定在波音場を用いた産業廃棄物分別方法の開発

稲田 智広^{*1}, 周 立波^{*2}, 尾畠 裕隆^{*2}, 清水 淳^{*2}

Development of separation method for industrial waste by using acoustic standing wave field

Tomohiro INADA^{*1}, Libo ZHOU^{*2}, Hiroataka OJIMA^{*2} and Jun SHIMIZU^{*2}^{*1} Graduate School of Sci. and Eng, Ibaraki University

4-12-1 Nakanarusawa-cho, Hitachi-shi, Ibaraki 316-8511, Japan

^{*2} School of Engineering, Ibaraki University

4-12-1 Nakanarusawa-cho, Hitachi-shi, Ibaraki 316-8511, Japan

Received 26 January 2016

Abstract

In recent years, more than 10 million tons of industrial wastes are discarded annually. Those wastes are mainly composed of plastic, glass and metals which are the materials massively used in automobiles, electric and electronic products. It is well known that industrial waste contain precious metals like gold and have a great value of reutilization. Therefore, technology to properly separate the waste by their types of subject is very important for recycling industry. In this study, we have developed a new separation method by use of acoustic levitation phenomenon in a standing wave field. Unlike the conventional methods such as centrifugal particle separation or magnetic separation, this method enables to sort subjects by their densities, without relying on other material properties including size, magnetism and weight. First described in this paper is a theoretical analysis of levitation force exerted on an object to derive its trajectory in a standing wave field. It is found that the motion of the object is governed by its density and the strength of acoustic field. Based on this finding, we developed a prototype of separation system with twin-transducers and a belt conveyer. As a result of test to separate a mixture of SiO₂ and Fe particles, 62wt% SiO₂ is captured at node side while 72wt% Fe is captured at anti-node side. Finally, the prototype is used to repeatedly separate the chipped waste of actual OA equipment. Its density was increased about 150%.

Key words : Acoustic levitation, Standing wave, Separating, Sorting, Industrial waste

1. 緒 言

近年、金属やプラスチックなどを多く含む自動車や冷蔵庫、あるいはテレビ、OA 機器などの工業廃棄物は、年間 1006 万トン（環境省、2014）にも達している。また、この中で金をはじめとする貴金属は電子製品の導電体として多く用いられており、再利用価値が高いために回収技術の開発が盛んに行われている（荒木他、2005）。効率よく貴金属を回収するためには予めプラスチックやガラスなどが混合した状態から金属を多く含んだ密度の大きい資源成分を抽出する必要がある。それらは処理をする際、小さく砕かれている小片から磁選機によって磁性金属とプラスチック類に分別する方法が最も一般的である。しかし、この方法では磁性金属を取り出すことはできるが、アルミ、銅、金など非磁性金属は取り出すことができないという問題点がある。

本研究室では、これまで音響浮揚を利用した応用技術の開発を行っている（Inada et al., 2013）。音響浮揚は液中の気泡や物体を音圧のノードに補足することが可能であり、液滴の浮揚（Bindal et al., 1984）、二次元の超音波マニピュレーション（Takeuchi, 1996）、赤血球の凝集（Yasuda et al., 1997）、液滴の非接触分注（Tanaka et al., 2012）、

No.16-00031 [DOI:10.1299/transjsme.16-00031], J-STAGE Advance Publication date : 30 August, 2016

^{*1} 正員、茨城大学大学院 理工学研究科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)

^{*2} 正員、茨城大学 工学部

E-mail of corresponding author: 13nd2011@vc.ibaraki.ac.jp

Fig. 1 Concept of acoustic levitation.

Fig. 2 Normalized wave field.

非接触溶融 (Whymark, 1975) など様々な分野で応用研究が行われている。この音響浮揚技術を用いて物質の大きさに関係なく密度のみで分別することが可能であれば、混合物から資源となる金属などの分別、再利用が可能となる。本論文では、まず廃棄物の分別に必要な定在波音場を発生するツイン振動子装置を開発し、浮揚力を含む分別するために必要な条件を理論的に求めた。次にこの装置を用いて鉄 (Fe)・二酸化ケイ素 (SiO₂) の分別に関する基礎実験を行い、本分別手法の妥当性について検証した。最後に、実際に OA 機器廃棄物を用いて密度による分別実験を行った。廃棄物に対し分別を繰り返し行い、分別の回数に伴う密度変化について調べた。

2. 音響浮揚の理論

音響浮揚の概要を図 1 に示す。振動子間の距離が半波長の整数倍の時、音場に定在波が形成される (Hoeppner and Reinhart, 2000) 振動子から出力される音響波を平面波としたとき、速度ポテンシャル Φ は以下の式で表される。

$$\frac{d^2\Phi}{dz^2} = \frac{1}{c^2} \frac{d^2\Phi}{dt^2} \quad (1)$$

ここで、 z は左側の振動子からの距離、 c は大気中における音速である ($c \approx 340\text{m/s}$)。式 (1) より、

$$\Phi = e^{j(\omega t - kz)} + e^{-j(\omega t - kz)} \quad (2)$$

が求まる。ここで、 ω は振動子の周波数、 k は波数 ($k = 2\pi/\lambda$)、 j は虚数である。右辺の第 1 項は、右への進行波を表し、第 2 項は左への進行波を表す。 Φ は位置 z と時間 t の関数である。 $2z/\lambda = 0.5$ の位置では、 Φ の振幅は時間に関係なく常に 0 になり、音圧ノードが生じる定在波になる。この場合、粒子速度を v 、音圧の変化を Δp としたとき、以下の式により求まる (早坂, 吉川, 1974)

$$\begin{cases} v = \nabla\Phi = C \cos \omega t \sin kz \\ \Delta p = \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \rho C \sin \omega t \cos kz \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 ρ は粒子密度 (大気中では $\rho = 1.293 \text{ kg/m}^3$)、 C は積分定数であり、振動子の初期条件から求まる。これらの時間平均を v_{rms} 、 Δp_{rms} としたとき、それぞれの無次元に正規化した音響場における分布を図 2 に示す。音圧のノード位置 ($2z/\lambda = 0.5$) において、粒子速度 v_{rms} が最大になり、また音圧がゼロであるが、その変化率 (Δp_{rms} の勾配) が最大になる。このため、定在波音響場におかれた物体が音圧の差により浮力と、粒子速度の差により揚力からなる浮揚力 (合力) を受けて、図 1 に示すようにノード位置へ移動することになる。このとき音場の音響ポテンシャル U は以下の式 (Gol'dberg, 1971) により求まる。

$$U = 2\pi r^3 \rho \left[\frac{\Delta p_{rms}^2}{3\rho^2 c^2} - \frac{v_{rms}^2}{2} \right] \quad (4)$$

ここで、 r は物体の半径である．右辺第 1 項は浮力に対応し，第 2 項は揚力に対応している．物体に作用する浮揚力を F とした時， $F = -\nabla U$ により，

$$F = \frac{5}{3} \frac{r^3 k \Delta p_{rms}^2 \pi}{\rho c^2} \sin 2kz \quad (5)$$

ここで， $\Delta p_{rms} = \Delta p_0 / \sqrt{2}$ ， $k = 2\pi f$ により式 (5) を置き換えると，

$$F = \frac{5}{3} \frac{\pi^2}{\rho c^2} r^3 f \Delta p_0^2 \sin 2kz \quad (6)$$

式 (6) ようになる．それによれば，浮揚力 F は，振動子の周波数 f ，または音圧の変化量 Δp_0 の二乗に比例する．

3. 分別装置の開発

式 (2) に示すように半波長の整数倍の距離に置かれた 2 枚の平行平板の間に波長と振幅が同じの 2 つの波が共振して定在波が生じる．これまで，平面振動子と硬質の平面反射板を用いて簡易的に試作した実験装置では，音波が反射時に減衰するため定在波を正しく生成することが困難であった．本研究では，減衰の影響を極力抑えるため同期した 1 対の平面振動子に向かい合わせて分別装置を構築した．その概念図を図 3 に示す．装置はツイン振動子とベルトコンベアから構成されており，振動子間に定在音響場が形成され，ベルトコンベアに載せた産廃混合物が定速でその間を通過することができる仕組みになっている．定在波音響場に物体が入ると，物体は Z 軸方向に浮揚力 F を受け，ノード位置へ向かって移動する．物体とベルトコンベア間の摩擦の影響を無視すれば，この時物体の運動方程式は，ニュートン第二法則に従い，式 (7) のように横軸 (Z-axis) と縦軸 (Y-axis) に分けて記述できる．

Fig. 3 This system is consisted of two transducers faced each other horizontally and belt conveyor. When objects which are fed at the anti-node pass through the field of the standing wave, they are subjected to the horizontal levitation force and move toward the node position. The lighter objects travel larger distance than the heavier objects.

$$\begin{cases} mz''(t) = \frac{5}{3} \frac{\pi^2}{\rho c^2} r^3 f \Delta p_0^2 \sin 2kz(t) & \dots(\text{Z-axis}) \\ y(t) = v_y t & \dots(\text{Y-axis}) \end{cases} \quad (7)$$

ここで m は物体の質量, v_y は Y-axis におけるベルトコンベア velocity, t は時間を表している. 今回の研究は, 工業産廃物の中に含まれる金属をプラスチックなどから分離・回収することが目的であるため, 高精度の計算を行わなくても実現できることから, 物体が Z 軸方向に移動する際に生じた物体同士の衝突, 物体・ベルト間の摩擦などの影響を無視した. また物体を球形と仮定し, $m = 4/3 \rho_s \pi r^3$ (ρ_s : 物体の密度) を式 (7) に代入すると, 式 (8) に変形できる.

$$\begin{cases} z''(t) = \frac{5\pi}{4\rho c^2} \frac{f\Delta p_0^2}{\rho_s} \sin 2kz(t) & \dots(\text{Z-axis}) \\ y(t) = v_y t & \dots(\text{Y-axis}) \end{cases} \quad (8)$$

式 (8) に物体の大きさを示す半径 r が消去されたため, Z-axis における物体の移動距離 $z(t)$ は, 物体の大きさに関係がなく, 密度 ρ_s のみに依存することがわかる. この性質を利用すれば, 金属, プラスチックのような異なる物質の分別が可能になる. ここで, ベルレ法を用いて式 (8) を解き, 音響場における物体の運動軌跡を求めた.

図 4 には, 幅が 20mm の定在波音場を通過する密度の異なる 2 つの物体 SiO_2 ($\rho_s = 2.1 \text{ g/m}^3$) と Fe ($\rho_s = 7.874 \text{ g/m}^3$) に対し, 音圧を $\Delta p_0 = 200, 400, 600 \text{ Pa}$, 物体の Y-axis 方向の速度を $v_y = 15, 20 \text{ mm/s}$ と変化させた時の物体の運動軌跡を示す. 密度の大きい Fe の微粒子に比べて, 密度の小さい SiO_2 の微粒子はアンチノード位置からより早くノード位置へと移動していることがわかる. 2 つの物体の密度に従って, 音圧 Δp_0 と Y-axis 方向の速度 v_y を適切に調整すれば, 音響場出口のところにおける 2 者の距離 d を大きくして分離することができる.

Fig. 4 Travelling trajectory of SiO_2 and Fe particles at standing wave acoustic field.

Fig. 5 Distance d at exit as a function of Δp_0 and v_y .

図 5 は、図 4 のシミュレーション結果を 3D マップで表している。出口における 2 つの物体間の距離 d は、音圧 Δp_0 とベルト速度 v_y に依存している。本シミュレーションにおいては、 d の最大値はおよそ 5mm 程度で、後に述べる開発した装置で生成した定在波の $\lambda/4 \sim \lambda/2$ に相当する。また図中の破線で示すように、物体間の距離が最大となる音圧 Δp_0 とベルト速度 v_y は比例関係になっている。そのためベルトの速度を早くする場合は同時に音圧も大きくする必要がある。

図 6 は、このコンセプトに従って開発した分別装置の写真で、表 1 は分別装置の仕様を示している。本装置では先端直径 $\phi 20\text{mm}$ のランジュバン振動子を対になるように設置し、定在波を形成する。振動子は約 23kHz で駆動し、振幅を 5~40 μm の間で調整可能である。これらの振動子間に約幅 30mm のベルトコンベアを設け、分別対象物を載せて通過させることで、一定時間浮揚力を加えて分別する。開発した分別装置の音響場音圧変化は振動子間に細長い音圧プローブを挿入して(図 3 参照)実測した。図 7 は Y-Z 平面における音圧分布を実測した例 ($\Delta p_0 = 300\text{ Pa}$) である。Z 軸における音圧の強弱が交互に存在し、5 つの音圧ノードを確認できる定在波が形成されている。また、音波の強度が左右対称であり、ツイン振動子によって音波強度の減衰が効果的に抑制されていることがわかる。

Fig.6 Developed system.

Table 1 Specifications of developed system.

Transducer	Frequency	23±2[kHz]
	Amplitude	5 ~ 40[μm]
	Phase	-100 ~ +100 [°]
	Tip diameter	$\phi 20[\text{mm}]$
	Transducer type	Bolt-clamped langevin transducer
	Function	Phase synchronizer, Automatic resonant frequency tracing
Belt conveyor	Material	Polyurethane
	Width	30[mm]
	Velocity	5 ~ 45[[mm/s]]

Fig. 7 Measured acoustic pressure distribution.

Table 2 Particles used for sorting test.

Material	SiO ₂	Fe
Media
Diameter	$r = 50[\mu\text{m}]$	$r = 50[\mu\text{m}]$
Density	2.100 [g/cm ³]	7.874 [g/cm ³]
Quantity	0.1[g]	0.4[g]

4. 分別実験

開発した分別装置の性能を検証するため、密度が既知の2種類の微粒子 (SiO₂, Fe) を用いて分別試験を行った。表2には使用した2種類の微粒子の仕様を示す。まず、SiO₂をコンベアに一樣分布させて、振動子間を通過させた時の写真を図8に示す。この時の音圧は $\Delta p_0 = 300 \text{ Pa}$ 、コンベア速度は $v_y = 20 \text{ mm/s}$ であり、SiO₂は振動子間に形成された定在波音場によってノード位置に移動する様子が確認できる。これらの間隔は約7.4 mmであり、周波数23 kHzの定在波の $\lambda/2$ に相当する。これにより第2章に述べたように、定在音響場において物体が浮揚力の作用によってノード位置に移動したことが確認された。

次に、体積が同じになるようにSiO₂を0.1g、Feを0.4gで混ぜ合わせた混合物をアンチノード位置から供給して、コンベア速度を $v_y = 20 \text{ mm/s}$ 、音圧を $\Delta p_0 = 300, 600 \text{ Pa}$ の2段階で変化させて分別試験を行った。図9は音圧300Paで分別中の写真であり、図4のシミュレーションと同様にアンチノード側に置かれたFeとSiO₂の混合体から、密度の小さいSiO₂だけがノード位置へと移動しているのが確認できる。図10は分別後それぞれアンチノード側(左)、ノード側(右)から回収された微粒子である。磁石を用いてそれらの成分を調べたところ、密度の小さいSiO₂は62wt%がノード位置に移動したのに対し、密度の大きいFeは72wt%がアンチノード側に残っていることがわかった。アンチノード位置で回収した微粒子について、SiO₂, Feの成分を計測して得られたそれぞれの供試品に対する重量比を図11に示す。音圧300Paでは、アンチノード側にFeが多く残り、SiO₂のノードへの移動量がFeの移動量と比較し、35wt%多くなった。これにより、浮揚力を利用して素材の密度による分別・分類が可能であることが実証できた。

Fig. 8 SiO₂ gathering at the node positions. Fig. 9 After passing through acoustic field, mixed SiO₂ and Fe particles are separated by acoustic levitation force.

Fig. 10 Sorted SiO_2 and Fe particles. Fig. 11 Rate of particle collected at node and anti-node. 72wt% of Fe stayed at anti node, and 62wt% of SiO_2 moved to the node which is 35wt% more than Fe.

Fig. 12 Rate of particle collected at the node position under different acoustic pressures. It is important to match the belt velocity with the acoustic pressures properly.

一方図 12 において音圧を 600Pa まで上昇させたときに得た結果を併示した。その場合、 SiO_2 だけではなく約 50wt% の Fe の微粒子もノード位置に移動した。この結果は、図 4, 5 のシミュレーション結果と一致しており、過度の音圧は音響場出口における 2 者間距離 d を小さくする恐れがある。したがって、距離 d を大きくする音圧とベルト速度の組み合わせが、密度分別の肝要である。また、本装置では本来 300Pa で移動しない Fe の一部が SiO_2 に引きずられてノード側に移動しているが、分別対象に合わせて流量の調整、繰り返し分別を行うことで分別精度向上が期待できる。

最後に、産廃業者から提供された実際の工業産廃物（細かく粉砕した OA 機器）に対して、分別試験を行った。産廃物の大きさ、形状、密度などが不明であり、また先述の Fe や SiO_2 等と異なり、形状も球形ではないため、分別条件の最適化が難しい。一方で移動量が密度に依存するという原理は同じであるため、ここでは産廃物の単価が密度とともに上昇することから、開発した装置を用いてアンチノード位置で回収した密度の大きい成分を再度開発装置を通して繰り返し分別実験を実施し、各回の分別による廃棄物の密度の変化を調べた。初期密度 800kg/m^3 、 950kg/m^3 の 2 種類の廃棄物を供試品として用意した。産業廃棄物の密度は質量、体積の計算値から求めており、質量は電子天びん、体積はシリンダに入れて計測した。ここでの体積はかさ体積であり、産廃物の密度が実際よりも小さくなると考えられるため、初期密度と相対比較を行う。図 13 は初期密度 800kg/m^3 の廃棄物の分別前、3, 7 回分別後のアンチノード位置で回収した成分の比較写真である。分別前廃棄物は、サイズがおおよそ 1mm 以下、大きさ、形状などが揃っていない様子がわかる。分別回数が増えるに連れ、貴金属の占める割合が増え、黒色を呈するようになった。

Fig. 13 Visual impression of sorted industrial waste.

Fig. 14 Density variation of industrial waste by repeated-sorting.

図 14 は初期密度 800 kg/m^3 と 950 kg/m^3 の 2 種類の OA 廃棄物を繰り返し 7 回分別した時の密度の変化を示している。7 回分別後の密度は 800 kg/m^3 から 1220 kg/m^3 に、 950 kg/m^3 から 1370 kg/m^3 となり、初期密度と比較してそれぞれ 153%、144% 上昇した。密度の上昇率は 2 種類共に 1 回目が最も大きく、回数を重ねるごとに少しずつ上昇率が小さくなった。これは繰り返し分別を行うことで産業廃棄物内の密度の小さい物体の含有率が減ったことが原因と考えられる。

5. 結 言

本論文は産業廃棄物から再利用可能な貴金属を回収する方法として音響浮揚の技術を応用した分別方法を提案し、理論および実験により本手法の妥当性について検証した。得られた結果を次のようにまとめる。

- (1) 音響浮揚の原理に基づき定在音響場における物体が受ける浮揚力を理論的に解析し、それを受けた物体の運動は大きさには関係なく密度のみに依存することを明らかにした。
- (2) 密度の異なる物体の移動軌跡についてシミュレーションを行い、音圧、物体の移動速度を適切に制御すれば、密度による分別が可能であることを確認した。
- (3) 上記の解析結果に基づき、ツイン振動子とベルトコンベアからなる分別装置を設計・開発した。
- (4) 密度が既知である 2 種類の SiO_2 と Fe の微粒子の分別試験を行い、62wt% の SiO_2 がノード位置に、72wt% の Fe はアンチノード位置に捕捉された。
- (5) 実際の OA 機器廃棄物に対し、開発装置を使って密度分別を 7 回繰り返し行い、廃棄物の密度をおよそ 150% 上昇させることができた。

謝 辞

本研究の一部は、科学研究費「挑戦的萌芽研究」(No. 24656094) の助成によって行われたことを記し謝意を表す。

文 献

- 荒木孝雄, 阿川隆一, 次田康裕, 廃プリント配線板からの金属回収の最新技術, エレクトロニクス実装学会誌, Vol.8, No.5 (2005), pp.442-446.
- Bindal, V. N., Jain, S. K., Saksena, T. K. and Singth, G., Acoustic levitation and its application in estimation of high power sound field, Applied Acoustics, Vol.17 (1984), pp.125-133.
- Gol'dberg, Z. A., Acoustic radiation pressure in high-intensity ultrasonic fields, L. D. Rozenberg, Ed (1971), p.73.
- 早坂寿雄, 吉川昭吉郎, 音響振動論, 丸善 (1974), pp.455-469.

- Hoeppe, J. and Reinhart, G., Non-contact handling using high-intensity ultrasonic, *Annals of the CIRP*, Vol.49 (2000), pp.5-8.
- Inada, T., Zhou, L., Shimizu, J., Ojima, H. and Ito, T., Development of non-contact classifying systems by use of acoustic levitation, *Int. J. of Automation Technology*, Vol.6, No.7 (2013), pp.326-331.
- 環境省, 産業廃棄物の排出及び処理状況等, 記者発表資料(2014), pp.1-8.
- 竹内正男, 微小物体の超音波マイクロマニピュレーション(<小特集>力としての超音波), *日本音響学会誌*, Vol.52, No.3 (1996), pp.203-209.
- 田中宏樹, 和田有司, 水野洋輔, 中村健太郎, 超音波による液滴の非接触分注(強力超音波, 一般), *電子情報通信学会技術研究報告. US, 超音波*, Vol.112, No.366 (2012), pp.29-34.
- Whymark, R. R., Acoustic field positioning for containerless processing, *Ultrasonics*, Vol.13 (1975), pp.251-261.
- Yasuda, K., Haupt, S. S., Umemura, S., Yagi, T., Nishida, M. and Shibata, Y., Using acoustic radiation force as a concentration method for erythrocytes, *Acoustical Society of America*, Vol.102 (1997), pp.642-645.

References

- Araki, T., Agawa, R. and Tugita, Y., Recent recycling technology of metals separation for waste printed circuit boards, *Japan Institute of Electronics Packaging (JTEP)*, Vol. 8, No.5 (2005), pp.442-446 (in Japanese).
- Bindal, V. N., Jain, S. K., Saksena, T. K. and Singth, G., Acoustic levitation and its application in estimation of high power sound field, *Applied Acoustics*, Vol.17 (1984), pp.125-133.
- Gol'dberg, Z. A., Acoustic radiation pressure in high-intensity ultrasonic fields, L. D. Rozenberg, Ed (1971), p.73.
- Hayasaka, T. and Yoshikawa, S., Logical acoustic oscillation, *Maruzen* (1974), pp.455-469 (in Japanese).
- Hoeppe, J. and Reinhart, G., Non-contact handling using high-intensity ultrasonic, *Annals of the CIRP*, Vol.49 (2000), pp.5-8.
- Inada, T., Zhou, L., Shimizu, J., Ojima, H. and Ito, T., Development of non-contact classifying systems by use of acoustic levitation, *Int. J. of Automation Technology*, Vol.6, No.7 (2013), pp. 326-331.
- Ministry of the Environment, Discharge and treatment of industrial waste, Press Release (2014), pp.1-8 (in Japanese).
- Takeuchi, M., Ultrasonic micromanipulation of micron-sized particles, *The Acoustical Society of Japan*, Vol.52, No.3 (1996), pp.203-209 (in Japanese).
- Tanaka, H., Wada, Y., Mizuno, Y., Nakamura, K., Non-contact dispensing of small droplets through ultrasonic levitation, *IEICE technical report. Ultrasonics*, Vol.112, No.366 (2012), pp.29-34 (in Japanese).
- Whymark, R. R., Acoustic field positioning for containerless processing, *Ultrasonics*, Vol.13 (1975), pp.251-261.
- Yasuda, K., Haupt, S. S., Umemura, S., Yagi, T., Nishida, M. and Shibata, Y., Using acoustic radiation force as a concentration method for erythrocytes, *Acoustical Society of America*, Vol.102 (1997), pp.642-645.