

# 船舶の曳航能力と曳航安全率に関する研究

正員 黒田 貴子\*      正員 原 正一\*  
正員 松田 秋彦\*\*

Towing Performance and Safety Factor of a Ship

by Takako Kuroda, *Member*      Shoichi Hara, *Member*  
Akihiko Matsuda, *Member*

## Summary

In order to make a plan of ship towing, it is necessary to investigate the towing performance of the tow ship, status of the towed ship, external force acting on the towed ship and sea conditions. The factors of the towing performance are derived from the towing gear and main engine power, which are evaluated by the bollard pull test in the case of the tugboat. When the general ship instead of the tugboat makes a towing operation, the towing performance with the main engine power is crucial. It is important to know the towing performance of the tow ship and tow force depending on the size of towed ships in several sea states in the emergency towing by the general ship.

The bollard pull test and towing test in calm and rough seas have been carried out to investigate the tow force and tow power, critical tow force and the condition of safe towing. The towing safety factor is defined by the critical tow force divided by the maximum towline tension during towing. The factor less than 1 indicates the disability of towing. The critical condition is shown by the value between 1 and 2. Lastly its value larger than 2 indicates the safe towing.

The towline tension is calculated by the Optimum Towing Support System developed by the National Maritime Research Institute. In this calculation, the patrol vessel as tow ship tows 5 kinds of ships in several sea states. By using the ratio of critical tow force and calculated towline tension, the towing safety factor is estimated and the chart for the critical towing performance in several sea states using the displacement ratio between tow and towed ship has been shown. Even the operator of the general ship will be able to know the possibility of the safe emergency towing using the displacement of the towed ship in certain weather condition in this chart.

## 1. 緒 言

船舶による曳航計画を立てる際、曳船の有する曳航能力や被曳船に働く力と船体状態、気象・海象状況を検討する必要がある<sup>1)</sup>。曳航能力を決定する要素は曳航資機材と、主機関出力による曳航力が挙げられ、タグボートの場合は主に岸壁曳引力で評価される。曳航作業時に使用する曳航資機材は、曳船の岸壁曳引力を基準にして安全率 2.5~3 の破断強度を持つ曳航索を選定する。また、曳航力は岸壁曳引力を基に曳航速度毎のスラストと機関出力を算出し、曳航可能かどうか

を検討する。しかし、岸壁曳引力がタグボートのように十分ではない一般の船舶が曳航作業を行う場合、主機関出力による曳航能力が問題となる。一般船舶が緊急曳航に対応するには、主機関出力による曳航能力と被曳船に働く力、海象を考慮した曳航能力の指標を用いて自船の曳航能力を事前に把握する必要がある。

本論文では、始めに一般船舶による岸壁曳引力試験と穏やかな海象下及び荒天下での曳航試験を実施し、曳船の曳引力及び曳航時の曳航力、曳航馬力、曳航限界荷重と索張力の関係を示し、曳船の曳航能力と安全な曳航状態を把握する。次に、風波浪下での曳船の曳航限界荷重と被曳船に働く力、すなわち索張力より曳航安全率を定義し、曳航事例を基に曳航安全率と曳航状態を検証する。さらに、海上技術安全研究所(以下、海技研)で開発した最適曳航支援システム(Optimum Towing Support System: OTSS)<sup>2), 3)</sup>を用いて曳船を巡視船、被曳船を5つの船種とした場合での海象6段階における索張力を計算し、曳航安全率を曳船に対する被曳船の排水量比で整理した曳航能力限界表を示す。これより被曳船の排水量が分

\* (独) 海上技術安全研究所

\*\* (独) 水産工学研究所

かれば緊急曳航時の海象下で安全な曳航の可否の判断が可能となる。

## 2. 曳船の曳航能力

### 2.1 岸壁曳引力と曳航力

曳船の曳航能力を決定する要素は、主機関、推進器による曳航力や曳航索、曳航ウィンチなど曳航装置・資機材の強度が挙げられる。中でも主たる要素は岸壁曳引力（Bollard Pull）であり、曳航能力を評価する際に用いられることが多い。岸壁曳引力は推進器の種類、直径、及び主機関の種類、馬力および回転数により決定される。

一般船舶の岸壁曳引力と機関出力馬力の関係を把握するために、実船による岸壁曳引力試験<sup>4)</sup>を千葉県館山港内で実施した。使用した船は（独）水産総合研究センター水産工学研究所の漁業調査船「たか丸」（総トン数61t）である。供試船の主要目を Table 1 に示す。主機関は、機関出力  $P=1000\text{PS}$ 、毎分回転数  $N=90\text{rpm}$ 、推進器は、プロペラ直径  $D=1.5\text{m}$ 、4翼ハイスキュード可変ピッチプロペラである。試験では、船尾甲板にあるネットウィンチから張力計を経由した曳航索を岸壁のボラードに掛け、主機関出力を系統的に変化させ、その時の曳航索にかかる索張力を計測した。曳航索は直径40mm、長さ50mのポリプロピレンクロスロープである。機関出力は速力3、4、6、8、10、12kts相当で系統的に変化させ、試験中は出力を一定に保った。なお、供試船の航海速力は12ktsである。試験結果を Fig. 1 に○印で示す。

図中、最大トルクを最大機関出力と最大回転数から求め、トルクは一定であると仮定して推定した曳航荷重と馬力の関係<sup>5)</sup>を合わせて図中に●印で示す。この推定結果は、岸壁曳引力試験結果と一致している。岸壁曳引力は、一般的に1軸の場合は機関出力100PSに対し岸壁曳引力1tfと言われており、今回の試験結果でも同様の結果となった。岸壁曳引力から自船の抵抗を引いた値が曳航力になる。Fig. 1 に示す岸壁曳引力から模型試験で求めた曳船の抵抗値を引いた曳航力を□印で示す。曳航力は岸壁曳引力の約1/2で、機関出力50%までは増加するが、それ以上の機関出力では増加率が低下していることが分かる。今回使用した船の場合、曳航荷重2.5tf程度が限界である。

Table 1 Principal particulars of TAKA-MARU

$L_{OA}$ [m]	29.5	$D$ [m]	2.0
$L_{pp}$ [m]	25.0	$d_m$ [m]	1.7
$B$ [m]	5.2	$W$ [t]	132

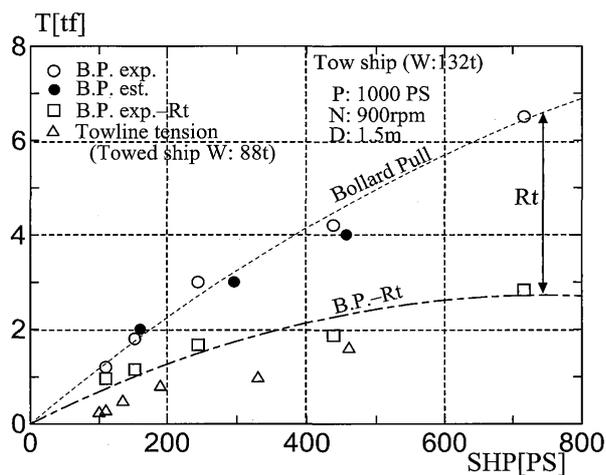


Fig. 1 Relation between bollard pull and tow force

### 2.2 曳航馬力と曳航力

岸壁曳引力試験と同船を曳船とした穏やかな海象下での実船曳航試験を千葉県館山港付近で実施した。被曳船は国立館山海上技術学校の練習船「望洋丸」（総トン数40t）である。被曳船の主要目を Table 2 に示す。試験海域の天候は雷雨であったが、波・風ともに穏やかであった。曳航試験時の曳船の主機関回転数とピッチ角は岸壁曳引力試験と同じで、速力3、4、6、8、10、12kts相当である。本試験では DGPS による曳船・被曳船の位置計測、方位ジャイロによる船首方位、曳航速度、機関出力、張力計による曳航索張力を計測した。

Table 2 Principal particulars of BOYO-MARU

$L_{OA}$ [m]	22.21	$D$ [m]	2.05
$L_{pp}$ [m]	20.50	$d_m$ [m]	1.50
$B$ [m]	5.50	$W$ [t]	88

曳航試験の結果、機関出力3~8kts相当での曳航では被曳船は曳船に追従したが、10、12kts相当での曳航では被曳船の若干の振れまわり運動が確認できた。Fig. 1 に機関出力と索張力の平均値の関係を△印で、機関出力と曳航速度の関係を曳船の通増速力試験結果と合わせて Fig. 2 に示す。Fig. 1 より、曳航中の索張力は曳船の持つ曳航力より常に小さく、曳航能力の範囲内で曳航していることが分かる。被曳船が振れまわりを起こした機関出力12kts相当での曳航時の索張力は、平均値1.59tfに対し最大値は1.9tfであり、19%の索張力変動であった。Fig. 2 より、機関出力を上げて被曳船と曳船にかかる抵抗が増加するに伴い、曳航速度が通増速力試験時の速度より小さくなる傾向が分かる。通増速力試験と曳航試験時の曳航速度の差から曳航馬力を推定した結果を Fig. 3 に示す。図中の一点鎖線が100馬力に対して1tfの関係を示

す。曳航速度 6.6, 7.9kts では曳航馬力に対して曳航力（索張力）が出ていないことが分かる。今回の曳航試験では、曳航馬力と索張力の関係は曳航速度が 6kts 以下で 100 馬力に対し約 1tf である。

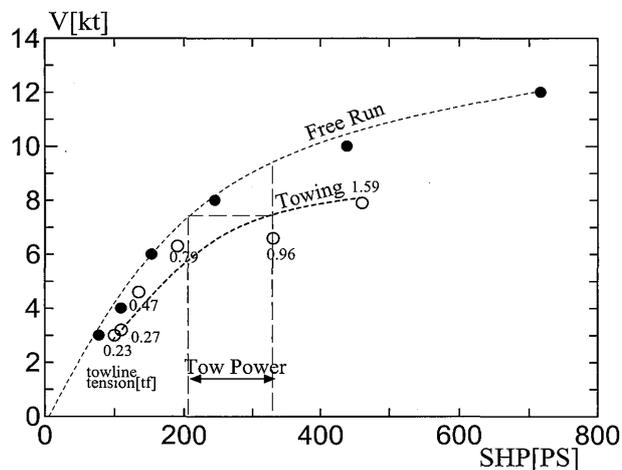


Fig. 2 Measured results of towing test in calm sea

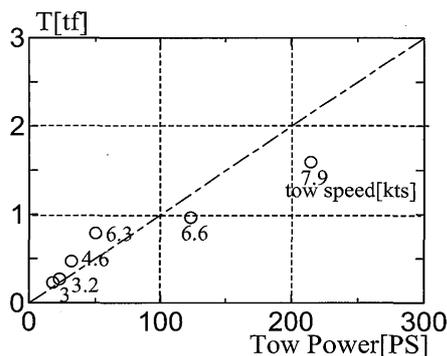


Fig. 3 Relation between tow power and towline tension during towing test in calm sea

### 2.3 曳航限界荷重

前節で岸壁曳引力を最大トルク一定と仮定して、主機関馬力と推進器の仕様から推定が可能であることを示した。同様の方法で曳航速度に対する曳航限界荷重を求めた結果を曳航試験結果と合わせて Fig 4 に示す。破線が曳航限界を示しており、0 から 10kts まで 2kts 毎に曳航限界荷重を表示している。また一点鎖線は自由航走時を示す。曳航速度 6kts 以下では曳航限界荷重は索張力に対して 3 倍以上を確保しているが、それ以上の曳航速度では索張力が著しく増加し、8kts では曳航限界荷重と索張力の比が 1.4 まで低下し、余裕のない曳航をしていることが分かる。今回使用した曳船と被曳船での曳航では、曳航速度 6kts 以下で曳航するのが望ましい。

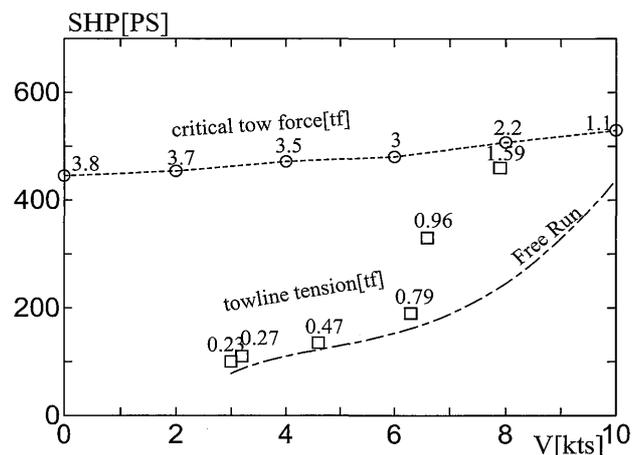


Fig. 4 Critical towing performance and tow force

## 3. 風波浪下での曳航時の安全率

### 3.1 風波浪下での曳航

実海域で曳航作業を行う際には風波浪の影響を十分に考慮する必要がある。そこで風波浪下で実施した海上保安庁の巡視船同士による曳航試験での索張力と曳航限界荷重について述べる。曳船は 1000t 型巡視船、被曳船はヘリコプター 1 機搭載型巡視船である。曳船、被曳船の主要目及び使用した曳航索を Table 3 に示す。

Table 3 Principal particulars of tow and towed ships

	Tow ship	Towed ship
	Patrol vessel	Patrol vessel
L <sub>OA</sub> [m]	93.47	105.4
B [m]	11.5	14.6
D [m]	5.0	7.8
W [t]	2118	4013
Towline	Polyethylene, l=400m, φ=75mm	

曳船の主機関、推進器はディーゼル 3500PS×600rpm×2 基の 4 翼可変ピッチプロペラである。曳航試験時の海象は風、波とも右舷 10deg. から最大風速 15m/sec.、波高約 1m で、潮流は左舷 10deg.、潮流速度約 1kt である。本試験では DGPS による曳船・被曳船の位置計測と方位ジャイロによる船首方位、曳航速度、機関出力及び曳船の張力計による曳航索張力の計測を行った。試験は曳船のプロペラピッチ角を 14、15、16 度と、系統的に変化させた増速直進曳航である。曳航試験の結果、被曳船は振れまわりを起こすことなく曳船に追従したが、ピッチ角 16 度での曳航時の索張力は波浪中の曳航速度の変動影響で、平均索張力から ±20% の索張力変動が確認できた。また、この時の曳航索は海面上から浮いた状態となった。

曳航時の機関出力と曳航速度の関係を曳船の通増速力試

験結果と合わせて Fig. 5 に示す。なお、図中に示す索張力は曳航中での平均値である。通増速力試験と曳航試験時の曳航速度の差から曳航馬力を推定した結果を Fig. 6 に示す。今回の曳航試験の場合、曳船の曳航馬力と索張力の関係は 100 馬力に対し約 1.4tf である。

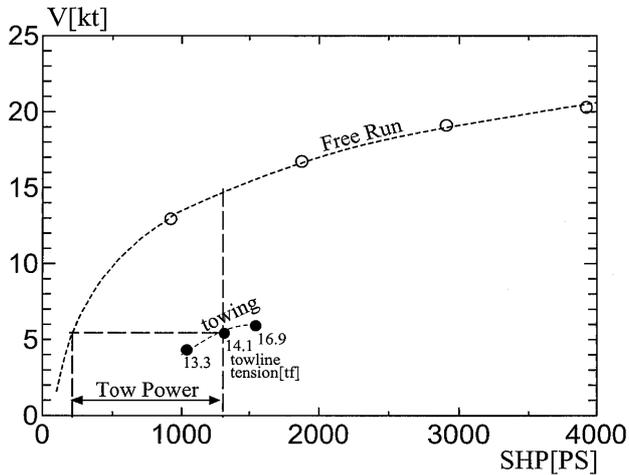


Fig. 5 Measured results of towing test in rough sea

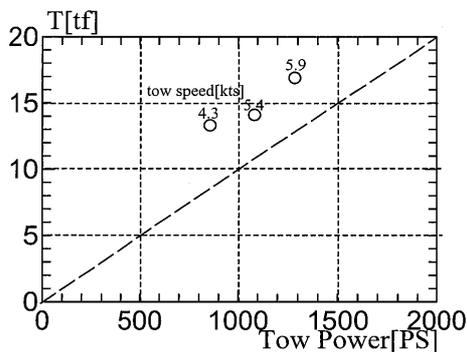


Fig. 6 Relation between tow power and towline tension during towing test in rough sea

### 3.2 曳航限界荷重と安全率

前述したように、タグボートなどの曳航作業船では、岸壁曳引力を基準に安全率を設定することが多い。一般的に曳航索の強度は岸壁曳引力の 6 倍を安全率として設定すると言われているが、曳航作業現場では岸壁曳引力に対して 2.5~3 倍程度とすることが多い。例えば、岸壁曳引力 20tf を有する曳船の場合、使用する曳航資機材は破断強度 60tf のものを選択する。また、曳航索はカタナリーを有し、海中に没している状態でサグ量を十分に確保して曳航するのが安全な曳航状態とし、曳航中は索の状態を監視する。曳航力に関しては岸壁曳引力を基に曳航速度毎のスラストと機関出力を算出し、索張力を平水中での被曳船の排水量に対する抵抗値や経験値を基に推定して曳航力と比較し、曳航計画を立てる。

一方、曳航力が十分ではない一般船舶では船自体の曳航力、曳航限界荷重が問題となる。

前章と同様の方法で曳船の曳航速度に対する曳航限界荷重を求めた結果<sup>6)</sup>を、風波浪下での曳航試験結果と合わせて Fig. 7 に示す。最大曳航速度 6kts での索張力は 16.9tf であるが、6kts 時の曳航限界荷重はその 1.9 倍の 32.4tf である。この場合は曳船の曳航荷重許容範囲内の曳航であるが、曳航索の状態は海面上に出た状態であり、安全な曳航とは言い難く曳航法を検討する状態である。よって、安全な曳航状態は曳航時にかかる索張力に対し曳航限界荷重を 2 倍以上有する必要がある。今回の曳航では曳航速度 5kts の場合が索張力に対して曳航限界荷重が 2.3 倍であり、適切な曳航速度である。なお、曳航時に使用した曳航索は直径  $\phi=75\text{mm}$ 、長さ  $l=400\text{m}$  のポリエチレンロープで、破断荷重は 53.6tf である。曳航索の破断荷重は曳航限界荷重 32.4tf に対して安全率 1.65 となりやや小さく、より破断荷重の大きい曳航索を使用するのが望ましい。

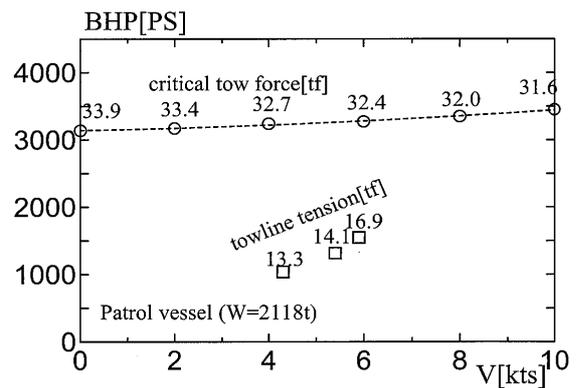


Fig. 7 Critical towing performance and tow force

## 4. 曳航安全率

### 4.1 曳航安全率の定義

主機関馬力や推進器による曳航力に対する安全率を考える。曳船が被曳船を風波浪下で安全に曳航できるかどうかの指標として、Fig. 7 に示す各曳航速度における曳航限界荷重に風波の影響としてシーマージンを 30%とり、曳航時の変動索張力の最大値で除した値を曳航安全率として(1)式のように定義する。曳航限界荷重は主機関・推進器から求めることとし、シーマージンの値は曳航作業現場で一般的に用いられている値<sup>1)</sup>とした。索張力は風波浪下でのものとし、振れまわりを起こす場合には振れまわりによる変動を含んだ最大索張力とする。曳航安全率 1 以下は曳航不能である。これまでに述べた穏やかな海象下及び風波浪下での実船での曳航試験結果より、必要な曳航限界荷重は曳航安全率 2 以上が

適当である。曳航安全率1以上2以下は曳航危険範囲となる。

の小さい曳航索を使ったために破断したことも考えられる。

$$\text{曳航安全率} = \frac{\text{曳航限界荷重} \times 0.7 (\text{シーマージン} 30\%)}{\text{変動索張力の最大値}} \quad (1)$$

風波浪下での曳航時の索張力を考える場合、被曳船に働く流体力に加え、風圧力、波漂流力を推定する必要がある。海技研では風波浪下での航行不能船舶の漂流運動、曳航時の曳船、被曳船の軌跡、振れまわり幅、索張力などの推定が可能な最適曳航支援システム(OTSS)を開発しており、実船による曳航と比較してシステムの性能評価を行っている。この性能評価により、風・波・潮流下での曳航時の被曳船の振れまわりや、振れまわりによる変動索張力の最大値は本システムで推定できることを確認している<sup>7)</sup>。本研究ではOTSSで風波浪下の索張力を推定する。

#### 4.2 曳航安全率の検証

曳航時に曳航困難に陥った事例と、曳航できなかった事例について曳航安全率で評価する。ここでの曳船は1000t型巡視船で、主機関、推進器はディーゼル 3500PS×380rpm×2基、4翼可変ピッチプロペラである。被曳船は巡視船とカーフェリーである。曳船、被曳船の主要目をTable 4に示す。表中の $W_2/W_1$ は、被曳船の排水量 $W_2$ と曳船の排水量 $W_1$ の比を示している。また、曳船の主機関及び推進器の性能から曳船の曳航限界荷重を算出した結果をFig. 8に示す。

はじめに、巡視船同士による曳航試験時に曳航困難となり、曳航を途中で断念した事例<sup>8)</sup>を述べる。被曳船はヘリコプター2機搭載型巡視船である。3ktsで曳航中の変針時に被曳船の追従が悪くなり曳航困難のため曳航を中止した。曳航時の状態及び計測した索張力を、OTSSで計算した索張力と合わせてTable 5に示す。なお、使用した曳航索の破断荷重は51.5tfである。3ktsで曳航時のOTSSによる索張力は計測値と良く一致している。また、Fig. 8に示す曳船の曳航限界荷重を用いて、曳航安全率を算出した結果も合わせて示す。曳航安全率は1.4で、曳航危険範囲である。曳航困難になった原因は曳船の曳航能力不足と考えられる。

次に、同じ曳船が航行不能となったカーフェリーを曳航中、曳航速度が5ktsになる寸前に被曳船側のペンダント部の曳航索が破断し、曳航中止となった事例を述べる。Table 6に曳航時の状態と、OTSSで計算した曳航時の索張力及び曳航安全率を合わせて示す。なお、使用した曳航索の破断荷重は31tfである。曳航安全率は4ktsでは1.4で曳航危険範囲であり、5ktsでは1.0となり曳航不能となる。この曳航では原因が曳航索ペンダントの破断であるが、曳船の曳航能力の限界状態で曳航を続けたため、曳航索の摩耗が進み、索破断荷重

Table 4 Principal particulars of tow and towed ships

	Tow ship		Towed ship	
	Patrol vessel	Patrol vessel	Car ferry	
$L_{pp}$ [m]	77.8	123	200	
$B$ [m]	9.6	15.5	26.5	
$D$ [m]	5.3	8.8	15.3	
$d$ [m]	3.6	5.7	6.8	
$W_{ft}$	1389	5503	18229	
$W_2/W_1$		4.0	13.1	

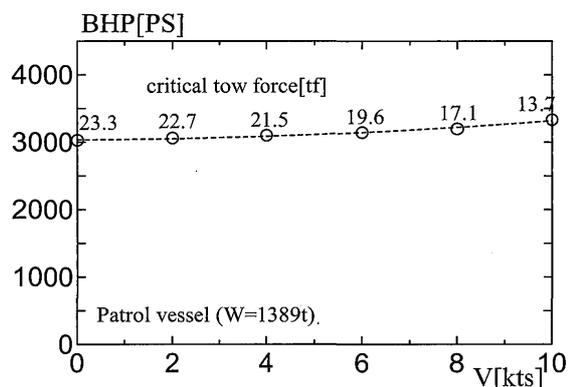


Fig. 8 Critical towing performance of tow ship

Table 5 Towing condition for patrol vessel

Wind	15m/sec dir. =60deg.	
Wave	3.5m dir. =60deg.	
Tow speed	3kts	
Tow line	Polyethylene $l=400m, \phi=65mm$	
Towline tension	Measured	OTSS
	11.0tf	11.6tf
Safety factor	1.4	1.3

Table 6 Towing condition for car ferry

Wind	5m/sec dir. =90deg.	
Wave	0.5m dir. =90deg.	
Tow speed	4-5kts	
Tow line	Polyethylene $l=600m, \phi=55mm$	
Towline tension (OTSS)	4 kts	5 kts
	11.0tf	14.7tf
Safety factor	1.4	1.0

#### 4.4 曳航能力限界表

OTSSを用いて風波浪下における5種類の船種を被曳船とした巡視船での曳航時の索張力を計算し、曳航安全率を算出して曳船に対する被曳船の排水量比で整理した曳航能力限界表を作成した。曳船は風波浪下での巡視船同士の曳航試験で曳船として使用したTable 3に示す海上保安庁の1000t型巡視船とし、被曳船は貨物船、コンテナ船、タンカー2種(満

載と軽荷状態)、巡視船、漁船の5つの船種で、曳航速度は5ktsとした。Table 7に被曳船の主要目と曳船との排水量比を示す。

Table 7 Principal particulars of towed ships

Ship type	$L_{OA}[m]$	$B[m]$	$D[m]$	$W_2/W_1$
Tanker-full/Ballast	256	48.3	22.4	78.3/33.4
Container	200.0	32.0	16.5	18.2
Cargo	156.0	26.6	14.1	12.7
Fishing vessel	53.0	9.4	4.0	0.53
Patrol vessel	105.4	14.6	7.8	1.89

外力は風と波とし、風速は0から15m/sec.、波高は0から3mまでの6段階とした。それぞれの向きは同じとして0deg.から180deg.までを45deg.ごとに計算した。そのうち風・波向が正面の0deg.から、曳航安全率が最も低くなる風・波向が真横の90deg.までの結果をFig. 9-11に示す。x軸は曳船の排水量 $W_1$ に対する被曳船の排水量 $W_2$ の排水量比( $W_2/W_1$ )、y軸は海象6段階を示しており、曳航安全率を5段階で示している。曳航安全率1以下は曳航不能、曳航安全率1~2は危険範囲である。船と風波の方向との相対角が大きくなると、船に働く外力が大きくなり、被曳船は横変位や振れまわり運動を起こす。横変位や振れまわり運動によって索張力変動も大きくなり、曳航安全率が低下し、曳航可能範囲が小さくなることが分かる。

次に作成した曳航能力限界表と実船曳航試験での曳航状態を比較する。前章で述べた風波浪下での巡視船同士の曳航試験では海象が風・波向きが正面で、最大風速15m/sec.、波高1mである。曳船・被曳船の排水量比は1.89である。曳航速度5ktsでの曳航時では、Fig. 7に示すとおり安全な曳航状態である。Fig. 9に示す風・波向き0deg.での曳航能力限界表のうち、曳航可能範囲部分を抜粋したものをFig. 12に示す。この曳航能力限界表で曳航試験状態となる部分を○印で示す。曳航能力限界表で見ると、曳航試験状態時では曳航安全率2~3の範囲にあり、曳航状態は一致している。この曳航能力限界表により被曳船の排水量を知ることによって緊急曳航時の海象下での曳航の安全性を把握することができる。

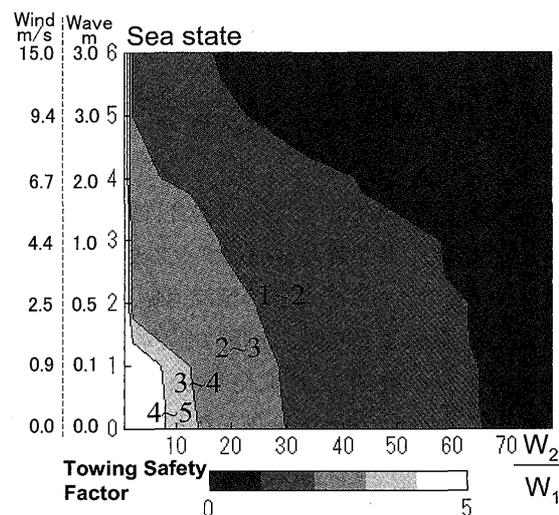


Fig. 9 Chart for critical towing performance in head seas

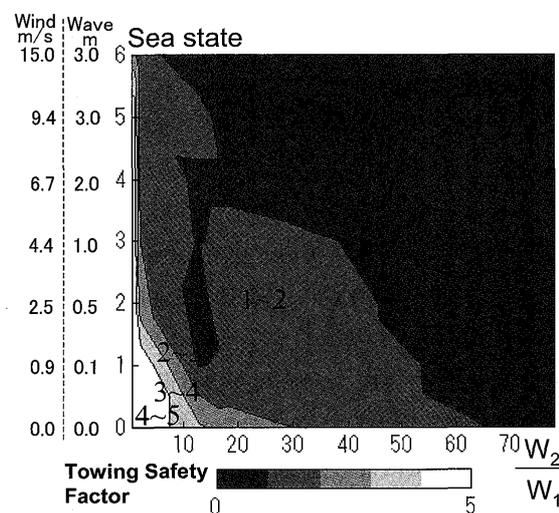


Fig. 10 Chart for critical towing performance in bow seas

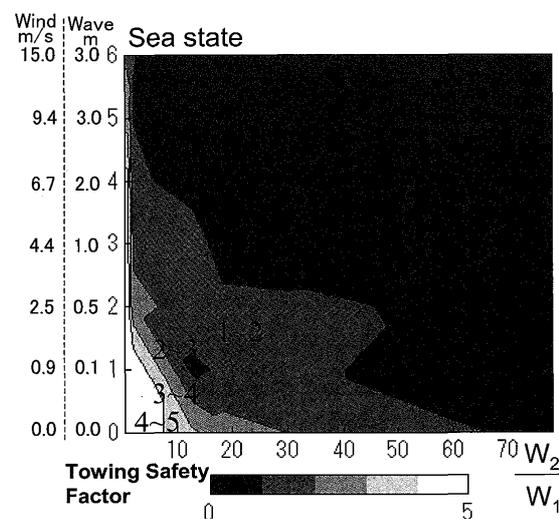


Fig. 11 Chart for critical towing performance in beam seas

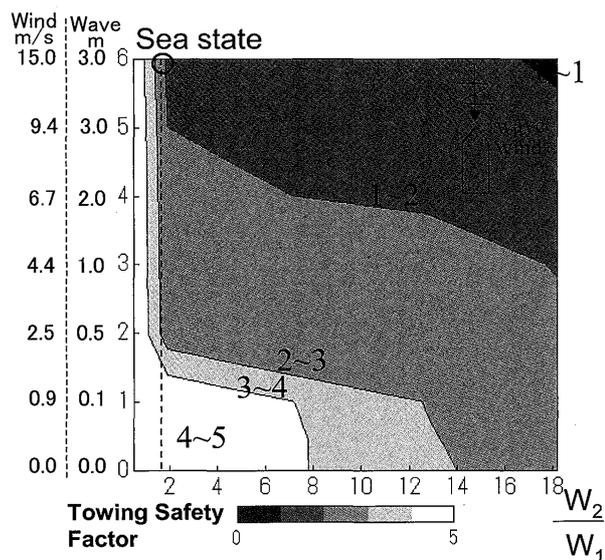


Fig. 12 Chart for critical towing performance in head seas  
( $W_2/W_1 < 18$ )

## 5. 結 言

船舶の曳航能力と曳航安全率を検討するため、実船による岸壁曳引力試験と、穏やかな海象下及び荒天下での曳航試験を実施し、以下の結論を得た。

- 1) 一般船舶を使用した岸壁曳引力試験による岸壁曳引力と、主機関馬力と推進器から推定した曳航限界荷重は一致することを確認した。
- 2) 曳航時の索張力と曳船の曳航限界荷重の比と曳航状態の関係より、曳航限界荷重は索張力の2倍以上が望ましいことを示した。
- 3) 風波浪下での曳船の曳航能力を主機関と推進器から推定した曳航限界荷重にシーマージン 30%を掛けた値と、曳航時の最大索張力との比を曳航安全率と定義した。
- 4) 定義した曳航安全率は、1以下は曳航不能、1~2は曳航危険範囲であり、曳航安全率2以上での曳航が適当である。
- 5) 曳航シミュレーションシステム OTSS を用いて風波浪下での5種類の被曳船を想定した曳航時の索張力を計算し、曳航安全率を算出して曳船に対する被曳船の排水量比で整理した曳航能力限界表を作成した。これより与えられた海象条件で被曳船の排水量により安全な緊急曳航作業の可否を判断できる。

## 謝 辞

本研究での実船による岸壁曳引力試験及び曳航試験を実施するにあたり、海上保安庁第2管区海上保安本部関係者及び巡視船乗組員、水産工学研究所関係者及び漁業調査船たか丸乗組員、国立館山海上技術学校関係者及び練習船望洋丸乗組員の皆様にご協力いただいた。関係各位に深く感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 警備救難マニュアル, 海上保安庁警備救難部
- 2) 原正一他: 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, 海上技術安全研究所報告, 第4巻, 第2号, 2004
- 3) 原正一, 星野邦弘, 湯川和浩, 長谷川純, 谷澤克治, 上野道雄, 山川賢次: 最適曳航支援システムの開発に関する研究, 関西造船協会論文集, 第241号, 2004, pp.115-124,
- 4) 三橋甲子: 船舶曳航実務, 成山堂書店, 1988
- 5) マリンプロペラ, ナカシマプロペラ, 1930
- 6) 長谷川純, 猿田俊彦, 岡本三千朗, 柳原健, 深澤良平: 波浪中曳航時の馬力推定-第1報巡視船の水槽試験-, 第74回船舶技術研究所研究発表会講演集, 2000, pp.38-41
- 7) 黒田貴子, 原正一: Application of Optimum Towing Support System in Emergency Towing Operation, Proceedings of International Conference on Towing & Salvage of Disabled Tankers, 2007, pp.83-91
- 8) 山本勉, 中村克則, 金子純蔵, 山川賢次, 原正一: 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, 船舶開発技報第20号, 海上保安庁装備技術部船舶課, 1994, pp.51-87