非磁性金属の選別システムの開発*

(第2報, 選別装置の開発)

宮本 哲郎^{*1}, 武田 文夫^{*1}, 林 政克^{*1}
高木 武夫^{*1}, 宇野 元雄^{*2}Sorting System for Nonmagnetic Metal
(2nd Report, Development of Discriminating and Sorting Mechanism)Tetsurou MIYAMOTO^{*3}, Fumio TAKEDA, Masakatsu HAYASHI,
Takeo TAKAGI and Motoo UNO^{*3} Hitachi, Ltd. Mechanical Engineering Research Laboratory,
502 Kandatsu, Tsuchiura-shi, Ibaraki, 300-0013 Japan

We have developed a system for selecting and collecting non-magnetic metal in material, which can then be independently recycled. It discriminates stainless steel by difference in the electrical resistance that was measured by two coil units setting up to separately frequency, and distinguishes aluminum from copper by the difference in density the metal piece from the mass and volume measured by two coil units that were arranged at right angles. As a result, it achieves accurate material discrimination even if there is fouling or discoloration of the surface of the metal pieces. Experiments in which the system sorted out copper, aluminum, and stainless steel in shredder-dust showed good results.

Key Words: Electromagnetic Measurement, Identification, Nonferrous Metal, Material Recycle, Shredder Dust

1. 緒 言

廃工業製品を破碎した破碎片の中に含まれる金属は、プラスチック等と比較して再利用しやすくリサイクル材として非常に有望であるため、その選別・回収は重要な課題である。現在、鉄は、磁力を用いた選別が容易である為、回収率が比較的高い。一方、銅やアルミニウム、オーステナイト系ステンレス等の非磁性金属の回収方法としては、比重選別や渦電流選別等があるが、回収精度等が不十分である為、最終的には人手による選別回収が行われていることが多い。このため、多種の非磁性金属類に対応した高精度な選別回収システムの開発が課題となっている。

こういった廃材の高度な識別・選別回収システムとしては、廃ガラス瓶の色選別装置¹⁾等がすでに実用化されている。また、金属片の色彩による選別装置²⁾の開発も行われている。しかし、汚れや変色を伴う場合の多い廃棄物の破碎片中から、非磁性金属を色識別のみで高精度に選別回収することは困難である。

そこで、表面の汚れに左右されない識別方法として、金属片の電気的特性と質量を用いた非磁性金属の識別方法の検討を行い、銅・アルミニウム選別の可能性を示した³⁾。本研究では、この方法にさらに改良を加え、銅、アルミニウム、ステンレスの識別を行う方法を提案する。

本選別システムでは、まず、電磁誘導を利用して破碎片の電気的特性の測定を行い、その結果からオーステナイト系ステンレスの識別を行う。さらに、破碎片の質量を測定し、上記の電気的特性の測定結果とあわせて銅・アルミニウムの識別を行う。その後、これら識別結果に基づいて、破碎片を材質毎に選別する。また、本選別システムに、実際の廃棄物破碎片を投入した場合の試験結果についても報告する。

2. システム構成と識別原理

2.1 システム構成 図1に、非磁性金属選別システムの構成を示す。

本システムは、選別対象である廃工業製品の破碎片を逐次供給する為の供給部、破碎片の電気的特性及び質量を計測し材質識別を行う識別部、識別結果に基づき選別回収を行う回収部によって構成される。

* 原稿受付 2001年3月27日。

^{*1} 正員、(株)日立製作所機械研究所 (〒300-0013 土浦市神立町502)。^{*2} 正員、(株)日立製作所環境システム推進本部 (〒101-8010 東京都千代田区神田駿河台4-6)。

E-mail: tetsu@merl.hitachi.co.jp

Fig. 1 Metal sorting system

図1の右側に位置する供給部の振動コンベアに投入された破砕片は、振動によってほぐされる。そして個々に整列され、識別部のベルトコンベアに一個ずつ逐次投入される。

図1中央部の識別部は、破砕片を搬送するベルトコンベアと、ベルトコンベアを挟むように設置された3つの金属検知コイルユニット、ベルトコンベアの先に設置された傾斜路、傾斜路に作用する荷重を測定する質量測定ユニット、各ユニットからのデータに基づいて材質識別演算を行うコントローラ、で構成される。

3つの金属検知コイルユニットにおいて、コイルユニット1とコイルユニット2はベルトコンベアのベルト面を上下に挟み、残るコイルユニット3は、ベルトコンベアを側面から挟むように配置されている。

図2に金属検知コイルユニットの基本構成を示す。金属検知コイルユニットは、発振回路に接続されたコイル1と、同期整流器（同期検波器）に接続されたコイル2によって構成される。コイル1は周囲に交流磁界を発生させており、その磁束の一部はコイル2を貫いて、コイル2に誘導起電力を生じさせる。この起電力はコイル1に印加された周波数と同じ周波数の交流起電力である。

2つのコイルの間に金属片を投入すると、電磁誘導によってこの金属片の表面には渦電流が発生し、この渦電流によって周囲とは逆向きの磁界が発生する。このため、コイル2を貫く磁束密度が変化して、発生し

た渦電流に応じてコイル2の交流起電力も変化する。この起電力変化は金属片の物性や形状などの情報を含んでおり、金属部材の非破壊検査³⁾や金属検出器等の用途で利用されている。

本システムでは、コイル2の交流起電力 $E \cos \omega t$ における位相 0° の振幅の変化を、同期整流器によって直流電圧 E として取り出す。なお、金属検知コイルユニット1, 2, 3の発振周波数はそれぞれ 32kHz, 8kHz, 32kHz に設定されている。

各々の金属検知コイルユニットの前には、破砕片の通過を検出する光電センサ (PS1, PS2, PS3) が設置されており、光電センサが破砕片を検出すると、各コ

Fig. 2 Metal detection coil

イルユニットが破砕片通過時の起電力変化を測定する。同様に、傾斜路に設置された光電センサ PS4 が破砕片を検出すると、荷重センサが傾斜路に加わる荷重から破砕片の質量を測定する。コントローラは、これらのデータを一時的に記憶して、22 節及び 23 節で示す方法で材質の識別を行い、結果に応じて回収部に指示を送る。

図 1 左側の回収部は、破砕片の通過経路を 4 つに切り替える選別機構と、材質毎の回収容器によって構成される。光電センサ PS5 により該当する破砕片の通過を検出すると、識別部からの指示により経路が切り替えられ、識別結果に応じた回収ボックスに破砕片を回収する。

22 オーステナイト系ステンレスの識別 ステンレスの識別は、金属検知コイルユニット 1、及びコイルユニット 2 の出力を用いて行う。

金属検知コイルユニットの出力変化 ΔE は、この場合電磁誘導によって金属片に発生する渦電流とほぼ比例する。ここで、金属片表面から深さ x [m] での渦電流密度 J [A/m²] は、金属片を無限平板導体、周囲の磁界を一樣磁界と単純に仮定すれば、位相項を省略して、

$$J = J_0 \cdot \exp(-\sqrt{\omega\mu/2\rho} \cdot x) \dots\dots\dots (2.1)$$

と表される。⁴⁾ ここで、

J_0 : 導体表面での渦電流密度 [A/m²]

ω : 磁界の角振動数 [rad/s]

μ : 金属の透磁率 [H/m]

ρ : 金属の体積抵抗率 [$\Omega \cdot m$]

である。 J_0 は、導体表面の磁界 H_0 を用いて、

$$J_0 = j\sqrt{\omega\mu/\rho} \cdot H_0 \dots\dots\dots (2.2)$$

式(2.1)、式(2.2)より、金属片の厚さを t とすれば、面積 S の金属片中に発生する渦電流の総量 ΣJ は、

$$\begin{aligned} \Sigma J &= \int_0^t |J(x)| dx \\ &= \sqrt{2} S \cdot H_0 \left\{ 1 - \exp(-\sqrt{\pi f \mu / \rho} \cdot t) \right\} \\ &\dots\dots\dots (2.3) \end{aligned}$$

(ただし、 $f = \omega / 2\pi$ [Hz])

式(2.3)より、金属片の厚さ t が増加すると渦電流の総和 ΣJ が $\sqrt{2} H_0$ に漸近し、同じ磁界の条件下では、周波数 f が大きく、体積抵抗率 ρ が小さいほど、その漸近速度が速くなる。すなわち、渦電流の総和 ΣJ は、金属片の厚さ t がある厚さ以上になるとほとんど変化しなくなるが、この、変化がなくなる厚さは、周波数 f が大きく、金属片の体積抵抗率 ρ が小さくなるほど小さくなる。このことは式(2.1)から明らかなように渦電流が金属片表面に集中していることによる。なお、比透磁率は、表 1 に示すように、非磁性金属に関してはほとんど 1 であるため、材質の違いによる影響は少ない。

ここで、2 つの金属検知コイルユニットの交流磁界の周波数を f_1 、 f_2 とした場合の渦電流密度をそれぞれ J_1 、 J_2 とする。それぞれの渦電流の総量 ΣJ_1 、 ΣJ_2 の比は、式(2.3)であらわされる金属片の面積 S が消去できて、次のように表される。

$$\Sigma \frac{J_2}{J_1} = \frac{1 - \exp(-\sqrt{\pi f_2 \mu / \rho} \cdot t)}{1 - \exp(-\sqrt{\pi f_1 \mu / \rho} \cdot t)} \dots\dots\dots (2.4)$$

式(2.4)において $f_1 > f_2$ とした場合、金属片の面積に関係無く、それぞれの渦電流の総量 ΣJ_1 、 ΣJ_2 の比は、金属片の厚み t が増大するにしたがって 1 に漸近し、体積抵抗率 ρ が小さいほどその漸近速度が速いことを示している。

式(2.4)に表 1 の数値を代入した結果を、縦軸に $\Sigma J_2 / J_1$ を取り、横軸に金属片の厚み t を取って図 3 中に、実線及び破線で示す。この結果によると、オーステナイト系ステンレス (SUS304 等) の体積抵抗率は他の非磁性金属と比較してきわめて大きく、式(2.4)の漸近速度が他の非磁性金属と比べて著しく遅い。

ここで、金属検知コイルユニットの出力変化 ΔE は、金属片に発生する渦電流 ΣJ と良く一致することから、 ΔE も上記の性質を示す。金属検知コイルユニ

Table 1 Electric resistance

Material	Electric resistance [$\times 10^{-8} \Omega \cdot m$]		Relative permeability (Literature ⁴⁹⁾)
	Real data	Literature ⁴⁹⁾	
Copper	1.694	1.72	1
Aluminum	4.960	4.1~5.3	1
SUS304	85.80	70.0	1.02
SUS303	85.80	-	-

Fig. 3 Effect of Thickness of metal piece

ット1, 2の電圧出力を E_1 , E_2 として, さまざまな金属片を通過させた場合の出力変化の比 $\Delta E_2 / \Delta E_1$ と金属片の厚み t の関係を, 縦軸に $\Delta E_2 / \Delta E_1$ を取り, 横軸に金属片の厚み t を取って図3にプロットで示す。

図3から, $\Delta E_2 / \Delta E_1$ は, 厚さ t が増加すると1に漸近していることがわかる。また, ステンレス片(SUS304)は, 銅, アルミニウムと比較して漸近速度が著しく遅く, 全体に式(2.4)と同様の傾向を示していることが確認出来る。

ここで, ステンレス片の厚さは廃棄物の素性や破碎工程などによるが0.5~5mmの範囲内であることが多い。そこで, 判別対象となる破片の厚さ t を図3中の破線で示す範囲に限定して, 図中の実線で示すしきい値を設定して, このしきい値と $\Delta E_2 / \Delta E_1$ を比較することで, ステンレスとそれ以外の非磁性金属を識別することが出来る。

23 銅, アルミニウムの識別 銅, アルミの選別は, 金属検知コイルユニット1, コイルユニット3及び質量測定の結果を利用を行う。

ステンレス以外の金属片の場合, 渦電流は表面付近に集中して現れるため, 金属検知コイルユニットの出力は, 金属片の, 磁界に対し垂直な投影面の面積にほぼ比例する。(厳密には金属片の形状などの影響を受ける)

金属片が金属検知コイルユニット中を通過する際, 放射状に広がった磁界中を通過する為, 金属片の測定面(上記の磁界に対する垂直投影面)は, 図4のように変化する。この時の金属検知コイルユニットの出力変化 ΔE を縦軸に, 横軸に通過時刻をとったグラフを図5に示す。

Fig. 4 Magnetic field around coil unit

Fig. 5 Coil output variation

図5中の(a), (b), (c)の部分の面積は, それぞれ図4に示す3つの測定領域に対応している。そこで, 金属検知コイルユニット1の出力変化 ΔE_1 について, 正出力値の積分値(図4における(b)の面積)を $\Sigma \Delta E_{1+}$, 負出力値合計(図4における(a), (c)の面積の合計)を $\Sigma \Delta E_{1-}$ とすれば, これらはそれぞれ, 図6に示す金属片の投影面積 S_1 及び S_3 に比例する。同様に, 金属片の側面を測定するように設置された金属検知コイルユニット3の $\Sigma \Delta E_{3+}$, $\Sigma \Delta E_{3-}$ は, 金属面の投影面

Fig. 6 Projection of metal piece

積 S_2 , S_3 に比例する。ここで、破砕片の体積 V は近似に次式で表す事が出来る。

$$\begin{aligned} V &\doteq \sqrt{S_1 S_2 S_3} \\ &\propto \sqrt{\Sigma \Delta E_{1+} \cdot \Sigma \Delta E_{3+} (\Sigma \Delta E_{1-} + \Sigma \Delta E_{3-})} \\ &= V_{\Delta E} \\ &\dots\dots\dots (2.5) \end{aligned}$$

図7に、サンプル金属片を測定した結果より式(2.5)によって得られる破砕片の体積を縦軸に、実際の体積を横軸にとったグラフを示す。破砕片によって誤差があるがほぼ比例している事が確認できた。

ここで、破砕片の質量を m として、判別値 α を次のように定義する。

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{\sqrt{\Sigma \Delta E_{1+} \cdot \Sigma \Delta E_{3+} (\Sigma \Delta E_{1-} + \Sigma \Delta E_{3-})}}{m} \\ &\propto \frac{\sqrt{S_1 S_2 S_3}}{m} \doteq \frac{1}{\sigma} \dots\dots\dots (2.6) \end{aligned}$$

σ は金属片の密度 [kg / m^3] であり、材質固有の値である。銅の密度は 8.9×10^3 [kg / m^3]、アルミニウムの密度は 2.7×10^3 [kg / m^3] であり、大きく異なることから、銅とアルミニウムの判別値 α はそれぞれ異なる分布をとる。

図8に実際の銅、アルミニウムの破砕片の判別値 α の測定結果を、縦軸に判別値 α 、横軸に破砕片の質量 m をとって示す。2.2 節と同様、図中に実線で示す適切なしきい値を設定し、このしきい値と判別値 α を比較することで、対象破砕片の、銅、アルミニウムを識別できる。

3. 選別試験結果

本システムの選別能力を検証するために、実際の廃棄物破砕片を投入して選別試験を行った。

実験に使用した破砕片は、実際のシュレッダーダストを、振動スクリーンによってふるい目 $\phi 30 \sim 60 \text{mm}$ にふるい分けしたものを使用した。

本選別装置に実際の破砕片を投入し、回収部に回収された結果を、縦軸に回収質量、横軸に回収ボックスをとって図9に示す。全体的にアルミニウムの割合が大きかったため、銅、ステンレスの回収純度はやや

低い。銅、ステンレスともにほぼ回収純度 90% であり、アルミニウムは回収純度 97% 以上を達成した。

なお、試験中供給部からの平均投入間隔は 2 個/秒であった。破砕片の平均質量は 40~50 g であったので、処理量は 300 [kg / h] 程度である。

4. 結 言

Fig. 7 Piece's volume and $V_{\Delta E}$

Fig. 8 Distinction value α

Fig. 9 Result of sorting

電磁気応用計測によって材質識別を行う、非磁性金属選別システムを提案した。本システムの特徴は以下の通りである。

(1) 2つのコイルユニットを用い、その励磁周波数を異なる周波数に設定することで、オーステナイト系ステンレスを識別する。

(2) 2つのコイルユニットを用い、その設置方向を直交配置とすることで、破砕片の体積を推定し、この体積と荷重検出器での質量測定結果から、破砕片の密度を推定することで、銅とアルミニウムを識別する。

また、上記2つの材質識別方法を用いた選別システムを試作し、実際のシュレッダーダスト用いた選別実験を行った結果、銅、ステンレスともに、ほぼ9

0%、アルミニウムについては97%以上の純度で回収することを確認した。

文 献

- (1) 大竹祥介, 廃ガラス瓶自動選別装置について, 粉体工学会誌, (1995), 32, 392-395
- (2) 岩浅康幸, 金属類選別方法及び装置, 公開特許公報, (1999)
- (3) 武田ほか3名, 機講論, No.98-6, (1998), 259-261.
- (4) (社)日本非破壊検査協会編, 新非破壊検査便覧, (1988), p379
- (5) 国立天文台編, 理科年表, (1988), p527