正員池畑光尚* 田草川善助**

Experimental Study by Towing Tank Tests on Propulsive Performances of Rowing of "Ro" (Oriental Sweep)

Mitsuhisa Ikehata, Member Zensuke Takusagawa

Summary

In order to investigate the propulsive performances of "Ro" that is oriental sweep used to propel a Japanese traditional wooden ship, the authors analyze geometrically the motion of "Ro" when rowing it first of all and make clear the principle of propulsion by "Ro" in the present paper. According to the results of such analysis of the motion of "Ro", manufacturing of the rowing machine of "Ro" is discussed.

The open tests have been carried out by rowing the model "Ro" of 1/3 scale installed on the realized rowing machine. Furthermore the self-propulsion tests of a 4 metres long model ship propelled by "Ro" operated by the rowing machine set-up in the model ship have been performed in the towing tank. As the results of such experiments the hydrodynamic characteristics of "Ro" have been made clear experimentally for the first time. For example, the efficiency of "Ro" is possible to be more than 0.70 in a good case but less than 0.40 in a bad case. In the worst case any thrust cannot be gained. Accordingly the propulsive performances of "Ro" strongly depends on the skill of a rower.

1. 緒 言

和船の櫓は,20年位以前まではまだ手漕ぎの漁船や渡し 船などに使われているのが見られたが,最近ではほとんど 見られなくなってしまった。小型のエンジンとスクリュー プロペラの組合せがその座を取って代ったためである。嘗 って五丁櫓や八丁櫓で快速を誇った小早や木造漁船などの 小型和船が姿を消し,木造船がFRP船に代って行くにつ れて櫓も姿を消していった。人力から動力推進への移行は, 技術の発達から見て当然の成り行きだったのだろう。しか し,櫓漕推進の技術的評価は,これまで必らずしも正当に 行われてきたとは思えない。ましてや,櫓に関する技術的 研究は甚だ少い。櫓にも技術史上に確実な地位を与えてや ることがぜひ必要である。

** 元横浜国立大学工学部建設学科船舶海洋工学教室

原稿受理 平成4年7月10日 秋季講演会において講演 平成4年11月9,10日 最とも古い櫓に関する論文は、横田成年が大正十年に造 船協会に発表した論文である¹。横田は、櫓を細長い平板翼 とみなして、櫓下が最とも深く水を搔く最下点位置を通過 する時点に発生する推力と仕事から効率を計算して、最良 効率が約 60%になる事を始めて明らかにした。この論文は 櫓槽の一番重要なポイントを適確に把えて簡略な理論によ って櫓の流体力学的特性を解明した最初の重要な論文であ る。それから年は下って昭和9年の雑誌「舵」に藤本武助 の櫓に関する解説が載った²)。藤本は櫓の原理は往復運動 する翼に発生する揚力によって推力を得ると説明し、現代 のフォイト・シュナイダー・プロペラは櫓の往復運動を回 転運動に変えた推進器であると論じた。次に、坂上富平は 櫓の運動を解析幾何学的手法で解析して、櫓下の先端は櫓 抗を中心点とする球面上を左右に揺動するため、櫓下は船 の前進に伴って螺旋面を描くという結論を得た³。

昭和31年に西山哲男の櫓の流体力学的研究が発表された⁴。西山は,横田の研究に前進率が関与していない欠点を 指摘して,フォイト・シュナイダー・プロペラと櫓の類似 性に着目し,その理論を土台に櫓の作用を流体力学的に解 析する事を試みた。即ち,前述の藤本の論説や,名著「船 型学」の中でフォイト・シュナイダー・プロペラは和船の

^{*} 横浜国立大学工学部建設学科船舶海洋工学教室

288

櫓と同じ原理によって推進力を得るもので,櫓の往復運動 を回転運動に変えたと看倣すことができると述べた、山縣 昌夫5)と同じ立場に立っている。西山によると、櫓下は、櫓 抗から真下に垂下した鉛直線を回転の中心軸としながら半 円錐面を描くような運動をするとしている。しかし正しい 櫓下の運動面は, 著者等が本論文で示すように早緒の付け 根と入子を結ぶ直線とその延長線を回転の中心軸とする円 錐の下半分に近い扇状の円錐面であって,西山の理論はそ の出発点の櫓下の運動軌跡に誤解がある。流体力学的な解 析は、翼素理論と運動量理論を組合せて展開した準定常理 論によって行なって、推力および回転力率を前進率の関数 として表わす事に初めて成功した。又、スクリュープロペ ラのピッチ比に相当する水切り角度の影響も考慮すること ができた。数値計算の結果によると 60%を超える推進効率 を発揮することも可能なことを示した。しかし、櫓下の回 転軸と運動軌跡を取り違えた事は、この理論の信憑性を著 しく欠く事になった。

その後,著者の一人の田草川は⁶,二材構成の現代の櫓の 形状寸法に関する詳細な調査研究を行い,技術史的な考察 を加えて,櫓が優れた推進具で操舵も兼ねる作用をする事 が既に英国海軍にも知られていたとの指摘がある⁷と紹介 している。

最近, Azuma, A. 等は⁸, 櫓漕の流体力学的解析のため に, 翼素理論を基にして運動量理論を応用した SMT と称 する理論と循環理論を応用した LCM と称する理論の 2 方 法を開発して, 長さ 5.79 m の実際のボートで行った実験 データを解析して両理論の有用性を実証した。しかるに解 析の結果得られた効率は, SMT で 0.354, LCM で 0.431 というー寸予想外の値になった。櫓槽は, 漕手の優劣に敏 感に影響されるので, この時の漕手の練達度の影響ではな いかと思う。

櫓槽法に関する一般的解説としては宮田勝善の著書がある⁹。

著者等は、本論文で、先ず櫓漕における櫓の運動を解析 し、櫓下は早緒の付根の点と入子とを結ぶ直線の延長線を 中心軸とする円錐の下半分の一部の円錐面上を左右に揺動 しながら捻りによって与えられた迎角で水を切って揚力を 発生するメカニズムを示し、次にその運動を正確に実現す るための櫓漕装置を設計製作し、その櫓漕装置を用いて行 なった単独試験と自航試験の解析結果について論説する。 なにしろ、手造同様の櫓漕装置を用いた櫓漕推進性能に関 する水槽実験という始めての試みであったので、試行錯誤 の繰返しの内に3年の歳月があっという間に過ぎてしまっ た。ここにその結果を報告して御批判を仰ぐ次第である。

2. 櫓漕における櫓の運動

Fig.1にとも櫓(船尾で漕ぐ櫓)のセッティング状態と各部の名称を示し,簡単に説明する。現在の櫓は二材から構



Fig. 1 Configuration and parts of "Ro"

成されており,漕ぎ手が持つ部分を櫓腕と呼び,没水する 部分を櫓下と呼ぶ。この二材を接合する部分を番(つがい) といい木栓をはめてその上を麻縄で堅く縛り合わされてい る。櫓腕には櫓づくという握り柄がついており,舟と櫓を 結ぶ縄すなわち早緒はこの櫓づくに掛けられる。早緒の下 端は根早緒といい,くさびを通して船床に根早緒を固定す る。櫓を漕ぐ時この早緒をぴんと張った状態に保つ事が重 要である。これは櫓下の没入角度を一定に保ちスムーズな 運動を行うためである。櫓下の下面には入れ子が取付けて あり,櫓床の上の櫓枕に立てられた櫓杭にかん入して一体 となり,櫓の運動の支点となる。

櫓の材質は,櫓腕が椎,櫓下が赤樫,入れ子が白樫,櫓 杭が姥目樫で作るのが上等とされている。詳しくは文献 6) を参照されたい。

Fig.2に、今回の実験に使用した模型櫓を示す。これは 13 尺とも櫓の1/3 縮尺模型である。入れ子は取りはずして 代りに支点のリングに固定するネジの当金がつけてある。 又、櫓づくも取りはずして固定用リングで自漕ロボットの 腕に連結されるようにしてある。Fig.2には櫓下の断面形 状の分布を示してある。上面の三角山形の面が水を切る圧 力面(正面)になる側で、下面の円弧形の面が背面になる 側である。なお、櫓腕の中心線に対して櫓下の中心線は番 の所で若干角度をつけて曲げてある。これは、とも櫓は左 舷で漕ぐのが普通なので、櫓下の方から見て櫓腕をやや右 に曲げて作られている。

とも櫓を漕ぐには、左手で櫓づくを握り、右手で櫓腕の 末端を握る。漕手は水面に向って左足を前に踏み出し、右 足を適宜後方に引いて立ち、櫓を前に押し、手前に引く操 作を繰返し行う。この際早緒を絶対ゆるめないように注意 しなければならない。この往復運動の両端において手加減 によって適宜に櫓下の水切り角度を交互に変えねばならな い。漕手は常に船首前方に顔を向けて針路を確認しながら 漕ぐ。船を回頭させるには、右回頭なら櫓を押え(おもか じ)、左回頭なら櫓を控える(とりかじ)。即ち、往復運動 のどちらか一方を強く漕ぎ、もう一方を弱くする。

以上の櫓の構成と漕法の説明に従って,櫓の運動を解析 し,図示してみると,側面から見れば Fig.3のようになり,

入れ子 1117 505 С 固定用リンク 1200 900 200 600 370 7.3 29.7 62.9 33.7 39.6 51.6 54.5 55.3 53.4 50.6 35.3 20.3 15.0 6.50 断面形状 単位 m m

櫓漕の推進性能に関する水槽実験

Fig. 2 Dimensions of 1/3 scale model of "Ro"

正面から櫓下の運動を見ると Fig.4のようになる。櫓漕の 際の不動点は、早緒の下端と入れ子の2点である。しかも 早緒は常にぴんと張られているので, Fig.3で四辺形 MTSO は往復運動中に変形する事はなく直線 MO を回転 軸としてそのまわりに回転運動をする。即ち櫓腕 TS は上 に凸なる円錐台面を描き,番Sと入れ子O間を結ぶ直線 ||SO (櫓下の一部)はO点を頂点とする上に凸なる円錐面を 描く。一方,入れ子から下の櫓下を表わす直線 OC は、2 つの不動点 M,O を結ぶ直線の延長線である OA を回転軸 としてそのまわりに回転運動をする。従って、櫓下 OC は 入れ子〇点を頂点とする下に凸なる円錐面を描く事にな る。 \overline{OE} を櫓下の往復運動の終端とし、 \overline{OG} をその途中の位 置とすると、櫓下の運動を正面から見た時、Fig.4のよう に、櫓下の先端は EGCE' のような円弧に略々近い曲線を 描く。これは回転軸が水平から角度 0 だけ傾むいているた め、Fig.3の円錐面 OECO を正面から見た扇形 OEC は完 全な円から切り取った扇形ではなくほんの少しつぶれた円 弧をもつことになる。しかし、通常回転軸の傾斜角 O は小 さいので、曲線 EGCE' は中心を A 点とする半径 AC の円 弧と見倣しても殆んど誤差はない。このように考えると、 櫓下の任意の点は Fig.4 で見るとうり,正面から見ると, 直線 OA 上に頂点を持ち扇形 AECE'A に相似な扇形の 運動をする事になる。従って、櫓下が往復運動の途中位置



Fig. 3 Profile of motion of "Ro"

 \overline{OG} にあるとき扇形 AGCA の頂角を ϕ とすると,櫓下の 途中の点 X の運動軌跡 XY がその曲率中心 Q 点と作る扇 形 QXYQ の頂角も ϕ となる訳である。即ち,次の角度の関 係がある。

289

$$\angle EAO = \angle FBO = \phi$$

 $\angle GAO = \angle HBO = \angle XQO = \phi$

ここに、F点は、Fig. 3 に示すとうり、櫓下の最上線の \overline{OE} と水面との交点であり、B点はこのF点の回転中心であ る。Fig. 3 の側面図で、櫓下の最下線 \overline{OC} 及最上線 \overline{OE} がそ れぞれ水平線となす角 \angle COP を θ_e , \angle EOP を θ_e とし、そ の途中 \overline{OG} にあるときの \angle GOP を θ とする。ここで櫓の 運動を決定する 4 つのパラメーターを次のように定義して おく。

没入角度=
$$\theta_c$$

回転角= ϕ の最大値(片振幅)
水切り角度=櫓下の断面の翼弦がその運動方向となす
角度= β
周期= T_R =往復運動の1往復の時間[秒]

3. 櫓漕による推進の原理

櫓の構造はわずかながら左右非対称であるが、左右対称 とみなし往復運動は中心線 (Fig. 4の OA) まわりに完全に



Fig. 4 Forward view of motion of "Roshita"

290

左右対称の往復運動をするものとする。

Fig.3 で櫓下の最下線 \overline{OC} 上の途中のy点に翼素dlを 取って考える。y点の支点Oからの距離をlとすると、こ の翼素がx点にあるときの回転速度成分 v_i は、

 $v_t = \{l \sin(\theta_c + \Theta) \cdot \cos \Theta\} \phi$ (1) で与えられる。但し、 ϕ は Fig. 4 の頂角 ϕ の時間微分すな わち櫓下の回転角速度である。

前進速度を V とすると, 櫓下の翼素 dl に垂直な成分 va は, 前進速度による一様流 V の翼断面への流入速度成分と 考えられ,

$$v_a = V \sin \theta_c$$
 (2)
で与えられる。よって翼断面への流入速度ベクトル \vec{v} は

$$\vec{v} = \vec{v}_t + \vec{v}_g \tag{3}$$

となり、その大きさは
$$v=\sqrt{v_t^2+v_a^2}$$
 (4)

で与えられる。

よって, 翼素 *dl* に生ずる揚力 *dL* と抗力 *dD* は次式のように表わされる。

$$dL = \frac{1}{2} C_{L} \rho v^{2} c dl = \frac{1}{2} C_{L} \rho c (v_{t}^{2} + v_{a}^{2}) dl$$
 (5)

$$dD = \frac{1}{2} C_{D} \rho v^2 c dl = \tan \lambda \cdot dL \tag{6}$$

但し、 C_L , C_D は翼素の翼断面の揚力係数,抗力係数であ り、c は翼弦長、 $\tan \lambda$ は抗揚比である。 C_L , C_D は櫓下の 水切り角度 β と流入速度三角形の仰角 ($\tan^{-1} v_a/v_l$) との 差で与えられる翼断面の迎角 α によって変わる。

$$\alpha = \beta - \tan^{-1} \frac{v_a}{v_t} \tag{7}$$

この迎角 αは、往きと復りで正負が逆転する。その事も考慮して、この翼素に働く推力成分を求めると

$$dT = dL \sin \theta \cos\left(-\phi + \tan^{-1}\frac{v_a}{v_t}\right) \left\{1 \mp \tan \lambda + \tan\left(-\phi + \tan^{-1}\frac{v_a}{v_t}\right)\right\}$$
(8)

 $\tan \lambda$ の前の複号は、 $\alpha > 0$ の時負号を、 $\alpha < 0$ の時正号をとるものとする。櫓下全体では没水部を $l_b \leq l \leq l_c$ とすると、この間で(8)式を積分して、

$$T = \int_{t_D}^{t_C} C_L \frac{1}{2} \rho c (v_t^2 + v_a^2) \sin \theta \cos\left(-\phi + \tan^{-1} \frac{v_a}{v_t}\right)$$
$$\left\{1 \mp \tan \lambda \tan\left(-\phi + \tan^{-1} \frac{v_a}{v_t}\right)\right\} dl \qquad (9)$$

を得る。この推力が船を推進させるのである。

一方,回転モーメントは,回転軸(Fig.3の MOA)まわりの回転力のモーメントを取ればよいから,

$$Q = \int_{l_{b}}^{l_{c}} C_{L} \frac{1}{2} \rho c \left(v_{t}^{2} + v_{a}^{2} \right) \left\{ \sin \left(\tan^{-1} \frac{v_{a}}{v_{t}} \right) \right\}$$
$$\pm \tan \lambda \cos \left(\tan^{-1} \frac{v_{a}}{v_{t}} \right) \left\{ l \sin \left(\Theta + \theta_{c} \right) dl \right\}$$
(10)

で与えられる。但し tan λ の前の複号は、 $\alpha > 0$ の時正、 $\alpha < 0$ の時負をとる。

この時(回転角 φ の時)の効率は,

$$\eta = \frac{TV}{Q\dot{\phi}} \tag{11}$$

で与えられる。

時々刻々 ϕ が変れば T も Q も η も変化する。今 ϕ は時間に関して余弦関数で与えられると考えてもよいから,

$$\phi = -\Phi \cos\left(\frac{2\pi}{T_R}t\right) \tag{12}$$

$$\dot{\phi} = \frac{2\pi\Phi}{T_R} \sin\left(\frac{2\pi}{T_R}t\right) \tag{13}$$

となる。

今考えている往復運動では、往きと復えりで、推力、回 転モーメント、角速度は、全く同じになる筈だが若干違い も出るので平均値は一周期分で行う方がよい。結局

$$\overline{T} = \frac{1}{T_R} \int_0^{T_R} T dt \tag{14}$$

$$\bar{Q} = \frac{1}{T_{R}} \int_{0}^{T_{R}} |Q| dt$$
(∵ 往き復りで符号が変る) (15)

$$\bar{\eta} = \frac{\frac{1}{T_R} \int_0^{T_R} TV dt}{\frac{1}{T_R} \int_0^{T_R} |Q\dot{\phi}| dt} = \frac{V\bar{T}}{\int_0^{T_R} |Q\dot{\phi}| dt}$$
(16)

となる。

櫓の前進率を表わすパラメーターは(7)式から v_a/v_t であることが分る。(1)式と(2)式と(13)とから,

$$\frac{v_a}{v_t} = \frac{V \sin \theta_c}{\left\{\frac{2\pi \mathcal{O}l_c}{T_R} \sin(\Theta + \theta_c) \cos \Theta\right\}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{l}{l_c}\right) \sin\left(\frac{2\pi t}{T_R}\right)}$$
(17)

となるので,この内,時間や場所によって変らない部分を 取って,櫓の前進率を次のように定義する。

$$J = \frac{V}{\left(\frac{2\pi \Phi l_c}{T_R}\right) \sin(\Theta + \theta_c) \cos\Theta}$$
(18)

(18)式の分母は,櫓下の先端の最大回転速度を表わしてい ることは明らかである。これを櫓の代表速度とすれば,推 力係数,回転モーメント係数は,次のように定義できる。

$$C_{r} = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho S\left\{\left(\frac{2\pi \Phi l_{c}}{T_{R}}\right)\sin(\Theta + \theta_{c})\cos\Theta\right\}^{2}}$$
(19)
$$C_{\varrho} = \frac{\overline{Q}}{\frac{1}{2}\rho Sx_{c}\left\{\left(\frac{2\pi \Phi l_{c}}{T_{R}}\right)\sin(\Theta + \theta_{c})\cos\Theta\right\}^{2}}$$
(20)

ここで、Sは櫓下の水中部にある翼面積の最小値をとる事にし、 x_c は支点Oから回転モーメント作用中心点までの距離とする。実際にはFig.3の \overline{CD} 間の中点とした。

4. 櫓 漕 装 置

第2節で解析した櫓漕のときの櫓の運動を実現できて, その時櫓に働く力(推力,左右力,上下力)を計測できる ような櫓漕装置なしでは,正確な実験はできないと判断し た。備えるべき機能は,

- (1)入れ子に相当するジンバル形式の支点で櫓下の入れ 子の位置をしっかり支えながら3自由度の回転がで きる事。
- (2) 櫓づくの位置で櫓腕をがっちり保持し、水切り角度の設定と左右揺動の端点に来たとき、水切り角度を反転できる機構をもつ事。
- (3) 上記(1),(2)の機構が一つの台座の上にあって櫓 下に作用した流体力の3成分をその台座を支える部 分に組込んだ3分力計で計測できる事。
- (4) 左右揺動機構は、(2)の櫓づくの位置でその運動を 櫓腕に伝達する事。
- (5) 櫓下の没入角度を調節できるように、(2)の櫓腕を 摑む機構の高さを変えられる事。
- (6) 左右揺動の周期を2秒~5秒の間で変えられる事。(矢切の渡船で実測した結果に基づく)

以上の機能を充たして,信頼できる計測ができる装置が 完成するのに約2年間の試行錯誤と改善修理の繰返しがあ った。最終の形の櫓漕装置の概略図を Fig.5 に示し,単独 試験中の写真を Fig.6 と Fig.7 に,自航試験中の写真を Fig.8 に示す。御覧のとうり,全機構部が台座の上に乗って いて,その台座を3分力計で支持する構造になっている。 従って,櫓に働く力は全て3分力計で受けとめられて測定



Fig. 5 Rowing machine of "Ro"



Fig. 7 Motor part of rowing machine

できる。本装置の最大の難点は揺動用のモーターが台座の 上の円弧上の平歯車の上を左右に往復するためその慣性力 も同時に3分力計に混入してしまう事である。釣りバネで モーターの重量は或程度バランスできるが,慣性力を打消 すことはできなかった。そこで,櫓をはずして代りに櫓づ くから入れ子までに相当する棒を抱かせて空中試験を行え ば、3分力計には慣性力だけがかかっているので,その計 測データを慣性力成分として差引く事で慣性力影響を取り 除く方法を採った。もう一つの難点は,左右揺動の行き止 まり点で水切り角度を反転させる際に生ずる衝撃による振 動ノイズの問題であった。この対策には最後まで悩まされ たが,水切り角度の反転機構をソレノイド方式からトグル バネ方式に交換し,更に入れ子に相当するピボットのジン バルに金属同志の接触をなくしショックを吸収する工夫を 施して何とか解消した。ここに主な仕様の要目を記す。

- (1) 3分力計(F_x, F_y, F_z)20kg 定格
- (2)回転角(**0**) 30度
- (3) 没入角度(θc) 30度,45度
- (4) 水切り角度(β) 20度, 30度, 35度
- (5) 周期(T_R)(3段階目盛合せ) 2.5~2.7秒
 - 3.3~3.4秒

30度

- 4.2~4.5秒
- (6) 回転軸傾斜角(Θ)



Fig. 6 "Ro" and rowing machine in open test



Fig. 8 Set-up of model ship self-propelled by "Ro" and rowing machine

292

日本造船学会論文集 第172号

5. 単独試験性能

試験水槽の曳航台車上に櫓漕装置をセットする枠組を作り、その枠組自体を上げ下げして、櫓下が最上線に来た時の没水部の長さを 37 cm (櫓下の長さの 1/3) になるように 調節した。

単独試験は, 没入角度 2 通り (30 度, 45 度), 水切り角 度 3 通り (20 度, 30 度, 35 度), 周期 3 通りの組合せ, 即 ち, 2×3×3=18 ケースについて行った。曳引車の前進速度 は, 0.1 m/sec から 0.1 m/sec づつ上げて行って, 推力 (*F_x*)が零以下になる速度まで上げた。

Fig.9に没入角度30度,水切り角度30°,周波数0.376 Hz(周期 $T_R = 2.7$ 秒),前進率0.438の場合の3分力の生デ ータを示す。櫓漕装置の慣性力成分は同一条件における空 中試験結果を差引いて取り除いてある。推力は前進方向を 正,横力は右舷方向を正,鉛直力は下向きを正にとってい る。横力は往きと復えりで当然方向が逆転するが,平均値 は絶対値の平均値を表わしている。推力に較べて横力と鉛 直力が大きい事がよく分る。漕手が下手だとこの大きな横 力による回頭モーメントにより船は大きくヨーイングをす るばかりでちっとも前進しないという事になる。

Fig. 10 に Fig. 9 と同じ条件の試験の性能曲線図と3分 力図を示す。勿論全ての値は平均値である。推力係数 Cr は



Fig. 9 Time history during one period of 3 components of hydrodynamic force of "Ro" in open test

(19)式の \overline{T} に計測推力の平均値を代入して求め,前進係数 J は(18)式から計算できるが,回転モーメント係数 C_q は (20)式の分子の \overline{Q} が計測値として直接求まっていないの で,横力 \overline{F}_y と鉛直力 \overline{F}_z から次式で求めた \overline{Q} を(20)式に 代入して計算した。

$$\bar{Q} = (\bar{F}_y \cos \phi - \bar{F}_z \sin \phi) \frac{l_c + l_D}{2} \sin(\Theta + \theta_c) \quad (21)$$

ここで、 l_{o} は支点から櫓下の先端迄の距離、 l_{o} は支点から 櫓下の最上線と水面との交点(D) 迄の距離、すなわち回転 力($F_{y}\cos\phi - F_{z}\sin\phi$)の作用点を櫓下の没水部の中央に 仮定した事になる。Fig. 10の性能曲線は、スクリュープロ ペラのそれに似ている。効率の最大値は 0.68 でかなり良い 事が知れる。 3分力の方は前進率の上昇とともに 3分力と も下がるが、推力が零になっても横力と鉛直力は零になら ず、まだかなり大きい値を示している。

Fig. 11 に没入角度 30 度,周波数 0.376~0.377 のときの 推力係数と効率に及ぼす水切り角度による影響の相違を示 す。推力係数は β =35 度のときが一番高いが,効率は β = 30 度が最高値を示す事が分る。 β =30°と 35°の差がほと んどなく安定している。矢切の渡船の実物で没入角度を約 30 度にしている理由はこの辺にあるのであろう。

Fig. 12 に没入角度 45 度,周波数 0.291~0.296 の場合の 水切り角度による違いを示す。まず推力係数が没入角度 30 度のときより高い事に気付くだろう。没入角度が大きい方 が推力が大きくなるという当然の事を表わしている。効率



Fig. 10 Open characteristics diagram and 3 component forces of "Ro"

没入角度45°



Fig. 11 Effect of angle of attack on thrust coefficient and efficiency of "Ro" in case of piercing angle 30 degrees

の方では β =35度で最高値 0.8を示している。 β =30°, 20° になると、効率が格段に落ちている。この事は、漕手の櫓 のひねり方の上手下手が効率に直ぐ響く事を表わしてい る。

Fig. 13 に、周波数の違いによる比較の例を示す。f= 0.290 のときが推力係数も効率も若干だが高い事を示して いる。即ち水切り角度 35°の場合 f=0.290 よりも早いのも 遅いのも推力が減少してしまう事になり、水切り角度と周 波数との組合せには最適値があることを表わしている。

6. 自航試験性能

和船の模型船が無かったので、4m長のバルクキャリヤ ーの模型船に,櫓漕装置を搭載して自航試験を行った(Fig. 8参照)。Table 1 に主要目を, Fig. 14 に正面線図を示す。

自航試験も,没入角度2通り,水切り角度3通り,周期 3通りの合計18ケースを行った。試験方法は、まず没入角 度と水切り角度と周期を設定して、曳引車の速度を適当に 定めて試走し、模型船との相対速度を観て、早過ぎたら下 げ、遅過ぎたら上げるという補正を行って試走を繰返し、 丁度模型船と曳引車速度が一致したとき計測を行ってデー タを取るという方法で行った。

Fig. 15 に生データの一例を示す。単独試験の場合とよく



周波数 0.291 ~ 0.296(Hz)(3.5)

Fig. 12 Effect of angle of attack on thrust coefficient and efficiency of "Ro" in case of piercing angle 45 degrees

似た変動を示している。

Fig. 16 に前進率の比較を, Fig. 17 に推力係数の比較を, Fig. 18 に効率の比較を示す。船速との関係を見るために, フルード数ベースに効率を比較したのが Fig. 19 である。 没入角度 45°, 水切り角度 30°の場合と没入角度 30°, 水切 り角度 30°の場合に,フルード数 0.05~0.07 あたりで効 率が 0.75 にも達している。しかし,他の組合せでは 0.4 に も達しない場合も多い。すなわち櫓漕推進では,没入角度 と水切り角度と周期との組合せによって効率は左右される ので,漕手の技倆の優劣が忽ち現われる事を示している。 Fig. 19 には通常のスクリュープロペラ模型による自航試 験時のプロペラ効率も参考のため示してあり, $\eta \approx 0.5$ であ る。櫓漕の時のフルード数はずっと低いため,同一フルー ド数での比較にはならないが,櫓漕の効率が上手く漕げば スクリュープロペラに劣らない事を示すデータであると思 う。

実船がある訳ではないが、仮りに櫓の縮尺 1/3 を考慮し て、3 倍の船 ($L_{pp}=12$ m)に換算してみると、Fig. 20 のよ うになる。没入角度 45°の場合、最高速力は約 1.9 / ット、 最大推力は約 14 kg であり、没入角度 30°の場合には、最 高速力は約 1.5 / ット、最大推力 15 kg となる。

293



4.0000 Lpp (M) 4.1155 Lw∟ (₩) 0.6657 B (M) D (M) 0.3500 0.2680 d (M) ¥ (M3) 0.5566 S (M²) 4.1225 0.7798 СÞ Cp 0.7943 0.9818 Сm 0.8973 Cw Lpp/B 6.009 2.484 B/d

Fig. 13 Effect of frequency of oscillation on thrust coefficient and efficiency of "Ro" in case of piercing angle 45 degrees



Fig. 14 Body plan of model ship used for selfpropulsion test

Table 1Principal particulars of model ship used for
self-propulsion test



Fig. 15 Time history during one period of 3 components of hydrodynamic force of "Ro" in selfpropulsion test



Fig. 17 Thrust coefficient of "Ro" in self-propulsion test



Fig. 16 Advance coefficient of "Ro" in self-propulsion test



Fig. 18 Efficiency of "Ro" in self-propulsion test



screw propeller in self-propulsion test



Fig. 20 Predicted speed of ship and thrust of "Ro" for assumed full-sized ship $(L_{pp}=12 \text{ m})$

今回の研究により次のような結論を得た。

7. 結

 櫓漕における櫓の運動について解析した結果,櫓下は, 早緒の付根と入れ子とを結ぶ直線の延長線を回転軸と する下に凸なる円錐面上を左右に揺動する事が判明した。

言

- 2) 櫓漕による推進の原理は、櫓下が水切り角度をもって 水を切るとき発生する揚力の前進方向成分が推力とな って船を推進させることが明らかになった。
- 3) 櫓漕の推進性能は、スクリュープロペラと同様に、櫓 下の先端の最大回転速度と前進速度の比に相当する前 進率をベースにして、推力係数、回転モーメント係数、 効率で表わされる事を示した。
- 4) 推進性能を支配するパラメーターは、櫓下の没入角度 と水切り角度と左右揺動周期である事が分った。
- 5) 単独試験により,没入角度が45°の方が大きい推力が 得られる事,水切り角度35°で周波数約0.29 Hzの時 最高の効率0.8になる事,没入角度30°の場合には推 力も効率も45°より低いが,水切り角度30°と35°の 差が少くて安定している事等が判った。
- 6) 自航試験により,櫓漕では船速は低いが,没入角度, 水切り角度,周波数の組み合わせにより効率が0.75 に も達する事もあるが,組合せが悪いと忽ち0.4以下に 落ちてしまう事が判明した。この事は櫓槽は多分に技 倆の優劣に左右される事を示している。

終りに当り,卒業研究として本研究に参加した当時の学 生の酒井恒宣,長谷川寿一,草野 司,篠原正喜,奥田恒 一,谷口直嗣の六氏に心から謝意を表します。また水槽試 験の実施面で助言と協力を賜わった鈴木和夫助教授,岡田 功技官,山崎 寿助手に感謝いたします。更に櫓漕装置の 製作で多大の協力を頂いた日章電機(株)の東島鎮珏氏と, 代替櫓の製作を心良く引受けて下さった近藤友一郎氏に心 から御礼申し上げます。

参考文献

- Yokota, Seinen: "Action of "Ro" (櫓)",造船協 会々報,第28号,大正10年4月。
- 2) 藤本武助: "艪の話", 舵, 13巻9号, 昭和9年9月。
- 5) 坂上富平: "櫓の運動に関する研究",海軍機関学 会々誌,第205号,昭和14年9月。

- 4) 西山哲男: "和船に於ける櫓の流体力学的解析",西 部造船会々報,第12号,昭和31年。
- 5) 山縣昌夫: "船型学推進篇", 天然社, 昭和 27 年, 34 頁。
- 田草川善助: "櫓について",東北民俗,第20輯, 昭和61年,又は,Takusagawa,Z.&Yoshioka,I.: "A Study on Ro (oriental sweep)", Bulletin of Faculty of Engineering, Yokohama National University, Vol. 25, 1976.
- 7) 松木 哲:"イギリス海軍と櫓",海事史研究,第25
 号,昭和 50 年。
- Azuma, A., Furuta, T., Iuchi, M. & Watanabe, I.: "Hydrodynamic Analysis of the Sweeping of a "Ro"—an Oriental Scull", Journal of Ship Research, Vol. 33, No. 1, March 1989.
- 9) 宮田勝善: "橈と櫓",「舵」発行所,昭和18年。