

# 実海域における馬力増加推定法

正員 内 藤 林\*      正員 三 宅 成司郎\*\*

Estimation of Power Increase in Actual Seas

by Shigeru Naito, *Member*      Seijiro Miyake, *Member*

## Summary

An integrated performance of ships is evaluated by using all the performance information of resistance, propulsion, seakeeping, maneuvering and others. One of the evaluation indices is a power increase of ships in actual seas. In this report, detail estimation methods of the power increase by using model experiment data are shown, and the estimated results are presented. These methods include the resistance not only due to waves but also due to winds and weather helm. Based on the results of power increase, it is possible to get significant performance information on the ship as speed drop, ratio of power increase, increase of fuel consumption and cost increase of it. Discussions and proposals are performed to make more advance procedure on this subject.

## 1. 緒 言

「実海域を航行する船舶の馬力増加をどのように推定するか？」という議論が近頃盛んになり始めた背景は、顧客の船舶性能に関する認識が変化してきた事にある。このことは、平水中の推進性能だけでなく、実海域における船舶の総合的な性能を重視する動きが強まってきた現れで、今後この動きは弱まる事はない。それは、「船舶性能を運航実態に即して評価する」ことが可能になった計測・解析技術の進歩を背景としているからである。この馬力増加推定の問題は過去日本でも議論されてきて、第二回耐航性シンポジウム第4章「波浪中の馬力増加」<sup>1)</sup>に種々の結論的なことが明らかにされているが、その議論の到達点を明確にしておく必要がある。当然、過去の各種シンポジウムでこれらの点に関して取りまとめられているが、ページ数制限から詳細に記述されていない。この状況認識の上に立ち、推定法の代表的な方法の手順を示し、その長所、短所について述べる。また、実験データを用いた馬力増加推定例を示すとともに、応答関数や計算周波数範囲の扱い方などの馬力増加推定に考慮すべき点について述べる。

ここでの「馬力増加」とは、「平水中の船速を、実海域で維

\* 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻  
船舶海洋工学部門

\*\*テクノ遊

持するために必要な馬力増加」と言う意味である。このためには主機ハンドルノッチを変え、燃料を増加しなければならない。実海域を航行すると船速が低下するが、その低下した状況下での馬力変化量ではない。船速低下は、「平水中の船速と、その時の主機ハンドルノッチと同一状態における実海域の船速、との差」である。即ち、船速低下と馬力増加は密接に関係するが、違う。

これらの問題が複雑であるのは、波高、波周期、波の進行方向などが変化するだけでなく、実海域になった場合は、加えてスペクトラムの形とその方向分布関数に変数として加わるからである。海象状態を定量的に特定する事が難しい故に、馬力増加や船速低下の推定量を実船試験と比較して検討することになると難しいのである。実験精度が高く、高度に洗練された平水中抵抗自航試験結果と、過去の蓄積されたデータベースを使った平水中馬力推定法から見ると、波浪中実験は一桁精度が落ちるので、それらの事も推定法の優劣を最終的に明示する事ができない状況にしている。

## 2. 馬力増加と船速低下の関係

Fig. 1 に横軸を船速、縦軸に馬力を表した主機パワーカーブを示す。図中、船速  $V_2$  を維持した状態での①→②を示す量が馬力増加量である。この量を推定する事を「馬力増加の推定」と言う。一般的に、この量は主機特性の影響を受ける。

さて、これは模型実験や理論的な検討の時にはあり得る

ことであるが、実海域では主機上の作動点がこの様に動く事は殆どあり得ない。実際は船速低下するため、主機の作動点①から③に移動したり④に移動したりする。作動点③に移動した場合、それに対応する横軸量  $V_2-V_1$  が船速低下量である。この時、作動点●の求め方が問題になる。この作動点●を一意的に定めるには、馬力増加を求める時に「平水中の船速を維持する」という条件を指定したように、更に一つの条件が必要である。その条件が「主機特性」である。即ち、搭載主機特性によって作動点●は違うのである。図中「作動点③に、或いは④に移動する」は、主機特性の影響を受ける。④に作動点移動した時の  $\Delta$  を以って馬力増加の推定問題と誤解している場合がある。これは、船速低下した状況下における馬力推定の問題である。この問題の方が実際的であるが、議論されている馬力増加量の定義は違う。船速低下推定と馬力増加推定の問題が同時に議論される場合には、混同しない注意が必要である<sup>2)</sup>。

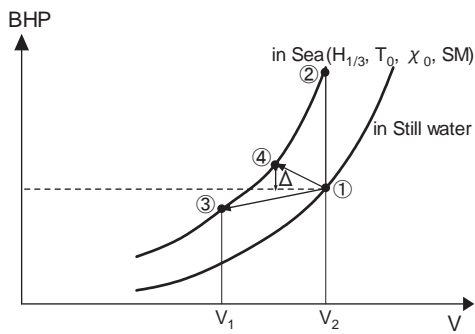


Fig.1 Explanation of power increase and speed loss on BHP-V diagram.

3. 実海域における馬力増加推定法

ここの議論を進めるに当たって、次のような記号の約束事を決めておく。 $\delta$ は平水中諸量からの増加量、 $\Delta$ は無次元化された増加量、上付きバーは時間的平均量、右下添え字  $0$  は平水中の諸量、 $w$ は波浪中を、 $sea$ は風圧抵抗等を考慮した実海域中を、右下添え字  $mod$  は模型船での値、右下添え字  $ship$  は実船での値、左下添え字  $m$  は表面摩擦修正  $SFC$  (Skin Friction Corection) 無しの実験値、左下添え字  $s$  は  $SFC$  付きの実験値、 $P, R, T, Q, N$  はそれぞれ馬力、抵抗、推力、トルク、回転数、 $\omega$ は角周波数、 $S(\omega)$ は波スペクトラム、 $\gamma$ はスケール比 ( $L_{ship}/L_{model}$ ) を表す。これらを纏めて、 $x\delta Ay, z$  という記号にて示す。但し、この記号を付記しなくても意味を違えることがない場合は省略する事がある。

各量の無次元化は、波振幅を  $\zeta_a$ 、船長を  $L$ 、船幅を  $B$ 、プロペラ直径を  $D$ 、船速を  $V$  とすると、次式で表される。

$$\Delta R(\omega) = \delta R(\omega) / \rho g \zeta_a^2 (B^2/L) \quad , \quad \Delta T(\omega) = \delta T(\omega) / \rho g \zeta_a^2 (B^2/L)$$

$$\Delta Q(\omega) = \delta Q(\omega) / \rho g \zeta_a^2 (B^2/L) \cdot D \quad , \quad \Delta N(\omega) = \delta N(\omega) / (g \zeta_a^2 (B^2/L) / VD^3)$$

さて、馬力増加推定法は種々な方法が提案されている<sup>3)</sup>が、主な推定法は、(1)直接馬力法：Direct Power Method (DPM)、(2)トルク・回転数法：Torque and Revolution Number Method (QNM)、(3)推力・回転数法：Thrust and Revolution Number Method (TNM)、(4)推力一致法：Thrust Identity Method (TIM)、(5)過負荷試験法：Over Load Test Method (OLTM)、の5種類である。著者らは、後述の理由により(4)の名称はResistance/Thrust Identity Methodの方が良いと考えており、以後、抵抗/推力一致法 (RTIM) と略称する。

なお、波浪中模型実験で使用される入射波高は、船長/50の値がITTCの推奨値である。船長4mの模型船では、波高8cmである。以下、各推定法における推定手順の要点や検討事項を述べるが、下線部が実験時に求める量を表す。なお、(5)のOLTMによる推定手順は、4.2にて述べる。

3.1 直接馬力法(DPM)

実施される模型実験と解析は、以下のとおりである。

- 1) ある速度  $V$  で平水中の SFC 無しの自航試験を実施して、トルク  $mQ_0$ 、回転数  $mN_0$  を求める。
- 2) 規則波中の自航試験 (速度  $V$ ) を実施して、トルク、回転数増加の周波数特性 ( $m\delta Q(\omega)_w, m\delta N(\omega)_w$ ) を求める。
- 3) 馬力増加の周波数特性  $m\delta P(\omega)_{mod}$  を次式にて求める。

$$m\delta P(\omega)_{mod} = \frac{2\pi}{75} \{ (mQ_0 + m\delta Q(\omega)_w)(mN_0 + m\delta N(\omega)_w) - mQ_0 \cdot mN_0 \} \quad (1)$$

- 4) 与えられた不規則波スペクトラム  $S(\omega)_{mod}$  を使い、平均馬力増加  $m\overline{\delta P}_{mod}$  を下記計算により求める。

$$m\overline{\delta P}_{mod} = 2 \int_0^\infty \frac{m\delta P(\omega)_{mod}}{\zeta_a^2} \cdot S(\omega)_{mod} d\omega \quad (2)$$

- 5) 求められた値を下記計算によりスケールアップする。これを、3.5乗則と言う事にする。

$$m\overline{\delta P}_{ship} = (\gamma)^{3.5} m\overline{\delta P}_{mod} \quad (3)$$

この方法は、自航要素などの情報は不要な上、自航試験時のプロペラもストックプロペラを使うことができる。問題は、(2)式で、馬力増加が波高の二乗に比例する事を仮定している事である。この事は、後述されている。

1)の段階で、 $SFC$ を施して平水中自航試験を実施する事が考えられる。 $SFC$ 付き自航試験で計測されたトルク、回転数を  $sQ_0, sN_0$  とし、 $SFC$ 無しとの差を  $\Delta q_0, \Delta n_0$  (これらの量は正值) とすると、

$$mQ_0 = sQ_0 + \Delta q_0 \quad , \quad mN_0 = sN_0 + \Delta n_0 \quad (4)$$

となる。すると、(1)式、(2)式、(3)式の結果とそれぞれ、次式に

示すだけの相違がでる。

$$\delta\delta P(\omega)_{mod} = \frac{2\pi}{75} (\Delta n_{0,m} \delta Q(\omega)_w + \Delta q_{0,m} \delta N(\omega)_w), \quad (5)$$

$$\overline{\delta\delta P}_{mod} = 2 \int_0^{\infty} \frac{\delta\delta P(\omega)_{mod}}{\zeta_a^2} \cdot S(\omega) d\omega, \quad (6)$$

$$\overline{\delta\delta P}_{ship} = (\gamma)^{3.5} \overline{\delta\delta P}_{mod} \quad (7)$$

なお、直接馬力法 (DPM) は容易な手順で計測・解析することとして、SFC 無しの自航試験を基本としている。

### 3.2 トルク・回転数法(QNM)

実施される模型実験と解析は、次のとおりである。

- 1) ある速度  $V$  で平水中の SFC 付きの自航試験を実施して、トルク  $sQ_0$ 、回転数  $sN_0$  を求める。
- 2) 規則波中の自航試験 (速度  $V$ ) を実施して、トルク増加、回転数増加の周波数特性 ( $s\delta Q(\omega)_w, s\delta N(\omega)_w$ ) を求める。
- 3) 与えられた不規則波中における平均トルク増加 ( $s\overline{\delta Q}_{mod}$ ) と平均回転数増加 ( $s\overline{\delta N}_{mod}$ ) を、次式により求める。

$$\left. \begin{aligned} s\overline{\delta Q}_{mod} &= 2 \int_0^{\infty} \frac{s\delta Q(\omega)_w}{\zeta_a^2} \cdot S(\omega)_{mod} d\omega \\ s\overline{\delta N}_{mod} &= 2 \int_0^{\infty} \frac{s\delta N(\omega)_w}{\zeta_a^2} \cdot S(\omega)_{mod} d\omega \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

- 4) 不規則波中の平均馬力増加  $s\overline{\delta P}_{mod}$  を、次式で求める。

$$s\overline{\delta P}_{mod} = \frac{2\pi}{75} \left\{ (s\overline{\delta Q}_{mod} + s\overline{\delta N}_{mod}) \cdot sQ_0 \cdot sN_0 \right\} \quad (9)$$

- 5) その値を 3.5 乗則によりスケールアップする。

$$s\overline{\delta P}_{ship} = (\gamma)^{3.5} s\overline{\delta P}_{mod} \quad (10)$$

この方法も、自航試験を実施するだけで良い。直接馬力法 (DPM) と違って、SFC の量を必要とする。この方法は、トルクも回転数も同時に波高の二乗に比例する事を仮定している。(9)式を波振幅の二乗で割ると、

$$\frac{s\overline{\delta P}_{mod}}{\zeta_a^2} = \frac{2\pi}{75} \left( sN_0 \frac{s\overline{\delta Q}_{mod}}{\zeta_a^2} + sQ_0 \frac{s\overline{\delta N}_{mod}}{\zeta_a^2} - \frac{s\overline{\delta Q}_{mod}}{\zeta_a^2} \cdot \frac{s\overline{\delta N}_{mod}}{\zeta_a^2} \times \zeta_a^2 \right) \quad (11)$$

となり、右辺第三項、 $\overline{\delta P}, \overline{\delta Q}, \overline{\delta N}$  の三量同時に波振幅の二乗に比例する仮定は成立しない<sup>1)</sup>。仮に(8)式で示された両式を認めると、DPM の(2)式で示された式とは矛盾する。即ち、DPM と QNM は、それぞれ違った量を波高の二乗に比例するという論理的矛盾を持っており、並立しない考えである。しかし、Murdey は、両推定法の差は小さい (5% を超えない) と言っている。更に、彼はトルク ( $Q$ ) と回転数 ( $N$ ) の計測を基にした方法 (QNM) は、複雑な船尾流場の影響が計測量  $Q, N$  に反映するものであると言う理由で評価している<sup>3)</sup>。

### 3.3 推力・回転数法(TNM)

実施される模型実験と解析は、次のとおりである。

- 1) ある速度  $V$  で平水中の SFC 付きの自航試験を実施して、推力  $sT_{0,mod}$ 、 $sN_{0,mod}$  を求める。この結果とプロペラオープン特性を使い、伴流係数  $1-w$  と  $\eta_{r0} = K_{Q0}/K_{QB}$  を求める。
- 2) 規則波中の自航試験 (速度  $V$ ) を実施して、推力増加の周波数特性 ( $s\delta T(\omega)_{mod}$ ) と回転数増加 ( $s\delta N(\omega)_{mod}$ ) の周波数特性を求める。
- 3) 与えられた不規則波中における平均推力増加 ( $s\overline{\delta T}_{mod}$ ) を、次式により求める。回転数増加も、同様に求める。

$$s\overline{\delta T}_{mod} = 2 \int_0^{\infty} \frac{s\delta T(\omega)_{mod}}{\zeta_a^2} \cdot S(\omega)_{mod} d\omega \quad (12)$$

- 4) この時の不規則波中の平均推力 ( $s\overline{T}_{w,mod}$ ) を求める。

$$s\overline{T}_{w,mod} = sT_{0,mod} + s\overline{\delta T}_{mod} \quad (13)$$

同様に、平均回転数 ( $s\overline{N}_{w,mod}$ ) を求める。

- 5) プロペラオープン特性を使い、以下の各ステップの計算を行う。下に示した計算ステップとプロペラオープン特性上の対応を、Fig.2 中に番号①～④で示す。この計算の⑤のステップ時における  $V, N, D$  などは実船の値を使う。

$$\begin{aligned} s\overline{T}_{w,mod}, s\overline{N}_{w,mod} &\xrightarrow{\text{①}} K_T = \frac{s\overline{T}_{w,mod}}{\rho \cdot s\overline{N}_{w,mod}^2 \cdot D^4} \xrightarrow{\text{②}} J = \frac{N \cdot D}{V_a} \\ &\xrightarrow{\text{③,④}} K_p = \frac{K_{Q0}}{J^3} = \frac{K_{QB} \cdot \eta_{r0}}{J^3} \xrightarrow{\text{⑤}} \\ \overline{P}_{w,ship} &= \frac{2\pi}{75} N_{ship} \cdot Q_{ship} = \frac{2\pi}{75} \rho D_{ship}^2 V_{ship}^3 (1-w)^3 \cdot K_p \quad (14) \end{aligned}$$

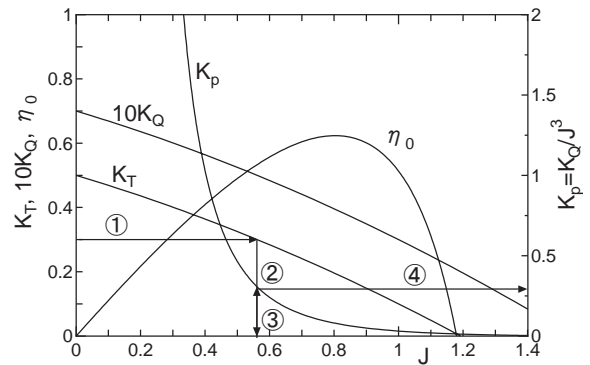


Fig.2 Propeller open characteristics and Kp curve.

- 6) 平水中の推力 ( $sT_{0,mod}$ ) と回転数 ( $sN_{0,mod}$ ) を用いて、ステップ 5) と同じ手順で平水中の馬力 ( $\overline{P}_{0,ship}$ ) を計算した後、次式にて馬力増加を求める。

$$\overline{\delta P}_{w,ship} = \overline{P}_{w,ship} - \overline{P}_{0,ship} \quad (15)$$

この方法も自航試験を実施するだけで良いが、自航試験に使用するプロペラオープン特性を知っておく必要がある。この時、「波浪中のプロペラの時間平均的特性は、平水中の特性と同じである。」と仮定することになる。

3.4 抵抗/推力一致法(RTIM)

実施される模型実験と解析は、次のとおりである。

- 1) ある速度  $V$  で平水中抵抗試験を実施して、抵抗  $R_{0,mod}$  を求める。同様に、自航試験 (速度  $V$ ) を実施して、プロペラオープン特性より  $1-w_0, 1-t_0, \eta_{t0}$  等の自航要素を求める。この場合のプロペラは、自航要素を求めるだけに必要なためストックプロペラでも良い。
- 2) 規則波中の抵抗増加実験 (速度  $V$ ) を実施して、抵抗増加の周波数特性 ( $\delta R(\omega)_{w,mod}$ ) を求め、無次元化量  $\Delta R(\omega)$  を計算する。
- 3) 与えられた不規則波中における実船の平均抵抗増加  $\overline{\delta R}_{w,ship}$  を下記計算により求める。

$$\overline{\delta R}_{w,ship} = 2 \int_0^{\infty} \frac{\delta R(\omega)_{w,ship}}{\zeta_a^2} \cdot S(\omega)_{ship} d\omega \quad (16)$$

この時、 $\delta R(\omega)_{w,ship} / \zeta_a^2 = \rho_s g (B_s^2 / L_s) \cdot \Delta R(\omega)$  を使う。サフィックス  $s$  は、実船の値である。

- 4) 更に、風圧抵抗 ( $\overline{\delta R}_{wind,ship}$ )、当舵抵抗 ( $\overline{\delta R}_{helm,ship}$ ) 等を考慮する場合は、次式で実海域の平均抵抗増加を求める。

$$\overline{\delta R}_{sea,ship} = \overline{\delta R}_{w,ship} + \overline{\delta R}_{wind,ship} + \overline{\delta R}_{helm,ship} + \dots \quad (17)$$

このように必要な抵抗増加量を加算することで、RTIM は実海域の各種影響を合理的に取り込むことができる。

- 5) これらの結果とプロペラオープン特性を使って、次に矢印で示す計算を行う。

$$\begin{aligned} \overline{R}_{sea,ship} &= R_{0,ship} + \overline{\delta R}_{sea,ship} \\ \overline{R}_{sea,ship} / (1-t_0) &\rightarrow T \\ \rightarrow K_T / J^2 = T / \rho D^2 V^2 (1-w_0)^2 &\rightarrow K_p \\ \rightarrow \overline{P}_{w,ship} = \frac{2\pi}{75} \rho D_{ship}^2 V_{ship}^3 (1-w_0)^3 \cdot K_p &\quad (18) \end{aligned}$$

$\eta_t$   
 $\downarrow$   
 $J, \eta_0 \rightarrow DHP, N$

上記では、3)の過程で実船換算したが、5)の過程までは模型レベルで値を求め、プロペラオープン特性利用時に実船の値を使って実船換算しても良い。この方法は、抵抗、自航試験を実施する必要がある。あらかじめ、 $K_T/J^2$  と  $K_Q/J^3$  を求めておくに便利である。

このように、馬力増加算定には  $TNM$  も  $RTIM$  もプロペラオープン特性を使うのは同じであるが、 $TNM$  は推力と回転数を使うために自航要素が不要であるのに対し (計算過程で自動的に求められる)、 $RTIM$  は抵抗増加を使うために自航要素が必要になる。これが、両方法の大きな違いである。

3.5 与えられた不規則波中における自航試験

指定された不規則波中における自航試験を実施する方法もあり、それは指定不規則波中における平均増加量 ( $\overline{\delta Q}_{mod}$ 、 $\overline{\delta N}_{mod}$ ) を求める方法である。 $DPM(2)$ 式、 $QNM(9)$ 式に相当す

る平均馬力増加量、 $\overline{\delta P}_{mod}$  を直接求める手法で、与えられた不規則波中における性能の優劣を議論するだけになる。

これは、平山の「評価海象」<sup>4)</sup>を設定して性能の優劣を判定する考え方と同じである。多くの変数を有する実海域推進性能を、ある評価海象下で評価するという考えは当面の実海域性能を評価する課題の一つの解決策と考えられる。この時与えた不規則波を、どの量が同一であれば同一の不規則と認定するかの議論が重要になる。

3.6 推定法の検討

3.6.1 波高の二乗に比例する量は何か

これまでの議論で、各々の推定法にとってどの量が波高の二乗に比例すると仮定しているか、が重要である事が解る。抵抗増加が波高の二乗に比例する事は理論的な根拠<sup>5)</sup>を持つから、不規則波中の平均抵抗増加量  $\overline{\delta R}_w$  を算出する(16)式は、(2)、(8)、(12)式に比べて確かな根拠を有する。このことは、不規則波中の二次の増加量を求める場合には、本質的に重要な事である。すなわち、海象が変化した場合を考えると、これは(2)、(8)、(12)、(16)の各式中の  $S(\omega)$  を変化させることに相当するが、どの式も波高の二乗に比例することを前提にしているからである。

3.6.2 波浪中における自航要素

直接馬力法 ( $DPM$ )、トルク・回転数法 ( $QNM$ )、推力・回転数法 ( $TNM$ ) は規則波中で計測された各種増加量を基にして馬力増加を推定するのに対し、抵抗/推力一致法 ( $RTIM$ ) は計測された抵抗増加を基にしている。故に、自航要素を介在させて馬力増加を求める。 $RTIM$  は抵抗試験と自航試験を実施するところが他の方法との相違である。このように見て他の方法の名前と比較すると、従来言われてきた推力一致法は抵抗/推力一致法と言う方が理解しやすい。

$RTIM$  は合理的であるが、難点は波浪中の自航要素を使う点にある。波浪中の自航要素は、平水中と同じでないからである。特に海象状態が厳しくなると、船尾流場が動的な影響を受けて静的な船尾流場と大きく違ってくる。推進効率の立場から見ると、特にプロペラ荷重の増加に伴うプロペラ効率の低下と、伴流係数の低下が影響として現れてくる。

平水中と同一船速で抵抗が増えたら波浪中の抵抗増加が生じるとプロペラ荷重が増加し、プロペラ単独効率が低下する。逆に、船体運動、特に縦揺れが大きくなると伴流係数の低下につながり、荷重量が減少する。このように船速を維持した実験において、抵抗増加と船体運動はプロペラ荷重量に対しては反対の働きをする。これらの事が、運動周波数、運動振幅、運動と波との位相差によって様々に変化する。波浪中における自航要素が、平水中とどのように違うかがはっきりする研究成果が出てくれば  $RTIM$  が一番論理的であるが、自航要素に関して精度を持った結論を得ること

は現下の研究段階では難しい。

今までの研究結果を概観すると、「激しい波浪状況では自航要素は変わるが、穏やかな波浪状況下ではほぼ同じである」と考えるのが妥当である<sup>6)</sup>。その境を決めるのは難しいが、プロペラ露出の有無が境目の一つと考え、「プロペラチップの露出確率がA%である範囲内ならば、平水中の自航要素を利用できる」と、Aを指定できれば明確になる。

3.6.3 波浪中におけるプロペラオープン特性

RTIMでの馬力増加推定には、プロペラオープン特性を使用する。この特性が波浪中で変わるとこの方法が成り立たなくなるが、McCarthy<sup>7)</sup>, Ilyin<sup>8)</sup>, 中村<sup>9)</sup>らの研究に拠ると「激しい波浪状況でなければ、時間平均的には平水中で得られたプロペラオープン特性と同じである。」と結論している。

4. 荷重量変更試験結果を用いる推定法について

4.1 過負荷試験法(OLTM)

自航要素の検討のために荷重量変更試験が実施される。波浪中の自航要素は、時間平均的抵抗増加量を平水中自航試験時に過負荷として与えた「擬波浪中」で近似できるという考えである。

ただし、この考えには自航要素への波浪と運動の影響が含まれないため厳密には正しくない。しかし、このような前提の基ではあるが、あらかじめ抵抗増加量を推定しておけば平水中の荷重量変更試験データだけから馬力増加を推定できる。以下、過負荷試験法(OLTM)の推定手順を示す。

4.2 推定手順

OLTMにおいて実施される模型実験と解析は、以下のとおりである。

- 1) ある速度Vで平水中のSFC無しの自航試験を実施して、トルク  $mQ_0$ 、回転数  $mN_0$  を求める。この自航点を荷重と、トルクと回転数の増分関係の原点と考える。
- 2) 荷重量を変えて、自航試験(過負荷試験; 速度V)を行う。過負荷試験で得られた結果のトルクと回転数を、横軸が荷重(Load(Newton))のグラフにプロットする。
- 3) 与えられた実海域における抵抗増加( $\overline{\delta R_{cal}}$ )を計算にて推定する。
- 4) その抵抗増加を過負荷と考えて、その過負荷におけるトルクと回転数の増分 $\delta Q$ 、 $\delta N$ を2)の実験結果より求める。
- 5) 次式により、平均馬力増加 $m\overline{\delta P_{mod}}$ を求める。

$$m\overline{\delta P_{mod}} = \frac{2\pi}{75} (mN_0 \cdot \delta Q + mQ_0 \cdot \delta N + \delta Q \cdot \delta N) \quad (19)$$

- 6) これを3.5乗則でスケールアップし、実船の馬力増加量を求める。

Fig.7に、荷重量変更試験データから馬力増加を求める流れを示す。ここでのトルク(●)と回転数データ(×)はSFC付きとSFC無しで行った自航試験データを使って作成した模擬データである。抵抗増加量( $\overline{\delta R_{cal}}$ )より $\delta Q$ と $\delta N$ が求まるので、 $mQ_0$ と $mN_0$ とともに(19)式に代入すれば馬力増加が算出できる。

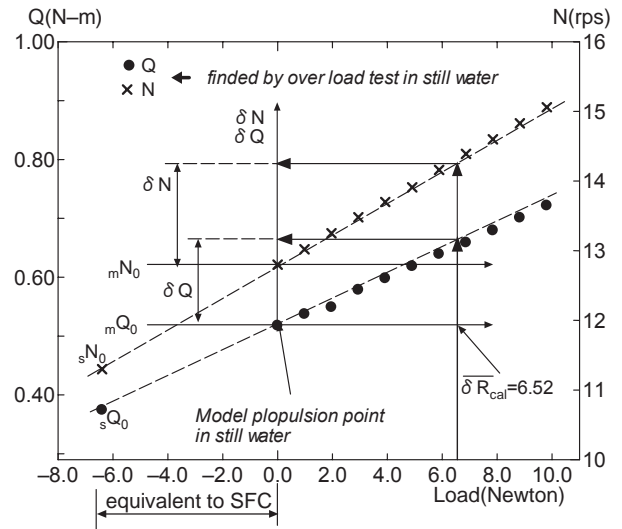


Fig.7 An example of the procedure by over load test.

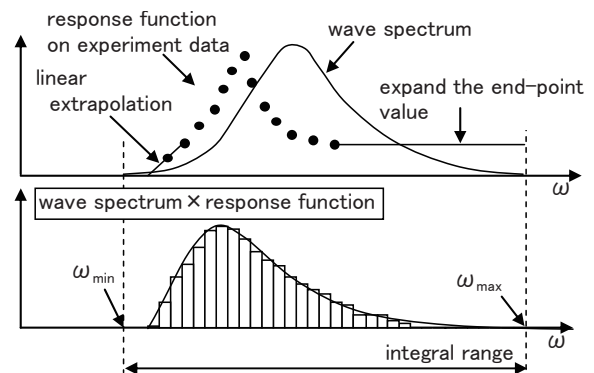


Fig.8 Treatment of response function on experiment data.

5. 規則波中抵抗増加の応答関数の処理方法

5.1 規則波中応答関数の基本的な扱い方

OLTMを除く4種類の手法は、馬力増加推定の段階で規則波中応答関数と波スペクトラムを掛け合わせた後に(2)、(8)、(12)および(16)式により $\omega_{min} \sim \omega_{max}$ の範囲で積分する。実験可能な周波数範囲は限られているので、応答関数は波スペクトラムの周波数範囲に比べて狭い範囲にしか実験値が存在しない。そこで、応答関数の端部処理を行うことになるが、この処理は重要である。ここでは比較的多く用いられる次の方法を採用した。すなわち、Fig.8に示すように低周波側の端点は、いずれの応答関数も直線外挿によってゼロに漸近させ周波数( $\omega_{min}$ )を決める。一方、高周波側は応答値がゼロ

には漸近しないので、実験を行った最大周波数での値がそのまま  $\omega_{max}$  まで継続することを基本とした。各手法の馬力増加推定手順に従い、こうして設定された積分範囲にて波スペクトラムと各応答関数を掛け合わせる。なお、抵抗増加の応答関数はトルク増加や回転数増加の応答関数と違い理論値を用いることで、後述する処理を行うことができる。

5.2 短波長域の抵抗増加推定と便宜的な端部処理

5.2.1 短波長域の抵抗増加推定式

トルク増加、推力増加および回転数増加は計算で求める理論がないため、実験または別の方法で取得するしかない。抵抗増加については短波長領域を含めて確立された理論式が存在するので、抵抗/推力一致法 (RTIM) の場合は理論値を用いることが可能である。ここでは、5.1 で示した端部処理のうちの高周波側の処理に理論値を使う。理論式と組み合わせることで、不明であった高周波側の値が明確になり、合理的な根拠を有した精度の良い馬力増加推定が可能となる。短波長域抵抗増加推定式として、SR243 研究部会にて提案<sup>10)</sup>された次式を用いる。これは、速度修正項、喫水修正項を含んだ藤井・高橋<sup>11)</sup>の式を、速度修正項は Faltinsen<sup>12)</sup>の式にて、喫水修正項は多数の実験結果を  $d/B$  で整理した式にて、それぞれ置き換えた式である。

$$\sigma_{AW}(\omega) = \left(1 + \frac{2 \cdot \omega \cdot V}{g}\right) \cdot f\left(\frac{d}{B}\right) \cdot \overline{\sin^2 \beta} \quad (20)$$

ここで、 $d$ : 喫水、 $g$ : 重力加速度、 $B$ : 船幅、 $\omega$ : 波周波数、 $V$ : 船速、 $\overline{\sin^2 \beta}$ : ブラントネス係数、である。

この式は船首部における波の反射によって生じる抵抗増加を表現したものであり、簡単な船型情報から短波長域の抵抗増加を推定できる。船舶が大型化するにつれて、この領域における抵抗増加推定がますます重要となる。

5.2.2 エントランス長さ ( $L_E$ ) を用いた端部処理

(20)式を用いると、短波長域の抵抗増加を求めることができるが、その値は  $\lambda/L$  が小さく ( $\omega$  が大きく) なれば極端に大きくなる。この場合、(20)式がどこまでの波長に対して有効であるかが問題となる。この問題は、未解決である。一つの対策として、エントランス長さ ( $L_E$ ) を用いて計算範囲を決めることとした。

向波状態を考えると、反射抵抗は船体平行部では生じない。そこで、 $L_E$  を一つの目安と考え、 $\lambda/L$  が  $L_E/L$  と等しくなるまでの抵抗増加量を(20)式で求め、その結果を妥当な値とした。すなわち、それより短い波長では砕波等の別な条件を考慮する必要があり、(20)式は単純には適用できない。

Fig.9 は、抵抗増加データに関する端部処理を示すものである。図中の○印は実験点を示しているが、 $\lambda/L=0.5$  ( $\omega \approx 0.55$ ) までしか値がない。そのため、 $\omega_{max}$  が  $\lambda/L=0.5$  よりもさ

らに右側にある場合は、次の三つの便宜的な方法を用いる。  
 ①最も短波長での実験値 (本論の場合は、 $\lambda/L=0.5$  の値) を継続して用いる。  
 ② (20)式によって推定した抵抗増加量を用いる。×印で表し、 $\lambda/L=0.1$  ( $\omega \approx 12.41$ ) まで計算しているが、波長が短くなる ( $\omega$  が大きくなる) に従い大きくなる。  
 ③+印は  $L_E/L$  により推定範囲を設定した場合で、この船では推定の下限が  $\lambda/L=0.3$  ( $\omega \approx 7.17$ ) である。①の場合と③の場合を比べると、Fig.9 下図の一点鎖線の差がある。①の方法は、最も短波長域での実験値が重要で、その値が過重視される傾向になる。

Fig.10 は、波スペクトラムと抵抗増加の応答関数を掛け合わせた応答スペクトラムを上述の  $L_E$  による処理をした場合としない場合と比較したものである。平均波周期 ( $T_0$ ) 別に示すが、短周期の波スペクトラムは高周波側にエネルギーを持つために端部処理の差が大きい。特に  $T_0=0.8$  秒における両者の差が顕著であり、これは無視できない。

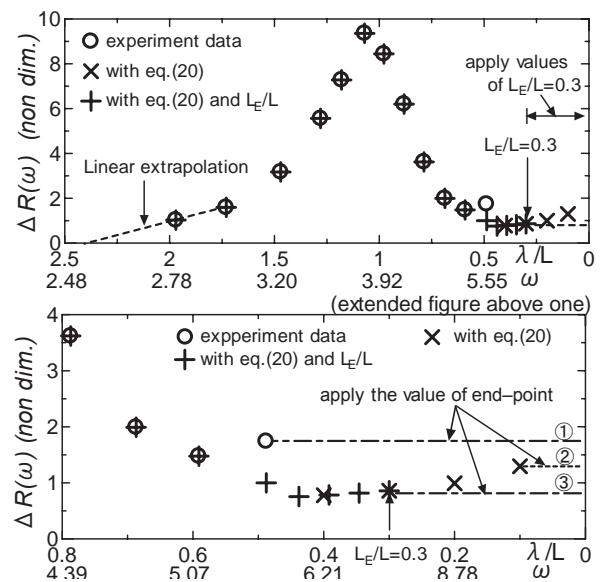


Fig.9 Added resistance in short wave length (head sea).

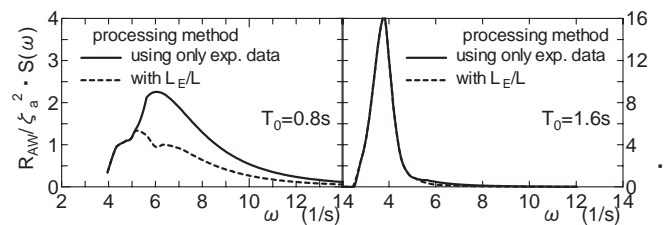


Fig.10 Comparison with response spectrum of added resistance in head sea condition (model scale).

6. 馬力増加の推定例

6.1 供試船のデータ

Tbale.1 は、試算に用いたコンテナ船 (模型ベース) お

よびタンカー（実船ベース）の主要目を示す。この他に必要な情報として、プロペラ特性、トルク、回転数、スラストおよび抵抗増加の応答関数、計算対象とする海象・気象データ（有義波高（ $H_{1/3}$ ）、平均波周期（ $T_0$ ）、風速、風向）がある。なお、用いた波スペクトラムは、ISSC(1964)で提案された次式である。

$$S(\omega) = 0.11 \cdot H_{1/3}^2 \cdot \frac{T_0}{2\pi} \left( \frac{\omega \cdot T_0}{2\pi} \right)^{-5} \exp \left\{ -0.44 \cdot \left( \frac{\omega \cdot T_0}{2\pi} \right)^4 \right\} \quad (21)$$

また、本論では正面向波中実験データを用いて、長波頂不規則波中の馬力増加を推定する。コンテナ船の模型実験データは、著者の一人が過去に発表した論文に記載されている結果を利用した<sup>13)</sup>。タンカー船の諸データについてはSR208 研究部会<sup>14)</sup>において提示された値を用いた。また、タンカー船の抵抗増加応答関数データは、SR208 研究部会で実施された推定結果を実験データとして代用した。

Table.1 Principal dimensions.

Item	Container (model)	Tanker (ship)
Length (m)	4.0	320.0
Breadth (m)	0.585	53.3
Propeller Diameter (m)	0.15	9.3
Entrance Length (m)	1.20	60.0
Scale	43.75	1.0
Froude no.	0.25	0.129
1-t	0.824	0.805
1-w	0.713	0.568
Resistance in still water (kg)	1.78	$1.46 \times 10^5$
Torque in still water (kg-m)	0.0528	—
RPM in still water (rps)	12.8	—
Ahead wind resistance coefficient	—	1.1
Ahead projected area above waterline (m <sup>2</sup> )	—	940.0

## 6.2 馬力増加の試算例

### 6.2.1 短波長域の実験不足の補正

Fig.11 は、各推定法によりコンテナ船の馬力増加を推定した例（平均波周期の影響）である。抵抗/推力一致法（RTIM）については、短波長域の実験値不足を Fig.9 で示した三つの方法で補正した結果を示す。すなわち、①実験点のみを用いて推定した結果を×印、②(20)式を使った場合を+印、③ $L_E/L$  で処理した場合が□印である。この図により、波周期の短い（短波長）領域で差が顕著であり、この船の場合は実験点だけを用いると他の方法に比べて馬力増加が大きくなる。すなわち、良く言われるように実験値がない短波長域の推定手法が重要なことを示している。

### 6.2.2 波高影響

Fig.12 は馬力増加の波高影響を確認するために、平均波周期が 10.6 秒の場合の、縦軸を有義波高の二乗で除した馬力増加の実船換算値を示す。図に示した波高の範囲において各推定法による馬力増加がどの程度まで波高の二乗に比例

しているか、その様子が解る。

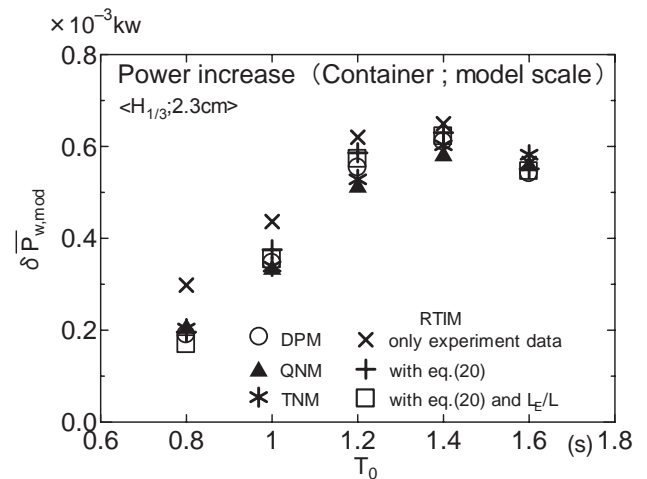


Fig.11 Relation between power increase and mean wave period (head sea,  $H_{1/3}=2.3\text{cm}$ ).

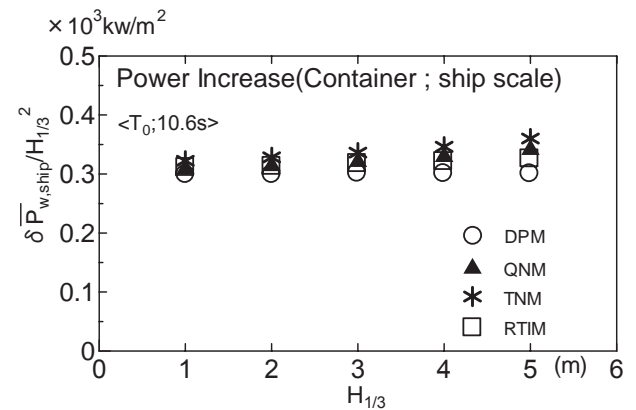


Fig.12 Relation between power increase and significant wave height (head sea,  $T_0=10.6\text{s}$ ).

### 6.2.3 馬力増加に影響する風圧抵抗、当舵抵抗

Fig.13 は、波、風、当舵の抵抗増加が馬力増加に及ぼす影響をビューフォート風力階級（BNO）毎に計算（向波中）したものである。BNO に対応する有義波高、平均波周期、風速を Table2 に示す。馬力増加推定法は RTIM で、タンカーを用いて計算した。実験値の抵抗増加応答関数だけを使う●印に比べ、短波長域の計算値を加えた推定(×印)は少し大きい。風圧抵抗は馬力増加推定に大きく影響し、波だけの場合(×印)に比べ BNO7 において概ね 2 倍(□印)になっている。この船では、BNO5 以下では風圧抵抗が支配的である。なお、風圧抵抗（ $\overline{\delta R}_{wind,ship}$ ）は Table 1 に示した正面風圧抵抗係数  $C_X$  と水面上正面投影面積  $A_T$  を用いて、次式で算出した。

$$\overline{\delta R}_{wind,ship} = \frac{1}{2} \rho_a \cdot A_T \cdot C_X \cdot V_R^2 \quad (22)$$

ここで、 $\rho_a$ ：空気の密度、 $V_R$ ：相対風速、である。

さらに、当舵を考慮した場合が△印である。この図では当

舵抵抗の影響度は小さいが、上部構造物大きい PCC(Pure Car Carrier)では当舵量の影響は無視できない。なお、当舵抵抗は、SR208 研究会にて提案された推定式<sup>15)</sup>を用いた。

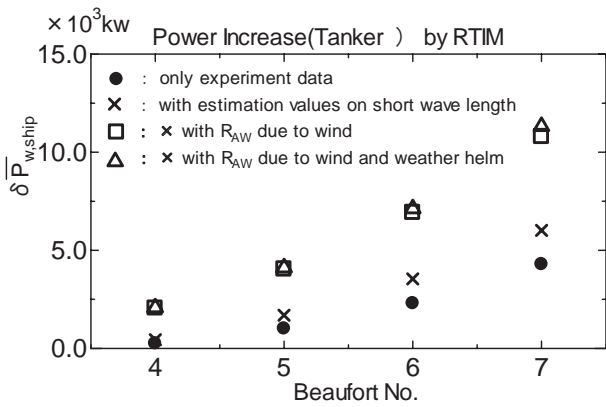


Fig.13 Power increase for tanker in actual seas that several added resistance components (wave, wind and helm) are considered. ( $L_{pp}=320\text{m}$ , head sea)

当舵量は、波高や波向きと強い相関がある。向波中を航行している場合であっても、波の方向分布を考えると当舵が必要になるとし、ここでは「当舵量  $\delta$  は波高の二乗に比例し、かつ最大当舵量は  $5^\circ$ （ここでは有義波高 4m で最大とした）である。また、プロペラ旋回流等の影響による平水中の当舵量は  $1^\circ$  である。」として、次式により与えた。

$$\delta = 0.25 \cdot H_{1/3}^2 + 1.0 \quad (23)$$

6.2.4 馬力増加から得られる情報；燃費、シーマージン

こうして馬力増加が求まると、短期海象中を航行した場合の船速低下量、馬力増加率や燃料消費量増加など各種情報の算出が可能となる。一例として、Fig.14 に馬力増加率の算出例を示す。例えば、波・風・当舵の抵抗成分を考慮して算出した馬力増加を用いた場合（ $\Delta$ 印）、BNO 4 で約 15%であった馬力増加率が厳しい海象になると増加してゆく様子が解る。

シーマージン (SM) はある意味では契約条項に含まれているような量であるが、次式で定義されている。

$$SM = \frac{P_w - P_0}{P_0} \quad (\%) \quad (24)$$

ここで、 $P_0$ ：平水中航海速力時の馬力、 $P_w$ ：波浪中で航海速力を維持するために必要な馬力、である。

この式は簡単であるが、それ故に種々の議論がなされ、誤解を招く場合もある。これは別の言葉で言えば、馬力増加率である。この時、馬力を比較する波浪中の船速は平水中のそれと等しい。この式を使って、ある短期海象下で「SM が A % である」とする場合があるが、短期海象下では「馬力増加率

が A % である」と言うべきと考える。シーマージンは、ある長期間の平均的な馬力増加を使った馬力余裕の概念であるからである。この意味から、Fig.14 ではシーマージンでなく馬力増加率と言う用語を用いた。当然のことながら、長期予測の手法にここで得られた馬力増加の結果を使えば、種々の意味でのシーマージンの算出は可能である。

Table.2 に、ビューフォート風力階級別 (BNO) の燃料消費量増加 (Fuel Oil Consumption ; FOC) を算出した結果を示す。BNO6 の場合に FOC 増加は 35ton/day であり、1 バーレル (約 159 リットル) を 70 \$ とした場合の燃料費の増加は、1 \$ を 120 円として、略 17,000 \$ /day (約 200 万円/日) となる。なお、この算出には馬力 (BHP) と燃料消費量の関係が必要である。ここでは、Fig.15 に示す同じような仕様を持つ数台の主機関に対して実施された Shop test 結果から得られた BHP-FOC 関係の平均線を用いた。

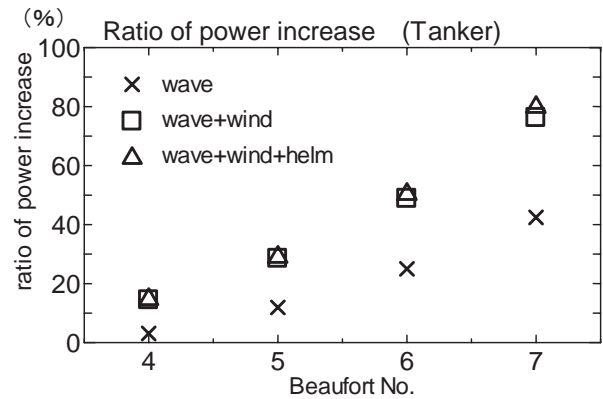


Fig.14 Relation between ratio of power increase and sea conditions.

Table.2 Estimation example for increase of FOC.

BNO	Power increase (kw)	BHP(kw)	Increase of FOC (ton/day)
4 $V_{wind}(m/s) / H_{1/3}(m) / T0(s)$ 6.75 / 1.0 / 3.9	$2.08 \times 10^3$	$1.63 \times 10^4$	10.6
5 9.40 / 2.0 / 5.5	$4.12 \times 10^3$	$1.83 \times 10^4$	20.4
6 12.35 / 3.0 / 6.7	$7.13 \times 10^3$	$2.13 \times 10^4$	34.2
7 15.55 / 4.0 / 7.7	$11.32 \times 10^3$	$2.55 \times 10^4$	51.9

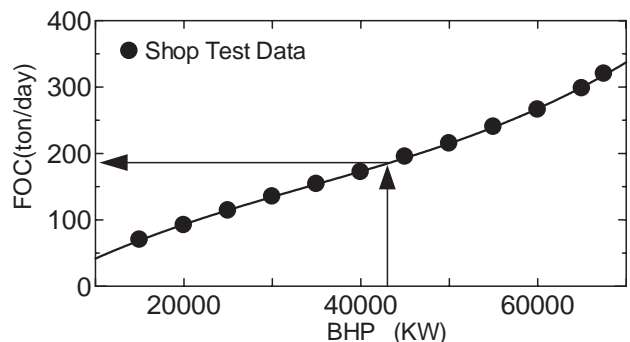


Fig.15 Relation between BHP and FOC.



## 5. 結 言

波浪中における抵抗・自航実験データを活用して、各種の方法で馬力増加を推定する場合の詳細や課題について示した。まとめると、以下のとおりである。

(1) これまでの研究結果を総括すると、プロペラが露出するほどの激しい海気象状況でない場合、抵抗/推力一致法 (*RTIM*) が論理的である。

(2) 「抵抗増加が、波高の二乗に比例する。」これは、理論的根拠を有し、かつ実験結果もこれを支持している。そのため、理論的に確立されている抵抗増加量が基本である *RTIM* は、波だけでなく風圧や当舵による影響を容易に組み込んだ実海域航行に即した馬力増加を推定できる。

(3) 推力増加、トルク増加、回転数増加が波高の二乗に比例するかは不明であるが、前二量は略比例する。それ故に、馬力が波高の二乗に比例するか不明であるが、過去の実験結果によると、略比例する。

(4) 現状の波浪中自航試験の実験精度、波浪推定精度などを総合的に勘案した場合、平水中荷重度変更実験だけを実施して馬力推定を行う簡便な方法 (*OLTM*) も、抵抗増加推定が理論的に可能であれば馬力増加の概算に有効である。この事に関する研究は、さらに進められるべきである。

(5) 船舶が大型化するにつれて、以前より指摘されてきた短波長域の抵抗増加推定が一層重要になってきた。現状下では一定の理論的・実験的根拠を有した短波長域抵抗増加値の補正法が必要である。

(6) 実海域における船舶の推進性能を、激しい海気象下であれば安全性を、穏やかな海気象下では経済性を重視して考えるのが合理的である<sup>1)6)</sup>。経済性の問題に直結した後者の馬力増加の問題は、あまり厳しくない海気象下でのみ考えるとすると、自航要素の変化を考える必要はない。

## 謝 辞

これらの課題に、永年議論していただいていた実海域推進性能研究会の諸氏、特に今は一線を退かれた方々にこの問題で多くのご指導を受けてきたことを感謝します。また、川崎造船(株)の齋藤泰夫氏、*ITTC* 耐航性委員会の日本委員であるユニバーサル造船(株)松本光一郎氏から、各種の情報提供をいただいた。記して感謝します。

## 参 考 文 献

1) 新谷厚、内藤林：第二回耐航性シンポジウム第4章「波浪中の馬力増加」、日本造船学会、1977、pp.165～180。

2) 中村彰一、内藤林：波浪中における船速低下および推進性能について、関西造船協会誌、1977、pp.25～34。

3) D.C.Murday : On Predicting Power Increase in Irregular Waves from Model Experiments In Regular Waves,1970

4) 平山次清、崔龍虎：荒天気象の設定に関する考察—就航時性能保証に向けて—、日本造船学会論文集、第189号、2001。

5) 丸尾孟：波浪中の船体抵抗増加に関する研究（第1報）（第2報）、日本造船協会論文集、第101号、1957、p.33、第108号、1960、p.5。

6) Journee; Motions, resistance and propulsion of a ship in longitudinal regular waves, Report No.428 of Delft Univ., 1976

7) McCarthy,J.H.,etal:The performance of a Full Submerged Propeller in Regular Waves, D.T.M.B.,Report 1440, 1961

8) Ilyin,V.M. et al : The Estimation Method for Ship Added Resistance and Propulsive Characteristics in Seaway, Sympo., on Dynamic of Marine Vehicles and Structures in Waves, Apr.1974,p.413.

9) 中村彰一、内藤林、井上隆一：波浪中におけるプロペラ単独特性と負荷変動について、関西造船協会誌 159号、1975、pp.41～50。

10) SR243 研究部会：スーパーシャロードラフト船の船型開発の研究、平成 13 年度報告書(総合報告書)、(社)日本造船研究協会、2002。

11) 藤井齊、高橋雄：肥大船の波浪中抵抗増加推定法に関する実験的研究、日本造船学会論文集 137 号、1975、p.132。

12) Faltinsen,O.M., Minsaas,K., Liapis,N., Skjoldal,S.O. : Prediction of resistance and propulsion of a ship in a seaway, 13<sup>th</sup> ONR, Tokyo, 1980, pp.505～530。

13) 内藤林：船舶の波浪中推進性能に関する研究、大阪大学大学院工学研究科学位論文、1979。

14) SR208 研究部会：速力試運転時波浪影響修正法に関する研究、平成 2 年度報告書、(社)日本造船研究協会、1995、pp.193～202。

15) SR208 研究部会：速力試運転時波浪影響修正法に関する研究、平成 5 年度報告書、(社)日本造船研究協会、1998、pp.131～145。

16) 内藤林：「実海域における船の推進性能」シンポジウム第5章「波浪中の推進性能」、日本造船学会、1995、pp.113～128。