

3K153009

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費補助金 総合研究報告書

中間処理技術の体系化を通したリサイクルの高効率化のための研究

(3K153009)

平成 27 年度～平成 29 年度

Organization of Comminution and Separation Technologies for More Efficient Recycling System

東京大学 村上進亮 (研究代表者)

早稲田大学 所千晴 (研究分担者)

平成 30 年 5 月

目 次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	1
2. 研究開発目的	2
3. 研究方法	2
(1) 使用済製品に関する情報収集と検討（項目 1a）	2
(2) 中間処理技術に関する情報収集と検討（項目 1b）	3
(3) データベース設計と内容について（項目 2）	3
(4) Critical Material の同定と評価項目の検討（項目 3, 4）	3
(5) DB を用いた使用済製品と中間処理技術のマッチングとその評価（項目 5）	3
4. 結果及び考察	4
(1) 使用済製品の発生量に関する情報	4
(2) 中間処理技術に関する情報収集とその補完	5
(3) データベースの設計とプロセス検索の流れ	6
(4) Critical Material の同定と評価項目の検討	7
(5) DB を用いたプロセス設計のケーススタディ	8
(6) 結果のまとめ	10
5. 本研究により得られた主な成果	10
(1) 科学的意義	10
(2) 環境政策への貢献	10
6. 研究成果の主な発表状況	11
(1) 主な誌上発表	11
(2) 主な口頭発表（学会等）	11
(3) 知的財産権	12
(4) 「国民との科学・技術対話」の実施	12
(5) マスコミ等への公表・報道等	12
(6) その他	12
7. 研究者略歴	12
II. 成果の詳細	13
II-1 中間処理技術と処理対象商品のマッチングに基軸を置いた 3R システム設計	13
[要旨]	13
1. はじめに	13
2. 研究開発目的	14
3. 研究開発方法	14
3.1 使用済み製品の発生量に関する情報収集	14
3.2 DB の設計	15
3.3 クリティカルマテリアルの同定とシステム評価項目の決定	15
3.4 使用済み製品に対する中間処理フロー設計の試行	15

4. 結果及び考察	16
4.1 使用済製品の発生量に関する情報	16
4.2 DB の設計	18
4.3 クリティカルマテリアルの同定とシステム評価項目の決定	19
4.4 使用済み製品に対する中間処理フロー設計の試行	20
4.5 結果のまとめに代えて：提案したフローの実現性	23
5. 本研究により得られた成果	24
6. 国際共同研究等の状況	25
7. 研究成果の発表状況	25
(1) 主な誌上発表	25
(2) 主な口頭発表（学会等）	25
(3) 知的財産権	25
(4) 「国民との科学・技術対話」の実施	25
(5) マスコミ等への公表・報道等	25
(6) その他	25
8. 引用文献	25
II-2 技術面側面から見た中間処理技術の類型化	27
[要旨]	27
1. はじめに	27
2. 研究開発目的	28
3. 研究開発方法	28
3.1 既存のデータの情報収集	28
3.2 実験とシミュレーションによる補完	28
4. 結果及び考察	32
4.1 既存情報の収集	32
4.2 実験とシミュレーションによる補完	32
5. 本研究により得られた成果	39
6. 国際共同研究等の状況	39
7. 研究成果の発表状況	40
(1) 主な誌上発表	40
(2) 主な口頭発表（学会等）	40
(3) 知的財産権	40
(4) 「国民との科学・技術対話」の実施	40
(5) マスコミ等への公表・報道等	40
(6) その他	41
8. 引用文献	41
III. 英文 Abstract	42

課題番号

I. 成果の概要

補助事業名 環境研究総合推進費補助金 循環型社会形成推進研究事業（平成 27 年度～平成 29 年度）

所管 環境省 及び 独立行政法人 環境再生保全機構

研究課題名 中間処理技術の体系化を通したリサイクルの高効率化のための研究

課題番号 3K153009

研究代表者名 村上 進亮（東京大学）

国庫補助金 14,064,000 円（うち平成 29 年度：4,105,000 円）

研究期間 平成 27 年 5 月 29 日～平成 30 年 3 月 31 日

本研究のキーワード 中間処理、資源効率、データベース、システム評価、排出量予測、費用便益、高効率化

研究分担者 所千晴（早稲田大学）

1. はじめに（研究背景等）

回収すべき素材としてのレアメタルへの注目の高まり、多様な製品を含む小型家電リサイクル制度が導入されたことなどを見るに、リサイクルはますます複雑になるばかりである。他方で SDGs のゴール 12 にマテリアルフットプリントの削減が明確にうたわれ、欧州はじめ世界中で資源効率の向上が望まれる中、3R 全体への期待は高まり続けており、これまでも大きな貢献を果たしてきたリサイクルについてもさらなる貢献が期待されることは間違いない。こうした中、リサイクルの高度化、高効率化をうたうなど旧来では回収しなかったような素材をリサイクルしていこうとする動きもある。

ここで我が国を見れば、技術力も、また実際の操業そのものも極めて強力な素材産業を持ち素材リサイクルに対するポテンシャルは非常に高いと考えられる。しかし、先にも述べたように使用済製品が多様化し、またその変化の速度も速まりつつある中、リサイクルシステムは極めて複雑なものへと変化しつつある。そして、中間処理、すなわち破碎・分離・選別技術が、この多様化する処理対象物を、回収を担う社会システムから我が国の誇る強力な素材産業へ適切な形に処理して渡す必要があり、その重要性は高まっている。しかし、そのリサイクル産業への実装については、必ずしも我が国は先進国とは言えない状況がある。

特に我々が問題であると認識している点は、実際には存在している中間処理技術が体系的に処理されておらず、これを網羅的に把握しているステークホルダーが存在していないという点にある。また、発生側の情報、すなわち誰の手元で、どのような使用済製品が、どのようなタイミングで、どのような量発生するのか、そしてそこにはどのような素材が含有されているのか、と言った情報についても十分に集まっているとは言いがたい。

この2つの情報を体系的に整理し、適切に組み合わせることでリサイクルシステムの高度化、効率化を図ることは可能であると考えられるが、それを実証して見せた事例は我々の知る限り存在しない。

2. 研究開発目的

前項に述べたような背景を踏まえ、本研究では大きく2つの開発目的を設定した。

まず、中間処理技術並びに使用済製品発生に関するデータベース構築である。技術についてであるが、特に単体分離を促進するための粉碎方法の選定に着目しこれをデータベース化、あわせて作成する選別技術のデータベースと組み合わせることで、処理対象物に対して適切な技術の選定を可能にする。さらに、実際の処理技術として社会に実装されていない基礎研究を見出す、逆に不足している基礎研究をあぶり出すことも可能である。このような整理を体系的に行った事例は他にはなく、非常に新規性の高く、さらに今後の研究・産業の発展に大きく寄与する研究であると言える。発生に関するデータとしては、市場投入量、製品寿命等を組み合わせることで発生を予測できるモデルを用意しつつ、そのために必要な情報をデータベースとして整理することを目的とする。ここで、可能であれば、消費者行動に関する簡易的なモデルを別途用意し、例えばとある製品について、現状であればどこに排出されるのか、と言った情報もあわせて構築することを追加的な目的として設定する。

データベース構築に続く2つ目の目的は、実際に、特に将来を見据えた技術と処理対象物のマッチングを行うことである。実際に急増が予想される処理対象物、回収すべき素材(Critical Material)を検討した上で、データベース化された中間処理技術とのマッチングを行うことで、今後のリサイクルシステムの高効率化を目指すと共に、今後必要となる中間処理技術を明らかにし、その技術開発の方向性を示唆する。

3. 研究方法

図1に本研究をいくつかの要素に分け、進捗を整理した図を示す。同時に研究代表者機関(東大)と分担者機関(早稲田)での役割分担も示すが、かなりの部分は共同作業によるものである。図に示したとおり大きく以下の6点に整理することが可能である。1) DB設計と整理の前段としての情報収集、結果的に不足する技術情報に関する事件、シミュレーションによる補填(主として使用済製品発生にかかるものをa、処理技術に関するものをbとする)2) DB設計と構築(a, bに対は前項と同様)3) Critical Materialの調査4) Criticalityだけではなくシステム評価を実施するための評価指標の同定5) DBを用いた使用済製品と中間処理のマッチング6) とりまとめである。これ以降はこのうち最後の点を除く5点について順に手法を説明する。

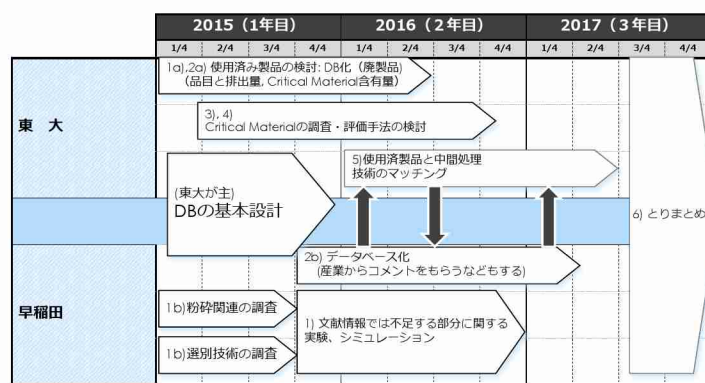


図1 研究項目と計画

(1) 使用済製品に関する情報収集と検討(項目1a)

本項目の基礎データを得るために、購入、保有、廃棄状況のデータが必要になる。まず研究対象とすべき使用済み製品については、耐久消費財を中心に考えることとした。文献調査等から、白物家電については先

行研究がそれなりにあること、自動車については車検制度もありそもそも比較的豊富な情報が得られることを踏まえ、相対的にこうした情報の少ない小型家電類については独自に調査を実施した。

調査手法としては、調査会社を通して web アンケートを実施、対象は全国とし、地方、性別、年齢別構成等は国勢調査に沿うようにサンプルを配布した。得られた使用年数サンプルについては 産業エコロジーにおける多くのマテリアルフロー・ストック分析において、Weibull 分布へのあてはめが行われており、今回もその例に倣うこととした。ただし、消費者の行動があまりに多様で既存の確率分布に必ずしも整合的でない場合も過去には報告されていることから、ノンパラメトリックなアプローチである Kaplan-Meier 法も同時に用い、結果を検討した。

(2) 中間処理技術に関する情報収集と検討 (項目 1b)

すべての処理技術に対して基本的に最低限必要な情報は、投入物と産出物、それぞれについての組成情報である。もし可能であれば、各プロセスに対して必要になるエネルギー投入、可能であれば金銭的な費用便益等の情報も蓄積されるべきである。既存文献や、研究担当者がこれまで自ら、もしくは学会活動等を通して触れてきた情報を改めて整理した後、不足がちな情報が何かを同定、不足しているものの中で重要だと考えられるものについては実験やシミュレーションをもって補完することとした。シミュレーション手法としては、研究分担者のもとで既にこの種のシミュレーションに対して十分な実績のある粉体シミュレーション手法である離散要素法 (Discrete Element Method (DEM)) を用いた。これ以上の詳細は結果の項に示す。

(3) データベース設計と内容について (項目 2)

詳細については結果の項に示すこととするが、2 研究機関での研究の円滑化、さらには将来的な公開の可能性を考え、SQL サーバーを構築しその中に本データベースを格納することとした。今回収納されるデータには守秘義務のある実際のプラントのデータも含まれること、今後のための検討要素としてセキュリティの確保が重要になることなどから、2 研究機関の担当者のみがアクセス可能な形で構築し、研究期間終了後は一時的にリモートアクセスを不可能とすることとした。

(4) Critical Material の同定と評価項目の検討 (項目 3, 4)

ここ 10 年来、レアアースに代表されるいくつかのレアメタルの供給不安などを背景に、鉱物資源に関してその Criticality を検討するような研究が多くなっている。そこで、評価において重要視すべき回収素材を考えるために、リサイクルにとって重要、という意味での Critical Material の同定を行い、それを踏まえた上で DB を用いたリサイクルシステムを構築した際の評価項目についての検討を行った。詳細は結果の項に示す。

(5) DB を用いた使用済製品と中間処理技術のマッチングとその評価 (項目 5)

DB に収納される中間処理技術を、投入される使用済製品について、半自動で検索、組み合わせることで中間処理システムの候補を自動的に導き出すことが可能である。しかし当然ながら、何らかの評価項目を定義し、それぞれ提案されたシステム候補を評価し決定する必要がある。本研究では、依然効率的な処理が一般化されていない小型家電類を対象にケーススタディを行い、DB から提案される複数のシステム候補について、前項で決定される複数の評価項目を用いて評価を試行することとした。

4. 結果及び考察

(1) 使用済み製品の発生量に関する情報

先に述べたとおり、耐久消費財が今回の検討対象であるが、文献調査等から、白物家電、車等の情報は比較的多いことが分かった。研究代表者がかつてその構築に関わった国立環境研究所のウェブサーバー内に設置済であるオンラインデータベース LiVES (Lifespan database for Vehicles, Equipment, and Structures)¹⁾は非常に網羅的なものであり情報のアップデートを試みてはいるものの、そこに収納される情報の多くは 2010 年以前に収集されたものであり、

そもそも小型家電がこうした検討の対象になる前のものであった。よって、小型家電に関して改めて情報収集を行い、最終的なケーススタディの中で反映することとした。ここではその代表的な結果として、携帯電話に関してパラメトリックな分析としてワイブル分布へのフィッティングを行った結果を図 2 に示す。携帯、デジカメ、携帯ゲーム機など典型的な高品位小型家電はやや大型出ようとも異なる PC に比べ、分布の立ち上がりが早く寿命が短いのみならず分布の形状も異なることがわかる。そこでこの携帯、デジカメ、携帯ゲーム機の 3 種の分布から使用済み品発生台数の予測を行なった結果も合わせて示した。携帯電話（スマホを含む）の発生量が減少傾向にあることが見て取れる。また参考として今後発生量の拡大が予想されるウェアラブル端末についてもデータを取得したが、サンプル数が少なく信頼の置けるデータとはならなかった。

使用年数については経時変化の懸念もある。つまり、陳腐化していない商品について特に言えることだが、使用年数が大きく経時変化するのであればこの種の調査は頻繁に必要である。他方で、そうで無ければそれほど頻繁に調査をする必要は無い。そうした意味で、未だ陳腐化していない財として、携帯電話・スマートフォンを検討対象として経時変化の検討を行った結果を図 3 に示す。2007 年に出荷された携帯電話・スマートフォンは(USE_2007)2010 年に出荷されたもの(USE_2010)に比べ、半減期が半年ほど短い。よってまだ経時変化の懸念はある。この時のアンケート調査では、回答者が過去に保有した複数の携帯電話・スマートフォンについて、使用開始時期と使用中止時期、廃棄時期の 3 点を聞いているが、ここで使用年数とは使用中止時期と使用開始時期の間の長さを示す。廃棄時期と使用開始時期の差が保有期間になる。ここで 2010 年使用開始分について、保有年数(POS_2010)は使用年数よりも大幅に長く、退蔵の多さが改めて示唆されることとなった。これらのことから、使用年数に関する調査はそれなりの頻度で引き続き行う必要があることが明らかになった。またこうした分布の信頼性についても検討をした結果、サンプル数に大きく依存することが明らかになっており、正確に廃棄台数を予測するのであれば頻繁な大規模調査が必要だと言える。本研究ではこうした調査を行って得られた結果の、ワイブル分布のパラ

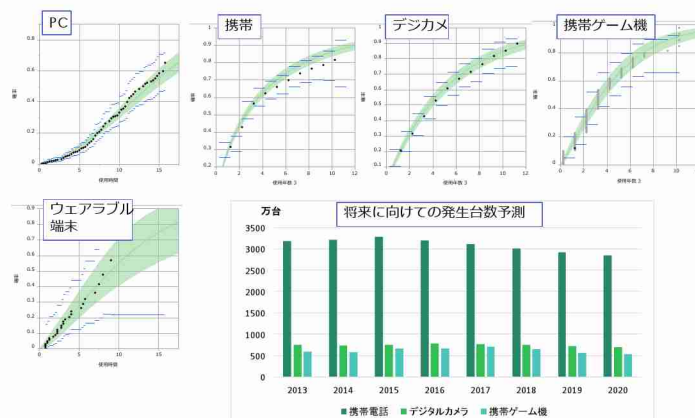


図2 得られたサンプルからの使用年数の分布とこれを用いた使用済み品発生台数の予測

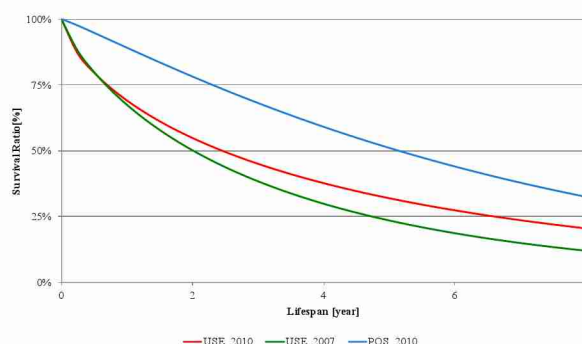


図3 携帯電話使用年数と保有年数の分布

メタ等が、各年の出荷台数とともにデータベースに格納されており、その結果がシステム評価に用いられることになる。アンケート調査に際して、消費者行動等についても調査を行ったがこれについては成果の詳細の項に示すこととする。

（２）中間処理技術に関する情報収集とその補完

研究の初期段階においては、研究分担者並びにその周辺の関係研究者が保有する研究レベルの情報を中心に整理を行い、次第に関係者に対してデータ提供の依頼をかけ現場のデータを得るというステップで進めた。これは、研究データについては詳細な組成等のデータがあわせて収集されているケースが多いことを期待しているものであるが、実際にはあまりに未整理でかつ残されているデータ項目も、当然ではあるがそれぞれの研究目的によって異なっていることが明らかになった。恐らく研究中には存在していたデータも多いと考えられ、その種の研究の際に残すべきデータのリスト、もしくはそのフォーマット等を作成し関係研究者で共有するなどすることで、かなりの貴重なデータが失われずに済むと考えられる。

情報収集の結果、特に今回最終的にケーススタディを行う小型家電類を想定した場合、情報が足りていないものが現場での使用実績が少なめであるドラム型衝撃式破砕機のようなものであることが分かった。そこで、実験とシミュレーションを試行し、その補完に努めた。この種の技術について、最終的な DB 利用に向けて重要な点がある。それは破砕機の設定とそれによる変化の想定が必要になる部分である。そこに資することを念頭に、実験では最適にはなりえないと思われるものも含め、パラメータを変化させ、結果を検討、シミュレーションを併用することで、パラメータ設定と回収率などの必要なパラメータの関係を同定することとした。実際に実験、シミュレーションの対象としたものは、高品位小型家電類から基板、すなわち高品位部位を選択的に脱離させる工程を行う手解体以外の手法として有望視されているクロスフローシュレッダー (CFS) である。これは縦型ドラムの底部に回転するチェーンが設置されており、破砕対象物はこのチェーンに跳ね上げられる際の衝突、跳ね上げられた後の対象物同士の衝突、そして壁面、底部との衝突などのエネルギーを受けることになる。投入物は小型家電類、産物は（出来るだけ破壊されていない）基板類とその他の部位の 2 つに分けて回収することを念頭に置く。なお、比較のため従来型のカッティングミルでスマートフォンの破砕試験を実施したが、基板回収率は著しく低く、かつ回収される基板が粉化（過破砕）してしまうことからその後の選別に支障を来すため、それ以上の実験、考察は行っていない。

実験においては、各種パラメータを変更しつつ基板回収率を測定した。DEM シミュレーションではそれぞれの実験を再現させ、破砕機内で対象物が受ける衝突エネルギーを計算し、基板回収率との関係を見た。考察の結果、図 4 のような関係を見出した。

つまり図中に回収曲線として示しているものが、横軸の衝突エネルギーと縦軸の基板回収率の最終的な関係であり、とある衝突エネルギーに至るまでは回収率は上昇し、その値を過ぎると悪化する。これは脱離曲線として示したエネルギーがかかるにつれて基板が製品から脱離する過程と、破壊曲線として示した脱離した基板が破壊されてしまう過程の組み合わせとして、過破砕されて

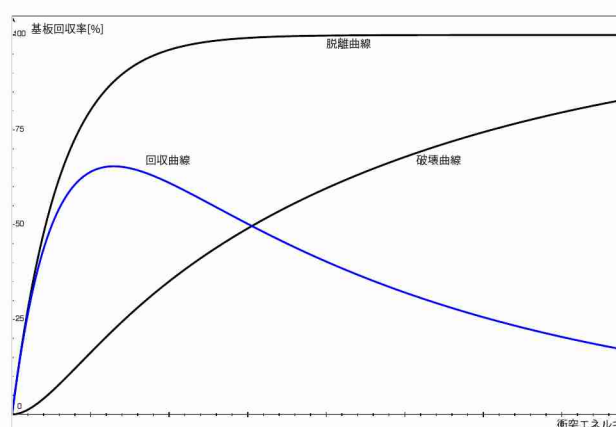


図 4 衝突エネルギーと基板回収率

いない基板が回収されるという一連の流れを表しているものと考えられる。基板脱離率 D 、基板破碎率 B 、基板回収率 R は、衝突エネルギー E と脱離速度定数 k_D 、破碎速度定数 k_B を用いて

$$D = 100(1 - \exp(-k_D E)), \quad (1)$$

$$B = D(1 - \exp(-k_B E)), \quad (2)$$

$$R = D - B \\ = 100(1 - \exp(-k_D E)) \exp(-k_B E) . \quad (3)$$

と表すことが出来る。一例として、スマートフォンと、低品位小型家電の代表格である電子レンジ、電気炊飯器の 2 パラメータを推定した結果を表 1 に示す。

表 1 速度定数の推定結果

	スマートフォン	電子レンジ	電気炊飯器
脱離速度定数 k_D	3.24×10^{-4}	1.77×10^{-4}	2.75×10^{-4}
破碎速度定数 k_B	4.54×10^{-5}	1.05×10^{-4}	1.23×10^{-4}

この結果は、これ自体新規性のある結果であるとともに、この衝突エネルギーが、破碎のパラメータに影響されることから、DB の中で実際に CFS を用いた実験、実操業データを掲載するだけでなく、必要に応じて実際に試したことの無い投入物についても仮想データを生成することを可能にする。これは CFS のように比較的新しく実データが少ない技術に対しては非常に重要な情報になる。

(3) データベースの設計とプロセス検索の流れ

データベースの設計の全体像を図 5 に示す。図 5 からわかるように、モノにかかる情報と技術にかかる情報から構成される。モノには種別が与えられておりその種別にラベルが与えられる。これがラベルリストの内容である。製品については製品リストを、それ以外のモノについてはこのリストが存在しており（後者については煩雑になるため、図中には掲載していない）、これら全てに固有の Item ID が付与されている。製品についてはさらに出荷台数、使用・保有年数情報のテーブルが用意され、必要に応じて廃棄台数の推計が行われる。技術側についてみれば、同じようにそのリストがあり、処理能力、消費電力といった情報が用意される。すなわち技術リストに掲載されるのは機械種と操業のパラメータ、ここに必要な費用情報（エネルギー消費等も含める）である。

最も重要である中間処理プロセスは、これらの情報を集約し、投入、産出、用いられた技術などの情報が集約されることになる。この中間処理プロセステーブルが本 DB の核でありこれ以外のテーブル、リストはこれらに対し必要な情報を付与するためのものである、と考えることができる。

次に中間処理技術に関して、データのカテゴリ別格納数の一覧を表 2 に示す。現時点で、中間処理技術に連動する形で掲載されている情報はこのようになっているが、例えば製品に関して使用・保有年数テーブルや出荷台数テーブルについては、ここに示したものの以外についても順次情報を格納している。

DB の内容はどのような項目からでも検索が可能ではあるが、ある使用済み品の中間処理過程を構築するのであれば、通常は最初段階の投入物、すなわち使用済み製品に対して用いることのできるプロセスを検索、そのプロセスの産物を再度投入として受け入れられることのできる次のプロセスを検索、という具合に検索が連鎖されていくことで、一つの連続したプロセス群が検索されることになる。

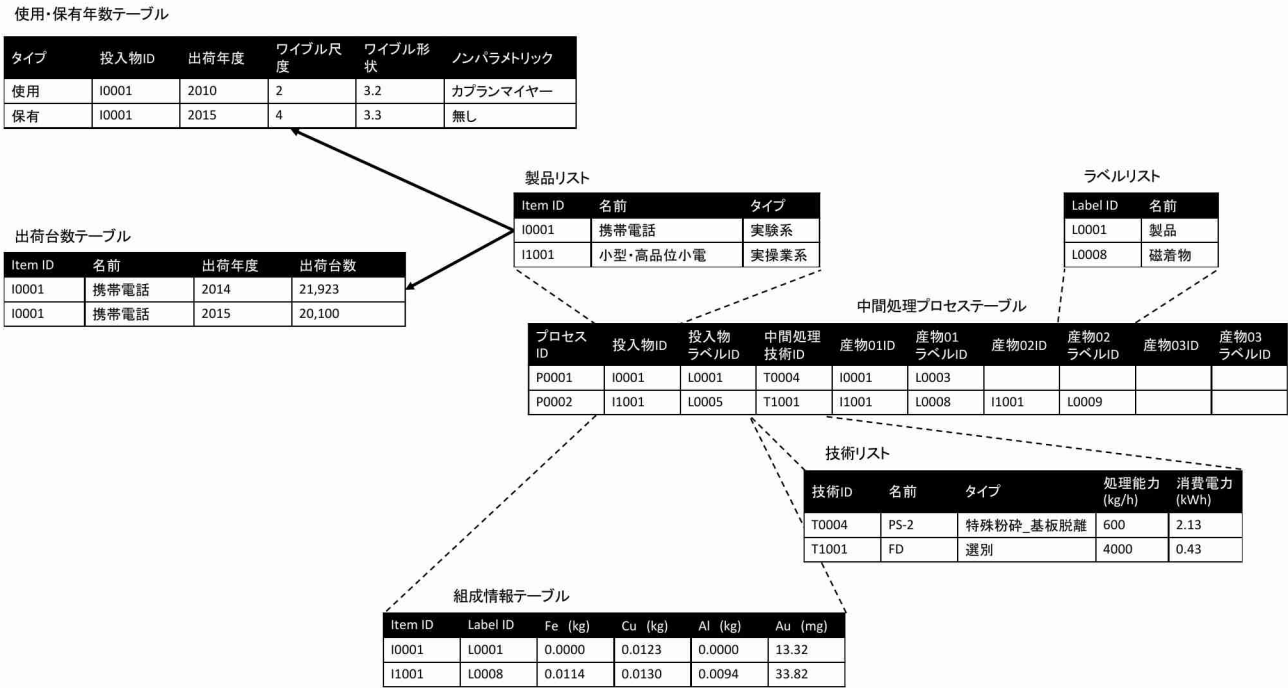


図 5 データベース設計の概要（データはイメージ、また各テーブル内の項目も全ては掲載していない）

表 2 収集されたデータのカテゴリ別件数

処理対象	処理後の産物	技術：大分類	技術：利用機械・手法
実作業系(4)	篩分けによるもの (15)	手解体(1)	手解体(1)
焼却系(1)	手解体産物(6)	一般粉碎(14)	一般粉碎(14)
実験系(11)	手解体産物(6)	特殊粉碎(11)	特殊粉碎(11)
	一般粉碎産物(1)	選別(12)	選別(12)
	特殊粉碎産物(4)		
	選別産物(10)		
	手解体産物(6)		

（４） Critical Material の同定と評価項目の検討

ここではリサイクルを推進することでその Criticality を削減することができるもの、という意味での Critical Material の同定を行う。Criticality とは図 6 に示すように、2 ないしは 3 の軸で考えられることが多い。²⁾ リサイクルの結果回収される素材が天然資源由来のものを完全代替できるのであるとすれば、図 6 における Z 軸で表現されている経済の脆弱性は由来が何であったとしても変わらず、環境影響については複雑な LCA を要することから、ここでは X 軸に現れる供給リスクの大きさのみを考える。例えば 2015 年の我が国に対する天然銅供給について供給リスクの高い順に国を並べた曲線を図 6（下）のように用意し 20 万トン をリサイクルで追加的にだいたいする場合、これによる供給リスク削減効果は図中の塗りつぶされた面積となる。縦軸に供給リスク指標値（World Governance Indicator³⁾ を用い、これを 0-100 に基準化した）を示しているがここで削減効果が 30 までしか至らない理由はリサイクル側の供給リスクが 30 あるとすればということになる。ここでいうリサイクルの供給リスクの定量化は極めて難しい課題であるが、例えば供

給量が天然資源の鉱山と違いある程度以上には制御不可能であることが最も大きなリスク要因であろう。何れにせよ一つの評価基準としてはリサイクルによる供給リスク削減効果を捉える。さらにリサイクルを実施する上でその主たる収入源としてリサイクルを支えている鉱種という視点を加えて決定した。

このような視点から最終的には、銅、金、PGM(特に小型家電についていえばパラジウム)を同定した。また逆に、現在リサイクル対象物に多く含有されているにも関わらず、経済性面で足を引っ張ってしまっているプラスチックはリサイクルシステムを促進すべきものとして重要であると考えているが、現状の評価の中で重点的にリサイクルすべきものではない。

続いてこの結果を踏まえて、どのような指標を用いてリサイクルシステムを評価していくかについてであるが、ここでは単純に有用素材回収量(率)、経済性、CO₂排出量(もしくはエネルギー消費量)、そしてリサイクルによって回避された天然資源由来の素材の関与物質総量(Total Material Requirement: TMR)とする。TMRについてはクリティカルリティ評価で回避してしまった環境影響に対して非常に粗い一次近似指標として機能すること、またクリティカルだと評価された貴金属ならびに銅を結果的に大きく評価することにつながるなどから採用した。この結果は必ずしもCO₂排出量と一致しないことも採用の理由である。そのほか回収量や経済性指標については、現場として必要不可欠な評価手法であることから可能な限り計算することとした。

(5) DBを用いたプロセス設計のケーススタディ

ここではモデルの活用に関するケーススタディとして、仮に、ある中間処理施設で実施されている現状の処理フローが図7(上)であるとしその改善を考える。このフローでは、スマートフォンやデジタルカメラといった小型・高品位の小型家電について、必ず取り外さなければならない電池のみを手作業で取り外している。電池以外の部分については、小型のため解体が困難であること、また高品位であることを理由として、そのまま銅製錬に投入されている。銅製錬プロセスでは銅および基板上の金と銀のみが回収され、それ以外は資源として回収されない。このフローを機械化することを考え、モデルを使用する。図7のフローを基準のフローとし、各プロセスについてデータベースに格納されているプロセスでの置き換え・追加を実施する形で検索を行う。検索されたフローと元のフローの比較評価にあたっては様々な指標が考えられるが、モデ

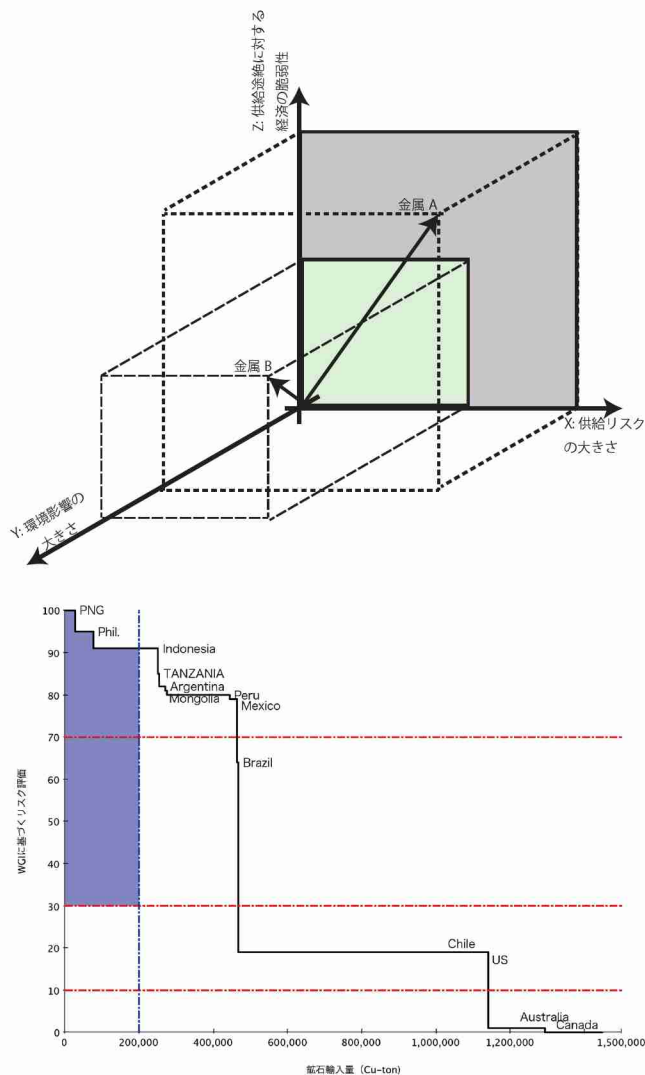


図6 一般的なクリティカルリティの定義(上)と
リサイクルによる供給リスク削減効果(下)

ルでは回収物重量、TMR、回収物金額、処理にかかるコスト、回収効率の五つを指標として用いた。なお、ここでは回収効率を、処理コストで回収物金額を除いたものと定義する。

DB 検索から最終的に提案された処理フローは図 7(下)のものとなった。フローの前半部では、手解体により電池を取り外した後、クロスフローシュレッダーを用いて特殊破碎を実施し、小型家電から価値の高い基板のみを脱離させている。基板は元の処理フローと同様に非鉄製錬プロセスへ投入され、基板以外の筐体部分についてはフローの後半部で示されている通り、粉碎により粒度を小さくした後磁力選別、気流選別、渦電流選別を経て鉄系金属、非鉄系金属、破碎残渣に選別される中間処理フローとしては一般的なフローが選択された。

二種類のフローを比較すると、必須である電池の取り外しには手解体が効果的であることがわかる。しかし、後でも述べるが、手解体には多額の人件費がかかり、フロー全体の処理コストを引き上げる要因となる。そこで、中間処理プロセスの前段階である排出プロセスにおいて電池があらかじめ取り外され、電池取り外し済小型・高品位小型家電が中間処理プロセスのインプットとなるフローを考える。具体的には、図 7(下)のフローのインプットが電池取り外し済となり、手解体のプロセスが外れたフローによって処理されることを考える。以降では、このフローを改良フローと呼んだ上で評価を行う。

元の処理フローと改良フローについて、五つの評価指標の値をそれぞれ比較した結果を、図 8 および表 3 に示す。筐体がすべて無価値物とされていた元フローと比較して、改良フローでは回収物重量が大きく増加している。一方、関与物質総量を見ると改良フローの方がわずかに大きいものの、大きな差はない。これは単位重量当たりの関与物質総量が大きい金や銀の回収量が元フローと比較して減少したためで、基板回収プロセスの機械化により元フローより基板回収率が下がっ

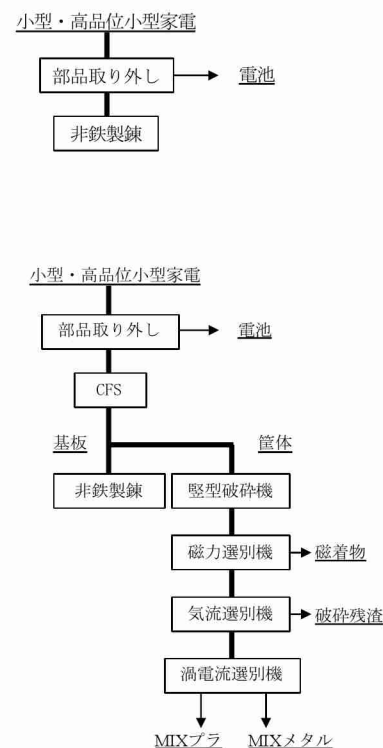


図 7 現状フロー（上）と提案フロー（下）

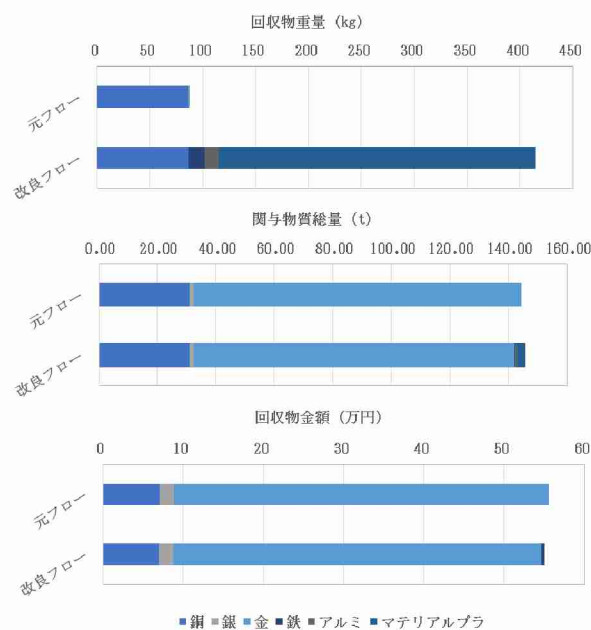


図 8 評価結果（回収物重量、TMR、回収物金額）

表 3 評価結果（処理費用と効率）

指標	元フロー	改良フロー
処理コスト(円)	129,397	2,024
回収効率	4.29	272.52

たことが原因と考えられる。回収物金額についても、価格の高い貴金属の回収量が落ちたために改良フローが元フローをわずかに下回った。

処理コストに着目すると、手解体プロセスがなくなり、人件費が大幅に削減された改良フローではコストが大きく減少した。回収効率についても改良フローが元フローを大きく上回った。

以上のことから、データベースを活用することにより、回収物金額はやや劣るものの、少ないコストで多くの利益を得ることが可能なプロセスを検索することに成功したと言える。

（６）結果のまとめ

前項に示した内容からもわかるように、DB の内容が充実すれば適切なフローの構築の半自動化は可能である。また、その結果からは、処理の機械化にあたって、手解体以上に効率的に取り外すことが難しい電池については、中間処理プロセスに投入される前に市民や市町村等によって取り外しが行われることが望ましく、結果的にはこれを促進するような制度的支援の必要性を示唆することなども可能である。つまりある種のソースセパレーションが望ましいことを示唆する結果ではあるが、使用年数調査と同時に行った消費者行動調査からは、小型家電類の分別排出に対しては後ろ向きな回答も見られており、電池のように取り外す理由が安全性などにある場合、これを担保するためには義務的な制度を持たせるか、やはり処理側で確実に行うことが必要だとも考えられる。何れにせよプロセスの自動検索、評価システムを用いることで、様々なパターンのプロセスを評価することができることから、その前後の社会システムとの連携に至る部分まで示唆を得ることができることは重要である。

＜参考文献＞

- 1) Shinsuke Murakami, et al.: "Lifespan of commodities, Part. I: A creation of database and its review", Journal of Industrial Ecology, Vol. 14 (4), pp. 598-612, 2010
- 2) 村上進亮, 小松孝裕 (2014) “明日を支える資源(138) <連載：製造業を支えるレアメタルの動向について①> クリティカルメタルとレアメタル” エネルギー・資源, 35(2), pp. 120-124
- 3) World Bank; World Governance Indicators. (<http://info.worldbank.org/governance/wgi/#home> 最終アクセス日 2018 年 3 月 20 日)

5. 本研究により得られた主な成果

（１）科学的意義

使用済み製品排出量予測のために実施した使用・保有年数分布の推定において、その情報を積み上げること自体重要な成果であるが、その信頼性に関する議論をきちんと行った事例はほぼなく、本研究の中でこれを実施したことはその最初の事例となっている。その結果が排出量に対してどの程度のインパクトを与えるのかの定量化まで実施したことの意味は、今後の同分野の研究展開に対して大きな示唆を与えるものである。（詳細は成果の詳細の項に記す。）これについてはすでに査読付き論文として公開済みである。

また、中間処理技術に関して、CFS を題材とし、実験の結果とシミュレーションから得られるエネルギー量の組み合わせから、基板脱離機構を解明、実際に実験しないとしてもある程度のパラメタ設定ごとの基板回収率を予想可能としたことも新しい成果だと言える。これについては現在投稿中である。

（２）環境政策への貢献

今回、小型家電を題材としたケーススタディを行なったが、これは小型家電が施行後 5 年の最初の見直しを迎えていることを考えれば重要な点である。中間処理の効率化は小型家電リサイクルの最大の課題の一つ

であるが、本研究が提案するような、実際に処理をすることなくある程度のプロセスを仮想的に組み立て、これを評価するシステムは、その検討に際して極めて重要なものとなろう。

さらに、使用済み製品の排出量予測も制度にとっての意味は極めて大きい。現在小型家電リサイクル制度は、制度制定時の回収量目標を達成することができていないが、実際には目標設定時の想定よりも排出量がかなり少ないことが指摘されており、その精緻化とそれに基づく目標値の検討が必要不可欠である。

<行政が既に活用した成果>

研究代表者（村上）は産業構造審議会産業技術環境分科会廃棄物・リサイクル小委員会 小型家電リサイクルWG、中央環境審議会循環型社会部会小型電気電子機器リサイクル制度及び使用済み製品中の有用金属の再生利用に関する小委員会両委員会の委員として、両省と密に連携を取る立場にあるが、本PJからの研究成果は頻繁に環境省担当者に伝達し、利用いただいているところである。また、産業構造審議会産業技術環境分科会廃棄物・リサイクル小委員会については、家電リサイクル、自動車リサイクルともにWGの委員を務めており、直接のケーススタディは行わないものの、こうした研究から得られた知見は審議会の場やその前後の関係者との意見交換の場などで常に役立てている。

<行政が活用することが見込まれる成果>

先にも述べた通りであるが、これからまさに始まろうとしている小型家電リサイクル制度の5年見直しの場において、中間処理技術に関する知見や、使用済み製品排出量の予測値はそのまま利用可能なものとなる。また今回提案している評価手法についても、その議論の中で大いに役立つと期待されるものである。

6. 研究成果の主な発表状況

（１）主な誌上発表

<査読付論文>

- 1) Shinsuke Murakami, Haruhisa Yamamoto, and Masahiro Oguchi, *Procedia CIRP*, 61, 140-145, (2017)
Uncertainty in lifespan estimation and its potential impacts on our social system.

（２）主な口頭発表（学会等）

- 1) Y. Tsunazawa, C. Tokoro, S. Owada. "Application of DEM Simulation on Comminution Printed Circuit Boards in Drum Type Agitation Mill". APT 2015 (Sep. 15-18, Seoul, Korea). 2015.
- 2) Shinsuke Murakami. "Critical Metals and Recycling". World Engineering Conference and Convention (Nov. 29th - Dec. 2nd, Kyoto, Japan) 2015.
- 3) Y. Tsunazawa, S. Fukui, C. Tokoro. "Investigation of comminution process of e-waste in drum type agitation mill using the discrete element method". 40th International Conference & Exposition on Advanced Ceramics & Composites (Jan. 24-29, Florida, USA). 2016.
- 4) H. Yamamoto: "Consumer behaviors of small-size WEEE use and disposal" ISIE SEM-AP Abstract Book, p. 103-104. (Third Prize in Poster Competition)
- 5) 福井将、綱澤有輝、松岡光昭、所千晴、村上進亮：「DEMシミュレーションを用いた破碎による廃小型家電からの基板回収挙動の予測」, エコデザイン・プロダクト&サービスシンポジウム2016, 2016年12月7日, p.163-164, P-16. (優秀賞受賞)
- 6) 高橋裕也、村上進亮：「供給障害事象に基づく鉱物資源の供給リスク指標開発」, 第12回日本LCA学会研究発表会, p. 72-73

- 7) Mei Nagase, G.Granada, S.Fukui, C.Tokoro, S.Murakami, " Prediction formula for determination of the best condition to remove printed circuit boards from home appliances using DEM simulation" IUMRS-ICAM2017, 京都大学 京都 2017.8.27-9.1
- 8) Mei Nagase, Shinsuke Murakami, Giuseppe Granata, Chiharu Tokoro, Yuichiro Kanematsu, Yasunori Kikuchi, " Development of a new database for the design of efficient recycling processes: the case study of tantalum" , EcoDesign2017 TAYIH LANDIS HOTEL 台南・台湾 2017.11.29-12.1

(3) 知的財産権

「特に記載すべき事項はない。」

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 所千晴：「循環型社会構築に寄与する固体分離技術」，日本学術会議第29回環境工学連合講演会，招待講演，P-10，2016年5月13日．
- 2) 所千晴：「資源循環型社会を構築するための技術とその社会実装への取り組み」，日本学術会議公開シンポジウム，2017年1月17日．

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 所千晴：「未来 EYES」，BS ジャパン，2016年8月28日放映．
- 2) 所千晴：「ガリレオ X」，BS フジ，2017年3月26日放映．
いずれも開発したシミュレーションの一部を紹介

(6) その他

- 1) ISIE SEM-AP Third Prize in Poster Competition 受賞 H. Yamamoto: "Consumer behaviors of small-size WEEE use and disposal" (口頭発表の1)
- 2) エコデザイン・プロダクツ&サービスシンポジウム2016 優秀賞受賞 福井将、綱澤有輝、松岡光昭、所千晴、村上進亮：「DEM シミュレーションを用いた破碎による廃小型家電からの基板回収挙動の予測」(口頭発表の2)

7. 研究者略歴

研究代表者：村上 進亮

東京大学大学院工学系研究科修了、博士（工学）、現在、東京大学大学院工学系研究科准教授

研究分担者：所 千晴

東京大学大学院工学系研究科修了、博士（工学）、現在、早稲田大学理工学術院教授

Ⅱ．成果の詳細

本研究PJは2つのサブテーマから構成される。本節ではそれぞれに分ける形で、成果の詳細を示す。

Ⅱ－１ 中間処理技術と処理対象商品のマッチングに基軸を置いた 3R システム設計

【要旨】

本研究全体としては、中間処理技術情報を集約したデータベースを作成し、そこにこれを評価するための情報や、使用済製品の発生量推計に必要な情報をあわせて格納すること、そして評価結果を含めDBの利用法としてある使用済製品を投入とした際に、複数の中間処理技術の組み合わせとして構築される中間処理フローをDB内の技術情報を検索、組み合わせることで提案し、あわせて評価指標を自動で計算させることで、中間処理フローの候補を得ることにある。最終的には実際に現場レベルで利用可能なレベルを目指す。現時点では簡易的な評価値の推計をもって、必ずしも中間処理をになう現場のステークホルダーだけではなく、例えば自治体や行政が、新しい使用済製品が出て来たときに、どのような処理を適用すると、どのような素材回収量やその費用がどの程度かについて、目安を得ることが出来るようにするためのものである。

その中で本サブテーマは、DBの設計、使用済製品発生量推計に必要な情報、すなわち出荷量等の情報と各種製品の使用・保有年数に関する情報を収集すること、さらに評価システムを構築することをになう。

まず、使用済製品に関する情報としては、特に小型家電を重点的なケーススタディ対象としたが、使用・保有年数が依然経時変化するような状況にあり、頻繁な調査が必要であること、さらにこの分布推計のもつ不確実性は排出量推計に大きな影響を与えることから調査の規模も大きなものが必要になることが分かった。次に評価指標としては、回収量、率、費用便益、CO₂排出量などの他に関与物質総量(TMR)を用いることで、CO₂排出量では評価しきれない環境負荷についてその一次近似的な評価を試みた。

最終的に試行した高品位小型家電のフローについて、最低限の手解体の後、銅製鍊へ全量投入するという実存のプロセスと比べ、有用金属回収量、TMRと言った物質フロー指標で見れば大きく改善するものを提案することが出来た。ただし、経済性が若干悪化することから実際に選択される可能性は現時点では低いことも分かった。逆に言えば、経済性で現場では選択されないが社会的に意味のあるフローの結果を示すことに成功したと言え、この種のDB構築が政策的に意味ある行為であることを示したと言える。

1. はじめに

回収すべき素材としてのレアメタルへの注目の高まり、多様な製品を含む小型家電リサイクル制度が導入されたことなどを見るに、リサイクルはますます複雑になるばかりである。他方でSDGsのゴール12にマテリアルフットプリントの削減が明確にうたわれ、欧州はじめ世界中で資源効率の向上が望まれる中、3R全体への期待は高まり続けており、その中でも既に大きな貢献を果たしてきたリサイクルについてもさらなる貢献が期待されていることは間違いない。こうした中、リサイクルの高度化、高効率化をうたうなどこれまでは回収の対象とされなかったような素材までをリサイクルしていこうとする動きもある。

我が国を見れば、技術力も、また実際の操業そのものも極めて強力な素材産業を持ち素材リサイクルに対するポテンシャルは非常に高いと考えられる。しかし、先にも述べたように使用済製品が多様化し、またその変化の速度も速まりつつある中、リサイクルシステムは極めて複雑なものへと変化しつつある。そして、中間処理、すなわち破碎・分離・選別技術の役割、つまり多様化する処理対象物を、回収を担う社会システムから我が国の誇る強力な素材産業へ適切な形に処理して渡すと言う機能が、その重要性を高めている。し

かし、個別の中間処理技術をリサイクルシステムへどう実装するかについては、必ずしも我が国は先進国とは言えない状況がある。

特に我々が問題であると認識している点は、実際には存在している中間処理技術が体系的に処理されておらず、これを網羅的に把握しているステークホルダーが存在していないという点にある。つまり課題は「中間処理技術と処理対象物の正しいマッチング」であり、そのためのシステム構築にある。さらに、発生側の情報、すなわち誰の手元で、どのような使用済製品が、どのようなタイミングで、どのような量発生するのか。そしてそこにはどのような素材が含有されているのか、と言った情報についても十分に集まっているとは言いがたい。

この2つの情報を体系的に整理し、適切に組み合わせることでリサイクルシステムの高度化、効率化を図ることは可能であると考えられるが、それを実証して見せた事例は我々の知る限り存在しない。

2. 研究開発目的

そこで本サブテーマにおける研究開発目的は以下のように設定する。すなわち、サブテーマ2が実施する中間処理技術の類型化を通じた体系的な整理の結果を受け、その情報を格納するデータベース（以下DB）を設計することと、そこに中間処理技術の情報が実際に収納された際に、これを用いて適切な中間処理フローを構築するために必要な情報を整理することである。ここでいう中間処理フローとは、適切な中間処理技術を必要に応じて複数組み合わせることで構築されるとある処理対象物が素材回収業（非鉄製錬や鉄鋼電炉などを意味する）に手渡されるまでの一連の流れを意味する。DBに収納される中間処理技術情報とは、投入物と産出物の組み合わせに、必要な情報、例えば必要時間や費用、エネルギー消費量などの情報を合わせたものである。これを組み合わせて構築されるフローの候補は非常に多く、いくつかの評価指標の値を示すことでユーザーがその中から最適なものを選べる必要がある。とすればその評価指標を決めること、そしてその評価に必要な情報を合わせてDBに収納させる必要がある。ここまで含めて広い意味でDBの設計を行うことが本サブテーマの大きな役割である。

さらに、どのような使用済み製品が将来どのような量発生するか、すなわち廃棄物発生量予測は、常に廃棄物処理の将来計画に対して重要な情報である。本DBでは投入物の候補である使用済み製品それぞれについて、出荷台数に、使用・保有年数分布の情報を組み合わせることでこれを推計することを可能にするような情報も合わせて収納する。そのために必要な情報を整理することも本サブテーマの役割である。

そして最後に、こうしてDBに収納された様々な情報を用い、実際に使用済み製品の中間処理フローを構築し、その評価を行うことも本サブテーマの役割になる。

3. 研究開発方法

3.1 使用済み製品の発生量に関する情報収集

情報収集の手法自体は文献調査になる。研究代表者がかつてその構築に関わった国立環境研究所のウェブサーバー内に設置済であるオンラインデータベースLiVES (Lifespan database for Vehicles, Equipment, and Structures)¹⁾は非常に網羅的なものであり情報のアップデートを試みてはいるものの、そこに収納される情報の多くは2010年以前に収集されたものであり、そもそも小型家電がこうした検討の対象になる前のものであった。そこでこのLiVESを中心に既存文献等からのデータを改めて収集しつつ、小型家電類からいくつかを選択して改めて使用・保有年数の情報を収集することとした。具体的にはアンケート調査を行いサンプルデータを収集したのち、パラメトリックな分析としてはこうした研究において一般的に用いられるワイ

ブル分布への当てはめを行う。ワイブル分布を用いた故障率の分布 $f(t)$ は形状パラメタ m 、尺度パラメタ η を用いて式 (1) のように表される。また平均値 μ が式 (2) になる。

$$f(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1} \exp\left\{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right\} \quad (1)$$

$$\mu = \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad (2)$$

ただし、製品によってはこうしたパラメトリックな分布への当てはまりが著しく悪いものの存在が知られていることから、ノンパラメトリックな分析としてカプランマイヤー法も同時に行なう。問題のない限りは推計されたワイブル分布のパラメタを用い、故障率関数 $f(t)$ と統計情報から得られた出荷台数 ($Shipment(t)$) と組み合わせることで、(3) 式のように使用済み製品の排出量を予測する。

$$Waste(t) = \sum_{\tau=t_0}^t Shipment(\tau) \cdot f(t - \tau) \quad (3)$$

このような調査を頻繁に行なうためには費用が必要になる。そこで、それを行なうべきかどうかの判断をするために、1) $f(t)$ のパラメタはどの程度経時変化するのか、そして 2) サンプル数がどの程度推計値の信頼性に影響を与えるのか、3) さらにその結果使用済み製品の排出量にどの程度の影響を与えるのか、の 3 点について検討を行うこととした。

3.2 DB の設計

DB の設計については結果の節に示すが、ハードウェア的には研究代表者機関内の LINUX サーバーに SQL をインストールしこの中に構築することとした。これは 2 つの研究機関間での情報の共有をスムーズにすることと、将来的な公開を視野に置いての決定である。ただし、今回収納される情報には守秘義務のかかるものもあり、セキュリティは厳密に設定した。また、研究期間終了後はオンライン公開は全て中止している。

3.3 クリティカルマテリアルの同定とシステム評価項目の決定

ここ 10 年来、レアアースに代表されるいくつかのレアメタルの供給不安などを背景に、鉱物資源に関してその Criticality を検討するような研究が多くなっている。そこで、評価において重要視すべき回収素材を考えるために、リサイクルにとって重要、と言う意味での Critical Material の同定を行い、それを踏まえた上で DB を用いたリサイクルシステムを構築した際の評価項目についての検討を行った。ここでいう「踏まえて」の意味であるが、特に重要視する、すなわちクリティカルマテリアルについては、評価項目の中でも重要視することになる。詳細は結果の項に示す。

3.4 使用済み製品に対する中間処理フロー設計の試行

サブテーマ 2 の技術の整理の結果から得られる情報を DB に格納したのち、ケーススタディ的に中間処理フローの設計を試行する。ここでは、現在の社会情勢と、含まれる使用済み製品が少量多品種、かつその割合も変動的であることなども含め、中間処理技術に確定したものがないことから小型家電類をケーススタディの対象とした。

4. 結果及び考察

4.1 使用済製品の発生量に関する情報

先に述べたとおり、耐久消費財が今回の検討対象であるが、文献調査等から、白物家電、車等の情報は比較的多いことが分かった。研究代表者がかつてその構築に関わった国立環境研究所のウェブサーバー内に設置済であるオンラインデータベース LiVES (Lifespan database for Vehicles, Equipment, and Structures) は非常に網羅的なものであり情報のアップデートを試みてはいるものの、そこに収納される情報の多くは2010年以前に収集されたものであり、そもそも小型家電がこうした検討の対象になる前のものであった。よって、小型家電に関して改めて情報収集を行い、最終的なケーススタディの中で反映することとした。ここではその代表的な結果として、携帯電話に関してパラメトリックな分析としてワイブル分布へのフィッティングを行った結果を図1に示す。携帯、デジカメ、携帯ゲーム機など典型的な高品位小型家電はやや大型で用途も異なるPCに比べ、分布の立ち上がりが高く寿命が短いのみならず分布の形状も異なることがわかる。そこでこの携帯、デジカメ、携帯ゲーム機の3種の分布から使用済み品発生台数の予測を行なった結果も合わせて示した。携帯電話（スマホを含む）の発生量が減少傾向にあることが見て取れる。また参考として今後発生量の拡大が予想されるウェアラブル端末についてもデータを取得したが、サンプル数が少なく信頼の置けるデータとはならなかった。

使用年数については経時変化の懸念もある。つまり、陳腐化していない商品について特に言えることだが、使用年数が大きく経時変化するのであればこの種の調査は頻繁に必要である。他方で、そうで無ければそれほど頻繁に調査をする必要は無い。そうした意味で、未だ陳腐化していない財として、携帯電話・スマートフォンを検討対象として経時変化の検討を行った結果を図2に示す。

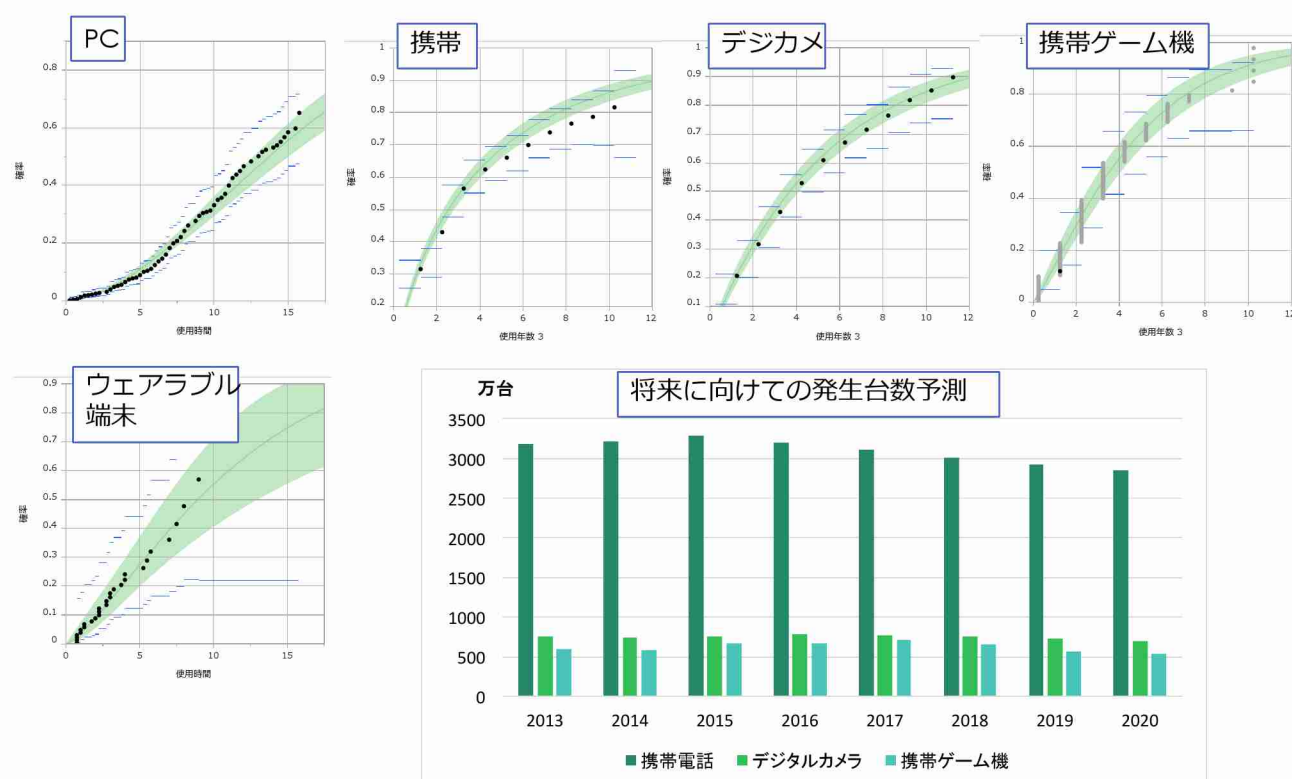


図1 得られたサンプルからの使用年数の分布とこれを用いた使用済み品発生台数の予測

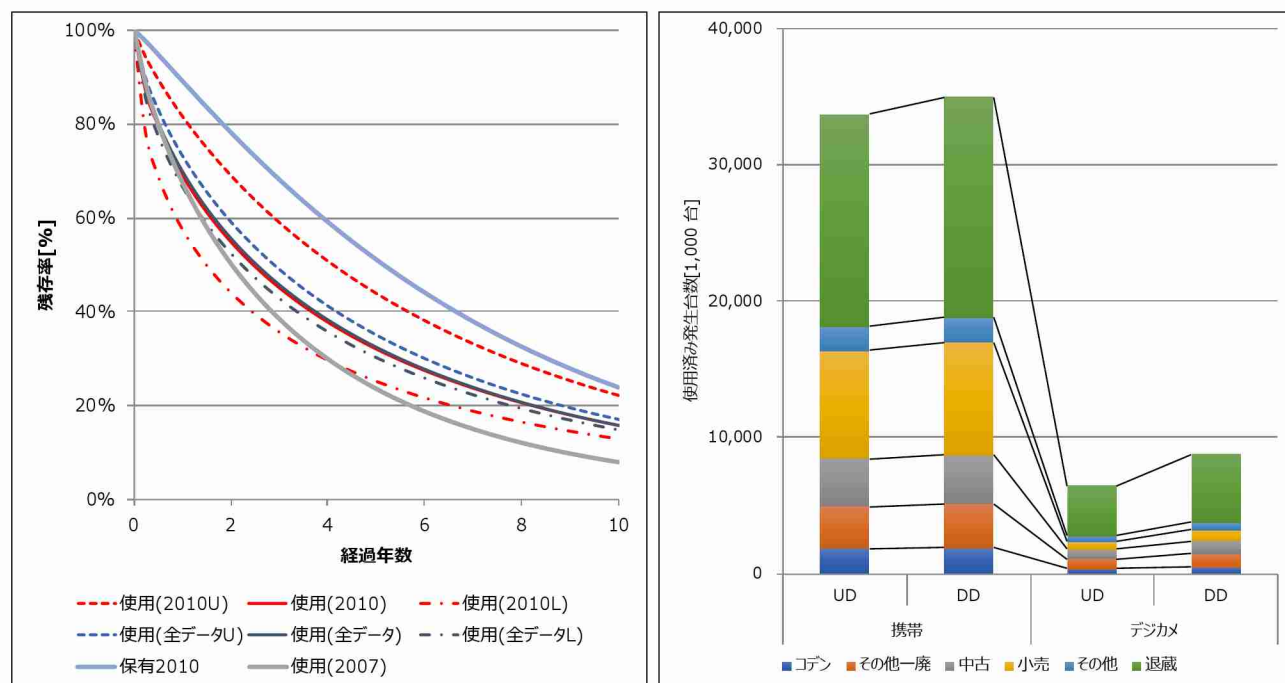


図2 携帯電話の使用・保有年数分布の変化と不確実性(左)そしてその使用済み発生台数推計への影響(右)

2007年に出荷された携帯電話・スマートフォンは(使用(2007))2010年に出荷されたもの(使用(2010))に比べ、半減期が半年ほど短い。よく言われている長期使用傾向が実際に見えていると言えるが、何れにせよ経時変化の懸念はある。この時のアンケート調査では、回答者が過去に保有した複数の携帯電話・スマートフォンについて、使用開始時期と使用中止時期、廃棄時期の3点を聞いているが、ここで使用年数とは使用中止時期と使用開始時期の間の長さを示す。廃棄時期と使用開始時期の差が保有期間になる。ここで2010年使用開始分について、保有年数(保有2010)は使用年数よりも大幅に長く、退蔵の多さが改めて示唆されることとなった。これらのことから、使用年数に関する調査はそれなりの頻度で引き続き行う必要があることが明らかになった。またこうした分布の信頼性についても検討をした結果、サンプル数に大きく依存することが明らかになっており、正確に廃棄台数を予測するのであれば頻繁な大規模調査が必要だと言える。図2左のU, Lとあるものはそれぞれの結果の上下の信頼区間を示している。全データとは全てのアンケート回答の集計結果であり、2010とあるものは2010年に使用を開始したもののみにについての推計結果である。当然サンプル数は大きく異なるが、実際に推計された分布自体は大きく変わらない。(使用(2010)と使用(全データ)を比較。)ただし、信頼区間の幅は全く異なることから、やはりサンプル数は重要だと言わざるを得ない。本研究ではこうした調査を行って得られた結果の、ワイブル分布のパラメタ等が、各年の出荷台数とともにデータベースに格納されており、その結果がシステム評価に用いられることになる。この2010年のように全てのデータについて使用開始年ごとにワイブル分布のパラメタを求めつまり式(3)における $f(t)$ を使用開始年ごとに用意したケースをDD, 全データを用いて推計された一つのパラメタセットを用いたものをUDと呼び、使用済み製品の発生台数を推計した結果が図2の右図である。ここには携帯電話、デジタルカメラ両方の結果を示しているが、その結果は特にデジタルカメラについては大きく異なる。デジタルカメラについては徐々に使用されない段階のフェーズへ入ってきていることから、排出傾向が強まっていることは容易に想像できる。そこに全データを用いた一つのパラメタセットで推計してしまうと(UD)起こっている変化をとらえきれ

なくなり、おそらく発生台数を過小評価しているのではないかと考えられる。これもまた、分布の推定頻度が頻繁ではないデメリットを表しているとも言える。

4.2 DBの設計

最終的に決定したデータベース構造のイメージを図3に示す。図からわかるように、モノにかかる情報と技術にかかる情報から構成される。モノには種別が与えられておりその種別にラベルが与えられる。これがラベルリストの内容である。製品については製品リストを、それ以外のモノについてはこのリストが存在しており（後者については煩雑になるため、図中には掲載していない）、これら全てに固有のItem IDが付与されている。製品についてはさらに出荷台数、使用・保有年数情報のテーブルが用意され、必要に応じて廃棄台数の推計が行われる。技術側についてみれば、同じようにそのリストがあり、処理能力、消費電力といった情報が用意される。すなわち技術リストに掲載されるのは機械種と操業のパラメータ、ここに必要な費用情報（エネルギー消費等も含める）である。

最も重要である中間処理プロセスは、これらの情報を集約し、投入、産出、用いられた技術などの情報が集約されることになる。この中間処理プロセステーブルが本DBの核でありこれ以外のテーブル、リストはこれらに対し必要な情報を付与するためのものである、と考えることができる。

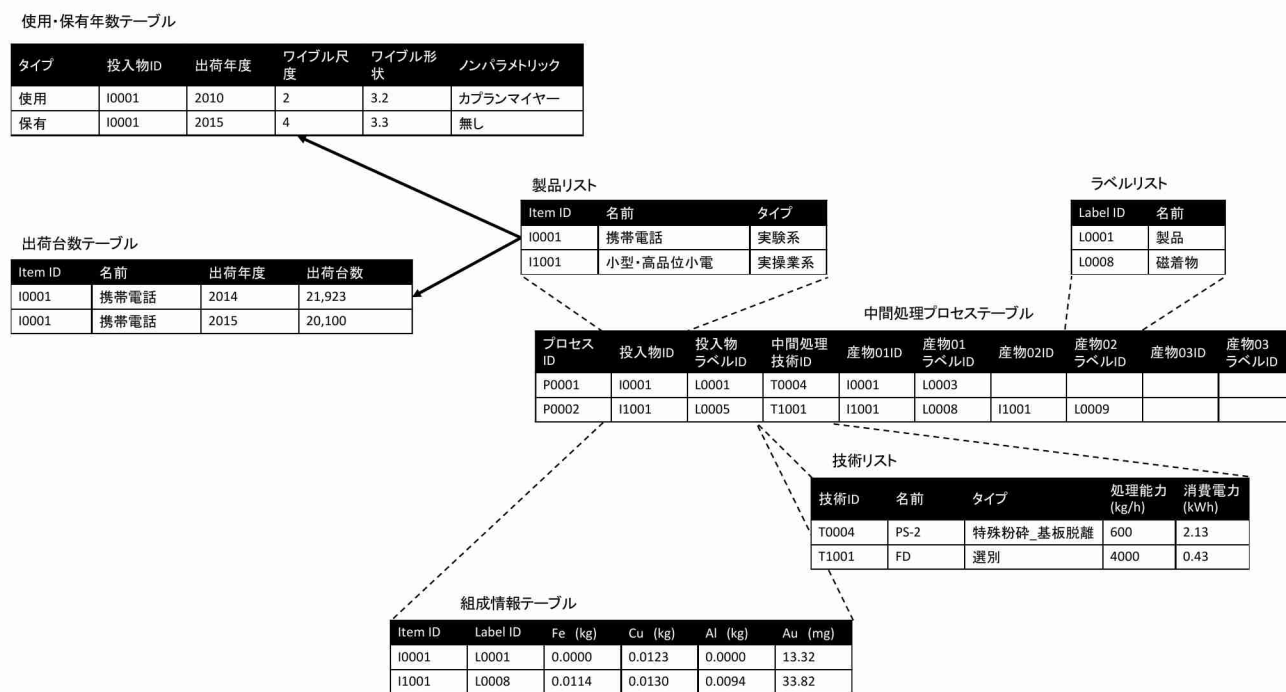


図3 データベース構造のイメージ図

4.3 クリティカルマテリアルの同定とシステム評価項目の決定

ここではリサイクルを推進することでその Criticality を削減することができるもの、という意味での Critical Material の同定を行う。Criticality とは図4（左）に示すように、2ないしは3の軸で考えられることが多い。²⁾ リサイクルの結果回収される素材が天然資源由来のものを完全代替できるのであれば、図4におけるZ軸で表現されている経済の脆弱性は由来が何であったとしても変わらず、環境影響については複雑なLCAを要することから、ここではX軸に現れる供給リスクの大きさのみを考える。例えば2015年の我が国に対する天然銅供給について供給リスクの高い順に国を並べた曲線を図4（右）のように用意し20万トンのリサイクルで追加的にだいたいする場合、これによる供給リスク削減効果は図中の塗りつぶされた面積となる。縦軸に供給リスク指標値（World Governance Indicator³⁾を用い、これを0-100に基準化した）を示しているがここで削減効果が30までしか至らない理由はリサイクル側の供給リスクが30あるとすればということになる。ここでいうリサイクルの供給リスクの定量化は極めて難しい課題であるが、例えば供給量が天然資源の鉱山と違いある程度以上には制御不可能であることが最も大きなリスク要因であろう。何れにせよ一つの評価基準としてはリサイクルによる供給リスク削減効果を捉える。さらにリサイクルを実施する上でその主たる収入源としてリサイクルを支えている鉱種という視点を加えて決定した。

このような視点から最終的には、銅、金、PGM(特に小型家電についていえばパラジウム)を同定した。また逆に、現在リサイクル対象物に多く含有されているにも関わらず、経済性面で足を引っ張ってしまっているプラスチックはリサイクルシステムを促進すべきものとして重要であると考えているが、現状の評価の中で重点的にリサイクルすべきものとはいえない。

続いてこの結果を踏まえて、どのような指標を用いてリサイクルシステムを評価していくかについてであるが、ここでは単純に有用素材回収量（率）、経済性、CO₂排出量（もしくはエネルギー消費量）、そしてリサイクルによって回避された天然資源由来の素材の関与物質総量(Total Material Requirement: TMR)とする。TMRについてはクリティカルリティ評価で回避してしまった環境影響に対して非常に粗い一次近似指標として機能すること、またクリティカルだと評価された貴金属ならびに銅を結果的に大きく評価することにつながるなどから採用した。この結果は必ずしもCO₂排出量と一致しないことも採用の理由である。そのほか回収量や経済性指標については、現場として必要不可欠な評価手法であることから可能な限り計算することとした。

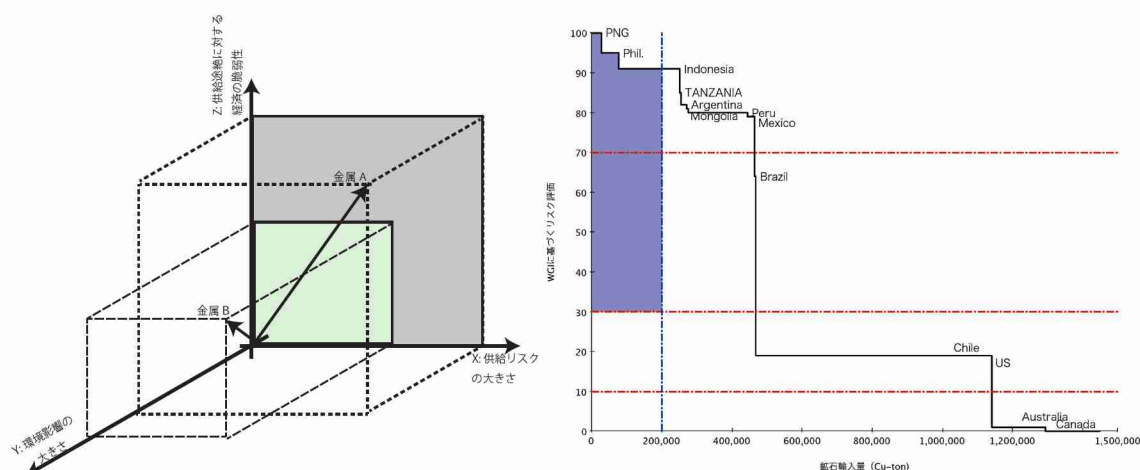


図4 一般的なクリティカルリティの定義（左）とリサイクルによる供給リスク削減効果（右）

4.4 使用済み製品に対する中間処理フロー設計の試行

ここではモデルの活用に関するケーススタディとして、仮に、ある中間処理施設で実施されている現状の処理フローが図 5(上)であるとしその改善を考える。このフローでは、スマートフォンやデジタルカメラといった小型・高品位の小型家電について、必ず取り外さなければならない電池のみを手作業で取り外している。電池以外の部分については、小型のため解体が困難であること、また高品位であることを理由として、そのまま銅製錬に投入されている。銅製錬プロセスでは銅および基板上の金と銀のみが回収され、それ以外は資源として回収されない。このフローを機械化することを考え、モデルを使用する。図 5 のフローを基準のフローとし、各プロセスについてデータベースに格納されているプロセスでの置き換え・追加を実施する形で検索を行う。検索されたフローと元のフローの比較評価にあたっては様々な指標が考えられるが、モデルでは回収物重量、TMR、回収物価値、処理にかかるコスト、回収効率の五つを指標として用いた。なお、ここでは回収効率を、処理コストで回収物金額を除いたものと定義する。

DB 検索から最終的に提案された処理フローは図 5 (下)のものとなった。フローの前半部では、手解体により電池を取り外した後、クロスフローシュレッダーを用いて特殊破碎を実施し、小型家電から価値の高い基板のみを脱離させている。基板は元の処理フローと同様に非鉄製錬プロセスへ投入され、基板以外の筐体部分についてはフローの後半部で示されている通り、粉碎により粒度を小さくした後磁力選別、気流選別、渦電流選別を経て鉄系金属、非鉄系金属、破碎残渣に選別される中間処理フローとしては一般的なフローが選択された。

二種類のフローを比較すると、必須である電池の取り外しには手解体が効果的であることがわかる。しかし、後でも述べるが、手解体には多額の人件費がかかり、フロー全体の処理コストを引き上げる要因となる。そこで、中間処理プロセスの前段階である排出プロセスにおいて電池があらかじめ取り外され、電池取り外し済小型・高品位小型家電が中間処理プロセスのインプットとなるフローを考える。具体的には、図 5(下)のフローのインプットが電池取り外し済となり、手解体のプロセスが外れたフローによって処理されることを考える。以降では、このフローを改良フローと呼んだ上で評価を行う。元の処理フローと改良フローについて、五つの評価指標の値をそれぞれ比較した結果を、図 6 および表 1 に示す。筐体がすべて無価値物とされていた元フローと比較して、改良フローでは回収物重量が大きく増加している。一方、関与物質総量を見ると改良フローの方がわずかに大きいものの、大きな差はない。

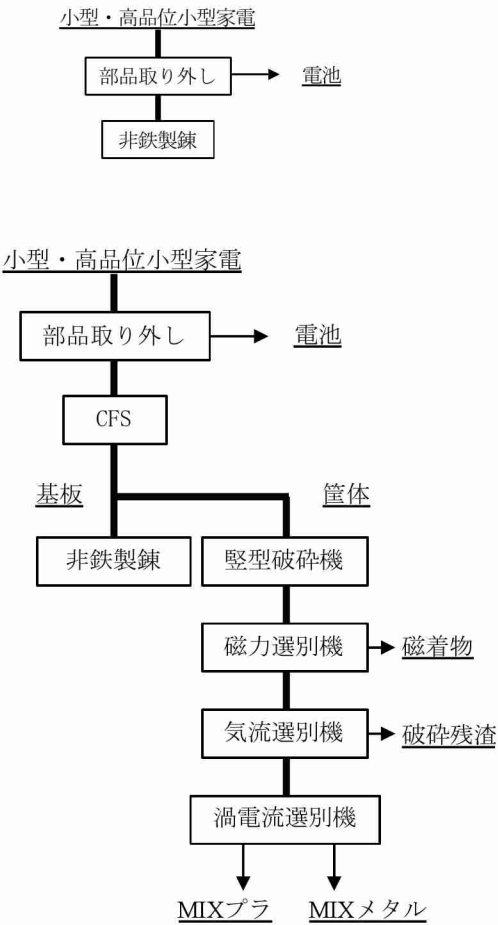


図5 検討対象フロー（上）と
DB から選定されたフロー（下）

表 1 評価結果（処理費用と効率）

指標	元フロー	改良フロー
処理コスト(円)	129,397	2,024
回収効率	4.29	272.52

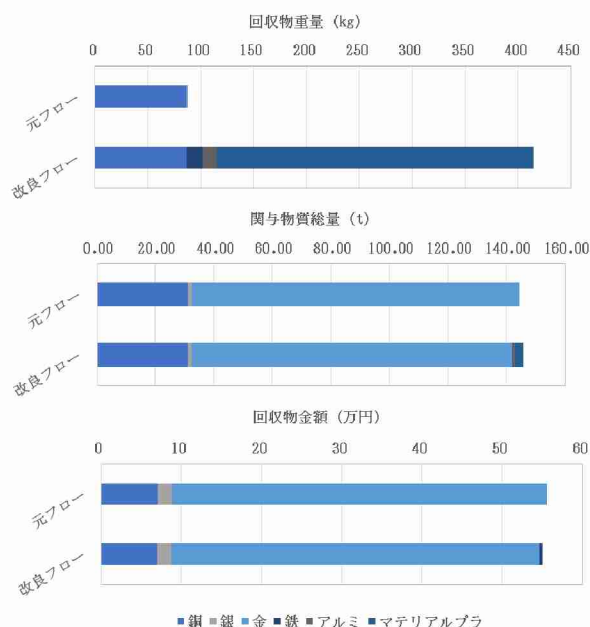


図6 評価結果（回収物重量、TMR、回収物金額）

どうかの選択をする。ここから先は図 7 のフローの候補を右から順に検索していくことになる。①～④の候補では、「特殊粉碎をしない」を選択している。その場合当然ながら何もせずに次のステークホルダーが購入しない限りは何らかの選別が必要になるが小型家電と言っても何もせず機械的な選別フローに入ることは出来ない。よって一般粉碎を行わない選択肢は採られない。粉碎の技術として、ここでは典型的な堅型破碎機が選択されている。フロー①と②～④の違いは磁選のみ（②～④）であるか、それ以降に風力選別（渦電流選別にかける前にダストを取り除くため）そして渦電流選別を付け加えるか（①）である。①のほうが手を

これは単位重量当たりの関与物質総量が多い金や銀の回収量が元フローと比較して減少したため、基板回収プロセスの機械化により元フローより基板回収率が下がったことが原因と考えられる。回収物金額についても、価格の高い貴金属の回収量が落ちたために改良フローが元フローをわずかに下回った。

実際にどのような候補が検索され選ばれたのかの探索の過程を図 7 および表 2 に示しておく。基準フローは表中の「基準」、最終的に選ばれたフローが「最終」である。まず機械化に当たって高品位小型家電が対象であることから、手解体の有無の選択が必要であるが今回は手解体を含まないもののみを対象とすることから、手解体を含むフローは基準フローのみを評価対象とする。

とすればその次の選択肢は、特殊粉碎を行うか

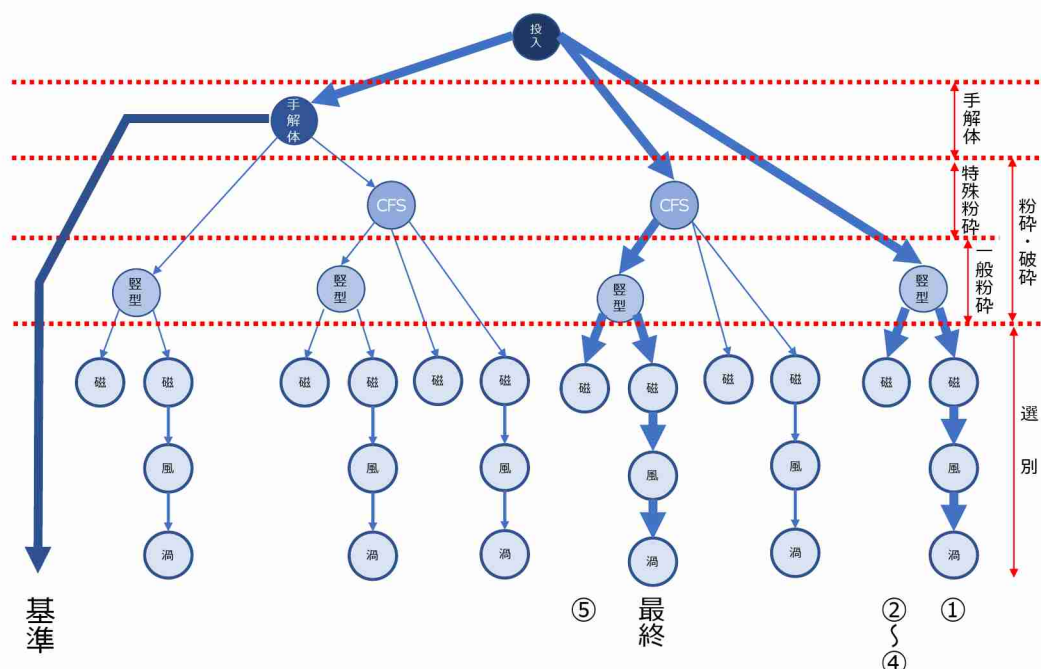


図7 探索の過程

かけていることになるが、手をかけても実際にあまり回収は伸びないことが表2から分かる。むしろ磁選のみとして、非磁着物の出荷先を検討することの意味が大きそうであることが②～④の比較から分かる。

表2 探索の過程

	プロセス					回収物重量 [kg]	TMR[kg]	価値[¥]	費用[¥]
	1	2	3	4	5				
基準	手解体					0.080	134.18	516.73	<u>143.93</u>
①	堅型破砕機	磁力	風力	渦電流		0.365	130.07	491.20	144.46
②	堅型破砕機	磁力（非磁着物がプラ）				0.306	7.42	11.59	144.46
③	堅型破砕機	磁力（非磁着物がミックスメタル）				0.106	134.85	<u>521.39</u>	144.46
④	堅型破砕機	磁力（非磁着物が銅製錬）				0.095	134.29	517.87	144.46
⑤	CFS	堅型破砕機	磁力			0.321	88.86	350.22	144.49
最終	CFS	堅型破砕機	磁力	風力	渦電流	<u>0.366</u>	<u>135.33</u>	513.04	144.49

これらはプロセスは同じで非磁着物の出荷をプラスチック系、ミックスメタル、銅原料の3つの別にその後の歩留まり・金額評価を実施したものである。ただし③の価値が高いのは貴金属類の歩留まりの値に問題があると考えられる。

何れにせよ、回収物重量と TMR に着目してどちらも基準から大きな改善を見せるものが今回選ばれた最終フローだと言える。そのほかの候補と比べてもこれら 2 項目でこれに比肩するものはない。逆に価値で負けていることから分かるように、こうした物量ベースの評価指標において仮に高く評価されるとしても、経済性のみで判定されれば選ばれないことがわかる。こうした社会的に望ましい可能性があるにもかかわらず現実的に選択されないフローを示唆することが出来るという点は、本研究 PJ からの大きな成果といえ、政策に対する貢献は高いと言えよう。

4.5 結果のまとめに代えて：提案したフローの実現性

本研究 PJ では使用・保有年数調査を一般消費者向けに実施しているが、その際に関連する動向の調査も行っている。例えば、前節で実施したケーススタディでは「高品位小型家電」だけが投入されることとなっているが、そもそもこのような回収が可能なのかという点は本 PJ の明示的な内容には含まれていない。しかし、重要な点でもある。よって、分別排出の意欲について消費者動向の結果を簡単に示し、これを踏まえた全く違うフローを示しておく。図 8 にボックス排出であった場合の分別区分

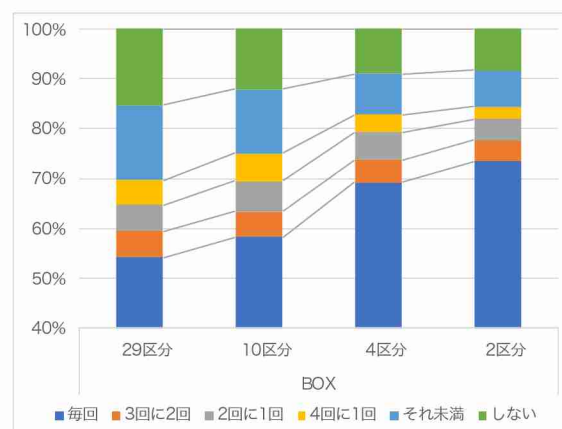


図 8 コデン分別排出意欲

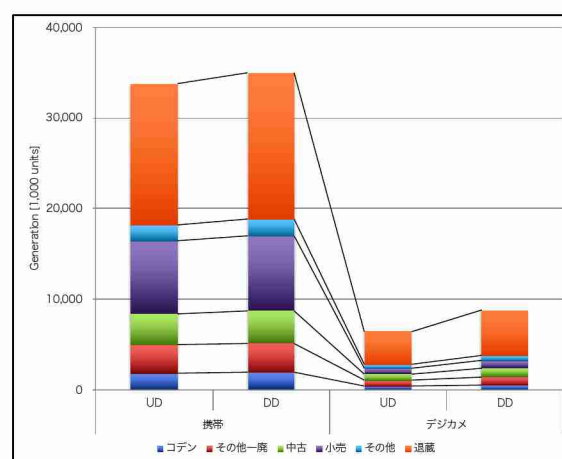


図 2 (左、再掲)

分数ごとの排出意欲を尋ねた結果を示す。先の高品位というものを別途回収するためには少なくとも 2 区分である必要があり、恐らく 4 区分程度の排出が望ましいことは、我々の聞き取り調査から明らかである。毎回適切に分別排出を行うとしている層の比率を見ると、29 区分であっても 10 区分であってもそれほど大きく変わらないがこれが 4 区分になるとその比率は大きく高まる。2 区分にする効果はそれほど無い。また、図中の 3 回に 2 回とあるものは、概ね 3 回に 2 回程度は適正に分別排出する、と言う選択肢である。よって、「それ未満」と「しない」の層についてはほぼ分別排出をしないとみるべきである。この比率の変化を見ても 10 区分と 4 区分の差は大きく、4 区分程度であれば排出するとしていることが分かる。これらの層は例えば区分数が 2 であっても 15% 以上存在することが分かる。ここまでの結果を見れば 4 区分程度であればそれなりの層が対応することから、これを促進するような施策を講じる余地は十分にあると言えよう。

他方で、いずれの区分数にしても適正な分別排出をしない層が一定程度居ることは事実である。それを踏まえれば、例えば電池の事前取り外しを消費者に期待することは、技術的に可能な場合であっても不可能だとする議論もあるかもしれない。また、場合によっては小型家電類が一般廃棄物のその他の分類に排出される可能性もある。実際、排出量推計の結果を示した 4.2 節の図 2 (左) を見れば携帯電話ですら少なからぬ量が、その他の一般廃棄物に排出されていることが分かる。より内訳を見れば、可燃ゴミ、不燃ゴミ、資源ゴミ (金属)、資源ゴミ (プラスチック) などその排出先の区分也多岐にわたる。そこで、消費者による分別排出、すなわちソースセパレーションを最も要求しない例として、全量可燃ゴミに排出された場合どうな

るかについても簡易的な推計を試みた。別サブテーマ側の成果の詳細における表5を見れば分かるように、本DBには焼却灰の選別を試みた結果も含まれている。ただし、一般廃棄物焼却灰全体としての選別データでしかなく、そのうちごくわずかに小型家電が余剰に投入されたとして、その含有物質がどのような挙動を示すのかについては正確には分からないため、定量的な評価はあまり行わない。

現在DBに収納されているデータに基づいて言えば、焼却灰中の貴金属類の含有量は実は少なくなく、よってこれを濃縮、選別することの意味は高い。しかし、今回の提案フローで言えば銅、金といった今回4.3節においてクリティカルだと同定した物質の実収率は90%を越える。他方で、焼却灰からの回収率はたかだか40%前後である。プロセスの組み方によってパラジウムの実収率はやや高めではあるが、それでも今回の提案フローと比べ全ての検討対象物質の実収率は悪い。確かに消費者にとってのコストは分別区分を落とすことで軽くなり、混合収集によって収集・運搬の費用も小さくなる可能性はあるが、現時点で我々が目指す資源効率の高い循環型社会という方向に対して正しいとは思えない。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

使用済み製品排出量予測のために実施した使用・保有年数分布の推定において、その情報を積み上げること自体重要な成果であるが、その信頼性に関する議論をきちんと行った事例はほぼなく、本研究の中でこれを実施したことはその最初の事例となっている。その結果が排出量に対してどの程度のインパクトを与えるのかの定量化まで実施したことの意味は、今後の同分野の研究展開に対して大きな示唆を与えるものである。これについてはすでに査読付き論文として公開済みである。

(2) 環境政策への貢献

今回、小型家電を題材としたケーススタディを行なったが、これは小型家電が施行後5年の最初の見直しを迎えていることを考えれば重要な点である。中間処理の効率化は小型家電リサイクルの最大の課題の一つであるが、本研究が提案するような、実際に処理をすることなくある程度のプロセスを仮想的に組み立て、これを評価するシステムは、その検討に際して極めて重要なものとなろう。

さらに、使用済み製品の排出量予測も制度にとっての意味は極めて大きい。現在小型家電リサイクル制度は、制度制定時の回収量目標を達成することができていないが、実際には目標設定時の想定よりも排出量がかなり少ないことが指摘されており、その精緻化とそれに基づく目標値の検討が必要不可欠である。

<行政が既に活用した成果>

研究代表者(村上)は産業構造審議会産業技術環境分科会廃棄物・リサイクル小委員会 小型家電リサイクルWG、中央環境審議会循環型社会部会小型電気電子機器リサイクル制度及び使用済み製品中の有用金属の再生利用に関する小委員会両委員会の委員として、両省と密に連携を取る立場にあるが、本PJからの研究成果は頻繁に環境省担当者に伝達し、利用いただいているところである。また、産業構造審議会産業技術環境分科会廃棄物・リサイクル小委員会については、家電リサイクル、自動車リサイクルともにWGの委員を務めており、直接のケーススタディは行わないものの、こうした研究から得られた知見は審議会の場合やその前後の関係者との意見交換の場などで常に役立てている。

<行政が活用することが見込まれる成果>

先にも述べた通りであるが、これからまさに始まろうとしている小型家電リサイクル制度の5年見直しの場において、中間処理技術に関する知見や、使用済み製品排出量の予測値はそのまま利用可能なものとなる。また今回提案している評価手法についても、その議論の中で大いに役立つと期待されるものである。

6. 国際共同研究等の状況

「特に記載すべき事項はない。」

7. 研究成果の発表状況

(1) 主な誌上発表

＜査読付論文＞

- 1) Shinsuke Murakami, Haruhisa Yamamoto, and Masahiro Oguchi, *Procedia CIRP*, 61, 140-145, (2017)
Uncertainty in lifespan estimation and its potential impacts on our social system.

(2) 主な口頭発表（学会等）

- 1) Shinsuke Murakami. “Critical Metals and Recycling”. World Engineering Conference and Convention (Nov. 29th - Dec. 2nd, Kyoto, Japan) 2015.
- 2) H. Yamamoto: “Consumer behaviors of small-size WEEE use and disposal” ISIE SEM-AP Abstract Book, p. 103-104. (Third Prize in Poster Competition)
- 3) 高橋裕也、村上進亮：「供給障害事象に基づく鉱物資源の供給リスク指標開発」，第12回日本LCA学会研究発表会，p. 72-73

(3) 知的財産権

「特に記載すべき事項はない。」

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

「特に記載すべき事項はない。」

(5) マスコミ等への公表・報道等

「特に記載すべき事項はない。」

(6) その他

- 1) ISIE SEM-AP Third Prize in Poster Competition 受賞 H. Yamamoto: “Consumer behaviors of small-size WEEE use and disposal”

8. 引用文献

- 1) Shinsuke Murakami, et al.: “Lifespan of commodities, Part. I: A creation of database and its review”, *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 14 (4), pp. 598-612, 2010
- 2) 村上進亮，小松孝裕（2014）“明日を支える資源(138) ＜連載：製造業を支えるレアメタルの動向について①＞ クリティカルメタルとレアメタル” エネルギー・資源，35(2)，pp.120-124

3) World Bank; World Governance Indicators. (<http://info.worldbank.org/governance/wgi/#home> 最終
アクセス日 2018 年 3 月 20 日)

Ⅱ－２ 技術面側面から見た中間処理技術の類型化

【要旨】

本研究全体としては、中間処理技術情報を集約したデータベースを作成し、そこにこれを評価するための情報や、使用済製品の発生量推計に必要な情報をあわせて格納すること、そして評価結果を含め DB の利用法としてある使用済製品を投入とした際に、複数の中間処理技術の組み合わせとして構築される中間処理フローを DB 内の技術情報を検索、組み合わせることで提案し、あわせて評価指標を自動で計算させることで、中間処理フローの候補を得ることにある。最終的には実際に現場レベルで利用可能なレベルを目指す、現時点では簡易的な評価値の推計をもって、必ずしも中間処理をになう現場のステークホルダーだけではなく、例えば自治体や行政が、新しい使用済製品が出て来たときに、どのような処理を適用すると、どのような素材回収量やその費用がどの程度かについて、目安を得ることが出来るようにするためのものである。

その中で本サブテーマは、中間処理技術情報の収集と、実験やシミュレーションを通した不足情報の補完をになった。最終的な技術と使用済製品をマッチングし中間処理フローの候補を得る作業は実際には両サブテーマで共同して取り組んだが、便宜上代表者機関側のサブテーマの成果として記した。

中間処理技術情報の収集に際しては、残念ながら網羅的に整理された情報はあまりに少ないことが浮き彫りになった。すなわち、実験レベルの情報であっても必要な組成情報が無い、逆に費用情報が取れないなどの問題が多く起こり、また実操業データからは詳細な組成等を得ることが難しかった。これはこの種の情報を整理するときの統一フォーマットなどを用意することの意味を示唆するものでもある。

更に、不足分を補完するための実験、シミュレーションの中で、クロスフローシュレッターからの基板脱離に関する機構を解明し、パラメタを変えつつ多くの実験をせずともおよその回収率が推計できるようになったことは、機構解明という学術的な意味と、実験回数の削減という実操業上の意味を二つ持つものでもあった。本サブのテーマは最終的なマッチングの試行に大きく貢献した。

1. はじめに

回収すべき素材としてのレアメタルへの注目の高まり、多様な製品を含む小型家電リサイクル制度が導入されたことなどを見るに、リサイクルはますます複雑になるばかりである。他方で SDGs のゴール 12 にマテリアルフットプリントの削減が明確にうたわれ、欧州はじめ世界中で資源効率の向上が望まれる中、3R 全体への期待は高まり続けており、これまでも大きな貢献を果たしてきたリサイクルについてもさらなる貢献が期待されることは間違いない。こうした中、リサイクルの高度化、高効率化をうたうなど旧来では回収しなかったような素材をリサイクルしていこうとする動きもある。

ここで我が国を見れば、技術力も、また実際の操業そのものも極めて強力な素材産業を持ち素材リサイクルに対するポテンシャルは非常に高いと考えられる。しかし、先にも述べたように使用済製品が多様化し、またその変化の速度も速まりつつある中、リサイクルシステムにおいては極めて複雑なものへと変化しつつある。そして、中間処理、すなわち破碎・分離・選別技術が、この多様化する処理対象物を、回収を担う社会システムから我が国の誇る強力な素材産業へ適切な形に処理して渡す必要があり、その重要性は高まっている。しかし、そのリサイクル産業への実装については、必ずしも我が国は先進国とは言えない状況がある。

特に我々が問題であると認識している点は、実際には存在している中間処理技術が体系的に処理されておらず、これを網羅的に把握しているステークホルダーが存在していないという点にある。つまり課題は「中間処理技術と処理対象物の正しいマッチング」であり、そのためのシステム構築にある。さらにこれを実現

するためにはそもそも中間処理技術を正しく整理するだけの情報が必要であるが、こうした技術の体系的な整理自体が行われていない。

この２つの情報を体系的に整理し、適切に組み合わせることでリサイクルシステムの高度化、効率化を図ることは可能であると考えられるが、それを実証して見せた事例は我々の知る限り存在しない。

２．研究開発目的

本サブテーマは中間処理技術を体系的に整理することが目的である。そのために次のような目的を設定した。すなわち 1) 既存の情報を収集・整理することで DB 設計に寄与すること、そして実際に得られた情報を DB 中に収納すること。2) 我が国の資源循環の現状を見つつ、1) で得られたデータに不足しているものを明らかにし、これを実験、シミュレーションを用いて補うことである。

３．研究開発方法

３．１ 既存のデータの情報収集

既存情報の収集に際して、最初のターゲットは 研究分担者（所）がこれまで自身で行ってきたものや、関連する研究者、フィールドでの実証実験などのデータを対象とした。これは実操業中のプラントに比して詳細なデータが集まっている可能性が高いことを期待したものである。結果の項に詳細を示すが、残念ながらそれほど細かいデータは集まらず、次項に示す実験及びシミュレーションによる補完が重要なものとなる事が明らかになった。

３．２ 実験とシミュレーションによる補完

その対象については 3.1 で述べた収集されたデータと、現在の社会状況を踏まえた上で高品位小型家電処理に期待のかかるドラム型衝突式破砕機の一つであるクロスフローシュレッダーを用いることとした。実験室レベルでの事例は多く、先行事例的には商業ベースでも用いられつつあるものの、多様な小型家電を入れた場合に何が起こるかを全て試したと言えるほどの情報はない。ここでは３年間で実施した全ての実験を記すことは叶わないため、最終年度に実施したスマートフォン、電子レンジ、電子炊飯器を事例に、実験の設定方法等を示す。

スマートフォンは、内蔵する電子基板に比較的高密度に電子部品や素子が使われており、今後の排出量の増加も予想される。既往の研究の多くは、携帯電話やデジタルカメラなど、内蔵する電子基板に比較的高密度に電子部品や素子が使われている家電に対して行われているため、内蔵する電子基板にはあまり多くの電子部品や素子が使われていないと考えられる電子レンジや電気炊飯器に対する粉碎特性などのデータや知見が不足している。そのため、電子レンジや電気炊飯器を検討対象とした。

（１）装置

破砕試験には、ドラム型衝撃式破砕機であるクロスフローシュレッダー（佐藤鉄工株式会社、s-1250、s-1000）を用いた。クロスフローシュレッダーは、装置下部に攪拌体としてチェーンを有しており、チェーンが回転することで試料に衝撃が与えられて破砕が行われる。本研究では、直径および高さが異なる２つの破砕機を使用した。装置外観を図 1 に、破砕機の寸法を図 2 にそれぞれ示す。



(a) s-1250



(b) s-1000

図 1 クロスフローシュレッダー外観

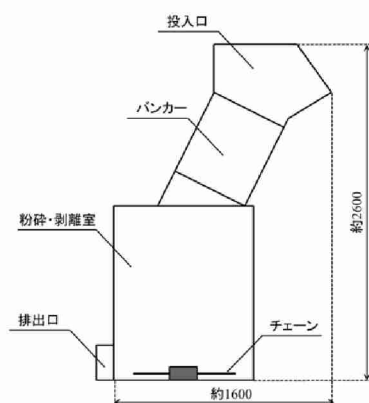


図 2 クロスフローシュレッダーの寸法(s-1000)

(2) 実験方法

破碎試料には、上述のようにスマートフォン、電子レンジおよび電気炊飯器を使用した。試験に使用した家電を図 2 に示す。スマートフォンの破碎にはクロスフローシュレッダーs-1000、電子レンジ、電気炊飯器の破碎にはクロスフローシュレッダーs-1250 を使用した。破碎実験は、試料投入時に装置の排出口を開放しはじめ、試料が装置外に排出され、破碎音がしなくなるところで装置を停止し、破碎試料を回収した。実験条件のパラメータは、チェーンの回転速度および試料投入量とした。また、電子レンジおよび電気炊飯器を同時に投入する試験も実施した。これらの実験条件を表 1-4 にまとめる。



スマートフォン



電子レンジ



電気炊飯器

図 2 使用済み小型家電サンプル

表 1 スマートフォン：回転速度変化の実験条件

投入重量 (kg)	投入台数 (-)	電 源 周 波 数 (Hz)	回転速度 (rpm)
5.00	51	20	500
4.99	47	30	750
5.05	49	45	1125
5.00	50	60	1500

表 2 電子レンジ：回転速度変化の実験条件

投入重量 (kg)	投入台数 (-)	電 源 周 波 数 (Hz)	回転速度 (rpm)
12.19	1	15	315
12.76	1	20	420
13.48	1	30	630
12.99	1	45	945
13.05	1	60	1260

表 3 電気炊飯器：回転速度変化の実験条件

投入重量 (kg)	投入台数 (-)	電 源 周 波 数 (Hz)	回転速度 (rpm)
3.31	1	10	210
2.59	1	15	315
2.31	1	20	420
3.82	1	30	630
4.02	1	45	945
3.32	1	60	1260

表 4 電子レンジ・電気炊飯器：投入量変化の実験条件

投入重量 (kg)	投入台数 (-)	電 源 周 波 数 (Hz)	回転速度 (rpm)
22.01	電子レンジ×2	20	420
6.47	電気炊飯器×2	20	420
6.40	電気炊飯器×3	20	420
14.74	電子レンジ×1 電気炊飯器×1	20	420

(3) シミュレーション方法

中間処理技術のデータベース化の目的の一つは、様々な対象物に適切な処理技術、処理条件の選定を可能にすることが挙げられる。しかしながら、実験のみでは得られるデータに限界があり、様々な処理技術や対象試料の横断的な比較が困難である。近年、実験結果を評価・考察するための有効なツールとしてシミュレーションが期待されている。そこで、本研究ではシミュレーションを用いて、使用済み小型家電からの基板回収過程を予測する技術の開発に取り組んだ。粉体シミュレーションの 1 つである離散要素法 (Discrete element method; DEM) を用いて、破碎機内の試料の挙動解析を行ない、シミュレーションから得られた衝突エネルギーを評価指標とし、衝突エネルギーの値から基板回収過程を予測できる手法の開発を目指した。

クロスフローシュレッダーに装着されているチェーンや使用済み小型家電の形状をモデル化するために、DEM に粒子ベース剛体モデルを導入した。本モデルでは、チェーンや使用済み小型家電を剛体と仮定しているため、試料の破碎や基板の脱離を直接的にシミュレーションすることはできない。そこで、実験で得られた基板回収特性を評価するために、装置内で試料が受けた衝突エネルギーを算出することで、間接的ではあるが基板回収特性を評価した。衝突エネルギー E は、以下の式より算出した。

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

ここで、 m は換算質量、 v は相対速度である。解析時間内において装置内で発生した衝突エネルギーを合計し、その値を投入試料数で割ることで試料 1 つが受けた衝突エネルギーを算出した。

(4) 基板回収予測式

式(2)に示すとおり、破碎後に回収された基板重量と投入した使用済み小型家電に含まれる基板重量の割合を用いて、使用済み小型家電からの基板回収率を定義した。

$$\text{基板回収率} = \text{基板回収量} / \text{投入基板量} \quad (2)$$

ここで、基板回収量とは、破碎試験後に回収された産物のうち、目視で基板と確認されたものの総重量である。また、投入基板量は、投入した使用済み小型家電に含まれる基板の総重量の推算値である。電子基板の高効率なリサイクリングを達成するためには、使用済み小型家電に含まれる電子基板は、家電筐体から未破壊のまま脱離させることが理想的である。しかしながら、破碎機を用いた場合、家電筐体からの電子基板の脱離は、電子基板の破碎と同時に進行してしまう。すなわち、破碎機内において、使用済み小型家電同士の衝突あるいは使用済み小型家電と破碎機壁面やチェーンのリングの衝突の結果、家電筐体からの電子基板の脱離と破碎が同時に進行してしまう。したがって、家電筐体からの電子基板の脱離と破碎は、粒子剛体モデルを用いた DEM シミュレーションから得られた衝突エネルギーと関連づけられると考えられる。そこで本研究では、電子基板の脱離過程および破碎過程を 1 次の速度式で仮定した。基板脱離率 D は、DEM シミュレーションから得られた衝突エネルギー E と脱離速度定数 k_D を用いて、

$$D = 100(1 - \exp(-k_D E)), \quad (3)$$

と表すことができる。また、同様に、基板破碎率 B は、衝突エネルギー E と破碎速度定数 k_B を用いて、

$$B = D(1 - \exp(-k_B E)), \quad (4)$$

と表すことができる。基板回収率は、未破碎で家電筐体から脱離した基板の重量割合であるから、基板脱離率と基板破碎率の差で表すことができる。つまり、基板回収率 R は、

$$\begin{aligned} R &= S - B \\ &= 100(1 - \exp(-k_D E)) \exp(-k_B E) . \end{aligned} \quad (5)$$

と表すことができる。これらの速度式において、脱離速度定数および破碎速度定数は、実験およびシミュレーションから決定づけるフィッティングパラメータである。

4. 結果及び考察

4.1 既存情報の収集

別サブテーマにおけるデータベース設計の結果等を踏まえ、収集された情報の一覧を表5に示す。

一般粉碎と特殊粉碎の区別がやや分かりにくく、特殊粉碎に利用される技術としてあげられている2つが双方共一般粉碎にも含まれているが、これはパーツセパレータ、クロスフローシュレッダ共に一般的な粉碎にも用いることができ、実際にそのようなデータが存在したためにこうしたハンドリングとなった。のちに実験・シミュレーションにより補完される事例となるクロスフローシュレッダによる基板脱離のようなある種の選択的な粉碎・破碎をここでは特殊粉碎と呼んでいる。

表5 DBに収納された情報の一覧

モノ:使用済製品	モノ:処理後の産物	技術:大分類	技術:利用機械・手法
実操業系(4)	篩分けによるもの(15)	手解体(1)	手解体(1)
小型・高品位小電	-0.25 [mm]	一般粉碎(14)	手解体
中型・高品位小電	0.25-0.5 [mm]	特殊粉碎(11)	
ケーブル類	0.5-1 [mm]	選別(12)	一般粉碎(14)
中大型・低品位小電	⋮		縦型破碎機
			プレシュレッダー
焼却系(1)	手解体産物(6)		シュレッダー
都市ごみ焼却主灰	基板		パーツセパレータ
	電池		ボールミル
実験系(11)	⋮		クロスフローシュレッダ SD-1000
携帯電話			⋮
ルーター基板	一般粉碎産物(1)		
PCサーバ	破碎物		特殊粉碎(11)
デジカメ			パーツセパレータ
電子レンジ	特殊粉碎産物(4)		クロスフローシュレッダ SD-1000
炊飯器	筐体(その他)		⋮
デスクトップPC	基板		選別(12)
ハードディスク	⋮		フェライトドラム型磁選機
ビデオカメラ			渦電流選別機
ゲーム機(試験)	選別産物(10)		⋮
スマートフォン	磁着物		
	導体		
	⋮		

4.2 実験とシミュレーションによる補完

3.2節の説明と同様に、最終年度に実施したスマートフォン、電子レンジ、電子炊飯器を事例に示す。これ以外に実施したものについてもDB内には当然収納されており、例えば別サブテーマの成果に示したマッチングのケーススタディでは携帯電話、デジタルカメラの混合処理をそうしているがそこでのデジタルカメラのデータは別の年度内に実施された実験・シミュレーションによる値を一部使っている。

(1) スマートフォン破碎における回転速度の影響

表1に示す条件で実施したスマートフォン破碎試験の結果を以下にまとめる。上述のとおり、スマートフォンの破碎試験には、クロスフローシュレッダーS-1000を用いた。電源周波数 20 Hz、チェーン回転速度 500

rpm の条件で破碎したスマートフォン破碎産物のうち、電子基板として回収されたものを図 4 に示す。図には、左から順に、4-8 mm、8-16 mm、16-32 mm、32-64 mm および 64 mm 以上の粒径として回収された代表的な回収基板を示している。図より、基板のサイズが大きいほど、基板上に多くの電子部品や素子が装着されていることがわかる。これは、基板上の電子部品や素子からの有用金属を効率的に回収するためには、筐体から電子基板をできる限り破碎しない状態で脱離することが適していることを示している。

各回転速度における破碎試験から得られた産物の粒度分布を、図 5 に示す。ここで、電源周波数はチェーン回転速度と比例関係にある。電源周波数が増加する、すなわちチェーン回転速度が増加するにつれて、産物の粒度分布は微粒にシフトすることがわかる。また、電源周波数 20 Hz とそれ以外の電源周波数の産物の粒度分布に大きな差があることがわかる。したがって、電源周波数が 30 Hz を超える条件でのチェーンの回転速度に、スマートフォンの筐体を破碎するのに十分なエネルギーを有していることが示唆される。スマートフォンからの電子基板の脱離に与えるチェーン回転速度の影響を評価するために、回収基板のサイズごとの個数分布および重量分布を計測した。回収基板の個数分布を図 6 に示す。16 mm 以下に分類された回収基板の個数は、32 mm 以上に分類された回収基板の個数よりも多かった。電源周波数の増加にともない、回収基板の個数、とくに 16 mm 以下の個数が増加していることがわかる。図 7 に回収基板のサイズごとの重量分布を示す。いずれの電源周波数においても、大きなサイズの回収基板の重量が分布の大部分を占めていることがわかる。回収基板の総重量を比較すると、電源周波数 30 Hz の条件が一番大きいことがわかる。したがって、回収基板の総重量を最大化させるとともに破碎される基板量を最小化させるような最適条件の存在が示唆され、スマートフォン破碎の場合では、電源周波数 30 Hz が最適であることが結論づけられる。



図 4 スマートフォンの回収基板

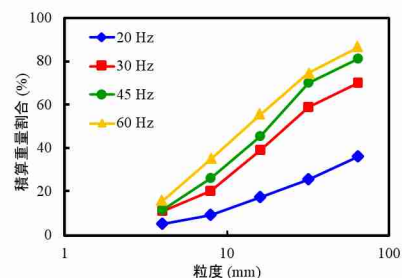


図 5 スマートフォン破碎産物の粒度分布

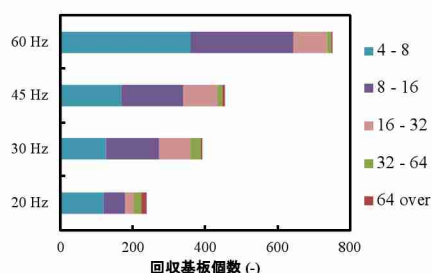


図 6 スマートフォン回収基板の個数分布

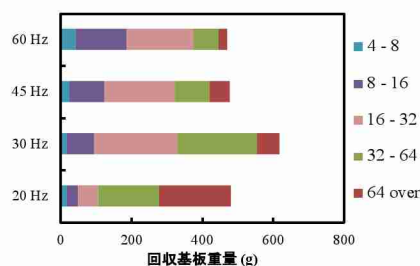


図 7 スマートフォン回収基板の重量分布

シミュレーションから得られた破碎機内のスマートフォンの挙動を図 8 に示す。チェーンの回転速度が大きくなるほど、チェーン付近のスマートフォンの速度が大きくなっていることがわかる。これは、スマートフォンが回転するチェーンから大きな衝突エネルギーを受けるためであると考えられる。したがって、スマートフォンと回転するチェーンの衝突がスマートフォンの筐体や基板を破碎する主要因であることが示唆された。解析初期の 3 秒間における総衝突エネルギーおよび総衝突エネルギーを総衝突数で除した平均衝突エネルギーを表 5 にまとめる。

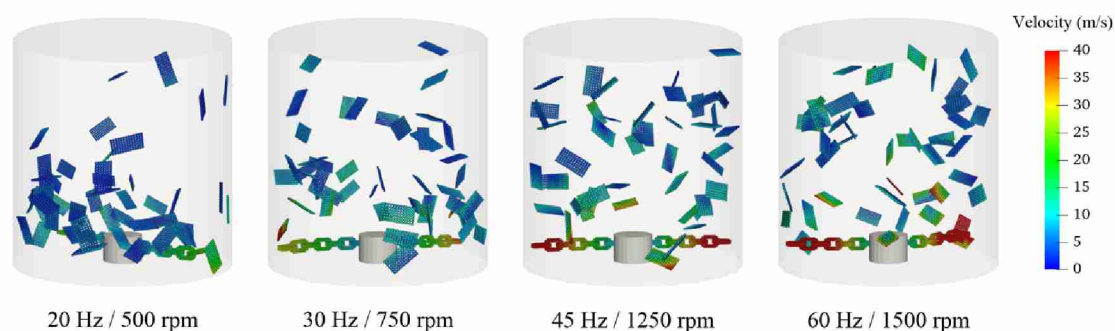


図8 破碎機内のスマートフォン挙動

表5 スマートフォンの衝突エネルギーまとめ

	20 Hz / 500 rpm	30 Hz / 750 rpm	45 Hz / 1250 rpm	60 Hz / 1500 rpm
平均衝突エネルギー (J)	1.15×10	2.40×10	5.94×10	1.04×10^2
総衝突エネルギー (J)	1.04×10^4	2.57×10^4	5.33×10^4	1.05×10^5

チェーン回転速度が大きくなるほど、総衝突エネルギーおよび平均衝突エネルギーが大きくなることわかる。より大きな電源周波数およびチェーン回転数はスマートフォンの破碎に十分なエネルギーを与えることができ、スマートフォン筐体からの基板脱離や破碎を促進させることができると考えられる。

(2) 電子レンジおよび電気炊飯器の破碎における回転速度の影響

表2および3に示す条件で実施した電子レンジおよび電気炊飯器の破碎試験の結果を以下にまとめる。上述のとおり、これらの破碎試験には、クロスフローシュレッダーS-1250を用いた。電源周波数60 Hz、チェーン回転速度1260 rpmの条件で破碎した電子レンジおよび電気炊飯器破碎産物のうち、電子基板として回収されたものを図9に示す。図4と同様に、左から順に、4-8 mm、8-16 mm、16-32 mm、32-64 mmおよび64 mm以上の粒群として回収された代表的な回収基板を示している。図4で示したスマートフォン破碎から得られた基板と比較すると、電子レンジや電気炊飯器の破碎から得られた基板上の電子部品や素子の数は少ないことがわかる。基板上にある電子部品や素子の数や種類は、電子レンジと電気炊飯器の間にはほとんど違いが無いように思われる。スマートフォンと比べると、電子レンジや電気炊飯器には有用金属を含む部品があまり多く使われていないと考えられる。

電子レンジおよび電気炊飯器の破碎から得られた産物の粒度分布を図10に示す。いずれの電源周波数の条件においても、電子レンジの破碎試験から得られた粒度分布には、大きな差は確認されなかった。これは、モーターのような大きくて重たい部品が電子レンジに装備されており、このような部品がクロスフローシュレッダーの破碎において粉碎されなかったためであると考えられる。電子レンジの破碎試験から得られた粒度分布には、電源周波数30 Hz以上の条件と電源周波数20 Hz以下の条件の間に大きな差があり、電源周波数30 Hz以上の条件では、粒度分布が全体的に微粒領域にシフトしていることが確認された。これは、電源周波数30 Hz以上の条件では、チェーンの回転が電気炊飯器を破碎するのに十分なエネルギーを有していることを示唆している。スマートフォンの破碎試験のときと同様に、回収基板のサイズごとの個数分布および重量分布を計測した。回収基板の個数分布を図11に示す。スマートフォンの破碎試験のときに得られた傾向と同様に、16 mm以下に分類された回収基板の個数は、32 mm以上に分類された回収基板の個数よりも多かつ

た。電源周波数 45 Hz の条件を除いて、電源周波数の増加にともない、回収基板の個数、とくに 16 mm 以下の個数が増加していることがわかる。電源周波数 45 Hz の条件において、回収基板の個数が少なかったのは、電気炊飯器の個体差に起因するところであると考えられる。図 12 に電子レンジおよび電気炊飯器の破碎試験から得られた回収基板の重量分布を示す。電子レンジおよび電気炊飯器のいずれも、電源周波数 30 Hz の条件において、回収基板の総重量が最大となった。したがって、電子レンジおよび電気炊飯器のいずれも、電源周波数 30 Hz の条件が最適であることが示唆された。

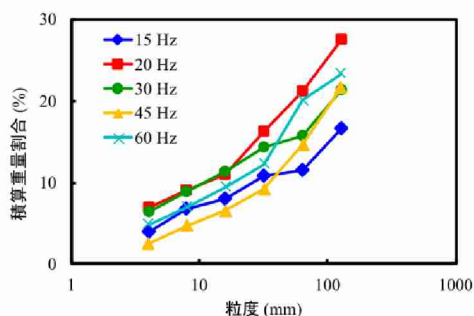


電子レンジ

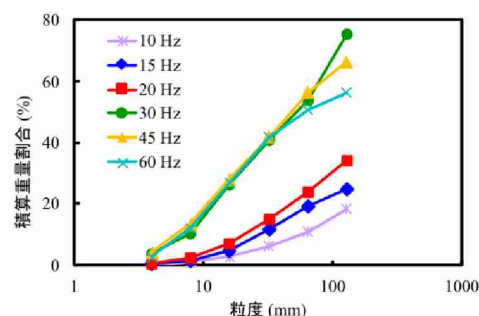


電気炊飯器

図 9 電子レンジおよび電気炊飯器の回収基板

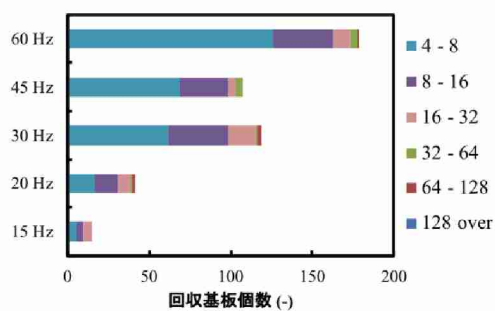


電子レンジ

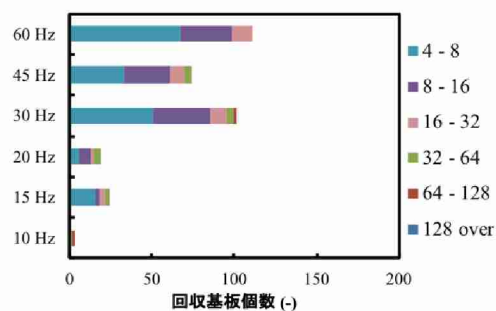


電気炊飯器

図 10 電子レンジおよび電気炊飯器の破碎産物の粒度分布



電子レンジ



電気炊飯器

図 11 電子レンジおよび電気炊飯器の破碎産物の個数分布

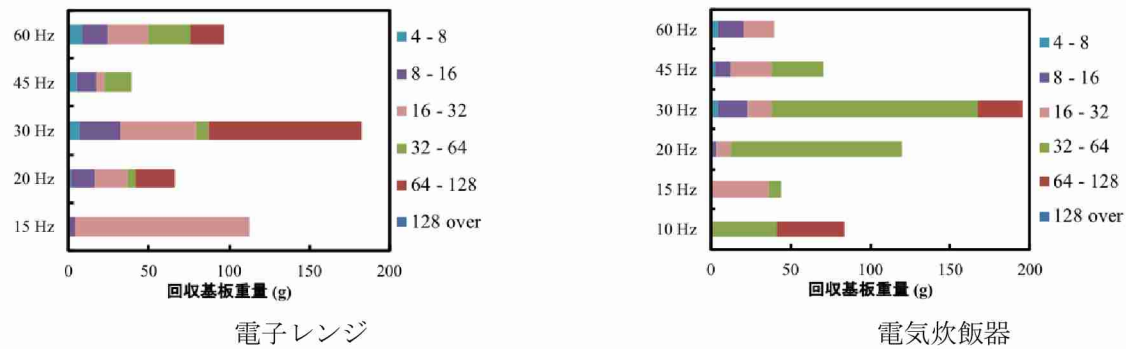


図 12 電子レンジおよび電気炊飯器の破碎産物の重量分布

シミュレーションから得られた破碎機内の電子レンジおよび電気炊飯器のチェーンとの衝突挙動を図 13 に示す。チェーンとの衝突前後の電子レンジおよび電気炊飯器に着目すると、チェーンの衝突によって電子レンジおよび電気炊飯器が運動量を得ていることがわかる。図には、電源周波数 30 Hz の条件における衝突挙動を示しているが、他の電源周波数の条件においても同様の傾向が確認された。スマートフォン破碎のときと同様に、電子レンジや電気炊飯器と回転するチェーンの衝突がこれらの筐体や基板を破碎する主要因であることが示唆された。解析初期の 3 秒間における総衝突エネルギーおよび総衝突エネルギーを総衝突数で除した平均衝突エネルギーを表 6 にまとめる。チェーン回転速度が大きくなるほど、総衝突エネルギーおよび平均衝突エネルギーが大きくなることがわかる。より大きな電源周波数およびチェーン回転数は電子レンジや電気炊飯器の破碎に十分なエネルギーを与えることができ、これらの筐体からの基板脱離や破碎を促進させることができると考えられる。

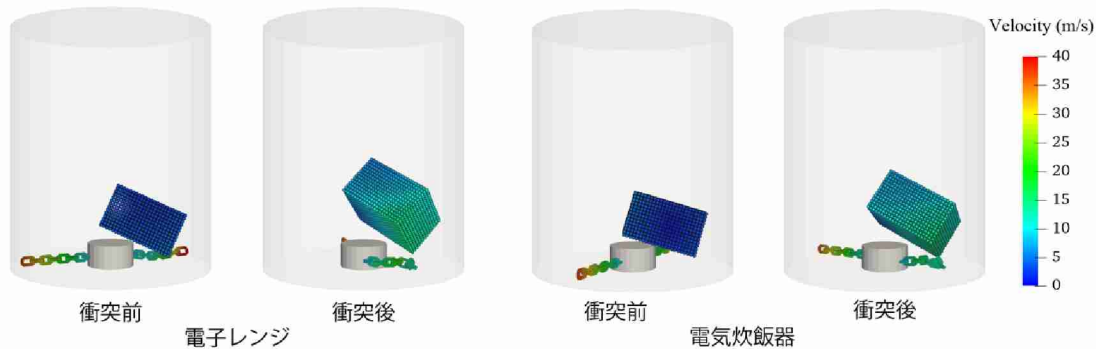


図 13 電子レンジおよび電気炊飯器のチェーンとの衝突挙動

表 6 電子レンジおよび電気炊飯器の衝突エネルギーまとめ

電子レンジ	10 Hz/210 rpm	15 Hz/315 rpm	20 Hz/420 rpm	30 Hz/630 rpm	45 Hz/945 rpm	60Hz/1260rpm
平均衝突エネルギー		2.12×10^2	1.77×10^2	2.88×10^2	1.74×10^3	2.91×10^3
総衝突エネルギー		3.25×10^4	3.26×10^4	4.44×10^4	2.17×10^5	6.43×10^5
電気炊飯器	10 Hz/210 rpm	15 Hz/315 rpm	20 Hz/420 rpm	30 Hz/630 rpm	45 Hz/945 rpm	60Hz/1260rpm
平均衝突エネルギー	1.54×10	6.53×10	6.60×10	2.35×10^2	3.31×10^2	1.66×10^3
総衝突エネルギー	3.01×10^3	5.68×10^3	1.25×10^4	1.13×10^4	3.54×10^5	4.98×10^5

(3) 基板回収予測式の確立

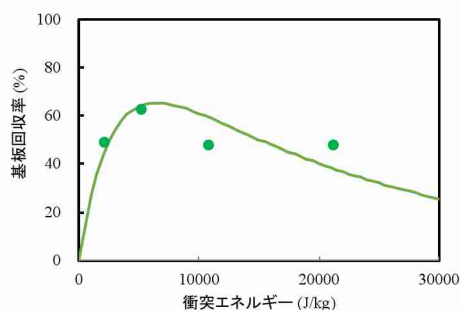
破碎後に回収された基板の総重量から、各破碎条件における基板回収率を算出した。算出した基板回収率を表 7 にまとめる。電源周波数が低い条件から得られた基板回収率は、電源周波数が中程度の条件から得られた基板回収率より小さいことが確認された。これは、電源周波数が低い条件では、家電筐体からの基板脱離や破碎に十分なエネルギーを有していないためであると考えられる。また、電源周波数が高い条件から得られた基板回収率も、電源周波数が中程度の条件から得られた基板回収率より小さいことが確認された。これは、電源周波数が高い条件では、家電筐体からの基板脱離を促進させるだけでなく、脱離した基板の破碎も促進させてしまい、結果として、基板回収率が小さくなってしまったと考えられる。実験から得られた基板回収率と投入重量で規格化した総衝突エネルギーの関係を図 14 に示す。図より、基板回収率は、総衝突エネルギーを用いて、1 次の速度式でフィッティングできることがわかる。推定した脱離速度定数(k_D)および破壊速度定数(k_B)を表 8 にまとめる。これらの速度定数は、小型家電の種類によって異なる。重くて大きな小型家電から基板を脱離させるためには、軽くて小さな小型家電から基板を脱離させるよりも、多量のエネルギーが必要であるから、小型家電の重量とサイズが大きくなるにつれ、脱離速度定数は小さな値をとると考えられる。スマートフォンの破壊速度定数は、電子レンジや電気炊飯器の破壊速度定数よりも小さい。これは、それぞれの小型家電内の基板に装着されている電子部品や素子の数の差によると考えられる。スマートフォンの基板には多くの電子部品や素子が装着されているため破壊速度定数が小さく、破壊されにくいのに対して、電子レンジや電気炊飯器の基板にはあまり電子部品や素子が装着されていないため破壊速度定数が大きく、破壊されやすい。このように、脱離速度定数および破壊速度定数は、対象となる小型家電の重量、サイズや小型家電内の基板に装着されている電子部品や素子の数によって特徴づけられる。

表 7 基板回収率の比較

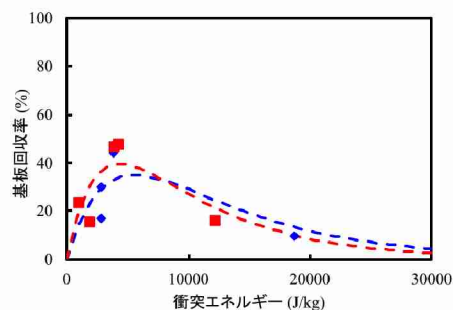
	10 Hz	15 Hz	20 Hz	30 Hz	45 Hz	60 Hz
スマートフォン	－	－	48.5	62.6	47.8	47.5
電子レンジ	－	30.0	16.9	44.1	10.0	24.2
電気炊飯器	23.1	15.6	47.4	46.8	16.1	10.9

表 8 速度定数のフィッティング結果

	スマートフォン	電子レンジ	電気炊飯器
脱離速度定数 k_D	3.24×10^{-4}	1.77×10^{-4}	2.75×10^{-4}
破碎速度定数 k_B	4.54×10^{-5}	1.05×10^{-4}	1.23×10^{-4}



スマートフォン



電子レンジ (赤) および電気炊飯器 (青)

図 14 基板回収率と衝突エネルギーの関係

(4) 低品位家電：投入量変化，混合条件

前項までは、使用済み小型家電を品目別にクロスフローシュレッダーによる破碎試験を実施し、家電筐体からの基板脱離および破碎の特性を調査してきた。本項では、電子レンジと電気炊飯器を同時に投入した混合条件での破碎試験および電子レンジ、電気炊飯器の品目別に投入台数を変えた破碎試験で得られた結果をまとめる。破碎産物の粒度分布を図 15 に示す。電子レンジ 1 台と 2 台の条件を比較すると、電子レンジ 2 台の条件の方が、あまり破碎されていないことがわかる。これは、電子レンジ 2 台の破碎試験に用いた電子レンジの開閉部の材質が樹脂でできていたのに対し、電子レンジ 1 台の破碎試験に用いた電子レンジの開閉部の材質がガラスでできていたため、破碎具合に大きな差が出たと考えられる。また、投入台数にかかわらず電気炊飯器の破碎産物の粒度分布には、電子レンジほどの差は確認されなかった。混合条件で得られた粒度分布は、電子レンジ 1 台および電気炊飯器 1 台の破碎試験で得られた粒度分布の中間に分布した。それぞれの破碎試験から回収された基板の個数分布を図 16、基板の重量分布を図 17 に示す。基板の個数分布を比較すると、電気炊飯器 3 台投入の条件や混合条件の基板量が多いことが確認された。また、基板の重量分布を比較すると、混合条件での回収基板量が大きいことが確認された。個々の試験で用いた使用済み小型家電の個体差があることから、一般化した結論を導くことは難しいが、小型家電の品目別に粉碎するだけでなく、小型家電の品目を混ぜて粉碎することで、それぞれの家電筐体からの基板脱離を促進させる可能性があると考えられる。

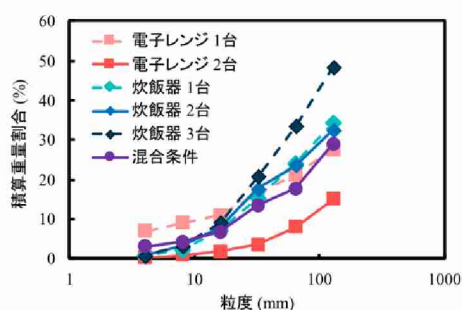


図 15 破碎産物の粒度分布

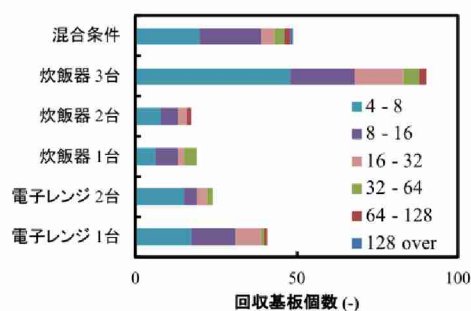


図 16 回収基板個数の比較

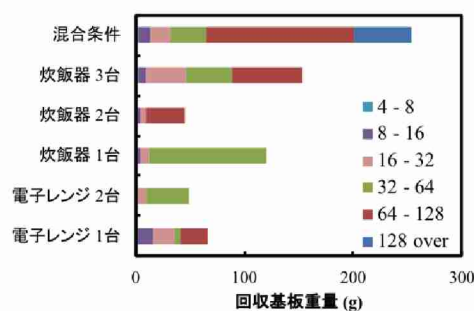


図 17 回収基板重量の比較

(5) まとめ

中間処理技術のデータベース化にあたって、使用済み小型家電としてスマートフォン、電子レンジおよび電気炊飯器を対象とした破碎試験を実施した。各種条件での破碎試験を実施することで、家電筐体から基板脱離および破碎試験による基板回収に適した条件を検討した。さらに、粒子ベース剛体モデルを導入した DEM シミュレーションを実施することで、実験で直接的に観察できない破碎機内の試料挙動を可視化するとともに

に、試料衝突にともなう衝突エネルギーを算出することで、それぞれの破碎試験における基板脱離や破碎特性を間接的に評価した。実験およびシミュレーションから基板回収過程の予測式の導出を試みたところ、1次の速度式を用いることで、使用済み小型家電からの基板回収過程を良好に表せることが確認された。さらに、電子レンジおよび電気炊飯器を混合させた条件での破碎試験を実施したところ、それぞれの品目別に破碎するよりも品目を混ぜて粉碎することで、それぞれの使用済み小型家電からの基板脱離を促進させる可能性があることが確認された。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

中間処理技術に関して、CFS を題材とし、実験の結果とシミュレーションから得られるエネルギー量の組み合わせから、基板脱離機構を解明、実際に実験しないとしてもある程度のパラメタ設定ごとの基板回収率を予想可能としたことは新しい成果だと言える。これについては現在投稿中である。

(2) 環境政策への貢献

今回、小型家電を題材としたケーススタディを行なったが、これは小型家電が施行後5年の最初の見直しを迎えていることを考えれば重要な点である。中間処理の効率化は小型家電リサイクルの最大の課題の一つであるが、本研究が提案するような、実際に処理をすることなくある程度のプロセスを仮想的に組み立て、これを評価するシステムは、その検討に際して極めて重要なものとなろう。

さらに、使用済み製品の排出量予測も制度にとっての意味は極めて大きい。現在小型家電リサイクル制度は、制度制定時の回収量目標を達成することができていないが、実際には目標設定時の想定よりも排出量がかなり少ないことが指摘されており、その精緻化とそれに基づく目標値の検討が必要不可欠である。

<行政が既に活用した成果>

研究代表者（村上）は産業構造審議会産業技術環境分科会廃棄物・リサイクル小委員会 小型家電リサイクルWG、中央環境審議会循環型社会部会小型電気電子機器リサイクル制度及び使用済み製品中の有用金属の再生利用に関する小委員会両委員会の委員として、両省と密に連携を取る立場にあるが、本PJからの研究成果は頻繁に環境省担当者に伝達し、利用いただいているところである。また、産業構造審議会産業技術環境分科会廃棄物・リサイクル小委員会については、家電リサイクル、自動車リサイクルともにWGの委員を務めており、直接のケーススタディは行わないものの、こうした研究から得られた知見は審議会の場やその前後の関係者との意見交換の場などで常に役立てている。

<行政が活用することが見込まれる成果>

先にも述べた通りであるが、これからまさに始まろうとしている小型家電リサイクル制度の5年見直しの場において、中間処理技術に関する知見や、使用済み製品排出量の予測値はそのまま利用可能なものとなる。また今回提案している評価手法についても、その議論の中で大いに役立つと期待されるものである。

6. 国際共同研究等の状況

「特に記載すべき事項はない。」

7. 研究成果の発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付論文>

「投稿中のものを別にすれば特に記載すべき事項はない。」

(2) 主な口頭発表（学会等）

- 1) Y. Tsunazawa, C. Tokoro, S. Owada. "Application of DEM Simulation on Comminution Printed Circuit Boards in Drum Type Agitation Mill". APT 2015 (Sep. 15-18, Seoul, Korea). 2015.
- 2) Y. Tsunazawa, S. Fukui, C. Tokoro. "Investigation of comminution process of e-waste in drum type agitation mill using the discrete element method". 40th International Conference & Exposition on Advanced Ceramics & Composites (Jan. 24-29, Florida, USA). 2016.
- 3) H. Yamamoto: "Consumer behaviors of small-size WEEE use and disposal" ISIE SEM-AP Abstract Book, p. 103-104. (Third Prize in Poster Competition)
- 4) 福井将、綱澤有輝、松岡光昭、所千晴、村上進亮：「DEM シミュレーションを用いた破碎による廃小型家電からの基板回収挙動の予測」, エコデザイン・プロダクト&サービスシンポジウム 2016, 2016 年 12 月 7 日, p.163-164, P-16. (優秀賞受賞)
- 5) Mei Nagase, G.Granada, S.Fukui, C.Tokoro, S.Murakami, " Prediction formula for determination of the best condition to remove printed circuit boards from home appliances using DEM simulation" IUMRS-ICAM2017, 京都大学 京都 2017.8.27-9.1
- 6) Mei Nagase, Shinsuke Murakami, Giuseppe Granata, Chiharu Tokoro, Yuichiro Kanematsu, Yasunori Kikuchi, " Development of a new database for the design of efficient recycling processes: the case study of tantalum" , EcoDesign2017 TAYIH LANDIS HOTEL 台 南 ・ 台 湾 2017.11.29-12.1

(3) 知的財産権

「特に記載すべき事項はない。」

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 所千晴：「循環型社会構築に寄与する固体分離技術」, 日本学術会議第 29 回環境工学連合講演会, 招待講演, P-10, 2016 年 5 月 13 日.
- 2) 所千晴：「資源循環型社会を構築するための技術とその社会実装への取り組み」, 日本学術会議公開シンポジウム, 2017 年 1 月 17 日.

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 所千晴：「未来 EYES」, BS ジャパン, 2016 年 8 月 28 日放映.
- 2) 所千晴：「ガリレオ X」, BS フジ, 2017 年 3 月 26 日放映.
いずれも開発したシミュレーションの一部を紹介

(6) その他

- 1) エコデザイン・プロダクツ&サービスシンポジウム 2016 優秀賞受賞 福井将、綱澤有輝、松岡光昭、所千晴、村上進亮：「DEM シミュレーションを用いた破碎による廃小型家電からの基板回収挙動の予測」

8. 引用文献

「特に記載すべき事項はない。」

Ⅲ. 英文 Abstract

Organization of Comminution and Separation Technologies for More Efficient Recycling System

Principal Investigator: [Shinsuke Murakami](#)

Institution: Graduate School of Engineering, The University of Tokyo
7-3-1 Hongo Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, JAPAN
Tel: +81-3-5841-7044/ Fax: +81-3-5841-7044
E-mail: smurakam@sys.t.u-tokyo.ac.jp

Cooperated by: Waseda University

[Abstract]

Key Words: Processing, Resource Efficiency, Database, System Evaluation, End Of Life Goods Generation Estimation, Cost Benefit Analysis, High efficiency

Considering our limited resource availability and expanding associated environmental impacts, we need to decrease our material footprint and more efficient recycling system will be highly demanded. In this research project, our ultimate goal is to achieve higher efficiency in recycling system as a whole. In Japan, we have very sophisticated material producing industry, though we need to hand our wastes as the industry can utilize efficiently. On the other hand, consumer durables becomes more diverse in various sense, and the material use in the production also becomes diverse. Then, how to process these End of Life (EoL) goods becomes more important than ever.

We developed the database for these processing technologies, including crushing, shredding, and separations. The information stored includes the technologies details as follows; the details of inputs and outputs, energy consumption, cost, type of equipment used. With these information, the database can propose the potential processing flows consists of multiple technologies. We also constructed the evaluation system so as to the users choose most appropriate flows from the candidates proposed by the database. The database also includes the information for EoL generation estimation.

In data collection, we found out there are so many data available but most data is incomplete; some lacks the composition data, while others do not include the monetary information. This suggests that we need to prepare the format for data collection and share among the stakeholders including both researchers and businesses. We also complement lacked data with laboratory experiment and simulations. These works enable us to estimate the outputs without carrying out significant amount of laboratory tests and some academically new findings.

In the information for EoL generation estimation, we gather the lifespan information for small-size home appliances, which were selected as the case study for the proposal system.

In the end, we utilize the database to propose the candidate processing systems for high-grade small size home appliances. Our database successfully propose the feasible system, which recover more materials both in weight and TMR-converted weight. However, proposed system has worse economic

feasibility than the current system. This is important outcome, because business may not employ the proposed system, but it suggests that there are potentially better system in the context of resource recovery, with less economic feasibility. If any political supports available, the proposed system may become better alternative for our society.