

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

和泉電気(株) 稲田 宏治、松田 里菜、藤原 千鶴、田門 立身、鷹尾 健、藤田 俊弘

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

Koji Inada, Rina Matsuda, Chizuru Fujiwara, Tatsumi Tamon, Takeshi Takao, and Toshihiro Fujita
IDEC IZUMI Corporation

Abstract : It is considered to be very important to establish automated recycling process to reuse waste materials such as plastics, in addition to existing production system. Currently infrared spectrometer, which is big and expensive, is widely utilized for plastic identification, however, there exists strong needs to develop other solution with compact, durable and easy-to-use sensor with reasonable cost performance. We have previously proposed a new technology utilizing infrared laser diode for plastic detection, which laser oscillation wavelength nearly matches to the optical absorption spectrum peak of plastic. We have further developed a technology based on new concept of plastic identification that three or more laser diodes are utilized for identification of many kinds of plastics. In this paper, detailed experimental data and analysis is presented for the first time.

1. はじめに

これまでの大量生産、大量消費、大量廃棄の結果、われわれは深刻な廃棄物問題を抱えており、わが国でも最終処分場の不足や有毒ガスの発生など様々な環境問題に直面している^[1]。これらの問題を解決するため廃棄物処理法や容器包装リサイクル法、家電リサイクル法などの各種リサイクルに関する法律が制定されており、廃棄物の適正な処理とともに限りある資源を有効に活用することが求められている^{[2][3]}。それに伴い、インバース・マニュファクチャリング（逆工場）の考え方があるように、生産性を優先した従来の生産システムから回収・分解・分別・再利用・生産といったリサイクルプロセスにも注目した生産システムへの転換が望まれている^[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のリサイクルについて注目してみると、その処理方法としては、固形燃料化により熱回収するサーマルリサイクルや、油化やガス化、また高炉還元剤として利用するケミカルリサイクルなどがある。このような処理を行う場合、例えば廃プラスチック中に PVC（ポリ塩化ビニル）が含有されていると、熱分解の際に塩素が発生し、設備の腐食を引き起こす危険性がある。このため、プラステ

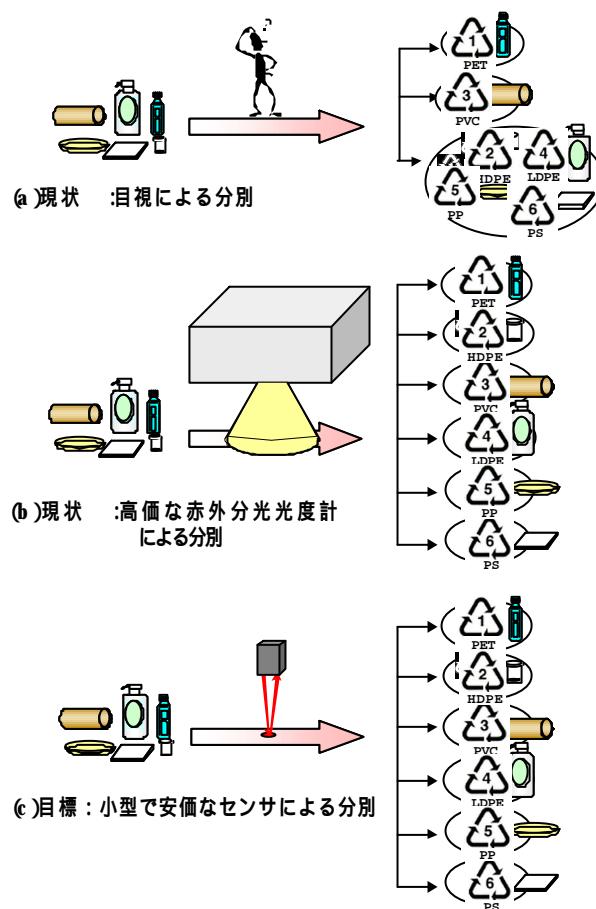


図1. プラスチック識別方法の現状と目標

ックを分別する必要があるが、ほとんどの廃棄物処理施設では図 1(a)に示すように人の目視に頼っているのが現状である。PVC と PET (ポリエチレンテレフタレート) は目視により何とか人手で分けられているが未だ十分ではなく、また、それ以外のプラスチックは現状目視では分別できない状態である。

プラスチックの種類識別の手段としては、図 1(b)に示すような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、オンラインでの使用を考えると、装置が大型かつ高価であり、また取り扱いが複雑である等の問題点がある。プラスチックのリサイクルにおける種類識別を自動化し、通常の FA (Factory Automation) 環境のようなシステムを実現するためには、図 1(c)に示すようなより小型で耐環境性が高く、安価で使いやすい種類識別のための手段が必要である。

われわれは、すでに半導体レーザー (以下 LD) を用いたプラスチックの有無検出に関する技術について報告した^[14]。ここではその内容をさらに発展させ、それぞれのプラスチックが近赤外領域に固有に持つ光吸収特性に着目し、3 種類の波長の LD を用いることでプラスチックの種類識別を可能とする技術を世界ではじめて開発したので報告する。

表1. 光吸収スペクトルの測定を行った6種類のプラスチックサンプル

| | 材質 | SPIコード | 厚み (mm) | 色 |
|-----|----------------------|--------|---------|-----|
| (a) | PET ポリエチレンテレフタレート | | 2 | 透明 |
| (b) | HDPE 高密度ポリエチレン | | 2 | 白色 |
| (c) | PVC ポリ塩化ビニル | | 2 | 透明 |
| (d) | LDPE 低密度ポリエチレン | | 2 | 半透明 |
| (e) | PP ポリプロピレン | | 2 | 半透明 |
| (f) | PS ポリスチレン | | 2 | 透明 |

2. プラスチックの近赤外光吸収スペクトル

赤外分光光度計によりプラスチックの種類識別を行う装置では、近赤外波長領域約 800 ~ 2500nm における光スペクトルの吸収パターンから、その材質が何であるかが識別されている。図 2(a) ~ (f) は 6 種類のプラスチック PET、HDPE、PVC、LDPE、PP、そして PS についての透過率を分光光度計で測定した結果である。被測定物としてのサンプルの厚みはすべてが 2mm でそれぞれの材質および色は表 1 の通りである。

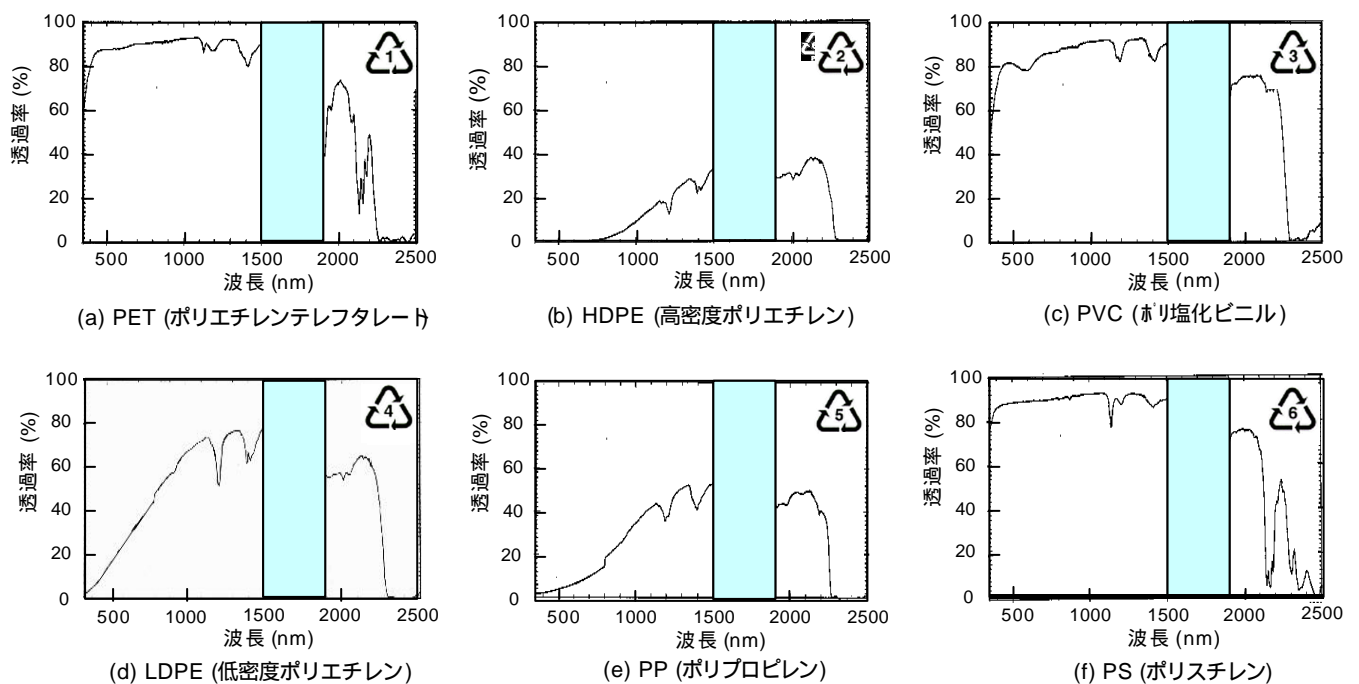


図 2. 各種プラスチックの光吸収スペクトル測定結果

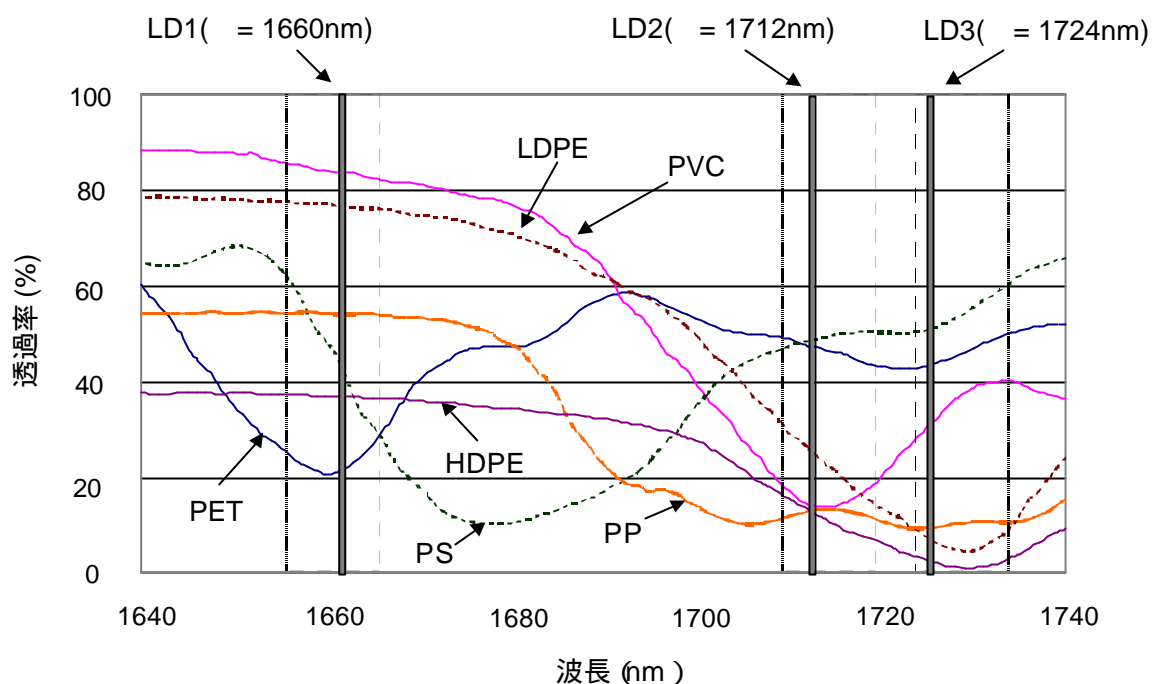


図3．図2に示した6種類のプラスチックの光吸収スペクトルの波長範囲1640~1740nmにおける拡大図

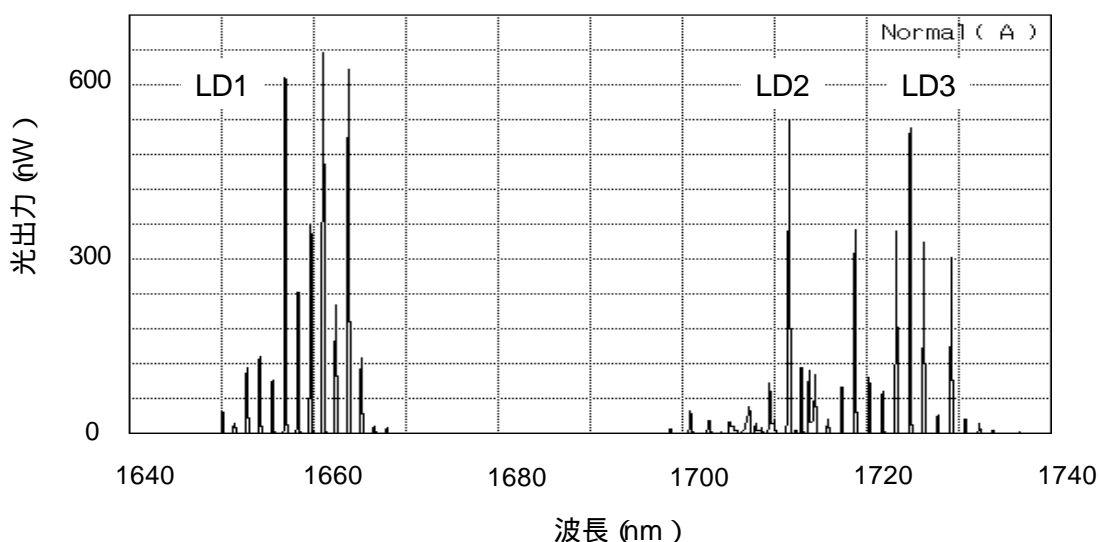


図4．プラスチックの光吸収測定に用いた3種類のLDの発振スペクトル

図2からわかるように、すべてのプラスチックに共通して、波長1700nm付近に特徴的な光吸収が存在することが確認できる。これらの吸収ピークは、プラスチックに含まれるC-H結合の伸縮振動に由来するものである^{[15][16]}。われわれは、この1700nm付近の吸収ピークに着目してLDを用いたプラスチック識別技術の検討を行った。

3. LDによるプラスチック識別技術の検討

図2に示した6種類のプラスチックの吸収スペクトルを、波長1640~1740nmの範囲で図3に示す。

これより、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。例えば、PETの光吸収ピークである1660nm近傍とPVCの光吸収ピークである1715nm近傍を見ても、それぞれの波長においてこれら2つのプラスチックの吸収特性は全く異なる。すなわち、発振波長1660nmのLDの光を照射すると、PETでは大きく吸収されるがPVCにはあまり吸収されない。また、1715nmのLDではPETに比べPVCでは大きく吸収されることがわかる。従って、これら2つの発振波長のLDを用いて光吸収の割合を比較するこ

とにより、PET と PVC の識別は容易に行えると考えられる。また、さらに異なった発振波長の LD の光を追加して照射することで、より精度の高い識別や多くの種類のプラスチックにおける識別が可能となる。

そこで、今回われわれは 3 種類の発振波長の InGaAsP 系 LD を光源として、各波長におけるプラスチックの吸収特性を測定した。これら LD の発振スペクトルを周囲温度 25 において測定した結果を図 4 に示す。この図から、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 1660nm、1712nm、1724nm 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。また、図 3 にはこれら 3 種類の LD の波長を示している。

以下では、このような特性の LD を用いて、実際のプラスチックサンプルとして PET と PVC について光吸収の測定を行ったので詳しく説明する。

4. 3 種類の LD によるプラスチック識別の実験

LD によるプラスチック種類識別を行うため、図 5 に示す実験系において、3 種類の LD の光がプラスチックにより吸収された後の受光光量の測定を行った。この実験系は、実際にオンラインで使われる状況を想定してあるため、サンプルからの反射光を測定する、いわゆる“反射型”の光学系とした。ここで用いた LD は前述の LD1、LD2、LD3 である。

それぞれの LD からの光はレンズによりビームサイズ約 7mm にコリメートされている。これらの光はハーフミラーを用いて同一光軸上に重ね合わせ、反射ミラーを用いサンプルに照射し、透過した光を反射ミラーで再度サンプルを透過させた後、光パワーメータで光量を順次測定する光学系となっている。図 4 で示した LD の発振スペクトルは、図中に示す光スペクトルアナライザにより測定されている。

ここで、各 LD のプラスチックサンプルへの入射光量が等しくなるように LD の駆動電流を制御してある。またプラスチックの光吸収の効果が顕著にあらわれるように、LD の光が 2 度サンプルを透過する光学系を採用した。また、実験に用いたサンプルの

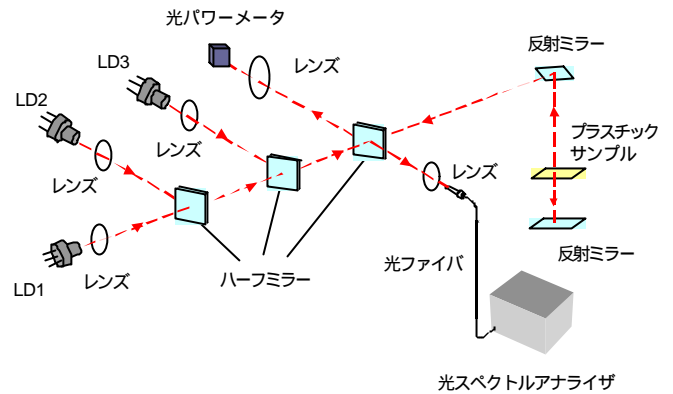


図5. 3種類の波長のLDによりプラスチック種類識別を行うための実験系

PET および PVC の厚みはそれぞれ 1mm、2mm、3mm で、顔料や染料による光の反射や散乱による影響を避けるため透明なものを用いた。このような光学系を用いることにより、分光光度計による透過率測定結果との比較が可能となる。

5. 実験結果及び考察

PET および PVC のサンプルを、図 5 に示した光学系で測定した結果をそれぞれ図 6(a-1)、(b-1)に示す。図 6(a-2)、(b-2)は分光光度計で厚み 2mm の同一サンプルを測定した結果であり対比のために示す。図 6(a-1)において LD1、LD2、LD3 のサンプル透過後の光パワーメータでの受光光量を P_{1PET} 、 P_{2PET} 、 P_{3PET} とすると、サンプルの厚みに関わらず、

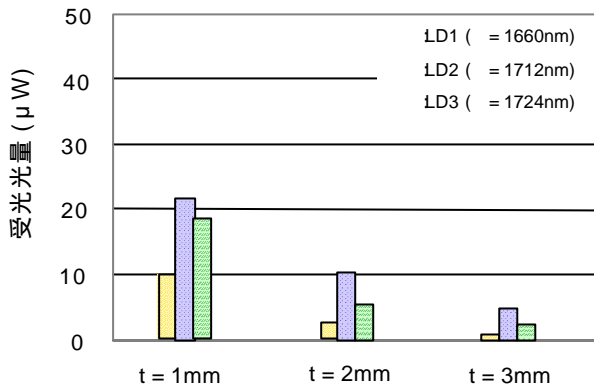
$$P_{2PET} > P_{3PET} > P_{1PET}$$

となっており、この関係は図 6(a-2)に示す分光光度計で測定した LD1、LD2、LD3 の波長における透過率測定結果と同じ傾向となっている。

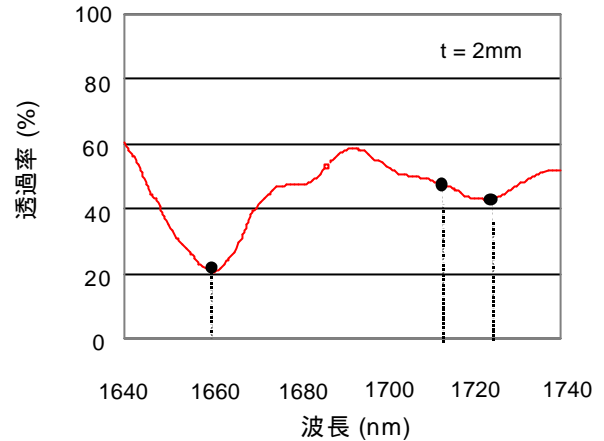
また、図 6(b-1)に示す PVC の測定結果においても、LD 1、LD2、LD3 のサンプル透過後の光パワーメータでの受光光量を P_{1PVC} 、 P_{2PVC} 、 P_{3PVC} とすると、サンプルの厚みに関わらず、

$$P_{1PVC} >> P_{3PVC} > P_{2PVC}$$

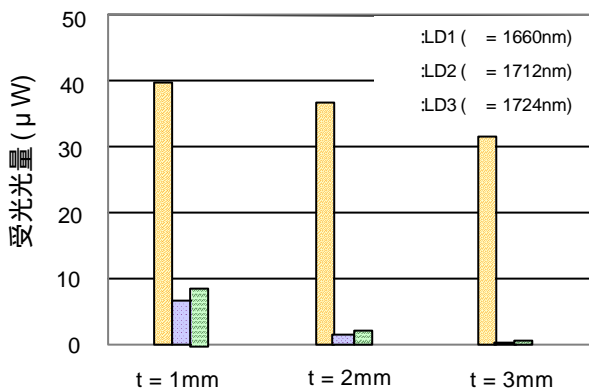
となっており、ここでも図 6(b-2)に示す分光光度計による測定結果と同じ傾向が得られた。従って、これらの結果から、LD1、LD 2、LD3 をサンプルに照射しその透過光の受光光量の比較を行うことで、PET



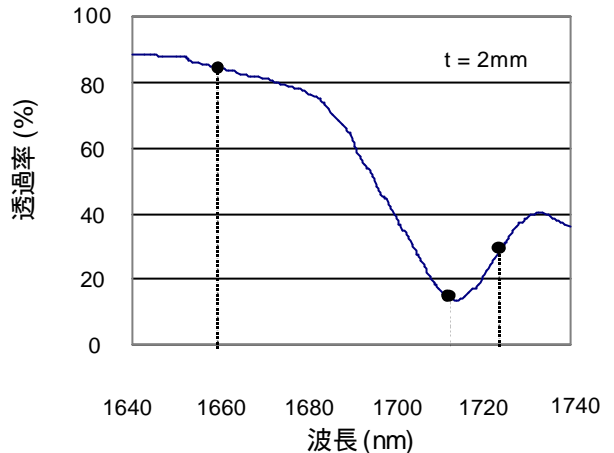
(a-1). PETをサンプルとした場合の各波長に対する受光光量の測定結果



(a-2). (a-1)で測定した厚み2mmのサンプルにおける分光透過率の測定結果



(b-1). PVCをサンプルとした場合の各波長に対する受光光量の測定結果



(b-2). (b-1)で測定した厚み2mmのサンプルにおける分光透過率の測定結果

図6. 図5に示した実験系にて厚み1mm、2mm、3mmのPET、PVCをサンプルとして受光光量を測定した結果(a-1)、(b-1)と分光光度計にて測定した分光透過率(a-2)、(b-2)

とPVCを簡単かつ確実に識別できることを実験的に明らかにすることができた。

このプラスチック識別の手法は他のプラスチックについても適用でき、色々な波長のLDの光を照射することにより個々のプラスチックの光吸収スペクトルに応じた受光光量が得られるため、各波長における受光光量の強度比などの傾向からプラスチックの種類識別が可能となる。そのため、図5に示した光学系において今後LDの波長を変化させ、各種のプラスチックの測定を行う予定である。

また、分析を行う上での留意事項としてプラスチックの複屈折性がある。プラスチックを成形する際の条件により、プラスチックの分子配向が発生することで複屈折性を生じるが^[17]、光源として用いているLDはほぼ直線偏光で発振しているため、これら

の関連性の評価が重要になるとと思われる。図6に示したように、LDを用いることによりプラスチック識別が可能であることは明らかであるため、今後更なる評価、分析を行うことで、より精度の高いプラスチック種類識別技術が実現できると考えられる。

6. 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、LDを用いることによりプラスチックの種類識別が可能であることがわかった。表2に、従来のプラスチック識別技術の一つである赤外分光分析法とわれわれの提案するLDの光吸収による方法との比較表を示す。表2より、サイズ1/100(体積比) 応答速度10~1000倍、光源寿命約33倍などの点でLDによる識別方法が従来にない特長を有していることが明らかであり、また従来よりも

表2．従来の赤外分光分析法と、今回提案する半導体レーザー光吸収法のプラスチック種類識別技術の比較

| | ㉑ 従来技術 | ㉒ 今回提案する技術 | 比較 |
|----------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------|
| 測定方法 | 赤外分光分析法(代表例) | 半導体レーザー光吸収法 | (b)/(a) |
| サイズ | 500 × 500 × 200 _[mm] | 100 × 100 × 50 _[mm] | 体積比 1/100 |
| 応答速度 | 遅い (1 ~ 1/100秒) | 速い (1/1000秒) | 10 ~ 1000 |
| 光源の寿命 および交換 | 白熱球 約3,000hr | LD 約100,000hr | 約33 |
| | 交換 必要 | 交換 不要 | |
| 消費電力 | 400W | 5W | 1/80 |
| 価格帯 | 約500 ~ 1000万円 | 約50万円(推定) | 価格比 1/10 ~ 1/20 |

飛躍的に安価に実現できるため、今後プラスチックの効率的なリ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。

7. 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、近赤外領域の3種類の波長のInGaAsP LDを用いることでプラスチックの種類判別が可能であることを初めて実証した。ここで取り上げたプラスチックは、PET、HDPE、PVC、LDPE、PP、PSの6種類であるが、世の中には他にも数多くのプラスチックが存在する。半導体レーザーを用いたプラスチックの種類識別技術が確立すれば、これらすべてのプラスチックを効率よくリサイクルすることが可能になると考える。

現実の廃棄物としてのプラスチックは、一般的には着色されていたりゴミや水分の付着があるため、実際の環境装置への応用に対しては、これらの影響まで含めた信号処理アルゴリズムの関係が非常に重要である。今後これらの開発を進めることにより、半導体レーザーを用いたプラスチック種類識別技術の実用化を目指す所存である。

謝辞

今回の技術開発は、通商産業省並びに新エネルギー・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] Foster, G.N., Row, S.B. and Griskey, R.G., Infrared Spectrometry of Polymers in the Overtone and Combination Regions., J. Appl. Polym Sci., 8: pp.1357-1361; (1964)
- [16] 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)
- [17] 廣恵章利、本吉正信：プラスチック物性入門、日刊工業新聞社(1973)