風圧下の平行移動操船について

不破 健*・福戸 淳 司*・染谷 実*

Wind Effects on Ship Maneuver for Parallel Course Change

Takeshi FUWA, Junji FUKUTO and Minoru SOMEYA

Abstract

International Maritime Organization (IMO) is going to establish the maneuvering performance standard, which defines practical indices for typical modes of ship handling in various navigation conditions. Among the indices, those of course change test are most practical and useful ones, which are directly applicable for course change maneuver. A parallel course shift test is proposed and investigated by means of computer simulation. Congested traffic conditions require the ship to perform collision avoidance maneuver, which is mainly composed of course change and parallel course shift. Wind effects on the performance in parallel course shift are examined in order to evaluate the wind as a factor of natural environmental condition for ship navigation and its effects. Practical charts and diagrams of the performance indices' and concrete guidelines for the correction in ship position control are obtained by the parallel course shift tests.

1. はじめに

近年の海上交通の輻輳化および船舶の専用船化、大型化による操船の困難さの増大に伴い、航行の安全性とそれに対する航行環境影響の評価法に関する研究⁽¹⁾が行われ始めた。また、船の操縦性に関しても、航行の安全を確保する観点より、各船ごとに基本的な性能を的確に把握・表現し、それを操船者に効果的に知らせる操船マニュアル等の作成・保持の義務付けおよびその性能の国際的な基準設定の機運にある⁽²⁾。

これらの立場からみると、従来より多数行われている船の操縦性能に関する研究のうち実際の操船状況に即した操船の指標について分かりやすい形でまとめたものは必ずしも多くない。

実際の操船状況を考えると、通常の航行で必要となる操船は針路変更と横移動の組合せと考えられる。針路変更のために必要な船の特性は新針路試験の解析結果より新針路距離等の実用的な指標値としてまとめられており、変針のための操船法と直接結び付いた性能指標として実際の操船においても活用されている。一方、横移動は目標航路からの偏差の補正や遭遇他船を避航する目的から実施されるが試験法としては確立されていない。従って、変針と同様に重要な操縦特性の指標となる横移動に関してさらに検討を進めることが重要となる。そこで、本研究ではこのような立場より、横移動を実現する平行移動操船について検討するとともに、外乱として風を作用させた時の影響およびその評価法についても考察する。

2. 平行移動操船

平行移動は基本的には変針の組合せであるが、一定の幅寄せ量を与える操舵法として変針と同様に一つの要素的な操船として扱うことが適当である。過去にも同様な視点による検討がいくつか見られるものの操船法も解析

* 正会員 運輸省船舶技術研究所 (〒181 三鷹市新川 6—38—1)

・評価手法も確立されていない。例えば、野本等により平行移動操舵試験や偏位測定試験⁽³⁾が紹介されている。このうち偏位測定試験は操舵による船の応答を現針路からの偏位の形でまとめられている。

ここでは、平行移動操船としてこの偏位測定試験を拡張し、操船法を規定する操舵量等のパラメータと平行移動距離等の操船に関する指標値に注目して検討を行う。ここで扱う平行移動操船は、港湾内での操船として横移動量 B^* が船幅 B の数倍から高々船長 L の数倍程度を対象とした。操舵量は通常の余裕のある状態に対応した 15° 程度の舵角と、緊急時や操船の限界状態における 35° の最大舵角で操船することを念頭におき左右等しい舵角とした。同時に船速については港湾内の航行速度として 5 m/s (約10ノット) あるいはそれ以下の条件とした。また、出来るだけ速やかな平行移動の完了が安全航行に結びつくので、左右の操舵が間隔を置かず連続して組み合わせられる操船を採用した。

具体的には、図1に示す手順による操船を平行移動操船と定義する。まず、直線航路(針路 ϕ_0) を船速 U で航行中の船が $t=t_0$ なる時点で所定の舵角 δ_m の操舵を行う。次に舵切り返し方位角 ϕ_1 (方位角変化 $\phi_{01}=\phi_1-\phi_0$) に達した時点 $t=t_1$ で舵角 $-\delta_m$ に転舵する。そのままの舵角を維持し方位角が操舵終了方位角 ϕ_2 (方位角変化 $\phi_{02}=\phi_2-\phi_0$) に達した時点 $t=t_2$ で操舵を終了して舵を中央にもどす。無外乱で ϕ_{01} , ϕ_{02} の関係が適切であれば、この操舵ではほぼ元の航路と平行となるが、完全に平行 ($\phi=\phi_0$) にするため $t=t_3$ まで舵中央とし、それ以降、元の航路に平行となるように補正の操舵を行うものとする。シミュレーションではこの最後の段階および最初の直進状態の操船は、目標航路からの偏差をフィードバックするオートパイロットにより実現した。この時のプロペラ回転数は、平水中直進状態において所定の船速を与える回転数で一定に保持した。

この試験法のパラメータは、船速 U 、設定操舵角 δ_m 、舵切り返し方位角変化 ϕ_{01} 、操舵終了方位角変化 ϕ_{02} である。試験の結果得られる計測結果は、幅寄せ量 B^* 、整定までの所要時間 t^* 、整定までの所要距離 l^* 、舵切り返しまでの時間 $t_{01}=t_1-t_0$ および操舵終了までの時間 $t_{02}=t_2-t_0$ である。さらに、自動操舵により試験を実施するため補正を開始するまでの時間 $t_{03}=t_3-t_0$ あるいは $t_{23}=t_3-t_2$ およびフィードバック操舵のゲインが試験のパラメータとなるが、例えば外乱下では $t_{23}=0$ とするなど、状況に応じて調整する必要がある。

また、後述するように操船法の最適解としては ϕ_{01} と ϕ_{02} は独立に選べないが、実際的には予備的なシミュレーション結果を基に ϕ_{02} の目安を設定し、 ϕ_{01} との不整合は補正の操舵で調整する方法が、幅広い外乱状況下での試験法として考える場合有効と思われる。運動の整定判定は方位角、旋回角速度が一定範囲に収束した時を整定時刻 $t=t_4$ とするが、この判定条件も状況に応じて適宜規定する必要がある。

3. 簡易操縦運動モデルによる検討

平行移動操船の特性を解析的に考察するため、簡略化した船の操縦運動モデルにより検討を行う。船の運動は定速航行からの微小運動変化を仮定すると線形近似として、いわゆる KT モデルで表される。

$$Tr + r = K\delta \quad (3-1)$$

$$r = \dot{\phi} \quad (3-2)$$

図1 平行移動操船の定義図

$$\begin{aligned}\xi &= \xi_0 + \int U \cos \phi \, dt \\ &\doteq \xi_0 + Ut\end{aligned}\quad (3-3)$$

$$\begin{aligned}\eta &= \eta_0 + \int U \sin \phi \, dt \\ &\doteq \eta_0 + \int U \phi \, dt\end{aligned}\quad (3-4)$$

ここで・は時間微分を意味し、 r , ϕ , ξ , η , δ はそれぞれ旋回角速度、船首方位角、移動距離、横変位および舵角を表す。また、 K , T は操縦性指数で K は旋回性、 T は速応性の指標である。

操舵法は、下記の通りとなる。

$$\delta(t) = \begin{cases} 0 & , t \leq t_0 \\ \delta_m & , t_0 < t \leq t_1 \\ -\delta_m & , t_1 < t \leq t_2 \\ 0 & , t_2 < t \end{cases} \quad (3-5)$$

ただし δ_m は設定操舵角である。

運動状態の初期条件として、 $t=t_0=0$ において、

$$\eta = \phi = r = 0$$

終端条件として、 $t \rightarrow \infty$ で、

$$\eta = B^*, \phi = r = 0 \text{ とすると,}$$

$$t_1 = [B^*/KU \delta_m]^{1/2} \quad (3-6)$$

$$t_2 = 2t_1 = 2[B^*/KU \delta_m]^{1/2} \quad (3-7)$$

$$\phi_{01} = [K \delta_m B^*/U]^{1/2} - KT \delta_m [1 - \exp\{-\alpha/T\}] \quad (3-8)$$

$$\phi_{02} = KT \delta_m [1 - \exp\{-\alpha/T\}]^2 \quad (3-9)$$

なる関係が得られる。ただし、 $\alpha = [B^*/KU \delta_m]^{1/2}$

このとき、横変位および方位角は解析解として以下の時系列として表される。

$0 \leq t \leq t_1$ のとき

$$\eta(t) = KU \delta_m [t^2/2 - T \cdot t + T^2 \{1 - \exp(-t/T)\}] \quad (3-10)$$

$$\phi(t) = K \delta_m [t - T \{1 - \exp(-t/T)\}] \quad (3-11)$$

$t_1 \leq t \leq t_2$ のとき

$$\begin{aligned}\eta(t) &= KU \delta_m [t^2/2 - T \cdot t + T^2 \{1 - \exp(-t/T)\}] \\ &\quad - 2KU \delta_m [(t-t_1)^2/2 - T(t-t_1) + T^2 \{1 - \exp(-(t-t_1)/T)\}] \end{aligned} \quad (3-12)$$

$$\begin{aligned}\phi(t) &= K \delta_m [t - T \{1 - \exp(-t/T)\}] \\ &\quad - 2K \delta_m [(t-t_1) - T \{1 - \exp(-(t-t_1)/T)\}] \end{aligned} \quad (3-13)$$

$t_2 \leq t$ のとき

$$\eta(t) = B^* - KU \delta_m T^2 [1 - \exp\{-\alpha/T\}]^2 \cdot \exp\{-t/T\} \quad (3-14)$$

$$\phi(t) = K \delta_m T [1 - \exp\{-\alpha/T\}]^2 \exp\{-t/T\} \quad (3-15)$$

これらより諸量の関係を解析的に検討することができる。例えば、船の特性が K , T の指数で表されていれば、船速 U , 設定操舵角 δ_m を与えて目標の幅寄せ量 B^* を実現するためには、式 (3-8), 式 (3-9) で規定される切り返しによる操舵を行えばよい。また式 (3-7) に示すように、左右等量の操舵をすることとなり、これはバンバン制御による最短時間制御に相当している。実際上は、 $B^* \sim \phi_{01}$ の関係が重要となり、式 (3-8) の右辺第1項の2次関数および第2項の指数関数の関係で規定される。また整定判定限界を指定すると式 (3-14) と式 (3-15) により、 t_4 が定まり整定時間 t^* , 所要距離 l^* などが求まるので、操船全体を評価できる。

4. シミュレーション

上記の試験法および指標値に関する検討結果を確認するためにシミュレーションを実施した。ここでは、シミュレーション計算とその結果について考察を加える。

4. 1 対象船およびシミュレーションモデル

対象船は風の影響を検討するため、風圧面積の大きい自動車運搬船を用いた。その主要目等を表1に示す。シミュレーションは船舶技術研究所の航行シミュレーションシステム SISANAM の機能⁽⁴⁾を利用した。計算モデルと計算手順をブロック図として図2に示す。船の操縦運動モデルには、外乱の影響を取り込んで計算するため以下に示すMMG型の運動モデル⁽⁵⁾を用いた。図3には運動計算に使用した座標系を示す。

$$m(\dot{u} - vr) = X + X_E \quad (4-1)$$

$$m(\dot{v} + ur) = Y + Y_E \quad (4-2)$$

$$I\dot{r} = N + N_E \quad (4-3)$$

m : 船体の質量

I : 船体の慣性モーメント

u, v : 前後および横方向の速度成分

r : 旋回角速度

X, Y, N : 流体力

X_E, Y_E, N_E : 外乱による力

表1 シミュレーション対象船の主要目

船種	自動車専用運搬船
船長	180.0 m
船幅	32.2 m
喫水	8.2 m
方形係数	0.547
排水量	48,700 ton
正面風圧面積	859.0 m ²
側面風圧面積	4,386.7 m ²
主機関	ディーゼル機関
MCR	13,440 PS
回転数	123 rpm

MMG型モデルでは流体力を下記のように船体、プロペラ、舵に働く成分に分解して表す。

$$\left. \begin{aligned} X &= X_H + X_P + X_R \\ Y &= Y_H + Y_P + Y_R \\ N &= N_H + N_P + N_R \end{aligned} \right\} \quad (4-4)$$

図2 船体運動計算モデル構成図

ただし、下付添字 H, P, R はそれぞれ船体、プロペラ、舵を表す。

具体的な操縦性能係数および風圧力の係数⁽⁶⁾は、SISANAM のデータベースのデータを用いた。主機関およびプロペラ軸系の運動方程式を下記に示す。

$$2\pi I_m \dot{n} = M_g(n, f) - 1/\eta_m \cdot M(n, u) \quad (4-5)$$

$M_g(n, f)$: エンジン出力トルク

$M(n, u)$: 制動トルク

I_m : 軸系慣性モーメント

u : 船速

f : 燃料操作量

n : 軸系回転数

η_m : 動力伝達率

主機関およびプロペラ等の特性は性能曲線を線形近似してモデル化した⁽⁷⁾。風等の環境条件や目標航路の設定、およびそれに基づくフィードバック操舵にも SISANAM の機能を利用した。

4.2 無外乱時のシミュレーション結果

平行移動操船の基本特性を把握するため、風や潮流等の外乱がない状態でシミュレーションを実施した。設定操舵角は $\delta_m = 15^\circ$ および 35° 、船速は $U = 5 \text{ m/s}$ および 2.5 m/s とした。また予備的な検討を行い各パラメータの影響を調査した。船長 L のほぼ2倍に当たる 400 m の横移動距離を想定した操船を中心とするシリーズ計算の結果、操舵終了方位角変化 ϕ_{02} を 20° として自動操舵によりほぼ目的の横移動距離を得ることがわかったので簡単のため以後の検討には、 $\phi_{02} = 20^\circ$ で一定とし、舵切り返し方位角変化 ϕ_{01} を第一義的なパラメータとして計算した。図4に舵角、旋回角速度、方位角、横変位、到達距離の時系列を例示する。操船法は、図1に示した通りであるが、 B^* を求める関係上 $t_1 = t_2$ として、方位角および旋回角速度の2項によるフィードバック操舵により、元の航路と平行となるように操船している。図4に対応する航跡図を図5に示す。この例では、船速 $U = 2.5 \text{ m/s}$ で航行中、舵角 $\delta_m = 35^\circ$ を取り、舵切り返し方位角変化 $\phi_{01} = 60^\circ$ で $\delta_m = -35^\circ$ に切り返し、操舵終了方位角変化 ϕ_{02} になった時刻 $t = t_2$ から、フィードバック操舵を開始し、横移動量 $B^* = 677 \text{ m}$ の平行航路に整定している。

図3 座標系

$U = 2.5 \text{ m/s}$, $\delta_m = 35^\circ$, $\phi_{01} = 60^\circ$, $\phi_{02} = 20^\circ$

図4 平行移動操船時の状態量時系列

図5 平行移動操船時の航跡図

図6 平行移動操船による幅寄せ量

このシリーズ計算の結果得られた幅寄せ量 B^* と舵切り返し方位角変化 ψ_{01} の関係を設定操舵角 δ_m と船速 U をパラメータとして図6に示す。幅寄せ量 $B^*=400\text{m}$ を想定して操舵終了方位角変化を $\psi_{02}=20^\circ$ と固定している関係上 ψ_{01} の小さい範囲は計算点がないので破線で示したが、 B^* が小さいときには小さな ψ_{02} で実施すればよい。図6の結果は定性的に式(3-8)の第1項により説明される。また図6は実際の操船において必要な幅寄せ量を実現するための操船法を与える直接的な特性資料として活用できる。例えば、この船の場合幅寄せ量 $B^*=400\text{m}$ を得る場合には設定操舵角 $\delta_m=15^\circ$ とすれば、 $\psi_{02}=28^\circ$ とする平行移動操船を行えばよい。平行移動操船の指標と操船特性の関係をみると図6あるいは別な船種船型に対する検討例から B^* は旋回性指数 K に大きく規定される。また整定時間 t^* や整定距離 l^* は速応性の指数 T とも関連が深い。

5. 外乱の影響

船の航行や海域の安全性評価を行う場合、自然環境は交通環境、地形環境と共に重要な要素でありそれらの影響は十分考慮する必要がある。ここでは風の影響を採り上げ風圧面積が大きい自動車専用船のシミュレーション結果をもとに検討した。これまでにも、操縦性能に及ぼす風圧力の影響は、保針や旋回等の操船要素ごとに考察されており、操船状態や航路の幅等を考慮に入れた操船限界や操舵余裕と風向・風速の関係が研究されている⁽⁸⁾。ここでもこの考え方に従って、風圧下での平行移動操船とその指標や操船限界について考察する。

5.1 風圧下でのシミュレーション例

無風状態と同じ舵切り返し方位角変化 ψ_{01} と操舵終了方位角変化 ψ_{02} を設定し、一様風中で平行移動操船のシミュレーションを行った。試験のパラメータは、設定操舵角 $\delta_m=35^\circ$ 、船速 5m/s である。ただし $t_{23}=t_3-t_2=0$ として舵中央に戻さず、すぐに方位角と旋回角速度によるフィードバック操舵に移行させた。これは B^* の変化により風の影響を検討するための方策であり同一の収束判定条件が満たされた $t=t_4$ のときの横変位 B^* を測定した。したがってこのシリーズ計算においては、横変位に対するフィードバック操船をしていないので最終的には平行な航路が実現されない。図7に示す結果から風の影響と操船の限界を知ることができる。縦軸は幅寄せ量 B^* 、横軸は風向 ψ_w を示す。ただしそれぞれ船からみて $\psi_w=0^\circ$ が追い風、 $\psi_w=90^\circ$ が左舷側からの横風、 $\psi_w=180^\circ$ が向い風、 $\psi_w=270^\circ$ が右舷側からの横風となる。

風圧力の運動に対する影響は風向および船速風速比で規定される。船速風速比が一定以上になると操船不能となる。ここで示した平行移動操船に対しても、風速が 20m/s では平行移動操船ができない場合がある。風速が 10m/s の結果のうち、◆マークは $t_{23}\neq 0$ として舵を中央に戻す操船法による結果を表す。これはフィードバック操舵により収束判定条件を満たす前に風とのバランス状態となることを避けるための処置である。この部分の操船法の差異は全体の特性には影響しないが、今後改良が必要である。

図8(a), (b), (c), (d)にそれぞれ風速 20m/sで $\psi_w = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ の4風向に対応した平行移動操船シミュレーションでの諸状態量の時系列を例示する。追い風の状態である $\psi_w = 180^\circ$ の場合、無風時と比べて全体に操舵時間が短くなっている。これは、風圧力によるモーメントが船首を風下に向ける方向に働いて旋回速度が速くなるためである。 $\psi_w = 270^\circ$ あるいは、 $\psi_w = 90^\circ$ の横風状態では、風圧力に対する当て舵が左右の操舵継続時間の差として舵角の時系列に見られる。 $\psi_w = 180^\circ$ の追い風状態では、相対風速が大きくなり風圧力によるモーメントが舵による回頭モーメントを越えるため、切り返しの舵を取り続けても元の航路と平行な針路に戻らない。これが、操船限界を越えた操船不能の状態である。

図9(a), (b)には、左舷側($\psi_w = 90^\circ$)から風速 20m/sの横風を受けている場合と、風速 20m/sの追い風($\psi_w = 180^\circ$)を受けている場合の航跡を示す。これらはともに目標の方位 $\psi = 0^\circ$ に船首を向けることができなかった例である。ただし前者は、横移動量を測定する都合上、航路からの偏差を考慮せず、方位角と旋回角速度のみをフィードバックして操船したため、船が元の航路と平行になる前に風圧力と舵によるモーメントがバランスした例にあたる。バランス時の舵角は 15° でまだ余裕があるので、操舵法の改良により平行移動操船は可能と考えられる。

5. 2 幅寄せ量を設定した平行移動操船および外乱の評価

旋回や保針に対する風の影響や操船限界は、基本的な特性として従来より検討されている。保針の場合、限界値に対する操舵角の余裕によりこのような評価が行われている。これは限界値と余裕量を設定すれば操舵量の平均値で外乱状態を評価していることになる。変針や平行移動のための操船は保針に比べて動的であるので操舵量の指標として平均値より高次の特性で考える必要があるとの立場から平均値、分散値、および積分量、所要距離、所要時間、整定時間等の諸量について検討した。ここでは、それらのうちデータにまとまりがあり、説明可能な

図7 風圧下の平行移動操船による幅寄せ量

図8(a) 風圧下平行移動操船時の状態量時系列

図8(b) 風圧下平行移動操船時の状態量時系列

図 8(c) 風圧下平行移動操船時の状態量時系列

図 8(d) 風圧下平行移動操船時の状態量時系列

図 9(a) 風圧下平行移動操船時の航跡図

図 9(b) 風圧下平行移動操船時の航跡図

ものを示し考察した。

実際の局面ではまず幅寄せ量を設定してそれを実現するよう操舵し針路の修正につとめる。このときの操舵量や整定時間等の変化に風の影響が反映されるので、それらを解析することにより操船に対する風の影響を評価できる。ここでは一様風中で PCC が右舷側へ $B^*=400\text{m}$ (約 $2L$) 平行移動するときのシミュレーション結果について考察する。そのため ψ_{01} は $B^*=400\text{m}$ を実現する値を試行錯誤により求めて用いた。

このような平行移動操船に対する風速の影響は、十分に操舵に余裕がある船速風速比が 1.0 の場合には、図 10 に示す風向による操舵量の変化から風の影響を操舵の積分量として定量的に知ることができる。この操舵の積分量は平行移動操船時

図 10 操舵量と整定時間に対する風向の影響

の左右の操舵持続時間の差に依存するが、整定までの所要時間 t^* の変化も操船に対する風の影響として含まれている。3章に示した最大原理に基づくバンバン操舵による方法をとれば、この操舵の積分量 I の絶対値および整定時間 t^* が最小となり評価の基準と考えることができる。すなわち整定時間 t^* により風による操船の困難さや、逆にこの操船に対する風圧力の寄与が評価できる。また、操舵の積分量 I の符号と大きさより左右への操船に対する風の影響度が判る。操船不能となる場合には、風速が上がるに従い操船の限界に近づき、最終的には操舵による回頭モーメントが風圧力によるモーメントに抗しきれず十分時間が経っても目標の方位角に達しないため、操舵の積分量 I が正または負に発散する形で現われる。以上のように、幅寄せ操船の場合、風向による影響が大きく、風向によっては風圧力が操船にプラスに働くことも確認された。

6. む す び

新針路試験と同様に実際の操船法である平行移動操船について考察し、操船に対する環境条件の影響を評価する方法について検討した。この操船法および評価法についてはさらに十分に検討する必要があるが、シリーズ計算によりその検討材料を得ることができた。今後指標値とその変化から外乱の状況の評価したり外乱の効果を加味した操船の指標を求めることができれば実際の操船に対しても有意義と考えられる。また、ここで示した試験法や評価法は水深その他の環境要素や船種・船型による差異の検討にも適用できる。

本研究は、(社)日本海難防止協会航行環境調査研究委員会小委員会の昭和63年度事業の一部に関連して実施したものである。御討論や御高配を賜った同小委員長原潔先生はじめ各委員ならびに関係者に深く感謝致します。また、シミュレーションのモデルに関し御教示頂いた(財)日本海事協会機関部主幹赤堀暉生氏、船舶技術研究所運動性能部野中晃二室長、原口富博主任研究官、研究遂行に配慮と協力を頂いたシステム技術部前部長翁長一彦氏、村山雄二郎部長および SISANAM 研究グループのメンバーに感謝致します。

参 考 文 献

- (1) 日本海難防止協会：航行環境の定量的評価手法に関する調査研究，昭和63年度報告書，1989
- (2) 貴島勝郎：操縦性能基準と Manoeuvring Booklet に関する国際動向，日本造船学会運動性能研究委員会・第2回シンポジウム 船舶の航行安全と操縦性能，1985
- (3) 藤井斉，野本謙作：操縦性能試験法，日本造船学会第2回操縦性シンポジウムテキスト，1970
- (4) Fuwa, T., Numano, M., Tanaka, K., Hino, T., Kaneko, F., Kiriya, N., Makino M. and Munemura, T.: "Simulation of Automatic Ship Navigation and Vessel Traffics (1st. Report: Design of Simulation System)", 船舶技術研究所報告，第24巻第4号，1987
- (5) 野中晃二：船舶の操縦運動の推定について，出入港自動化システムの評価技術特別講演会講演集，船舶技術研究所，1989
- (6) 辻豊治，高石敬史，菅 信，佐藤辰二：船体に働く風圧力に関する模型試験，船舶技術研究所報告 第7巻 第5号，1970
- (7) 山口守：船用ディーゼル主機自動制御システムの解析，内燃機関第5巻第12号，1966
- (8) 芳村康男：外力下の操縦性，日本造船学会運動性能研究委員会・第2回シンポジウム 船舶の航行安全と操縦性能，1985

表2 変形Z試験の結果

P C C U=5m/s			
K (1/sec)	T (sec)	δ_r (deg)	$\delta_{sw}-\psi_{sw}$ (deg)
0.0197	42.6	-0.29	35-15
0.0194	41.2	-0.57	35-10
0.0354	61.3	-0.52	15-10

付録1 変形Z試験による操縦特性の検討

K T 指数は基本的な操縦特性指数として広く用いられている。ここでも、基本特性を把握するため $U=5$ m

/sの状態に変形Z試験を行った。表2にその結果を示す。ただし、 δ_r は左右非対称性を表現する当て舵量である。

付録2 主機一軸系モデルの検討

船速の応答の時定数に比べて、主機回転数のそれは十分小さいとして通常主機および軸系の特性は無視される。しかし、プロペラ操作まで含めた精密な操船を行う場合にはこの応答遅れの補償も重要と考えられるので、

ここでは簡単なモデルを使って考察を行った。

軸系の運動方程式は、式(4-5)を用いた。また船体の運動方程式は、前後方向のみを考慮し、式(4-1)を簡略化した式(4-6)を使い、船体運動と主機を含む軸系との相互干渉を表現した。

$$\dot{m}u = -X(u) + T(n) \quad (4-6)$$

図11 軸系モデルのシミュレーション例

ただし、連立微分方程式の数値計算において船速 u はMMGモデルで計算した値を使用した。式(4-5)および式(4-6)の具体的な定式化では摂動法を用いて簡略化を図った。その結果、主機関の性能曲線およびプロペラ特性は、1次の微分係数で表現されている。ここで用いたモデルの摂動の基準点は主機回転数 $n=1.33\text{rps}$ 、船速 $u=6.02\text{m/s}$ 、燃料噴射量 $f=513\text{kg/hour}$ である。

図11に指令回転数をステップ状に変化させることにより、船が $u=5\text{m/s}$ の直進状態から $u=6\text{m/s}$ に増速するときの、主機関および船速の応答波形を示す。ただし主機回転数の制御は現在回転数と指令回転数の差に応じて燃料噴射量を調整するフィードバック方式によった。図11によれば、燃料噴射量および主機回転数はオーバーシュートの後、10秒足らずで整定している。しかし、船速の応答時定数は大きく、整定に700~800秒かかった。また、船速の時系列に主機関特性を無視した場合の応答を点線で示したがその差異は十分小さいことが確認された。

質疑応答

小川陽弘（船舶技術研究所）：風の影響を表す指標の一つとして、舵角をそのまま積分した積分量を用いていますが、これだと風向の影響だけが強く表されるように思います。操舵の困難さを示すならば、舵角の絶対値か、二乗などの積分の方が適当かと思えます。操船する立場からみると、舵角の総量が負になることもあるということ、感覚的に受け入れにくいのではないかと思いますので、如何でしょうか。

不破 健：操舵量の評価指標としてここで示した以外に、舵角の絶対値や二乗の積分量も含めて幅広く検討しています。御指摘の通り、指標値の選択は風向の影響を評価と考えるか、操船の困難さの指標を求めるかに依存します。ここでは、実用的な指標値として風向、風速と特定の操船法との関係に注目しており、平行移動であれば変針と異なり風向が定義しやすいことも含めて前者の立場で考えております。また風向により風が操船の助けになることもありますので、舵角の正負は左右と読みかえれば感覚的な問題は少なくなると思います。いずれにせよ、どのような指標値が適当であるか、今後も十分に研究することが必要と考えています。

鳥野慶一（北海道大学）：本論文の操船で操船不能になるのは、風圧のヨーモーメントの影響か、それとも力の影響によるものかいずれが大きいのでしょうか。

不破 健：一般論としては運動全体には風圧モーメントの作用の寄与が大きいと考えます。また、本論の主旨である実際の局面における影響を評価する立場では特定の船型、特定の操船法において総合された結果として、どの方向からの風に大きく影響されるかを知ることが第一目標といえます。その意味では図7の B^* に対する風の寄与として操船不能は風圧力の影響の大きい横風の場合という表現となります。平行移動操船は動的に舵角を切り返す部分と保針の部分とからなるので、各段階ごとに成分を検討しないと横力とモーメントの寄与に関する全般的な結論は得にくいと思います。