

コイル状ステータ超音波モータ駆動用の水熱合成 PZT 多結晶膜振動子の開発

Development of Hydrothermally Synthesized PZT Polycrystalline Film
Transducers for CS-USM (Coiled Stator Ultrasound Motor)

阿部 峻靖¹・守屋 正²・入江 喬介²・竹内 真一¹

(2013 年 9 月 27 日 受理)

1. はじめに

近年、医療分野においてアテレクトミーや血管内超音波 (IVUS: Intravascular Ultrasound) などの小型デバイスを用いた血管内治療が著しい発展を続けている。血管内治療は低侵襲な治療が可能であり患者への負担を軽減でき、冠動脈疾患の治療などに用いられている。しかし、実用化されている回転駆動を行う血管内治療機器は体外に駆動源を持つため、長く蛇行した血管内を経て動力を伝える必要がある。その際動力を伝えるためのワイヤに負荷が掛り、負荷によるワイヤの破損を防止するために使用時間に制限が生じる。また、一般的に用いられている機械走査式 IVUS 装置では体外に設置したモータが駆動源となりカテーテル自体が回転するため、冠動脈の屈曲などにより途中で摩擦が生じると回転が不均一となり、画像歪み (NURD: Non Uniform Rotation Distortion) が生じることがある^[1]。

守屋らは医用応用を目的とした、超小型の超音波モータであるコイル状ステータ超音波モータ (CS-USM: Coiled Stator Ultrasound Motor) の開発を行ってきた^[2-4]。超音波モータであるため、電磁モータのように磁石やコ

イルの必要が無く小型化が可能である。また、CS-USM は構造が非常にシンプルな超音波モータであるため、これまでに外径 1mm 以下のモータが作製されている^[5-6]。CS-USM のさらなる小型化、高効率化の為に、超小型の振動子が求められている。

我々は CS-USM の小型化及び高効率化を目指し、素材がチタンであれば複雑な形状や微小なものにも成膜可能な圧電素子である水熱合成 PZT 多結晶膜に着目した^[7]。チタン細線の周囲に水熱合成 PZT 多結晶膜を成膜し振動子とすることで CS-USM 駆動用の振動子と成り得るのではないかと考えた。今回、水熱合成 PZT 多結晶膜を用いた振動子で CS-USM の駆動を確認したので報告する。

2. CS-USM の駆動原理

CS-USM は、進行波型超音波モータの動作原理に基づくものである。音響導波路に進行波が伝搬するとき、進行波は時間とともに進行する波であり、音響導波路表面の粒子の垂直方向の運動軌跡 $v_1(x, t)$ は式 (1)、

$$v_1(x, t) = A \cos(\omega t - kx), \quad (1)$$

Toshinobu ABE¹, Tadashi MORIYA², Takasuke IRIE², Shinichi TAKEUCHI¹

1. Faculty of Engineering, Toin University of Yokohama
1614 Kurogane-cho, Aoba-ku, Yokohama, Kanagawa, 225-8502, Japan

2. Microsonic Company Limited

3-10-18, Honchou, Kokubunji, Tokyo 185-0012, Japan

となる。この時 A は振幅、 k は波数、 x は媒質状の位置、 w は角周波数、 t は時間をそれぞれ表す。ロータの周りに巻かれたステータに屈曲波が伝搬すると、ロータに接する面の粒子は屈曲波の進行方向と逆方向の楕円運動をする。このとき摩擦力により、ロータは屈曲波の伝搬方向と逆方向に駆動される。音響導波路の先端部をコイル状にしたものがステータとして用いられているため、ロータに駆動力を与える範囲が広く、単位長さ当たりの駆動力が小さいままで大きな駆動力を与えることが可能となる^[3]。また、CS-USM は振動子、音響導波路、ロータによって構成され、構造がシンプルであるため小型化も期待できる。CS-USM の駆動原理を図 1 に示す。

3. 水熱合成法 PZT 多結晶膜振動子

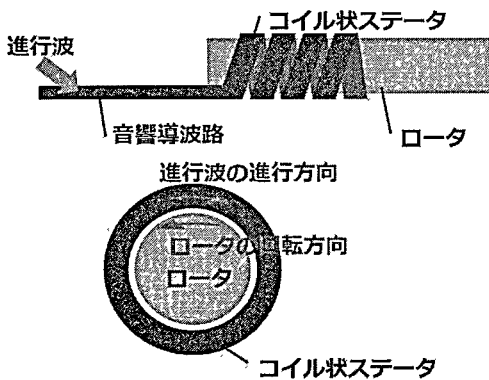


図 1 CS-USM の駆動原理

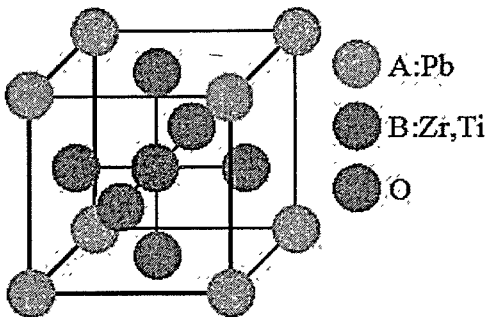


図 2 ペロブスカイト型結晶構造 (一般組成式 ABO_3)

3.1. 水熱合成法について

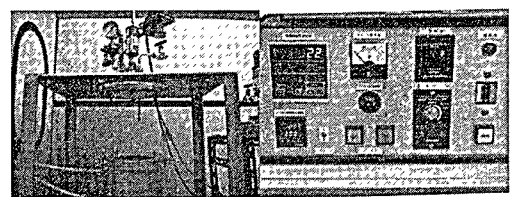
水熱合成法とは、高温高压の状況にある水溶液から結晶を析出させる方法である^[8]。大気圧下では水が気体となって存在する温度でも、高压下では液体のまま存在する。この為、高温高压下での化学反応において大気圧下では実現できない反応結果や、結晶の成長を行うことができる。

水熱合成法を利用し、水晶やルビー、様々な無機化合物が生成され、工業的にも利用されている。その中でペロブスカイト構造 (ABO_3) の結晶体を形成する水熱合成反応を利用し、圧電性結晶である PZT^[9]、 $BaTiO_3$ ^[9] などの合成が報告されている。PZT は図 2 に示すペロブスカイト型結晶構造 (一般組成式 ABO_3) をとる。B が O を 6 配位する表示法である (A イオンが頂点に、酸素イオンは面心に、B イオンは体心にある構造)。

3.2. 水熱合成 PZT 多結晶膜の成膜プロセス

水熱合成 PZT 多結晶膜を成膜する場合、高温高压下において反応を行う為、温度と圧力の管理を行う必要がある。当研究室では耐圧硝子工業 (株) 製の水熱合成装置とその制御パネルを使用して、PZT 多結晶膜の合成を行っている。図 3 (a) に水熱合成装置を、図 3 (b) に水熱合成装置制御パネルを示す。

本研究における水熱合成では、出発原料として $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O_{aq}$ (0.25 mol/l) 90ml、 $Pb(NO_3)_2_{aq}$ (0.5mol/l) 150ml、 KOH_{aq} (4mol/l) 300ml 及び表面処理をしない平均粒径 300nm のルチル型 TiO_2 微粒子 1g からなる懸濁液を用いて行う。この懸濁液をポリテトラフルオロ

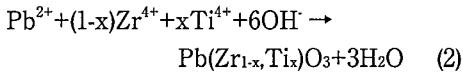


(a) 水熱合成装置

(b) 水熱合成装置の制御パネル

図 3 当研究室で使用している水熱合成システム

エチレン製容器に入れ、チタン基板上に PZT 多結晶膜を形成させた。この水熱合成は、次式に従って反応し、PZT 多結晶が生成する^[10]。



式 (2) における Pb^{2+} 、 Zr^{4+} イオンは、出発原料溶液から供給され、 Ti^{4+} イオンは出発原料溶液中の TiO_2 微粒子およびチタン基板から溶出して供給される。このチタン基板から溶出した Ti^{4+} イオンと Pb^{2+} 、 Zr^{4+} 及び O^{2-} イオンとが反応して、PZT 結晶核が基板界面に形成される。この際の鉱化剤として 4mol/l の水酸化カリウム水溶液を用いた。本研究における水熱合成法は、2 種類のプロセスから成り立っている。最初にチタン基板と水溶液の合成反応で基板に結晶核の生成が行われる。次に、その生成した結晶核と水溶液の合成反応により結晶を成長させる。チタン基板上に最初の結晶核を生成させる過程を 160℃ で実施する結晶核形成プロセス (NC: Nucleation process) とし、その結晶を成長させる過程を 140℃ で実施する結晶成長プロセス (CG: Crystal growth process) とする。CG を繰り返すことにより厚膜化が行われる。

3.3. CS-USM 駆動用の水熱合成 PZT 多結晶膜振動子の作製

作製した水熱合成 PZT 多結晶膜振動子は、当研究室において成膜実績のあるチタン基板上に PZT 多結晶膜を成膜した板状振動子と CS-USM 駆動用振動子の小型化を目指した円柱状の振動子の 2 つを作製した。板状振動子については、厚さ 50μm のチタン基板を 10 × 20mm に切断したものに対して両面に PZT 多結晶膜の成膜を行い、表面に導電性ペーストを塗布することにより電極を取り付けている。円柱状振動子については、φ 0.3 × 25mm のチタンワイヤの周囲に PZT 多結晶膜の成膜を行い、スパッタリング装置を用いて電極を取り付けている。今回使用した振

動子は水熱合成の NC を 1 回、CG を 5 回行った PZT 多結晶膜の成膜を行っている。図 4 (a) に示すようにチタンワイヤの全面に成膜された PZT 多結晶膜が確認できる。板状振動子、円柱状振動子ともに形成された膜厚はおおよそ 10 ~ 15μm である。図 4 (b) にチタンワイヤに成膜された PZT 多結晶膜の拡大画像を示す。

4. 水熱合成 PZT 多結晶膜振動子を用いた CS-USM の作製

CS-USM の構成は大きく分けてロータ、コイル状ステータ、振動子の 3 つの要素に分けられる。

CS-USM を駆動させると、ロータが回転運動をしながら前後方向への移動を行うため、本実験ではロータの前後方向への移動を防ぎ保持を行うために、ロータの一部にくぼみを設けた形状に加工したものを使用し、その部

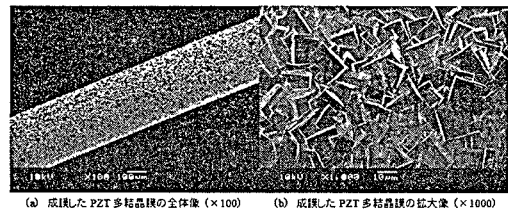


図 4 チタンワイヤ上に成膜した PZT 多結晶膜の SEM 画像

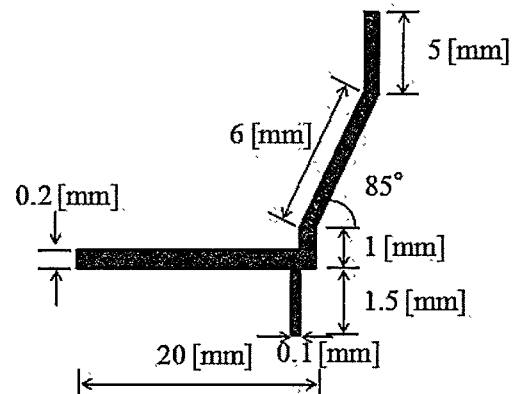


図 5 CS-USM 用音響導波路の構造

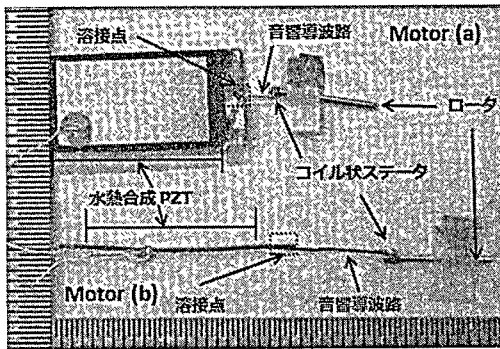


図6 作製したCS-USM

分にコイル状ステータを接触させてストッパーとして用いている。ロータの寸法は $\phi 0.6\text{mm}$ （くぼんだ部分は $\phi 0.4\text{mm}$ ） $\times 10\text{mm}$ であり、素材はSUS304を用いている。

コイル状ステータ音響導波路の構造を図5に示す。音響導波路の一部に角度設けることで、音響導波路をコイル状に成型しやすくしている。ロータに音響導波路を押しあてながらコイル状に成型していく。音響導波路の素材はPZT多結晶膜を成膜する基板と同様のチタンである。

振動子については水熱合成法を用いて作製したPZT多結晶膜振動子を用いる。板状の振動子を用いて作製したCS-USMをMotor (a)、円柱状の振動子を用いて作製したCS-USMをMotor (b)とする。作製したCS-USMを図6に示す。

5. CS-USM 駆動実験

CS-USMの駆動確認及び回転速度の測定を行った。測定条件を一定にするために、振動子端面を強固に固定している。ハイスピードカメラ（CASIO, EX-FC200S）を用いて、最も回転速度の速い周波数を駆動周波数として選定し、駆動電圧を変化させながら回転速度の変化を記録した。駆動条件はMotor (a)は周波数16.8kHz、Motor (b)は周波数50.6kHzで駆動し、どちらも駆動信号は連続正弦波を用い、回転し始めた駆動電圧から記録を行っ

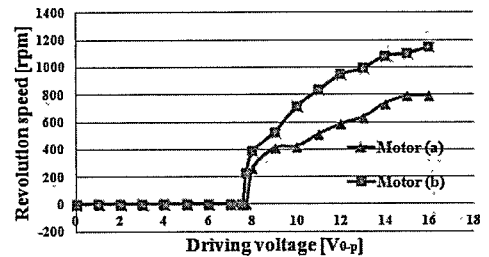


図7 CS-USMの駆動電圧と回転速度の関係

ているMotor (a)では最大で789rpmを記録し、Motor (b)では最大で1152rpmを記録した。測定結果を図7に示す。

6. まとめ

水熱合成PZT多結晶膜を用いて作製した振動子を取り付け、コイル状ステータ超音波モータの駆動を確認した。回転速度の測定の結果、Motor (a)では最大で789rpmを記録し、Motor (b)では最大で1152rpmを記録した。どちらのCS-USMでも現在の回転速度では血管内治療に用いるデバイスへの応用が難しいため、今後PZT多結晶膜の成膜方法を見直して駆動の効率化、回転速度の上昇を目標にCS-USMの作製を行っていく。また、CS-USMのトルク測定の方法を検討する。

謝辞

本研究にあたりモータ駆動回路の設計にご協力頂きました、職業能力開発総合大学の五十嵐茂先生に感謝致します。

【参考文献】

- [1] 山本真功, 清野精彦, 水野杏一: 日医大会誌5 [2], 2009, pp.75-77
- [2] 守屋正, 古川勇二, 赤野洋一, 中島明平: 信学技報US2005-29, 2005, p.41
- [3] 田邊将之, 謝尚平, 田川憲男, 守屋正: Proc. Symp. Ultrason. Electron. Vol.27, 2006, pp.121-122

- [4] T. Moriya, T. Irie, M. Sato : Proc. of Ultrason. Electro, 33 , 2012, p.477
- [5] 守屋正, 古川勇二 : 日本機械学会誌 Vol.110 No.1058, 2007.1, pp.22-25
- [6] 篠原潤, 鈴木誠, 春日政雄, 古川勇二, 廣田輝直 : マイクロメカトロニクス (日本時計学会誌) Vol.52 No.199, 2008, pp.58-61
- [7] M. Shiiba, T. Uchida, T. Kikuchi, M. Ishikawa, N. Kawashima, S. Takeuchi : Jpn. J. Appl. Phys 50, 07HE02, 2011, pp.283-286
- [8] K. Shimomura, T. Tsurumi, Y. Ohba and M. Daimon : Jpn. J. Appl. Phys. 30, 1991, p.2174.
- [9] M. Yoshimura, S. Yoo, M. Hayashi and N. Ishizawa : Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 28 , 1989, pp.2007-2009
- [10] T. Morita, T. Kanda, Y. Yamagata, M. Kurosawa and T. Higuchi : Jpn. J. Appl. Phys., vol.36, part1, no.5B, 1997, pp.2998-2999