(昭和 48 年 11 月日本造船学会秋季講演会において講演)

大型模型による幅広船の操縦性に関する研究

正員 佐 藤 茂* 正員 中 村 一 郎*
 正員 高 木 又 男** 正員 城 野 隆 史*
 正員 山 田 孝 三 郎* 正員 引 野 正 巳***
 正員 高 井 忠 夫** 正員 八 尾 英 男****

On a Study of Ship-Controllability of a Wide-Beam Tanker Using Large Scale Models

by Shigeru Sato, *Member* Ichiro Nakamura, *Member*
 Matao Takagi, *Member* Takashi Jono, *Member*
 Kozaburo Yamada, *Member* Masami Hikino, *Member*
 Tadao Takai, *Member* Hideo Yao, *Member*

Summary

This report deals with a feasibility study of a wide-beam tanker ($L/B=5$) with respect to ship-controllability.

The report consists of the following three parts ;

- 1) To estimate the indices of manoeuvring characteristics of the ship by the method of series tests using similar models which are 4 m, 10 m and 30 m in length.
- 2) To check whether or no the ship is unstable in course keeping mainly owing to so-called unusual phenomena.
- 3) To check the feeling of control of the ship which has the manoeuvring characteristics estimated by item 1), by the method of simulation apparatus of ship manoeuvre.

The results hereby obtained show that if a big large wide-beam tanker has an enough large-rudder area ratio, the ship is feasible in the viewpoint of ship-controllability.

1 緒 言

別の論文¹⁾で示されたように、或る条件のもとで超大型船に幅広船 ($L/B=5$) を採用する事が有利であるとの結論が得られた。これを実船に採用するには、種々の面での検討が必要であるが、その操縦性能に対する検討は最も重要なものの一つと考えられる。

このような大型肥大船の操縦性能の検討に際して特に重要と考えられるのは、次の二点であると思われる。一つは、操船面で十分な性能をもっているかどうかであり、いま一つは、実用上十分な針路保持性能をもっているかどうかである。

前者に対しては模型実験によって推定された操縦性指数を従来のそれと比較することにより大略の判定を下すことが可能である。更に、船長または操舵手のその船に対する操船感覚を問題にするときは、操縦性シミュレーション装置を用いて実際の操舵応答を試みることによって問題の有無をみることができる。

後者に対しては、いわゆる「異常現象」²⁾³⁾に基づく針路安定性が特に懸念される。異常現象については、現

* 日立造船船舶事業本部

** 日立造船技術研究所

*** 明石船型研究所

**** 日立造船舞鶴工場

在, その流体力学的機構が充分解明されていないので, 実船でその有無をあらかじめ判定することは困難であるが, 出来る限り広い範囲の相似模型による実験⁴⁾を慎重に行うことにより実用的な結論を得ることができると考えられる。

以上のような考察にもとづき, 相似模型として長さ 4 m, 10 m 及び 30 m (実際の L_{pp} は 29.9 m であるが以下 30 m 模型と呼ぶことにする) のものを選び, 縮率影響に慎重な考慮を払いながら種々の操縦性試験を行って, 大型幅広船の操縦性能について問題がないことを確認したので以下に報告する次第である。

2 縮率影響と供試相似模型の選定

使用した模型は前述のとおり長さ 4 m, 10 m 及び 30 m の三隻である。想定実船及びそれぞれの模型の主要目を Table 1 に示す。また, その側面および正面線図の概要を Fig.1 (ただし, 側面図は 30 m 模型の配置) に示す。なお Table 1 に示す慣動半径は 4 m 模型の場合は計測値を, 10 m および 30 m に対しては計算値を示す。

操縦性能に対する縮率影響を出来るだけ避けるためには, 可能なかぎりの大型模型を用いるのがよいことは明らかであるが費用の点からは勿論, 実験をなるべく正確に行う点からも余り大きな模型は好ましくない。

比較的大きな運動を対象とする操船性能に対しては, 縮率影響は連続的に Reynolds 数とともに変化すると考えてよいであろう。そのとき操縦性能の諸量が, 推進抵抗の問題に於て行われる⁵⁾ ように摩擦抵抗係数 C_f の関数としてうまく表示できるものとすれば, 最大 30 m の長さの模型を選べば充分の精度で実船の値を外挿できると考えられる。この長さの模型船は今回試験を行った海面舞鶴湾の広さに対して最も適合した大きさである。ま

Table 1 Principal particulars of models and designed ships.

	4 m Model		10 m Model		30 m Model		Actual ship (corresponding to 30 m test condition)	
	Full	Ballast	Full	Ballast	Full	Ballast	Full	Ballast
L_{pp} (m)	4.0		10.0		29.9		350.0	
B (m)	0.8		2.0		5.98		70.0	
d_f (m)	0.253	0.105	0.632	—	1.885	0.793	22.15	9.12
d_a (m)	0.253	0.137	0.632	—	1.915	1.049	22.15	11.95
Displacement	0.670	0.300	10.49	—	289.5	130.2	462,700	205,900
$Ar/L \times d(\%)$	2.40		2.40	—	2.40		2.39	
Ar (m ²)	0.0242		0.151		1.35		185.0	
κ/L	0.244	0.258	0.234	—	0.230	0.260		
Propeller								
Dia (m)	0.1109		0.277		0.828		9.7	
Pitch ratio	0.6995		0.6995		0.6995		0.6995	
Number of blades	6		6		6		6	
speed	0.858 m/s	0.912 m/s	1.355 m/s	—	4.55 kt	4.85 kt	15.6 kt	16.6 kt

Fig.1 Profile and body plan of 30 m model

た、外挿を行うには少なくとも三隻のデータが必要であり、適当な間隔として 4 m および 10 m が選定された。

上述のように、縮率影響を Reynolds 数の連続的变化として捉えることが可能とすれば、試験は完全な幾何学的相似条件を満足させたうえで、Froude 則を満足させて行うのが合理的である。今回の試験では、すべての実験は以上の方法によって行われたものであることを付言しておく。

一方、比較的小さな運動を対象とする保進性能に対しては、流場の不連続的な変化が考えられるので問題は複雑である。先ず問題になるのは、肥大物体であるから流れに直角な方向の大きさ、つまり船幅でとった Reynolds 数が限界 Reynolds 数を超えるかどうかである。30 m の模型船では、これは約 2×10^7 に達しており、限界 Reynolds 数 $10^5 \sim 10^6$ を充分超えているところから、渦の生成、流出などについては実船とはほぼ同様の定性的挙動を行うものと考えてよいであろう。いま一つの問題は流場の周期的変動である。このような現象が起ると、その周期が自動操舵系によって与えられる船の船首揺の固有周期に一致した場合操針性能に重大な支障を来すことが予想される。この場合周期現象は Strouhal 数がほぼ一定の範囲で起るものとすれば Froude 則に従った実験が行われる限り、実船の状況を推定することが可能である。

3 模型試験による実船操縦性能の推定

3.1 4 m 模型による操縦性試験

3.1.1 試験項目および試験方法

模型試験は大阪大学操縦性実験池の設備を借用して行った。試験は無線により自航模型をコントロールして行い、データは模型船上の記録計に記録するようになっている。Z 試験、逆スパイラル等は自動的に行えるような電気回路が装備されている。また、船速は、あらかじめ速力試験を行い、所定の速力になる回転数を求めておき、プロペラ回転数を所与の値にすることによって行った。なお、この模型のみはビルジキールをつけない状態で試験が行われた。

実施した試験の種類は次のとおりである。

(1) 満載状態

i) 船体+舵原形

イ 大舵角旋回 ($\pm 40^\circ$, $\pm 35^\circ$, $\pm 25^\circ$, $\pm 15^\circ$, $\pm 10^\circ$, $\pm 5^\circ$)

ロ 小舵角旋回

ハ 逆スパイラル試験

ニ Z 試験 ($\pm 20^\circ$, $\pm 15^\circ$, $\pm 10^\circ$, $\pm 7.5^\circ$, $\pm 5^\circ$)

ii) 船体+フィン+舵原形 (異常現象を助長すると思われる場所³⁾ にフィンを取付けた。)

イ 小舵角旋回

ロ Z 試験 ($\pm 10^\circ$, $\pm 7.5^\circ$, $\pm 5^\circ$)

iii) 船体+小舵 (舵面積原形の 78%)

イ 小舵角旋回

ロ Z 試験 ($\pm 5^\circ$, $\pm 7.5^\circ$, $\pm 10^\circ$)

(1) バラスト状態

i) 船体+舵原形

イ 大舵角旋回 ($\pm 40^\circ$, $\pm 30^\circ$, $\pm 20^\circ$, $\pm 10^\circ$, $\pm 7.5^\circ$)

ロ 小舵角旋回

ハ 逆スパイラル試験

ニ Z 試験 ($\pm 20^\circ$, $\pm 10^\circ$, $\pm 7.5^\circ$, $\pm 5^\circ$)

3.1.2 実験結果

(1) Z 試験 Z 試験結果を代入法により解析した結果を Fig.2 および Fig.3 に示す。無次元化に用いた速度は直進時 (試験開始前) のものである。(以下 10 m, 30 m の場合も同様。)

この結果から見ると、いずれの場合も小さな角速度で操縦性指数が安定化するような異常現象は表われていない。

満載フィン付の場合は、操縦性指数は原形より安定側に、小舵の場合は原形より不安定側に出ている。

(2) 旋回, 逆スパイラル試験
示す。

通常用いられる方法によって解析した結果を Fig.4 および Fig.5 に

無次元角速度は旋回試験では旋回半径より求めた。その他の場合は、予め種々の旋回試験よりそれぞれの角速度に対する速力減少の曲線を求めておき、これを用いて直進時の速力より定常旋回中の速力を仮定し、角速度を無次元化した。

Fig.2 Indices K' and T' derived from zig-zag test (4m model, full load condition)

Fig.3 Indices K' and T' derived from zig-zag test (4m model, ballast condition)

Fig.4 Turning characteristics (4m model, full load condition)

Fig.5 Turning characteristics (4m model, ballast condition)

満載では $2 \sim 3^\circ$ 程度のループがあり、バラストでは安定である。

舵固定の小舵角旋回のときに船が明瞭に周期的なヨーイングをする異常現象は、フィン付を含めていずれの場合にも起らなかったが、風の影響などにより明らかにおかしいと思われるデーターを除いたにも拘らず $r'-\delta$ 特性のパラツキは少しみられる。この現象は特に左旋回のときによくみられるが、4 m 模型ではプロペラ回転数の変動を伴うような現象は記録に表われていない。

3.2 10 m 模型による操縦性試験

3.2.1 試験項目および試験方法

この試験は大阪府狭山町にある大鳥池で行なわれた。この池は $200 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ の広さを有し、水深も 4 m 程度以上あり、この大きさの模型に対し充分の大きさである。試験方法は、通常の模型試験と殆んど同様であるが、試験に際しては、直接計測員が船に乗り、プロペラ回転数、舵および計器の操縦を行っている。また船の推進はガソリンエンジンを用いずに直流モータによっている。

実施した試験は次のとおりである。

(1) 満載状態

i) 船体+舵原形

イ 大舵角旋回 ($\pm 40^\circ, \pm 35^\circ, \pm 30^\circ, \pm 20^\circ, \pm 10^\circ, \pm 5^\circ$)

ロ Z 試験 ($\pm 20^\circ, \pm 15^\circ, \pm 10^\circ, \pm 7.5^\circ, \pm 5^\circ$)

ハ 逆スパイラル

ニ スパイラル

ii) 船体+小舵 (舵面積原形の 83.9%)

イ 逆スパイラル

3.2.2 試験結果

(1) Z 試験 Z 試験を代入法により解析した結果を Fig.6 に示す。この場合も操縦性指数安定化の異常現象は表われていない。

(2) 旋回, スパイラル, 逆スパイラル試験 4 m の場合と同様の解析法による結果を Fig.7 に示す。

原形舵の場合、ある平均的な角速度をねらった逆スパイラル試験を行っているとき、二つまたはそれ以上の平衡値が得られるような異常現象は、他の模型よりやや強く表われている。その詳細を Fig.8 に示す。これは試

Fig.6 Indices K' and T' derived from zig-zag test (10 m model, full load condition)

Fig.7 Turning characteristics (10 m model, full load condition)

Fig. 8 Unusual phenomena in turning characteristics (10 m model with original rudder, full load condition)

Fig. 9 Unusual phenomena in turning characteristics (10 m model with small rudder, full load condition)

験中プロペラ回転数変動するような現象に気付いたため、特に数多く、また、長い時間にわたって一つの試験を行ったためである。特に小舵を用いた実験ではさらにこれが明瞭に表われており、平均舵角の差は Fig. 9 に示すように、 5° 程度にも及んでいる。この場合には状態の変化は計測員にも明瞭に感取されており、いちじるしい特徴はプロペラ回転数も変化することである。即ち、平均角速度がある値になるように操舵しているとき、突然別の釣合状態に入り、この時プロペラ回転数が上昇するとともにその角速度を保つのに必要な平均舵角も小さくなる。

3.3 30 m 模型による操縦性試験

3.3.1 模型船および計測システム

(1) 船体および機関について 一般配置を Fig. 2 に示す。すでに述べたようにプロペラ、舵等は実船と相似のものを装備している、船体外面の仕上げ精度は J. S. Q. S. の規定を満足するような仕様で船殻を建造したが、実際に出来あがったものは、やせ馬もほとんどなく実験に必要な精度は充分確保されていた。ただ、シーム、パットの溶接ビードの凸起が目立ったので、船首部を除いて（乱流促進の意を持たせて）グラインダー仕上げを行って充分平滑にした。

エンジンは、いすゞ船用 40 P. S. 逆転減速クラッチ付ディーゼルエンジンで操縦は船橋よりリモコンで行った。エンジン回転は低速においても十分安定していた。

(2) 操舵機について 操舵機は本実験の重要な要素であり、特に慎重に選定した。型式は東京計器の電動油圧型で主な仕様は次のとおりである。

- i) 最大舵角 $\pm 37.5^\circ$
- ii) 操舵速度 $65^\circ \sim 8.2$ 秒（実船と時間スケールを合せている。）
- iii) 命令舵角と実際舵角の差 最大 0.5°

操舵系のブロック図は Fig. 10 の如くであり、実船の操舵機と異なる点は、不感帯が大きいこと、実船が比例制御になっているのに比べ模型船ではオンオフ制御になっている事等があり、オートパイロット作動時の系の安定性を多少阻害すると思われるが、その他の試験には全く支障がないと思われる。

Fig. 10 Block diagram of steering system in 30 m model

(3) 計測システムについて 計測システムの概略を Fig. 11 に示す。二、三の計測器を除きほぼ模型または実船試験で用いられているとおりである。ただし、流速計は翼車式のものを取り付けが故障が多かつ

Fig.11 Measuring system in 30 m model

たので、船速は投板によるものを用いた。

(4) オートパイロットについて 30 m 模型

船用に特にオートパイロットを製作した。これは計測用方位ジャイロ、角速度ジャイロの出力を操舵機系にフィードバックし、実船のオートパイロット作動時をシミュレートしようとするものである。このオートパイロットの電気回路には、天候調整としてデッドバンドまたはバックラッシュを挿入することもできるようになっている。その他、波浪中での保針をシミュレートするため電氣的にノイズを入力できるようになっている。オートパイロットの回路図を Fig.12 に、また、ブロック線図を Fig.13 に示す。ただし、ここに

G_r : 操舵機の伝達函数, ψ_I : 設定方位, G_s : 舵角に対する船の伝達函数, δ : 舵角, G_s' : 波に対する船の伝達函数, δ^* : 命令舵角, C_1 : 舵角調整 (deg./deg.), ψ_r : 舵による方位の応答, C_2 : 当て舵調整 (deg./deg./sec), ψ : 方位, ψ_N : ノイズ信号, 外乱による方位の応答

である。

3.3.2 試験実施海面について

試験を行ったのは、舞鶴湾内で水深は 12 m~20 m で浅水影響はないと考えられる。また、まわりが山に囲れており、風も弱く、吹送距離が短いので波も小さく風速 10 m/sec 程度でも波高は 50 cm 程度であった。

また、実験は風の影響を避けるため、旋回試験では風速 5 m/sec 以下、その他の試験は 3 m/sec 以下、特に小さな運動はできるだけ無風状態近くで行うようにした。

3.3.3 模型試験の方法および実施試験の種類

試験は運転要員および計測要員が乗り込んで行った。実験および解析はほぼ一般の実船試験と同じやり方で行った。プロペラ回転数と船速の関係はマイルポスト間の自航試験により求めた。旋回試験は船上の 2 ケ所に設けた方位盤を用い、アンカーにより固定されたブイを見透し、その方位の連続記録より旋回軌跡を求める方法により行った。逆スパイラル試験は、角速度をディジタルに表示し、それを見ながらオートパイロット装置の舵角設定スイッチを切り換えて操舵することによって行った (Fig.12 参照)。Z 試験の操舵も逆スパイラルのときと同じ方法に従っている。

保針試験は直進中オートパイロットの係数を種々かえて行った。また、電氣的なノイズを入れたものについても同様のことを行った。また、オートパイロットを切りはなし、手動によって針路がどの程度保持されるかについても試験を行った。

なお、30 m 模型では舵、船体などは原型状態のもののみについて試験を行っている。

実施した試験の項目は次のとおりである。

(1) 満載状態

イ 大舵角旋回 ($\pm 37.5^\circ$, $\pm 15^\circ$, $\pm 5^\circ$)

ロ スパイラル試験

Fig.12 Auto pilot circuit in 30 m model

Fig.13 Block diagram of auto pilot system

- ハ 逆スパイラル試験
- ニ Z試験 ($\pm 20^\circ$, $\pm 15^\circ$, $\pm 10^\circ$, $\pm 7.5^\circ$, $\pm 5^\circ$)
- ホ 保針試験
- (2) バラスト状態
- イ 大舵角旋回 ($\pm 37.5^\circ$)
- ロ スパイラル試験
- ハ 逆スパイラル試験
- ニ Z試験 ($\pm 20^\circ$, $\pm 15^\circ$, $\pm 10^\circ$, $\pm 5^\circ$)

3.3.4 試験結果

(1) 旋回試験 旋回軌跡の例を Fig.14 に示す。定常旋回に入るまで及びバラスト状態の結果から

かなり風の影響を受けていることがみられるので、その修正を行った。修正の方法として定まった方法は未だないが、小川⁹⁾の計算によれば、風が一定ならば軌跡はほぼ一方に一定にずれているので、定常旋回に入った部分の記録より方位角 360° 回頭する間のずれを計算しそれより軌跡の修正を行った。図中点線線がその結果である。

(2) 旋回、スパイラル、逆スパイラル試験 結果を Fig.15, Fig.16 に示す。無次元化に用いた速度は投板によって計測したものを用い、旋回による影響を修正している。

舵固定スパイラル時の方位角の時間記録には、明瞭な周期をもっていないが、わずかながら時間的変動を伴っている。また、逆スパイラル試験の結果でも、一つの試験状態中で流体力の変化に基づくと考えられる $r'-\delta$ 曲線のバラツキがみられる。この場合、プロペラ回転数の変動は 10 m 模型の場合ほど明らかなではないが、定性的傾向は同じであった。

満載状態に比し、バラスト状態では $r'-\delta$ 特性のバラツキは殆んどみられない。Z 試験で表われている小舵角での安定化は、この試験結果にも明瞭にみられる。

(3) Z 試験 代入法で計算した結果を Fig.17, Fig.18 に示す。満載状態では、舵角の小さい所では、安定に出ており、バラスト状態では 4 m の場合とかなり異なった傾向になっており、小舵角で安定化する異常現象を起しているように見える。

Fig.15 Turning characteristics (30 m model, full load condition)

Fig.14 Turning locus (30m model, full load condition)

(4) 保針試験 (イ) ノイズなしの場合 舵角調整 (C_1), 当て舵調整 (C_2) およびデッドバン

Fig.16 Turning characteristics (30 m model, ballast condition)

ド、バックラッシュ幅等を変えて行った結果の1例を満載状態について Fig.19 および Fig.20 に示す。

これによると長周期の小さなヨーイング（最大復振巾 2° 弱）を起しており、これが操舵機のアンプのデッドバンドがバックラッシュとして系の安定を阻害しているのか、船体に作用する異常外力によるものかは慎重に検討する必要がある。

Fig.17 Indices K' and T' derived from zig-zag test (30 m model, full load condition)

Fig.18 Indices K' and T' derived from zig-zag test (30 m model, ballast condition)

Fig.19 Results of course stability test (30 m model, full load condition, without electric dead band and back lash)

Fig.20 Results of course stability test (30 m model, full load condition, with electric dead band)

Fig. 21 Results of course stability test (30 m model, full load condition, with electrical dead band and noise)

(ロ) ノイズを入れた場合 オートパイロットで直進中ノイズを入れたものの一例を Fig. 21 に示す。入れたノイズの大きさは、約 150 m の貨物船が北大平洋航走中、小山⁷⁾により計測されたヨーイングのスペクトラム (海象は Sea 6, Swell 7, Wind 15 m/sec) により模型用に計算したものである。

同一係数 ($C_1=1.0$, $C_2=5.0$) について約 150 秒の平均をとると、

分散	ノイズなし	ノイズあり
$\psi(\text{deg.}^2)$	0.438	0.677
$\delta(\text{deg.}^2)$	0.775	1.478

のようになる。

4 模型試験結果に対する考察

4.1 操縦性能に対する縮率影響

それぞれの模型での Z 試験結果に対し、視察によって通した平均値を重ねて表示すると Fig. 22 および 23 の如くなる。

この結果からみれば、満載状態の場合、舵の運動が比較的大きいところでは、実験点のバラツキ、慣動半径の差などを考えると、本船型の場合操縦指数は殆んど Reynolds 数の影響を受けないとみてよい。しかし、明確な議論は実船での試運転結果を待つ必要があろう。

一方、運動の小さいところでは、実験点のバラツキを考慮しても、なお、明瞭な縮率影響が存在し、これは、従来言われて来たような現象、即ち、模型尺度が小さいほどプロペラ・スリップが大きいため舵力が大きくなり安定化することや、縦渦の発生によって安定化する (小型模型ほど強い) ことなどと傾向が逆である。

Fig. 22 Scale effect on the indices K' and T' (full load condition)

Fig. 23 Scale effect on the indices K' and T' (ballast condition)

この現象を説明する要素としてはやはり上述の二つのことを考える必要がある。安定化モーメントの原因となる縦渦は、従来、境界層外流方向の剥離の傾向から、Reynolds 数が小さいほど発生し易く、また、強いと考えられて来たが、本船型のような幅広船では、平板翼的な傾向が強く、むしろ、Reynolds 数の減少とともに渦の強さが減少することも考えられる。また、小型模型ではプロペラ荷重量が高いために吸引作用が強く安定化モーメントが弱められることも考えられる。これらのことは、後述の異常現象と考え合わせると、何等かの形で現象に影響していることは間違いないと思われるが、これ以上の議論は詳細な基礎実験を行っていない現状では無意味である。

次に、本船型のような強い伴流中にある舵に作用する直圧力について考えてみよう。大型タンカーでは、プロペラ後流の影響を受けない舵面積がかなりあり、少なくともこの部分の舵効きは大型模型ほどよい筈である。従って、スリップ中にある舵効きが悪くなっても、全体としての舵効きがよくなることが考えられる。このことを確かめるために、2, 3 の仮定のもとに簡単な計算を行ってみる。

計算に用いる伴流率は、本船型について行われた造船技術センターでの模型試験をもとに矢崎のチャート⁸⁾を外挿して各長さの模型および実船に対する値を求めた。また、プロペラ回転数は、模型船については試験時の、実船については通常用いられる推定法から求めた値をそれぞれ用いた。舵はプロペラの上縁を境にプロペラ後流の当る部分とその他の部分に分け、それぞれ別々に計算を行った。ただし、ホーン部は計算から除外した。また、各部分のアスペクト比としては、それぞれの部分がある境界線に関する鏡像と同じ性能であると仮定して求めた。計算に用いた直圧力係数の計算式は岡田の式⁹⁾で、それぞれの長さの模型に対し、プロペラ後流を受けない部分の直圧力係数 C_{N1} 、プロペラ後流を受ける部分の直圧力係数 C_{N2} および舵全体の直圧力係数 C_N を示せば、Table 2 の如くなる。

以上の計算結果から、伴流率の変化によって舵の直

Table 2 Coefficients of normal forces acted on rudders.

L (m)	4.0	10.0	29.9	350
$1-w$	0.37	0.406	0.456	0.543
s	0.747	0.709	0.662	0.488
C_{N1}	0.331	0.400	0.503	0.712
C_{N2} { STARBOARD	1.80	2.06	2.44	2.44
{ PORT	2.11	2.38	2.75	2.70
C_N { STARBOARD	1.454	1.67	1.98	2.03
{ PORT	1.69	1.92	2.22	2.23

Fig. 24 Scale effect on the turning characteristics (full load condition)

Fig. 25 Scale effect on the turning characteristics (ballast condition)

圧力係数が変化し、模型寸法が 4 m, 10 m, 30 m と変化するとともに操縦性能が安定化し、30 m と実船では余り差がなくなることが定性的に説明できる。この際特に注目すべきことは、 C_{N1} のみならず C_{N2} も増加していることである。運動が大きくなると船体伴流も減少し、それぞれの模型の値の差が小さくなるものと考えられる。

なお、試験では 4 m 模型のみビルジキールをつけていなかったため、上記推論への影響を確かめるために、大阪府立大学に依頼して、ビルジキール有り無しの影響を調査した。結果は、ビルジキール有りの場合全般に不安定化しているが、定性的結論は影響を受けないことが確かめられた。

バラスト状態の場合に、小舵角の運動の所で 30 m 模型の試験結果が大きく安定化しているのは、舵の直圧力係数の変化によるとするよりは、一応異常現象とみるべきであろう。何故ならば、バラスト状態では C_{N1} の部分が少く、殆んどが C_{N2} の部分であり、その増加量は少いからである。 K' , T' の異常現象については後に述べる。

バラスト状態の場合には、大きな運動の所で、 K' , T' に明らかな差があるが、10 m 模型での実験を行っていない（バラスト状態の操縦性能を重視しなかったため）ことや、他に資料も少いことから、その縮率影響については実船試運転が行われるまで言を避けたい。

それぞれの模型の r' - δ 特性の平均曲線を $r'=0$, $\delta=0$ の点を一致するように重ねて表示したものが Fig. 24 および Fig. 25 である。バラスト状態の場合には、小舵角旋回で 30 m 模型の結果が明らかに 4 m 模型の結果より安定化した傾向がみられるが、満載状態では各模型の間に明瞭な差はみられない。これはバラスト状態では現象が安定しているのに対し、満載状態では二又的で現象そのものが不安定なことによるものとみられる。

大きな運動では、両状態とも殆んど縮率影響がない。旋回特性と K' , T' との傾向の対応が完全には一致しないのは、運動モードが異なるのであるから当然かも知れない。

4.2 異常現象

操縦性能に於ける異常現象は、本来運動が小さくなるとともに船体運動のダンピングが減少する筈であるのに対し、逆に大きくなり安定化する現象に対して野本²⁾により始めて名づけられたものである。この現象は従来小型模型ほど起り易いと考えられていたが、本研究ではバラスト状態でむしろ大型模型に明瞭に表われている。この理由として前項で述べた二つの要素が考えられる。

野本²⁾によれば、異常現象は直進中に両舷から強い縦渦が出る場合にみられるという。このような縦渦は、外部流に強い振れがある場合は Reynolds 数が高い程強い渦が出来る（翼の揚力、低吃水、幅広船でトリムがあればこの状態に近いと考えられる）。また、外部流にそれほど強い振れがなくとも、外部流の流線方向流が剥離状態に近くなるよう状態（満載状態はどちらかというところこれに近いと思われる）では、Reynolds 数が低い方が縦渦の渦度は高い。したがって、一般には小模型ほど強い異常現象を起すが、プロペラの吸引作用を受けるような場合は、むしろ大型模型の方が異常現象を起し易くなる。本研究でみられた異常現象は、どちらかと言えば前者の要素に支配されたのではないかと考えられるが、バラスト状態の操縦性試験資料が少い現状では、確度の高い推論を導くのは困難である。

満載状態では、上述のような異常現象は出なかった。しかしながら、3.2.2 で述べたような小さな旋回運動中にみられる特異な現象は極めて興味があるので、これについて少しく考察してみよう。

r' - δ 曲線で二つの平衡点（実際にはそれ程明確に出るわけではないが、平均的には二つの曲線が得られると思われる）が得られるような現象も根本的には前述と同様な機構によるものと考えられる。ただし、この場合は縦渦の発生が不安定であり、縦渦の発生がない場合スパイラル特性は不安定側に、縦渦が発生する場合は安定側になる。また、縦渦の発生、消滅が船尾流場全体との関連で周期的になる場合は、豊城丸⁹⁾の場合のようにオートパイロットで保針中に同調して発振現象を起すことがある。本船の場合は、その発生、消滅は舵固定のスパイラル試験の記録などからみて非周期的であるので、上述のようなトラブルを起す恐れはないと考えられる。

Fig. 26 Schematic diagram of the mechanism of unusual phenomena

次に、上記の現象が特に左旋回している場合に多くみられ、また、そのときプロペラ回転数が、操縦特性が安定側に出たときに高くなる現象（Fig. 8, Fig. 9 参照）について考えてみよう。Fig. 26 に示すように、操

縦特性が安定化しているときは、右舷側から出る反時計方向（前進方向に向い）の渦が消えるから、右回転のプロペラは荷重量が減少して回転があがる。また、このような渦の消滅が主としてプロペラ作動円板上第1象限の部分による吸引影響¹⁰⁾を受けるものとすれば、それはプロペラの回転方向のため、右旋回の場合の第2象限の部分による影響より強い。このため、左旋回の場合には片側にだけ縦渦が残って安定化現象が生じ易くなるのではないかと考えられる。

さて、このときの安定化モーメントとしては、縦渦によるもののほかに、プロペラ回転数の増加による舵直圧力の増加が考えられるが、舵原形の場合より、小舵の場合に大きな差がみられることから、前者の影響が支配的と考えられる。このような意味で、本研究の対象としているような幅広船では充分な舵面積をとることが望しい。

4.3 操縦性能の設計的検討

先づ保針性能から検討してみよう。Fig. 19 にみられるように、オートパイロットの電気回路にデッドバンド、バック・ラッシュなどの天候調整を含まない場合に、最大複振幅約 2° のヨーイング及び複振幅 2° の当舵を行っている。ヨーイングの大きさは必ずしも小さいとは言えないが、本研究で用いた操舵機がオン・オフ操舵になっていること、及び、その他の機械的なバックラッシュを持っていることから、実船では優秀な操舵装置を使用することによりかなり改善できるのではないと思われる。

Fig. 28 は、速力試運転時を利用して実施された数隻の船の保進性能試験から求めた、直進時の当舵舵角の大きさと逆スパイラル試験のループ幅との関係を示したものである。図中、H は操舵手がオートパイロットに頼らずに直接保針した場合、 A_1 及び A_2 は異なる二社のオートパイロット装置を用いた場合の結果を示す。ループ幅、当舵量には実験値のバラツキがあるので図にはその散らばり幅が示されている。また、図中に示された直線は、 A_1 オートパイロットの場合の最大値の包絡線を示し、これらの実績が実際就航時にトラブルがなかったこと

から、これ以下であれば實際上特に問題はないと考えられる。本船の場合、ループ幅は $2 \sim 3^\circ$ であるから、両振幅 2° の当舵量は平均的であり、異常現象が特に保針上問題を起しているとは考えられない。

次に、ヨーイングの周期について考察しておこう。

Fig. 19 の結果だけでは明確な周期は不明であるが、

Fig. 27 Actual results of loop width in reversed spiral test (full load condition)

Fig. 28 Relation between loop width and check helm (full load condition)

Fig. 29 Actual results of indices K' and T' in 10° zig-zag test (full load condition)

40～60 秒程度である。一方、渦の発生の周期を Strouhal 数から計算してみると、長さの次元に幅をとり、30～15 秒程度となり、仮りに周期現象を起したとしてもかなりはなれていること、また、舵固定の直進中のヨーイング記録には明確な周期を持っていないことから、オートパイロット発振の恐れはないと考えられる。

更に、波浪海面を航行する場合であるが、電氣的ノイズを用いて行った試験結果から、海象が $sea=6$, $swell=7$, $wind\ 15\ m/sec$ というかなり荒れた状態でも、ヨーイングおよび舵角の標準偏差は 0.823° 及び 1.21° 程度であり、従来の経験値と比較して大きくないので、この点でも実用上問題はないと考えられる。

最後に操縦性指数について検討しておこう。Fig. 29 は各種の資料から $10^\circ Z$ 試験の K' および T' の左右の平均値を船の長さをベースにプロットしたものである。本船の場合の $K'=3.3$, $T'=4$ は、これらの実績と比較しても十分な安定性を持っていることが分る。

また、Fig. 27 は山田¹¹⁾ の舵面積決定法による進路安定性からの舵面積を標準とし、それより舵面積比が増減することにより、逆スパイラル試験のループ幅がどのように分布するかを描いたもので、図の線は各種資料の値の平均値を示している。

本船の場合、模型実験よりの推定ループ幅は $2\sim3^\circ$ であるが、本図によれば 6° 程度のループ幅を持つ可能性もあり、その時でも“すなおな不安定”⁸⁾ であれば、操船上何等问题はないことは、次節に示されるとおりである。

5 操縦シミュレーションによる操船感覚の調査

5.1 シミュレーションの目的と方法

4.4 に述べたように本船型の模型試験結果を在来船の実績と比較検討した結果などから見れば、本船型を採用した 40 万トン型の実船は操縦性の見地から見て特に問題はないものと予想される。しかし、従来から操縦性指数などは無次元値で扱われているので、本船型の実船のように船の長さが在来の 20 万トンクラスに比して増加しているものについては、操舵に対する船の運動を絶対時間を基準に検討し、操船感覚上の問題の有無を調査しておくことも必要と考えられる。そこで、ここでは 30 m 模型船の操縦性能を 40 万トンの実船に拡張し、これをインプットした操縦シミュレータを操船員が直接操縦することにより、実際操船上の問題点を調査しようとするものである。

実験は広島大学船舶工学教室に設置されている操縦シミュレータを借用して行った。これは種々の操縦性能、大きさ、速力などを持つ船の運動の模様の研究室内で再現できるようにした装置であり、「針路制御シミュレータ」の詳細についてはすでに公表されている¹²⁾ ので、ここではその内容の記述を省略する。また、参考として「避航操縦シミュレータ（水路上に障害物を存在させ、自船と障害物の相対位置を操船者に与えて、障害物避航、追越しなどの模様を再現できる）」を用いたシミュレーションも併せて実施した。

シミュレータにインプットした運動方程式は

$$T_1 T_2 \ddot{\psi} + (T_1 + T_2) \dot{\psi} + \psi = K\delta + K T_3 \dot{\delta} \quad (5.1)$$

であり、方程式の諸係数は 30 m 模型の満載状態の操縦性試験結果より決定した。また、一般に模型より実船の方が進路安定性が不安定側に移る場合も多いことを考慮し、先に定めたモデルにループ幅 ($2\delta_c$) 8° のスパイラル特性を与えるように修正した仮想モデルを考え、これについてもシミュレーションを実施した。

実船換算の船速は 15.6 kt および 8.0 kt (いずれも満載状態) とし、これらは 30 m 模型の対応速度でそれ

Table 3 Coefficients of equation of motion.

SYMBOL	L_{pp} (m)	V_S (kt)	Full-width of Loop	T_1 (sec)	T_2 (sec)	T_3 (sec)	K (1/sec)	ν (sec ²)
M 1	29.9	4.56	1.9°	-136.7	4.21	15.05	-0.423	-0.90
M 2	29.9	2.34		-266.4	8.14	29.24	-0.217	-3.42
S 1	350	15.6	1.9°	-466.3	14.37	51.17	-0.124	-10.46
S 2	350	8.0		-909.1	28.01	99.76	-0.064	-99.79
S' 1	350	15.6	8.0°	-309.5	14.73	51.17	-0.042	-5.21
S' 2	350	8.0		-603.4	28.72	99.76	-0.022	-19.87

ぞれ 4.56 kt および 2.34 kt となる。

これらの場合の運動方程式の諸係数を Table 3 に示す。

シミュレーションによる実船の操船感覚の評価は Fig.30 に示す流れによった。その際、操船経歴などの個人差を考慮に入れるために、同一内容の実験を下記 2 名の操舵員によって実施した。

操舵員(A)：30 m 模型船操縦性試験期間中の操舵員。中小型船、艦艇などの経験豊富。ただし、超大型タンカーの満載状態の操船経験はない。

操舵員(B)：超大型タンカーの経験豊富。30 m 模型実験中、満載及びバラスト状態各 1 日のみ操船を担当。

針路制御シミュレーションは Fig.31 に示す針路指令を操舵員に与え、それに基づいて操舵を行わせた。ただし、操舵員は 10° および 20° 変針発令時に 15° を指定した以外は、操舵員の裁量にまかせた。

避航操縦シミュレーションは停泊船の回避、及び、直角に相手船と交叉する場合について使用舵角を制限しないで実施した。

Fig.30 Flow chart of criterion for feeling of ship-control

Fig.31 Steering pattern

5.2 シミュレーション結果の解析

針路制御シミュレーションのうち、変針操縦性能についての評価は、新針路に達するまでの時間、操舵量の大きさ、運動の強さなどによって行うことができる。ここでは代表例として変針中の回頭運動のタイムヒストリ、変針完了を代表する時間 T_r と L/V の関係、および、変針中の平均操舵量 $\sqrt{\sum \delta^2/N}$ と L/V の関係をそれぞれ示すものを Fig.32, Fig.33 および Fig.34 に示す。ただしここに

$$T_r = \frac{1}{\psi_I} \int_0^\infty (\psi_I - \psi) dt \quad (5.2)$$

ψ_I ：新針路方位， ψ ：任意の時間の方位， δ ：任意の時間の舵角

N ：舵角のサンプリングの数， L ：船の長さ， V ：アプローチ速度

である。

また、Fig.33 には (5.1) を一次系近似でおきかえて、理想的な変針操舵（最初 10° および 20° 変針に対し 15°，また、30° および 40° 変針に対し 35° の操舵を変針所要時間の半分だけ行い、次に反対舷に同じ大きさの操舵を行う。30° および 40° 変針のときは、A, B 操舵員ともほぼ 35° 程度の操舵を行っている。）を行った場合の T_r を計算した結果が曲線で併記されている。ただし、

$$T_r = L/V \times \sqrt{\frac{2}{3} \frac{T'}{K'} \frac{\psi_I}{\delta}} \quad (5.3)$$

となる。

Fig.32 に示す方位のタイムヒストリからは、操船の困難さを示すような徴候は何等見当たらない。またこの時の角速度の最大値は、最も小さい場合で約 0.25°/sec であり、これは自船の動きを他船に認めさせるのに必要な

Fig.32 An example of time history of heading angle

Fig.33 T_r (Representative time of course changing) versus L/V curve Fig.34 Root mean square of helm angle versus L/V curve

最小角速度, 約 $0.12^\circ/\text{sec}$ (著者の一人が巨大船運航者から調査した値¹³⁾) よりも充分大きい。また, この最大角速度は浅水影響 (実船の航路に英国海峡が含まれるとすると $h/d \approx 1.3$) による性能劣化約 50% (SR 98¹⁴⁾ の資料から略算) を考えても上記必要最小角速度を下廻らない。

Fig. 33 に於て理想操舵と実際操舵の場合の値を比較するとかなりよく一致しており, 操舵は充分うまく行われているとみられる。30 m 模型の場合に少し高い値が見られるが, 小型船では操舵員が躊躇するためと考えられる。このことは Fig. 34 の操舵量にも表われており, 動きの遅い大型船の場合には大きな舵角によって船を積極的に動かそうとしていることが見られる。ループ幅が大きい場合にはやや差が大きい, これが操舵の困難さによるものか, 一次近似による誤差かは明確でないが, T_r が理論的推定とそれ程離れていないこと, 理論的推定によれば T_r が L/V に比例しており, 一方 20 万トン程度のタンカーで何等问题が起っていないことなどから考えて, 本研究の対象としている L/V 程度では操船上特に問題になるようなことは何等考えられない。

保針操舵は変針運動の最初と最後に実施したが, 今回の実験の目的が主として L/V の差の影響を知ることにあつたので, 外乱相当のノイズを入れず, 平水中に対応する状態で行った。したがって, 保針運動は船首揺れ, 当舵舵角ともに何ら問題となる量ではなく, 記録は省略する。ただ, 大型船に慣れた操舵員 (B) は当舵調整的な操舵をし, その量も小さいのに対し, 小型船に慣れた操舵員 (A) は比例制御的な操舵を行い, その量も大きいことが見られ, 興味深い。

避航操舵に於ても特に問題になるような現象は見られない。今回の数例の実験から特に結論めいた事は得られないが, L/V が増加するとともに積極的な操舵を行っていること, その結果行き過ぎも当然大きくなり, 障害物通過時の障害物と自船との距離が大きくなっていることなどが見られる。

シミュレーション結果の解析値と操舵員の操縦感覚を結びつけるために, 各実験終了毎に操舵員の所感を聴取した。これらをまとめるとおおむね次のようになる。

- (1) 30 m 模型船の実際の操船とシミュレータによる操船感覚はよく似ている。(操舵員 (A), (B))
- (2) 350 m 船の 15.6 kt, 8.0 kt (S_1, S_2) の場合, 操舵に対する反応等は従来の 20 万トンクラスと同等, あるいはそれより優れているように思う。(操舵員 (B))
- (3) S_1, S_2 程度ならば, これまで超大型タンカーの経験はないが操船上何ら問題はないと思う。(操舵員 (A))
- (4) S_1, S_2 と S'_1, S'_2 (ループ幅 8° の場合) を較べると, 後者の方が当舵も多く必要で, 操舵に対する反応も遅いののが明瞭にわかるが, 操船上問題になるほどではない。(操舵員 (A), (B))

以上述べたように, 操舵員の所感と実験結果の解析値の傾向との間には特に矛盾するような現象も見られないところから, 今回のシミュレーションはほぼ妥当な結果を与えたものと考えられる。

350 m の実船が無次元値で 30 m 模型船とほぼ同一のスパイラル特性を持てば, L/V の差を考慮しても操船上何ら問題はないと考えられる。

また, 仮りに 350 m の実船が 30 m 模型よりもかなり不安定度が高く, ループ幅 8° が程度になったとしても, 今回のシミュレーション結果から判断すれば, 実際操船上特に問題となるような現象は起らないものと推察される。

6 結 言

三隻の相似模型を用いて行った各種の操縦性試験に於て見出された特異な現象をあげると,

- 1) 満載状態では小舵角の運動に於て明瞭な縮率影響が表われており, 従来の現象と異なり, 大きな模型ほど操縦性指数が安定化している。これは伴流が大きいと, 舵の直圧力が従来と逆の影響を受けることが強いことなどによるものではないかと推定される。
- 2) 満載状態に於て, スパイラル特性が唯一に定まらない異常現象が表われている。そのバラツキの幅は小さい舵ほど大きく, また, 左旋回に於て顕著である。また, この現象はプロペラ回転数とも連動しており, スパイラル特性が不安定なとき低く, 安定のとき高い。
- 3) バラスト状態では, 小舵角に於て操縦性が安定化する現象が 30 m 模型に表われ, 4 m 模型に表われていない。これは安定化モーメントの原因である渦の発生機構が翼などのそれに近く, Reynolds 数が高いほど顕著であることによるものではないかと推定される。

次に想定実船の操船性能については

- 1) K' , T' およびスパイラル特性のループ幅などが、従来の実績船と比較して充分安定側にあること、
- 2) 異常現象発生に明確な周期がなく、30 m 模型における保針性試験の結果が従来の実績船と同程度であること、

3) 操舵員によるシミュレーションテストの結果に操船上問題となるような現象があらわれていないこと。などから、本船に採用した舵面積および船尾形状であれば、実際運航上何等支障となることはないと思われる。

操縦性能の縮率影響などについては、実船試運転の結果を待つ必要があり、また、上記したような特異現象の力学的機構の完全な解明にはなお多くの基礎研究が必要であることは論を俟たない。

謝 辞

本研究の遂行にあたっては多くの方々のご指導ならびにご協力を頂いた。東京大学元良誠三教授および大阪大学野本謙作教授には、本研究の計画時より終始御熱心な御指導を頂いた。大阪府立大学田口賢士教授およびその教室員の方々にはビルジキールの影響についての実験、また、広島大学小瀬邦治氏には操船シミュレーション実験をお引き受け頂いた。東京大学小山健夫助教授には貴重なご討論を頂いた。また、日立造船船舶事業本部、同舞鶴工場および同技術研究所の多くの方々には実験の遂行にあたり昼夜を分たず惜しみないご協力を賜わった。本研究の完成が上記の方々に負う所極めて多いことを銘記して、ここに衷心よりの謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 佐藤 茂 外：制限喫水における超大型船の最適船型の決定，造船学会昭和 48 年度秋季講演会発表予定。
- 2) K. Nomoto: Unusual scale effect on manoeuvrabilities of ships with blunt bodies, Proceeding of 11th I. T. T. C. (1966).
- 3) 元良誠三 外：異常現象を伴う船の操縦性の一解析，日本造船学会論文集 128 号，(昭和 45 年 11 月)。
- 4) 岡本 洋 外：肥大船型の操縦性試験例と模型船/実船の相関について，日本造船学会論文集 131 号，(昭和 47 年 5 月)。
- 5) 第 107 研究部会：船舶の速度計測および馬力推定法の精度向上に関する研究，日本造船研究協会報告書 73 号，(昭和 48 年 1 月)。
- 6) 小川陽弘：外力を受ける船の操縦運動の計算 (その 1)——様な風と流れの中の直進および旋回一，日本造船学会論文集 126 号，(昭和 44 年)。
- 7) 小山健夫：外洋航行中の最適自動操舵系に関する研究，造船協会論文集 122 号，(昭和 42 年 12 月)。
- 8) 矢崎敦生 外：船用プロペラ設計資料 (第 1 集)，運輸技研資料 43 号，(昭和 37 年 7 月)。
- 9) 岡田正次郎：船の背後に置かれた舵の性能に関する実験結果について (舵の流体力学的研究—その 5)，造船協会論文集 105 号，(昭和 34 年 5 月)。
- 10) K. Watanabe and others: Study on flow pattern around the stern of full ship form by use of the Geosims, The Society of Naval Architects of Japan, Vol. 131, (May, 1972).
- 11) 山田孝三郎：大型船の操縦性判定と舵面積の決定，関西造船協会誌 134 号，(昭和 44 年 12 月)。
- 12) 野本謙作，小瀬邦治：人間が操舵する船の操縦運動に関する実験的研究 (1)，日本造船学会論文集 132 号，(昭和 47 年 12 月)。
- 13) 山田孝三郎：日立造船社内技術論文，(昭和 47 年 7 月，未公刊)。
- 14) 第 98 研究部会：巨大船の運航性能に関する実験研究報告書，(昭和 44 年 3 月)。