

(昭和32年5月造船協会春季講演会に於て講演)

船の操縦性に就いて (2)

正 員 野 本 謙 作*

正 員 田 口 賢 士**

On Steering Qualities of Ships (2)

By Kensaku Nomoto, *Member*

and Kenshi Taguchi, *Member*

Abstract

This paper follows the preceding paper of the authors in 1956. Now it may be concluded that ;

(1) Steering quality of a ship may be described by a transfer function of the form $\frac{K(1+T_3p)}{(1+T_1p)(1+T_2p)}$ or a set of the steering quality indices K, T_1, T_2 and T_3 . These indices are functions of hull form, rudder size and other particulars of a ship. Analytically, they are composed of coefficients of governing equations of motion.

(2) In a more practical sense, steering motions of ships are described substantially by a first-order equation of motion $T \frac{d\theta}{dt} + \theta = K\delta$. Accordingly steering quality may be described in brief by two fundamental indices K and T .

(3) Use of the transient response test and frequency response test of a free self-propelled model is an effective means of providing a full description of steering quality in terms of K, T_1, T_2 and T_3 , through a procedure not so lengthy as the usual approach of resistance derivatives.

(4) Kempf's zig-zag test followed by an analysis employing the first-order equation of motion provides a figure of merit for steering qualities of actual ships in terms of K and T . The zig-zag test would bring out many things about steering quality if it were carried out for many ships.

(5) Referring the values of K and T for a number of actual ships, it may be said that (a) improvement of turning ability (increase of K) brings necessarily some reduction of quick-responsibility and stability in steering (increase of T), if the relative rudder size remains constant, (b) rudder size, cut-up of dead-wood and other similar arrangement have fair effects for steering quality, while main hull form has much smaller effects for it.

(6) It may be expected that the present expression of steering quality would provide a reasonable basis for design work relating to steering and turning. In this connection, consideration of a feed-back system composed of a ship, a steering gear and a helmsman or an auto-pilot may be an important aid.

3. 操縦性の実用的な表現法——操縦性指数

3.1 操縦運動の方程式：

さきにわれわれは Davidson の運動方程式から出発した。この方程式の係数はすべて無次元であり変数も亦普通の運動方程式の時間の代りに船の走つた距離を無次元化して使っている。このやり方は確かに便利であるが一方個々の船の操縦特性を直接表わしているのはやはり時間ベースの運動方程式である。大きい船も小さい船も同

原稿受付：1月10日

*大阪大学造船学教室

**大阪府立大学船舶工学教室

じ時間ベースに就て運動していること——大きい船も小さい船も同じ速さの操舵機によつて操舵され、同程度の周期の波に遭遇し或は同じ敏捷さをもつ鯨を追わねばならないという様なこと——を考えると回頭の角速度にしても舵の効きの速さにしても直接問題となるのはその実際の値であつて無次元値ではない。そこで Davidson の運動方程式を時間ベースに書き直すと

$$\left\{ \begin{aligned} \left(\frac{l}{V} \right) m_2 \frac{d\psi}{dt} + c_l \psi - \left(\frac{l}{V} \right) m \dot{\theta} &= c_\lambda \delta \\ \left(\frac{l}{V} \right)^2 n \frac{d\dot{\theta}}{dt} + \left(\frac{l}{V} \right) c_k \dot{\theta} - c_m \psi &= c_\mu \delta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで $\dot{\theta}$ は旋回角速度, δ は舵角, ψ は drift angle, V は船の速度, l は船の長さである。 ψ を消去し係

$$\text{数を整理すると (1.1 参照)} \quad T_1 T_2 \frac{d^2 \dot{\theta}}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{d\dot{\theta}}{dt} + \dot{\theta} = K \delta + K T_3 \frac{d\delta}{dt} \quad (3)$$

ここに

$$K = \left(\frac{V}{l} \right) \frac{c_m c_\lambda + c_l c_\mu}{c_l c_k - m c_m}, \quad T_1 T_2 = \left(\frac{l}{V} \right)^2 \frac{m_2 n}{c_l c_k - m c_m}, \quad (T_1 + T_2) = \left(\frac{l}{V} \right) \frac{m_2 c_k + n c_l}{c_l c_k - m c_m}, \quad T_3 = \left(\frac{l}{V} \right) \frac{m_2 c_\mu}{c_m c_\lambda + c_l c_\mu}$$

この K, T_1, T_2, T_3 は無次元の方程式から作られた無次元の K, T_1, T_2, T_3 (1.1 参照) と $\left(\frac{V}{l} \right)$ だけ異つてゐる。初めに述べた事情を考慮した結果、われわれはこの機会に無次元の K, T_1, T_2, T_3 を K', T_1', T_2', T_3' と書き改めることにした*。 K, T_1, T_2, T_3 は操縦運動の方程式を決定するからこの四つの指数で船の操縦性を表わすことができる。或は 1.1 に述べた様に伝達函数の形にまとめて $Y_s(p) \equiv \frac{K(1+T_3 p)}{(1+T_1 p)(1+T_2 p)}$ で操縦性を表現してもよい。指数 K, T_1, T_2, T_3 の意味とか之等の指数が自航模型船や実船の操縦試験から直接決定できることなどは既に述べた所である。

方程式 (3), 従つて操縦性の指数 K, T_1, T_2, T_3 は必ずしも Davidson の方程式から誘導する必要はない。速度の変化を無視し抵抗係数を使つて線型化した操縦運動の方程式はどの様な形のものにせよ, (3) の形にすることができからである。

3.2 操舵に対する船の運動:

船の操縦性はこの様にして四つの指数で表わされるがもう少し実際の立場から考えてみると之等四つの指数が全部同程度に本質的なのではない。むしろこの K と、もう一つ T_1 を主とし之に T_2, T_3 の影響を考慮した新しい一つの指数 T の二つを以て操縦性の実質的な表現を得ることができる。このことを明らかにするために先ず実際の操舵の仕方とそれに対する船の運動を考えてみよう。第7図は代表的な三種類の操舵機による操舵の実例である。之によれば一定の舵角迄一定の速さで舵角を増したのちその一定舵角を保つという形をすべての操舵機に共通な操舵の仕方とみてよい様である。実際の操縦に際してはこの形の操舵が相次いで行われるわけである。この基本的な操舵に対する船の運動を運動方程式から求めると

$t \leq t_1$ の間—操舵中—は

$$\theta(t) = K \delta_0 \left[\frac{t^2}{2 t_1} - \frac{T_1 + T_2 - T_3}{t_1} t + \frac{1}{t_1 (T_1 - T_2)} \{ T_1^2 (T_1 - T_3) (1 - e^{-t/T_1}) - T_2^2 (T_2 - T_3) (1 - e^{-t/T_2}) \} \right]$$

第7図 種々の操舵機に依る操舵の実例

t_1 以後では

$$\theta(t) = K \delta_0 \left[t - \left\{ (T_1 + T_2 - T_3) + \frac{t_1}{2} \right\} + \frac{1}{t_1 (T_1 - T_2)} \left\{ T_1^2 (T_1 - T_3) (e^{t_1/T_1} - 1) e^{-t/T_1} - T_2^2 (T_2 - T_3) (e^{t_1/T_2} - 1) e^{-t/T_2} \right\} \right]$$

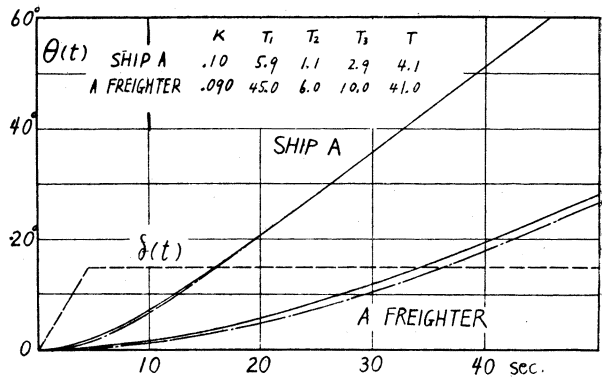
* 之に関連して 2.4 の $K', T_3', Y_s'(p)$ を $K\psi', T_3\psi', Y_s\psi'(p)$ と改める。

ここに δ_0 は舵角, t_1 はそれをとるに要する時間である。二つの代表的な実例——非常に安定で quick response な ship "A" [9] とかなり安定度が低く従つて response も遅い満載した貨物船——に就て計算してみると(第8図)確かに船の運動は K と T の二つだけで決定される一次系の運動で近似できる様に見える。問題は T の選び方であるが一つの方法は時間が充分経つた時, 誤差がなくなる様に T を決めることである。こうすると $T = (T_1 + T_2 - T_3)$ となり近似の程度は図に鎖線で示す如く大体に於て満足すべきものである。今扱っている操舵の形はどの様な形の

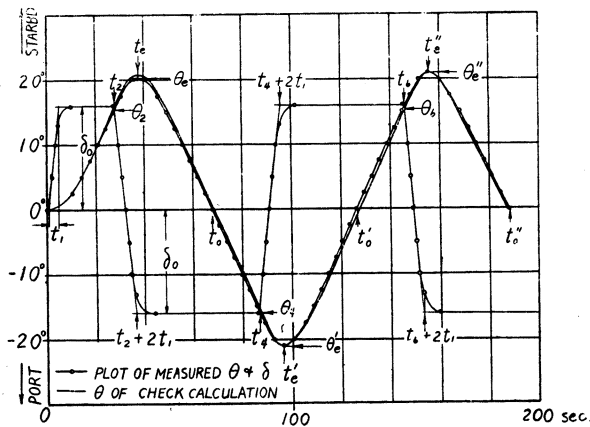
操舵も結局この形の操舵の重ね合せになる様な基本的な形であるから, この操舵に対する船の運動が一次系でよく近似されるからにはどの様な操舵に対する運動にせよ同程度に一次系近似が出来る筈である。

3.3 実船の操縦運動の解析:

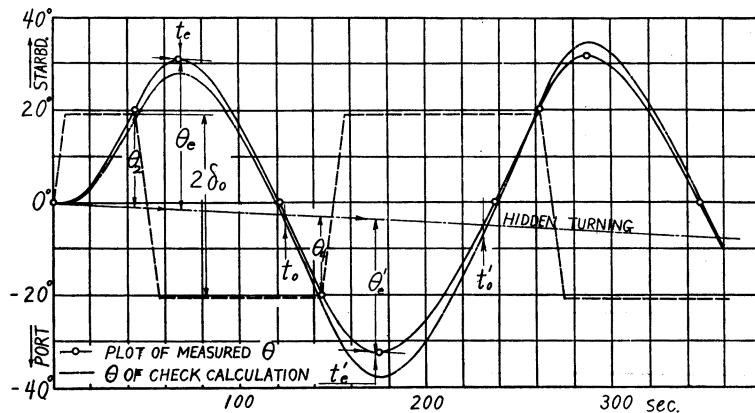
此処で少し立場を変えて船の実際の運動がどの程度一次系による近似に堪えるか検討しよう。普通の操縦運動の範囲で船の運動がどの程度線型的なものであるかに就て必ずしも明確でないことを考えると, この検討は実は一次系近似に限らず線型運動方程式で船の操縦運動を取扱うことの正当さを実証的に確めるということにもなる。実船の運動は限りなく多様であるがわれわれは代表的な操縦運動として Kempf が提案した Z-操縦試験 [15] を考え, 約 20 隻の実船に就て Z-試験の結果を解析してみた。第9, 10図はその代表的な実例である。貨物船の方は公試状態のもので著しく船尾トリムしている上に相対的に舵面積が大きいから著しく安定で quick-response な例である。タンカーの方は満載してかなり安定度の悪い方の代表である。実測した操舵に対して, その船の運動に最も近い運動をする一次系を求めてみるとその運動は鎖線の様になる。この結果から安定な船, 云いかえれば T の小さい船に対しては一次系近似は充分の精度をもっていることが分る。タンカーの結果にみられるかなり



第8図 Transient Phase of Turning



第9図 公試状態に於ける貨物船のZ-操縦試験成績



第10図 満載したタンカーのZ-操縦試験成績

の不一致は一次系近似の悪さというよりはむしろ線型取扱いの限界を示すものである。この不一致は一次系近似をあきらめて T_2, T_3 を使ってみても余り変りばえがしない、云いかえれば線型の運動方程式を使う限りその階数を上げて余り精度はよくならない。従つてもつと精度のよい取扱いをするためには操縦による速度の変化や旋回運動の発達に伴つて起る抵抗係数の変化などの非線型影響を考慮しなければならない。しかしこの例に使っている 20° の舵角は普通の操縦には余り使われない大きい舵角である。大きい舵角は強い運動を起し従つて非線型影響も大きくなることを考えると普通の操縦に見られる程度の比較的ゆるやかな運動では、この船にしてももつといい精度で線型取扱いができるのではないと思われる。結論として実船の運動の解析も亦船の運動が大体に於て一次系の運動に近いものであることを示していると云つてよい。

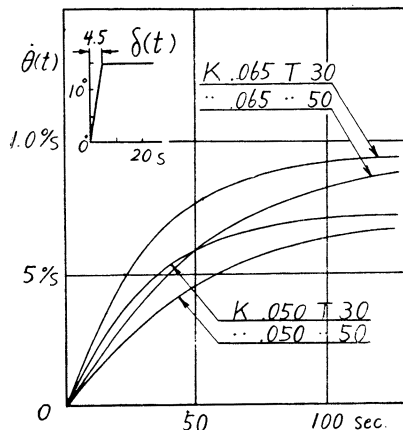
ここに述べた様に実際の操縦運動を最もよく近似する様に T を決めることは又 T を定義する一つの方法である。この様にして決めた T はさきに述べた決め方による T とよく似た値をもつ筈であるけれども詳しく考えればこの T は実船の運動に存在するなにかしらの非線型影響を平均化したものであり、又実際の運動は多かれ少なかれ未だ過渡状態にあるわけでの影響も又平均化されて入っている筈である。この様な意味でこの T は謂わばその操縦運動に就ての有効的な T と云うべきものである。従つて現実に行われる多様な操縦運動をよく代表する様な形の操縦運動に対してこの様に T を決めるならばそれは恐らく最も実際の T の値を与えるであろう。ここに述べた Kempf の Z—操船試験はそれを普通の操縦に使われる程度の舵角に就て行ふならば操縦運動の代表として適当なものと考えられる。

3.4 K と T による操縦性の表現：

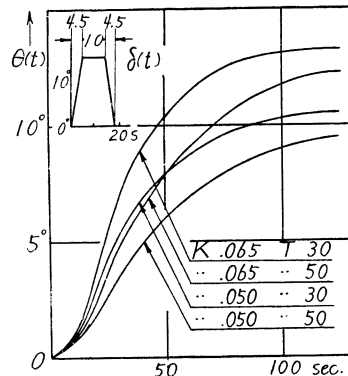
以上の議論から船の操縦運動が本質的に言つて一次系の運動であること、云いかえれば一階の線型運動方程式

$$T \frac{d\dot{\theta}}{dt} + \dot{\theta} = K\delta \quad (4)$$

で表わすことのできる運動であることが認められる。この運動方程式から明らかな様に T は船の慣性に対する水の抵抗の比であり K は舵による旋回力に対する水の抵抗の比である。しかしこの慣性は船の慣性能率だけでなく横方向の質量が加味された有効的な慣性能率であり抵抗にしても旋回モーメントにしてもその様な意味の有効的なものである(1.3参照)。従つて解析的には K と T は基礎的な運動方程式(2)の諸係数即ち船の慣性の係数、水の抵抗の係数、それに舵に働く力の係数から組立てられている。しかしこれらの諸係数は結局 K と T の二つの係数に纏められた形で操縦性に寄与しているのであるから、いくらか端的な云い方をすれば個々の係数の値はどうあろうともそれらから組立てられた K と T がつまるところ操縦性を決定するのである。この様な立場は当然実船や自航模型の運動の観測から直接その船の操縦性の定量的な表現を得ようとする方法につながるものであり、その意味で水槽試験から個々の係数を知り然して操縦性を知ろうとする従来の方法といくらか異っている。しかしこの両者の相違はさほど本質的なものではない。例えば従来船の横揺に関して減衰係数や波浪による強制外力の研究は多分にここに述べた様な立場からなされて来た。指数 K, T の意味に就ては既に触れたところであるが一言にして云えば K はその船が本来持つている旋回力の強さを示すものであり、 T は操舵に応じ



第 11—a 図 Build-up of Turning



第 11—b 図 Response to Trapezoidal steering

てその旋回力を発揮するすばやさ (quick-responsibility) を示すものである。 T は又所謂進路安定性 (dynamic stability on course) の指数でもあるがこれは進路安定性とは云いかえると 0° の舵角に対する quick-responsibility であることを考えると当然である。

本質的に考えてこの二つの能力、旋回力と安定性は船の操縦性を決定する必要にして十分な要素である。このことはさきに述べた基本的な操舵に対する船の運動をいろいろな K, T の組合せに就て検討することによつて明らかにされる。第 11 図はその結果である。 $K=.050, T=30$ は或るタンカーの満載時の値に近いもので、他の K, T の組合せはこの値を夫々少しづつ変化させて作つたものである。第 11— a 図で見ると大きい K と小さい T をもつ船は強い旋回をすみやかに発揮して終始他の船に先んじて回頭するから最も優れた操縦性をもっている。一方小さい K と小さい T をもつ船は旋回の初めのうちはその quick-responsibility によつて優れているがそのうち大きい K と大きい T をもつ船が徐々にその強い旋回力を発揮して来て順位が逆転するに至る。第 11— b 図の形の操舵では K の大きい船は一定の操舵の量—舵角とそれを保持する時間の積—に対して大きく変針し得るし、 T の小さい船はすみやかにその変針を行うことが分る。実際の操縦ではこの様な基本的な操舵が相次いで行われるから操縦性の優劣は強い旋回力のみならずその迅速な発揮にも亦大きく依存するのである。

なおここに述べた様に最終的な変針角度は操舵の形には無関係にその積分値である操舵の量に比例するものであり、 K がその比例常数になる。これは有限の操舵時間をもつ操舵であれば常に成立つことである。即ち運動方程式 (3) を $t=0-$ から ∞ 迄積分すれば

$$T_1 T_2 \int_{0-}^{\infty} \ddot{\theta}(t) dt + (T_1 + T_2) \int_{0-}^{\infty} \dot{\theta}(t) dt + \int_{0-}^{\infty} \theta(t) dt = K \int_{0-}^{\infty} \delta(t) dt + K T_3 \int_{0-}^{\infty} \delta(t) dt$$

$$\text{従つて} \quad \theta(\infty) = K \int_{0-}^{t_1+t_2} \delta(t) dt$$

ここに (t_1+t_2) は操舵の終つた時刻である。

4. 操縦性の実際問題

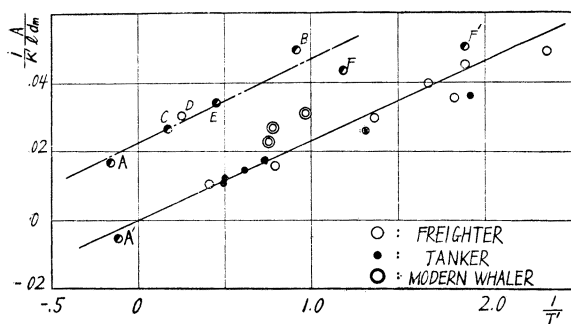
4.1 K, T の実際の数値—— K と T の相関々係：

第一表は実船の K, T を Z —操船試験から求めた結果であるが之によるといくつかのグループが明らかに見分けられる。先づ満載したタンカー及び貨物船の一群は $30 \sim 40$ 秒に及ぶ大きい T がその特徴である。 K の値は 0.05 程度である。次はこれらの船の試運転状態のものであるが、 T は大変小さくて 10 秒前後であり K は余り変らない。半載時のものは丁度この中間を結ぶ形になつている。これらの値は一般商船の K, T の大体の範囲を示すものと考えられる。

K, T の値は一般に船型や舵面積の函数であるが、その全貌を明らかにするためには更に多くのこの種の資料と共に系統的な模型実験が必要である。この問題に関連して K と T の相関々係を調べておくことは有益である。

第 1 表 操縦性指数 K, T の実例

	cond.	Lpp×Bm×Dm	K	T	$\left(\frac{V}{l}\right)$	K'	T'	$\frac{r}{l} / \left(\frac{l^2 dm}{1000}\right) AR/l dm$
Tanker	full	201×28.2×14.6	.0527	46.0	.0437	1.20	2.01	108 1/77.4
	ballast		.0380	10.6	.0495	.768	.524	109 1/36.0
Tanker	full	181×25.4×13.5	.0553	41.9	.0484	1.15	2.01	102 1/72.2
Tanker	full	167×22.0×12.2	.0521	33.6	.0488	1.07	1.64	96.5 1/65.3
Freighter	full	145×19.5×12.2	.0516	24.7	.0514	1.00	1.27	87.7 1/64.6
	light		.043	7.0				
Freighter	half	121×16.2	.0382	17.4	.0424	.900	.738	87.4 1/37
Freighter	ballast	132×18.2×11.7	.0570	8.22	.0666	.860	.550	101 1/22.8
Freighter	ballast	114×16.4×9.3	.0544	7.26	.0735	.740	.533	104 1/30.2
Bulk-carrier	ballast	152×20.6×12.7	.0430	9.99	.0601	.716	.600	98.5 1/35.2
Fish-Carrier	ballast	67×10.8×5.7	.075	5.7	.086	.87	.49	107 1/23.3
Whaler	approval	57×9.5×5.1	.27	9.9	.140	1.9	1.39	75.8 1/22.1
Whaler	approval	57×9.7×5.1	.18	6.7	.154	1.20	1.04	89.6 1/27
Whaler	approval	45×8.2×4.4	.20	7.6	.169	1.18	1.28	93.7 1/27
Whaler	approval	42×7.8×4.45	.20	5.0	.178	1.12	.89	1/37.4

第12図 K, T の相関々係

の表示を直接図上に移すと A, B, \dots, F になるが一方 Schiff と Gimprich [9] がこのうち A, F と思われる船に就て詳細な係数を与えているからそれを使つて本論文の表示に換算すると A', F' となる。 A, F と A', F' の差は大舵角の旋回による非線型影響及び T' と T_1' の差によるものである。その他の船に就ても同様の計算を行うならば恐らく同様の結果を得るであろう。 K, T のこの様な表示は延長すると原点を通る傾向を持たねばならない。線型取扱ひでは $T=\infty$ は安定不安定の境界でここでは K も ∞ になるからである。この様な船は一旦舵をとられると無限に速い旋回に向つて運動を起すが Davidson が示している様に非線型影響が暫時にしてこれを押し止めてほどほどの旋回に安定させる。Davidson の表示の $\left(\frac{D}{l}\right)_{\min}$ はこの状態に対するものであるから原点を通らない。

この表示の重要な意味は船型の相当大きい相違にも拘らず K と T が大体に於て舵面積比だけによつて関係づけられていることである。云い換えると一定の舵面積比をとる限り K の増加は必然的に T' の増加をもたらし——旋回力の強化は必然的に安定性乃至 quick-responsibility の減少を伴う——ということである。この関係は K', T' の意味から考えて根拠がある。 K' は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であり一方 T' は船の慣性の係数と旋回抵抗モーメントの係数の比である。従つて $\frac{1}{K'}$ と $\frac{1}{T'}$ は確かに或る比例関係にありその比例常数は慣性の係数と舵による旋回モーメントの係数の比である。このうち舵によるモーメントの係数は舵の有効さが同程度ならば舵面積比に比例する。従つて舵の有効さ並に慣性の係数に余り大きい開きがないならば $\frac{1}{K'} \times \text{舵面積比} = \frac{1}{T'}$ に対してほぼ直線的に並ぶことになるであろう。事実慣性の係数に就てはここにあげた船の殆どが $\frac{l^3 d_m}{1000} = 95 \sim 110$ の間にある、 ∇ は排水容積、 l は船長、 d_m は平均吃水である。船の慣性半径は約 $0.25l$ で余り開きがないことを考えるとこの $\frac{l^3 d_m}{1000}$ は慣性の係数に大体比例する形のものであつて、この値に余り開きがないということは慣性の係数にも船によつて余り大きい相違がないことを示している。一方舵の有効さは舵や推進器の配置に従つて大体一定したものと考えられる。この様に考えてみると $\frac{1}{K'} \times \text{舵面積比}$ が大体に於て $\frac{1}{T'}$ に比例することは自然であるが、一方それは同程度の慣性の係数と舵の有効さを前提としていることに注意しなければならない。例えば非常にずんぐりした船とか特別な舵の配置などに対してはこの関係は相応のばらつきを示す筈のものである。第12図に於て新型キャッチャーの一群が明らかに一般商船から見分けられるのはこの理由によるものであろう。

無次元の係数の形にしてみると船の慣性の相違は意外に小さいものであるということ——これは $\frac{1}{K'} \times \text{舵面積比}$ が $\frac{1}{T'}$ に比例する傾向が明らかであればある程確実になるのであるが——このことは安定性 T に決定的な影響を与えているのは旋回抵抗を大きく変える手段、具体的には舵とか船首尾に於ける cut-up, fin などであることを暗示している。このことは Davidson の total-less-rudder moment に関する結果からも想像される。彼によれば定常旋回中船体に働くモーメントは船によつて大きい相違があり旋回角速度の函数としてのこのモーメントの形が船体の特性をよく表すものであるが、一方このモーメントの形は単に fin の面積を少し変えることによつて或る船型に対するものから他の船型に対するものに移ることができる。これは船体主要部はその船型の如何に関せず大体一定の特性をもつており、従つて船型による特性の相違は fin や舵, dead wood に関係するものであるということである。ここにあげた程度の資料から余り決定的な議論はできないけれども K' と T' が

これは船型や舵面積が K, T に与える影響の仕方に就て多くの示唆を与える。第12図は $\frac{1}{K'}$ と舵面積比の積を $\frac{1}{T'}$ に対して図示したものである。寸法の異なる船を同じペースで考えるため無次元の K', T' を使い且つ安定度が低くなるにつれて K, T 共に非常に大きくなることを考えてその逆数をとつたものである。この表示は Davidson と Schiff [4] が与えた $\left(-\frac{D}{l}\right)_{\min} \times \text{舵面積比} \times \delta_{\max}$ 対安定性指数 p_1 と類似のものである。Davidson

舵面積比だけで結ばれるという傾向が明らかであればある程（１）舵面積比を一定にする限り旋回性の強化は安定性の減少を伴う（２）旋回性と安定性に大きい影響をもつのは舵、fin、dead wood などであつて船体主要部ではないという二つの結論が確実になるのである。そしてこの結論は従来漠然とではあるが経験的に知られていた様に思われる。

これに関連して舵の二つの作用が明らかに現われていることは注意すべきである。舵は船を旋回させるモーメントを発生すると共に常に旋回を抑えようとする fin の効果をも併せ持っているものである。この後の効果は実際には旋回に伴う舵圧の減少の形で現れている。上の議論に於て K' と T' を結んだ舵面積はこの第一の効果に関するものであり、 K' はこの効果に比例する。舵の第二の効果は K' 、 T' 双方に同じ様に含まれこの効果が大きくなると K' 、 T' は小さくなる。このことは舵面積を増せば T は無制限に小さくできるが一方 K の増加は限度があることを示している。即ち旋回に対する抵抗の大部分が舵の第二の効果で与えられる様になつて来れば舵面積の増加によつて得る旋回力の強化は僅かなものになつてしまう。之は舵の宿命である。

4.2 進路を保持する能力と操縦性の関係：

操縦性に關係の深い重要な問題として course-keeping quality の問題がある。優れた操縦性が進路の保持に決定的な寄与をすることは疑いないがしかしこの二つの能力が全く同一のものではない。特に操縦性の一つの要素である進路安定性（dynamic stability on course）と course-keeping quality の関係は明らかにしておかねばならない。

船が海の上を走る時には波や風によつて絶えずその進路を乱される。その進路の振れを操舵員或はオート・パイロットが見つけて舵をとり、その操舵に応じて船がもとの進路へ戻つてゆくわけであるが操縦性が直接関与しているのは明らかにこの最後の段階だけである。従つて進路保持の問題には先ずその船が波や風の影響を受け易いか否かということ、そして操舵の仕方がどれ位 quick-response で又進路の振れに対してどの様な関係で行われるかということと一緒に考えなければならない。この様にして結局 course-keeping の問題は船と操舵機とそれに操舵員或はオート・パイロットから構成される feed-back system が外力の擾乱に対してどの様に抵抗するかという問題になる。従つて操縦性が進路保持に直接関係する仕方はこの feed-back system の一つの要素の特性として system 全体の特性に關係するということである。具体的に云うならば操舵員はもとよりオート・パイロットや操舵機に比べて船の response はずつと遅いから進路の振れを打消してゆく速さは主に船の quick-responsibility によることになるし、又大きい K は少しの操舵で進路を保持することに役立つのである。

操縦性と進路保持性の直接の關係はこの様なものであるが一方船が波や風の影響を受ける仕方に就ても操縦性との関連が見られる。これは船の運動の立場から見ればどんな外力にせよそれに等価な操舵を考えることができるからである。例えば横から吹きつける突風はさきの第 11—*a* 図の操舵によく似た旋回モーメントを与えると考えられるし、船首に加えられた波の一撃は第 11—*b* 図の形の操舵でおきかえることができるであろう。この二つの例は恐らく船が遭遇する複雑な外力の基本的な二つの形であるが、どの場合にも明らかなことは T の小さい船は外力の影響がすみやかに現れることである。これは外力の影響が大きいということとは別であつて後に述べる様に T の小さい船は同じ外力に対して結局少い運動しか起さないのであるが、その発達が速かなのである。従つて Davidson と Schiff [4] の様に進路の振れの大小に関せず操舵の時間遅れが一定であると考えたと小さい T は進路保持上好ましくないことになる。しかし之は誤りであつて操舵の遅れは実は時間遅れではなくて進路の振れ乃至はその角速度が或る値に達する迄は操舵しないという形の遅れ——遅れというよりは dead-band（不動帯）——であるから小さい T はこの点でも少なくとも不利ではない。

一方小さい T は大きい旋回抵抗を示すものである。従つて同じ外力に対して T の小さい船は小さい運動しか起さない。外力の原因が風圧などの様に水面下の船体の形に無関係のものであれば小さい T は殆どそれに比例して小さい運動を与える事になるが、一方波による力などの様に水を通じて働く外力を考えると旋回に対する抵抗の大きい船型はそれだけ大きい外力を受ける場合があり得る。例えば小さい T は大きい舵面積や船尾の dead wood で与えられることが多いが、この様な船は追波の中で大きい yawing moment を受けるかも知れない。しかしこの場合にも小さい T が不利なのではなくてその優秀さが大いに相殺されるというに過ぎないのであるし又この船が波に向つて航走する時には小さい T ——大きい旋回抵抗——の効果はよりよく表れるであろう。この問題に就てもつと確実な知識を得るためには波による yawing moment に関してさきに元良氏によつてなされた様な研究 [16] を進めねばならない。

結論として小さい T ——優れた安定性——は(1) 同じ海面の状態に対して全体として進路の振れを起すことが小さい。(2) そしてその振れの現れ方が速かであるからそれだけ速かにそれを打消すための操舵を惹き起す(3) その操舵に対する船の response が速かであるからそれだけ速かに進路の振れを修正することができる。従つて course-keeping の問題に決定的な影響を与える操縦性の要素は安定性 T である。これは従来の経験に一致した結論であるが、注意しなければならないのは船の自由運動の特性である進路安定性がそのまま course-keeping quality ではないということである。従つて又進路保持の問題は船の操縦性の問題であると共に操舵機やオートパイロットの特性の問題であることも忘れてはならない。事実或る船に是非とも必要な T の値はその船が持つ操舵機とオートパイロット或は操舵員によつて決まる筈のものである。

4.3 操縦性に関する設計上の問題：

さきに述べた様に船の操縦性は旋回力を表す K と quick responsibility を表す T の二つの指数で云い表すことができる。そして(1) 大きい K と小さい T をもつ船はどんな場合にも優れた性能をもち(2) 一方小さい K と小さい T をもつ船は大きい K と大きい T をもつ船に比べて旋回運動の初期に於て優つており、従つて繰返しの頻繁な操舵に対してよりよく順応する能力をもっている。(3) 航走中に進路を保持する能力は K には余り関係せず小さい T に依存することが大きい。(4) 或る決まつた船型について優れた進路安定性(小さい T) と強い旋回力(大きい K) を併せもつためには大きい舵をもたねばならない。云いかえれば舵面積を大きくすることの効果は二つあり、それは K を大きくし T を小さくすることである。(5) fin や skeg とか船首や船尾に於ける cut-up などは旋回性をいくらか犠牲にしてその分だけ進路安定性を改善し或は逆に安定性の犠牲に於て旋回力を強くする効果がある。即ちこれらの工夫は K と T を同時に増減することはできるけれども K を大きく T を小さくすることはできない。船体主要部の形に就て操縦性に対する考慮を払う余地は普通ないし、又許される範囲に船型を変えても余り効果は見られない。之を要するに舵面積の大小は謂はば操縦性の総量を決定するものであり、一方 cut-up や fin などは操縦性の二つの要素、旋回力と安定性の間の割り振りを決めるものと云つてよい。

実際問題として大きい舵は望ましくないから設計上の第一の問題はその船の操縦性に対する要求、即ちどれだけ大きい K とどれだけ小さい T を必要とするかに応じて必要最小限の舵面積を決定することである。例えばキャッチャーや曳船などは貨物船よりも操縦性に対する要求が高いから比較的大きい舵面積をもたねばならぬ。次の問題はその船の用途によつて旋回性と quick-responsibility に対する重点のおき方は自ら異なるものであるからそれに応ずる様に船首尾の cut-up とか、必要ならば fin などを設計することである。この問題は K と T の大きい値をとるか小さい値をとるかの撰択であるがこの選択は又必要最小限の舵面積の決定に重要な関連をもっている。何となれば舵面積の増加は旋回性と安定性をいくらかづつ改善する効果をもつがこの効果を二つの性能の各々に分配する仕方によつてバランスがとれてないならば舵面積の効果の一部は無駄に費される事になつて結局大きい舵面積が要求されることになるからである。例えば キャッチャーの設計に於て船尾の cut-up を控えると要求されるだけの旋回力 (K) を得るためにはそれだけ大きい舵を必要とするがその結果得られた安定性 (T) が必要以上であるなら cut-up の控え方は過度であつたわけである。この場合にはもつと大きく cut-up することによつてより小さい舵面積で同じ旋回力と丁度必要なだけの安定性が得られるのである。

この様な立場から舵面積の決定その他の操縦性に関する設計を進めるためには(1)船型や舵面積と K, T の関係と(2) 船の用途や大きさなどに応じて適当な K, T の値を知ることが必要である。実船の K, T を多くの船について集めれば設計に際して適当な K, T の値を推定する目的に役立つであろう。さらに之等の資料は船型や舵と K, T の関係に就てもよい指針を与える。又この目的には2に述べた自航模型による試験も役立つであろう。

或る船に適当な K, T の値を推定するためにその船の使用条件を力学的に解析することは論理的な方法である。例えばキャッチャーが鯨を追う場合船を向きたい方向は鯨の出没に応じて次々に変化するがその変化の振幅や周期から追鯨に必要な K, T を推定するという様なやり方である。この種類の解析には既に述べた様に船だけでなく操舵機とそれに操舵員或はオート・パイロットをも含めた系を考えることが屢々必要であろうし、又不規則現象の調和解析——時系列論の方法——が大きい役割を果すことも期待されてよいであろう。

5. Z—操船試験による操縦性指数の決定

Kempf が提唱した Z—操船試験 [15] は実船の運動の観測からその船の操縦性を知る方法を与える。この方法は 2.2 の終りに述べた実船に対する impulse 操舵よりも信頼性が高く實際的である。この試験は(1) 先ず

舵を或る角度（例えば 15° ）だけ右舷にとりその舵角を保つ（2）船の向きがその舵角に等しいだけ右へ振れた時舵を今度は左舷へ同じ角度だけとる（3）次いで船の向きが同じ角度だけ左へ振れた時舵を再び右へ同じ角度だけとる。この様な操舵を数回繰返して舵角と船の向きの変化を計測する（第 9, 10 図）。この様な操舵は第 11 - b 図の梯形操舵を次々に重ね合せたものでよく表すことができるから船の運動もさきの結果を重ね合せて計算することができる。一次系近似の運動方程式を使い、進路の振れが極大になる時刻を次々に $t_e, t_{e'}, t_{e''}$ 、その時の θ を $\theta_e, \theta_{e'}, \theta_{e''}$ とすれば $t_e, t_{e'}, t_{e''}$ に於て $\dot{\theta} = 0$ であるから

$t_e \geq t_2 + 2t_1$ の場合には

$$\left. \begin{aligned} T(e^{-t_e/T} - e^{-(t_e-t_1)/T} - e^{-(t_e-t_2)/T} + e^{-(t_e-t_2-2t_1)/T}) &= t_1 \\ T(e^{-(t_{e'}-t_2)/T} - e^{-(t_{e'}-t_2-2t_1)/T} - e^{-(t_{e'}-t_4)/T} + e^{-(t_{e'}-t_4-2t_1)/T}) &= t_1 \\ T(e^{-(t_{e''}-t_4)/T} - e^{-(t_{e''}-t_4-2t_1)/T} - e^{-(t_{e''}-t_6)/T} + e^{-(t_{e''}-t_6-2t_1)/T}) &= t_1 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

なお指数函数部分は大きい方から四項だけとつて残りは捨ててあるが之で数値的に充分である。 t_2, t_4, t_6 は図に示す如く次々に舵を反対舷へとり始めた時刻、 δ_0 は舵角、 t_1 は δ_0 をとるに要する時間である。大部分の船はこの場合であるが、時々 $t_e \leq t_2 + 2t_1$ になる船もある。その時には

$$\left. \begin{aligned} T(1 + e^{-t_e/T} - e^{-(t_e-t_1)/T} - e^{-(t_e-t_2)/T}) &= t_e - (t_1 + t_2) \\ T(1 + e^{-(t_{e'}-t_2)/T} - e^{-(t_{e'}-t_2-2t_1)/T} - e^{-(t_{e'}-t_4)/T}) &= t_{e'} - (t_1 + t_4) \\ T(1 + e^{-(t_{e''}-t_4)/T} - e^{-(t_{e''}-t_4-2t_1)/T} - e^{-(t_{e''}-t_6)/T}) &= t_{e''} - (t_1 + t_6) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

次に $t_e, t_{e'}, t_{e''}$ に於て θ は夫々 $\theta_e, \theta_{e'}, \theta_{e''}$ になるから

$$\left. \begin{aligned} t_e \geq t_2 + 2t_1 \text{ の場合には } \frac{1}{K} &= \frac{\delta_0}{\theta_e} \left(-t_e + 2t_2 + \frac{3}{2}t_1 \right) \\ \frac{1}{K} &= \frac{\delta_0}{\theta_{e'}} \left(t_{e'} + 2t_2 - 2t_4 - \frac{1}{2}t_1 \right) \\ \frac{1}{K} &= \frac{\delta_0}{\theta_{e''}} \left(-t_{e''} + 2t_2 - 2t_4 + 2t_6 + \frac{3}{2}t_1 \right) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} t_e \leq t_2 + 2t_1 \text{ ならば } \frac{1}{K} &= \frac{\delta_0}{\theta_e t_1} \left\{ (t_1 + t_2)t_e - \frac{1}{2}(t_e^2 + t_1^2 + t_2^2) \right\} \\ \frac{1}{K} &= \frac{\delta_0}{\theta_{e'} t_1} \left\{ -(t_1 + t_4)t_{e'} + \frac{1}{2}(t_{e'}^2 + t_1^2 + t_4^2) + t_1(t_1 + 2t_2) \right\} \\ \frac{1}{K} &= \frac{\delta_0}{\theta_{e''} t_1} \left\{ (t_1 + t_6)t_{e''} - \frac{1}{2}(t_{e''}^2 + t_1^2 + t_6^2) - 2t_1(t_4 - t_2) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$t_e, t_{e'}, t_{e''}$; $\theta_e, \theta_{e'}, \theta_{e''}$; t_2, t_4, t_6 ; δ_0, t_1 を測定結果から読み取つてこれらの方程式に代入すれば K, T が得られる。(5), (6) 式は数式的には解けないから逐次近似か“cut and try”法によつて数値計算を行う。それに使う T の第一近似値としては $(t_e - t_2)$ をとると便利である。

同様の操作を船が最初のコースを次々に過ぎる時刻 t_0, t_0', t_0'' について行うことができる。即ち t_0, t_0', t_0'' に於て $\theta = 0$ とおくと、 $t_0 \geq t_2 + 2t_1$ の場合には

$$\left. \begin{aligned} T &= \left(t_0 - 2t_2 - \frac{3}{2}t_1 \right) + \frac{T^2}{t_1} (e^{-t_0/T} - e^{-(t_0-t_1)/T} - e^{-(t_0-t_2)/T} + e^{-(t_0-t_2-2t_1)/T}) \\ T &= \left(t_0' + 2t_2 - 2t_4 - \frac{t_1}{2} \right) + \frac{T^2}{t_1} (e^{-(t_0'-t_2)/T} - e^{-(t_0'-t_2-2t_1)/T} - e^{-(t_0'-t_4)/T} + e^{-(t_0'-t_4-2t_1)/T}) \\ T &= \left(t_0'' - 2t_2 + 2t_4 - 2t_6 - \frac{3}{2}t_1 \right) + \frac{T^2}{t_1} (e^{-(t_0''-t_4)/T} - e^{-(t_0''-t_4-2t_1)/T} - e^{-(t_0''-t_6)/T} + e^{-(t_0''-t_6-2t_1)/T}) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

実際問題として $t_0 \leq t_2 + 2t_1$ になることは考えられない。この方程式も (5), (6) と同様の計算を経て T の決定に使われる。最後に t_2, t_4, t_6 に於て測られた θ を $\theta_2, \theta_4, \theta_6$ とすると

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{K} &= \frac{\delta_0}{\theta_2} \left\{ \left(t_2 - \frac{t_1}{2} \right) - T + \frac{T^2}{t_1} (-e^{-t_2/T} + e^{-(t_2-t_1)/T}) \right\} \\ \frac{1}{K} &= \frac{\delta_0}{\theta_4} \left\{ \left(2t_2 - t_4 + \frac{3}{2}t_1 \right) + T + \frac{T^2}{t_1} (-e^{-t_4/T} + e^{-(t_4-t_1)/T} + e^{-(t_4-t_2)/T} - e^{-(t_4-t_2-2t_1)/T}) \right\} \\ \frac{1}{K} &= \frac{\delta_0}{\theta_6} \left\{ \left(2t_2 - 2t_4 + t_6 - \frac{t_1}{2} \right) - T + \frac{T^2}{t_1} (e^{-(t_6-t_2)/T} - e^{-(t_6-t_2-2t_1)/T} - e^{-(t_6-t_4)/T} + e^{-(t_6-t_4-2t_1)/T}) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

この式は今迄の計算で得た T を使って K を求めるのに使われる。以上の操作を実際に行つてみると各方程式からいくらか異つた値の K 或は T が得られる。その差が余り大きくなければその平均をその船の K, T と考えることができる。第 9, 10 図の鎖線はこの様にして得た K, T に対する運動である。

上に並べた方程式はもともと左右舷等しい舵角をとるものとして作られたが実際問題として操舵機やテレモーターの調整の不完全とか推進器による旋回モーメントなどのため有効的な舵の 0 点はいくらかずれていることが多い。そこで上の計算を行うに先立つてこの修正——residual helm correction——が必要になる。residual helm の船の運動に対する影響は緩やかな定常旋回をつけ加える形になると考えられるからこの旋回を船の運動から見出して差引けばよい。この角速度は $\frac{1}{2} \left| \frac{\theta_6}{t_6 - t_0'} - \frac{\theta_4}{t_4 - t_0} \right|_{\text{measured}}$ で大体与えられる。何となれば $\frac{\theta_6}{t_6 - t_0'}$ と $\frac{\theta_4}{t_4 - t_0}$ は夫々右及び左向き回頭の最終角速度に大体等しい。そしてこの最終角速度には residual helm による旋回が含まれているからその差は residual helm による旋回角速度の二倍に大体等しい筈である。差引くべき旋回角速度が決まれば修正は第 10 図に示す様に図上で行うのが簡単である。この修正は往々にして $\theta(t)$ や t_0, t_0', t_0'' に大きく影響するがその様な場合にも t_0, t_0', t_0'' に対する影響はずつと小さい。之は $\theta(t)$ に対する residual helm の影響は累積されてゆくけれども $\dot{\theta}(t)$ に対するそれは単に僅かな 0 点のずれに過ぎないことを考えると当然である。この事情から t_0 からよりも t_0 から信頼性のある T が得られる様である。

Z 試験の計測は従来 t_0, t_0' などの時刻にとびとびに舵角と船のコースを読むことが多かつたが、できれば連続的な計測の方がよい結果を与える。この目的に電磁石でペンを動かす形式の簡単な装置は便利である。コンパスと舵角指示器の前に計測員がつき、 θ なら 1° か 2.5° おきに舵角なら 5° おき位に押ボタンを押してペンを動かすわけである。時刻は電接時計で 1 秒おきに入れる。連続的な計測が出来ない時に特に注意しなければならないのは t_1 である。普通使われている電動油圧操舵機は所定舵角に近づくと非常に運動が緩やかになるから所定舵角に止つた時刻から t_1 を決めてはいけない。むしろ舵を反対舷へ回し始めた時から舵角 0 を通過する迄の時間を測つて t_1 とするのがよい様である。この舵角はむしろ実際の舵角であつてテレモーターの上についている指示針の舵角ではない。

結 論

- (1) 船の操縦性は $\frac{K(1+T_3p)}{(1+T_1p)(1+T_2p)}$ の形の伝達函数或は指数 K, T_1, T_2, T_3 を以て表すことができる。この指数は船型や舵面積などの函数である。解析的にはそれらは運動方程式の係数から組立てられている。
- (2) 船の操縦運動は実際問題として一階の運動方程式 $T \frac{d\dot{\theta}}{dt} + \dot{\theta} = K\delta$ で大体に於てよく表すことができる。 T は T_1 にいくらか T_2 と T_3 の影響が加わつたものである。 K と T は操縦性の実用的な指数である。
- (3) 自航模型による transient response test や frequency response test から K, T_1, T_2, T_3 の形でその船の操縦性を知ることができる。この方法は従来の旋回水槽などによる方法に比べて実用的であり、船型と操縦性の関係を知るのによい方法である。
- (4) Z-操船試験から実船の操縦性指数 K, T を知ることができる。この試験を多くの船に就て行うことが望ましい。
- (5) 実船の K, T を検討するに、舵面積比を一定にする限り旋回性の強化は安定性の減少を伴うことが認められる。又、操縦性に決定的な影響を与えるのは舵、dead-wood などで船体主要部はそれ程でない様に見える。
- (6) K, T による操縦性の表示は操縦性に関係した設計上の問題に役立つであろう。之に関連して船と操舵機、それに操舵員或はオート・パイロットからなる feed-back system を考えることも大切である。

この研究に当り川崎重工、日立造船、佐野安船渠、大阪造船、塩山船渠、播磨造船、藤永田造船の各社から試運転などの機会に多くの御協力を受けている。又現在行つている航海中の Z 操船試験に就ては船舶会社各位に御協力を受けつつある。ここに記して深く謝意を表する次第である。又終始多くの御援助を受けた笹島教授始め阪大水槽関係者各位にも深く謝意を表したいと思う。

引 用 文 献

- [15] G. Kempf: Measurements of the Propulsive & Structural Characteristics of Ships. T. SN⁴ ME 1932.
- [16] 元良誠三: 強制外力によるヨーイングについて, 造船協会々報 83 号, 1948.