

機関番号：82627

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18914

研究課題名（和文）弾性表面波により物体表面から放射する音響流を用いた乱流摩擦抵抗低減法の研究

研究課題名（英文）A Study on Turbulent Friction Drag Reduction Method Using Acoustic Flow Radiation by Surface Acoustic Wave

研究代表者

川島 英幹（KAWASHIMA, HIDEKI）

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：20450679

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：乱流摩擦抵抗を低減する流場制御デバイスを開発するため、流場制御デバイスから音響流を適切な角度で放射できるように、圧電体材料を金属や樹脂材料と積層する方法を開発し、材料の物性の組み合わせ等により、放射角を決定する因子である縦波伝搬速度がどのように変化するか研究した。そして、試作流場制御デバイスを製作し、共振周波数計測試験を実施し、縦波伝搬速度を変化させられることを確認した。また圧電材料と基盤材料の物性等をパラメータとして、複合化した圧電材料の縦波伝搬速度を推定する手法を構築し、流場制御デバイスの設計を可能とした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

船舶の場合、全抵抗の70～80%を乱流摩擦抵抗が占めるため、温室効果ガスの排出を削減するには、乱流摩擦抵抗を低減する方法の開発が重要である。現状では、船舶の乱流摩擦抵抗を削減する実用化された手段は、研究代表者もその実現に貢献した空気潤滑法のみである。本研究では、物体表面に圧電素材と櫛歯回路により、弾性表面波を発生させ、物体壁面の接線方向に近い角度の音響流を放射し乱流境界層内の流体を直接制御することで、乱流摩擦抵抗低減を図る音響流放射型流場制御デバイスの研究を行い、音響流の放射角を決定する因子である圧電素材の縦波の伝搬速度を制御する手法を開発できたことに、学術的、社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：In order to radiate the acoustic flow from the flow field control device at an appropriate angle, a method of stacking piezoelectric materials with metal or plastic materials was developed and the change of longitudinal wave propagation speed was studied depending on the combination of materials. Then, prototype flow field control devices were fabricated, and resonant frequency measurement tests were carried out, and it was confirmed that the longitudinal wave propagation speed could be varied. The method to estimate the longitudinal wave propagation velocity of composite piezoelectric materials has been developed to design flow field control devices.

研究分野：流体力学

キーワード：弾性表面波 音響流 流場制御 抵抗低減

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

国際海事機関 (IMO) では、今後建造される船舶の排出する温室効果ガスの総排出量を 2025 年までに 30%に削減する規制を国際条約で定めている。船舶の全抵抗の 70~80%を乱流摩擦抵抗が占めるため、船舶の温室効果ガスの排出削減目標を達成するためには、乱流摩擦抵抗を低減する方法の開発が必要不可欠である。一方、船舶の摩擦抵抗低減は、10<sup>9</sup> オーダーの非常に高いレイノルズ数の発達した乱流境界層において摩擦抵抗低減効果を得るところに難しさがある。何らかの手段で乱流境界層を層流化できても、その状態を広範囲にわたって維持しなくてはならないからである。そのため、現状において、船舶の乱流摩擦抵抗を削減する実用化された手段は研究代表者もその実現に貢献した空気潤滑法のみである。発達した乱流境界層において摩擦抵抗を低減するには、継続的かつ能動的に乱流渦を抑制する作用が必要であり、それを効果的に行うためには、乱流の発生源である物体壁面側から制御することが有効であるため、本研究を提案実施した。

2. 研究の目的

物体表面近傍の乱流境界層の発生部分に直接働きかけ、乱流摩擦抵抗を低減する流場制御技術を開発することを目的とする。現在、壁面から境界層内の流場を制御する実用的手段は実現されていない。そこで物体表面に弾性表面波を発生させ、物体表面から放射される音響流を用いて、流場を制御する手法を開発する。弾性表面波により励起される音響流が壁面と成す放射角は、(1)式と図1に示すように物体表面の音速と流体の音速で決まる (レイリー角) ため、単に弾性表面波を発生させるだけでは、音響流の放射角は壁面に対して大きな角度を持ち、むしろ流れ場を乱してしまう。そこで、流体の音速に合わせて物体表面の音速を制御し、壁面の接線方向の音響流を放射することで、流れを乱すことなく、境界層内の流場に直接的な影響を与え、乱流摩擦抵抗の低減を図ることが可能なデバイスの開発 (図2参照) を目的とする。

$$\alpha = \frac{180}{\pi} \arcsin \left( \frac{c_{fluid}}{c_{surface}} \right) \quad (1)$$

$\alpha$  : Reyleigh angle (degree)  
 $c_{fluid}$  : Sound velocity of fluid  
 $c_{surface}$  : Sound velocity of surface

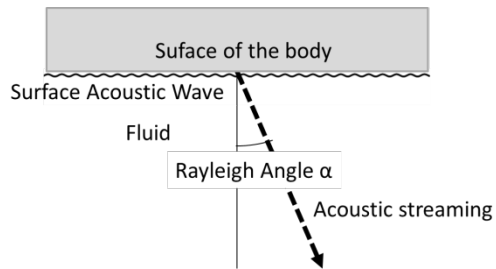


図1 レイリー角 (音響流の放射角)

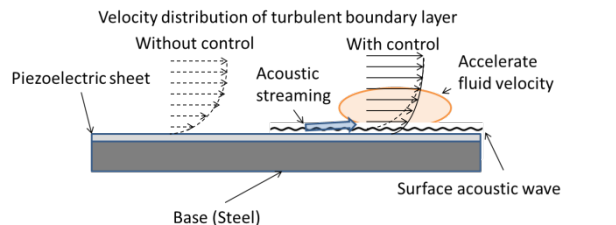


図2 音響流放射による境界層内流場制御の概念図

3. 研究の方法

音響流放射のための弾性表面波の発生手段として、SAW (Surface Acoustic Wave) デバイスを用いて、任意の放射角の音響流を放射する流場制御デバイスを開発する。SAW デバイスは、櫛歯型の電極を圧電素材上に形成し、電流を流すことで、表面に弾性表面波を励起する装置である。この SAW デバイスの圧電材料の縦波伝搬音速を、接する流体の音速より、わずかに速くなるように制御すれば、SAW デバイス表面の接線方向に近い角度で、音響流を放射できる。また圧電材料の厚みを、発生させる弾性表面波の波長より薄くし、他の材料と貼り合わせると複合材料化された圧電材料の縦波伝搬速度を制御することができる。まず文献調査の結果を基に、圧電材料の物性と厚み、基盤材料の厚み、回路で設定する波長から、複合圧電材料の縦波伝搬速度と音響流の放射角の推定式 ((2)式及び図3) を提案した。この推定式を用いて、圧電材料の種類と厚みと基盤の材質、回路の波長を変化させて、いろいろな組み合わせの流場制御デバイスを設計した。過去の論文から得られた推定式の定数  $\alpha$  は、圧電材料と基盤材料の組み合わせにより、幅があったため、この幅を考慮しながら、試作する流場デバイスを選定した。試作したデバイスを用いて、回路の同調周波数を探索することにより、試作流場デバイスの縦波伝搬速度を算定した。その結果、圧電材料の複合化により縦波伝搬速度の制御ができることが確認できた。第一次試作デバイスとして、比較的水に近い音速で圧電性を持つ PVDF 樹脂シート上に形成することとした。PVDF 樹脂シートの、縦波伝搬速度は、1144m/s であり、水の音速 1483m/s よりも遅いため、そのまま音響流は水中に放射されないため、縦波伝搬速度の速い金属材料

との組み合わせで複合圧電材料化することとした。第二次試作デバイスとして、水よりも縦波伝搬速度よりも速い（3992m/s）ニオブ酸リチウム薄膜を圧電素材として用い、縦波伝搬速度の遅いポリスチレン樹脂基盤と組み合わせた試作流場デバイスを製作し、共振周波数の計測を行った。

$$\frac{(V_{SAW} - V_{piezo})}{(V_{base} - V_{piezo})} = e^{x(-\alpha \frac{h}{\lambda})} \quad (2)$$

- $V_{SAW}$  : 複合圧電材料の縦波伝搬速度
- $V_{piezo}$  : 圧電材料の縦波伝搬速度
- $V_{base}$  : 基盤材料の縦波伝搬速度
- $\alpha$  : 定数
- $h$  : 圧電材料の厚み
- $\lambda$  : 弾性表面波の波長

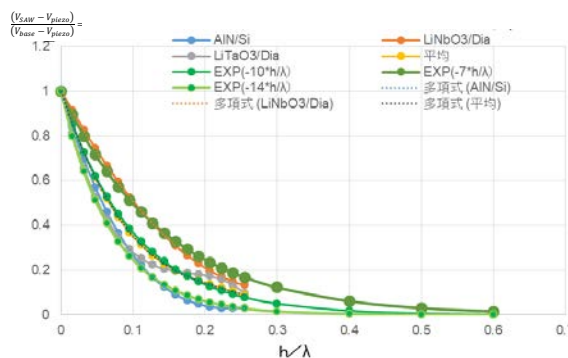


図3 複合圧電材料の縦波伝搬速度の推定

#### 4. 研究成果

物体表面に弾性表面波を発生させ、音響流を放射し、境界層内の流場を制御することで流体抵抗低減を図るデバイスの研究を行った。弾性表面波により放射される音響流は、弾性表面波を発生させる物体の縦波伝搬速度と接する流体の音速の関係により、放射角が決まり、流体の音速に対して、デバイス側の縦波伝搬速度がやや速いと、デバイス壁面とほぼ接する角度で音響流を放射することができる。このような音響流を放射できれば、境界層内の流れを乱すことなく効率的に流場制御することができる。一方、弾性表面波を発生させるのに一般的に使用される圧電材料は、水の音速と比べて、縦波伝搬速度が大幅に速く、そのまま用いると、音響流の放射角は、デバイスの壁面の垂直方向成分の方が接線方向成分のほうが大きくなり、そのままでは使用するのが難しい。また樹脂系の圧電材料は縦波伝搬速度が水の音速より遅く、音響流が放射されない。そこで圧電材料の縦波伝搬速度を制御するため、圧電材料を弾性表面波の波長以下に薄膜化し、金属、樹脂材料と貼り合わせる手法を対象として、材料の組み合わせ、材料の厚み、回路の形状により、縦波伝搬速度がどのように変化するか研究した。まず過去の研究結果から、圧電材料と基盤材料の物性、圧電材料の厚みと回路で発生させる弾性表面波の波長の組み合わせから、縦波伝搬速度を推定する方法を提案した。この推定方法を用いて、所要の縦波伝搬速度を持つ流場制御デバイスを設計し、PVDF（圧電材料）＋ステンレス、PVDF＋アルミ、ニオブ酸リチウム（圧電材料）＋ポリスチレンの組み合わせのデバイスを試作した。共振周波数計測試験の結果、縦波伝搬速度の変化が確認できた。そして圧電材料の厚み、回路の形状から決まる弾性表面波の波長、圧電材料と基盤材料の縦波伝搬速度をパラメータとして、複合化した圧電材料の縦波伝搬速度を推定する手法を構築し、流場制御デバイスの設計ができるようになった。

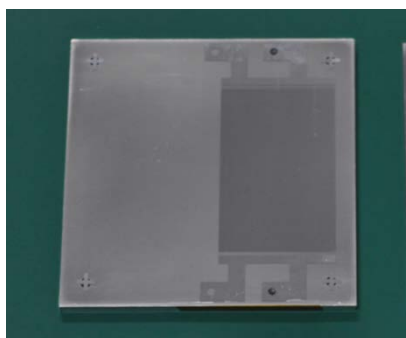


図4 PVDF+アルミデバイス



図5 ニオブ酸リチウム+ポリスチレンデバイス



図6 共振周波数計測試験

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究期間終了後、研究結果を基に、特願2020-111951「構造物の流体抵抗低減方法、構造物の流体抵抗低減装置」として特許を出願。

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------