出入港時の要素操船性能について—Ⅱ.

——保針操船とその限界——

小 瀬 邦 治*・岩 崎 寛 希**・吉 川 賢 治***

Elemental Performances of Harbour Approaching and Departing Maneuvers—Ⅱ.
—Manual Course-Keeping and Allowable Limit of Directional Instability of Ships

Kuniji KOSE, Hiroki IWASAKI and Kenji YOSHIKAWA

Abstract

In the previous report, the authors have pointed out that manoeuvring motions of ships in harbours can be briefly divided into and composed of several kinds of elemental manoeuvres, such as course keeping and changing with/without speed changing, turning drifting and so on. In the present report, an attempt is done to analyze a manual steering system of directionally unstable ships under speed changing, putting a special emphasis on the allowable limit of instability.

At first, the frequency responses of unstable ships are examined and the specific characteristics of phase lag of unstable ships are pointed out. Summarizing in short, the directional stability and the rudder effectiveness of ships under decelerating become less but the phase lag of ships under the condition is not so different from the one under constant speed.

Secondly, the performances of human operators are investigated by the manoeuvring simulator of Hiroshima university and their models are identified statistically from manual course-keeping simulations under constant advance speed. It is pointed out from such studies that human operators can adjust easily their control gain, responding to the properties of ships but they have a limit in compensating the phase lag of unstable ships for stabilizing the manual course-keeping system. The allowable limit of the phase lag to be compensated by human operators is roughly estimated about 30 to 50 degrees. Then, the difficulty of manual course-keeping for such ships is characterized by the phase lag to be compensated by human operators. Taking the above into consideration, it is concluded that the difficulty of course-keeping under decelerating differs little from under constant speed.

The above conclusion is finally made sure of from manual course-keeping simulations under decelerating.

1. は じ め に

IMOは航行安全の立場から、船に要求される最少限度の操縦性能（操縦性基準）のあり方を検討しているが、これには最も安全性が重要となる出入港操船を考慮する必要がある。又、船の操縦性能を記載した Maneuverability Booklet の検討の際、操船者側からそれに盛りこんで欲しいと要請のあった項目⁽¹⁾の主力は港湾域における操船にかかわるものであった。

* 正 会 員 広島大学工学部（〒724 東広島市西条町大字下見）

** 正 会 員 大島商船高等専門学校（〒742-21 山口県大島郡大島町小松 1091-1）

*** 学生会員 広島大学工学部（〒724 東広島市西条町大字下見）

船の操縦性に関する研究の進展に伴って、操縦運動の数学モデルは一般の航行局面に対しては実用の域に達し⁽²⁾、水域に制限があり、低速で縦横自在に操船される局面に対しても検討⁽³⁾が進んでいる。これらを利用して、定常旋回特性とかZ試験成績とか、代表的な操縦運動はほぼ推定できる状態になっている。

こうして、確立しつつある操縦運動の数学モデルを活用して、港湾域における操船の安全に資することが今日の操縦性研究の課題の一つとなる。先に筆者らは、出入港操船を加減速を伴いつつ保針、変針する、その場回頭する、そして横移動するといった要素操船の組合わせで考えることを提案した⁽⁴⁾。そうすると、各要素操船の性能とか、制御限界といった問題は、運動力学的、制御工学的立場から取扱いうることになる。さらに、操縦性能基準のあり方を考える際にも、要素操船という単純な操縦が人間の能力で実現できるかという立場を当面の出発点とすることができる。

そこで本稿においては、加速、減速しつつ保針する要素操船を取りあげ、操縦性能のおよそ明確となった船と、特性の明瞭でない操舵員の2者から成る閉ループ制御系の安定性という立場から、人間の制御限界、船に要求されるべき性能等について考察し、実時間操船シミュレータを用いて確認したので報告する。

2. 供試船と減速中の操縦性能

2.1 供試船シリーズ

この研究に用いる供試船としては、強い針路不安定な性能を持つものが望ましい。そこで初期に建造された典型的なVLCCの中から、不安定ループの全幅が 10° 以上のVLCCで、拘束操縦性試験が実施されているものを選択した。

変速中の操縦運動性能を正確に推定するには、プロペラ回転数の変化が舵の特性に及ぼす影響を正確に見積る必要があり、船体、プロペラ、舵の役割を分離した形で扱うMMGモデルを用いて流体力を記述するのが望ましい⁽⁵⁾。しかし、拘束操縦性試験は実施されているが、プロペラと舵に作用する流体力の計測はなされていないので、プロペラ特性、舵の船体に対する干渉係数等を実績から推定し、MMGモデルの諸係数を求めた。この供試船の流力微係数等を表1に示す。又、無次元化の方法等はITTCの標準によった。

船の大きさが変わると、操縦運動のテンポが変化する。人間の特性はこの運動のテンポによって変わることが知られているから、供試船として、母型の $L_{pp}=310\text{m}$ のVLCCの他に、船長が、200m, 100m, 50m

のものを考えることとした。この換算において、船体抵抗のみに尺度影響を考慮し、その他の無次元化されたパラメータはすべて同じ値を用いている。又、これら4船の舵高さを一定として、舵面積を増減したと仮定して、不安定ループの全幅が、 15° , 10° , 7.5° , 5° の全16隻のシリーズモデルを用意した。図1に長さが母型の310mシリーズの定常旋回特性を示す。

2.2 針路不安定船の保針時の周波数特性

一定速度で保針航行中、運動が微小であると仮定すれば、重心に原点を置く船体固定座標系を用いて、船の運動方程式は次式で与えられる。

表1 供試モデル(母型)の流力微係数

微係数	$\times 10^3$	微係数	$\times 10^3$	微係数	$\times 10$
J_s	689.45	$Y'\dot{v}$	-12.21	$N'\dot{v}$	-0.47
m'	13.794	$Y'\ddot{r}$	-0.612	$N'\ddot{r}$	-0.677
I'_{zz}	0.849	$Y'v$	-12.377	$N'v$	-7.5622
		$Y'r$	2.5008	$N'r$	-2.0425
$X'\dot{u}$	-0.84	$Y'vvv$	-138.21	$N'vvv$	8.1391
$X'uu$	-0.9725	$Y'r r r$	0.8046	$N'r r r$	-1.1881
$X'v$	-3.2958	$Y'v r r$	-21.74	$N'v r r$	3.2248
$X'vv$	8.189	$Y'v v r$	11.066	$N'v v r$	-13.339
$X'vvv$	0.0				
$X'rr$	0.0				
$X'vr-Y'\dot{v}$	10.71				

$$m(\dot{u}-vr) = -\frac{\rho}{2}L^2U^2X'$$

$$m(\dot{v}+ur) = -\frac{\rho}{2}L^2U^2Y'$$

$$I_{ZZ}\dot{r} = -\frac{\rho}{2}L^3U^2N'$$

ただし,

m : 質量 U : 船速 I_{ZZ} : 慣性モーメント

X' , Y' : 船に作用する縦横方向の力

N' : 船に作用する重心まわりのモーメント

u , v , r : 船の縦横方向の速度と旋回角速度

ここで, 操舵に対する旋回や横流れは第2, 3式を連立した形で考えることができる。又, 保針中であるから旋回と横流れが微少であると仮定すると, 船に作用する横方向の流体力と重心回りのモーメントは船体とプロペラによって生じる成分と舵の寄与する成分の和として, 次式で表現できる。

図1 船長310mの供試シリーズによる定常旋回特性

$$Y' = (Y'_{HP\dot{v}}\dot{v} + Y'_{HP\dot{r}}\dot{r}) + Y'_{HPv}v + (Y'_{HPr}r + Y'_{HP\dot{u}}\dot{u})r' - (1 + a_H)F'_N \cdot \cos \delta$$

$$N' = (N'_{HP\dot{v}}\dot{v} + N'_{HP\dot{r}}\dot{r}) + N'_{HPv}v + N'_{HPr}r' - (x'_R + a_H x'_H)F'_N \cdot \cos \delta$$

この場合の流力微係数は, プースティングのような過渡特性を無視すると, 舵への流入速度を u_R とすると, 次のように計算できる。

$$Y'_v = Y'_{HPv} + k_1 \gamma_R (u_R/U)$$

$$Y'_r = Y'_{HPr} + k_1 \gamma_R l_R' (u_R/U)$$

$$N'_v = N'_{HPv} + k_1 \gamma_R (u_R/U)$$

$$N'_r = N'_{HPr} + k_1 \gamma_R l_R' (u_R/U)$$

$$Y'_\delta = k_1 (u_R/U)^2$$

$$N'_\delta = k_2 (u_R/U)^2$$

ただし,

$$k_1 = - (1 + a_H) \cdot (A_R/Ld) \cdot (d/L) \cdot f_\alpha$$

$$k_2 = - (x_R + a_H x_H) \cdot (A_R/Ld) \cdot (d/L) \cdot f_\alpha$$

γ_R : 船体の整流作用に伴う修正係数

u_R : 舵位置の有効流速の縦方向成分

a_H : 船体に作用する舵の干渉力を表す係数

x_H : 船体に作用する舵の干渉力の中心

f_α : 舵単独直圧力特性の迎角に対する傾き

$-l_R' \approx 0.9$

x_R : 舵位置

A_R : 舵面積

L : 船長

d : 喫水

この運動方程式中から横流れの項を消去すると, よく知られた操舵角 δ による回頭運動を与える応答方程式が得られる。

$$T_1 T_2 \ddot{r} + (T_1 + T_2) \dot{r} + r = K\delta + K T_3 \dot{\delta}$$

ただし,

$$T_1 T_2 = (L/U)^2 q'_1 / q'_3$$

$$T_1 + T_2 = (L/U) q'_2 / q'_3$$

$$K = (U/L) q'_4 / q'_3$$

$$T_3 = (L/U) q'_5 / q'_4$$

$$q'_1 = (m' + m'_y) (I'_{zz} + J'_{zz})$$

$$q'_2 = - (m' + m'_y) N'_r - Y'_v (I'_{zz} + J'_{zz})$$

$$q'_3 = Y'_v N'_r + N'_v \{ (m' + m'_x) - Y'_r \}$$

$$q'_4 = N'_v Y'_\delta - N'_\varepsilon Y'_v$$

$$q'_5 = (m' + m'_y) N'_\delta$$

..... (1)

m_x, m_y : x, y 方向の付加質量

J_{zz} : 付加慣性モーメント

$Y_v, Y_r, N_v, N_r, Y_\delta, N_\delta$: 流力微係数

r : 回頭角速度 δ : 舵角

このようにして算出した各操縦性指数を表 2 に示す。ここで各船の識別符号のうち、前部が船長(m)を後部が不安定ループの全幅(度)を示している。又、各操縦性指数の中で、 K , T_1 と不安定ループ幅の関係を図 2 の実線で示す。図 1 の旋回特性の不安定ループ幅に直接寄与し、原点付近の傾斜を与える K は、針路不安定船では負の値を取り、ループ幅によって大きく変化する。又、 T_1 についても同様に負となり、針路安定性によって変わる。しかし、他の指数 T_2 , T_3 については、ほとんどループ幅に依存しないことがわかる。この理由については後に簡単に考察する。

さてここで、保針時の制御系の周波数特性について考える。一般に船の針路制御系は図 3 に示す構成を持つ。制御系を構成する要素のうち、コントローラが人間の場合がこの研究の課題である。この閉ループ制御系のうち、人間以外の操舵機、船、コンパスつまり、制御対象の応答特性は、次式で記述される。

$HG(j\omega)$

$$= \frac{K(1+j\omega T_3)}{j\omega(1+j\omega T_1)(1+j\omega T_2)(1+j\omega T_E)}$$

ただし、 T_E は操舵機の時定数である。

上式を用いて針路不安定な供試船シリーズの船と操舵機、コンパスの周波数特性を計算した結果を図 4 に示す。(a)はループ幅 10° の母型のもので、船長を変えた場合を示す。そして(b)は $L_{pp} = 310\text{m}$ で、針路安定性が違うシリーズの結果を示す。船の運動のテンポは (L/V) で決まるから、本研究のようにシリーズ船の速力を一定とすると、船の長さが直接その船のテンポの違いを示すことになる。この結果から、針路不安定な船の周波数応答特性を特徴づけるのはその位相特性であると指摘できる。この位相特性はおよそ次のように説明できる。針路不安定な船では低周波数域では、位相遅れが大きく、 $3\pi/2$ となる。周波数が高

表 2 供試シリーズモデルの操縦性指数

Ship	L/V ^{sec}	$2\pi\theta_c$ ^{deg}	$\sec K$	$\sec T_1$	$\sec T_2$	$\sec T_3$	$\sec T_E$	$\deg \theta_c$
L50-5	5.926	5	-0.181	-18.95	2.301	5.795	2.0	-12.86
L50-7.5	do.	7.5	-0.133	-16.36	2.328	5.796	do.	-15.26
L50-10	do.	10	-0.118	-15.41	2.340	5.796	do.	-16.31
L50-15	do.	15	-0.077	-13.40	2.387	5.835	do.	-19.05
L100-5	11.853	5	-0.093	-37.88	4.546	11.459	do.	-0.81
L100-7.5	do.	7.5	-0.072	-33.22	4.593	11.460	do.	-2.65
L100-10	do.	10	-0.057	-30.17	4.630	11.461	do.	-4.11
L100-15	do.	15	-0.043	-27.29	4.707	11.539	do.	-5.88
L200-5	23.701	5	-0.045	-75.50	9.123	22.984	do.	6.72
L200-7.5	do.	7.5	-0.034	-65.69	9.223	22.987	do.	4.98
L200-10	do.	10	-0.028	-60.46	9.288	22.989	do.	3.86
L200-15	do.	15	-0.020	-54.31	9.456	23.166	do.	2.17
L310-5	36.778	5	-0.028	-115.74	14.208	35.756	do.	9.71
L310-7.5	do.	7.5	-0.022	-103.80	14.330	35.760	do.	8.43
L310-10	do.	10	-0.018	-94.80	14.440	35.764	do.	7.27
L310-15	do.	15	-0.013	-84.58	14.723	36.068	do.	5.58

図2 船長, 針路安定性の違いによる操縦性指数の変化

くなるにつれて, T_3 の位相進み効果が増してきて, 位相遅れは π 以内に回復する。更に周波数が高くなると, T_2 が位相を遅らす方向に効いてくるので, 船自体の位相遅れは最終的に π になる。

制御対象全体としては, これに操舵機特性が加わる。操舵機の時定数 T_E は船の大きさによらずほぼ一定であるから, 小型船, 高速船では T_3 と T_E の比が小さくなる。この為, T_3 の位相進み効果が十分に現れないうちに T_E による遅れが発生し, 中間周波数域における位相遅れの大きさを大きく支配

図3 人間の制御特性モデル
(文献(9)から引用)

図4 供試シリーズモデルのゲイン, 位相特性

することになる。図4(a)中の実線で示す特性は、船長、ひいては船の運動のテンポがちがった場合の位相特性の変化を典型的に示すものである。

さて、制御対象の周波数特性に船の針路安定性がどのように効くかが、図4(b)からわかる。この針路安定性のちがうモデルは、舵面積を増減する形で導いたものであり、安定性のよい船は舵面積を増した分だけゲインが大きくなっているが、その程度は小さいことがわかる。位相特性については、ループ幅が 5° から 15° という相当に針路安定性がちがうモデルであるにもかかわらず、予想以上に位相特性の変化が小さいと指摘できる。これは中間周波数域における位相特性が T_1 、 T_3 に規定されるが、この2つの時定数は舵面積が変化した程度では殆どその値を変えないからである。ここで、舵面積が操縦性指数に及ぼす影響について多少の考察を加えておく。舵面積を変化させた時、主として変化する微係数は Y_δ 、 N_δ である。 Y_r 、 N_r 、 Y_v 、 N_v の項はその主力は主船体で決まり、舵の寄与する部分はわずかであるが、操縦性には大きく効いてくる。又、船の質量や付加質量の項に至っては殆ど影響がないと考えてよい。このことを考慮すると、舵面積の影響が大きいのは、まず $q_3 (= Y_v'N_r' + N_v'\{(m' + m_x') - Y_r'\})$ であり、第1項と第2項は肥大船ではきわどいバランスを保っている。それで、この q_3 は零付近の値をとり、微係数のわずかなちがいで正負に値を転じる。したがって、この q_3 が効いてくる T_1 は大きく影響を受けるが T_2 はあまり変化しない。又、 Y_δ 、 N_δ は舵面積の変化によって、ほぼ同じ割合で増減するから T_3 の分子と分母の増減は互いに相殺されて、 T_3 は殆ど変わらないという結果になる。なお、本研究の供試船は表2に示した舵面積を変更した場合について成り立つものである。船型要目が大幅に変化した時に、これらの操縦性指数がどのように変わるかについては、別の機会に論じたい。

さて、制御対象の特性がわかったので、制御系全体の性能の検討に移る。制御系の性能を把握する際の基本は、その安定性である。これには、ナイキストの安定判別の方法⁽⁶⁾があり、それによると、コントローラと制御対象を併せた一巡伝達関数を求め、そのゲインが1となる周波数、カットオフ周波数において、その位相遅れが π 以内であれば、制御系は安定になることがわかる。

前述の制御対象の応答特性を考えると、もし可能ならば、コントローラのゲインを調整して、カットオフ周波数を制御対象の位相遅れが最少となる周波数域に一致させることができれば、少ない位相進みで制御系の安定性が保ちうることになる。人間であれ、オートパイロットであれ、パワーステアリングが採用されている現在の船にあっては、このゲイン調整は極めて容易であるから、上記の最少となる位相遅れの値、つまり安定性から必要とされる位相補償量が制御系の性能を決めることになる。表2に本供試船の位相補償量を示す。

2. 3 減速中の船の保針制御特性

減速中には時々刻々と船の性能が変わり、それに応じてコントローラも特性を変えている。しかし、減速中における船速の追従は、旋回応答に比べて極めて緩やかであるから、この過渡状態における船の保針性能の基本は、その時の船速とプロペラ回転数によって決まると考えることができる。つまり、減速中の保針をその時々船速とプロペラ回転数で決まる準定常問題として取扱うという視点をうる。そこで、減速中に生じる船速とプロペラ回転数における船の旋回応答特性について検討を加えた。図2中に各船の Full, D. Slow に対応するプロペラ回転数をしめす。又、同図の破線がプロペラ回転数が Full に対応する船速で航行中に D. Slow を指令した場合の K 、 T_1 の変化を示したものである。まず、スタティックゲインにあたる K は、プロペラ回転数の減少に応じて顕著に下がり、Full の場合に比べて D. Slow は約1/2程度になる。 T_1 で示される安定性もやはり回転数の減少により悪化するが、 K ほどではない。又、 T_2 、 T_3 については、ほとんど回転数による変化はない。この操縦性指数の変化の仕方は、先述の舵面積の増減の場合と同じ議論で説明できるものである。図4(a)中の破線は、減速により変化した指数を用いて描いた操舵指令に対する旋回応答のゲインと位相遅れを計算したものである。ゲイン特性の方は舵効きが低下した分だけ、小さくなり、位相の遅れも大きくなっている。しかし、ゲインが Full 時に比べ約1/2に減少しているのに対し、位相の変化はわずかであり、安定化に必要とされる位相補償量には顕著な差はない。

3. 操舵員による減速中の保針限界

減速中の保針制御系は、操舵する人間の立場から考えると、制御対象の性質が船速の変化に伴って時々刻々と変わることになる。しかし、この船速変化は極めて緩やかであるから、人間は相当程度制御対象の性能変化に追

従して、自らの制御特性を調整できると考えられる。この立場から、制御対象の性能は船速とプロペラ回転数で決まり、その性能に十分にチューニングされた人間の特性を組合わせる形で減速中の保針制御の基本的性質が解明できると考える。

これらの考え方を実証するためには、減速状態を操船シミュレータに設定し、操舵員による保針のシミュレーションを試みるのが有益と考えられる。

そこで、昨年度に開発した操船シミュレータ⁽⁷⁾を用いて、減速中の保針操船に関するシミュレーションスタディを試みた。このシミュレーションスタディの供試船は前述の16種のシリーズモデルである。

3. 1 人間のモデルと加える外乱

人間の制御動作は非定常性、非線型性等を含み相当複雑なものであるが、平均として把握された線型部分 $H(j\omega)$ で基本が表現できるものとし、それ以外の成分をレムナント $n(t)$ といういわば人間の発生したノイズと考える⁽⁸⁾。こうすると、人間を含む制御系の特性の基本はこの線型成分で議論できると期待される。この考えの下で、船の保針制御系は図3のように表現できる。この図中の $i(t)$ は船が受ける外力であり、コントローラはこの外力の影響をキャンセルし、船の針路誤差が零になるように制御出力、つまり指令舵角を与える。この場合の人間の平均的な周波数特性は、この外乱に対する人間の応答と結果のそれぞれのクロススペクトル密度の比である次式で表現できる。このことは、文献⁽⁹⁾

に詳しい。

$$Y_h(j\omega) = \frac{\phi_{i\delta}^*(j\omega)}{\phi_{i\phi}(j\omega)}$$

$\phi_{i\delta}^*$: 角速度相当の外乱と命令舵角とのクロススペクトル密度

$\phi_{i\phi}$: 角速度相当の外乱と針路誤差とのクロススペクトル密度

本研究では、正横方向からの平均風速 10m/s で、そのスペクトルがダーベンポートによるとした場合の変動風と出合い周期 5 秒の波浪によって生じた外乱を加えた。船長が 100m の場合に加えた回頭角速度の形に換算した外乱のパワースペクトル密度の例を図5に示す。それぞれ低周波域が変動風の、高周波域が波浪の成分であるが、波浪の成分については複雑さを避けて同一船長のものは同一の波浪応答とした。

3. 2 人間の制御特性と限界

まず、通常船速で保針操舵を行った結果から前述の方法で求めた人間の制御特性の例を図6に示す。小山等の結論⁽⁹⁾のとおり、人間が与える位相補償量は、一般に $\pi/6$ 程度から $\pi/3$ 位のようにある。又、図7の実線は船と操舵機の応答特性であり、実験点は人間を含んだ一巡伝達関数を示している。人間の制御のゲインは、でたらめに設定しているわけではなく、位相遅れが小さくなる周波数域にカットオフ周波数を設定するように調整されていることも確認できる。

また、減速中に生じる船速とプロペラ回転数で決まる船の性能をセットして、保針シミュレーションを行った。こうした状態の船の性能に対しても人間の制御特性は上述の指摘のとおりであることを確認した。

したがって、減速中の人間による保針を考えた場合、制御対象の変化に追従して、人間がどの程度すみやかに、自己の特性を調整できるかが問われることになる。この人間の特性のチューニング能力をチェックするために、しばらく一定速力で航行後、プロペラ回転数を極端に減らし、減速しつつ保針するというシミュレーションを行

図5 保針時に付加した外乱のパワースペクトラム (Lpp=100シリーズ)

図6 針路不安定船の保針時における人間の特性の同定例

図7 人間による保針時の制御系の応答特性の例

った。その時の船速，方位，舵角の時系列を図8に示す。プロペラ回転数を減じた直後，船の特性が急速に変わったことになり，しかも最も針路不安定になっているのであるから，もし人間の制御特性のチューニングがうまくいかないのであれば，安定性に問題を生じ，蛇航が増すはずである。しかし，減速開始から図8のB点付近までは特に顕著な蛇航の増加は見られないから，およそ人間はすみやかに自己の特性をチューニングしているものと考えられる。

このことは制御対象の特性から考えて，ゲインのチューニングはかなり大雑把でよいと判断されるところから十分に予想できるものである。つまり，位相遅れが最少になる範囲は緩やかな山状の特性になっており，カットオフ周波数が多少どちらかにずれても，極端な位相補償量の増加は生じないからである。

減速が進むにしたがって船の安定性は少しずつ回復するけれども，外力の影響は相対的に大きくなる。そこで，外力の影響による蛇航は船速の低下とともに顕著になり，最終的には操舵によって外力に抗する旋回モーメント

図8 減速時の保針シミュレーション例

が確保できなくなって、ついには針路の発散を招くことになる。その外力との静的な釣合い限界と思われる点が図8のB点である。この釣合問題については、すでに多くの船型に対して計算例⁽¹⁰⁾が示されているのでここでは論じない。

ここでの結論は、動的な意味での人間による保針、換言すると、人間の操縦下における保針制御系の安定性は、一定速力で航行中と較べて減速中にも極端な低下はないと見込まれることである。したがって、チューニング漏れ等を考慮して、一定船速航行時の保針制御系をある程度余裕を持って評価しておけば、静的な釣合いの十分に保ちうる範囲ならば、減速中も動的な意味での安定性が保たれると考えてよいと指摘できる。

4. 結 言

港湾域における操船と要素操船という概念で把握することを提案し、今回はその最も基本的なものである速力変更を含む保針について人間による針路不安定船の減速中の保針がどこまで可能かという問題を中心に検討を加えた。得られた主な結論は次のとおりである。

- (1) 一定速力航行中と同様、その時々船速とプロペラ回転数で決まる船体の応答特性に操舵機の特性を加えた周波数応答から決まる位相補償必要量が減速時においても人間による保針の可能性の目安になる。
- (2) 一定速力航行時に較べて減速中船のゲインはかなり低下するが、位相の遅れの増加はわずかである。
- (3) 人間による保針は、制御対象の位相遅れが最少になる周波数域に、一巡伝達関数のゲインが1となる周波数を設定するように自らゲイン特性を調整し、位相補償量が最小ですむように制御している。その限界は、 $\pi/6 \sim \pi/3$ 程度であり、保針制御の限界を規定する。
- (4) 人間による保針制御系の安定は、減速中にも極端な低下はない。一定船速航行時の保針制御系をある程度余裕を持って評価しておけば、減速中も安定性が保たれる。この研究の一部は、文部省科学研究費補助金を用いた成果であることを付記する。又、この研究の過程で、操船の専門家として協力いただいた弓削商船高専の地本船長、豊田一等航海士、大島商船高専の西田船長に御礼を申し上げたい。又、日本造船研究協会 RR 742 分科会（小山健夫主査）における種々の討論は本研究の進展に有力な手助けを与えるものであった。最後に、広島大学工学部の浮体運動学研究室の諸氏のご協力も忘れることができない。付言して謝す次第である。

参 考 文 献

- (1) 日本造船研究協会第7基準研究部会：国際規則と船舶設計等との関連に関する調査研究報告書（別冊）—船舶の操縦性に関する研究—，昭和59年3月
- (2) 例えば柏木正：不均一潮流中での船舶操縦運動の計算法と鳴門海峡における適用例，日本航海学会論文集，第75号，pp. 55～67，昭和61年
- (3) 例えば小瀬，日當，橋詰，二川：低速で航行する船の操縦運動モデルについて，日本造船学会論文集，第155号，1984
- (4) 小瀬，日當：出入港時の要素操船性能について—Ⅰ—。—出入港操船と要素操船性能—，日本航海学会論文

集, 第74号, pp. 29~34, 昭和61年3月

- (5) 小瀬, 湯室, 芳村: 操縦運動の数学モデルの具現化—船体・プロペラ・舵の相互干渉とその表現, 日本造船学会, 第3回操縦性シンポジウム, pp. 27~52, 昭和62年12月
- (6) 伊沢計介: 自動制御入門, オーム社
- (7) 小瀬, 平田, 平尾, 大橋, 浜田: 出入港操船シミュレータ, 日本航海学会論文集, 第79号, pp. 101~107, 昭和63年
- (8) 後藤: 手動制御系における操縦者の線型モデルについて, 日本航空学会誌, 21巻232号, 昭和48年
- (9) 小山, 小瀬, 長谷川: 保針操舵における針路不安定の許容限界に関する考察, 日本造船学会論文集, 第142号, pp. 119~126, 昭和52年
- (10) 小林, 中谷: 定常風下における保針操舵限界に関する一考察, 日本航海学会論文集, 第66号, 1981

質 疑 応 答

鳥野慶一: 人間の特性について, 微分特性, 積分特性が存在すると思いますが, この場合どちらが現れているのでしょうか。

岩崎寛希: 人間の特性は, 微分特性に現れ, 積分特性はあまり発揮できないと言われています。しかし, 今回は人間の特性を仕分けして解析はしておらず, 位相補償量, ゲイン調整等を人間の総合的な特性として算出いたしました。

奥村宗行: 前刷りの図1と講演時 OHP の図と違って見えますが, 特に PHASE LAG の曲線で見えますが, どうしてでしょうか。

又, 超大型から小型船に向ってカーブのピークが右にずれていくのはどういう理由か示して下さい。船丈とその舵面積比についての影響があるのか, その影響をどのように取扱っているのでしょうか。

岩崎寛希: 前刷りの図1と OHP は同じ図ですが, 位相遅れのスケールが違いました。誤解を招きましたことを深くお詫びいたします。

小瀬邦治: 問題の図4は, 人間の制御の対象となります船体, 操舵機, コンパスの系の周波数特性を描いたものです。船体のみの特性に限定しますと, 針路安定な船と違い, 不安定船の場合は位相遅れは低周波域で 1.5π となり, 高周波になるにつれて, 一度は π 以内に回復し, 最終的には π に落ちつきます。これに, 今回各船ルール等を考慮して操舵機の時定数は一律に2秒としましたが, この操舵機の一時遅れが加わると, 位相遅れの π への修復するか否かは, 各船の運動のテンポを表す T_s によって左右されることになります。小型船程 T_s と T_E の比が小さくなるため, T_s の位相進め効果が十分効かないうちに T_E の遅れが発生し, 位相遅れが π に回復していません。したがって, グラフが小型船程右にずれるのは運動のテンポが速くなるためで, 又, ピーク値が下がるのはその右にずれる位相に対し, 操舵機の時定数が高周波数域で一律に位相を遅らせるように効いてくるためです。