

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 17 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560219

研究課題名（和文） 弾性平板上に生成される純粋進行波を利用した水中推進機構の推力向上と横力低減

研究課題名（英文） Improvement of Thrust and Reduction of Transverse Force of An Aquatic Propulsion Mechanism Which Uses Waving Motion of Flexible Plates

研究代表者

松村 雄一（MATSUMURA YUICHI）

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：20315922

研究成果の概要（和文）：本研究は、ベルヌーイ・オイラーはりにおける半無限要素を利用することで、水中の弾性平板上に純粋進行波を生成する方法に関係する。はじめに、水中推進機の推力を向上させるため、弾性平板前端において所望のピッチ角を得る方法を波動の行列解法に基づいて導き、実験によって妥当性を検証した。次に、水中推進機で発生する横力の低減を意図して、駆動力と制御力によって発生する反力を打ち消す役割の対向平板を導入した。対向平板により、横力によって実験機上に発生する振動が低減することが示された。

研究成果の概要（英文）： This study deals with a generation method of a transverse wave on an aquatic flexible plate using throw-off elements of Bernoulli-Euler beams. At first, in order to improve the thrust of the aquatic propulsion mechanism, generation techniques of desired pitch angle of a flexible plate was derived by a matrix-based wave analysis. Then the techniques were realized, and the validity of the techniques was verified. Secondly, in order to reduce the transverse force of the aquatic propulsion mechanism, counter plate was introduced to cancel the reaction forces from both driving forces and control forces. Then the experimental results showed the vibration on the aquatic propulsion mechanism induced by the transverse force was reduced.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	400,000	120,000	520,000
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，機械力学・制御

キーワード：交通機械制御

1. 研究開始当初の背景

弾性平板前端部に配置したアクチュエータにより平板上に進行波を発生させる方式の水中推進機は、保守性に優れ、人や機械の

作業領域が確保しやすいなどの利点がある。しかしながら、実用的な機械としての水中推進機を開発する意味においては、以下の2つの課題の解決が期待される。

(1) 所望の進行波を平板上に励起するには、前端の駆動力による波動生成のメカニズムを理解すると共に、後端の制御力で反射波を吸収して定在波の発生を抑制するメカニズムの理解が不可欠である。まず、前端部のピッチング運動は、推力を生み出す渦の発生と関係しており、推力向上のためには制御しなければならないとされる。機構により強制的に所望のピッチング運動を生成する方法もあるが、本研究では前後進切換用に前端部での能動インピーダンス整合機能も残す観点から、適切な駆動力の設計によって、前端部で所望のピッチ角を得る手法を開発する必要がある。また、後端の制御力によって反射波を吸収するには、平板上の曲げ波が4階の微分方程式でモデル化されることに起因して、制御モーメントの付与が不可欠である。先のピッチ角の制御にも駆動モーメントの付与が不可欠と考えられるため、水中の平板にモーメントを与える手法と、このモーメントによって、ピッチ角制御と反射波抑制制御の両者を実現する手法の開発が必要である。

(2) 推力と垂直な方向に発生する振動的横力への対策が不可欠である。先行研究では、平均推力の3倍程度の振動的横力が発生することが報告されている。水中の平板上に曲げ波の純粋進行波を発生させるには、駆動力や制御力を平板の横方向に与える必要がある。このとき、駆動力や制御力の反力が、船体側に与えられ、船内の乗員や機械への振動暴露が問題となる。

2. 研究の目的

- (1) 平板前端のピッチ角制御による推力向上
- (2) 対向平板の導入による振動横力の低減

3. 研究の方法

(1) ピッチ角制御：

駆動力と駆動モーメントにより、ピッチ角を制御するための理論を導く。また、弾性平板前端部に剛体板を設け、これを2台のアクチュエータで駆動することでピッチ角を制御できる構造にする。

(2) 対向平板の導入：

対向型弾性平板方式を採用し、2枚の弾性平板を逆位相の波動で駆動することにより、横力を打ち消し合う構造とする。

4. 研究成果

有限長のはりにおいて、一端に与える励振力によって発生させた曲げ波の進行波を、逆側の端部において反射を抑制し、弦やはりに

進行波のみが存在する状態を生成するための手法を示す。本論では、駆動力側を前端、制御力側を後端と呼ぶこととする。また、推力向上に關係する弾性平板前端部のピッチ角を制御するための手法を示す。

(1) 制御理論

はりの運動方程式

曲げ剛性 EI 、線密度 ρA の一様はりの曲げ波の運動方程式は、たわみを $W(x,t)$ として、

$$\rho A \frac{\partial W(x,t)}{\partial t^2} = - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EI \frac{\partial^2 W(x,t)}{\partial x^2} \right].$$

この運動方程式の一般解は、次式である。

$$W(x,t) = w(x)e^{j\omega t} = (ae^{-jkx} + be^{jkx} + a_N e^{-kx} + b_N e^{kx})e^{j\omega t}$$

ここに a は x 軸の正方向、 b は負方向に伝播する波の振幅、 a_N は x 軸の正方向、 b_N は負方向の近接波である。また、 k は波数であり、

$$k = \sqrt{\frac{\rho A}{EI}} \cdot \sqrt{\omega}$$

波動振幅ベクトルの導入

前進波動振幅ベクトル \mathbf{a} 、後退波動振幅ベクトル \mathbf{b} を以下のように定義する。

$$\mathbf{a} = \begin{Bmatrix} a \\ a_N \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{Bmatrix} b \\ b_N \end{Bmatrix}$$

このとき、位置 x での波動振幅は次式となる。

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{a}(x) \\ \mathbf{b}(x) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_a(x) & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{G}_b(x) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{a} \\ \mathbf{b} \end{Bmatrix}$$

ここで、 \mathbf{G} は次式の伝播行列である。

$$\mathbf{G}_a(x) = \begin{bmatrix} e^{-jkx} & 0 \\ 0 & e^{-kx} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_b(x) = \begin{bmatrix} e^{jkx} & 0 \\ 0 & e^{kx} \end{bmatrix}$$

いま、たわみとたわみ角をまとめることで一般化変位ベクトルが求まる。

$$\mathbf{w}(x) = \begin{Bmatrix} w(x) \\ \partial w(x) / \partial x \end{Bmatrix} = \boldsymbol{\Psi}_a \mathbf{a}(x) + \boldsymbol{\Psi}_b \mathbf{b}(x)$$

ここに、 $\boldsymbol{\Psi}$ は変位 波動振幅変換行列である。

$$\boldsymbol{\Psi}_a = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -jk & -k \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\Psi}_b = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ jk & k \end{bmatrix}$$

いま、曲げモーメントとせん断力をまとめることで一般化力ベクトルが求まる。

$$\mathbf{f}(x) = EI \begin{Bmatrix} -\partial^3 w(x) / \partial x^3 \\ \partial^2 w(x) / \partial x^2 \end{Bmatrix} = \boldsymbol{\Phi}_a \mathbf{a}(x) + \boldsymbol{\Phi}_b \mathbf{b}(x)$$

ここに、 $\boldsymbol{\Phi}$ は力 波動振幅変換行列である。

$$\boldsymbol{\Phi}_a = EI \begin{bmatrix} -jk^3 & k^3 \\ -k^2 & k^2 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\Phi}_b = EI \begin{bmatrix} jk^3 & -k^3 \\ -k^2 & k^2 \end{bmatrix}$$

完全無反射端生成条件

完全無反射端生成条件を導出する。はじめに、後端境界部の機械インピーダンス行列を次式で定義する。

$$\mathbf{Z}_L = \begin{bmatrix} Z_{TTL} & Z_{TRL} \\ Z_{RTL} & Z_{RRL} \end{bmatrix}$$

また、この機械インピーダンス行列に対応する動剛性行列を次式のようにおく。

$$\mathbf{D}_L = \begin{bmatrix} D_{TTL} & D_{TRL} \\ D_{RTL} & D_{RRL} \end{bmatrix}$$

右端の反射係数行列は次式のように表せる。

$$\mathbf{r} = -(\Phi_b - \mathbf{D}_L \Psi_b)^{-1} (\Phi_a - \mathbf{D}_L \Psi_a)$$

この反射係数行列において、入射波から反射波への伝播ゲインをすべて零にすることで完全無反射端条件を得る。

$$\Phi_a - \mathbf{D}_L \Psi_a = \mathbf{0}$$

$$\Leftrightarrow EI \begin{bmatrix} -jk^3 & k^3 \\ -k^2 & k^2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} D_{TTL} & D_{TRL} \\ D_{RTL} & D_{RRL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -jk & -k \end{bmatrix} = \mathbf{0}$$

本条件より、無反射端を形成するための機械インピーダンスを求めると、次式を得る。

$$\begin{cases} Z_{TTL} = \frac{-D_{TTL}}{j\omega} = \frac{(1+j)EI k^3}{\omega} \\ Z_{TRL} = \frac{-D_{TRL}}{j\omega} = \frac{EI k^2}{\omega} \\ Z_{RTL} = \frac{-D_{RTL}}{j\omega} = \frac{EI k^2}{\omega} \\ Z_{RRL} = \frac{-D_{RRL}}{j\omega} = \frac{(1-j)EI k}{\omega} \end{cases}$$

進行波生成制御

上式に示した機械インピーダンスは周波数依存であるため、任意の周波数で無反射を実現するには、アクチュエータによる制御力でインピーダンスを付与する必要がある。そこで、無反射端生成に必要なはりの両端に与える力について示す。前端における駆動力 F 、駆動モーメント M と応答の関係は次式：

$$-f(0) + \begin{Bmatrix} F \\ M \end{Bmatrix} = \mathbf{0} \Leftrightarrow -\Phi_a \mathbf{a} - \Phi_b \mathbf{b} = -\begin{Bmatrix} F \\ M \end{Bmatrix}$$

このとき、駆動点において後退波動振幅ベクトルは存在しないので次式を得る。

$$\mathbf{a} = \begin{Bmatrix} a \\ a_N \end{Bmatrix} = \Phi_a^{-1} \begin{Bmatrix} F \\ M \end{Bmatrix}$$

この応答が後端に達する際の変位応答と速度応答は、それぞれ次式となる。

$$\mathbf{a}(L) = \mathbf{G}_a(L) \cdot \mathbf{a}$$

$$\mathbf{v}(L) = j\omega \cdot \mathbf{w}(L)$$

後端に無反射インピーダンスのアタッチメントを仮定すると後端に加わる力とモーメ

ントは、次式となる。

$$\mathbf{f}_c = \begin{bmatrix} Z_{TTL} & Z_{TRL} \\ Z_{RTL} & Z_{RRL} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{v}(L)$$

これは、無反射端生成条件に必要な制御力と考えられる。代入して次式を得る。

$$\mathbf{f}_c = \begin{bmatrix} Z_{TTL} & Z_{TRL} \\ Z_{RTL} & Z_{RRL} \end{bmatrix} \cdot j\omega \Psi_a \cdot \mathbf{G}_a(L) \cdot \Phi_a^{-1} \begin{Bmatrix} F \\ M \end{Bmatrix}$$

以上より、制御力を求めると次式となる。

$$\mathbf{f}_c = \begin{Bmatrix} f_T \\ f_R \end{Bmatrix}$$

ここに、

$$f_T = \frac{\sqrt{2}}{2} \left(e^{-j(kL - \frac{3}{4}\pi)} - e^{-kL + j\frac{1}{4}\pi} \right) F - \frac{\sqrt{2}k}{2} \left(e^{-j(kL - \frac{3}{4}\pi)} - e^{-kL + j\frac{3}{4}\pi} \right) M$$

$$f_R = \frac{\sqrt{2}}{2k} \left(e^{-j(kL - \frac{1}{4}\pi)} - e^{-kL + j\frac{1}{4}\pi} \right) F - \frac{\sqrt{2}}{2} \left(e^{-j(kL - \frac{1}{4}\pi)} - e^{-kL + j\frac{3}{4}\pi} \right) M$$

ピッチ角の制御

駆動点 ($x=0$) における変位 $w(0,t)$ とたわみ角 $\theta(0,t)$ を所望のピッチ角に設定するための駆動力 $f(0,t)$ と駆動モーメント $m(0,t)$ の与え方をまとめる。

まず、弾性平板前端部のピッチ角の制御に必要な変位とたわみ角の位相差の目標を示す。変位 w とたわみ角 θ を次式で表す。

$$w(x,t) = W(x)e^{j\omega t}$$

$$\theta(x,t) = \Theta(x)e^{j\omega t}$$

駆動力 f と駆動モーメント m を次式で表す。

$$f(x,t) = F(x)e^{j\omega t}$$

$$m(x,t) = M(x)e^{j\omega t}$$

ここでの目標は、次式を満足するように駆動力 F と駆動モーメント M を設定することである。は位相を表す。

$$\angle \Theta - \angle W = \angle \frac{\Theta}{W} = \frac{\pi}{2}$$

ただし、駆動モーメント M の振幅は実数として、駆動力 F の振幅のみ、複素数とする。

$$F = F_R + jF_I, \quad M = M_R$$

駆動点における変位とたわみ角の複素振幅と駆動力と駆動モーメントの関係式を導出すると、次式のように表せる。

$$\begin{cases} W = \frac{1}{EI k^3} \{F_R - F_I + j(F_R + F_I - kM_R)\} \\ \Theta = \frac{1}{2EI k^3} \{kF_I - k^2 M_R + j(-kF_R + k^2 M_R)\} \end{cases}$$

いま、

$$\angle \frac{\Theta}{W} = \tan^{-1} \frac{Z_m(\Theta/W)}{R_e(\Theta/W)} = \frac{\pi}{2}$$

とおくと、次式が成り立てばよいことがわかる。

$$F = jkM_R, \quad M = M_R$$

(2) 検証実験

実験装置

実験装置を上から撮影した写真を図1に、弾性平板を横から撮影した写真を図2に示す。弾性平板を水面に対して垂直に置き、弾性平板の両端には剛体板を取り付ける。前端に取り付けた剛体板は、ピッチ角を制御するための並進力とモーメントを印加するためのものであり、後端に取り付けた剛体板は、弾性平板の前端で生成された進行波を後端で反射することのないように制御力と制御モーメントを印加するためのものである。弾性平板と剛体板は計4つのアクチュエータ（ボイスコイルモータAVM40-20）に接続する。前端の2つのアクチュエータ（Actuator1,2）は、弾性平板に進行波を生成するための駆動力と駆動モーメントを与えるために使用し、後端の2つのアクチュエータ（Actuator3,4）は、反射波を抑制するための制御力と制御モーメントを与えるために使用する。弾性平板は横力キャンセルのために対向型に2枚設置し、アクチュエータは計8つ使用する。それぞれのアクチュエータは一軸で運動させるため、シャフトガイドとリニアブッシュを用いる。ここで、低摩擦のリニアブッシュを使用することにより、アクチュエータの正弦波加振を阻害しないようにする。弾性平板には(180×45×0.1)mmのばね用りん青銅C5210を使用した。剛体板には(15×45×1)mmのアルミニウム合金A5052を使用した。

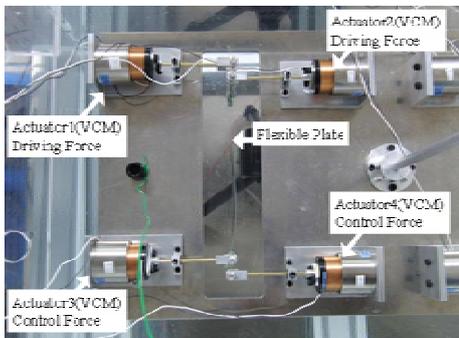


図1 実験装置上面写真



図2 弾性平板と剛体板

進行波生成制御

はじめに、はりの右端においてモーメント加振を行わない場合の進行波生成の可能性について検証する。実機の挙動は高速度カメラを用いて撮影し、定在波比の同定を行った。10Hzの正弦波駆動で、進行波を生成した結果を図3に示す。また、周波数5Hzから20Hzの間で定在波比の同定を行った結果を図4に示す。曲げの固有振動モードがある周波数では、わずかに定在波が出てしまうが、これら以外の周波数帯域では、概ね定在波比1.5以下のほぼ純粋進行波の状態を実現できた。

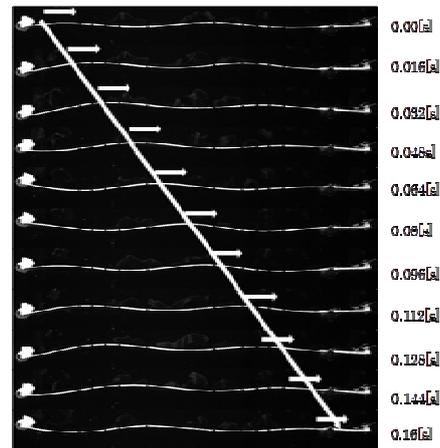


図3 進行波生成実験

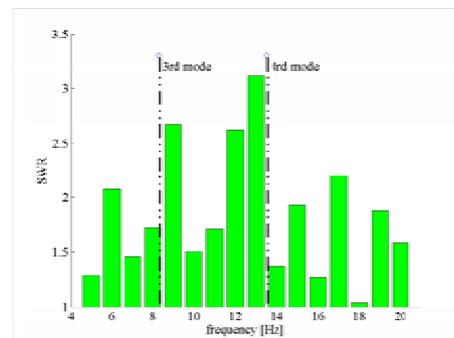


図4 定在波比

ピッチ角制御実験

弾性平板前端の変位とピッチ角を実験により測定する。先に導出したピッチ角制御理

論を使用して、駆動力と駆動モーメントに位相差を与える。実験装置を周波数 3Hz、駆動力と駆動モーメントの位相差を $\pi/2$ で駆動させる。その時の弾性平板前端の変位とピッチ角の測定データを図 5 に示す。

図 5 より、弾性平板前端の変位とピッチ角は位相がずれている。本来はピッチ角の位相を変位の $\pi/2$ 遅れにしようとしたが、所望の結果を得ることができなかった。これは、ボイスコイルモータの直動を案内する要素の摩擦やボイスコイルモータで発生する渦電流の影響により、指令電圧通りの電圧がモータに付加されていないことが原因とも考えられるが、研究期間内には理由を解明できなかった。今後、引き続いて所望のピッチ角の実現を目指す。

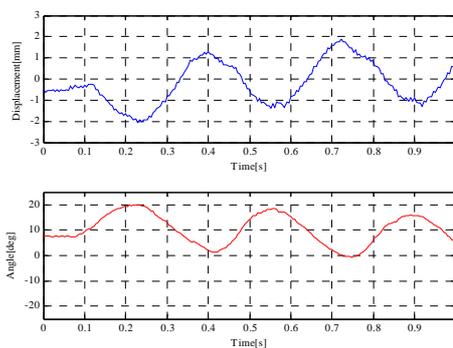


図 5 変位とピッチ角

横力キャンセル実験

横力の問題を解消するために、横力キャンセル機構として弾性平板を対向型に設置し、2 枚の弾性平板を逆位相の波動で駆動することにより、横力を打ち消しあう構造にする。この装置において、図 6 に示す通り、船体を吊り下げる丸棒にひずみゲージを貼り付け、横方向のひずみを計測した。弾性平板 2 枚を、それぞれ周波数 3Hz で駆動した場合に、同相で駆動する場合と、逆相で駆動する場合の横方向のひずみを図 7、図 8 にそれぞれ示す。

実験結果を比較すると、弾性平板 2 枚を逆相で駆動した場合の方が、弾性平板 2 枚を同相で駆動した場合よりも横振動が低減されていることが読み取れる。

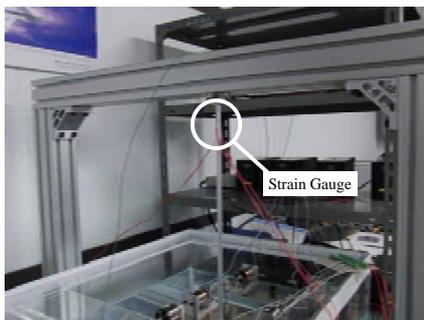


図 6 ひずみ計測

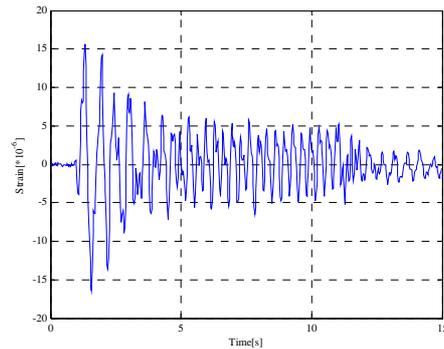


図 7 対向平板同相駆動時の横方向ひずみ

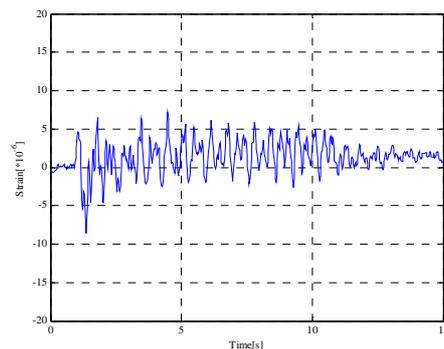


図 8 対向平板逆相駆動時の横方向ひずみ

(3) まとめ

ほぼ純粋な進行波の生成には成功した。概ね、定在波率が 1.5 以下の進行波を生成できた。

ピッチ角制御のための駆動理論を導出した。しかしながら、実験機では所望のピッチ角を得られなかった。引き続き、理由を解明していく所存である。

弾性平板を対向型に設置し、2 枚の弾性平板を逆相で駆動することにより、横力キャンセルが可能であることが示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

松村雄一, 岩本久和, 古屋耕平, 不連続部を有する機械構造物のスペクトル要素モデリングの簡便化, 日本機械学会論文集 C 編, 査読有, 79 巻 797 号, 2013, 17 - 26
DOI: 10.1299/kikaic.79.17

〔学会発表〕(計 2 件)

北山弘樹, 松村雄一, 弾性平板の波動運動を利用した水中推進機構の推力向上のための反射波抑制手法, Dynamics and Design

Conference 2011 講演論文集
発表年月日：2011年9月9日
発表場所：高知工科大学（高知県香美市）

久田悠介，北山弘樹，松村雄一，弹性平板
を利用した水中推進機構における非定常環
境下での進行波生成，Dynamics and Design
Conference 2010 講演論文集
発表年月日：，2010年9月15日
発表場所：同志社大学（京都府京田辺市）

〔その他〕

ホームページ等

[http://www1.gifu-u.ac.jp/~dyn/index.htm](http://www1.gifu-u.ac.jp/~dyn/index.html)
l

6．研究組織

(1)研究代表者

松村 雄一 (MATSUMURA YUICHI)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：20315922