

希土類蛍光粉回収のための廃蛍光管選別装置の開発 に関する研究

太屋岡, 篤憲

<https://doi.org/10.15017/1866288>

出版情報 : Kyushu University, 2017, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

希土類蛍光粉回収のための
廃蛍光管選別装置の開発に関する研究

2017 年

太屋岡 篤憲

目次

第 1 章 序論	
1.1 緒言	1
1.2 廃蛍光管リサイクルに関する現在までの研究	4
1.3 本研究の目的	7
1.4 本論文の構成	8
参考文献	11
第 2 章 紫外線照射による三波長蛍光管の識別	
2.1 諸言	14
2.2 実験方法	15
2.2.1 蛍光粉の分光蛍光光度測定	15
2.2.2 廃蛍光管への UV 照射による発光	15
2.2.3 RGB 表色系から HSV 表色系への変換	16
2.2.4 分離度	18
2.2.5 分離度を最大にする二値化	19
2.3 結果および考察	20
2.3.1 蛍光粉の分光蛍光光度測定	20
2.3.2 RGB / HSV 表色系の特徴量による蛍光管の分離度	25
2.3.3 明度画像を用いた蛍光管直径の算出	28
2.4 結言	30
参考文献	31
第 3 章 AE センサ信号を用いた蛍光管のフィルム有無の識別	
3.1 諸言	32
3.2 実験方法	33
3.2.1 AE 信号の測定実験	33
3.2.2 判別分析	35

3.3	結果および考察	37
3.3.1	時間領域の特徴量を閾値とした判別	37
3.3.2	周波数領域の特徴量を閾値とした判別	40
3.3.3	時間・周波数領域の特徴量を閾値とした判別	43
3.3.4	判別分析の適用	46
3.3.5	特徴量の組み合わせの検討	50
3.4	結言	52
	参考文献	53
第4章 電界による導電性を有する蛍光管の識別		
4.1	諸言	54
4.2	実験方法	55
4.3	結果および考察	57
4.3.1	電界による蛍光管発光実験	57
4.3.2	蛍光管端面からの電界の侵入	58
4.3.3	電界分布のシミュレーション	60
4.3.4	判別分析を用いた導電性有無の識別	61
4.4	結言	63
	参考文献	65
第5章 廃蛍光管自動選別装置の開発		
5.1	諸言	67
5.2	廃蛍光管自動選別装置	67
5.2.1	廃蛍光管自動選別装置の概要	67
5.2.2	選別システムのハードウェアの概要	72
5.2.3	選別システムのソフトウェアの概要	74
5.3	実験方法	76
5.3.1	使用した廃蛍光管	76
5.4	結果および考察	77
5.4.1	蛍光管選別実験	77
5.5	結言	78

第 6 章	その他のリサイクル分野への応用	
	－風力選別のための画像処理システム－	
6.1	諸言	80
6.2	実験方法	81
6.3	結果および考察	84
6.3.1	二種類の背景を用いた物体抽出	84
6.3.2	判別関数の学習	88
6.3.3	Cu / PVC 混合画像から Cu / PVC 画素の判別	90
6.4	結言	93
	参考文献	94
第 7 章	結論	96
	謝辞	100

第 1 章 序論

1.1 緒言

レアアース(希土類元素)は、1794年にスウェーデンで見つけられ、新しい鉱物中に未知元素の酸化物の“新しい土”が発見されたため、“レアアース(希な土)”と名付けられた。レアアースは、原子記号 21 番の Sc(スカンジウム), 39 番の Y(イットリウム), 57 番の La(ランタン)から 71 番の Lu(ルテニウム)の 17 種類の元素のグループで、20 世紀初頭に、ライターの発火石の原料として使われはじめたが、当時はレアアースの精製・分離技術が確立されておらず、原鉱の状態のままか合金の状態で利用されるケースがほとんどであった。その後、精製・分離技術が発達し、また、レアアースの特性が明らかにされ、現在は、永久磁石・ガラス研磨剤・触媒・蛍光体等幅広く使用され、日本のハイテク産業には不可欠な金属資源となっている[1][2]。

レアアースは、発見された経緯や元素ごとに分離する際の状況により大別され、La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu は「軽希土類元素」、Sc, Y, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu は「重希土類元素」と呼ばれる。「軽希土類」は、比較的世界の広い地域に分布しているため、今後各地での開発が進むと考えられているが、「重希土類」は偏在性が高く、現状は中国の特定の鉱床でしか十分に生産できる量が確認できていない。レアアースは、「マグマ由来」と「イオン吸着型」の 2 種類の鉱床を持ち、「マグマ由来」の鉱床は、地下深くのマグマに含まれていたレアアースが数億年をかけて地表に移動したもので、世界の様々な地域に存在するが、ウランなどの放射性物質を含み、処理工程にコストがかかる。これに対し、「イオン吸着型」の鉱床は、レアアースを比較的多く含む花崗岩が数百万年かけて粘土層になったもので、中国南部など一部の地域にしか存在せず、レアアース生産の課題となる放射性元素を含まないため、製錬・処理が容易である。中国は重希土類やイオン吸着型鉱床が偏在しているため、レアアース生産大国となっている。

1990年代半ばまで、米国が主なレアアース生産国であったが、米国を含むレアアース資源保有国の多くは、環境に良くないうえに生産コストがかかるレアアースの生産から手を引き、1992年以降、中国は逆に生産に力を入れ、安い人件費で、レアアースを最も安く生産した。その結果、中国以外の生産国のレアアース鉱山の多くが閉山に追い込まれ、市場から次々と撤退した結果、2000年以降は中国が世界の9割以上のレアアースを供給する、一国独占生産の状態になった[3]。こうした中、2010年、中国政府は国内産業の高度化を目指す目的で、レアアースを含む各種非鉄金属の生産および輸出管理を強化しており、我が国をはじめとする世界各国でレアアース供給の不安定化が懸念された。この供給問題に対して、米国、オーストラリア、ベトナム、カザフスタン等でレアアースの新規鉱山の開発が進んでいるが、「重希土類」は偏在性が高いため、「軽希土類」に比べてより調達リスクが高く、安定な供給が危ぶまれている。

世界のレアアースの生産量は、2006年以降、右肩上がり伸びたが、2010年の中国のレアアース輸出問題発生以降、2011年に前年比で84%と大幅に減少し、レアアース単価も2011年7月に最高値となった。この事態を前に、世界各地で、レアアース生産の再開の努力がなされ、2012年度以降中国での増産が進行し、2015年には前年比102%の133.0千まで回復した。2015年における世界のレアアースの生産量は、中国が1位(114.0REO千t)、豪州が2位(10.0REO千t)、米国が3位(4.0REO千t)となっており、依然として中国が多く、世界の生産量の86%を占めている[4]。

2010年の中国のレアアース輸出問題発生以降、レアアースに関する日本国内の関心と意識が高まり、レアアースの安定供給は”国家的課題”として位置づけられている。日本のエネルギー政策の基本的な方向性を示すために政府が策定した「エネルギー基本計画」においても、レアアースはLi(リチウム)やW(タングステン)等とともに「戦略レアメタル」として特定され、“需要拡大の見込みや特定国への偏在性や依存度、供給障害リスク等の観点から安定供給のために政策資源の集中投入が必要”と考え、政府は2030年までに自給率を50%以上とすることを目標に掲げている。

JOGMEC(石油天然ガス・金属鉱物資源機構)は、中国以外の国・地域で行

われるレアアース開発プロジェクトに対する投資や技術提供を行い、レアアース供給源の確保に努めているほか、レアアースのリサイクルフローの構築に向けた取り組みを実施し、目標達成の一翼を担っている。

レアアースのうち、Eu(ユーロピウム)、Tb(テルビウム)、Y(イットリウム)、La(ランタン)、Ce(セリウム)などが蛍光管の蛍光体として使われているが、「重希土類」の Y, Tb, 「軽希土類」の Eu は、中国以外での採掘は難しく、これらの元素が含有されている廃蛍光管は重要なリサイクル資源と考えられ、近年の世界的なレアアース危機の状況下で、蛍光管からのレアアース回収も期待されるようになってきている。

蛍光管のガラス内面に塗布される蛍光体には、白色蛍光体と三波長蛍光体があり、白色蛍光体は、 $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{FCl:Sb, Mn}$ のハロリン酸カルシウムで構成され、三波長蛍光体は、 $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}$ など赤色蛍光体、 $\text{LaPO}_4:\text{Ce, Tb}$ など緑色蛍光体 $(\text{Sr,Ca,Ba,Mg})_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl:Eu}$ $(\text{Ba,Sr})\text{MgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu,Mn}$ など青色蛍光体の混合物で構成される[5][6]。以下、本研究では、白色蛍光体を用いた蛍光管を“白色蛍光管”，三波長蛍光体を用いた蛍光管を“三波長蛍光管”と呼ぶ。両蛍光体の出す光は同じ可視光でも異なり、三波長蛍光体の方がより自然光に近く、明るく、また、白熱灯と比べ、同じ明るさでも消費電力を低く抑えられる。現在、普及が進められている白色 LED は、青色 LED チップと黄色蛍光体(YAG 蛍光体)を組み合わせたものであるが、発光効率が低く、高温で効率が下がるため、デバイスやヒートシンクの形状の改良が必要である。また、LED ランプは発光部が狭く点光源状に発光するため、不快な眩しさを生じ易く、照射範囲も狭く、室内用蛍光灯としては、解決すべき課題がある。日本では、省エネの観点から LED 照明が注目されているが、蛍光粉使用製品の動向における一般照明分野の市場予測によると、LED ランプの需要が増えるものの、世界的には、絶対量として今後も蛍光管が主流と予測されている[7]。また、蛍光粉向けレアアース需要量予測によると、白色蛍光管から三波長蛍光管への切り替え需要は今後も継続し、蛍光粉向けのレアアースの需要は今後も増加すると予測されている[7]。

蛍光管で使われているレアアースのリサイクルには、廃蛍光管の回収が重要であるが、現在、一般家庭から廃棄される蛍光管は、一部の自治体が

回収を行っているものの、多くの自治体が燃えないごみに定めており、現状の蛍光管の回収率も30%と非常に低い[7]。また、一部の企業により蛍光管のリサイクルが行われているが、リサイクルの主な対象は水銀・ガラスであり、蛍光体の再資源化や有効利用についてはほとんど行われず、埋め立て・廃棄処分されている。蛍光管に含まれるレアアースの量は、蛍光管のメーカー、種類、大きさにもよるが、1本当たり2~5gの蛍光粉が使用され、その内約70%がレアアースであるので、蛍光管1本当たり1.4~3.5gものレアアースが含まれている。

福岡県、九州大学および企業からなる共同研究の報告によると、仮に、九州で1年間に出る使用済み蛍光管の全てが回収されれば、レアアースの回収量は約57トン、金額にすると約25億円になると推定され、適正に回収処理されれば、輸入に大きく依存しているレアアース資源の安定確保に貢献できるものと予想される[7]。また、環境問題の観点からも水銀を含んだ蛍光管の回収は非常に重要である。

現在、廃蛍光管から回収されたレアアースの単価は、2012年のピーク後、2013年辺りから低迷し続けているが、回収後のレアアースを高品位にできれば、レアアースリサイクルの事業化の可能性も見えてくる。そのためには、効率的な分離・濃縮方法の確立が重要となる。

1.2 廃蛍光管リサイクルに関する現在までの研究

これまで、レアアースの分離・濃縮に関して、以下のような研究がなされてきた。高橋らは、廃蛍光管からレアアースを分離回収し、高純度レアアース酸化物を得て、さらに、硫酸浸出液から $Y_2O_3:Eu^{3+}$ 、 $LaPO_4:Ce^{3+}$ 、 Tb^{3+} のレアアース蛍光体の再生に成功したと報告している[8]。その後、溶媒抽出法によるレアアースの分離回収、廃蛍光管処理事業所から排出される廃蛍光管の物理選別および再合成したレアアース蛍光体の実用化などについて検討し、野村興産(株)イトムカ鉱業所での廃蛍光管処理プロセスを紹介している[9]。

また、平島らは、希土類蛍光体の溶媒抽出等による分離精製コストは、

廃蛍光体中の希土類元素の品位に大きく依存するため、廃蛍光体の基礎性状の把握、希土類元素を安価に分離・濃縮する方法を検討した。表面ぬれ性の差を利用した浮選、粒径及び沈降速度差を利用したふるい分け、乾式分級（ターボプレックス）、湿式分級（湿式サイクロン）、薄流選別（Multi-Gravity Separator (MGS)）、比重差を利用した重液選別等を行った結果、廃蛍光体から希土類蛍光体を分離・濃縮するには、疎水化処理後に重液選別を行う場合が最も選別成績が良く、排水処理などを行わないで安価に濃縮するためには風力分級機による選別が良いことを報告している[10][11]。

藤田らは、蛍光管の水銀を除去した後の赤、緑、青の蛍光粉を、液液分離法により 90%以上で分離し、従来は、蛍光粉を粉体のままで回収ができず、リサイクルが経済的でなかったが、新技術の開発はリサイクル手法を変えることも可能と報告している[12]。

蛍光体に含まれるレアアースには難溶性のものがあり、溶解させるのに高温、高濃度の酸またはアルカリが必要である。柴田らは、メカノケミカル処理法や晶析剥離法を含む湿式分離技術を検討し、穏やかな条件で蛍光体からレアアースを浸出させる方法を検討し、その有効性を示している[13]。

これらの研究は、回収された廃蛍光管を粉砕し取り出した蛍光体の分離・濃縮方法に関するものであるが、ガラス管を粉砕する前に、廃蛍光管に含まれる蛍光体の種類を知ることができれば、さらに高品位のレアアースを得ることができると予想される。

図 1-1 に、現在、廃蛍光管から蛍光体のリサイクルを行っている株式会社ジェイ・リライツの廃蛍光管リサイクルプロセスを示す。図 1-1 のプロセスは、ECM(MRT System 製 End Cut Machine)と呼ばれる装置を用いて、蛍光体の種類を識別し、蛍光管の両端を切断後、ガラス管内部の蛍光体を吸い取り、レアアースを分離・回収すると共に、ガラス、水銀、金属等の有価物質を回収している。

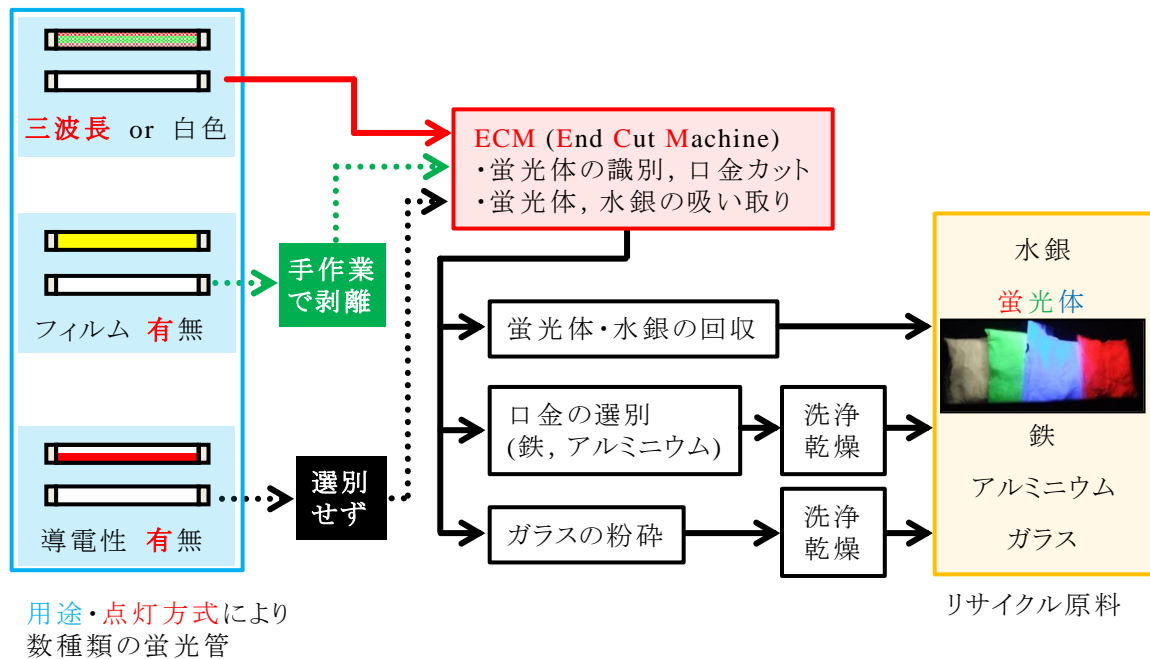


図 1-1 廃蛍光管リサイクルプロセス

しかし、蛍光管には、蛍光体の違い(白色または三波長)、落下時の飛散防止や昆虫の飛来防止紫外線吸収フィルムの有無、点灯方式の違いによる蛍光管自身の導電性の有無、および、長さや直径等、形状の違いにより、様々な種類があるため、ECM を用いてこれらの蛍光管を処理するには、現状では作業員の手作業による前処理が必要になる。

ECM はフィルムの有無を識別する機能がなく、フィルムを有する蛍光管をそのまま ECM に投入すると、フィルムがガラス回収の際の不純物となってしまう。そのため現状では、作業員がフィルムを目視で識別し、カッター等を用いてフィルムを剥ぎ取った蛍光管を ECM に投入している。また、蛍光管には、蛍光管自身に導電性を持たせるためにガラス管内面に導電性被膜が塗布されたものがあるが、ECM にはガラス管内部の導電性被膜の有無を識別する機能もなく、また、蛍光管のガラス管内面に塗布された導電性被膜は、作業員が目視でも識別が困難であるため、現状では、導電性被膜の有無を区別せず、そのまま ECM に投入され、導電性被膜はガラス回収の際の不純物となっている。このように、現状の ECM で処理した蛍光体には、導電性被膜などの不純物を含む場合もあり、分離・濃縮後の品位はそれほど高くできない。また、ECM は 5 千万円以上と高価なため、

ほとんどの廃蛍光管リサイクル企業が ECM を持たず、粉砕機を利用して
いる。使用済み蛍光管から回収された廃蛍光管中のレアアース品位は、
ECM を有する企業の場合でも高々約 60%，その他の企業では約 5%~35%
程度となっている[7]。逆に、フィルムも導電性皮膜も無い三波長蛍光管を
自動で識別し、不純物を含まない状態で、ECM や従来の粉砕機に投入でき
れば、回収後のレアアースも高品位となり、蛍光管のレアアースリサイク
ルの実現の可能性も見えてくる。従って、蛍光管の粉砕前の選別の自動化
は重要な課題と言える。

近年、このような自動化の要求に応える技術として、センサ選別技術が
注目されている[14]。これまで、蛍光管の種類を識別する方法として、蛍光
管に印字された型番を読み取る方法や、蛍光管を切断し、紫外線光源を挿
入し、その際の発光の様子から判断する方法が提案されてきた[15]。しか
し、前者は汚れや劣化による印字の消失、後者はガラス管破断に伴う水銀
の放出等の問題があった。また、現場において、UV ランプを用いて、蛍光
管に特定の波長の紫外線を照射すると、青く発光することが知られていた。
西須らは、特定波長の UV 光を蛍光管に照射した際の蛍光管の色度測定
の結果から三波長と白色蛍光管を識別する方法を提案している。また、色
度測定により、落下防止用等の蛍光管を覆うフィルムの有無の判別の可能
性も示している[16]-[18]。また、平島らは、AE(Acoustic Emission)法を用いて、
1 個の微粒子を AE センサに落下させた際の衝突音波形の計測及び解析を
精度良く行い、衝突音を利用して粒子を識別し[19]、さらに、風力選別機
の内部で、選別粒子が選別機内壁と衝突した際に発生する衝突音をオンラ
インモニタリングするシステムを開発し、実際の PET フレーク樹脂回収工場
でモニタリングシステム適用の可能性を示している[20]。

1.3 本研究の目的

本研究では、図 1-2 に示すように、3 種類のセンサ選別技術を用いて、三
波長蛍光管の識別を簡易な装置に置き換え、また、現在、手動で行われて
いる前処理を自動化し、高品位のレアアース回収のための廃蛍光管自動選

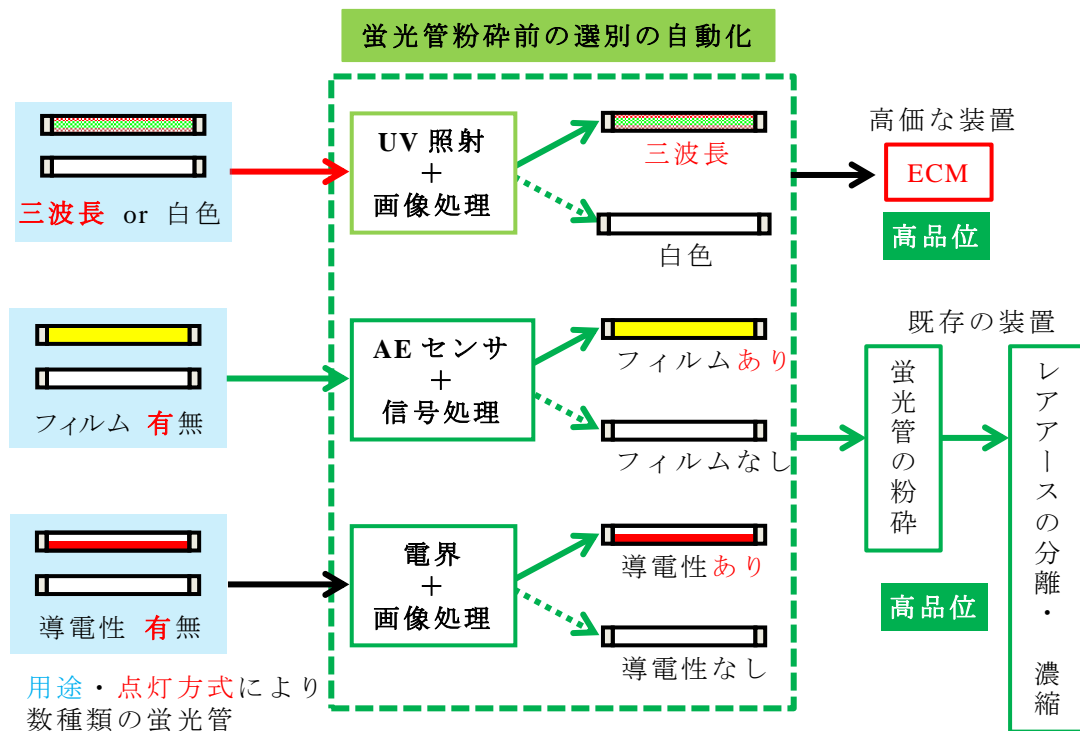


図 1-2 前処理の自動化

別装置を開発することを目的とした。

具体的には、まず、UV 光を蛍光管に照射した際の画像を USB カメラで撮影し、画像処理を用いて、数種類ある蛍光管の中からフィルムに覆われていない三波長蛍光管を識別する。次に、蛍光管を AE センサに落下させた際の衝突音を測定し、信号処理とパターン認識の一手法である判別分析を用いて、フィルムの有無を識別する。さらに、電界中に蛍光管を置き、その際の発光特性の違いから導電性を有する蛍光管を識別する。さらに、それらの機能に、蛍光管の搬送・回収の機能を加え、廃蛍光管自動選別装置を作製する。

1.4 本論文の構成

本論文は、7 章からなる。第 1 章では、本研究の背景、目的および構成を記した。

第 2 章では、UV 光照射と画像処理を用いた三波長蛍光管の識別について検討した。まず、白色、赤色、緑色及び青色の蛍光体の粉末について、

分光蛍光光度測定を行い、三波長蛍光管のみが青く発光する理由を明らかにした。UV 吸収フィルムで覆われた蛍光管、フィルムがない白色蛍光、フィルムがない三波長蛍光管について、UV 光を照射した際の発光の様子を USB カメラで撮影し、それらの画像の明度についてのヒストグラムを描き、三波長蛍光管を識別する条件を求め、誤判別の無い三波長蛍光管の識別を可能とした。さらに、画像処理を用いて、蛍光管を回収箱に格納する際に必要な情報である蛍光管の直径を算出した。

第 3 章では、AE 信号と信号処理を用いたフィルムの有無の識別について検討した。まず、AE 信号の波形解析により得られた時間領域における特徴量、離散フーリエ変換を行って得られた周波数領域における特徴量、ウェーブレット変換の展開係数をフラクタル次元解析して得られた時間・周波数領域の特徴量を領域毎に 6 個求め、それらの特徴量の特定な値を閾値として、フィルムの有無を判別した。さらに、3 つの領域に対して、パターン認識の分野で良く用いられる複数の特徴量を変数とする一次関数、二次関数を用いて判別を行う判別分析を適用し、閾値による判別の誤判別を改善した。さらに、判別結果をベン図によって整理し、誤判別の生じにくい特徴量を組み合わせて、二次関数を用いた判別分析を行った結果、誤判別の無いフィルム有無の識別を可能とした。

第 4 章では、電界と画像処理を用いた導電性の有無の識別について検討した。まず、電界を放射するテスラコイルの放電電極と蛍光管の位置関係による発光の違いを明らかにした。次に、フィルムの有無による発光の違いが、静電遮蔽によるものと予想し、基礎実験と蛍光管内外の電界シミュレーションを行い、静電遮蔽が原因であることを明らかにした。さらに、電界中に置かれた蛍光管を撮影した画像の明度の平均と分散を特徴量とし、それらの特徴量の特定な値を閾値として、導電性の有無を判別した。さらに、二つの特徴量を変数とする二次関数を用いて判別分析を行った結果、誤判別の無い導電性有無の識別を可能とした。

第 5 章では、第 2 章から第 4 章までに得られた 3 つのセンサ技術をもとに、紫外線照射と画像処理による三波長蛍光管の識別、AE センサと信号処理によるフィルム有無の識別、電界と画像処理による導電性有無の識別に

より、高価な装置を簡易な装置(UV ランプとカメラ)に置き換えて三波長蛍光管を識別し、現状の問題点であった作業員が目視で行っていたフィルム有無の識別、現状で対応できていない導電性有無の識別を自動化した。さらに、3つの識別方法に、蛍光管の搬送・回収を行う機能を追加した専用のハードウェア / ソフトウェアを作成し、誤判別無く蛍光管を選別する廃蛍光管自動選別装置を開発した。

第6章では、本研究で得られたカメラと画像処理を用いたセンサ技術を、廃被覆電線のリサイクル[21]工場で作業員が目視で行っている選別結果の評価の自動化に応用した例[22]について述べた。回収箱内の銅(Cu)粒子と6種類の色のポリ塩化ビニル(PVC)の粒子が混ざった画像をカメラで撮影し、画像処理で良く用いられる二値化により、背景から粒子を抽出した。次に、判別分析により、CuとPVC粒子の混合画像からCuとPVCの画素の比を計算した。さらに、粒子が完全分離していると仮定し、粒子の輪郭情報を利用して、判別分析後の輪郭内のCuおよびPVCの識別画素数を比較し、画素数が少数派である画素を多数派の識別結果に変更することにより、判別分析の際生じた誤りを改善した。

第7章は結論であり、各章で得られた結果をまとめた。

参照文献

- [1] Shinzo OSHIMA: “The Application of Rare Earth”, *Shigen-to-Sozai*, **109** (1993), pp.478-481.
- [2] Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC) (2011): “JOGMEC NEWS Vol. 27”, Retrieved June 16, 2017 from <http://www.jogmec.go.jp/content/300059413.pdf>.
- [3] Kazunori FUKUDA: Japan, “the U.S. and the EU's Response until 2007 to China's Export Restrictions on Raw Materials”, *Journal of MMIJ*, **124** (2008), pp 562-569.
- [4] Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC) (2017): “Material flow of mineral resources, Fiscal Year 2016, 6 Rare Earth (REE)”, Retrieved June 16, 2017 from http://mric.jogmec.go.jp/public/report/2017-01/06_201701_REE.pdf.
- [5] Phosphor Research Society: *Phosphor Handbook*, (Ohmsha, Tokyo, 1987), pp. 207-233.
- [6] J. Tsukahara: “Kougen”, *Journal of the Illuminating Engineering Institute of Japan*, **77** (1993), pp. 444-449.
- [7] Fukuoka Research Commercialization Center for Recycling Systems: *Shiyozumi haikokan karano reaasu risaikuru jigyo ka kanosei chosa* [Commercialization feasibility study for rare earth recycling from waste fluorescent lamps], (Mitsubishi UFJ Research and Consulting, Tokyo, 2011), pp.20-92.
- [8] T. Takahashi, A. Takano, T. Saitoh, and N. Nagano: “Refining and Utilization of Rare Earth Elements from Phosphors in Waste Fluorescent Lamp”, *Resources Processing*, **45** (1998), pp. 288-294.
- [9] T. Takahashi, A. Takano, T. Saitoh, N. Nagano, S. Hirai, and K. Shimakage, “Separation and Recovery of Rare Earth Elements from Phosphor Sludge in Processing Plant of Waste Fluorescent Lamp by Pneumatic Classification and Sulfuric Acidic Leaching”, *Shigen-to-Sozai*, **117** (2001), pp.579-585.

- [10] T. Hirajima, A. Bissombolo, K. SASAKI, K. Nakayama, H. Hirai and M. Tsunekawa: “Floatability of Rare Earth Phosphors from Waste Fluorescent Lamps”, *Int. J. Miner. Process*, **77** (2005), pp. 187-198.
- [11] T. Hirajima, K. Sasaki, A. Bissombolo, H. Hirai, M. Hamada, M. Tsunekawa: “Feasibility of an efficient recovery of rare earth activated phosphors from waste fluorescent lamps through dense-medium centrifugation”, *Separation and Purification Technology*, **44** (2005), pp. 197-205.
- [12] T. Fujita, G. Dodbiba, and A. Otsuki: “Liquid-liquid Separation of Rare Earth Fluorescent powders for Recycling”, *Rare earths*, **54** (2009), pp.28-29.
- [13] S. Hattori¹, N. Murayama, and J. Shibata, “Leaching and Separation of Rare Earth Elements from Waste Fluorescent Powder”, *KAGAKU KOGAKU RONBUNSHU*, **39** (2013), pp.472-478.
- [14] S. Koyanaka: “Recent Trends of Sensor Based Sorting Technology in Resources Recycling”, *Journal of MMIJ*, **129** (2013), pp. 615-625.
- [15] N. Hashimoto and Y. Inokai: Toku Kai 2005-203214.
- [16] Y. Nishisu, and N. Akimoto: “Nondestructive Identification Method of Fluorescent Lamps using Chromaticity Values” [Translated from Japanese], *Proceeding of MMIJ Fall Meeting (2011)*, CD, pp.193-194.
- [17] Y. Nishisu. Toku Kai 2013-56294.
- [18] Yoshihiro NISHISU, “Performance of Used Rare-Earth Fluorescent Lamps and Their Employed Phosphors”, *Journal of MMIJ*, **130** (2014), pp. 527-533.
- [19] T. Hirajima, K. Kataoka, R. Toyoshima and M. Tsunekawa: “Particle Identification by the Measurement of Acoustic Emission Due to the Impact of a Particle on a Circular Plate”, *Journal of MMIJ*, **117** (2001), 573-578.
- [20] T. Hirajima, K. Kataoka, T. Nishida, R. Toyoshima and M. Tsunekawa: “On-line Monitoring for Air Classification”, *Journal of MMIJ*, **118** (2002), 681-686.

- [21] C. Park, N. Subasinghe, and H. Jeon: “Separation of Covering Plastics from Particulate Copper in Cable Wastes by Induction Electrostatic Separation”, *Materials Transactions*, **56** (2015), pp. 1140-1143.
- [22] A. Tayaoka, S. Nagao, T. Hirajima, and K. Sasaki: “Recovery of Cu and PVC from the Tailings of Covered Electric Wire Using the Air Classification”, *Proceedings of International Symposium on Earth Science and Technology*, December (2009), pp. 555-558.

第 2 章 紫外線照射による三波長蛍光管の識別

2.1 諸言

蛍光管には，蛍光体として白色蛍光体を用いた白色蛍光管，希土類を含む蛍光体を用いた三波長蛍光管がある。UV 吸収フィルムで覆われていない蛍光管に，特定の波長の UV 光を照射すると，三波長蛍光管のみが青色に発光することが知られている。この特性を利用すれば，数種類の蛍光管の中から三波長蛍光管を識別することが可能と考えられる[1]。本研究では，まず，この現象の原因を調べるため，白色，赤色，緑色及び青色の蛍光体の粉末について，分光蛍光光度測定[2]を行った。

通常，USB カメラで撮影した画像は，赤(R)，緑(G)，青(B)の混合比で色を表現する RGB 表色系が用いられるが，RGB 表色系は撮影した環境の明るさの変化に影響されやすい。本研究では，撮影した RGB 表色系の画像を，画像処理の分野で広く用いられ，撮影環境の変化に影響されにくい色相(H)，彩度(S)，明度(V)で色を表現する HSV 表色系(円柱モデル)[3]に変換した。

UV 吸収フィルムで覆われた蛍光管，フィルムがない白色蛍光，フィルムがない三波長蛍光管について，UV 光を照射した際の発光の様子を USB カメラで撮影し，それらの画像の明度についてのヒストグラムを描き，三波長蛍光管を識別する条件を調べた。

本研究では，5 章で述べるように，廃蛍光管自動選別装置を作製したが，この装置では，蛍光管を選別後，回収箱に格納する際，各蛍光管の直径に関する情報が必要になる。そこで，画像処理の分野で，画像中の物体と背景を分離するのに広く用いられる分離度が最大となる二値化[4]を用いて，撮影した画像から蛍光管を抽出し，蛍光管の直径を求める方法を検討した。

2.2 実験方法

2.2.1 蛍光粉の分光蛍光光度測定

本研究では、まず、日亜化学株式会社製の白色、赤色、緑色及び青色の蛍光体の粉末を用いて、分光蛍光光度測定を行った。また、分光蛍光光度測定には、日本分光株式会社製の分光蛍光光度計 FP-6600 を用いて、励起光の波長を 220 nm から 400 nm まで走査し、その際、発生する光の波長と強度を測定した。なお、最も強い蛍光強度を与える励起波長をその蛍光体の“最適励起波長”と呼ぶ。実際の蛍光管は、ガラス管の内面に蛍光体が塗布されている。そこで、励起光光源と蛍光粉の間にガラスを挿入した場合についても分光蛍光光度測定を行った。

2.2.2 廃蛍光管への UV 照射による発光

次に、リサイクル工場より借用した廃蛍光管に UV ランプ(アズワン製ハンディ UV ランプ、長波長 365 nm)を用いて波長 365 nm の紫外線を照射した際の発光の様子を USB カメラで撮影し、白色蛍光管と三波長蛍光管の発光の違いを観察した。

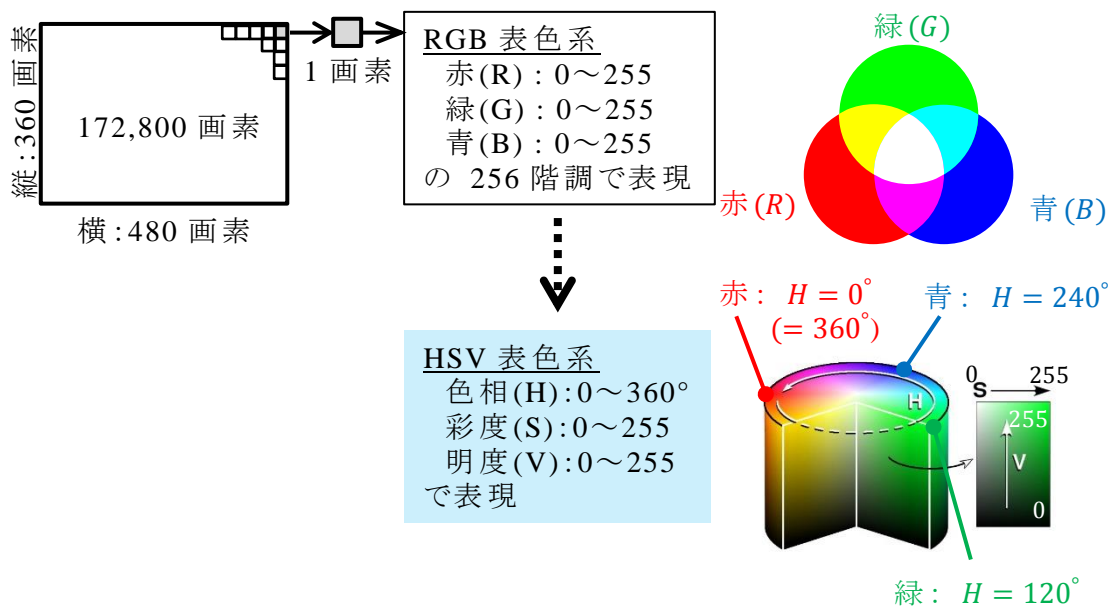
表 2-1 に、使用した廃蛍光管を示す。表 2-1 のように、使用した蛍光管は、蛍光体の種類(三波長または白色)、フィルム(UV 吸収被膜)の有無、導電性の有無により、5 つのグループ(G₁~G₅)に分けられた。G₁~G₅ の蛍光管の型式はそれぞれ、FLR40S/EX-N/M・M・NU-H, FLR40S・EX-N/M/36・P, FLR40SW/M-B, FLR40SS・W/37, 及び、FHF30EX-N であった。また、蛍光管の本数は、G₁~G₄ は各 13 本、G₅ は 3 本で、蛍光管の長さは 1200 mm と共通であるが、直径は 2 種類(S サイズ：約 32 mm, SS サイズ：約 28 mm)であった。

表 2-1 使用した廃蛍光管

グループ	蛍光体	フィルム	導電性	直径(mm)	本数
G ₁	三波長	あり	あり	32.5	13
G ₂	三波長	なし		32.2	13
G ₃	白色			32.4	13
G ₄		三波長	なし	28.9	13
G ₅	27.4			3	

2.2.3 RGB 表色系から HSV 表色系への変換

図 2-1 に、USB カメラにより撮影した画像の概要と本研究で採用した HSV 表色系の円柱モデルを示す。撮影された画像は、横方向 480 画素、縦方向 360 画素、合計 172,800 画素を持つ。通常、一つの画素の色は、赤(R)、緑(G)、青(B)の 3 種の原色を合成し表現する RGB 表色系が用いられ、それぞれの色の範囲は 0~255 で、 $256 \times 256 \times 256$ で 16,777,216 色を表現することができるが、RGB 表色系では、「明るい赤」や「薄い緑」というような表現がしにくく、光源の変動の影響も受けやすい。これに対して、画像処理の分野で広く用いられる HSV 表色系では、色相(H)は円柱の外周に沿って $0^\circ \sim 360^\circ$ の範囲で変化(図中の白矢印)し、図 2-1 のように、「赤、オレンジ、黄色、緑、水色、青、紫色、一周回って再び、赤」と色を表す。彩度(S)はその色が他の色に対してどの位際立っているかを示し、中心からの距離によって 0~255 の範囲で変化し、255 で純色(図中では緑)となる。明度(V)は、「明るさ」を表し、底面から上面に向かって 0~255 の範囲で変化し、0(黒)から上げていくと 255 で純色(緑)になる。RGB 表色系の場合、周囲が暗くなると、R、G、B の値が小さくなり、周辺の影響を受けやすい。これに対して、HSV 表色系の場合、図 2-1 のように、周囲が暗くなると、V の値は下がるが、H、S は変化せず、周辺の影響を受けにくい。



出典: File:HSV cylinder.jpg Created by Wapcaplet CC
表示-継承 3.0 赤・青・緑の説明等追加

図 2-1 USB カメラで撮影した画像と HSV 表色系の概要

本研究では、カメラで撮影された RGB 表色系の画像を HSV 表色系に変換し、画像の特徴を示す赤(R)、緑(G)、青(B)、色相(H)、彩度(S)、明度(V)等の値を用いて、白色蛍光管と三波長蛍光管の識別を検討した。

R 、 G 、 B の三つの値のうち、最大のものを max 、最小のものを min とすると、RGB 表色系から HSV 表色系への変換は、以下の式(2-1)、(2-2)、(2-3)で表される。

まず、明るさを表す明度(V)は、

$$V = \max \tag{2-1}$$

と表される。ここで、 max がゼロならば、その色は黒なので、 S 、 H 共にゼロとおく。

また、鮮やかさを表す彩度(S)は、

$$S = \frac{\max - \min}{\max} \tag{2-2}$$

色合いを表す色相(H)は,

$$H = \begin{cases} 60 \times \frac{G - B}{\max - \min} & (\text{if } \max = R) \\ 60 \times \frac{G - B}{\max - \min} + 120 & (\text{if } \max = G) \\ 60 \times \frac{G - B}{\max - \min} + 240 & (\text{if } \max = B) \end{cases} \quad (2-3)$$

と表される。

2.2.4 分離度

画像に関するヒストグラムは、横軸に画像の特徴を表す彩度(S)や明度(V)等の“特徴量”，縦軸に画素数などの特徴量の度数をプロットしたものであり、ヒストグラムを用いることで、画像全体の特徴を知ることができる。図 2-2 は、ある特徴量についてのヒストグラムの例で、(a)のような理想的な画像では、図中のグループ 1 とグループ 2 を表す 2 つのピークの間には、はっきりとした谷を有し、この谷の底部で両者を分離する閾値を設定することができる。(a)のように、閾値 Th_a を境界として、各画素を二つのグループに分け、 Th_a よりも小さい側 (グループ 1) のデータ数が n_1 、平均が m_1 、分散が σ_1 、 Th_a よりも大きい側 (グループ 2) のデータ数が n_2 、平均が m_2 、分散が σ_2 、となった場合、グループの広がりを示すグループ内分散 σ_w^2 は以下の式(2-4)、グループ間の距離を示すグルー

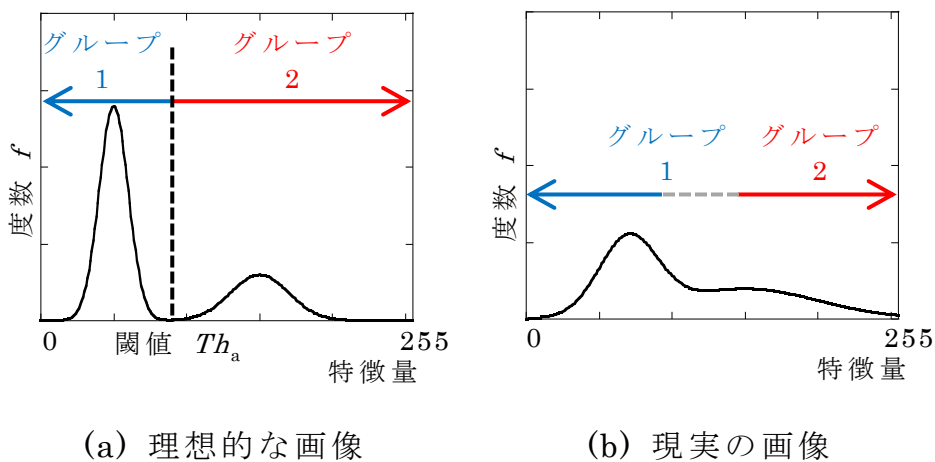


図 2-2 画像のヒストグラム

グループ間分散 σ_b^2 は、以下の式(2-5)で表される。

$$\sigma_w^2 = \frac{n_1\sigma_1^2 + n_2\sigma_2^2}{n_1 + n_2} \quad (2-4)$$

$$\sigma_b^2 = \frac{n_1n_2(m_1 - m_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (2-5)$$

ここで、グループ内分散 σ_w^2 が小さいほど、グループが尖り、グループ間分散 σ_b^2 が大きいほど、2つのグループが離れていることを意味する。従って、以下の式(2-6)で表される σ_w^2 と σ_b^2 の比である分離度 η が大きいほど、閾値 Th_a によって、二つのグループが良く分離されていることになる。

$$\eta = \frac{\sigma_b^2}{\sigma_w^2} \quad (2-6)$$

2.2.5 分離度を最大にする二値化

画像処理では、背景と物体を分離し、物体を抽出することが良く行われるが、その際、ヒストグラムは背景と物体の境界を示す閾値の決定に用いられる。しかし、実際の画像は図 2-2(b)のように両者を分ける谷底がはっきりせず、閾値を決定することが困難な場合が多い。

このような問題に対して、分離度を最大にする二値化が広く用いられている[4]-[6]。この二値化は、閾値の候補を特徴量の最小値(0)から最大値(255)までシフトし、式(2-6)で表される分離度 η を逐次計算し、 η が最大となった特徴量の値を閾値として採用する。

表 2-1 のように、蛍光管にはいくつかの直径がある。本研究では、選別した蛍光管を回収用のテーブルに一つずつ並べていき、一つの層が詰まったら、回収テーブルを蛍光管一層分下げるが、その際、各蛍光管の直径の情報が必要になる。

本研究では，蛍光管の直径を求めるのに，撮影された画像から蛍光管と背景の境界を検出するために分離度が最大となる二値化を用いた。なお，本研究では，フリーの OS である Linux(Fedora 14)上で，フリーの画像処理ライブラリである OpenCV を用いて，C 言語で画像処理プログラム等を作成した。

2.3 結果および考察

2.3.1 蛍光粉の分光蛍光光度測定

本研究では，まず，白色，赤色，緑色及び青色の蛍光体の粉末を用いて，分光蛍光光度測定を行った。図 2-3(a)～図 2-3(d)に，各蛍光粉を用いて，励起光光源と蛍光粉の間にガラスを挿入せずに行った分光蛍光光度測定の結果を示す。(a)が白色，(b)が赤色，(c)が緑色，(d)が青色蛍光粉の結果である。各図共に，横軸は蛍光粉に照射した励起光の波長 λ_{Ex} (nm)，縦軸は蛍光粉から発生された蛍光の波長 λ_{Em} (nm)を示す。図中で，蛍光の強度を等高線で表し，右端に等高線の高さを緑から赤色で示す。また，左端に可視光線のスペクトルを示す。なお，図に見られる斜めのラインは，励起光の 2 次のレイリー散乱によるもので，無視して構わない。

図 2-3(a)より，白色の蛍光粉の場合，最適励起波長 255 nm に対して，発光波長は 576 nm で，図中の左端に示した可視光線のスペクトルでは，黄色に近い色となった。同様に，図 2-3(b)～図 2-3(d)より，その他の蛍光粉の場合，最適励起波長(b)赤色 255 nm，(c)緑色 285 nm，(d)青色 345 nm に対して発光波長は，(b)赤色 612 nm，(c)緑色 544 nm，(d)青色 446 nm となり，各蛍光粉の色の可視光線のスペクトルとほぼ一致した。

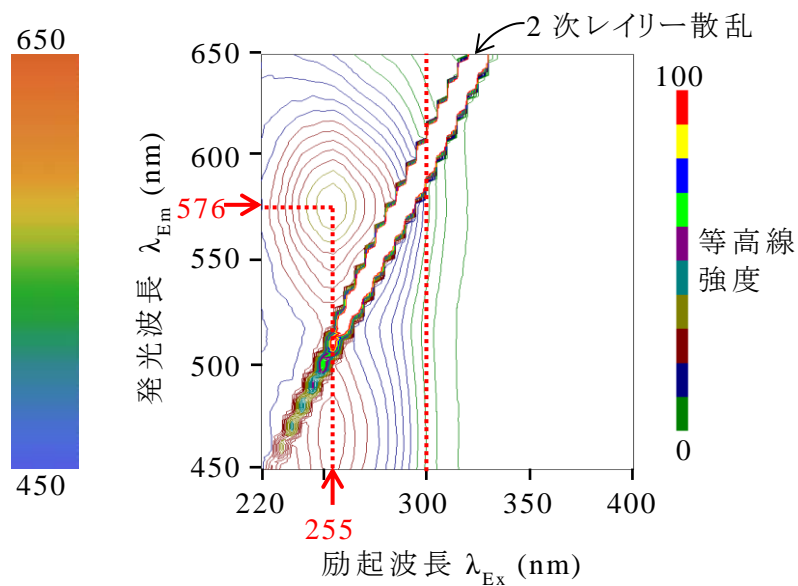


図 2-3(a) 分光蛍光光度測定の結果(白)

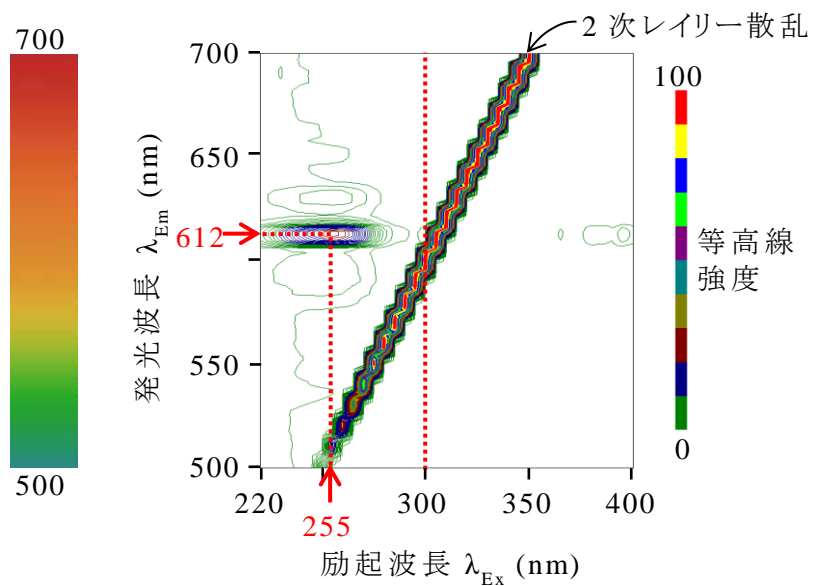


図 2-3(b) 分光蛍光光度測定の結果(赤)

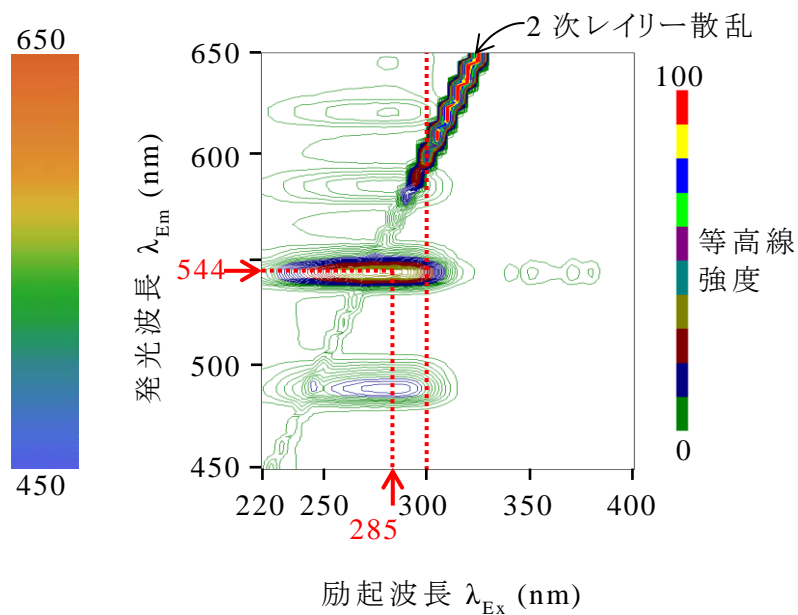


図 2-3(c) 分光蛍光光度測定の結果(緑)

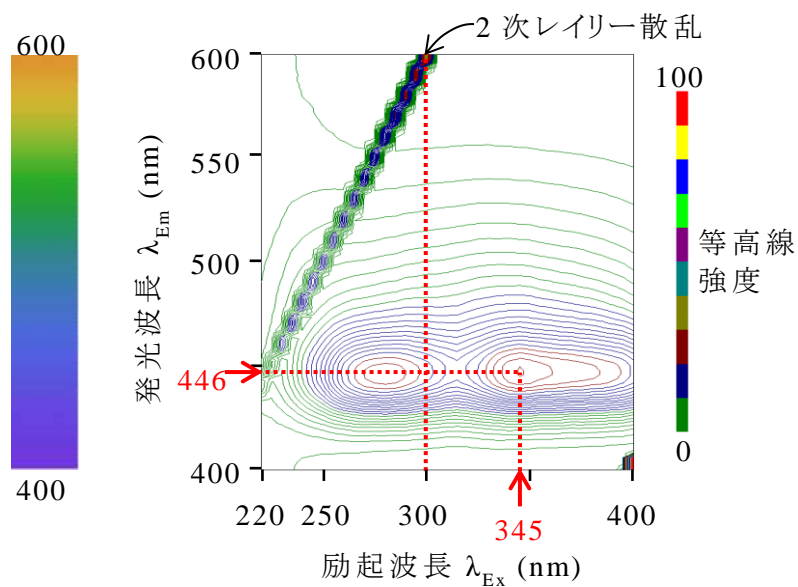


図 2-3(d) 分光蛍光光度測定の結果(青)

これらの結果より，(d)の青色の蛍光粉の最適励起波長は他の蛍光粉の最適励起波長よりも長く，300 nm を超えることがわかった。

次に、ガラス管内面に塗布された蛍光体と同様の条件になるように、励起光光源と蛍光粉の間にガラスを挿入して行った分光蛍光光度測定の結果を図 2-4(a)~2-4(d)に示す。

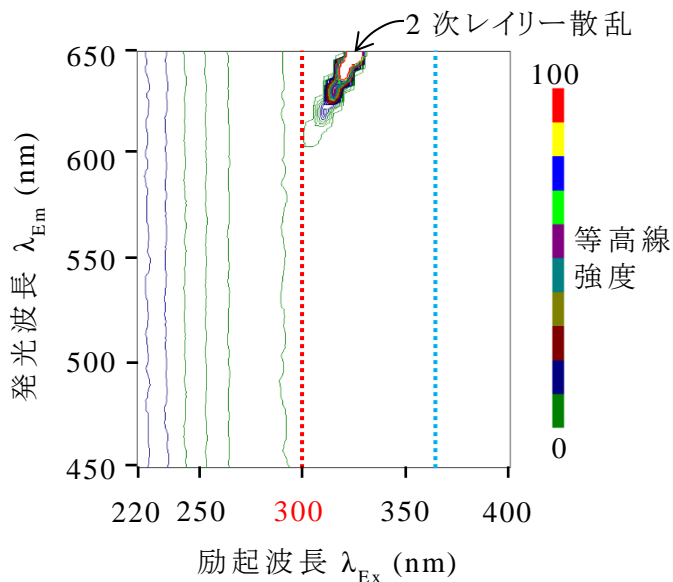


図 2-4(a) ガラスありでの分光蛍光光度測定の結果(白)

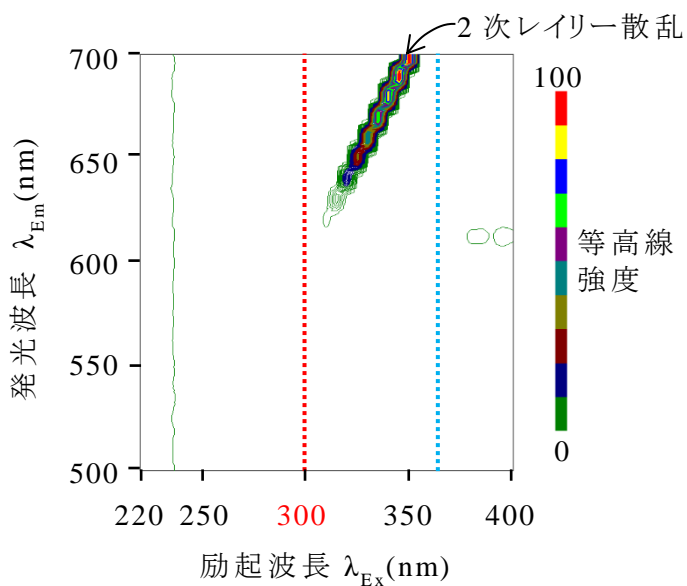


図 2-4(b) ガラスありでの分光蛍光光度測定の結果(赤)

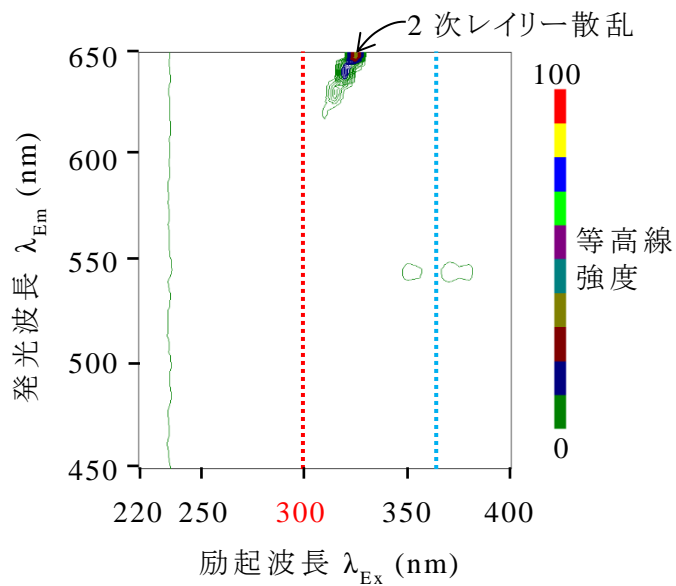


図 2-4(c) ガラスありでの分光蛍光光度測定の結果(緑)

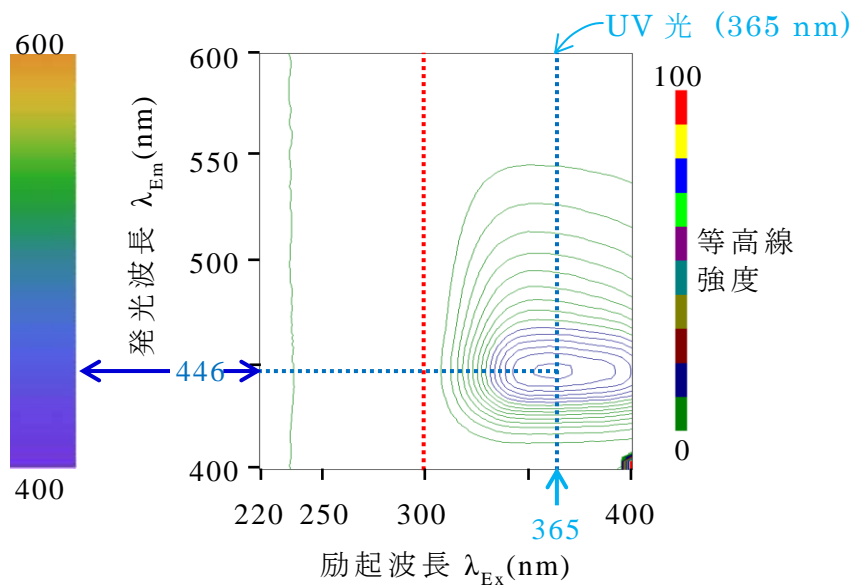


図 2-4(d) ガラスありでの分光蛍光光度測定の結果(青)

図 2-4(a)～図 2-4(c)より，(a)白色，(b)赤色，(c)緑色の蛍光粉の場合，特に発光波長は見られず，2次レイリー散乱も約 300 nm 以下で消滅して

いた。これに対して，図 2-4(d)の青色蛍光粉の場合，図 2-3(d)の結果と同じように，最高励起波長 365 nm で，発光波長 446 nm となった。

表 2-2 各蛍光粉の最適励起波長と発光波長

ガラス	波長 (nm)	白	赤	緑	青
なし	励起	255	255	285	345
	発光	576	612	544	446
あり	励起	×	×	×	365
	発光	×	×	×	446

×: 発光しない

表 2-2 に，図 2-3(a)～図 2-3(d)と図 2-4(a)～図 2-4(d)をまとめた結果を示す。

蛍光管に使用されているソーダ石灰ガラスは，波長 300～700 nm 程度の可視光線を良く通すが，それより短い波長の紫外線を通しにくい特徴がある[7]。表 2-2 のように，ガラスが無い場合，青色以外の蛍光粉の最適励起波長は全て 300 nm 以下の 225 nm～285 nm であるため，励起光がガラス管を通過することができず，発光しなかったものと考えられる。

現在，波長 356 nm の UV ライトが市販されているが，この UV ライトを用いて，廃蛍光管に 365 nm に近い励起波長を照射すれば，青色の希土類蛍光体がガラス内面に塗布された三波長蛍光管のみが青く発光し，白色蛍光管と三波長蛍光管を判別できることが予想される。

2.3.2 RGB / HSV 表色系の特徴量による蛍光管の分離度

次に，表 2-1 に示した各種蛍光管のうち，グループ G₁(フィルムあり)，G₂(三波長，フィルムなし)，G₃(白色，フィルムなし)について，市販の UV ランプを用いて，白色蛍光管か三波長蛍光管の判別を行った。

図 2-5(a)に，UV ライトで波長 365 nm の紫外線を，G₁, G₂, G₃ の蛍光管に照射し，その際の発光の様子を，UV カメラで撮影した写真の原画像，赤(R)画像，緑(G)画像，青(B)画像，および，色相(H)画像，彩度(S)画像，明度(V)画像を示す。図 2-5(a)の列は左からフィルムあり(G₁)，三波長蛍

光管(G₂), 白色蛍光管(G₃)の蛍光管の各画像を示し, 1行~4行は原画像, 赤(R)画像, 緑(G)画像, 青(B)画像を示す。原画像を比較すると, 三波長蛍光管のみが青く発光し, 白色蛍光管とフィルムありの蛍光管は発光しないことがわかった。UV光を照射すると, 三波長蛍光管はUV光がガラス内面の青色蛍光体を励起し, 青色に発光したが, 白色蛍光管は発光せず, フィルムありの蛍光管は, UV光がフィルムに吸収され, 内部の蛍光体まで届かず発光しなかったものと予想される。そのため, フィルムありの蛍光管は, 白色蛍光管と三波長蛍光管の区別がつかないことがわかった。

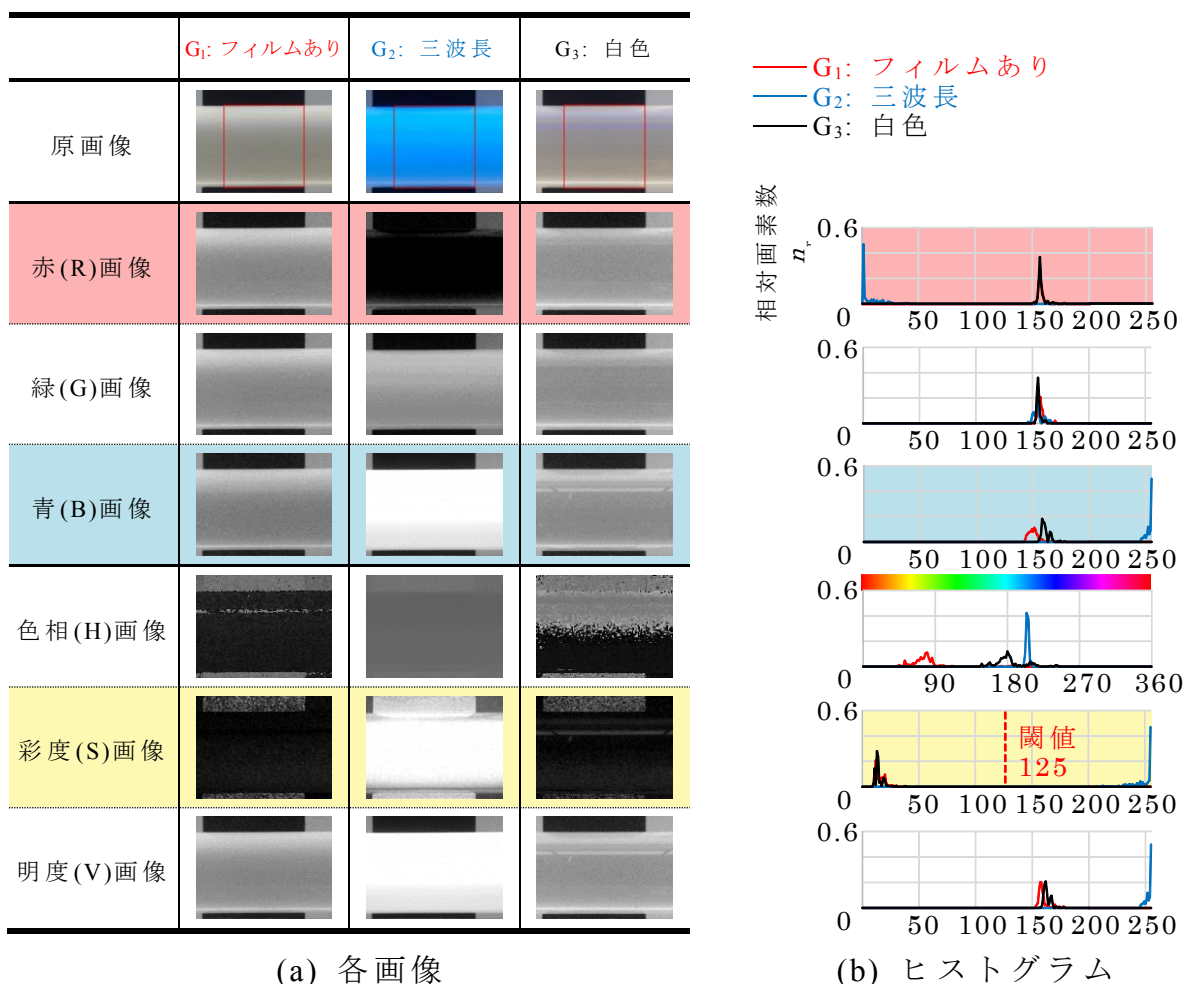


図 2-5 蛍光管の RGB / HSV 表色系 画像とヒストグラム

R, G, B 画像をもとに, 三波長蛍光管とその他の蛍光管の判別を検討するため, 表 2-1 の G₁, G₂, G₃ の蛍光管に UV 光を照射した際の写真を,

182 枚(=13 本×14 枚)ずつ撮影し、原画像中に示した赤い四角で囲まれた領域の各画素について各特徴量の平均値を計算し、図 2-5(b)のようなヒストグラムを描いた。なお、赤い四角の領域は、横は 100 番目から 379 番目までの固定の 280 画素、縦は蛍光管の直径に合わせて 227 画素から 293 画素とした。

図 2-5(b)の 1 行～3 行に、RGB 表色系のヒストグラムを示す。ヒストグラムの横軸は、 R , G , B の値(0～255)、縦軸は各画素数を最大の画素数で割った相対画素数 n_r を示す。図 2-5(a)の二列目の R 画像を比較すると、三波長蛍光管は暗く、赤色がほとんどないが、フィルムありの蛍光管と白色蛍光管は灰色であった。この結果は、図 2-5(b)の R のヒストグラムと良く対応し、三波長蛍光管は 0 辺りに鋭いピークを持ち、その他の蛍光管は共に 150 辺りでピークを持ち、三波長蛍光管と他の蛍光管が、 R のヒストグラム上で、約 150 離れていることがわかった。 G 画像については、3 種類の蛍光管は共に灰色で、 G のヒストグラムでも、3 種類の蛍光管は共に 150 辺りでピークを持ち、違いが見られなかった。 B 画像については、三波長蛍光管は白いが、フィルムありの蛍光管、白色蛍光管は、共に灰色であった。 B のヒストグラムを見ると、三波長蛍光管は 255 辺りに鋭いピークを持ったが、その他の蛍光管は 150 辺りに分布した。以上の結果より、RGB 表色系の場合、 R または B のヒストグラムを描き、三波長蛍光管とその他の蛍光管のピークの間辺りを閾値とすれば、両者の判別が可能ながわかった。

次に、図 2-5(a)の原画像を、式(2-1)～(2-3)を用いて、RGB 表色系から HSV 表色系に変換した、 H 画像、 S 画像、 V 画像を、図 2-5(a)の 5 行～7 行に示す。 H 画像を比較すると、三波長蛍光管は灰色で、白色蛍光管は灰色と黒が半々で、フィルムありの蛍光管は黒色であった。図 2-5(b)の H のヒストグラム上でも三波長、白色、フィルムありの順番で値が小さくなっていった。 S 画像については、三波長蛍光管は白く、その他の蛍光管は共に黒色であった。 S のヒストグラムを見ると、三波長蛍光管は 255 辺りに鋭いピークを持ち、その他の蛍光管は共に 20 辺りに分布し、三波長とその他の蛍光管が、 S のヒストグラム上で、約 235 と大きく離れている

ことがわかった。V 画像を比較すると，三波長蛍光管は明るく，白色蛍光管は紫外線がガラス面で反射し 1, 2 本の筋が見られた。フィルムありの蛍光管は白色蛍光管のような反射もなく灰色であった。V のヒストグラムを見ると，三波長蛍光管は 255 辺りに鋭いピークを持ったが，その他の蛍光管は 160 辺りに分布した。

表 2-3 に，図 2-5 の R, G, B, H, S, V のヒストグラム，式(2-6)を用いて求めた三波長蛍光管とその他の蛍光管を分離した際の分離度 η を示す。この表より，特徴量として，S(彩度)を用いた場合の分離度が最も大きく，三波長蛍光管とその他の蛍光管の判別には，特徴量として，S が最も有効であることがわかった。

表 2-3 各特徴量を用いた場合の分離度

赤	緑	青	H	S	V
120.7	0.032	76.90	0.735	253.6	146.9
○	×	△	×	◎	△

本研究では，図 2-5 の S(彩度)の閾値を 125(図中の赤破線)とし， $125 \leq S$ の場合は三波長蛍光管(G_2)， $S < 125$ の場合はその他の蛍光管(G_1, G_3)と判断する簡単なルールで判別実験を行った結果，全ての蛍光管について，誤りなく判別できた。

2.3.3 明度画像を用いた蛍光管直径の算出

本研究では，分離度が最大となる二値化を用いて，背景から蛍光管を抽出し，蛍光管の直径を求める方法を検討した。

図 2-6 に，明度(V)のヒストグラム，二値化を用いて，蛍光管の画像から直径を求める概要を示す。この図の(a)は蛍光管の V 画像であり，(b)は，(a)の V 画像の上部の青線で囲まれた領域の画素，(c)は，(a)の V 画像の下部の赤線で囲まれた領域の画素，それぞれについて，V のヒストグラムを描いたものである。なお，(a)の青色と赤色で四角に囲まれた領域の画素は，それぞれ，横 50，縦 360，合計 18000 画素とした。(b)，(c)の

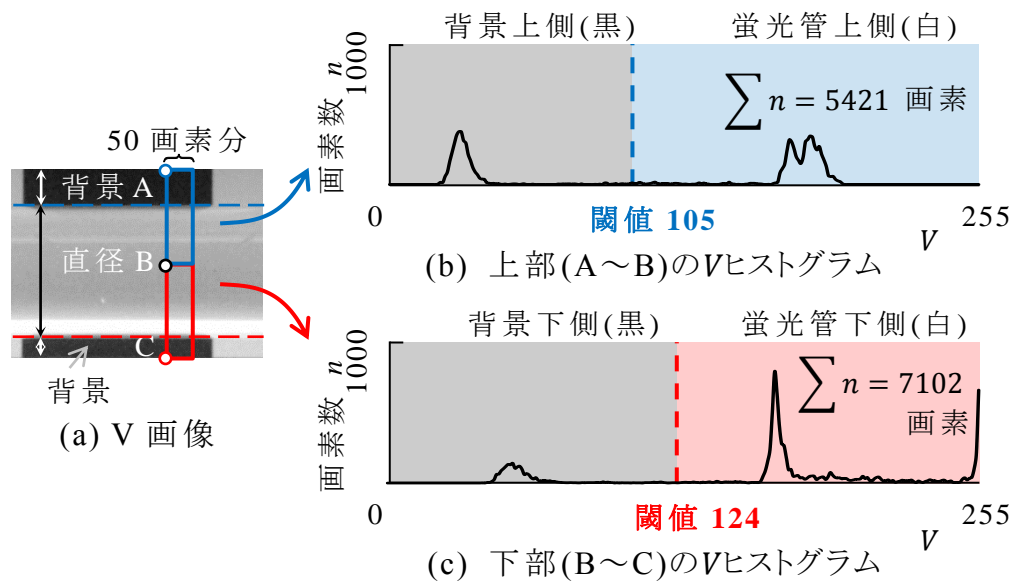


図 2-6 明度(V)画像による蛍光管の直径の計算

横軸は V ，縦軸は画素数 n を示す。この(b)，(c)の V のヒストグラムに対して，分離度 η が最大になる閾値を求めると，それぞれ，105(図中の青い破線)と124(図中の赤い破線)となった。(b)の閾値105，(c)の閾値124より大きな V を持つ明るい画素は，(a)の青色と赤色の四角で囲まれた領域のうち蛍光管が占める画素で，この閾値より小さな V を持つ暗い画素は，(a)の青色と赤色の四角で囲まれた領域のうちの蛍光管以外の部分の画素と言える。(b)の $V = 105 \sim 255$ 及び(c)の $V = 124 \sim 255$ の画素の総和を求めると，それぞれ，5421と7102となり，両者を加えた12523個の画素は，青色と赤色の四角で囲まれた領域のうち，蛍光管が占める画素であり，この値を横幅の画素数50で割った値 $12523 / 50$ が，蛍光管の直径に対応する画素数となる。本研究では，予め，白いテープが張られ，直径が30.0mmと既知の棒を撮影し，その直径に対応する画素数を求めた結果，265画素であった。この画素数(265画素)と直径(30.0mm)の対応を用いると，図2-6(a)に示された蛍光管の直径 x は， $30:265 = x:12523/50$ ， $x = 12523/50 \times 30/265 \cong 28.4 \text{ mm}$ と求まった。

表2-1の $G_1 \sim G_4$ に属する蛍光管，それぞれ10本， G_5 に属する蛍光管2本について，同様の計算を行い，平均した直径の推定値を表2-4に示

す。表のように，相対誤差 1%程度で，蛍光管の直径を算出できることがわかった。

表 2-4 使用した廃蛍光管

グループ	蛍光体	フィルム	真値 (mm)	推定値 (mm)	相対誤差 (%)
G ₁	三波長	あり	32.5	32.1	1.0
G ₂	三波長	なし	32.2	32.3	0.3
G ₃	白色		32.4	32.1	0.8
G ₄			28.9	28.7	0.7
G ₅	三波長		27.4	28.1	0.6

2.4 結言

蛍光管に使用されているガラスは，波長 300～700 nm 程度の可視光線を良く通すが，それより短い波長の紫外線を通しにくい特徴がある。青色以外の蛍光粉の最適励起波長は全て 300 nm 以下の 225 nm～285 nm であるため，励起光がガラス管を通過できず発光しないが，青色の蛍光粉の最適励起波長は 345 nm であるため，励起光がガラス管を通過し，発光することがわかった。

UV 吸収フィルムで覆われた蛍光管，フィルムがない白色蛍光管と三波長蛍光管について，UV 光を照射した際の発光の様子を USB カメラで撮影し，*R*, *G*, *B*, *H*, *S*, *V* のヒストグラムを用いて，三波長蛍光管とその他の蛍光管の分離度を計算した結果，彩度(*S*)を用いた場合の分離度が最も大きく，*S* の閾値を 125 とし， $125 \leq S$ の場合は三波長蛍光管， $S < 125$ の場合はその他の蛍光管と判断する簡単なルールで，全ての蛍光管を誤りなく識別した。

分離度が最大となる二値化を用いて，撮影した画像から蛍光管を抽出し，蛍光管の直径を誤差 1%程度で算出できることがわかった。

参考文献

- [1] Y. Nishisu: “Performance of Used Rare-Earth Fluorescent Lamps and Their Employed Phosphors”, *Journal of MMIJ*, **130** (2014), pp. 527-533.
- [2] L. Mori: “Measurement and Calculation of Color”, *Journal of the Textile Machinery Society of Japan*, **18** (2009), pp. 297-303.
- [3] Y. Taniguchi, and X.M. Zhang: *Dejitaru shikisai kogaku* [Digital color engineering], (Kyoritsu.Shuppan, Tokyo, 2012).
- [4] N. Otsu: “A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, **9** (1979), pp. 62-66.
- [5] K. Nakamura, N. Koda, H. Takeuchi, and Y. Kawase: “Detection of Amnesic Mild Cognitive Impairment Using Texture Features of MRI”, *Transactions of Japanese Society for Medical and Biological Engineering*, **50** (2012), pp. 12-22.
- [6] K. Hotta: “Particle Detection and Tracking in Intracellular Images”, *Medical Imaging Technology*, **33** (2015), pp. 90-96.
- [7] T. Hasegawa (2016): Hasegawa's Official Web Site, Retrieved June 16, 2017, from <http://www.ge.fukui-nct.ac.jp/~hasegawa/research/ガラスの光学特性向上に関する研究.pdf>.

第 3 章 AE センサ信号を用いた蛍光管のフィルム有無の識別

3.1 諸言

蛍光管には様々な種類のものがあるが，落下時の飛散防止フィルムや昆虫の飛来防止 UV 吸収フィルムで覆われた蛍光管がある [1]。廃蛍光管から蛍光体をリサイクルする ECM は，分光蛍光光度計を用いて三波長蛍光体と白色蛍光体の識別を行っているが，蛍光管を覆っているフィルムを認識する機能を持たないため，UV 吸収フィルムで覆われた蛍光管内の蛍光体を認識できない。そのため，フィルムを有する蛍光管は，フィルムの無い白色蛍光管と判断され，ガラスのリサイクルのために粉碎されてしまい，フィルムはガラス回収の際の不純物になる。従って，現状では，図 1-1 の緑色の破線の流れのように，作業員が蛍光管のフィルムの有無を目視で判断し，カッター等でフィルムを剥ぎ取った蛍光管を ECM に投入しているため，フィルムを有する蛍光管を自動で識別する装置の開発が望まれている。

本研究では，蛍光管を AE センサに落下させた際に発生する衝突音を計測し，信号処理と判別分析を用いて，図 1-2 の流れのように，蛍光管を ECM に供給する前に，フィルムの有無を自動で識別する手法を検討した。本研究では，まず，AE 信号を波形解析して得られた時間領域における特徴量，離散フーリエ変換を行って得られた周波数領域における特徴量，ウェーブレット変換の展開係数にフラクタル次元解析を行って得られた時間・周波数領域の特徴量を各 6 個求め，それらの特徴量の特定の値を閾値として，フィルムの有無を判別できるかを調べた。しかし，特徴量を閾値とした判別では十分な判別結果が得られなかったため，パターン認識の分野で良く用いられる複数の特徴量を変数とした一次関数や二次関数を用いて判別を行う判別分析をフィルム有無

の判別に適用した。さらに，判別結果をベン図によって整理し，誤った判別の生じにくそうな特徴量を組み合わせて，二次関数の判別分析を行った。

3.2 実験方法

3.2.1 AE 信号の測定実験

表 3-1 に，本研究で使用した蛍光管を示す。本研究では，AE センサを用いて得られる衝突音をもとに，フィルムありのグループ (G_1) とフィルムなしのグループ ($G_2 \sim G_5$) の判別を検討した。

表 3-1 使用した廃蛍光管

グループ	蛍光体	フィルム	導電性	直径 (mm)	本数	番号 FN
G_1	三波長	あり	あり	32.5	13	1 ~ 39
G_2	三波長	なし		32.2	13	40 ~ 78
G_3	白色			32.4	13	79 ~ 117
G_4			なし	28.9	13	118 ~ 156
G_5	三波長			27.4	3	157 ~ 165

図 3-1 に，AE センサを用いて蛍光管の衝突音を測定した実験の概要を示す。本研究では，予備実験で板状のセンサヘッドを用

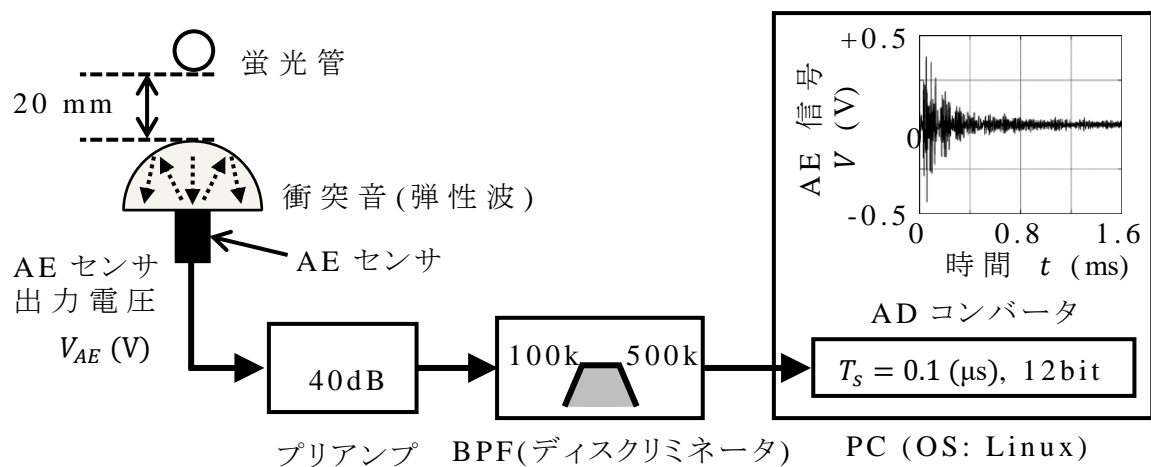


図 3-1 AE センサを用いた衝突音の測定

いていたが、蛍光管がセンサヘッドの角に当たるため、蒲鉾型(真鍮製、直径 40 mm、長さ 35 mm の円柱を長さ方向で 2 つに切断した物)のセンサヘッドに変更した。図のように、センサヘッドのフラットな面に AE センサ(NF 回路設計ブロック製 AE900s-WS)を固定し、センサヘッド上高さ 20 mm の位置から蛍光管を落下させた。AE センサにより発生した電圧 V_{AE} (V) を、まず、プリアンプを用いて 100 倍(40 dB)し、ディスクリミネータ(NF 回路設計ブロック製 AE9922)を用いて、増幅(0 dB~60 dB)し、バンドパスフィルタ(BPF)により 100 kHz 以下の低周波ノイズ及び 500 kHz 以上の高周波ノイズを除去した後、サンプル周期 0.1 μ s、分解能 12 ビットの AD 変換ボード(インタフェース製 PCI-3252)により、4,096(= 2^{12})点、PC に取り込んだ。以下、PC に取り込み、解析に用いた各蛍光管の衝突音のデータを、“AE 信号 V ” と呼ぶ。

また、予備実験において、同じ蛍光管を落下させても AE 信号の振幅等が異なることが判明した。そこで、本研究では、表 3-1 に示した 5 種類の各蛍光管をそれぞれ 3 回ずつ AE センサに落下させ、その際発生した衝突音を測定し、合計 165 個(=グループ $G_1 \sim G_4$ の 4 種類 \times 13 本 \times 3 回 + G_5 の 1 種類 \times 3 本 \times 3 回)分の衝突音のデータを得た。

また、表 3-1 に示すように、落下実験で得られた衝突音のデータに、以下のような通し番号(FN)を付けた。まず、本数 13 本の G_1 は、3 回の落下実験のうち、1 回目の落下実験で得られた各蛍光管の衝突音のデータを No. 1~13、2 回目の落下実験で得られた衝突音のデータを No. 14~26、3 回目の落下実験で得られた衝突音のデータを No. 27~39 とした。 $G_2 \sim G_4$ の蛍光管は、 G_1 と同様に、衝突音のデータをそれぞれ、No. 40~78、No. 79~117、No. 118~156 とした。 G_5 の蛍光管は 3 本であるので、1~3 回の落下実験で得られた各蛍光管の衝突音のデータを No. 157~165 とした。

本研究では、No. 1~165 の衝突音のデータについて、時間領域における波形解析、離散フーリエ変換[2]を用いた周波数解析及び

離散ウェーブレット変換[3]とフラクタル次元解析[4]を組み合わせた時間・周波数解析の3つの解析を行い、各々6つの特徴量を求め、それらの特徴量の特定の値を閾値として、フィルムありの蛍光管(No. 1~39)とフィルムなしの蛍光管(No. 40~165)を識別した。さらに、識別の誤りを減らすために、3つの信号処理より求めた特徴量を組み合わせ、パターン認識の分野で広く用いられる判別分析を用いて、蛍光管のフィルムの有無を識別した。

3.2.2 判別分析

図 3-2 に、本研究で用いた判別方法の概要を示す。以下、青色のデータはグループ 1、赤色のデータはグループ 2 に属するものとして説明する。(a)は、一つの特徴量を用いて、その特徴量の特定の値を閾値とし、閾値との大小関係で判別を行う方法、(b)は、複数の特徴量を組み合わせた判別得点(Discriminant Score 以降 DS と略す)と呼ばれる新たな値を準備し、判別を行う方法である。例えば、(a)の場合、特徴量 x_1 の閾値である x_{1TH} (図中の緑色の破線)と比較して、大きい場合は、グループ 1、小さい場合は、グルー

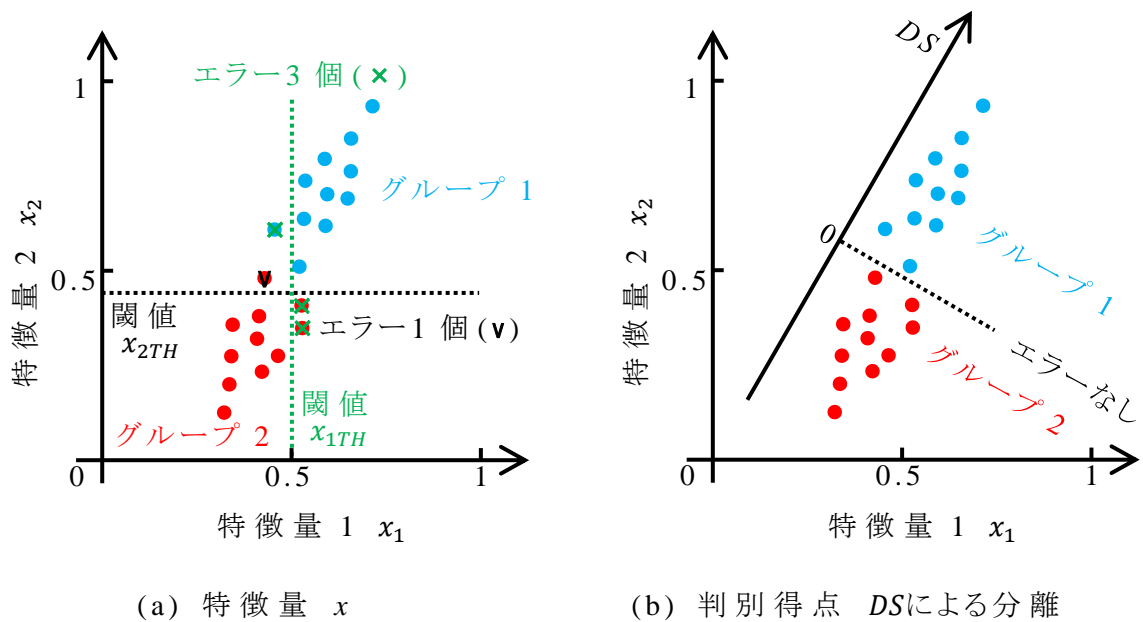


図 3-2 判別方法の概要

グループ 2 と判別する。しかし，この例では，グループ 1 が 1 つ，グループ 2 の 2 つ(図中の×)が誤って判別される。同様に，特徴量 x_2 の閾値である x_{2TH} (図中の黒色の破線)と比較して，大きい場合は，グループ 1，小さい場合は，グループ 2 と判別すると，グループ 2 の 1 つ(図中の V)が誤って判別される。これに対し，(b)の方法では， x_1, x_2 から新たに計算した判別得点 DS が 0 以上であれば，グループ 1， DS が 0 未満であれば，グループ 2 と判別する。図のように， DS を用いると，誤りなく判別できていることがわかる。

本研究では，パターン認識の分野で広く用いられる判別分析を，蛍光管のフィルム有無の判別に適用した。一般に，判別分析では， k 個の特徴量 $x_1 \sim x_k$ に対して，以下の式(3-1)のような一次関数で表される判別得点 DS を計算し， DS の正負によって判別を行う。この方法は，線形判別分析[5]と呼ばれる。

$$\begin{aligned}
 DS &= a_0 + [a_1, \dots, a_k] \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_k \end{bmatrix} = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i \\
 &= a_0 + a_1 x_1 + \dots + a_k x_k
 \end{aligned} \tag{3-1}$$

ここで，式(3-1)は， k 個の特徴量 $x_1 \sim x_k$ を軸とする空間から DS を軸とする空間への変換式であり，係数 $a_1 \sim a_k$ は， DS を軸とする空間上でのグループ 1 と 2 のデータが最も良く分離されるように，以下の式(3-2)で表される分離度 η が最大になるように決定される。

$$\eta = \frac{(\overline{DS}_1 - \overline{DS}_2)^2}{\frac{1}{n_1 + n_2 - 2} \{(n_1 - 1)S_1 + (n_2 - 1)S_2\}} \tag{3-2}$$

ここで， n_1, n_2 はグループ 1, 2 のデータ数， $\overline{DS}_1, S_1, \overline{DS}_2, S_2$ は， DS を軸とする空間上でのグループ 1, 2 の平均と分散のベクトルを示す。式(3-2)の分母は，“グループ内分散”と呼ばれ，この値が小さいほど各グループ内のばらつきが小さく，(3-2)式の分子は，“グループ間分散”と呼ばれ，この値が大きいほど両グループが離れることを示す。また， $\partial\eta/\partial a_i = 0$ を解くことで，分離度 η が最大とな

る係数 $a_1 \sim a_k$ を求まることことができる。

なお、係数 a_0 は、両グループの個数 (n_1, n_2) より、 $a_0 = -\log n_2/n_1$ で求まる定数である。

式(3-1)のような一次関数で表される判別得点 DS は、判別する二つのグループの分散が等しい場合には有効であるが、そうでない場合には、二次関数で表される二次判別得点 (Quadratic Discriminant Score 以降 QDS と略す) を用いた二次判別分析が有効な場合がある。そこで、本研究では、誤判別を減らすため、以下の式(3-3)で表される二次判別得点 (QDS) を採用し、 QDS の正負によって判別を行った。

$$QDS = a_0 + [x_1, \dots, x_k] \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{k1} & \cdots & a_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_k \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

例として、以下に、特徴量の数 k が 3 の場合の二次判別得点を算出する式(3-4)を示す。

$$QDS = a_0 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 + 2a_{12}x_1x_2 + 2a_{13}x_1x_3 + 2a_{23}x_2x_3 \quad (3-4)$$

特徴量の数が k 個の場合、一次及び二次の判別得点の係数の個数は、 $k+1$ 個及び $\sum_{i=1}^k i+1$ 個となるので、二次の判別得点を用いることで判別性能の向上が期待できる。

3.3 結果および考察

3.3.1 時間領域の特徴量を閾値とした判別

図 3-3 に、フィルムあり (a) とフィルムなし (b) の場合の代表的な AE 信号 V を示す。(a), (b) 両図の横軸は時間、縦軸は AE 信号の電圧を示している。また、AE 信号を PC に取り込む時間間隔、すなわち、サンプル周期 T_s は $0.1 \mu\text{s}$ とした。図より、両信号共に、激しく

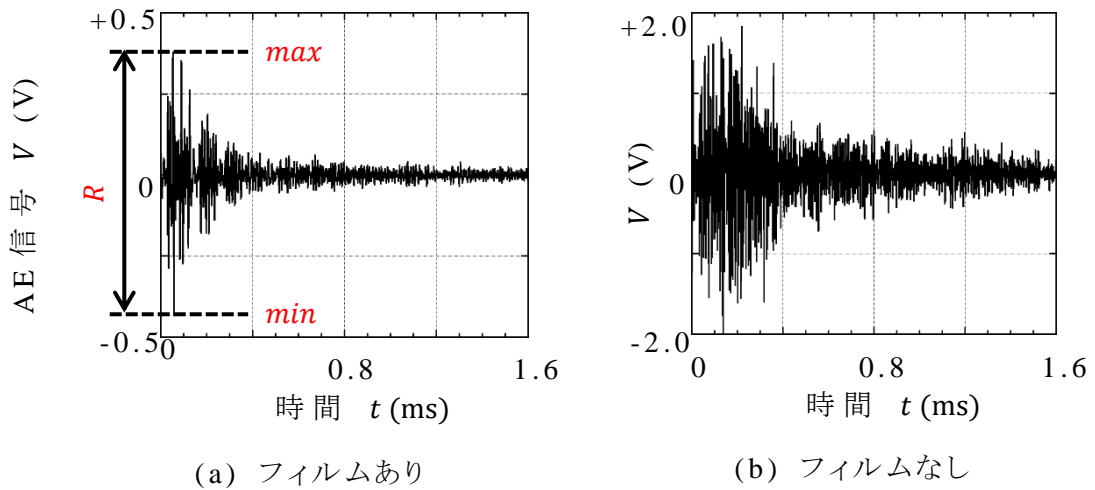


図 3-3 AE 信号

振動しながら減衰するが，(a)フィルムありの場合は，(b)フィルムなしの場合に比べ，振幅が小さく，減衰が早いことがわかる。

本研究では，まず，AE 信号 V の波形を時間領域で解析し，図 3-3(a)に示すような＋方向の絶対値 (max)，－方向の絶対値 (min)，最大振幅値 ($R = max - min$) 及び以下の式 (3-5)~(3-7) に示す絶対値の総和 (SAV)，分散 (SD)，時間を考慮した評価値 ($STAV$) 等の 6 つの特徴量を求めた。

$$SAV = \sum_{i=1}^M |V_i| \quad (3-5)$$

$$SD = \sum_{i=1}^M (V_i - \bar{V}) \quad (3-6)$$

$$STAV = \sum_{i=1}^M t |V_i| \quad (3-7)$$

ここで， M はデータ数 4096， V_i は各時点での電圧， \bar{V} は V_i の平均値， t は時間である。

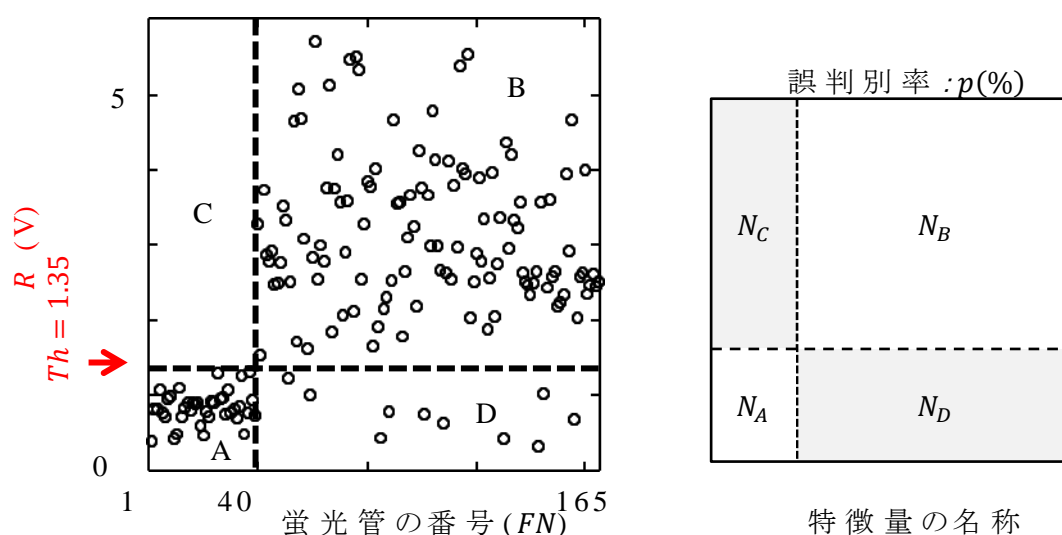
次に，特徴量の特定の値との大小関係により，フィルムの有無

を判別できると仮定し，特微量の値を最小値から最大値まで変化させ，以下の式(3-8)から算出される“誤判別率 p ”が最小となる特微量の値を求めた。以下，この値を“閾値(Threshold)”と呼ぶ。

$$p = \frac{N_C + N_D}{N} \times 100(\%) \quad (3-8)$$

ここで， N は実験データの総数 165， N_C はフィルムありの蛍光管がフィルムなしと誤判別された数， N_D はフィルムなしの蛍光管がフィルムありと誤判別された数である。

図 3-4 に，閾値を用いた判別と判別結果の表示方法を示す。例として，特微量の一つである最大振幅値 R で判別した結果を示す。(a)の横軸はデータ番号，縦軸は特微量，縦の破線は，フィルムありの蛍光管 ($FN = 1 \sim 39$) とフィルムなしの蛍光管 ($FN = 40 \sim 165$) の境界を示し，横の破線は R に関する閾値 (T_h) を示している。また，(a)は，A~D の 4 つの領域に分かれ，A はフィルムありの蛍光管が正しく判別された領域，B はフィルムなしの蛍光管が正しく判別された領域，網掛けされた左上の C と右下の D はフィルムありの蛍光管がフィルムなし，フィルムなしの蛍光管がフィルムありと



(a) 閾値を用いた判別

(b) 判別結果の表示の仕方

図 3-4 閾値を用いた判別と判別結果の表示方法

誤判別された領域を示す。本研究では，(b)のような各領域 A~D に属するデータ数 $N_A \sim N_D$ をまとめた図を用いて判別結果を示した。(b)の下部には使用した特徴量の名称，上部に誤判別率 p を示した。

図 3-5 に，時間領域における波形解析に関する 6 つの特徴量を閾値とした場合の判別結果を示す。全ての特徴量について，左上の網掛け部分 N_C が 0 となり，フィルムありの全ての蛍光管が正しく判別された。この結果は，ガラス回収の際の不純物となるフィルムで覆われた蛍光管を ECM に混入しないようにできることを意味し望ましい。また，6 つの特徴量のうち (f) の $STAV$ を閾値とした場合， $N_A = 39$ ， $N_B = 118$ ，誤判別を示す網掛け部分では $N_C = 0$ ， $N_D = 8$ となり，誤判別は 165 中 8 で，誤判別率 p は最小の 4.85% となった。しかし，時間領域における波形解析のみでは，全ての蛍光管を正しく判別できないことがわかった。

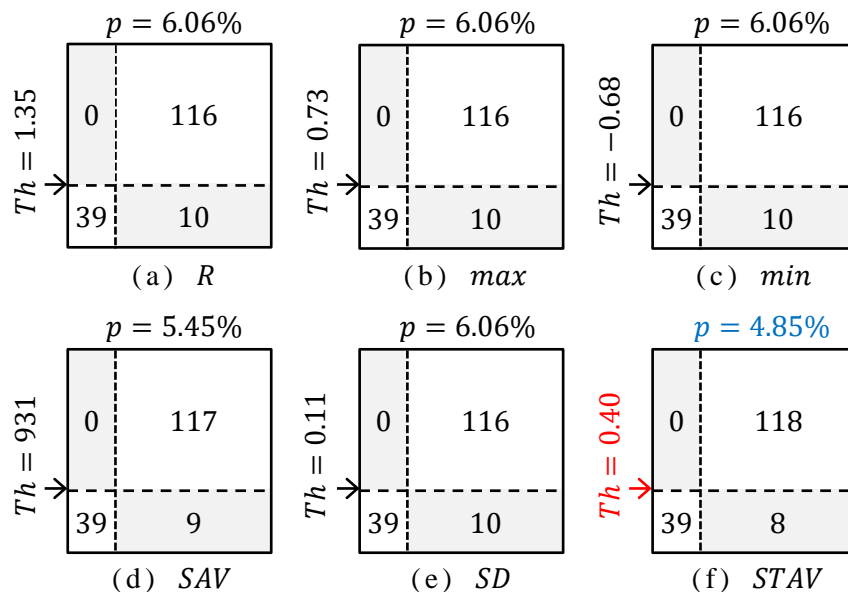


図 3-5 閾値を用いた判別結果(波形解析)

3.3.2 周波数領域の特徴量を閾値とした判別

本研究では，AE 信号 V の周波数領域についても検討を行った。

一般に，AE 信号のような衝撃波形は信号の初めと終わりが不連続であるため，通常の離散フーリエ変換では，本来，信号が持たない高周波成分が存在するような結果となる。そこで，本研究では，信号に窓関数を掛け，信号の初めと終わりを緩やかにゼロにして，不連続性を緩和した窓付き離散フーリエ変換を採用した。

図 3-6 に，図 3-3 の AE 信号 V を窓付き離散フーリエ変換して得られたパワースペクトル (PS) を示す。(a) はフィルムあり，(b) はフィルムなしの場合のパワースペクトラムである。但し，図 3-3 のように，フィルムの有無により AE 信号の最大振幅値に差があるので，本研究では，全ての周波数におけるパワースペクトルの総和が 1 になるように規格化した。図 3-6 の横軸は周波数，縦軸は規格化したパワースペクトラムを示し，周波数分解能は 610 Hz である。(a) のフィルムありの場合，50 kHz~60 kHz の低周波成分を有し，(b) のフィルムなしの場合，150 kHz~300 kHz の高周波成分を有することがわかった。

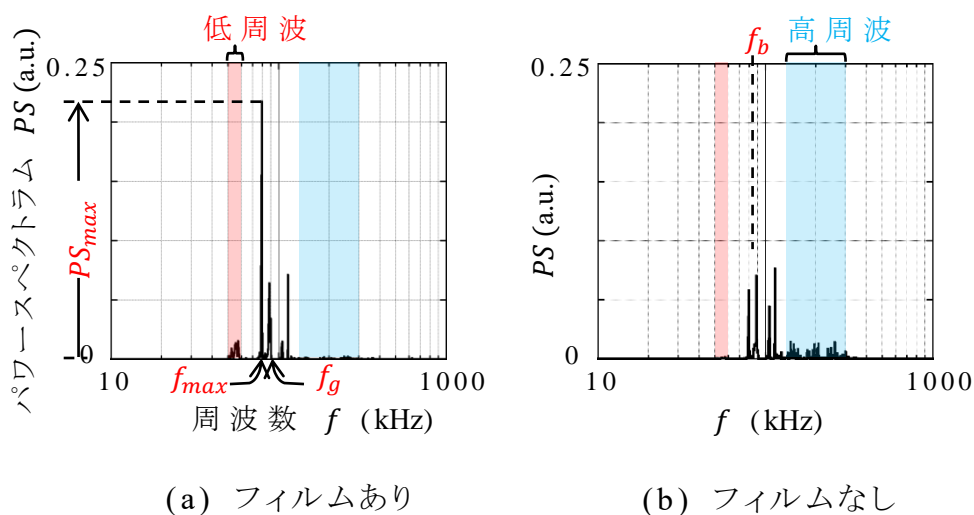


図 3-6 AE 信号 V のパワースペクトラム

本研究では，フィルムの有無を判別する特徴量の候補として，当初，全周波数 (610 Hz~5 MHz) において，全てのフィルムありの蛍光管 (No. 1~39) が共通に持ち，全てのフィルムなしの蛍光管 (No.

40~165)が共通に持たない周波数を探したが、そのような排他的な周波数を求めることができなかつた。そこで、図 3-6 に示すようなパワースペクトルが最大となる周波数(f_{max}), その際のパワースペクトルの値(PS_{max}), 重心周波数($f_g = \sum PS \times f / \sum PS$)を特徴量とした。また、フィルムありがフィルムなしに比べ、低い周波数成分を持つことから、両者の境界と考えられる周波数 f_b (Hz)を 84 kHz と仮定し、周波数 610 Hz~ f_b のパワースペクトルの総和 $\sum PS_{low}$, 周波数 f_b ~400kHz のパワースペクトルの総和 $\sum PS_{high}$, さらに、両者の比 $R_{lh} = \sum PS_{low} / \sum PS_{high}$ も加え、合計 6 つを周波数解析の特徴量として採用した。

図 3-7 に、窓付き離散フーリエ変換に関する 6 つの特徴量を閾値とした場合の判別結果を示す。全ての特徴量について、何本かのフィルムありの蛍光管がフィルムなしとして誤判別され、右上の網掛け部分で $N_c \neq 0$ となった。この結果は、ガラス回収の際の不純物となるフィルムで覆われた蛍光管を ECM に混入することを意味し望ましくない。図のように、最小の場合でも 165 中 11 を誤判別し、誤判別率 p も 6.67%となり、離散フーリエ変換を用いた周波数解析のみでは、全ての蛍光管を正しく判別できないことが

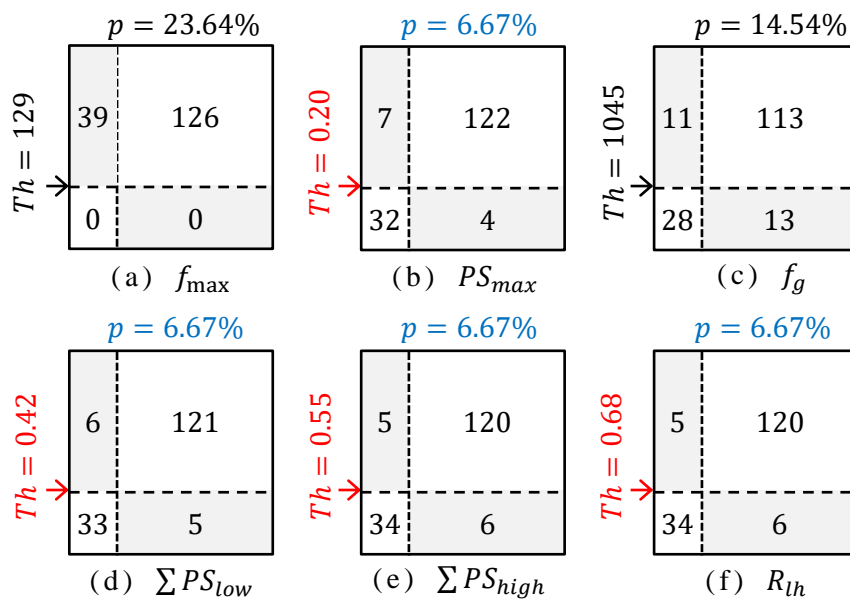


図 3-7 閾値を用いた判別結果(窓付き離散フーリエ変換)

わかった。

3.3.3 時間・周波数領域の特徴量を閾値とした判別

AE 信号は、衝突直後に衝突物の情報を多く含み、時間的に周波数成分が変化する信号である。窓付き離散フーリエ変換では、強制的に衝突直後の波形の振幅を 0 とするので、衝突物を識別する際の有益な情報が消されてしまうことが予想される。また、離散フーリエ変換は、信号の全領域を 1 周期と仮定するため、AE 信号のような時間的に周波数成分が変化する信号の解析には適さない。そこで、本研究では、信号の時間・周波数解析に適している離散ウェーブレット変換を用いて、AE 信号の周波数成分の時間的な変化を求めた。

図 3-8 に、図 3-3 の AE 信号 V を離散ウェーブレット変換して得られたウェーブレット展開係数 $w_1 \sim w_3$ を示す。図の (a) がフィルムあり、(b) がフィルムなしの場合で、横軸は時間、縦軸は展開係数を示す。ウェーブレット展開係数 w_k は、添字 k が大きくなるほど低い周波数成分の大きさを示し、周波数成分が時間とともにどの

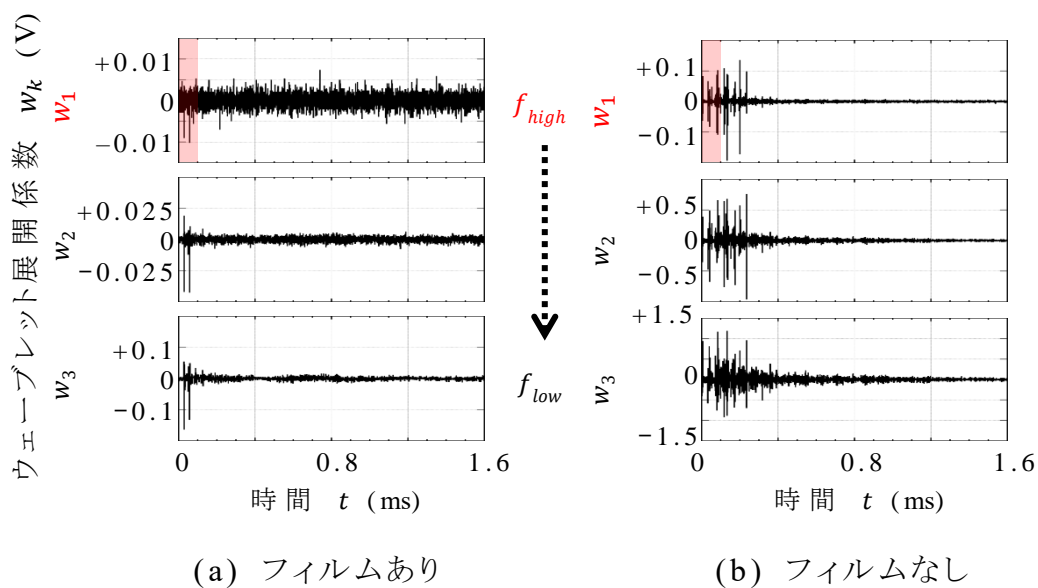


図 3-8 ウェーブレット展開係数

ように変化するかを示すため、信号の時間・周波数解析が可能となる。(a), (b)の最も高い周波数成分の時間変化を示す展開係数 w_1 を比較すると、(b)のフィルムなしの信号は、衝突直後の0~0.4 msに激しく振動し、減衰しているが、(a)のフィルムありの信号は、(b)のフィルムなしに比べ、振幅が小さく、全ての時間において振幅の変化が少ない。従って、この衝突直後における両者のウェーブレット展開係数 w_k の違いを定量的に表現できれば、フィルムの有無を判別する特徴量となることが予想される。

宅間ら[6]は、AE センサを用いて、FRP 積層板の曲げ疲労を観察し、AE 信号のウェーブレット変換の結果を定量化する方法として、Box-counting 法によるフラクタル次元解析[7]を採用し、その有効性を示している。図 3-9 に、Box-counting 法を用いて、図 3-8(b)のフィルムなしの蛍光管のウェーブレット展開係数 w_1 の網掛け部分の時間 0~102.4 μ sについて、フラクタル次元(FD)を求める手順を示す。Box-counting 法では、図 3-9(a)のように、まず、横軸の計測時間 0~102.4 μ s(全データ数 $n = 1024$ 個)を 1、縦軸のウェーブレット展開係数の絶対値の最大値が 1 となるように規格化し、時系列データ w_k のグラフ全体を一辺の長さ ε が 1 の 1 つの正方形(ボックス)に重ねる。次に、(b)のように、正方形を一辺の長さ ε が 1/2 の 4 つの正方形に分割し、グラフの曲線が重なったボックスの数 $N(\varepsilon)$ を数える。その後、分割とカウントを全データ数

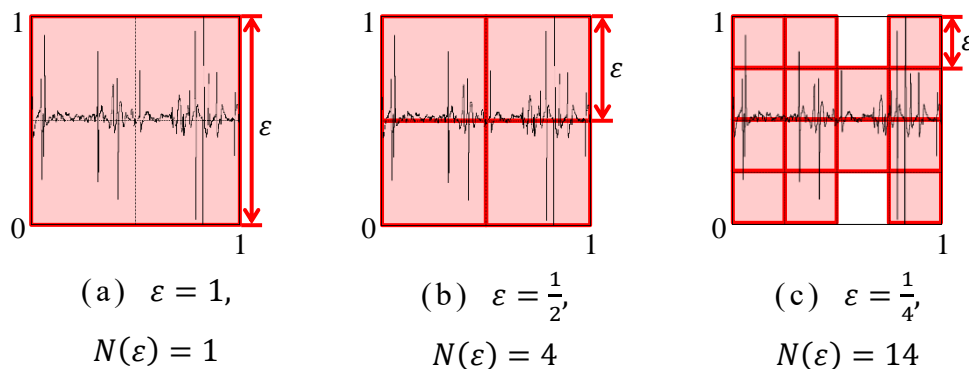


図 3-9 フラクタル解析の手順

の n 回，すなわち， $\varepsilon = 1/n = 1/1024$ まで繰り返す。例えば，図 3-9 の場合，(a) は $\varepsilon = 1$ で $N(\varepsilon) = 1$ ，(b) は $\varepsilon = 1/2$ で $N(\varepsilon) = 4$ ，(c) は $\varepsilon = 1/4$ で $N(\varepsilon) = 14$ となる。

得られた $N(\varepsilon)$ を用いて，図 3-10 のように，横軸を $\ln(n \cdot \varepsilon)$ ，縦軸を $\ln N(\varepsilon)$ としてプロットし，プロットしたグラフが直線であれば，そのグラフの示す現象は自己相似性を持ち，直線の勾配 $\ln N(\varepsilon)/(\ln(n \cdot \varepsilon))$ がフラクタル次元 FD となる。図 3-10 の場合，フィルムありのウェーブレット展開係数 w_1 のフラクタル次元 FD_f とフィルムなしのウェーブレット展開係数 w_1 のフラクタル次元 FD_{nf} は，それぞれ，1.55，1.37 となった。この両者の違いは，(a) のフィルムありは白色ノイズに近く，Box-counting 法を用いた場合，波形がボックスを埋め尽くし，フラクタル次元が大きくなり，(b) のフィルムなしはただらにスパイクが入り，フラクタル次元が小さくなったためと考えられる。

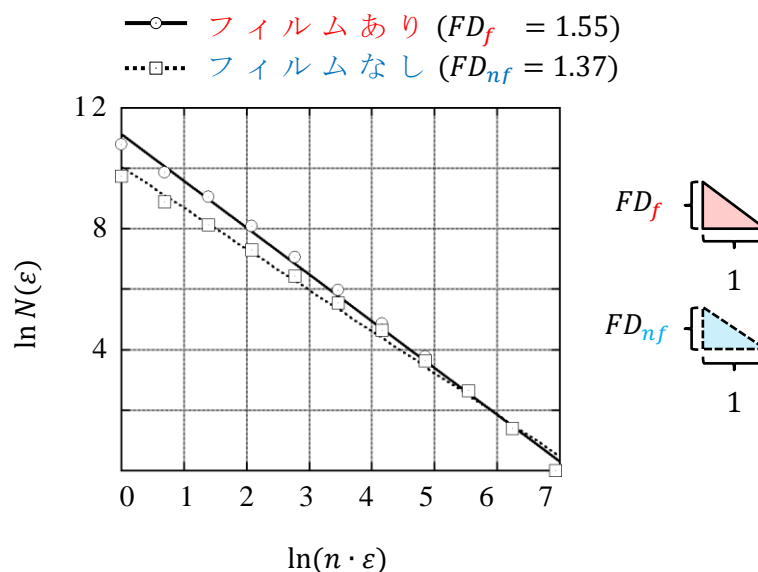


図 3-10 ウェーブレット展開係数のフラクタル次元解析

本研究では，Box-counting 法を用いて，衝突直後のウェーブレット展開係数 $w_1 \sim w_6$ のフラクタル次元 $FD_1 \sim FD_6$ を求め，フィルムの有無を判別するための特徴量とした。

図 3-11 に、これら 6 つの特徴量を閾値とした場合の判別結果を示す。 FD_1 については、 $N_c = 0$ となり、フィルムありの全ての蛍光管が正しく判別された。しかし、 FD_1 以外は $N_c \neq 0$ となり、フィルムありの蛍光管がフィルムなしと誤判別され、誤判別率 p は最小でも 6.06% となった。このように、ウェーブレット展開係数のフラクタル次元を特徴量として用いた場合も、全ての蛍光管を正しく判別できないことがわかった。

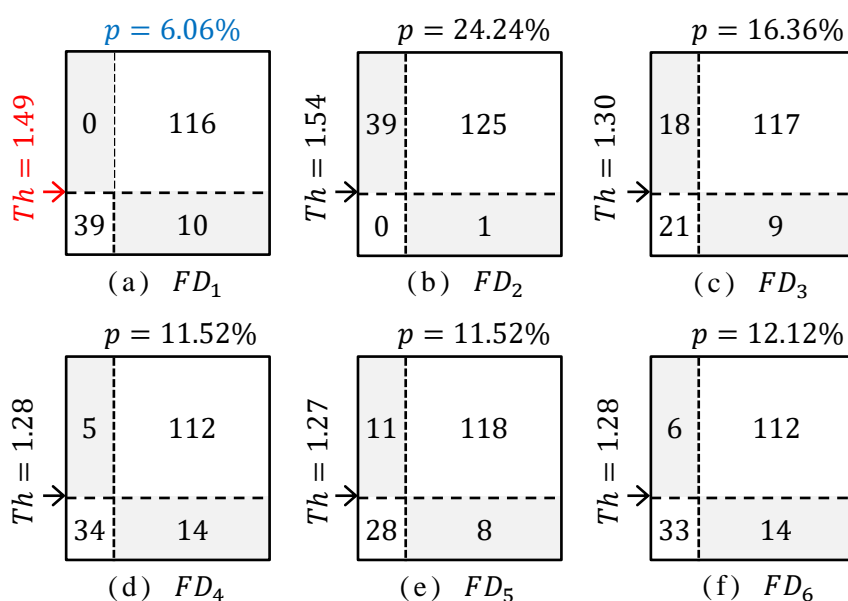


図 3-11 閾値を用いた判別結果
(ウェーブレット展開係数のフラクタル次元解析)

3.3.4 判別分析の適用

波形解析，離散フーリエ変換を用いた周波数解析及びウェーブレット変換・フラクタル次元解析に関する閾値を用いた判別では，十分な判別結果が得られなかったため，本研究では，特徴量を変数とする関数の値を用いて判別を行う判別分析[8]を，蛍光管のフィルム有無の判別に適用した。

以下に，図 3-5 で用いた時間領域における波形解析に関する 6

つの特徴量をもとに，判別分析で導き出された DS を算出する式 (3-9)を示す。

$$\begin{aligned}
 DS &= a_0 + \sum_{k=1}^6 a_k x_k \\
 &= a_0 + a_1 min + a_2 max + a_3 R + a_4 SAV + a_5 SD + a_6 STAV
 \end{aligned}
 \tag{3-9}$$

表 3-2 に得られた係数 $a_1 \sim a_6$ の値を示す。

表 3-2 判別得点の係数 (波形解析)

$a_1 (1/V)$	$a_1 (1/V)$	$a_1 (1/V)$	$a_1 (1/V)$	$a_1 (1/V)$	$a_1 (1/V)$
-313.39	313.88	-620.16	94.48	-64.19	-34.97

なお，本研究の場合， $a_0 = -\log(n_2/n_1) = -\log(126/39) = -0.51$ となった。

図 3-12 に判別分析を適用した結果を示す。図の横軸はデータ番号 FN ，縦軸は判別得点 DS の値である。図中の白丸(○)は正しく判別，黒丸(●)は誤って判別されたデータを示している。図 3-5 の特徴量を閾値として判別した場合と異なり，判別分析では，全てのフィルム有のデータが正しく判別されず， $N_C \neq 0$ となった。また，誤判別されたデータが 8 個から 13 個に増え，誤判別率も 4.85% から 7.87% に低下した。

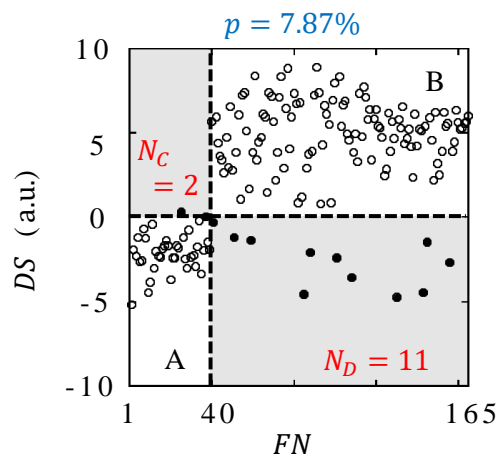


図 3-12 判別得点 DS を用いた判別結果 (波形解析)

本研究では、判別得点を、式(3-3)のような二次関数を用いて表現する二次判別分析についても検討した。なお、式(3-3)は複数の係数同士の積を含む非線形方程式であり、係数の数も多く、係数と特徴量との関係も複雑になるので、各係数の記載は省略する。

図 3-13(a)に、図 3-12 の判別分析で用いたものと同じ 6 つの特徴量を用いて、二次判別分析を適用した結果を示す。図の横軸はデータ番号 FN 、縦軸は二次判別得点 QDS の値である。(b)は、(a)の $QDS = 0$ 付近を拡大した図である。二次判別分析では全てのフィルムありのデータが正しく判別され、 $N_c = 0$ となった。また、二次判別得点を用いることで、誤判別されるデータも一次判別分析の 13 個から 5 個に減り、誤判別率も 7.87% から 3.03% に改善された。

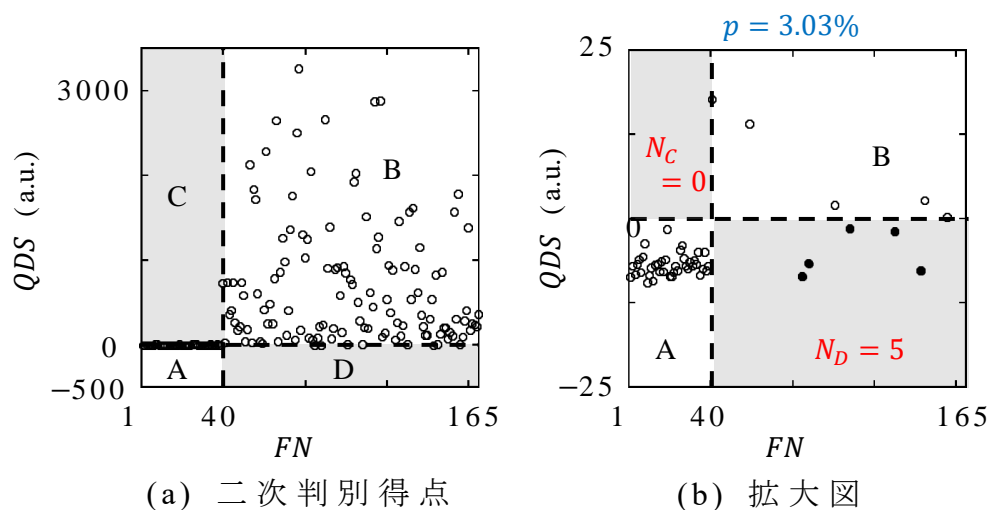


図 3-13 二次判別得点を用いた判別結果(波形解析)

同様に、図 3-7 で用いた窓付き離散フーリエ変換に関する 6 つの特徴量をもとに、二次判別分析を適用した結果を図 3-14 に示す。(b)は、(a)の $QDS = 0$ 部分を拡大した図で、フィルムありのデータの QDS は、一つを除いて負(A 領域)となり正しく判別された。二次判別得点を用いることで、誤判別されるデータも 11 個から 9 個に減り、誤判別率も 6.67% から 5.45% に改善された。但し、(a)のように、フィルムなしのデータの QDS は、0 辺りと 28000 辺り

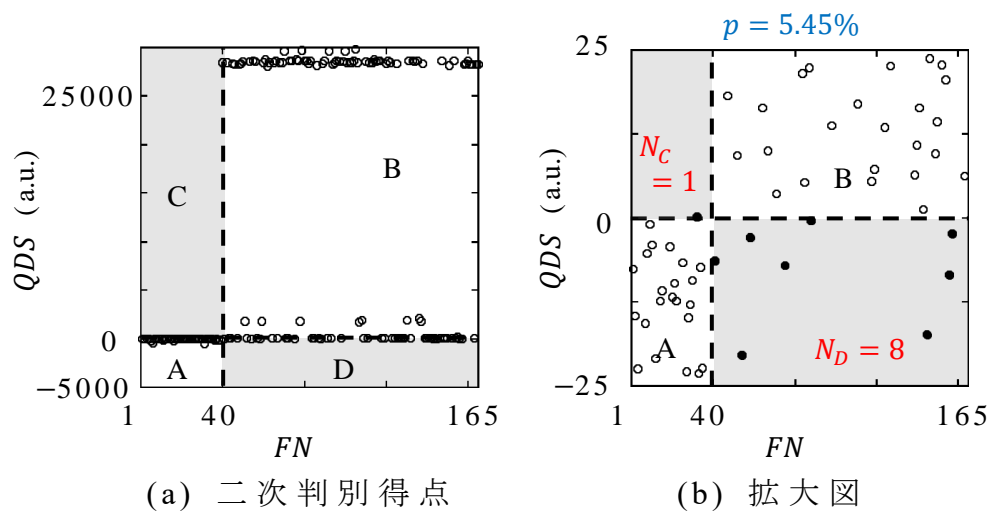


図 3-14 二次判別得点を用いた判別結果
(窓付き離散フーリエ変換)

に二極化した。この二極化の原因を探るため、窓付き離散フーリエ変換に関する各特徴量のヒストグラムを描いたところ、 f_{max} のヒストグラムが二極化していた。そこで、 f_{max} を除いた 5 つの特徴量で再度二次判別分析を行うと、 QDS の分布に二極化を生じず、誤判別されるデータもさらに 9 個から 7 個に減り、誤判別率も 5.45%から 4.24%に改善された。この結果より、適切な特徴量の選択が誤判別率改善に重要であることがわかった。

図 3-15 に、離散ウェーブレット変換の展開係数 $w_1 \sim w_6$ より求めたフラクタル次元 $FD_1 \sim FD_6$ を 6 つの特徴量として、二次判別分析を適用した結果を示す。(b)に示すように、フィルムありのデータの QDS は、2 個のデータを除いて負 (A 領域) となり正しく判別された。また、フィルムなしのデータの QDS は広く分布し、ほとんどの値が正 (B 領域) であったが、5 個のデータがフィルムありとして誤判別された。離散ウェーブレット変換の展開係数より求めた 6 つのフラクタル次元に二次判別分析を適用すると、誤判別されるデータが 7 個で、誤判別率は 4.24%となった。

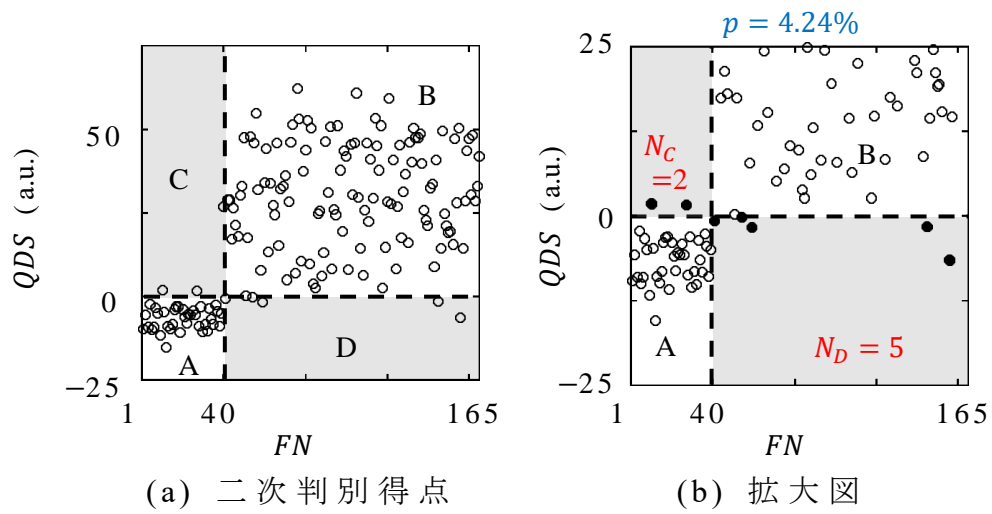


図 3-15 二次判別得点を用いた判別結果
(ウェーブレット展開係数のフラクタル次元解析)

3.3.5 特徴量の組み合わせの検討

図 3-16 に、波形解析，窓付き離散フーリエ変換，離散ウェーブレット変換・フラクタル次元解析を用いた各信号処理に対して，二次判別分析を行った際，誤判別となるデータ番号をベン図で示す。図中の波形解析と窓付き離散フーリエ変換の判別結果を見る

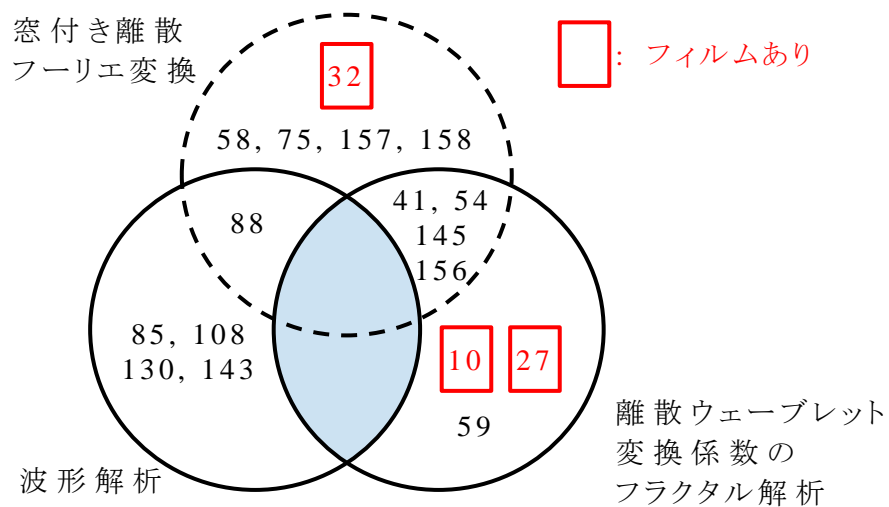


図 3-16 誤判定のデータ番号

と、No. 88 のデータを両者が共に誤判別していることがわかる。また、窓付き離散フーリエ変換と離散ウェーブレット変換・フラクタル次元解析の判別結果を見ると、No. 41, 54, 145, 156 のデータを両者が共に誤判別していることがわかる。

これらに対して、波形解析と離散ウェーブレット変換・フラクタル次元解析の判別結果を見ると、網掛けで示される共通部分に、誤判別したデータがなく、波形分析で誤判別したデータは離散ウェーブレット変換・フラクタル次元解析で正しく判別され、逆に、離散ウェーブレット変換・フラクタル次元解析で誤判別したデータは波形分析で正しく判別されたことがわかった。そこで、波形解析の特徴量 6 個と離散ウェーブレット変換・フラクタル次元解析の特徴量 6 個を合わせた合計 12 個の特徴量を用いて二次判別分析を行った。図 3-17 に、その結果を示す。(b)の $QDS = 0$ 辺りの拡大図に示すように、誤判別されるデータがなくなり、誤判別率は 0% になった。

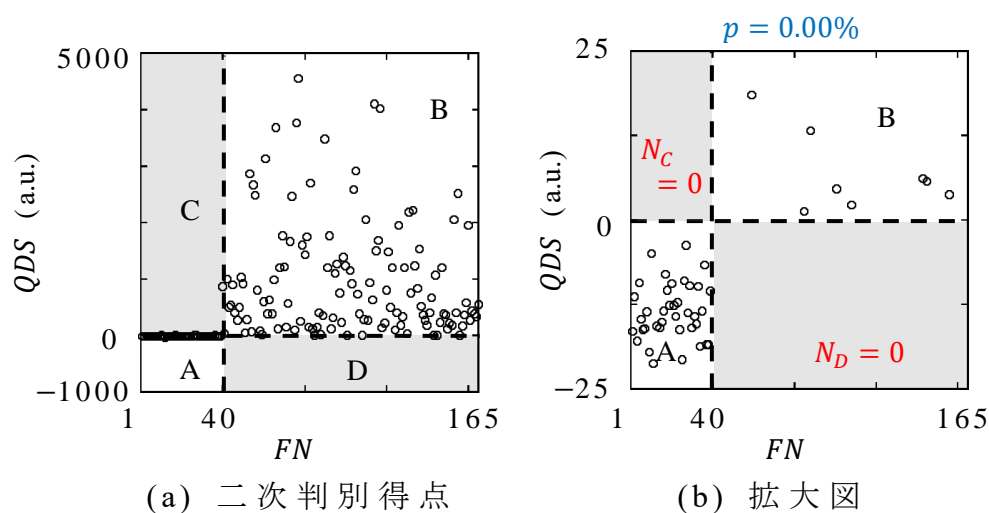


図 3-17 特徴量を組み合わせた二次判別分析の結果

3.4 結言

蛍光管の AE センサへの落下実験より得られた AE 信号の波形解析(時間領域), 離散フーリエ変換(周波数領域), 離散ウェーブレット変換展開係数のフラクタル次元解析(時間・周波数解析)により, 各領域において 6 つの特徴量を求めた。各領域それぞれ 6 つの特徴量の特定の値を閾値として判別を行った結果, 誤判別率は, 時間領域で 4.85%, 周波数領域で 6.67%, 時間・周波数領域で 6.06% となった。

特徴量を変数とする二次関数により判別分析を行う判別分析法を適用し, 誤判別率を, 時間領域で 3.03%, 周波数領域で 4.24%, 時間・周波数領域で 4.24% と改善した。

さらに, 波形分析と離散ウェーブレット変換・フラクタル次元解析が共通に誤判定している蛍光管がないことを見出し, 波形分析と離散ウェーブレット変換・フラクタル次元解析の合計 12 個の特徴量を用いて, 二次判別分析を適用した結果, 誤判別率を 0% にすることが可能となった。

以上より, AE 信号をもとに, 信号処理と判別分析を適用すれば, 自動でフィルムの有無を判別できることを示した。

参考文献

- [1] H. Ohi, and S. Horikoshi: “Preventive effect to nocturnal insects and dirt-decompositive effect of luminaire with UV-absorbant and photocatalytic coatings”, Journal of the Illuminating Engineering Institute of Japan, **82** (1998) No. Appendix, pp. 277-278.
- [2] D. Gabor: “Theory of Communication”, Journal of IEE, **93** (III) (1949), pp. 429-457.
- [3] I. Daubechies: “The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis”, IEEE Tans. on Inform. Th., **36** (1990), pp. 961-1005.
- [4] T. Matsushita: *Furakutaru no butsurei (I) Kisoheh* [Physics of fractal (I) Basics], (Shokabo, Tokyo, 2002).
- [5] S. Koyanaka: “Recent Trends of Sensor Based Sorting Technology in Resources Recycling”, Journal of MMIJ, **129** (2013), pp. 615-625.
- [6] M. Takuma, N. Shinke, K. Suzuki and T. Fujii: “Evaluation of Bending Fatigue Damage for FRP laminate with AE Application of Fractal Dimension of Wavelet Transform Results and Neural Network”, Journal of JSPE, **68** (2002), pp. 1309-1315.
- [7] K. Itakura, Y. Watanabe, K. Sato, T. Goto, J. Kodama and Y. Yoshida: “Modeling Method for Cracks in Rocks based on the Fractal Structure of the AE Source Distribution”, Shigen-to-Sozai, **114** (1998), 918-924.
- [8] N. Baba, K. Kobayashi and T. Shinozaki: “Indicators for Risk Assessment of Deteriorated Reservoir Break/Washout by Applying Multivariate Analysis”, Journal of JSIDRE, **74** (2006), pp. 329-334.

第4章 電界による導電性を有する蛍光管の識別

4.1 諸言

蛍光管には，点灯方式の違いにより，ガラス管外面に導電性リボンが張られたものやガラス管内面全体に導電性被膜を塗布したものがあある。現在，両端の口金や電極等を切断・分離し，蛍光体を吸引・回収されたガラス管は粉碎され，ガラスのリサイクルの原料となっているが，ガラス管外面に張られた導電性リボンやガラス管内面に塗布された導電性被膜は，ガラスをリサイクル際の不純物となる。ガラス管外面に張られた導電性リボンは目視で判別できるので，作業員が手動で剥ぎ取っているが，ガラス管内部の導電性被膜は目視で認識することが困難であるため，導電性被膜を有する蛍光管を自動で識別する装置の開発が望まれている。

動作中の電子レンジや送電線の側で，蛍光管が発光する現象が知られているが，この現象が導電性被膜を有する蛍光管の識別のヒントとなる。この現象は，ガラス管内部に存在する残留電子が，電子レンジが発生するマイクロ波(電磁波)や送電線が発生する電界により加速され，ガラス管内に封入された水銀原子と衝突することに起因する[1]。

本研究では，電界中に蛍光管を置いた際，導電性被膜の有無により，発光の様子が異なることを利用し，ガラス内面に導電性被膜を有する蛍光管を識別する手法を検討した。まず，電界を放射するテスラコイル[2]-[5]の放電電極と蛍光管の位置関係による発光の違いを検討した。さらに，フリーの静電界計算[6][7]ソフトを用いて，蛍光管の内外の電界シミュレーションを行い，電界中に置かれた蛍光管の発光の原理を検討した。

明度の平均と分散を特徴量とし，それらの特徴量の特定の値を

閾値[8]とし，導電性の有無を識別した。さらに，二つの特徴量を変数とする一次関数を用いて判別を行う判別分析[9]を，導電性の有無の判別に適用した。

4.2 実験方法

表 4-1 に，本研究で用いた蛍光管を示す。表のように，蛍光体の種類，導電性の有無により，4 つのグループ($G_1 \sim G_4$)に分けられるフィルムの無い蛍光管を用いた。なお，実験に用いた蛍光管の長さは，全て 120 cm である。

表 4-1 使用した蛍光管

グループ	蛍光体	フィルム	導電性	本数
G_2	三波長	なし	あり	4
G_3	白色			4
G_4	三波長		なし	5
G_5				3

図 4-1 に，本研究で，電界発生のために用いたテスラコイルの概要を示す。テスラコイル(株式会社光洋製 コード 2839)は，電源回路，一次共振回路(C, L_1)，二次コイル(L_2)，ギャップ(G)から構成され，共振により高電界を得る装置である。まず，電源回路

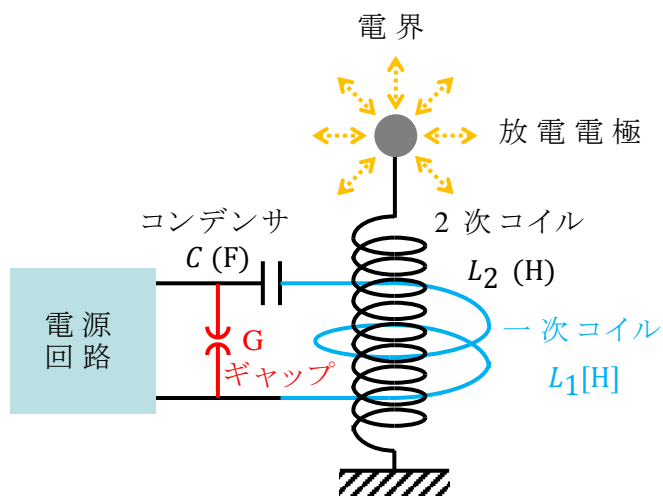


図 4-1 テスラコイルによる電界発生装置の概要

で直流電圧を発生させ、コンデンサ C (F) を充電し、 C の両端電圧が徐々に上昇する。その際、放電ギャップ G にも同じ電圧が印可され、 G の両端電圧が火花放電電圧に達すると、パルス的なアーク放電が発生し、 C と一次コイル L_1 が G を介して接続され、 C と L_1 の振動電流が発生する。 L_1 を流れる振動電流が周囲に磁界を作り、この磁界により二次コイル L_2 に誘導された電圧が共振を起こし高電圧を生じる。この時、二次コイルの先端に取り付けられた球形の放電電極より電界を放出する。なお、放電電極より放出される電界の周波数・電圧はギャップの調整により変えることができる。

本研究では、まず、電界を放射するテスラコイルの放電電極と蛍光管の位置関係による発光の違いを観察した。図 4-2 に、電界による蛍光管の発光実験の概要を示す。

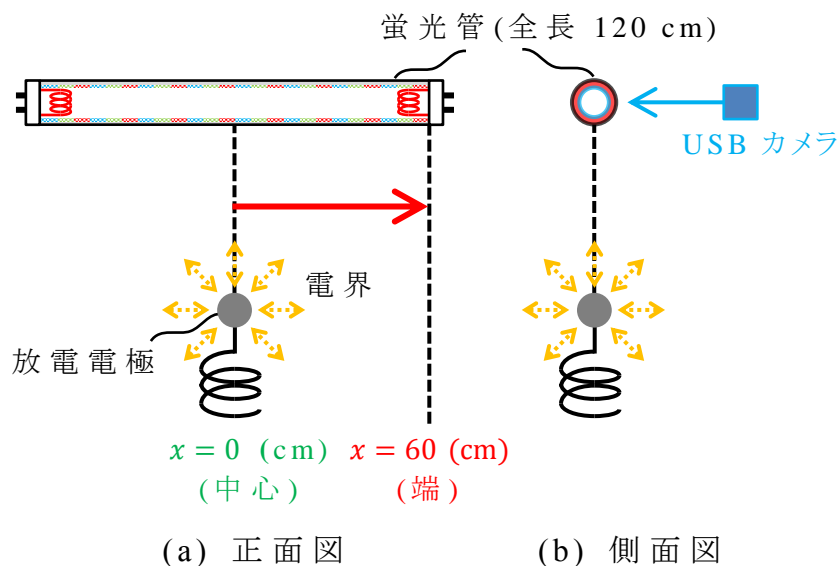


図 4-2 電界による蛍光管発光実験

(a)は、実験装置を正面から見た図、(b)は実験装置を側面から見た図である。テスラコイルの放電電極の真上に蛍光管を水平に置き、放電電極の位置を蛍光管の中心 ($x = 0$ cm) から蛍光管の端 ($x = 60$ cm) まで移動し、その際の発光の様子を、USB カメラで撮影した。なお、放電電極から蛍光管までの距離(高さ)は、実際に作製

した廃蛍光管自動選別装置と同じ 10 cm に固定した。

さらに，本研究では，静電界計算フリーソフトを用いて，蛍光管の内外の電界シミュレーションを行った。

USB カメラにより撮影した RGB 元画像を HSV 画像に変換し，発光の明るさを示す明度 (V) の平均，分散を特徴量として用いた閾値，判別分析により，蛍光管の導電性の有無を判別した。

4.3 結果および考察

4.3.1 電界による蛍光管発光実験

本研究では，電界を放射するテスラコイルの放電電極と蛍光管の位置関係による発光の違いを観察した。図 4-3 に，放電電極の位置と明度 (V) の関係を示す。

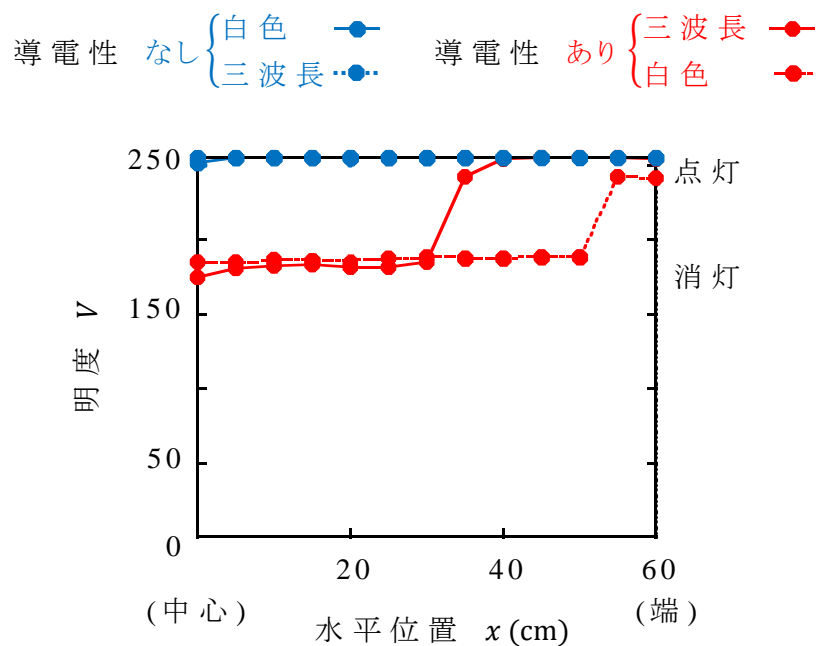


図 4-3 電界による蛍光管発光実験

この図の横軸は放電電極の蛍光管中心からの距離 x (cm)，縦軸は明度 V である。ガラス管内面に導電性被膜が塗布されていない蛍

光管は，蛍光体の種類や放電電極の位置に関わらず点灯し，明度 V (範囲：0～255)も最大値 250 辺りを示した。これに対して，導電性被膜のある蛍光管は，蛍光管の中心では点灯せず，明度は三波長蛍光管，白色蛍光管共に 180 程度であった。放電電極の位置を端に移動すると，三波長蛍光管が $x = 30 \text{ cm}$ ，白色蛍光管が 50 cm 位の位置から明度が徐々に大きくなり，三波長蛍光管が $x = 40 \text{ cm}$ ，白色蛍光管が 55 cm の辺りで，明度が 240 程度になり点灯した。

導電性皮膜のある蛍光管において，蛍光体が白色と三波長の場合で，明度が増加し始める放電電極の位置が異なる理由は明らかにできていないが，得られた結果より蛍光管の中心に放電電極を置き，電界を発生し，明度の閾値を 200 辺りに設定すれば，導電性被膜の有無を判別できることがわかった。

4.3.2 蛍光管端面からの電界の侵入

電界中に置かれた蛍光管が，導電性被膜の有無により，発光の様子が異なる理由は，図 4-4 に示す“静電遮蔽”が関係するものと考えられる。図中に両蛍光管の断面を示す。

図中の左側に示したガラス管内面に導電性被膜がない蛍光管の場合，電界は，ガラス管を通過し，蛍光体に届き，蛍光管が発

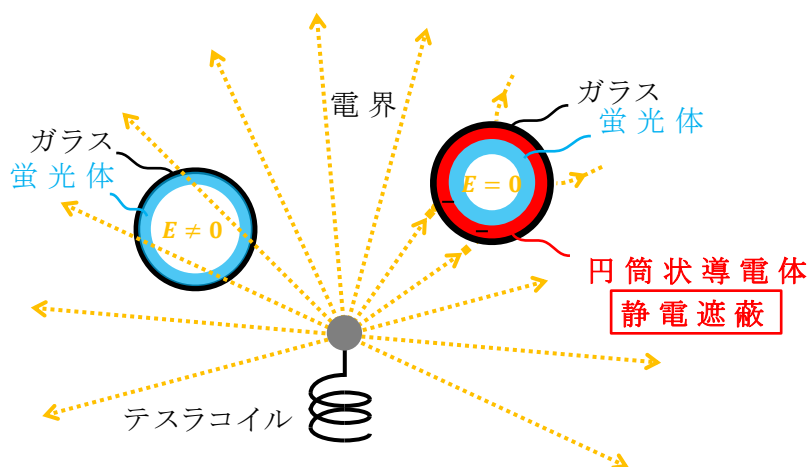


図 4-4 電界中の導電性のある蛍光管

光する。これに対して、右側に示したガラス管内面全体に導電性被膜が塗布された蛍光管は、円筒状の導体内部に蛍光体があり、放電電極が蛍光管の中央付近に置かれた場合、電界が導体内部に侵入できない静電遮蔽を生じたため、発光しなかったが、放電電極を蛍光管の端に近づけると円筒状の導体の端から導体内部に電界が侵入し、発光したものと予想される。

そこで、蛍光管の端での電界の侵入を確かめるため、次のような簡単な実験を行った。図 4-5 にその概要を示す。

導電性被膜が塗布された蛍光管の端の電極部分(a)に、絶縁テープを張り付け(b)、絶縁テープとガラス管を、導電性を有するアル

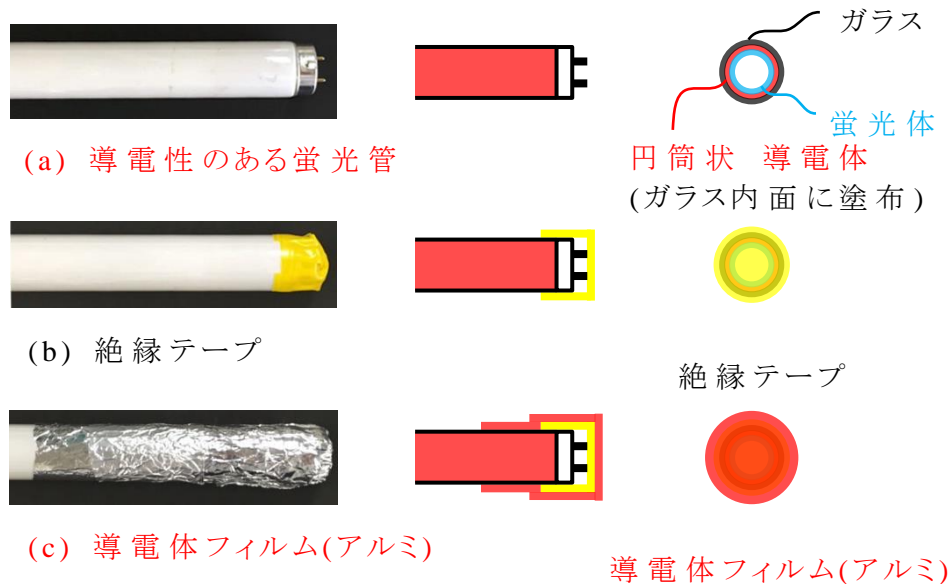


図 4-5 蛍光管の端における電界の侵入実験

ミホイルで覆った。このアルミホイルにより、蛍光管の内部は完全に導体に覆われるため、静電遮蔽により、電界が導体内部に侵入できなくなることが予想される。この蛍光管を用いて、図 4-3 と同様な実験を行った結果、放電電極をどの位置においても発光は見られなかった。

4.3.3 電界分布のシミュレーション

本研究では、株式会社アドバンスト・サイエンス・ラボラトリー製の静電界計算フリーソフト SATE を用いて、蛍光管の内外の電界シミュレーションを行った。なお、シミュレーションの際、両端の電極や口金はないものとして計算した。

図 4-6 に、放電電極が蛍光管の中心 ($x = 0 \text{ cm}$)、端 ($x = 60 \text{ cm}$) の真下にある場合の蛍光管内外の電界分布をシミュレーションした結果を示す。

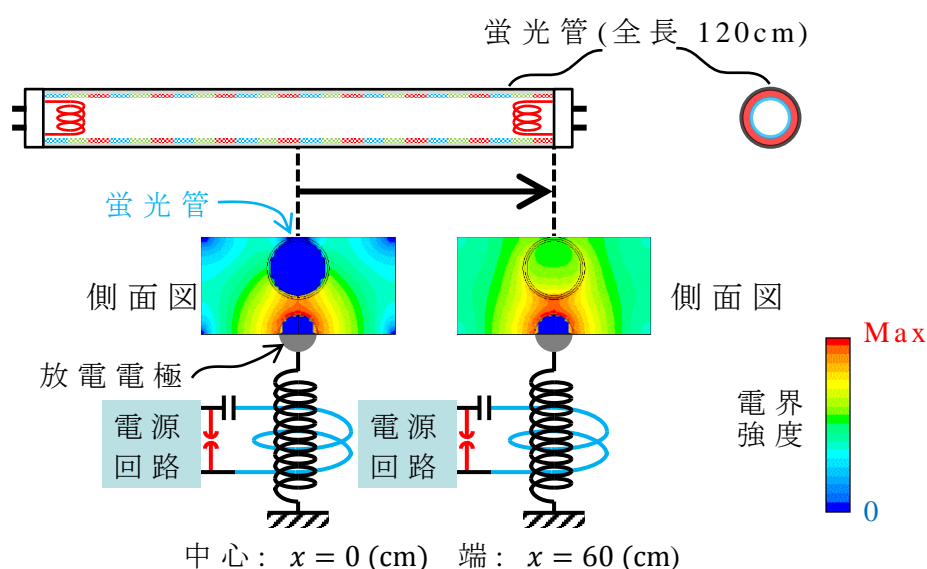


図 4-6 蛍光管内外の電界シミュレーション

図 4-6 は蛍光管の側面方向から見た電界分布を示している。また、右端に示された電界強度は最大値で正規化し、青色が 0 (V/m)、赤色が最大値 (Max) を示している。電界分布の下側にある青色の半円は放電電極を示し、電界が 0 となっていることがわかる。また、電界分布の上側の大きな円は蛍光管を示し、放電電極が蛍光管の中心 ($x = 0 \text{ cm}$) の真下にある場合、蛍光管内部は青色で、内部に電界が侵入しないことがわかった。これに対して、放電電極が蛍光管の端 ($x = 60 \text{ cm}$) の真下にある場合、蛍光管内部が黄色から黄

緑色に変化しており，蛍光管の端から蛍光管内部に電界が侵入していることがわかった。

4.3.4 判別分析を用いた導電性有無の識別

図 4-3，図 4-5 の実験，図 4-6 のシミュレーションの結果より，蛍光管の中心の真下に，放電電極を置き，蛍光管に電界を与えた際の画像を撮影し，撮影した画像の明度 (V) を算出すれば，導電性の有無を判別できることがわかった。

図 4-7(a) に，明度 (V) の平均を特徴量とした場合の積み上げヒストグラムを示す。

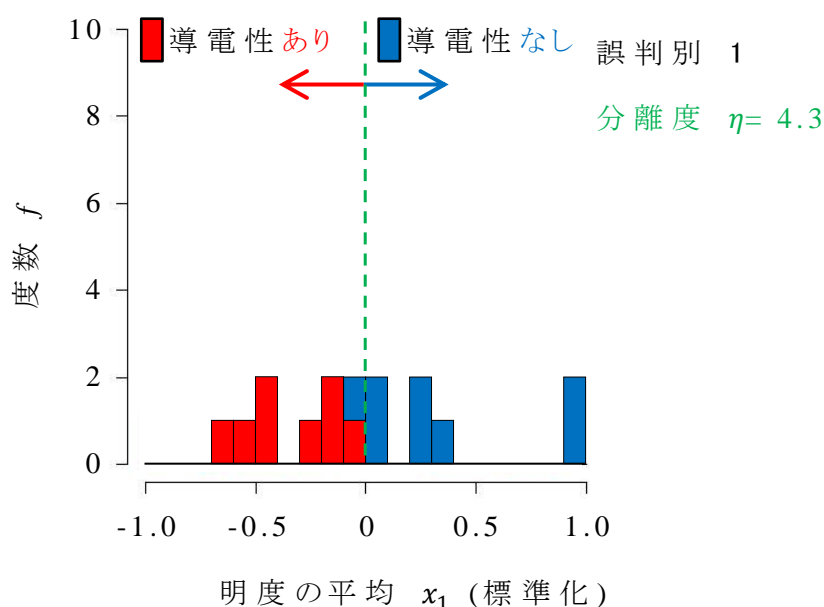


図 4-7(a) 明度 (V) の平均を用いた導電性の有無の判別

この図の横軸は明度の平均値を平均 0，分散 1 になるように標準化した値 x_1 を示し，縦軸は度数 f を示している。なお，導電性のある蛍光管は赤色 (■)，導電性の無い蛍光管は青色 (■) で示している。明度の平均 0 を閾値として，導電性の有無を判別した結果，導電性の無い蛍光管 1 本が導電性ありと誤って判別され，分離度は 4.3 となった。特徴量として明度の平均を用いた場合，誤判別

率は 6.25%となった。

図 4-7(b)に、明度の分散を特徴量とした場合の積み上げヒストグラムを示す。この図の横軸は明度の分散を標準化した値 x_2 を示し、縦軸は図 4-7(a)と同様に、度数 f を示している。明度の分散 0 を閾値として、導電性の有無を判別した結果、導電性のない蛍光管 2 本が導電性ありと誤って判別され、分離度は 3.4 となった。特徴量として明度の分散を用いた場合、誤判別率は 12.5%となった。

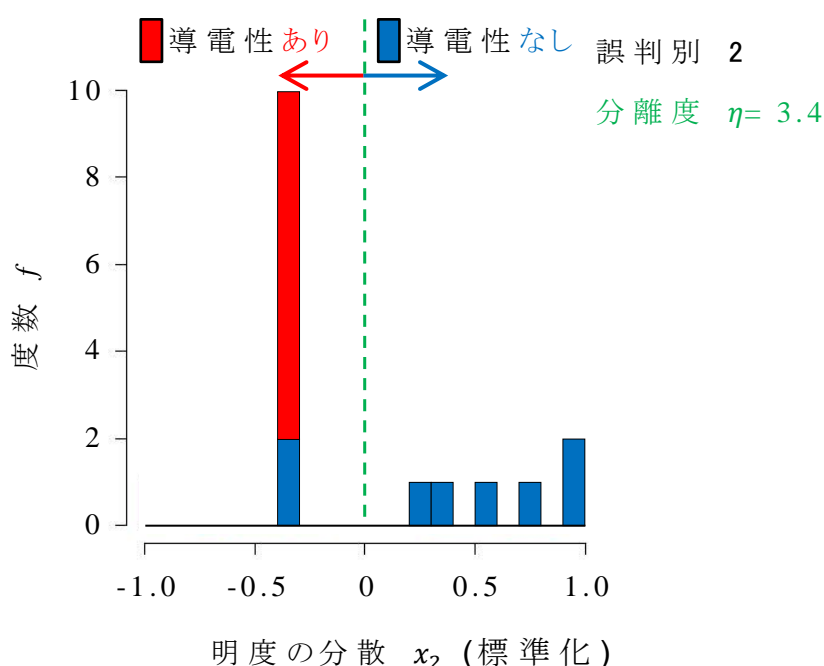


図 4-7(b) 明度の分散を用いた導電性の有無の判定

本研究では、導電性の有無の判別において、分離度を大きくし、誤判別を減らすため、第 2 章でフィルムの有無を判別した際に用いた判別分析を適用した。明度の平均と分散を標準化した値 x_1, x_2 を用いて求めた判別得点 DS は、以下の式(4-1)のようになった。

$$DS = 9.44x_1 + 8.69x_2 \quad (4-1)$$

図 4-8 に、判別得点 DS を用いた場合の積み上げヒストグラムを示す。 $DS = 0$ を閾値として、導電性の有無を判別した結果、分離度

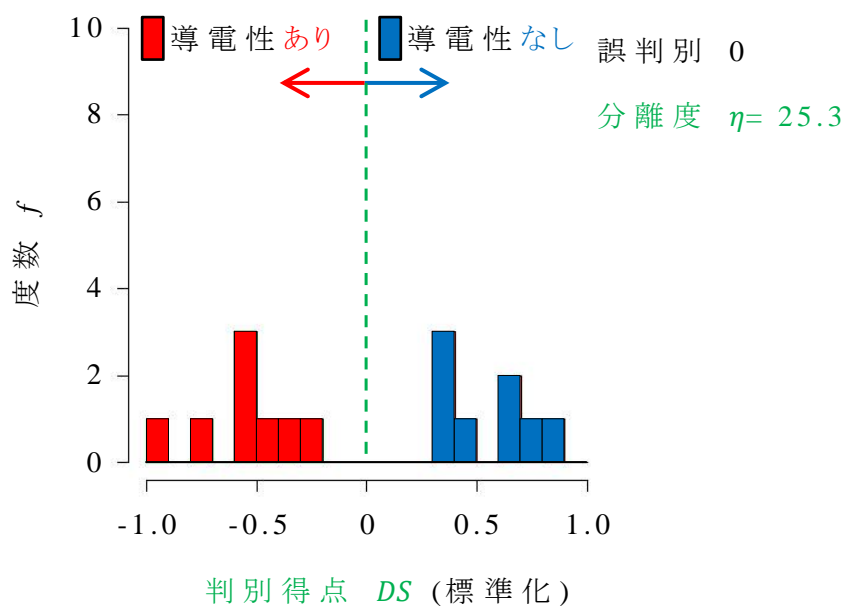


図 4-8 判別得点を用いた導電性の有無の判定

は 25.3 と大幅に改善され，誤りも無く，誤判別を 0% にすることが可能となった。

4.4 結言

テスラコイルで発生した電界中に蛍光管を置いた場合，ガラス管内面に導電性被膜が塗布されていない蛍光管は，蛍光体の種類や放電電極の位置に依存せず点灯し，明度 V も最大値 250 辺りを示したが，導電性被膜のある蛍光管は，放電電極の位置が蛍光管の中心付近では点灯せず，放電電極の位置を蛍光管の端に移動すると，明度が徐々に大きくなり点灯した。

電界分布をシミュレーションした結果，放電電極が蛍光管の中心の真下にある場合，導電性被膜の静電遮蔽により蛍光管内部の電界は $0(\text{V/m})$ で，電界が蛍光管内部に侵入しないことがわかった。これに対して，放電電極が蛍光管の端の真下にある場合，電界が蛍光管の端から蛍光管内部に侵入し，発光することがわかった。

特徴量を明度の平均とした場合，導電性のない蛍光管 1 本が導

電性ありと誤って判別され，分離度は 4.3，誤判別率は 6.25%となった。また，特徴量を明度の分散とした場合，導電性のない蛍光管 2 本が導電性ありと誤って判別され，分離度は 3.4，誤判別率は 12.5%となった。明度の平均と分散を変数とする一次関数で求まる判別得点を用いて，2 章で用いた判別分析を適用した結果，分離度は 25.3 と大幅に改善され，誤りも無く，誤判別を 0%にすることが可能となった。

電界中に置いた蛍光管の発光の様子を撮影し，明度の平均と分散を変数とする判別得点を用いて，判別分析を適用すれば，ガラス内面に導電性被膜を有する蛍光管の識別が可能であることを示した。

参考文献

- [1] K. Morita, Y. Yahata, A. Yamada, Y. Ushimi, M. Katsuragi, and Y. Yamamoto: “High Frequency Lighting of a Doughnut-type Fluorescent Lamp”, *Journal of Osaka Sangyo University, Natural Sciences*, **115** (2004), pp. 27-37.
- [2] N. Tesla: *Experiments with Alternate Currents of High Potential and High Frequency*, (McGraw Pub. Co., N.Y., 1904).
- [3] R. Matsuoka, T. Okamoto, T. Kamakura, K. Watanabe, and M. Saito: “Production and theoretical analysis of Tesla coil” [Translated from Japanese], *Butsuri*, **67** (2012), p. 143.
- [4] T. Imura, H. Okabe, T. Uchida, and Y. Hori: “Wireless Power Transfer during Displacement Using Electromagnetic Coupling in Resonance –Magnetic-versus Electric-Type Antennas–”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **130** (2010), pp. 76-83.
- [5] T. Imura, and Y. Hori: “Wireless Power Transfer Using Electromagnetic Resonant Coupling”, *The Journal of the Institute of Electrical Engineers of Japan*, **129** (2009), pp. 414-417.
- [6] T. Nakata, and N. Takahashi: “Finite element method for electrical engineering” [Translated from Japanese], *The Journal of the Institute of Electrical Engineers of Japan*, **100** (1980), pp. 45-48.
- [7] O. Fujiwara, K. Okuda, K. Fukunaga, and Y. Yamanaka: “FDTD computation of electromagnetic fields caused by electrostatic discharge between charged metal spheres”, *The IEICE Transactions on Communications (Japanese Edition)*, **J84-B** (2001), pp. 101-108.
- [8] N. Otsu: “A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and*

Cybernetics, **9** (1979), pp. 62-66.

- [9] S. Koyanaka: “Recent Trends of Sensor Based Sorting Technology in Resources Recycling”, Journal of MMIJ, **129** (2013), pp. 615-625.

第 5 章 廃蛍光管自動選別装置の開発

5.1 諸言

現在，三波長蛍光管と白色蛍光管の選別には，ECM と呼ばれる高価な装置が使われている。しかし，ECM は，蛍光管に覆われたフィルムの有無を識別する機能を持たないため，現場では，作業員が目視でフィルムを識別し，カッター等を用いてフィルムを剥ぎ取った蛍光管を ECM に投入している。また，ECM にはガラス内面に塗布された導電性皮膜を識別する機能もなく，作業員も目視でガラス内面を観察することが困難なため，現在，導電性の有無は区別せずに粉碎され，導電性皮膜はガラス，レアアース回収の際の不純物となっている。ECM や粉碎機に投入する前に，フィルムが無く導電性皮膜の無い三波長蛍光管を識別できれば，高品位のレアアースを回収できることが予想される。

本研究では，第 2 章から第 4 章までに得られた 3 つのセンサ技術をもとに，紫外線照射と画像処理による三波長蛍光管の識別，AE センサと信号処理によるフィルム有無の識別，電界と画像処理による導電性有無の識別により，現状の問題点を解決する廃蛍光管自動選別装置を開発することを検討した。

5.2 廃蛍光管自動選別装置

5.2.1 廃蛍光管自動選別装置の概要

図 5-1 に，開発した廃蛍光管自動選別装置(図面)を示す。また，図 5-2 にその概要を示す。本装置は，全長約 4m，幅約 1.4m，高さ約 1.4m で，前半部がストッカーと三つのセンサを配した傾斜コンベア，後半部が水平コンベアと三つの回収テーブルからなる。左側が装置の前面入口で，蛍光管を蓄えておくストッカーがあり，蛍光管は，ストッカーの傾きにより傾斜コンベアまでずるずると転がり，傾斜コンベアのフィンに掻き

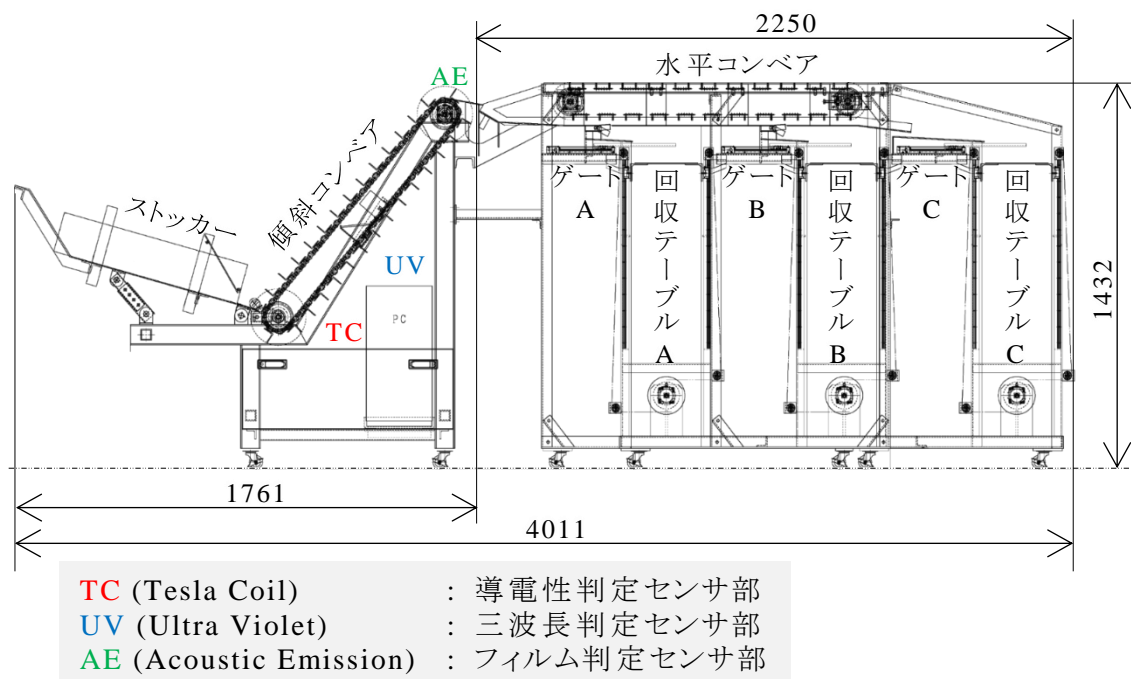


図 5-1 廃蛍光管自動選別装置(図面)

揚げられ上昇する。

蛍光管が傾斜コンベアによって上昇する間、まず、テスラコイルが発生した電界中で蛍光管が点灯すれば、導電性のない蛍光管と識別される。次に、UV 照射により、青く点灯すれば三波長蛍光管と識別される。また、蛍光管を回収テーブルに回収する際に必要となる蛍光管の直径もここで算出される。さらに、傾斜コンベアの頂上で、蛍光管を AE センサ

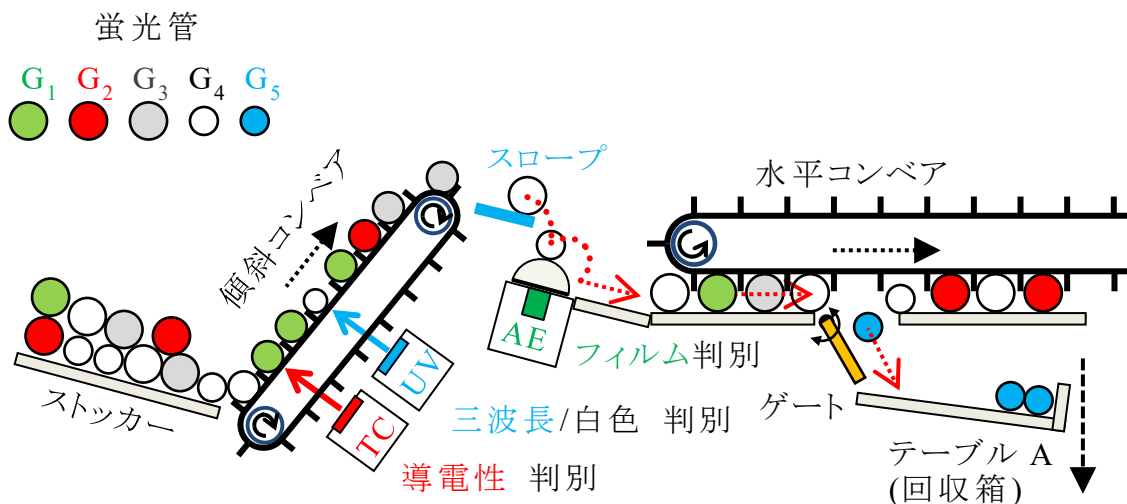
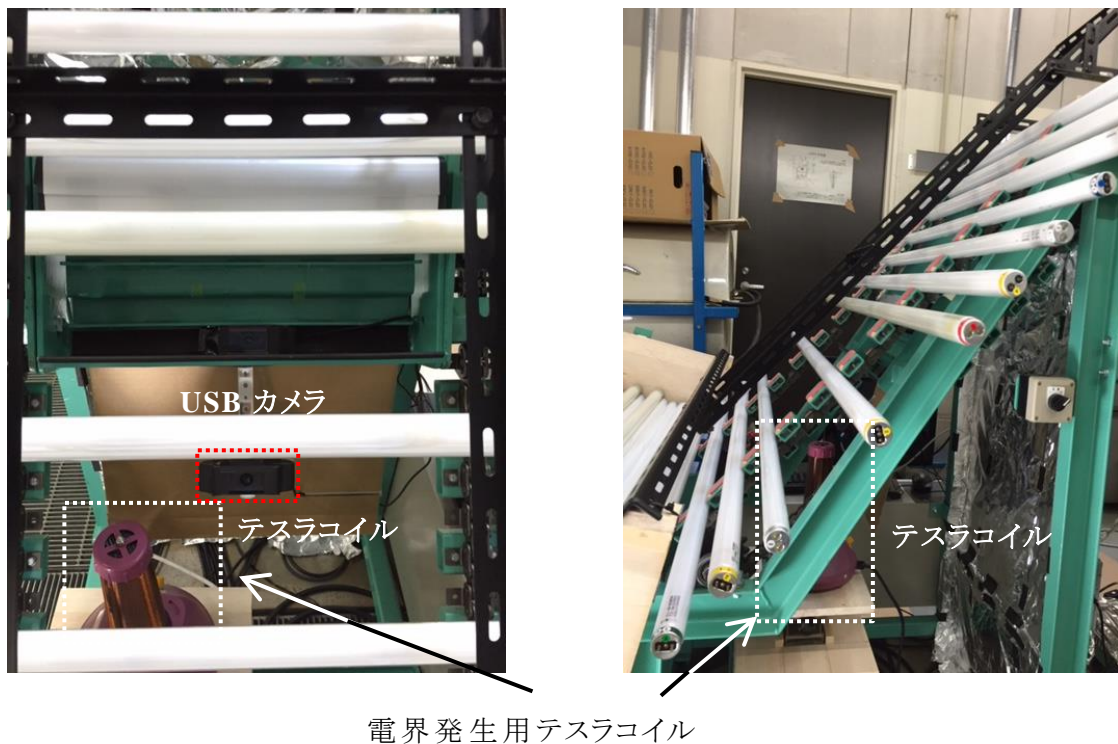


図 5-2 廃蛍光管自動選別装置の概要

ヘッドに落下して得られた衝突音よりフィルムの有無が判別される。

図 5-3 に、電界による導電性の有無を識別するために、傾斜コンベアの内側に設置されたテスラコイル、USB カメラの写真を示す。(a)が正面から撮影した写真、(b)が側面から撮影した写真である。この部分で、テスラコイルで発生した電界中での蛍光管の点灯状態を USB カメラで撮影し、導電性の有無を識別する。



(a) 正面からの写真

(b) 側面からの写真

図 5-3 電界による導電性有無の識別(写真)

図 5-4 に、UV 照射により三波長蛍光管を識別するために、傾斜コンベアの内側に設置された UV ランプ、USB カメラ等の写真を示す。(a) は装置入口部分、蛍光管ストッカーに貯められた蛍光管、(b) は UV ランプ、USB カメラ、背景用の板、(c) は UV 照射により三波長蛍光管を識別する部分、(d) に UV 照射により青色に点灯している三波長蛍光管の写真を示す。この部分で、UV を照射した際の蛍光管の点灯状態を USB カメラで撮影し、三波長蛍光管を識別する。

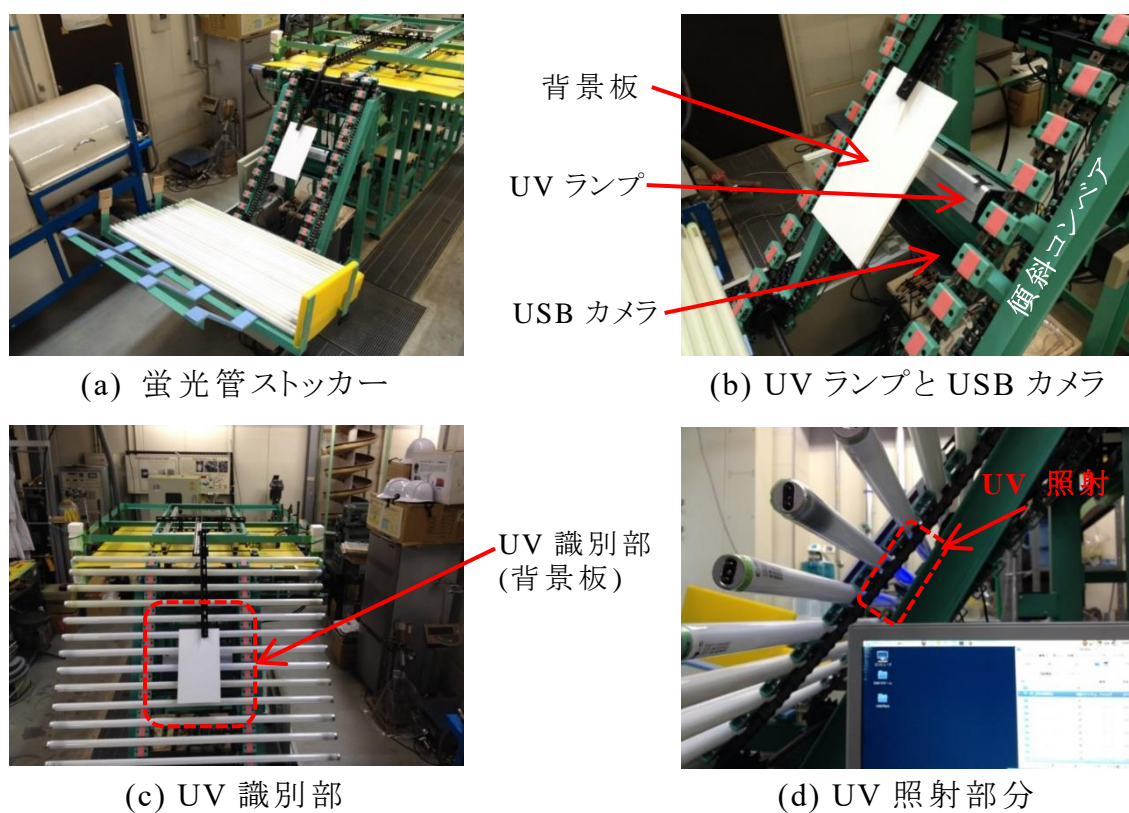


図 5-4 UV による三波長 / 白色蛍光管の識別(写真)

図 5-5 に、AE センサによりフィルムの有無を識別するために、傾斜コンベアの頂上部分に設置された AE センサヘッド等の写真を示す。傾斜コンベアによりコンベア頂上部分(a)に運ばれた蛍光管は、傾斜 2°、長さ 10cm の青色のスロープ(b)を転がり、スロープ先端から 20mm 下の AE センサヘッドに落下する。この衝突の際に得られる AE 信号により、フィルムの有無を識別する。落下後の蛍光管(c)は水平コンベア入口まで転がり、その後、水平コンベアにより、回収用のテーブルまで搬送される(d)。この時点で、4つの属性(蛍光体の種類、フィルムの有無、導電性の有無、直径)が求まり、五つ目の属性である3つの回収箱、すなわち、回収用テーブル(A, B, C)のうち、どのテーブルに格納されるかが決定される。なお、各テーブルに回収する蛍光管の種類は、システムの初期設定により設定可能である。

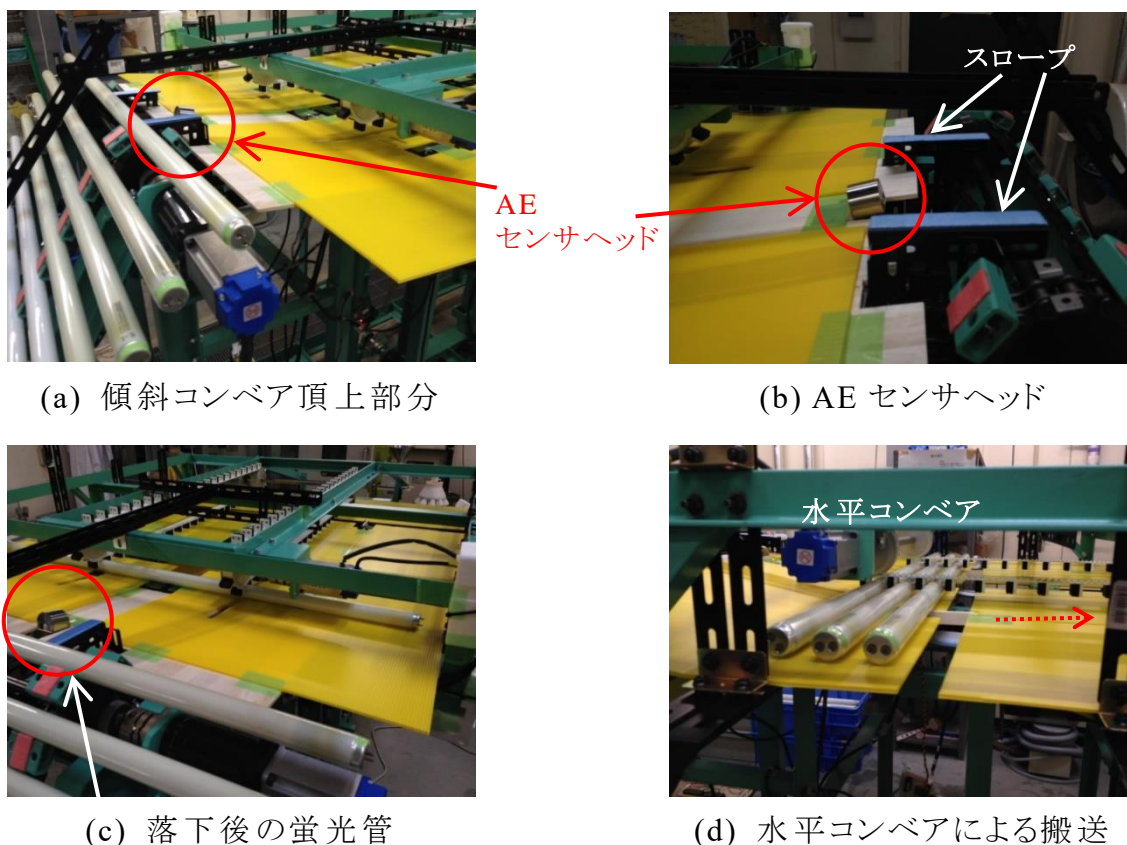


図 5-5 AE センサによるフィルム有無の識別(写真)

図 5-6 に，蛍光管を回収用のテーブルに積み上げる概要を示す。ここでは，蛍光管を回収用のテーブル A に格納する場合を例に説明する。水平コンベアにより，蛍光管が回収用のテーブル A 上に運ばれると，テーブル A 上に設置されたゲートが開き(a)，蛍光管はゲート上を滑りながら落下後，テーブル A の傾斜を転がり前に詰めながら格納される(b)。テーブルがいっぱいになった場合，テーブル上下動用モータ(c)により，蛍光管 1 本分の高さだけ，テーブルを下げる。選別終了後(d)，3 つのテーブルを一番下まで下げる。

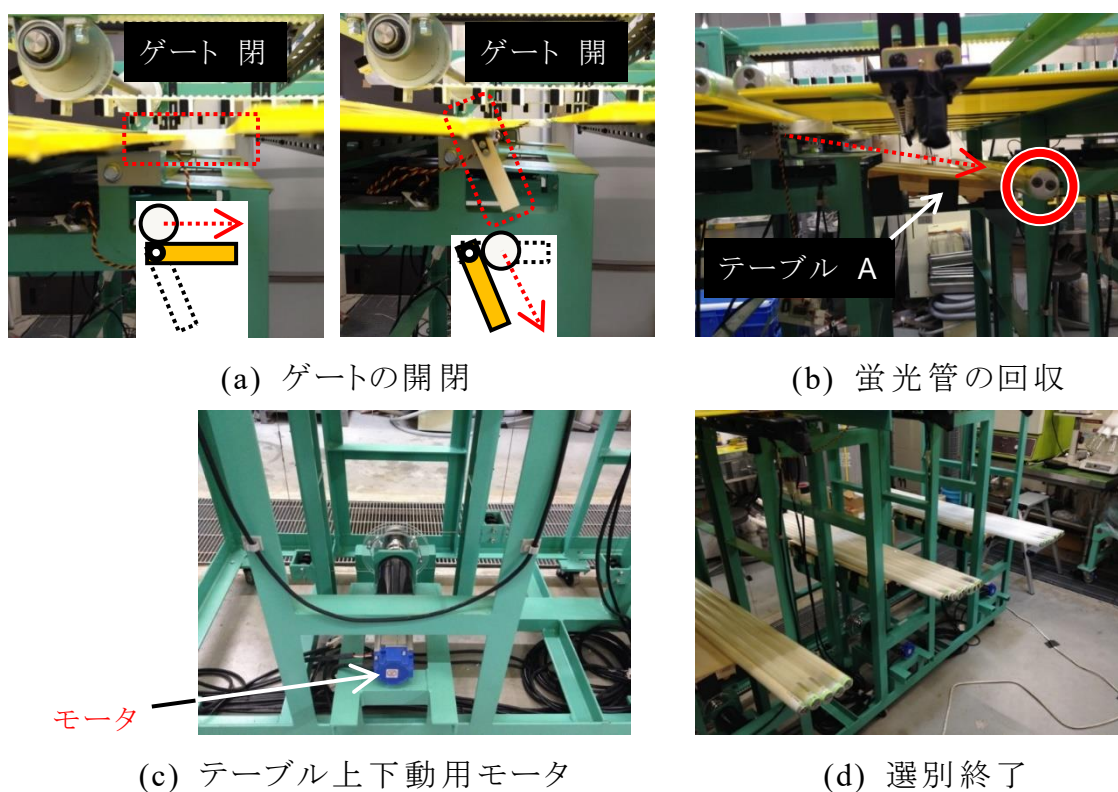


図 5-6 蛍光管回収テーブル(写真)

5.2.2 選別システムのハードウェアの概要

図 5-7 に，本システムのハードウェアの構成を示す。本装置は，一般的なパーソナル・コンピュータ(以下 PC と略す)を，システム全体をコントロールするメインマシンとした。なお，PC の OS には Linux(Fedora14)

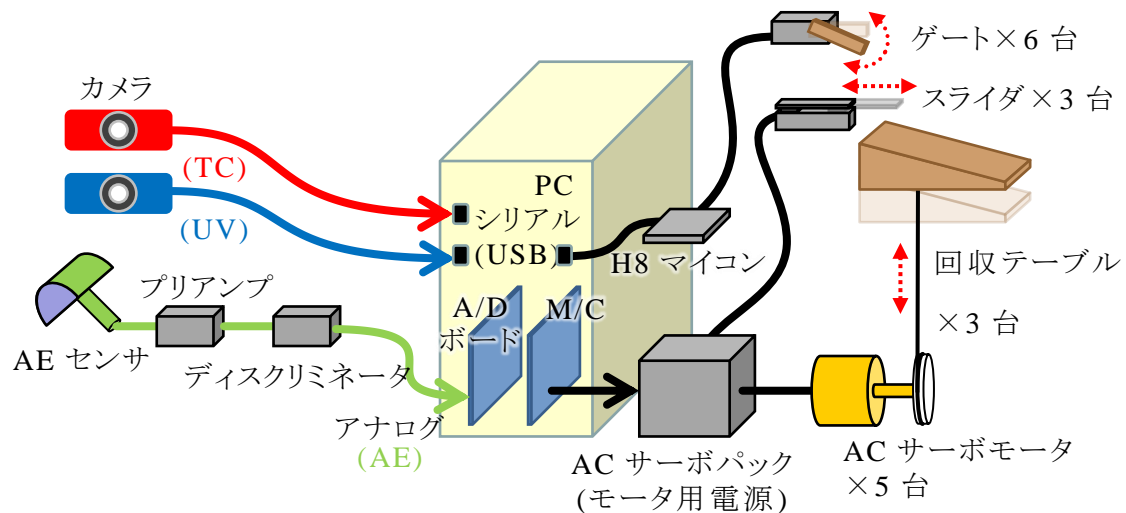


図 5-7 ハードウェアの構成

を採用した。導電性の有無，三波長蛍光管の識別用に，USB カメラ (Logicool C910) で撮影した画像は USB シリアル通信を通して PC に取得した。また，フィルムの有無の識別用に，AE センサから取得した衝突音は，第 3 章で述べたように，プリアンプを用いて増幅し，ディスクリミネータ (NF 回路設計ブロック製 AE9922) でノイズを除去した後，AD 変換ボード (インタフェース製 PCI-3525) を介して PC に取り込んだ。装置の定常運転中は，傾斜コンベアと水平コンベアを 1.3 秒に 1 本蛍光管を処理する速度で駆動していくが，これらコンベアの駆動は，PC からの指令を，モーションコントロールボード (インタフェース製 M/C ボード，PVC-7414V) から出力し，AC サーボモータ用の電源である AC サーボパックを介して AC サーボモータに送ることで実現した。また，蛍光管の回収に必要なテーブルの上下駆動や回収テーブル上に並んだ蛍光管の上で蛍光管を 1 本分押し出す動作も同様に，PC からの指令を，AC サーボパックを介して AC サーボモータに送ることで実現した。なお，AC サーボモータは，傾斜・水平コンベアで各 1 台，回収用テーブル A～C で各 1 台，3 台のリニアスライダに各 1 台の合計 8 個使用した。水平コンベアによって運ばれた蛍光管が対応する回収テーブル上に到達すると，PC から H8 マイコンを介して RC サーボへ命令が送られ，ゲートが開き，蛍光管が回収テーブルに落下する。

本装置の蛍光管回収テーブルは、傾斜をつけた板に蛍光管を落下させ、転がす形で前に詰めながら格納していく。蛍光管が回収テーブルの1層分を埋め尽くすタイミングと1層分の降下距離は、蛍光体判定時にカメラ画像から計算した直径を利用して決定される。図5-8に、回収テーブルの1層目が埋まった際の回収テーブル、ゲート、スライダの動きを示す。(a)のように、テーブルの1層目が埋まった状態で新たな蛍光管の回収を行う場合、(b)のように、PCからの命令により、1層目に積まれた蛍光管の最大直径に合わせてテーブルを降下させる。次に、(c)のように、ゲートをクローズした後、回収テーブルの上部に取り付けられたスライダを移動させ、蛍光管を1本分押し出す。このスライダの移動は、次の1層がいっぱいになるまで、新たな蛍光管が入る度に行われ、2層目に並んだ蛍光管が回収テーブルのゲート付近に溜まらないように工夫した。

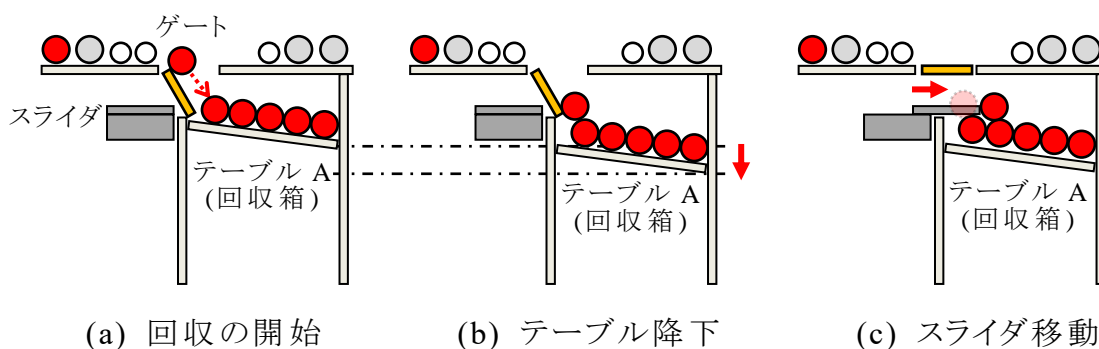


図 5-8 廃蛍光管自動選別システム 回収テーブルの動作

5.2.3 選別システムのソフトウェアの概要

図5-9に、本システム用に作成したソフトウェアの全体構成を示す。本システムは、まず、開始処理で、駆動部初期化、カメラ初期化、回収のための各蛍光管の属性ファイル(蛍光体の種類、フィルムの有無、導電性の有無、直径、格納テーブル等)の初期化を行った後、3つの識別(導電性の有無、三波長蛍光管の識別、フィルムの有無)、蛍光管の搬送・回収を繰り返し、全ての蛍光管について、識別・搬送・回収処理が終わると、

終了処理を行い終了する。

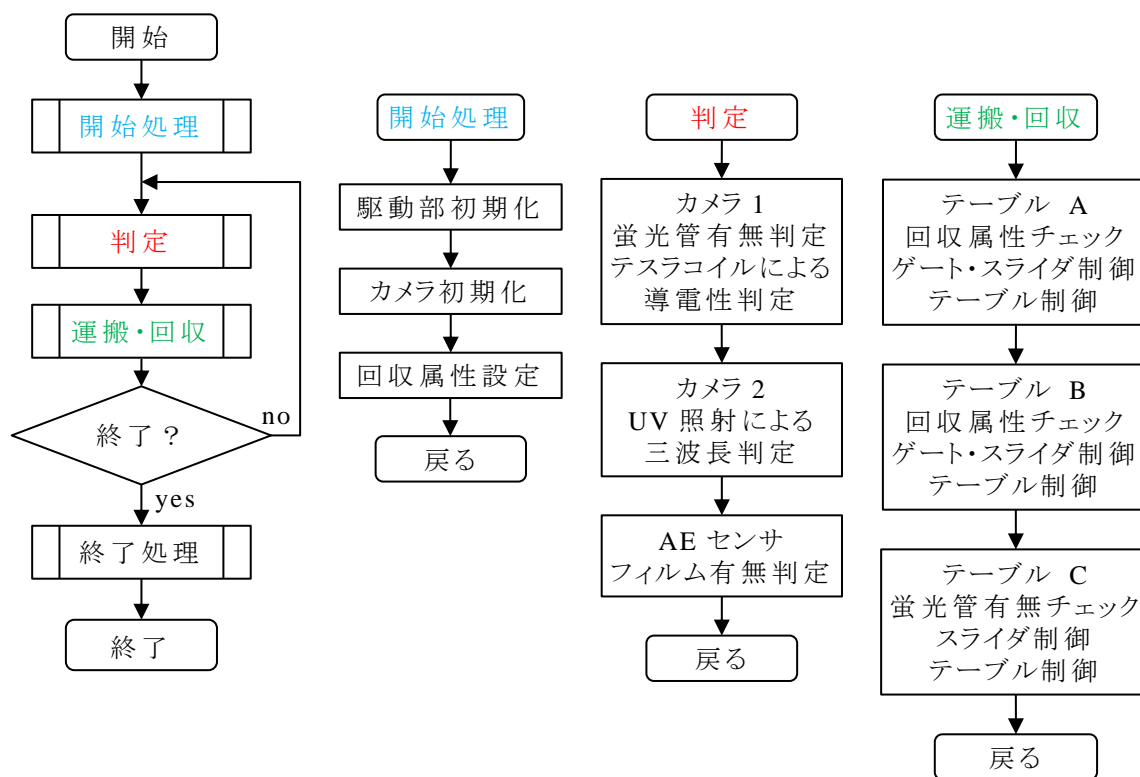


図 5-9 ソフトウェアの構成

表 5-1 に、本システム用に独自に作成した処理プログラムモジュールの一覧を示す。本ソフトウェアの主プログラム(Main 関数)から呼ばれる関数は、3つの判定用のグループ(導電性判定、三波長判定、フィルム判定)と導電性判定と三波長判定の関数から呼ばれる画像処理関連の関数のグループ、コンベヤ、テーブル、スライダ、ゲート用 RC サーボを駆動するための搬送・回収に関する関数のグループからなる。PC は、各蛍光管の判別結果や格納するテーブル等の情報を属性ファイルに保存し、条件を満たした時点で、その都度、蛍光管への操作を行う。

表 5-1 処理プログラムモジュール一覧

Main				
導電性判定	三波長判定	フィルム判定	画像処理	運搬・回収
TC_初期化	UV_初期化	AE_初期化 AE_設定	Camera_初期化	Motor_初期化
判定用関数群 TC_判定	UV_判定	AE_開始 AE_測定	直径測定	Gate_オープン / クローズ
TC_終了	UV_終了	AE_判定	S, V 平均計算	Table_ダウン / アップ
		AE_終了		Conveyor_前進 / 停止
				Slider_プッシュ / プル
				Motor_終了

5.3 実験方法

5.3.1 使用した廃蛍光管

表 5-2 に、実験で使用した蛍光管を示す。蛍光管は、蛍光体の種類(三波長蛍光体または白色蛍光体)、UV 吸収や落下時の飛散防止用フィルムの有無、点灯方式の違いによるガラス管内面の導電性皮膜の有無、直径などの形状の違いなどにより、様々な種類があるが、本研究では、表 5-2 に示した 5 つのグループ(G₁~G₅)の廃蛍光管を用いて選別実験を行った。

表 5-2 使用した廃蛍光管

グループ	蛍光体	フィルム	導電性	直径(mm)	本数
G ₁	三波長	あり	あり	32.5	13
G ₂	三波長	なし		32.2	13
G ₃	白色			32.4	13
G ₄	白色	なし	なし	28.9	13
G ₅				三波長	27.4

5.4 結果および考察

5.4.1 蛍光管選別実験

本研究では、開発した廃蛍光管自動選別装置を用いて、以下のような二種類の選別実験を行った。図 5-10(a)に、表 5-2 に示した 5 種類 55 本の蛍光管を、G₅(三波長、フィルムなし、導電性なし)、G₁(フィルムあり)、その他の G₂(三波長、フィルムなし、導電性あり)、G₃(白色、フィルムなし、導電性あり)、G₄(白色、フィルムなし、導電性なし)に選別する実験を行った結果を示す。G₅は 3 本中 3 本が誤判別なしで回収テーブル A に格納され、G₁は 13 本中 13 本が誤判別なしで回収テーブル B に格納され、その他 G₂、G₃、G₄は 39 本中 39 本が誤判別なしで回収テーブル C に格納された。

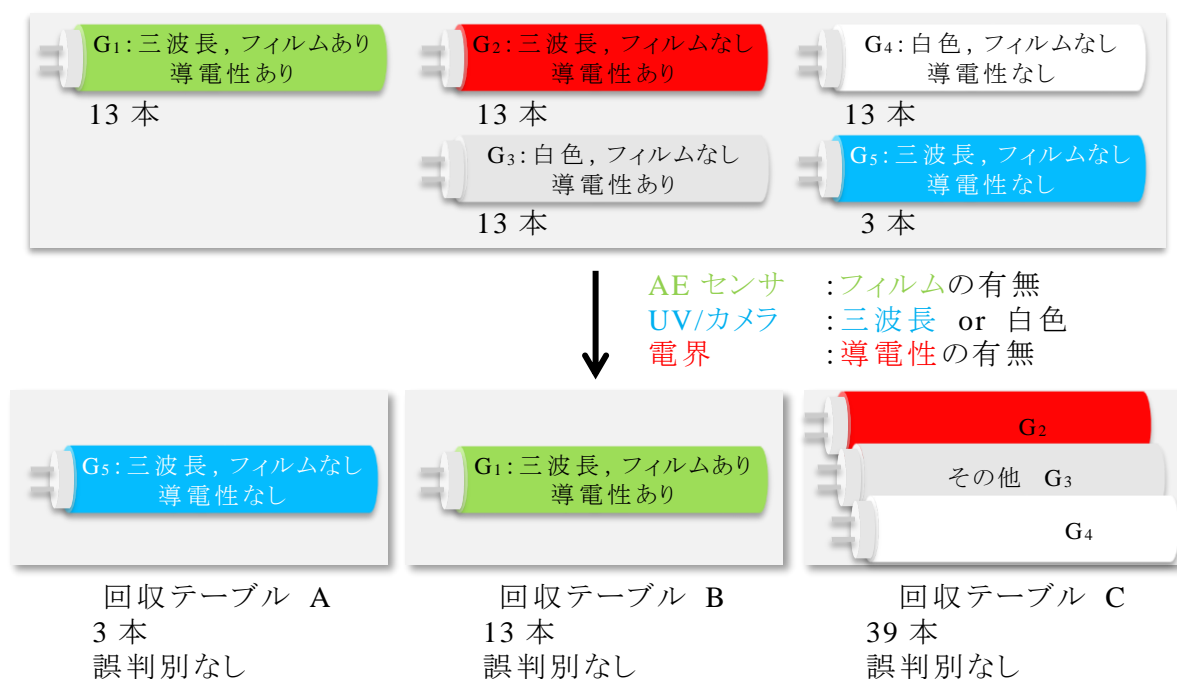


図 5-10(a) 実験結果(選別実験 1)

同様に、図 5-10(b)に、G₂(三波長、フィルムなし、導電性あり)13 本、G₃(白色、フィルムなし、導電性あり)13 本、G₄(白色、フィルムなし、導電性なし)13 本を選別する実験を行った結果を示す。G₂は 13 本中 13 本が誤判別なしで回収テーブル A に格納され、G₃は 13 本中 13 本が誤判別なしで回収テーブル B に格納され、G₄は 13 本中 13 本が誤判別なしで回収テーブル C に格納された。

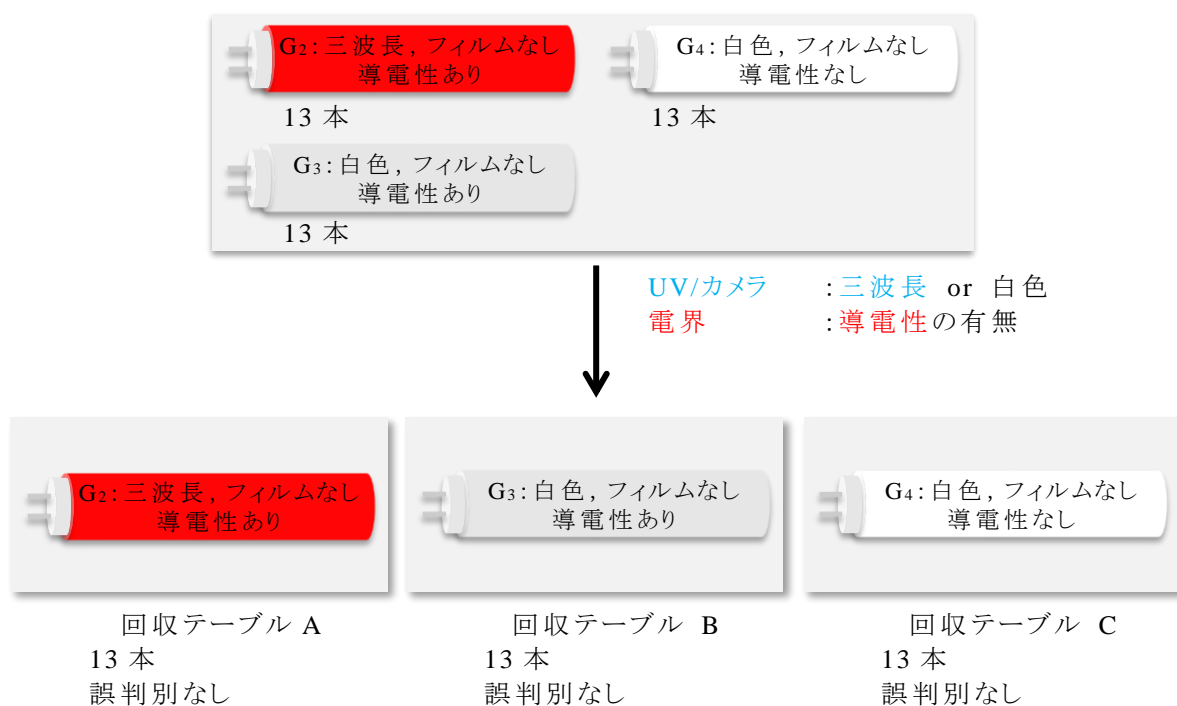


図 5-10(b) 実験結果 (選別実験 2)

5.5 結言

第 2 章から第 4 章で得られた 3 つのセンサ技術、紫外線照射と画像処理による三波長蛍光管の識別、AE センサと信号処理によるフィルム有無の識別、電界と画像処理による導電性有無の識別により、従来、高価な装置で行われていた三波長蛍光管の識別を簡易な装置(UV ランプ、カメラと画像処理)に置き換え、作業員が目視で行っていたフィルム有無の識別、現状で対応できていない導電性皮膜の有無の識別を自動化し、現状の問題点を解決した。また、3 つの識別方法に、搬送・回収を行う独

自のハードウェアとソフトウェアを追加し，廃蛍光管自動選別装置を開発した。開発した廃蛍光管自動選別装置は，最大 46 本 / 分(約 2700 本 / 時間) の処理能力を有し，誤りの無い判別を可能とした。

第 6 章 その他のリサイクル分野への応用

－風力選別のための画像処理システム－

6.1 諸言

本研究の第 2 章で得られた画像処理と第 3 章で得られた判別分析の技術を、廃被覆電線のリサイクルプロセスに応用した結果について述べる。これまで、廃棄被覆電線から銅をリサイクルするためのいくつかの研究がなされてきた[1][2]。廃被覆電線のリサイクル工場では、作業員が選別後の回収箱内の銅(Cu)とポリ塩化ビニル(PVC)の選別結果を目視で評価し、一定の間隔毎に風力の設定を調整している。しかし、このような調整は、作業員の勘と経験に基づく場合が多く、適正に設定を行うことが困難である[3]-[5]。この作業員の操作を自動化できれば、廃被覆電線のリサイクルプロセスの処理能力が向上することが予想される。

本研究では、作業員が行っている目視による回収箱内の Cu と PVC の選別結果の評価を、画像処理と判別分析を用いて自動で行うシステムの開発を試みた[6]。選別後の Cu と PVC 粒子の混合画像をカメラで撮影した場合、背景と似た色の粒子は、背景に埋もれてしまう。この問題に対して、本研究では、粒子を動かさずに、背景を黒と白色の 2 色に交換し撮影した 2 枚の画像の差分画像を作成し、分離度を最大にする二値化により[7]、背景から物体を抽出した。また、判別分析[8]-[10]により、Cu と PVC 粒子の混合画像から Cu と PVC の画素の比を計算した。さらに、Cu と PVC が完全分離していると仮定し、粒子の輪郭情報を利用して、判別分析後の各輪郭内の Cu と PVC の識別した画素数を比較し、画素数が少数派である画素を多数派の画素に変更することにより、誤判別率を低減した。

6.2 実験方法

図 6-1 に本研究で用いた試料を示す。

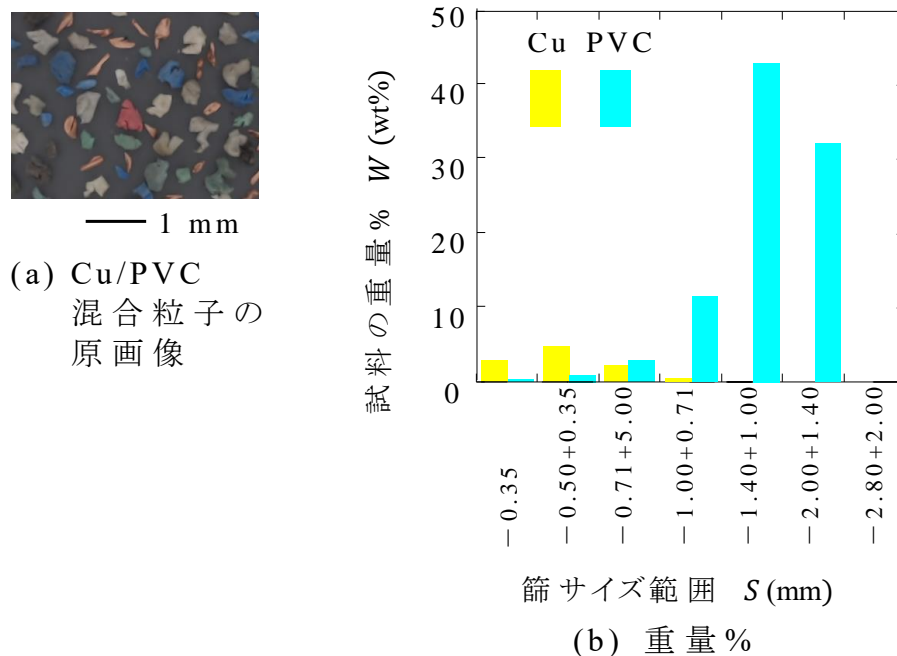


図 6-1 試料

本研究では、廃被覆電線のリサイクル工場のオーバーフロー回収箱に回収された Cu と PVC の粉碎粒子を借用した。(a)の写真のように、試料は Cu と 6 色(白色、灰色、緑色、青色、黒色および赤色)の PVC の粉碎粒子からなる。また、(b)に、ふるい分けにより得られた試料中の Cu と PVC の各サイズの重量比を示す。Cu と PVC の比重は、それぞれ、約 8.5、約 1.4 と大きく異なり、本来ならば、Cu はアンダーフロー回収箱、PVC はオーバーフロー回収箱に分離、回収されるが、(b)のように、粉碎されて細かくなった Cu がオーバーフロー回収箱に混入していることがわかる。リサイクル工場において作業員は、回収箱内の選別状況を見て風力等の調整を行うが、(a)の写真のように、背景色と似た色の粒子が背景に紛れてしまうため、選別状況の確認が困難であることがわかる。

図 6-2 に、密閉型内部循環式の風力選別実験装置(松岡エンジニアリング社製)の概要を示す。

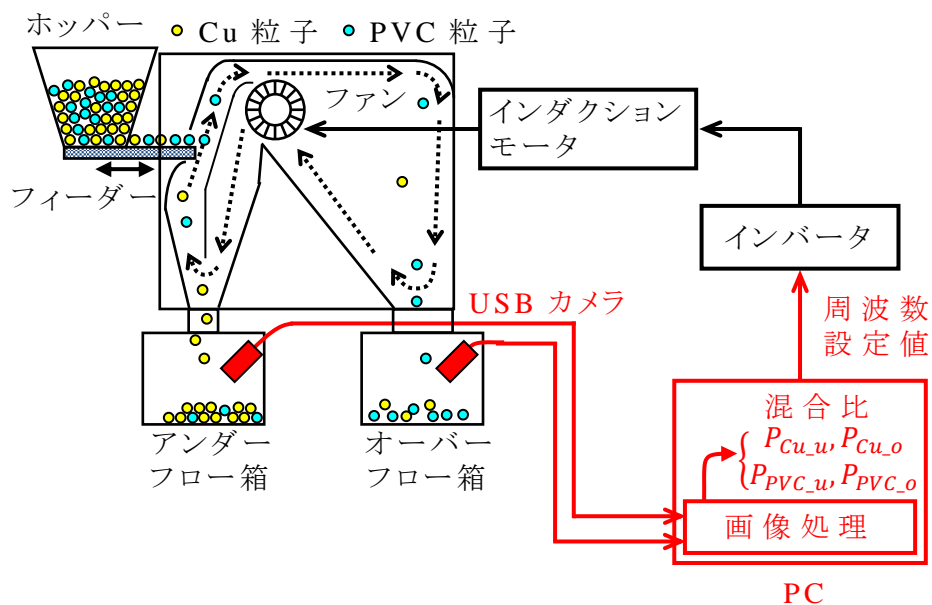


図 6-2 風力選別実験装置

この装置は、振動フィーダー、シロッコファン、インダクションモータ、インバータ、選別室から構成される。振動フィーダーは、試料を選別機内に供給し、試料の供給速度は手動で設定できる。シロッコファンは風を発生し、風速は、ファンが軸に取り付けられたインダクションモータの回転数をインバータ(MSテクノ製 MITY-VEAS04)を用いて変更することで、手動で設定できる。選別室内に発生した風力により、試料のうちの軽量物は飛ばされ、オーバーフロー産物となり、試料のうちの重量物は落下し、アンダーフロー産物となる。

本研究は、既存の装置に図中の赤色部分を追加し、USBカメラで撮影した回収箱内の画像をPCに取り込み、それらの画像からCuとPVCの混合比を算出し、得られた混合比より風力を自動で調整する装置の開発を目指している[11][12]。そのため、本研究では、USBカメラ(Logicool社 HD Pro Webcam C920t)、ドーム型光源(アイテックシステム TD102x20-60W-4)、定電流電源(アイテッ

クシステム株式会社 TPDC2-2430NCW)を用いて，背景に埋もれた背景色に似た色の粒子を抽出し，さらに，Cu と PVC の混合比を算出する画像処理システムの検討を行った。

図 6-3 に，本研究で用いた Cu / PVC 粒子の撮影装置の概要を示す。

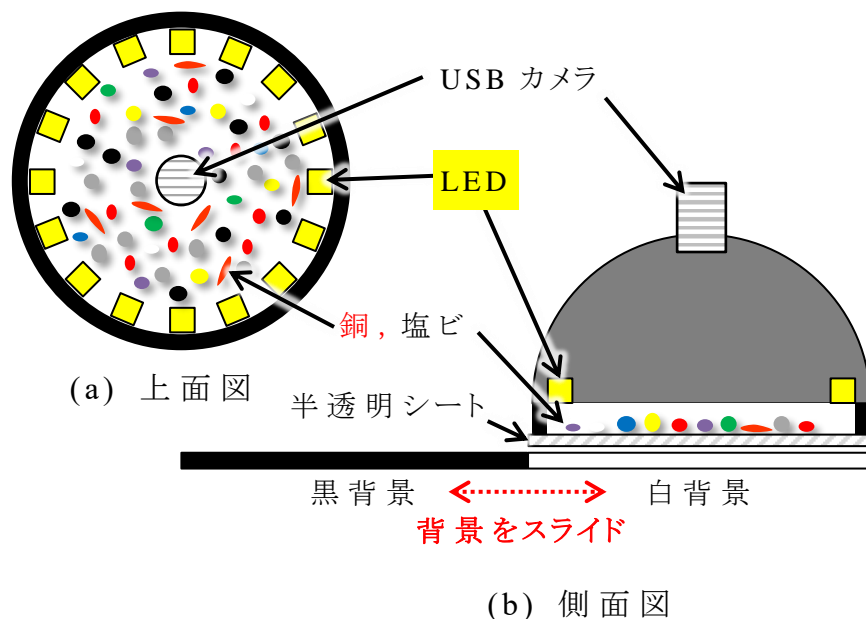


図 6-3 背景色を切り替える撮影装置の概要

通常の光源は，光源の真下と周囲に置かれた試料で光の当たり方に違いを生じ，光源の周辺に置かれた試料が暗くなりやすい。本装置は，円周上に並べられた LED とドーム状の反射カバーにより，試料に当たる光を均一にすることができる。また，図 6-1(a)で示したように，背景色と似た色の粒子は背景に紛れてしまうが，本研究では，図 6-3 のように，試料を半透明なプラスチック板上に置き，試料を動かさずに，プラスチック板の下で白色と黒色の背景をスライドさせ，白と黒の 2 色の背景の写真を撮影し，両画像の差を利用して，全ての色の粒子を背景から抽出することを検討した。

本研究では，背景から Cu, PVC 粒子を抽出するために，第 2 章で用いた分離度を最大にする二値化により，前景である粒子と背

景の分離度を最大にする閾値を求めた。さらに，第3章で用いた判別分析により，Cu / PVC 混合粉砕粒子を撮影した画像から Cu と PVC の画素を識別し，Cu と PVC の混合比を算出した。

6.3 結果および考察

6.3.1 二種類の背景を用いた物体抽出

本研究で用いた試料には6色のPVCがあり，図6-1(a)のように背景色に似た色の粒子は，背景に紛れてしまう。そこで，本研究では，粒子の色に依存することなく，背景から粒子を抽出する方法を検討した。以下，黒色PVC粒子の場合について説明する。通常，撮影された画像は，RGB表色系で表現されるが，本研究では，第2,3章と同様に，RGB表色系を，色相(H)，彩度(S)および明度(V)で色を表現するHSV表色系に変換した。

図6-4に，背景が白色(a)および黒色(b)で，黒いPVC粒子を撮影した明度(V)画像およびそのヒストグラムを示す。

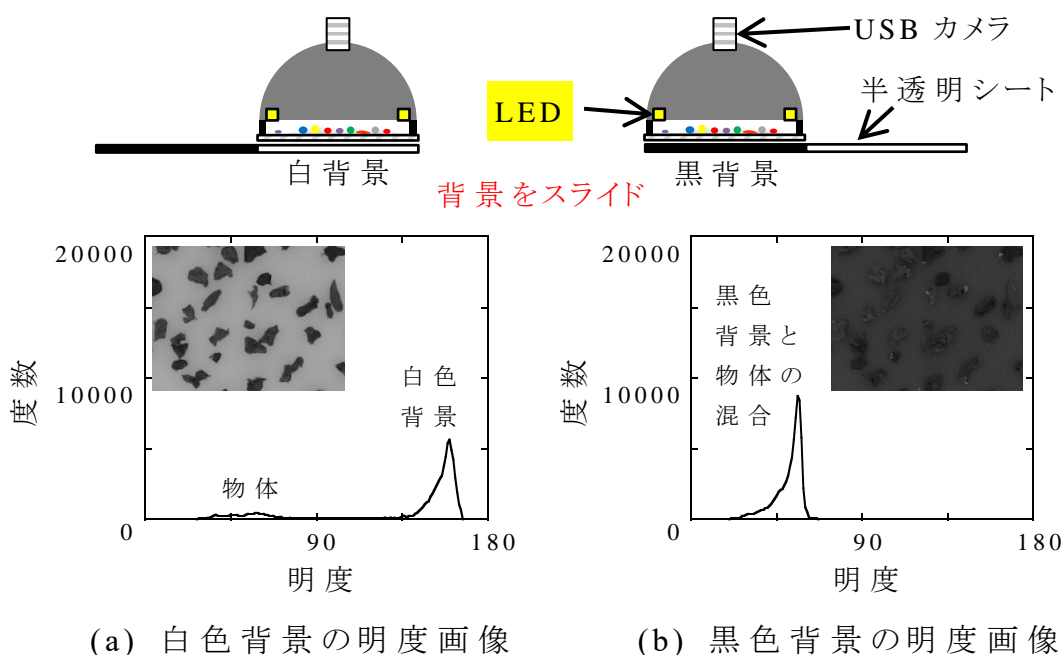


図6-4 白色および黒色背景画像の明度のヒストグラム

このヒストグラムの横軸は V 、縦軸は度数を示している。写真のように、白色背景(a)では、黒色 PVC 粒子がはっきりと識別できるが、黒色背景(b)では、黒色 PVC 粒子が背景に埋もれてしまい、はっきりと識別することができない。(a)のヒストグラム上では黒色 PVC 粒子は 35~70 辺りに分布し、白色背景は 130~160 辺りにピークを持ち、両者の V の分布は分離し、白色背景から黒色 PVC 粒子が容易に抽出できる。それに対し、(b)のヒストグラム上では、黒色 PVC 粒子と黒色背景の V が重なり、25~60 辺りにピークが 1 つしかなく、背景から PVC 粒子を抽出することが困難であることがわかった。また、白色背景で、白い PVC 粒子を撮影した V 画像およびそのヒストグラムについても同様な結果となった。そこで、本研究では、白色背景と黒色背景の場合の二枚の画像を利用して、背景と粒子の分離を検討した。

図 6-5 に、白色背景の明度画像(a)から黒色背景の明度画像(b)を引いた明度の差分画像(c)を示す。図のように、粒子の色は(a)、(b)で差が小さいので、(a)と(b)で差分を取ると暗くなる。これに対して、背景の色は(a)、(b)で差が大きいため、(a)と(b)で差分を取ると明るくなる。従って、両背景画像の差分を取ると、(c)のように、粒子と背景の V の差が大きくなり、両者を識別しやすくなる。

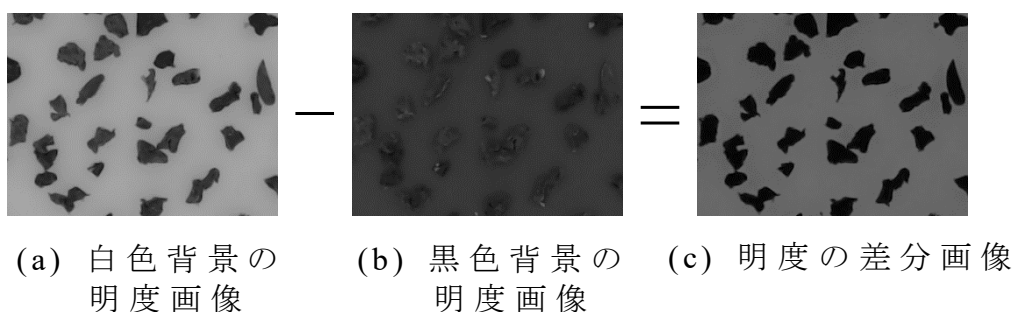


図 6-5 白色背景と黒色背景の黒色 PVC 画像の明度差分

図 6-6 に、図 6-5(c)で示した明度の差分画像(a)およびそのヒストグラム(b)を示す。

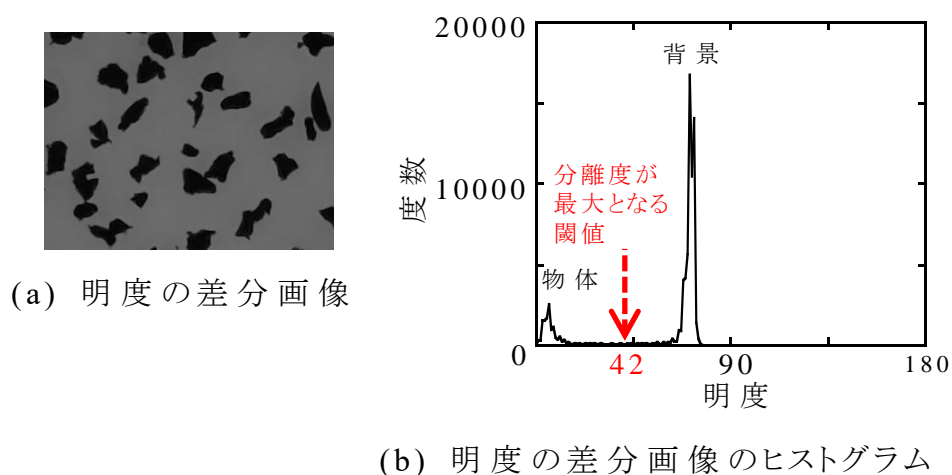


図 6-6 明度の差分画像のヒストグラム

(b)より明度分布には2つのピークが存在し、低い方の分布(0~16)が画像中の物体部分に対応し、高い方の分布(60~75)が背景に対応している。差分画像の明度のヒストグラム上で、物体と背景の分布には明確な差があるため、背景から物体を抽出することが可能であることが予想される。

明度分布の2つのピーク間の閾値は、分離度を最大にする二値化を用いると、42と求まり、 V が42以上は背景、 V が42未満は粒子によるものとした。

図 6-7 に、黒色 PVC 粒子を例に、明度の差分と分離度が最大となる二値化等を用いて、粒子を背景から抽出する手順を説明する。図中の(a)は、図 6-6(c)に示した明度の差分画像、(b)は、分離度が最大となる二値化より求めた V の閾値 42 により、明度が 42 以上を白、42 未満を黒とした二値化画像、(c)は(b)の二値化画像の白色と黒色を反転した“マスク”と呼ばれる画像である。(c)のマスクは、粒子を抽出し背景を除去するため、粒子部分で V が 255、背景部分で V が 0 に設定されている。最後に、(d)の黒色背景の黒色 PVC 粒子の原画像と(c)のマスクとの積を取ると、背景が除去され、粒子が抽出された(e)の背景除去画像が得られる。

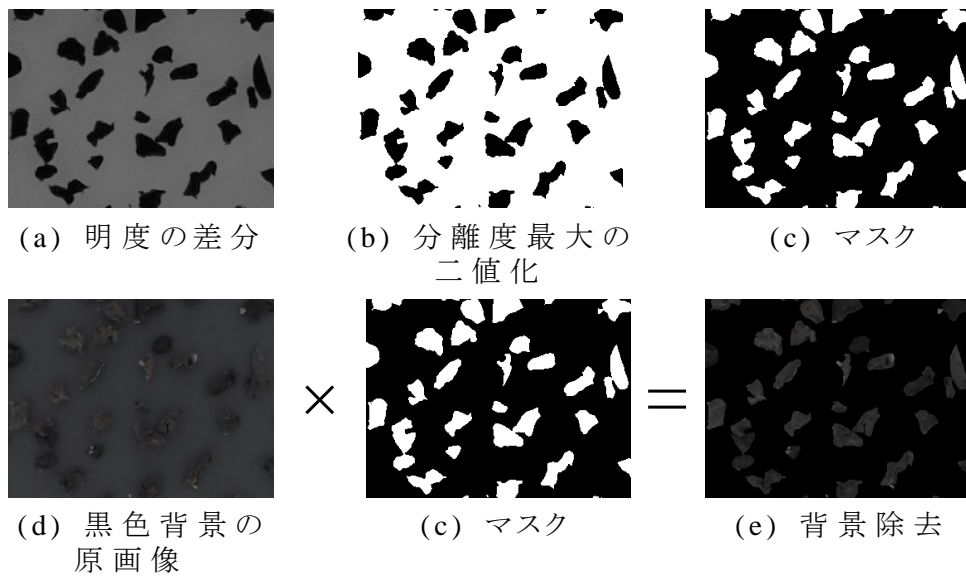


図 6-7 黒色 PVC 画像の背景除去

図 6-8 に、図 6-7(e)の背景が除去された黒色 PVC 粒子の画像の明度のヒストグラムを示す。

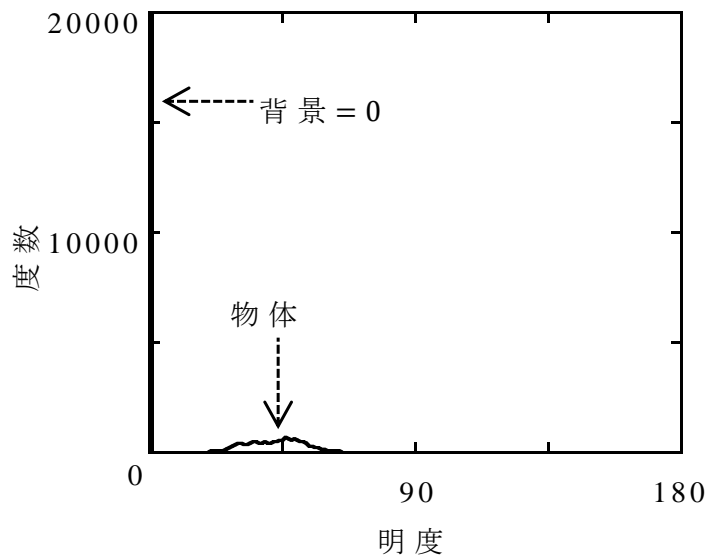


図 6-8 黒色 PVC 背景除去画像の明度ヒストグラム

背景の明度は 0，黒色 PVC 粒子の明度は 23～69 に分布し，背景が除去されていることがわかる。

6.3.2 判別関数の学習

図 6-8 に示したように，背景色に依存しない背景除去が可能となったので，背景除去された Cu と PVC の粉碎粒子が混ざった画像から Cu および PVC 画素の判別を試みた。

本研究では，判別結果を評価するために，フリーの GNU 画像操作プログラム(GIMP)を用いて，画像中の Cu と PVC の画素の正しい領域を手動で設定した真値データを作成した。また，第 3 章で述べた式(3-1)の係数 $a_1 \sim a_k$ を決め，判別得点 DS を求める操作を，以下，“ DS の学習”と呼ぶ。

まず，Cu 粒子の画素をグループ 1 に，6 色全ての PVC 粒子の画素をグループ 2 に分けるための判別得点 DS を求めた。得られた DS を用いて判別を行った結果，Cu 粒子の 83.85% が PVC と誤判別され，PVC 粒子の 2.23% が Cu と誤判別された。この誤判別を改善するため，6 色全ての PVC 粒子の画素をグループ 2 に分けるのではなく，例えば，Cu の画素と白色 PVC の画素というように，Cu と単色の PVC に分ける， DS_{Cu_White} ， DS_{Cu_Gray} ， DS_{Cu_Green} ， DS_{Cu_Blue} ， DS_{Cu_Black} ， DS_{Cu_Red} の計 6 つの判別得点を求めた。6 つの DS の学習のうち，例として，Cu と黒色 PVC 粒子の画素を判別する DS_{Cu_Black} の学習結果を図 6-9 に示す。(a) および (d) は学習に用いた Cu 粒子，黒色 PVC 粒子，それぞれの背景除去画像である。学習により， DS は，以下の式(6-1)のように求まった。

$$DS_{Cu_Black} = -0.653\tilde{H} + 16.121\tilde{S} + 13.078\tilde{V} - 2.713 \quad (6-1)$$

ここで \tilde{H} ， \tilde{S} および \tilde{V} は，特徴量 H ， S および V を平均値 0，標準偏差 1 に変換した値である。(b) は，(a) の画素のうち Cu 粒子が正しく判別された領域を白とした画像，(c) は，(d) の画素のうち黒色 PVC 粒子が正しく判別された領域を白とした画像である。この場合の判別誤差は，Cu が 0.78%，PVC 粒子が 0.01% であった。

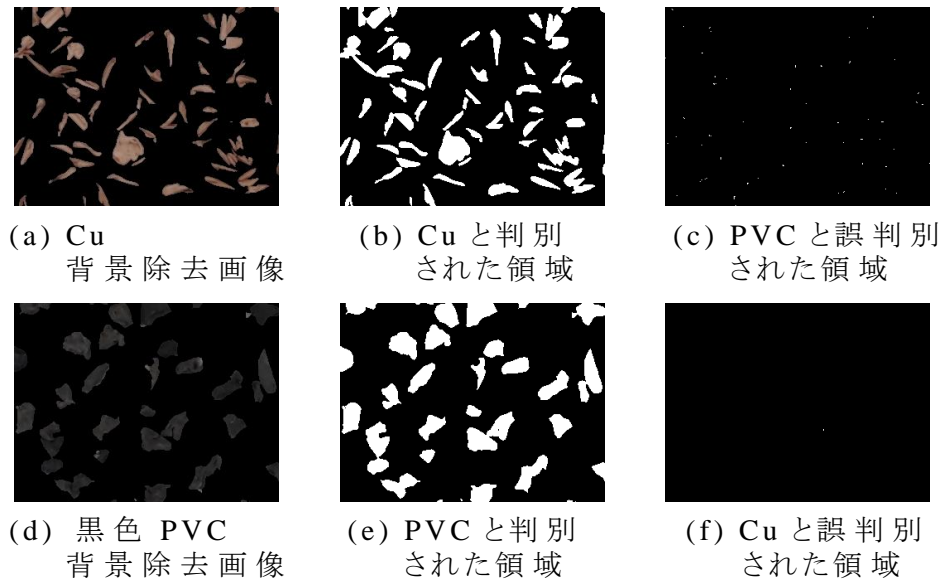


図 6-9 Cu と黒色 PVC との DS の学習結果

図 6-10 に，Cu と各単色 PVC を用いた DS の学習結果を示す。横軸は各 DS の学習に用いた PVC の色，縦軸は判別誤差 $e(\%)$ である。破線で囲まれた結果は，例として図 6-9 に示した Cu と黒色 PVC 粒子の学習結果である。

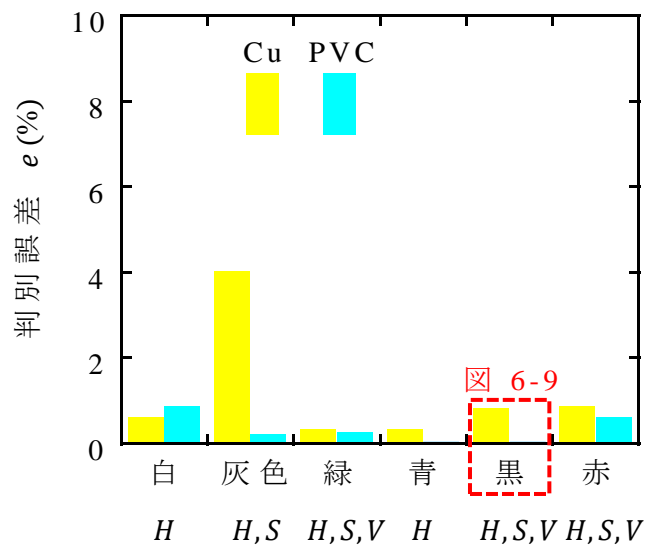


図 6-10 Cu と各 PVC の DS 学習結果

DS を構成する特徴量は， H ， S ， V の 3 つあり，7 通りの組み合わせ (H ， S ， V ， H と S ， H と V ， S と V ， HSV の全て) が考えられるが，特

微量の組み合わせにより，判別誤差が異なった。そこで，特徴量の 7 通り全ての組み合わせについて， DS の学習を行い，判別誤差が最小となる組み合わせを求めた。図 6-10 の横軸で，PVC の色の下に，その組合せを示した。図 6-10 のように，Cu と灰色 PVC の学習における Cu 粒子の判別誤差が 3.98%と最大になった。また，Cu と白色 PVC，Cu と赤色の学習における PVC 粒子の判別誤差が大きくなった。

6.3.3 Cu / PVC 混合画像から Cu / PVC 画素の判別

Cu 粒子と 6 色の PVC 粒子が混ざった画像について，Cu と PVC の画素の判別を行った。図 6-11(a)に，黒色背景で Cu 粒子と 6 色の PVC 粒子が混ざった原画像を示す。(b)に，(a)の黒色背景の原画像と別途撮影した白色背景画像の差分画像を求め，分離度が最大になる二値化により作成したマスク画像を示す。(c)に，(a)の原画像に(b)のマスク画像をかけて背景を除去した画像を示す。判別結果を評価するために，(c)の背景を除去した画像に対し，GIMP を用いて，正しい Cu と PVC の画素を手動で設定した画像を作成した。図 6-11(c)の画像に対して，判別分析を行い，Cu と PVC の画素を判別した。

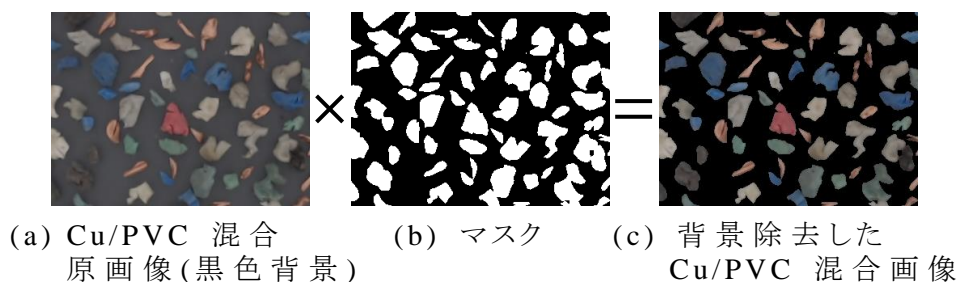


図 6-11 Cu/PVC 混合画像の背景除去

図 6-12 に，判別分析の結果を示す。まず，判別分析の第 1 ステップとして，図 6-11(c)の画像に対し，Cu と白色 PVC 粒子を判別する判別得点 DS_{Cu_White} を適用した。第 2 ステップでは，第 1 ステ

ップで PVC と判別された画素はそのままで，第 1 ステップで Cu と判別された画素についてのみ，Cu と灰色粒子を判別する DS_{Cu_Gray} を適用した。以下同様に，PVC と判別された画素はそのまま残し，PVC の判別誤差を減らすように，Cu と緑，青，黒および赤の PVC 粒子を判別する DS_{Cu_Green} ， DS_{Cu_Blue} ， DS_{Cu_Black} ， DS_{Cu_Red} を適用した。

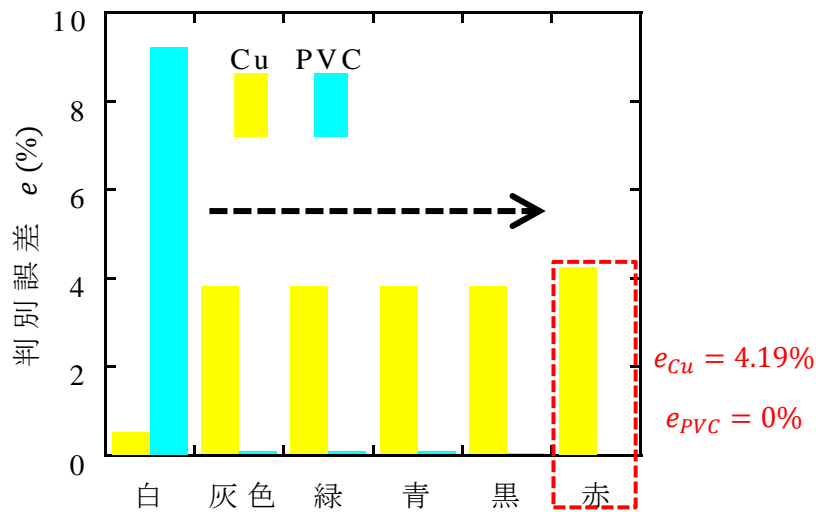


図 6-12 Cu と PVC に対する各ステップの判別結果

図 6-13 に，各判別ステップでの判別結果を示す。

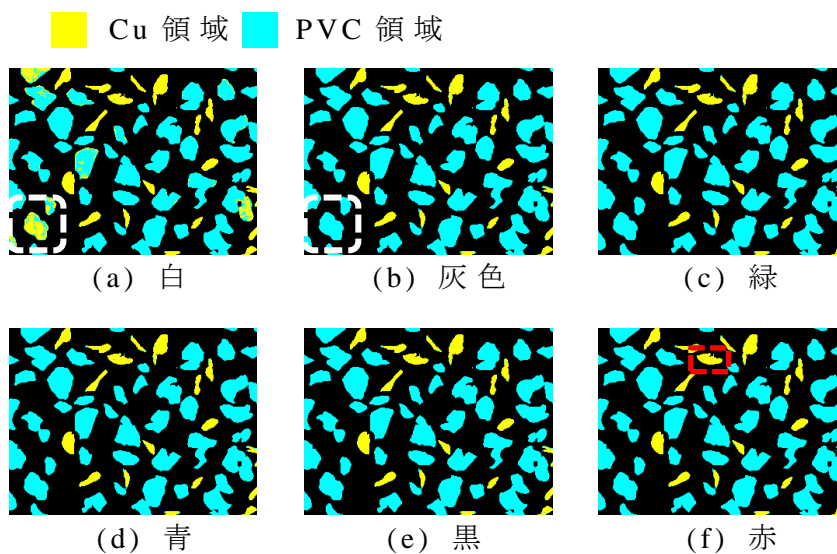


図 6-13 各ステップでの判別結果

ここで、Cu と判別された画素は黄色、PVC と判別された画素は水色で示している。判別のステップが進むにつれて、Cu と誤判別された PVC の画素が修正された。例えば、(a)の白い破線で囲まれた黄色と水色の画素は、(b)のように誤判別された PVC の画素が水色に修正された。Cu と赤色 PVC を判別する DS_{Cu_Red} を用いた最後の判別で、PVC の判別誤差は 0% となったが、Cu の判別誤差は 4.19% で、誤判別率は 0.61% となった。

本研究では、Cu と PVC が完全分離されていると仮定し、判別分析の誤判別を、粒子の輪郭情報を用いて修正した。図 6-14 に、輪郭情報を用いた判別分析の修正結果を示す。

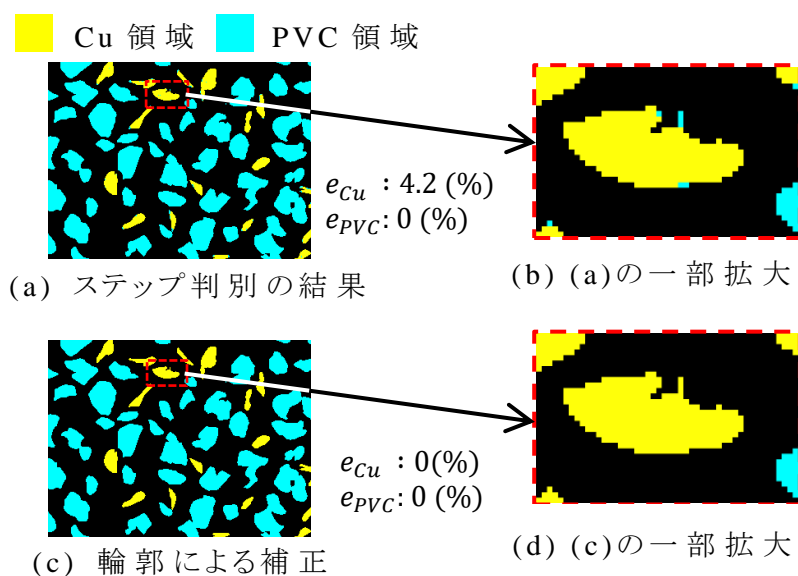


図 6-14 輪郭を用いた判別分析の修正

図 6-14(a)は、図 6-13(f) に示した Cu と赤色 PVC を判別する DS_{Cu_Red} を用いた最後の判別結果の画像である。また、(b)に、(a)の赤い破線で囲まれた Cu 粒子を含む領域の拡大図を示す。(b)に示すように、画素の大部分は Cu と正しく判別され、黄色で描かれたが、少数の画素が PVC として誤判別され、水色で描かれた。本研究では、(a)の画像に対して、輪郭抽出を行い、1つの輪郭内の画素のうち Cu と判別された画素数と PVC と判別された画素数を

比較し、画素数の少ない方に判別されていた画素を、画素数の多い方に修正した。(c)に、(a)を修正した画像を示す。また、(d)に、(c)の赤い破線で囲まれた領域の拡大図を示す。(d)に示すように、輪郭による修正により、誤って PVC と判別されていた画素は Cu に修正され、Cu の判別誤差は 4.19%から 0%に改善された。

6.4 結言

本研究では、作業員の目視の代わりに回収箱内の銅(Cu)とポリ塩化ビニル(PVC)の混合比を計算する画像処理システムの開発を試みた。

まず、背景と似た色の粒子は、背景に埋もれてしまうため、2色の背景で撮影した2枚の画像を差分し、得られた差分画像の明度のヒストグラムに対して、粒子と背景の分離度を最大にする閾値を決定し、この閾値を用いて、背景に似た色の粒子も背景から抽出した。

判別分析により、Cuと6色のPVC粒子の混合画像に対して、CuとPVCの各色を識別する判別関数を求めた。得られた6個の判別関数を、Cuと6色のPVC粒子の混合画像に対して、一つずつ用いて、Cuと6個のPVCの識別を行った。

判別分析の結果、PVC画素の判別誤差は0%、Cu画素の判別誤差は4.19%、誤判別率は0.61%となった。

さらに、CuとPVCが完全分離していると仮定し、粒子の輪郭情報を用いて、判別分析後の輪郭内のCuおよびPVCの識別画素数を比較し、画素数が少数派である画素を多数派の識別結果に変更することにより、判別誤差を修正した。最終的に、Cu画素の判別誤差を0%にすることができた。

参考文献

- [1] C. Park, N. Subasinghe, and H. Jeon: “Separation of Covering Plastics from Particulate Copper in Cable Wastes by Induction Electrostatic Separation”, *Materials Transactions*, **56** (2015), pp. 1140-1143.
- [2] A. Tayaoka, S. Nagao, T. Hirajima, and K. Sasaki: “Recovery of Cu and PVC from the Tailings of Covered Electric Wire Using the Air Classification”, *Proceedings of International Symposium on Earth Science and Technology*, December (2009), pp. 555-558.
- [3] S. Koyanaka: “Recent Trends of Sensor Based Sorting Technology in Resources Recycling”, *Journal of MMIJ*, **129** (2013), pp. 615-625.
- [4] G. Bonifazi, S. Serranti, F. Volpe, and R. Zuco: “Characterisation of Flotation Froth Colour and Structure by Machine Vision”, *Computers & Geosciences*, **27** (2001), pp. 1111-1117.
- [5] S. Ri, T. Numayama, M. Saka, K. Nanbara, and D. Kobayashi: “Noncontact Deflection Distribution Measurement for Large-Scale Structures by Advanced Image Processing Technique”, *Materials Transactions*, **53** (2012), pp. 323-329.
- [6] A. Tayaoka, E. Tayaoka, T. Hirajima, and K. Sasaki: “Development of Image Processing System for Air Classification”, *Proceedings of International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology*, November (2013), 452-455.
- [7] N. Otsu: “A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, **9** (1979), pp. 62-66.

- [8] N. Baba, K. Kobayashi, and T. Shinozaki: “Indicators for Risk Assessment of Deteriorated Reservoir Break/Washout by Applying Multivariate Analysis”, *Journal of the Agricultural Engineering Society, Japan*, **74** (2006), 329-334.
- [9] Y. Xu, J. Yang, and Z. Jin: “A Novel Method for Fisher Discriminant Analysis”, *Pattern Recognition*, **37** (2004), pp. 381-384.
- [10] A. Tayaoka, E. Tayaoka, T. Hirajima, and K. Sasaki: “Classification of the Waste Fluorescent Lamps using Signal Processing and Discriminant Analysis”, *Journal of MMIJ*, **132** (2016), pp. 53-58.
- [11] A. Tayaoka, M. Kuwata, T. Hirajima, and K. Sasaki: “Identification and Control of Air Classifier using AE Sensor”[Translated from Japanese], *Proceedings of International Symposium on Earth Science and Technology*, December (2010), pp. 189-192.
- [12] A. Tayaoka, M. Kuwata, T. Hirajima, and K. Sasaki: “Improvement of Control System of Air Classification Using AE Sensor”, *Proceedings of International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology*, November (2011), pp. 776-779.

第 7 章 結論

蛍光管は、蛍光体として、Eu, Tb, Y, La, Ce 等が使われているが、「重希土類」の Y, Tb, 「軽希土類」の Eu は、中国以外での採掘は難しく、これらの元素を含む三波長蛍光管は重要なリサイクル資源と考えられる。しかし、レアアースの単価は、2012 年のピーク後低迷し続け、一部の企業により蛍光管のリサイクルが行われているが、廃蛍光管から回収されたレアアースの品位は、三波長蛍光管を識別できる ECM を有する企業でも約 60%、その他の企業では約 5%~35%程度に留まっている。これまで、回収された廃蛍光管を粉碎し取り出した蛍光体の分離・濃縮に関する研究が行われてきたが、粉碎後の不純物となるフィルムや導電性皮膜の無い三波長蛍光管を粉碎前に自動で識別することができれば、回収後のレアアースも高品位となり、蛍光管のレアアースリサイクルの事業化の可能性も見えてくるため、廃蛍光管自動選別装置の開発は重要な課題と言える。

本研究は、3 種類のセンサ選別技術を用いて、安価な装置による三波長蛍光管の識別、現在、目視で行われているフィルム有無の識別、現在対応できていない導電性皮膜の有無の識別を自動化し、高品位のレアアース回収のための廃蛍光管自動選別装置を開発することを目的として研究を行った。

第 1 章では、本研究の背景、目的および構成について述べた。

第 2 章では、蛍光管に紫外線を照射した際に得られた画像を用いて三波長蛍光管の識別と蛍光管の直径を算出する手法を検討した。まず、蛍光粉の分光蛍光光度測定を行った結果、ガラスを通して紫外線を蛍光粉に照射すると、波長 300 nm 以下の紫外線を通しにくいというガラスの特性のため、最適励起波長 356 nm の青色蛍光粉のみが発光することを明らかにした。UV 吸収フィルムで覆われた蛍光管、フィルムがない白色蛍光と三波長蛍光管について、UV 光を照射した際の発光の様子を USB カメラで撮影し、R, G, B, H, S, V のヒストグラムを用いて、三波長

蛍光管とその他の蛍光管の分離度を計算した結果、彩度(S)を用いた場合の分離度が最も大きいことがわかった。Sの閾値を125とし、 $125 \leq S$ の場合は三波長蛍光管、 $S < 125$ の場合はその他の蛍光管と判断する簡単なルールで、全ての三波長蛍光管を誤りなく識別した。画像処理の分野で、画像中の物体と背景を分離するのに広く用いられる二値化を用いて、撮影した画像から蛍光管を抽出し、蛍光管の直径を誤差1%程度で算出した。

3章では、蛍光管をAEセンサに落下させて得られるAE信号を用いて、フィルムの有無を識別する手法を検討した。まず、AE波形を解析した時間領域、AE信号を離散フーリエ変換した周波数領域、AE信号のウェーブレット変換の展開係数をフラクタル次元解析した時間・周波数領域で、それぞれ6つの特徴量を求めた。特徴量の特定の値を閾値とし、フィルムの有無を判別した結果、誤判別率はそれぞれ、4.85%、6.67%、6.06%となった。特徴量を変数とした二次判別分析を適用し、誤判別率を3.03%、5.45%、4.24%と改善した。誤判別したデータを、ベン図を用いて整理した結果、時間領域と時間・周波数領域の両者が共通に誤判別したデータがないことがわかった。そこで、時間領域と時間・周波数領域の合計12個の特徴量を用いて、二次判別分析を適用した結果、誤判別率が0%となり、AEセンサの信号をもとに、信号処理と判別分析を適用すれば、フィルムの有無を自動で判別できることを明らかにした。

第4章では、電界中に置かれた蛍光管の発光特性の違いから導電性皮膜の有無を識別する手法を検討した。ガラス管内面に導電性被膜が塗布されていない蛍光管は、蛍光体の種類や放電電極の位置に依存せず点灯し、明度Vも最大値250辺りを示した。これに対して、導電性被膜のある蛍光管は、放電電極の位置が蛍光管の中心付近では点灯せず、放電電極の位置を蛍光管の端に移動すると、明度が徐々に大きくなり、点灯した。電界分布をシミュレーションした結果、放電電極が蛍光管の中心の真下にある場合、蛍光管内部の電界は0(V/m)で、電界が蛍光管内部に侵入しないが、放電電極が蛍光管の端の真下にある場合、電界が蛍光管の端から蛍光管内部に侵入することがわかった。特徴量を明度の平均とし

て閾値による判別を行った場合、導電性のない蛍光管 1 本が導電性ありと誤って判別され、誤判別率は 6.25%となった。また、特徴量を明度の分散として閾値による判別を行った場合、導電性のない蛍光管 2 本が導電性ありと誤って判別され、誤判別率は 12.5%となった。明度の平均と分散を変数とする判別得点を用いて、2 章で用いた判別分析を適用した結果、誤判別もなく導電性皮膜の有無を識別した。電界印加と判別分析により、導電性の有無を自動で判別できることを明らかにした。

第 5 章では、第 2 章で検討した UV ライトを照射した際の発光特性の違いから三波長蛍光管と白色蛍光管を判別する方法、第 3 章で検討した AE センサに蛍光管を衝突させた際発生した AE 信号をもとに、蛍光管を覆うフィルムの有無を判別する方法、第 4 章で検討したテスラコイルによって発生させた電界中での蛍光管の点灯特性の違いから蛍光管自身の導電性の有無を判別する方法に、蛍光管の搬送・回収を行う独自のハードウェア / ソフトウェアを追加し、廃蛍光管自動識別装置を開発した。開発した装置により、現状の高価な三波長蛍光管の識別を安価な装置 (UV ランプ, USB カメラ) と画像処理に置き換え、作業員が目視で行っているフィルム有無の識別、現状では対応できていない導電性皮膜の有無の識別を自動化した。また、蛍光体の違い(三波長 / 白色)、フィルムの有無、導電性の有無の違いによる 5 種類の蛍光管から高品位レアアースを回収できるフィルムが無く、導電性も無い三波長蛍光管を誤判別無く、選別できることを選別実験により確認した。開発した廃蛍光管自動選別装置は、最大 46 本 / 分(約 2700 本 / 時間) の処理能力で、誤りの無い廃蛍光管の選別を可能とした。

6 章では、本研究で得られた画像処理と判別分析の手法を、廃被覆電線のリサイクルプロセスに応用し、現在、作業員が目視で行っている回収箱内の銅(Cu)とポリ塩化ビニル(PVC)の混合比を自動で計算する画像処理システムの開発を検討した。まず、背景と似た色の粒子が背景に埋もれてしまうため、本研究では、背景を黒と白色の 2 色に変えて撮影し、2 枚の画像を差分した画像の明度のヒストグラムに対して、二値化を用いて、粒子と背景の分離度が最大とする閾値を決定した。この閾値を用

いた画像からの粒子抽出，すなわち，背景除去を行った。判別分析により，Cu と 6 色の PVC 粒子の混合画像に対して，Cu と 6 色の PVC の各色を識別する判別関数を求めた。得られた 6 個の判別関数を，Cu と 6 色の PVC 粒子の混合画像に対して，一つずつ適用し，Cu と 6 色の PVC の識別を行った結果，PVC 画素の判別誤差は 0%，Cu 画素の判別誤差は 4.19%，誤判別率は 0.61%となった。さらに，両粒子が完全分離しているものと仮定して，粒子の輪郭情報を利用して，判別分析後の輪郭内の Cu および PVC の識別画素数を比較し，画素数が少数派である画素を多数派の識別結果に変更することにより，識別誤差を修正した。最終的に，Cu 画素の判別誤差は，この輪郭情報による補正によって 0%になった。

本研究では，様々なタイプの廃蛍光管を所望のグループに選別可能な廃蛍光管自動選別装置を開発した。本装置を用いれば，高品位のレアアースの回収が期待できるフィルムがなく導電性もない三波長蛍光管を選別することができることを示した。また，第 2 章，第 3 章で得られた画像処理，信号処理の技術を，他のリサイクル分野の識別に応用し，本研究の有効性を示した。

謝辞

本研究をまとめるに当たり，終始ご丁寧なご指導を賜りました九州大学大学院工学研究院地球資源システム工学部門教授平島剛博士に厚く御礼申し上げます。

また，有意義なご助言とご指導を賜りました九州大学大学院工学研究院化学工学部門生産システム工学講座教授 深井潤博士に厚く御礼申し上げます。

日々の研究等において，多くのご助言を賜りました九州大学大学院工学研究院地球資源システム工学部門教授 笹木圭子博士，同部門准教授 沖部奈緒子博士，同部門准教授 三木一博士，同部門 野中壮泰助教に厚く御礼申し上げます。

本研究の遂行に当たり，株式会社ジェイ・リライツ顧問 増本耕平 様には多大なるご協力を頂きました。心より感謝致します。

また，実験等で多大なご協力を頂きました研究室修了生の長尾諭様，桑田真之様に厚く御礼申し上げます。

このような機会をお与え頂いた北九州工業高等専門学校元校長 陣内靖介博士，同校元校長 塚本寛博士，同校電子制御工学科教授 添田満博士，同学科教授 吉野慶一博士に厚く御礼申し上げます。

最後に，解析，実験等にご協力頂きました太屋岡恵里子に深く感謝致します。