

# はかる 第4回

わたなべ しんいち  
**渡邊 紳一**  
慶應義塾大学 理工学部  
准教授

2002年 東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。博士(理学)。スイス連邦工科大学研究員、東京大学理学部物理学科助教などを経て、11年4月から現職。

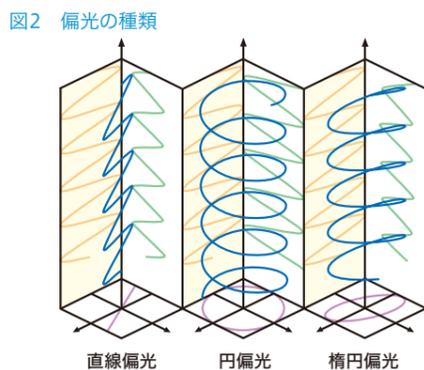
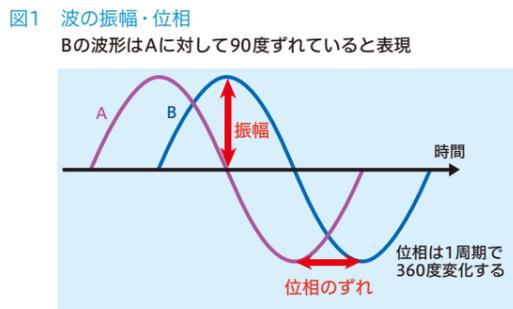


図3 カーボンブラックの凝集体の向き(オレンジ色の矢印)は、引っ張った方向に沿って整列する。

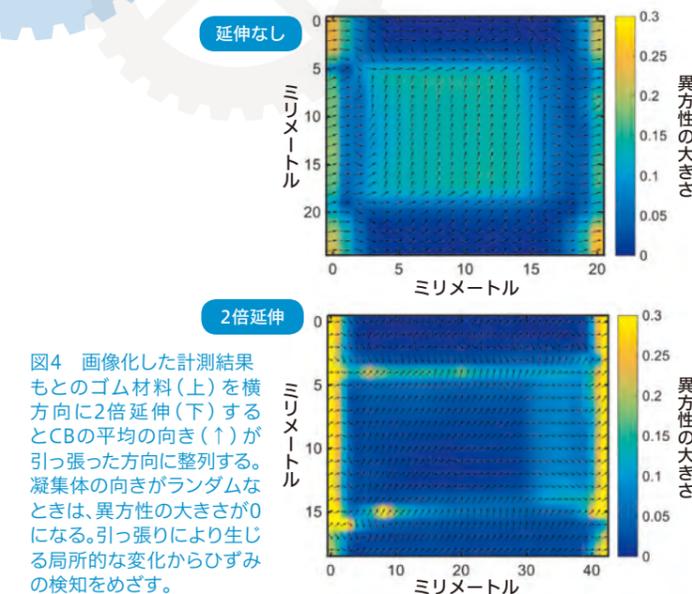
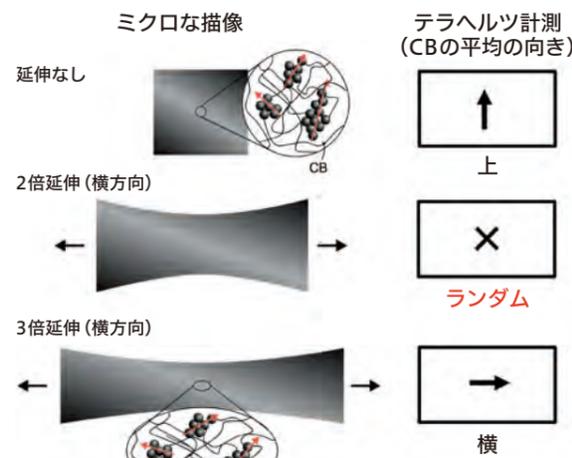
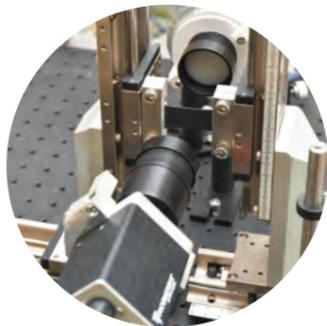


図4 画像化した計測結果もとのゴム材料(上)を横方向に2倍延伸(下)するとCBの平均の向き(↑)が引っ張った方向に整列する。凝集体の向きがランダムなときは、異方性の大きさが0になる。引っ張りにより生じる局所的な変化からひずみの検知をめざす。

## テラヘルツ光で見るゴム深部のひずみ 光でミクロの構造に迫る

光と電波の両方の性質を兼ね備えたテラヘルツ光。慶應義塾大学理工学部の渡邊紳一准教授らは、テラヘルツ光を用いた黒色ゴムの非破壊検査手法を開発した。この技術により、タイヤや防振ゴムなどの内部のひずみが簡単に計測できるようになると期待されている。



▲黒色ゴム材料を挟んで  
手前が発信機、奥が受信機。

### 光と電波の間 テラヘルツ光の利点

テラヘルツ光(またはテラヘルツ波)と呼ばれる電磁波は、赤外線と電波の両方にまたがる領域、周波数にして1テラ(1兆)ヘルツ付近の波である。光は粒子としての性質と波としての性質を併せ持っているが、テラヘルツ光は人間の目が感じる可視光に比べて波としての性質が観測しやすい。従来は発生させるのが難しく、未開拓の電磁波といわれてきたが、ここ数十年の間に発信機・受信機ともに技術開発が進み、近年世界中でテラヘルツ光を利用した研究が進められている。渡邊さんの研究もその1つだ。

渡邊さんの専門は光物性といって、光で物の性質を調べ、光による物質の制御や、その新しい機能の探索をめざす学問だ。テラヘルツ光は高分子材料などの不透明な材料も透過する。しかも、可視光よりも波動性を観察しやすいため、光強度以外に振動の最大値である振幅や1周期のうちのどのタイミングかを示す位相(図1)もわかる。これが「テラヘルツ時間領域分光法」の大きな利点である。渡邊さんが開発した測定法では、振幅、位相に加えて振動の向きである偏光(図2)の情報も正確に測ることができる。こうして得られる多くの情報から、材料内部のミクロなメカニズムを調べられるようになった。

### まだまだ未知の領域が残る ゴム内部のミクロな物理現象

炭素の微粒子カーボンブラック(CB)が配合された黒色ゴムは、タイヤや防振ゴムなどに広く利用される材料だ。ゴム製品の内部にひずみがたまる、予期しない亀裂などが発生する可能性があるため、安全上、その内部状態を検査する技術が求められている。黒色ゴムは可視光や近赤外線、中赤外線が透過しない。このため、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たが、テラヘルツ光は透過できる。「ゴム弾性など、ゴムのマクロな物理は教科書にも載っている物性物理の基礎ですが、延伸や劣化でどのような構造変化が起きるのかなど、ミクロなレベルではまだまだわかっていないことが多いのです。それを新しい光で解明できれば、新材料の開発にもつながるかもしれません。」

産業用のゴムには、耐久性を増すための硫黄や、強度を高めるためのCBなど多くの添加物が含まれ、その詳細な配合は企業秘密で共同研究者にもなかなか明かされないことがない。しか

もゴムの合成は複雑で、自前で材料を配合し、作製することも難しかった。「複雑で中身がわからないものを調べてシンプルな物理法則を導き出すのは至難の業で、多くの研究者は敬遠します。幸運にもあるサンプルのCB含量についての情報を入手できましたが、それでも物理モデルに落とし込むのは大変でした。共同研究者で専任講師の岡野真人さんが、複雑な材料の計測が好きで、材料の引っ張り方をさまざまに変えて大量のデータを取ってくれたことで研究が進みました。」

### 邪魔者のカーボンブラックが 意外な鍵に

従来、ゴムの光学的性質を決定しているのは、ゴムの本体である高分子鎖の配向だと考えられ、添加物のCBは可視光を透過させないので、光計測による非破壊検査にとっては邪魔者としてしか考えられていなかった。ところが意外なことに、渡邊さんが開発した手法では、このCBが有効な検出物質として働く重要な鍵となったのだ。

材料にテラヘルツ光を透過させると、偏光の状態によって材料内部を通過する時間が異なる現象(複屈折)が起こるが、ゴム材料ではCBを含む黒色ゴムだけが巨大な複屈折を起こすことから、CBが深く関係していると考えられた。CBはゴムに導電性を与える役割を持っている。また、凝集体をつくり、不規則にさまざまな方向を向いて分散している。そこで渡邊さんらのグループは、CBの導電性と平均の向きおよびその向きの偏り具合が複屈折の原因と推測してモデルを立て、シミュレーションを行った。すると、屈折率の大きさが最大になる方向(光学軸)がCB凝集体の平均の向きに当たり、外力が加わると引っ張った方向に沿って整列すると推測できた(図3)。

「今では、シミュレーションと実験データとがぴったり一致しています。複雑だと思っていた黒色ゴムの構造的特性が、予想外にシンプルな物理法則で説明できるようになりました。」

CB凝集体が「どちらの方向に」、「どの程度」整列しているかわかると、その整列の様子から、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る。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ため、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される。

「こうしてゴム材料の各点を計測した一連のデータから画像を作り、どこに異常があるかが一目でわかるようにするシステムの開発を進めています(図4)。」

### テラヘルツ光で確立した 新手法の応用を広げたい

渡邊さんらの開発した検査手法と装置は、これまで内部検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注目され始めており、産業界における需要が期待できそうだ。今回開発した装置は、テーブルサイズの手軽さやコスト面に大きな利点を有しているため、開発現場での活用が期待できる。

実用化へ向けてのボトルネックは発信機のパワー不足だ。実用的なCBの濃度では厚さ1~2ミリメートル程度しか計測できないが、実用ゴム部品は厚さ数センチメートル程度のものも多いためである。「同じ領域で研究開発が進んできているので、さらなる技術革新に期待しています。」

渡邊さんらは黒色ゴムのほかにプラスチックなどの高分子材料も計測している。ゴムに比べると単純で、温度により結晶状態が変化する点に興味深いという。高い透過率を利用してコーティングされた薬剤の内部を非破壊で調べられることから、医薬品の検査などへの応用も可能だ。

「テラヘルツ光の研究を進めたことで、光のベクトル波形を見るという新しい手法が確立できました。この成果を応用すれば、テラヘルツ光より可視光に近い領域でも、もっとエレガントな方法で計測できるようになるのではないかと考えています。今後、テラヘルツ周波数領域で確立した手法を使って、中赤外光などでの新たな計測手法も開拓したいですね。渡邊さんの挑戦が、光計測の新たな未来を拓き、未知のミクロ物性解明に迫ろうとしている。」