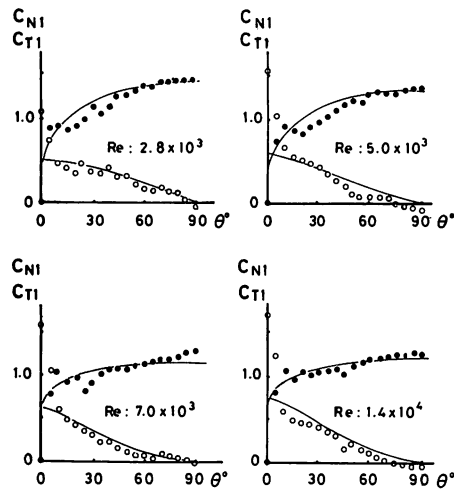


Fig. 2-14-b. Relationship between the attack angle and the normal coefficient ; between the attack angle and the tangential coefficient, concerning the M_{26} mesh model of the respective Reynolds number.

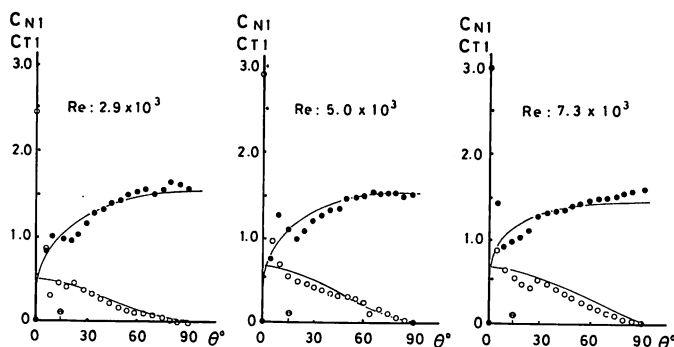


Fig. 2-14-c. Relationship between the attack angle and the normal coefficient ; between the attack angle and the tangential coefficient, concerning the M_{13} mesh model of the respective Reynolds number.

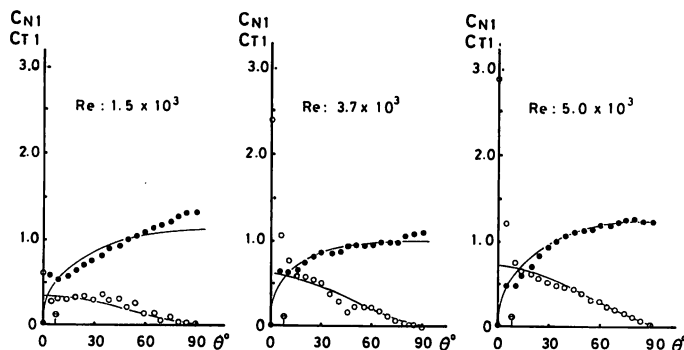


Fig. 2-14-d. Relationship between the attack angle and the normal coefficient ; between the attack angle and the tangential coefficient, concerning the M_{16} mesh model of the respective Reynolds number.

2. 2. 3. 網地模型の抵抗に関する考察

網地は網素子の集合であり迎角の小さな範囲では網素子相互の干渉が生じる。このような場合の網地の流体抵抗特性を調べるために相互干渉の生じ易い d/l 値の大きい網地模型について実験した。

Fig. 2-11 に法線分力係数とレイノルズ数の関係を描いた、それらの値はほぼ一定であった。即ち、予期したように、ニュートンの流体抵抗則が適用されるレイノルズ数の範囲内にあることが分かった。 d/l 値が非常に大きい網地模型についても見掛の空隙率を媒介変数として資料処理すると法線分力係数は目合や網糸太さに依存しない値となることが明らかとなった。平板および孔明き平板については、レイノルズ数が 2×10^3 となる流速についてのみ実験を行ったが、いずれも網地模型より若干大きい値を示した。投影面上の網目の孔が消失する迎角 θ' または θ の値が 25° より大きい $P_{21}(\theta' = 43.7^\circ)$, $P_{11}(\theta' = 26.6^\circ)$ および

$M_{23}(\theta=29.7^\circ)$ 模型の法線分力係数は 25° 付近でピークを示した。一方、 θ が 25° より小さい $P_{12}(\theta=14.7^\circ)$, $M_{13}(\theta=15.0^\circ)$, $M_{26}(\theta=14.3^\circ)$ および $M_{16}(\theta=7.5^\circ)$ 模型については、 θ 付近に小さいピークが現れた。従って、 $0^\circ \leq \theta \leq \theta$ の範囲では正弦曲線で近似できないことが分かった。また、接線分力係数はこの迎角の範囲では大きい値を示し、余弦曲線で近似することができなかった。これらの場合、水は網目を通らず網地面に沿って流れるために、水が網目を通過する場合と異なった物理学的要因に支配されていると考えた。

これらの実験結果から θ' または θ は、網地の抵抗特性に密接に関与しており、 θ が 25° より小さい網地の各抵抗係数はそれぞれ (2-19) 式および (2-20) 式で近似できることが明らかとなった。 d/l 値が最も小さい網地模型 $M_{16}(d/l=0.183)$ は、漁網としては d/l 値の最も大きいトロール網のコッド・エンド網地に相当していることから、網素子について導いた (2-19) 式および (2-20) 式は全ての漁網用網地に適用できることが明らかとなった。この場合、正弦関数の指数 m は1より小さく、余弦関数の指数 n は1より大きい値を示した。これらの指数は網素子相互干渉の程度に関連していることが予測されたが、資料にかなりのばらつきがあり両者の関係を明確にできなかった。

P_{12} 模型の見掛けの空隙率は M_{13} 模型および M_{26} 模型とほぼ等しいが P_{12} 模型の C_{N1} の値が他の模型に比べ高い値を示したのは網目形状の差に基づいていると推定した。網地模型 M_{13} , M_{26} は幾何学的に相似であるにもかかわらず抵抗係数に差が生じたのは M_{13} が 10×10 目であるのに対し、 M_{26} が 5×5 目であり、端の影響が現れたものであろう。即ち、網漁具設計の基礎資料とするためには端部の影響を受けない網地抵抗係数でなければならない。そのためには模型に何らかの工夫をするか、端の影響が無視できる網目数を明らかにし、そのような網目数の網地について、抵抗測定しなければならない。

第3章 網地の流体抵抗

第1節 レイノルズ数異なる場合の網地抵抗

水中を相対運動する物体が受ける流体抵抗は、物体の周りの流れの形状により差異が生じ流れの形状はレイノルズ数に依存している。

抗力係数とレイノルズ数の関係は球や円柱のような単純形状の物体については解明されており、それらの直径を代表長さとしたレイノルズ数の或る範囲内では、抗力係数はレイノルズ数に依存せずほぼ一定の値を示すことが明らかにされている。このような範囲内ではレイノルズ数の影響を考慮することなく解析できる。まず、法線分力係数および接線分力係数とレイノルズ数の関係を調べ、前述のレイノルズ数の範囲内で次の段階の実験条件で実験し、その実験条件を支配する媒介変数を見出すことにした。網地構成の最少単位を網素子と考えたことから、網糸直径を代表長さとしたレイノルズ数を用いている。

この節は主に北海道大学水産学部大型水理実験水槽で行った曳航実験に基づいている。実験に用いた各水槽の概要を付録Ⅰに、実験装置と実験方法の概要を付録Ⅱに示した。第2章で示した網地単純模型の実験で設定した見掛けの空隙率を用いた抵抗係数に、添字1をつけて表したように、新しい媒介変数を用いて求めた各抵抗係数に添字2をつけて表した。

3. 1. 1. 供試網地および実験方法

網地抵抗の法線分力係数および接線分力係数とレイノルズ数の関係を調べるために、曳航実験を行った。実験に用いた網地は、2子撚り式貫通型無結節網地2種と3子撚り糸を用いた蛙又結節網地2種である。この実験では全て内割縮結2割9分3厘（縮結角 $\phi=45^\circ$ ）であり、供試網地の網目数は全て 9×9 目であった。実験に用いた網地の概要を Table 3-1 に示した。各抵抗係数とレイノルズ数の関係を調べるためには、できるだけ網糸の太い網地を選ぶべきであったが、両網地の特性を比較するために d/l 値の似た網地を選ぶことにした。即ち、IM-2 網地の d/l 値は0.064、IK-2 網地は0.067であり、IM-3 網地の d/l は0.053、IK-3 網地は0.056であった。無結節網地は蛙又結節網地に比べ用途が狭いために手持ちの網地の種類が少なく、そのためにこのような供試網地を選ぶ結果となった。

物体の抵抗係数とレイノルズ数の関係を論ずる場合、抗力係数について検討されるのが一般的である。この研究では第2章第1節に示す資料処理上の理由から、網地抵抗を法線分力 N と接線分力 T に分解して解析した。そのために、レイノルズ数がこれらの抵抗係数にどのように影響するかを調べる必要があった。

付録Ⅱの Fig. Ⅱ-3 に示す実験装置を用い、迎角を迎角として $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ の9段階与えた。それぞれの迎角について0.2, 0.4, 0.6, 0.8 m/s とレイノルズ数が 1.3×10^3 となる曳航速度について実験を行った。但し、レイノルズ数が 1.3×10^3 となる曳航速度の近傍の実験は行っていない。実験時のレイノルズ数の範囲は無結節網地の場合 $6.1 \times 10^2 \sim 3.0 \times 10^3$ であり、蛙又結節の場合 $5.9 \times 10^2 \sim 3.1 \times 10^3$ であった。

Table 3-1. Principal dimensions of the netting used in the towing tank experiments.

Netting	Re	d (cm)	l (cm)	d/l	i	j	Materials
IM-2	7.6×10^2	0.39	6.11	0.064	9	9	PE
IM-2	1.3×10^3	〃	〃	〃	〃	〃	〃
IM-2	2.3×10^3	〃	〃	〃	〃	〃	〃
IM-2	3.0×10^3	〃	〃	〃	〃	〃	〃
IM-3	6.1×10^2	0.31	5.84	0.053	9	9	PE
IM-3	1.3×10^3	〃	〃	〃	〃	〃	〃
IM-3	1.8×10^3	〃	〃	〃	〃	〃	〃
IM-3	2.4×10^3	〃	〃	〃	〃	〃	〃
IK-2	7.8×10^2	0.40	6.00	0.067	9	9	PE
IK-2	1.3×10^3	〃	〃	〃	〃	〃	〃
IK-2	2.3×10^3	〃	〃	〃	〃	〃	〃
IK-2	3.1×10^3	〃	〃	〃	〃	〃	〃
IK-3	5.9×10^2	0.31	6.05	0.056	9	9	PE
IK-3	1.3×10^3	〃	〃	〃	〃	〃	〃
IK-3	1.8×10^3	〃	〃	〃	〃	〃	〃
IK-3	2.4×10^3	〃	〃	〃	〃	〃	〃

3. 1. 2. 異なるレイノルズ数における網地の抵抗

第2章第1節に示した網素子の実験と同様網地が受ける流体抵抗の抗力と揚力を測定し見掛けの空隙率を媒介変数として法線分力係数 C^*_{N1} と迎角 θ および接線分力係数 C^*_{T1} と迎角 θ の関係を調べた。この場合も網地模型の場合と同様それぞれ両者の関係を次式で表した。

$$C^*_{N1} = C^*_{N2} \sin^m \theta \quad (3-1)$$

$$C^*_{T1} = C^*_{T2} \cos^n \theta \quad (3-2)$$

それぞれの網地のそれぞれの曳航速度について (3-1) 式の C^*_{N2} および m の値、(3-2) 式の C^*_{T2} および n の値を重回帰曲線式として最小自乗法を用いて求め Table 3-2 に示した。 m の値は正弦曲線の形状を、 n の値は余弦曲線の形状を表わすが、それぞれの指数の平均値、即ち、無結節網地の場合 $m=0.80$, $n=1.25$, 蛙又結節網地の場合 $m=0.80$, $n=1.20$ と置いて再び最小自乗法を用いて計算を行いそれぞれの網地について係数 C^*_{N2} および C^*_{T2} を求めた。網地模型の場合と同様、迎角 0° の接線分力係数は大きい値を示したことからこの場合は迎角 0° の資料を除いて処理した。

Table 3-2. Results of regression using the equation (3-1) and (3-2), in the towing tank experiments.

Netting	Re	C^*_{N2}	m	C^*_{T2}	n
IM-2	7.6×10^2	0.96	0.66	0.83	1.55
IM-2	1.3×10^3	1.13	0.85	0.75	1.39
IM-2	2.3×10^3	1.18	0.90	0.75	1.25
IM-2	3.0×10^3	1.10	0.85	0.77	1.40
IM-3	6.1×10^2	0.99	0.74	0.82	1.45
IM-3	1.3×10^3	1.23	0.88	0.73	1.22
IM-3	1.8×10^3	1.18	0.86	0.76	1.19
IM-3	2.4×10^3	1.18	0.92	0.76	1.27
			(4/5)		(5/4)
IK-2	7.8×10^2	0.87	0.66	0.60	1.20
IK-2	1.3×10^3	0.92	0.81	0.56	1.20
IK-2	2.3×10^3	0.95	0.89	0.56	1.20
IK-2	3.1×10^3	0.91	0.79	0.55	1.20
IK-3	5.9×10^2	0.87	0.70	0.49	1.21
IK-3	1.3×10^3	0.98	0.77	0.57	1.21
IK-3	1.8×10^3	1.01	0.91	0.52	0.91
IK-3	2.4×10^3	0.98	0.89	0.57	1.21
			(4/5)		(6/5)

無結節網地 (IM 網地) 2 種, 蛙又結節網地 (IK 網地) 2 種のそれぞれのレイノルズ数に対する法線分力係数 C^*_{N2} および接線分力係数 C^*_{T2} を Table 3-3 に示した。第3章第2節に後述する理由から無結節網地の場合は $4\theta \sim 90^\circ$, 蛙又結節網地の場合は $6\theta \sim 90^\circ$ の迎角の範囲の資料について解析した。但し, θ は (1-12) 式に示す投影面上の網目の孔が消失する迎角である。

Table 3-3. Results of secondary regression obtained when assumed the value of exponents are constant on the equation (3-1) and (3-2), in the towing tank experiments.

Netting	Re	C_{N2}^*	C_{T2}^*	Remarks	
IM-2	7.6×10^2	0.98	0.77	$m=0.80,$	$n=1.25$
IM-2	1.3×10^3	1.13	0.72	〃	〃
IM-2	2.3×10^3	1.17	0.73	〃	〃
IM-2	3.0×10^3	1.09	0.72	〃	〃
IM-3	6.1×10^2	1.00	0.81	〃	〃
IM-3	1.3×10^3	1.22	0.73	〃	〃
IM-3	1.8×10^3	1.17	0.76	〃	〃
IM-3	2.4×10^3	1.16	0.77	〃	〃
IK-2	7.8×10^2	1.31	0.79	$m=0.80,$	$n=1.20$
IK-2	1.3×10^3	1.34	1.19	〃	〃
IK-2	2.3×10^3	1.36	0.75	〃	〃
IK-2	3.1×10^3	1.33	0.73	〃	〃
IK-3	5.9×10^2	1.37	0.68	〃	〃
IK-3	1.3×10^3	1.49	0.79	〃	〃
IK-3	1.8×10^3	1.45	1.26	〃	〃
IK-3	2.4×10^3	1.41	0.78	〃	〃

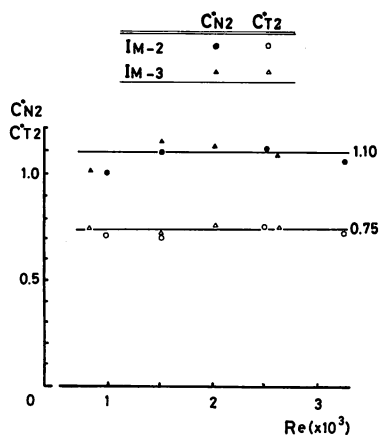


Fig. 3-1.

Fig. 3-1. Relationship between the Reynolds number based on a twine diameter and the normal coefficient C'_{N2} ; the one between the Reynolds number based on a twine diameter and the tangential coefficient C'_{T2} concerning knotless nettings IM-2 and IM-3 in the towing tank experiments.

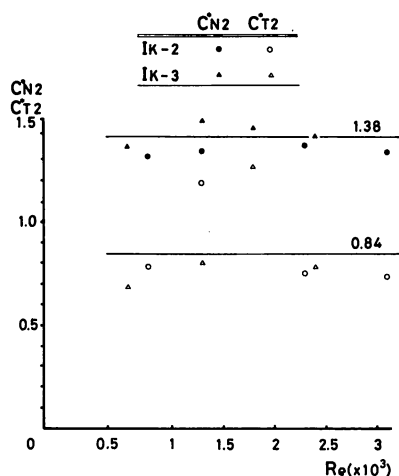


Fig. 3-2.

Fig. 3-2. Relationship between the Reynolds number based on a twine diameter and the normal coefficient C'_{N2} ; the one between the Reynolds number based on a diameter and the tangential coefficient C'_{T2} concerning Weaver's knot nettings IK-2 and IK-3 in the towing tank experiments.

無結節網地 IM-2 および IM-3 の法線分力係数 C^*_{N2} 接線分力係数 C^*_{T2} とレイノルズ数の関係を Fig. 3-1 に、蛙又結節網地 IK-2 および IK-3 の C^*_{N2} および C^*_{T2} とレイノルズ数の関係を Fig. 3-2 に示した。これらの結果各抵抗係数は、いずれもレイノルズ数の影響を受けないことが明らかとなった。なお無結節網地に比べ蛙又結節網地の各抵抗係数は若干小さい値を示した。これらの結果から、レイノルズ数が $6 \times 10^2 \sim 3 \times 10^3$ の範囲で行った曳航実験ではレイノルズ数の影響を受けないことが明らかとなった。

3. 1. 3 異なるレイノルズ数における網地抵抗の考察

田内³⁸⁾は自己の実験結果および宮本³⁹⁾⁴⁰⁾の定置網模型実験の結果を整理して検討を加え、網地の抵抗に及ぼすレイノルズ数の影響は、レイノルズ数が $5 \sim 2 \times 10^3$ の範囲内では抵抗係数に大きな差がない、即ち水の粘性による影響は少ないことを示している。

FRIDMAN, A. L.¹⁵⁾は、FRIDMAN, A. L.・Yu. A. DANILOV の実験結果を次のように示している。即ち、 d/l の値が 0.02~0.10 の 7 種のポリアミド (カプロン) 網地について実験を行い抗力係数を求めた結果、一定のレイノルズ数に対する各網地の抗力係数の差は 30~50% であり、網糸直径を代表長さとしたレイノルズ数が $2 \times 10^2 \sim 6 \times 10^2$ の範囲では抗力係数はレイノルズ数の影響を受けるが、 6×10^2 より高い範囲ではレイノルズ数の影響は極めて小さく、相対運動速度の 2 乗に比例することを明らかにした。

レイノルズ数が網地の抵抗におよぼす影響を論ずる場合、網地は網糸を組み合わせた構造物と考えて網糸直径を代表長さを選ぶ場合と、金属格子等について用いられるハイドロウリック・ミーン・デプスを代表長さを用いた場合の報告がある。本論では、網地は網素子の集合と考えていることから網糸直径を代表長さとしたレイノルズ数を用いている。曳航実験を行った無結節網地では C^*_{N2} の値は 1.10、 C^*_{T2} の値は 0.75 であった。また、蛙又結節網地の場合 C^*_{N2} の値は 1.38、 C^*_{T2} の値は 0.84 であった。前述の結果等から見掛の空隙率を媒介変数として設定することにより、目合や網糸太さの影響が除去され各抵抗係数は網地別に一定となることが示された。即ち、曳航実験の結果レイノルズ数が $6 \times 10^2 \sim 3.1 \times 10^3$ の範囲では、各抵抗係数はいずれの場合もレイノルズ数に依存しないことが明らかとなった。この結果は FRIDMAN, A. L.・Yu. A. DANILOV の実験結果と一致した。これらの実験結果から以後の実験は、レイノルズ数が 8×10^2 以上となる流速を与えた。

第 2 節 網目数が異なる場合の網地抵抗

網地抵抗の測定は一般に水槽若くは風洞で行われるが、それらの規模の制約を受けて、網漁具に比べかなり小さい網地試験片を用いて実験が行われている。それにもかかわらず供試網地の網目数が抵抗係数にどのように影響をおよぼすかについては明らかにされてはいない。

網漁具は操業中種々の形状を形成するが、どのような形状をした網漁具でも網地の微小面は平面と考えることができ、端の影響を含まない網地の抵抗係数を得ることができれば、大規模な網漁具についてもその基礎設計に役立てることができる。

第 2 章第 2 節の M_{13} 模型と M_{26} 模型の抵抗係数について示唆されたように、網目数が異なると網地中央部の X 形状の網素子数と V 形状の端部数の比率が変わってくる。網素子の

周りの流れと端部の周りの流れに差がある場合は供試網地の網目数は抵抗係数に影響をおよぼすことになる。この現象を確かめるために、予備実験として網地にタフトをつけて網地の周りの流れを可視化する定性実験を行った。予備実験に用いた網地は直径3.8mmおよび5.8mmのポリエチレン3子撚り糸および直径10mmの3子撚りロープを用いて、その交差部を電流で加熱したステンレス線で切り取り接着剤で接合した無結節網地である。脚長はいずれも6.0cm、縮結角は45°であった。これらの網地の脚の中央と結節部の中央に、長さ4.5cmのミシン糸(絹50番)を結びつけてタフトとした。この網地をコの字型網枠に張り迎角を0°, 10°, 20°, 30°, 40°, 45°, 50°, 60°, 70°, 80°, 90°の11段階与えて、回流水槽の側面から写真撮影した。この場合の実験流速は0.29 m/sであった。脚に沿う流れが観察される迎角の範囲は網糸直径により異なった。また、端部と網素子ではタフトの方向に差が見られた。この流れの差が網地の抵抗係数におよぼす影響を明らかにすることを目的として、無結節網地について実験を行った。まず、鹿児島大学水産学部の大型回流水槽で横目数と縦目数の等しい網地について実験を行い、次いで北海道大学水産学部の大型水理実験水槽で横目数と縦目数の異なる網地について曳航実験を行った。

3. 2. 1. 供試網地および実験方法

供試網地の網目数が抵抗係数におよぼす影響を調べるために、Table 3-4 に示す2子撚り式貫通型無結節網地について回流水槽で実験を行った。網枠が網地におよぼす影響を除くために、網地の全投影面積 S_{90} が網枠で囲む面積の約65%となる大きさのコの字型網枠を作製して、GA字網地の網目数を変えて実験を行った。供試網地の網目数は、10×10目～26×26目であった。この場合縮結角は45°であり、レイノルズ数が 8×10^2 となる流速を与えた。なお設定迎角は5°毎の19段階であった。大型水理実験水槽では、21×21目、21×11目、21×5目、21×3目および21×1目のYM網地を用い網地の長辺が運動方向と平行な場合と直交する場合について実験を行った。この場合も縮結角は45°であった。実験時の曳航速度はレイノルズ数が 1.3×10^3 となるように設定した。設定迎角は0～90°の範囲の0°, 5°, 10°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°の9段階であった (Table 3-5 参照)。

Table 3-4. Principal dimensions of the knotless nettings used on the circulating tank experiments, concerning the different mesh number nettings.

Netting	i	j	d (cm)	l (cm)	d/l	Materials
GA-1	10	10	0.10	1.25	0.080	PES
GA-2	12	12	〃	〃	〃	〃
GA-3	14	14	〃	〃	〃	〃
GA-4	19	19	〃	〃	〃	〃
GA-5	26	26	〃	〃	〃	〃

PES : Polyester

Table 3-5. Principal dimension of the knotless netting used in the towing tank experiments, concerning the different mesh number netting.

Netting	d (cm)	l (cm)	d/l	i	j	Materials
YM-0	0.22	2.56	0.086	21	21	PE
YM-1	〃	〃	〃	21	11	〃
YM-2	〃	〃	〃	21	5	〃
YM-3	〃	〃	〃	21	3	〃
YM-4	〃	〃	〃	21	1	〃
YM-I	0.22	2.56	0.086	11	21	PE
YM-II	〃	〃	〃	5	21	〃
YM-III	〃	〃	〃	3	21	〃
YM-IV	〃	〃	〃	1	21	〃

3. 2. 2. 網目数が異なる網地の抵抗

回流水槽で行った GA 1～5 網地について、前節と同じように網地抵抗の法線分力係数 C^{**}_{N1} を (3-1) 式で、接線分力係数 C^{**}_{T1} を (3-2) 式で表わして、最小自乗法を用いて C^{**}_{N2} と m および C^{**}_{T2} と n を求めて Table 3-6 に示した。指数 m は正弦曲線の、指数 n は余弦曲線の形を決める要因であるが、それぞれの平均値から $m=0.75$, $n=1$ と置いた。従って (3-1) 式および (3-2) 式は次のようになる。

$$C^{**}_{N1} = C^{**}_{N2} \sin^{0.75} \theta$$

$$C^{**}_{T1} = C^{**}_{T2} \cos \theta$$

$$C^{**}_{N2} = C^{**}_{N1} / \sin^{0.75} \theta \quad (3-3)$$

$$C^{**}_{T2} = C^{**}_{T1} / \cos \theta \quad (3-4)$$

網素子相互の干渉を受けない各抵抗係数を導くために、迎角 4θ より大きい資料について、最小自乗法を用いて資料処理し、それぞれ網地の C^{**}_{N2} と C^{**}_{T2} の値を求め Table 3-7 に示した。これらの結果が示すように、それぞれの網地の網目数と各抵抗係数の関係を明らかにできなかった (Fig. 3-3 参照)。

Table 3-6. Results of the regression using the equation (3-1) and (3-2), concerning different mesh number knotless nettings on the circulating tank experiments.

Netting	C^{**}_{N2}	m	C^{**}_{T2}	n
GA-1	0.93	1.09	0.70	0.92
〃	0.63	0.83	0.55	1.00
GA-2	0.65	0.75	0.67	1.15
〃	0.57	0.59	0.61	1.06
GA-3	0.66	0.87	0.55	0.95
〃	0.91	1.06	0.66	0.92
GA-4	0.60	0.44	0.58	1.25
〃	0.57	0.39	0.56	1.10
GA-5	0.75	0.67	0.55	1.15
〃	0.72	0.71	0.53	1.17

Table 3-7. Results of the secondary regression obtained when assumed the value of exponents are constant, concerning different mesh number knotless nettings on the circulating tank experiments.

Netting	i	j	C_{N2}^{**}	C_{T2}^{**}	Remarks	
GA-1	10	10	0.87	0.71	$m=3/4$	$n=1$
〃	〃	〃	0.63	0.56	〃	〃
GA-2	12	12	0.65	0.64	〃	〃
〃	〃	〃	0.59	0.61	〃	〃
GA-3	14	14	0.64	0.56	〃	〃
〃	〃	〃	0.86	0.67	〃	〃
GA-4	19	19	0.64	0.57	〃	〃
〃	〃	〃	0.62	0.56	〃	〃
GA-5	26	26	0.76	0.57	〃	〃
〃	〃	〃	0.72	0.53	〃	〃

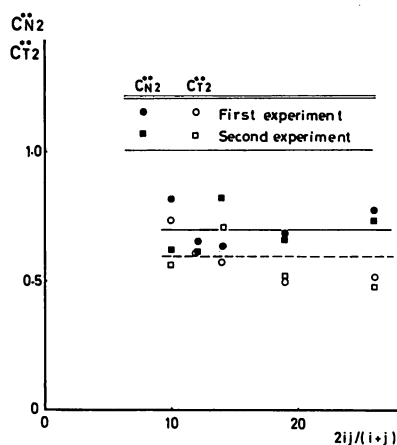


Fig. 3-3. Relationship between the ratio, namely the number of netting elements divided by the number of edged netting elements and the normal coefficient; the one between the ratio and the tangential coefficient concerning i equal j mesh nettings in the circulating tank experiments.

横目数と縦目数の等しい網地の場合は、端部に対する網素子の数が少ないことから、大型水理実験水槽では横目数と縦目数の異なる無結節網地について曳航実験を行った。YM-1網地 (21×11目) と、YM-I網地 (11×21目) の C_{N1}^{**} および C_{T1}^{**} と θ の関係を Fig. 3-4-a に、YM-2網地 (21×5目) と YM-II網地 (5×21目) について Fig. 3-4-b に、YM-3網地 (21×3目) と YM-III網地 (3×21目) について Fig. 3-4-c に、YM-4網地 (21×1目) と YM-IV網地 (1×21目) について Fig. 3-4-d に示した。この場合運動方向と網地の長辺が平行な YM 1～4網地を $\blacktriangle(C_{N1}^{**})$ または $\blacktriangledown(C_{T1}^{**})$ で現わし、運動方向と網地の長辺が直交する YM-I～IV網地を $\triangle(C_{N1}^{**})$ または $\triangledown(C_{T1}^{**})$ で示している。

迎角が大きい範囲では網地の向きに関係なく両者の抵抗係数はほぼ等しい値を示した。これらの結果この迎角の範囲では各網素子は独立に流体抵抗を受けていると推定した。網素子相互の干渉が起こる迎角の範囲を明らかにするためには小刻みに迎角を設定し、その結果について検討すべきであるが、GA 網地および YM 網地の資料および次節で用いた無結節網地 (GB~GF および HA~HC 網地) について回帰曲線を描き、その曲線から離れる迎角の臨界値について検討して、網素子相互の干渉が生じる迎角を 4θ と推定した (Fig. 3-4 a~b および Fig. 3-5 参照)。以後 $4\theta \sim 90^\circ$ の資料について解析することにした。

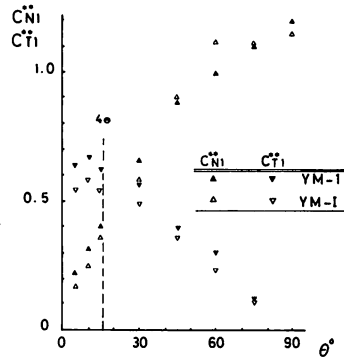


Fig. 3-4-a. Relationship between the attack angle and the normal coefficient ; the one between the attack angle and the tangential coefficient concerning the lateral netting strip (21×11 meshes) and the longitudinal netting strip (11×21 meshes).

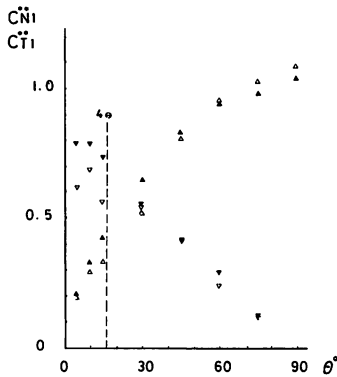


Fig. 3-4-b.

Fig. 3-4-b. Relationship between the attack angle and the normal coefficient ; the one between the attack angle and the tangential coefficient concerning the lateral netting strip (21×5 meshes) and the longitudinal netting strip (5×21 meshes).

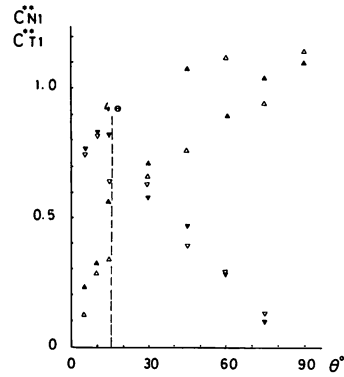


Fig. 3-4-c.

Fig. 3-4-c. Relationship between the attack angle and the normal coefficient ; the one between the attack angle and the tangential coefficient concerning the lateral netting strip (21×3 meshes) and the longitudinal netting strip (3×21 meshes).

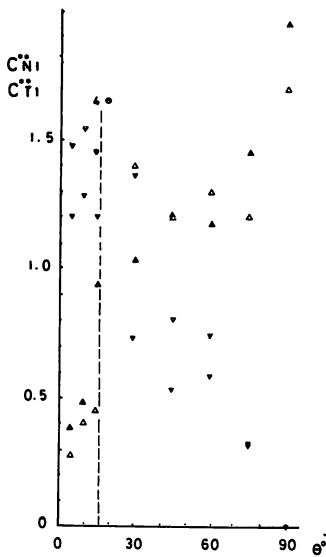


Fig. 3-4-d. Relationship between the attack angle and the normal coefficient ; the one between the attack angle and the tangential coefficient concerning the lateral netting strip (21×1 meshes) and the longitudinal netting strip (1×21 meshes).

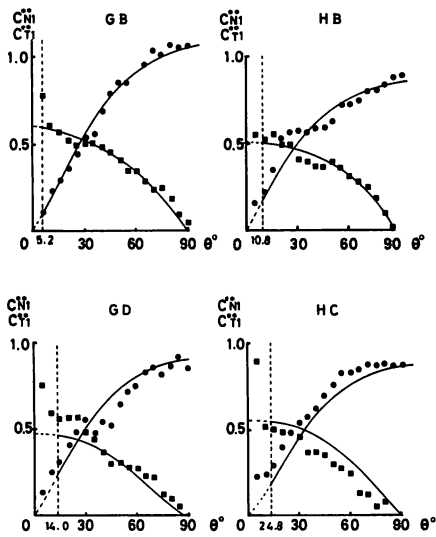


Fig. 3-5. Relationship between the attack angle and the normal coefficient ; the one between the attack angle and the tangential coefficient. Vertical dotted line shows 4θ .

曳航実験の場合も前述と同様な資料処理し、(3-1)式の m を0.80、(3-2)式の n を1.25と置いて、法線分力係数および接線分力係数を求めた。この場合YM-4またはYM-IV網地の各抵抗係数は他の網地に比べ大きい値を示した。

Fig. 1-6に示すように網地はX形状の網素子とV形状の端部から構成されており、 $i \times j$ 目の供試網地の網素子数は $2ij - i - j$ 個であり、端部の数は $2(i+j)$ 個である。いま、端部2個を網素子1個で近似すると、網目数が $i \times j$ の全網素子数は $2ij$ 個と考えてよい。

端部の数に対する全網素子数(網素子と網素子で近似した端部の和)の比率 $2ij/(i+j)$ を媒介変数として設定し、それぞれの網地のこの比率と法線分力係数および接線分力係数の関係を求め、Table 3-8に示した。なお、Fig. 3-6に、それぞれ両者の関係を描いた。これらの図の●印は運動方向と網地の長辺が平行な場合と $i=j$ のYM-0網地の場合であり、■印は運動方向と長辺が直交する場合で、▲印はレイノルズ数の影響を調べたIM-2、IM-3網地の各抵抗係数の平均値である。それぞれ両者の関係を表す実験式を最小自乗法を用いて求め次式を得た。

$$C_{N2}^{**} = 1.65(i+j)/2ij + 1.00 \quad (3-5)$$

$$C_{T2}^{**} = 1.70(i+j)/2ij + 0.50 \quad (3-6)$$

網目数 ij が無限に多くなると(3-5)式は1.0、(3-6)式は0.5となり前節で導いた無結節網地の C_{N2}^{**} の値1.10および C_{T2}^{**} の値0.75と差があるように見えるが、Table 3-8に示すそれぞれの網地の抵抗係数は前述の値とほぼ等しい値を示している。即ち、(3-5)式および(3-6)式は $2ij/(i+j) < 6$ の場合に抵抗係数を補正するために用いる実験式であり、 $2ij/(i+j) > 6$ の供試網地を用いると端の影響は無視してよいことを示している。

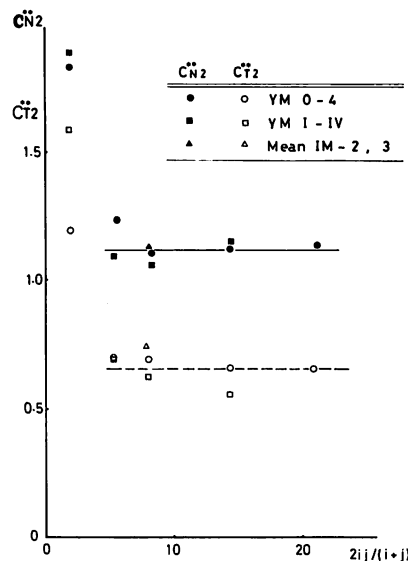


Fig. 3-6. Relationship between the ratio, namely the number of netting elements divided by the number of edged netting elements and the normal coefficient C_{N2}^{**} ; the one between the ratio and the tangential coefficient C_{T2}^{**} , concerning i not equal to j mesh nettings, in the towing tank experiments.

Table 3-8. Results of experiments concerning the different mesh number of knotless nettings on the towing tank experiments.

Netting	i	j	$2ij/(i+j)$	C_{N2}^{**}	C_{T2}^{**}	Remarks
YM-0	21	21	21.0	1.13	0.65	
YM-1	21	11	14.4	1.13	0.65	fixed longitudinally
YM-2	21	5	8.1	1.10	0.68	〃
YM-3	21	3	5.3	1.24	0.70	〃
YM-4	21	1	1.9	1.82	1.19	〃
YM-I	11	21	14.4	1.15	0.55	fixed laterally
YM-II	5	21	8.1	1.06	0.62	〃
YM-III	3	21	5.3	1.09	0.69	〃
YM-IV	1	21	1.9	1.88	1.57	〃

3. 2. 3. 網目数が異なる網地抵抗の考察

網漁具は雄大な規模を持つものが多く漁具設計に際しては端の影響を含まない抵抗係数を要求される。このような見地から SENIN, N. T. は, 150m²の網地を用い運動方向に平行な網地の流体抵抗を測定し, 次式を導いたことを FRIDMAN, A. L.¹⁵⁾が紹介している。

$$R_{00}=0.79SU^{1.72}$$

網地は流体抵抗と釣合って自由に形状が変わる性質を持っており, 所定の形状を保つためには網枠に張り付けなければならない。前述のような広大な網枠を構えないようにして, 任意の迎角を与えて抵抗測定することは, 実験装置の観点から不可能である。なお, 網地の抵抗係数を求める実験は, 実験水槽等の制約を受けるために比較的小さな網地試験片について行われている。

V 形状をした端部と X 形状をした網素子が受ける流体抵抗に差がある場合は, 網目数の異なる網地の各抵抗係数はこれらの網素子数の関数になるはずである。この場合端部数に対する全網素子数, 端部数に対する網素子数および網素子数に対する全網素子数の比率と, それぞれ逆の比率の 6 通りの場合がある。これらの比率と各網地の各抵抗係数の関係を描いて検討した結果, 両者の関係を表現し易い端部の網素子数に対する全素子数 $2ij/(i+j)$ を媒介変数とした。

回流水槽で行った予備実験の段階では検出荷重がロードセルの最大荷重の 1/100 以上となるように配慮したために, 10×10 目～26×26 目の無結節網地について実験を行った。結果から言えば比較的網目数の多い網地を用い, しかも横目数と縦目数の等しい網地について実験を行ったために, $2ij/(i+j)$ 値が大き過ぎこの実験目的に沿った結果は得られなかった (Fig. 3-3 参照)。

曳航実験では端部数に対する全網素子数の比率 $2ij/(i+j)$ 値が小さくなるように横と縦の網目数が異なる YM 網地について実験を行った。網地の方向を変えて網枠に網地を張りつけて実験を行った結果, 網地を構成する網素子相互の干渉がない迎角の範囲と網素子相互の干渉がある迎角の範囲があることを見出した (Fig. 3-4 a～d 参照)。この段階では網素子相互の干渉の無い抵抗係数を求めることを目的としていることから, それぞれの網地の

40°～90°の範囲の資料を用いて、法線分力係数 C^{**}_{N2} および接線分力係数 C^{**}_{T2} を求めた。その結果、各抵抗係数と媒介変数 $2ij/(i+j)$ の関係を(3-5)式および(3-6)式として表わすことができた。Fig. 3-6 から媒介変数 $2ij/(i+j)$ が6より大きければ C^{**}_{N2} , C^{**}_{T2} の抵抗係数は一定であると言える。換言すれば横目数と縦目数の等しい網地では6×6目以上の網目数の供試網地を用いて求めた抵抗係数は、無限大の網地に適用できる。

これらの実験結果に基づき以後の実験は6×6目以上の網地について行うことにした。この実験の段階では蛙又結節網地の投影面積を求める実験式が導かれていなかったために、無結節網地についてのみ実験を行っているが、前述の結果は蛙又結節網地にも準用して差し支えないものと推定している。

第3節 目合および網糸太さの異なる場合の網地抵抗

目合および網糸太さの異なる網地が受ける流体抵抗の研究は、数多くの研究者により水産学の草創期から研究が着手され種々の実験式が導かれた。これらの実験式はいずれも限定された条件下でのみ有効であり広い条件の下では成立しにくいものである。

相対運動方向に平行または殆ど平行に設置された網地の場合は、流体は網目を通過せず網地面に沿って流れる。相対運動方向と網地面のなす角(迎角)を少し大きくすれば流体は網目を通り抜けるようになる。この場合は網地を構成する網素子相互の干渉を受ける。更に迎角を増すと、或る迎角で網素子相互の干渉は無くなり、それぞれの網素子は独立して流体抵抗を受ける。このように網地の抵抗は迎角により種々の現象が現れ、その現象を支配する種々の媒介変数を見出して解析しない限り網漁具設計の基礎計算に役立つ汎用の実験式は得られない。この節では目合および網糸太さの異なる網地について、網素子が独立して流体抵抗を受ける迎角の範囲の網地抵抗の実験式を導くことを目的としている。そのために第3章第1節および第2節の結果を踏まえて、レイノルズ数の影響を受けない範囲内に実験流速を設定し、網端の影響を受けない目数の網地を用いた。なお、縮結角は全て45°とした。

3. 3. 1. 供試網地および実験方法

網端の影響を受けない抵抗係数を得るために、供試網地の網目数は6×6目以上でなければならない。一方網枠は水槽の規模の制約を受けるためにその大きさに限界がある。これらの理由から供試網地の脚長は回流水槽で6cm以下、曳航実験で7.5cm以下の網地を選ぶ結果となった。また、網枠前縁材の後流の影響を少なくするために、前縁材のステンレス線に比べ太い網糸の網地を用いることにした。そのために、 d/l 値が比較的大きい網地について実験を行うこととなった。供試網地の d/l 値は回流水槽実験の無結節網地の場合0.032～0.153であり、蛙又結節網地の場合は0.029～0.153であった。これらの網地の主要目をTable 3-9に示した。

曳航実験に用いた無結節網地の d/l 値は0.047～0.086であり、蛙又結節網地で0.030～0.084であった。これらの網地の主要目を、Table 3-10に示した。全ての網地は横目数と縦目数が等しい網地であった。これらの網地を選ぶに当たり、適当な間隔の d/l 値とすることを優先したために、網地の素材はポリアミド(PA; ナイロン, アミラン), ポリエチレン(PE; ハイゼックス, カネライト), ポリエステル(PES; テトロン), ポリ塩化ビニル(PVC

Table 3-9. Principal dimension of the netting used in the circulating tank experiments for the effect of mesh size and twine diameter.

Netting	d (cm)	l (cm)	d/l	i	j	Re	Materials
GA-1	0.10	1.25	0.080	10	10	8×10^2	PES
GA-2	〃	〃	〃	12	12	〃	〃
GA-3	〃	〃	〃	14	14	〃	〃
GA-4	〃	〃	〃	19	19	〃	〃
GA-5	〃	〃	〃	26	26	〃	〃
GB	0.17	5.25	0.032	6	6	〃	PE
GC	0.13	3.00	0.043	10	10	〃	PVD
GD	0.22	2.56	0.086	12	12	〃	PE
GE	0.18	2.25	0.080	14	14	〃	PVD
GF	0.14	1.70	0.082	19	19	〃	PA
HA	0.11	2.56	0.043	12	12	〃	PES
HB	0.17	2.59	0.066	12	12	〃	PVD
HC	0.20	1.31	0.153	21	21	〃	PVC
TA	0.17	5.78	0.029	6	6	〃	PE
TB	0.26	4.45	0.058	6	6	〃	〃
TC	0.42	4.50	0.093	6	6	〃	〃
TD	0.63	4.56	0.130	6	6	〃	〃
TE	0.70	4.55	0.153	6	6	〃	〃

Table 3-10. Principal dimensions of the netting used in the towing tank experiments for the effect of mesh size and twine diameter.

Netting	d (cm)	l (cm)	d/l	i	j	Re	Materials
I M-1	0.46	6.04	0.077	9	9	1.3×10^3	PE
I M-2	0.39	6.11	0.064	9	9	7.6×10^2	PE
I M-2	〃	〃	〃	〃	〃	1.3×10^3	〃
I M-2	〃	〃	〃	〃	〃	2.3×10^3	〃
I M-2	〃	〃	〃	〃	〃	3.0×10^3	〃
I M-3	0.31	5.84	0.053	9	9	6.1×10^2	PE
I M-3	〃	〃	〃	〃	〃	1.3×10^3	〃
I M-3	〃	〃	〃	〃	〃	1.8×10^3	〃
I M-3	〃	〃	〃	〃	〃	2.4×10^3	〃
I M-4	0.29	6.08	0.047	9	9	1.3×10^3	PES
YM-0	0.22	2.56	0.086	21	21	1.3×10^3	PE
I K-1	0.62	7.40	0.084	9	9	1.3×10^3	PE
I K-2	0.40	6.00	0.067	9	9	7.8×10^2	PE
I K-2	〃	〃	〃	〃	〃	1.3×10^3	〃
I K-2	〃	〃	〃	〃	〃	2.3×10^3	〃
I K-2	〃	〃	〃	〃	〃	3.1×10^3	〃
I K-3	0.30	6.05	0.051	9	9	5.9×10^2	PE
I K-3	〃	〃	〃	〃	〃	1.3×10^3	〃
I K-3	〃	〃	〃	〃	〃	1.8×10^3	〃
I K-3	〃	〃	〃	〃	〃	2.4×10^3	〃
I K-4	0.17	5.78	0.030	9	9	1.3×10^3	PE

；エンピロン）、ポリ塩化ビニリデン（PVD；サラン、クレハロン）等多岐にわたっている。これらの網糸はいずれも210～2000デニールのマルチ・フィラメントであり無結節網地の片子糸数は2子、蛙又結節網地の片子糸は3子であった。即ち、いずれの網地も毛羽立ちはなく網地の表面粗度はそれぞれほぼ等しいと言える。実験時におけるレイノルズ数は回流水槽実験の場合は 8×10^2 、曳航実験の場合には主に 1.3×10^3 （ $6 \times 10^2 \sim 3 \times 10^3$ ）であった。

3. 3. 2. 目合および網糸太さの異なる網地の抵抗

回流水槽実験に用いた無結節網地 GA～GF 網地および HA～HC 網地の測定値についても前節と同じように資料処理した。この場合（3-1）式の指数 m および（3-2）式の n は若干変動するが、これらは三角関数の形状に関与することから、それぞれの平均値を用い $m=0.75$, $n=1$ と置いて再び最小自乗法を用いて計算を行い、それぞれの網地の法線分力係数 C'_{N2} および接線分力係数 C'_{T2} を Table 3-11 に示した。この場合網素子が独立して流体抵抗を受けると推定される迎角の範囲 $4\theta \sim 90^\circ$ の資料について解析した。全資料について最小自乗法を用いて求めた C'_{N2} 値は0.776であった。一方、全資料について最小自乗法を用いて求めた C'_{T2} 値は、0.566であった。これらの結果から回流水槽実験における無結節網地の場合の法線分力係数および接線分力係数は、目合および網糸太さに依存せず次式で表わすことができることが明らかになった。

$$C'_{N1} = 0.78 \sin^{0.75} \theta \quad (3-7)$$

$$C'_{T1} = 0.57 \cos \theta \quad (3-8)$$

Table 3-11. Results of the secondary regression concerning the different mesh size and twine size of knotless nettings in the circulating tank experiments.

Netting	d/l	C'_{N2}	C'_{T2}	Remarks
GA-1	0.080	0.870	0.706	$m = 0.75$
GA-1	〃	0.625	0.561	$n = 1.00$
GA-2	〃	0.646	0.635	
GA-2	〃	0.589	0.610	
GA-3	〃	0.643	0.562	
GA-3	〃	0.863	0.671	
GA-4	〃	0.638	0.565	
GA-4	〃	0.615	0.556	
GA-5	〃	0.762	0.566	
GA-5	〃	0.722	0.526	
GB	0.032	0.999	0.647	
GC	0.043	0.763	0.520	
GD	0.086	0.842	0.549	
GE	0.080	0.845	0.467	
GF	0.082	0.924	0.549	
HA	0.043	0.871	0.508	
HB	0.066	0.843	0.539	
HC	0.153	0.906	0.419	

前述の仮定を確かめるために縦軸に実測値 C'_{N1m} を、導いた実験式の計算値 C'_{N1c} を横軸にとり両者の関係を Fig. 3-7 に、また、 C'_{T1m} と C'_{T1c} の関係を Fig. 3-8 に示した。前者の相関係数は0.963 後者のそれは0.985であり、289個の資料について t 検定を行い、いずれの場合も0.01水準で有意な結果を得た。

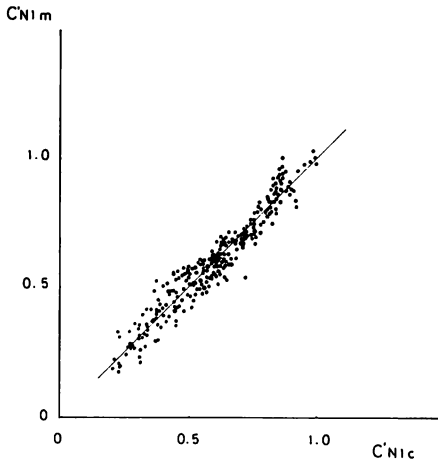


Fig. 3-7.

Fig. 3-7. Relationship between the calculated normal coefficient C'_{N1c} and the measured one C'_{N1m} , concerning GA~GF and HA~HC knotless nettings.

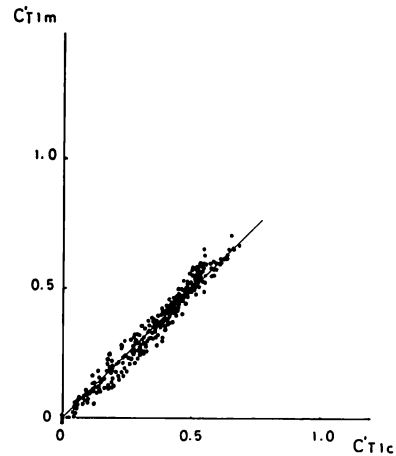


Fig. 3-8.

Fig. 3-8. Relationship between the calculated tangential coefficient C'_{T1c} and measured one C'_{T1m} , concerning GA~GF and HA~HC knotless nettings.

これらの結果から、回流水槽実験に基づく無結節網地の抵抗の法線分力 N'_c および接線分力 T'_c は、それぞれ次式で与えられる。

$$N'_c = 0.78 \sin^{0.75} \theta (\rho/2) S'_{B\theta} U^2 \quad (3-9)$$

$$T'_c = 0.57 \cos \theta (\rho/2) S'_{B\theta} U^2 \quad (3-10)$$

曳航実験における無結節網地の資料についても同様な解析を行い、その結果を Table 3-12 に示した。この場合 $m=0.80$, $n=1.25$ と置いて最小自乗法を用いて、それぞれの網地の C'_{N2} および C'_{T2} を求めた。全ての資料について求めた C'_{N2} の値は1.117であり、 C'_{T2} の値は0.731であった。従って曳航実験の場合の無結節網地の法線分力係数 C'_{N1} および接線分力係数 C'_{T1} は次式で表わすことができる。

$$C'_{N1} = 1.12 \sin^{0.80} \theta \quad (3-11)$$

$$C'_{T1} = 0.73 \cos^{1.25} \theta \quad (3-12)$$

実測値に基づく法線分力係数 C'_{N1m} に対応する導いた実験式 (3-11) の計算値 C'_{N1c} の関係を Fig. 3-9 に、接線分力係数 C'_{T1m} に対応する (3-12) 式の計算値 C'_{T1c} の関係を Fig. 3-10 に示した。前者の相関係数は0.922, 後者は0.983であり、t 検定を行った結果いずれも0.01水準で有意であった。

Table 3-12. Results of the secondary regression concerning the different mesh size and twine size of knotless nettings in the towing tank experiments.

Netting	d/l	C'_{N2}	C'_{T2}	Remarks
IM-1	0.077	1.13	0.70	$m = 0.80$
IM-2	0.064	0.98	0.77	$n = 1.25$
IM-2	〃	1.13	0.72	
IM-2	〃	1.17	0.73	
IM-2	〃	1.09	0.72	
IM-3	0.053	1.00	0.81	
IM-3	〃	1.22	0.73	
IM-3	〃	1.17	0.76	
IM-3	〃	1.16	0.77	
IM-4	0.047	1.23	0.64	
YM-0	0.086	1.13	0.65	

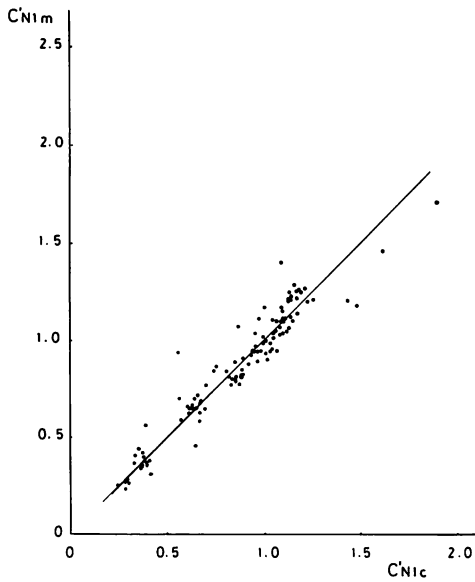


Fig. 3-9.

Fig. 3-9. Relationship between the calculated normal coefficient C'_{N1c} and the measured one C_{N1m} , concerning IM 1~4 and YM~O knotless nettings.

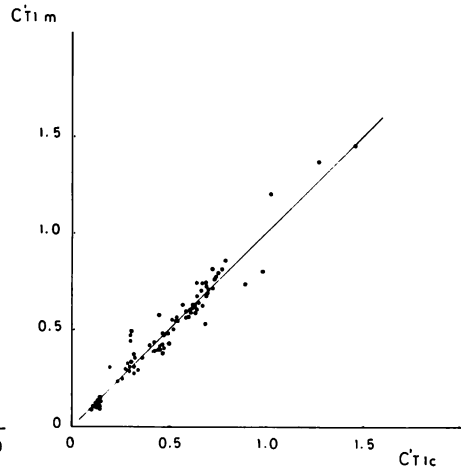


Fig. 3-10.

Fig. 3-10. Relationship between the calculated tangential coefficient C'_{T1c} and measured one C_{T1m} , concerning IM 1~4 and YM~O knotless nettings.

これらの結果から、曳航実験に基づく無結節網地の法線分力 N'_T および接線分力 T'_T は、それぞれ次式となる。

$$N'_T = 1.12 \sin^{0.80} \theta (\rho/2) S'_{B\theta} U^2 \quad (3-13)$$

$$T'_T = 0.73 \sin^{1.25} \theta (\rho/2) S'_{B\theta} U^2 \quad (3-14)$$

蛙又結節網地について迎角の小さい範囲で、小刻みに迎角を設定した実験を行い 4θ 以上、 5θ 以上、 6θ 以上および 7θ 以上の資料について回帰曲線を求めて検討した結果、網素子相互の干渉の無い迎角の範囲を $6\theta < \theta \leq 90^\circ$ と決めた (Fig. 3-11 参照)。

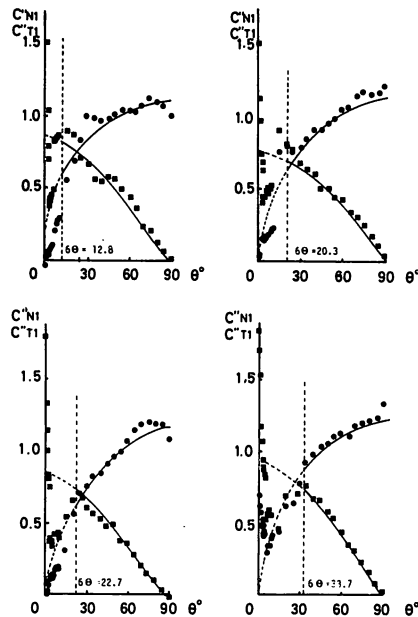


Fig 3-11. Relationship between the attack angle and the normal coefficient ; the one between the attack angle and the tangential coefficient concerning Weaver's knot nettings in the circulating tank experiments. Vertical dotted line shows 6θ .

回流水槽実験で用いた蛙又結節網地 TA~TE について無結節網地の場合と同様の資料処理を行い、指数 m を 0.80 指数 n を 0.50 と置いて解析した。

$$C''_{N1} = C''_{N2} \sin^{0.8} \theta \quad (3-15)$$

$$C''_{T1} = C''_{T2} \cos^{0.5} \theta \quad (3-16)$$

この場合の各抵抗係数 C''_{N2} , C''_{T2} を Table 3-13 に示した。これらの結果から、蛙又結節網地の各抵抗係数はそれぞれ次式で与えられる。

$$C''_{N1} = 1.10 \sin^{0.8} \theta \quad (3-17)$$

$$C''_{T1} = 0.52 \cos^{0.5} \theta \quad (3-18)$$

実測値から求めた法線分力係数と (3-17) 式で求めた計算値の関係を Fig. 3-12-a. に、同接線分力係数と (3-18) 式で求めた計算値の関係を Fig. 3-12-b. に示した。前者の相関係数は0.920, 後者の相関係数は0.832であった。これらの結果について t 検定を行い 0.01水準で有意であった。従って、回流水槽実験に基づく蛙又結節網地の法線分力 N''_c および接線分力 T''_c は、次式として与えられる。

$$N''_c = 1.10 \sin^{0.8} \theta (\rho/2) S''_{B\theta} U^2 \quad (3-19)$$

$$T''_c = 0.52 \cos^{0.5} \theta (\rho/2) S''_{B\theta} U^2 \quad (3-20)$$

Table 3-13. Results of the secondary regression concerning the Weaver's knot netting TA~TE, on the range of an attack angle $60^\circ < \theta \leq 90^\circ$, in the circulating tank experiments.

Netting	d/l	C''_{N2}	C''_{T2}	Remarks
TA	0.029	1.15	0.48	$m = 0.8$
TB	0.058	1.20	0.48	$n = 0.5$
TC	0.093	1.00	0.40	
TD	0.130	1.09	0.51	
TE	0.153	1.28	0.74	

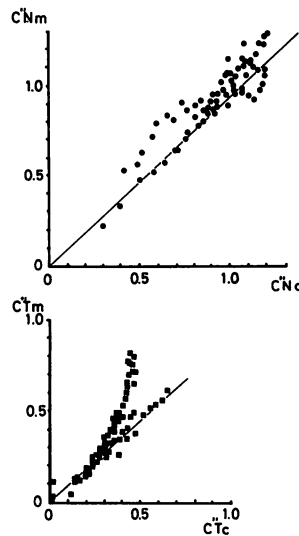


Fig. 3-12-a. Relationship between the calculated normal coefficient and the measured one concerning Weaver's knot netting TA~TE, in the circulating tank experiment. (Upper)

Fig. 3-12-b. Relationship between the calculated tangential coefficient and the measured one concerning the same netting in the same tank. (Lower)

Table 3-14. Results of the secondary regression concerning the Weaver's knot netting IK 1~4, on the range of an attack angle $6\theta < \theta \leq 90^\circ$, in the towing tank experiments.

Netting	d/l	C''_{N2}	C''_{T2}	Remarks
IK-1	0.083	1.16	0.59	$m = 0.8$
IK-2	0.067	1.31	0.79	$n = 1.2$
〃	〃	1.34	1.19	
〃	〃	1.36	0.75	
〃	〃	1.33	0.73	
IK-3	0.051	1.37	0.68	
〃	〃	1.49	0.79	
〃	〃	1.45	1.26	
〃	〃	1.41	0.78	
IK-4	0.030	1.53	0.87	

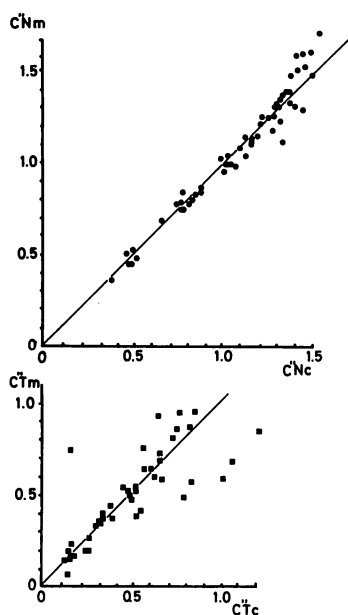


Fig. 3-13-a. Relationship between the calculated normal coefficient and the measured one concerning Weaver's Knot netting IK 1~4 in the towing tank experiments. (Upper)

Fig. 3-13-b. Relationship between the calculated tangential coefficient and the measured one concerning the same netting in the same tank. (Lower)

曳航実験に用いた蛙又結節網地 IK 1~4 について, m を 0.80 n を 1.20 と置いてそれぞれの網地の C''_{N2} および C''_{T2} を求め Table 3-14 に示した. これらの結果から, 曳航水槽における C''_{N1} および C''_{T1} は, 次式で与えられる.

$$C''_{n1} = 1.38 \sin^{0.8} \theta \quad (3-21)$$

$$C''_{t1} = 0.84 \cos^{1.2} \theta \quad (3-22)$$

法線分力係数の実測値と計算値を比較して Fig. 3-13-a. に、接線分力係数の実測値と計算値を比較して Fig. 3-13-b. に示した。前者の相関係数は0.982後者のそれは0.985であり t 検定を行った結果0.01水準で有意であった。

これらの結果から、曳航実験に基づく蛙又結節網地の法線分力 N''_T および接線分力 T''_T は、次式として与えられる。

$$N''_T = 1.38 \sin^{0.8} \theta (\rho/2) S''_{B\theta} U^2 \quad (3-23)$$

$$T''_T = 0.84 \cos^{1.2} \theta (\rho/2) S''_{B\theta} U^2 \quad (3-24)$$

3. 3. 3. 目合および網糸太さの異なる網地抵抗の考察

回流水槽実験で用いたロード・セルの最大容量が抗力用で10 kgf, 揚力用で5 kgf, 曳航実験に用いた4分力計はいずれも20 kgf であったため、網地抵抗の測定値がそれぞれの検出器の最大容量の1/100以上となるように供試網地を選んだ。また水槽の規模上、大型回流水槽では、45×45cm², 大型水理実験水槽では80×80cm² 程度の網地の広さが必要であり、供試網地の網目数は6×6目より多く、かつ d/l 値が適当に分散しなければならない。その結果 Table 3-9, Table 3-10 に示すように、ほぼ等しい目合で網糸直径が異なる網地を選ぶ結果となった。

実験に用いた網地の素材は主にポリエチレンであったが、ポリアミド、ポリエステル、ポリ塩化ビニル、ポリ塩化ビニリデン網地も混在している。野村ら⁹⁾は網地素材の異なる網地の流体抵抗を測定して、抵抗係数を $k = R/U^2$ として求めている。その結果、合成繊維の k の値に若干の相違を見出しているが、その差は主に毛羽立ち（表面粗度）に起因していると報告している。

この実験で用いた網地は全て210～2000デニールのマルチ・フィラメントであったことから表面粗度については差異はないと仮定して資料処理した。供試網地の比重はポリエチレンの0.97からポリ塩化ビニリデンの1.70の範囲にあるが、網地を張った網枠はボール・ジョイントにより垂直に懸吊されるか、または静止状態で z 分力の0点を設定したために網地の比重による力は、検出したそれぞれの力に含まれていない。

導いたそれぞれの実験式は、指数 m および指数 n の値が異なるため、単純に比較することはできないが、正弦関数は迎角90°の場合は指数に関係なく1であり、余弦関数は迎角0°の場合は指数に関係なく1であることから、それぞれこの条件の下で各係数を比較した。導いた抵抗係数は、いずれの水槽でも蛙又結節網地が大きく現れた。また、回流水槽実験に基づいたそれぞれの網地の抵抗係数は、曳航実験に基づいたそれぞれの抵抗係数より若干小さい値を示した。その理由は、曳航実験では網地の周りの流れに乱れが含まれていないのに対して、回流水槽実験では網地の周りの流れに乱れが含まれているためである。即ち、網地を構成する脚や結節部又は結節から流れが剥離する位置に相違が生じるためである。漁場における乱れの大きさは、気象条件、海況、潮流流および海底地形等によりさまざまであるが、網漁具の設計に際し漁具の使用条件に合った抵抗式を適用しないと、その計算値に誤差を生じることが明らかとなった。即ち、鮭鱒流刺網や定置網のように表層または浅海で用いられ

る漁具は、風浪やうねり等によって派生する乱れを含んだ流れの場で使用されるのに対して、中層や底層で用いられる曳網や底刺網等は殆ど乱れの無い場で使用されている。従って、前者については回流水槽実験に基づく実験式を適用し、後者に対しては曳航実験に基づいた実験式を適用すれば、より精度の高い計算値を得ることができる。

TAUTI, M.⁵⁾が示すように、脚長に対する網糸直径が小さい場合は、脚が受ける抵抗に比べ結節が受ける抵抗は無視し得る位小さい、この場合は無結節網地と結節網地が受ける抵抗の差は表われない。このように考えると導いた蛙又結節網地の抵抗に関する実験式は d/l に依存し、 d/l の或る値より大きい範囲について適用すべきものであろう。この研究では、比較的太い網糸について実験を行ったために、その臨界値について明らかにできなかった。

回流水槽で行った TA~TE 網地の法線分力係数の実測値と計算値を比較した Fig. 3-12-a. では両者は良く一致したが、接線分力について示した Fig. 3-12-b. ではデータがかなりばらついた。Fig. 3-13-a, b に示す曳航実験についても、法線分力係数に比べ接線分力係数はばらつきを示した。これらの結果から、蛙又結節網地の接線分力成分には網地の表面粗度の影響（結節が抵抗係数におよぼす影響）が含まれていることが示唆された。

導いたこれらの実験式と、田内⁴³⁾が示した(3-25)式および(3-26)式、並びに宮崎¹²⁾が示した(3-27)式および(3-28)式と比較して、Fig. 3-14, Fig. 3-15, Fig. 3-16 および Fig. 3-17 に示した。

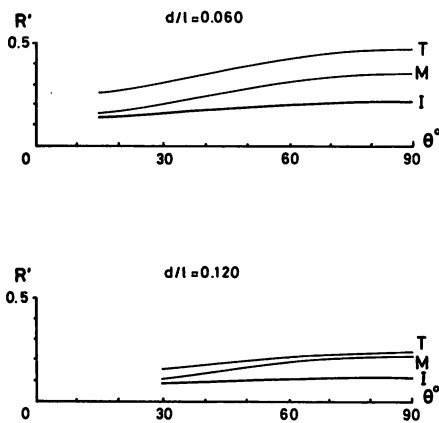


Fig. 3-14.

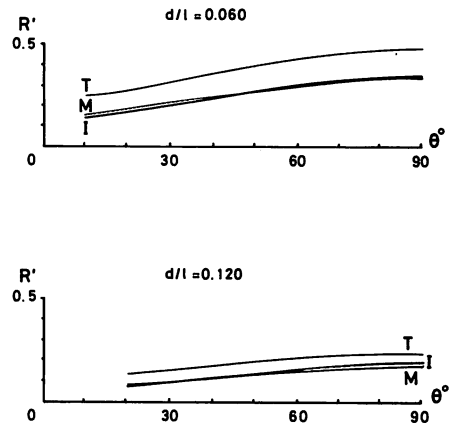


Fig. 3-15.

Fig. 3-14. Results of the calculations of netting resistance, based on the TAUTI's equation (T), the MIYAZAKI's equation (M) and the IMAI's equation (I), concerning twisted knotless netting in the circulating tank experiments.

Fig. 3-15. Results of the calculations of netting resistance, based on the TAUTI's equation (T), the MIYAZAKI's equation (M) and the IMAI's equation (I), concerning twisted knotless netting in the towing tank experiments.

$$N = a(d/l)U^2 \sin \theta / (\sin \phi \cos \phi) \quad (3-25)$$

$$T = a(d/l)U^2 (1 - \cos^2 \phi \cos^2 \theta) / (\sin \phi \cos \phi) \quad (3-26)$$

但し、田内 (1963)⁴³⁾は、網地の抵抗係数 a は CGS 絶対単位系で、1.0 と推定している。

$$N = \{C_{D(90)} \sin \theta (1 - \cos^2 \theta \sin^2 \phi + \cos^2 \theta \sin \theta \sin^2 \phi - \sqrt{a} \cos^3 \theta \sin \theta \cos^2 \phi) \} (\rho/2) a S_{(90)} U^2 \quad (3-27)$$

$$T = \{C_{D(90)} \cos \theta (1 - \cos^2 \theta \sin^2 \phi - \sin^3 \theta \sin^2 \phi - 3a \cos \theta \cos^2 \phi + \sqrt{a} \cos \theta \sin^3 \theta \cos^2 \phi + \sqrt{a} \cos \phi \sin^3 \phi) \} (\rho/2) a S_{(90)} U^2 \quad (3-28)$$

なお、宮崎⁴¹⁾¹⁰⁾は、 $C_{D(90)} = 16(Re_{(H)})^{-0.28}$ 、 $a = S_{D(90)}/S_{(90)}$ であることを示している。

この場合網糸直径 0.3cm、脚長 5.0cm、 d/l の値が 0.06、 6×6 目の網地および網糸直径 0.3cm、脚長 2.5cm、 d/l 値が 0.12、 6×6 目の網地が 0.5 m/s の相対速度で運動しているとして計算した。図中の曲線 T は、田内⁴³⁾の示す (3-25) および (3-26) を次式に代入して求めたものである。

$$R = \sqrt{N^2 + T^2} \quad (3-29)$$

曲線 M は宮崎¹²⁾が示した (3-27) 式および (3-28) 式を (3-29) 式に代入して求めた網地抵抗であり、曲線 I は本論で導いたそれぞれの実験式から求めた網地抵抗を示している。この場合、いずれも網素子が独立して流体抵抗を受ける迎角の範囲について図示した (Fig. 3-14, Fig. 3-15, Fig. 3-16 および Fig. 3-17 参照)。これらの図から曲線

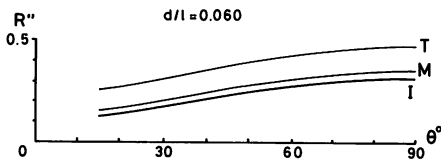


Fig. 3-16.

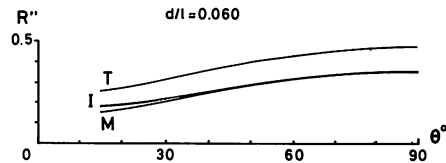


Fig. 3-17.

Fig. 3-16. Results of the calculations of netting resistance, based on the TAUTI's equation (T), the MIYAZAKI's equation (M) and the IMAI's equation (I), concerning Weaver's knot netting in the circulating tank experiments.

Fig. 3-17. Results of the calculations of netting resistance, based on the TAUTI's equation (T), the MIYAZAKI's equation (M) and the IMAI's equation (I), concerning Weaver's knot netting in the towing tank experiments.

I は曲線 T に比べいずれの場合も数10%小さい値を示し、その差は d/l 値に依存していることが分かった。無結節網地について行った曳航実験に基づく曲線 I はいずれも曲線 M と良く一致した。曳航実験に基づいた蛙又結節網地の場合がこれに次いでいる。回流水槽実験に基づく曲線 I と曲線 M は蛙又結節網地の場合が数%の差であり、無結節網地の場合が数10%の差を示した。これらの結果から宮崎¹²⁾は良く整流された風洞を用いて実験したことが推察されると共に、(3-27)式および(3-28)式は乱れのある場で用いる網漁具については、幾分大きい値となることが分かった。

第4章 総合考察

網漁具は種々の魚種を漁獲するために、種々の形状に作られ、種々の操作が行われている。これらの漁具は、長い歴史の中で改良され淘汰されてきたものであり、基本設計を行うことなく主に経験則に基づいて設計され製作されている。新しい漁具の開発には原型が必要であり、原型とした漁具について蓄積された多くの知見が要求される。漁具の開発に関して一部の先進漁具は模型実験によりその特性を調べたり、測定器により操業中の漁具の主要部分の測定が行われるようになり、漁具の開発に貢献してきた。然し、従来の開発方法を踏襲するばかり、原型に基づかない新しい構想の漁具は生まれにくい状況にある。このような現況から脱却するためには、基礎資料に基づいて基本設計を行い、模型実験等で確認した後、詳細設計を行う等工学的方法を導入する必要がある。そのためには、網地の基本的抵抗特性を明らかにしなければならない。網漁具の基本設計が可能となれば、既存の漁具にこだわることなく計画・設計ができる。なお、その漁具を運用するに適した能力を持つ漁船や漁業機械の開発にも貢献することができる。

或る相対速度で運動している網漁具は、流体抵抗と内部応力が釣り合って一定形状を形成する。その表面は曲面であるが微小部分については平面と見做すことができる。このような観点から平面網地が受ける流体抵抗の研究が行われてきた。この研究では、網地は網素子の集合と考え、まず網素子の抵抗特性を研究対象として一定の実験条件の下で測定した。網素子の抵抗を支配する要因は、網糸直径、目合、結節形状、網糸形状、等網地の構造に基づくものと、レイノルズ数、迎角、縮結角等使用条件に基づくものがある。これ等の要因は互いに複雑に関連し合い、種々の媒介変数に支配されている。

鹿児島大学水産学部の大型回流水槽の常用流速は、最大0.7 m/sであったことと、試作した2分力計の容量を勘案した結果、第2章第1節に示す無結節網素子拡大模型と、その中心に球を取り付けた結節網素子拡大模型各2種について実験を行った。その結果、網地抵抗を法線分力と接線分力に分解した方が資料処理上有利であることが分かり、従来の研究とは異なり法線分力係数および接線分力係数について解析した。

これらの抵抗係数は網地の流体抵抗特性の基本となる係数と、設定した種々の媒介変数の積として表わすことができると仮定した。即ち、実験条件を単純化することによりそれらを支配する媒介変数を捜し、媒介変数との関係を表わす実験式を導き、更に実験条件を変えて実験し媒介変数を求めるといった方法で、基本となる抵抗係数を導いた。

網素子の抵抗係数は、全正射影面積 S_{90} を用いると脚長の影響が表れ、それぞれの抵抗

係数は種々の値を示した。これらの抵抗係数と見掛けの空隙率 S_{90}/S_{90} の積は脚長に依存しない値となることが分かった。その結果任意の迎角における任意の網地の網糸投影面積 S_{90} の実験式を導く必要が生じた。

寺田²⁾は然り糸が X 形状に交差した場合の正射影面積を計算し、結節投影面の見取図を数枚作り、結節面積は糸の交差によって生じる菱形面積の 2.94 倍であることを示している。

三宅⁴⁾は寺田²⁾に従い、運動方向に垂直な投影面への脚の投影面積を $(ld - ad^2)\sin\delta$ で、結節の投影面積を $d^2\xi_0$ で表わしている。この場合 δ を $\cos^{-1}(\cos\theta\cos\phi)$ で表わしているが、 α 、 ξ_0 については明らかにしていない。

宮本⁷⁾は網地を構成する脚の数と結節の数の比率は 2 : 1 であるとして、1 脚の面積を $d(l - ad)$ 、結節の面積を βd^2 で表わし、3 種の網地の抵抗式を示しているが、 α 、 β の値については明らかにしていない。

宮崎・高橋¹⁰⁾は結節網地半目の網糸投影面積を $2dl$ で表わしている。即ち結節の増分は直径 d の円柱の重なり面積 $d^2\sin 2\phi$ に相当すると仮定している。従って結節面積は縮結角に依存し、重なり部の面積が最大となる 45° の場合の結節面積は $2d^2$ である。

FRIDMAN, A. L.¹⁵⁾が紹介するところによると、BARANOV, F. I. は、目合の大きい網地では結節投影面積は脚の投影面積に比べ無視できる位小さいと仮定して、網地の網糸全長 l と網糸直径 d の積 dl を代表面積としている。なお、STENGEL, H.・A. FISCHER¹⁶⁾は蛙又結節の投影面積を直径 $3d$ の相当円で表わしている。このように、実測値に基づかない種々の面積を代表面積としているために、抵抗係数は面積の誤差を含んだ値となり、実験条件に関連した媒介変数を捜し出すことを困難にした。

この問題を解決するために第 1 章第 2 節に示す実験式を導いた。網地抵抗について導いた網素子の概念は、面積についても有効であり、無結節網地模型について導いた式は実測値とよく一致した。この式の結節部を実験的に修正して無結節網地網糸投影面積の近似式を導いた。

網糸投影面積の実測値はプランメータで 3 回以上測定し、近似した 3 個の平均値を用いた。ISO 規格では網糸の外接円の直径を網糸の直径と決められている。この場合は網地から切り出した 5 本の網糸の中央部 3 箇所について、網糸外接円の直径を読取顕微鏡で測定して網糸直径とした。従って網糸実質面積の相当直径は、網糸直径の測定値より幾分小さいことが予測されることから、次式で検算した。

$$s'_{90} = 2(d + \alpha)l\sin\delta - (d + \alpha)^2/\sin 2\epsilon + 0.44d^2\sin 2\phi\sin\theta \quad (4-1)$$

その結果、補正係数は円柱と網糸投影面積の差に基づくことが明らかになった。

蛙又結節網地については宮本⁷⁾に従い、1 脚の面積を $d(l - ad)$ 1 結節の面積を βd^2 として任意の迎角における網糸投影面積を表す実験式を導いた。蛙又結節は複雑な形状しているにもかかわらず、迎角が θ^* 以上ではその投影面積は一定であり (1-23) 式で表すことができた。即ち、直径が $2.8d$ の相当円で置き換えることができる。この値は STENGEL, H.・A. FISCHER¹⁶⁾が示した値の 0.87 倍である。

結節長を $2.8d$ として脚面積を計算すると、実測値より大きくなることから脚に沿った結節長 f_1 および f_2 を測定して (1-21) 式を導いた。即ちこの場合は、結節を $3.03d$ の相当円で表した。網素子 1 個の脚の投影面積 s''_{10} を (1-25) 式で表わし実測値と比較した

結果、(1-27)式を導き網素子の網糸投影面積を表わす(1-28)式を得た。

投影面上に網目の孔が表われ結節の投影が互いに重なり合う場合の網素子について(1-31)式を導いた。結節形状は複雑であるにもかかわらず前方の結節で遮蔽される結節投影面積は、(1-24)式として近似できた。この研究では網地構成の最小単位を、結節および結節部の周りの4本の脚の中心で水平に切断したX形状の構造物と定義し、網素子と称することにした。この概念を導入することにより $i \times j$ 目の網地面積は、 $2ij s_{be} + (i+j) s_{ke}$ として求めることができた。即ち、任意の迎角における網素子および結節または結節部について投影面積を実験的に把握することにより、任意の網糸太さ、目合、迎角、および縮結角における網糸投影面積を計算できるようになった。これらの実験式についてt検定を行った結果0.01水準でいずれも有意であった。但し、迎角が θ より小さい範囲では、水は網地面に沿って流れるために網糸投影面積を代表面積とするより網糸表面積を代表面積として解析することが適していることが分かり、(1-19)および(1-24)式は網地の抵抗の解析に用いていない。

網地の基本となる抵抗特性を把握するために、第2章に示す単純模型について大型回流水槽で実験を行った。まず網素子拡大模型について実験を行い、網地抵抗を法線分力と接線分力のベクトル和として解析し代表面積に網糸投影面積を用いる方法を確立した。網素子の概念は元来網地抵抗の最小単位として考えたものであり、網素子単体の抵抗特性を調べることで、網素子相互の干渉の無い抵抗特性を把握できた。

網素子について立てた解析方法を更に検討するために、網地の単純模型について実験を行い、 d/l 値が0.18以下の場合、即ち漁網用の全ての網地は法線分力係数を迎角の正弦関数として、接線分力係数を迎角の余弦関数として表わすことができることを明らかにした。但し、投影面上の網目の孔が消失する迎角 θ より小さい場合は前述の関係は成立しなかった。これらの結果から、 θ は網地の周りの流れの形状に深く関与しており、この迎角の範囲では別の方法で解析しなければならないことが明らかとなった。

これらの結果を踏まえて、第3章に示す無結節網地および蛙又結節網地について大型回流水槽実験と、大型水理実験水槽の曳航実験を行った。これらの網地の法線分力係数および接線分力係数とレイノルズ数の関係を調べた結果、いずれの水槽の場合でも実験時のレイノルズ数を、 8×10^3 以上とすることにより影響を受けないことが明らかとなった。

水中で操作される網漁具の相対運動速度は、 $0 \sim 3$ m/sであり、網漁具を構成する網糸直径は $0.2 \sim 8.0$ mmである。海水の動粘性係数は水温 20°C で 1.025×10^{-6} m^2/s^2 であることから、漁撈中における網漁具のレイノルズ数は 2.5×10^5 以下である。この研究で用いたそれぞれの水槽の常用相対速度は、大型回流水槽で $0.2 \sim 0.7$ m/s 大型水理実験水槽で $0.2 \sim 0.8$ m/sであった。そのためにレイノルズ数の最大値は、 3×10^5 であった。網地模型 M_{23} について行った実験ではレイノルズ数の最大は 1.4×10^4 であり、この場合もニュートンの抵抗則が成立していることから網地の場合にも適用できると考えた。即ち、中層トロールのように高速曳網される網漁具のコッド・エンド部等特殊な場合を除き殆どの網漁具に、導いた実験式を適用できる。

網地試験片の網目数が抵抗係数に及ぼす影響について実験を行い、媒介変数 $2ij/(i+j)$ が6より大きい場合は端の影響は無視することができることを明らかにした。従来の研究では端の影響を考慮した実験はあるが、その影響を無視できる網目数の限界を示したものはな

い。これらの実験結果は、網地抵抗の解析に有益であった。即ち 6×6 目以上の網地を用い、レイノルズ数が 8×10^2 以上となる流速を設定することにより網目数やレイノルズ数の影響を無視でき、その他の実験条件を支配する媒介変数を捜しだすことが容易となった。なお、このような実験条件について導いた抵抗係数は、大規模な網漁具の基本設計にも応用することができる。

網糸太さと目合の異なる網地の流体抵抗特性を、明らかにするために、大型回流水槽では無結節網地 9 種、蛙又結節網地 5 種について、大型水理実験水槽では無結節網地 5 種、蛙又結節網地 4 種について実験を行った。無結節網地では媒介変数 S_{80}/S_{90} を設定すること、即ち網糸投影面積を代表面積とすることにより、3.2.2. に示すそれぞれの網地のそれぞれの水槽に基づく抵抗係数の実験式を導くことができた。この場合網素子が独立に流体抵抗を受ける迎角の範囲に限定して解析した。無結節網地の場合は、網素子相互の干渉の無い迎角の臨界値を 4θ とした。この場合の θ は、投影面上の網目の孔が消失する角度である (Fig. 3-4 の a~d および Fig. 3-5 参照)。

蛙又結節網地の場合はこの範囲の迎角を小刻みに与えて抵抗測定し最小自乗法を用いて求めた曲線とデータが一致しなくなる点を捜して、迎角の臨界値を 6θ と決め、 $6\theta < \theta \leq 90^\circ$ の範囲の資料について解析を行った。即ち無結節網地の場合は $\theta < \theta \leq 4\theta$ の迎角の範囲、蛙又結節網地の場合は $\theta < \theta \leq 6\theta$ 範囲では網素子相互の干渉があるため導いた網地抵抗の実験式の修正が必要である。

それぞれの水槽のそれぞれの網地の m および n の値には若干の差が表れたが、解析を進めるためにそれらの平均値を用いている。網素子拡大模型の場合、導いた実験式の指数 m および n はいずれも 1 であったのに対し、無結節網地の場合は、 $m < 1$, $n \geq 1$ となり、蛙又結節網地の場合は、 $m < 1$ であり、 n については回流水槽で $n < 1$ 曳航水槽で $n > 1$ であった。指数 m の値は水槽の流れの特性、網地に依存せず 0.8 と置いても問題はない。蛙又結節網地の接線分力係数を示した Fig. 3-12-b および Fig. 3-13-b では、実測値と計算値はかならずしも一致しなかった。これらの結果から、 n について網地表面の粗度に関する媒介変数を捜し、更に解析を加える必要があることが示唆された。

細い網糸で大きい目合に編まれた網地では、結節または結節部が受ける抵抗は脚が受ける抵抗に比べ微小である。このような場合の蛙又結節網地の抵抗式は無結節網地の抵抗式と等しくなるはずである。このように考えると、蛙又結節網地の抵抗係数は網糸直径、脚長に関連した媒介変数の関数として表わすことが可能である。この研究では比較的太い網糸で、比較的小さい目合の網地を対象としたために、この問題について解明することはできなかった。

川上⁽⁴⁾は流れの中に支えられた網が受ける力について、水のように粘性の少ない流体の場合は網が受ける抵抗は主に圧力抵抗であるとした、

$$R_0 = R \sin \theta \quad (4-2)$$

で表わす見解と、流速のベクトルを法線方向力と接線方向力に分けた、

$$R_0 = R \sin^2 \theta \quad (4-3)$$

で表わす見解および摩擦抵抗は流れに平行に働くとした、

$$R_0 = R \sin^2 \theta + F \sin \theta \quad (4-4)$$

の見解があることを示している。なお、摩擦抵抗は一般に小さく実験結果から $F/R = 0.01$

～0.03であり、(4-4)式の見解は(4-3)式で近似できることを示している。

網地は網糸を組み合わせた構造物であり、一本の網の抵抗に比べその抵抗特性は複雑である。即ち一本の網の場合は常に独立して抵抗を受けるのに対し、網地の場合は流れが網目を通る場合と網地面に沿って流れる場合があり、その中間の場合もある。流れが網目を通る場合は圧力抵抗が主体となり、網地面に沿って流れる場合は摩擦抵抗がその主体となる。

或る迎角の網地抵抗 R_θ は網地面に垂直な法線分力 N_θ と網地面に平行な接線分力 T_θ のベクトル和である。従って、

$$R_\theta = \sqrt{N_\theta^2 + T_\theta^2} \\ = \sqrt{(C_{N2} \sin^m \theta)^2 + (C_{T2} \cos^n \theta)^2} (\rho/2) S_{B\theta} U^2 \quad (4-5)$$

となる。(4-5)式の第2項は迎角の大きい範囲では第1項に比べ無視できる位小さい、この場合 $m \div 0.8$ であることから、ほぼ $\sin \theta$ に比例すると言える。迎角が比較的小さい場合は第2項は無視できなくなり、更に迎角を小さくすると網素子相互の干渉が生じ、(4-5)式は修正項が必要となる。なお、迎角が θ より小さな場合は(4-5)式は成立しなくなる。網素子相互の干渉を調べるためには、迎角を小刻みに与えて実験しなければならない。そのような実験を行い資料処理し検討を加えたが、網素子相互の干渉について明らかにすることができなかった。その理由は、一定のレイノルズ数の下で実験を行ったため、実験流速が網地毎に異なることとなり、その結果回流水槽の外車が作る乱れが網地毎に異なり、網地の周りの流れが等しくなかったためと推定している。レイノルズ数の影響を無視できる範囲が明らかとなったことから、その範囲内で一定流速を与えた実験を行うことにより網素子相互の干渉の問題も解決できるであろう。

水が網地面に沿って流れる迎角の範囲については、摩擦抵抗が主として働くことが予測されることから、網地抵抗は網糸表面積に依存すると考えて、蛙又結節網地について実験式を導いた。(今井⁴⁵⁾参照) また無結節網地についても実験を行い実験式を導いている(未発表)。この迎角の範囲の網地抵抗については目下実験計画中である。

これらの実験式が完成した後、ラッセル式無結節網地やウルトラ・クロス式無結節網地等について実験を行い、撚り式無結節網地の抵抗式を実験的に修正することにより、また本目結節網地や二重蛙又結節網地等については、一重蛙又結節網地の抵抗式を実験的に修正することにより、比較的容易にそれぞれの実験式を導くことができるであろう。

漁具の基本設計を行うことは、電算機が普及する以前は容易な事ではなく、結果的に経験則に従わざるを得なかった。今後は種々の網地の流体抵抗特性を把握することにより、比較的容易に基本設計値を算出できるようになるであろう。その段階に到達するには、懸案の諸問題やソフトウェアの開発等、解決しなければならない問題が山積されており、かなりの年月を要すると思われるが、それほど遠い道程ではないと考えている。

第5章 結 論

網地は、相対運動方向と網地面が平行または殆ど平行な場合を除き水が網目を通過する特性を持ち、水の慣性力および粘性力に基づく流体抵抗を受ける。漁網用の網地は繊維で作られているため柔軟であり、流れの場では流体抵抗と内部応力が釣り合うように、自由にその

形状を変える特性を持つために、或る特定の網目形状について実験するときは網地を網枠に強く張り付けなければならない。従って、迎角の小さな範囲では網地は網枠前縁材の後流域に入り、正確な抵抗測定を行うことができなくなる。この迎角の範囲は網枠前縁材の太さとその形状に依存している。このような問題を解決するために、網枠の前縁材に細いステンレス線を用い、相対的に太い網糸の網地を用いることにより、ステンレス線の後流の影響を無視できる網枠を試作して実験を行った。

この研究では付録に示す Fig. II-1 または Fig. II-3 の実験器具を試作して用いた。第2章に示した網地単純模型について解析方法を検討した結果、網地抵抗を法線分力と接線分力に分解してそれぞれの抵抗係数を求めると、網地の法線分力係数は迎角の正弦関数で、接線分力係数は迎角の余弦関数で表わすことができることが明らかとなった。これらの結果から、従来の研究と異なり法線分力係数と接線分力係数について検討した。

網地抵抗に関与する要因は種々あり、それらの要因が複雑に関連し合って網地抵抗の解明を困難にしている。この研究では種々の条件下で得た或る網地の抵抗係数は、基本となる抵抗係数と実験条件に関する種々の媒介変数の積であると仮定して資料処理した。

$$C_N = C_{Nn}(f_{(Re)}, f_{(L/J)}, f_{(d/l)}, \dots, f_n) \quad (2-12)$$

$$C_T = C_{Tn}(f_{(Re)}, f_{(L/J)}, f_{(d/l)}, \dots, f_n) \quad (2-13)$$

但し、 C_{Nn} は基本となる法線分力係数、 C_{Tn} は基本となる接線分力係数で、 $f_{(Re)}$, $f_{(L/J)}$, $f_{(d/l)}, \dots, f_n$ は添字で示した種々の媒介変数で無次元数である。

単純模型について行った実験の結果から、抵抗係数を求める場合の代表面積に網糸投影面積を用いると、網素子拡大模型の各抵抗係数はほぼ等しくなることが解明された。この結果から、漁具として用いられる種々の網地について、任意の迎角における精度の高い網糸投影面積を求める実験式を導くことが必要になった。

(1) 網糸投影面積の実験式

網漁具として用いられる網地は形状が複雑であるために、まず円柱を組み合わせた網地模型の網素子について、幾何学的に導いた式を立てた、その式を網地模型について実験的に確かめた。漁網として用いられる2子撚り式貫通型無結節網地と3子撚り糸を用いた一重蛙又結節網地についてその式を補正して網糸投影面積の実験式を導くことができた。無結節網地の網糸投影面積は $\theta < \theta \leq 90^\circ$ の迎角の範囲では次式で与えられる。

$$S_{Bo} = 1.11[2ij(2dl\sin\delta - d^2/\sin 2\epsilon + 0.44d^2\sin^2\phi\sin\theta)] \\ + (i+j)(d^2/\sin 2\epsilon - 0.22d^2\sin 2\phi\sin\theta) \quad (1-18)$$

蛙又結節網地の場合は投影面上に網目の孔が現れる場合を、(1-22)式で示す投影面上の結節の影像が互いに接し合う迎角 θ^* より大きい範囲 $\theta^* < \theta \leq 90^\circ$ と小さい範囲 $\theta < \theta \leq \theta^*$ に区分して実験式を導いた。 $\theta^* < \theta < 90^\circ$ の範囲の蛙又結節網地の網糸投影面積 S''_{Bo} は次式で与えられる。

$$S''_{Bo} = 2.08ij[1.68d(l\sin\delta - 3.03d)] + 6.08d^2(2.08ij + i + j) \quad (1-29)$$

$\theta < \theta \leq \theta^*$ の範囲については、

$$S''_{Bo^*} = 4.06ijd(l\sin\delta - 3.03d) \\ + 6.08d^2(2.42ij + i - j - 1)(\theta/\theta^*) + 2j + 1 \quad (1-32)$$

導いたこれらの実験式は実験値と良く一致した。(1-12)式および(1-22)式を判別式としてこれらの実験式を選択することにより任意の目合, 網糸太さ, 縮結, 網目数における任意の迎角 θ の網糸投影面積を容易に計算できるようになった。その結果, 抵抗係数を求める資料処理過程の初段階における代表面積の精度が上がり, 算出した抵抗係数に規則制を見出し易くなり, 設定条件に基づく媒介変数を設定し易くなった。

(2) 網地の単純模型の流体抵抗

網地の流体抵抗の解析方法を検討するために, 単純形状の模型について実験を行った。網素子拡大模型の実験から, 網地が受ける流体抵抗は法線分力と接線分力に分解して資料処理した方が, 資料処理上有利であることが分かった。なお任意の迎角における網糸投影面積を代表面積とすることにより, 脚長に依存しない各抵抗係数が得られた。

$$C_{N1} = C_{N2} \sin \theta \quad (2-21)$$

$$C_{T1} = C_{T2} \cos \theta \quad (2-22)$$

網素子は網地構成の最小単位であるが, 前述の(2-21)および(2-22)式は4脚の端の効果を含んでおり, 迎角が小さな場合に生ずる網素子相互の干渉の影響を含んでいない。そのために網地とは幾分違った抵抗特性を示すことになる。これらの理由から, 円柱を組み合わせた網地模型等について実験を行った。その結果網漁具に用いられる網地の d/l 値は0.18より小さいことから, 全て次式として表わすことができることが分かった。但し, 迎角が $0^\circ \leq \theta \leq \theta$ の範囲の C_{T1} の値は余弦関数で表わすことができなかった。

$$C_{N1} = C_{N2} \sin^m \theta \quad (2-19)$$

$$C_{T1} = C_{T2} \cos^n \theta \quad (2-20)$$

迎角 90° の場合の法線分力は抗力であることから, この場合の法線分力係数と, 網糸直径を代表長さにしたレイノルズ数の関係を調べ $1.5 \times 10^3 \sim 1.4 \times 10^4$ の範囲では法線分力係数はレイノルズ数に依存しない結果を得た。これらの実験は鹿児島大学水産学部大型回流水槽で行った。

(3) 網地の流体抵抗

水中で相対運動する物体の抵抗係数はレイノルズ数の影響を受けるが, 或るレイノルズ数の範囲ではその影響が無視できる位小さいことが明らかにされている。網地についてこの範囲を確かめた後, そのレイノルズ数の範囲で実験を行うことにした。即ち, ニュートンの流体抵抗則に基いた網地の各抵抗係数を得ることを目的とした。この研究は北海道大学水産学部の大型水理実験水槽で行った曳航実験と鹿児島大学水産学部大型回流水槽で行った実験に基づいている。

大型水理実験水槽では無結節網地および蛙又結節網地各2枚について4段階の曳航速度, および9段階の設定迎角を与えて実験を行ったその結果, レイノルズ数が $6 \times 10^2 \sim 3 \times 10^3$ の範囲では各抵抗係数に影響をおよぼさないことが明らかとなった。即ち, 6×10^2 以上, 余裕を見て 8×10^2 以上のレイノルズ数で実験すると抵抗係数にはレイノルズ数の影響が含まれないことが明らかとなった。

この研究は端の影響を受けない網地抵抗係数値を得ることも, その目的であったことから,

横目数 i と縦目数 j が異なる無結節網地について曳航実験を行い次の結果を得た。

$$C^{**}_{N_2} = \{1.65(i+j)\}/2ij + 1.0 \quad (3-5)$$

$$C^{**}_{T_2} = \{1.70(i+j)\}/2ij + 0.5 \quad (3-6)$$

これらの実験から $2ij/(i+j) > 6.0$ の場合、即ち $i=j$ 目の網地では 6×6 目以上の網地を用いることにより、網地外周の端の影響は無視できることが明らかとなった。蛙又結節網地については実験を行っていないが、この実験結果は応用できると推定し、以後 6×6 目以上の供試網地を用いることにした。即ち、このような網目数の網地について導いた抵抗式は端の影響を含まないために、どのような規模の網漁具についても適用できる。

前述の結果を踏まえ、網糸直径や脚長が網地の抵抗におよぼす影響について、実験を行った。回流水槽実験では無結節網地 9 種、蛙又結節網地 5 種、曳航実験では無結節網地 5 種、蛙又結節網地 4 種を用いた。任意の迎角における網糸投影面積を代表面積にとることにより、実験水槽別に各抵抗係数は一定値となった。即ち、回流水槽における無結節網地の法線分力 N'_c 、接線分力 T'_c については次式が導かれた。

$$N'_c = 0.78 \sin^{0.75} \theta (\rho/2) S'_{B\theta} U^2 \quad (3-9)$$

$$T'_c = 0.57 \cos \theta (\rho/2) S'_{B\theta} U^2 \quad (3-10)$$

なお、曳航実験における無結節網地については次式が導かれた。

$$N'_T = 1.12 \sin^{0.80} \theta (\rho/2) S'_{B\theta} U^2 \quad (3-13)$$

$$T'_T = 0.73 \cos^{1.25} \theta (\rho/2) S'_{B\theta} U^2 \quad (3-14)$$

回流水槽実験に基づく蛙又結節網地の抵抗は、次式で与えられる。

$$N''_c = 1.10 \sin^{0.8} \theta (\rho/2) S''_{B\theta} U^2 \quad (3-19)$$

$$T''_c = 0.52 \cos^{0.5} \theta (\rho/2) S''_{B\theta} U^2 \quad (3-20)$$

一方、曳航実験における蛙又結節網地については次式で与えられる。

$$N''_T = 1.38 \sin^{0.8} \theta (\rho/2) S''_{B\theta} U^2 \quad (3-23)$$

$$T''_T = 0.84 \cos^{1.2} \theta (\rho/2) S''_{B\theta} U^2 \quad (3-24)$$

これらの実験式は、無結節網地の場合 $4\theta < \theta \leq 90^\circ$ 蛙又結節網地の場合 $6\theta < \theta \leq 90^\circ$ の迎角の範囲で成立する。なお、網地抵抗は法線分力と接線分力の和であるから、それぞれの実験式を (3-29) 式に代入することにより容易に求めることができる。

このようにして求めた網地抵抗は、いずれも田内⁴³⁾が示した (3-25) 式および (3-26) 式よりかなり小さい値を示した。一方曳航実験に基づいた (3-13), (3-14), (3-23) および (3-24) 式は、宮崎¹²⁾が示した (3-27) 式および (3-28) 式と一致した。回流水槽実験に基づいた (3-9), (3-10) および (3-20) 式は、乱れのある場の測定に基づいているため、前者に比べ小さい値を示した。即ち、(3-9), (3-10), (3-19) および (3-20) 式は乱れのある場で用いられる表層や浅海用の漁具設計に、曳航実験から導いた (3-13), (3-14), (3-23) および (3-24) 式は乱れの少ない中層や底層で用いられる漁具の設計に適している。

SUMMARY

The fishing net under operation shows various shapes but, it is possible to consider it as one plane as quite a small portion of it is concerned. If fluid dynamical characteristic of plane netting is obtainable, it is easy to ascertain the resistance of a certain portion of the net applicable for summing up the plane netting resistances. In other words, it is possible to obtain the net resistance value applicable for any shapes of fishing net. For this purpose, it is necessary to obtain not only an accurate and a widely useable coefficient for fluid dynamical resistance of a netting, but also a confirmed value, of which the edge-effect was eliminated.

The materials used in this study are the commonly used Japanese two-ply-twisted knotless netting and the Weaver's knot netting of three-ply-twisted twine. The used netting are fixed on the \square -shaped netting frame, the two edges of which are fixed with a thin stainless steel wire. In this case, a netting was fixed on the hang-in ratio of 0.293 (hanging angle $\phi=45^\circ$).

The velocity of relative motion under fishing shows 0~3 m/s, accordingly the value of Reynolds number must cover the range from 0 up to 2.5×10^5 . But in this study, the value of Reynolds number was restricted within the range from 8×10^2 to 3×10^3 , due to the capacity of the experimental tank.

In most of the papers in which the characteristic of fluid dynamical resistance on the netting was treated, the resistance was expressed as a function of the drag coefficient and as the lift coefficient. But in this paper, the resistance was expressed as the function of the normal coefficient and as that of the tangential coefficient. The reason why this method was adopted is the easiness in carrying the analysis of the netting resistance. And here, it was assumed that these coefficients are obtained by multiplying the fundamental fluid dynamical coefficient of the netting, with the setting-parameters fixed in accordance with experimental conditions.

The first experiment was carried out in order to fix the projective area of nettings at a certain attack angle, with the confirmation of experimental equation applicable for the above mentioned nettings, ascertaining an accurate value of the fluid dynamical coefficients.

The second experiment was carried out to establish the method of analysis concerning the fluid dynamical characteristics of the simplified netting models.

The third experiment was carried out to determine the values of the normal coefficient and of the tangential coefficient of the netting concerning the two kinds of fishing net.

(1) In this study, the minimum fabric of a netting is termed as a "Netting element". The fabric is cut horizontally at the respective intermediate points of the knotted four legs, the shape of a netting element is, to be shown in the form of "X". If the notion for a netting fabric of $i \times j$ meshes is applied, it may be possible to regard a netting fabric of $i \times j$ meshes as the sum of netting elements countable in the number of $2ij$ plus the edged knots countable in the number of $i+j$.

(2) The projective area of a knotless netting on a twine portion can be expressed as

follows :-

$$\theta < \theta \leq 90^\circ$$

$$S'_{B\theta} = 1.11[2ij]2dl\sin\delta - (d^2/\sin 2\epsilon) + 0.44d^2\sin 2\phi\sin\theta] \\ + (i+j)(d^2/\sin 2\epsilon + 0.22d^2\sin 2\phi\sin\theta) \quad (1-18)$$

In this case, the adopted θ is,

$$\theta \doteq \sin^{-1}(d/2l\cos\phi) \quad (1-12)$$

(3) The projective area of a Weaver's knot netting on a twine portion can be expressed as follows :-

$$\theta < \theta \leq \theta^*$$

$$S''_{B\theta^*} = 4.06ij d(l\sin\delta - 3.03d) \\ + 6.08d^2\{2.42ij + i - j - 1\}(\theta/\theta^*) + 2j + 1\} \quad (1-32)$$

$$\theta^* < \theta \leq 90^\circ$$

$$S''_{B\theta} = 2.08ij\{1.68d(l\sin\delta - 3.03d)\} + 6.08d^2(2.08ij + i + j) \quad (1-29)$$

In this case, the adopted θ^* is,

$$\theta^* \doteq \sin^{-1}(1.52d/l\cos\phi) \quad (1-22)$$

(4) The fundamental experiments were carried out on the circulating water tank, belonging to the Faculty of Fisheries Kagoshima University, concerning the enlarged model of netting elements. The results obtained are as follows: The netting resistance may reasonably be expressed as the sum of a normal force vector and a tangential force vector. The normal force may be expressed as a sine-function of an attack angle; and the tangential force may be expressed as a cosine-function of an attack angle. Those experimental formulae have only two unknown variables, so it is easy to fix the value of variables (a coefficient and a exponent), using the method of multiple regression for dual independent variables.

When the projective area of a netting twine was chosen for the representative area, the values of fluid dynamical coefficients come to be independent of leg length and twine thickness.

(5) Concerning the enlarged single netting element for a plane netting, it is impossible to apply the results of the experiments because of the influence of edge-effect of four legs and of the lack of mutual interference of netting elements. Accordingly the simplified mesh models were used for ascertaining the fluid dynamical characteristics. The results obtained can be expressed in the following experimental equations.

$$C_{N1} = C_{N2}\sin^m\theta \quad (2-19)$$

$$C_{T1} = C_{T2}\cos^n\theta \quad (2-20)$$

The normal coefficient of a simplified mesh model is independent of the Reynolds number from the value 1.5×10^3 to 1.4×10^4 . In this case the Reynolds number is based on a twine diameter.

(6) In the results obtained from the towing experiments, concerning the knotless netting and the Weaver's knot netting, the normal coefficient and the tangential coefficient are proved to be independent of the Reynolds number from the value 6×10^2 to 3×10^3 . But it is impossible to clarify the critical value of the upper limit. After these experiments fluid dynamical research was carried out on the larger value of 8×10^2 of the Reynolds number.

(7) Before a fundamental calculation of the net design is carried out, it is necessary to obtain the value of the fluid dynamical coefficient in which the edge-influence of netting is eliminated. But nobody has described the relationship between the mesh number and the coefficients.

The experiment was carried out with the use of towing experiment on the different mesh numbers of a twinwise direction "i" and normal knitting direction "j" concerning knotless netting, in the towing tank experiment. The relations obtained are as follows:-

$$C_{N_2}^{**} = [1.65(i+j)/2ij] + 1.0 \quad (3-5)$$

$$C_{T_2}^{**} = [1.70(i+j)/2ij] + 0.5 \quad (3-6)$$

From these results it is possible to say that the value of the coefficients is not depending on mesh numbers when the value of $2ij/(i+j)$ is larger than 6.0. After these experiments, nettings made of more than 6×6 of mesh numbers were used.

(8) The experimental equations of the normal force and the tangential force of plane netting on the respective twine diameter and leg length, are derived as in the followings:-

i) In case of a knotless netting in the water circulating experiments the equations are expressed as:-

$$N'_c = 0.78 \sin^{0.75} \theta (\rho/2) S'_{B\theta} U^2 \quad (3-9)$$

$$T'_c = 0.57 \cos \theta (\rho/2) S'_{B\theta} U^2 \quad (3-10)$$

ii) The equations obtained in the towing experiment are expressed as:-

$$N'_T = 1.12 \sin^{0.80} \theta (\rho/2) S'_{B\theta} U^2 \quad (3-13)$$

$$T'_T = 0.73 \cos^{1.25} \theta (\rho/2) S'_{B\theta} U^2 \quad (3-14)$$

iii) In the case of a Weaver's knot netting in the water circulating experiment the equations are expressed as:-

$$N''_c = 1.10 \sin^{0.8} \theta (\rho/2) S''_{B\theta} U^2 \quad (3-19)$$

$$T''_c = 0.52 \sin^{0.5} \theta (\rho/2) S''_{B\theta} U^2 \quad (3-20)$$

iv) The equations obtained in the towing experiment are expressed as:-

$$N''_T = 1.38 \sin^{0.8} \theta (\rho/2) S''_{B\theta} U^2 \quad (3-23)$$

$$T''_T = 0.84 \cos^{1.2} \theta (\rho/2) S''_{B\theta} U^2 \quad (3-24)$$

Concerning a knotless netting these derived equations are well coincided with the experimental data in the range of attack angle $4\theta < \theta \leq 90^\circ$; concerning a Weaver's knot netting these are well coincided with the data in the range of $6\theta < \theta \leq 90^\circ$. And little corresponding is noted in the range of an attack angle, $\theta < \theta \leq 4\theta$ on a knotless netting; in the range of attack angle, $\theta < \theta \leq 6\theta$ on a Weaver's knot netting, owing to mutual interferences of the netting elements. Those are not agreed with the experimental values on the range of an attack angle, $0^\circ \leq \theta \leq \theta$. In these cases, the medium was made to be passed along the surface of netting, instead of passing through the mesh hole. This phenomenon might be related with the other parameters, so it may be necessary to carry out further studies for the ascertainment of the fluid dynamical resistance characteristics of nettings.

(9) The experiments were carried out on the different characteristics of fluid medium, the towing experiment carried out on a static water condition and the water circulating experiment carried out on a running water condition are these. The results obtained are different coefficient values and exponent values, depending on the conditions. It is

convenient to adopt the experiential equations derived from the water circulating experiment, in which the shallow water fishing net like a drift gill-net and a set-net are used; and the equations are derived from the towing experiment for a deep sea fishing net like a trawl and a bottom gill-net.

謝 辞

この論文をとりまとめるに当たって、御懇篤なる御指導と御校閲を賜った北海道大学水産学部教授佐藤修博士、同教授五十嵐脩蔵博士および同助教授梨本勝昭博士に深甚なる感謝の意を表します。

また、終始有益なる御教示を戴き、励まして下さった日本大学理工学部教授黒木敏郎博士ならびに鹿児島大学水産学部教授肥後伸夫博士に心から感謝の意を表します。

なお資料解析・資料整理に当たり、北海道大学水産学部助手山本勝太郎博士および鹿児島大学水産学部助手不破茂氏に貴重な御助言や御助力を戴いた。また鹿児島大学大学院水産学研究科で研究された、平川栄一氏、西田雄祐氏、新門道範氏、吉賀慎二氏ならびに鹿児島大学水産学部漁具学講座で卒業研究された多くの卒業生の御助力を戴いた。なお、実験装置の製作等については、鹿児島大学水産学部漁具学講座技官田畑静夫氏ならびに同機械工場技官高岡勝義氏の御助力を戴いた。ここに記し深く感謝の意を表します。

文 献

1. 松井佳一・松本 巖 (1960): ベルギー国における古代漁網について 近畿大学農学部紀要 1 3~23
2. 寺田寅彦・関根磯吉・野崎知之 (1915): 網に対する水の抵抗の研究 水産講習所試験報告 10 (5) 1~23
3. 田内森三郎・三浦定之助・杉井一美 (1925): 網地の水中に於ける抵抗に就て 水産講習所試験報告 21 (2) 25~35
4. 三宅 豊 (1927): 網地の研究(一) 水中に於ける網地の抵抗 (第1報) 水産講習所試験報告 23 (2) 48~61
5. TAUTI, M. (1934): The Force Acting on the Plane Net in Motion through the Water *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.* 3 (1) 1~4
6. 藤田 博・横田敏之 (1951): 網地のうける水中抵抗に就て I 平面網の場合の研究 応用物理 20 (2) 59~63
7. 宮本秀明・野村正恒・下崎吉矩 (1952): 水中を動く網地が受ける水の抵抗-I. 本目・蛙又及び無結節網地の流水抵抗の違い 日水誌 17 (8~9) 39~44
8. 宮本秀明・野村正恒 (1953): 水中を動く網地が受ける水の抵抗-II 網目の形状変化と流体抵抗 日水誌 18 (7) 327~330
9. 野村正恒・森敬一郎 (1956): 水中を動く網地が受ける水の抵抗-III 網糸の種類による流水抵抗の違い 日水誌 21 (11) 1110~1113
10. 宮崎芳夫・高橋 正 (1964): 網地の流体抵抗に関する基礎的研究-III 平面網地の抵抗について *Journ. Tokyo Univ. Fish.* 50 (2) 95~103
11. 宮崎芳夫 (1964): 網地の流体抵抗に関する基礎的研究-IV ロープおよび平面網地の水中における抵抗について *Journ. Tokyo Univ. Fish.* 50 (2) 105~110

12. 宮崎芳夫 (1964) : 網地の流体抵抗に関する基礎的研究-VI 一様な流れの中に傾けて置かれた平面網地の抵抗について *Journ. Tokyo Univ. Fish.* **50** (2) 125~134
13. 大沢要一・森敬四郎・田原陽三 (1982) : 平面網地の流水抵抗に関する研究 I 網地抵抗測定装置の試作と貫通式無結節平面網地の流水抵抗について 水工研報告 **3** 227~238
14. 大沢要一・田原陽三・森敬四郎 (1983) : 平面網地の流水抵抗に関する研究 II 蛙又結節, 貫通式無結節およびラッセル平面網地の流水抵抗測定結果について 水工研報告 **4** 183~196
15. FRIDMAN, A. L. (1973) "Theory and Design of Commercial Fishing Gear" (Trans. from Russian) pp 45~72 Israel Program for Scientific Translation JERUSALEM
16. STENGEL, H.・A. FISCHER (1968) : Ergebnisse von Untersuchungen an genotenen Netzen aus gedrehten Polyamidfäden *FISCHEREI-FORSCHUNG* **6** (3) 45~59
17. KORITZKY H. -H. (1970) : Verfahren zur Berechnung von Widerstand und Auftreib weitmaschiger Netzen *FISCHEREI-FORSCHUNG* **8** (2) 41~46
18. TAKENOUTI, Y. (1941) : On the Differential Equation of Fishing Net *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.* **10** (1) 1~6
19. KAWAKAMI, T. (1955) : Equilibrium Configuration of a Rectangular strip of Net Subjected to a Uniform Current *Mem. Coll. Agr., Kyoto Univ.* **72** 1~4
20. KAWAKAMI, T. (1955) : On the Mechanical Characters of the Drag Net *Mem. Coll. Agr., Kyoto Univ.* **72** 5~15
21. KAWAKAMI, T.・K. NAKASAI (1962) : On the Mechanical Character of the Drag Net II *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.* **28** (7) 664~670
22. FUJITA, H. (1953) : The Drag Acting on a Net in a Uniform Current II *Mem. Coll. Agr., Kyoto Univ.* **66** 11~20
23. 谷口武夫 (1955) : 水中に於ける各種囊網の抵抗について I 日水誌 **21** (5) 291~296
24. 谷口武夫 (1956) : 水中に於ける各種囊網の抵抗について II 日水誌 **21** (9) 969~972
25. 谷口武夫 (1956) : 水中に於ける各種囊網の抵抗について III 日水誌 **21** (11) 1107~1109
26. 谷口武夫 (1957) : 水中に於ける各種囊網の抵抗について IV 日水誌 **22** (12) 727~729
27. 谷口武夫 (1968) : 水中に於ける各種囊網の抵抗について V 日水誌 **34** (4) 295~299
28. 谷口武夫 (1968) : 水中に於ける各種囊網の抵抗について VI 日水誌 **34** (11) 979~982
29. 谷口武夫 (1969) : 水中に於ける各種囊網の抵抗について VII 日水誌 **35** (7) 641~643
30. 小山武夫 (1974) : 船尾トロールについての実験的考察 東海水研報 **77** 171~247
31. MACLENNAN, D. N. (1981) : The Drag of Four-panel Demersal Trawls *Fisheries Research* **1** 23~33
32. 川上太左英 (1964) : 曳網の力学 日水誌 **30** (10) 858~871
33. SUZUKI, O.・K. MATUDA (1965) : Drag Force of Plane Net set to the Parallel to Stream *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.* **31** (8) 579~584
34. 小長谷庸夫 (1971) : 巾着網の設計理論に関する基礎研究 三重県立大学水産学部紀要 **8** (3) 209~296
35. 今井健彦 (1984) : 無結節網地の投影面積 日水誌 **50** (11) 1817~1822
36. 今井健彦 (1984) : 蛙又結節網地の投影面積 日水誌 **50** (11) 1823~1828
37. 田内森三郎 (1938) : "水産物理学" pp 57~64 朝倉書店 東京
38. 田内森三郎 (1954) : "漁具物理学 第3版" pp 61~65 東京水産大学 漁具学教室 (謄写版印刷)
39. 宮本秀明 (1936) : 鰈大謀・落し網の模型実験的研究-I 越中式大謀網及び普通大謀網 日水誌 **5** (3) 158~170
40. 宮本秀明 (1936) : 鰈大謀・落し網の模型実験的研究-II 潮流急なる漁場における落し網 日水誌 **5** (4) 227~234

-
41. 宮崎芳夫 (1964) : 網地の流体抵抗に関する基礎的研究 - I 平面格子の抵抗について *Journ. Tokyo Univ. Fish.* **50** (2) 79~88
 42. 宮崎芳夫・高橋 正 (1964) : 網地の流体抵抗に関する基礎的研究 - II ロープおよび糸の抵抗について *Journ. Tokyo Univ. Fish.* **50** (2) 89~94
 43. 田内森三郎 (1963) : “演習漁業物理学” pp 44~45 恒星社厚生閣 東京
 44. 川上太左英 (1981) : “漁業解析入門” pp 33~111 恒星社厚生閣 東京
 45. 今井健彦 (1983) : 蛙又結節および本目結節の表面積 *日水誌* **49** (8) 1195~1198
 46. 今井健彦 (1984) : ポリエチレン 3 子撚り糸の表面積 *日水誌* **50** (4) 573~576

付 録

I 実験に使用した水槽の概要

I-1 大型回流水槽

この研究は主に鹿児島大学水産学部の両対流式大型回流水槽で行った。水槽の測定部水路は長さ2.0m、幅2.0m、深さ1.0mであり、実験時の水深は0.8mであった。この水槽は一對の可変翼外車をVS型交流電動機(11KW)で駆動する構造であり2段切替クラッチを備えており常用流速は0.2~0.7m/sである。

実験に先立ち、網柵周囲の流れを均一にするために流速調整板等进行操作した。プロペラ式電気流速計(東邦電探CM-10-S型)を用いて10cm間隔で流速水平分布を調べ流速調整板の調整を行い、流速調整板の中間に真鍮棒を入れて微調整した。その後、網柵の中心位置から左右の40cm間隔を5cm毎に測定した結果、最大値と最小値の差が $\pm 4\%$ であった。

この水槽には測定部水路の上流に金属製の整流格子があるが、可変翼外車が作る乱れを充分整流することはできない構造であり、流れはかなり乱れを含んでいる。

網柵の軸芯の上流約1mの位置で、網地中心に合わせて設置したプロペラ式電気流速計で実験流速の設定を行った。実験に際し、4m間隔の見通し線上で流木試験(棒状の釣用浮きを模様替えした浮標)を行い流速計の精度を確めた。Fig. I-1に大型回流水槽の概要を示した。

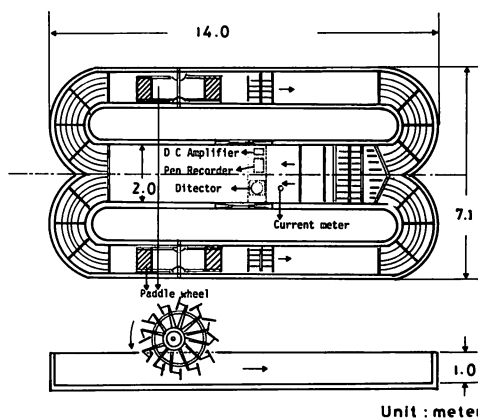


Fig. I-1. Schematic drawing shows the experimental circulating tank belonging to the Faculty of Fisheries, Kagoshima University.

I-2 大型水理実験水槽

この研究の一部を北海道大学水産学部水理実験水槽で行った。この水槽は全長64.3m、幅3.5m、深さ1.8m、曳航距離50m、常用水深1.3mであり、曳航電車の常用速度は0.2~0.8 m/sであった。水路の両端には波のエネルギーを拡散、吸収する8×6mおよび6×6mの水槽がある。曳航速度は電車に備え付けてあるタッチ・ローラー式速度計（電子工業）のデジタル表示器により設定した。1設定迎角および1設定速度につき1回曳航し定速曳航を確認した後測定開始したために、1測定時間は20~60秒であった。速度設定の誤差を±1.5%として速度調節を誤った場合は再度曳航した。帰路に次の曳航速度の目盛を読取ることでより比較的スムーズに速度設定することができた。

この水槽は静止水中を定速度で曳航して抵抗測定するために、鹿児島大学の回流水槽に比べ乱れは無視し得る位小さい。Fig. I-2に大型水理実験水槽の概要を示した。

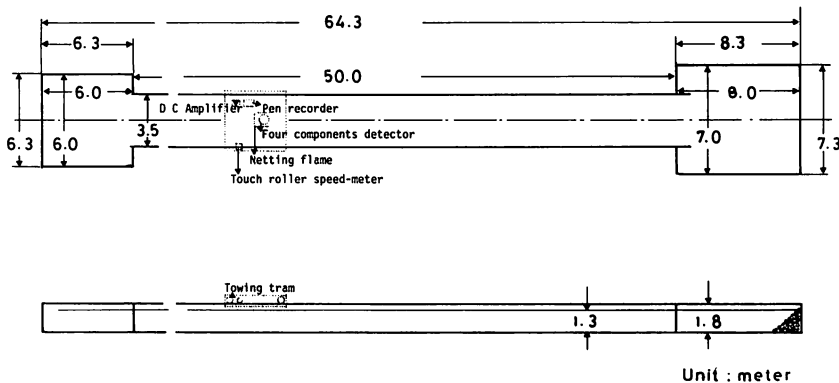


Fig. I-2. Schematic drawing shows the fluid dynamical towing tank belonging to the Faculty of Fisheries, Hokkaido University.

II 実験装置および実験方法の概要

II-1 大型回流水槽における実験装置と実験方法

測定水路の水槽壁の上面に設置されたレール上に、L型鋼材を渡し、その上に抵抗検出装置、直流歪増幅機、記録器を設置した。実験装置の模式図をFig. II-1に示した。抵抗検出器はL型鋼材を箱形に組んだ構造物で、天板上に円形分度器を接着した迎角設定板を設けた。分度器の中心に板面に垂直な回転軸を取りつけ、ボール・ベアリングを介して天板の中心を貫通させた。回転軸の下端に取りつけたボール・ジョイントを介して網枠支持桿を懸吊し、その下端に網枠取付金具を設けて網枠をセット・ピンで固定する構造とした。網地抵抗は流れ方向に直交するように設置したロー・ドセル（10kgf）で抗力成分を、流軸に平

行に設置したロード・セル (5 kgf) で揚力成分を検出した。これらのロード・セルはそれぞれクロス・テーブル上に取り付けられており、ロード・セルの位置を前後、左右に微調節できる構造とした。ロード・セルの受感部にはボール・ベアリングの鋼球を接着し支持棒に取り付けた円盤と点接触させた。支持棒を取りつける前に、下げ振りの見通し線を基準として、クロス・テーブルで接点の位置を調整した。但し、網素子の抵抗を測定した検出器は、Fig. II-1 に示す検出器より以前に試作したもので軽構造であり、クロス・テーブルは組み込まれていなかった。

これらの検出器を用いて実験を行う際、流れ方向と網地面のなす角 (迎角 θ) が小さい場合は、網地に働く揚力が小さいために網枠支持棒の位置がずれて測定誤差が生ずることがあった。実験の後期には支持棒の円板に2本のバネ (標準バネ H-10-12) を組み込むことにより、この欠点を補った。

ロード・セルで検出した歪量を直流歪増幅機で増幅しペン・レコーダに記録した。これらの機器は約1時間ウォーミング・アップした後、上皿天秤用重錐で較正して実験を行い、実験終了後再び較正して測定値を確認した。

構造上迎角は任意に設定できるが、特別な場合を除き $0 \sim 90^\circ$ の範囲の 5° 毎の19段階とした。セット・ピン等の僅かな隙間が迎角の設定誤差を誘起しないように 90° から 0° に向かって設定した。1 設定迎角についての測定時間は約1分間としペン・レコーダの記録の平均値を読みとった。

実験流速は回流水槽の能力、網枠の強度、網糸直径を勘案して、ニュートンの抵抗則が成立するレイノルズ数の範囲内で一定レイノルズ数となるように設定した。流速設定はプロペラ式電流速速計を用い30秒間の測定を3回以上行い、偶然誤差と思われる値を除いたそれらの平均値を用いた。実験終了後再び流速測定して実験中の流速変動が無かったことを確認した。

流速設定誤差を除くために回流水槽を稼働した状態で網枠を外し、網地を取り除いた後、網地を張るのに要した長さのステンレス線 (直径0.2mm) を用いて網枠の形状を修正した。その網枠を再び抵抗検出器に取り付けて19段階の迎角について網枠の抵抗測定を行った。網地抵抗は網枠に網地を張った抵抗値から、網枠だけの抵抗値の差として求めた。

網枠は直径8mm、6mm、4mmの丸鋼シャフトをコの字型に曲げて網枠の前端に直径0.4mm、若しくは0.3mm、のステンレス線を張り、その上辺の中央に10mmの丸鋼棒を溶接した構造物である。網枠の模式図を Fig. II-2 に示した。迎角が小さな場合の網枠前縁材の影響を無視する目的でこのような網枠を作り、できるだけ太い網糸の網地を用いることにより網枠前縁材の後流の影響はないものとして資料処理した。このような構造としたために網枠は非対称であり、網枠を垂直に懸吊するために、重心補正用として網枠下部先端に紡錘型釣用鉛を取り付けた。網地を網枠に張りつけると枠は僅かに歪み重心差が生じるが、枠に板鉛を巻き再び重心補正した。供試網地は原則として横目数と縦目数の等しい 6×6 目以上の網地を用い、縮結角が 45° となり、網の中心が網枠の中心に一致するように細いステンレス線 (直径0.2mm) で強く張り付けた。また網枠が作る乱れが網地に影響をおよぼさないように網地の全面積が網枠縁材で囲まれる面積の約65%となるように配慮した。網枠は手造りであるために個々の形状に若干の差があった。網地を網枠に張った後、網枠支持棒のセット・ピンの孔と、網地中心の長さを計り、モーメント計算の資料とした (Fig. II-2 参照)。

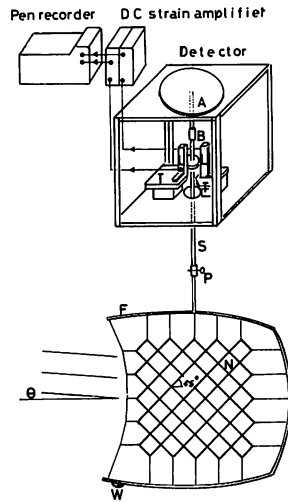


Fig. II-1. Schematic drawing shows the experimental equipment for the circulating tank experiment.

A : Setting disk for an attack angle	B : Ball joint
F : U-shaped netting frame	L : Load cell
N : Netting piece	P : Setting pin
S : Shaft	T : Cross table
W : Compensating weight	θ : Attack angle

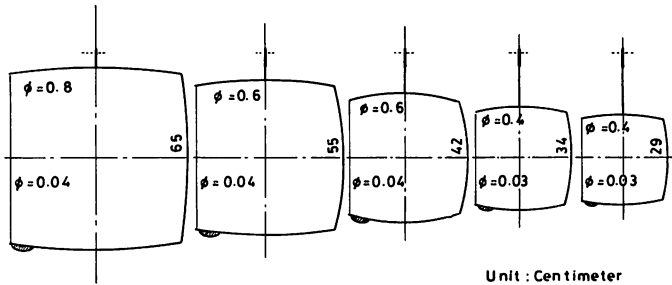


Fig. II-2. Schematic drawing shows the U-shaped netting frame for the circulating tank experiments, upper ϕ value shows a diameter of hard steel shaft and lower ϕ value shows a diameter of stainless steel wire.

II-2 大型水理実験水槽における実験装置と実験方法

曳航電車中央部のレール上に L 型鋼製の箱型枠を取りつけ、その中央に 4 分力計を設置してフォーク型の網枠支持金具を取りつけた。検出した抗力および揚力は直流増幅器で増幅し、ペン・レコーダーに記録した。実験装置の模式図を Fig. II-3 に示した。

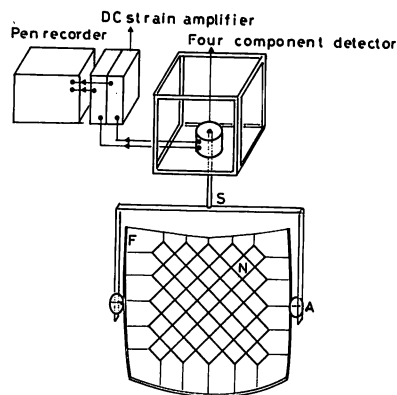


Fig. II-3. Schematic drawing shows the experimental equipments for the towing tank experiments.

A : Setting disk for an attack angle

F : U-shaped netting frame

N : Netting piece

S : Fork-shaped supporting frame

この分力計は運動方向 (x 軸), 垂直方向 (z 軸) の分力 F_x および F_z と x 軸の周りのモーメント M_x , y 軸の周りのモーメント M_y を同時に検出する装置である。この研究では4分力計の F_x , F_z のみを用いた。この装置は運動方向に平行な分力を F_x として、垂直な分力を F_z として検出する構造であることから、網枠支持金具の長さの問題は考慮する必要はない。また静止状態で網枠水平の場合を0点とすればよいことから網枠の重心補正等複雑な作業を行う必要はない。但し網枠の形状が変わると抵抗値に差が生じる恐れがあるために網地を除いた場合の網枠形状の補正を行った。

4分力計を設置する前に4分力計の2次較正器を既知の重さの重錘(潜水用鉛ベルトの鉛: 1 kg)で較正し、その後2次較正器を用いて実験開始時と終了時に較正した。これらの機器は実験開始前に約1時間ウォーミング・アップを行った。曳航開始前に F_x , F_z の0点をチェックした。網枠は直径10mmの丸鋼シャフトをコの字型に曲げ、両先端部に0.7mmのステンレス線を張って網枠を成形した。迎角を仰角として与えたために網枠の左右の縁材の中心に設けた支持棒に、5°毎に孔を開けた円形の迎角設定板を溶接した。フォーク形の網枠支持金具の先端部に設けた孔と円板の孔をそれぞれ2本のボルトで縫い合わせて螺子止することにより5°毎の迎角を与える構造とした。網枠支持金具の両腕は流線型に削っており、網枠支持棒の直径は20mmの丸鋼シャフトであった。このシャフトが4分力計を貫通する部分は直径16mmに切削してある。網枠および装置の概要を Fig. II-4 に示した。

設定迎角は0°, 5°, 10°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°の9段階とした。なお供試網地の網糸直径と曳航電車の常用曳航速度から、原則としてレイノルズ数が 1.3×10^3 となるような速度と設定して実験を行った。この場合も全抵抗と網枠だけの抵抗を測定しそれらの値の差を網地抵抗とした。

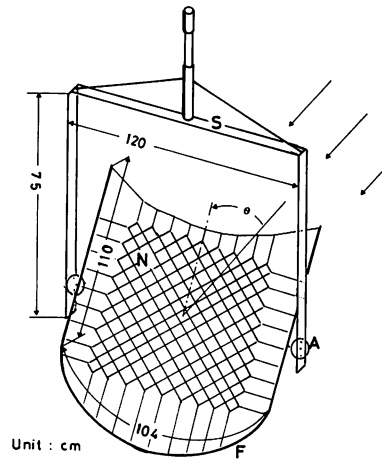


Fig. II-4. Schematic drawing shows the □-shaped netting frame and the fork-shaped supporting frame for the towing tank experiments.

A : Setting disk for an attack angle

F : □-shaped netting frame

N : Netting piece

S : Fork-shaped supporting frame

θ : Attack angle