

報告日 2014 年 (平成 26 年) 10 月 24 日
報告者 豊橋技術科学大学 エレクトロニクス先端融合研究所
テニュアトラック助教
真下 智昭

1. 研究概要

(和文)

(1)課題名 (日本語)

微量流体を駆動する圧電マイクロポンプの開発

(2)研究者氏名

真下智昭 豊橋技術科学大学 エレクトロニクス先端融合研究所 テニュアトラック助教

(3)研究概要 (日本文)

本研究では、マイクロポンプの開発を目指し、液体駆動の推進力を生み出す振動子の研究開発を行った。振動子は金属立方体に穴が開いているという構造で簡単に試作でき、小型化することが容易である。音響流で穴の中で液体を回転し得られる推力を用いる。本研究では、実験法の検討、振動子の試作、および振動子の最適設計を行った。駆動原理を検証するために、5mm 角で内径 3.5mm の振動子を開発し、電圧を印加して、液体の回転力を発生させることに成功した。また、振動子の最適設計指針を明らかにするために、様々な形状の振動子を試作し、振動振幅の大きさ、エネルギー密度などの評価を行った。

(4)キーワード

圧電アクチュエータ, 振動解析, マイクロ流体, 音響流

(英文)

(1) Research title

Development of Piezoelectric Micropump for Actuating a Small Amount of Liquid

(2) Name of researcher with title of position

Tomoaki Mashimo, Toyohashi University of Technology, EIIRIS, Tenure-track assistant professor

(3) Summary

We study the vibrator of a piezoelectric micro pump that generates liquid movement

using an acoustic streaming. The vibrator is a metallic cube with a through-hole and the simplicity makes the vibrator small even to a few millimeters. In this report, we build a prototype of the vibrator, build a prototype vibrator, and optimize the design. The vibrator with a side length of 5 mm and hole of 3.5 mm is built and driven to verify the driving principle. To clarify the optimal design method, a variety of the stator is developed and these vibration amplitude and energy density is measured experimentally.

(4) Key Words

Piezoelectric actuator, vibration analysis, micro fluidics, acoustic streaming

2. 本研究の意義・特色

近年、小腸などの消化器疾患の検査には、患者への負担が少ない「カプセル内視鏡」が用いられるようになり始めている。次の目標として、このカプセルの中から、患部に向けて、治療をするための薬液や、腫瘍を光らせる蛍光試薬を投与できる投薬機能が求められている。しかし、限られたカプセル内のスペースで、投薬を実現できるほどの小型ポンプを備え付けるのは今の技術では難しい。

提案する技術は、圧電駆動の原理を用いて、液体を自由に回転させることのできるものである。提案する構造はシンプルで、中心穴の開いた金属直方体（金属部）の側面に圧電素子を貼り付けてある。周囲の圧電素子から進行波状に電圧を印加すると穴内に音圧の差が生じ、その結果、中の液体には音響流が発生し進行波と同じ方向の流れを生み出すことができるというものである。生じた回転流れは、ボールネジのようなメカニズムを用いることで直進に変えることができる。

この圧電駆動を原理として用いるマイクロポンプであれば、脈動が極めて小さく、サイズの割に流速の大きいマイクロポンプが実現可能である。超音波振動によるキャビテーション（マイクロバブル）が発生し、液体粘性が低下する効果が働くため、小さくても非常に流しやすいポンプが実現できると考えられる。

3. 実施した研究の具体的内容、結果（本文）

3. 1 評価方法・実験装置の開発

液体が生じる流れを評価するためには、単位時間あたりの流量や、着色料を使って拡散されるまでの時間を調べるなどの方法が用いられることが多い。しかしこれらは微小量の流体を扱うことが難しい。そこで本研究では、液体表面に浮かべられたアルミ粉の変位を調べることで、その回転性能を評価することとした。まず、図1のような、実験装置の開発を行った。流速を計測する高速度カメラ、撮像を容易にするための光源で構成される。溶液の流速を観察するために、溶液の液面にはアルミ粉を浮かべ、下方向から光源で照らし、そのアルミ粒子の変位を高速度カメラで捕える。実験では、溶液に水を用い、振動子（ステータ部）の上面と水面がほぼ同じとなるように満たしている。波形発生器と電力アンプを用いて電圧を発生する。駆動原理である曲げ

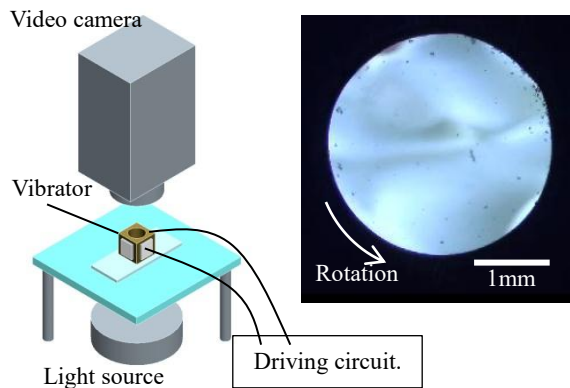


図 1 実験装置の概要

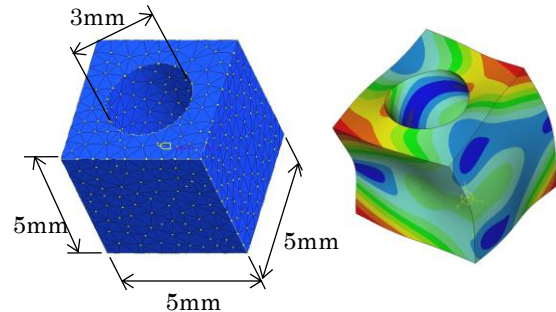


図 2 振動子の有限要素法解析

の振動モードを励起するためには 2 組の対向する圧電素子のそれぞれに、振動モードの位相が 90° だけ異なるように、2 種類の電圧を印加する．これらは電圧 $E_A = A \sin(2\pi f t)$ と $E_B = A \sin(2\pi f t + \phi)$ のように表される．ここで、 A は印加電圧の振幅で、 f は印加電圧の周波数であり、波形発生器によって変えることができる． ϕ は電圧の位相であり、周波数が低い場合は 90° でよいが、周波数が高い場合は、実際の振動を測定しながら決定する必要がある．実験に用いる振動子では、電圧位相を調整しながら、レーザードップラ振動計で測定した実際の振動は 90° となることを確認した上で実験を行った．

3. 2 試作と実験

試作した振動子は、図 2 に示すように、幅、奥行、高さがそれぞれ 5mm の立方体で、穴径 ϕ 3.5mm である．この穴内の容積は、ほぼ水の一滴の容積に相当する．設計は、図 2 のように、有限要素法解析を用いて行った．モード解析を行い、駆動原理となる曲げの振動モードを発生する固有振動数は、約 250kHz であることがわかった．試作した振動子を図 3 に示す．対向する二つの圧電素子に、電圧が与えられる．また、図中の黒い線は GND 線である．この振動子に、印加電圧 ($A = 50V_{p-p}$, $f = 250kHz$) を与えたときに、液体が回転する時刻歴応答を図 4 に示す．このとき、角速度は単位時間当たりの角度変位から算出している．電圧を印加した後、0.5 ms までに最大回転数まで到達する．液体表面における粒子の動きを見てみると、半径が大きくなるにつれ速度は概ね比例して上昇するため、粒子の移動は外側の方が大きい、側面付近では粘性が高くなり急速に速度が減衰する．あるアルミ粒子の移動をトラッキングしてみても、その流速には変化があり、最大値と最小値にばらつきがある．平均値と比べ、最大で約 100% のばらつきが観察されている．これはアルミ粒子の持つ慣性や、液体表面の揺れなどに影響していると考えられる．このような挙動は、穴径が小さくなって表面張力の影響が大きくなるにつれ顕著になる．

この振動子において重要な評価項目は、印加電圧の周波数と振幅を変えた場合における性能である．アルミ粒子が流体の表面上で回るが、このときの回転数を、性能を表す指標として回転数

を評価することとした．電圧振幅が $A = 50V_{pp}$ で一定としたときの，振動子の周波数特性を測定したところ，回転できる周波数の範囲は約 2kHz であった．周波数の範囲は電圧振幅が大きくなれば広くなることを確認している．共振周波数付近で，回転数は高くなり，これよりも周波数が高くなるにつれ，回転数が緩やかに低下する挙動が観察されたが，これは圧電材料に由来する影響であると考えられる．また，電圧周波数を一定としたときの振幅を測定すると，電圧を上昇させるにつれ，液体の回転数も概ね比例して上昇していることがわかった．これは振動振幅（音圧）の大きさと回転数が比例関係にあることを意味する．

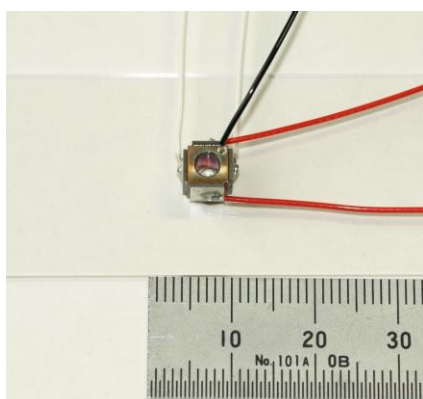


図 3 試作した振動子

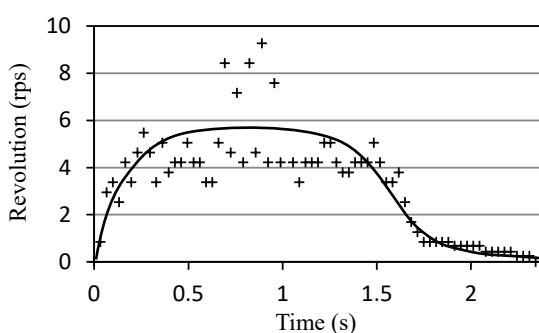


図 4 流体の時刻歴応答

3. 3 振動子の設計手法の開発

前節で行った試作の例では，振動子の形状は立方体を扱った．また振動振幅が大きくなるにつれ，流体の回転能力が大きくなることも実験で明らかにした．振動子の設計を最適化するためには，寸法の変化に対してどのように振動振幅が変化するかを調査することである．振動子の高さを 10mm で一定として，幅と奥行きを同時に変えた場合（図 5）のインピーダンス特性の調査を行った．インピーダンスが小さい時，振動子には大きな電流が流れる．つまり，大きな振動を発生できることを意味する．この実験では併せて材料を検討するために，銅と SUS の二種類を用意した．また，振動振幅の大きさは圧電素子の厚みも影響することが分かっている．そこで，圧電素子の厚みが 0.5mm と 1mm のものの 2 種類を用意した．サイズが変わった場合に，インピーダンス測定から計算される投入電力の変化を図 6 に示す．幅寸法が大きくなるにつれ，周波数が高くなり，インピーダンスが低下し，電流が流れやすくなることを意味する．特に SUS の 16mm 以上においては，14mm 以下のものと比べて数倍の電力がかけられることとなる．これはエネルギー密度が大きくなるということ意味する．つまり小さいサイズの割に大きなエネルギーを出力できるという優れた特長を示している．

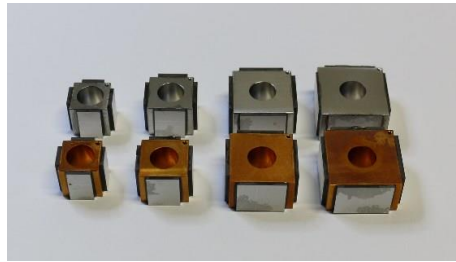


図5 サイズの異なる振動子

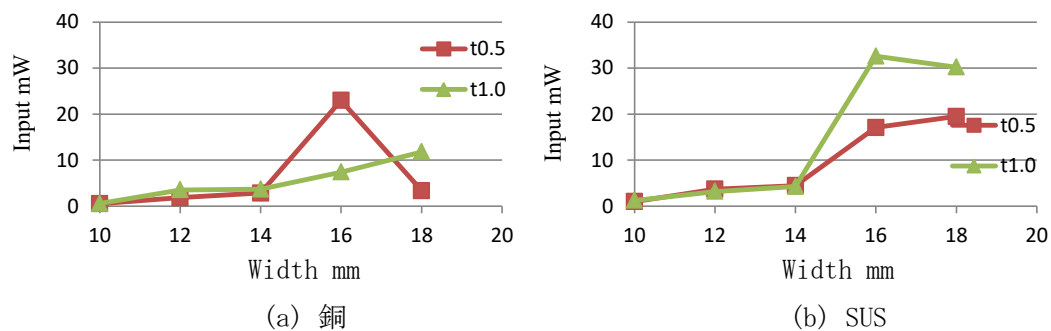


図6 振動子形状と入力の関係

4. 本研究を実施したグループに属するおもな研究者の氏名・役職名

渋谷 涼太 豊橋技術科学大学大学院・大学院生（博士課程）

5. 研究実施時期

2013 年（平成 25 年） 4 月 1 日から 2014 年（平成 26 年） 9 月 31 日

6. 本研究に関連して発表した主な論文等

- (1) T. Mashimo, “Piezoelectric Rotational Mixer based on a First Bending Vibration Mode,” IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 60, No.10, pp. 2098-2104, 2013.
- (2) 伊藤敦, 渋谷涼太, 真下智昭, 寺嶋一彦, 超音波振動によって生じる音響流を用いた小型圧電ミキサーの評価, 日本機械学会 2013 年度年次大会, 2013.
- (3) 真下智昭, 1 ミリ立方メートルのステータを用いた小型超音波モータの試作, 精密工学会学術講演会, 2014

7. 内外における関連研究の状況

超音波などを用いて液体を駆動することのできる音響流はこれまでに他の研究機関で研究開発されてきた。音響流は、超音波振動を、音場に変換し、その音場によって液体を

駆動する技術である。解放系では、音響エネルギーの減衰によって音響流が生じるため、広いスペースの割に流量を上げることができない。申請者が提案するポンプの振動子の特長の一つは、音場がクローズドであることである。したがって提案する方式では音響エネルギーを蓄えることができ小さいスペースでも容易に液体を駆動することができる。

8. 今後の発展に対する希望

本研究では、評価方法、振動子開発、振動子の設計手法の開発を行った。今後取り組むべき課題は、特に効率に関する研究である。投入される電気エネルギーから、出力される流体の運動エネルギーまでの変換を設計で最適化すれば、ポンプの効率を向上することができる。また、医療機器などで数マイクロリットルの溶液の搬送および攪拌が必要とされており、これらの機器への応用に向けた取り組みも開始する。