操縦性解析の二方法 II.

—微係数の補正について—

稲葉恭人*・川島利兵衛*

A Simple Analyzing Method of Ship's Manoeuvrability - II

—Adjustment of hydrodynamic derivatives on ship manoeuvring—

Yasuhito INABA and Rihei KAWASHIMA

Abstract

In the previous paper, we reported on a method of determining the derivatives corresponding to a single set of experimentally recorded turning trial data by means of a procedure of successive approximation calculated in two series, i. e. transitionary and stationary states of motion. Nevertheless, we could not see the work which dealt with the different ship's movements.

This paper concerns a method of determining the derivatives agreeing to the other turning trial data of the same ship, i. e. to those by other rudder angles. For this purpose, we have varied successively the derivatives, $C_{NH\beta}$ and C_{NHr} , which are consistent with r , U , and ϕ_{20} as shown in Fig. 5, and by the use of them, we can fix the value of K_1/K_2 consistent with another data recorded. In conclusion, we present some considerations on this method mentioned above.

1. ま え が き

著者等は前報(1)において、井上の微係数推定法(2),(3),(4)より求めた係数を基にして、その補正係数 K_1 , K_2 を逐次近似法により変化させ、実船の実験結果と、その微係数を用いた計算結果が一致するよう、修正する方法について報告した。すなわち、簡単な、直進からの右又は左への1回の旋回運動のデータが、その過渡および定常状態において求められておれば、その船の1組の操縦微係数が決められる。ところで上記の方法は、海上試運転で通常行われている、最大舵角附近での1組のデータを想定したものであるが、同一船について他の舵角をとった時、換言すれば、運動の強さの異なるときの実験データが得られている場合には、計算結果は、それらのデータをも併せて満足することが望ましい。より一般的には、求められた微係数は、その船の全ての操縦運動をカバーするものであることが要求される。そのための、前報より得られた微係数の補正法について、若干の知見が得られたのでここに報告する。記号およびその意味は文献(1),(2)による。

2. 補正の方法

前報において、yaw の式の流体力として次式を用いた。

$$N = \frac{\rho}{2} L^2 d U^2 \left[\left\{ C_{NH\beta} \beta - C_{NHr} r' - h_{N\beta\beta} \beta^2 - h_{N\beta r} \beta r' \right\} \frac{S}{Ld} + \frac{L_2}{L} F_R' \cos \delta \right]$$

$$= \frac{\rho}{2} L^2 d U^2 \left\{ \left(C_N \beta - h_N \beta^2 \right) \frac{S}{Ld} + \frac{L_2}{L} F_R' \cos \delta \right\}$$

ここに $C_N = C_{NH\beta} - \frac{r'}{\beta} C_{NHr}$, $h_N = h_{N\beta\beta} + \frac{r'}{\beta} h_{N\beta r}$

前報の逐次近似法においては、修正された $C_{N(n+1)}$ から $C_{NH\beta(n+1)}$, $C_{NHr(n+1)}$ を求める場合、既に決定した

* 正会員 北海道大学水産学部 (函館市港町3-1-1)

$C_{YH\beta(n+1)} \cdots h_{N\beta r(n+1)}$ より求まる補正係数 K_1, K_2 を用いて算出した, $C_{NH\beta}$ と C_{NHr} の比の値 $a_{(n+1)}$ より次式で決めた。

$$C_{NH\beta(n+1)} = a_{(n+1)} \cdot C_{N(n+1)} / \{a_{(n+1)} - r'_{sn}/\beta_{sn}\}$$

$$C_{NHr(n+1)} = C_{N(n+1)} / \{a_{(n+1)} - r'_{sn}/\beta_{sn}\}$$

すなわち, $a_{(n+1)}$ は $C_{YH\beta(n+1)} \cdots h_{N\beta r(n+1)}$ の結果から, 逐次決められる値として使用している。本文ではこの a を自由にとり得る値として変化させ, 強さの異なる他の実験結果に合致させる方法をとる。 C_N の定常状態値が同一であれば, 差の形で結ばれる, $C_{NH\beta}$ と C_{NHr} の数値の組合せは変えても, 定常状態における $r_s, U_s, r'_s/\beta_s$ 等は変化しないという, 前報に述べた結果を利用する訳である。本文では, 前報で求めた $\delta=35^\circ$ における微係数(以下基係数という)を基にして, $\delta=5^\circ, \delta=15^\circ$ 等の弱い運動の実験結果に合わせる方法を試みる。

3. a の変化の影響

対象とした北大水産学部研究船うしお丸の諸要目, 状態, 実験結果を表1に, 又前報で得られた基係数を表2

表1 実験船の諸要目, 状態および実験結果

L_{PP}	22.7m	A_R/Ld	1/30
B	5.6m	L_2	10.53m
D	2.5m	U_0	4.66m/sec
$d.f.$	1.7m	δ	35°
$d.a.$	2.2m	t_0	7.9sec
$Disp$	152.5ton	ϕ_{20}	97°
C_b	0.60	r_{SA}	$5.477^\circ/\text{sec}$
$C_W \equiv C_{W2}$	0.86	U_{SA}	2.20m/sec

表2 実験船の基係数

K_1	0.606	C_{NHr}	0.0413
K_2	0.433	$h_{Y\beta\beta}$	0.6230
K_1/K_2	1.399	$h_{Y\beta r}$	0.1026
$C_{YH\beta}$	0.3065	$h_{N\beta\beta}$	0.0240
C_{YHr}	0.0888	$h_{N\beta r}$	0.0410
$C_{NH\beta}$	0.0800	h_x	0.2350

に再掲する。この場合, $C_N = -0.02135$, $a = 1.937$ である。ここで C_N の値は固定したままで a を順次変え($C_{NH\beta}$ と C_{NHr} が変わる), 他は基係数を代入して得られた, 舵角別の計算結果を図1, 2, 3, 4に示す。

図1 a による定常旋回角速度の変化

図2 a による定常旋回速度の変化

図3 a による r'_s/β_s の変化 図4 a による変針角の変化

r_s , U_s は基準とした $\delta=35^\circ$ の値は変化せず、舵角の差が開く程、 a による変化は大となる。 r'_s/β_s の変らないことは、 $C_{NH\beta}$, C_{NHr} の算出を容易にする。これに反し、過渡状態の ψ_{20} は $\delta=35^\circ$ において最も変化している。この ψ_{20} の変化の幅の大なることは、 $\delta=35^\circ$ において、 r_s , U_s を変えないで、 a を補正することにより、如何なる K_1/K_2 の系列に対しても、 $\psi_{20}=97^\circ$ となる微係数を求め得ることを示している。○印が $K_1/K_2=1.399$, $a=1.937$, $\psi_{20}=97^\circ$ の係数による点である。

4. 実験値を満足する微係数

前項の調査結果をうけて、数系列の K_1/K_2 について、 r_s , U_s , ψ_{20} を表1の実験結果と一致させてみる。すなわち、前報において逐次近似計算法により、 r_{SA} , U_{SA} を一致させた、 K_1/K_2 の数系列の微係数を用い、 a を逐次変化して、 $\psi_{20}=97^\circ$ とする。その変化した a と $C_{NH\beta}$, C_{NHr} を K_1/K_2 をベースにして示すと、図5が得られる。

前報の K_1 , K_2 によって逐次固定した a は、右上りの略直線となり、図中鎖線でしめす。これと実線で示す a との交点が係数の位置となる。 a をこのように、自由に大幅に変えれば、それぞれの $C_{NH\beta}$, C_{NHr} で $\psi_{20}=97^\circ$ となり、前報ではその中の1点を決めたことになる。

5. 微係数の補正

前項に述べた、 r_s , U_s , ψ_{20} を $\delta=35^\circ$ の実験値と一致させた結果の諸量を、 K_1/K_2 をベースにして、舵角別に示すと図6, 7, 8, 9が得られる。 r'_s/β_s は極値を持つ。 $\delta=35^\circ$ の r_s , r'_s , U_s , ψ_{20} は実験値の通りで変化しないが、弱い運動、例えば $\delta=5^\circ$ の場合をみると、 K_1/K_2 がこの図の範囲で、 $r_s=3.72\sim1.80$, $r'_s=0.448\sim0.166$, $U_s=3.29\sim4.30$, $\psi_{20}=38.2\sim26.7$ と幅をもっている。従って、 $\delta=5^\circ$ における何らかの実験データが、この幅の範囲にあれば、それに合致する K_1/K_2 が、その回帰式より決められることになる。又、図の両

図5 実験値 ($\delta=35^\circ$) を満足する微係数

図6 実験値 ($\delta=35^\circ$) を満足する r_s'/β_s 図7 実験値 ($\delta=35^\circ$) を満足する定常旋回角速度 図8 実験値 ($\delta=35^\circ$) を満足する定常旋回速度 図9 実験値 ($\delta=35^\circ$) を満足する変針角

端の K_1/K_2 が 0.833 と 4.000 の場合の $r'-\delta$ 曲線は、図10に示すようになり、基準とした $\delta=35^\circ$ からの舵角が離れる程、幅が広がっている。このようにして、 K_1/K_2 が決まれば、 $C_{NH\beta}$ と C_{NHr} は図5より、その他の微係数は、定常状態値が実験と一致する、前報図7に示した関係より求めることが出来る。

6. 考 察

6.1 4項で求めた、 r_s 、 U_s 、 ϕ_{20} を a を変えて実験値と合致させた数系列の中、 K_1/K_2 が 0.833 および 4.000 の場合の過渡状態の変化を図11に示す。○印が $\phi_{20}=97^\circ$ の点である。 K_1/K_2 に大きな開きがあるにもかかわらず、その差は小さく、前記の補正法の、 K_1/K_2 を変えることによる問題は少ない。

6.2 舵角 35° の基係数を基にして、小舵角の実験値に合わせる方法について述べたが、この逆の補正も可

図10 実験値 ($\delta=35^\circ$) を満足する $r'-\delta$ 曲線 図11 過渡状態における K_1/K_2 による差

能である。又、合わせる実験値として考えられる r_s , U_s , ϕ_s の3個の中、1個のデータの場合は、それを目標にして1組の微係数を決められるが、同じ舵角でも2個又は3個ある場合や、異なる舵角についてのデータがある場合は、それら全てに厳密に一致させることは、数学モデルの限界や、実験値の誤差も考えると、前記方法では難しい。基係数を求めるのに、何れのデータを採用かの問題も含め、それぞれのデータの信頼度を勘案して決めなければならない。前記のように合わせるデータは、舵角差の開いたものが、変化が大きく望ましい。

6.3 本文の目的とした、1組のデータ以外の実験結果をも、満足させる方法としては、前記方法以外に surge 方向の数学モデルの指数を変える方法が考えられる。指数 n を変えた場合の変化については、appendix に後述する。

前報ならびに本報告においては $n=3$ を採ってきたのであるが、採り得る両端と考えられる⁽²⁾, $n=2$ および 4 の場合について、appendixの第3項の計算結果から、一例として $r'-\delta$ 曲線を示すと、図12が得られる。

$\delta=0^\circ \sim 35^\circ$ の間で n による差がみられる。従って指数 n を変えて、中間値に補正する方法も可能である。しかし、(1)数学モデルが船によって変えることは、船毎の微係数の相互比較を困難にする。(2) n を変えることの物理的意味が不明確である。(3) n による差が比較的小さく、計算量が大きい等の理由により、この方法は望ましくない。

7. あとがき

本報告の補正をすることにより、実船の操縦微係数に、多少なりとも一般性を持たせることが出来ると考えられる。本報告に対して、御批判、御教示を頂ければ幸いである。尚本計算には、北海道大学大型計算機センターを利用した。終りに操縦性解析について、種々御教示を頂いた、船舶技術研究所小川陽弘氏をはじめ諸先生方に、厚く謝意を表する。

図12 指数 n による $r'-\delta$ 曲線の変化

参 考 文 献

- (1) 稲葉 外：操縦性解析の一方法 I，日本航海学会論文集 第62号 1980年
- (2) 小川 外：操縦性解析への電子計算機の適用，第2回操縦性シンポジウム 1970年
- (3) 造船協会：操縦，旋回および針路安定，船舶工学便覧 第1分冊 1960年
- (4) 井 上：旋回中船体に働く力の非線型項，西部造船会会報 32号 1966年

質 疑 応 答

岩井 聡：微係数の補正の手順として非線型度の高い $\delta=35^\circ$ を base に他の小舵角 ($\delta=10^\circ, 5^\circ$ 等) 非線型度の低いものを推定する意味(義)についてお聞かせ下さい。

稲葉恭人：前報からの解析法が海上試運転で通常行われている，最大舵角附近での1組のデータを想定していますので，このような手順となりました。逆の手順として小舵角のものを基係数として，大舵角のデータで補正することも，同様な方法で可能であると考えます。

Appendix—surge 方向の数学モデルについて—

前報(1)において，surge 方向の運動方程式として，次式を用いた。

$$(m+m_x)\ddot{u}-(m+m_y)v\dot{r} \\ = \frac{\rho}{2}LdU^2\left[X'_{H0}\left\{\frac{1}{\cos\beta}\left(\frac{U_0}{U}\right)^n-1\right\}-\frac{S}{Ld}-F_R'\sin\delta+h_x\beta^2\right]$$

図A1 補正係数 h_x の n による変化

表A1 n を変えた時の操縦微係数

n	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
K_1/K_2	1.82	1.62	1.399	1.14	0.88
h_x	1.20	0.72	0.235	-0.42	-1.28
$C_{YH\beta}$	0.362	0.340	0.3065	0.275	0.230
C_{YHr}	0.104	0.097	0.0888	0.078	0.066
$h_{Y\beta\beta}$	0.506	0.585	0.6230	0.675	0.745
$h_{Y\beta r}$	0.091	0.096	0.1026	0.112	0.123
$C_{NH\beta}$	0.096	0.089	0.0800	0.064	0.037
C_{NHr}	0.049	0.046	0.0413	0.032	0.019
$h_{N\beta\beta}$	0.021	0.022	0.0240	0.026	0.029
$h_{N\beta r}$	0.037	0.039	0.0410	0.044	0.049

参考文献(2)によると，上式右辺の $\left(\frac{U_0}{U}\right)^n$ の指数 n は2～4が考えられる。又 $h_x\beta^2$ の補正項を入れたのが特長である。この指数 n を2～4の範囲で変えたとき，前報の逐次近似の結果に，如何なる変化があるかを調べた。対象船は同一であり，その結果は次の通りである。

- (1) r_s, U_s が同じであれば， $C_{YH\beta}, C_{YHr}, h_{Y\beta\beta}, h_{Y\beta r}, C_{NH\beta}, C_{NHr}, h_{N\beta\beta}, h_{N\beta r}$ の8個の係数の逐次近似の最終値は， K_1/K_2 が変らなければ，同一となり n に

図A2 n による変針角の変化

図A3 定常状態のみを合致させた場合
の過渡状態における差

より変化しない。 h_x のみ変化がみられ、これを示せば図A1が得られる。同図より、 $n \approx 3.2$ とすれば、この対象船については、 $h_x \beta^2$ の項は不要となる。この $h_x = 0$ となる n を、多数の船について、統計的に調査することは、今後の課題である。

- (2) 前項の結果の ψ_{20} を K_1/K_2 をベースに示すと図A2となる。過渡状態の $\psi_{20} = 97^\circ$ は、図中鎖線で示す位置となり、その交点の K_1/K_2 を表A1に示す。すなわち、 n を変えると r_s 、 U_s 、 ψ_{20} 全てを満足する K_1/K_2 が移動する。図A3は $K_1/K_2 = 2.3$ における、 r_s 、 U_s を実験値と合わせた場合の過渡状態の n による諸量の差を示す。 $\psi_{20} = 97^\circ$ は $n = 2$ の実線より上方にあるが、この両線との差が K_1/K_2 の移動差となる。
- (3) (1), (2)項の結果より、前報図7の関係も入れて、過渡および定常状態における実験値を満足する微係数の推定値を、各 n について求めると表A1に示すようになり、 $n = 3.0$ の場合が前報の結果である。これらの推定値を用いた計算結果は、実験値とよく一致し、本文の図12はその結果である。