

近赤外線を用いた廃プラスチックの材質識別に関する研究

代田 寧, 坂本広美, 牧野 宏*, 桜井敏郎,
米田健一**, 平林 漸**
(環境工学部, *現環境情報部, **三菱重工業 (株))

Original

Study on Separation of the Waste Plastics Using Near-Infrared Spectroscopy.

Yasushi DAITA, Hiromi SAKAMOTO, Hiroshi MAKINO*, Toshiro SAKURAI,
Kenichi YONEDA**, Susumu HIRABAYASHI**
(Environmental Engineering Division, *Environmental Information Division,
**Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.)

Summary

In order to develop the automatic sorting system for the waste plastics in municipal solid waste, the necessary information was obtained as a result of examining material separation conditions using near-infrared spectroscopy and conditions for inhibiting the separation. These conditions are as follows :

- (1) The material peaked respectively at 1669nm for PET, 1688nm for PS, 1735nm for PE, 1716 ~ 1726nm for PVC and 1716 ~ 1735nm for PP, when the separation conditions were examined using the standard plastics, and the material could be accurately distinguished on the basis of these absorption wavelengths. Furthermore, the influence of thickness and color, adhesion of the water to the plastic was limited in these conditions.
- (2) Using the near-infrared transmission style equipment, when the influence on the material separation was mainly examined for the PET bottles, though the separation was inhibited according to extreme fouling and deep-colored label, etc., it was solvable by applying processing software.
- (3) Using the near-infrared reflection style equipment, when the conditions for separating the waste plastics were examined for opaque plastics, though the separation was impossible for black trays and composite trays with aluminum, separation was possible for other colored trays, opaque bottles and packs. And, it was proven that the stainless or Teflon-made conveyor belt could be used in order to distinguish transparent plastics by the reflection style.

Key words : near-infrared spectroscopy, waste plastics, material separation conditions, inhibition conditions, automatic sorting system

1. はじめに

家庭等から排出される都市ごみのうち廃プラスチックは重量で約1割、容積では約4割を占めている^{1)~3)}が、そのほとんどはそのまま焼却処理または埋立処分されているのが現状である。近年、容器包装リサイクル法の整備に伴い、廃プラスチックのリサイクルの促進が強く求められている。廃プラスチックをリサイクルするにあたり課題となっているのは、家庭等から多種類の廃プラスチックが排出され、多くの材質が混在していることであり、これらを連続的に材質別に分離選別する

技術の開発が期待されている。

近赤外分光分析技術^{4), 5)}は、多成分の同時分析が可能であり、非破壊で測定できるなどの特徴を有しており、食品中の成分分析など主に食品工業分野を中心に実用化されている^{6), 7)}が、この技術を応用して廃プラスチックを材質別に分離選別する技術が注目されている^{8)~10)}。プラスチックに近赤外線を照射すると、官能基等の化学的構造によって特定の波長が吸収され、この時吸収された度合(吸光度)を縦軸に、波長を横軸にして得られる吸収スペクトルの特徴をつかむことによ

り、各プラスチックの材質を識別することができる。

著者らは、近赤外線を用いてプラスチックの材質を識別する研究や家庭から排出される廃プラスチックの実態について調査を行ってきた^{11)~14)}。本研究は、近赤外線で見用プラスチックであるポリエチレンテレフタレート (PET)、ポリ塩化ビニル (PVC)、ポリスチレン (PS)、ポリプロピレン (PP)、ポリエチレン (PE) の5種類のプラスチックを識別する条件、及び識別を阻害する条件を明らかにすることを目的として検討を行った。

2. 実験方法

2.1 標準プラスチックによる識別条件の検討

2.1.1 試料

表1 標準プラスチック試料

No.	材質	厚さ [mm]	色	形状
1	PET	0.42	透明	凹凸有り
2	PVC	1.00	白	平板
3	PS	0.15	透明	、
4	PP	1.70	半透明	、
5	PE	0.10	、	、
6	PVC	0.10	透明	、
7	PVC	1.00	、	、
8	PVC	1.00	灰色	、
9	PS	2.60	透明	、
10	PS	2.65	赤	、
11	PP	1.00	半透明	、
12	PE	1.00	白	、
13	PET	0.40	緑	湾曲
14	PET	0.35	薄青	凹凸有り
15	PVC	0.53	、	、
16	PP	0.10~0.40	半透明	熱い感じの平板
17	PP	0.80	クリーム	湾曲
18	PE	0.90~1.20	白	、

材質既知の市販のプラスチック製品を、20mm × 20mm のピースに切り取り、厚さ、色、形状 (基本的に平板) が異なる 18 試料を用いた (表1)。

2.1.2 装置

材質識別に最適な波長帯を選定するための予備実験には、実験室用のニレコ社製近赤外分光光度計 (以下、「装置1」とする) を用いた。

識別条件の検討には、三菱重工業 (株) が設計・製作した透過型近赤外線式分光分析装置 (以下、「装置2」とする) を用いた (図1、写真1)。本装置は試料固定台が可変式で、入射角度を変えることができる。光源にはハログゲンランプを、分光器にはポリクロメーターを、受光器には PbS を 256 素子並べたマルチチャンネル検出器を用いている。このポリクロメーターを用いたマルチチャンネル分光法は、回折格子を回転する走査機構が不要であるため高速測定が可能であり、実用化の際に要求される迅速な処理を行えることが特徴である。



写真1 透過型近赤外線式分光分析装置

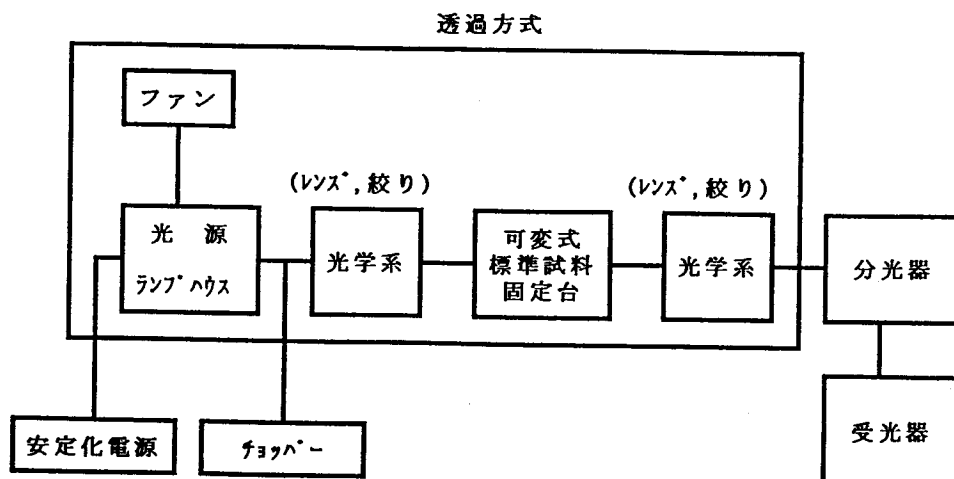


図1 透過型近赤外線式分光分析装置の構成

2.1.3 方法

試料固定台を光源に対して垂直（入射角度 0° ）にセットし、試料No.1～5について照射実験を行い、得られた吸収スペクトルの特徴から5種類の材質を識別する基礎条件を求めた。次に、No.6～18について同様に照射実験を行い、吸収スペクトルを比較することにより、試料の厚さや着色による影響について検討した。また、試料固定台の角度を変えることにより、入射角度の影響について検討した。

2.2 透過方式による実用化に向けた検討

2.2.1 試料

調味料による汚れが識別に与える影響を検討するため、市販のしょう油、ソース、ケチャップ、サラダ油、マヨネーズを用いた。また、家庭から排出されたボトルが識別に与える影響を検討するため、汚れが付着したボトル、着色ボトル、全面がフィルム（ラベル）で覆われたボトル等を用いた。使用したボトルは、主に分別収集されたPETボトルである。

2.2.2 方法

石英製のセルに各調味料を入れて装置1で吸収スペクトルを測定し、プラスチックのスペクトルと比較した。また、排出ボトルの識別に与える影響の検討は装置2を用い、試料固定台を外してコンベア上に直接ボトルを置いて実験を行った。基本的にはコンベアを静止した状態で吸収スペクトルを測定し、識別への影響を検討した。

2.3 反射方式による実用化に向けた検討

2.3.1 試料

不透明プラスチックとして、白色及び着色した発泡トレー、アルミニウムとの複合トレー、シャンプー、洗剤等の不透明ボトル、マーガリン、プリン等の不透明パック・カップを用いた。また、透明プラスチックの識別には、飲料用PETボトル、お菓子等の透明トレー、果物パック等の透明パック・カップを用いた。

2.3.2 装置

写真2に、反射型近赤外線式分光分析装置を示した。基本的な仕様は装置2と同じであるが、受光器に256素子のInGaAsマルチチャンネル検出器を用いているところが異なる。InGaAs検出器は、技術の進歩により最近になって製品化されてきたものであるが、PbS検出器に比べてノイズが少ないため装置を簡略化できる。そのため、処理速度が装置2の約4倍速くなっている。



写真2 反射型近赤外線式分光分析装置

2.3.3 方法

まず、反射方式で各種不透明プラスチックの吸収スペクトルを測定し、材質を識別する場合の影響について検討した。次に、白色の発泡トレーに汚れとしてしょう油を付着させた場合、ポリ塩化ビニリデン(PVDC)及びポリエチレン(PE)のラップをかぶせた場合について照射実験を行い、それぞれ識別に与える影響について検討した。

透明プラスチックの識別実験は、各種のコンベアベルト（ステンレス製、テフロン製、ポリウレタン製、シリコン製）を使用して検討を行った。

3. 結果及び考察

3.1 標準プラスチックによる識別条件の検討

3.1.1 識別波長の検討

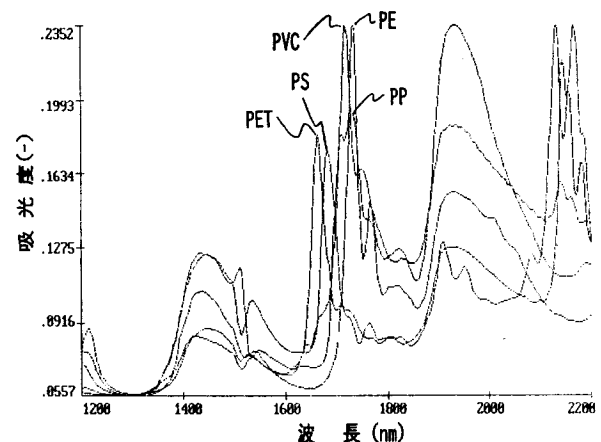


図2 予備実験による近赤外スペクトル

廃プラスチックの材質を識別するのに適した波長帯を選定するため、No.1～5の試料について実用化に際して特に問題となる水を付着させて吸

収スペクトルを測定した。その結果、図2に示したように1450nmと1940nmに水の吸収によるピーク^{4), 5)}が見られるが、1600～1800nmの範囲内では水による影響はなく、また5種類のプラスチックにそれぞれ特有な吸収ピークが認められた。したがって、これ以降の詳細な検討は1600～1800nmの範囲に限定して行った。

次に基本的な識別条件を検討するため、No.1～5の試料について、近赤外線が最も効率良く照射される入射角度0°において実験を行った。その結果得られた吸収スペクトルを、吸光度の最大値を1、最小値を0に換算して図3に示した。図3より、PETは1669nm、PSは1688nm、PEは1735nm、PVCは1716～1726nm、PPは1716～1735nmにそれぞれ特有な吸収ピーク（または波形）が認められた。したがって、これらの材質に特有な吸収波長をもとにして、5種類のプラスチックを識別できると考えられる。また、これらの結果はボトルを使用して行った研究結果¹⁵⁾と一致しており、これらの吸収波長をもとに作成した材質識別アルゴリズムを適用することにより、5種類のプラスチックを識別できることが確認されている¹⁵⁾。

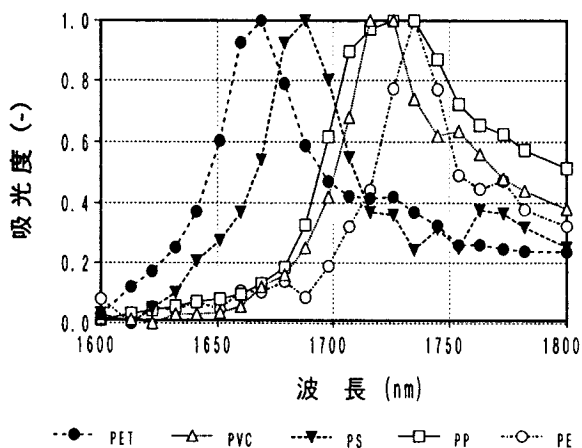


図3 標準的な近赤外スペクトル

3.1.2 厚さ、着色等の試料の影響

厚さ及び色が異なるNo.6～18の試料について検討した結果、大部分の試料はスペクトルにほとんど変化はなく、識別ピークが同一であったことから、プラスチックの厚さ及び着色による識別への影響はほとんどないと考えられる。しかし、厚さ1.00mmで灰色に着色した試料No.8については、図4に示したようにスペクトルが異なりピークが明確ではなかった。この原因としては、試料の厚さや色の影響よりも光が透過しないことによるものと考えられた。図5に、異なるPVC試

料について縦軸に透過光量を示したが、試料によって透過光量は異なり、No.8に関してはほとんど光が透過していない。このように透過光量が少ない場合には、識別に影響を与える可能性があると考えられ、反射方式による検討が必要である。

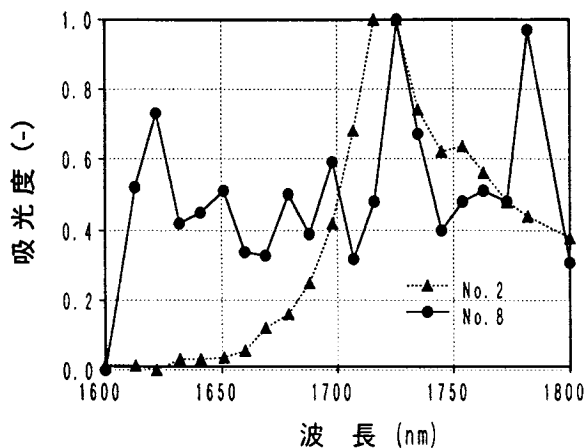


図4 試料No. 8の近赤外スペクトル

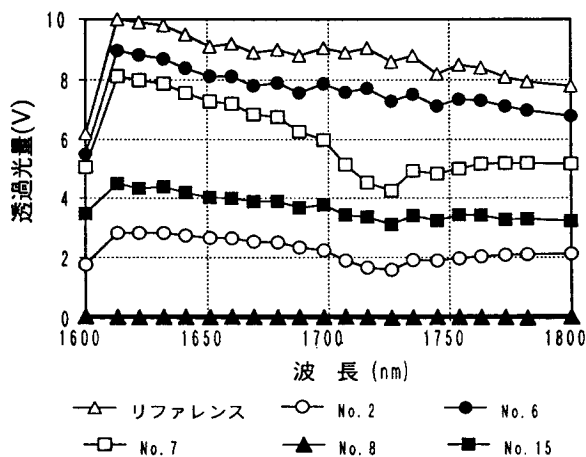


図5 各PVC試料の透過光量

3.1.3 入射角度の影響

実際に近赤外線を照射して材質を識別する場合、試料の形状や整列の仕方から必ずしも近赤外線が試料に対して垂直にあたるとは限らない。そこで、No.1～5の試料について、近赤外線の入射角度を0°、10°、20°、30°、45°と変化させて実験を行った結果、5種類のプラスチック全てにおいてスペクトルに変化がなかったことから、入射角度が異なっても識別に影響を与えないことが明らかになった。これらの結果からボトル類の選別を前提として実用化を考えると、試料がきちんと整列されていない場合、また形状が異なっていたり、変形しているような場合でも、各5種類の材質を正確に識別できると考えられる。

3.2 透過方式による実用化に向けた検討

3.2.1 調味料による汚れの影響

廃プラスチックの材質識別装置を実用化する際には、調味料等が付着した汚れによる影響について検討する必要がある。汚れの原因として5種類の調味料を選定し、それぞれ吸収スペクトルを測定して識別に与える影響を検討した。その結果、しょう油、ソース、ケチャップのスペクトルはほぼ同様な傾向を示し、1450nmと1940nmに水の吸収によるピークが見られるが、1600～1800nmの波長範囲にはピークがないため、識別にはほとんど影響を与えないと考えられる。

サラダ油は、ピーク位置が若干ずれているがPEと似たスペクトルであり、付着量によっては影響を与える可能性が考えられる。そこで、サラダ油の容器として用いられているPE、PP、PETについて、0.1、0.5、1mmの石英セルにサラダ油を入れて、それぞれ標準プラスチック平板と重ねた状態でスペクトルを測定した。その結果、PEとPPではサラダ油が多くなるほど識別ピークが若干ずれるが、石英セル(サラダ油)の厚さが1mmの場合でもそれほど大きなずれはなく実用的にはほとんど影響はないと考えられる。また、PETについては、石英セルの厚さが0.1mmの場合にはほとんど影響はないが、0.5mm以上ではサラダ油のピークの方が大きくなり、このような場合には誤判定する可能性が示唆された。

マヨネーズは、1400nm、1700nm、1900nmの付近にピークが認められた。1400nm及び1900nm付近のピークは水の吸収によるものであり、1700nm付近のピークはサラダ油とほぼ同じピークであった。これは、マヨネーズの成分にサラダ油が用いられているためである。したがって、マヨネーズの場合には水とサラダ油の両方の影響がある。

3.2.2 汚れ付着ボトル等の識別阻害

汚れたボトルとして、しょう油が入っていたPETボトル、及びミルクティー用のPETボトルについて検討した結果をそれぞれ図6、及び7に示した。図6の「付着多」はしょう油が黒いかたまりになって付着している部分で、図7の「付着多」は白くミルクが付着している部分である。これらの場合はスペクトルが異なっており、正確に識別できない。これは十分な透過光量が得られないことが原因であったが、このようなしょう油の黒いかたまりの部分はごく一部であり、それ以外の大部分は茶色く汚れているが、十分に透過光量が得られ識別できた(図6の「付着少」)。また、ミルクティーの場合も同様で、図7のように付着

量の少ない部分では識別が可能であった。今回は静止した状態で検討したが、実装置ではベルトコンベアを動かして連続的に材質を識別するため、一つのボトルで複数点(今回の装置では1.5ℓボトルで20点程度)スペクトルを測定する。したがって、ボトル全体が光を透過できないほど汚れているような特殊な場合以外は、アルゴリズム等の処理ソフトで対応できる。同時に、処理速度の向上等により測定点を増加させるなどハード面を改良することにより、さらに性能がアップすると考えられる。また、識別への影響が懸念されたサラダ油用のPETボトル及びPEボトルについて検討した結果、若干油が付着して表面がべたべたしていたが、スペクトルにほとんど変化はなく、識別への影響はなかった。

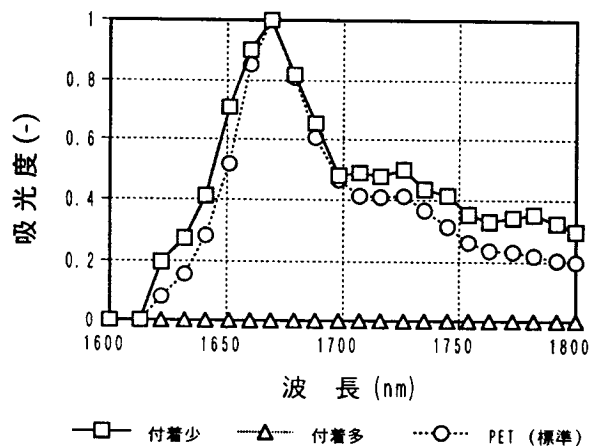


図6 しょう油ボトルの識別

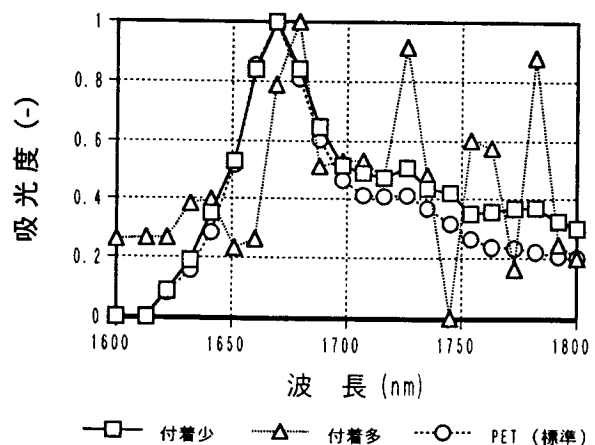


図7 ミルクティーボトルの識別

その他の阻害因子として、全面フィルム(ラベル)付きボトル、着色ボトル、残液入りボトル、変形ボトルについて同様に検討した。その結果、黒色のフィルムは光が透過しにくいいためスペクト

ルが異なっており、全面を黒いフィルムで覆われたコーヒャボトトルなどは正確に識別できない可能性がある。また、着色ボトトルは緑色と水色のどちらもスペクトルに変化はなく、識別には影響を与えなかった。残液入りボトトルについては、今回は入っている液量がそれほど多くはなく、識別に影響を与えるようなものはなかった。本装置では、ボトトルを寝かせて横方向から近赤外線を照射するため、ある程度の液量ならば近赤外線が当たる位置よりも残液のレベルが低くなるので影響はない。

また、変形ボトトルについてもスペクトルに影響はなかったが、完全につぶれているような場合には光が当たらない可能性があるため、光を当てる位置や方法などハード面の対応が必要になるかもしれない。しかし、これらのボトトルについて、コンベアを動かして検討を行った結果、コンベア速度が1 m/秒では100%識別が可能であった。

3.3 反射方式による実用化に向けた検討

3.3.1 発泡トレイ等の識別

不透明のため透過方式では識別できない発泡トレイの他、不透明ボトトル、不透明パック等を対象に反射方式で検討した結果、白色の発泡トレイ、及び薄茶色や青色に着色した発泡トレイはスペクトルにほとんど変化はなく、識別への影響はなかった。一方、黒色の発泡トレイ及びアルミニウムとの複合トレイは、スペクトルが異なっており識別できなかった。これは、黒色の場合には全波長域で吸収が大きいために、またアルミニウムとの複合材質では入射光が全反射してしまうために、材質特有のピークが得られないことが原因であった。したがって、黒色及びアルミニウムとの複合材質では、透過及び反射のどちらの方式でも材質を識別することは難しい。しかし、これらは5種類以外の材質として選別除去することが可能であるため、リサイクルに不適なアルミニウムの混入を防ぐことができる。

また、シャンプー、洗剤などの不透明ボトトル、マーガリン、プリンなどの不透明パック・カップについて検討した結果、スペクトルにほとんど変化はなく、反射方式により材質を識別することができた。

3.3.2 汚れ及びラップの付着の影響

しょう油を用いて汚れの影響を検討した結果、白色の発泡トレイにしょう油を全面に満たした場合には識別できなかったが、付着量が少ない場合や乾燥した後のトレイではほとんど識別への影響はなかった。また、上述したように複数点でスペ

クトルを測定し材質を識別するため、トレイ全体が極端に汚れている場合以外はほとんど問題にならないと考えられる。

また、発泡トレイにはラップが付着していることが考えられるため、PVDC及びPEのラップを発泡トレイに付着させて照射実験を行った結果、PVDCラップの場合には干渉を起こしてスペクトルが波打ってしまうため、材質特有のピークが得られなかった。PEラップの場合にも干渉を起こすが、PVDCラップより干渉する割合が少なく、トレイの材質特有のスペクトルが得られる場合があった。これは、ラップよりもトレイの方が厚く吸収量が多いためと考えられる。したがって、ラップが付着している場合、干渉を起こせば「その他の材質」と識別されるが、干渉を起こさない場合には「PS」と識別される場合もあるため、ラップが混入する可能性がある。また、干渉を起こすかどうかは、ラップの厚さ、ぴんと張っているかゆるんでいるかといった張り具合などが影響していると考えられたが、詳細な検討が今後必要である。

3.3.3 透明プラスチックの識別

反射方式により透明プラスチックを精度良く識別できれば、材質が透明、不透明に関係なく幅広い廃プラスチックを識別することができる。そこで、飲料用PETボトトルやお菓子のトレイなどを供試料に用いて、透明プラスチックを反射方式で識別するための条件について検討した。その結果、近赤外線が透明な試料を透過し、コンベアベルトで反射したのち再び試料を透過した光を検知して識別するため、コンベアベルトの材質が大きく影響した。ベルトの材質について検討した結果、ステンレス製及びテフロン製のベルトを用いることにより識別できることが明らかになった。ステンレス製のベルトは鏡と同様に光を吸収せずに全反射するため、プラスチックの材質に特有な吸収ピークが得られた。また、テフロン製のベルトは全体的に吸収が少ないため、同様に識別が可能であった。

4. まとめ

家庭等から排出される廃プラスチックを対象に、連続的に材質別に分離選別する装置を開発するため、近赤外線を用いた材質の識別条件や識別を阻害する条件について検討を行った結果、次の知見が得られた。

(1) 標準プラスチックを用いて識別条件を検討したところ、PETは1669nm、PSは1688nm、PEは1735nm、PVCは1716～1726nm、PPは1716

～ 1735nm にそれぞれ材質特有のピークが認められ、これらの吸収波長をもとに正確に材質を識別できることが明らかになった。また、これらの条件では、プラスチックの厚さや色、水分の付着による影響は少なかった。

(2)透過型近赤外線式分光分析装置を用いて、主にPETボトルを対象に材質識別への影響を検討したところ、極端な汚れや濃色のラベル等により識別が阻害されるが、ボトルの複数点でスペクトルを測定して材質を識別するため、処理ソフトにより対応が可能であった。

(3)反射型近赤外線式分光分析装置を用いて、不透明な発泡トレーを中心に識別条件を検討したところ、黒色トレーやアルミニウムとの複合トレーは識別が不可能であったが、その他の着色発泡トレー、不透明なボトルやパック・カップは識別が可能であった。また、透明なプラスチックを反射型で識別するには、ステンレス製及びテフロン製のコンベアベルトを用いればよいことがわかった。

5. おわりに

本研究の成果から、近赤外線を用いた方法が廃プラスチックの材質識別装置として非常に有効であることがわかった。実用化する際、選別の対象となるプラスチックがPETボトル等の透明なプラスチックの場合は、透過型の装置が光量が多く精度良く識別できる。また、不透明なプラスチックが混在したものを選別する場合には、反射型の装置にする必要がある。このように、選別対象プラスチックや選別精度等に応じて近赤外線の識別方法を選択し、最適な装置とすることができる。

現在、本研究の結果をもとに、PETボトルを資源化するための選別装置を開発しており¹⁶⁾、またボトル以外のトレーやフィルムを対象とした一連の選別装置についても検討を行っている^{17)、18)}。

本研究は、平成7～9年度科学技術庁・科学技術振興調整費による「環境と資源の持続的利用に資する資源循環型エコシステムの構築に関する研究」の一環として実施したものである。

参考文献

- 1) 金高隆一，飛鳥田充：クリーンジャパン，110号，24～27(1995)
- 2) 日本環境衛生センター：容器包装廃棄物排出状況実態調査報告書(1995)
- 3) 山田國廣：月刊廃棄物，22(5)，78～82(1996)
- 4) 尾崎幸洋，河田聡：近赤外分光法，学会出版センター

- 5) B.G.Osborne and T.Fearn：NEAR INFRARED SPECTROSCOPY IN FOOD ANALYSIS，Longman Scientific & Technical
- 6) 米田健一，堀田武夫：光アライアンス，4(10)，25～29(1993)
- 7) 米田健一，高石武夫，森田秀夫：第251回日本機械学会講演論文集，46～49(1992)
- 8) 飯島林蔵，山本弘樹，相川克明：第4回廃棄物学会研究発表会講演論文集，301～304(1993)
- 9) 天野敏夫：いんだすと，10(2)，31～33(1995)
- 10) 相川克明：資源環境対策，32(16)，88～91(1996)
- 11) 代田寧，牧野宏，桜井敏郎，米田健一，米澤富任：第7回廃棄物学会研究発表会講演論文集，365～367(1996)
- 12) 牧野宏，代田寧，坂本広美，桜井敏郎，米田健一，米澤富任：第8回廃棄物学会研究発表会講演論文集，42～44(1997)
- 13) 代田寧，坂本広美，牧野宏，桜井敏郎，米田健一，米澤富任：第8回廃棄物学会研究発表会講演論文集，257～259(1997)
- 14) 代田寧，牧野宏，桜井敏郎，米田健一，平林漸：第9回廃棄物学会研究発表会講演論文集，299～301(1998)
- 15) 米田健一，三井昭二，山本昇志，米澤富任：第6回廃棄物学会研究発表会講演論文集，480～483(1995)
- 16) 米田健一，平林漸，米澤富任，木村真康：光アライアンス，8(4)，30～34(1997)
- 17) 米田健一，米澤富任，木村真康，平林漸：第8回廃棄物学会研究発表会講演論文集，253～256(1997)
- 18) 米田健一，米澤富任，木村真康，田中千草，平林漸：第9回廃棄物学会研究発表会講演論文集，292～295(1998)