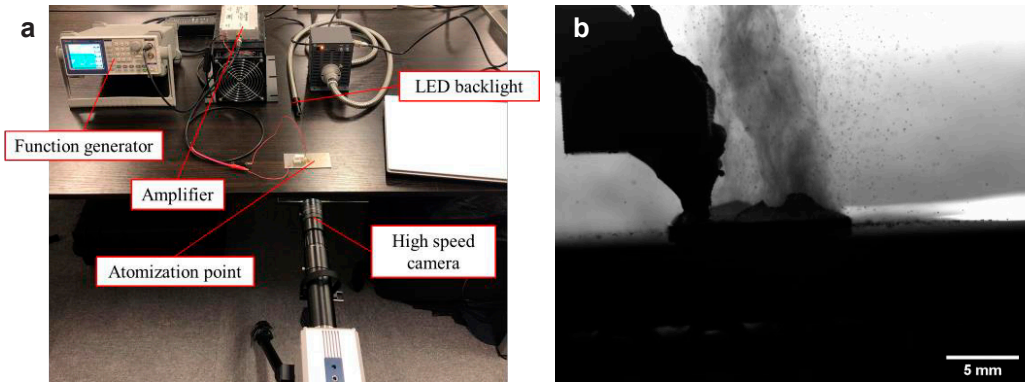
197　$LiNbO_3$を用いたウェアラブル超音波ディフューザの開発	倉科　佑太

【目的】これまでに、超音波噴霧技術はその基礎研究、および燃料噴霧等への応用が既になされており、一般居住空間の保湿を目的とした噴霧技術へも製品化が行われている。しかしながら、現状用いられている超音波噴霧は一般的には空間全体に噴霧する装置や噴霧した薬剤をマスクで吸引する装置などの設置型である。これは一般的に圧電素子として Piezo electric ceramic（PZT）を噴霧するための振動子として用いており、振動伝達効率が悪く装置が大型であることに起因する。加えて、PZT に印加する周波数が 1〜2 kHz であることから表面を伝達する Lamb 波を用いており、効率的に振動を伝達できていない。一方で、昨今のパーソナル空間の価値の向上から、USB 給電小型噴霧器などの個人ごとに適した湿潤環境をワークデスク上で構築することやセルフメディケーションに関心が高まっている。しかし、現状では、装置が設置型であることやマスクを使った吸引であることなど、大きさ制約があり、日常的に使用することは極めて難しい現状である。このような背景を鑑みて、本研究では従来の PZT の Lamb 波よりも効率的に噴霧することができるリチウムナイオベートの厚さ方向の振動モードを用いることで、デバイスの小型化を行う。加えて、超音波デバイスへの入力エネルギーや周波数帯域、霧の放射特性の関係、水滴径などの使用条件の最適化を行い、効率よく噴霧できるウェアラブル超音波ディフューザを製作する。さらに、パーソナル空間において十分に湿潤環境を達成することができるかを確かめる。

【方法】はじめに、霧を可視化するために、表面を金でスパッタリングしたリチウムナイオベートウエハを数十 mm 角で切り出し、MHz 帯の交流電圧を印加して、溶液の噴霧の様子を本研究費で購入予定のハイスピードカメラで観察し、その噴霧の様子を確認した。次に、入力エネルギーおよび入力周波数帯と霧発生の関係を評価した。超音波を発生させるためには、電気的な入力が必要であるが、その入力エネルギーや入力周波数帯と霧の発生量や液滴の大きさは、非線形な関係となっており、最適な噴霧を実現可能とするエネルギーと周波数について、入力エネルギーをパラメータとした検討によって確認した。この撮像によって霧の放射特性を把握し、下記の各種パラメータを変化させた際の放射特性の変化を検討した。

【結果】本研究では、図に示すようにファンクションジェネレータ、アンプとリチウムナイオベートのデバイスを接続して、ハイスピードカメラによりその噴霧挙動を撮影した。リチウムナイオベートに約 7 MHz の交流電流を印加して、素子の thickness 共振モードを励起して液滴を噴霧した。噴霧した液滴をハイスピードカメラで撮影して、液滴の大きさを評価した。その結果、液滴の大きさは直径 3〜4 μ m でピークとなった。これは従来のピエゾ素子による噴霧と比較すると粒径が小さくなることを確かめた。また、素子の大きさを変化させると、一定の値以上では噴霧効率が低下することが明らかとなった。すなわち、リチウムナイオベートを用いた噴霧装置には適した効率の大きさがあることが明らかとなった。

リチウムナイオベート基板を用いた超音波噴霧



197. $LiNbO_3$を用いたウェアラブル超音波ディフューザの開発

倉科　佑太

東京工業大学 物質理工学院 材料系 ライフエンジニアリングコース

Key words：超音波噴霧，ネビライゼーション，リチウムナイオベート，液滴，共振

緒　言

人が聴くことのできる周波数の範囲は20 Hzから20 kHzと考えられ、これを可聴音という。これに対して、周波数が 20 kHz 以上の音や振動を超音波と定義することが多い。現代における超音波は幅広い応用分野に適応されており、超音波のエネルギーを動力的に応用する超音波噴霧としての用途が近年注目されている。超音波噴霧とは、液面付近で大きな音圧を発生させることで液面から微小な液滴が多く発生する現象である。この技術は熱を使わずに溶液を霧状にすることができるため、これまでに超音波霧化分離技術の研究が行われており［1]、エタノール類の濃縮に応用することで、アルコール度数の高いお酒の風味を損なわずに作ることが可能である。また、非加熱であるという点から、薬液や薬剤が変質するリスクも低いため、超音波噴霧を用いた空間除菌として薬剤散布の研究も進められており［2]、ウイルスや微生物対策としても注目されている。さらに、薬液を噴霧する医療機器にも応用され、例えば耳鼻科の超音波ネブライザが挙げられる。超音波によるネブライザ治療は鼻や喉の炎症を抑える薬液を超音波によって細かい霧状にして放出し、それを呼吸とともに吸い込むことで気管や鼻の奥へ薬剤を送り込み、炎症を和らげることを目的とした治療法である。この治療において、気管支や鼻の奥の炎症部分に薬液を到達させるためには数μm程度の粒子が必要である。霧の粒径は高周波ほど細かくなるが、本検討で噴霧用振動子として用いるリチウムナイオベート（LN）は、一般的に広く用いられているチタン酸ジルコン酸鉛（PZT）よりも硬いために共振周波数が高く、より微細な液滴が効率よく生成できることが期待される。つまり、リチウムナイオベートの噴霧特性の知見を得ることにより、ネブライザ治療などの効率化につながる可能性が示唆されている。また、噴霧用振動子としてリチウムナイオベートを用い、Thicknessモードで振動させることでPZTよりも効率的に噴霧可能であることが、最近の研究で明らかとなった[3]。しかし、噴霧用振動子として広く用いられている PZT に関する研究事例は多くみられるが、LN に関する研究事例、およびその噴霧特性についてはほとんど知見が得られていないのが現状である。そこで本研究では、リチウムナイオベートを用いた超音波噴霧デバイスの基礎的な性能について評価を行い、パーソナル空間の環境改善への応用を見据えた実験を行った。

方　法

はじめに超音波噴霧の振動子として用いた LN 素子について、素子の面積がそれぞれ異なる 5 種類の LN 素子を用意した。なお、これら 5 種類の素子はアスペクト比を 4：5 に固定し、面積を変化させた。代表的な素子の写真を図 1 に示す。5 種類の LN 素子は、両面から通電させて噴霧用振動子として用いるため、LN 基板の両面に Cr を蒸着後、Au を蒸着するような加工を施してある。この加工における Cr の蒸着は Au の蒸着を保護し、剥離を防ぐ役割がある。なお、基板には酸素還元処理（ブラック処理）が施してある。このブラック処理は、$LiNbO_3$に含まれる酸素を還元することで抵抗率が下がり、温度変化の際に起こる表面電位スパークを抑制することが可能である。

LN から超音波噴霧するために、噴霧実験システム（図 2）を構築した。本システムは、ファンクションジェネレータ、電圧増幅器および噴霧部からなっている。超音波を駆動するために、ファンクションジェネレータで周波数および電圧を入力して接続されている電圧増幅器によって電圧を増幅し、噴霧部に出力される。噴霧部における構造（図 3）は、鋼板とプローブの間に LN 素子を挟みこんでいる。プローブ本体は 3D プリンタによって作製し、プローブは後部

下面にネオジウム磁石を設けており、鋼板に固定できるようになっている。また、プローブ前方には、LN 素子を押さえるためのスプリングプローブが取り付けられており、LN 素子に通電させるためにスプリングプローブと導線が導電性銀ペーストで接着されている。鋼板には導線がはんだ付けされており、噴霧実験の際にはプローブと鋼板の上下面から通電させることで信号を LN 素子へ出力した。

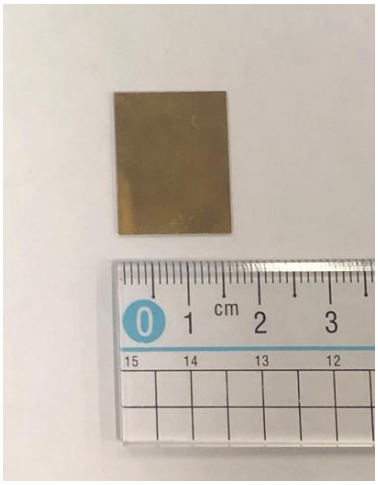


図 1. 金属を蒸着した LN 素子
縦 16 mm×横 20 mm の大きさ。

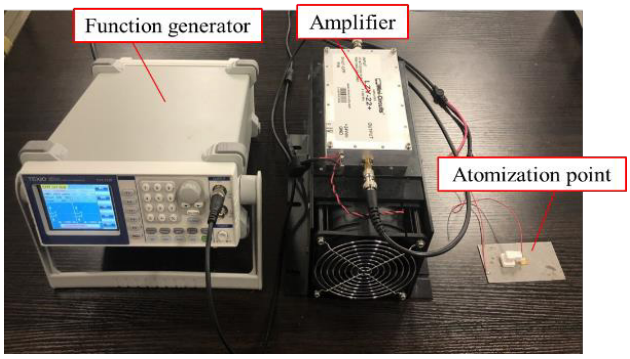


図 2. 噴霧実験のセットアップ
ファンクションジェネレータとアンプを装置に接続。

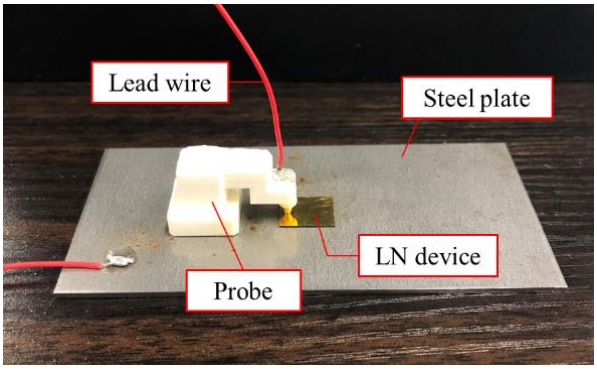


図 3. リチウムナイオベートの駆動デバイス
LN の上面と底面に交流電流を印加する。

LN 素子の超音波噴霧の様子を把握するため、ハイスピードカメラで噴霧前後の液滴の様子を撮影、観察した（図 4）。実験系は、ファンクションジェネレータ、電圧増幅器、噴霧部、ハイスピードカメラ、LED 光源から構成されている。撮影時は LED 光源から白色の光をハイスピードカメラに向けて照射した。本実験で設定したハイスピードカメラの撮影速度、シャッタースピード、倍率はそれぞれ、2,000 fps、1／500,000 s、1 倍とした。また、噴霧させる液体には一般的な水道水を使用した。

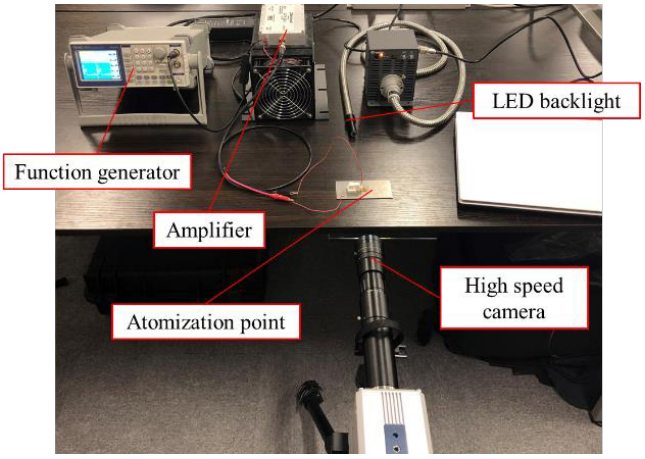


図 4. ハイスピードカメラによる噴霧の測定
噴霧の観察と液滴直径の測定で異なる倍率のレンズを利用。

結果および考察

1. 噴霧現象の観察と噴霧粒径の測定

観察した噴霧の様子を図 5 に示す。超音波を素子に照射すると、液滴の表面が小刻みに振動した。そして、振動していた液滴の表面がさらに大きく振動し、最終的には液滴の表面から微細なミストが生成される様子が確認できた。異なる 5 種類のサイズの LN 素子における粒径をハイスピードカメラで拡大撮影し、画像解析により粒径を測定した（図 6）。解析して得られた、それぞれの素子における粒径のピークは 3.2～4.2 μ m の範囲であることが確認できた。このことから素子の大きさの違いによる粒径の大きな変化は、ほとんど生じていないと思われる。この原因として周波数の影響が考えられる。周波数は粒径に影響を与えることが知られているが [4]、本検討で用いた 5 種類の素子は共振周波数に大きな差はなかったため、粒径にほとんど影響を与えなかったと考えられる。

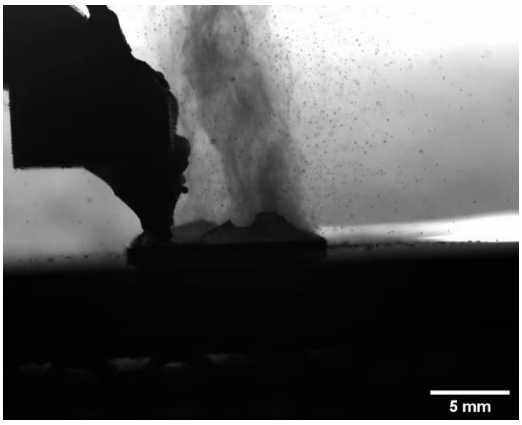


図 5. ハイスピードカメラで撮影した噴霧の様子
噴霧 300 ms 後の様子。

2. 噴霧量の測定

LN 素子の噴霧特性について調べるために、さらに LN 素子の大きさと噴霧量の関係性を調べた。加えて、噴霧時における各素子の消費電力も併せて測定することで噴霧量と素子面積、および噴霧量と消費電力の面から LN 素子の噴霧効率について評価した。噴霧時における LN 素子の消費電力を測定するため、噴霧部とオシロスコープを電圧プローブと電流プローブで接続した。電流プローブと電流プローブはそれぞれ、LN 素子に流れる電流と電圧を測定することが可能である。一方、噴霧部においては、連続的に安定した水の供給および噴霧を実現するため、シリンジに多孔質のメッシュを取り付け、素子の表面に水を供給する機構を設けた。噴霧量を測定するために、ガーゼを取り付けたシリンジをクリップ付きのアームで固定し、電子天秤の上に乗せることで重量の変化を測定した。さらに、メッシュは素子の端に接触させることにより、噴霧効率に影響を及ぼさないようにした。そして、ファンクションジェネレータで周波数と電圧を入力し出力する。その後、電子天秤上に乗せたシリンジに水を入れ、電圧増幅器のスイッチを入れ噴霧を開始する。そして、1 分間連続的に噴霧を行い、噴霧前後での水の減少量を計ることで噴霧量を測定した。さらに、噴霧時の電圧と電流を、電圧プローブおよび電流プローブを用いて測定し、それらをオシロスコープに出力することにより消費電力を測定した。その際、ファンクションジェネレータで入力した周波数は、それぞれの LN 素子における共振周波数であり、印加電圧は 1.2 V_{pp} とした。

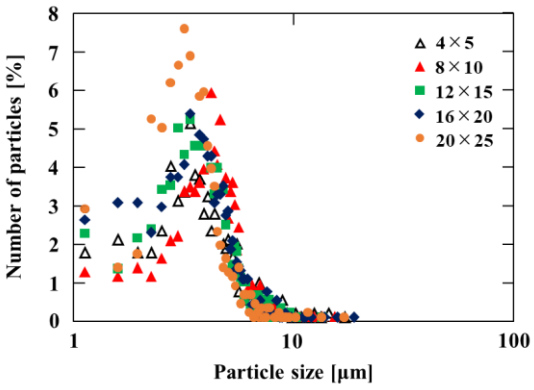


図 6. 各素子による噴霧における粒子径の比較
4×5、8×10、12×15、16×20、20×25 mm の大きさの素子から噴霧した液滴をハイスピードカメラで拡大撮影。

その結果、素子の面積が大きくなるにつれて噴霧量も徐々に増加していく傾向があることが確認できた。次に、素子の面積と消費電力の関係を確認した。その結果、素子の面積が大きくなるにつれて、素子の消費電力も増加していくことがわかった。これらの結果から、噴霧量と消費電力の関係は密接に結びついていると思われる。さらに、素子の消費電力あたりの噴霧量について測定した。その結果、消費電力が増加するにつれ、噴霧量も増加する傾向が見られたが、素子の消費電力あたりの噴霧量の観点からみると、一定の素子面積に噴霧効率のピークが存在することが明らかとなった。これらの結果より、噴霧条件に応じた最適な素子面積があることが示唆された。すなわち、本研究によりウェアラブル超音波ディフューザに最も重要な要素である素子のサイズを決定することができた。今後はこの知見を用いて装置をパッケージング化して、実用実験を行っていく。

共同研究者・謝辞

本研究の共同研究者は、東京理科大学機械工学科朝倉学研究室の朝倉巧、慶應義塾大学システムデザイン工学科三田研究室の小川愛実である。

文 献

1) Matsuura, K. Industrial Applications of Separation through Ultrasonic Atomization, Earozoru Kenkyu Vol.26, No.1 (2011), pp.30-35. DOI: doi.org/10.11203/jar.26.30

2) Yamaguchi, M., Isawa, K., Yamada, Y., Kawakami, R., and Tomioka, K., Examixation of the Anti-microbe Measure with the Chlorine-based Chemicals, J. Environ. Eng.,Vol.80, No.716 (2015), pp.945-952. DOI: doi.org/10.3130/aije.80.945

3) Collignon, S., Manor, O. and Friend, J. Actuators: Improving and Predicting Fluid Atomization via Hysteresis-Free Thickness Vibration of Lithium Niobate, Adv. Funct. Mater., Vol.28, No.8(2017), pp.1-9. DOI: doi.org/10.1002/adfm.201870048

4) Chiba, T., Atomisation of Liquid by Sonic Vibration (II), Journal of the Fuel Society of Japan, Vol.58, No.632 (1979), pp.1015-1021.