

サイドスラストを装備した船舶の操縦性能

中川 宏司*, 千葉 元**, 金山 恵美*, 小竹 泰生*, 江口 聡道*, 廣澤 陽介*

Ship maneuvering on Side Thruster

NAKAGAWA Hiroshi*
CHIBA Hajime**
KANAYAMA Emi*
ODAKE Yasuo*
EGUCHI Toshimichi*
HIROSAWA Yousuke*

In recent years, a lot more ships equipped with Side Thruster have come to be navigated in order to improve safety and economic effectiveness. Performance data about the maneuvering effect of those ships equipped with Side Thruster against wind pressure resistance, and wave power, will be collected in the training ship Wakashio Maru as proof ship. The effective use range of Side Thruster is also cleared with general shipping.

キーワード サイドスラスト, 操船, 風圧抵抗, 流圧抵抗, 波漂流力

1. はじめに

近頃、各種船舶においてサイドスラストを装備した客船、フェリー、作業船及び小中型の貨物船が一般的になりつつある。

通常の船舶においてサイドスラストを使用する場合は港内であり、操船に影響を及ぼす外的な要因は風と潮流であることから、その船舶に与える風圧抵抗量と流圧抵抗量に対してサイドスラストの能力が有効に作用するかを見極める必要がある。

また洋上等波の影響を受ける海域でサイドスラストを使用する場合としては、作業観測船による定点保持、遭難救助等があるが、これらの場合は風圧抵抗と流圧抵抗に加え、波の力も受けることとなり、この要素も考慮しなければならない。

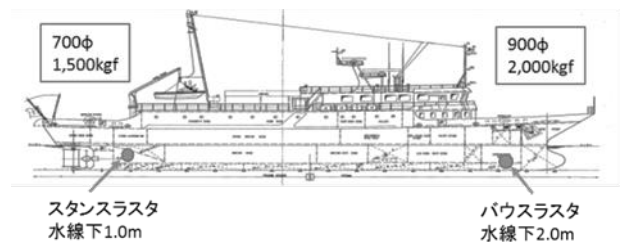
以上の基本的な考え方から、3つの力を推算し、これらによる影響を実際の船舶において検証することと

する。この実証船として練習船「若潮丸」において行うこととし、風圧力、流圧力及び波力が操船に与える影響を探ることとした。

またサイドスラストを装備している各船舶において操船の有効範囲の概要を当該船舶の一般要目から簡単に計算できる指針があると有効性が高いと考え、その近似値を求める一例も検討することとした。

2. 練習船若潮丸の主要目

実証船として使用する富山高等専門学校の練習船「若潮丸」のサイドスラスト配置、主要目及び若潮丸の主要目については図—1、表—1 及び表—2 のとおりである。



図—1 サイドスラスト配置図

* 練習船 若潮丸

e-mail: h.nakagawa@nc-toyama.ac.jp

e-mail: ekana@nc-toyama.ac.jp

e-mail: yodake@nc-toyama.ac.jp

e-mail: eguchi@nc-toyama.ac.jp

** 商船学科

e-mail: chiba@nc-toyama.ac.jp

表-1 サイドスラスタ主要目

項目	パウスラスタ	スタンスラスタ
メーカー名	かもめプロペラ	かもめプロペラ
型式	TCA-30MA	TCA-15MA
スラスタ翼直径	900mm	700mm
公称スラスト	2,000kgf	1,500kgf
装備数	1台	1台
操縦方式	翼角制御方式	翼角制御方式

表-2 若潮丸の主要目

項目	内容
船舶の用途	練習船
航行区域	近海区域
全長	53.59m
登録長	49.05m
垂線間長	46.00m
型幅	10.00m
型深さ	5.40/3.20m
総トン数	231トン
最大航海速力	13.80k't
航海速力	12.50k't
航続距離	2'180海里
主機関	単動4サイクル、ディーゼル機関 956kw×390rpm×1基
推進器	4翼スキュード可変ピッチプロペラ×1基
主発電機関	243kw×1200rpm×1基
舵型式	Monovec schilling rudder

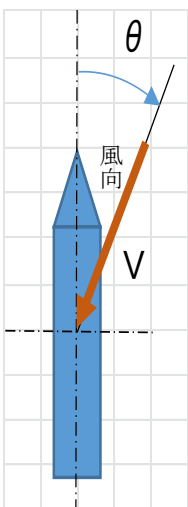
3. 風圧抵抗

3.1 風圧抵抗の求め方

風圧抵抗は水面より上の船体及び上部構造物が風の影響により押し流される抵抗である。

この風圧抵抗の概略計算式は(1)式のとおりである。(1)

$$Rw=0.5 \rho_w Cr (A \cos\theta + B \sin\theta) Vw^2 \quad (1)$$



- Rw : 風圧抵抗力(kg)
- ρ_w : 空気密度:0.125(kg・sec²/m⁴)
- Cr : 風圧係数
- A : 正面投影面積 (m²)
- B : 側面投影面積 (m²)
- θ : 船首尾線に対する風向
- Vw : 風速 (m/s)

なお、風圧係数は船種及び風向によって以下の求め方となる。(1)

・客船

$$Cr:1.142-0.142\cos2\theta-0.367\cos4\theta-0.133\cos6\theta$$

・一般貨物船:

$$Cr:1.325-0.050\cos2\theta-0.350\cos4\theta-0.175\cos6\theta$$

・タンカー・バルカー:

$$Cr:1.200-0.083\cos2\theta-0.250\cos4\theta-0.117\cos6\theta$$

また各風圧係数を計算すると図-2 のとおりとなる。

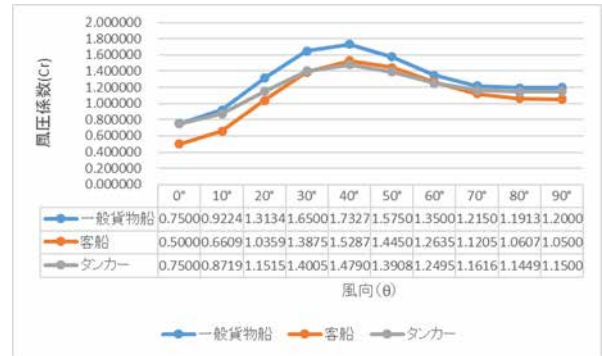


図-2 (1)式による各種船舶の風圧係数 Cr

(1)式から練習船若潮丸の風圧抵抗を計算すると図-3 のようになる。

但し、A=87.6 m²、B=349.5 m²、平均喫水=3.00mとし、風圧係数は船の形状が近い客船の数値を使用することとする。

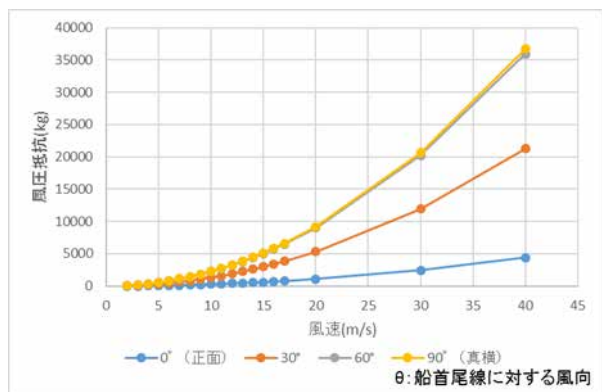


図-3 練習船若潮丸の(1)式による風圧抵抗 Rw

風圧抵抗力は風速の二乗に比例することから風速が増大すると風圧抵抗力は急激に大きくなり、また風圧係数が図-3のとおり船首尾線に対する風向 θ によって異なることから、 θ が 60° と 90° がほぼ同じ風圧抵抗力という結果となる。

3.2 操船の限界風速を求める方法

特定の船舶における一般的な主要目から操船の限界風速を求める近似値の計算式(2)式を提案する。

但し、図—3 に示したように一番風圧が大きく、船舶の操船において条件のよくないのは船体の真横方向からの風向であり、サイドスラストのみを使用した横方向保持の限界値である。

また前後方向の船速はほとんどなく、サイドスラストの実用上の最大能力とする。

$$Vw.max = \sqrt{\frac{P}{0.05 \times L \times B}} \quad (2)$$

Vw.max : 操船可能な限界風速(m/s)

P : 横方向スラストのトータル有効推力(kg)

L : 船舶の全長(m)

B : 船舶の幅(m)

なお、サイドスラストの有効推力と出力の関係は、おおよそ推力 1 トン ≒ 90PS ≒ 66kw 程度と推定される。

また提案している(2)式は風圧抵抗の計算式(1)式を風速 Vw を求める式に変換すると(3)式となる。

$$Vw = \sqrt{\frac{Rw}{0.5 \rho_w Cr (A \cos \theta + B \sin \theta)}} \quad (3)$$

風圧抵抗 Rw に耐えられるサイドスラスト推力が限界値となることから Rw=P となる。

さらに分子の $0.5 \rho_w Cr$ は船型によって若干は異なるが定数となり、 $(A \cos \theta + B \sin \theta)$ は風があたる水線上の面積となる。ただこの風があたる面積を求める水線上の高さが船型等により複雑かつ一般要目がないことから、ほぼ比例する船幅を採用することとし、先の定数 $0.5 \rho_w Cr$ に一定係数を乗じ、0.05 とし、(2)式を導き出している。

以下いくつかの船舶における凡例を記載することとする。

- (a) 若潮丸 (練習船、全長 53.59m、総トン数 231t)

$$Vw.max = \sqrt{3000 / (0.05 \times 53.59 \times 10)} \\ \approx 10.58 \text{m/s}$$

- (b) 深江丸 (練習船、全長 49.95m、総トン数 449t)

$$Vw.max = \sqrt{2700 / (0.05 \times 49.95 \times 10)} \\ \approx 10.40 \text{m/s}$$

- (c) すばる (ケーブル敷設船、全長 124m、総トン数 9,557t)

$$Vw.max = \sqrt{75000 / (0.05 \times 124 \times 21)} \\ \approx 24.00 \text{m/s}$$

但し、実用上の 80% 出力とする。

4. 流圧抵抗

4.1 流圧抵抗の求め方

流圧抵抗は水面より下の船体が海潮流の影響により押し流される抵抗である。

この船体の真横方向からの流圧抵抗力の概算式は以下のとおりである。⁽²⁾

$$Rf = 0.5 \rho_f C_f S V_f^2 \quad (4)$$

Rf : 流圧抵抗力(kg)

ρ_f : 海水密度 : 104.5 (kg · sec² / m⁴)

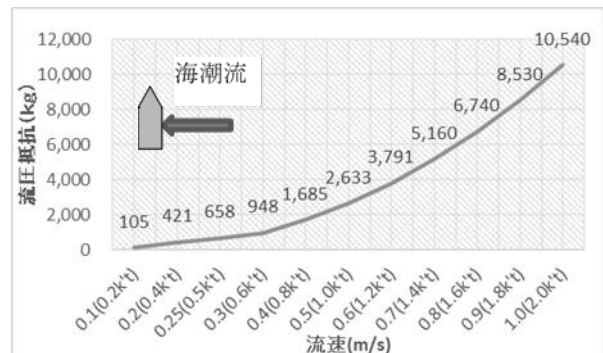
S : 浸水部の投影面積(m²)

Vf : 流速(m/sec)

Cf : 流圧抵抗係数 : 船型等により異なるが、若潮丸データの 1.39 を使用する。⁽³⁾

この式から練習船若潮丸の真横方向の流圧抵抗を算出すると概略図—4 のようになる。

但し、S=145 m²、平均喫水=3.00m とする。



図—4 練習船若潮丸の流圧抵抗 Rf

また(4)式により流圧抵抗が 3.0ton となる流速 Vf を求めると、

$$3000=0.5 \times 104.5 \times 145.0 \times V_f^2 \times 1.39$$

$$V_f^2=0.285$$

$$V_f \doteq 0.53 \text{m/s} \doteq 1.04 \text{k}^{\cdot} \text{t}$$

故に真横方向から流速 1.04k[・]t の力と若潮丸のバウスラスト、スタンスラストの同一方向へ Full に使用した場合の力(1.5+1.5ton)と同一となり、船の横方向移動は停止状態となる。

したがって、真横方向の流速約 1.0k[・]t 以上の流速に対してはサイドスラストのみの使用効果は期待できないという結果となる。

4. 2 操船の限界流圧速度を求める方法

特定の船舶における主要目から操船の限界流圧速度を求める近似値の計算式(5)式を提案する。

但し、船体の真横方向からの流向であり、サイドスラストのみを使用した横移動保持の限界値である。

また前後方向の船速はほとんどなく、サイドスラストの実用上の最大能力とする。

$$V_{f.\text{max}} = \sqrt{\frac{P}{65 \times L \times d}} \quad (5)$$

Vf.max: 操船可能な限界流圧速度 (m/s)

P: 横方向スラストのトータル有効推力 (kg)

L: 船舶の全長 (m)

d: 船の喫水 (m)

また提案している(5)式は流圧抵抗の計算式(4)式を流速 Vf を求める式に変換すると(6)式となる。

$$V_f = \sqrt{\frac{R_f}{0.5 \rho_f C_f S}} \quad (6)$$

流圧抵抗力 Rf に耐えられるサイドスラスト推力が限界値となることから Rf=P となる。

さらに分子の 0.5 ρ_fC_f は船型によって若干は異なるが定数となり、S は海潮流があたる水線下の面積となる。ただ、この海潮流があたる水線下の面積の求め方として、船舶の一般要目である全長と喫水から計算することとし、

先の定数 0.5 ρ_fC_f に一定係数を乗じ、65 とし、(5)式を導き出している。

以下いくつかの船舶の凡例を記載することとする。

(a) 若潮丸

バウとスタンスラストを同推力とした場合

$$V_{f.\text{max}} = \sqrt{3000 / (65 \times 53.59 \times 3.0)} \\ \doteq 0.53 \text{m/s} \doteq 1.04 \text{k}^{\cdot} \text{t}$$

(b) 深江丸

$$V_{f.\text{max}} = \sqrt{2700 / (65 \times 49.95 \times 3.2)} \\ \doteq 0.51 \text{m/s} \doteq 0.99 \text{k}^{\cdot} \text{t}$$

(c) すばる

$$V_{f.\text{max}} = \sqrt{75000 / (65 \times 124 \times 7)} \\ \doteq 1.15 \text{m/s} \doteq 2.24 \text{k}^{\cdot} \text{t}$$

但し、実用上の 80%出力とする。

4. 3 風の影響による圧流を求める方法

3項及び本項において風圧抵抗と流圧抵抗について記述してきたが、ここでは風速とその風速によって、どれくらい船舶は影響を受け、流されるかを試算してみることとする。

若潮丸の場合、真横方向の風圧係数 Cr 及び流圧係数 C_f と船体水面上横面積及び水面下船体横面積を風圧抵抗の計算(1)式及び流圧抵抗の計算(4)式に代入すると、圧流速度は次のような簡略化された計算式の(7)式で求められる。

【流圧抵抗】 $0.5 \rho_f C_f S V_f^2 = 0.5 \rho_w C_r B V W^2$ 【風圧抵抗】

$$V_f = \sqrt{\left(\frac{\rho_w}{\rho_f}\right) \times \left(\frac{C_r}{C_f}\right) \times \left(\frac{B}{S}\right) \times V_w}$$

「若潮丸」の値を代入すると

$$V_f = \sqrt{\left(\frac{0.125}{104.5}\right) \times \left(\frac{1.05}{1.39}\right) \times \left(\frac{350}{145}\right) \times V_w}$$

$$V_f \doteq 0.05 V_w \quad (7)$$

Vf: 風による船舶の圧流速度(m/s)

Vw: 風速(m/s)

故に、風速の約 1/20 の速度で圧流されることとなる。

例えば、真横方向から風速 10m/s の風を受けていると 0.5m/s(1k[・]t)の速度で圧流されることとなる。

5. 波力

5.1 波力の求め方

ここで言う波力とは波の持つエネルギーが浮体を押し流す力を算出することが必要と考えられるが、この求める方法として一般的な波漂流力を求めることとした。

波漂流力の求め方も、色々な理論及び実験などが行われてきているが、ここでは規則波中の定常波漂流力を用いた Hsu らの方法及び Pinkster の方法に従った近似的な計算の中で比較的簡単な方法で算出できる Hsu の方法で求めることとした。

以下その近似式は(8)式のとおりである。⁴⁾

$$F_w = 0.5 \rho g L C_w H_w^2 \sin \theta \tag{8}$$

F_w : 波漂流力 (kg)

ρ : 海水の密度、 $1025(\text{kg}/\text{m}^3)/9.8 = 104.5$

g : 重力加速度、 $9.8(\text{m}/\text{s}^2)$

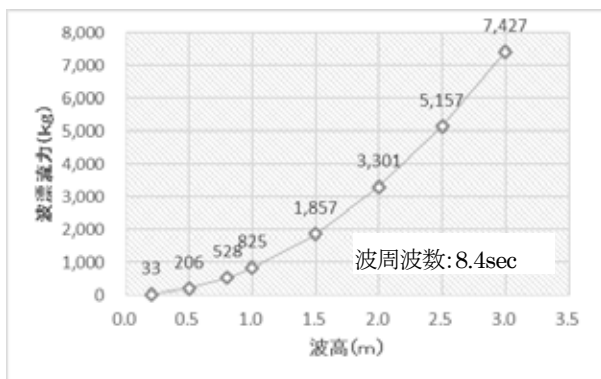
L : 浮体の代表寸法 (m)

C_w : 波漂流力係数、波数や水線面長等に依存するが、ここでは真横方向からの参考値 0.14 を使用することとする。⁴⁾ この値は波周期 8.4 秒付近時の最大値である。したがって、波周期が変わると、この係数は小さくなる。

H_w : 波振幅 (m)

θ : 船首尾線に対する波向

この式から練習船若潮丸の真横方向の波漂流力を計算すると概略図一5 のようになる。



図一5 練習船若潮丸の波漂流力 (真横方向) F_w

また(8)式より若潮丸の波漂流力における限界波高を求め、そのサイドスラストの条件は流圧抵抗の時と同じように船首部と船尾部の水線下の形状は若干異なるものの

真横方向の力に対抗させるためにはバウスラストとスタンラストの推力を同推力とし、トータル推力 3 トンにおいて算出すると以下のとおりとなる。

$$F_w = 0.5 \rho g L C_w H_w^2$$

$$3000 = 0.5 \times 104.6 \times 9.8 \times 46 \times 0.14 \times H_w^2 \times \sin 90^\circ$$

$$H_w^2 = 3000 / 3300.76$$

$$H_w = 0.953 \text{ m} \approx \text{波高 } 1.91 \text{ m}$$

故に船体真横方向から波高約 1.9m 以上の波を受けると他の風圧力及び流圧力が無くてもサイドスラストにおける横移動能力は発揮できないことになる。

また参考として、外海における風による風圧抵抗と風が吹くと波が発生することから波漂流力の合成によって、どれくらい耐えうるにかの一例をあげると以下のようになる。

若潮丸において、風速 8m/s、この風速による波高 1m とし、風向・波向は真横方向からとし、(1)式から風圧抵抗及び(7)式から波漂流力の数値を割り出すと、

風圧抵抗: 1,680kg、波漂流力 825kg で合計 2,505kg となり、理論上では若潮丸推力の 3,000kg より下回ることから横移動能力はあるという結果になる。

5.2 サイドスラストの横移動における限界波高

特定の船舶における主要目からサイドスラストの横移動が可能もしくは停止可能な限界波高を求める近似値の計算式(9)式を提案する。

但し、船舶の真横方向からの波向であり、かつサイドスラストのみを使用した横移動保持の限界値である。

また前後方向の船速はほとんどなく、サイドスラストの実用上の最大能力とする。

$$H_{\text{max}} = 2 \sqrt{\frac{P}{62 \times L}} \tag{9}$$

H_{max} : 停船可能な限界波高 (m)

P : 横方向スラストのトータル有効推力 (kg)

L : 船舶の全長 (m)

また提案している(9)式は波力の計算式(8)式を波振幅 H_w を求める式に変換すると(10)式となる。

$$H_w = 2 \sqrt{\frac{F_w}{0.5 \rho g L C_w}} \tag{10}$$

波漂流力に耐えられるサイドスラスト推力が限界値となることから $F_w=P$ となる。

さらに分子の $0.5 \rho_f g C_w$ は定数となり、 L は全長としたことで、水線間長との比率係数を乗じ 62 とした。また(9)式は波高を求めることとしていることから、(9)式の H_w の波振幅値の 2 倍とし、(10)式を導き出している。

以下いくつかの凡例を記載することとする。

(a) 若潮丸

$$H_{\max} = 2\sqrt{3000/(62 \times 53.6)} \\ \approx 1.90\text{m}$$

(b) 深江丸

$$H_{\max} = 2\sqrt{2700/(62 \times 50)} \\ \approx 1.87\text{m}$$

(c) すばる

$$V_{f,\max} = 2\sqrt{75000/(62 \times 124)} \\ \approx 6.2\text{m} \quad \text{但し、実用上の 80\%出力とする。}$$

6. 若潮丸の実証試験方法

これまで各船舶の操船に影響を与える要素において、理論上における記述を行ってきたが、本項では練習船若潮丸を使用して、理論値と比較を行うこととする。

実験項目については以下のとおり港内において 4 項目、また港外において 2 項目を実施することとした。

1. 港内における実証試験

(1) 船速 0k't 時における横移動性能試験

- ① バウ Half、スタン Full
- ② バウ、スタン共 Full+Main Eng.CPP3°・舵
- ③ バウ・スタン共 Full

(2) 船速 0k't 時における旋回性能試験

- ① バウのみ使用による旋回 バウ Full
- ② バウ・スタン使用による旋回 バウ・スタン共 Full

(3) 船速 2k't 時における横移動性能試験

- ① バウ Half、スタン Full

(4) 船速 2k't 時における旋回性能試験

- ① バウのみ使用による旋回 バウ Full
- ② バウ・スタン使用による旋回 バウ・スタン共 Full

2. 港外における実証試験

(1) 船速 0k't 時における横移動性能試験

① バウ Half、スタン Full

② バウ、スタン共 Full+Main Eng.CPP3°・舵

(2) 船速 2k't 時における横移動性能試験

① バウ Half、スタン Full

7. 港内における若潮丸の実証試験結果

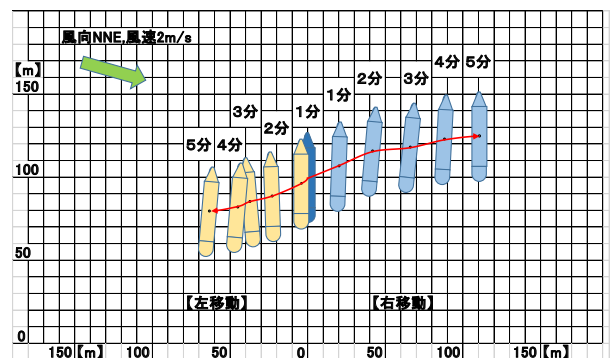
7.1 船速 0k't 時における横移動性能試験

(a) バウスラスト 5~7°、スタンスラスト 10° (full)、船首方向キープ

スタンスラストを Full に使用し、バウスラストの強さをコントロールしながら船首方向をキープさせ、横移動させ、その試験結果は図一6 のとおりである。

なお、試験時における船位は DGPS 位置、方位はジャイロコンパスからのデータである。

また試験時 10 時方向から 2m/s の風を左舷側から受けていたことから左舷側移動距離は少なく 4 分間で 62m (移動速度 0.50k't)、右舷側移動距離は大きく 91m (移動速度 0.74k't) となり、左右平均横移動速度は 0.62k't であった。



図一6 バウ Half、スタン Full による横移動(船速 0k't、船首キープ)試験

この試験結果から左右平均移動速度による流圧抵抗算出値からスタンスラスト推定推力は 640kg となり、公称推力 1,500kg の約 43%の能力しか発揮していないこととなる。この原因としては、スタンスラスト位置が水線下 1m と浅いことから推力が逃がっていることも一つの要因として考えられる。

また、試験時の風速から風圧抵抗値を算出し、この値を流圧計算式による流速値に換算し、実際の左右移動速度差と比較すると、計算値の約 70%が試験時の値となる。

(b) バウ・スタンスラスト 10° (Full)、メインエンジン 3~5° 舵一杯(70°)、船首方向キープ

バウ・スタンスラスト共フルに使用し、スタンスラスト推力不足をメインエンジン、舵の利用で補い、船首方向をキープしながら横移動させた。その試験を2回行い、結果の一例については図-7のとおりである。

また試験時は前項の試験時と同様に左舷側から風を受けていた影響があり、4分間で左舷側移動距離138m(移動速度 1.12k't)、右舷側移動距離 158m(移動速度 1.28k't)となり、平均横移動速度は 1.20k't であった。

この試験結果から左右平均移動速度による流圧抵抗算出値からバウスラストの推定推力は 2,005kg となり、公称推力 2,000kg とほぼ一致した能力を発揮していることとなる。

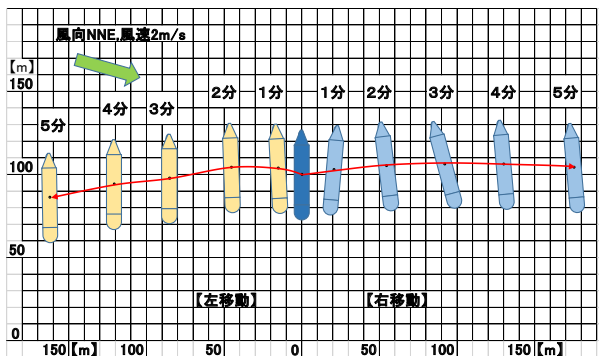


図-7 両スラスト Full、メインエンジン・舵による横移動(船速 0k't、船首キープ)試験

(c) バウ・スタンスラスト 10° (Full)、船首方向キープ無

バウ・スタンスラスト共に Full で使用した運動性能(船首方向キープはしない)の試験結果は図-8のとおりである。

また試験時は前項と同様に左舷側から風を受けていた影響があり、以下の試験結果が得られた。

- ・スタンスラストよりもバウスラストの能力は高く、平行移動はしない。
- ・風上への移動距離は小さく、また回頭しやすい。
- ・風下への移動距離は大きく、また回頭しにくい。

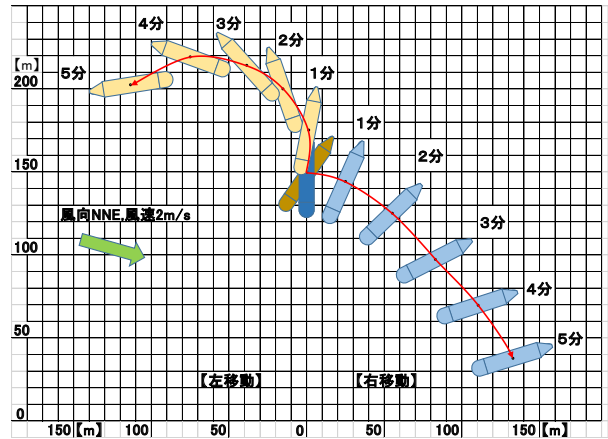


図-8 サイドスラストのみによる横移動(船速 0k't、船首キープ無)試験

7.2 船速 2k't 時における横移動性能試験

(a) バウスラスト5~7°、スタンスラスト 10° (full)、船首方向キープ

メインエンジンの翼角 3~4°で前進しながら、スタンスラストを Full に使用し、かつバウスラストで船首方向をキープさせながら、横移動させた試験結果は図-9のとおりである。

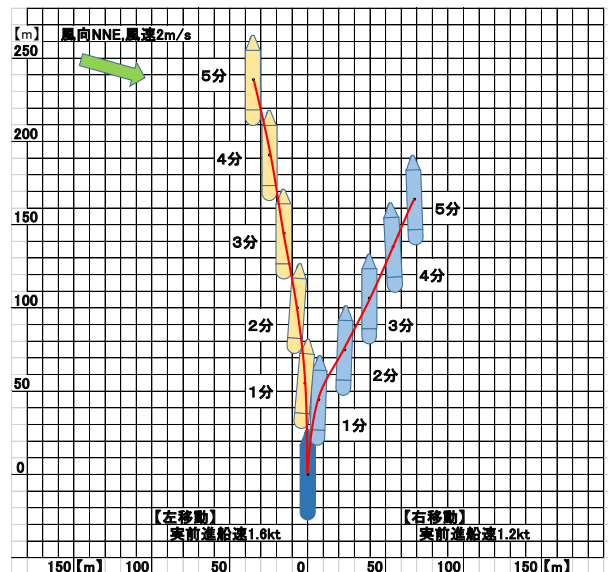


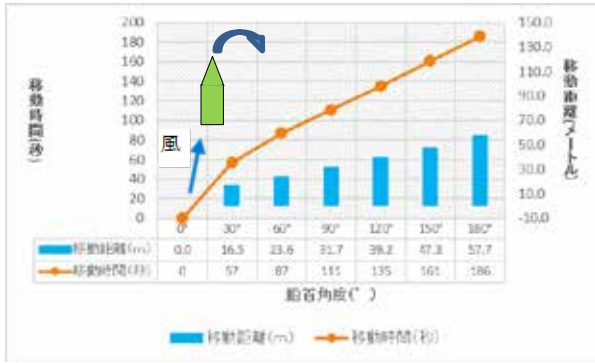
図-9 バウ Half、スタン Full による横移動(船速 2k't、船首キープ)試験

試験結果の概要は前進速度が 1.2~1.6k't あることから 4分間で風上方向への左舷側横移動距離は約 32m(0.26k't)、風下方向への右舷側横移動距離は約 63m(0.51k't)、左右平均横移動速度は 0.38k't となり、前後方向 0k't 時の約 62%の横移動速度であり、横推力値は約 38%であった。

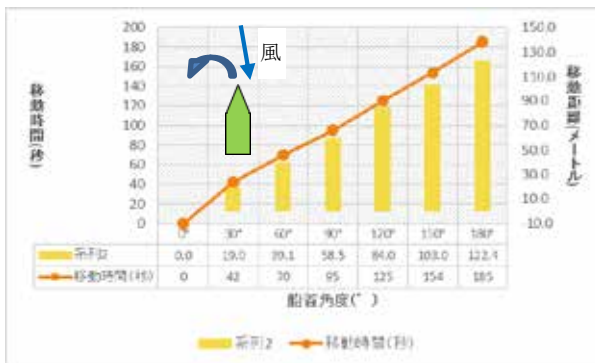
7.3 船速 0k't 時における旋回性能試験

(a) バウスラスタ単独による旋回

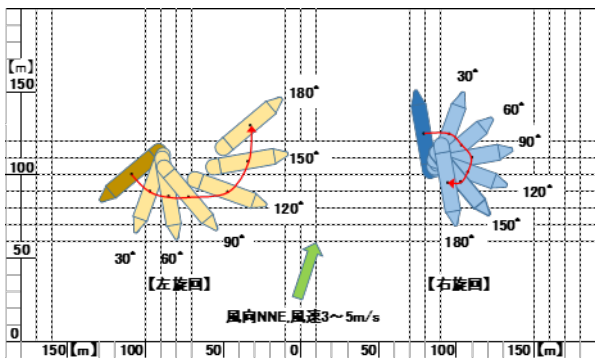
メインエンジン翼角 0° で、バウスラスタのみを Full に使用した旋回性能試験を行い、その結果、船首方向 30° 毎の移動経過時間及び移動距離については図一10、図一11、左右旋回試験結果図については図一12 のとおりである。



図一10 バウスラスタのみによる風上方向への右旋回試験(船速 0k't)結果



図一11 バウスラスタのみによる風下方向への左旋回試験(船速 0k't)結果



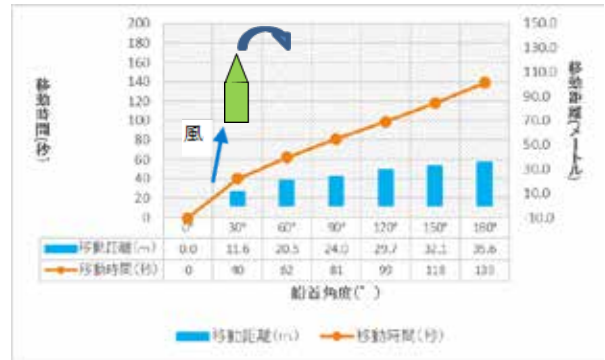
図一12 バウスラスタのみによる旋回試験結果図(船速 0k't 時)

試験結果の概要は風上方向への旋回移動距離は約 50m、風下方向への旋回移動距離は約 120m となり、旋回距離

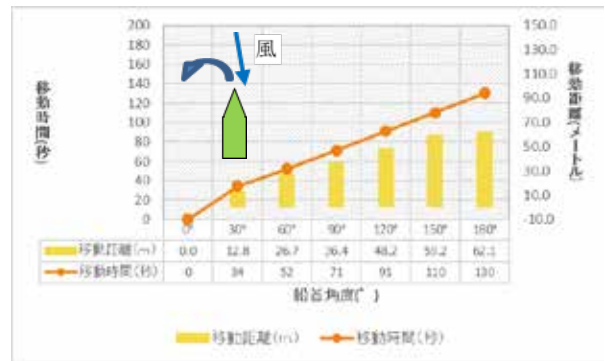
に差が現われたが、旋回時間はほぼ同じであった。いずれにしても風上への旋回距離が小さく小回りが効くことから旋回性能に優れている結果となった。

(b) バウ及びスタンスラスタによる旋回

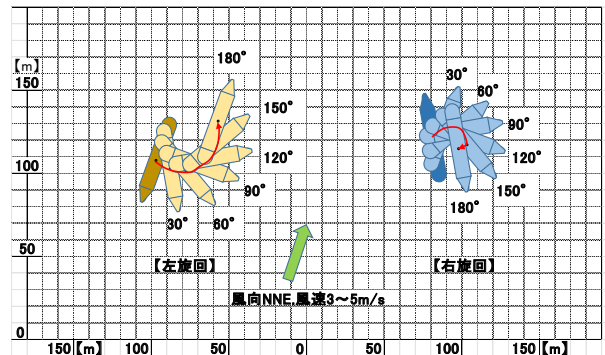
メインエンジン翼角 0° で、バウスラスタ及びスタンスラスタ両方を Full に使用した旋回性能試験を行い、その結果、船首方向 30° 毎の移動経過時間及び移動距離については図一13、図一14、左右旋回試験結果図については図一15 のとおりである。



図一13 バウ&スタンスラスタによる風上方向への右旋回試験(船速 0k't 時)結果

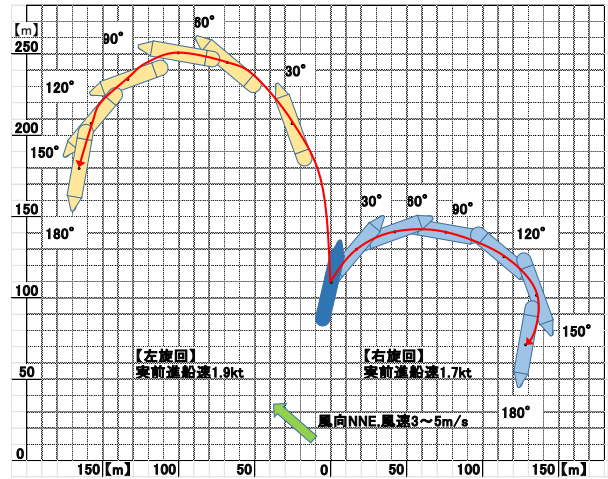


図一14 バウ&スタンスラスタによる風下方向への左旋回試験(船速 0k't 時)結果



図一15 バウ&スタンスラスタ両方による旋回試験結果図
(船速 0k't 時)

試験結果の概要は風上方向への旋回移動距離は約 18m、風下方向への旋回移動距離は約 40mとなり、前項 (a) 試験と同様に風上方向への旋回性能が優れており、また旋回移動距離はバウスラスタのみによる場合の 1/3、旋回時間は 2/3 であり、スタンスラスタ使用が旋回性能にも有効に作用することがわかる結果となった。



図一18 バウスラスタのみによる旋回試験結果図 (船速 2k't 時)

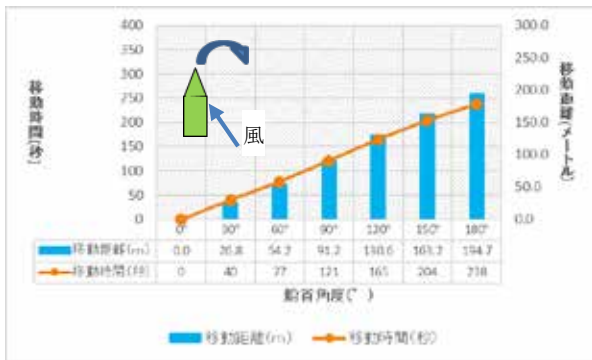
7. 4 船速 2k't 時における旋回性能試験

(a) バウスラスタ単独による旋回

メインエンジン翼角 3~4° で前進しながら、バウスラスタのみを Full に使用した旋回性能試験を行い、その結果、船首方向 30° 毎の移動経過時間及び移動距離については図一16、図一17、左右旋回試験結果図については図一18 のとおりである。

船速 2k't 時における試験結果の概要は風上方向への旋回移動距離は約 135m、風下方向への旋回移動距離は約 170mとなり、また旋回時間も含めて前項 7.3 試験と同様、風上方向への旋回性能が優れていることがわかった。

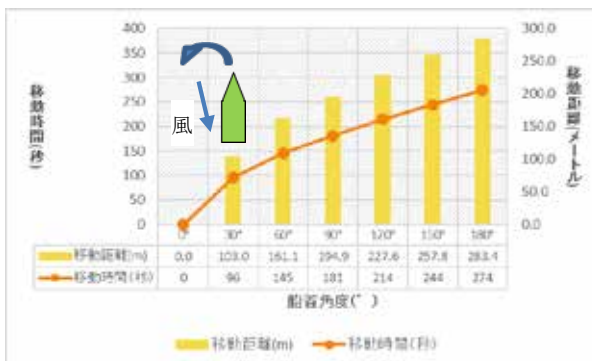
また船速 0k't 旋回と比較すると移動距離が約 1.4~2.7 倍、旋回時間が約 1.3~1.5 倍となり、旋回に必要なエリア、時間共に多く必要である結果となった。



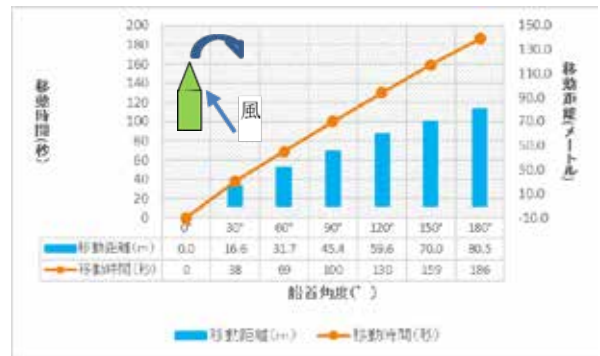
図一16 バウスラスタのみによる風上方向への右旋回試験(船速 2k't 時)結果

(b) バウ及びスタンスラスタによる旋回

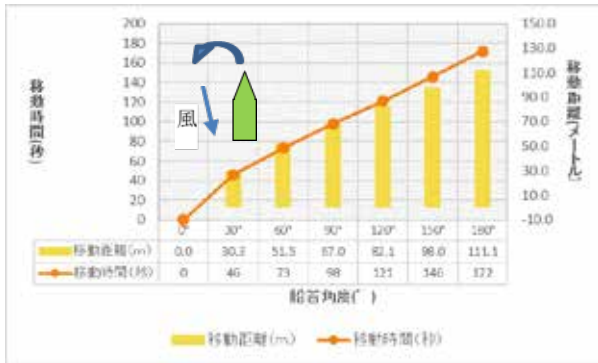
メインエンジン翼角 3~4° で、バウスラスタ及びスタンスラスタ両方を Full に使用した旋回性能試験を行い、その結果、船首方向 30° 毎の移動経過時間及び移動距離については図一19、図一20、左右旋回試験結果図については図一21 のとおりである。



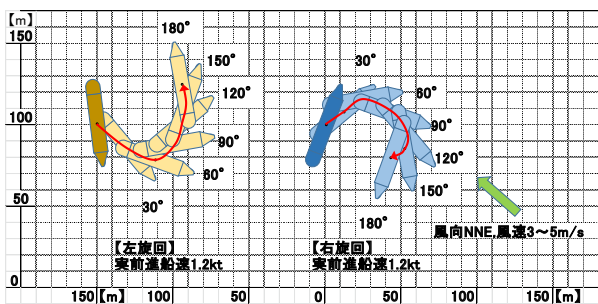
図一17 バウスラスタのみによる風下方向への左旋回試験(船速 2k't 時)結果



図一19 バウ&スタンスラスタによる風上方向への右旋回試験(船速 2k't 時)結果



図—20 バウ&スタンスラストによる風下方向への左旋回試験(船速 2k't 時)結果



図—21 バウ&スタンスラスト両方による旋回試験(船速 2k't 時)

試験結果の概要はバウスラストのみによる旋回移動距離の半分以下、また旋回時間は約3割以上短縮した結果となり、スタンスラスト使用が旋回性能にも有効に作用することが船速 2k't においても明らかな結果となった。

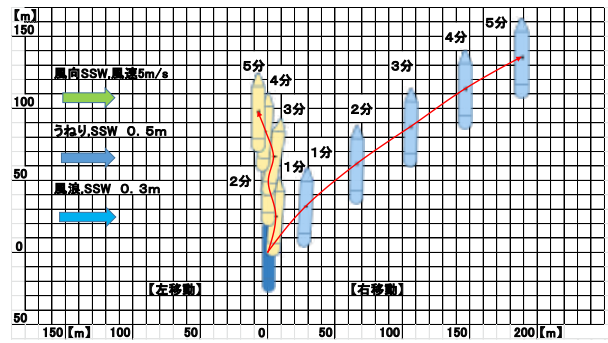
また船速 0k't 時のバウ及びスタンスラストを使用した旋回性能と比較すると、旋回距離が約2倍、旋回時間が約1.3倍となり、7.3 (b)項と同様、旋回に必要なエリア及び時間共に多く必要であることが判明した結果となった。

8. 港外における若潮丸の実証試験結果

8.1 船速 0k't 時における横移動性能試験

(a) バウスラスト 5~7°、スタンスラスト 10° (full)、船首方向キープ

港外においてスタンスラストを Full に使用し、バウスラストにて船首方向をキープさせながら、横移動させた試験結果については図—22 のとおりである。



図—22 港外におけるバウ Half、スタン Full による横移動(船速 0k't、船首キープ)試験

また試験時うねり及び風浪を9時方向から約0.5m及び0.3m受け、風も9時方向から5m/s左舷側から受けていたことから左舷側移動距離は少なく4分間で12m(移動速度 0.10k't)、右舷側移動距離は大きく162m(移動速度 1.31k't)となり、左右平均横移動速度は0.70k'tであった。

この試験結果から流圧抵抗におけるスタンスラストの推定推力は690kgとなり、公称推力の約46%の能力しか発揮していないこととなる。

また、この時の風速に対する風圧抵抗及びうねり、風浪に対する波漂流力の理論値は合計約850kgとなり、試験時の移動距離からの外力合計値は約1,000kgであり、理論値の約1.18倍という結果であった。

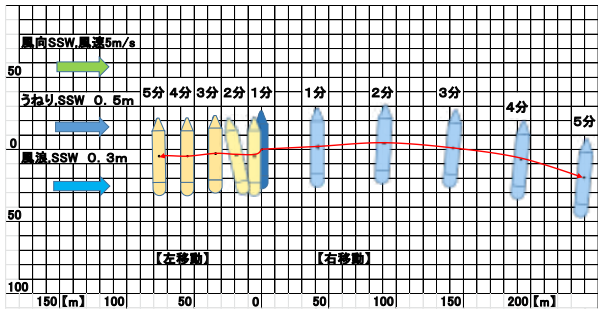
(b) バウ・スタンスラスト 10° (Full)、メインエンジン 3~5° 舵一杯(70°)、船首方向キープ

バウ・スタンスラスト共フルに使用し、スタンスラスト推力不足をメインエンジン、舵の利用で補い、船首方向をキープしながらの横移動試験結果については図—23 のとおりである。

また試験時は前項の試験時と同様に左舷側から風、うねり、風浪を受けていた影響があり、4分間で左舷側移動距離71m(移動速度 0.58k't)、右舷側移動距離208m(移動速度 1.68k't)となり、平均横移動速度は1.13k'tであった。

この試験結果から流圧抵抗におけるバウスラストの推定推力は1,790kgとなり、公称推力の約90%の能力を発揮していることとなる。

また、この時の風速に対する風圧抵抗及びうねり、風浪に対する波漂流力の外力理論値と移動距離に対する試験時外力はほぼ同じ850kgという結果であった。



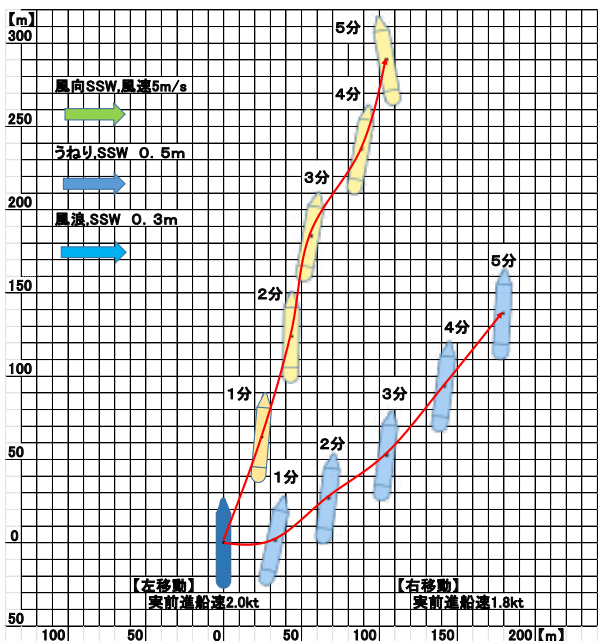
図—23 港外における両スラスト Full、メインエンジン・舵による横移動(船速 0k't、船首キープ)試験

8.2 船速 2k't 時における横移動性能試験

(a) バウスラスト 5~7°、スタンスラスト 10° (full)、船首方向キープ

港外においてメインエンジンの翼角 3~4° で前進しながら、スタンスラストを Full に使用し、バウスラストにて船首方向をキープし、横移動させた試験結果については図—24 のとおりである。

試験結果の概要は前進速度が約 2.0k't あることから 4 分間で風上方向への左側への横移動はせず、圧流の力のほうが大きく、右側への移動距離は約 80m(0.65k't)、風下方向への右側移動距離は約 156m(1.26k't)、左右平均速度は 0.31k't となり、前後方向 0k't 時に対して約 44% の横移動速度であり、横推力値は約 20%であった。



図—24 バウ Half、スタン Full による横移動(船速 2k't、船首キープ)試験

9. 実証実験のまとめ

若潮丸の実証実験については6~8項において記載してきたが、主な結果を取りまとめると以下のことが言える。

1. 両スラストの現推力値については、実証試験全体を通じてバウスラストが公称推力 2,000kg の 80~100%、スタンスラストは公称推力 1,500kg の 40~50% の実力値であった。

この原因として考えられるのは、スタンスラスト位置が水面下 1m と浅いことから充分推力が伝わらないこと、また船尾の抵抗が大きい形状が推定される。

2. 前進速度がある場合の横方向推力は 0kt の推力に対して 1.5kt で 40%、2.0kt で 20%位の値となる。
3. スラストの旋回性能について、バウスラストのみとバウ・スタン両スラスト使用の場合を比較すると、図—10~21 のデータより旋回距離については約 2 倍、旋回必要時間については約 1.4 倍バウ・スタン両スラスト使用のほうが優れ、船速 0k't 時と 2k't 時の旋回性能を比較すると、2k't 時の旋回距離は約 2.2 倍、旋回必要時間は約 1.4 倍となる。

また、風速 4m/s 時においても風下側は風上側の旋回距離の 1.6 倍、旋回時間はほぼ同じという結果となり、風上側への旋回が有利となる。

4. 風圧抵抗、流圧抵抗、波漂流力の理論計算式については、今回の実証実験結果全体からだけ言えば、理論計算は移動距離からの流圧抵抗値が風圧抵抗値の平均 60% の値となり、風圧計算値が大きく、流圧抵抗値が小さい。また波漂流力値も幅があるが計算値と実測値との差が平均 30% 程度小さいという結果であった。今後使用する各計算式の係数等の精度をより向上させたい。

5. 今回の実証試験を踏まえ、練習船若潮丸のサイドスラストの各要素における最大実力値は以下のようになると推定される。ただ主機及び舵を併用することにより、実力値はアップすることが可能である。なお、この各外力が一番条件の悪い船舶の真横方向からのものとした場合である。

- ① 風圧抵抗⇒風速 8m/s
- ② 流圧抵抗⇒流速 0.7k't

③ 波漂流力⇒波高 1.3m(波周波数約 5S)

10. 実船の状況

本項では実船舶のサイドスラスト等装備されている状況等を記述し、各船のサイドスラスト等の能力を比較したものは表—3 及び図—25 のとおりである。

なお、各船の能力比較については単純にサイドスラストの能力＝バウスラストの推力を代表値とし、比較1として(船長×船幅)比で割った数値、比較 2 として(船長×喫水)比で割った数値で比較したが、両方の数値共各船の能力に対してほぼ比例するものとなった。

一般的には、表—3 及び図—25 のとおり、外海等で定点保持もしくは微速で船をコントロールしなければならぬ特殊船が能力的に高く、続いて離着岸の多いフェリー、

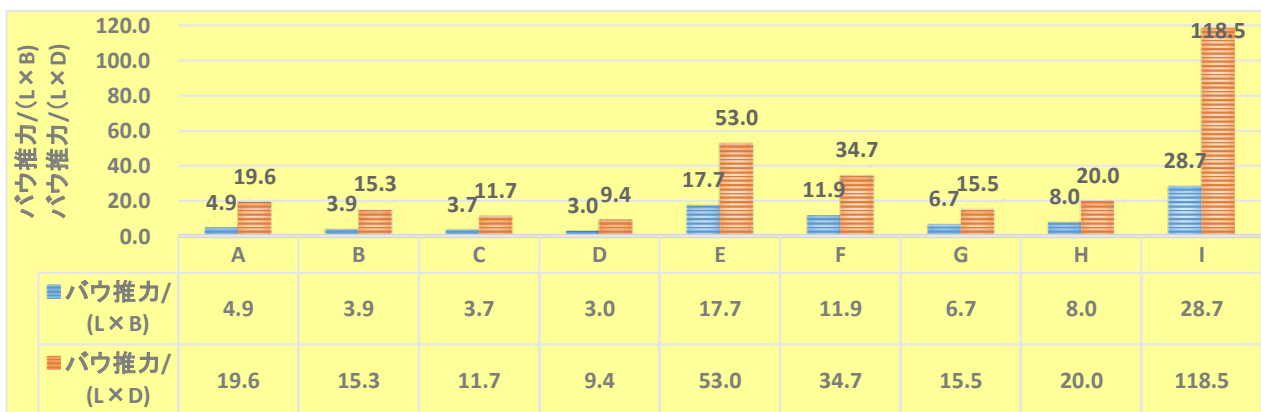
練習船の順となっている。

また船の種類における用途によって、能力要求が以下のように異なる。

- (a) 一般船舶においては、主に港内離着岸時の能力が要求されることから、風圧抵抗の対抗能力が要求される。フェリーにおいては概略風速 15m/s に耐えられるスラスト能力を要求されるのが一般的のようである。
- (b) 特殊船の場合は洋上における定点保持やルートキープの要求上、外乱としては主に海潮流や波浪といった流圧抵抗、波漂流力を優先させることが多いようである。ただ特殊船の操船能力要求条件は用途によって多様である。
- (c) またトンネルスラストの推力については、おおよそ推力 1 トン≒90PS≒66kw 程度であると推定される。

表—3 サイドスラストの能力比較

船種 船名	フェリー、客船		練習船		特殊船				
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
L(m)	183.0	241.0	53.6	50.0	124.0	128.6	87.6	86.1	210.0
B(m)	27.0	29.6	10.0	10.0	21.0	19.0	13.6	14.5	38.0
D(m)	6.7	7.5	3.2	3.2	7.0	6.5	5.9	5.8	9.2
L×B	4941	7134	536	500	2604	2443	1191	1248	7980
L×D	1226	1808	172	160	868	836	517	499	1932
主推進器 (kw)	CPP×1 14000×1	CPP×4 8200×4	CPP×1 956×1	CPP×1 1100×1	アジマス×2 2700×2	CPP×2 3680×2	CPP×1 3900×1	ノズルCPP×2 3680×2	アジマス×3 4200×3
バウスラスト (kw)	1,600	1,000	115	(1.5t)	1,190	760	460	650	4200×3
バウスラスト合計 推力(t)	24.0	27.6	2.0	1.5	46.0	29.0	8.0	10.0	229.0
スタンスラスト(kw)	AZ:1000×2 推進器補助		95	(1.2t)		760			
バウ推力/ (L×B)	4.9	3.9	3.7	3.0	17.7	11.9	6.7	8.0	28.7
バウ推力/ (L×D)	19.6	15.3	11.7	9.4	53.0	34.7	15.5	20.0	118.5



図—25 実船におけるサイドスラストの能力比較図

11. おわりに

以上、船舶の操船に影響する主な3要素である風圧抵抗、流圧抵抗及び波漂流力について述べ、加えて実際に稼動している船舶の実情を記述してきた。

また内容的には理論上の記述と若潮丸を使用しての実証実験について記述し、特に理論上ではあるが、各項目における船舶の主要目値からサイドスラストの使用可能な限界値の近似値を割り出す簡易計算式を提案し、船舶の形状等により違いはあるかもしれないが、操船をするにあたっての指標にしていただければ幸いである。

最後に本稿をまとめるにあたり種々教示いただいた方々に深く感謝をいたします。

(10) 社団法人日本海運集会所, 国土交通省海事局, 日本船舶明細書, 12、15-16、25、27、32、64(2009)

12. 引用文献

- (1) 日本船主責任相互保険組合, P&I ロスプリベンションガイド第25号走錨防止, 8、11(2013)
- (2) 日本船主責任相互保険組合, P&I ロスプリベンションガイド第32号港湾設備損傷防止と港内操船, 15-16(2014)
- (3) 藤重良二, 横井幸治, 川端一人, 佐々木正, 若潮丸IVのサイドスラスト実船実験について, (1997)
- (4) 竹沢誠二, 平山次清, 陳剛, セミサブの方向スペクトル波中に於ける長周期運動の簡易推定法, 1-3(1993)
- (5) 北原悠, 係留系強度モデルを用いたウインドウファームにおける浮体式風車の連鎖漂流事故リスク評価, 22-23(2010)
- (6) 原正一, 山川賢次, 星野邦弘, 桐谷伸夫, 谷澤克治, 上野道雄, 南真紀子, 大松重雄, 湯川和浩, 長谷川純, 航行不能船舶の漂流予測と曳航技術, 4-5(2003)
- (7) P.S.Renukaradhya, 長崎作治, 建造中の長方形浮遊構造物にかかる波漂流力, 1-2(1979)
- (8) 坪川毅彦, 阿部均, 小澤宏臣, 吉武正湛, 三井造船技報, No.186 地球深部探査船“地球”の船体部及び自動船位保持システムの全体性能, 1、5-6(2005)
- (9) 村田航, 永瀬悟, 田中清一, 小河原寛行, 野村嘉信, 五十嵐和之, 三井造船技報, No.186 地球深部探査船“ちきゅう”の自動船位保持装置の開発, 2-5(2005)

