(昭和 48 年 11 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一方法 (続報)

正員 藤 野 正 隆*

An Analyzing Method of Manoeuvrability with the Phase Portrait
(continued report)

by Masataka Fujino, *Member*

Summary

In the previous report, the author introduced a new method to determine the manoeuvring characteristics of ships by means of some kinds of the phase portraits. However, it cannot be said that the proposed method is absolutely perfect. Because it is very tedious for the trajectory of manoeuvring motion to reach the limit cycle even in case of stable ships, and accordingly in case of unstable ships it often becomes impossible to continue the modified zigzag manoeuvre up to the limit cycle, so that the proposed method becomes invalid.

Hence, in this report, the author modifies the previous method so that it may become applicable for an arbitrary section of the trajectory on the phase portrait. The validity of this modified method is proved by simulation studies as well as by good agreement between the trajectories measured on board and those of the model identified by this method. If this modified method is used, it becomes unnecessary to carry out the two kinds of the modified zigzag tests to determine the manoeuvring characteristics.

1 緒 言

筆者は前報において、非線形性を加味した 2 次系操縦モデル (たとえば前報 (2) 式で記述されるもの) 中の操縦性指数 T_1, T_2, T_3 を、位相面上でのリミットサイクルの囲む面積から決定する方法を提案し、その有効であることを示した¹⁾。しかし実際に適用する場合には、その方法は必ずしも容易であるとはいえない。それはまず第 1 に、変形 Z 試験ないしは Z 試験の手順を踏んで操舵を繰返して、リミットサイクルに到達するには針路安定な船でもかなりの時間を要するからである (厳密には無限に長い時間がかかる)。いわんや針路不安定な船ではリミットサイクルに到達する以前に、舵角を反転しても船の方位は反転せず、試験を続行することが不可能になるといったことがしばしば起るために、前報で述べた方法はそのままでは適用できないことが多い。第 2 に、十分時間が経過して、ほぼ運動がリミットサイクルに入ったと見做せる場合でも、種々の原因により運動の位相面上の軌跡は完全に閉じる閉曲線すなわちリミットサイクルを形成せず喰違いを生ずることが多い。この場合の対策としては、数サイクルの平均的な閉曲線を描くことによって閉じたリミットサイクルに代用させるということが可能だが、そのための時間の延長は冗長の感をまぬがれない。さらに第 3 には、目的の $T_1 T_2 / K, (T_1 + T_2) / K, T_3$ を決定するには、最低限 2 種類の変形 Z 試験を実行せねばならないし、特にそのときに用いる舵角の大きさ δ^* と切返し方位角 ψ^* の組合せの選択には、精度よい推定をするために十分注意を払わねばならなかった。

そこで本続報では、このような前報での欠点を補うために、リミットサイクルだけではなく、それ以前の位相面上の軌跡から、所期の操縦性解析が行なえる方法を検討しようとするものである。このようなことが可能であれば上述の 3 つの欠点は全部補えるわけである。実は、前報のような方法で各種位相面上での面積を (但し今度ではリミットサイクルの囲む面積とは限らない) を用いれば、原理的には前報と全く同様にして操縦性解析が行なえることは明らかであるが、ここではさらにシミュレーション実験や実際の位相面軌跡に適用して、その有効で

* 東京大学工学部船舶工学科

あることの検証をしようとするものである。まず最初に前報と同様、定常旋回特性 $\delta=H(\dot{\psi})/K$ が既知の場合について述べる。次に定常旋回特性が良く用いられている、 $\dot{\psi}$ についての奇数次の多項式で記述されるような操縦モデルを利用するときには、そのような定常旋回特性が未知の場合でも、本方法を適用して $T_1 T_2/K$, $(T_1+T_2)/K$, T_3 を求めうることを示す。

2 位相面軌跡による操縦性解析

操縦運動は前報と同様、非線形定常旋回特性を考慮に入れた (1) 式で記述されるものとする。

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

リミットサイクルを利用して未知定数 T_1 , T_2 , T_3 を決めるために前報では、(1) 式に $\ddot{\psi}$ または $\dot{\psi}$ を両辺に掛けてリミットサイクルを一周する間、時間について積分したが、今度は全く任意の時間の間 $t_1 \rightarrow t_2$ まで積分する。まず両辺に $\dot{\psi}$ を乗じて積分を行なえば

$$T_1 T_2 \int_{t_1}^{t_2} \dot{\psi} \ddot{\psi} dt + (T_1 + T_2) \int_{t_1}^{t_2} \dot{\psi} \dot{\psi} dt + \int_{t_1}^{t_2} H(\psi) \dot{\psi} dt = K \int_{t_1}^{t_2} \dot{\psi} \delta dt + K T_3 \int_{t_1}^{t_2} \dot{\psi} \dot{\delta} dt \quad (2)$$

となる。左右両辺の積分の各項は

$$\left. \begin{aligned} \int_{t_1}^{t_2} \dot{\psi} \ddot{\psi} dt &= \int_{t_1}^{t_2} \dot{\psi} d\dot{\psi} = \int_{t_1}^{t_2} \left\{ \frac{1}{2} \frac{d(\dot{\psi}^2)}{dt} - \frac{dA}{dt} \right\} dt = \frac{1}{2} [\dot{\psi}^2] - \int_{t_1}^{t_2} dA \\ \int_{t_1}^{t_2} \dot{\psi} \dot{\psi} dt &= \int_{t_1}^{t_2} \dot{\psi} d\psi = \frac{1}{2} [\psi^2] \\ \int_{t_1}^{t_2} H(\psi) \dot{\psi} dt &= \int_{t_1}^{t_2} H(\psi) d\psi \\ \int_{t_1}^{t_2} \dot{\psi} \delta dt &= \int_{t_1}^{t_2} \delta d\psi \\ \int_{t_1}^{t_2} \dot{\psi} \dot{\delta} dt &= \int_{t_1}^{t_2} \dot{\psi} d\delta \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

となる。ここで第1式の dA は、Fig.1 のような $\dot{\psi} \sim \psi$ 位相面上で、状態点 $(\dot{\psi}, \psi)$ が $(\dot{\psi} + d\dot{\psi}, \psi + d\psi)$ まで移動するとき、状態点と原点を結ぶ動径が走査する面積とする。このときの面積の増加率 dA/dt は

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{2} (\dot{\psi}^3 - \dot{\psi} \ddot{\psi}) \quad (4)$$

で与えられるので、次の (5) 式を考慮すれば (3) の第1式を得る。

$$\frac{d(\dot{\psi} \ddot{\psi})}{dt} = \dot{\psi}^3 + \dot{\psi} \ddot{\psi} \quad (5)$$

Fig.1 $\dot{\psi} \sim \psi$ 位相面における また (3) 式中の括弧 [] は、括弧内の量の t_2 における値と t_1 における値の差を意味するものとする。しからば、(2) 式は

$$-\frac{T_1 T_2}{K} \left\{ \frac{1}{2} [\dot{\psi}^2] - \int_{t_1}^{t_2} dA \right\} + \frac{T_1 + T_2}{K} \left[\frac{1}{2} \psi^2 \right] - T_3 \int_{t_1}^{t_2} \dot{\psi} d\delta = \int_{t_1}^{t_2} \left\{ \delta - \frac{H(\psi)}{K} \right\} d\psi \quad (6)$$

となり、定常旋回特性 $\delta=H(\dot{\psi})/K$ が既知であれば前報で考えたと同様の各種の位相面を用いて (3) 式中の諸量を求めることができるので、(6) 式は未知定数 $T_1 T_2/K$, $(T_1+T_2)/K$, T_3 を決定する一次方程式となる。もちろん t_1, t_2 をリミットサイクル上の同一の点に対応する時間とすれば

$$\left. \begin{aligned} \int_{t_1}^{t_2} \dot{\psi} d\dot{\psi} &= - \oint dA = -D_2 \\ \int_{t_1}^{t_2} \dot{\psi} d\psi &= 0 \\ \frac{1}{K} \int_{t_1}^{t_2} H(\psi) d\psi &= \frac{1}{K} \oint H(\psi) d\psi = D_5 \\ \int_{t_1}^{t_2} \delta d\psi &= \oint \delta d\psi = D_3 \\ \int_{t_1}^{t_2} \dot{\psi} d\delta &= \oint \dot{\psi} d\delta = -D_4 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

となり、そのときの (6) 式は前報の (9) 式と一致することは当然である。

次に (1) 式の両辺に $\ddot{\psi}$ を乗じて時間に関して t_1 から t_2 まで積分すれば、

$$T_1 T_2 \int_{t_1}^{t_2} \ddot{\psi} \dot{\psi} dt + (T_1 + T_2) \int_{t_1}^{t_2} \ddot{\psi}^2 dt + \int_{t_1}^{t_2} H(\dot{\psi}) \ddot{\psi} dt = K \int_{t_1}^{t_2} \delta \ddot{\psi} dt + K T_3 \int_{t_1}^{t_2} \delta \dot{\psi} dt \quad (8)$$

となる。ここで左右両辺の積分の各項は

$$\left. \begin{aligned} \int_{t_1}^{t_2} \ddot{\psi} \dot{\psi} dt &= \int_{t_1}^{t_2} \ddot{\psi} d\dot{\psi} = \frac{1}{2} [\dot{\psi}^2] \\ \int_{t_1}^{t_2} \ddot{\psi}^2 dt &= \int_{t_1}^{t_2} \ddot{\psi} d\dot{\psi} = \int_{t_1}^{t_2} \left\{ \frac{1}{2} \frac{d(\dot{\psi} \ddot{\psi})}{dt} + \frac{dA}{dt} \right\} dt = \frac{1}{2} [\dot{\psi} \ddot{\psi}] + \int_{t_1}^{t_2} dA \\ \int_{t_1}^{t_2} H(\dot{\psi}) \ddot{\psi} dt &= \int_{t_1}^{t_2} H(\dot{\psi}) d\dot{\psi} \\ \int_{t_1}^{t_2} \delta \ddot{\psi} dt &= \int_{t_1}^{t_2} \delta d\dot{\psi} \\ \int_{t_1}^{t_2} \delta \dot{\psi} dt &= \int_{t_1}^{t_2} \delta d\dot{\psi} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

であるので、(8) 式は未知定数 $T_1 T_2/K$, $(T_1 + T_2)K$, T_3 を決定する一次方程式 (10) 式となる。

$$\frac{T_1 T_2}{K} \left[\frac{1}{2} \dot{\psi}^2 \right] + \frac{T_1 + T_2}{K} \left\{ \frac{1}{2} [\dot{\psi} \ddot{\psi}] + \int_{t_1}^{t_2} dA \right\} - T_3 \int_{t_1}^{t_2} \delta d\dot{\psi} = \int_{t_1}^{t_2} \left\{ \delta - \frac{H(\dot{\psi})}{K} \right\} d\dot{\psi} \quad (10)$$

もし t_1, t_2 をリミットサイクル上の同一点に対応する時刻とすれば

$$\left. \begin{aligned} \int_{t_1}^{t_2} \ddot{\psi} d\dot{\psi} &= 0 \\ \int_{t_1}^{t_2} \ddot{\psi} d\dot{\psi} &= \oint dA = D_2 \\ \int_{t_1}^{t_2} H(\dot{\psi}) d\dot{\psi} &= 0 \\ \int_{t_1}^{t_2} \delta d\dot{\psi} &= \oint \delta d\dot{\psi} = D_4 \\ \int_{t_1}^{t_2} \delta d\dot{\psi} &= \oint \delta d\dot{\psi} = D_6 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

となり、この場合の (10) 式は前報 (12) 式と一致する。

以上の (6) 式ないしは (10) 式を位相面上の任意の時刻 t_1, t_2 に対して適用すれば任意個の (6) 式ないしは (10) 式を得ることができるので、それらを代数的に解けば、定数 $T_1 T_2/K$, $(T_1 + T_2)/K$, T_3 を決めることができる。

さて以上は、定常旋回特性 $\delta = H(\dot{\psi})/K$ が既知であることを仮定していたが (たとえばスパイラル試験や逆スパイラル試験などで)、良く利用されているように定常旋回特性を旋回角速度 $\dot{\psi}$ の奇数べきの多項式で記述した操縦モデルを前提として、船の操縦運動を考えるのであれば、舵角～定常旋回角速度の特性が必ずしも既知でなくとも、同様の解析を行なうことができる。たとえば、 $\dot{\psi}$ の 3 次の項の非線形性とあて舵 δ_r を考慮に入れた定常旋回特性

$$\frac{H(\dot{\psi})}{K} = \delta_r + p\dot{\psi} + q\dot{\psi}^3 \quad (12)$$

について考えてみる。この場合

$$\int_{t_1}^{t_2} \frac{H(\dot{\psi})}{K} d\dot{\psi} = \delta_r [\dot{\psi}] + \frac{p}{2} [\dot{\psi}^2] + \frac{q}{4} [\dot{\psi}^4] \quad (13)$$

であるから、Fig.2 に示したように $\dot{\psi}(t_1) = \dot{\psi}(t_2)$ のとき t_1 から t_2 までの積分では

$$\int_{t_1}^{t_2} \frac{H(\dot{\psi})}{K} d\dot{\psi} = 0 \quad (14)$$

となり、(10) 式は

$$\begin{aligned} \frac{T_1 T_2}{K} \left[\frac{1}{2} \dot{\psi}^2 \right] + \frac{T_1 + T_2}{K} \left\{ \frac{1}{2} [\dot{\psi} \ddot{\psi}] + \int_{t_1}^{t_2} dA \right\} \\ - T_3 \int_{t_1}^{t_2} \delta d\dot{\psi} = \int_{t_1}^{t_2} \delta d\dot{\psi} \end{aligned} \quad (15)$$

となり、定常旋回特性を知らずとも幾つかの $\dot{\psi}(t_1) = \dot{\psi}(t_2)$

Fig.2

に相当する (15) 式より, $T_1 T_2 / K$, $(T_1 + T_2) / K$, T_3 を決めることができる。

さらに一般的には, $\dot{\psi}(t_1) \neq \dot{\psi}(t_2)$ なる任意の t_1 から t_2 の積分に対して (15) 式は

$$\begin{aligned} & \frac{T_1 T_2}{K} \left[\frac{1}{2} \ddot{\psi}^2 \right] + \frac{T_1 + T_2}{K} \left\{ \frac{1}{2} [\dot{\psi} \ddot{\psi}] + \int_{t_1}^{t_2} dA \right\} + \delta_r [\dot{\psi}] + p \left[\frac{1}{2} \dot{\psi}^2 \right] + q \left[\frac{1}{4} \dot{\psi}^4 \right] \\ & = \int_{t_1}^{t_2} \delta d\dot{\psi} + T_3 \int_{t_1}^{t_2} \delta \dot{\psi} \end{aligned} \quad (16)$$

となる。これを未知定数 $T_1 T_2 / K$, $(T_1 + T_2) / K$, δ_r , p , q , T_3 に関する一次方程式と見做せば, 原理的には位相面解析でも定常旋回特性 $H(\dot{\psi}) / K = \delta_r + p\dot{\psi} + q\dot{\psi}^3$ を決定できるが, 本来このような特性を求めることを目的としたスパイラル試験や逆スパイラル試験に較べると, 位相面解析から求められる特性の信頼性には, あまり多くを期待できないと思われる。

3 シミュレーション実験による検証

前報ではその方法の有効性を検証するために, アナログ・シミュレーションを行なったが, ここではデジタル・シミュレーションによって同様の検証を行なう。想定したモデルの諸定数は前報のものと同一で, Table 1 に示した。本解析に使った位相面は, デジタル・シミュレーターによって行なった $10^\circ \sim 2^\circ$ の変形 Z 試験 (舵角 10° , 切返し方位角 2°) の結果をあらためて図化したものである。なおシミュレーター上での数値解は, ルンゲ・クッタ・ギル法にて時間間隔 0.5 秒で (1) 式を解いたものである。

Table 1 位相面解析のシミュレーション実験による検証

	モデル の 設定値	定常旋回特性は既知の場合									定常旋回特性 は未知の場合	
		T_1, T_2 のみを求める ($\delta=\delta_0=\text{const}, \dot{\delta}=0$)						T_1, T_2, T_3 を求める			T_1, T_2, T_3 のみを求める	非線形特性をも推定する
		①—②	③—④	③—⑤	⑥—⑦	(10) 式のみ	(6) 式のみ	(6) 式のみ	(10) 式のみ	(6)(10) 式併用		
T_1 (sec)	−250.0	−253.9	−253.5	−260.8	−259.9	−258.9	−260.5	−264.4	−260.8	−264.4	−262.0	−278.6
T_2 (sec)	10.0	9.658	9.740	9.914	10.12	9.85	9.97	10.27	10.23	10.28	10.27	10.03
T_3 (sec)	25.0							27.05	26.50	27.08	26.59	26.41
K (sec ^{−1})	−0.2											−0.2140
p (sec)	−5.0											−4.674
q (sec ³ /deg ²)	31.25											26.34

a) まず定常旋回特性 $\delta = H(\dot{\psi}) / K$ は既知として, 操縦性指数 T_1, T_2, T_3 を決定する。この場合 (6) 式のみ, あるいは (10) 式のみを用いても決定することは可能であるし, もちろん両式を併用しても良い。指数 T_1 ,

Fig. 3

T_2 だけでよいのであるならば, 位相面軌道中, 舵角を一定値 δ_0 に保っている間の軌道を用いてかなり精度良く, それら 2 定数を定めることができる。たとえば Fig. 3 に示した $\dot{\psi} \sim \psi$ 位相面上の ①から②までの軌道を利用して (6) 式と (10) 式を併用すれば良い。そのようにして求めた結果が Table 1 に示した①—②の欄とか③—④の欄の結果である。また, そのように一定舵角を保ったままの 4 個所の軌道に対する (6) 式のみ, または (10) 式のみを複数個用いて同様に解析して求めた結果も同表に示した。その結果によると, このような方法で T_1, T_2 はあまりばらつかずに決定できることがわかったので, 後に実船試験結果に本方法を適用して T_1, T_2, T_3 を求める際にも, $\delta = \delta_0 = \text{const}$, $\dot{\delta} = 0$ となっている軌道での (6) 式また (10) 式を利用することにした。

さて T_3 をも決定するには $\dot{\delta} \neq 0$ である軌道部分を含んだ位相面解析が必要である。いま Fig. 3 に示した位相面上で状

態点が①→②, ①→③, ①→④, ①→⑤, ①→⑧の間, それぞれ変化するときの各種位相面上の面積より, (6) 式のみ, (10) 式のみ, さらに (6) 式と (10) 式を併用した場合の解析結果を同じく Table 1 に示した。3 者の結果は実用上ほとんど差がない。しかし後に述べる実際例に適用した場合には, (10) 式のみではとくに $T_1 T_2 / K$ の値の精度が著しく悪くなる。それは実測値では $[(1/2)\ddot{\psi}^2]$ の値の精度が悪いのが主な原因のようであるので, 実際に応用する際には, やはり (6) 式と (10) 式を併用するのが好ましいようである。

一方, このようにして決定された定数 T_1, T_2, T_3 の設定値に対する精度を比較すると, T_3 の精度が他の 2 定数に比してあまり良くない。その原因の 1 つは $\int_{t_1}^{t_2} \delta d\dot{\psi}$ や $\int_{t_1}^{t_2} \psi d\delta$ の値に幾分精度が落ちる傾向があるためである。以上のようにして決定された諸係数をもつ操縦モデルについて, $10^\circ \sim 2^\circ$ 変形 Z 試験を行ない原モデルのそれと比較した場合の両者の差異はとくには示さなかったが, その差は後に示した別の同定の場合における原モデルとの差 (Fig. 4 参照) 程度であった。両者は非常に良く一致しているとはいえないが, 実用上その程度の推定がなされれば十分利用価値があると思われる。

b) 次に同じシミュレーションの結果を, 定常旋回特性が未知であるとして, (15) 式を用いて解析を行なってみた。一例として Fig. 3 に示した位相面上でいうと, ①→④, ④→⑧, ⑧→⑩, ⑩→⑬, ⑬→⑭の間の軌道を用いた結果 (未知数の数より方程式の数を多くして, 誤差の自乗が最小になるように連立一次方程式の根を求め

Fig. 4 原モデルと同定モデルとの $10^\circ \sim 2^\circ$ 変形 Z 試験シミュレーションの比較 (非線形定常旋回特性をも決定した例)

た), $T_1 = -262.0$ 秒, $T_2 = 10.27$ 秒, $T_3 = 26.59$ 秒を得た。また上記以外の区間の軌道を利用しても, ほぼ同様の結果を得ている。

さらに (16) 式を用いれば, 時定数 T_1, T_2, T_3 のほかに定常旋回特性をも推定できるので, 同じシミュレーション結果に適用してみた。ただし解析の精度を上げるために, (i) $\delta = \delta_0 = \text{const}$, $\dot{\delta} = 0$ の軌道区間内の a) で用いたデータ, (ii) 最も一般的な, $\dot{\delta} \neq 0$ の軌道区間を含む a) で用いたデータ, (iii) $H(\dot{\psi})/K$ が未知でも時定数 T_1, T_2, T_3 が推定できる, $\dot{\psi}(t_1) = \dot{\psi}(t_2)$ な $t_1 \sim t_2$ 区間内の上述のデータなど多数のデータを用いて最小2乗法によって解析した。その結果も Table 1 に示した。もちろん良い推定値とはいえないが, 設定値にかなり近い値を与えている。このようにして得た値の妥当性を検証するために, 求められた諸定数を用いて $10^\circ \sim 2^\circ$ 変形 Z 試験をシミュレートした結果を, $\psi \sim \dot{\psi}$ 位相面, $\dot{\psi} \sim \ddot{\psi}$ 位相面およびタイムヒストリー上で原モデルでの $10^\circ \sim 2^\circ$ 変形 Z 試験と比較したのが Fig. 4 である。同図によれば, 同定されたモデルの軌道と原モデルの軌道の差は時間が経過するにつれ顕著になっているが, この差は船の運動を駆動する舵角のタイムヒストリーが異なることにもよっているので, もし舵角のタイムヒストリーとして原モデルのものを使えば幾分かは改善されるはずである。しかし, いずれにせよ, この程度の誤差であれば実用上は良く同定されたといっても良いのではないだろうか。

以上でのシミュレーション実験による検討の結果, 本論文で述べた解析法が有効であることが示されたので,

Fig. 5 「青雲丸」 $10^\circ \sim 2^\circ$ 変形 Z 試験に対する適用例

これを実船試験結果にあてはめてみた。用いた事例は前報の解析法の検証にも使用した航海訓練船「青雲丸」の $10^\circ \sim 2^\circ$ 変形 Z 試験の結果である。本船の定常旋回特性は逆スパイラル試験より既知であって, $\delta = H(\dot{\psi})/K = -0.4 - 1.928 \dot{\psi} + 19.13 \dot{\psi}^3 - 7.489 \dot{\psi}^5$ (δ : deg., $\dot{\psi}$: deg/sec) とした。この表示式は前報で用いた $\delta = -2.5 \dot{\psi} + 20.18 \dot{\psi}^3 - 7.986 \dot{\psi}^5$ と異なるが, 定常旋回特性を図示した $\delta \sim \dot{\psi}$ 図上では両者の優劣はどちらともいいがたい。しかし $\dot{\psi} \sim \ddot{\psi}$ 位相面上での軌道の形状に対しては, この差は特に第 1 象限, 第 3 象限の軌道の形にかなり影響を与える。実は, この面からも定常旋回特性を決めるのにも, ただ逆スパイラル試験に依るだけでなく, 位相面上の軌道を利用することも十分考慮の余地があると思われる (最近, 野本・小瀬は高速線返し演算のアナログ・シミュレーターによって角速度切返し変形 Z 試験のリミットサイクルの形状をより良く近似するように, 未知パラメータを試行錯誤で, 選定するという遣方で, 操縦モデル中の諸定数を決めるという方法を発表している²⁾)。

両式の差は, (6) 式では $\int_{t_1}^{t_2} \{\delta - H(\dot{\psi})/K\} d\psi$ の値に影響し (10) 式では $\int_{t_1}^{t_2} \{\delta - H(\dot{\psi})/K\} d\dot{\psi}$ に影響するが, 括弧内第 2 項の積分値は, それぞれ第 1 項の積分 $\int_{t_1}^{t_2} \delta d\psi$ および $\int_{t_1}^{t_2} \delta d\dot{\psi}$ にくらべて, はるかに小さい量であるので, 定常旋回特性として両式のいずれを用いても, 得られる $T_1 T_2 / K$, $(T_1 + T_2) / K$, T_3 の値にはそれほど大きい差はない。したがって, 一度このようにして決められた $T_1 T_2 / K$, $(T_1 + T_2) / K$, T_3 を用いてシミュレーションを実行し, 位相面上で実測された軌道とシミュレーションによる軌道とを比較して, 定常旋回特性を修正し, その特性を用いて再度本解析法を適用して $T_1 T_2 / K$, $(T_1 + T_2) / K$, T_3 を改善するという方法によれば, より同定された諸定数の精度を上げられそうである。こ

Fig.6 「青雲丸」 $10^{\circ}\sim 8^{\circ}$ 変形Z試験のリミットサイクルと同定されたモデルでの $10^{\circ}\sim 8^{\circ}$ 変形Z試験リミットサイクルとの比較

のような考え方を徹底させたのが文献 2) の考え方であると思われる。

さて「青雲丸」 $10^{\circ}\sim 2^{\circ}$ 変形Z試験の結果に (6) 式と (10) 式を適用して T_1T_2/K , $(T_1+T_2)/K$, T_3 を求めた結果から, K を上述のように既知として時定数を求めると, $T_1=-175.8$ 秒, $T_2=4.658$ 秒, $T_3=9.161$ 秒であった。このようにして得られた諸定数をもつ操縦モデルで $10^{\circ}\sim 2^{\circ}$ 変形Z試験 (前報でも述べたが本来 $10^{\circ}\sim 2^{\circ}$ 変形Z試験として行なわれたが, その結果を $\psi\sim\delta$ 位相面上で検討してみると, $10^{\circ}\sim 4^{\circ}$ 変形Z試験と見る方が妥当であったので, シミュレーションは $10^{\circ}\sim 4^{\circ}$ 変形Z試験として行なった) を行なった結果をリミットサイクルと比較したのが, Fig.5 である。前報における $10^{\circ}\sim 2^{\circ}$ 変形Z試験のシミュレーション (前報 Fig.10~11) は必ずしも良好でなかったが, 本解析の結果はかなり改善されていることがわかる。

また, この $10^{\circ}\sim 2^{\circ}$ 変形Z試験の解析の結果得られた操縦モデルを用いて, 他の変形Z試験 ($10^{\circ}\sim 8^{\circ}$) をシミュレーションしたときのリミットサイクルを, 実測のリミットサイクルと比較したのが Fig.6 である。細く見れば差はあるが, シミュレーションの結果は良く実在の船の操縦特性を捉えているといえる。このことは本解析法の妥当性と同時に, (1) 式のような非線形定常旋回特性を含んだ操縦モデルで, 良く船の操縦運動を表現できるということを暗示しているといえる。

さらに試みに (15) 式を用いて, 定常旋回特性が未知であると仮定して解析してみたが, 明らかに不合理な結果を得てしまったので, (15) 式による解析の実例を示すことはできなかった。(15) 式の第 1 項 T_1T_2/K の係数 $1/2[\ddot{\psi}^2]$ は他の係数に比してはるかに値が小さいと, 実測では $\ddot{\psi}$ を直接計測することはできず, $\dot{\psi}$ の記録から数値微分によって求めているために, $\dot{\psi}$ の記録に含まれる誤差やノイズが大きく影響して, $\ddot{\psi}$ の値の精度をかなり悪くしている。そのために T_1T_2/K の値が負になるとか, 使用する位相面軌道の違いによってその値が大きく変動するということになる。したがって (15) 式による解析を行なうには, まず $\dot{\psi}$ の値が精度よく計測されていることが前提条件として必要である。 $\dot{\psi}$ に含まれる有害なノイズ成分を除くには, 文献 2) に紹介されている数値フィルターなどを使用するのも一法であろう。

4 結 言

本論文で述べた, リミットサイクルに限らず位相面軌道上の任意の 2 点間の面積を用いた解析法を用いれば, 実用上十分な精度で操縦性指数を決定できることがわかった。とくに本報で述べた方法は前報と異なり, 2 種類の変形Z試験を行なう必要もなく, また必ずしも運動がリミットサイクルに到達するまで試験を続行せずとも, 未知定数を求めるのに十分な数の (6) 式または (10) 式が得られ, たとえばそれらを最小 2 乗法で解くなどすれば, かなり精度良く決定できることがわかった。その意味では強いて, いわゆるZ試験 (変形Z試験を含めて) である必要もないわけで, 位相面解析さえできるものであれば, どのような操舵による運動を解析しても良いわけである。

また原理的には定常旋回特性が未知の場合でも, T_1T_2/K , $(T_1+T_2)/K$, T_3 を求めうることを示したが, 実例

でその有効性を検証することはできなかった。しかし水槽実験などのように、ある程度理想的な良い計測を行なえる場合には、このような方法を用いてかなり良い操縦性解析が行なえることが期待できる。

最後に日頃ご指導いただいている元良誠三教授に心からの感謝の意を表したいと思います。なおデジタル・シミュレーションには東京大学大型計算機センターの HITAC 8700/8800 システムを利用したことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 藤野正隆：位相面を用いた操縦性解析の一方法，日本造船学会論文集第 132 号（1972），p. 203.
 - 2) 野本謙作，小瀬邦治：船舶操縦運動解析システムの一方法，第 35 回試験水槽委員会第 2 部会資料(1973).
-