

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：10103

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20217

研究課題名（和文）超音波による血管内ロボット推進システム

研究課題名（英文）Ultrasonic Self-propelled Vascular Robot Propulsion System

研究代表者

孔 徳卿（Kong, Deqing）

室蘭工業大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：50868974

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：推進力発生メカニズムを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した。音響放射圧を中心として音響駆動力を計算し、音響流と粘性の影響も考慮し、推力特性を議論した。高周波数による弾性表面波素子とバクセル振動子を検討し、推進システムの小型化と多自由度制御を検討した。人体に優しい圧電材料を考慮し、非鉛性圧電振動子も議論した。パイプ内走行実験で血管内ロボット向けのテストを行った。将来的に、新型超音波推進力による血管内自走式ロボットを利用し、高精度で安全性が高い、身体に優しい血管外科手術法の創成が期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

血管内には血流があり、従来の液中推進システムでは高推力と小型化の両立は困難である。我々が超音波推進システムによる血管内自走式ロボットを考案した。超音波推進システムは、単純な構造、高推力と小型化という利点がある。低侵襲心臓血管外科手術を革新するため、超音波推進システムによる血管内自走式ロボットを用い、高精度で安全性が高い、身体に優しい次世代心臓血管外科手術法が期待される。ターゲット療法さらに遠隔医療に向け、血管内ロボットの創成が期待される。超音波による血管内ロボット推進システム技術の実現は医療と生物科学の分野に大きな貢献が期待される。

研究成果の概要（英文）：Propulsion mechanism of acoustic propulsion system is studied and investigated based on vibration mode, frequency, and others. The acoustic propulsion force is calculated based on the acoustic radiation pressure, and the thrust characteristics were discussed considering the effects of acoustic flow and viscosity. Miniaturization and multi-degree-of-freedom of swimmer are investigated with surface acoustic wave and a buck wave transducers at MHz frequency. Lead-free piezoelectric transducer is studied for the human body. A test for an intravascular robot in a pipeline experiment is investigated. In the future, Acoustic propulsion system is expected that a new type of ultrasonic propulsion-based intravascular self-propelled robot will be used to create highly accurate, safe, and body-friendly vascular surgical procedures.

研究分野：超音波，非線形音響，超音波モータ，弾性表面波デバイス，水中ロボット，血管内自走式ロボット

キーワード：超音波 非線形音響 液中推進システム 血管内ロボット

### 1. 研究開始当初の背景

水中に放射された強力な音波が、非線形現象により直流的な流れになることはよく知られているが、放射源である基板表面に、放射圧による大きな推進力が生ずることは新たな発見であった。本研究課題で血管内を動き回り診断を行ったり治療を行ったりすることが考えられる。超音波振動子から液中に超音波を放射する際に発生する音響放射力の反作用、音響放射推進力とする、超音波による血管内ロボット推進システムに関する理論について研究し、推進システムの性能指標を明らかにする。本推進システムでは、振動面から放射する音響放射力の反作用、音響放射推進力を駆動力として作用する。自走型の液中推進システムという全く新しい技術分野を開拓することとなる。血管内で血流があり、高推力と小型化の推進システムは不可欠である。本研究の超音波による自走式液中推進システムにおいて、単純な構造、高推力、小型化と低コストの利点を持ち、低侵襲治療、ターゲット療法さらに遠隔医療に向け、血管内ロボット推進システムの創成を目的とする。超音波による血管内ロボット推進システム技術の実現は医療と生物科学の分野に大きな貢献が期待される。

### 2. 研究の目的

超音波振動子から液中に超音波を放射する際に発生する音響放射力の反作用、音響放射推進力とする、超音波による血管内ロボット推進システムに関する理論について研究し、推進システムの性能指標を明らかにする。推進システムの推進力に関しては、既存の音響放射圧の理論を適用することで、振動分布を持つ振動子放射面における音響放射推進力の理論体系を新たに構築する。また、媒質となる液体の密度や粘度などの物理的性質が放射力に及ぼす影響を明らかにすることで、音響放射推進力による本推進システムを体系化する。振動源としては、弾性表面波素子を用いた推進システムと円板状圧電素子の厚み振動を用いた推進システムに関して研究する。マイクロ化と高推進力のため、超音波素子の材料と電極設計に関するも行う。先進的な医療技術に向け、液中を自由に動き回ることのできるスイマーアクチュエータの開発が活発化している。血液中の医療ロボットのため、ロボットの新たな推進力の開発は世界的な問題となっている。液中での自走型推進システムは種々考案されているが、単純な構造、高パワー密度、小型化と低コストの利点を持ち、超音波推進システムは他の方式に比較して優れた性能と機能を有する。実用化に向け、血管環境のような管内実験と複数の液体中の駆動実験も行う。低侵襲治療、ターゲット療法さらに遠隔医療に向け、血管内ロボット推進システムの創成を目的とする。超音波による血管内ロボット推進システム技術の実現は医療と生物科学の分野に大きな貢献が期待される。

### 3. 研究の方法

超音波液中推進システムについては、超音波振動子から液中に超音波を放射する際に発生する音響駆動力の反作用、音響推進力で定義される。本研究で考案した液中推進システムは、超音波素子の振動面に働く力を利用することで、液中自走式推進システムである。高周波化によるマイクロ化が容易である。20-100MHzの周波数することで、振動振幅は10 $\mu$ m-10nmと極微小となるが振動速度は3m/s程度となり、大きな放射圧が出る。微小化しても単位面積当たりの推力は低下せず、高推力の実現が可能である。超音波振動子はMEMSプロセスで作製するので、低コストという利点もある。単純な構造、高推力、小型化と低コストの利点を持ち、血管内ロボット推進システムの創成が期待される。具体的研究方法は以下である。

- A. 音響駆動力の反作用として、液中振動子の振動振幅、音圧、流速で音響推進力を検討する。
- B. バルク波振動子による液中推進システムを検討する。
- C. 弾性表面波振動子による液中推進システムを検討する。
- D. 高周波数による液中推進システムの小型化。
- E. 血管内ロボットのため、人体に優しい圧電材料を考慮し、非鉛性圧電振動子を検討する。
- F. パイプ内走行実験で血管内ロボット向けのテストと多自由度走行実験を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) 推進メカニズム

バイオミミックスイミングでは、流体を体の後方に押し出すことで高い水圧の領域が生成され、結果として動物が前進する。体のスラッピングアクションを繰り返し、周囲の水を後方に押し出すことで後方に高圧領域を発生される。この動作を連続的に行うことで前方へ水泳する推進メカニズムは、体の端の往復運動として考えることができる。超音波振動子の表面振動はnm/ $\mu$ mの振動振幅とMHz/kHzの駆動周波数を用いた往復運動として考えることができる。機械往復振動のパワーPは、振動速度vの2乗に比例し、振動速度vは式 $2\pi fA$ のように、駆動周波数fと振動振幅Aから計算できる。動物の往復運動における振動振幅と駆動周波数はcmとHzのオーダーであり、超音波振動子の表面振動であるnm/ $\mu$ mの振動振幅とMHz/kHzの駆動周波数では、同等かそれ以上の振動速度、または機械出力が得られるはずである。したがって、振動子後方に高水圧を発生されることで、高周波微小振動を推進力発生源として利用することが可能となる。

図1に示すように、2MHzの円板厚み振動子(φ10×1)による液中推進システムを作製し、水中で振動振幅分布を測定した。厚み振動モードは径方向の振動があるため、純粋な縦振動モードではないことを解明した。その上に、振動子付近の音圧分布と流速分布を測定し、円板厚み振動子の音響駆動力が確認できた。バイオミックスイミングにおける高い水圧の領域と流体を体の後方に押し出すことが生成され、スイマーが前進することが可能である。

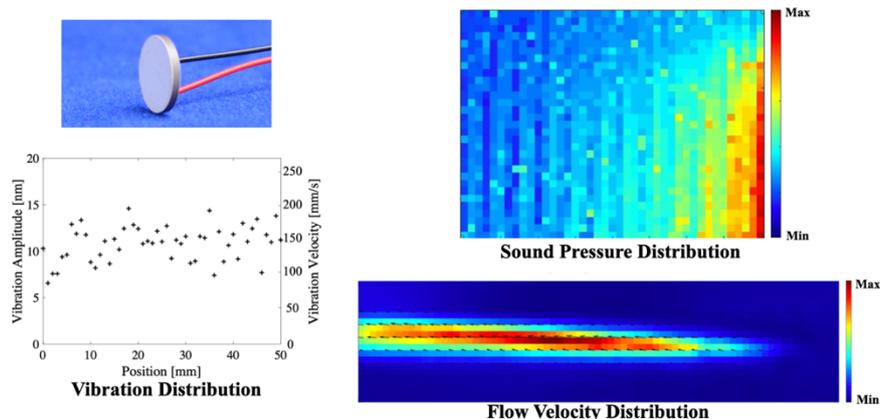


図1：円板振動子による推進原理。

非線形音響の一つとして、音響流や音響放射力などの音響駆動力を発生させる。音響駆動力は、振動・波動伝搬の非線形現象による直流的な力であり、そのパワーが生ずる源は、固体中を伝搬する微小振幅である。境界面には直流的な力が発生し、液中に生ずる駆動力の反作用を音響推進力として定義できる。超音波振動子による推進力を検討するため、振動速度による音響放射圧を利用し、音響推進力を検討した。図2(a)に示すように、超音波振動子の水中振動速度は入力電圧の増加により、大きくなることであった。入力電圧が25.6 V<sub>pp</sub>の場合、水中の振動子の平均振動振幅と平均振動速度は6.4 nmと0.36 m/sであった。入力電圧に対する推進力の計算値と測定値の結果を図3(b)に示した。入力電圧が増加するにつれて増加した。5 V<sub>pp</sub>での測定結果と計算結果は約0.1 mNであった。25 V<sub>pp</sub>の場合、計算した推進力と測定値は2.3 mNと4.6 mNで、計算結果はより高い割合で増加した。測定値との分布はほぼ同じである。

音響推進力の粘性特性を議論するため、液体粘度による推進力特性を検討した。図2(c)に示すように、グリセリン・純水の体積比を調整し、高粘度により推力が低下することも判明した。グリセリン濃度が100%, 80%, 60%, 40%, 20%, 0%の場合、印加電圧40 V<sub>pp</sub>での推進力はそれぞれ0.1 mN, 0.1 mN, 1.4 mN, 1.6 mN, 1.8 mN, 4.8 mNであった。正常な血液の水に対する相対粘度はヘマトクリット値から3.5付近(グリセリン・水の40%・60%)であり、入力電圧40 V<sub>pp</sub>では1.6 mNの推力が得られた。水中の4.8 mNより血液中の推進力は小さくなっていた。

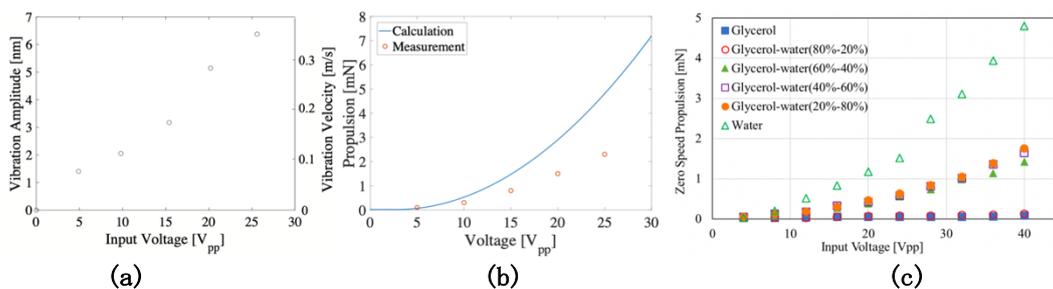


図2：推進力特性。

## (2) バルク振動子による推進システム

超音波振動子による自走式液中音響推進システムを検討するため、PZT円板振動子(φ9 mm×1 mm)を用いたプロトタイプスイマーを試作した。スイマーの原理図と写真を図3に示した。振動子右側での液中音響推進力を抑えるため、アクリルシエルで空洞を設置した。これにより、水中で一方向性の音響推進力が生み出せる。スイマーの全長と直径は18 mmおよび14 mmである。スイマーの先端部分は水中抵抗を減少させるため半球形状としている。スイマーを組立てた状態で、円板振動子のアドミタンス特性を測定した。図3に示すように、空気中および水中での振動子のコンダクタンスは、それぞれ最大51.1 mSおよび22.8 mSであり、共振周波数は2.065 MHzである。サセプタンスはいずれも0 mS付近である。水中での振動子のコンダクタンスは空気中より小さくなるため、振動面から水中に放射されるパワーとして期待できる。

スイマーの動きを評価するため、スイマーの走行実験を行った。スイマーの重量を考慮していないため、水中でのバランスが維持しにくく、水面を駆動させている。音響推進システムの性能評価を行うためにした入力電力に対するゼロ速度推進力と無負荷速度を図3に示す。入力電圧12.4 V<sub>pp</sub>(入力電力0.4 W)からスイマーの動きが検出され、0.2 mNのゼロ速度推進力と6.1 mm/s

の無負荷速度が得られた。入力電力の増加に伴い、ゼロ速度推進力と無負荷速度も増えていき、ゼロ速度推進力は入力電力に比例していることがわかる。一方、無負荷速度に関しては、移動速度に応じて流体抵抗も増加する影響から、その増加率が徐々に減少していることがわかる。最終的には、入力電圧 89.6 V<sub>pp</sub> (入力電力 22.7 W) とした場合、11.6 mN のゼロ速度推進力と 171.9 mm/s の無負荷速度が得られた。使用した振動子の実効面積は 28.27 mm<sup>2</sup> であるため、単位面積あたりのゼロ速度推進力は 0.4 mN/mm<sup>2</sup> である。

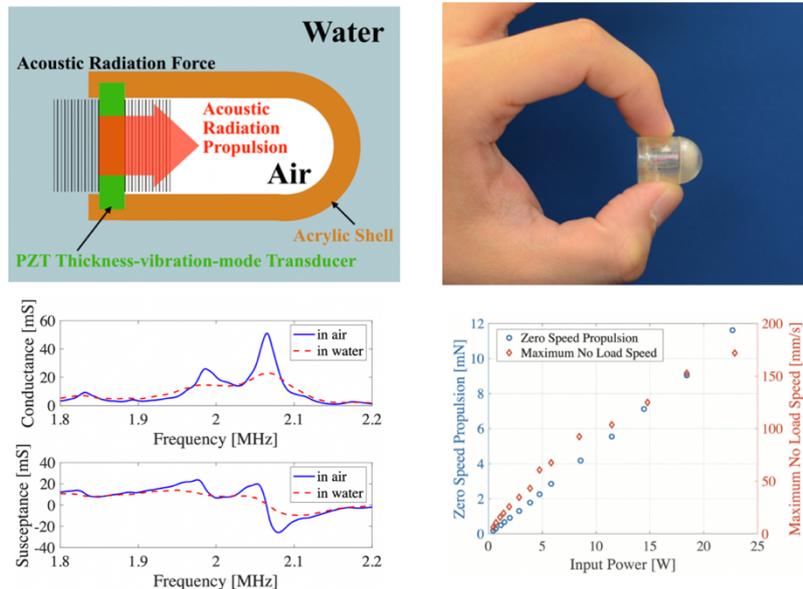


図 3 : バルク振動子によるスイマー。

### (3) 弾性表面波振動子による推進システム

本研究においては厚み 1 mm の 127.8 度回転 Y 板-X 伝搬 LiNbO<sub>3</sub> 基板 (LN) が用いられている。LN は、電気機械結合係数が大きく、伝搬損が小さいという特徴を持ち、弾性表面波デバイス基板としてよく使われている。IDT 電極の設計とパラメータを図 5 に示した。周期長は 400 μm のため、共振周波数は 9.61 MHz である。対数と交差指幅は 20 と 10 mm である。MEMS プロセスで IDT デバイス (16 × 14 mm) を加工した。

IDT デバイスから液中に放射された駆動力を検討するため、放射された音響流速を測定した。水中にトレーサ粒子を入れた状態で振動子に交流電圧を印加し、高速カメラで粒子の流れを記録できる。その後、数値解析ソフトウェアを用いて粒子速度解析を行い、音響流による流速を評価できる。弾性表面波振動子を用いた液中推進システムの効率を検討するため、水中に入れた部分による粒子速度を観察した。LN 基板の前端のみが水中に入れた場合、最も流速が速かった箇所では 23.9 mm/s という結果が得られた。IDT デバイスの半分が水中に入れた場合、最大粒子速度は 61.7 mm/s であった。LN 基板の前端のみが水中に入れた場合、空気中の IDT デバイスの振動振幅が利用できないので、水中での音響駆動力が小さいである。IDT 電極も水中に入れた場合、有効面積が増え、同じ 27.6 V<sub>pp</sub> の駆動電圧の時、音響駆動力も増加していた。水中の IDT デバイスからの音響流はレイリー角で両側に放射されるため、全体的な IDT デバイスが水中に入ると、有効面積が 2 倍に増加できる。音響駆動力の反作用として、効率的な音響推進システムが期待される。弾性表面波振動子を用いた液中推進システムにおいて、水中の振動振幅の有効面積が重要である。電気的なパワーロスとデバイス安全性から考慮し、全体的な IDT デバイスが水中に入れるため、IDT 電極表面の絶縁加工が不可欠である。本研究では SiO<sub>2</sub> で IDT を絶縁した振動子と絶縁加工なしの振動子の推進力を比較するため、測定実験を行った。測定結果を図 4 に示した。SiO<sub>2</sub> で IDT を絶縁した方は推力が高くなることがわかった。印加電圧が 86 V<sub>pp</sub> の時、IDT を絶縁した振動子では 4 mN、絶縁していない振動子では 2.8 mN の推力が得られた。

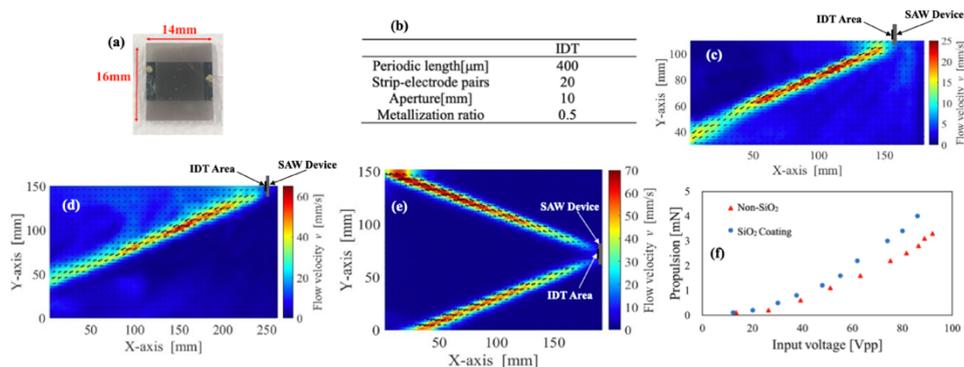


図 4 : 弾性表面波振動子による推進システム。

#### (4) 非鉛振動子と高周波数による小型化

血管内ロボット推進システムの創成のため、人体に優しい圧電材料を考慮し、非鉛性圧電振動子を検討した。そして、高周波数による液中推進システムの小型化も検討した。非鉛性の強誘電体単結晶であるニオブ酸リチウム(LN : Lithium Niobate,  $\text{LiNbO}_3$ )振動子はセラミックスのようなドメイン壁構造をもたず、材料内部の結晶構造が均一に連続している。このため、直流電圧で駆動するアクチュエータを構成するとき、ヒステリシスやクリープがなく、入力電圧に対して優れた線形性を持つ圧電変位を得られる。これと同じ理由から、圧電単結晶を超音波駆動源として用いる場合、振動損失が極めて小さく、発熱も小さな優れた振動特性を持つことができる。

$36^\circ$  回転 Y 板厚み振動子を利用し、9 MHz 程度で  $10 \times 10$  mm、 $7 \times 7$  mm と  $4 \times 4$  mm の LN 振動子によるスイマー ( $7 \times 7 \times 25$  mm) を試作した。振動子の厚みは 0.35 mm である。図 5 (a) に示すように、推力の増加に伴い、最大無負荷速度も増加しているが、振動子スイマーにかかる水の抵抗が大きくなるため速度に上限があると考えられる。また、振動子スイマーは 0.3 mN ほど動くことができることが分かり、推力による最大無負荷速度は  $4 \times 4$  mm の LN 振動子によるスイマーが一番大きくなっている。小型化にしてもスイマーは低入力電圧で高速度走行が実現できた。

小型化のため、96 MHz の SAW デバイスでスイマー ( $10 \times 10 \times 25$  mm) を作製し、速度測定を行った。図 5 (b) に示すように、入力電圧を上げるにつれスイマーの速度も上昇していることがわかった。印加電圧  $24 V_{pp}$  のときに最高速度 177 mm/s が得られた。駆動周波数 10 MHz の SAW デバイスを使用した先行研究では  $40 V_{pp}$  で 20 mm/s の速度だった。今回の実験で作製したスイマーは先行研究で作製されたスイマーより小型で高出力であることがわかった。

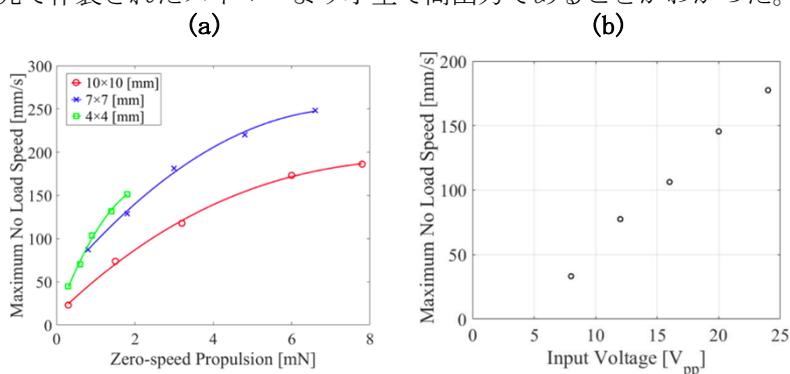


図 5 : 高周波数による小型化。

#### (5) 走行実験

パイプ内走行実験で血管内ロボット向けのテストのため、1センチ未満のスイマーを試作し、内径2センチのパイプでの走行実験を行った。図 6 (a) に示すように、入力電圧は  $35 V_{pp}$  のときに 0.2 mN の推進力を得られた。動きが初め、 $80 V_{pp}$  のときに 36 mm/s も最大走行速度を測定できた。スイマーの形状とワイヤーの改良した上、走行性能の向上が必要である。

多自由度走行を実現するため、複数の PZT 縦振動子 ( $\varnothing 5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ ) を用いたスイマーの操舵を検討した。多自由度スイマーは 3D プリンタを用いて作成した。振動子は、後方の 4 個を前進・左右旋回用、前方の 1 個を後退用とした。旋回動作の確認のため、左側の振動子のみと、先頭と左側の振動子を同時に駆動させた場合におけるスイマーの軌跡を図 6 (b) に示した。単純な左側だけの駆動より前後の非対称な駆動を行うことで、スイマーがより早く旋回できることがわかる。以上のように、複数の振動子を用いることで多自由度スイマーを実現することができた。

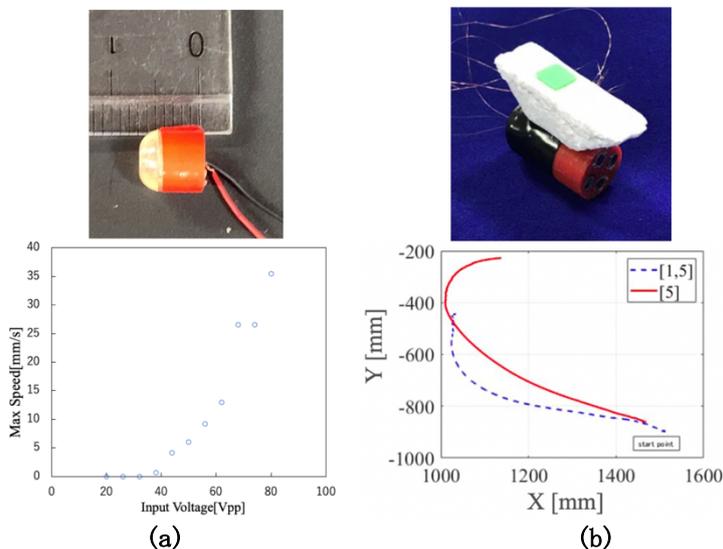


図 6 : 走行実験。

## 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 Deqing Kong, Yuan Qian, Minoru Kuribayashi Kurosawa, and Manabu Aoyagi	4. 巻 150
2. 論文標題 Evaluation method for acoustic underwater propulsion systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA	6. 最初と最後の頁 1157~1164
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1121/10.0005657	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 Hao Yun, Deqing Kong, Manabu Aoyagi	4. 巻 332
2. 論文標題 Characteristics of thickness-vibration-mode PZT transducer for acoustic micropumps	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 SENSORS AND ACTUATORS A-PHYSICAL	6. 最初と最後の頁 1132061~1132067
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.sna.2021.113206	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 60
2. 論文標題 An underwater propulsion system with (Bi,Na,Ba) (Ti, Mn)O <sub>3</sub> 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 Tanimura Ryo, Kong Deqing, Aoyagi Manabu	4. 巻 61
2. 論文標題 Multi-degrees-of-freedom swimmer using an ultrasonic longitudinal transducer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SG1038 ~ SG1038
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac58e0	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27件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 10件）

1. 発表者名 Takumi Hirata, Deqing Kong, Yutaka Doshida, Minoru Kuribayashi Kurosawa and Manabu Aoyagi
2. 発表標題 BNBTM and SCNN lead-free Ultrasonic Transducers for Underwater propulsion System
3. 学会等名 IEEE International Ultrasonic Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryo Tanimura, Deqing Kong and Manabu Aoyagi
2. 発表標題 Acoustic underwater propulsion system using longitudinal vibrator
3. 学会等名 Symposium on Ultrasonic Electronics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 孔 徳脚, 平田 拓己, 黒澤 実, 青柳 学
2. 発表標題 ニオブ酸リチウム厚み振動子による液中音響推進力の検討
3. 学会等名 日本音響学会2022年春季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 孔徳脚, 銭源, 黒澤実, 青柳学
2. 発表標題 カテーテルアブレーション向けの超音波自走式ロボット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 谷村 瞭, 青柳 学, 孔 徳卿
2. 発表標題 縦振動子を用いた自走式スイマー
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 平田 拓己, 孔 徳卿, 土信田 豊, 黒澤 実, 青柳 学
2. 発表標題 厚み振動モードの非鉛性振動子(BNBTM, SCNN)の液中推進システムの検討
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 孔 徳卿, 雲 浩, 青柳 学
2. 発表標題 厚み振動子による音響駆動力のマイクロポンプ特性の検討
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 Sho Kajii, Deqing Kong, Kazuki Nishio and Minoru Kuribayasi Krosawa
2. 発表標題 Propulsion and speed measurement of high frequency underwater SAW actuators
3. 学会等名 IEEE International Ultrasonic Symposium (国際学会)
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 <sub>3</sub> Piezoelectric Ceramics
3. 学会等名 Symposium on Ultrasonic Electronics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 D. Kong, K. Nishio, S. Kajii, Y. Qian and M. K. 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 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 花田徳, 青柳学, 孔德卿
2. 発表標題 圧電円盤振動子の厚み振動モードの有限要素法解析
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 Ryo Tanimura, Deqing Kong, Minoru Kuribayashi Kurosawa and Manabu Aoyagi
2 . 発表標題 Characteristics of surface acoustic wave propulsion system at 10 MHz
3 . 学会等名 Symp. Ultrasonic Electronics 2022 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Takumi Hirata, Deqing Kong, Fei Li, Minoru Kurosawa and Manabu Aoyagi
2 . 発表標題 Acoustic Underwater Propulsion System via a 36° Y-cut LN Thickness-vibration-mode Transduce
3 . 学会等名 Symp. Ultrasonic Electronics 2022 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Yimeng Wang, Deqing Kong, Yutaka Doshida, Minoru Kuribayashi Kurosawa and Manabu Aoyagi
2 . 発表標題 Underwater Characteristics of a Lead-free BNBT15-BNM Transducer
3 . 学会等名 Symp. Ultrasonic Electronics 2022 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Ryo Tanimura, Deqing Kong , Minoru Kuribayashi Kurosawa and Manabu Aoyagi
2 . 発表標題 Study of an underwater propulsion system by high-frequency surface acoustic wave device
3 . 学会等名 International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators ( 国際学会 )
4 . 発表年 2022年

1. 発表者名 Yimeng Wang, Deqing Kong, Yutaka Doshida , Minoru Kuribayashi Kurosawa and Manabu Aoyagi
2. 発表標題 A Lead-free BNBT15-BNM Ultrasonic Transducer for Underwater Microrobot
3. 学会等名 International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators ( 国際学会 )
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takumi Hirata, Deqing Kong, Fei Li, Minoru Kuribayashi Kurosawa and Manabu Aoyagi
2. 発表標題 Investigation of acoustic underwater propulsion with 36°Y-cut lithium niobate transducer
3. 学会等名 IEEE Ultrason. Symp.2022 ( 国際学会 )
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 谷村 瞭, 孔 徳卿, 青柳 学
2. 発表標題 超音波縦振動子を用いた多自由度スイマー
3. 学会等名 第34回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平田 拓己, 花田 徳, 孔 徳卿, 黒澤 実, 青柳 学
2. 発表標題 血管内ロボット向けの超音波推進システムの粘度と推進力特性の検討
3. 学会等名 日本超音波医学会第 95 回学術集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 孔 徳卿
2. 発表標題 液中超音波振動子に関する研究とその応用
3. 学会等名 精密工学会次世代センサ・アクチュエータ委員会第 26 回定期講習会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 谷村 瞭, 黒澤 実, 青柳 学, 孔 徳卿
2. 発表標題 PZT 厚み振動子による液中推進システムの推力特性の検討
3. 学会等名 日本音響学会 2022 年秋季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平田 拓己, 花田 徳, 黒澤 実, 青柳 学, 孔 徳卿
2. 発表標題 弾性表面波振動子を用いた液中推進システムにおける粒子速度の評価
3. 学会等名 日本音響学会 2022 年秋季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 孔 徳卿, 雲 浩, 黒澤 実, 青柳 学
2. 発表標題 サファイアスライダを用いた弾性表面波モータの出力特性の検討
3. 学会等名 日本音響学会 2022 年秋季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 王 伊萌, 津幡 泰平, 黒澤 実, 青柳 学, 孔 徳卿
2. 発表標題 The Characteristics of Surface Acoustic Wave Atomization with Unidirectional Interdigital Transducer
3. 学会等名 日本音響学会 2022 年秋季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yimeng Wang, Deqing Kong, Yutaka Doshida, MinoruKurosawa, Manabu Aoyagi
2. 発表標題 Evaluations of a lead-free BNBT15-BNM disc transducer for underwater acoustic propulsion system
3. 学会等名 日本音響学会2023年春季研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 孔 徳卿, 谷村 瞭, 黒澤 実, 青柳 学
2. 発表標題 高周波数による液中弾性表面波推進システムの小型化と絶縁膜 SiO <sub>2</sub> の性能検討
3. 学会等名 日本音響学会2023年春季研究発表会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 振動子による液中口ポット	発明者 孔徳卿	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願：2021-186723	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
---------	---------