

2.4.5

カーボンマイクロコイル(CMC)を 活用した超高感度触覚センサの開発

元島 栖二
岐阜大学工学部応用化学科 教授

陳 秀琴
華僑大学化学工程系 教授(中華人民共和國)
岐阜大学 特別研究員

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全てを高感度で知覚できる。すなわち、人間の手は、優れたアクチュエータであると同時に、優れた触覚センシング特性(皮膚感覚)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。既存の触覚センサは、静電容量型、ピエゾ抵抗型、光学型、ひずみゲージ型など、種々の方式がある。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。

カーボンマイクロコイル(CMC; Carbon Micro Coils)は、コイル径が数マイクロメートルから数百ナノメートルの三次元ヘリカル/らせん構造という従来の素材には見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。

筆者らは最近、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特性があることを見出した^{1)~5)}。そこで本稿では、CMCを用いた新規の超高感度触覚センサ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(触覚センサ)に学ぶ～

皮膚には、図1に示したように、マイスナー小体、パチニ小体、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 $1,500/\text{cm}^2$ の

●触覚センサ

密度で存在している。このマイスナー小体は神経細胞末端がくるくると巻いたもので、コイル径 $40 \sim 70 \mu\text{m}$ 、長さ $20 \sim 150 \mu\text{m}$ の繭状の形をした3D-ヘリカル/らせん構造をしている。これが外部応力に応じて伸び縮みするとその電気特性が変化し、その信号が脳に伝達されることにより高度の触覚機能を発現している。カーボンマイクロコイル(CMC)は、後で示すようにマイスナー小体と類似の3D-ヘリカル/らせん構造をしており、大きさも同じくらいで、しかも伸び縮みに伴い電気特性が変化する。すなわち、マイスナー小体とCMCは構造と特性が非常によく似ている(図2)。したがって、この皮膚の高度・高次構造に習い、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あるい

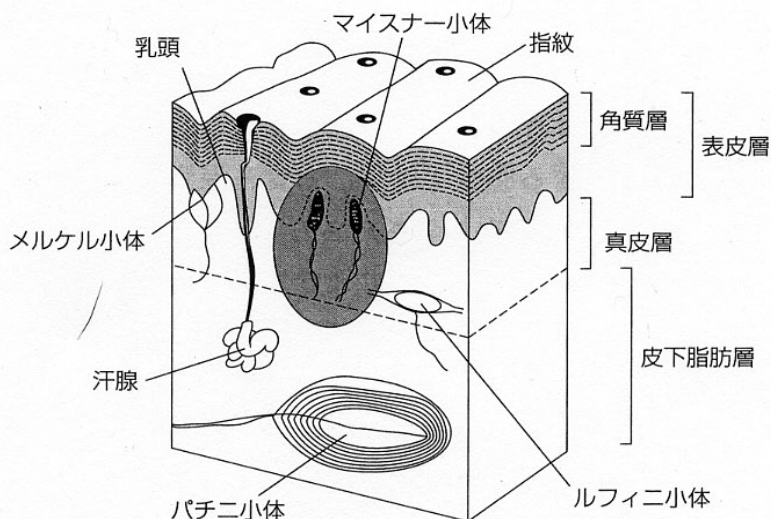


図1 人間の指腹部の組織と触覚受容器⁶⁾

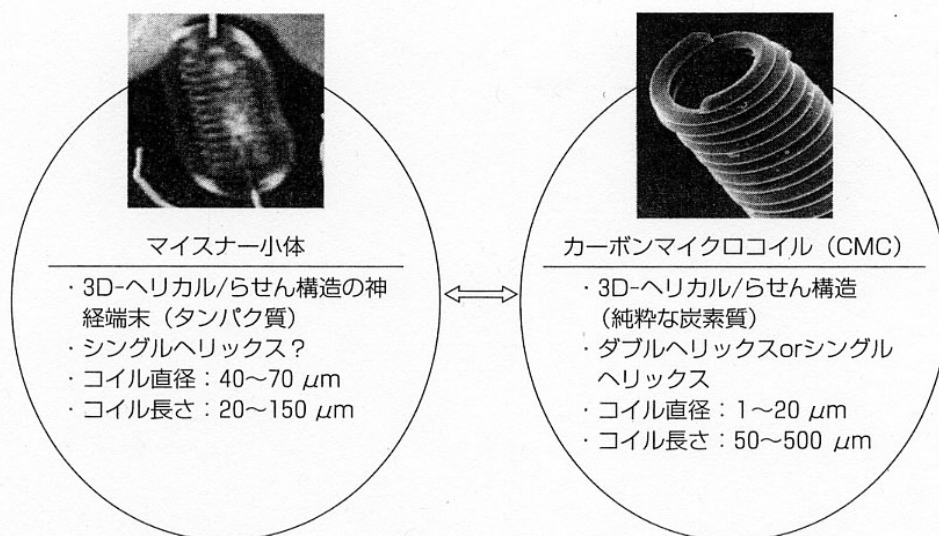


図2 マイスナー小体とCMCとの比較

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センサの開発を行った。

3. センサ素子原料

図3にCMC触覚センサ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。一般にコイル径は $2\sim 5\mu\text{m}$ である。CMCは合成条件によりコイル形態、ファイバ径、コイル径などは大きく変化する。一般にファイバ径が小さく、コイル径が大きなコイルは、弾力性が優れている。図4(a)はコイル径が大きく(約 $10\mu\text{m}$)、ファイバ径が小さなコイルを示す。このようなコイルは弾力性が非常に優れており、小さな荷重でも元のコイル長さの $5\sim 15$ 倍伸ばすことができる(超弾力性コイル)。図4(b)は、この超弾力性コイルを左右に伸ばした状態である。コイルによってはほぼ直線状まで伸びることがわかる。図5にコイルに印加した荷重(応力)と伸び縮みの長さとの関係を示す。CMCは印加応力に比例して再現性よく伸び縮みすることがわかる。図6に、as-grownコイルを基板から板状($5\times 20\text{mm}^2$)に切り出したバルクコイルを約 4mm 伸ばし、その後、元の長さまで縮めた際の電気成分;L(インダクタンス)、C(キャパシタンス)およびR(抵抗)成分の変化を示す。いずれの電気成分もCMCを伸ばすと増加し、収縮させると減少している。本研究では、コイルとしては、主としてコイル径 $1\sim 10\mu\text{m}$ 、コイル長さ $300\sim 500\mu\text{m}$ のコイルを用い、また弾力性マトリックス樹脂としては、弾力性シリコーン樹脂(信越シリコーン:KE-103R[®])を用いた。

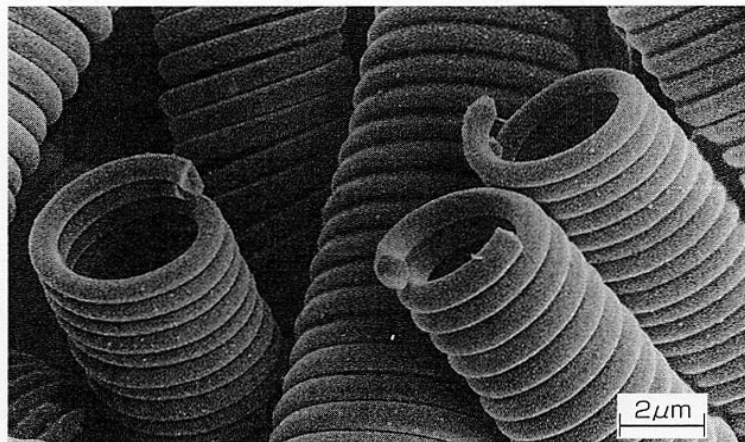


図3 代表的な二重巻きカーボンマイクロコイル (CMC)

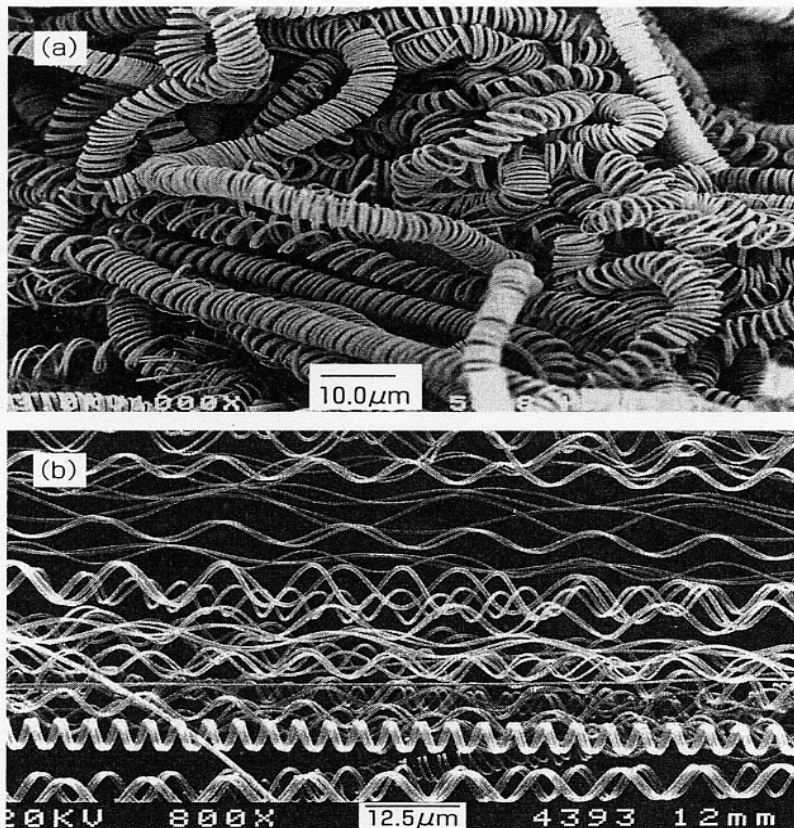


図4 (a) 超弾力性CMCと(b)これを左右に伸ばした状態

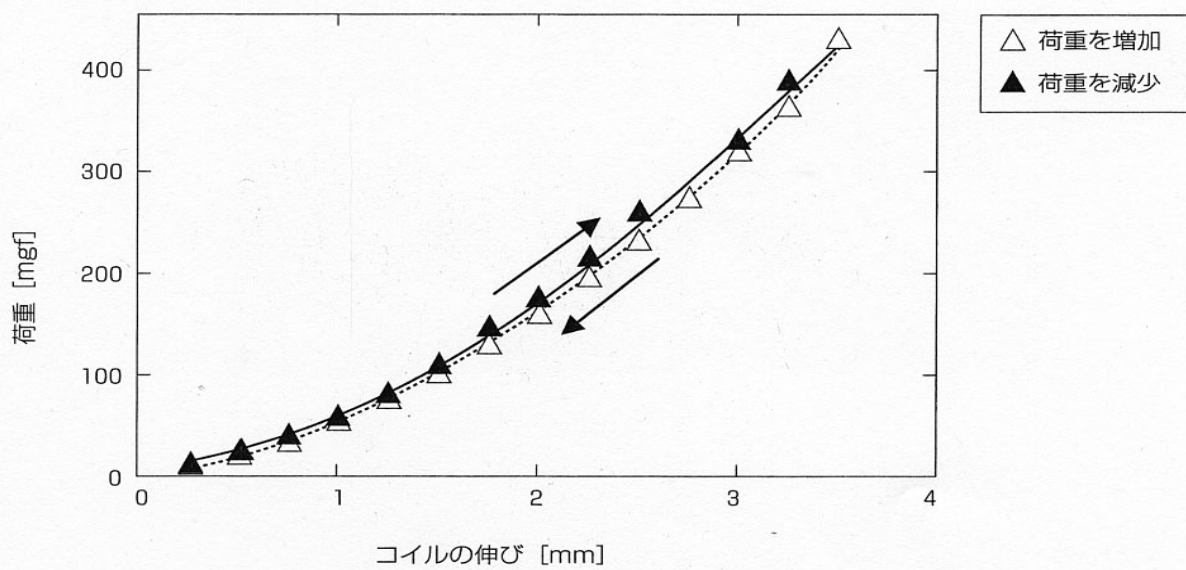


図5 CMCの荷重と伸びの関係

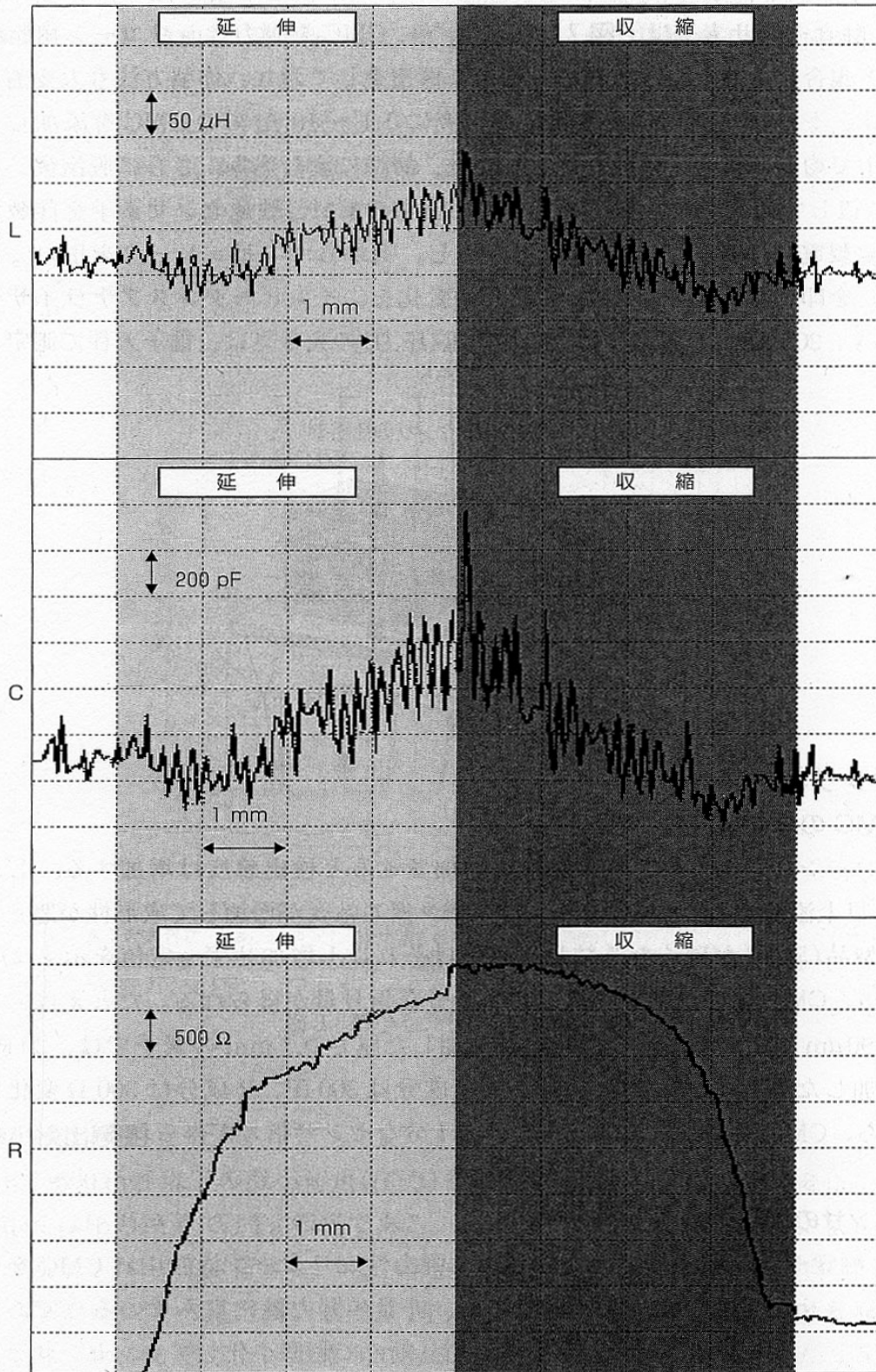


図6 バルクCMCを4 mm伸ばし、元の長さに戻した時のLCRパラメータ変化

4. 素子の作成法およびセンサ特性評価法

CMC 触覚センサ素子は、図7に示すように CMC を弾力性シリコーン樹脂中に均一分散・複合化させただけの極めて簡単な構造をしており、作製方法も大変簡単である。まず、シリコーン母材+硬化剤混合液に 0.1～10 wt% の CMC を添加し、遠心脱泡機中で均一に攪拌・分散・脱泡した後、鋳型に流し込み、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 触覚センサ素子を作製した。これを銅製電極(間隔: 3 mm)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、その時の LCR 成分の変化を、インピーダンスアナライザーを用い、0.5 V、200 kHz 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。

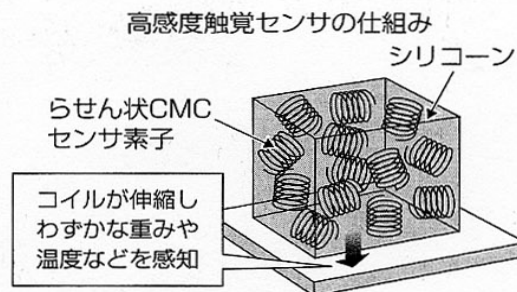


図7 CMC触覚センサ素子のモデル

5. センサ特性

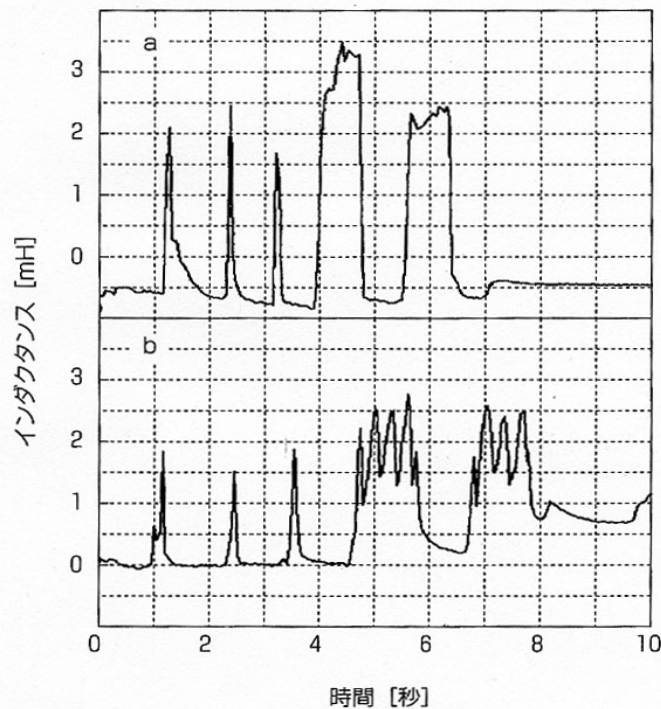
5.1 CMC の添加量

シリコーン中への CMC の添加量を増加させると検出感度は増加する。しかし、10 wt%以上添加すると CMC 分散シリコーン液の粘度が増加して成形性が悪くなり、また成型品(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。たとえば、コイル長さが 90 μm 以下の CMC を 0.1 wt% 添加した厚さ 0.1 mm の素子では、20 Pa の圧力を印加した場合、L 成分は 1.5 mH、C 成分は 300 fF、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信号が得られる。

5.2 センサの超微小化

CMC 触覚センサ素子の大きな特長は、弾力性シリコーン樹脂中に CMC を少量均一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点である。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、センサとしての特性は変わらない。原理的に一本のコイルが弾力性樹脂中に複合化されていれば、センサ特性が発現される。たとえば、CMC を 5 wt% 添加した 10 × 10 × 3 mm³ 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50 Paの圧力を印加すると、L成分は3~5 mH増加し(図8(b))、C成分は250~400 fF増加し、R成分は200~400 Ω 減少した。これらの値は、大きなセンサ素子の場合(図8(a))とほとんど同じであり、微小化してもセンサ感度は低下しないことがわかる。また、厚さ50 μm の超薄膜センサでも十分な信号変化が検出できる。したがって、CMCセンサ素子は、超微小・超薄膜触覚センサ素子として極めて有用である。

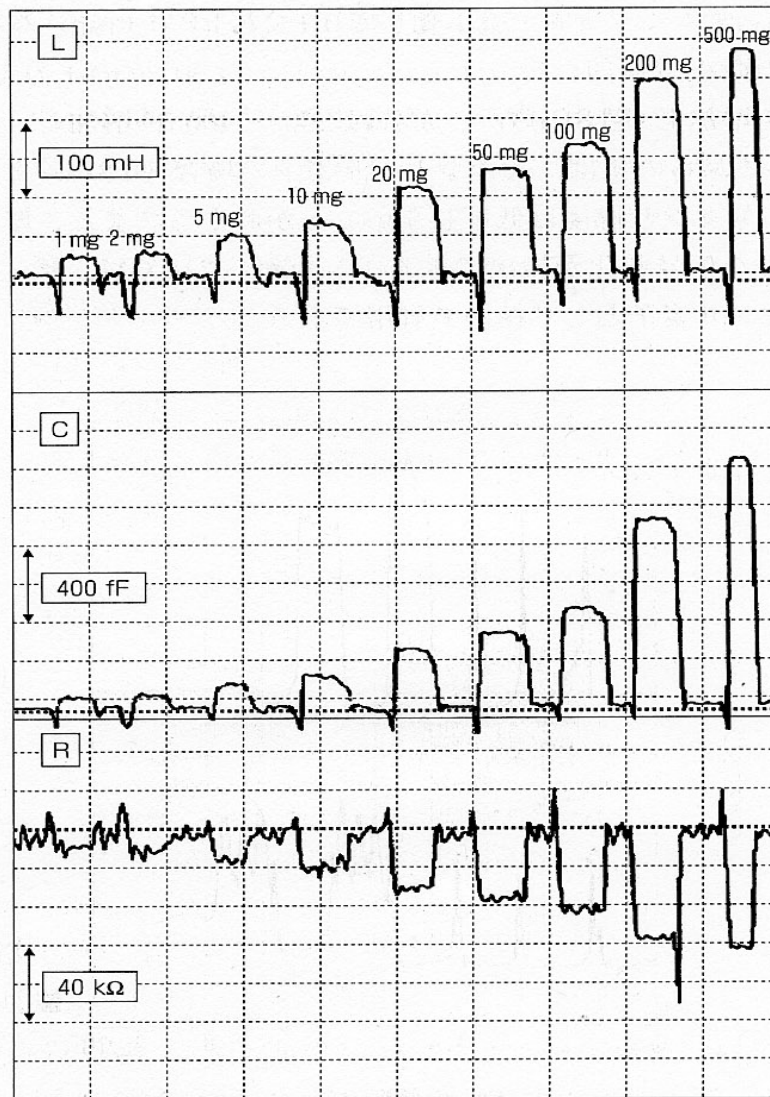


素子の大きさ：(a) $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$, (b) $0.1 \times 0.1 \times 0.1 \text{ mm}^3$
 CMC添加量：5 wt%、CMCのコイル長さ：300~500 μm 、コイル径：1~10 μm 、
 印加圧力：50 Pa

図8 微小センサ素子のL成分変化

5.3 最小検出感度

図9に、500 mgf以下の微小荷重(圧力)を印加した時のLCR成分の変化を示す。荷重1 mgfは圧力換算で1 Pa相当である。いずれの成分でも印加圧力に依存した信号変化が観察され、1 Pa(荷重：1 mgf)の超微小圧力でも十分な変化が観察される。すなわち、CMCセンサの圧力検出感度は1 Pa以下であり、これは市販の触覚センサ感度の1,000~10,000倍以上の高感度である。一方、センサ素子面に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。



CMC添加量：1 wt%、センサ素子の厚さ：0.1 mm

図9 CMC/ポリシリコン薄膜センサ素子のLCR成分変化

5.4 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が、CMC 触覚センサ素子の場合、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。たとえば、CMCを1 wt%添加した厚さが0.1 mmの素子の場合、C成分は、1 Paの圧力では50 fF、10 Paでは200 fF、100 Paでは600 fF変化する。また、素子の upper layer に弾力性の高いマトリックスを用いた高感度用センサ層を、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層を積層させることにより、幅広いダイナミックレンジを達成できる。

5.5 識別能

CMC 触覚センサ素子をカテーテル、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、携帯電話(1 GHz)あるいは音響(約 2,000 Hz)を近づけても信号変化が観察され、電磁波あるいは音響にも敏感である。IR、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。

6. 触覚センシング原理

市販の触覚センサには、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(ひずみ)変化に伴う抵抗変化を検出)、あるいは光学型(圧力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 触覚センサでは、図 6 に示したように、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 は電氣的 LCR 成分を持っており、またマトリックスは 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、また単位長さ当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。一方、樹脂中に添加された CMC は、図 10 の厚さ方向の積分顕微鏡写真からわかるように、添加量が高濃度(～10 wt%)でも互いに接触しておらず、パーコレーション(コイル同士の電氣的接触)構造を形成していない。それにもかかわらず、電気信号が変化する。これは、素子に刺激が加えられた場合、図 11 に示すように、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。この電氣的 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、刺激の種類の識別が可能である。すなわち、CMC 触覚センサ素子による触覚センシングは、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。このような LCR 複合共振に基づくセンシング機能はこれまで全く報告されていない。

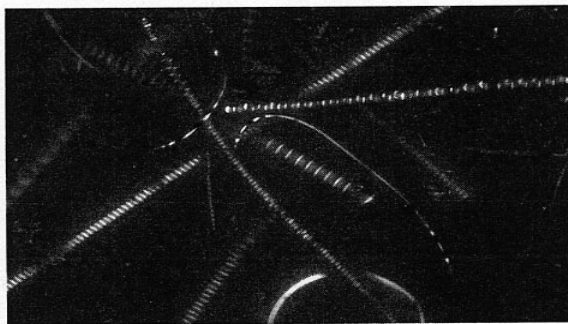


図10 CMCセンサ素子中でのCMCの分散状態

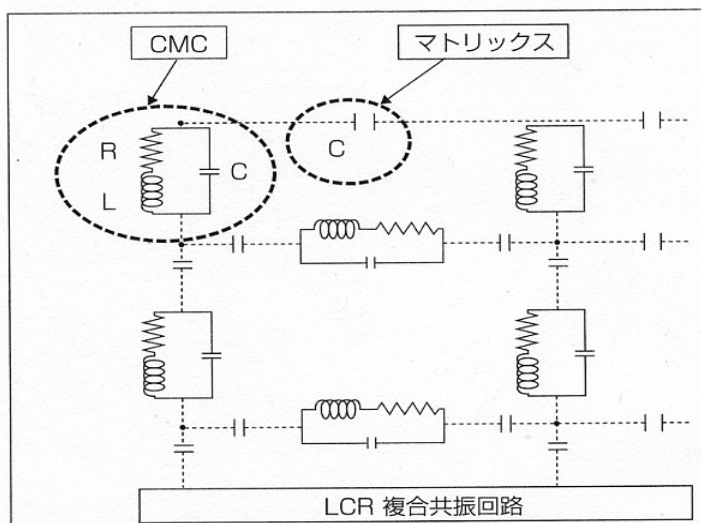


図11 CMCセンサ素子のLCR複合共振回路モデル

7. まとめ

既存のセンサとの性能比較を表1に示す。CMC 触覚センサは、CMC を弾力性樹脂(シリコーン樹脂など)中に均一分散・複合化させただけの極めて簡単な構造であるが、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特性は、既存センサと比較して極めて優れている。したがって、医療用高感度・高識別能触覚センサ、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、赤外線・温度・音響センサなど、幅広い応用が期待できる。なお、カーボンマイクロコイル(CMC)については、最近のレビュー^{7),8)}を参照されたい。

表1 触覚センサの性能比較表

センサの種類	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

8. 今後の展望

CMC センサ素子については、多くの国際会議で発表しているが、Carbon-2005 では Best Poster 賞を受賞、IEEE-2005 Int. Conf. on Robotics and Biomimetics では、Finalist for Best Paper にリストされるなど、国際的にも非常に注目されている。CMC 触覚センサは、平成 16～20 年度文部科学省知的クラスター創生事業「岐阜・大垣地区「ロボティック先端医療クラスター」の中で中核技術として取り上げられ、先端医療用触覚センサとしての実用化が図られることになっている。また、医療用ばかりでなく、広く産業用先進センサとして、産学官共同研究により実用化研究が精力的に進められている。また、本技術は、CMC 関連技術移転機関でもあるシーエムシー技術開発(株)を通して、民間企業での商品化が進められている。

【参考文献】

- 1) 元島栖二：応用物理, 73, pp.1324-1327(2004).
- 2) X. Chen, S. Yang, M. Hasegawa, K. Takeuchi, K. Kawabe, 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), pp.9-16(2004).
- 5) 元島栖二, 河辺憲次：セラミックス, 40, pp.111-114(2005).
- 6) 前野隆司：日本ロボット学会, 18, p.772(2000).
- 7) S. Motojima, Y. Hishikawa and H. Iwanaga. : *Recent. Devel. Mater. Sci.*, 3, pp.633-662(2002).
- 8) S. Motojima and X. Chen. : *Encyclopedia of Nanosci. Nanotech.*, 6, pp.775-794(2004).