波浪中における船速低下の推定法に関する研究

正員 内 藤 林* 正員 中 村 彰 一*
正員 原 正 一**

On the Prediction of Speed Loss of a Ship in Waves

by Shigeru Naito, *Member* Shoichi Nakamura, *Member*
Shoichi Hara, *Member*

Summary

In this paper, a synthetic method for predicting the speed loss of a ship in waves by taking account of the main engine characteristics is shown. In determining the ship speed in waves, two factors are considered: the nominal speed loss due to added resistance caused by wind and waves and the deliberate speed loss by the captain's command in order to prevent severe ship motions.

An example of the calculations by this method for 175m length single screw high speed container ship equipped with diesel engine is also presented.

1 緒 言

波浪中における船舶の挙動では船体運動が基本的なものであるが、船体が動揺することにより抵抗が増加し船速が低下する。また、海水打込み、スラミング、プロペラレーシングなどが生じ、船長が船あるいは貨物が危険であると判断した場合、意識的に船速を落としたり変針したりして乗組員の安全を確保し船体損傷の危険を回避する。これらの諸問題は耐航性分野の研究対象¹⁾であるが、これはストリップ法の出現で船体運動が比較的正しく推定できるようになって以来、格段の進歩を示している。

船速低下の問題を的確に解決するためには耐航性分野の研究を総合的にとりまとめる必要があるが、船体運動、抵抗増加など一連の理論計算プログラムがまとめられたり²⁾、船速低下まですべて理論的に解いた結果も報告されている³⁾。一方、このような状況にあるにもかかわらず船の基本設計の段階などにおいて耐航性能に対する考慮は十分なされているとはいいい難いが、それは耐航性能に関する研究成果を使用しやすい形で総合的にとらえていない点にもその原因があると思われる。

本論文では、波浪中における船舶の挙動をできるだけ実際の運航状況に即した形でとらえ、今までの研究成果を取り入れ比較的容易に利用できる一つの方法を提起し

ようとするものである。そして高速コンテナ船 ($L_{pp}=175\text{m}$) を例にとり、各種の試算例の一部を示した。

2 波浪中推進性能の総合的考察

波浪中における船舶の推進性能関係の挙動全体として、その各機能の相互関係を示したのが Fig. 1 のブロック図である。この図の上側のブロックは船体部分を、真中の部分は推進器を、下側の部分は主機を示し、この三つのブロックが相互に影響し合いながら船舶は波浪中を航行している。右側の部分は船長指令でこの部分も入ると四つのブロックということになる。船長指令は人間の判断が入るのでそれを除いた形で議論し、後に船長指令の部分を論ずることとする。

この船の挙動をベクトルの的に表現するために、 $\mathbf{x}_1$ 軸に船体抵抗 (R)、 $\mathbf{x}_2$ 軸にプロペラ推力 (T_p)、 $\mathbf{x}_3$ 軸にプロペラトルク (Q_p)、 $\mathbf{x}_4$ 軸に主機トルク (Q_e) をとり、それらの $\mathbf{x}_i$ 軸で作られる空間で船が作動している点を Fig. 2 のようにベクトルで表現する。船が平水中を航行している場合の釣り合い点 C (ベクトル $\mathbf{E}_c$) から船が波浪中に入り $\delta \mathbf{E}_n$ だけそのベクトルが変化し、点 A (ベクトル $\mathbf{E}_n$) で平均的には釣り合いながら点 A のまわりに変動する (ベクトル $\mathbf{e}_n(t)$)。この $\delta \mathbf{E}_n$ を求めて新しい釣り合い点 A を求めるのが自然減速あるいは船速損失 (nominal speed loss) の問題であるとする。この A 点において船長は、船が安全であるか危険であるかを判断し、危険である場合意識的に船速を落としたり変針した

* 大阪大学工学部

** 船舶技術研究所

分を表し前述した船の三つのブロックが一つのマトリックスに表現されたことになる。

初期の釣り合い点より、 δV , δU , δN_p , δX , δA だけ変数が微小変化した時のベクトルの変化分 $\delta \mathbf{E}$ は、(5) 式を使うと

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{E} &= \mathbf{y}_N \cdot \delta N_p + \mathbf{y}_V \cdot \delta V + \mathbf{y}_U \cdot \delta U + \mathbf{y}_X \cdot \delta X + \mathbf{y}_A \cdot \delta A \\ &= \delta \bar{\mathbf{E}} + \mathbf{e}(t) \end{aligned} \quad (6)$$

となる。以上の結果よりベクトル $\mathbf{E}$ を具体的に書くと次のようになる。

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \left(R_0 + \frac{\partial R}{\partial V} \delta V + \frac{\partial R}{\partial X} \delta X \right) \mathbf{x}_1 \\ &+ \left(T_{p0} + \frac{\partial T_p}{\partial N_p} \delta N_p + \frac{\partial T_p}{\partial U} \delta U \right) \mathbf{x}_2 \\ &+ \left(Q_{p0} + \frac{\partial Q_p}{\partial N_p} \delta N_p + \frac{\partial Q_p}{\partial U} \delta U \right) \mathbf{x}_3 \\ &+ \left(Q_{e0} + \frac{\partial Q_e}{\partial N_e} \cdot r \delta N_p + \frac{\partial Q_e}{\partial A} \delta A \right) \mathbf{x}_4 \end{aligned} \quad (7)$$

ここで

$$\begin{aligned} \partial R / \partial V &= R_V, \quad \partial R / \partial X = R_X, \quad \partial T_p / \partial N_p = P_{TN}, \\ \partial T_p / \partial U &= P_{TU}, \quad \partial Q_p / \partial N_p = P_{QN}, \\ \partial Q_p / \partial U &= P_{QU}, \quad \partial Q_e / \partial N_e = E_{QN}, \quad \partial Q_e / \partial A = E_{QA} \end{aligned}$$

なる略記号を用いると (7) 式は

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= (R_0 + R_V \delta V + R_X \delta X) \mathbf{x}_1 \\ &+ (T_{p0} + P_{TN} \delta N_p + P_{TU} \delta U) \mathbf{x}_2 \\ &+ (Q_{p0} + P_{QN} \delta N_p + P_{QU} \delta U) \mathbf{x}_3 \\ &+ (Q_{e0} + E_{QN} \cdot r N_p + E_{QA} \delta A) \mathbf{x}_4 \end{aligned} \quad (8)$$

となる。以上によって初期状態と (5) 式で与えられる $[\mathbf{P}_{kj}]$ の各要素の値を知ることによって微小変化後の状態を推定することができる。これを時間平均的定常部分と変動部分に分ける。この場合、各微係数は定常成分については大文字で、変動成分については小文字で示すことにすると

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{E}} &= \mathbf{E}_0 + \delta \bar{\mathbf{E}} = (R_0 + R_V \delta \bar{V} + R_X \delta \bar{X}) \mathbf{x}_1 \\ &+ (T_{p0} + P_{TN} \delta \bar{N}_p + P_{TU} \delta \bar{U}) \mathbf{x}_2 \\ &+ (Q_{p0} + P_{QN} \delta \bar{N}_p + P_{QU} \delta \bar{U}) \mathbf{x}_3 \\ &+ (Q_{e0} + E_{QN} \cdot r \delta \bar{N}_p + E_{QA} \delta \bar{A}) \mathbf{x}_4 \quad (9) \\ \mathbf{e}(t) &= \{r_v v(t) + r_X \chi(t)\} \mathbf{x}_1 + \{p_{tn} n_p(t) \\ &+ p_{tu} u(t)\} \mathbf{x}_2 + \{p_{qn} n_p(t) + p_{qu} u(t)\} \mathbf{x}_3 \\ &+ \{e_{qn} \cdot r n_p(t) + e_{qa} \lambda(t)\} \mathbf{x}_4 \end{aligned} \quad (10)$$

となる。

前述したように $\delta \bar{\mathbf{E}}$ を求める微係数は変化前のものを取り、 $\mathbf{e}(t)$ を求める微係数は変化後の値をとることにする。変動項 $\mathbf{e}(t)$ については以下論じないことにする。

さて、波浪中を航行する船舶の時間平均的な定常状態を決定するためには、船体抵抗 ($\mathbf{x}_1$ 軸) とプロペラ推力 ($\mathbf{x}_2$ 軸) の釣り合いと、プロペラトルク ($\mathbf{x}_3$ 軸) と主機トルク ($\mathbf{x}_4$ 軸) の釣り合いが同時に満たされる必要がある。

プロペラ推力と抵抗の間には、推力減少係数を t とし、 $(1-t) = \bar{t}$ とおく

$$\bar{R} = \bar{t} \bar{T}_p \quad (11)$$

の関係がある。船速変化前の推力減少係数を t_0 とし、 $(1-t_0) = \bar{t}_0$ とおく。新たな釣り合い状態になり $\bar{t}_0$ が δt だけ変化したとし $\bar{t} = \bar{t}_0 + \delta t$ と $R_0 = \bar{t}_0 T_{p0}$ の関係を使うと

$$\delta \bar{R} = \bar{t} \cdot \delta \bar{T}_p + \delta t \cdot T_{p0} \quad (12)$$

となる。プロペラトルクと主機トルクの関係は伝達効率 η_t 、プロペラ効率比 η_R とし、 $Q_{p0}/\eta_R = r \eta_t Q_{e0}$ の関係を使うと

$$\frac{1}{\eta_R} \delta \bar{Q}_p = r \cdot \eta_t \cdot \delta \bar{Q}_e \quad (13)$$

となる。さらに、船速 $\bar{V}$ とプロペラ面での速度 $\bar{U}$ との間には、伴流係数を w とし $(1-w) = \bar{w}$ とおく

$$\bar{w} \bar{V} = \bar{U} \quad (14)$$

の関係がある。船速変化前の伴流係数を w_0 とし、 $(1-w_0) = \bar{w}_0$ とおく。新たな釣り合い状態になり $\bar{w}_0$ が δw だけ変化したとし $\bar{w} = \bar{w}_0 + \delta w$ と $\bar{w}_0 V_0 = U_0$ の関係を使うと

$$\delta \bar{U} = \bar{w} \cdot \delta \bar{V} + \delta w \cdot V_0 \quad (15)$$

となる。

波浪中の自航要素は難しい問題が多いが^{4),5)}、差はどうかであれ平水中の値と違うのは事実であるので一般的にこのように表現し、計算に当っては、自航要素の変化による影響を論ずることにする。

(9) 式、(12) 式、(15) 式を考慮して、 $\mathbf{x}_1$ 軸、 $\mathbf{x}_2$ 軸の釣り合いと、 $\mathbf{x}_3$ 軸、 $\mathbf{x}_4$ 軸の釣り合いを表すと

$$\begin{aligned} R_V \cdot \delta \bar{V} + R_X \cdot \delta \bar{X} \\ = \bar{t} \{P_{TN} \cdot \delta \bar{N}_p + P_{TU} (\bar{w} \cdot \delta \bar{V} + \delta w \cdot V_0)\} + \delta t \cdot T_{p0} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{\eta_R} \{P_{QN} \delta \bar{N}_p + P_{QU} (\bar{w} \cdot \delta \bar{V} + \delta w \cdot V_0)\} \\ = r \eta_t (E_{QN} \cdot r \delta \bar{N}_p + E_{QA} \delta \bar{A}) \end{aligned} \quad (17)$$

となる。(16) 式、(17) 式は船舶が波浪中を航行する場合に満たしていなければならない条件式であるが、四つの未知数 ($\delta \bar{V}$, $\delta \bar{N}_p$, $\delta \bar{X}$, $\delta \bar{A}$) に対して二つの方程式だから、このままでは四つの未知数を決定することができない。しかるに、自然減速、意識的減速の場合おのの定義によって新たな条件式が加えられ両者を分けて論ずることができる。

さて、(5) 式で与えられるマトリックス $[\mathbf{P}_{kj}]$ 中の諸係数は、船体、推進器、主機の性能の重要な一つの側面を抽象化して表現しているものであるが、それらについて説明する。

2.1 船体ブロック

船体ブロックの R_V , R_X は平水中の抵抗、あるいは風や波による抵抗増加量を知ることによって得られる。平水中抵抗は、水槽試験の結果または、推定用図表を使

い、抵抗増加は、丸尾の方法⁶⁾、丸尾の方法を斜波中の場合に拡張した細田の方法⁷⁾、あるいは簡便な Gerritsma の方法⁸⁾ などを用いて規則波中の応答関数を求め、不規則波のスペクトラムとの重ね合わせて求められる。

2.2 推進器ブロック

プロペラの単独性能曲線は、プロペラ単独試験などの結果より

$$\begin{cases} K_T = a + bJ + cJ^2 \\ K_Q = d + eJ + fJ^2 \end{cases} \quad (18)$$

のように、 K_T , K_Q は前進数 J の2次式で極めて良く近似することができる。 P_{TV} , P_{QU} はプロペラへの流入速度に対する微係数、 P_{TN} , P_{QN} は、回転数に対する微係数として (18) 式を使うと次のように与えられる⁹⁾。

$$\begin{cases} P_{TV} = \rho D^2 (bDN + 2cU) \\ P_{TN} = \rho D^3 (2aDN + bU) \\ P_{QU} = \rho D^3 (eDN + 2fU) \\ P_{QN} = \rho D^4 (2dDN + eU) \end{cases} \quad (19)$$

ここで D はプロペラ直径、 ρ は流体密度を表す。

2.3 主機ブロック

主機性能を示す E_{QN} は回転数に対する微係数、 E_{QA} は燃料投入量に対する主機出力トルクの微係数で与えられ $E_{QN} = -0$ の時は主機出力トルク一定の、 $E_{QN} = -\infty$ の時は回転数一定の、 $E_{QN} = -Q_{p0}/r^2 N_{p0}$ の時は主機馬力一定の機関性能を表現する⁹⁾。このように E_{QN} 値を変化させることによって主機の性能を表すことができる。これらは、主機の単独特性試験や、実船の海上公試の結果などを使って求められる。海上公試の結果より一般には、

Fig. 3 Trial results of 175m length container ship

Fig. 4 Relation between engine torque and fuel consumption

回転数に対する馬力、あるいは単位時間当りの燃料消費量などが得られるから、その結果より燃料投入量に対する主機トルクの関係を知ることができる。主機トルクの微小変化量は x_4 軸の変化分であり、 $\delta \bar{Q}_e = E_{QN} \cdot \delta \bar{N} + E_{QA} \cdot \delta \bar{A}$ で与えられる。しかるに、主機トルク一定の性能をもった機関の場合、 $E_{QN} = -0$ より、 $\delta \bar{Q}_e = E_{QA} \cdot \delta \bar{A}$ となる。ゆえに、 $E_{QA} = \delta \bar{Q}_e / \delta \bar{A}$ であるから、燃料投入量に対する主機トルクの関係より、その微係数として E_{QA} が求められる。主機の性能に応じて E_{QN} を与えてやれば、同様に E_{QA} をその機関性能に対して知ることができる。主機の陸上運転の結果などからも E_{QA} を求めることができよう。Fig. 3 に長さ 175m 級の高速コンテナ船の公試運転結果を示し、Fig. 4 にそれを使って求めた燃料投入量-主機トルク曲線 ($A-Q_e$ 曲線) を示す。

3 自然減速

船が平水中を航行している状態から波浪中に入ると船速が低下するが、この量を自然減速あるいは船速損失といい、Fig. 2 によると C 点から A 点への変化をいう。この場合、変針せず ($\delta \bar{\lambda} = 0$)、かつ燃料ハンドル一定 ($\delta \bar{A} = 0$) の条件より、(16) 式、(17) 式は

$$R_V \cdot \delta \bar{V} = i \{ P_{TN} \delta \bar{N}_p + \bar{w} P_{TV} \delta \bar{V} \} + i P_{TV} V_0 \cdot \delta w + \delta t \cdot T_{p0} \quad (16')$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\eta_R} \{ P_{QN} \cdot \delta \bar{N}_p + \bar{w} P_{QU} \delta \bar{V} + P_{QU} \cdot \delta w \cdot V_0 \} \\ & = r^2 \cdot \eta_t E_{QN} \delta \bar{N}_p \end{aligned} \quad (17')$$

となる。(16)' 式右辺第 3、第 4 項、(17)' 式左辺第 3 項が自航要素の変化による影響項である。さて (16)' 式左辺 $R_V \cdot \delta \bar{V}$ の項であるが、C 点は平水中における釣り合

い点で抵抗増加の成分が入っておらず、A点では抵抗増加の成分が入っているから次のように取り扱う。

抵抗 $R(\bar{V}, \bar{\lambda})$ は平水中抵抗 $R_C(\bar{V})$ と抵抗増加 $R_{AW}(\bar{V}, \bar{\lambda})$ (ある一つの海象状態について) の和として

$$R(\bar{V}, \bar{\lambda}) = R_C(\bar{V}) + R_{AW}(\bar{V}, \bar{\lambda}) \quad (20)$$

と表すことができる。平水中釣り合い点Cの時の船速を $\bar{V}_C$ で表し (20) 式より

$$\begin{aligned} R_V \cdot \delta \bar{V} &= R(\bar{V}, \bar{\lambda}) - R_C(\bar{V}_C) \\ &= R_C(\bar{V}) + R_{AW}(\bar{V}, \bar{\lambda}) - R_C(\bar{V}_C) \\ &\cong \left[\frac{\partial R_C}{\partial \bar{V}} \right]_C \cdot \delta \bar{V} + R_{AW}(\bar{V}, \bar{\lambda}) \end{aligned} \quad (21)$$

この (21) 式のままで、 R_{AW} を知るのに $\bar{V}$, すなわち $\delta \bar{V}$ が必要であり、 $\delta \bar{V}$ を求めるのに R_{AW} が必要と

$$\delta \bar{V} = \frac{R_{AW}(\bar{V}_C, \bar{\lambda}) - \delta t \cdot T_{p0} - V_0 \left(\frac{\delta w}{\bar{w}} \right) \left\{ \left[\frac{\partial R_C}{\partial \bar{V}} \right]_C + \left[\frac{\partial R_{AW}}{\partial \bar{V}} \right]_C \right\}}{\bar{w} \bar{t} \left\{ P_{TU} + \frac{P_{QU} \cdot P_{TN}}{r^2 \eta_i \eta_R E_{QN} - P_{QN}} \right\} - \left\{ \left[\frac{\partial R_C}{\partial \bar{V}} \right]_C + \left[\frac{\partial R_{AW}}{\partial \bar{V}} \right]_C \right\}} - V_0 \left(\frac{\delta w}{\bar{w}} \right) \quad (24)$$

$$\delta \bar{N}_p = \frac{\bar{w} P_{QU} [R_{AW}(\bar{V}_C, \bar{\lambda}) - \delta t \cdot T_{p0} - V_0 \left(\frac{\delta w}{\bar{w}} \right) \left\{ \left[\frac{\partial R_C}{\partial \bar{V}} \right]_C + \left[\frac{\partial R_{AW}}{\partial \bar{V}} \right]_C \right\}]}{\bar{w} \bar{t} \{ P_{TN} P_{QU} + P_{TU} (r^2 \eta_i \eta_R E_{QN} - P_{QN}) \} - (r^2 \eta_i \eta_R E_{QN} - P_{QN}) \left\{ \left[\frac{\partial R_C}{\partial \bar{V}} \right]_C + \left[\frac{\partial R_{AW}}{\partial \bar{V}} \right]_C \right\}} \quad (25)$$

自航要素が変化前後で変わらないとすると ($\delta w = \delta t = 0$) (24) 式, (25) 式の第2項以下は、全部0になる。この (24) 式, (25) 式により $\delta \bar{V}$, $\delta \bar{N}_p$ が求められれば $\delta \bar{E}_R$ ベクトルが求められ、自然減速した場合の各種の時間平均的諸量が求められる。さて、ディーゼル機関に all speed governor が装備されることが多くなっているが、この場合は次のように取り扱う。All speed governor は主機に対して回転数を一定にする制御を施すものであ

なり、そのために繰り返し計算が必要である。そこで $R_{AW}(\bar{V}, \bar{\lambda})$ を次のように表す。

$$R_{AW}(\bar{V}, \bar{\lambda}) \cong \left[\frac{\partial R_{AW}}{\partial \bar{V}} \right]_C \cdot \delta \bar{V} + R_{AW}(\bar{V}_C, \bar{\lambda}) \quad (22)$$

(21) 式, (22) 式より

$$\begin{aligned} R_V \cdot \delta \bar{V} &= \left\{ \left[\frac{\partial R_C}{\partial \bar{V}} \right]_C + \left[\frac{\partial R_{AW}}{\partial \bar{V}} \right]_C \right\} \delta \bar{V} \\ &\quad + R_{AW}(\bar{V}_C, \bar{\lambda}) \end{aligned} \quad (23)$$

となる。 $R_{AW}(\bar{V}_C, \bar{\lambda})$ は、今問題にしている海象中において平水中の速度を維持したとした時の抵抗増加量である。(23) 式を (16)' 式に代入して、 $\delta \bar{V}$, $\delta \bar{N}_p$ を求めると次のようになる。

るが、ディーゼル主機の性能として主機トルク一定より $E_{QN} = -0$, かつ回転数一定に保つよう制御するから $\delta \bar{N}_p = 0$ とすると (16)' 式, (17)' 式は次のようになる。

$$\begin{aligned} &\left\{ \left[\frac{\partial R_C}{\partial \bar{V}} \right]_C + \left[\frac{\partial R_{AW}}{\partial \bar{V}} \right]_C \right\} \delta \bar{V} + R_{AW}(\bar{V}_C, \bar{\lambda}) \\ &= \bar{w} \cdot \bar{t} \cdot P_{TU} \delta \bar{V} + \delta t \cdot T_{p0} + \bar{t} \cdot \delta w \cdot P_{TU} V_0 \\ &\quad \frac{1}{\eta_R} \{ \delta w \cdot P_{QU} \cdot V_0 + \bar{w} \cdot P_{QU} \delta \bar{V} \} = r \eta_i E_{QA} \delta \bar{\lambda} \end{aligned}$$

これより

$$\begin{aligned} \delta \bar{V} &= \frac{R_{AW}(\bar{V}_C, \bar{\lambda}) - \bar{t} \cdot \delta w \cdot V_0 \cdot P_{TU} - \delta t \cdot T_{p0}}{\bar{w} \bar{t} P_{TU} - \left[\frac{\partial R_C}{\partial \bar{V}} \right]_C - \left[\frac{\partial R_{AW}}{\partial \bar{V}} \right]_C} \\ \delta \bar{\lambda} &= \frac{\bar{w} P_{QU}}{r \eta_i \eta_R E_{QA}} \left[\frac{R_{AW}(\bar{V}_C, \bar{\lambda}) - \bar{t} \cdot \delta w \cdot V_0 \cdot P_{TU} - \delta t \cdot T_{p0}}{\bar{w} \bar{t} P_{TU} - \left[\frac{\partial R_C}{\partial \bar{V}} \right]_C - \left[\frac{\partial R_{AW}}{\partial \bar{V}} \right]_C} + V_0 \left(\frac{\delta w}{\bar{w}} \right) \right] \end{aligned} \quad (26)$$

として、船速低下と、その時に governor が必要とする燃料投入量がわかる。(26) 式の船速低下量は、(24) 式において $E_{QN} = -\infty$, すなわち回転数一定性能の主機として計算された場合の結果と一致する。

なお、以前著者らが示した自然減速の推定計算法⁹⁾は、繰り返し計算が必要であったが、この方法では繰り返し計算は不要である。自航要素が平水中の値と変わらないとして実施した自然減速に関する両者の計算結果は、よい一致を与えていた¹⁰⁾。

4 意識的減速, 変針

自然減速した平衡点 (A点) において航行している時船長は船が安全か、あるいは危険かの判断を下し、危険な場合に操船し安全な平衡点 (B点) に移るようにする。

この船長の判断を数量化する場合、船首加速度、プロペラレーシングなどいくつかの現象が考慮されるわけであるが、それらを以下のように扱うことにする。 l 個の現象のうち i なる現象の分散値 σ_i^2 は、その現象の振幅応答関数を使い、与えられた波スペクトラムで線形重ね合わせの方法によって求められるが、ある海象 $\bar{S}$, 船速 $\bar{V}$, 出合い角 $\bar{\lambda}$ の関数として次のように表現される。

$$\sigma_i^2 = F_i(\bar{S}, \bar{V}, \bar{\lambda})$$

ある平衡状態からの微小変化 $\delta \bar{S}$, $\delta \bar{V}$, $\delta \bar{\lambda}$ が生じた場合の分散値 σ_i^2 の増分 $\delta \sigma_i^2$ は、高次の項を無視すると次のように表すことができる。

$$\delta \sigma_i^2 = \frac{\partial F_i}{\partial \bar{S}} \delta \bar{S} + \frac{\partial F_i}{\partial \bar{V}} \delta \bar{V} + \frac{\partial F_i}{\partial \bar{\lambda}} \delta \bar{\lambda}$$

ここでは、一定海象 ($\delta \bar{S} = 0$) のもとの議論をしてい

るから

$$\delta\sigma_i^2 = \frac{\partial F_i}{\partial V} \delta\bar{V} + \frac{\partial F_i}{\partial \chi} \delta\bar{\chi} \quad (27)$$

となる。

i なる現象については限界値 C_{i0} とそれを超す確率 (限界確率) A_{i0} が与えられ、これらの量がこの現象に対する船の安全性の評価基準になっている。限界確率が A_{i0} になるような値 C_i は、現象の極値分布が Rayleigh 分布に従うとすると

$$A_{i0} = \exp\left(-\frac{C_i^2}{2\sigma_i^2}\right)$$

となり、この式より

$$C_i = (-2\sigma_i^2 \log A_{i0})^{1/2}, \quad i=1, 2, \dots, l \quad (28)$$

となる。この C_i と限界値 C_{i0} を比較することにより

$$C_{i0} - C_i < 0 \quad (29)$$

ならその現象について船は危険であり

$$C_{i0} - C_i \geq 0 \quad (30)$$

の時、その現象について船は安全であると考えられる。

ゆえに、船が危険な場合 (29) 式を満たしている m 個の現象について ($m \leq l$)

$$\delta C_i = C_{i0} - C_i \quad (i=1, 2, \dots, m)$$

とおくと、この δC_i 分だけ補正するように船速を落としたり変針したりすれば、船は安全域に入ることになる。

(28) 式を分散 σ_i^2 で微分すると

$$\frac{dC_i}{d\sigma_i^2} = \sqrt{-\log A_{i0}/2\sigma_i^2}$$

となる。ゆえに

$$\delta C_i = \delta\sigma_i^2 (-\log A_{i0}/2\sigma_i^2)^{1/2}$$

となり、(27) 式を代入すると

$$\delta C_i = \left(\frac{\partial F_i}{\partial V} \delta\bar{V} + \frac{\partial F_i}{\partial \chi} \delta\bar{\chi} \right) \sqrt{\frac{-\log A_{i0}}{2\sigma_i^2}} \quad (31)$$

となる。すなわちこれは、 i なる現象について危険を回避するために必要な船速低下量と変針角の関係を与えるものである。これを表現し直すと

$$\delta\bar{V}_i = \frac{\delta C_i}{\left[\frac{\partial F_i}{\partial V} \right]_A \sqrt{\frac{-\log A_{i0}}{2\sigma_i^2}}} - \frac{\left[\frac{\partial F_i}{\partial \chi} \right]_A}{\left[\frac{\partial F_i}{\partial V} \right]_A} \delta\bar{\chi}_i \quad (32)$$

となる。

サフィックス A は Fig. 2 の A 点における微係数をとることを意味する。右辺第1項は、変針しない場合に必要な意識的船速低下量であり、第2項は変針の影響項である。危険になっている現象 m 個について (32) 式の関係式があるが、 $\delta\bar{\chi}_i$ を与えて $\delta\bar{V}_i$ を計算し、最も大きな船速低下量を必要とする現象に対して危険回避の操船を行うと考える。(32) 式は、(16) 式、(17) 式に加えられた新たな条件式である。しかし (32) 式で示されたように $\delta\bar{V}_i$ と $\delta\bar{\chi}_i$ に任意性が残る。それを一意的に決めるためには、さらに別の条件が必要である。

その条件としては、例えば「ある A 点から B 点まで航

行するのに最小時間で到達せよ」あるいは「 A 点から B 点まで最も経済的に到達せよ」などの条件が考えられる。これは最適航法の問題ということになる。この最適航法の定義はまだ定まったものはないといわれているが、ここでは文献 (11) によるところの局所的最適航法 (主に大洋航海中の荒天避航に代表される) といわれるものを考えることにする。すなわち、最適航法の問題を議論して始めて、意識的減速、変針時の問題が、(16) 式、(17) 式、(32) 式の条件式を考えて、一意的に解けることになるのである。

こうして求められた四つの条件式から波浪中の平均的釣り合い時の各諸量が求められ、船舶の挙動を知ることができる。さらに、今回の議論で除いた変動項 ($e(t)$)、あるいは波浪荷重なども、この船速低下した釣り合い点を知ることによって、実情に即した議論が可能になる。

5 波浪中における船速低下、変針の計算例

計算は、日本造船研究協会 第 108, 125 部会の研究で使用されてきた高速コンテナ船 ($L_{pp}=175\text{m}$) を対象にして行った。各現象の限界値や限界確率は、文献 (12) と同じにとり分散値は「SR 125 高速コンテナ船の耐航性諸要素計算とりまとめ、担当、日立技研、大阪府立大、昭和 50 年 3 月」の結果を利用した。計算では、 $\eta_i = \eta_R = 1$ 、減速比 $r=1$ 、ディーゼル船を考え $E_{QN} = -0$ と

Fig. 5 Calculation of speed drop in irregular oblique waves

Fig. 6 Calculation of optimum ship operation in waves

し、(1-t), (1-w) は、まず平水中の値を使用した。

Fig. 5 に平均波周期 10.3 秒, ISSC 型のスペクトラムで有意波高を変化させた場合の, $\chi=180^\circ$ (向波), 150° , 120° に対する船速低下の計算結果を示す。図中、破線は自然減速を示す。船が危険になり、針路を保持したまま危険回避に必要な減速をした結果が実線であり、この速度まで落とせば安全ということである。横軸に有意波高をとり、平均波周期をパラメータとして示してある。この場合の船長の危険判断では海水打込みが最も苛酷であった。次にある X 点と Y 点を考えて Y 点の方から X 点の方に波が来る状況を考えて、「X から Y まで、最短時間で行くようにせよ」という条件で解いた結果の一例が Fig. 6 である。

図中太い実線で示したのが最小時間で航行することができる航法である。すなわち、 $H_{1/3} \div 7$ m, $\bar{T}_0 \div 10.3$ 秒位の荒れた不規則海面では、波に対して 60° 変針して進行し、X, Y の中間点で反対側に 60° 変針して進むのが一番早く、かつ安全に目的地に到着できるということである。

Fig. 7 Relation between heading angle and fuel consumption at critical speed

Fig. 8 Relation between ship speed and fuel consumption

次に Fig. 4 から求めた E_{qa} を使用し、Fig. 6 に対応して船が安全に航行できる変針角と燃料投入量の限界線を求めたのが Fig. 7 である。Fig. 6 との対応でみると、この海象では 60° 変針し、燃料を $2 \text{ kg/hour} \cdot \text{rpm}$ 減少させて走ると安全であり、かつ一番早く目的地に到着するが、その時の船速は、ほぼ 21 kt 位ということになる。この場合の初期状態は、 $F_n = 0.30$, $V = 24.16 \text{ kt}$ である。

Fig. 8 は、自然減速の場合、主機トルク一定の場合と、回転数一定の場合では、どの位の燃料差があるかを試算したものである。回転数一定は、結果として all speed governor を取り付けただけになるから、両者の差の分

Fig. 9 Effect of self-propulsion factors on ship speed, revolutions and apparent slip in irregular head waves

を governor が補充すると平水中と同じ回転数で航行できるということである。

5.1 自航要素の影響について

前述の計算では、自航要素は平水中の値を用いたが、波浪中ではその値が変化するから、その影響について考える必要がある。波浪中の自航要素は、波の周波数や振幅に依存し簡単な問題ではないが、現在までの研究結果では、伴流係数 w と、推力減少係数 t は、平水中の値に比べて減少し、 η_R は 1 に近づく傾向にある⁴⁾。そこで、 $(1-w)$ 、 $(1-t)$ 共に平水中の値に比べて 1 割ずつ大きくした場合の計算の一例を Fig. 9 に示す。このように波浪中における推進性能の推定精度向上のためには、波浪中の自航要素の正確な推定法について、さらに研究が深められる必要がある。

5.2 主機関からみた運航制限

主機関の立場から、波浪中における船舶に対し運航制限が課せられることがある。波浪中では抵抗が増加し、一般的にはプロペラ荷重が増加し、長時間の運転は避けるようにいわれている主機の作動領域に入る傾向になる¹³⁾。175m 級高速コンテナ船の公試運転結果より主機特性平面上（主機トルク-回転数平面）の作動点を調査した結果と、平水中の作動点の推定値は、ほぼ同様な状況であるが¹⁴⁾、前記の波浪中における計算結果をこの平面上に示したのが Fig. 10 である。

さて文献 (15)、(16) には、見掛けスリップを意識的減速、変針をするための船長判断の包括的指標と考えた場合の問題を述べているが、仮にそれが可能であれば、

Fig. 10 Operation point on engine characteristic plane concerning nominal speed loss

Fig. 11 Critical ship speed in irregular oblique waves

極めて簡便な判断指標である。そこで等見掛けスリップ線を求めて他の現象（この場合、危険回避のための操船の原因となった海水打込み）の安全性基準との兼ね合いを示したのが Fig. 11 である。これによると見掛けスリップの安全基準を一応 25%¹⁵⁾ と考えてみると、それは安全であっても海水打込みは危険状態になっている領域もあるしその逆もある。また、波に対する出会角一定のままでは船速を落としても見掛けスリップは小さくならず、かえって増加する。見掛けスリップを下げようとするならば変針することが必要であることがわかる。これらのことから、25%見掛けスリップだけでは船長判断の包括的指標とするには若干無理があることがわかる。さて、ここで計算された見掛けスリップ線を Fig. 10 の主機特性平面上に示してみた。図の領域①は、主機関の短時間運転可能領域であるが、この見掛けスリップ線はこの主機の作動制限をも代表していると考えられて、船長判断というものは、それなりの合理性をもったものといえよう。なお、実船の公試結果¹⁵⁾の解析によると、計算対象の高速コンテナ船の見掛けスリップは、ほとんど 0 であり本計算による平水中の見掛けスリップも 0 である。すなわち見掛けスリップ 25% 増加ということは、平水中に比べて正味のスリップ増加量である。

5.3 運航の最適化

波浪中における船舶性能の総合評価というものは、当然簡単にできるものではない。しかし安全で、かつでき

Fig. 12 Factors of evaluation for optimum ship route

るだけ早く、低燃費で船が運航されるのが良いということとは一致する内容であろう。本試算例で、X、Y両点を50海里（約92.6km）、その区間で海象の変化はないとし、X点からY点まで航行するのに要する時間 T (hour) と、時間当りの燃料消費量 Λ_h (kg/hour) を求めてみたのが Fig. 12 である。この図から、一つの評価として時間を考えてみると 120° に変針し、中間点で折り返して走るのが早い、燃料の問題からみると船速が遅くとも向波状態で航走するのが低燃費でよい。ただし、向波状態の場合、海水打込みなどの現象に対しては安全であるが、見掛けスリップは25%を優に超えている。 120° に変針の場合は、25%見掛けスリップ内におさまっている。他に一つの評価係数として

$$J = \alpha_1 T \cdot (\alpha_2 \Lambda_h \cdot T) \\ = \alpha_1 \alpha_2 T \cdot F \text{ (hour} \cdot \text{kg)} \quad (33)$$

のようなものを考えてみる。ただし F は燃料消費量 (kg)。これは、短時間で、低燃費であればあるほど良しとする、すなわち J は小さい方がよいと評価すると考えたものであるが、その結果も図示されている。 α_1 、 α_2 は時間と燃料に対する重み係数である。計算では、 $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ としている。これによると $\chi = 180^\circ \sim 140^\circ$ 位まであまり差がないことがわかる。

さて、これに見掛けスリップあるいは海水打込みなどのことを考えてみると (Fig. 11) 140° 前後に変針して進むのが、ここで出された条件をそれなりに満たして、最も良さそうということになる。

6 結 論

以上の研究の結果、次のような諸点が明らかになった。

1) 波浪中における船舶の挙動を総合的に表現することができ、今までの研究成果相互の位置づけが明確になった。

2) (5) 式で与えられているマトリックス $[P_{kj}]$ の成分を知ることができれば、波浪中における自然減速などを知ることができる。さらに与えられた海象中における船体動揺や他の現象の分散値を知ることと、その現象の許容条件を与えて船長判断を数量化し、最適条件を与えることによって一意的な意識的減速量、変針量が計算できる。

3) 主機関の性能を E_{QN} 、 E_{QA} の二つの係数でもって代表させることによって主機特性の耐航性分野における位置づけがなされ、それによって燃費の問題も論ずることが可能になった。

4) 見掛けスリップだけでもって船長判断の包括的表現とすることには難点があるが、見掛けスリップとともに船体運動による諸現象を考慮に入れて船長判断を表現することは、合理性のある考え方である。その場合、見掛けスリップは主機関の運航制限を代表するものとも考えられる。

5) 本方法は、船舶の挙動を総合的にわかりやすくするために、平均的作動点まわりの微小変化としてとらえてみたものである。そのために、自然減速は良いが、意識的減速、変針の場合のように大きく船の作動点を移動させるような場合、誤差が大きくなる。この点の改良を目下検討中である。

6) ここで提起した方法を具体化することによって、一隻の船舶の長期、短期の挙動を知ることができるようになる。

最後に本研究の計算の一部を担当した大阪大学大学院工学研究科の松本光一郎君に対し心から感謝の意を表します。なお、この研究は日本造船研究協会第161研究部会の研究の一環として実施されたものであり、御討議いただいた委員の方々にお礼申し上げます。また、本研究の一部は、文部省科学研究費の補助を受けたものであり、計算には大阪大学大型計算機センター ACOS-700、および造船学科の HITAC-10II を使用したことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 中村彰一：耐航性の諸要素，日本造船学会，耐航性に関するシンポジウム，(昭44.7)，p.121.
- 2) 小林正典他：船舶の耐航性に関する理論計算プログラム，三井造船技報，第82号(昭48.4)，p.1.

- 3) 山崎隆介, 中武一朗, 城野清治, 幸口喜佐夫: 規則的向波の中の船の推進性能について, 日本造船学会論文集, 第143号 (昭53.6), p.95.
- 4) 中村彰一, 細田龍介, 内藤 林, 井上盛夫: コンテナ船の波浪中推進性能に関する研究 (第4報), 関西造船協会誌, 第159号 (昭50.12), p.29.
- 5) 新谷 厚, 内藤 林: 波浪中の馬力増加, 日本造船学会, 第2回耐航性に関するシンポジウム, (昭52.12), p.165.
- 6) 丸尾 孟: 波浪中の船体抵抗増加に関する研究, 造船協会論文集, 第101号 (昭32.8), p.33, 第108号 (昭35.12), p.5.
- 7) 細田龍介: 斜波中における船体抵抗増加に関する研究, 日本造船学会論文集, 第133号 (昭48.6), p.7.
- 8) Gerritsma, J. and Beukelman, W.: Analysis of the Resistance Increase in Waves of a Fast Cargo Ship, I.S.P., Vol. 19, No. 217 (Sept. 1972), p.285.
- 9) 中村彰一, 内藤 林: 波浪中における船速低下及び推進性能について, 関西造船協会誌, 第166号 (昭52.9), p.25.
- 10) 原 正一: 波浪中における船速低下に関する研究, 大阪大学院工学研究科修士論文, (昭54.3).
- 11) 細田龍介, 黒井昌明: 最適航法, 日本造船学会, 第2回耐航性に関するシンポジウム, (昭52.12), p.211.
- 12) 北沢孝宗, 黒井昌明, 高木又男: コンテナ船の波浪中での限界速度, 日本造船学会論文集, 第138号 (昭50.12), p.269.
- 13) A. Schiff: 船用主機の開発動向-出力率の増大, 日本船用機関学会誌, 第11巻, 第6号, (昭51.6).
- 14) 中村彰一, 内藤 林: コンテナ船の軽荷状態における波浪中推進性能について, 関西造船協会誌, 第173号 (昭54.6), p.69.
- 15) 日本海難防止協会: 大型専用船の運航上の安全対策に関する調査研究 完了報告書, (昭46).
- 16) 宮本雅史: 限界速力による主機およびプロペラの決定について, 日本造船学会誌, 第574号 (昭52.4), p.1.
- 17) 日本航海学会: 船舶の荒天運航に関するシンポジウム, (昭48.2).
- 18) 関西造船協会: コンテナ船特集, 関西造船協会誌, 第130号 (昭43.12)