

## アクティブ減揺フィンの波浪推進への試み

金本真美子（北海道大学水産科学院）  
芳村康男（北海道大学水産科学研究院）

### 1. はじめに

海上で航行する船舶は6自由度の運動をしているが、これらの運動の中で復原力のある縦揺れ・横揺れ・上下揺れは、船の安全性や乗組員の乗り心地に大きな影響を与える。特に縦揺れと横揺れは船酔いに大きく影響する。

当研究室では平成16年度からフィン制御によるピッチングの減揺の研究を開始し、フィンの角度をアクティブに制御することによってピッチングを減少する方法について開発を進め、平成20年度からはフィンの配置をやや船体中央寄りにし、一对のフィンでピッチングとローリングを同時に減揺することも可能であることも実験で確認した。

ところがフィンを装備するということは船底に付加物を出すことであり、これが船体抵抗を大きくして船の推進効率を低下させることが懸念される。

一方、船首に水中翼を取り付け、波エネルギーを推力に変えて船体を航行させる波浪推進が提案されており<sup>1)~5)</sup>、波エネルギーを船の運動エネルギーとして吸収し、船首に設置された水中翼を上下動させることで推力を発生させ、船舶を前進させることが期待できる。

そこで、船体の船首部に取り付けられたフィンでピッチングの減揺と波エネルギーを推進エネルギーに変換することによって推進性能の向上が本当に可能かを試みることにした。

### 2. アクティブ減揺フィン

#### 2.1 アクティブ減用フィンの概要

船体にフィンを取り付けたときに、フィンによって発生する力を考えるため、船体が船速 $u$ で走行中に向かい波を受け、正方向にピッチングし、同時に負方向にヒーピングした場合の一瞬の運動について考える。ただし、フィンは、横揺れ減揺効果を得るため、 $x$ - $y$ 平面と角度 $\theta$ を成すように取り付けられる。

この場合、投影面積が小さくなったフィンが $x$ - $y$ 平面と平行に装備されていると考えることができ、

よって $x$ - $y$ 平面とフィンの成す角度は船体のピッチ角度と等しいと考えることができる。また、フィンは両舷に一枚ずつ取り付けられているが、縦揺れにおいては、二枚のフィンを一枚のフィンとみなして取り扱う。

船体の重心 $G$ からフィンの圧力中心までの距離を $x_f$ （前方を正）とすると、フィンの圧力中心における上下速度は上向きに $\dot{\theta}x_f$ であり、上下加速度は、上向きに $\ddot{\theta}x_f$ で表される。このとき、フィンへの流入は、流入角度 $\alpha$ 、流入速度 $U$ で表される。ただし、 $\dot{\theta}$ は船の重心の上下速度である。

ここで、船のピッチ角度が $\theta$ のとき、フィンの迎角は $(\alpha - \theta)$ となり、フィンには揚力 $L_f$ と抗力 $D_f$ とフィンによる加速抵抗が働く。この力を、縦揺れの運動方程式に加えると次のようになる。

$$\begin{aligned} & \left\{ I_{yy} + J_{yy} + (m_f + m_{fz})x_f^2 \right\} \ddot{\theta} + \left\{ M_{\dot{\theta}} + \frac{\rho}{2} \cos \gamma A_f U (f_{\alpha} + C_D) x_f^2 \right\} \dot{\theta} \\ & + \left( GM_L W - \frac{\rho}{2} \cos \gamma A_f f_{\alpha} U^2 x_f \right) \theta \\ & = M_w + \frac{\rho}{2} \cos \gamma A_f U (f_{\alpha} + C_D) x_f \dot{z} + (m_f + m_{fz}) x_f \ddot{z} \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、 $\alpha$ : フィンへの流入角度、 $\rho$ : 流体の密度、 $C_L$ : フィンの揚力係数、 $f_{\alpha}$ : フィンの揚力係数勾配、 $C_D$ : フィンの抗力係数、 $A_f$ : 両舷フィンの面積、 $\gamma$ : フィンの取り付け角度、 $m_f$ : フィンの質量、 $m_{fz}$ : フィンの付加質量である。

装備したフィンをアクティブに動かし、より揚力が大きく発生する角度にフィンを制御した場合の縦揺れ運動方程式について考える。固定していた状態から、さらにフィンを揚力が大きくなると考えられる方向に、 $\theta_{fp}$ の角度だけ動かした場合、(1)式より、ピッチ角速度に比例した(定数: $b_p$ )フィンの制御を行うのが効果的である。この場合(1)式は、

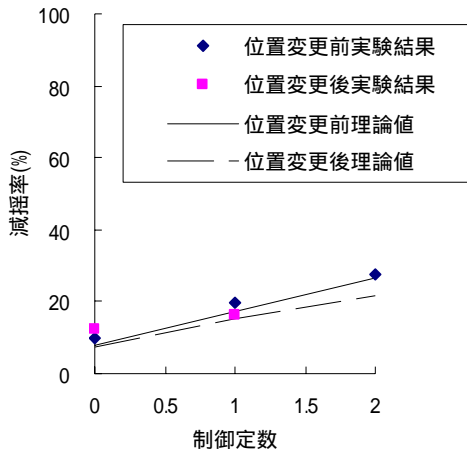
$$\begin{aligned} & \left\{ I_{yy} + J_{yy} + (m_f + m_{fz})x_f^2 \right\} \ddot{\theta} + \left\{ M_{\dot{\theta}} + \frac{\rho}{2} \cos \gamma A_f U [f_{\alpha} (b_p U + x_f) + C_D x_f] \right\} \dot{\theta} \\ & + \left\{ GM_L W - \frac{\rho}{2} \cos \gamma A_f f_{\alpha} U^2 x_f \right\} \theta = M_w + \frac{\rho}{2} \cos \gamma A_f U (f_{\alpha} + C_D) x_f \dot{z} \\ & + (m_f + m_{fz}) x_f \ddot{z} \end{aligned}$$

となる。横揺れについても同様に取扱うと、ロール角速度に比例するフィンの制御を行うのが最も効果的なことが理論的に示される。

## 2.2 アクティブ減用フィンの実験結果

波浪中における減用フィンの結果の一例を Fig.1 に示す。

(縦揺れの減揺: 縦揺固有周期)



(横揺れの減揺: 横揺固有周期)

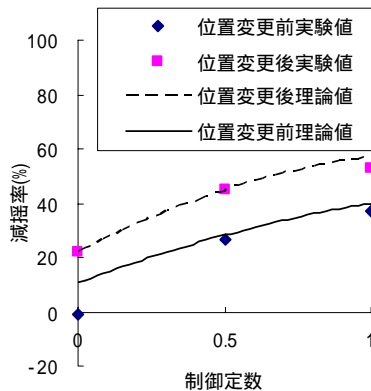


Fig.1 アクティブ減用フィンの効果

横軸には角速度の制御定数を取り、縦軸には波に対する縦揺れ応答についてフィンを装備しない状態に対する比率を%で示す。横揺れ減揺率も同様である。

これらの実験などから、フィンによる減用に関して以下の点が明らかになった。

- 1) 縦揺れ、横揺れをフィンでアクティブに減揺するにはそれぞれの角速度に比例するフィンの角度で制御するのが最も効果的である。
- 2) 減用効果は、フィンの面積、フィンの取付レバー、および船速に比例するが、フィンの角度を制御するピッチングあるいはローリングの角速度の制御定数に概ね比例して効果が増大する。

## 3. 船首フィンによる推力の理論的検討

船体にフィンと取り付けるとき、フィンによって発生する力を考える際に Fig.2 のように船体が船速で走行中に向かい波を受け、正方向にピッチングした状態を考える。(この時、ピッチングは船首が上がった状態を正とし、ヒービングは考えない)

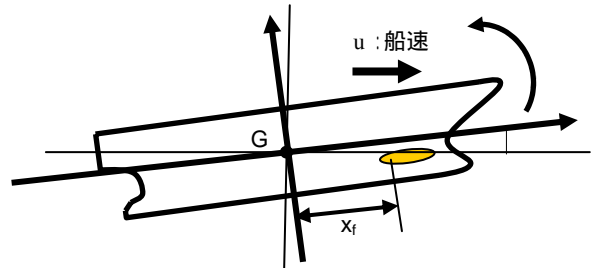


Fig.2 船体がピッチングした状態

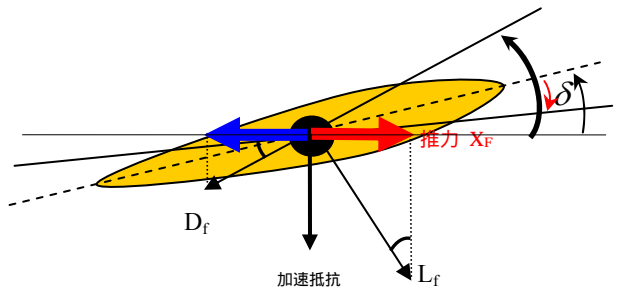


Fig.3 フィンの迎え角とフィンに作用する力

フィンは両舷に一枚ずつ取り付けているが、縦揺れにおいては二枚のフィンを一枚のフィンとみなして取り扱う。船体の重心からフィンの圧力中心までの距離 (前方向に正) とすると、フィンへの流入角度はフィンへの流入速度をとると、次式となる。

$$\varepsilon = \tan^{-1} \left( \frac{x_f \dot{\theta}}{u} \right) \quad (2)$$

船のピッチ角が  $\theta$  のときフィンの迎角は  $(\varepsilon - \theta)$  となり、Fig.3 が示すようにフィンには揚力と抗力および加速抵抗が働く。この揚力と抗力の鉛直成分とフィンによる加速抵抗が縦揺れを減揺する力となる。また、揚力の水平成分が推力となり抗力の水平成分が推進を妨げる力となる。

ここで、揚力が大きく発生する角度にフィンを(下向きを正とする)だけ動かすと、フィンの迎角はに変化し、この時発生する揚力は次式のようになる。

$$\left. \begin{aligned} L_f &= \frac{\rho}{2} C_L \cos \gamma A_f U^2 \\ C_L &= f_\alpha \sin(\varepsilon - \theta + \delta) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

推力  $X_F$  は揚力  $L_f$  の水平成分なので、これらより

$$X_F = L_f \sin \varepsilon \quad (4)$$

となる。

ここで、流入角度  $\varepsilon$  は微小角と考えると、 $\sin \varepsilon \cong \varepsilon$ 、 $\cos \varepsilon \cong 1$  であり、(2)式の  $\varepsilon$  は次式のように近似することができる。

$$\varepsilon = \frac{x_f \dot{\theta}}{u} \quad (5)$$

Fig.2 よりフィンへの流入速度  $U$  は次式となる。

$$U = \sqrt{u^2 + (x_f \dot{\theta})^2} = u \sqrt{1 + \varepsilon^2} \cong u \quad (6)$$

ただし、 $\theta$  : ピッチ角度

$\rho$  : 流体の密度

$C_L$  : フィンの揚力係数

$f_\alpha$  : フィンの揚力係数勾配

$A_f$  : 両舷フィンの面積

$\gamma$  : フィンの伏角

$x_f$  : 重心からフィン中心までの距離

ここで、フィンの制御角度  $\delta$  を

$$\delta = C_1 \theta + C_2 \dot{\theta} \quad (7)$$

と制御すると、推力  $X_F$  は次式となる。

$$\begin{aligned} X_F &= L_f \sin \varepsilon \\ &= \frac{\rho}{2} f_\alpha \sin(\varepsilon - \theta + \delta) \cos \gamma A_f U^2 \sin \varepsilon \\ &= \frac{\rho}{2} f_\alpha \cos \gamma A_f u^2 (\varepsilon - \theta + \delta) \cdot \varepsilon \\ &= \frac{\rho}{2} f_\alpha \cos \gamma A_f u^2 \left( \frac{x_f \dot{\theta}}{u} - \theta + (C_1 \theta + C_2 \dot{\theta}) \right) \cdot \frac{x_f \dot{\theta}}{u} \\ &= \frac{\rho}{2} f_\alpha \cos \gamma A_f u^2 \left\{ \left( \frac{x_f}{u} + C_2 \right) \frac{\dot{\theta}^2}{u} + (C_1 - 1) \frac{\theta \dot{\theta}}{u} \right\} x_f \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、ピッチ角  $\theta$  を  $\theta = \theta_0 \sin \omega t$  とすると、

$$\begin{aligned} \theta \cdot \dot{\theta} &= \theta_0 \sin \omega t \cdot \theta_0 \omega \cos \omega t \\ &= \frac{\theta_0^2 \omega}{2} \sin 2\omega t \end{aligned}$$

であるから、 $(\theta \cdot \dot{\theta})$  の平均は 0 となることにより推力  $X_F$  に  $C_1$  は関係しないことがわかる。これより、フィンの制御は  $C_2$  のみとなり、ピッチ角速度  $\dot{\theta}$  を  $\delta$  の制御に利用する。すなわち、

$$\delta = C_2 \dot{\theta} \quad (9)$$

となって、ピッチングの減揺と全く同じ制御で良いこととなる。すなわち、 $C_2 = b_p$  とすると、この場合の推力  $X_F$  は次式となり、 $\dot{\theta}^2$  に比例する推力が最終的に以下のように得られる。

$$\begin{aligned} X_F &= \frac{\rho}{2} f_\alpha \cos \gamma A_f u^2 \left( \frac{x_f}{u} + b_p \right) \frac{x_f \dot{\theta}^2}{u} \\ &= \frac{\rho}{2} f_\alpha \cos \gamma A_f (x_f + b_p u) x_f \dot{\theta}^2 \end{aligned} \quad (10)$$

## 4. 模型実験

### 4.1 平水中強制ピッチング実験

供試模型船とフィンの要目を Table 1 および Table 2 に示す。

Table 1 供試模型船の主要目

		模型船
$L_{pp}$	m	1.9828
$B$	m	0.4138
$d_m$	m	0.1517
	m3	0.0715
$C_b$		0.5743
$L/B$		4.7917
$B/d$		2.7273
$x_G$	m	-0.0372

Table 2 フィンの要目

		片側フィン 両フィン	
スパン	m	0.1	0.2
コード	m	0.1	0.1
翼厚	m	0.0097	0.0097
フィン面積	m <sup>2</sup>	0.01	0.02
軸系	m	0.008	0.008
アスペクト比		1	2
Af/LppB		0.0122	0.0244



Fig.4 供試模型船と取り付けられたフィンの写真

平水中において船体を強制的にピッチングさせることでフィンの推力の発生を検証した。船体の船首部に Fig.5 のような加振装置を製作して取り付け、平水中で船体ピッチングさせながら、自由航走試験を行い船速を計測した。このとき、加振装置の回転速度と錘の位置によって船体のピッチングの状態を変えた。実験項目を Table 3 に示す。

Table 3 平水中実験項目

フィンの状態	回転速度(s)	錘の回転半径(m)	制御値 $b_p$
なし	0.6, 0.8, 1.2	0.08, 0.14, 0.16	
あり	0.6, 0.8, 1.2	0.08, 0.14, 0.16	0, 2.0

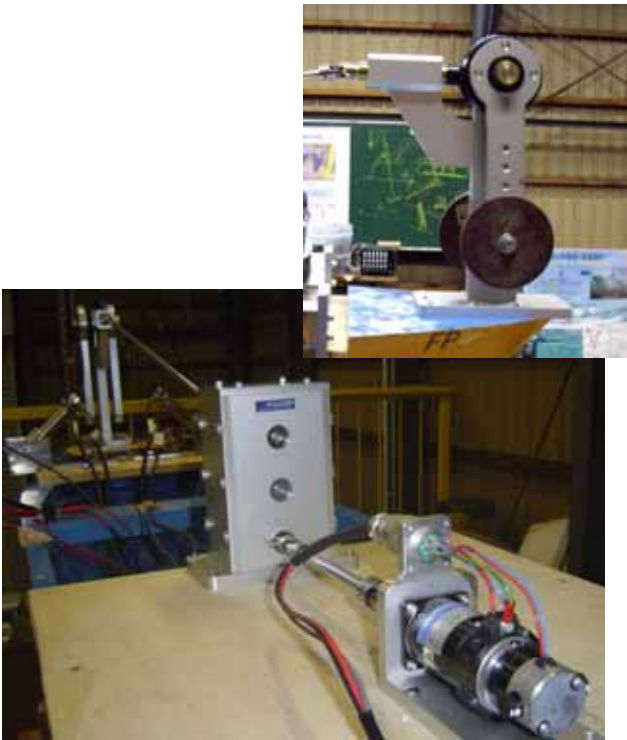


Fig.5 強制ピッチング装置

強制ピッチングを発生させる加振装置は、モータで左右互いに反対方向にアームを回転させ、アームに取り付けた錘の遠心力で上下に加振する方法で、前後方向の遠心力は互いに打ち消し合い推力は発生しない。加振振動数はモータの回転数で決まるが、本実験では自航プロペラを駆動する小型 60W 直流モータを使用し、PID 制御でモータ回転数を所定の回転数に制御した。錘は左右 1kg 左右同量とし、錘の取付位置、すなわち回転中心から 0.08m ~ 0.18m と変えてピッチングの加振力を変えた。

平水中を加振装置でピッチングさせた場合、模型船の前進速度を Fig.5 に示す。まず、フィンが無い場合は、船速はいずれの加振周波数や加振の大きさを変えてもマイナスとなっており、船体は後退した。

これに対して、フィンを動かさず固定した場合 ( $b_p=0$ )、低速ではあるが船が前に進んだことが分かる。更にフィンをアクティブに制御した場合 ( $b_p=2$ )、前進船速は大きく、より推力が発生したことが分かる。また、角周波数 が大きくなるほど船速は大きくより推力が発生したことも分かる。

また、何れの周波数 において錘の回転半径が大きいほど、つまり加振力が大きく船体動揺が大きくなるほど、船速は大きくなっている。

以上の実験から、船体がピッチングすることでフィンに推力が発生し、船が前に進むことが分かった。この時フィンに発生する推力は(14)式の通り pitch 角が大きく、角周波数 が大きいほど大きくなる。また、フィンをアクティブに制御することによって、より大きな推力を発生させることができることが明らかになった。

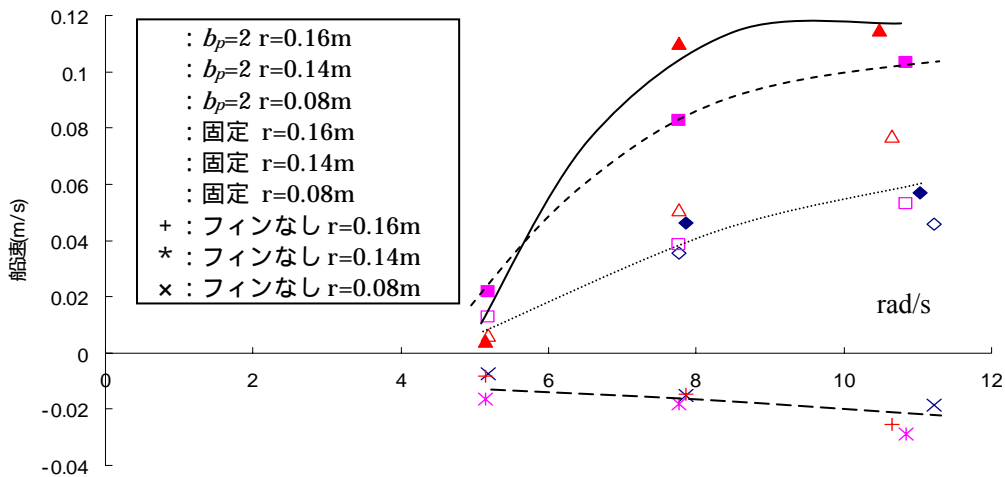


Fig.6 平水中強制ピッチング時における模型船の速度



## 4.2 波浪中における実験

波の中で自由航走試験を行い、船速を計測した。電車を速度 0.02m/s で走らせ、手で模型船を曳航し初速をわずかに与えてから模型船を切り離し、自由航走させた。これは(10)式に示したように、船体運動をしていない状態ではフィンに推力が発生しない他、最初の波で模型船が後方に漂流力を受けて流されて、推力が逆向きに発生するのを防ぐためである。そして、初期船速が減衰すると思われる時間経過後から計測を開始した。

波はピッチングの固有周期以上の 3 種類とし、波高は波漂流力が大きくなるよう小さくした。また、フィンは最も推力が発生する制御定数  $b_p=2.0$  の状態とフィンなし状態で計測を行った。実験項目を Table.4 に示す。

Table 4 波浪中実験項目

フィン	波高 (cm)	波周期 (s)	角周波数 $\omega$ (rad/s)
なし	1.1	1.24	5.07
あり		2.06	3.05
あり		2.58	2.44

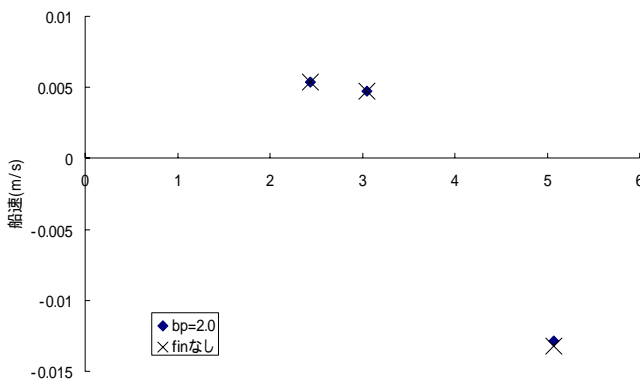


Fig.7 波浪中で自由運動した時の船速

波浪中の前進船速を Fig.7 に示す。この図から、フィンなし状態の時と制御定数  $b_p=2.0$  でフィンをアクティブに制御した時の船速はほとんど変わらず、フィンの推力によって推進したとは言えない。波の角周波数 が大きくなるにつれて船速が小さくなっていることから、波漂流力の影響は が大きいほど大きいということが分かる。また、(10)式よりフィンの推力は が大きくなるほど大きくなるので、Table 4 に示されている角周波数以上の波で計測したが、同時に波漂流力も大きくなるので全てのケースで模型船は後方に流された。また、波高についてもピッチングが大きくなるように Table 4 以上の波で検証してみたが波漂流力は波高の自乗に比例

することから、いずれも前進に進むことはなかった。

以上の結果より、フィンの推力で波漂流力に打ち勝って船が前に推進することはこのサイズでは困難なことがわかった。

## 5. おわりに

船首フィンをアクティブに駆動することによりピッチングやローリングを減揺できるが、このフィンで波エネルギーを推進エネルギーに変換し、推力を発生させ船舶を前進できることが確認できた。

すなわち、平水中で船体を強制的にピッチングさせた場合、フィンによる推力は理論考察通り、角周波数 が大きいほど、またピッチング運動が大きいほど大きくなるということが確認できた。また、停止状態でピッチングを強制しても船体が前進したことから、船速がない状態でも推力は発生していることが分かる。さらに、固定フィンの状態でも推力は発生するが、フィンをアクティブに制御することによって、より大きな推力を発生させることができることも確認できた。

しかし、これは平水中で船体を強制的にピッチングさせた時のみであり、波浪中では船を推進させるまでには残念ながら至らなかった。この原因として波漂流力がある。波漂流力は波高や角周波数に依存し、この程度のフィンではこの力を超えるほどの推力を発生させることができなかつたためと思われる。

これらの検討結果を基に、フィンサイズを更に検討し直すことで、波浪中でも推力可能な組合せを見つけることも可能である。しかし、少なくとも、減揺を第一に考えてきたフィンが、推進性能面にマイナスではなくプラスになることが明らかになった。これによって、より快適に安全に航海ができるとともに推進性能を向上させることができ、アンチピッチングフィンの実用性が期待できると思われる。

## 参考文献

- 1) 一色 浩, 八田 和也, 寺尾 裕: 波力利用振動翼推進の研究開発, 日本造船学会誌, 第 179 号(1989), pp280-288
- 2) 内藤 林, 檜垣 祥市, 加藤 淳, 水野 滋也, 山森 隆江: 船首固定翼による波浪中抵抗増加の減少及び推力の発生に関する研究, 関西造船協会論文集, 第 235 号(2001), pp 79-89
- 3) 内藤 林, 一色 浩, 藤本 圭祐: 波浪中の船体に取り付けられた Fin が発生する推力に関する

研究, 関西造船学会誌, 第 202 号(1986),  
pp23-29

- 4) 一色 浩: 波喰い推進, 関西造船協会誌, 第  
208 号(1988), pp 81-82
- 5) 寺尾 裕: 波に向かって進む浮体(波浪推進器の  
可能性について), 関西造船協会誌, 第 184 号  
(1982), pp51-54
- 6) 金本真美子: ローリング・ピッチング統合型  
減揺フィンの実験的研究, 北海道大学卒業論  
文, 2010