(昭和 34 年 11 月造船協会秋季講演会において講演)

大型油槽船の操縦性に関する模型試験 (続)

7243-57
(3)

正員 野 本 謙 作*

正員 藤 井 齊*

Steering Test of a Super-Tanker Model (2)

By kensaku Nomoto, *Member*
and Hitoshi Fujii, *Member*

Abstract

This paper relates to Kempf's zig-zag test results for a super-tanker model with several alternative rudder sizes and a special rudder arrangement shown in Fig. 8, following the preceding paper published in the Journal of the Society of Naval Architects of Japan, No. 103, 1958.

The results are analyzed in terms of the steering quality indices which has been developed by the author and published in the I. S. P. Nr. 35, 1957. This procedure provides a successful investigation for the effect of relative rudder size on steering quality. It should be noted that a considerable reduction of steering quality indices K and T with increase of turning angular velocity is experienced.

緒 言

われわれはさきに周波数応答の考え方にしたがって大型油槽船船型の操縦性を表わす指数を求めることを試みた[4]。その結果直進やゆるやかな操縦における操縦性指数——操縦運動の方程式の係数——が求められたがつてその範囲における任意の操縦に対する船の運動を計算することができた。そして大型油槽船はそのフルな船型と小さい舵面積比のため一般商船に比べてかなり操縦に対する追従がおそく進路安定性もまた劣ること、舵面積比の増加は船の旋回力を僅かに強くし、操縦に対する追従のはやさおよび進路安定性をかなり改善するがしかし常識的な範囲の舵面積比の増加を以てしては、これらの改善は余りめざましいものではないこと、船の速力の増加あるいは減少は特に高速にならない限り、単に同じ運動を(同じ航跡に沿って)それだけはやく、あるいはおそく行なうだけであることなどが明らかになった。

一方類似した実船の Z 試験から得られた操縦性指数と上記の指数を比較するに Z 試験からの結果は旋回力が相当小さく、追従は相当はよいことを示している。これはいわゆる非線型影響であつて操縦運動がはげしくなるに従つて旋回に対する船の抵抗が急激に増加するためと考えられる。従来の経験から見るとこの影響は舵面積の小さい——従つて操縦に対する追従のおそい——船ほど著しい傾向があり、大型油槽船はまさにこの影響のはげしい船に当る。実際の操船は直進やゆるやかな旋回だけでなく相当はよい回頭も屢々行われるわけであるから上記周波数応答法による操縦性指数だけで船の操縦性を規定するのは合理的でない。

このような観点からわれわれは上記試験に続き、同一模型を使用し、舵は極端に小さいものを追加して Z 試験を行ない、相当強い操縦運動における操縦性指数を求め上記非線型影響を確かめることを試みた。また運研船舶性能部において自航模型船による広汎な系統的試験を実施されているので [5] その結果を参照して旋回試験結果から同じく上記非線型影響を確かめることを試みた。その結果実船の Z 試験に略一致する結果を得、非線型影響の存在並びにその程度が確かめられた。したがつて保針の問題、オートパイロットの設計等には上記周波数応答試験による指数を使うことが適当であるがコースの変換、緊急操舵等のかなりはげしい操縦運動に対してはその程度を考慮して Z 試験あるいは旋回試験による操縦性指数を使うことが合理的であると考えられる。

原稿受付 昭和 34 年 7 月 10 日

* 大阪大学工学部

また、今回の試験においては単螺旋双舵の試験を加えている。この舵は運研船舶性能部志波部長と江田治三氏によつて提案されたもので [6] 舵軸モーメントを大きくしないで舵面積を大幅に増加し得る特長を有し、実用的な関心をもたれている舵型式である。その結果は予想通り双舵を合せた舵面積の単舵に比べてほとんど劣らない舵効果を示し、この際トルクは双舵合せても半減しているはずであるからこの舵型式の特長は明らかである。

なお今回の試験は模型船の運動範囲が周波数応答試験に比べてずっと広がるので模型船の操縦には全面的に無線を使い、計測器はすべて模型船に積載する必要が生じた。これに使用した装置はこの試験の外に種々の応用も考えられるのでいくらか実験技術の細部にわたりすぎる嫌いがあるけれども附録として記述した。

1. 試験した船型および舵

試験した船は大型油槽船でその船型、要目は論文集 103 号 76 頁に示す。今回の試験は満載状態のみについて行なつた。舵は第3表、第7, 8 図に示す。

第7図 舵

第3表

舵	A	C	E	G	H	T*
A_R	70.5	59.9	50.4	35.7	28.6	70.5
$A_R/L \cdot d$	1/60.9	1/71.6	1/85	1/120	1/150	1/60.9

* Tは双舵、面積は双舵の合計面積

第8図 単螺旋双舵

2. 試験結果並びに解析

2.1 Z 試験

Z 試験結果の一例を第9図に示す。Z 試験の解析には1次系近似の方程式 [3] を使う。ただし計測舵角の0で船は完全に直進はしないのが普通であるから¹⁾ その修正舵角 δ_r を附加する。

$$T \frac{d\theta}{dt} + \dot{\theta} = K \delta_m(t) + K \delta_r$$

$\delta_m(t)$: 計測した舵角 δ_r : 舵角0の修正量

この方程式を操舵始め ($t=0$) から時刻 t まで積分して

$$T[\theta(t) - \theta(0)] + \theta = K \int_0^t \delta_m dt + K \delta_r t$$

ただし θ は原針路から測る。試験に先立ち船を完全に直進させてをけば $\dot{\theta}(0)=0$ になる²⁾。

- 1) この原因は単螺旋推進器右旋の左右不対称によるものと、舵取付の誤差によるものとが略 same-order に効いて来るようである。 δ_r の値は 1° 前後である。
- 2) ある程度以上の $\dot{\theta}(0)$ が認められる場合にはそれを入れて以下の計算を修正する。

第9図 Z 試験結果の一例

変針角が最大値をとる時刻 (t_e, t_e', t_e'') においては $\dot{\theta}=0$ であるから、

$$\left. \begin{matrix} \theta_e \\ \theta_e' \\ \theta_e'' \end{matrix} \right\} = K \int_0^{t_e} \delta m(t) dt + K \delta r \times \left. \begin{matrix} t_e \\ t_e' \\ t_e'' \end{matrix} \right\}$$

t_e', t_e'' におけるこの式から K と δr を決定し、この K を $K⑥⑧$ (試験後半部の K) とする。この δr をもつて t_e におけるこの式から再び K を求め $K④$ (前半部の K) とする。

船が原針路に戻ったときには $\theta=0$ であるから、

$$T \times \left. \begin{matrix} \dot{\theta}(t_0) \\ \dot{\theta}(t_0') \\ \dot{\theta}(t_0'') \end{matrix} \right\} = K \int_0^{t_0} \delta m(t) dt + K \delta r \times \left. \begin{matrix} t_0 \\ t_0' \\ t_0'' \end{matrix} \right\}$$

試験結果から $\dot{\theta}(t_0'), \dot{\theta}(t_0'')$ を測りこの式を使つて各々 T を求めその平均を $T⑥⑧$ とし、 $\dot{\theta}(t_0)$ を測り T を求めて $T④$ とする。 $K④$ と $K⑥⑧$ の平均を K 、 $T④$ と $T⑥⑧$ の平均を T とする。推進器回転数から試験直前の速力 V を推定して (V/L) を得、 $K'=(L/V)K$ 、 $T'=(V/L)T$ と K' 、 T' を得る。 L は垂線間長をとる。

以上の解析により第4表の操縦性指数を得る。これらの値は周波数応答試験よりのものに比べて K' 、 T' とも目立って小さく、一方類似実船のZ試験結果と比べると少し低目ながら K' 、 T' とも略一致するものである。

第4表 Z試験による K' 、 T'

舵	A		C		E		G		H	T	
舵面積比	1/60.9		1/71.6		1/85		1/120		1/150	1/60.9	
舵角	13°	20°	13°	20°	14°	19°	15°	20°	14°	14°	20°
K'	.916	.896	.965	.894	.875	.841	.833	.817	.635	1.089	.917
T'	1.45	1.32	1.64	1.53	1.60	1.68	2.16	1.98	2.51	1.43	1.47

2.2 舵面積比と操縦性指数

第10図は K' 、 T' を舵面積比に対して描いたものである。周波数応答法による K' 、 T' の同様な表現と比較するに K' 、 T' とも非線型影響によつて著しく低くなつてはいるが舵面積比の影響はよく似たものである。したがつて舵面積比の効果としてはZ試験程度の強い操船においても直進やゆるやかな操縦におけると同じく、舵面積比の増加は旋回力を少し強化し、操舵に対する追従性を相当程度すみやかに、進路安定性も相当程度よくするということができる。

第10図 $K_1' T' - Ld/A_R$

第11図 旋回抵抗と舵面積比

2.3 旋回抵抗と舵面積比

第11図は舵面積比 A_R/Ld に対して $A_R/K' Ld$ を表わしたものである。 K' はもともと舵による旋回モーメントの係数と船の旋回抵抗モーメントの係数の比という構成をもつものであるから [3] [7], 舵の単位面積当りの直圧力には余り変化がないことを考えると $A_R/K' Ld$ は船の旋回抵抗の大小を表わすものと考えられる。図に見られるように船の旋回抵抗は舵面積比の減少とともに減少する³⁾。舵が旋回抵抗を受けもつのは一見不自然に思われるがそれはそうでない。操舵して船が旋回を始めると drift angle がついて舵への流入角が減少し、舵角は変わらないのに舵にはたらく直圧力は減少する。このことを舵が与える旋回モーメントは船の運動に関せず舵角に略比例して一定で、その代りに drift angle より減少分だけの旋回抵抗が舵に働くと考えてもよい。もともと操縦運動の方程式において舵による旋回モーメントは舵角に比例するとしているのはこの考え方によっているわけで、したがって旋回運動によつて舵の旋回モーメントが減少する分は旋回抵抗の方に算入していることになる [3]。それで $A_R/K' Ld$ の形で表わされた旋回抵抗が舵面積比の減少にしたがつて減少するのは当然である。

図の直線を舵面積比の小さい方に延長して考えると、船体と推進器だけではほとんど旋回抵抗はなく——実船 Z 試験の結果から見るとむしろ負の旋回抵抗を持つようである——これに舵をつけることによって船は安定化さ

れていることが明らかである。この辺の事情は Davidson-Thieme の total moment curve [1] [2] による解析とよく対応している。またこの非線型影響は旋回試験結果から確かめることが出来る。運研船舶性能部で実施された旋回試験 [5] の系統模型のうち $C_b=0.800$ のものは第5表に示すごとく今回の試験の模型とほとんど同じ要目であるので舵面積比の内挿だけ行なつて第12図を作った。

第5表

	L_{FP}	L/B	B/d	C_b	$\eta/L^2 d$
運研系統模型	2.500m	7.50	2.50	0.800	0.109
本試験模型	2.800m	7.48	2.47	0.806	0.108

第12図 $L/R - \delta$

3) H 舵の結果がおかしいが、これは小さい舵面積のため不安定に近づいているのを無理に線型解析をした結果と考えられる。その意味で G 舵の結果も A や D に比べればその信頼性は落ちているおそれがある。このことは後に述べる K-T 図表にも表われている。

L は船長, R は旋回半径である。この形に表わすとき L/R 対 δ 曲線の傾斜が K' に当るわけであるが図に明らかのように舵角が小さくて運動がゆるやかな間は $d(L/R)/d\delta$ が大きく旋回が強くなるにしてがつてだんだん緩かになっている。すなわち、直進附近では大きい K' (小さい旋回抵抗) を示すが旋回が発達するにつれて K' は小さくなる (旋回抵抗が大きくなる) ことがよく表われている。そしてこの変化は直進附近で最も著しくある程度旋回が発達すると変化の割合は減少するように見られる。

大型船においては屢々舵面積をなるべく小さくおさへたい設計上の要求が存するが負の旋回抵抗, すなわち進路不安定は操船上明らかに望ましくないものであるから舵面積の決定に当つては適度の旋回抵抗を確保することを考慮しなければならない。

2.4 実船 Z 試験結果との比較——縮率影響の疑い

類似実船の Z 試験から得られた K' を第 11 図に入れてみると図に見られるように実船の K' が少し大きい (旋回抵抗が小さい) 傾向がある。これらの実船は類似船とはいふものの寸法要目等が相当ばらついているし、また実船の Z 試験は天候その他の原因で信頼性も一様でないので現在のところ余り決定的なことは云えないが、この結果から考えると何か模型船の K' を小さくする (旋回抵抗を大きくする) 原因が疑われる。次節に述べる $K-T$ 図表では実船と模型とが区別なく一本の線に沿うことを考えると、舵の有効さ——舵の単位面積当りの直圧力——には大きい差がないものと見られる。これは大きい wake と舵の小さい Reynolds 数による舵の有効さの減少を実船に比べて相対的に強い推進器後流——摩擦修正なしの自航であるから——が補っているという想像が成立つ。そのように考えると模型船の旋回抵抗が大きいのは推進器の fin effect の増加ではないかと思われる。しかしこの考え方は現在のところ想像の域を出ず今後の調査にまちたい。

2.4 KT 図表——旋回力と追従安定性相反の確認

Z 試験並びに周波数応答試験から得られた K' , T' を $A_R L / K' \nabla$ 対 $1/T'$ に描くと第 13 図のようになる。

この図表は旋回力の指数 K' と追従, 安定性の指数 T' の相関関係を示すもので [3] [7] 舵面積, 舵角のいかんによらず、また周波数応答試験も Z 試験も一本の直線に沿っている。またこの直線は多数の実船について描かれた同様の図表における平均の直線 [7] ととも完全に一致している。この結果は船型, 舵面積等のいかんによらずこの形の $K-T$ プロットは一本の直線に沿うはずであるという推論 [3] [7] を確めるものであり、そしてこの推論が保証されるならば舵面積比を一定に抑える限り旋回力の強化は必然的に操舵に対する追従をおそくし、進路安定性を悪くするという重要な結論が導き出されるのである [3]。

第 13 図 $K-T$ 図表

この図表のもう一つの有用性は K' か T' か一方がわかればこれによつて他の一方が推定できることである。舵面積, 舵角や操舵の形式によらず、また船型の相違からさえも余り影響を受けずに $K-T$ プロットが一本の線にまとまるということは K' から T' を、あるいはその逆の推定の信頼性が高いということで、これは大変都合のよいことである。

2.5 単螺旋双舵の効果

この型式の舵は 1957 年に運研船舶性能部志波部長並びに江田氏によつて提案され推進器と組合わせた模型試験が行はれた。その結果双舵の間隔を推進器直径の 55% にとれば双舵合させた直圧力は合計面積に等しい単舵のそれに略等しく一方舵軸モーメントは双舵合させて単舵のその約 1/2 になると見積られている [6]。

本試験ではこの結果に基づき第 8 図のごとき配置の双舵を装備し、また shoe piece は不要になるので shoe piece と船尾の dead wood を少しく cut した船型について Z 試験を行なつた。双舵合計面積は A 舵に等しい。その結果は第 4 表に示す如く、旋回力については A より稍優れ追従は A よりも少しくおそくなつてゐる。これはいずれも cut up の影響と考えられ、舵の有効さとしては大体において A と同じと考えてよい。

結 論

1. 大型油槽船にあつてはいわゆる非線型影響が著しく、旋回が発達するにつれて急激に旋回抵抗が増加する。その結果ある程度強い旋回操縦においては直進やゆるやかな操船時に比べて旋回力はほとんど半減し進路安定性は倍加し操縦に対する追従は2倍程度すみやかになる。操縦性指数で表わせば K, T とも約 $1/2$ に減少するわけである。そしてこの減少の割合は直進附近で最もはげしく旋回が発達するにつれてずつと少なくなるようである。

2. オート・パイロットの問題のように直進附近の運動が問題になる場合には周波数応答法によつて得られた操縦性指数を使つて船の運動を表わすことが適当であるが、変針とか出入港、衝突回避等のかなり強い旋回が含まれる運動ではその程度に応じて直進時よりも相当小さい操縦性指数を使うことが合理的である。舵角 15° ないし 20° の Z 試験による操縦性指数はこの種の運動を大体においてよく表わすものと考えられる。

3. 模型船と実船の Z 試験結果を比較するに模型船では K', T' とも小さい傾向が見られる。その原因は明らかでなく今後の調査が望まれる。したがつて模型船の操縦性指数をその儘実船に適用するのは問題があるが、一方この不一致は余り著しいものではないから舵面積、舵配置、船型等の相対的な比較と操縦性指数の大体の値を知る目的には模型試験は充分有効である。

4. かなり強い旋回が含まれるような運動においても舵面積比の増加は旋回力をいくらか増し追従をはやくし進路安定性をよくする。船体と推進器だけでは旋回に対する抵抗はほとんどないか負であると見られ、ある大きさの舵をつけて初めて船は安定化されているものと考えられる。舵面積の決定に当つては旋回力だけでなくこの旋回抵抗ないし進路安定、追従性のことを考慮すべきである。

5. 運研型単螺旋双舵はその配置を適当に選べば単独試験から予想される通り普通の単舵に比べて約 $1/2$ の舵トルクで同じ旋回力、追従性、安定性を得ることができる。この際 shoe piece とともに dead wood を一部 cut すれば追従、安定性は稍劣るけれども旋回力はそれだけ増加することができる。

この研究に関して運輸技術研究所船舶性能部から資料の提供を始めとして多くの御援助を受けた。志波部長始め関係者各位に深く謝意を表したい。また川崎重工造船設計部の御協力も記して謝意を表する。本試験の実験並びに解析は大阪大学職員多田納久義氏、大学院学生村瀬和久、四年次学生喜多島浩、津田達雄、斎藤定一、根木勲の諸君の尽力で行なわれたことを記して謝意を表する。

引 用 文 献

- [4] 野本, 空中 大型油槽船の操縦性に関する模型試験 造船協会論文集 103 号
- [5] 志波久光, 水野時雄, 富田哲次郎, 江田浩三 模型船による最適舵面積の研究 造船協会論文集 105 号
- [6] 志波久光, 江田浩三 超大型船を対照とする旋回能力の増進策に関する模型実験 その一 舵 第 14 回運輸技術研究所研究発表会講演 1957, 11,
- [7] 野本 船の操縦性について 船舶 No. 2, 1959

附 録 試 験 装 置

1. 回頭角度 $\theta(t)$ の計測 $10,000 \text{ g} \cdot \text{cm}^2$, $10,000 \text{ rpm}$ の free-gyro を模型船繫留時に充分加速し試験中は惰力回転。計測時間を充分にとるためには回転を倍以上に上げるか、なし得れば試験中も電力を供給することが望ましい。回頭角度は第 14 図の鋸歯状波門板を free-gyro の垂直軸（その回転が回頭角を示す）に固定し、スリット、フォト・トランジスタ、電磁オシログラフを使用して計測する。測定精度は歯切りの精度、並びに free-gyro の self-rotation に依存する。

2. 舵角 $\delta(t)$ の計測 $\theta(t)$ と同様の方法で電磁オシログラフに記録。

3. 無線操縦装置 市販の模型飛行機無線操縦装置の送信器、受信器を使う。27.12 Mc の搬送波に 300 c/s , 1000 c/s の 2 種類の低周波信号のうちいずれかをのせて送信することができる型式のものである。玩具として型式承認を受けた市販の送信器を使い高周波部分に手を加えなければ特に電波法規の手続を必要としないからこの点便利である。これに第 17, 18 図に示すごときリレー回路を附して前後進、停止、計測始め、計測終りの 5 信号と操舵信号を処理する。操舵は 3° （あるいは Helm adjust により 1° , 5° ）おきに $\pm 36^\circ$ までとる。それ以上の

舵角は舵の0点をずらせればよい。操舵回路は電話交換用の Rotary Relay の接点間に 50Ω の抵抗をつないで可変抵抗器とし、この可変抵抗と舵軸に直結したポテンショメータでブリッジを構成する。ブリッジ出力をトランジスタで増幅、リレーを介して操舵電動機を駆動する。1000c/s 信号は R-Rotary RL の可変抵抗を増し 300c/s 信号は L-Rotary RL の抵抗を増す。双方の抵抗の差に応ずる舵角になるとブリッジが平衡して操舵電動機が停止する。舵角設定の精度は 0.2° 程度にできる。精度を上げるには操舵機構のガタをなくすること、gain を適当に選ぶこと、 50Ω の抵抗を精密に調整すること等が必要である。

第 14 図 フォト・トランジスタによる $\theta(t)$, $\delta(t)$ の計測
(訂正 : SAW-TEETH DISK の矢印は実線と破線が逆になっている)

第 15 図 Block Diagram of HF-Wireless control for Model Ship

前進計測の場合の送受信例

送受信例

- 1) SIG SELECTOR と E (AHEAD) δ (MEASURE ON) に 7.5
- 2) SIG SW 2 ON (BMA MOTOR START)
- 3) BMA MOTOR STOP 後 SIG SW 2 OFF

この方法で送信機からの信号を処理する

操舵信号の処理

1. PULSE 間隔 δ と短かくすれば STEERING ENGINE は連続回転となり、 $\delta(t)$ は階段状になる連続線となる。
2. 300% 長信号が来ない限り DELAY RELAY OFF 従って 300%, 1000% SELECTOR は SIG と L+R-ROTARY RELAY へ送り ROTARY RELAY へ送らない。

第 16 図 信号の構成