

# イオンゲルと半導体を用いた高感度タクトイルセンサの作製と評価

## A Study on A Tactile Sensor based on Field Effect Transistor Using An Ionic Gel Insulator

2187012



研究代表者 早稲田大学 ナノ・ライフ創新研究機構 次席研究員 山田 駿 介  
 (助成受領時：東京大学大学院 工学系研究科 博士課程)

### [研究の目的]

近年のセンサ、人工知能の発展によるロボット技術の高まりを受け、ロボットの社会投入への期待が高まっている。高性能なロボットの実現、社会への投入には、高性能なセンサ技術による環境情報の取得が求められる。このため、熱・圧力・湿気など様々な情報を取得できる優れた感覚器官である人の皮膚を、回路・センサで模倣した人工皮膚 (e-skin) が注目を集めている。

最も基本的な e-skin は圧力を検出するタクトイルセンサである。本センサは検出方法により抵抗型、静電型、Field Effect Transistor 型 (FET 型) の 3 種類が提案されている。抵抗型、静電型は検出感度が低く ( $<10 \text{ kPa}^{-1}$ )、圧力 1 kPa 以下を検知することは難しい。一方 FET 型は、高感度 ( $>100 \text{ kPa}^{-1}$ ) でありアクティブマトリックス構造により、大面積化が容易という特徴を有している。しかしながら、駆動電圧が高く ( $> \text{数十 V}$ )、消費電力が高い、感電の恐れという課題をもつ。

加えて、FET 型はデバイスの構造から圧力検出時の摩擦を避けられなかった。そこで、本研究では、FET 型タクトイルセンサの特性を改善し、①感度を従来の 10 倍  $1000 \text{ kPa}^{-1}$  を実現する。②さらに、FET 型の欠点である駆動電圧を低減させ、10 V 以下で駆動する。また、

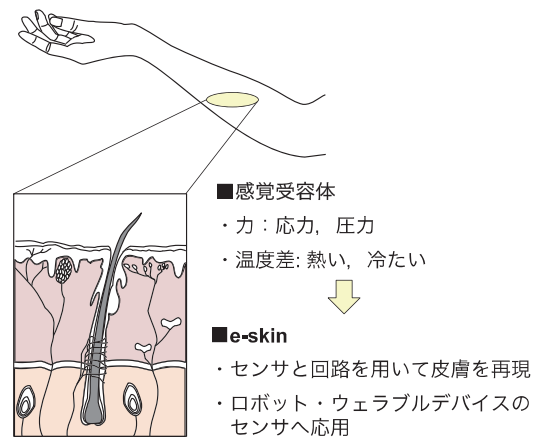


図1 e-skin の概念図

本センサをアレイ状に配置し、アクティブマトリックスを形成することで、大面積化を実現する。

### [研究の内容, 成果]

イオン液体をゲート絶縁層に用いることで上記課題解決を図った。イオン液体は、正と負の電荷を持つ分子、カチオン/アニオンから成り、電圧を印加されると、電極-イオン液体間に分子 1 層程度の厚みを持つ電気二重層を形成する。このため、イオン液体は非常に大きな静電容量 ( $\text{数 } \mu\text{F cm}^{-2}$ ) を持つ。これをゲート絶縁膜に使用することで、半導体と絶縁層の電気的結合を強め、FET 型センサを低電圧で駆動できる。イオン液体 1-ethyl-3-methylimidaz-

zolium bis (trifluoromethylsulfonyl) imide ([EMIM]<sup>+</sup> [TFSI]<sup>-</sup>) と、ポリマー poly (vinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene) (PVDF-HFP), アセトン重量比 1:4:7 で混合して、スターラーで 1 日攪拌した。ポリマー前駆体をシリコンゴムで作製した鋳型に流し込み、70℃、3 時間加熱してアセトンを完全に揮発させた。イオンゲルの電気特性をインピーダンスアナライザー (HIOKI, IM3590) を用いて測定した。

ガラスにアルミニウム (40 nm) を蒸着して 1 組の電極を作製して、その間に、イオンゲルを挿入して、図 2 に示すように静電容量  $C_{gel}$  を測定したところ、1 Hz において非常に大きな  $C_{gel}=4.6 \mu\text{F}/\text{cm}^2$  を示した。これは、イオン液体の静電容量  $C_{IL}=12 \mu\text{F}/\text{cm}^2$  とほぼ同じ値である。次に電極-イオンゲル間に 1 mm の空気層があるときの静電容量  $C_{gel+Air}$  を測定したところ、 $C_{gel+Air}=33 \text{ pF}/\text{cm}^2$  を示した。空気層とイオンゲルが直列に接続されたため、全体の静電容量は静電容量が小さい空気層が支配的ななったと考えられる。イオンゲルによる静電容量の変化  $C_{gel} / C_{gel+Air}$  は  $1.4 \times 10^5$  となる。このため、イオンゲルが圧力により酸化半導体 ZnO と接触すれば、チャンネルが形成され、ドレイン-ソース電流  $I_{ds}$  が  $1.4 \times 10^5$  変調できると考えられる。

図 2 にデバイスの概念図を示す。はじめにタ

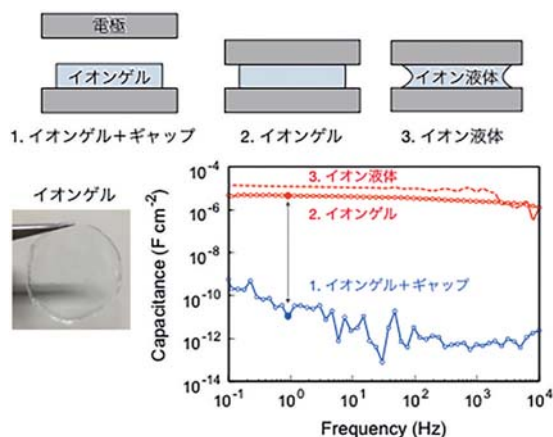


図 2 静電容量の比較, 1. イオンゲル (空気層 1 mm), 2. イオンゲル (電極と接触), 3. イオン液体

クタイルセンサの下部を作製した。厚み  $50 \mu\text{m}$  ポリイミドに、真空蒸着装置でアルミニウムを 40 nm 蒸着して、ソース、ドレイン電極 (幅: 5 mm, ギャップ: 1 mm) を作製した。酸化半導体 ZnO を、ステンシルマスクとスパッタリング装置を用いて厚み 700 nm 成膜した。

厚み  $50 \mu\text{m}$  のポリイミドにアルミニウム (40 nm) を成膜して、ゲート電極を作製した。その上にイオンゲル ( $350 \mu\text{m}$ ) を成膜した。作製した上部と下部の間に、ポリイミドをスペーサー ( $50 \mu\text{m}$ ) として挿入してギャップを形成した。

図 3 に測定系の概念図と実験写真を示す。作製したタクタイルセンサの上にシリコンゴム ( $1 \text{ cm}^2$ ) を通じておもりを乗せて、圧力を印加した。デバイスを電子天秤にのせて、印加された力を測定した。印加した圧力に対する電圧・電流特性、ドレイン-ソース電流  $I_{ds}$ , ゲート-ソース電流  $I_{gs}$ , ドレイン-ソース電圧  $V_{ds}$ , ゲート-ソース電圧  $V_{gs}$  を半導体パラメータアナライザ (B1500A, Agilent) を用いて測定した。図 5 (a), (b) に圧力印加無しと有りにお

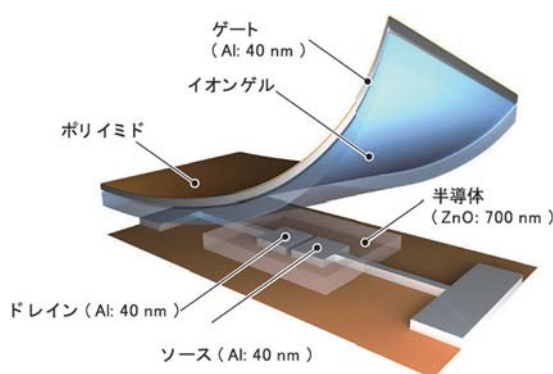


図 3 圧力センサの概念図

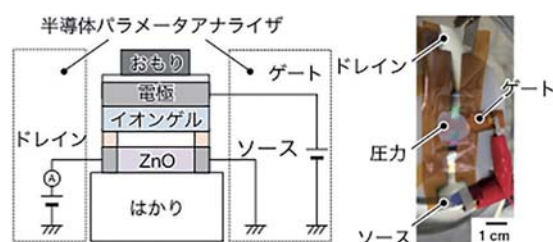


図 4 圧力センサの実験系とその実験風景

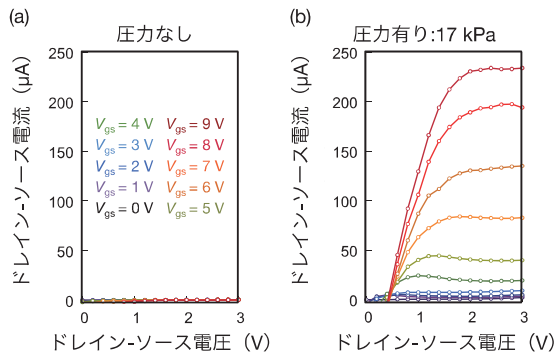


図5 ドレインソース電圧に対するドレインソース電流特性 (a) 圧力印加なし, (b) 圧力 17 kPa

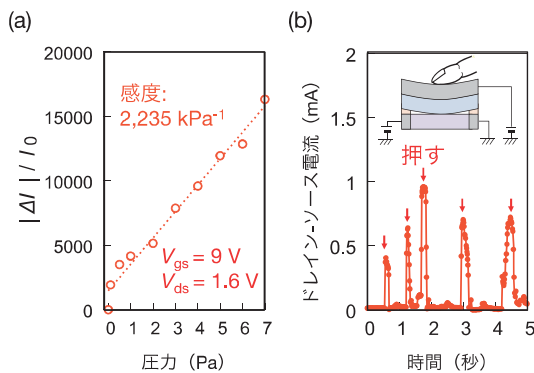


図6 (a) 圧力に対する電流の相対変化, (b) 指でデバイスを押したときの電流の時間変化

けるデバイスの  $V_{ds}$  に対する  $I_{ds}$  特性を評価した。圧力印加なしのときには、様々な  $V_{gs}=1\sim 9\text{ V}$  において、 $V_{ds}=2\text{ V}$  のとき、 $I_{ds}$  は最大  $298\text{ nA}$  の電流が生じた。一方、 $17\text{ kPa}$  の圧力を印加した場合、 $V_{gs}=9\text{ V}$ 、 $V_{ds}=1.6\text{ V}$  のとき電流  $236\text{ }\mu\text{A}$  が得られた。

この電流は、イオンゲルが半導体に接触したことによりチャネルが形成したと考えられる。

この結果から、圧力に対して  $I_{ds}$  が大きく変化できることがわかった。圧力に対する  $I_{ds}$  の変化を計測して、タクトイルセンサの感度を測定した。図 6(a) に圧力に対する電流  $I_{ds}$  の相

対変化  $|I_{ds}-I_0|/I_0=|\Delta I_0|/I_0$  を示す。ここで、電流  $I_0$  は、圧力印加なしの電流  $I_{ds}$  である。圧力を大きくすると電流が増大して、圧力  $7\text{ kPa}$  において、電流変化  $|\Delta I_0|/I_0=15,000$  を示した。最小二乗法を用いて、図 6(a) のプロットの傾きを計算したところ、感度  $=2,235\text{ kPa}^{-1}$  が得られ、世界最高値を示した。デバイスのデモンストレーションとして指で押したところ、大きな電流が得られタクトイルセンサとして機能することがわかった。

#### [今後の研究の方向, 課題]

本研究では、タクトイルセンサの基礎特性を測定して、イオンゲルと半導体を使用したタクトイルセンサの有効性と妥当性を確認できた。しかしながら、アレイ化による大面積化の実現はできなかった。今後、デバイス作製プロセスの最適化を実施してアレイ  $3\times 3$  を実現して、大面積を実現する予定。

#### [成果の発表, 論文等]

##### 【論文】

- i) S. Yamada and H. Toshiyoshi, "A Water Dissolvable Electrolyte with an Ionic Liquid for Eco-Friendly Electronics," *Small*, vol. 14, no. 32, p. 1800937, Jun. 2018.

##### 【国際学会】

- i) S. Yamada, T. Sato, and H. Toshiyoshi, "Pressure Sensitive Ionic Gel-FET of Extremely High Sensitivity over  $2,200\text{ kPa}^{-1}$  under  $2\text{ V}$ ," 19th Int. Conf. on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers 2017), June 18-22, 2017, Kaohsiung Exhibition Center, Kaohsiung, Taiwan.