

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02379

研究課題名（和文）音響流放射を用いた乱流変動抑制による乱流摩擦抵抗低減法の研究

研究課題名（英文）A Study on Turbulent Frictional Resistance Reduction Method by Suppressing Turbulent Fluctuation Using Acoustic Streaming Radiation

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） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：圧電材料に水の音速に近似した表面波音速を持つBGOを採用し、単方向型櫛歯回路を採用することで、音響流を壁面から約30度の角度でほぼ一方向に放射できる音響流放射型流場制御デバイスと、電極を矩形に形成し、V字型に配置することで、剪断力の絶対値だけでなく剪断力の方向も評価することができるV字電極型剪断力計を開発した。

これらを組み合わせてチャンネル流内において流場制御実験を行った。音響流放射型流場制御デバイスの上下流側にV字型電極剪断力計を設置し、流場制御時の剪断力を計測した。音響流放射型流場制御デバイスの上流側、下流側両方で剪断力が減少するケースがあり、流場制御により抵抗低減が図れることが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

開発した音響流型流場制御デバイスは、壁面に対して30°以下の放射角の音響流をほぼ一方向に放射可能で、流速を入力電圧で制御可能な、流場制御に適した特性を持っている。現在、水中において可動部分無しで壁面から直接流体を制御できるデバイスは実用化されていないため、極めて独自性の高い有用な装置である。

また開発したV字型電極剪断力計は、壁面上の剪断力の絶対量だけでなく方向も瞬時値として計測することができる画期的な装置である。

さらに両者を組み合わせたシステム試験により、チャンネル流れにおいて抵抗低減を示す結果が得られ、水中での乱流摩擦抵抗低減実現の道筋を開くことができた。

研究成果の概要（英文）：The piezoelectric material is BGO, which has a surface wave sound velocity similar to that of water, and a unidirectional type circuit is used to develop an acoustic flow radiation type flow field control device that can radiate acoustic flow in one direction at an angle of about 30 degrees from the wall surface. The V-shaped electrode type shear force meter was developed to evaluate not only the absolute value of shear force but also the direction of shear force by forming a rectangular electrode and arranging it in a V-shape.

By combining these devices, flow field control experiments were conducted in a channel flow. V-shaped electrode shear force gauges were installed on the upstream and downstream sides of the acoustic flow control device to measure the shear force during flow field control. In some cases, the shear force decreased both upstream and downstream of the acoustic flow control device, confirming that the flow field control can reduce drag.

研究分野：流体力学

キーワード：音響流 流場制御 抵抗低減 電極型剪断力計 剪断力計測

1. 研究開始当初の背景

研究開始当時、国際海事機関 (IMO) では、海事分野に於ける温室効果ガスの総排出量を 2050 年までに 2008 年の 50% に削減することを戦略目標に定めており、船舶は更なる省エネ化の実現を要求されていた (現在では、海上物流のカーボンニュートラル化が目標とされるようになり、船舶の省エネ化への要求も更に厳しくなっている)。一方、船舶の全抵抗の 70~80% を乱流摩擦抵抗が占めるため、船舶を効果的に省エネ化し、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。当時 (現在もそうだが)、船舶の乱流摩擦抵抗を削減する実用化されている手段は、研究代表者もその実現に貢献した空気潤滑法のみであった。

その頃、研究代表者は、全く新しい乱流摩擦抵抗の低減技術として、科学研究費挑戦的研究 (萌芽) 「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」(平成 30 年度~令和元年度) (以下、挑戦的研究 (萌芽) と記す。) において、物体表面より、物体壁面の接線方向に近い角度の音響流を発生させ、乱流境界層に接する壁面近傍の流体を直接制御し、乱流境界層内の速度勾配の緩和を行うことで、乱流摩擦抵抗低減を可能にする新たな音響流放射型流場制御デバイスを開発していた。

一方、研究分担者は、物体壁面に埋めた電極により、運動量と物質輸送のアナロジーに基づき、物質移行係数を電流の変化として計測し剪断力を算出することができる電極型剪断力計測器を開発していた。

そこで、これらの電極型剪断力計測器と音響流放射型流場制御デバイスとを組み合わせることで、能動型乱流場抑制制御システムを開発することとした。

2. 研究の目的

船舶の船体や推進器の周りは乱流境界層が発達しており、推進に必要となるエネルギーの大半が消費されている。そのため、船体や推進器などの表面から直接流場を制御し、無駄に消費されるエネルギーを削減することができれば、船舶の効果的な省エネルギー手段となる。しかし現時点では、水流を壁面から直接流場を制御する実用的手段は実現されていない。

そこで、乱流境界層内の乱流場を壁面部分から制御することができる音響流放射による流場制御デバイスと電極型剪断力計を開発し、流場制御により乱流摩擦抵抗の低減を可能とする技術を開発することを目的として、本研究を実施した。

3. 研究の方法

壁面に沿った角度で音響流を一方向に放射できる音響流放射型流場制御デバイスを開発するため、圧電材料の物性を調査し、回路の適切な設計方法を検討した。その結果を基に、音響流放射型流場制御デバイスを設計・製作した。製作した音響流放射型流場制御デバイスの固有周期をまず計測し、基本特性を把握した。その後、小型の水槽において、静止した水の中で音響流の放射試験を行い、PIV 計測により、流場を計測し、作動時の音響流放射の特性を調査した。

剪断力の絶対値だけでなく、方向も計測ができるように矩形電極を V 字型配置とした V 字電極型剪断力計を開発するため、矩形電極の一樣流中での剪断力計測特性、角度のついた流れでの特性の把握、矩形電極の形状パラメータが計測結果に与える影響を調査した。また V 字電極で計測された結果から、剪断力の値と方向を計算する方法についても検討した。

音響流放射型流場制御デバイスと V 字電極型剪断力計を組み合わせた流場制御システムを製作し、チャンネル流を発生させられる小型高速流路内に設置して、乱流中における流場制御実験を行った。

4. 研究成果

(1) 音響流放射型流場制御デバイスの開発

音響流により壁面に接する水に直接作用できる音響流放射型流場制御デバイスを開発した。

これまで、音響流を水中に放射するためのデバイスとしては、ほとんどの場合において、圧電材料にニオブ酸リチウム (LiNbO₃) を用い、弾性表面波を発生させる回路に IDT を用いた弾性表面波デバイスが用いられてきた。音響流と壁面の垂線が成す角は、(1)式と図 1 に示すように物体の表面波の音速と流体の音速の関係で決まる (レイリー角)。LiNbO₃ の表面波の音速は、3992m/s であり、水の音速は、1483m/s (20°C) であるため、レイリー角は 23.5° となり、壁面と音響流のなす角は 66.5° となる。これを流場制御に使おうとすると、音響流は壁面に対して大きな角度を持ち、壁面に対して平行な速度成分よりも、壁面に対して垂直な速度成分が大きく、むしろ流れ場を乱してしまう。また IDT 回路は、双方向型の回路のため、デバイスの両側に同じ強さの音響流を放射する。そのため、放射された音響流の水平速度成分は、相殺されることになり、流場制御に向くデバイスでは無かった。

そこで、本研究では、流場制御デバイスとして、圧電材料に、表面波の音速が 1681m/s と水の音速に近い BGO (Bi₁₂GeO₂₀) を用い、回路を単方向型とした SAW デバイスを開発した。BGO を用

いることで、レイリー角は61.9度となり、音響流と壁面のなす角度は28.9度となる。壁面に対して平行な速度成分が、壁面に対して垂直な速度成分より大きくなり流場制御にて適するようになる。

また音響流を一方向に放射できるよう表面波を発生するための回路に単方向型の回路を採用した。

流場制御デバイスの製作に用いたBGO圧電体は矩形の平板で、寸法は幅10mm、長さ9mm、厚さ0.5mmとした。20MHzの高周波電力での駆動を想定し、表面波の波長が84μmとなるように、回路を設計した。回路の幅は2mmとし、回路は50要素で構成した。製作した音響流放射型流場制御デバイスの写真を図1に示す。流場制御デバイスの共振周波数は、気温12.2度において、20,2104MHzであり、共振周波数から表面波の音速を計算すると1697m/sとなった。

続いて製作した流場制御デバイスを用いて、音響流放射試験を行った。試験は、長さ300mm、幅200mm、高さ250mmのガラス水槽中で行った。水槽に設置された流場制御デバイスを図3に示す。音響流放射試験では、流場制御デバイスにより音響流を発生させた時の流場をPIVにより計測した。試験に用いたPIV計測システムの写真を図4に、入力電圧を40Vとしたときの速度マグニチュードの分布を図5に示す。20Vと40Vの2種類の入力電圧において、周波数を変化させ、流場を計測した。入力電圧と周波数、音響流の最大速度の関係を図6に示す。

入力電圧が20Vの場合、速度のピークは20.042MHzにあった。この周波数が水中での共振周波数になっていると考えられる。この共振周波数から求められるBGOの水中での表面波音速は1681m/s、計測時の水温である12.8度での水の音速は1458m/sであり、レイリー角は、60.1度、壁面からの放射角は29.9度となった。また、40Vでの最大速度は31.6mm/sであった。

また音響流をほぼ一方向に放射することが確認できた。さらに入力電圧と最大流速は、概ね比例することが判った。

開発の音響流放射型流場制御デバイスは、主流方向成分が、垂直方向成分に卓越し、またほぼ一方向に放射されるため、流場制御に適した特性を持つことが確認された。また音響流の放射される速さは、入力する電圧に概ね比例するため、電圧の制御により、流速を制御できるという流場制御デバイスとして有効な特徴を持つことを確認した。

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

- α : Reyleigh angle (degree)
- c_{fluid} : Sound velocity of fluid
- $c_{surface}$: Sound velocity of surface

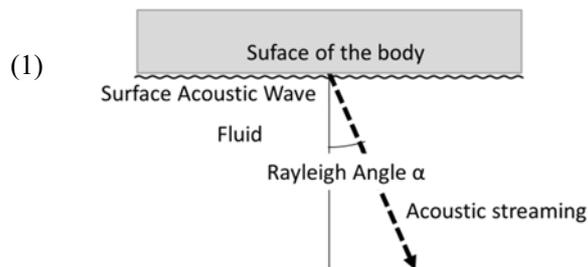


図1 レイリー角（音響流の放射角）

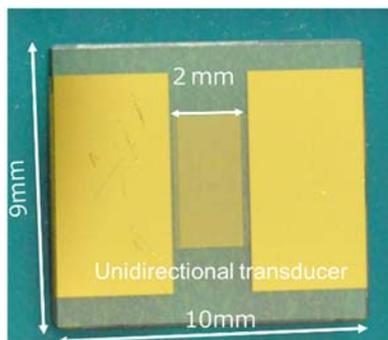


図2 音響流放射流場制御デバイス

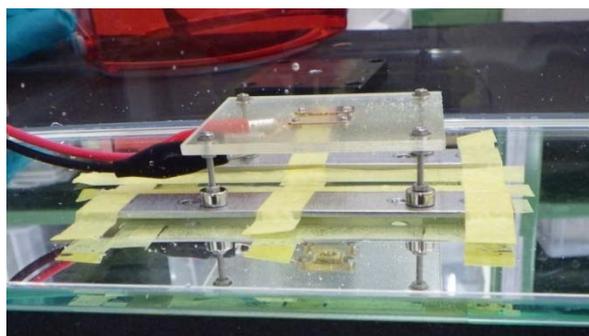


図3 流場制御デバイスの設置状況

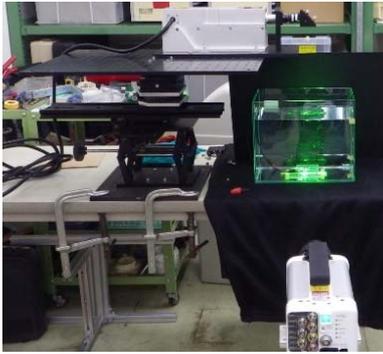


図4 PIV計測システム

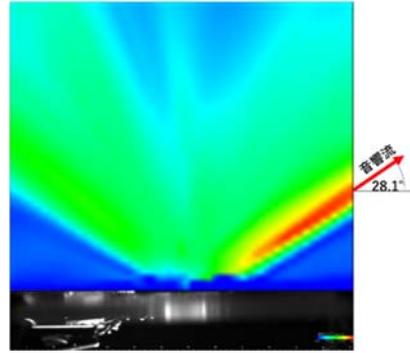


図5 音響流放射時の流速分布 (速度マグニチュード (40V))

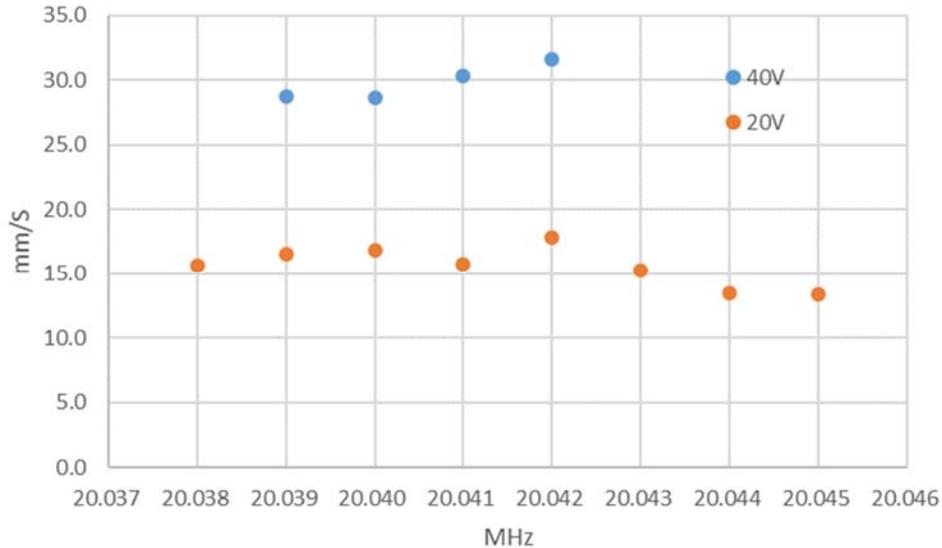


図6 電圧と周波数の音響流の最大速度との関係

(2) 電極型剪断力計の開発

物体壁面に埋めた電極により、運動量と物質輸送のアナロジーに基づき、物質移行係数を電流の変化として計測し剪断力を算出することができる電極型剪断力計を開発した。電極型剪断力計の、電極を矩形に形成し、図7に示すようにV字型に配置することで、剪断力の絶対値だけでなく剪断力の方向も計測することを可能とした。図8に矩形電極の角度依存性について調査した結果を示す。

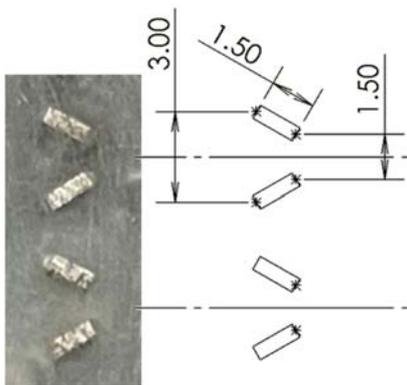


図7 V字型電極剪断力計

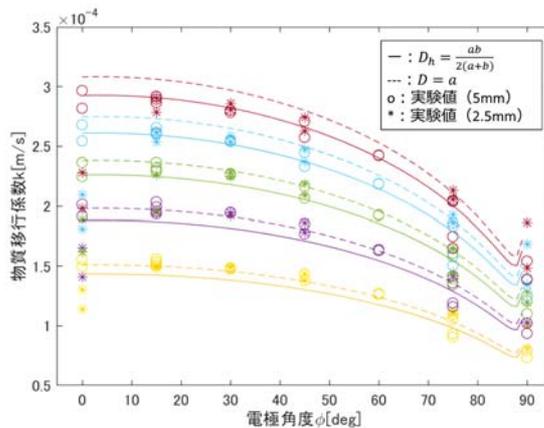


図8 電極の角度依存性の調査結果 (各流速での実験値とBlasius式の値の比較)

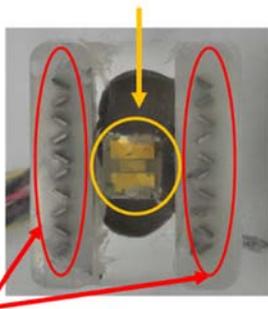
(3) 音響流放射型流場制御デバイスと電極型剪断力計の組み合わせシステムによる抵抗低減実験

BGO型音響流放射型流場制御デバイスとV字型電極剪断力計を組み合わせた流場制御システムを用いて乱流境界層中の流場制御実験を行った。

BGO 型音響流放射型流場制御デバイスの上流側と下流側に V 字型流場制御デバイスを設置した図 9 に示す流場制御システムを製作した。

実験は精度良く安定したチャンネル乱流を生成できる小型高速流路に流場制御システムを設置し、音響流放射時の、剪断力の計測を行った。実験装置の概要を図 10 に示す。図 11 はチャンネル内に流れを起さず静止した状態で、音響流を放射した際の PIV 計測結果である。左が上流側、右が下流側で、上流側に音響流の主流が放射されていることが判る。図 12 は、平均流速 1.0m/s のチャンネル流内において、音響流放射型流場制御デバイスに入力した電圧と剪断力の関係を示したものである。入力電圧を変化させることにより、音響流の速さを変化させることができるが、入力電圧を 5V とするとデバイスの上流側、下流側両方で剪断力が減少した。デバイス前後での剪断力の現象は、デバイス近傍の壁面で摩擦抵抗が低減していることを示しており、本デバイスによる流体制御が、流体の抵抗低減に有効であることが確認された。

音響流放射型流場制御デバイス



V字型電極剪断力計



図9 流場制御システム

図10 小型高速流路における流場制御実験の様子

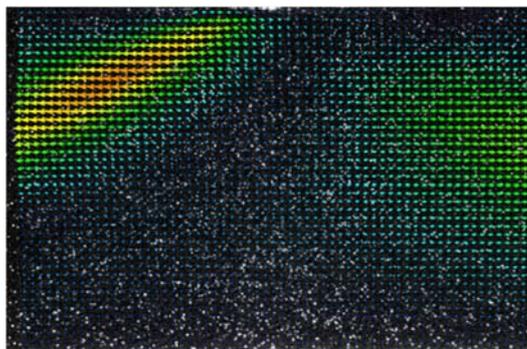


図 1 1 流場制御デバイスによる音響流の放射

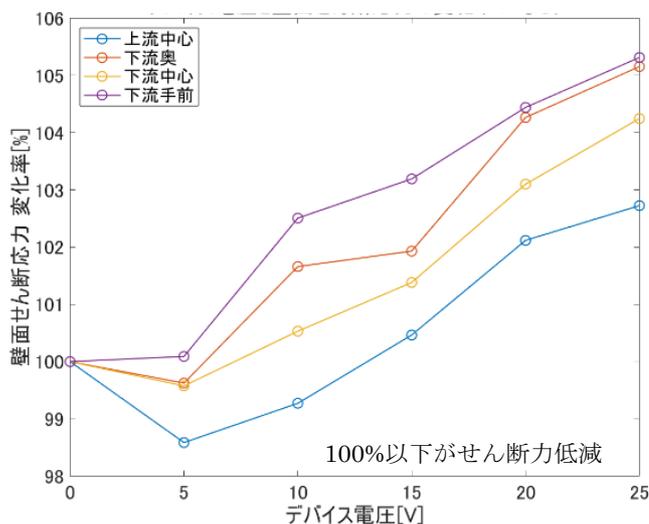


図 1 2 デバイス入力電圧と剪断力の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 川島 英幹
2. 発表標題 EXPERIMENTS ON FLOW FIELD CONTROL USING A UNIDIRECTIONAL ACOUSTIC FLOW GENERATOR DEVICE
3. 学会等名 The 13th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究分担者	辻 義之 (TSUJI YOSHIYUKI) (00252255)	名古屋大学・工学研究科・教授 (13901)	

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
---------	---------