

エアテーブル選別機を用いた廃自動車シュレッダーダスト
(ASR)からの非鉄金属の回収におけるテーブル振動数の影響

古山 隆

東北公益文科大学総合研究論集第42号 抜刷

2022年1月31日発行

研究ノート

エアテーブル選別機を用いた廃自動車シュレッダーダスト (ASR)からの非鉄金属の回収におけるテーブル振動数の影響

古山 隆

1. はじめに

1960年の日本における自動車保有台数は約135万台であったが、その後、高度経済成長に伴う「マイカーブーム」により保有台数は年々増加し、2006年では7586万台となった。このころから、日本では自動車は「一家に一台」から「一人に一台」と言われるようになり、2019年の自動車保有台数は7841万台に達している状況にある¹⁾。新車販売台数は1960年に約37万台であったが、その後、「オイルショック」による一時的な減少は見られたものの翌年からはほぼ右肩上がりが増加し、バブル経済の絶頂期（1990年）では777万台の新車が販売された。その後、新車販売台数は徐々に減少していき、1998年以降は約600万台を推移していたが、「リーマンショック」が起きた2008年以降からはさらに新車販売台数が減少し、東日本大震災が起きた2011年では420万台まで低下した。2014年に556万台まで上昇したが、それ以降は大きな変化はなく500万台付近を推移している²⁾。廃車台数は「前年の保有台数+当年の新車台数 - 当年の保有台数」によって求められるが、廃車台数は新車台数と連動して増加しており、1998年以降は毎年500万台前後を推移していた。2007年から2009年までの3年間は廃車台数が新車台数を上回ったが、その後はまた500万台前後を推移している。

廃車には有価物である鉄、銅、アルミニウムなど金属が含まれていることから、通常は破碎して物理的な選別により有価物を回収する処理が行われる。有価物を回収した後に残る残渣は廃自動車シュレッダーダスト（Automobile Shredder Residue：ASR）と呼ばれており、1990年代にはその大量不法投棄が社会問題となったが、2005年以降は自動車リサイクル法が施行され、自動車メーカーはASRを適正処理することが義務付けられている。ASRには主に可燃物が含まれており、自動車工業会の調査³⁾によると樹脂33%、発泡ウレタン16%、繊維15%、ゴム7%、木3%、紙2%となっている。また、ASRには

鉄8%、ガラス7%、ワイヤーハーネス5%、非鉄金属4%も含まれている。

日本におけるASRリサイクルの研究は1990年後半から2000年頃にかけて行なわれ、主に乾留ガス化⁴⁾や溶融⁵⁾を行なう技術が開発された。これらの技術開発により、現在のASRリサイクルでは専ら溶融炉やセメント焼成炉を利用したサーマルリサイクルが適用されている。しかしながら、ASR中に残留している銅やアルミニウム等の非鉄金属は高温処理によりスラグ化してしまっており、結果的に、多大なエネルギーを利用して価値のある非鉄金属をスラグという価値の低い産物にしている状況にある。また、ASR中のガラスについても、それ自体は無害であるにもかかわらず高温で処理されてスラグ化されている。不燃物を高エネルギーで処理してスラグにすることは非効率であるので、ガラスについても事前に選別回収されることが望まれている。ガラスの比重は2.6程度であり、プラスチックやゴムよりも重いことから比重差を利用した比重選別で理論上は分離が可能である。しかしながら、構成物が多岐に渡ると回収物中にガラス以外のものが混ざり込んで品位を下げってしまうため、目的とする有価物を回収するためには比重差に加えて別の物性の違いを利用する必要がある。そこで本研究では、慣性力を加味して比重選別を行うエアテーブル選別機を用い、ASRから非鉄金属を選別回収する実験を行った。具体的には、ASRを空気選別機で選別した際の沈下産物(-2mm)を試料とし、その中に含まれる銅線、被覆線、銅板、アルミニウムおよびその他金属に対する最適なテーブル振動数を調べた。

2. 実験

2. 1 実験試料

本研究ではA社の廃自動車処理プラントにおいて発生しているASRを試料原料として用いた。同社ではASRをジグザグ式空気選別機によって軽質ASR(浮上物)と重質ASR(沈下物)とに分別している。沈下物は孔径35mmのトロンメルスクリーンによりふるい分けられ、+35mm産物は磁力選別機、高磁力選別機、渦電流選別機により鉄、ステンレス、アルミニウムが回収されている。-35mm産物は箱型の密閉式空気選別機により浮上物(軽質物)と沈下物(重質物)に分けられ、沈下産物の+15-6mm産物および+6-2mm産物はそれ

ぞれ金属回収工程と流動床式の乾式比重選別工程に送られて非鉄金属が回収されている。本研究では箱型の密閉式空気選別機沈下産物の-2mm産物をさらに1mmのふるいでふるい分けたふるい上産物を対象とした実験を行った。なお、試料には線状の銅、被覆線、粒状のアルミニウムとガラス、および様々な形状の金属が含まれていた。

2. 2 実験装置

本研究では乾式比重選別機的一种であるエアテーブル選別機を用いてASR(-2mm産物)の選別実験を行った。写真1(a)および写真1(b)にエアテーブル選別機の正面および上部を示す。本選別機では主に比重と摩擦抵抗を利用して選別が行われる。まず、デッキ上に投入された実験試料は、デッキ下から吹



写真1(a) エアテーブル選別機(正面)



写真1(b) エアテーブル選別機(上部)

き上げる風によって、低比重物は浮き、高比重物はデッキと接触を保つ。この時デッキ上ではエンドスロープに沿う振動が起きている。これによりデッキと接触している高比重物にはデッキの振動により慣性力が働き、エンドスロープ上側へ移動する。上昇流によって浮いている低比重物は、エンドスロープの傾きが作られていることでエンドスロープ下側へと流れ落ちる。つまり重いものは上側へ、軽いものは下側へと移動する。また、デッキにはサイドスロープの傾きも設けられているので、デッキ上の試料は投入口から排出口へと向かうことになる。エアテーブル選別機は送風ファンの周波数、サイドスロープ角度、デッキの振動数を変化させることによって、様々な条件下で選別を行うことが可能である。

選別実験の前に風速計を用いてデッキ上の風速と送風ファンの周波数を調べた。図1に風速の測定箇所を示す。測定箇所は図中にあるように12箇所に区分けし、①で表わされている箇所は「上段1」、⑫で表わされている箇所は「下段5」と命名した。送風ファンを30Hzから60Hzまで10Hz刻みで変化させた場合の風速の変化を図2から図5に示す。測定の結果、「上段2」の箇所が各送風ファンの振動数において最も風速が大きく、60Hzでは5.66m/sとなっていた。また、「2」および「3」の列では風速が大きく、「1」および「5」の列では風速が小さいことが分かった。

2. 3 実験方法

本研究では、スプリッターは出口幅(145cm)の下側から50cm、50cm、45cmの間隔で設置し、上側を上産物、下側を下産物、中央を中間産物とした。また、リップル(高さ3cm)は試料投入箇所Aから35cmおよび55cmの位置に図6にあるように設置した。実験は試料約600gを6秒間隔で試料投入箇所Aに投入し、試料投入から60秒後にB、C、Dで上産物、中間産物、下産物をそれぞれ5秒間採取した。なお、エンドスロープ、サイドスロープおよび送風ファンの周波数はそれぞれ、6°、5°および60Hzに固定して実験を行った。

3. 実験結果および考察

3. 1 テーブル振動数の影響

各回収産物の重量割合に及ぼすテーブル振動数の影響を調べた結果を図7に

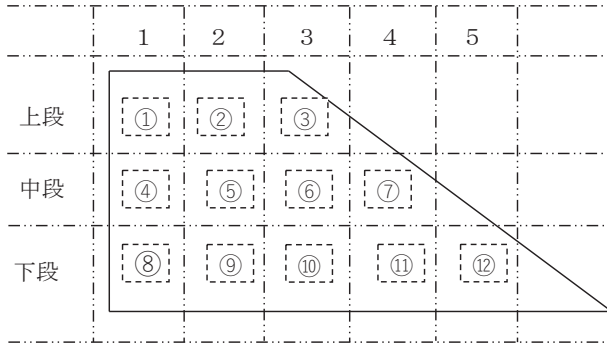


図1 デッキ上の風速箇所

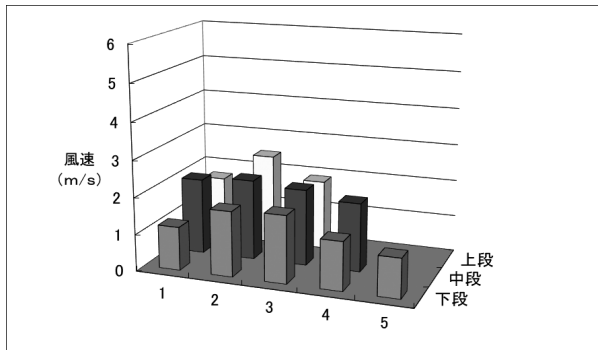


図2 送風ファンの周波数が30Hzの場合の風速分布

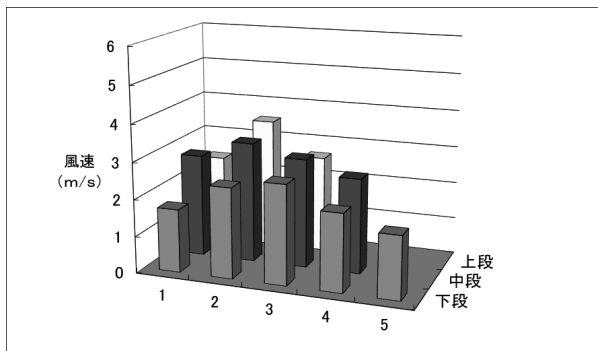


図3 送風ファンの周波数が40Hzの場合の風速分布

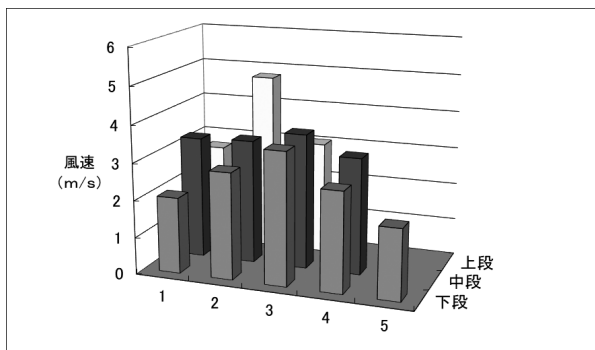


図4 送風ファンの周波数が50Hzの場合の風速分布

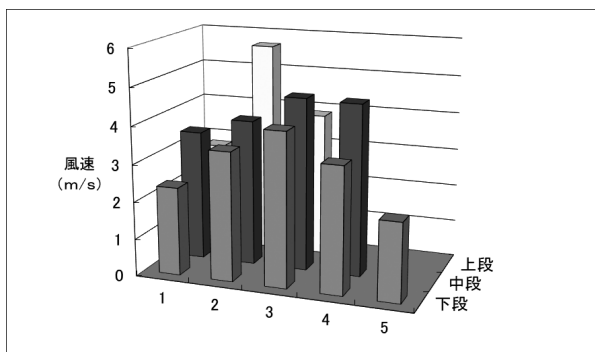


図5 送風ファンの周波数が60Hzの場合の風速分布

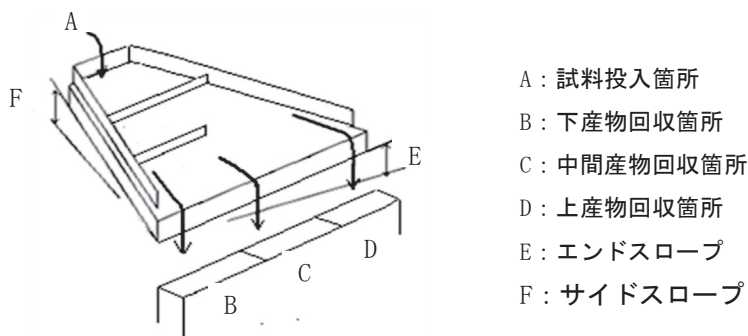


図6 回収産物およびリップルの位置

示す。また、上産物と下産物の写真をそれぞれ写真2 (a)および写真2 (b)に示す。テーブル振動数が40Hzの時、下産物の重量割合が99.7%を占めた。45Hzを超えると下産物が徐々に減少するが中間産物が徐々に増加した。なお、52.5 Hzになると、下産物は23.1%にまで減り、中間産物は73.7%にまで増え、上産物は3.2%となった。

銅線の重量割合に及ぼすテーブル振動数の影響を調べた結果を図8に示す。また、銅線の写真を写真3に示す。40Hzの時、下産物、中間産物、上産物の重量割合がそれぞれ、97.2%、2.8%および0.0%であった。42.5Hzを超えると、中間産物が増え始め、下産物が減り始めた。なお、上産物は47.5 Hzから増え始めた。52.5Hzになると、下産物は17.2%にまで減り、中間産物は67.7%にまで増えている。

被覆線の重量割合に及ぼすテーブル振動数の影響を調べた結果を図9に示す。また、被覆線の写真を写真4に示す。40Hzの時、下産物が重量割合の97.4%を占めたが、上産物には被覆線を見ることができなかった。42.5Hzを超えると、中間産物が増え始め、下産物は47.5Hzから減り始めた。なお、上産物は50Hzから増え始めた。52.5Hzになると、下産物は16.5%にまで減り、中間産物は65.9%にまで増えている。これらのことから、被覆線は銅線とほぼ同じような重量割合の変化が見られた。これは被覆線の形状が似ているためであると考えられる。

銅板の重量割合に及ぼすテーブル振動数の影響を調べた結果を図10に示す。また、銅板の写真を写真5に示す。40Hzの時、下産物が重量割合の93.3%を占め、上産物は見ることができなかった。42.5Hzを超えると、中間産物が増え始め、下産物が減り始めた。これまでと同様に、上産物は50Hzから増え始める。52.5Hzになると、下産物は11.5%にまで減り、中間産物は65.4%にまで増えている。銅板は銅線と比較して下産物における重量割合が直線的に減少した。空気抵抗を受けにくい銅線の細い形状と空気抵抗を受けやすい銅板の平たい形状が影響していると推察される。

アルミニウムの重量割合に及ぼすテーブル振動数の影響を調べた結果を図11に示す。また、アルミニウムの写真を写真6に示す。40Hzの時、下産物が重量割合の99.3%を占め、上産物には見ることができなかった。42.5Hzを超え

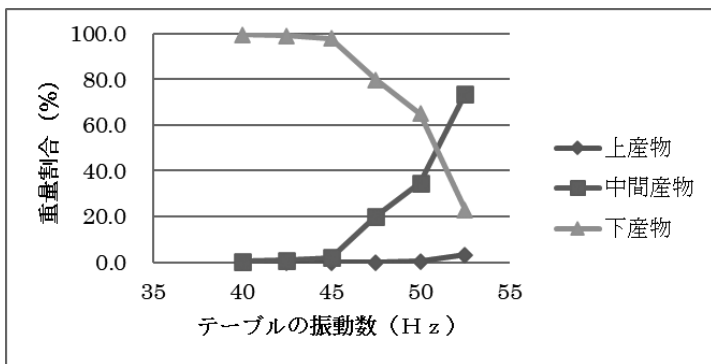


図7 各産物の重量割合とテーブル振動数の関係

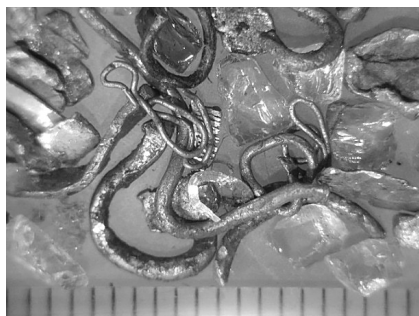


写真2 (a) 上産物

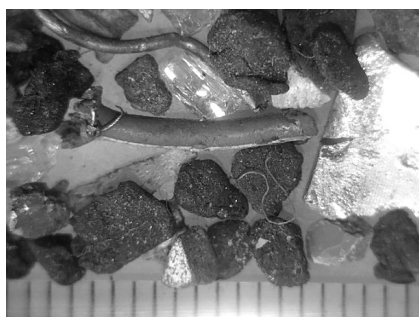


写真2 (b) 下産物

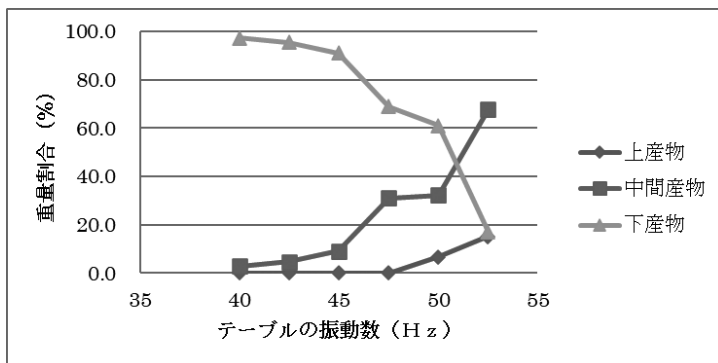


図8 銅線の重量割合に及ぼすテーブル振動数の影響



写真3 銅線

ると、中間産物が増え始めるとともに下産物は減り始め、上産物は52.5Hzから増え始めた。52.5Hzになると、下産物は15.7%にまで減り、中間産物は78.1%にまで増えた。

銅線、被覆線、アルミニウムのグラフを比較すると、中間産物、下産物のグラフは同じような形になっている。しかし、銅線、被覆線における上産物が47.5Hzから増えているのに対して、アルミの上産物は50Hzから増え始めた。アルミニウムの場合、形状が丸く転がりやすいため、テーブル振動数を大きくしても上産物側に移動しにくいと考えられる。

その他金属（銅線、被覆線、銅板、アルミニウム以外の金属）の重量割合に

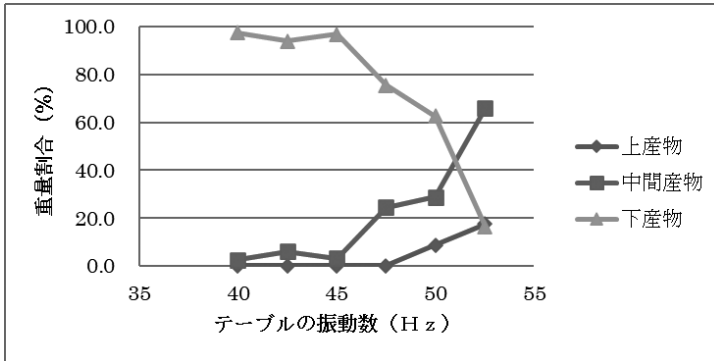


図9 被覆線の重量割合に及ぼすテーブル振動数の影響



写真4 被覆線

及ぼすテーブル振動数の影響を調べた結果を図12に示す。また、その他金属の写真を写真7に示す。その他金属の場合、これまでの構成物の重量割合の変化とは異なった挙動を示した。これはサンプル数が少ないため、規則性が見いだせない結果になったと考えられる。

ガラスの重量割合に及ぼすテーブル振動数の影響を調べた結果を図13に示す。また、ガラスの写真を写真8に示す。ガラスはアルミニウムと似たような重量割合の変化となった。また、ガラスの上産物はテーブル振動数を変化させても重量割合がほぼ0.0%となった。これは、ガラスの形状がアルミニウムよりも丸いため、テーブル振動数を上げ、力が更に加わっても、上産物側に上がって

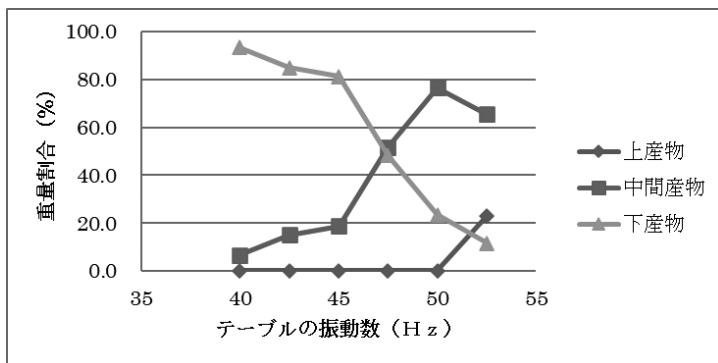


図10 銅板の重量割合に及ぼすテーブル振動数の影響

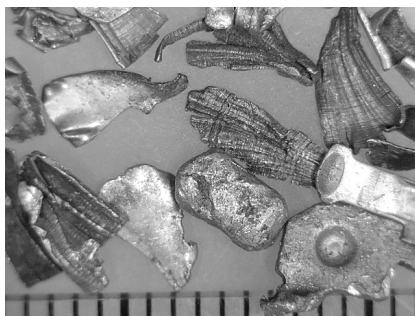


写真5 銅板

いかなないと考えられる。

ガラス以外の非金属の重量割合に及ぼすテーブル振動数の影響を調べた結果を図14に示す。また、ガラスの写真を写真9に示す。40Hzの時、下産物が重量割合の99.4%を占め、上産物はほとんど見ることができなかった。42.5Hzを超えると、中間産物が増え始め、下産物は減り始めている。なお、上産物は50Hzから増え始める。52.5Hzになると、下産物は44.3%にまで減り、中間産物は47.4%にまで増えている。

3. 2 選別成績と振動数テーブルの関係

本研究では、選別成績を表す指数としてニュートン効率を用いた。ニュート

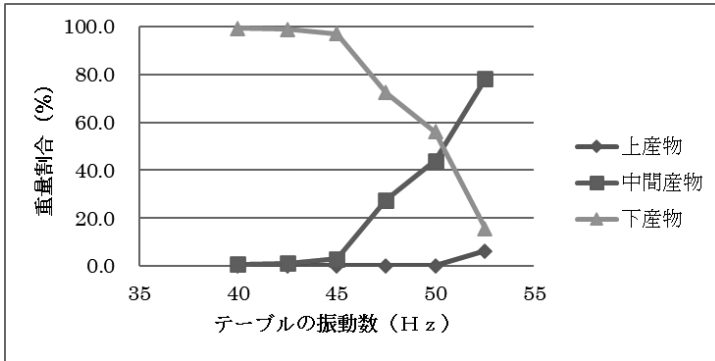


図11 アルミニウムの重量割合に及ぼすテーブル振動数の影響

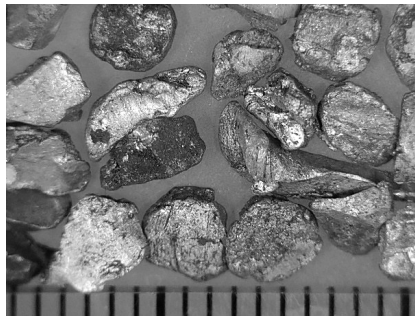


写真6 アルミニウム

ン効率は2成分混合物の分離の度合いを示す効率として使用され、有用成分回収率から不用成分残留率を引いた値で表される。なお、ニュートン効率100%は完全分離を示す。

試料 $F(g)$ をエアテーブル選別機で選別し、精鉱（上産物） $C(g)$ と尾鉱（下産物） $T(g)$ を得たとする。目的とする各構成物の品位を $f(\%)$ 、 $c(\%)$ および $t(\%)$ とすると物質収支より次式が成り立つ。

$$F = C + T \quad \dots \dots (1)$$

$$fF = cC + tT \quad \dots \dots (2)$$

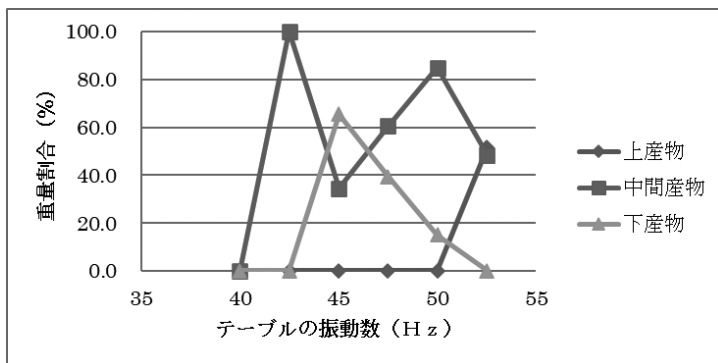


図12 その他金属の重量割合に及ぼすテーブル振動数の影響

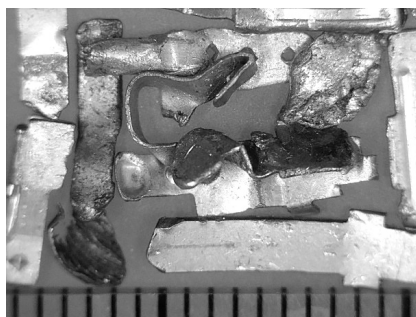


写真7 その他金属

有用成分（精鋳）の回収率を R_a (%)、不用成分（尾鋳）の回収率を R_b (%)とすると、 R_a (%)と R_b (%)は次のように表すことができる。

$$R_a = \frac{cC}{fF} \times 100(\%) \quad \dots \dots (3)$$

$$R_b = \frac{tT}{fF} \times 100(\%) \quad \dots \dots (4)$$

ニュートン効率 η は有用成分の回収率から不用成分の回収率を引いた式(5)となる。

$$\eta = R_a - (1 - R_b) = R_a + R_b - 1 \quad \dots \dots (5)$$

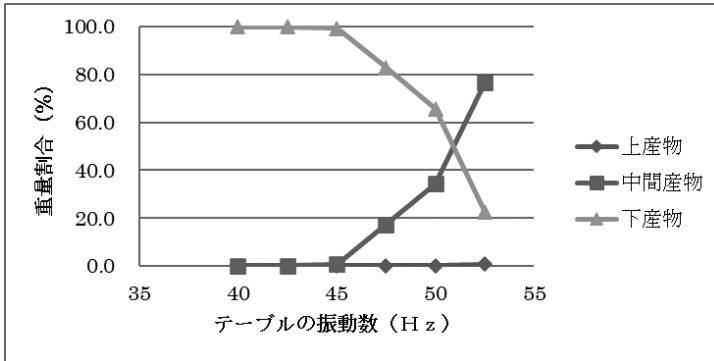


図13 ガラスの重量割合に及ぼすテーブル振動数の影響

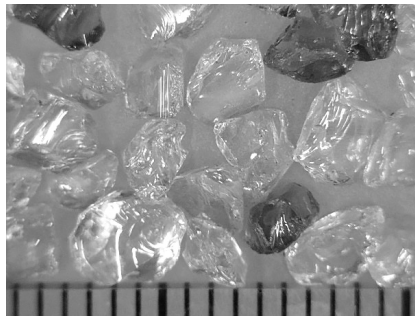


写真8 ガラス

式(5)を用いて、有用成分を①全ての金属、②銅線・被覆線、③銅線・被覆線・銅板・その他金属の3つの組み合わせでニュートン効率を求めた。その計算結果を図15に示す。計算の結果、有用物を③銅線・被覆線・銅板・その他金属を回収物とした場合、ニュートン効率が52.0%と最も高いことがわかった。

4. おわりに

本研究では、ASRリサイクルの高効率化を図るため、乾式比重選別機であるエアテーブル選別機を用いてASRから非鉄金属を選別回収する実験を行った。具体的には、エアテーブル選別機のエンドスロープ、サイドスロープおよび送

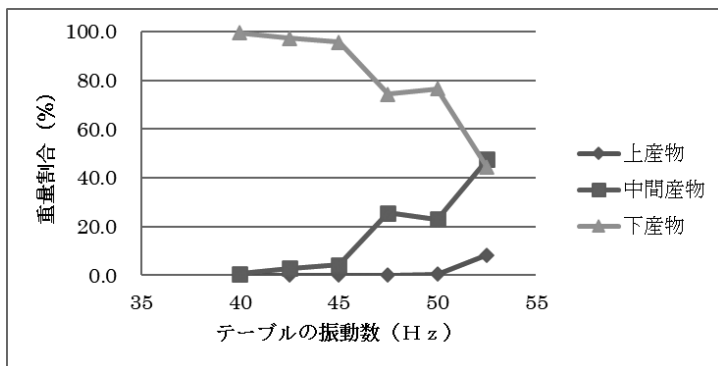


図14 非金属の重量割合に及ぼすテーブル振動数の影響



写真9 非金属

風ファンの振動数はそれぞれ、6°、5°および60Hzに固定し、各回収産物の重量割合に及ぼすテーブル振動数の影響を調べた。その結果、40 Hzの時に下産物の重量割合が99.7%を占めたが、42.5Hzを超えると下産物が徐々に減少することが分かった。また、中間産物は52.5Hzになると、重量割合が73.7%にまで増えることが分かった。さらに、有用成分を銅線、被覆線、銅板、その他金属としてニュートン効率（選別成績）を計算し、そのテーブル振動数との関係を調べた結果、テーブル振動数が52.5Hzの時にニュートン効率は52.0%と最も高い数値を示すことが分かった。

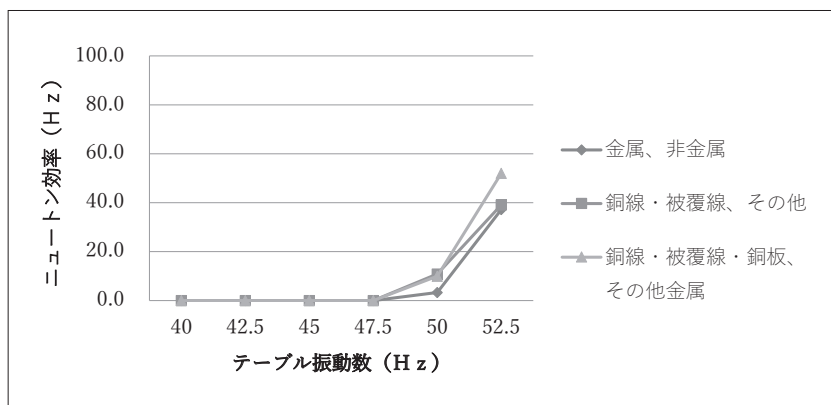


図 15 有用成分を変化させた場合のニュートン効率とテーブル振動数の関係

参考文献

- 1) 一般社団法人自動車工業会ホームページ：日本の自動車産業 四輪車 保有・普及率, https://www.jama.or.jp/industry/four_wheeled/index.html (2021年12月7日参照)
- 2) 一般社団法人自動車工業会ホームページ：日本の自動車産業 四輪車・販売, https://www.jama.or.jp/industry/four_wheeled/index.html (2021年12月7日参照)
- 3) Syuji IIDA : “Development of Batch Type Dry Distillation / Gasification Technology for ASR (Automobile Shredder Residue) by JAMA”, JIDOSHA-KENKYU, 30, 49-54(1998)
- 4) 堀井光雄他：自動車研究, Vol.20, p.603-606, 1998
- 5) 加藤涼一他：自動車研究, Vol.23, p.662-667, 2001