

## 漁具重量を考慮した場合の曳網索へのカテナリー理論適用

井上 悟<sup>1†</sup>, 多田 陽<sup>2</sup>, 永松公明<sup>1</sup>

### Verification of the catenary-application to the warp of a trawl considering the weight of the gear

Satoru Inoue<sup>1†</sup>, Akira Tada<sup>2</sup> and Kimiaki Nagamatsu<sup>1</sup>

**Abstract** : Many methods have been used to determine the shape approximation of the warp of a trawl. The catenary approximation is one of them. Therefore, in the previous paper, we verified the catenary-application to the warp of a towed net under various conditions using a circulating water tank. However it was carried out under a simple condition, that is, not considering the weight of the gear. Therefore in this paper, we verified the catenary-application incorporating the weight of the gear to the warp of a trawl net. We used a cord weighted with lead weights and a cone net as the actual warp and a towed net as before. We newly attached lead weights to simulate the weight of the gear to the cone net. In the tank, we took photographs of the cord in the flow, changing the lead weights, the length and the weight of the cord and the velocity of the flow. From the photographs we measured the depth of the net. We also calculated the depth by the rectified catenary and compared it against the measured depth. Furthermore in a shipboard trial, we calculated the depth by the rectified catenary and compared it against the measured depth of an actual trawl. In both tank and on-board assessments, the variance between the measured depth and the calculated depth was small. Therefore it is considered that the current verification of the rectified catenary-application to the warp of a trawl is appropriate.

**Key words** : catenary, catenary-application, warp, trawl, circulating water tank.

### 緒 言

曳網の効率的運用においては、曳網時の身網水深や所要水深に網を設定するために繰り出すべき曳網索の長さを知る必要がある。今日、特に曳網の水深測定には各種の機器が用いられているが、予め、曳網の水深や所要水深設定のための曳網索長が計算されれば、非常に有効と考えられる。これらの計算は曳網索の形状を知ること他にない。曳網索の形状近似には従来いろいろな方法が用いられているが<sup>1-4)</sup>、カテナリー近似はその一つにあげられる。ただ、曳網索へのカテナリー近似に関する過去の研究では、カテナリーに双曲線関数が含まれていることから、コ

ンピュータを使わざるを得なかったり、ほかの式に変換して計算したりと面倒な処理が必要であった<sup>5-8)</sup>。また、それらの多くは実船を用いた研究であり、いろいろな条件での検証が十分行われていなかったといえる<sup>8)</sup>。実船を用いた研究では生のデータが大きな意味を持つが、条件設定が難しい。一方、水槽実験は現場との相違が考えられるが、条件設定が自由で、いろいろな場合の結果を細かく検討することが可能である。すなわち、曳網索へのカテナリー理論適用においては、実際の曳網索での実験を行う前に、まず、水槽での実験を行うことは有意義と考えられる。そこで我々は、回流水槽を用いることにより、さまざまな条件下の水深測定を行い、曳網索へのカテナリー理論適用の基

2010年8月31日受付。 Received August 31, 2010.

1 水産大学校海洋生産管理学科 (Department of Fisheries Science and Technology, National Fisheries University)

2 水産大学校海洋生産管理学科卒業生 (Graduate, Department of Fisheries Science and Technology, National Fisheries University)

† 別刷り請求先 (Corresponding author) : sinoue@fish-u.ac.jp

礎的資料を得, その結果を先の報告に記した<sup>9)</sup>。しかしその報告では, 漁具の重量が全く考慮されておらず, 純粋な形でのカテナリー理論適用の検証実験であった。実際の操業では, 網やオッターボードといった漁具の重量が少なからず曳網索の形状に影響を及ぼすと考えられる。そこで, 今回は, カテナリー理論に漁具重量を加える補正を行い, 網や拡網板の重量を考慮した場合のカテナリー理論適用の検証実験を行うと共に, 実際のトロール操業データとの比較によって, より実用性の高いカテナリー理論適用の有効性を検討したのでそれらを報告する。

### カテナリー曲線と曳網索形状

#### (1) カテナリーの基本式

Fig. 1に示すごとく, 曲がりやすい一本の網を2点I, IIで支えるとき, 網は重量によってI, IIを通る鉛直面内に垂下するが, そのときの曲線の形状をカテナリー曲線という。同図において, 曲線の一番低い点Aから曲線上の任意の点P(x, y)にいたるSなる長さをもった一つの弧の「釣合」を考える。すなわち, 点Aと点Pにおける張力をそれぞれ $T_0, T$ とすると, 弧APに作用する力は,  $T_0, T, AP$ の重さ $wS$  ( $w$ はこの網の単位長さの重量)の三つで, この三力が釣合を保っている。そして釣合の式を展開すると, 最終的に点I, IIの2点間につるされた懸垂曲線の式, すなわち, カテナリーの式として(1)式と(2)式が得られる<sup>10)</sup>。

$$S = \frac{a}{2} (e^{\frac{x}{a}} - e^{-\frac{x}{a}}) = a \sinh \frac{x}{a} \quad (1)$$

$$y = \frac{a}{2} (e^{\frac{x}{a}} + e^{-\frac{x}{a}}) = a \cosh \frac{x}{a} \quad (2)$$

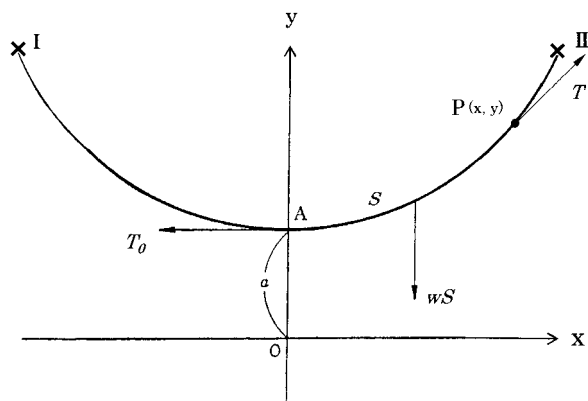


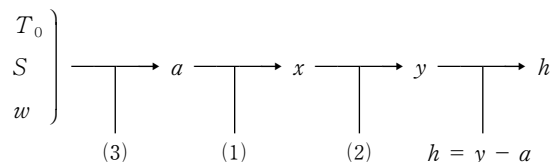
Fig. 1. A coordinate axis in the case of a piece of flexible rope which is supported at two points: I and II.

なお, 上の2式において, 本研究では $a$ を“カテナリー係数”と呼び, 次式の関係がある。

$$T_0 = wa \quad (3)$$

次にこのカテナリー曲線を曳網の曳網索に対応させた場合を考える。まず, 先の報告では基礎的研究として, 単純化した曳網を考えた。すなわち網の重量は無視し, 拡網板なども無いTowing netを対象とした。

Fig. 2は海中での曳網索の形状をカテナリー近似した場合の図である。同図において, 曳網索の長さを $S$ , 網の抵抗を $T_0$ , 網の水深を $h$ , 水平位置を $x$ とした。本研究では, 既知のデータとして抵抗 $T_0$ , 長さ $S$ , 単位長さ当たりの曳網索の重量 $w$ が与えられているとする。水深 $h$ を求めるためには, これらの値を上述の式に代入する。その計算フローチャートを下に示す。同チャートにおいて括弧つきの数字は前述の式番号を示す。また,  $y$ は鉛直位置であり(2)式によって算出されるが, Fig. 2に示されるごとく, 水深 $h$ は $y - a$ で求められる。なお, 現在の関数電卓は双曲線関数機能を付加したものが一般的である<sup>11)</sup>。したがって, これらの計算は机上にて非常に簡単に行うことができる。



#### (2) 漁具重量を考慮した場合のカテナリー近似計算

ここまでの計算では漁具重量が全く考慮されていない。そこで, 本研究では漁具(網+オッターボード)重量 $W$ を考慮したカテナリー理論の適用を検討することにした(Fig. 2)。

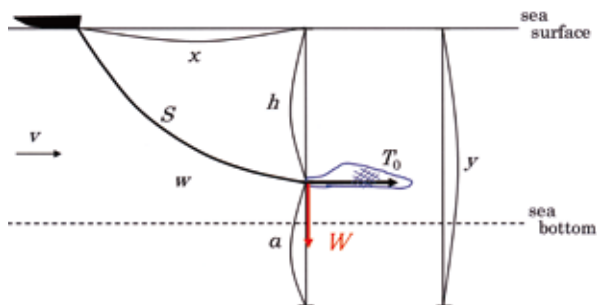


Fig. 2. Application of catenary to the warp of a trawl. The dashed line which shows the sea bottom is different from the abscissa in Fig. 1.  $W$  stands for the weight of the gear.

その方法はいろいろ考えられるが<sup>12)</sup>、ここでは漁具重量を曳網索の重量に換算して加えることにした。すなわち、漁具重量 $W$ を曳網索の長さ $S$ で割った値を、本来の単位長さ当たり曳網索重量 $w$ に加算して

$$w^* = w + \frac{W}{S} \quad (4)$$

とし、 $w^*$ を(3)式の $w$ の代わりに用いることにした。

$$T_0 = w^* a \quad (3)$$

なお、本来のオッターロールでは、オッターボードと網との間にハンドロープなどが存在するが、本研究では力学的取扱上、ハンドロープ長は無視して、オッターボードと網の重量が $W$ として曳網索先端に作用することにした。また、後述のごとく実験においては、漁具重量として鉛製の錘重量を代用しており、曳網索の代わりに鉛付きコードを用いている。

### (3) 直線近似計算

本実験を行った際に、流れをかけたコード(曳網索)の描く形状の中には、曲線よりも直線に近いものが存在することが確認された。曳網索の形状近似に関する過去の研究においても、条件によっては直線近似が有効であることが述べられている<sup>13,14)</sup>。そこで本研究でも、カタナリー計算だけでは無く、次に示すように直線近似による理論水深の算出比較を行った。

Fig. 3において、まず、コード先端に鉛直方向に働く力を $G$ とすると、 $G$ は錘(漁具:黄色楕円部分)重量 $W$ にコード重量の $1/2$ の値を加えた値となる。すなわち、 $G$ は次式

$$G = W + \frac{wS}{2} \quad (5)$$

で表すことができる。

次に、 $G$ と $T_0$ が描く力の三角形は、 $h$ と $S$ が描く長さの

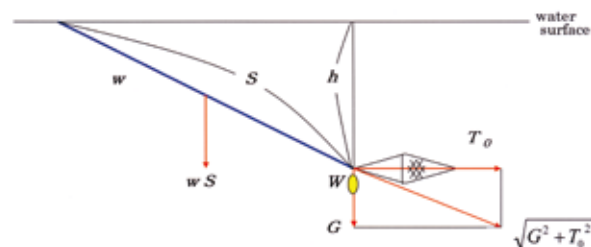


Fig. 3. Relationship between  $T_0$  and  $G$  in the case of the cord shows a straight line.  $T_0$ : drag force on the cone net.  $G = W + wS/2$  ( $W$ : weight of the lead,  $w$ : weight per unit length of the cord)

三角形に対応する。

$$\frac{G}{\sqrt{G^2 + T_0^2}} = \frac{h}{S} \quad (6)$$

この対応関係から、水深 $h$ は

$$h = S \cdot \frac{G}{\sqrt{G^2 + T_0^2}} \quad (7)$$

で算出できる。

## 実験方法

水産大学の大型回流水槽を用いて実験を行った。同水槽の詳細は前報<sup>9)</sup>に記載したごとくであり、実験方法も基本的には前報<sup>9)</sup>に記載した方法と同様である。すなわち、同水槽は長さ6m、幅2.2m、深さ1.2mの観測部において、流速0~1.2m/sの定常流を発生させるリモートコントロール方式の起流装置を備えている<sup>15)</sup>。この水槽上に設置した三分力計支持棒の先端に、曳網索に見立てた鉛付きコードを取り付けた。この支持棒の先端がFig. 2の船尾に対応している。さらに、鉛付きコードの先端には網に見立てた抵抗体(家庭用洗濯機で用いるくず取りネット)を取り付けた。本研究では、測定した鉛付きコード先端の水深とカタナリーの式で算出した水深を比較する。そのため、流れをかけたときの鉛付きコード先端の位置をデジタルカメラ〔SP-560UZ〕(OLYMPUS)有効画素数800万画素)で撮影し、撮影した画像からコード先端の水深を測定した(Fig. 4)。



Fig. 4. Photographing of the position of the lead cord end by a digital camera.

今回新たに漁具重量の代わりとして抵抗体に取り付けた鉛製錘の重量を,  $W1=6.0\text{g}$ ,  $W2=11.8\text{g}$ ,  $W3=20.5\text{g}$ ,  $W4=26.5\text{g}$ の4段階に変化させた。Fig. 5に錘の取り付け状況を示すが, 同図に示した $W4$ の錘は $W1$ と $W3$ を併用したものである。また, 鉛付きコードの長さ $S$ を2段階, 同コードの単位長さ当たり重量 $w$ を3段階に変えて測定した。すなわち,  $w1=9.0\text{g/m}$ ,  $w2=13.5\text{g/m}$ ,  $w3=17.9\text{g/m}$ であり, それぞれの重量のコードにおいて,  $S1\approx 0.79\text{m}$ および $S2\approx 1.48\text{m}$ とした。なお, 本研究では便宜上, コードの単位長さ当たり重量を $w1=10\text{g/m}$ ,  $w2=15\text{g/m}$ ,  $w3=20\text{g/m}$ , 長さを $S1=0.75\text{m}$ ,  $S2=1.5\text{m}$ , 取り付けた錘重量を $W1=6\text{g}$ ,  $W2=12\text{g}$ ,  $W3=21\text{g}$ ,  $W4=27\text{g}$ とそれぞれ表記した。さらに, 鉛付きコードごとに流速 $V$ を $7.1\sim 69.4\text{cm/s}$ の範囲内で5~6段階に変化させて測定を行った。

一方, カテナリー理論の適用においては, 抵抗体の抵抗の正確な値が必要となる。写真撮影とは別個に張力計を用いて抵抗体の抵抗を測定した。アングル材を用いて作った, 高さ $1.2\text{m}$ , 幅 $0.9\text{m}$ , 長さ $1.8\text{m}$ の金属枠の中央に抵抗体を係留固定して, 抵抗体の流水抵抗を測定した。抵抗体の係留には, 直径 $0.58\text{mm}$ の係留糸(ダイアルコード: 伸びが少ない)を用い, 前後・上下方向に緊張固定した。抵抗測定装置として, 定格出力 $1\text{kg}$ の超小型の水中張力計(LT6-1, ㈱三計エンジニアリング)および動的歪測定器(DPM-611B, ㈱共和電業)を用いた。なお, 流水抵抗に対する錘の影響を調べるため,  $W4$ の錘を取り付けた状態と外した状態とで抵抗を測定した。また, 抵抗体の網

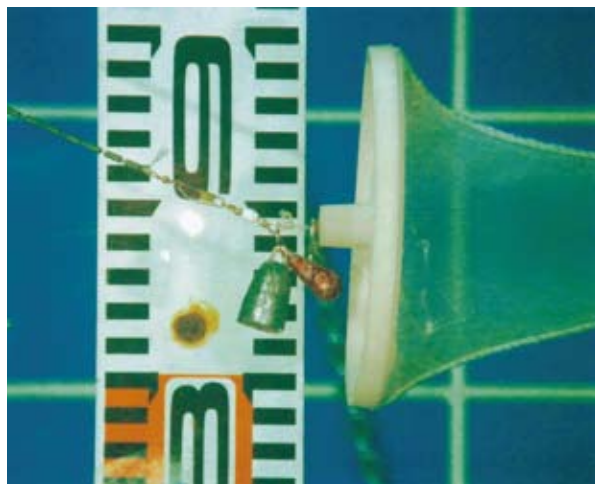


Fig. 5. Weights which are attached to the cone net (in the case of  $W4$ ).

目にごみがつまって抵抗体の抵抗が変化することも想定されたので, 全体の実験開始時と実験終了時の2回にわたって上記の測定を行った。

そして, 実験を行った $S1$ ,  $S2$ ,  $w1\sim w3$ および $W1\sim W5$ において, 各流速値のときの抵抗を求め, その値を $T_0$ とし, 与えられた $S$ ,  $w$ および $W$ とともにカテナリーの理論式に代入して水深を算出し, 計算値として実測値と比較した。

## 結果および考察

### (1) 抵抗体の抵抗測定結果

抵抗体だけの抵抗を測定した結果をFig. 6に示す。同図から見られるように, 抵抗体に錘を取り付けた場合も取り付けない場合も同様な抵抗値を示している。そこで, 本研究では取り付けた錘は抵抗体の抵抗に影響を及ぼさないものと判断した。また, 同図には全体の実験終了時の抵抗体の抵抗測定結果もプロットしているが, 網目の目詰まりによる抵抗増加はほとんど見られない。さらにいずれの場合でも流速の二乗値 $V^2$ と抵抗 $T_0$ とはきれいな一次比例関係を示している。そこで, 全体の実験開始時の抵抗体だけの抵抗, 錘を含んだ抵抗, さらに実験終了時の抵抗体だけの抵抗の三つの場合の抵抗値を全てまとめた一本の回帰直線を描き, その回帰式を求めると次の式が得られた。

$$T_0 = 0.0239 \cdot V^2$$

(相関係数:  $\rho = 0.999$ )

### (2) 実測値と計算値との比較

本実験で測定した水深の値(実測値 $h_m$ )と漁具重量を考慮した場合のカテナリー理論で計算した水深の値(計算

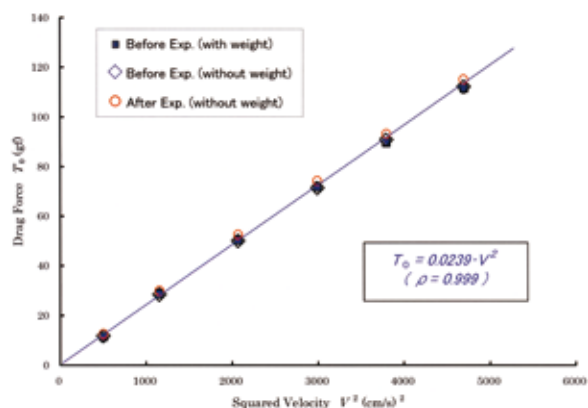


Fig. 6. Relationship between the squared velocity and the drag force on the cone net.

水深 $h_c$ )とを比較した結果がFig. 7である。それぞれ、コード長(S1, S2)とコード単位長さ当たり重量( $w_1, w_2, w_3$ )別に、錘重量を4段階(W1, W2, W3, W4)に変化させた結果である。実測値を横軸に計算値を縦軸にプロットしている。図中の直線は $h_m = h_c$ を示している。実測値と計算値が近ければ $h_m = h_c$ の直線付近にプロットされる。条件ごとに示した図の右下にそれぞれの計算値と実測値の比の平均(C/M)を示す。実測値と計算値が同じ値であればC/Mは1となり、誤差は0%となる。

Fig. 7において、S1では概ね $h_m = h_c$ の直線付近にプロットされており、両者の値の差が小さいことを示している。また、C/Mの値が示すごとく、実測値より計算値がわずかに小さい値となっている。一方、S2ではS1に比べプロットに多少のばらつきが出た。特に、Wが小さい場合(W1, W2)では全体的に実測値より計算値が大きい値となっている。しかし、Wが大きい場合(W3, W4)では、S1と同様に $h_m = h_c$ の直線付近にプロットされており、両者の値の差は小さい。このようにコード長の違いに応じてC/Mの値に差違が生じたが、このことは前報(漁具重量を考慮しない場合)の結果と異なる点の一つである。ただ、今回の実験において、実測値と漁具重量を考慮しないままでの計算値とを比較すれば、当然ながらC/Mの値は1から大きく外れており(条件によってはC/M=0.4以下)、漁具重量を考慮したカタナリー計算値は、全体のC/Mの値が1.022であり、実測値に適合していると考えられる。

一方、今回は前回と違って曳網索(コード)の吹かれに対する補正を行っていない。前報に記述したごとく、漁具重量分をコードの重量増加に加えていることから、吹かれによるコードの重量減少が少ないものと推測したためである。さらにまた、吹かれに対する補正計算が煩雑なため、できれば補正計算を省略したかったからである。ちなみに、吹かれに対する補正は次のように考えられる。すなわち、前報に示したように、便宜上コードを直線とみなし、コードに働く流水圧力 $F_\theta$ を考える。すると、 $F_\theta$ の揚力成分 $F_L$ はコードの重量減少分として作用し、同じく抗力成分 $F_D$ は抵抗体の抵抗増加分として作用する。そこで“ $w - F_L/S$ ”を新たに単位長さ当たりのコードの重量とし、“ $T_0 + F_D$ ”を新たに抵抗体の抵抗として解析をおこなう。

このようにして吹かれに対する補正を行った結果、特にS2の結果が変わった。補正前ではFig. 7に示すごとく、 $w$ ごとのC/Mの値は、1.05, 1.11, 1.13とやや大きめだっ

たのが、吹かれに対する補正を行ったあとでは、それぞれ0.990, 1.02, 1.05と1に近い値になった。これは、コードの長さが長い分だけ吹かれの影響が現れているものと考えられる。

次に直線近似法で計算した水深の値(計算水深 $h_c'$ )と本実験で測定した水深の値(実測値 $h_m$ )とをFig. 7と同様に比較した結果がFig. 8である。同図において、S1の一部(水深が大)では $h_m = h_c'$ の直線付近にプロットされているが、ほとんどの場合において直線から大きく離れてプロットされている。コードごとに見ても、C/Mの値は1.3~1.5と全体的には3から5割ほど計算値が大きい結果になっている。特にコード長別の比較においては、コード長(曳網索長)が大きい場合には、曳網索の直線近似は不的確で、谷口らの実船での観察結果<sup>13,14)</sup>と一致する。

### (3) 耕洋丸操業結果との比較

漁具重量を考慮したカタナリー理論を用いて、(独)水産大学の練習船である耕洋丸(国際総トン数2,703ton)の中層トロール操業結果との比較を行った。用いたデータは平成20年8月、第7次航海における操業結果で、曳網速度4.5ノットにおいて曳網抵抗9.8トン、オッターボード抵抗1.7トン、オッターボード重量2.2トン、曳網索単位長さ当たり重量2.3kgであった。このデータを前述のカタナリー計算に当てはめると、

- ・流速： $V=4.5$ ノット
- ・抵抗： $T_0 = \text{曳網抵抗}/2 + \text{オッターボード抵抗} = 6.6$ トン
- ・漁具重量： $W=2.2$ トン
- ・曳網索単位長さ当たり重量： $w=2.3$ kg/m

となる。なお、上記の抵抗 $T_0$ の算出において、実際の操業では2本の曳網索によって曳網していることから、1本の曳網索にかかる網の抵抗は半分になるものとして計算した。

以上の条件において、曳網索長600mおよび1,000mにおける実測された網の水深は、

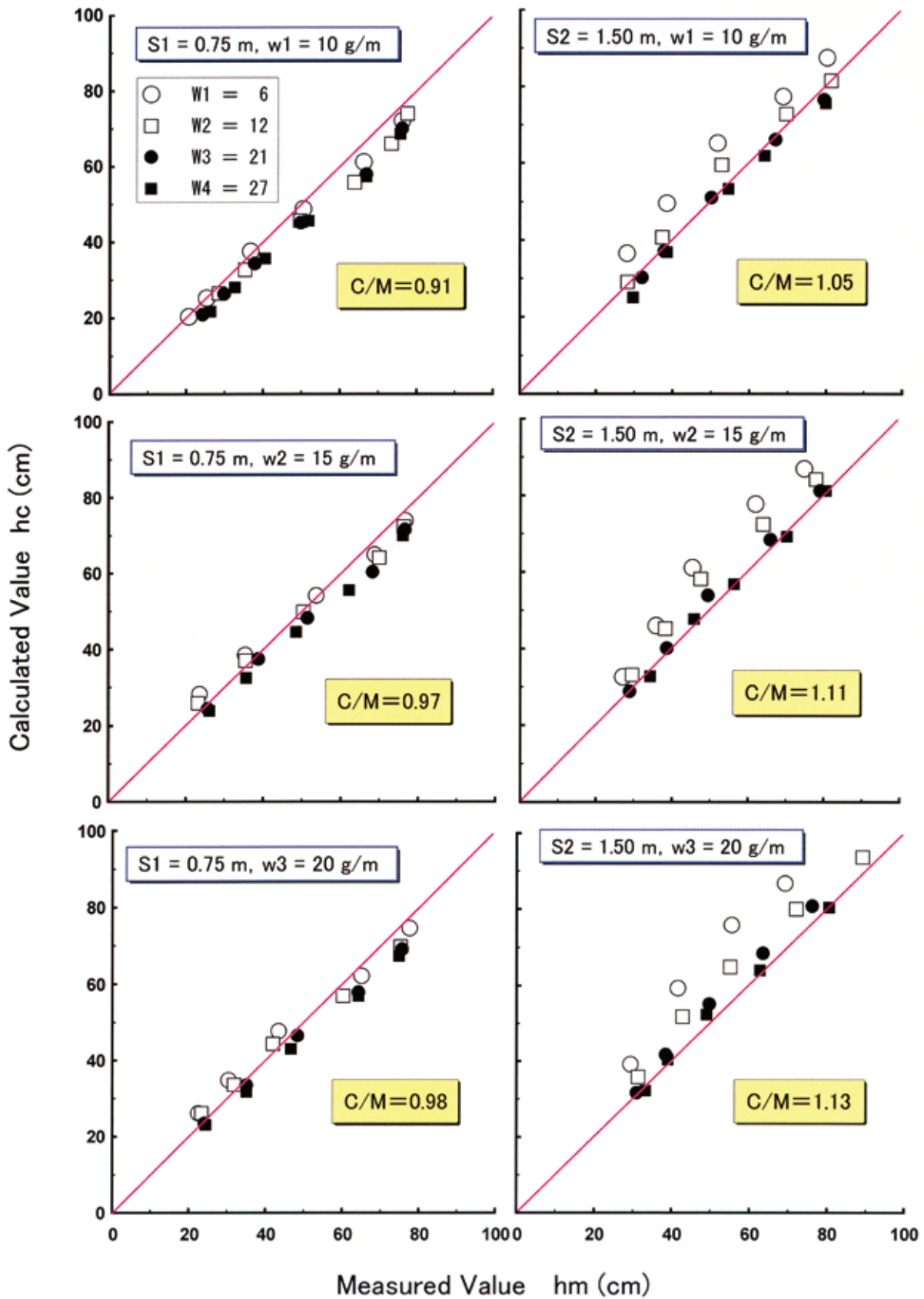
- ・600mにおいて152.0m
- ・1,000mにおいて271.3m

であった。

次に、漁具重量 $W$ と曳網索単位長さ当たり重量 $w$ を用いて(4)式によって求めた $w^*$ は

- ・600mにおいて5.9kg/m
- ・1,000mにおいて4.5kg/m

となり、これらの値からカタナリー近似計算により算出し



**Fig. 7.** Relationship between the measured value ( $h_m$ ) by taking a photograph and the calculated value ( $h_c$ ) by rectified catenary of the depth for the two lengths of the lead cord (S1, S2) and the weight per unit length of the cord ( $w_1 \sim w_3$ ) for each cord considering the weight of the gear ( $W_1 \sim W_4$ ). The straight line shows  $h_m = h_c$ .

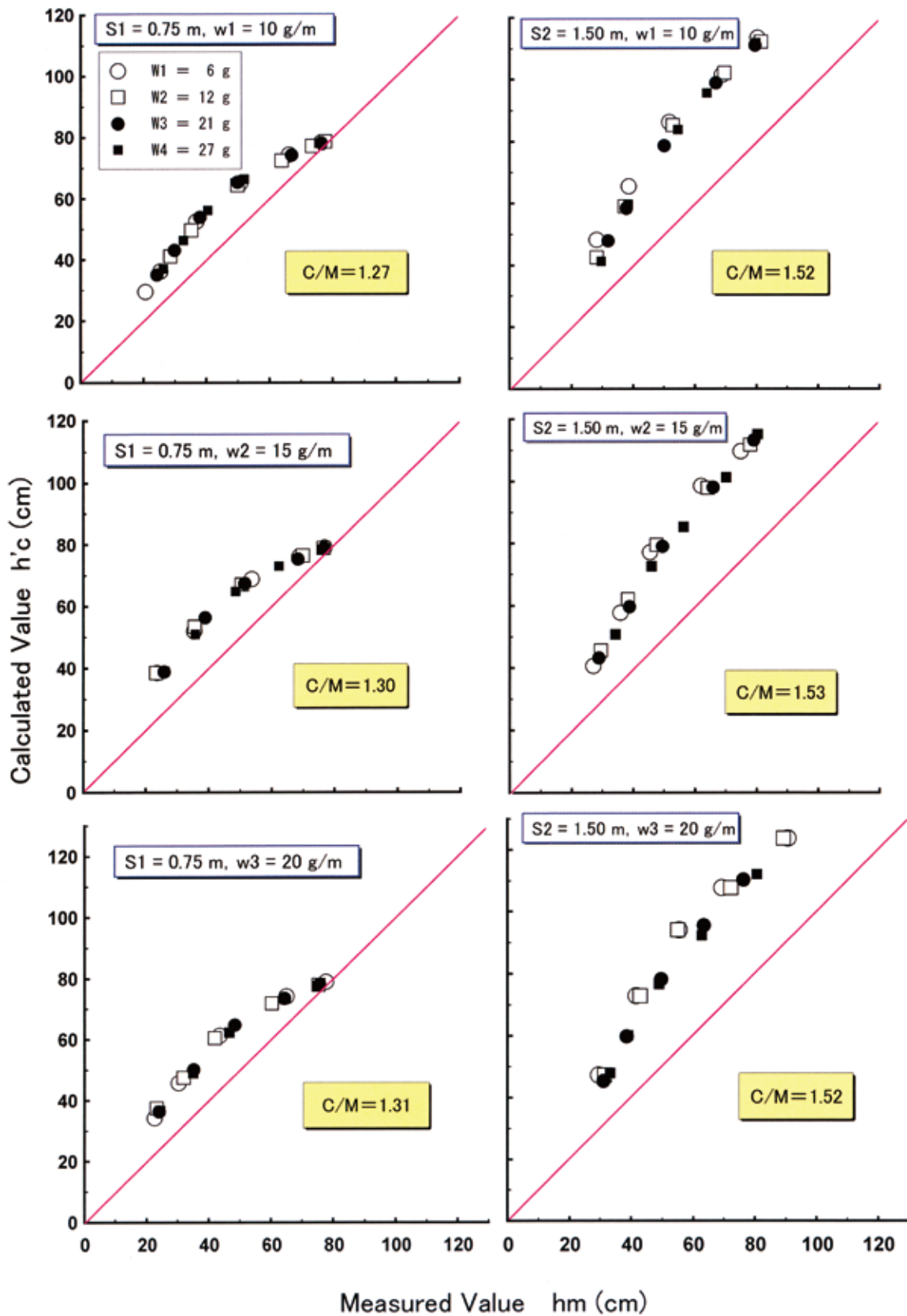


Fig. 8. Relationship between the measured value ( $h_m$ ) by taking a photograph and the calculated value ( $h'_c$ ) by considering the cord shape is linear of the depth for the two lengths of the lead cord (S1, S2) and the weight per unit length of the cord ( $w_1 \sim w_3$ ) for each cord considering the weight of the gear (W1~W4). The straight line shows  $h_m = h'_c$ .

た水深は,

・600mにおいて151.5m ( $h_c/h_m=0.997$ )

・1,000mにおいて307.5m ( $h_c/h_m=1.13$ )

となった。曳網索長600mでのカテナリー計算値は、耕洋丸での実測水深とほぼ合致し、同1,000mにおいても13%の誤差に収まっている。このことから、本研究で用いたカテナリー理論が実用面においても有効であると推察される。

#### (4) 水槽実験と耕洋丸操業結果との無次元量比較

本実験は相似模型実験ではないので、本来的にはそれぞれ(水槽内と海上)において、カテナリー理論が適用できるかどうか問題になる。しかしながら、次のような無次元量で水槽内と海上での実験条件を比較してみた。

まず、漁具重量とワープ重量の比： $W/(wS)$  では、水槽内での値は、0.226~3.73であったのに対し、耕洋丸での値は0.945~1.58であった。また、漁具抵抗とワープ重量の比： $T_0/(wS)$  では、水槽内での値は、0.0850~9.02であったのに対し、耕洋丸での値は2.86~4.77であった。したがって、本実験条件は実際のトロール操業条件とかけ離れたものではないといえる。すなわち、本実験結果が実際のトロール操業に十分適用可能であるといえる。

#### (5) 今後の課題

本実験において、 $S$ ,  $w$ ,  $W$ の組み合わせによって $C/M$ の結果に多少のばらつきが見られた。今後は、 $V$ ,  $T_0$ を含めた条件を考慮した上で、カテナリー理論適用の条件の検討や、条件に合わせた理論の補正が必要となる。

## 結 論

回流水槽を用いた実験により、いろいろな条件下での曳網索形状への、漁具重量を考慮した場合のカテナリー理論適用の検証を行うことが出来た。また、実際のトロール操業データとの比較によって、同理論適用の検証を行い、より実用性の高いカテナリー理論適用の有効性を検討することができた。

## 文 献

- 1) 小林喜一郎, 高橋廣弥: 中層トロールに関する一考察. 北大水研究彙報, 1, 139-141 (1949)
- 2) 高山重嶺, 小山武夫: 中層トロールに関する研究-I (1本曳による中層トロールについて). 東海水研業績A, 64, 27-40 (1958)
- 3) 川上太左英: 曳網の力学. 日水誌, 30, 858-871 (1964)
- 4) 仲才啓, 川上太左英: On a simple estimation of working depth of mid-water trawl. 日水誌, 31, 277-280 (1965)
- 5) 宮崎芳夫: 曳網索の近似算法について-I (近似方法の概要). 日水誌, 36, 48-57 (1970)
- 6) 宮崎芳夫: 曳網索の近似算法について-II (計算法). 日水誌, 36, 58-67 (1970)
- 7) 宮崎芳夫: 曳網索の近似算法について-III (三次元問題の近似法). 日水誌, 38, 1215-1222 (1972)
- 8) 宮崎芳夫: 曳網索の近似算法について-IV (三次元問題の計算法). 日水誌, 38, 1223-1228 (1972)
- 9) 井上 悟, 大場和孝, 永松公明, 梶川和武: Verification of the catenary-application to the warp of a towing net (曳網索へのカテナリー理論適用に関する基礎的研究). 水大校研報, 57, 255-262 (2009)
- 10) 井上 悟: 漁具形状へのカテナリー理論適用についての一考察. 水大校研報, 56, 311-315 (2008)
- 11) 井上 悟, 奥田邦晴: 関数電卓による波力簡易計算法. 水大校研報, 54, 1-6 (2006)
- 12) 川上太左英: 漁業解析入門. 恒星社厚生閣, 東京, 52-54 (1981)
- 13) 谷口武夫, 南 四郎, 隅川芳雄: 100尺2枚仕立てトロール網の海上実験. 日水誌, 34, 889-941 (1968)
- 14) 谷口武夫, 陣野鉄朗, 大村千之, 橋田近雄: 115尺4枚仕立てトロール網の海上実験. 水大校研報, 17, 117-132 (1969)
- 15) 井上 悟, 加藤 光, 永松公明, 梶川和武: 水産大学校大型回流水槽の特性. 水大校研報, 54, 31-42 (2006)