

II. 針路不安定な船の特質

元良 誠三* 藤野 正隆*

目 次

はじめに.....	41	1.3.1. 非常常スパイラル試験における ループ幅.....	51
1. 通常の意味での針路不安定な船.....	41	1.3.2. 自動操縦による操縦性の向上.....	52
1.1. 針路不安定な船の流体力学的性質.....	41	1.3.3. 不安定度の許容限界.....	53
1.2. 針路不安定な船の現象.....	44	2. 異常不安定船.....	54
1.2.1. スパイラル試験における現象.....	44	2.1. 実船の異常例.....	54
1.2.2. 通常 α 試験および変形 α 試験に おける現象.....	47	2.2. 現象の説明.....	57
1.2.3. 正弦操舵に対する反応.....	50	2.3. 対策.....	59
1.3. 針路不安定な船の操船に関する考察.....	51	参 考 文 献.....	59

は じ め に

ここ数年来、盛んに建造されている肥った巨大船型の船では針路安定性の面からいうと、ほとんど例外なく針路不安定であるといっても過言ではなく、たとえ針路安定なものがあったとしても安定度は極端に悪く針路不安定になる一歩寸前のものばかりといえよう。

しかし、針路不安定だといっても実際の操船面において非常に困難を感じるかというと、必ずしもそうではなく、いまのところどうにも操船できないという船はほとんどないといってもよいのではなからうか。一方、そうはいうものの、やはりある程度以上不安定度が大きくなると、操船面で好ましくない結果が出ているようであるので、その意味から本章では針路不安定な船の特質について二・三その性質を明らかにし、不安定性の本質の理解に供したい所存である。そこで 1. には通常の意味での不安定な船の現象をまとめて記述した。

一方最近二・三の船について観測された結果では、従来の意味での針路不安定な船での現象では説明できない、特異な現象が現われはじめている。これらについての研究は、まだまだその端緒をつかんだ程度状態で、事の本質を十分に説明できるまでには至っていないが、従来の意味での不安定性と区別して別項を設け、異常不安定な船としてその概要を 2. で述べることにする。

なお、狭水路中などでの針路不安定性等については、本章で述べる場合とくらべると、流体力学的には別の因子が働いているので、ここではそのような場合の不安定性については触れずに、次章Ⅲにゆずることにした。

1. 通常の意味での針路不安定な船

1.1. 針路不安定な船の流体力学的性質

最初に、通常な意味での針路不安定な船というのは、いかなる原因のために不安定なのかを考察してみよう。実はこれについては、すでにⅠ章でも述べられていて重複することになるが、話の筋道から取って述べることにした。

ある定常な運動状態から、わずかな攪乱が生じたとして、その摂動成分についての運動方程式を書き表わそう。船は、ある一定速度で航走しているものとして前進方向の速度変化を無視すれば、横すべりおよび旋回運動

* 東京大学

についての運動は次式で書き表わされる。

$$\begin{pmatrix} \dot{\beta}' \\ \dot{\gamma}' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta' \\ \gamma' \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (1.1)$$

ただし

$$\begin{aligned} a_{11} &= \frac{1}{\Delta} \{ (I'_{zz} + J'_{zz}) Y'_{\beta} + Y'_{\tau} N'_{\beta} \} \\ a_{12} &= \frac{1}{\Delta} \{ (I'_{zz} + J'_{zz}) (Y'_{\tau} - m' - m'_x) + Y'_{\tau} N'_{\tau} \} \\ a_{21} &= \frac{1}{\Delta} \{ -(m' + m'_y) N'_{\beta} + N'_{\beta} Y'_{\beta} \} \\ a_{22} &= \frac{1}{\Delta} \{ -(m' + m'_y) N'_{\tau} + N'_{\beta} (Y'_{\tau} - m' - m'_x) \} \\ \Delta &= -(m' + m'_y) (I'_{zz} + J'_{zz}) - Y'_{\tau} N'_{\beta} \end{aligned}$$

この微分方程式は、よく知られたように $e^{\sigma t'}$ の形の解をもち、定数 σ は (1.1) 式の右辺の係数行列に対する固有値を計算することによって得られる。すなわち、 σ は次の方程式の根なのである。

$$\begin{vmatrix} \sigma - a_{11} & -a_{12} \\ -a_{21} & \sigma - a_{22} \end{vmatrix} = \sigma^2 - (a_{11} + a_{22})\sigma + a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} = 0 \quad \dots\dots\dots (1.2)$$

ところで $e^{\sigma t'}$ の解の形から、 σ の実数部が正であると、わずかな擾乱も時間とともに大きく増大していくことが判るであろう。このことは、例えば直進状態という一つの平衡状態にあった船に、わずかな旋回角速度が生じると、その擾乱は収まらずにむしろ時間とともに大きくなり、ついには誰もみ状態にまで達してしまうことを意味するのである。このように、擾乱が収まらずに益々時間とともに大きくなるような平衡状態を不安定な平衡状態と呼ぶのである。逆に固有値 σ の実数部がすべて負であれば、ある瞬間に生じた擾乱も時間の経過とともに消滅する。安定性の面からいえば、このような船を針路安定な船といい、前の場合の船を不安定な船という。

さて針路安定であるための必要十分な条件は、固有値 σ の実数部がすべて負であることであったが、それは Routh-Hurwitz によれば (1.2) 式の代数方程式の係数がすべて正となることと同等である。

$$-(a_{11} + a_{22}) > 0, \quad a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} > 0 \quad \dots\dots\dots (1.3)$$

ところが船の場合には、(1.1) に見られるように、

$$-(a_{11} + a_{22}) = \frac{1}{\Delta} \{ -(I'_{zz} + J'_{zz}) Y'_{\beta} + (m' + m'_y) N'_{\tau} - Y'_{\tau} N'_{\beta} + N'_{\beta} (Y'_{\tau} - m' - m'_x) \} \quad \dots\dots\dots (1.4)$$

であり、式中に含まれる流体力微係数の符号は

$$I'_{zz} + J'_{zz} > 0, \quad m' + m'_y > 0, \quad Y'_{\beta} > 0, \quad N'_{\tau} < 0 \quad \dots\dots\dots (1.5)$$

である。また微係数 Y'_{τ} 、 N'_{β} は他の微係数にくらべて、はるかに小さいので、(1.5) 式を考慮すると (1.4) 式の右辺は常に正となり、(1.3) の第一の条件は常に満たされる。したがって針路安定であるためには、

$$a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} = \frac{Y'_{\beta}(Y'_{\tau} - m' - m'_x)}{\Delta} \left[\frac{N'_{\tau}}{Y'_{\tau} - m' - m'_x} - \frac{N'_{\beta}}{Y'_{\beta}} \right] \quad \dots\dots\dots (1.6)$$

が正であることが必要かつ十分な条件である。さて、 $Y'_{\tau} - m' - m'_x$ は水深が極端に浅い場合等の例外的な場合を除けば (詳しくは III. 5 参照) 負の量であるので、(1.6) の右辺が正なることは [] 内の値が正なることと同等である。ところで [] 内第一項は旋回運動に対する減衰力の着力点の位置を表わし、同様に第二項は横すべり運動に対する減衰力の着力点の位置を表わしていることは、その分数の形から明らかであろう。結局針路安定であるというのは、流体力学的にいえば、旋回運動に対する流体力学的減衰力の着力点が、横すべり運動に対する流体力学的減衰力の着力点より船首側にあることであるといえる。したがって、そうではない場合すなわち横すべり運動に対する減衰力の着力点の方が、旋回運動に対する減衰力の着力点より前方にある場合に、船は針路不安定であるという。

以上のように (1.6) 式の右辺の値が船の針路安定性をきめるので、通常これを (場合によっては [] 円の値を) Stability Criterion と呼んでいる。

さて (1.2) 式の固有値 σ を具体的に書き表わし詳しく検討してみよう。

$$\left. \begin{matrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{matrix} \right\} = \frac{1}{2} \left[a_{11} + a_{22} \pm \sqrt{(a_{11} + a_{22})^2 - 4(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})} \right] \dots\dots\dots (1.7)$$

ただし $\sigma_1 = -1/T'_1$ $\sigma_2 = -1/T'_2$ のごとく操縦性指数 T'_1 , T'_2 と対応する。船が針路不安定な場合には、上述のように $a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}$ は負の量であるから、右辺の根号内の値は必ず正であり、したがって固有値 σ_1 , σ_2 はともに実数値となり、虚数値をとることはない。このため、針路不安定な船では一度生じた攪乱は時間の経過とともに一緒に増大していくのみで (σ が実数ゆえ)、針路安定な場合には攪乱が一緒に減衰する場合 (σ が実数の場合) と周期的に減衰する場合 (σ が虚数の場合) の二通りの減衰の仕方があるのにくらべて、かなり特徴的なことである¹⁾。

このように船の針路安定性を決定するのは、流体力微係数のうち、static derivatives といわれる Y'_β , N'_β , $Y'_r - m' - m'_x$, N'_r であることが判ったわけであるが、ここで代表的な実験例として、江田²⁾ が Series 60 の船型のうち、長さ、幅、喫水は全く同じであるが ($L_{pp}=5$ フィート, $B=0.714$ フィート, $d=0.267$ フィート) C_B 係数のみが 0.60, 0.70, 0.80 と異なる模型を使って、ローティティング・アームにより、これらの微係数を計測した結果を Table 1 に示す。

ただし、船の長手方向の付加質量係数 m'_x は、元良のチャートから、船の主要目寸法比等を用いて求めた³⁾。

Table 1. に示した例では、船型の肥大化とともに旋回抵抗モーメントの係数 N'_r は減少し、旋回抵抗力の係数 $Y'_r - m' - m'_x$ は増大しているため、両者相俟って旋回運動に対する減衰力の着点、船体中央寄りになり大幅に移動させることとなり、針路不安定側に向う傾向を示している。一方、横すべり運動に対する減衰力の着点、 $C_B=0.80$ の場合には船型の肥大化によって、むしろ針路安定側に向う傾向であるが、前者すなわち旋回運動に対する減衰力の不安定化の傾向が

Table 1. Series 60 模型船での static derivatives と流体力学的減衰力の着点の位置

C_B	0.60	0.70	0.80
Y'_β	0.305	0.324	0.354
Y'_r	0.0896	0.0832	0.0852
$m' + m'_x$	0.177	0.209	0.241
$Y'_r - m' - m'_x$	-0.0874	-0.126	-0.156
N'_β	0.0954	0.104	0.0864
N'_r	-0.0701	-0.0662	-0.0601
$N'_r / (Y'_r - m' - m'_x)$	0.802	0.525	0.385
N'_β / Y'_β	0.313	0.321	0.244
$N'_r / (Y'_r - m' - m'_x) - N'_\beta / Y'_\beta$	0.489	0.204	0.141

はるかに著しいため、結果的には Stability Criterion $N'_r / (Y'_r - m' - m'_x) - N'_\beta / Y'_\beta$ にみられるように C_B 係数の増大とともに一緒に針路不安定側に向うことになっている。

ここで特に注意すべきは、旋回運動に対する減衰力の着点の位置を大きく変えているのは、 N'_r の減少もさることながら、むしろ $Y'_r - m' - m'_x$ の値の増大の方が大きく効いていることで、流体力を表わす Y'_r (一般には B/d の増加は Y'_r の減少を生来するが、たまたまこの実験例では B/d は C_B 係数の変化によらず一定である) そのものは余り変化していないことを考えると、結局船型の肥大化にともなう遠心力の項 $m' + m'_x$ の増大が、針路不安定化に大きく影響しているといえよう。

なお、この例では肥大化とともに針路安定性は悪くなっているとはいえ、針路不安定になるまでには至っていない。しかし、これはあくまで模型試験の結果であり、これと全く同一の船型を有する実際の船もそうであるかは、実際の船について試験をしてみなければ、なんともいえないのである。

ここで巨大船型の船に限定せず、一般に水面下の船体形状の変化によって針路安定性がどのように変わるかを調べてみよう。

いま針路不安定な船があるとしよう。(不安定な場合には、攪乱は時間とともに一緒に増大してゆくので、これを非周期的不安定と呼び、安定な場合で攪乱が周期的に減衰する場合を周期的安定というような呼び方を以後する) この船を安定化するには二通りの方法がある。

一つは旋回運動に対する抵抗モーメントの微係数 N'_r を増すことで、このとき stability criterion の第一項が大きくなるので確かに針路安定化される方向に向う。この場合には (1.7) 式の根号の中は正の場合が一般的で、 σ は負の実数となって、いわゆる非周期的安定となる。これは、船首尾に dead wood を増すか、あるいは船首

尾の船底を尖らせたり、 C_p を小さくすることに相当する。

一方 N'_r はそのままにして横すべり運動に対する減衰力の着力点の位置 N'_β/Y'_β を後に下げることによっても、針路安定化できることは (1.6) 式から明らかである。すなわち船尾のみに dead wood をつけること等によって着力点を船尾側に移動させることができるが、このような場合には相対的に N'_β の減少、 Y'_β の増大をきたし (1.7) 式の根号の中が負になる場合も出ずる。このときは固有値 σ は負の実数部をもつ虚数となり、攪乱は周期的に減衰していくので、周期的安定ということは先に述べたとおりである。

上述の関係を模式的に図形に表わしたのが Fig. 1 で、図の横軸には水面下縦投影面積を Ld で除した値を目盛り、縦軸は水面下縦投影面積の中心 O と船体中央 \boxtimes の間の距離を L で除した値で、O が \boxtimes より前方にある場合を正としている。

1.2. 針路不安定な船の現象

針路不安定な船について、いわゆる操縦性試験を実施した場合に現われる現象を、安定な船で見られる現象と対比させながら述べ、針路不安定な船の特質を明らかにしてみよう。

1.2.1. スパイラル試験における現象

一定舵角をとって旋回運動に入るとき最終的に到達する定常旋回角速度を計測して、舵角と定常角速度の関係を調べる試験をスパイラル試験と呼ぶことは、すでに I 章で述べたが、そのようなスパイラル試験の結果を、舵角 δ' を横軸にとり定常角速度 r' を縦軸に目盛って図示すると、Fig. 2 に示したような三種類のタイプがある。右側の場合が針路安定な船の場合で、ある一つの舵角に対して定常旋回角速度はただ一個だけしか存在しない。それに対し左側の図は針路不安定な船の典型的なスパイラル試験結果で、0 付近の舵角に対しては定常旋回角速度は一義的には決まらない点が、安定な場合と比較して著しく相異なる点である。中央の図は、安定と不安定の丁度中間的な性質をもった船のスパイラル試験の様子で、舵角で 0 の接線が垂直に近いが、舵角と定常角速度は一対一に対応している。このような船は通常限界安定または臨界安定 (marginally stable) といわれている。

特に針路不安定な船では、Fig. 3 に示すように大舵角 (図中 A 点に相当する旋角) から、だんだん舵角を減じてゆくと角速度も減少はするが、あまり急激には減少せず、舵角 0 (図中 c 点) でも角速度を有する。すなわち舵角 0 でも定常旋回をするわけである。そして舵角を少々反対側 (図中 D の側) に取っても依然として、同じ方向の旋回が続き、この間は舵角と旋回方向は逆になる。しかし C よりもさらに大きく反対側にとると、はじめて最初の A の状態と逆の方向の旋回をはじめることになる。逆に図中 F 点から E 点の方向に舵角を徐々に

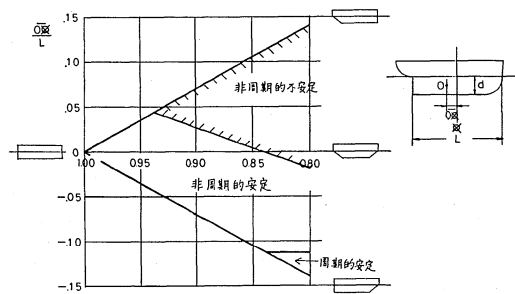


Fig. 1 水面下の形状と針路安定性

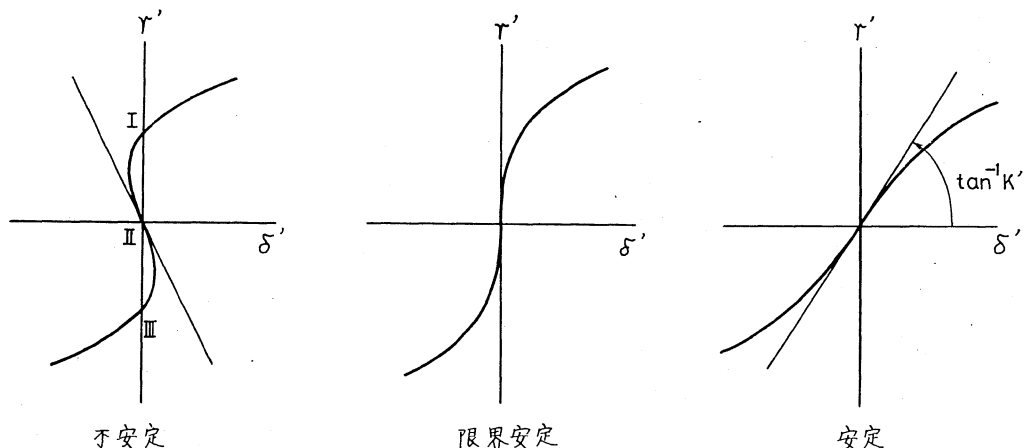


Fig. 2 スパイラル試験における 3 種の典型的なタイプ

増していった場合の定常旋回角速度についても同様のことが起こる。このように一方向の定常旋回から反対方向の定常旋回に移るためには、ループ幅± δ_1 以上の舵角を与える必要がある。次にこのような現象を生ずる理由を理論的に考察してみよう。

いま操縦運動を記述する、横流れ角 β と旋回角速度 r についての連立微分方程式を一つにまとめると、次式になることは、すでにI章(2.7)式に述べられている⁴⁾。

$$T'_1 T'_2 \ddot{r}' + (T'_1 + T'_2) \dot{r}' + r' = K' \delta' + K' T'_3 \dot{\delta}' \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

ここで T_1, T_2, T_3, K は操縦性指数と呼ばれるものであったが、ここでは後の便宜のため K についての表式をしておこう。

$$K' = \frac{Y'_\delta N'_\beta - N'_\delta Y'_\beta}{N'_r Y_\beta - (Y'_r - m' - m'_x) N'_\beta} \quad (2.2)$$

ところで旋回運動が定常状態に達したときの $r' \sim \delta'$

特性は線型方程式(2.1)を使うかぎり、指数 K' のみで一義的に決ってしまうことは、(2.1)式で時間について微分した項を消去すれば明らかであろう。すなわちFig. 2で曲線に引いた細い実線がそれで、この直線の勾配は $\tan^{-1} K'$ になっている。 δ' が増大するにつれて定常旋回角速度が、この直線からずれてくるのは運動の非線型特性のためである。そこで、取り敢えずここでは原点付近の傾斜角 $\tan^{-1} K'$ だけを検討してみよう。 K' の値は(2.2)式にみるように流体力微係数のみからきまるが、そのうち特に分母は、先の(1.6)式と比較すると直ちに明らかなように、stability criterionの一部であることが判る。一方分子は、その中に含まれる微係数の符号から常に負であるので、結局 K' の符号は分母の符号によって決まり、たとえば針路安定の船では分母は負となるので K' は正、逆に不安定な船では分母が正ゆえ、 K' は負となる。よって、針路安定な場合には右上りの直線となり、不安定な場合には右下りの直線となることが了解され、Fig. 2に示したような図と針路安定性が対応することが判るであろう。また、限界安定の場合についても、このときはstability criterionが0であるために K' が無大になることから、同様の図の対応は明らかである。

さて、針路不安定な船のスパイラル試験結果はFig. 2に示したようにS字形になるわけであるが、これについてもう少し検討してみよう。

舵角が0の場合に、ありうる平衡状態としてはFig. 2中にI, II, IIIと示したように3個の平衡状態が存在しうわけであるが、すでに述べたごとく原点のIIという平衡点(舵角0で直進することに相当する)は不安定な平衡点(そのゆえにこそ針路不安定なのである)であるため、極く微少な攪乱も消滅することなく大きくなり、この平衡点上に運動が停止することはできない。一方、後に示されるように平衡点I, IIIは、実は安定な平衡点であるので、平衡点IIからはずれていった運動は必ず、IあるいはIIIの平衡点に達し、その平衡点に相当する定常旋回角速度で旋回しつづける。しかも、この平衡点は安定平衡点であるから、平衡状態からわずかな攪乱によって乱されたとしても、その攪乱はやがて消滅し、結局IまたIII平衡点に相当する定常角速度を維持しつづけることになる。

そこで平衡点I, IIIの安定性を考えてみる。いま図のようなS字形の特性を表現するのに、いわゆる r^3 の非線型項を(2.1)の左辺に導入してみよう^{5), 6)}。

$$T'_1 T'_2 \ddot{r}' + (T'_1 + T'_2) \dot{r}' + r' + \alpha r'^3 = K' \delta' + K' T'_3 \dot{\delta}' \quad (\alpha < 0) \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

いま $\delta' = 0$ の場合を考察しているのであるから、右辺は0と置いてよい。このときの非線型方程式(2.3)は、次の連立方程式系と同等であることは、式の変形より容易に理解されよう。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dr'}{dt} &= p \equiv R(r', p') \\ \frac{dp'}{dt'} &= -\frac{T'_1 + T'_2}{T'_1 T'_2} p' - \frac{1}{T'_1 T'_2} r' - \frac{\alpha}{T'_1 T'_2} r'^3 \equiv P(r', p') \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

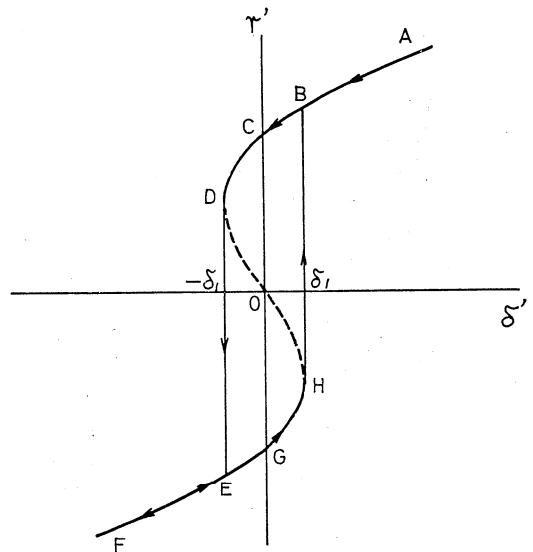


Fig. 3 針路不安定な船のスパイラル試験におけるヒステリシス・ループ

なお以後、無次元量を表わすダッシュ記号 (') は落して書こう。さて平衡点は (2.4) 式の右辺をそれぞれ 0 とした

$$\left. \begin{aligned} R(r, p) &= 0 \\ P(r, p) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

なる方程式を解けば得られ、いまの場合は容易に解けて、平衡点を (r, p) のごとくに表わせば、 $(1/\sqrt{-\alpha}, 0)$, $(0, 0)$, $(-1/\sqrt{-\alpha}, 0)$ の 3 点で、これらが、それぞれ図の I, II, III の平衡点に対応している。I と III は符号のみ異なる平衡点であるので、もとの方程式の原点に対する対称性を考慮すれば、いずれか片方のみを検討しておけば十分であるので、ここでは平衡点 I の安定性のみを考察する。I の点における次の偏微分係数を計算すると

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{\partial R}{\partial r}\right)_I &= 0 & \left(\frac{\partial R}{\partial p}\right)_I &= 1 \\ \left(\frac{\partial P}{\partial r}\right)_I &= \frac{2}{T_1 T_2} & \left(\frac{\partial P}{\partial p}\right)_I &= -\frac{T_1 + T_2}{T_1 T_2} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

であるから

$$\left(\frac{\partial R}{\partial r}\right)_I \left(\frac{\partial P}{\partial p}\right)_I - \left(\frac{\partial R}{\partial p}\right)_I \left(\frac{\partial P}{\partial r}\right)_I = -\frac{2}{T_1 T_2} \neq 0 \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

となるので、I なる平衡点は単純特異点と呼ばれるものである⁷⁾。このような平衡点の安定性は、次の線型方程式系で議論できることが知られている。(実はこれだけでは不十分で、別の条件をも満たさねば、そのように結論することは出来ないが、今の場合にはその条件も満足していることが確かめられる)

$$\left. \begin{aligned} \frac{dr}{dt} &= \left(\frac{\partial R}{\partial r}\right)_I r + \left(\frac{\partial R}{\partial p}\right)_I p \\ \frac{dp}{dt} &= \left(\frac{\partial P}{\partial r}\right)_I r + \left(\frac{\partial P}{\partial p}\right)_I p = \frac{2}{T_1 T_2} r - \frac{T_1 + T_2}{T_1 T_2} p \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

このときの固有値 σ は、次式を解くことによって得られることは、先の場合と同様の考察より明らかであろう。

$$\sigma^2 + \frac{T_1 + T_2}{T_1 T_2} \sigma - \frac{2}{T_1 T_2} = 0 \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

一方、操縦性指数 T_1, T_2 については

$$\left. \begin{aligned} T'_1 T'_2 &= \frac{-(m' + m'_y)(I'_{zz} + J'_{zz}) - Y'_r N'_\beta}{N'_r Y'_\beta - (Y'_r - m' - m'_x) N'_\beta} \\ T'_1 + T'_2 &= \frac{(m' + m'_y) N'_r - (I'_{zz} + J'_{zz}) Y'_\beta - Y'_r N'_\beta - (Y'_r - m' - m'_x) N'_\beta}{N'_r Y'_\beta - (Y'_r - m' - m'_x) N'_\beta} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

であるので、針路不安定な船では (2.9) 式の右辺はともに負である。したがって、(2.8) 式の σ の各次数の項の係数はすべて正であるので、Routh-Hurwitz の判定条件より、(2.8) 式を満す σ はいずれも負の実数部をもつことがわかる。以上より平衡点 I が、安定な平衡点であることが証明された。全く同様に平衡点 III も安定な平衡点である。

さて、Fig. 3 で $\delta_1 \sim -\delta_1$ の間の舵角に対しても、以上と同様に、1 個の δ に対し 3 個の平衡点があるが、上と同じようにその平衡点の安定性を調べると、その点での $dr'/d\delta'$ が負の微係数をもつ平衡点是不安定であり、他の 2 個は安定な平衡点であることが証明できる。したがって、針路不安定な船のスパイラル試験結果を $r' \sim \delta'$ 平面にプロットすると、先の Fig. 3 のようになり、原点を通る点線の部分は実現できないことになる。

そこで図中 A に相当する舵角の定常旋回の状態から順次舵角を $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$ というふうに小さくしてゆくと、定常旋回角速度はこの S 字型曲線上を、どのような経路をたどっていくかという、 $A \rightarrow B$ までは定常状態は 1 個 (安定) のみであるので特に問題はないが、 $B \rightarrow D$ の間に相当する舵角には、実は $H \rightarrow E$ の曲線に相当するもう一つの安定な定常状態が存在するわけであるが、それ以前の運動がどういう状態の運動であったかによって——すなわち右旋回であったか左旋回であったかによって—— $B \rightarrow D$ 上の定常状態に入るか、 $H \rightarrow E$ 上の定常状態に入るかが決まる。今の場合は A から (右旋回) 順次舵角を小さくしていったのであるから、舵角が δ_1 以下になっても $A \rightarrow B \rightarrow C$ のように右旋回を続けてゆく。しかし、 δ が $-\delta_1$ よりもさらに小さくなると、定常旋回

角速度 r の点は D より急に E に飛び、E→F 間のしかるべき状態に落ちつく。同様に舵角を負の側から順次大きくしてゆくと、定常旋回角速度 r は F→E→G→H→B→A の順に変化する。

このように原点付近に B→C→D→E→G→H というループができるが、これをヒステリシスループと呼び、ループ幅の $\pm \delta_1$ 、ループ高さ \overline{CG} は不安定度の大きい船ほど大きく、船の不安定度の度合いを示す 1 つの物差しとなりうる。このようなループの存在のために、定常旋回運動に入っている船を反転させようとするには、上述のヒステリシス・ループの特性により、ループ内の反転舵角では反転せず、ループ幅 $\pm \delta_1$ より大きい反転舵角を使用しないと反転しないことは前述したとおりである。

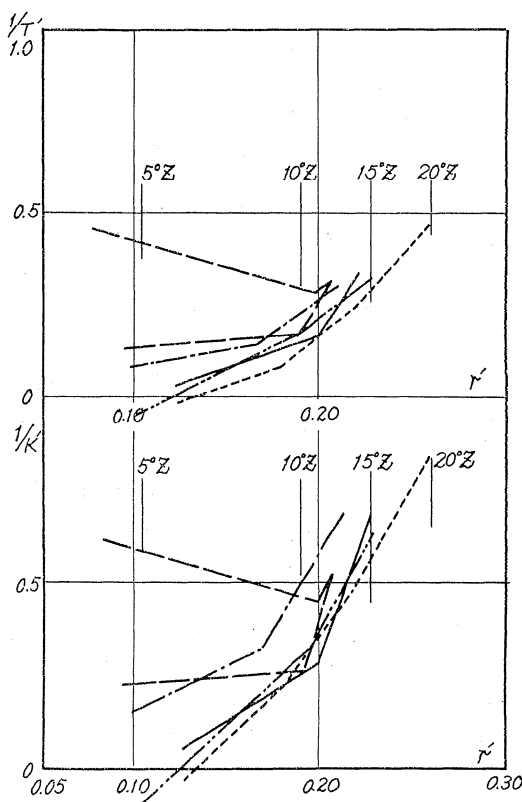
しかしながら実際の操船時には、旋回角速度は Fig.

3 に示したような大きな定常旋回角速度までに発達しないうちに操舵するので、ループ幅 $\pm \delta_1$ より大きな反転舵角まで取らなくとも反転させることができる。(このことは 1.3. に述べる) したがって、船が直進から外れはじめてからの経過時間が短いうちに、偏倚を感じればするほど反転舵角が小さくてすむことになる。

1.2.2. 通常 z 試験および変形 z 試験における現象

非線型性の少ない針路不安定な船では、通常の z 試験を行なうと小さい舵角の切り返しては船の方位は切り変わらず、運動がそのまま発散して試験が続行不能になることが多い。実際には非線型性がかなり大きいために、 $5^\circ \sim 5^\circ$ あるいは $10^\circ \sim 10^\circ$ z 試験が行なえない船でも、 $20^\circ \sim 20^\circ$ z のような大きな舵角を用いる z 試験は実行できるようなのである。このように針路不安定な船の z 試験の一次系解析⁹⁾を行なうと、操縦性指数 T 、 K は舵角が小さくなるにしたがって大きくなり、ある舵角以下では ∞ になりそれ以下の舵角では負となる傾向が見受けられる。巨大船型の船について各種 z 試験を行ない T 、 K 解析した一例を Fig. 4 に示したが、これによっても上述の意味での限界舵角の存在が了解されるであろう⁹⁾。ただし、この意味での限界舵角は、前述のスパイラル試験におけるヒステリシス・ループの幅 $\pm \delta_1$ とは必ずしも等しくないが、密接な関係があり針路不安定の程度が大きい船ほど、この限界舵角も大きくなる。なお、図中長い点線で表わした $L/B=6.0$ の船では、舵角が小さくなるにつれて、その z 試験結果はむしろ船が針路安定側に向う傾向を示していて、上述の説明とは矛盾しているが、これらについては 2. で説明される。

さて試験をもう少し別の面から考察してみよう。 z 試験において用いる舵角を δ^* 、舵を切り返すときの方位角を ϕ^* とすれば、 z 試験は Fig. 5 のようなブロック線図で表現することができる。ここで $\phi_i(t)$ は設定方位角、 $\phi_0(t)$ は操舵の結果生ずる方位角であり、その差 $e(t) = \phi_i(t) - \phi_0(t)$ を入力とし $\delta(t)$ を出力とするヒステリシス・ループが操舵を表わしている¹⁰⁾。さて直進の状態から操舵を続けていったときに、船の変針運動が定常的な振動状態に入るかあるい



記号	7.0	6.62	6.19	6.12	6.00
L/B	7.0	6.62	6.19	6.12	6.00
$CB/(L/B)$	116	121	130	132	138
B/d	2.67	2.62	2.72	2.64	2.64
Ar/Ld	1/77	1/70.9	1/64.3	1/65.3	1/58
備考	SR 61		SR 98		

Fig. 4 通常 z 試験による操縦性指数 T 、 K

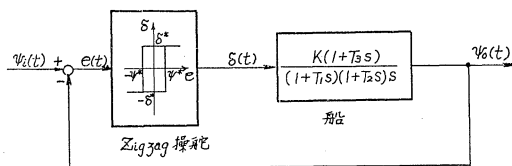


Fig. 5 z 試験のブロック線図

は発散して試験続行が不可能になるかは、船の応答特性 $G(j\omega)$ と操舵の応答特性を調べることによって判定される。ところで z 操舵の応答特性——すなわちヒステリシス・ループの応答特性——は記述関数 Keq によって次のように表わされる¹¹⁾。

$$\left. \begin{aligned} Keq &= \frac{4\delta^*}{\pi\phi} \cos \phi_1 - j \frac{4\delta^*}{\pi\phi} \sin \phi_1 \\ \phi_1 &= \sin^{-1} \frac{\phi^*}{\phi} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.10)$$

この Keq の意味は、正弦波状の入力 $\bar{\phi} \sin \omega t$ がそのような応答特性をもっている系に入った場合、出力として得られる波形は、その大きさが入力力の $|Keq|$ 倍になり位相角が $\arg Keq$ だけ進んだ正弦波形と同等となることを意味している。このような Keq を導入すると、次の (2.11) 式の条件が満足されるときに、運動が定常振動状態に入るであろうことは、Fig. 5. のブロック線図で $\phi_i(t)$ を 0 とし、 z 操舵に対する入出力関係と船の伝達関数 $G(j\omega)$ への入出力特性を考慮すれば直ちに了解されよう。

$$\begin{aligned} G(j\omega) \cdot Keq &= -1 \\ \text{ただし } G(j\omega) &= \frac{K(1+T_3j\omega)}{j\omega(1+T_1j\omega)(1+T_2j\omega)} \end{aligned} \dots\dots\dots (2.11)$$

この (2.11) 式を書き直せば

$$\left. \begin{aligned} Re\{G(j\omega)\} &= Re\left(-\frac{1}{Keq}\right) \\ Im\{G(j\omega)\} &= Im\left(-\frac{1}{Keq}\right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.12)$$

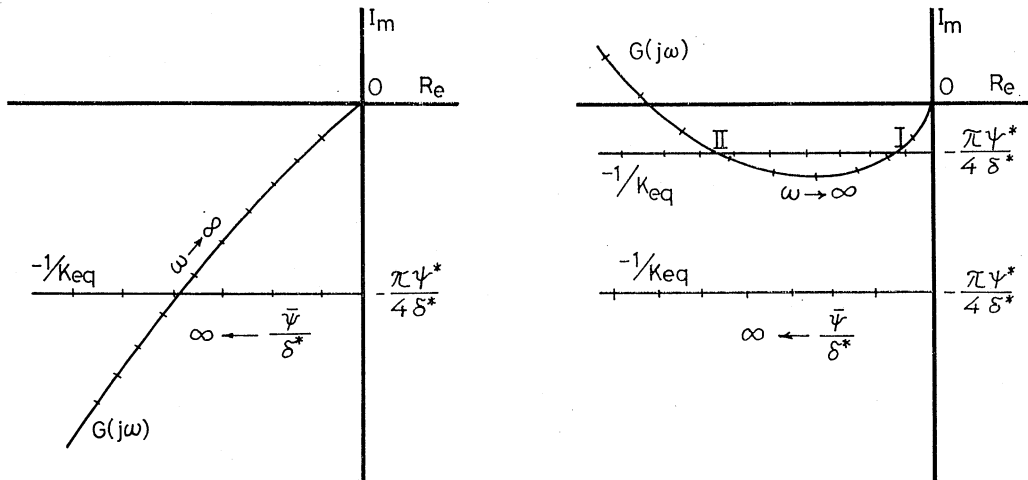
となる。一方、(2.12) 式の右辺については (2.10) より

$$\left. \begin{aligned} Re\left(-\frac{1}{Keq}\right) &= -\frac{\pi\bar{\phi}}{4\delta^*} \cos \phi_1 \\ Im\left(-\frac{1}{Keq}\right) &= -\frac{\pi\phi^*}{4\delta^*} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.13)$$

であるので、 $G(j\omega)$ 、 $-1/Keq$ をナイキスト線図上に描けば、 $-1/Keq$ は切り返し方位角 ϕ^* と舵角 δ^* の組合わせ (ϕ^* , δ^*) によってきまる実軸に平行な直線で、常に第三象限にある。

一方、船の伝達関数 $G(j\omega)$ は針路安定な船と不安定な船とでは、様子は全く異なる。

(i) 針路安定な場合 Fig. 6 (a) は針路安定な場合を示しているが、 $G(j\omega)$ は ω が無限に小さいときには原点から遠く離れた無限遠にあるが、 ω が大きくなるにしたがい原点に近づく曲線で常に第三象限にある。した



(a) 針路安定な場合

(b) 針路不安定な場合

Fig. 6 z 試験におけるリミットサイクルの存在

がって図にも示したように、どのような (ϕ^*, δ^*) の組合わせによる z 試験を行なっても、 $G(j\omega)$ は $-1/Keq$ を表わす半直線と交点を持ち、必ず定常振動状態（リミットサイクル）に入っゆく。なお、 $G(j\omega)$ 曲線上の各点には運動の周波数 ω がパラメーターとして対応し、 $-1/Keq$ 直線上の各点には (2.13) 式にみられるように $\bar{\phi}/\delta^*$ がパラメーターとして対応しているの、最終的に到達する定常振動状態の方位角振幅 $\bar{\phi}$ とそのときの周波数は、交点での両曲線上のパラメーターから一義的に決定される。したがって、 $20^\circ \sim 20^\circ z$ 試験、 $10^\circ \sim 10^\circ z$ 試験、 $5^\circ \sim 5^\circ z$ 試験等の通常 z 試験のように、 ϕ^* と δ^* の比が1で同じであるならば、 $-1/Keq$ を表わす半直線は全く同じであるので、リミットサイクルの ω はいずれの場合も同じであるが、振幅 $\bar{\phi}$ は δ^* (または ϕ^*) に比例することになる。

(ii) 針路不安定な場合 $G(j\omega)$ は Fig. 6(b) に示したように、 ω がある程度小さくなるとナイキスト線図上で第三象限から第二象限に移ってしまう。したがって、 (ϕ^*, δ^*) の組合わせによっては $G(j\omega)$ 曲線と $-1/Keq$ 直線とは交点を持たず、結局操縦をつづけていっても方位角は発散してしまう。 ϕ^*/δ^* の比が1でない z 試験を、 $\phi^*/\delta^*=1$ である通常 z 試験と区別して、変形 z 試験と呼んでいるが¹²⁾、舵角 δ^* にくらべて切り返し方位角 ϕ^* が相対的に大きい変形 z 試験の $-1/Keq$ 直線は、(2.13) にみるとおり、実軸から遠くに離れた直線となるため、 $G(j\omega)$ 曲線と交点を持ちえないことになる。一方、逆に舵角 δ^* に比し切り返し方位角 ϕ^* を小さくとした変形 z 試験を表わす $-1/Keq$ 直線は、実軸に近づくので図のように $G(j\omega)$ 曲線と交点を持つことができる。ただし、この場合には一般に2個のリミットサイクルが存在するわけであるが、図中IIに相当するリミットサイクルは不安定なリミットサイクルで物理的には実現できない定常振動状態である。

このようなわけで、通常 z 試験 (たとえば $5^\circ \sim 5^\circ$ 、 $10^\circ \sim 10^\circ z$ 試験) では運動が発散してしまうものでも、切り返し方位角 ϕ^* の小さい (1° 、 5°) あるいは (1° 、 10°) 変形試験は実行可能となる。

以上より針路不安定な船でも切り返し方位角 ϕ^* を舵角 δ^* よりも小さくすれば運動は発散せず、 z 試験を行なうことができるわけであるが、不安定度の強い船ほど ϕ^*/δ^* の小さい z 操縦を行なわないと運動は発散してしまう。

ところで、このような変形 z 試験 (ϕ^*/δ^* が1より小さい) の結果を1次系解析して、操縦性指数 T, K を求めてみると、針路不安定な船でも正の指数を得ることができ、その結果、十分操船可能であることが示される。

しかも ϕ^*/δ^* が1より小さい変形 z 試験から求めた T, K の値は、通常 z 試験から求めた T, K よりも小

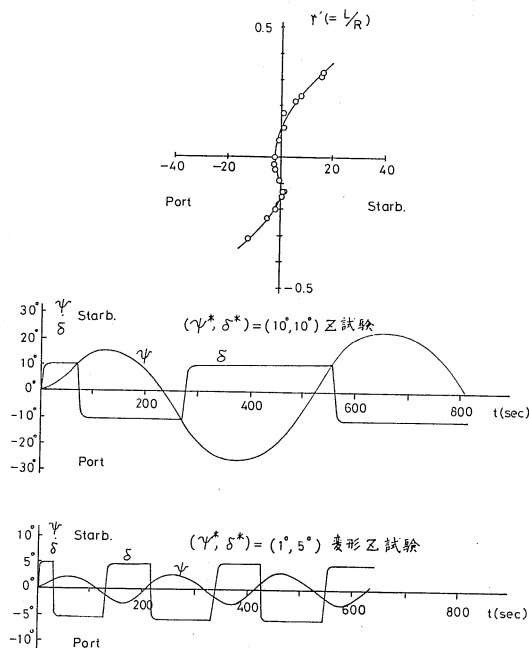


Fig. 7(a) 針路不安定な船 (A 船) の操縦性試験の一例

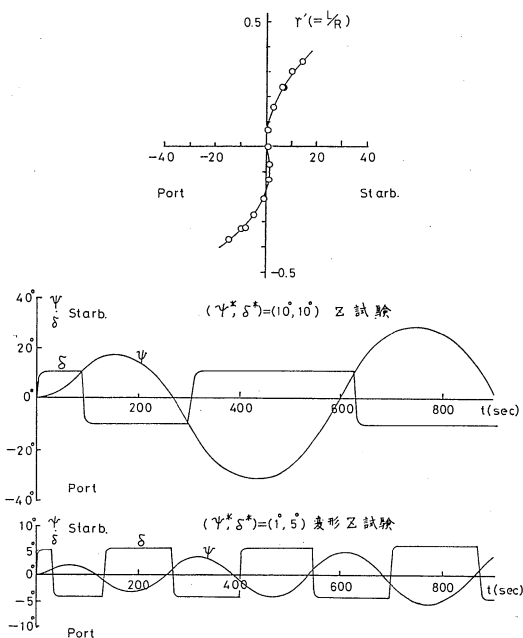


Fig. 7(b) 針路不安定な船 (B 船) の操縦性試験の一例

さく針路安定側の値が得られる。このことは針路不安定な船でも針路からの外れが大きくないうちに操舵してやれば、あたかも針路安定な船と同じように操舵することができることを示している。また、 ϕ^*/δ^* の値が小さい変形 z 試験ほど——すなわち直進からの外れが小さいうちに操縦してやるほど——針路安定側の T, K の値を与える。

Fig. 7(a), (b) に逆スパイラル試験の結果では、針路不安定であることを物語るヒステリシス・ループが計測された船について、 $10^\circ \sim 10^\circ$ の通常 z 試験と (ϕ^*, δ^*) で $(1^\circ, 5^\circ)$ の変形 z 試験を行なった方位角の記録を示しているが¹⁰⁾、これを一次系解析してみた結果 (Table 2)、 $(1^\circ, 5^\circ)$ の変形 z 試験よりの操縦性指数 T, K の値の方が、 $(10^\circ, 10^\circ)$ 通常試験からのそれよりも小さく出て、針路安定側な応答を示したことがうかがえるであろう。

1.2.3. 正弦操舵に対する反応

針路不安定な船では、ある限度以下の小舵角で通常 z 試験を行なうと発散し、また変形 z 試験でも切返し方位角と舵角の比 ϕ^*/δ^* がある限度を越えると発散することは前に述べたとおりである。

ところが、1.1. で述べたように針路不安定な船は必ず非周期的であるから、この z 試験における発散は、いわゆる同調現象による振動の発散ではなく、舵の切返し時間が次々に延長してゆき、したがって方位角の振幅が増加してゆく現象である。たとえば Fig. 8 は、 $\phi^*/\delta^*=1$ はなる変形 z 操舵がリミットサイクルを持たないことが判っている針路不安定な船について、 $5^\circ \sim 5^\circ z$ 試験をアナログ計算機上でシミュレートした結果である。

では、針路不安定な船に正弦操舵 (舵を一定の周期で正弦波状にとることをこう呼ぶことにする) を行なったら、どのような反応を示すであろうか。

ところで、舵を振幅 $\bar{\delta}$ 周波数 ω で $\bar{\delta} \sin \omega t$ のごとくに正弦操舵したときに生ずる方位角 ϕ の変化は、次のように書き表わすことができる。

$$\left. \begin{aligned} \phi(t) &= Ae^{-t/T_1} + Be^{-t/T_2} + C + \bar{\phi} \sin(\omega t + \varphi) \\ \bar{\phi} &= \frac{K\bar{\delta}}{\omega} \sqrt{\frac{1+T_3^2\omega^2}{(1+T_1^2\omega^2)(1+T_2^2\omega^2)}} \equiv |G(j\omega)| \cdot \bar{\delta} \\ \varphi &= \tan^{-1} \frac{1+(T_1T_3+T_2T_3-T_1T_2)\omega^2}{\omega(T_1+T_2-T_3+T_1T_3T_3\omega^2)} \equiv \arg G(j\omega) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.14)$$

ただし、 A, B, C は初期条件により決まる定数である。針路安定な船では操縦性指数 T_1, T_2 はいずれも正であるから、操舵をはじめから十分時間がたてば、 $\phi(t)$ の右辺第一項、第二項は他の項にくらべて無視できるほどに小さくなり、したがって船の方位はある方位角 C を平均的方位角として正弦的に変化し、そのときの振幅 $\bar{\phi}$ は舵角の振幅 $\bar{\delta}$ に比例し、位相は φ だけ進むことになる。

一方、針路不安定な船でも正弦的な操舵に対しては正弦的に反応し、そのときの振幅比 $\bar{\phi}/\bar{\delta}$ および方位角変動のうち正弦状に変動する部分の舵角変動に対する位相進みはそれぞれ $|G(j\omega)|$ と $\arg G(j\omega)$ で、針路安定な場合と同様に表わされるが、不安定な場合には T_1 (または T_2) が負のために (2.14) 式の第一項 (または第二項) は時間の経過とともに指数的に大きくなる。したがって、針路安定な場合には、ある方位角を中心に正弦状に変化したのにくらべ、不安定な場合には時間とともに方位角は一様に増大し、その上で周期的に変動することとなる。実際には、ある程度以上旋回運動が発達すると非線型影響により定常旋回に入り、その定常旋回の上に $\bar{\phi} \sin(\omega t + \varphi)$ で表わされるヨー運動が重なった運動となるのである。このように針路不安定な船における正弦

Table 2 実船計測された船の主要目と計測結果

		A 船	B 船
垂線間長 L_{pp}		307.0 m	313.0 m
幅 (型) B		48.2 m	48.2 m
喫水 d		19.39 m	19.40 m
排水量		250,750 ton	250,251 ton
舵面積 $/L_{pp}d$		1/69.0	1/66.7
(10, 10°) 通常 z 試験	T'_{68}	4.56	11.0
	K'_{68}	2.38	5.23
(1°, 5°) 変形 z 試験	T'_{68}	1.13	3.62
	K'_{68}	0.927	2.17

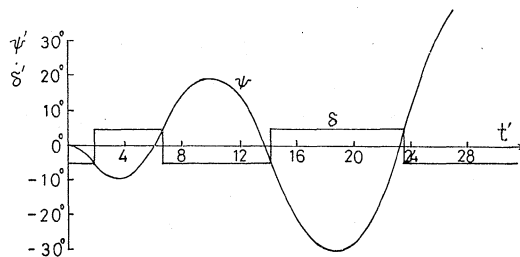


Fig. 8 針路不安定な船における $5^\circ \sim 5^\circ z$ 試験

操舵では、方位角の振幅そのものが発散するのではないことを十分注意しておく必要がある。

とくに不安定な船において、ヒステリシス・ループの幅 $\pm \delta_1$ を越えない舵角振幅 $\bar{\delta}$ で正弦操舵しても船はやはり舵角変動に応じて操舵の方向に反応するのであり、ループ幅以上の舵角をとらなければ反応しないのではない。Fig. 9(a), (b) に正弦操舵を行なった場合の方位角の変化の様子を、針路安定な船と不安定な船について描いて上述の関係を明らかにした。

1.3. 針路不安定な船の操舵に関する考察

1.3.1. 非定常スパイラル試験におけるループ幅

1.2.1. スパイラル試験の項でも述べたごとく、針路不安定性を表わすヒステリシス・ループは、旋回運動が十分発達した状態での定常旋回角速度のループであって、定常状態に到達する以前の旋回角速度——たとえば転舵後一定時間までに発達した速度——を舵角を変えて、 $r' \sim \delta'$ 平面上にプロットしてみると時間が短かければ短いほど不安定ループは小さくなるか、あるいは消滅してしまう。したがって、反転舵角も小さくてすむことは前述のとおりである。このことは全く相似な大船と小船があって等しい不安定ループを持っていた場合、絶対時間でいうと小船ほど定常旋回角速度に達するまでの時間が短いのであるから、進路から外れはじめたのと同じ時間放置しておく、小船の方が大船より大きなヒステリシスループをもつことを示している。したがって、反転に要する舵角も大きくなり大船より針路不安定度を強く感ずることになるが、定常スパイラル試験の結果は全く同一であることを考えると、一概にヒステリシス・ループの幅なり高さなりから操縦性を判断することは適当ではない。

Fig. 10 に針路不安定な船をアナログ計算機上で、いわゆる r^3 の非線型項を導入した (2.3) 式の運動方程式によりシミュレートしたときの定常スパイラル試験結果 ($t' = \infty$ の曲線がこれに対応する) と同時に、定常旋回に達する以前の旋回角速度を転舵後の時間をパラメーターにとって示した。これによれば $t' = 1$ (転舵した瞬間から1船長の距離進むに要する時間を意味する) では、舵角が 20° 位までは正の傾斜を有する直

線に近く、安定度の良い船の定常スパイラル試験結果に似ており、 $t' = 3, 5$ でもせいぜい限界安定 (Marginally stable) な船が示す定常スパイラル試験の結果に酷似している。このことから、直進状態からの船の偏倚をできるだけ早く検出して、角速度があまり発達しないうちに転舵してやれば、あたかも針路安定な船のように挙まうであろうことが推測される。さて次に Fig. 10 における無次元時間一定の非定常スパイラル試験結果を、絶対時間 (有次元時間) 一定の曲線に直して、大船と小船に対するヒステリシス・ループの相違を検討してみよう。無次元化された時間 t' は1章 (2.6) 式にあるように $t' = tU/L$ であるので、大船に関する量を添字 l 、小船に関する量を添字 s で表わすことにすると、無次元時間が等しいということは、絶対時間 (あるいは有次元時間) でい

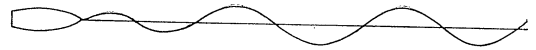


Fig. 9(a) 針路安定な船の正弦操舵

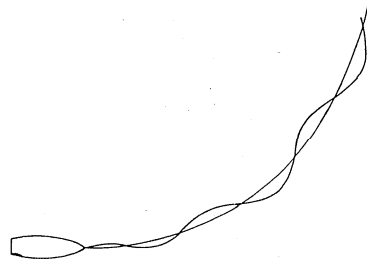


Fig. 9(b) 針路不安定な船の正弦操舵

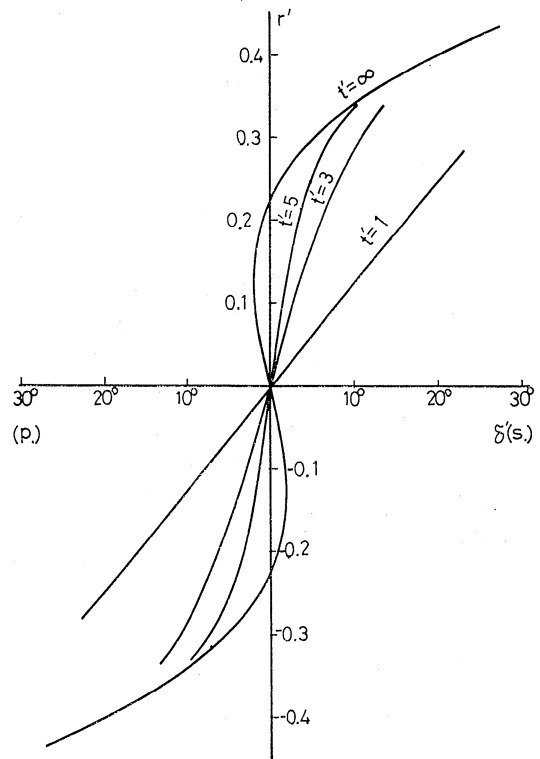


Fig. 10 非定常スパイラル試験

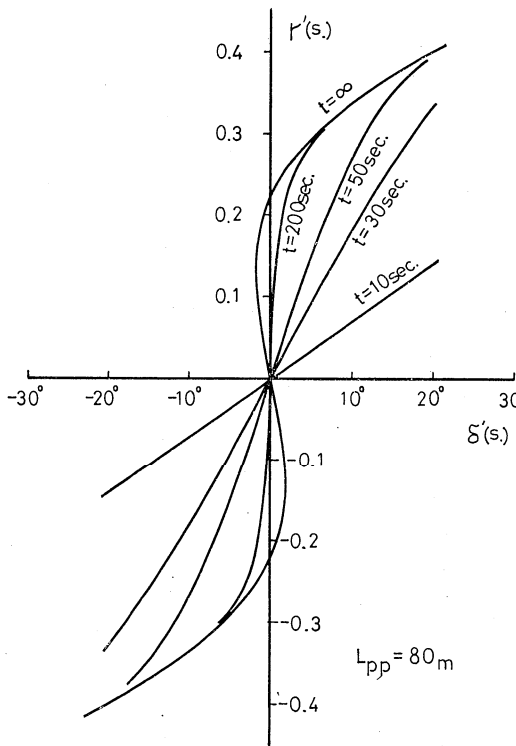


Fig. 11(a) 非定常スパイラル試験 ($L_{pp}=80$ m)

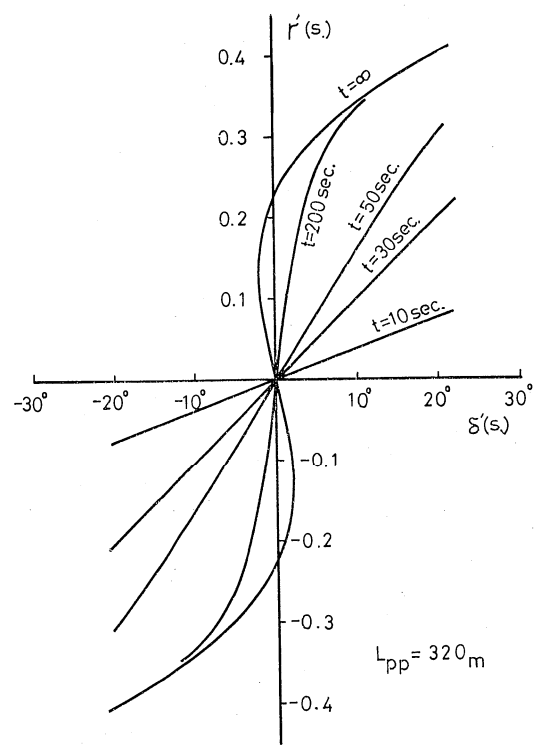


Fig. 11(b) 非定常スパイラル試験 ($L_{pp}=320$ m)

うと、小船に対する絶対時間 t_s は大船に対するそれ t_l の $\sqrt{L_s/L_l}$ (<1) 倍であり、逆に絶対時間が等しいということは無次元時間では、小船に対する t'_s は大船に対する t'_l の $\sqrt{L_l/L_s}$ (>1) 倍になっている。たとえば、 L_s を 80 m、 L_l を 320 m と仮定すると、 $t_s=t_l/2$ または $t'_s=2t'_l$ ということになり、小船における 30 秒は大船における 60 秒に相当することになる。そこで具体的に、転舵後 10 秒、30 秒、50 秒、200 秒後の旋回角速度をプロットしてみると Fig. 11(a), (b) に示すようになり、大船では小船ほど旋回角速度が発達していないことが明らかであり、同程度のヒステリシス・ループを持った場合には、小船ほど不利であることは前述のとおりである。

1.3.2. 自動操縦による操縦性の向上

針路不安定な船でもすみやかに、その運動の偏倚を検知して操舵してやれば、あたかもヒステリシス・ループのない安定な船か、またはあっても非常に不安定度の弱い船のように操縦することができることが示されたが、さらに自動操縦を採用することによって船の操舵に対する反応を、針路安定な船のそれと変わらないように針路安定性を改善することができる¹³⁾。

たとえば、I 章 (2.6) 式の運動方程式で β' を消去すると、

$$\left. \begin{aligned} \ddot{r}' + 2a_1\dot{r}' + a_2r' &= c_1\ddot{\delta}' + (a_4c_1 + a_3c_2)\dot{\delta}' \\ \text{ただし} \quad 2a_1 &= \frac{Y'\beta}{m' + m'y'} - \frac{N'r}{I'_{zz} + J'_{zz}} \\ a_2 &= \frac{-Y'\beta N'r - (m' + m'_x - Y'r)N'\beta}{(m' + m'y')(I'_{zz} + J'_{zz})} \\ a_3 &= \frac{N'\beta}{I'_{zz} + J'_{zz}} \quad c_1 = \frac{N'\delta}{I'_{zz} + J'_{zz}} \\ a_4 &= \frac{Y'\beta}{m' + m'y'} \quad c_2 = \frac{Y'\delta}{m' + m'y'} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.1)$$

となる。ただし (2.6) 式中で δ' に関する項は一般には、かなり小さい量であるから無視した。さて、いま舵を船の角加速度 \ddot{r}' や角速度 r' は打ち消すようにとり、さらに操舵手の命令舵角 δ'^* には比例して自動的に操舵

するものとすれば、そのときの舵角 δ' は

$$\delta' = -k'_1 r' - k'_2 \dot{r}' + k'_3 \delta'^* \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

となる。この (3.2) を (3.1) に代入して整理すると

$$\begin{aligned} (1+c_1 k'_2) \ddot{r}' + [2a_1+c_1 k'_1 + (a_4 c_1 + a_3 c_2) k'_2] \dot{r}' + \{a_2 + (a_4 c_1 + a_3 c_2) k'_1\} r' \\ = k'_3 c_1 \delta'^* + k_3 (a_4 c_1 + a_3 c_2) \delta'^* \end{aligned} \quad (3.3)$$

したがって、針路安定な船に対する (3.1) 式の係数を上に一をつけて表わすことにすれば、自動操縦の定数 k'_1 , k'_2 , k'_3 を、次式を満足するようにすれば、針路不安定な船に安定な船と同じような反応をさせることができる。

$$\left. \begin{aligned} 2a_1 + c_1 k'_1 + (a_4 c_1 + a_3 c_2) k'_2 &= 2\bar{a}_1 (1 + c_1 k'_2) \\ a_2 + k'_1 (a_4 c_1 + a_3 c_2) &= \bar{a}_2 (1 + c_1 k'_2) \\ k'_3 (a_4 c_1 + a_3 c_2) &= (\bar{a}_4 \bar{c}_1 + \bar{a}_3 \bar{c}_2) (1 + c_1 k'_2) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

しかし、このような自動操縦系を採用すると、波・風などの外乱のうち高周波の成分に対しても反応して、いわずらに大きな舵角をとることになるので、実際面では角加速度に対するフィード・バックはしない方が好ましいようだ。

1.3.3. 不安定度の許容限界

小船と大船が全く相似な不安定ヒステリシス・ループをもっている場合、大船は小船より時定数が大きいので、船が直進状態から外れて少々時間放置しておいても、それほど角速度は発達せず反転に要する舵角も必ずしもループ幅 $\pm \delta_1$ 以上である必要はなかった。したがって、大船ではヒステリシスループが存在したとしても、実際の操舵にそれほど困難を感じずということはないわけで、現在のところ巨大船では $\pm 5^\circ$ 位のループ幅をもつ船までは、なんとか操船できるようである。

しかし、船の操縦性を考える場合には船体が物理的に操船可能であるということと同時に、それを実際に操船する人間の情緒を著しく不安定にしないような船にしなければならないであろう。すなわち、自動操縦装置等を使って機械的に操縦すれば操船可能であるとしても、操舵手の神経に異常な緊張感と不安感を与えて操舵を放棄させるよう船は操船可能とはいえない。

この意味で、たとえば針路不安定度の1つの尺度となりうるヒステリシス・ループのループ幅と物理的な意味での操船限界との間の研究も必要であるが、さらに人間工学的なこの方面の研究も同時に推し進められなければならないであろう。

ともあれ現状では、それらの研究が未着手の状態であるので、針路不安定度がどこまで許されるか具体的に述べることはできないが、もし不安定度の許容限界を考えるとするとすれば、次の諸点などが考慮されて決められるべきであろう。

- (i) 人間が感知しうる最小限の方位角変化または角速度を打消すように操舵した場合、 $\pm 35^\circ$ までに十分な余裕舵角を残したある舵角以下（たとえば 5° 以下とか 10° 以下とか）で、変形 α 試験におけるがごとく安定なリミットサイクルに追い込めて運動が発達しないようにできること。
- (ii) ヒステリシス・ループ幅がかなりあっても、直進状態からの外れを早く検知して操舵してやれば、安定な船のごとくに操舵できたわけであるが、波や風等の外乱を受けて急速に角速度が発達した場合には、大きい反転舵角を必要とするし、反転に長時間を要することとなる。とくに、狭い水路や港湾内で避航動作をするときに大きな初期角速度のため、大舵角を必要としたり反転に長時間かかったりするのは、物理的にも避航の効果をも十分にあげないと同時に、それを操船する人間にとって著しい負担となる。
- (iii) 最近の大型船では100%近くオートパイロットをもっており、外洋航行中は人力操舵をすることは稀れでほとんどオートパイロットで航行している。このような場合、針路不安定度の強い船では風や波などの外乱を受けて大きな舵角を頻繁にとり、そのための蛇行による馬力損失が無視できなくなったり操舵機を異常に酷使することが生ずる。ただし操舵量そのものでいうと必ずしも針路不安定度の強い船ほど操舵量が大きくなるとは限らず、オートパイロットの特性も十分検討しなければならないが、同じオートパイロットを使うかぎりには、安定度の良い船ほど操舵量は少なくすむであろうから、操舵量があまり大きくならない程度までには針路安定性を改善しておくべきであろう。

2. 異常不安定船

ここで異常不安定船というのは剝離現象等による不安定現象を伴った針路不安定船のことをいう。タンカー船型が L/B 7 に近づき、 C_B が 0.8 をこえた頃から、模型試験で小舵角の舵の反応に対して著しく安定化したような現象を生じ、しかも実船ではそのような安定化が起こらないために模型—実船の相関を著しく困難なものとした。この現象は野本らにより異常現象と名づけられ、流れの船尾における剝離現象によるものであらうと考えられた⁹⁾¹⁴⁾。(I 参照)

このような異常現象は最近まで模型船のみに現わ、タンカー実船では起こらなかったが、1, 2 年前から、実船でも同様な安定化現象を生じる船がぼつぼつ現われて来たことが報告されている⁹⁾。すなわち、Fig. 4 において角速度 r' の減少につれて小さくなるべき $1/T'$, $1/K'$ の値が逆にある r' 以下で大きくなって (いいかえれば安定化して) いる船が現われているのである。これは L/B が増々小さくなって来て、実船でも剝離現象が生じはじめたためであらうと考えられている。

タンカーの模型実験でこの種の異常現象を起こした船は、小舵角付近で安定化するだけで、測定点にばらつきが出たり、舵角を増すときと減するときで反応が違ういわゆる二俣現象もあまり報告されていない。この限りでは船は直進付近で安定し、しかも大舵角を取ると、本来の不安定船の性質に戻って旋回しやすいわけで、いわば理想的な操縦性を持っていることになる。実船で異常現象を起こした船も全部このような直進付近での単純な安定化を生じているならば、むしろ歓迎すべき現象といえよう。

2.1. 実船の異常例

所がタンカーではないが、実船で極わめて不可解な動きを示す船が現われて来た。その一つは漁船で、小山¹⁵⁾により水槽委員会操縦性小委員会に報告された。発見の端緒は、オートパイロットにより保針運動する際に異常に大きな舵角および方位角の振れを記録したためである。なおこの船の要目は Table 3 に示してある。

この船の特徴は、舵角の小さな所で舵角を一定にしているにもかかわらず、極わめて気紛れな運動をし、ある周期で大きな振幅のヨーイングをするかと思うと、旋回の方を逆転したりするのである。航跡の一例を Fig. 12 に示す。この船についてスパイラルテストを行なった結果は Fig. 13, Fig. 14 のようになった。

Fig. 13 は公試状態で、逆ループ (仮称) を示している。また Fig. 14 は出航状態で、小舵角の付近で矢印の範囲でふらつき、多くの場合は、最後には矢印のどちらかの端に落ちついている。したがって、矢印の末端を連ねると、図中実線のように典型的な不安定船の様相を示すが、矢印の範囲の平均値を取ると、図中黒丸および破線のようにあたかも異常現象により安定化した船の反応のように見える。

通常的不安定船のスパイラルテストで生じるヒステリシスループは、元来 S 字型になるべきものが、一部不安定解であるために実現せず、ジャンプをして生じ

ることは 1. に詳述されている通りであり、直進からの偏差を早期に検出して舵を取れば、極く小さな舵角でもコントロール可能なことは 1. に述べた通りである。

所が Fig. 13 のような逆ヒステリシスの場合には、如何に偏差を早く検出しても、ループ幅を超える舵角を使わないと船を反転させることはできないので、ループ幅内では操航不可能である。

もう一つの例はセメント運搬船である¹⁶⁾。この船の要目は Table 4 に示すように、特に変わった点はないが、

Table 3

$L_{pp}=41.00\text{ m}$	$d = 3.36\text{ m}$ (出航状態)
$B = 8.10\text{ m}$	$L/B=5.06$
$D = 3.30\text{ m}$	$C_B = 0.701$ (出航状態)

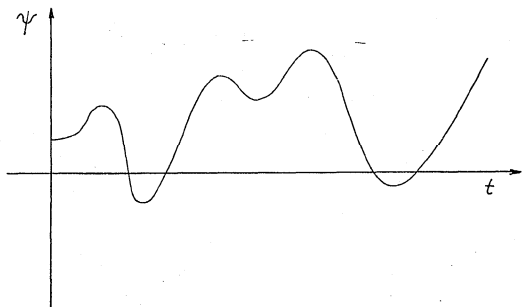


Fig. 12

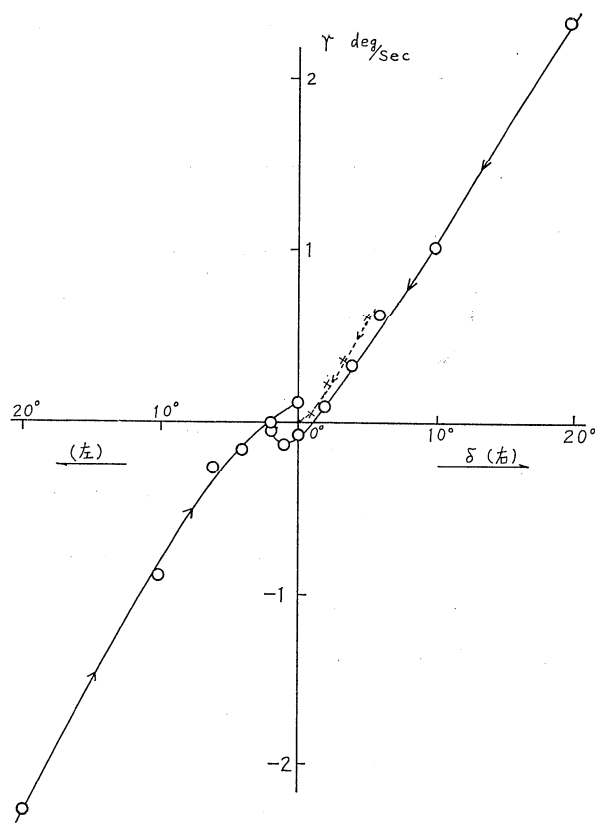


Fig. 13

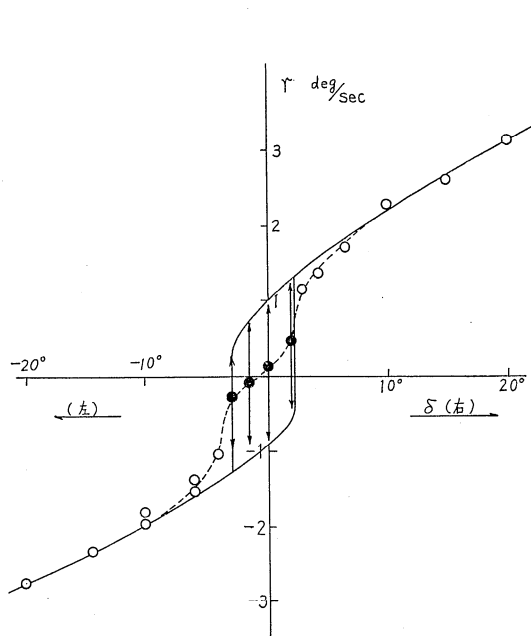


Fig. 14

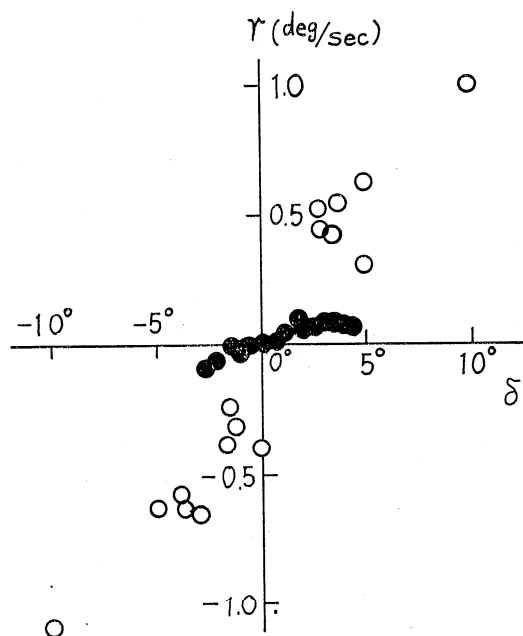


Fig. 15

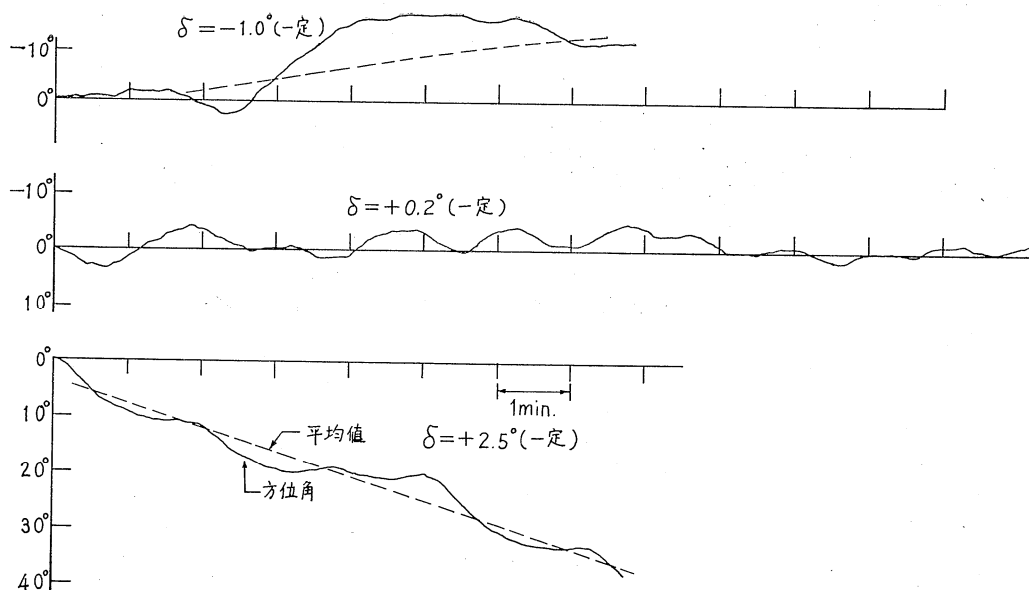


Fig. 16

前述の漁船に類似した性状を示した。先ずスパイラルテストでは Fig. 15 のような結果が出た。図中の黒丸は角速度に周期約 90 秒のふらつきがあり、その平均値を取ったことを示す。平均値に関する限り、直進付近で安定化していることがわかる。スパイラル試験中、船は舵角一定にもかかわらず約 90 秒の周期でヨーイングし、時に旋回方向を逆転するなど、極めて気紛れな運動を示した (Fig. 16)。またオートパイロットによる保針運動でも、舵角、方位角共に異常に振幅が大きかった。

模型実験でも同じようなふらつき現象が現われ、スパイラル試験は Fig. 17 のような結果を示した。またこの模型の船尾に船長の 3% 程度のヒレをほぼ水平につけた所、スパイラルテストの結果は Fig. 18 のように、ふらつきが全く消え、模型は全くの通常不安定船の性状を現わしたのである。

船尾に水平にヒレをつけると、異常現象にする安定化が妨げられ、船は不安定化することは、昭和 40 年頃から川崎重工基本設計部で異常現象の解明のため行なわれた一連の模型実験でもすでに発見されていた現象である¹⁷⁾。前述の漁船の現象が起こった時、小山は偶々同じような着想から水平ヒレを船尾につけ、かなり操縦性を向上させる (つまりふらつき現象を無くす) ことが出来たことが報告されている¹⁵⁾。

今述べたセメント運搬船も、同様の考えから船尾の水平ヒレをつけた結果が、前述の大幅な通常安定化を来したわけである。所がさらに同じヒレを、やや後方かつ下方につけた所、今度は原型にもましてふらつ

Table 4

L	100.0m	L/B	6.1
B	16.4m	V	12 kt
d	7.0m	A_R/Ld	1/56
C_B	0.746		

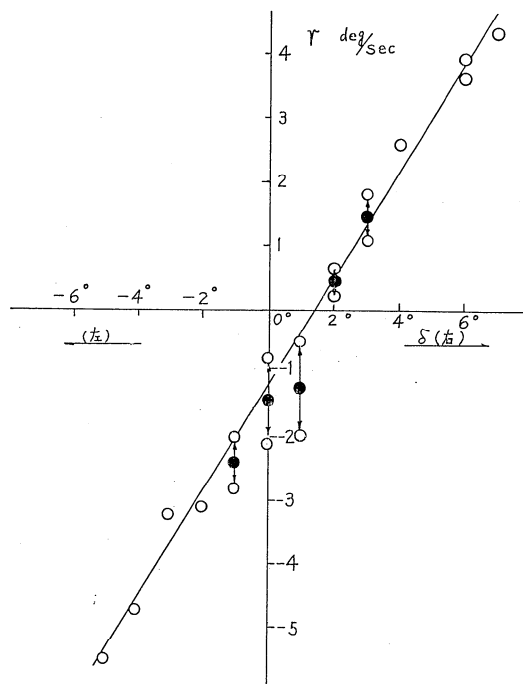


Fig. 17

きが激しくなり、かつ平均としてはより安定化の傾向を示した。このことから、この種の異常現象が、船尾付近の水流の剝離または不安定にもとづくものであり、極く微妙な船型の変化や付加物により、大幅に性質が変わるものであることが推定される。

以上二つの例は比較的小型の船の例であるが、最近 20 万トン級のタンカーにこの種の現象ではないかと疑われる現象が現われた。この船は $L/B=6.52$, $C_B=0.836$, DW 約 22 万トンのタンカーであるが、同型船のスパイラルテストでは片幅約 4° のループ幅を示した。この船の変形試験の記録を見ると、Fig. 19 のように、試験前のアプローチで、舵角一定であるにもかかわらず、船は約 240 秒の周期のヨーイングをしていることがわかる。これは前二者の直進付近のふらつき現象と類似の感をいだかせる。ただしこの船では特に操縦性の異常や、オートパイロットによる保針の異常は報告されていない。

このように巨大タンカーでも、今後ますます L/B が小さく、かつ C_B が大きくなるにつれて、この種のふらつき型の異常が現われる可能性があると考えなければならない、肥大化に対する一つの赤信号ともいえるうである。

2.2. 現象の説明

このような異常現象の説明について、定説というようなものはいまだない現状であるが、先ず船尾の非対称剝離によるものと考えて間違いはなさそうである。ここでは 14), 17) 等で試みられている説明に多少憶測を加えて述べて見る。

2.2.1. 単純ステップ型

船の旋回方向により on-off 的に方向の変わる流体力の旋回モーメントが、非対称剝離のために生じると考えられるものをいう。その方向は、船の旋回を妨げる方向、すなわち安定化の方向に働く。流体力のモーメントは安定しており、旋回方向によりヒステリシスを生じないで向きが変わるものとする。

このモーメントを最も関係のありそうな船尾の有効偏角 β_s をベースに定性的に表わすと、Fig. 20(a) のようになる。

旋回角速度の大きな、すなわち大舵角の運動では、他の流体力が大きいので、この異常モーメントの影響ははっきり現われないが、小舵角の運動に対しては、大きな安定化の影響を現わす。これを定性的に表わすと流体力のステップの形状や、船の本来の安定性の大小に従って Fig. 20(a), (b), (c) のようになる。

(a) は船の安定性があまりよくなく、かつステップの高さが低く、かつ旋回方向による切り変わりが余りシャープでない場合で、I 章 Fig. 3.10 の Super stable に相当する。この場合は操船上はむしろ安定化していて好ましい。

(b) はステップがかなりはっきりしていて、直進付近で $\partial r'/\partial \delta$ が 0 になる場合で、I 章 Fig. 3.10 の infinite stable に相当する。これに類似したものが、タンカー模型にしばしば現われることが報告されている。この場合は、舵の効きに対し、一種の dead band がある場合に相当するので、この dead band を超える舵角を取らないと船は反応しないわけで、舵の動きは大きくなる。

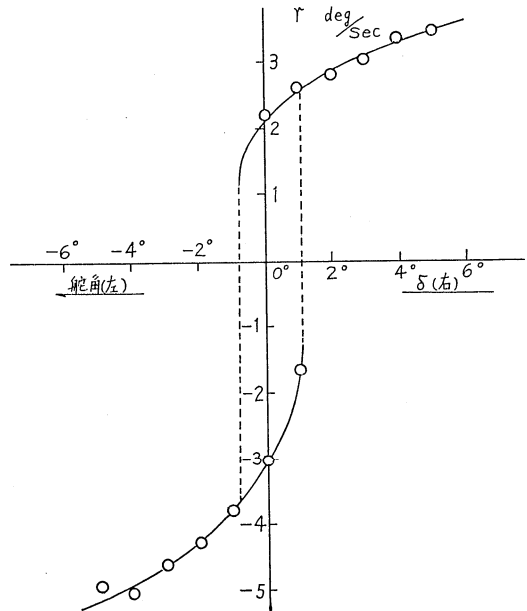


Fig. 18

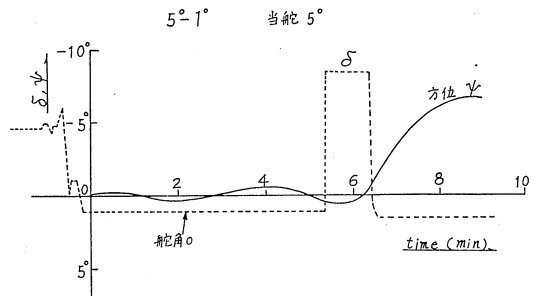


Fig. 19

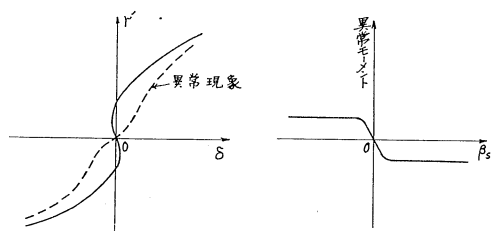


Fig. 20(a)

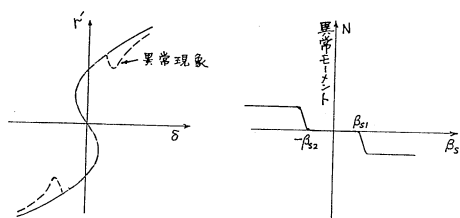


Fig. 22(a)

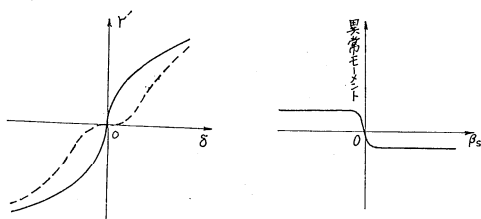


Fig. 20(b)

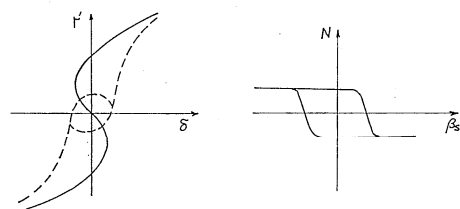


Fig. 22(b)

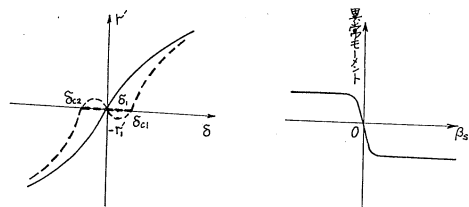


Fig. 20(c)

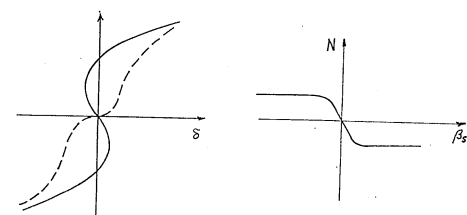


Fig. 22(c)

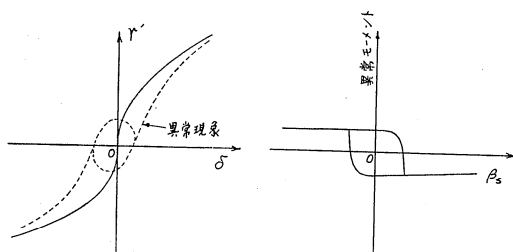


Fig. 21(a)

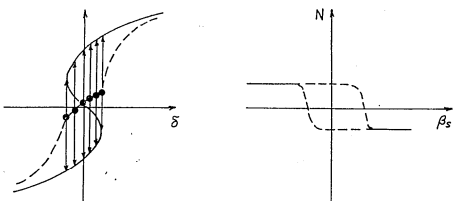


Fig. 22(d)

(c) は船が比較的安定で、それに大きなステップを持つ異常流体力が加わったとすると、(a)、(b) からの類推で存在の可能性ありそうなので一応図示したが、(I 章 Fig. 3.10 の reversed loop に相当) 実際はあり得ない。なぜならば Fig. 20 で、 $+\delta_1$ の舵角を取ったとすると、もし、この型が存在するならば船は $-r_1$ の角速度を生じる。すなわち舵の方向と逆の旋回をする。所が異常モーメントは旋回方向と逆であるから $+$ の異常モーメント、すなわち正の旋回を助ける方向が生じるから、仮に逆旋回が起こっても減衰してしまう。また仮に正旋回が起こったとすると、異常モーメントは $-$ すなわち正旋回を妨げる方向に働くから旋回は減衰し、結局 δc_1 から $-\delta c_2$ の間は船は舵に反応しないことになり、(b) の infinite stable と同じになるわけである。

2.2.2. ヒステリシス型

Fig. 21 のように異常モーメントが、旋回方向に関しヒステリシスを持つ場合で、スパイラル試験の結果は一見前の reversed loop のような形となるが、この場合には理論的には存在しうる。Fig. 13 がこの例である。この場合は通常の不安定船の場合と異なり、ループ幅内の舵角では操縦不可能である。

2.2.3. ヨーイング型 (ふらつき型)

前出漁船の満載状態やセメント運搬船のような場合で著しいヨーイングを伴ない、また時に舵角一定のまま

旋回方向を変えることがある (Fig. 22)。極端に針路安定な船ではヨーイングの固有周期を持つことがあるが、今の場合には当てはまらない。今の場合は、流体力のモーメントが不安定で、周期的に変化すると考えられる。事実このような船の航跡を模型で観測すると、模型は拘束されて斜航しているにもかかわらず航跡の上流側に周期的な乱れが見られる。これは (a), (b) の場合のような上流側の剝離が安定せず、周期的に渦の発生が消長するものと考えられる。このヨーイングは周波数からいって自動操縦では効果的に押えることが難しい。なお旋回方向を変える現象については、船は元々進路不安定であり、それに Fig. 22 のような形の異常モーメントが作用し、さらにその異常モーメントが周期的に変化するというモデルが考えられた¹⁶⁾。すなわち流体力のモーメントはヒステリシスを持つが、ヒステリシスの部分が不安定で時に Fig. 22(a) のようになり、時には (b) のようになり、また時には (c) のようになると考えると、(a) の場合は直進付近で部分的に元の不安定な性質となり、(b) の場合はヒステリシス型となり、さらに (c) の場合には super stable または dead band 型となる。したがってスパイラル試験の結果は Fig. 22 の $+\beta_{s1}$ と $-\beta_{s1}$ に相当する舵角の間、船の反応が不定になり、(a), (b), (c) の値どれをも取りうるし、そのどれにも落着かないでヨーイングをするという結果になると考えられる。従ってばらつきの外側を連ねると、ほぼ元の不安定な船のループの形になるわけであり、平均値を取ると super stable のような形になるわけである。

2.2.1. に述べた型も、この型の β_{s1} と β_{s2} が非常に小さいケースであると考えられ、事実小舵角に対する計測値は多少ばらついたり、不定になったりすることが知られている。また 2.2.2. のようなヒステリシス型が安定に存在するかどうか確かめられておらず、恐らく 2.2.3. のような性質を持っているものと考えられる。

2.3. 対 策

前節 2.2.1(a) のような単純ステップ型に限っていえば、直進付近の運動に対しては安定化し、大舵角では本来の性質に戻ってよく旋回するので、むしろ好ましい現象であるといえるが、その原因が流れの剝離にするとすると、微妙な船型の差で 2.2.3. のような型になる恐れも充分あるので、何等かの対策が必要であろう。

まず最初に考えられるのは船尾の形状である。異常現象は L/B が小さく、 C_B の大きい船型に起きてはいるが、同程度の船型で異常のない船が多いことを考えると、微妙な船尾の形状が影響するものと考えられる。また同じ C_B でも、 LCB を前に移し、船尾の流線が剝離を起こし難いような素直な形にすることも有効であろうと推定されるが、定量的には明らかにされていない。

次にコントロールサrfフェースによるものとしては、15), 16), 17) 等の結果から見て、船尾にほぼ水平につけたヒレがこの現象に大きく影響することは間違いない。しかしながら、16) の例のようにヒレの装着場所のわずかの違いが、一方は異常現象を消す方向に作用し、一方は益々助長する方向に働いているのから見て装着場所の選定非常に難しい。またなぜ水平ヒレが効くかについて 16) では定性的な説明が試みられているが、装着場所やヒレの大きさを決めるまでには至っていない。

一方、舵の後方中心線にヒレ (一種のスケグともいえる) をつけた例 15), 16) では、異常現象を完全に止めるには至らなかったが、かなり消すことができた。この場合、このヒレは普通のスケグのように yaw damping を増加する作用よりも、下流側の渦が上流側に及び、上流の剝離に影響を与えるのを防ぐ効果があると考えられる。

事実 16) の場合、中心線のヒレの装着によって、船は平均的には不安定化している。

何れにせよ、この種の異常現象の解明と対策は、今後の研究にまつべきものが極わめて多いといわなければならない。

参 考 文 献

- 1) 元良誠三: 船体運動力学 (応用力学講座 17) 共立出版。
- 2) Eda, Haruzo and Crane, C.L.Jr.: "Steering Characteristics of Ships in Calm Water and Waves" SNAME.
- 3) 元良誠三: "船体運動に対する附加質量および附加慣性モーメントについて" (その 1 ~ その 5) 造船協会論文集, 第 105 号, 106 号, 107 号 (1959~1960)。
- 4) 野本謙作, 田口賢士, 本田啓之助, 平野 進: "船の操縦性について (1)", 造船協会論文集, 第 99 号 (1956)。
- 5) Nomoto, K.: "Approximate Nonlinear Analysis on Steering Motion", Contribution to 12 th I.T.T.C.

- (1969).
- 6) Norrbín, Nils. H.: "On the Reduced Nonlinear Equation of Steering and its Application to the Analysis of the Pull-Out Maneuver", Contribution to 12th I.T.T.C. (1969).
 - 7) 前沢成一郎: 非線形常微分方程式, ダイヤモンド社.
 - 8) 野本謙作, 田口賢士: "船の操縦性について (2)", 造船協会論文集, 第 101 号 (1957).
 - 9) 日本造船研究協会: "巨大船の運航性能に関する実験研究" (第 98 研究部会報告書), (1968).
 - 10) 藤野正隆, 元良誠三: "変形 z 試験とその一応用例について", 昭和 45 年日本造船学会秋季講演会発表予定.
 - 11) Gibson, J.E.: "Nonlinear Automatic Control" McGraw-Hill.
 - 12) Matora, S. and Fujino, M.: "On the Modified Zig-zag Maneuver to Obtain the Coursekeeping Qualities of less Stable Ships, Contribution to 12th I.T.T.C. (1969)
 - 13) 元良誠三, 小山健夫: "自動操縦による操縦性能の向上について", 造船協会論文集, 第 116 号 (1964).
 - 14) K. Nomoto: "Unusual Scale Effect on Manoeuvrability of Ships with Blunt Bodies", Proceedings of 11th I.T.T.C., Tokyo, Oct. 1966.
 - 15) 小山健夫: 「鮪漁船に現われた異常現象について」, 造船学会水槽委員会第 2 部会資料, 昭 43. 10.
 - 16) 元良誠三, 高木又男, 国米昭久, 加藤洋治, 小山健夫: 「異常現象を伴う船の一解析」, 昭 45. 11, 造船学会講演会にて講演予定.
 - 17) 岡本 洋, 玉井浩正: 「模型異常現象対策実験—整流翼の効果 M No. 1050」, 昭 41.6 川重基本設計部資料 (社内報).