

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630017

研究課題名(和文) THz偏光計測による樹脂成形品の残留応力評価技術の開発

研究課題名(英文) Evaluation of residual stress in plastics with THz polarization measurement

研究代表者

梶原 優介 (Kajihara, Yusuke)

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：60512332

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究においては、樹脂成形品における内部物性評価手法としてTHz光弾性法の適用を提案した。THz光弾性の妥当性を評価する基礎検証として、様々な条件で射出成形したポリプロピレン試料に対しTHz時間領域分光法(THz-TDS)を利用したTHz分光を行った。結果として、特に4～5 THzの領域において、残留応力や結晶配向がTHz偏光特性と大きな相関があることが確認でき、提案法の妥当性が示された。THz応答は様々な要素に起因して生じているため、今後は定量的に分離できるよう、より偏光特性等の評価を推し進めれば、残留応力などの内部物性を精密に評価可能な技術が確立すると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study we have proposed to apply THz photoelasticity method to evaluate inside physical properties in plastic products. To verify the validity of introducing THz photoelasticity method, we have performed THz-TDS (Terahertz Time Domain Spectroscopy) to polypropylene (PP) formed by injection molding with various injection conditions. We have confirmed that the residual stress and the crystal orientation are correlated with THz polarization property, which indicate that our proposed method should be valid. The THz response contains many factors like residual stress and crystal orientation. We should isolate such individual factors by driving the evaluation of THz polarization properties in the future work.

研究分野：加工計測

キーワード：テラヘルツ波 残留応力 結晶配向 プラスチック 光弾性法

1. 研究開始当初の背景

工作機械から自動車部品、携帯電話に至るまで工業製品は樹脂成形品であふれており、加工技術(射出成形など)や計測技術(外観計測)はほぼ確立している。しかし成形品の内部特性のうち、残留応力の評価技術は未だ確立しておらず、高精度かつ非破壊な残留応力評価法への要求は産業界から非常に大きい。塑性変形や熱処理により生産される樹脂成形品には大きな内部残留応力が複雑に分布しており、劣化や余寿命減少などの原因となっているからである。

現在樹脂成形品に対して行われている残留応力評価法は、主に破壊試験法と X 線回折法である。破壊試験法とは、計測対象とその周囲に歪みゲージを張り付け、部材を細切れにしながら開放歪み変化を測る方法であり、ポリプラスチックス社(国内)や Veqter 社(英国)などが同手法による残留応力評価装置を開発している。しかし成形品を破壊するため試作品にのみ使用可能で、完成品の評価は不可能である。X 線回折法は、残留応力歪みにより変化する格子間距離を X 線回折で評価する方法であり、非破壊であるため汎用されている(リガク社(国内)などが製品化)。しかし装置が大掛かりで高価な点、表面から 20mm 程度の深さまでしか測定できない点が大きな課題である。

2. 研究の目的

本研究では、非破壊かつ深さ方向にも高分解能な残留応力評価技術として、テラヘルツ (THz) 偏光計測法を提案する。THz 波は 100 μm ~1 mm という長波長の光であり、樹脂に対して透明な点、結晶配向に敏感な点が大きな特徴である [D.Mittleman, *Sensing with THz Radiation*, Springer, (2003)]. 樹脂成形品内部は残留応力によって結晶配向が変化しているが、THz 波を入射すればそれが偏光の変化となって現れるはずで、THz 偏光光学系を構築すれば残留応力の 3D マッピングが実現できる。透明、不透明にかかわらず全ての樹脂成形品に対する残留応力の 3D 評価法が確立するため、大規模な市場を形成する樹脂成形産業において、非常に大きな需要創成が期待できる。また工学応用例が乏しい THz 技術において、産業応用へ向けた大きな楔となる。

3. 研究の方法

THz-TDS を利用し、樹脂成形品の内部残留応力の非破壊・非接触な評価が可能かどうか検証した。具体的には、残留応力の異なる樹脂サンプルを複数作製し、その後 THz-TDS 実験により THz 波の透過吸収の変化を検証し、従来法(穿孔法)と比較することで提案法の実現可能性を検証した。

本研究ではまず、射出成形法によって物性の異なる樹脂サンプルを作製した。同じ樹脂を使用した射出成形品であっても、その成形条件によって品質は大きく変わる。成形条件

には大きく分けて樹脂温度、金型温度、射出速度、保圧などがあり、樹脂の硬化や収縮の際のふるまいに大きく作用する。例えば、金型に接触し先に硬化するスキン層と、内部を流れるコア層の強い摩擦により内部に応力が発生し、内部の結晶配向が変化すると考えられる。

本研究では、成形樹脂として主にポリプロピレン(PP)を使用した。PP はプラスチック成形品の様々な分野で汎用されているエンジニアリングプラスチックであり、加工性の高さ、今後の応用展開を考慮すると試料として妥当である。他にも、場合によって結晶性の低いポリスチレン(PS)や結晶性の高いポリアセタール(POM)、ポリエーテルエーテルケトン(PEEK)なども評価している。

成形に利用した射出成形機としては、FANUC 社の Roboshot α i を使用した。PP 成形時において、金型温度は 50°C、スクリー先端の樹脂温度を 200°C で固定した。試料作成において変更したパラメータは、内部物性に大きく関与すると考えられる、スクリーにおける射出速度、および射出後に印加する保圧の 2 つである。

4. 研究成果

成形機の射出速度を変更し、以下に示す 2 種類の試料を作製した。試料の外観写真を図 1 に示す。一般には射出速度が大きいほど、樹脂の粘性が低いために残留応力は小さい。つまりサンプル①は残留応力が大きく、サンプル②は小さいと予想される。①と②で保圧の大きさが異なるが、射出速度 200m/s において保圧が小さい場合、ヒケなどの影響が大きいため、射出速度が大きい場合と同様の外観が得られる保圧を採用している。

	射出速度	保圧	残留応力
試料 ①	200 mm/s	50 MPa×2 s	大
試料 ②	1200 mm/s	20 MPa×2 s	小



図 1 成形した PP 試料の写真(厚さ 2.5mm)

成形した PP に対して、テラヘルツ時間領域分光(THz-TDS)測定を行った。使用した装置は、アドバンテスト社の TAS7500 である。分光結果の一例を図 2 に示す。グラフにおいて、縦軸は吸光を表わしており、①、②はそ

それぞれ前述の実験条件を表わす。また x-dir, y-dir は、それぞれ x 方向(樹脂の流れる方向), y 方向に電場を持つ偏光(樹脂の流れと垂直な方向)を入射した場合の結果を意味している。図 2 のように、サンプル①では 4~5THz 近傍において大きく変更依存性が現れる一方、サンプル②においては偏光の方向に対して大きな依存性は確認できなかった。サンプル①は、PP 分子が残留応力によって X 方向に引っ張られて配向していると考えられるが、その垂直方向(Y 方向)に双極子モーメントが存在するために Y 方向の吸収が大きくなると考えられる。

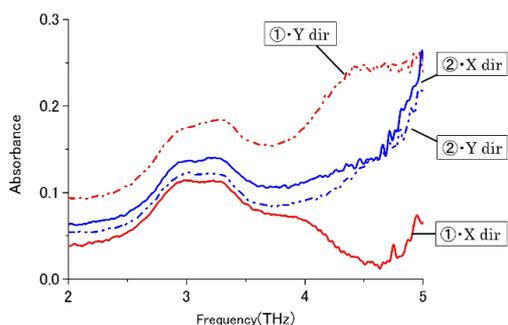


図 2 射出速度の異なる PP の THz 分光結果

THz 分光実験の結果が、残留応力の差から生じたものかどうかを確認するため、従来の残留応力測定法である穿孔法の結果と比較した。穿孔法実験では、前述の分光実験で用いた PP の 2 種類を評価した。結果を図 3 に示す。サンプル①の残留応力が高く、サンプル②の残留応力が低いことが確認できる。試料①は、PP 分子が残留応力によって高分子結晶が X 方向に引っ張られており、その垂直な方向(Y 方向)に電気双極子が発生しやすくなるため、THz 波が Y 方向に吸収されやすくなっている(逆起電力が生じやすくなるため)と想定される。つまり本測定結果から、試料②には残留応力がほとんど存在しないこと、試料①には X 方向に近い方向に対して残留応力が存在することが定性的ではあるが想定される。主応力の方向は、サンプル①が X 方向に対して 24.8°、サンプル②が X 方向に対して 43.8°である。高速・低圧で成形されたサンプル②は樹脂の粘性が低く、金型内部で自由な方向に流れる傾向にあり、その結果応力が X 方向に揃いにくいと考えられる。

この結果から、前述のサンプル①とサンプル②の吸収差と残留応力は相関があると考えられる。つまり、THz 波を利用しての残留応力評価には妥当性があると言える。

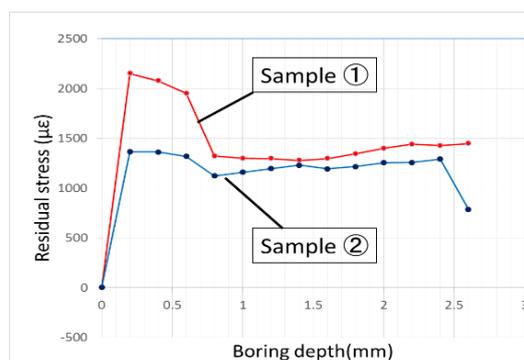


図 3 穿孔法による残留応力評価の結果

次に成形機の保圧を変更し、以下に示す 2 種類の試料を作製した。試料の形状は図 1 同様である。一般的に保圧が大きいほど、より大きな力がかかるために残留応力は大きい。つまりサンプル①は残留応力が大きく、サンプル②は小さいと予想される。

	射出速度	保圧	残留応力
試料①	200 mm/s	40 MPa×2	大
試料②	200 mm/s	20 MPa×2	小

成形した PP に対して、テラヘルツ時間領域分光(THz-TDS)測定を行った。分光結果を図 4 に示す。本実験においては、試料に対して 4 方向の偏光依存性を評価している。グラフにおいて、縦軸は吸収を表わしており、保圧大、保圧小はそれぞれ試料①、②を示す。また載せてある角度は、x 方向(樹脂の流れる方向)を 0 度とした偏光方向である。

図 4 に示されるように、保圧の大きな試料(サンプル①)では 4~5THz 近傍において大きく変更依存性が現れる一方、保圧の小さな試料(サンプル②)においては偏光依存性が小さい。サンプル①は、保圧の大きさ(残留応力の大きさ又は配向)が偏光依存性として大きく表れていると考えられる。穿孔法による評価も行っているが、穿孔法と本結果も大きな相関が得られている。

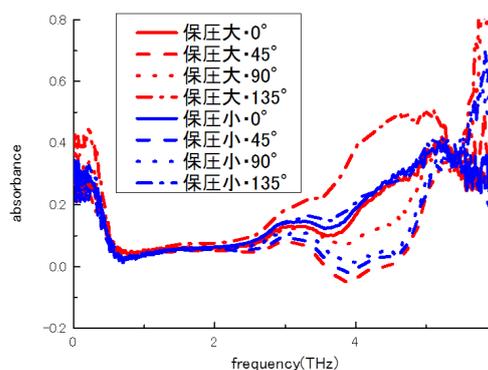


図 4 保圧の異なる PP 試料の THz 分光結果

本研究により得られた知見，結論，課題は以下の通りである。

1. プラスチック成形品は非常に特徴的な THz 応答を示す

プラスチック成形品の成形条件，結晶性などの違いによって，PP や PEEK(報告にはグラフなし)では 4~5 THz 帯域に特徴的な偏光依存性が現れている。結果は載せていないが，結晶性の低い PS は成形条件の違いによる THz 偏光依存性は表れておらず，THz 応答は結晶性の高い物質に大きく表れると考えられる。

2. 成形条件と THz 応答には相関がある

射出速度や保圧を変更することにより，THz 偏光依存性が大きく表れることが示された。理由としては，成形条件における内部応力/配向の違いが THz 応答に現れたと考えられる。

3. 内部応力と THz 応答の相関は，現状で確認できない

現状で，内部応力と THz 応答との相関は完全に確認できていない。局所的な応力を印加可能な治具を作製する，残留応力が定量的に制御できる成形法の確立などを通じて追実験を重ねる必要がある。

4. 結晶配向と THz 応答には相関がある

THz 分光結果から，樹脂内結晶配向と THz 応答は大きな相関があると考えられる。しかし配向のみが THz 応答に関与するとは考えにくく，他の要素(残留応力など)との関連性を詳細に評価する必要がある。

5. THz 応答は数要素に起因する可能性が高く，それらを分離することが必要

試験研究から得られた知見から，THz 応答が配向，内部応力などいくつかの要素に起因する可能性が高いことが分かった。それらを定量的に分離できれば，残留応力などの内部物性を精密に評価可能な技術が確立する。今後は，そのテーマの実現に向けて，研究を押し進めるべきである。

今後の研究方針としては，

1) 様々な条件(配向，残留応力)の試料を測定し，応答の指導原理を見出す

2) 実際の光弾性法の導入の 2 点が主に考えられる。

まず 1)は，これまでの研究の延長であり，PP に限らず様々な試料を戦略性を持って準備し，THz 応答を詳細に評価することによって THz 応答の要因を見出し，分離する。以上によって，配向や結晶化度，残留応力などの要素を THz 応答のみから定量的に分離できる可能性がある。

2)については，本試験研究のももとのベースである光弾性法に立ち返る。残留応力に

より発現する複屈折を，テラヘルツ光弾性法装置を構築して評価する。THz はほとんどの樹脂に透過するため，光弾性による複屈折評価により残留応力を定量評価できる可能性がある。

最後に，本試験研究によって，これまで困難とされていた樹脂成形品の高精度・非侵襲な残留応力評価法の実現可能性の端緒をつかむことができた。しかしながら，THz 応答の分離など様々な課題が残っており，提案法確立に向けてはもう少し時間がかかる。しかし，残留応力の精密な評価は，製品の信頼性・耐久性向上に向けた設計において必要不可欠であるため，大規模な市場を形成する樹脂成形産業において非常に大きな需要創成が期待できる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

①梶原優介：計測技術-テラヘルツ計測-，成形加工，プラスチック成形加工学会，26，7，(2014) 342-345.

[学会発表] (計 5 件)

①梶原優介：テラヘルツ計測と加工技術応用への展望，第 42 回新加工技術専門委員会講演会，東京工業大学，6 月 25 日 (2013).

(招待講演)

②松澤亮，梶原優介：赤外/THz 計測による樹脂成形品の残留応力評価法の検証，2014 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(2014) 967-968.

③松澤亮，梶原優介：THz 計測による非破壊な樹脂残留応力評価法の検証，プラスチック成形加工学会第 25 回年次大会，(2014).

④梶原優介，松澤亮，木村文信：THz 計測による樹脂内残留応力評価法の検証，第 10 回生産加工・工作機械部門講演会，徳島大学，259-260 (2014).199-200.

⑤松澤亮，木村文信，梶原優介：樹脂内部応力による THz 応答変化，プラスチック成形加工学会シンポジウム，朱雀メッセ，新潟，141-142 (2014).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：

残留応力評価装置および残留応力評価方法

発明者：梶原優介，松澤亮

権利者：東京大学

種類：特許出願

番号：2014-135826

出願年月日：2014 年 7 月 1 日

国内外の別：国内

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.snom.iis.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

梶原 優介 (KAJIHARA, Yusuke)

東京大学生産技術研究所 准教授

研究者番号：60512332

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：