

研究助成研究成果報告書

令和 4年 9月 28日

研究課題: 高速テラヘルツ断層撮影測定装置の開発とそれを用いた黒色ゴム内部構造の可視化

申請者: 岡野真人 (防衛大学校通信工学科)

1. 背景・目的

ゴム母材にカーボンブラックを充填した黒色ゴム複合材料(以下、黒色ゴム)は、タイヤや防振ゴムなどに利用されている我々の生活に欠かせない重要な材料である。黒色ゴムの内部ではカーボンブラック凝集体同士が弱く結合することでネットワーク構造を形成しており、この内部ネットワーク構造が力学特性や電気特性に強い影響を与える。実用上、黒色ゴムは外部からの荷重によって変形された状態で利用されることが多いが、このような力学変形下におけるゴム内部のカーボンブラックネットワーク構造の挙動についてわかっていないことも多い。内部ネットワーク構造の可視化には非接触での内部検査が有効と考えられるが、黒色ゴムは既存の非接触検査で用いられている可視光に対しては不透明であるため新しい検査法の開発が必要であった。

申請者はこれまでにテラヘルツ光を利用した非破壊・非侵襲での黒色ゴムの内部検査手法の開発を行ってきた[1-5]。既存光源である可視光、近赤外光は黒色ゴムを透過しない一方で、テラヘルツ光は黒色ゴムを透過することができるため、テラヘルツ光を用いることで非破壊・非接触での黒色ゴムの内部検査が実現できる。近年、申請者はテラヘルツ光によるマクロな物性測定を通じてマイクロな内部ネットワーク構造の推定が可能であることを見出した[2]。このようなマクロな測定からマイクロな構造へのアプローチ方法は既存の研究手法に対して相補的な視点を持ち込むことができるため、更なる学理の深化が期待できる。

そこで、本研究ではテラヘルツ偏光断層撮影装置の開発を試みるとともに、マクロな測定からマイクロな構造を推定する理論解析方法を発展させることで、既存手法では困難な力学変形中の黒色ゴム内部のカーボンブラックネットワーク構造を3次元的に可視化することを目的とした。

2. ファイバーレーザーベースのテラヘルツ断層撮影測定装置の開発

初期段階において、申請者が開発した高速・高精度テラヘルツ偏光測定装置[1]を利用したテラヘルツ断層撮影測定装置の試作を行った。本装置は高速性や精度に優れているが、テラヘルツ光強度が弱いことや、市販の装置を利用しているために光学系の拡張性がよくないため、今回の目的には適さないことがわかった。

そこで、テラヘルツ光強度や光学系の自由度を高めるために自作の光源を用いたテラヘルツ偏光断層撮影装置の作製を試みた。具体的には、テラヘルツ光発生および検出用の光源としてエルビウム添加ファイバーを利得媒質に用いたファイバーレーザーを自作した。さらに、テラヘルツ発生素子として近年注目を集めているテラヘルツスピンエミッタ素子[7]の作製を試みた。今後は、ファイバーアンプを作製することで高強度テラヘルツ光の発生を行うとともに、断層撮影測定装置でポイントとなる焦点深度が深い光学系を構築することで、テラヘルツ偏光断層撮影装置を実現する予定である。

3. 有効媒質理論を利用した黒色ゴム内部構造の可視化法の開発

申請者が以前に提案した有効媒質理論を利用した誘電応答解析は内部カーボンブラックネットワーク構造を解析する方法としては有効であったが、限られた変形条件下でしか利用できないという課題が存在した[2]。この課題を解決するために、変形時のカーボンブラック凝集体の配向分布を考慮した新しい解析方法を開発し、繰り返し延伸にとまなう不可逆誘電率変化機構について明らかにした[6]。

図1に一軸延伸にとまなう誘電率の実部および虚部の延伸率依存性を示す。この実験では、荷重を加えて3倍まで延伸したのち、荷重を取り除くことで元の長さまで収縮させている。ここでは、実験、計算ともに0.2–1.0 THzの間の誘電率の値の平均値をプロットした。実験結果を見ると、延伸に平行な方向および垂直な方向の誘電率の実部、虚部ともに延伸時に比べて収縮時の方が値が減少していること、すなわち変形に対して不可逆な誘電率変化をしていることがわかる。このような不可逆誘電率変化機構を理解するために新しい解析法を用いた計算結果と比較したところ、延伸時にカーボンブラック凝集体間の弱い結合が切断されることで内部ネットワーク構造が破断し、誘電率の減少が起こっていることが明らかになった。

本実験を通じて、新しい解析手法の妥当性を検証することができた。今後は、この手法を利用することで、テラヘルツ偏光断層撮影装置で得られた3次元データから内部ネットワーク構造の可視化を試みる予定である。

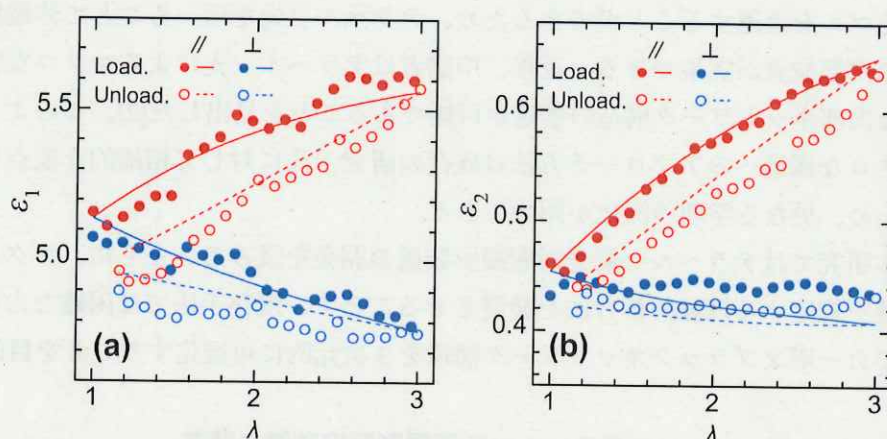


図1. 誘電率の(a)実部および(b)虚部の延伸率依存性。●は延伸時、○は収縮時の実験値、実線は延伸時、点線は収縮時の計算値。赤が延伸に平行な方向、青が延伸に垂直な方向の誘電率に対応する(文献[6]より転載)。

<参考文献>

- [1] M. Okano and S. Watanabe, *Sci. Rep.*, **6**, 39079 (2016).
- [2] M. Okano, M. Fujii, and S. Watanabe, *Appl. Phys. Lett.*, **111**, 221902 (2017).
- [3] A. Moriwaki, M. Okano, and S. Watanabe, *APL Photon.*, **2**, 106101 (2017).
- [4] M. Okano and S. Watanabe, *Polym. Test.*, **72**, 196–201, (2018).
- [5] M. Okano and S. Watanabe, *Polymers*, **11**, 9 (2019).
- [6] K. Mizuta, M. Okano, T. Morimoto, S. Ata, and S. Watanabe, *Appl. Phys. Lett.*, **121**, 024101 (2022).
- [7] T. Seifert *et al.* *Nat. Photon.* **10**, 483 (2016).