

フジシール財団 研究助成事業
成果報告書

公益財団法人フジシール財団
理事長 岡 崎 裕 夫 殿

報告日 2026 年 5 月 29 日

研究課題	テラヘルツ波と機械学習を用いた外見的特徴を考慮した廃プラスチックの高度素材識別技術の開発	助成金額
		300 万円
助成名	研究助成	
ふりがな	おおくぼ かずあき	研究助成申請年度
研究者氏名	大窪 和明	2025 年度
所属機関	東北大学大学院国際文化研究科	研究期間
		2025 年 4 月～2026 年 3 月
役 職	准教授	

下記の通り、研究成果を報告いたします。

記

1. 研究成果の概要

1) 研究の背景と目的

プラスチック製パッケージの資源循環を促進する上で、使用後の容器包装を素材ごとに高精度で識別・分別する技術は不可欠である。特に食品容器や包装材では、異なる素材で構成されていても外観が類似しているものがあり、目視や画像認識のみによる素材識別には限界がある。このため、NIR（近赤外分光法）をはじめとする電磁波を用いた識別技術が広く利用されている。一方で、測定条件や素材によっては十分な識別精度が得られない場合があり、既存技術を補完する識別手法の確立が課題となっている。このような背景のもと、テラヘルツ (THz) 波を用いた材料識別技術が注目されている。THz 波はプラスチック材料に対する透過性を有し、試料を透過した後の電圧から透過率を評価できる。しかし、THz 波は波動性を有するため、光源と試料との距離に応じた位相変化や、試料表面・内部で生じる反射・多重反射に起因する干渉の影響を受ける。そのため、実際の食品容器に適用する際には、測定位置や容器形状、厚みの違いによって透過率が変動し、素材識別の安定性が低下する可能性がある。本研究では、THz 波を用いた廃プラスチックの高度素材識別技術の開発を目的とし、容器包装の外見的特徴、特に段差や厚み変化が THz 波の透過率に及ぼす影響に着目した。具体的には、THz 波の光源と試料との距離、および段差を有する試料表面上の測定位置を変化させながら透過率を取得する装置を開発し、得られた透過率を 3 次元空間分布として解析した。これにより、材料差に由来する透過率変化に加え、外見的特徴に起因する透過率変動の特徴をふまえながら素材識別および形状評価への応用可能性を検討した。

2) 研究成果

2.1) 3 次元透過率計測装置の開発

本研究では、3 次元空間におけるテラヘルツ (THz) 波の透過率を計測する装置を開発した (図 1a))。本装置では、THz 波の光源と検出器を固定し、試料を水平方向 (x-y 座標) および垂直方向 (z 座標) に移動させることによって、各測定点における透過率を取得できる。これにより、試料表面上の位置だけでなく、光源と試料との距離の違いを含めた 3 次元空間における透過率分布を計測することが可能となった。

2. 2) 平面上の透過率分布と段差近傍における素材識別の可能性 (学会発表論文 1)

まず、試料内の段差が THz 波の透過率に及ぼす影響を検討した。試料は、それぞれ PP (Polypropylene)、PE (Polyethylene)、PET (Polyethylene terephthalate) を用い、図 1b)に示すような中心部に段差を有する試料を作製

した。試料寸法は 100 mm × 100 mm × 10 mm である。平面 (x-y 座標) 上で取得した透過率分布を図 1c)に示す。図 1c)から、段差周辺において透過率が大きく変動していることが確認できる。

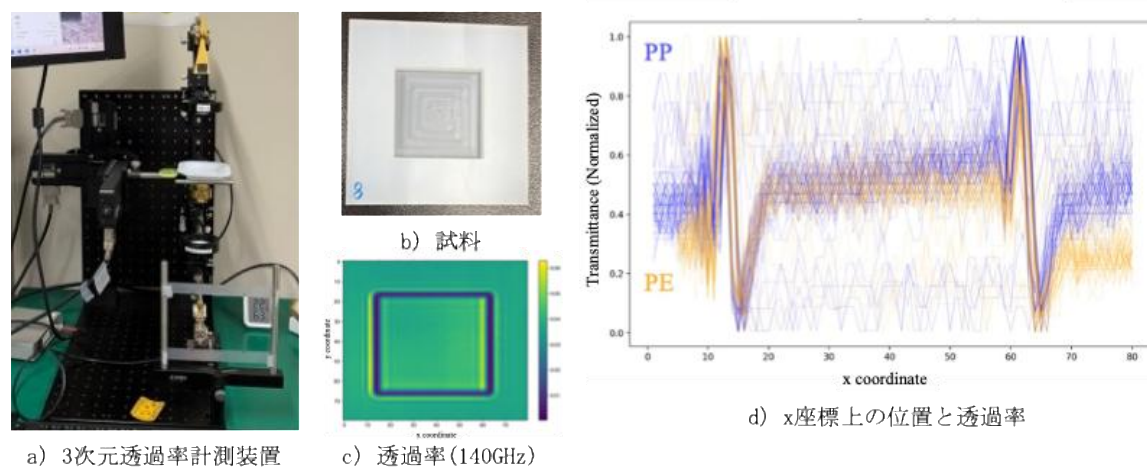


図1 段差構造サンプルにおけるTHz透過率測定と透過率分布

次に、PP および PE の試料について、図 1c)のような測定データから、各 y 座標における x 軸方向プロファイルを抽出し、x 軸方向に沿った透過率変化として表示したものを図 1d)に示す。段差から十分に離れた中心部の領域では、PP および PE の透過率は比較的近い値を示した。これは当該領域では試料厚さが一定であり、さらに PP と PE の屈折率が近いため、両者の透過特性に大きな差異が生じにくいことを示している。一方、段差近傍では、PP と PE の透過率に明確な差が確認された。この差は、段差により厚さが異なる領域を通過した THz 波同士が干渉したことに起因すると考えられる。この解釈は、平板内の多重反射および厚さの違いに伴う位相差を考慮した理論モデルからも確認された。以上より、PP と PE のように屈折率が近く、平坦部では透過率の差が小さい材料であっても、段差近傍で生じる干渉を特徴量として利用した機械学習モデルを用いることによって両者を識別できる可能性が示された。

2. 3) 3次元空間における透過率分布の計測

本研究で開発した 3 次元での透過率計測装置を用いて、HDPE、PP、PET の段差を有する試料について、3 次元空間における透過率分布を計測した。図 2a)は、試料の一例として HDPE を用いて作製した試料の 3D スキャンの画像を示している。この試料では段差の外側の厚さを 10 mm、内側の厚さを 9 mm とし、段差の高さは 1 mm である。測定では、段差を有する面を表面とし、段差のない裏面側から THz 波を照射して透過率を取得した。図 2c)は、図 2a, b)の赤い四角で囲まれた部分について、各 (x, y, z) 座標における透過率を示しており、プロット

の色が赤に近いほど透過率が高く、青に近いほど透過率が低い。図 2b)に示すように、裏面側からの観察では段差を目視で確認することは難しい。一方、図 2c)では、段差近傍において透過率の変化が確認され、THz 波の透過率分布から段差を検出できることが示された。また、段差を境界とした外縁部よりも内縁部の方が透過率は高い (赤色に近い) 傾向を示し、厚さの違いが透過率に反映されていることが確認された。ただし、THz 波

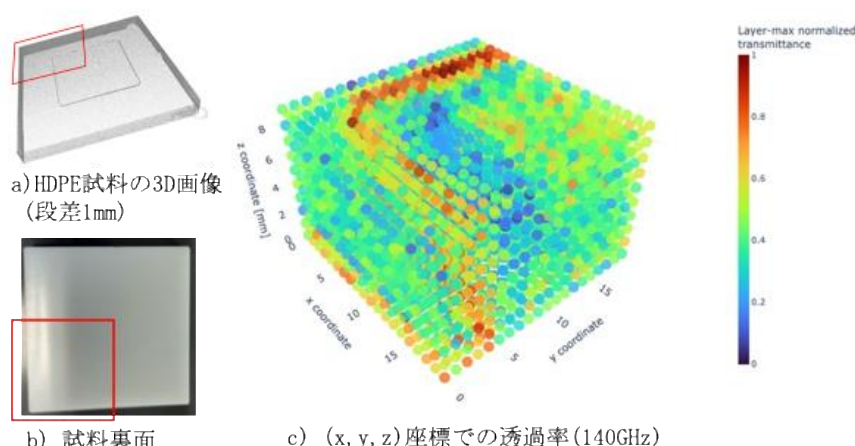


図2 段差構造サンプルにおける透過率の3次元分布

の透過率は波動性の影響を受けるため、単純に厚さが薄いほど透過率が高いとは限らない。実際には、試料の材質、THz 波の周波数、光源と試料との距離、段差や厚み差によって、透過率分布や識別のしやすさが異なることが確認された。したがって、対象とする試料や識別目的に応じて適切な測定条件を設定することが重要であり、本装置はその条件探索および透過率分布の評価に有用であると考えられる。一方で、機械学習モデルを用いることによって、3D 画像 (図 2 a))や THz 波の透過率分布(図 2 c))から適切な特徴量を抽出し、素材の識別に応用することによって高い精度で識別できる可能性が示唆された。

2. 研究成果のパッケージ産業への貢献の可能性

本研究成果は、パッケージ産業における容器包装の選別、設計、品質評価の各段階に貢献する可能性を有している。第一に、プラスチックパッケージの自動選別技術の高度化への貢献が期待される。本研究では、PP と PE のように平坦部における THz 波の透過率が近い材料であっても、段差近傍で生じる干渉に由来する透過率変動を利用することで、素材識別の可能性が高まることを示した。これは、単純な透過率の大小だけでなく、容器形状に起因する透過率変動を識別情報として活用できることを意味する。したがって、画像認識などによって容器の形状や段差を把握し、THz 波の測定位置を適切に選定することで、より高精度な素材識別技術につながると期待される。第二に、リサイクルしやすいパッケージ設計への応用が考えられる。今後の循環型社会においては、使用後に自動選別装置で正しく識別されることもパッケージ設計の重要な設計要件の一つになることも考えられる。本研究の 3 次元透過率解析により、どのような形状や厚み変化が THz 波による識別に有効であるか、あるいは識別を不安定化させるかを評価できれば、選別工程を見据えたパッケージ設計が可能となる。例えば、投稿論文 3)では、利用者の利便性を妨げず材料識別に適した測定領域を容器に設け、識別しやすい形状設計について議論している。第三に、容器包装の非接触・非破壊評価技術への展開が期待される。本研究で示した 3 次元透過率分布の取得は、素材識別だけでなく、容器や包装内部について局所的な空隙、段差、成形不良などを非破壊で検出できる可能性がある。関連する検討として、投稿論文 4)では殻付きピーナッツに対して THz 波の透過率分布を取得し、内部の実の状態や重量との関係性を評価しており、THz 波の透過率が包装内部の情報取得にも応用可能であることを示唆している。以上のように、本研究は、THz 波を用いた材料識別技術を単なる素材判別にとどめず、容器形状、厚み分布、段差検出を含む 3 次元的な評価技術へと発展させる可能性を示すものである。

3. 学会発表、学会誌等への論文掲載、産業財産権出願などの実績（現時点で未発表・未掲載・未出願のため、上記「1. 研究成果の概要」、「2. 研究成果のパッケージ産業への貢献の可能性」の当財団ホームページ上の公開の延期を希望される場合、その旨 記載してください。）

【学会発表】

- 1) 宮崎聖也，大窪和明，眞子岳，田邊匡生：プラスチックの形状特性に着目した THz 波透過率の変動要因の把握と材料識別への応用，第 17 回廃棄物資源循環学会東北支部・第 13 回日本水環境学会東北支部合同研究発表会，2026 年 2 月 21 日．
- 2) 大窪和明：実践による理論の課題設定の更更新一容器包装プラスチック識別研究にみる実践と理論の往還一，令和 8 年度土木学会全国大会 第 81 回年次学術講演会，発表予定．

【投稿論文】

- 3) Yoshihara, J.; Okubo, K.; Shigeri, M.; Manago, G.; Tanabe, T. Designing a Sustainable Plastic Container Based on Terahertz Spectroscopy. Manuscript submitted for publication.
- 4) Manago, G.; Okubo, K. Millimeter-Wave Transmission Imaging of In-Shell Peanuts for Non-Destructive Evaluation, Internal Defect Detection, and Agricultural Quality Assessment. Manuscript submitted for publication.