



# 静電引力を用いた触覚ディスプレイの薄膜化による 低電圧化と振動の提示

Thin-film tactile display using electrostatic attraction for lower voltage and vibration presentation

佐野竜雅<sup>1)</sup>, 安部隆<sup>1)</sup>, 寒川雅之<sup>1)</sup>

Ryuga SANO, Takashi ABE, and Masayuki SOHGAWA

1) 新潟大学 自然科学研究科 (〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐 2 の町 8050 番地)

**概要:** 従来までの静電触覚ディスプレイは、十分に感じられる触感を得るために、扱いにくい高電圧の印加を必要とするものが多い。我々はこの課題に対して、高誘電率材料の使用や薄膜化により低電圧化を図ってきた。今回は絶縁膜として SiO<sub>2</sub> を薄膜化し、低電圧かつ摩擦の変調を感じられるデバイスを試作した。また、デバイスに生じる振動現象について、電圧、振動数、薄膜化の影響について検討した。

**キーワード:** 触覚, 機構・アクチュエータ, 触覚ディスプレイ

## 1. 緒言

### 1.1 はじめに

従来までは視覚・聴覚に働きかけるデバイスが主な情報獲得手段であった。しかし、近年では新たに視聴覚以外の感覚として触覚が注目され、「触覚提示」を追加しようという動きが活発化している。本研究では、触覚センサと触覚提示素子を用いた触覚再現システム構築に向け、将来的にセンサや提示素子、信号処理回路を集積化し、かつ複数種の触感提示とそれらの相乗効果による複雑な触感を生じさせるデバイスの実現を目標として、静電引力を用いた触覚ディスプレイについて印加電圧の低減と静止時の振動現象に関する印加電圧の周波数、電圧等の影響について評価した。

### 1.2 触覚提示デバイスの現状と課題

これまでに電気刺激[1]や静電[2][3][4]、超音波[5]といったさまざまな提示方式の触覚ディスプレイが研究・開発されているが[6][7]、提示方式によって出力強度・小型化・侵襲性・集積性に得手不得手がある。本研究室では、接触荷重や摩擦、振動を複合的に取得可能な MEMS 技術を応用した触覚センサを開発しており、それによって得た触覚情報をディスプレイにより提示するシステムの構築を目標としている。[8][9]触覚は能動的な接触を伴うため、位置や速度、荷重などの接触状況に応じた提示が必要であり、センサによる情報をフィードバックするシステムが必要と考えている。その中で、摩擦や振動を提示するディス

プレイとして小型化および侵襲性の面で優位な静電方式を検討している。しかし、静電触覚ディスプレイで知覚可能な摩擦力を提示するには、100~1000 V といった高電圧を必要とするという課題がある[10]。そこで、我々は低電圧化のため、比較的高誘電率な 1 μm 以下の薄膜を絶縁膜として用いた静電引力方式の触覚ディスプレイを提案している[11]。

### 1.3 研究の目的

我々はこれまで、比誘電率で 15~40 という高誘電率を有するセラミックス材料である ZrO<sub>2</sub> の薄膜を用いて低電圧化を図っており[12]、1 V という低電圧において摩擦力変化の提示に成功したが、膜中電荷や界面電荷の影響で提示力の制御が難しく、絶縁耐圧も低かった。一方、比誘電率は 3.9 と ZrO<sub>2</sub> に比べると小さいが、静電方式の触覚ディスプレイで絶縁膜として一般的に用いられるポリマー系材料よりは大きく、膜質や界面特性、絶縁性に優れ Si ウェハ上で薄膜形成が容易な熱酸化膜(SiO<sub>2</sub>)を用いた素子も試作しており、1 μm の SiO<sub>2</sub> 薄膜により印加電圧は約 100 V と比較的高いものの、様々な振幅・波形の交流電圧の印加により人が知覚可能な触感の違いを提示可能であることを示した[13]。上記の背景を踏まえ、本研究では、静電触覚ディスプレイの絶縁膜として絶縁特性の優れた SiO<sub>2</sub> を使い、かつ低電圧化を図るために薄膜化したデバイスの作製および評価を行った。また、予備実験よりこの構造の静電方式のディスプレイにおいて静止状態でも振動が

生じていることがわかっており、振動振幅の定量的評価を行うとともに、その要因を探った。

## 2. 触覚ディスプレイの構造

本研究で作製した触覚ディスプレイの構造を図1に示す。Si ウェハに熱酸化法により  $\text{SiO}_2$  が成膜されたものを使用し、 $\text{SiO}_2$  を希フッ化水素酸によりエッチングして任意の膜厚に調節した薄膜を絶縁膜として使用する。なお、Si ウェハは半導体の微細加工プロセスが使用でき、将来的にダイオードなどの半導体素子やセンサ・アクチュエータ用の MEMS 素子との集積化が見込める。Si は不純物濃度を高くした低抵抗 ( $\leq 0.02 \Omega\text{cm}$ ) なものを使用しており、導電性ペーストにより配線を接続してそのまま電極として電圧を印加することで、 $\text{SiO}_2$  を介して生じるクーロン力を触覚の提示に利用する。裏面に Cr 薄膜の電極を形成した接触子を用い、電極を設置した状態で接触子をスライドさせると、電圧を印加した場合に電極間に生じる引力により見かけ上の摩擦力が増大する。また、前述したように接触子を静止した状態においても、周期的な電圧を印加すると振動が生じるが、これは接触子とディスプレイのたわみや表面凹凸により、それらの間にわずかな空隙が存在することによって、静電引力と接触子の自重、および空隙の空気のばね・ダンパ系により生じる振動現象であると考えられる。[14]



図1: 作製した静電触覚ディスプレイ

## 3. 静電触覚ディスプレイの出力特性評価方法

静電触覚ディスプレイの出力特性を評価するため、最大静止摩擦力和静止時に生じる振動についてそれぞれ定量的に計測した。

### 3.1 摩擦力の出力特性評価

図2に静電触覚ディスプレイの摩擦出力特性の測定系を示す。摩擦力の計測にはフォースプレート(TF 2020, テック技販)を用いる。実験台の上に固定した触覚ディスプレイの静電提示部の電極に交流電圧を印加し、20 g の錘を載せた接触子を接触させ、一軸ステージにて約 2.5 mm/s で水平方向に移動させた。その際に滑り出して動摩擦状態に移行する前の、フォースプレートにかかる水平方向の力の最大値を最大静止摩擦力とした。

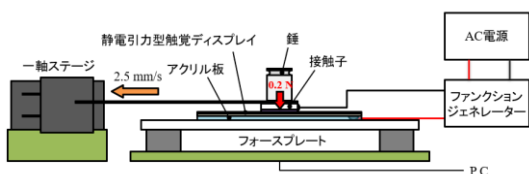


図2: 摩擦力測定系

### 3.2 振動の出力特性評価

図3に静電触覚ディスプレイの振動出力特性の測定系を示す。振動の計測にはレーザードップラー振動計(LV-1610, 小野測器)を用いる。実験台の上に固定した触覚ディスプレイの静電提示部の電極に交流電圧を印加し、錘を載せていない接触子を接触させた状態で静止させ、垂直方向の振動の計測を行った。また、前述にて想定したように空隙が存在することによる振動現象であることを検証すべく、接触子とディスプレイの間に液体(2-プロパノール; IPA)を満たし、空隙を液体で置換して同様に実験を行った。

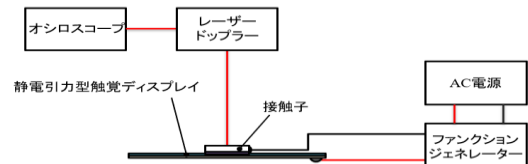


図3: 振動測定系

## 4. 静電触覚ディスプレイの出力特性評価結果

本章では、先の実験系を用いて、摩擦力測定および振動測定した結果を示す。

### 4.1 摩擦力の出力特性評価結果

図4に  $\text{SiO}_2$  の膜厚が 50 nm, 100 nm, 150 nm の静電触覚ディスプレイに正弦波交流電圧 (100 Hz) を印加した際に生じる、静電引力による最大静止摩擦力の増加量の印加電圧実効値に対する依存性を示す。なお、グラフの縦軸は、電圧印加の有無による最大静止摩擦力の差分である。  $\text{SiO}_2$  の膜厚が 150 nm の場合、印加電圧が大きくなるにつれて最大静止摩擦力が増加していることがわかる。電極間に働く静電引力は印加電圧の2乗に比例するが、カーブフィッティングの結果、増加の傾向はおおよそそれに一致しており、摩擦力の増加は静電引力の増加に起因するものであるといえる。0.05 N の摩擦力増加に必要な電圧は約 40 V であり、100 V 以下での提示に成功し、先行研究と比較しても 70%以上印加電圧を低減できた。[13]一方で、50 nm および 100 nm においては電圧の大きさに対して有意な依存性は得られなかった。これについては、絶縁膜がある程度まで薄くなると、ディスプレイと接触子間の空隙の影響が無視できなくなり、そちらにかかる電界が支配的になるためであると考えられ、これにより薄膜化には限界があるといえる。

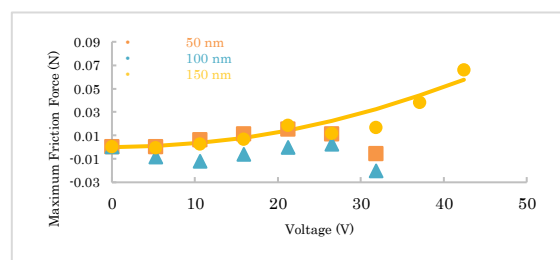


図4: 最大静止摩擦力の印加電圧依存性

4.2 振動の出力特性評価結果

図3の実験系において、振幅 300 V<sub>p-p</sub>、周波数 200 Hz の正弦波交流電圧を静電触覚ディスプレイに印加した際の、印加電圧波形とレーザードップラー振動計で計測した振動波形を図5に示す。正弦波電圧を印加した場合、入力電圧の2倍の周波数の正弦波状振動が生じていることが分かる。これは、正弦波の場合には静電引力が入力電圧の2倍の変化となるためである。[16]一方、図6に入力電圧をのこぎり波状の波形の電圧(振幅 160 V<sub>p-p</sub>)とした場合の振動波形を示す。この場合は、それとは異なった振動波形が出力されている。のこぎり状の場合は、印加電圧が最大値から0Vになった際に静電引力が急激に変化し、それにより振動現象が生じているものと考えている。ヒトの触覚受容器の一つであるパチニ小体の振動検出閾値は数百 Hz の領域では0.1 μm 程度とされており、[17]正弦波、のこぎり波のどちらを印加した場合においても、作製したディスプレイを用いてそれ以上の振幅の振動を出力可能である。図7にのこぎり波状電圧を印加した場合の電圧の振幅に対する振動波形の変化を示す。印加電圧を増加させることで振動の振幅も増加していることが分かる。図8に振動振幅の印加電圧周波数に対する依存性を示す。印加電圧の周波数が高くなると振幅が減少する傾向にあるが、1000 Hz までの周波数において 0.1 μm 以上の振動が提示できている。図9は絶縁膜の膜厚に対する振動振幅をプロットしたものであるが、膜厚に比例して振動振幅が減少していることがわかる。空隙の要因となる基板のたわみは絶縁膜である熱酸化膜の応力により生じているので、薄膜化により基板のたわみが減少し、空隙が減少したためであると考えている。また、液体(IPA)の有無による振動波形の違いを図10に示す。比較のため、縦軸は空気の場合に正規化している。IPAがある場合はない場合と比べて非常に小さくほとんど0に近い値を取っており、IPAがディスプレイと接触子の間に存在する場合には、空気の場合に比べて振幅が減少していることが分かる。この結果から、空隙があることによって静電引力およびばね効果によって、振動が生じているといえる。

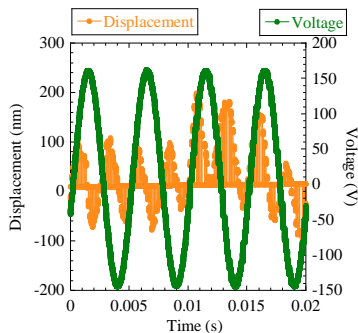


図5: 振動の計測結果(正弦波 200 Hz 印加)

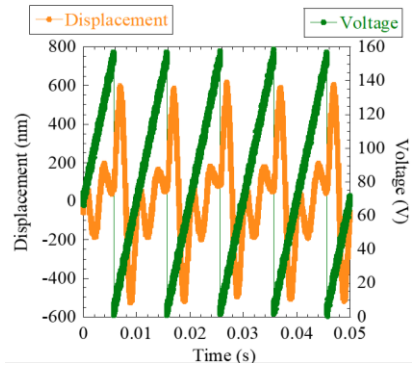


図6: 振動の計測結果(のこぎり波 100 Hz 印加)

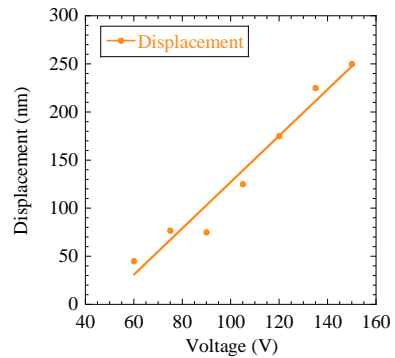


図7: 印加電圧(のこぎり波)の大きさ(V<sub>p-p</sub>)による振動振幅の変化

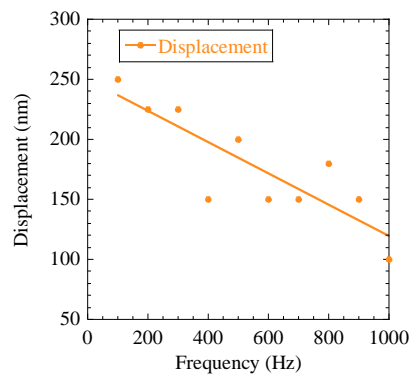


図8: 振幅の周波数依存性(のこぎり波 160V<sub>p-p</sub>)

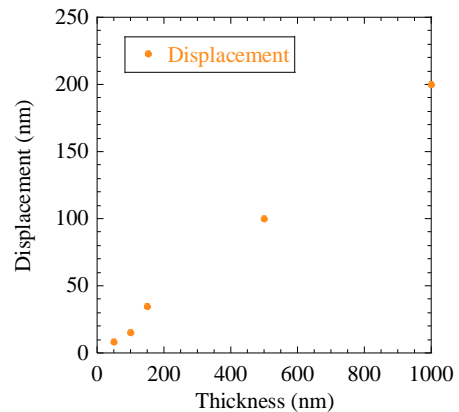


図9: 振動振幅の絶縁膜厚依存性(正弦波 100Hz, 300V<sub>p-p</sub> 印加)

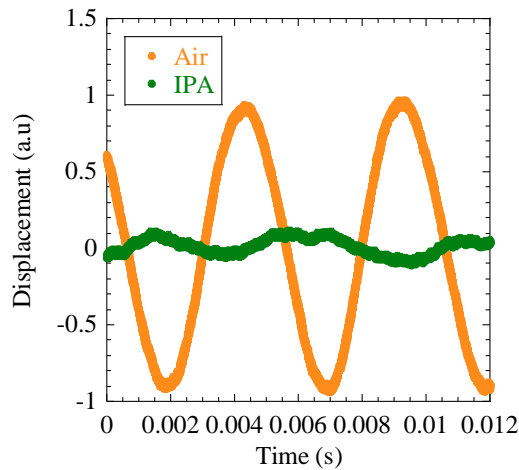


図 10: 液体の有無による振動波形の違い (正弦波 100Hz, 300Vp-p 印加)

## 5. 結論

以上, 定量的な評価によって, 静電提示部駆動による摩擦・振動出力により, 摩擦力の提示に関しては, ウエットエッチングを用いた薄膜化による低電圧化の限度が空隙の影響により 150 nm 近傍であることを示した. また, 振動現象に関しては, 接触子とディスプレイの間の空隙が大きな役割を果たしており, 印加電圧の周波数や電圧に対しての振動の変化について示した. この結果より, 静電触覚ディスプレイの更なる低電圧化や振動の提示においては, 接触面の空隙を制御することが重要であることが示唆されている. 今後は, 我々が有する MEMS 技術や薄膜応力制御技術を応用し, 提示できる摩擦力や振動を増強させるように表面微細加工や薄膜応力によるたわみ量制御をおこなう.

**謝辞** 本研究室は永井知覚科学振興振興財団の助成により行われた.

### 参考文献

- [1] 梶本裕之, 菅野米蔵, 館暉: 日常的装具としての電気触覚ディスプレイ, 計測と制御, 第 47 巻, 第 7 号, 2008 年月号, pp. 601-605, 2008.
- [2] 中山央己, 篠田裕之: 静電型柔軟触覚ディスプレイ, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 2P2-B23, 2006.
- [3] Hiroshi Haga, Kazuhide Yoshinaga, Jiro Yanase, Daisuke Sugimoto, Kenichi Takatori, Hideki Asada, Electrostatic Tactile Display Using Beat Phenomenon for Stimulus Localization, IEICE Trans. Electron, Vol.E98-C, No.11, 2015.
- [4] Olivier Bau, Ivan Poupyrev, Ali Israr, Chris Harrison: TeslaTouch: Electro-vibration for Touch Surfaces, UIST'10, pp. 283-292, 2010.
- [5] 星貴之, 岩本貴之, 篠田裕之: 空中超音波フェーズドアレイによる触覚ディスプレイ, 日本バーチャルリアリティ学会

アリティ学会第 13 回大会論文集, 3A2-2, 2008.

- [6] 下条誠, 前野隆司, 篠田裕之, 佐野明人, : 触覚認識メカニズムと応用技術 - 触覚センサ・触覚ディスプレイ, 第一章第一節, pp.3-18, S&T 出版, 2014.
- [7] Shogo Okamoto, Hikaru Nagano, Yoji Yamada: Psychophysical Dimensions of Tactile Perception of Textures, IEEE Transactions on Haptics, Vol. 6, No. 1, pp. 81-93, 2012.
- [8] 橘弘人, 釜鳴志郎, 美馬達也, 寒川雅之, 金島岳, 奥山雅則, 山下馨, 野田実, 野間春生, 樋口誠良: 3 方向カンチレバーを用いた多軸触覚センサの作製と基礎特性, 電気学会論文誌 E, Vol. 130, No. 6, pp.223-229, 2010.
- [9] 高橋春暁, 難波勇太, 安部隆, 寒川雅之: 触覚センシングにおける振動検知のためのマイクロカンチレバーの作製と評価, 電気学会論文誌 E, 139 巻, 11 号, pp.375-380, 2019/11
- [10] 芝夏穂, 堀金真一, 橋本悠希: プリントブル静電触覚ディスプレイにおける印加電圧周波数と手掌部の知覚強度の関係, 第 27 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 1F5-5, 2022.
- [11] 高橋駿, 近藤雅敏, 佐藤淳喜, 安部隆, 寒川雅之, : 触覚ディスプレイにおける摩擦制御のための静電引力提示デバイスの低電圧化, 第 27 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2B1-5, 2022..
- [12] 英興株式会社, ファインセラミックス資料 [https://eikoh-kk.co.jp/tecdata/ceramics\\_data.html](https://eikoh-kk.co.jp/tecdata/ceramics_data.html)
- [13] 近藤雅敏, 高橋駿, 安部隆, 寒川雅之: Si ウェハを用いた静電力提示ディスプレイと圧電アクチュエータとの複合化, 第 13 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 14P3-PN-50, 2022.
- [14] Dommlcus J IJntema, Harne A C Tllmans : : Static and dynamic aspects of an air-gap capacitor, Sensors and Actuators A, Vol. 35, No. 2, pp. 121-128, 1992
- [15] 佐藤淳喜, 本間遼, 安部隆, 寒川雅之: 小型化・低電圧化に向けた絶縁樹脂薄膜静電触覚ディスプレイの基礎検討”, 電気学会, 電気学会研究会資料, pp.41-44, 2020.
- [16] 下条誠, 前野隆司, 篠田裕之, 佐野明人, : 触覚認識メカニズムと応用技術 - 触覚センサ・触覚ディスプレイ, 第一章第一節, pp.488, S&T 出版, 2014
- [17] 下条誠: 皮膚感覚の情報処理, 計測と制御, 第 41 巻, 第 10 号, pp.723-727, 2002.