

再生プラスチック含有化学物質の
分析および健康リスク評価のための
ハンドブック
(第1版)

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

安全科学研究部門

物質計測標準研究部門

2025年7月24日

改訂記録

1. 初版 2025年7月24日

執筆担当者

(所属は2025年7月24日現在。執筆担当順。)

蒲生 昌志	国立研究開発法人 産業技術総合研究所	安全科学研究部門	監修
羽成 修康	国立研究開発法人 産業技術総合研究所	物質計測標準研究部門	監修、5章、 Appendix
小島 直也	国立研究開発法人 産業技術総合研究所 実装研究センター（兼務 安全科学研究部門）	サーキュラーテクノロジー	1、2、4、5章 Appendix
小野 恭子	国立研究開発法人 産業技術総合研究所 実装研究センター（兼務 安全科学研究部門）	サーキュラーテクノロジー	2章
篠原 直秀	国立研究開発法人 産業技術総合研究所	安全科学研究部門	2、3章
山崎 絵理子	国立研究開発法人 産業技術総合研究所	物質計測標準研究部門	2章
小栗 朋子	国立研究開発法人 産業技術総合研究所	安全科学研究部門	3章
中村 圭介	国立研究開発法人 産業技術総合研究所	物質計測標準研究部門	3章
小倉 勇	国立研究開発法人 産業技術総合研究所	安全科学研究部門	3章

目次

1	はじめに.....	1
2	再生プラスチックの利用およびその含有物質に関する現状と動向.....	3
2.1	プラスチックの循環経済構築の必要性.....	3
2.2	プラスチックの種類と用途およびそのリサイクルの現状.....	5
2.3	国内外の安全基準や規制.....	11
2.4	プラスチックに含まれる物質の分析方法.....	16
3	再生プラスチック試料の分析事例.....	21
3.1	収集した再生プラスチック試料の概要.....	21
3.2	フーリエ変換赤外分光分析法（FTIR）を用いた再生プラスチック試料の分析事例.....	24
3.3	可搬型蛍光 X 線分析装置を用いた再生プラスチック試料の分析事例.....	31
3.4	熱脱着ガスクロマトグラフィー／質量分析法を用いた再生プラスチック試料の分析事例.....	36
4	リスク評価のケーススタディ.....	43
4.1	対象物質の選定.....	44
4.2	許容上限値の設定.....	45
4.3	暴露量推計手法.....	47
4.4	ハザード比を用いたリスク評価結果.....	51
4.5	再生プラスチック中に含まれる物質濃度に関する管理上限値の検討.....	52
	参考文献.....	53
5	プラスチックの循環経済構築に向けて.....	57
Appendix A	熱脱着 GC-MS 手法の開発とその検討事項の詳細.....	59
A.1	手法開発の背景.....	59
A.2	手法開発の指針.....	59
A.3	検討事項の詳細.....	60
A.3.1	供試料.....	60
A.3.2	分析条件.....	60
A.3.3	再生プラスチックの使用履歴.....	61
A.3.4	TD-GC/MS のクロマトグラムによる使用履歴の判別.....	62
A.4	今後.....	63
	参考文献.....	63
Appendix B	略語表.....	65
	謝辞.....	67

1 はじめに

近年、循環経済（あるいはサーキュラーエコノミー、Circular Economy、CE など）の観点から、プラスチックのリサイクルへの関心が高まっている。循環経済とは、大量生産・大量消費・大量廃棄が一方向に進むリニアエコノミー（線形経済）に代わって、あらゆる段階で資源の効率的・循環的な利用を図りつつ、付加価値の最大化を目指す社会経済システムを意味する(産業技術総合研究所 HP)。しかし、プラスチックに関する循環経済を実現するためには多くの課題が存在する。とりわけ本書では、再生プラスチックが様々な用途への利用拡大が図られる中、それぞれの用途に応じた安全性を確認する手法が、世界的に確立されていない点に着目する。

現在、再生プラスチックの原料や製品の製造事業者においても、再生プラスチックに含まれると推定される健康懸念物質の種類や量を把握する方法や、それらの物質によるリスクを評価・管理する枠組みについて、検討が進められている段階にある。

本書では、こうした検討に資する科学的知見の一部として、まずはプラスチックのリサイクルに関する現状と課題を整理したうえで、初期的な成果が得られた再生プラスチックの分析事例やリスク評価事例を紹介する。

本書が想定する読者は、再生プラスチック原料（ペレット、フレークなど）の製造事業者や再生プラスチックを利用した製品の製造事業者、およびそれらに関連して分析やリスク評価を実施する事業者である。本書が再生プラスチック製品のリスク管理の一助となれば幸いである。

本書の構成については、次のとおりである。

- ・ 第 2 章「再生プラスチックの利用およびその含有物質に関する現状と動向」では、再生プラスチックに関する循環経済構築が必要とされる背景について整理したうえで、プラスチックの種類と用途およびそのリサイクルの現状、国内外の安全基準や規制の現状、プラスチックに含まれる物質の分析方法について概説する。
- ・ 第 3 章「再生プラスチック試料の分析事例」では、筆者らが実施した、フーリエ変換赤外分光分析法、可搬型蛍光 X 線分析法、および熱脱着ガスクロマトグラフィー／質量分析法を用いた再生プラスチック試料の分析事例を紹介する。
- ・ 第 4 章「リスク評価のケーススタディ」では、先行研究レビューを踏まえ、再生ポリプロピレン製の製品中に RoHS 指令対象物質が含まれるケースを想定して、その健康リスクを評価した結果を示す。
- ・ 第 5 章「プラスチックの循環経済構築に向けて」では、各章の内容を総括し、今後必要と見込まれる技術や取り組みについて述べる。

また、Appendix A では、熱脱着ガスクロマトグラフィー／質量分析（GC-MS）手法の開発とその検討事項の詳細を、Appendix B では、本書で用いた略語の一覧をそれぞれ示す。

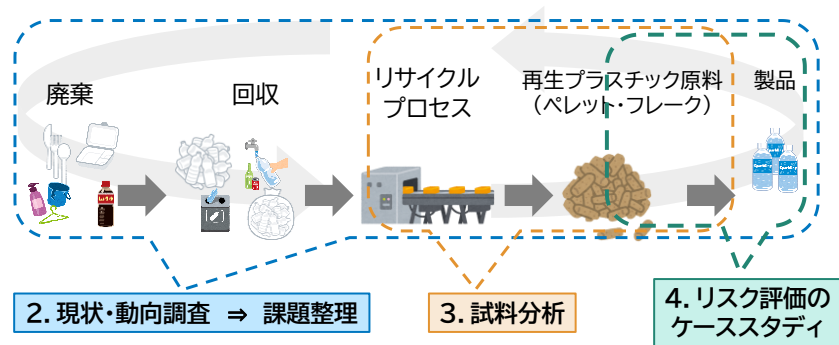


図 1-1 本書の構成

参考文献

産業技術総合研究所 HP, 2023. 産総研マガジン 「サーキュラーエコノミーとは？」 [WWW Document]. 産総研マガジン. URL https://www.aist.go.jp/aist_j/magazine/20231011.html (accessed 5.7.25).

2 再生プラスチックの利用およびその含有物質に関する現状と動向

2.1 プラスチックの循環経済構築の必要性

近年、プラスチックのリサイクルに関する要求は高まっている。日本の国家戦略にも明示されており、たとえば「プラスチック資源循環戦略」(消費者庁ほか, 2019)では、2030年までに容器包装の6割をリユース・リサイクルすること、2035年までに全ての使用済プラスチックを100%リユース又はリサイクル等することを目標としている。また、「地球温暖化対策計画」(2025年2月18日閣議決定)(環境省, 2025)では、再生利用を推進し、使用済プラスチック等の廃棄物の焼却に伴う二酸化炭素排出量を削減するとされている。さらに、「成長志向型の資源自律経済戦略」(経済産業省, 2023a)では、気候中立のためにはマテリアルの脱炭素化が不可欠であり、二酸化炭素の経済効率的な削減のためには再生材等の循環資源活用等が効果的とされている。欧州では、2023年に「自動車設計・廃車(ELV)管理における持続可能性要件に関する規則案」(EC, 2023)が提案され、同規則案において、新車生産に必要なプラスチックの25%以上を再生プラスチックとすること、またそのうち25%は廃車由来とすることが定められたが、その後、2025年1月29日に、25%を20%(うち廃車由来15%)に引き下げる修正案が欧州議会により提示されている。

プラスチックのリサイクルにおける二酸化炭素排出量の削減効果は、マテリアルリサイクル(2.2で説明)の方がケミカルリサイクル(2.2で説明)よりも高いとみられる(経済産業省, 2023a; 森, 2023)ことから、今後はマテリアルリサイクルの一層の推進が見込まれる。一方で現状では、マテリアルリサイクル・ケミカルリサイクルされる使用済プラスチックは、主に容器包装リサイクル法に基づき回収される、PETボトルやプラスチック製容器包装に限定されており、これは廃棄されるプラスチック全体の約25%程度である。

「成長志向型の資源自律経済戦略」(経済産業省, 2023a)では、プラスチック製容器包装の循環構造の設計にあたっての課題として、「プラスチック製容器包装は、多種多様な商品の容器及び包装として用いられており、その機能性を確保するという観点から、難リサイクル性の複合素材を用いたものが一定量存在する」こと、「プラスチック製容器包装は、衛生面・安全性の観点から、再生樹脂利用の制約が大きい」こと、および「プラスチック製容器包装における再生樹脂利用を推進していくためには、再生樹脂を利用できる条件を明確化し、条件を満たした再生樹脂の利用拡大が求められる」ことが記載されている。

「再生樹脂を利用できる条件」の一つに、コストがある。一般に、再生されるプラスチックペレットの質は、新品のプラスチック(以下、バージンプラ)の質に比べて制限があるため、コスト(使用済みプラスチックから再生ペレットへの製造コスト、および再生ペレットから再生プラ使用製品への加工コスト)に対して、再生プラスチックを使用した製品に十分な付加価値がある場合でないと「アップサイクル」(2.2で説明)は難しい。実際に、容器包装リサイクル法に基づいて収集された使用済みプラスチックは、容器包装以外の、より付加価値の低い用途(例えば、路盤材や輸送用パレットなど)に利用されることが一般的である。さらに分別が不十分で、汚染のひどい使用済みプラスチックは、フレー

クや固形燃料化され焼却（サーマルリカバリー）される場合もある。将来的に、より付加価値の高い用途への利用が拡大すると、再生プラスチックの販売価格の向上や規模の経済が働くため、リサイクルによるメリットが高まり、リサイクルが促進されることもありうる（経済産業省 2023）。その場合、「再生樹脂を利用できる条件」として機能性の観点や、衛生面・安全性の観点から判断すること必要となってくるが、これらの判断に資する情報は、現状では不足している。

本書では、「再生樹脂を利用できる条件」として安全性への懸念の払拭に着目した。安全性への懸念は、とくにプラスチック添加剤に関して持たれることが多い。プラスチック添加剤の中には、個々のプラスチック製品の性能維持に不可欠な一方で、人への有害性が指摘されている物質も存在すること、また、用途によっては、そのような物質が製品の使用中に溶出・揮発する可能性があることが知られている。そのためバージンプラの場合、その製造事業者が添加剤の種類と量を管理し、一定の安全性が確認されている。一方、再生プラスチックは、使用済みかつ多種多様なプラスチック廃棄物を混ぜ合わせて製造されるために、添加剤の種類も含有量も完全に明らかになっていないとはいえず、安全性に対する漠然とした懸念を持たれている。また、添加剤以外にも印刷インク、容器包装の内容物（食品およびその腐敗物、洗剤、化粧品など）、反応による生成物、分別収集から再生材製造までの過程における混入物など、多様な物質がプラスチック廃棄物に付着・混入している可能性がある。そのため、マテリアルリサイクルでは人が接触する機会の高い用途への再生は漠然と敬遠され、人の接触機会がほとんどない用途といった、不必要に「ダウングレード」したプラ製品に使用される傾向にあるのが現状である。

マテリアルリサイクルの促進のためには、再生品に含まれる添加剤の種類や含有量を分析するとともに、具体的な用途ごとに、再生プラスチック原料（ペレット、フレーク等）や製品に含まれる添加剤等に関するリスク評価を行い、リスクに応じて再生ペレットの適切な用途を選択できることが重要であると考えられる。「プラスチック資源循環戦略」（消費者庁ほか、2019）においても、「プラスチック再生材の安全性を確保しつつ、繰り返しの循環利用ができるよう、プラスチック中の化学物質の含有情報の取扱いの検討・整理を行う」こと、および「これらの化学物質に係る分析測定・処理を含めた基盤整備の充実を図る」ことが謳われている。

参考文献

EC, 2023. Proposal for a Regulation on Circularity Requirements for Vehicle Design and on Management of End-of-Life Vehicles.

消費者庁, 外務省, 財務省, 文部科学省, 厚生労働省, 農林水産省, 経済産業省, 国土交通省, 環境省, 2019. プラスチック資源循環戦略（令和元年5月31日）。

環境省, 2025. 地球温暖化対策計画（令和7年2月18日閣議決定）。

経済産業省, 2023. 成長志向型の資源自律経済戦略（2023年3月31日）。

2.2 プラスチックの種類と用途およびそのリサイクルの現状

本節では、プラスチック自体の種類や生産量、用途等について概説するとともに、そのリサイクルの現状を樹脂の種類別に整理する。

2.2.1 プラスチックとは

プラスチックは、一般的に、外力や熱によって可塑性を有する高分子物質であり、合成樹脂・セルロイド・カゼイン等を指す。ただし、フェノール樹脂やユリア樹脂などの可塑性を有していない熱硬化性樹脂についても、プラスチックと称されることが多い(全日本プラスチックリサイクル工業会 HP)。プラスチックの種類としては、ポリプロピレン (PP)、ポリエチレン (PE)、ポリ塩化ビニル (PVC)、ポリスチレン (PS)、ポリエチレンテレフタレート (PET)、ポリウレタン (PUR)、ナイロンなどがある。プラスチックの 2023 年の世界の製造量は 413,800 万トンであり、PP が 19.0%、PE が 26.2%、PVC が 12.8%、PS が 5.2%、PET が 6.2%、PUR が 5.3%を占めている (Plastic Europe, 2023)。我が国における 2023 年のプラスチック生産量は、884 万トンであり、そのうち、PP が 23.4% (208 万トン)、PE が 23.0% (204 万トン)、PVC が 17.4% (155 万トン)、PS が 10.4% (92.1 万トン)、PET が 3.1% (27.5 万トン) である (図 2-1、日本プラスチック工業連盟, 2024)。

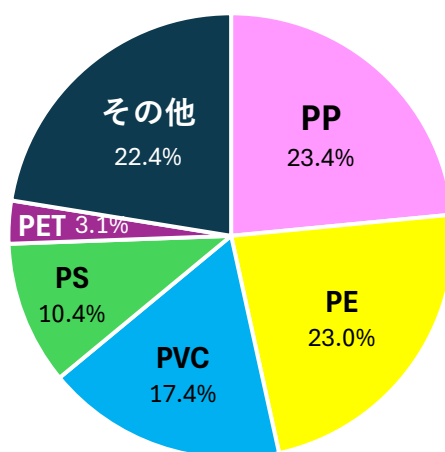


図 2-1 2023 年の日本国内のプラスチック生産量の樹脂別内訳
(日本プラスチック工業連盟, 2024)

2.2.2 プラスチックの種類

主なプラスチックについて、その特徴や用途を以下に示す。

(ア) ポリプロピレン (PP)

PP は、気体のプロピレンを触媒存在下で重合することにより合成されるプラスチックである。PP は、密度がプラスチックの中で最も低いとされている (0.90~0.91g/cm³)。機械

的特性、耐熱性、耐薬品性に優れており、様々な分野で利用されている。PP だけで重合させたホモポリマーは、表面に光沢があり、その高剛性・高耐熱性から、食品包装用フィルム、食品トレイ、シート、繊維、梱包用テープなどに使用されている。PP にモノマー（エチレンが使われることが多い）を少量混合して共重合化したランダムコポリマーは、透明度が高く、柔軟性があり、熱融着が可能な素材となり、透明ボトル、ラッピング、包装フィルムのシーラントなどに使用されている。PP にプロピレンとエチレン共重合させたブロックコポリマーは、高い耐衝撃性・高靱性・高剛性を有しており、自動車内外装、家電、冷凍食品用トレイなどに使用されている。

(イ) ポリエチレン (PE)

PE は、気体のエチレンを触媒存在下で重合することにより合成されるプラスチックである。PE には、高圧化で合成される低密度ポリエチレン (LDPE、 $0.91\text{-}0.93\text{ g/cm}^3$) と中圧下で合成される高密度ポリエチレン (HDPE、 $>0.93\text{ g/cm}^3$) がある。LDPE は、分岐の多い構造をしており、透明で柔らかいプラスチックであり、HDPE は、分岐の少ない構造で透明性が低く、やや硬いプラスチックである。LDPE の主な用途としては、透明なごみ袋やポリ袋、ジッパー袋や食品用ラップフィルム、チューブ容器、米袋、緩衝材、農業用シート、電線被覆などに使用されている。HDPE は、白色レジ袋、燃料タンク、シャンプー・化粧品・洗剤などの容器、水道管や排水管やガス配管、化学薬品の容器、ボトル、ラップフィルム、緩衝材、文具、農業用シート、電線被覆などに使用されている。

(ウ) ポリ塩化ビニル (PVC)

PVC は、クロロエチレンを重合することにより合成されるプラスチックである。PVC は、安価であり、耐水性、耐酸・アルカリ性、難燃性、電気絶縁性を有している。一方で、硬くて脆い性質があるため、フタル酸エステル類などの可塑剤を添加して柔軟性が付与されている。可塑剤の量によって、硬質 PVC と軟質 PVC がある。上下水道管、マットレス、床材や壁材、電線被覆、ビニルレザー、デスクマット、消しゴム、浮き輪、食品容器、手袋などに使用されている。

(エ) ポリスチレン (PS)

PS は、スチレンをラジカル重合することにより合成される非晶質のプラスチックである。比較的硬質であり、無色透明もしくは白色をしており、熱可塑性を有している。PS は、電化製品の筐体、プラ板・プラモデル、CD ケースなどに用いられている。また、発泡剤を用いて成型した発泡スチロールは、2023 年に 11 万トンが出荷されており、食品容器などとして 50.6%、梱包緩衝材として 32.4%、建築用断熱材などの建築・土木用資材として 16.9% が使用されている (発泡スチロール協会 HP)。

(オ) ポリエチレンテレフタレート (PET)

PET は、テレフタル酸とエチレングリコールを高温・高真空下で脱水縮合することで合成されるプラスチックである。透明性を持っており、強度が高いことから、ペットボトルや繊維製品などに利用されている。

2.2.3 プラスチックのリサイクル

再生プラスチックは、使用後に廃棄されたプラスチックを原料の一部とするもので、プラスチックとして再度利用できるようにするものである。プラスチックの再生方法には、熱回収するサーマルリカバリーを除くと、マテリアルリサイクルとケミカルリサイクルの二通りがある。マテリアルリサイクルは、廃棄されたプラスチックを高温で溶かしてプラスチック原料に戻し、改めてプラスチック製品を製造する方法である。ケミカルリサイクルは、廃棄されたプラスチックを化学的に分解・反応させ、新たな樹脂として用いる方法である。燃焼させて熱として利用するものをサーマルリカバリーと呼び、廃プラスチックの再利用の一環とみなされているが、燃やしてしまうことから再生プラスチックとはならない。2023年に世界で生産されたプラスチックのうち、マテリアルリサイクルされたプラスチックの占める割合は 8.7%、ケミカルリサイクルされたプラスチックの占める割合は 0.1%である (Plastic Europe, 2023)。また、廃棄されたプラスチックと別のプラスチック製品にリサイクルすることをカスケードリサイクル、廃棄されたプラスチックと同じプラスチック製品にリサイクルすることを水平リサイクルと呼ぶ。近年では、素材をそのままに新たな価値を与えて別の製品とするアップサイクルが、エネルギー消費も少なくより持続的だとする考え方もあり、リユースも含めて廃プラスチックを減らして活用することも重要である。

我が国において、2023年の廃プラスチック総排出量の 769 万トンのうち、マテリアルリサイクルされたプラスチックは 22.2% (171 万トン) であり、そのうち 82.4% (141 万トン) が使用済み製品 (うち、一般系廃棄物は 74 万トン)、17.6% (30 万トン) が未使用品 (生産・加工ロス品由来) である (プラスチック循環利用協会, 2024)。ケミカルリサイクルされたプラスチックは 3.4% (26 万トン)、サーマルリカバリーされたプラスチックは 63.8% (491 万トン) である。

2.2.4 再生プラスチックの使用量と用途

我が国における 2023 年の日本国内のマテリアルリサイクルされたプラスチック生産量は、171 万トンであり、PP が 19.8% (33.9 万トン)、PE が 17.0% (29.1 万トン)、PVC が 13.5% (23.1 万トン)、PS が 7.3% (12.5 万トン)、PET が 33.2% (56.8 万トン) である (図 2-2、日本プラスチック工業連盟, 2024)。

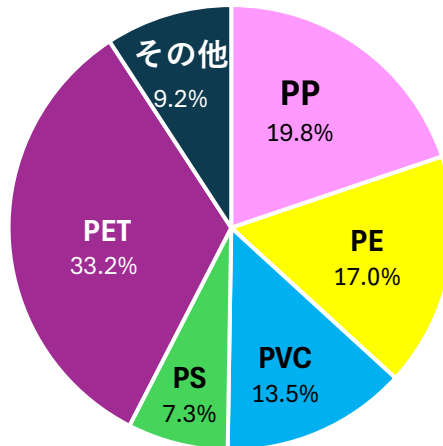


図 2-2 2023 年の日本国内のマテリアルリサイクルされたプラスチック 171 万トンの樹脂別内訳
(日本プラスチック工業連盟, 2024)

(ア) ポリプロピレン (PP)

我が国における廃プラスチックの総排出量に対する PP の割合は、2023 年には 24.3% (187 万トン) を占めており、34 万トンがマテリアルリサイクルされている (プラスチック循環利用協会, 2024)。リサイクル率は、回収された PP 製品の分別・洗浄度合いによって大きく異なることから、よく分かっていない。現状のリサイクル品の用途としては、輸送用パレット、防水シートや路盤材などの土木建築用資材、ハンガーやごみ箱などの日用品などである。

(イ) ポリエチレン (PE)

我が国における廃プラスチックの総排出量に対する PE の割合は、2023 年には 33.9% (261 万トン) を占めており、29 万トンがマテリアルリサイクルされている (プラスチック循環利用協会, 2024)。リサイクル率は、回収された PP 製品の分別・洗浄度合いによって大きく異なることから、よく分かっていない。現状のリサイクル品の用途としては、輸送用パレット、防水シートなどの土木建築用資材、ハンガーやごみ箱などの日用品などである。

(ウ) ポリ塩化ビニル (PVC)

我が国における廃プラスチックの総排出量に対する PVC の割合は、2023 年には 9.0% (69 万トン) を占めており、23 万トンがマテリアルリサイクルされている (プラスチック循環利用協会, 2024)。現状では、塩ビ製パイプや床材などにリサイクルされて使用されている。PVC は、焼却処理する場合には、塩素系ガスが発生することから、適切な処理が必要である。

(エ) ポリスチレン (PS)

我が国における廃プラスチックの総排出量に対する PS の割合は、2023 年には 11.6% (89 万トン) を占めており、12 万トンがマテリアルリサイクルされている (プラスチック循環利用協会, 2024)。PS は、再生使用した場合の強度や硬さの低下が少ないため、マテリアルリサイクルしやすい材料とされている。TV の筐体、冷蔵庫内の仕切り棚、印刷機のカートリッジなどにリサイクルされて使用されている。

(オ) ポリエチレンテレフタレート (PET)

PET ボトルのリサイクルは、1990 年代半ばから始められており、プラスチックのリサイクルとしては最も進んでいる。2023 年にマテリアルリサイクルされた使用済み PET ボトルは 54 万トンであり (プラスチック循環利用協会, 2024)、その他の PET 樹脂を含めたマテリアルリサイクル量は 57 万トンである (日本プラスチック工業連盟, 2024)。市場に出回った PET ボトル製品のうち、回収された割合を示す回収率は 92.5% であり、回収された PET ボトル製品のうちリサイクルされた割合 (マテリアルリサイクルとケミカルリサイクルを併せて) を示すリサイクル率は 85.0% であった (PET ボトルリサイクル推進協議会 HP, 2025a)。日本では、この回収率とリサイクル率は最近 10 年間ほぼ同程度で推移しているが、欧州や米国では回収率とリサイクル率ともに日本と比べて高くない (2021 年: 日本 94.1%・86.0%、欧州: 56.8%・42.7%、米国: 28.6%・19.6%)。容器包装リサイクル法では、PET ボトルとその他のプラスチック製容器包装が分けて取り扱われているが、その他のプラスチック製容器包装にも PET は含まれており、PP・PE や PS などと選別した上でリサイクルされている。リサイクル方法としては、マテリアルリサイクルとケミカルリサイクルの両方が用いられている。ケミカルリサイクルでは、PET にエチレングリコールを加えて解重合し、中間原料のビス-2-ヒドロキシエチルテレフタレートに戻して精製した後、PET に再重合されている。

再生 PET の用途としては、従来は、PET ボトルのマテリアルリサイクルにより繊維製品やシート類 (食品トレイのシートや日用品の包装など) へのカスケードリサイクルが多かった。しかし、近年は技術が進んだこともあり、それらの用途が減少し (2006 年度: 83%、2023 年度: 37.9%)、マテリアルリサイクルやケミカルリサイクルによる PET ボトルへの水平リサイクルの量が増加している (2006 年度: 14.4%、2023 年度: 54.7%) (PET ボトルリサイクル推進協議会 HP, 2025b)。

ちなみに、PET の燃焼時の単位重量当たりの熱量は約 5,500 kcal/kg であり、PP (約 10,500 kcal/kg) や PE (約 9,600 kcal/kg) の半分程度であり、紙 (約 4,000 kcal/kg) と近い発熱量であることから、サーマルリカバリーには適していない。

参考文献

- PET ボトルリサイクル推進協議会 HP, 2025a. 統計データ [WWW Document]. PET ボトルリサイクル推進協議会. URL <https://www.petbottle-rec.gr.jp/data/> (accessed 5.7.25).
- PET ボトルリサイクル推進協議会 HP, 2025b. 基礎知識 [WWW Document]. PET ボトルリサイクル推進協議会. URL <https://www.petbottle-rec.gr.jp/basic/> (accessed 5.7.25).
- Plastic Europe, 2023. Plastics – the fast Facts 2024.
- プラスチック循環利用協会, 2024. プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況 マテリアルフロー図.
- 全日本プラスチックリサイクル工業会 HP, 2025. プラスチックについて [WWW Document]. 全日本プラスチックリサイクル工業会. URL http://www.jpri.biz/f07_plastic.html (accessed 5.7.25).
- 日本プラスチック工業連盟, 2024. 2012 年～2023 年 プラスチック原材料生産実績（確定値）.
- 発泡スチロール協会 HP, 2025. リサイクル実績 [WWW Document]. JEPSA 発泡スチロール協会. URL <https://www.jepsa.jp/recycle/results.html> (accessed 5.7.25).

2.3 国内外の安全基準や規制

本節では、廃棄されたプラスチックを再生プラスチック製品として使用する際、留意しなければならない国内の安全基準や国外の規制等について執筆時点での最新情報と併せて紹介する。

2.3.1 国内の安全基準や規制

現在、国内の化学物質管理規制のうち、次項で紹介する REACH 規則に最も近いものとして「化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律」（いわゆる化審法）が挙げられるが、化審法は原則として製品中の化学物質については規制の対象外である（三島, 2017）。そのため本項では、国内のリサイクル材の安全基準に関するガイドラインとして 2024 年に策定された「食品用器具及び容器包装の製造に用いる合成樹脂の原材料としてのリサイクル材料の使用に関する指針」について紹介する。なお、二重鉤括弧で示す単語は本指針や食品衛生法において定義された用語のため、定義の詳細については指針・法令本文（厚生労働省, 2024）を参照されたい。

「食品用器具及び容器包装の製造に用いる合成樹脂の原材料としてのリサイクル材料の使用に関する指針」の目的は、『食品用器具及び容器包装』の原材料として『リサイクル材料』を使用する際、食品衛生上の危害の発生を防止するために必要な管理水準に関する要件を定め、『食品用器具及び容器包装』の安全性の確保を図ることを目的としている（厚生労働省, 2024）。本指針が策定された背景には、2020 年施行の食品衛生法の改正法において導入された合成樹脂製器具・容器包装のポジティブリスト制度がある。これは、安全性を評価した物質のみ使用を認めるリスト（ポジティブリスト）に基づき、それ以外の物質の使用は原則として禁止する制度である（厚生労働省, 2020）。本制度の対象となる材質は、『合成樹脂』と定められており（厚生労働省, 2020）、再生プラスチック材料に関するリスク管理の位置づけで「食品用器具及び容器包装の製造に用いる合成樹脂の原材料としてのリサイクル材料の使用に関する指針」が示された（厚生労働省, 2024）。食品用器具又は容器包装の原材料として適切な『リサイクル材料』の要件として、食品衛生法で定める『合成樹脂』と同様にポジティブリスト制度に適合していなければならない（厚生労働省, 2024）、対象となる物質は『合成樹脂の基本を成す基ポリマー』及び『合成樹脂の物理的または化学的性質を変化させるために最終製品中に残存することを意図して用いられる添加剤』である（厚生労働省, 2019）。2025 年 2 月時点で基ポリマーが 71 物質群、添加剤が 1665 物質収載されている（消費者庁, 2020）。対象物質数が多いため、具体的な物質名や使用制限量の紹介は割愛する。

2.3.2 国外の安全基準や規制

(ア) RoHS 指令

RoHS 指令とは、欧州において上市する電気電子機器中の有害物質の使用制限に関する

指令（The Restriction of the use of certain hazardous substances）で、2006年に発効した指令である（EU, 2003）。2011年の改正により RoHS2 となり¹、電気電子機器の廃棄物による人の健康と環境に及ぼすリスクの防止と、廃棄物となった電気電子機器に含有する有害物質の低減によりリサイクルを促進し、欧州市場での電気電子機器の製造・輸入事業者の公平な競争条件の確保を目的としている（EC, 2021）。表 2-1 に使用が制限されている物質及びそれらの最大許容濃度を示す。発効当初は鉛、水銀、カドミウム、六価クロム、ポリブロモビフェニル（PBB）、ポリブロモジフェニルエーテル（PBDE）が対象物質であったが、2015年の改正においてフタル酸エステル類 4 種類が追加された（EU, 2015）。なお、2018年に追加候補物質としてテトラブロモビスフェノール A 及び中鎖塩素化パラフィンが提案され、議論が続けられていたが、2024年12月本提案は撤回されたことが発表されている（EC, 2024）。

表 2-1 RoHS 指令における対象物質の最大許容濃度（EU, 2015）

物質名（略称）	CAS 番号	最大許容濃度
		（重量比）
鉛 (Pb)	7439-92-1	0.1%
水銀 (Hg)	7439-97-6	0.1%
カドミウム (Cd)	7440-43-9	0.01%
六価クロム (Cr (VI))	18540-29-9	0.1%
ポリブロモビフェニル (PBB)	—*	0.1%
ポリブロモジフェニルエーテル (PBDE)	—*	0.1%
フタル酸ジ(2-エチルヘキシル) (DEHP)	117-81-7	0.1%
フタル酸ベンジルブチル(BBP)	85-68-7	0.1%
フタル酸ジ(<i>n</i> -ブチル) (DBP)	84-74-2	0.1%
フタル酸ジイソブチル (DIBP)	84-74-2	0.1%

*異性体が複数存在するため、CAS 番号の記載は省略する。

(イ) REACH 規則

REACH 規則とは、欧州における化学物質の登録・評価・認可および制限に関する規則（Regulation on the registration, evaluation, authorisation and restriction of chemicals）で、2007年に発効した規則である（EU, 2006）。人の健康と環境の保護、欧州市場での物資の自由な流通の確保と、欧州化学産業の革新と競争力の強化を目的とし、欧州で製造・輸入・使用する物質そのもの・調剤中の混合物・成形品中の物質が対象である。製造・輸入事業者は登録されていない物質を欧州で販売することができないため、欧州化学品庁（ECHA）の認可を得る必要がある。この認可が必要な物質は認可対象物質と呼ばれる。認可対象物質にはその候補となる物質（認可対象候補物質）があり、表 2-2 に示す要件を満たす場合、ECHA への届出が必要である。さらに、認可対象候補物質を 0.1%（重量比）含有する成形品の受

¹本文中では特に断らない限り RoHS 指令とする。

領者または消費者に対して、安全に関する情報を伝達（提供）する必要がある。また、指定された条件内のみで製造・輸入・使用が可能である制限対象物質があり、条件は各物質によって異なる。認可対象物質、認可対象候補物質、制限対象物質のリストはそれぞれ Authorisation List (ECHA, 2023)、Candidate List of substances of very high concern for Authorisation (ECHA, 2025)、Restriction List (ECHA, 2024) として ECHA のウェブサイトにて 随時更新・公開されている。

表 2-2 REACH 規則において成形品中存在量の要件とそれに対し要求される義務 (御園生, 2008)

成形品中存在量の要件	要求される義務
年間合計 1 トン以上かつ当該物質が意図的に放出される	登録
認可対象候補物質が 0.1% (重量比) かつ年間合計 1 トン以上	届出
制限対象物質ごとに異なる	使用制限
認可対象候補物質が 0.1% (重量比)	情報伝達

(ウ) TSCA

TSCA とは米国における有害物質規制法 (The Toxic Substances Control Act) で、1976 年に制定された法律である。有害な化学物質による人の健康または環境への影響の不当なリスクを防止することを目的とし、米国で製造もしくは輸入される化学物質、混合物または化学物質・混合物を含有する物品が対象である (環境省, 2015)。2016 年、第 6 条に (h) 項が追加され、2021 年および 2024 年の改正により残留性・生体蓄積性・毒性 (Persistent, Bioaccumulative, and Toxic: PBT) を持つ化学物質 (PBT 物質)、5 物質に関する許容閾値が表 2-3 のように規定されている (U.S. EPA, 2025)。ただし、PIP(3:1)に関しては、PIP(3:1)を含む製品から再利用されたプラスチック製品については適用除外としている (U.S. EPA, 2025)。

表 2-3 TSCA 第 6 条(h)項記載の PBT 物質に関する許容閾値 (U.S. EPA, 2025)

物質名 (略称)	CAS 番号	非意図的な許容閾値 (重量比)	意図的な許容閾値 (重量比)
デカブロモジフェニルエーテル (DBDE)	1163-19-5	0.1%	禁止
リン酸トリス (4-イソプロピルフェニル) (PIP(3:1))	68937-41-7	0.1%	禁止
2,4,6-トリ- <i>tert</i> -ブチルフェノール (2,4,6-TTBP)	732-26-3	規制なし	0.3%
ヘキサクロロブタジエン (HCBd)	87-68-3	規制なし	禁止
ペンタクロロチオフェノール (PCTP)	133-49-3	規制なし	1%

参考文献

- EC, 2024. Hazardous substances in electrical and electronic equipment – list of restricted substances (update) [WWW Document]. URL https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13469-Hazardous-substances-in-electrical-and-electronic-equipment-list-of-restricted-substances-update_en (accessed 5.7.25).
- EC, 2021. FAQ key guidance document - RoHS, version of 12 December 2012.
- ECHA, 2025. Candidate List of substances of very high concern for Authorisation [WWW Document]. URL <https://echa.europa.eu/candidate-list-table> (accessed 5.7.25).
- ECHA, 2024. Substances restricted under REACH [WWW Document]. URL <https://echa.europa.eu/substances-restricted-under-reach> (accessed 5.7.25).
- ECHA, 2023. Authorisation List [WWW Document]. URL <https://echa.europa.eu/authorisation-list> (accessed 5.7.25).
- EU, 2015. COMMISSION DELEGATED DIRECTIVE (EU) 2015/863 of 31 March 2015 amending Annex II to Directive 2011/65/EU of the European Parliament and of the Council as regards the list of restricted substances.
- EU, 2006. REGULATION (EC) No 1907/2006 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 18 December 2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH), establishing a European Chemicals Agency, amending Directive 1999/45/EC and repealing Council Regulation (EEC) No 793/93 and Commission Regulation (EC) No 1488/94 as well as Council Directive 76/769/EEC and Commission Directives 91/155/EEC, 93/67/EEC, 93/105/EC and 2000/21/EC.
- EU, 2003. DIRECTIVE 2002/95/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment.
- U.S. EPA, 2025. Persistent, Bioaccumulative, and Toxic (PBT) Chemicals under TSCA Section 6(h) [WWW Document]. URL <https://www.epa.gov/assessing-and-managing-chemicals-under-tsca/persistent-bioaccumulative-and-toxic-pbt-chemicals> (accessed 5.7.25).
- 三島隆之, 2017. 化学物質規制と製品含有化学物質管理. 住友電工テクニカルレビュー = Technical review : 住友電工グループ技術論文誌 1-5.
- 厚生労働省, 2024a. 健生食基発 0328 第 8 号・健生食監発 0328 第 8 号「食品用器具及び容器包装の製造に用いる合成樹脂の原材料としてのリサイクル材料の使用に関する指針」について (令和 6 年 3 月 28 日) .
- 厚生労働省, 2024b. 健生食基発 0328 第 8 号, 健生食監発 0328 第 8 号「食品用器具及び容器包装の製造に用いる合成樹脂の原材料としてのリサイクル材料の使用に関する指針」について.
- 厚生労働省, 2020. 食品用器具・容器包装のポジティブリスト制度について.

- 厚生労働省, 2019. 食品用器具・容器包装のポジティブリスト制度導入について（令和元年 8 月）.
- 御園生誠, 2008. 欧州化学物質規制ハンドブック：管理強化の動きから対応事例まで. エヌ・ティー・エス.
- 消費者庁, 2020. 食品、添加物等の規格基準の一部改正について（令和 2 年 4 月 28 日公布）別表第 1.
- 環境省, 2015. 諸外国の新規化学物質審査規制制度の概要（アメリカ） [WWW Document]. URL <https://www.env.go.jp/chemi/foreign/usa.html> (accessed 5.7.25).

2.4 プラスチックに含まれる物質の分析方法

安全性が懸念される物質については、国内外で様々な安全基準や規制が検討されており、それらの一部については 2.3 で解説した。これらの懸念物質が再生プラスチック中に含まれているかどうかを測定によって確認することは、再生プラスチックを安全に利用していくうえで重要である。本節では、プラスチックに含まれる物質の分析方法について、金属・元素と有機化合物に分けて以下に概説する。

2.4.1 金属・元素

(エ) 誘導結合プラズマ質量分析法／誘導結合プラズマ発光分光分析法 (ICP-MS / ICP-AES)

プラスチック中の複数の金属や元素を一斉分析する方法として、誘導結合プラズマ質量分析法 (ICP-MS) や誘導結合プラズマ発光分光分析法 (ICP-AES) が広く用いられている。ICP-MS は、高温のアルゴン (Ar) プラズマ中に試料を導入して、試料中の元素をイオン化させて、そのイオンの m/z (質量電荷数比) ごとにイオン個数を測定する方法で、 m/z から元素および同位体の同定を行い、イオンの個数から定量を行うものである。ICP-AES は、高温の Ar プラズマ中に試料を導入して、励起された元素が基底状態に戻る際に放出される光を分光し、その波長から元素の定性、強度から定量を行うものである。プラスチック試料にレーザー照射して気化させた元素を ICP に直接導入することもあるが、多くの場合、プラスチック試料から硫酸灰化や酸分解などの前処理を行い、溶液化した試料を分析に供する。

懸念物質とされている鉛 (Pb) やカドミウム (Cd) や水銀 (Hg) についての電気電子製品中の精密分析については、国際電気標準会議 (IEC) の国際規格 IEC 62321-5 (IEC, 2013a) において、ICP-MS や ICP-AES を用いた方法が記載されている。Hg やクロム (Cr) について、ICP-MS や ICP-AES による分析は可能であるが、それらの形態を分けて測るためには、液体クロマトグラフィー (LC) を ICP の前段に付けるなどの工夫が必要となる。

(オ) 蛍光 X 線分析 (XRF)

プラスチック中の金属や元素を一斉分析する方法として、液中に抽出するなどの前処理が不要で固体試料を直接計測できる蛍光 X 線分析 (XRF) がある。試料に X 線を照射した際に発生する元素固有のエネルギー (波長) を持つ蛍光 X 線 (特性 X 線) の波長から元素の定性を行い、X 線の強度から定量を行うものである。不規則な形状の固体をそのまま分析することも可能ではあるが、多くの場合、加圧成型により平板を作成して分析に用いる。

懸念物質とされている Pb、Cd、Hg の一斉分析が可能である。IEC 62321-3-1 (IEC, 2013b) において、電気電子製品中のこれらの金属などの簡易分析 (スクリーニング) 法として、XRF が取り上げられている。

(カ) 原子吸光法 (AAS)

プラスチック中の目的の金属や元素を分析する方法として、原子吸光法（AAS）がある。分析対象の元素原子特有の波長の光が原子化させた試料中を通過する際に吸収される光量から目的の元素の濃度を求める方法である。試料を原子化する手法として、炎を用いて原子化するフレーム AAS 法、グラファイト管に大電流を流した際の熱を用いて原子化する黒鉛炉 AAS 法、試料溶液中の 2 価の水銀イオン (Hg^{2+}) に塩化スズ(II) (SnCl_2) を加えて 0 価の原子状の水銀に還元する還元気化 AAS 法、試料中の水銀を管状炉で気化させた後に金アマルガムとして吸着させたものを再加熱してガス化する加熱気化 AAS 法などがある。これらの分析を行う前に、プラスチック試料から硫酸灰化や酸分解などの前処理を行い、試料を溶液化することが必要である。

懸念物質とされている Hg の電気電子製品中の精密分析法として、還元気化 AAS 法や加熱気化 AAS 法が IEC 62321-4 (IEC, 2017a) に記載されている。

(キ) その他の手法

電気電子製品中の六価クロムの分析法としては、IEC 62321-7-1 (IEC, 2015a) でアルカリ分解/比色法が記載されている。この方法では、プラスチック試料を 250 nm 以下に粉碎した上で、炭酸ナトリウムおよび水酸化ナトリウムの混合アルカリ溶液中で熱を掛けて抽出した後、ジフェニルカルバジド試薬を添加して、吸光光度法で吸光度を測定するというものである。

2.4.2 有機化合物

(ア) ガスクロマトグラフィー-質量分析法 (GC-MS) / タンデム質量分析法 (GC-MSMS)

プラスチック中の有機化合物は、溶媒中に抽出した上で、ガスクロマトグラフィー-質量分析法 (GC-MS) で分析する方法が良く用いられている。GC は、抽出液をヘリウム (He) などのキャリアガスと共にカラムに注入すると、カラムとの相互作用の違いによりカラムから出てくる時間が化合物によって異なることを利用して複数の化合物を分離するという手法である。MS では、カラム出口から出てきたそれぞれの化合物に電子を衝突させることで断片化 (フラグメント化) およびイオン化し、その m/z (質量電荷数比) ごとにイオン個数を測定する方法で、フラグメントの m/z の組成比 (マススペクトル) から化合物の同定を行い、イオンの個数から定量を行うものである。また、夾雑物の多い試料や微量成分に対して精度の高い分析をすることが求められる場合には、GC-MS でフラグメント化された特定のイオンを対象に再度フラグメント化・イオン化を行う GC-MSMS が用いられることもある。また、ガスクロマトグラフィーへの試料の導入では、抽出液でなく直接プラスチック試料を加熱して GC に導入する方法が用いられることもある。

電気電子製品中のポリ臭素化ビフェニル (PBB) やポリ臭素化ジフェニルエーテル (PBDE) を GC-MS で分析する方法については IEC 62321-6 (IEC, 2015b) に、フタル酸エステル類 (DIBP、DBP、BBP、DEHP) を GC-MS で分析する方法については IEC 62321-8

(IEC, 2017b)に記載されている。

(イ) 液体クロマトグラフィー-質量分析法 (LC-MS) / タンデム質量分析法 (LC-MSMS)

プラスチック中の有機化合物の分析で、特に揮発性の低いものについては、溶媒中に抽出した上で、液体クロマトグラフィー-質量分析法 (LC-MS) が使用されることも多い。LC では、移動相が液体であるが原理は上記の GC と同様で、カラムとの相互作用の違いによりカラムから出てくる時間が化合物によって異なることを利用して複数の化合物を分離するという手法である。LC で用いられる MS では、フラグメント化しにくいソフトなイオン化を行った上で、イオンの個数から定量を行う。LC-MSMS は、LC-MS で得られた特定のイオンを対象に再度フラグメント化・イオン化を行って分析する方法である。

(ウ) その他の分析法

プラスチック中の有機化合物のノンターゲット分析 (対象物質を決めずに網羅的に含まれている化合物を計測する分析) を行う際には、上記の GC や LC の検出部に飛行時間形質量分析計 (TOFMS) という質量をより精密に計測できる装置を用いた GC-TOFMS や LC-TOFMS が用いられることもある。TOFMS は、イオン化した化合物やそのフラグメントが、電位差で加速されて無電場のフライトチューブ内を飛行する時間がイオンの質量によって異なることを応用した手法である。

参考文献

- IEC, 2013a, Determination of certain substances in electrotechnical products - Part 3-1: Screening - Lead, mercury, cadmium, total chromium and total bromine by X-ray fluorescence spectrometry, IEC 62321-3-1 (IS).
- IEC, 2013b, Determination of certain substances in electrotechnical products - Part 5: Cadmium, lead and chromium in polymers and electronics and cadmium and lead in metals by AAS, AFS, ICP-OES and ICP-MS. IEC 62321-5 (IS).
- IEC, 2015a, Determination of certain substances in electrotechnical products - Part 6: Polybrominated biphenyls and polybrominated diphenyl ethers in polymers by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), IEC 62321-6 (IS).
- IEC, 2015b, Determination of certain substances in electrotechnical products - Part 7-1: Hexavalent chromium - Presence of hexavalent chromium (Cr(VI)) in colourless and coloured corrosion-protected coatings on metals by the colorimetric method. IEC 62321-7-1 (IS).
- IEC, 2017a, Determination of certain substances in electrotechnical products - Part 4: Mercury in polymers, metals and electronics by CV-AAS, CV-AFS, ICP-OES and ICP-MS, IEC 62321-4 (IS).
- IEC, 2017b, Determination of certain substances in electrotechnical products - Part 8: Phthalates in

polymers by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), gas chromatography-mass spectrometry using a pyrolyzer/thermal desorption accessory (Py-TD-GC-MS), IEC 62321-8 (IS).

3 再生プラスチック試料の分析事例

2.4 ではプラスチックに含まれる物質のさまざまな分析方法について概説したが、本章では、その中の一部の方法を用いて筆者らが実施した再生プラスチック試料の分析事例を紹介する。分析に先立ち、筆者らは再生プラスチック製造事業者 9 社の協力を得て、PP と PE を中心に、46 種の再生プラスチック試料を収集した。3.1 では収集した試料の概要、3.2 ではフーリエ変換赤外分光分析法 (FT-IR) による樹脂分析、3.3 では可搬型蛍光 X 線分析装置 (XRF) による元素分析、3.4 では熱脱着ガスクロマトグラフィー/質量分析法 (TD-GC/MS) による有機化合物の分析、について述べる。

3.1 収集した再生プラスチック試料の概要

2023 年 4 月から 10 月にかけて、関東を中心とした再生プラスチック製造事業者 13 社に対してアンケート調査を実施し、そのうち 9 社のリサイクル施設から再生プラスチックを 46 試料収集した。また試料を収集する際には、①プラスチック種類、②原料とした廃プラスチックの由来、③性状、④原料プラスチック分別方法、⑤洗浄方法、⑥ペレットの想定用途に関する情報をヒアリングにより得た。

3.1.1 再生プラスチック試料の種類・原料・性状

収集した再生プラスチック試料の種類 (材質) は、PE リッチ (PE・PP 混合で PE の割合が高いもの) が 26 試料、PP リッチ (PE・PP 混合で PP の割合が高いもの) が 17 試料、PE・PP 混合 (PE と PP が同程度含まれたもの) が 2 試料、PS リッチ (PS を主成分とするもの) が 1 試料であった。

収集した再生プラスチック試料の原料は、容器包装リサイクル法回収プラスチック (以下「容リプラ」という) が 14 試料、容器包装材が 11 試料、産業利用済製品が 13 試料、工場端材が 8 試料であった。

回収したプラスチックを破砕・洗浄・乾燥させた角片状の試料を「フレーク」(PET ボトルリサイクル推進協議会 HP)、フレークを溶解して均一化した粒状のものを「ペレット」という。収集した再生プラスチック試料 46 試料の内訳は、フレークが 7 試料、ペレットが 38 試料、その他が 1 試料であった。

3.1.2 再生プラスチック試料の分別方法

収集した再生プラスチック試料の製造工程では、46 試料中 44 試料で何らかの原料分別を行っていた。分別工程が最も多い試料では、手選別、金属除去、光学式選別、水比重分離、風力・振動選別、レーザーフィルターもしくはスクリーンメッシュによる分別を行っていた。

3.1.3 再生プラスチック試料の洗浄方法

収集した再生プラスチック試料の製造工程では、46試料中34試料で何らかの洗浄が行われており、そのうち25試料で水洗浄が、9試料で高圧摩擦水洗浄が行われていた。残り12試料については洗浄無しであった。容リプラを原料とする試料のすべてと、容器包装材を原料とする試料のほとんどで洗浄が行われていた。

3.1.4 再生プラスチック試料の用途・想定用途

収集した再生プラスチック試料の用途（または想定用途）は、産業用製品が19試料、消費者製品が8試料、産業用・消費者用の複数用途があるものが16試料、不明が3試料であった。

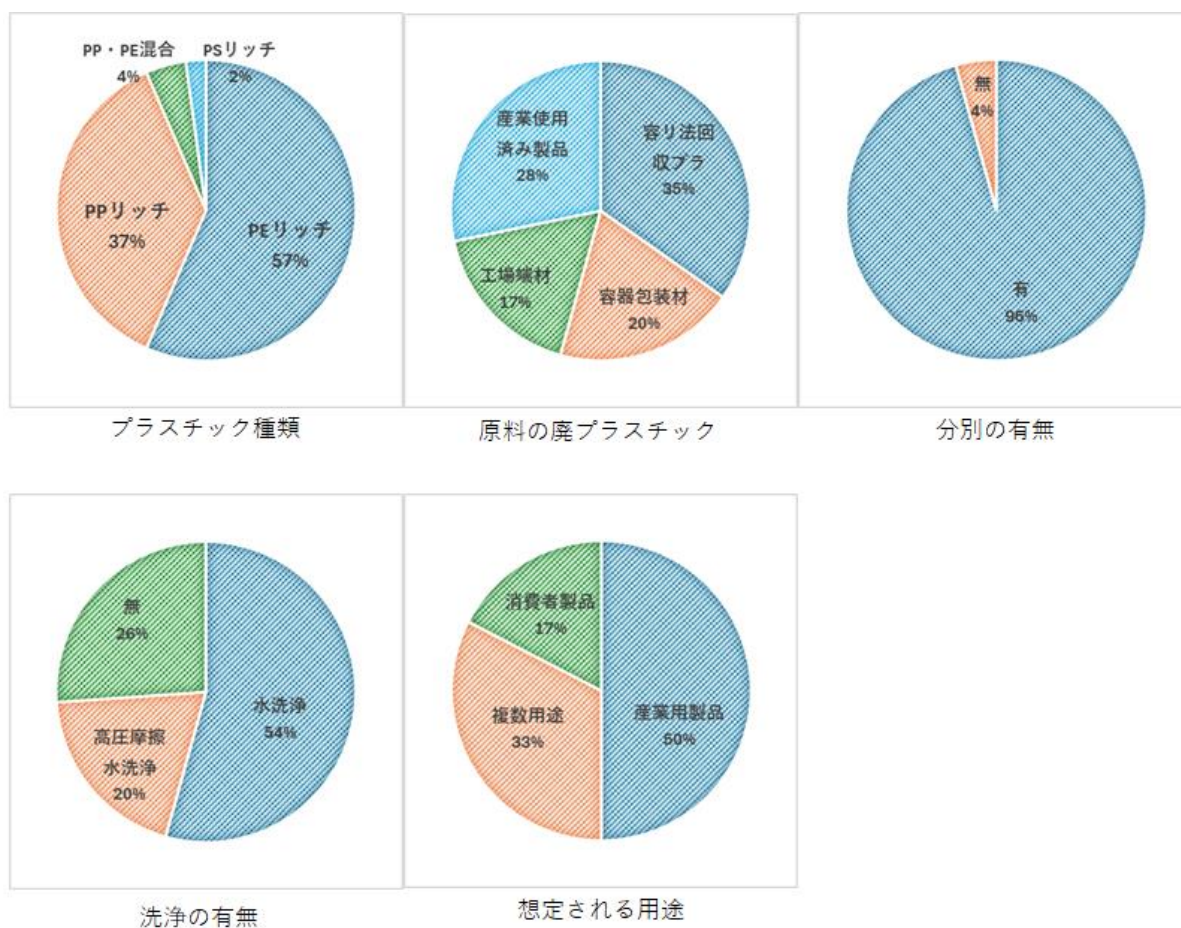


図 3-1 収集した再生プラスチック試料の特徴

3.1.5 試料写真

図 3-2 に入手したペレット試料の一例を示す。



図 3-2 再生プラスチックペレット試料の一例

参考文献

- PET ボトルリサイクル推進協議会, 2025. PET ボトル Q&A 「リサイクル手法」 [WWW Document]. PET ボトルリサイクル推進協議会. URL <https://www.petbottle-rec.gr.jp/qanda/sec5.html> (accessed 5.7.25).
- 経済産業省, 2023. 経済産業省生産動態統計 [WWW Document]. 経済産業省. URL https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/seidou/result/ichiran/08_seidou.html (accessed 5.7.25).

3.2 フーリエ変換赤外分光分析法（FTIR）を用いた再生プラスチック試料の分析事例

フーリエ変換赤外分光分析法（Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR）は、測定対象物固有の赤外線吸収スペクトルを読み、対象物の特性を分析する赤外分光法の一つであり、プラスチックやゴム等の有機材料の材質判定などに利用されている。本節では、筆者らが行った FT-IR を用いた再生プラスチック試料の材質の分析例を紹介する。

3.2.1 方法

(ア) 再生プラスチック試料

再生プラスチック試料は、再生プラスチック製造事業者から入手し（3.1 参照）、分析を行うまで室温・暗所で保管した。本分析実施例では、ポリエチレン（PE）、ポリプロピレン（PP）、それらの混合物、ポリスチレン（PS）を主成分とする図 3-2 に示すようなペレット試料を分析に供した。

(イ) 試料の準備

FT-IR では、再生プラスチックペレット試料をそのまま分析することが可能である。しかし、全反射測定（ATR）法を用いて固体試料の分析を行う場合、試料のプリズムへの密着具合や押し付け強さによって、ピーク強度が変化する。よって、PE 又は PP ペレット試料については、カッターにより真ん中から切断し、切断面をプリズムに密着させるようにした。PS ペレット試料については、カッターでの切断が容易でなかったことから、ペレットの形状のまま分析した。ペレット試料は手のタンパク質、皮脂、汗などが付着しないようにピンセット又は手袋を使用して取り扱った。カッターで切断したペレット試料は、切断面を触れないようにした。後述の結果に示すように、保管時の PE 袋には滑剤（成形加工時の摩耗低減、フィルム同士の密着防止）が使われている場合があり、ペレットを測定すると滑剤の赤外吸収スペクトルがみられることがある。カッターで切断したペレット試料を用いることで、表面に付着した異物の寄与を排除することができる。

(ウ) 装置と実験条件

本分析実施例では、島津製作所製 IR Spirit-T を使用した。分析条件を表 3-1 に示す。付属のライブラリ（標準ライブラリ、ならびに加熱劣化プラスチックライブラリおよび紫外線劣化プラスチックライブラリ）により、試料の主成分を同定した。また、PP、PE、PS、ポリエチレンテレフタレート（PET）の主要なスペクトルのピークの有無から、各成分の混入の有無を判断し、混入されると考えられた成分のライブラリのスペクトルを用いて、その重ね合わせが検体のスペクトルにあうように、各成分の割合を大雑把に推定した。重ね合わせの割合は、マイクロソフト社 Excel のソルバー機能を用いて、検体のスペクトルと重ね合わせのスペクトルの最小二乗誤差の和が小さくなるようにして求めた。本方法で得られる各成分の割合は、あくまでライブラリのスペクトルの重ね合わせの結果であり、厳

密なものではないが、おおよその傾向を知ることができる。

表 3-1 FT-IR 装置の設定条件

測定法	全反射測定(ATR: Attenuated Total Reflection)
波数範囲	400—4000 cm^{-1}
積算回数	32 回
分解能	4 cm^{-1}
アポダイズ関数	Happ-Genzel

3.2.2 結果

装置付属のライブラリにより同定した試料の主成分は、試料入手時に再生プラスチック製造事業者から聞いているものと基本的に一致していた。ただし、試料によっては、その他の成分の混入も示唆された。

一例として、容器包装リサイクル法に基づく家庭ごみを原料とした PE および PP を主成分とする再生プラスチックペレットを FT-IR によって測定した結果を図 3-3 に示す。図 3-4 は、図 3-3 の赤枠の囲みを拡大したものである。この再生プラスチックペレットには、PP と PE 以外に PS や PET が含まれていることが示唆された。一般に、容器包装リサイクル法に基づく家庭ごみを原料とした PP や PE の再生プラスチックでは、PS (692 cm^{-1} 付近にピーク) や PET (1090、1236、1714 cm^{-1} 付近にピーク) が含まれる傾向が見られた。一方、PE 又は PP を主成分とした工場端材では PS や PET の含有はほとんど見られなかった。

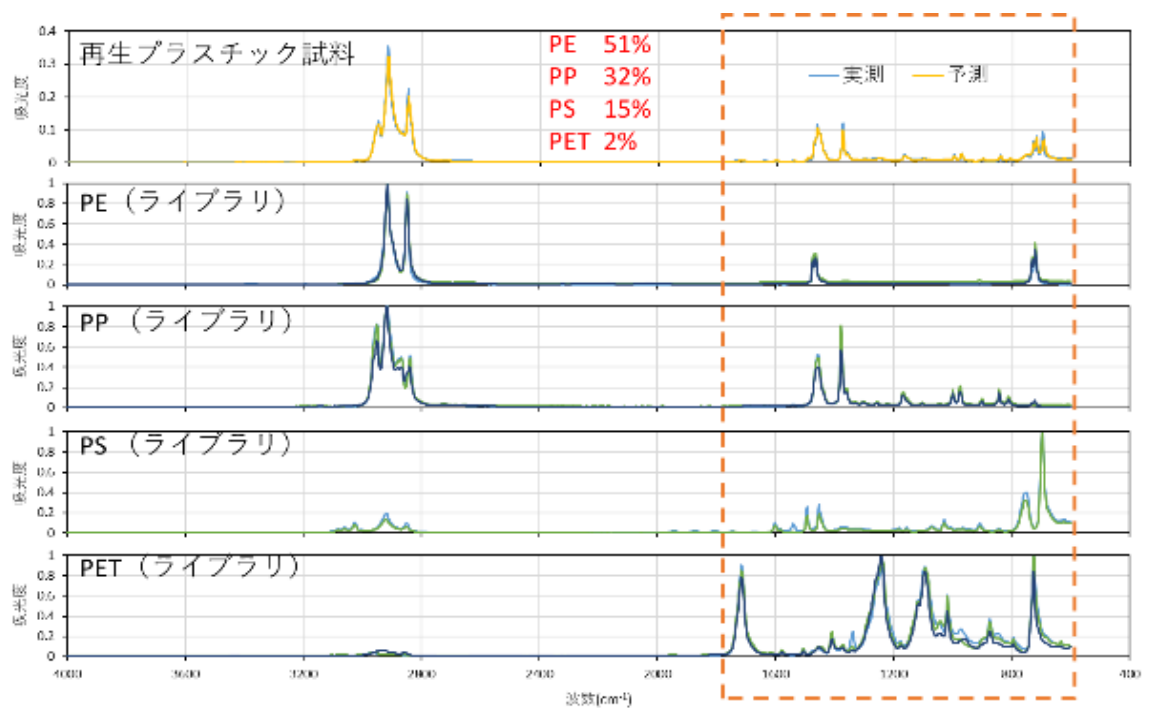


図 3-3 FT-IR による再生プラスチック試料の組成の解析例 1

一番上のグラフの実測は、PP 及び PE を主成分とする再生プラスチックペレットの FT-IR スペクトル、予測は、2 から 5 番目の PE、PP、PS、PET の各ライブラリのスペクトルを重ね合わせたもの。ライブラリデータは島津製作所製 IRSpirit-T に付属のライブラリを使用した。

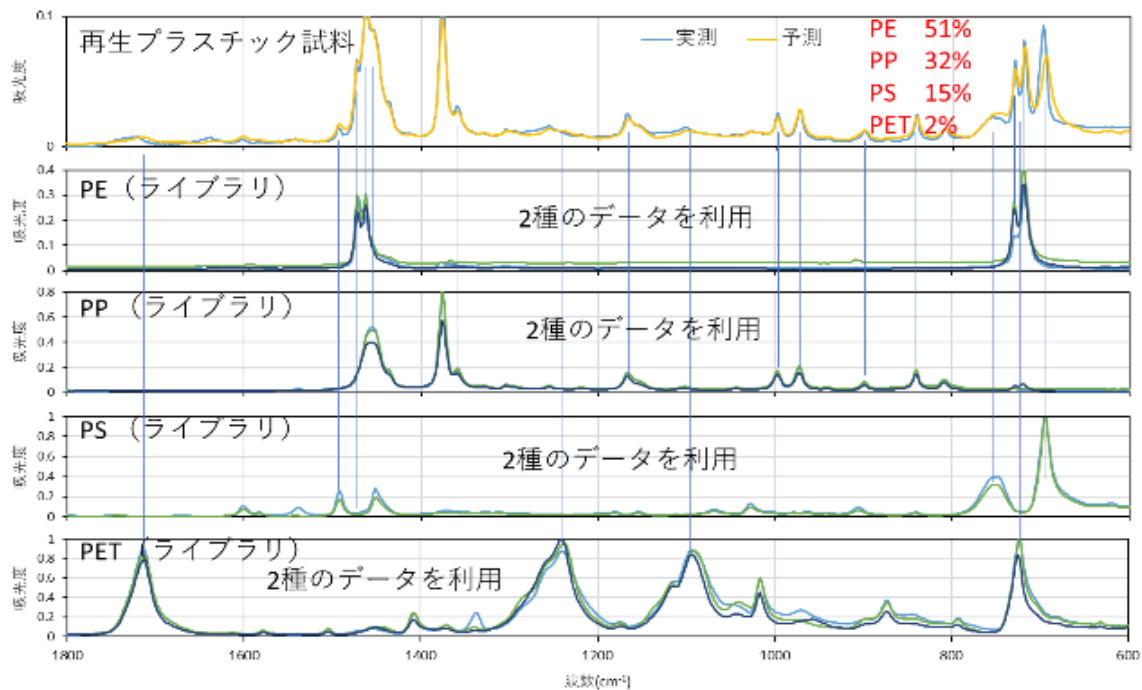


図 3-4 FT-IR による再生プラスチック試料の組成の解析例 2

図 3-3 の赤の枠の囲みを拡大したもの。

別の PE を主成分とする再生プラスチックペレットの解析例を図 3-5 に示す。この再生プラスチックペレットには、PS や PET の混入はないが、プラスチックの充填剤として使われる炭酸カルシウム CaCO_3 が含まれることが示唆された。再生の過程で、炭酸カルシウム CaCO_3 は取り除かれずに残ると考えられた。

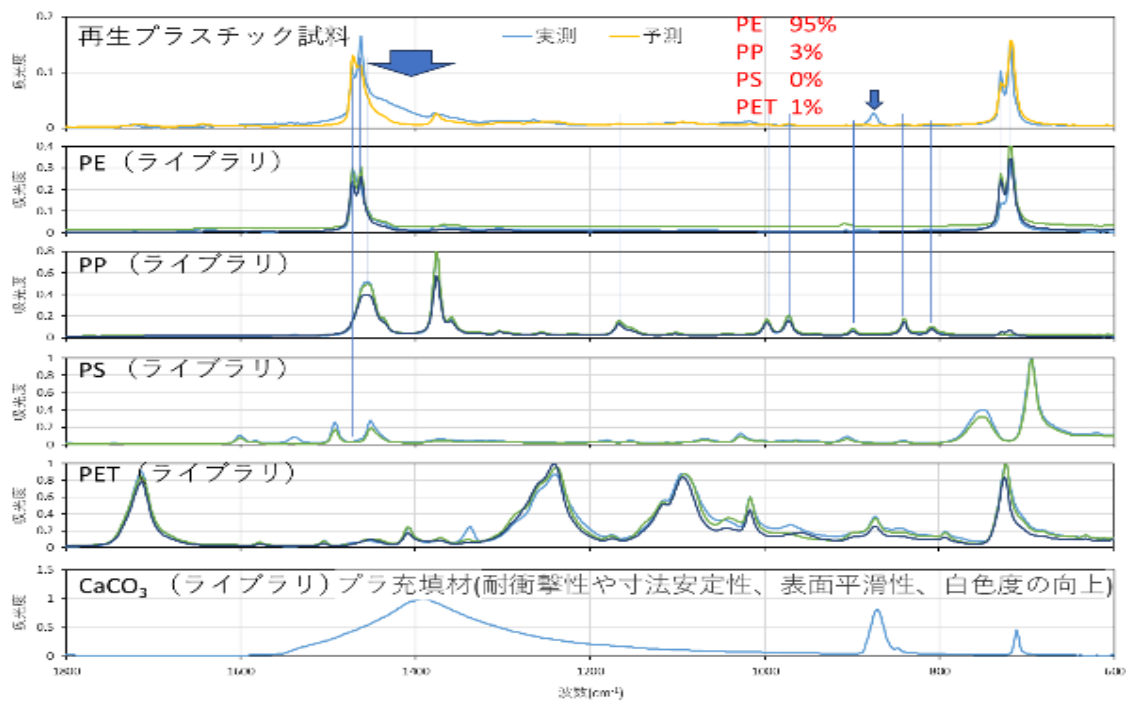


図 3-5 FT-IR による再生プラスチック試料の組成の解析例 3

一番上のグラフの実測は、PE を主成分とする再生プラスチックペレットの FT-IR スペクトル、予測は、2 から 5 番目の PE、PP、PS、PET の各ライブラリのスペクトルを重ね合わせたもの。一番下のグラフは、プラスチックの充填剤として使われる炭酸カルシウム CaCO_3 のスペクトル。ライブラリデータは島津製作所製 IRSpirit-T に付属のライブラリを使用した。

さらに別の PE を主成分とする再生プラスチックペレットの解析例を図3-6に示す。一番上のグラフに、ペレットを切断したものとペレット表面をそのまま測定したものを重ねて示した。ペレット表面では、矢印で示したところにピークがみられた。これらのピークは PE 袋の滑剤などで使われるステアリン酸アミドやオレイン酸アミドのスペクトルのピークと一致した。ペレット内部からは検出されないことから、保管時の PE 袋の滑剤の寄与と考えられた。

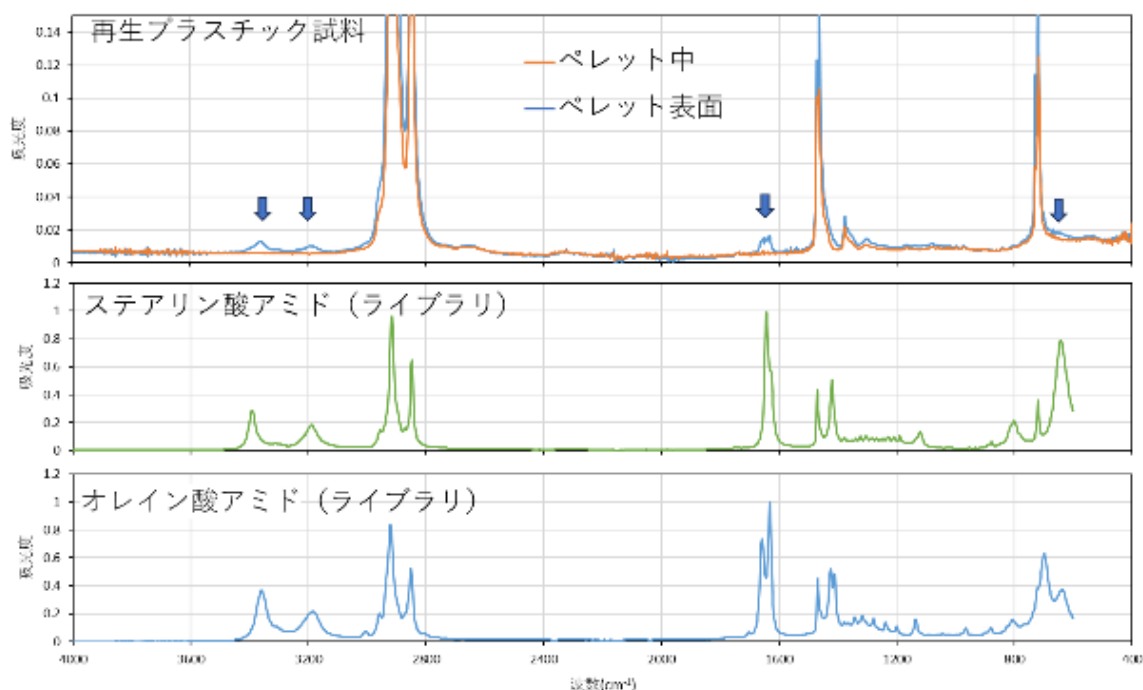


図 3-6 FT-IR による再生プラスチック試料の組成の解析例 4

一番上のグラフは、PE を主成分とする再生プラスチックペレットの FT-IR スペクトル（ペレット中はペレットを切断したもの、ペレット表面はペレットをそのまま測定したもの）、2 番目と 3 番目のグラフは、プラスチックの滑剤として使われるステアリン酸アミドやオレイン酸アミドのスペクトル。ライブラリデータは島津製作所製 IRSpirit-T に付属のライブラリを使用した。

3.2.3 まとめ

本節では、FT-IR を用いた再生プラスチック試料の原料の分析事例を示した。FT-IR で測定できるのは数パーセント程度含有されている成分のみだが、FT-IR は比較的安価で簡易な装置であり、再生プラスチックの主成分の確認に加えて、予期しないプラスチックや添加剤の混入が評価できる。FT-IR で得られる情報は、混入の可能性がある有害物の予測や、確認された有害物の起源を推定する上でも、重要な基礎となる。参考情報として、分析機器メーカーによる FT-IR を用いた再生プラスチック測定のアプリケーション例を参考文献に示す。

参考文献：分析機器メーカーのアプリケーションノート

アジレント・テクノロジー, 2023. FTIR 分光分析によるライフサイクルを通じたプラスチックの材料同定、Agilent Cary 630 FTIR と ATR を用いたプラスチックのポリマーの種類
の同定. URL <https://www.chem-agilent.com/appnote/pdf/an-plastic-life-cycle-cary-630-5994-6145ja-jp-agilent.pdf> (accessed 5.7.25).

島津製作所, 2018a. Application News No. A580 「FTIR によるリサイクルプラスチックの定量
分析 -個別算出法-」. URL
https://www.an.shimadzu.co.jp/sites/an.shimadzu.co.jp/files/pim/pim_document_file/an_jp/applications/application_note/19492/an_a580.pdf (accessed 5.7.25).

島津製作所, 2018b. Application News No. A581 「FTIR によるリサイクルプラスチックの定
量分析 -混合比算出法-」. URL
https://www.an.shimadzu.co.jp/sites/an.shimadzu.co.jp/files/pim/pim_document_file/an_jp/applications/application_note/19493/an_a581.pdf (accessed 5.7.25).

パーキンエルマー, 2021. 第 23 回 FTIR による品質検査 -良品のばらつきを考慮する-URL
<https://www.perkinelmer.co.jp/support/labblog/ftir/article23/> (accessed 5.7.25).

3.3 可搬型蛍光 X 線分析装置を用いた再生プラスチック試料の分析事例

蛍光 X 線分析 (X-ray fluorescence spectrometry, XRF) は、試料に X 線を照射して発生する蛍光 X 線のエネルギーと強度から試料中に存在する元素の種類や濃度を計測する方法である。

XRF は検出機構によって装置構成が大きく変わり、波長分散型 X 線分析 (Wavelength-dispersive X-ray fluorescence, WDXRF) とエネルギー分散型 X 線分析 (Energy-dispersive X-ray fluorescence, EDXRF) の 2 つに分けられる。近年では環境や廃棄物分野において、また RoHS 指令対応への文脈から、オンサイト分析も可能な可搬型 EDXRF が利用可能となっている。本節では、可搬型 EDXRF を用いた再生プラスチック試料の元素分析例を紹介する。

3.3.1 方法

(ア) 再生プラスチック試料

再生プラスチック製造事業者から再生プラスチックペレット試料 38 試料を入手し (3.1 および図 3-2 参照)、分析を行うまで室温暗所で保管した。各試料の材質 (主成分) は、ポリエチレン (PE)、ポリプロピレン (PP)、PE と PP の混合物、ポリスチレン (PS) であった。

(イ) 試料調製

ペレット試料は加圧成形機を使用して 30mm×30mm×3mm のディスクに成形し (図 3-7)、1 ディスクにつき 5 箇所元素濃度を測定して、その平均値をその試料の元素濃度とした。検出下限値はメーカーから提供された値 (PE 樹脂を 60 秒測定したときの 3σ に基づく値) を用い、元素濃度が検出下限値以下の場合は、検出下限値の 1/2 を濃度と仮定して統計解析を行った。

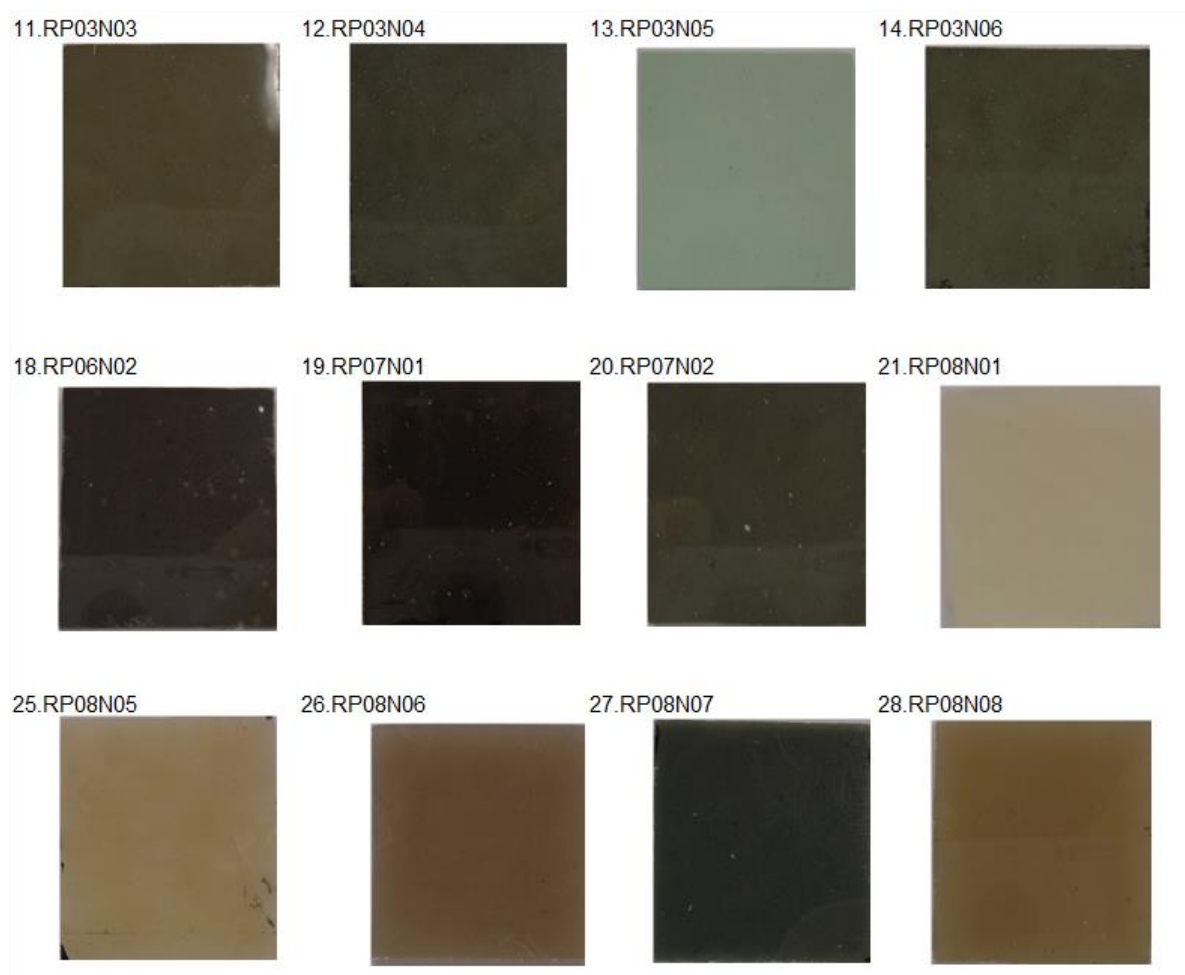


図 3-7 再生プラスチックペレット試料（ディスク）

(ウ) 測定条件

試料中の元素含有量は可搬型蛍光 X 線分析計（可搬型 EDXRF）（エビデント製、VANTA VCA）を用いて測定した。可搬型 EDXRF の主な仕様を表 3-2 に示す。測定条件は RoHS モードとし、測定時間は 1 回の照射につき 60 秒とした。

可搬型 EDXRF の分析値の妥当性を確認するため、欧州 JRC 製の低密度 PE 樹脂中元素分析精度管理用標準物質 ERM-EC680m 及び ERM-EC681m を測定し、As, Br, Cd, Cr, Hg, Sb, Pb, Zn の認証値と可搬型 EDXRF による測定値の比較を行った。得られた測定値は Cr を除く元素で認証値の $\pm 20\%$ であった。Cr の測定値は認証値に対して高めであったが（認証値の 144%及び 169%）、参考値として結果に含めた（表 3-3）。

表 3-2 使用した可搬型 EDXRF の主な仕様 (エビデント製 VANTA VCA)

X線管、フィルター	X-ray tube, 50kV, Cu 350 μ m	
	X-ray tube, 30kV, Al 2mm	
ターゲット材	Ag	
検出器	Silicon Drift Detector	
分解能	<140eV	
RoHS モード		
サンプルサイズ	30mm(w) × 30mm (d) × 3mm (t)	
定量方法		
樹脂モード: 検量線法		
対象元素の検出下限値 (PE)		
	Cr	4 mg/kg
	Hg, As, Br, Pb, Sb	2 mg/kg
	Cd	3 mg/kg
	Cl	500 mg/kg
	その他の元素*	4 mg/kg

*その他の元素は Ag, Au, Ba, Bi, Ca, Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Se, Sn, Sr, Ti, Zn, Zr の 17 元素が含まれる。

表 3-3 低密度 PE 樹脂中元素分析精度管理用標準試料の分析結果 (n=5)

		Cr	Zn	As	Br	Cd	Sb	Hg	Pb
ERM-EC680m (PE)	測定値 (mg/kg)	16	204	4	189	19	<2	3	14
	認証値 (mg/kg)	10	194	5	181	21	10	3	11
	回収率(%)	169	105	77	105	90	-	114	121
ERM-EC681m (PE)	測定値 (mg/kg)	65	1280	21	1444	123	71	8	65
	認証値 (mg/kg)	45	1170	17	1430	146	86	10	70
	回収率(%)	144	109	124	101	84	83	82	94

3.3.2 結果

表 3-4 に再生プラスチックペレット中の元素濃度を示す。RoHS 指令の許容濃度が設定されている 4 元素 (Cd, Cr(VI), Hg, Pb) のうち、Cd は 38 試料中 1 試料で最大許容濃度を (100 mg/kg) を超過した。Cd が基準値を超過した再生プラスチックペレット試料の原料は産業利用済みのペレットであり、プラスチックの着色剤としても使用される黄色顔料 (カドミウムイエロー) の混入などが可能性として考えられた。

表 3-4 再生プラスチックペレット中元素濃度 (mg/kg)

元素	検出率(%)	検出 下限値	平均値	標準偏差	RoHS 許容濃度
Ag	0	<4	<4		
As	5	<2	<2		
Au	34	<4	<4		
Ba	45	<4	187	520	
Bi	39	<4	<4		
Br	32	<2	7.1	19	
Ca	100	<4	5900	10000	
Cd	5	<3	8.0	39.8	100
Cl	8	<500	<500		
Co	3	<4	6.0	25	
Cr*	8	<4	4.2	13	1000
Cu	97	<4	54	55	
Fe	92	<4	270	230	
Hg	3	<2	<2	6.0	1000
Mn	5	<4	2.9	5.0	
Mo	3	<4	4.4	15	
Ni	100	<4	62	60	
Sb	16	<2	5.5	14	
Se	5	<4	2.1	6.1	
Sn	39	<4	4.8	7.0	
Sr	66	<4	9.3	8.3	
Ti	82	<4	5600	6800	
Pb	53	<2	4.2	5.8	1000
Zn	89	<4	110	150	
Zr	5	<4	2.2	0.8	

*測定値は全 Cr 濃度、RoHS 許容濃度は Cr(VI)濃度を示す。

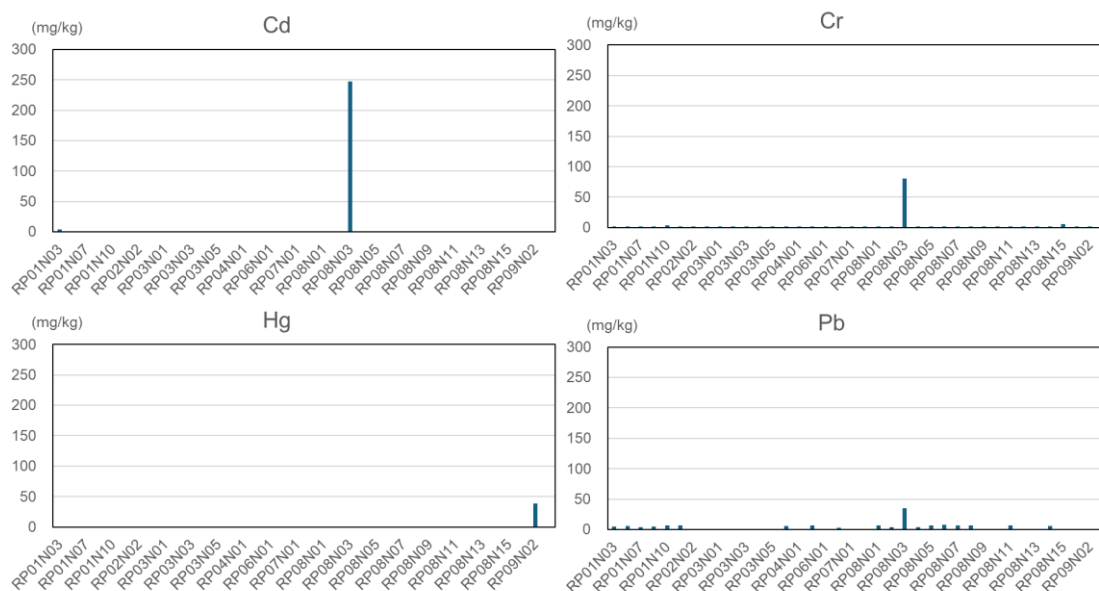


図 3-8 再生プラスチックペレット中 RoHS 指令対象元素濃度 (mg/kg)
(縦軸はペレット中濃度、横軸は試料 ID)

参考文献

- Kajiwar, N., Matsukami, H., Malarvannan, G., Chakraborty, P., Covaci, A., Takigami, H., 2022. Recycling plastics containing decabromodiphenyl ether into new consumer products including children's toys purchased in Japan and seventeen other countries. *Chemosphere* 289, 133179. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133179>
- Oguri, T., Kojima, N., Shinohara, N., Ogura, I., Ono, K., Kajihara, H., Gamo, M., 2024. Content of heavy metals in pellets of recycled plastic: A screening assessment of dermal contact and oral ingestion for workers. Presented at the ISES (International Society of Exposure Science) 2024 Annual Meeting Abstract, 23th, Oct. 2024.
- 中井泉, 日本分析化学会 X線分析研究懇談会(監修), 2013. 蛍光 X線分析の実際, 第2版. ed. 朝倉書店.
- 小栗朋子, 篠原直秀, 小倉勇, 小島直也, 梶原秀夫, 小野恭子, 蒲生昌志, 2024. 「再生プラスチック材料中元素濃度とその変動要因の考察」 2024年室内環境学会学術総会要旨集. Presented at the 室内環境学会, 北海道.
- 梶原夏子, 貴田晶子, 滝上英孝, 2011. 可搬型蛍光 X線分析計による各種製品部材中 RoHS 指令対象物質のスクリーニング調査. *環境化学* 21, 13-20. <https://doi.org/10.5985/jec.21.13>
- 河合潤, 日本分析化学会(編), 2012. 蛍光 X線分析. 共立出版.
- 皆川源信, 1996. プラスチック添加剤活用ノート: 安定化、改質化向上の決め手, K books. 工業調査会.
- 藤井光雄, 垣内弘, 1985. プラスチックの実際知識(第4版). 東洋経済新報社.

3.4 熱脱着ガスクロマトグラフィー／質量分析法を用いた再生プラスチック試料の分析事例

熱脱着ガスクロマトグラフィー／質量分析法（Thermal desorption gas chromatography mass spectrometry, TD-GC/MS）は、揮発性物質の代表的な分離分析法であるガスクロマトグラフィー／質量分析法（GC/MS）の試料前処理法として熱脱着法を採用した機器分析法であり、プラスチックや環境試料中に含有される揮発性成分のスクリーニング分析に利用されている（Zhang et al., 2023; Seeley and Lynch, 2023; Akoueson et al., 2021; International Electrotechnical Commission, 2021; 渡辺, 2024）。本節では、TD-GC/MS を用いた再生プラスチック試料の分析について概説すると共に、筆者らが行った分析例を紹介する。なお、本方法の開発に至る背景や、手法開発に関する検討事項の詳細については、Appendix A を参照されたい。

3.4.1 熱脱着ガスクロマトグラフィー／質量分析法（TD-GC/MS）

TD-GC/MS は、①熱脱着による試料成分の抽出、②GC による試料成分の分離、及び③MS による試料成分の検出、といった3つの過程からなり、図 3-9 に示すようなパイロライザを備えた GC/MS 装置（Py-GC/MS）が用いられている。

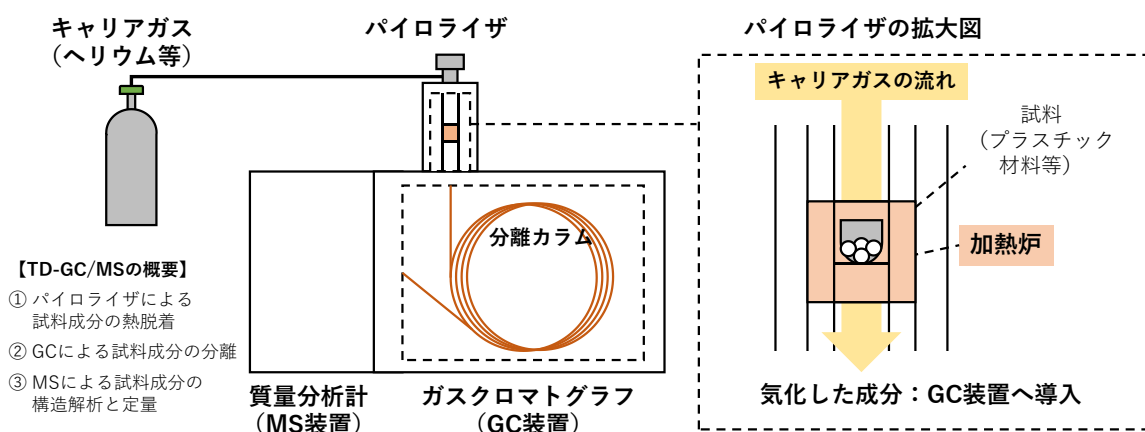


図 3-9 パイロライザを備えた GC/MS 装置の概要

(ア) 熱脱着(Zhang et al., 2023; Seeley and Lynch, 2023; Akoueson et al., 2021; 渡辺, 2024)

TD-GC/MS の熱脱着には、パイロライザが用いられる。パイロライザは、サンプルカップ等に分取した試料を加熱炉によって 350 °C 程度まで加熱し、熱的に脱着した揮発性成分やプラスチック部材の熱分解で生じた成分を GC/MS 装置に導入する装置である。最近では、昇温プログラム機能や自動の試料投入装置を備えたパイロライザも市販されており、分析者は目的や用途に適した装置を選択することが可能となっている。パイロライザを用いてプラスチック部材を熱分解することも可能だが、再生プラスチックのリスク評価においては、試料に含まれる添加剤等が主な分析対象となるため、熱分解よりも熱脱着を目的とする場合が多い。加熱炉や GC 装置との接続インターフェースの温度条件を決定する際には、

分析対象成分の熱分解に留意する必要がある。また、分析対象成分と接触する可能性のあるサンプルカップ等の消耗品は、分析対象成分の吸着が生じづらい材質のものを選択することで、分析対象成分の損失を防ぐことができる。また、熱脱着過程には試料の厚さや形なども影響する。試料形状の影響を取り除き、再現性よく分析を行うために、溶媒を用いた固体試料からの成分溶出（又は溶解）によって得られた試料溶液をサンプルカップに導入し、溶媒を揮発させた後に分析を行う方法も考案されている。

(イ) ガスクロマトグラフィー (GC)

GC は、気体や揮発性物質の分離分析に有効な手法である。GC 装置の注入口で気化された試料成分は、移動相ガスの流れに乗って装置内を移動し、分離カラム内で固定相との相互作用の差に応じて分離される。各種メーカーにおいて様々な特徴を持った分離カラムが開発されており、プラスチック試料に含まれるフタル酸エステル類や臭素系難燃剤等の添加剤を分析対象とする場合は、これらの分離に特化したカラムを選択することで、分析時間を短縮することや分析値の信頼性を高めることが可能となる。試料成分の検出には、後述する質量分析計や水素炎イオン化検出器 (Flame ionization detector, FID) 等が用いられている。GC の測定結果は、横軸に分析時間、縦軸に検出器における検出強度をプロットしたクロマトグラムと呼ばれるグラフとして得られ、クロマトグラム上のピーク面積の大きさを基準にして、各成分の定量を行う。

(ウ) 質量分析法 (MS)

MS は試料成分をイオン化し、質量電荷比 (m/z) に応じて分離したのちに検出する機器分析法であり、前述の GC や液体クロマトグラフィー等の空間的な分離法と組み合わせて用いられることも多い。GC/MS で用いられるイオン化法には、電子イオン化 (Electronic ionization, EI) 法と化学イオン化 (Chemical ionization, CI) 法がある。EI 法では、各成分がそのままイオン化した分子イオンよりも成分ごとに固有のフラグメントイオンのパターンを観測することができ、これをデータベースと比較することで成分の同定が可能となる。一方 CI 法は、EI 法と比較して分子イオンが検出されやすいという特徴がある。再生プラスチック試料の分析では、これらのイオン化法ごとの特徴を把握し、目的や分析対象成分の種類に応じて適したイオン化法を選択する必要がある。

イオンの分離方式には、四重極型、飛行時間型、及び磁場型などの分離方式がある。四重極型は最も汎用される方式であり、スクリーニング分析から微量成分の定量分析まで幅広い用途に用いることができる (吉野, 2017)。特定の添加剤のスクリーニングや品質管理を目的とした再生プラスチック試料の分析においては、四重極型の MS 装置が有用である。四重極型の MS 装置では、任意の m/z 範囲内のイオンを網羅的に検出するスキャンモードと、選択した m/z のイオンを検出する選択イオンモニタリングモード (Selected ion monitoring, SIM) を使い分けることができ、前者は主にスクリーニングや半定量分析、後

者は定量分析に用いられている。スキャンモードによる測定は、再生プラスチックの成分を推定することが困難な場合に有効であり、試料成分をスキャンモードで網羅的に測定した結果を主成分分析等の統計的手法を用いて解析することで材料の由来を判別するような取り組みも報告されている(山崎ら, 2025a)。また、コリジョンセルを挟んで二つの四重極を連結させたタンデム四重極型 MS 装置を用いることで、選択性や検出感度を向上させることができる(吉野, 2017)。一方、再生プラスチック成分の構造決定が目的の場合、被測定イオンの精密質量を測定可能なイオントラップ型、飛行時間型、又は磁場型の MS 装置を利用することで、四重極型よりも高い正確性で構造を決定することが可能となる(吉野, 2017; MOHRING and ヴィンセント, 2018)。

3.4.2 分析実施例

(ア) 実験

I. 試薬

再生プラスチック試料に含有する化学物質の溶出にはテトラヒドロフラン (THF、関東化学製、特級) を用いた。

II. 再生プラスチック試料

再生プラスチック試料は、再生プラスチック製造事業者から入手し (3.1 参照、試料の一例は図 3-2)、分析を行うまで室温・暗所で保管した。なお、本稿ではポリプロピレン (PP) の分析事例を紹介する。

III. 試料調製

Py-GC/MS を用いた分析では、再生プラスチック試料を固体のまま分析することが可能であるが、本稿では溶媒による成分溶出を行った試料の測定法を紹介する。図 3-10 に試料調製に用いた器具を示す。ガラスバイアルに分取した再生プラスチック試料ペレット 30 mg に 1 mL の THF を加えて、一週間静置することで試料成分を溶出した。この溶出液の一部 (例 : 50 μ L) をマイクロシリンジでサンプルカップ (フロンティアラボ製、Eco-Cup LF、80 μ L) に分取し、50 $^{\circ}$ C のオーブン内で溶媒を揮発させ、分析試料とした。



図 3-10 試料調製に用いた器具

IV. 装置と実験条件

本分析実施例では、オートサンプラー（フロンティアラボ製、AS-1020E）を備えたパイロライザ（フロンティアラボ製、EGA/PY-3030D）と接続したGC/MS装置（アジレント・テクノロジー製、6890/5975）を使用した。分析条件を表 3-5 に示す（羽成ら, 2024a）。

(イ) 結果

図 3-11 に 8 種類 of フタル酸エステル類を含んだポリ塩化ビニル（NMIJ CRM 8156-a）（計量標準総合センター, 2025）（A 及び B）とポリプロピレン（PP）を主成分とする再生プラスチックペレット（C 及び D）を TD-GC/MS 法によって測定した結果を示す。図 3-11（A）及び（C）は全イオン電流クロマトグラム（TICC：設定したスキャン範囲において取得したマススペクトルから求められる全イオン電流値をプロットしたクロマトグラム（日本質量分析学会用語委員会 編, 2020）を、図 3-11（B）及び（D）は TICC からフタル酸エステル類の検出に用いられる m/z 149 の値を抜き出した抽出イオンクロマトグラム（EIC）を示している。各 TICC では、比較的短い保持時間を示すピークが多く検出されると共に、これらのピーク面積も保持時間の長い成分と比較して大きかった。これらは、再生プラスチックに含まれる化学物質は高沸点成分よりも低沸点成分が種類も量も多いことを示唆している。また、 m/z 149 の EIC について、NMIJ CRM 8156-a と PP の分析結果を比較すると、今回分析を行った再生プラスチックペレットには、フタル酸ジブチル、フタル酸ジペンチル、フタル酸ジヘプチル、フタル酸ジヘチルヘキシル、及びフタル酸ジオクチルが含まれていることが示唆された。

表 3-5 Py-GC/MS 装置の設定条件の一例

装置	パラメータ	条件
パイロライザ	加熱炉温度	200 °C (20 °C/min) →300 °C (5 °C/min) →340 °C (1 min 保持)
	インターフェース温度	300 °C
GC	注入法	スプリット注入法 (スプリット比 50:1)
	注入口温度	300 °C
	移動相	ヘリウム
	流量	1.1 mL/min
	カラム	UA-PBDE
	オープン温度	50 °C (1 min 保持、20 °C/min) →200 °C (100 °C/min) →340 °C
MS	インターフェース温度	300 °C
	イオン源温度	300 °C
	四重極温度	150 °C
	スキャン範囲	m/z 50 から m/z 550

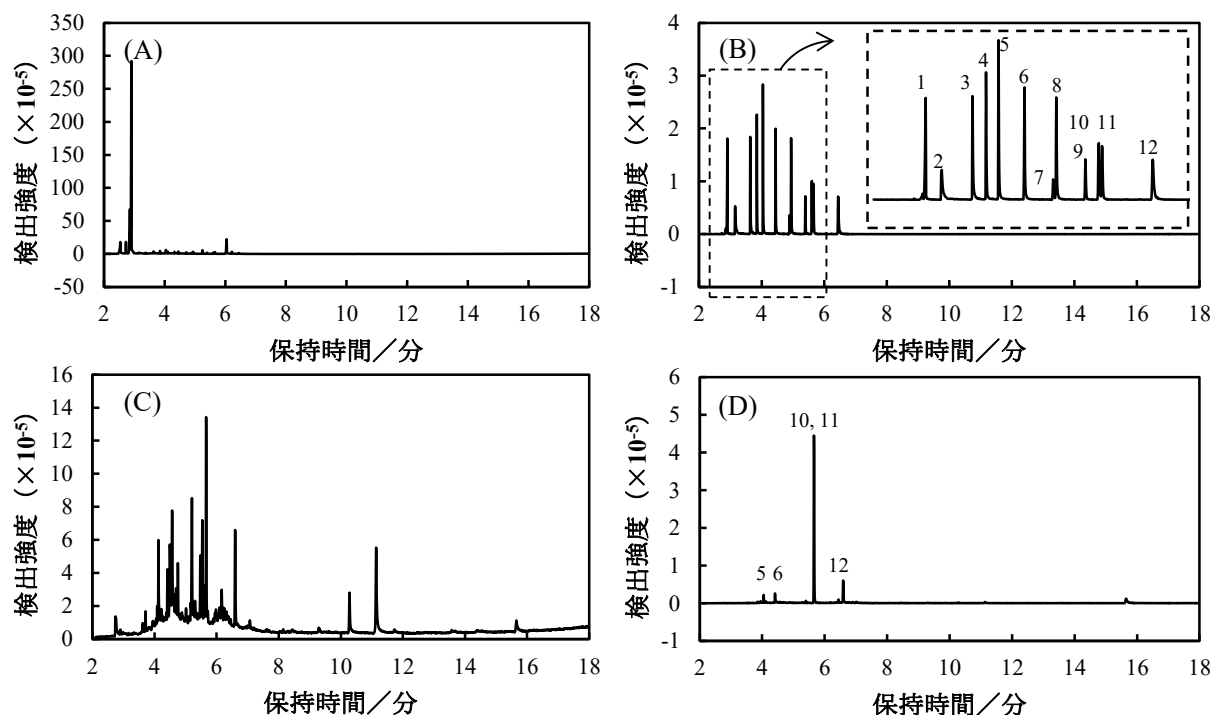


図 3-11 TD-GC/MS による再生プラスチック試料の分析例

(A) NMIJ CRM 8156-a の TIC、(B) NMIJ CRM 8156-a の EIC (m/z 149)、(C) 再生 PP 試料の TIC、(D) 再生 PP 試料の EIC (m/z 149)。(B) と (D) の数字はそれぞれ次のフタル酸エステル類を示す。1：フタル酸ジメチル、2：フタル酸ジエチル、3：フタル酸ジプロピル、4：フタル酸ジイソブチル、5：フタル酸ジブチル、6：フタル酸ジペンチル、7：フタル酸ベンジルブチル、8：フタル酸ジヘキシル、9：フタル酸ジシクロヘキシル、10：フタル酸ジヘプチル、11：フタル酸ジエチルヘキシル、12：フタル酸ジオクタール

3.4.3 まとめ

本節では、TD-GC/MS の概要を述べると共に、これを用いた再生プラスチック試料の分析実施例を示した。部材の異なるプラスチックの分析やフタル酸エステル類以外の添加剤等の分析について興味のある読者は、手軽にアクセスすることが可能なアプリケーション例を参考文献覧にまとめたので、これらを参考にされたい。

参考文献：論文等

- Akoueson, F., Chbib, C., Monchy, S., Paul-Pont, I., Doyen, P., Dehaut, A., Duflos, G., 2021. Identification and quantification of plastic additives using pyrolysis-GC/MS: A review. *Science of The Total Environment* 773, 145073. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145073>
- International Electrotechnical Commission, 2021. IEC 62321-3-3, Determination of certain substances in electrotechnical products - Part 3-3: Screening - Polybrominated biphenyls, polybrominated

diphenyl ethers and phthalates in polymers by gas chromatography-mass spectrometry using a pyrolyser/thermal desorption accessory (Py/TD-GC-MS). International Electrotechnical Commission; 2021.

MOHRING, T., ヴィンセント知子, 2018. オービトラップ型イオントラップを有する質量分析計の原理と応用研究. *ぶんせき* 2018, 526–531.

Seeley, M.E., Lynch, J.M., 2023. Previous successes and untapped potential of pyrolysis–GC/MS for the analysis of plastic pollution. *Anal Bioanal Chem* 415, 2873–2890. <https://doi.org/10.1007/s00216-023-04671-1>

Zhang, T., Ye, X., Luo, X., Niu, Z., Wang, H., Ma, Q., 2023. Simultaneous screening of 33 restricted substances in polymer materials using pyrolysis/thermal desorption gas chromatography–mass spectrometry. *Anal Bioanal Chem* 415, 5463–5473. <https://doi.org/10.1007/s00216-023-04819-z>

吉野健一, 2017. 入門講座 「質量分析」. *ぶんせき/日本分析化学会 編* 6, 216–223.

山崎絵理子, 羽成修康, 中村圭介, 小栗朋子, 小島直也, 篠原直秀, 小倉勇, 小野恭子, 梶原秀夫, 蒲生昌志, 2025. ガスクロマトグラムデータを用いた多変量解析による再生プラスチックペレットの由来の分類・判別手法の検討. *分析化学* 74, 1–5. <https://doi.org/10.2116/bunsekikagaku.74.1>

日本質量分析学会用語委員会 編, 2020. マススペクトロメトリー関係用語集. 国際文献社. 渡辺尅, 2024. 高分子材料のキャラクタリゼーションのための多機能熱分解 GC/MS システムの開発. *分析化学* 73, 251–263. <https://doi.org/10.2116/bunsekikagaku.73.251>

羽成修康, 中村圭介, 山崎絵理子, 小栗朋子, 小島直也, 篠原直秀, 小倉勇, 梶原秀夫, 蒲生昌志, 2024. 熱脱着 GC-MS による再生プラスチック中含有化学物質のスクリーニング分析. *分析化学* 73, 649–655. <https://doi.org/10.2116/bunsekikagaku.73.649>

計量標準総合センター, 2025. 標準物質認証書 「ポリ塩化ビニル (フタル酸エステル類分析用 低濃度)」.

参考文献：分析機器メーカーのアプリケーションノート

Agilent Technologies, 2024. 熱分解-GC/MS による高分子材料のキャラクタリゼーションにおける熱分析情報の重要性. <https://www.chem-agilent.com/appnote/pdf/an-polymeric-materials-pyrolysis-5994-7577ja-jp-agilent.pdf> (accessed 5.7.25).

Agilent Technologies, 2022a. 熱分解-GC/MS を用いた UV 硬化材料の組成解析. <https://www.chem-agilent.com/appnote/pdf/an-uv-curable-pyrolysis-gcms-5994-5443ja-jp-agilent.pdf> (accessed 5.7.25).

Agilent Technologies, 2022b. 熱分解-GC/MS による UV 硬化材料中に混入したポリマー不純物の特定. <https://www.chem-agilent.com/appnote/pdf/An-polymer-impurities-gc-ms-pyro-5994-5479ja-jp-agilent.pdf> (accessed 5.7.25).

Agilent Technologies, 2020. 熱分解 GC/MS と多変量解析によるポリスチレンの差異解析.

<https://www.chem-agilent.com/appnote/pdf/GC-MS-202001HO-001.pdf> (accessed 5.7.25).

Frontier Laboratories, 2025. マルチショット・パイロライザーを用いた試料の分析例.

https://www.frontier-lab.com/assets/file/application-booklet/App_Booklet-J_compressed.pdf

(accessed 5.7.25).

Frontier Laboratories, 2020. 熱分解 GC/MS を使用したゴムおよびプラスチック材料の特性評価.

https://www.frontier-lab.com/assets/file/application-booklet/5.App_Booklet_Plastics_and_Rubbers-J-compressed.pdf (accessed 5.7.25).

4 リスク評価のケーススタディ

本章では、ケーススタディとして、ハザード比を用いた再生プラスチック製品に関するリスク評価のケーススタディを紹介する。

本章で用いるリスク評価手法は、ある特定の物質についての許容されうる上限値（許容上限値）と推定される暴露量（推定暴露量）とを比較して、推定暴露量が許容上限値を超過する場合には、リスクの懸念があるとして、超過しない場合にはリスクの懸念がないとして判定する手法を採用した。この判定のための指標をハザード比と言い、ハザード比は式 4-1 であらわされる。

$$\text{HI : ハザード比} = \frac{\text{A: 推定暴露量}}{\text{B: 許容上限値}} \quad \text{式 4-1}$$

ハザード比は推定暴露量を許容上限値で除して算出され、リスクの懸念が有る場合にはハザード比は1より大きくなり、反対に、リスクの懸念がない場合には1より小さくなる。このように、ハザード比は様々なリスク評価で用いられてきた。

ハザード比を用いたリスク評価手法の長所は、1 を境界としてリスク懸念の有無を判定できるため指標の意味がわかりやすく、また再生プラスチック中の汚染物質のように入手可能な情報が限られた場合においても比較的簡便にリスクの懸念の有無が可能な点である。この特徴から、日本を含めた各国の行政機関やリスク評価機関において、初期リスク評価やリスクスクリーニングでハザード比は用いられてきた。なお、推定暴露量が許容上限値を超過し、リスクの懸念があると判定された場合には、より精度や信頼性を高めた評価に移行し、詳細なリスク評価を経た上で、適切な管理措置を決定するのが一般的である。

ハザード比を算出するために必要な許容上限値と推定暴露量を得るための枠組みを図 4-1 に示す。まず、先行研究や分析事例をレビューすることで、本書で評価する対象物質を選定した。以下、許容上限値の設定、推定暴露量の推計、ハザード比を用いたリスク評価結果について解説する。

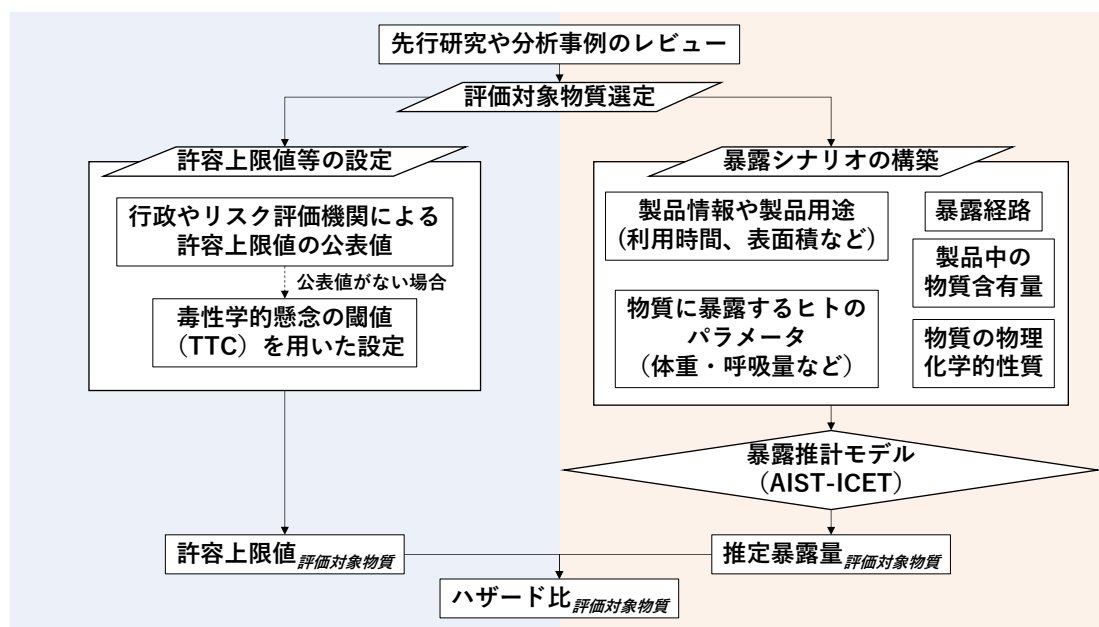


図 4-1 本ケーススタディにおけるリスク評価の枠組み

4.1 対象物質の選定

再生プラスチック中の汚染物質に関するリスク評価のケーススタディは少ないため、まずは再生プラスチック製造事業者にとって関心が高い物質を対象にケーススタディが望ましいと考えた。また、先行研究や分析事例をレビューした結果、含有量の情報が得られる汚染物質は限られていた。以上の2つの観点から、RoHS 指令対象物質を評価対象物質として取り上げた。

RoHS 指令とは、欧州において上市する電気電子機器中の有害物質の使用制限に関する指令（The Restriction of the use of certain hazardous substances）で、表 4-1 に示す 10 物質については電気電子機器中の最大許容濃度が設定されている。

表 4-1 RoHS 指令における対象物質の最大許容濃度（EU, 2015）（2.3 より一部再掲）

グループ	物質名（略称）	CAS 番号	最大許容濃度
金属	鉛	7439-92-1	0.1%
	水銀	7439-97-6	0.1%
	カドミウム	7440-43-9	0.01%
	六価クロム	18540-29-9	0.1%
臭素系難燃剤	ポリブロモビフェニル (PBB)	—※	0.1%
	ポリブロモジフェニルエーテル (PBDE)	—※	0.1%
フタル酸エステル類	フタル酸ジ(2-エチルヘキシル) (DEHP)	117-81-7	0.1%
	フタル酸ベンジルブチル(BBP)	85-68-7	0.1%
	フタル酸ジ(<i>n</i> -ブチル) (DBP)	84-74-2	0.1%
	フタル酸ジイソブチル (DIBP)	84-74-2	0.1%

※異性体が複数存在するため、CAS 番号の記載は省略する。

表 4-1 に示された最大許容濃度の分母は製品全体ではなく、製品中の「均質物質」と言われるものであり、いわば部品単位の重量が分母となる。そのため、電気電子機器中に使用されるプラスチック部品においても使用が制限されている。RoHS 指令はあくまでも EU 域内の、また電気電子機器に関する規制であるものの、国際的に流通する製品にとってのデファクトスタンダードとなっており、日本国内の様々な製品製造事業者が RoHS 指令対象物質の不使用や最大許容濃度未満であることの証明を発行している状況である。このような背景から、今後、様々な用途の製品に再生プラスチックを使用していくためには、RoHS 指令は遵守すべき法令の一つといえ、RoHS 指令対象物質は事業者にとっての関心が高い物質と考えた。

なお、RoHS 指令に関するより詳細な説明は、本書の 2.3 や外部 web ページ (中小機構 J-NET21, 2021; 日本貿易振興機構, 2024) を参照されたい。

4.2 許容上限値の設定

本ケーススタディで用いる許容上限値は、ヒトに健康影響を及ぼさないと考えられる摂取量の上限值を指し、ヒトの体重 1kg あたり 1 日あたりの摂取量 ($\mu\text{g}/\text{kg}/\text{day}$) で表される。物質がヒトの体内に取り込まれる経路 (吸入、経口、経皮) の違いによって、代謝や吸収といった体内動態が異なるため、許容上限値は暴露経路によって異なる。そのため、本リスク評価では、経路ごとに個別に許容上限値を設定した。これらの許容上限値は、一般にヒトに関する疫学調査結果や、動物試験の結果から得られる無毒性量 (No Observed Adverse Effect Level, NOAEL) または最小毒性量 (Lowest Observed Adverse Effect Level, LOAEL) (以下、NOAEL 等) に、不確実性係数の積を乗じて算出する。

RoHS 指令の対象物質のうち、フタル酸エステル類と金属については各国あるいは国際的なリスク評価機関がリスク評価を実施し、その評価結果として許容上限値に相当する評価値を公表している。本ケーススタディでは、日本、米国、欧州において評価結果として公表されている評価値のうち最も小さい評価値を許容上限値として採用・設定した。最も小さい評価値を設定した理由は、少量の摂取であっても健康影響が生じるという仮定を置く方が、より安全側の立場に立ったリスク評価となるためである。

RoHS 指令の対象物質のうち、臭素系難燃剤については、異性体が複数存在していることもあり、一つの許容上限値を設定することはできず、また個々の異性体に関する評価結果もほとんど得ることができない。例外として PBDE のうち、ジフェニルエーテルの置換基すべてが臭素化されたデカブロモジフェニルエーテル (DecaBDE) については、許容上限値に相当するいくつかの公表値が得られる。そのため、DecaBDE 以外の異性体の許容上限値は毒性学的懸念の閾値 (Threshold of Toxicological Concern, TTC) を設定した。TTC の詳細については、例えば食品安全委員会 (2015) を参照されたい。

表 4-2 に設定した許容上限値を示す。臭素系難燃剤のうち PBB については濃度が得られなかった (4.3.1 で後述) ため、設定自体を行わなかった。PBDE については、TTC により

1.5 µg/kg/dayとし、個別のPBDEについてはすべて同様の値を設定することとした。また、金属については今回想定する製品用途において吸入経路、経口経路の暴露はないと考えられ、リスク評価を実施しないため、空欄とした。

表 4-2 設定した許容上限値

物質	暴露経路	設定した許容上限値 ^{※1} (µg/kg/day)	参考文献
BBP	経皮	4,500	(ECHA Chemical Database, 2010)
	吸入 ^{※2}	780	
	経口	200	(U.S. EPA, 1989a)
DBP	経皮	70	(ECHA Chemical Database, 2010a)
	吸入	20	
	経口	7	
DEHP	経皮	720	(ECHA Chemical Database, 2010b)
	吸入	130	
	経口	20	(U.S. EPA, 1987)
DIBP	経皮	(評価値なし)	(ECHA Chemical Database, 2010c)
	吸入	720	
	経口	210	
Pb	経皮	1	(Huang et al., 2021)
	吸入		
	経口		
Hg	経皮	(評価値なし)	(U.S. EPA, 1995)
	吸入		
	経口		
Cd	経皮	(評価値なし)	(U.S. EPA, 1994)
	吸入		
	経口		
Cr (IV)	経皮	(評価値なし)	(U.S. EPA, 2024)
	吸入		
	経口		
PBDE ^{※3} (PBDE-47、PBDE-99)	経皮	1.5	(EFSA Scientific Committee, 2012)
	吸入	1.5	
	経口	1.5	
PBB	-		

※1：NOAEL等/UFsにより推定した。NOAEL等として、NOAEL: no observed adverse effect level, 無毒性量; LOAEL: Lowest observed adverse effect level, 最小毒性量などが挙げられる。UFs：uncertainty factors, 不確実性係数の積。

※2：吸入経路の許容上限値について、評価機関の公表値の単位が µg/day であった場合、1日当たりの呼吸量 (m³/day) と想定した被曝者の体重 (kg) を用いて換算した値である。

※3：PBDE-47とPBDE-99はCramer class III相当であり(QSAR Toolbox Ver.4.7.1)、TTCにより経路によらず1.5µg/kg/dayとした。

4.3 暴露量推計手法

ここでは、暴露量の推計に必要な製品中の物質濃度の推定方法、暴露量推計モデルに必要なパラメータの設定根拠となる製品想定や暴露シナリオ、および推計モデルとして用いた AIST-ICET の概要について述べる。

4.3.1 製品中の物質濃度の推定

再生プラスチック製品中に含まれる評価対象物質の濃度に関する利用可能な情報はほとんどないのが現状である。一方、再生プラスチック製ペレット中の物質濃度については、わずかではあるものの先行研究や報告書においてその分析結果が公表されている。そのため、本ケーススタディでは一部の先行研究や報告書をレビューし、先行研究において定量されている物質濃度を使用した。

評価対象物質に関する分析結果が得られた先行研究や報告書の一覧を表 4-3 に示す。これらの文献から得られた濃度のうち最大値を、暴露量推計に用いた PP 製再生プラスチックペレット中の物質濃度として用いた (表 4-4)。クロムの報告値については RoHS 指令対象の六価クロム以外も含む濃度であるが、安全側の評価のためにここでは全量が六価クロムであるとみなして、ケーススタディに用いた。また、PBDE については、先行研究から濃度が得られ、かつ暴露量推計に必要な物理化学的パラメータ (4.3.3 で後述) の得られた PBDE-47 と PBDE-99 を評価対象とした。なお、それぞれの文献では溶出方法が異なっており、ペレット中の全物質が分析されたと見込まれる論文

表 4-3 評価対象物質の分析結果が得られた先行研究や報告書の一覧

文献情報	フタル酸 エステル類	臭素系 難燃剤	金属	素材など	溶出溶媒など
Denmark MoE (2021)	定量	-	検出	PP	化粧品模擬溶媒
Pivnenko K. (2016)	定量	-	-	PP	
Chibwe L. (2023)	定量	定量	定量	混合 (PP、PE、PET 等)	
Tumu K. (2024)	定量	-	-	混合 (PP、PE 等)	
Brandsma SH. (2022)	定量	定量	-	混合 (PP/PE)	
Huang G. (2021)	-	-	定量	PP	人工汗模擬溶媒
Su QZ. (2021)	定量	-	-	ポリオレフィン	食品模擬溶媒
Nunez SS. (2022)	-	-	定量	LDPE	-
Peng B. (2020)	-	定量	-	PE、PVC 等	-
Garcia Ibarra V (2018)	定量	-	-	PP	食品模擬溶媒
Garcia Ibarra V (2019)	定量	-	-	PP、PE	食品模擬溶媒

表 4-4 暴露量推計に用いた PP 製再生プラスチックペレット中の物質濃度

物質		物質濃度 (mg/kg)	参考文献
鉛 (Pb)		0.181	(Huang et al., 2021) ^{※4}
水銀 (Hg)		不検出 ^{※1}	
カドミウム (Cd)		0.003	
六価クロム (Cr(VI)) ^{※2}		0.194	
DEHP		120	(Pivnenko et al., 2016)
BBP		4.7	
DBP		11	
DIBP		11	
PBB		不検出 ^{※1}	
PBDE ^{※3}	PBDE-47 ^{※3}	0.0146	(Chibwe et al., 2023)
	PBDE-99 ^{※3}	0.0143	

※1：水銀、PBBについては、レビューした文献内では検出されなかった。

※2：クロムについては六価クロム以外も含む値であるが、安全側の評価のためにここでは全量が六価クロムであるとみなした。

※3：PBDEについては、先行研究から濃度が得られ、かつ暴露量推計に必要な物理化学的パラメータ（4.3.3で後述）の得られたPBE-47（2,2',4,4'-TetraBDE）とPBE-99（2,2',4,4',5-PentaBDE）を評価対象とした。

※4：凍結粉碎したペレットを人口汗溶媒に浸し、ICP-MSを用いて溶解濃度を測定した。そのため、左記の物質濃度は、ペレット中の一部であると考えられる。他の文献値は全量が溶出した値と考えられるため、注意が必要である。

4.3.2 想定する製品と暴露シナリオ

本リスク評価では、実際に再生プラスチックの利用検討のために試作が進められている製品である、再生ポリプロピレン（PP）製の爪切りホルダー（図 4-2 左側）および自動車の窓開閉用ボタンパネル（以下、ボタンパネル）（図 4-2 右側）を対象に、暴露シナリオの作成、およびパラメータの設定を行った。

製品重量に占める再生プラスチックの割合は100%とした。

それぞれの製品の使用者は、現実的に想定される範囲で体重の軽いヒトを想定した。これは、同量の物質に暴露した場合に、体重の重いヒトよりも軽いヒトの方が、体重あたりの暴露量が大きく推計され、より安全側の立場に立ったリスク評価となるためである。爪切りホルダーについては、使用時に手で触れることにより、再生プラスチック中に含まれる物質に経皮的に暴露することを想定した。爪切りは2週間に1回（NHK, 2022）、1回あたり5分使用すると仮定し、これに基づき爪切りホルダーへの接触頻度は0.36（min/day）と設定した。一方、ボタンパネルについては、手のひらで接触することにより、再生プラスチック中に含まれる物質に経皮的に暴露することに加え、ボタンパネルから車内空気中に揮発・移行した物質の吸入暴露、ならびに車内のダストに吸着した物質の経口暴露も考

慮した。車の運転時間は、日本人の運転時間の 90 パーセンタイル値にあたる 1 日当たり 144 分 (製品評価技術基盤機構, 2019) とし、ボタンパネルへの接触は運転時間の 5%と仮定した。

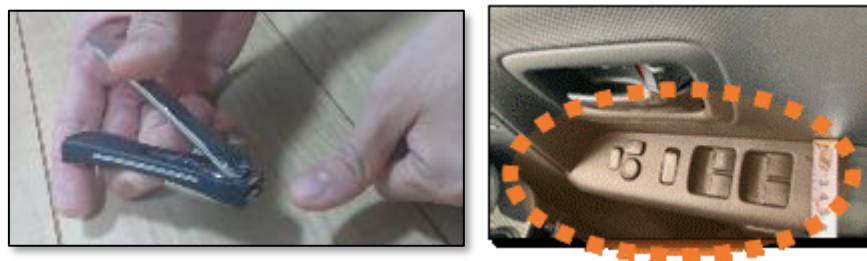


図 4-2 想定した再生プラスチック製品のイメージ図

(左側：爪切りのホルダー部分、右側：自動車の窓開閉用ボタンパネル)

4.3.3 推計モデル

暴露量推計手法として、フタル酸エステル類と臭素系難燃剤の接触に伴う経皮暴露、揮発に伴う吸入暴露およびダスト吸着に伴う経口暴露の推計は、産総研－室内製品暴露評価ツール (AIST-ICET) を用いた。金属については経皮暴露のみを考慮し、先行研究 (Huang et al., 2021; U.S. EPA, 1989b) を参考とした。

(ア) フタル酸エステル類および臭素系難燃剤

AIST-ICET とは、国立研究開発法人 産業技術総合研究所 (AIST) が開発した、室内製品に含まれる化学物質の人への吸入、経皮および経口暴露を評価するためのツールであり、以下の機能を備えている。

- ・ 化学物質、製品、住宅・世帯・人の各データベース
- ・ 吸入・経皮・経口暴露量の推計
- ・ 住宅内の濃度の時間変化を推計
- ・ 日本全国の世帯・住民の暴露分布を推計
- ・ 室内空气中濃度、ハウスダスト中濃度の推計
- ・ 計算結果のグラフ表示

詳細は参考文献を参照されたい。上述した 4.3.1 および 4.3.2 の想定に基づき、評価に必要なパラメータを表 4-5 のように設定した。AIST-ICET に必要なパラメータのうち、水溶解度や蒸気圧等のパラメータが内蔵データベースに含まれない物質については、U.S. EPA の EPI SUITE から得られたパラメータを用いた。

表 4-5 評価に用いたパラメータ

カテゴリ	暴露経路	パラメータ	単位	爪切りホルダー	ボタンパネル	備考
製品	共通	製品比重	g/cm ³	0.9		平均的な PP の比重
		製品重量	g	2	36	
		製品表面積	cm ²	20	400	実測値から概算
	経皮	使用時間	min/day	0.36	7.2	本文参照
	経口			-	144	
	吸入			-	144	
ヒト	共通	想定する体格	-	小学生 1 年生	成人女性	参考：厚生労働省 学校保健統計調査 2015 年度、産総研 暴露係数ハンドブックなど
		体重	kg	20.2	48.6	
	経皮	接触部位	-	片手の指先	片手の手のひら	接触面積＝体表面積×接触部位が占める割合
		接触面積	cm ²	20	167.9	
		皮膚表面水層厚さ	cm	0.01		U.S. EPA, 1990
	経口	ハウスダスト摂取量	g/day	-	0.05	AIST-ICET デフォルト値
	吸入	呼吸量	m ³ /day	-	16.2	AIST-ICET 95 パーセンタイル値
暴露空間	吸入	暴露空間の体積	m ³	-	3.56	ワゴン型軽自動車の体積
		換気回数	回/h	-	2.1	先行研究における実測値 4)
	共通	バックグラウンド濃度	g/m ³	-	0	再生プラスチック製品からの寄与のみを考慮

(イ) 金属

再生プラスチック製品中の金属の経皮暴露量の推計手法として、Huang et al. (2021) の暴露濃度推計手法、および参考元である U.S. EPA (1989) の手法を参考とし、本ケーススタディでは式 4-2 から式 4-4 で経皮暴露量を推計した。式 4-2 では、Huang et al. (2021) の分析より得られた物質濃度を体積当たりの濃度に換算した。式 4-3 では皮膚接触濃度に、接触面積、皮膚透過係数 (U.S. EPA, 2004)、暴露時間を乗じ、一生涯で暴露する総量を推計した。式 4-4 で皮膚透過量を体重一日あたりの暴露量に換算した。

$$\text{皮膚接触濃度 (mg/cm}^3\text{)} : C_{skin} = C \times \frac{M}{V} \quad \text{式 4-2}$$

$$\text{皮膚透過量 (mg)} : I_{skin} = C_{skin} \times S_0 \times K_p \times ET \times ED \quad \text{式 4-3}$$

$$\text{経皮暴露量 (mg} \cdot \text{cm/kg/h)} : Ex_{skin} = I_{skin} \times \frac{1}{BW \times AT} \quad \text{式 4-4}$$

C : 人口汗を溶媒とする試験から得られた重量あたりの溶出する物質濃度 (mg/kg) (表 4-4)

参照)

M : 製品重量 (kg) (表 4-5 参照)

V : 製品体積 (cm³) (表 4-5 の製品重量と比重より算出)

S_0 : 製品接触面積 (cm²) (表 4-5 参照)

K_p : 透過係数 (cm/h) (表 4-6 参照)

ET : 一日当たりの暴露時間 (h/day) (表 4-5 参照)

ED : 生涯の暴露日数 (day) (表 4-5 参照)

BW : 体重 (kg) (表 4-5 参照)

AT : 平均化時間 (h)。ET×ED と同様とした (表 4-5 参照)

表 4-6 物質別の透過係数 (cm/h)

元素*	K_p : 透過係数 (cm/h)
カドミウム (Cd)	1.0E-03
クロム (Cr)	2.0E-03
鉛 (Pb)	1.0E-04

*Huang et al. (2021) において水銀 (Hg) の濃度は測定対象外であり、透過係数が得られなかった。

4.4 ハザード比を用いたリスク評価結果

爪切りホルダーおよびボタンパネルに関するリスク評価結果をそれぞれ表 4-7 および表 4-8 に示す。 Σ (ハザード比) は、同種の物質に関してハザード比を合計し、合計値が 1 を超過するかないかでリスクの有無を判定する手法である。評価の結果、すべての物質、経路、製品においてハザード比は 1 を超過しておらず、本ケーススタディで想定した範囲においてリスクの懸念はないと判定された。

表 4-7 爪切りホルダーに関するリスク評価結果

暴露経路	物質	A. 推定暴露量 (µg/kg/day)	B. 設定した許容上限値 (µg/kg/day)	ハザード比 (A/B)	Σ (ハザード比)	リスク判定	
経皮	DEHP	1.8E-04	720	2.5E-07	4.1E-07	<<1 ⇒リスクの懸念なし	
	DBP	1.1E-05	70	1.5E-07			
	BBP	3.5E-06	4,500	7.7E-10			
	DiBP	6.7E-06	(評価値なし)	—			
	PBDE-47	1.4E-08	1.5	9.3E-09	9.5E-10		
	PBDE-99	2.7E-10	1.5	1.8E-10			
	Cd	1.7E-06	(評価値なし)	—	—		—
	Cr	2.4E-04	(評価値なし)	—	—		—
Pb	1.1E-05	1	1.1E-05	<<1			

表 4-8 ボタンパネルに関するリスク評価結果（経皮）

暴露経路	物質	A. 推定暴露量 (µg/kg/day)	B. 設定した許容上限値 (µg/kg/day)	ハザード比 (A/B)	Σ(ハザード比)	リスク判定
経皮	DEHP	5.60E-03	7.20E+02	7.78E-06	3.60E-05	<<1 ⇒リスクの懸念なし
	DBP	1.60E-03	7.00E+01	2.29E-05		
	BBP	4.90E-04	4.50E+03	1.09E-07		
	DiBP	1.00E-03	(評価値なし)	-	1.20E-06	
	PBDE-47	1.10E-06	1.5	7.33E-07		
	PBDE-99	9.00E-09	1.5	6.00E-09		
	Cd	5.10E-11	(評価値なし)	-	-	
	Cr	7.30E-09	(評価値なし)	-	-	
	Pb	3.40E-10	1	-	3.40E-10	
吸入	DEHP	1.40E-04	5.00E+01	2.80E-06	3.60E-05	<<1 ⇒リスクの懸念なし
	DBP	1.30E-05	6.00E+00	2.17E-06		
	BBP	5.60E-06	2.10E+02	2.67E-08		
	DiBP	1.30E-05	2.00E+02	6.50E-08	1.20E-06	
	PBDE-47	1.70E-08	1.5	1.13E-08		
	PBDE-99	1.70E-08	1.5	1.13E-08		
	Cd	-	-	-	-	
	Cr	-	-	-	-	
	Pb	-	-	-	-	
経口（ハウスダスト）	DEHP	5.20E-07	3.60E+01	1.44E-08	3.60E-05	<<1 ⇒リスクの懸念なし
	DBP	1.60E-05	7.00E+00	2.29E-06		
	BBP	2.20E-06	5.00E+02	4.40E-09		
	DiBP	5.00E-06	2.10E+02	2.38E-08	1.20E-06	
	PBDE-47	4.10E-07	1.5	2.73E-07		
	PBDE-99	1.90E-07	1.5	1.27E-07		
	Cd	-	-	-	-	
	Cr	-	-	-	-	
	Pb	-	-	-	-	

4.5 再生プラスチック中に含まれる物質濃度に関する管理上限値の検討

現在、プラスチックに関して、2章で述べたような安全基準や規制が実施されている。再生プラスチックはバージンプラスチックよりも、汚染物質や非意図的添加物が混入しやすく、かつその流入経路や種類・量の把握が困難であると考えられる。そのため、将来、再生プラスチックについてはバージンプラスチックとは異なる安全基準や規制が適用される可能性がある。このような、安全基準や規制の構成要素の一つに、再生プラスチック製品中に含まれ健康影響が懸念される物質の濃度を管理するための基準値や参照値（以下、管理上限値）がある。本節ではこの管理上限値のあり方について、ケーススタディの結果を踏まえて、検討する。

管理上限値の設定のためには、4.4 までで実施したケーススタディよりも、より詳細なリスクの評価が必要とされる。4.4 までで用いたシナリオやパラメータは、実現可能性がありそうな範囲で比較的风险が大きくなるように、より安全側の立場に立った設定をし

た。管理上限値を決める際には、例えば、管理上限値を遵守することで誰の健康が、どの程度リスクを被らないことになるのか（リスクから守られうるのか）という効果の観点や、またその管理上限値を遵守可能かどうかといった実効性の観点も含めて、より多くの要素を考慮してシナリオやパラメータする必要がある。

管理上限値の効果の観点からみて、ケーススタディで設定した再生プラスチック製品中の RoHS 指令対象物質の濃度は、健康リスクに関する懸念はないと判断されたことを踏まえると、管理上限値はここで設定した以上の濃度になると見込まれる。しかし、ケーススタディで扱った製品は、その接触頻度や使用時間が比較的限られたものであった。ケーススタディで扱った製品の特徴として、ヒトが直接接触する用途がある、室内空気に晒される、その製品や製品に接触した飲食物等を意図的に体内に取り込む可能性がほぼない、という点が挙げられる。こういった特徴は食品、医薬品、化粧品用途に関わるプラスチック製品・容器包装にはあてはめられず、かつこれらの用途を介した推定暴露量はケーススタディで想定したものよりも大きくなる可能性がある。そのため管理上限値は、より推定暴露量が高くなる用途を考慮した場合についてもあわせて検討する必要があると考えている。

参考文献

- Brandsma, S.H., Leonards, P.E.G., Koekkoek, J.C., Samson, J., Puype, F., 2022. Migration of hazardous contaminants from WEEE contaminated polymeric toy material by mouthing. *Chemosphere* 294, 133774. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133774>
- Chibwe, L., De Silva, A.O., Spencer, C., Teixeira, C.F., Williamson, M., Wang, X., Muir, D.C.G., 2023. Target and Nontarget Screening of Organic Chemicals and Metals in Recycled Plastic Materials. *Environ. Sci. Technol.* 57, 3380–3390. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c07254>
- ECHA Chemical Database, 2010a. Benzyl butyl phthalate [WWW Document]. URL https://chem.echa.europa.eu/100.001.475/dossier-view/89497f66-d1a1-4f74-a692-2a0daed17fb4/3eb60d3e-6d2a-4240-95c9-2a28a78ea493_3eb60d3e-6d2a-4240-95c9-2a28a78ea493?searchText=85-68-7 (accessed 6.9.25).
- ECHA Chemical Database, 2010b. Bis(2-ethylhexyl) phthalate [WWW Document]. URL https://chem.echa.europa.eu/100.003.829/dossier-view/8f1917da-0781-4b4c-bf29-759626d96047/b726440b-748d-4ee1-9912-79fc39048908_ace221f4-949b-408f-8e6b-afdf93e771aa (accessed 6.9.25).
- ECHA Chemical Database, 2010c. Dibutyl phthalate [WWW Document]. URL https://chem.echa.europa.eu/100.001.416/dossier-view/5ac5a3cf-7792-48ce-ab71-72bad67bae5f/f1b89afc-76c0-49fb-94a3-eb4d5c2e06cc_f1b89afc-76c0-49fb-94a3-eb4d5c2e06cc
- ECHA Chemical Database, 2010d. Diisobutyl phthalate [WWW Document]. URL <https://chem.echa.europa.eu/100.001.412/dossier-view/afd5cd6e-d81b-41fb-a54b->

[6c5d2b3a70e4/IUC5-bbc6345f-29d6-421a-97b2-d6f28ad2052e_12fdc8d7-06a1-4891-815d-7799c7e1ff63?searchText=84-69-5](https://doi.org/10.2903/j.efsa.2012.2750) (accessed 6.9.25).

- EFSA Scientific Committee, 2012. Scientific Opinion on Exploring options for providing advice about possible human health risks based on the concept of Threshold of Toxicological Concern (TTC). *EFSA Journal* 10, 2750. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2012.2750>
- García Ibarra, V., Rodríguez Bernaldo de Quirós, A., Paseiro Losada, P., Sendón, R., 2019. Non-target analysis of intentionally and non intentionally added substances from plastic packaging materials and their migration into food simulants. *Food Packaging and Shelf Life* 21, 100325. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100325>
- García Ibarra, Verónica, Sendón, R., García-Fonte, X.-X., Paseiro Losada, P., Rodríguez Bernaldo de Quirós, A., 2019. Migration studies of butylated hydroxytoluene, tributyl acetyl citrate and dibutyl phthalate into food simulants. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 99, 1586–1595. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9337>
- Huang, G., Xie, J., Li, T., Zhang, P., 2021. Worker health risk of heavy metals in pellets of recycled plastic: a skin exposure model. *International Archives of Occupational and Environmental Health* 94, 1581–1589. <https://doi.org/10.1007/s00420-021-01727-6>
- NHK, 2022. 深爪にリスクも...爪切りについて専門家に聞いてみた [WWW Document]. URL <https://www3.nhk.or.jp/news/html/20220128/k10013452281000.html> (accessed 6.9.25).
- Núñez, S.S., Moltó, J., Conesa, J.A., Fullana, A., 2022. Heavy metals, PAHs and POPs in recycled polyethylene samples of agricultural, post-commercial, post-industrial and post-consumer origin. *Waste Management* 144, 113–121. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.03.016>
- Peng, B., Yu, Z.-M., Wu, C.-C., Liu, L.-Y., Zeng, L., Zeng, E.Y., 2020. Polybrominated diphenyl ethers and organophosphate esters flame retardants in play mats from China and the exposure risks for children. *Environment International* 135, 105348. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105348>
- Pivnenko, K., Eriksen, M.K., Martín-Fernández, J.A., Eriksson, E., Astrup, T.F., 2016. Recycling of plastic waste: Presence of phthalates in plastics from households and industry. *Waste Management* 54, 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.014>
- OECD QSAR Toolbox 4.7.1.
- Su, Q.-Z., Vera, P., Nerín, C., Lin, Q.-B., Zhong, H.-N., 2021. Safety concerns of recycling postconsumer polyolefins for food contact uses: Regarding (semi-)volatile migrants untargetedly screened. *Resources, Conservation and Recycling* 167, 105365. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105365>
- Tumu, K., Vorst, K., Curtzwiler, G., 2024. Understanding intentionally and non-intentionally added substances and associated threshold of toxicological concern in post-consumer polyolefin for use as food packaging materials. *Heliyon* 10, e23620. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23620>
- U.S. EPA, 2024. IRIS; Hexavalent Chromium; CASRN 18540-29-9.

- U.S. EPA, 2004a. IRIS; Lead and compounds (inorganic); CASRN 7439-92-1.
- U.S. EPA, 2004b. Risk assessment guidance for superfund volume I: Human health evaluation manual (Part E, Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment).
- U.S. EPA, 1995. IRIS; Mercury, elemental, CASRN 7439-97-6.
- U.S. EPA, 1994. IRIS; Cadmium; CASRN 7440-43-9.
- U.S. EPA, 1989a. IRIS; Butyl benzyl phthalate; CASRN 85-68-7.
- U.S. EPA, 1989b. Risk assessment guidance for superfund: volume I. Human health evaluation manual (Part A).
- U.S. EPA, 1987. IRIS; Di (2-ethylhexyl)phthalate (DEHP); CASRN 117-81-7.
- U.S. EPA, EPI Suite™-Estimation Program Interface.
- Villadsen, S., Malmgren-Hansen, B., Kristensen, G., Kastbjerg, S., Jacobsen, E., Boyd, H., Møller, L., Larsen, P., 2021. Initial safety assessment of recycled plastic for packaging of cosmetic products.
- 中小機構 J-NET21, 2021. RoHS 指令の概要-RoHS 指令の基礎 [WWW Document]. URL <https://j-net21.smrj.go.jp/development/rohs/basic/basic.html> (accessed 3.7.25).
- 日本貿易振興機構, 2024. RoHS（特定有害物質使用制限）指令の概要：EU, [WWW Document]. URL <https://www.jetro.go.jp/world/qa/04J-100602.html> (accessed 3.7.25).
- 産総研－室内製品暴露評価ツール（AIST-ICET）.
- 製品評価技術基盤機構, 2019. 室内暴露にかかわる生活・行動パターン情報 4 自動車.
- 食品安全委員会, 2015. 毒性学的懸念の閾値（TTC）を用いたリスク評価手法に関する調査.

5 プラスチックの循環経済構築に向けて

ここまでプラスチックの循環経済構築に向けて、現状と課題の整理を行い、分析事例やリスク評価事例を紹介した。各事例において適用した分析手法やリスク評価手法は、すでに様々な対象に適用されてきた手法ではあるものの、再生プラスチックを対象とした場合に、新たに追加すべき手順や考慮すべき要素があることがわかった。それらの一部は、本書の執筆時点までに議論・検討が進み、ここまでで述べた手続きを踏襲することにより解決できる。一方で、改良の余地のある部分や着手できなかった部分も残されている。ここでは、分析およびリスク評価を実施した経験を踏まえ、それぞれで今後必要と見込まれる技術や取り組みについて述べる。

分析について、本書内ではプラスチックの材質を判別するために FT-IR を適用し、PP リッチ、PE リッチや PS などの判別を行った。また含まれる成分に関して、金属・元素類は XRF を、有機化合物は熱脱着-GC-MS を適用し、幾つかの対象物質に関して評価を行った。特に、規制対象となっている対象物質に関しては、定量的な情報の評価まで実施した。これら幾つかの対象物質の分析手法は、2.4 で紹介した内容に準じていることから、一般に広く周知されており、ある程度汎用的な手法であると考えられる。ただし、採用または改良したこれら分析手法は、上述のとおり規制値等が設定されているなどの背景から、対象物質が予め決められており、それら規制対象物質の評価に適したものとなっている。一方で、XRF では軽元素の分析が、GC-MS では難揮発性物質の分析が困難であることが知られており、本書内で紹介した分析事例の取得で用いた手法ではこれらの評価が十分とは言えない。加えて 2 章で述べたように、非意図的成分、出所やプラスチック組成の複雑な再生プラスチックの評価が必要な場合も想定される。そのため今後は、不足箇所を補う分析技術（例えば、多くの元素分析が可能な ICP-MS や半揮発性～難揮発性物質まで分析可能な液体クロマトグラフなど）の検討が必要であり、また網羅性の高い分析技術（例えば、飛行時間型質量分析計やオービトラップ質量分析計など）も、現状より広範に活用されると考えられる。さらに、再生プラスチックは試料数が多いことや高品質化に費用をあまり掛けられないことなど、コストパフォーマンスやタイムパフォーマンスを意識すべき産業・製品分野であることから、複数の分析技術が選択肢としてある中から、目的・用途に応じた分析技術を選択可能なフローチャートなどの必要性も高まることが予想される。将来的には、分野や目的ごとに活用されている分析技術の幾つかが公定法化されるなど、広く周知され、汎用的になることが期待される。

リスク評価について、本書内で想定した暴露シナリオにおいては、リスクの懸念はないと判断された。シナリオは一定のエビデンスに基づき暴露量が大きいと推定される場合を想定し、かつ暴露量と比較する許容上限値についても最も厳しい値で評価した。以上から、いわゆる安全側の評価において、リスクは十分に許容できる範囲にあると評価されたことを踏まえると、今回想定した暴露シナリオに近い製品群に関しては、早急に再生プラスチック製品に対する追加的なリスク管理策を実施する必要性は低いと考えられる。

Appendix A 熱脱着 GC-MS 手法の開発とその検討事項の詳細

本稿では、主要な含有化学物質のなかでも、有機化合物の評価に用いるための熱脱着ガスクロマトグラフィー／質量分析法（TD-GC/MS）の開発に至る背景や、手法開発に関する検討事項の詳細を述べる。

A.1 手法開発の背景

まずは、プラスチックに含まれる有機化合物分析に関して述べる。近年、RoHS 指令（DIRECTIVE 2011/65/EU）等が注視されており、この規制対象物質としてフタル酸エステル類や臭素系難燃剤が知られている。この指令では、規制対象物質の最大許容濃度（0.1%）が決められており（2.3 参照）、この濃度を超える電気電子機器の欧州への上市が規制されている。そのため、規制対象物質の濃度を評価するための手法が IEC（国際電気標準会議）で定められ、IEC 62321 シリーズ（IEC 62321-3-1:2013、IEC 62321-6:2015、IEC 62321-8:2017）として発行されている。手法の概要は、IEC 62321-3-1（臭素系難燃剤）や-8（フタル酸エステル類）では最大許容濃度を超える可能性があるかないかを簡便に判別するスクリーニング手法であり、IEC 62321-6（臭素系難燃剤）や IEC 62321-8（フタル酸エステル類）¹ではこれら濃度を精密に評価する手法となっている。この措置は、電気電子機器の検体数の多さが要因であり、再生プラスチックにおいても状況はほぼ類似していると考えられる。近年、学会等での再生プラスチック評価手法に関する研究事例が増加しており、スクリーニング手法や精密に評価する手法の両方が数多く検討されている。ただし、国内ではスクリーニング手法の事例が多い印象である。加えて、再生プラスチック製造事業者へのヒアリング調査でも簡便に評価できる手法が望まれている傾向が強かったことから、比較的簡便な有機化合物の評価手法の開発に取り組んだ。

A.2 手法開発の指針

簡便な評価として引用されている IEC 62321-8 のスクリーニング手法では、熱分解装置を備えたガスクロマトグラフを用いることが推奨されている。そこで、本研究でも同様の装置を用いて検討を始めることとした。IEC 62321-8 のスクリーニング手法では、上述のとおり、フタル酸エステル類を対象物質として検出することを目的としている。一方で、本研究では再生プラスチックに含まれる多くの有機化合物を可能な限り評価することを目的としたため、手法の改良を行うこととした。また、主にバージン材を用いて開発される電気電子機器と比較して、再生プラスチックでは再生により得られる樹脂（ペレット）の組成がリサイクルプラスチックの回収先や季節等で変動すること、リサイクル工場での機器による選別精度が樹脂種により異なることなどから、作成されるペレットごとに樹脂の組成が全く同じではない。そこで、組成の異なるペレットから、可能な限り多くの有機化合物

¹*-8 にはフタル酸エステル類に関するスクリーニング手法及び精密に評価する手法の両方が記載されている。

を評価できる手法の開発を目指すことにした。

A.3 検討事項の詳細

A.3.1 供試料

再生プラスチックに含まれる多くの有機化合物を可能な限り評価するには、再生プラスチックペレットごとに樹脂組成が異なることに注意しなければならない。そこで、まずは熱分解装置にセットする供試料の性状・形状に関して検討した。一般的に、熱分解装置にはペレットをそのまま供し、含まれる有機化合物を熱脱着または熱分解し、ガスクロマトグラフに導入する(日本分析化学会ガスクロマトグラフィー研究懇談会編, 2024)。熱分解条件では、含まれる有機化合物が分解してしまい、それら进行评估することが簡単ではないため、熱脱着条件を選択した。熱脱着温度は樹脂の軟化点がそれぞれ異なるため、樹脂種ごとに最適な温度を設定することが必要となるが、先に述べたように、再生プラスチックでは樹脂組成が一定でないことから、ペレットそのままを供試料とすることは困難と判断した。そのため、ペレットを有機溶媒に一定期間つけ置き、溶出液を分析することで、可能な限り多くの有機化合物を評価することとした。樹脂を完全溶解する有機溶媒を溶媒として選択することも考えたが、今回の再生プラスチックの主な樹脂種は PP や PE であり、特殊な溶媒(トリクロロベンゼン等)と温度条件(150℃以上)でないと完全溶解が実現できない。実際に、完全溶解を実施した試料を熱分解装置に供し、熱脱着条件で評価した場合、溶解溶媒であるトリクロロベンゼンが主要な有機化合物として検出されてしまう。そのため、可能な限り有機化合物が再生プラスチックから溶出し、かつ揮発性の高い有機溶媒を選定することとした。テトラヒドロフラン(THF)はプラスチックに含まれる有機化合物を評価する際によく使用される有機溶媒であることから、THF とトリクロロベンゼン等完全溶解する溶媒との比較を行い、THF の適性を評価した。結果として、THF で 1 週間程度つけ置きすることで、主要な有機化合物は、完全溶解する溶媒から得られるクロマトグラムパターンと類似することが明らかとなったため、この溶媒を採用した。なお、この比較・評価においては、規定量が含まれるフタル酸エステル類を含有するプラスチック試料を用いている。

加えて、検出された有機化合物の濃度も簡単に判別できるよう、供試料量は 30 mg、有機溶媒である THF は 1 mL と再生プラスチック試料を分析する条件を同一にすることとした(羽成ら, 2023, 2024b)。これらにより、ある程度ピーク強度を指標として用いることで、相対的な濃度情報も簡便に判別できるようになった。

A.3.2 分析条件

再生プラスチックに含まれる多くの有機化合物を可能な限り評価することが望ましいが、上述のとおり、つけ置きが 1 週間程度であるため、分析時間は通常より短くすることを検討した。臭素系難燃剤であるデカブプロモジフェニルエーテル(PBDE)は分子量(959

g/mol) が大きく、分析時間が比較的長く必要な有機化合物として知られている。そのため、ガスクロマトグラフに接続するキャピラリーカラムは 15 m と、通常 (30 m) よりも短めのものを採用し、昇温速度も速く設定した (表 A-1)。また、含まれる多くの有機化合物を可能な限り評価したいが、含まれる有機化合物が特定されていない状況から、質量分析計 (MS) はスキャンモードを設定した。結果として、PBDE の検出時間が 11 分程度となり、多くの有機化合物は 10 分以内に検出される分析条件となった。分析条件等の詳細は関連論文 (羽成ら, 2024a) を参照されたい。

表 A-1 TD-GC/MS の分析条件 (例示)

装置	パラメータ	条件
熱分解装置	燃焼炉温度	200 °C (20 °C/分) → 300 °C (5 °C/分) → 340 °C (1 分)
	インターフェース温度	300 °C、320 °C など
ガスクロマトグラフ	注入モード	スプリット注入 (50:1、20:1 など)
	注入口温度	300 °C
	オーブン温度	50 °C (1 分) → (50 °C/分) → 200 °C → (10 °C/分) → 340 °C
質量分析計	インターフェース温度	300 °C
	イオン源温度	300 °C、250 °C など
	質量分析部温度	150 °C

A.3.3 再生プラスチックの使用履歴

A.3.1 および A.3.2 で TD-GC/MS の条件を確定できたため、次に、再生プラスチックの使用履歴の差異が評価できるか、クロマトグラムの分析事例の蓄積を試みた。3.2 の分析事例で示した通り、使用履歴の差異がクロマトグラムの差異にある程度関連することが明らかとなった (羽成ら, 2023, 2024b, 2024a)。特に、容リプラを使用履歴とする再生プラスチックでは、3~5 分程度に多くのピークが検出され、ピーク強度も他の使用履歴のものと比較すると明らかに高かった (図 A-1)。ただし、使用履歴の差異と含まれる特徴的な有機化合物の関連性は、検出される有機化合物種が多いため、また検出されるピークに複数の有機化合物が含まれ共溶出している可能性があるため、不明である。

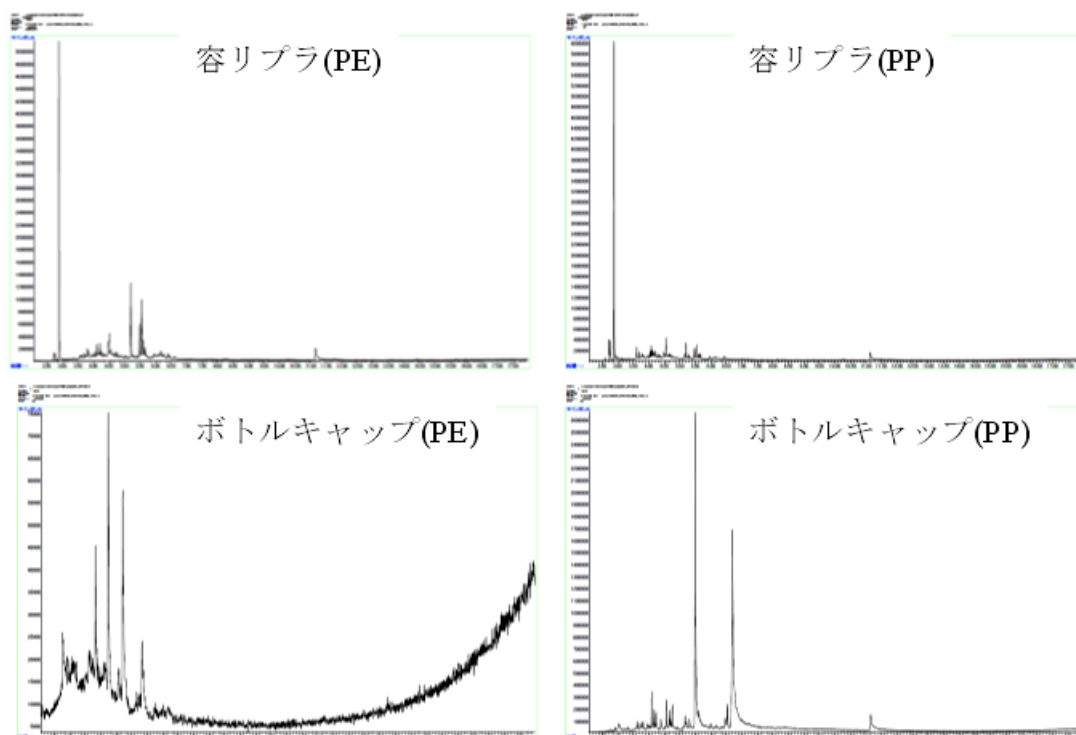


図 A-1 熱脱着 GC-MS のトータルイオンクロマトグラム (例示)

A.3.4 TD-GC/MS のクロマトグラムによる使用履歴の判別

A.3.3 でクロマトグラムにある程度特徴が表れる可能性があることを述べた。そのため、反対のアプローチとしてクロマトグラムから、使用履歴の判別ができないかを検討した。使用履歴と含まれる特徴的な有機化合物の関連性が不明なことから、特定の有機化合物の定量値を求めることをせず、クロマトグラムパターンだけでの判別を行う必要があると判断した。そこで、単純に csv ファイルとしてエクスポートしたクロマトグラムデータを用いた。エクスポートされたデータポイント数は非常に多いため、ピークが溶出していない区間（具体的には 12 分以降）を削除し、またデータポイントを規格化し、データポイント数を減じた。この規格化後のデータを用いて、多変量解析で使用履歴の判別ができるかを検討した。結果として、容リプラはクラスター分析で、他の使用履歴の再生プラスチックとは明らかに分類されていた (図 A-2)。この結果より、ある程度簡便な試料履歴の判別がクロマトグラムデータより可能になることが示唆された。また主成分分析では、容リプラでは 5~7 分ごろに検出するピークが、ボトルキャップや工場端材では 2~4 分ごろに検出するピークがこれら特徴を表す成分として示唆された。さらなるクロマトグラムデータの蓄積により、判別精度の高度化が見込めると考えたことから、定常的管理への適用も検討したところ、容リプラの判別精度はある程度高いことが示された。なお、多変量解析の詳細は論文 (山崎ら, 2025b) を参照されたい。

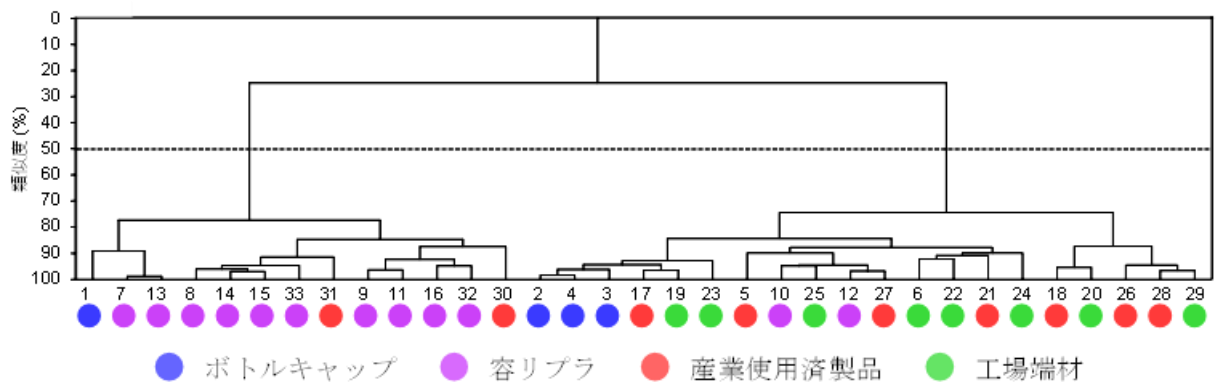


図 A-2 トータルイオンクロマトグラムを用いたクラスター分析結果（例示）

A.4 今後

今回開発した手法を用いることで、含まれる有機化合物を比較的に簡便に評価できるだけでなく、多変量解析を組み合わせることで、クロマトグラムパターンから使用履歴の簡便な判別も可能なことを明らかにした。リサイクルされるプラスチックの種類は PP や PE だけでなく、ABS、ポリカーボネートやプラスチックが積層された複雑な組成のものもあり、本手法の開発は PP と PE に特化した一つの事例紹介にすぎない。そのため、他の樹脂種、評価目的や状況に応じてのカスタマイズや新たな手法の開発が必須になると考えている。非常に限られた事例紹介ではあるが、これら検討事項の内容が、手法のカスタマイズや新規手法の開発の一助になれば幸いである。

参考文献

European Union, 2011. DIRECTIVE 2011/65/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 8 June 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (RoHS 指令 (RoHS2 原文)) .

International Electrotechnical Commission, 2017. IEC 62321-8, Determination of certain substances in electrotechnical products - Part 8: Phthalates in polymers by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), gas chromatography-mass spectrometry using a pyrolyzer/thermal desorption accessory (Py-TD-GC-MS).

International Electrotechnical Commission, 2015. IEC 62321-6, Determination of certain substances in electrotechnical products - Part 6: Polybrominated biphenyls and polybrominated diphenyl ethers in polymers by gas chromatography -mass spectrometry (GC-MS).

International Electrotechnical Commission, 2013. IEC 62321-3-1, Determination of certain substances in electrotechnical products - Part 3-1: Screening - Lead, mercury, cadmium, total chromium and total bromine by X-ray fluorescence spectrometry.

山崎絵理子, 羽成修康, 中村圭介, 小栗朋子, 小島直也, 篠原直秀, 小倉勇, 小野恭子, 梶原秀夫,

- 蒲生昌志, 2025. ガスクロマトグラムデータを用いた多変量解析による再生プラスチックペレットの由来の分類・判別手法の検討. 分析化学 74, 1-5.
- 日本分析化学会ガスクロマトグラフィー研究懇談会 編, 2024. ガスクロ自由自在 Q&A 準備・試料導入編 第2版. 日本分析化学会ガスクロマトグラフィー研究懇談会編.
- 羽成修康, 中村圭介, 山崎絵理子, 小栗朋子, 梶原秀夫, 蒲生昌志, 2023. 熱分解-GC-MS を用いた再生プラスチック中含有化学物質のスクリーニング分析. 日本分析化学会年会講演要旨集(Web) 72nd.
- 羽成修康, 中村圭介, 山崎絵理子, 小栗朋子, 小島直也, 篠原直秀, 小倉勇, 梶原秀夫, 蒲生昌志, 2024a. 熱脱着 GC-MS による再生プラスチック中含有化学物質のスクリーニング分析. 分析化学 73, 649-655. <https://doi.org/10.2116/bunsekikagaku.73.649>
- 羽成修康, 中村圭介, 山崎絵理子, 小栗朋子, 梶原秀夫, 小島直也, 篠原直秀, 小倉勇, 蒲生昌志, 2024b. 熱脱着-GC-MS を用いたスクリーニング分析により得られた再生プラスチック中含有化学物質の組成評価, in: 第84回分析化学討論会 2024年5月19日. Presented at the 日本分析科化学会, 京都.

Appendix B 略語表

略語 (英語)	正式名称 (英語)	正式名称 (日本語)
AAS	Atomic absorption spectroscopy	原子吸光法
ATR	Attenuated total reflection	全反射測定
BBP	Benzyl butyl phthalate	フタル酸ベンジルブチル
CE	Circular Economy	循環経済
CI	Chemical ionization	化学イオン化 (法)
DBP	Dibutyl phthalate	フタル酸ジブチル
DEHP	Di(2-ethylhexyl)phthalate	フタル酸ビス(2-エチルヘキシル)
DIBP	Diisobutyl Phthalate	フタル酸ジイソブチル
EC	European Commission	
ECHA	European Chemicals Agency	
EDXRF	Energy-dispersive X-ray fluorescence	エネルギー分散型 X 線分析
EI	Electronic ionization	電子イオン化 (法)
EIC	Extracted ion chromatogram	抽出イオンクロマトグラム
EU	European Union	
FID	Flame ionization detector	水素炎イオン化検出器
FT-IR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy	フーリエ変換赤外分光分析法
GC-MS (あるいは GC/MS)	Gas chromatography mass spectrometry	ガスクロマトグラフ質量分析法
GC-MSMS	Gas chromatography-tandem mass spectrometry	ガスクロマトグラフ・タンデム (直列) 質量分析法
ICP-AES	Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy	誘導結合プラズマ発光分光分析法
ICP-MS	Inductively coupled plasma mass spectrometry	誘導結合プラズマ質量分析法
IEC	International Electrotechnical Commission	国際電気標準会議
LC-MS	Liquid chromatography mass spectrometry	液体クロマトグラフィー質量分析法
LC-MSMS	Gas chromatography-tandem mass spectrometry	液体クロマトグラフ・タンデム (直列) 質量分析法
LOAEL	Lowest Observed Adverse Effect Level	最小毒性量
NOAEL	No Observed Adverse Effect Level	無毒性量
OECD	the Organization for Economic Cooperation and Development	経済協力開発機構
PBB	Polybrominated biphenyl	ポリ臭素化ビフェニル
PBDE	Polybrominated diphenyl ether	ポリ臭素化ジフェニル エーテル
PE	Polyethylene	ポリエチレン
PET	Polyethylene terephthalate	ポリエチレンテレフタレート
PP	Polypropylene	ポリプロピレン
PS	Polystyrene	ポリスチレン
PUR	Polyurethane	
PVC	Polyvinyl chloride	塩化ビニル
Py-GC/MS	Pyrolysis gas chromatography mass spectrometer	パイロライザを備えた GC/MS 装置
REACH	Regulation on the registration, evaluation, authorisation and restriction of chemicals	
SIM	Selected ion monitoring	選択イオンモニタリングモード

TD-GC-MS	Thermal desorption gas chromatography mass spectrometry	熱脱着ガスクロマトグラフィー質量分析法
THF	Tetrahydrofuran	テトラヒドロフラン
TICC	Total ion current chromatogram	全イオン電流クロマトグラム
WDXRF	Wavelength-dispersive fluorescence X-ray	波長分散型 X 線分析
XRF	X- ray fluorescence	

再生プラスチック含有化学物質の分析および健康リスク評価のためのハンドブック

(第1版)

第1版 2025年7月24日

国立研究開発法人 産業技術総合研究所、安全科学研究部門

〒305-8569 茨城県つくば市小野川 16-1

国立研究開発法人 産業技術総合研究所、物質計測標準研究部門

〒305-8563 茨城県つくば市梅園 1-1-1

本書の複製・転載、および記載内容に関するご意見・ご要望は、(国研) 産業技術総合研究所、安全科学研究部門までお問い合わせください。

<お問い合わせ> E-mail : M-recycledplastic-PR-ml@aist.go.jp

謝辞

本ハンドブックの執筆にあたり、再生プラスチックの製造にかかわる技術情報やペレット試料をご提供いただいた事業者をはじめ多くの方のご助言、ご協力をいただきました。厚く御礼申し上げます。