

カーボンマイクロコイルを用いた小型分布型触覚センサの開発

森田 宏, 本間 将人(慶大院), 前野 隆司(慶大), 昆陽 雅司(東北大)
元島 栖二(岐阜大), 河辺 憲次 (シーエムシー技術開発)

Development of Distributed Tactile Sensor using Carbon Micro Coil

Hiroshi Morita, Masato Homma, Takashi Maeno (Keio Univ.), Masashi Konyo (Tohoku Univ.)
Seiji Motojima (Gifu Univ.) and Kenji Kawabe (CMC Tech Devl.)

Abstract: In this paper, we show the mechano-electrical conversion mechanism of Carbon Micro Coil (CMC) tactile sensor. CMC is a carbon fiber which owns electrical parameters of inductor [L] capacitor [C] and resistor [R]. Since CMC tactile sensor has dozen of CMCs in it, it is thought that LCR circuit is formed in this sensor. When the sensor is transformed by mechanical force, the condition of LCR circuit changes and tactile information is detected as impedance change. In this research, we paid attention to distribution of LCR circuit to find out the sensor mechanism. By measuring relationships between percent by mass of CMC and output characteristic of impedance, we defined the mechano-electrical conversion mechanism of CMC tactile sensor. Further, the influences of arrangement and the shape of the electrode on the mechano-electrical conversion mechanism are measured. These findings are used to develop the distribution tactile sense.

1. はじめに

近年, 自律ロボット, テレロボットなどの高度化が進み, 人間に代わって作業を行うロボットの実現に期待が寄せられている. このようなロボットが人間と接する環境で活躍するためには, ロボットは複雑な動作を行えることのみならず, 人間との安全な接触を行える必要がある. すなわち, ロボットの指先における物体の触覚検出, 把持力制御や歩行制御などのための圧力分布情報, 安定把持のための固着・滑り情報, 全身触覚による環境や人間との接触情報を検出するための皮膚感覚センシングが重要である. これまで, ひずみゲージ^[1]や PVDF フィルム^[2], 静電容量センサ^[3], 光学式センサ^[4]などを用いた様々な触覚センサが開発された. しかし, これらの触覚センサは, 用いられたセンサ素子のサイズ, 剛性, 配線の問題から, 小型化・集積化が困難, 柔軟性に乏しい, 単機能に特化している, 感度が低いなどの問題点を有する. すなわち, 触覚センサ用のセンサ素子には,

- ・ 小型化・集積化が容易にできること
- ・ 高感度で, 様々な触覚情報を検出可能であること
- ・ 柔軟性に富んでいること

が求められる.

本研究では, 筆者らの一部が開発しカーボンマイクロコイル (CMC)^[5]を用いる. CMC は, マイクロメートルオーダーサイズの 3 次元ヘリカル・螺旋構造を有する炭素繊維であり, これまで, 電磁波吸収素材, マイクロ波発熱材など, 様々な分野に応用されている. また, CMC 単体は弾力性に富み, 微小な応力でも伸び縮みが可能であり, その際, インダクタ[L], キャパシタ[C], レジスタ[R]の 3 つの電気パラメータも変化する. そのため, CMC を弾力性樹脂素材中にマトリックス状に配置した CMC 触覚センサは, 機械的的刺激を上述の電気

的变化としてとらえることができる. 以上のように, CMC 触覚センサは, センサ素子である CMC が小型であり, 微小応力にも反応することから, 小型・集積化実現のために適していると考えられる. また, 用途に応じてセンサ形状を自由に設定できる点でも, CMC 触覚センサは有効であると考えられる. しかし, その機械電気変換メカニズムが十分に解明されていない. そのため, 本研究では, CMC 触覚センサの機械電気変換メカニズムを明らかにし, 小型分布型触覚センサの開発に応用することを目的とする.

2. CMC 触覚センサの構造とセンシング原理

CMC は, 図 1 に示したような 2 重螺旋構造を有する炭素繊維である. そのサイズは, 繊維径 0.1~1 μ m, コイル径 1~10 μ m, コイル長 300~500 μ m と, 非常に小型である. また, CMC はコイルばね形状を有しているため, 負荷と伸びには, ほぼ線形な関係がある. さらに, コイル単体のインダクタ[L], キャパシタ[C], レジスタ[R]の 3 つの電気パラメータは, CMC の伸縮とともに変化する. レジスタはコイルを伸ばすことによって増加し, インダクタ, キャパシタも伸縮とともに変化

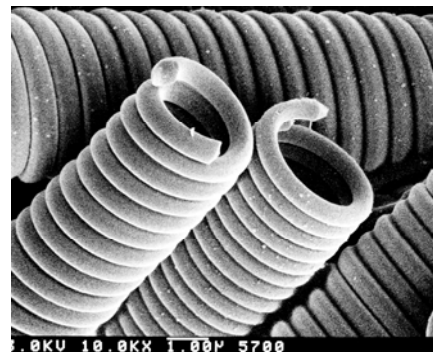


図 1 カーボンマイクロコイルの SEM 写真^[5]

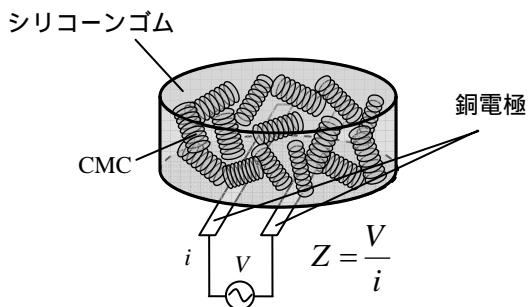


図2 CMC 触覚センサの構造

することが知られている。

図2に弾塑性樹脂素材にCMCを分布した、CMC触覚センサの模式図を示す。CMC単体は上述の電氣的3パラメータを有するため、センサ内部では、LCR回路網が形成されていると考えられる。センサに機械的外力が加わり、センサが変形した際、センサ内部のCMCの伸縮状態および分布状態が変化し、その結果、センサ内部に形成されているLCR回路網が変化する。したがって、LCR回路網の変化を、特定の周波数の交流電圧を印加した際の、センサのインピーダンス Z の変化を測定することにより、機械的刺激を触覚情報として検出できると考えられる。

3. 機械 電気変換メカニズムの解明

3.1 インピーダンスの変化要因

CMC触覚センサのインピーダンスが、機械的刺激に対して変化する原因として以下の要因を検討する。

(1) 外的要因

I. センサ素子と電極間の接触抵抗の変化

・電極間距離の変化によるキャパシタンスの変化

(2) 内的要因

・CMC同士の接触/非接触によるLCR回路網の変化

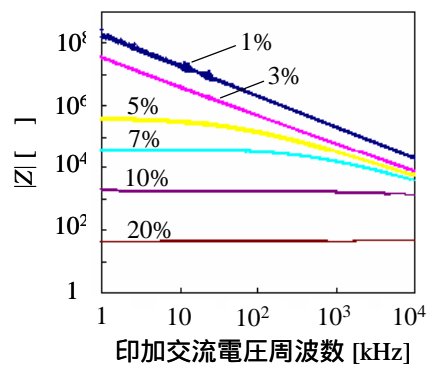
・CMC単体の変形による電気インピーダンスの変化

V. CMC間距離の変化によるキャパシタンスの変化

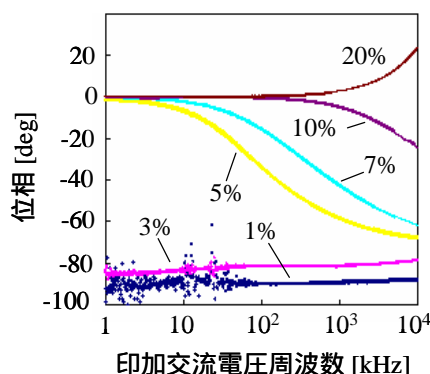
外的要因I, IIは、センサ素子と電極との接触状態が変化する場合に影響を与える。実際、静的な押し込み実験の結果、電極を接着したものに比べて、電極を接着しないものはインピーダンスの変化量がかなり大きくなることが確認された。このことから、電極との接着が変化する場合、接触抵抗の変化がセンサ出力に大きく影響すると考えられる。しかし、接触抵抗や電極間の静電容量の変化を利用した触覚センサは従来から存在しており、コイル形状を有するというCMC自体の特徴を活かしたセンサとはいえない。本研究では、上記の外的要因を排除した実験装置を製作することで、センサ素子自体の変形とインピーダンス変化の関係を調べることにする。表1に示した内的要因に関しては、以下の方針に従って検証する。

表1 インピーダンス変化要因と電氣的変化

要因	電氣的変化
(III) CMC 同士の接触/非接触	LCR 回路網の変化
(IV) CMC 単体の変形	抵抗値の変化
(V) CMC 間距離の変化	キャパシタンスの変化

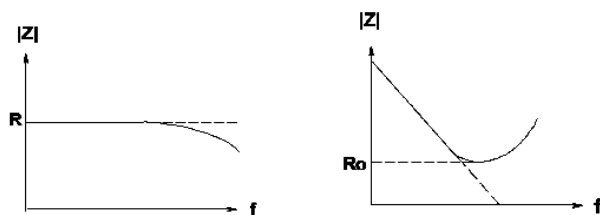


(a) 印加電圧の周波数と $|Z|$ の関係



(b) 印加電圧の周波数と位相の関係

図3 CMC 触覚センサの周波数特性



(a) 抵抗の周波数特性

(b) コンデンサの周波数特性

図4 抵抗 / コンデンサの周波数特性

- (1) CMCの混入量によって接触/非接触の割合を変化させ、そのインピーダンスの周波数特性から支配的な回路モデルを検討する。
- (2) (1)の結果に従い、接触/非接触、または両方が混在した状態の触覚センサを製作し、機械変形(ひずみ)に対するインピーダンス特性の変化から内的要因III~Vの可能性を検証する。

3.2 接触状態による LCR 回路網の変化

3.2.1 混入量とインピーダンス支配要因の関係の仮説

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。このような接触状態は CMC の混入量によって制御できると考えられる。センサ内で CMC が接触している場合、CMC の抵抗もしくはインダクタンスが支配的となり、CMC が非接触で分布している場合、CMC 間に形成されるキャパシタンスが支配的となると考えられる。

3.2.2 インピーダンス支配要因の検証実験

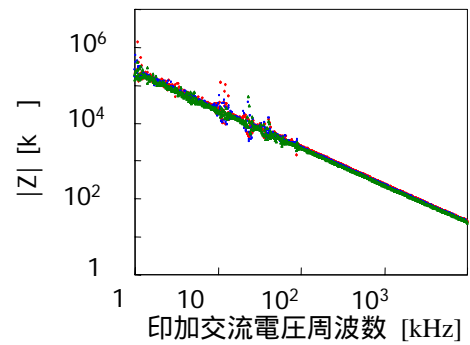
仮説を検証するため、CMC の混入量を変化させたセンサ素子を製作した。各混入量のセンサ素子の無負荷状態における周波数特性を測定した。この際、アジレント社製のインピーダンスアナライザ[4294A]を用い、交流電圧の振幅 500mV に設定し、周波数を 1kHz から 10MHz の範囲で掃引して測定した。

測定した印加交流電圧の周波数と $|Z|$ および位相の関係を図 3 に示す。また、比較のため一般的な抵抗およびコンデンサの周波数特性を図 4 に示す。図 3 と図 4 の比較から、CMC の混入量が少ない 1 wt%、3 wt% の際、コンデンサの周波数特性と一致し、大きい 10 wt%、20 wt% の際は、抵抗の周波数特性と一致することがわかる。また、5 wt% および 7 wt% のとき、抵抗とキャパシタンスの双方の特性を足し合わせた回路を有している。以上より、CMC の混入量により、支配的な回路要素が変化することを確認した。なお、CMC のインダクタンスとしての特性は確認されなかった。このことから、10MHz 以下の印加周波数では、コイルとしての電気的特性は表れないと考えられる。

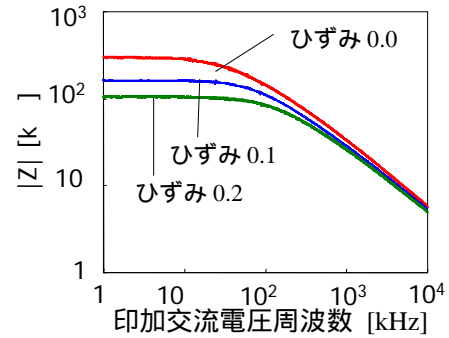
3.3 センサ原理の検証

3.3.1 機械 電気変換原理の仮説

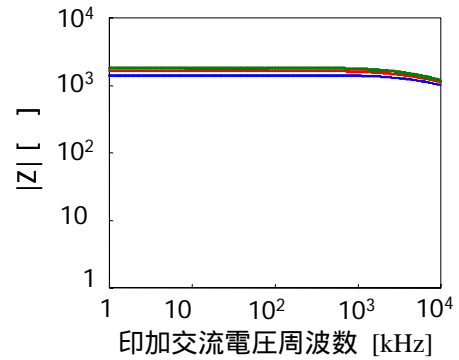
センサ素子が変形した際、インピーダンス $|Z|$ が変化するメカニズムとして、3.1 節の内的要因 III ~ V を挙げた。すなわち、要因 III の CMC 同士の接触 / 非接触が変化した場合、電気回路網に変化が起こり、機械変形に従って周波数特性が変化すると思われる。要因 IV の CMC 単体の変形の効果として、CMC 単体が伸長すると抵抗が増加することが知られている。そのため、抵抗成分が検出されるような十分に混入量の多いセンサ素子では、センサ素子の変形によって内部の CMC は伸長し、その結果、センサの $|Z|$ は増加すると考えられる。要因 V の CMC 間距離の変化はキャパシタンスの変化として現れる。3.2 節より CMC の混入量が十分少なく、非接触の状態の時、CMC 間距離が変化することによって、キャパシタンスが変化すると思われる。押し込みによってセンサ素子全体が収縮すると仮定すると CMC 間距離が全体として小さくなり、キャパシタンスが減少すると考えられる。



(a) 混入量1 [wt%]



(b) 混入量5 [wt%]



(c) 混入量10 [wt%]

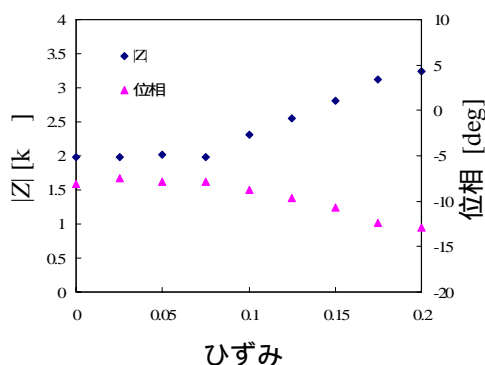
図 5 センサ変形時の周波数特性

3.3.2 機械 - 電気変換原理の検証実験

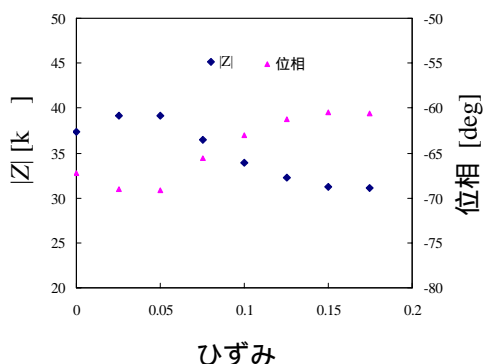
仮説を検証するため、3.2 節で用いた CMC の混入量の異なる各センサ素子の上面に対して、十分に大きい剛体で垂直方向に負荷を加えた押し込み試験を行った。まず、インピーダンスの変化要因(III)の検証を行うため、各混入量のセンサ素子上面に平板を段階的に押し込んだ際、1kHz ~ 10MHz の範囲で周波数特性を測定した。測定結果を図 5 に示す。図 5 より、いずれの混入量のセンサ素子も、押し込みに対して周波数特性が定性的に変化しないことを確認した。すなわち、接触 / 非接触による回路網の変化(要因 III)はほとんど起こっていないと考えられる。

次に、インピーダンスの変化要因(IV)および(V)を検証するために、混入量を 1 wt%、5 wt%、10 wt% に設定した際の、ひずみとインピーダンスの関係を測定した。この際、印加交流電圧の振幅は 500mV、周波数は 1MHz の一定値とした。測定結果を図 6 に示す。

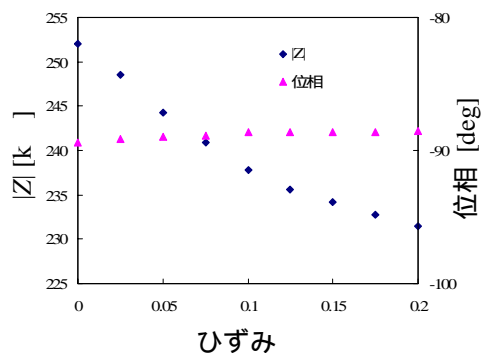
CMC が十分に接触した状態である図 6(a)では、押し込みによって $|Z|$ は増加したことから、また、位相がほぼ 0 [deg]のままであったことから、このときの支配的要因は CMC 単体の変形による抵抗の増加（要因 IV）であると考えられる。一方、非接触状態である図 6(c)では、 $|Z|$ が減少したことから、また、位相がほぼ -90 [deg]のままであったことから、この支配的要因は CMC 間距離の縮小によるキャパシタンスの変化（要因 V）であると考えられる。なお、図 6(b)の接触 / 非接触の混合状態では、複雑なインピーダンス変化が見られた。この原因は、要因(IV)の抵抗と要因(V)のキャパシタンスの変化が組み合わせられた効果であると考えられる。



(a) 接触状態 (CMC: 10 wt%)



(b) 接触 / 非接触混合状態 (CMC: 5 wt%)



(c) 非接触状態 (CMC: 1 wt%)

図 6 ひずみとインピーダンスの関係

3.4 機械 - 電気変換メカニズムの考察

本実験の結果より、CMC 触覚センサは CMC の混入量を変化させることによって、インピーダンスの支配要因を変化させられることがわかった。すなわち、CMC 触覚センサは、CMC の混入量を変化させるのみで、静電容量型センサ、抵抗型センサまたは、それらの中間型のセンサになりうることがわかった。また、要因(IV)の抵抗成分を利用する場合と要因(V)のキャパシタンスを利用する場合を比較すると、抵抗成分を利用する場合、キャパシタンスに比べて応答性が低くなるなどの特性を確認している。ヒトの触覚も、複数の応答速度の異なる触覚受容器から形成されている。そのため、CMC 触覚センサのこの応答速度の違いは、ヒトの皮膚感覚機能を模倣したセンサを開発する際、有効であると考えられる。

一方、CMC のコイル形状は、その機械的なパネ形状による柔軟性が特長であると考えられる。一般に知られる感圧導電性ゴムのように、弾性樹脂内部に剛性の高い導電性材料を混入した場合、変形によってゴムに破断が生じると考えられる。そのため、CMC 触覚センサは、弾性樹脂の変形に伴って CMC が変形するため、弾性樹脂との親和性が高いと考えられる。よって、CMC 触覚センサは、耐久性の面でも優れたセンサであると考えられる。

4. 電極配置および面積の影響

4.1 有効電解領域の仮説

CMC 触覚センサの機械-電気変換の特性は、電極の配置および面積によっても変化すると考えられる。こ

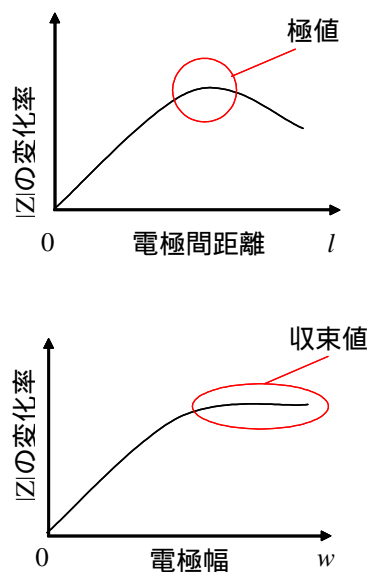
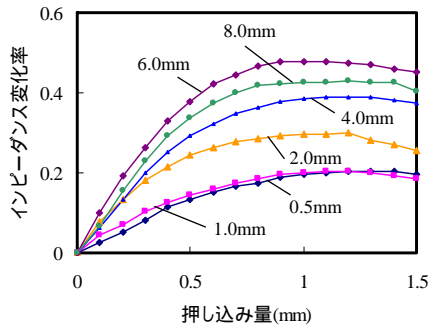
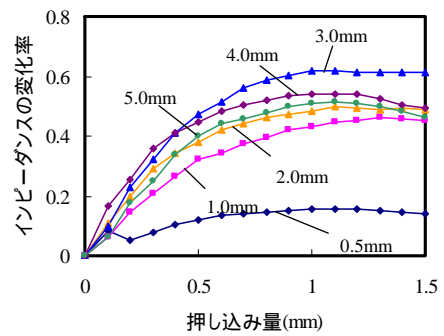


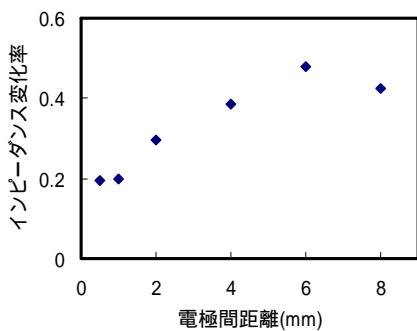
図 7 電極形状と $|Z|$ 変化率の関係の仮説



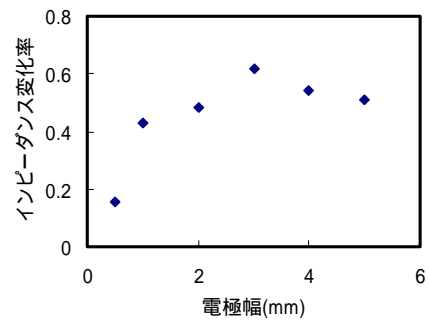
(a) 押し込み量と $|Z|$ の関係



(a) 押し込み量と $|Z|$ の関係



(b) 電極間距離と $|Z|$ 変化率の関係



(b) 電極幅と $|Z|$ 変化率の関係

図 8 電極間距離を変化させた際の測定結果

図 9 電極幅を変化させた際の測定結果

これは、電極の配置および面積によって、センサ素子内部に発生する電界領域の大きさと強度が変化するためであると考えられる。これを有効電界領域と定義し、センサ出力との関係を調べる。有効電界領域を変化させる方法として、電極配置および電極面積を変化させた場合を考える。

まず、電極配置に関して、1組の電極間距離が大きくなる程、電界の影響を受ける領域は増加する。一方、電界の影響は電極間距離の2乗に反比例して減少する。よって、電界の影響を受ける領域の大きさと、電界の強さの相互関係から、電極間距離に対する $|Z|$ の変化率は、図7(a)に示したように、極値を持つと考えられる。

次に、電極面積に関して、対向する方向に沿って電極面積を増加させた場合、電極面積が増えるに従って、電界の影響を受ける領域は増加するが、電界の影響は電極間近傍に集中すると考えられる。よって、電極面積が増加した際、図7(b)に示したように、 $|Z|$ の変化率に対する影響は徐々に減少し、一定に収束値すると考えられる。

4.2 有効電界領域の検証実験

仮説を検証するために、電極間距離および電極幅を変化させたセンサ素子を製作した。なお、電極間距離を変化させたとき、電極はすべて同じ形状のものを用いた。また、電極幅を変化させたとき、電極間距離はすべて同様とした。また、CMCの質量パーセント濃度は5%で一定とした。製作したセンサ素子を用いて、3.3節と同様の押し込み試験を行い、押し込み量と $|Z|$ の変化率および位相の関係を測定した。この際、振幅500mV、周波数1MHzの交流電圧を印加した。

電極間距離および電極幅が変化した場合の測定結果を図8(a)および図9(a)に示す。また、これらのグラフの押し込み量1.0mmにおける、 $|Z|$ の変化率を図8(b)および図9(b)に示す。図8(a)および(b)より、電極間距離が増えるにつれて、 $|Z|$ の変化率は増加したが、電極間距離6mm付近を境界に減少した。また、図9(a)および(b)より、電極幅が増加するにつれて $|Z|$ の変化率は増加し、ある一定値に収束する傾向を示した。すなわち、仮説で述べた有効電界領域の影響が確認された。

4.3 有効電解領域の考察

本実験の結果より,CMC 触覚センサは電極配置および面積によって,そのセンサ感度が大きく変化することがわかった.すなわち,電極間距離を変化させた際,電極感度は極値をもち,電極幅を変化させた際,電極面積がある程度以上になると,センサ感度に影響を与えないことがわかった.以上から,今後,小型分布型触覚センサの電極を最適設計するにあたり,小型化を実現するために,電極間距離および電極面積を設計パラメータとして考慮する必要があることがわかった.

5. 結論

本研究では,CMC 触覚センサのセンシング原理を説明することを目的に,機械 - 電気変換特性を定量的に測定し,インピーダンスの周波数特性,ひずみとインピーダンスの関係を明らかにした.CMCの混入量を制御することにより,センサ素子内部のCMCの接触状態とそれに対応した支配的インピーダンス要因を計測した.その結果,CMC 触覚センサは,CMCの混入量が少ない場合,CMC間距離に応じたキャパシタンス変化を出力すること,混入量が多い場合,CMC単体の変形による抵抗の変化を出力することを明らかにした.また,電極の配置および形状により,有効電界領域が変化し,センサ出力に影響が及ぶことを確認した.

今後は,動的特性の測定など,センサ特性を把握する上で必要な測定をさらに行った後,CMC 触覚センサ

の機械 電気変換の詳細なモデル化を行う予定である.また,得られたセンシング原理を設計指針として,小型分布型触覚センサの開発を行う予定である.

6. 参考文献

- [1] Yuka Mukaibo, Hirokazu Shirado, Masashi Konyo and Takashi Maeno: Development of a Texture Sensor Emulating the Tissue Structure and Perceptual Mechanism of Human Fingers, Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005, pp. 2576-2581
- [2] 山田大介, 前野隆司, 山田陽滋, 指紋により接触 / 非接触・固着 / 滑り分布を検出する弾性ロボットフィンガの開発, 日本機械学会論文集 70 巻 690 号 C 編, 2004 年 2 月, pp. 560-566
- [3] 山本敏, 鈴木孝直, 中尾知: タッチモード容量型圧力センサ, フジクラ技報, No. 101, pp. 71-74, (2001)
- [4] Masahito Ohka, Hiroaki Kobayashi, Yasunaga Mitsuya: Sensing Characteristics of an Optical Three-axis Tactile Sensor Mounted on a Multi-fingered Robotic Hand, International conference on manufacturing, machine engine and robotics, Session MTD-301, (2006)
- [5] 葛谷知洋, 上田秋恵, 河邊憲次: CMC の触覚センサへの応用, マテリアルインテグレーション, Vol.17, No.8, p-p9-16, (2004)