

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：11501

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14692

研究課題名（和文）ナノ界面制御によるマイクロポア構造を有するソフト圧力センサの創出

研究課題名（英文）Development of soft pressure sensor with micropore structure by nano-interface control

研究代表者

関根 智仁（Sekine, Tomohito）

山形大学・大学院有機材料システム研究科・助教

研究者番号：20805634

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、新規ソフト圧力センサ開発のための溶液材料システムを構築し、ナノ界面制御の観点から高感度圧力センサの作製と特性評価を行った。これを達成するために、センサデバイスに使用する材料群と成膜方法の最適化、および膜内解析を行った。また、得られた感圧層薄膜を導電性高分子からなる電極上に塗布し、センサデバイスを作製した。センシング特性では、界面活性剤の炭鎖長に由来するマイクロポア径と印加圧力に対する感度に相関性があることが新たに明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、機能性材料群の最適な組み合わせによる高感度な有機圧力センサを創出するものであり、デバイス工学の特性向上と材料構成設計のプロセス効率向上に寄与できる。さらに、多様な組み合わせ論を簡便にデバイス特性に展開できる特徴も有している。これは、本研究の目的にひとつとしている有機エレクトロニクス材料分野への展開にとどまらず、様々な材料システム工学と電子デバイス工学への応用が可能な新手法を提案するものである。

研究成果の概要（英文）：We developed a soft pressure sensor with micropore structure by nano-interface control for robotic wearable devices. A pressure-sensitive layer was formed on an electrode made of a conductive polymer. In terms of sensing properties, it was newly revealed that there is a correlation between the micropore diameter derived from the surfactant chain length and the sensitivity to applied pressure.

研究分野：機能性有機材料

キーワード：相溶性 ナノ界面 圧力センサ マイクロポア

1. 研究開始当初の背景

ソフトロボティクスへの触感覚付与は、ヒトとの協働ならびに精密遠隔操作などの未来技術実現にむけて重要である。なかでも、非線形管体である当該ロボットに対するソフトセンサの有用性が明らかにされつつあり、高感度触覚センサデバイスの開発は重要なターゲットである。さらに、ごく最近では、実装を重視した薄く軽い薄膜センサにおいてもヒトと同等の検出レスポンス精度を達成するなど、その発展性は目覚ましい。一方、当該センサの実用上の課題として、薄膜作製時の高感度性と薄膜化の両立が困難であることや材料システムの構築技術の改善などが挙げられる。

ここで、ソフト触覚センサの中でも最重要パラメータの一つである力覚検知（すなわち印加圧力検出）においては、その印加された圧力を抵抗値変化から検出する導電性カーボン型センサが、機能付与と感度の観点から有効である。当該センサは溶液材料（導電性カーボン、界面活性材、溶媒などで構成）から作製可能であり、形成した薄膜中にマイクロポアが形成されることでセンシングできる。これは、圧力印加時の当該ポアの変形が膜内導電パスを変化させるという原理に基づく。一方、マイクロポアを形成するための界面活性剤は、単純炭素鎖と親液基から構成されることが多いが、溶媒との相溶性によって凝集体を形成し、著しい感度低下を招くことがある。実際、多層カーボンナノチューブ（MWCNT）を溶質とする 1-ナフタレン酢酸およびポリエチレングリコールの混合溶液から形成した薄膜は、凝集により単位体積当たりの密度が大きく上昇する。

これに対し、本研究開始当初では、申請者はベンゼンスルホン酸と純水などから混合溶液を構築、センサ内のカーボン材料の凝集防止することで優れた成膜性と高感度化の両立が可能であることを見出している。これは、①界面活性剤やナノカーボン界面の化学結合に影響する C 鎖数と溶媒との相溶性向上、②薄膜センサ内の安定的マイクロポア実現による導電性とセンシング能向上が特徴である。一方、より詳細な材料構成とセンサ特性や成膜性との関連性は不明な点が多かった。これを解決することで、新規圧力センサはヒトの触感覚に匹敵する高感度で、全溶液プロセスで作製する薄膜センサ中、もっとも軽く薄い魅力あるデバイスが実現できる。表 1 に、上記の背景と課題などをまとめた。

表1 本研究の背景、課題、および方向性

研究背景	【ソフト圧力センサの応用】 ■触覚デバイス／ロボットに期待
研究課題	【実用上の課題】 ■高感度／薄膜の両立 ■材料システムの構築
従来技術との比較	【薄膜状態で印加圧力を検出可能】 ■圧力でポア内導電性変化で検知 *ポア径と感度の相関性が不明 *ポア径コントロール技術が不定
研究の方向性	■ポア径制御と圧力センサ開発 ■センサ特性評価とデバイス応用

2. 研究の目的

上記のとおり、報告者はこれまで、機能性材料と界面活性剤間のナノ界面制御による効率的な機能発現の原理解明とセンサ応用により、関連溶液材料の実現と高感度化に成功してきた。特に、溶液中の材料分散状態の安定化を目指した薄膜成膜による物理パラメータ検出に注力してきた。これらにより、薄膜形成時のポア構造が圧力検出上重要であることを突きとめつつあった。しかし、特に溶液材料中の界面活性剤自体の分子量や化学構造が、感圧層の成膜性に与える影響は明らかではない。加えて、薄膜センサ形成時のポア径寸法に起源を発する導電性変化および感度との相関性も未解明のままである。

そこで本研究では、ソフト圧力センサのための溶液材料システムを構築し、ナノ界面制御の観点から薄膜センサ形成時のポア径寸法がデバイス特性に与える影響を解明することを目的とし

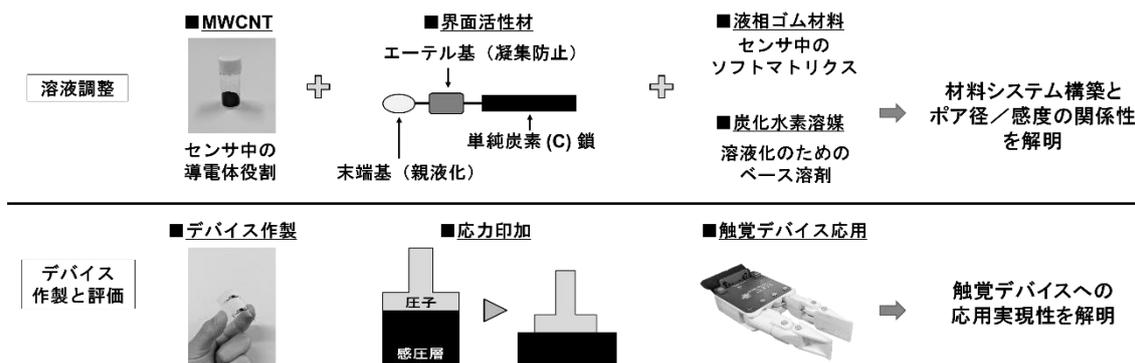


図1 本研究の目的と研究計画の概略

た。加えて、得られた知見から高感度センサを実現し、触覚デバイスへの応用実現性を明らかにした (図 1)。

3. 研究の方法

本研究では、上記目的達成に向けて、以下の 2 つの方法を試みた。

- (1) 界面活性剤の炭鎖長がマイクロポア径形成に及ぼす影響の解明
- (2) 高感度ソフトセンサの作製と圧力検出能評価

4. 研究成果

(1) 界面活性剤の炭鎖長がマイクロポア径形成に及ぼす影響の解明

新規に調整した溶液中の界面活性剤 (ポリオキシエチレン-*n*-ステアリルエーテル, PSE) の炭鎖長とマイクロポア径形成の相関性を明らかにし、当該ポア径と成膜性の相関解明を行った。

まず、界面活性剤 PSE の炭鎖長 *n* を *C*=2~100 まで変更した場合の当該溶液をそれぞれ調整し、薄膜形成時の内部ポア径形成様相を明らかにした (図 2)。調整した溶液の材料構成は PSE の他に MWCNT、マトリクスポリマー (ポリジメチルシロキサン, PDMS)、純水および炭化水素系溶媒 (ヘキサン) であり、各添加量は最適化したものを用いた。特に、本研究では薄膜形成時のソフト化、および溶液材料の過凝集防止の観点から界面活性剤にはエーテル基を有する PSE を採用している。また、薄膜の状態解析のための物理化学的状态に注目し、膜内構造解析として光学顕微鏡やレーザー顕微鏡、走査型電子顕微鏡 (SEM)、FT-IR などを駆使して実施した。なお、薄膜自体は溶液材料をスクリーン印刷法で成膜形成した。その後、当該界面活性剤の炭鎖長と薄膜形成時の膜内ポア径の相関性を、SEM を用いて観察した。これより、界面活性剤の炭鎖長の短いものがポア径を大きくできる傾向にあることが分かった。これは、添加した各材料の凝集状態に依存していると考えられる。

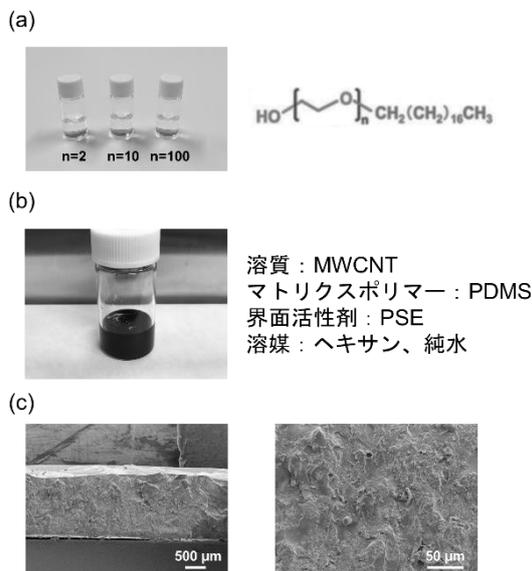


図2 本研究で作製した新規感圧層と材料の概略。(a) 用いた界面活性剤Pの外観と分子構造。(b) 作製した溶液と各材料構成。(c) 成膜した感圧層の断面SEM像 (左) と表面SEM (右) 像。

(2) 高感度ソフトセンサの作製と圧力検出能評価

構築した溶液材料を用いてソフト圧力センサを作製し、印加圧力に対する信号検出を行った。センサの電極形成には導電性高分子である PEDOT:PSS を用いた。印刷法で形成したセンサに垂直圧力を印加したときの抵抗値変化を測定することで、炭鎖長の異なる界面活性剤を導入したセンサの、ポア径に対する感度応答性を明らかにした (図 3)。ここでは、ポア径が大きいほど、圧力に対する感度が高いことが分かった。特に *n*=2 においては、最小感度 1 kPa を達成しており、本研究の材料システム構築によるセンサ特性の最適化に成功した。

さらに当該センサをロボットハンドに実装したときの触覚センシングを行った。当該ロボットハンドが把持対象物を把持したときの抵抗値変化を作製したセンサで計測した。これによると、把持時の検出速度は約 70 ms であり、明確な触覚検出に成功した。

以上より、ソフト圧力センサのための溶液材料システムを構築し、薄膜センサ形成時のポア径寸法がデバイス特性に与える影響を明らかにした。特に界面活性材の炭鎖長に注目したときの、薄膜形成時のポア径と感度の相関性を定量化し、センサ応用への展開可能性も明らかにした。

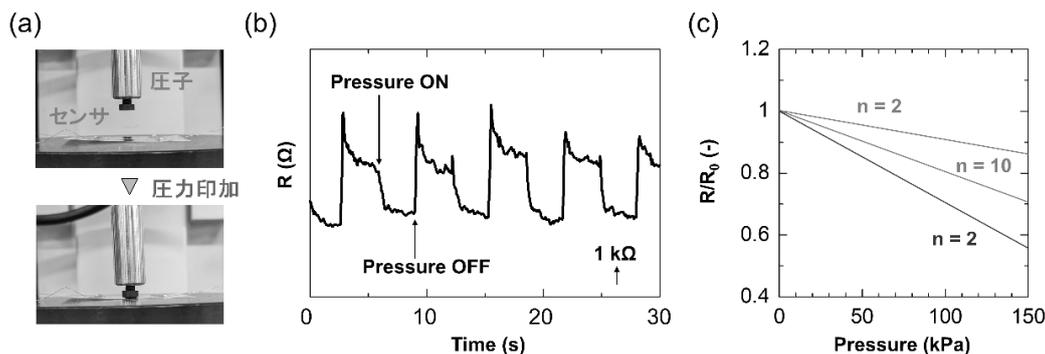


図3 作製したセンサのデバイス評価。(a) 圧縮試験。(b) 圧力印加時の抵抗変化。(c) PSEの*n*数変更時の抵抗値変化の近似直線。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2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 関根智仁	4. 巻 12
2. 論文標題 機能性有機材料を用いたウェアラブル物理センサのヘルスケア応用	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 センサイトWebジャーナル	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tou Kaiin, Nara Kenta, Sekine Tomohito, Wang Yi Fei, Takeda Yasunori, Kumaki Daisuke, Tokito Shizuo	4. 巻 2
2. 論文標題 Micro Pore Composed Soft Pressure Sensor with Ether Surfactant via High Sensitivity in Wide Range for Robotic Machine Interface Application	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advanced Sensor Research	6. 最初と最後の頁 2300045-2300050
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/adsr.202300045	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7件（うち招待講演 2件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 関根智仁
2. 発表標題 機能性高分子を駆使したソフト触覚デバイスの開発と応用
3. 学会等名 令和3年度東北地区先端高分子セミナー（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 関根智仁
2. 発表標題 機能性有機材料による触覚センシングシステムの開発と応用展開
3. 学会等名 第247回研究会有機エレクトロニクス材料研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 阿部 真依、菅 凌輔、立花 将吾、関根 智仁、Wang Yi-Fei、竹田 泰典、熊木 大介、時任 静士
2. 発表標題 細孔構造を有する薄膜型ソフト圧力センサの作製
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菅凌輔, 鬼澤好輝, 関根智仁, Wang Ye-Fei, 熊木大介, 時任静士
2. 発表標題 ロボットハンドへのデュアル触覚センサ直接形成と特性評価
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 董海韵, 奈良健汰, 関根智仁, Wang Yi-Fei, 熊木大介, 時任静士
2. 発表標題 ステアリルエーテル界面活性剤を用いた薄膜型高感度圧力センサの作製
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 董海韵, 奈良健汰, 関根智仁, Wang Yi-Fei, 竹田泰典, 熊木大介, 時任静士
2. 発表標題 界面活性剤の鎖長最適化による薄膜型高感度圧力センサの高感度化
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 奈良健汰, 董海韵, 関根智仁, Wang Yi-Fei, 竹田泰典, 熊木大介, 時任静士
2. 発表標題 ナノカーボン型複合材料によるソフトな硬さセンサの作製
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
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