

3 種類の波長の近赤外半導体レーザーによるプラスチック種類識別技術の開発(II)

和泉電気(株) 稲田 宏治、○松田 里菜、野村 光俊、田門 立身、鷹尾 健、藤田 俊弘

Development of a New Sensing Technology for Plastic Identification by Using Three Infrared Laser Diodes Oscillating Different Wavelength (II)

Koji Inada, ○Rina Matsuda, Mitsutoshi Nomura, Tatsumi Tamon, Takeshi Takao, and Toshihiro Fujita
IDEC IZUMI Corporation

Abstract : In the current recycling system, a plastic identification is carried out using a spectrometer that recognizes a near-infrared spectrum of each plastic. A spectrometer is superior in accuracy but disadvantaged in cost-efficiency, maintenance and so on. To solve these problems, we pay attention to a different optical absorption peak of each plastic at wavelength around 1700nm and studied alternative plastic identification technology using InGaAsP laser diode. We have proven the feasibility of this plastic identification technology for transparent PET, PVC and PS using a prototype of the equipment featuring three different wavelength InGaAsP laser diode. This paper describes our experimental study and verifies the effectiveness of the new plastic identification technology using InGaAsP laser diode.

1. はじめに

20 世紀における大量生産・大量消費・大量廃棄型の社会システムは、経済発展と同時に地球規模での環境問題を引き起こしている。このためこれまでの経済社会システムを改め、製品の製造、生産、流通という動脈産業と同様に、廃棄物の回収、解体、再生利用する静脈産業をより一層発展させ、双方のバランスがとれた循環型経済社会へ転換することが重要な課題となっている^[1-4]。

ここで、現在われわれの日常生活に欠くことのできないプラスチックに注目すると、資源有効利用促進法や容器包装リサイクル法などで廃プラスチックは資源として有効に活用することが求められている。

図1は2000年度の我が国における主なプラスチック原材料生産実績を示したものである。現在生産されているプラスチックの種類は非常に多く、例えば容器包装リサイクル法では、このように多種存在するプラスチックから成る容器包装に対してリサイクルの対象となるかどうかの表記を行うことを定めている。

回収された廃プラスチックは、PET ボトルではプラスチック成形材料として再利用する材料リサイクル、その他プラスチックでは油化やガス化、高炉原料化、コークス炉原料化として利用するケミカルリサイクル、固形燃料化により熱回収するサーマルリサイクルなどの方法により再資源化が行われている。中でも材料リサイクルでは再生品の品質を保つために混入している他のプラスチックとの分別が非常に重要である。

また、ケミカルリサイクル、サーマルリサイクルにおいても、PVC (ポリ塩化ビニル)のような熱分解の際に有毒な塩化水素を発生したり、設備の腐食を引き起こす危険性があるプラスチックは事前に分別しておく必要がある。この分別は、多くの場合人の目視に頼っており、材質表示や成形時に発生する特徴を見分けることによって、PVCとPETは何かか人手で分けられているが未だ十分ではなく、それ以外のプラスチックは目視では分別できないのが現状である。

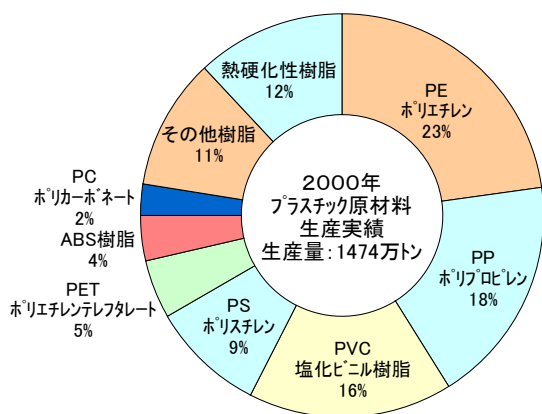


図1 2000年度プラスチック原材料生産実績

一方、プラスチック種類識別の自動化の手段としては、分光光度計で近赤外吸収スペクトルを測定し^{[5][6]}分析する方法が一般的である^{[7]-[13]}。この方法は非常に高精度であり広く用いられているが、装置が大型かつ高価であり、またメンテナンスに手間がかかり取り扱いが複雑であるなどの問題点がある。そこでプラスチックの円滑なリサイクルを行うためには、耐環境性に優れ、安価で使い易い手段により種類識別を自動化し、FA(Factory Automation)における生産工程のようなシステムを構築することが必要である。

そこでわれわれはすでに近赤外領域におけるプラスチック固有の光吸収特性に着目し、世界で初めて半導体レーザ（以下 LD）を用いたプラスチックの種類識別技術の基礎開発を行い報告を行ってきた^[14-16]。ここではその成果に基づき、3種類の波長の半導体レーザを用いたプラスチック種類識別装置の試作および検証を行ったのでその詳細について報告する。

2. 半導体レーザによるプラスチック識別技術の検討

図1において生産量の多いPE(ポリエチレン)系プ

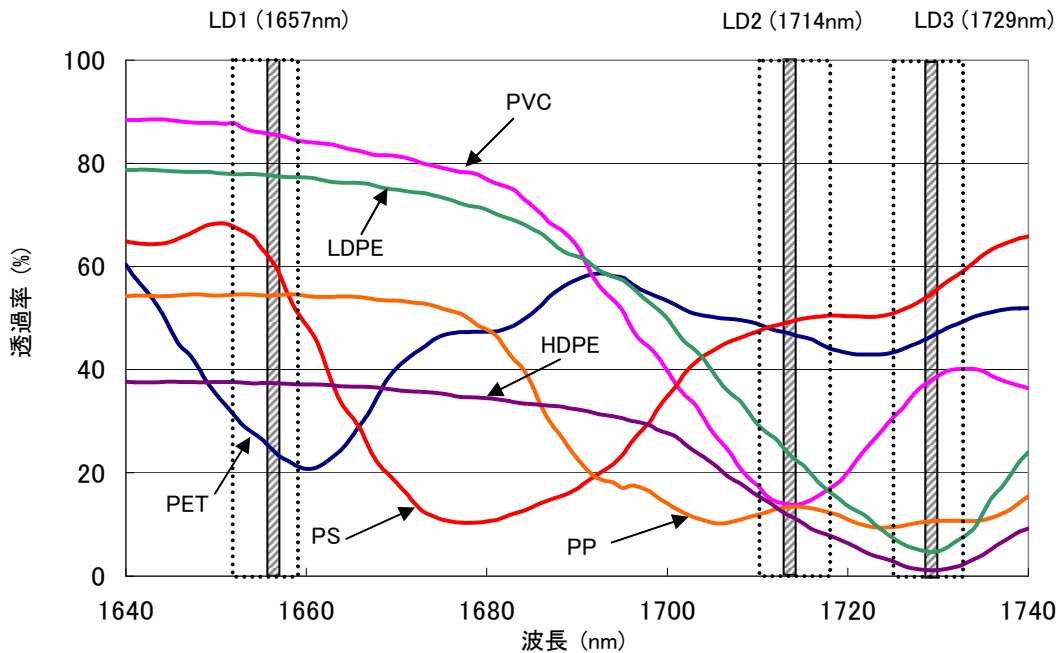


図2 分光光度計で測定した波長範囲 1640~1740nm におけるプラスチックの光吸収スペクトルの拡大図

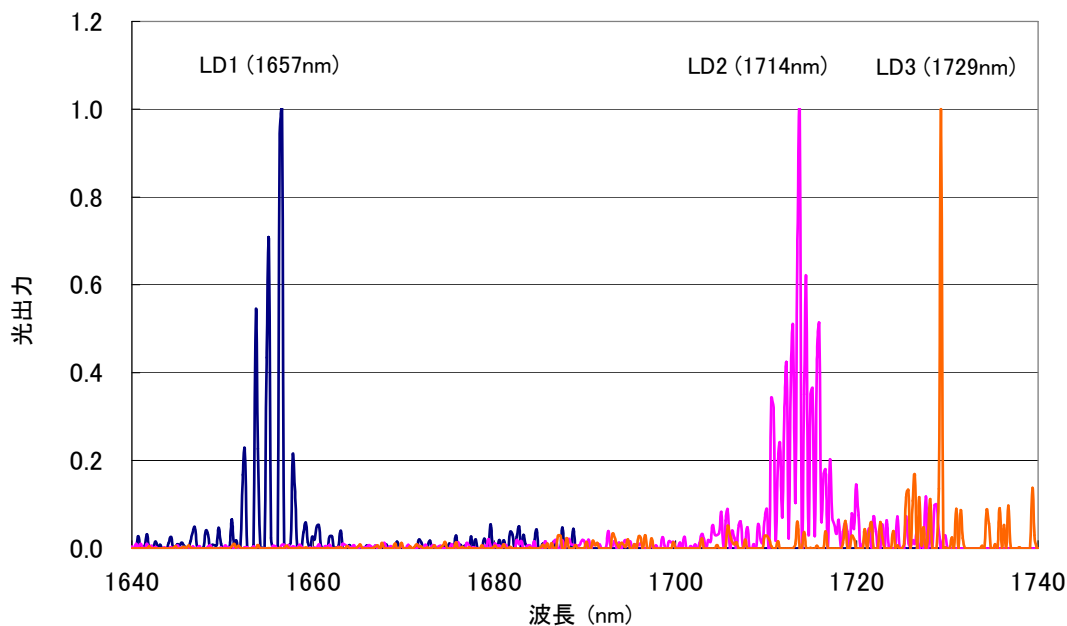


図3 プラスチック種類判別装置に用いた LD1、LD2、LD3 の光スペクトルアナライザで測定した発振スペクトル

プラスチックである HDPE(高密度ポリエチレン)と LDPE(低密度ポリエチレン)、PP(ポリプロピレン)、PVC、PS(ポリスチレン)、PET の光吸収スペクトルを波長 1640~1740nm の範囲において分光光度計で透過率を測定した結果を図 2 に示す。被測定物としてのサンプルの色は原材料の関係で HDPE、LDPE、PP は白色不透明で PET、PVC、PS は無色透明、厚みはすべて 2mm である。図 2 より C-H 結合の伸縮振動に起因する^[17]各プラスチックの透過率の波長依存性は、それぞれの種類により明らかに異なっていることがわかる。従って、この光吸収スペクトルが特徴をあらわす波長付近の透過率を比較することでプラスチックの種類識別が可能であると考えられる。

図 3 は 3 種類の InGaAsP 系 LD の発振スペクトルを、周囲温度 25°C において光スペクトルアナライザにて測定した結果である。この図 3 から、LD1、LD2、LD3 は縦マルチモードで発振しており、ピーク波長はそれぞれ約 1657nm、1714nm、1729nm であり、包絡線スペクトルの半値全幅は 10nm 程度であることがわかる。

以下では、このような特性の LD を用いてプラスチック種類識別装置の試作を行い、PET と PVC、PS をサンプルとして種類識別についての検証を行ったので詳しく説明する。

3. 3種類の半導体レーザによるプラスチック識別実験

図 4 は試作を行ったプラスチック種類識別装置の実験系を示したものであり、3 種類の LD からの光をハーフミラーにより同一光軸上に重ね合わせ、サンプルに照射し、後方に配置したミラーとサンプルからの直接反射光をフォトダイオード (以下 PD) で受光する光学系を採用している。ミラーを用いる理由は、透明な PET、PVC、PS など直接反射光の少ないサンプルにおいて、十分な受光光量を得られるためである。

光源に用いた LD を図 5 に示すように時系列的に順次点灯させることによって、PD で光電変換された電気信号 (受光信号) の処理回路は 1 系統で対応可能となり、装置の小型化に繋がっている。なおこの技術は、我々が開発したフルカラーセンサ^[18]における赤、緑、

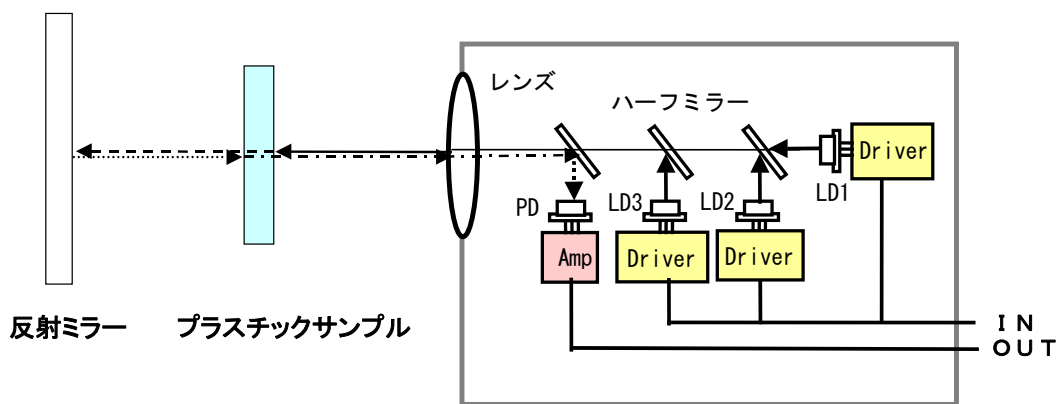


図 4 プラスチック種類識別装置を用いた実験系

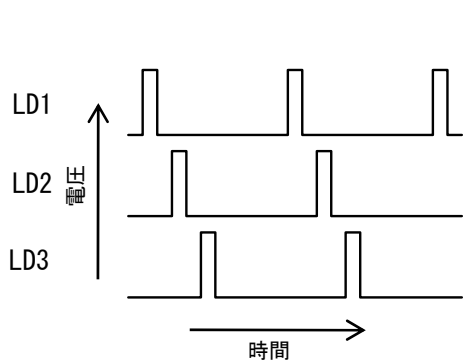


図 5 3 種類の LD の時分割点灯駆動パルス列

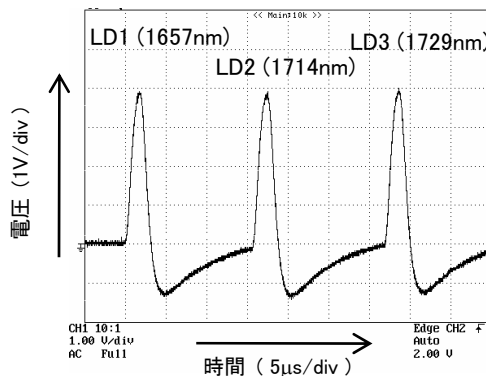
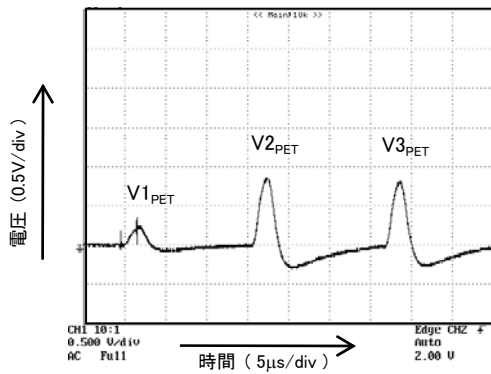
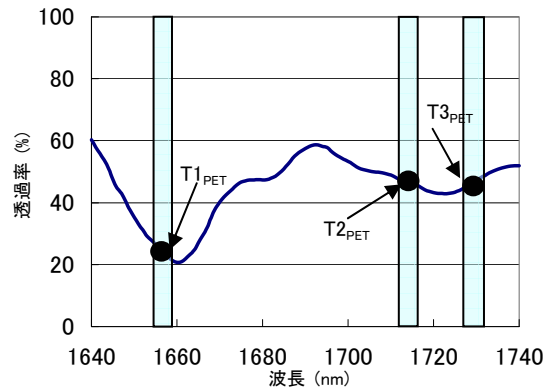


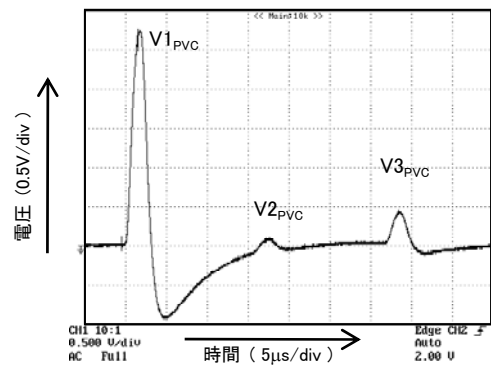
図 6 サンプルが無い時の LD1、LD2、LD3 のオシロスコープにおける電圧レベル



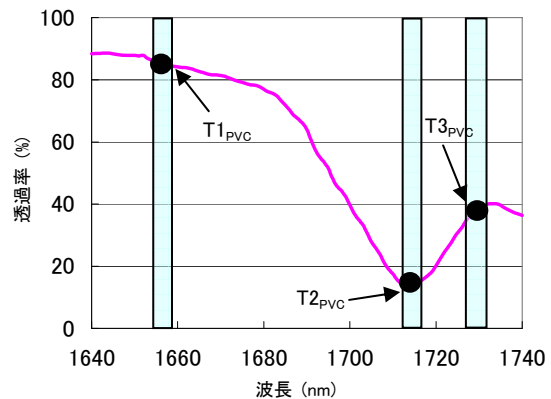
(a-1) オシロスコープで測定したプラスチック種類識別装置におけるPETの受光信号



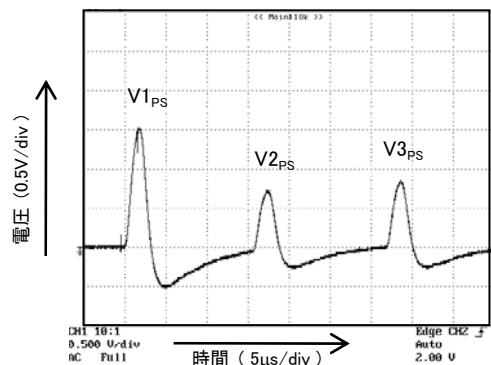
(a-2) 分光光度計で測定したPETの分光透過率



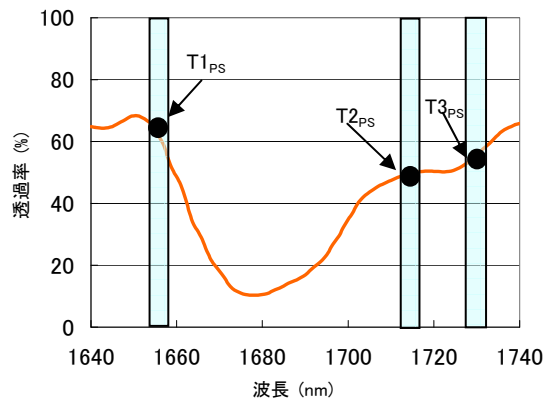
(b-1) オシロスコープで測定したプラスチック種類識別装置におけるPVCの受光信号



(b-2) 分光光度計で測定したPVCの分光透過率



(c-1) オシロスコープで測定したプラスチック種類識別装置におけるPSの受光信号



(c-2) 分光光度計で測定したPSの分光透過率

図7 (a-1)、(b-1)、(c-1): プラスチック種類識別装置における各プラスチックの受光信号をオシロスコープで測定した結果
(a-2)、(b-2)、(c-2): 分光光度計で測定した分光透過率の測定結果

青のLEDを順次パルス点灯させて測定対象物に照射し、それぞれの光源に対する反射光の強度比から色を識別するというアルゴリズムを応用したものである。今回の実験では、それぞれのLDの光に対する受光信号をオシロスコープで測定し、サンプルの違いによる信号の変化を比較した。

図6に示すようにまず、各LDの電流を制御し発光量を一定にした後、測定位置にサンプルを配置し、受光信号の変化を測定した。これらの測定結果は、分

光光度計で透過率を測定した結果と照合され、プラスチック種類識別の可否について検証を行った。

4. 実験結果及び考察

図7に、試作したプラスチック種類識別装置を用い測定した結果と、分光光度計で測定した結果を示す。同図(a-1)は試作した装置でPETを測定した結果であり、光源であるLD1、LD2、LD3の各波長に対応し

て得られた受光信号の波形とその電圧ピーク値を $V1_{PET}$ 、 $V2_{PET}$ 、 $V3_{PET}$ で示している。また(a-2)は PET を分光光度計で測定した結果であり、各 LD の発振波長付近での透過率を $T1_{PET}$ 、 $T2_{PET}$ 、 $T3_{PET}$ で示している。その他のサンプルである PVC と PS についても同様である。

まずサンプルが PET の場合について、試作した装置で得られた受光信号の電圧ピーク値と、分光光度計で得られた透過率の関係は次のようになっている。

$$V1_{PET} < V2_{PET} \cong V3_{PET} \text{ -----(1)}$$

$$T1_{PET} < T2_{PET} \cong T3_{PET} \text{ -----(2)}$$

(1)式と(2)式より、二つの測定結果が同じ傾向を示していることがわかる。

また、PVC、PS をサンプルとした場合にも、以下に示すように二つの測定結果は同じ傾向を示す。

$$V1_{PVC} \gg V2_{PVC} < V3_{PVC} \text{ -----(3)}$$

$$T1_{PVC} \gg T2_{PVC} < T3_{PVC} \text{ -----(4)}$$

$$V1_{PS} > V2_{PS} < V3_{PS} \text{ -----(5)}$$

$$T1_{PS} > T2_{PS} < T3_{PS} \text{ -----(6)}$$

これらの結果をグラフにまとめたものを図 8 に示す。

図 8 から、これら 3 種類のプラスチックに対する分光光度計での測定データと、今回試作したプラスチック種類識別装置による測定データは同じ傾向にあり、それぞれが異なった特徴を示すため、これらの種類識別が簡単かつ確実に実現できることがはっきりとわかる。

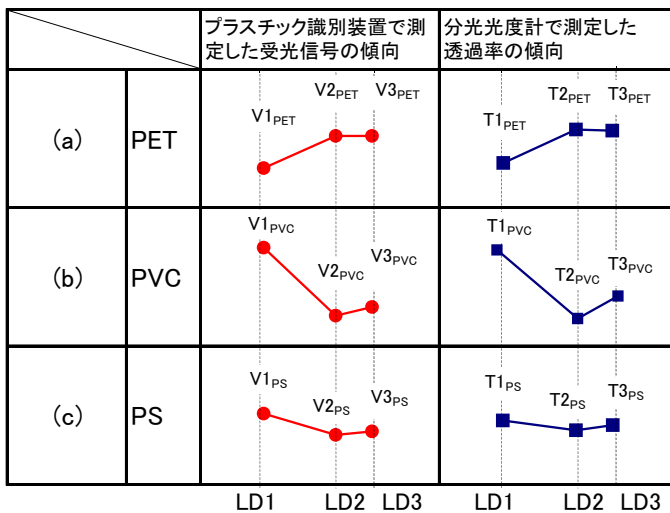


図 8 各プラスチックにおいて分光光度計で測定した透過率とプラスチック種類識別装置で測定した受光信号の波長依存性

図 9 には、PP、HDPE、LDPE を分光光度計で測定した透過率の結果を、図 8 の場合と同様にまとめたものを示す。ここで、(e)の HDPE と(f)の LDPE の結果は全く同じ傾向を示すことがわかる。その理由は、この両者は成形時の加圧条件が異なるだけで原料は同じであることによる。従って、現在プラスチックを分別する際には、HDPE と LDPE は同じ PE として扱われているが、今後はひとまとめにして考える。

図 8 と図 9 より、PET、PVC、PS、PP、PE の 5 種類の分光光度計による測定結果からみた、LD のそれぞれの波長における透過率の傾向を比較した場合、個々に異なる特徴が確認できるため、これらのプラスチックも含めた種類識別も可能である。

5. 従来のプラスチック識別技術との比較

以上述べてきたように、今回 3 種類の異なる波長の LD を用いて試作したプラスチック種類識別装置による識別が可能であることが実証できた。表 1 に、従来技術の一つである赤外分光分析装置とわれわれの提案する LD を用いたプラスチック種類識別装置の比較表を示す。表 1 より、サイズ 1/40 以下 (体積比)、応答速度 1/20 倍、光源寿命約 33 倍などの点でプラスチック種類識別装置が従来にない特長を有していることが明らかである。また、従来より飛躍的に安価に実現できるため、今後プラスチックの種類を的確に識別し効率的なりサイクルを促進する上で非常に有用な手段であると考えられる。

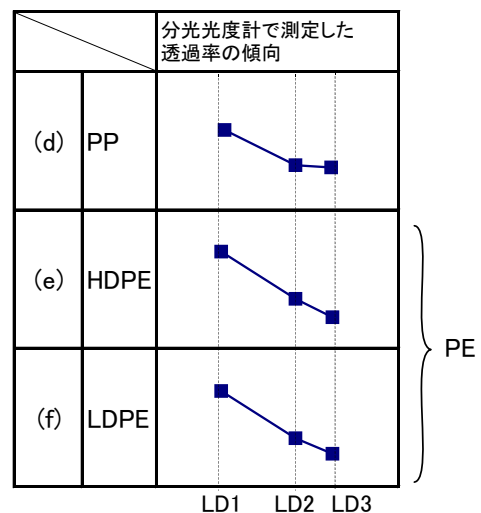


図 9 各プラスチックにおいて分光光度計で測定した透過率の波長依存性

測定方法	(a)従来技術	(b)今回提案する技術	比較
	分光光度計(代表例)	プラスチック種類識別装置	(b)/(a)
サイズ W×L×H (mm)	350×300×200 ～3500×2000×4000	50×100×100	体積比 1/40以下
応答速度 (msec)	1	0.05	1/20
光源の寿命 (交換)	白熱球:約3,000hr (必要)	LD:約100,000hr (不要)	約33
消費電力 (W)	150	5	1/30
価格帯 (万円)	約500～3000	約50	価格比 1/10～1/60

表1 従来技術の一つである赤外分光分析法と半導体レーザーを用いたプラスチック種類識別装置との比較



図10 小型プラスチック種類識別センサのプロトタイプ概観図

6. おわりに

今回われわれは、プラスチックの光吸収特性に着目し、近赤外領域に発振波長を持つ3種類のInGaAsP系LDを用いたプラスチック種類識別装置の試作を行い、この装置による種類識別が可能であることを実証した。今後は図10に示す小型プラスチック種類識別センサとして実際の廃棄物選別ラインでの評価などを行うことにより、インバース・マニユファクチャリング並びに循環型社会構築に向けて推進する所存である。

謝辞

今回の技術開発は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の産業技術研究開発実用化技術開発事業として推進しているものであり、関係各位のご指導、ご支援に対し深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] レスター R. ブラウン: 地球白書 1999-2000、ダイヤモンド社 (1999)
- [2] 環境庁: 平成 10 年版環境白書
- [3] 酒井伸一: 循環・廃棄のインテグレーション、産業と環境、第 28 巻、第 4 号、pp.36-39 (1999)
- [4] Yoshikawa, H., Sustainable Manufacturing In The 21st Century. Zero Emissions Research Initiative Symposium. (1996)
- [5] 尾崎幸洋、河田聡: 近赤外分光法、日本分光学会 (1998)
- [6] 錦田晃一、岩本令吉: 赤外法による材料分析、講談社 (1986)
- [7] Miller, C.E., Near-Infrared Spectroscopy of Synthetic Polymers. Applied Spectroscopy Reviews., 26(4): pp.277-339; (1991)
- [8] Weyer, L.G., Near-Infrared Spectroscopy of Organic Substances. Applied Spectroscopy Reviews., 21(1&2): pp.1-43; (1985)
- [9] Bledzki, A.K., and Nowaczek, W., Identification of plastics in waste materials and methods for their recycling. International Polymer Science and Technology., 21: pp.73-80; (1994)
- [10] Eisenreich, N., Herz, J., Kull, H., Mayer, W., Rohe, T., Fast On-Line Identification Of Plastics By Near-Infrared Spectroscopy For Use In Recycling Processes. SPI ANTEC 96(Society Of Plastics Engineering Annual Technical Conference 96)., : pp.3131-3135; (1996)
- [11] Eisenreich, N., and Rohe, T., Analysis:Identifying Plastics. Kunststoffe plast europe., 86(2): pp.31-32; (1996)
- [12] Florestan, J., Lachambre, A., Mermilliod, N., Boulou, J.C. and Marfisi, C., Recycling of plastics: Automatic identification of polymers by spectroscopic methods. Resources, Conservation and Recycling., 10: pp.67-74; (1994)
- [13] Huth-Fehre, Th., Feldhoff, R., Kantimm, Th., Quick, L., Winter, F., Cammann, K., van den Broke, W., Wienke, D., Melssen, W. and Buydens., NIR – Remote Sensing and Artificial Neural Networks for Rapid Identification of Post Consumer Plastics. Journal of Molecular Structure., 348.,: pp.143-146; (1995)
- [14] 田門立身、藤井祥二、稲田宏治、本村幸一、西原一寛、藤田俊弘: 半導体レーザーを用いた赤外吸収によるプラスチック識別に関する検討、第 16 回センシングフォーラム、計測自動制御学会、 pp.147-152 (1999)
- [15] 稲田宏治、松田里菜、藤原千鶴、田門立身、鷹尾健、藤田俊弘: 3 種類の波長の近赤外半導体レーザーによるプラスチック種類識別技術の開発、第 17 回センシングフォーラム、計測自動制御学会、 pp.233-238 (2000)
- [16] Koji, Inada., Rina, Matsuda., Chizuru, Fujiwara., Mitsutoshi, Nomura., Tatsumi, Tamon., Ikkan, Nishihara., Takeshi, Takao., Toshihiro, Fujita., Identification of plastics by Infrared absorption using InGaAsP Laser Diode. Resources, Conservation & Recycling., 33/2: pp.131-146; (2001)
- [17] Miller, R.G.J., Willis, H.A., Quantitative Analysis In The 2-μ Region Applied To Synthetic Polymers. J. Appl.Chem., 6: pp.385-391; (1956)
- [18] 野村光俊、稲田宏治、鷹尾健、藤田俊弘: フルカラーセンサにおける LED の色合成と制御技術の開発、第 16 回センシングフォーラム、計測自動制御学会、 pp.153-158 (1999)