和船人力推進における熟練者の櫓漕ぎ技量評価-Ⅳ. -櫓杭 3 分力計の製作とその櫓漕ぎ出力から見た評価-

清水健一*・高山久明**・合田政次**・山脇信博***

Evaluation of Veteran Seaman's Skill of Working a "Ro-scul" to Propel Japanese Traditional " Wasen-boat" -Ⅳ.

- Production of Three-component Force Sensor Measuring the Force at Scull Lock and Evaluation of Sculler's Skill from the Output of the Sensor -

Ken-ichi SHIMIZU, Hisaaki TAKAYAMA, Masaji GODA and Nobuhiro YAMAWAKI

Abstract

In the former paper, we reported the development of a measuring system which quantitatively compared the skills of veteran scullers in working a "Ro-scul" with those of inexperienced ones. Consequently, we found that a veteran sculler worked a Ro-scul with an almost constant force and period, and it became evident that the propulsion efficiency of veteran sculler had been reached to around 20% of the total resistance corresponding to the boat's speed. However, the results of above tests were not useful to find out how the driving power could be generated by working single Ro-scul and what forces were acting to the scull lock fulcrum. Therefore, we experimentally produced a three-component force sensor in order to study the mechanism of driving power and to approach the skill of veteran sculler by measuring the three-component force acting to the scull lock. We corrected the output of the produced three-component force sensor and decided that it fitted for use. The following knowledge was acquired by a test using a three-component force sensor.

- (1) In the result of the test of working a Ro-scul by four scullers including two veterans, the veterans had the large output force in horizontal of left and right direction compared to the force pressing down the scull lock.
- (2) When the scull lock was moved from the original position, the output waveform had the tendency to show partiality to one side compared to that in the case of original position.

key word: propulsion efficiency, seamanship, three-component force at scull lock, veteran sculler, time series analysis

キーワード：推進性能、シーマンシップ、3 分力、熟練者、時系列解析

1. はじめに

前報までの報告において著者らは、熟練者の櫓漕

ぎ技量と非熟練者のそれを定量化することを目的に、計測システムの開発を行い、被験者の櫓漕ぎ中の航跡・船速、出力波形を比較した。(1)-(3)

*学生会員 長崎大学大学院生産科学研究科 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

** 正会員 長崎大学水産学部 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

*** 正会員 長崎大学水産学部長崎丸 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

その結果、熟練者は櫓漕ぎ出力のばらつきは小さくほぼ一定な周期で漕いでおり、櫓下に確実に力を伝えていることがわかった。また、前報では、抵抗試験の結果から得られた全抵抗値と平均的な櫓下力による推進効率の見積りを行い、熟練者ではその効率は、対応船速全抵抗値の 20%前後に達していたことを明らかにした。⁽³⁾

本報ではこれらを踏まえ、支点としての櫓杭に着目し、櫓杭の 3 分力を検出した自航ロボットによる模型実験結果の報告を参考にしながら⁽⁴⁾実船の櫓杭 3 分力計を試作した。製作した 3 分力計の出力を校正し、使用できるものと判断して行った実験から熟練者と非熟練者の櫓漕ぎ出力の 3 分力を比較した結果、新たに二三の知見を得たので報告する。

2. 方法

櫓杭に働く 3 分力の検出装置には前報⁽¹⁻³⁾までの方法などを踏まえ、厚さ 3mm の薄い L 型鉄板 2 枚を張り合わせた直方体の側面に前後・左右応力が検出できる 1mm 厚の鉄板ゲージを各 1 枚用意し、この裏表に防水型の動歪みゲージ（共和製：KFW-5-120-C1-11 L5M2R）をそれぞれ貼って製作した。加わる荷重や板の厚さから予想される歪を考慮して

Fig.1 Overview of the sensor to measure three-component force at scull lock

Fig.2 Way to mount the sensor to measure three-component force at scull lock

前後、左右方向に加わる力はいずれも 4 アクティブゲージ法によりその曲げ応力を計測することとした。上下方向で下向きの荷重成分は計測装置の下面に圧力ゲージを取り付けて下方向への圧力を計測した。

（以下、「上下力」）これらの装置の概要を Fig.1 に示す。試作した 3 分力計の校正はデジタルデータレコーダ（共和製：EDX-1500A）を介してあらかじめ重さのわかっている重量物を順次垂下していく方法で行った。実際の櫓漕ぎ実験時の装着法は Fig.2 に示す。このとき、櫓杭の位置は舷端から 30cm ほど内側に入った供試船本来のオリジナル位置のみでなく、第二報⁽²⁾による長崎市網場の木造伝馬船での位置である櫓杭が舷端に近い位置と早緒付け根位置が平行になるような位置（以下、「舷端」）とその中間の位置（以下、「中間」）の 3 段階に分けて実験を行った。但し櫓杭位置のみの変更で、早緒取り付け位置は変更していない。

一方、被験者への櫓漕ぎ実験は前報までの報告と同様に実施した。ただし、本実験の供試船は長崎市近郊の時津漁港内に係留中の長崎大学水産学部所有の FRP 製和船（L：576cm，B：166cm，D：64cm，W：約 300kg）⁽¹⁾である。また、今回は船首部の揺れの計測について前報までの実験時に使用した垂直ジャイロ（東京航空計器製）を用いた船体の 6 自由度運動計測に加えて船首部に角速度計（東京航空計器製レートジャイロ）を新たに備え付け、その計測も行った。

その他、DGPS を用いた船速・船位の計測や実験結果の櫓漕ぎ出力波形に対する解析方法は概ね前報までと同様に行った。⁽²⁾

3. 結果および考察

3.1 3 分力計の校正結果

Fig.3 に歪みゲージを用いて製作した 3 分力計の校正結果を示す。上から順に X 軸の前後力、Y 軸の左右力および Z 軸の上下力の結果をいずれも縦軸は垂下した錘の重量、横軸はその電圧値 (mvolt) をとったものを示す。図では (+) 側への向きはそれぞれ Aft 側、Port 側、下向き圧力を示す。図に示すようにいずれも概ね負荷重量 40kgf までの範囲において比較的精度よく直線近似できている。以上から、ある程度の精度を持つ 3 分力計が製作できたものと考えられる。

3.2 櫓下力、櫓杭 3 分力、早緒張力と 6 自由度船体運動等の出力波形の比較

次に櫓漕ぎ時の櫓下力、前述の櫓杭 3 分力、早緒張力と 6 自由度船体及び船首揺れ角速度運動の出力

Fig.3 Results of the correction of the three-component force sensor

波形例を Fig.4 に示す。図の左側は非熟練 A について、また右側は熟練 G の結果を示す。図は上から順に櫓下力、櫓杭 3 分力（前後力、左右力および上下力）、早緒張力と 6 自由度船体運動（Surge、Sway 及び Heave の加速度と角速度および Pitch、Roll 及び Yaw の角度）である。

図からまず今回の計測主眼である櫓杭に働く 3 分力に注目すると、非熟練の A では前後力、左右力、上下力の振幅はいずれもほぼ等しい。熟練 G では左右力が他の 2 成分と比較して振幅が大きくなっている。また被験者毎に 3 分力の大きさを比較すると、熟練 G では左右力が大きい、非熟練の A では上下力が比較的大きい。

次に早緒張力について比較すると、A で大きく、G ではやや小さくなっており、この傾向は前報までと同様であった。⁽²⁻³⁾

本実験のレートジャイロによる船首揺れ角速度については A と G で振幅はほぼ同じであるが、A にやや振幅の大小が見られる。

その他の船体 6 自由度運動に関しては前報までの結果と同様、加速度運動に関して Surge、Heave よりも Sway が、揺れ角については Pitch よりも Roll、Yaw

Fig.4 Examples of the output waveform (Left: Inexperienced sculler "A", Right: Veteran sculler "G")

The above are the output waveforms in an outward trip indicating, in descending order, the force to the blade of Ro-scul, the X axial force (positive zone: force to the Aft direction), Y axial force (positive zone: force to the port direction), and Z axial force (downward pressure).

で振幅が大きくなっている。⁽²⁻³⁾ また、船首揺れの角速度の波形と船首揺れの角度 (Yaw) の波形については振幅の大小の出現時期はほぼ一致している。

これらの結果は今回実験した延べ 4 人の熟練、非熟練者で比較した場合も、ほぼ同様の傾向であった。

3.3 櫓漕ぎ出力の周波数分析結果

次に前述の各応力および 6 自由度運動などについて時系列分析した結果を示す。Fig.5-1 に非熟練 A の結果を、Fig.5-2 に熟練 G の結果をそれぞれ示した。図は、左列に、上から順に櫓下力、早緒張力、前後・左右・上下力の各応力を、右列に 6 自由度船体運動の Surge、Sway、Heave、Pitch、Roll、Yaw および角速度を示しており、横軸は周期、縦軸はスペクトルを対数目盛りで示している。

これらの図より、それぞれの成分ごとに櫓漕ぎに伴う周期性についてみると、いずれの成分も周期約 1.2~1.5 秒付近の櫓漕ぎの「押さえ」と「控え」に伴う個々の運動と、それらが合成された周期 2.4~3.0 秒付近の運動が現れていると言える。A では X 軸

Fig. 5-1 Frequency analysis result
(Output waveforms of inexperienced sculler "A" in an outward trip.)

Fig. 5-2 Frequency analysis result
(Output waveforms of veteran sculler "G" in an outward trip.)

の前後力における周期があまり明瞭でないものもある。さらに櫓杭の3分力のピーク周波数に注目すると、Aでは前後力、左右力、上下力のピーク値は3

つともほぼ等しくなっている。ただし、前後力のみ前述したように周期約1秒付近のピーク値はあまり明瞭でない。一方、Gでは左右力の出力の周期性が他の2成分と比較しても明瞭に現れている。6自由度船体運動に関しては、概ね前報までの傾向と同様であるが、⁽²⁻³⁾船首揺れ角速度の解析結果ではYawのスペクトルとほぼ同様の周期を示している。

3.4 櫓杭位置の違いによる比較

次に櫓杭位置を変えた場合の結果について述べる。Fig. 6は非熟練Aについて前述の櫓杭3分力および櫓下力、早緒張力の時系列分析結果を櫓杭の位置ごとに並べたものである。図はいずれも上から櫓下力、早緒張力と櫓杭3分力の前後力、左右力、上下力と左から順に櫓杭位置がオリジナルの場合、中間および左舷舷端の場合についてそれぞれ示す。

まずこの図をそれぞれの櫓杭位置における各項目で比較すると、程度の差はあるもののいずれも周期2秒を越えた付近と1秒を越えた付近でピークが見られ、これらの運動が櫓漕ぎの一連動作の中で互いに関係しあっていることがわかる。

次に櫓杭位置を変化させた場合で比較すると、ピ

Fig. 6 Frequency analysis result of each force by inexperienced sculler "A" in the different position of scull Lock (Position of scull lock (starting from the left): the original position, the intermediate position between the original position and the parallel position, and the parallel position to the base which ties Hayao-rope)

ークの周期はほぼ一定であるものの、いずれの項目も3つの並びのうち一番右側、すなわち、櫓杭左舷舷端位置に移動させた場合ほどピーク周波数がはつきりしており、漕ぎのピッチが一定していたことがわかる。他の櫓杭位置と比べ、一定したピッチで漕がっていたということは、A ではこの舷端位置が適正な位置であった可能性がある。

ただし、これらのことは周期性から見た結果のみであって実際に櫓杭位置を変えた場合のように被験者が普段の漕ぎの中で常日頃から櫓漕ぎに慣れ親しんでいるような場合には普段の“慣れ”も加味する必要があり、さらなる解析や、より多くの被験者への試みにより明らかにしていく必要がある。

3.5 櫓漕ぎ出力の平均値と標準偏差の比較

今まで述べた傾向を櫓漕ぎ出力や船速に関して平均値と標準偏差から見た結果について示す。Fig.7

Fig.7 Statistical results (Indicating, beginning at the top, the mean value plus or minus standard deviation of the force to the blade of Ro-scutt, X axial force, Y axial force and Z axial force, and the boat speed by GPS)

The meaning of marks is as follows; (1): Outward trip, (2): Return trip, [A]: Inexperienced sculler "A", [B]: Inexperienced sculler "B", [G]: Veteran sculler "G", [H]: Veteran sculler "H", [a]: Original position of scull lock, [b]: Intermediate position of scull lock between the original position and the parallel position, and [c]: Parallel position of scull lock to the base which ties Hayao-rope.

は本実験の全ての場合における被験者・櫓杭の位置ごとの櫓下力、前後力、左右力、上下力について往路・復路ごとに平均±標準偏差を並べたものと GPS 船速について往路・復路ごとに平均+最大、平均-最小を並べたものである。これらの図からまず上から2つ目の前後力で熟練被験者との違いが大きく現れており、熟練者では出力荷重がかなり大きくなっていた。しかし上下力や左右力、櫓下力および GPS 船速に大きな違いは見られない。また櫓杭位置を変えた場合の変化の方が往復による違いよりも大きくなっている。これは往復における違いについては風や流れの強さの違いによって生じた差異だと考えられるが、櫓杭の位置の違いによる力のかけ具合が微妙に変化したものと考えられる。このとき、いずれの被験者も左右力と前後力に違いが大きく見られることから櫓杭位置を変えたことによる影響はこれら2つの出力であったことがわかる。この傾向を熟練者と非熟練者と比較すると熟練者はいずれも左右力で偏差が大きくなっているのに対して非熟練者では熟練者ほどはつきりした違いは見られないが、上下方向への荷重成分の平均値が大きい。

ただし、これも周波数解析結果で述べた結果と同様、どの櫓杭位置が各被験者にとってもっとも漕ぎやすい位置になっているかについては判断できない。

3.6 3 分力合力の成分毎の比較

Fig.8 は上述の傾向を確かめるためにそれぞれの被験者において前述した波形分析で使用した 102 秒間のデータを用い 3 分力の合力を成分ごとに時系列で並べたものである。図は3つに分けて表しており、左から順に X-Y 軸方向合力、X-Z 軸方向合力および Y-Z 軸方向合力を示している。図中のベクトルの向きについてはそれぞれの場合で図中に示した。左端の X-Y 軸方向合力では図の左側への向きが Aft(+) 側への力を、上側への向きが Port(+) 側への力を示している。同様に、中央の X-Z 軸方向合力では図の左側への向きが Aft(+) 側への力を、下側への向きが下向きへの荷重を示す。右端の Y-Z 軸方向合力では図の左側への向きが Port(+) 側への力を、下側への向きが下向きへ圧力をそれぞれ示す。また、それぞれで上段には櫓杭位置をオリジナルの位置とした場合、下段には舷端に取り付けた場合を示している。

この図により、櫓杭位置オリジナルの被験者 A を見ると、まず、図左端の X-Y 軸方向合力では前後方向への力と比較して左右方向への力が、またその中でも左舷側への力よりも若干右舷側への力が顕著に見られている。したがってこのとき被験者 A は前後

Fig.8 Time-sequence diagram of resultant force of three-component force at scull lock

(Starting from the left, the resultant force of X-Y axial force, the resultant force of X-Z axial force and the resultant force of Y-Z axial force)

方向へは若干船首より、左右方向には右舷側への力が大きくなるように漕いでいたことがわかる。

次に、中央の X-Z 軸方向合力の図からは、この間 X 軸方向へは船首方向へ、また Z 軸方向へはかなり大きな荷重をかけていたことがわかる。同様に右端の Y-Z 軸方向合力については右舷側への力が、Z 軸方向で先の例と同様大きな荷重をかけていることが示されている。

ここで、櫓（腕）の動きと櫓杭に加わる力の関係を考えてみると、Fig.9 に示すように、櫓腕を手前（右舷）側へと引く「控え」の時には櫓杭が支点となるため櫓杭に加わる力は右舷側への力となって表れ、

Fig.9 Direction of power to act on "Hikae" and "Osae" at scull lock

反対に櫓腕を舷端（左舷）側へと押し出す「押さえ」の時には櫓杭は左舷側への力となって表れる。

したがって、この点を踏まえて上述の結果に着目すると、被験者 A は右舷側への力が大きかったことから「押さえ」よりも「控え」を強く意識して漕いでいたといえる。次に櫓杭位置がオリジナルの他の被験者を比較する。まず左端の X-Y 軸方向合力では、G、H の熟練者では合力自体が大きく、しかもそれらは左右両舷に均等に出力されている。また、A、B の非熟練者に比べて船首方向よりもむしろ船尾方向への出力が目立っているのも特徴である。さらに図の中央列及び右端の X-Z 軸方向合力、Y-Z 軸方向合力について見ると、G、H の熟練者は A、B に比べて下向きの荷重成分ははるかに小さい。

櫓杭位置を舷端に変えた場合の熟練 G、H の比較では、X-Y の前後左右の出力成分は、オリジナルと比べやや上（+）側の左舷側への出力がより大きめにれている。このことは櫓杭位置がオリジナルの位置から舷端の左舷に移動したことにより、直進前進においては櫓杭への力の掛け加減をオリジナルの左右均等出力と比較して、やや左舷側に強めに掛ける、言い換えると「押さえ」を強くする調整を行った結

果と考えられる。

4. まとめ

今回の櫓杭 3 分力計の試作およびそれを用いた熟練者 2 名を含めた延べ 4 名への実験結果から以下の知見を得た。

- (1) 前後、左右および上下方向への出力を精度よく直線近似できる 3 分力計が製作できた。
- (2) この検出装置を用いて行った熟練者 2 名を含むのべ 4 名による櫓漕ぎ実験結果から、非熟練では下向きの荷重成分が大きかったのに対し、熟練では下向きの荷重成分は小さく Y 軸の左右方向力が大きかった。
- (3) X 軸の前後力について非熟練が船首もしくは中正であるのに対し、熟練では船尾方向力が顕著であった。
- (4) 櫓杭位置を適当に変えると熟練の場合はそれに対応して左右力の「押さえ」と「控え」の力配分を変化させていることがわかった。
- (5) 櫓杭位置の適正性について、櫓杭をオリジナル位置と舷端に移動した場合とを比較したが、これは熟練、非熟練に関わらず、左右方向への出力に関し、偏りがなく均等に見られる場合、櫓杭位置として適性であると考えられる。

今後、熟練者への更なる実験の繰り返しによって 1 本の櫓による前進推力のメカニズムの追求と、被験者毎の櫓杭位置の適正性をより明らかにする必要がある。

特に本研究から明らかになった Y 軸の左右力や X 軸の前後力が推進にどのように寄与するのかについて、更に詳細な解析が必要である。

謝辞：

本研究を行うにあたり、被験者として実験にご協力頂いた長崎県西彼杵郡時津町、大村湾南部漁協組合員、久米三男氏に対し厚くお礼申し上げます。

参考文献

- (1) 高山久明・合田政次・矢田殖朗・山口恭弘：和船人力推進における熟練者の櫓漕ぎ法の分析，日本航海学会論文集，第 100 号，81-89，(1999)。
- (2) 高山久明・清水健一・山脇信博・合田政次：長崎市網場在来の木造和船を用いた熟練者の櫓漕ぎ技量の分析と評価，日本航海学会論文集，第 110 号，125-133，(2004)。

- (3) 高山久明・清水健一・山脇信博・合田政次：和船人力推進における熟練者の櫓漕ぎ技量評価-III. 木造和船推進抵抗と被験者の櫓漕ぎ推進効率に関する個人評価，日本航海学会論文集，第 111 号，17-23 (2004)。
- (4) 池畑光尚・田草川善助：櫓漕の推進性能に関する水槽実験，日本造船学会論文集，第 172 号，pp287-297，(1992)。

質疑応答

津金正典（東海大学）：

櫓杭 3 分力計の出力データを教育にどのように使うのでしょうか

清水健一：

ご討論ありがとうございます。本研究では初心者には櫓漕ぎを指導する際、熟練者が獲得した櫓漕ぎ技量、すなわち櫓漕ぎ時の前後、左右、上下方向の 3 分力出力などの力配分を示すことでより早く櫓漕ぎに習熟できるように、またこれらを通して海や船に親しめるようにという意図をもって実験を行っております。実験を通して、初心者には櫓漕ぎ入門ともいふべき手引書が作成できたらと考えております。

津金正典（東海大学）：

櫓杭位置は常に一定のものだと考えていましたがこの装置によりその船の最適櫓杭位置が決定できるのでしょうか。

清水健一：

ご討論ありがとうございます。前報までの結果⁽²⁾・⁽³⁾からも示されておりますが、櫓杭と早緒の相対位置は常に一定のものではなく、船により若干異なっていることがわかりました。

従って、その船に合った、またその船を常時使う人に合った櫓杭位置はどこになるのか。船を真直ぐに進めるにあたり、押さえと控え出力のバランスの取れた櫓杭位置が最適櫓杭位置と考えられ、これは本研究の実験を積重ね検討することで、最適櫓杭位置を見出す法則性が明らかになると考えております。