

曳航時における巡視船の曳航索張力*1

正会員 原 正一*2, 正会員 山川賢次*2
星野邦弘*2, 正会員 湯川和浩*2
長谷川純*2

On the Towline Tension of the Patrol Boat During Towing

By Shoichi HARA (*Member*), Kenji YAMAKAWA (*Member*)
Kunihiro HOSHINO, Kazuhiro YUKAWA (*Member*)
and Jun HASEGAWA

When the tug tows the shipwrecks in rough seas, the large dynamic towline tension occurs due to the relative motion between tow and towed ship and causes the breakage of the towline. There occurs such accidents resulting in the secondary disaster such as the collision and strand. The prediction of the unstable motion of the towed ship is quite important to estimate the towline tension accurately. The authors have made the various model and full-scale experiment to measure the towline tension during tow comparing with the numerical calculation so far. However, the relation between the towline tension and distance from tow to towed ship has not been accurately measured.

The Japan Coast Guard Academy makes a tow training using the training ship named 'Kojima' every year. Authors had a chance to participate in the tow training and measured the data during tow. The at sea towing experiment was carried out in the Seto Inland Sea December in 2000. The towline force and the distance between tow and towed ship were mainly measured. The relation between towline force and the distance has been made clear using KGPS. The towline figure during tow by the observation has been compared with the numerical calculation with a good agreement.

The elongation characteristics of polyethylene rope with 65 mm diameter used during tow was made clear by the full-scale measurement of both the distance between tow and towed ship and towline force. The hysteresis loop has also been confirmed in this experiment.

Keywords : *Full-Scale Measurement, Towline Tension, KGPS, Elongation, Patrol Boat*

1. はじめに

荒天下において遭難した船舶等を曳航する際、曳航索には曳船と被曳船の相対運動により動的な張力がかかり、索が切断して2次災害を引き起こす事故が多々発生している。また、曳航時の被曳船におこる不安定挙動(ふれまわり運動)の予測は、曳航索張力を正確に推定するための要因となる。著者らはこれまで船舶等の曳航時における索張力を計測するための模型実験、実機実験を実施し、理論解析との比較検討を行ってきた^{1)~3)}。

海上保安大学校では、訓練船による曳航実験が毎年実施されている。今回、曳航実験に参加し、曳航索張力及びKGPS(キネマティックGPS)による曳船、被曳船の水平距離の計測の機会を得たのでその結果を報告する。本実験の目的は、曳船と被曳船の距離をKGPSによって正確に計測し、曳航時及び旋回時の索張力との関係を明らかにすることであった。この実験計測結果と数値計算との比較を行い、両者の一致がよいことが確認できた。

今後、波浪域での曳航索張力の計測を実施し、平成10年度から5年計画で実施中の「荒天下における航行不能船舶の漂流防止等に関する研究」の最終目標である最適曳航支援システムの開発のひとつの技術要素である曳航索張力の推定法の確立を目指す予定である。

*1 平成13年11月16日造船3学会秋季連合大会において講演, 原稿受付平成13年11月30日

*2 海上技術安全研究所

Table 1 Main dimension of tow and towed ship.

	Kojima	Misasa
Length	107m	60m
Breadth	14m	7.8m
Depth	7.3m	4.3m
Draft	4.4m	2.65m
Gross tonnage	3000t	600t
Power	8000PS	3000PS

2. 実験の概要

2.1 実験方法

曳航実験には、Table 1に示す訓練船「こじま」と呉海上保安部の巡視船「みささ」を使用した。実験海域は、呉沖約30kmの宮島付近である。実験日程は、平成12年12月13日～14日であり、曳航実験の計測は12月14日の1日で、前日に計測機器の準備を行った。

実験状態をTable 2に示す。曳船「こじま」による「みささ」の直進曳航及び旋回曳航（船首曳航）（表中実験番号①～④）と曳船「みささ」による「こじま」の直進曳航及び旋回曳航（船尾曳航）である。被曳船「こじま」の船尾に索をとり曳航する船尾曳航は、船尾の推進器に曳航索が絡む事故も考えられ、過去の実験実験では中々実現しにくかったが今回初めて試みる事ができた（実験番号⑤、⑥）。最後の実験状態⑦では、「こじま」の曳航索を船尾から船首に移し替えて「こじま」の旋回曳航を実施した。ただし、「みささ」は2軸1舵であり、自船より排水量のかかなり大きい「こじま」を曳航して旋回する際の舵効きが悪く旋回に失敗した。曳航索は、直径65mm、長さ165mのポリエチレンロープ（単位重量⁴⁾：2.125kg/m）を2本繋いで使用した。

2.2 計測項目及び計測方法

計測機器を使用した計測項目は、曳航索張力と曳船及び被曳船の位置である。この他に、船舶に設置されている風速計による風の計測、波高及びうねりの目視観測、ログ速力、索の張り具合（曳航索が水面に接するまでの距離）の目視観測、被曳船が「こじま」の際の船体中心からの曳航索角度を計測した。これは、船尾ブルワークに目盛りを打ち、一定時間間隔で曳航索位置の値を目視観測した。また、波浪計測を行うのが通常であるが、実験実施海域が瀬戸内海という静穏海域であるため特に実施しなかった。さらに、曳船の推進性能関係のデータ（機関出力、回転数、プロペラ翼角）も一定時間間隔で記録したが、詳しい解析結果については別途報告する。

索張力は、JISF3303 スタッド付き第3種直径50mm

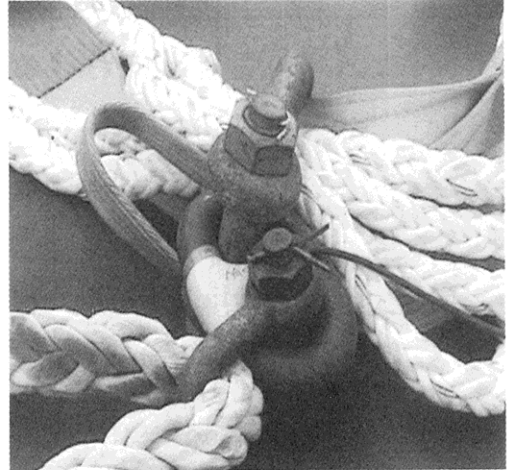


Photo 1 Tension meter installed at bow.

チェーンを用い、その平行部にストレインゲージを貼って防水加工した張力計を使用して計測した。計測は、「みささ」の曳航支点がブリッジ後方部にありチェーンリンクを設置することが困難なため、実験では「こじま」の船首尾の一つずつ索張力計を設置した。船首側の張力計の設置は、2つのボラードに1本ずつ布帯ベルトを巻きつけ、シャックルを介して張力計を取り付けた（Photo 1）。曳航索は、パナマチョークを通り船外へ出した。また、船尾側については、船尾の曳航ビットのフックにシャックルを介して張力計を吊るした（Photo 2）。また、「こじま」に設置されている張力計の出力を取り出して記録し当所の張力計と比較した。

2隻の船舶の位置計測に関する装置の配置図をFig.1に示す。KGPS及びパソコンをそれぞれ5台用意して、曳船及び被曳船の船首尾に1台ずつ設置し（トリンプル製MS750）、海上保安大学校校舎の屋上に基準局としてKGPSを1台（トリンプル製4700）設置した。装置は、受信機とアンテナが対になっており、アンテナは「こじま」については船首突端と船尾の曳航フックの真上の位置のヘリデッキ上に設置した。ヘリデッキ上にアンテナを設置する際は、三脚を用いて風等で転倒しないように土嚢を三脚上部から吊り下げた。「みささ」側については、曳航フックがブリッジ上にあるために設置スペースの制約からアンテナの設置位置が船体中央より1.57m右舷よりに設置した。データ収録は、2つの張力計についてはサンプリング周波数100Hzとし、KGPSについては1Hzである。パソコンどうしの同期については、パソコンの時刻を合わせるによりデータ解析の際に処理した。KGPSのデータ解析は、曳船及び被曳船の船首尾のそれぞれ位置を取得し、基

Table 2 Experimental conditions at sea.

Exp. No.	time	speed(kt)	Kojima	Misasa	rudder angle(deg)	tow ship
①	1240~1255	0~8	straight	straight		Kojima
②	1255~1311	6	course change	follow		Kojima
③	1315~1333	7	right turn	follow	7	Kojima
④	1336~1348	7	left turn	follow	7	Kojima
⑤	1400~1432	2,4,6	straight	straight		Misasa
⑥	1440~1448	2	follow	turn	7	Misasa
⑦	1516~1544	3~5	follow	turn	7,15,30	Misasa

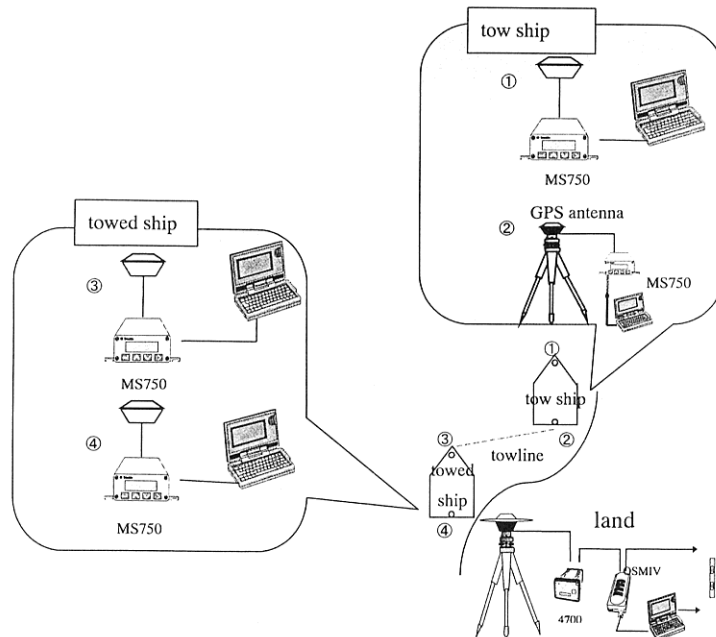


Fig. 1 Measuring system using KGPS.

地局の座標位置を検出した。実験終了後、両船の時間、X, Y (日本平面直角座標系で座標変換した値), H (高さ) のデータを解析し、曳船と被曳船の方位を求めた。

3. 解析結果及び考察

実験当日は、天候は晴れで風速が2~4m/secであり、海上の波はほとんどないといった好天であった。また、Fig.2 及び Fig.3 に KGPS の精度チェックのために「こじま」及び「みささ」のそれぞれの船首尾に設置したアンテナ間の距離の時間経過を示した。

実際の距離は、それぞれ 110.64m 及び 50.2m であった。これより両船の位置情報が非常に不安定な領域と比較的安定な領域があることが判明し、安定領域でも

細かな変動が絶えず観測された。「こじま」の場合、最大で 10.6cm の変動が観測され、実際の距離の約 0.1% である。また、「みささ」の場合、最大で 19.6cm の変動があり、約 0.4% にあたる。この誤差の原因は、曳船及び被曳船と基準局との距離が大きく、電離層及び大気の状態が計測された位置で異なるため基準局による位置補正が保証されなかったことによるものと考えられる。従って、今回の解析は KGPS で比較的安定な位置の解析結果が得られた時間帯 (Table2 の実験番号 ⑤) に限って報告する。

Fig.4 に KGPS による「こじま」及び「みささ」の船首方位の時間経過を示す。実験番号⑤及び⑥については、船尾曳航であるので2船の方位に180°程度ずれ

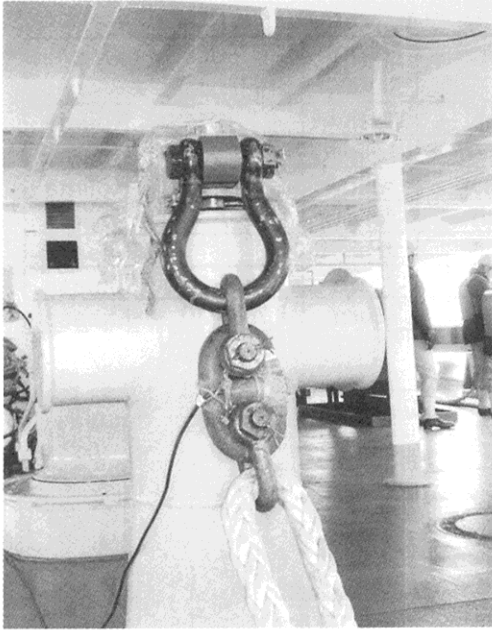


Photo 2 Tension meter installed at stern.

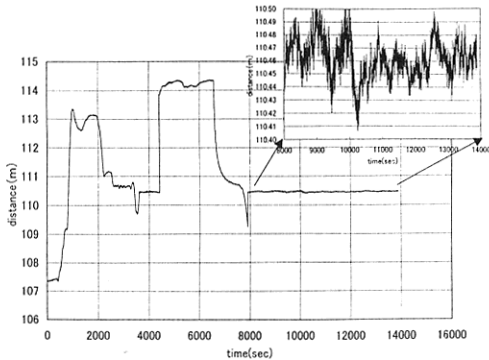


Fig. 2 Change of distance between two antennas in 'Kojima'.

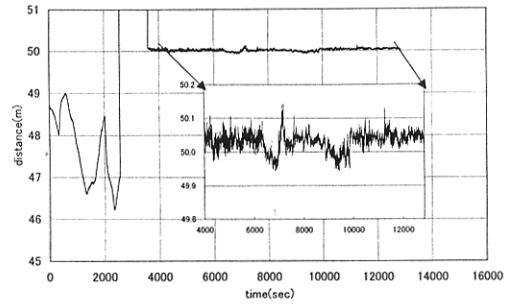


Fig. 3 Change of distance between two antennas in 'Misasa'.

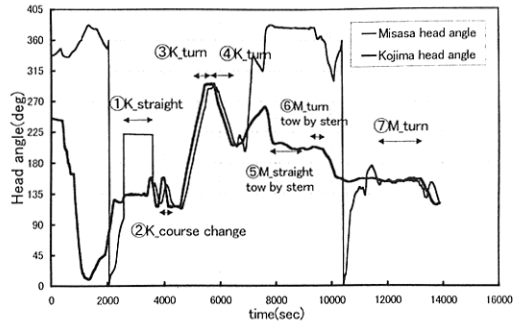


Fig. 4 Head angle of tow and towed ship.

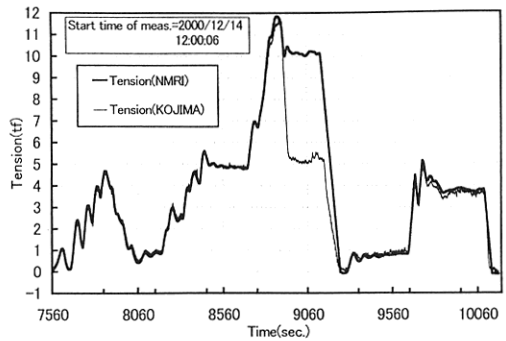


Fig. 5 Time history of towline tension.

がある。2 船の船首方位については、船に設置された方位計によっても読み取り観測しており、 1° 以上の誤差はなく KGPS のデータと一致していた。KGPS の計測による船首方位の誤差は、今回の実験が 2 船の相対的な距離を計測することが目的であることから充分許容できる範囲内である。また、船尾曳航の際ふれまわり運動は見られず、「こじま」は安定して追従していることがわかる。

Fig.5 に、「こじま」に設置した張力計と著者らが設置した張力計による索張力の比較を、時間経過を横軸にとって示す。両者は概ね一致しているが、Fig.4 の

9000sec 付近の時点で突然前者の示す索張力が小さくなった。しかしながら、両者が一旦零近くまで小さくなったあとで正常に戻っており、原因は不明である。

ポリエチレン製の曳航索は比重が 0.96 で水に浮くので、曳航索に張力がさほどかからない場合 Fig.6 のように空中部分の索についてはカテナリー形状を保持する。図のように曳船と被曳船の曳航点をそれぞれ A 及び B として、AB の水平距離を l_1 とする。また、A 点及び B 点から水面に接するまでの曳航索長さをそれぞれ l_a 及び l_b 、それぞれに対応する水平距離を d_a 及び d_b とする。A 点及び B 点の水平曳航索張力をそれぞれ T_a 及

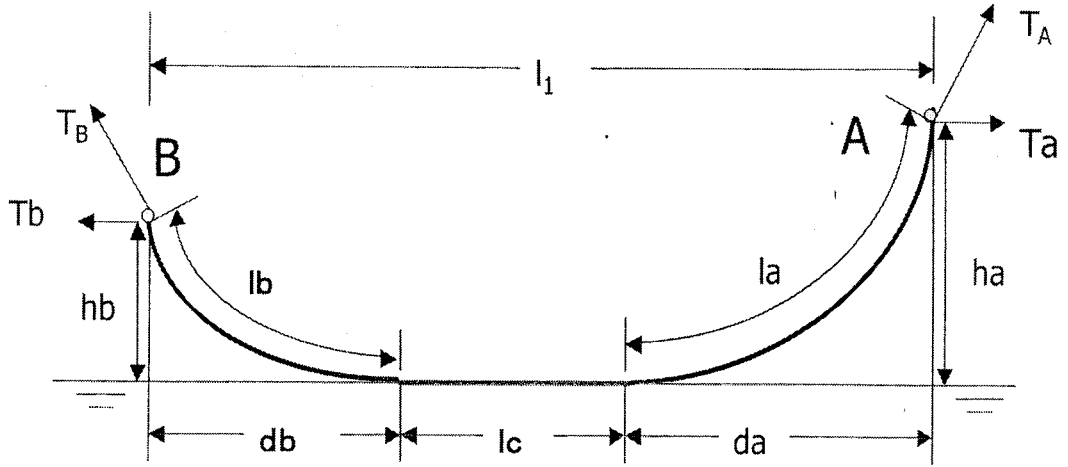


Fig. 6 Schematic idea of towline figure during towing.

び T_b とし、索張力を T_A 及び T_B とする。さらに、水面上に浮かぶ索長さ l_c をとして、次式が成り立つ⁵⁾。

$$l_a = \sqrt{h_a \left(h_a + 2 \frac{T_a}{w} \right)} \quad (1)$$

$$d_a = \frac{T_a}{w} \sinh^{-1} \frac{wl_a}{T_a} \quad (2)$$

$$l_b = l - l_a - l_c = \sqrt{h_b \left(h_b + 2 \frac{T_b}{w} \right)} \quad (3)$$

$$d_b = l_1 - l_c - d_a = \frac{T_b}{w} \sinh^{-1} \frac{w(l - l_a - l_c)}{T_a} \quad (4)$$

ただし、

$$T_a = T_b \quad (5)$$

$$T_A = \sqrt{T_a^2 + (wl_a)^2} \quad (6)$$

$$T_B = \sqrt{T_b^2 + (wl_b)^2} \quad (7)$$

である。曳航索の伸びを考慮して、曳航索のばね定数を k 、索の全長が l' と仮定すると、索長と曳航索張力との間に次式が成り立つ。

$$l' = l + \frac{\sqrt{T_a^2 + (wl_a)^2}}{k} \quad (8)$$

さらに、索が張ってくると索の中央部が水面から離れ索全体が空中に浮く状態となる。索の最下端の水面からの垂直距離を h' とすると、(1) 式及び (3) 式は次のようになる。

$$l_a = \sqrt{(h_a - h') \left(h_a - h' + 2 \frac{T_a}{w} \right)} \quad (9)$$

$$l_b = \sqrt{(h_b - h') \left(h_b - h' + 2 \frac{T_b}{w} \right)} \quad (10)$$

また、

$$l_c = 0 \quad (11)$$

$$l_1 = d_a + d_b \quad (12)$$

である。以上より、索の水平距離 l_1 と索張力 T_B 、 d_a 、 d_b 及び h' の関係を Fig.7 に示す。

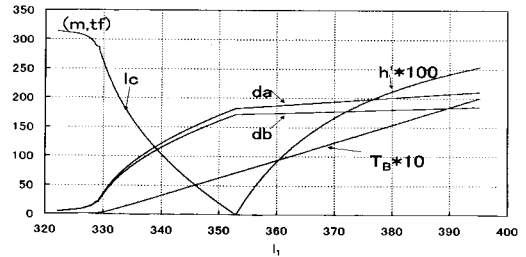


Fig. 7 Numerical calculation of towline tension figure.

使用したポリエチレンロープの強伸度曲線（伸び率と荷重の関係を表わした図表）から破断荷重の30%でのばね定数 k を求め $0.350(tf/m)$ とした。また、 h_a 及び h_b の値は、それぞれ $4.89m$ と $4.35m$ である。図より曳船と被曳船の距離が大きくなると徐々に d_a と d_b の距離の差が出始めて、 l_c が零になった後は曳航点の水面からの高さの違いによりその差が大きくなるのがわかる。 l_1 が $353m$ の点でが零になり、その後 h' が増加している。目視観測の結果から最大索張力が発生した点では、約 $1m$ 程度水面上に索が飛び出していたこ

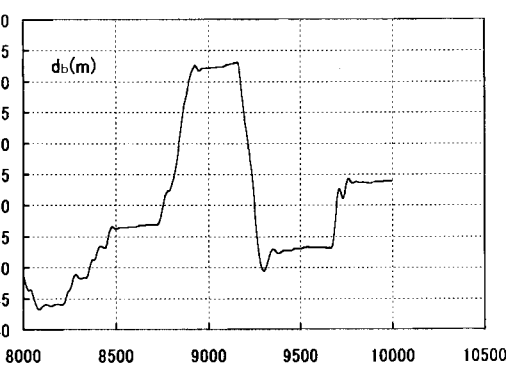
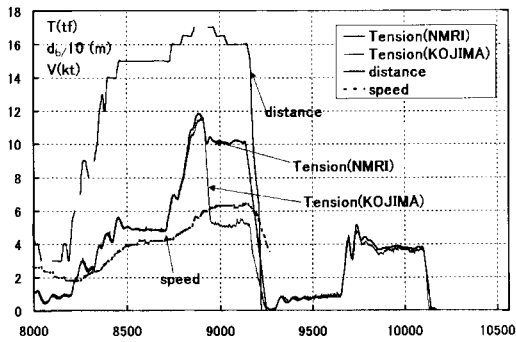


Fig. 8 Towline tension and distance between tow and towed ship.

とが観測されており計算結果ともほぼ一致している。索張力は、計測結果から得られた索の弾性係数を使用して求めたものであるが、2船間の距離に対して直線状に増加していくことがわかる⁵⁾。

曳航索の張り具合を目視観測で記録した結果について、横軸に経過時間、縦軸に被曳船「こじま」の曳航フック位置から索が接水する位置までの距離及び索張力を Fig.8 に示す。実験状態は、「みささ」の直進曳航（船尾曳航）で実験番号⑤である。

曳航索張力と2船の水平距離の目視観測の結果は、よく対応していることがわかる。最大索張力の11.6tfとなった後、索のヒステリシスのためにその前後の索張力がほぼ同じであるにもかかわらず水平距離が最大張力発生後のほうが大きくなっている。索張力がピークに達する8900sec前後で索はすべて海面上にでているためデータの欠損がある。図中に曳航速度を示したが、6ktの設定で船に加速がつき増速の過程で索張力にピークがでたものと考えられる。Fig.8の下段の図は、両船の絶対位置から求めたKGPSによって計測された2船間の水平距離であるが、その値は索長をはるかに超えており正確ではない。しかしながら、両船間の距離と索張力は時系列でみると両者の相関は非常によい

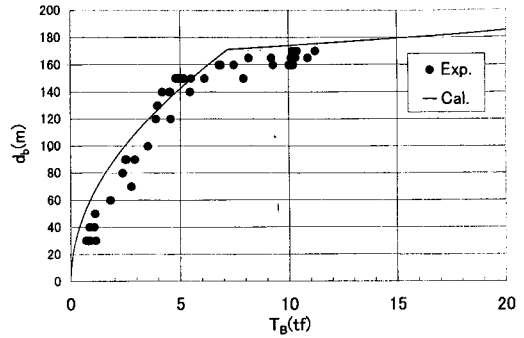


Fig. 9 Comparison between towline tension and distance from towed point to sea surface.

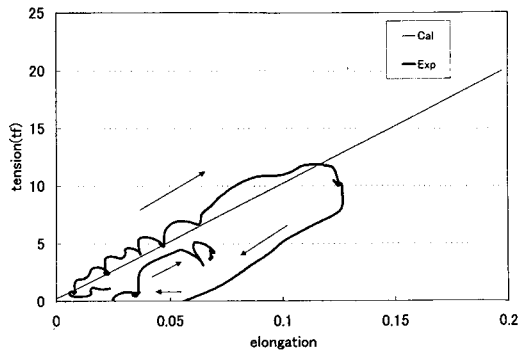


Fig. 10 Relation between towline tension and elongation.

ことがわかる。KGPSによる正確な距離が計測できなかったため、曳船と被曳船の曳航支点間の距離と索張力の関係を比較できなかったが、Fig.9に横軸に索張力(T_B)をとり、縦軸に被曳船「こじま」の船尾曳航支点から索が海面に接する点までの目視観測による距離(d_b)を示し、数値計算結果と比較した。これより両者は目視観測による精度を勘案すればよい一致を示していることがわかる。

さらに、Fig.10にKGPSによる2船間の水平距離の代わりに索の伸び率を横軸にとり、索張力との関係を示した。伸び率は、Fig.8の8000sec付近の索張力が最も小さくなった時刻での曳航支点間の距離を始点とし、索の初期長さを330mとして計算した。これより、負荷時と除荷時の勾配がほぼ等しく2~3%の塑性伸びが観測できることなどの合成繊維索のヒステリシス特性が表現できているので、絶対距離から求めた索の伸びではなく相対的な伸び率と索張力の関係を調べることができると判断した。Fig.10よりヒステリシスループは伸びの大きくなる方向にずれる傾向があるが、合成繊維ロープの伸び荷重曲線は、一定レベルの荷重を繰り返す

ことにより塑性伸びとヒステリシスループの再現性が良好になることを著者らのポリエチレン索(直径3mm)を使用した実験室レベルの研究で確認している^{6),7)}。実験結果より大直径のポリエチレン合成繊維索のヒステリシスの特性がわかり、索の弾性係数は0.320(tf/m)であり、最大で12.5%の伸びがあったことがわかった。これは、強伸度曲線から求めた0.350(tf/m)と9%の差であり、強伸度曲線からある範囲の精度でバネ定数の推定が可能であることがわかった。これは、著者らが過去に実施した曳航実験におけるポリエチレン曳航索の弾性係数0.357(tf/m)と比較しても妥当な値と考えられる。バネ定数から合成繊維索の弾性係数を求めるためには、索の断面積が必要となる。ポリエチレン索の線密度は直径65mmで2125(g/m)であり、比重0.96として弾性係数 E は52.3(kgf/mm²)となった。

4. まとめ

KGPSを使用して、曳航実験時に曳船と被曳船の2隻の曳航支点間の水平距離を計測し、以下のことがわかった。

- (1) 穏やかな海象条件であったが、索張力と曳航支点間水平距離の関係について、実験結果と数値計算結果を比較し両者の良好な一致を得た。
- (2) 直径65mmのポリエチレン索の弾性係数が52.3(kgf/mm²)となった。また、負荷時と除荷時の伸び荷重曲線における勾配がほぼ等しいことなどのヒステリシス特性を確認できた。

今回実施したKGPSの計測の精度は、基準局と実験海域との距離が大きかったため目標のレベルには達し得なかったが、索張力と2船間の水平距離との関係及び曳航索の特性についていくつかの知見を得た。平成14年において、波浪中における実機曳航実験を実施し、再度KGPSによる計測を試みる予定である。

5. 謝辞

海上保安大学の訓練船「こじま」の曳航訓練の参加に関して快諾いただき、計測のための準備にご尽力

され、解析について貴重なご助言を賜りました道本順一教授に心より感謝の意を表します。また、実験に際してご協力いただいた日當博喜教授、山田多津人助教授に感謝いたします。船舶の位置計測にあたり、計測機器の借用及びデータ解析に関してご協力いただきましたトリンプルジャパン(株)の濱田文子課長と実験計測を補助していただいた服部道典氏にお礼申し上げます。

巡視船「みささ」及び訓練船「こじま」の関係者の皆様のご協力に感謝致します。さらに、実験時には訓練中の海上保安大学校訓練生の方々に交替で観測作業をお手伝いいただいた。目視観測は貴重なデータであり、感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 山川賢次, 原正一, 山本勉, 中村克則, 金子純蔵, 曳航が巡視船の船体及び曳航索に及ぼす影響に関する研究, 船舶開発技法第20号, 1994年9月, pp51-87.
- 2) 山川賢次, 原正一, 山本勉, 中村克則, 金子純蔵, 曳航が巡視船の船体及び曳航索に及ぼす影響に関する研究(第2報), 船舶開発技法第21号, 1995年9月.
- 3) 原正一, 山川賢次, 星野邦弘, 湯川和浩, 損傷船舶の曳航に関する研究, 関西造船協会誌第233号, 2000年3月.
- 4) ロープ類の知識, 東京タンカー株式会社海務部編, 成山堂.
- 5) 道本順一, 日當博喜, 寺本定美, 田中明, 荒天下における曳船と被曳船の運動に関する研究(その3, 曳航索の形状変化を考慮した索張力変動の計算), 海上保安大学校研究報告, 第44号第1号, 1998年.
- 6) 山川賢次, 原正一, 申鉦慶, 曳航用合成繊維索の静的特性, 資源素材学会秋季大会, 平成1993年11月.
- 7) Hyunkyong Shin, Kenji Yamakawa, Shoichi Hara, Laboratory Tests on Synthetic Fiber Ropes, OMAE94, 1994, pp.441-448.