

(昭和 47 年 10 月日本造船学会秋季講演会において講演)

位相面を用いた操縦性解析の方法

正員 藤 野 正 隆*

An Analyzing Method of Manoeuvrability with the Phase Portrait

by Masataka Fujino, *Member*

Summary

In this paper, a new method to determine the manoeuvrability of ships by using some kinds of phase portraits is introduced.

When we want to determine the stability indices $T_1 T_2 / K$ and $(T_1 + T_2) / K$ by Bech's method, it is much necessary to assess the derivative $\ddot{\psi} = \dot{\psi}(d\dot{\psi}/d\psi)$ with enough accuracy. However, it is difficult to do so because the yaw rate signal measured on the board contains many noises. On the contrary, this new method makes good use of the areas of limit cycles on the phase portraits instead of the time derivatives $(\dot{\psi}, \ddot{\psi}, \ddot{\psi})$ at certain instants.

The validity of this method is verified by some trials on the analogue simulator. Moreover this method is applied to the analysis of the modified zigzag manoeuvres of a certain real ship and is proved to be very useful.

1 緒 言

船の操縦性解析の標準的手法として、野本が提案した Z 試験の一次系解析 (T, K 解析) が従来広く利用せられ、多くの成果をあげていることは、いまさら言う必要もなからう¹⁾。この解析法は、操舵に対する追従の速さを代表する時定数 T と操舵に対する応答の大きさ、すなわちゲイン定数 K の 2 個の定数で、船の操縦性能を端的に把握することができるという点ですぐれた近似法である。しかし、逆に近似法の簡略さゆえに実際に適用する際、不便でないわけではなかった。それは、操縦運動の平均的な強さの度合によって、同一の船でありながら適宜 T, K 指数の値を使いわけなければ、あまり良い近似が得られないという点である。このことは実際にある一隻の船の操縦特性を明確に把握、それを用いて種々の状況下に置かれた船の操縦性能を知ろうとする場合に、数個の数学モデルを使いわけなければならないという不便さを意味すると同時に、操縦性試験の際どの程度まで、あるいはどの位の種類の試験をやれば十分なのかという問題に対する明確な解答を与え得ないという不十分さをも意味していた。このような欠点を補うものとして、線形の範囲で考えるならば、1) 横すべり運動と回頭運動を共に考慮した本来の操縦運動方程式に立ち帰り、

$$T_1 T_2 \ddot{\psi} + (T_1 + T_2) \dot{\psi} + \psi = K \delta + K T_3 \dot{\delta} \quad (1)$$

の 4 定数 T_1, T_2, T_3, K を用いて、より完全に操縦特性を把握しようとする行方と、2) 線形重ね合わせの理が成り立つ範囲の操縦運動を考えるのであれば、いわゆる周波数応答特性がわかればよいとする立場から、これを実験的に決定しようとする行方の 2 通りが現在ある²⁾。このうち前者については、たとえば Bech³⁾ によって提案された位相面解析が現在のところ有力な方法であって、野本⁴⁾・鳥野²⁾・小瀬⁵⁾等により、さらに詳細な検討が試みられていて、これらでは (1) 式のような線形な運動方程式ではなく、非線形性をも考慮に入れている。その方法の基本的な考え方は、おおよそ次のようである。操縦運動中の船の運動を、 $\dot{\psi} \sim \psi$ 位相面上にプロットし、その軌道上で任意の時刻の $(\dot{\psi}, \ddot{\psi}, \ddot{\psi})$ を求めて運動方程式に代入し、これを代数的に解いて未知数 $T_1 T_2 / K, (T_1 + T_2) / K$ を求めようとするものである。また時定数 T_3 については別途に、舵を切返している間の同様の解析から

* 東京大学工学部船舶工学科

決定するのである。しかし、実際に位相面上の軌道ないしは時間記録から $\dot{\psi}$, $\ddot{\psi}$ を精度よく求めることは、かなり困難であろうと予想される。なぜならば、 $\dot{\psi}$, $\ddot{\psi}$ は直接に計測することは非常にむずかしいので、まずレートジャイロによる角速度 $\dot{\psi}$ の時間記録から数値微分によって $\ddot{\psi}$ を求め、それを $\dot{\psi} \sim \ddot{\psi}$ 位相面上にプロットした軌道上の微係数 $d\ddot{\psi}/d\dot{\psi}$ によって、 $\ddot{\psi} = \ddot{\psi}(d\dot{\psi}/d\psi)$ で $\ddot{\psi}$ を求めなければならないという、数値微分の手順を2重に用いて必要な値を決定しなければならないからである。また著者は $\ddot{\psi}$ を求めるのに實際上比較的容易に求められる $\dot{\psi} \sim \ddot{\psi}$ 位相面から、数値微分 $\ddot{\psi} = \dot{\psi}(d\dot{\psi}/d\psi)^2 + \dot{\psi}^2(d^2\dot{\psi}/d\psi^2)$ によって $\ddot{\psi}$ を求めて同様の解析を行ってみたがやはりあまり良い結果を得ることはできなかった。

そこで本論文では上述の方法とは異なり、位相面上で操縦運動がリミットサイクルに入ったのちに、位相面軌道から得られる他の情報——すなわちリミットサイクルの囲む面積——を用いて(1)式中の4定数が得られないかを検討した。このような方法の利点の1つは、上述の方法のようにある瞬間瞬間の $(\dot{\psi}, \ddot{\psi})$ を使うのではなく、そのリミットサイクルの囲む面積を利用するので、時々刻々の $\dot{\psi}$, $\ddot{\psi}$ の値そのものは多少ばらついていても差しつかえないという点である。また著者は以前、針路不安定な船でも切返し方位角 δ^* が、用いる舵角 δ^* よりも小さい変形Z試験を行うならば、その位相面上の軌道をリミットサイクルに追い込むことができることを述べたが⁶⁾、実船ではさらに運動の非線形性が効いてきて、リミットサイクルに追い込むことは一層容易である。またリミットサイクルに追い込むだけであるならば、必ずしも変形Z試験の手順を厳密に踏まなくとも、あらかじめ途中で見越し操舵を行って、リミットサイクルに入るまでの時間を短縮することが可能である。

2 位相面による操縦性解析

以下に考察する操縦運動は、非線形定常旋回特性を考慮に入れた(2)式で表わされるものとし、その非線形定常旋回特性 $\delta = H(\dot{\psi})/K$ は既知であるものと仮定する。すなわちZ試験ないしは変形Z試験の位相面解析によって、時定数 T_1 , T_2 , T_3 を決定しようとするものである。ただし(1)式のような線形方程式を用いる場合にはゲイン定数 K をも決定できることは言うまでもない。

$$T_1 T_2 \ddot{\psi} + (T_1 + T_2) \dot{\psi} + H(\dot{\psi}) = K\delta + K T_3 \dot{\delta} \quad (2)$$

まず(2)式の両辺に $\dot{\psi}$ を乗じ、時間について t_0 から t_1 まで積分する。ただし t_0, t_1 は $\psi(t_0) = \psi(t_1)$, $\dot{\psi}(t_0) = \dot{\psi}(t_1)$, $\ddot{\psi}(t_0) = \ddot{\psi}(t_1)$ のごとく、位相面上のリミットサイクルの同一の点の時刻で、 $t_1 - t_0$ はそのリミットサイクル上を状態点が一周するのに要する時間である。積分の結果、

$$\frac{T_1 T_2}{K} \oint \dot{\psi} d\ddot{\psi} + \frac{T_1 + T_2}{K} \oint \dot{\psi} d\dot{\psi} + \oint \frac{H(\dot{\psi})}{K} d\psi = \oint \delta d\psi + T_3 \oint \dot{\delta} d\psi \quad (3)$$

なお(3)式中の積分は Stieltjes 積分で、たとえば $\oint \dot{\psi} d\ddot{\psi}$ は $\int_{t_0}^{t_1} \dot{\psi}(t) d\ddot{\psi}(t)$ の意味であり、他も同様である。これらの積分が存在することは $\psi, \dot{\psi}, \ddot{\psi}, \delta$ が連続で有界変動であることから明らかである。さて(3)式中に現われている積分 $\oint \dot{\psi} d\ddot{\psi}$, $\oint \dot{\psi} d\dot{\psi}$, $\oint H(\dot{\psi})/K d\psi$, $\oint \delta d\psi$, $\oint \dot{\delta} d\psi$ を考えてみる。まず $\dot{\psi} \sim \ddot{\psi}$ 位相面上の状態点は、Fig.1 に示したようにリミットサイクルに入っていくわけであるが、状態点はそのリミットサイクル上を時計方向に回るので、そのリミットサイクルの囲む面積を D_2 とすれば、積分 $\oint \dot{\psi} d\ddot{\psi}$ は

$$\oint \dot{\psi} d\ddot{\psi} = -D_2 \quad (4)$$

であることは明らかである。同様に積分 $\oint \delta d\psi$, $\oint \dot{\delta} d\psi$ は、縦軸に δ をとり横軸にはそれぞれ ψ と $\dot{\psi}$ をとってリミットサイク

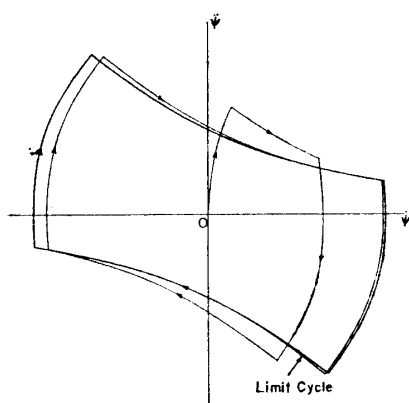


Fig. 1 $\dot{\psi} \sim \ddot{\psi}$ 位相面

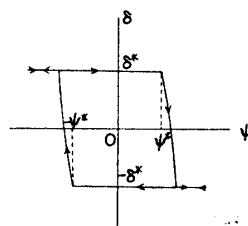


Fig. 2 $\psi \sim \delta$ 位相面

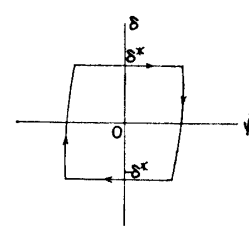


Fig. 3 $\dot{\psi} \sim \delta$ 位相面

ルを Fig.2 および Fig.3 のように描けば、それぞれのリミットサイクルの囲む面積 D_3, D_4 により

$$\oint \delta d\psi = D_3$$

$$\oint \dot{\psi} d\delta = -D_4 \quad (5)$$

で与えられる。また積分 $\oint \dot{\psi} d\psi$ は状態点がリミットサイクル上をちょうど一周すれば明らかに零である。最後に $\oint H(\dot{\psi})/K d\psi$ を検討してみる。最初に仮定したように舵角対定常旋回角速度の特性 $\delta = H(\dot{\psi})/K$ は、スパイラル試験や逆スパイラル試験等で既知である。そこで Fig.4 に示したような $\psi \sim \dot{\psi}$ 位相面上のリミットサイクルと $\delta = H(\dot{\psi})/K$ 特性から $\psi \sim H(\dot{\psi})/K$ の関係を求める。このために $\psi \sim \dot{\psi}$ 位相面上に $\delta = H(\dot{\psi})/K$ を重ねて描く。たとえば針路安定な船の場合について描くと Fig.5 a) のごとくなる。 $\psi \sim \dot{\psi}$ 軌道上の A 点に対応する $\psi \sim H(\dot{\psi})/K$ 位相面上の状態点を求めるには、A 点より ψ 軸に平行線を引き、それが $\dot{\psi}$ 軸および $\delta \sim H(\dot{\psi})/K$ 曲線と交わった点を B, C とすれば、A より ψ 軸に降した垂線 AD 上に $\overline{ED} = \overline{BC}$ の点 E を取ればよい。このようにして得られる E 点は、A 点を矢印の方向に $\psi \sim \dot{\psi}$ リミットサイクル上を順次動かして行けば、図に点線で描いた閉軌道上を時計方向に動くことになる。この点線のリミットサイクルの囲む面積を D_5 とすれば

$$\oint \frac{H(\dot{\psi})}{K} d\psi = D_5 \quad (6)$$

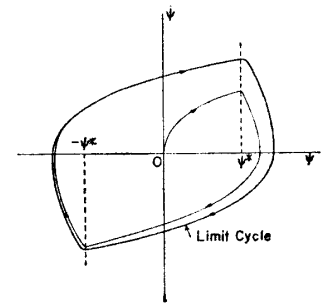
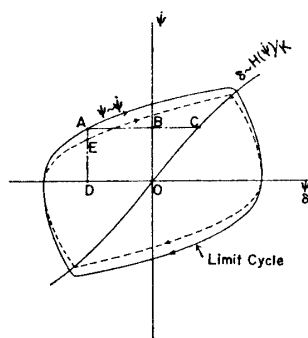
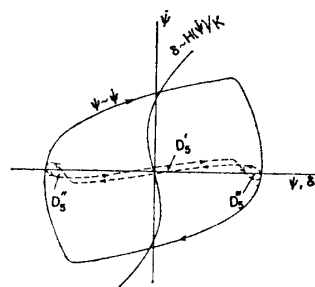


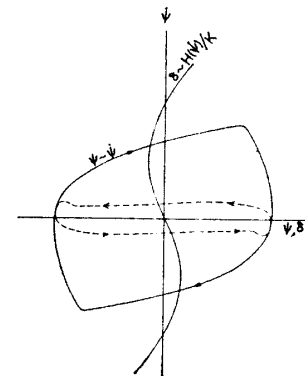
Fig. 4 $\psi \sim \dot{\psi}$ 位相面



a) 針路安定な場合



b) 針路不安定な場合 (その 1)



c) 針路不安定な場合 (その 2)

Fig. 5 $\psi \sim H(\dot{\psi})/K$ 位相面

である。また船が針路不安定である場合には、定常旋回特性 $\delta = H(\dot{\psi})/K$ は不安定ヒステリシスループをもつ。このような場合の $\psi \sim H(\dot{\psi})/K$ 位相面は Fig.5 b) Fig.5 c) に示したが、状態点は一部または全部、リミットサイクル上を反時計方向に回る。このように反時計方向に状態点が回るリミットサイクルの囲む面積は負と勘定しなければならない。たとえば Fig. 5 b) の場合、 $\psi \sim H(\dot{\psi})/K$ リミットサイクルは部分的に 3 個の閉曲線に分けることができるが、それぞれの囲む面積を D_5', D_5'', D_5''' とすれば

$$\oint \frac{H(\dot{\psi})}{K} d\psi = D_5' - D_5'' - D_5''' \quad (7)$$

となる。

なお $H(\dot{\psi}) = \dot{\psi}$ として (1) 式のような線形方程式で議論をする場合には

$$\oint H(\dot{\psi}) d\psi = \oint \dot{\psi} d\psi = D_1 \quad (8)$$

で、 D_1 は位相面 $\psi \sim \dot{\psi}$ 上のリミットサイクルの囲む面積そのものである。以上まとめると

$$-\frac{T_1 T_2}{K} D_2 + T_3 D_4 = D_3 - D_5 \quad (9)$$

となる。

次に (2) 式の両辺に $\dot{\psi}$ を乗じ、先の場合と同様時間について t_0 から t_1 まで積分する。

$$\frac{T_1 T_2}{K} \oint \ddot{\psi} d\dot{\psi} + \frac{T_1 + T_2}{K} \oint \dot{\psi} d\dot{\psi} + \oint \frac{H(\dot{\psi})}{K} d\dot{\psi} = \oint \delta d\dot{\psi} + T_3 \oint \dot{\delta} d\dot{\psi} \quad (10)$$

先と同様に考えれば

$$\begin{aligned} \oint \ddot{\psi} d\dot{\psi} &= 0 \\ \oint \dot{\psi} d\dot{\psi} &= D_2 \\ \oint \delta d\dot{\psi} &= - \oint \dot{\psi} d\delta = D_4 \\ \oint \dot{\delta} d\dot{\psi} &= D_6 \end{aligned} \quad (11)$$

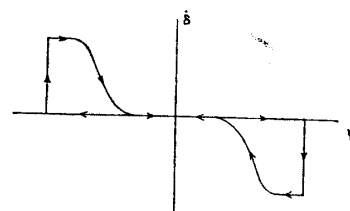


Fig. 6 $\dot{\psi} \sim \delta$ 位相面

である。ただし、 D_6 は縦軸に δ 、横軸に $\dot{\psi}$ をとって描いたリミットサイクルの囲む面積である (Fig. 6)。また (10)式左辺第3項の積分 $\oint H(\dot{\psi})/K d\dot{\psi}$ は、 $\dot{\psi} \sim H(\dot{\psi})/K$ 位相面上の状態点の動きを考えれば明らかのように零である。よって(10)式は

$$\frac{T_1 + T_2}{K} D_2 - T_3 D_6 = D_4 \quad (12)$$

となる。

以上のようにして得られた(9)式と(12)式を連立させて代数的に解けば、 $T_1 T_2/K$ 、 $(T_1 + T_2)/K$ 、 T_3 を決定することができるわけであるが、未知数が3個であるのに対し方程式の数が不足しているため、最低限2種類のZ試験ないしは変形Z試験を行う必要がある。ただし、その際未知数を精度よく決定するためには、 ψ^*/δ^* の値が大幅に異なる組み合わせの試験を選ぶなどして、代数方程式の係数行列式等があまり小さくならないように配慮すべきである。

3 シミュレーター実験による本解析法の検証

前節までに述べた解析法の有効性を検証するために、アナログシミュレーター上に(2)式で表わされる非線形操縦モデルを作成し、変形Z試験を試みた。作成したモデルの非線形定常旋回特性 $\delta = H(\dot{\psi})/K$ の具体形としては、針路不安定な船に見られる不安定ループを最も簡単に実現するものとして、いわゆる cubic type の非線形項を導入したものを用いた。すなわち

$$\delta = -5 \dot{\psi} + 31.25 \dot{\psi}^3 \quad \delta \text{ (deg)}, \dot{\psi} \text{ (deg/sec)} \quad (13)$$

とした。また3個の時定数 T_1 、 T_2 、 T_3 は、それぞれ -250 sec 、 10 sec 、 25 sec とした。さらに実際の船における指令舵角と真の舵角との間の時間遅れの関係を再現しなければならないが、ここでは付録に述べたような非線形要素を用いて操舵中は操舵速度が一定であるようにした。

さて本解析法で変形Z試験結果を解析するにしろ、あるいはBechの方法での解析にしろ、その実用性を検証するには、実際の船上で取りうる記録と同種のもの、すなわち経過時間に対する舵角・方位角・角速度の記録をとって、これより必要な位相平面を描くのが妥当と思われるので、 $\dot{\psi} \sim \ddot{\psi}$ 位相平面を描くのにもシミュレーター上で直接得られるはずの角加速度 $\ddot{\psi}$ は利用しないことにした。すなわち、 $\ddot{\psi}$ は面倒でもタイムヒストリーとしての $\dot{\psi}$ の数値微分 (いわゆる7点法) から求めた。また実施した変形Z試験は、舵角 10° 切返し方位角が 7° と 1° の2種類である。とくに数多くの試験を実施しなかったのは、本シミュレーター実験の目的が、Bechの方法と面積法の良否の判定にあるのではなく、本論文に述べた面積法の有効性が検証されれば十分であるからである。

まずBechの解析法について簡単に触れると、 $\dot{\psi} \sim \ddot{\psi}$ 位相面上で、舵角が一定に保たれているときの、すなわち $\dot{\delta} = 0$ のときの状態点 $(\dot{\psi}_i, \ddot{\psi}_i, \ddot{\psi}_i)$ を i 個求めて、(2)式に代入し、 i 個の代数方程式

$$\frac{T_1 T_2}{K} \ddot{\psi}_i + \frac{T_1 + T_2}{K} \dot{\psi}_i + \frac{1}{K} H(\dot{\psi}_i) = \delta_i \quad (14)$$

を解くことにより、 $T_1 T_2/K$ および $(T_1 + T_2)/K$ を決定する。その際、未知数 $T_1 T_2/K$ 、 $(T_1 + T_2)/K$ を精度よく求めようとするならば未知数の数より多い状態点を選び ($i > 2$)、 i 個の(14)式から最小2乗法の意味で最も確からしい値を得るのが実際的のようである。本シミュレーター実験でも $10^\circ \sim 7^\circ$ および $10^\circ \sim 1^\circ$ 変形Z試験からそれぞれ4点ずつの状態点を選びだし、最小2乗法によって未知数を決定した。なお、この場合も定常旋回特性

Table 1 位相面解析のシミュレーター実験 (10°
~7°, 10°~1° 両変形Z試験) の結果

	Bechの方法	本解析法	設定値
T_1 (秒)	-257.4	-240.8	-250.0
T_2 (秒)	10.5	9.64	10.0
T_3 (秒)	25.8	23.7	25.0

(9) 式と1個の(12)式より単純に求めた値は、同表の面積法による値とほとんど一致している。以上のように Bech の方法によるにしろ、本論文の面積法によるにしろ、決定された3時定数の値は実用上設定値にほぼ等しいと見做せ、この2方法が十分有効であることを裏付けているといえる。ただしアナログシミュレーター上での計算実験は、Bech の方法に多少有利であることに注意する必要がある。実際の船上で得られるレートジャイロによる角速度 $\dot{\psi}$ の記録には、低周波数の成分で $\dot{\psi}$ の記録をかなり脈動させる成分が混入することが多く、数値微分 $\ddot{\psi} = \dot{\psi}(d\dot{\psi}/d\psi)$ による $\ddot{\psi}$ の値が大きなバラツキを持つのと比べて、シミュレーター実験では $\ddot{\psi}$ の値もかなり精度よく決定できるからである。したがってシミュレーター実験で、ほぼ同程度の精度で所期の T_1, T_2, T_3 が求められることが確かめられたということは、むしろ面積法に利点があるように思える。

ただし本方法による決定法にも問題がある。いま2種類の変形Z試験から求めた各種の面積 D_2, D_3, D_4, D_5, D_6 を添字 i, j で区別すると、上述のように2個の(9)式と1個の(12)式から $T_1 T_2 / K, (T_1 + T_2) / K, T_3$ を求める場合を考えてみると、

$$\begin{aligned} \frac{T_1 T_2}{K} &= \frac{D_4^j (D_3^i - D_5^i) - D_4^i (D_3^j - D_5^j)}{D_4^i D_2^j - D_4^j D_2^i} \\ \frac{T_1 + T_2}{K} &= \frac{D_4^i}{D_2^i} + \frac{D_6^i \{ D_2^j (D_3^i - D_5^i) - D_2^i (D_3^j - D_5^j) \}}{D_2^i (D_4^i D_2^j - D_4^j D_2^i)} \\ T_3 &= \frac{D_2^j (D_3^i - D_5^i) - D_2^i (D_3^j - D_5^j)}{D_4^i D_2^j - D_4^j D_2^i} \end{aligned} \quad (15)$$

となるので、十分良い組合わせの変形Z試験を行わないと、分母の $D_4^i D_2^j - D_4^j D_2^i$ がばらつき、 $T_1 T_2 / K$ の精度が極端に悪くなる。これにくらべて $(T_1 + T_2) / K$ の値は右辺第一項の値が第二項よりかなり大きいので、 $D_4^i D_2^j - D_4^j D_2^i$ のバラツキはそうきかない。また2個の(12)式と1個の(9)式による場合も、事情はほぼ同様である。このように本方法によって精度よく $T_1 T_2 / K, (T_1 + T_2) / K$ を決定するには、上述の意味で良い組合わせの変形Z試験ないしはZ試験を行う必要がある。

次に実際に航海訓練船「青雲丸」で実施された変形Z試験結果の位相面解析に、本方法を適用した例を示そう。

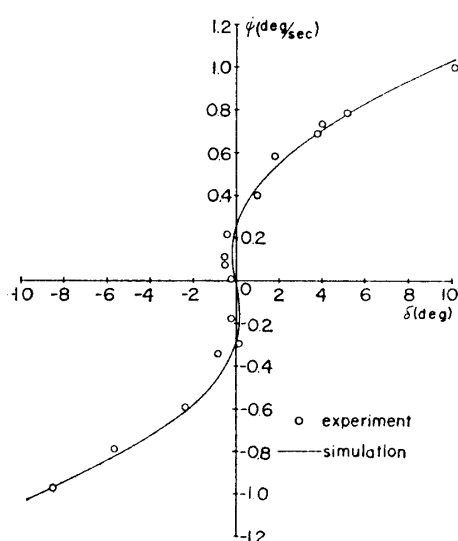


Fig. 7 定常旋回特性 $\delta = H(\dot{\psi})/K$ (青雲丸)

$\delta = H(\dot{\psi})/K$ は既知であるものとする。

このようにして Bech の方法により決定した結果を Table 1 に示した。また本論文に述べた面積法によって解析した結果も同表に示した。面積法による値も2組の(9)式と(12)式を最小2乗法で解いた値であるが、(12)式同志は互いに非常に似かよった式であるため、実質的には2個の(9)式と1個の(12)式より3未知数を決定しているのとはほぼ等しい。事実2個の

Fig. 7 に本船の逆スパイラル試験結果を $\delta = -2.5\dot{\psi} + 20.18\dot{\psi}^3 - 7.986\dot{\psi}^5$ でシミュレートした結果を実線で示し、試験結果と比較して示した。この定常旋回特性を用いて10°~8°, 10°~2°の変形Z試験結果(ただし実際にタイムヒストリー上で真の舵角が切返された瞬間の方位角を調べてみたところ、それぞれ10°~10°Z試験, 10°~4°変形Z試験と見た方が妥当のようであった)を本方法で解析したところ、 $T_1 = -268.3$ sec, $T_2 = 8.97$ sec, $T_3 = 22.6$ secを得た。そこでこれらの結果を用いて(2)式の操縦モデルを作成し、それぞれの変形Z試験を行って、実測された位相面軌道と比較したのがFig. 8~11である。おおよそ本解析法で得られた値は、良く実船の特性を把握しているようだが、なお細く実測値とシミュレーションの結果を比較すると必ずしもよく一致しているとはいえないようだ。ただし、この一致度の悪さをすべ

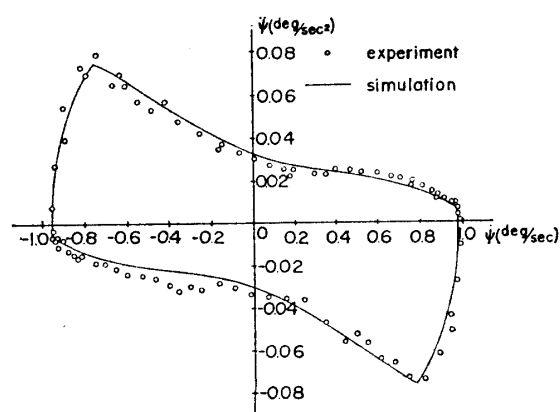


Fig. 8 $\dot{\psi} \sim \psi$ 位相面でのシミュレーションと実船試験との比較 (青雲丸): 10°~8° 変形 Z 試験

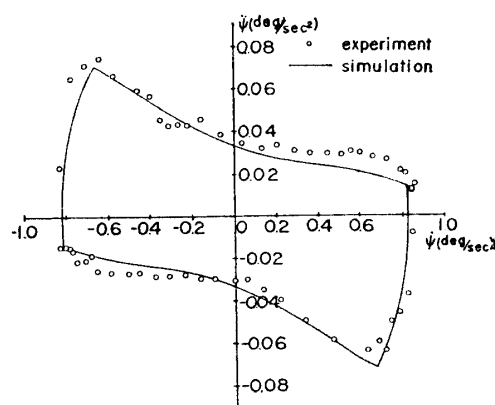


Fig. 10 $\dot{\psi} \sim \psi$ 位相面でのシミュレーションと実船試験との比較 (青雲丸): 10°~2° 変形 Z 試験

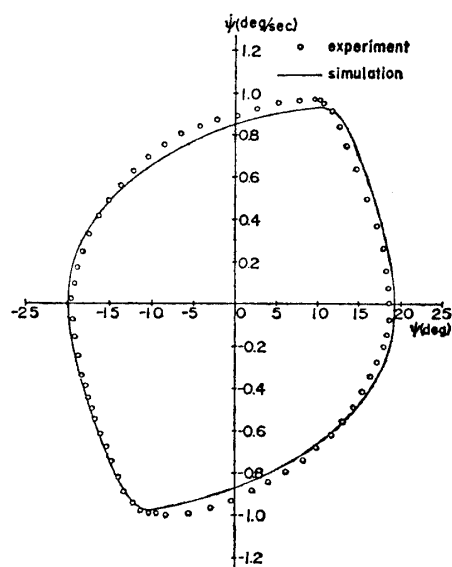


Fig. 9 $\dot{\psi} \sim \psi$ 位相面でのシミュレーションと実船試験との比較 (青雲丸): 10°~8° 変形 Z 試験

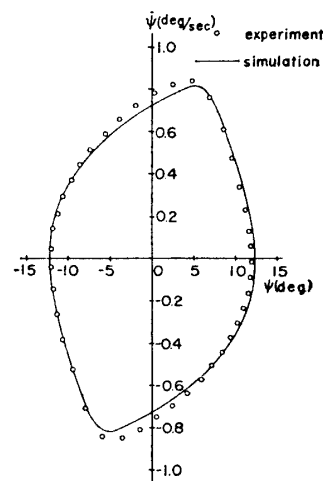


Fig. 11 $\dot{\psi} \sim \psi$ 位相面でのシミュレーションと実船試験との比較 (青雲丸): 10°~2° 変形 Z 試験

て本解析法に負わせるのは酷で、むしろ実際の船の操縦特性を(2)式の数学モデルで近似しようとするところにも無理があるのではないと思われる。

4 結 論

以上、本論文では(1)式または(2)式に示した数学モデルで操縦運動を近似したときの、諸定数 T_1 , T_2 , T_3 , K の実際的決定法を検討した。この方法を実船で得られた試験結果に適用した事例は、まだわずかに一例のみにしかすぎないが、一応妥当な値を与えていることと、シミュレーター実験による本方法による解析法の検証によれば、本方法が十分有効であるといえる。しかしながら、従来の Bech の方法と比較してみても特に優れた方法であるとは未だ結論できないようであるが、位相面上でのリミットサイクルの囲む面積を利用するという点で、 $\dot{\psi} \sim \psi$ 位相面上の軌道の微係数を使うという Bech の方法よりは、精度向上が期待できるのではないだろうか。なお、この点に関しては今後とも数多くの事例について検討を続けていく必要があると思われる。

終りに臨み、日頃ご指導いただいている元良誠三教授に対し厚くお礼申し上げる。また本論文の一部は小島武司氏の卒業論文として行われ、また実船試験の解析は大学院生周正会氏に負うところが大きい。両氏には心から感謝する次第である。また実船試験の結果は日本造船研究協会第2基準研究部会の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 野本謙作 他：船の操縦性について(1)，造船協会論文集第99号(1956)。
- 2) 烏野慶一：実船周波数応答特性の測定—実船における平行移動操舵試験—，日本造船学会論文集第128号(1970)。
- 3) M. Bech and L. Wagner Smitt: Analogue Simulation of Ship Manoeuvres based on full-scale trials or free-sailing model tests, Hydro-og Aerodynamisk Laboratorium Rep. No. Hy-14 (1969)。
- 4) 野本謙作：操縦運動解析における位相面軌跡法の一例，第23回試験水槽委員会第2部会資料(1970)。
- 5) 小瀬邦治：非線型性を考慮した船の操縦運動の取扱い法，第30回試験水槽委員会第2部会資料(1972)。
- 6) 藤野正隆，元良誠三：変形Z試験とその一応用について，日本造船学会論文集第128号(1970)。

付録 アナログシミュレーターについて

指令舵角と真の舵角との間の時間遅れの関係を再現するのに，Fig. A1 に示した非線形要素を用いた。すなわち， δ を真の舵角， δ' を指令舵角とすれば，

$$\frac{d\delta}{dt} = k \operatorname{sgn}(\delta' - \delta) \quad (\text{A} \cdot 1)$$

であり， k は操舵速度で一定である。この結果，Z試験ないしは変形Z試験における舵角のタイムヒストリーは台形状になる。

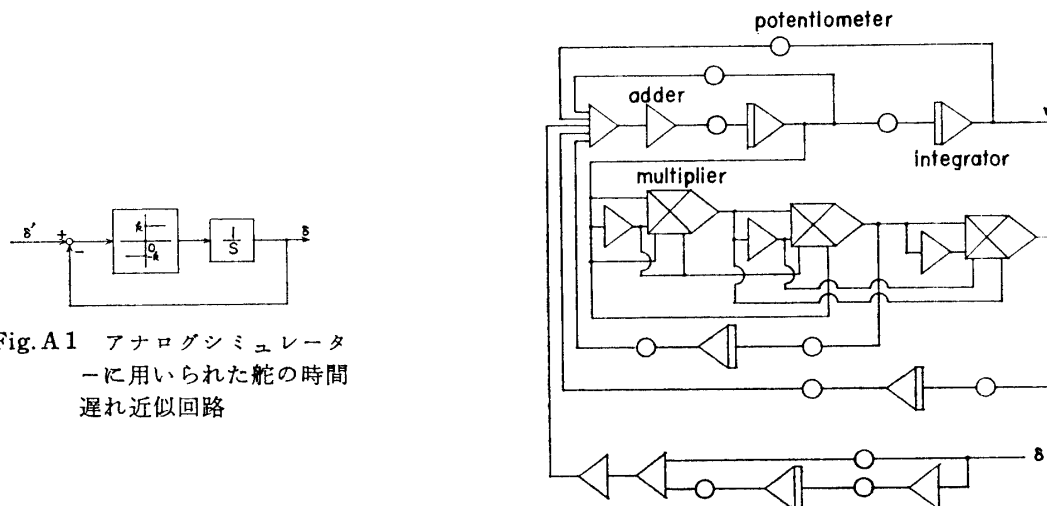


Fig. A1 アナログシミュレーターに用いられた舵の時間遅れ近似回路

Fig. A2 非線形定常旋回特性を加味した操縦モデルのシミュレーション

一方，真の舵角 δ を駆動源とする操縦モデルを Fig. A2 に示した。ただし，ここでは(2)式のままではなく，(2)式を時間について一度積分した形でシミュレートされている。なおシミュレーター上での変形Z試験における指令舵角の切返しは，方位角の記録を自動平衡型記録器上に描かせておいて，これを人間が見ながら手動にて行っている。