中層トロールシステムの静的特性の解析法^{*1}

胡 夫 祥, 松 田 俊

(1991 年 1 月 7 日 受付)

An Analytical Method of Static Characteristics of Midwater Trawl System

Hu Fuxiang^{*2} and Ko Matuda^{*2}

Equilibrium differential equations of motion for a three dimensional midwater trawl system, which consists of warp, otter board and trawl net were introduced. A new analytical method that was solved from the side of net as initial conditions was developed. A computer simulation was made and the results were compared with those of the field experiments on the midwater trawl system of FRV "Shinyo-maru" belonging to the Tokyo University of Fisheries. There was good agreement between simulation and experiment on the working depth of the otter board and the net. However, in regard to the spread of wingend, it was observed that the difference between both increased with the warp length. This is supposed that the attack angle of otter board was not always settled in perfect condition.

トロールシステムを構成するワープの形状および張力分布などの解析法については、すでに宮崎,¹⁻⁴⁾ 佐藤・宮崎,⁵⁾ Nakasai and Kawakami⁶⁾ および She *et al.*⁷⁾ による近似計算法が報告されている。しかし、それらはいずれもいわゆるケーブルの問題に限られ、ワープ、オッターボードおよび網とを組合わせた三次元の中層トロール網のシステムとしての解析はまだ十分に解明されているとは言えない。さらに、漁船の曳網条件と漁場環境などを考慮して漁具を設計するためには、網の規模やシステムの運動状態を定量的に把握しておく必要がある。

本論文では、定常運動状態における中層トロールシステムを構成するワープ、ブライドルなどロープ類の釣合の状態方程式を導き、コンピュータにより網の水深、オッターの水深および袖網間隔などの数値解を求めた。理論から得られた計算値と海上実験による実測値とを比較した。さらに、この解析法を用いて、中層トロールシステムのワープ長および曳網速度などの主要パラメータが網の水深、袖網間隔などに及ぼす影響をシミュレーションにより検討した。

釣合方程式の導出

水中において任意の運動をしている伸びない均質で、柔軟なロープの一定点から P 点までの長さを s とし、 s と $s+ds$ との間の微小長さ ds に作用する外力の合力ベクトルを Rds , ロープの各点に働く s の増加する向き

の張力ベクトルを $T(s, t)$, ロープの単位長さの質量を m

$$m \frac{\partial^2 \mathbf{r}}{\partial t^2} = \mathbf{R} + \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial s} \quad (1)$$

と表される。ここで、 $\mathbf{r}(s, t)$ は P 点の位置ベクトルである。

このロープが定常運動を保っているときには、(1) 式の左辺は 0 となり、 $\mathbf{r}$ と $\mathbf{T}$ とはそれぞれ長さ s だけの関数になるから、Fig. 1 に示すような曳網方向を x 軸、鉛直上方を z 軸、 x, z 軸と垂直方向を y 軸とする座標系において、ロープの単位長さ ds に作用する流体力の x, y, z 軸成分をそれぞれ R_x, R_y, R_z とすると、この座標系に関する定常運動における一般の釣合方程式として (1) 式より

Fig. 1. Diagram of coordinate axis.

^{*1} 本論文の大意は平成元年度日本水産学会年会（東京）において報告した。

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

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{ds}(T \cos \alpha) - R_x &= 0 \\ \frac{d}{ds}(T \cos \beta) \pm R_y &= 0 \\ \frac{d}{ds}(T \cos \gamma) + R_z &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

が導かれる。この (2) 式を中層トロールシステムを構成するワープなどロープ類の定常運動における張力および形状の計算に用いる。この場合、 α, β, γ はそれぞれワープまたはブライドルなどの任意の位置における張力 T の x, y, z 軸との成す角度である。(2) の第二式の第二項における複号は、オッター式中層トロールの場合、右舷側のワープおよび左舷側のブライドルを対象とする時は正、逆に左舷側のワープおよび右舷側のブライドルを対象とする時は負をとる。しかし、中層トロールは左右対称であると思なせるので、以下右舷側のワープのみを取扱う。

佐藤ら³⁾によれば、ワイヤロープの x, y, z 軸に対する流体力係数はそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} C_x &= C_{D0}(1 - \sin^2 \theta \cos^2 \delta) \\ C_y &= C_{D0} \sin \theta \cos \delta \frac{\sin^2 \delta}{\sqrt{1 - \cos^2 \theta \cos^2 \delta}} \\ C_z &= C_{D0} \sin \theta \cos^2 \theta \cos^2 \delta \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

と表される。ただし、 C_{D0} は、ワイヤロープが流れに直角に置かれたときの抗力係数で、次式で表される。

$$C_{D0} = 2.086(R_e)^{-0.08} \quad (3 \times 10^3 < R_e < 1 \times 10^4) \quad (4)$$

ここに、 $R_e = Vd/\nu$ (V : 曳網速度、 d : ワイヤロープの直径、 ν : 流体の動粘性係数)。

Fig. 1 に示す幾何学的関係より、(3) 式における角度 θ と δ をそれぞれ α, β, γ に置換えると、単位長さに作用する流体力の x, y, z 軸の成分は、それぞれ次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} R_x &= kV^2(1 - \cos^2 \alpha) \\ R_y &= kV^2 \frac{\cos \alpha \cos^2 \beta}{\sqrt{1 - \cos^2 \gamma}} \\ R_z &= kV^2 \frac{\cos \alpha \cos^2 \gamma}{\sqrt{1 - \cos^2 \beta}} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここに、 $k = 0.5 \rho C_{D0} d$ (ρ : 流体の密度)。(5) 式を (2) 式に代入し、次のような変数変換を行う

$$\left. \begin{aligned} \tau &= T/W_B, \quad \sigma = s/l_n, \quad \xi = x/l_n \\ \eta &= y/l_n, \quad \zeta = z/l_n, \quad \kappa = kl_n V^2/W_B \\ \phi &= l_n q/W_B \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

(6) 式で定義された各変数はすべて無次元量で、 q はロープの単位長さの水中重量、 l_n は網の全長、 W_B はオッターボードの水中重量である。このようにして得られた式に $d\xi/d\sigma, d\eta/d\sigma$ および $d\zeta/d\sigma$ を付け加えて連立させる

と、定常運動におけるワープなどロープ類の張力および形状を求める無次元の釣合方程式

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\tau}{d\sigma} &= \kappa \sqrt{1 - \cos^2 \beta - \cos^2 \gamma} \left(\cos^2 \beta + \cos^2 \gamma \right. \\ &\quad \left. - \frac{\cos^2 \beta}{\sin \gamma} - \frac{\cos^2 \gamma}{\sin \beta} \right) + \phi \cos \gamma \\ \frac{d\beta}{d\sigma} &= \frac{\kappa}{\tau} \cot \beta \sqrt{1 - \cos^2 \beta - \cos^2 \gamma} \left(\cos^2 \beta + \cos^2 \gamma \right. \\ &\quad \left. - \frac{\cos \beta \sin^2 \beta}{\sin \gamma} - \frac{\cos^2 \gamma}{\sin \beta} \right) + \frac{\phi}{\tau} \cot \beta \cos \gamma \\ \frac{d\gamma}{d\sigma} &= \frac{\kappa}{\tau} \cot \gamma \sqrt{1 - \cos^2 \beta - \cos^2 \gamma} \left(\cos^2 \beta + \cos^2 \gamma \right. \\ &\quad \left. - \frac{\cos \gamma \sin^2 \gamma}{\sin \beta} - \frac{\cos^2 \beta}{\sin \gamma} \right) - \frac{\phi}{\tau} \sin \gamma \\ \frac{d\xi}{d\sigma} &= \sqrt{1 - \cos^2 \beta - \cos^2 \gamma} \\ \frac{d\eta}{d\sigma} &= \cos \beta, \\ \frac{d\zeta}{d\sigma} &= \cos \gamma \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

が得られる。

(7) 式は網の袖先を計算の始点とするワープなどロープ類の張力および形状を求める釣合方程式であるから、袖先における初期条件を得るために、ここでは、定常運動における網の筋網が常に xy 平面上にあると思なし、また網の浮力 F 、沈降力 (フロントウェイトを含む) W_n および網の抵抗 R は、すべて袖先の O 点に集約すると近似する。ただし、中層トロール網の抵抗 R については、次の推定式*を用いる。

$$R = \frac{1}{2} \rho V^2 C_{DN} S_T \quad (8)$$

ここに、 S_T は網糸の総面積、また C_{DN} は網の抵抗係数で、網の全長 (l_n) を代表長さとするレイノルズ数 (R_e) の関数として表される ($C_{DN} = 3.02 R_e^{-0.188}$)。

いま袖先における網ブライドルの張力を T_0 、それと x, y, z 軸とのなす角度をそれぞれ $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$ とすると、力の釣合から袖先における無次元化した初期条件は次式になる。

$$\left. \begin{aligned} \tau_0 &= \frac{1}{2} \sqrt{(1 + \lambda^2) \phi^2 + (\omega - \nu)^2} \\ \beta_0 &= \cos^{-1} \left(\frac{\lambda \phi}{2\tau_0} \right) \\ \lambda_0 &= \cos^{-1} \left(\frac{\omega - \nu}{2\tau_0} \right) \\ \sigma_0 = \xi_0 = \zeta_0 &= 0, \quad \gamma_0 = \frac{y_0}{l_n} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ここに、 $\lambda = \frac{y_n}{2\sqrt{l_n^2 - (\frac{1}{2} y_n)^2}}$ (y_n : 袖先間隔),

* 胡 夫祥: 中層トロールシステムの力学特性に関する基礎的研究, 東京水産大学大学院修士論文, 1989, pp. 36-54.

$$\phi = \frac{R}{W_B}, \quad \omega = \frac{W_a}{W_B}, \quad \nu = \frac{F}{W_B}.$$

次に、オッターボードに作用する力は、オッターボードの揚力 L 、抗力 D および水中重量 W_B 、ハンドロープの張力 T_H (T_H と x, y, z 軸とのなす角度を $\alpha_H, \beta_H, \gamma_H$ とする。下付きの H はハンドロープの計算における変数を意味する。以下略)、ワープの張力 T_w (T_w と x, y, z 軸とのなす角度を $\alpha_w, \beta_w, \gamma_w$ とする。下付きの w はワープの計算における変数を意味する。以下略) である。これらの力をすべてオッターボードの圧力中心に集約すると仮定すると、オッターボードに作用する力の釣合は

$$\left. \begin{aligned} T_w \cos \alpha_w &= D + T_H \cos \alpha_H \\ T_w \cos \beta_w &= L - T_H \cos \beta_H \\ T_w \cos \gamma_w &= W_B + T_H \cos \gamma_H \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

となる。ここで、(6) 式にならって、無次元量 $\mu_B = L/W_B$ および $\phi_B = D/W_B$ を導入すると、(10) 式および $\cos^2 \alpha_w + \cos^2 \beta_w + \cos^2 \gamma_w = 1$ の関係から

$$\left. \begin{aligned} \tau_w &= \sqrt{(\phi_B + \tau_H \cos \alpha_H)^2 + (\mu_B - \tau_H \cos \beta_H)^2 + (1 + \tau_H \cos \gamma_H)^2} \\ \beta_w &= \cos^{-1} \left(\frac{1}{\tau_w} (\mu_B - \tau_H \cos \beta_H) \right) \\ \gamma_w &= \cos^{-1} \left(\frac{1}{\tau_w} (1 + \tau_H \cos \gamma_H) \right) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

が得られる。

解析方法

前述のように、曳網の中層トロールシステムの網水深、袖網間隔などを予測することは操業上極めて重要である。それらの計算について、仮に、曳航点（船尾）におけるワープの張力および傾角が得られれば、曳航点を始点として計算するのが便利である。しかし、実際において、ワープの傾角の正確な計測値を得ることは極めて困難であり、仮にワープの傾角を初期値として計算したものは、その計算方法が正確であっても、精度的には問題があると思われる。このような理由から、本論文では、被曳航点（袖先）を計算の始点に選んだ。

袖先から、網ブライドル、ハンドロープおよびワープの計算について、(7) 式で与えられた非線形常微分方程式を四次のルンゲ・クッタ法を用いて数値計算することにする。ただし、以下の解析例にあげた中層トロールでは、ブライドルが三本から構成されているが、計算では簡単のため、三本のブライドルをまとめて一本として取扱った。ここに、ブライドルの計算では、 $\sigma_0 = 0$ における初期条件として (9) 式を用いる。またワープの計算では、 $\sigma_w = 0$ における初期条件 (11) 式と

$$\xi_w = \xi_H, \quad \zeta_w = \zeta_H, \quad \eta_w = -\eta_H \quad (12)$$

を用いるほか、曳航点においては、船のトップローラの

間隔 E の制約を受けるので、末端条件

$$\eta_e = \frac{E}{2l_n} \quad (13)$$

を必要とする。計算では、袖網間隔などのパラメータ値を変えることによって、末端条件に収束するまで繰り返す。

ここで、前報⁹⁾の実験に用いた神鷹丸に装備した網を例に計算を試みる。実測値と比較するため、オッターボード、ロープ類などシステム全体に関して、海上実験と同一の値を用いた。ただし、オッターボードの性能については、海上実験において必ずしも最大揚力の得られる迎角で使用されているかどうか、断定できないので、計算では、それが常に最大揚力の得られる状態で使用されていると仮定した。

また、この計算は収束するまでに相当の計算時間を要し、特に計算ステップ SP によって左右されると考えられる。そこで、ルンゲ・クッタ法によるロープ類（ワープ、ハンドロープおよびブライドルを含む）の計算ステップ SP とそれによる網水深（または袖網間隔）の相対誤差 ε_z （または ε_{yn} ）との関係をワープ長 400 m、曳網速度 3 ノットの場合について、Fig. 2 にプロットしてみた。 ε は次式に示すように、 $SP=1$ m のときの網水深 $z_{(1)}$ （または袖網間隔 $y_{n(1)}$ ）をもとに計算した。

$$\varepsilon_z = \frac{|z_{(1)} - z_{(SP)}|}{z_{(1)}} \quad (14)$$

Fig. 2 から、例えば $SP=5$ m とした時、 $SP=1$ m とした時の計算結果に対して ε_z は 0.6% 以下、 ε_{yn} も 2% 以下となることが分かる。したがって、以降の計算はす

Fig. 2. Relationship between the relative errors of working depth of net and spread of wing-end to the calculated step length (warp length=400 m, towing speed=3 kt). ε_z : relative error of working depth, ε_{yn} : relative error of spread of wingend.

べて $SP=5$ m として行った。

結果および考察

網水深およびオッター水深 Fig. 3 は, 上記の解析法に基づく網水深の理論値と実測値との比較を示す。横軸は理論値, 縦軸は実測値で, ワープ長 300 m および 500 m の曳網速度 2.5 ノット以下の点を除いては, いずれも両軸に対する 45° 線上にほぼ均等に分布していると思なせる。ワープ長 300 m および 500 m の低速時において, 両者の間に多少差が生じたのは, 前報⁹⁾の結果より実測値が潮流などの影響を受けて実際の値よりやや小さく観測されたのではないかと考えられる。しかし, 全体を通して理論値の実測値に対する相対誤差は, ワープ長 100 m, 200 m, 300 m, 400 m, 500 m の順に, それぞれ 9.1, 10.9, 7.6, 4.7, 7.1% で, 全体の平均で 8% 以内に納まっている。

次に, オッター水深の理論値と実測値の比較を Fig. 4 に示す。Fig. 3 と同様に, 横軸は理論値, 縦軸は実測値である。同図から, オッター水深は網水深よりも両者でよく一致していることが分かる。網水深と同じく理論値の実測値に対する相対誤差を求めると, 平均で 7.1% であった。これらのことから, 上記の解析法を用いて, かなりの精度で中層トロールの網水深およびオッター水深は計算で求めることができる。

袖網間隔 中層トロールは底曳と同様に, 曳網によって網口を通る海水を濾過する過程で漁獲が確定され, 大きな網口が漁獲効率の向上につながるものになる。したがって, 作業中の網口形状を予測することは大きな意味がある。しかし, 過去の近似計算法において, 袖網間隔

Fig. 3. Comparison between the experimental and calculated values of the working depth of net.

Fig. 4. Comparison between the experimental and calculated values of the working depth of otter board.

Fig. 5. Comparison between the experimental and calculated values of the spread of wing-end. Each symbols show the experimental values at different warp length (●100 m; ▼200 m; ▲300 m; ■400 m; ◆500 m).

まで論じた研究は少ない。本文では袖網間隔の理論計算ができたので, それを実測値と比較したのが Fig. 5 である。同図より, 袖網間隔のワープ長に対する変化は, 両者がほぼ同様な傾向が示されたものの, ワープ長が長くなると, 理論値の実測値に対する差も大きくなることが認められた。特に実測値の方が曳網速度に対する袖網間隔の増加が急である。このことは, 作業時におけるオッターボードが常に揚力の最も優れた状態に保たれる前提に大きな原因があると思われる。

Fig. 6. Comparison of the values of ζ_n and σ_w at different values of κ .

Fig. 7. Comparison of the values of ζ_n and σ_w at different values of ω .

網水深および袖網間隔に及ぼす各種パラメータ値の影響 ここでは、各種パラメータ κ , ω , $\sigma_w (=l_w/l_n)$, (l_w : ワープ長) および C_L などの値の変化によって、網の水深 (z_n) および袖網間隔 (y_n) がどのように変化するかを調べることにする。ただし、各種パラメータを実用的な範囲内に各々独立に変化させたとき、他のパラメータの値は以上の計算に用いた値をそのまま引用した。

Fig. 6~9 に、計算された結果を無次元化で示す。 $\zeta_n (=z_n/l_n)$ および $\eta_n (=y_n/l_n)$ は、それぞれ網の水深および袖網間隔を表す無次元量である。これらの計算結果から、次のことが分かった。

Fig. 6 において、船速に関するパラメータ κ を 0.1~

Fig. 8. Comparison of the values of η_n and κ at different values of C_L .

Fig. 9. Comparison of the values of η_n and κ at different values of σ_w .

0.3 (実際の曳網速度 2.43~4.30 ノットに相当する) に変化させた場合の網の水深に及ぼす影響はワープ長とともに大きくなる。しかし、 κ が大きくなるに従ってその影響は小さくなる。また Fig. 7 から、網の水中重量に関するパラメータ ω を変えた場合、 ω の網の水深に及ぼす影響は無視できない程度であることがわかる。

Fig. 8 は、オッターボードの揚力係数 (C_L) をパラメータとしたときの袖網間隔 (η_n) と船速 (κ) の関係であるが、袖網間隔は船速よりもオッターボードの揚力係数に大きく左右される。 κ が船速 4.30 ノットに相当した場合、オッターボードの揚力係数を 0.6 から 1.4 に増加させたとき、袖網間隔は 3 倍も増えるという結果を得た。一方、ワープ長の変化による袖網間隔への影響は、Fig.

9 に示すように極めて大きい。しかし, ワープの長さが長くなるとその影響は小さくなる。

なお, 本研究は文部省科学研究費補助金一般研究01560202の援助のもとで行われた。記して謝意を表わす。

文 献

- 1) 宮崎芳夫: 日水誌, **36**, 48-57 (1970).
- 2) 宮崎芳夫: 日水誌, **36**, 58-67 (1970).
- 3) 宮崎芳夫: 日水誌, **38**, 1215-1222 (1972).

- 4) 宮崎芳夫: 日水誌, **38**, 1223-1228 (1972).
- 5) 佐藤 要, 宮崎芳夫: 日水誌, **50**, 793-804 (1984).
- 6) K. Nakasai and T. Kawakami: *Nippon Suisan Gakkaishi*, **31**, 277-280 (1965).
- 7) X. W. She, C. D. Yu, and F. X. Hu: *Journ. Zhejiang Coll. Fish.*, Vol. 3, 167-177 (1984).
- 8) 佐藤 要, 宮崎芳夫: 日本航海学会論文集, **67**, 11-20 (1982).
- 9) 松田 皎, 胡 夫祥, 佐藤 要, 五月女雄二郎, 春日 功: **57**, 日水誌, 655-660 (1991).