

樹脂判別ハンディセンサーの開発

Development of Portable Plastic Identification Sensor

野口 英剛*	柳田 晃司*	建部 哲郎*	江原 誉*	土屋 聡*
Hidetaka NOGUCHI	Koji YANAGIDA	Tetsuro TATEBE	Homare EHARA	Satoshi TSUCHIYA
嶋田 才明*	釜谷 智彦*	加藤 英紀*	安住 純一*	東口 昌浩*
Toshiaki TOKITA	Tomohiko KAMATANI	Hidenori KATO	Junichi AZUMI	Masahiro HIGASHIGUCHI
藤田 哲丸*	谷田 裕一*	磯邊 雄紀*	久保 伸一*	尾形 亮磨**
Tetsumaru FUJITA	Yuichi TANIDA	Yuki ISOBE	Shinichi KUBO	Ryoma OGATA
佐々木 譲**				
Yuzuru SASAKI				

要 旨

近年、廃プラスチックの問題は世界的な社会課題の一つとなっている。国内の廃プラリサイクルにおいてマテリアルリサイクルやケミカルリサイクルの比率が低い原因の一つは、プラスチックの種類が非常に多く分別が十分になされていないことである。そこで我々は誰でも簡単に廃プラの分別が可能となる小型、軽量の近赤外分光方式の樹脂判別ハンディセンサー RICOH HANDY PLASTIC SENSOR B150を開発した。センサーのサイズは長さ154mm、高さ75mm、幅50mm、重量は約285g、片手で使用できるハンディサイズであり、分光ユニットはMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) ミラー、凹面回折格子を組み合わせたリコー独自構成で大幅な低コスト化を実現した。

ABSTRACT

The ever-increasing amount of plastic waste has become a global concern. One of the reasons for the low ratio of material and chemical recycling of plastic waste in Japan is that there are numerous types of plastics and they are not sorted correctly. To address this, we have developed the RICOH HANDY PLASTIC SENSOR B150, a small, light-weight, near-infrared spectroscopic portable plastic identification sensor that enables anyone to easily sort plastic waste. The sensor is 154 mm × 50 mm × 75 mm (LWH) and weighs about 285 g, which is sufficiently small for one-handed use. Ricoh's unique structure combines a MEMS mirror and concave grating for the spectroscopy unit, which significantly reduces the cost.

* リコーデジタルサービスBU 日本極統括 環境・エネルギー事業センター
Environment & Energy Business Center, Japan Management Division, RICOH Digital Services BU

** リコーインダストリアルソリューションズ株式会社 オプティカル事業部
Optical Business Center, Ricoh Industrial Solutions Inc.

本稿は、S&T出版株式会社に利用許諾を受け、「リサイクル材・バイオマス複合プラスチックの技術と仕組」に掲載した記事を一部使用した。

1. 背景と目的

近年、廃プラスチックの問題は世界的な社会課題の一つとなっている。日本国内におけるプラスチックの年間生産量は1045万トン、廃プラの総排出量は824万トン、廃プラの内訳として家庭等から出る一般系廃プラが419万トン、工場などから排出される産業系廃プラが405万トンである。廃プラ総排出量の約13%、107万トンは埋め立てや単純焼却処分され、残りの約87%、717万トンはマテリアルリサイクル（再生利用）、ケミカルリサイクル（原料・モノマー化、ガス化、油化など）、エネルギー回収（セメント原・燃料化、ごみ発電、RPF、ガス化、油化など）で有効利用されており、それぞれの比率は25%、4%、71%となっている¹⁾。マテリアルリサイクルは、廃プラをプラスチックのまま原料にして新しい製品を作るリサイクル手法である。ケミカルリサイクルは、廃プラを還元剤として使用することや、モノマー化、ガス化、油化などにより化学工業製品の原料としてリサイクルする手法である。エネルギー回収は、廃プラの固形燃料化や、ごみ焼却熱をエネルギー利用するなど石油代替の燃料として利用するリサイクル手法である²⁾。国内の廃プラの多くはこれらの手法で有効利用されてはいるが、特に欧州においては焼却を伴うエネルギー回収はリサイクルとは認められておらず、いかにエネルギー回収の比率を下げ、マテリアルリサイクル、ケミカルリサイクルの比率を向上していくかが課題となっている。マテリアルリサイクルやケミカルリサイクルには程度の差はあるが必ず樹脂の種類を分別する必要があり、多くの種類があるプラスチックを一般の人では分別できないことがマテリアルリサイクルやケミカルリサイクルの比率が低い原因の一つとなっている。そこで我々は「樹脂判別をいつでもどこでも」という開発コンセプトで、誰でも簡単に廃プラの分別が可能な小型、軽量の樹脂判別ハンディセンサー RICOH HANDY PLASTIC SENSOR B150 (Fig. 1) を開発した。



Fig. 1 Exterior image of RICOH HANDY PLASTIC SENSOR B150.

2. 樹脂判別ハンディセンサーの概要

樹脂判別の原理は近赤外線を用いた反射型の分光方式である。光学式の樹脂判別方法には近赤外線、中赤外線を使った分光方式やハイパースペクトルカメラ、ラマン分光を利用した方式、THz波を使用したTHz分光など多くの方式がある^{2,3)}。それぞれの方式に特徴はあるが、「樹脂判別をいつでもどこでも」という開発コンセプトの実現のため、小型化・低コスト化に優れた近赤外分光方式を採用し開発を行った。センサーのサイズは長さ154mm、高さ75mm、幅50mm、重量は約285g、片手で使用できるハンディサイズでスマートフォンとBluetoothで無線接続して使用する。

Fig. 2にセンサーの構成概略図を示す。センサーから近赤外線を照射し樹脂サンプル内部からの拡散反射光を取得することで樹脂の判別を行っている。センサーの構成としては近赤外光を照射するハロゲン

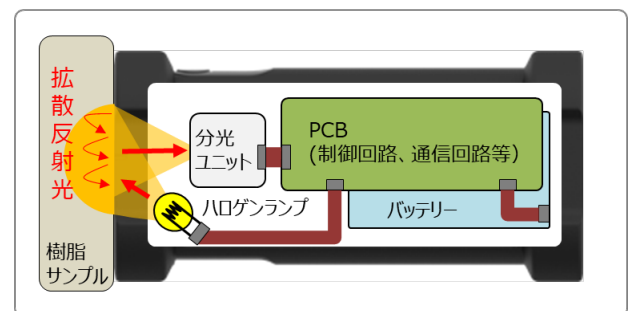


Fig. 2 Schematic diagram of RICOH HANDY PLASTIC SENSOR B150.

ンランプ、測定樹脂サンプルからの拡散反射光のスペクトルを取得するための分光ユニット、それらを駆動する制御回路、スマートデバイスとの通信を行う通信回路等を含むPCB (printed circuit board)、バッテリー等から構成される。

Fig. 3にセンサーの全体システムの概要を示す。測定は樹脂サンプルをセンサーの測定部に接触させ近赤外線を照射し、樹脂サンプルからの拡散反射光のスペクトルを取得する。取得した反射スペクトルはスマートフォンへ転送され専用アプリに登録されている登録樹脂データ（基準樹脂のスペクトルデータ）との相関係数比較を実施し樹脂判別を行う。判別結果はアプリ画面に表示されるとともに音声でも出力される。判別結果の詳細には本センサーで取得したスペクトルデータも含まれておりアプリ画面上で確認することが可能となっている。測定から判別結果の表示までは約2秒である。現在は、製造され樹脂製品の約8割を占めるPP（ポリプロピレン）、PE（ポリエチレン）、PVC（ポリ塩化ビニル）、PS（ポリスチレン）、PET（ポリエチレンテレフタレート）、ABS（アクリロニトリルブタジエンスチレン）、PC（ポリカーボネート）の7樹脂にPA（ポリアミド、ナイロン）、PMMA（ポリメタクリル酸メチル、アクリル）、POM（ポリオキシメチレン、

ポリアセタール）、PBT（ポリブチレンテレフタレート）、PETG（グリコール変性PET）やバイオマス樹脂であるPLA（ポリ乳酸）を加えた13樹脂の判別が可能となっている。樹脂種に関してはこれら以外にもユーザー登録機能で追加が可能となっている。判別精度としては弊社の基準樹脂を使用した評価において上記13樹脂の誤判別率が0.1%以下である。また、本センサーは混合樹脂の比率算出が可能となっている。例えばPP/PEの混合樹脂に対して±10%以内の精度で混合比率を算出することができる（弊社の基準PP、PE樹脂を使用した評価において）。一方で、近赤外分光方式を用いているために測定できないサンプルもある。例えば、黒色系樹脂など顔料としてカーボンブラックを使用している材料に関してはカーボンブラックが近赤外線を吸収するため樹脂材料特有の吸収スペクトルを得ることができず判別は困難である。また、食品パッケージ等に使用されるアルミ蒸着付きフィルム等も樹脂層からの十分な吸収スペクトルを得ることができないため判別が難しい。

3. 樹脂判別ハンディセンサーの開発

3-1 分光ユニット

Fig. 4に分光ユニットの構成概略図を示す。分光ユニットは主に入射スリット、凹面回折格子、MEMSミラー、出射スリット、InGaAs単素子PD (Photo Diode) から構成されている。InGaAs（インジウム・ガリウム・ヒ素）は近赤外線の検出に用いられる化合物半導体である。MEMSミラーや凹面回折格子に関しては弊社の画像機器や車載機器で培ったMEMSプロセス技術、精密光学設計・製造技術を応用し開発した。Fig. 5に小型分光器に用いられるポリクロメータの構成を示す。一般的な小型の近赤外線分光器は凹面回折格子とInGaAsアレイセンサを組み合わせたポリクロメータ⁴⁾の構成が従来から用いられているが、InGaAsアレイセンサが高価なことやアレイセンサに合わせて凹面回折格子をフ

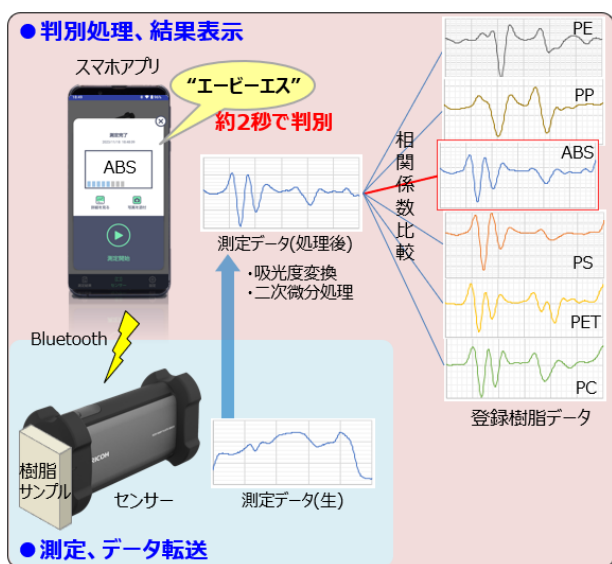


Fig. 3 System overview of RICOH HANDY PLASTIC SENSOR B150.

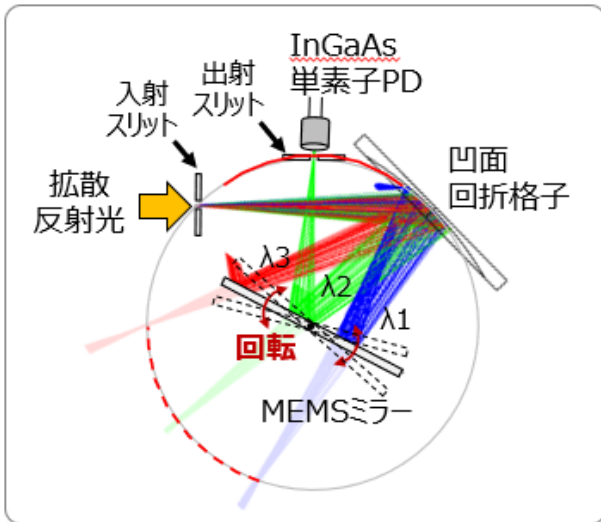


Fig. 4 Schematic diagram of spectroscopic unit.

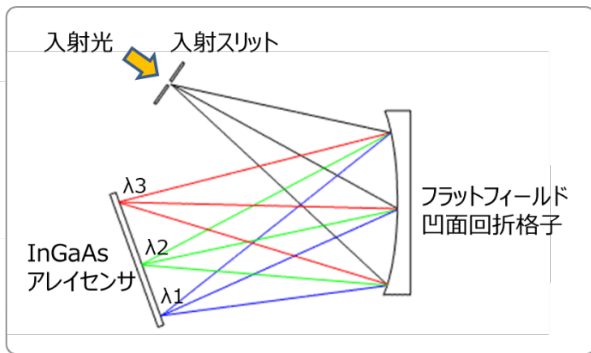


Fig. 5 Schematic diagram of polychromator.

ラットフィールド化⁴⁾する必要があることなどは、近赤外分光器の製品価格が高くなる一因であった。

本センサーの分光ユニットの特長はMEMSミラーを用いてInGaAs単素子PDで分光スペクトルを取得可能にしたことである。Fig. 4を用いて分光のメカニズムを説明する。サンプルからの拡散反射光は入射スリットから凹面回折格子へ導かれ分光される。分光された光はMEMSミラーで反射されるとともに出射スリット上で走査される。Fig. 4中の λ_1 , λ_2 , λ_3 は近赤外線領域の異なる波長を表している。MEMSミラーの角度によって出射スリットを通過する波長が変化するため、MEMSミラーを走査させながらInGaAs単素子PDの出力信号を時系列で取得することで測定サンプルの分光スペクトルデータを得

ることができる。MEMSミラーは1秒間に100回以上の走査が可能であり、1回の樹脂サンプル測定で複数回の平均スペクトルを取得することでノイズを低減し判別精度を向上している。

3-2 樹脂判別性能評価

Fig. 6に本センサーで取得した基準樹脂13種の拡散反射スペクトルの二次微分値を示す。二次微分処理にはSG（サビツキーゴーレイ）法を用いており、拡散反射スペクトルからオフセットおよびノイズ除去の処理を実施している。また、二次微分処理により樹脂の吸収ピークが明確となりFig. 6では樹脂特有の吸収ピークが下に凸のピークとなっている。このように各樹脂において吸収ピークの波長や大きさが異なるためこれらを利用して樹脂判別を行っている。各樹脂の主要な吸収ピークで波長間隔が最も近いものがPEの1395nm, 1430nm間の35nmであり、Fig. 6中に示した。これらの波長を分離できるように分光ユニットの波長分解能を25nm以下に設定した。Fig. 7に本分光ユニットにレーザー光（980, 1310, 1550nm）を入射した場合の分光スペクトルを示す。また、Fig. 8に各波長の半値全幅（FWHM）

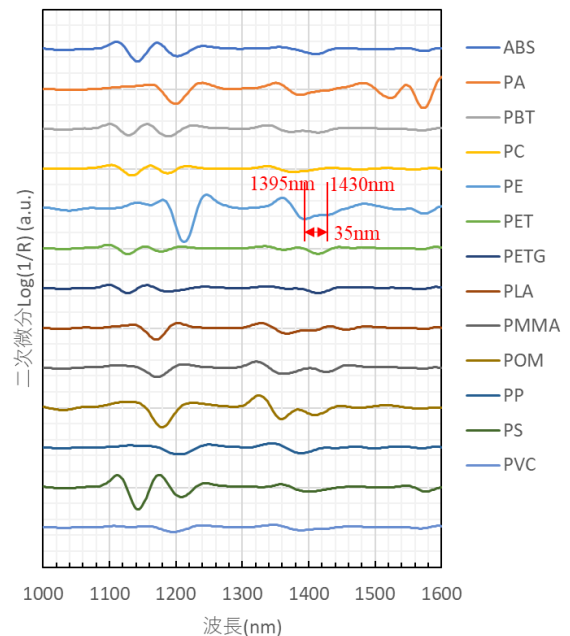


Fig. 6 2nd derivative diffuse reflectance spectra of 13 reference resins measured by B150.

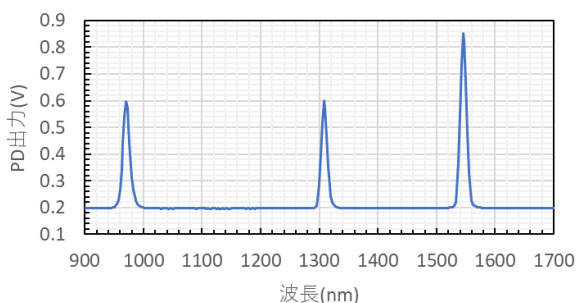


Fig. 7 Spectrum when laser light with wavelength of 980, 1310 and 1550 nm are incident.

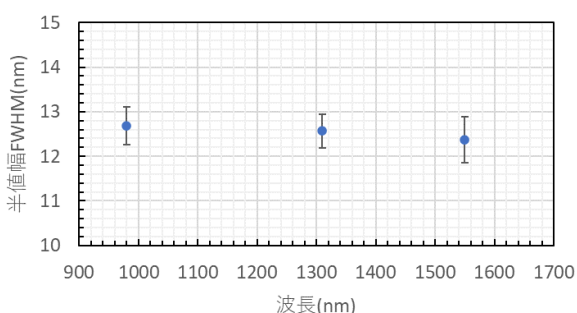


Fig. 8 FWHM when laser light with wavelength of 980, 1310 and 1550 nm are incident.

の平均値 (N=165) とそのばらつき範囲 ($\pm 3\sigma$) を示す。Fig. 8のFWHMより、各波長ともばらつきも含めて目標の波長分解能25nmを満足している。

本センサーの樹脂判別性能としては評価用の基準樹脂に対して誤判別率が0.1%以下を目標値とした。Table 1に基準樹脂13種の各々の相関係数の一覧表を示す。各樹脂に対して2番目に相関係数が高いセルを黄色でハッチングした。これらの基準樹脂13種の中ではABSとPSの相関係数が0.96と最も高く、基準樹脂の中ではこの2樹脂が誤判別の可能性が最も高

Table 1 Correlation coefficient between 13 reference resins.

	ABS	PA	PBT	PC	PE	PET	PETG	PLA	PMMA	POM	PP	PS	PVC
ABS	1.00	0.39	0.18	0.27	0.49	0.04	0.24	-0.31	-0.17	0.05	0.38	0.96	0.39
PA	0.39	1.00	0.60	0.29	0.54	0.00	0.52	-0.10	-0.03	0.44	0.86	0.17	0.94
PBT	0.18	0.60	1.00	0.79	0.02	0.71	0.91	0.12	0.26	0.54	0.43	0.03	0.72
PC	0.27	0.29	0.79	1.00	-0.26	0.54	0.61	0.13	0.22	0.27	0.21	0.28	0.40
PE	0.49	0.54	0.02	-0.26	1.00	-0.13	0.27	-0.34	-0.36	0.08	0.69	0.34	0.50
PET	0.04	0.00	0.71	0.54	-0.13	1.00	0.83	0.26	0.33	0.42	-0.04	-0.04	0.21
PETG	0.24	0.52	0.91	0.61	0.27	0.83	1.00	0.03	0.12	0.48	0.43	0.07	0.65
PLA	-0.31	-0.10	0.12	0.13	-0.34	0.26	0.03	1.00	0.86	0.68	0.08	-0.37	0.09
PMMA	-0.17	-0.03	0.26	0.22	-0.36	0.33	0.12	0.86	1.00	0.78	0.04	-0.22	0.14
POM	0.05	0.44	0.54	0.27	0.08	0.42	0.48	0.68	0.78	1.00	0.46	-0.15	0.58
PP	0.38	0.86	0.43	0.21	0.69	-0.04	0.43	0.08	0.04	0.46	1.00	0.19	0.89
PS	0.96	0.17	0.03	0.28	0.34	-0.04	0.07	-0.37	-0.22	-0.15	0.19	1.00	0.16
PVC	0.39	0.94	0.72	0.40	0.50	0.21	0.65	0.09	0.14	0.58	0.89	0.16	1.00

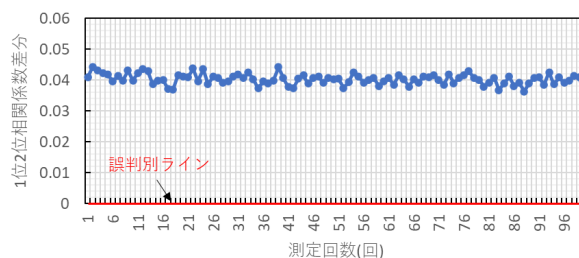


Fig. 9 Difference of correlation coefficient between ABS and PS in 100 times of ABS measurements.

い。各樹脂を100回測定し、相関係数が最も高い1位樹脂と2番目に高い2位樹脂との相関係数の差分の平均値と差分の標準偏差を用い、これらが正規分布である仮定の下で相関係数の差分が負となる（1位と2位の相関係数が逆転する）確率を算出し、それを誤判別率と定義した。確率の算出には、ExcelのNORM.DIST関数を使用した。ABS樹脂を100回測定した場合、1位のABS、2位のPSに対するそれぞれの相関係数の平均値は0.999、0.959であった。Fig. 9にABS100回測定での1位樹脂ABS、2位樹脂PSの相関係数差分を示す。グラフのx軸上が1位樹脂と2位樹脂の相関係数が逆転し誤判別が発生するラインである。計算上の確率としては目標の誤判別率0.1%に対して 5.7×10^{-119} であり、目標値をクリアしている。またTable 1より、他の基準樹脂12種に関しては2位樹脂との相関係数差がABSとPS間の相関係数差よりも大きいため、誤判別率の目標値は問題なくクリアできている。

次に、比率算出に対する評価結果について説明する。比率算出の目標値は $\pm 10\%$ とした。比率算出の評価はPP、PEの混合比率（重量比）が25:75、50:50、75:25の混練樹脂を作成して行った。熱分析（DSC）によってPP、PEの組成比を算出した結果はそれぞれ24.5:75.5、50:50、77.8:22.2であり、この値を真値とする。比率算出は重回帰分析の一種である改重回帰分析⁵⁻⁸⁾を用いて行い、PP、PE 50:50の混練樹脂の比率算出値が50%となるように補正を行っている。Fig. 10にPP、PE混練樹脂の比率算出結果を示す。

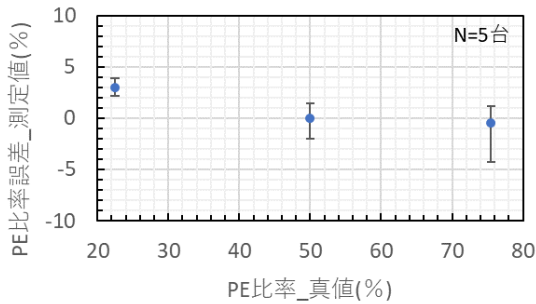


Fig. 10 Ratio calculation results of PP and PE mixed resin.

横軸はPE比率の真値，縦軸は算出したPE比率と真値との差分を示しており，センサー5台分のデータである．Fig. 10より，PP，PEの混錬樹脂に関しては算出したPE比率は真値の±5%以内であり，目標値の±10%を満足する結果が得られた．

4. センサーの活用事例

4-1 工場端材，廃材

PoC検証の中で延べ160社以上へのセンサー貸し出しを実施した．貸出先としては廃プラ排出元である製造業者の比率が約6割と非常に高かった．2022年4月に施行されたプラスチック資源循環法（プラ新法）により，廃プラの中間処理業者やリサイクル業者だけでなく排出元の企業でのリサイクルへの取り組みの意識が非常に高まっており，廃プラ分別に対するニーズの高さが明らかとなった．実際に貸し出しを行ったフィルムメーカー様においてはFig. 11に示すようなフィルムロールの端材が毎月約7トン発生しており，これらの端材をセンサーで分別する



Fig. 11 Photos of end materials of film rolls.



Fig. 12 Photos of packing materials, wrapping materials, cushioning materials, parts trays for parts and materials.

ことにより，これまで廃棄物処理費用が必要であった廃プラが有価物となり年間で約400万円のコスト削減効果が得られた．また，これまで廃棄されていた廃プラがリサイクルされることにより特にPEに関してはマテリアルリサイクル率が80%向上した．さらにそれらに伴い年間のCO₂排出量も約170t低減効果が見込まれている（CO₂排出量削減効果の算出には環境省の排出係数：2.55tCO₂/tを使用した⁹⁾）．一方で，現状は多くの工場や事業所においてFig. 12に示すような部品や材料の梱包材，包装材，緩衝材，部品トレイなどの多くが焼却処分されている．これらの廃プラは素材が不明で種類も多く分別できないことが原因の一つである．本センサーを使用してこれらの廃プラを分別しマテリアルリサイクル率の向上を検討する企業も増加している．

4-2 分別作業の効率化

電化製品の分解リサイクルを行っている業者では本センサーを使用することで分別作業の効率化が可能となった．電化製品の多くのプラスチック部品には材料表示の刻印が施されている¹⁰⁾が，これらの刻印は必ずしも目視しやすい部分にあるわけではなく，部品のサイズによっては刻印のサイズも小さいため，刻印を探して読み取ることに時間がかかっていた．作業によってはルーペ等で刻印を確認する必要がある．また，同じ形の部品であっても樹脂材料が異なる場合がありそのような部品は必ず目視での確認が必要となる．本センサーを使用すれば誰でも約2秒での判別が可能であり，刻印を探して目視で判断

する場合と比較すれば大幅に効率化でき、手作業での単純な判別ミスも防止することができる。

4-3 外部検査の代替

材料の品質管理のため樹脂部品の検査を外部業者に委託しているお客様も多く、外部検査は費用と時間がかかることが課題であり、本センサーで簡易的に検査を代替でき外部検査の回数を低減できる効果がある。実際に外部検査を委託すると1サンプルあたり数万円程度の費用と1~2週間程度の検査期間が必要となるため、本センサーを使用してその場で簡易検査することによりこれらのコストを低減することが可能となる。また、海外からの部品購入時などに材料間違いや悪質な材料変更等を納品時に簡易確認できることから導入を検討いただいたお客様もいる。

4-4 教育向け

別のセンサー活用例として小学校での環境教育向けに使用した例を紹介する。福井県小浜市での海ごみ学習にて内外海小学校の5、6年生が浜辺で海洋プラスチックごみを収集しセンサーを使って分別を行った。Fig. 13にその様子を示す。実際にセンサーを手に持ち海洋プラスチックごみの分別を体験することで、リサイクル可能な素材が廃棄され自然環境を汚染している現実や、センサーを使用することで



Fig. 13 Beach cleanup activity during environmental education at Uchitomi Elementary School.

回収した廃プラを簡単に分別できること、分別できた廃プラはリサイクル可能なことなどを体験として記憶に定着できる。次世代における廃プラリサイクルの啓蒙活動の一つと期待されている。

5. 今後の展開

機能向上に関してお客様からのニーズが高いものに低密度PE (LDPE) と高密度PE (HDPE) の判別、混合比率の精度向上、積層フィルムの判別、黒色樹脂の判別などがある。LDPE、HDPEの判別に関しては追加のアルゴリズムの開発を進めている。比率測定や積層フィルム測定など、より高精度が求められる用途に関してはセンサーのS/N向上や分解能向上などハード的な改良について検討を進めている。黒色樹脂判別に関しては近赤外分光では原理的に難しいため、中赤外領域の分光技術やラマン分光など異なる方式の技術開発が必要であり今後の開発課題である。

大量生産・大量消費・大量廃棄を前提とするリニアエコノミー (LE) から資源の効率的・循環的な利用を図りつつ付加価値の最大化を図るサーキュラーエコノミー (CE) へと転換していく¹⁾中でプラスチックのリサイクルはますます重要になる。廃プラのリサイクル率を向上していくためには樹脂判別をより身近で当たり前のことにしていく必要があり、センサーの更なる小型化・低価格化についても開発を進め、一般のオフィスや自治体、文教市場などまだ開拓できていない市場へ展開し樹脂判別のすそ野を拡大していかなければならない。欧州ではDPP (Digital Product Passport) の市場導入、法制化が検討されており、それに伴って様々な製品、材料管理のプラットフォームが開発されている。本センサーはそれらプラットフォームへの情報インプットのためのエッジデバイスとして活用でき、プラットフォームと連携可能なシステム、サービスの開発を進めていく必要がある。

6. まとめ

廃プラスチックの資源循環促進という社会課題の解決に貢献可能な技術として小型、軽量、低価格な樹脂判別ハンディセンサーを開発した。これまで樹脂判別は知識や経験のある人にしかできない作業であり様々な現場で誰もがすぐに廃プラを判別することは難しかったが、本センサーでは現場で容易に樹脂判別を行うことが可能となった。また、本センサーをお客様の現場でご活用いただき、マテリアルリサイクル率の向上、廃プラ処理費用の削減、CO₂排出量の削減、廃プラ分別作業の効率化、検査業務の効率化、教育用途での使用など様々な有効活用事例が得られ、お客様のSDGsや脱炭素化への取り組み、業務の生産性や効率の向上に貢献可能であることを実証した。

謝辞

本センサーは、環境省から令和元年度二酸化炭素排出抑制対策事業費等補助金（脱炭素社会を支えるプラスチック等資源循環システム構築実証事業）の交付決定を受けた一般社団法人日本有機資源協会（JORA）より、『石油由来プラスチックの代替素材である再生可能資源への転換及び社会実装化又はプラスチック等のリサイクルプロセス構築及び省CO₂化を行う事業』に要する経費の一部を補助する事業として認められ、令和元年、および令和二年に開発費の一部補助を受けて開発を行った。

参考文献

- 1) 一般社団法人プラスチック循環利用協会: プラスチックリサイクルの基礎知識 2023.
- 2) 河済博文: 光学識別法を用いる次世代ソーティング機器の開発動向, 廃棄物資源循環学会誌, Vol. 29, No. 2, pp. 125-132 (2018).
- 3) J. Yu et al.: New Terahertz Wave Sorting Technology to Improve Plastic Containers and Packaging Waste Recycling in Japan, *Recycling* 2022, 7, 66.
- 4) 喜多敏昭: フラットフィールド・ポリクロメータ用機械刻線収差補正凹面回折格子の開発, 分光研究, 第32巻, 第3号, pp. 173-182 (1983).
- 5) 吉田晋一ほか: ポリエチレン, ポリプロピレン, ポリスチレンからなるリサイクルプラスチックの組成比率決定を目指した重回帰分析の適用, 鳥取県産業技術センター研究報告, No. 21 (2018).
- 6) 松下晃ほか: 改重回帰分析によるアクリロニトリル-ブタジエン-スチレン共重合樹脂中のアクリロニトリル, ブタジエン, スチレン混合率の測定, *BUNSEKI KAGAKU*, Vol. 55, No. 8, pp. 561-566 (2006).
- 7) 三井利幸, 奥山修司: 改重回帰分析 (DCR) によるガスクロマトグラムからの灯油と軽油の混合比の決定, *Journal of Computer Aided Chemistry*, Vol. 6, pp. 23-29 (2005).
- 8) 松下晃ほか: 改重回帰分析法による混合色素試料中の低混合比成分の定量と未知成分の判定, *BUNSEKI KAGAKU*, Vol. 56, No. 5, pp. 349-354 (2007).
- 9) 環境省: 算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧, p. 8.
- 10) 一般財団法人 家電製品協会 製品アセスメント専門委員会: 家電製品のプラスチック等部品の表示およびリサイクルマークのガイドライン第3版, pp. 23-27 (2013).
- 11) 経済産業省: 資源循環経済政策の現状と課題について, https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/resource_circulation/pdf/001_05_00.pdf

注1) Excelは米国Microsoft Corporationの米国およびその他の国における登録商標です。