

令和 2 年 8 月 18 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03188

研究課題名（和文）低電圧高出力な半球殻状超音波トランスデューサの開発

研究課題名（英文）Hemi-spherical ultrasonic trasducer producing high power at low voltage

研究代表者

梅村 晋一郎 (Umemura, Shin-ichiro)

東北大学・医工学研究科・学術研究員

研究者番号：20402787

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,000,000円

研究成果の概要（和文）：超音波治療や結石破碎の効率を飛躍的に高める音響キャビテーションを発生させるためには、著しく高い音圧の短い超音波パルスが有効である。これを、従来の厚み振動に基づく圧電変換器により生成しようとする、必要な駆動電圧がMOSFETの限界に達してしまう。本研究では、この課題を解決することを目的に、同半径の薄い圧電球殻と水玉がほぼ同じ周波数で共振することを利用する球殻型変換器を提案してきた。さらに、この考え方を発展させ、同半径の薄い圧電円筒と水円柱がほぼ同じ周波数で共振することを利用する円筒型変換器を提案し、数値計算による原理確認の後、試作し、音圧出力/駆動電圧の比が、実用範囲にあることを確かめた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

同半径の薄い圧電球殻と水玉の共振や、薄い圧電円筒と水円柱の共振を、電気的インピーダンスの低い圧電変換器を実現するのに利用することは、考え方として新規である。本研究の成果により実現される圧電変換器は、音圧出力/駆動電圧の比が優れているため、汎用半導体により構成されたアンプを用いて駆動することにより、超音波治療や結石破碎の効率と適用症例範囲を飛躍的に高める音響キャビテーションを生成できるようになる。これは、有用性の大きな医療機器の実用化に寄与するところ大である。

研究成果の概要（英文）：A short ultrasonic pulse at an extremely high pressure is effective to generate acoustic cavitation, which remarkably enhances the efficiency of ultrasonic therapy and lithotripsy. However, if it is for a conventional thickness mode piezoelectric transducer, the required driving voltage may almost exceed the limit of MOSFETs. To overcome this problem, we have suggested a spherical transducer utilizing the co-resonance between a piezoelectric spherical shell and a water sphere. We are further suggesting a cylindrical transducer utilizing the co-resonance between a piezoelectric cylindrical shell and a water cylinder. Its principle was confirmed by a numerical simulation, and a prototype transducer was constructed, which proved that the ratio of acoustic output / driving voltage was in a realistic range.

研究分野：医用超音波

キーワード：音響キャビテーション 圧電トランスデューサ 超音波治療 結石破碎

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

強力超音波治療の効率と適用範囲を飛躍的に高める音響キャビテーションを、精度よく発生させるためには、著しく高い音圧の短い超音波パルスが有効である。また、このようにして生成した音響キャビテーションは、尿路結石の破碎にも有効であることが知られている。しかし、これを、従来の厚み振動に基づく圧電超音波トランスデューサにより生成しようとする、必要な駆動電圧が汎用パワーMOSFETの限界である数百Vに達してしまい、問題であった。

2. 研究の目的

本研究では、上記の課題を原理的に解決することを目的とする。すなわち、汎用パワーMOSFETで可能な範囲の電圧で駆動することにより、音響キャビテーションを精度よく生成できる高い音圧を発生することのできる圧電超音波トランスデューサを提示することを目的とする。

3. 研究の方法

まず、課題を原理的に解決するために、圧電変換の原理を考察し、電界あたりの機械的変位を大きくする圧電変換器構成を案出する。次に、その圧電変換器構成について、動作の物理を近似的に解析し、見通しを得る。さらに、その圧電変換器を具体的に設計し、数値計算シミュレーションを用いて、その動作特性を検討し、実効性を確認する。最後に、それらの検討に基づいて圧電変換器素子を試作し、実現性を確認する。

4. 研究成果

(1) 課題解決の原理

圧電体の機械的変位は、圧電体を構成する格子の変形にもとづき、圧電体の電気変位は、その格子に束縛されたイオンの変位にもとづく。従って、上記課題を解決するため、単位電界あたりの電気変位を大きくするには、単位電界あたりの機械的変位が大きくなるような圧電体の構成を選べばよい。

圧電体の共振点付近では、圧電体への電気または機械的刺激に対する電気または機械的変位が大きくなる。この現象は、多くの圧電トランスデューサに利用されている。本研究では、この共振現象を強調する圧電体の構成を新規に考案し、印加電圧あたり超音波出力の大きな圧電トランスデューサを実現する方針とする。

水の球と圧電球殻の共振

圧電体の薄い球殻の径方向振動は、その半径 r 方向の変位を u とおくととき[1]のように近似できる。

ここで、 ρ 、 E 、 σ は、それぞれ、圧電体の密度、ヤング率、ポアソン比である。圧電体は、弾性体としては等方的であると近似した。[1]より共振周波数 f_0 は[2]のように与えられる。これに、圧電セラミックの代表的材料定数を代入すると [3]となる。

生体軟部組織の音響インピーダンスが水に近いため、圧電トランスデューサと生体とのカップリングには、水または音響インピーダンスが水に近い媒質が用いられる。そこで、上記の球殻に内包させる水の球の径方向振動を考える。[1]と同じく、半径 r 方向の変位 u は [4]をみたく。ここで、 k は波数、 m は非負の整数である。解が、原点 $r=0$ において特異的でないためには、 $r=0$ において $u=0$ である必要がある。[4]をみたくこのような解のうち波長の長い解は、[4]において、 $m=1$ とおくことにより、[5]のように与えられる。この振動において、原点 $r=0$ に最も近い腹および節の位置 r は、それぞれ $kr=2.07$ および 4.49 により与えられる。すなわち、十分に柔らかい殻や十分に硬い殻に内包されたときの最小の共振周波数 f_0 の範囲は[6]により与えられる。さらに、水の音速 c_w に値を代入すると、[7]が得られる。[3]と[7]を見比べると、同一の半径 r をもつ圧電体の球殻と水の球が、同一の周波数で共振する可能性が示唆される。この共振現象を利用すれば、印加電圧あたり超音波出力の大きな圧電トランスデューサを実現できる可能性があることがわかる。

水の円柱とセラミックの円筒の共振

圧電体の薄い円筒殻の径方向振動は、その半径 r 方向の変位を u とおくととき、[8]のように近似できる。[8]より共振周波数 f_0 は[9]のように与えられる。これに、圧電セラミックの代表的材料定数を代入すると [10] となる。

この円筒殻に内包させる水の円柱の径方向振動を考えると、半径 r 方向の変位 u は [11]をみたく。ここで、 m は非負の整数である。解が、原点 $r=0$ において特異的でないためには、 $r=0$ において $u=0$ である必要がある。[11]を満たすこのような解のうち波長の長い解は、[11]

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{2E}{1-\sigma} \cdot \frac{u}{r^2} = 0 \quad [1]$$

$$f_0 r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{2}{1-\sigma}} \quad [2]$$

$$f_0 r = 760 \text{ m/s} \quad [3]$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \left(k^2 - \frac{m(m+1)}{r^2} \right) u = 0 \quad [4]$$

$$u = \frac{u_0}{\sqrt{kr}} \left(\frac{\sin kr}{kr} - \cos kr \right) \quad [5]$$

$$f_0 r / c_w = 0.329 - 0.715 \quad [6]$$

$$f_0 r = 494 - 1073 \text{ m/s} \quad [7]$$

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{E}{1-\sigma^2} \cdot \frac{u}{r^2} = 0 \quad [8]$$

$$f_0 r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{1-\sigma^2}} \quad [9]$$

$$f_0 r = 470 \text{ m/s} \quad [10]$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \left(k^2 - \frac{m}{r^2} \right) u = 0 \quad [11]$$

において、 $m=1$ とおくことにより、ベッセル関数を用いて[12]のように表される。この振動において、原点 $r=0$ に最も近い節の位置 r は、 $kr=3.83$ により与えられる。すなわち、十分に硬い殻に内包されたときの最小の共振周波数 f_0 は[13]で与えられる。さらに、水の音速 c_w に値を代入すると、[14]となる。一方、原点 $r=0$ に最も近い腹の位置 r は、 $kr=1.84$ により与えられる。すなわち、十分に柔らかい殻に内包されたときの最小の共振周波数 f_0 は[15]で与えられる。さらに、水の音速 c_w に値を代入すると、[16]となる。

$$u = u_0 J_1(kr) \quad [12]$$

$$f_0 r / c_w = 0.61 \quad [13]$$

$$f_0 r = 914 \text{ m/s} \quad [14]$$

$$f_0 r / c_w = 0.29 \quad [15]$$

$$f_0 r = 439 \text{ m/s} \quad [16]$$

[10][14][16]を見比べると、同一の半径 r をもつ圧電体の円筒殻と水の円柱が、同一の周波数で共振する可能性が示唆される。この共振現象を利用すれば、印加電圧あたり超音波出力の大きな圧電トランスデューサを実現できる可能性がある。

圧電体の球殻についても、円筒殻についても、その内側と外側の全面を電極とし、圧電セラミックの場合には、その電極を用いてポーリングすることにより、圧電軸を厚み方向とする構成をとることができる。この構成によれば、印加電圧あたりに圧電体に印加される電界を高くすることができる。上記の共振現象に加えてこの効果が相乗的に働き、印加電圧あたり超音波出力の大きな圧電トランスデューサを実現できると考えられる。

円筒型圧電トランスデューサは、水中超音波分野にて既に用いられていたが、上記の共振現象に着目したものはなかった。また、球殻型圧電トランスデューサは、可聴音分野にてツイーターとして用いられたことはあるが、伝搬媒質が音速の低い空気であるため、上記の共振現象に着目したものではなかった。

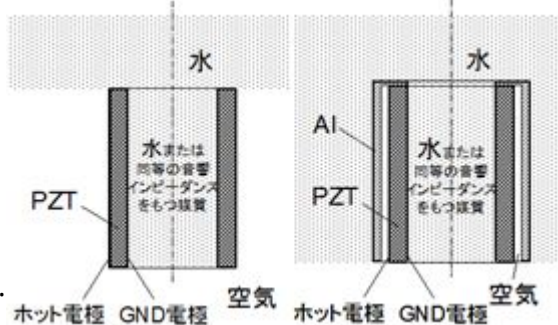
(2) 数値計算シミュレーション

有限要素法に基づく圧電シミュレーションコード PZFlex を用いて、球殻状圧電トランスデューサおよび円筒状圧電トランスデューサの実現性を、数値計算により検討した。球殻状圧電トランスデューサについては、すでに報告したので、ここでは、円筒状圧電トランスデューサについて報告する。

まず、図1のように、実用性を重視したシース入りと理想バツフル付きの円筒型トランスデューサのモデルを数値計算上構築し、比較した。中心周波数は

0.5 MHz 付近をねらった。電圧の自乗あたりの音響出力を長さ/内直径について図2にプロットした。圧電体の厚さ/内直径は0.2とした。シースの影響はあるものの、印加電圧 100 V あたり 1 kW 程度の大きな超音波出力が得られる見通しが得られた。

次に、シース入り円筒型トランスデューサについて、円筒厚さの効果を調べた。図3には、図2と同様、電圧の自乗あたりの音響出力を長さ/内直径についてプロットした。単純な予測では、一定の印加電圧における圧電体中の電界は厚さに反比例するので、厚さが薄いほど、電圧の自乗あたりの音響出力が大きくなるはずである。おおまかなには、そのような傾向がなくはないが、実際の現象は、より複雑であることが見て取れる。なお、図2よりも細かな凹凸が少ないのは、横軸における数値計算点の間隔が、図2よりも粗いためである。



(a) 理想バツフル付 (b) シース入り

図1. 円筒型トランスデューサの構造

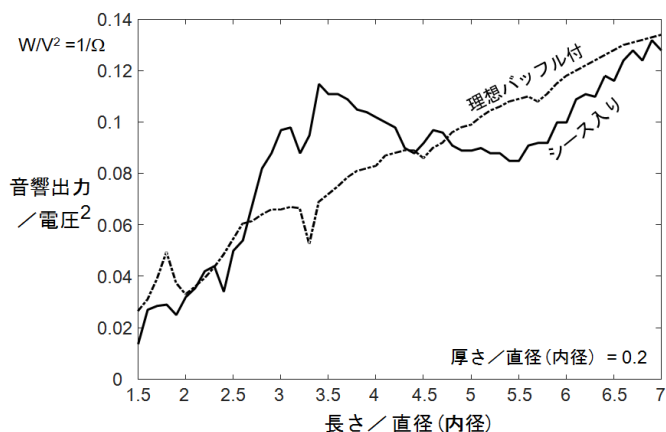


図2. 理想バツフル付とシース入り円筒型トランスデューサ

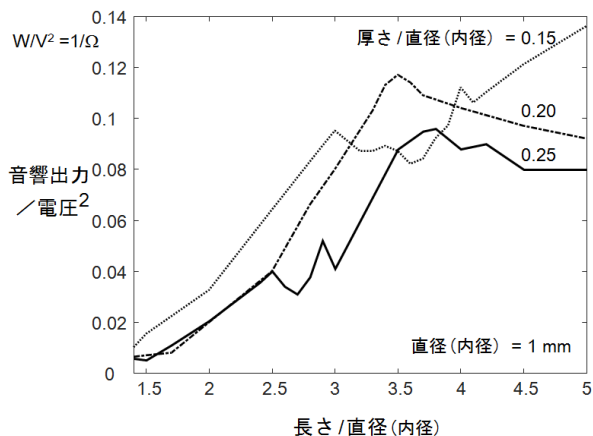
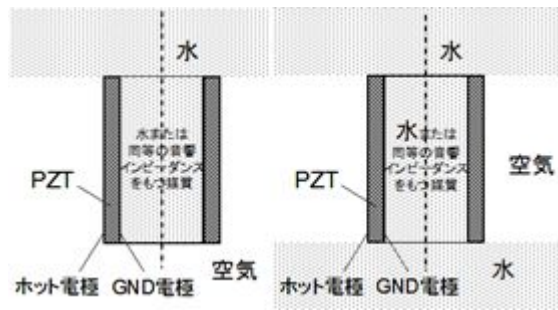


図3. 圧電体円筒厚さの効果

さらに、試作トランスデューサを用いた原理実験の準備として、図4のように、背面が空気の場合と水の場合について、数値計算上モデルを構築して比較した。圧電体の厚さ/内直径は0.2とした。電圧の自乗あたりの音響出力を長さ/内直径について図5にプロットした。背面が空気であっても水であっても、電圧あたりの超音波出力は、大きくは変わらないことがわかった。ただし、プロットした超音波出力は、水背面の場合、前面への出力と背面への出力の合計である。従って、前面への出力はその半分となる。



(a) 空気背面 (b) 水背面
図4. 空気背面および水背面トランスデューサ

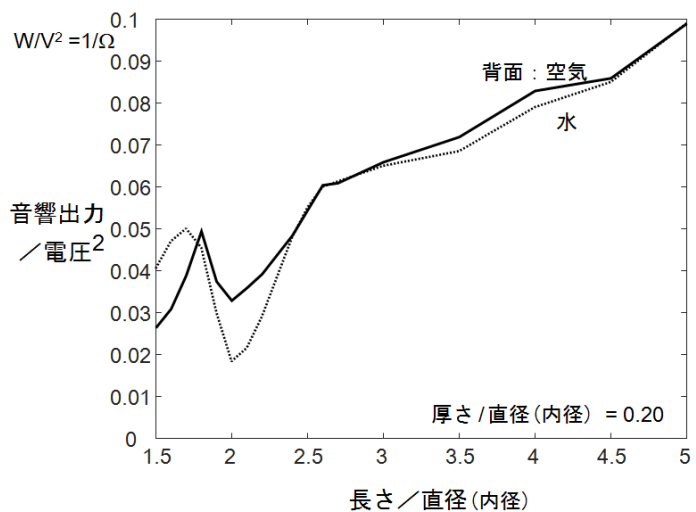


図5. 空気背面と水背面の比較

(3) 試作トランスデューサによる実験

前面・背面とも水に接する図4(b)のトランスデューサ構成であっても、図5に示したように超音波出力を評価できることがわかったので、原理実験を目的に、図6に示したような、実験における扱いが比較的容易な円筒型トランスデューサを試作した。

試作トランスデューサを空中においたときと水中に沈めたときのアドミタンス実部を周波数の関数として計測し、図7にプロットした。水中では、0.47~0.48MHzにおいて60~70Ωの低いインピーダンスが実現されている。空中と水中で共振周波数が大きくシフトしていることは、水中でトランスデューサと水と良くカップリングしていることを示唆する。

比較のため、図6のトランスデューサについて、PZFlexを用いて数値計算シミュレーションを行った結果を図8に示す。水中のアドミタンスについてみると、計測値は数値計算値の56%程度に留まった。一方、空中と水中での共振周波数のシフトは、実測値の方が数値計算値よりも大きかった。水中で電圧2V p-pにて駆動したときの音圧を計測したところ、前面のアルミバツフルから1/2波長(1.6mm)の点で音圧60kPa p-p、さらに1/4波長

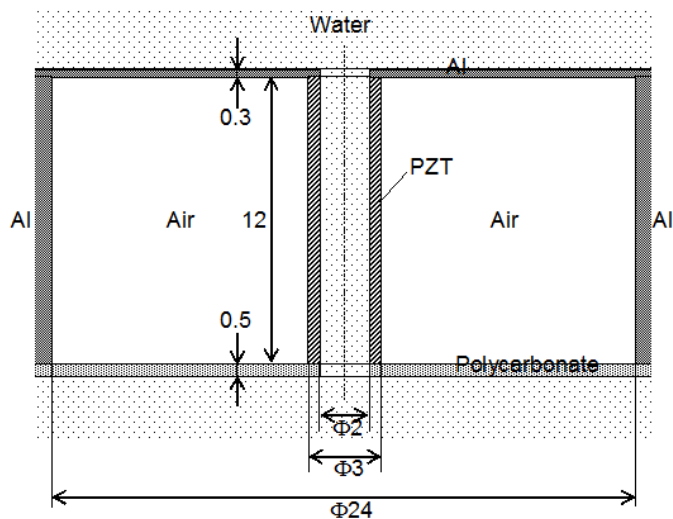


図6. 試作トランスデューサの構成

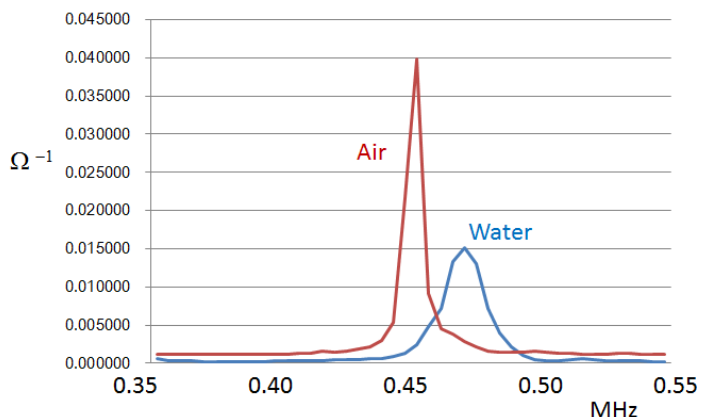


図7. 試作トランスデューサのアドミタンス実部計測値

まで近づけた点で最大音圧 70 kPa p-p が得られた。100 Vp-p にて駆動すれば, 3.5 MPa p-p が得られることになる。

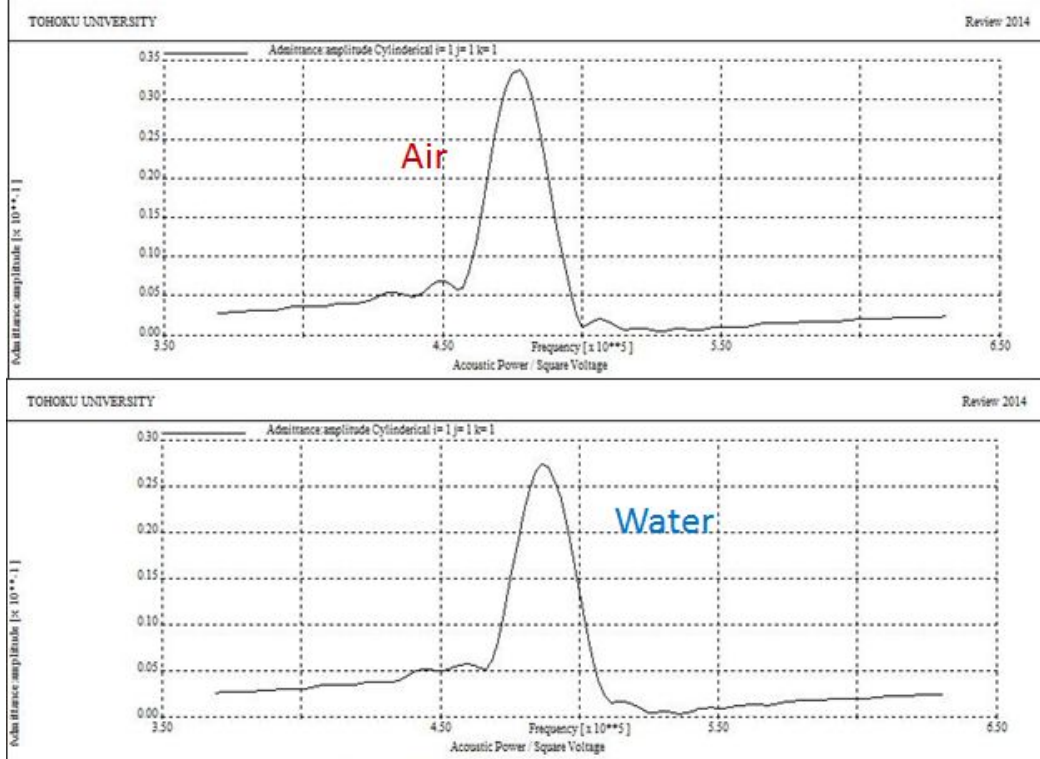


図 8. 数値計算シミュレーションによる試作トランスデューサのアドミタンス実部 ($\times 10\Omega^{-1}$)

(4) まとめ

印加電圧あたりの超音波出力の大きな圧電トランスデューサを実現するため、水の球に共振する圧電球殻トランスデューサに加え、水の円柱に共振する圧電円筒殻トランスデューサを考案した。有限要素法の数値計算シミュレーションを用いて、その原理を確認した上で、試作するトランスデューサの構成を決定した。試作したトランスデューサが、共振周波数において大きな電気的アドミタンスの実部をもつことを確認した。今後、キャビテーション生成に必要な音圧が、比較的低い印加電圧で得られることを確認する必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 9 件)

- Iwasaki, R., Nagaoka, R., Yoshizawa, S., Umemura, S.-I., “Selective detection of cavitation bubbles by triplet pulse sequence in high-intensity focused ultrasound treatment,” *Japanese Journal of Applied Physics*, 57(7),07LF12, 2018. 査読有
- Yura, T., Lafond, M., Yoshizawa, S., Umemura, S.-I., “Effect of annular focusing of ultrasound on rate of stone erosion using cavitation bubbles,” *Japanese Journal of Applied Physics*, 57(7),07LB18, 2018. 査読有
- Lafond, M., Asquier, N., Mestas, J.-L.A., Carpentier, A., Umemura, S.-I., Lafon, C., “Evaluation of a three-hydrophone method for 2-d cavitation localization,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 65(7), pp. 1093-1101, 2018. 査読有
- Yoshizawa, S., Takagi, R., Umemura, S.-I. “Enhancement of high-intensity focused ultrasound heating by short-pulse generated cavitation,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 7, no. 3, 2017. 査読有
- Tamano, S., Yoshizawa, S., Umemura, S.-I. “Multifunctional pulse generator for high-intensity focused ultrasound system,” *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 56, no. 7, 07JF21, 2017. 査読有
- Jimbo, H., Takagi, R., Taguchi, K., Yoshizawa, S., Umemura, S.-I. “Advantage of annular focus generation by sector-vortex array in cavitation-enhanced high-intensity focused ultrasound treatment,” *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 55, no. 7, 07KF19, 2016. 査読有
- Osuga, M., Yasuda, J., Jimbo, H., Yoshizawa, S., Umemura, S.-I. “Acceleration of lithotripsy using cavitation bubbles induced by second-harmonic superimposition,” *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 55, no. 7, 07KF18, 2016. 査読有
- Tamano, S., Jimbo, H., Azuma, T., Yoshizawa, S., Fujiwara, K., Itani, K., Umemura, S.-I. “Improvement of high-voltage staircase drive circuit waveform for high-intensity

therapeutic ultrasound,” Japanese Journal of Applied Physics, vol. 55, no. 7, 07KF17, 2016. 査読有

Zaini, Z., Osuga, M., Jimbo, H., Yasuda, J., Takagi, R., Yoshizawa, S., Umemura, S.-I. “Study on heavy matching layer transducer towards producing second harmonics,” Japanese Journal of Applied Physics, vol. 55, no. 7, 07KF15, 2016. 査読有

〔学会発表〕(計3件)

Umemura, S., Yasuda, J., Yoshizawa, S., “Cavitation Generating and Utilizing Exposure Sequence for Focused Ultrasound Treatment,” International Congress on Ultrasonics 2017, Honolulu, Dec. 20, 2017.

Umemura, S., Yasuda, J., Yoshizawa, S., “Generation of Localized Cavitation by Focused Traveling Wave for Ultrasonic Therapy,” International Symposium of Frontier Acoustics 2017, Shenzhen, Dec. 5, 2017.

Umemura, S., “Sonodynamic Therapy: from Sonodynamically Active Antitumor Agent to Cavitation Generating High-Intensity Focused Ultrasound Exposure System,” International Conference on Biomedical Engineering 2017, Hong Kong, Dec. 3, 2017.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称：超音波処置具

発明者：伊藤寛，梅村晋一郎，吉澤晋

権利者：オリンパス株式会社

種類：特許

番号：PCT/JP2019/007064

出願年月日：2019年2月25日

国内外の別：国外

取得状況(計0件)

〔その他〕

研究室ホームページ：<http://www.ecei.tohoku.ac.jp/ume/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：吉澤 晋

ローマ字氏名：YOSHIZAWA SHIN

所属研究機関名：東北大学

部局名：工学研究科

職名：准教授

研究者番号(8桁)：30455802

研究分担者氏名：高木 亮

ローマ字氏名：TAKGI RYO

所属研究機関名：国立研究開発法人産業技術総合研究所

部局名：生命工学領域

職名：研究員

研究者番号(8桁)：20771885

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：伊藤 寛

ローマ字氏名：ITO HIROSHI