

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14523

研究課題名(和文) 廃蛍光管の自動識別・有価資源完全回収装置の開発

研究課題名(英文) Development of apparatus for automatic identification and separation of waste fluorescent lamps

研究代表者

平島 剛 (Hirajima, Tsuyoshi)

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：00175556

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では以下の(1)から(3)の識別法により各種廃蛍光管を自動選別する装置を開発した(約2700本/時間の処理能力)。(1)UV光照射時の蛍光管の発光状態をカメラで撮影し、画像処理を用いて三波長蛍光管を判別する方法を開発。(2)電界中に置かれた蛍光管の光をカメラで撮影し、導電性を判別する方法を開発。(3)AE(Acoustic Emission)センサと線形判別法、画像処理とニューラルネットを用いてフィルムの有無を判別する方法を開発。これらの判別率は全て100%であった。さらに、(4)フィルムの剥離、ガラスの切断を行う装置を試作した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed an apparatus which separates three-band fluorescent lamps, fluorescent lamps with conductivity, and plastic covered fluorescent lamps from waste fluorescent lamps. The results are summarized as follows: 1) Three wavelength fluorescent tubes were identified by processing UV light illuminated images. 2) We used a Tesla coil and camera images to determine the conductivity of fluorescent lamps. 3) We developed two methods to determine whether fluorescent lamps were covered with film or not, namely a method using AE sensors and linear discrimination, and a method using image processing and a neural net. 4) Each identification accuracy was 100% and the processing capacity was 2700 lamps/hour. 5) Further, we developed a prototype of apparatus which peels off the plastic films and cuts the glass tubes.

研究分野：資源処理工学

キーワード：リサイクル レアアース 廃蛍光管 自動識別 画像処理 アコースティック・エミッション 希土類
蛍光体 選別

1. 研究開始当初の背景

世界最大のレアアース供給国である中国が実質的な禁輸措置を実施するまで、レアアースの価格は比較的安定していたが、供給障害などにより価格は暴騰し、その後急速に下落してきており、リサイクルなども含めたレアアースの安定確保が望まれている。蛍光管には、ハロリン酸カルシウムを蛍光体として用いる白色蛍光管と5つのレアアース(Y, La, Ce, Tb, Eu)を蛍光体として用いる三波長蛍光管があるが、各国の設備事情や高演色性・省エネルギー推進等の観点から、今後はレアアース使用の三波長蛍光管の需要が世界的にも増えることが予想される。しかし、現状では使用済み蛍光管の完全分離は困難なため、リサイクル企業により、一部の廃蛍光管から水銀、ガラスが回収されているだけであり、蛍光体の再資源化及び有効利用はほとんど行われていない。このような状況の中、西須ら(産業技術総合研究所)は、蛍光管の外部から紫外線(UV)光を照射した際の色度測定を応用した三波長蛍光管と白色蛍光管の識別法について報告しているが、各種廃蛍光管の完全識別には至っていない。申請者は、これまでAE(Acoustic Emission)法に関する多数の論文及び特許を公表してきており、これらの成果をもとにAE法を用いたプラスチック製フィルムの有無の識別、UV光照射による三波長/白色蛍光管の識別、さらに、電界による導電性の有無の識別を組み合わせることで、精製の前処理段階で、廃蛍光管を種類別に完全に識別すれば、処理効率を画期的に向上できるのではという着想に至った。

2. 研究の目的

近年、世界のレアアース供給国である中国は、国内産業の高度化を目指すため、レアアースの生産及び輸出管理を強化しており、世界各国でレアアース供給の不安定化が懸念されている。蛍光管には、蛍光体としてレアアースを使用した種類があるので、廃蛍光管から高純度にレアアースを回収できれば、我が国のレアアース資源の安定確保に貢献できる。本研究では、全種類の廃蛍光管からUV光照射によりレアアースを使用した蛍光管、AEセンサ及び電界によりプラスチック製フィルム及び導電性被膜を有する蛍光管を自動で識別し、高精度に制御した赤外線を用いたガラス管切断法により、蛍光粉回収の際、異物となるガラス微粒子の発生を抑え、蛍光粉及びガラス等の有価資源を自動で高純度に完全分離回収する装置を開発することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、各種廃蛍光管からの三波長蛍光管の自動識別装置の開発を行った。識別には、三波長蛍光体を検知する特定の励起波長光を用いた。また、被覆管、導電ストライプ塗布管など多種類の蛍光管を識別するため

に、AE法、導電法、画像解析法などを適用し、1台で多種類の蛍光管を高速に自動で識別し、希土類蛍光体を回収できる装置の開発を目指した。

3.1 実験で用いた廃蛍光管

表1に、使用した廃蛍光管を示す。表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。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1200mmと共通であるが、直径は2種類(Sサイズ:約32mm, SSサイズ:約28mm)であった。

表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			32.2	13
G ₃	白色	なし		32.4	13
G ₄	白色	なし	なし	28.9	13
G ₅	三波長			27.4	3

4. 研究成果

4.1 導電性の有無の判別

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する際の不純物となる。ガラス管外面に張られた導電性リボンは目視で識別できるので、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は識別できないため、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。

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。電界発生には、テスラコイル(株式会社光洋製コード2839)を用いた。図1に電界中での蛍光管の発光実験の概要、図2に実験装置の写真を示す。

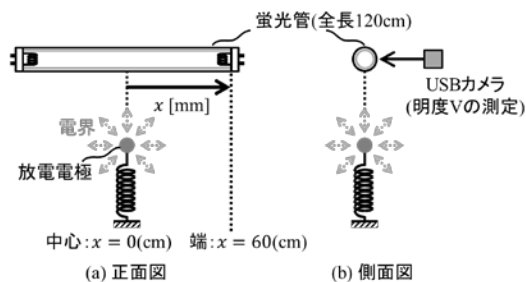


図1 電界による発光実験の概要



図2 電界による発光実験装置の写真

図1の(a)は、実験装置を正面から見た図、図1の(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床に対して水平に置き、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。

図3に、放電電極の位置(x)と撮影した画像の明るさを示す明度(V)の関係を示す。

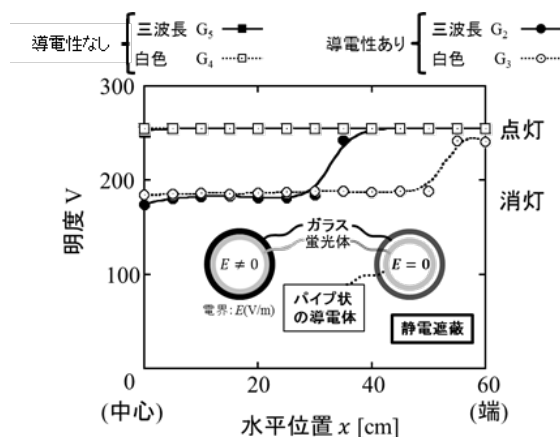


図3 放電電極の位置(x)と明度(V)の関係

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: $0 \sim 255$) 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 $x=30$ cm、白色蛍光管が $x=50$ 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 $x=40$ 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。

この導電性皮膜の有無による発光の違いは、以下のように予想される。ガラス管と蛍光体の間に導電性被膜がない蛍光管の場合、電界がガラスを通過し、蛍光体に届き、蛍光体が発光するが、ガラスと蛍光体の間に導電

性被膜が塗布された蛍光管の場合、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際、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、蛍光体が発光した。

そこで、蛍光管の端での電界の侵入を確かめるため、次のような実験を行った。導電性被膜が塗布された蛍光管の端の電極部分(端から 10cm 程度)を絶縁テープで覆い、絶縁テープとガラス管を、導電性を有するアルミホイルで覆った。このアルミホイルにより、蛍光体が完全に導体で覆われるため、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。

また、静電界計算ソフト(株式会社アドバンス・サイエンス・ラボラトリー製 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結果、放電電極が蛍光管の中央付近に置かれた際は、電界が導体内部に侵入しないが、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電界が導体内部に侵入することが確かめられた。

図3の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 V の閾値を 220 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。

4.2 フィルムの有無の判別

本研究では、これまで、蛍光管を AE センサに落下させ、その際生じる衝突音により、フィルムの有無の判別を行ってきた。

通常、フィルムはガラスに比べ柔らかいため、フィルムに覆われた蛍光管を AE センサに落下させた際に生じる衝突音は、フィルムに覆われていない蛍光管の場合に比べ、低い周波数成分を持つ。しかし、フィルムが古くなると硬くなるため、低い周波数成分が減り、フィルム有無の判別に誤りを生じる可能性もある。

そこで、本研究ではこれまで用いた二次関数により判別を行う非線形判別法よりも複雑な関数が表現でき、判別能力の向上が期待されるニューラルネットワーク(以下、NN と略記する)をフィルム有無の判別に適用した。

通常、カメラで撮影した画像は、R(赤)、G(緑)、B(青)の割合で色を表現する RGB 表色系が用いられる。本研究では、RGB 表色系に比べ、より人の感覚に近い、HSV 表色系に変換し、判別のための特徴量として採用した。なお、HSV 表色系は、その色がどんな色かを示す H(色相)、他の色に比べてその色がどの位鮮やかなのかを示す S(彩度)、明るさを示す V(明度)からなる。

本研究では HSV 表色系の H, S, V の 3 つを特徴量として採用し、図4に示す NN による判別プログラムを新たに作成した。

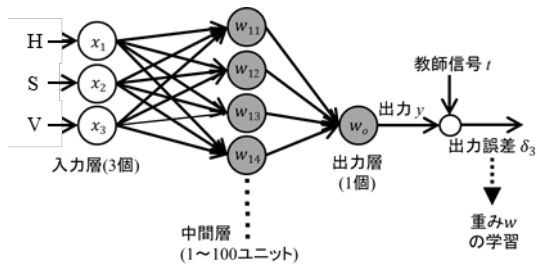


図4 ニューラルネットワーク

NNは、入力層、中間層、出力層の三層から構成される。入力層に与えられた判別のための特徴量(x)は、中間層を介して相互に結合され、出力層から判別結果として出力される。この出力(y)と正しい判別である教師信号(t)から求めた出力誤差(δ)により設定パラメータである中間・出力層の重み(w)が修正される。

設定パラメータとして、NNの中間層のユニット数や中間層の数等があるが、本研究では、中間層のユニット数を変更し、判別誤差への影響を調べた。図5にその結果を示す。

図5より、学習回数 n を増やすと判別誤差 e が減少し、中間層の数が大きいほど、誤差が小さいことがわかる。

本研究では、作成したNNの判別プログラムを目視では判別できないフィルムに覆われた蛍光管に適用したが、フィルムなしと誤判別し、従来の方法の改善には至らなかった。今後は、入力層に与える特徴量を計算機が自動で学習するディープラーニングの適用が望まれる。

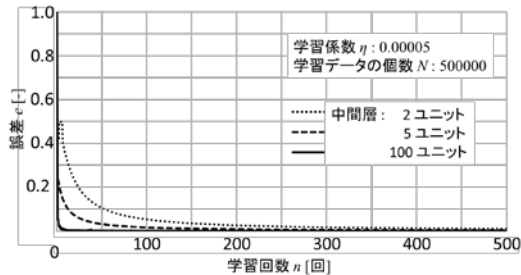


図5 中間層ユニット数による誤差の変化

4.3 廃蛍光管自動分別装置

図6に、本研究で開発した廃蛍光管自動選別装置の概要(図面)を示す。

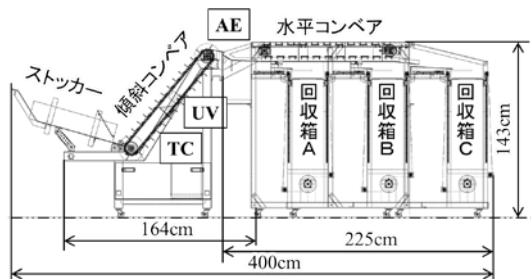


図6 廃蛍光管自動選別装置の概要

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設置した傾斜コンベア、後半部が水平コンベアと三つの回収箱(テーブル)からなる。

図7に、本装置前面部の写真を示す。傾斜コンベアの内側には、テスラコイル、UVランプ、USBカメラ等が格納されている。

図7(a)が斜め正面から撮影した写真で、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と転がり、傾斜コンベアのフィンに掻き上げられ上昇する。

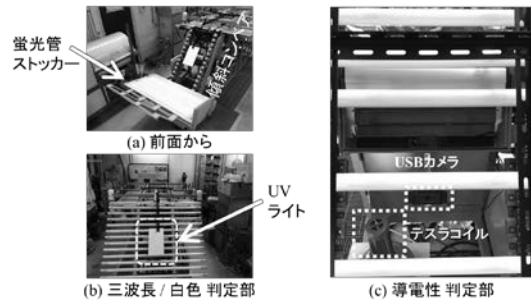


図7 導電性、三波長 / 白色蛍光管判別部

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判別される。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8に、フィルム判別用のAEセンサヘッド、蛍光管搬送用の水平コンベア、回収テーブル等の写真を示す。

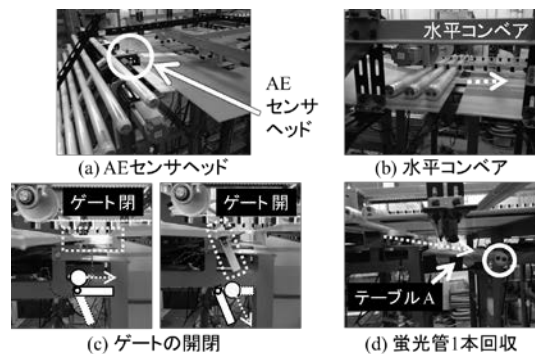


図8 フィルム判別部、蛍光管搬送部

傾斜コンベアによりコンベア頂上(a)に運ばれた蛍光管はスロープを転がり、スロープ先端から15mm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した。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、どの回収用テ

ーブル(A, B, C)に格納されるかが決定される。(b)の水平コンベアにより、蛍光管が回収用のテーブルの上まで搬送されると、テーブル上に設置されたゲートが開き(c)、蛍光管はゲート上を滑り、テーブルの傾斜を転がり前に詰めながら格納される(d)。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により、直径が最大の蛍光管1本分の高さだけテーブルを下げる。蛍光管上に乗った蛍光管は転がらないため、回収テーブルに取り付けられた水平スライダにより、蛍光管を1本分押し出し格納する。図9に、選別終了後、3つのテーブルを一番下まで下げた写真を示す。

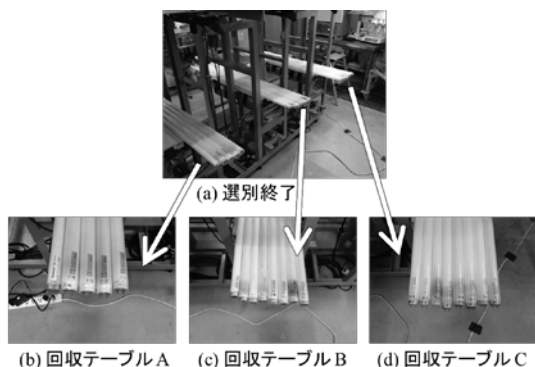


図9 選別終了後蛍光管回収部

本研究では、3つのセンサ技術、UV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、電界とカメラ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。

4.4 フィルム剥離装置の試作

本研究では、さらに、レアアース回収のために必要な要素技術であるフィルム剥離装置の雛形を試作した。図10にフィルム剥離装置の概要、図11に試作した実験装置の写真を示す。

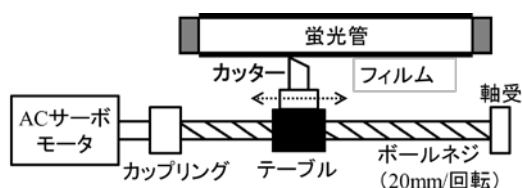


図10 試作したフィルム剥離装置の概要

本研究では、PC内のモーションコントロールボード(インタフェース製 PCI-7414V)を用いて、ACアンプ(安川電機製 JUMA)に指令パルス P [plus] を送り、ACアンプがACサーボモータ(安川電機製)の回転数、トルク等の制御を行った。ACサーボモータの軸とボールねじはカップリングを介して連結され、ボールねじ1回転で、カッターが20mm移動する。なお、フィルムを切断している間、PC内のモーションコントロールボードから出力される電圧に従って角度が180度変化するRCサーボで挟む形で蛍光管を固定した。

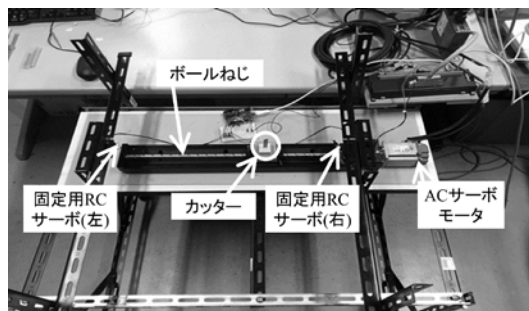


図11 試作したフィルム剥離装置の写真

図12に、PCからの指令パルス P [plus]とACサーボモータの回転数 R [rps]及びテーブルの移動距離 x [mm]の関係を示す。

図のように、PCからの指令パルスにより、テーブルの移動を制御できることがわかる。

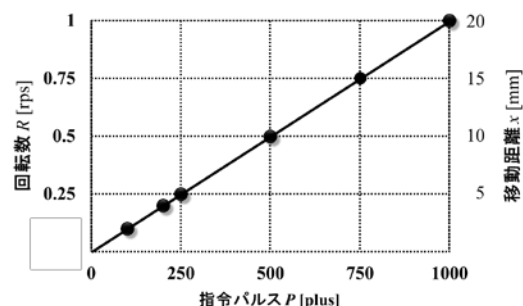


図12 指令パルスとACサーボモータの回転数及びテーブルの移動距離

4.5 ガラス管切断装置の試作

本研究では、レアアース回収のために必要なもう一つの要素技術であるガラス管切断装置の雛形を試作した。

図13にガラス管切断装置の概要、図14に試作した実験装置の写真を示す。

本研究では、PC内のAD/DAボード(インタフェース製 PCI-3523A)を用いて、直流安定化電源(菊水電子工業製 PAN16-10A)に指令電圧 V [V]を印加し、直流安定化電源の出力電流を設定し、この電流により集光型ヒータ(HEAT-TECH製 HPH-30/f15)の出力を制御した。また、その際、ガラス表面温度を放射温度計(ジャパンセンサー製 TMHX-CGE1200)を用いて測定し、PC内のAD/DAボードを用

いて、温度の変化 T [°C] を電圧に換算し PC に取り込んだ。

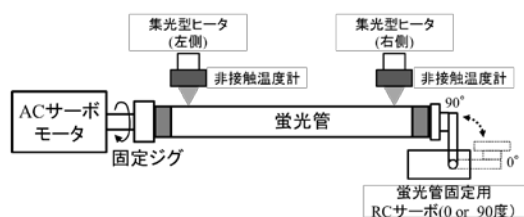


図 13 試作したガラス切断装置の概要

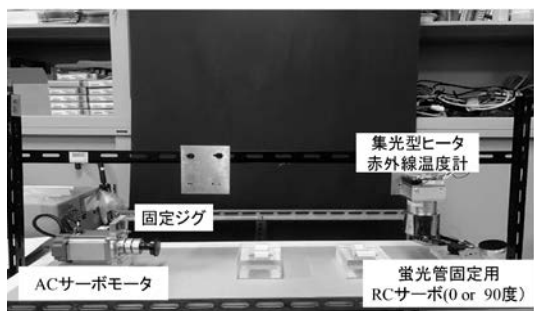


図 14 試作したガラス切断装置の写真

図 15 に、PC からの指令電圧 V [V] を、0V から 1~5V と階段状に変えた際のガラス表面温度 T [°C] を放射温度計で計測した結果を示す。同図より、温度の上昇と下降で異なる特性があることがわかった。

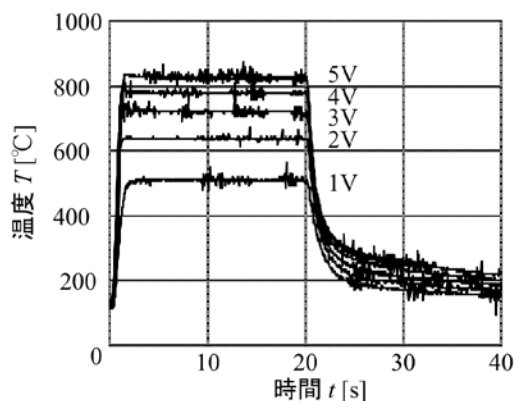


図 15 指令電圧と温度の関係

図 16 に、指令電圧 V [V] と温度の収束値 T_s [°C] の関係を示す。同図より、指令電圧 V [V] と温度の収束値 T_s [°C] の関係は線形でないことがわかった。本研究では、図 16 より、以下の式(1)の関係を求め、式(1)を変形し、所望の温度を得るための指令電圧の値を決める式(2)を得た。

$$T_s = 720.0 \times (1.0 - e^{-0.6V}) + 140.0 \quad \dots(1)$$

$$V = -\frac{1}{0.6} \ln\left(1.0 - \frac{T_s - 140.0}{720.0}\right) \quad \dots(2)$$

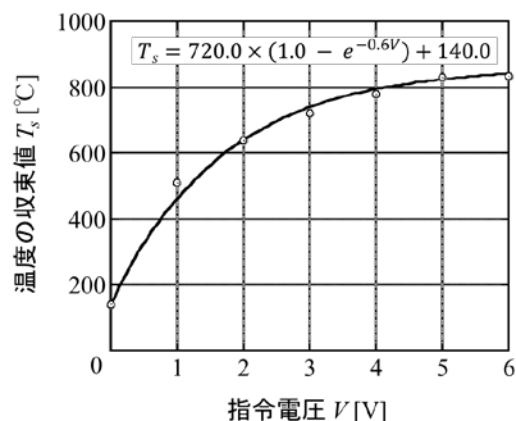


図 16 指令電圧と温度の定常値の関係

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

(1) Atsunori TAYAOKA, Eriko TAYAOKA, Tsuyoshi HIRAJIMA, Keiko SASAKI, Image Processing System for Air Classification using Linear Discriminant Analysis, Journal of Computational Water, Energy, and Environmental Engineering, 査読有, Vol.6, 2017, 192-204, DOI:10.4236/cweee.2017.62014

6. 研究組織

(1)研究代表者

平島剛 (HIRAJIMA, Tsuyoshi)

九州大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：00175556

(2)研究協力者

太屋岡篤憲 (TAYAOKA, Atsunori)

太屋岡恵里子 (TAYAOKA, Eriko)