

令和 6 年 5 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K12271

研究課題名（和文）小型家電リサイクルを事例としたプラスチック二次原料化のための定量解析

研究課題名（英文）Quantitative analysis for the conversion of plastics into secondary raw materials in e-waste recycling

研究代表者

齋藤 優子（Saito, Yuko）

東北大学・環境科学研究科・准教授

研究者番号：30712575

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、小型家電を主とした定量的なデータ分析を行った。現場で分析可能なハンドヘルド型のプラスチックアナライザーやXRFを用いて、従来明らかとされてこなかった小型家電のプラ構成比や添加剤に関するデータ基盤を構築するための知見を得た。一方で、国内外で主に充電式二次電池であるリチウムイオン電池による火災が問題となっており、小型家電リサイクルと抱き合わせで電池リサイクルの課題も考えていく必要性が浮き彫りになった。そこで各種データの収集や電池関連境界との情報交換を行い、課題を整理したうえで、国内のリチウムイオン電池とそれに付随する資源賦存量推計を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では使用済み小型家電由来のプラスチックに着目し、二次資源化するための課題の抽出を行った。従来科学的知見が希薄で合った小型家電由来プラスチックに関する定量分析を行うことで、その資源性を定量的に議論することを可能となるよう導くことができた。また課題の抽出を通して、プラスチックの母材の分析を通じて添加剤、リチウムイオン電池、太陽電池モジュールの研究へと展開していくことができた。当初の研究課題設定よりも広範囲な研究を行うことができたと同時に、社会課題を解決するための知見を得ることができたと考える。

研究成果の概要（英文）：In this study, we conducted quantitative data analysis of plastics derived from small household appliances. Using a hand-held plastics analyzer and XRF, we obtained knowledge on the plastic composition ratio and additives of unknown small household appliances. This highlighted the need to consider the issue of battery recycling as well. After collecting various data and exchanging information with battery-related industries and organizing the issues, we estimated the amount of lithium-ion batteries and associated resources in Japan.

研究分野：資源循環

キーワード：小型家電リサイクル E-waste WEEE プラスチック 二次原料化

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

少子高齢化が進行し、廃棄物処理インフラと社会実態とのミスマッチは今後ますます拡大する懸念がある。小型家電リサイクルは「都市鉱山」として大きな期待が持たれたが、人口減少やプラスチックリサイクルを取り巻く状況の激変に直面している。資源循環分野は従来学術研究が置き去りになってきた部分があるが、実行者・施策立案者が指標にし得る定量的研究こそが極めて重要である。

従来プラスチックリサイクルに関する研究開発は、プラスチックのまま原料化・製品化するマテリアルリサイクル（MR）のための選別技術や、原料・モノマー化、高炉還元剤、コークス炉化学原料化、ガス化、油化等のケミカルリサイクル（CR）技術、セメント原燃料や発電・熱利用焼却等のサーマルリサイクル（TR）技術向上を目指す研究、機構解明のための基礎的研究等が行われてきた。また我が国においては、個別リサイクル法で規制された産業（自動車、家電、建設部門や容器包装）では、プラスチック樹脂の種類が明らかである一部（ポリプロピレン;PP, ポリエチレン;PE等）を自社内で自己循環させる「クローズドループ」や品質を下げて日用品等を製造する「カスケード」のMRが行われてきた。

一方で、自治体責任の一般廃棄物や、自治体管轄の小型家電リサイクル法対象の28品目の樹脂組成は明らかとなっておらずリサイクルも進んでいない。すなわち、個別リサイクル法の枠内の限られた範囲では廃プラリサイクルは行われているものの、その枠組みを超えた展開はなく、廃プラの二次原料化を包括的に進めるための研究は十分に行われてこなかったと言える。

2. 研究の目的

本研究の目的は、持続可能で包括的なプラスチックのリサイクルシステムを構築するためのエビデンスとなる研究を行うことである。廃プラを資源としてできる限り二次原料化あるいは利用していくかは、資源の本質である「量」と「品質」を一定のものとして満たすようにする必要がある。すなわち、二次原料の利用工場へ供給を「脈流」から「一定流」にするために、セクターを越えて多くの廃プラを集めることが不可欠である。

さらに品質として、プラスチックの種類はもとより、それぞれのリサイクル（MR・CR・効率的TR）に向ける原料のための忌避物質をどのように一定に制御できるかが重要である。これらの忌避物質（例えば塩素・臭素などのハロゲン、難燃性を補完する目的で使用されるアンチモンなどの重金属、その他添加物質）を各用途向けに制御することができれば、原料利用は大きく進展する可能性があるうえ、エネルギー回収も進展させる事ができる。

従来日本では、良いものを選んで利用する事には長け、そのための要素技術開発も進んできたが、忌避物質を一定量以下に制御し二次製品を使うという考え方の研究はほとんどなかった。本研究の独自性として、従来主に個別リサイクル法の枠内で研究が行われてきたスキームを根本的に打開し、プラ製品群を一括りに捉える点と、従来定性分析に留まりがちであった本分野の研究を定量的に解明する点にある。

3. 研究の方法

本研究では、小型家電を主とした定量的なデータ分析を行った。現場で分析可能なハンドヘルド型のプラスチックアナライザー（TSI社製; Polymax Plastics Analyzer）を用いて、従来明らかとされてこなかった小型家電のプラ構成比に関するデータ基盤を構築する。また、難燃剤として添加されることの多い臭素およびアンチモン含有の有無についてXRF分析器等を用いて測定する。分析結果の実測値を用いて、ワイブル分布による排出量推計を行う。一方で忌避物質対策を主眼に置く研究も行う。また、プラスチックを選別する前の機器収集等を行う際のLiB（リチウムイオン電池）の混入も、それが原因で発生する火災の問題から忌避物質に考える必要が出てきている。EUのRoHS指令、REACH、あるいは国際条約であるPOPs条約や、それを基にした各国の関連法などがそれにあたる。

4. 研究成果

本研究では使用済み小型家電に用いられるプラスチックの二次原料化を図るために、まず市中から実際に排出された小型家電のサンプル採取を行い、スクリーニング分析を行った。初年度である2020年度は、まず小型家電に使用されているプラスチック類のサンプル収集を試みた。一般廃棄物として排出された使用済み小型家電（1,296kg）の平均サンプルを採取した。回収した使用済み小型家電は、今後の国際比較を考慮し、EUのWEEE指令のカテゴリーに基づいて分類し、これらの中から採取したプラスチックサンプル（n=71）のプラスチックの種類や添加剤に関する分析を行った。具体的には、サンプルのプラスチック種類を定性的に明らかにするために、ラマン分光ハンドヘルドアナライザーを用いてスクリーニング調査を行った。さらに、SEM-EDXを用いて、樹脂中の含有元素に関する検討を行った。

上記の分析の結果、使用済み小型家電に用いられるプラスチックの種類を同定すること

ができた。また、母材となるプラスチックの種類だけでなく、添加剤に関する知見も得ることができた。今回分析に供したサンプルのうち、相当数のサンプルにおいて臭素系難燃剤やリン系難燃剤の含有が確認された。

一方、プラスチックは国際循環するものであることから、国際的な比較や、日本の正確な状況の情報発信を行うことを目指し、“The Global E-Waste Monitor”の著者らと web 会議を継続的に実施し、EU の使用済み小型家電量の算出根拠等に関する議論を行った。EU と日本のカテゴリーの違いや排出スキームに関して議論することができた。

2 年目となる 2021 年度はプラスチック中元素の定量分析のため、分散型蛍光 X 線分析装置 (XRF) による網羅的分析を行った。特に塩素・臭素等ハロゲンや臭素系 難燃剤に付随して含有するアンチモン、顔料として小型家電に多用されると考えられるチタン等に主に着目した。

また、リサイクル技術の検討も含め、プラスチックの燃料利用の現状について調査を行った。

一方で、小型家電リサイクルにおいて電池が大きな課題であることが明らかとなって来た。国内外で主に充電式二次電池であるリチウムイオン電池による火災が問題となっており、小型家電リサイクルと抱き合わせで電池リサイクルの課題も考えていく必要性が浮き彫りになった。そこで各種データの収集や電池関連業界との情報交換を行い、課題を整理したうえで、国内のリチウムイオン電池とそれに付随する資源賦存量推計を行った。特に小型家電のうち統計データが比較的整備されている携帯電話、スマートフォン、モバイルバッテリー、ラップトップ、デジタルカメラ、タブレット、加熱式たばこを選定した。その結果、表示の有効性や正極活物質のトレンドについて把握することができた。

制度的な側面からは、特に欧州連合 (EU) で近年サーキュラーエコノミーやカーボンニュートラルへの政策展開の動きがみられる。これらの最新動向を把握するため各種情報収集を行った。欧米では小型家電とそれに付随する電池の資源循環に関して、長期的な目標を立てており、カーボンニュートラルと連携させた資源循環制度、規制を次々に発効している現状について各種情報収集・整理、加えて日本への制度適合性の検討を行った。

3 年目となる 2022 年度は、昨年度 4 月に国が施行した「プラスチック資源循環促進法」を受け、製品プラスチック回収を開始する自治体が出てきたことから、製品プラスチック回収に混入した小型家電プラスチックの分析を行った。実際に自治体を実施した製品プラスチック回収・リサイクル実証事業に参画し、サンプルを取得・分析することで、プラスチック二次資源としての資源性と課題について検討を行った。プラスチック分析の手法に関する知見を得るため、ラマン分光や XRF を用いたスクリーニング分析から、元素分析、ICP-MS、GC-MS 分析等の精緻な分析まで網羅的に行った。その結果、製品プラスチックとして排出されるもののプラスチック組成に加え、添加剤由来と考えられる元素の含有等についても明らかにすることができた。特に、ハロゲン含有については容器包装プラスチックリサイクルルートで再資源化する際の課題として捉えることができた。また、製品プラスチック回収に伴って、リチウムイオン電池等内蔵の小型家電、モバイルバッテリー等が排出される場合があり、EU との法制度比較等も踏まえ課題として指摘した。

一方で、今後新たに多量の排出が見込まれ、EU では WEEE の一つとして取り扱われる使用済み太陽電池モジュールに関する研究を行った。太陽光パネルに用いられるプラスチックに関する研究としては、フッ素樹脂と PET で構成される太陽光パネルのバックシートのリサイクルに関する知見を得た。小型家電リサイクルはリサイクル法制度の枠組みの変化や IT 化による製品の多様化に伴い複雑化が進んでいることから、科学的知見の蓄積によるリサイクル技術・システムの最適化の重要性が増している。本研究の成果によりその実態を示すことができた。

最終年度である 2023 年度はラマン分光装置よりも大幅に小型化したハンドヘルド型近赤外線分光装置を用いてプラスチック分析を行った。既往研究との整合性を検証し、収集後の集積施設や中間処理・リサイクル施設等現場での分析有効性の検証を行った。これらの知見に基づき、製品プラスチック回収における課題と解決策について検討を行った。

また、小型家電に内包するリチウムイオン電池やモバイルバッテリー等の発火事案が頻発し、社会的課題としても増大してきたことから、排出実態に関する調査を行い回収スキームに関する考察を行った。さらに技術開発検討として、減圧加熱により比較的低温で不活化するリサイクル手法の検討を行った。リチウムイオン電池のバインダーに用いられるフッ素樹脂のリサイクルという視点から検討を行った。

さらに、EU では WEEE の一つに分類されている使用済み太陽電池モジュールに関する研究も実施した。樹脂部分に着目し、リサイクル手法や長期使用に関して文献調査等も実施し、回収スキーム等の検討を行った。

本研究では使用済み小型家電由来のプラスチックに着目し、二次資源化するための課題の抽出を行った。定量分析を行うことで、その資源性を定量的に議論することを可能となるよう導くことができた。また課題の抽出を通して、プラスチックの母材の分析を通じて添加剤、リチウムイオン電池、太陽電池モジュールの研究へと展開していくことができた。当初の研究課題設定よりも広範囲な研究を行うことができたと同時に、社会課題を解決するための知見を得ることができたと考える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yoshinori Morita, Yuko Saito, Shogo Kumagai, Tomohito Kameda, Toshikazu Shiratori, Toshiaki Yoshioka	4. 巻 26
2. 論文標題 Fluorine recovery through alkaline defluorination of polyvinylidene fluoride	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Material Cycles and Waste Management	6. 最初と最後の頁 669 ~ 678
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10163-023-01749-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yoshinori Morita, Yuko Saito, Shogo Kumagai, Tomohito Kameda, Toshikazu Shiratori, Toshiaki Yoshioka	4. 巻 25
2. 論文標題 Alkaline hydrolysis of photovoltaic backsheet containing PET and PVDF for the recycling of PVDF	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Material Cycles and Waste Management	6. 最初と最後の頁 674-683
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10163-023-01609-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 齋藤優子, 熊谷将吾, 吉岡敏明	4. 巻 61(6)
2. 論文標題 プラスチックリサイクルの現状と将来展望	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 油空圧技術	6. 最初と最後の頁 32-38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 齋藤優子, 白鳥寿一	4. 巻 33 (3)
2. 論文標題 電池関連制度の海外動向に関する考察 - EUのリチウムイオン電池関連制度を中心として -	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 廃棄物資源循環学会誌	6. 最初と最後の頁 204-213
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshinori Morita, Yuko Saito, Toshiaki Yoshioka, Toshikazu Shirator	4. 巻 175
2. 論文標題 Estimation of recoverable resources used in lithium-ion batteries from portable electronic devices in Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Resources, Conservation & Recycling	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.resconrec.2021.105884	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 白鳥寿一, 齋藤優子	4. 巻 91(10)
2. 論文標題 資源の循環に関する国際的動向-EUの二次資源関連制度を中心に-	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 金属	6. 最初と最後の頁 806-812
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計20件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 白鳥 寿一
2. 発表標題 使用済みPVパネルの適正処理に関するPVCYCLE JAPANの活動-EUのESPRやDPPの動向も考慮して-
3. 学会等名 循環パリュチェーンコンソーシアム第15回セミナー (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Yuko Saito, Shogo Kumagai, Toshikazu Shiratori, Toshiaki Yoshioka
2. 発表標題 Research on the development of data infrastructure for the proper disposal and long-term use of waste photovoltaic panels
3. 学会等名 The 10th 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Yoshinori Morita, Yuko Saito, Shogo Kumagai, Tomohito Kameda, Toshikazu Shiratori, Toshiaki Yoshioka
2. 発表標題 Fluorine Recovery from Used Small Lithium-Ion Batteries for Halogen Circulation
3. 学会等名 International Symposium on Feedstock Recycling of Polymeric Materials (ISFR 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 齋藤優子
2. 発表標題 製品プラスチックリサイクルに関する考察 -仙台市実証事業を事例として-
3. 学会等名 国立環境研究所 循環領域セミナー (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 森田 宜典, 齋藤 優子, 熊谷 将吾, 亀田 知人, 白鳥 寿一, 吉岡 敏明
2. 発表標題 使用済み小型リチウムイオン電池からのフッ素回収
3. 学会等名 第34回廃棄物資源循環学会研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 齋藤 優子
2. 発表標題 プラ新法施行によるプラスチック資源循環の促進
3. 学会等名 プラスチックスマートシンポジウム プラスチックスマート戦略のための超域学際研究拠点 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 齋藤優子
2. 発表標題 使用済み小型家電および使用済み電池の一般廃棄物への排出実態に関する研究 宮城県を事例として
3. 学会等名 日本地域政策学会2023年度 第22回 全国研究【東京】大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuko Saito, Yoshinori Morita, Shogo Kumagai, Tomohito Kameda, Toshikazu Shiratori, Toshiaki Yoshioka
2. 発表標題 Analysis of WEEE Plastics for Secondary Raw Materials
3. 学会等名 The 9th 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 齋藤優子, 熊谷将吾, 亀田知人, 横田一馬, 菅澤拓哉, 川村和輝, 白鳥寿一, 吉岡敏明
2. 発表標題 製品プラスチックリサイクルに関する課題検討-仙台市実証事業を事例とした考察-
3. 学会等名 廃棄物資源循環学会第33回研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuko Saito, Shogo Kumagai, Tomohito Kameda, Kazuma Yokota, Takuya Sugasawa, Kazuki. Kawamura, Toshikazu Shiratori, Toshiaki Yoshioka
2. 発表標題 A Study of the New Plastic Recycling Law in Japan - A Case Study of Sendai City
3. 学会等名 11th International Symposium on Feedstock Recycling of Polymeric Materials 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshinori Morita, Yuko Saito, Shogo Kumagai, Tomohito Kameda, Toshikazu Shiratori, Toshiaki Yoshioka
2. 発表標題 Dehydrofluorination of poly (vinylidene fluoride) by alkaline solutions for fluorine recycling
3. 学会等名 11th International Symposium on Feedstock Recycling of Polymeric Materials 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 齋藤優子
2. 発表標題 リチウムイオン電池に関する国内外の制度状況について
3. 学会等名 廃棄物資源循環学会令和4年度第1回セミナー「リチウムイオン電池の資源性と将来展望」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 齋藤優子
2. 発表標題 プラスチック資源循環と持続可能な社会の実現に向けて
3. 学会等名 環境あきた県民フォーラムセミナー(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 白鳥寿一
2. 発表標題 サーキュラーエコノミーへの移行に向けた課題とは?
3. 学会等名 日本経済研究所21世紀金融行動原則 セミナー2022年度第8回東京講演会(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 白鳥寿一
2. 発表標題 使用済み太陽光発電システムのリユース・リサイクル
3. 学会等名 宮城県環境事業公社セミナー（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 齋藤優子
2. 発表標題 サーキュラーエコノミー - 循環型社会への道筋と課題
3. 学会等名 みやぎグリーン購入セミナー，サーキュラーエコノミー 循環型社会に向けて（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshinori Morita, Yuko Saito, Shogo Kumagai, Tomohito Kameda, Toshikazu Shiratori, Toshiaki Yoshioka
2. 発表標題 Alkaline hydrolysis of photovoltaic backsheets for fluorine recovery
3. 学会等名 The 8th 3R International Scientific Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuko Saito, Nozomi Nakamura, Jiaqi Lu, Siqingaowa Borjigin, Shogo Kumagai, Tomohito Kameda, Toshikazu Shiratori, Toshiaki Yoshioka
2. 発表標題 Brominated flame retardant removal technology for plastic recycling
3. 学会等名 The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 白鳥寿一, 齋藤優子
2. 発表標題 資源の循環に関する国際的動向 EUの二次資源関連制度を中心に-
3. 学会等名 2021年度多元物質科学研究所 金属資源プロセス研究センターシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuko Saito, Toshikazu Shiratori, Yoshinori Morita, Shogo Kumagai, Tomohito Kameda, Toshiaki Yoshioka
2. 発表標題 Screening survey of plastics used in WEEE for conversion to secondary raw materials
3. 学会等名 The 7th 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 日本エネルギー学会	4. 発行年 2023年
2. 出版社 コロナ社	5. 総ページ数 334
3. 書名 廃プラスチックの現在と未来	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 太陽光パネルに使用されるバックシートからのフッ素の回収方法およびフッ化カルシウムの製造方法	発明者 森田宜典, 渡邊亮栄, 吉岡敏明, 熊谷将吾, 齋藤優子	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、B09B 3/35, B02C 23/08	出願年 2023年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	白鳥 寿一 (Shiratori Toshikazu) (20396469)	東北大学・環境科学研究科・客員教授 (11301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関