

廃車由来プラスチックの水平リサイクル技術

田中靖昭^{*1}, 内田 均^{*1}, 寺田洋平^{*2}, 古川欣史^{*3}, 水野克俊^{*3}

Horizontal Recycling Technology for Plastics from End-of-Life Vehicles for Use in Automotive Applications

Yasuaki Tanaka^{*1}, Hitoshi Uchida^{*1}, Yohei Terada^{*2}Kinji Furukawa^{*3}, Katsutoshi Mizuno^{*3}

要旨

豊田合成は脱炭素を目指し、廃車由来のプラスチックを自動車部品にリサイクルする技術を業界に先駆けて実用化した。自動車でも最も使用量の多いポリプロピレン（PP）について、静脈産業との連携によりサプライチェーンを構築し、内装・外装部品への水平リサイクルを実現した。外装部品では塗膜剥離技術とPP配合設計により、ELV回収バンパー材50%含有でもバージン材同等の強度を達成した。内装部品では、リサイクル材から発生するVOC（揮発性有機化合物）をアミン系捕捉剤の添加により低減し、周辺部品への影響もないことを確認した。この技術により、従来は埋め立てや燃料処理されていた廃車プラスチックの価値を創出し、自動車産業のカーボンニュートラルと循環経済に貢献する基盤を構築した。

Abstract

Toyoda Gosei has pioneered the practical implementation of technology to recycle plastic from end-of-life vehicles for re-use in automotive parts, with the aim of decarbonization. Polypropylene (PP) is the most widely used plastic in automobiles, and the company has built a PP supply chain through collaboration with the reverse logistics industry to achieve horizontal recycling into interior and exterior parts. For exterior parts, we have achieved strength equivalent to virgin materials even with 50% content of bumper materials recovered from ELVs. This has been done mainly through paint film removal technology and PP compound design. For interior parts, we have reduced the volatile organic compounds (VOCs) generated from recycled materials by adding amine-based scavengers, and confirmed that this has no impact on surrounding parts. This technology creates value from waste vehicle plastics that were previously landfilled or used as fuel, establishing a foundation that will contribute to carbon neutrality and a circular economy in the automotive industry.

1. はじめに

豊田合成は、中長期経営計画（2030事業計画）のもと脱炭素をキーワードに高分子の知見を活かしたプラスチックとゴムのリサイクルを推進している。

プラスチックは軽くて、複雑な形状にも加工しやすいため、自動車にも多く使われている（図－1）。一方、環境負荷低減の観点から、プラスチックの資源循環に関わる法規制の強化が各国

で加速している。自動車業界では欧州の廃車規則の改定が議論され、車のプラスチック部品に一定割合のリサイクル材の使用が義務化される予定である。

そのため脱炭素と並び欧州の法規対応という側面もあり業界全体としての重要性が非常に高まっている。

本報告では、業界に先駆けて実現した「廃車由来のプラスチックを自動車用内装部品に適用」の事例について報告する。

*1 第2材料技術部 樹脂材料技術室

*2 第2材料技術部 樹脂リサイクル企画プロジェクト

*3 IE生技開発部 IE材料技術室

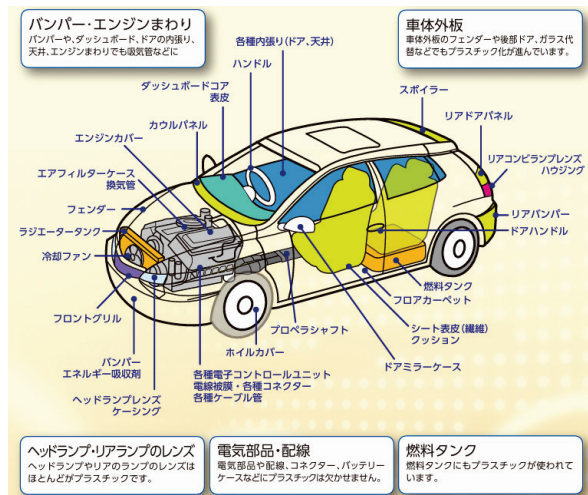


図-1 自動車に使われる主なプラスチック部品例¹⁾

2. 背景と目的

ポリプロピレン（PP）は自動車の中で最も多く使用されているプラスチック（図-2）であり、重量比率で44%を占めている。豊田合成においては、多種多様な製品でPPを使用しており、なかでも内装及び外装部品はPPの使用比率が非常に高く、CE実現に向けて早期のリサイクル技術の実用化が期待されている。

プラスチックのリサイクルは大きく分けるとサーマルリサイクル（熱回収）、ケミカルリサイクル、マテリアルリサイクルの3つの方法に分類（表-1）され、日本ではサーマルリサイクルが広く行われている。

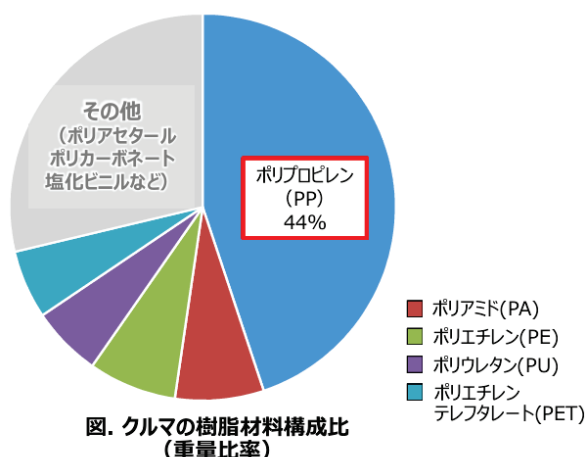


図-2 クルマの樹脂材料構成比率（重量%）²⁾

表-1 リサイクルの3つの分類³⁾

分類	特徴
サーマルリサイクル	<ul style="list-style-type: none"> ・廃プラスチックを熱エネルギーとして利用する。 ・汚れや、異樹脂の混合の影響が小さく簡便である。
ケミカルリサイクル	<ul style="list-style-type: none"> ・化学の力で分解して再利用する方法で、プラスチックを化学的に分解して元の材料（モノマー）に戻す。 ・元の材料に戻すので、新品と同じくらい高品質な製品が作れる。 ・特別な設備や技術が必要で、コストが高く、まだまだ使用されていない。
マテリアルリサイクル	<ul style="list-style-type: none"> ・廃プラスチックを、新たな製品原料としてリサイクルする。 ・リサイクル時に必要なエネルギーが少ない。 ・様々なグレードの材料が混ざり、性能が新材と比較して劣る。

サーマルリサイクルは、使用済製品を燃焼して、その熱で発電したり暖房に使ったりする。どんなプラスチックでも使え、汚れていても、種類が混ざっていても燃やせるので便利であるが、CO₂が出るので、地球温暖化の原因になることもある。

ケミカルリサイクルは、使用済製品を化学的に分解し、化学原料（モノマー・ガス等）として再利用する方法であり、新材と同等の品質の材料確保ができるが、価格及びリサイクルの過程で排出するCO₂排出量が多いのが課題である。

マテリアルリサイクルは、使用済製品から回収した材料を新たな製品の原材料として使用する方法でありリサイクル時のCO₂排出量が少ないが、使用時の劣化及び汚染の影響を受けること、均一な材料の回収が難しく不純物が混入することにより新材と同等の性能を得るのが難しい課題がある。

特に自動車から回収する廃プラスチックは、長期間使用による劣化、汚れ及び塗膜などの不純物混入等の問題があり、リサイクルの難易度が高くサーマルリサイクルまたは必要性能の低い用途に再利用（ダウンサイクル）することが一般的である。

今回、自動車向けで最も使用量比率の大きいPP材料について、難易度の高い外装3部品と内装3部品（図-3）で水平リサイクルを実用化した。

外装部品は、リサイクル材に含まれる塗膜による材料性能低減を補完する開発材料を適用した。

内装部品は、材料物性に加えてVOCに対して改良をした開発材料を適用したので、それぞれの技術について報告する。

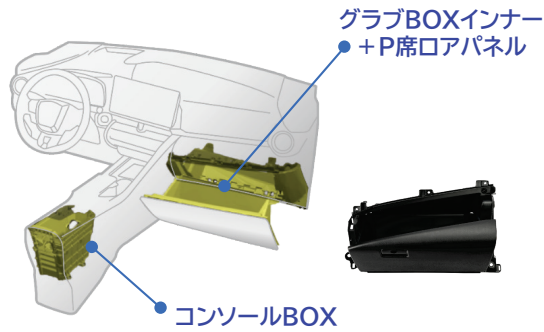


図-3 今回適用した内装樹脂部品
(外装部品は後述)

3. 動静脈連携による サプライチェーン構築

前述のとおり、廃自動車から発生するプラスチックはマテリアルリサイクルされることはほとんどなく、ASR (Automobile Shredder Residue) という形で回収され、埋め立てもしくは燃料という形で最終処理されることが大半であり、リサイクル推進に向け、サプライチェーン構築が必要である。

今回、廃プラスチックを入手するために、全国

の解体業者から廃車由来のプラスチック回収及び再生に取り組まれている静脈産業のいその株式会社と協業することでサプライチェーン構築を進めた (図-4)。

3-1. 解体業者との連携

図-4において、解体業者と連携して廃自動車由来のプラスチックを調達し、いその株式会社で物性調整及び異物除去をすることで自動車部品に適用可能なリサイクル原料となる。

この中で重要なのは解体業者において、いかに異物のない状態でPPを回収できるかが重要で、解体業者の協力が欠かせない。

実際の廃車から廃プラスチックを回収する過程は図-5に示すように、

- ①廃自動車からPPを使用した樹脂部品を取り外す
 - ②回収した自動車部品からPP材料以外 (シール、クリップ等の異材質) を取り除く
 - ③粉碎・洗浄してフレーク状に加工し梱包
- 以上の作業を解体業者に実施いただくことで、異材の少ない自動車に活用可能な廃プラスチック素材となる。

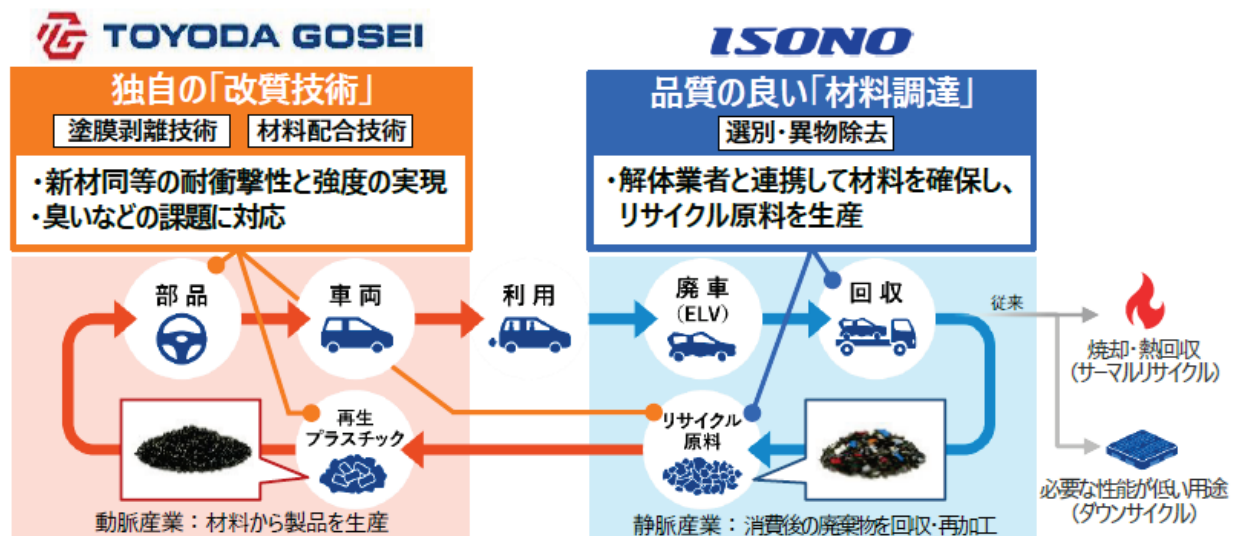


図-4 いその株式会社と協業して構築したサプライチェーン

<解体業者での樹脂回収の様子>



図-5 解体業者でのPP素材の回収

このような形で、静脈産業の解体業者及びその株式会社と動脈産業の豊田合成が連携したサプライチェーンを構築できた。

3-2. 今後について

廃自動車由来のリサイクル PP を使用した内装部品、外装部品を実用化することができた。そこには動静脈連携による、需要側と供給側の mismatches の解消が重要であることがわかった。

そこで、これまで活用されていなかった廃車由来プラスチックの価値を全国の解体業者に認知いただき、廃車由来プラスチックの市場構築に引き続き貢献していきたい。更に、動静脈連携の知見を活かして、他の車種や自動車部品へのリサイクルプラスチックの適用を広げていく。

また、他産業の廃プラスチックでの自動車部品への適用も進め自動車産業の CN, CE に貢献する。

4. ELV 回収バンパー材を含有するリサイクル材料開発

4-1. ELV 回収バンパー材の活用

ELV (End of Life Vehicle: 使用済自動車のこと) から回収したバンパーは塗装が施されているため、そのままリサイクルすると塗膜が異物として作用し、主に耐衝撃性がバージン材と比較して劣る。さらに、様々な自動車メーカーのバンパーが混在するため、ロット間で耐衝撃性や弾性率などの物性ばらつきが生じる。

このような課題に対し、塗膜剥離による異物除去技術と独自の PP 配合設計技術を組み合わせることで、ELV 回収バンパー材を 50% 含む高強度リサイクル材を開発した。

本開発材料はバージン材と同程度の品質を確保していることから、インナーグリルやロアグリルシールといった、高剛性の性能が必要な外装部品へ採用された。

ここでは塗膜剥離技術と PP 配合設計技術による高強度化について述べる。

4-2. 塗膜剥離技術

塗膜剥離の手法として、有機溶剤を用いる化学的手法と、研磨やブラスト等による物理的手法に大別される (表-2)。しかしながら、従来の化学的手法では使用済み溶剤の処理が必要となるうえ、熱処理によるポリマーの熱分解が懸念される。また、物理的手法のブラスト処理においても、処理時間が長く量産性に不向きである。

これらの理由を踏まえ、今回は物理的手法の表面研磨を選択した。

表-2 塗膜剥離の既存手法

分類	塗膜剥離	物性保持	環境影響	処理時間
化学的	溶剤剥離	○	× (廃液処理要)	×
	塗膜分解	△	○	○
物理的	表面研磨	△	○	○
	ブラスト	△	○	×

凡例… ○: 採用可, △: 要検討, ×: 採用不可

採用した手法の剥離原理は、加圧・攪拌により材料同士で生じる摩擦力と摩擦熱を利用して塗膜を除去するものである。

本手法での塗膜剥離による衝撃性の改善効果を図-6 に示す。剥離処理されたものは、衝撃性がバージン材相当まで向上することが確認された。

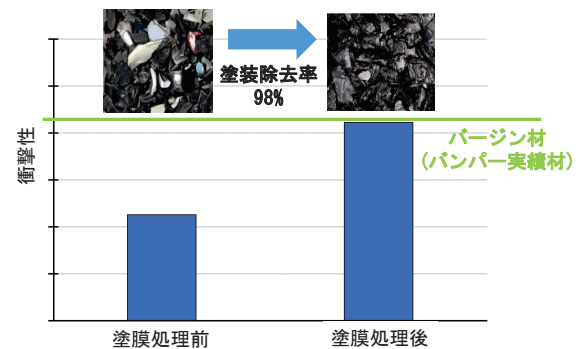


図-6 塗膜剥離による効果

4-3. PP 配合設計による高強度化

塗膜剥離材のさらなる高強度化を目指し、バージン原料配合による物性改質を行った。

物性改質のための配合設計として、①塗膜剥離で改善した衝撃性を維持しつつ弾性率を向上させることと、②回収バンパー材の物性ばらつきを吸収しつつ目標物性域に収めることに十分留意した。

豊田合成独自の配合ノウハウに基づき、複数のバージン PP 原料にタルクとゴムの補強材を組み合わせ、それぞれの配合材比を調整した (図-7)。

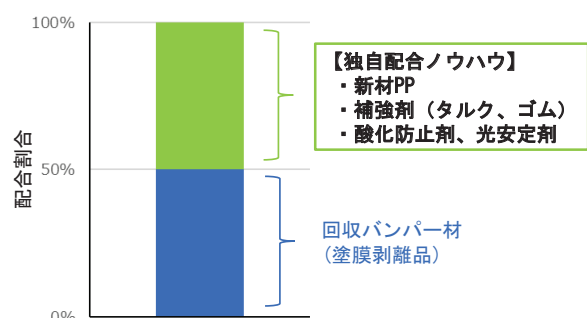
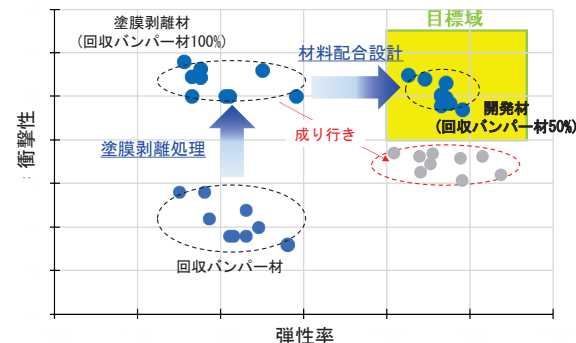


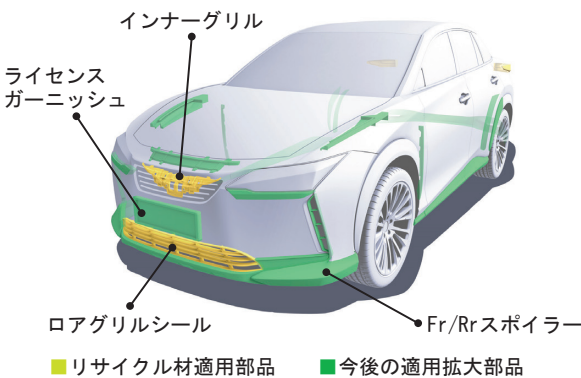
図-7 開発材の配合イメージ

その結果、回収バンパー材 50% の高含有率でありながら、バージン材と同程度の強度（衝撃性等を合わせた強さ）を達成することができた（図－8）。



図－8 材料改質の考え方

今後はフロントスポイラーやライセンスガーニッシュなどの意匠部品への適用を目指し（図－9）、さらなる外観品質の向上を行っていくとともに、ASR など新たなリサイクル原料の拡大に向けて挑戦を継続する。



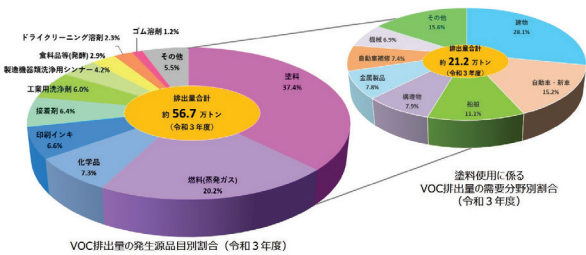
図－9 今回の適用製品（黄）と
今後に拡大したい部品（緑）

5. VOC（揮発性有機化合物）低減技術

5－1. VOC 対策の必要性

VOC とは、揮発性を有し、大気中で気体状となる有機化合物の総称であり、トルエン、キシレン、酢酸エチルなど多種多様な物質が含まれる。VOC は健康に様々な影響を与える可能性があり、シックハウス症候群の原因となることが報告されている。具体的な症状として、目の痛み、頭痛、注意力の低下、意欲の低下、寝付きが悪い、朝すっきり起きられない、イライラ、怒り、感情の爆発などが挙げられる。

VOC は、塗装、建設工事、印刷、脱脂洗浄や自動車への給油など、様々なところから排出される（図－10）。



図－10 VOC 発生源⁴⁾

自動車において、車室内 VOC 規制の目的は住宅のシックハウス症候群防止と同じであり、日本自動車工業会として自主規制するもの。規制物質は、厚生労働省が定めた 13 物質で濃度指針値も同じ。規制物質は以下の 13 種類である。（ホルムアルデヒド、アセトアルデヒド、トルエン、キシレン、エチルベンゼン、スチレン、パラジクロロベンゼン、テトラデカン、フタル酸ジ-*n* ブチル、フタル酸ジ-2 エチルヘキシル、クロルピリホス、ダイアジノン、フェノブカリブ）。

自主規制であるが、規制対応を一般公開しており、市販車で車室内 VOC が検出された場合は処置が必要となる重要品質製品である。

今回採用の ELV 回収材においても VOC 発生が検出されるため、その対策を材料面から実施した。

5－2. VOC 対策配合

VOC 対策をしていない開発材料の VOC 評価を実施した（表－3）。評価方法については、顧客規格に準拠した試料サイズ、加熱条件にて処理し、発生物質を HPLC（高速液体クロマトグラフィー）と GC-MS（ガスクロマトグラフ質量分析）によって定量した。

表－3 VOC 対策前の開発材の VOC 測定結果

VOC 成分	ELV50%配合材
トルエン	規格未満
キシレン	
スチレン	
エチルベンゼン	
DBP	
テトラデカン	
DOP	
ベンゼン	規格超
ホルムアルデヒド	
アセトアルデヒド	

開発材では、ホルムアルデヒド、アセトアルデヒドが高い値で検出された。原材料とする ELV 材において、アルデヒド値が高くなる要因として以下が挙げられる。

- 1) リサイクル工程中で発生する廃水や廃材からの VOC 発生
- 2) 金属（鉄／銅）との接触による PP（ポリプロピレン）の劣化
- 3) POM, ABS, ウレタンなどの VOC 発生要因となり得る材料の混入
- 4) 喫煙、芳香剤、体臭などの付着や浸透

以上のホルムアルデヒド、アセトアルデヒドの発生を抑制することが必要であり、その対策案を検討した。

5-3. VOC 対策剤の検討

市場には、アルデヒド排出を抑制する改質剤が種々販売されている。アルデヒド捕捉剤としては、物質として無機／有機／無機＋有機のもの、捕捉機構が化学吸着／物理吸着のもの、性状が粉末／マスターバッチ／液体のものなど、その効果についてもさまざま存在している。

その中で今回は、リサイクル PP へ添加すること、機械物性への影響が小さいこと、コストなどを考慮して有機官能基修飾無機粒子を選定した。捕捉機構はアミン系化学吸着機構となる。吸着されるアルデヒド類と化学結合を形成するため、活性炭やシリカゲルのような物理吸着機構の捕捉剤に比べて、吸着された物質を再放出しない点が特徴である。反応機構について図-11 に示す。

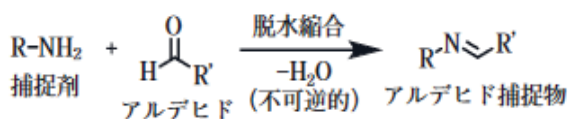


図-11 アルデヒド捕捉反応機構

アミン類の注意点として、反応性が高く、隣接する他部品（樹脂、塗装など）と反応して分解や変色を引き起こす可能性がある。これらについては、後で検証する。

アルデヒド捕捉剤を開発材へ添加した場合のホルムアルデヒド捕捉効果を図-12 に示す。ある添加量以上でホルムアルデヒドの検出が抑制されることを確認し、その添加量を設定した。アセトアルデヒドについても同様な結果が得られている。

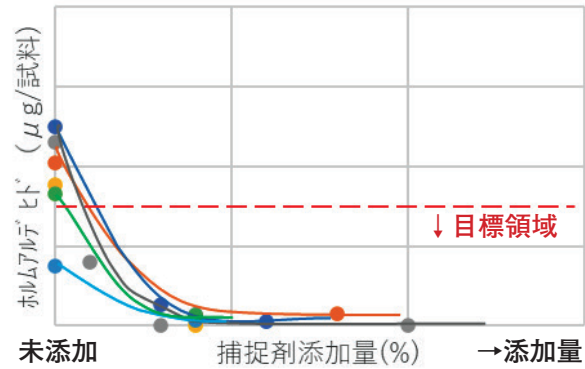


図-12 アルデヒド捕捉剤の効果

また、アルデヒド捕捉剤を添加したことによる機械物性への影響についても評価した。

PP 樹脂へ無機フィラーや充填剤を添加する場合、その分散性や衝撃性低下などが心配される。今回選定したアルデヒド捕捉剤も無機粒子骨格であるため、機械物性を評価した。その結果、機械物性についてアルデヒド捕捉剤を設定量添加した場合においても、無添加の場合と同等であることを確認された。

5-4. アルデヒド捕捉剤の周辺部品への影響

今回、アミン系アルデヒド捕捉剤を配合した材料を内装部品へ適用するにあたり、隣接する他部品への影響が心配される。

アミン類は反応性が高く、縮合重合系の物質と反応し分解・劣化、あるいは、変色や腐食を引き起こす可能性がある。特に3級アミンの場合、窒素原子 N が露出し反応性が高いことが知られている。今回選定のアミン系捕捉剤は、3級アミンではないが、アミンの反応性についての心配点を確認しておく必要があると考えた。自動車内装部品の場合、PC/ABS 製の部品や PVC 表皮などと PP 部品が隣接する設計の車両が考えられる。それら材料と今回の開発材の接触による影響を評価した。

PC/ABS への影響を評価する方法として、次の実験を実施した。PC/ABS のテストピース (TP) を開発材の TP で上下からサンドイッチ状に挟み密着させた状態 (図-13) で、製品耐久試験条件を想定した湿冷熱サイクルを実施し、その後の物性変化を測定した。

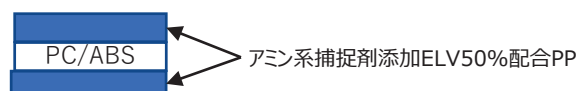


図-13 アルデヒド捕捉剤の PC/ABS への影響試験の形態

図-14に示すとおり、PPとの接触と湿冷熱サイクルにより、PC/ABSの衝撃値や引張伸びは変化せず、劣化が促進しないことを確認した。

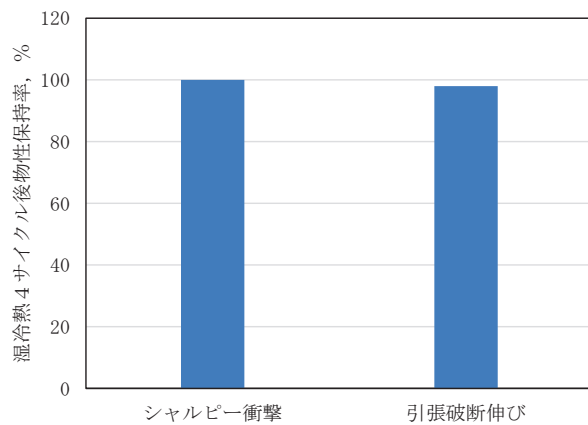


図-14 アルデヒド捕捉剤添加 ELV 配合 PP を接触させた PC/ABS の物性変化

次に PVC 表皮への影響を次の方法で評価した。PC/ABS の場合と同様に、PVC 表皮 TP をアミン系捕捉剤添加の開発材で上下からサンドイッチ状に挟み密着させた状態で、100℃×24 時間放置後の表皮変色を色差変化 (ΔE^*) 及び外観目視にて評価した。表皮 TP との接触面については、PVC 面と基布面の両側で評価した。表皮の色調については、ブラウン系とグレー系の2種類で実施した。試験状態を図-15に示す。

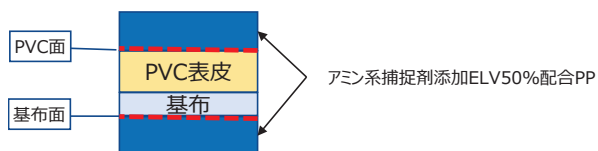


図-15 アルデヒド捕捉剤の PVC への影響試験

表-4に示すとおり、それぞれの色調の表皮において変色は発生せず、本捕捉剤によるアミン変色のリスクは低いと判断した。

表-4 アルデヒド捕捉剤添加 ELV 配合 PP を接触させた PVC 表皮の色差・外観評価結果

表皮の接触面	目標値	ブラウン				グレー			
	ΔE^*	ΔE^*	外観	判定	ΔE^*	外観	判定	ΔE^*	判定
PVC 面	≤ 3.0	0.21	異常なし	○	0.18	異常なし	○		
基布面		0.14	異常なし	○	0.14	異常なし	○		

5-5. VOC 低減技術のまとめ

上述したように、ELV 材から検出される VOC、特にアルデヒド類については、選定したアミン系捕捉剤の添加により、規格満足まで抑制することが可能となった。

6. まとめ、おわりに

廃自動車由来のリサイクル PP を使用した外装内装部品を実用化することができた。

今回の知見を活かして、他の車種や自動車部品へのリサイクルプラスチックの適用を広げていく。また、他産業の廃プラスチックでの自動車部品への適用も進める。

謝辞

今回のリサイクル技術の実用化にあたり、いその株式会社の皆様には、廃車由来プラスチックの回収・再生に関して多大なご協力をいただきました。解体業者との連携や、異物除去・物性調整など、実用化に向けた素材づくりにおいて、いその社の知見とご尽力が大きな力となりました。心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 日本プラスチック工業連盟 (編)。「暮らしの中のいろいろなプラスチック」
- 2) 自動車工業会。「再生材プラスチックの活用促進に向けた 自工会の取組みについて」
- 3) プラスチック循環利用協会。「プラスチックリサイクルの基礎知識」
- 4) 環境省「令和4年度揮発性有機化合物 排出インベントリ作成等に関する調査業務報告書 (R5)」

著 者



田中靖昭



内田 均



寺田洋平



古川欣史



水野克俊