

令和元年5月17日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18419

研究課題名(和文) 高感度MEMS可動部の完全アディティブ形成技術の開発とセンサ応用

研究課題名(英文) Development of the additive fabrication process for mechanical moving elements toward highly sensitive MEMS sensors

研究代表者

金澤 周介 (Kanazawa, Shusuke)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・研究員

研究者番号：60783925

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では立体的な中空構造を極めて高効率に作製する新規プロセスの開発を行った。印刷で形成した積層体に剥離性を持たせることで、部分的な接触による一括転写を可能にし、高機能なカンチレバーを完全アディティブプロセスで形成することに成功した。また変位センサとしての評価からは梁の変位を電気的に検出できることに加え、良好な機械的安定性も示された。開発されたプロセスは種々の機械変位式センサの製造工程を高効率化し、環境負荷と材料浪費を低減したセンサの大量生産の実現に寄与するものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

印刷技術を用いて電子デバイスを作製するプリントドエレクトロニクス(PE)の技術は、フレキシブルな素材を基板とする新しいデバイスを高効率に製造できる利点から注目されている。世界的なInternet of Things(IoT)の社会実装を背景としてセンサデバイスの需要は急伸しており、センサの高性能化のみならず生産技術の高効率化の必要性も高まっていた。これらに応える技術として、必要な構造のみの積層によるアディティブマニファクチャリングを実施可能な印刷技術には、デバイス製造技術としてのさらなる適用範囲の拡充が期待されるとともに、それを可能とする技術の更新が求められていた。

研究成果の概要(英文)：A Novel printing-based process to achieve efficient fabrication of a three-dimensional suspended structure has been established in this research. In the process, stacked layers on a temporary substrate complementary transferred for another substrate by a partial contact to form a micro cantilever with a multiple layer. As a displacement sensor, the cantilever showed satisfiable performance by a printed wire embedded into the cantilever. The developed process enhances the potential of printing techniques as the manufacturing method for devices with three-dimensional structures.

研究分野：フレキシブルエレクトロニクス

キーワード：センサ 印刷 MEMS カンチレバー

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

印刷技術を用いて電子デバイスを作製するプリンテッドエレクトロニクス（PE）の技術は、飛躍的に効率化されたデバイス生産を可能にすること、繊維や紙などのフレキシブルな素材を基板とする新しいデバイスを創出できることなどの利点から注目されている。近年は特にセンサデバイスへの応用が盛んに検討されており、面状に圧力分布を検出できるシート型のセンサや、感度の高いひずみセンサが報告されていた。世界的な Internet of Things (IoT) の社会実装を背景としてセンサデバイスの需要は急伸しており、センサの高性能化のみならず生産技術の高効率化の必要性も高まっていた。これらに応える技術として、必要な構造のみの積層によるアディティブマニュファクチャリングを実施可能な印刷技術には、デバイス製造技術としてのさらなる適用範囲の拡充が期待されるとともに、それを可能とする技術の更新が求められていた。

本研究以前の PE 分野の研究開発において、基板上に機能層を二次元展開する技術については実用化レベルの進展が得られていた。一桁ミクロンオーダーの微細配線の形成や、大面積パターンニングについては実用化に近いレベルで完成されていた。一方で、本研究で志向した三次元構造形成への印刷技術の適用は、本研究で事前に検討した Lift-On Offset Printing (LOOP 法) が唯一の成功例であった。三次元構造の形成はセンサデバイスの製造と深く関わるものであり、その代表例が MEMS (Micro Electro Mechanical System) の分野で広く利用されている中空構造体の形成である。MEMS における中空構造体は機械変位式センサのコア部として利用されており、片持ち梁（カンチレバー）や両持ち梁（ダイヤフラム）に、検出対象と選択的に化学結合する感応膜や、たわみに応じて電位を発生させる圧電層を導入することで幅広いセンシングが実現されていた。しかしながら既存の中空構造体の製造方法はバルクの固体から梁を削り出すため、製造工程は長く複雑であった。そしてその過程では、エッチング用の保護レジストや深掘りされる犠牲層など、多くの材料が廃棄を前提として利用されていた。この中空構造体の製造工程に、印刷技術に基づくアディティブマニュファクチャリングを適用することは、将来にわたるセンサの大量生産の環境負荷と材料浪費を著しく低減することが期待された。

2. 研究の目的

上述の社会的背景を受け、本研究では樹脂材料による MEMS 可動部を、工程が短くかつ材料の浪費のない高効率製造技術とともに創出することを目指した。センサデバイスが急速な需要拡大を続けていることは周知の事実であったが、シリコンをベースとした半導体プロセスによる製造方法はコモディティ化を余儀なくされ、最終製品のコスト勝負に陥る可能性が高いと考えられた。これを回避するためには可動部となる中空構造体に低ヤング率な樹脂材料を適用し、感度を飛躍的に向上させることが有効だが、その製造技術の本命は不在であり、犠牲層を用いる既成技術の転用では根本的な差別化は困難であった。そこで本研究は印刷法による中空構造体の完全アディティブ形成技術の確立を目指し、そのための立体転写プロセスに係る知的基盤を整備することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では図 1 に示す独自のプロセス開発を通じて、中空構造体の完全化アディティブプロセスの確立に取り組んだ。同手法はオフセット印刷の要領で中空構造体を乗せるように形成するため Lift-On Offset Printing (LOOP 法) と名付けた。LOOP 法ではまず仮基板となるシリコンゴムの表面に、後にカンチレバー部となる構造（前駆構造）をスクリーン印刷等で形成し、これを一旦加熱によって完全に硬化させる（図 1 ①）。続いて前駆構造の端部に粘着部となるインクをスクリーン印刷やディスペンス塗布により供給する（図 1 ②）。この状態でデバイス用の基板へ粘着部を接触させ（図 1 ③）、必要に応じて粘着部を硬化させるための熱処理を加えた後に二つの基板を引き剥がす。これによって粘着部がデバイス基板へと転写される際に前駆構造も共にシリコンゴムから剥離され、粘着部の厚みの分基板表面とのエアギャップを有するカンチレバー構造が形成される（図 1 ④）。最初の前駆構造の印刷に銀ペーストなどの導電材料を使うことで導電性のカンチレバーが得られる。この手法を基にした新規機械変位式センサの開発、ならびにプロセス改良による構造の高度化を実施期間中に精力的に進め、次項に記すような研究成果へと繋げた。

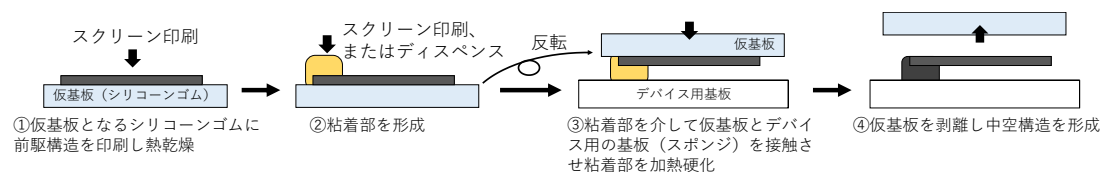


図 1 LOOP 法のプロセスフローの模式図

4. 研究成果

本研究の主な成果は、伸縮性の基板上を用いた微小中空構造の形成と、多層一括転写技術に

よる中空構造の高度化の2点である。

4-1. 伸縮性基板への微小中空構造体の形成とセンサ応用

LOOP法を用いてウレタンスポンジの表面へカンチレバー構造を形成することに成功した。プロセスの流れは図1に示した通りであり、まず厚み75 μm のステンシルマスクを印刷版に用いて、カンチレバーの前駆構造となる幅500 μm 、長さ7mmの矩形状に銀ペースト(DIC, GOAGT-93C)を仮基板となるシリコンゴム(ポリジメチルシロキサン)のシート上にパターン供給し、160 $^{\circ}\text{C}$ のオープン内に1時間投入し硬化させた。硬化後の銀ペーストの厚みは64 μm であった。続いて矩形の片方の端部に、厚み100 μm のステンシルマスクを用いて1.5mm四方の粘着部を、接着性銀ペースト(ニホンハンダ、ECA100)をインクとして形成した。これをウレタンスポンジの表面に接触させ、120 $^{\circ}\text{C}$ のオープンで10分間加熱し粘着部を硬化させた。最後に両者を引き剥がすことで、図2のように正方形の端部が裏面の粘着によってスポンジ表面に固定され、他方の端部が宙に浮いた状態のカンチレバー構造を形成することができた。これより粘着部の厚みを適切に設定することで表面ラフネスの大きな基材に対しても粘着性を高めることが可能であること、その粘着性を用いてスポンジを基板としてもLOOP法によるカンチレバー構造の形成が可能であることが示された。

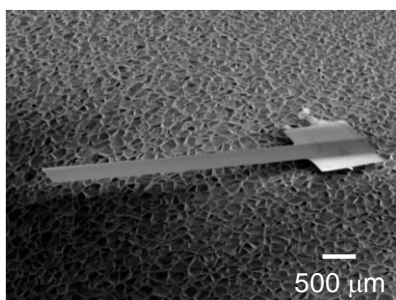


図2 LOOP法でスポンジ表面に作製した導電カンチレバーの電子顕微鏡像

LOOP法の改良によってウレタンスポンジへカンチレバー構造の形成が可能となった。これを応用してヘッドマイク先端に組み込むための呼気センサの開発を図った。ヘッドマイクの先端部での呼気の検出は、使用者の拘束感が低いという利点がある反面、呼気を発する鼻孔や口と距離が離れているため高い感度が必要であると考えられた。よって具体的なセンサ構造を構想するにあたり、図4(a)に示すように呼気を受けて変位を示しやすいカンチレバーの構造を用いることとした。細く長い柄の先端に団扇のように受風部を設けることで、呼気を受けた際にカンチレバーが大きく変位することを期待した。検出方法としては消費電力の小さい静電容量型を選択し、カンチレバー部とエアギャップを介して静電容量を形成するための対向電極を基板となるウレタンスポンジ表面に設けることとした。

図4(b)は作製したセンサ構造を電子顕微鏡(KEYENCE、D-500)で観察したものである。粘着部から伸びた矩形の柄の先端に円形の受風部が通風孔にかかるように浮遊している様子を確認することができる。また柄の下部(図中の白い点線で囲った領域)には導電性カーボンによる対向電極が形成されている。また柄と対向電極は接触していないことが視覚的に確認できた。カンチレバーがたわんでいるために完全な平行平板構造ではないが、対向電極の厚みが68 μm 、粘着部の厚みで設けたカンチレバーの基板からの距離が92 μm であることから、およそ24 μm のエアギャップが形成されていると推察された。このエアギャップを挟む導電カンチレバーおよび下部電極に電圧を印加し、その際にエアギャップに生じる静電容量を計測することで、呼気を受けた導電カンチレバーの変位で静電容量が変化する機械変位式のセンサとしての動作が可能であると考えられた。

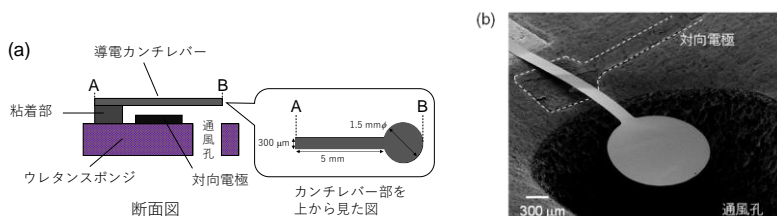


図4 (a)作製した静電容量型の呼吸センサ構造の概要、(b)作製した呼吸センサのカンチレバー部の電子顕微鏡像

ウレタンスポンジ上に形成したデバイスを実際に呼気センサとして駆動させた。図5(a)の写真のようにウレタンスポンジをデバイス作製面が内側になるように円筒状に丸め、ヘッドマイクの先端に固定した。このときスポンジに設けた通風孔が使用者の鼻からの息を受けるように

位置を調整した。導電カンチレバーおよび対向電極にはそれぞれリード線を接続し、ヘッドマイクのケーブル部分に巻き付けることでマイク部から耳あての位置まで導線を引き回した。この導線をさらに図5 (a)右側に示すようにLCRメーター（日置電機、IM3570）へと接続することで静電容量を計測した。使用者の通常通りの呼吸を行ったところ、図5 (b)の実線で示されるように呼吸に合わせて静電容量の低下が観測された。これはカンチレバーと対向電極の間のエアギャップが広がる方向への変位が得られたことを意味している。続いて睡眠時を模した深く長い呼吸を行うと図5 (b)の点線で示された結果が得られた。平常時の呼吸に比べて静電容量の変化が大きく得られ、また1回の呼吸もより長く示されているように見られた。実際に2つのデータを定量的に比較すると、平常時の呼吸によるベースラインからの変化量は平均 0.008 pF であり、対して睡眠時を模した呼吸は 0.018 pF であった。またベースラインから静電容量が減少し、再びベースラインまで戻る間の時間を呼吸の長さとする、平常時は平均 0.8 秒、睡眠時を模した呼吸は平均 1.3 秒と違いを示した。

今回の実験では実際の睡眠時の呼吸を取得してはいないものの、作製したセンサが使用者の呼吸の深さと長さを特徴付けられることから、呼吸から使用者の状態を推定するための入力デバイスとして十分な利用価値を有すると考えられる。また非接触で呼吸を検出できることも実用上の利点である。一方で実験の中では非接触であるがゆえに鼻との位置関係がデータ取得に影響を与えるなどの課題も示された。よって本格的な実用化にはさらなるデバイス構造の最適化が必要であるが、スポンジという従来デバイス作製が困難であった素材に対して機械変位式のセンサが直接形成可能になったことで、新たなセンサ形態の獲得が可能になり、今回示したヘッドマイク式呼吸センサのように生活の中に溶け込んだセンサが社会の安全性をより高められる可能性を示すことができたと考えられる。

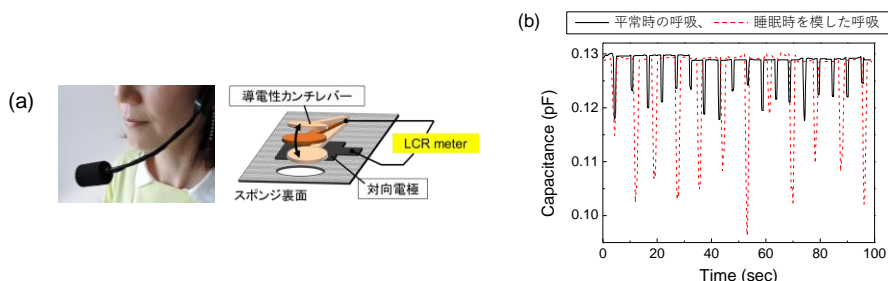


図5 (a)ヘッドマイク式呼吸センサの外観と駆動時イメージ、(b)使用者が呼吸した際の静電容量測定の結果

4-2. 多層一括転写技術による中空構造の高度化

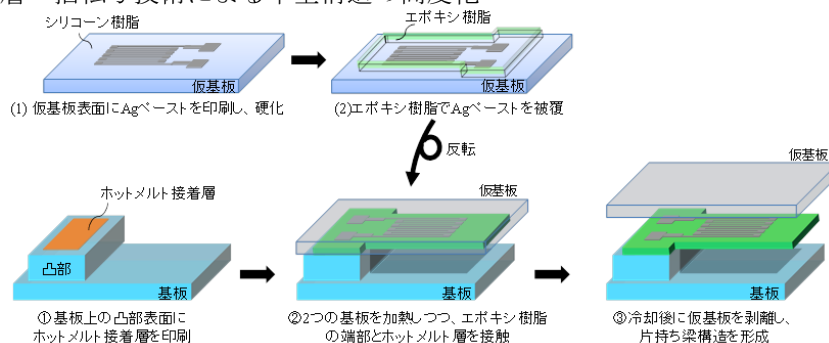


図6 多層一括転写用に改良した LOOP 法の概要図

開発したプロセスの断面模式図を図6に示す。基板上に形成した凸部の表面に仮基板上に印刷した層の一部のみを接触させ転写することで、基板上で一端のみが支持されたカンチレバー構造を形成する。仮基板は表面を剥離性に優れるシリコン樹脂で被覆し用いる。また基板の凸部表面にはホットメルト接着層を印刷で形成し、接触転写時に加熱し、剥離時に冷却することで接着性を発現させる。この基本工程は既報のプロセスと共通であるが、本実験では仮基板上で多層を積層し一括転写する可能性を以下のように検討した。

仮基板としてサイズ 150mm 角、厚み 0.7 mm の無アルカリガラス（日本板硝子）を用い、表面にポリジメチルシロキサン（信越シリコン、KE106）をスピンコートし 150°C1 時間の加熱により硬化させた。この表面に市販の Ag ペースト（ミノグループ、MP-603S）をスクリーン印刷機（ミノグループ、CUBE1515）で印刷した。印刷後の基板を 120°C30 分オープン内で加熱し Ag ペーストを硬化させ、一般的なひずみゲージと同様に、連続する多段折り返し配線を形成した。折り返し部分のライン&スペースは共に 50 μm 、長さは 4 mm で設計した。また硬化後の Ag ペーストの厚みは 7.8 μm であった。さらにこの配線を完全に被覆するように熱硬化型のエポキシ樹

脂 (3M、EW2020) をステンシル版を介して印刷し、120°C30 分の加熱により硬化させた。硬化後のエポキシ樹脂の厚みは 84 μm であった。一方基板には仮基板と同様の無アルカリガラスを用い、さらに幅 20 mm、奥行き 150 mm、厚み 0.7mm のガラス片を表面に接着固定して凸部を形成した。この凸部の表面にホットメルト接着層 (十条ケミカル、JELCON AD-HM6) を 1.5 mm 角状にスクリーン印刷し、70°C のホットプレート上で 5 分乾燥させた。そしてこのホットメルト層と、仮基板上のエポキシ樹脂層の端部が接触するように 2 つの基板を重ね合せ、ホットプレス機 (ASONE、H300-01) で 44 kPa の圧力を加えつつ上下両面を 130°C5 分加熱した。そして基板を自然放冷した後に仮基板を剥離し、基板表面を顕微鏡観察した。

電子顕微鏡 (KEYENCE、D500. 以下 SEM と略す) を用いた観察にて得られた結果を図 7 に示す。ここから確認できるように一方の端部のみが基板に支持され、また他方の端部にかけての領域が宙づりとなったカンチレバーの構造を作製することに成功した。また同 SEM 像よりカンチレバーの母体が暗部として示され、その表面の多段折り返し線が明部として示された SEM の特性上、導電性の領域は明部として、絶縁性の領域は暗部として示される。よって明部は仮基板上に最初に形成した Ag ペーストの配線、暗部はそれを被覆したエポキシ樹脂の層であり、転写によって天地が逆転し、先に印刷した配線層が表面に側に位置した結果であることが確認できた。転写後の仮基板の表面を顕微鏡観察したが印刷した層は残っておらず、上述の転写プロセスによってシリコン樹脂と Ag ペーストおよびエポキシ樹脂の層との界面から完全に剥離されていることが確認された。以上より図 6 に示したプロセスがエポキシ樹脂の層とその内部に埋設された Ag ペーストによる配線を一括で転写しカンチレバー構造を形成できることが明らかとなった。

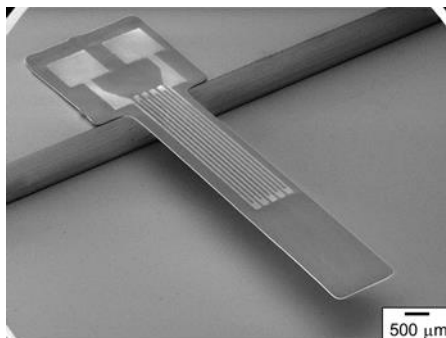


図 7 ひずみゲージ埋設型の樹脂カンチレバーの SEM 像

作製したひずみゲージ埋設型カンチレバーは荷重計 (ロードセル) や位置センサとしての応用が期待できる。そこでこれらの用途を想定した機械変位時の電気特性の評価を行った。評価のために図 8 a) に示す測定系を構築した。カンチレバーの端部のうち基板に支持された側の表面に形成した導電パッド部に電気プローブを接触させ、電気抵抗を測定可能なインピーダンスアナライザ (日置電機、IM3570) へと接続し、5 V の交流電圧を印加した。この状態で宙づりとなったカンチレバーの端部を上下に垂直に動作する機械式ステージ (IMADA、EMX-1000N) で押し込み、機械による変位量 (δ) とその際の抵抗値および初期抵抗からの変化率 ($\Delta R/R_0$) を評価した。結果を図 8 b) に示す。初期値は 125.9 Ω であった抵抗が押し込みによる変位とともに上昇し、1 mm 押し込み時には 126.8 Ω へと上昇した。その際の変化率は 0.6% 強の微小なものであるが、一般的なひずみゲージは 0.01% オーダーの変化率で計測されることから、変化率の低さは実用上の問題にはならないと考えられる。また抵抗値の上昇は変位量に対して直線的に得られたことからカンチレバーの先端位置を埋設された配線の抵抗率で読み取ることにより最適な動作を示したものと考えられる。

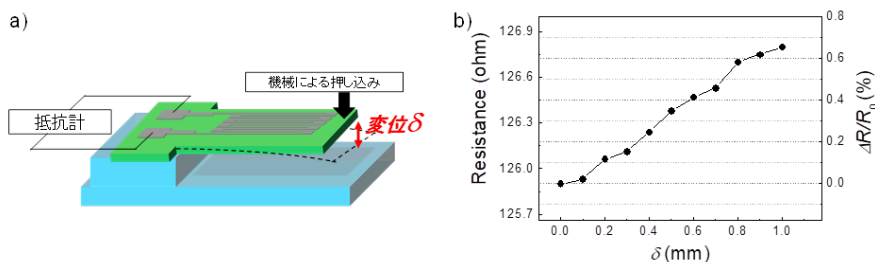


図 8 a) 機械変位特性評価の測定系の概要、b) 変位量 (δ) と抵抗及び抵抗変化率 ($\Delta R/R_0$)

〔雑誌論文〕（計 2 件）

- ・ Shusuke Kanazawa, Yasuyuki Kusaka, Yoshinori Horii, and Hirobumi Ushijima, ‘Fully additive manufacture of a polymer cantilever with an embedded functional layer’, *Jpn. J. Appl. Phys.* **57**, 030312 (2018).
- ・ Shusuke Kanazawa, Yasuyuki Kusaka, Noritaka Yamamoto, and Hirobumi Ushijima, ‘Improved process for forming a three-dimensional undersurface on a printed cantilever’, *Jpn. J. Appl. Phys.* **57**, 05GB01 (2018).

〔学会発表〕（計 2 件）

- ・ 金澤周介、フレキシブルひずみセンサーの開発とみまもり応用、e-テキスタイルの社会実装に向けた 産学官連携シンポジウム（招待講演）2018 年 7 月.
- ・ 金澤周介、e テキスタイルの実現に向けたフレキシブルセンサーの開発、第 22 回ナノテク高機能テキスタイル基盤技術研究会（招待講演）、2018 年 11 月.

〔図書〕（計 1 件）

- ・ 金澤周介、牛島洋史、日本工業出版株式会社、クリーンテクノロジー 29 巻 1 号 21～25 頁、2018 年.

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

〔その他〕

産総研プレスリリース「浮遊部を持つ微小構造を形成できる印刷技術を開発」

https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2017/pr20170601_2/pr20170601_2.html

6. 研究組織

(1) 研究分担者

該当なし

(2) 研究協力者

該当なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。