

(1) 研究題目

※スペースが足りない場合は、枠を追加いただいて構いません。

多様化する廃棄プラスチックに対応する材料識別技術の開発

(2) 本研究の期間

(西暦) 2023年4月 ～ 2024年3月

(3) 本研究の成果と今後の課題

プラスチック製品は長年広く利用され、人類はその機能性や利便性を享受してきたが、近年では海洋マイクロプラスチックなど廃棄プラスチックの課題も認識されるようになってきた。しかしながら今でもレジ袋やストローなどの使い捨て容器の増加や、コロナ禍での容器包装廃棄物の急増など、皮肉にもむしろ使用量は増え続けている。特にポストコロナにおける現状では、今まで利用されていたプラスチック製のパーティションも大量に廃棄されつつあり、その処理も課題になっている。焼却によるCO₂の排出や埋立地が不足する日本の現状を考えると、再利用(マテリアルリサイクル)を進めることが必要である。更に原油価格に連動するプラスチック材料価格の高騰によって再生プラスチックの需要が急拡大してことからリサイクルが求められるが、プラスチックの複雑化・多様化、更に多種の添加剤の混入がマテリアルリサイクルを妨げることになっている。

日本では1990年代に交付・施行された「容器包装に係る分別収集及び再商品化の促進等に関する法律」(容器包装リサイクル法)に加え、2022年4月からは更に「プラスチックに係る資源循環の促進等に関する法律」(プラ削減法)が施行されており、リサイクルの対象を製品系廃棄物まで拡大するとともに、独自回収ルートも認めるなど、新しい資源循環ネットワークの構築が進められている。しかし、回収までは定められているが、回収後の処理方法については十分な対策ができていないために後手に回っていると言わざるを得ない。

これらの廃棄プラスチックを高品質の再生資源化する技術が求められている中で、我々は独自に開発したテラヘルツ波を用いた材料識別技術によって廃プラスチックを高度に選別することによってそのリサイクルを促進し、CO₂の削減と持続可能な資源循環を同時に達成することを目指している。本研究では、まずプラスチック識別・同定のために最も基本となるスペクトルのデータベースを揃えるにあたり大きな課題となる干渉(共振)効果を避けた試料形状の作成法を開発し、測定標準化を行った。次に、この手法を利用して、容器包装プラスチックを含む多種多様プラスチックのテラヘルツスペクトルデータベース構築を進めた。更に、プラスチックに含まれる添加剤が、リサイクル時には不純物として純度を下げる可能性があるため、この検出・定量可能性について確かめた。加えて、テラヘルツ波を用いたプラスチック識別について(株)ベイシアの協力を得て社会実証実験を行ったので、これを報告する。

① 多種多様なプラスチック材料のテラヘルツスペクトル測定標準化

テラヘルツ周波数帯域における各種プラスチック材料の吸収が大きく異なるために、透過率スペクトルの取得及び比較のためには、試料作成の簡便化・標準化が求められていた。単純に考えれば、市販されている平板素材を購入して適当な大きさにカットして測定すればよいように思われるかもしれないが、実際には表面と裏面による共振現象の為に、多くの場合に測定が難しい。これは干渉効果とも呼ばれるが、表面での反射と裏面での反射成分(何度も繰り返すので、実際には多重反射成分)が重なり合い、位相が揃ったときには強めあい、位相が180度ずれた場合は弱めあうために、スペクトルに共振フリンジと呼ばれる成分が重なり、実際のスペクトルを覆い隠してしまう。これを避けるための工夫の一つは表面と裏面が平行にならないように加工することである。しかしながら、1mm以下のもともと薄い板材にこのような傾きをつける加工は困難であった。そこで、今回任意の厚さ及び大きさ、そして表裏面間の傾きを制御した形状の試料を作成する為に、熱プレス装置を利用した試料作成方法を開発した。一般にプラスチックの熱プレスや射出成型には金型の製作が重要であり、寸法精度や、大量生産を目指して耐久性を求めると非常に高価となる。しかしながら、研究レベルであれば精度や耐久性を求める必要はないので、アルミを加工することで実現できると考えた。実際にNC

加工機でアルミに直径 10～20 mm、厚さ 0.1～2 mm 程度の穴をざぐり、これを金型として 200℃ 前後 (材料に依存する) で熱プレスすることで、テラヘルツ透過率スペクトルに適した形状の試料を準備できるようになった。作成した試料の例を図 1 (左) に、その透過率スペクトルを右図に示す。これは $\phi 10$ mm の Cyclo Olefin Polymer (COP) を成型加工した例であり、表裏面間で約 4 度の傾きを持ち、断面形状は楔型となっている。60～90% 程度の高い透過率を示すにも関わらず、共振 (干渉) 効果が観測されていない点が重要であり、材料の透過率を評価できていると考えられ、試料作成方法のひとつとして優れた手法であることを示している。

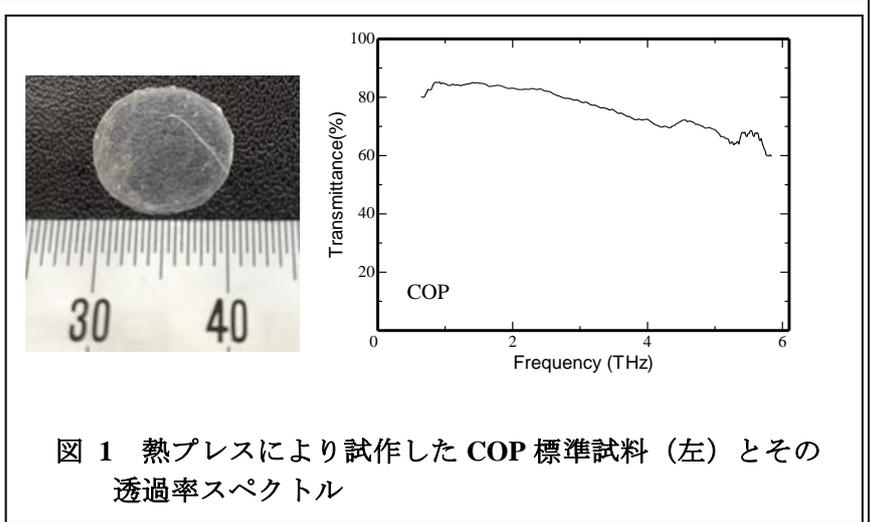


図 1 熱プレスにより試作した COP 標準試料 (左) とその透過率スペクトル

上記のように 0.1 ミリメートル程度までの薄さの試料を準備することができるようになったが、本研究を進める中で、予想以上に吸収が大きく、透過率が低いプラスチック試料が存在することがわかった。このような試料の透過率測定に対応する為には、更に薄いミクロンオーダーの薄切試料の作成が必要であったので、静岡大学の共同利用機器であるロータリーマイクロトム (大和光機工業 RX-860) を用いたところ、このような薄切試料を準備できることがわかった。ちなみに、このような薄い試料では共振周波数周期が非常に大きくなることと、そもそも透過率が低い試料であることから共振現象は起こりにくいので測定に支障はない。これらの開発により、以下の②以降の測定が可能となった。

② 多種多様プラスチックのテラヘルツスペクトルデータベース構築

JIS規格掲載のプラスチックの中から、入手可能であったプラスチックとして、Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)、前述の COP、Polyamide (PA、ナイロン)、Polyamideimide (PAI)、Polycarbonate (PC)、Polybutyleneterephthalate (PBT)、Polyetheretherketone (PEEK)、Polyetherimide (PEI)、Polyethylene (PE)、Polyethyleneterephthalate (PET)、Polyimide (PI)、Polymethylmethacrylate (PMMA、アクリル)、Polyoxymethylene / Polyacetal (POM)、Polypropylene (PP)、Polystyrene (PS)、Polytetrafluoroethylene (PTFE、テフロン)、Polyvinylchloride (PVC、塩ビ) について、それぞれ材料ごとに適した厚さの試料を作成してテラヘルツ分光吸収スペクトルを取得し、静岡大学電子工学研究所佐々木研究室の HP 内のデータベース (<https://www.rie.shizuoka.ac.jp/~thz/database/>) に掲載し、世界に向けて一般公開した。更に、上記の中から COP、PA、PE、PET、PP については、70K~300K の範囲で低温温度依存性スペクトルも取得した。これらのデータはプラスチックの識別のための工学的な基礎データとなるだけでなく、プラスチック中の分子振動を解析する為に学術的にも意義深いデータとなった。一例として、容器包装プラスチックとして分別回収されている PE、PP、PS 及び PET の透過率スペクトルを図 2 に示す。PE では 2.1 THz、PP では 3.2 と 5.2 THz、PET では 4.1THz 付近に特徴的な吸収が現れることがわかる。PS も 2.5 THz 付近に吸収が見えるが、吸収線幅が広いので識別には用いにくい。しかしながら、PS は PE、PP に比べて全体的に吸収が大きいため容易に識別することが可能である。容器包装プラスチックの分別回収が進む中で、そのリサイクル材の純度を下げているのはこれら3種類が識別の不完全性によりお互いに混ざってしまう、いわゆるクロスコンタミネーションであるので、これを解決するに相応しい技術となっている。

図 3 には、PA、PI、PTFE の透過率スペクトルを示しており、それぞれ特徴的な吸収を示しており、識別に有用であることがわかる。PA はいわゆるナイロンとも呼ばれるが、分子を特定する呼称ではなく総称となっており、ナイロンの中にもナイロン 6 やナイロン 6,6 など多くの種類がある。いくつかの種類を測定してスペクトルを得た結果、それぞれのスペクトルに共通点はあるものの識別可能な程度に違いがみられることがわかった。同様に PI もイミド結合をもつ高分子の総称であるので、ここに

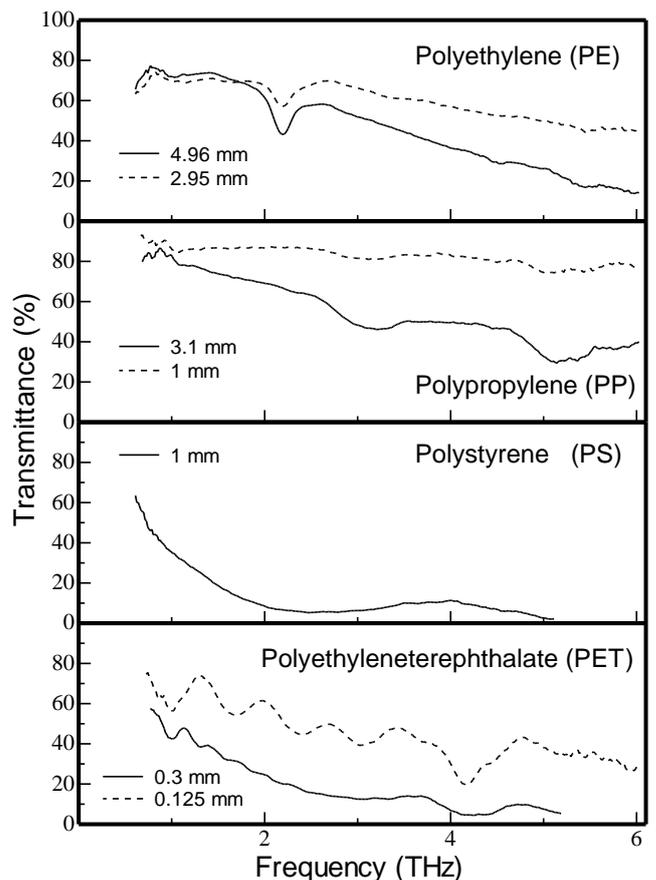


図 2 容器包装プラスチックである PE、PP、PS、PET の透過率スペクトル

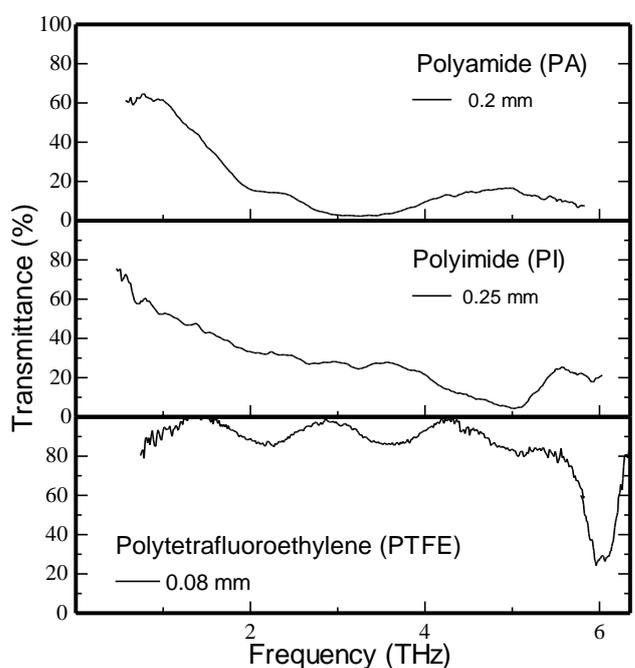


図 3 PA、PI、PTFE の透過率スペクトル

示すものはあくまでも一例ということになるが、同様にいずれの材料も特徴的な吸収を示す。PTFEはいわゆるテフロンであるが、6THzに非常に特徴的な鋭い吸収が観測され、識別・同定は容易と考えられる。6THzを超える我々の光源の広帯域性能によってこれが実現している。

③ 添加剤のテラヘルツスペクトルデータの取得

テラヘルツ分光スペクトル測定の特徴のひとつは色付きのプラスチックを色素の影響を受けずに識別できることである。これは近赤外分光(NIR)が可視光に近いことから着色料の影響を強く受けて識別精度が格段に落ちることに対して大きなメリットとなる。つまり、着色剤が特徴的な吸収を示さないことと、量が少なくテラヘルツスペクトルへの影響が小さいことが物質識別性能を高めていると言える。図4は着色剤の例としてサンセットイエローFCF、アシッドイエロー、23、ピグメントブルー15のテラヘルツ透過率スペクトルを示す。これらのスペクトルは着色剤をポリエチレン粉末で5%に希釈して測定した結果であるが、特徴を顕著にとらえるためにあえて高い濃度で調整しており、実際のプラスチック中あるいはプラスチック上の着色剤はこれほど高い濃度ではない。ここでは透過率の値が重要ではなく、特徴的な吸収の有無が重要であるが、多くの着色剤は特徴的な吸収がない。ただし、まれにピグメントブルーのように特徴的な吸収を示すものがあるので注意が必要であることがわかった。

更に、リサイクルにおいて問題になるのは添加剤の中でも多量に含まれる充填剤の存在である。一般的に利用されているプラスチック製品には充填剤が含まれていることが多く、例えば食品トレイでは、強度や耐熱温度等の物性を制御する為に炭酸カルシウム(CaCO_3)やタルク($3\text{MgO}\cdot 4\text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$)のような充填剤が数十%程度含有される場合があるが、このような多量の添加剤はリサイクル時には不純物となり、再生品の純度に大きな影響を与える。これらの透過率スペクトルを図5に示すが、炭酸カルシウムでは3.3 THz付近、タルクでは5.1と5.4 THz付近に鋭い吸収が観測される。これらの特徴を利用すれば添加剤の検知や定量分析が可能である。実際に食品トレイのひとつについて計測した結果を図6に示す。ここには炭酸カルシウムの特徴である3.3 THz付近の吸収と、タルク由来と考えられる5.1及び5.4 THz付近のツインピークが明瞭に見えており、大量の添加剤の存在を確認することができる。

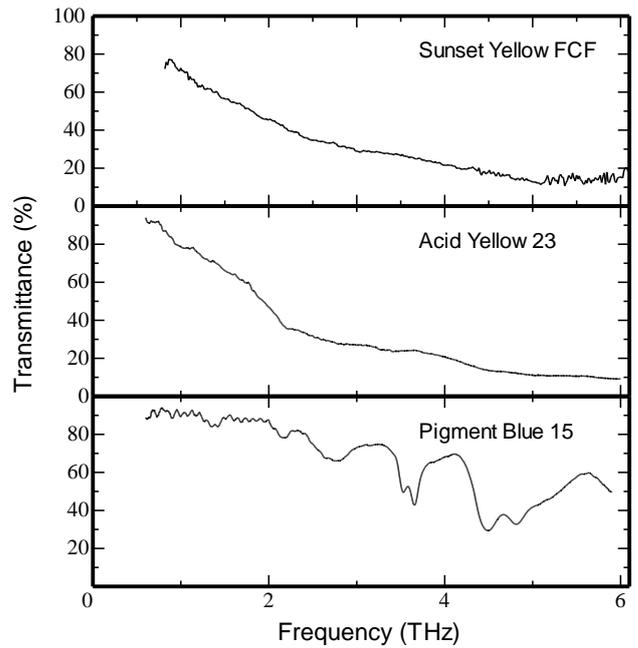


図4 着色料サンセットイエローFCF、アシッドイエロー、23、ピグメントブルーの透過率スペクトル

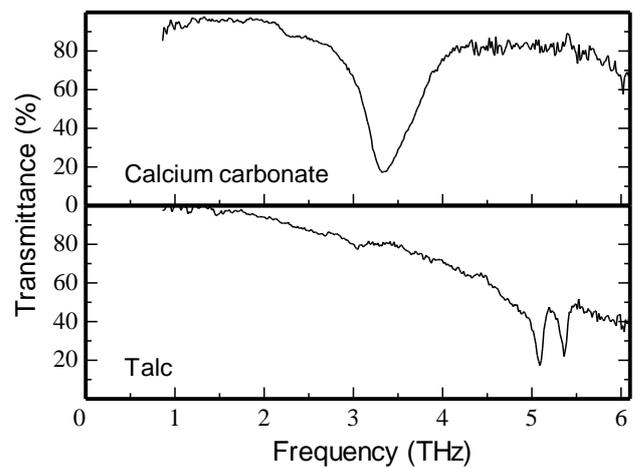


図5 添加剤炭酸カルシウム、タルクの透過率スペクトル

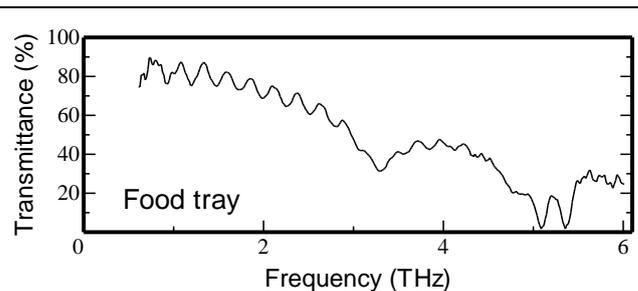


図6 フードトレイの透過率スペクトル例

しかしながら、ここに示した添加剤はあくまでも一例であり、他にも多種多様に存在している。それぞれの物質の単体のスペクトルデータもまだ十分ではなく、更にこれらの材料がプラスチック中で単体と同じスペクトルを示すかどうかという知見も存在せず、まだまだやり残していることは多いと言わざるを得ない。

尚、本研究ではこの他にもファストグリーン FCF、ライトグリーン SF Yellowish、メチルグリーン、メチルレッド、フェノールレッド、チモールブルー等の添加剤・着色剤についてテラヘルツ透過率スペクトルを取得し、同じくデータベースに公開した。

④社会実証実験の実施

透明食品トレイ回収の社会実験・分別実証実験を株式会社ベイシアの協力のもと、2023年8月4日、5日にベイシア伊勢崎駅前店にて実施した。具体的には、お客様が店頭で持参された透明食品トレイ（廃プラスチック）を、開発中のテラヘルツ波による材料識別装置を利用した選別実験と、また同時にアンケートを実施した。図7に当日の実施状況を示す。尚、事前の広報として「伊勢崎市市政だより」（7月16日号掲載）、およびベイシア広報からのプレスリリースに基づく「上毛新聞」（7月28日掲載）、およびSNSを利用したお客様への協力の依頼を案内して頂いた。大学からも同時にプレスリリース「静岡大・東北大・芝浦工大、ベイシア伊勢崎駅前店でテラヘルツ波による透明食品トレイ回収の社会実験・分別実証実験を実施」（2023/07/28）を行うことで、広く社会に関心を持ってもらいつつ、当日多くの皆様に参加・ご協力いただくことができた。また、当日上毛新聞をはじめとして、循環経済新聞、包装タイムス紙の取材を受けて新聞掲載されたので、これらの紙面切り抜きも資料として添付するとともに、オンライン記事についてはリストを文末に提示する。

結果として、回収した透明容器の数は、1日目は383個、2日目は48個であった。これらの分別結果としては、PETと識別された透明容器の正答率は約83%であり、PSと判定された透明容器の正答率は約60%であった。詳細に分析すると特に2日目の正答率が下がっていたが、これは真夏の伊勢崎という高温・多湿の環境の中で装置に若干不具合が生じた時間もあり、このことが影響を与えたと考えている。この点は若干残念であったものの、このような屋外環境下での耐久試験を兼ねた実証実験であったので、想定していた目的は大いに果たすことができたいへん有意義だったと考えている。

尚、当日店頭での回収・分別実験に合わせて、伊勢崎市からは環境局職員が隣にブースを設けて、資源回収の市民啓蒙活動を行ったこともあり、僭越ながら市民の環境意識向上にも一役買ったのではないかなと思われる。この社会実証実験を通じて、家庭からどのようなプラスチックが廃棄されるのか、テラヘルツ波でどこまで正確な識別ができるのかということを実験調査するとともに、アンケートも含めて住民のリサイクル協力行動などを分析することができた。持続可能な社会を創造するため、多様なアクターと社会連携、新しい研究開発のもと、SDGsの達成に繋がる有意義な実験になったと考えている。



実証実験会場（ベイシア伊勢崎駅前店）



実験装置外観



お客様による分別実験

図7 テラヘルツ装置による分別実証実験の様子

テラヘルツ波によるプラスチック識別・分別技術の将来と課題について

テラヘルツ波を利用した素材識別は科学的に考えて原理的に優れた手法であることは間違いないが、その技術はまだ熟成されておらず、光源や検出器もまだまだ高価で身近なものではない。しかしながら、現在携帯電話の5G通信が普及しつつあるが、これは電波の高周波化が進んでいると言い換えることができる。次世代通信技術として控えている Beyond5G あるいは 6G 通信は現在急速に研究開発が進んでいるが、ここで利用されるキャリア電波や、自動運転化を視野に入れた車間センサ用途として開発が進んでいる電磁波の周波数がまさに「テラヘルツ波」となる。つまり、携帯電話に入るような小さいサイズで安価なテラヘルツ波の発信器や検出器は実現されることが約束されると言っても過言ではない。数年後には安価にテラヘルツ波・サブテラヘルツ波の単色光源が得られるようになるので、今回我々が開発・実証してきた技術の延長線上で、手軽に素材識別が実現できるようになると考えている。しかしながら、そのためには何よりも本研究で取得したような素材のテラヘルツ透過率スペクトルなどの基礎データがまだまだ不足していると考えられ、本研究成果がようやくその第一歩になったと認識している。

今後スペクトルデータベースが拡充して分子振動帰属解明が進めば、分子鎖切断などの劣化や微量不純物までも検出できるようになり、廃プラスチックをマテリアルリサイクル、ケミカルリサイクル、サーマルリサイクル向けなどにランク付けして厳密に分類できる高度識別装置へと展開され、無駄のないリサイクルが実現される未来が実現すると考えている。

以下添付資料

伊勢崎市広報

プラスチック製の容器・包装は資源です！ 正しく分別してリサイクルしましょう



市ではプラマークの表示がある容器や包装を分別収集しています。もえるごみと一緒に捨てると、貴重な資源が焼却処分されてしまいます。正しく分別してごみ減量とリサイクルに協力してください。
問い合わせ 資源循環課 (☎27-2732)



▶便利なごみ分別アプリ
「さんあ〜る」の活用を



◀各地区のごみの出し方
や収集日はこちら

目印はプラマーク

分別の対象になる容器や包装はプラマークの表示があります。市指定袋に入れて指定の収集日に出してください。

【プラスチックで出す主な物】

弁当容器、トレイ・パック、ボトル、レジ袋・フィルム、チューブ、発泡スチロール(緩衝材)など



分別の前に汚れを落とす

汚れや食品が残っているとリサイクルできません。軽くすすいで汚れを落としてください。汚れが落ちないものはもえるごみへ。



間違えやすい分別収集対象外のプラスチック製品

ペットボトル本体はプラスチックとは別に分別収集し、リサイクルしています。各地区のごみの出し方に従って出してください。



※プラスチック製品でも弁当のスプーンやストローなどのプラマークがないものは分別収集の対象外です。もえるごみで出してください

赤堀地区在住の場合

赤堀地区では、ごみステーションでプラスチック製容器包装の分別収集をしていません。分別に協力できる場合は、指定袋に入れて赤堀支所に設置してある専用資源保管庫に出してください。

利用時間 平日午前8時30分～午後5時

※年末年始は除きます

透明のプラスチック製容器を回収します

株式会社ベイシアでは、静岡大学・東北大学・芝浦工業大学と共同で、プラスチック製容器の再資源化向上を目的とした素材識別の実証実験のため、透明プラスチック製容器を回収します。リサイクル推進の取り組みとして協力をお願いします。

期日・時間

●8月4日(金) = 午前10時～午後5時

●8月5日(土) = 午前10時～午後3時

会場 ベイシアスーパーマーケット伊勢崎駅前店

回収する物 卵のパックや弁当・総菜などの透明なプラスチック製容器

※汚れを落としてから出してください

2023年(令和5年)7月16日号

新聞掲載

「電磁波で透明食品トレーを選別 再資源化向けベイシア(群馬・前橋市)が研究に協力」
2023年7月28日 (株)ベイシアによるプレスリリース掲載 上毛新聞

新聞掲載

「ベイシア、3大学の研究協力 トレー再資源化実験 買い物客、分別装置を体験」
2023年8月5日 8月4,5日にベイシアにて実施された実証実験の現地取材記事 上毛新聞

新聞掲載

「テラヘルツ波用い素材識別 静岡大学／東北大学／芝浦工業大学 透明食品トレーの分別実証実験」
2023年9月4日 8月4,5日にベイシアにて実施された実証実験の現地取材記事 包装タイムス

新聞掲載

「テラヘルツ波で透明トレイ識別 産学連携、店頭で実証実験 ベイシア／静岡大学ほか」
2023年8月28日 8月4,5日にベイシアにて実施された実証実験の現地取材記事 循環経済新聞

プレスリリース(ベイシア)

「【産学連携】ベイシア伊勢崎駅前店にて透明食品トレイ回収の実証実験を8月4日・5日に実施 透明食品トレイ持参でオリジナル商品プレゼント」

プレスリリース掲載

1. 産経新聞 <https://www.sankei.com/pressrelease/prtimes/2W7O3DAYIJLTMUMM6UPWGTXL/>
2. 財経新聞 <https://www.zaikei.co.jp/releases/2134009/>
3. PR TIMES <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000216.000069349.html>
4. リテールガイド <https://retailguide.tokubai.co.jp/data/44617/>
5. 時事ドットコム <https://www.jiji.com/jc/article?k=000000216.000069349&g=prt>
6. NEWS Collect <https://newscollect.jp/article/?id=1057496015922348933&pref=10>
7. BIGLOBE ニュース https://news.biglobe.ne.jp/economy/0727/prt_230727_8435963406.html
8. 流通スーパーニュース <https://news.shoninsha.co.jp/csr/226991>
9. NEWS PICKS <https://newspicks.com/company/SPD34DXSZS4PGYIU/>
10. excite ニュース https://www.excite.co.jp/news/article/Prtimes_2023-07-27-69349-216/

プレスリリース(静岡大学)

「静岡大・東北大・芝浦工大、ベイシア伊勢崎駅前店でテラヘルツ波による透明食品トレイ回収の社会実験・分別実証実験を実施」

プレスリリース掲載

1. 日本経済新聞 https://www.nikkei.com/article/DGXZRSP659867_X20C23A7000000/
2. Newsweek <https://www.newsweekjapan.jp/press-release/2023/07/post-6405.php>
3. @Press <https://www.atpress.ne.jp/news/363396>
4. BIGLOBE ニュース https://news.biglobe.ne.jp/economy/0727/atp_230727_3403988813.html
5. ウーマンエキサイト https://woman.excite.co.jp/article/lifestyle/rid_atpress_363396/pid_2.html
6. ニコニコニュース https://news.nicovideo.jp/watch/nw13079177?news_ref=tag