

血管内超音波診断を目的としたアウターロータ型 コイル状ステータ超音波モータの基礎検討 ——アウターロータの回転速度特性に関する検討——

Basic study on the outer rotor type Coiled Stator UltraSound Motor for
intravascular ultrasound:
Consideration on the characteristics of revolution speed

栗田 恵亮¹・上原 長佑¹・大関 誠也²・竹内 真一¹

¹ 桐蔭横浜大学 医用工学専攻 工学研究科

² つくば国際大学 医療保健学部 医療技術学科

(2017年3月18日 受理)

I. はじめに

平成28年(2016年)12月に厚生労働省より公表された人口動態統計によると心疾患は悪性新生物に次ぎ、日本人の主な死因第2となっている。2015年の確定数ではその数は19万6,113人にもおよび死者数全体の15.2%を占めている。そのうち73.2%が冠動脈疾患によるものである¹⁾。Figure 1に心疾患での死者数の内訳を示す。冠動脈疾患の治療法として薬物療法に加え冠動脈インターベンション(PCI: Percutaneous Coronary Intervention)や冠動脈バイパス手術(CABG: Coronary Artery Bypass Grafting)が行われている。とくにわが国では、CABGにくらべPCIの施行数は多く、10倍以上と言われている。その要因として、全身麻酔に胸骨正中切開、人工心肺を用いた心肺停止など侵襲の大きいCABGに比べ、PCIはカテーテル穿刺部位の局所麻酔だけで実施できることが大きいと考えられる。現在、PCIにはバル

ーンやステント、ロータブレードといった様々なデバイスが用いられている。中でもロータブレードや血管内超音波検査(IVUS: Intravascular Ultrasound)に用いられるデバイスは回転駆動を行う。しかし、これらのデバイスは駆動源からワイヤを介して動力を伝達しているためワイヤに負荷が掛かり、不均一な回転むらを生じることがある。さらに、ロータブレードは駆動に窒素ガスを使い、200,000 rpm以上もの回転数を必要とする為、駆動音が大きく、患者に精神的ストレスを与

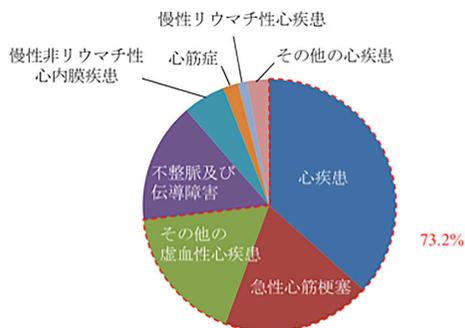


Figure 1 2015年日本における心疾患での死者数の内訳

¹ KURITA Keisuke, UEHARA Choyu, TAKEUCHI Shinichi : Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama. 1614, Kuroganecho, Aoba-ku, Yokohama 225-8503, Japan

² OZeki Seiya : Faculty of Health Sciences, Department of Medical Care Technology, Tsukuba International University. 6-20-1 Manabe, Tsuchiura-shi, Ibaraki-ken 300-0051, Japan

えていると考えられる。これらの問題を解決するために小型で静音なモータの開発が行われてきた²⁾。

当研究室ではこれまでに、圧電セラミックス振動子および水熱合成法により製膜したPZT振動子を用いてコイル状ステータ超音波モータ (CS-USM : Coiled Stator Ultra-Sound Motor) の作製を行ってきた³⁻⁵⁾。しかし、これまでに作製してきたCS-USMは回転軸に対して振動子が垂直に位置し、血管内に挿入することが困難であった。そこで、本研究では回転軸と振動子が同軸上に位置する形状のCS-USMを作製したので報告する。

II. CS-USM

1. CS-USM とは

CS-USMは血管内治療機器および検査機器への応用を目的として2005年に守屋正氏らにより開発された²⁾。これはコイル状の音響導波路をステータとし、ロータを進行波により回転させる進行波型の超音波モータである。進行波型超音波モータの中でも構造がシンプルであるため小型化が有利であり、さらにコイル状のステータにより、ステータ内外どちらにも回転体を配置することが可能である。そのため、血管内治療機器および検査機器への応用が期待されてきた。これまでに、ヘリカルコイル状のステータを用いてステータ外側に配置されたロータに画像化用の超音波トランスデューサを搭載したIVUSシステムの開発も行われ、臨床での実用化が示唆された⁶⁾。

2. 駆動原理

進行波とは時間とともに進行する波である。進行波を伝える媒質である音響導波路上には表面粒子が存在する。進行波が伝わった時の表面粒子の運動軌跡 $v_t(x, t)$ は、

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

と表すことができる。この時、 A は振幅、 k

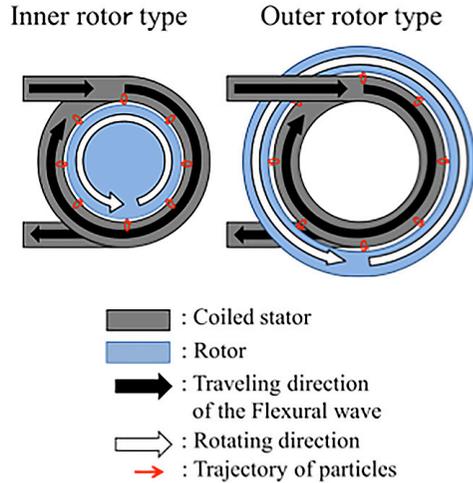


Figure 2 CS-USMの駆動原理

は波数、 x は粒子の位置、 ω は角周波数、 t は時間をそれぞれ表している。進行波が音響導波路上を伝搬するとき、音響導波路表面上の粒子の軌跡は楕円を描く。この時、回転体が与圧によって音響導波路に押しえつけられている状態であれば、音響導波路表面に発生した粒子の楕円運動によって、移動体を引掻くような運動が生まれ、発生した摩擦力によって移動体を進行波とは逆方向に駆動させる⁷⁾。Figure 2にCS-USMの駆動原理を示す。

III. 実験

1. CS-USMの作製

Figure 3の形状に打ち抜き加工を施したステンレス製 (SUS304) の板材を音響導波路として使用した。コイル状ステータ作製にはファインテクノ社製のステンレスパイプ (SUS304) を使用し、巻き付け後に熱処理を施すことで形状の固定を図った。振動子には富士セラミックス社製の圧電セラミックス (C213) を使用した。

今回作製を行ったCS-USMは、1つの振動子により駆動を行う「単振動子型」と呼ばれるものである。単振動子型は今回の形状にする際に、振動子を2つ使用する二振動子型

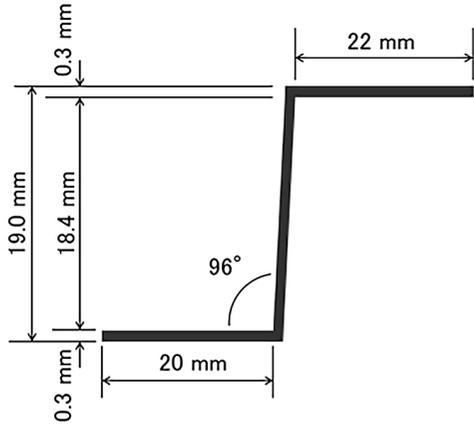


Figure 3 96° Z型音響導波路 (SUS304)

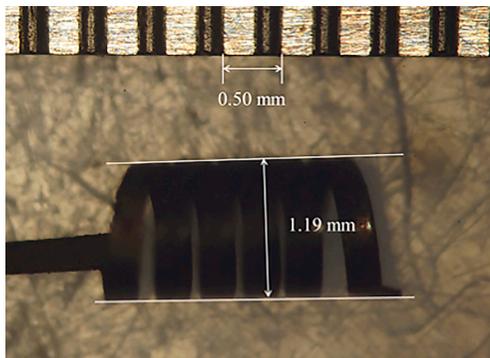


Figure 4 作製したCS-USMの
コイル状ステータ部分

に比べ作製し易いことが大きな特徴である。作製したCS-USMのコイル状ステータ部分を Figure 4 に示す。

2. 駆動実験

次に作製したCS-USMを用いて駆動実験を行った。アウターロータは測定用に反射マークを張り付けた内径1.25 mm、外径1.61 mmのステンレス (SUS304) パイプを使用した。まず、周波数の変化におけるステータ表面上の振動速度およびアウターロータの回転速度を測定するために小野測器社製のレーザードップラー振動計LV-1710および光電式回転検出器FG-1300を用いた。Figure 5、6に駆動実験のセットアップ図を示す。設定周波数の範囲は250～350 kHzとして1 kHzごとに100回ずつ測定を行った。次に、印加

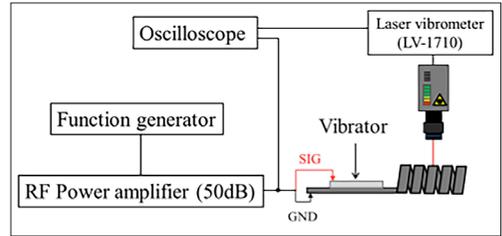


Figure 5 振動速度測定の設定アップ図

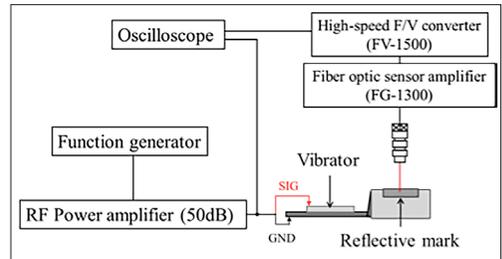


Figure 6 回転速度測定の設定アップ図

電圧とステータ表面上の振動速度およびアウターロータの回転速度の関係を測定した。印加電圧の範囲は4～60 V_{pp}として約4 V_{pp}毎に100回ずつ測定を行った。

3. 結果

上記の駆動実験における測定結果を Figures 7～10 に示す。このとき、印加電圧とは、オシロスコープを用いて測定した振動子両端の電圧を意味する。回転方向はコイルの巻き付け方向と同一方向を順方向回転とし、としてハイスピードカメラCASIO EX-FC200Sを用いて撮影し確認を行った。

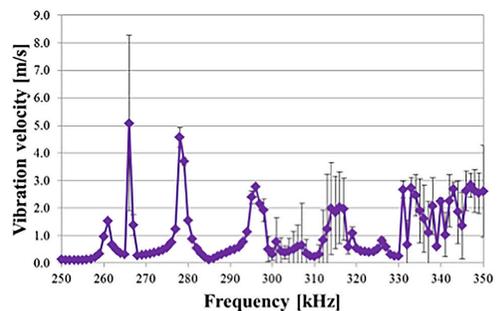


Figure 7 コイル状ステータ表面の
振動速度の周波数特性

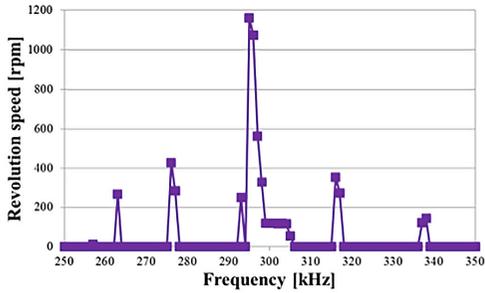


Figure 8 アウターロータの回転速度の周波数特性

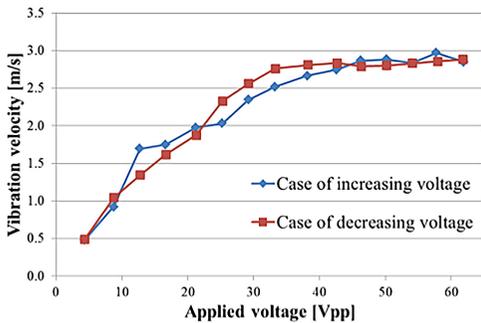


Figure 9 印加電圧とコイル状ステータ表面上の振動速度の関係に関する測定結果

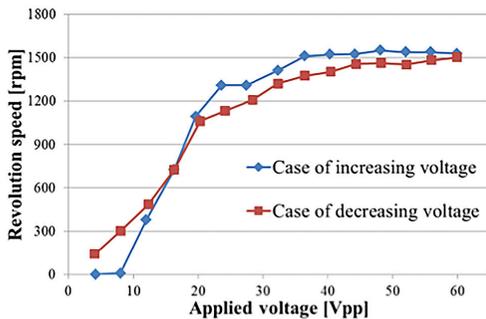


Figure 10 印加電圧とアウターロータの回転速度の関係に関する測定結果

IV. まとめ

今回作製したCS-USMのコイル外径は1.20 mmであった。アウターロータも含めると1.61 mmとなり、実際に使用されているIVUSカテーテルの直径約1 mmに近づけることが出来た。駆動実験の結果から、駆動周波数とステータ表面上の振動速度および回転速度には複数のピークが見られ、これら

のピークの周波数はほぼ同じであった。しかし、最大振動速度が示した点と最大回転速度を示した点は異なっていた。このことからコイル状ステータとロータ間の接触が大きく関係していると考えられる。

また、印加電圧と振動速度および回転速度の関係に関する測定では、印加電圧の上昇に伴い振動速度および回転速度の上昇が確認された。しかし、40 Vpp付近からは飽和傾向を示していた。

今後は、駆動周波数と振動速度および回転速度の測定において見られたピークについて詳しく調査するとともに、コイル状ステータとロータ間の与圧の設計および調整方法を検討していきたい。

謝辞

本研究を進めるきっかけを与えてくださりました首都大学東京 名誉教授 守屋正先生、マイクロソニック株式会社 社長 入江喬介先生ならびに熊本大学（当時：首都大学東京）の田邊将之先生に深く感謝致します。

【参考文献】

- 1) 厚生労働省, 人死因簡単分類別にみた性別死亡数・死亡率 (人口10万対), 厚生労働省
- 2) 守屋正, 古川勇二, 赤野洋一, 中嶋 明平, “コイル型ステータを用いる超小型超音波モータの実験的検討”*IEICE Technical Report US2005-29*, July 2005, pp.41-45.
- 3) T. Abe, S. Oki, T. Moriya, T. Irie, and S. Takeuchi, *Spring Meeting Acoustical Society of Japan* 1289-1290, 2013 [in Japanese].
- 4) S. Ozeki, M. Kurosawa, and S. Takeuchi, *Autumn Meeting Acoustical Society of Japan* 1303-1304, 2014 [in Japanese].
- 5) C. Uehara, S. Ozeki, and S. Takeuchi, *Spring Meeting Acoustical Society of Japan* 1233-1234, 2016 [in Japanese].

- 6) Masayuki Tanabe, Shangping Xie, Norio Tagawa, Tadashi Moriya, and Yuji Furukawa, “Development of a Mechanical Scanning-type Intravascular Ultrasound System Using a Miniature Ultrasound Motor” *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 46, No. 7B, 2007, pp. 4805–4808
- 7) 高塚公朗, “進行波型超音波モータの駆動メカニズム——反転挙動の解明——” 福井工業大学研究紀要, Vol. 30, March 2000, pp.113–120.