

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20500

研究課題名（和文）肥満・糖尿病患者の足裏圧計測に向けた、熱膨張ポリマー含有圧力センサの研究

研究課題名（英文）Study of Pressure Sensor Containing Thermally Expandable Polymer for Measurement of Plantar Pressure in Obese and Diabetic Patients

研究代表者

多川 友作 (Tagawa, Yusaku)

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・特任助教

研究者番号：20962517

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、高荷重にわたって高感度かつ線形応答可能なフレキシブル圧力センサを、熱膨張ポリマーを使って実現した。熱膨張ポリマーを即座に加熱することで、ポリマーの径をばらつかせ、種々の荷重に応答するような直径分布のある内部構造にすることが可能となった。結果として溶液プロセス可能なフレキシブル圧力センサの中では世界最高の線形応答性・線形応答荷重領域・感度を達成した。これらの成果で、国際学会2件、国内学会2件、国際学術論文1報を報告した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

フレキシブル圧力センサは曲面形状や生体などに張り付け、脈波や足底荷重、歯ぎしり等様々な信号取得に有効であった。静電容量型のセンサの場合、より高感度に信号を取得するためには、空隙構造を用いて見かけの初期容量を下げる手法が良く用いられるが、高荷重下では空隙構造が消滅してしまう。サイズの異なる空隙になるように鋳型を作製して界面制御することで、線形高荷重応答可能な圧力センサは報告されたが、溶液処理のみで可能なセンサはなく、本研究の学術的意義は高い。また、高荷重下でも線形応答可能なため、靴底での応用やインソール圧力センサでの使用時にも非線形フィッティング等の複雑な校正は必要がない点が社会的に重要である。

研究成果の概要（英文）：In this study, a flexible pressure sensor with high sensitivity and linear response over wide pressure range was realized using a thermally expandable polymer. By immediately heating the thermally expanded polymer, it was possible to vary the diameter of the polymer and create an internal structure with a diameter distribution that responds to various loads. As a result, the world's highest linear response, linear response load range, and sensitivity among solution-processable flexible pressure sensors were achieved. With these results, two international conferences, two domestic conferences, and one international academic paper were reported.

研究分野：医用工学

キーワード：圧力センサ 熱膨張ポリマー 静電容量型圧力センサ フレキシブル圧力センサ

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

ウェアラブルデバイスでの足圧分布測定は、体重計測・歩行分析などによる健康管理やリハビリテーションで需要がある。とりわけ糖尿病患者の足裏部圧力集中による潰瘍予防や肥満患者の足部負担モニタリングのために、局所的な高圧力領域 (< 1MPa) でも高感度 (> 10^{-3} kPa $^{-1}$) を有するインソール式圧力センサは重要である。様々な動作原理の圧力センサのうち、静電容量型圧力センサは低消費電力で単純構造、高い信頼性などの特性から広く用いられる。静電容量型圧力センサの圧力感度は、誘電膜に空隙を作製することで、初期容量 C_0 の低下・ヤング率の低下・圧縮時の空隙減少による誘電率増加により向上できる。既存研究では、テンプレートを用いてピラミッド型の構造を作製したり (S. R. A. Ruth, et al., *Adv. Funct. Mater.*, 30, 29,(2020).)、砂糖構造を水融解により取り除いたりすることで (S. Chen, et al., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 8, 31,(2016).)、誘電層に空隙構造を作製した。しかし、自由に切り貼りして成型できる使いやすさや大面積性、均一な膜特性を同時に達成するうえで重要な、コーティングプロセスかつ低温 (~120°C) プロセスで作製可能な空隙構造は少ない。さらに、既存の体重計のように、60~80 kg の人の体重変化を 0.1 kg 程度の分解能で測定可能な精度を有するような靴型ウェアラブルは報告がない。そこで本研究では、低温のコーティングプロセスで空隙構造を作製し、高圧力領域でも高感度なフレキシブル圧力センサを実現することを目指した。

2. 研究の目的

本研究ではゴム溶媒に混ぜて加熱するだけで空隙が作製可能な熱膨張ポリマー (TPM) を用いた高圧力応答可能な圧力センサの開発を目的とする。作製した圧力センサを用いて、大面積化、また荷重計測のための靴型デバイスを実装することを目指す。

3. 研究の方法

① 静電容量型圧力センサの開発

図1のような作製行程を検討した。まず、ポリイミド基板にマスクでパターンされた金を蒸着した。基板をスライドガラスに固定し、ポリジメチルシクロカン (PDMS) で TPM を混合した溶液を上から滴下し、スピンドコーティング法によってコーティングした。その後、TPM の膨張及び PDMS の硬化を別々のアニール条件で行った。最後に接着層として PDMS を再度スピンドコーティングし、熱圧着によって上部電極を取り付け、静電容量型のセンサを開発した。条件出しとして、TPM の膨張度合いを変化させ、圧力感度を調査するために、TPM の濃度と加熱温度を変更して最も高い感度が得られる条件を探索した。

② 圧力センサの評価系の設計及び耐久性評価

静電容量型圧力センサは LCR メータと荷重試験機で測定された。静電容量は人間や装置の接近や空調等にも応答してしまうため、アクリル板や絶縁薄膜テープ、2重に重ねた手袋等を用いて容量型圧力センサへの電気力線の経路を断つような系を構築した。また繰り返し試験が可能な荷重試験機を用いて、1万回の耐久試験を行った。

③ アプリケーションとしての靴実装・大面積多点化

溶液プロセスの利点として大面積化が容易である点があげられる。そのため 4*4 cm の大きさで 3*3 点の圧力センサアレイを検討した。また、下駄の靴底に大面積の圧力センサをカバーすることで、体重をもれなく計測可能な靴ウェアラブルを実装検討した。

4. 研究成果

① 高荷重下で線形応答可能な圧力センサの作製

図2に、熱膨張温度及び TPM 濃度別の圧力応答結果を示す。検討の結果、125°C の膨張温度かつ 8 wt% の濃度で TPM を含有する圧力センサが最も感度が良いことが判明した。ちなみに、125°C 以上の温度を加えてしまうと TPM の外殻が破れ、空隙構造を良好に保つことが困難になり、8 wt% 以上の濃度の場合は加熱時に表面の凹凸が顕在化し、良好な平坦面を維持することができないため、センサとしての評価が困難である。

② 耐久性評価

図3に、150 kPa 下で1万回の耐久試験の結果を示す。突発的で高い容量応答は、突発的な高い荷重によるものであり、そのような荷重があっても安定的に応答を示すことが分かる。また、通常 100 kPa 以下でフレキシブル圧力センサの耐久試験は行われるが、本センサは 150 kPa の高荷重でも安定的な応答を出力可能である。

③. アプリケーション

図4左図に多点計測用センサを示す。すべてのセンサで初期容量が4~5 pF程度で安定しており、感度も単点デバイスのばらつきの範囲内に収まるセンサを作製できた。500 g 重の重りをセンサ中心に設置し、その挙動を図4右図に示す。予想されるように中心が最も容量変化が多く、次いで中心に近い周辺の4点での容量変化を示すことが実証された。

図5に下駄ウェアラブルのアプリケーションを示す。異なる荷重下での小さな荷重変化を定荷重の重りを用いて観察し、そのデータを比較することで、高荷重でも0.1 kgの変化を線形に追跡可能なことを示すことに成功した。このような挙動は、追加の較正や非線形フィッティングを必要とせず、靴型のウェアラブルアプリケーションのシステムを簡便化することに貢献する。

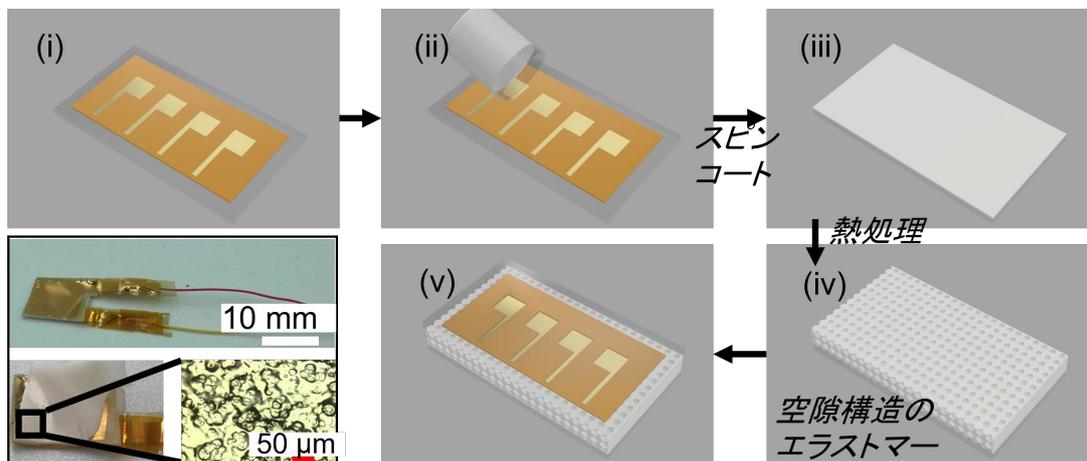


図1. 提案センサの作製行程

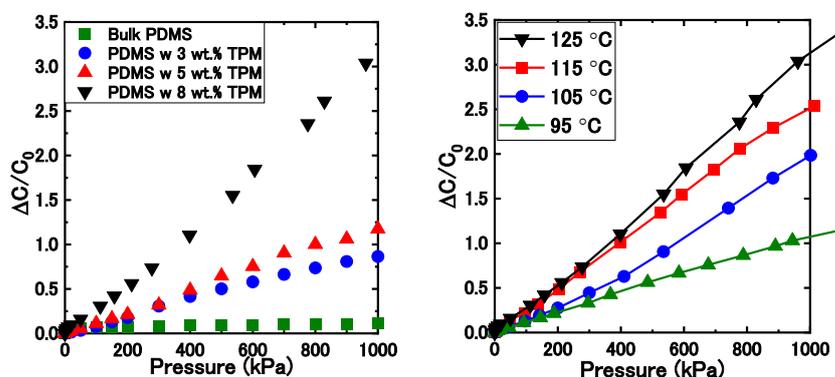


図2. TPM 濃度、熱膨張温度別の圧力応答

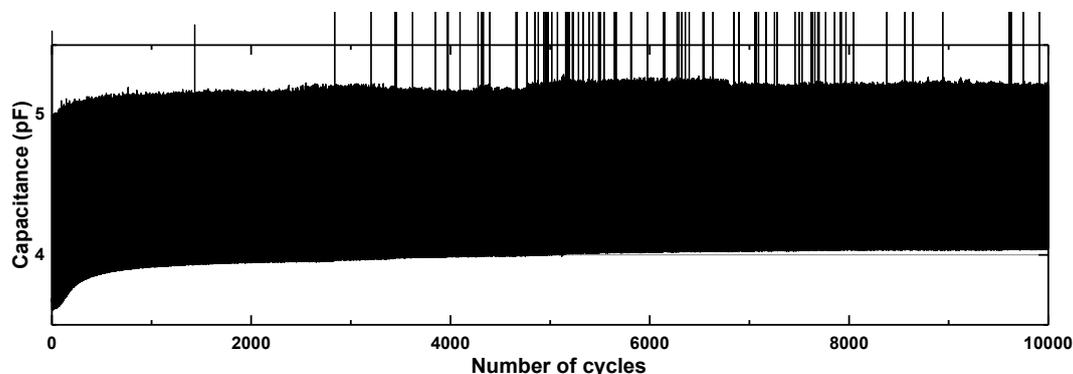


図3. 150 kPa 下で1万回の耐久性試験結果

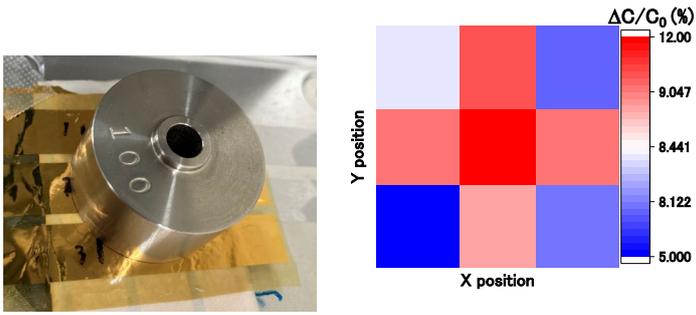


図 4. 多点計測の例

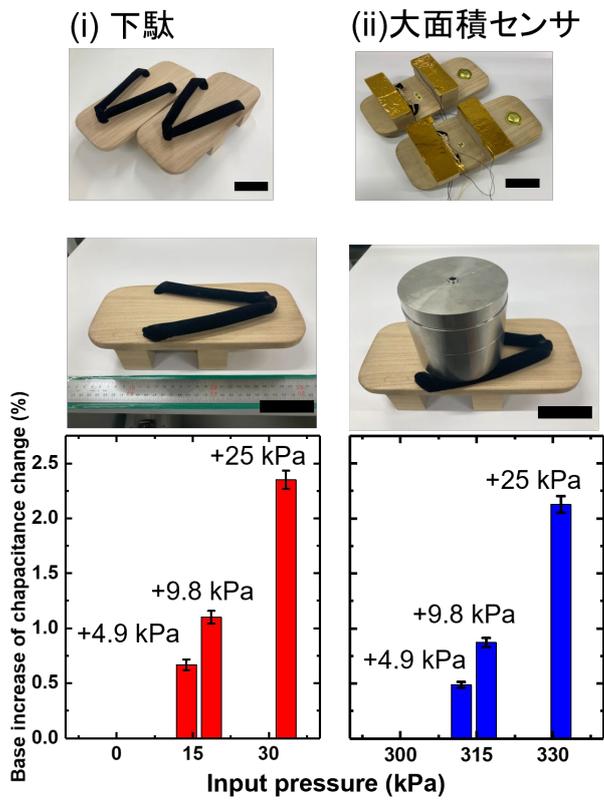


図 5. 下駄ウェアラブルのアプリケーション

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tagawa Yusaku, Lee Sunghoon, Someya Takao, Yokota Tomoyuki	4. 巻 9, 2201304
2. 論文標題 A Capacitive Pressure Sensor with Linearity and High Sensitivity over a Wide Pressure Range using Thermoplastic Microspheres	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advanced Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/aelm.202201304	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 多川友作、染谷隆夫、横田知之
2. 発表標題 高荷重で高感度かつ線形応答可能な熱膨張ポリマー含有フレキシブル静電容量型圧力センサ
3. 学会等名 第83回応用物理学会 秋季学術講演会 講演番号：22a-C105-7
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 多川友作、岡谷泰祐、小野寺宏
2. 発表標題 滑り転倒防止に向けた簡便かつ安価に滑りを計測可能な靴システム
3. 学会等名 第84回応用物理学会 秋季学術講演会 22p-D902-5
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yusaku Tagawa, Sunghoon Lee, Takao Someya, Tomoyuki Yokota
2. 発表標題 A Flexible Capacitive Pressure Sensor with Linearity and High Sensitivity over a Wide Pressure Range using Thermoplastic Microspheres
3. 学会等名 The 5th Event of the Young Researchers Society for Flexible and Stretchable Electronics, 0-12（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yusaku Tagawa, Sunghoon Lee, Takao Someya, Tomoyuki Yokota
2. 発表標題 A Flexible Capacitive Pressure Sensor with High Sensitivity and Linear Response using Size-Distributed Microsphere
3. 学会等名 2023 MRS Fall Meeting, SF01.03.34 poster presentation (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関