

# 琉球大学学術リポジトリ

## 人力振動翼船の試作

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学工学部 公開日: 2009-08-25 キーワード (Ja): キーワード (En): Fluid dynamics, Swimming motion, Oscillating fin, Ship propulsion, Human power 作成者: 永井, 實, 照屋, 功, 久貝, 幸作, 根保, 康史, Nagai, Minoru, Teruya, Isao, Kugai, Kohsaku, Neho, Yasufumi メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/20.500.12000/12087">http://hdl.handle.net/20.500.12000/12087</a>

## 人力振動翼船の試作

永井 實\* 照屋 功\*\* 久貝幸作\*\*\* 根保康史\*\*\*\*

### Construction of a Human Powerd Oscillating Wing Ship

Minoru NAGAI\*, Isao TERUYA\*\*, Kohsaku KUGAI\*\*\* and Yasufumi NEHO\*\*\*\*

#### Summary

This paper is concerning a construction of a human powered oscillating wing ship and some results of the performance.

One of the authors has over ten years experience of the study on the carangiform animal swimming. They have recognized the carangiform swimming as an oscillating wing motion mechanism which is constituted from a heaving and a pitching motions of a lunate-shape tail. They carefully observed the motion of animals such as dolphin, carp and tilapia, and then introduced a new dimensionless number, swimming number  $Sw = u / (f \cdot \ell)$ , which represents an ability of the animal's swimming relating with the beating frequency and the body length.

On the basis of their recognition of the oscillating wing mechanism, they have a lot of experiences to make a small artificial mechanical fish, a large mechanical fish and an oscillating fin ship which was driven by a two cycle motorbike engine. And now, they have constructed a human powered ship with the basically same idea and the same mechanism.

This new ship has been examined by the authors on the surface of a pond located in the university campus. The propelling performance of the ship was cleared to be influenced by many conditions, such as the fin shape, the stiffness of the coil spring which constitutes the important part of the oscillating mechanism, the human power, and the others. The best combination of the parts, so far, showed the maximum propelling speed about 0.97m/s and the mean swimming number about 0.49, which almost satisfied the designed value.

受付: 1991年5月13日

\*琉球大学工学部エネルギー機械工学科

Dept. of Energy and Mech. Eng., Fac. of Eng.

\*\*琉球大学工学部機械工学科

Dept. of Mechanical Eng., Fac. of Eng.

\*\*\*琉球大学大学院工学研究科機械工学専攻

Graduate Student, Mechanical Eng.

\*\*\*\*日立製作所

Hitachi Seisakusho Co.

Key Words : Fluid dynamics, Swimming motion, Oscillating fin,  
Ship propulsion, Human power

### 1. 序論 ～本学における振動翼船研究の経緯～

現在船舶の推進機構としては一部を除いてはスクリュープロペラが主流である。しかしスクリュープロペラについては次のような欠点が指摘されている。

- ① 高速回転におけるキャビテーションの発生
- ② 巻き込み事故などの危険性
- ③ かくはん作用による水質汚濁
- ④ 動力ロスが大きい

一方スクリュープロペラ方式はアルキメデスのスクリュープポンプの発明にその源流を見いすことができるように人間の発明によるものであり、ごく一部の微生物を除いて自然界では見あたらない推進法である。<sup>(1)</sup>

そこで生物の泳法にあらためて注目してみると、もっぱら尾ヒレの振動によって泳ぐイルカやカジキの類はその筋肉量からは考えられないほどの出力で高速・長時間の航行を可能にしていることが分かってきた。<sup>(2)</sup>

これは、他面からみれば生物の尾ヒレによる推進、すなわち振動翼推進機構が我々の予想以上の高効率推進を達成しているためと考えることもできる。

著者らの一人は過去にコイ、ティラピア、イルカ等泳動運動を詳細に観察したが、それらの動物の、対体長比速度 ( $u/l$ ) と尾ヒレの振動周波数 ( $f$ ) の比である無次元速度を、泳動数 (Swimming Number)

として次のように定義し、体や尾ヒレの形状、筋肉量、振動周波数の異なる水棲生物の泳動能力の比較を可能にした。<sup>(3)</sup>

$$Sw = u / (f \cdot l) \quad (1-1)$$

本学の実測によれば泳動数はイルカにおいて最も高く0.82、ついでコイの0.7、ティラピア、フナ等は約0.6である。すなわちイルカの場合、尾ヒレが一周期する度に体長の82%進むことを意味している。

振動翼による推進力発生の原理をFig. 1-1に示す。よく泳ぐ魚類や、イルカ、クジラ等の生物はからだの後半ほどを左右または上下に振動させて尾ヒレにヒービングとピッチングの組合せ運動を与え推力を得ている。図より明らかなように尾ヒレは流体力と一種の弾性力である尾部筋肉力とのバランスにより、相対水流に対してある迎え角をもつために、相対流に垂直の揚力を生じその進行方向成分が推力となる。

魚類の泳動の解析や推進力に関する理論的研究は、M.J.Lighthill<sup>(4)</sup> や T.Yao-Tsu.Wu<sup>(5)</sup> などによって既に数多く行われているが、本研究のように振動翼を船舶の推進機として応用することを意図した研究は少ない。本学では特に自動機械魚を「既知の推進力を有する魚」という点で注目し、その製作と性能試験を行ってきた。既知の動力を使用することによってはい

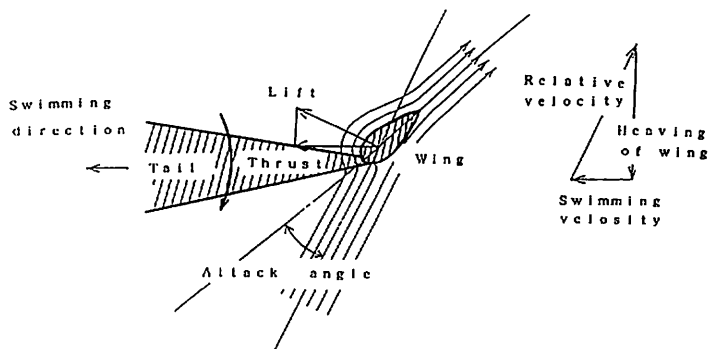


Fig. 1-1 Mechanism of oscillating wing propulsion

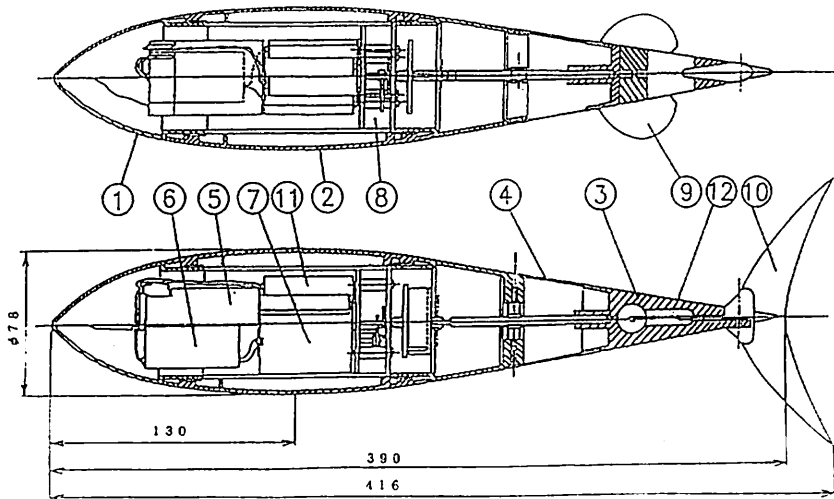


Fig. 1-2 Small mechanical fish

めて、自己推進運動を行う物体の推力や抗力を研究する際の難解さ<sup>(6)</sup>が回避され高速遊泳能力解明の手がかりが得られるからである。

本学で最初に開発した小型機械魚の概要をFig. 1-2に示す。魚の泳動をできるだけ模倣するために、頭部・胴体部・尾部・尾ヒレ部からなる4体で構成し、それぞれアルミニウム塊より製作した。胴体部と尾部間は、厚さ1mmのシリコン膜(図中④)で連結し、尾部が胴体部に対し振動運動できるようにしている。さらに尾ヒレは、尾部に対して相対運動ができるよう弾性支持され、胴体部と尾部、尾部と尾ヒレの間が二重の関節方式となっている。体型はマグロをモデルとしており、全長416mm(体長390mm)、最大直径78mmである。振動周波数は、ラジオコントロール装置によって制御し、尾部には、姿勢制御の効果を増すために水平安定板(スタビライザー)を取り付けた。その結果本機械魚は、最大速度130cm/s、泳動数約0.64を記録しほぼ淡水魚なみの泳動能力を有することが確認された。<sup>(7)</sup>

次に製作した大型機械魚をFig. 1-3に示す。小型機械魚と同様にマグロの体型をモデルとした紡錘体で体長2316mm、最大直径は440mmとした。すなわち小型機械魚とほぼ相似型で、胴体部・尾部・ハッチ部に分

かれており、胴体部およびハッチ部はFRPで作り、尾部はアルミニウムを加工して整形してある。また胴体部と尾部を連結する可動部分はゴム膜で防水加工されている。本大型機械魚は、ストラットによって洋上船(二人乗り)に固定し船上からの操作によって推進する方法で実験を行った。この場合大型機械魚の最大船速は1.5m/s、泳動数で約0.40にとどまった。これは、モーター回転数が、設計値にくらべかなり低い領域でしか作動できなかったためであり、結果的に翼の流体力学的効率を低下させたためであると思われる。そこで1986年度においては、Fig. 1-4に示すように、動力源を電動モータからエンジン駆動に変え、大型機械魚から船外機型推進機へと発展させた振動翼型舶用推進機の設計を行った。<sup>(8)</sup> 1987年度<sup>(9)</sup>および1988年度<sup>(10)</sup>は1986年度の設計概要に基づいて、低重心化(およびエンジンの設置法のコンパクト化)や強度面などの部分で細かい変更を施し、設計を完成させた後、部品の大半を製作した。<sup>(11)</sup>そして、1989年度は、この振動翼型舶用推進機を完成させ<sup>(12)</sup>推進実験を行い<sup>(13)</sup>1990年度に於いては最高1.12m/sの船速を記録した。

このように本学ではこれまでモーターやエンジンを動力源とした振動翼型舶用推進機を研究・開発してき

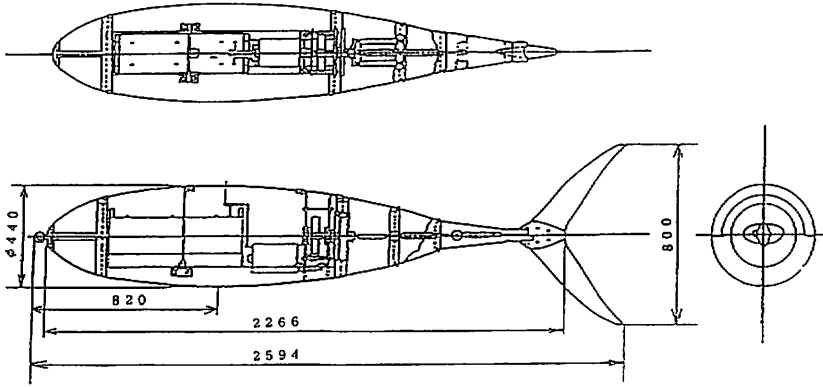


Fig. 1-3 Large mechanical fish

Fig.1-4

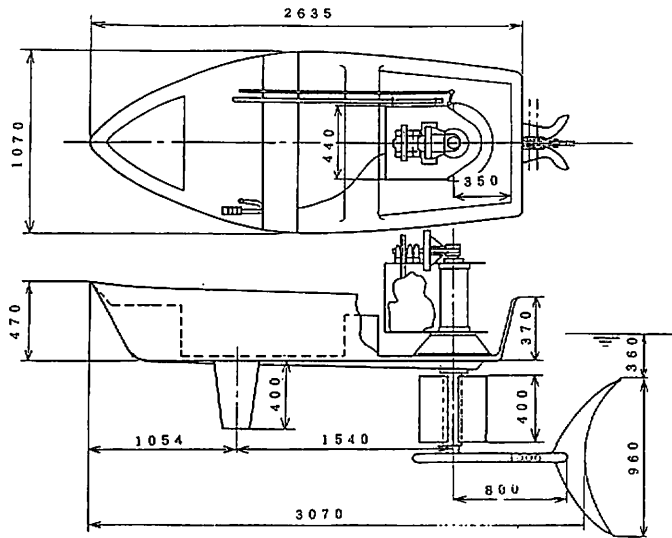


Fig. 1-4 Oscillating wing propulsive ship with motorbike engine

た。<sup>44)</sup>しかし、振動翼型推進機構は本来往復運動であり、その動力源としてはモータ等の回転運動より往復運動が適当であるように思われる。そこで本研究は

1990年度より人間の足の往復運動を利用した人力振動翼船の開発を新たに試みたものである。<sup>44)</sup>

2. 人力振動翼船の設計と製作

人力船を製作するにあたり次のことを考慮した。

- ① 操縦者は一人であること
- ② 初心者でも容易に操縦できるような足漕ぎ式であること
- ③ 魚類の泳法に模して尾ヒレの左右の振動（振動翼）により推進力を発生すること

但し、ガソリンエンジンを使用した機械振動翼船に比べ動力が極めて貧弱であるため高周波数の翼の振動は期待せず、低周波数で大きな振幅が得られるような設計とした。

2. 1 船体

振動翼船は、従来のスクリューと異なり、振動翼のヒーピングアンドピッチング運動に原因する船体の左右の揺れ、即ち船体のヨーイング及びローリングが大となることが予想される。この点を考慮すると、船体は長い方が理想的であり、更にその船底には垂直安定板が必要不可欠なものと判断できる。しかしながら、カヌーのように極端に細長いものは、装置の取付がスペース的に困難であるので、種々検討した上、市販の手漕ぎボート（Rowing Boat YAMAHA ROW-12）を船体として採用した。

Fig. 2-1に製作した人力振動翼船の概要を示す。人力振動翼船の主要構成は船体、足踏み装置、回転振動部、振動板および翼である。また各部品は軽量化、耐食性を考慮して製作した。試作船の振動発生機構をFig. 2-2に示す。人の足が足踏み部を踏み込むとワイヤを介してプーリーに片振れ角を生じ、プーリーに

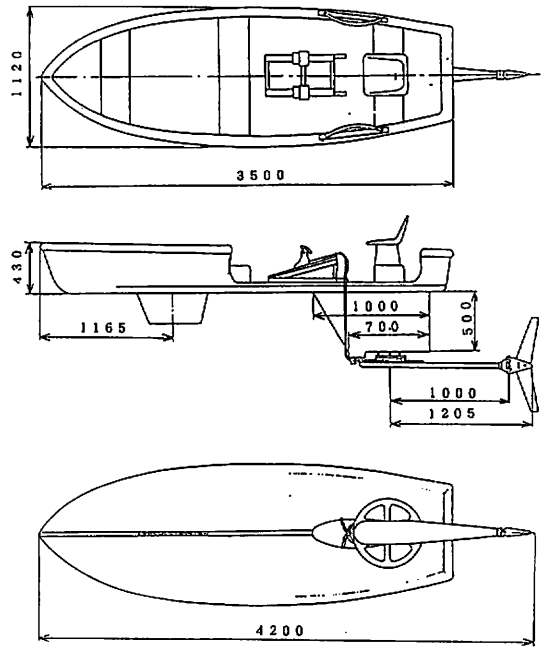


Fig. 2-1 Human-powered oscillating wing ship

取り付けられた振動板が片側へ揺れる。これを左右に繰り返すことにより振動板後端にねじり巻バネを介して取り付けられた翼はヒーピングアンドピッチング運動を行う。足踏みを中間位置から150mm踏み込んだときの片振れ角は30°であり、その時の尾ヒレの片振幅

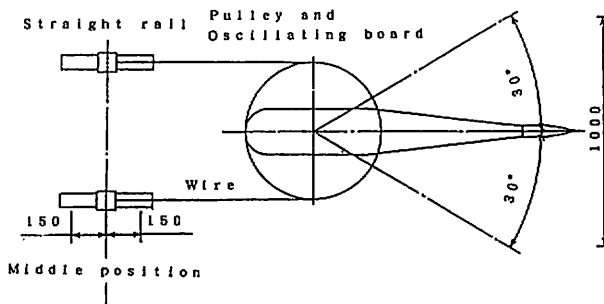


Fig. 2-2 Schematic drawing of oscillation mechanism

は500mmである。設計時の目標船速は、( $\ell=4.2\text{ m}$ ,  $S_w=0.5$ として)  $f=0.5\text{ Hz}$ の時に  $u=1.05\text{ m/s}$ とした。

## 2. 2 振動部

人の足が、足踏み部を中間位置より前方に踏み込むと、ワイヤを介して、プーリーに片振れ角を生じプーリーに取り付けられた振動板が同様の片振れ角で振幅運動を行う。更に翼部分は、流れに対して適度な迎え

角が得られるように、ねじり巻きバネを組み込み二点ヒンジによる推進力発生を実現した。

人力駆動でポピュラーなものは、自転車に使用されているペダルとチェーンによる回転駆動システムだが、前述のように振動翼船には振動系の動力が適当と思われるので、足踏み運動が直線往復運動となるようレールを設け、レールには直線スライドパック (THK FBW 50110F) を採用した。

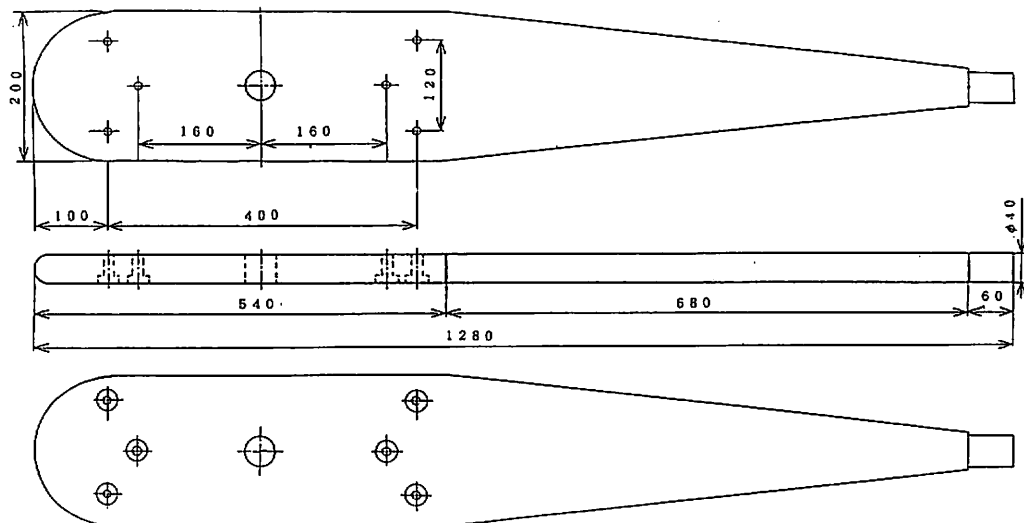


Fig. 2-3 Oscillating board

## 2. 3 振動板

Fig. 2-3に振動板を示す。プーリーによって得られた揺動運動を受けて、振動するのがこの振動板である。軽量化のため材料に木材 (アピトン) を使用した。また振動時の抵抗を減らすため断面を楕円に整形し、防水のためニスを塗った。振動板は、プーリーにボルトで取り付け、振動時に最大振幅1000mmを得るようにした。また振動板の最後端は面積最小になるので、以下のように最後端の面積を算出した。

足で踏み込む力を  $f_f = 20\text{ kgf}$  とすると、振動板の最後端に加わる力  $f_w$  はトルクの釣合から

$$f_w = 20 \cdot 300 / 1000 = 6\text{ kgf} \quad (2-1)$$

材料の木の許容せん断力を  $\tau_w = 0.08\text{ kgf/mm}^2$  とし、繰り返し荷重の安全係数を15とすると使用せん断応力は

$$\begin{aligned} \tau_{ws} &= 0.08 / 15 \\ &= 5.3 \times 10^{-3} \text{ kgf/mm}^2 \quad (2-2) \end{aligned}$$

よって振動板の最後端の断面積  $S$  は

$$\begin{aligned} S &= f_f / \tau_{ws} = 6 / (5.3 \times 10^{-3}) \\ &= 1125\text{ mm}^2 \quad (2-3) \end{aligned}$$

断面を円にすると、その直径  $d$  は

$$d = \sqrt{4S/\pi} = 37.8\text{ mm} \quad (2-4)$$

余裕を見て、 $d = 40\text{ mm}$  を採用した。

## 2. 4 翼取り付け部

Fig. 2-4 ~ 2-6 に振動板後端と振動翼の間に設置した取り付け金具の組み立て図および部品図を示す。部品の一つ (Fig. 2-5) は振動板後端に固定し、他の

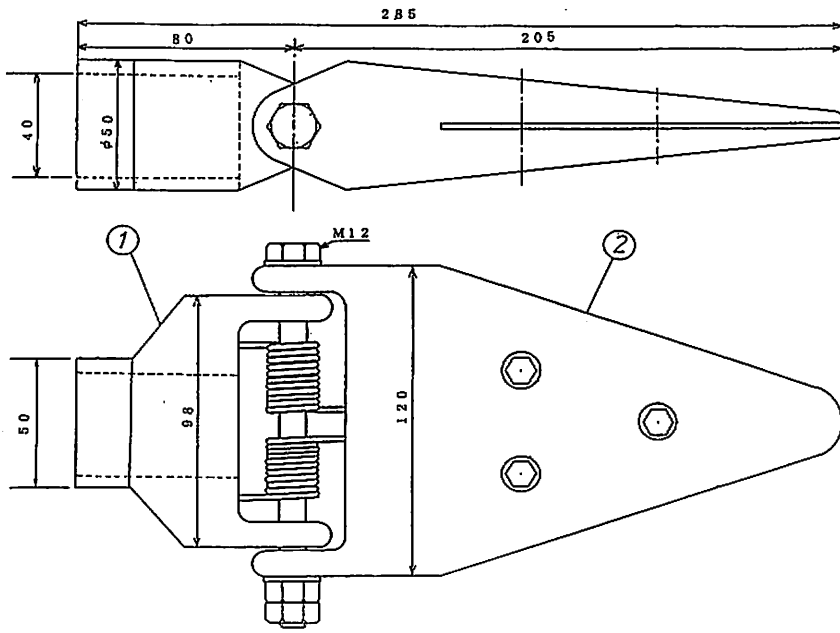


Fig. 2-4 Wing holder

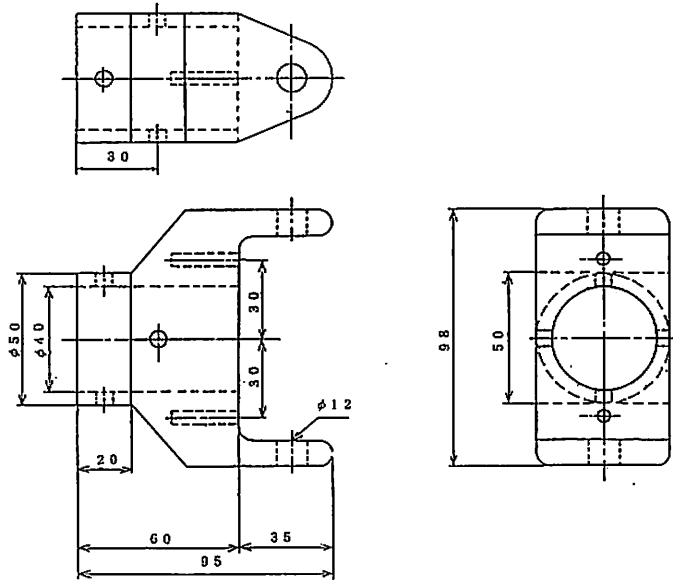


Fig. 2-5 Wing holder, parts ①



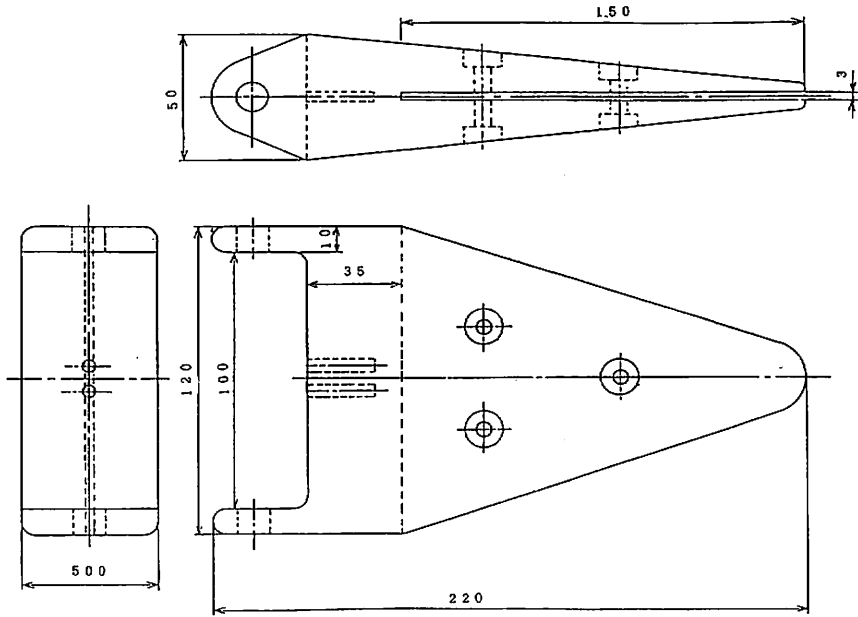


Fig. 2-6 Wing holder, parts ②

一つ (Fig. 2-6) は翼をはさんで取り付けるようにした。二つの部品は中央ボルトにより回転自在に連結され、さらに両者間にねじり巻バネを組み込むことによって、前に述べた原理による推進力を発生するよう工夫したものである。ねじり巻バネは、捻る方向によってバネ定数が若干違ってくるが、図に示すようにバネを上下2ヶ所に取り付けることによって、一対のバネが常に互いに逆方向に捻られるよう設計し、バランスをとってある。又、本機構は試作品であることからバネおよび翼はそれぞれ任意に取り替えられるよう組み立て式としてある。材質は全てアルミニウムの切り出しであり、腐食防止のため塗装を施した。

2. 5 ねじり巻バネ

ねじり巻バネ定数はバネ素径の断面が円の場合、次式のようになる<sup>4)</sup>

$$k_T = \frac{M}{\phi} = \frac{E d^4}{64 D n} \quad (2-5)$$

$k_T$ : ねじり巻バネ定数  $D$ : 平均コイル径

$\phi$ : 捻れ角  $n$ : 有効巻数  
 $M$ : ねじりモーメント  $E$ : 縦弾性係数  
 $d$ : バネ素線径

翼取り付け部品に取り付けるバネは、スペースの関係上、その外形寸法が決まってしまうので、巻数と素線径をかえることによってバネ定数の調整を行い次の三種のバネを設計し製作 (外注) した。Table 2-1 に三種のバネの設計仕様と検定結果を示す。

製作納入されたねじり巻バネのバネ定数を実際に測定した。Fig. 2-7 にねじり巻バネの外形寸法を、Fig. 2-8 に検定方法をそれぞれ示す。図示するように翼取付部品そのものをねじり巻バネの「検定装置」として用いた。検定装置は接続部を中心に回転できるので、この中心から135mmの位置に丁度翼取付用の穴 ( $\phi 6.5$ ) が設けられているので、ここに荷重をかけることにした。その際、翼面に対して垂直に荷重がかかるよう翼面を常に水平に保つようにした。

Fig. 2-9 に三種のねじり巻バネの検定結果を示す。図より明らかなようにいずれのバネも設計値より

Table 2-1 Specification of torsion coil spring

No	d mm	spring constant $k_v$ kgf-cm/deg	
		designed	measured
1	6.5	1.50	1.65
2	7.5	0.78	0.87
3	8.5	0.38	0.43

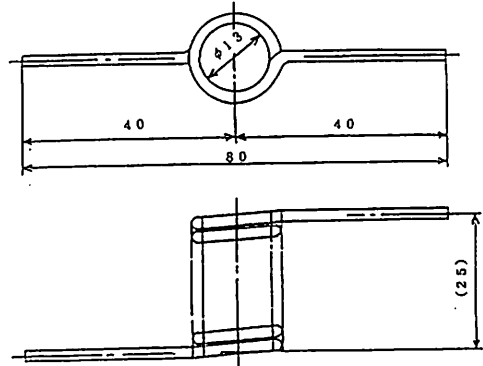


Fig. 2-7 Torsion coil spring

やや高い定数を示しているが、荷重と変位の間には十分な直線性があり、試験船に供し得るものであることが分かった。

2. 6 翼

翼の大きさは、翼の非正常運動に伴う仮想質量力と揚力および抗力を考慮して決定されるが、振動中の翼の迎え角は刻々変化し、バネ定数や相対流速等によっても影響を受けるので、その予測はかなり困難であり、解析もむずかしい。

そこで、ここでは運転者にとって最も過酷な運転状態を考え、翼がその面と直角方向にのみ動く場合の仮想質量力を計算し、参考的に翼の大きさを決めることにした。

二次元翼を考えて、翼にかかる力は

$$F = \underbrace{\frac{\pi}{4} \rho b c^2}_{\text{仮想質量}} \underbrace{(-R\omega^2 \alpha_{\max} \sin(\omega t))}_{\text{振動による加速度}} \quad (2-6)$$

- $F$  : 翼にかかる力
- $b$  : 翼の縦長
- $R$  : 回転中心からの位置
- $\alpha_{\max}$  : 振動板の最大片振れ角
- $\rho$  : 水の密度
- $c$  : 翼の横長
- $\omega$  : 固有角速度
- $t$  : 時間

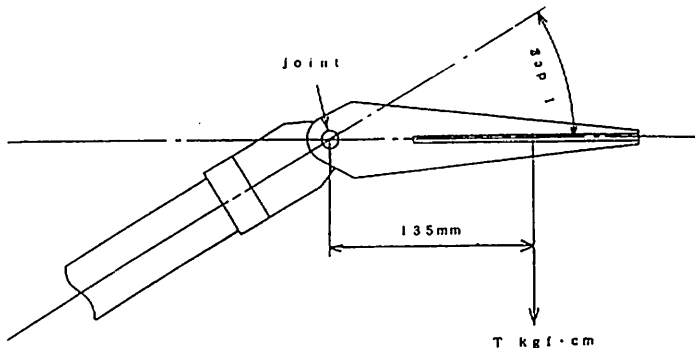


Fig. 2-8 Spring constants check

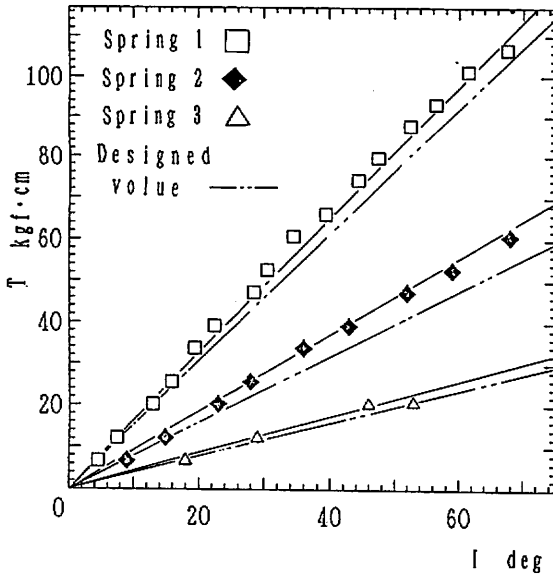


Fig. 2-9 Results of the spring constant check

よって、翼にかかる最大の力は

$$F_{\max} = \frac{\pi}{4} \rho b c^2 R \omega^2 \alpha_{\max} \quad (2-7)$$

これをアスペクト比  $b/c$  に対して整理すると

$$K = \frac{b}{c} = \frac{1}{c^3} \frac{4 F_{\max}}{\pi \rho R \omega^2 \alpha_{\max}} \quad (2-8)$$

ここで、次の値を代入すると

$$\begin{aligned} \rho &= 10^{-6} \text{ kg/mm}^3 & R &= 1000 \text{ mm} \\ \omega &= \pi \text{ rad/s} & \alpha_{\max} &= \pi/6 \text{ rad} \\ F_{\max} &= 6 \text{ kgf} \quad (2-1) \text{ 参照} \end{aligned}$$

$$K = \frac{b}{c} = 14.48 \times 10^6 / c^3 \quad (2-9)$$

書き換えて

$$c = \sqrt[3]{\frac{14.48}{K}} \times 10^2 = \frac{244}{K^{1/3}} \text{ mm} \quad (2-10)$$

従って、翼の大きさは、アスペクト比によって与えられる。上式に基づき、アスペクト比を2から6にした

場合の計算結果をTable 2-2 に示す。翼は表を参考に、アスペクト比を2, 4, および6の3種について設計した。

Table 2-2 Specification of wing

k	2	3	4	5	6
b mm	386	507	616	715	804
c mm	193	169	154	143	134

翼の形状をFig. 2-10 に示す。厚さ3mmのアルミ板より切り出し、翼取付部品に固定できるように6mmの穴を3ヶ開けた。表面をサンドペーパーにてきれいに仕上げた後、腐食防止と水上より見えるようにするため蛍光塗料を施した。

## 2. 7 センターボード

ヨーイング（船の頭が振る状態）を防止するために船底に別途取り付け付けたセンターボードをFig. 2-11 に示す。厚さ10mmの木板にボルトを埋め込み、ボード自体の補強のため表面をFRPで覆い、整形した後塗装した。船体への取付はボルト固定をし、その際に船底に開けた穴には、防水のためシリコンを埋めた。

## 3. 推進実験

製作を完了した人力振動翼船を用い、尾ヒレ形状とねじり巻きバネの適合を図りながら、速度・振動数を基に泳動数を求め本実験船による振動翼推進の性能を調べる。今回の実験は翼のアスペクト比を6とし三種のねじり巻きバネについて以下の要領で行った。

### 3. 1 実験方法

実験場に選定した本学構内千原池に、ロープとプイで20m（10m×2区間）の測定区間を設け充分な助走の後この区間を通過し、その通過時間より船速を算出する。

- ①. 実験船に一名乗り込む。
- ②. 電子メトロノームで振動数を設定し、その音に合わせて足踏みを継続する。

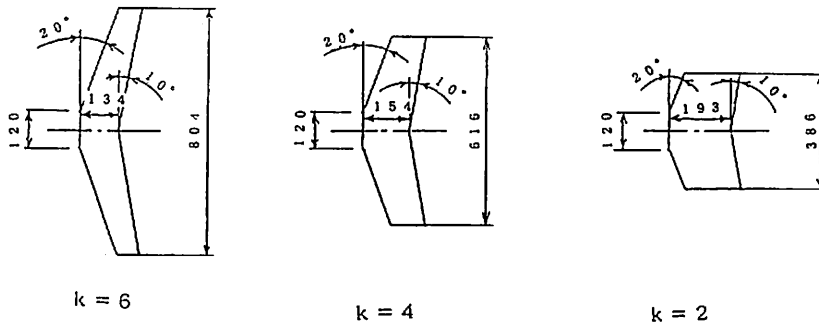


Fig. 2-10 Shape of the wings

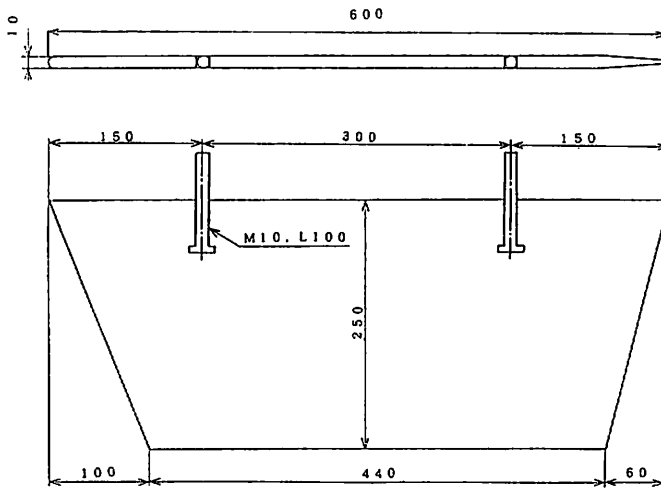


Fig. 2-11 Center board

- ③. 測定区間を通過する際に要した, 区間ごとの時間と, 全区間での合計の足踏み回数を記録する。
- ④. ②～③を繰り返す。
- ⑤. 通過に要した時間より区間ごとの船速を算出し, また全区間における足踏み回数と時間より平均振動数を算出する。
- ⑥. 船速と平均振動数を基に, 区間ごと及び全区間での泳動数を求める。

### 3. 2 実験結果と考察

試作した人力振動翼船について, 翼とパネの組合せにより, 三通りの実験を行った。

- |      |  |
|------|--|
| 実験 1 | 翼型 1 (アスペクト比 6)  |
|      | パネ 1 ( $k_T=1.65 \text{ kgf} \cdot \text{cm}/\text{deg}$ ) |
| 実験 2 | 翼型 1 (アスペクト比 6)  |
|      | パネ 2 ( $k_T=0.87 \text{ kgf} \cdot \text{cm}/\text{deg}$ ) |
| 実験 3 | 翼型 1 (アスペクト比 6)  |
|      | パネ 3 ( $k_T=0.43 \text{ kgf} \cdot \text{cm}/\text{deg}$ ) |

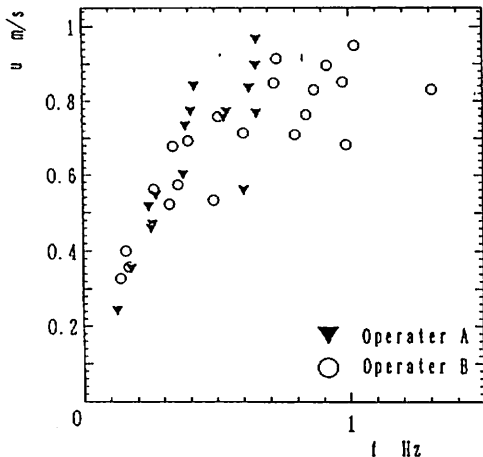


Fig. 3-1 Ship velocity (spring 1)

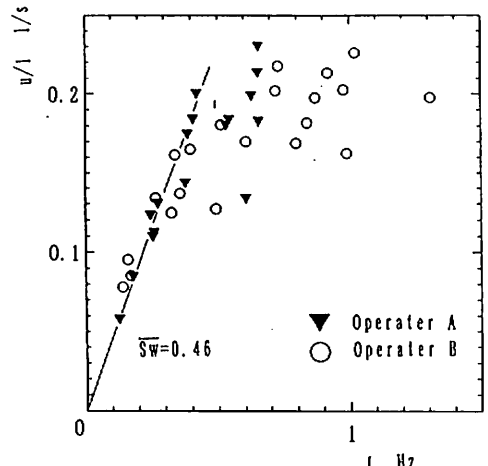


Fig. 3-4 Velocity in body length (spring 1)

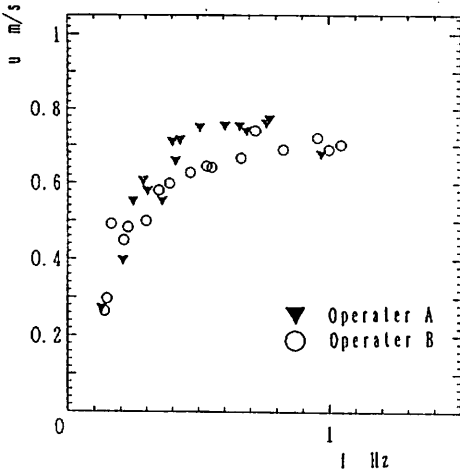


Fig. 3-2 Ship velocity (spring 2)

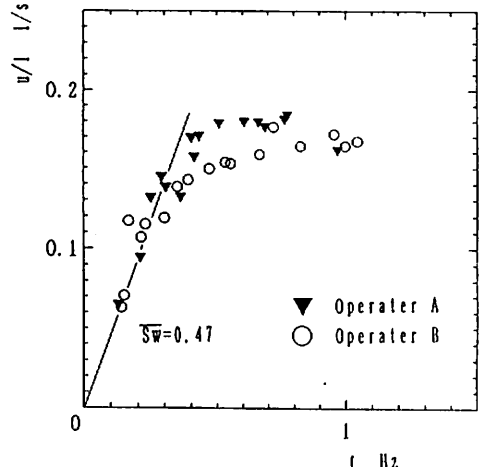


Fig. 3-5 Velocity in body length (spring 2)

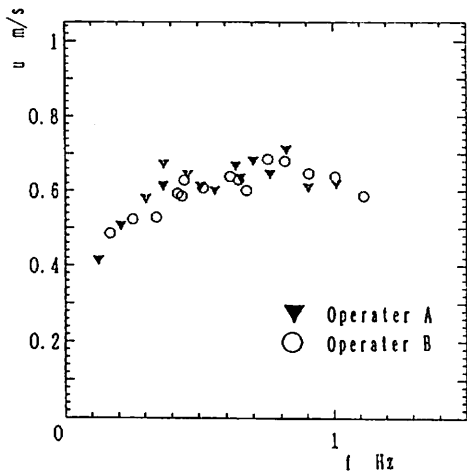


Fig. 3-3 Ship velocity (spring 3)

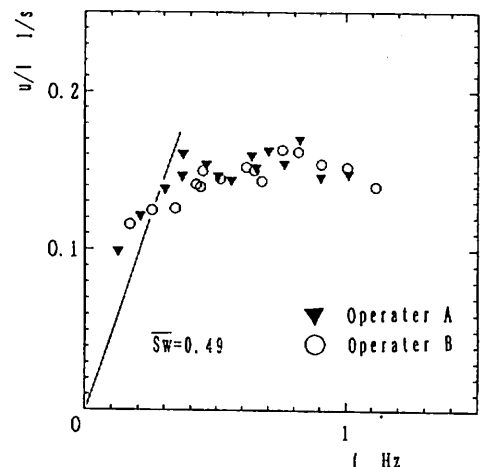


Fig. 3-6 Velocity in body length (spring 3)

実験結果をFig. 3-1~3-3に示す。図は縦軸に推進速度  $u$ 、横軸に平均振動数  $f$  をとった図である。また同じ実験結果をFig. 3-4~3-6に、縦軸に体長比速度  $u/l$ 、横軸に平均振動数  $f$  として示した。これらの図中の▼印は実験者A (体重52kg, 身長165cm), ○印は実験者B (体重70kg, 身長161cm) によるデータであり、船長  $l$  は4.2mである。

いずれの実験においても低振動数域 (約0.4Hz以下) においては速度が振動数とともに直線的に増加するので、その平均的な傾きとして泳動数を求めFig. 3-4~3-6中に示した。平均泳動数は実験1で0.46, 実験2で0.47, 実験3で0.49となり、バネが弱いほどこの領域における泳動数は高いことがわかった。

水上より目視観察したところ低振動数域では、実験1では振動板に対して、翼がほとんど傾いておらず、弱いバネほど適当な傾き角を持っていることがわかった。しかし、さらに振動数を上げていくと、翼にかかる力が大きくなるため、弱いバネでは傾き角が大きくなり (場合によってはほぼ90°) になりすぎており、船速が強いバネに比べて早めに頭打ちの状態となることが分かった。実験1は実験3に比べ振動数を上げるほど速度を増加させる傾向にあるが、これも高周波数域 (約0.7Hz以上) になるとデータにばらつきが始め全体的にみて速度が頭打ちに近い状態となる。

Fig. 3-7は、各バネについて同振動数のデータを平均しプロット点を少なくし、まとめたものである。これを見てもわかるように、低振動数ではバネが弱いほど、高振動数ではバネが強いほど良いことがわかる。またいずれのバネも一定振動数以上で頭打ちの傾向があることがわかる。運転者の経験より実際に足踏みにかかる力を比較してもらくと、バネが弱いほど足へかかる力が小さく滑りやすいようである。実験1において高振動数域で船速が頭打ちとなる原因の一つは、足への負担が大きくなりすぎて、人の脚力がついていかないためである。

また、本実験船は人力船である以上、実験者による泳動特性が必然的に異なってくると思われる。そこで実験者による比較を行った。実験者Aは、低振動数域で船速が大きい、頭打ちの時期が早い。高周波数域のデータが少ないのは、実験者Bに比べて実験者Aの体力が劣ることに原因するものである。実験者Bは、実験者Aに比べると、低振動数での船速は小さいが、頭打ちの時期が実験者Aに比べると遅い。その原因は、実験者Aと実験者Bの足踏みストロークの違いと、体

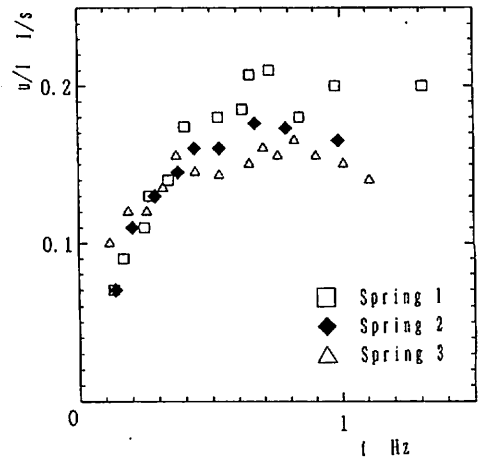


Fig. 3-7 Velocity in body length (assembled)

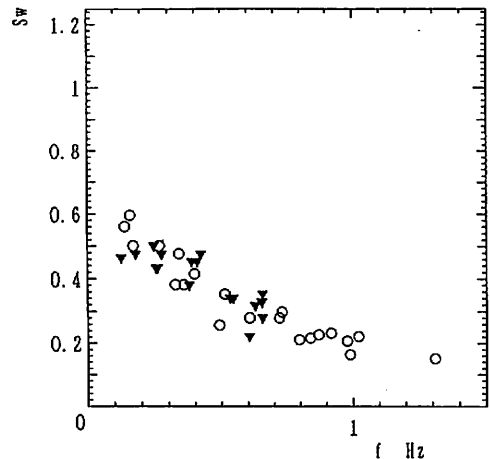


Fig. 3-8 Swimming number (spring 1)

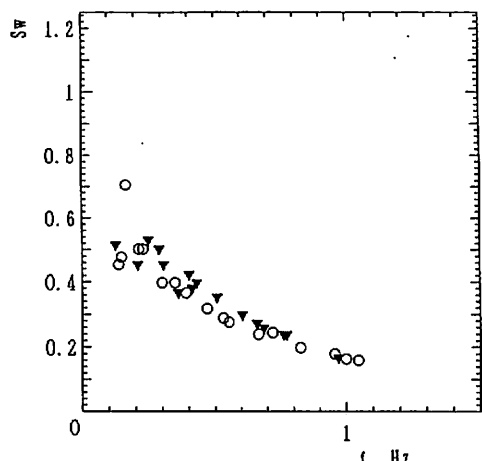


Fig. 3-9 Swimming number (spring 2)

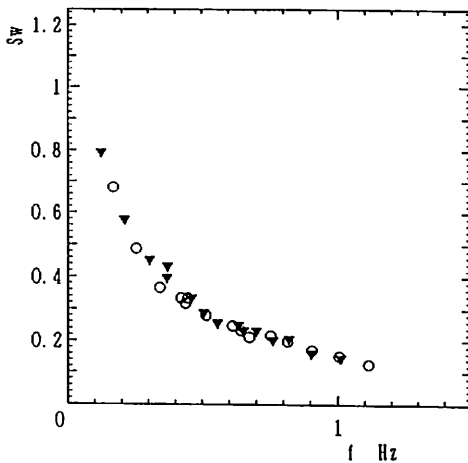


Fig. 3-10 Swimming number (spring 3)

重差 (18kg) によるものであると思われる。このことから低振動数域に於いては、足踏みのストロークが大きいほど、すなわち翼の振幅が大きいほど、泳動数は高くなるようである。

次に、各実験ごとに式 (1-1) より泳動数  $S_w$  を計算しその振動数による変化を求めて、Fig. 3-8~3-10 に示した。前述のように、どのグラフにおいても振動数の増加にともない、泳動数は低下していることがわかる。特に、弱いバネほど漕ぎ始めの泳動数は高いが、その後急速に泳動数（一種の泳動効率）を低下させることが分かる。

以上のことから、弱いバネは低振動数域では高い泳動数を示すものの、高振動数域では、相対流速に対する迎え角が小さくなり充分な推力が得られていない。また、強いバネは逆に低振動数域で迎え角が大き過ぎるため、足踏みにかかる力ほど推力が得られていない。しかし、高振動数での速度の頭打ちが遅いことから、高振動数でのより高い泳動数が期待できるといえる。

今回の実験では、最高速度  $0.97\text{m/s}$ 、低速領域における最高泳動数  $0.79$  という結果が得られた。エンジン駆動の振動翼船の最高速度は現在のところ  $1.12\text{m/s}$  であるから、<sup>(4)</sup> それと比較して人力ということを考慮すればかなり良好な結果が得られたと思われる。

#### 4. 結 言

人力振動翼船を試作し推進実験を行った結果、ほぼ設計どおりの推進性能を有することが出来た。本実験のまとめ及び今後留意すべき改良点を以下に述べる。

(1) バネが弱いほど低振動数域で泳動数が高く、効

率がよい。しかし、振動数を上げるにつれて泳動数の落ち込みは強いバネに比べ急激である。更に、船速の頭打ち周波数も、弱いバネほど早く現れる。しかしながらバネ定数を上げることは、同時に足踏みにかかる力を増すことになり、高振動数域での駆動が困難になるため、必ずしも性能向上になるとは限らない。従って、低振動数では弱く、高振動数では強くなるような可変バネ定数の採用も考慮に値しよう。そのためには次のものが考えられる。

- ①. 捻れ角によって、バネ定数が変化する可変バネを組み込む。
  - ②. ダッシュポットを組み込むことにより、弱いバネを用いたときの高振動数での速度の頭打ちを引き延ばす。
- (2) 実際に本船を漕ぐと、予想以上に足踏みが重く決して快適なものではなかった。原因として考えられるのは
- ①. 用いた翼の面積が過大であった。
  - ②. 振動板及びプリーを水中で振動させる際の、水の抵抗の影響。
  - ③. 駆動ワイヤにかかる摩擦抵抗の影響。
  - ④. 支柱部フランジと、プリーが接触し摩擦抵抗となっている可能性がある。
  - ⑤. 使用したルールに、防水用グリスを多量に塗布したため粘性抵抗を大きくした。また、連続使用によるルールの劣化が認められ、そのための摩擦抵抗の影響。
- 等があげられる。これらの点を改善すれば、現状でも足踏みにかかる力が軽くなり、それに伴いより高い振動数とより大きなストロークが得られ、推進性能の向上が期待できる。
- (3) 本船には、ヨーイング防止のためのセンターボードを船底に取り付けてあるが、ローリング防止としてはなお不十分であり、より大きな安定板が必要であると思われる。
  - (4) ワイヤーが破断し、その取り替えを行った際、水中での作業が困難であった。この経験から、プリーを船上にあげることによって作業の簡略化を図る必要がある。
  - (5) 足踏みルールに用いたスライドバックは、連続使用に耐えられず破損があった。より強度の高いルールに替えるか、他の方法を考えるべきである。
  - (6) 漕ぎ手が替わった際のストロークの調整は足踏

み側で行うようになっている。しかし、この作業は調整が難しく時間がかかる。そこで、船体に完全固定したある腰掛けを可動化すれば、この作業は極めて簡略化される。また、腰掛けに用いたプラスチック製の椅子は硬く、運転中に腰がいたくなるので、改良した方が望ましい。人力船はあくまで人に優しくあるべきである。

本船はまだ実験船として未完成である。しかし、以上の改善をすることによって推進性能は向上するであろう。本学の大型機械魚による実績値 $1.5\text{m/s}$ を上回る可能性もある。また、今回の実験では翼形状を一種類のみしか使用していないので翼形状による推進性能の比較は今後の課題である。その上で翼とバネと最適な組合せを求める必要があらう。

本研究の遂行、解析に当たって多大の助力、助言を頂いた那須謙一助教授、井坂勝幸氏、比嘉秀樹技官及び研究室の友人諸氏に甚深の謝意を表する。

## 5. 参考文献

- (1) Lighthill, J., *Mathematical Biofluidynamics*, Society for Industrial and Applied mathematics, 1975.
- (2) 谷 一郎, 科学, 34-9 (1964-9), 471.
- (3) 永井 實, 魚と鳥の運動, 流体力学ハンドブック, 1987-7, 丸善, 758.
- (4) Lighthill, M. J., Note on the swimming of slender fish, *J. Fluid Mechanics* (1960-9), 305.
- (5) Wu, Y. T., *Swimming and Flying in Nature*, 1975, Plenum Press.
- (6) 種子田定俊, 自己運動を行う物体の抵抗, *Nagare*, 9-2 (1977-6), 10.
- (7) Nagai, M., et al, Study on swimming motion of various swimmers and a mechanical fish, *Advances in Bioengineering* (1982), ASME, 56.
- (8) 宮城・吉川・振動翼型船用推進機の試作, 1986年度琉球大学卒業論文, (1987-3).
- (9) 比嘉和弘, 振動翼型船用推進機の試作, 1987年度琉球大学卒業論文, (1988-3).
- (10) 阿南信也, 振動翼型船用推進機の試作, 1988年度琉球大学卒業論文, (1989-3).
- (11) 石嶺真睦, 振動翼機構の研究, 1988年度修士論文, (1989-3).
- (12) 安次富宏行, 亀田裕史, 振動翼型船用推進機の開発, 1989年度琉球大学卒業論文 (1990-3).
- (13) Nagai, M., Teruya, I. and Isaka, K., Experimental study on an oscillating wing propulsion ship, *Proc. the 1st Pacific/Asia Offshore mechanics Symposium*, 1990-6, 417.
- (14) 平田・羽深, 振動翼型船用推進機の開発, 1990年度琉球大学卒業論文 (1991-3).
- (15) 井坂勝幸, 振動翼型船用推進機の開発, 1990年度琉球大学修士論文 (1991-3).
- (16) 久貝・根保, 人力振動翼船の試作, 1990年度琉球大学卒業論文 (1991-3).
- (17) ばね技術研究会編, ばね, 1985, 丸善.