

(昭和 41 年 11 月造船協会秋季講演会において講演)

船首揺にもとづく推進馬力の損失について

正員 野 本 謙 作*

正員 元 山 登 雄**

Loss of Propulsive Power Caused by Yawing
with Particular Reference to Automatic SteeringBy Kensaku Nomoto, *Member*
and Takao Motoyama, *Member*

Summary

It is widely known among seamen that the automatic steering introduces sometimes a sluggish yawing with fairly a long period, say, around 100 sec. This is an inherent oscillation of the whole system which is composed of a ship, steering gear and auto-steering device, being naturally accompanied with rudder movement of the same period. This yawing is not vital from the navigational point of view, but it may cause a considerable loss of propulsive power.

An analysis with the equation of motion (Chapter 2) shows that the power loss results largely from an inertial resistance induced by yawing and the resistive component of rudder force. Yawing experiments for free-running models of an oil-tanker and two cargo-boats supported the analysis (Chapter 3 & 4). The incremental resistance is given as Eq. (5) and its rough estimation can be done practically by Eqs. (7) and (8).

Applying these results, the power losses under automatic course-keeping for two typical merchantmen, a tanker and a cargo-boat, are estimated as much as 2 to 5% for reasonable adjustment of auto-steering device and in rather an exceptional case it may reach even 20% of the normal power.

1 緒 論

自動操舵による保針は現在ほとんどすべての航洋船舶で常用されている。この装置は針路の誤差をコンパスで検知し、その誤差信号でリレー回路を作動せしめて針路修正の操舵を行うものであるから、その性質上なにがしかの操舵おくれは避けがたい。これに加えて現用の装置では、コンパスからの針路誤差信号伝達の途中に調節可能な遊隙（機構的または電氣的）を設け、個々の波が誘起する小振幅の船首揺には応答しない様になつている。いわゆる“天候調整”機構がこれであるが、この遊隙もまた、針路誤差が現れてから舵が動くまでのおくれを大きくする。

自動制御理論の示す所によれば、信号伝達の“おくれ”は自動制御系の安定を害し、系の固有振動の減衰を劣化する。この理論によつて計算を行なうと満載状態の商船においてはしばしば周期 100 秒前後、振幅数度以内位の長周期の船首揺が自動操舵系の自由振動として現われることが示される⁽¹⁾。事実この位の yawing は実船のコース・レコーダー記録によく見受けられるものである。

ところでこの程度の振幅、周期の船首揺は大洋中航行に関する限り、航海術上または船の安全の見地からは余り問題とならないであろう。しかし一方ではこの程度の運動にしても、その誘起する推進馬力の損失は必ずしも無視できない可能性がある。例えば元良氏はある貨物船の実例について近似的な計算を行ない、この損失が平水直進馬力の 10% に達することを示した⁽²⁾。

原稿受付 昭和 41 年 7 月 10 日

* 大阪大学工学部造船学教室

** 大阪大学大学院工学研究科（当時） 三井造船株式会社玉野造船所（現在）

最近のタンカーでは大型肥大化に伴い保針性の劣化が目立つ様になり、一体商船としてはどの程度の保針性が最少限必要であるかが現実的な課題となりつつある。保針性の劣化は自動操舵下の長周期 yawing を助長し⁽¹⁾、この原因による推進馬力損失を増大させる。そこで上の課題に対する一つの判定基準として、船首揺れにもとづく馬力損失をある値以下に抑えるにはいか程の船固有の保針性を必要とするかと云う立場が考えられる。おそらくこの問題は狭水域における保安上の考慮と並んで大型タンカーのもつべき必要最少限の操縦性を決定する要因たるべきものであろう。

また、この問題はオート・パイロットの設計やその調整等に関しても十分意を用うべきものと考ええる。

本論文はこのような背景の下に、船首揺れが誘起する推進馬力損失について論ずるものである。

2 力学的解析

操縦運動の方程式は第1図に示す座標および記号を用い、普通の手順に従って次のごとく書かれる。

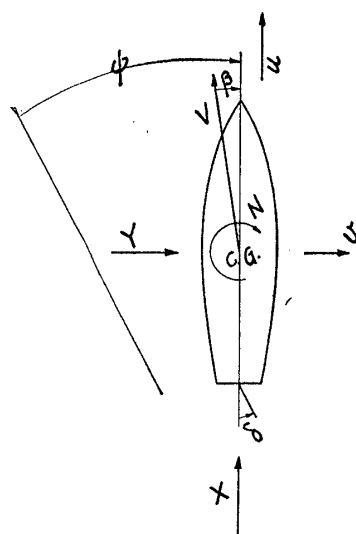


図1 Co-ordinates and Notations

$$\left. \begin{aligned} (m+m_x)\dot{u}-(m+m_y)v\dot{\psi} &= X \\ (m+m_y)\dot{v}+(m+m_x)u\dot{\psi} &= Y \\ (I+I_z)\ddot{\psi} &= N \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

m_x, m_y, I_z は付加質量, X, Y, N は船にはたらく流力的諸力である。

操縦に伴う surging (前進速力変動) は第一式で表わされるが、今の場合、 V の変動分は V に比べて大変小さく、また β は小さい角度であるから、この式を書きかえると

$$T(1-t) = (m+m_x)\dot{V} + (m+m_y)V\beta\dot{\psi} + R + R_r \quad (2)$$

ここに T : 推力, t : 推力減少率, R : 船体走行抵抗, R_r : 舵の抵抗

(2) 式は操縦運動中に推進器が負担すべき推力 T を示す。

自動操舵を行なうとき現われる船首揺れは完全に単一周期の正弦振動ではないにしても、それにかなり近いものである。自動操舵系の自由振動の計算では単一周期の yawing が得られるが、実際の状態では、つぎつぎに船に作用する“不規則”な外乱が、甚だ減衰の悪いこの自由振動を絶えず誘発している形となる。このような場合の運動が鋭いスペクトルをもち、それは本質的にはほとんど非減衰の自由振動そのものであることはエネルギー・スペクトラムの考え方を使つて容易に示すことができる。事実、満載航海時のコース・レコーダー

記録を見ると、この形の長周期、規則的な船首揺れがしばしば認められる。

このことを考慮するならば、自動操舵航行中の yawing にもとづく馬力損失を考えるに当つて単一周期の正弦振動を以て yawing を代表させることは妥当であろう。この場合、舵もまた同じ周期で正弦振動を行なうことになる。この取扱はまた、yawing のエネルギー・スペクトラムを与えて全馬力損失を計算する方法に直接つながるものである。

かくして単一周期の定常船首揺れを考えることにすれば、yawing 角速度 $\dot{\psi}$, 横流れ角 β , 舵角 δ はすべて操舵周期で正弦的に変化しているから

$$\dot{\psi} = |\dot{\psi}| \sin(\omega t + \phi), \quad \beta = |\beta| \sin(\omega t + \phi_\beta), \quad \delta = |\delta| \sin \omega t$$

|| は半振幅を示し、 ϕ は $\delta - \dot{\psi}$ 間の、 ϕ_β は $\delta - \beta$ 間の位相差を示す。(2) 式の慣性第二項を計算すると

$$(m+m_y)V\beta\dot{\psi} = \frac{1}{2}(m+m_y)\bar{V}|\beta|\cdot|\dot{\psi}|\{\cos(\phi-\phi_\beta) - \cos(2\omega t + \phi + \phi_\beta)\} \quad (3)$$

なお V の変動は後で述べるように極めて小さいので単に平均値 $\bar{V}$ をとればよい。慣性抵抗の項は、ある平均値の上下に、操舵の倍周波数で正弦的变化を行なうことがわかる。

舵抵抗は舵直圧力の抵抗成分を考えて

$$R_r = \frac{\rho}{2} A_R V_r^2 \frac{\partial C_N}{\partial \alpha} \delta^2 = \frac{\rho}{4} A_R V_r^2 \frac{\partial C_N}{\partial \alpha} |\delta|^2 (1 - \cos 2\omega t) \quad (4)$$

これまた、ある平均値の上下に操舵倍周波数の変動をなす。 A_R : 舵面積, V_r : 舵への流入速力, $\partial C_N / \partial \alpha$: 直圧力傾斜である。

船体の抵抗 R はいまの程度の船首揺れでは直進時とほとんど変わらず一定と見なしてもよいが、一般にはこれもま

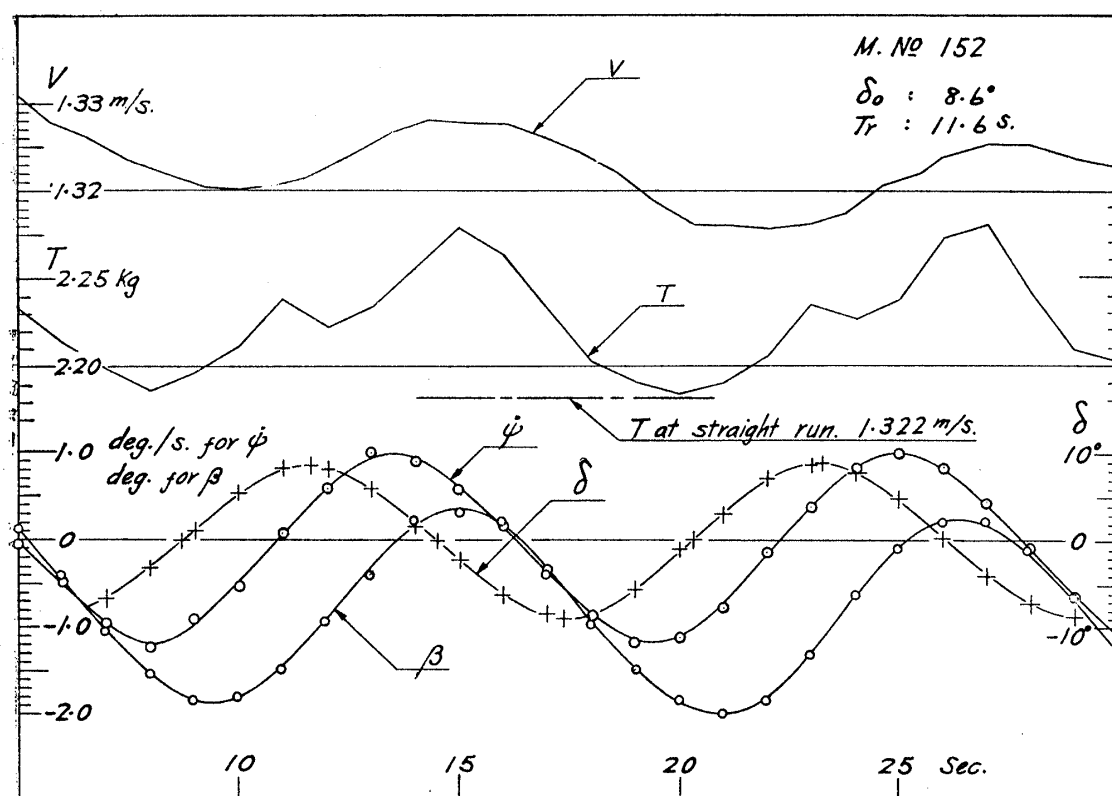


図 2 Measured Ship Motions and Propeller Thrust at periodic Yawing

た、ある平均値プラス yawing の倍周波数変動の形になる。

一方 yawing 中の推力を自航模型船で測ると、例えば第 2 図の如く操舵周期を基本波とする複雑な変動を示し、上記から期待される操舵倍周波数の成分は別に顕著でない。

これは一見不合理に見えるが、そうではない。推進器の発生推力（自航試験で測られる推力）は一定の回転数に対し推進器に流入する流速だけで決まるものであり、この流速が別に操舵の倍周波数で変る理由はない。別の言い方をすれば、発生推力は回転数と流入速度だけで決まるもので、慣性力や舵抵抗と直接の関係はないのである。この点は次章で再び触れるであろう。

しかしながら時々刻々の発生推力が (2) 式で表わされるところの、運動に必要な推力に全体として等しいことは疑う余地がない。従つてこの差は慣性第一項 $(m+m_x)\dot{V}$ で埋められねばならない。かくして $\dot{V}$ には慣性抵抗や舵抵抗から生ずる操舵倍周波数の成分も yawing 中の伴流変動を反映する推進器推力の複雑な変動成分も、二つながら含まれていることになり、その波形は多くの要素を含むものである。唯、船の質量 $(m+m_x)$ が非常に大きいために $\dot{V}$ の振幅は極めて小さく、それを積分して得られる速力の変動もほとんど現れないのである。例えば重量 700 kg の模型船で観測される推力変動振幅は 50~100 gr., 慣性抵抗および舵抵抗の振幅は合計 100 gr. の程度である。これはたかだか $\dot{V}=0.003\text{ m/s}^2$ に対応し、実船換算 200 秒の長周期でも約 1% の速力変動振幅を生ずるにすぎない。従つてまた、 $(m+m_y)V\beta\dot{\psi}$ や R_r の平均を考えるに当つて V の変動は無視して差支えなく、平均速力 $\bar{V}$ をとれば十分である。

このように周期的変動分については $(m+m_y)V\beta\dot{\psi}$ と R_r は操舵倍周波数で変動し、一方、推進器に作用する推力はまた別の周期変動を行ない、その差を $(m+m_x)\dot{V}$ が埋める。一方平均値については、船が全体として加速または減速してない限り $\dot{V}$ の一周期平均値は零となるから、推進器推力の平均値と $(m+m_y)V\beta\dot{\psi}+R_r$ の平均値はバランスしなければならない。船体抵抗 R は yawing しても直進と大差ないから、結局 $(m+m_y)V\beta\dot{\psi}+R_r$ の平均値が yawing による推力増加に対応することになる。

ついでながら、以上の考察は若干の注意すべき結果を生む。

1. 計測される推力およびトルクの変動分は船首揺れに伴う伴流分布の変動を反映するものであつて、推進馬力損失に寄与するところの慣性抵抗ならびに舵抵抗の変動の模様とは云わば無関係の動きをしている。従つて例え

ば実船就航時に計測されたトルク変動から操舵周期または船首揺周期の成分を抽出しても、これは船首揺にもとづく推進馬力増加には結び着かない。このことは操舵倍周波数を取つてももちろん同じである。馬力損失は平均船速に対する平均推力が平水中直進に比べて、どれだけ増加するかによつて考えなければならない。

2. 全く類推的な結論は yawing 以外の動揺についても成立つ。例えば rolling は推進器位置に周期的な斜流を誘起する。普通の船ではその振幅は rolling 角度の order, 周期はむしろ rolling 周期に等しい。yawing の実験例から考えてこの周期的斜流はかなり目立つた rolling 周期のトルク変動を与えらると思われが、それと rolling にもとづく推進馬力増加とは必ずしも直接結び着かない。

これらの一見意外にも見える事柄は、基本的には船の運動に基因する前進抵抗の増加が運動の一乗でなしに、その自乗量に関係し、従つてそれは運動の周波数ではなしに、ある平均値プラス運動の倍周波数変動の形の時間的变化を行うことに因つてゐる。推進馬力の損失はもちろん、この平均値の方に依存するものである。

yawing 中の平均推力と推進馬力損失：yawing 中の推力の一周期平均値は以上の考察と (3), (4) 式からつぎの如く与えられる。

$$\bar{T}(1-t) = \frac{1}{2}(m+m_y)\bar{V}|\dot{\psi}| \cdot |\beta| \cos(\phi-\phi_\beta) + \frac{\rho}{4} A_R V_r^2 \frac{\partial C_N}{\partial \alpha} |\delta|^2 + \bar{R} \quad (5)$$

R は船の longi 方向に作用する抵抗であつて、ある瞬間の船の進行方向に反対にはたらく抗力ではない。横流れ角 β は小さいけれども、それでも抗力と抵抗には相当の差があり両者を同一視することはできない。推力とバランスするのは抵抗の方である。抗力は β と共に明らかに増加するが、抵抗は小さい β に対しては直進抵抗とはほとんど変わらないようである^{(3), (4)*}。

この結果によると、yawing 角速度 $\dot{\psi}$ と横流れ角 β が同位相に近いときは $\cos(\phi-\phi_\beta) \approx 1$ となり、慣性抵抗は平均推力増加に寄与する。本来この項は $(m+m_x)\dot{V}$ と同じく慣性の項であるから、船が全体として増速または減速していない限り、平均すれば消失しそうなものであるが必ずしもそうならないことになる。

この項は見方によれば船の旋回運動の遠心力の抵抗成分であるが、 $\dot{\psi}$ と β が同位相に近いときは右旋しても左旋しても遠心力は常に後向きの成分、すなわち抵抗成分をもつことになり、従つてその平均値はある大きさの抵抗になると解釈することができる。

自動操舵下に現われる船首揺は本質的には自動操舵系の自由振動であるから、それは直接には操舵によつて誘起されている運動である。操舵によつて起こる $\dot{\psi}$ と β の位相関係は原運動方程式 (1) の第二、三式を連立に解いて求めることができる。すなわち V の変動、 $\dot{\psi}$, β は一般に小さいから、普通の手順に従つて両式を線型化し、それから β まは $\dot{\psi}$ を消去すればそれぞれ次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} T_1 T_2 \frac{d^2 \dot{\psi}}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{d\dot{\psi}}{dt} + \dot{\psi} &= K\delta + K T_3 \frac{d\delta}{dt} \\ T_1 T_2 \frac{d^2 \beta}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{d\beta}{dt} + \beta &= K_\beta \delta + K_\beta T_{3\beta} \frac{d\delta}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここに K , T_1 , T_2 , T_3 および K_β , $T_{3\beta}$ は原方程式 (1) を線型化した方程式の係数から組立てられ、船型や舵面積の函数となる⁽⁵⁾。これから直ちに、周波数 ω の周期的操舵に対し

$$\begin{aligned} \phi &= \text{Arg} \frac{K(i+\omega T_3)}{(1+i\omega T_1)(1+i\omega T_2)} \\ \phi_\beta &= \text{Arg} \frac{K_\beta(1+i\omega T_{3\beta})}{(1+i\omega T_1)(1+i\omega T_2)} \end{aligned}$$

が得られる。一般に排水型船舶に対しては $T_1 \gg T_3 > T_2 > T_{3\beta}$ 且つ $T_{3\beta} \approx 0.3 T_3$ の程度であるから⁽⁵⁾, ϕ と ϕ_β はよく似た値となり、細かく云えば ϕ_β の方が少し大きい。すなわち操舵によつて起された船首揺においては ϕ と ϕ_β は略同位相であり、従つて yawing することによつて余分の平均推力を必要とすることになる。これはもちろん、推進馬力の増加を招き、その量は場合によつては相当大きいものになる。

一方、波によつて直接誘起される船首揺においては、例えば江田氏の計算⁽⁶⁾ が示すように β と $\dot{\psi}$ はほとんど直角位相となり、従つてこの原因による平均推力の増加はない。

* これに関連するが、模型船を yawing させながら曳行して抵抗を測る場合、その解析には、この点注意すべきであろう。

又、文献 (4) で測られた斜航時 X-Force は (推力-抵抗) であるから、同一船型について斜航時推力を測り、それを差引いて斜航時走行抵抗を求めた。

このようにして周期的操舵と船首揺れを行ないながら航行するのに必要な平均推力が与えられた。(5)式中 $\bar{R}$ は自動操舵程度の yawing では直進抵抗とほとんど変わらないから、結局、慣性抵抗と舵抵抗が余分な推力に対応する。なおこれは元良氏の近似計算の結論⁽²⁾ に一致する。さきに示したように船速の変動はほとんどないから、この余分の推力と速力の積が、そのまま余分の推力馬力となる。あるいは、余分の推力の直進推力に対する割合がそのまま推進馬力損失の割合になる。

(5) 式に見られるように yawing による余分の推力は略 V^2 で従って馬力は V^3 で増加する。従って yawing によつて平均速力も僅かに落ちるけれども、それよりも馬力増加の方が著しく表われることになる。

3 船首揺れ中の推進器推力の変動に関する実験

自由に航走する模型船を使い、yawing 中の推力を連続測定すると第2図のような結果が得られる。推力変動は運動が烈しい程目立つて来るが、一般に平均推力の5~10%位の振幅を示す。変動の波形は複雑であるが、操舵周期の成分が卓越することが多い。

船速変動を流速計で測ると(第2図参照)、前の解析から期待される通り大変小さく、この船速変化によるスリップの変動では到底このような大きい推力変動は説明できない。推進器回転数は一定と見てよいから、残る原因としては船首揺れに伴う横流れが考えられる。この程度の船首揺れでは横流れ角 β は $0.5 \sim 3^\circ$ 、無次元角速度 r' は $0.03 \sim 0.1$ 位であるから、推進器位置では $\pm 1^\circ \sim 6^\circ$ 位の振幅で β の周期的変化がある。

一様斜流をうける推進器性能に関する資料⁽⁷⁾によれば、推進器の単なる斜航を考える限りではこの程度の横流れで上の如き推力変動を説明することはできない。

しかし船尾伴流場の著しい左右方向の分布を考えるならば、僅かの斜流といえども相当大きい有効伴流の変化を与えるかも知れない。伴流に対する船首揺れの影響を考えるに当つて、船尾横流れ角 β_r のみに運動状態を還元するのは十分正しくはなく、理想的には重心の横流れ角 β と旋回曲率 r' の二変数を使うべきである。しかし基本的に効くのは β_r であろうとの推定と実験の容易さを取つて、ここでは船を β_r の角度で斜航せしめ推力の測定から斜航時の有効伴流係数を求めてみた。実際との相違は、yawing 中は旋回運動のために横流れ角が船首に近づく程小さくなるのに対し、この実験では一様に β_r である点である。

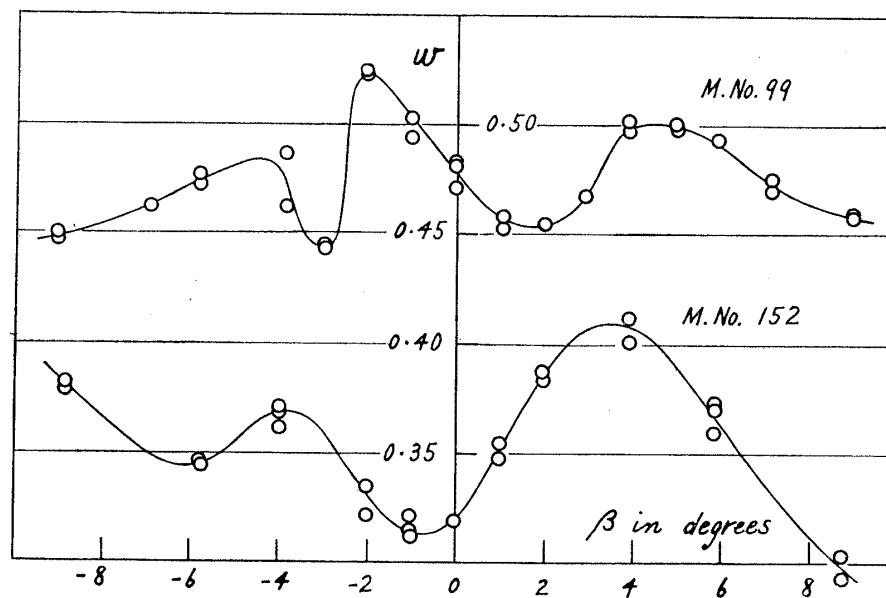


図3 Effective wake Fractions at Oblique Running

結果は第3図のごとく、 $2^\circ \sim 3^\circ$ の斜流でも有効伴流は大きく変化することが分つた。そこでこの結果を使つて yawing 中の推力変動を説明することを試みる。

yawing 中の β_r は測られた β と $\dot{\psi}$ から

$$\beta_r = \beta + \frac{r'}{2} = \beta + \dot{\psi} \left(\frac{V}{L} \right)$$

で求められる。

時々刻々の β_r に対する w を第3図から求め、時間に対してプロットすれば yawing 中の w の変化が推定できる。一方、yawing 中に測った推力から w を求め、両者を比較する。第4図はその一例であるが両者はよい一致を示す。ここに挙げた L/B 6.0, C_B 0.8 のタンカー (M. No. 99) では他の周期、舵角でも一般にこの考え方で推力変動をよく説明できるようである。

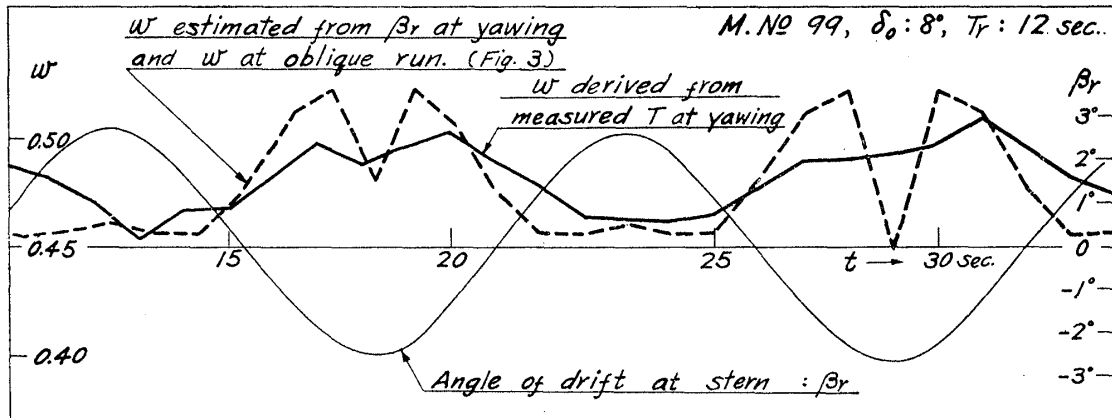


図4 Effective wake Fluctuation at Yawing

一方、他の例、貨物船 (M. No. 152), L/B 7.0, C_B 0.7 では振幅の方は略よいが位相ないし波形的には、この方法で余りよい一致が得られなかつた。これはおそらく肥大船型では粘性伴流が強く、これに対する yawing の影響は β_r で略代表されるのに対し、一般船型では potential wake, 特に circulation に依存するその影響が肥大船型より強く現われ、そのために β_r だけに問題を簡単化できず r' も併せ考えなければならないものかと想像される。この点は定常旋回中の推力を測るとか、或は旋回水槽で β と r' をいろいろに変えて推力または伴流場を測るならば更に明らかになるであろう。

それはさておき、以上の実験によつて yawing 中に見られる推進器推力の、従つてまたトルクの時間的変動は、yawing に伴う船尾伴流場の変動がその主因をなすものであることは明らかにされたと考えられる。

4 自航模型船による船首揺と推力増加の実験

自由に航走する模型船に一定振幅、周期の操舵を加えて船首揺を与え、推進器推力と船の運動を連続測定することは、船首揺と推力増加の関係を実験的に明らかにし、以上の解析の良否を総合的に確めるのに有益であろう。

第1表 供試模型船要目

M. No.	99	149	152
Remarks	SR 61-TANKER	CUT-UP STERN MARINER RUDDER	SERIES-60
$L_{pp}(M)$	4,500	4,325	4,500
L/B	6.00	6.53	7.00
B/d	2.76	2.72	2.50
C_B	0.80	0.81	0.70
$D(M/M)$	131	150	180
P/D	0.71	0.80	1.10
$E \cdot A \cdot R$	0.67	0.40	0.50
Z	5	4	4
A_R/Ld	1/70.1	1/70.6	1/71.3
λ	1.71	2.10	2.42
$V/\sqrt{Lg}$	0.17	0.18	0.20

模型船は第1表に示す三隻で、普通型タンカー、一般貨物船、ならびに特に進路安定の悪い純特殊貨物船の三者である。

実験は大部分、大阪大学試験水槽、80 m×7 m×3.6 mで行ない、一部は側壁影響を見る目的で、同操縦性試験池を使用した。その結果、この実験程度の船首揺と模型、水槽寸法比に対しては側壁影響は見分けがたいことが分つた。

船首揺の範囲は自動操舵時の長周期船首揺を代表するものとして舵振幅 $\pm 5^\circ \sim 15^\circ$ 、周期 7~25 秒 (実船換算 50~200 秒) 位の数種類を選ぶ。yawing 角度は $1^\circ \sim 5^\circ$ 程度となる。載貨状態は満載、速力は代表的な値一種に限つた。

平均航跡を水槽中心線に平行に船首揺させるには一寸した工夫がいる。中心線から少し離れた位置で模型船を

中心線に平行に（十分正確を要する）曳引車で曳行加速する。所定の速度に達したら、曳引車を一瞬減速して模型船を発進せしめ、同時に cosine 位相で操舵を始める。従つて発進時には最大舵角をとっているわけで、その方向は船を中心線へ向ける方向である。初期のシフト距離、舵振幅の中心 (effective な零舵角) 等は試走によつて若干調整する必要がある。

実験装置は一般の操縦性試験用諸装置の他に自航試験動力計を積む。水槽では長い釣竿の先から自由に垂らしたリード線で模型と曳引車を電氣的に連絡することができるが釣竿の操作には熟練を要する。特記すべきものとしては、対水速度を精密に測る流速計を船底に装備すべきである。横流れ角 β の計測を兼ねて、阪大水槽では第 5 図のごときものを使っているが、アクリライト製の軽いインペラと宝石軸受の採用で性能は満足できるものである。実績によれば 2mm/sec 以下の分解能と 1cm/sec 程度の総合精度を有する。船底より喫水の半分以上突出しておけば、模型船装着直進の検定だけで十分であり、旋回運動による速度誤差は考えなくてよいようである。

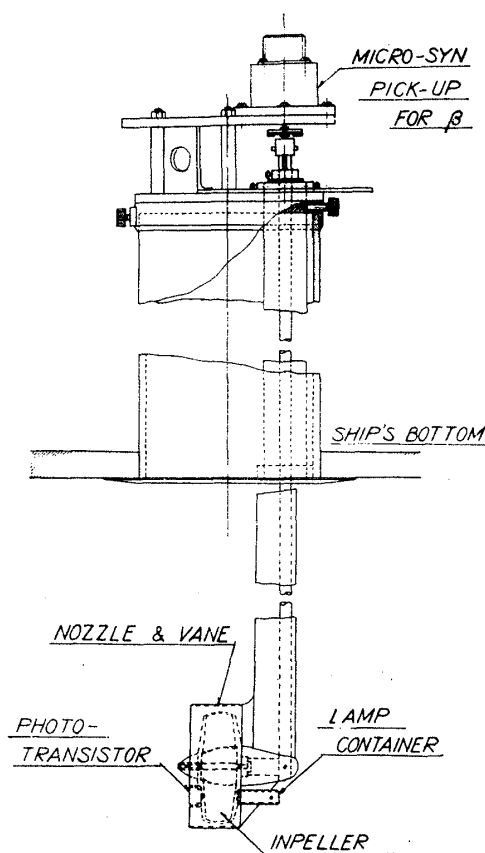


図 5 Speed and Drift Angle Pick-up

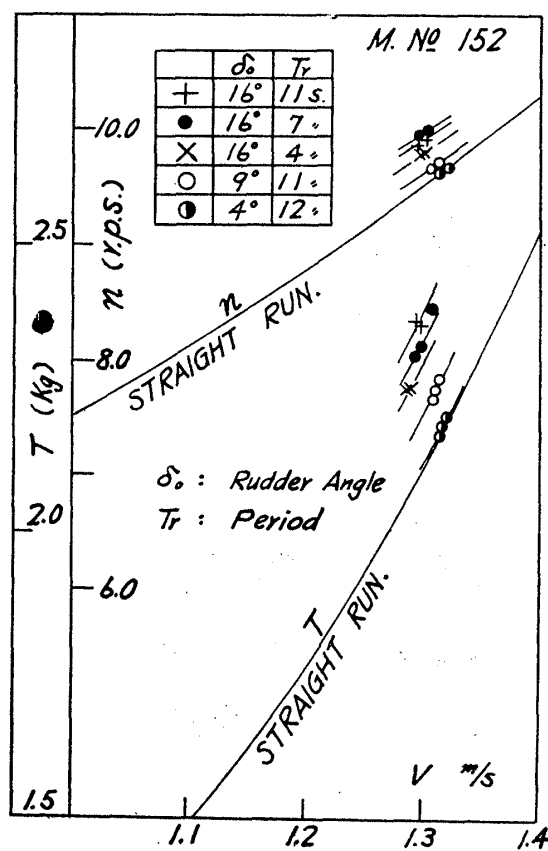


図 6 Thrust Increment at Yawing for a Cargo-Boat Model

測られた推力を何周期かにわたつて平均値を求め、同じ期間における平均速力に対してプロットする。速力は流速計による。

この yawing 自航では発進時速力と自航速力を完全に一致させることは困難で、平均速力が僅かながら徐々に増加または減少していることが多い。この平均加速度 $\bar{V}$ も流速計で読取り（流速の定差微分）、次の修正を行う。

$$\text{修正推力 } \Delta T = -\frac{1.06}{1-t} \frac{W}{g} \bar{V}$$

$$\text{修正回転数 } \Delta n = -\frac{1}{2} \frac{\Delta T}{T} n$$

ここに W : 排水重量, T, n は測定推力および回転数, この目的にも精密な流速計は不可欠である。

なお肥大船型などで推力測定値がばらつく傾向のある場合には、yawing 自航と直進自航を交互に行なつて、base となる直進自航の推力を check する必要があるようである。

第6図は結果の例である。確かに yawing が大きい程、また舵角が大きい程、平均推力の増加が大きい。

この実験で舵角 δ 、船の運動 $\dot{\psi}$ と β は連続記録されているから (5) 式に従つて慣性抵抗と舵抵抗の平均値を求めることができる。 t は直進自航の値を、また付加質量は元良チャートで推定した。舵抵抗は M. No. 152 では直接測定、他は次の藤井式⁽⁸⁾から求めた。 λ は舵のアスペクト比である。

$$N = \frac{\rho}{2} A_R V^2 (1-w)^2 (1+3.6 s^{1.5}) - \frac{6.1 \lambda}{\lambda+2.2} \delta$$

結果は第2表に示す通り、この考え方で船首揺にもとづく平均推力の増加を説明できることが分つた。すなわち ΔT_m と $(\Delta T_i + \Delta T_r)$ は計測誤差の範囲で一致している。

第2表 船首揺にもとづく推力増加

M.No.	V	$ \delta $	T_y	ΔT_m	ΔT_i	ΔT_r	$\Delta T_i + \Delta T_r$	$\Delta T_m / T_0$
99	1,125 m/s	16°0	11.6 s.	195 gr	87 gr	99 gr	186 gr	8.4%
		15.9	7.3	100	29	97	126	4.2
		9.7	10.8	80	25	29	54	3.5
		8.4	24.4	125	120	21	141	5.4
		4.6	10.8	20	4	6	10	0.8
149	1,210 m/s	15°8	13.6 s.	205	63	178	241	9.2
		15.6	8.0	215	17	176	193	9.6
		15.6	5.8	220	10	176	186	9.8
		8.6	19.3	70	29	45	74	2.9
		8.9	12.2	75	19	46	65	3.3
152	1,310 m/s	15°8	11.2 s.	270	63	186	249	12.6
		15.8	7.2	220	27	186	213	10.3
		15.8	4.3	185	4	186	190	8.8
		8.6	11.6	95	20	55	75	4.5
		4.3	11.9	26	5	13	18	1.2

T_y : yawing period,

ΔT_m : measured thrust increment

ΔT_i : estimated thrust increment by inertial resistance

ΔT_r : do. rudder resistance

T_0 : measured thrust at straight running

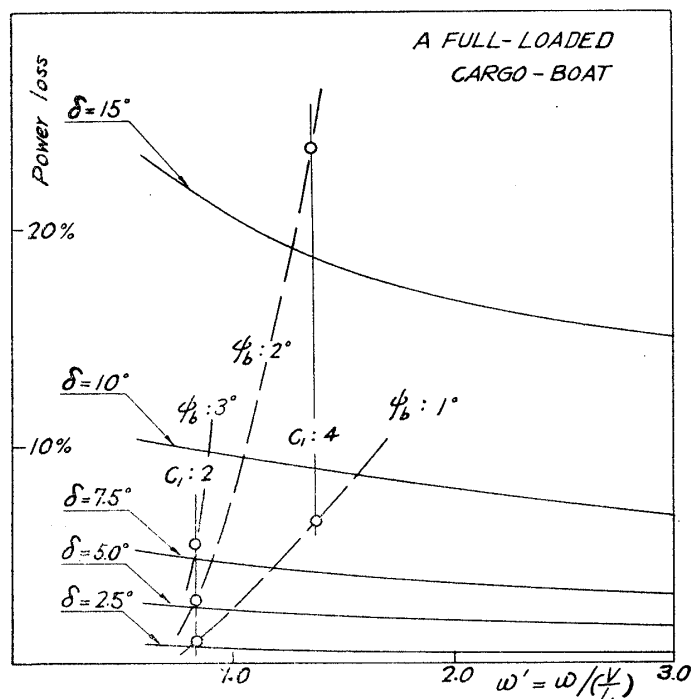


図7 Power Loss Induced by Yawing at Automatic Course-Keeping for a Cargo-Boat

船首揺にもとづく船体抵抗の増加が計測誤差の範囲にかくれる位小さいのは意外な感もあるが、これが抵抗であつていわゆる抗力ではないことを考えると従来の資料^{(9),(4)}と矛盾するわけではない。本実験結果でも yawing の大きい所では計測推力増加が慣性抵抗プラス舵抵抗の計算値よりいくらか上回る傾向があり、これが船体抵抗かも知れない。仮にそれとしてもこの程度の船首揺による船体抵抗の直接の増加は全推力増加のたかだか 10%、全推力の 1% 以下と見られ、重視する必要はなさそうである。

5 自動操舵と推進馬力損失

船首揺にもとづく平均推力の増加は主として慣性抵抗 $(m+m_y)V\dot{\psi}$ ならびに舵抵抗の平均値から成り、これらは船の運動と舵角が与えられれば計算できる。船の運動は舵角と操舵周期で決まるから、結局推力増加は舵角と操舵周期 (船首揺周期) で決まることになる。

前章の実験に使った貨物船ならびにタンカーの結果を、それぞれ 125m ならびに 250m の実船に scale up し、馬力損失を平水中直進馬力の%で表わすと第 7, 8 両図を得る。実船では模型よりも粘性抵抗が相対的に小さいから、船首揺れによる馬力損失の%は実船の方が大きくなる。

周期の増大 (ω の減少) と共に馬力損失が増えるのは一定舵角に対し周期が大きい程、船首揺れが大きくなるからである。この傾向は追従性に劣る (進路安定の悪い) タンカーの方が特に著しい。一方、同じ周期ならば慣性抵抗も結局 $|\delta|^2$ に比例するので、馬力損失全体も $|\delta|^2$ に比例する。

さて、自動操舵時の長周期 yawing が自動操舵系の自由振動であることは既に緒論に述べた所である。なかでも“天候調整”の遊隙は全系の減衰を劣化させること甚しく、ために船はしばしば減衰しないで持続する自動船首揺れを起こすに至る。この運動は自動操舵時の長周期船首揺れの典型的なもので、その周期と振幅は自動操舵系の解析から求められる⁽¹⁾。その結果と本論文の結果を組合わせれば、自動操舵に伴って起こる馬力損失を見積もることができる。

さきに引用した貨物船とタンカーについてこの計算を行ない、第 7, 8 図に記入すると図中破線を得る。 ϕ_b は天候調整の遊隙の半幅を回頭角に換算したもの、 C_1 は針路誤差と舵角の比例常数である。

これによると満載した商船が少し天候調整を効かせて走る場合——大体において普通の大洋航海状態——船首揺れ $\pm 2^\circ \sim 3^\circ$ 、舵角 $2^\circ \sim 6^\circ$ 、周期 100~200 秒位で、馬力損失は 2~5% 程度である。しかし図から明らかなように、10% をはるかに越える場合もあり、全般的に云つて軽視できない order であろう。事実、推定 18% と云う驚くべき馬力を捨てながら千鳥足で太平洋を渡つてきた実例もある。

第 7, 8 図はまた、オートパイロットの特性が馬力損失に及ぼす大きい影響を物語る。なかでも大きい舵角比 (普通舵角調整と呼ばれる) の不利益は著しい。従つて波が発達して来て天候調整を強く効かさねばならないときは (ϕ_b 大)、極力舵角比 C_1 を小さくすべきである。ところがこのような海況では一般に外乱が烈しいから舵角比もまた、余り絞りたくないわけで、根本的な対策としては減衰の劣化を伴わない形の天候調整機構の開発が望まれる⁽¹⁾。

最近の装置によく使われる角速度制御 (微分制御) は船首揺れ振幅を抑える効果があり、計算によると最大 30% 位、振幅を減らすことができる⁽¹⁾。馬力損失にすると自乗で効いて約半減となり相当有効である。また、舵角制限は yawing 振幅には余り効かないが、舵抵抗の減少には効くであろう。同じ手法で解析できるはずである。

いずれにせよ、自動操舵に伴う推進馬力損失はオートパイロットの特性に大きく依存するもので、悪くすると 20% にもおよぶ損失が現実起こり得る。このことはオート・パイロットの設計や調整、またその使用に際しても十分留意すべきことである。

コース・レコーダー記録からの馬力損失略算式：実船の運航実績を解析する時などには yawing の簡単な記録から、これによる馬力損失を略算できれば便利である。汎用のコース・レコーダーは紙送り 0.6 秒/分位で、出合い周期の yawing は見分けられない。記録に周期 50~200 秒くらいのかかなり規則的な yawing が認められたら、まずそれは馬力損失を起こす長周期船首揺れと見てよい。その半振幅を ϕ° 、周期 $T_y(\text{sec})$ 、また船長 $L(m)$ 、排水量 $W(\text{ton})$ と書くと慣性抵抗平均値は

$$\bar{R}_i = 0.33 WL(\phi^\circ/T_y)^2 \text{ kg} \quad (7)$$

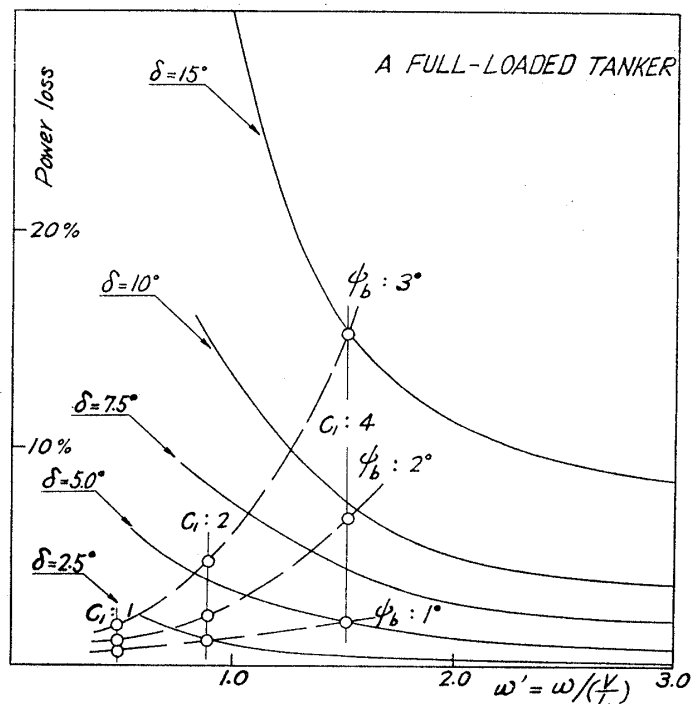


図 8 Power Loss Induced by Yawing at Automatic Course-Keeping for a Tanker

この式は $(m+m_y)/m=1.8$, $\cos(\phi-\phi_\beta)=0.75$, $|\beta|/|r'|=0.4$ を使っており, 商船の長周期船首揺にはよい近似であろう。

舵抵抗は藤井式⁽⁸⁾に従って

$$\bar{R}_r = 0.013 V_{Kt}^2 (1-w)^2 (1+3.6 s^{1.5}) \frac{A_R \lambda}{\lambda+2.2} (\delta^0)^2 \quad \text{kg} \quad (8)$$

V_{Kt} : 船速 (Kt), $s=1-0.514 V_{Kt}(1-w)/np$: スリップ比, λ : 舵アスペクト比, δ^0 : 舵半振幅 (deg)

なお舵角の記録がない場合, 当時のオート・パイロット舵角調整量 (舵角比) と天候調整量を調べ yawing 振幅から舵角振幅を推定するのが实际的である。

結 論

1. 自動操舵中にしばしば見られる長周期船首揺は船, 操舵機, オート・パイロット三者よりなる自動制御系の自由振動であつて同じ周期の操舵を伴う。この運動は一般に余り目立たないが, その誘起する推進馬力の損失は平水直進馬力の 2, 3% から極端な場合には 20% にも達し得る。

2. この馬力損失は主として船首揺による慣性抵抗 $(m+m_y) V \dot{\beta}$ および舵の抵抗によつてひき起こされる。その大きさは上記両抵抗の時間平均値に対応し, (5) 式で表わされる。

3. コース・レコーダー等によつて就航時における船首揺の振幅, 周期, 舵角が与えられれば, この馬力損失は (7), (8) 式から概算できる。

4. 波によつて直接励振されている船首揺はほとんど慣性抵抗を生じない。従つて個々の波に应答する無益の操舵を行なわないならば, この船首揺は馬力損失を招かない (それを行えば舵の抵抗に対応するだけの損失が現われる)。

5. 船首揺ないしはこれに伴う斜航にもとづく船体走行抵抗の変化は小さいようである。運動が大きくなると若干増加する傾向もあるが, 普通の船首揺の範囲ではたかだか全走行抵抗の 1% 以内の増加と見られる。なおこれは推力と対向すべき抵抗であつていわゆる抗力ではない。

6. 推進器に働く推力およびトルクの時間的変動は船首揺による船尾伴流場の変動を反映するもので, 従つてその変動の形は平均推力の増加に大きい影響をもつところの慣性抵抗ならびに舵抵抗の時間的変動の形とは直接関係はないことに注意すべきである。

7. オートパイロット使用に際し, 舵角比 (コース誤差に対する舵角の割合) はなるべく小さく取るべきである。とくに天候調整遊隙と舵角比の双方を大きくすることは甚だしい馬力損失を招くおそれが強い。

謝 辞

この論文の実験は昭和 40, 41 両年度にわたり大阪大学造船学科卒業研究として行われた。40 年卒, 小西昌昭, 桜井仁, 村上和弘, 41 年卒, 岡田陽雄, 小野木宏, 斎藤忠文, 高井忠夫の諸君の真摯な努力を想起し, ここに記して謝意を表する。

引 用 文 献

1. 野本謙作: 自動操舵の安定性について, 造船論文集 104, 1959
2. 元良誠三: 荒天中自動操舵と Yawing について, 造船論文集 94, 1954
3. 神中竜雄, 深瀬彊, 湯室彰規, 山崎禎昭: 高速船型の旋回に関する 2, 3 問題, 造船論文集 111, 1962
4. M. Chislett & J. Strøm-Tejsen: Planar Motion Tests for a Mariner Class Vessel, Rep. No. Hy-6 Hydro-og Aerodynamisk Lab., Denmark, 1965
5. 野本謙作: 船の操縦性について, 造船シンポジウム, 1964
6. H. Eda & C. L. Crane Jr.: Steering Characteristics of Ships in Calm Water and Waves, S. N. A. M. E. 1965
7. 山県昌夫: 船型学推進篇 159 頁
8. 藤井齊, 津田達雄: 自航模型船による舵特性の研究 (2), 造船論文集 111, 1961