加速カラム型風力選別機の開発 (銅とアルミニウムの選別)

伊 藤 信 一*・李 在 天**
荒 井 怜***

Development of Pneumatic Separator Using Acceleration Column (Separation between Copper and Aluminum)

Shinichi ITO, Jae-chun LEE
and Satoshi ARAI

A new pneumatic separator (Acceleration column type, column constrictions: 1. a tube shaped main separator body column 2. acceleration column, localized at different places of the separator body, defining acceleration zone) is developed. Using disk type copper and aluminum for model samples, separation efficiencies of usual air separator (straight column type) and the developed separator are compared. Separation velocity between 11.8 and 13.0 m/s results in separation efficiencies of about 100% by acceleration column type. On the other hand, straight column type gets to about 100% of efficiency between 12.7 and 13.0 m/s. Separation time that reach to 100% efficiency by acceleration column type is 12 times shorter than that by straight column type. It is considered that an acceleration column type is more advantageous than straight column type in air velocity and separation time that produces about 100% separation efficiency.

1. はじめに

廃棄物の選別操作への風力の適用は、従来数多く試みられており、廃棄物処理現場で活躍しているが、現在も風力選別機の特許公開あるいは研究発表が行われている。その内容は、廃棄物供給に対するカラムの設置角度とカラム内部あるいは形状工夫に大別される。後者については、ジグザグ分級機^{1,2,3)}あるいは積層逆三角型カラム⁴⁾の研究等がある。本研究は、カラム内部にメインカラム内径より内径を絞り込んで風速を加速するオリフィスを設けた、いわば加速カラム型風力選別機を試作し、また同時に、従来用いられているストレートカラム型風力選別機も試作し、両者の選別性能比較を、銅とアルミ

ニウムを用いて行ったものである。

2. 実験方法および試料

2.1 実験装置

図1に実験に供したストレートカラム型風力選別機を示す。カラムは、外径70 mmで内径60 mmの亚克力樹脂製で、長さ1000 mmの選別カラム、および長さ250 mmの風導入カラムから構成されている。選別試験は、試料をスクリーン上に導入して行った。送風機は、昭和電機K.K製品(Max. Vol. 8.7 m³/min, Max. mmaq490)を用いた。カラム上端部には、亚克力樹脂製の浮揚物回収器が付属している。送風機と風導入カラムの接続は、蛇腹管を用いた。風速は、HITACHI INVERTER J100 (IGBT Inverter) で制御した。風速測定は、柴田科学器械工業 K.K 製 PT-3 型ピトー管式風速計および柴田科学器械工業 K.K 製熱線式風速計アネモメータ ISA-67 を用い、図1におけるカラム最上端部で行った。図2は、カラムが無負荷の状態での測定した結果である。動圧はピトー管式風速計で測定した結果である。周波数(X)と風速(Y)は、直線回帰で、 $Y = 0.464X - 6.84 \times 10^{-2}$ の

* 産業技術総合研究所 環境調和技术研究部門 粒子分離研究グループ

** 韓国地質資源研究所 資源活用研究部 リサイクルセンター長

*** 元資源環境技術総合研究所
平成13年12月10日受理

図1 ストレートコラム型風力選別装置

関係がある。両風速計は、図2に示すように良い一致をみているので、以後、簡易的な熱線式風速計を用いて選別実験風速を決定した。

2.2 実験試料と選別効率

表1に実験試料と選別効率を示す。試料は、銅とアルミニウムの円盤型試料を用いた。円盤は、直径3.6および9mmで厚みが0.5および1mmの寸法のもの6種類を用意した。比重は、室温で電子比重計（ミラージュ貿易 K.K 製 EW-200SG）で測定した。選別効率は、オーバーフロー産物として回収されるべきアルミニウムとアンダーフロー産物として回収されるべき銅の両者を産物と考える、いわば全選別効率となっている。選別実験は、表1に示される試料1種類につき100枚、全量1,200枚をコラムに投入して行った。

3. 実験結果

3.1 風速分布測定

コラムの風速分布測定は、柴田科学器械工業 K.K 製簡易型多点風速計 ISA-916 を用いて行った。本装置は、風速プローブ（白金素子）、風速変換ユニット（15本のプローブまで可能）およびコンピュータから構成される。本装置を用い、コラムの所定位置にプローブをセットし

図2 インバータ周波数と風速および動圧の関係（コラム無負荷）

て、1秒間隔で、5分間の風速時間変動（測定数300）を測定した。測定結果の平均値（ μ ）および標準偏差（ σ ）は、300の測定値から算出した。なお、流路断面積（ $S = \pi(60/2)^2 \text{ mm}^2$ ）はプローブ挿入によって小さくなるがこの補正を行っている。図3は、ストレート型コラムの横方向中央（ $60/2 = 30 \text{ mm}$ ）にプローブを設置し、風速とプローブ位置の関係をみたものであり、風速最大値、最小値および平均値が示してある。プローブ位置は、スクリーン位置を0としたプローブまでの距離である。

表1. 実験試料と選別効率

実験用調整試料		
直径×厚さ (mm)	銅 (g)	アルミニウム (g)
9×0.5	0.284	0.083
9×1.0	0.577	0.172
6×0.5	0.128	0.037
6×1.0	0.265	0.079
3×0.5	0.035	0.010
3×1.0	0.071	0.021

比重：銅 8.92

アルミニウム 2.70

銅及びアルミニウムの各サイズ100枚ずつを混合選別効率の計算式

$$E(\%) = \left(\frac{X_1}{X_0} \right) \left(\frac{Y_1}{Y_0} \right) \times 100$$

ここで、

E ：選別効率（％）

X_0 ：アルミニウムの供給量（枚）

X_1 ：アルミニウム浮揚回収量（枚）

Y_0 ：銅の供給量（枚）

Y_1 ：銅のメッシュ上残留回収量（枚）

図3 ストレートカラム中の流速分布 (1)

図4 ストレートカラム中の流速分布 (2)

プローブは、図3に示す縦方向位置9ヶ所に設置した。プローブ位置が高くなるほど平均値が次第に大きくなっているのは、図1にみられるように送風機からの横方向流れが、蛇腹管によって縦方向流れになり、かつ風導入カラムが250 mmでは十分に整流されず、流れの乱れが大きいためであろう。このことは、プローブ位置が高くなるほど最大値と最小値の差が小さくなっていることから考えられる。また、カラム最上端部では12.5 m/s（アネモメータ測定）であるが、プローブ位置825 mm付近から上部は既にカラムトップとほぼ同じ風速になっていることが伺える。図4は、同じ測定結果から標準偏差を算出し、風速平均値 (μ)、 $\mu + 2\sigma$ および $\mu - 2\sigma$ とプローブ位置の関係をみたものである。測定の標準偏差は小さく、かつ、 $\mu + 2\sigma$ と $\mu - 2\sigma$ の差は、プローブ位置が高くなるほど小さくなっている。図5は、プローブのカラム横方向設置位置を幾分中心からずれた壁面から37 mmの位置で測定した結果である。プローブ最下端部125 mmの位置では標準偏差が大きく流れの乱れが中心より大きくなっている。平均風速は、どのプローブ位置でも図4結果より大きくなっており、特に750 mmの位置では、カラムトップの風速12.5 m/sより大きく13.0 m/sとなって

いる。図6は、図5のプローブ位置よりさらに中心からずれた壁面から45 mm位置にプローブを設置した結果である。図4および図5と比較して、標準偏差はさほど変わっていないが平均値の変動が大きく、同図においては、プローブ位置275 mm - 475 mm、475 mm - 750 mm および 750 mm - 975 mm に山がみられ、風速がカラムの高さに対して振動している様子が窺える。この振動は、図では3回/1 m であるが、プローブ位置475 mmと500 mmにおいて風速変動が1 m/sにおよぶことから推定して、さらに多くの振動が発生していると考えられる。図3から図6において、高さ475 mm以下のカラム下部の平均風速が遅くなっている傾向が認められる。単位時間当たりのカラム内任意断面への流入風量が等しいとすると、高さは異なっても同一断面内のプローブ位置では、風速が同じはずなのに、カラム下部で風速が低くなっているのは、流れの乱れ方が上部より大きく、測定点以外の位置で風速が大きくなり、流入風量を等しくしていると推定される。内径52 mm 厚み5 mmの加速器（オリフィス型）をスクリーンから250 mm、500 mm および 750 mm 位置に設置した場合のカラム内風速分布を測定した。プローブは図7に示す13ヶ所に設置した。図7

図5 ストレートカラム中の流速分布 (3)

は、カラム横方向中心の壁面から 30 mm 位置に設置した場合の風速最大値、平均値および最小値を示してある。カラム最上端部の風速が 12.5 m/s の場合であるが、加速器を設置してもカラム最上端部付近の 975 mm 位置における平均風速が 12.5 m/s であり、加速器を設置してもエネルギー損失がほとんど無いことを示している。同一プローブ位置における最大値と最小値の差は概ね 1 m/s 以下となっている。

加速器間カラム内の平均風速は変動がほとんどなく、325 mm - 475 mm 間では平均 12.1 m/s、575 mm - 725 mm 間では 12.5 m/s、825 mm - 975 mm 間では 12.6 m/s となっている。一方、加速器中心の平均風速は、275 mm で 14.3 m/s、525 mm で 14.7 m/s、775 mm で 15.3 m/s となっている。したがって、カラム内では、振幅がおおよそ 2 m で振動数 38 (1 m のカラムを風速 12.5 m/s で通過しその間 3 回の振動) の風速変動が生じていると考えられる。図 8 は図 7 の結果を、 μ 、 $\mu + 2\sigma$ および $\mu - 2\sigma$ についてプロットしたもので、標準偏差は小さく同一プローブ位置で風速変動が少ないことを示している。図 9 は、カラム横方向中心からずれた壁面から 45 mm 位置にプローブをセットした結果で、 μ 、 $\mu + 2\sigma$ および

図6 ストレートカラム中の流速分布 (4)

$\mu - 2\sigma$ についてプロットしてある。標準偏差は、図 8 におけるそれよりも大きくカラム中心からずれると風速変動が大きくなることを示している。また、加速器間風速が安定していた図 8 とは異なり、加速器出口付近の 325 mm ではおおよそ 12.6 m/s なのに対し、次の加速器入り口付近の 475 mm では 10.4 m/s と減速している。さらにこの加速器出口付近の 575 mm では 12.8 m/s なのに対し次の加速器入り口付近の 725 mm では 11.1 m/s と減速している。また、加速器中心では、下の加速器から順にそれぞれ 14.8 m/s、14.7 m/s、15.6 m/s となっている。したがって、カラム中心からずれると中心より大きく風速の加速・減速を繰り返すものと考えられる。また、図 7 から図 9 までの、加速型カラムにおける加速器間風速が 13.0 m/s を越えていないことが認められる。

3.2 選別実験

図 10 は、表 1 に示された銅とアルミニウムの選別実験を風速 12.3 m/s で行った結果である。ストレート型カラムでは、選別時間が増大すると選別効率も増大しているが、30 秒経過しても 80% 強の選別効率しか得られていない。一方、加速型カラムでは 10 秒でほぼ完全選別が行われ、20 秒では 100% 選別が達成されている。なお、

図7 カラム中の流速分布 (1)
(アクセラレータ: $\phi 52 \times 50$ T; mm)

図8 カラム中の流速分布 (2)
(アクセラレータ: $\phi 52 \times 50$ T; mm)

この風速では銅は浮揚せず、もっぱらアルミニウムのカラム最上端部における浮揚率で選別効率は決定されている。図 11 は、選別時間が 20 秒と 60 秒の場合について、風速と選別効率の関係をみたものである。ストレート型カラムでは、両選別時間において風速 12.7 m/s ~ 13.0 m/s の間でほぼ完全な選別が行われている。一方、加速型カラムでは、選別時間 20 秒の場合、風速 11.8 m/s ~ 13.0 m/s と広い風速区間でほぼ完全な選別が行われている。60 秒の場合は、風速 11.5 m/s ~ 13.0 m/s となっている。なお、風速 11.5 ~ 13.0 m/s までは、銅はカラム上端部に出現しないので選別効率はアルミニウムの浮揚率によって決定される。したがって、加速型カラムはストレート型カラムと比較して、図 10 にみられるように低風速かつ短時間で選別が行われる省エネルギー型風力選別機といえよう。また、同時に図 11 にみられるように、風速変化に対する選別効率変化が鈍感なため、操作性の良い風力選別機といえよう。

4. 考 察

風力選別の基本的考え方は、終端速度より大きな風速を付与された物体は、その風速から終端速度を差し引き

た正味の上昇速度でオーバーフロー産物として回収され、終端速度より遅い風速を付与された物体は、その風速から終端速度を差し引いた下降速度でアンダーフロー産物として回収されるということである。したがって、ストレート型カラムと加速型カラムの選別性能の差を考察する際に、用いた試料の終端速度の検討は不可欠である。流体中の物体に作用する力は様々であるが、風力選別においては、重力と空気の粘性抵抗に起因する抗力を考慮すれば充分であろう。すると、カラム内を風に対して垂直に運動する円盤粒子については、次の運動方程式を得る。

$$ma = mg - (1/2)C_d \rho_a v^2 A$$

ここに、m: 粒子重量、a: 加速度、g: 重力加速度、 C_d : 抗力係数、 ρ_a : 空気密度、v: 粒子と空気の相対速度、A: 代表面積（空気の流れに垂直な面に対する投影面積）

重力と抗力がバランスした ($a = 0$) とき、円盤の円面が、流れに垂直な面であるとき (1) 式を解くと ($m = A t \rho_m$, ρ_m : 粒子密度、t: 厚み)、終端速度 V は、次

図9 カラム中の流速分布 (3)
 (アクセラレータ: $\phi 52 \times 50 \text{T}$; mm)

式で表され、円盤粒子は、A に依存せず (直径に依存しない) 厚み t のみが関与していることがわかる⁵⁾。

$$V = \sqrt{2t g \rho_m / C_d \rho_a}$$

流れに垂直におかれた円盤の抵抗係数 C_d は、レイノ

ルズ数 (Re) が小さい (< 0.5) 場合は、Lamb の式、 $5 < Re < 40$ の範囲では今井の式⁶が知られているが、 $2 \times 10^4 < Re < 2 \times 10^5$ の範囲では $C_d \approx 1.2$ でほぼ一定とされている^{7,8)}。本実験条件の Re は、この範囲にあり、また、 $g = 980 \text{ cm/s}^2$ 、および $\rho_a = 0.001167 \text{ g/cm}^3$ を上式に代入して用いた試料の V を算出すると以下ようになる。

厚み t (mm)	V_{cu} (m/s)	V_{Al} (m/s)
0.5	7.90	4.35
1	11.2	6.15

空気流れに対して θ の傾きで円盤面積が投影される場合は、終端速度式の分子に $\cos \theta$ が掛けられるので V はより大きな値となる。図9において、風速 13.0 m/s で選別効率が減少し始めるのは、厚み 0.5 mm の銅がカラム最上端部で回収され始めるためと考えられるから、終端速度が、 $13.0/7.9 = 1.65$ 倍大きく、抵抗係数が変化しないとすると、風向きに対するこの円盤粒子の傾き $\theta = 68.3^\circ$ となる。但し、円盤粒子の風向きに対するこの傾きは一般的でなく、平島ら³⁾ は、直径の大きい円盤粒子ほど風向きに対し傾きが大きくなると報告している。加速型カラムがストレート型カラムに対し、短時間でかつカラム最上端部風速がより低速で選別が行われるのは、図3～6のストレート型カラムの風速分布および図7～9の加速型カラムの風速分布測定結果からわかるように、加速カラム部分における風速の増加によるアルミニウムの正味上昇速度の増加によるためと、加速カラム間の風速が、厚み 0.5 mm 銅の終端速度 13.0 m/s に達していないためと考えられる。また、加速カラムのほうがストレートカラムと比較して、カラム風速変化に対する選別効率変化が少ないのは、加速カラム内風速がカラム最上端部のそれより大きいため、カラム最上端部風速が低速でもアルミニウムの正味上昇速度が大きくなっているためと考え

図10 選別時間と選別効率の関係 (風速 12.3 m/s)

図 11 風速と選別効率の関係（選別時間 20 秒と 60 秒）

られる。

5. おわりに

ストレートカラム内にオリフィスを $3/4$ 設置した加速カラム型風力選別機を試作し、また同時に、従来から用いられているストレートカラム型風力選別機も試作し、両者の選別性能比較を行った。選別性能比較は、厚み 0.5 および 1.0 mm の円盤形銅とアルミニウムを用いて行い、この試験試料の場合、加速カラム型風力選別機は、ストレートカラム型風力選別機と比較して、両者の選別がより低風速かつ短時間で選別が行われ、省エネルギー的であること、また風速変化に対して、選別効率変化が少ない易操作性を有することが明らかとなった。

参 考 文 献

- 1) Taub, B. and Peirce, J.J.: J. Energy Eng., 109 (2) p. 74-87 (1983)
- 2) Peirce, J.J. and Wittenberg, N.: J. Energy Eng., 110 (1) p. 36-48 (1984)
- 3) 平島 剛, 西田卓史, 片岡憲治, 恒川昌美, 朝倉國臣: 資源と素材, Vol. 116, No. 11, p. 913-917 (2000)
- 4) Everett, J.W. and Peirce J.J.: Resources, Conservation and Recycling, 4, p. 185-202 (1990)
- 5) 吉田卓也, 小関康雄, 福本千尋, 小泉達也: 廃棄物学会誌, Vol. 9, No. 2/3, p. 95-103 (1998)
- 6) 今井 功: 科学, Vol. 28, No. 3, p. 110-115 (1958)
- 7) Roshko, A.: J. Fluid Mech., 10, p. 345 (1961)
- 8) 日本機械学会編: 機械工学便覧, 基礎編 A5 流体力学, A5-98 (1992)