

弾性表面波応用デバイスの小型化

Miniaturization of Surface Acoustic Wave Devices

石上 陽平* ・ 尼木 勉** ・ 桐ヶ谷 昌広* ・ 佐藤 正博*
Yohei Ishigami Tsutomu Amaki Masahiro Kirigaya Masahiro Sato

弾性表面波素子のアクチュエータへの応用において、球の転がりを利用して駆動方向への自由度を確保しながらスライダとステータの間に予圧を印加する構造を開発し、薄型化を実現した。また霧化への応用では、毛細管現象を利用して設置状態に関係なく一定量の液体を振動子に供給する構造を考案し、小型の霧化デバイスを実現した。

このアクチュエータは薄型であるとともに高速、高精度といった特徴を有しており、組立などの精密位置決めや高速化、省スペース化のための機械要素として期待がもてる。また、霧化デバイスは小型であるとともに $1\ \mu\text{m}$ の微細なミストを精度よく安定した量の生成が可能であり、湿度調整や粉塵対策等にも応用できる。

In Actuator using Surface Acoustic Wave device, a thin design has been attained with stable preload to slider and stator while maintaining single-degree-of-freedom in the driving direction by using rolling balls. In the application for atomization, the devised structure of supplying a constant quantity of liquid regardless of the installed condition by using capillarity has made possible a compact atomizing device.

The actuator, featuring a thin profile, high speed and high accuracy, is expected to be a mechanical element used for space-efficient high-precision positioning such as for assembly process. The compact atomizing device is capable of producing a micromist of $1\ \mu\text{m}$ in diameter in a stable and accurate atomizing volume for humidity adjustment and dust control.

1. ま え が き

弾性表面波（Surface Acoustic Wave：以下、SAWと記す）素子は、圧電基板上に簡単なすだれ状電極（Interdigital Transducer：以下、IDTと記す）を配置したもので容易にMHz帯域の波を発生できる。本稿では、その波を利用した小型で特徴的な機械要素として駆動要素と霧化要素の2種類を取り上げ、それぞれに対して検討を行い、さらなる小型化を試みる。

駆動要素では、速度と精度においては従来方式の同サイズのものと比較して1桁以上の向上が期待できる。しかし薄型化においては、摩擦力を取り出すための予圧機構が阻害要因となっていた。今回、球を使用した薄型の予圧機構を開発し、厚み2.1 mmを実現した。

また霧化要素では、これまで筆者らが開発した素子は、粒子径が従来方式の霧化要素と比較して小さくできるが、液体供給部が大きくなりデバイスの小型化が困難であった。

今回、液体供給部に毛細管現象を利用することにより構成の簡素化を行い、小型で安定した霧化が可能なデバイスを実現した。

2. SAW素子

2.1 構成・現象

図1にSAW素子の構成を示す。圧電性をもつ基板（振動子）上にIDTを配置して、高周波電圧を与えることにより、数MHzから数GHzの波が励振できる。IDTは金属膜の成膜およびパターニングプロセスで形成可能であり、また振動子は厚み0.3～1 mmと薄くデバイスの小型化に適している。

* 生産技術研究所 Production Technologies Research Laboratory

** ものづくり総合部 Production Engineering Division

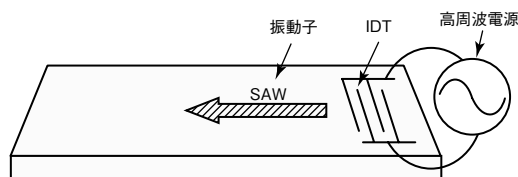


図1 SAW素子構成

励振される波は振幅数十 nm, 振動速度 1 m/s 程度であり, 図2のように進行方向に対して後方楕円運動をしている。この楕円運動を利用し, SAW素子にスライダを押し付けるとスライダの駆動が可能であり, また液体を接触させると霧化が行える。

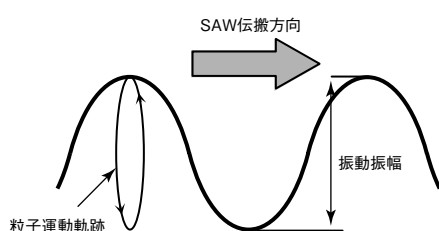


図2 SAW伝搬時の粒子の挙動

3. SAWアクチュエータ

SAW アクチュエータは薄型, 高速, 高精度という特徴を有する小型超音波アクチュエータであり^{1), 2)}, 機能部品として小スペースへの配置には有効である。また, 摩擦を利用しているため, 停止時の電力が不要である。

3.1 動作原理

SAW アクチュエータの概要を図3に示す。図のようにステータ（振動子）上を伝搬する SAW にスライダを接触させることにより摩擦力を介して推進力を得ることができる。しかし十分な推進力を得るためには, 予圧を与えてスライダとステータ間に適切な接触圧力を維持する必要がある。

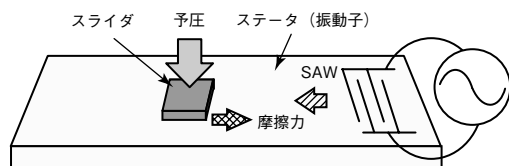


図3 SAWアクチュエータの概要

3.2 実用化への課題

SAW アクチュエータでは数十 nm の振動を利用するため, 前述のように接触面圧力を均等にする予圧機構が必要である。しかし, 従来品の構造では図4に示すように予圧機構が大型で厚い構造となることから一層の薄型化は困難

であった。

ステータとスライダは位置関係が変化するため, リニアガイド等で予圧を維持しながら可動領域を確保する必要がある。しかし構成要素がスライダ厚み 0.3 mm , ステータ厚み 0.5 mm であるのに対し, リニアガイドの厚みは 3 mm 程度であることから構造的に薄型化が困難である。

一方, 図5のようにスライド軸を利用した構造も考えられるが, 構成部品が細いことからスライド軸にたわみが生じて抵抗が大きくなり駆動に必要な電力が増加する。

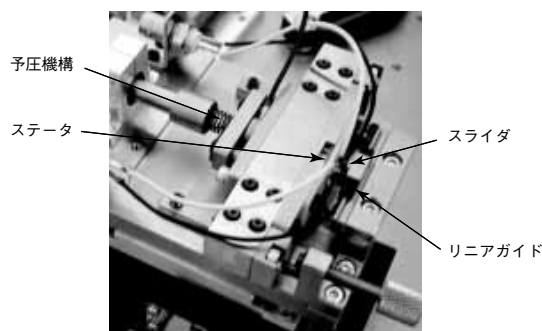


図4 従来のSAWアクチュエータ

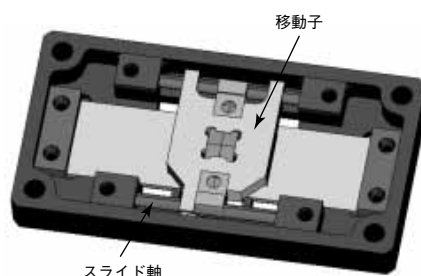


図5 スライド軸による予圧モデル

3.3 球を用いた薄型の予圧機構

そこで筆者らは, 球の転がりを利用して駆動方向への自由度を確保しながら予圧を印加する構造を考案し, 厚み 2.1 mm の薄型化を実現した。

開発品の構成を図6にその外観を図7に示す。スライダを中心に4箇所に球を配置して, 予圧を印加している。ステータに対するスライダの位置によって予圧印加位置が異なるため, 予圧印加部の違いによる接触圧力分布の変化を有限要素法で解析して求めている。また, 全体の変形や応力分布は図8に示すように $1/4$ モデルで解析を行い, 適切な接触圧力を導き出している。

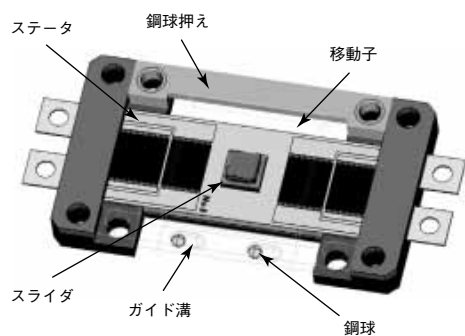


図6 開発品の構成



図7 開発品

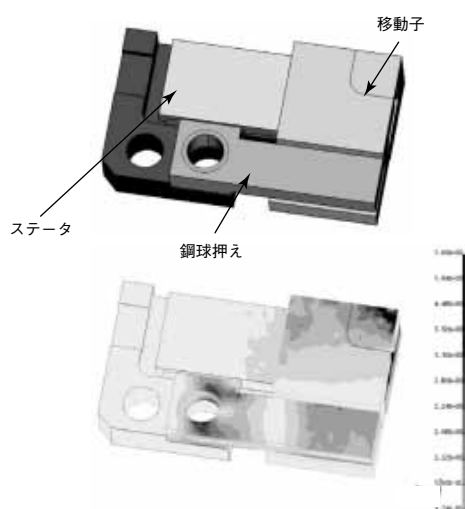


図8 応力解析 (1/4モデル)

さらに、摩擦駆動を行うためにはスライダとステータの接触圧力分布を均一化してスライダエッジ付近での応力集中を防止する必要がある。そこで、接触圧力のシミュレーションを行い、その結果を図9に示す。図9(a)は銅球の接触点(4点)からの距離が均等の場合の銅球接触部の応力分布であり、その中心部がもっとも接触応力が高く、緩やかな変化をしており集中応力が発生しない。これに対して図9(b)はスライダが端にある場合で、銅球が転がり、予圧位置が中心から外れ偏加重が加わることから、銅球接触部の圧力が高くなる。これらのことからシミュレーションでは最大応力値を約2倍としている。

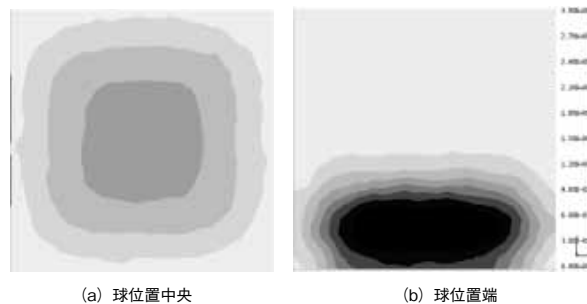


図9 接触応力分布シミュレーション

3.4 駆動特性

作製したアクチュエータの駆動特性を測定する。入力電力に対する速度特性を図10に示す。この図から入力電力に応じて安定した駆動ができることがわかる。

また、最小駆動電力は従来装置とほぼ同等の0.38 Wである。

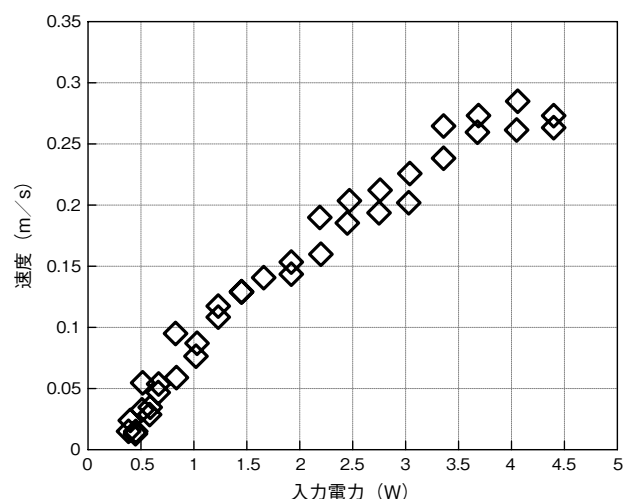


図10 速度特性

4. SAW霧化デバイス

数 nm の振幅で振動している SAW 振動子に液体を接触させると霧化が可能である。安定した霧化を得るためには、液体を安定して供給するとともに基板上に保持しておく必要がある。

図11にSAW霧化デバイスの概要を示す。

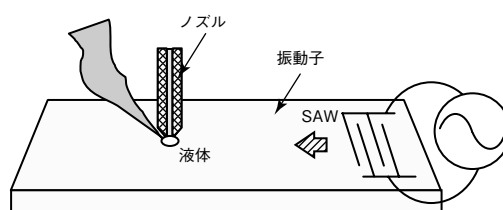


図11 SAW霧化デバイスの概要

4.1 SAW霧化の特性

4.1.1 粒子径特性

120 MHz で励振されている SAW 素子において発生する霧の粒子径分布を測定し、その結果を図 12 に示す。この図から 1 μm 前後の粒子が生成していることがわかる。

一般的な霧化方法（スプレー、超音波、蒸気）による粒子径は 10 ～ 60 μm であるが³⁾、本方式を用いると 1 桁小さい粒子径の微細な霧化が可能である。

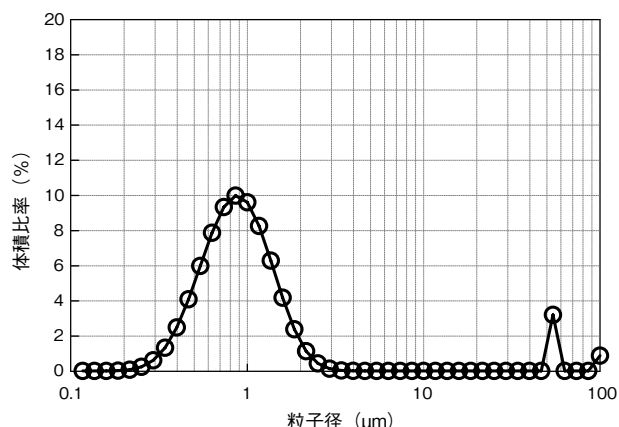


図 12 粒子径特性 (励振周波数 120MHz)

4.1.2 霧化量特性

図 13 に周波数 40 MHz の振動子における霧化量の入力電力依存性を示す。図に示すように入力電力を 2 ～ 4 W の範囲で制御することで、1 ～ 8 g/h の安定した霧化が行える。

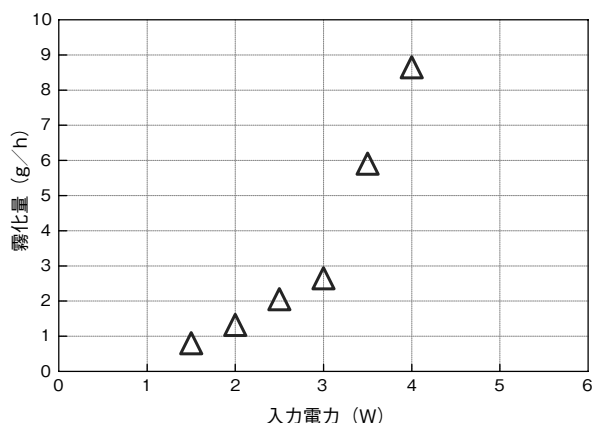


図 13 霧化量特性 (励振周波数 40MHz)

4.1.3 特性評価のまとめ

これらの検討結果から、SAW 霧化における霧化量は 1 ～ 8 g/h であり、他の方法と比較すると大量には霧化が行えないが、1 μm 程度の粒子径で精度良く生成できることに特徴がある。

4.2 SAW霧化における課題

SAW 霧化では、簡単な構成で粒子径が小さく均一な霧化量を確保できるが、振動子に液体を安定的に送り続ける必要がある。そのためにはポンプなど別の供給系を設ける手段もあるが、この方法は追加の電源が必要になり体積も増えることから小型である特徴を活かせない。また、重力により液体を供給する方法は装置の設置状態の影響を受けるため、そのままでは安定した供給ができない。

振動子に液体を供給することで霧化が行えるが、過剰供給になると霧化効率の低下や、液体が電極部位に達して電極部の電氣的短絡が生じる。また液体が不足状態になると、霧化が間欠的となるため、液体を過不足なく供給する必要がある。

4.2.1 毛細管現象による液体の供給

今回は、液体を安定的に供給する手段として設置状態や駆動力を必要としない点などから、毛細管現象を利用する。微細隙間に入った液体に働く力 F は式 (1) で与えられる。

$$F = L\Gamma \cos \theta \quad (1)$$

ここで、 F は液体に働く力、 L は表面張力の働く線長、 Γ は表面張力、 θ は接触角である。

設置状態によらず、安定した供給を満たすためには、式 (2) のように表面張力が重力より大きい必要がある。

$$F = L\Gamma \cos \theta \geq \sigma gAh \quad (2)$$

なお、 σ は液体の密度、 g は重力加速度、 A は液体断面積、 h は送搬高さを示している。

ここで図 14 のように微小隙間の毛細管現象モデルを考えると、液体断面積は $A = L \times G/2$ (G : 微小隙間) となり、式 (2) は式 (3) に置き換えられ、 G は式 (4) を満たすように設定すればよい。

$$\Gamma \cos \theta \geq \frac{\sigma g h}{2} \quad (3)$$

$$Gh \leq \frac{2\Gamma \cos \theta}{\sigma g} \quad (4)$$

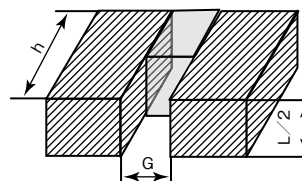


図 14 毛細管現象モデル

ここで水の表面張力等のパラメータは、 $\Gamma = 72.75 \text{ mN/m}$ 、 $\theta = 20 \sim 30^\circ$ 、 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 、 $\sigma = 1000 \text{ kg/m}^3$ 、であるため、式 (4) から $Gh \leq 12.86 \sim 13.95 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ となる。

したがって、液体の供給構成を考えると h が 20 mm では G を 0.64 mm 以下とすれば、設置状態の影響を受けず液体搬送が行える。

これらの結果をもとに、図 15 に示す構成の小型デバイスを開発した。

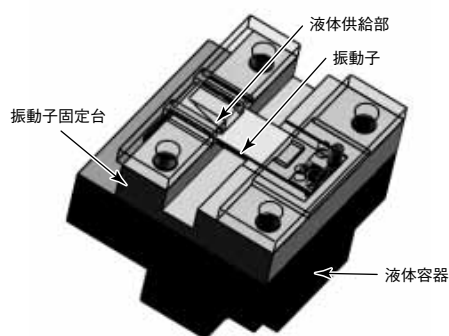


図 15 開発品の構成

4.2.2 開発品の概要と特徴

計算結果に基づいて液体供給部に 2 枚の薄板で構成する微小隙間を設け、振動子に液体を供給する搬送路構造を開発した (図 16)。この構造により、図 17 に示すように安定した霧化が可能である。

また、図 18 に示すように霧化装置の姿勢にかかわらず、霧化が可能である。

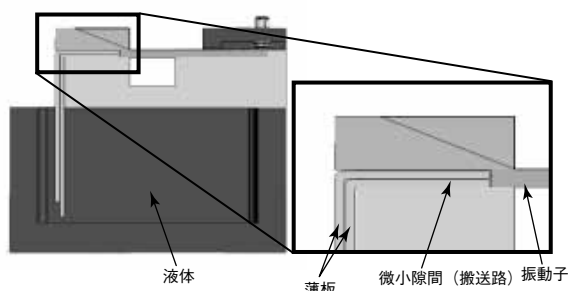


図 16 液体の搬送構造

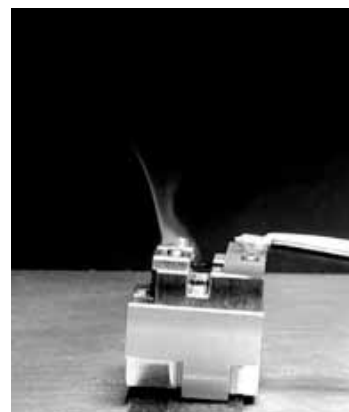


図 17 開発品の霧化状態

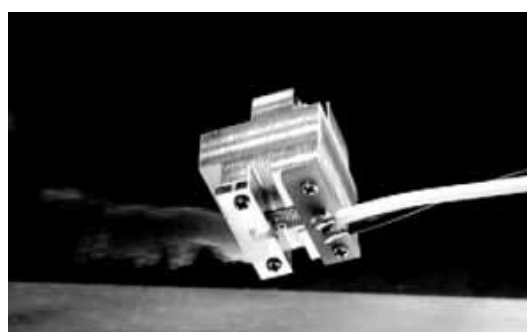


図 18 逆さ姿勢での霧化状態

4.3 液体の浸入防止

開発した構造の SAW 霧化装置もこのままでは、振動子上に供給された液体が波のエネルギーを受けるため、基板上からこぼれることや部品間の微小隙間へ浸入することがある。これらの防止にパッキン等の封止材を用いるとコスト増となり、また必要なスペースが大きくなることから、表面張力を利用する構成としている。

これは、表面張力が隙間が微小であればあるほど液体質量当りに大きな力が発生するため、液体の挙動を抑制できることを利用している。

SAW 霧化において、液体の浸入防止がもっとも必要な場所は励振用電極部である。液体が電極部に入り込むと短絡し、電極が破損する。そこで励振用電極部では、図 19 に示すように液体供給部と電極との間に微小隙間を設けることによって、液体が電極側へと移動した際には、この隙間に保持し、電極まで到達するのを防ぐ構造としている。

また、部品どうしの隙間への液体の浸入に対しては、振動子と液体供給部に微小隙間を振動子の外郭付近に比較的大きな隙間を形成することにより、液体は微小隙間にあるほうが安定である性質を利用し、液体供給部と振動子固定台の隙間への浸入防止を図っている (図 20)。

このような構造とすることにより、小型かつ高精度の部品を必要とせず、サイズが $15 \times 15 \times 15.5 \text{ mm}$ の小型かつ粒子径と霧化量の安定した霧化装置を実現した。

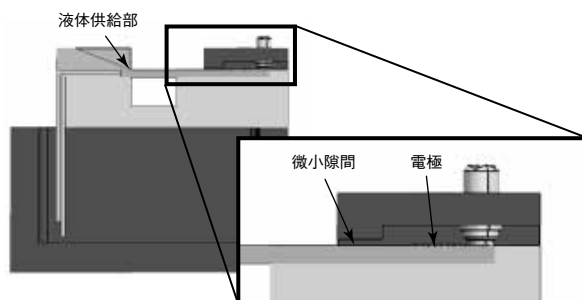


図19 電極部への浸入防止構造

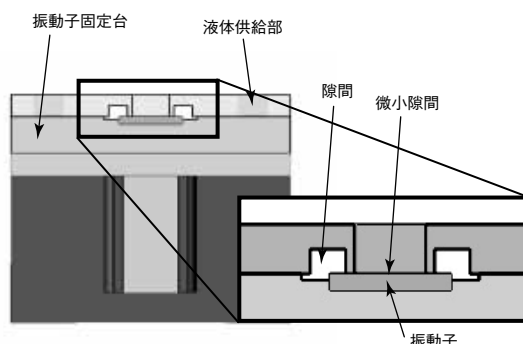


図20 液体供給部と振動子固定台の隙間への浸入防止構造

5. あとがき

SAW素子のアクチュエータへの応用において、球の転がりを利用して駆動方向への自由度を確保しながらスライダとステータの間に予圧を印加する構造を開発し、薄型化を実現した。また霧化への応用では、毛細管現象を利用して設置状態に関係なく一定量の液体を振動子に供給する構造を考案し、小型の霧化デバイスを実現した。

このアクチュエータは薄型であるとともに高速、高精度といった特徴を有しており、組立などの精密位置決めや高

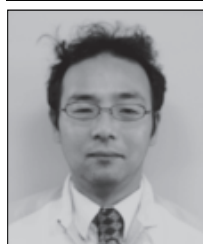
速化、省スペース化のための機械要素として期待がもてる。また、霧化デバイスは小型であるとともに $1\text{ }\mu\text{m}$ の微細なミストを精度よく安定した量の生成が可能であり、湿度調整や粉塵対策等にも応用できる。

本開発にあたりご支援、ご協力をいただいた東京工業大学 黒澤 実 准教授に対し感謝の意を表します。

*参考文献

- 1) N. Osakabe, M. Kurosawa, T. Higuchi, and O. shinoura. : Surface Acoustic Wave Linear Motor Using Silicon Slider, MEMS'98, p. 390-395 (1998)
- 2) T. Shigematsu, M. K. Kurosawa and K. Asai : Nanometer Stepping Drives of Surface Acoustic Wave Motor, IEEE TRANSACTION ON ULTRASONICS, p. 376-385 (2003)
- 3) 倉林 俊雄：液体の微粒子化技術，アイピーシー（1995）

◆執筆者紹介



石上 陽平
生産技術研究所



尼木 勉
ものづくり総合部



桐ヶ谷 昌広
生産技術研究所



佐藤 正博
生産技術研究所
博士（工学）