(昭和 53 年 5 月 日本造船学会春季講演会において講演)

細長型没水体の縦方向運動に関する研究

(第 2 報 操縦性能指数及びそのパイロットレイティングとの関係について)

正員 村 上 俊 一*

An Investigation of the Longitudinal Motion of the Slender-type Body
at Fully Submerged Condition

(Part 2 On the Maneuverability Indices and their Relationship
with the Pilot Ratings)

by Toshikazu Murakami, Member

Summary

In this paper, maneuverability indices of submarine longitudinal motion deduced from the mathematical model are correlated statistically with the pilot ratings obtained from the specified maneuvering test by several submarines.

1 緒 言

船の運動の研究において船の運動等を記述する運動方程式から構成される数学モデルによる方法は自走模型あるいは実船による physical モデルによる方法とともに、研究の有力な手段と考えられる。このように考えられる数学モデルはその使用目的によって大別すると次の二つになろう。すなわち、その一つは船が与えられていて船の運動の軌跡をできるだけ正確に求めたいとか、あるいはシミュレーターに被制御体としての船の運動特性を模擬させる場合で、この場合には複雑でも正確なモデルを使用する必要があり、一般には推進機関などの特性を含めることが多く、非線型の運動方程式が使用される。

もう一つは船の運動の性質を見極めたり、船型要素と運動の関係を大雑把に把握したり、あるいは自動制御系の設計に使用する場合で、この場合は運動の本質を逸脱しない範囲でできるだけ簡単なモデルを使用することが望ましいと考えられ、通常線型の運動方程式が使用される。特にその周波数領域における表現である伝達関数がこの目的のために利用されることが多い。この場合にこのようなモデルから運動の様相を代表するような指数が導けられれば、使う上からは甚だ都合であろうと考えられる。

水上船の運動についてはその水平面内の運動を簡単な指数で表現する方法が野本ら¹⁾によって提唱されて久しい。しかし没水体の運動についてはこのような試みがな

されているとはいえないので、今回はこの問題を取りあげ、没水体の縦方向運動の指数を導くとともに、この指数と操縦者の操縦感覚の関係について検討を行なうことにした。

2 操縦性能指数について

船の操縦性能を指数で表現しようとすることは、一口にいえば、船の運動をマクロ的に把握しようとするものであるといえよう。このことは別の言葉でいえば、船の運動を誘起する舵の動きなどを入力とし、船の運動を出力とする船の運動に関するブラックボックスを簡単な指数で表わすことにはかならない。このようなブラックボックスは数学モデルを線型なものとした場合、その周波数領域における表現、すなわち伝達関数にはかならないことは衆知の事実である。以上の観点から本論文では伝達関数を基にし、マクロ的見地から操縦性能指数を導く。なお運動方程式に使用する記号、座標などの定義は文献 2) に従うことにする。

没水体の縦運動において必要な伝達関数は舵の動き δ に対する深度 h および船体姿勢角 θ に関するものである。これらは文献 2) に示されている運動方程式から次のように求められる。

$$G_{\delta} \ddot{h} = \frac{1}{A_{2L}} \left[\frac{1}{4} \rho^2 V^{1/3} V^2 \{ (\dot{I} - C m \dot{q}) C z \delta \right. \\ \left. + C z \dot{q} C m \delta \} s^2 + \frac{1}{4} \rho^2 V^2 V^2 \{ (-C m \dot{w} - C m \dot{q}) \right. \\ \left. \times C z \delta + (C z \dot{w} + C z \dot{q}) C m \delta \} s + \frac{1}{4} \rho^2 V^{5/3} V^4 \right]$$

* 防衛庁技術研究本部第 1 研究所第 3 部

$$\times \left\{ \left(\frac{2g\delta}{V^2} - Cmw \right) Cz\delta + Cz\omega Cm\delta \right\} \quad (1)$$

$$G_\delta^\theta = \frac{1}{A_{2L}} \left[\frac{1}{4} \rho^2 V^2 V^2 \{ Cm\dot{\omega} Cz\delta + (\hat{m} - Cz\dot{\omega}) Cm\delta \} s \right. \\ \left. + \frac{1}{4} \rho^2 V^{5/3} V^3 (Cmw Cz\delta - Cz\omega Cm\delta) \right] \quad (2)$$

ここで

$$A_{2L} = \frac{1}{4} \rho^2 V^{8/3} \{ (\hat{m} - Cz\dot{\omega}) (I\dot{y} - Cz\dot{q}) - Cz\dot{q} Cm\dot{\omega} \} s^3 \\ + \frac{1}{4} \rho^2 V^{7/3} V \{ (\hat{m} - Cz\dot{\omega}) (-Cm\dot{\omega} - Cm\dot{q}) \\ - Cz\omega (I\dot{y} - Cm\dot{q}) - Cz\dot{q} Cm\omega - (Cz\dot{\omega} + Cz\dot{q}) \\ \times Cm\dot{\omega} \} s^2 + \frac{1}{4} \rho^2 V^2 V^2 \left\{ (\hat{m} - Cz\dot{\omega}) \left(\frac{2g\delta}{V^2} \right. \right. \\ \left. \left. - Cm\omega \right) + Cz\omega (Cm\dot{\omega} + Cm\dot{q}) - (Cz\dot{\omega} + Cz\dot{q}) \right. \\ \left. \times Cm\omega - Cz\omega Cm\dot{\omega} \right\} s + \frac{1}{4} \rho^2 V^{5/3} V^3 \\ \left(-\frac{2g\delta}{V^2} Cz\omega \right) \quad (3)$$

伝達関数の分母 A_{2L} は1次式と2次式の積で、また舵角に対する深度変換速度の伝達関数の分母は1次式の積で表わされるので(1)、(2)式は下記のごとく書き表わされる。

$$G_\delta^{\dot{H}} = \frac{K_\delta^{\dot{H}} (1 + T_{\delta 1} \dot{H} s) (1 + T_{\delta 2} \dot{H} s)}{(1 + T_{L1} s) \left(1 + \frac{2\zeta}{\omega_n} s + \frac{1}{\omega_n^2} s^2 \right)} \quad (4)$$

$$G_\delta^\theta = \frac{K_\delta^\theta (1 + T_\delta \theta s)}{(1 + T_{L1} s) \left(1 + \frac{2\zeta}{\omega_n} s + \frac{1}{\omega_n^2} s^2 \right)} \quad (5)$$

ここで

$K_\delta^{\dot{H}}, K_\delta^\theta$: 舵角に対する深度変換速度および船体姿勢角のゲイン

$T_{\delta 1} \dot{H}, T_{\delta 2} \dot{H}, \dots$: 時定数

ζ : 減衰係数

ω_n : 固有円振動数

である。

伝達関数を構成するゲイン、時定数等は単独もしくは組合せて操縦性能指数として採用し得ると考えられるが、数があまりにも多いので物理的意味を考えつつ、運動を支配すると考えられるものにしぼる必要がある。このため、平均的な没水体船型の伝達関数を計算することにより、伝達関数を簡易化することを試みる。平均的な船型としては主船体の排水容積および重心浮心間の距離が Table 1 に示す既成船の平均的な値、すなわちそれぞれ 3000 m³ および 0.3 m であり、その流力係数などが Table 2 に示す既成船の平均的な値をもつものを採用し、この船が 2 m/s ~ 10 m/s の速度で航走するときの潜、横舵角に対する深度変換速度および姿勢角の伝達関数を計算して、Fig. 1 ~ Fig. 4 に図示した。

Table 1 Particulars of Sampled Bodies

SHIP	A	B	C	D	E
LENGTH (m)	59.000	60.520	88.300	88.300	72.000
BREADTH (m)	6.480	6.480	8.200	8.200	9.900
DEPTH (m)	6.370	6.370	7.470	7.470	9.900
DISPLACEMENT (m)	14.25	14.81	31.93	32.09	35.79
MOMENT OF INERTIA (m ²)	0.2732 × 10 ⁸	0.2921 × 10 ⁸	1.374 × 10 ⁸	1.502 × 10 ⁸	0.8948 × 10 ⁸
PRISMATIC COEFF.	0.735	0.742	0.745	0.750	0.641
BG (m)	0.240	0.270	0.280	0.270	0.350

Table 2 Coefficients of Longitudinal Equation of Motion

SHIP	A	B	C	D	E	TYPICAL VALUE
Czw	-0.716	-0.704	-0.716	-0.773	-0.716	-0.700
Cz $\dot{\omega}$	-1.746	-1.725	-1.759	-1.751	-1.995	-1.900
Czq	-0.573	-0.621	-0.492	-0.573	-0.526	-0.600
Cz $\dot{q}$	-0.017	-0.016	-0.028	-0.027	-0.093	-0.050
Cmw	1.089	1.012	1.266	1.117	0.744	1.000
Cm $\dot{\omega}$	-0.017	-0.016	-0.028	-0.027	-0.093	-0.050
Cmq	-2.470	-2.761	-4.646	-4.608	-3.090	-3.000
Cm $\dot{q}$	-2.367	-2.520	-3.191	-3.191	-2.170	-2.500
Cz $\dot{H}$	-0.109	-0.123	-0.171	-0.183	-0.178	-0.150
Cm $\dot{H}$	0.199	0.190	0.308	0.366	0.206	0.250
Cz $\dot{g}_a$	-0.135	-0.118	-0.166	-0.200	-0.385	-0.250
Cm $\dot{g}_a$	-0.384	-0.356	-0.573	-0.653	-0.813	-0.750
$\hat{m}$	2.068	2.066	2.036	2.062	2.059	2.00
$\dot{I}_y$	3.028	3.207	3.966	3.959	2.135	3.00
$\dot{B}G$	-0.0213	-0.0237	-0.0190	-0.0183	-0.0229	-0.02

Fig. 1 Bode Diagram of Depth Change Rate by Bow Plane Angle of Typical Submarine

これらの図からマクロ的に判断すると舵角に対する深度変換速度の伝達関数はほぼ1次系で、また舵角に対する姿勢角の伝達関数はほぼ2次系で表現し得ることが知れよう。また、これらの伝達関数の折点角周波数は固有円振動数にほぼ等しいことも知れる。従って(4)、(5)式は次のように簡易化され得るであろうと考えられる。

$$G_\delta^{\dot{H}} = \frac{K_\delta^{\dot{H}} (1 + T_{\delta 2} \dot{H} s)}{\left(1 + \frac{2\zeta}{\omega_n} s + \frac{1}{\omega_n^2} s^2 \right)} \quad (6)$$

Fig. 2 Bode Diagram of Depth Change Rate by Stern Plane Angle of Typical Submarine

$$G_{\delta}^{\theta} = \frac{K_{\delta}^{\theta}}{\left(1 + \frac{2\zeta}{\omega_n}s + \frac{1}{\omega_n^2}s^2\right)} \quad (7)$$

人間が船を操縦するときの操縦パターンは経験的にステップ操舵の連続したものであることがわかっているの、伝達関数から操縦性能指数を導く際に採用する舵の動きはステップ状としても差し支えないと考えられる。ではこのように舵を取ったときの船体運動としては、何に着目すればよいであろうか。最も妥当と考えられるものは運動のフェーズに着目することであろう。つまり操舵直後の運動、定常状態にいたるまでの過渡応答時の運動および定常状態の運動をそれぞれ代表するような指数を選ぶべきであると考えられる。

以上の理由から次の 11 の指数を選んだ。

$$(1) K_{\delta}^{\theta} = \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{s^3}{s} G_{\delta}^{\theta} \quad (7) \quad 1/\omega_n$$

$$(2) K_{\delta}^{\dot{\theta}} = \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{s^2}{s} G_{\delta}^{\dot{\theta}} \quad (8) \quad 1/R$$

$$(3) \omega_n \quad (9) \quad 1/I$$

$$(4) \zeta \quad (10) \quad K_{\theta} = \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{s}{s} G_{\theta}^{\theta}$$

$$(5) R = -\zeta\omega_n \quad (11) \quad K_{\dot{\theta}} = \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{s}{s} G_{\dot{\theta}}^{\dot{\theta}}$$

$$(6) I = \sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n$$

ここで K_{δ}^{θ} , $K_{\delta}^{\dot{\theta}}$ はステップ操舵直後の船体のピッチングおよびヒービングの加速度を表すもので、操舵直後の船体運動を代表する指数である。 ω_n および ζ は伝達関数を部分的に代表するものであり、これらの組合せは伝達関数の分母の復素根の実数部および虚数部 I となり、その各々は船体応答の単調減衰成分の時定数および振動成分の周期に関係する。また $1/\omega_n$ は非減衰振動の

Fig. 3 Bode Diagram of Trim Angle by Bow Plane Angle of Typical Submarine

Fig. 4 Bode Diagram of Trim Angle by Stern Plane Angle of Typical Submarine

周期に、 $1/R$ および $1/I$ はそれぞれ船体応答の Settling Time および Time of Peak に関係する値であり、これらの指数は船体の過渡応答を代表するものであると考えられる。 K_{δ}^{θ} および $K_{\delta}^{\dot{\theta}}$ はステップ操舵をしたとき、過渡応答が消滅した後の定常運動時の姿勢角および深度変換速度を表すものであり、これらは船体の定常運動を代表する指数であると考えられる。

3 模型実験結果から求められた数学モデルと実験試験結果との相関関係について

前節で導かれた操縦性能指数を使用するに当たっては、その元である数学モデルが実船の運動を的確に表現するものであることが前提となる。一番正確な数学モデルは縮尺模型を用いた水槽実験結果から得られる流力係数を使用したものであろう。

数学モデルが正しいか否かを実船の運動から検証する方法は多くあるが、操縦性能指数が伝達関数に由来しているため、ここでは、模型実験結果を元にして求めた伝達関数と、実船試験結果から求めた伝達関数の関係について調べることにする。

実船の伝達関数を求める方法は入力としての舵の動きのパターンにより周波数応答試験法、インパルス応答試験法、ステップ応答試験法、不規則入力試験法に分けられ、各長所短所を有している。ここでは試験結果が周波数の全範囲にわたらないきらいがあるが、一番データが正確に得られる周波数応答法およびステップ応答法により直接に実船の伝達関数を求めた。

ここで行なった周波数応答試験は普通の意味の周波数応答試験ではなく、いわゆる ZIGZAG 試験である。その方法について簡単に述べると一定深度で姿勢角零でトリムを整定し、約5分間定常航行を行なった後、最大舵角および execute angle を一定として Fig. 5 に示すごとく舵を ZIGZAG 状にとり、その場合の舵角姿勢角および深度の変化を計測し、その結果から舵の動きと船体運動の間の振幅および位相特性を求める。ここで execute angle とは舵を切り出す姿勢角を指すものである。運動の周期は最大舵角および execute angle を適当に組合せて変化させる。実験値の解析に当っては舵角の振幅はその波形を調和解析した場合の第1項目のものを採用した。また位相は各波形の1周期の半分の点の差から求めた。Table 1に示したB船について、理論計算と実船実験から求めた伝達関数の比較を Fig. 6 および Fig. 7 に示す。実船実験には船体運動、計測誤差の観点から種々の制限があるので伝達関数の振幅特性が0デシベルの付近の周波数でしか実験が行えないが、その範囲内

Fig. 5 Example of Longitudinal ZIGZAG Test Result (Ship: B, $V=3.6$ m/sec)

Fig. 6 Comparison of Calculated and Measured Transfer Functions

Fig. 7 Comparison of Calculated and Measured Transfer Functions

Fig. 8 Example of Longitudinal Step Response Test Result (Ship: E, $V=2.6$ m/sec)

では伝達関数の振幅位相両特性について計算値と実験値がほぼ一致していることがわかった。

以上の周波数応答試験法によっては限られた周波数の範囲しか船の周波数特性がわからない。これを補う意味で行なわれるものにステップ応答試験がある。この試験は Fig. 8 に示すごとく、一定深度でトリム整定後数分間の定常航走を行ない、舵を一定舵角取り可能な限りその舵角を保持し、そのときの姿勢角および深度の変化を求めるものである。この実験結果から伝達関数のゲインが求められる。Table 1 に示す各船型について行なわれた実験結果を用いて、潜横舵角に対する姿勢角および深度変換速度のゲインを求め、理論計算値と比較したものが Fig. 9 である。この図から実験値および計算値はかなりよい相関をもつことが知れよう。

実船による試験は舵角が高々 20 度以内で行なわれたものであり、また船体運動も線型領域にあるものを対象として行なわれたものであるが、上記の比較から使用した数学モデルはかなりの精度で実船の運動を表現しているものであると結論づけても差し支えないように考えられる。

4 操縦性能指数とパイロットレイティングの関係

2 節で導かれた操縦性能指数はそれを使用するに当たって、どれほどの値にとればよいかが問題になる。この問題を解決する一つの手段は、船は操縦者によって操縦されるのであるから、操縦者の操縦性能に対する評価すなわち Pilot Rating を求め、これと対比させることによって、その重要度なり、範囲なりを決めることであろう。

この目的のため、先ず既成の船について、操縦者に一定の操縦方法にもとづいて操縦してもらい、それらの船の操縦運動に関する評価を求めた。操船パターンは代表的な操艦パターンと考えられる 60m の深度変換である。この際、評価の対象として、具体的に何を选ぶべきかが問題であるが操船者と協議の結果、姿勢角の制御特性 (HAC)、および保持特性 (HAK) ならびに深度の制御特性 (DEC) および保持特性 (DEK) が重要な特性ということになったので、この 4 つを性能評価の対象として選んだ。評価は各対象について“優れてる”、“よい”、“普通”、“悪い”、“駄目”の 5 段階とした。ここで“優れてる”は目的の操縦を思うようにできる、“よい”は目的の操縦をちょっと努力すればできる、“普通”は目

Fig. 9 Comparison of Calculated and Measured Gains of Transfer Functions

的の操縦を努力すればでき、この程度なら使用に耐え得る、“悪い”は目的の操縦を相当努力すればできるがとも使用に耐え得るとは思えない、“駄目”は目的の操縦ができないという内容を表わすものとした。

供試船型は Table 1 に示す船型の中の 4 船型、6 隻である。試験は船の被制御特性をできるだけ変化させる意味で、速力を 3 ノットから 14 ノットの範囲で変え、潜、横舵の一方のみを使用して行なった。試験回数は計 65 回である。評価値の数値化に当たっては評価が“優れてる”は 9、“よい”は 7、“普通”は 5、“悪い”は 3、

Table 3 Statistical Values of Maneuverability Indices and Pilot Ratings

	RANGE	MEAN	ST.DEV.
HAC	1 ~ 9	4.67	2.74
HAK	1 ~ 9	5.18	3.02
DEC	1 ~ 9	5.58	2.91
DEK	1 ~ 9	5.24	2.31
K_θ	0.005 ~ 8.95	1.46	2.20
K_H	0.07 ~ 626	7.45	13.4
K_θ^g	0.0002 ~ 0.025	0.00734	0.00772
K_H^g	0.003 ~ 0.228	0.0651	0.0600
ω_n	0.0312 ~ 0.0791	0.0477	0.0151
ζ	0.261 ~ 0.851	0.553	0.152
R	0.0125 ~ 0.0347	0.0249	0.00582
I	0.0161 ~ 0.0700	0.0397	0.0163
ω_n^{-1}	126 ~ 32.1	22.71	5.95
R^{-1}	28.7 ~ 96.2	43.1	13.9
I^{-1}	13.9 ~ 62.1	2.95	11.9

Table 4 Correlation Matrix of Maneuverability Indices and Pilot Ratings

	HAC	HAK	DEC	DEK	K_{θ}	$K_{\dot{\theta}}$	$K_{\ddot{\theta}}$	$K_{\ddot{H}}$	ω_n	ζ	R	I	ω_n^{-1}	R^{-1}	I^{-1}
HAC	1.000	0.868	0.720	0.714	0.646	0.521	0.668	0.580	-0.500	0.255	-0.349	-0.479	0.485	0.253	0.433
HAK		1.000	0.721	0.794	0.602	0.532	0.631	0.619	-0.518	0.341	-0.301	-0.513	0.541	0.194	0.528
DEC			1.000	0.658	0.528	0.487	0.630	0.655	-0.658	0.368	-0.404	-0.643	0.614	0.287	0.565
DEK				1.000	0.462	0.399	0.526	0.506	-0.350	0.166	-0.278	-0.324	0.342	0.157	0.314
K_{θ}					1.000	0.966	0.883	0.772	-0.371	0.322	-0.147	-0.392	0.407	0.095	0.465
$K_{\dot{\theta}}$						1.000	0.841	0.779	-0.370	0.349	-0.139	-0.401	0.425	0.095	0.529
$K_{\ddot{\theta}}$							1.000	0.939	-0.432	0.249	-0.269	-0.430	0.412	0.229	0.415
$K_{\ddot{H}}$								1.000	-0.548	0.429	-0.233	-0.568	0.557	0.149	0.598
ω_n									1.000	-0.635	0.511	0.981	-0.956	-0.287	-0.822
ζ										1.000	0.316	-0.768	0.714	-0.497	0.834
R											1.000	0.344	-0.422	-0.919	-0.168
I												1.000	-0.960	-0.127	-0.885
ω_n^{-1}													1.000	0.202	0.918
R^{-1}														1.000	-0.013
I^{-1}															1.000

“駄目”は1とした。また、各試験状態に対応する操縦性能指数を Table 2 に示す値を用いて計算した。これらの値の一覧表は割愛するが、その平均、標準偏差は Table 3 に示すとおりである。

かくして得られた操縦性能指数と各 Pilot Rating の間の統計的に有意な関係を求めるため³⁾ これらの数値の相関係数を求めた。その結果を Table 4 に示す。なお計算に当っては操縦者は船の特性を十分把握しているものと考えて操縦性能指数はすべて正とした。Table 4 に示す相関係数マトリックスから各 Pilot Rating について相関係数が0.5以上のものを大きい順に書いてみると

HAC: K_{θ} , $K_{\dot{\theta}}$, $K_{\ddot{H}}$, $K_{\ddot{\theta}}$, ω_n

HAK: K_{θ} , $K_{\dot{\theta}}$, $K_{\ddot{H}}$, $K_{\ddot{\theta}}$, $1/\omega_n$, $K_{\ddot{H}}$, $1/I$, ω_n , I

DEC: ω_n , $K_{\ddot{H}}$, I , $K_{\ddot{\theta}}$, $1/\omega_n$, $1/I$, K_{θ}

DEK: K_{θ} , $K_{\ddot{H}}$

となる。以上のことから姿勢角の制御および保持に大きく関係するものは、 K_{θ} , $K_{\dot{\theta}}$ および $K_{\ddot{\theta}}$ であり、折点角周波数 ω_n 減衰係数 ζ などで代表される船の動安定性はあまり関係がないこと、これに反し深度の制御特性には ω_n および Pole の虚数部 I で代表される船の動安定性および $K_{\ddot{H}}$ が大きく関係すること、また深度の保持特性には K_{θ} , $K_{\dot{\theta}}$ が大きく関係することなどが知れよう。ここで船の設計時に今まで、問題となっていた運動の振動成分の減衰係数 ζ がいずれの Pilot Rating とも大きな相関を示していないことが知れるが、このことは本質的にこの係数が人間が船を操縦するときの操縦感覚に関係ないことを示すのか、あるいはその値の分布が小さいため相関係数に表面化しないのかわからない。

次に操縦性能指数と Pilot Rating の関係を定量的に表現するために、各 Pilot Rating について前記の相関係数が0.5以上の操縦性能指数の中から性質が重複すると思われるものを除いて、重回帰分析を行ない、操縦性能指数から各 Pilot Rating を推定する式を求めた。

Table 5 Coefficients of Regression Equation of Pilot Ratings

	HAC	HAK	DEC	DEK
CONST	2.53	0.304	-1.06	4.05
K_{θ}	2.85	1.32	-0.813	
$K_{\dot{\theta}}$	-0.383	-0.250		
$K_{\ddot{\theta}}$	-1.04	3.36	6.56	1.28
$K_{\ddot{H}}$	2.47	20.0	-44.0	3.98
ω_n^{-1}		-0.0485	0.114	
I^{-1}		0.161	0.112	
STANDARD	1.73	2.07	1.97	1.99

それらの式の係数を Table 5 に示す。また、各 Pilot Rating について観測値と求められた推定式にもとづく推定値およびそれらの差を図示したものが Fig. 10 である。

上記のごとく求められた式を用いて既成船の各 Pilot Rating を求め、速度ベースにプロットしたものが Fig. 11 である。図中塗りつぶした部分が5つの船型についての評価値の範囲であり、実線はその包絡線に推定値の標準誤差を加減したものである。この図から各 Pilot Rating は速度の増加とともに大きくなること、横舵を用いた場合の方が潜舵を用いた場合より Pilot Rating が高く、その差は速度が大きくなるほど大きくなること、潜舵による姿勢角の制御および保持性能は概して悪いと評価されていること、また潜舵による深度保持性能は船型によりあまり差がないと評価されていることなどがわかる。これらのことは今までの経験と照してあまり差がないので、この推定式はそう誤った結論を導くものではないように思える。

5 結 語

本論文は没水体の水中縦運動に関する操縦性能指数に関するものであり、得られた主な結果は次のとおりである。

- (1) 没水体の縦運動を端的に表現すると考えられる

Fig. 10 Observed, Estimated and Residual of maneuverability Indices

操縦性能指数を数学モデルから得られる伝達関数から導いた。

(2) 操縦性能指数と実船の操縦から得られた姿勢角の制御および保持特性ならびに深度の制御および保持特性に関する Pilot Rating の関係を相関分析および重回

帰分析により統計的に解析し、人間が船を操縦するときに重要と考えられる操縦性能指数を抽出するとともに、それらの関係を定量的に表現する式を求めた。

(3) 操縦性能指数を誘導した伝達関数の真実性を実船について行なった ZIGZAG 試験および STEP 応答試

Fig. 11 Estimate Pilot Ratings of Actual Submarines

験結果を用いて実証した。

参 考 文 献

- 1) 野本謙作, 田口賢士: 船の操縦性について (2), 日本造船学会論文集, 第101号 (1957).
- 2) 村上俊一: 細長型没水体の縦方向運動に関する研究 (第1報 運動方程式とその固有値について), 日本造船学会論文集, 第138号 (1975).
- 3) 奥野忠一他: 多変量解析法, 日科技連, (1971).