

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 24 日現在

機関番号：82404

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560060

研究課題名(和文) 電解質を用いたフレキシブルシート型剪断応力センサの開発

研究課題名(英文) Development of flexible sheet-type shear force sensor using electrolyte

研究代表者

外山 滋 (TOYAMA, Shigeru)

国立障害者リハビリテーションセンター(研究所)・研究所 障害工学研究部・研究室長

研究者番号：50360681

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：フレキシブルで厚みの薄いシート状のせん断力センサの開発を行った。このセンサは薄膜電極を形成したプラスチックフィルムやゴム材料と液体電解質で構成されている。具体的には3次元有限要素法により電極の設計指針を得た他、電解質の材料特性を調べた。また、センサとしては数次にわたり改良を重ねたが、結果として厚さ0.8mmのものを作製することができた。さらに測定回路も2回にわたり開発し小型化を図った。応用事例として、足の下に挿入して様々な歩行活動を行ったときの記録が取れることを確認した。

なお、研究結果をもとに、これまでに1報の国際誌への英語論文としての公表の他、国内外で計6件の発表を行った。

研究成果の概要(英文)：A thin flexible sheet-type shear force sensor has been developed. This sensor is composed of thin metal electrode-patterned plastic films, rubber materials, and liquid electrolyte. To develop this sensor, we carried out 3d-finite element method calculation to get guidelines for electrode designing. We also performed electrochemical research of electrolyte. We have refined sensor structure several times, and finally obtained a thin sensor of which thickness was 0.8 mm. We developed 2 types of measurement circuit systems for the sensor. Furthermore, as an example of application, a recording system of walking activity has been developed.

We have published one English paper on an international journal, and performed presentation 6 times including international presentation.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学工学基礎・応用物理学一般

キーワード：せん断力 センサ 電解質 塩化リチウム エチレングリコール フレキシブル基板

1. 研究開始当初の背景

従来よりフレキシブルなシート型の圧力センサが開発・市販化されている。シート型圧力センサは体表面圧測定に様々な場面で応用されており、申請者の研究機関においても、ベッドやイスの上の加重分布計測、義足と切断端との間の圧力分布計測などへの応用がなされている。

しかし、圧力分布計測のみでは、体表面に加わる剪断方向の力の評価はできない。剪断応力分布が評価できれば、例えば車いすの上に座っている人がずれ落ちそうな状態にあるかどうかの判断、ベッドに寝ている病者の臀部に褥瘡(床ずれ)の原因となる様な剪断力が加わっているかの判断、義足装着歩行時に切断端へに加わる捻れの評価など応用範囲が多岐にわたる。

そこで、フレキシブルで厚みの薄いシート状の剪断応力センサが望まれることになる。応用を考えると、センサ自体を曲げることができ、変形を受けてもセンサとして機能するものでなくてはならない。

剪断応力を測定するセンサは、従来より開発がなされていないわけではない。しかし、市販レベルの旧来のセンサの多くが立体的に大きな容積を持つ物である。一方、シート状センサも 2000 年以降開発が始まっている(例えば Y. Xu, et al, Sens. Act. A105, 321 (2003), L. Beccai, et al, Sens. Act. A120, 370 (2005), K. Noda, et al, Sens. Act. A127, 295 (2006) など)。しかし、殆どのケースは、シリコンのマイクロ加工技術により作られたものであり、それ故にセンサ自身は固いものであり、マイクロ化し柔らかいシートの上に実装することで擬似的なフレキシビリティを出している。

2. 研究の目的

そこで本研究はフレキシブルで厚みの薄いシート状の剪断応力センサを開発することを目的とする。すなわち、センサ自身が本質的に柔らかいものを目指す。

本研究では、センサ用の電極基板としてプラスチックフィルムを用いるとともに、変形を電気信号として捉える導電性素材として、導電性ポリマー等の固体ではなく、液体電解質を用いることを特徴とする。液体電解質であれば変形が自在であることは元より、変形を受けても電極との接触抵抗が安定であることが期待できるからである。

液体を物理センサの材料に用いるという発想は多くないと考えられ、これまでに我々が検索により見つけた例としては、液体金属である Galinstan (Ga, In, Sn の共晶合金(融点-19))を用いたものがある(H. Hu, et al, IEEE Sensors Conference, pp.815-817 (2007))。このセンサの場合は、ポリマーのシート内に設けられた空間内に二つの電極が形成されており、その間に Galinstan が充填されている。ここに圧力が加わると液層が

変形を受け、それに伴って電極間抵抗が変化するというものである。極めてシンプルな構造であるが、高価な液体金属を用いること、構造にもよるが金属を用いることにより重くなるなどの不利益がある。そこで、我々は方針として電解質を用いることとした。

3. 研究の方法

(1) 数値シミュレーション方法

センサの設計指針を得るために、3次元有限要素法を用いたシミュレーションを行った。具体的には、センサを構成する部材(電極基板や隔壁材料)の機械的特性を用いた構造変形のシミュレーションを行った後、さらにセンサ内部の電流密度を計算するという2段階のシミュレーションを行った。センサを構成するそれぞれの素材の弾性係数、ヤング率が計算中に必要となるため、文献検索、製造会社への照会、あるいは実測することで数値を決定した。ソフトウェアは PDE Solutions Inc. の FlexPDE version 6.15 を使用し、コンピュータは CPU: Core i7-3960X、メモリ 32GB、OS: Windows7 64bit 版を使用した。

(2) センサの作製方法

本研究では、センサ用の電極基板としてプラスチックフィルムを用いるとともに、変形を電気信号として捉える導電性素材として、導電性ポリマー等の固体ではなく、液体電解質を用いることとした。液体電解質であれば変形が自在であることは元より、変形を受けても電極との接触抵抗が安定であることが期待できるからである。

試作したセンサの構造は改良の過程で様々であるが、基本的には電極パターンを形成した2枚のプラスチック基板の間にシリコンゴムなどによるリング形状のスペーサーを挟んだ構造となっている。プラスチック基板とリング状スペーサーからなる隙間に液体電解質を封入している。電極パターンとしては、基本的には中央と(中央電極)、それを取り囲む様に四方に(周辺電極)、計5個の電極を形成した。なお、試作したセンサによって、5電極の全てを片側のプラスチック基板上に形成したものと、中央電極のみを対向する基板上に形成したものとがある。

また、センサ用電極基板は OHP シート等の PET フィルムに金属薄膜の電極パターンを形成したものをを用いた。その詳細な方法は(S. Toyama, et al, Electrochem., 74, 128 (2006))に準じるが、まず設計した電極の反転パターンをレーザープリンターによりプラスチックフィルム上に印刷し、電子ビーム蒸着法にて全面蒸着を行い、有機溶媒中にてトナーとその上の金属薄膜を不要なものとして除去することで所望のパターンを形成した。なお、金属薄膜は Cr 5nm の上に Au 200nm 積層させた。

液体電解質としては 350 mM の LiCl のエチレングリコール溶液を用いた。

(3) センサ周辺回路

センサの周辺回路としては、当初はアナログ回路と市販のデータロガーを組み合わせたものを開発して用いた。その後、その改良型として、マイクロプロセッサを用いた回路を開発し用いた。測定の際は、周辺電極をグラウンドとし、中央電極に交流を加える（典型的には $\pm 80\text{mV}$ 程度、 5kHz もしくは 25kHz ）。その際に各周辺電極を流れる電流を電圧信号に変換し、さらに整流、平滑化したものが出力となる。図1に回路概念図を示す。

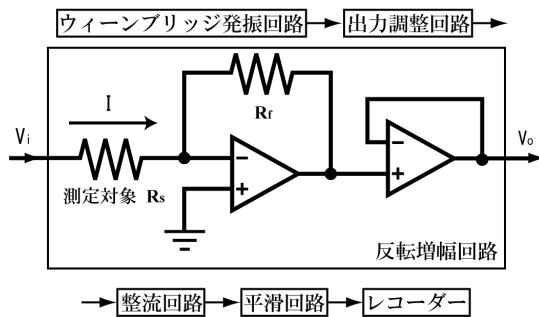


図1 回路概念図

(4) 評価方法

電解液の評価および測定条件を決めるための実験は市販の金電極を用いた。また、測定機としては、市販のポテンショスタット（100B/W, Bioanalytical Systems）や周波数応答測定機（S-5720B, NF 回路設計ブロック）を用いた。

センサのせん断力に対する応答は、分銅の重力を滑車により水平方向の力として加えたときの応答を測定することにより評価した（図2）。

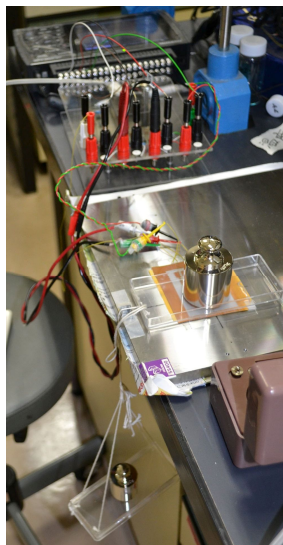


図2 せん断力測定写真

4. 研究成果

(1) センサ材料と駆動条件の検討

電気化学的評価法によりセンサ内部液としてエチレングリコール溶液を用いることが水溶液より優れていることを確認し、また測定条件として 1kHz 以下の交流をセンサの電極間に加えることが良いことを確認した（詳細については雑誌論文を参照のこと）。

(2) センサ設計の指針化のための数値シミュレーション

センサの設計に際し、センサ内部の電流密度を有限要素法により予測した。最初に静的なモデルでの簡単な計算を行った。その結果、電極の一部に電流が集中するため、ほぼ電流が0の部分については電極を形成する必要が無いこと、すなわちその電極を省略した分だけセンサ面積を小さくできることがわかった。

次に、せん断力によるセンサの変形を予測し、さらにその変形に基づく電流密度計算を行った。その結果、せん断力に対して水平な位置にある電極はせん断力に対して線型な応答を示し、垂直な位置にある電極は応答しないことが示唆された。この結果は、後述の実験結果の傾向と同じであり、計算手法が妥当であることが示された。

そこで、次にセンサの組立時に誤差があったことを仮定し、特にセンサ外周のゴムリングが目標位置からずれたものと仮定した場合の電流密度変化を求めた。その結果、せん断力と水平方向に配位されている電極の応答感度にはほぼ影響は無いものの、垂直方向にある電極がわずかではあるが影響を受けることが予想された。その理由として、せん断力と垂直方向に配位されている電極上層の電解質の厚みが変化することが考えられる。このことから、ゴムリングの貼り合わせの際に位置ずれが生じ、それにより電解質の厚み変化が起きても影響を受けにくいように電極を設計する必要性が示唆された（以上、詳細については学会発表における電気学会研究会資料 pp.27-31 を参照のこと）。

(3) センサ構造の改良による小型化、薄型化

センサ構造の改良（本研究予算申請前のプロトタイプと比べて）を数次にわたって行った。まず、申請前の構造は、2枚のプラスチックシート（片側に5個の電極を配置）を固めのゴムリングを介して貼り合わせる構造であった。このとき、中心部には圧力変化を受けにくい様にするためにスペーサーを挿入していた。2枚のシートの間には電解質を満たした構造であった。そして、せん断力に対して上部シートが変形を受けるようにするために上部に突起を設けていた。突起に水平方向の力が加わると、突起が僅かに傾き、それが上部シートを変形させ、その結果電極上層の電解質層の厚み変化となり、結果として電流変化が起きる仕組みであった。このセ

ンサをタイプ 0 と呼ぶことにする。しかし、この構造では、突起部分に力が集中するという問題があった。

そこで、図 3 の様に突起を挟んで、さらに 3 枚目のシートを載せる構造を採用した。これにより、センサに加わる力は際上面のシート上に均一に分散させることができる。このセンサをタイプ 1 と呼ぶことにする。このセンサは圧力による影響を受けず、せん断力に対して線型に応答することが示された。正確には、せん断力を受けた方向に平行な電極間のインピーダンスが線型に変化し、垂直方向に配置された電極間のインピーダンスはほぼ変化がなかった（詳細については雑誌論文を参照のこと）。

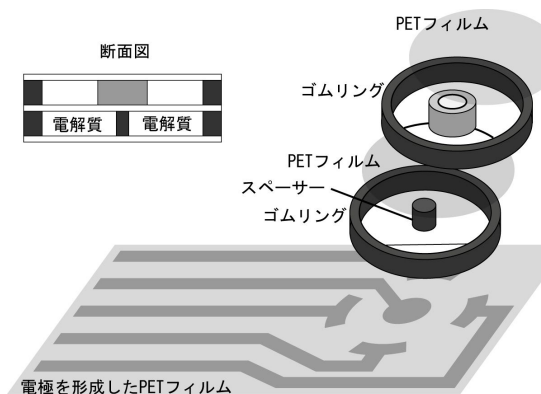


図 3 タイプ 1 センサ構造概念図

しかし、タイプ 1 のセンサは 2 層構造であり厚みがあるため、その後さらに構造を見直し、再び、単層構造のセンサを開発した。このセンサをタイプ 2 と呼ぶことにする。図 4 にタイプ 2 の構造の概要を、また図 5 には写真を示す。タイプ 2 のセンサはタイプ 1 のセンサと似ているが、異なるのは、中央電極が上部シートに形成されていることと、ゴムリングが弾性率の低い柔らかいものを用いている点である。せん断力を受けると上下のシートが相対的に変位し、これにより中央電極と周辺電極との水平位置が変化し、結果として電流変化が起きることを原理としている。この様に構造を単純化したことで、厚さ 0.8mm、配線パターンを除くセンサ本体の直径として 16mm のものを開発した（詳細については学会発表 の講演論文集を参照のこと）。

(4) 測定回路の改良による小型化

測定用回路も二次にわたって開発した。最初のもは、アナログ IC を利用した回路と市販の超小型レコーダーを組み合わせたことにより、電池で駆動され携帯可能なものを作製した。これを回路 A と呼ぶことにする。

次に、マイクロプロセッサを用いることでさらなる小型化を図った。これを回路 B と呼ぶことにする（図 6）。

回路 A, B とともに電池で駆動可能であるが、回路 B の方が手のひらサイズでよりハンディなものとなった。

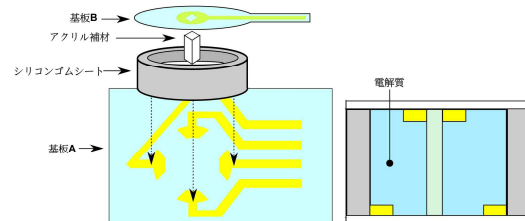


図 4 タイプ 2 センサ構造概念図



図 5 タイプ 2 センサ写真

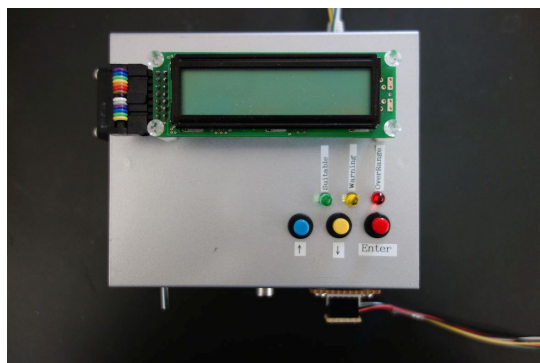


図 6 回路 B 写真

(5) センサのその他の特性評価

電極を形成したセンサの湿度に対する影響を調べたところ、高温化で劣化することがわかったが、この問題はセンサから端子までのリード部分を絶縁することにより回避できた。

また、センサの温度特性を調べたところ、温度の上昇に伴って電流が上昇することがわかった。一方、温度センサが容易に作製で

きたので、必要な場合はせん断力センサと組み合わせて温度補償することが可能であるものと考えられる（未発表）。

(6) 応用計測

タイプ1のセンサを足下に敷いてせん断力を評価するシステムを構築し、足踏み、歩行、足を浮かせるなどの行動を行ったときの記録をとった。システムの写真を図7に示す。用いた回路は上記の回路Aである。この結果、イベントに応じた応答パターンが得られた（詳細については学会発表における電気学会研究会資料 pp.49-53 を参照のこと）。

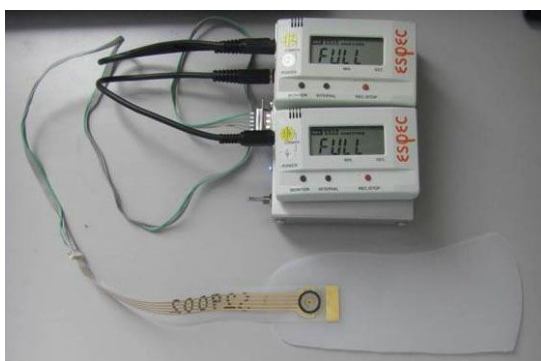


図7 応用実験システム写真

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計1件)

S. Toyama, S. Utsumi, T. Nakamura, T. Noguchi, Y. Yoshida, A Novel Thin Shear-Stress Sensor Using Electrolyte as a Conductive Element, Sensor Letters, 査読有, Vol.11, No.2, 2013, 442-445
DOI:10.1166/s1.2013.2740

〔学会発表〕(計6件)

上原遼、海野暁央、五十嵐洋、田中靖紘、中村隆、外山滋、シート型剪断力センサの開発、2014年3月20日、愛媛大城北キャンパス

田中靖紘、海野暁央、五十嵐洋、中村隆、外山滋、電気化学を用いたシート型せん断力センサの開発：電極設計の指針化のためのコンピュータシミュレーション、電気学会センサ・マイクロマシン部門総合研究会、2013年8月9日、東京工科大蒲田キャンパス

S. Toyama, Y. Tanaka, S. Utsumi, T. Nakamura, T. Noguchi, Y. Yoshida, T. Umino, Film-based Shear Force Sensor Using Electrolyte, 223rd ECS Meeting, 2013年5月13日, Sheraton Center (Toronto)

外山滋、野口晃正、吉田泰彦、内海沙世子、中村隆、電解質を利用したシート型せん断力センサ、電気学会センサ・マイクロマシン部門総合研究会、2012年6月11日、京都大学百周年時計台記念館

T. Noguchi, Y. Yoshida, S. Utsumi, T. Nakamura, S. Toyama, Development of sheet-type shear force sensor using electrolyte, 9th International Symposium on Bioscience and Nanotechnology, 2011年12月10日, Toyo Univ.

野口晃正、吉田泰彦、中村隆、外山滋、内海沙世子、電解質を抵抗体に用いる剪断応力センサ、第28回センサ・マイクロマシンと応用システムシンポジウム、2011年9月27日、タワーホール船堀

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.rehab.go.jp/ri/event/2012openhous/rehabeng2.pdf>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

外山 滋 (TOYAMA, Shigeru)
国立障害者リハビリテーションセンター(研究所)
研究所 障害工学研究部 研究室長
研究者番号：50360681

(2) 研究分担者

中村 隆 (NAKAMURA, Takashi)
国立障害者リハビリテーションセンター(研究所)
研究所 義肢装具技術研究部 義肢装具士
研究者番号：40415360

(3) 連携研究者

田中 靖紘 (TANAKA, Yasuhiro)
国立障害者リハビリテーションセンター(研究所)
研究所 障害工学研究部 生体工学研究室
流動研究員
研究者番号：80568113