(昭和 48 年 11 月日本造船学会秋季講演会において講演)

Z 試 験 の 新 し い 解 析 法

正員 野 本 謙 作* 正員 小 瀬 邦 治**
 正員 芳 村 康 男***

A New Procedure of Analysing Zig-zag Test

by Kensaku Nomoto, *Member* Kuniji Kose, *Member*
 Yasuo Yoshimura, *Member*

Summary

There are a number of procedures of analysing the zig-zag test to obtain the steering quality parameters of a relevant ship, ranging from the simple method with the first-order (K and T) equation to the phase-plane analysis taking the higher-order time constants and non-linearity into account.

Growing importance of closed-loop studies of steering control and increasing number of less course-stable ships (e.g. very large tankers) call for the latter type of comprehensive mathematical model of steering response. However, it is not an easy task, unlike the simple K-T analysis, to define all the parameters involved in such mathematical model from a zig-zag test record. The more numbers of parameters to be defined, the harder to keep the numerical accuracy and to assure the feasibility of such analysis.

The present paper relates to a new approach to this task which proved promising. That is,

(1) to adopt numerical filtering to minimize the noise involved in the yaw-rate record and at the same time to obtain a reasonably noise-free yaw-acceleration; the result gives us a measured yaw-acceleration to yaw-rate phase-plane trajectory of a relevant zig-zag test.

(2) to adjust the parameters of the mathematical model built in an analogue computer by turning a number of knobs, keeping one eye to the phase-plane trajectory displayed on a cathode-ray oscilloscope, so that the displayed trajectory coincide with the measured one.

The mathematical model employed is the rudder-to-yaw response equation with a cubic-type non-linear term, i.e.

$$T_1 T_2 \ddot{\psi} + (T_1 + T_2) \dot{\psi} + \alpha \dot{\psi}^3 = K \delta + K T_3 \delta^3$$

1 緒 論

船の操縦運動の KT 解析は、その簡単明瞭さの故に広く普及し、操縦性に関する船舶設計上の指標として、また、操縦運動の簡潔な数学モデルとして役立っている。

実際、実船や自航模型船の操縦運動の記録から、その船の性能を表現する特性常数—数学モデルの係数—を決める時、この解析の簡単さは大変都合である。すなわち、 K 、 T 二つだけの特性常数を持つ簡単な数学モデルを観測された操舵と運動の記録にあてはめ、これによく合致するように未定常数 K 、 T を決めればよい。この手順は Z 試験の KT 解析法としてよく知られている。

しかし、 KT 解析はその簡単さの故に限界がある。まず、一次系近似の KT モデルは操舵が頻繁でないこと

* 大阪大学工学部

** 広島大学工学部

*** 広島大学大学院工学研究科

を前提にしているから、操舵管制機構と船とで構成される船舶の閉ループ制御系の運動の取扱いには適当でない。この場合には、フィードバックによって絶えず操舵が繰返されるから、本来の操縦運動方程式

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

に立ち帰る必要がある¹⁾。

さらに、最近の大型タンカーの如く、進路安定のよくない船においては、運動の強さとともに特性常数 K, T が大幅に変化する。 $5^\circ Z$ の T が -200 秒、 $10^\circ Z$ のそれが 100 秒というような例が屢々存在するが、このような場合には KT モデルそのものが無意味に近いと言えるかも知れない。以上の二点を考えると拡張された非線型モデル

$$T_1 T_2 \ddot{\psi} + (T_1 + T_2) \dot{\psi} + \dot{\psi} + \alpha \dot{\psi}^3 = K\delta + K T_3 \dot{\delta} \quad (2)$$

は大きい改善と言ってよからう^{2,3)}。しかし、この新しい数学モデル (2) を実船や自航模型船の運動記録にあてはめて、その特性常数を決めることは KT 解析のように簡単ではない。そのあてはめを時間領域 (time history の形) で行うにせよ、位相面軌跡の形で行うにせよ⁴⁾、決定すべき特性常数の個数の増加は解析の困難を招かざるを得ない。これは、連立方程式の解における“桁落ち”また、iteration 法における収束の悪さとなって現われ、操縦運動の記録や解析の過程に含まれる僅かの誤差が決定された常数に大差を与える結果となる。

この点に関する解決策の一つは、全ての特性常数を Z 試験のみから決めることを断念し、Bech と Wagnar-Smitt⁴⁾ が行ったように、逆スパイラル試験によって効果的に得られる小舵角の定常旋回特性を併用することである。しかし、 Z 試験のみから、その船の操縦性能の全貌を明らかにできれば大層有益である。実船試験の手軽さ、通常水槽における自航模型試験の可能性等、多くの利点が考えられる。

本論文は、この様な背景のもとに、 Z 試験の新しい解析法について述べたものである。このため、まず、観測された旋回角速度の記録に含まれる雑音 (外乱) を除去し、可能な限り正確な角速度、角加速度記録を得るための「数値フィルタ」の適用を論ずる。

続いて、実測の角速度-角加速度の位相面軌跡と、非線型運動方程式 (2) を模擬するアナログ演算回路の演算結果として得られる同様な位相面軌跡とを視覚的に照合しながら、演算回路の係数を調整し、より実測に近い特性常数を決定するという、一種の「アナログ解析法」について論じる。

2 操縦運動方程式の拡張—二階非線型モデルの誘導

緒論で述べたように一次系近似の KT モデルの欠点を改善するためには二つのポイントがある。すなわち、

- (1) 高次の時定数を含み、より頻繁な操舵に対する応答の性質をよく表わすこと
- (2) 操縦運動における非線型 damping の効果を考慮に入れることである

ここに述べる新しい運動方程式は二階線型運動方程式 (1) から出発する。なお、この二階線型モデルは周知の Sway と yaw の線型連成運動方程式と等価であることはよく知られている。

後者の諸係数と (1) 式の常数の間の関係は次の通りである。

$$\left. \begin{aligned} T_1 T_2 &= (L/V)^2 (m' + m_y') (I_z' + I_{zz}') / D \\ T_1 + T_2 &= (L/V) \{ (m' + m_y') N_r' + (I_z' + I_{zz}') Y_{\beta'} \} / D \\ K &= (V/L) (N_{\beta'} Y_{\delta'} + Y_{\beta'} N_{\delta}') / D \\ K T_3 &= (m' + m_y') N_{\delta'} / D \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ただし $D = \{ Y_{\beta'} N_r' - (m' + m_x' - Y_r') N_{\beta'} \}$

針路安定な船では、 $D > 0$ 、不安定な船では $D < 0$ である。直進時に不安定な船もある程度運動が発達すると安定になることを考えると、直進時不安定ないしは弱安定の船—普通に言う進路安定性の悪い船—は一般に D の値が零の近傍になる。換言すれば、 D の第 1 項と第 2 項が際どいバランスを保つ差の形をしていると言ってよい。その結果、運動の強弱によって起る Y_r', N_r' 等の流力係数の僅かの変化も、 D には大きな差となって現われる。(3) 式の分子の項は全て和の形であるから、流力係数の僅かの変化は余り大きな影響を与えない。

しかしこの状況を簡単化すると

- (1) 運動の強弱によって (3) の諸式の分子は不変である。

- (2) " に応じた D の変化は

$$D = D_0 + n \dot{\psi}^2 \quad (4)$$

で表わすことができると考える。 D_0 は $\dot{\psi}=0$ における D , n は常数である。

この仮定は従来から知られている事実, すなわち, 運動の強弱によって K, T の値は大幅に変る際でも K/T の値は殆んど不変であること, 換言すれば, 進路安定性の向上は旋回性の低下と相伴っていることから考えても妥当であろう。操縦運動の非線型性は専ら, 旋回に対する damping の非線型性によるもので, 船の慣性や舵の力には運動の強弱による非線型性はないと考えたことになる。

(4) 式を (3) の諸式に入れ, 運動方程式 (1) を書き換えると

$$T_{10}T_{20}\ddot{\psi} + (T_{10} + T_{20})\dot{\psi} + \alpha\dot{\psi}^3 = K_0\delta + K_0T_{30}\dot{\delta} \quad (2)'$$

となる。ここに, $T_{10}, T_{20}, T_{30}, K_0$, は各々, $\dot{\psi}=0$ (直進) 時の T_1, T_2, T_3, K , である。又, α については

$$\alpha \equiv n/D_0$$

以下, 簡単のために, 今誘導した非線型モデルについては, T_{10} を T_1, T_{20} を $T_2 \dots \dots$ のように書くことにする (緒論の (2) 式)。

定常旋回時においては, $\ddot{\psi}=\dot{\psi}=\dot{\delta}=0$ であるから,

$$\dot{\psi} + \alpha\dot{\psi}^3 = K_0\delta \quad (5)$$

となり, 定常旋回特性を表わす。この三次式は進路安定性に欠ける船の $r'-\delta$ 特性の傾向によく一致している。

3 正確な角速度, 角加速度を得るための数値フィルタ

船の操縦運動方程式を Z 試験から決めるためには, Z 試験中, 操舵によって誘起された旋回角速度, 角加速度を正確に求めなければならない。通常, 船の角速度はレートジャイロ装置を利用すれば直接計測可能である。しかし, この計測値には, 操舵によって誘起された角速度の他に種々の外乱が加わっている。一方, 角加速度を直接計測する実用的手段は今のところない。従って, 試験中, 操舵によって誘起された角速度, 角加速度を求めるには, 計測された角速度から外乱を除去し, さらにその値を微分しなければならない。

外乱を除去する方法として, 操舵による運動と外乱の周波数の相違に着目し, 適当な低域フィルタを利用して両者の分離をはかることは合理的である。しかし, 両者の周波数域は十分に分離しているとは言えないから, 低域フィルタの特性として, 十分に鋭い遮断特性と位相遅れによる波形歪の少ないことが必要になる。一般の物理フィルタでは, 両者は相反する性質を持つから, この目的に利用することは難しい。

ところが物理的には実現困難な理想的なフィルタ特性, 例えば, 位相遅れなしに鋭い遮断特性を持つ低域フィルタも数学的には容易に実現できるから, 実際に物理フィルタを通すかわりに計算によってフィルタを通すことにすればフィルタ設計は大層楽になる。

同様な目的に, 数値フィルタを利用した例として, Clarke, D⁵⁾ は Martin⁶⁾ の数値フィルタを利用している。本論文では, 理想フィルタの考えに基づく数値フィルタを設計し, 試験期間中の角速度, 角加速度の算定に用いたので, その手法と問題点を説明し, 適用例を述べる。

3.1 低域フィルタの設計

理想的な低域フィルタの周波数特性を次式で与える。

$$F(i\omega) = A(\omega)e^{i\phi(\omega)} \quad (6)$$

$$\text{ただし } A(\omega) = 1 \quad |\omega| \leq \omega_c$$

$$= 0 \quad |\omega| > \omega_c$$

$$\phi(\omega) = 0$$

計測した変動量を計算の上でこのようなフィルタを通すわけであるが, その計算は時間領域, 周波数領域のいずれでも可能である。今の場合, 測定量が回頭角速度の時間記録だから, 時間領域の処理が便利である。

フィルタの入力を $x(t)$ とすると, 出力: $y(t)$ はフィルタの Weighting function: $w(t)$ と入力: $x(t)$ の convolution integral の形で得られる。すなわち

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)w(t-\tau)d\tau$$

フィルタの Weighting function はフィルタの周波数応答函数 (6) のフーリエ逆変換として得られるから

$$w(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(i\omega)e^{i\omega t}d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_c}^{\omega_c} e^{i\omega t}d\omega = \frac{\sin \omega_c t}{\pi t} \quad (7)$$

Fig. 3.1 Weighting functions of filters

この weighting function は $1/t$ の減衰特性を持つ。convolution integral には, $w(t)$ の収束がよい方が便利であるから, (7) 式の収束をよくするために次式に示す Lag-window を使うことにする。

$$\begin{aligned} \text{weighting function は} \quad L(t) &= (1 + \cos \pi t/L)/2 & |t| \leq L \\ &= 0 & |t| > L \\ L(t)w(t) &= \sin \omega_c t (1 + \cos \pi t/L)/2 \pi t & |t| \leq L \\ &= 0 & |t| > L \end{aligned}$$

この weighting function をフーリエ変換すると, この場合のフィルタの周波数特性が得られる。window 長を十分に長くすれば, 周波数特性は $F(i\omega)$ に近づき, 短くすれば遮断特性が劣化する。本フィルタの weighting function と window 長が $L_c = 2\pi/\omega_c$, $3L_c$, $10L_c$ の場合の lag-window および遮断特性を Fig. 3.1, 3.2 に示す。

フィルタ設計上, 必要な遮断特性を得るには, その特性に応じた window 長を選ばばよい。この目的の場合には $L_c = 2\pi/\omega_c$ で十分である。注目すべきことは, 通過成分の位相遅れがないことであり, weighting function は $t < 0$ の場合も値を持つ偶関数となる。この性質は原因より前に結果があることを意味し, 因果律に反するから物理フィルタでは実現できず, 理想フィルタと呼ばれる所以である。

3.2 微分フィルタの設計

微分フィルタも同様に設計できる。フィルタの周波数特性を次式で与える。

$$\begin{aligned} DF(i\omega) &= B(\omega)e^{i\Theta(\omega)} \\ \text{ただし } B(\omega) &= \omega \quad |\omega| \leq \omega_c \\ &= 0 \quad |\omega| > \omega_c \\ \Theta(\omega) &= \pi/2 \end{aligned}$$

このフィルタは微分低域フィルタの特性を持つ。この場合の weighting function は

$$dw(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} DF(i\omega)e^{i\omega t} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_c}^{\omega_c} i\omega e^{i\omega t} d\omega = \frac{\omega_c t \cos \omega_c t - \sin \omega_c t}{\pi t^2}$$

lag-window を同様に考えると

$$\begin{aligned} L(t)dw(t) &= \frac{(\omega_c t \cos \omega_c t - \sin \omega_c t)(1 + \cos \pi t/L)}{2\pi t^2} & |t| \leq L \\ &= 0 & |t| > L \end{aligned}$$

window 長の変化に伴う周波数特性を Fig. 3.1, 3.2 に示す。window 長が $L_c = 2\pi/\omega_c$ の微分フィルタの場合, 通過成分の利得が $|\omega|$ より大きくなるので, 使用周波数域の平均の利得が $|\omega|$ の時に一致するように修正係数を乗じた weighting function を使用した。本例では修正係数は 0.97 である。

3.3 数値フィルタの適用例

上述の数値フィルタを用いて, Z 試験中の角速度, 角加速度を得る手順と実施例について述べる。

Fig. 3.2 Frequency response functions of filters

数値フィルタの適用は、時間領域で convolution integral の形になるから、計測した角速度信号をディジタル量に変換し、離散的なデータ処理を考える。A-D 変換はデータ量が多く、かつ低周波のサンプリングノイズの混入を防ぐ観点から、A-D 変換器の使用が望ましい。サンプリング周期は、本解析例では大型タンカで 1~2 秒、高速フェリで 0.5 秒とした。

旋回角速度の計測値を $\dot{\psi}(L\Delta t)$ とし、低域フィルタの出力として得られる平滑化された角速度を $\dot{\psi}_s(L\Delta t)$ 、その微分値を $\ddot{\psi}_s(L\Delta t)$ とすると、 $\dot{\psi}_s, \ddot{\psi}_s$ は次式で計算される。

$$\dot{\psi}_s(L\Delta t) = \Delta t \sum_{n=-N}^N \dot{\psi}((l-n)\Delta t) \times L(n\Delta t) \times w(n\Delta t)$$

$$\ddot{\psi}_s(L\Delta t) = \Delta t \sum_{n=-N}^N \ddot{\psi}_s((l-n)\Delta t) \times L(n\Delta t) \times dw(n\Delta t)$$

この場合の window 長は、長すぎると操舵前後のフィルタ出力に発振を生じるため、 $L_c = 2\pi/\omega_c$ とした。

データ処理上、最も重要な事はフィルタの遮断周波数の選択である。遮断周波数を十分に低く取れば、外乱は完全に消去できるが、操舵前後の船の運動の高周波成分も同時に消去され、運動波形が丸められて後の解析に問題を残す。Fig.3.3 は実船の試験例である。この角速度に本フィルタを適用し、角速度-角加速度の位相面軌跡を求めた例を Fig.3.4 に示す。遮断周波数の変化による外乱の除去の様子がわかる。このように遮断周波数を低く取ると外乱の除去は大変良好であるが、同時に運動波形が丸められてしまう結果となる。

遮断周波数の選択に際して、外乱の除去と運動波形の保存という相反する要求を考慮し、可能な限り高い遮断周波数を高く選ぶ必要がある。運動波形に比較的周波数の高い成分が含まれる操舵前後と其他で遮断周波数を変えるのも一方法である。

Fig. 3.3 Example of zig-zag trial result

Fig.3.4 Phase plane trajectories of Z test through digital filter with various cut-off frequencies

3.4 外乱消去とリミットサイクル型 Z 試験

実船の操縦性試験は外乱の影響下で実施されることが多いから、以上の数値フィルタによっても外乱の十分な消去が難しい場合がある。従って、試験の実施は可能な限り外乱の少ない条件下で行われることが望まれ、特に低周波の外乱の混入を避ける必要がある。

ところで、角速度-角加速度の位相面軌跡決定の精度向上に、回頭角速度 Z 試験⁷⁾ のようなリミットサイクル型の Z 試験の利用は大変有効である。回頭角速度 Z 試験は、方位の代りに角速度を基準にして、Z 試験と同様な操舵を行うものであるが、どのような船に対しても、すみやかにリミットサイクル状態の運動を実現できる。

このリミットサイクルの位相面軌跡の数周期分の平均をとることによって、個々の軌跡に外乱が残っている場

できる。カーフェリの例を Fig. 4.2 に示す。

(iii) 操舵管制機構

操舵法として、Z 試験の様に、方位を基準に、一定量の操舵を行う方式と、回頭角速度 Z 試験の様に、角速度を基準にする方式が選択できる。

4.1.2 演算制御部

試行錯誤的に特性常数を決定することを容易にするため、演算制御部に各種の特徴を持たせている。

(i) 演算速力の選択

試行錯誤的に特性常数を決める際、試行に要する時間を十分に短くする必要がある。本装置では積分素子のフィードバックインピーダンスを切換えて、演算速力の選択を可能にした。

- ・高速演算——実際の試験の $1/10^4$ の時間尺で演算し、特性常数の推定に用いる。
- ・低速演算——実時間もしくは $1/10$ の時間尺で演算し、解析結果の記録に利用する。

(ii) 演算モード制御方式の選択

初期値設定と演算という演算モードの切換を高速繰返しできるように、F. E. T リレーや初期値設定を短時間でいうる特殊な演算増幅器を採用した。

- ・手動制御——演算モードの選択を手動制御する。
- ・繰返し制御——函数発生器出力で演算モードを高速繰返し切換をする。1 回の演算に割りあてて時間は任意に調整できる。

4.2 実際の手順

角速度—角加速の位相面軌跡から、本解析装置を用いて特性常数を得るための手順は次の通りである。

4.2.1 演算方式の選択

本解析法では、試験中の操舵管制、操舵機、船で構成される閉ループ制御系を等価な演算回路で模擬する。リミットサイクル型の Z 試験の模擬は操舵時の角速度を本装置に設定し、同じリミットサイクルを作ればよいが、通常の Z 試験の場合、実際の試験では方位を基準に操舵しているけれども、操舵時の角速度を用いて等価な回頭角速度 Z 試験として模擬するのがよい。方位を基準に操舵する演算方式の場合、特性常数の推定値を変化させるに伴って、演算軌跡が大層複雑に変化し、観測軌跡の追跡が難しいからである。

十分に低周波の運動をしている Z 試験の場合、その運動がリミットサイクルになっていない時でも、その 1 周期分の運動を等価な回頭角速度 Z 試験のリミットサイクルとみなすことができる。この場合、試験の模擬は回頭角速度 Z 試験を高速演算、手動制御で実施し、リミットサイクルを観測軌跡に合致させればよい。

Z 試験で、等価な回頭角速度 Z 試験のリミットサイクルで置換できない場合には、一定区間の軌跡を高速繰返し演算する方法で観測軌跡に合致させればよい。

4.2.2 特性常数推定の手順

今、本解析の本命である二階非線型モデルを考える。

$$T_1 T_2 \ddot{\psi} + (T_1 + T_2) \dot{\psi} + \alpha \dot{\psi}^3 = K(\delta_m + \delta_r) + K T_3 \dot{\delta}_m \quad (2)'$$

ただし δ_m : 計測舵角, δ_r : 舵中心補正項

Fig. 4.3 Procedure to adjust characteristic parameters

従って、推定すべき常数は $T_1, T_2, T_3, K, \alpha, \delta_r$ の6ヶとなる。この常数の推定手順は Fig.4.3 に示す。

① 観測軌跡を回頭角速度Z試験のリミットサイクルとみなしうるか否かに従い、演算モード制御方式を選択する。

② δ - δ 位相面軌跡から得られる $\delta_m, \dot{\delta}_{max}, T_E$ および舵切換回頭角速度を設定し、特性常数に適当な初期推定値を与え、高速演算する。

③ 軌跡の角加速度の幅と角加速度方向の偏りに着目して $K/T_1, \delta_r$ を調整する。

④ 角速度=0 付近の軌跡の傾斜に着目して K, T_1 を調整する。

⑤ 操舵前の軌跡を用いて、 α を調整する。

⑥ 操舵中および直後の軌跡から T_2, T_3 を調整する。

⑦ 演算を終了し、推定値を読み取る。その時の演算軌跡を低速演算し、ペンレコーダに記録する。

4.3 出力部

本装置には、出力部として、低速演算時にはペンレコーダ、高速演算時にはブラウン管オシロが接続できる。両者共、時間記録、位相面軌跡の記録ができる。

4.4 演算補助機構

本装置の調整、使用を便利にするため、各種の補助機能を付置しているが、その主たるものは次の通りである。

- 係数設定および読み取り機構——演算回路の諸係数の設定や特性常数推定値の読み取りを行う。
- バランスチェック機構——演算回路の零バランスを調べ、調整する。

5 解析例

本解析法によって、Z試験のデジタル シミュレーション結果や実船、自航模型試験結果を解析し、その有効性を確かめた。

5.1 デジタル シミュレーション結果の解析

本解析装置によって、特性常数の判っている数学モデルを使用したデジタル シミュレーション結果を解析し、精度を確かめた。試験は回頭角速度Z試験とし、モデルの常数と本装置で得られたその推定値を Table

Table 5.1 デジタル シミュレーション結果の解析例

	数学モデル	解析値 (回頭角速度Z試験)			
		20°~0.5°/s 15°~0.4°/s 10°~0.3°/s			
K	-0.0432	-0.0415	-0.0429	-0.0376	
α	-7.32	-7.51	-7.91	-7.36	
T_1	-208.0	-198.0	-201.8	-183.0	
T_2	14.2	14.0	14.2	16.2	
T_3	29.0	29.3	28.3	32.9	

Table 5.2 実船試験解析例

船名	B	C	D	E
船種	カフェリー	タンカー	タンカー	鉱油船
試験	回頭角速度Z試験	Z試験	Z試験	Z試験
K	0.111	-0.197	-0.043	-0.154
α	0.117	-44.6	-16.3	-23.0
T_1	21.8	-854.0	-249.0	-503.0
T_2	5.43	17.1	18.9	10.2
T_3	9.87	37.5	53.7	27.3

Fig.5.1 Time histories of zig-zag tests (car-ferry B)

5.1 に示す。推定に利用した位相面軌跡と観測装置のそれとは大変良い一致を示し、本解析装置の精度は実用上、十分と考えられる。

5.2 実船試験結果の解析例

種々の実船に対して、本解析法を適用し、特性常数を決めるとともに、その特性常数による運動の記述精度を調査した。

前掲の Fig.3.5 は外洋カーフェリの回頭角速度 Z 試験の位相面軌跡である。破線が観測軌跡、実線が演算軌跡である。本船は大変線型性の良好な船で、非線型影響を与える特性常数 (α) は大変小さな値となり、位相面軌跡のみから決定することは難しく、スパイラル特性を参考にした。このような船では、線型モデル (1) で十分に運動を記述できるが、スパイラル特性を参考にして得た (α) を加えた非線型モデルで、各種の試験の舵角を与えた時の船の運動を計算した。この time history を Fig.5.1 に示すが、実船の運動と大変良い一致を示している。

Fig.5.2 Phase plane trajectory of zig-zag test (tanker D)

Fig.5.3 Time history of zig-zag test (tanker D)

Fig.5.2 はタンカー D の解析例である。この場合の同様の time history を Fig.5.3 に示す。Z 試験の一山目は前進速力の変動が大きいためその部分の計算は省略した。

その他、Table 5.2 に示す船に本解析法を適用し、特性常数を決定するとともに、その常数による運動の記述の精度を調べた。試験中、速力の変動の少ないデータについては良い結果が得られるが、運動がはげしく速力変化の大きいものでは一致が悪くなる。これは数学モデル (2) に速力変動が考慮されてないことから考えて当然である。この点を改良するためには速力変動の数学モデルを新に設定し (2) との連成を計ることになる。しかし Z 試験の本来の目的が、あまり大きい速力変動までは伴わない普通程度の操船における性能決定であるならば、(2) 式だけの解析でよいという考え方もあろう。この点は、どのような目的で、どのような状況における特性を問題にするかにかかっている。

6 結 論

本研究により、得られた結論は次の通りである。

(1) Z 試験で得られた運動の記録に、二階非線型運動方程式をあてはめ、位相面軌跡の形でアナログ計算機を用いて解析する方法は、高次の時定数や非線型性を考慮した船舶操縦性の数学モデルを決める手段として有望である。このようなモデルは、従来の KT モデルでは十分に特性を表現できなかった、タンカーの様に針路安定の悪い船の運動をよく表現することができるし、又、操舵管制機構と船を一体とする船舶操縦系の分析にも役立つ。

(2) この目的に使う Z 試験として、従来のように回頭角がある値に達した時、舵を反転する代りに、角速度がある値に達した時、舵を反転する Z 試験が適している。

(3) レートジャイロで計測された角速度の time history に外乱除去、ならびに微分のためのフィルタを数値計算の形で適用する方法は有効である。

謝 辞

本研究の実船試験には、川崎重工、日立造船、波止浜造船等の各位のご協力を頂いた。ここにお礼申し上げます。又、この実船試験の一部は造船研究協会第二基準研究部会操縦性試運転法の調査研究事業として実施されたものである。数値計算には広島大学計算センタの TOSBAC-3400 を使用した。

参 考 文 献

- 1) 野本謙作, 鳥野慶一: 新しい操縦性模型試験法, 日本造船学会論文集第126号, (昭和44年12月).
 - 2) Nomoto, K., Wagner-Smitt, L.: Evaluation of steering properties with particular emphasis on closed loop behaviour, 13th ITTC, (1972).
 - 3) 田中 豊, 小瀬邦治: 船の操縦運動の位相面解析, 関西造船協会誌第147号, (1973年3月).
 - 4) Bech, M & Wagner-Smitt, L.: Analogue simulation of ship manoeuvres, HyA Report NO. Hy-14, (1969).
 - 5) D. Clarke, D. R. Patterson & R. K. Wooderson: Manoeuvring trials with the 193,000 tonne deadweight tanker "Esso Bernicia", THE ROYAL INSTITUTION OF NAVAL ARCHITECTS, (spring, 1972).
 - 6) Martin, M. A.: Frequency domain applications in data processing, Technical Information Series No. 57 SD 340, General Electric Co., Missile and Ordnance Systems Dept., Philadelphia U. S. A. (May, 1957).
 - 7) 小瀬邦治, 金 鐘三, 小林弘明: 回頭角速度Z度試験とその実船および自航模型船への適用, 関西造船協会誌, (1973年5月発表).
-