

## 審査結果の要旨

## 審査委員会

審査員主査

西脇 武志

博士後期課程

専攻長

渡邊 慎一

審査員

蔦森 秀夫

審査員

坪井 涼

審査員

小橋 眞

論文題目：

カーボンフィラーを添加した樹脂複合材からなる柔軟なひずみセンサ材料の開発

申請者：

吉村 圭二郎

(論文博士)

## 審査要旨

樹脂と導電性フィラーからなる樹脂複合材は、その柔軟性とひずみに対する電気抵抗率変化特性に優れているため、生活支援・医療介護ロボット向けのひずみセンサとしての活用が大きく期待されており、高齢化社会の進展でこれまで以上に高性能化の要求が高まっている。これを背景として、センサ材料としての感度、柔軟性、測定可能なひずみ範囲、ヒステリシス特性などの改善が最重要課題である事を提示し、導電性フィラーとしてカーボンフィラーを添加した樹脂複合材について検討している。フィラーにはカーボンマイクロコイル (CMC) を用い、異なる弾性率の樹脂をマトリックスとして用いた場合の複合化による機械的特性の変化、電気抵抗率変化を調査して、CMC 添加複合材がひずみセンサ材料として感度に優れることを明らかにするとともに、複合材内部の CMC の挙動について調べ、電気抵抗変化のメカニズムを解明している。また、粒子状のフィラーであるケッチェンブラック (KB) を添加した複合材も作製し、さらにそれを多孔質化することで、測定可能なひずみ範囲やヒステリシス特性が著しく改善することを見出している。KB 添加多孔質複合材の高圧縮率における電気抵抗率変化の低下に対する解決策として、気孔率分布が変化する傾斜多孔質複合材を開発し、センサ特性を評価してその有用性を実証している。これらの研究に関わる一連の成果について、各章ごとに詳細に報告し、カーボンフィラー添加した樹脂複合材の作製技術とこれに対応するセンサ性能特性の両面から非常に有用となるデータとなっている。

本論文は全 5 章で構成されている。

第1章は序論であり、複合材ひずみセンサ材料の現在の用途と課題、およびこれを高機能化するためにどのような改良手段があるかを述べ、本論文で取り扱う研究の目的および位置づけを明確にしている。

第2章では、カーボンフィラーとして CMC を樹脂に添加した複合材を作製し、これをひずみセンサ材料として用いるための検討を行っている。フィラーやマトリクス樹脂の種類と機械的特性値の変化や電気抵抗率変化の関係について詳細に調べ、CMC を添加した複合材が、10%の変形で電気抵抗率が $10^3$ 倍増加することを見出しており、その変形時の CMC 複合材の内部観察や破断面の SEM 観察から CMC 自身の変形による電気抵抗増加が複合材の電気抵抗率増加に寄与するメカニズムを明らかにしている。これにより、CMC/樹脂複合材の高感度ひずみセンサ材料としての可能性と基礎的データを示している。

第3章では、カーボンフィラーとして KB を樹脂に添加した複合材に対し、スパーサー法を用いて多孔質複合材を作製し、これをひずみセンサ材料として用いるための検討を行っている。気孔の導入に伴い複合材の弾性率は減少し、気孔のサイズにより柔軟性を制御できることを示している。また、多孔質複合材では圧縮率80%の範囲まで電気抵抗率が減少し、繰り返しの圧縮変形時の電気抵抗率変化のヒステリシスも軽減できることを明らかにしている。これらの諸特性から、KB を添加した開発材料が、高い柔軟性を有し繰り返しの大変形にも対応できるひずみセンサ材料であることを明確にしている。さらにフィラーに CMC を用いた多孔質複合材についても作製と評価を行い、KB 多孔質複合材とは逆に80%の変形で電気抵抗率が $10^3$ 倍増加することを見出しており、CMC 多孔質複合材のひずみセンサ材料としての有用性も明らかにしている。

第4章では、傾斜多孔質複合材に関する検討を行っている。第3章で得られたデータから KB 多孔質複合材では高圧縮率における電気抵抗率変化の低下が課題であり、これを解決するためスパーサー法の応用で気孔率分布が変化する KB 添加傾斜多孔質複合材を作製している。この材料は、圧縮率の増加に伴って変形領域がシフトすることで、高圧縮率においても電気抵抗率の変化が継続することを明らかにし、さらに繰り返し圧縮変形を行った際の電気抵抗率変化のヒステリシスも小さくなることを見出し、開発材料がセンサ材料として性能に優れていることを示している。

第5章は総括であり、本研究で得られた成果についてまとめている。

以上のように、本論文はカーボンフィラーを添加した樹脂複合材を、フィラー/マトリクスの最適化、気孔の導入、気孔分布の傾斜化などの手法で改良し、実用的視点から実験解析することで、開発材料が柔軟でひずみセンサ特性に優れることを示し、同時に複合材からなるセンサ材料の問題点を克服し、これらが実用的技術であることを提示している。第2章、第3章、第4章は一流誌である *Carbon, Sensors and Actuators A: Physical, Composites Science and Technology, Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics* に掲載されており、これらの研究成果に対して、国内外の研究者より高い評価を受けており、学術的に極めて高いレベルである。加えて今後、国内外で需要が増加していく生活支援ロボット向けセンサ材料として、提案された新複合材料の開発手法とその特性データの提示は、工業的側面と学術的側面から意義のあるものと言える。したがって、申請者 吉村 圭二郎は博士（工学）の学位を受けるのに十分な資格を有すると判断する。