

## オイルを用いたフレキシブル静電型触覚センサ

高橋 智一\*

### Flexible Force Sensor Measuring Change in Capacitance due to Dielectric Oil Displacement out of Domed Polymer into Surrounding Channels

Tomokazu TAKAHASHI

#### 概 要

本論文では、可動部に電極がないフレキシブル静電型触覚センサについて提案する。この触覚センサにはドーム状構造の内部にシリコンオイルが充填されており、周囲にマイクロチャンネルが配置されている。マイクロチャンネルの上下面には電極が形成されている。ドーム部に力が印加されると、オイルがマイクロチャンネルに押し出され、電極間の静電容量が変化する。試作した触覚センサの感度は0.05 pF/gfであった。

#### 1. はじめに

ロボットの指のような3次元構造をした面に取り付けるフレキシブル触覚センサの多くは、力による構造の変位を静電容量の変化として読み取り<sup>1) 2)</sup>。これらのセンサはPDMS (polydimethylsiloxane) などの柔軟性のあるポリマを基板として用い、その上面に金属電極を形成することが多い。このとき感受部に力が印加されると、金属電極が破断する問題がある。これはポリマに対する金属の密着力が弱いことや金属とポリマとのヤング率の違いが原因であると考えられる。

また、対向する電極が力によって変位するデバイスの場合、センサの測定範囲が初期の電極間距離によって制限されてしまう。これについてはフィードバック制御により測定範囲を広げることができるが、作製が複雑になる問題点がある<sup>3)</sup>。

そこで本研究では、上述の問題を解決するために、オイルを用いたフレキシブル触覚センサ(図1)を提案する。本センサは力の印加される部分に従来のよう

な電極がなく、絶縁性液体(ここではシリコンオイル)で満たされている。力が印加されるとオイルが周囲に配置されたマイクロチャンネルに流れ込み流路内の静電容量が変化する。この変化をチャンネルの上下面に形成された電極で検出する。力による変形がないため電極の破断はなくなり、かつチャンネルの設計によってセンサの感度・測定範囲を任意に作製することが可能となる。

一次試作デバイスでは、シリコン基板上に形成したセンサをフレキシブル基板にアレイ状に配置する。このとき、フレキシブル基板の電極とセンサからの配線とはカーボングリースで接続する<sup>5) 6)</sup>。また、オイルは滴下後に低真空中でバリレンを堆積しドーム状に封止されている<sup>4)</sup>。

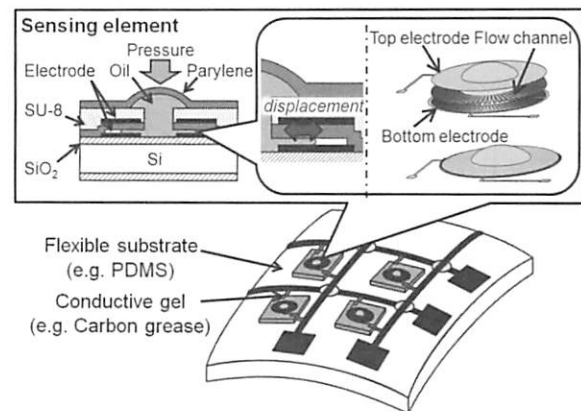


図1 一次試作デバイスの概念図

#### 2. 原 理

図2にマイクロチャンネルの単純なモデルを示す。チャンネル長に対するチャンネル内のオイルの初期位置の

比を  $\alpha$ 、印加する力を  $F$  はボイルの法則により

$$F = \frac{x-\alpha}{1-x} P_0 A \quad (1)$$

となる。このとき、 $x$ 、 $A$ 、 $P_0$ は、それぞれ力を印加したときのチャンネル長に対するオイルの位置の比、力を受ける面積、大気圧となっている。このとき、電極間の静電容量 ( $C$ ) は

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{wxl_0}{d} + \epsilon_0 \frac{w(1-x)l_0}{d} \quad (2)$$

ここで、 $\epsilon_0$ 、 $\epsilon_r$  は真空の比誘電率、オイルの比誘電率であり、 $w$ 、 $l_0$ 、 $d$  はマイクロチャンネルの幅、長さ、高さである。測定した静電容量  $C$  と式 (1)、(2) から力  $F$  を求めることができる。

図3は式 (1)、(2) から求めた、印加する力に対する静電容量の変化量を示している。 $w$ 、 $l_0$ 、 $d$  は  $1000 \mu\text{m}$ 、 $50 \mu\text{m}$ 、 $1 \mu\text{m}$  である。図からわかるように、感度を高めるためにはオイルの初期位置 ( $\alpha$ ) を小さくする必要があり

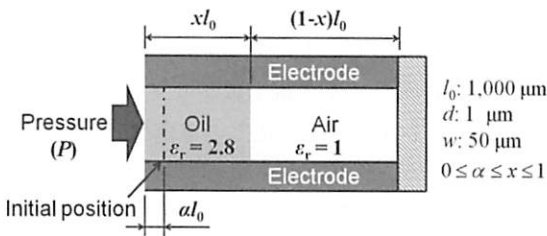


図2 マイクロチャンネルのモデル

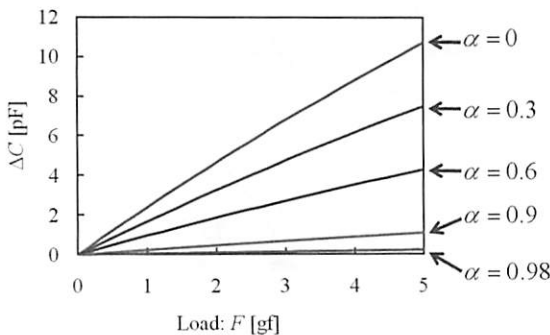


図3 印加した力に対する静電容量の変化量(解析結果)

### 3. 有限要素法解析 (FEM 解析)

本センサでは感光性樹脂であるSU-8 (日本化薬) を用いてマイクロチャンネルを形成する。ここでSU-8

は一般的な感光性樹脂と異なり、5倍程度高いアスペクト比の構造体を形成することが可能である。

本センサではマイクロチャンネル部は外部より印加される力による変形が小さいことが条件となる。力を印加したときチャンネル部が変形してしまうと、オイルの移動によるものだけでなく、電極間距離が変わることによっても電極間の静電容量が変化してしまい、ノイズとなる。

そこで図4(a)のようなモデルのFEM解析 (COMSOL, Inc., COMSOL Multiphysics<sup>®</sup>) を行った。センサは軸対称であるので、モデルは1/100軸対称モデルとなっている。ここでチャンネルの長さは  $1000 \mu\text{m}$ 、 $50 \mu\text{m}$ 、 $1 \mu\text{m}$  である。パリレンドームの厚さは  $10 \mu\text{m}$ 、高さは  $300 \mu\text{m}$ 、SU-8構造体の高さは  $50 \mu\text{m}$  である。

パリレンドーム中心に  $5 \text{ gf}$  の力を鉛直方向に印加したとき、パリレンドームは最大で  $13 \mu\text{m}$  変位した (図4(b))。図5にマイクロチャンネルの変位を示す。図からわかるように、チャンネルの最大変位は  $2.4 \text{ nm}$ 、変位の平均値は  $0.3 \text{ nm}$  となっている。図6に初期位置  $\alpha$  とSN比 (信号ノイズ比) の関係を示している。初期位置  $\alpha$  が  $0.98$  のとき、SN比は  $18$  となっており、この構造を用いることで静電容量の変化を十分測定することができる。

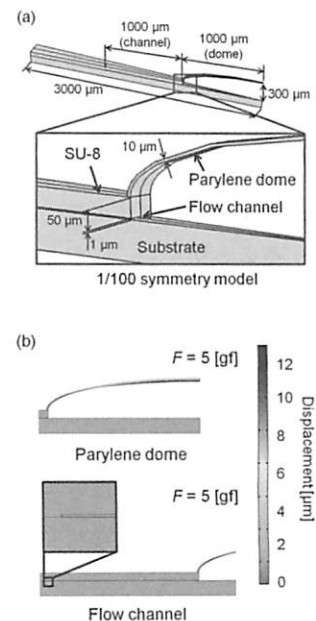


図4 (a)FEM 解析モデル, (b)  $5 \text{ gf}$  印加時のパリレンドームとマイクロチャンネルの変位

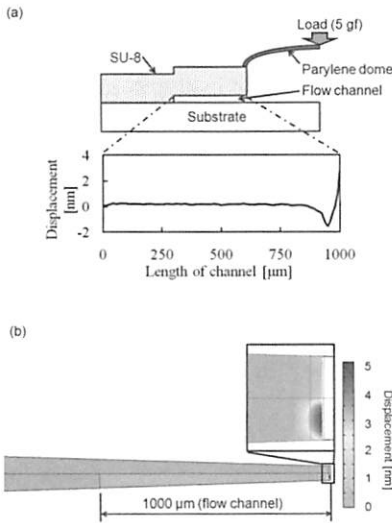


図5 マイクロチャンネルの変位。(a) 流路上面の中央線、(b) 流路面

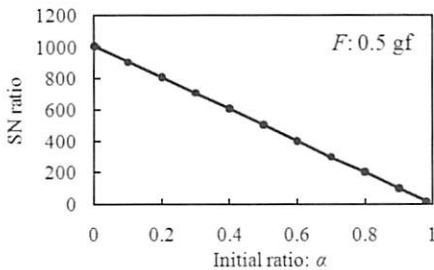


図6 0.5gfを印加したときの初期位置 $\alpha$ とSN比の関係(解析結果)

#### 4. 作製方法

図7に一次試作センサの作製プロセスを示す。熱酸化したSiウェハ上にAl下部電極を形成する(図7(a)-(c))。ここでAlの厚さは $1\mu\text{m}$ 、 $\text{SiO}_2$ の厚さは $0.3\mu\text{m}$ となっている。下部電極の形成後、犠牲層となるアモルファスSi(a-Si)を $1\mu\text{m}$ 堆積する(図7(d))。このときのa-Siの厚さがマイクロチャンネルの高さとなる。絶縁層として堆積したParylene上にAl上部電極を形成する。その後、SU-8をフォトリソグラフィでパターニングする(図7(e)-(g))。Paryleneを酸素プラズマを用いてエッチングしたのち、 $\text{XeF}_2$ ガスを用いてa-Siをエッチングし、マイクロチャンネルを形成する(図7(h)-(i))。シリコンオイル(信越化学、Hivac F-4、動粘性:  $37\text{cSt}$ )を滴下後、Paryleneを堆積し封止する(図7(j)-(h))。

図8に作製した触覚センサを示す。図8(a)、(b)のように下部電極は放射状に形成されている。このときマイクロチャンネルは100本あり、感圧部は直径4mmとなっている。作製したデバイスはマイクロ

チャンネル上部にAl上部電極があるため、流路内のオイルの初期位置を確認することができなかった。図8(d)のようにSi基板の上にアレイ状のセンサを形成することに成功した。このセンサをフレキシブル基板上に配置することが今後の課題となる。

#### 5. 評価

図9に作製したセンサの性能評価システムの概念図を示す。Paryleneドームに重りを載せ、そのときの静電容量をLCRメータ(Agilent Technology Inc., E4980A, accuracy is 0.05%)を用いて測定した。図10に印加した力( $F$ )と静電容量の変化( $\Delta C$ )の関係を示す。この結果より測定の原理が確認され、感度 $0.05\text{pF/gf}$ を達成した。このときの感度は前述の理論計算では $\alpha$ が0.98のときと同程度であったので、初期状態でオイルは流路の98%を占めていたと考えられる。これはオイルを封止するため低真空中でParyleneを堆積するとき、流路内の空気が脱泡されたためと考えられる。前述のように初期位置 $\alpha$ が小さいほど感度が高いことから、オイルの封止方法を改善するのが今後の課題である。

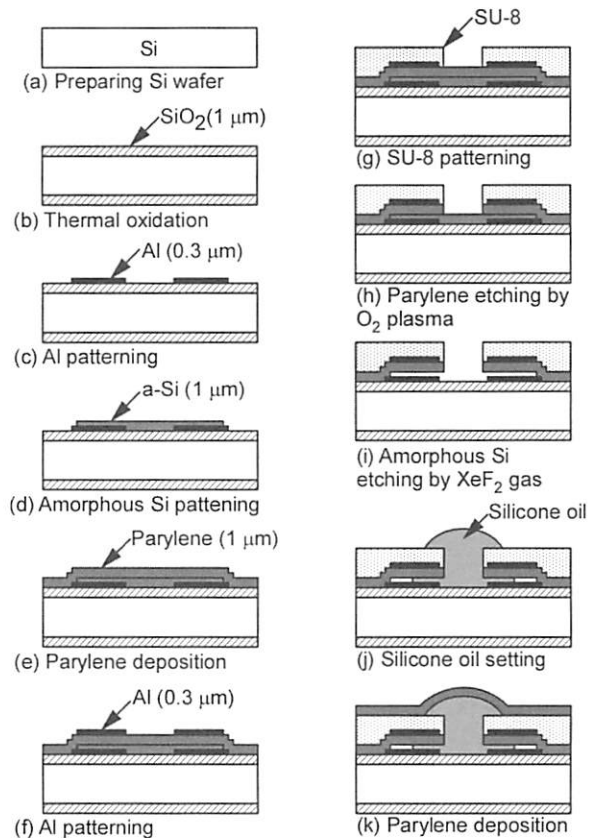


図7 オイルを用いたフレキシブル触覚センサの作製プロセス

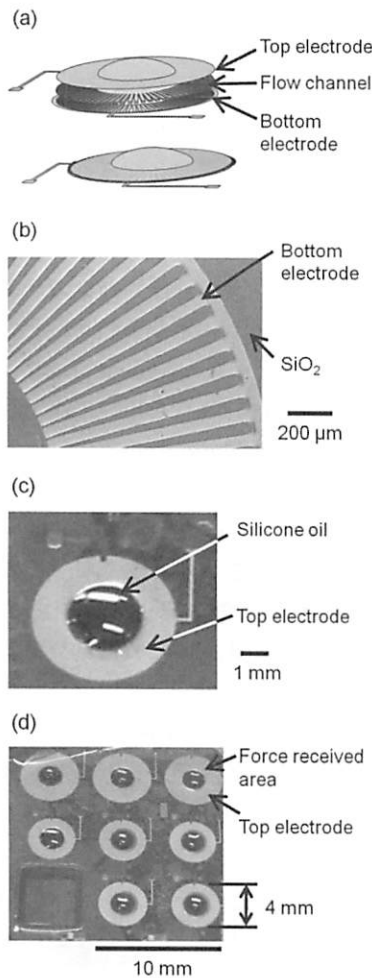


図8 一次試作センサの作製結果

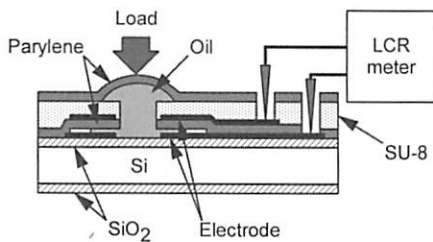


図9 性能評価システム

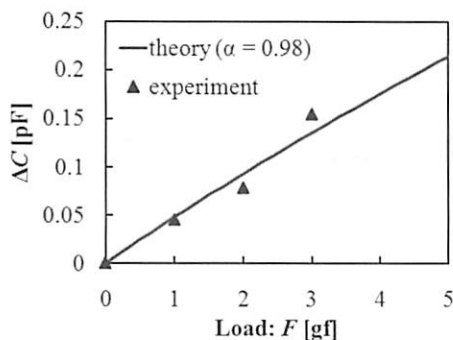


図10 印加した力に対する静電容量の変化 (実験)

## 6. おわりに

本研究では破断しにくい電極をもつフレキシブル静電型触覚センサを提案した。FEM解析により、力印加時のマイクロチャネルの変位を求め、SU-8構造体が静電容量の変化を測定するのに十分であることを示した。実際にセンサを作製し、感度0.05pF/gfを達成した。理論式からオイルはマイクロチャネルの98%を占めているとわかった。今後は、オイルを封止する工程の改善を行い、センサの高感度化を目指す。

## 参考文献

- 1) H-K. Lee, J. Chung, S-I. Chang, and E. Yoon, "Normal and Shear Force Measurement Using a Flexible Polymer Tactile Sensor with Embedded Multiple Capacitors", *IEEE J. Microelectromech. Syst.*, vol. 17, no. 4, pp. 934-942, 2008.
- 2) T. Someya, T. Sekitani, S. Iba, Y. Kato, H. Kawaguchi, and T. Sakurai, "A Large-area, Flexible Pressure Sensor Matrix with Organic Field-effect Transistors for Artificial Skin Applications", *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, vol. 101, no. 27, pp. 9966-9970, 2004.
- 3) S. Suzuki, S. Tsuchitani, K. Sato, Y. Yokota, M. Sato, and M. Esashi, "Semiconductor Capacitance-Type Accelerometer with PWM Electrostatic Servo Technique", *Sens. Actuators*, vol. A21-23, pp. 316-319, 1990.
- 4) N. Binh-Khiem, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, "Polymer Thin Film Deposited on Liquid for Varifocal Encapsulated Liquid Lenses", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 93, pp. 124101-3, 2008.
- 5) M. T. Petralia, and R. J. Wood, "Fabrication and Analysis of Dielectric-elastomer Minimum-energy Structures for Highly-deformable Soft Robotic Systems", *Proc. IEEE/RSJ Conf. Intelligent Robots Syst. (IROS2010)*, Taipei, Taiwan, Oct. 18-22, 2010, pp. 2357-2363.
- 6) T. Maleki, G. Chitnis, and B. Ziaie, "A batch-fabricated laser-micromachined PDMS actuator with stamped carbon grease electrodes", *J. Micromech. Microeng.*, vol. 21, 2011, p.027002 (8 pp).