近赤外分光法による木質系廃棄物の判別分析

土 川 覚*, 山 登 香 織*

1. はじめに

木材を建築・工業材料として利用する際には、防腐・難燃等の処理、接着剤の塗布、あるいは塩化ビニルシートなどの化粧材料の複合といった、いわゆる二次加工が日常的に行われている。したがって、これらの加工が施された木質系建材を廃棄・リサイクルする過程においては、包含される化学物質の種類・含有量などを正確・迅速・簡便に把握して、可燃・不燃の見極めや最適な再利用法を考えることが大切となる。ところが、実際の廃材処理工場や解体現場では分別の自動化がほとんど確立されておらず、人海戦術的な方式によっておおまかに仕分けされているにすぎない。地球環境の保全という立場からも、早急に対策を講じることが強く求められている。

近赤外分光法 (Near Infrared Spectroscopy; NIRS)^{1,2)}は、近赤外波長領域における拡散反射、または透過スペクトルを測定することによって、液体から固体まで様々な形態をなす試料中の成分値を非破壊で短時間のうちに分析する方法で、食品、薬品、パルプ等の工業分野ではすでにオンライン分析装置として実用化されている。我々の研究分野 (生物材料機械学) でも、本法を木材に適用するための一連の研究を行っている³⁻⁵⁾。その結果、含有水分や繊維傾斜角などの情報がNIRSによって正確に検出できることが明らかにされ、新しい非破壊計測手法としての展開が期待されるようになった。ところで、NIRSの有用性はこのような非破壊定量分析の枠にとどまらず、試料の定性分析としても活用できることが様々な分野で実

証されており、木質系廃棄物の判別も同様に行えるのではないかと考えた。

このような背景に基づき、我々は近赤外分光法による木質廃棄物同定システムの開発を目ざしていろいろな基礎実験を行っている。本稿では、近赤外分光法について簡単に解説するとともに、木質系建材の判別分析をいくつかの多変量解析に基づいて実施した結果について紹介し、木材保存分野における本法の適用可能性について助言を得る機会としたい。

2. 近赤外分光法

電磁波である光は、その波長領域によって性質が大きく異なる。近赤外光は、可視光 (波長: 380-780nm) と赤外光 (波長: 2,500-25,000nm) の中間に存在する電磁波 (波長: 800-2,500nm) のことで、可視光線のように人間の目で確認することはできない。この波長域における光の吸収や発光に基づく分光法のことを、近赤外分光法と呼ぶ^{1,2)}。

近赤外域に存在する吸収ピークは、赤外域に出現するさまざまな官能基の基準振動の倍音や結合音であるために、図1(a)に示すようなブロードな形状のスペクトルとして観測される。近赤外光が物質に吸収される割合は、赤外領域に比べてはるかに微弱である。したがって、赤外法のように試料を希釈するなどの前処理を施す必要がほとんどない。これは、試料中の高濃度成分を直接測定できること、換言すれば、試料を非破壊で計測することが可能であることを意味する。とくに、近赤外領域における水分子のモル吸収係数は、赤外領

*名古屋大学大学院生命農学研究科

域におけるその1/1,000程度であるため、木材のように水を多量に含むことがある材料を測定対象とする場合には、とりわけ有益な手段になる。

実際の測定によって得られる拡散反射スペクトルまたは透過スペクトル(オリジナルスペクトル)を2回微分すると、図1(b)のような信号が求められる。微分処理をすることによって吸収帯の実態

図1 試験研究用分光光度計で測定した木質建材の近赤外拡散反射スペクトルおよび2次微分スペクトル

が明確になるとともに、オリジナルスペクトルでは他の吸収スペクトルに隠れて確認することができなかった多くの吸収帯についても、その情報を取得することができるようになる。また、オリジナルスペクトルに見られたバックグラウンドが直線化され、スペクトル間の比較が容易になる。

近赤外分光法では、複数の特定波長における吸収量の変化に着目してこれらを適当な統計的手法で処理することにより、試料内のいろいろな成分を同時に定量・定性分析することができる(このような手法は、ケモメトリックス⁶⁾と呼ばれる)。また、比較的エネルギーの低い電磁波であるために、人体および試料が測定中に損傷を受けることがほとんどないことも本法の大きな特色である。

3. 実験装置

今回紹介する事例は、通常の実験室における分析と実際の廃材処理現場での分析を念頭に置いたものである。以下に示す2種類の分光光度計を用いて近赤外拡散反射スペクトルを測定した。

3.1 試験・研究用近赤外分光光度計 (L-Type)

試験・研究用近赤外分光光度計(プラン・ルーベ社製、インフラライザ500型)について概要を述べる。この装置は、光源(タングステン・ハロゲンランプ)からの光を回折格子によって各波長に分散させる方式を採用している。通常の計測は装置の本体に装備されている積分球を用いて行われるが、試料寸法の制約を受けずに計測することができるように、本体と同システムの光学系を有する光ファイバアタッチメントプローブによって近赤外スペクトルを測定した(図2(a))。本装置は広

(a) 試験・研究用近赤外分光光度計 (L-Type)

(b) 可搬型近赤外分光光度計 (F-Type)

図2 測定装置の外観

範な波長域（800–2,500nm）にわたって高い波長精度を保つことができるが、照射光強度は相当量減衰し、また、測定時間も一回の測定で約1分要する。

3.2 可搬型近赤外分光光度計（F-Type）

実際の廃材処理現場での判別分析を考慮して、可搬型分光光度計（クボタ社製、フルーツセクター）による測定を行った。外観を図2(b)に示す。本装置は、果実の糖度、酸度等に関する非破壊測定機として開発されたもので、リニアイメージセンサによる分光システムを採用している。本装置は比較的堅牢な光学系システムを採用しているため、屋外等への移動ならびに作業現場での使用が可能である。また、測定時間も約5秒ときわめて短時間であるが、リニアイメージセンサの特性上550–1,010nmの短波長領域での測定に限定される。

4. 供試材

現実の木質系廃棄物は、形状、汚損・劣化状態、素性とも多岐にわたるから、実際に判別分析を行う場合には多くの条件を考慮する必要がある。今回は、形状にむらがなく素性が明らかな木質系建材を対象とした基礎実験を行い、本法の有用性および問題点について検討した。

(注)日本木材加工技術協会製の木質建材試料の中

表1 供試材の一覧

試料	分類
スギ (<i>Cryptomeria japonica</i>)	素材
ヒノキ (<i>Chamaecyparis obtusa</i>)	
ダグラスファー (<i>Pseudotsuga menziesii</i>)	
ウエスタンヘムロック (<i>Thuja heterophylla</i>)	
ケヤキ (<i>Zelkova serrata</i>)	
ナラ (<i>Quercus crispula</i>)	
合板 単板積層材 (LVL)	合板・LVL
パーティクルボード 中質繊維板 (MDF) インシュレーションボード ハードボード	繊維板
防腐処理木材 難燃処理木材	防腐・難燃処理材
樹脂フィルムオーバーレイ合板 化粧紙オーバーレイ合板 樹脂フィルムオーバーレイパーティクルボード 化粧シートラッピング加工材 WPC 複合合板	化粧材

から供試材を選定した。本実験では、判別すべき木質系建材の分類を「素材」、「合板・LVL」、「繊維板」、「防腐・難燃処理材」および「化粧材」の5種類とした。それぞれの集団に含まれる個々の試料を表1に示す。これらを屋外で6ヶ月間暴露し、2ヶ月ごとに近赤外スペクトルを測定した。なお、測定時の試料はいずれも気乾状態にあった。

5. 多変量解析による判別分析

測定したスペクトルの2次微分値をデータベースとして、マハラノビス汎距離、KNN (K Nearest Neighbors) および SIMCA (Soft Independent Modeling of Class Analogy) による判別分析⁶⁾を試みた。いずれの場合も、測定したスペクトルを集団作成用と判別用にあらかじめ分類して解析する多変量解析であり、いわゆる「教師ありのパターン認識」に相当する。マハラノビス汎距離に着目した判別分析では、近赤外吸収スペクトルの中の数波長に着目して多次元空間を設定し、この空間内に各集団を配置するが、KNN および SIMCA では測定した全波長のデータによって集団を作成する。ただし、用いた多変量解析ソフトウェアの関係上、マハラノビス汎距離による判別分析は L-type での測定値に対してのみ行い、KNN および SIMCA による判別分析は L-type、F-type 双方の測定値を対象とした。

6. 解析結果

解析結果を図3に示す。マハラノビス汎距離による判別分析では、水の吸収波長帯（985nm）が説明変量として選択されてしまい、いずれの場合も正答率は低かった。このことから、マハラノビス汎距離による木質建材の判別分析は困難であると推定される。KNN および SIMCA による判別分析では、L-type および F-type とともに90%以上の正答率を得ることができた。先述のように、F-type の測定波長領域は550–1,010nmに限定されるが、L-type（測定波長領域：800–2,500nm）とほぼ同程度の正答率が得られたことは非常に興味深い。ただし、SIMCA による解析結果を詳細に調べたところ、F-type では可視領域のスペクトルが判別に大きく関与していることが明らかとなった。したがって、含水率による色変化があった場合の

図3 各判別法における正答率

正答率に関しては、今後検討する余地があるといえよう。一方、L-type では、CH の倍音あるいは結合音に関係する吸収帯が判別に大きく寄与していることがわかった。この結果は、近赤外領域に存在する分光学的な情報を正しく抽出すると、含水率の影響を無視して予測精度の高い判別分析ができることを示している⁷⁾。

7. おわりに

廃棄物処理に関しては法令化による取締りが今後さらに厳しくなるであろう。したがって、処理の実態と環境保護に対する社会の要請との乖離を防いで木材リサイクル工業を経済的に成り立たせるためにも、有用な対策を早急に講じることが渴望されている。

木質系廃材分析装置が開発されると、燃料用チップは可燃物として保証され、また、再利用チップの使用に際しても通常の木質素材と同様な取り扱いができるようになるため、商用価値が大幅に向上すると考えられる。このように、近赤外分光法の応用と実機の具体化は木質廃材の環境負荷リスクの低減とその再利用促進に極めて大きな貢献をもたらすと考えられる。

引用文献

- 1) Osborne, B. G. and Fearn, T. : "Near Infrared

Spectroscopy in Food Analysis", Longman Scientific & Technical, Harlow, Essex, UK, 1988.

- 2) Siesler, H. W., Ozaki, Y., Kawata, S. and Heise, M. : "Near Infrared Spectroscopy-Principle, Instrumentation, and Applications", John Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2002.

- 3) 土川 覚, 堤 成晃 : 近赤外分光法による木材の非破壊計測 (第 5 報) 試料の物理的構成に関する情報の検量線, 木材学会誌, **43** (2), 149-158 (1997)

- 4) Tsuchikawa, S. ; Tsutsumi, S. : Non-traditional application of NIRS to detect physical and chemical conditions of biological materials, Recent Research Developments in Applied Spectroscopy, **3**, 113-134 (2000).

- 5) Tsuchikawa, S. ; Tsutsumi, S. : Application of time-of-flight near infrared spectroscopy to wood with anisotropic cellular structure, Applied Spectroscopy, **56** (9), 1117-1124 (2002).

- 6) 相島鐵郎 : "ケモメトリックス", 丸善, 1992.

- 7) Tsuchikawa, S. ; Yamato, K. : Discriminant Analysis of Wood Based Materials with Weathering Damage by Near Infrared Spectroscopy, *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, accepted.

(2003. 8. 14受付)