(昭和 36 年 11 月造船協会秋季講演会において講演)

操縦性の研究における自航模型の適用について (2)

正員 野 本 謙 作* 正員 村 瀬 昭 久*
正員 多 田 納 久 義*

Utilities of Free-running Models in Ship Manoeuvrability Researches (2)

By Kensaku Nomoto, *Member* Aakihisa Murase, *Member*
and Hisayoshi Tatano, *Member*

Summary

Following the paper of the same title on this Journal, vol.109, the present paper treats at first with a procedure of obtaining resistance derivatives from free-running model steering experiments. This is carried out by analysing "steering quality indices" K' , T'_1 , T'_2 and T'_3 produced from frequency response analysis upon the test results, but using drift angle observed in circular turning and also estimating virtual mass and moment of inertia of a model from calculation or experiments. Thus free-model experiments may yield information not only for steering motion of a ship but for forces acting on her. Measurements of rudder force in circular turning may also be useful for getting informations on the forces through total-less-rudder moment procedure of Davidson and Schiff and through the similar procedure for lateral force.

Two new procedures of analysing the standard manoeuvre are also discussed and both are based upon the first-order equation of motion of integrated form of Eq.(5). The first of the two is to solve the simultaneous equations derived by applying the above equation for several particular instants during a test and the second utilizes the least square error method for the similar equations set up at a certain time interval.

A brief description upon radio-control instruments and measuring techniques for free-model experiments is finally presented. An illustrated system utilizing a conventional toy aeroplane radio-control is easy to construct and is enough to carry out various types of steering experiments. A new device for precision measuring of heading angle using a free-gyro and photo-transistor detector is introduced, with a current meter measuring ship speed, a photographic means of obtaining drift angle and wire-strain-gauge type rudder forces measurement.

2 自航模型試験から船に作用する流体力学的諸力を推定すること

2.1 自航模型試験による resistance derivative の決定

resistance derivative は船にはたらく力を横流れ角 β , 回頭角速度 $\dot{\theta}$ (普通は無次元化して (L/R) 又は Ω) 並びに舵角 δ の線型関数で記述するのに使う係数で方程式 (1) の $C_{Y\beta}$, $C_{M\Omega}$ 等がそれである。これらを実験から求めるには旋回水槽の使用が伝統的であり, また通常水槽での振動曳行法も併用されて来た。そのいずれも模型船にはたらく力の計測を基とするから derivative の決定は直接的で信頼性に富む。自航模型試験は本来船の運動を直接の対象とするが, その運動の本をなすのは船にはたらく力であるから運動の観測は力に関する情報をも多量に含むはずである。従つて, より間接的にはあるが自航模型試験から derivative を求めることも原理的に可能であり, それが実行できれば旋回水槽では得られない直進付近の derivative や実船の derivative を得る途が開かれる。また特殊設備に属する旋回水槽なしにこの分野の知識が得られることも実際の魅力がある。そして従来操縦性の研究における二つの流れであつた所の, 船にはたらく力を知ろうとする立場と一方実船や自航模型の運動の観測からより直接的に実際の資料を得ようとする立場を結ぶことをこの解析に期待できな

原稿受付 昭和 35 年 6 月 20 日

* 大阪大学工学部

いであろうか。

ところで定常旋回や正弦操舵から得られる4箇の操縦性指数 K', T_1', T_2', T_3' は回頭運動を記述するもので、船の横流れ運動については語る所がない。船の運動の性質に止まらず、それに関与する力に解析を進めるには回頭運動に必ず伴っている横流れ運動をも同時に考えねばならないであろう。事実、慣性力は別にして船にはたらく力を記述する係数は6箇ありこれは4箇の指数からは決定できない。そこで序論に述べた所の、原方程式(1)から回頭運動を記述する方程式(2)を得たと同様の手続きによつて横流れ運動の記述を試みる。即ち(1)から $\dot{\theta}$ を消去して β に関する方程式を作ると(2)と同型の方程式が得られ、その係数として新たに二つの操縦性指数が生れる。

$$K\beta = \frac{C_{M\Omega}C_{Y\delta} + (\mu_x - C_{Y\Omega})C_{M\delta}}{C_{Y\beta}C_{M\Omega} - (\mu_x - C_{Y\Omega})C_{M\beta}}, \quad T_3\beta = \left(\frac{L}{V}\right) \frac{iC_{Y\delta}}{C_{M\Omega}C_{Y\delta} + (\mu_x - C_{Y\Omega})C_{M\delta}}$$

これらは回頭運動における K, T_3 と完全に対応する意味を横流れ運動に対して有する¹⁾。なお T_1, T_2 は共通である。これらの指数を旋回や正弦操舵における横流れ角 β の観測から求めることは回頭運動の場合と同様に可能であり、これか実行されたならば船の見掛慣性を示す三つの係数を計算あるいは実験から推定することに加えて6箇の derivative が決定される。

$T_3\beta$ を決定するには非定常運動の β をよい精度で測るの必要がありこれは困難であるが、実はその必要はない。 $C_{M\delta}/C_{Y\delta} = l_r/L$, l_r は船の重心から舵軸までの距離、なる関係がよい精度で存在するからである。これで未知数は5箇となり $T_3\beta$ の実験的決定なしに全部の係数が決まり、もし必要ならそれから $T_3\beta$ を算定することもできる。

第8図 横流れ角 β と旋回半径の関係の実例

$K\beta$ は定常旋回中の横流れ角を測ればよいからこれは余り困難ではない。第8図は4に示す方法で得た β を無次元角速度 (L/R) に対してプロットしたものであるが面白いことにこれは船型や舵面積のいかんに関わらず直線的関係にあるようである。この傾向は志波氏等の旋回試験[2]にも表われている。進路安定の悪い船では非線型影響のために K' は相当変化し $K\beta$ も同様であるがその比率は不変ということである。

回頭運動における指数 K', T_1', T_2', T_3' の他には $K\beta$ だけを知らばよいこと、 $K\beta/K'$ は旋回角速度が変つても変わらないことは自航模型による derivative の決定を実際的なものにする。計算を実行すると先ず

$$C_{Y\delta} = \frac{1}{\gamma} \frac{K'T_3'}{T_1'T_2'}, \quad C_{M\delta} = \gamma C_{Y\delta} \quad \text{ここに } \gamma \equiv l_r/L$$

が得られ、続いて

$$C_{M\Omega} = \frac{\frac{K\beta}{K'} \left(\frac{T_1' + T_2'}{T_1'T_2'} - \frac{1}{T_3'} \right) \mu_y - \frac{T_3'}{\gamma T_1'T_2'}}{\frac{K\beta}{K'} \frac{\mu_y}{i} - \frac{1}{\gamma}}$$

$$C_{Y\beta} = \mu_y \left(\frac{T_1' + T_2'}{T_1'T_2'} - \frac{C_{M\Omega}}{i} \right)$$

$$C_{Y\Omega} = \frac{C_{M\Omega}}{\gamma} - \frac{K\beta}{K'T_3'} \mu_y + \mu_x$$

$$C_{M\beta} = \mu_y \gamma \left(\frac{1}{T_3'} - \frac{T_1' + T_2'}{T_1'T_2'} + \frac{C_{M\Omega}}{i} \right)$$

が得られる。

慣性の係数は

$$\mu_x = \frac{m_x}{(\rho/2)L^2d} = \frac{\nabla}{L^2d} 2(1 + m_x'/m), \quad \mu_y = \frac{\nabla}{L^2d} 2(1 + m_y'/m),$$

$$i = \frac{I}{(\rho/2)L^4d} = \frac{\nabla}{L^2d} 2[(\kappa/L)^2 + (\kappa'/L)^2] \quad \begin{array}{l} \kappa \text{ 船の慣性半径} \\ \kappa' \cdot \sqrt{\text{付加慣性モーメント/船の質量}} \end{array}$$

1) なお $K\beta/K'$ は定常旋回時転心から重心の距離 L , また $K\beta T_3\beta/K'T_3$ は操舵直後の転心から重心の距離 L 後者は $iC_{Y\delta}/\mu_y C_{M\delta} = I/m_Y l_r$ で赤崎氏が示された如く撃心に一致する。 $T_3\beta/T_3$ は 0.2~0.4 位だから操舵後旋回に入る途中の転心の移動は相当著しい。

となるが、問題は $m_x'/m, \kappa'/L$ 等のいわゆる見掛質量係数の決定である。従来船の見掛質量を没水体のそれとする考え方がしばしば使われたが、最近元良氏は山本氏の理論を援用しつつ船の見掛質量に与える水面の影響は到底無視できぬ程度であり、しかもそれは運動の周期によつて著しく変ることを明らかに示した [8]。しからばこの場合取るべき周期いかんというに操縦運動は周期をもたず時々刻々新しい運動が誘起されているのだから操縦運動においては衝撃によつて運動が始まる際の見掛質量を取るという考えがある。これは換言すれば周期無限小の運動における見掛質量をとることになるが、一方非周期運動といえどもそれは異なる周期の無数の周期運動から組立てられたものと考えることができるから各々の運動成分に対してその周期に応ずる見掛質量を使い、重ね合わせの手続を経て運動の表現を計るべしとする考えも理詰めである。この立場から操縦運動を眺めるに、そのスペクトルは他の運動に比べて著しく低周波部分に偏しており見掛質量が周期の影響を受けるような短周期の操舵に対して船はほとんど応答を示さないことが分る。従つて後者の立場からすれば操縦運動においては周期無限大の運動に対する見掛質量を使えばよいことになる。かくして問題は端的にいうならば操縦運動における見掛質量は周期無限小の運動に対するものか周期無限大に対するものかという二者択一となるであろう。

この問題をこれ以上論ずることは本論文の目的でないが、舵直圧力の計測が有力な手がかりとなることに注意したい。すなわち直進中に操舵すると操舵中は船の運動はほとんどないと考えてよいから、この時測つた直圧力 N から $C_{Y8} = N \cos \delta / (\rho/2) L \cdot d \cdot V^2 \cdot \delta$ を得る。一方 $T_3'/T_1'T_3'$ が第4図に示す w_c' なることに注意すれば $K'T_3'/T_1'T_2'$ は短周期正弦操舵の振幅比を連ねる勾配 -1 の直線と $\log |Y_8'| = 0$ の線の交点で示されることが分る。かくして $K'T_3'/T_1'T_2'$ は正弦操舵からよい信頼度で与えられるから、前述の $C_{Y8} = K'T_3'/rT_1'T_2'$ の関係が i の推定乃至確認に使われる。第2表はこの解析の例であるが、衝撃法で得られた周期零に対する見掛慣性モーメント [8] では測られた C_{Y8} と矛盾する。この不一致をなくすには第2列の i の値が必要でこれは付加慣性モーメントが周期零のもの 1.8 倍なることを意味し、[8] によると大周期に対する値に略一致する。従つてこの例からは大周期の見掛質量をとる方がよさそうである。いずれにせよ、この方法の信頼を高めるには見掛質量に関する今一層の知識が望まれる。

表の derivative は上記二通りの見掛慣性を使つて得た値であり、今述べた所からして第2,4列の値が真に近いであろう。なお2,4列の m_Y' は strip method 式の考え方から付加慣性モーメントと同率で付加質量を修正した。 m_x' は船の形から考えて水面影響の小さいものであり且つ付加部の値も他に比して著しく低い所から修正を行なっていない。20° 旋回の列は旋回正弦操舵から求めたものである。運動が烈しくなると derivative が一般に増加することは従来から認められている所であるが、旋回中の速力低下に基づくスリップの増加が舵直圧力を通じて C_{Y8} のみならず他の derivative にも相当の影響をもつことは注意すべきである。このスリップの直圧力に与える効果は著しいもので岡田氏、藤井氏等の資料から算定するに優に2倍を越える。これは大舵角の運動が速力変動と密な連成をもつことを暗示する。例えばZ試験からの K' と旋回のその不一致 (第12図) はこの理由によるかも知れない。

2.2 舵直圧力を測つて旋回中船にはたらく力を推定すること

この手段は Davidson と Schiff によつて total-less-rudder moment の名で始められた [7]。すなわち定常旋回中は $\dot{\theta} = 0$ であるからすべての流体力学的モーメントの和は零であり、従つて定常旋回中の舵直圧力を N と書くと $-N \cos \delta \times l_r$ が舵以外の部分にはたらいっている力の重心回りのモーメントである。第9図はこの手順で得られた結果を示す。このモーメントが旋回角速度の増加と共に著しく増大する様子が明らかである。

船の前後方向見掛質量を2.1のごとく推定す

第2表

	直 進		20° 旋 回	
M_{Lz}	.18	.18	.18	.18
M_{Ly}	.36	.50	.36	.50
i	.019	.027	.019	.027
C_{Y8}	.029	.040	.047	.135
C_{Y8}	.014	.020	.048	.066
C_{Mz}	.018	.026	.11	.16
C_{Yp}	.41	.58	.29	.42
C_{Yp}	.023	.031	.14	.19
C_{Yp}	.072	.027	.23	.24

M69B60 MARINER STERN LINER, Ax/L_0 1/40

第2表

第9図 Total-less-Rudder Moment の事例

れば類似の解析が船にはたらく横方向の力についても行なえる。すなわち定常旋回中は $\dot{V}=0$, $\dot{\beta}=0$ であるから船にはたらく横方向の力の和は $m_x V \dot{\theta} \cos \beta$ に等しい。従つて total-less-rudder force とでもいうべきものは内向き正に

$$m_x V \dot{\theta} \cos \beta - N \cos \delta \quad \text{あるいは無次元化して} \quad \mu_x (L/R) \cos \beta - N \cos \delta / (\rho/2) L d V^2$$

これらの力やモーメントは定常旋回中に実現されている (L/R) と β , それは2・1に述べたように比例関係にあるが, この一組の (L/R) と β のときに船にはたらくもので, 他の組合せの (L/R) と β のときには, たとえ同じ (L/R) であつてもこれらとは違つた値の力がはたらくことに注意すべきである。この二つはそれぞれ単独にあるいは2・1の derivative と組合わせて, 船にはたらく力に関する色々な考察に使うことができる。

3 Z 試験とその解析

3・1 Z 試験の解析と一次系近似

Z 試験は実船でも随時行なわれているが自航模型試験でも手軽にその船型の操縦性を判定できて便利である。操舵法は直進整定の後一定舵角まで操舵してこれを保ち, 回頭角が舵角に等しくなつた時反対に同舵角をとる。以後これを繰返して普通三度目に原針路に戻つた後に試験を終る。船の運動は正弦操舵のそれによく似ているが, この操舵は周期を厳密に一定にしているわけではなく, また $\delta(t)$ の形も折線状で正弦函数よりも数学的取扱いが困難であるから(3)式に基づく周波数応答解析には向かない。しかしこの操舵は確に実際操船の諸相をよく表わしておりまた実船で容易に実行できる点から実船と模型船の対応を見るのにも都合がよい。そこでこの試験については周波数応答解析ではなくて運動方程式による解析が考えられた。運動方程式(2)は舵角 $\delta(t)$ と運動 $\dot{\theta}(t)$ の時々刻々の関係を規定するものであるから, 観測によつて $\delta(t)$ と $\dot{\theta}(t)$ を知り且つ方程式の形を与えるならば, すじ道を逆に辿つて方程式の係数が求められ従つてその船型の操縦性の全貌が明らかになるはずである。

この操作は方程式の係数を未知数とする連立方程式の解法に帰着するが連立方程式の解法は多くの引算を含むから観測に含まれる誤差が引算の度に増巾されることを覚悟しなければならない。実はこの事情こそ周波数応答解析を必要ならしめたものである。そこで今の場合運動を表現する能力はいくらか落ちても階数の少ない, 従つて係数の数の少ない近似的な運動の方程式を使つて解析を進めることが望ましい。この目的に適うものとして一次系近似の方程式 $T(d\dot{\theta}/dt) + \dot{\theta} = K\delta$, $T \equiv T_1 + T_2 - T_3$ がある。これは原方程式(2)に色々な角度から検討を加えた結果得られたもので比較的舵の動きの少ない操舵程その近似がよいことが推論された。また実際の運動に適用してみた所普通に行なわれる操船に対しては実用上十分よい近似を示すことが知られている。そこでZ試験解析の方法としてこの方程式を使い数回の航走と簡単な計算からその船型の操縦性の概略を一次系近次の操縦性指数 K, T の形で得ることが考えられる。これが恐らくこの試験に適しい解析法であろう。

3・2 連立方程式法—常用的方法

解析に使う記号を第10図に示す。運動の方程式は $\delta=0$ で $\dot{\theta}=0$ すなわち直進を示すが計測舵角 $\delta_m=0$ で

船は一般に直進しない。単螺旋後流等のためである。そこで補正項 δ_r を考え

$\delta = \delta_m + \delta_r$ で表わす。 δ_r は未知であるが, とにかく一つの航走の間は一定値のはずである。

運動方程式は $T(d\dot{\theta}/dt) + \dot{\theta} = K(\delta_m + \delta_r)$

$t=a$ から $t=b$ まで両辺を積分すると

$$T[\dot{\theta}(b) - \dot{\theta}(a)] + \theta(b) - \theta(a) = K \int_a^b \delta_m dt + K\delta_r(b-a) \quad (5)$$

まず積分範囲を $t=0$ から t_e' にとる。

$$\theta_{e'} = K \int_0^{t_e'} \delta_m dt + K\delta_r$$

$t=0$ から t_e'' にとれば同じ形の式が今一つできる。

連立に解いて K と $K\delta_r$ を得, δ_r を得る。この操作を試験後半に選ぶのは運動が定常になつて K が安定しているから δ_r をよい精度で求められるからである。ここで求めた K を K_{Z} で表わす。この δ_r をもつて

第10図 Z試験解析に使う記号

$$\theta_e = K \int_0^{t_e} \delta_m dt + K_r \delta t_e \quad \text{から } K \text{ を求め } K_{\text{④}} \text{ と書く。}$$

つぎに積分範囲を $t=t_2$ から t_e にとつて²⁾

$$T\dot{\theta}_0 - T\dot{\theta}(t_2) + [\theta_e - \theta(t_2)] = K \int_{t_2}^{t_e} \delta_m dt + K_r \delta(t_e - t_2)$$

第 1 表

から T が得られ、 $T_{\text{④}}$ と書く。この K には $K_{\text{③}}$ を使う。

$t=t_4$ から t_e' , t_6 から t_e'' にとつて同様の二式を得、従つて T が二つ得られる。この場合には $K_{\text{③}}$ を使い二つの T の平均を $T_{\text{④}}$ と書く。 $K_{\text{④}}$ と $K_{\text{③}}$ の平均を K_m , $T_{\text{④}}$ と $T_{\text{③}}$ の平均を T_m で表わし試験全体を通じての K, T となる。経験によれば運動の定常的な試験後半の $K_{\text{③}}$, $T_{\text{③}}$ の方が信頼性が高い。

この方法は実船でもそのまま使われる。第一表は計算例である。

3-3 運動を travel ベースに変換して速力変動の影響を除くこと

15° 以上の試験では操舵に伴う速力の変化が K, T を時間と共に変化させる影響が表われて来る。すなわち $K=K'(V/L)$, $T=T'(L/V)$ と書けるが、無次元指数 K', T' は速力によつてほとんど変らず K', T' は V の変化に従つて変動する。この影響は当然解析の基礎となる運動方程式の信頼性を悪くするから、なるべく試験中の速力を測つて次の如き修正を行なうことが望ましい。いま $ds=(V/L)dt$ なる変数を考え、 t ベースに書かれている原方程式を s -ベースに改める。 s は船の航走距離 (travel) を船長を尺度として表したもので、いわゆる何艇身というに当る。 $ds/dt=(V/L)t$ であるから方程式は

$$T' \frac{d\theta'(s)}{ds} + \theta'(s) = K' \delta \quad \text{となる。}$$

θ' は $d\theta/ds$ で無次元角度 (L/R) に等しい。 K', T' は速力によつて変らないから t の代りに s を使うと上記の不都合が避けられる。全く同様の解析の手順で K', T' を得る。

自航模型試験においては第 3 図の如き流速計を使い、その一回転毎にマークが記録されるようにしておくことと次の手順が便利に使われる。翼車流速計の回転数 rps' と V は一般に直線関係にある。この直線が原点を通るならば流速計の一回転は完全に一定の航走距離に対応し、従つて上記のマークは s の目盛として使われる。実際には摩擦のため原点を通らないが速力変化の巾の小さい Z 試験や正弦操舵では試験中の平均の rps' に対応する点と原点を結ぶ直線で実際の検定直線を近似すると考えて流速計回転マークを s の目盛として使つて十分である。マークを s' とすると $L \cdot (rps')_{\text{mean}} / V_{\text{mean}} = s'/s$ の関係があるから、 s' ベースにすべての計算を進めて得た K, T に s'/s および s/s' をそれぞれ乗すれば K', T' が得られる。この手順は t ベースの解析と同じ手数で速力変動の影響を自動的に修正する。

3-4 最小自乗法

3-2 の連立方程式法は計算に便利ないくつかの時刻を選んで運動方程式を適用し指数 K, T を求めたが、この K, T が観測された θ と δ の関係を試験全体を通じて最もよく表しているという保証はない。この観点からすれば、もつと多くの時刻を等間隔に選び各々に運動方程式を適用して未知数 K, T, δ_r に対する多くの方程式を作り、最小自乗法を使つて最も確からしい K, T を求める方法がより合理的である。

2) 積分範囲を $t=0$ から t_0, t_0', t_0'' にとる方法もあるが、此処に述べる方法の方がよい結果を得る様である。

SHIP

EXP No.

DATE

t_e 280 t_e' 740 t_e'' 1200 θ_e -310 θ_e' 315 θ_e'' -310 δ_1 -20
 t_2 180 t_4 610 t_6 1090 θ_2 -200 θ_4 200 θ_6 -200 δ_2 +20
 $t_e - t_2$ 100 $t_e' - t_4$ 130 $t_e'' - t_6$ 110 $\delta_2 - \delta_1$ -20
 $\delta_2 - \delta_1$ -20
 t_1 30 t_2 180 t_4 610 t_6 1090 θ_2 -200 θ_4 200 θ_6 -200 δ_2 +20
 $t_{1/2}$ 15 t_3 240 t_5 67 t_7 115 rps' 230
 $(+)$ 42 $(+)$ 123 $(+)$ 224 V 885 rpm 230
 $(\frac{1}{2})$ 210 $(\frac{1}{2})$ 64 $(\frac{1}{2})$ 112 $\frac{L \cdot rps'}{V}$ 1106

	δ_1 -390	δ_2 878	δ_3 -960	t_e 740	$\int_{t_2}^{t_e} \delta_m dt$	θ_e'
$-\delta_1$ -390				④ 740	$\times K \delta_r + 288 \times K = 31.5$	
$-\delta_2$ -15	$-(t_2+t_4)/2$ 21	$-(t_4+t_6)/2$ 64	$-(t_6+t_e)/2$ 112	③ 1200	$" - 312 \times " = -31.0$	
$(t_1+t_3)/2$ 21	$(+)$ 195	$(+)$ 439	$(+)$ 48	$\times 120$	34555 = 3780	
δ_1 -390	δ_2 (+) 878	δ_3 (-) 960		$\times 74$	-23090 = -2245	
$-\delta_1$ -390	$-\delta_2$ -878	$-\delta_3$ -960			57645 K = 6075	
$-\delta_2$ -15	$-\delta_3$ -12	$-\delta_4$ -12			K = .105	
t_e 280	t_e' 74	t_e'' 120		④ 74	$\times K \delta_r + 288 \times .105 = 31.5$	
$(+)$ 70	$(+)$ 10	$(+)$ 8			-30.3	
δ_2 (+) 140	δ_3 (+) 200	δ_4 (+) 160		③ 120	$\times K \delta_r - 312 \times .105 = -31.0$	
$\int_{t_2}^{t_e} \delta_m dt$ -250	$\int_{t_4}^{t_e'} \delta_m dt$ 288	$\int_{t_6}^{t_e''} \delta_m dt$ -312			32.9	
$(t_2+t_4)/2$ 21	$(t_4+t_6)/2$ 64	$(t_6+t_e)/2$ 112			1.9	
$-t_2$ -18	$-t_4$ -61	$-t_6$ -109			$K \delta_r = + 0.16$	
$(+)$ 3	$(+)$ 3	$(+)$ 3			$\delta_r = + 152$	
δ_1 (+) -60	δ_2 (+) 60	δ_3 (+) -60		δ_r	.152	
$\int_{t_2}^{t_e} \delta_m dt$ 180	$\int_{t_4}^{t_e'} \delta_m dt$ -140	$\int_{t_6}^{t_e''} \delta_m dt$ 100		t_e	280	
$\delta_1(t_e-t_2)$ 1	$\delta_2(t_e'-t_4)$ 2	$\delta_3(t_e''-t_6)$ 2		$\delta_r t_e$	4	
$(+)$ 181	$(+)$ -138	$(+)$ 102		$\int_{t_2}^{t_e} \delta_m dt$	-250	
$K(1)$ 10.2	$K(2)$ -14.5	$K(3)$ 10.7		$(+)$	-246	
$(\theta_e - \theta_2) - 11.0$	$(\theta_e' - \theta_4) 11.5$	$(\theta_e'' - \theta_6) - 11.0$		θ_e	-310	
$(1) - K(1) - 21.2$	26.0	-21.7		$K_{\text{④}} = \theta_e / (+) .126$		
$\theta_2 - 1.75$	$\theta_4 1.65$	$\theta_6 - 1.55$		$K_{\text{③}}$	.105	
T 12.1	15.8	14.0		$K_{\text{④}}$	.231	
$T_{\text{④}}$ 12.1	$T_{\text{③}}$ 14.9	15.8		K_{mean}	.116	
$L \times B \times D$ 800 x 134 x 6.25	14.9	29.8		T_{mean}	13.5	
ds 469 Δ 2325	12.1	14.9		K_m	1.05	
$d\delta$ 307 $\theta/L \delta$ 27.0	27.0	13.5		T_m	14.9	
d_m 3.88 $Ar/L \delta$ 0.314	1/31.9					
C_b .544						

この方法は t ベースでも前節の s' ベースでも同様に使えるがここでは s' ベースの測定方程式を示す。試験開始に $s'=0$ ととり、適当な等間隔に選んだ s' まで次々に運動方程式を積分して次の形の測定方程式が得られる。

$$T^*[\dot{\theta}_0^* - \dot{\theta}^*] + K^* \int_0^{s'} \delta_m ds' + K^* \delta_r s' = 0$$

$$K^* = \frac{V}{L \cdot r \cdot p s'} K', \quad T^* = \frac{L \cdot r \cdot p s'}{V} T', \quad \dot{\theta}^* = d\theta/ds', \quad \dot{\theta}_0^* = |d\theta/ds'|_{s'=0}$$

$\dot{\theta}^*$ は観測結果を定差微分して得る。最小自乗法の手続によって未知数 K^*, T^*, δ_r を得、 K', T' を得る。

第 11 図 Z 試験解析結果の検算

K', T' は小さい。しかし非線型影響の性質から考えてこの変化は舵角に関係するというよりは、回頭角速度の強さに、より直接的に関係しているはずである。従つて試験中の角速度の平均的な値に対して K', T' を表示するのが合理的であろう。無次元角速度 $\dot{\theta}/(V/L) = (L/R)$ の自乗平均値は最小自乗法解析においてはその過程で得られるからこれを使えばよい。常用法では別にこれを求めねばならないが、簡単には舵を切返すときの角速度、略角速度の極大値であるが、この絶対値の平均に 0.7 を乗じても大差ない値が得られる。比較の標準であるからこれでもよいと思われる。

第 12 図はこのような表示の例で回頭運動が強くなると K', T' 共に減少することを明らかに示す。この K' 対 (L/R) 曲線が旋回試験からの平均的 K' 対 (L/R) 曲線に一致するとなればみごとであるが図に示すごとく少し差が出るようである。 $(L/R)=0$ すなわち直進では両者は略一致するといえるが (L/R) の増加に伴う K' の減少は Z 試験の方が急である。もともと非線型影響を丸めた線型方程式をさらに単純化した一次系近似の解析であるからこの程度の矛盾は止むを得まい。この辺りが一次系近似の限界であつて、確かにこの近似は簡単な方程式で船の操縦運動の性質を端的に表わし実用上便利なものではあるが、一方その限界を越えた精密さは期待できないことをこの不一致は示しているといえよう。それはとにかく、Z 試験とその一次系近似解析は実船、模型船を通じて少数の試験航走と簡単な計算からその船型の操縦性の概略を知ることができる所に捨て難い価値がある。

船型、舵面積等を変えて Z 試験を繰返し得られた K', T' を $K-T$ 図表その他の方法で整理し種々の考察を加えたり、実

この方法で得た K, T を原方程式に入れて行なつた検算を、常用法のそれと共に第 11 図に示す。確かにこの方がよい結果を得ている。一方この計算は電動計算機を使つても常用法の 2 倍以上の工数を要し且つ計算に、より高い熟練が要求される。電子計算機の利用はこの困難を略解決するが、とにかくこの方法の問題点は計算労力にある。

3.5 Z 試験と非線型影響

Z 試験では回頭運動が相当強くなる部分があるから K', T' は非線型影響によつてある程度変動している。以上の線型解析で得た K', T' は従つて試験中を通ずる平均的なものである。あるいは等価的線型係数といつてもよい。だから舵角の異なる試験から得られた K', T' には普通相当の差があり、舵角が大きい程

第 12 図 Z 試験結果の一例

用上の資料を作ることも期待できるわけであるが、これらは他の機会に譲りたい[9]。

4 自航模型操縦試験の実験手段

4.1 無線操縦装置

自航模型操縦試験において運転計測員が模型船に乗ることは4米以上の模型では可能であるが、実行してみると乗員の身動きによる横揺を防ぐことは極めて困難である。この横揺がどの程度結果を左右するかは定かでないが信頼できる無線操縦装置が得られるならばその方が望ましい。一方計測量をラヂオ・テレメータリングによって陸上で記録する方式と模型船に自記記録装置を積む方式は一長一短が考えられる。自航模型はロケット等と異なり、試験航走が終る毎に容易に確実に手許に帰つて来るものであり、また目で十分追える範囲内で行動することを考えるとテレメータリングの必要は基本的なものではない。その長所としてはデータ処理の自動化と結ぶ実験工数の低減を第一にあげるべきであろう。普通の旋回操縦試験でデータ処理工数はしばしば実験の3倍に及ぶからこの問題も軽視できないが、一方信頼できるテレメータリング並びにそれなくしてはテレメータの意味の過半を失うところのデータ自動処理は無線操縦と比較にならない技術的経済的困難を伴なう。こう考えて来ると無線操縦—自記記録の方式が現在の所では实际的だという考え方もできるであろう。

無線機としては種々の考慮から短波ないし超短波の使用が有利であるが、特に最近広く市販されている模型飛行機用ラヂコンの利用は实际的である。この装置は商品化の過程において多くの洗練を経て信頼性が高く無線機の不調で実験を乱されることが少ない。経費的にも有利でありまた周波数割当の面倒のないことも都合がよい。唯、この装置の操作部はゴム動力の簡単なもので実験の目的には使えないからこの装置の無線部分を10チャンネルのスイッチ回路として利用し、操作部としては目的に応ずるリレー回路を作るべきである。この方式で手軽に信頼性の高い無線操縦装置を作ることができる。

操作部リレー回路は実験目的によるが、全力前進、後進、停止、記録器の起動停止は問題のない所であろう。加速用の過負荷前進は水面の有効な利用上必要であるが、これは発進時だけのものだから手動のタイム・リレーでよい。主軸回転数を連続的に制御することは普通は必要なく、また十分信頼性の高い制御にしないと却つて混乱を招く恐れがある。

操舵の型式は数多考えられるが、ある信号で一定舵角まで操舵し、他の信号で中央に戻す動作は先ず必要である。これに加えて自動復帰方式、信号が送られる間はある舵角を保ち信号が切れると舵中央に戻る動作を使うことが望ましい。これは試験に先立ち模型船を直進させるのに極めて有効であり、試験終了後の帰投にも便利に使われる。舵を任意に連続的に制御できるのは確かによいことであるが、上の二方式を独立に設け両者の指定舵角を前以て調整できるようにしておけば普通の試験では少しも不都合はなく、また連続制御に比べて遙かに簡単に精度と信頼性のよい操舵をさせることができる。正弦操舵や旋回正弦操舵をさせるにはスコッチ・ヨークによる正弦操舵と直接駆動の定角速度操舵の両機構を機構的に直列に接いだ一種のduplicate方式が便利であろう。どちらの機構で操舵するかは発進前の操作と無線信号の組合せで適当に選ばれる。第13図は以上の方式による無線操縦装置の操舵用リレー回路を、第14図は操舵機を示す。 $\pm\delta_2$ は一杯操舵、 $\pm\delta_1$ は自動復帰操舵でその角度はshadow pieceで設定する。

第13図 無線操縦操舵リレー回路（正弦操舵を除く）

第14図 自航模型操縦試験用操舵機

4.2 計測に関する問題点

計測で特に問題になるのは回頭角の精密な測定である。造協論文集106号に示す自由ジャイロの回頭角を鋸歯円板とフォトトランジスタで測るのは一つの有効な方式でこれで略 0.1° まで測ることができる。この方法は舵角にも利用できる。レイト・ジャイロで角速度を測るのもよい方法であるがジャイロの回転を一定に保つこと、ピック・アップの精度と周波数特性に留意する必要がある。

この他に前述した対水速力の測定はこの種の実験にほとんど必要不可欠といつてよいこと、舵直圧力の測定は旋回操縦性の研究においても多くの情報を与えること、横流れ角の測定亦同じであること等に注意したい。流速計の回転数ピックアップにはフォト・トランジスタが便利である。安定した結果を得るには軸受の摩擦に十分の注意を要する。また船底から $0.5d$ 位下げて横流れによる流速増加を防ぐ必要がある。舵直圧力の測定は舵軸を canti-lever として舵を支持し、舵軸の一部を薄肉円筒にしてその歪をストレイン・ゲージで測る方法が便利であろう。信頼できる直圧力を得るには上下2組のゲージを差動的に使う4ゲージ法がよい。横流れ角 β の測定は

第15図 β 観測の原理

一般的には風向板式の drift angle vane が有効と思われる。もし2.1の考え方で行けば定常旋回中の β だけを知ればよいがそれならば次の方法も比較的簡単で精度がある。重心と船尾にマストを立て、塗分けによって一定の長さを表示する。陸岸の一点から旋回円への切線の切点付近で船の運動をシネカメラで撮影すると、二本のマストは少しの時間において次々に最も外側へ出る。最外側位置の間隔を最外側位置でのマストの長さ標識を尺度に測れば二本のマストの旋回半径の差 ΔR が得られる(第15図)。

これから

$$\sin \beta = \left(1 + \frac{\Delta R}{2R}\right) \frac{\Delta R}{l_r} - \frac{l_r}{2R} \quad \begin{array}{l} l_r: \text{マスト間隔} \\ R: \text{重心の旋回半径} \end{array}$$

が計算される。データ読取には停止投影のできる映写機が便利である。

背景に明確な目標を設けること、マストの垂直並びに左右位置の誤差に注意することが必要である。カラーの使用は読取を楽にする。5~6 駒毎秒の低速撮影ができれば都合がよい。

引用文献

- [8] 元良誠三 船体運動における付加質量について 造協論文集 105, 106, 昭和34年
- [9] 野本謙作 Z試験の解析と操縦性指数(訳名) ティラー水槽 1960 シンポジウム論文集