



慶應義塾大学

平成28年12月26日

科学技術振興機構 (JST)

Tel : 03-5214-8404(広報課)

慶應義塾大学

Tel : 03-5427-1541 (広報室)

テラヘルツ光による黒色ゴム材料の非破壊検査手法を開発

～自動車タイヤなどのひずみ計測が可能に～

ポイント

- 可視光を透過しない黒色ゴム材料の内部状態をテラヘルツ光で調査。
- コンパクトな装置で高速・高精度テラヘルツ偏光計測を実現。
- タイヤや防振ゴムなどの非破壊・非接触検査への応用が期待。

JST 研究成果展開事業において、慶應義塾大学 理工学部 物理学科の岡野 真人 専任講師と渡邊 紳一 准教授の研究グループは、高速で高精度なテラヘルツ偏光計測装置^{注1)}を用いた新しい黒色ゴム材料の非破壊検査手法^{注2)}の開発に成功しました。

カーボンブラック^{注3)}が配合された黒色ゴム材料は、タイヤや防振ゴムなどに利用されており、その内部状態を検査する技術の確立が必要ですが、黒色ゴムは、人間の目が感じる可視光や近赤外線、中赤外線も透過しないため、光を用いてその内部状態を非破壊で観察することは極めて困難とされてきました。

今回、幅広い光スペクトルの中で、電波と光の境界にあるテラヘルツ光だけが黒色ゴム材料に対して透過性をもつことに着目し、添加されたカーボンブラック凝集体の並び方を偏光測定によって推測できることを実証しました。さらに、カーボンブラック凝集体の整列の様子から、材料が「どちらの方向に」、「どの程度」ひずんでいるかを推測することにも成功しました。

この分析手法は、外からの力によるゴム材料変形を推測できることを示しており、これまで光では内部調査ができなかったタイヤや防振ゴムの新しい非破壊検査ツールとして期待されます。

本研究は、JST 研究成果展開事業 産学共創基礎基盤研究プログラム「テラヘルツ波新時代を切り拓く革新的基盤技術の創出」により一部支援を受けて行われました。

本研究成果は2016年12月23日(英国時間)にネイチャー・パブリッシング・グループ(NPG)の電子ジャーナル「Scientific Reports」で公開されます。

<研究の背景>

カーボンブラックが配合された黒色ゴム材料は、タイヤや防振ゴムなど、生活のあらゆる箇所で利用されています。ゴム製品の内部にひずみがたまると、予期しない亀裂などが発生する可能性があるため自動車タイヤの安全上その内部状態を検査する技術の確立が必要です。しかし、黒色ゴムは、人間の目が感じる可視光や近赤外線、中赤外線も透過しないため、光を用いてその内部状態を非破壊で観察することは極めて困難とされてきました。

<研究の内容>

本研究では、幅広い光スペクトルの中で、テラヘルツ光だけが黒色ゴム材料に対して透過性をもつことに着目しました(図1)。テラヘルツ光に対する黒色ゴム材料の屈折率^{注4)}は、黒色の起源にもなっているカーボンブラック添加物の並び方によって決定され、偏光測定によってある方向への屈折率が大きいこと(異方性)がわかれば、その並び方を推測できることを実証しました。

図2に示すように、ゴムは外からの力が加わると、異方性をもったカーボンブラック凝集体の並び方が変化し、引っ張った方向に沿って整列するようになります。本研究では、テラヘルツ偏光計測を用いることにより、引っ張ったゴム材料について、①「どの方向」に屈折率が大きいか(屈折率主軸角度)を決定しました(図3(a))。②また、屈折率主軸方向の屈折率とそれと垂直方向の屈折率を比較することで「どの程度」の屈折率差(複屈折)があるかを決定しました(図3(b))。③以上のテラヘルツ光によって観測される「屈折率主軸角度」と「複屈折」の計測結果が、カーボンブラック凝集体の整列の仕方に関連することを見いだしました。

以上の結果から、テラヘルツ光を用いて、ゴム材料内部でカーボンブラック凝集体が「どちらの方向に」、「どの程度」整列しているかを知ることができます。そして、カーボンブラック凝集体の整列の様子から、材料が「どちらの方向に」、「どの程度」ひずんでいるかを推測することができます。ゴム材料に対するテラヘルツ光の透過率は比較的大きいので、これまで到達できなかったゴム深部のひずみの様子も調査できることが期待できます。

可視光を透過させず、非破壊検査では邪魔者であったカーボンブラック凝集体が、テラヘルツ光にとってはひずみ検査の有効な検出物質として働くことを示しました。これは、テラヘルツ光を用いた非破壊検査の重要な応用事例として位置づけられるものです。

<今後の展開>

黒色ゴム内部を透過するテラヘルツ光計測の利点を生かし、タイヤや防振ゴム内部の非破壊・非接触ひずみ検査への応用計測、空間分解能が数mm程度の、ひずみイメージングへの応用を試みます。さらに、反射型計測装置を開発し、金属部品上のゴム材料など透過測定では計測できないサンプルに対しても計測可能にするように試みます。

なお、本研究で開発した装置は、図4に示すように、小型テーブルに乗る程度に小さく、さらにテーブルタップ電源で動作するコンパクトな装置です。一点の計測時間が最速25ミリ秒と高速です。今後、実用化と普及をめざし①計測装置の堅牢化を進め、工場などで実地検査できるような装置開発、②高速イメージング用途に応用するため、10cm/sの速度で非破壊検査できるようなセンサーの機械動作機構を構築します。

また、展示会への出展とデモンストレーションにより、産業界のニーズを随時取り入れながら、実用化に向けた装置開発を進めます。

<参考図>

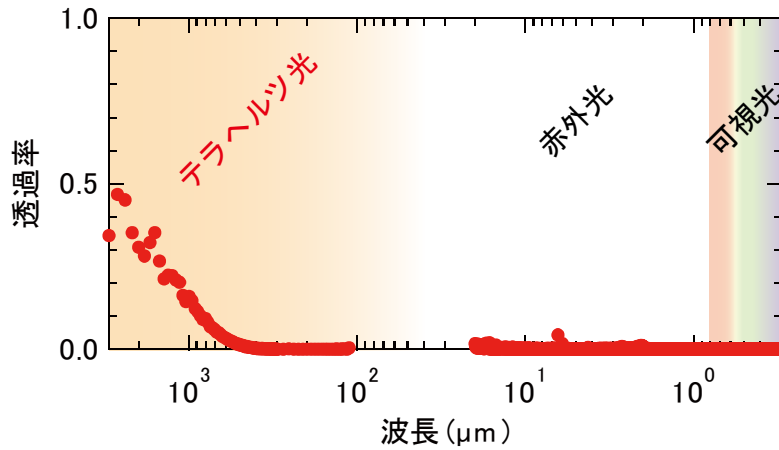


図1 厚さ1 mmの黒色ゴム材料の透過率スペクトル

黒色ゴム材料は、波長が約1マイクロメートル以下の可視光や、波長が1～300マイクロメートルにかけての赤外光の透過率はほぼゼロですが、波長が300マイクロメートル以上のテラヘルツ光ではじめて黒色ゴム材料を透過するようになります。

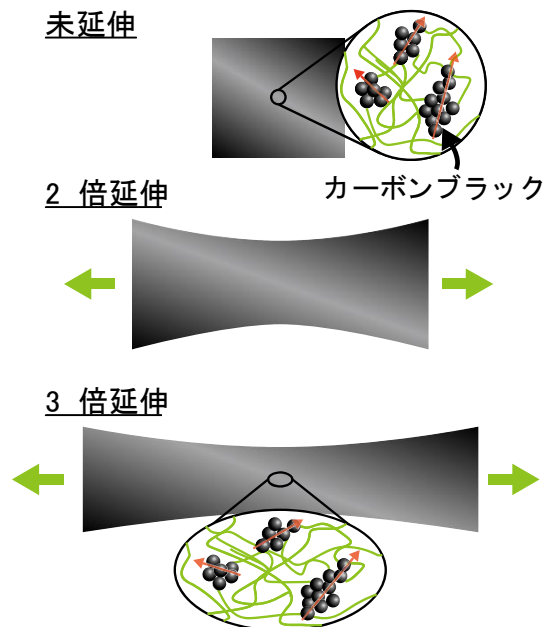


図2 延伸時の黒色ゴム内部状態の模式図

ゴムは外力が加わると、異方的な形状をもったカーボンブラック凝集体の並び方が変化します。未延伸時（図上部）は、上方向に向けたカーボンブラック凝集体が、横方向に引っ張ることによって全体として横方向を向くようになります。

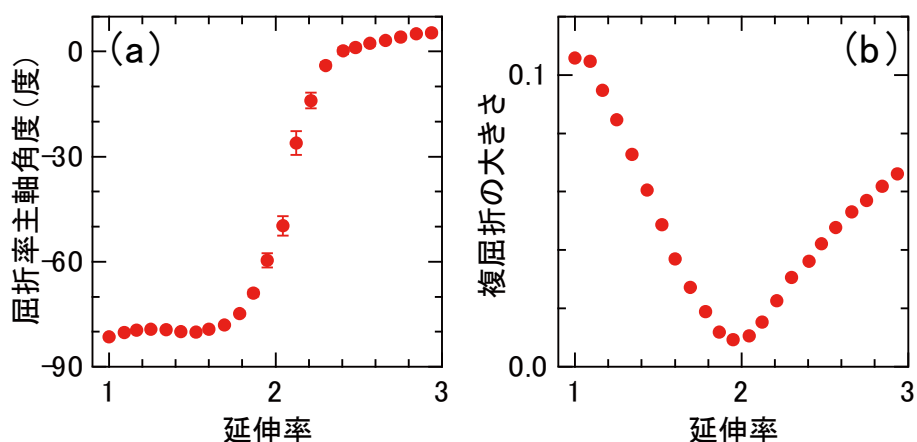


図3 テラヘルツ偏光計測結果

(a) 黒色ゴム内部のカーボンブラック凝集体の平均の向きに該当する屈折率主軸角度と

(b) カーボンブラック凝集体の整列度合いを表す複屈折の大きさ。

未延伸時（延伸率=1）はカーボンブラック凝集体が上方方向を向いているため、図（a）の角度は約 -90 度、図（b）の複屈折は0.1です。ゴム材料を横方向に引っ張り、延伸率が2となったときに、カーボンブラック凝集体の方向がばらばらになり方向依存性がなくなります。その結果、図（b）の複屈折は0となります。さらに引っ張って延伸率が3のときは、図（a）の角度が約 0 度となり、未延伸時に比べて軸が約 90 度回転します。

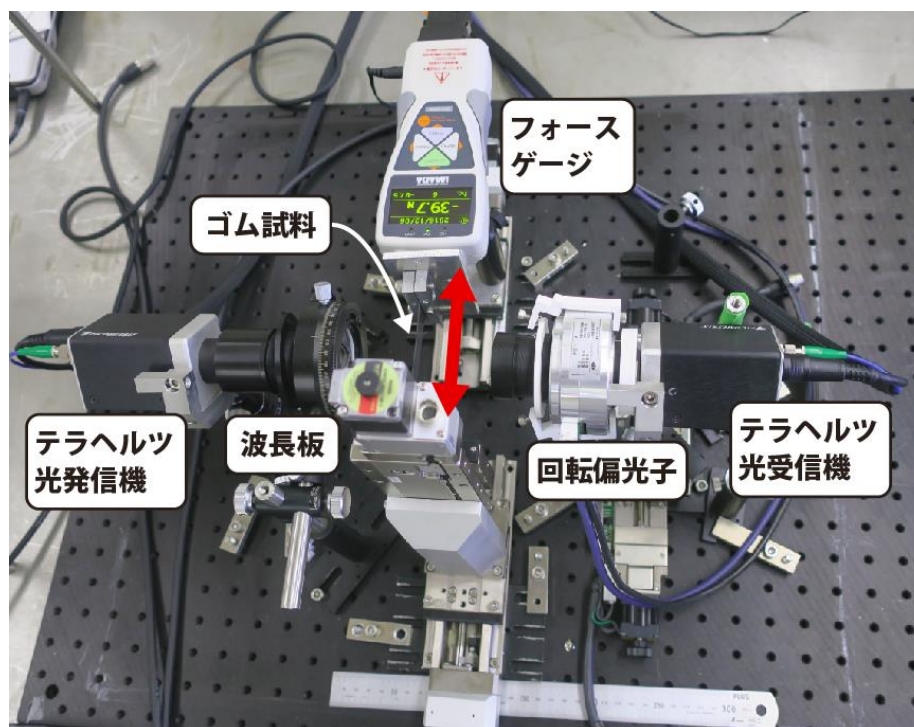


図4 高速・高精度テラヘルツ偏光計測装置の外観

高速・高精度テラヘルツ偏光計測装置の写真。写真中央部にゴムを配置し、写真の矢印方向に引っ張りながら計測を行っている。写真下部の定規は30cmに対応。

<用語解説>

注1) テラヘルツ偏光計測装置

テラヘルツ光は周波数 10^{12} ヘルツを中心にした、電波と光波の境界に位置する電磁波のこと。物質によって可視域の光とは異なる透過特性を示すため、新しい非破壊・非接触検査光源として期待されている。今回、ゴム材料を透過する光の偏光状態を調査するために、市販のコンパクトなテラヘルツ分光装置に高速回転する偏光子を取り付け、高速かつ高精度に偏光計測できるように改良した。

注2) 非破壊検査手法

測定対象物を破壊することなく内部のきずやひずみを調査する手法のこと。X線検査、超音波検査、渦電流探傷検査など、測定対象物の性質に応じて様々な手法が存在する。

注3) カーボンブラック

ゴム製品に補強剤として用いられる炭素微粒子であり、凝集体を形成する。合成ゴム材料の黒色の起源になっている。

注4) 屈折率

物質内部の光の吸収や進み方を表す物質に固有の定数。屈折率の実部は、真空中と物質中の光速の比で表すことができる。

<論文タイトル>

"Anisotropic optical response of optically opaque elastomers with conductive fillers as revealed by terahertz polarization spectroscopy"

(テラヘルツ偏光スペクトル計測による伝導性添加物を含んだ可視光不透過エラストマーの異方的光学応答の解明)

doi:10.1038/srep39079 (2016).

<お問い合わせ先>

<研究に関すること>

渡邊 紳一 (ワタナベ シンイチ)

慶應義塾大学 理工学部 物理学科 准教授

〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉三丁目14番1号

Tel : 045-566-1687 Fax : 045-566-1672

E-mail : watanabe@phys.keio.ac.jp

URL : <http://www.phys.keio.ac.jp/guidance/labs/watanabe/>

<JST事業に関すること>

林部 尚 (ハヤシベ ヒサシ)

科学技術振興機構 産学連携展開部

〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町

Tel : 03-3238-7682

E-mail : kyousou@jst.go.jp

<報道担当>

科学技術振興機構 広報課

〒102-8666 東京都千代田区四番町5番地3

Tel : 03-5214-8404 Fax : 03-5214-8432

E-mail : jstkoho@jst.go.jp

慶應義塾 広報室

〒108-8345 東京都港区三田2-1-5-45

Tel : 03-5427-1541 Fax : 03-5441-7640

E-mail : m-koho@adst.keio.ac.jp