

サーキュラーエコノミーと材料診断

～ビジネスとしてのプラスチックリサイクルの実現に向けて～

渡邊宏臣

産業技術総合研究所

サーキュラーテクノロジー実装研究センター

プラスチックマテリアルリサイクル研究チーム

(兼：機能化学研究部門 有機材料診断研究グループ)

2026年1月21日(水) 13:15~15:15

かながわプラごみ削減オンラインフォーラム (発表20分)

NATIONAL INSTITUTE OF
ADVANCED
INDUSTRIAL
SCIENCE &
TECHNOLOGY

- ・ リサイクルは「環境問題対応」の側面だけではなく、「**新しいものづくり**」であり、「**新しいルールでの競争（共創）**」として捉える必要があります。
- ・ 材料診断技術は、これを勝ち抜く上で必要不可欠かつ有力なツールです。

- ・ 欧州において、推進のための指針を規制も絡めながら戦略的に策定
- ・ 日本は、欧州規制への対応という形で後ろ向きに推進

欧州グリーンディール（2019年）：←行程表

人々の幸福と健康の向上を目的とする。気候中立は、人や地球、経済にとって良いこと

「欧州グリーンディールは、EUの新しい成長戦略です。
雇用を創出しながら、排出量の削減を促進します」

ウルズラ・フォン・デア・ライエン 欧州委員会委員長



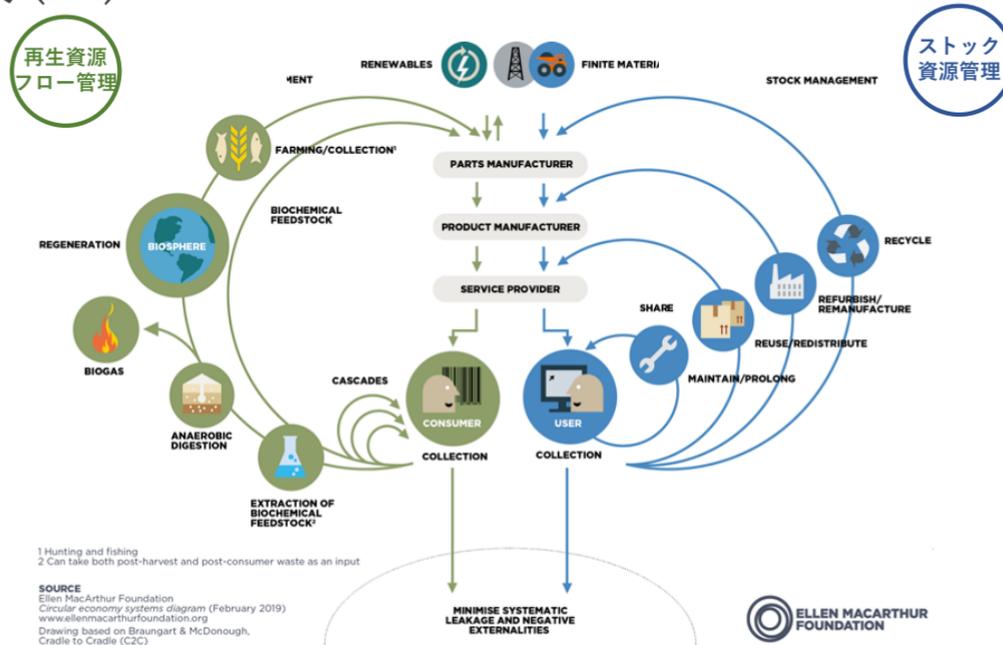
新循環経済行動計画（2020年3月） ←行動規範

生産者と消費者、市民や組織が一体となってクリーンかつ競争力の高い欧州の実現を目的



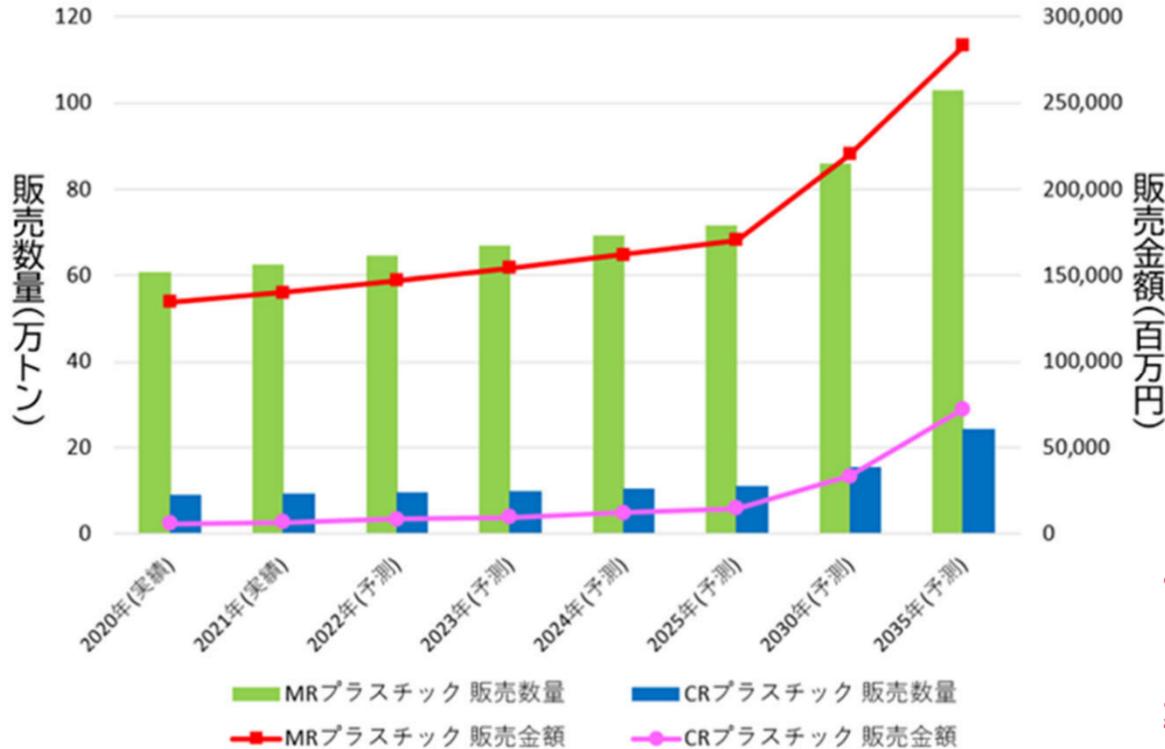
「欧州の産業的および戦略的自律性の強化」

- ・資源や製品などを可能な限り長く利用しつづけながら、廃棄物の量を最小化し、原則ゼロにすることを目標とする、新たな経済システム
- ・リマン・リペア・リユースと共に、リサイクルはサーキュラーエコノミーの推進に必須 (4R)



<https://emf.thirdlight.com/link/bxqwo5kx53lq-2syjxg/@/preview/1?o>

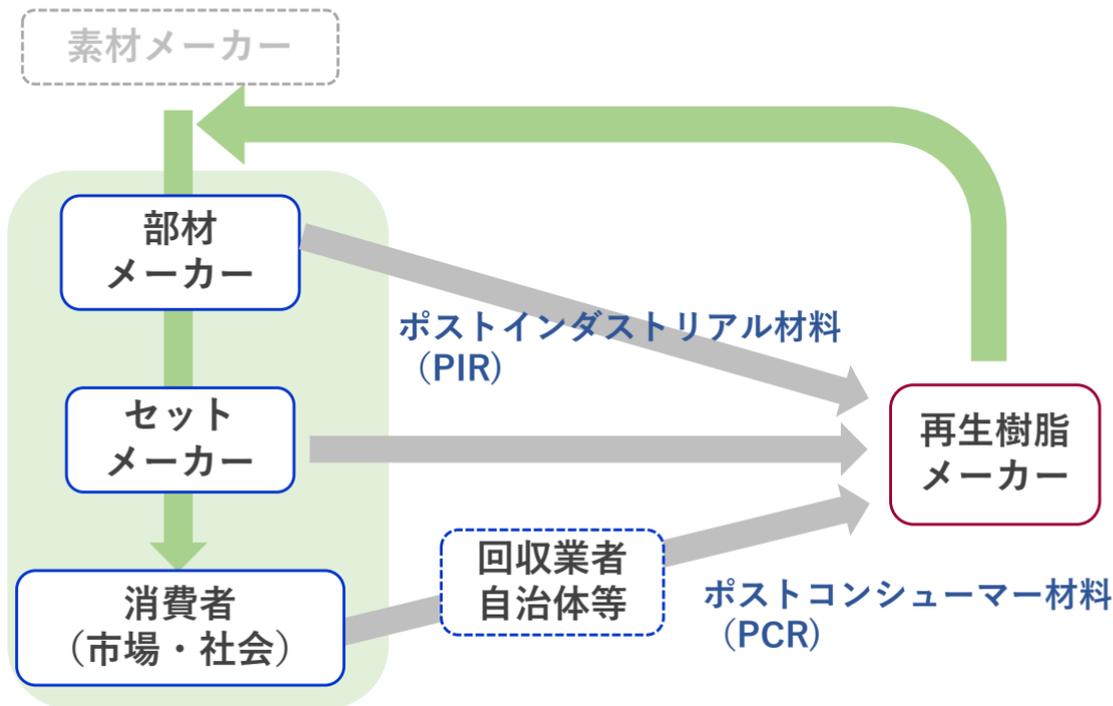
リサイクルの現状と予測



- ・ プラスチックの生産に必要な原料は、国内で963万トン。
→ なぜ、リサイクル材の利用率は低い水準に留まるのか？

出典：富士経済資料（2022年3月発行）をもとに、独自に作成

- 素材メーカーから消費者までのリニア型からの脱却
- 川中・川下が原料供給元となるサーキュラー型への転換



<これまで>

- 素材メーカーは部材メーカーが求める特性を有した原料を、同じ品質で無制限に供給可能

<これから>

- 部材メーカーは、再生樹脂メーカーが保有する原料を組み合わせることで、必要な数量を確保する。

【樹脂成型品の組成（PPバンパーの場合）】

ポリプロピレン（PP）は、車のバンパー用の素材として知られていますが、機能性の付与や向上のために、実は様々な素材を混ぜ合わせています。

- エラストマー配合による、**衝撃強度の改善**
- タルクやガラス繊維配合による、**弾性率の改善**と**耐熱性の付与**
- 酸化防止剤の添加による、**加工安定性/長期熱安定性の改善**
- 紫外線吸収剤（UVA）および光安定剤（HALS）による、**光劣化への耐性**
- これらを混ぜ合わせるための**分散剤**
- 色を付けるための**カラーマスターバッチ**



合計すると、なんと**10種類以上**の成分からなる



場合によっては、
40wt%以下

Q. リサイクル材を原料として考えた場合の課題点は？

(計100社程度のヒアリング結果から抽出)

A. 現在のソーティング技術では、バージン品と同じような**高品質の原料を、必要量だけ安定して供給・入手することが困難**



厳しい品質を求められない低品位の用途のみに適応可
(例えばポリプロピレンであればパレット、フラワーポットなど)



付加価値の低いリサイクルに留まるため、利用率も低い
(国内のプラ原料963万t、廃プラ量822万tに対して、250万t程度)

【必要量分の安定した供給・入手を阻害する要因】

素性が明らかなバージン品とは異なり、中身が解らない点
→材料の劣化、異物の混入（添加物、他の樹脂・フィラー）

【打開策: 私たちの取り組み】

材料診断（多角的な材料の分析・解析技術）により素性を明らかにすることで、状態遷移における「グレーディング」を適切に行う



高品質部材を確実に分類・配合



付加価値の高いリサイクルが実施され、
利用率が向上

医療診断

体の不具合
(ケガ・病気)



診察

人が抱える健康に関する問題を解決!!

検査
・
診断

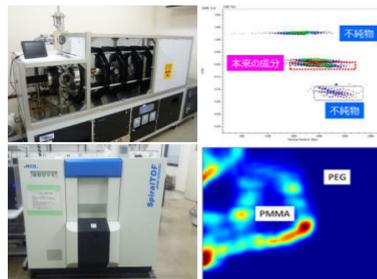
治療
(投薬、手術…)
→健康の回復

材料診断

製品不具合
(劣化、品質不良、
耐久性不足)



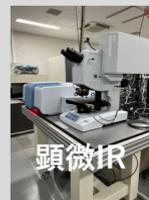
技術相談



分析・
解析

技術コンサル
→プロセス改善、
品質向上

産業界で抱える材料に関する課題を解決!!



<製造プロセス装置群（10種）>

- ・ 超微細解繊装置
- ・ 加圧型ニーダー
- ・ 混練用ロール機
- ・ ミキサー
- ・ 4軸混練押出機
- ・ 小型射出成形機
- ・ 万能型混練成形装置
- ・ 圧縮成形機 など

<分析・解析装置（120種以上）>

- ・ ラマン/ブリルアン 散乱測定装置
- ・ 核磁気共鳴装置
- ・ X線光電子分光装置
- ・ AFM-IR
- ・ 熱分解GCMS
- ・ 高温GPC
- ・ 和周波発生分光
- ・ ケミルミネッセンス
- ・ 超分解能SEM
- ・ ソフトマター用TEM
- ・ SAXS/WAXS
- ・ 疲労試験機
- ・ Flash-DSC など

化学構造解析・品質保証

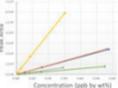


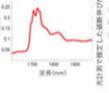
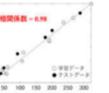

$$\left(\text{CH}_2\text{CH} \left(\text{C}_6\text{H}_5 \right) \right)_n$$

$$\left(\text{CH}_2\text{C} \left(\text{CH}_3 \right) \text{C} \left(\text{O}=\text{C}-\text{CH}_3 \right) \right)_n$$

- 各種分析装置を用いた、多角的な分子構造解析/組成解析技術

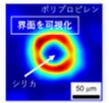
劣化評価

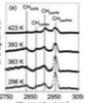



- LC-MSによる、添加剤の定量分析技術
- 分光分析と機械学習による、劣化度診断技術

複合材料評価 (接着・界面)

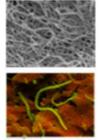





- 顕微IRと相関解析を用いた、分子構造の可視化技術
- 和周波分光を用いた、最界面の構造評価技術

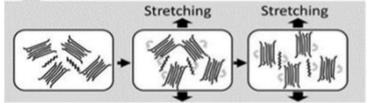
複合材料評価 (分散性)

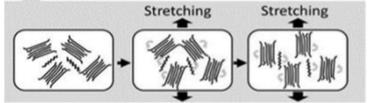


- X線CTによる、局所分散性評価技術
- 超高性能SEM-EDSによる、局所分散性評価技術

その場・簡易評価



- 伸長下における分光分析技術
- 可搬型装置を用いた、プロセス中の構造評価技術

リサイクル性評価




- 多角的分析による、構造と材料特性の紐づけ技術
- AI解析による、リサイクル材の使いこなし技術

それぞれの課題に対して、多角的な分析・評価を行うことで、適切な解決策を提示

材料診断を基軸とした「**グレーディング**」により、**品質が保証**される。これによりリサイクラーと樹脂ユーザーの「**マッチング**」が実現。

リサイクラー



売り手



樹脂ユーザー



買い手

- 材料診断により保有樹脂をグレーディング
- 目的の要求特性にマッチする配合やプロセス条件を把握・提示
- 要求特性に幅を持たせて仕様とし、これにマッチした樹脂を調達

－注意点－

これまでのような一方的な品位の要求ではなく、リサイクル樹脂の特性は一定ではないことを前提として両者のマッチングを図る必要がある。

【モール型エコシステムの構築】

リサイクラー



売り手

- 高く売りたい
- 大量に売買したい

取り組みで実装しているPF群

マッチングPF

特性評価PF
(リアル)

使いこなしPF
(サイバー)

コア・コンピタンス

- 材料診断による材料特性評価
- インフォマティクスを活用した物性評価・予測
- プロセス設計による使いこなしの提案
- 標準化を含めた仕組みづくり

樹脂ユーザー



買い手

関連企業

素材メーカー（樹脂、添加剤など）
機器メーカー（プロセス装置、分析機器）
DX・DPP関連企業、商社

- 各種添加剤をビジネスとしたい
- プロセス技術や分析技術を参入させたい
- 仕組みや商品取引をビジネスとしたい

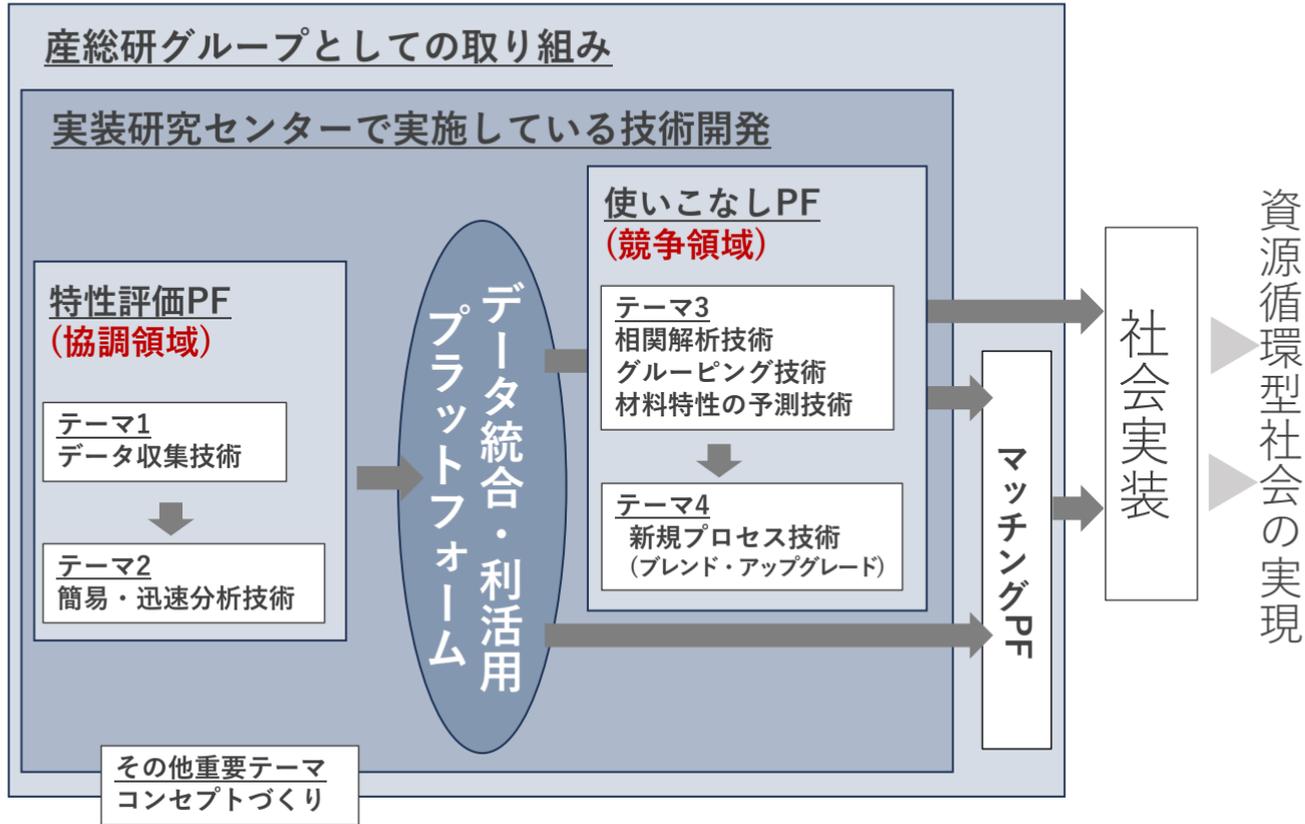


パブリック

国・自治体・協会・団体・大学/研究機関

- 法律、規則
- 仕組み
- 活動、行動様式
- 個別技術





【背景】 市場回収品には、多くの他種ポリマーが混入

【確立した技術】 IRやNIRで簡単に混入量が推定できる技術

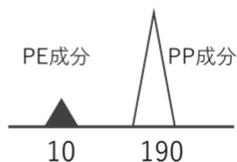
サンプル (二成分系)

PP : PE = 100 : 0、95 : 5、90 : 10、80 : 20、50 : 50、0 : 100
(PE割合(%)=0、5、10、20、50、100)

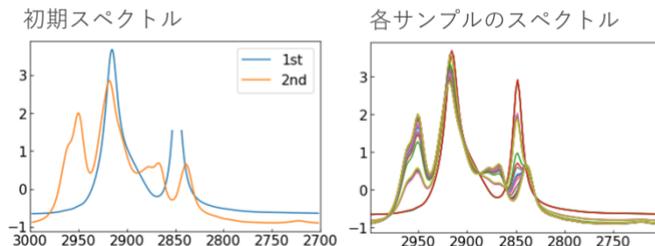
判定手法

- 以下の3つの手法で検証

< 検量線 >

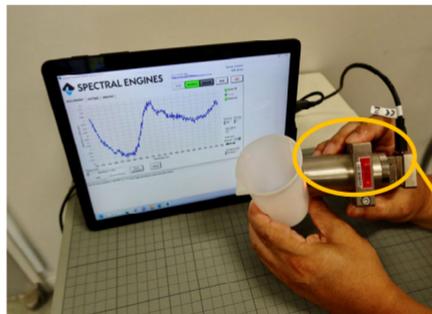


< 多変量スペクトル解析 >



< 教師あり機械学習 >

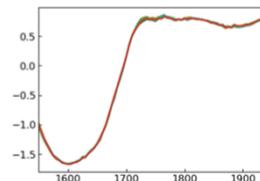
- 1サンプルに対して顕微IRで5回測定
- 1回分の4096本のスペクトルを学習データとして使用
- 予測値の検証には、各測定の平均スペクトルを使用



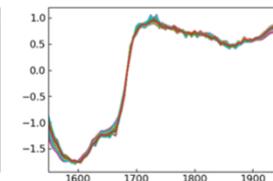
Spectral Engines社
NIRONE Sensor S

ペレット一つ、数分程度で迅速に分析可能

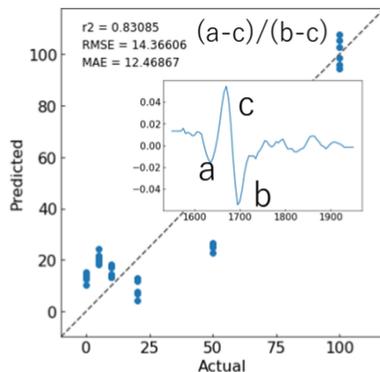
PP:PE=100:0



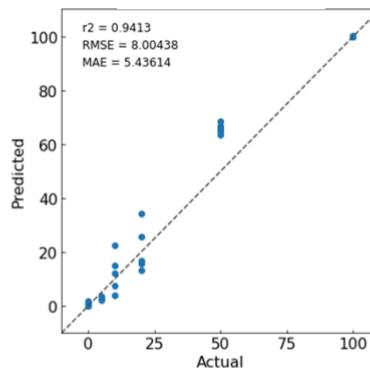
PP:PE=90:10



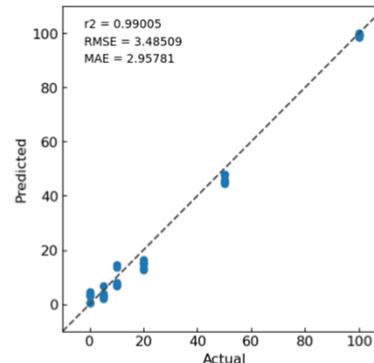
検量線



多変量スペクトル解析



回帰分析_手法A

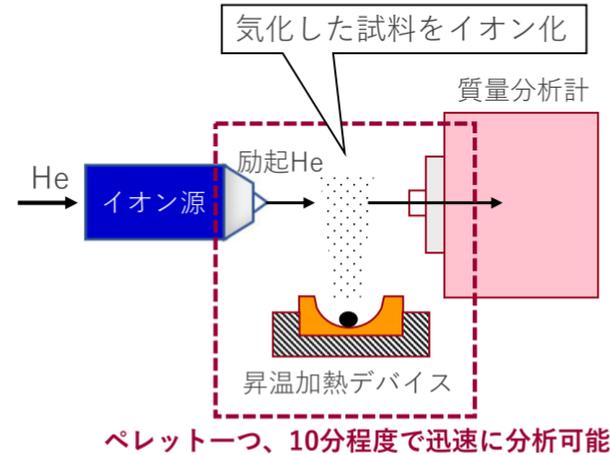


現在は、3成分系の多成分系、および少ない教師データでの学習を実施中

【背景】 リサイクル材には、用途別に多種多様な添加剤を含有
【確立した技術】 迅速かつ網羅的に添加剤種類を判別・分類分けする技術
【将来的なアウトカム】 リサイクル材の品位保証に必要な分析・解析を簡略化し、かつ使いこなし技術の提示

使用装置

DART-MS : AccuTOF LC-plus 4G (日本電子)
昇温加熱デバイス : ionRocket (バイオクロマト)

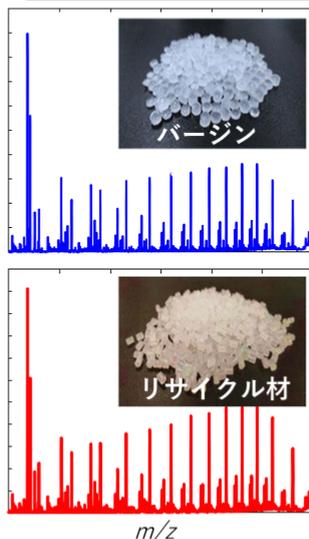


現在、更なる迅速化・他の手法との組み合わせ・低コスト化のため、メーカーと装置を共同開発中 (高分子分析討論会 2025にて発表)

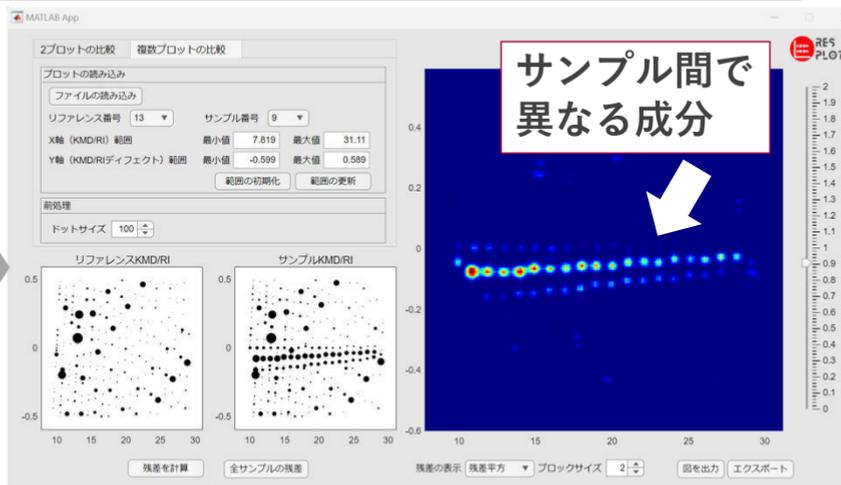
参考) LC-MSによる定量分析: 1週間
熱分解GC-MSによる簡易分析: 3時間

【背景】 誰でも容易に視覚的に材料診断ができる必要性

【確立した技術】 生データの入力だけで、結果が得られるアプリを開発



マススペクトルやクロマトグラムを見ても違いが判らない



開発したアプリ (ResPlot ToolBox) により
リサイクル材のみに含まれる成分を**簡便に可視化**

【産総研グループ/AIST Solutions】化学データ解析アプリ
公開によるサービス提供を開始 (2024/11/20)

【背景】用途に応じて添加物等の種類が大別できる

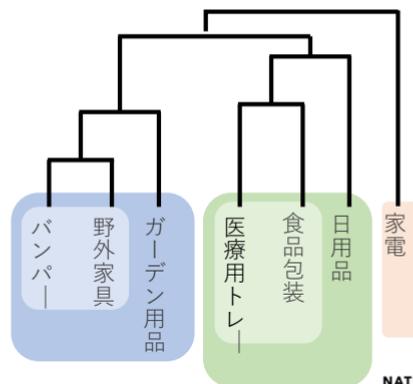
【確立した技術】市販品をグレーディングすることで、リサイクル材料の用途先を決定する

- 1) 用途が明確な「市販品」について、**材料診断により網羅的な材料データの収集**を行う
- 2) 得られたデータについて、物性・機能に関わる「指標」の重み付けに基づき、**インフォマティクス解析で分類分け**を行う。
- 3) 再生品の材料診断を行い、**市販品との類似度から用途先を決定**する

<決定木によるグルーピング>

▶実施する材料診断技術

- 1) 赤外・近赤外：ポリマー種とその比率
- 2) 蛍光X線：異物、規制対象物質、無機フィラーの混入有無
- 3) MFR測定：流動性、成形加工性、ポリマー分岐度など
- 4) DART-MS、ケミルミ：長期安定性 など



フィラー残存の可能性あり。高強度用に利用可能

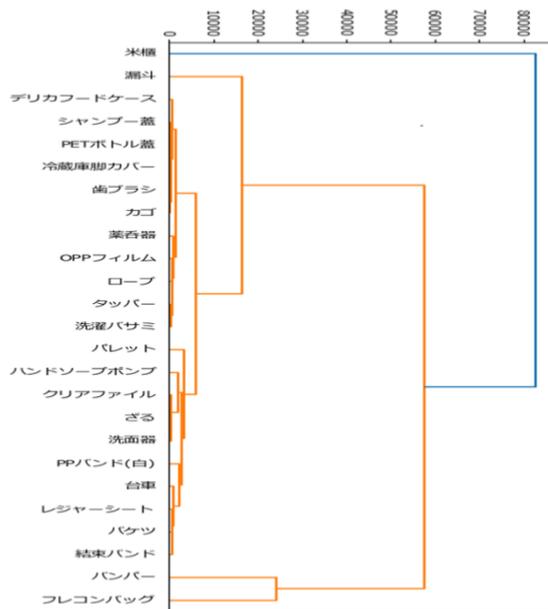
屋外使用のため、さまざまな添加剤が混入。

高純度・無添加のため、添加剤を加えることで様々な用途に利用可能

室内用途のため、樹脂の劣化無し

難燃剤が残存

市販PPの分類 (DART-MSを用いた添加剤分析結果のみ)



クラスター	市販PP製品	MFR (g/10min)	分類根拠	リサイクル製品候補
参考試料	ハチテック™ MA3	9.2	—	—
1	チューブ	3.1	Irgafos 168以外の添加剤未検出	MFRを基にした製品 任意の添加剤を追加可能
	掃除機柄	40.6		
	つなぎ	> 60.0		
	マスク	> 60.0		
	紙おむつ	> 60.0		
2	米櫃	31.3	高い滑剤含有率	滑剤を使用した製品
3	ハンバー	33.5	紫外線吸収剤、滑剤	屋外で使用する製品
	フレコンバッグ	7.3		
4	デリカフードケース	1.1	MFR ≤ 5 滑剤	押出成形 滑剤を含有する製品
	薬容器	2.5		
	レジヤント	2.6		
	ベッポト鉢蓋	3.3		
	PPバンド	3.4		
	クリアファイル	4.7		
	バレット	5.3		
	OPPフィルム	6.6		
	歯ブラシ	12.5		
	ロープ	15.1		
5	洗濯バサミ	15.3	MFR > 5 滑剤	射出成形 滑剤を含有する製品
	かご	16.0		
	ハンドソープポンプ	20.2		
	シャンプー蓋	20.3		
	台車	21.1		
	結束バンド	24.2		
	漏斗	26.1		
	タッパー	29.7		
	ざる	34.5		
	バケツ	38.8		
洗面器	40.8			
冷蔵庫脚カバー	52.4			

再生材についても同様にカテゴライズされる。

→ それぞれに応じた用途の提案が可能。

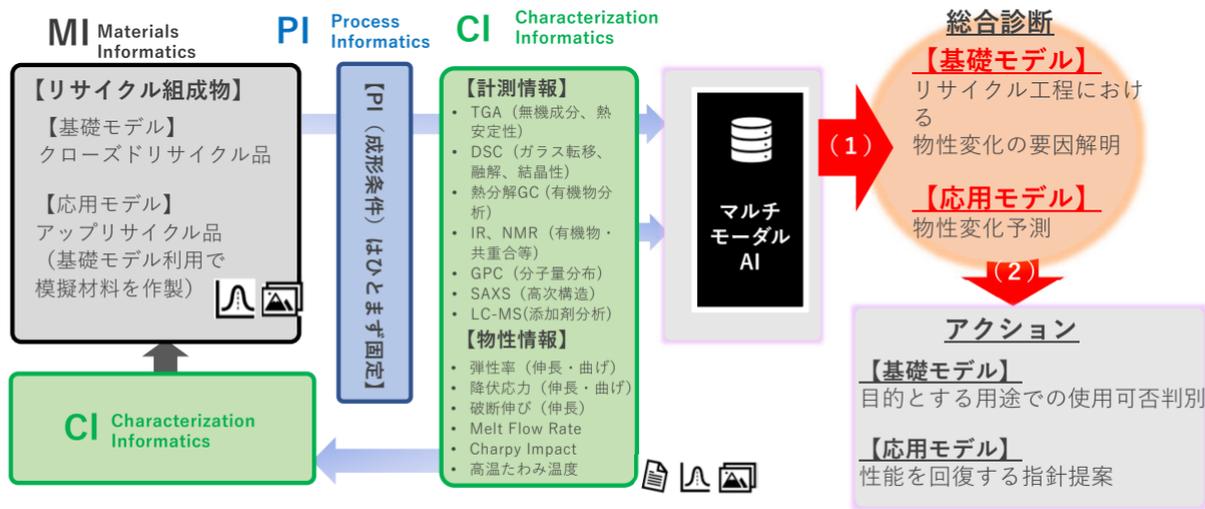
→ 他分析と併せることで、細かいグレーディングの実現

【背景】 実試験で力学特性を求める従来の手法は、サンプル成形に時間を要するため、品質の安定しないリサイクル材は都度行う必要があり実施が困難

【確立した技術】 成形無しに材料データから主要な物性値を予測する技術

【アウトカム】 目的とする用途での使用可否判別や、設計指針の提示

リサイクル材評価におけるマルチモーダルAI (MM-AI) の概念図

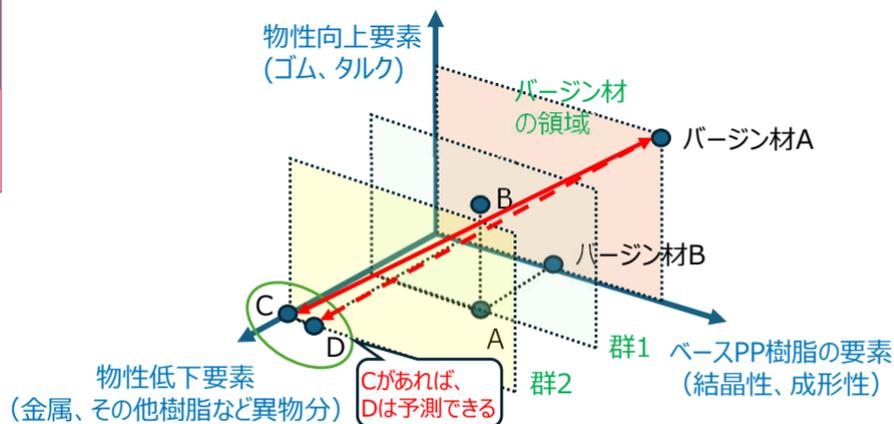
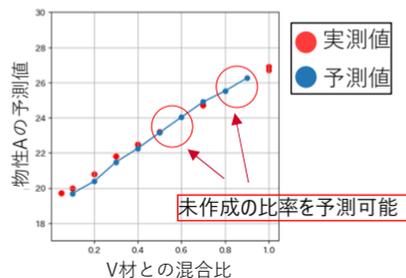
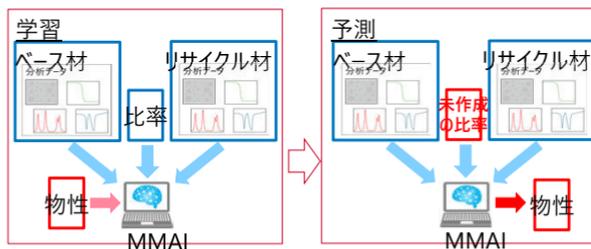


【未成形材の物性予測技術】

- 実際に成形した材料の化学特性・物性値を学習
- 混合ペレットの化学特性データから、成形時の物性値を予測



- 混合ペレットの実際の比率が算出でき、成形材の正確な物性予測が可能
⇒ **バラつきの検証、エラーの検出が可**
- 未成形材の群や、バージン材との混合比率の予測が可能



**It is not the strongest of the species that survives,
nor the most intelligent that survives. It is the one
that is most adaptable to change.**

By Charles Robert Darwin