

PS-25 音響流放射型流場デバイスによる流場制御実験

流体設計系 * 川島 英幹, 拾井 隆道

1. はじめに

2018年4月, 国際海事機関 (IMO : International Maritime Organization) は「船舶からのGHG排出量削減に関する初期戦略」を採択し, 2050年までに国際海運からのGHG排出量を少なくとも50%削減し, 今世紀中の可能な限り早期にGHG排出量をゼロとすることを目標として掲げている. 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, 推進に必要なエネルギーの大半が摩擦抵抗として消費されている. 船舶の温室効果ガスの排出削減を図るには, 船体周りに生じる流体现象を制御し, 船体周りの流場で消費されるエネルギーを大きく減少させることは効果的である. そのため, 物体表面近傍の流体に直接働きかけ, 流場を制御できる技術を開発することを目的として, 音響流放射型流場制御デバイスの開発を実施している.

開発中の音響流放射型流場制御デバイスを用いて, 水中での流場制御実験を行い, PIVにより流場を計測した. その結果を報告する.

2. 音響流による流場制御デバイス

船体や推進器などの表面から直接流場を制御し, 摩擦抵抗として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. 現在, 水中で乱流境界層を壁面から直接制御する実用的手段は実現されていない. 一方, SAW (Surface Acoustic Wave) デバイスを用いて, 音響流を放射させ, 液滴を移動させたり¹⁾, 水流を起させたり²⁾することが研究されている. SAW デバイスは, 圧電素材上のIDT回路に, 高周波電力を供給することで, 表面に弾性表面波を励起する装置である. SAW デバイスが弾性表面波を励起すると隣接する媒質に音響流を放射する. 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).

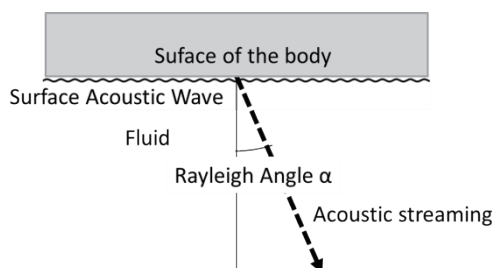


図-1 レイリー角 (音響流の放射角)

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

α : Reyleigh angle (degree)

c_{fluid} : Sound velocity of fluid

$c_{surface}$: Sound velocity of surface

これまでの SAW デバイスによる音響流の放射の研究で用いられている圧電材料の多くは LiNbO₃ である. 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, (1)式で求められるレイリー角は 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用しようとすると, 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なり, むしろ流れ場を乱してしまう. また, IDT 回路を用いた SAW デバイスは, V 字型に双方向に同じ速さの音響流を発生させてしまい流場制御にもちいるのには困難があった.

本研究では, SAW を発生させる圧電材料に, 表面波の音速が 1681m/s と, より水の音速に近い BGO (Bi₁₂GeO₂₀)³⁾ を用い, 回路を単方向型⁴⁾とした流場制御デバイスに適した SAW デバイスを開発⁵⁾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 28.1 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デバイスとなる.

3. 流場制御デバイスの基本特性

流場制御デバイスの基板となる BGO 圧電体は, 矩形平板状のものを用い, 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 84 μm 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 組の要素で構成した. 製作した流場制御デバイスの写真を図-2 に示す.

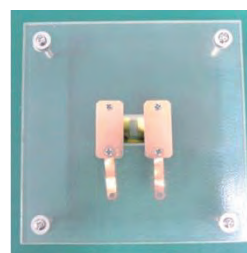


図-2 BGO 単方向型音響流放射型流場制御デバイス

製作した流場制御デバイスの共振周波数は、気温 12.2 度において、20,210MHz であった。共振周波数から表面波の音速を計算すると 1697m/s となり、参考文献 3 に記載されている表面波音速と概ね一致した。

4. 流場制御デバイスの音響流発生試験

製作した流場制御デバイスを用いて、音響流発生試験を行い、その流場を PIV により計測した。計測システムの写真を図-3 に示す。試験は、長さ 300mm、幅 200mm、高さ 250mm のガラス水槽の中で行い、レーザーは水槽上方から照射し、水槽側方から撮影を行った。

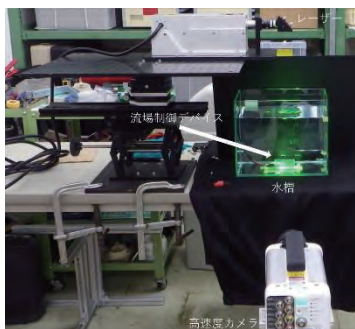


図-3 PIV 計測システム

20V と 40V の 2 種類の入力電圧の周波数を変化させ、PIV により流場を計測した。入力電圧 20V では、周波数を 20.039MHz~20.046MHz まで変化させ、入力電圧 40V では、周波数を 20.039MHz~20.042MHz まで変化させた。周波数と音響流の最大速度の関係を図-4 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。計測時の水温は 12.8 度であった。

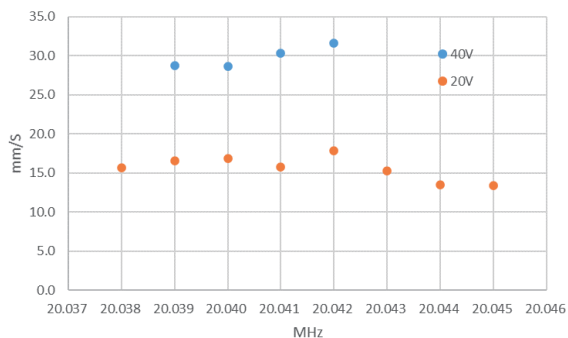


図-4 PIV 計測システム

共振周波数である 20.042MHz における入力電圧 20V での速度ベクトルの分布と速度マグニチュードを図-5 に、入力電圧 20V での速度ベクトルの分布と速度マグニチュードを図-6 に示す。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、この水温での水の音速は 1458m/s であり、(1)式から求まるレイリー角は、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。

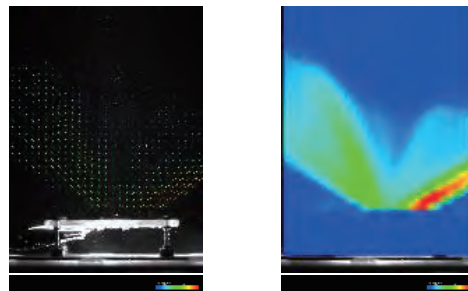


図-5 速度ベクトル分布と速度マグニチュード分布 (入力電圧 20V)

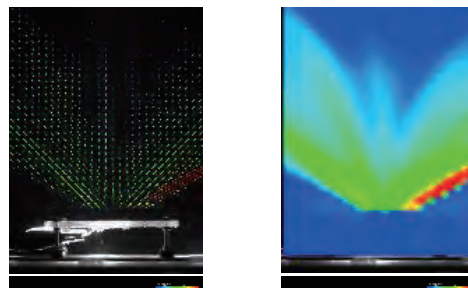


図-6 速度ベクトル分布と速度マグニチュード分布 (入力電圧 40V)

5. まとめ

物体壁面近傍に直接流れを発生させる音響流放射型流場制御デバイスを開発した。

表面波の音速が水とより近い BGO (Bi₁₂GeO₂₀) をデバイスの圧電材料をとすることで、壁面より 29.9 度の放射角での音響流の発生に成功した。

40V の電圧で電力を入力することにより、最大で流速 31.6mm/s の音響流が発生した。

入力電圧と最大流速は、概ね比例した。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 20H02379 の助成を受け実施しました。また名古屋大学辻教授からは有益な助言をいただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) S. Shiokawa, Y. Matsui, T. Ueda : Study on SAW Streaming and its Application to Fluid Devices, Proceedings of 10th Symposium on Ultrasonic Electronics 1989, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 29 (1990), pp.137-139.
- 2) 前沢峰雪, 鎌倉友男 : 水中における SAW 音場評価と流れの可視化, 信学技報, (2007), pp.47-51.
- 3) Clin Cambell : Surface Acoustic Wave Devices and There Signal Processing Applications, Academic Press(1989) pp.20
- 4) 近藤 淳 : 弾性波式小型液相系センサの開発, NEDO 平成 18 年度産業技術研究助成事業研究成果報告書, (2007)
- 5) H. Kawashima, S. Miyazaki, T. Hiroi : Experiment on Flow Field control Using a Unidirectional Acoustic Flow Generator Device, Psfvip13, (2022)