

カーボンマイクロコイルを用いた触覚センサの機械-電気変換メカニズム

Electromechanical conversion mechanism of a tactile sensor with Carbon Micro Coil

○学 本間将人 (慶大) 正 昆陽雅司 (慶大) 正 前野隆司 (慶大)
非 森田宏 (慶大院) 非 河邊憲次 (CMC 技術開発) 非 元島栖二 (岐阜大)

Masato Homma, Masashi Konyo, Hiroshi Morita, Takashi Maeno, Keio University, fr011996@hc.cc.keio.ac.jp
Kenji Kawabe, CMC Technology Development Co., Ltd.
Seiji Motojima, Gifu University

Carbon Micro Coil (CMC) tactile sensor, containing CMCs in it, is thought to have LCR circuit. When the sensor is transformed by mechanical force, the condition of LCR circuit changes. In consequence, the sensor is thought to be able to detect various kind of tactile information by measuring impedance. In this paper, we focused on distribution of LCR circuit. By changing percent by mass of CMC, we made the sensors that CMCs are in contact and not in contact. When the sensor is under unloaded condition, we measured the relationship between frequency of alternating voltage and impedance. As the result, we found that electrical parameters change with percent by mass of CMC. When the sensor is under transformed condition, we measured relationship between thrust displacement and impedance. As the result, we found that impedance changes by deformation of CMC and change of distance between CMCs.

Key Words: Carbon Micro Coil, Tactile sensor, Electromechanical conversion characteristics

1. はじめに

ロボットが器用な作業を行い、かつ人に安全に接するためには、多様な触覚情報を検出する柔軟かつ高密度なセンサが必要である。このような触覚センサの素子として、小型で感度が高いといわれるカーボンマイクロコイル(CMC)が有用であると考えられる。しかし、CMCを用いた触覚センサは、機械-電気変換メカニズムが十分に解明されていないため、センサ形状の最適化や適切な出力情報の選択を行うことができない。このため、本稿では、CMCを用いた触覚センサの機械-電気変換メカニズムを解明することを目的とする。

2. CMC 触覚センサのメカニズムの仮説

2.1 CMC 触覚センサの構造

CMCは、1990年に岐阜大学の元島らによって開発された2重螺旋構造を有する炭素繊維である^[1]。その大きさは、繊維径0.01~1 μm 、コイル径1~10 μm 、コイル長0.1~25mmである。CMCはコイルばねと同様に応力と伸びの関係が線形な機械的特性を有している。また、CMCは導電性コイルであるため、CMC単体でインダクタ、キャパシタ、抵抗の3つの電気的要素を有する。

図1にシリコーンゴムにCMCを混入したCMC触覚センサの模式図を示す。センサ内では、CMCの分布によりLCR回路網が形成されていると考えられる。センサの機械的変形により、CMCの伸縮および分布状態が変化し、センサ内に形成されているLCR回路網が変化する。したがって、LCR回路網の変化を特定周波数の電圧を印加した際のインピーダンスZの変化として計測することにより、機械的刺激を判別

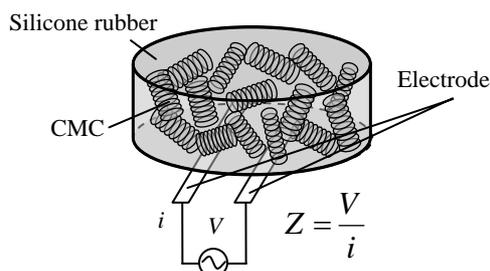


Fig. 1 Inside and structure of CMC tactile sensor

することができると考えられる。

2.2 センサ内部の LCR 回路網の仮説

CMCは、導電性を有する炭素繊維であるため、センサ内におけるCMC同士の接触/非接触により、LCR回路網の接続/切断が生じると考えられる。よって、CMCによるLCR回路網は、CMCの分布状態により変化すると考えられる。したがって、CMCの接触/非接触によるLCR回路網の変化について、仮説を述べる。

まず、CMCが接触していない場合におけるLCR回路網について考える。CMCを1つのインピーダンス Z_{CMC} とすると、2つのCMCが接触していない場合、2つの Z_{CMC} が切断されていると考えられる。ここで、2つのCMCを2つの電極とした場合、CMC間に、キャパシタが形成されると考えられる。したがって、2つのCMCが非接触であった場合、図2に示すように、キャパシタが形成された直列回路になると考えられる。また、CMCは抵抗値が小さいため、非接触である場合、2つのCMC間に形成されるキャパシタ成分が支配的となると考えられる。したがって、CMCが非接触で分布していた場合、キャパシタ成分が支配的となると考えられる。

次に、CMCが接触している場合について考える。2つのCMCが接触している場合、図3に示すように、 Z_{CMC} が直列に接続される。CMCは、その形状から、高周波領域においてインダクタ成分が影響することが知られている。したがって、CMCが接触して分布している場合、抵抗成分が支配的となると考えられる。

2.3 機械-電気変換の仮説

CMC触覚センサの変形により、センサ内で生じると考えられる現象は、CMC単体の変形、CMC間距離の変化、CMC



Fig. 2 Circuit in noncontact distribution



Fig. 3 Circuit in contact distribution

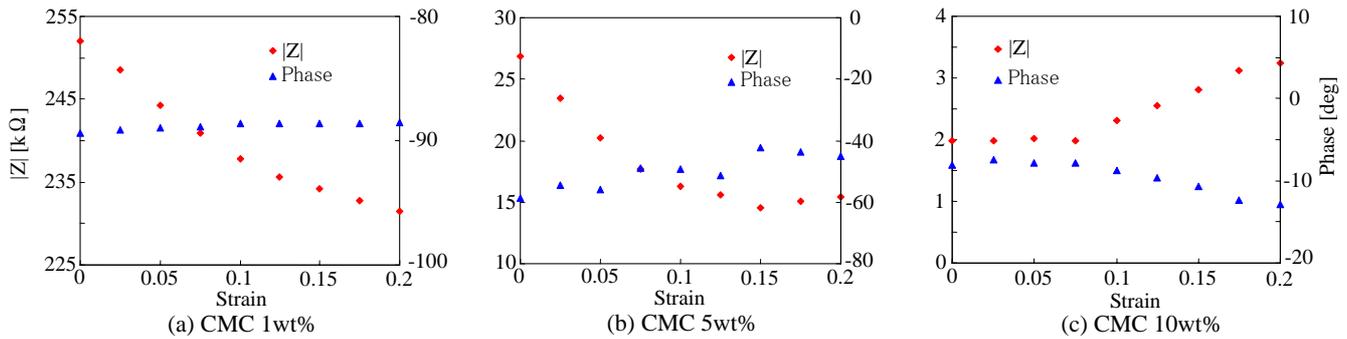


Fig. 4 Relationship between strain and impedance

同士の接触/非接触の3つであると考えられる。すなわち、機械 - 電気変換の関係は、上述した3つにわけることが可能であると考えられる。

CMC 間距離が変化する場合、キャパシタンスは CMC 間距離により変化する。センサが変形する際のひずみは部位により異なる。このため、CMC 間距離が大きくなるキャパシタと距離が小さくなるキャパシタにわけてキャパシタンスの変化を考慮する必要がある。この際、キャパシタンスの変化より算出される $|Z|$ の値は、押し込みにより減少すると考えられる。

CMC 同士が非接触から接触状態に変化した場合、2.2 節で述べたように、支配的な回路網がキャパシタ成分から抵抗成分に変化すると考えられる。また、導電体の接触増加を利用したセンサ素子として感圧導電性ゴムがあげられる。感圧導電性ゴムは押し込みにより、抵抗値が減少することが知られている。したがって、CMC 触覚センサにおいても、同様に、押し込みより $|Z|$ が減少すると考えられる。

CMC は伸長すると、抵抗値が増加することが知られている。このため、CMC が接触している場合、センサの変形により $|Z|$ は増加すると考えられる。

3. 検証実験

2章の仮説を検証するため、CMC の添加量が異なるセンサおよび押し込み装置を製作した。製作した CMC 触覚センサは直径 15mm、高さ 4mm の円柱形状であり、センサ底部に銅電極が配置されている。銅電極とシリコーンゴムの接触状態および接触面積の変化を無視するために、シリコーンゴムとセンサ底部の電極は完全に接着した。また、攪拌・脱泡を行うことにより、センサ内における CMC の分布状態を一様にした。

3.1 センサ内部の LCR 回路網

CMC の添加量が異なるセンサの印加電圧周波数と、 $|Z|$ および位相の関係は無負荷状態において測定した。その結果、センサの印加電圧周波数と $|Z|$ の関係は、CMC の添加量が 1wt%、3wt% の際には、キャパシタの周波数特性と一致し、10wt%、20wt% の際には、抵抗の周波数特性と一致することを確認した。また、5wt%、7wt% の際には、キャパシタと抵抗の2つの成分を有すると考えられる。

センサが変形した際に、同様の実験を行った。この結果、周波数特性の傾向は、センサの変形によらず定性的に一致した。すなわち、押し込みにより、LCR 回路網は変化しないことが示された。

以上より、CMC の添加量が大い際には、抵抗成分が支配的となり、小さい際には、キャパシタ成分が支配的となることを明らかにした。また、支配的な電気的要素は、押し込みにより、変化しないことを確認した。

3.2 機械 - 電気変換特性

添加量を変化させたセンサに垂直な押し込み力を与え、各センサの変形時における電気的変化を測定した。CMC の添加量は 1wt%、5wt%、10wt% である。印加交流電圧は、振幅 500mV、周波数 1MHz である。結果を図 4(a)~(c) に示す。

$|Z|$ は、CMC の添加量が 1wt% の際には押し込みにより減少したのに対し、添加量が 10wt% の際には増加した。添加量が 1wt% の際のインピーダンスは、センサの変形によるキャパシタの変化を考慮した計算結果と定性的に一致した。この結果、2.3 節で述べた機械 - 電気変換の仮説と一致した。したがって、CMC 触覚センサでは、CMC 間距離によるキャパシタンスの変化および CMC の変形による抵抗値の変化によって機械 - 電気変換が行われることを明らかにした。

本実験の結果より、CMC を触覚センサとして用いる場合、CMC の添加量によってインピーダンス特性が異なることを考慮する必要があることがわかった。抵抗成分を用いる場合には、CMC の添加量が多くなるため、センサの剛性が高くなる。また、キャパシタ成分を用いた場合に比べ、定常状態に至る出力の収束時間が大きくなる。抵抗成分とキャパシタ成分における $|Z|$ の変化量を比較すると、キャパシタ成分の変化量が大きい。このことから、キャパシタ成分の変化を用いた触覚センサが有効であると考えられる。

また、実験を行った周波数帯域では、CMC のコイル形状は電気的なインダクタとしての特性よりも、機械的なバネ形状による柔軟性が特長であると考えられる。シリコーンゴム内に剛性の高い導電性材料を混入した場合、変形によってゴムが破断することが考えられる。すなわち、繰り返し使うにつれ、安定した出力を得ることが困難になると考えられる。これに対し、柔軟な CMC を混入した CMC 触覚センサは、シリコーンゴムの破断を防止でき、安定した出力を得ることができる。このため、CMC 触覚センサは、導電性ゴムなどのセンサよりも高感度かつ高信頼性のあるセンサとなり得ると考えられる。

4. 結論

CMC の分布状態による LCR 回路網の特性を予測した上で、機械 - 電気変換特性の解析を行った。この結果、CMC の変形および CMC 間距離により、 $|Z|$ が変化することを確認した。今後は、本研究で得られた指針をもとに、動的特性の解析、CMC を用いた分布触覚センサの開発を行う予定である。

参考文献

- [1] 葛谷知洋, 植田秋恵, 河邊憲次: CMC の触覚センサーへの応用, マテリアルインテグレーション, vol. 17, no. 8, pp. 9-16, (2004)