ドラム型衝撃式破碎機による基板からの部品剥離機構の 検討および DEM シミュレーション

Investigation and DEM Simulation for Part Detachment Process of Printed Circuit Board in a Drum-type Impact Mill

綱澤 有輝^a, 所 千晴^b, 大和田 秀二^b, 酒井 幹夫^c, 村上 進亮^c

Yuki Tsunazawa, Chiharu Tokoro, Shuji Owada, Mikio Sakai, Shinsuke Murakami

Received 14 November 2011; Accepted 1 February 2012

The mechanism of part detachment and board breakage process in a drum-typed impact mill to recover valuable metals by removing components from printed circuit boards (PCBs) was investigated. Experimental results using test PCBs showed that parts detachment was enhanced by the increase of input number of PCBs in the mill and board breakage was enhanced by the increase of rotational speed of the agitator. DEM simulation results using spherical particles model showed that board breakage was achieved by the collision of boards with drum wall and agitator, and part detachment was achieved by the interaction between PCBs.

To simulate part detachment and board breakage process more briefly, particle-based rigid body model, in which model PCB geometry was constructed consisting of bonded particulates, was included to DEM simulation. Simulation results showed that board breakage was obtained from the impact of boards with the drum wall and part detachment was obtained from the collision of the boards with each other. These simulation results were successfully corresponded to experimental observations.

Keywords: Discrete Element Method (DEM), Rare metal recycling, Wasted printed circuit board, Impact mill

1. 緒 言

近年、レアメタルに対する供給不安が高まっている。電子機器製造に不可欠なレアメタル資源の確保は、日本の製造業にとって喫緊の重要課題であるが、リサイクリングの推進は、その対策の1つとして重要

視されている¹⁾。これは、電気・電子機器の一大消費国であるわが国において、これらを有効にリサイクルすることにより、天然資源の延命と持続的な資源循環型社会の実現を目指すという、いわゆる「都市鉱山」の概念である²⁾。

現在、世界中で年間2-5千万トンもの使用済み電気・電子機器(WEEE: Waste Electrical and Electronic Equipment)が廃棄されており、その量は年々増加している^{3, 4)}。WEEEに含まれるプリント基板(PCBs: Print Circuit Boards)は、国内で年間1500万m²生産されており、密度換算すると年間約4万トンの生産量と推定される⁵⁾。PCBsには、抵抗、コンデンサ、IC、コイルなどの様々な部品が実装されているが、これらの部品には多種多様なレアメタルが含有されている。

^a 早稲田大学大学院 創造理工学研究科
Graduate School of Creative Science and Engineering, Waseda University

^b 早稲田大学 理工学術院
Faculty of Science and Engineering, Waseda University
(〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)
TEL 03-5286-3320
(3-4-1, Okubo Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555, Japan)

^c 東京大学大学院 工学系研究科
(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1) TEL 03-5841-6977
Graduate School of Engineering, the University of Tokyo
(7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan)

これまで、リサイクルや有害物質の回収を目的として、使用済みの PCBs に対する様々な処理法が研究されてきた⁶⁻⁸⁾。これらの研究は、乾式製錬法を用いた銅や貴金属の回収を主目的としている⁹⁻¹¹⁾。しかし、レア金属の多くは既存の乾式製錬プロセスでは回収することができないため¹²⁾、適切な前処理によってそれらを分離濃縮するプロセスが求められている。また、高効率で低負荷な金属の回収法として、湿式製錬法も提案されているが^{13, 14)}、これらのプロセスにおいても、前処理としての粉碎や選別が全体の効率を大きく左右する^{15, 16)}。

我々はいかねてより、廃小型家電や廃 PCBs を対象として、レア金属を分離濃縮するために適した破碎・選別法を検討している¹⁷⁾。その結果、タンタルやネオジム等のレア金属は特定の実装部品に集中して使用されており、それらを基板から剥離させて物理選別を施すことによって、濃縮が可能であることを確認している¹⁸⁾。また、幾つかの破碎機を用いて比較検討したところ、ドラム型衝撃式破碎機が粉化を最小限に抑え、基板から実装部品を剥離させるような特殊粉碎に適していることを確認している¹⁹⁾。しかし、その詳細な機構は未解明である。

本研究では、ドラム型衝撃式破碎機における PCBs からの部品剥離機構の解明を目的とする。初めに、手製の模擬電子基板を用い、部品の剥離機構に対する操作条件の影響を系統的に把握した。次に、離散要素法 (DEM: Discrete Element Method) を用いたシミュレーションにより、ドラム型衝撃式破碎機内の PCBs の挙動を詳細に把握することを試みた。DEM シミュレーションでは、従来の球形粒子を用いた考察に加え、微小な構成粒子を連結させて実際の PCBs の形状を模擬した粒子ベース剛体モデルを用いたシミュレーションも行い、より直接的な部品剥離機構の解明を試みた。

2. 実験方法

2. 1 破碎実験

2. 1. 1 実験試料

実在の廃 PCBs を使用した破碎試験では、試料にばらつきがあるため一般化が困難である。そこで本研究では、手製の模擬基板を作製し、実験試料とした。基板には 210 mm × 155 mm 両面ガラスユニバーサル基板 (FR-4, Picotec International, Taiwan) を使用し、10 μ F および 35 V セラミックコンデンサ (GP075F106Z, Taiyo Yuden, Japan) を 9 個、等間隔になるようには

Fig. 1 Schematic of drum-typed impact mill represented in the DEM simulation

んだ付けした。基板 1 枚あたりの質量は 92.8×10^{-3} kg であった。

2. 1. 2 実験装置

破碎試験にはドラム型衝撃式破碎機 (パーツセレータ, 平田機工株式会社) を用いた。本機は一般的な衝撃式破碎機とは異なり、対象物に対して直接的に衝撃力を加えるのみではなく、底部にあるかく拌翼によって対象物同士あるいは対象物を壁面に衝突させることにより破碎を促進させる構造となっている。破碎機のドラム直径およびドラム高さはともに 0.860 m である。ドラムは垂直に対して 30° 傾いており、底面に 2 個の突起を有するかく拌翼 1 枚と、側面に突起が 2 か所装備されている。Fig. 1 に、後述の DEM シミュレーション用に構築したドラム型衝撃式破碎機のモデルを示す。本機では、ドラムは回転せず、かく拌翼のみが回転する。かく拌翼の形状は、上からの断面は長方形であり、上方に向かって側面に傾斜を有し、横からの断面は台形となっている。

2. 1. 3 破碎実験方法

所定の枚数 (5-100 枚) の模擬基板を破碎機内に投入後、所定のかく拌翼回転速度 (300, 500, 1000 rpm) で 30 秒間、破碎を行った。破碎後、全量を回収し、それぞれの基板質量および基板上に残存した部品の数を計測した。後段の物理選別により容易に特定のレア金属を濃縮させるためには、基板はできるだけ破壊されずに、部品だけが剥離されることが好ましいため、本研究では基板破壊率も計測することにした。未破壊基板の定義は、破碎後の質量が 1 枚当たり 90×10^{-3} kg 以上である基板とした。これは、1 枚当たり 90×10^{-3} kg 未満の基板では、明らかに基板が破断された状態を確認することができたためである。

部品剥離率および基板破壊率の定義を次式に示す。

$$\begin{aligned} (\text{部品剥離率}) &= \frac{(\text{部品剥離数})}{9 \times (\text{基板投入枚数})} \\ &= \frac{9 \times (\text{基板投入枚数}) - (\text{部品残存数})}{9 \times (\text{基板投入枚数})} \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\text{基板破壊率}) &= \frac{(\text{破壊した基板枚数})}{(\text{基板投入枚数})} \\ &= \frac{(\text{基板投入枚数}) - (\text{未破壊の基板枚数})}{(\text{基板投入枚数})} \quad (2) \end{aligned}$$

2. 1. 4 破断エネルギー測定

基板からの部品の剥離および基板の破壊に要するエネルギーを得るために、万能試験機（オートグラフ AGS-10kNJ, 島津製作所）を用い、それぞれの試験片を作製して引張試験を行った。引張速度は 1.0 mm/min で一定とし、得られた破断荷重および破断時間より、破断エネルギーを算出した。

2. 2 DEM シミュレーション

2. 2. 1 球形粒子モデル

はじめに、Cundall²⁰⁾ によって提唱された従来のモデルに基づき、PCBs を球形粒子で模擬したシミュレーションを行った。接触モデルには Voigt モデルを用いた。計算負荷の低減のため線形ばねモデルを用い²¹⁾、ばね定数は仮想的な値としたが、予備シミュレーションにより、ばね定数の値は本研究で対象とした計算結果にほとんど影響しないことを確認している。粘性係数は、基板の落下試験によって得られた反発係数を満たすように決定し、摩擦係数は、傾斜させたスチール板上ですべり始める傾斜角から求めた値を用いた。このようにして決定したシミュレーション条件を **Table 1** に示す。

DEM シミュレーションでは、破砕機内に粒子を重ならないようにランダム発生させ、全ての粒子を自由落下させた後、かく拌翼を回転させ始めた。シミュレーションの発散を防ぐために、かく拌翼の回転数は徐々に増加させ、設定値に達してから十分に時間が経過し、粒子の運動エネルギーの総和がほぼ定常状態に達してからの値を考察に用いた。

Table 1 DEM simulation conditions in spherical particle model

Spring constant	(N/m)	4000
Dashpot coefficient	(N/m ²)	4.0
Friction coefficient	(-)	0.8
Diameter of particle	(m)	0.1
Number of particles	(-)	100
Mass of particle	(kg)	92.8 × 10 ⁻³

Fig. 2 Schematic of test PCBs represented in the DEM simulation using particle-based rigid body simulation

particle diameter (a) 2 mm
(b) 5 mm
(c) 10 mm
(d) 20 mm

本研究では、DEM シミュレーションにより、ドラム型衝撃式破砕機内の球形粒子挙動の把握と衝突エネルギーの算出を行った。DEM シミュレーションにおける衝突エネルギーの算出方法には幾つかの手法が存在するが²²⁾、本研究では、衝突開始時の運動エネルギーを次式により求めた^{23~25)}。

$$E_i = \sum_{j=1}^n \frac{1}{2} m v_j^2 \quad (3)$$

ここで、 E_i は粒子 i に作用する衝突エネルギー、 m は粒子の質量、 v_j は衝突開始時の粒子 j または壁面 j との相対速度、 n は粒子 i と衝突している粒子 j または壁面 j の総数である。

2. 2. 2 粒子ベース剛体モデル²⁶⁾

球形粒子を用いた DEM シミュレーションでは、そのままの形状で破砕機内の基板の挙動を詳細に再現することは困難であった。そこで、実際の基板挙動の把握と基板の破壊現象や部品の剥離機構の解明を目的として、1つの基板を多数の小さい粒子で構成するモデルを検討した。構成粒子径は一定とし、2, 5, 10 または 20 mm に設定して、構成粒子径が解析結果に及ぼす影響を評価した。粒子は格子状に配置し、基板部分を1層の粒子で構成した後、部品を模擬した構成粒子をその上に配置した。粒子ベース剛体モデルを用いた DEM シミュレーションで作成した基板モデルを **Fig. 2** に示す。また、基板1枚当たりの構成粒子数を **Table 2** に示す。個々の構成粒子の質量は、基板

Table 2 DEM simulation conditions in particle-based rigid body model

Spring constant	(N/m)	4000
Dashpot coefficient	(N/m ²)	4.0
Friction coefficient	(—)	0.8
Diameter of particle	(m)	0.002 0.005 0.01 0.02
Number of particles for board	(—)	8220 1302 336 80
Number of particles for part	(—)	15 15 8 2
Mass of board	(kg)	92.8×10^{-3}

Fig. 3 Results of grinding experiment for test PCB using drum-typed impact mill
(a) test PCB before grinding experiment
(b) unbroken PCB
(c) broken PCB

全体の質量が実験用模擬基板と同様の $92.8 \times 10^{-3} \text{ kg}$ となるように設定した。基本的な DEM パラメータは、Table 1 に既述の球形モデルを用いたシミュレーションと同様とした。模擬基板では、1つの基板上に9個のセラミックコンデンサを配置し、DEM シミュレーションにおいても構成粒子径に 2mm を用いた場合には部品数を9個としたが、構成粒子径に 5mm 以上を用いた場合には、部品を構成する粒子数を確保しつつ、基板上の部品の密度が高くなりすぎないように、部品数を5個とした。

3. 実験結果および考察

3. 1 破碎実験結果

Fig. 3 に、破碎実験前の模擬基板 (a) と、破碎実験後の基板 (b), (c) の様子を示す。基板 (b), (c) では、基板上の部品のほとんどが剥離している様子がわかる。写真 (b), (c) に見える黒い影は部品が付いていた跡であり、基板 (b) での部品残存数は1.5個（1つは半分欠けた状態で残存）、基板 (c) での部品残存数は

Fig. 4 Relationship between rotational speed of the agitator and part detachment, board breakage and difference between part detachment and board breakage
Input number of PCBs 100

Fig. 5 Relationship between input number of PCBs and part detachment, board breakage and difference between part detachment and board breakage
Rotational speed of the agitator 500rpm

0個となっている。破碎後の基板の多くは (b) に示す未破壊の状態であったが、一部は (c) のように破壊されているものも確認された。

Figs. 4, 5 に破碎後の部品剥離率と基板破壊率を示す。**Fig. 4** は投入枚数100枚の際のかく拌翼回転速度

Table 3 Results of tensile test for part detachment and board breakage

	Force (N)	Time (s)	Energy (J)
Part detachment	3.0×10	20	0.01
Board breakage	4.5×10^3	100	7.5

の影響を示したものであり、Fig. 5 はかく拌翼回転速度 500 rpm における投入枚数の影響を示したものである。これらの図には、基板が壊れることなく部品のみが剥離する最適条件を考察するために、部品剥離率と基板剥離率の差も示した。

Fig. 4 より、かく拌翼回転速度の上昇に伴い、部品剥離率と基板剥離率が共に上昇することが確認できる。しかし、部品剥離率に比べて、基板剥離率の方がかく拌翼回転速度の影響は大きい。これは、部品剥離に比べて基板破壊に要するエネルギーが大きいことに起因している。特に、1000 rpm での基板破壊率が他のかく拌翼回転速度に比べて非常に大きいことを鑑みると、本研究の目標である基板を破壊せずに部品を剥離させるための条件としては、500 rpm 程度が最適であると考えられる。

Fig. 5 より、投入枚数の増加に伴い、部品剥離率と基板破壊率が共に上昇することが確認できる。しかし、基板破壊率に比べて、部品剥離率の方が投入枚数の影響は大きい。これは、破碎機への投入枚数が増加すると、基板同士の相互作用および衝突回数が多くなり、それに伴い部品剥離が促進されているためであると考えられる。この結果より、本研究の目標である基板を破壊せずに部品を剥離させるための条件としては、ある程度投入枚数が多い方がよいことがわかる。100 枚以上の投入枚数における実験的検討は、今後の課題の 1 つである。

3. 2 破断エネルギー測定結果

Table 3 に部品剥離および基板破壊に対して得られた破断荷重および破断時間と算出された破断エネルギーを示す。結果より、基板破壊には部品剥離の 750 倍の破断エネルギーを要することがわかる。

万能試験機で得られる破断エネルギーは、準静的な条件下での値であり、高速でかく拌翼が回転するドラム型衝撃式破碎機内部での剥離および破壊機構とは異なるものと考えられるが、本研究では後述の DEM シミュレーションより得られたエネルギー値に対する考察への 1 つの参考値として測定を行った。なお、ここでは破断時間が比較的長く精度の高い実験が可能である引張速度 1.0 mm/min での測定結果を示したが、本研究では別途、引張速度 1.0-500 mm/min の範囲で同

Fig. 6 Results of DEM simulation using spherical particle model
Collision energy between
(a) particle and wall in normal direction
(b) particle and wall in tangential direction
(c) particle and particle in normal direction
(d) particle and particle in tangential direction

様の測定を行っており、この引張速度の領域では、部品剥離および基板破壊に関するエネルギー値が±10%の範囲内であることを確認している。

3. 3 球形粒子モデルを用いた DEM シミュレーション結果

上述の破碎実験における部品剥離の機構を詳細に解明するため、基板を球形粒子で模擬した DEM シミュレーションを行った。シミュレーションには Table 1 に示した条件を用いた。Fig. 6 に、シミュレーションより得られた衝突エネルギー平均値を示す。衝突エネルギーは、(a) 粒子・壁面間 (p-w) の法線方向、(b) 接線方向、および (c) 粒子・粒子間 (p-p) の法線方向、(d) 接線方向に分けて算出した。図より、粒子・壁面間 (p-w) が受けるエネルギーは、粒子・粒子間 (p-p) が受けるエネルギーよりもかなり大きいことがわかる。これを Fig. 4 の実験結果と比較すると、実験より得られた基板破壊率は、シミュレーションより得られた Fig. 6 の粒子・壁面間接線方向における衝突エネルギーのかく拌翼回転速度による変化の傾向とよく類似していることがわかる。我々は、比較対象としてボールミルを用いた場合の同様の実験とシミュレーションを行った結果を既に報告しているが²⁷⁾、ボール

ミルで基板を破碎した場合には、長時間の破碎でなければ基板は破壊されず、Fig. 3 (c) に示すような亀裂が大きく入った形式で基板が破壊されるのではなく、全体が粉状化することを確認している。さらに、ボールミル内の媒体を対象とした DEM シミュレーションでは、ドラム型衝撃式破碎機に比べて接線方向の衝突エネルギーが非常に小さいことも確認している。以上の事項は、ドラム型衝撃式破碎機による基板の破壊は、基板と壁面との接線方向の衝突が大きく影響していることを示唆している。

一方、Fig. 4 に示した実験結果では、部品剥離率は基板破壊率と異なり、かく拌翼回転速度に対して徐々に飽和するグラフ形状を示している。この形状を Fig. 6 のシミュレーション結果と比較すると、部品剥離率には粒子・壁面間法線方向の衝突または粒子・粒子間の衝突が関与しているのではないかと推察される。

ここで解析された衝突エネルギーは、全てが破碎に消費されるわけではなく、破断の形式には引張の他に圧縮、せん断など、種々存在するため、Table 3 に示した準静的な引張りに基づく破断エネルギーとの直接的な関係を論じるのは難しいが、ある程度の目安としての比較を行うことは可能と思われる。Table 3 より、部品剥離に要する破断エネルギーは 0.01J であるが、これを Fig. 6 に示した粒子・粒子間の衝突エネルギーと比較すると粒子・粒子間の衝突も十分に部品剥離に寄与し得ると推察される。

3. 4 粒子ベース剛体モデルを用いた DEM シミュレーション結果

3. 4. 1 構成粒子径の影響

Fig. 7 は、かく拌翼回転速度 500 rpm、投入枚数 10 または 20 枚の条件で、粒子ベース剛体モデルを用いた DEM シミュレーションより得られた衝突エネルギーの平均値とモデル構成粒子径との関係を示したものである。

構成粒子径の影響を検討するに当たり、構成粒子径 2 mm の場合には、模擬基板と同様に基板 1 枚につき部品を 9 個設置したが、構成粒子径 5 mm 以上の場合には、基板 1 枚につき部品 5 個を設置した。これは、事前の検討にて、部品 1 つあたりを構成する粒子個数があまりに小さくなると、部品が衝突を受ける機会にばらつきが生じることによって、シミュレーション結果への誤差が大きくなることがわかったためである。部品 1 個あたりの構成粒子個数をある程度大きくすると、構成粒子径 5 mm 以上では部品 1 個あたりの大きさが模擬基板に用いた実際の部品よりも大きくなるた

Fig. 7 Relationship between particle diameter and collision energy
Rotational speed of the agitator 500 rpm
input number of PCBs 10 or 20

め、部品個数を 5 個と実際よりも減少させることとした。

図より、いずれの投入枚数においても構成粒子径の増加によって、衝突エネルギーも増加している。しかし、構成粒子径 2 mm と 5 mm とでは、衝突エネルギー値にはほとんど相違が認められない。構成粒子径が小さくなるほど計算負荷が大きくなるという課題は有するものの、定量的な衝突エネルギー把握を目的とする場合には、実験で使用した基板や部品の厚みと同程度である構成粒子径 5 mm 以下を採用すべきであると考えられる。

しかし、構成粒子が大きくなっても、投入枚数 10 枚に比べて投入枚数 20 枚の方が衝突エネルギーが大きくなる傾向は構成粒子が小さい場合と一致していることから、衝突エネルギーを定性的に把握する目的においては、計算負荷の軽減の立場から、実際の基板や部品よりも大きい構成粒子を用いることも可能であると考えられる。

3. 4. 2 投入枚数の影響

Fig. 8 は、かく拌翼回転速度 500 rpm、構成粒子径 5 mm の場合に、粒子ベース剛体モデルを用いた DEM シミュレーションより得られた衝突エネルギーの平均値を示したものである。ここでは、衝突エネルギーを、基板の構成粒子が受けたエネルギーと部品の構成粒子が受けたエネルギーとに分けて計測した。結果より、基板は部品よりも大きい衝突エネルギーを受けていることがわかる。

図より、投入枚数の増加に対して、基板が受けるエネルギーは増加しているが、部品が受けるエネルギー

Fig. 8 Average of collision energy obtained from DEM simulation using particle-based rigid body model
Rotational speed of the agitator 500 rpm
particle diameter 5 mm

は20枚で最大となっている。これは、基板枚数の増加に伴って、基板同士の相互作用の機会は増加するが、1回当たりの衝突エネルギーはやや減少する傾向にあるのに対し、かく拌翼や壁面との衝突エネルギーは増加する傾向にあるためである。後述のように、部品の衝突には基板同士の相互作用による影響が強いため、結果として投入枚数に対して衝突エネルギーが単調増加せず、投入枚数20枚で最大値が得られたものと考えられる。

前述のように、ここで解析された衝突エネルギーは、全てが破砕に消費されるわけではない上、破断には引張り以外の形式が種々存在するため、Table 3に示した破断エネルギーとの直接的な比較は行えないが、ある程度の目安としての見ることは可能である。Table 3より、基板の破壊に要する破断エネルギーは7.5Jであったが、本解析により基板の構成粒子が7.5J以上の衝突エネルギーを受けた衝突回数の全体の衝突回数に対する割合を算出すると、投入枚数10枚では約5%となり、投入枚数20枚および50枚では約30%であった。この傾向は、Fig. 5に示した破砕実験において得られた基板破壊率が投入枚数に対して増加傾向にあることと一致している。

一方、Table 3より、部品剥離に要する破断エネルギーは0.01Jであったが、本解析により部品の構成粒子が0.01J以上の衝突エネルギーを受けた割合は、枚数によらず90%以上であった。このことから、本研究で用いたドラム型衝撃式破砕機は、部品剥離に十分なエネルギーを有していると考えられる。Fig. 5に示した破砕実験結果では、投入枚数の増加に伴い、部品剥離

Fig. 9 Number and energy of collision obtained from DEM simulation using particle-based rigid body model
rotational speed of the agitator 500 rpm
input number of PCBs 50
particle diameter 5 mm
B : board P : part A : agitator D : drum wall

率の増加が確認できるが、これは投入枚数の増加に伴って部品に作用する衝突エネルギーが増加したことによる効果よりも枚数の増加に伴って相互の衝突機会が増加した効果の方が大きいと考えられる。

3. 4. 3 ドラム型衝撃式破砕機における部品剥離機構の考察

Fig. 9は、投入枚数50枚、かく拌翼回転速度 500 rpm、構成粒子径 5 mm の場合に、粒子ベース剛体モデルを用いた DEM シミュレーションより得られた衝突回数と衝突エネルギーの平均値を示したものである。ここでは、基板 (B) と部品 (P) の他に、さらに衝突対象をかく拌翼 (A) とドラム壁面 (D) とに分けて、衝突回数と衝突エネルギーを計測した。衝突回数は、基板 1 枚当たりの回数である。ここで、Fig. 9における基板に対する衝突エネルギー (B-A, B-B, B-D) の平均値と部品に対する衝突エネルギー (P-A, P-B, P-D) の平均値は、Fig. 8における投入枚数50枚における基板への衝突エネルギーや部品への衝突エネルギーと等しい。

Fig. 9より、基板や部品が受ける衝突エネルギーは、直接的にかく拌翼から受けるよりも、ドラム壁面から受ける方が大きいことが確認できる。したがって、特に大きい破断エネルギーを要する基板破壊は、ドラム壁面に基板が高速で衝突することによる自生粉砕的な作用によるものが大きいと推察される。一方、部品においては、ドラム壁面から受ける力は大きいものの、その衝突回数は少なく、基板との衝突の方が衝突回数は圧倒的に大きい。したがって、小さい破断エ

エネルギーで生じる部品剥離は、主に基板との相互作用によって生じていると推察される。

4. 結 言

廃基板からのレアメタル分離濃縮を目的として、ドラム型衝撃式破砕機における部品剥離および基板破壊の機構を検討した。得られた結果を以下に示す。

- 1) 部品をはんだ付けした模擬基板を用いて破砕実験を行ったところ、部品剥離率および基板破壊率は、かく拌翼回転速度の増加および投入枚数の増加に伴って、両者とも増加する傾向が確認されたが、かく拌翼回転速度は基板破壊率に対する影響がより大きく、投入枚数は部品剥離率に対する影響がより大きかった。
- 2) 引張試験より基板破壊および部品剥離に要する破断エネルギーを計測したところ、基板破壊には部品剥離の750倍もの破断エネルギーを要することがわかった。
- 3) 球形粒子モデルを用いた DEM シミュレーション結果を実験結果と比較したところ、基板破壊には壁面からの影響が大きいものに対して、部品剥離には粒子間の衝突も寄与している可能性が示唆され

た。

- 4) 粒子ベース剛体モデルを用いた DEM を用いたシミュレーションより、投入枚数の増加により、基板が受ける衝突エネルギーは増加し、このことが基板破壊率の増加を招いていることが確認された。また、基板破壊を生じさせるような大きな衝突エネルギーは、ドラム壁面との自生粉碎により生じていることが明らかになった。
- 5) 粒子ベース剛体シミュレーションより、ドラム型衝撃式破砕機は部品剥離に十分なエネルギーを有しており、投入枚数の増加等の衝突機会を増やすことが、部品剥離率の増加につながることを確認された。また、部品剥離には基板との相互作用が重要な役割を果たしていることが確認された。

[謝 辞]

本研究の一部は平成22～23年度環境研究総合推進費補助金 (K22028, K2320) により遂行されたものであり、ここに謝意を表す。また、本研究の一部は平成22～23年度 JOGMEC 希少金属資源開発推進基盤整備事業の委託研究により遂行されたものであり、ここに謝意を表す。

References

- 1) METI: Sogo shigen energy chosakai kogyo bunkakai siryo, <http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g61120a04j.pdf> (2006)
- 2) Nanjyo, M.: "Urban mine, new resources for the year 2,000 and beyond", *Bulletin of the Research Institute of Mineral Dressing and Metallurgy, Tohoku University*, **43** (2), 239-251 (1988)
- 3) UNEP: "E-waste, the hidden side of IT equipment's manufacturing and use E-waste, the hidden side of IT equipment's manufacturing and use", Environment Alert Bulletin, <http://www.grid.unep.ch/product/publication/EABs.php> (2005)
- 4) Heart, S.: "Sustainable management of electric waste (e-waste)", *Clean*, **35**, 305-310 (2007)
- 5) METI: Yearbook of Machinery Statistics, 258 (2008)
- 6) Guo, J., J. Guo and Z. Xu: "Recycling of non-metallic fractions from waste printed circuit boards: A review", *J. Hazard. Mater.*, **168**, 567-590 (2009)
- 7) Huang, K., J. Guo and Z. Xu: "Recycling of waste printed circuit boards: A review of current technologies and treatment status in China", *J. Hazard. Mater.*, **168**, 399-408 (2009)
- 8) Lee, J., H. Song and J. Yoo: "Present status of the recycling of waste electrical and electronic equipment in Korea", *Resources, Conservation and Recycling*, **50**, 380-397 (2007)
- 9) Oishi, T., K. Koyama, S. Alam, M. Tanaka and J. Lee: "Recovery of high purity copper cathode from printed circuit boards using ammoniacal sulfate or chloride solutions", *Hydrometallurgy*, **89**, 82-88 (2007)
- 10) Cui, J. and L. Zhang: "Metallurgical recovery of metals from electronic waste: a review", *J. Hazard. Mater.*, **158**, 228-256 (2008)
- 11) Zhan, L. and Z. Xu: "Application of Vacuum Metallurgy to Separate Pure Metal from Mixed Metallic Particles of Crushed Waste Printed Circuit Board Scraps", *Environ. Sci. Technol.*, **42**, 7676-7681 (2008)
- 12) Nakajima, K., O. Takeda, T. Miki, K. Matsubae and T. Nagasaka: "Thermodynamic Analysis of Contamination by Alloying Elements in Aluminum Recycling", *Environ. Sci. Technol.*, **44**, 5594-5600 (2010)
- 13) Huang, Z., F. Xie. and Y. Ma: "Ultrasonic recovery of copper and iron through the simultaneous utilization of Printed Circuit Boards (PCB) spent acid etching solution and PCB waste sludge", *J. Hazard. Mater.*, **185**, 155-161 (2011)
- 14) Yang, H., J. Liu and J. Yang: "Leaching copper from shredded particles of waste printed circuit boards", *J. Hazard. Mater.*, **187**, 393-400 (2011)
- 15) Li, J., H. Lu, J. Guo, Z. Xu and Y. Zhou: "Recycle

- Technology for Recovering Resources and Products from Waste Printed Circuit Boards”, *Environ. Sci. Technol.*, **41**, 1995-2000 (2007)
- 16) Murugan, R. V., S. Bharat, A. P. Deshpande, S. Varughese and P. Haridoss : “Milling and separation of the multi-component printed circuit board materials and the analysis of elutriation based on a single particle model”, *Powder Technol.*, **183**, 169-176 (2008)
 - 17) Owada, S. and C. Tokoro : “Recycling technology of “rare metal” from wasted small household appliance”, *Chem. Eng.*, **2010-10**, 729-733 (2010)
 - 18) Koga, C., H. Kikutani, M. Goto, E. Matsunaga, S. Owada, C. Tokoro, T. Shiratori and T. Yumoto : “Concentration of “rare metal” from wasted cellular telephone and PCBs by “part” or “ground product” separation”, *Proc. MMIJ annual meeting*, **2**, 71-72 (2010)
 - 19) Kikutani, H., C. Koga, E. Matsunaga, M. Goto, S. Owada, C. Tokoro, T. Shiratori and T. Yumoto : “Experimental comparison of grinding method for mounted component and wasted PCBs”, *Proc. MMIJ annual meeting*, **2**, 69-70 (2010)
 - 20) Cundall, P. A. and O. D. L Strack : “A discrete numerical model for granular assemblies”, *Geotechnique*, **29**, 47-65 (1979)
 - 21) Tokoro, C., K. Okaya and J. Sadaki : “A Fast Algorithm for the Discrete Element Method by Contact Force Prediction”, *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **40**, 236-245 (2003)
 - 22) Park, J. and C. R. Wassgren : “Modeling the Dynamics of Fabric in a Rotating Horizontal Drum Using the Discrete Element Method”, *Particulate Sci. and Technol.*, **21**, 157-175 (2003)
 - 23) Mio, H., J. Kano, F. Saito and M. Ito : “Estimation of liner design in a tube mill by discrete element method”, *J. MMIJ*, **123**, 97-102 (2007)
 - 24) Sato, A., J. Kano and F. Saito : “Analysis of abrasion mechanisms of grinding media in a planetary mill with DEM simulation”, *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **44**, 186-190 (2007)
 - 25) Soda, R., J. Kano and F. Saito : “Analysis of effect of pin configuration on beads motion in a stirred mill by DEM”, *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **46**, 180-186 (2009)
 - 26) Tanaka, M., M. Sakai and S. Koshizuka : “Particle-based rigid body simulation and coupling with fluid simulation”, *Transactions of JSCEs*, No. 20070007 (2007)
 - 27) Tsunazawa, Y., N. Tsusaka, C. Tokoro, S. Owada, M. Sakai and S. Murakami : “Investigation and DEM simulation for part detachment process of printed circuit board in a drum-type impact mill”, *Proc. 47th Summer Symposium, J. Soc. Powder Technol.*, pp. 53-54 (2011)