パイロット操船からみた針路不安定の許容限界 に関するシミュレータスタディ

小 瀬 邦 治* ・中 谷 辰五郎**
信 川 孝 司*** ・中 村 祐 三***

Simulator Study on an Allowable Limit of Directional Instability
of Ships from the View-Point of Marine Pilots

Kuniji KOSE, Tatsugoro NAKATANI,
Takashi NOBUKAWA and Yuzo NAKAMURA

Abstract

The Japanese Pilots' Association has listed out a significant number of ships with extremely poor maneuverability. The ships are under operation in ports and waterways near Japan and dangerous experiences happened on such ships have been pointed out by the association. These show us an urgent necessity of the maneuverability standards which are the minimum requirements in maneuverability of ships.

To evaluate relations between the maneuverability and the operational safety from the viewpoints of marine pilots, simulation studies were carried out as a cooperated program between the Japanese Pilots' Association and Hiroshima university. Maneuvering simulations of berthing in some port and passing through a curved narrow channel were conducted by pilots on the Harbor Maneuvering Simulator of Hiroshima University.

The difficulty was assessed by the pilots. The results of performed maneuvers were carefully examined and the relation between both results was also confirmed. The allowable instability limit estimated from the present simulator studies is finally reported.

はじめに

最近、船が最低限、持つべき性能を明確にし、基準化しようという立場から、種々の研究がなされている。この操縦性能基準を巡る議論に重要な問題提起をしたのが、日本パイロット協会の操縦性能不足船リストであった。操船のベテランであるパイロットが不安を覚えるような針路不安定船が相当数、運航されていることは安全上大変に深刻な問題であり、パイロット協会では操縦性に関する小委員会を設置し、実船の性能把握と、それと操船の難易度との関連に関する調査を行っており、その結果は別に報告される筈である⁽¹⁾。しかし、パイロット業務の中で実施する操縦性能調査は時間的、場所的制約から限界がある。

* 正会員 広島大学工学部 (〒724 広島市西条町下見)

** 正会員 広島大学大学院工学研究科 (〒724 広島市西条町下見)

*** 正会員 日本パイロット協会 (〒102 千代田区麴町4-5 海事センタービル)

他方、広島大学では操船シミュレータを開発し⁽²⁾、港内操船の基本パターンである要素操船における針路不安定の許容限界を検討をしている⁽³⁾。このような操船シミュレーションの手法を用いると、多分に単純化された航行環境の下ではあるが、既知の性能の船に対する操船難易度の系統的な調査が可能になり、上述の実船調査の弱点を補うに役立つ。

そこで、パイロット操船という立場から、針路不安定の許容限界に関するシミュレータスタディを共同して実施した。操船が困難になりやすいと考えられる航行環境をパイロットの経験から摘出し、入港着桟と狭水路、漁労水域の通過という操船シナリオを制作した。このシナリオに従い、ハーバー及びベイパイロットによる操船シミュレーションを行い、パイロットの評価した操船の難易度を聴取した。また、操船の結果をまとめ、この困難度との相関を調べ、最終的に針路不安定の許容限界について検討した。以下、本研究について要約して報告する。

1. 実施した操船シミュレーションの概要

以下、操船シミュレーションの概要を紹介する。

(1) 供試モデル

このシミュレーションでは、MMG型の操縦運動の数学モデルを用い、約10度の不安定ループ幅を持っている初期のVLCCを母船型とした。この船の流体特性は拘束操縦性試験をベースとし、舵特性は類似船型の実績から求めた。このVLCCの数学モデルを単に時間スケールを変更する形で、船長約140m、排水量約2万トンの船に換算した。そこで、通常の2万トンクラスの船に較べて、結果的には主機馬力が相対的に小さい特性を持つと考えられる。このモデルの舵面積を変更して、ループ幅が 5° 、 7.5° 、 10° 、 15° のシリーズモデルを作った。

図1 供試モデルの定常旋回特性

これらのモデルの定常旋回特性を、図1に示す。なお、入港時の停止、横移動の局面では、通常のMMGモデルから、低速時の操縦運動数学モデルに次第に切り替えている。

(2) 想定シナリオ

操船のシナリオを決めるに当たり、パイロットの側から、操船が困難な典型的な局面として、①狭水路の通過、②検疫錨地への投錨、③港内での岸壁間のシフト、④漁網の展開された海域の通過等が摘出された。針路不安定船の運動性能と操船法から、その局面でなぜ操船が困難になるかを想定し、これらの操船の局面を次の2つの操船シナリオに集約し、シミュレーションに供した。

(a) 狭水路通過操船シナリオ

通常航行中、パイロットは針路の指示を操舵員に与え、船を目的の方向に誘導することができる。しかし、湾曲した狭水路などでは、旋回半径を必要な大きさに保ちつつ、時々刻々の方位を制御する必要がある、こ

のような操縦において、パイロットは操舵員に舵角を直接に指示するので、その船の性能を良く把握して操縦に当たる必要がある。こうした場合、その船がパイロットが想像しているよりも著しく悪い場合、あるいは、パイロットが適切な判断をするのが困難になるほどに性能が悪い時、操船の困難が生じる。

また、地形などに関しては、パイロットは予め情報を収集しておき、操船法を想定することができる。しかし、漁網などの仮設物はその近傍に至って初めて情報が与えられるものであるから、臨機応変な操船指揮が要求される。そのような操船を強いる意味で、漁網を配置した海域の通過を考えることにした。

岸壁への接近の場合、曳船の支援を得て操船が行われる。しかし、港湾外の錨地への接近や停船の場合には、自力操船が要求される。この場合には、精度は厳しくないが、減速しながらの船位誘導を要求される。

以上のような操船を想定して、狭水路通過操船のシナリオを作成した。想定した操船のシナリオは次の通りで

図 2 狭水路通過操船シナリオで用いた狭水路モデル
(湾曲した狭水路—漁網の間隙の通過—検疫船地)

図 3 入港操船シナリオで用いた港湾モデル

ある。

- ① 想定水路：来島海峡に類似した，図 2 に示す模擬海峡を，いくつかの島，灯台，標識ブイなどで構成した。また，水路通過後には，水路部を相当に覆う形で漁網が展開されている状況を設定している。ここを通過後，航路を航行し，検疫船地に停船することになっているが，今回のシミュレーションでは，この部分は時間の関係で省略した。
- ② 操縦性能：同僚のパイロットより，本船は針路安定性が良くないとの情報が提供されているが，詳細は操船者には不明である。
- ③ 水路，外力条件：風速約10m/s，多少の波あり。潮流は風いでいる。
- ④ 漁網：海峡通過後の航路上に漁網が張られているとの情報が提供されている。

(b) 入港着棧操船シナリオ

針路不安定船の操船においては，一定船速航行中以上に，減速中は舵効きの低下と安定性の劣化が顕著であるから，入港着棧操船のシナリオを想定した。減速中の保針，変針の難易度の研究によると，操舵員による保針に関しては減速中も一定速度の場合とあまり変わらないが，減速中の変針は顕著に困難になると指摘されている。そこで，減速しつつ，変針するような入港操船の局面を考えた。

- ① 想定港湾：図 3 に示す模擬横浜港本牧埠頭にアプローチの後，着棧する。
- ② 操縦性能：同僚パイロットより，本船は針路安定性が良くないという情報が提供されているが，詳細は操船者には不明である。
- ③ 港湾の外力条件：外乱無し
- ④ 曳船：3000馬力Zプロペラ装備曳船利用可能（隻数は指定による）
- ⑤ 着棧速力距離表示装置：使用可能

(3) シミュレーションの実施要領

狭水路通過と入港着棧のシミュレーションに際しては，それぞれ日本パイロット協会のベイ及びハーバーパイロットが操船指揮を担当した。ほとんどのパイロットはシミュレータは未経験であったから，シミュレータに馴れる意味で，最初にファミリアライゼーションシミュレーションを実施し，その後，不安定度の異なる供試モデルをランダムに設定した。狭水路通過操船シナリオの場合，時間の関係上，針路不安定の程度が軽いループ全幅が5度の場合をファミリアライゼーションとして用いた。表1はシミュレーションに参加したパイロットとそれぞれに対する供試モデルの実施順序を示す。多数のシミュレーションを実施した狭水路通過操船の場合，ループ全幅が7.5°，10°，15°のシミュレーションはランダムに順序を配置している。シミュレーションを重ねるに従って，針路不安定な船の特性やシミュレータに馴れることが予想され，その程度を把握するための配慮である。

シミュレータには，通常の航海計器のほか，レーダに替わる情報をCRT上に表示し，パイロットの要請に従

表 1 操船シミュレーションに参加したパイロットに対する供試モデルの実施順序

パイロット	供試モデル			
	1回目	2回目	3回目	4回目
A パイロット	5°	10°	7.5°	15°
B パイロット	5°	15°	7.5°	10°
C パイロット	5°	10°	15°	7.5°
D パイロット	5°	7.5°	10°	15°
E パイロット	5°	15°	10°	7.5°
F パイロット	5°	7.5°	15°	10°

価が得られた。

以上を総合すると、パイロットの立場から許容される針路不安定の範囲を求めるという今回のシミュレーションの目的から考え、必要最小限のシミュレータ性能は確保できたと判断される。このシミュレータの設計、制作に際しては、操縦室の窓の近くに大型スクリーンを配置し、下方にも広い視界を確保し、入港着岸操船の臨場感に配慮したが、この目的は十分に達成したようである。

2. 針路不安定度と操船の難易の相関に関する調査結果

2.1 調査の概要

今回、入港着岸と狭水路通過操船シナリオの内、主力として系統的に実施したのは後者である。入港着岸操船は減速状態の劣化した操縦性能の評価が主目的であり、そのシミュレーション例を前述の図3の中に示す。船首尾の棧橋からの距離、接近速力、前後位置を表示する離着岸情報表示パネルの利用等もあり、入港着岸の様子はうまく再現できたようである。しかし、今回の限られた調査例で針路不安定が操船に及ぼす影響を把握するには至らなかった。この操船では一度、大きな回頭をするが、この際には操縦性能とともに、パイロットの判断の適否が操船の結果を大きく支配すること、岸壁前面迄のアプローチの際には本船固有の性能の他に曳船の影響が大きいこと、外力を加えていないために操船が容易であった等で、操船の自由度が相当に大きく、性能限界の把握が困難だったものと考えられる。今後の系統的な調査を待って、入港着岸時の問題は検討することにした。

他方、狭水路通過操船の場合は航路の湾曲に従って、長い間、継続的に運動を制御する必要があるから、船の性能が平均化した形で把握でき、針路不安定度と操船の困難度との関係を把握しやすいようである。以下、この操船を中心にシミュレーション結果を報告する。

本研究では、これらの操船の結果を次の3つの立場から整理してみる。つまり、① 操船者に対するアンケート調査から、シミュレーションに参加したパイロットがどの様な、どの程度の困難を感じたかを整理する。これは言うなれば、供試モデルの操縦性能に対するパイロットの主観的な評価である。続いて、② 水路通過のために使用した舵角とか、船位のばらつきとかの操船結果に、針路不安定の程度がどのような影響を与えているかを整理する。これは、操船結果の客観的な評価となる。そして最後に、③ 両者の相関を調べることであり、両者の間により相関があれば、これらの評価結果に信頼性があることになる。

さて、以上のような操船シミュレーションの結果は、外力や航行環境の状況、視界等を通じて与えられる情報、緊張感等の違いを考慮して評価する必要がある。シミュレータスタディにおいては、そこで得られた結果が実際の世界の経験といかに対応しているかに関する Validation が重要である。このための方法として、① 実際と同様なシミュレーションを行う、② シミュレーションで得られた操船の困難度の評価を、パイロットの経験で実際の操船における評価に置き換えてもらう、③ 実際の船に対する調査とシミュレーションにおける評価の結果を比較し、換算の尺度を得る、換言すると、一種の Calibration を行うことが大切と考えられる。今回のスタディでは、さしあたり、①の方法は断念し、②の方法を取り入れることにした。また、日本パイロット協会では、

って、主要な目標からの距離、船速等の情報を提供した。なお、回頭角速度指示器が装備されているが、一般的な船は装備していないので、今回のシミュレーションでは使用しないことにした。

シミュレーションに際して、パイロットから操縦運動の数学モデル、シミュレータやシナリオ自体の評価も聴取した。この時に寄せられた指摘を参考にし、視界等の不十分な点は可能な限り改良を重ねつつ、シミュレーションを進めた。数学モデルに関しては、VLCベースの運動特性を設定したために、前後方向の制動力が弱く、操縦運動による船速低下も大きいこと等、多少、経験とは違うところがあるが、総じて針路不安定な船の操縦特性がうまく表現されているとの評

は操縦性能と操船の困難度に関する実船調査を進めており、③の方法もいずれ試み得ると期待される。この②と③の方法は、パイロットの操船困難度評価の尺度の Calibration を試み、シミュレーションの結果を実世界の経験に換算しようとするものである。

2.2 供試モデルの性能に関するパイロットの評価

パイロットに対する船の性能に関する質問事項は表2に示す通りであり、(1)としてシミュレーションシナリオのような操船にこのモデルが耐えられるかを、(2)として、一般的な操船局面を考慮して、このモデルの性能が耐えられるかを聞いている。以下、アンケート結果を紹介する。このアンケートに関する回答の集計結果は表2に示す。

- (1) ほとんどのパイロットが操船シミュレータによる操船は初めての経験であるから、シミュレーションに対する不慣れが評価に関連している可能性がある。この点をチェックできるように、2回目から4回目のシミュレーションにおいては、モデルの設定順序をランダムにしておき、パイロットによる評価点を試験順序毎に平均化すると、順序あるいは馴れの影響がわかる。この結果から、基本的には、順序あるいは馴れの影響は特にないと指摘できる。
- (2) シミュレーションに供したモデルの性能とパイロットの評価の関連については、一人だけ、7.5°と10°の評価が本来の性能と逆になっているのを除くと、残りは全て、正確に対応している。これから、パイロットは大変、正確に供試モデルの性能を把握しながら操縦していたことがわかり、今回のシミュレーションの信頼度が確認できる。
- (3) このシナリオの操船に耐えられるかとの質問については、5°の場合に十分、まあまあ、やや不十分が各2人ずつとなっているが、15°の場合には危険、不十分が各2人、まあまあとやや不十分が各1人となっており、5°程度ならなんとか許容できるが、7.5°あるいは10°幅では不十分という指摘が主力となる。
- (4) 一般的な操船に耐えられるかという質問に関しては、5°のループ幅の場合には、総じて「まあまあ」という評価であるが、7.5°ではやや不十分という評価が主力となり、10°では不十分、危険という評価がでてきている。
- (5) シナリオの操船と一般的な操船に耐えられるかという両質問に対する回答は、当然ながら、後者の方が厳しい評価になっている。狭水路航行中のシミュレーションにもかかわらず、潮流の影響を考えていないとか、遭遇船舶が無いとかの条件を設定しているのであるから、現実の操船はシナリオよりも困難で、性能評価も厳しくならざるを得ないと考えられる。今後、より現実に近いシミュレーションを企画する必要性を示す結果である。

パイロットから具体的に指摘された事項の詳細なリストアップは省略するが、概略、次の指摘を得た。

- ① 船が2万トンと小さいが、操縦性能不足船リストの主力を占める5万トンの船になると、通過できたかどうか心配だ。
- ② 潮流が入っていないが、実際は相当に強い影響を受ける。
- ③ 遭遇船があったら難しい。相手がこちらの行動をどう理解するか不安である。
- ④ 当て舵が効かない。結局、ハードを発令することになる。

総じていうと、今回のシミュレーションで想定した操船の局面は、実際よりも簡単であり、船の大型化、高速化、外力条件の現実化等を考慮したシナリオ開発が必要になる。

2.3 操船シミュレーション結果の評価

続いて、パイロットによって実際に操船された結果について検討する。操船結果の評価においては、例えば、

表2 操船シミュレーションに参加したパイロットに対する操船の難易に関する質問への解答

Question (1)

How do you assess the maneuverability for the maneuvers in the present curved narrow channel.

Instability loop width	5.0 deg	7.5 deg	10.0 deg	15.0 deg
Enough	● ●		●	
Possible	● ●	● ●	●	●
A little insufficient	● ●	● ● ● ●	●	●
Insufficient			● ● ●	● ●
Dangerous				● ●

Question (2)

How do you assess the maneuverability for the maneuvers which you face usually near Japan.

Instability loop width	5.0 deg	7.5 deg	10.0 deg	15.0 deg
Enough	●		●	
Possible	● ● ●	●	●	
A little insufficient	● ●	● ● ● ● ●	●	●
Insufficient			●	● ● ●
Dangerous			● ●	● ●

図4 狭水路通過シミュレーション時の航跡

図5 狭水路通過操船中の回頭角速度の分布
(6人のパイロットの平均)

性能が変わっても一定の望ましいコース上を航行しうるとか、一定以下の操作量の範囲で余裕を残して操船可能であるとか、きわめて常識的な検討を行った。以下、評価結果を要約して述べる。

(1) 最初に検討すべきは、船はどのような航跡で狭水路を通過したかであろう。図4は各供試モデル毎に狭水路通過時の航跡、6例を重ねてプロットしたものである。但し、ループ全幅が 7.5° の場合は、通過すべき航路の勘違いが1例あり、5例のみ示している。水路中のどの部分を通過すべきかは指示されていないので、どの部分を通過するかはパイロットの自由ではあるが、一見して、ループ幅が 5° の場合には、6人の操船者ともに概略、航路中央に近いスムーズな航跡を得ていることがわかる。しかし、船の性能が針路不安定になるに従い、望むとおりに航路中央を航行できず、航跡のパラツキが顕著になり、しかも、不必要な蛇行を伴っていることがわかる。パイロットの指摘によれば、遭遇船がある場合には、本船の行動意図が誤解される可能性があり、このように蛇行すると大変に危険ということである。

(2) 航行中の回頭角速度の分布を図5に示す。この結果は6人のパイロットの平均を意味しているが、このようなヒストグラムの形で見ると、顕著な差はないようである。回頭角速度の自乗平均値を求めたが、この結果にも、針路不安定の程度の顕著な影響はないように見える。

(3) この操船をする際に、パイロットが発令した舵角の分布を図6に示す。6人のパイロットの平均であるが、針路不安定の程度が強くなると、大きな当て舵が使用されるようになるのが顕著である。ループ幅が 5° のモデルの場合、 20° 以内の舵角で操船しているが、最大舵角の当て舵の発令が 7.5° から生じはじめ、 15° の場合では普通のことになっている。船の回頭運動を止めるための当て舵の効果が、回頭運動によって誘起される負の旋回抵抗モーメントによって相殺され、小さな舵角ではほとんど効果が期待できず、結果として最大舵角が採用されることになる。通常の航行中に 15° 、 20° 程度の舵角で航行できれば、残りは操作量余裕として確保できることになるが、ループ幅が 10° 以上ではこの余裕がなくなると評価される。

舵角の自乗平均値を求めた結果を実施順に示したものを図7に示す。針路不安定が強くなると、この自乗平均値はわずかに増加する傾向が見られる。増加量は少ないようにも見えるが、当て舵を発令している時間の割合が多くないからである。

針路安定性の影響が回頭角速度ではなく、舵角に顕著となるのはヒューマンオペレータの一般的な特性で、あ

図 6 狭水路通過操船中の舵角の分布
(6人のパイロットの平均)

図 7 狭水路通過操船中の舵角の自乗平均値

る程度の性能の低下は制御面で補償するということである。

2.4 シミュレーション結果とパイロットの評価との相関

操船シミュレーションに参加されたパイロットの供試モデルの性能に対する評価はモデルの特性をよく把握した上で成されており、設定した性能とよい相関を保っていた。また、操船結果にも性能の影響が現われており、針路不安定が強くなると、蛇行をしながら誘導され、航跡が人により、時により変わる結果になり、当て舵の効きを確保するために最大舵角の適用が顕著に増加し、操作量の余裕が減るという結果を得ている。ここで、パイロットによる主観的な評価と操船結果の評価との相関を確認しておきたい。

さて、図8は使用舵角の自乗平均値とパイロットによる性能評価の相関を示したものである。操舵量の増加とパイロットの感じる操船の困難度は明瞭に対応していると指摘できる。この操舵量の増加は最大舵角の当て舵を適用する頻度の増加によると考えてよい。回頭角速度の自乗平均値とパイロットによる性能評価の相関も求めているが、回頭角速度の自乗平均値には性能の影響が顕著でなかったから、当然ながら、パイロットが感じる操船の困難度との相関も明確でない。

以上の結果は当然の傾向であろう。人間は船の性能が変わるとその性能変化を補償するように特性をかえる。その結果、船の性能変化の影響は操作量にまず、現われ、制御の結果である操縦運動に顕著な影響がでるのは人間の制御限界を越えてからというのが通例である。この意味で、今回の操船シミュレーションに用いられたモデルの性能は、パイロットによる狭水路通過に必要な船首方位の制御が全く困難というには至っていないと指摘できる。しかし、操作量に余裕が残らないという形で、性能不足と評価されていることになる。

2.5 漁網回避操船シミュレーションの結果

今回の操船シミュレーションでは航路内に展帳された漁網を回避するというシナリオが含まれている。狭水路通過の場合はあらかじめ海図等で確認した水路上を予定の通りに航行可能かが課題となるが、この漁網回避操船シナリオでは、近くに到着し、はじめて視認できる障害物を臨機応変に回避する必要がある。したがって、どこまで自在に船の回頭運動が制御できるかが課題になる。この目的のために、パイロットには海上交通センターから漁網が展開されていると知らされているが、その具体的な配置の情報は提供しないことにし、しかも、3種類

図 8 狭水路通過操船中の舵角の自乗平均値と操船者の感じる操船難易度の評価との関連

図9 漁網回避操船中の航跡
(パターン mizu-01・ループ幅別)

ングが遅れ、過大な回頭を生じる等の為である。

狭水路通過操船の場合と同様に、その操船時の回頭角速度や舵角の分布、両者の自乗平均値等の算定も行い、不安定の程度が増加すると最大舵角の発令が多くなるという傾向が指摘できる。今後、この操船における針路不安定の許容限界を求めるには、シミュレーション例を増やすこと、操船区間を延長すること、潮流等の外力影響を加えること等が考慮される必要があろう。また、航路上に展開された漁網の回避は交通安全上、重要な問題になっているが、シミュレーション手法を用いて、生じる危険を定量化できる可能性も考えられる結果である。

2.6 針路不安定の許容限界に関する考察

人間の操縦を前提とした場合の針路不安定の許容限界については、操舵員による保針⁽³⁾⁽⁴⁾、変針操縦⁽³⁾についてすでに検討例がある。変針操縦についてはまだ許容限界が明瞭になるに至っていないが、保針時については人間の制御の特徴と限界がわかっている。その結果によると、保針の限界は閉ループ制御系の安定問題と考えることができ、船、操舵機、コンパスの部分の位相遅れの極小値が安定性を支配し、それが人間の進めることが可能な位相補償量、 30° 以内にあれば、保針可能となる。この意味の位相特性は船の操縦性能の他に、船の大きさに依らずほぼ一定にされている操舵機の時定数に大きく依存し、運動のテンポの速い船ほど、遅れ量が大きくなる。従って、保針における針路不安定の許容限界は運動のテンポの速い、 L/V の小さい船ほどシビアになる。野本は針路不安定の許容限界を不安定ループ全幅と L/V の関係で示している⁽⁵⁾。

図10は本研究の供試モデルの針路を安定に制御するために、コントローラとしての人間が補償しなければなら

図10 供試モデルの位相特性

の配置パターンを作り、事前のシミュレーションで馴れることがないように配慮した。

図9はある漁網配置パターンにおける船の通過航跡であり、針路不安定度の違う供試モデルごとに示している。シミュレーション例が少ないこと、また、シミュレーション区間が比較的短いから、初期のアプローチ位置の影響が大きいこと等から、この操船において許容される供試モデルの性能の範囲を結論づけるのは困難である。しかし、針路不安定の程度が増加すると、次第に意図するようなスムーズな回避行動がとれなくなっていることを指摘できよう。針路不安定な船では、一度回頭運動が発達すると当て舵によって抑制することが困難になるから、行き過ぎを恐れて十分に回頭運動を発達させられない、反対に当て舵のタイミ

ない位相進みの特性を表す。狭水路通過操船シミュレーションの結果に依れば、 L/V が20から25秒の供試船の場合、ループ全幅で 7.5° になると、相当に操縦困難と評価されている。この場合に必要とされる位相補償量は数度程度であり、 30° 程度の位相補償が可能な操舵員による保針に較べて相当に厳しい評価となっている。操舵員は長期間、その船に乗船し、船の特性に習熟できるが、パイロットは乗船後、すぐに操船指揮をする必要があり、人間の持つ習熟効果が期待できないことも原因と考えられよう。しかし、本質的には、操舵員は針路のみの制御に専念できるが、パイロットは船位を同時に制御する必要があるという点に困難が生じると考えるべきであろう。針路に較べて、船位は 90° だけ位相が遅れるから、船位に着目した操縦を強めるほど、操舵の位相は遅れがちになることは避けら

れず、その結果として、パイロット操船においては、操舵員の保針の場合以上に良好な針路安定性が要求されると考えられる。

また、不安定が増加すると、位置制御が強められないところから、図4に見るように、誘導軌跡が広く分布する結果となるのであろう。この意味で、人間の位置制御能力自体の調査が将来の課題となる。

しかし、操船限界を上述のような制御系の安定性から判断するのみでは不十分であろう。不安定船が回頭運動をすると、それを助長する方向に旋回抵抗が作用するから、回頭を止めようと当て舵を適用しても、その効果の相当部分がキャンセルされ、通常に適用される15度程度の当て舵では十分な効果が期待できなくなる。そこで最大舵角の当て舵の適用がなされる結果となるが、この場合には制御量の余裕はないことになり、操船者には相当の不安を与えることになる。著者の一人が公表している変針操船限界に関する考え方は、有限の操作量という見地が取り入れられており、この面からの許容限界の定量的把握が課題となる。

3. 結 論

本研究ではパイロット操船という観点から、船の操縦性能の中で重要な位置を占める針路不安定の許容限界を調べるために、広島大学の港内操船シミュレータを用いて、系統的な操船シミュレーションを実施した。この中で、針路不安定と操船の困難度との対応が比較的に把握しやすい狭水路通過操船を主とする結果を要約すると、以下の結論を得る。

- (1) 本研究で実施したような操船シミュレーションは、針路不安定の許容限界を調べるという等、人間を含む操縦システムの解明に有効な手段である。
- (2) 操船者は設定された船の性能を与えられた視界、コンパス等の情報から的確に把握しており、設定した性能とパイロットの理解は良い相関を示しており、信頼するに足る操船シミュレーションになっていたと指摘できる。
- (3) 湾曲した狭水路を誘導する際、針路不安定な船は当て舵の効きが十分でないために、操船が困難になる。実施したシミュレーションナリオは水路幅も相当に広く、外力も僅かであり、交通流も想定していないから、明らかに操船不能という事態には至っていないが、不安定の程度の増加に従い、目標とするコース上に船を誘導するのが困難になり、蛇行を伴ったり、頻繁な最大舵角の発令を余儀なくされており、現実には運航されている船の中で針路不安定の程度の高いものでは操船上の余裕はすでに失われていると指摘できる。
- (4) パイロット操船という立場からの針路不安定の許容限界は相互連携動作である海上交通流の中での避航の安全性の判断とか、生じるかも知れない危険を確実にクリアしうる余裕の確保等を不可欠としており、それらを考慮したパイロットの操船感覚から見た許容限界は、この大きさの船に対して、不安定ループ幅にして 5° ～ 10° 以下の範囲にあると指摘できよう。しかし、この範囲をより絞り込むためには、もっと現実的な条件、例えば交通流、複雑な外力条件等を考慮したシミュレーションや実操船との比較が必要となる。これらの一部は別の機会に報告される予定である。

この研究は日本パイロット協会と広島大学で共同して実施したものである。この研究は船の持つべき最低限の操縦性能、操縦性能基準を確立するためになされた、日本パイロット協会技術委員会操縦性小委員会、日本造船研究協会RR742委員会を実施されつつある一連の研究の一部であり、その過程で両委員会の委員各位の助言と協力を戴いた。特に、両委員会の委員である住友重機械(株)の芳村康男博士、シミュレーションに参加戴いたパイロットの各位、また、種々の助言と援助を戴いた弓削商船高専の野村士平教授、海上保安大学校の寺本定美教授、長澤明助教授、日當博喜講師、大島商船高専の岩崎寛希講師、広島大学工学部の浮体運動学研究室の平尾三郎助手、学生諸氏の貢献に対して、深甚の謝意を表する次第である。また、この研究に対して、文部省科学研究費補助金の交付を得たことを記す。

参 考 文 献

- (1) T. Nobukawa, T. Kato, K. Motomura, Y. Yoshimura: "Studies on Maneuverability Standards from the Viewpoint of Marine Pilots", Proceedings of MARSIM & ICSM 90, 1990.
- (2) 小瀬邦治, 平田法隆, 平尾三郎, 大橋克海, 浜田康弘: 出入港操船シミュレータ, 日本航海学会論文集,

79号, 1988年

- (3) 小瀬邦治ほか：出入港時の要素操船性能について，第一報，第二報，第三報，日本航海学会論文集，74号，81号，82号，1986年，1989年，1990年
- (4) T. Koyama, K. Kose, K. Hasegawa: "A Study on the Instability Criterion of the Manual Steering of Ships", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 142, 1977.
- (5) K. Nomoto: "Some Aspects of Simulator Studies on Ship Handling", Proceedings of the PRADS-International Symposium on Practical Design in Shipbuilding, 1977.

質 疑 応 答

本田啓之輔(神戸商船大学)：設定水域における針路不安定許容限界を検討する場合，コースライン上の保針操船の許容限界を見る問題とは異なり，水路幅，水路長，変針角，変針回数といった変位量が操船限界に影響する重要な因子になると思われます。今回のテーマの検討では，水路諸元を入れた評価手法についてどのようにお考えですか。

小瀬邦治：この研究で検討対象とした操縦性基準はどのように船にも最低限，必要とされる性能という意味ですから，特定の水路を想定すると，そのような水路を通過する必要のない船に対しては過酷な要求になる危険があります。しかし，港湾や水路域での操船を考えないで，基準を作ったのでは，安全上，もっとも重要な局面の検討が欠けることになります。そこで，操縦性基準を求める立場は，幅とか，広さとかに関係なく，港湾や水路域で操船される場合に，必要とされるような操縦運動が人間の制御下で可能な操縦性能と考えるべきとしています。

有限の幅の水路の通行が船の性能に応じて，どの程度，困難になるかという問題は重要と考えますが，本研究は上記の意味で，水路幅の制約は考えないという立場から検討しています。従って，水路幅の制約が問題にならないような幅を選んでシミュレーションしたつもりです。水路諸元を考慮した安全性評価法については，別の問題として検討したいと考えています。

飯島幸人(東京商船大学)：水路の通航難易度を相互比較できるような係数を Relative Risk Factor (RRF) というもので表わしている論文が PIANC で論議されています。この論文には RRF の導出方法は書かれていませんが，もし御存じならば教えてください。

小瀬邦治：本田教授への回答において述べましたように，今回の検討は水路の通行の可否を論じると言うより，水路等を航行する際に最低限，必要となる操縦，つまり，必要とする回頭運動を人間の制御下で自在に設定可能か否かに着目して行っています。特に，回頭運動の制御能力を保針や変針という特定の制御パターン下のみではなく，より自在な運動に対して調査すると言うことで，その典型として湾曲した水路という考えを取り入れています。そうした観点から考えましたので，水路の通航難易度を比較する RRF 等の概念の導入は考えていませんが，十分に余裕のある水路の通航の難易度という観点から，今後，そうした手法の導入による評価の定量化を検討してみたいと存じます。