(昭和 28 年 11 月造船協会秋季講演会に於て講演)

舵軸に加わる振りモーメントについて

正員 工学博士 木 下 昌 雄*

正員 工 学 士 岡 田 正 次 郎**

Abstract

On the Twisting Moment acting upon the Ship's Rudder-Stock

By Masao KINOSHITA, *Kogakuhakushi, Member*

Shojiro OKADA, *Kogakushi, Member*

This paper deals with the results of experiments in which the authors have hitherto measured the twisting moment acting upon the rudder-stocks of five vessels during their turning and backing, together with the other related factors. The data thus obtained were compared with the calculating values by the Jössel's, Beaufoy's, and Akazaki's formulae.

The measured twisting moment curves show many newly known phenomena. But the following three features seem to be the most noteworthy.

The first is the difference between the maximum values of the twisting moment in port and starboard turning, in spite of the fact that the speed and helm angle were kept the same for both cases. The second is the large fluctuation of the twisting moment, which appeared in hard port turning only. The third is the alternating twisting moment acting on the rudder-stock during backing trial.

The authors tried to explain these three interesting features, by assuming the velocity distribution against the rudder in the propeller race behind a vessel.

I. 緒 言

船の舵および操舵機の計画は、水中実験あるいは風洞実験等によつて得られた種々の実験式に準拠して行われているのが通例である。

しかるに、これらの実験は、その内の 2, 3 の例外を除いて、その他の大多数は、小型の模型単独の場合のいわゆる“Open water test”と称する定常的な実験である。

舵の性能は、勿論、その形状、アスペクト比、厚さ等によつて影響されるところは多いが、その実際の装備状態においては、船体伴流および推進器後流の影響（特に単螺旋船の場合に甚しい）、船および舵の運動に基く非定常的な流体力学的力の影響を蒙ることが非常に大きい。

あまつさえ、最近の船舶に装備される舵は、流線型反動平衡舵と称する頗る複雑なものであつて、前記の理想的状态の流れの下に行われた定常的な模型実験結果がそのまま実船の舵に適用できるものとは到底考えられない。

この意味において、筆者らはかねてから、実船の舵軸モーメントの測定を計画していたが、たまたまこれに適当な計器として、磁歪式振計が他の研究実施の際に完成されたので、懸案であつた本実験を、これを利用して遂行すべく着手し、昭和 26 年 9 月に行われた銀光丸に対するものをはじめとし、その後引続いて計 5 隻の貨物船に対する実験を既に終了したので、それらの実験結果を取纏めて、ここに報告し諸賢の御批判を仰ぐ次第である。

II. 従来の実験式について

一般に自由な流れの中に舵が単独でおかれた場合に舵に働く直圧力 P_n は、舵面積、舵角、舵形状、流速、流体密度および粘性の函数である。しかし、実験式として表わされる場合にはこれは簡単にされ、普通次の如き形

*, ** 日立造船(株)技術研究所

で表わされている。

$$P_n = c\rho V^2 A f(\alpha) \quad (1)$$

但し ρ : 流体の密度

A : 舵面積

V : 流速

c : 比例常数

$f(\alpha)$: 舵角 α の函数

この第(1)式中の $f(\alpha)$ が従来、各種の実験結果から、種々の形で導き出されているわけであつて、その主なものを掲げると次の第1表の如くである。

第 1 表

実 験 者	$f(\alpha)$
赤 崎 ⁽¹⁾	$\sin \alpha + \frac{1}{12.6} \sin 2\alpha + \frac{n}{180} \sin \left(\frac{180}{n} \alpha \right) - \frac{mn}{360} \sin \left(\frac{360}{n} \alpha \right)$
Renard	} $2 \sin \alpha - \sin^3 \alpha$
M. Goupil	
Duchemin	$4 \sin \alpha / 1 + \sin^2 \alpha$
M. de Louvrie	$2(1 + \cos \alpha) \sin \alpha / 1 + \cos \alpha + \sin \alpha$
Jössel ⁽⁷⁾	$2 \sin \alpha / 0.39 + 0.61 \sin \alpha$
Hutton	$\sin \alpha (1.84 \cos \alpha - 1)$
Rayleigh	$(4 + \pi) \sin \alpha / 2 + \frac{\pi}{2} \sin \alpha$
Lössel	} $\sin \alpha$
Beaufoy ⁽²⁾	
Newton	$\sin^2 \alpha$
Weissbach	$\sin^4 \alpha$
Legrand	$\alpha^\circ / 30 (\alpha < 30^\circ)$
Keck	$4 \sin^2 \alpha / 1 + \sin^2 \alpha$

これら十数式の内、わが国において最も広く用いられているのは赤崎博士⁽¹⁾、Jössel 氏⁽⁷⁾、Beaufoy 氏⁽²⁾による3つの式であつて、この3式を m, kg, sec, degree 単位で書き表わすと次の如くなる。

赤崎博士の式

$$P_n = 69.0 A V^2 \left\{ \sin \alpha + \frac{1}{12.6} \sin 2\alpha + \frac{n}{180} \sin \left(\frac{180}{n} \alpha \right) - \frac{mn}{360} \sin \left(\frac{360}{n} \alpha \right) \right\} \quad (2)$$

ただし m, n , はアスペクト比による常数

Jössel 氏の式

$$P_n = 41.3 A V^2 \left\{ \frac{\sin \alpha}{0.195 + 0.305 \sin \alpha} \right\} \quad (3)$$

Beaufoy 氏の式

$$P_n = 58.8 A V^2 \sin \alpha \quad (4)$$

また圧力中心位置に関しても、Lángley, Dines, Haslar, Eiffel, Jössel, Rayleigh 等の人々によつて、実験が行われている。実験条件が異なるためにこれらの結果は必ずしも完全には一致していないが、大略同様の傾向を示し、Jössel 氏の式をして、これらを代表させても大過ない様に思われる。この Jössel 氏の式を示すと、

$$\alpha = (0.195 + 0.305 \sin \alpha) W \quad (5)$$

但し α ; 舵の前縁から圧力中心位置迄の距離

W ; 舵の弦長

であつて、わが国における舵の計画には殆んどすべて本式が用いられている様である。

III. 実船実験とその結果

実船実験においては供試船として、日立造船(株)において新造された5隻の貨物船を選び、その海上試験運転の際の旋回力試験および機力操舵試験を利用する外、特に本研究のために、その他の船速において、各種舵角による旋回実験を行い、転舵時に舵軸に加わる振りモーメント及びその他の関連事項を実測した。

5隻の貨物船の船名、主要目、機関、操舵機等は第2表に掲げてある。

第 2 表

船 名		銀 光 丸	日 光 丸	山 里 丸	雄 光 丸	大 有 丸
船 主		三 光 汽 船	日 産 汽 船	山 下 汽 船	甲 南 汽 船	大 洋 海 運
$Lpp \times B \times D(m)$		112.5×16.7×9.1	140×19.2×12.2	134×18×10.5	112.5×16.7×9.1	128×17.5×10.5
d (m)		7.33	9.06	8.30	7.33	8.25
総 噸 数 (G. T.)		5,000	9,000	7,150	5,000	6,600
主 機	名 称	石川島タービン	日立タービン	日立 B & W	川崎タービン	三井 B & W
	出 力	SHP RPM 2700 ×110	SHP RPM 10,000×110	BHP RPM 6450 ×115	SHP RPM 3200 ×115	BHP RPM 4800 ×150
計画最高航海速力 (kt)		12.75	18.0	15.5	13.5	14.5
舵	面 積 (m ²)	13.22	19.01	16.61	12.73	15.91
	面 積 比 * ₁	62.3	66.7	67.3	64.7	66.3
	軸 位 置 比 * ₂	0.273	0.308	0.282	0.276	0.289
	軸 径 (mm)	240	330	290	240	280
操 舵 機	型 式	HELESHAW	JONNEY	HELESHAW	JONNEY	HELESHAW
	馬 力	10 HP	20 HP	15 HP	10 HP	15 HP
	計画最大出力 (t-m)	20.7	50.0	29.9	17.0	23.8
試運転(公試)状態	排 水 量 (t)	3,730	6,806	6,194	3,837	5,200
	d_a (m)	4.835	6.338	6.030	5.100	5.460
	舵 面 積 比 * ₁	27.1	30.2	28.0	27.3	28.9
	年 月 日	昭和 26. 9. 29	昭和 27. 11. 13	昭和 28. 3. 16	昭和 28. 3. 30	昭和 28. 4. 10

註 *₁ 面積比 = $\frac{Lpp \times d_{mean}}{\text{舵面積(没水部)}}$

*₂ 軸位置比 = $\frac{\text{前縁から舵軸中心位置までの距離}}{\text{舵の弦長}}$

舵軸トルク測定のためには、磁歪式振計を操舵機が据付けられている甲板の直下の舵頭材の最小径部分に装着し、また舵角測定のためには撓動抵抗式の角度指示器を製作してこれを用いた。これらの変化の状況を記録せしめるためには、6素子あるいは12素子の電磁オツシログラフを用いた。オツシログラフの他の素子には合図マークおよび刻時を入れたが、なお余裕がある場合には、推進軸トルクおよび推進器回転マーク、あるいは操舵機用電動機の電流電圧等を同時に計測した。

計測は原則として $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{4}{4}$ の各機関出力に対して、それぞれ舵角 15°, 25° および 35° の3種類両舷合計 18 回操舵した場合に、転舵後約 1 分間に亘つて連続的に之を行うことに予定していたが、実験回数を重ねるに従つて、経験上大して必要と思われるものをこれから除外して、出来るだけ試運転予定を阻止せぬ様に留意しつつ行つた。

5隻に対して行われた計測回数は合計 70 回の多きにおよび、その際の舵軸に加わるモーメントの変化の様相は、筆者らが計測前に予想していたよりは、遙かに複雑なものであるので、小数例を以つてその全貌を完全に明らかにすることは出来ぬが一応代表的と思われるものを選び出し、これを第1図から、第16図までに示した。

第1図 銀光丸予行運転舵軸モーメント変化図

第2図 銀光丸公試運転旋回力試験舵軸モーメント変化図

第3図 銀光丸公試運舵軸モーメント変化図

第4図 日光丸舵軸モーメント変化図

第5図 日光丸舵軸モーメント変化図

第6図 日光丸舵軸モーメント変化図

第7図 日光丸舵軸モーメント変化図

第8図 雄光丸舵軸モーメント変化図 (1/2 全力)

第9図 雄光丸舵軸モーメント変化図 (3/4 全力)

第10図 雄光丸舵軸モーメント変化図 (3/4 全力)

第 11 図 雄光丸舵軸モーメント変化図 (1/4 全力)

第 12 図 雄光丸舵軸モーメント変化図 (1/4 全力)

第13図 山里丸舵軸モーメント変化図 ($\frac{1}{4}$ 全力) 第14図 大有丸舵軸モーメント変化図 ($\frac{1}{2}$ 全力)

第17図 銀光丸公試運転後進試験モーメント変化図 (昭和26年9月29日)

第15図 大有丸舵軸モーメント変化図 ($3/4$ 全力)

第16図 大有丸舵軸モーメント変化図 (旋回試験 $1/4$ 全力)

第18図 大有丸公試運転後進試験

また転舵時以外の計測としては、船の後進試験の際に中央に保持された舵軸に加わる振りモーメントの計測を行つたが、後進中には舵軸に相当大きな繰返しモーメントが加わっていることが判明したので、これを第 17 図および第 18 図に掲げておいた。

IV. 実験結果の検討およびこれに対する考察

第 1 図～第 16 図の舵軸に加わるモーメントの変化図を通覧すると、各船、各船特有の傾向を有しているが、全体に通ずるものとして 3 つの大きな特徴が見受けられる。

まずその第一は、同一条件で転舵しても、右旋回と左旋回とにおいて操舵直後に現われるモーメントの極大値が異り、銀光丸、日光丸、雄光丸の 3 隻は左旋回の方が大きく、山里丸、大有丸の 2 隻は右旋回の方が大きいことである。

次に第 2 の特徴は第 1, 2, 4, 8, 10, 14 の諸図に見受けられる如く、右旋回の場合には 1 つの極大値を示した後、時間の経過とともにモーメントはほぼ零に近い値に漸近して静定するが、左旋回の場合にはこれと異り、約 5 秒～約 10 秒間隔で頗る大きなモーメントが衝撃的かつ週期的に現われて、現象は不安定であることである。最後に第 3 の特徴は後進中に大きな繰返し振りモーメントが働いていることであり、かつその毎秒周波数は完全に、推進器の毎秒回転数に推進器翼数を乗じた積に等しい。

いま、これから 3 大特徴について論ずる前に、舵および操舵機の計画に必要な旋回時に舵軸に加わる振りモーメントに対して量的な検討を行つてみる。

前掲の各図によると、旋回中には種々の原因に因る振りモーメントが働いているように推定されるので、まず操舵直後に現われるものと、定常旋回に移つてからの静定値と、定常旋回中に現われる異常な変動値とに大別して考えることにする。

5 隻に対する解析結果の代表例として、銀光丸と日光丸および大有丸に対するものを選び、全測定結果を横軸に舵角をとり、縦軸に振りモーメントを $\frac{1}{2}\rho V_s^2 A$ (V_s : 船速) で除したものとつて、点置すればそれぞれ第

第 21 図

* JÖSSEL-BEAUFOY の式とは、圧力中心位置の算定には JÖSSEL 氏の式を用い、直圧力の算定には BEAUFOY 氏の式を用いて、この両者を組合せて作つた振りモーメントを算定する式の意。

第 22 図

第 23 図

21 図、第 22 図および第 23 図の如くなる。なお本図には比較のために前章において述べた 3 つの実験式による計算値を併記したが、これに拠ると銀光丸においては操舵直後の極大値は、ほぼ赤崎博士の式と JÖSSEL-BEAUFOY* の式の計算値の中間に位しているが、日光丸においては、実測値の方が計算値よりも格段に大きい。

理想的な均一流れの下に、定常的に行われた模型実験結果と推進器後流中の非定常的な実船実験の計測値とを比較する際に、実船計測値のいずれの部分を探るのが妥当であるかは一考を要する問題であるが、いま操舵直後のものを採り上げて、この比較を 5 隻の結果に対して行くと、日光丸を除く、他の船においては、右旋回の場合は大略 JÖSSEL-BEAUFOY の式に一致するが、左旋回の場合には、これより大きいあるいは小さく、4 船の内 2 船はこれの約 20% 増しであり、他の 2 船はこれの約 60% 程度であつた。

日光丸においては、その旋回方向に無関係に、計算値より遙かに大きく、JÖSSEL-BEAUFOY の式の 2 倍以上に達するものさえあつた。

すなわちその舵軸中心が前縁から弦長の 27~28% 附近に位置している矩形平衡舵を有する船に対しては JÖSSEL-BEAUFOY の式が適用出来るが舵軸中心位置比が 30% を超える過平衡舵を有する船においては本式は適用出来ず、これより大きな振りモーメントが加わっていることが判明した。ただしかような舵では船は定常旋回に入ればその際の舵軸モーメントの静定値は非常に小さいことは注目すべきである。

また操舵機は、船の旋回中に現われるモーメントの性質如何にかかわらず、その最大値より以上の力量を備えているべきであると考えて、これを計算値に対して比較すれば、最大振りモーメントの実測値は流入相対速度としてそれぞれ後述の如き値を採った JÖSSEL 氏の式による計算値に大略等しく、これを超えるものは僅かであつた。

ゆえに操舵機の計画に当つては JÖSSEL 氏の式によつて一応検討を行うことは有意義と思われる。但しこの際に操舵角が 15°, 25° 等の小さい場合には計算によると、その絶対値が実測値に比べて非常に小さいから実用

上, 最も大切である 35° 操舵の場合のみを比較の対称として採り上げたのである。又これらの計算値を算出する際に用いる舵とその周囲の水との相対速度としては、次に述べる如き方法に依つて得た値を用い、出来る限り実際に近きを期した。

その方法とは、先ず海上試運転結果の解析によつて得られた試運転状態に対する推進器位置に於ける平均船体伴流率を用いて、推進器円盤内における平均相対流速を求め、続いて推進器渦理論⁽⁶⁾に依つて推進器後流の平均値を求めて、流入相対流速に之を加えて、舵装備箇所の相対流速を求めるわけである。この様にして求めた舵の水に対する相対速度は、推進器回転速度に依つて異なるが大略銀光丸、雄光丸に対しては船速の $3\sim4\%$ 増し、日光丸は $6\sim8\%$ 増し、山里丸、大有丸は $8\sim10\%$ 増しであり、従来の各種文献に見られる $14\sim20\%$ 増しに比べて、最近の貨物船の船後の推進器後流は試運転状態においては小さいことは留意すべきことである。

以上で最大振りモーメントの値に対する定量的な検討を終り、前掲の興味深い3つの特徴について考えてみることにする。

これらの現象を解明する為には、舵装備部分の水流の方向および速度の分布状態を知ることが肝要である。供試船の試運転状態における分布状態は、測定されていない故、供試船と同様の単螺旋船の模型について実測された例を引用して論ずることにする。

先ず推進器作動部の船体伴流分布に関しては、山県⁽⁵⁾、van Lommeren⁽⁹⁾、Kempf⁽¹⁰⁾等の諸博士等によつて測定されているが、その内の1例を示すと第19図の如きものであり、伴流は上部で大きく、下部で小さく、又船体中心線上で大きく、これより離れるに従つて小さくなつていく。この様な伴流分布をしている水流が推進器に流入すると推進器の作用によつて回転加速されて、舵装備部を通過するわけである。しかも船後の推進器後

第19図 船体伴流分布の1例

第20図 推進器(単量施船に装備されたもの)後流の舵への水平入射角

流中の舵装備箇所の水流角度は山県博士の計測例⁽⁴⁾⁽⁵⁾によると、第20図に示されている様な上下非対称のものであつて、同図に参考の為に画かれている推進器単独の場合の後流の様な上下対称のものとは全然異つている。斯様に舵に作用する水流は、非常に複雑な擾乱流であつて、たとえ操舵速度が全く同じであつたとしても左舷旋回と右舷旋回の場合に現われる振りモーメントの値が異なるのは寧ろ当然であると言ふべきであるかも知れない。

すなわち、舵に当る水流の速度分布の状態如何によつて或いは、その上半部が有効に働いたり、又或いは下半部が有効に働いたりして、夫々左旋回に現われる振りモーメントが大きくなつたり右旋回の方が大きくなつたりするものと考えられる。然し如何なる船においてはどちらが大きくなるかという定性的な説明すら現在の段階においては、これを完全にすることは困難の様である。

一方、矩形平板の直圧力は流入角が $35^\circ\sim40^\circ$ 附近において所謂 *Burbling* なる現象の為に急激に変化している。第20図を併せ考えて実流入角が本角度に達する取舵 25° 以上を操舵した場合には、この為に舵軸モーメントが不安全となり、更にこれが空気吸込現象によつて助長され、左舷回頭の定常旋回中に週期的に大きな変動を生ずるものと考えられる。かつて旧海軍の朝潮型等の駆逐艦の高速時に、大舵角によつて旋回した際にみられた

如き空気吸込現象とは境界条件は大いに異なるけれども、本実験にみられる現象も空気吸込と思われる。この際に推進軸トルクもこの影響を受けて、殆んど同時に増大する模様が第10図に示された雄光丸^{3/4}出力取扱35°旋回の場合に明瞭に窺われる。この様に大きな振りモーメントが衝撃的に舵軸に加わることは、舵および操舵機的设计上、留意すべき新しい現象であると考えられる。但しこの現象は船尾が軽吃水の際に起るものであつて、深吃水、例えば油槽船の満載試運転の場合には起らぬことがクリスチナ号（日立造船建造、輸出船）に対する実験の際に確かめられている。

又船が後進している際には、舵は流線伴流以外の船体伴流、および推進器後流の直接的影響を受けず唯、直後にある推進器翼の回転に伴う旋回する循環系に基く誘導速度の変化の影響のみを受けることになる。従つて転角を0°に保持している限り、舵軸に加わる振りモーメントは、この推進器翼の誘導速度に因るもののみが現われるものと考えられる。即ち第17図の銀光丸の後進中の記録に見られる土約4 t-mの繰返し振りモーメントがこれである。

V. 結 言

一般に、船体、推進器および舵の3者に関連する問題、特にその内でも旋回に関する問題は、船体の抵抗、推進および旋回分野において、最も未開のものの一つである。

本研究はその一部門である舵軸に加わる振りモーメントを測定することに依つて、本分野開拓の一つの足がかりと為すべく、又併せて舵および操舵機設計の基礎資料を得ようとして、上述の如き実船実験を行つたが、全般を見通すには未だ不明の点があまりにも多く、日暮れて道遠しの感さえする次第である。

今度行つた5隻の貨物船に対する実験結果のみから推論すれば、操舵機の力量を決定する方法としては先ず適当な方法によつて舵の相対流速を算出し、これを用いたJösSEL氏の式に拠る計算値そのままか、若しくはこれに僅かの余裕を加えたものを用いるのが現状に於ては最も良い方法であると考えられる。

今回は実船実験に依つて得た計測結果の発表を主体とし、これに従来の実験式との比較を加えた程度にとどめ、更に今後は模型実験によつて舵の空気吸込現象を確かめ又実船の舵の水圧分布の変化の状況等を計測して、これを再検討する予定である。

最後に本実験に御協力下さつた日立造船(株)桜島工場、因島工場、向島工場および設計部の関係各位に厚く御礼申上げる。

参 考 文 献

- (1) 赤崎 繁；“舵の直圧力とその中心について”造船協会々報 第63号 昭和13年
- (2) 岡本方行；“舵板の単独実験”造船協会々報 第49号 昭和7年
- (3) 赤崎 繁；“船の旋回に関する実験的研究”造船協会々報 第61号 昭和12年
- (4) 山県、菊池；“推進器と舵との相互作用に関する実験”造船協会々報 第52号 昭和8年
- (5) 山県昌夫；“船型学”推進篇 昭和27年
- (6) 河田三治；“螺旋状渦によつて誘導される速度場について”日本航空学会誌 第2巻第8号 昭和10年11月
- (7) “Principles of Naval Architecture” 1939.
- (8) H. Glauert；“The Elements of Airfoil and Airscrew Theory” Cambridge, 1926.
- (9) W. P. A. van Lammeren；“Analyse einiger Mitstrommessungen an einen Schiffsmodell” Schiffbau 1, Okt. 1938.
- (10) G. Kempf；“Further Model Tests on Immersion of Propellers, Effect of Wake and Viscosity” N.E.C.I. of Eng. & Shipb. 1938.