永久磁石回転法を用いた非磁性金属類 の渦電流選別*

藤田 豊久¹ 外島 康博² 葛野 栄一³

Eddy-Current Separation with Rotating Permanent Magnets for the Recovery of Nonmagnetic Metals

by Toyohisa FUJITA¹, Yasuhiro SOTOJIMA¹ and Eiichi KUZUNO¹

1. Mining College, Akita University, Akita 010

Alternating Magnetic field generates in the separation area by rotating alternatively arranged magnetic poles of permanent magnet fixed on hexagonal iron pillar. Magnetic flux is concentrated by an iron pole piece of Fe-Nd-B type permanent magnet. Feed sample passes through the separation area vertically to the direction of magnet rotation. Eddy-current-induced force on metal plate increases as the value of conductivity divided by density becomes large. As metal plate size decreases, the larger number of magnet rotation is needed.

If the ratio of conductivity per density is enough large, nonmagnetic metals can be separated with each other. Also by controlling the rotation speed of magnet, metal plates with different size can be classified.

KEY WORDS : Fe-Nd-B Permanent Magnet, Eddy Current, Separation, Nonmagnetic Metals, Classification

1. 緒 言

渦電流選別の原理は1889年にエジソンがUSAで特許を取得したように古くから知られていた。その後、リニアモータ方式、電磁石によるパルス磁界方式などいくつかの選別機が製造されてきたが、近年、高性能の永久磁石が開発されるに至り、永久磁石を使用した各種渦電流選別機が製造され、アルミニウム缶の選別を主体として実用化された¹⁾²⁾。渦電流選別機は今後ますます廃棄物中からの非鉄金属回収のリサイクリングに使用が期待されている。永久磁石を利用した渦電流選別機には、大きく分けて、磁極を交互に配列して傾斜させ、その中を試料を移動させて選別する方式^{3)~5)}と、ドラム内で永久磁石を回転させる方式¹⁾²⁾がある。永久磁石回転方式による渦電流選別の詳細な報告は少ない。

本研究では後者の永久磁石回転方式による新しい選別方式の選別機を試作し、基礎実験を行った。本研究では継鉄上に希土類永久磁石を配置しその上部に鉄片を付けて回転させ、その上方を振動フィーダで磁石の回転方向とは垂直に金属片を移動させ、金属片が選別可能な粒径および磁石の回転速度を調査した。非金属と非磁性金属の選別の目的以外に同種の金属においては粒度ごとの選別である分級、また非磁性金属類相互の選別の可能性をも検討した。

2. 実験方法および原理

2・1 選別装置

試作した渦電流選別装置の正面図、平面図、および装置の側面からみた磁石の模式図をFig. 1に示す。供給試料は振動フィーダにて平面状に配列され、フィーダに接続している20°に傾斜している銅板上をガイド板に沿って一列にすべり選別部に達する。振動フィーダには神鋼電機(株)製のvibra flow feederを使用し

Fig. 1 Schematic diagram of eddy current separator.
□ High conductivity light particle
■ Low conductivity heavy particle

* 1994年9月7日受付 11月15日受理 資源・素材学会平成6年度春季大会にて一部講演

1. 正会員 工博 秋田大学助教授 鉱山学部資源・素材工学科

2. 学生会員 秋田大学鉱山学部資源・素材工学科

3. 正会員 秋田大学技官 鉱山学部資源・素材工学科

(著者連絡先) FAX 0188-37-0401 (秋田大・鉱山)

キーワード: Fe-Nd-B系永久磁石, 渦電流, 渦電流選別, 非磁性金属類, 分級

Fig. 2 Shape of pole piece on magnet.

Fig. 3 Magnetic flux density (to z direction in Fig. 1) on the separation area as a function of revolution angle of magnet.

Shape of pole piece
○ (a)
△ (b)

Fig. 4 Magnetic flux density change per 1 degree as a function of revolution angle of magnet. (from Fig. 3)

○ (a)
△ (b)

た。傾斜板は硬いポリマーの方が傾斜板内部に渦電流が生ぜずより良いと考えられるが、本実験では選別部を磁石回転部に近付けるために、とりえず厚さ 0.5 mm の薄くて形状の変化が少ない銅板を使用した。選別部では下方で磁石が回転しているため交番磁界が生じている。交番磁界によって渦電流を生じた非磁性金属試料は磁石の回転方向に力を受け、重力との合力方向に移動して流れ分離板の外側に達する。渦電流による移動力の少ない試料および非金属試料は分離板の内側を流れ選別される。永久磁石は信越化学工業(株)製の Fe-Nd-B 系希土類永久磁石を使用し、一片は厚さ 23 mm、磁極面 35 mm × 20 mm である。この永久磁石を軟鉄の 6 角柱の側面に N 極と S 極を交互に張り合わせ、6 角柱の中心部を可変モータの軸に接続した。可変モータはオリエンタルモータ(株)製の BL550A-AF である。なお、磁極面は Fig. 2 に示すような 3 角柱の軟鉄の磁極片を付けて磁力線をしばってある。永久磁石は回転の際に生ずる遠心力で移動しないようにワイヤロープで 3 角柱と回転台である 6 角柱とを固定し、さらに接着剤で回転台と固定させた。磁極片の形状は各種考えられるが、Fig. 2 で示すような 2 種の磁極片を使用した。磁極片先端部から 2 mm 離れた位置の選別部における回転角と磁束密度変化を Fig. 3 に示す。最大磁束密度はほぼ等しいが、磁束密度の変化は異なる。Fig. 4 に Fig. 3 から求めた回転角 1° 当たりの磁束密度変化を示す。磁束密度の変化は Fig. 2 の(a)のように磁

Fig. 5 Forces acting on a metal plate.

極片を鋭角にした方が大となり、回転における磁束密度変化が大きい(a)の磁極片を本実験では使用した。なお、磁極片を付けない場合は最大磁束密度は 0.2 T を越えるが、角度当たりの磁束密度変化は小であり、さらに、磁極片は遠心力による永久磁石の飛散を防ぐ目的もあり重要である。

2・2 非磁性金属への作用力

渦電流による移動力を作用させる対象とする金属は、磁界勾配中で強い吸引力を及ぼされる強磁性金属 (Fe, Co, Ni およびそれらの合金など) をあらかじめ除去した非磁性金属類である。この基礎的理論は Schlömann⁴⁾, Fletcher⁶⁾⁷⁾ らにより報告されている。

Fig. 5 に示すような薄い 4 角柱の金属板の渦電流選別を考察する。まず、金属板を金属の棒と仮定し、その滑る速度を V_y 、金属棒と垂直方向の磁束密度を B_z 、磁束の入る面積を A とすると、金属棒に生ずる起電力 V は Faraday の法則より

$$V = AV_y (\partial B_z / \partial y) \quad (1)$$

となる。金属棒に生ずる x 方向の力は Lorentz 力より、

$$F_x = -JA (\partial B_z / \partial x) \quad (2)$$

で、電流 J は抵抗を R として Ohm の法則より

$$J = V/R = V/k \sigma \quad (3)$$

となる。 k は定数、 σ は導電率である。また、金属棒への力 F_x を金属の体積を v 、密度を ρ として

$$F_x = \alpha v \rho V_y \quad (4)$$

と表すと、(1)~(3)式より

$$\alpha \propto A (\sigma / \rho) (\partial B_z / \partial y)^2 \quad (5)$$

となる⁴⁾。金属棒を金属板にするには棒の部分積分すればよい。(5)式より σ / ρ あるいは粒径に差がある物質を磁束密度の変化を大とすれば選別が可能と考えられる。

一方、本装置では F_x 対抗する力として金属板が銅板を滑り落ちるため摩擦力 f_x が存在する。 $(F_x - f_x)$ が大であれば粒子は x 軸方向により大きく移動して選別が可能となる。

2・3 摩擦力の測定

金属板と銅板との間の摩擦力は、選別に使用する台の銅板を水平とし、この上をストレインゲージに細い線でつないだ金属板を移動させて測定した⁸⁾⁹⁾。作用力の観察においてスティック・ス

Table 1 Friction coefficients between several size of metal plates and the copper feed plate measured by stick slip motion.

Metal plate Side length of square	Metal	Static friction coefficient $\times 10^{-2}$	Kinematic friction coefficient $\times 10^{-2}$
9x9 mm	Cu	3.1	2.6
	Al	3.9	2.8
7x7 mm	Cu	3.6	3.0
	Al	2.4	1.7

Table 2 Conductivity/density of several metals.

Metal	Density(ρ) (10^3 kg m^{-3})	Conductivity(σ) ($10^8 \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$)	(σ/ρ) ($10^2 \text{ m}^2 \Omega^{-1} \text{ kg}^{-1}$)
Al	2.70	374	139
Mg	1.74	225	129
Cu	8.96	599	66.9
Ag	10.50	629	59.9
Zn	7.13	169	23.7
Sn	7.28	91	12.5
Cr	7.19	77	10.7
W	5.65	177	9.2
Ti	4.50	24	5.3
Pb	11.34	49	4.3
Mn	7.44	5	0.7

リップモーションが現れ、厚さが5 mmで7 mm × 7 mmあるいは9 mm × 9 mmのCu板、Al板の静摩擦係数、動摩擦係数を求めこれをTable 1に掲げる。Al板Cu板ともに粒径にはあまり影響せず、ほとんど同じオーダーの 10^{-2} であった。

2・4 選別試料

非磁性金属で異なる物質の選別には(5)式より σ/ρ の差が大きければ良く、11種類の非磁性金属の σ/ρ をTable 2に掲げる。Al, Mgの値は大きく、ついでCu, Ag, Znと小となっている。本実験ではニラコ(株)製の厚さ5 mmのアルミニウムAl, 銅Cu, 亜鉛Zn, チタンTi板を一辺が15, 11, 9, 7 mmの正方形に切断して選別対象試料とした。

3. 選別試験および考察

Fig. 1に示される選別部に直径0.5 mmの銅線で5巻した直径11 mmのコイルを配置する。そのコイルをオシロスコープに接続してモータの回転数を400, 600, 800 rpmに変化させた場合のコイル内磁束変化による起電力をFig. 6に示す。回転数が

Fig. 6 Effect of revolution on induced electromotive force in coil as a function of time.
(Coil diameter 11 mm)
Revolution, rpm
○ 400
● 600
△ 800

Fig. 7 Effect of revolution on induced electromotive force in coil as a function of time.
(Coil diameter 7 mm)
Revolution, rpm
△ 800
▲ 1000
□ 1200

Fig. 8 Effect of revolution of magnetic circuit on recovery of square-shaped aluminum plate.
(Thickness of plate 0.5 mm)
a side length of square
□ 7 mm
△ 9 mm
○ 11 mm
◇ 15 mm

Fig. 9 Effect of revolution of magnetic circuit on recovery of square-shaped copper plate.
(Thickness of plate 0.5 mm)
a side length of square
■ 7 mm
▲ 9 mm
● 11 mm
◆ 15 mm

Fig. 10 Effect of revolution of magnetic circuit on recovery of square-shaped zinc plate.
(Thickness of plate 0.5 mm)
a side length of square
△ 9 mm
○ 11 mm
◇ 15 mm

増加するに伴い誘導起電力は増加し、周期も短縮した。一方、さらに小さい直径の7 mmのコイルを配置して測定した結果をFig. 7に示す。コイル径を小するとFig. 6と比較して同じ800 rpmでも起電力は低下し、起電力を増大させるにはより回転速度を大とする必要がある。(4), (5)式より金属板単位体積当たりの渦電流による移動力と摩擦力の差 $(F_x - f_x)/(\nu\rho)$ を一定に保持するには粒径すなわち面積 A が小となれば金属板内の磁束密度変化を大としなければならない。よって粒径が小、および σ/ρ が小となっても金属板を移動させるにはモータの回転速度をより増加させる必要がある。

各種金属板の選別結果をFig. 8～10に示す。Fig. 1において

金属板が分離板を越えた割合を実収率として表示した。それぞれの金属板の落下する速度 V_y は $0.02 \sim 0.04$ m/s を使用した。

アルミニウム板の選別結果を Fig. 8 に示す。アルミニウム板は粒径が 15 mm では 200 rpm を超えた低回転速度から移動し始め 500 rpm 以上で 100 % 移動した。粒径が小さくなるに従い移動させるには高い回転速度が必要となった。また、移動し始めた毎分回転数と、100 % 移動するようになる毎分回転数の差は粒径が小となるに従い、やや大となる傾向を示した。粒径が小になると粒子が移動する速度に適した磁束変化を多数の粒子内に得るには広範囲でより大きな磁束変化を必要とするため、毎分回転数を移動限界値よりもさらに大とさせることが必要と推定される。一方、例えば 11 mm のアルミニウム板を移動させて 7 mm のアルミニウム板と分離するには 750 rpm の毎分回転数を使用すればよく、本渦電流選別においては回転速度の調節により分級も可能である。

銅板の選別結果を Fig. 9 に示す。銅板は粒径が 15 mm では 400 rpm を超えてから移動し始め 1,000 rpm 以上で 100 % 移動した。粒径が小となるにしたがい移動に高回転速度を要し、粒径 7 mm では 1,200 rpm でも移動しなくなった。Fig. 8 と比較すると例えば粒径が 11 mm のアルミニウム板を移動させて 11 mm の銅板を移動させないで分離するには 750 rpm で選別が可能である。

亜鉛板の選別結果を Fig. 10 に示す。亜鉛板は粒径が 15 mm では 900 rpm を超えてから移動し始め、粒径が 11 mm では 1,100 rpm を超えてから移動した。また、図には示していないが、チタン板は粒径が 15 mm では 1,200 rpm においても移動は全く観察されなかった。Fig. 8 ~ 10 より適した回転速度を用いれば、非磁性金属の亜鉛板あるいはチタン板とアルミニウム板との選別およびチタン板と銅板の選別は容易と考えられる。

4. 結 言

希土類磁石を回転させて交番磁界を発生させ、その上方を回転

方向と垂直に試料を振動フィーダで移動させて選別する渦電流選別装置を作製し基礎実験を行った。本装置は、試料の供給方向と磁石の回転方向が垂直であること、回転する永久磁石の磁極上に磁極片を付け磁力線を絞っていることを特徴とする。非磁性金属板の移動は導電率/密度で推定でき、この比が小となるほど移動には磁石の高回転速度が必要となった。また、粒子が小さくなるほど移動には高回転速度が必要で、移動し始めた毎分回転数と 100 % 移動するのに要した毎分回転数の差は広がった。本選別方式では非金属と非磁性金属類の相互選別の他に、導電率/密度の差が充分大で粒径がほぼ同じであれば磁石の回転速度を調整することにより非磁性金属類相互の選別が可能であると推定されるが実際の混合試料の分離は今後の課題である。また、同種の非磁性金属でも回転速度を変化させて大なる粒子を移動させ、小なる粒子を移動させないで分級することも可能であることが明らかとなった。

謝辞 本研究の開始でお世話になった八嶋三郎東北大学名誉教授、文献試料等を頂いた日本エリーズ(株)および富士車輛(株)に感謝の意を表する次第である。

引 用 文 献

- 1) Warlitz, G.: ALUMINIUM Vol. 65, Jahrgang 11, p. 1125-1131, (1989)
- 2) van der Valk, H. J. L., Dalmijn, W. L. and Duyvesteyn, C. D.: Erzmetall, Vol. 41, 5, p. 266-274, (1988)
- 3) Spencer, D. B. and Schlömann, E.: Resources Recovery and Conservation, Vol. 1, p. 151-165, (1975)
- 4) Schlömann, E.: J. Applied Physics, Vol. 46, No. 11, p. 5012-5021, (1975)
- 5) Schloemann, E.: IEEE Trans. Magn. Vol. MAG-13, No. 5, p. 1496-1498, (1977)
- 6) Fletcher, D., Gerber, R., Lawson, P. and Boehm, J.: IEEE Trans. on Mag. 27, No. 6, p. 5375-5377, (1991)
- 7) Fletcher, D., Gerber, R., Tarrant, L. and Reid, T.: IEEE Trans. on Mag. 28, No. 5, p. 2415-2417, (1992)
- 8) 清宮 憲: コロイドおよび界面化学部会 Newsletter, 日本化学会, Vol. 18, No. 5, p. 3-7, (1993)
- 9) 吉沢久江・Israelachvili, J.: コロイドおよび界面化学部会 Newsletter, 日本化学会, Vol. 18, No. 5, p. 18-22, (1993)