

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02092

研究課題名(和文)音響放射圧駆動による液中アクチュエータ

研究課題名(英文)Self moving fluidic actuator using acoustic radiation force

研究代表者

黒澤 実(Kurosawa, Minoru)

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：70170090

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：液中アクチュエータの推進力は、駆動電圧の二乗となる推進力特性となっており、音圧の二乗で推力が大きくなることを確認した。音響放射力による推力発生メカニズムであることが理論的に確認された。

弾性表面波デバイスを用いたアクチュエータでは、駆動周波数9.61 MHz, 19.22 MHz, 29.14 MHz, 38.45 MHz および96.13 MHzのデバイスで推進力を比較し、駆動周波数が異なってもほぼ同一の推進力が得られることがわかった。高い周波数ではデバイスが小さくなることから、単位面積あたりの推力では大きくなり、高周波化による推力の低下は避けられることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

固体内での振動が流体中へ放射する際に、固体振動面に作用する音響放射圧の存在は、これまで注目されたことが無く、物理現象として深く研究された事や、アクチュエータへの利用を研究されたことは無かった。本研究課題では、固体である超音波振動源から流体中に超音波が放射する際に発生する音響放射圧について、物理現象を定量的に解析するとともに、アクチュエータとして利用することを研究する、初めての試みである。

研究成果の概要(英文)：The propulsive force of the liquid actuator has a propulsive force characteristic that is the square of the drive voltage, and it was confirmed that the propulsive force increases with the square of the sound pressure. It was theoretically confirmed that the thrust generation mechanism is based on acoustic radiation force.

The thrust force of the actuator using the surface acoustic wave device was compared for devices with drive frequencies of 9.61 MHz, 19.22 MHz, 29.14 MHz, 38.45 MHz, and 96.13 MHz, and it was found that almost the same thrust force was obtained even if the drive frequencies were different. The higher frequencies resulted in larger thrust per unit area due to the smaller size of the device, and it was found that a decrease in thrust due to the higher frequencies could be avoided.

研究分野：超音波工学

キーワード：アクチュエータ 超音波 圧電 ロボット 流体力学 固体振動

1. 研究開始当初の背景

流体中を伝搬する超音波振動による音響放射圧を用いた物体の浮揚や微粒子の操作、音響流の発生などは広く知られ、物理現象の理解や応用に関しては研究が進められてきている。これらの物理現象は、流体中を伝搬する音波が、固体表面に照射したときに発生する直流的な音響放射圧を利用しているものである。すなわち、流体中の音波が固体面に作用する音響放射圧のみが利用され、研究されてきた。

一方、固体内で発生した超音波振動が、水などの流体中に放射する際にも、同様の直流的な力である音響放射圧が発生する。しかし、固体内での振動が流体中へ放射する際に、固体振動面に作用する音響放射圧の存在は、これまで注目されたことが無く、物理現象として深く研究された事や、アクチュエータへの利用を研究されたことは無かった。本研究課題では、固体である超音波振動源から流体中に超音波が放射する際に発生する音響放射圧について、物理現象を定量的に解析するとともに、アクチュエータとして利用することを研究する、初めての試みである。

超音波振動子がピストン振動する場合については、これまで研究されている放射圧の理論を用いて解析を行うことができる。しかし、現実の超音波振動子では、広い振動面において、振動変位が分布すること無く一様にピストン振動する事は無い。また、導波路を伝搬する進行波音場から、音波が放射する場合もある。したがって、振動が分布している放射面に働く放射圧の理論を構築し、アクチュエータに適した振動子設計を検討する必要がある。

流体の種類によって、粘度や密度などが異なる。また、振動子の駆動周波数によっても放射圧が異なってくることが考えられる。これらの物理定数の違いにより、放射圧による推進力は変化してくるので、どのようにアクチュエータを構成するのがよいか、用途によって検討する必要がある。流体の物理的性質により、振動系をどのように設計すべきか、という観点からの研究も必要である。

2. 研究の目的

我々が発明した、液体中を自在に動き回ることが可能な、音響放射圧を推進力源とする液中超音波アクチュエータに関する研究を行う。この液中アクチュエータは、動作を初めて確認した新しいデバイスであり、動作メカニズムや物理特性の詳細など、これから明らかにしていく必要がある。そこで本研究課題では、推進力発生メカニズムを音響放射圧の理論から定量的に明らかにするとともに、推進力源となる振動子の振動姿態や周波数に対する応答など、基本的な特性について検討する。

振動源としては、弾性表面波素子を用いたアクチュエータと円板状圧電素子の厚み振動を用いたアクチュエータに関して研究する。推進力を増強するために、音響直進流も利用したアクチュエータ構成に関する検討も行う。マイクロ化に向けた液中アクチュエータについての検討も行う。

3. 研究の方法

3-1 弾性表面波の利用

音響放射圧を用いた超音波液中アクチュエータのひとつは、弾性表面波素子（駆動周波数 9.6MHz）を用いたアクチュエータである。反射器付きのすだれ状電極を持ち、水中に置いた場合、表面波の伝搬方向から斜めに水中へと音波を放射する。音響放射の方向と推進の方向が同じになると考え、最大 10cm/秒の速度で自走することを確認した。弾性表面波素子基板表面に働く音響放射圧が推力源となっていると推察できる。表面波は基板に沿って下方向に進行波となって減衰（水中に音波を放射）しながら伝搬していくので、基板中の波動伝搬と水中への振動漏洩とを考慮することにより、音響放射圧分布を算出できると考えられる。推進力としては、mN オーダーと考えられるので、実験値と算出した値とで動作理論は検証できる。動作理論を明らかにすることで、液中アクチュエータとして基板中での波動伝搬と電極設計の最適化を図り、効率よく動作させる条件を明らかにする。

駆動周波数をこれまでの 9.6MHz から高周波化することで小型化が図れる。駆動周波数を 50～

100MHz とすると、各部の寸法は周波数に反比例して小さくなり、mm オーダーの寸法を持つアクチュエータを実現できる。小型化で粘性の影響は大きくなるが、高周波化による放射圧の増加が見込まれるので、理論と実験により検討を進める。また、音響直進流も推進力として作用するような構造としたアクチュエータ構成も検討する。

3-2 円板状圧電素子厚み振動子の利用

円板状圧電素子の厚み振動を用いた液中アクチュエータに関して研究をおこなう。例えば、駆動周波数は、圧電素子の厚みより決まる半波長共振周波数となり、約 1.6MHz を用いている。円板状放射面全面が振動していることから、大きな音響放射圧が作用すると考えられる。実際には円周境界部からの波動反射により、全面がピストン振動とはならず、かなり分布した振動となっているので、分布の影響を考慮した推進力評価を行うことで動作理論を明らかにし、実験により検証を行う。また、音響直進流も利用した構成によるアクチュエータも検討する。

円板状圧電素子の厚さに反比例して駆動共振周波数が決まるので、振動子を薄型・小口径化により高周波化を行い、その特性の変化を検討する。円板状圧電素子としては例えば直径 10~20mm 程度、厚さを変えた PZT バルク素子を用いる。厚さの違いで共振周波数 (= 駆動周波数) が異なる。異なる周波数での実験により、動作特性と駆動周波数に関する知見を得ると共に、駆動力発生メカニズムに関する理論解析を行い、実験により検証する。

4. 研究成果

液中アクチュエータの推進力を測定した結果、駆動電圧の二乗となる推進力特性となっており、音圧の二乗で推力が大きくなることを確認できた。二乗特性となることから、入力電力に比例した推力の発生となっており、音響放射力による推力発生メカニズムであることが推測されるため、理論的な考察の見通しが正しいことが確認された。

円板の厚み振動を用いたバルク波デバイスによるアクチュエータでは、振動速度の分布を求めため振動解析と電気機械等価モデルの導出を行った。厚みモードと径方向モードをそれぞれモデル化し、それぞれの振動モードについて電気機械等価回路を求めた。2つのモードの結合に関してモデル化を行うことで電気入力を超音波振動に変換する定量的なモデル化が実現できるところまですすんだ。液中アクチュエータの発生推力に関する理論解析では、既存の音響放射圧理論から推力を算出したが、差異が大きく、さらに検討を要することを明らかにした。

操舵性に関しては、4つのバルク波デバイスを配置することで、前後左右への移動を実現した。このデザインでは、曲がる動作なく移動方向を変えることができるので、狭い管内などの移動に有利である。圧電素子については、2 MHz および 3 MHz を共振周波数とする PZT 素子について検討を行い、推進力 1.1 mN および 1.7mN を得た。また、ピスマス系の圧電素子 (Bi, Na, Ba) (Ti, Mn)O₃ の素子でも実験をおこない、4 MHz の駆動周波数で 6 cm/s の速度および 4 mN の推進力を得た。

弾性表面波デバイスを用いたアクチュエータでは、駆動周波数 9.61 MHz, 19.22 MHz, 29.14 MHz, 38.45 MHz および 96.13 MHz のデバイスを試作し動作特性について検討を行った。推進力を比較したところ、駆動電圧が同一であれば、駆動周波数が異なってもほぼ同一の推進力が得られることがわかった。また、高い周波数ではデバイスが小さくなることから、単位面積あたりの推力では大きくなり、高周波化による推力の低下は避けられることがわかった。

弾性表面波基板を用いた液中アクチュエータの応用として、駆動 IDT に加えて反射器 IDT を設置することで、一方向に効率よく伝搬する電極構造とした駆動周波数約 10 MHz の素子を用いて、音響流駆動によるアクチュエータを検討した。2枚の弾性表面波素子を対向して設置して、素子の配置と素子間隔を変えて実験したところ、素子を端部に設置し、素子間隔を狭くすることで、より大きな推力が得られることを明らかにした。しかし問題点として、駆動 IDT から放射された表面波が、反射器に到達する前に、水中に放射されてしまい、一方向に表面波を効率よく伝搬させることが難しいことがわかった。

この実験結果から、アクチュエータとしての動作は確認されたが、より効率よく動作させるためには、電極構造を再検討する必要があることがわかった。解決策としては、駆動電極内部に反射用浮き電極を設置するなど、駆動電極と反射器が一体構造となった一方向性電極の採用が必要であることがわかった。

円板形状の素子の、厚み振動を利用したバルク波デバイスによるアクチュエータについては、デバイス表面に発生する音響放射圧の利用に加え、新たに音響流を推力に変換する構造の検討を行った。約 2 MHz で厚み共振する圧電素子を用いた。音響流を推進力として利用するため、圧電振動子の前方に流路が形成されるように樹脂による囲いを設置した。囲いには、振動子放射面前方に噴出口を設置し、振動子の脇には吸入口を作製した。噴出口の直径を 2 mm から 9 mm の間で 5 種類作製し、それぞれ推力の測定を行った。推力としては、1.1 mN から 1.5 mN が得られた。直径 3 mm 以上ではほぼ同じ推力となり、噴出口の直径が大きい方がやや大きな推力となる傾向となった。囲いの無い音響放射力による場合は 2 mN の推力が得られており、音響流による推力はやや小さな値であるが、推力を得ることができた。

弾性表面波デバイスを用いた液中アクチュエータでは、流体の粘性の変化による駆動変化を検討した。グリセリン濃度を変えることで水溶液の粘性を変化させ、駆動力の変化を実験的に検討した。また、推力の発生原理と考えられる非線形効果に対する粘度の影響を考慮することで、推力源となり得るふたつの非線形効果の推力への寄与について検討した。実験結果より、粘性が高いほど推進力が低下することを確認した。このことから、音響放射圧と音響流のふたつの駆動原理のうち、粘性による影響が大きく作用する音響流の駆動原理が、駆動力に大きく作用するのではないかと考えられた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Qian Yuan、Kong Deqing、Doshida Yutaka、Aoyagi Manabu、Kurosawa Minoru Kuribayashi	4. 巻 60
2. 論文標題 An underwater propulsion system with (Bi,Na,Ba) (Ti, Mn)O3 transducer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SDDD11 ~ SDDD11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abf3d7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kong Deqing、Nishio Kazuki、Kurosawa Minoru Kuribayashi	4. 巻 309
2. 論文標題 Surface acoustic wave propulsion system with acoustic radiation force	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators A: Physical	6. 最初と最後の頁 111943 ~ 111943
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sna.2020.111943	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 QIAN YUAN、KONG Deqing、Doshida Yutaka、AOYAGI Manabu、KUROSAWA Minoru Kuribayashi	4. 巻 0
2. 論文標題 An underwater propulsion system with (Bi,Na,Ba) (Ti, Mn)O3 transducer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abf3d7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Deqing Kong、Kazuki Nishio、Minoru Kuribayashi Kurosawa	4. 巻 29
2. 論文標題 Self-propelled swimmer via thickness-vibration-mode ultrasonic transducer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SMART MATER. STRUCT	6. 最初と最後の頁 02LT02 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-665X/ab6437	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 相原一鷹, 孔徳卿, 梶井将, 黒澤実
2. 発表標題 弾性表面波を用いたSAWスイマーのVHF 帯における推進力の検討
3. 学会等名 日本音響学会2021年秋季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 銭源, 孔徳卿, 黒澤実
2. 発表標題 振動振幅及び駆動周波数による圧電素子を用いた液中推進システムの推進力の変化
3. 学会等名 日本音響学会2021年秋季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 銭源, 孔徳卿, 土信田豊, 柳学, 黒澤 実
2. 発表標題 非鉛圧電素子による超音波液中推進システムの検討
3. 学会等名 第33回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sho Kajii, Deqing Kong, Kazuki Nishio, Minoru Kuribayashi Kurosawa
2. 発表標題 Propulsion Measurement of High Frequency Underwater SAW Actuators
3. 学会等名 IEEE International Ultrasonics Symposium 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Deqing Kong, Kazuki Nishio, Sho Kajii, Gen Sen, Minoru Kuribayashi Kurosawa
2. 発表標題 Self-propelled vascular robot propulsion system via SAW and BAW
3. 学会等名 日本超音波医学会第93回学術集会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuan Qian, Deqing Kong, Yutaka Doshida, Manabu Aoyagi, Minoru Kuribayashi Kurosawa
2. 発表標題 A Underwater Propulsion System with (Bi,Na,Ba)TiO ₃ Piezoelectric Ceramics
3. 学会等名 The 41st Symposium on UltraSonic Electronics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 孔德卿, 花田徳, 銭源, 黒澤実, 青柳学.
2. 発表標題 バルク厚み振動子による液中推進システム
3. 学会等名 日本音響学会2021年春季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuki Nishio, Deqing Kong, Minoru Kuribayashi Kurosawa.
2. 発表標題 Self-propelled Swimmer Propulsion System using SAW and BAW
3. 学会等名 IEEE International Ultrasonics Symposium 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 孔 徳卿, 西尾 一輝, 黒澤 実
2. 発表標題 弾性表面波による自走式血管内ロボット推進システムの検討
3. 学会等名 第31回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西尾一輝, 宮岡洋平, 孔徳卿, 黒澤実.
2. 発表標題 音響放射力によるスイマーアクチュエータの微小推進力の測定について
3. 学会等名 日本音響学会2019年秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梶井将, 西尾一輝, 孔徳卿, 黒澤実
2. 発表標題 SAWデバイスの高周波化による小型スイマーの検討
3. 学会等名 日本音響学会2019年秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西尾 一輝, 孔 徳卿, 黒澤 実
2. 発表標題 弾性表面波によるジェット式液中自走型スイマーアクチュエータ,
3. 学会等名 第31回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム
4. 発表年 2019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
--	---------------------------	-----------------------	----

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