「海一自然と文化」東海大学紀要海洋学部　第２巻第１号　19-23頁（2004）
Journal of The School of Marine Science and Technology, Vol.2 No.1 pp. 19-23, 2004

二翼式波浪推進装置の性能について

寺尾　裕[*1]

Performance of Dual fin type Wave Devouring Propulsion System

Yutaka TERAO

Abstract

Utilization of natural energy is a most important research area even for sailing ships in the ocean. We propose a new wave power utilization device, wave devouring propulsion system (WDPS), which is a thrust generator of a ship and is also used as a motion stabilizer. The WDPS converts wave energy directly into trust and efficiently reduces the hull motion in the waves.

In 2000, experimental results of a newly designed dual fin type WDPS and hydrodynamic wave forces acting on the foils were presented by the author. In the previous discussion of WDPS, which is related to the mechanism of thrust generation of a single hydrofoil located at the incident waves, the heading sea condition is more suitable than any another wave direction. But the newly developed WDPS test shows that the fastest speed is achieved with a beam sea condition. The theoretical analysis of the effect of WDPS is shown in this paper.

１．緒　　言

今日，社会および経済活動を支えるために消費される大量の化石燃料に伴う大気中の CO_2 の大幅な増加は，地球上で最も大きな環境問題の１つである．言うまでもなく，海洋上での船舶の排気ガスによる CO_2 の問題は，海運業界や造船業界が率先して取り組むべき課題の一つとなっている．

我々は，1982年以降波浪推進の原理を追求し（Terao (1982)），波浪を推進力に変換する一翼型の波浪推進装置を発表し，（Isshiki et al. (1989)），1990年には本学練習船を改造し実海域にて実証試験を行った．また，2000年には，二翼式波浪推進装置を考案し波浪中模型実験にて推力を得ることを確認した．

今報では，簡単な横波中の波浪推進装置の性能解析を，線形翼理論で評価を行ったので紹介する．正面向波と横波の比較は（Terao 2000）に示してあり，今回は横波についてのみ考えることとする．

２．横波中の翼性能の評価

翼に働く力は Fig. 1 のように考える．ここで取り上げる問題の座標系を Fig. 2 に示す．問題を単純化し，翼運動はあらかじめ与えて考えることとし，２次元翼問題を取り扱う．３次元問題にはアスペクト比による揚力修正をする．

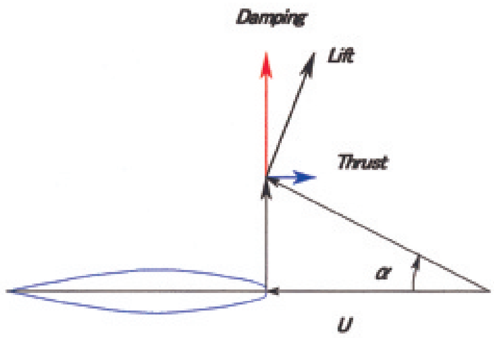

Fig. 1　Lift, thrust and damping force acting on the hydrofoil.

2004年５月12日受理

＊1　東海大学海洋学部マリンデザイン工学科（Department of Marine Design and Engineering, School of Marine Science and Technology, Tokai University）

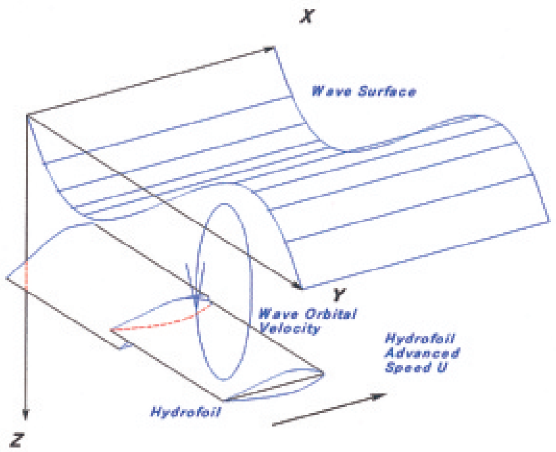

Fig. 2　Hydrofoil coordinates system and wave orbital velocity.

2. 1　横波中固定翼性能の評価

波の速度ポテンシャルは,

$$\phi=\frac{gA}{\omega}e^{-kz}\sin(ky-\omega t)\,:\,k=\frac{\omega^2}{g} \tag{1}$$

$$\frac{\partial\phi}{\partial z}=-A\omega e^{-kz}\sin(ky-\omega t)\equiv\nu_w \tag{2}$$

$$\eta=A\cos(ky-\omega t)|_{y=0} \tag{3}$$

一様前進速度 U の水平水中翼の発生する揚力を,

$$L_w=\frac{1}{2}\rho SC_L(\alpha_w)U^2 \tag{4}$$

で表されるものとする．翼は運動せず固定し広がっているとしても翼迎角は波の粒子運動より変化し,

$$\alpha_w=\frac{\nu_w}{U} \tag{5}$$

となり，正面向波と同じように記述ができて,

$$L_w=\frac{1}{2}\rho S\frac{\partial C_L}{\partial\alpha}\nu_w U \tag{6}$$

推力 T は前縁推力を考えないとして,

$$T_w=L_w\sin\alpha=L_w\frac{\nu_w}{U} \tag{7}$$

$$=\frac{1}{2}\rho S\frac{\partial C_L}{\partial\alpha}\nu_w^2 \tag{8}$$

これを翼面に沿って積分する．翼素に分け出合い周期 Te にわたり時間平均推力を積分で求めると,

$$\tilde{T}_w=\frac{1}{T_e}\int_0^{Te}\int_{-s}^{s}\frac{1}{2}\rho C\frac{\partial C_L}{\partial\alpha}\nu_w^2\,dydt$$

$$=\frac{1}{2}\rho\frac{\partial C_L}{\partial\alpha}A^2\omega^2e^{-2kz}CS \tag{9}$$

ただし翼長を 2S とし，翼弦長 C は波長 λ より短い．

これらより推力は翼面積に比例し，波高の 2 乗と周波数の 2 乗に比例する傾向が見える．翼位置は，周波数影響を考えなければ，浅い方が推力を発生しやすいこともわかる．この計算では 2 次元翼の近似でしかないので，アスペクト比の修正を与え 3 次元の翼性能の評価を得ることができる．推力は AR をアスペクト比とすれば，新たに

$$\frac{\partial C_L}{\partial\alpha}=\frac{\partial C_L}{\partial\alpha_{2D}}\cdot\frac{AR}{AR+2}$$

と書き直して

$$Tw=\frac{1}{2}\rho\frac{\partial C_L}{\partial\alpha}A^2\omega^2e^{-2kz}CS$$

$$=\frac{1}{2}\rho\frac{\partial C_L}{\partial\alpha}gA^2ke^{-2kz}CS \tag{10}$$

と変形すると波周波数と翼深さを同時に含みその影響が見えやすい．つまり

$$E_1(z,k)\,ke^{-2kz} \tag{11}$$

が翼深さと周波数の影響項であり，分離できない．しかし，これは $k\to\infty$ で 0 に収束し，$z\neq0$ で $k=\frac{1}{2z}$ のときに最大値を持つ．そのとき推力極大値は

$$Tw|_{\max}=\frac{1}{4ze}\rho\frac{\partial C_L}{\partial\alpha}gA^2CS \tag{12}$$

これらより，翼の取り付け深さの最適値は波周波数の関数として与えられたことになる．なぜなら，(10) 式からは Z＝ 0 で最大の推力が得られるが，実際これでは翼が水面に露出してしまう．そのため，物理的には実海面の出現頻度の波高以下に翼を取り付けることが必要になる．さらに，2 次元の理論からは水面に近いほど波漂流力をうけ，発生する推力が見かけ上低下することが知られている．このため (12) 式で得られる値が実用上では最大推力に近いものとなると考える．

これらの関係を波数 k，翼深さ z を二次元平面上にとり，z を一定とし，k を変化させたときの $E_1(Z,k)$ を高さ方向に示す三次元表示とし，Fig. 3 に示しておく．

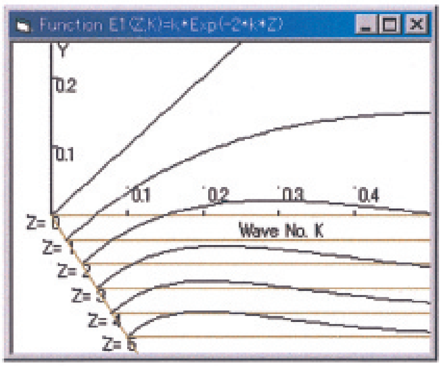

Fig. 3　Wave frequency and hydrofoil depth influence function.

実海面での横波中二翼式波浪推進装置の使用を考えるなら，波のパワースペクトラムのピーク周波数となる波周波数を調べ，それにあった深度に翼を取り付けるということになろう．いま，与えられた波周波数に対応する翼取り付け深さが，実海域の周波数範囲で対応出来るものになるか検証してみることとする．実際の日本近海でのパワースペクトラムのピーク周波数 T＝3(sec) と，北太平洋 T＝

6(sec) で検討すると以下の表にまとまる．

Table. 1 Wave period and optimum foil depth

T (sec)	ω	k	z (m)	λ (m)
3	2.09	0.45	1.12	14.04
6	1.05	0.11	4.47	56.15

ω は周波数，k は波数，z は翼深さ，λ は波長である．この値の範囲なら欲深さは実際の大きさの船にも対応出来そうな範囲に収まる．

2.2 翼の Pure Roll による翼発生揚力の検討

翼単独の Roll を考え，波粒子の流入を考えない場合，Roll Angle を θ と書くと，横揺れは波傾斜の μ 倍に比例し，位相差 ε を持つから，

$$\theta = -A\mu k \sin(ky - \omega t + \varepsilon) \tag{13}$$

$$\dot{\theta} = -A\mu k\omega \cos(ky - \omega t + \varepsilon) \tag{14}$$

中心からの翼の距離を s で表すと，重心から離れた所にある翼の前進時の Roll による発生の揚力成分は，翼面上垂直成分 v により発生する．これは，

$$\nu_R = s\dot{\theta} \tag{15}$$

一様前進速度 U の水平水中翼の発生する翼力 L は，

$$L = \frac{1}{2}\rho S C_L(\alpha) U^2 \tag{16}$$

で表される．翼は Pitch 運動を固定され左右に広がっているものとする．このとき迎角は，$\alpha_R = \dfrac{\nu_R}{U}$ であるから，

$$L_R = \frac{1}{2}\rho S \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \nu_R U \tag{17}$$

翼推力 T は，前縁推力を考えないとして，

$$T_R = L\sin\alpha = L\frac{\nu_R}{U}$$
$$= \frac{1}{2}\rho S \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \nu_R^2 \tag{18}$$

前進速度影響は消えている．これを翼面に沿って積分する．ただし，翼長を 2S とし，翼弦 C は波長 λ より，短いとし翼要素に分け，時間平均推力を積分より求める．

$$\tilde{T}_R = \frac{1}{T_e}\int_0^{Te}\int_{-s}^{s} \frac{1}{2}\rho C \frac{\partial C_L}{\partial} \nu_R^2 \, dydt$$
$$= \frac{1}{6}\rho \frac{\partial C_L}{\partial \alpha}(A\mu k\omega)^2 C S^3 \tag{19}$$

Pure Roll Effect/Wave Effect を η と定義するなら，

$$\eta = \frac{\dfrac{1}{6}\rho \dfrac{\partial C_L}{\partial \alpha} A\mu k\omega^2 C S^3}{\dfrac{1}{2}\rho \dfrac{\partial \alpha_L}{\partial \alpha} A^2\omega^2 e^{-2kz} C S}$$
$$= \frac{1}{3}\frac{(\mu k S)^2}{e^{-2kz}} = \frac{(\mu k S)^2 e^{2kz}}{3} \tag{20}$$

これより，μ，k の関係により Roll 運動による推力が変化することがわかる．

2.3 翼と波粒子運動を含んだ翼発生揚力の検討

このとき翼の迎角は翼運動により，

$$\alpha_{All} = \alpha_w + \alpha_{Foil} \tag{21}$$

よって

$$L = \frac{1}{2}\rho S \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \alpha_{All} U^2 \tag{22}$$

翼推力 T は，前縁推力を考えないとして，流入角影響を考えて，翼への流入角を幾何学的に考えると

$$T = L\sin(\alpha_w)$$
$$= \frac{1}{2}\rho S \frac{\partial D_L}{\partial \alpha}\left(\frac{\partial \phi}{\partial Z} + \alpha_{Foil} U\right)\frac{\partial \phi}{\partial Z} \tag{23}$$

これを翼面に沿って積分する．時間平均推力を積分により求めると，

$$\tilde{T} = \frac{1}{2T_e}\rho C \frac{\partial C_L}{\partial \alpha}\int_0^{Te}\int_{-s}^{s}(\nu_w + \nu_F)\nu w \, dydt \tag{24}$$

$$\nu_w = A\omega e^{-kz}\sin(ky - \omega t) \tag{25}$$

$$\nu_F = U\alpha_{F0}\sin(ky - \omega t + \varepsilon_\alpha) \tag{26}$$

ここで，積分して推力が出てくるためには，ν_F についても二乗となる流速成分が望ましい．そこで，全て同位相となり，かつ振幅が最大となる条件がないかを考える．ただし stall を避けるために最大流入角に制限があるとする．これは，$|\alpha_w| \le \alpha_{Stoll}$ のときのみ迎角に比例する線形の揚力が得られるとし，それ以上では 0 と考えるのが簡単である．逆に平均流入角で考えて，$\alpha_w = \alpha_{Stoll}$ となるような翼角の制御を与えると考えても良い．

今，左右翼の長さに関して，最大の揚力発生条件を考える．

$$I_{WF} = \frac{1}{T_e}\int_0^{Te}\int_{-s}^{s}(\nu_w + \nu_F)(\nu_w)\, dydt$$
$$= \frac{1}{T_e}\int_0^{Te}\int_{-s}^{s}(\nu_w^2 + \nu_F\nu_w)\, dydt$$
$$= \frac{1}{2}\int_{-s}^{s}(-A\omega e^{-kz})^2 dy + \frac{1}{T_e}\int_0^{Te}\int_{-s}^{s}(\nu_F + \nu_w)\, dydt$$
$$= sA^2\omega^2 e^{-2kz} + I_{FV1} \tag{27}$$

また，

$$I_0 = C_1C_2\sin(e_1 - \omega t)\sin(e_2 - \omega t)$$

を考える．

$$C_1 = -A\omega e^{-kZ} \quad ; C2 = U\alpha_{F0}$$
$$e_1 = ky \quad ; e2 = ky_F + \varepsilon_\alpha$$
$$C_{12} = C_1C_2$$

と置き換えれば，

$$I_0 = -\frac{C_{12}}{2}\{\cos(e_1 + e_2 - 2\omega t) - \cos(e_1 - e_2)\} \tag{28}$$

これより周期関数は積分により消えて

$$I_{FV1}=\int_{-s}^{s}\frac{C_{12}}{2}\cos(e_1-e_2)\,dy \tag{29}$$

$$e_1=e_1(y) \tag{30}$$

であるから，

$$I_{FV1}=\frac{C_{12}}{2}\int_{-s}^{s}(\cos e_1\cos e_2-\sin e_1\sin e_2)\,dy \tag{31}$$

ここで，２翼式では左右翼が独立に動作するからそれをL,R という suffix で区別すれば，

$$=\frac{C_{12L}}{2k}\{\cos e_{2L}[\sin(ky)]_{-s}^{0}+\sin e_{2L}[\cos(ky)]_{-s}^{0}\}+\frac{C_{12R}}{2k}\{\cos e_{2R}[\sin(ky)]_{0}^{s}+\sin e_{2R}[\cos(ky)]_{0}^{s}\} \tag{32}$$

$$=\frac{1}{k}\{C_{12L}\cos e_{2L}+C_{12R}\cos e_{2R}\}\sin(ks)+\frac{1}{k}\{C_{12L}\cos e_{2L}+C_{12R}\cos e_{2R}\}\cos(ks)+\frac{1}{k}\{C_{12L}\cos e_{2L}-C_{12R}\cos e_{2R}\} \tag{33}$$

これでは全体がわかりにくいので，左右翼の振幅は同じとすれば，

(1)　位相が異なるとき，

$$C_{12L}=C_{12R}\;;\;e_{2R}=ky_F+\varepsilon_\alpha\;;\;e_{2L}=-ky_F-\varepsilon_\alpha \tag{34}$$

という条件を付加して考える．

$$I_{FV1}|_{asym}=\frac{2C_{12}}{k}\{\cos(ky_F+\varepsilon_\alpha)\sin(ks)+\sin(ky_F+\varepsilon_\alpha)\cos(ks)\}=\frac{2C_{12}}{k}\sin(ky_F+\varepsilon_\alpha+ks) \tag{35}$$

(2)　位相が同じとき，

$$C_{12L}=C_{12R}\;;\;e_{2R}=ky_F+\varepsilon_\alpha\;;\;e_{2L}=e_{2R} \tag{36}$$

という条件を付加し，左右翼は連結して動く場合，

$$I_{FV1}|_{sym}=\frac{2C_{12}}{k}\{\cos(ky_F+\varepsilon_\alpha)\sin(ks)\} \tag{37}$$

(1) のとき，I_{FV1} は，$\sin(ky_F+ks+\varepsilon_\alpha)=-1$ で最大となるので，s は翼長で任意に選択できるから，例えば

$$k(y_F+s)\varepsilon_\alpha=2n\pi+\frac{3\pi}{2} \tag{38}$$

で最大値を持つことができる．翼角は，s と y_F と ε_α がある関係の中から選べることになる．

(2) のとき，I_{FV1} は $\cos(ky_F+\varepsilon_\alpha)\sin(ks)=-1$ で最大となるので，s は翼長で任意に選択できるから，例えば

$$\cos(ky_F+\varepsilon_\alpha)1\;;\;ky_F+\varepsilon_\alpha=n\pi \tag{39}$$

$$\sin(ks)=-1\;;\;ks=2n\pi+\frac{3\pi}{2} \tag{40}$$

で最大値を持つことができる．このときの翼角は，s と y_F と ε_α が，ある関係の中から選べることになる．こちらの方が制約条件は少なく，選択の自由度が高いように思える．

ここまでで，横波中の翼推力発生の可能性は示されたと考える．しかし，実際にこのようにパラメータの値が取れるかは，より詳細に実物に即して考えなければならない．特に我々の採用した模型では翼運動は pitch のみ許し，単純なバネによる pitch 復元力を与えた受動式である．そのためこれらの関係が全て満たされるわけではなく，我々の実験からは翼ピッチ運動の左右の位相差は90度に近い値で最速となることを得ている．

これらの値については翼と船体との連成運動方程式をたてて計算を進める必要があり，現在準備中である．

いま I_{FV1} の振幅を検討するために

$$Amp=\frac{A\omega e^{-kz}U\alpha_{F0}}{k} \tag{41}$$

とおくと，

$$Amp(k)=A\sqrt{g}\;U\alpha_{F0}\frac{e^{-kZ}}{\sqrt{k}} \tag{42}$$

$$E_2(k)=\frac{e^{-kZ}}{\sqrt{k}} \tag{43}$$

の関数形状を考えておく．

これは，

$$\left.\begin{array}{l} k\to 0\;;\;E_2(0)\to\infty \\ k\to\infty\;;\;E_2(\infty)\to 0 \end{array}\right\} \tag{44}$$

となり，k の増加とともに急速に減少する関数であり，k が小さく，かつ z が小さいところでは有効に働く．しかし，U の関数であるので，前進速度の影響を受ける．

5．結　　論

単純な仮定で横波中の波浪推進装置の性能把握が一部できた．しかし，横波中の翼推力と，船体運動までの理論的計算は進んでいない．また簡単な理論計算により横揺れによる推力発生のメカニズムの一部が明らかになり，模型実験からも横波状態で推力が発生しているので，この事実を証明していることがわかった．

参考文献

Isshiki, H., Murakami, M. and Terao, Y. (1989): [A report of research and development of Wave Devouring Propulsion System] No.719, Bulletin of the SNAJ, pp.280-288.

Terao, Y. (1982): [Floating structure which moves toward the waves] Jour. Of Kansai Society of Naval Architects, Japan. No. 184, pp.51-54 (in Japanese).

Terao, Y. (2000): [Experimental study of a dual fin type Wave Devouring Propulsion System] Fourth Osaka Colloquium on Seakeeping Performance of Ships, pp. 469-478.

要　旨

波浪エネルギーを船舶の推進装置に利用する波浪推進措置についての理論的な解析を行い，横波中の二翼式波浪推進装置の基本的性能を把握するために簡単な翼理論を用い理論展開を行った．

二翼式は通常の一翼式と比較し，横波中で正面向い波よりも全身速度が大きくなるという波浪中の模型実験からの結果がある．それを検証するために，新たに二翼横波中での翼性能に関する理論展開をおこない，翼を独立に作動させることで，今までの１翼式よりも横波中では最大 $\sqrt{2}$ 倍の性能向上が見込まれることを導いた．また波浪推進装置の取り付け翼深さにも，実用においては最適な深さが存在することも導き，これにより波浪推進装置の横波中性能向上の可能性を解明することができた．