

伸縮性ひずみセンサ C-STRETCH® の開発

Development of Stretchable Strain Sensor C-STRETCH®

大高 秀夫

Hideo OHTAKA

Abstract

Conventionally, in order to measure the distortion of the rigid, such as metal, the strain gauges are widely used. The strain measurement of the flexible object, and a wide dynamic range (for example 100% or more) strain sensor are required. Flexible strain sensor is expected to realize a variety of technologies. For example, measurement applications, human interface, smart wear, skin-motion monitoring, and robotic skin.

We have developed a C-STRETCH®, used the compounding techniques elastomer and elastic conductive materials. This sensor is wide dynamic range (up to 200% elongation), very soft, very thin film, high responsiveness, and excellent measurement accuracy.

Keywords: stretchable strain sensor; elastomer; conductive material

1. はじめに

近年、ウェアラブルデバイスとしてバイタル情報や活動情報など人に関するセンシングデバイスの開発が盛んに行われている。センシングする手段は様々あるが、スマートフォンのように加速度センサや角速度センサから動作やバイタルを解析する手法、カメラ等による光学的な情報から体全体の動作を解析する手法が代表的である。ウェアラブルデバイスもスマート端末を軸として Google Glass や Apple Watch のように、魅力的なアプリとセットで提供することで一般消費者は受け入れやすいものとなっている。

現在製品化されている上記のデバイスで使用されているセンサは、加速度センサのようなチップ部品、感圧センサや圧電素子のようなフィルム部品で構成されている。メガネや腕時計のように普段から身に付けられている人との親和性が高いデバイスに組み込むことで何気ないセンシングを実現している。一方、フレキシブルなウェアラブルデバイスも製品化され始めている。例えば導電素材（導電性高分子コートした導電糸）を電極として織り込むことで心電を計測するウェア製品 “hitoe”（東レ）¹⁾ などが挙げられる。

本報で紹介する C-STRETCH® は、非常に薄く柔軟で大きく伸び縮みできることから人体などの曲面へ装着した際にも動きの追従性に優れ、装着感の少ない身体への親和性が高い特徴と、後述するように繰り返し精度よく運動等を検出できる特徴を併せ持っていることから、衣服や靴のような大きな伸縮をとまなう、ストレッチャブルな装着型センシングデバイスに活用できるものとして期待される。

2. C-STRETCH® の計測原理と基礎特性

C-STRETCH® は静電容量式のひずみセンサであり、面方向の伸張変形（面積変化）を検知するセンサである。センサ構造の模式図を図 1 に示す。柔軟で弾性変形するエラストマー（絶縁層）と、伸張変形に追従可能な伸縮電極層（導電層）が交互に積層された構造で、電気的には並行平板コンデンサ構造になっている。

構造はコンデンサであるため静電容量は式 1 で示される。

$$C = \varepsilon \cdot \frac{S}{d} \cong \text{const} \cdot S^2 \dots\dots\dots \text{式 1}$$

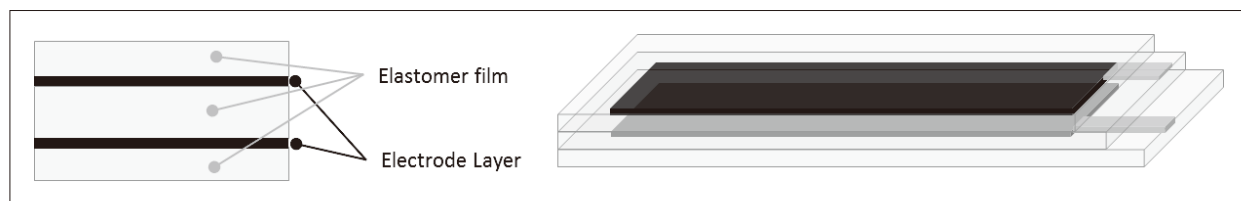


図 1. 構造の模式図（左：断面図、右：斜視図）

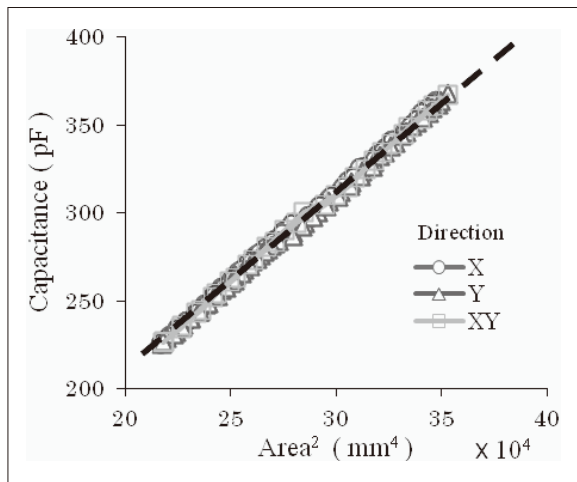


図2 検知部面積と静電容量の関係
および伸長方向の比較

センサ静電容量Cは、電極で挟まれたエラストマー層（誘電層）の誘電率 ϵ 、厚みd（電極間距離）、対抗する電極の面積Sにより決まる。エラストマーのポアソン比は0.5に近く、体積一定と見なすことが出来る。また比誘電率は材料固有の値であり伸長による変化も小さいため、式をまとめると、静電容量は面積の2乗に比例する関係となる。すなわちC-STRETCH®は電極面積の変化を検知するセンサである。実験的に確認した結果を図2に示す。

検知部面積はビジョンセンサ（COGNEX EZ-140）を用いて計測し、面積の2乗に比例していることが確認された。C-STRETCH®は異方性の無い検出原理であるため、X方向、Y方向の区別なく、さらには、検知部の局所的な変形であっても、面積の2乗に比例することを確認している。²⁾

センサの両端を挟持して1軸方向に伸長させた場合は、センサ検知部の長さを計測できるセンサとなる。長さ方向にn倍伸長した時の静電容量をC'とすると、元の長さlに対して伸長後の長さは $l' = n \cdot l$ と

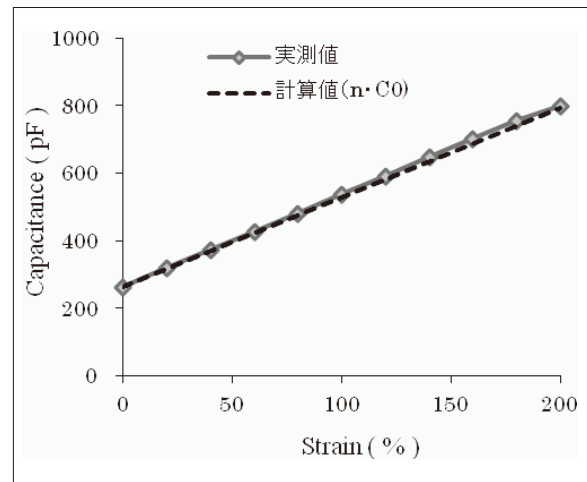


図3 1軸伸長率と静電容量の関係

なり、幅wと厚みdは、エラストマーの体積が一定であるために、それぞれ $w' = w/\sqrt{n}$ 、 $d' = d/\sqrt{n}$ となる。誘電率は材料の固有値、面積は製造条件から既知であるため、式2で示されるように、静電容量は伸長前の静電容量C₀に対してn倍になる。実験的に確認した結果を図3に示す。

$$C' = \epsilon \cdot \frac{l' \cdot w'}{d'} = \epsilon \cdot \frac{l \cdot w}{d} = n \cdot C_0 \dots\dots\dots \text{式2}$$

以上の結果から、上式の固有値（誘電率、検知部面積、厚み）となる。製造条件を適切に管理することで、面積や長さの絶対値を計測できるポテンシャルを持ったセンサである。

3. 他方式との対比

伸縮性ひずみセンサ（ストレッチセンサ）はまだ製品例が少ないが、計測原理として静電容量式と抵抗式がある。抵抗式では、導電フィラーを充填した

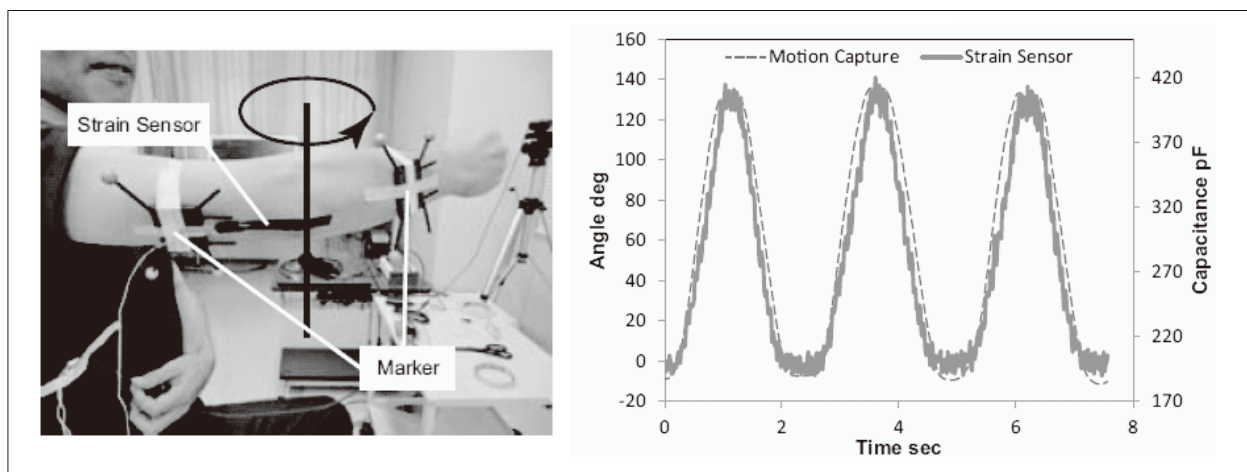


図4 肘関節角度の計測の様子と計測結果

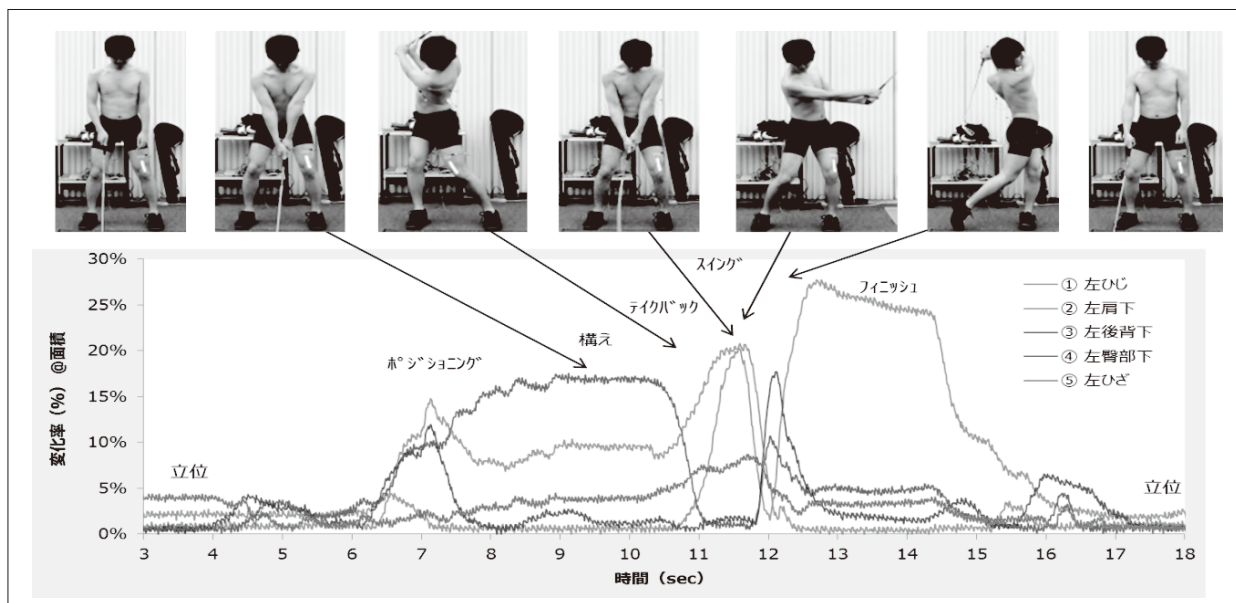


図5 身体各部へセンサ貼付してゴルフスイングフォームの計測

ポリマー材料や、CNT配向膜³⁾などが報告されている。これらは、この導電材料の配合設計や加工条件の工夫によって、伸長に対する出力変化の線形性や、計測感度、繰り返し精度、応答性のような電気的特性のみならず、柔軟性や伸縮性のような物理特性にも影響する。1つの導電材料で多くのパラメータを設計・制御する必要があり、高度な技術と品質管理が要求される。換言すると高度な精度や物理特性の要求に対しての自由度が低い。これに対して、静電容量式であるC-STRETCH[®]では、センサ出力が式1に示すように明確であり、エラストマーの形状因子を適切に制御、導電層は静電容量に対して十分な導電性を有していれば良い。また伸長によって多少の抵抗変化をしたとしても出力に影響しない設計が容易であることから、高精度の検出を実現でき、設計の自由度の高い方式である。

4. 応用の利用例

C-STRETCH[®]の計測用途の一例として、肘関節の回転角度の測定を挙げる⁴⁾。被験者の肘関節にまたがるようにセンサを貼り付けた。肘の曲げ伸ばし運動によりセンサが伸縮することを利用し、関節角度を計測するためのモデル立てを行った例である。比較対象としては、モーションキャプチャを使用し、マーカの3次元座標情報から関節角度を算出した。図4に示したモーションキャプチャで算出した角度(点線)とC-STRETCHの静電容量(実線)の変化が一致している。よって、2点でキャリブレーション(例えば0℃と90度)を行うことで、C-STRETCH[®]の出力結果から関節角度を推定することが可能である。

他の応用例を代表図にて以下に紹介する。図5は関節等の身体5箇所にセンサを貼付し、ゴルフスイングにおける各所の動きを計測した結果である。動きの大きさや速さと、動きのリズムなどの情報が得られ、例

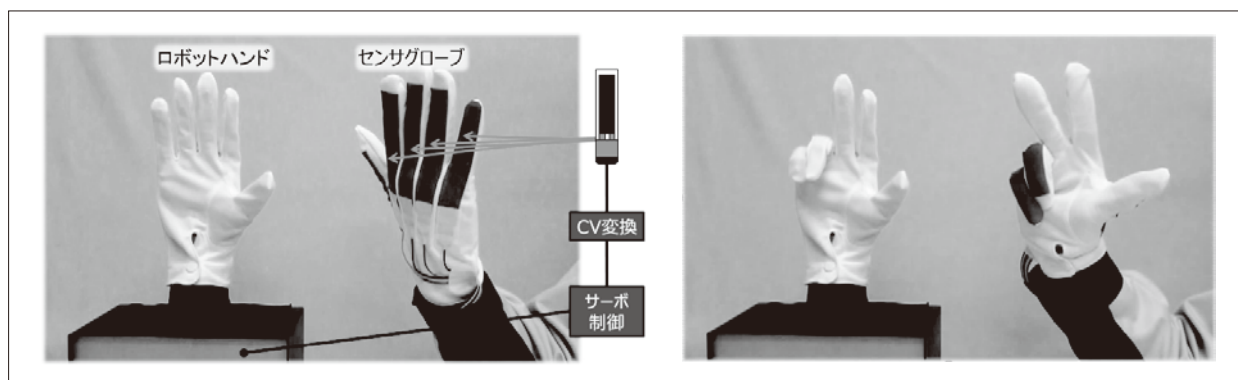


図6 手袋にセンサ貼付したセンサグローブにてロボットハンドを操作

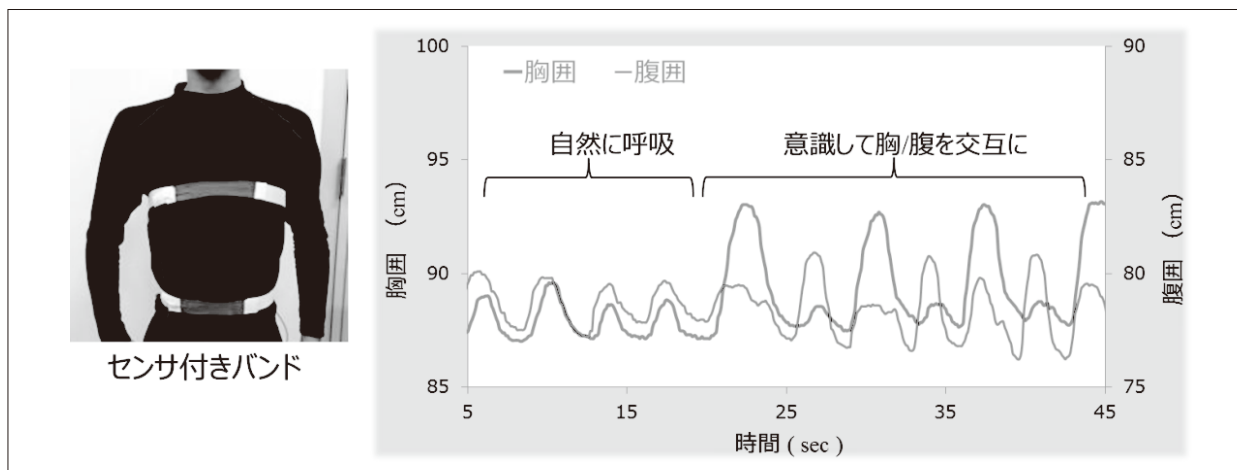


図7 センサ付きバンドを装着して呼吸による胸囲と腹囲の変化を計測

えば正しいスイングフォームへと導くティーチングデバイスへの応用が考えられる。

図6は、センサ貼付したグローブにて5指の屈曲状態を検出し、同じ動きをロボットハンドで再現するデモンストレーションを行ったものである。センサの出力変化でロボットハンドのサーボモータをコントロールしている。ロボットの遠隔操作や、ゲーム・玩具でのコントローラ、バーチャル空間での操作インターフェースなどの応用が考えられる。

図7は、胸部および腹部を一周するバンドにセンサを貼付し、呼吸による胸囲および腹囲の変化を計測した結果である。呼吸数、呼吸の大きさ、胸郭運動パターン等の情報が得られる。呼吸数モニタなどへの応用が考えられる。

4. おわりに

C-STRETCH®は、従来の歪みゲージでは設置困難であった自由な曲面への設置が可能であり、柔軟物のような大きな歪みの計測が可能である。柔軟で大変

形できるというこれまでにない特徴を持ち、精度にも優れるセンサであり、広い産業分野で適用し得るポテンシャルを持ったセンサであると期待している。C-STRETCH®を新製品の研究開発のために評価いただけるように、センサ素子、トランスミッター、専用ソフトウェア等の一式をセット（図8）にしたキット販売を行っている。

あらゆる柔軟物に組み付けることで、大変形のひずみゲージ、スイッチ、インターフェースとして利用でき、例えば、アパレル製品や、クッション等の柔軟な製品の設計のためのひずみ評価ツールとして、身体に装着して活動量や運動フォーム等の運動情報を取得するウェアラブルセンサとして、呼吸や体動などの生体情報を検出するウェアラブルデバイスとして、ゲームや玩具等を操作するインターフェースとしてなど、さまざまなアプリケーションが考えられる。アパレル分野、医療福祉分野、リハビリテーション分野、アミューズメント分野、ロボット分野など広い産業分野で使用して頂けるよう、今後も改良開発にさらなる注力していく。



図8 C-STRETCH®キット BT01

表1 C-STRETCH®キット 仕様

センサ素子	検知サイズ	W10×L50(mm) W10×L30(mm)
	伸長レンジ	0~100% ※1軸伸長
トランスミッタ	チャンネル数	4ch
	サンプリング	10Hz(10msec) ※無線モード
	バッテリー	単4型乾電池×1本
	連続駆動時間	約10時間
ソフトウェア	出力	デジタル: 無線(Bluetooth), 約10m アナログ: 0~3V
	寸法	W75×D50×H30(mm)
	機能	波形グラフ表示、CSVデータ保存
付属品	対応OS	Windows 7 / 8.1
	入力ケーブル	2m×4本組 ※センサとトランスミッタの接続
	出力ケーブル	2m ※アナログ出力時に使用

参考文献

- 1) <http://www.hitoe-toray.com/>
- 2) Hiroyuki; Nakamoto; Hideo Ootaka; Mitsunori Tada; Ichiro Hirata; Futoshi Kobayashi : IEEE Sensors Journal. 04/2015; pp. 2212-2218.
- 3) Le Cai; Li Song; Pingshan Luan; Qiang Zhang; Nan Zhang; Qingping Gao; Duan Zhao; Xiao Zhang; Miu Tu; Freng Yang; Wenbin Zhou; Qingxia Fan; Jun Luo; Weiya Zhou; Pulickel M Ajayan; Sishen Xie : Scientific Reports. 2013 Oct 25;3: pp.3048.
- 4) 中本裕之、平田一郎、大高秀夫、多田充徳、小林太、小島史男、インタラクシヨン2015論文集、pp.468 ~ 469, 2015



大高 秀夫
Hideo OHTAKA
2011年 入社
R&Dセンター