高効率・高出力な静電駆動型空中超音波振動子の開発

神 垣 貴 晶*・二 宮 悠 基*・篠 田 裕 之*

Developing Electrostatically Driven Ultrasound Transducer with High Sound Intensity and High Energy Conversion Efficiency

Takaaki KAMIGAKI*, Yuki NINOMIYA* and Hiroyuki SHINODA*

This paper proposes an airborne ultrasound transducer driven with electrostatic force, which potentially enhances applications of airborne ultrasound. The proposed transducer can be fabricated by laminating flexible materials and can be formed as a sheet-like phased array device. As the first step, we fabricated a prototype of a single transducer. In experiments at 44 kHz, we obtained 55% electro-acoustic energy conversion efficiency and 8.7 Pa sound pressure at 20 cm from the circular sound source of 6.4 mm in diameter. These basic properties suggest that the proposed method enables a thin and light weight airborne ultrasound phased array that is usable in nonlinear acoustics applications.

Key Words: airborne ultrasound, electrostatic transducer, nonlinear acoustics, midair haptics, high efficiency

1. はじめに

本研究の最終的な目的は、非線形音響領域、特に、触覚提示にも利用可能な薄型の空中超音波フェーズドアレイを実現することである。

空中超音波フェーズドアレイは、空間中に任意波面の超音波を生成するデバイスであり、これまで各種計測¹⁾での利用だけでなく、非線形音響現象を用いたパラメトリックスピーカ²⁾としての応用や、気流の制御³⁾、微小物体のマニピュレーション⁴⁾、触覚提示^{5)~7)}など、幅広い用途での利用が検討されている。特に触覚提示、すなわちフェーズドアレイが生成する焦点での放射圧によって触覚を提示するシステムは、非接触で皮膚の自由な箇所を刺激できる方法として期待されているが、有意な触感生成のためには、音響パワー密度を十分高める必要がある。40 kHz 超音波を用いた現在の典型的な研究例においては、1 cm² の面積に 5 W 程度の音響パワーを集中している。たとえば 20 cm 角フェーズドアレイが 400 個の素子から構成されており、そのすべての放射パワーが 1 cm² に集中するとして単純計算すると、1 素子あたり 12.5 mW の音響出力が必要ということになる。このような出力が得られるフェーズドアレイは、本論文執筆時点において例外なく圧電セラミックスを用いた個別素子（圧電型素子）を配列することで実現されている。各素子は、空気とのインピーダンス整

合をとるために厚みを要する構造物の付加が必要であり、ある程度厚みと重量のあるデバイスとならざるを得ないのが現状である。

一方、基礎研究段階の薄型デバイスとして、MEMS 技術を用いた静電駆動型のデバイス⁸⁾や圧電性高分子を用いた手法⁹⁾が検討されている。MEMS 技術を用いた手法は、シリコンウェーハを用いているため、一体成型で大型化するためには多くの課題がある。また、圧電性高分子を用いた手法は、圧電係数が圧電セラミックスより小さく、高効率で強力音場を発生するデバイスの実現には至っていない。以上の理由により、空中用途において、非線形音響領域で使用可能な大面積一体型の薄型デバイスは、著者の知る限り、実現されていない。

そこでわれわれは、フレキシブルな材料の積層により製作可能な静電駆動型の薄型デバイスを提案している¹⁰⁾。振動膜に金属蒸着した数 μm 以下の高分子フィルムを用いれば、高効率に超音波を生成できることが理論的にわかっている。しかし、2 章で述べる問題により、その発生可能な音響出力には上限があり、少なくとも著者らの実験の範囲では、一般に市販されている圧電型素子に比べて 1 桁程度小さい音圧しか得られていなかった。本稿では、この問題を解決し、現在多くの空中超音波フェーズドアレイデバイスで用いられているものと同等の音響パワー出力が確認されたので、以下に報告する。

2. 静電駆動型における問題

Fig. 1 に静電駆動型超音波素子の基本構造を示す。振動膜には、あらかじめバイアス電圧 V_0 を印加し、振幅 V_1 の交流

* 東京大学大学院新領域創成科学研究科 柏市柏の葉 5-1-5

* Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa

(Received August 8, 2017)

(Revised November 22, 2017)

Fig. 1 Basic structure of electrostatic ultrasonic transducer

電圧の印加により生じる静電気力を駆動力とし、超音波を生成する。この基本構造のままでは、以下に示す二つの問題により、発生音圧を大きくすることが困難である。

2.1 電極間での放電

膜の質量と、Air layer として示される空気層とで共振系を構成し、機械的構造によるインピーダンスの効果を排除した後で達成される発生音圧の原理的な上限値は、膜に対する駆動力、すなわち、電極間の電界により決まる。発生音圧を大きくするには、極板間への印加電圧を高くすればよいが、放電しない範囲での印加にとどめる必要がある。平行平板間の放電開始電圧 V_S [kV] はすでに詳しく調べられており、平行平板間の間隔 D を用いて、以下のように表わされると報告されている¹¹⁾。

$$V_S = 23.85\delta D \left(1 + \frac{0.329}{\sqrt{\delta D}} \right) \quad (1)$$

$$\delta = \frac{0.289p_a}{273 + t} \quad (2)$$

ここで、 δ [-] は相対空気密度、 p_a [hPa] は大気圧、 t [°C] は空気の温度を意味する。Fig. 2 (a) に放電開始電圧と空気層厚みの関係の数値計算結果を示す。また、縦軸を空気層に生じる電界に取り直したものを Fig. 2 (b) に示す。このように間隔 D に対して許容される電界の上限値は D に対して単調減少する傾向がある。

2.2 空気粘性による損失

前述の Fig. 2 (b) によれば、間隔 D を小さくすることで振動膜に対する駆動力を増大させることができる。しかし空気の逃げ場がないまま間隔 D を極端に小さくすると、空気層が高い伸縮率で伸縮する必要があり、それに伴う粘性損失が増大する。薄い空気層内の空気はおもに厚み方向に振動することになるが、一方向の伸縮は等方変形とせん断変形の重ね合わせであり、せん断変形成分が粘性損失を引き起こす。膜の質量と空気層の弾性で共振系を形成し、見かけのインピーダンスを低下させることができるが、それらの努力をした結果、最終的には共振系内での損失分のインピーダンス（抵抗分）が残ることとなる。この損失分を空中への音響放射に比べて十分小さな値に抑制しておくことが、高効率化のための要件となる。

これまでの実験例として、駆動周波数を 40 kHz とし、空気層の弾性インピーダンス（リアクタンス）を空中音波の固有インピーダンス ρc の 10 倍以内に設定しようとする、間隔 D は 100 μm 程度以上にする必要がある。その際に印加で

(a)

(b)

(c)

Fig. 2 The results of numerical calculation. (a) Discharge voltage V_S against air gap D when $p_a = 1013.25$ hPa and t is 20°C. (b) Discharge electric field V_S/D against air gap D . (c) Electric-acoustic energy conversion efficiency against air gap D for a 6.4 mm vibrating membrane in diameter

きる最大電界強度では、目標音圧にまで到達することはできなかった。ここで間隔 D を、一桁小さい 10 μm に設定すると、膜に印加される静電気力は（電界の 2 乗に比例するため）Fig. 2 (b) より $2.7^2 = 7.3$ 倍程度まで引き上げることができるが、Fig. 2 (c) に示す数値計算（振動膜が 40 kHz で共振するように、振動膜に張力を印加した際の物理モデルを用いた）結果によれば、このときの粘性損失は放射される音響パワーを大幅に上回るようになり、電気-音響変換効率は 1% 程度までに低下する¹²⁾。このように、間隔 D に対して放電限界電界

と粘性損失のトレードオフが存在するため、著者らの実験の範囲では、直径 6.4 mm の振動膜から放射可能な音響パワーとして 1 mW 程度 (40 kHz) が限界であり、市販の振動子の特性を大きく下回るものしか実現されていなかった。

3. メッシュ電極を用いる提案手法

上記問題を解決する一つの手法として、空気層部分を耐圧の大きい柔軟固体で置き換えることが考えられる。空気並みの弾性率を有する柔軟固体は、微細な気泡を有する発泡体によって原理上は実現できると考えるが、少なくとも現時点までに、本研究に利用可能な発泡体は見つかっていない。

そこで本稿では、空気を通させることのできる電極を用いることで、Fig. 1 の空気層厚みを減少させることなく、極板間距離を近づける、すなわち、空気層内の粘性損失の増大を抑制しつつ、電極間の最大電界強度を増大させる構造 (Fig. 3) を提案する。この構造は、Fig. 4 に示す構造をもつ金属メッシュ (直径 25 μm の金属の糸を編んだメッシュ) の電極に、金属層を備えた振動膜が接触する構成となっている。振動膜の導電層と金属メッシュの間に印加されるバイアス電圧による静電気力により、振動膜の絶縁体面 (下面) と金属メッシュ状電極は所定の圧力で接触状態にある。

このような構造をとることによって、メッシュ表面の平均的な高さは振動膜の下方 25 μm にまで近づいている。また、Fig. 5 に示すように、有限曲率を有するメッシュ上面と振動

Fig. 3 Structure of proposed electrostatic type transducer using a fine metal mesh with openings

Fig. 4 A photograph of the used metal mesh

Fig. 5 An illustration around a contact point between the vibrating membrane and the mesh metal surface in Fig. 3

膜の接触点付近においては、10 μm を下回るきわめて薄い空気層ギャップが生じており、接触点近辺に大きな駆動力を発生することができる。それでいて、振動膜によって下方に押し出された空気は、メッシュの開口を通して容易に下方に移動することができる。

ただし、このような構造で従来より強い音圧が発生できるかについては必ずしも自明ではない。局所的な最大電界強度が向上すると同時にメッシュ開口付近での駆動力はむしろ低下すると考えられる。また接触点付近の微細構造に起因する粘性・熱伝導損失についても評価する必要がある。これらを理論のみで考察するのは容易ではない。そこで Fig. 3 の構造を実際に試作し、その発生音圧とデバイスに印加される電圧・電流との関係を実験的に評価することとした。

4. 製作した振動子とその評価

4.1 試作した振動子

Fig. 6 (a) に製作した振動子の外観図、Fig. 6 (b) にその構造図を示す。振動膜には、スパッタリングにより 10 nm の金を蒸着した厚さ 2.3 μm のアラミドフィルム (ミクトロン, TORAY INDUSTRIES, INC.) を用い、金属メッシュ電極には、直径 25 μm の導電性繊維を 26 μm の間隔をあけて編み込まれた金属メッシュ (ファインメッシュ #500, Sogyo Co.Ltd.) を用いた。振動膜の可動部は、直径 6.4 mm の円形部とし、その可動部以外の振動が測定音圧に寄与しないように配慮した。

可動部以外で高電界が印加される面積は、可動部の周囲 7 mm 以内となるようにし、可動部以外の部分のメッシュ表面には、厚さ 12.5 μm の絶縁フィルム (カプトン 50EN, DU PONT-TORAY INDUSTRIES, INC.) を挟んだ。また、測定時には内径 6.4 mm のアクリル板 (厚さ 1 mm) の開口が可動部と重なるように配置した。

下層の絶縁体には、アクリル板を用い、その絶縁体と金属メッシュとの間の空気層の厚み D は 80 μm とした。この空気層を確保するためのスペーサーとして、片面に接着性のある絶縁体 (PureCell008, INOAC CORPORATION) を用いた。

4.2 発生音圧と電気-音響エネルギー変換効率の測定

試作した振動子の生成する音圧、および電気-音響エネルギー

Fig. 6 (a) Photograph of the prototype transducer, and (b) the cross-section of the structure

Fig. 7 Experimental setup. (a) The microphone observes sound pressure at 20 cm from the device surface. (b) Measurement system of the phase difference between the AC voltage and the current

変換効率を、確実に放電が生じない印加電圧のもとで測定した。音圧測定は、標準マイクロホン (4138-A015, Bruel&Kjaer) を使い、増幅器 (NEXUS コンディショニングアンプ 2690-A-0S1, Bruel&Kjaer) を介してオシロスコープ上に表示される実効値の数値を目視により読み取った。音圧取得時、マイクロホンが周囲からの反射音を拾わないよう、**Fig. 7** (a) に示すように、製作した振動子の 20 cm 直上に吊るした。周囲物体からの反射音が干渉していないことは、マイクを上下左右に数 mm 動かしても測定音圧の著しい変化が見られないことで確認した。振動子の電気-音響エネルギー変換効率 η は、振動子で消費される有効電力 P_E と振動膜表面の振動速度 v から以下のように求められる。

$$\eta = \frac{\text{Re}[Z|v|^2]}{P_E} \quad (3)$$

$$P_E = V_{1rms} I_{rms} \cos \theta \quad (4)$$

ここで、 V_{1rms} [V] は交流電圧の実効振幅値、 I_{rms} [A] は振動子に流れる電流 I の実効値、 θ [°] は振幅値 V_1 の交流電圧と電流 I の位相差である。ただし振動膜の振動速度は膜面内で一様であることを仮定している。 v は、球面状に伝搬した音場の実測値 p から解析的に求めることができ、以下の (5) 式により与えられる¹³⁾。 p [Pa] は振動子から d [m] 離れた位置で取得された実効音圧とし、今回の実験においては $d = 0.2$ m である。

$$\rho c v = \frac{p}{2 \sin \frac{ka}{2} \left(\sqrt{\left(\frac{d}{a}\right)^2 + 1} - \frac{d}{a} \right) \exp \left[j \left\{ \frac{\pi}{2} - \frac{ka}{2} \left(\sqrt{\left(\frac{d}{a}\right)^2 + 1} + \frac{d}{a} \right) \right\} \right]} \quad (5)$$

(3) 式の Z [N/(m/s)] は、振動膜が空気から受ける力の総和 (振動膜面上での圧力の積分値) を振動速度で除した複素数であり、解析的に下記の (6) 式で与えられる¹⁴⁾。

$$Z = \rho c \left[\left\{ 1 - \frac{J_1(2ka)}{ka} \right\} + j \frac{S_1(2ka)}{ka} \right] \quad (6)$$

ここで、 ρ [kg/m³] は空気の密度、 c [m/s] は音速、 a [m] は

Fig. 8 Frequency characteristic of the prototype single transducer

Fig. 9 Phase difference between AC voltage and current

振動子の半径、 k [1/m] は波数、 J_1 は 1 次のベッセル関数、 S_1 は 1 次のシュトルーベ関数である。 $\rho = 1.2$ kg/m³、 $c = 340$ m/s、 $a = 3.2 \times 10^{-3}$ m とし、周波数を 40 kHz とすると、 $Z = (1.12 + 0.38j)\rho c$ である。

Fig. 7 (b) に示す実験システムを用いて、振動子に印加した交流電圧波形、および振動子に流れる電流波形の測定を行ない、変換効率 η を求めた。バイアス電圧 V_0 を 650 V とし、振幅値 V_1 が 15 V である交流電圧を印加したときの音圧 p を、20 kHz から 130 kHz の範囲で測定した結果を **Fig. 8** に示す。**Fig. 8** より、試作した振動子は、Q 値が低く、広帯域をカバーしていることがわかる。また、**Fig. 9** に印加交流電圧と電流の位相差 θ の測定結果、**Fig. 10** に (3)、(4)、(5)、(6) 式に基づき算出したエネルギー変換効率 η を示す。**Fig. 10** より、駆動周波数が 44 kHz のとき、58% の変換効率が確認された。

つぎに、上記実験でエネルギー変換効率の最も高かった 44 kHz において、交流電圧振幅の音圧に対する寄与を調べた。バイアス電圧は 500 V に固定し、交流電圧 (正弦波) の振幅値 V_1 を 0 V から 150 V まで 15 V ずつ増加させ、音圧を取得した。**Fig. 11** に示す実験結果より、印加電圧の増加に伴い、発生音圧が増加しており、交流電圧が最大のときに、8.7 Pa の音圧実効値が観測された。このときのエネルギー変換効率は 55% であり、交流電圧を増加させてもエネルギー変換効率の低下は見られなかった。

現行の空中超音波デバイスに使用されている 40 kHz の圧電

Fig. 10 Electro-acoustic energy conversion efficiency for 650 V DC voltage and 15 V AC voltage

Fig. 11 AC voltage amplitude V_1 contribution to generated sound pressure

型素子 (T4010A1, 日本セラミック (株) 製) は、直径 10 mm の円形放射面を有し、その 20 cm 直上で実効値 21 Pa (振幅 12 V の 40 kHz 正弦波印可時の実測値) の音圧を生成することを確認した。この振動子を、直径 10 mm の円形放射面内で一様に振動する振動板と同等であるとみなして (5) 式から $|v|$ を求めると、今回試作したデバイスの 44 kHz における $|v|$ の最大値の 1.09 倍であった。この素子を稠密に並べて平面波を送出したときに、振動速度が変化しないとすると、今回試作したデバイスの送出する単位面積あたりの音響パワーは、市販振動子の 85% であると計算される。

5. おわりに

本稿では、非線形音響領域で利用可能な薄型空中超音波フェーズドアレイの実現を目的として、高効率・高出力な静電型の振動子について報告した。提案する手法は、 $2.3\ \mu\text{m}$ の薄膜導電層を備えた高分子フィルムと金属メッシュ電極により、空気層の粘性ロスを増やすことなく、高電界を形成する構造になっている。この構造により、触覚提示デバイスとして使用可能な音響パワーを出力し、駆動回路内の損失を含めなければ 55% の電気-音響エネルギー変換効率が実現されることを確認した。

今後は、この構造を用いて薄型の空中超音波フェーズドアレイの実現を目指す。

謝辞 本研究の一部は、科研費 16H0630 の研究支援を受け

ている。

参考文献

- 1) M. Fujiwara, K. Nakatsuma, M. Takahashi and H. Shinoda: Remote measurement of surface compliance distribution using ultrasound radiation pressure, *2011 IEEE World Haptics Conference*, 43/47 (2011)
- 2) M. Yoneyama, J. Fujimoto, Y. Kawano and S. Sasabe: The audio spotlight: An application of nonlinear interaction of sound waves to a new type of loudspeaker design, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **73**-5, 1532/1536 (1983)
- 3) K. Hasegawa, L. Qiu, A. Noda, S. Inoue and H. Shinoda: Electronically Steerable Ultrasound-Driven Narrow and Long Air Stream, *Applied Physics Letters*, **111**, 064104 (2017)
- 4) Y. Ochiai, T. Hoshi and J. Rekimoto: Pixie Dust: Graphics Generated by Levitated and Animated Objects, *ACM Trans. Graph.*, **33**-4, 1228/1233 (2016)
- 5) T. Iwamoto, M. Tatezono and H. Shinoda: Non-contact Method for Producing Tactile Sensation Using Airborne Ultrasound, *Haptics: Perception, Devices and Scenarios*, 6th International Conference, Eurohaptics 2008 Proceedings (Lecture Notes in Computer Science), 504/513 (2008)
- 6) T. Hoshi, M. Takahashi, T. Iwamoto and H. Shinoda: Non-contact Tactile Display Based on Radiation Pressure of Airborne Ultrasound, *IEEE Trans. Haptics*, **3**-3, 155/165 (2010)
- 7) B. Long, S.A. Seah, T. Carter and S. Subramanian: Rendering volumetric haptic shapes in mid-air using ultrasound, *ACM Trans. Graph.*, **33**-6, 181:1/181:10 (2014)
- 8) M.I. Haller and B.T. Khuri-Yakub: A surface micromachined electrostatic ultrasonic air transducer, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, **43**-1, 1/6 (1996)
- 9) Y. Kato, T. Sekitani, Y. Noguchi, T. Yokota, M. Takamiya, T. Sakurai and T. Someya: Large-area flexible ultrasonic imaging system with an organic transistor active matrix, *IEEE Trans. Electron. Devices*, **57**-5, 995/1002 (2010)
- 10) 神垣, 井上, 門内, 野田, 牧野, 篠田: シート状空中超音波フェイズドアレイ, 第 33 回センシングフォーラム資料, 240/243 (2016)
- 11) 電気学会: 電気工学ハンドブック第 7 版, 584, オーム社 (2013)
- 12) 神垣, 野田, 牧野, 篠田: シート状空中超音波フェイズドアレイのための振動子の開発とその評価, 第 17 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, 48/51 (2016)
- 13) 早坂, 吉川: 音響振動論, 612/616, 丸善 (1974)
- 14) 早坂, 吉川: 音響振動論, 626, 丸善 (1974)

[著者紹介]

神垣 貴晶 (学生会員)

2014 年熊本大学大学院自然科学研究科機械システム工学専攻修士課程修了。現在、東京大学大学院新領域創成科学研究科複雑理工学専攻博士課程在学中。空中超音波を用いた触覚提示技術に興味をもつ。

二 宮 悠 基

2016年東京大学工学部物理工学科卒。現在、同大学大学院新領域創成科学研究科複雑理工学専攻修士課程在学中。空中超音波を用いた触覚提示技術に興味をもつ。

篠 田 裕 之 (正会員)

1988年東京大学工学部物理工学科卒。90年同大学院計数工学修士，同年より同大学助手，95年博士（工学）。同年東京農工大学講師，97年同助教授，99年UC Berkeley 客員研究員を経て2001年東京大学大学院情報理工学系研究科助教授，2007年同准教授，2012年同教授。触覚を中心としたセンサシステムとデバイス，センサネットワーク，二次元通信，ヒューマンインターフェース，光・音響・生体計測などの教育と研究に従事。

.....