

2節 カーボンマイクロコイル (CMC) を用いた高感度触覚・近接センサー

1 はじめに

触覚とは、狭義には生物が体表に機械的な刺激を受けたことを感受する感覚であるが、広義には接触に伴って生ずる感覚；圧覚、力覚、温覚、冷覚、痛覚、固い・軟らかいなどの弾性特性認識、つるつる・ざらざらなどの表面形状認識、なども含まれる。人間の皮膚はこれらすべてを高感度で知覚できる。さらに、物体が近づいただけでも（接触しなくても），“なんとなく”という、第六感ともいわれる感覚を持っている。最近、この人間の優れた皮膚感覚を材料機能として具現化しようとする研究が精力的に行われるようになってきた。既存の触覚センサーは、静電容量型、ピエゾ抵抗型、光学型、歪ゲージ型など、種々の方式があるが、いずれも圧力の絶対値のみを検出する単機能であり、検出感度も低く、微小化が困難で、柔軟性もない。また、近接センサーは容量型のものが実用化されているが、検知距離はせいぜい5～8mmである。

カーボンマイクロコイル (CMC ; carbon micro-coil) は、コイル径が数 μm ～数百nmの三次元ヘリカル/らせん構造という従来の素材にはみられない特異的構造を持ち、電磁波吸収材、マイクロ波発熱材、生物活性化剤、など幅広い応用が期待されている機能性新素材である。CMCは、非晶質で非常に弾力性があり微小な応力でも容易に伸び縮みし、その際電気特性も変化する。

著者らは最近、少量のCMCを弾力性樹脂中に均一分散させた複合材は、人間の皮膚に匹敵する高度の触覚センサー特性があることを見いだした¹⁻⁴⁾。さらに、人間の第六感ともいえる近接感覚あるいは電磁波や熱にも感応することを見いだした。そこで本稿では、CMCを用いた新規の超高感度・微小触覚/近接センサーの開発の現状を紹介する。

2 開発のコンセプト—人間の皮膚感覚構造(触覚・近接感覚)に学ぶ—

皮膚には、マイスナー小体、パチーニ小体、ルフィニ小体、メルケル小体など、種々の外部刺激を感受・識別する多くの受容器がある。その中で、触覚受容器として重要なのはマイスナー小体で、指紋の直下に2列に1,500/cm³の密度で存在している。マイスナー小体はCMCと類似の3D-ヘリカル/らせん構造をしており、これが外部応力に応じて伸び縮みすることにより高度の触覚機能を発現している。この皮膚の高度・高次構造に倣い、弾力性樹脂中に弾力性の優れたCMCを添加・複合化させれば、人間の皮膚感覚機能を持つ弾力性の高感度触覚センサーあるいは人工皮膚が得られると期待できる。そのような基本コンセプトのもとに、CMCを用いた新規の触覚/近接センサーの開発を行っている。

3 センサー素子原料

図1(a)にセンサー素子原料として用いた代表的なCMCのSEM写真を示す。CMCは比較的規則正しく一定のコイル径とコイルピッチで二重らせん状に巻いている。このCMCはかなり弾力性があり、コイルによってはほぼ直線状まで伸びる(図1(b))。本研究では、主として、コイル径1～10 μm 、コイル長さ300～500 μm のコイルを用いた。コイルに荷重(応力)を印加すると、印加荷重に比例して伸長し、荷重を取り去るともとの長さまで戻る優れた弾力的特性がある。コイル径が20～50 μm のCMC(超弾力性CMC)では、もとのコイル長さの10～15倍まで再現性良く伸縮する。単コイルでは数mgオーダの荷重でも伸長する。コイルを伸長させると電気抵抗(R成分)は増加し、収縮させると減少する。この変化は非常に再現性が良い(図2)。また、インダクタンス成分(L)、キャパシタンス成分(C)、インピーダンス成分(Z)などもCMCの伸縮に応じて変化する。本研究では、弾力性フィロックスとして、主

ナノカーボンハンドブック(エヌ・ティーエス、2007)より

KE-103)を用いた。

4 素子の作製法およびセンサー特性評価法

CMC触覚センサー素子は、図3に示すようにCMCをシリコン樹脂中に均一分散・複合化させただけのきわめて簡単な構造をしており、作製方法もとても簡単である。まず、シリコン母材+硬化剤混合液に0.1~20wt%のCMCを添加し、遠心脱泡機中で均一に攪拌・分散・脱泡したあと、鑄型に流し込み、さらに脱泡後、室温で7時間放置して硬化させ、種々の大きさ・厚さのCMC触覚センサー素子を作製した。これを銅製電極(間隔:3mm)間にセットし、上からマニピュレータを用いて一定荷重(圧力)を印加し、そのときの電気パラメータの変化を、インピーダンスアナライザを用い、0.5V、200KHzで測定した。印加荷重(圧力)の大きさは、電子天秤で測定した。各電気パラメータは、荷重を印加しない場合を値をゼロとし、荷重を印加した際の変化量を絶対値あるいはDC変換出力(Volt)で示した。

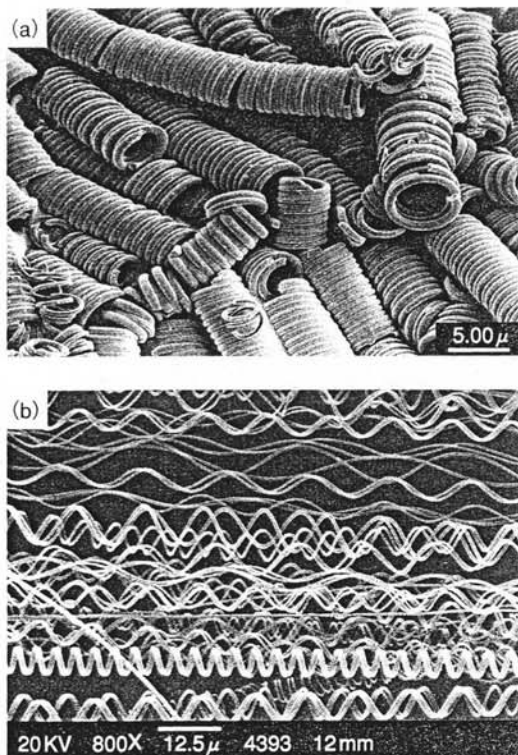


図1 (a) 素子原料の代表的 CMC および (b) これを伸ばした状態

5 センサー特性

(1) CMCの添加量

シリコン中へのCMCの添加量を増加させると検出感度は増加する。しかし、10wt%以上添加するとCMC分散シリコン液の粘度が増加して成形性が悪くなり、また成形品(素子)が硬くなる結果、感度はそれ以上増加せず一定値を示すようになる。一方、CMC添加量は1%以下でも十分な信号量が得られる。例えば、コイル長さが90 μ m以下のCMCを0.1wt%添加した厚さ0.1mmの素子では、200mgfの荷重を印加した場合、L成分は1.5mH(図4)、C成分は300fF、R成分は300 Ω 変化した。すなわち、CMCを微量添加しただけで十分なセンサー信号が得られる。こ

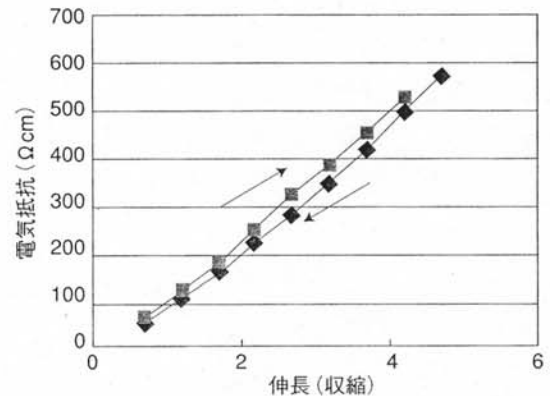


図2 CMCの伸びと電気抵抗との関係

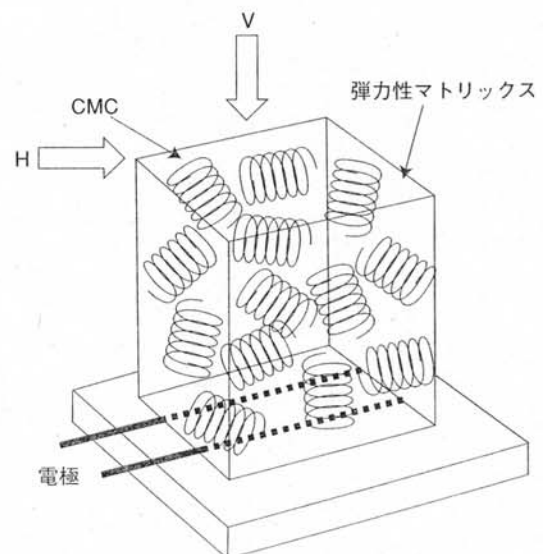


図3 CMC触覚センサーの原理図

の際CMC同士は相互に全く接触しておらず、パーコレーション(コイル同士の接触)構造を形成していない(図5)。

(2) センサーの超微小化

CMC触覚センサー素子は、弾力性シリコン樹脂中にCMCを少量均一に分散させただけの簡単な構造であり、非常に弾力性に富んでいる。また、素子をハサミなどでどんどん小さく切り刻んで超微小化しても、センサーとしての特性は変わらない。原理的に1本のコイルが弾力性樹脂中に複合化されていれば、センサー特性が発現される。例えば、CMCを5wt%添加した $10 \times 10 \times 3 \text{ mm}^3$ の大きさの素子を、超音波メスで裁断・微小化して $0.1 \times 0.1 \times 0.1 \text{ mm}^3$ の超微小素子を得た。これを2枚の微小電極間にセットし、この上から50Paの圧力を印加すると、L成分は3~5mH増加し、C成分は250~400fF増加し、R成分は200~400 Ω 減少した。これら値は、大きなセンサー素子の場合とほとんど同じであり、微小化してもセンサー感度は低下しないことが分かる。また、厚さ50 μm の超薄膜センサーでも十分な信号変化が検出できる。したがって、CMCセンサー素子は、超微小・超薄膜触覚センサー素子としてきわめて有用である。

(3) 最小検出感度

図6に、微小荷重を印加したときのL成分の変

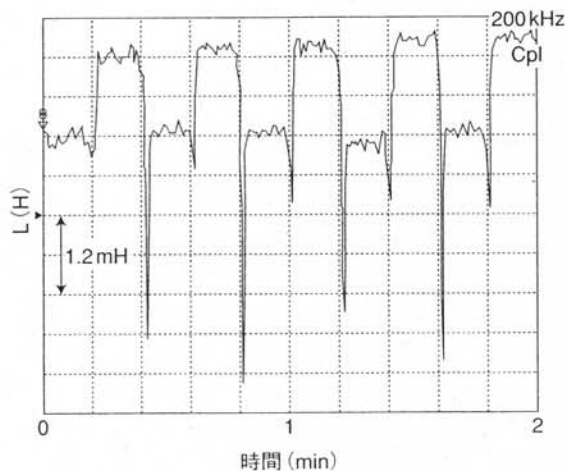


図4 CMCセンサー素子のL成分変化
CMC添加量：0.1wt%、素子の厚さ：0.3mm、印加荷重：200mg

化を示す。印加荷重に依存した信号変化が観察され、1mgf (0.1Pa相当)の超微小荷重でも十分なL成分変化($S/N > 5$)が観察される。C成分についても同様の変化が観察された。すなわち、CMCセンサーの圧力検出感度は0.1Pa以下であり、これは市販の触覚センサー感度の1,000~10,000倍以上の高感度である。一方、センサー素子表面の垂直方向の変位に対する最小検出感度は、約0.5 μm である。図7に、CMCの添加量1wt%、厚さが0.1mmのセンサー素子に対する印加荷重とL成分変化との関係を示す。L成分は、印加荷重に対して直線的ではなく指数関数的に増加している。ほかの電気パラメータも同様な変化を示す。図8に、マトリックスとしてシリコン樹脂および弾力性エポキシ樹脂を用いて得られたセンサー素子に、10gfの荷重を印加した際のマトリックスの硬度と抵抗成分変化(ΔR)のDC出力との関係を示す。硬度が低いほど高い ΔR 変化量を示している。一般に弾力性の高いマトリックスを使用すると微小荷重でもCMCの変形量も大きく、したがって最小検出感度の高いセンサー素子が得られる。

(4) ダイナミックレンジ

高感度と検出範囲(ダイナミックレンジ)は通常相反する特性である。CMC触覚センサーの場合、信号強度は荷重の対数に比例するので、幅広いダイナミックレンジが得られる。例えば、CMCを1wt%添加した厚さが0.1mmの素子の場合、C成分は、0.1Paの圧力では50fF、1Paでは

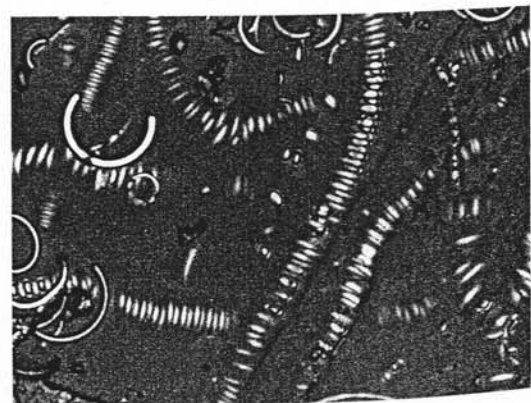


図5 CMCセンサー素子内部の光学顕微鏡写真
CMC添加量：10wt%

200 fF、10 Paでは600 fF変化した。信号強度は、CMCの伸縮の変化量、したがってマトリックスの変化量に影響される。弾力性が優れており柔らかい(硬度の小さい)マトリックスでは、弾力性が小さく硬い(硬度の高い)マトリックスに比べて単位荷重を印加した場合の変形量は大きく、したがって信号変化も大きく高感度であるが、その変化量は低荷重で急激に飽和に達するのでダイナミックレンジは小さい。一方、固いマトリックス

では、単位荷重に対する変化量は小さく感度は低い、荷重幅を大きく取れるのでダイナミックレンジは大きくなる。高感度と高ダイナミックレンジを両立させるために、素子の上層に弾力性の高いマトリックスを用いた高感度用センサー層を、下層に弾力性の低いマトリックス樹脂を用いた重荷重用センサー層を積層させた2層センサー素子が開発されている。

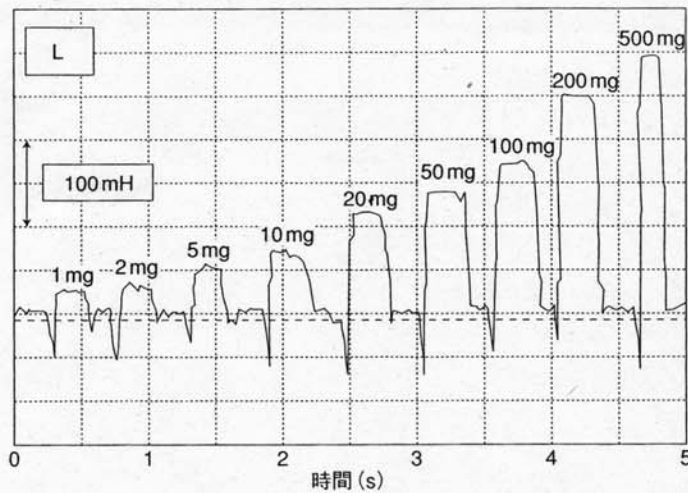


図6 CMCセンサー素子の微小加重によるL成分変化
 CMCの添加量：1 wt%、素子の厚さ：0.2 mm、CMCの長さ：300 ~ 500 μm、コイル径：1 ~ 10 μm
 破線は荷重ゼロのときの信号レベルを示す

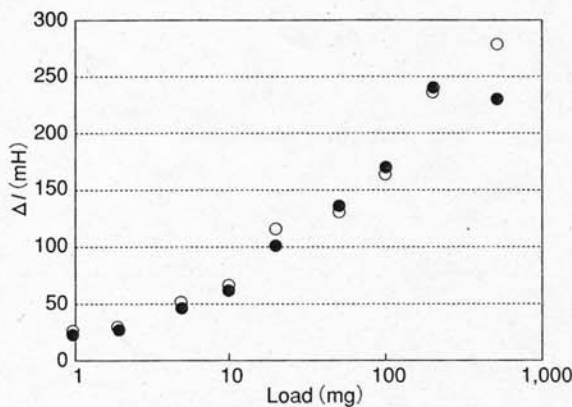


図7 印加荷重とL成分変化との関係
 CMC添加量：1 wt%、素子の厚さ：0.1 mm

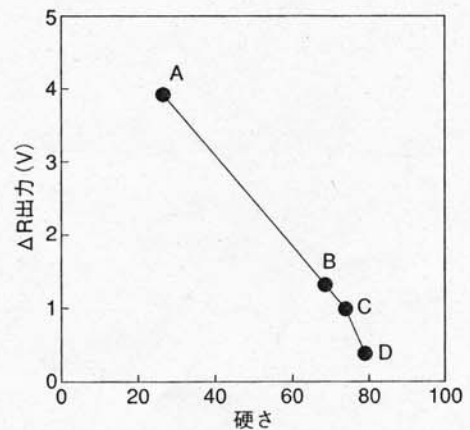


図8 素子の硬さ(デュロメーターA)とR成分の出力変化との関係
 マトリックス：(A) シリコン樹脂、(B~D) 弾力性エポキシ樹脂
 CMC添加量：(B) 3 wt%、(C) 4 wt%、(D) 10 wt%
 印加荷重：10 gf

(5) 表面形状の影響

CMCセンサー素子の表面は一般に平滑であるが、ある程度の粗い方が感度は高い。例えば、等方的な場合、感度は平均粗度 (Ra) が30~50 μ までは急激に増加するがその後はあまり変化しない。図9は、指紋型形態を持つセンサー素子の表面形状である。このセンサー素子表面の指紋の方向に対して、垂直 (A) 方向、水平 (B) 方向におよび円形にソフトブラシで軽くこすった (応力を印加) 際のL+CおよびRのDC出力を図10に示す。

指紋に対して垂直方向に印加した方が、水平のときより2倍以上高い出力が観察される。円形に印加すると両者による出力変化が連続的に観察される。すなわち、表面形状に異方性がある場合は、出力 (センサー感度) にも異方性が観察される。

(6) 温度の影響 (温度ドリフト)

温度が上昇すると、マトリックスの樹脂は柔らかくなり、応力下での変形量が大きくなり、したがって感度も高くなる。例えばCMC (5wt%) /シ

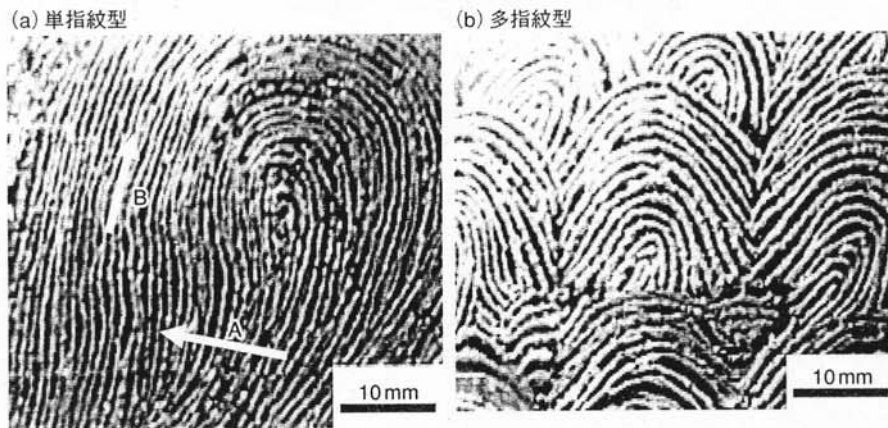


図9 指紋型センサー素子の表面形状
(A) 指紋の隆線方向に垂直、(B) 指紋の隆線方向に平行

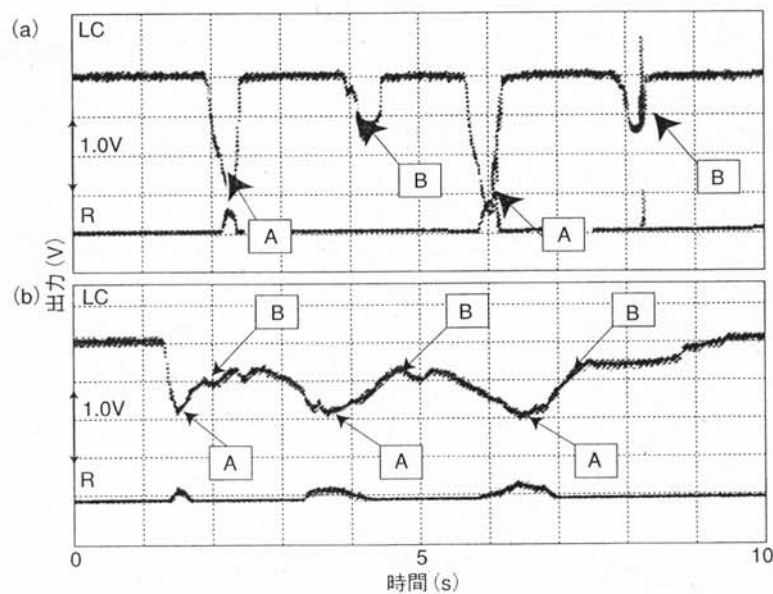


図10 指紋型センサー素子表面を刷毛でこすった場合のLCR成分の出力変化
(a) 指紋の方向に直線的に刷毛でこすった場合、(b) 円形にこすった場合
A: 指紋の方向に垂直、B: 指紋の方向に平行
印加荷重: 約10gf

リコーン樹脂 ($1 \times 1 \times 1 \text{mm}^3$) の素子に 100mgf を印加した場合、 ΔL 成分の変化は、 30°C では $20 \mu\text{H}$ 、 40°C では $50 \mu\text{H}$ 、 50°C では $100 \mu\text{H}$ に増大する。すなわち感度は温度に非常に敏感であるので、実際に使用する際には温度補正が必要である。

(7) 応答速度

信号変化の速度はマトリックスの機械的特性に影響され、概して $0.05 \sim 0.1$ 秒である。

(8) 識別能

触覚センサーをカテーテル、内視鏡、鉗子などの医療用器具、あるいは介護用ロボットなどの皮膚感覚を持つ人工皮膚として用いる場合、硬い、軟らかい、すべすべ、ざらざらなどの弾性特性や表面特性、あるいは皮膚のような温度・音響など、種々の刺激を識別できることが必要である。CMC 触覚センサーでは、表面を面で押した場合、先のとがったもので突いた場合、刷毛で擦った場合などでは、出てくる信号の波形は異なるので、これらを識別できる。さらに、センサーに手を近づけた場合、あるいは加熱した半田ゴテを近づけた場合にも、 L 成分の明らかな変化が観察された。また、携帯電話 (1GHz) あるいは音響 (約 $2,000\text{Hz}$) を近づけても信号の検出が観察され、電磁波あるいは音響にも敏感である。IR (赤外線)、音響、電磁波などは、一種の波動であり、CMC はこれらと強い相互作用を示すので、これが LCR 複合共振に強い影響を及ぼすと考えられる。したがって、CMC 触覚センサー素子は種々の刺激を検出できる多機能性を示すものと考えられる。

(9) 近接センサー特性

CMC センサー素子は、触覚ばかりでなく、非接触で近づいてくる物体を検知・認識する近接感覚も持っている。図 11 は、CMC センサー素子に手を近づけた際の、 200kHz での L 成分の DC 出力変化を示す。手がセンサー素子に 20cm に近づくとインダクタンス (L) の減少が認められ始め、近づくにつれて急激に減少する。図 12 は銅板を素子に近づけた際の 200kHz でのインピーダンス (Z) の変化を示す。銅板を素子に 30mm まで近づけると明らかな信号変化が観察され、さらに接触した瞬間には非常に大きな信号変化が観察され

る。すなわち、CMC 近接センサーは 20cm の長距離から近接信号を検出できることが分かる。

6 触覚センシング原理

市販の触覚センサーには、静電容量型 (圧力による 2 枚の電極間距離の変化を静電容量の変化として検出)、電気抵抗型 (圧力による導電性粉末間の距離の変化に伴う抵抗変化、圧力によるピエゾ抵抗変化、あるいは圧力による形状 (歪) 変化に伴う抵抗変化を検出)、あるいは光学型 (圧力

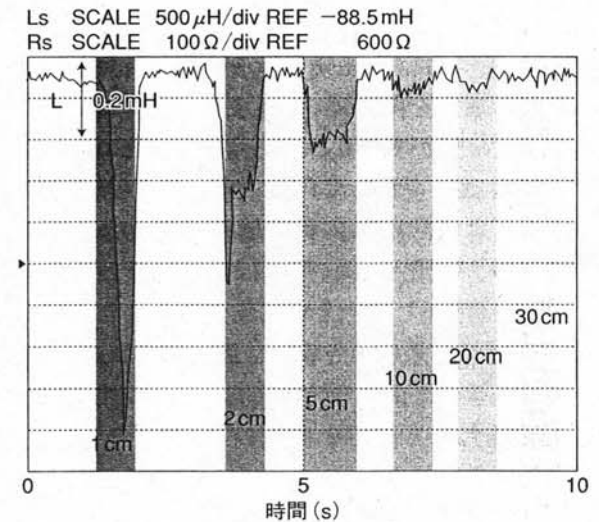


図 11 CMC センサー素子に手を近づけた際の L 成分の DC 出力変化

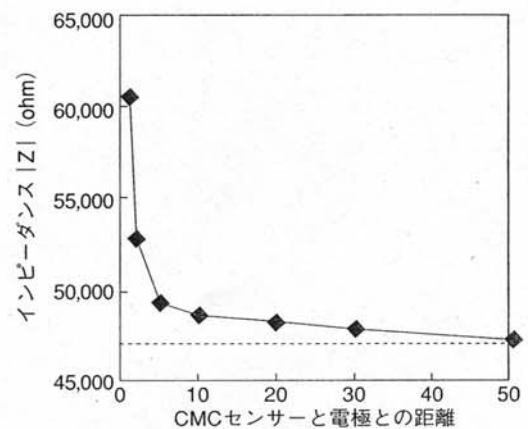


図 12 CMC センサー素子に銅板を近づけた際のインピーダンス (Z) の変化
CMC 添加量: $0.5 \text{wt}\%$

表1 触覚センサーの性能比較表

センサーの種類	動作原理	識別能力*1	最小検出圧力	最小検出変位	最小寸法	弾力性(柔軟性)
CMC	LCR共振型	◎	◎	◎	◎	◎
従来品	静電容量型	×	△	△	△	×
	ピエゾ抵抗型	×	△	△	△	×
	Si振動型	×	△	△	△	×

*1識別能力：応用力の種類、温度、生体音響などを検出・識別できる能力
◎：非常に優れている、△：劣っている、×：全くない

による光導波路の変化を検出)など種々の方式があるが、いずれも単一の物理量(圧力)の変化のみを検出し、刺激の種類は識別できない。一方、CMC触覚センサーでは、外部圧力により弾力性樹脂が伸縮し、その際その中のCMCも伸縮する。CMCは電気的LCR成分を持っており、マトリックスはC成分を持っている。CMCは伸縮に伴い内部ひずみ量が増加し、また単位長さあたりのコイルの巻数も変化して印加交番電磁界が変調され、コイル内に流れる電流値も変化し、LCRパラメータが変化する。例えば、圧力を加えるとLC成分は増加し、R成分は減少する。したがって、刺激が加えられた場合、図13に示したように、これらの電気成分間で複合共振的共鳴が起こると考えられる。この電気的LCR複合共振は、機械的に微小バネで三次元的で結ばれた質点の振動で置き換えて考えることができる。共振あるいは振動モードは、加えられた刺激の種類により変化するので、刺激の種類が識別可能である。すなわち、CMC触覚センサーによる触覚センシングは、新規のLCR複合共振回路形成に基づくものであり、微小応力・刺激を高感度で検出・識別できるという大きな特長がある。

7 まとめ

既存のセンサーとの性能比較を表1に示す。CMC触覚センサー素子は、CMCを弾力性樹脂(シリコン樹脂など)中に均一分散・複合化させただけのきわめて簡単な構造である。このセンサー素子は、弾力性に富み、超微小化・薄膜化が容易であり、LCR複合共振回路形成により検出感度および識別能などのセンサー特性は、既存セ

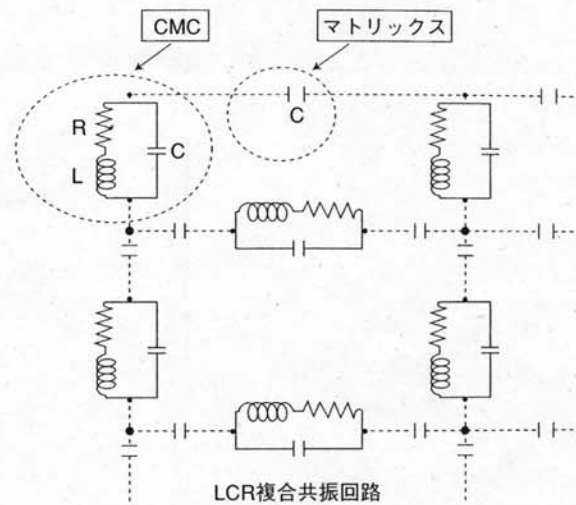


図13 CMCセンサー素子のLCR複合共振回路モデル

ンサーと比較してきわめて優れている。したがって、医療用高感度・高識別能触覚センサー、ロボット用の皮膚感覚を持つ人工皮膚、各種応力・変位センサー、赤外線・温度・音響センサーなど、幅広い応用が期待できる。

[引用・参考文献]

- 1) 元島 栖二：応用物理, 73, 1324-1327 (2004).
- 2) X. Chen, S. Yang, M. Hasegawa, K. Takeuchi, K. Kawabe and S. Motojima : Proc. 2004 Int. Conf. MEMS, NANA, and Smart Systems, pp.486-490 (2004).
- 3) S. Yang, X. Chen, M. Hasegawa and S. Motojima : Proc. 2004 Int. Conf. MEMS, NANA, and Smart Systems, pp.32-35 (2004).
- 4) 葛谷知洋, 植田秋恵, 河辺憲次：マテリアルインテグレーション, 17 (8), 9-16 (2004).

<元島 栖二/陳 秀琴>