

平成 22 年 5 月 26 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2009

課題番号：19560237

研究課題名 (和文) 純粹進行波生成のための能動インピーダンス整合制御に基づく水中推進機構の高効率化

研究課題名 (英文) Efficiency improvement of aquatic propulsion with an elastic plate based on active impedance matching for generation of a pure traveling wave

研究代表者

松村 雄一 (MATSUMURA YUICHI)

山梨大学・大学院医学工学総合研究部・准教授

研究者番号：20315922

研究成果の概要 (和文)： 水中の弾性平板上に進行波を発生させて推進する機構の効率改善のため、境界での反射を抑制する手法の課題を解決することを目指した。はじめに、弦での進行波生成理論に従い、復元特性において張力を支配的とした水中の弾性平板に進行波が生成できることを確認した。次に、はりにおける進行波生成にも着手し、簡便な波数同定法を開発した。弾性平板上に励起された波動を動画像解析することで、波動の位相速度から波数を同定できた。また、計測された波動を波動解析の結果と比較することで、波動の距離減衰を同定できた。

研究成果の概要 (英文)： This research project aims to solve the issue on active control of reflection waves to improve the efficiency of aquatic propulsion with an elastic plate. At first, active generation of pure traveling waves on aquatic plates, which was modeled after a string because it was mainly supported by tension force, was verified successfully based on impedance matching method of string theory. Then, active generation of pure traveling waves by beam theory was launched. We newly developed simple and easy method to identify wave number of aquatic plate. In this approach, an excited wave was measured by the motion analysis, and then the wave number was identified from the phase velocity. And attenuation coefficient was also estimated by comparing measured and simulated waves.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2008 年度	500,000	150,000	650,000
2009 年度	500,000	150,000	650,000
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

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：機械力学・制御、振動制御、制御機器、バイオ流体力学、水中推進、進行波生成、インピーダンス整合、進行波フィルタ

## 1. 研究開始当初の背景

近年、水棲生物の泳ぎに学び、スクリュウに代わる安全で、高速、高効率な水中推進機

構を開発しようとする試みが数多くなされている。魚の運動の中でも推進効率が高いものとして、ウナギなどの細長い形状のものが

体全体を蛇行させながら進む機構と、アジなどのように体の後方だけを動かし、発達した尾ひれの振動によって進む機構がある。これらの推進機構を有する魚は、いずれも体の後方に向けて進行波を送り、運動を生み出していることが実験的に確かめられており、細長体理論や振動翼推進理論によって、その推進機構の理論的裏付けがなされている。

進行波型水中推進機構を工学的に実現する場合、進行方向前方に配置されたアクチュエータから、振動板上に進行波を発生させて推進する方法が、最も単純な機構である。この機構は少数のアクチュエータで実現でき、船体内に人や機械の作業領域が確保しやすくなる他、機構がシンプルになることから、保守もしやすくなる。水中推進機構開発の先駆者とされる Hertel らは、この方式に従った振動板推進実験船を開発し、高効率な推進が可能であることを示した。しかしながら、一般の有限長構造物を考えればわかるように、推進に際して頭から尾に向けて進行波を送り続けると、必ず反射波の影響が表れ、純粋進行波を生成し続けるのは困難となる。本船よりさらに大きな振幅、高い周波数で進行波を発生させた場合には、振動板の末端での反射も大きくなり、定在波の生成によって推進効率が低下することが予想される。推進効率を低下させることなく振動板推進の出力を大きくしていく上で、末端での反射を抑制することが不可欠である。

## 2. 研究の目的

近年、研究段階ではあるが、有限長構造物における反射波の発生を能動制御などによって抑制し、純粋な進行波だけを生成することが実現されている。この技術を応用すれば、水中振動板の反射波生成を抑制できる可能性がある。媒質の中を進む波は、インピーダンスが変化しない限り反射されない。境界のインピーダンスを制御できれば、波を反射させずに境界で吸収させることができる。この原理の実現にあたっての課題は、インピーダンスが周波数依存関数であることである。受動インピーダンス整合では、周波数の変化に対応できず、任意周波数の進行波生成に適さない。最近では、能動インピーダンス整合の手法により、空中に置かれた平板等において、純粋進行波を生成する制御が実現されている。本研究では、これらの技術を水中の振動板の制御に応用し、高効率な水中推進機構の実現を目指す上での課題を解決する。また、定在波と進行波の比率を求めるのに必要な波動フィルタについても検討する。

## 3. 研究の方法

はじめに、有限長構造物の進行波生成制御において比較的容易な手法である弦にお

ける進行波生成理論により、水中でも弾性平板上に進行波生成が可能か否かを検証した。次に、将来的に船舶などに応用することを主眼に置き、より実用的で大きな推力を発生させることが見込まれるはりにおける進行波生成に関する実験を行った。

### (1) 進行波生成制御理論

#### ① 運動方程式

弦の運動方程式は以下ようになる。ここで  $u$  は、弦の横方向変位である。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = f(x, t) \quad (1)$$

この方程式の解は次式の進行波である。

$$u(x, t) = (C_1 e^{-jkx} + C_2 e^{jkx}) e^{j\omega t} \quad (2)$$

一方、一様なオイラー・ベルヌーイはりの曲げ波の運動方程式は、次のように表せる。

$$\rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = f(x, t) \quad (3)$$

ここに、曲げ剛性  $EI$ 、線密度  $\rho A$  とした。本式の一般解は、次式の進行波である。

$$w(x, t) = W(x) e^{j\omega t} \quad (4)$$

ただし、

$$W(x) = C_1 e^{-jkx} + C_2 e^{jkx} + C_3 e^{-kx} + C_4 e^{kx} \quad (5)$$

#### ② 純粋進行波生成制御

はじめに、はりの場合の純粋進行波生成制御の手法について述べる。両端加振の場合に、駆動点と制御点に与える正弦波状励振力をそれぞれ次式で表す。

$$f(0, t) = F_0 e^{j\omega t} \quad (6)$$

$$f(L, t) = F_L e^{j\omega t} \quad (7)$$

駆動点と制御点におけるインピーダンスは、それぞれ次式で表される。

$$Z_0 = \frac{f(0, t)}{v(0, t)} = \frac{-jF_0}{\omega(C_1 + C_2)} \quad (8)$$

$$Z_L = \frac{f(L, t)}{v(L, t)} = \frac{-jF_L}{\omega(C_1 e^{-jkL} + C_2 e^{jkL})} \quad (9)$$

ここに、 $x = 0, L[\text{m}]$  に力を与えるとした。一様なはりにおいて、両端のインピーダンスは等しいので、次の関係を得る。

$$F_L = \frac{C_1 e^{-jkL} + C_2 e^{jkL} + C_3 e^{-kL} + C_4 e^{kL}}{C_1 + C_2 + C_3 + C_4} F_0 \quad (10)$$

式(5)から、 $C_2 = C_3 = C_4 = 0$  とすることで右向きの純粋進行波を生成できることがわかる。この条件を上式に代入すると次式になる。

$$F_L = F_0 e^{-jkL} \quad (11)$$

本式より、両端に与える励振力に位相差  $kL$  を与えることで反射波を抑制でき、進行波だけの状態を生成できる。

一方、弦の進行波生成制御理論においても式(2)の  $C_2$  を  $C_2 = 0$  とすることで式(11)と全く同じ関係を得る。

#### (2) 波数の同定理論

加振力に位相差を与えて進行波生成を行うには、式(11)からもわかるように波数  $k$  が

既知でなければならない。しかしながら、波数の算出には、水の付加質量効果を考慮する必要があり、水中での推定実験が不可欠である。以下、弦とはりの波数算出式を示す。

#### ①弦の波数

弦における波数は、弦の単位長さあたりの質量  $\rho$ 、張力  $T$ 、加振角周波数  $\omega$  を用いて、次のように表される。

$$k = \sqrt{\frac{\rho}{T}} \omega \quad (12)$$

ここに、単位長さあたりの質量には、水の付加質量効果が含まれ、波動の振幅や周波数などに依存して変化する量と考えられる。しかしながら、振幅と周波数を一定とした場合には、波数は加振周波数に比例して変化するので、この定数項をまとめて  $\alpha$  とおくと、波数は次式で表せる。

$$k = \alpha \omega \quad (13)$$

#### ②はりの波数

はりの波数を伝播速度から求める手法を示す。曲げ波の位相速度  $v_B(\omega)$  は、はりの運動方程式から次式のように導出される。

$$v_B(\omega) = \sqrt[4]{\frac{E}{12\rho} \cdot \sqrt{h} \cdot \sqrt{\omega}} \quad (14)$$

この  $v_B(\omega)$  より波数の式を導出し、振幅と周波数を一定とした場合に次式を得る。

$$k = \frac{\omega}{v_B} = \beta \sqrt{\omega} \quad (15)$$

#### ③距離減衰効果

水中における波動の距離減衰は、空中に比べて顕著である。距離減衰を考慮する場合の波数は複素数となる。

#### (3) 実験装置

##### ①弦理論に基づく検証用装置 (実験装置 1)

弾性平板を弦と見なして反射波抑制制御を行った実験装置を図 1 に示す。水中には、水面と平行に弾性平板を置き、2本のレールで空中の船体を吊るす。平板の両端にアクチュエータ (ボイスコイルモータ: VCM) を取り付け、張力が振動板の弾性よりも優位に働くようにする。本実験では、ばね用りん青銅 C5210 の  $300 \times 180 \times 0.1\text{mm}$  の板を使用した。

##### ②はり理論に基づく検証用装置 (実験装置 2)

弾性平板をはりと見なして反射波抑制制御を行った実験装置を図 2 に示す。弾性平板の前方に取り付けた剛体板に2台のアクチュエータを取り付け、位相差を与えて駆動することで、せん断方向と回転方向の加振を行えるようにした。振動板には、ばね用りん青銅 C5210 の  $300 \times 45 \times 0.2\text{mm}$  を使用した。

## 4. 研究成果

### (1) 弦における進行波生成

#### ①純粋進行波生成

実験装置 1 において、インピーダンス整合により、定在波の発生を抑えられることを確認した。進行波生成に成功した例を図 3 に示す。加振周波数 5Hz、加振力 0.05N とし、両アクチュエータに与える位相差を試行錯誤により変化させて進行波を生成した。

#### ②波数の同定

波数が既知であれば、試行錯誤によらず、式(11)により両アクチュエータで発生すべき励振力の位相差を与えられる。しかしながら、波数は式(13)に示したように周波数依存であることから、任意の周波数で進行波を生成するには、式(11)の係数  $\alpha$  を求めておく必要がある。図 4 には、駆動力、制御力共に 0.05N に固定し、加振周波数を離散的に変化させながら、進行波生成に成功する加振力の位相差を求めた結果を○印で示す。本図より、加振周波数の増加に比例して、加振力に与えるべき位相差が増加することがわかる。これは、式(11)と式(13)に示した通り、進行波生成に必要な位相差が加振周波数に比例する理論に合致する。

図 4 を用いて波数を同定する。図 4 中の直線は最小自乗法による近似直線である。式(11)と式(13)より位相差  $\phi$  は次式で表せる。

$$\phi = L\alpha\omega \quad (16)$$

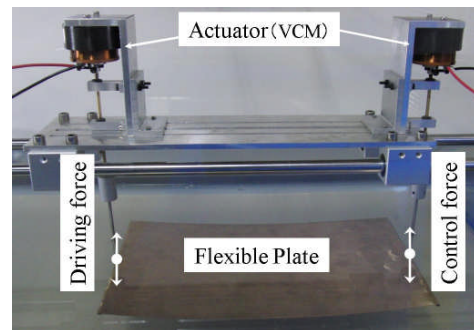


図 1 実験装置 1

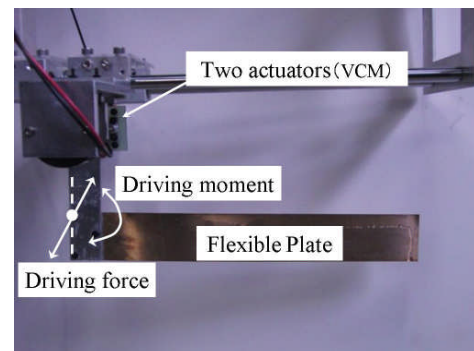


図 2 実験装置 2

ここに、板長を  $L[m]$  とした。本式に近似直線の傾きを代入し、次式の関係を得た。

$$k = 0.59 \omega \quad (17)$$

### ③ 距離減衰効果の検証

任意条件下での反射波制御には、距離減衰を考慮した複素波数が必要となる。図5には、進行波生成に成功した際の駆動力と制御力の振幅比を示す。加振周波数と励振力間の位相差は、それぞれ  $5\text{Hz}$ 、 $330^\circ$  とした。図5より、駆動力が大きくなるほどに、駆動力に比した制御力の振幅は小さくてよいという振幅依存性を有することがわかる。これは、波動の振幅が大きくなるほどに、波動の減衰量も増加し、末端に到達する波動の振幅が小さくなることに起因すると考えられる。また、振幅依存性は、この範囲において、ほぼ線形の関係にあることがわかる。

### (2) はりにおける複素波数同定実験

前節の手法では、試行錯誤により進行波生成に必要な、駆動力と制御力間の振幅比と位相差を求めることで波数を同定していたため、複素波数の同定に多くの時間と労力を要した。本節では、はり理論に従ったインピー

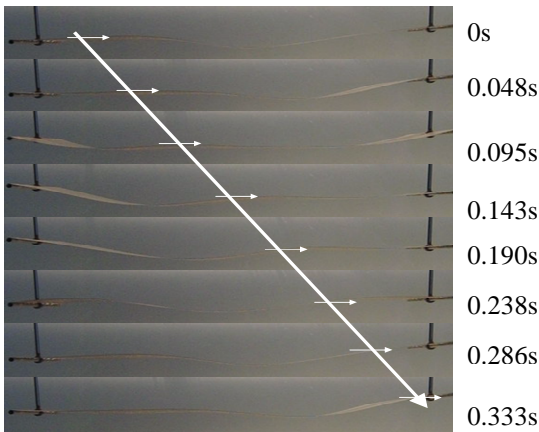


図3 インピーダンス整合制御による純粋進行波の生成

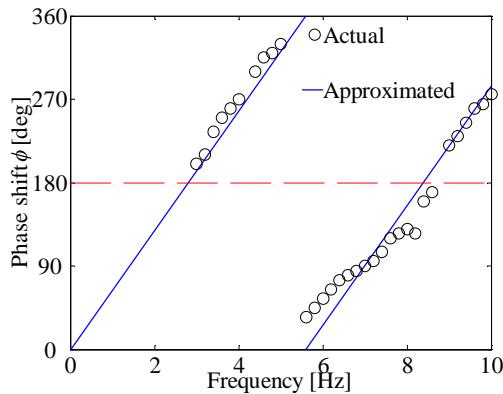


図4 進行波生成に必要な駆動力と制御力の位相差

ダンス整合制御を実現するため、簡便に複素波数を同定する手法を示す。これは、駆動力だけを与えた場合の波動運動を動画像解析するだけの簡便な手法である。

### ① 波数の同定

はじめに、動画像解析から、曲げ波の位相速度を推定する。弾性平板の波動運動を高速度カメラで撮影した。加振周波数を  $0.2\text{Hz} \sim 6\text{Hz}$  まで  $0.2\text{Hz}$  刻みで変化させ、2台の駆動用アクチュエータ間の位相差を  $90^\circ$  とし曲げ波を発生させた。各周波数での曲げ波の伝播速度を計測した結果を図6に示す。実験結果を、曲げ波の位相速度を表す式(14)に最小自乗近似することで、次式を得た。

$$v_B = 0.24\sqrt{\omega} \quad (18)$$

はりにおける波数の同定を行う。式(15)と式(18)より、波数は次式のように同定された。

$$k = 4.1\sqrt{\omega} \quad (19)$$

### ② 距離減衰効果の推定

弾性平板上に生成される波動運動を波動アニメーションと比較することで、距離減衰効果を推定する。複素波数は次式で表される

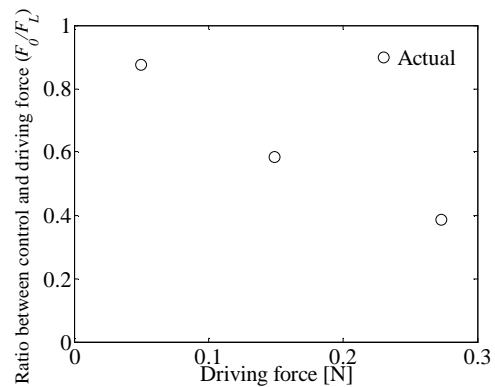


図5 進行波生成に必要な駆動力と制御力の振幅比

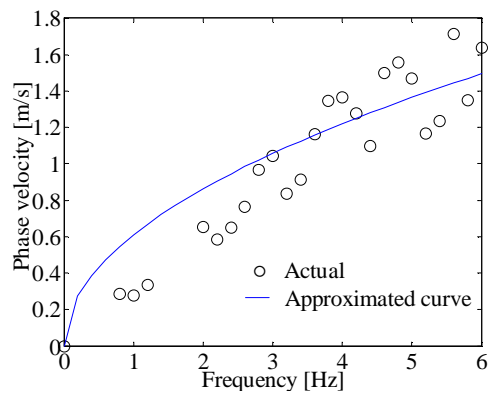


図6 水中での曲げ波の位相速度

ので、虚数項の大きさ  $\gamma$  に数値を代入し、減衰を与えたアニメーションを作成する。

$$k(\omega) = \beta\sqrt{\omega} - \gamma \cdot j \quad (20)$$

図7に駆動周波数2.2Hzの実験で求めた波動の連続写真を示す(左側が加振側)。本図より、自由端側に振動の節が見られるという特徴が見られた。これは、加振点近傍の左端では進行波が支配的であるが、波動の減衰が大きいため、右端近くでは自由端への入射波と反射波の合成波が定在波状になることで、節が見られたと考えられる。

式(20)に示す複素波数を用いた波動アニメーションを作成し、図7の特徴を表す虚数項の大きさを同定した。図8は、 $\gamma = 4$  を用いて図7と同条件の元で描かれた波動のアニメーションである。図8の1段目は入射波、2段目は反射伝播波、3段目は反射近接波、4段目は合成波を表す。実験で見られた図7中の節は、図8の4段目に示す合成波でもほぼ同じ位置に現れていることがわかる。また、図の左側では進行波が支配的であり、節が存在しないなど、図7と図8の4段目の特徴は良く一致している。これより、推定された  $\gamma = 4$  は妥当であると考えられる。

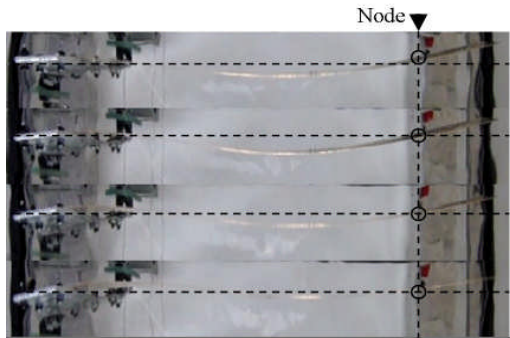


図7 無制御時に見られる節

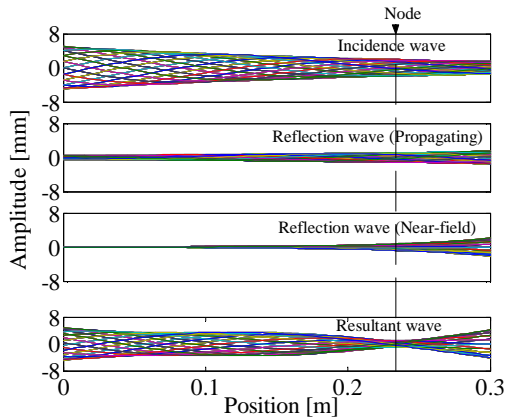


図8 合成波のアニメーション

波動運動をさせた際に、定在波の節状の点が見られたメカニズムについて考察する。図8の1段目に示すように、左端の加振で発生した波は、大きく減衰しながら右端に達する。この入射波により、自由端で発生する反射伝播波と反射近接波の和が、位置0.23mのあたりで、入射波とほぼ打ち消し合う。その結果、合成波には、節が見られることがわかる。

節の位置を利用した複素波数同定法の適用限界について考察する。本手法は、図8の2段目に示す反射伝播波が、左端で減衰しきることを仮定している。これにより、右端での入射と反射だけを考慮した波動アニメーションを作成するだけで、厳密に運動方程式を解くことなく、実験結果とアニメーションを比較し、節の存在を手がかりにして複素波数を同定しようという簡易手法である。従って、板の長さが短い場合や、波の振幅が小さい場合などでは、反射伝播波が左端で減衰しきるという仮定が成り立たず、この複素波数同定は利用できない。

水中弾性平板上の波動の減衰定数を推定したことにより、複素波数を次式のように同定できた。

$$k = 4.1\sqrt{\omega} - 4 \cdot j \quad (21)$$

### (3) 波動フィルタ

定在波/進行波比(通称、定在波比)の計測に供するため、アレイセンサを利用して所望の波動成分を検出するフィルタについても検討した。従来、現実的に利用されている波動フィルタとしては、波数のPhasorを利用してアレイセンサ出力に重みを乗じ、その総和をとるタイプと、アレイセンサの計測値と、その計測値から求まる傾きを利用するタイプが基本であることがわかった。前者のタイプは、研究代表者らが提案するモード群分解から、複数のモードを不可観測とするフィルタの設計手法と同じように設計できることから、今後の研究において、定在波比を求めるには、このフィルタを転用すればよいことを示した。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

① Yuichi Matsumura and Naoki Hosoya, Design of Multi-Modes Filter and Wave Filter Based on Modal Cluster Decomposition, Proceedings of the 9th International Conference on Motion and Vibration Control, IM1-1208, (2008), 査読有。

② 松村雄一, 細矢直基, 2次元周波数空間にお

けるモード分解とモード群分解（モード群のリアルタイムフィルタリング），日本機械学会論文集（C編），73巻，（2007），pp. 2703–2709，査読有．

〔学会発表〕（計2件）

① Yusuke Hisada, Yuichi Matsumura and Hironori Natori : Active Generation of Traveling Wave for Aquatic Propulsion, Proceedings of the Japan-Korea Joint Symposium on Dynamics and Control 2009, Session 5-1, No. 501, August 5, 2009, Hokkaido University.

② 名取広智, 松村雄一, 水中推進のための進行波生成制御, 日本機械学会関東支部第48回学生員卒業研究発表講演会, No. 412, 2008年3月6日, 茨城大学.

〔その他〕

ホームページ：

<http://www.ms.yamanashi.ac.jp/lab/matsumura/index.htm>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松村 雄一 (MATSUMURA YUICHI)  
山梨大学・大学院医学工学総合研究部・准教授  
研究者番号：20315922

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

栗田 裕 (KURITA YUTAKA)  
滋賀県立大学・工学部・教授  
研究者番号：70275171