

# 5 波長の DFB 半導体レーザーを用いた微小プラスチック種類の高速度選別技術開発

平尾 忠悦<sup>1</sup>、稲田 宏治<sup>1</sup>、藤田 俊弘<sup>1</sup>、細藤 慎司<sup>2</sup>、原 正純<sup>2</sup>、伊藤 隆文<sup>2</sup>

1. IDEC 株式会社, 2. 株式会社サタケ

## Development of a New Sensing Technology for high-speed Plastic Identification by using Five Infrared DFB Laser Diodes.

Tadaetsu Hirao<sup>1</sup>, Koji Inada<sup>1</sup>, Toshihiro Fujita<sup>1</sup>, Shinji Saito<sup>2</sup>, Masazumi Hara<sup>2</sup>, and Takafumi Ito<sup>2</sup>

1. IDEC Corporation, 2. SATAKE Corporation

**Abstract** : Mass production and mass consumption society have caused serious environmental problems, such as air pollution, sea pollution, and global warming. In order to overthrow this critical situation and to build the sustainable society, it is necessary to solve the problem about energy and resources. In such a situation, we have so far continued the development paying attention to recycling of plastics by using infrared laser diodes. In this paper, we report the possibility of realization of high-speed plastic identification technology of identifying much more kinds of plastics by using five infrared laser diodes.

### 1. はじめに

これまでの世界経済の発展は、大量生産、大量消費によるところが大きく、発生した廃棄物は埋め立てや焼却を行うことにより、土壌汚染、海洋汚染、大気汚染、CO<sub>2</sub>による地球温暖化等の世界規模での深刻な環境問題を生み出している。また、資源の枯渇による原油や材料価格の高騰、異常気象による世界的な食料不足も引き起こされたため、省エネやリサイクルの重要性も確実に認識されてきている。

わが国では、20世紀後半から21世紀初頭にかけて、循環型社会形成推進基本法が制定され、これを基本的な枠組みとして、資源有効利用促進法、廃棄物処理法や個別のリサイクルに関する法律が次々と制定、改正されてきている。リサイクルに関する個別の法律としては、まず初めに容器包装リサイクル法が施行され、その後家電リサイクル法や自動車リサイクル法と続き、今年度は環境・気候変動がテーマのひとつとなった洞爺湖サミットが開催されたこともあり、今後も環境問題に関して新たな法律が制定されることは十分

考えられる。

このような時代の流れを背景として、われわれは真の循環型社会を実現するためには、図1に示すように、これまで発展を遂げてきたものづくりの自動化生産プロセスである動脈産業と同様に、リサイクルプロセスである静脈産業も発展する必要があると考え、プラスチックのリサイクルに着目してきた。

プラスチックのリサイクルには大きく分けて3つの方法があり、a)固形燃料等により最終的に熱回収す

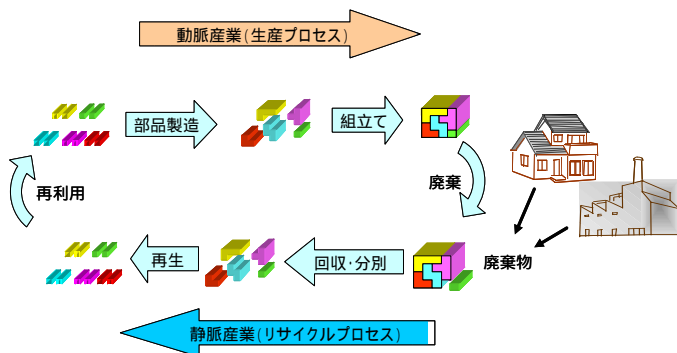


図1. 循環型社会における生産プロセスとリサイクルプロセスの流れ

るサーマルリサイクル、b)油化、ガス化、高炉還元剤として利用するケミカルリサイクル、そしてc)材料自体を再利用するマテリアルリサイクルである。最も望まれる方法はマテリアルリサイクルであるが、実現のためにはプラスチックの高精度な選別が必要である。また、他の方法の場合でも、有毒ガスの発生や設備の腐食等の観点から、プラスチックの選別は重要な課題となっているが、廃棄物処理施設では未だに人による目視に頼っている部分が多く、選別の精度は十分とは言えない。

プラスチック材料は、赤外吸収スペクトルを測定することにより判別できるため<sup>[1][2]</sup>、一部の大規模なリサイクル施設では、回折格子を用いた赤外分光光度計が導入されプラスチックの自動選別が行われているが、この装置には次のような問題点が挙げられる。複雑な光学系で構成されているため大形で、振動や衝撃に弱い、信号処理速度が遅い、メンテナンス性が悪い、非常に高価である。従って、赤外分光光度計は、装置の性格上厳しい耐環境性が要求されるオンラインセンシングには本来あまり適していない。そのため上述したようなプラスチックのリサイクルプロセスの自動化を実現するためには、より小形・高速で耐環境性が高く、かつ使いやすいセンサを開発することが望まれている。

図2に、PET(ポリエチレンテレフタレート)、PE

(ポリエチレン)、PVC(ポリ塩化ビニル)、PP(ポリプロピレン)、PS(ポリスチレン)、ABS(アクリロニトリルブタジエンスチレン)の反射スペクトルを示す。

この図より、すべてのプラスチックには波長1700nm近傍にC-H結合の伸縮振動に由来する光吸収ピークが存在することがわかる<sup>[3][4]</sup>。

われわれは、このプラスチック固有の光吸収特性に着目し、世界で初めて3種類の波長の半導体レーザー(以下LD)を用いたPET、PE、PVC、PP、PSの種類判別技術開発を行い、成果を挙げてきた<sup>[5-10]</sup>。しかし、前述のように、時代の流れとともにそれまでは透明な容器が中心であったプラスチックの選別ニーズが、家電製品や自動車部品を含めた不透明なプラスチックの選別に変化してきており、それに伴い前述の5種類のプラスチックに加えてABSの選別ニーズも高まってきている。また、選別対象であるプラスチックの形状についても、これまでのバルク形状に加えて、破砕したプラスチックの選別ニーズも顕在化してきている。

そこで今回われわれは、これまでよりもハイパワーかつ波長精度の高いDFB(分布帰還型)レーザーを開発し、5種類の波長の半導体レーザーを用いたプラスチック種類選別装置の判別技術開発を行ったのでその詳細について報告する。

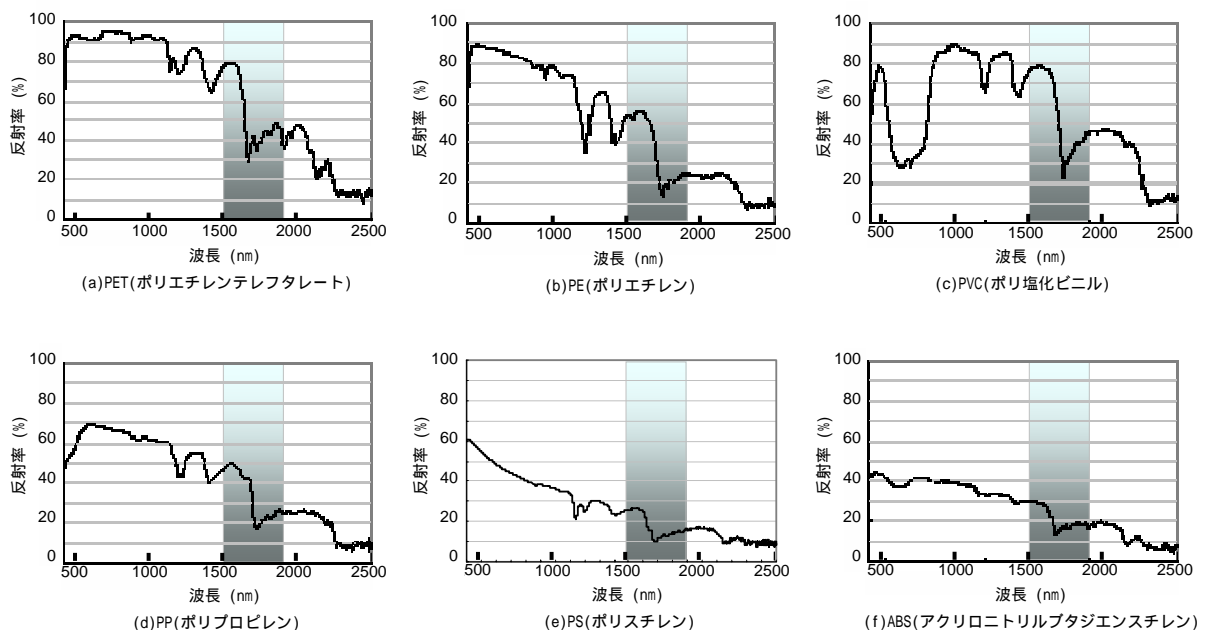


図2. 各種プラスチックの反射スペクトル

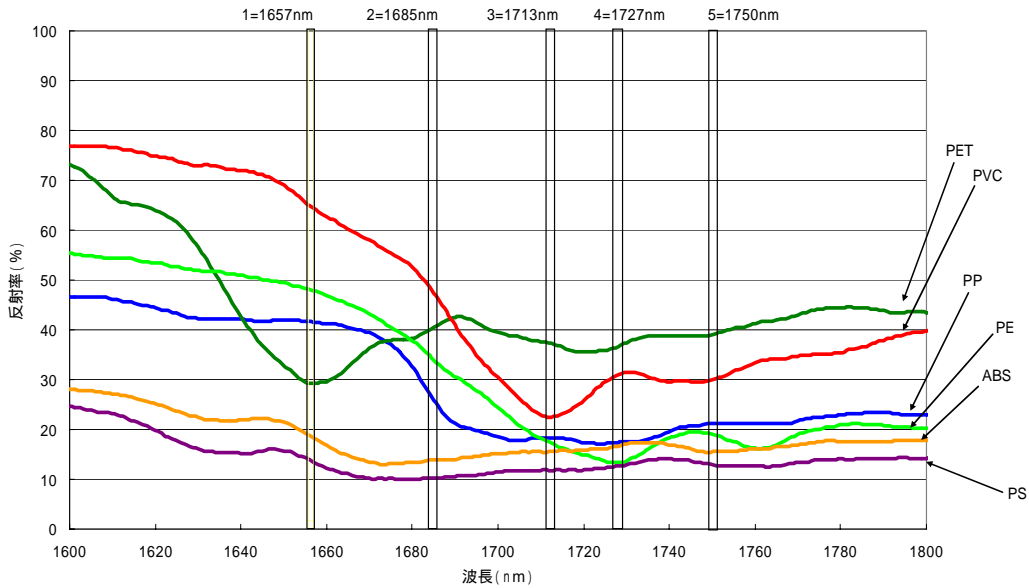


図3. 波長範囲1600nm～1800nmにおける各種プラスチックの反射スペクトル

## 2. LD によるプラスチック判別技術の検討

不透明なプラスチックの判別を行う場合、反射スペクトルの分析が重要である。そこで、ABSを含めた6種類のプラスチックの反射スペクトルを、波長1600nmから1800nmの範囲で図3に示す。この結果より、プラスチックの反射率の波長依存性は、同じスチレン系であるABSとPSを除いて、それぞれの種類によって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1657nm近傍とPVCの光吸収ピークである1713nm近傍を見てみると、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1657nm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、1713nm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の判別は容易に行えると考えられる。

われわれは、これらの反射スペクトルを詳細に検討し、後述する判別結果においてそれぞれの差が最大になるように、1657nm、1685nm、1713nm、1727nm、1750nmの5つの波長を決定し、InGaAsP系のDFBレーザの開発を行った。これらLDのうち、ピーク発振波長1657nmのLDについて、光スペクトルアナライザによる測定結果と、I-L(電流-光出力)特性を図4に示す。

今回われわれが開発した5つのレーザの波長は非

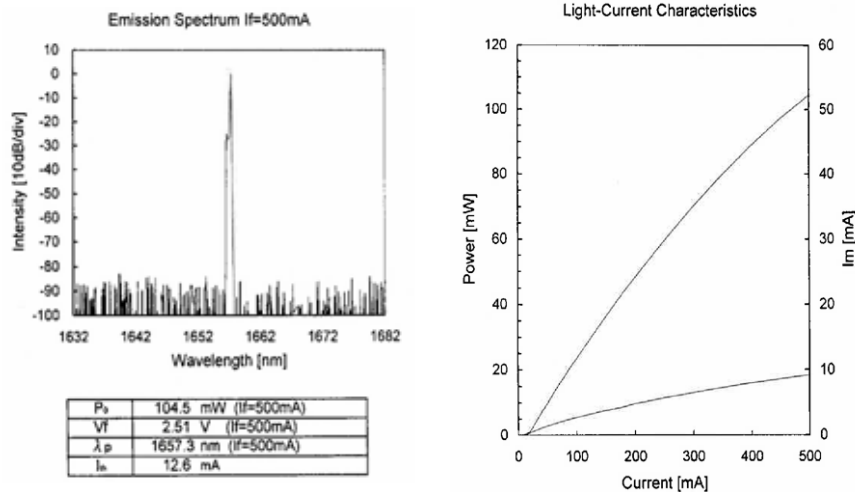


図4. ピーク発振波長1657nmのDFBレーザの基本特性

常に接近しているため、発振波長が縦マルチモード発振でスペクトル拡がりが多いと、プラスチックの光吸収特性の差を分解できない可能性があるが、図4の結果からわかるように、開発したレーザは縦単一モード発振でスペクトル拡がりは十分狭いため、光吸収特性の差を分解できることが確認できた。以下ではこのような特性のDFBレーザを用いてPET、PE、PVC、PP、PS、及びABSのプラスチック種類判別についての検証を行ったので詳しく説明する。

### 3. 実験系

われわれが目指すプラスチック選別装置は、幅300mmのベルトコンベア上を2.8m/sで移動する破碎したプラスチック(3mm)が選別できることを目標とした。これは、破碎プラスチックの現状と、コンベア速度を考慮した、世界で初めてのレーザ方式による実用化をターゲットとする最高水準の仕様である。

基本性能を実験にて確認できるよう、本実験系ではサンプルステージ上に判別試験を行うプラスチックサンプルを置き、そのプラスチックサンプルに対してレーザ光を照射し、反射光を1600nmから1800nmに感度をもつNIR(近赤外線)カメラにて測定する。レーザ光は、NIRカメラの1スキャンに対し1波長を照射してデータを順次パソコンに取り込み、5波長分のデータが揃った時点で演算処理を行う構成とした。プラスチックの材質判別試験概略図を図5に示す。

プラスチックサンプルを置くサンプルステージには静止状態から2.8m/sまで任意の速度でサンプルを移動させることができるものを用い、NIRカメラはレンズを組み合わせ視野幅を300mmに調整し、カメラに内蔵した256個のInGaAs一次元ラインセンサによって光電変換された出力のA/D変換値を出力する仕様となっている。

レーザモジュールの写真を図6に示す。レーザ光源は、カメラ視野幅300mm全体にレーザの照射を行う必要があり、各波長6個ずつ計30個のレーザを使用してレーザの照射エリアを確保できるようにしたレーザモジュールを製作した。このレーザモジュールでは波長ごとに6個のレーザを同時に照射するため、専用のレーザ駆動回路を設計・製作した。また、レーザモジュールのウィンドウにはARコート

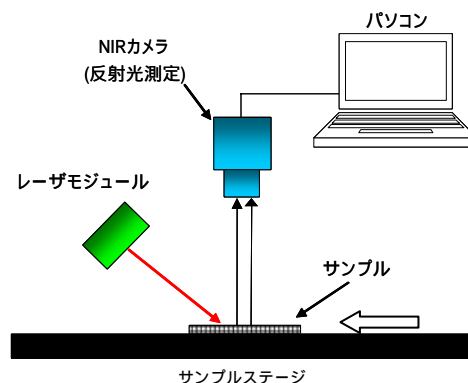


図5. プラスチックの材質判別試験概略図



図6. レーザモジュールの外観写真

付のガラスを採用し、干渉による影響が最小限となるように設計している。

このレーザモジュールの特長としては、ガルバノミラーやポリゴンミラー等の機械的なスキャンングを行わないことにある。機械的なスキャンングを行わないため、最終的な装置に組み込んだときに機構部品の寿命による制約を受けない。また、スキャンング時間が応答速度に与える影響を考慮する必要もなくなる。

実験を行うにあたり、これらの光源、カメラ、サンプルステージを搭載した専用のテストベンチを考案し製作した。光源として搭載するレーザモジュールは波長、光出力ともに世界初のものであるため、プラスチックサンプルと各光学デバイスを任意の位置に設定できるようになっている。

### 4. LDによるプラスチック判別の実験

レーザモジュールをテストベンチに設置し、サンプルステージに置いた基準板(近赤外光を反射する白板)をNIRカメラで測定した結果を図7に示す。図の横軸はカメラに内蔵している256個のInGaAs一次元ラインセンサのそれぞれの素子位置を示し、縦軸は

ラインセンサによって光电変換された出力の A/D 変換値である。図7でわかるように、カメラ出力データから、カメラ視野全体にレーザがほぼ均一に照射できていることがわかる。この基準板のデータは、後述するそれぞれのプラスチックの反射率及び吸光度を計算する基準値となる。

次に、6 種類の白色プラスチックサンプル(PET、PE、PVC、PP、PS、ABS)について NIR カメラによる測定を行った。測定は、上記基準板の測定と同様に、サンプルステージ上にそれぞれのプラスチックサンプルを配置して行った。測定に使用したプラスチックサンプルの大きさは、170mm×40mm であり、サンプルステージの移動速度は 800mm/s としている。破砕したプラスチックではなく 170mm 幅の板をサンプルとしている理由は、NIR カメラのデータ取り込みに要する同一スキャン内で場所によるデータのバラツキを確認するためである。

## 5. 実験結果及び考察

前項で測定した NIR カメラによるプラスチックと基準板の測定データから、連続した 100 素子分のデータに対して、プラスチックの反射光量÷基準板の反射光量の演算を行い、基準版の反射光量に対する各プラスチックの反射率データを算出した。

色彩選別機の色判別手法として、このような反射率データをサンプルごとに演算し、それぞれ三次元空間

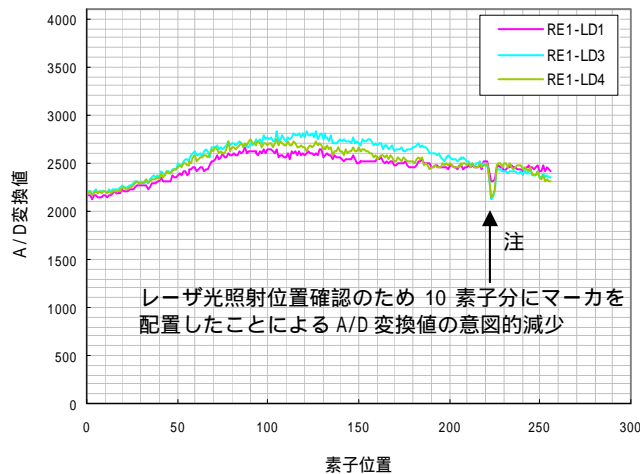
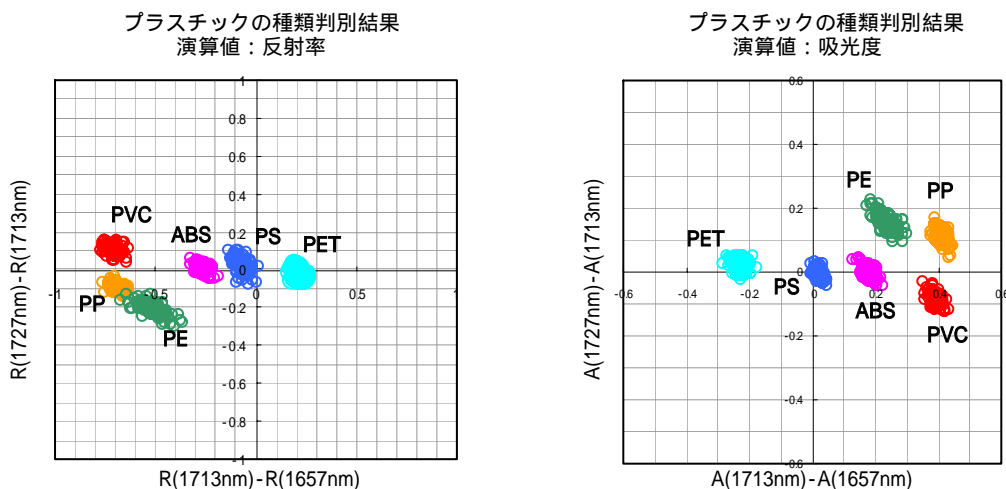


図7. 256素子に対するNIRカメラ出力

上にプロットを行う方法がある<sup>[11]</sup>。今回の場合、三次元空間に対する3つの軸に対してレーザの波長が5つあるため、5つの波長から2つの波長の組み合わせを3つ選択し、それぞれの反射率の差を軸として3軸を決定して分析を行った。

ここでは“1713nm と 1657nm の反射率差 (R1713-R1657)”、“1727nm と 1713nm の反射率差 (R1727-R1713)”を軸とした二次元(X 軸：R1713-R1657、Y 軸：R1727-R1713)平面上でのプロット結果を図8(a)に示す。また、それぞれの波長の反射率から、以下の式をもとに吸光度の計算を行った。

$$A = \log_{10} (1/R) \text{ -----}$$



(a) 演算値：反射率

(b) 演算値：吸光度

図8. プラスチック判別結果 (移動速度800mm/s)

式により求められた吸光度を元に、反射率と同様に二次元平面上にプロットした結果を図 8(b)に示す。

これらのグラフを見ると、図 8(a)に示すように反射率差を軸にした場合、PP と PE のプロットされる領域が一部重なっているものの、図 3 に示したプラスチックの吸収スペクトルにおいて分光特性が酷似している ABS、PS も含め、プラスチックの種類ごとに分かれており、上記 X、Y 軸の二次元平面上のみでほぼ判別できることがわかる。さらに図 8(b)に示すように吸光度差を軸にした場合は完全にプラスチックの種類ごとにわかれており、上記 X、Y 軸の二次元平面上のみで判別できることがわかる。この結果から LD を用いた PVC、PS、PP、PE、ABS、PET の判別が可能であることがわかる。

## 6. おわりに

これまでに I D E C (株)では、小型光電センサのみならず、カラーセンサ、水検出センサなど動脈産業の生産プロセスで一役を担う信頼性の高いセンサをフォトンクス技術を応用することで多数開発してきている。また、(株)サタケでは米や大豆、プラスチックペレットなど微小対象物への異物混入を判別・除去する種々の光選別機の開発を行ってきている<sup>[12]</sup>。

今回われわれは、5 種類の波長の LD を用いて各種プラスチックの判別実験を行い、近赤外光吸収を利用した LD によるプラスチックの判別が十分可能であるということを検証した。この技術と光選別機の技術を融合することにより、信頼性の高いレーザ式微小プラスチック高速選別装置の開発が可能であると確信している。また、これまで検証を行った 6 種類の他にもプラスチックは多数存在するが、これらについても同様に LD による判別が可能であると考えられる。

はじめに述べたように、今後の循環型社会の構築に対して動脈産業としての生産プロセスのみならず、地球環境に配慮した静脈産業としてのリサイクルプロセスも今後ますます重要となる。今回報告したプラスチック選別技術は、フォトンクス技術を環境・ものづくり分野へ応用する一手法として社会貢献できるユニークな世界に誇れる技術であると考えており、われわれは今後も環境問題の一助となる技術を開発して行きたいと考えている。

## 謝辞

今回の技術開発は、NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)の支援による平成 11 年度産業技術研究開発実用化技術開発費助成事業(半導体レーザを用いたプラスチック種類判別技術開発)を礎とし、経済産業省近畿経済産業局の平成 18 年度、19 年度地域新規産業創造技術開発事業(リサイクル用レーザ式微小プラスチック高速選別装置の開発)として推進させていただいたものであり、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。

また、本研究遂行に多大なご協力をいただいた、大阪大学工学研究科の河田聡教授、大阪大学産業科学研究所の真嶋哲朗教授、清水裕一教授および京都女子大学現代社会学部の蒲生孝治教授にも感謝いたします。

併せて、大阪大学フォトンクス先端融合研究センターの関係各位にも感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 尾崎幸洋、河田聡：近赤外分光法、日本分光学会 (1998)
- [2] 錦田晃一、岩本令吉：赤外法による材料分析、講談社 (1986)
- [3] G.N. Foster, S.B. Row and R.G. Griskey, Infrared Spectrometry of Polymers in the Overtone and Combination Regions., J. Appl. Polym Sci., 8: pp.1357-1361; (1964)
- [4] R.G.J. Miller, H.A. Willis, Quantitative Analysis In The 2- $\mu$  Region Applied To Synthetic Polymers. J. Appl.Chem., 6: pp.385-391; (1956)
- [5] 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)
- [6] 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)
- [7] 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)
- [8] 稲田宏治、松田里菜、野村光俊、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によるプラスチック種類識別技術の開発 ( ) 第 18 回センシングフォーラム、計測自動制御学会、pp.199-204 (2001)
- [9] Koji Inada, Lanny Schuberg, Takeshi Takao, Toshihiro Fujita, DEVELOPMENT OF A NEW SENSING TECHNOLOGY FOR PLASTIC IDENTIFICATION BY USING THREE INFRARED LASER DIODES., ISA ETCON 2002 Conference., 21-24 October, 2002, Chicago, Illinois
- [10] 稲田宏治、伊藤祥幸、鷹尾健、藤田俊弘：3 種類の波長の近赤外半導体レーザによるプラスチック種類識別技術の開発 ( ) 第 19 回センシングフォーラム、計測自動制御学会、pp.17-22 (2002)
- [11] 高山篤：色彩選別機フルカラーベルトソーターの選別技術について、農業機械学会誌 68(3)、農業機械学会 pp.18-19 (2006)
- [12] 佐竹寛：米の分光選別機の開発と設計、農業機械学会選書 8、農業機械学会(2001)