

令和 6 年度環境省委託業務

令和 6 年度脱炭素型循環経済システム構築促進事業
(うち、プラスチック等資源循環システム構築実証事業)
(長寿命用途のバイオプラスチック素材開発と資源循環の
ライフサイクル実証事業) 委託業務

成果報告書

令和 7 年 3 月

公益財団法人京都高度技術研究所

実証事業成果の要旨

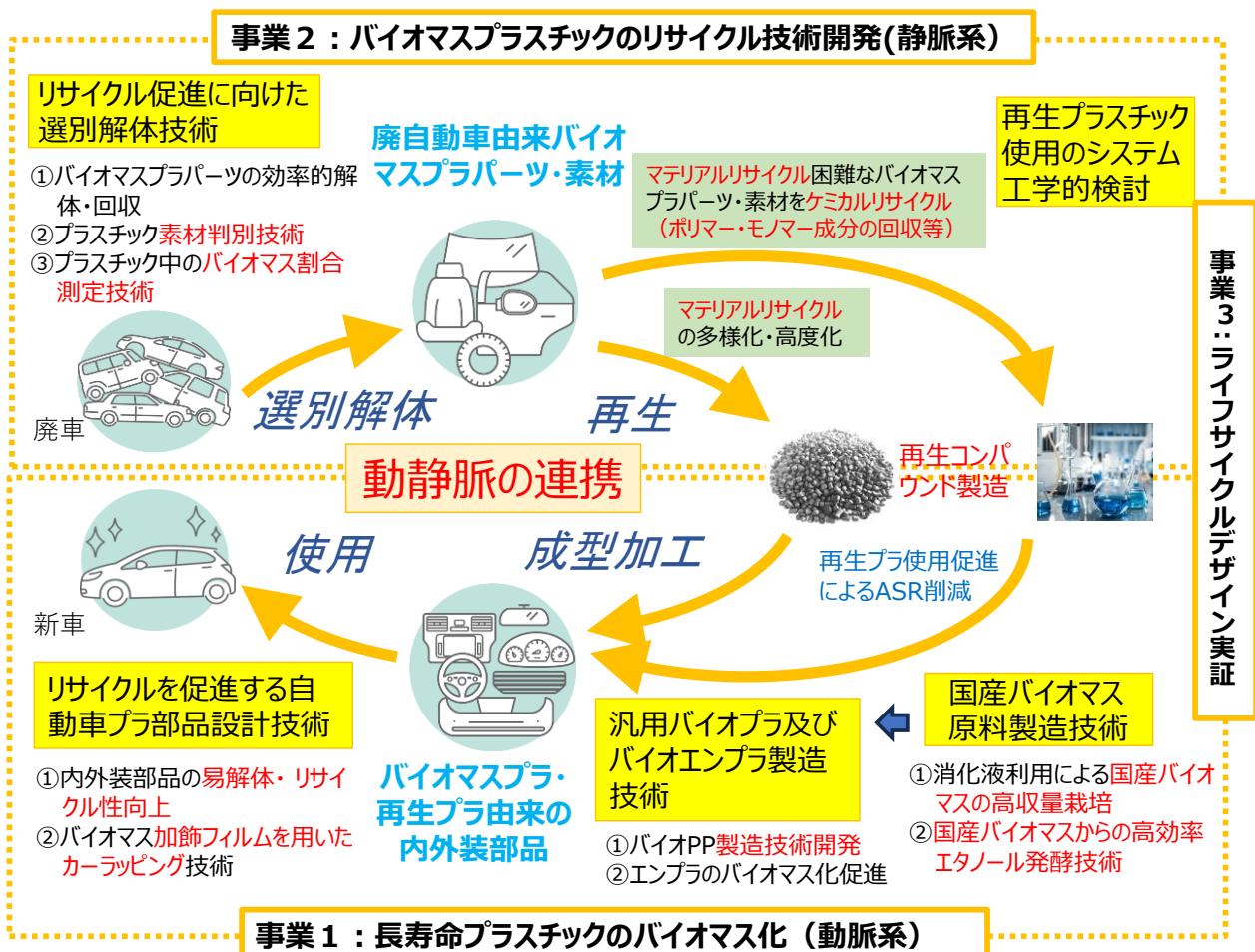
令和6年度脱炭素型循環経済システム構築促進事業（うち、プラスチック等資源循環システム構築実証事業）
長寿命用途のバイオプラスチック素材開発と資源循環のライフサイクル実証事業

申請法人 (公財) 京都高度技術研究所
共同実施者 三菱ケミカル（株）
豊田合成（株）
いその（株）
三菱UFJリサーチ&コンサルティング（株）

（1）本実証事業の概要

本事業は、使用年限が長期にわたる自動車用途等での利用が拡大するプラスチックのバイオマス化・資源循環に係る技術開発を進めるとともに、これによって実現し得るライフサイクルでの温室効果ガス削減効果等の評価を通じて、用途に適合した十分な寿命のプラスチックの動静脈が連携する新たな資源循環モデルを構築・検証し、脱炭素化・資源循環の加速化を目指すものである。

そのため、バイオマス由来プラスチックの自動車内外装部品用素材としての適性を検証し、効率的な素材判別、解体・回収方法の検討を実施するとともに、リサイクル技術開発、検出装置開発、バイオマス原料の国産化や耐久性評価指標の開発、LCAによる本事業のCO₂削減効果試算を行う。



本事業の概要

(2) 本年度の成果

本年度は、国産バイオマス由来エタノール中の不純物を分析し、化学品原料としての利用性を評価するとともに。開発材であるバイオポリプロピレン（バイオ PP）材の自動車内装部品向けの原料として妥当性を確認した。新たなバイオエンジニアリングプラスチックとしてバイオポリカーボネート、バイオエポキシ樹脂、バイオポリエステルの開発に取り組んだ。またスプレー塗装を代替する加飾フィルム基材としてバイオマス由来の熱可塑性ポリウレタン樹脂（バイオ TPU）を開発した。PP 材を中心に、回収量が確保できかつ解体分離が容易であるパーツを回収候補として、一次手解体と一次ニブラ解体を二つの事業者で精緻解体を実施した。マテリアルリサイクル（MR）に不向きな廃プラスチックのケミカルリサイクル（CR）技術開発にも取り組んだ。黒色の自動車部品プラスチックの素材判別に中赤外線を用いた分光で判別が可能であること、タルク等の添加剤の含有有無も検出できる可能性があることを確認した。回収するプラスチックのバイオベース度を計測する方式として、キャビティリングダウン分光法（CRDS）を最有力候補として選定した。中長期的視点からバイオマス原料の国産化を図るため、ソルガムを取り上げ、京都、笠岡、東温の3ヶ所での試験栽培とその搾汁液のエタノール発酵試験を実施した。バイオプラスチックとしてポリブチレンサクシネート（PBS）とポリヒドロキシブチレート/ヒドロキシヘキサノエート（PHBH）を対象に、高温多湿の劣化促進環境を想定して、劣化指標、機械的特性指標および生分解性指標それぞれの間の関係性を調査した。自動車の PP 素材・PP 使用部品等のプラスチック使用量を推定する動的フローモデルを開発し、化石資源由来プラスチックからバイオ PP 及びバイオエンジニアリングプラスチック（バイオエンプラ）への転換による温室効果ガス（GHG）削減効果について試算した。

ソルガム由来エタノール中の不純物を分析した結果、300～1000 ppm のエチレンとアセトアルデヒドなどが含まれていることが明らかとなつたが、十分な精製を行うことによって化学品原料として利用可能であると判断された。

新たなバイオエンプラ開発については、バイオポリカーボネートで新規バイオモノマー共重合品 2 種とポリオール共重合品 3 種を開発できた。耐熱性に関しては十分なものが得られたことから、自動車の内装用途への応用が期待される。バイオエポキシ樹脂では、構造接着剤向けに選定したバイオ原料を用いてエポキシ化の合成を試み、植物油由来原料を使用したケースで、液状のバイオエポキシ樹脂を得ることができた。バイオポリエステルについては、種々のモノマーを用いて重合反応を検討したところ、バイオマス由来の共重合成分の添加によって結晶化速度も調整することができ、二軸延伸フィルムの高延伸倍率化に成功した。

スプレー塗装に代替する加飾フィルム基材として、剥離性と印刷性に優れるバイオ TPU を開発することができた。特に、TPU 層にインキ密着層として PC 層を用い、多層化することで、印刷性に優れるクリアフィルムの開発に繋がった。また、本樹脂は透明性、耐候性、耐久性にも優れ、自動車外装製品をはじめとする長寿命用途での使用に耐えうる基本性能を有していることを確認した。

一次手解体と一次ニブラ解体の二つの事業者で廃自動車の精緻解体並びに部品回収を実施し、その解体性や回収量を調査した結果、回収量が期待できる PP パーツはバンパー、ドアパネル、インストルメントパネル次いでトランクコンポーネント、ピラー、ヒーティングシステム等であること、手解体とニブラ解体を比較すると手解体の方が回収量が多くなるが、ニブラ解体では単位時間で回収できる量が多く時間効率に優れた結果となった。つまり、一定の時間内、すなわち一定のコストの制約のもとではニブラ解体の方が回収量が多くなる。回収量を確保しつつ短時間で回収でき、かつ一定の品質を確保するためには、一次手解体と一次ニブラ解体の組合せ、二次解体が容易になるような

パーツ設計が必要と考えられる。

自動車用途のバイオエンジニアリングプラスチックが廃自動車から回収された後の再利用技術として、MRに不向きなバイオエンジニアリングプラスチックのCR技術の開発に取り組んだ。具体的には、ポリカーボネート樹脂、エポキシ樹脂、ポリ塩化ビニル等を含む廃プラスチックから溶媒等を用いて効率よく目的とする成分の分離回収する技術の可能性が確認できた。

自動車に多く用いられる黒色樹脂の素材判別方式として、各種分光方式を検討した結果、小型化のポテンシャル、オンライン分析における利便性や安全性の面から拡散反射型の中赤外線方式を黒色樹脂の判別方式の第一案として選定した。本方式ではタルク等の添加剤の含有有無を検出できる可能性もある。一方、回収するプラスチックのバイオベース度を計測する方式として、加速器質量分析法(AMS)、液体シンチレーションカウンタ法(LSC)及び、キャビティリングダウン分光法(CRDS)の比較評価を行った結果、現場での計測を想定のもと、測定時間が10分程度と短いこと、感度および精度を確保しつつも前処理に手間がかからず自動化が可能なこと、卓上サイズであることなどを考慮すると、CRDSが最有力候補との結論を得た。

国産原料の一つとしてソルガムを取り上げ、京都市(2圃場)、岡山県笠岡市、愛媛県東温市の3カ所で高糖度の3品種を選定して試験栽培を実施した。収量としては1ha当たりのソルガムの新鮮重量ベースで最大28トン、搾汁液のBrix糖濃度では17%程度が得られた。また、ソルガム搾汁液を用いたエタノール発酵試験を実施した結果、得られたエタノール濃度は最大67.6g/L、糖濃度より算出した収率は87~88%程度であり、エタノール発酵への阻害はないことが確認された。本年度は7月播種した結果であり、本来シーズンの5~11月に2期作を行えばこの数値の2倍程度の収量が期待できる。

バイオプラスチックとしてPBSとPHBHを対象に、耐久性を統合的に評価するため、高温多湿の劣化促進環境を想定して、劣化指標、機械的特性指標および生分解性指標それぞれの間の関係性を調査した結果、PBSサンプルはPHBHサンプルと比較して高温多湿環境での影響を受けやすく、より高温、高湿度の条件に長時間暴露されることにより結晶化度の上昇と低分子量化が進行している可能性が示唆された。劣化に伴う結晶化の進行や可塑剤の喪失は、プラスチックの脆化を引き起こし、伸びの顕著な減少を引き起こすとともに、メタン発酵においてプラスチックの微細化を促進し、分解の促進に寄与している可能性が示唆された。

自動車のPP素材・PP使用部品等のプラスチック使用量を推定する動的フローモデルを開発し、化石資源由来プラスチックからバイオPP及びバイオエンプラへの転換によるGHG削減効果について試算した。その結果、バイオPPで53.4万t-CO₂eq/年、バイオエンプラで49.1万t-CO₂eq/年、合計で103万t-CO₂eq/年の削減効果が期待されることが確認できた。なお、バイオPPの試算前提はブラジル産廃糖蜜を原料とした場合であるが、国産原料の一つとしてソルガムを用いた場合についても同様の削減効果が確認された。

以上のように、本年度における各事業の検討課題は概ね計画通りに目標を達成することができた。次年度は、評価審査委員会からの指摘等を踏まえ、より社会実装を意識した取組を進めていく予定である。また、実証事業に進展や社会環境の変化に応じて柔軟に計画内容を見直し、適切に対応したい。

Summary of the progress of the demonstration project in FY2024

Development of biobased plastics for long-life applications and life cycle demonstration for resource circulation

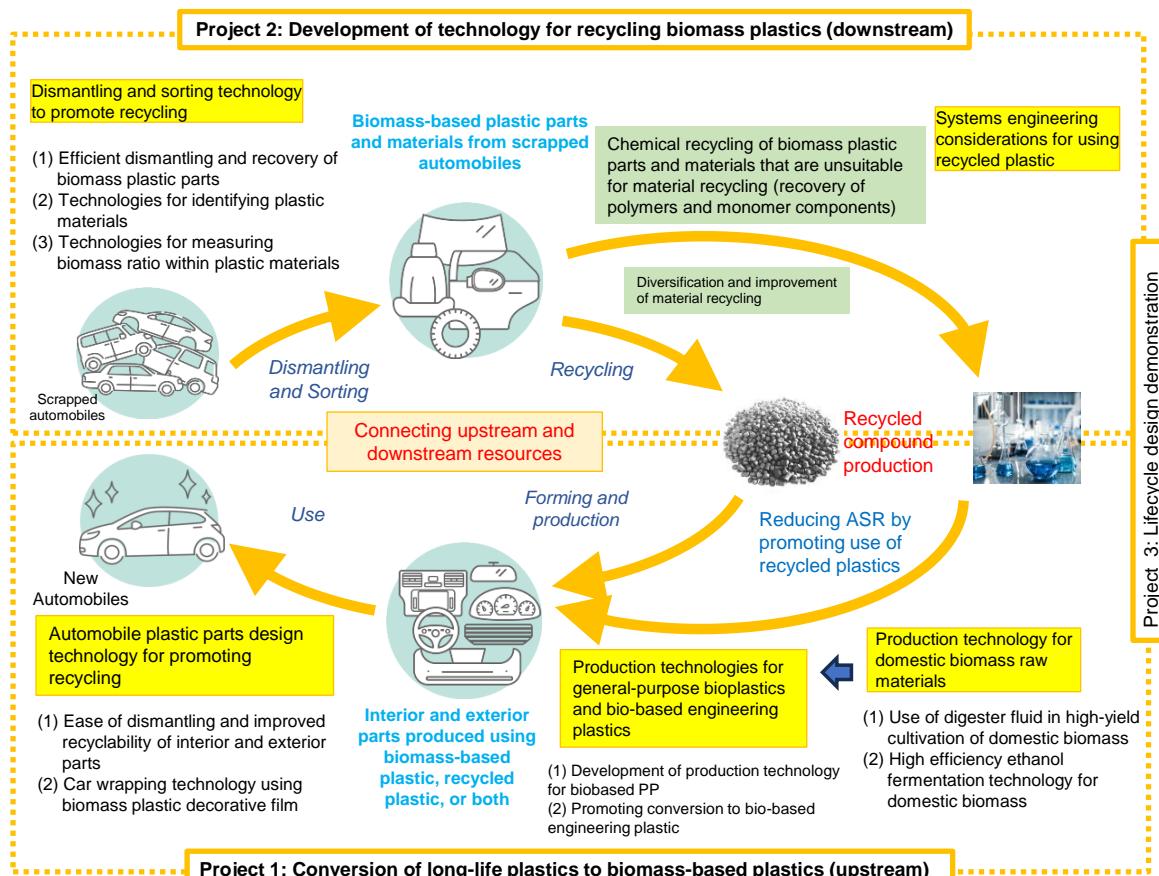
Representative: Advanced Science, Technology & Management Research Institute of KYOTO

Jointly implemented by Mitsubishi Chemical Corporation, Toyoda Gosei, ISONO,
and Mitsubishi UFJ Research and Consulting

(1) Demonstration Project Overview

The use of plastics for long-life application, such as automobile components, is increasing. The project aims to promote the development of technologies to shift from fossil plastics to biobased plastics and technologies for resource circulation. The potential for reducing life cycle greenhouse gas (GHG) emissions through substitution to biobased plastics and resource circulation will be evaluated by building and verifying a new resource circulation model that interconnects the upstream (production) and downstream (recycling) systems for plastics with adequate durability for long life applications. Our overall goals are to accelerate decarbonization and resource circulation.

Therefore, we are verifying the suitability of biomass-based plastics as materials for automotive interior and exterior parts. We are also examining efficient material identification methods and disassembly/recovery techniques. Additionally, we are developing recycling technologies, detection devices, domestically produced biomass raw materials, and durability evaluation indicators. A life cycle assessment is estimating the potential for reducing CO₂ emissions of the technologies developed by the project.



Outline of the demonstration project

(2) Results in FY2024

In fiscal year 2024, we analyzed impurities in ethanol produced using domestic crops and evaluated its usability as a raw material for chemical products. We confirmed the suitability of the bio-polypropylene (bio-PP) being developed material as a raw material for automotive interior parts. We worked on developing new bio-based engineering plastics, including bio-polycarbonate, bio-epoxy resin, and bio-polyester. We also developed a biomass-based thermoplastic polyurethane resin (bio-TPU) as a decorative film alternative to spray paint. Parts that were easy to recover in large quantities, mainly made of PP materials, were selected as candidates for recovery; precise dismantling was carried out by two companies, one using manual methods and one using a nibbler equipped dismantling machine for primary dismantling. We also worked on developing technology for chemical recycling (CR) of waste plastics that are unsuitable for material recycling (MR). Our work confirmed that it is possible to identify the type of polymer for black plastic automobile parts using mid-infrared spectroscopy and that it may be possible to detect the presence of talc and other additives. Cavity ring-down spectroscopy (CRDS) was selected as the most promising method for measuring the bio-based content of recovered plastics. To promote domestic production of biomass raw materials in the medium to long term, we conducted test sorghum cultivation at three locations: Kyoto, Kasaoka, and Tōon. Ethanol fermentation tests were performed using sorghum juice. The relationship between degradation indexes, mechanical property indexes, and biodegradability indexes for polybutylene succinate (PBS) and 3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyhexanoate (PHBH) bioplastics were investigated in a high temperature and high humidity environment that accelerates degradation. A dynamic flow model was developed to estimate the amount of plastic such as PP and parts made from PP used in automobiles that we used to estimate the reduction of GHG emissions achieved by switching from fossil resource-derived plastic to bio-PP and bio-based engineering plastics.

Analysis of impurities in ethanol produced from sorghum showed that it contained 300 to 1000 ppm of ethylene and acetaldehyde. However, it was judged that the ethanol could be used as a raw material for chemical products if sufficiently refined. It was confirmed that the ethanol could be used to synthesize methacrolein and isobutylene, which are raw materials for automotive parts.

Regarding the development of new bio-based engineering plastics, two new bio-monomer copolymers were developed for polycarbonate, along with three new polyol copolymers. As it was shown that these bio-based engineering plastics have sufficient heat resistance, they are expected to be used in automotive interiors. For bio-based epoxy resins, epoxidation synthesis was attempted using biomass raw materials selected for structural adhesives. Vegetable oil-derived raw materials were used to obtain liquid bio-based epoxy resin. For bio-polyesters, polymerization reactions were examined using various monomers; it was found that the crystallization rate could be adjusted by adding biobased copolymer components to achieve a high stretch ratio for biaxially oriented films.

We developed a biomass-based thermoplastic polyurethane resin (bio-TPU) with excellent peelability and printability for use as a decorative film substrate to replace spray paint. In particular, we developed a transparent film with excellent printability using a polycarbonate layer as an ink adhesion layer with a TPU layer to create a multi-layer structure. In addition, we confirmed that this resin had excellent transparency, weather resistance, and durability and has the performance required to withstand use in long-life applications such as automotive exterior products.

Two companies, one using manual dismantling and one using a nibbler equipped dismantling machine for primary dismantling, carried out precise dismantling of scrapped automobiles and parts recovery. Investigation of

the dismantling ability and recovery volume showed that the PP parts expected to be recovered included bumpers, door panels, and instrument panels, followed by trunk components, pillars, and heating systems components. Manual dismantling yielded a larger recovery volume, but nibbler dismantling took less time to recover a given volume. However, within a given time and under certain cost constraints, nibbler dismantling yields a greater recovery volume. To ensure recovery volume while conducting recovery in a short time, it is thought that a combination of manual and nibbler dismantling for primary dismantling and parts design to facilitate secondary dismantling are necessary.

We have been developing a method of chemical recycling as a technology for reusing bio-based engineering plastics recovered from scrapped vehicles that are unsuitable for material recycling. Specifically, we have verified the possibility of a technology using a solvent-based process that efficiently separates and recovers the desired components from waste plastics containing polycarbonate resin, epoxy resin, polyvinyl chloride, and other polymers.

Various spectroscopic methods were considered for distinguishing the polymer components of black resins which are often used in automobiles. Diffuse reflectance mid-infrared spectroscopy was selected as the first choice for identifying black resin materials due to its potential for miniaturization, convenience for on-site analysis, and safety. This method may also be able to detect the presence or absence of additives such as talc. As a result of a comparative evaluation of accelerator mass spectrometry (AMS), liquid scintillation counting (LSC), and cavity ring-down spectroscopy (CRDS) as methods to measure the bio-based content of recovered plastics, CRDS was the most promising candidate for onsite analysis based on the short measurement time of about ten minutes, the possibility of automation without the need for preprocessing, sensitivity and precision, and tabletop size.

Sorghum was selected as a potential source of domestic raw materials, and three varieties with high sugar content were selected for test cultivation in three locations: Kyoto City (two fields); Kasaoka City, Okayama Prefecture; and Toon City, Ehime Prefecture. Maximum annual yield based on the fresh weight of sorghum was 28 tons per hectare, with the Brix sugar concentration of the extracted sorghum juice being about 17%. Ethanol fermentation tests were carried out using sorghum juice. Ethanol concentration was a maximum of 67.6 g/L, and the yield calculated from the sugar concentration was 87 to 88%, confirming that there was no inhibition of ethanol fermentation. The results were for sorghum sown in July of 2024; if two crops are grown in the growing season from May to November, the anticipated yield would be about twice the yield from the single crop test cultivation.

To comprehensively evaluate the durability of PBS and PHBH bioplastics, we investigated the relationship between degradation, mechanical properties, and biodegradability indexes in a high temperature and high humidity environment that accelerates degradation. The results showed that PBS was more susceptible to high temperature and humidity effects than PHBH. Prolonged exposure to high temperature and humidity conditions may have led to increased crystallinity and decreased molecular weight. The progress of crystallization and loss of plasticizer associated with degradation may cause embrittlement of the plastic, causing a significant reduction in elongation and promoting fragmentation of the plastic during methane fermentation, which may contribute to the promotion of decomposition.

We developed a dynamic flow model to estimate the amount of plastic (such as PP materials and parts made from PP) used in automobiles, and calculated the GHG emission reduction effect of switching from fossil resource-derived plastics to bio-PP and bio-based engineering plastics. For the Japanese automobile industry, it was confirmed that a reduction of 534,000 t-CO₂eq/year could be expected from bio-PP and 491,000 t-CO₂eq/year from bio-engineering plastics, for a total reduction of 1,030,000 t-CO₂eq/year. Note that the calculation for bio-

PP was premised on using Brazilian waste molasses as the raw material. A similar reduction was confirmed when domestically cultivated sorghum was used as a raw material.

As can be seen from the above, in large part, we were able to achieve the goals set for each project this year. In the next fiscal year, we plan to move forward with initiatives with greater focus on social implementation based on feedback from the evaluation committee. We also intend to flexibly review and adjust plans in accordance with progress in the demonstration projects and in response to changes in the social environment.

< 目 次 >

1. 本実証事業の概要	1
1.1 実証事業概要	1
1.2 技術及び社会的意義	1
1.3 実施体制と実施計画	1
1.3.1 実施体制	1
1.3.2 実施計画	2
1.4 将来展望	3
2. 長寿命用途バイオマスプラスチックの導入拡大に向けた素材開発（事業1）	5
2.1 自動車用途プラスチックのバイオマス化：汎用バイオマスプラスチック（バイオPP等）の実装促進に向けた検討	5
2.1.1 目的	5
2.1.2 ソルガム由来バイオエタノールに含まれる夾雜成分の分析	5
2.1.3 ソルガム由来バイオエタノールの活用を想定した自動車用プラスチック原料（メタクリル酸メチル）の合成法の開発	11
2.1.4 バイオPP材の自動車部品適用に向けた適性評価	15
2.2 自動車用途プラスチックのバイオマス化：バイオエンプラ等の素材開発に向けた検討	16
2.2.1 目的	16
2.2.2 自動車内外装部品に向けた新たなバイオポリカーボネートの開発	16
2.2.3 自動車内外装部品に向けた新たなバイオエポキシ樹脂の開発	20
2.2.4 自動車内外装部品に向けた新たなバイオポリエステルの開発	23
2.2.5 バイオマス複合エンプラ材料の開発	25
2.3 自動車用途プラスチックの環境配慮設計に向けた検討	28
2.3.1 目的	28
2.3.2 自動車用加飾フィルムに向けたバイオポリウレタン素材の開発	28
2.3.3 自動車用加飾フィルムに向けたバイオポリウレタンフィルムの製膜技術の開発	29
2.3.4 バイオポリウレタンを活用した粘着剤の開発	31
2.3.5 自動車用加飾フィルムに向けた性能評価等の検討	33
2.4 事業1の成果の要点	48
2.4.1 自動車用途プラスチックのバイオマス化：汎用バイオマスプラスチック（バイオPP等）の実装促進に向けた検討	48
2.4.2 自動車用途プラスチックのバイオマス化：バイオエンプラ等の素材開発に向けた検討	48
2.4.3 自動車用途プラスチックの環境配慮設計に向けた検討	49
3. 長寿命用途バイオマスプラスチックのリサイクル技術開発（事業2）	50

3.1 自動車用途バイオマスプラスチックの解体・判別技術の開発	50
3.1.1 目的	50
3.1.2 自動車解体性の検討	50
3.1.3 自動車用途バイオマスプラスチックのマテリアルリサイクルの多様化・高度化	67
3.2 自動車用途バイオマスプラスチックのケミカルリサイクル技術の多様化	69
3.2.1 目的	69
3.2.2 廃自動車由来の使用済みプラスチック製品のリサイクル技術の開発：ポリカーボネート樹脂を含むもの等	69
3.2.3 廃自動車由来の使用済みプラスチック製品のリサイクル技術の開発：エポキシ樹脂を含むもの等	70
3.2.4 廃自動車由来の使用済みプラスチック製品のリサイクル技術の開発：PBT、PET を含むもの等	73
3.2.5 廃自動車由来の使用済みプラスチック製品のリサイクル技術の開発：ポリ塩化ビニル等を含むもの等	75
3.2.6 廃自動車由来の使用済みゴム製品のリサイクル技術の開発：スチレンブタジエンラバーを含むもの等	76
3.2.7 廃自動車由来の使用済みプラスチック製品のリサイクル技術の開発：ポリウレタンを含むもの等	78
3.2.8 廃自動車由来の使用済みプラスチック製品のリサイクル技術の開発：CFRP を含むもの等	80
3.2.9 廃自動車由来の使用済みプラスチック製品のリサイクル技術の開発：汚れや金属、塗料等の分離が困難な成分を含むもの等	81
3.3 バイオマスプラスチックの素材や由来の検出技術の開発	84
3.3.1 目的	84
3.3.2 バイオマスプラスチックの素材の検出技術の開発	84
3.3.3 バイオマスプラスチックの由来の検出技術の開発	91
3.4 事業2の成果の要点	94
3.4.1 自動車用途バイオマスプラスチックの解体・判別技術の開発	94
3.4.2 自動車用途バイオマスプラスチックのケミカルリサイクル技術の多様化	94
3.4.3 バイオマスプラスチックの素材や由来の検出技術の開発	95
4. 脱炭素化資源保全時代のライフサイクル設計の在り方検討（事業3）	96
4.1 バイオマスプラスチック国産原料開発	96
4.1.1 目的	96
4.1.2 ソルガムの試験栽培と搾汁液調製	96
4.1.3 ソルガム搾汁液を用いたエタノール発酵	102
4.2 ライフサイクルに応じたバイオプラスチックのシステム開発	110
4.2.1 目的	110

4.2.2 方法	110
4.2.3 結果	112
4.2.4 まとめと課題.....	122
4.3 ライフサイクル観点から見た実証事業展開	124
4.3.1 目的	124
4.3.2 自動車のプラスチックならびに PP の動的フローモデル開発.....	124
4.3.3 バイオマスプラスチック代替による GHG 削減効果の試算	133
4.4 事業3の成果の要点	145
4.4.1 バイオマスプラスチック国産原料開発.....	145
4.4.2 ライフサイクルに応じたバイオプラスチックのシステム開発	145
4.4.3 ライフサイクル観点から見た実証事業展開.....	146
5. 事業全体の令和6年度の成果と今後の課題.....	147
5.1 長寿命用途バイオマスプラスチック導入拡大に向けた素材開発（事業1）	147
5.1.1 自動車用途プラスチックのバイオマス化：汎用バイオマスプラスチック（バイオ PP 等）の実装促進に向けた検討	147
5.1.2 自動車用途プラスチックのバイオマス化：バイオエンプラ等の素材開発に向けた検討	147
5.1.3 自動車用途プラスチックの環境配慮設計に向けた検討	148
5.2 長寿命用途バイオマスプラスチックのリサイクル技術開発（事業2）	148
5.2.1 自動車用途バイオマスプラスチックの解体・判別技術の開発	148
5.2.2 自動車用途バイオマスプラスチックのケミカルリサイクル技術の多様化	149
5.2.3 バイオマスプラスチックの由来や素材の検出技術の開発	149
5.3 脱炭素化資源保全時代のライフサイクル設計の在り方検討（事業3）	150
5.3.1 バイオマスプラスチック国産原料開発.....	150
5.3.2 ライフサイクルに応じたバイオプラスチックのシステム開発	150
5.3.3 ライフサイクル観点から見た実証事業展開.....	150
参考資料	0
1. 実施記録	1
2. 成果（特許、論文、学会発表等）	2
2.1 特許権.....	2
2.2 学会発表	2
2.3 その他.....	2
3. 精緻解体部品回収記録簿例（自動車 B）	3

1. 本実証事業の概要

1.1 実証事業概要

本事業は、使用年限が長期にわたる自動車用途等での利用が拡大するプラスチックのバイオマス化・資源循環に係る技術開発を進めるとともに、これによって実現し得るライフサイクルでの温室効果ガス削減効果等の評価を通じて、用途に適合した十分な寿命のプラスチックの動脈が連携する新たな資源循環モデルを構築・検証し、脱炭素化・資源循環の加速化を目指している。

そのため、自動車用途を対象として取り上げ、長寿命用途バイオプラスチックの導入拡大に向けたバイオマス素材開発（事業1）、長寿命用途バイオマスプラスチックのリサイクル技術開発（事業2）、脱炭素資源保全時代のライフサイクル設計の在り方検討（事業3）の三つの事業に取り組むものである。

1.2 技術及び社会的意義

プラスチック資源循環戦略（2019年）は、2030年までにバイオマスプラスチックを約200万トン導入する目標（マイルストーン）を掲げている。今後、同戦略に基づき、バイオマスプラスチックの導入を推進する政策・制度が導入されれば、様々なプラスチック用途においてバイオマスプラスチックへの素材転換が進むと予想される。特に、長寿命（概ね5～10年以上）のプラスチック用途については、2030年という同戦略のバイオマスプラスチック導入の目標年次を踏まえると優先的な素材転換への対応が求められるところ、長寿命である自動車用途のプラスチックにもバイオマスプラスチック導入が進むことが期待される。その場合、使用済み自動車から回収されるプラスチックにもバイオマスプラスチックが含まれることになるが、「バイオマス由来のリサイクルプラスチック」であることを価値化できれば、現状では主にコストがネックとなり使用済み自動車から回収されずにASRとして熱回収処理されている廃プラスチックをMRもしくはCR用に仕向けられる可能性がある。本事業は、そういった近い将来における上述の政策基盤の実現を見据えて取り組むものである。

1.3 実施体制と実施計画

1.3.1 実施体制

（公財）京都高度技術研究所が申請法人として全体をとりまとめ、バイオマスプラスチック素材開発とケミカルリサイクル技術開発を三菱ケミカル（株）、自動車用内外装部品への適用性評価を豊田合成（株）、バイオマスプラスチックのマテリアルリサイクル性検証をいその（株）、廃自動車の解体性評価について（公財）京都高度技術研究所と三菱UFJリサーチ&コンサルティング（株）、バイオマスプラスチック検出技術開発を（株）リコーと（株）島津製作所、各種分析については（株）島津テクノリサーチ、バイオマスプラスチック国産原料開発を京都農業の研究所（株）とGreen Earth Institute（株）、耐久性評価指標開発を（国研）国立環境研究所、LCA解析による環境負荷低減効果の評価については（大）京都大学と三菱UFJリサーチ&コンサルティング（株）がそれぞれの課題を担当するが、幅広い学識経験者の指導の下、上記全構成メンバーが協力して効率的かつ効果的に実証事業を遂行できる体制を整えている。図1に実施体制表を示すが、メンバー名の横に、表1に示すテーマの中の主たる担当課題を付記する。

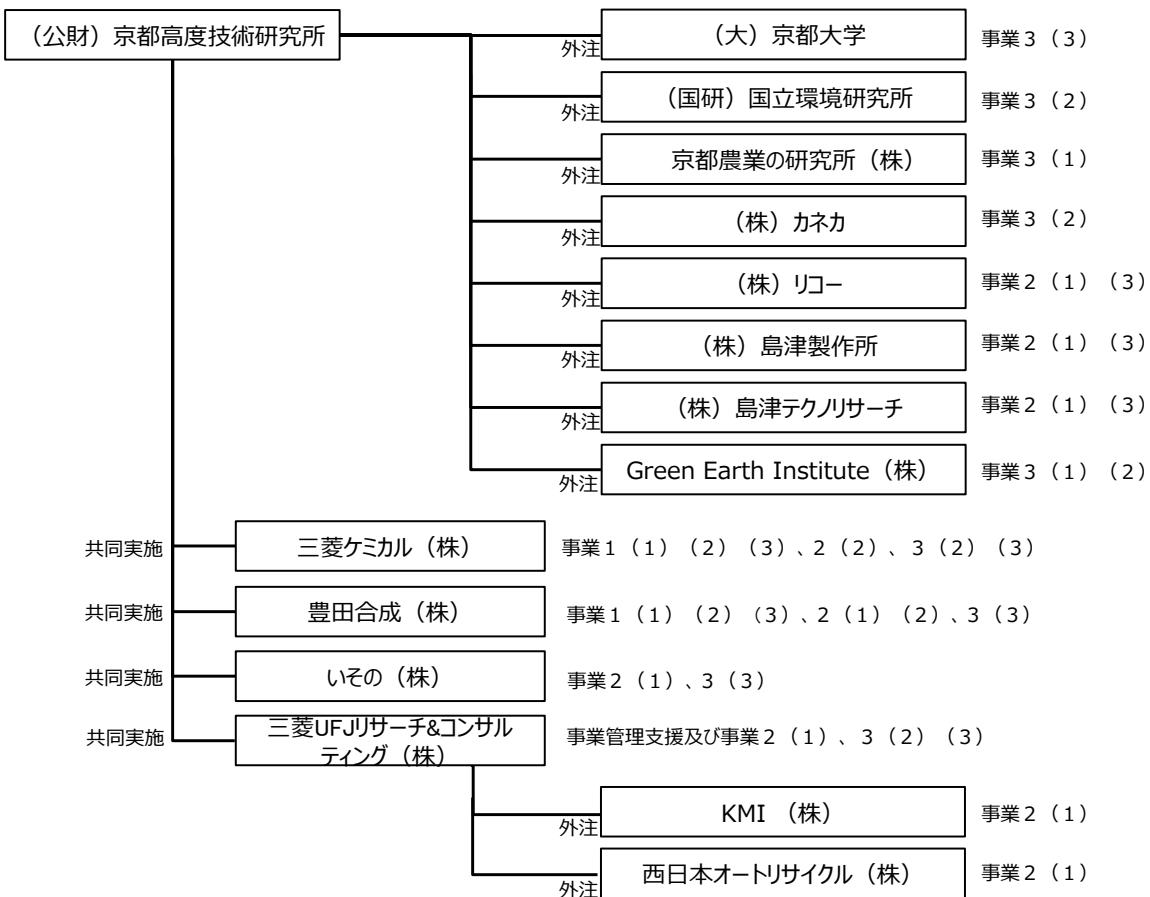


図 1 実施体制

1.3.2 実施計画

本実証事業は、大きく分けて、3つの実証事業から構成されている。

実証事業1では、プラスチック資源循環戦略のバイオマスプラスチック導入目標の達成に向け、自動車用途プラスチックについてもバイオマスプラスチックへの素材転換を目指すものであり、バイオPP等の汎用バイオマスプラスチックやバイオエンジニアリングプラスチックの社会実装を促進するものである。そのため、新たなバイオマスプラスチック素材の開発と自動車用内外装部品の素材としての適用性評価、更には、塗装工程を省略するための加飾フィルムの開発に取り組むことを計画している。本年度は、国産バイオマス由来のバイオエタノールの分析・評価を行う。また、新たなバイオPC等の試作と自動車用部品素材としての適性評価を行うとともに、バイオマス加飾フィルム素材を開発・製膜し性能評価とともに、剥離、印刷技術の検討を実施する。

実証事業2では、将来的に自動車用途のプラスチックへのバイオマスプラスチックの導入が進んだ場合、使用済み自動車から回収されるプラスチックにもバイオマスプラスチックが含まれることから、それを価値化することを目指している。現状では主にコストがネックとなり使用済み自動車から回収されずに熱回収処理される廃プラスチックをMRもしくはCRに仕向けることが可能になると期待されるため、リサイクル関連技術の検討も必要であり、廃自動車由来のバイオプラの効果的解体・回収システムの開発や回収したバイオマスプラスチックのMR技術とともにMRに不向きな低品質回収プラのCR技術開発にも取り組む。また、選別・回収作業の効率化のため自動車用内外装部品を対

象としたプラスチック素材の検出装置の開発を進めるものである。本年度は、廃自動車の手解体とニアラ解体による精緻解体を行い、解体時間と回収量を比較評価するとともに、ポリマー成分やモノマー成分を効率よく回収する技術開発や黒色樹脂判別方式の絞り込みと¹⁴C濃度測定方式の候補選定を進める計画である。

実証事業3では、自動車用途バイオマスプラスチック用の原料の安定調達のために、中長期的視点からは原料の国産化が求められる。また、バイオプラスチックについては、生分解性と耐久性・耐候性等の特性を活かした利用のための判断に資する評価指標の開発を目指す。以上のような技術実証を行った上で、バイオマスプラスチック素材への転換によるライフサイクルでのCO₂削減効果や資源保全効果等を算定することを目指している。本年度は、国産バイオマスの一つとしてソルガムを栽培しその搾汁液からバイオエタノールを製造する。また、バイオプラスチックの劣化試験結果と劣化要因の関係を整理するとともに、バイオPP及びバイオエンプラの動的フローモデルを作成し、LCAによるCO₂削減効果を試算する。

三つの実証事業の実施課題に対する最終年度目標と本年度の実施計画を次表に示す。

表1 最終年度目標と本年度の実施計画

実施課題	最終年度目標	本年度の実施計画
【事業1】 長寿命用途バイオマスプラスチックの導入拡大に向けた素材開発	(1) バイオPP等による自動車用内外装素材の活用促進。 (2) バイオエンプラの開発と自動車用内外装部材へ適用 (3) バイオマス加飾フィルムの開発と塗装工程の省略	(1) 国産バイオマス由来のバイオエタノールの分析・評価 (2) 新たなバイオPC等の試作と自動車用部品素材としての適性評価 (3) 加飾フィルム用バイオ素材の試作と製膜、剥離、印刷技術の検討
【事業2】 長寿命用途バイオマスプラスチックのリサイクル技術開発	(1) 廃自動車由来バイオプラの効果的解体・回収システムの開発 (2) MRに不向きな低品質回収プラのCR技術開発 (3) 黒色プラスチックの素材判別技術と ¹⁴ C濃度測定装置の仕様決定	(1) 廃自動車の精緻解体による解体時間計測と回収量の把握 (2) ポリマー成分やモノマー成分を効率よく回収する技術開発 (3) 黒色樹脂判別方式の絞り込みと ¹⁴ C濃度測定方式の候補選定
【事業3】 脱炭素資源保全時代のライフサイクル設計の在り方検討	(1) 国産バイオマスの収量増、コスト削減可能な栽培方法の開発 (2) バイオマスプラスチックの耐久性評価指標の開発 (3) バイオマスプラスチック転換によるCO ₂ 削減効果の算定	(1) 国産バイオマスの試験栽培とエタノール発酵試験の実施 (2) バイオプラスチックの劣化試験結果と劣化要因の関係整理。 (3) バイオPP及びバイオエンプラのLCAによるCO ₂ 削減効果試算。

1.4 将来展望

本事業は、プラスチック資源循環戦略に基づくバイオマスプラスチックの導入を推進する政策・制度の導入や、「バイオマス由来のリサイクルプラスチック」の使用を制度的に価値化する仕組みの検討への基礎情報となることを想定しているが、バイオPP及びバイオエンプラの採用については、そのリサイクルシステムの整備と組み合わせることで、GHG排出削減や資源循環の促進に大きく貢献し得ることから、その前提にとらわれず、動脈が連携して取組を進めることが求められる。

特にバイオエンプラについては、バイオマス素材という価値だけでなく、素材そのものの性能という価値から、市場ニーズに応じた導入が進むと考えられる。また、自動車外板やガラス等の現時点で

はプラスチック以外の他素材が使用されている部位へのバイオエンプラの採用も同様に期待される。

また、本事業により得られる知見については、自動車リサイクル業界・事業者に積極的に展開し、廃自動車由来のプラスチックの MR・CR 化に向けた取組を加速化することも必要である。事業 2(3) で開発するバイオマスプラスチックの検出技術についても、検出装置の自動車解体現場への普及が望まれる。

こうした中、2025 年 1 月 29 日、欧州議会の環境・公衆衛生・食品安全委員会 (ENVI)、域内市場・消費者保護委員会 (IMCO) は、2023 年 7 月に欧州委員会が発表した ELV 規則案の修正点を示したドラフトレポートを公表した。このレポートによると、自動車の再生材最低含有率にカウントされるものとして再生プラスチックに、新たにバイオマスプラスチックが追加されるとともに、リサイクル技術として CR が追加されている。まだ欧州議会からの提案段階であるが、今後、欧州委員会で承認された時には、本実証事業の成果が貢献することが期待される。

更に、本事業で取り扱うバイオ PP 及びバイオエンプラとも、自動車用途以外にも幅広く適用することが可能であり、特にバイオ PP については、石油由来 PP の使用量が多い容器包装や家電製品等への展開が進むことが波及効果として見込まれる。

2. 長寿命用途バイオマスプラスチックの導入拡大に向けた素材開発（事業1）

2.1 自動車用途プラスチックのバイオマス化：汎用バイオマスプラスチック（バイオPP等）の実装促進に向けた検討

2.1.1 目的

自動車用途のプラスチックのうち、約6割を占めるPPについては、国内外の化学メーカーがバイオPP開発に向けた取組を進めており、今後、自動車部品への採用が始まると想定される。本項では、原料の安定調達等の観点から、将来的な国産バイオエタノールの国内製造・供給にも期待し、事業3①で製造を検討するバイオエタノールの活用を含め、バイオPP製造に関する検証を行い、また、得られたバイオPP等の自動車内外装部品等向け素材としての適性を検証することを目的とする。

令和6年度は、事業3①で製造するバイオエタノールを候補に含め、バイオエタノール中に含まれる不純物がバイオPP等の製造に与える影響についてラボスケールで検証すること、及び、少量（～20kg程度）のバイオPPを供試し、小型の自動車部品を試作のうえ性能評価し、自動車内外装部品向け素材としての適性を検証することを目的とした。

2.1.2 ソルガム由来バイオエタノールに含まれる夾雜成分の分析

（1）目的

事業3①で製造するソルガム由来バイオエタノール中の不純物が、バイオPPの原料であるプロピレン等の製造に悪影響がないかをラボスケールで品質確認を行う。また、検出された不純物が重合反応に対してどのように影響するか推察する。加えて、自動車内外装部品を試作するためのバイオPP等を試供し、当該部品等を試作のうえ、素材としての適性を検証する。

（2）分析手法

本項では、以下の5つの測定方法を用い、ソルガム由来エタノールに含まれる不純物の分析を行った。

・ガスクロマトグラフ質量分析（GC/MS）を用いた測定

条件1

装置：Agilent 7890B/5977B

カラム：Supelco 社、強極性、SUPELCOWAX-10、0.32mm×60m×0.25μm

温度：50°C (10min, 10°C/min) → 250°C (10min)

Ti = 250°C、イオン源 = 230°C、IF = 250°C

ガス：コンスタントプレッシャー、He = 18.9psi

注入量：1.0 μL

スプリット：10:1

測定モード：スキャン-EI

質量範囲：m/z 20～500

前処理：なし

定量法：メタノール標準溶液による3点検量法

条件2

装置：Agilent 7890B/5977B

カラム：GL サイエンス社、無極性、InertCap-1、0.32mm×60m×0.4μm

温度：50°C (5min、10°C/min) → 300°C (10min)

Ti = 300°C、イオン源 = 230°C、IF = 250°C

ガス：コンスタントプレッシャー、He = 14.4psi

注入量：1.0 μL

スプリット: 10 : 1

測定モード：スキャン-EI

質量範囲：m/z 20～500

前処理：なし

定量法：メタノール標準溶液による 3 点検量法

・ガスクロマトグラフィー/化学発光硫黄検出器 (GC/SCD)、ガスクロマトグラフィー/化学発光窒素検出器 (GC/NCD) による分析

装置：Agilent 8890

検出器：8355 SCD、8255 NCD

カラム：SGE 社、BPX-5、0.32mm×60m×0.25 μm

温度 : 50°C (5min、10°C/min) → 300°C (10 min)

注入口=300°C、バーナー温度=800°C (SCD)、900°C (NCD)

ガス : コンスタントフロー、He = 1.5mL/min

注入量：1.0 μL

スプリット： 1:10

前処理：なし

定量法：ベンゾチオフェン標準溶液による 3 点検量法 (SCD)

キノリン標準溶液による 3 点検量法 (NCD)

・誘導結合プラズマ発光分光分析法 (ICP-OES) 測定

【マイクロ波分解装置による加熱分解処理】

装置：アントンパール製 Multiwave PRO 型

容器：NFX100 (テフロン)

試料量：0.25 g

酸：TAMA 製 硝酸 8 mL

定容：超純水で 25 mL

【定性・半定量】

誘導結合プラズマ発光分析法 (ICP-OES)

装置：サーモフィッシュ iCAP6500 型

備考：一斉定性半定量対象元素

Ag, Al, As, Au, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Dy, Er, Eu, Fe, Ga, Gd, Ge, Hf,

Hg, Ho, In, Ir, K, La, Li, Lu, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Nd, Ni, P, Pb, Pd, Pr, Pt, Re, Rh,

Ru, S, Sb, Sc, Se, Si, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Te, Ti, Tl, Tm, V, W, Y, Yb, Zn, Zr

- ・燃焼吸収-イオンクロマトグラフィー (IC) 法による全塩素 (T-Cl)、全硫黄 (T-S)、全窒素 (T-N) の分析

【燃焼吸収処理 (AQN2100H)】

試料量 : 150 mg

燃焼温度 : Inlet 1000°C/Outlet 1100°C

燃焼雰囲気 : Ar/O₂ 雰囲気 → O₂ 雰囲気

吸收液 : 10 mL 過酸化水素水 (定容法)

【IC 条件】

装置 : DIONEX Integrion HPIC

カラム : DIONEX IonPac AS23

溶離液 : 0.5 mmol NaHCO₃/4.5 mmol Na₂CO₃

流量 : 1.0 mL/min

温度 : 35°C

注入量 : 100 μL (三菱化学アリテック GA-210)

検出 : 電気伝導度

【全窒素分分析 (T-N)】

分析装置 : 三菱ケミカルアリテック TN-2100V

測定モード : 油系

温度 : In 800°C-Out 900°C

前処理 : なし

(3) 結果及び考察

・GC/MS 測定

GC/MS 分析結果を表2に、試料のGC/MSクロマトグラムを図2、図3に示した。試料中の不純物のうち、300~1000 ppm オーダーの不純物としてエチレンとアセトアルデヒドを、50 ppm程度の不純物としてジエチルエーテルを検出した。これらのピークは標準スペクトルと一致度が高く、異性体の可能性が低いピークであると判断した。また、各不純物の量は全ての試料で同程度だった。なお、条件1 (Supelcowax-10 カラム)において24 min以降に検出されている微小ピークはベースラインの変動によるノイズと判断した。

表 2 GC/MS の分析結果

ピーク No.		分子式	分子量	分子構造	濃度 (mg/L) ¹								
条件 1	条件 2				エタノール①		エタノール②		エタノール③				
					条件 1	条件 2	条件 1	条件 2	条件 1	条件 2			
1		C ₄ H ₁₀ O	74	$\text{H}_3\text{C}-\text{O}-\text{CH}_3$	45	-	56	-	56	-			
	1'	C ₂ H ₄	28	$\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2$	-	320	-	310	-	350			
2	2'	C ₂ H ₄ O	44	$\text{H}_3\text{C}-\text{C}(=\text{O})-\text{H}$	590	1500	640	1520	590	1670			

¹ メタノールによる換算値

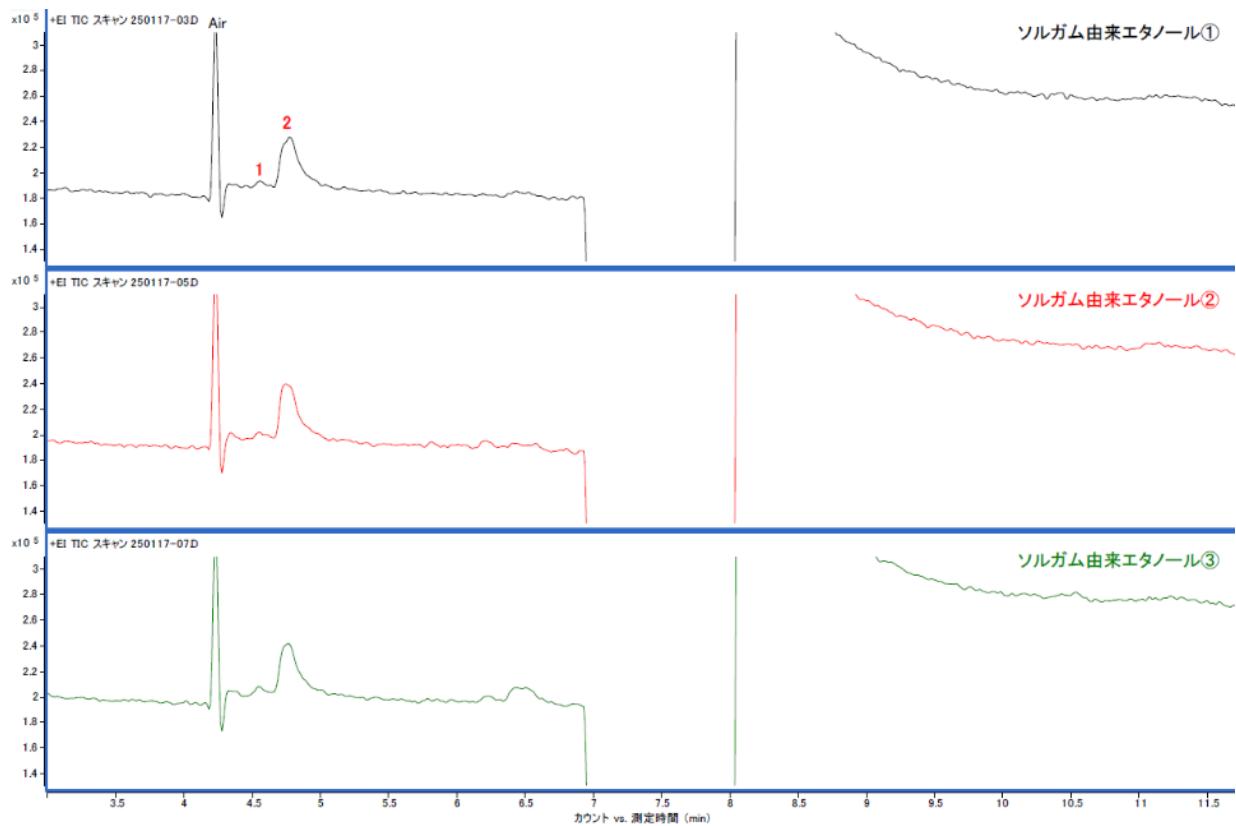


図 2 試料の GC/MS クロマトグラム比較 (条件 1)

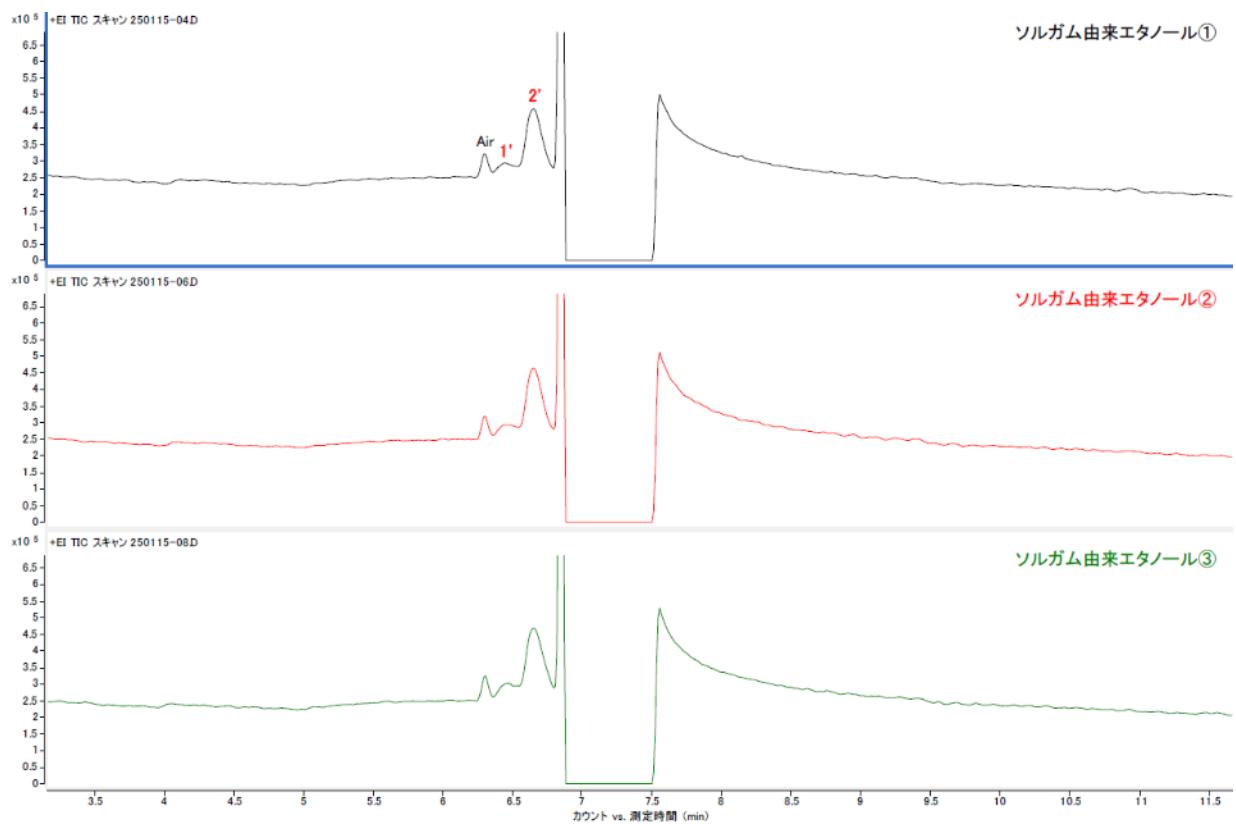


図 3 試料の GC/MS クロマトグラム比較 (条件 2)

・ GC/SCD、NCD 同時測定

試料中の窒素成分定量結果を表3に、試料のGC/SCDクロマトグラム比較を図4に、GC/NCDクロマトグラム比較を図5に示した。GC/SCDでは不純物由来と考えられるピークは検出されなかった。10min付近のピークはブランクでも検出されていることから、試料由来の不純物ピークではないと判断した。GC/NCDでは全ての試料で5.4minに1ppm程度の微小ピークを検出した。検出したピークの保持時間から判断すると含窒素化合物は低沸点成分と推測される。

表3 N成分の定量結果

保持時間	濃度 (mg/L) ¹									
	エタノール①			エタノール②			エタノール③			
	min.	n = 1	n = 2	平均	n = 1	n = 2	平均	n = 1	n = 2	平均
5.44	0.7	0.8	0.7	0.6	0.7	0.7	0.7	1.1	1.0	1.1

¹キノリンによる換算値

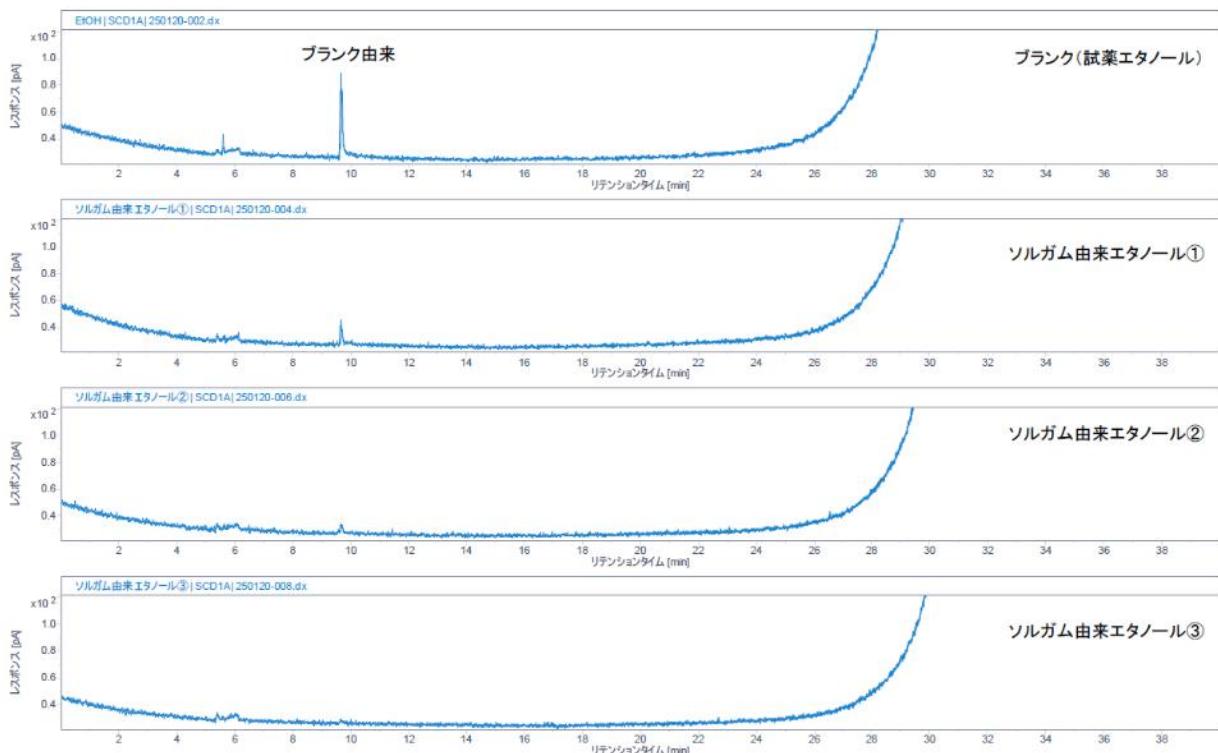


図4 試料のGC/SCDクロマトグラム比較

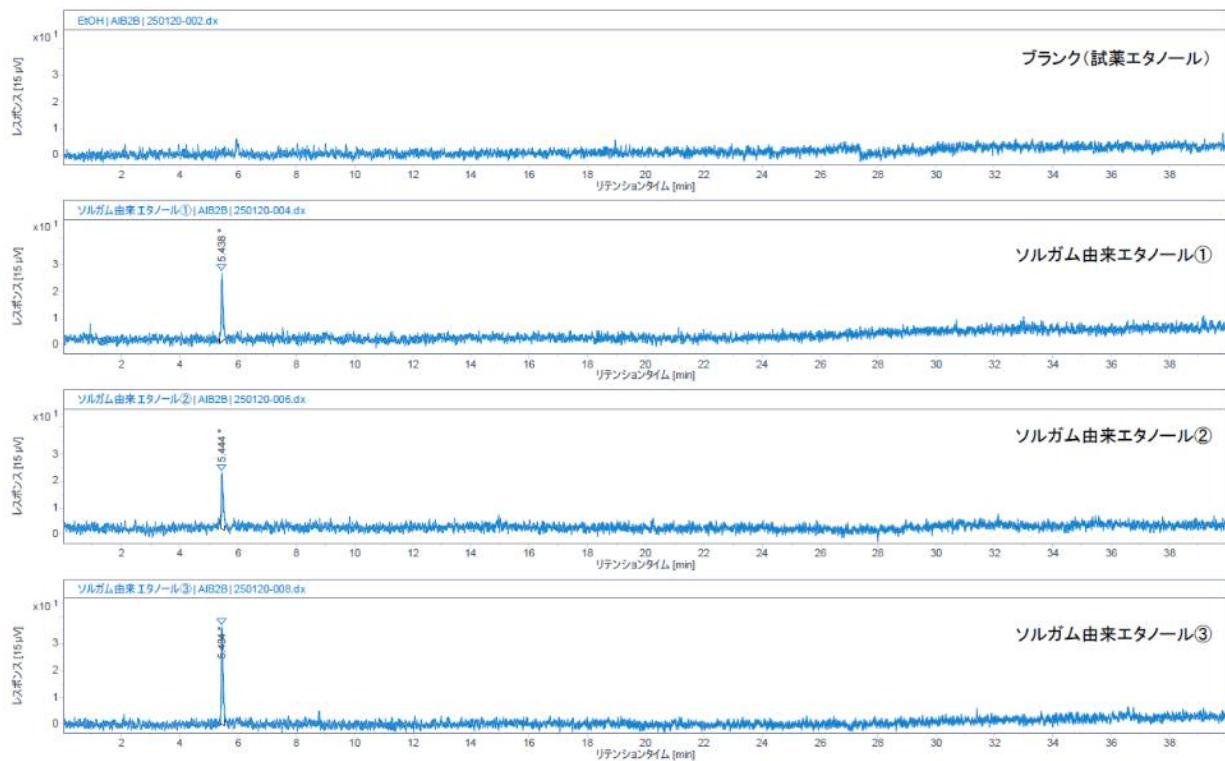


図 5 試料の GC/NCD クロマトグラム比較

・誘導結合プラズマ発光分光分析法 (ICP-OES) 測定

ICP-OES 測定による定性・半定量の結果を表 4 に示した。ソルガム由来エタノール①でのみ微量の Al が検出された。しかしながら $n=2$ の測定で 1 回のみ検出されていること、それ以外の 2 サンプルではいずれも検出されていないこと、Al は比較的コンタミネーションしやすいことから、検出された Al はコンタミネーション由来の可能性がある。その他の元素 (Ag, Al, As, Au, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Dy, Er, Eu, Fe, Ga, Gd, Ge, Hf, Hg, Ho, In, Ir, K, La, Li, Lu, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Nd, Ni, P, Pb, Pd, Pr, Pt, Re, Rh, Ru, S, Sb, Sc, Se, Si, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Te, Ti, Tl, Tm, V, W, Y, Yb, Zn, Zr) については検出されなかった。

表 4 ICP-OES 測定による定性・半定量の結果

定性・半定量値	濃度 (mg/L) ¹		
	エタノール①	エタノール②	エタノール③
10 以上	該当なし	該当なし	該当なし
1~10	Al	該当なし	該当なし
1 未満	該当なし	該当なし	該当なし

・燃焼吸収-イオンクロマトグラフィー (IC) 法による全塩素 (T-Cl)、全硫黄 (T-S) 分析、全窒素 (T-N) 分析

T-Cl、T-S、T-N の分析結果を表 5 に示した。全ての試料で T-Cl、T-S は検出下限以下だった。T-Cl、T-S については 1 ppm 未満であったものの T-N については 0.8~1.3 mg/L の値を示し、何らかの窒素成分が混入していることが明らかとなった。この結果は前述した GC/NCD と矛盾しない結果だった。

表 5 T-Cl、T-S、T-N の分析結果

試料名	T-Cl [wtppm]	T-S [wtppm]	T-N [mg/L]
エタノール①	< 1	< 1	0.8
エタノール②	< 1	< 1	0.9
エタノール③	< 1	< 1	1.3

(4) まとめと課題

(3) でまとめたように、ソルガム由来エタノールには 300~1000 ppm オーダーの不純物（有機物）としてエチレンとアセトアルデヒドが、50 ppm 程度の不純物としてジエチルエーテルが含まれていることが明らかとなった。また、1 ppm 程度の窒素成分が含まれていることが明らかとなった。その他の不純物（無機物）としては Al が検出されたものの、n=2 の測定で 1 回のみ検出されていることと、それ以外の 2 サンプルではいずれも検出されていないことこれはコンタミネーションの可能性が否定できなかった。また、Al 以外の金属成分については検出限界以下であった。これらのことと踏まえると、ソルガム由来エタノールは十分な精製を行うことによって化学品の原料として利用可能であると判断できる。

2.1.3 ソルガム由来バイオエタノールの活用を想定した自動車用プラスチック原料（メタクリル酸メチル）の合成法の開発

(1) 目的

本事業では、事業 3 ①で製造するソルガム由来バイオエタノールを実際に自動車に用いられているプラスチックの製造に活用可能か、様々な可能性を検討していく方針である。検討候補の一つとしてのテールライト、インストルメントパネル等に用いられるポリメタクリル酸メチル（PMMA、アクリル樹脂）を選択し、そのモノマーであるメタクリル酸メチルがソルガム由来バイオエタノールを用いて製造が可能か検証する。令和 6 年度は市販のエタノールを原料として用いて、メタクリル酸メチルの原料となるメタクロレインおよびイソブチレンの製造が可能であるかについて検証した。

(2) 試験方法、結果と考察

① エタノールからのメタクロレイン合成の可能性の検討

各種固体触媒を用いて、エタノールからメタクロレインを合成する反応が進行するかどうか検証した。副原料としてメタノールを用いた。本年度は、低級アルコールの活性化能を持つと予想した Au 担持触媒 7 種（担体 : A, B, C, D, E, F, G）を用いて反応評価および物性分析を行った。各触媒を 10% H₂/Ar 気流中、温度 300°C で 1 h 還元したのち、エタノール/メタノール混合液 (2 mol/mol) を濃度 4.5 mol/m³ に希釈した原料を、0.02 g-cat · min/cm³、300°C の条件で反応評価した。活性は制限原料であるメタノールの転化率で評価した。その結果、主生成物はアセトアルデヒド、イソブチルアルデヒド、メタクロレインであり、さらに未同定の高沸点生成物が観察された。

7 種の Au 担持触媒で反応評価を行ったところ、担体により生成物が大きく異なった。A, B, C, D ではメタクロレインが検出され、中でも Au/単体 A は最も高いメタクロレイン収率 1.26% を示した。特に Au/単体 A と Au/単体 B では C4 化合物より高沸点の逐次生成物がほとんど観察されなかつたことから、生成物の増炭や重合を促進して選択率低下の原因となる酸点がほとんどないことが予想され

る。メタクロレイン収率が高いものはイソブチルアルデヒド収率も高いことから、イソブチルアルデヒドの脱水素によりメタクロレインが生成する反応機構が推定される。一方で、Au/単体E、Au/単体Fはメタクロレインが観測されず、かつメタノール転化率も低かった。担体により活性および生成物分布が大きく異なったことから、担体がAuに影響を与えているか、担体そのものが活性点として機能していることが考えられる。

表 6 Au触媒の担体による性能比較

担体	エタノール転化率 (%)	メタクロレイン選択率 (%)	メタクロレイン収率 (%)	イソブチルアルデヒド収率 (%)
A	75.6	1.66	1.26	24.7
B	62.1	1.22	0.76	11.8
C	87.0	0.95	0.83	34.7
D	25.9	0.40	0.10	1.0
E	19.2	未検出	未検出	未検出
F	14.3	未検出	未検出	0.6
G	60.9	未検出	未検出	未検出

担体によるAuへの影響を把握するため、各触媒のAu粒子サイズを比較した。メタクロレイン生成を確認した担体(A, B, C, D)のAu粒子径とメタクロレイン選択率との相関性を確認したところ、Au粒子径が2 nm付近で最大の収率を示した。一般的にAuは2~5 nmで特異な活性を持つことが知られているが、本触媒もこれに矛盾しなかった。一方で単体Fと単体Gもそれぞれ3.1 nm、1.8 nmのAu粒子径であるがメタクロレインが生成しなかったことから、Au粒子だけでなく担体上の活性点も複合的に反応に寄与していると考えられる。

表 7 Au粒子径とメタクロレイン収率の関係

担体	Au粒子径 (nm)	メタクロレイン選択率 (%)
A	2.0	1.66
B	1.8	1.22
C	3.3	0.95
D	4.5	0.40
E	データなし	未検出
F	3.1	未検出
G	1.8	未検出

② エタノールからのイソブチレン合成の可能性の検討

ZnZrO_x および InZrO_x 触媒を使用して、エタノールからイソブチレンを合成する反応が進行するかどうかを検証した。 ZnZrO_x および InZrO_x 触媒を用いて 450°C , エタノール 1.8 mol%, S/C = 0.5, W/F = 0.11 s·g/mL の条件で評価を行った。その結果、主な生成物はイソブチレン、アセトンであり、その他アセトアルデヒド、プロピレン、エチレン、メタン、 CO_2 、CO が検出された。この時エタノール転化率は 100% であり、 ZnZrO_x のイソブチレン選択率は 36%、アセトン選択率は 32.7% であった。 InZrO_x のイソブチレン選択率は 17.9%、アセトン選択率は 67.6% であった。

表 8 $\text{ZnZrO}_x/\text{InZrO}_x$ 反応評価結果

触媒	選択率 (%)			
	イソブチレン	アセトン	アセトアルデヒド	その他
ZnZrO_x	36.0	32.7	0.3	31.0
InZrO_x	17.9	67.6	1.5	13.0

反応条件を複数設定して試験を行い、生成物分布の変化を確認した結果、以下 3 ステップで反応が進行していることが推定された。

- ① Zn/In 塩基点 : $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} \rightarrow \text{CH}_3\text{CHO}$ (エタノール → アセトアルデヒド)
- ② Zn/In 塩基点 : $\text{CH}_3\text{CHO} \rightarrow \text{CH}_3\text{COCH}_3$ (アセトアルデヒド → アセトン)
- ③ Zr 酸点 : $\text{CH}_3\text{COCH}_3 \rightarrow i\text{-C}_4\text{H}_8$ (アセトン → イソブチレン)

反応機構の推定により Zn/In 塩基点と Zr 酸点の役割が明確になり、イソブチレン収率の向上には酸点により③反応を活性化させることが重要であることが判明した。目的生成物であるイソブチレン収率は InZrO_x よりも ZnZrO_x の方が高いが、アセトンはイソブチレンに変換可能であることを勘案すると逐次反応物の少ない InZrO_x がより適した触媒である可能性示唆された。

ZnZrO_x および InZrO_x 触媒で得た知見をベースに、新規触媒として MZrO_x 触媒の調製を行った。HAADF STEM で粒子形状および元素分布を確認したところ、 ZnZrO_x , InZrO_x , MZrO_x 何れも 10-20 nm 程度の粒子の凝集体であり、Zn, In, M が ZrO_2 上に均一に分布していた。XRD 測定では MZrO_x のみ若干ピークがブロードなことから結晶性が低いことが分かった。同条件で反応評価を実施したところ、エタノール転化率は 100% で、イソブチレン選択率は 36.1%、アセトン選択率は 45.1% であった。イソブチレン収率は ZnZrO_x と同等ながら逐次反応物は少ないとため、有力な触媒候補であることを突き止めた。

さらに、 MZrO_x による反応の後段に固体酸物質を充填するタンデム化により、ステップ③ (アセトン → イソブチレン) を進行させる検討を実施した。固体酸物質として、A, B, C, D を選定した。 $\text{MZrO}_x +$ 固体酸物質 A では、イソブチレン選択率が約 12% 増加して 48.5% となった。一方で逐次反応物選択率も約 13% 増加して 31.4% となった。他方で、固体酸物質 B, C, D ではイソブチレン選択率が低下して 13.3~17.7% となった。逐次生成物選択率は 2~13% 増加した。酸点によりイソブチレン → アセトンの逆反応と共にイソブチレンの逐次反応も進行させた可能性がある。SAO34 とその他固体酸物質とは員環数や Si/Al 比が異なるが、反応に影響を与える因子は明らかにはなっていない。固体酸物質の最適化により更なる性能向上が期待できる。

仮説検証のために、前段と後段を入れ替えて、固体酸物質 A + MZrO_x でタンデム評価を実施した。同条件で反応を行ったところエタノール転化率は 100%、エチレン選択率 99% で、イソブチレンの生成は見られなかった。固体酸物質 A によりエタノールの脱水が選択的に起こったためだと考えられる。固体酸物質 A は酸点として機能していることが確認できた。仮説の通り、MZrO_x と固体酸物質 A をタンデム化することによって前段で未反応だったアセトンが後段の酸点でイソブチレンに変換されることがわかったが、同時にイソブチレンの逐次反応も進行した。これらの結果から、酸点の強度、量、分布を最適化することにより逐次反応を抑制してイソブテン選択率を向上させることができると考えられる。

表 9 MZrO_x タンデム反応評価結果

触媒			選択率[%]		
前段	後段	イソブチレン	アセトン	アセトアルデヒド	その他
MZrO _x	—	36.1	45.1	0.3	18.6
MZrO _x	固体酸物質 A	48.5	19.8	0.4	31.4
MZrO _x	固体酸物質 B	14.7	60.3	3.0	22.0
MZrO _x	固体酸物質 C	13.3	51.9	3.6	31.2
MZrO _x	固体酸物質 D	17.7	53.9	7.5	20.9
固体酸物質 A	MZrO _x	0	1	0	99

(3) まとめと課題

メタクロレンの合成：Au 担持触媒 7 種（担体：ZnO, Fe₂O₃, ZrO₂, CeO₂, NiO, MnO₂, CoO₄）を用いて反応評価および物性分析を行って仮説を立証し、今後注力すべき触媒系の選定と最適化のための指針を得た。しかし、本年度の検討ではメタクロレン収率は～2%弱と低いため、今後、反応機構から律速段階を特定してブレークスルーする方法を探索する必要がある。

イソブチレンの合成：ZnZrO_x、InZrO_x および新奇な MZrO_x 触媒を使用してエタノールからのイソブチレン合成反応を実施し、その生成物分布から反応機構を推定した。この反応機構をベースにして、イソブチレン収率を向上させるために必要な触媒特性を推定し、新規触媒系の設計を行った。中でも MZrO_x および固体酸物質とのタンデム化によりイソブチレン収率を向上させる可能性が示されたため、次年度以降はこれらの最適化を実施する。一方で、現在は反応評価条件による影響の確認が十分とは言えないため、反応温度、原料濃度、SV、S/C（スチーム/炭素）比等についても変更した反応データを蓄積して反応解析を行い、より精度の高い反応機構モデルを構築することで高性能触媒の開発につなげる。固体触媒を用いてエタノールからイソブチレンを製造する手法を確立することができれば、バイオエタノールの利活用の拡幅の一助となると期待する。

2.1.4 バイオ PP 材の自動車部品適用に向けた適性評価

(1) 方法

三菱ケミカルの開発材であるバイオ PP 材の基本物性と自動車向け要求特性との比較による判断。

(2) 結果

バイオ PP 材の諸物性に関する基礎データを元に自動車内装部品向け原料として妥当性を検証した。

まず、石油由来ポリプロピレン、バイオポリプロピレンを比較したところ、立体規則性の指標である mmmm 値、分子量の指標である MFR(メルトフローレート)は何れも同程度であった。また、GPC 測定により得られた分子量分布値(Mw/Mn)、および DSC 測定に得られた融点(Tm)、結晶化温度(Tc)についても同程度であった。以上の結果より、石油由来ポリプロピレンとバイオポリプロピレンの物性には大きな差異が無く、自動車内装部品の素材としての品質についても差異は無いと判断した。

(3) まとめと課題

三菱ケミカルの開発材であるバイオ PP 材の諸物性は自動車内装部品向け原料として問題ないことを確認した。課題としては、自動車内外装部品の対象部位により、自動車 OEM の要求物性／性能が異なり、それに応じた配合チューニングが必要となるのが課題であり、配合グレードごとに性能確認する必要がある。

2.2 自動車用途プラスチックのバイオマス化：バイオエンプラ等の素材開発に向けた検討

2.2.1 目的

近年、バイオマスを原料とするエンジニアリングプラスチック（以下「エンプラ」という。）については、石油由来エンプラの性能を上回るものが開発されつつあり、再生可能資源であるバイオマス由来という価値だけでなく、素材そのものの性能という価値によって、自動車用途プラスチックとしての採用が進むと期待される。また、高い価値を持つことにより、廃車後にリサイクルされるエンプラの価値の向上にもつながる。加えて、自動車外板やガラス等、現時点ではプラスチック以外の素材が使用されている部位へも将来的にバイオエンプラが採用されていくと期待される。これらの期待に応えるため、本事業では、バイオエンプラ（バイオポリカーボネート、バイオエポキシ樹脂、バイオポリエステル、バイオポリウレタン、バイオアクリル樹脂等）を開発する。これらのバイオエンプラの自動車内外装部品等向け素材として適性を検討すること。また、バイオ原料（改質リグニン等）を複合したバイオマス複合プラスチックの自動車部品用途への適用可能性を明らかにすることを目的とする。

令和6年度は、車載向けの新たなニーズを満たすバイオエンプラの開発目標を複数設定したうえで、バイオエンプラの製造に向けた基礎技術の開発を進めることを目的とした。また、得られた試作品を用い、自動車内外装部品向け素材としての適性を検証した。加えて、国内調達が可能な改質リグニン等を複合したバイオマス複合プラスチックに対して、材料物性等を評価することで、自動車部品への適用可能性を検証した。

2.2.2 自動車内外装部品に向けた新たなバイオポリカーボネートの開発

（1）方法

バイオマス等の再生可能資源由来の機能性モノマーを積極的に活用しつつ、これまでの課題を克服して物性や機能を向上させたバイオポリカーボネートを開発し、自動車内外装部品等向け素材としての適性を検討する。特に本年度はバイオマス度を向上させることを念頭に、種々のバイオモノマーから目的に叶ったものを絞り込むため、ラボスケールの少量重合装置で重合検討を行った。具体的には、重合反応性、耐熱性、吸水率などの基礎物性の初期評価を行い、現行材（DURABIO）との比較検証を行った。まず、自社/他社の新規バイオモノマーを用いた共重合ポリマーの新規組成の検討を行い、反応性と基礎物性評価（ガラス転移温度：Tg, 色調など）の評価を行った。次に、代表的なバイオモノマーであるイソソルビド（isosorbide : ISB）の共重合割合を増やし、共重合相手にポリオールを使用した組成の重合検討を実施し、反応性と基礎物性評価及び耐薬品性評価を実施した。

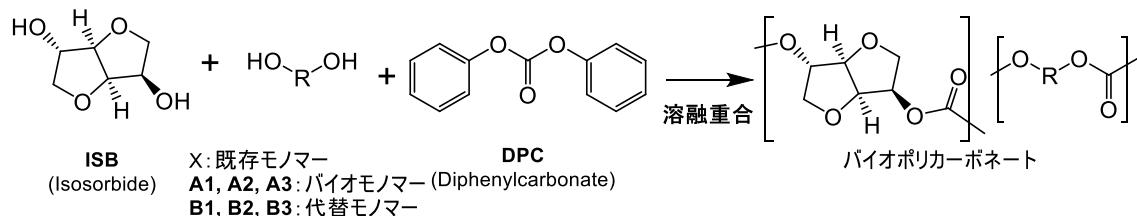


図 6 新たなバイオポリカーボネート

(2) 結果及び考察

① 新規モノマーの重合及び基礎物性評価 1：複素環系モノマー

新規モノマーの共重合検討結果を表 10 にまとめた。他社製バイオモノマー A1 を用いた場合には重合反応が目標粘度まで到達せず、非常に脆い樹脂が得られた。モノマー中の不純物が重合反応に影響した可能性を考慮して、モノマーの再精製を行った後改めて重合検討を実施したが、重合反応性に改善は見られなかった。このことから反応不良の原因はモノマー構造に起因する可能性が高いと推定している。一方、自社開発の新規モノマー A2, A3 を用いた場合には問題なく重合反応が進行した。生成物の粘度は目標値まで到達し、それぞれ薄黄色透明樹脂、橙色透明樹脂が得られた。得られた樹脂のバイオマス度は既存の DURABIO グレードから 10%程度向上したことに加え、耐熱性 (Tg) は同等以上のものが得られた。

表 10 新規バイオモノマーの共重合検討結果

候補試料	組成	バイオマス度 ¹	重合反応性	Tg (°C)	ポリマーの色調
参照 (DURABIO)	ISB/X ²	約 60%	○	120	 無色/透明
1	ISB/A1 ³	約 60%	×	-	-
2	ISB/A1 ⁴	約 60%	×	-	-
3	ISB/A2	約 70%	○	123	 薄黄色/透明
4	ISB/A3	約 70%	○	142	 橙色/透明

1 バイオマス由来モノマーの含有量 (wt%)

2 参照 (DURABIO に用いられている共重合成分については非開示)

3 他社製品 (未精製品)

4 他社製品 (当社で精製したもの)

② 新規モノマーの重合及び基礎物性評価 2：代替モノマー

新規モノマー共重合検討結果を表 11 にまとめた。代替モノマー B1, B2, B3 を用いた場合には、問題なく反応が進行した。生成物の粘度は目標値まで到達し、それぞれ薄黄色透明樹脂 (Entry1)、薄黄色透明樹脂 (Entry2) が得られた。一方で B3 を用いた場合には白濁した半透明の樹脂が得られた (Entry 7)。ポリオール B3 を共重合したものが白濁化したことに関しては、ISB とポリオール B3 の相溶性が

低く、ISB リッチなドメインとポリオール B3 リッチなドメインで一部相分離構造を取っていることが推定される。得られた樹脂のバイオマス度はいずれも既存の DURABIO グレードから 10%程度向上しつつ、耐熱性 (Tg) は同等以上のものが得られた。

表 11 代替モノマーの共重合検討結果

候補試料	組成	バイオマス度 ¹	重合反応性	Tg (°C)	ポリマーの色調
参照 (DURABIO)	ISB/X ²	約 60%	○	120	 無色/透明
1	ISB/B1	約 70%	○	125	
2	ISB/B2	約 70%	○	133	
3	ISB/B3	約 70%	○	141	

1 バイオマス由来モノマーの含有量 (wt%)

2 参照 (DURABIO に用いられている共重合成分については非開示)

③ 耐薬品性評価結果

②で検討した代替モノマー共重合品に関して、界面活性剤に対する耐薬品性評価を行ったところ。DURABIO 現行グレード同等以上の耐薬品性が確認された。特に ISB/B3 共重合品の室温評価では目標を上回る耐薬品性が確認された。高温条件下 (70°C) では目標には及ばなかったものの、大幅な改善が見られた。

(3) バイオポリカーボネート樹脂の自動車外装向け信頼性評価結果

車載向けの新たなニーズ展開の可能性検討として、バイオポリカーボネート樹脂に対する開発目標を設定し、試作材料を用いて、自動車外装向けの材料物性および信頼性評価を行い、課題出しを実施した。結果を表12に示す。

荷重たわみ温度および耐チッピング性が目標値未達となつたため、引き続き透明性と機械物性を両立する材料設計を進める。

表12 バイオポリカーボネート樹脂の評価結果

項目	評価項目	単位	試験方法	目標値 (内は自主目標)	比較品				開発品		
					PC+ハードコート	PMMA	高耐候PC (非バイオ)	バイオPC (DURABIO TM)			
					ハードコート	PMMA	PC	バイオPC			
	条件				測定値	測定値	測定値	判定	測定値	判定	
材料物性	比重	g/cm ³	JIS K 7112	[表面ハードコートPC 同等以下]	1.20	1.19	1.2	○	1.37	×	
	荷重焼み	0.45MPa	℃	JIS K 7191	[表面ハードコートPC 同等以上]	141	—	130	○	118	×
		1.8MPa	℃		126	100	118	○	106	×	
衝撃性	シャルピー (リサ有)	RT	kJ/m ²	JIS K7111	8以上	71	1.4	25	○	9.0	○
		−30℃	kJ/m ²		—	—	—	10.0	—	—	—
	耐チッピング性	常温 (玄武岩6号)	—		自主 (非開示)	基材ワレなきこと	ワレなし	基材ワレ	ワレなし	○	基材ワレ ×
傷付き性	洗車傷付き	自動洗車機 10回	—	JIS K 5600-5-4	外装実績材 (PMMA) 同等以上	5~4級	3級	3級	○	4~3級	○
	鉛筆硬度	—	—		HB 以上	2H*	2H	HB	○	F~H	○
耐候性	SWOM	1200h	point	後述	ΔE=3.00 以下	ΔE= 1.73 (ΔYI= 0.8)	—	ΔE= 2.31 (ΔYI= 3.6)	○	ΔE=2.20 (ΔYI=1.78)	○
総合評価								○		×	

※表面ハードコート処理をしたT/Pの結果

促進耐候性試験機

メーカー：スガ試験機株 名称：サンシャインウェザオメーター、型式：S300

試験内容：紫外線、熱、水等の複合環境における材料の促進劣化試験

指標：色差（ΔE）、イエローインデックス（ΔYI）

試験方法：放電電圧/電流 50V/60A ブラックパネル温度 63℃、サイクル：照射（連続）+水スプレー（間欠）

(4) まとめと課題

種々のモノマーを用いて重合反応を検討したところ、新規バイオモノマー共重合品2種と代替モノマーの共重合品3種、計5種を開発した。いずれの樹脂も耐熱性に関しては十分なものが得られたため、機械特性が十分であれば、自動車の内装用途への応用が期待される。特に代替モノマー共重合品は、優れた耐薬品性を示すことが明らかとなつたため、内装材の中でも人の手が良く触れる部材への適用が期待できる。次年度は、本年度の成果を踏まえ、候補材の成型片を用いて、詳細な物性測定（粘弾性測定、光学測定など）を実施し、現行材よりも耐熱性や機械特性向上が期待できる候補材を決定する。

また、代替モノマー共重合に関しては、分子構造や分子量を変えることで、機械物性やその他の物性（耐薬品性含む）へ与える影響を明らかにし、樹脂設計の基本情報を蓄積する。さらに、樹脂の白濁化という課題が残るので、屈折率の制御などによって耐薬品性を維持しつつ透明性の高い樹脂を得ることを指標とする。

2.2.3 自動車内外装部品に向けた新たなバイオエポキシ樹脂の開発

(1) 方法

2.2.2に続き、バイオエンプラの開発の一環として、本項では構造接着剤および自動車構造材向けCFRPの母材（マトリックス樹脂）に適したバイオエポキシ樹脂の開発を目指し、まず、バイオ原料の探索とそのエポキシ化を試みた。さらに、本項で開発したバイオエポキシ樹脂を、現在接着剤やCFRP用途にて広く使用されているエポキシ樹脂に配合し、用途に十分な物性の硬化物が得られるかを確認するために、代表的なビスフェノールA型エポキシ樹脂(jER828)と配合した硬化物の物性を評価した。

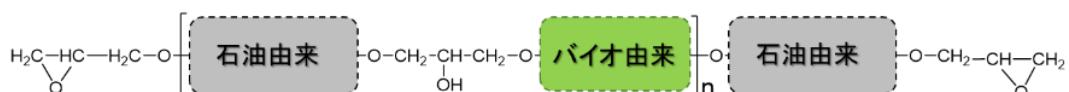


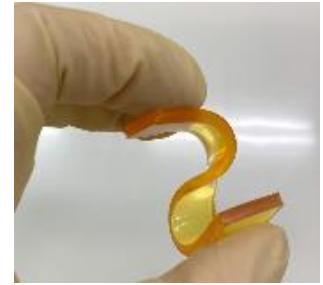
図7 新たなバイオエポキシ樹脂

(2) 結果及び考察

バイオ原料の探索：構造接着剤向けに選定したバイオ原料2種（天然糖由来、植物油脂由来）を用いて、エポキシ化を試みた。糖由来の原料を使用した場合は、反応時にゲル化が進行し、液状のエポキシ樹脂を得ることができなかった。一方、植物油脂由来の原料を使用した場合では、液状のバイオエポキシ樹脂を得ることができた。（表13）バイオマス度は約60-70%となる。

既存エポキシ樹脂との配合によって得られる硬化物の評価：得られたバイオエポキシ樹脂にjER828を配合し、硬化を試みた。得られた硬化物の樹脂特性を評価した結果、接着強度、引張り伸び特性において良好なデータが得られた。

表 13 構造接着剤に向けて選定した新規モノマーの共重合検討の結果

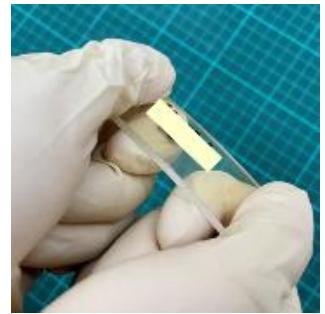
試料名	組成	エポキシ樹脂の特性		硬化物の特性	
		反応性	バイオマス度 ¹	接着強度 (N/25mm)	引張伸び (%) 硬化物の色調、硬さ
参照	ビスフェノール A型 エポキシ	0%	0%	9	 6 無色/透明、折れ曲がらない
1	石油由来 エポキシ I + 糖由来原料	ゲル化	約 65%	-	-
2	石油由来 エポキシ I + 植物油脂由来 原料	○	約 70%	21	 19 橙色/透明、折り曲げる ことができる
3	石油由来 エポキシ II + 植物油由来原料	○	約 60%	124	 89 橙色/透明、かなり柔らかい

¹ バイオマス由来モノマーの仕込み比率 (wt%)² 配合比: jER828 (ビスフェノール A 型エポキシ樹脂) /X=50/50, 硬化剤: DICY、硬化促進剤: DCMU, 硬化条件: 80°C 1h + 130°C 1.5h

次に構造材 CFRP 向けに選定した非可食性植物由来バイオ原料にて、エポキシ化の合成に成功した。いずれの場合も良好に反応が進行し、エポキシ樹脂が得られた。またそれぞれのバイオ化度は約 20-50% であった。得られたバイオエポキシ樹脂に jER828 (ビスフェノール A 型エポキシ樹脂) を配合

し、硬化させた。その硬化物性を評価した結果、ガラス転移温度は既存のビスフェノールA型エポキシ樹脂型の硬化物には及ばないものの、高い弾性率を示した。

表 14 構造材に向けて選定した新規モノマーの共重合検討の結果

試料名	組成	エポキシ樹脂の特性		硬化物の特性	
		反応性	バイオマス度 ¹	曲げ弾性率 (GPa)	Tg (℃) 硬化物の色調、硬さ
参照	ビスフェノール A型 エポキシ	0%	0%	2.4	 189 無色/透明、折れ曲がらない
1	石油由来 エポキシIII + 天然糖由来原料	○	約 20%	3.0	 129 無色透明、折れ曲がらない
2	石油由来 エポキシIII + 植物油脂由来 原料	○	約 50%	2.4	 102 無色透明、折れ曲がらない

1 バイオマス由来モノマーの仕込み比率 (wt%)

2 配合比 : jER828 (ビスフェノール A型エポキシ樹脂) /X=50/50, , 硬化剤 : WA, 硬化条件 : 120°C 2h + 175°C 6h

(3) まとめと課題

種々のモノマーを用いて重合反応を検討したところ、エポキシ樹脂中に植物由来の新規モノマーを導入することによって高い接着強度を示すバイオエポキシ樹脂を合成することに成功した。加えて、エポキシ樹脂中に植物由来の新規モノマーを導入することによって高弾性のバイオエポキシ樹脂の合成することにも成功した。構造接着剤向けとしては、バイオマス度を維持しつつより高い接着強度を

併せ持つバイオエポキシ樹脂の開発を進める。また構造材 CFRP 向けとしては、より高いガラス転移温度 (Tg) かつ成型加工性を併せ持つバイオエポキシ樹脂の開発を進める。

2.2.4 自動車内外装部品に向けた新たなバイオポリエステルの開発

(1) 方法

2. 2. 2. 2. 3 に続き、本項では新たなバイオポリエステルを開発し、自動車内外装部品等向け素材としての適性を検討する。特に初年度は、バイオマス度と機能性（物理強度）の向上に寄与すると期待されるバイオモノマーを用いたセグメントをポリブチレンテレフタレート (PBT) 骨格に導入することを検討する。

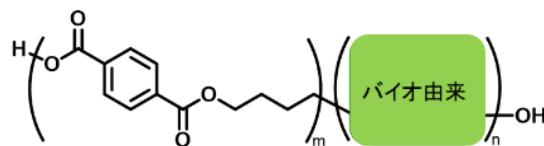


図 8 新たなバイオポリエステルの基本構造

(2) 結果及び考察

新規モノマーを用いた共重合の検討結果を表 15 にまとめた。開発品 1 はバイオモノマーを共重合させた PBT を延伸したフィルム、開発品 2 はバイオモノマーを共重合させた PBT にさらに PBT を配合して押出製膜したフィルム、開発品 3 は開発品 2 を延伸したフィルムである。それぞれの機械物性の測定結果から、開発した新規バイオポリエステルは、延伸により高い耐突き刺し性能、引張弾性率を示した。特に興味深い点としては、1 と 3 は市販の延伸 PBT よりも高い突き刺し耐性を有しており、さらに、3 の方が 1 よりも高い突き刺し性能を示した。

表 15 新規モノマーの共重合検討の結果

	バイオマス度 ¹ (%)	延伸倍率	厚み (μm)	引張強度	耐突き刺し性	サンプルの外観
参照 1 ² (ナイロン)	-	-	15	-	○	
参照 2 (延伸 PBT)	-	3.5×3.5^3	15	○	○	
開発品 1	72	4.0×4.0	13	△	○	
開発品 2	69	-	13	○	○	
開発品 3	69	4.0×4.0	13	○	×	

¹ 東洋紡（株） ハーデン® DN036 の HP 掲載値 ² 興人フィルム&ケミカルズ（株）の特許情報をもとに作成、その他の物性は実測値

（3）まとめと課題

種々のモノマーを用いてポリエステルの重合反応を検討したところ、バイオマス由来の共重合成分の添加によって結晶化速度も調整することができ、また、二軸延伸フィルムの高延伸倍率化にも成功した。特に、バイオモノマーを共重合させた PBT を市販の PBT に添加することによって延伸倍率、突き刺し応力を向上させることができたことから、開発した樹脂は添加剤として製品のバイオマス度を向上させることができるだけでなく、ポリエステルの機械特性を向上させることができる可能性を示している。バイオマスプラスチックの最大の課題は石油由来プラスチックとの価格差であり、本検討で得られる新規バイオポリエステルが添加剤として既存のポリエステルを改質することができれば、価格差の縮小を実現するなど様々な選択肢を提供できるのではないかと考えられる。

2.2.5 バイオマス複合エンプラ材料の開発

(1) 方法

自動車に使用されるプラスチックの割合は、ポリプロピレン（PP樹脂）が最も多く、全体の50%以上を占める。また、ポリアミド（PA樹脂）についても、全体の約7%を占め3番目に多く、今後は金属代替として構造部材などへの展開の可能性がある。よって、バイオマス複合プラスチック材料開発のターゲットは、PP樹脂とPA樹脂とすることとした。

また、バイオマス材料は、日本国内に豊富に存在する杉の木粉を抽出して得られるという供給面の安定性、および耐熱性、加工性に優れている点より改質リグニンを選定した。さらに、リグニン由来のベンゼン環より剛性をもつことから、樹脂の強度向上に注目し検討することとした。

(1) - 1. 試験装置および方法

1) 小型混練機

メーカー：レオ・ラボ（株） 名称：卓上小型混練機、型式：Xplore シリーズ MC 15HT
試験内容：10g スケールでの樹脂混練

2) 小型射出成型機

メーカー：レオ・ラボ（株） 名称：射出成形機、型式：Injection Moulder IM12
試験内容：引張試験用のダンベル試験片の作成

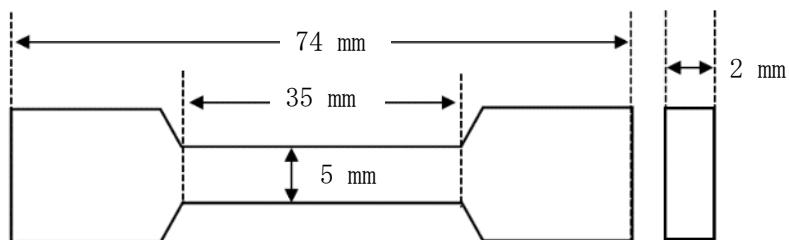


図 9 ダンベル試験片

3) 引張試験機

メーカー：オリエンテック、名称：テンシロン万能試験機、型式：AC-50KN-CM
試験内容：引張試験
試験方法：試験速度 50mm/min, ロードセル定格 1tf, チャック間距離 35mm

4) 二軸押出機・・・(株)DJK にて実施

メーカー：㈱テクノベル 名称：同方向回転二軸押出機、型式：KZW15-30MG
試験内容：改質リグニンマスターバッチの作成
試験方法：スクリュー径Φ15mm, L/D=30

(1) - 2. 実施内容

- 1) ポリアミド6樹脂への改質リグニン^{※1}配合（以下、PA6+GLという。）に対する評価
- 2) ポリプロピレン樹脂への改質リグニン配合（以下、PP+GLという。）に対する評価

(2) 結果

1) PA6+GL

PA6, PA6+GF30 に対して、改質リグニンを 20wt%配合し、引張特性を評価した。(表 16)

PA6 に対して改質リグニンを配合した場合、引張破断強度の向上が確認できたが、伸びは減少した。断面の SEM 観察(図 10)では、PA6 と GL の界面が判断できないほど相溶しており、強度向上に繋がったと考えられる。

表 16 引張試験結果 (PA6+GL)

引張評価		PA6	PA6+GL
破断強度 (MPa)	-30°C	60.2	102.3
	23°C	77.6	78.8
	80°C	69.2	69.4
伸び(%)	-30°C	100~200	150~300
	23°C	400	250
	80°C	500	300~400

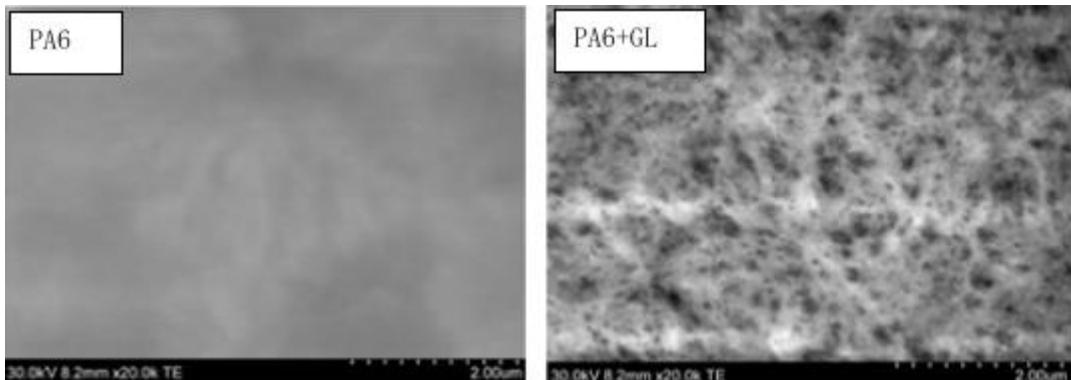


図 10 SEM 測定 (PA6+GL)

2) PP+GL

2)-1

PP に対して改質リグニン(GL)を 20wt%配合したポリマーに対して、添加剤の種類を変更し、引張特性を評価した。この時、添加剤は、樹脂全体に対して 0.5 部添加した。(エラー! 参照元が見つかりません。)に示すとおり、水準 PP-①では、標準 PP と比較し強度、伸びともに低下が確認された。水準 PP-②や水準 PP-③を使用した場合、水準 PP-①と比較して、強度の改善は確認できたが、標準 PP には劣る結果となった。水準 PP-④は、強度は大幅に低下したが、伸びは標準 PP 同等となった。各水準において、モルフォロジーの観察を図 11 に示した。水準 PP-②は、PP 中に改質リグニンが高分散できているが、伸びが向上しない。その理由は GL 自体に伸びにくい性質があるからであると考える。一方、伸びが向上している PP-④では、添加剤 C が改質リグニンのドメインに存在しており、改質効果を与えたと考えている。

表 17 引張試験結果(PP+GL)

水準	標準 PP	PP-①	PP-②	PP-③	PP-④
ベースポリマー	PP	PP+GL20	PP+GL20	PP+GL20	PP+GL20
添加剤	樹脂種類	-	-	PP	PE
	添加量(phr)	-	-	0.5	0.5
引張	強度(MPa)	20.2	18.5	18.5	17.1
	伸び(%)	338	140	140	110

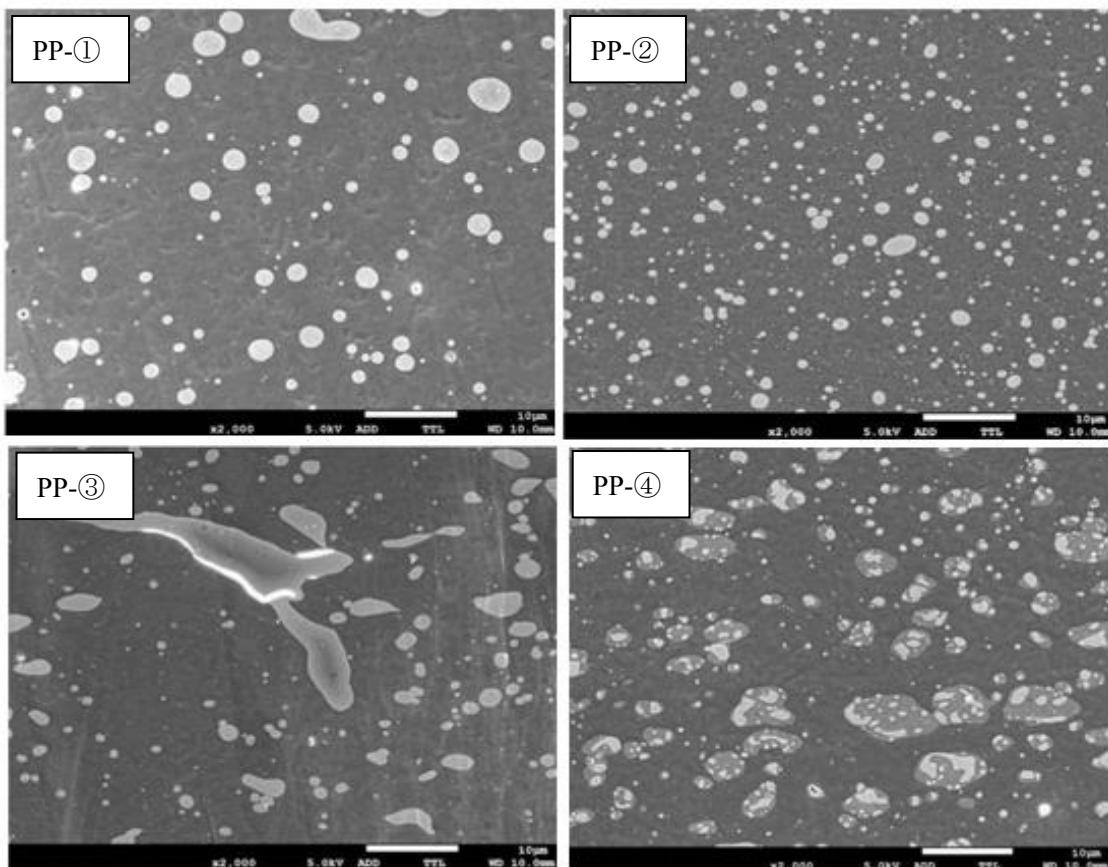


図 11 モルフォロジー観察(PP+GL)

(3) まとめと課題

PA6(非強化)とGLの相性は良好であり、GLを配合させることで強度向上が確認できた。

PP+GLでは、分散性が悪く引張物性が低下した。改善のため添加剤を添加した場合、高分散により、引張強度の改善傾向が見られたが、伸び性能の改善はみられなかった。伸び性能を改善するため、添加剤を使用すると、伸びが大幅改善した。今後は、強度と伸びの両立について検討する。

最後に、本検討のように各種樹脂に他成分を混合するプラスチックにおいては、リサイクル性についても確認する必要があると考える。MRを想定した繰り返し使用時の物性変化を今後確認する予定である。また、CRへの影響についても確認する必要がある。

2.3 自動車用途プラスチックの環境配慮設計に向けた検討

2.3.1 目的

スプレー塗装が施される自動車部品、特にプラスチック部品に対して、剥離性のある加飾フィルムを用いてスプレー塗装を代替できれば、バンパー等のプラスチックのリサイクル性の向上と、自動車塗装プロセスにおける脱炭素化の同時実現ができ、自動車の環境配慮設計の推進が期待される。本項では、加飾フィルムの施工による塗装代替を高度化するため、バイオポリウレタンを用いた加飾向けの素材開発、加飾フィルムの製膜技術及び加飾フィルムと被着体を速やかに分離するための易剥離接着技術の開発を進め、剥離性のある加飾フィルムの基本設計を行うことを目的とする。さらに、その基本設計に適合した印刷層・接着層に対して使用可能なバイオマス度の高い材料技術を開発すること。それらを踏まえ、剥離性のあるバイオマス加飾フィルムの性能を評価し、社会実装に向けた計画を作成することを目指す。

令和6年度は、フィルムの基礎素材となるバイオポリウレタンのラボスケールでの合成と製膜試験を進めるとともに、加飾フィルムを成立させる要素技術である易剥離接着技術、印刷プロセス技術、バイオポリウレタン等フィルムの加工技術、フィルム剥離技術の開発を進めること。また、印刷層・接着層のバイオマス化に向けた技術調査を行うことを目的とした。

2.3.2 自動車用加飾フィルムに向けたバイオポリウレタン素材の開発

(1) 方法

本年度は、加飾フィルムに最適なバイオマス由来の熱可塑性ポリウレタン (Thermoplastic polyurethane : TPU) の分子設計と開発を行った。特に、高い耐候性、耐擦傷性を付与でき、かつ非可食バイオマス由来のポリオール材料を原料の一つに選定して、新たな TPU 樹脂の設計を行った。まず、候補のポリオール材料を用いて TPU 樹脂の合成を試み、得られたサンプルについて種々の基礎物性を測定した。これらの開発品は、2.3.3 の製膜検討及びその性能評価試験に供された。

(2) 結果及び考察

加飾フィルム用途の樹脂に求められる物性（評価の観点）を設定し、種々のポリオール材料の中から、高い屋外耐久性と安定した意匠性（色安定性）が得られると期待される原料ポリオールを種々検討した結果、新たにバイオマス由来の TPU 樹脂を開発した。図 12 に開発した樹脂の外観を、表 18 にその物性をまとめた。

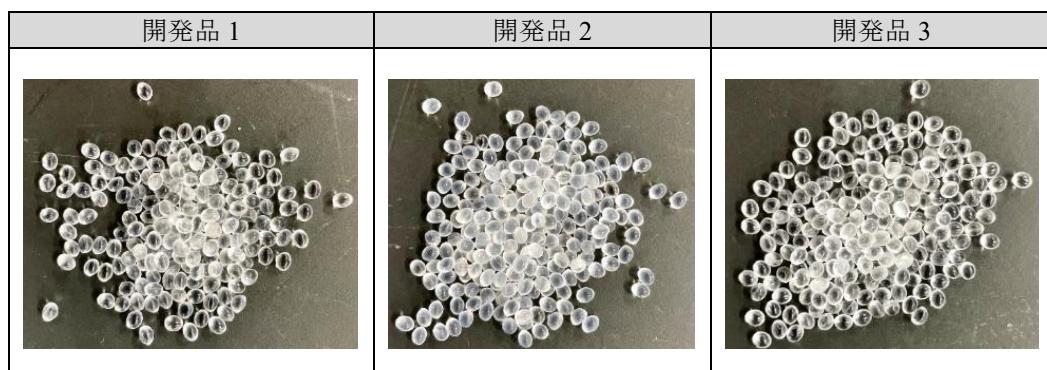


図 12 開発した TPU 樹脂サンプルの外観

表 18 開発した TPU 樹脂サンプルの諸物性

試作品名		開発品 1	開発品 2	開発品 3	評価の観点
設計思想		成形加工性	耐光性	耐光性 タック改善 ¹	
物性	ショア硬度	A90	A90	A94	自己修復性 張付安定性
	MFR (g/10 min) @190°C	1.16	0.89	0.84	成型加工性
	引張強度 (MPa)	81.4	88.7	85.7	耐摩耗性
	伸度 (%)	780	750	760	貼合性
	傷付き試験	傷跡なし	傷跡なし	傷跡なし	耐擦傷性
	Haze (%)	1.07	1.15	2.56	透明性
	YI 値 ² (初期)	0.53	0.52	0.42	屋外耐光性
YI 値 (耐候試験後)		△	○	○	
バイオマス度 (概算値)		50	50	50	

1 粘着フィルムの粘着面の『べたつき』を示す指標

2 フィルムの色相が無色又は白色から黄方向に離れる度合い。黄色度は通常はプラス値であり、マイナスの値は色相が青であることを示す。

2.3.3 自動車用加飾フィルムに向けたバイオポリウレタンフィルムの製膜技術の開発

(1) 方法

令和 6 年度は、2.3.2 において開発した TPU 樹脂を用いて、ラボスケールでの自動車用塗装レス加飾フィルムの基材となるクリアフィルムの開発に取り組んだ。特に、透明性、耐候性、耐擦傷性に優れるフィルムを製造可能と目されるバイオマス由来 TPU 樹脂開発品が、クリアフィルムに求められる製膜性、二次加工性、印刷性を発揮しうるかを評価するため、ラボスケールでの製膜試作、添加剤処方、多層製膜及び各種基本物性評価などを行った。

(2) 結果

① 製膜方法の検討

押出機として $\phi 40\text{ mm}$ 同方向二軸押出機を用い、シリンダー、口金温度 200°C、押出量約 4.5 kg/h で TPU 樹脂の製膜を検討した。原料として使用した TPU はタック性 (粘着フィルムのべたつき) が強く、製膜した巻き取った際にフィルム同士が密着してしまい剥離することができなくなる。そこで、離型フィルムとして PET セパレーターを使用し、口金から溶融状態で押し出した TPU フィルムと貼り合わせることでフィルム同士が密着することなく巻き取ることができた。(図 13、表 19)

② 添加剤処方の検討

TPU フィルムはタック性が強く、印刷性評価において巻き出し・搬送不良が発生し、印刷することができなかつた。そこで、TPU フィルムのタックを抑制するため、滑性を向上させる添加剤の配合を検討した。結果として、添加剤 B を用いた場合に巻き出し・搬送不良を改善することができ、かつインキ見切りも発生させることなく良好な印刷性を確認した。しかしながら、印刷後の搬送工程においてインキ層にクラックの発生が見られた。



図 13 製膜の様子

表 19 評価サンプル一覧

No.	TPU 原料			TPU フィルム		PET セパレーター		インキ密着層	
	グレード	硬度 ¹	添加剤	厚さ/ μm	添加剤	厚さ/ μm	離型処理	材料	厚さ/ μm
1	開発品 2	A90	A	150	有	125	無		
2	開発品 3	A94	A	150	無	125	無		
3	開発品 3	A94	A	150	無	50	無		
4	開発品 3	A94	A	150	有	125	無		
5	開発品 1	A90	B	密着層合わせ 計 150	無	125	無	非晶性樹脂 C	小
6	開発品 1	A90	B	密着層合わせ 計 150	無	無		非晶性樹脂 C	小
7	開発品 1	A90	B	密着層合わせ 計 150	無	125	無	非晶性樹脂 C	小
8	開発品 1	A90	B	密着層合わせ 計 150	無	125	無	非晶性樹脂 C	中
9	開発品 1	A90	B	密着層合わせ 計 150	無	無		非晶性樹脂 C	中
10	開発品 1	A90	B	密着層合わせ 計 150	無	125	無	非晶性樹脂 C	中
11	開発品 1	A90	B	密着層合わせ 計 300	無	125	無	非晶性樹脂 C	大
12	開発品 1	A90	B	密着層合わせ 計 150	無	125	無	非晶性樹脂 D	小
13	開発品 1	A90	B	密着層合わせ 計 150	無	125	無	非晶性樹脂 D	小
14	開発品 1	A90	B	密着層合わせ 計 150	無	125	無	非晶性樹脂 D	中
15	開発品 1	A90	B	密着層合わせ 計 150	無	125	無	非晶性樹脂 D	中
16	開発品 1	A90	B	密着層合わせ 計 300	無	125	無	非晶性樹脂 D	大

1 ショア A 硬度…ポリマーにおけるエラストマ－性の指標の一つ。一般的に値が大きくなるほど硬く、高反発性（例：ゴルフボール）になり、値が小さいほど柔らかく、低反発性（例：こんにゃく）になる。

③ 多層フィルムの検討

インキ層のクラックがフィルムとインキの密着性に影響されることがわかったため、インキの密着性を向上させるため、インキ密着性を有する層を設定した多層化を検討した。その結果、インキ密着層として非晶性樹脂 C または D を使用することで印刷後の搬送工程においてもインキ層にクラックを発生させないフィルムが得られた。

(3) まとめと課題

今年度の成果のまとめとして、印刷性に優れるクリアフィルムを開発することができた。特に、TPU層にインキ密着層として非晶性樹脂 C または D を用い、多層化することで、印刷性に優れるクリアフィルムの開発に繋がった。本樹脂は透明性、耐候性、耐久性にも優れるため、自動車向け加飾フィルム基材としての利用が期待できる。次年度は、現状の課題である防汚性（水性/油性）の改良検討、および、加飾フィルムとしての成形性を評価すると共に、製膜設備のスケールアップを検討する。

2.3.4 バイオポリウレタンを活用した粘着剤の開発

(1) 方法

2.3.2、2.3.3 で開発する加飾フィルムのリサイクル性の向上と、加飾フィルム全体のモノマテリアル化を志向し、フィルムの基材と同系統のウレタン系素材を用いた加飾フィルム向けの粘着剤を開発する。本年度はウレタン粘着剤のプロトタイプを試作し、その塗装代替フィルム用粘着剤としての実力把握と課題抽出を行い、次年度以降の開発方向性を定めた。

(2) 結果と考察

① ウレタンプレポリマーの開発

ウレタン粘着剤は過去検討に従い、構造が異なる 2 種類の特殊ポリオールを用いてイソシアネートと反応させ分子量約 2 万のウレタンプレポリマー 2 種類を合成し、架橋させて粘着剤とした。（表 20）

表 20 ウレタンプレポリマーの合成

品番	粘着力	原料組成			プレポリマー分子量		
		ポリオール	イソシアネート	NCO/OH ²	Mn	Mw	Mw/Mn
開発品 1	中 粘着	特 殊 ポ リ オール 1	メチレンジイソシアネート (MDI)	0.833	21,690	39,839	1.84
開発品 2	強 粘着	特 殊 ポ リ オール 2	メチレンジイソシアネート (MDI)	0.833	19,752	38,086	1.93

1 所定量のPEPCD と MDI を固形分 60%でメチルエチルケトンに溶解し、ジラウリン酸ジブチルスズを 20 ppm 添加して 80°Cで反応させる。サンプリングを行い NCO 量を測定し、NCO 量が計算値以下になら反応終了とし、冷却してウレタンプレポリマーを得た。

2 MDI と PEPCD の末端 OH 基の比率

② 対自動車塗装板に対する粘着剤の評価

試作したウレタン系粘着剤の初期の粘着物性として、SUS 板及び対自動車塗装板に対する粘着剤の評価を行った（図 14、図 15）。なお、塗装代替フィルムは市販品がないため、求められる性能が類似と推定されるペイントプロテクションフィルム（PPF）の市場品を入手し、粘着剤組成を分析のうえ、類似組成のアクリル系粘着剤を比較対象とした。

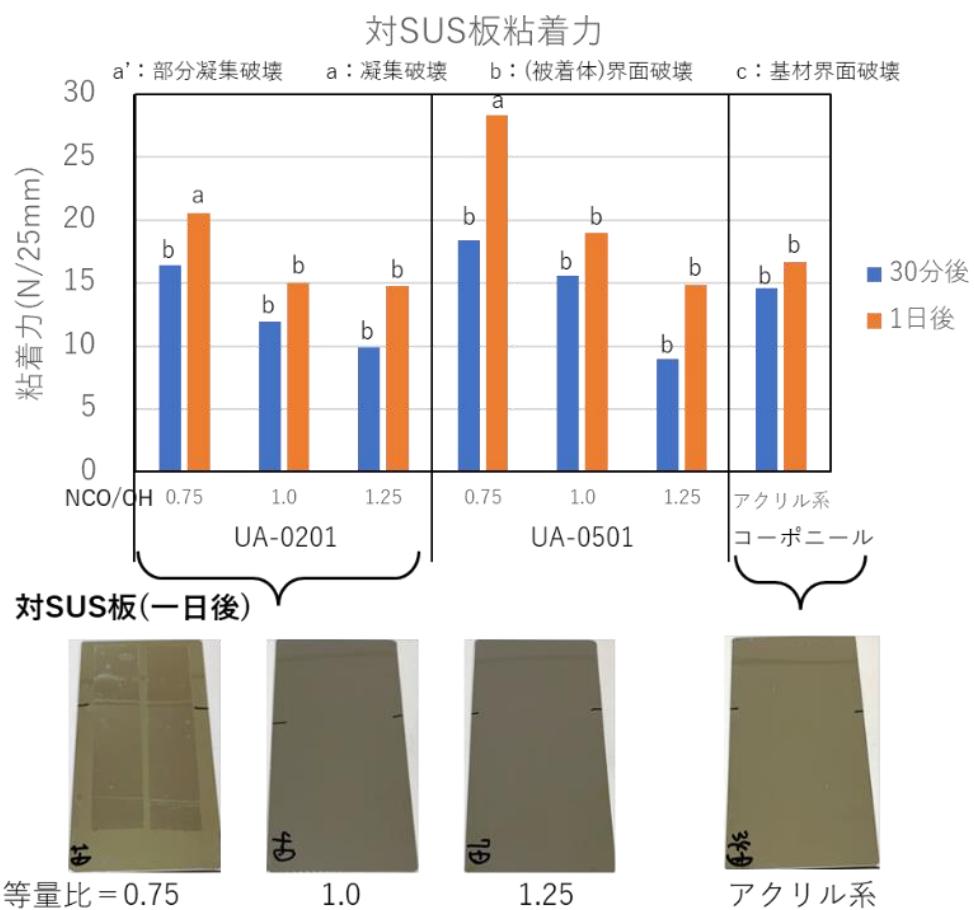


図 14 対SUS板粘着力(30分後と1日後)と外観

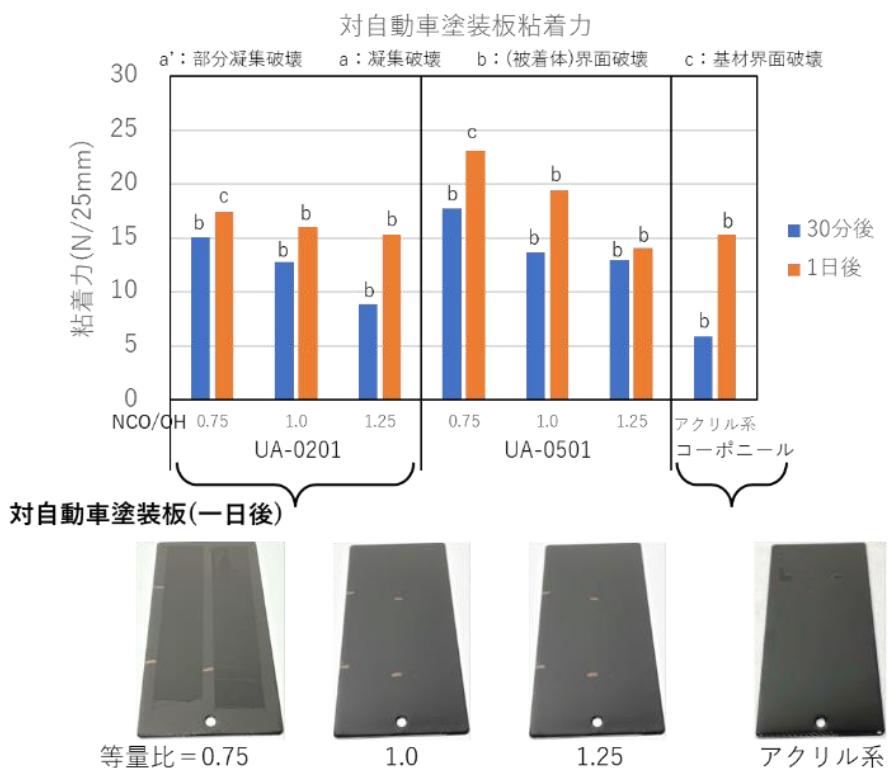


図 15 対自動車塗装板粘着力(30分後と1日後)と外観

特殊ポリオールとイソシアネートを用いて合成したウレタンプレポリマー2種について、架橋剤の添加量を変えた配合で新規のウレタン系粘着剤を試作し、粘着性の評価を実施した。初期粘着性能についてはプロトタイプのウレタン粘着剤は架橋剤の添加量を1:1以上にすることでアクリル系粘着剤と同等の粘着性・剥離性(界面剥離)となることが確認できた。

(3)まとめと課題

本年度に評価を行った範囲では、ウレタン系粘着剤のプロトタイプは、ベンチマークのアクリル系粘着剤とほぼ同等性能であることが分かった。

2.3.5 自動車用加飾フィルムに向けた性能評価等の検討

(1) 方法

三菱ケミカル㈱が開発中の耐候性、耐擦傷性に優れ、かつ非可食バイオマス由来の新規な熱可塑性ポリウレタン樹脂(TPU)を用いて、自動車外装用加飾フィルム用途に適用するための、材料物性、信頼性などの性能評価および印刷加工性について検討を実施した。

(1) - 1. 試験装置および方法

1) 促進耐候性試験機

メーカー：スガ試験機㈱ 名称：スーパークリゼンウェザーメーター、型式：SX75

試験内容：紫外線、熱、水等の複合環境における材料の促進劣化試験

指標：色差(ΔE)、光沢保持率、イエローラインデックス(YI)、目視外観

試験方法

照度180W/m²、ブラックパネル温度63°C、サイクル：照射(連続) + 水スプレー(間欠)

2) 平面摩耗試験機

メーカー：大栄科学精器製作所 名称：平面摩耗試験機、型式：PA-300A

試験内容：表面摩耗による材料の擦傷性試験

指標：曇り度(ヘイズ、Hz)

試験方法

スチールウール#000、荷重：4.9N、摩耗子：□4cm²、摩耗回数：11往復、

往復速度：60回/分

3) 光線透過率測定器

メーカー：スガ試験機㈱、名称：ヘイズメーター、型式：HZ-VE3

試験内容：材料の透明性を評価

指標：全光線透過率(Tt)

試験方法：JIS K 7136に準拠

4) 色差測定器

【透明材】

メーカー：株島津製作所 名称：紫外・可視分光光度計、型式：UV-2450

試験内容：材料の色、変退色、黄色度を評価

指標：色差（ΔE）、イエローインデックス（YI）

試験方法：透過測定、JIS K 8722、JIS K 7373 に準拠

【非透明材】

メーカー：コニカミノルタ株 名称：分光測色計、型式：CM-700d

試験内容：材料の色、変退色を評価

指標：色差（ΔE）

試験方法：反射測定、JIS K 8722 に準拠

5) 光沢計

メーカー：コニカミノルタ株 名称：光沢計、型式：GM-268A

試験内容：材料表面の光沢度を評価

指標：60° グロス

試験方法：JIS Z 8741 に準拠

(1) - 2. フィルム加工設備

1) 熱転写印刷機

フィルムなどの被着体に対し、印刷ヘッドで CMYK カラーインクリボンを熱転写する方式の印刷機を使用した。外観を図 16 に示す。今回選定したポイントは、自動車部品用途への適用を見据えた場合、少量多種の加工に対応でき、柄印刷およびカラー表現の自由度が高い印刷システムであることと、溶剤を使用しないため、設置場所が限定されないことが挙げられる。

メーカー：株SGJ、名称：マイクロドライ印刷加飾システム 型式：MDD7H

ヘッド解像度：600×600dpi、印刷速度：1inch/秒

インクリボン：株SGJ 製（C：シアン、M：マゼンタ、Y：イエロー、K：ブラック、W：ホワイト、

In：フラッシュシルバー、Pr：易接着プライマー）

印刷積層構成：

赤部：ベースフィルム／Y／M／W／In／K／K／Pr

黒部：ベースフィルム／K／K／Pr

ミラー：ベースフィルム／In／K／K／Pr



図 16 熱転写印刷機

2) フィルム成形機

自動車部品への適用を想定し、立体形状の成形体へのフィルム貼合を得意とする 3 次元表面被覆工法 (TOM : Three dimension Overlay Method) を選定した。フィルムを加熱し、軟化させた状態で、加圧することによって基材にフィルムを密着させる貼合方法であり、特殊な金型を必要とせず、樹脂成形体に直接、フィルム貼合が可能である。近年、自動車大型外装部品を対象とした加飾技術検討も盛んに行われている。

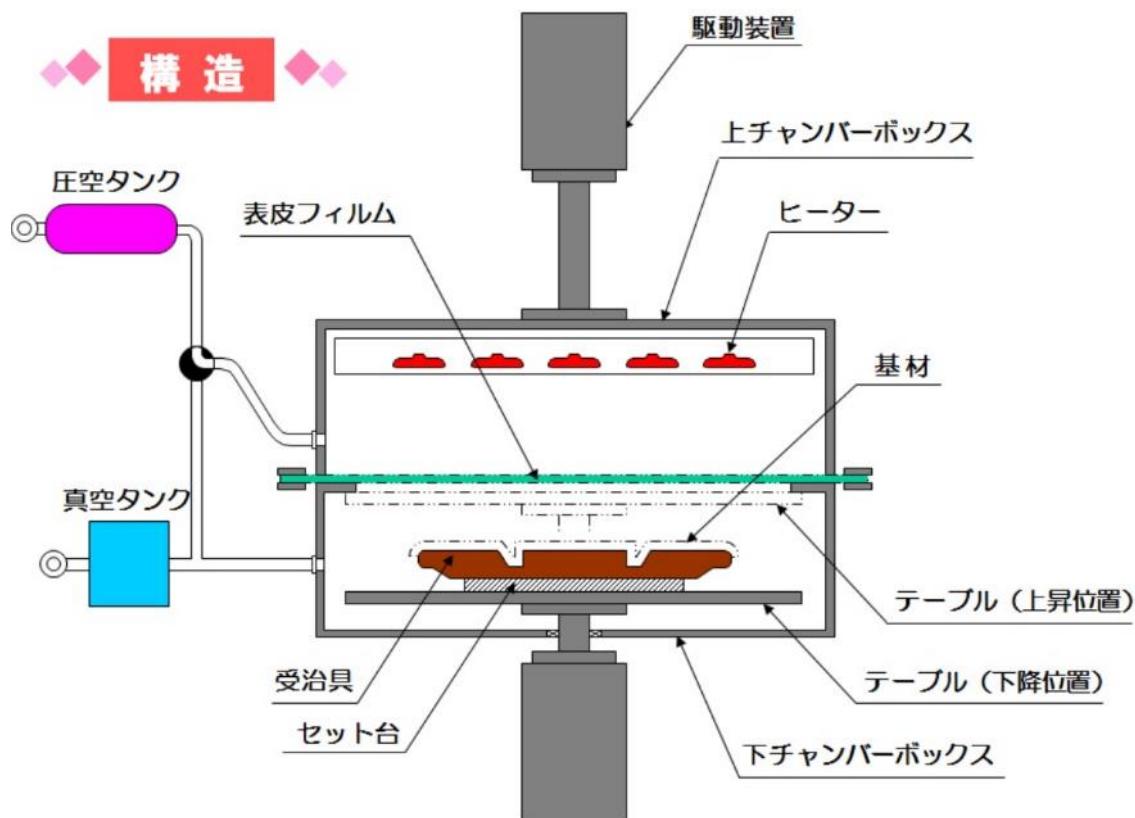


図 17 TOM 工法の装置概要 ※布施真空(株)HP より引用

(2) 結果

(2) - 1. バイオ TPU フィルムの物性評価

【評価サンプル】

開発品：三菱ケミカル㈱製 バイオ TPU フィルム (バイオマス度 (概算値) : 50%)

比較品：A 社製 高耐候性無黄変 TPU フィルム (バイオマス度 : 0%)

B 社製 ペイントプロテクションフィルム (グロスタイル)

C 社製 ペイントプロテクションフィルム (グロスタイル)

【評価結果】

上記フィルムサンプルを用いて、初期外観評価として透過率、ヘイズ、YI を測定し、さらに自動車外装用途での使用を想定した耐擦傷性と促進耐候性の 2 項目の試験を実施した。結果については表 21

の通りである。

表 21 バイオ TPU フィルムの物性評価結果

評価項目	単位	判定基準	開発品		比較品					
			TPU		TPU		ペイントプロテクションフィルム			
			三菱ケミカル社製	判定	A社製	判定	B社製	判定	C社製	判定
フィルム厚み	μm	—	150	—	150	—	約200	—	約200	—
バイオマス度	%	—	50	—	0	—	0	—	0	—
初期	全光線透過率	%	85以上	93	○	92	○	91	○	90
	ヘイズ	%	—	4.8	—	1.1	—	26.2	—	12.2
耐擦傷性	YI	—	—	0.8	—	0.2	—	1.8	—	1.4
	ヘイズ	%	—	7.3	—	2.2	—	35.7	—	16.2
	変化量 (ΔHz)	%	3以下	2.5	○	1.1	○	9.6	×	4.0
	色差	—	3以下	0.5	○	0.1	○	1.0	○	0.2
促進耐候性 Xenon500MJ	光沢保持率	%	80以上	98	○	92	○	100	○	82
	ΔYI	—	3以下	0.3	○	0.4	○	0.0	○	0.2
	外観	—	—	異常なし	○	異常なし	○	異常なし	○	異常なし
										○

三菱ケミカル株のバイオ TPU 開発品は、フィルム材料単体において、目標とする透過率、耐擦傷性、促進耐候性の値を満足することを確認した。本検討において比較品として用いたサンプルと見比べても遜色ない結果であることから、自動車外装用途に使用されるペイントプロテクションフィルムのベースフィルムとしての基本性能を有していることが分かった。

(2) - 2 防汚コーティング技術

市販のプロテクションフィルムには、表面を保護するためのコーティングが施されている。目的は TPU 樹脂の環境劣化の防止と表面に付着した汚れの沈着を抑制するためである。三菱ケミカル株提供のバイオ TPU 開発品においても汚れが沈着することが確認されており、自動車外装用途で使用する場合、汚れを防止するコーティングの施工が必須であると言える。本検討では防汚性を評価するため、以下の 2 つの方法で試験を実施した。

1) 水性汚れ (煤煙)

市販のカーボンブラック (粒径: 90~200 μm) に水を加えることでペースト状の試薬を調製し、サンプル表面に塗り広げ、70°C に設定した恒温槽で 1 時間放置する。恒温槽から取り出し、自然放冷した後、汚れ物質を拭き取り、中性洗剤を用いてサンプル表面を洗浄する。ウエスを用いて表面を軽くするように水分を拭き取り、外観の汚れ沈着状態を目視にて観察した。

2) 油性汚れ (マジック)

ゼブラ製マッキー黒 細字で表面に線を書き、中性洗剤を用いてサンプル表面を洗浄した後に、ウエスを用いて表面を軽くするように水分を拭き取り、外観の汚れ沈着状態を目視にて観察した。



表 22 汚れ沈着状態のランク

ランク	結果
1	汚れが落ちない
2	拭けばやや落ちる
3	拭けば目立たない
4	拭けば落ちる
5	汚れが付かない

図 18 バイオ TPU フィルム単体の防汚試験後の外観（ランク 1）

【評価サンプル】

開発品

TPU フィルム：三菱ケミカル(株)製バイオ TPU フィルム開発品（バイオマス度（概算値）：50%）

コーティング：三菱ケミカル(株)製 LAF011 開発品

D 社製 ペイントプロテクションフィルム用防汚コート

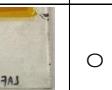
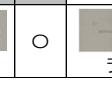
比較品：A 社製 ペイントプロテクションフィルム（グロスタイル[®]）

B 社製 ペイントプロテクションフィルム（グロスタイル[®]）

【評価結果】

上記フィルムサンプルを用いて、防汚性評価を実施した。また、(2) - 1 と同様に、初期外観評価として透過率、ヘイズ、YI を行い、耐擦傷性、促進耐候性に対する影響についても試験を実施した。結果については表 23 の通りである。

表 23 防汚コーティングの物性評価結果

評価項目	単位	判定基準	開発品						比較品			
			バイオTPU単体		バイオTPU開発品+コーティング		D社コーティング		A社		B社	
			バイオTPU	判定	コーティング	バイオTPU	コーティング	バイオTPU	コーティング	TPU	コーティング	TPU
					判定	判定	判定	判定	粘着層	判定	粘着層	判定
全光線透過率	%	85以上	93	○	92	○	92	○	91	○	90	○
耐擦傷性	ヘイズ	%	—	7.3	—	3.2	—	15.4	—	35.7	—	16.2
	ΔHz	%	3以下	2.5	○	2.2	○	14.7	×	9.6	×	4.0
促進耐候性 Xenon500MJ	色差	—	3以下	0.5	○	0.4	○	0.5	○	1.0	○	0.2
	光沢保持率	%	80以上	98	○	100	○	95	○	100	○	82
	ΔYI	—	3以下	0.25	○	0.2	○	0.6	○	0.0	○	0.2
	外観	—	—	異常なし	—	異常なし	—	異常なし	—	異常なし	—	異常なし
防汚性	水性汚れ (煤煙)	外観	—	比較品と 同等以上	 ランク1	×	 ランク4	○	 ランク4	○	 ランク4	—
	油性汚れ (マジック)	外観	—	比較品と 同等以上	 ランク1	○	 ランク3	○	 ランク3	○	 ランク1	—

三菱ケミカル株のバイオTPU開発品にコーティングを施工することにより、水性および油性汚れを防止することが可能であり、バイオTPU材料が有する透明性、耐擦傷性および促進耐候性などの機能を阻害しないことを示唆する結果が得られた。

(2) - 3 少量多品種に対応した印刷技術

従来のスプレー塗装を加飾フィルムで代替するためには、エンドユーザーの多様性、嗜好性に合わせ、カラーや意匠のラインアップが必要となる。市場ニーズやトレンドへの迅速な対応や在庫を最小化することが求められる中で、本検討では、上述の熱転写印刷機を用いて、バイオTPUフィルムへの印刷加工性を検討するとともに、市販のインクリボンを活用し、印刷層の品質面における課題について検討を実施した。結果を表24に示す。

表 24 热転写印刷加工の結果

△	バイオTPU				PETセパレーター		評価結果		
	グレード	硬度 ¹	膜厚(μm)	添加剤	膜厚(μm)	離型処理	RtoR搬送性	印刷外観	
								ミキリ	クラック
検討①	開発品3	A94	150	—	—	—	×	—	—
検討②		A94		—	50	無	○	×	×
検討③		A90		B	50		○	○	×
検討④		A90		B	125		○	○	×

1 ショアA硬度…ポリマーにおけるエラストマー性の指標の一つ。一般的に値が大きくなるほど硬く、高反発性（例：ゴルフボール）になり、値が小さいほど柔らかく、低反発性（例：こんにゃく）になる。



図 19 ミキリ NG 外観



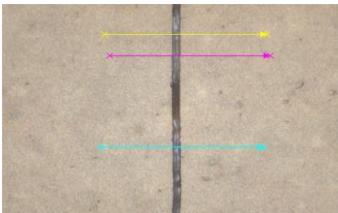
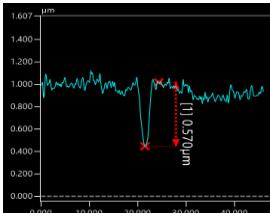
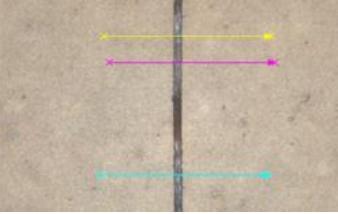
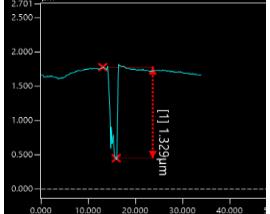
図 20 クラック NG 外観

バイオTPUフィルムは表面にタック性があるため、印刷ヘッドで熱転写した際に、非印刷部のフィルムにもインクリボンが接触し、フィルム側にインクが転写されてしまう。そこで、バイオTPUフィルムにシリコーン系の滑剤を添加し、タック性を低減させることにより、ミキリ品質を改善することを確認

した。また、クラック対策については、バイオTPUフィルムの剛性および搬送時のフィルム延伸を抑えるためバイオTPUフィルムの背面（印刷面の反対側）にPETフィルムを貼り合わせたが、クラックの改善効果は確認できなかった。

印刷層のクラックを微視的に観察するため、光学顕微鏡とレーザー顕微鏡を用いて解析を実施した。結果を表25に示す。

表25 クラック観察および深度解析結果

観察手法	表面観察画像	段差解析	クラック深さ（μm） ※N=3平均値	狙いの 印刷膜厚（μm）
光学顕微鏡 3600倍			0.68	1~2
レーザー顕微鏡 3600倍			1.35	

光学顕微鏡とレーザー顕微鏡ではクラック深度の解析結果に相異が見られた。また、レーザー顕微鏡で得られたクラック深さと狙いの印刷膜厚の値が一致しており、印刷層の深さ方向かつバイオTPUフィルム表面に至るまでクラックが進展していることが分かった。観察手法の違いによる解析結果の相異については、測定原理に由来するところが大きく、検体に対し、光を均一に照射する光学顕微鏡に比べ、レーザー顕微鏡は短波長で直進性の高いレーザー光を照射するため、クラックの深さ方向まで光が散乱することなく、深さ方向の情報に対し、より精度よく測定できているものと推察している。

（2）－4 TPUの印刷加工性を確保するための2層押出フィルム化

クラック発生に対する原因調査として、フィルム材質の違いによる影響を確認した。結果を表26に示す。

表26 フィルム材質違いによる印刷加工性検討結果

△	被着体（フィルム）					PETセパレーター		評価結果		
	材質	グレード	硬度 ¹	膜厚（μm）	添加剤	膜厚（μm）	離型処理	印刷外観		
								RtoR搬送性	ミキリ	クラック
検討①	バイオTPU	開発品1	A90	150	B	50	無	○	○	×
検討②	PET	光学用	—	50	—	50	不明	○	○	○
検討③	PC	光学用	—	250	—	50	不明	○	○	○

1 ショアA硬度…ポリマーにおけるエラストマー性の指標の一つ。一般的に値が大きくなるほど硬く、高反発性（例：ゴルフボール）になり、値が小さいほど柔らかく、低反発性（例：こんにゃく）になる。

クラックはバイオTPUフィルムのみに発生していることから、TPUフィルムの高い柔軟性と印刷機の構造的な要因が起因しているものと推察した。そこで加工中に目視にて注意深く観察したところ、搬送時にガイドローラーに沿ってフィルムが屈曲した際にクラックが発生していることが確認された。熱転写印刷機の印刷加工部の外観とロール to ロール搬送の概略図を図29に示す。

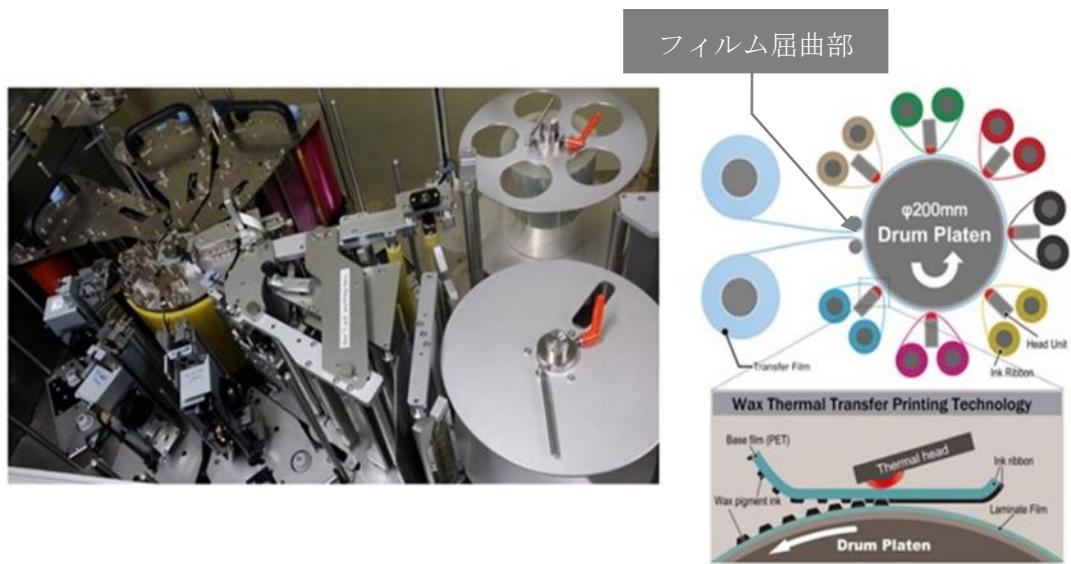


図 21 熱転写印刷機の印刷加工部とロール to ロール搬送の概略図
※株SGJ ホームページより引用

クラック発生のメカニズム検証を目的に、フィルムの屈曲を模擬した構造解析を実施することにより印刷加工性に向けた改善策の方向性を検討した。結果を表 27 に示す。

表 27 構造解析モデルと結果

解析モデル	セパレーター	フィルム		
		TPU (厚み150μm)	PC (厚み150μm)	TPU/PC (厚み100μm/50μm)
インク:~10μm フィルム セパレーター:50, 100μm 	セパレーター	PET (厚み50μm) 		
		PET (厚み100μm) 		

構造解析結果から、TPU フィルムのみをガイドローラーで屈曲させた場合、印刷層に加わる圧縮ひずみにより印刷層に対して応力集中が起こることで、クラックを引き起こしていることが示唆された。特に興味深いのは、TPU と非晶性樹脂 B を積層した 2 層構造にすることにより、非晶性樹脂 B フィルム単体と同等の応力値を示すことが分かった。今回得られた結果に基づき、印刷層のクラック対策に取り組んだので、検討状況を紹介する。

【評価サンプル】

開発品

1層目：三菱ケミカル(株)製バイオTPU フィルム 開発品 (バイオマス度(概算値)：50%)

2層目：非晶性樹脂 C

非晶性樹脂 D

上記サンプルを用いて、熱転写印刷加工検討を実施した結果を表28に示す。

表28 2層押出フィルムを用いた印刷加工性検討結果

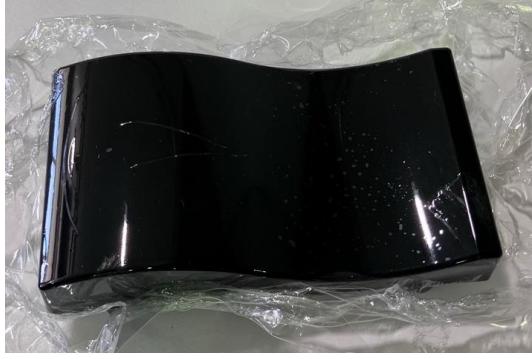
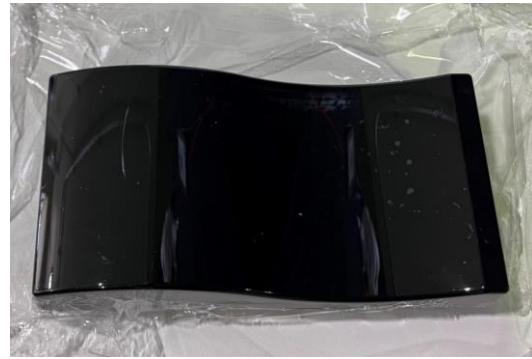
		検討結果		
フィルム構成		TPU/非晶性樹脂C (厚み150μm)	TPU/非晶性樹脂D (厚み150μm)	TPU (厚み150μm)
印刷外観	全体			
	部分拡大			

TPU/非晶性樹脂 C 及び D ともに印刷層にクラックが発生しないことを確認した。

また、TOM成形機を用いて、バイオTPU 単層押出フィルムおよび2層押出フィルム (バイオTPU/非晶性樹脂 C) に対し、課題出しの位置づけとして成形加工性の確認を実施した。結果を表29に示す。

今回用いたフィルム厚み $150\mu\text{m}$ のフィルムに関しては、バイオTPU 単層押出フィルムおよび2層押出フィルムともにTOM成形加工での成形が可能であり、製品形状への追従性も良好であった。ただし、設備へのセット、リセット時の作業性において、TPUフィルムの特徴でもある柔軟性が背反として作業性を悪化させる要因となることが、一つの課題として挙げられる。

表 29 2層押出フィルムのTOM成形加工性検討結果

	検討結果	
	2層押出フィルム TPU/非晶性樹脂C (厚み150μm)	単層押出フィルム TPU (厚み150μm)
フィルム 被着体	ABS樹脂	ABS樹脂
TOM 成形外観		

(2) - 5 易剥離接着によるリサイクル性検討

フィルム剥離技術の開発に当たり、剥離後に粘着／接着層やフィルム素材自体の残渣が樹脂素材自体のリサイクル性に及ぼす影響を検証し、不純物をどれだけ除くかという観点での剥離プロセスの必要精度を検討した。

また、その結果を考慮した上で、粘着／接着層候補材料、及び剥離プロセス候補の選定を実施した。

① 方法

バージンのPP系樹脂100重量部に対し、粘着剤（PP系、アクリル系）を表30に示す重量部で添加し混練した上で、ダンベル形状に成形し、引張試験を実施した。試験データより引張降伏応力、引張降伏ひずみ、弾性率を算出し比較を実施した。今回、接着剤を混練する水準については、混練時の熱、せん断による物性低下を考慮し、リファレンスとしてPP樹脂単体での混練加工品とも比較を行った（水準No.8）。

バージンのPP系樹脂とフィルム付リサイクルPP系樹脂の粉碎品を表31に示す重量比で混練した上で、ダンベル形状に成形し、引張試験を実施した。試験データより引張降伏応力、引張破断伸び、引張破断ひずみ、弾性率を算出し比較を実施した。リファレンスとしてPP樹脂単体での混練り加工品とも比較を行った（水準No.15）。

表30 粘着材等の残渣による影響検討水準

No.	ベース樹脂	接着剤	添加量(重量部)	混練加工	射出成型	試験片
1	PP	PP系A	5	小型混練機	小型射出成型機	JIS K 7162-1BA
2			10			
3			20			
4		PP系B	5			
5			10			
6			20			
7		アクリル系C	10			
8(Ref.)						

表 31 加飾フィルム残渣による影響検討水準

No.	ベース樹脂 (A)	リサイクル樹脂 (B)	混合比 (A : B)	混練加工	射出成型	試験片
9	PP	PPフィルム付 リサイクルPP	99.5 : 0.5	混練機	80t射出成型機	ISOダンベル (タイプA1)
10			97.5 : 2.5			
11			50 : 50			
12		PC/PMMAフィルム付 リサイクルPP	99.5 : 0.5			
13			97.5 : 2.5			
14			50 : 50			
15(Ref.)						

検討設備

1) 小型混練機

メーカー : Xplore Instruments 社 名称 : Micro Compounder、型式 : MC 15 HT



2) 小型射出成型機

メーカー : Xplore Instruments 社 名称 : 小型射出成型機、型式 : IM 12

ダンベル形状 : JIS K 7162-1BA に準拠

図 22 小型混練機

※メーカーHP より引用

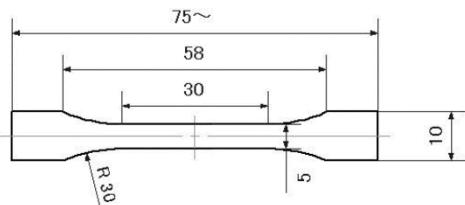


図 23 測定試験片の形状



図 24 小型射出成型機

※メーカーHP より引用

3) 混練機

メーカー : (株)日本製鋼所 名称 : 二軸スクリュー押出機、型式 : TEX30 α -45.5BW-3V

4) 粉碎機

メーカー : ホロン精工(株) 名称 : COMPACK、型式 : MC250-7

5) 80t 射出成型機

メーカー : 日精樹脂工業(株) 名称 : 電気式高機能射出成型機、型式 : NEX80III-12EG

ダンベル形状 : ISO ダンベル (タイプ A1)

6) 引張試験機

メーカー : (株)島津製作所、名称 : オートグラフ、型式 : AGS-10kNX

規格 : JIS K 7161-1 に準拠

② 結果

表 30 (接着剤の残渣) の試験水準の引張試験結果より、引張降伏応力、引張降伏ひずみ、引張弾性率を算出し、比較した結果を図 25 に示す。

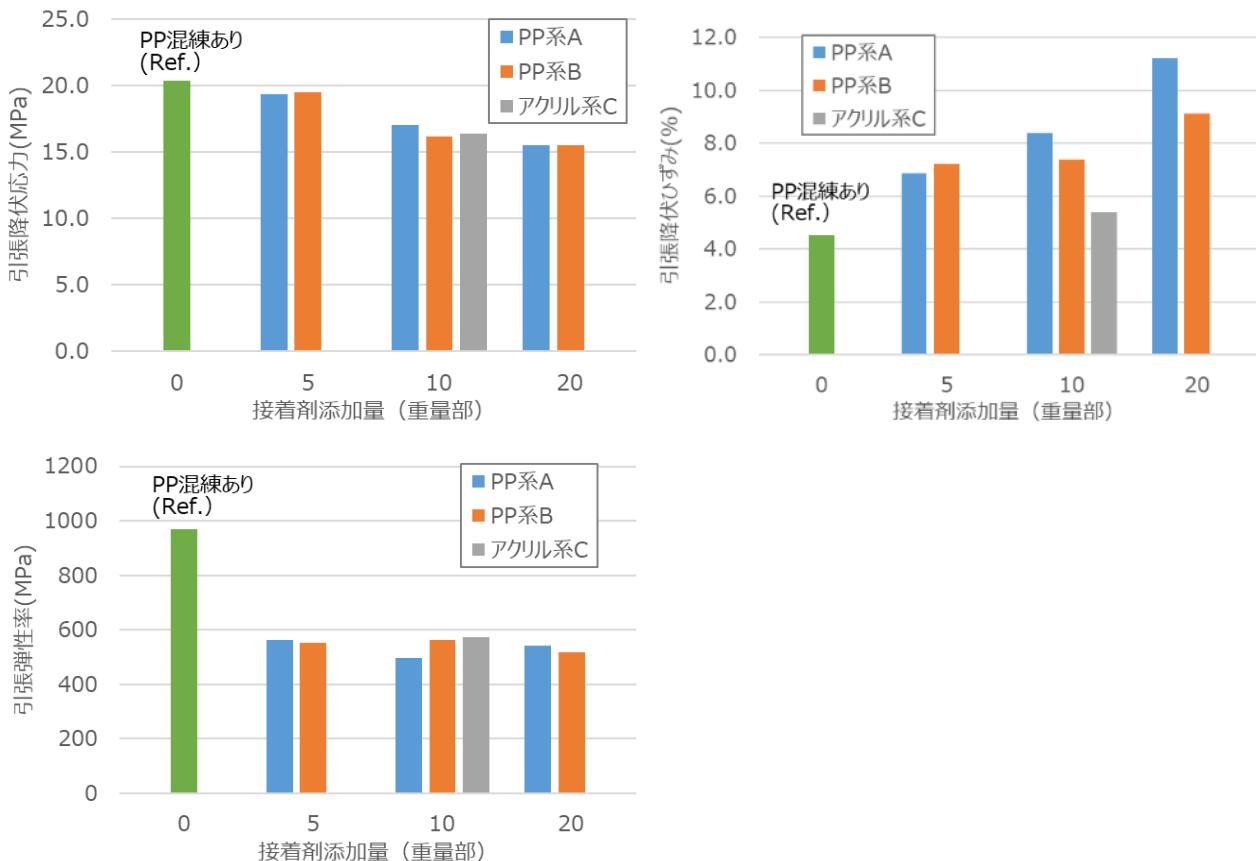


図 25 引張試験結果 (引張降伏応力、引張降伏ひずみ、弾性率)

オレフィン系およびアクリル系接着剤の材質に関わらず、添加量が増加するに従い、引張降伏応力は線形上に低下する傾向を確認した。引張降伏ひずみは、添加量の増加に従い、ひずみが増加する傾向を確認した。弾性率については接着剤添加により低下が見られたが、接着剤の材質および添加量による有意な差は確認できなかった。今回検討では、モデルケースとして 5 重量部以上の残渣が混入することを前提に検討を実施したが、リサイクル性を考慮した場合、極力残渣を低減させること、あるいは混入しても樹脂素材の物性に影響を与えるにくい接着剤設計が必要であることが分かった。引き続き、課題解決に向けた材料調査および技術開発を進める。

表 31 (加飾フィルム残渣) の試験水準の引張試験結果より、引張降伏応力、引張破断ひずみ、引張破断応力、引張弾性率を算出し、比較した結果を図 26 に示す。

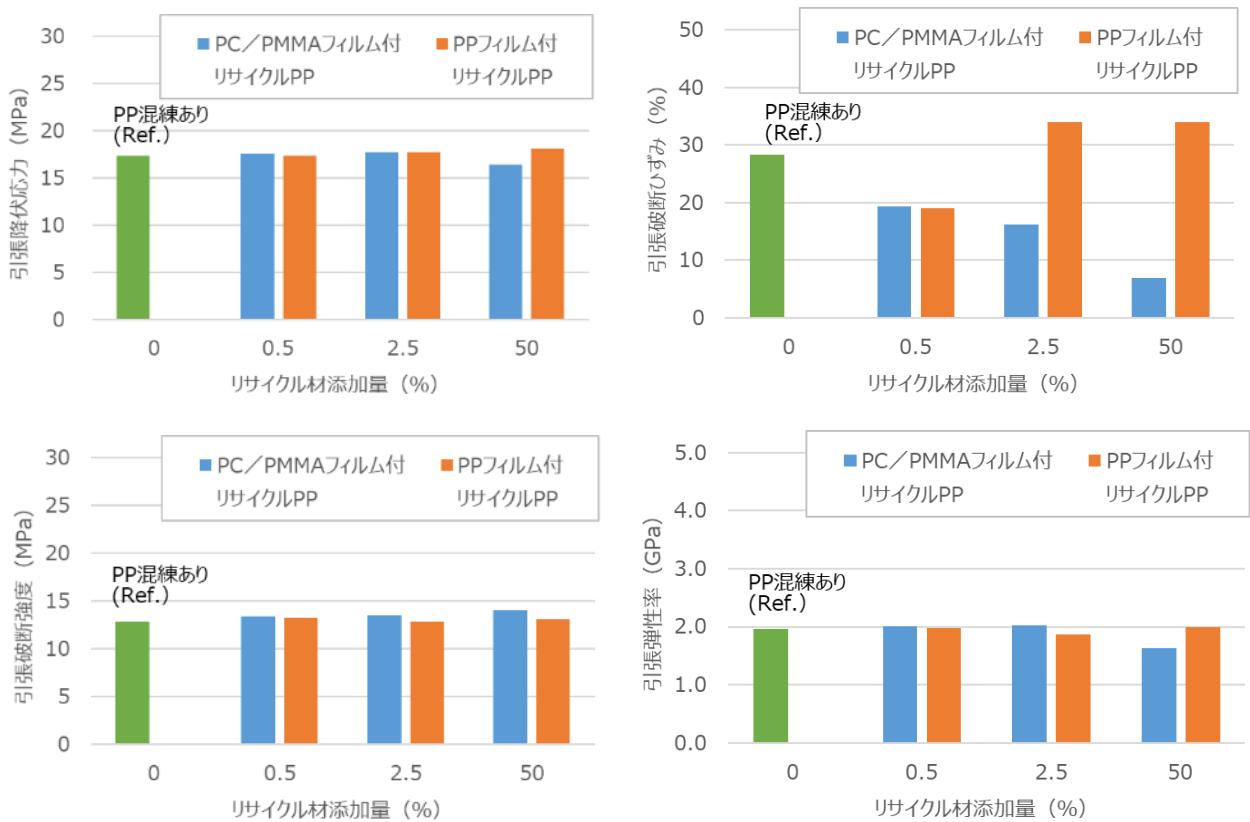


図 26 引張試験結果 (引張降伏応力、引張破断ひずみ、引張破断応力、引張弾性率)

PC/PMMA フィルム付リサイクル PP 系樹脂を 50%混ぜ込むことで、引張降伏応力および引張弾性率が低下する傾向を確認した。一方で、PP フィルム付リサイクル PP 系樹脂の場合は、50%の混ぜ込みにおいても特に顕著な物性低下は確認されなかった。これは PP フィルムが前述の粘着剤と比べて分子量や T_g 点が高く、加飾基材となる PP 系樹脂と物性面で類似するため、混練加工において各々が相溶することにより、物性低下が抑制されたものと推察される。

また、フィルム剥離プロセスについて、比較的に低エネルギーで実施可能なプロセスとして、a) 水熱(亜臨界)処理、及び b) 超臨界処理の 2 種類のプロセスを有力候補として選定し、今後技術検証を継続していく。

a) 水熱(亜臨界)処理

圧力 22.1 MPa、温度 374°C で液体と気体の密度が等しくなる臨界点を下回る領域である亜臨界領域の水を用いる水熱処理で、大きな分解力を持ち、有機物との親和性が高い特徴があり、有機物を分解したり溶かすことが得意なプロセスであることから、PP 等樹脂基材／粘着材等間の剥離を助長する可能性があると考えている。

b) 超臨界処理

臨界点を超えた超臨界 CO₂ 等を用いた物理発泡によるプロセスで、金属と樹脂の界面を分解させ、接合強度を低下させる事例が発表されている。

樹脂基材に対する加飾フィルムのように、樹脂ー樹脂間の界面に対して物理発泡プロセスが適用できるかは課題ではあるが、残渣が極力低減可能な有力なプロセスと考えている。

(2) - 6 インク／粘着剤のバイオマス化に向けた技術調査

インクのバイオマス化を検証するに当たり、自動車のエンドユーザーの行動変容等も含めて、自動車のボディーカラーのトレンドを調査し、バイオマス化を検証するインクカラーの優先度を設定した。また、インク顔料を開発するに当たり、使用後のリサイクル性を鑑み、開発の方向性を検証した。

① 方法

社会的価値観に対して、フォーキャストカラー（インテリア、ファッショントレンドカラーリー予測）と自動車ボディーカラートレンド、家電等他業界のカラーデザイントレンドの相関を2018年から2024年までの期間を対象に検討した上、2030年トレンドカラーを予測した。

② 結果

フォーキャストカラーは社会的価値観との相関が高く、インテリア業界カラートレンドに大きく寄与している。それに対し、自動車ボディーカラーや家電業界のカラートレンドはインテリア業界のように大きな相関はなく、その世相に合わせたコンセプトや色相の観点で反映されているレベルであった。特に自動車ボディーカラーは対象期間である7年間で確固たるカラーシェア比率が存在しており、ホワイト系、ブラック系、グレー系、ブルー系のシェア上位色で大勢を占めている。

なお、家電業界、特に携帯電話/スマートフォンのカラーシェアは自動車ボディーカラーに比べ、シェア変動が大きい傾向がある。これは家電に比べ自動車のライフサイクルが長く、トレンドに依らないボディーカラーを選択する傾向があるからだと推測する。

この結果を踏まえ、ホワイト系・ブラック系・グレー系・ブルー系の2030年トレンドカラーを予測した。その中でブルー系カラー2色（「使用」想定と「所有」想定）を優先度の高いカラーと選定した。ブルー系を選定した理由として、無彩色に対して有彩色の方が色相調整が難しく、ブルー系の顔料発色が難しい現状を踏まえて選定した。

また、インク顔料を開発するに当たり、使用後のリサイクル性、特にカラーの観点で調査した。

具体的には自動車内装部品に対して、自動車内装部品の樹脂材の6～7割が淡色や無着色（ナチュラル色）であり、ほぼ黒色材となるリサイクル材で置き換えることが厳密にはできないことがわかった。

現状の脱色技術については大掛かりなケミカル処理が必要であり、現状リサイクルが大きな付加価値に転換できる容器パッケージ業界向けへの供給がメインとなり、自動車業界への供給については限定的な供給になる予測である。

その状況を踏まえて、脱色プロセスへの負荷の高い有機顔料ではなく、構造発色の無機顔料に着目し、無着色材に戻しやすくする易リサイクルの方向性の検証を優先することと判断した。

(2) - 7 塗装代替加飾フィルムの社会実装に向けたサプライチェーン調査

本年度は外板塗装代替の加飾フィルムの社会実装に向けた基礎的な情報収集を目的とし、特にフィルムコンバーター（ロール状フィルムにウェットコーティング、ハードコーティング、またはその両方により、基材フィルムとは異なる機能・材質・意匠等を成膜または積層、貼合する加工メーカーを指す）の業界構造とサプライチェーンの現状に焦点を当てた。フィルムコンバーターが多層的に介在していること、また設備産業としての性質が強いことが確認されたことで、今後のコスト構造の検討に向けた課題が明確になった。

本年度の調査結果を踏まえ、今後はコスト構造分析を実施し、外板塗装代替の加飾フィルムの社会実装に向けたバリューチェーン構築可能性の検証、及び設備投資とスケールメリットの試算を実施する。

（3）まとめと課題

今年度の成果のまとめとして、三菱ケミカル製のバイオ TPU フィルムは自動車外装製品をはじめとする長寿命用途での使用に耐えうる基本性能を有していることを確認した。加飾フィルムとして活用する上では、バイオ TPU フィルムへの印刷加飾や保護コーティング、製品形状への貼合などの後加工を伴うため、ベースフィルムに対する印刷、コーティングなどの 1 次加工性および製品に貼り合わせるための賦形、貼合、トリミングなどの 2 次加工性に加え、市場での使われ方を想定した耐久性、リサイクル性まで加味したフィルム積層体の材料設計が必要となる。

カラートレンドを分析することにより、2030 年の自動車業界予測として、リサイクル性を考慮した無機顔料開発の方向性が示唆された。Tier1 の立ち位置において慢性的な課題であるフィルムに対して、コスト構造分析とリーズナブルなバリューチェーン構築の可能性を検証していく。

2.4 事業 1 の成果の要点

「事業 1：長寿命用途バイオマスプラスチックの導入拡大に向けた素材開発」では、ソルガム由来エタノールには、不純物としてエチレンやアルデヒドなどが微量含まれているが、十分な精製を行うことによって化学品の原料として利用可能であると判断された。また、エタノールを原料に各種固体触媒用いて、メタクリル酸メチルの原料となるメタクロレンおよびイソブチレンを合成できる可能性が確認できた。また開発材であるバイオ PP 材の諸物性と基礎データを基に、自動車内装部品向けの原料として妥当性を確認した。新たなバイオエンプラとしてバイオポリカーボネート、バイオエポキシ樹脂、バイオポリエステルの開発に取り組んだ。またスプレー塗装を代替する加飾フィルム基材として印刷性に優れるバイオ TPU を開発することができた。

本年度の各課題の主な検討成果は以下に示すとおりである。

2.4.1 自動車用途プラスチックのバイオマス化：汎用バイオマスプラスチック（バイオ PP 等）の実装促進に向けた検討

ソルガム由来エタノールには、不純物として 300~1000 ppm のエチレンとアセトアルデヒド、50 ppm 程度のジエチルエーテル、1 ppm 程度の窒素成分が含まれていることが明らかとなった。他の不純物（無機物）としては Al が検出されたもののコンタミネーションと判断した。また、Al 以外の金属成分については検出限界以下であった。これらのことと踏まえ、ソルガム由来エタノールは十分に精製しさえすれば化学品原料として利用可能であると判断された。

また、ソルガム由来バイオエタノールを活用し、自動車のテールライト、インストルメントパネルに用いられるポリメタクリル酸メチルのモノマーであるメタクリル酸メチルの製造可能性を検討した。そのため市販のエタノールを原料に各種固体触媒用いて、メタクリル酸メチルの原料となるメタクロレンおよびイソブチレンを合成する反応が進行するか評価した結果、低収率ではあるがその可能性が確認できた。

2.4.2 自動車用途プラスチックのバイオマス化：バイオエンプラ等の素材開発に向けた検討

バイオマスを原料とするエンプラについて、バイオマス由来という価値だけでなく、素材そのものの性能という価値から自動車用途プラスチックへ採用されることも目指して、新たなバイオエンプラ（バイオポリカーボネート、バイオエポキシ樹脂、バイオポリエステル等）の開発に取り組んだ。その結果、バイオポリカーボネートでは、種々のモノマーを用いて重合反応を検討したところ、新規バイオモノマー共重合品 2 種とポリオール共重合品 3 種を開発した。いずれの樹脂も、耐熱性に関しては十分なものが得られたため、機械特性次第では、自動車の内装用途への応用が期待される。特にポリオール共重合品は、優れた耐薬品性を示すことが明らかとなつたため、内装材の中でも人の手が良く触れる部材への応用が期待でき、バイオマス度はいずれも既存のグレードから 10% 程度向上した。バイオエポキシ樹脂では、構造接着剤向けに選定したバイオ原料 2 種（天然糖由来、植物油由来）にて、エポキシ化の合成を試みた。天然糖由来原料使用した場合は、反応時にゲル化し、液状のエポキシ樹脂を得ることができなかつたが、植物油由来原料を使用したケースでは、液状のバイオエポキシ樹脂を得ることができた（バイオ化度約 60-70%）。バイオポリエステルについては、種々のモノマーを用いて重合反応を検討したところ、バイオマス由来の共重合成分の添加によって結晶化速度も調整することができ、二軸延伸フィルムの高延伸倍率化に成功した。

2.4.3 自動車用途プラスチックの環境配慮設計に向けた検討

スプレー塗装が施される自動車用途のプラスチック部品に対し、剥離性のある加飾フィルムを用いてスプレー塗装を代替することを目的に、加飾フィルム基材として印刷性に優れるバイオTPUを開発することができた。特に、TPU層にインキ密着層としてPC層を用い、多層化することで、印刷性に優れるクリアフィルムの開発に繋がった。また、本樹脂は透明性、耐候性、耐久性にも優れている。加飾フィルムとして活用する上では、バイオTPUフィルムへの印刷加飾や保護コーティング、製品形状への貼合などの後加工を伴うため、ベースフィルムに対する印刷、コーティングなどの1次加工性および製品に貼り合わせるための賦形、貼合、トリミングなどの2次加工性に加え、市場での使われ方を想定した耐久性、リサイクル性まで加味したフィルム積層体の材料設計が必要となるが、バイオTPUフィルムは自動車外装製品をはじめとする長寿命用途での使用に耐えうる基本性能を有していることを確認した。カラートレンドを分析することにより、2030年の自動車業界予測として、リサイクル性を考慮した無機顔料開発の方向性が示唆された。

3. 長寿命用途バイオマスプラスチックのリサイクル技術開発（事業2）

3.1 自動車用途バイオマスプラスチックの解体・判別技術の開発

3.1.1 目的

バイオマス由来のリサイクルプラスチックを価値化するには、廃自動車由来のプラスチック部品の素材と由来を自動車解体現場で判別する技術・システム（バイオマス割合の測定技術）の開発が求められるところ、(i)自動車解体性の検討、(ii)事業2③で開発するプラスチックの素材・由来判別機器の自動車解体現場における解体システムとしての活用技術の開発、(iii)回収されたバイオマスプラスチックを用いた自動車向けリサイクルコンパウンド開発、(iv)当該コンパウンドの自動車内外装製品等向け素材としての適性の検証、(v)プラスチックの由来・素材判定を容易にする部品設計（易リサイクル設計）に向けたニーズ整理を行うことを目的とする。

令和6年度は、将来的なバイオマスプラスチック化が見込まれる自動車プラスチック部品をリストアップし、その解体に要する時間を計測して解体コストを算出に向けた検討をすること、及び、プラスチックの素材・由来選別機器の自動車解体システムにおける活用方法を整理することを目的とした。

3.1.2 自動車解体性の検討

(1) 方法

A2MAC¹が有する欧州市場の日本車精緻解体データベースを用いて、プラパーツの回収ポテンシャルを検討するとともに、PP材（材料コードの最初に PP と記載されているもの）を中心に、まずは回収量（単体、もしくはグループとして 1kg 以上のもの）あるいは容易な回収が期待できるパーツをリストアップし、手による一次解体（廃自動車からのパーツ回収）を行っている西日本オートリサイクル（株）とニブラによる一次解体を行う KMI（株）（いずれも、パーツから異材を取り除く二次解体は手作業による）の 2 社において、軽自動車、普通自動車の解体・パーツ回収を行った。その後、さらにパーツの回収量、解体時間等の解体性について詳細に検討するために、小さな 100g 以上のパーツの回収も行った。手による一次解体の様子を図 27 に、ニブラによる一次解体の様子を図 28 に示す。また、図 29 は一次解体したパーツから金属、布、シール等の異材を除去する二次解体の様子を示す。

各解体の作業時間、各パーツの回収量を測定するとともに、パーツの材料コード、異材を記録し、必要に応じてパーツの回収作業状況（解体のしやすさ等）を両社にヒアリングした。

¹ フランスに本社を置く会社で、世界中の車輌を毎年 100 台以上解体・分析し、各パーツの素材、重量からデザイン、技術、性能に関する知見を蓄積することで、データベースを構築している。



図 27 手による一次解体の様子

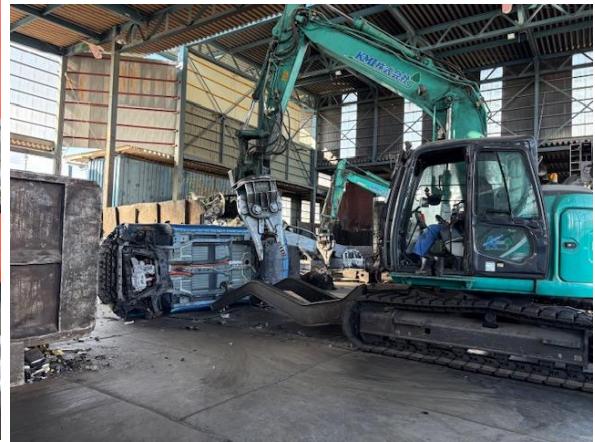


図 28 ニプラによる一次解体の様子



図 29 二次解体の様子

(2) 結果

現行、上記の解体業者 2 社では、外装材はバンパー、内装材はピラーとドアパネルが回収されている。本事業では量の確保や解体の容易さから回収が期待できるパーツとして、さらにスクリーンエアロダイナミクス（アンダーカバー）、インストルメントパネル、センターコンソール、トランクコンポーネント、スカッフプレート、カウルサイドトリム、ヒーティングシステムを追加し、まずこれを Base として各社で 9 台ずつ、合計 18 台の廃自動車を解体した。

その総解体時間（一次解体時間と二次解体時間の和）と回収量を回収パーツごとにグループ分けして表示したのが図 30 である。

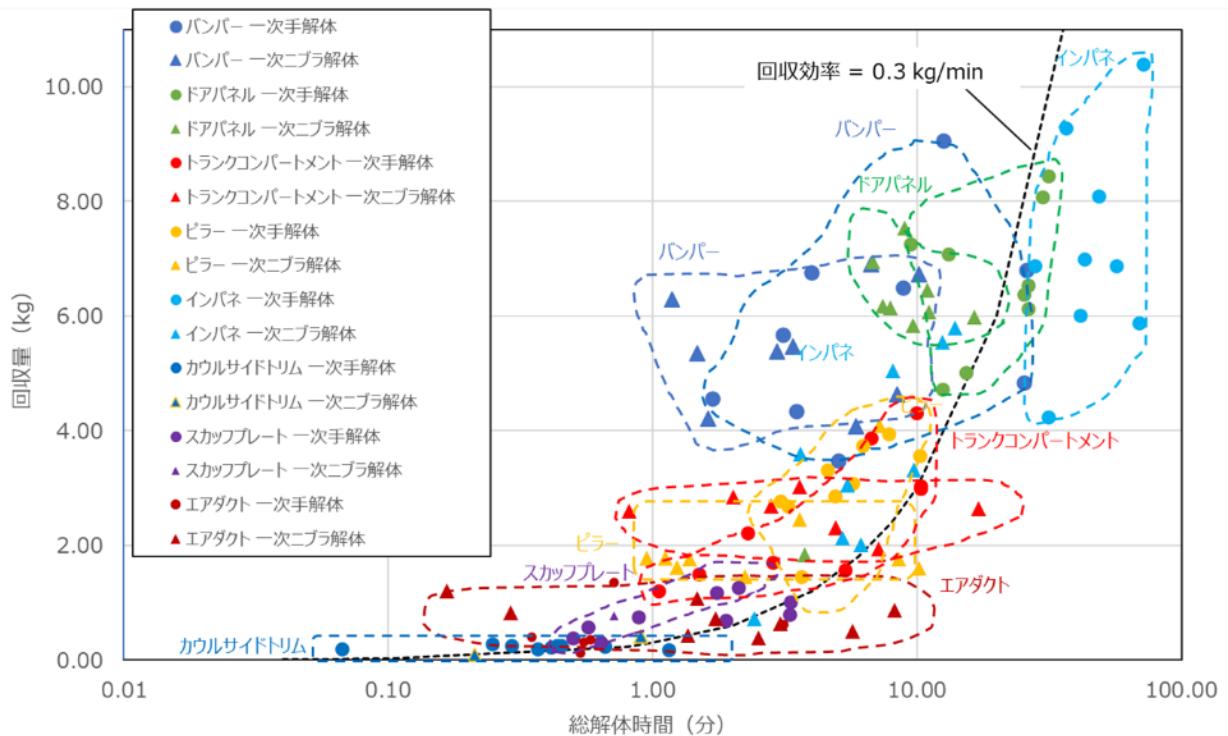


図 30 各パーツの総解体時間と回収量

図 30 から、重量の大きなパーツほど回収量のばらつきが大きいことがわかる。また、パーツの大きさによらず、総解体時間は非常にばらつきが大きい。これは、同じパーツであっても、車ごとのファスナー（取付具）の位置、異材の状態（量、付着方法等）で解体時間に大きな差が生じるためである。例えばドアパネルの一部に布が貼ってあったり、吸音材が全面接着してあったりすると、これらを剥がすのに多くの時間を要する。なお、車格の小さな車にはスクリーンエアロダイナミクスやセンターコンソールのないものが多かった。

この 18 台の Base 解体後、さらに 100g 以上のような小さなパーツまで含めた精緻解体性を検討するためには、同型式の車を各社 3 台ずつ計 6 台解体（以後、精緻解体と呼ぶ）し、同様にデータを集めた。この後、手による二次解体でさらに細かくパーツを分類するとともに異材を除去する。

図 31 に精緻解体を行った 3 車種 A、B、C の 100g 以上のプラスチックパーツが、総プラスチックパーツの重量に占める割合を示す。これは前述の A2MAC1 のデータから求めた値である。100g 以上のプラスチックパーツは重量割合で総プラスチックパーツの 90% 以上を占め、この精緻解体でほとんどのプラスチックパーツの解体性がわかつことになる。

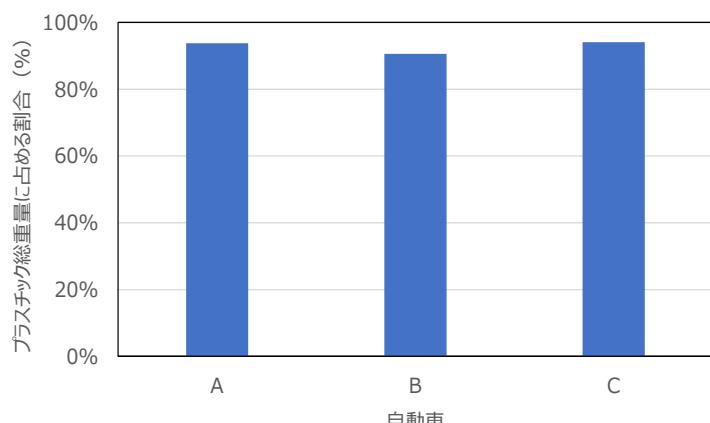


図 31 自動車 A、B、C の 100g 以上のプラスチックパーツがプラスチック総重量に占める割合

また、100g 以上のプラスチックパーツの主要素材別重量割合を図 32～図 34 に示す。PP 材が 64～70% を占めており、種々のパーツに使われていることがわかる。重量割合で次いで多いのが PUR である。これは主にシートのクッションである。自動車 B では PUR がほぼ存在しなかつたが、シートのクッションの材質は「その他のプラスチック」と分類されていた。PE 材は主にダクト等に使用されている。参考資料 3 に自動車 B の精緻解体部品回収記録簿を例として示す。

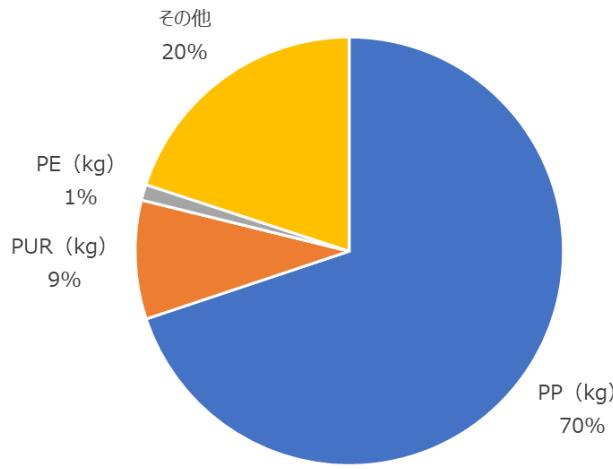


図 32 自動車 A の 100g 以上のパーツ
の素材別重量割合

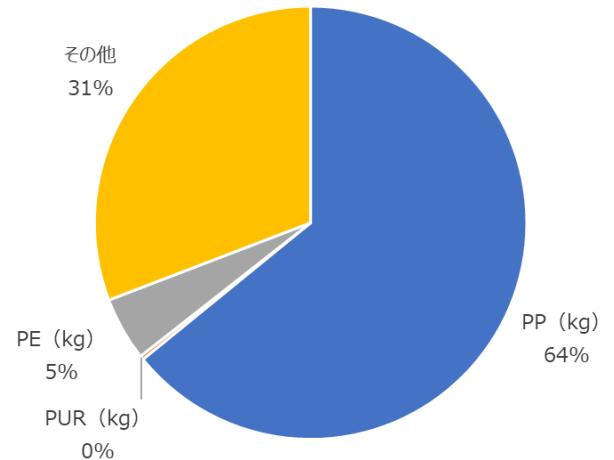


図 33 自動車 B の 100g 以上のパーツ
の素材別重量割合

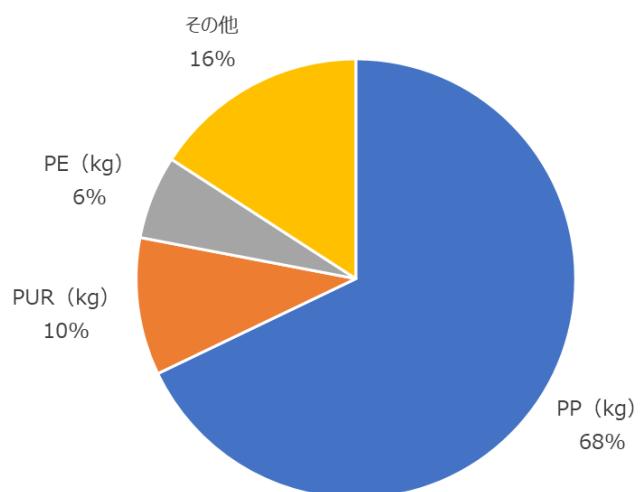


図 34 自動車 B の 100g 以上のパーツ
の素材別重量割合

図 35 に手による一次解体で回収された各パーツを自動車の元あった位置に並べた状態を示すが、
このように手解体では、ほぼ解体前のままの形状をとどめていることが分かる。

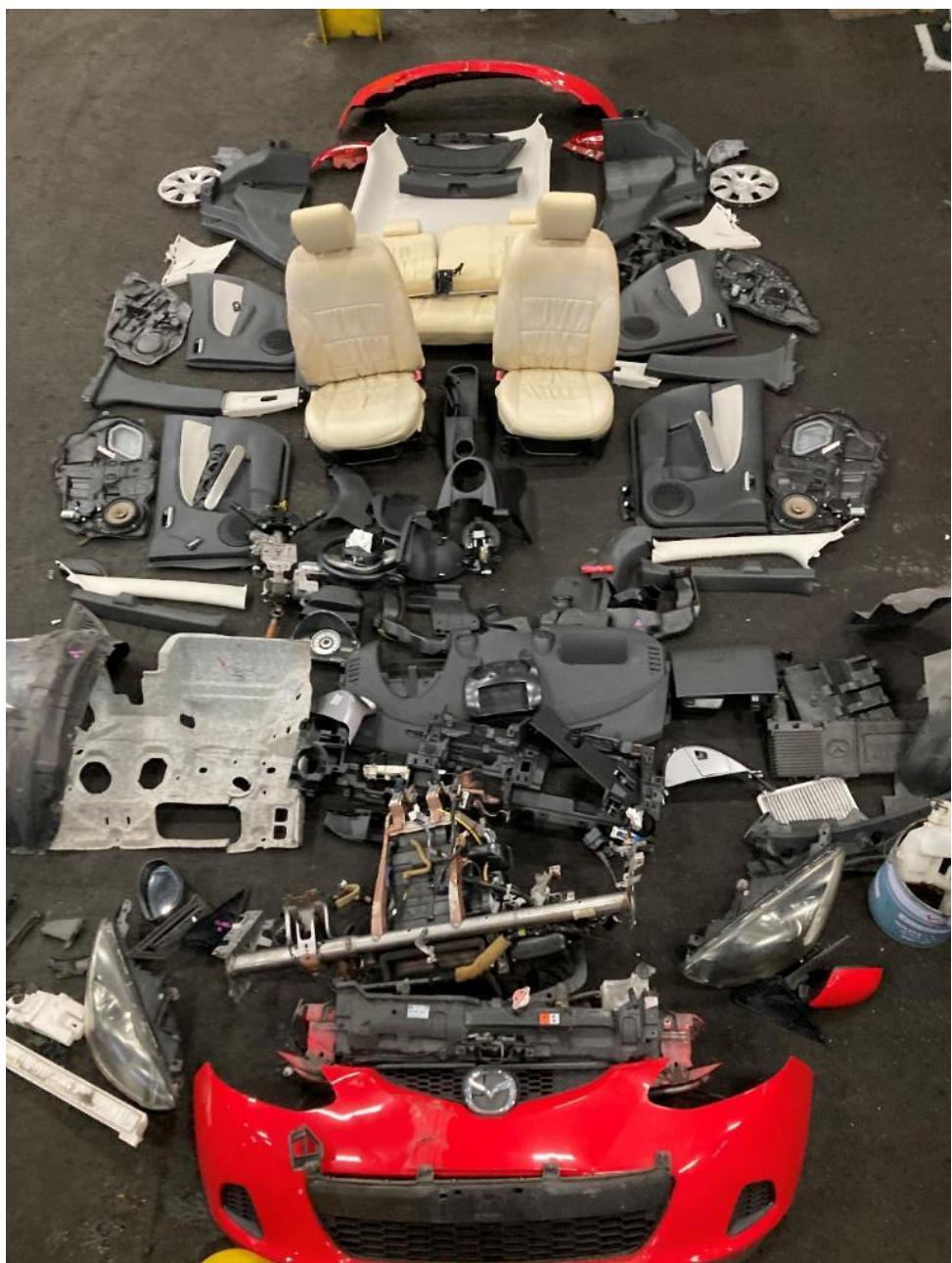


図 35 精緻解体された廃自動車

各パーツの回収量を示したのが図 36 である。横軸に示すパーツの左端のバンパーからスカッフプレートまでが、Base の解体で回収したパーツである。同じパーツ、例えばバンパーでも精緻解体で回収量が増しているのは、Base 解体ではフロントバンパー本体、リアバンパー本体しか回収していなかったが、精緻解体ではグリルやエネルギー吸収体等の軽く、小さなパーツも回収しているからである。

パーツの回収コストに最も影響を及ぼすと考えられるのは人件費である。そこで、各パーツの総回収時間からそのパーツを 1kg 回収するのに要した時間を算出した。その結果を図 37 に示す。

図 36 と図 37 に共通して、Base 解体は 9 台ずつデータがあるので外れ値やデータの分布範囲がよくわかるが、精緻解体は 3 台ずつしか行っていないため、よりばらつきが大きく見える。このため、精度にはまだ問題があるが、概して以下のことが言える。

- ① 精緻解体により回収量は増加する。
- ② 回収量が期待できる PP パーツはバンパー、ドアパネル、インストルメントパネル次いでトランクコンポーネント、ピラー、ヒーティングシステム等である。
- ③ 手解体とニブラ解体（一次）を比較すると、手解体の方が回収量が多い傾向がある。これは、ニブラ解体において、小さなパーツが掴みにくい、掴んだ時に取り付け部分をはじめとして割れたり、欠損したりすることが多いためと考えられる。
- ④ ニブラ解体（一次）の方が手解体よりも、単位重量を回収するのに要した時間が短い。特に細かいパーツまで回収した精緻解体においては、計器類等が付随するインストルメントパネルやセンターコンソール、ドアパネル、ステアリングシステム等でニブラと手の解体時間に顕著な差が出る。
- ⑤ 手解体（一次）ではバンパー、トランクコンポーネント、ピラー、カウルサイドトリムやスカッフプレートの単位重量回収に要した時間は短い。これらと比較すると他のパーツは回収時間とそのばらつきが大きい。
- ⑥ ニブラ解体（一次）はパーツによる回収時間の差が小さく、ばらつきも手解体と比べて小さい。これは、ニブラ解体ではどのパーツも一様に掴み引きはがすためであると言える。
- ⑦ プラスチックパーツの回収においては、解体・回収後のパーツの裏面を見ると材料コードが記載してあるのでその素材を判別することができる。しかし、パーツの裏面は解体してからでないと確認できない。そこで、3.3 で開発しているハンディタイプの判別装置を用いて、解体・回収前に素材を判別することができれば、回収するかどうかの判断ができる。また、欠損して材料コードが読み取れないパーツの一部についても素材を判別することができる。回収したパーツの素材別の分別も容易になり、解体、回収いずれにおいても効率が良くなる。

パーツ 1kg を回収するのに要した時間に労務単価を乗じることで解体に要する人件費を算出でき、人件費が解体コストの大半を占めることになるが、総コストを算出するにはそれ以外にも機器費用、用役費、管理費等を考慮する必要がある。特に、手解体とニブラ解体では、機器費用の影響が出てくるが、その組合せを検討している過程なので計算が困難である。また、解体コストだけが独り歩きしないよう注意する必要もあるため、今の時点では金額に換算せず、解体時間までの評価に留めておくこととする。

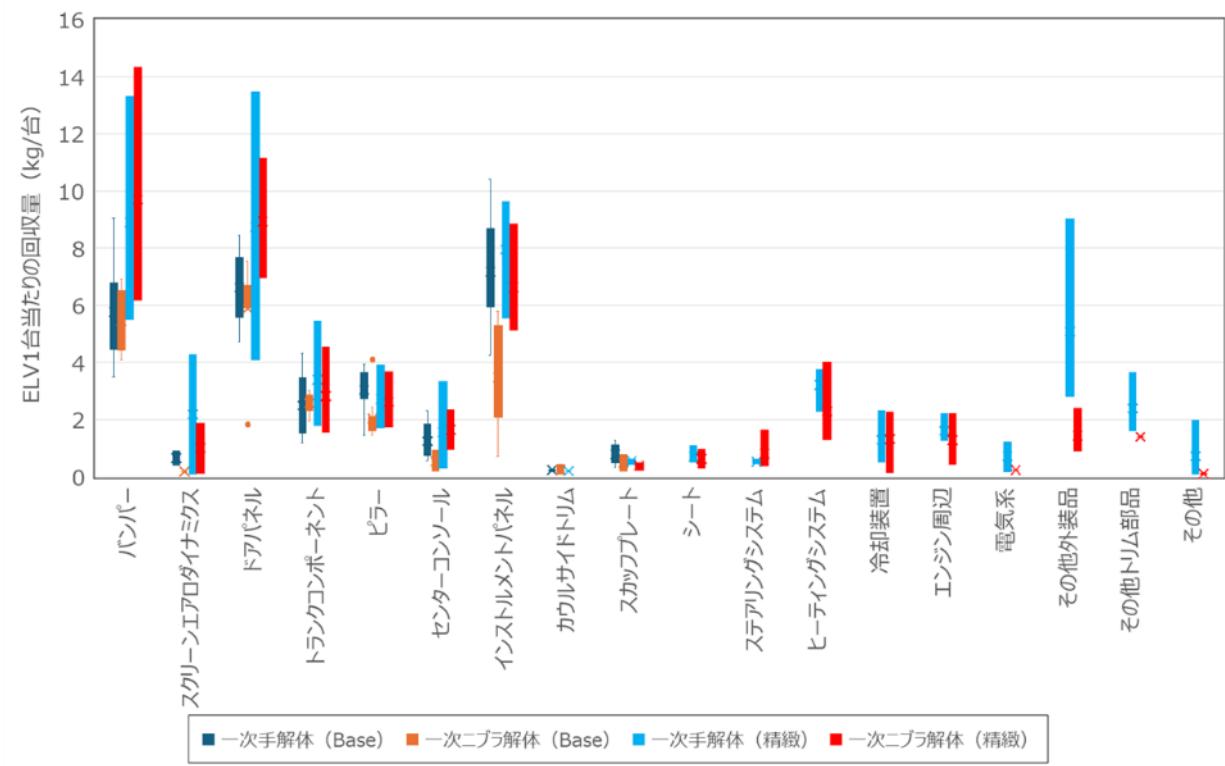


図 36 ELV1 台当たりの各パーツの回収量（主成分が PP のパーツのみで比較）

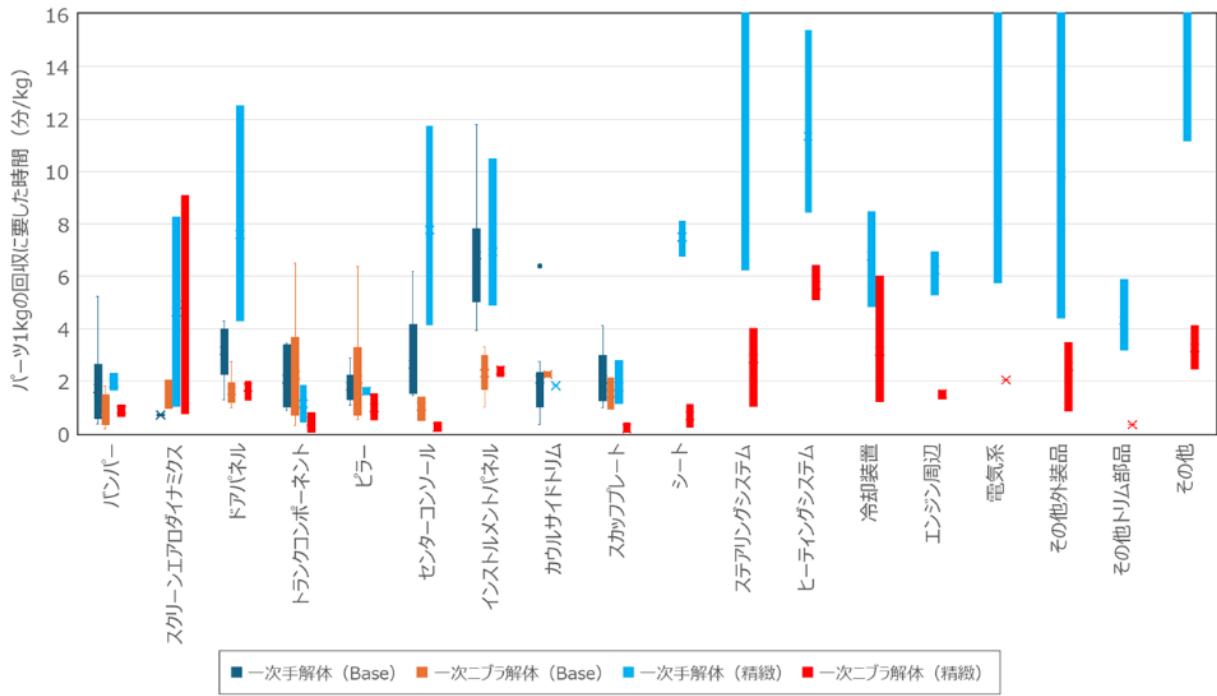


図 37 各パーツを 1kg 回収するのに要した時間（主成分が PP のパーツのみで比較）

次に、横軸に各車の各パーツを 1kg 回収するために要した時間を取り、縦軸にそのパーツの回収量を実装率 1 として 1 台当たりに換算し（そのパーツの回収量を回収できた車の台数、すなわち 3 台

から採取できれば3、2台からであれば2で回収量を除す)、積算した結果を図38に示す。

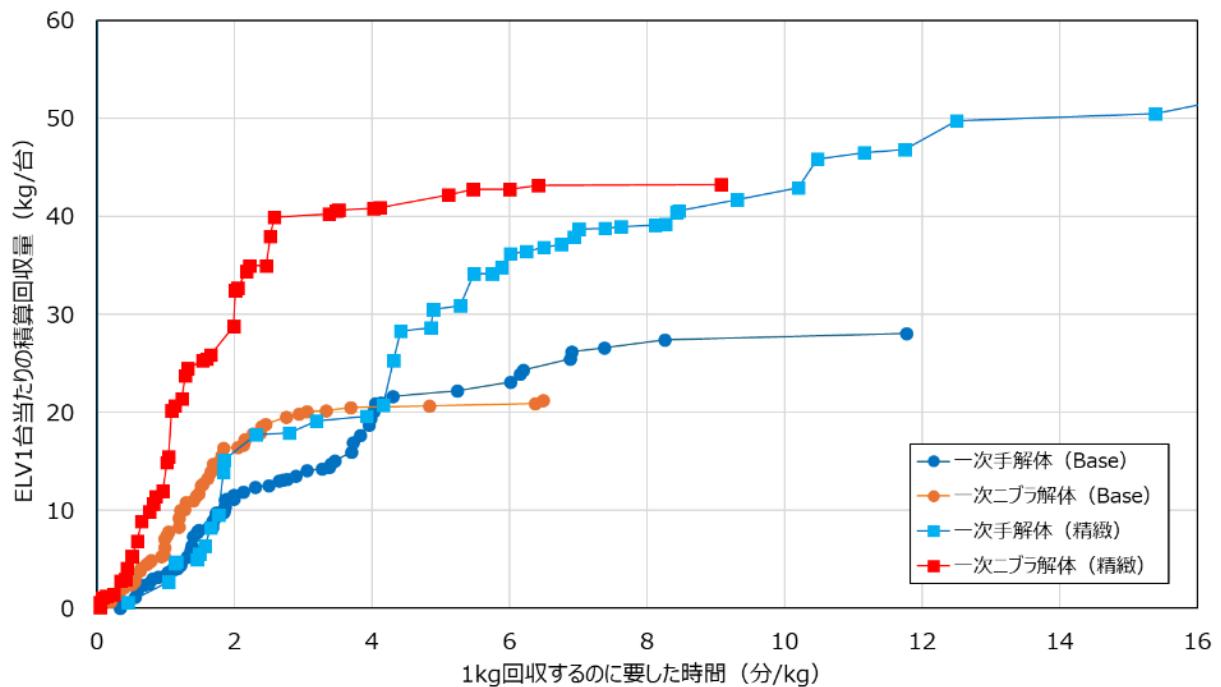


図38 各パーツを1kg回収するのに要した時間と積算回収量

回収の積算量を見ると、ニプラの一次解体時間は図38に示したようにパーツによる大きな差がないためBase解体でも、精緻解体でも2分/kg程度まで順調に立ち上がるが、以降なだらかな増加に変わり、やがてほとんど増えなくなる。また同様に、ニプラ解体では回収するパーツが増えても一次解体・回収時間に大きな差が生じないために、精緻解体によるパーツ増加で増加率が大きくなる。

手解体ではBase解体でも、精緻解体でも2分/kg程度まで順調に立ち上がった後、ややなだらかになるが、3分/kg以降に再度増加率が大きくなり、やがてあまり増えなくなる。ただし、2分/kg付近で積算回収量は急激に増えるものの、ニプラ解体に見られたような、精緻解体によるそれまでの増加率の顕著な増大は見られない。これは約2分/kg以降に精緻解体で増えたパーツの回収が寄与するためと考えられる。

最終積算回収量は精緻解体により大きく増加し、手解体とニプラ解体では手解体の方が多くなる。

表32～表35に図38で表示した1kg回収するのに要した時間とパーツのデータを示す。表中、網掛けがしてあるのは、図38において1kg回収するのに要した時間が短く、一次手解体と一次ニプラ解体にさほど差がない、回収しやすいと考えられるバンパー、トランクコンポーネント、ピラー、カウルサイドトリム、スカッフプレートである。

表 32 一次手解体の単位重量回収時間と回収量 (Base)

パーツ	一次手解体 (Base)			
	単位重量 回収時間 (分/kg)	回収量 (kg)	1 台当たり 回収量 (kg/台)	積算回収量 (kg)
カウルサイドトリム	0.33	0.20	0.03	0.03
バンパー	0.37	4.56	0.51	0.53
バンパー	0.55	5.68	0.63	1.16
バンパー	0.59	6.76	0.75	1.91
スクリーンエアロダイナミクス	0.68	0.90	0.45	2.36
スクリーンエアロダイナミクス	0.75	0.40	0.2	2.56
バンパー	0.80	4.34	0.48	3.05
トランクコンポーネント	0.88	1.20	0.13	3.18
カウルサイドトリム	0.89	0.28	0.04	3.21
スカッフプレート	0.98	0.58	0.06	3.28
トランクコンポーネント	1.00	1.50	0.17	3.45
トランクコンポーネント	1.03	2.22	0.25	3.69
ピラー	1.10	2.78	0.31	4.00
カウルサイドトリム	1.13	0.26	0.03	4.03
スカッフプレート	1.16	0.76	0.08	4.12
ピラー	1.21	2.68	0.30	4.42
ドアパネル	1.30	7.26	0.81	5.22
スカッフプレート	1.32	0.38	0.04	5.26
バンパー	1.36	6.50	0.72	5.99
ピラー	1.38	3.32	0.37	6.36
バンパー	1.39	9.06	1.01	7.36
バンパー	1.45	3.48	0.39	7.75
センターコンソール	1.45	0.56	0.11	7.86
スカッフプレート	1.48	1.18	0.13	7.99
センターコンソール	1.62	1.02	0.20	8.20
カウルサイドトリム	1.67	0.26	0.03	8.23
ピラー	1.67	3.74	0.42	8.64
トランクコンポーネント	1.68	1.70	0.19	8.83
スカッフプレート	1.68	1.26	0.14	8.97
ピラー	1.72	2.86	0.32	9.29
トランクコンポーネント	1.72	3.88	0.43	9.72
カウルサイドトリム	1.73	0.26	0.03	9.75
カウルサイドトリム	1.84	0.20	0.03	9.78
センターコンソール	1.85	0.94	0.19	9.97
ピラー	1.85	3.08	0.34	10.31
ドアパネル	1.86	7.08	0.79	11.10
カウルサイドトリム	1.88	0.22	0.03	11.12
スカッフプレート	1.98	0.32	0.04	11.16
ピラー	1.99	3.94	0.44	11.60
センターコンソール	2.13	1.38	0.28	11.87
トランクコンポーネント	2.30	4.32	0.48	12.35
ピラー	2.49	1.46	0.16	12.52
ドアパネル	2.64	4.72	0.52	13.04
スカッフプレート	2.70	0.70	0.08	13.12
カウルサイドトリム	2.76	0.24	0.03	13.15
ピラー	2.88	3.56	0.40	13.54
ドアパネル	3.05	5.02	0.56	14.10
スカッフプレート	3.26	1.02	0.11	14.21

トランクコンポーネント	3.38	1.58	0.18	14.39
トランクコンポーネント	3.40	3.04	0.34	14.73
トランクコンポーネント	3.45	3.00	0.33	15.06
ドアパネル	3.69	8.08	0.90	15.96
ドアパネル	3.72	8.44	0.94	16.90
バンパー	3.82	6.80	0.76	17.65
インストルメントパネル	3.95	9.28	1.03	18.68
ドアパネル	3.97	6.38	0.71	19.39
ドアパネル	4.02	6.54	0.73	20.12
インストルメントパネル	4.04	6.88	0.76	20.88
スカッフプレート	4.13	0.80	0.09	20.97
ドアパネル	4.30	6.13	0.68	21.65
バンパー	5.24	4.84	0.54	22.19
インストルメントパネル	6.01	8.10	0.90	23.09
インストルメントパネル	6.15	7.00	0.78	23.87
センターコンソール	6.19	2.30	0.46	24.33
インストルメントパネル	6.88	10.40	1.16	25.48
インストルメントパネル	6.90	6.02	0.67	26.15
インストルメントパネル	7.37	4.24	0.47	26.62
インストルメントパネル	8.26	6.88	0.76	27.39
インストルメントパネル	11.77	5.88	0.65	28.04

表 33 一次ニプラ解体の単位重量回収時間と回収量 (Base)

パーツ	一次ニプラ解体 (Base)			
	単位重量 回収時間 (分/kg)	回収量 (kg)	1 台当たり 回収量 (kg/台)	積算回収量 (kg)
バンパー	0.19	6.29	0.70	0.70
バンパー	0.28	5.35	0.59	1.29
トランクコンポーネント	0.31	2.6	0.37	1.66
バンパー	0.38	4.21	0.47	2.13
センターコンソール	0.50	0.93	0.31	2.44
ピラー	0.53	1.78	0.22	2.67
バンパー	0.55	5.39	0.60	3.26
バンパー	0.62	5.47	0.61	3.87
ピラー	0.63	1.78	0.22	4.09
トランクコンポーネント	0.71	2.85	0.41	4.50
ピラー	0.76	1.62	0.20	4.70
ピラー	0.79	1.76	0.22	4.92
スカッフプレート	0.93	0.72	0.36	5.28
スクリーンエアロダイナミクス	0.96	0.3	0.15	5.43
バンパー	0.97	6.91	0.77	6.20
ドアパネル	0.98	6.95	0.87	7.07
インストルメントパネル	1.01	3.59	0.40	7.47
トランクコンポーネント	1.04	2.69	0.38	7.85
トランクコンポーネント	1.19	3.02	0.43	8.28
ドアパネル	1.19	7.54	0.94	9.23
ドアパネル	1.21	6.17	0.77	10.00
センターコンソール	1.27	0.19	0.06	10.06
ドアパネル	1.29	6.14	0.77	10.83
センターコンソール	1.39	0.49	0.16	10.99
バンパー	1.44	4.08	0.45	11.45
ピラー	1.47	2.45	0.31	11.75
バンパー	1.51	6.73	0.75	12.50
ピラー	1.53	1.46	0.16	12.66
インストルメントパネル	1.60	5.05	0.56	13.22
ドアパネル	1.65	5.84	0.73	13.95
ドアパネル	1.69	6.46	0.81	14.76
インストルメントパネル	1.78	3.06	0.34	15.10
バンパー	1.81	4.64	0.52	15.62
ドアパネル	1.83	6.07	0.76	16.38
スクリーンエアロダイナミクス	2.04	0.18	0.09	16.47
スカッフプレート	2.13	0.43	0.22	16.68
トランクコンポーネント	2.14	2.31	0.33	17.01
カウルサイドトリム	2.14	0.42	0.21	17.22
インストルメントパネル	2.26	5.55	0.62	17.84
カウルサイドトリム	2.36	0.09	0.05	17.88
インストルメントパネル	2.39	5.8	0.64	18.53
インストルメントパネル	2.45	2.13	0.24	18.76
ドアパネル	2.74	5.99	0.75	19.51
インストルメントパネル	2.93	3.32	0.37	19.88
インストルメントパネル	3.05	2.01	0.22	20.10
インストルメントパネル	3.33	0.73	0.08	20.19
トランクコンポーネント	3.68	1.94	0.28	20.46
ピラー	4.83	1.76	0.22	20.68

ピラー	6.37	1.6	0.20	20.88
トランクコンポーネント	6.49	2.64	0.38	21.26

表 34 一次手解体の単位重量回収時間と回収量（精緻）

パーツ	一次手解体（精緻）			
	単位重量 回収時間 (分/kg)	回収量 (kg)	1台当たり 回収量 (kg/台)	積算回収量 (kg)
トランクコンポーネント	0.44	1.80	0.60	0.60
スクリーンエアロダイナミクス	1.03	4.26	2.13	2.73
トランクコンポーネント	1.13	5.44	1.81	4.54
スカッフプレート	1.15	0.58	0.19	4.74
スカッフプレート	1.46	0.62	0.21	4.94
ピラー	1.49	1.70	0.57	5.51
ピラー	1.57	2.54	0.85	6.36
バンパー	1.65	5.50	1.83	8.19
ピラー	1.77	3.90	1.30	9.49
バンパー	1.83	13.31	4.44	13.93
カウルサイドトリム	1.83	0.20	0.20	14.13
トランクコンポーネント	1.85	2.94	0.98	15.11
バンパー	2.30	7.90	2.63	17.74
スカッフプレート	2.80	0.44	0.15	17.89
その他トリム部品	3.19	3.64	1.21	19.10
その他トリム部品	3.91	1.62	0.54	19.64
センターコンソール	4.16	3.34	1.11	20.75
ドアパネル	4.31	13.48	4.49	25.25
その他外装品	4.41	9.02	3.01	28.25
冷却装置	4.85	1.06	0.35	28.61
インストルメントパネル	4.89	5.54	1.85	30.45
エンジン周辺	5.28	1.36	0.45	30.91
インストルメントパネル	5.47	9.63	3.21	34.12
電気系	5.74	0.18	0.06	34.18
その他トリム部品	5.88	1.90	0.63	34.81
ドアパネル	6.00	4.08	1.36	36.17
ステアリングシステム	6.25	0.62	0.21	36.38
エンジン周辺	6.50	1.26	0.42	36.80
シート	6.75	1.08	0.36	37.16
エンジン周辺	6.93	2.20	0.73	37.89
冷却装置	7.00	2.30	0.77	38.66
センターコンソール	7.39	0.30	0.10	38.76
シート	7.62	0.50	0.17	38.92
シート	8.11	0.54	0.18	39.10
スクリーンエアロダイナミクス	8.26	0.10	0.05	39.15
ヒーティングシステム	8.43	3.62	1.21	40.36
冷却装置	8.47	0.52	0.17	40.53
その他外装品	9.31	3.42	1.14	41.67
ヒーティングシステム	10.19	3.74	1.25	42.92
インストルメントパネル	10.47	8.70	2.90	45.82
その他	11.16	1.96	0.65	46.47
センターコンソール	11.74	1.08	0.36	46.83
ドアパネル	12.50	8.71	2.90	49.74
ヒーティングシステム	15.39	2.28	0.76	50.50
その他外装品	16.08	2.82	0.94	51.44
ステアリングシステム	19.41	0.46	0.15	51.59
ステアリングシステム	24.03	0.50	0.17	51.76
電気系	30.73	0.8	0.27	52.02

電気系	31.56	1.22	0.41	52.43
その他	42.41	0.1	0.03	52.46
その他	105.16	0.08	0.03	52.49

表 35 一次ニプラ解体の単位重量回収時間と回収量（精緻）

パーツ	一次ニプラ解体（精緻）			
	単位重量 回収時間 (分/kg)	回収量 (kg)	1台当たり 回収量 (kg/台)	積算回収量 (kg)
スカッフプレート	0.04	0.22	0.07	0.07
トランクコンポーネント	0.04	1.56	0.52	0.59
センターコンソール	0.07	0.96	0.48	1.07
スカッフプレート	0.14	0.49	0.16	1.24
シート	0.24	0.29	0.15	1.38
その他トリム部品	0.34	1.40	1.40	2.78
スカッフプレート	0.41	0.48	0.16	2.94
センターコンソール	0.43	2.33	1.17	4.11
ピラー	0.51	3.67	1.22	5.33
トランクコンポーネント	0.58	4.53	1.51	6.84
バンパー	0.65	6.17	2.06	8.90
スクリーンエアロダイナミクス	0.76	1.88	0.94	9.84
トランクコンポーネント	0.81	2.37	0.79	10.63
その他外装品	0.85	2.39	0.80	11.42
ピラー	0.96	1.73	0.58	12.00
バンパー	1.01	8.61	2.87	14.87
ステアリングシステム	1.04	1.64	0.55	15.42
バンパー	1.09	14.33	4.78	20.19
シート	1.13	0.96	0.48	20.67
冷却装置	1.23	2.25	0.75	21.42
ドアパネル	1.28	6.95	2.32	23.74
エンジン周辺	1.32	2.22	0.74	24.48
ピラー	1.53	2.47	0.82	25.30
エンジン周辺	1.59	0.44	0.15	25.45
エンジン周辺	1.65	1.18	0.39	25.84
ドアパネル	1.99	8.71	2.90	28.75
ドアパネル	2.00	11.15	3.72	32.46
電気系	2.04	0.23	0.23	32.69
インストルメントパネル	2.16	5.13	1.71	34.40
冷却装置	2.21	1.56	0.52	34.92
その他	2.45	0.11	0.06	34.98
インストルメントパネル	2.52	8.84	2.95	37.93
インストルメントパネル	2.57	5.92	1.97	39.90
その他外装品	3.37	0.91	0.30	40.20
その他外装品	3.48	1.02	0.34	40.54
ステアリングシステム	3.51	0.37	0.12	40.67
ステアリングシステム	4.02	0.44	0.15	40.81
その他	4.11	0.09	0.05	40.86
ヒーティングシステム	5.11	4.01	1.34	42.19
ヒーティングシステム	5.46	1.57	0.52	42.72
冷却装置	6.00	0.15	0.05	42.77
ヒーティングシステム	6.42	1.29	0.43	43.20
スクリーンエアロダイナミクス	9.08	0.13	0.07	43.26

表 32、表 33 の Base 解体においては、これらのパーツは 9 つのパーツのうち 5 つを占めることもあり、1 kg を回収するのに要する時間が短い前半に多めとはいえ比較的全体に散らばっている。それでも、一次手解体の表 32 では解体に時間がかかるインストルメントパネルが最終盤を占めているのに比べ、一次ニブラ解体の表 33 において最後の 4 つに回収しやすいはずのパーツが入っているのが特徴的である。

精緻解体になると、手解体の表 34 では上記 4 パーツは序盤に集中している。図 38 の精緻解体の一次手解体において、1.8 分/kg 付近で積算回収量が急に増加するのは、バンパーの影響であることがわかる。4 分/kg 以降で増加率が再度高くなるのは、ドアパネルやインストルメントパネルの回収の効果である。一方、一次ニブラ解体の表 35 では、表 34 に比べて 4 パーツは散在しているが、やはり前半の 2 分/kg 以内にある。その後、回収量の多いパーツが現れるが、手解体に比べて回収時間が短いため、高い増加率を維持しているということがわかる。

これらのことから、回収量を確保しつつ短時間で回収できるようにするには、回収が容易なパーツの一次手解体とその他のパーツの一次ニブラ解体の組合せ、二次解体が容易になるようなパーツ設計が必要と考えられる。

今回は精緻解体は 3 台ずつに留まつたので、さらに解体台数を増やして精度を上げてコスト評価をするとともに、材料コードとも照合してバイオマスプラへの変換を進めるパーツを選択していきたい。

(3) まとめと課題

PP 材を中心に、回収量が確保できる、もしくは回収が容易であるパーツを回収候補として選択し、一次手解体と一次ニブラ解体の 2 業者で 9 台ずつ、計 18 台の廃自動車を解体し、その解体性や回収量について調査した。その後、同じ型式の廃自動車 3 台ずつ、計 6 台から 100g 以上の小さなパーツまで解体・回収し、その解体性や回収量を調べた。その結果、車種、パーツによる回収量、回収時間のばらつきが大きく、精度を上げるにはさらにデータ数が必要であるが、以下の結論を得た。

- ① 小さなパーツまで含めた精緻解体により回収量は増加する。
- ② 回収量が期待できる PP パーツはバンパー、ドアパネル、インストルメントパネル次いでトランクコンポーネント、ピラー、ヒーティングシステム等である。
- ③ 手解体とニブラ解体（一次）を比較すると、確実に回収ができる、解体時に欠損が生じないといった理由から手解体の方が回収量が多くなる。
- ④ ニブラ解体（一次）はパーツによる回収時間の差が小さく、ばらつきも手解体と比べて小さい。特に細かいパーツまで回収した精緻解体においては、計器類等が付随するインストルメントパネルやセンターコンソール、ドアパネル、ステアリングシステム等でニブラと手の解体時間に顕著な差が出る。
- ⑤ 手解体（一次）ではバンパー、トランクコンポーネント、ピラー、カウルサイドトリム、そしてスカッフプレートの単位重量回収に要した時間は短い。これらと比較すると他のパーツは回収時間とそのばらつきが大きい。
- ⑥ これらのことから、回収量を確保しつつ短時間で回収できるようにするには、回収が容易なパーツの一次手解体とその他のパーツの一次ニブラ解体の組合せ、二次解体が容易になるようなパーツ設計が必要と考えられる。
- ⑦ プラスチックパーツの回収においては、解体・回収後のパーツの裏面を見ると材料コードが記載してあるのでその素材を判別することができる。しかし、パーツの裏面は解体してから

でないと確認できない。そこで、3.3で開発しているハンディタイプの判別装置を用いて、解体・回収前に素材を判別することができれば、回収するかどうかの判断ができる。また、欠損して材料コードが読み取れないパートの一部についても素材を判別することができる。回収したパートの素材別の分別も容易になり、解体、回収いずれにおいても効率が良くなる

今後、さらに解体・回収のデータ数を増やして解体性に関する情報の精度を高め、解体作業性や回収量から、解体作業を煩雑にする要因を整理して回収効率の向上やコスト削減策を検討するとともに今後の回収候補パートの選定を進める。これらと合わせて材質も確認し、バイオプラスチックへの変換の可能性と回収量の目途を得るようにしたい。

3.1.3 自動車用途バイオマスプラスチックのマテリアルリサイクルの多様化・高度化

(1) 方法

自動車用途にバイオマスプラスチックが採用された事例の一つとして、三菱ケミカル（株）の新規バイオエンプラ DURABIO がある。この素材が使用開始されている年代・車種の中古パーツを調達したものを検討用原料として使用した。用意できた数量は、2台分の白色のカラーパネル、1.29kg であったが、この量では、押出溶融加工によるリペレット加工の評価は難しいため、カラーパネルを粉碎加工することにより、粉碎片でペレットサイズへ近づけ、得られた粉碎片を用いて出来る範囲での物性測定を行うこととした。ただし、カラーパネルを粉碎すると、ペレットサイズに近いものと、ペレットサイズより小さいものが出来てしまうため、篩にて粉碎片のサイズを揃えた。先ず目開き 2mm の篩を使い、2mm アンダーの粉碎片を取得し、2mm より大きいものを目開き 5mm の篩を使い、ペレットサイズに近い 2~5mm の粉碎片を取得した。2mm アンダーの粉碎片はメルトフローレートの測定に使用する。ペレットサイズに近づけた 2~5mm の粉碎片は縦型成形機において物性用試験片を成形し、アイゾット衝撃強度と比重を測定する。メルトフローレートや成形時の溶融温度は三菱ケミカル（株）ホームページにて公開されている DURABIO の物性表の試験条件を参考とした。

(2) 結果

1) 検討用原料



図 39 ハスラーカラーパネル 2 台分



図 40 2mm アンダー粉碎片



図 41 2~5mm 粉碎片

2) 物性測定用試験片



図 42 物性測定用試験片



図 43 縦型成形機

3) 物性測定結果

表 36 白色カラーパネルの物性測定結果

試験成績表

2025 年 1 月 21 日

試験項目	試験条件	単位	試験方法	支給品 カラーパネル白色
メルトフローレート	230°C、21N	g/10min	ASTM D 1238	16.3
アイゾット衝撃強度	23°C、ノッチ付	J/m	ASTM D 256	82.9
比重	水中置換法	—	ASTM D 792	1.34
備考				
• 支給品準備数量1.29kgのため、ペレットの作成ができず、粉碎片で物性測定を実施。 ①メルトフローレート…筛2mm以下の粉碎片。②アイゾット衝撃強度と比重…筛2~5mmの粉碎片で、試験片を成形し、測定。 • アイゾット衝撃強度測定試験片の厚み(測定値): 5.06mm • 試験条件は、三菱ケミカル株式会社 DURABIO™の物性表にある試験条件を参考にした。 三菱ケミカル株式会社様ホームページ»製品情報»ポリマー/レジン/機能化学品»新規バイオエンプラ DURABIO™»物性表 https://www.m-chemical.co.jp/products/departments/mcc/pc/product/1200363_9344.html				

表示の値は実測値であり、保証値ではありません。

いその 株式会社

(3) まとめと課題

今年度の検討結果は、次年度以降へ向けての参考データと考える。参考データとする理由としては、用意できた数量が少なかった点がある。市場には、白色のカラーパネルだけではなく、別の色もある。また、別の車種や部品などにもバイオプラスチック PC は採用されている。今年度のように、1車種の白色のカラーパネルだけで数量を増やせたとしても、そのリサイクル性評価は限定的なものと考える。ただし、限定回収が条件であれば、その上での評価になるとも考える。市場全体のバイオ PC 採用部品を原料として混ぜ合わせたものを評価することも、動脈の連携を考える上で必要になると考えられる。

3.2 自動車用途バイオマスプラスチックのケミカルリサイクル技術の多様化

3.2.1 目的

本事業では、自動車に用いるさまざまなプラスチックの循環利用を目指し、たとえば、プラスチック製の部品を廃自動車から効率的に分解、分別、回収して再資源化することにより、廃自動車を粉碎処理した際に発生する ASR の量を減らし、さらにどうしても発生してしまう ASR についてはできるだけ焼却処理を避けてプラスチックを回収することを検討している。本項では、2.2 で開発する自動車用途のバイオエンプラ等が、廃自動車から分解、分別、回収された後の再利用技術として、CR 技術の開発を行うことを目的とする。具体的には、CR の対象として、MR に不向きな低品質なもの、金属や塗料等の不純物を含むもの、及び素材別に分別できない複合プラスチック材料等を想定し、ポリマー成分やモノマー成分のみを効率よく回収する技術を開発する。また、CR で得られた再生プラスチックの自動車内外装製品等向け素材としての適性を検証する。

令和 6 年度は、劣化が進み汚れや塗料等の不純物や異物を含む低品質な資源、素材別に分別できない複合材料等の資源から、目的とするポリマー成分やモノマー成分のみを効率よく回収する基礎技術を開発することを目的とした。

3.2.2 廃自動車由来の使用済みプラスチック製品のリサイクル技術の開発：ポリカーボネート樹脂を含むもの等

（1）方法

ポリカーボネート (PC) は、高い透明性、成形性、及び耐衝撃性を持ち合わせていることから、自動車ではヘッドライトなどのガラス製部品の代替として用いられている。近年、紫外線による劣化や表面硬度などの PC の欠点を克服し、かつバイオマス原料を用いたバイオエンプラ DURABIO が開発され、自動車の内外装に徐々に適用が進んでいる。

令和 6 年度は、市中から回収した使用済の DURABIO から CR によってポリマー成分やモノマー成分のみを効率よく回収する技術の開発を試みた。さらに、得られた原料を用いて、自動車内外装部品等向け素材としての適性を検証した。

また、PCR を資源として用いるリサイクルプロセスの構築の観点から、様々な成型加工工程や使用環境の影響による樹脂の劣化度合いを予測し、推定するために、成形と粉碎を繰り返す処理と材料劣化の相関性についての検証を行った。加えて、実際に自動車部品として使用された DURABIO に物性変化がみられるかどうかの評価を計画した。

（2）結果及び考察

令和 6 年度は廃自動車からの使用済 DURABIO の回収が十分に実施できなかつたため、三菱ケミカルが保有する、DURABIO の製造工程で発生する端材を活用して以下のモデル実験を行った。

まず、DURABIO の樹脂から成分の抽出を試みた。DURABIO がハロゲン系の溶媒には微溶であるものの、基本的に等難溶性であったため、得られたポリマー成分から効率よく顔料等の異物を除去することが課題であった。また、透明部品の PCR を資源とすることを想定し、使用済 DURABIO の同等品として三菱ケミカル保有の実暴露品（8 年）と一般的なポリカーボネート (A-PC、未暴露) 製の板材の物性の比較を行った。両者について、表面劣化度合い及び劣化深さを比較したところ、A-PC では表面の変色が顕著に進行し、約 50 μm の劣化層が観察されたのに対し、DURABIO では表面の変色や

明確な劣化層は観察されなかった。また、物性評価においては成型性に影響するメルトフローレート（MFR：樹脂の流動性を簡易的に把握するための指標）の上昇は確認されたが、引張強度、曲げ強度及びシャルピー衝撃強度の顕著な低下はみられなかった。

一方で、成型加工済みの PCR を資源とすることを想定して、二軸押出機を用いた溶融混練処理試験に DURABIO を供試し、処理回数と樹脂の劣化度合いの相関を検証した。その結果、処理回数に比例して各物性の低下が起こることが明らかになった。特に耐衝撃性が大きく低下した。

廃自動車からの使用済 DURABIO の回収ができなかったため、弊社保有の DURABIO の工程端材を活用して以下のモデル実験を行った。

まず、DURABIO 成分の抽出を試みたが、DURABIO が難溶性（塩化メチレン等に微溶）であったため、効率よく異物（顔料等）を除去するのが困難だった。そこで、透明品の PCR を想定し、使用済 DURABIO として弊社保有の実暴露（8 年）品と一般的なポリカーボネート板（A-PC、未暴露）の物性の比較を行った。両者について、表面劣化度合い、劣化深さの比較を実施したところ、A-PC では表面変色が顕著に進行し、約 50 μm の劣化層が観察されたが、DURABIO では表面の変色や明確な劣化層は観察されなかった。また、物性評価においては MFR（メルトフローレート：樹脂の流動性を簡易的に把握するための指標）の上昇は確認されたが、引張強度、曲げ強度、シャルピー衝撃強度の顕著な低下はみられなかった。

一方で、成型加工品の PCR を想定して、DURABIO に対して二軸押出処理を行い、処理回数と劣化度合いの相関を検証した。その結果、処理回数に比例して各物性の低下が起こることが明らかになった。特に耐衝撃性が大きく低下することが明らかとなった。

（3）まとめと課題

自動車の部品として実際に使用された DURABIO の回収についてはが限られた数量にとどまった、会社保有の材料を用いたモデル実験に切り替えねばならなかったが、透明材料、成型加工品の CR に関して一定の知見を得た。来年度は、ポリマー成分やモノマー成分の回収効率の向上やリサイクル品に混入する不純物対策技術の開発の進捗を図るとともに、実際にリサイクル DURABIO を再度自動車部品として用いるために、その物性改善を目的とした改質剤の検討や、要求物性に応えるための DURABIO バージン材との配合等の検討に取り組む。

3.2.3 廃自動車由来の使用済みプラスチック製品のリサイクル技術の開発：エポキシ樹脂を含むもの等

（1）方法

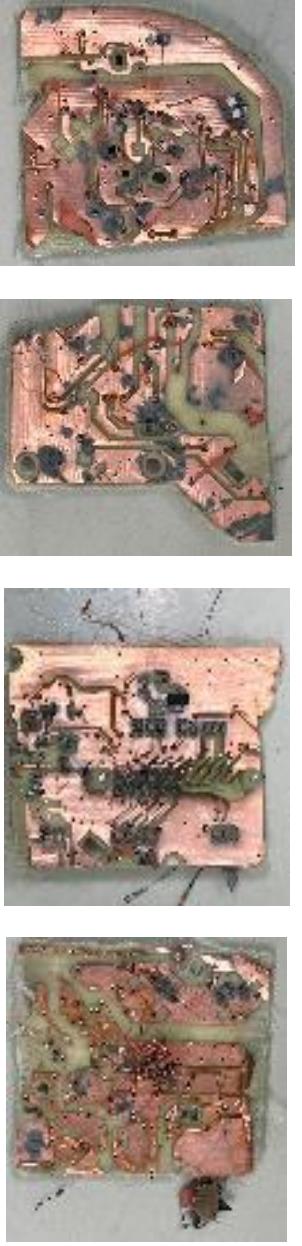
本項では、多種素材からなる車載の廃プリント基板を廃自動車から分別、回収、リサイクルすることを想定し、有用成分のみを効率よく回収する技術を開発する。令和 6 年度は、プリント基板中に含まれるエポキシ樹脂、金属、ガラスファイバー等の再生可能な有価物を、温和な条件で回収する手法（加溶剤分解法）を確立するために、自動車で使用されていたプリント基板を市中から回収し、これを試料した実験を行った。まずビスフェノール A が原料として使用されているエポキシ樹脂の分解を想定した試験に着手した。

(2) 結果及び考察

加溶剤分離法の開発のために3種類のプリント基板を供試し、試験を行った（表37）。プリント基板に使用される熱硬化性樹脂は多岐にわたるが、本試験では、エポキシ樹脂硬化物について分解可能な分解液組成を開発した。加温した分解液にプリント基板を浸漬することで、エポキシ樹脂硬化物以外の樹脂についても分解することを確認し、エポキシ樹脂硬化物に使用されていたビスフェノールAを可溶化させた状態で回収できた。また、プリント基板に使用されていた金属およびガラス繊維についても損傷させることなく回収できた。

表37 プリント基板の分解実験

	写真	反応性	反応残渣の様子
参照 (エポキシ樹脂硬化物)		○	 エポキシ樹脂硬化物が分解され、可溶化している様子
プリント基板 ¹		○	 金属（銅等）  ガラス繊維
プリント基板 ²		○	 基板の左側部分の残渣  基板の右側部分の残渣

<p>プリント基板²</p>		<p>○</p>	
---------------------------	---	----------	--

1 自社調達品

2 西日本オートリサイクル提供品

(3)まとめと課題

本年度、検討に使用したプリント基板2、3（西日本オートリサイクル提供品）は、試験の結果ビスフェノールAが使用されたエポキシ樹脂硬化物ではないことが判明した。フェノール樹脂ではないかと推測される。本項ではビスフェノールAが使用されたエポキシ樹脂硬化物と対象としたプリント基板の分解法を検討してきたため、ビスフェノールA以外の架橋剤の回収はできなかった。しかし、ビスフェノールAが使用されたエポキシ樹脂硬化物が使われていないプリント基板であっても、樹脂成分は可溶化させることができ、フェノール性の架橋剤と思われる成分が回収できた。このことから、今後エポキシ樹脂が使用されている様々なプリント基板に対し、樹脂別に選別回収することができれば、使用済プリント基板からの樹脂原料の回収及び有価物の回収が可能であることが示唆された。

3.2.4 廃自動車由来の使用済みプラスチック製品のリサイクル技術の開発：PBT、PETを含むもの等

(1) 方法

本項では、自動車から分別、回収を予定するエンプラ製部品のリサイクルを想定し、有用成分を回収する技術を開発する。令和6年度は、市中から回収されたシートベルト、座席向け繊維、給油口キヤップやコネクターなどのポリエスチル類(PET、PBT)等が使われている部品から、ポリマー成分を効率よく回収する技術を開発することを念頭に、ポリエスチル(PET、PBT)、アクリロニトリル-ブタジエン-スチレン共重合樹脂(ABS)に対する良溶媒、貧溶媒の探索を行った。特に、樹脂が混在していても溶解分離ができるよう、それぞれの樹脂のみを溶解する溶媒の探索を行った。

(2) 結果及び考察

ポリエスチル類(PET、PBT)、ABSに加え、これらと複合して使われることが多いポリカーボネート(PC)も対象に含め、溶媒で溶解させる条件を検討した。ポリエスチル類を溶解する溶媒は少なく、溶媒Aや溶媒Dに溶解した(表38)。3種の試料を溶解できた溶媒Dは揮発性が高く、腐食性も高いため、工業プロセスでは使いにくいと考えられる。そのため、ポリエスチルを溶解する溶媒として溶媒Aを選択することが好ましい。しかしながら、溶媒AはPCおよびABSも溶解してしまう。また、PCおよびABSは貧溶媒も同じであるため、ポリエスチルにPCやABSが混在する複合材料の場合、各樹脂を分離することができない。

表38 ポリエスチル(PET、PBT)、ABSおよびPCの溶解度試験

	溶媒A	溶媒B	溶媒C	溶媒D	溶媒E	溶媒F
PET	○	×	○	×	○	○
PBT	○	×	×	○	×	×
ABS	○	×	×	○	×	×
PC	○	×	○	○	△	△

注記 溶媒A、B…芳香族系溶媒、溶媒C、D…ハロゲン系溶媒、溶媒E、F…脂環式溶媒

以上の結果をもとに、溶媒Aを用いて、PET、PBT、PCを分離する方法について探索した。溶媒BはPCを溶解しないが、PCを膨潤させる。そこで溶媒Aと溶媒Bを混合して溶解させたところ、PCが溶解した。次に、溶媒Aと溶媒Bを様々な比率で混合し、各樹脂の溶解性を確認したところ、PCは溶媒Aの割合が低下しても溶解し、溶媒A:溶媒B=2:8となるときに溶解した。また、PBTは溶媒A:溶媒B=5:5で溶解し、PETは溶媒Bを混和すると溶解しなかった。

以上の結果から、溶媒Aと溶媒Bの比率を変え、徐々に溶媒Aの比率を高くすることで、PC、PBT、PETを分離することができる事が分かった(表39)。また、ABSは貧溶媒を溶媒XとしてABSが溶媒Xに溶解したまま析出しないので、PCやポリエスチルと分離できる。さらに、溶媒Aはオレフィン系の樹脂を溶解しないため、これらの樹脂とも分離できると考えられる。

表 39 溶媒 A と溶媒 B の比率の違いによる各樹脂の溶解の様子

	溶媒 A : 溶媒 B		
	2 : 8	5 : 5	10:0
PET	 X	 X	 O
PBT	 X	 O	 O
PC	 O	 O	 O

以上の結果から、複合材料から溶媒 A を用いてポリエステルを回収する場合、PC はポリエステルよりも先に溶解分離する必要があり、溶媒 A 以外の溶媒（溶媒 C など）を用いて分離してもよいと推測される。また、PET および PBT の分離は芳香族溶媒 B を用いて PBT を先に溶解させ、未溶解分を芳香族溶媒 A で溶解することで PET を分離できることが示唆された。

（3）まとめと課題

PET、PBT、ABS、PC を溶解する溶媒を検討した。その結果、溶媒 A はすべての樹脂を溶解させるが、溶媒 B との比率を変えることで、PET、PBT、ABS、PC を分離することができる事が分かった。これにより、リサイクル原料中に様々な樹脂が混在してもそれぞれの樹脂を分離できるので、複合材料からのリサイクルが期待できる。

今後は実際の PCR 品を用いて、樹脂の分離が可能であるかを確認する。また、樹脂製品中には様々な不純物を含むため、溶解再沈殿だけでは、品質がバージンに劣ると予想される。不純物除去のための精製方法を検討し、回収した樹脂の品質の向上にも取り組んでいく。

3.2.5 廃自動車由來の使用済みプラスチック製品のリサイクル技術の開発：ポリ塩化ビニル等を含むもの等

（1）方法

初年度は、市中から回収されたウェザーストリップ（ドアとボディのすき間を埋める帶状のシール材）やワイヤーハーネス（電子部品に使用されている被覆材）等のポリ塩化ビニル（PVC）からなる部品から有用成分を効率よく回収する技術を開発する。特に、ワイヤーハーネスに含まれる PVC、金属（銅）等の再生可能な有価物を温和な条件で回収する手法を確立するために、市中から回収した自動車において使用されていたプリント基板を原料にした実験を行う。

（2）結果と考察

廃車から抜き取られたワイヤーハーネスは現状、機械的な処理によって PVC と銅を分離した後、銅のみがリサイクルされ、PVC が埋立処理されている。そこで本項では、PVC も銅も回収/再利用可能な手法の開発を目指して以下の実験に取り組んだ。

まず、ハンセン溶解度パラメータを踏まえて、PVC を溶解でき、かつ除去も容易な溶媒を 2 種類選び、それぞれの溶媒にて PVC の回収実験を実施し、と銅の収率を確認した。自社調達のワイヤーハーネス（バージンの PVC に相当、銅は含まれていない）および西日本オートリサイクル社から提供されたものの反応性を比較した場合、溶媒 A を使用した際には PVC と銅が高収率で得られた。また、回収された PVC における溶媒の残存量は ppm オーダーであり、十分に除去できていることを確認した。また溶媒 A は溶媒 B よりも沸点が低いため、低温で乾燥処理が可能であり、溶媒 B を用いた場合よりも PVC の熱劣化を抑制できることを確認した。なお、熱劣化具合の評価は JIS 規格で定められているコンゴーレッド試験にて実施した。

表 40 ワイヤーハーネスからの PVC の回収実験の結果

原料	溶媒	原料概観	リサイクル PVC 概観	PVC 収率(%)	銅 収率(%)
参照 PVC ¹	溶媒 A			89	-
提供品 ²	溶媒 A			93	99
提供品 ²	溶媒 B			48	97

1 自社で調達した PVC 製のワイヤーハーネス（銅を含まない）

2 西日本オートリサイクル社提供のワイヤーハーネス

（3）まとめと課題

新たに開発したプロセスにおいて、溶媒 A を用いることでワイヤーハーネスからリサイクル PVC とリサイクル銅をそれぞれ高収率で得た。比較的低沸点の溶媒 A を用いた場合には熱劣化が抑制されることもあきらかとなった。得られたリサイクル PVC の色は使用したハーネス由来の色であり、リサイクル前後で顕著な脱色や可塑剤、添加剤の漏出が認められなかった。リサイクル PVC に可塑剤、添加剤、バージンの PVC を必要量混合させることで、劣化した機械物性を補うことができれば、自動車のワイヤーハーネス向けのリサイクルコンパウンドとして利用できる可能性がある。

3.2.6 廃自動車由来の使用済みゴム製品のリサイクル技術の開発：スチレンブタジエンラバーを含むもの等

（1）方法

ウェザーストリップは車種や窓枠の位置によって、PVC 製とゴム製（加硫 EPDM : ethylene propylene diene monomer ゴム）のものが存在すると言われている。廃自動車の解体現場から回収されるウェザーストリップの大半は黒色であるため、見た目でも、識別機でも PVC 製かゴム製かの判断が難しい。そこで初年度は、前項で検討した PVC の回収方法を発展させ、PVC とゴムの反応性や物性の違いを利用して、PVC 製とゴム製のウェザーストリップの分離について検討を行うとともに、ウェザーストリップの再利用に向けた指針を得ることを目指す。

まず、市中から回収したウェザーストリップに対し、PVC 製かゴム製かを判別するために、PVC だけを溶解させることができ分かっている溶媒を用いた溶解試験を行った。次に、得られた残存物に対し、未加硫 EPDM を溶解させることができる溶媒として知られているものを使用して溶解試験を行った。

(2) 結果と考察

3.2.4 で報告した PVC が溶解することを確認している溶媒 A にて、西日本オートリサイクル社から提供されたウェザーストリップが溶解するか確認したところ、全く溶解しなかった。このことからゴム製のものであることが推察される。本ウェザーストリップが仮に EPDM であった場合、その比重は $0.86\sim0.87\text{ g/cm}^3$ である。水（比重 : 1.0 g/cm^3 ）よりも比重が小さいため、浮沈選別によって判断できると予想したが、本ウェザーストリップは水に沈むという結果になった。おそらく、アルミ等の補強材が含まれている可能性が示唆された。

次に、EPDM（未加硫）を溶解させている溶媒 B を用いて、室温と 50°C 加熱によって同ウェザーストリップの溶解性を確認したが、いずれの条件でも全く溶解しなかった。これらのことから、本ウェザーストリップは加硫型の EPDM である可能性が示唆された。

表 41 ウェザーストリップの溶解試験/浮沈選別の結果

原料	溶媒	原料概観	溶解試験の様子	結果	備考
提供品	溶媒 A			不溶	
提供品	水			沈降	EPDM : $0.86\sim0.87\text{ g/cm}^3$ 水 : 1.0 g/cm^3
提供品	溶媒 B			不溶	-
提供品	溶媒 B			不溶	50°C に加熱

(3) まとめと課題

溶媒を用いた処理でウェザーストリップの材質判断が可能となった一方で溶解リサイクルと比重分別は現状できておらず課題が残る結果となった。先に述べたように、廃自動車の解体現場から回収されるPVC製品、ゴム製品の大半は黒色であるため識別が難しい。ASR削減のためには3.2で開発しつつある素材別の新たなリサイクル手法の確立と並行して、自動車を構成するプラスチック材料に対する材質識別表示制度を、リサイクル技術の進展に合わせて見直すことによって、リサイクルを確実にすることができる。

3.2.7 廃自動車由来の使用済みプラスチック製品のリサイクル技術の開発：ポリウレタンを含むもの等

(1) 方法

本項では、市中から回収された自動車のシートやヘッドレストのクッション材やダッシュインシュレーター（エンジン音を遮断する部品）、2.3に記載したTPU製の加飾フィルム等、ポリウレタンからなる部品から有用成分を効率よく回収する技術の開発に取り組む。令和6年度は、ポリウレタンに含まれる架橋剤や硬化剤等といった有価物を温和な条件で回収する手法を確立するために、一般的に入手が可能なポリウレタンサンプルを原料にしたモデル実験を行う。

(2) 結果及び考察

廃自動車から回収した使用済みポリウレタンのリサイクル試験に先立ち、基礎的なデータの取得および硬化剤（ジアミン）の定量手法を確立するために、ポリウレタンの解重合液の後処理検討を行った。

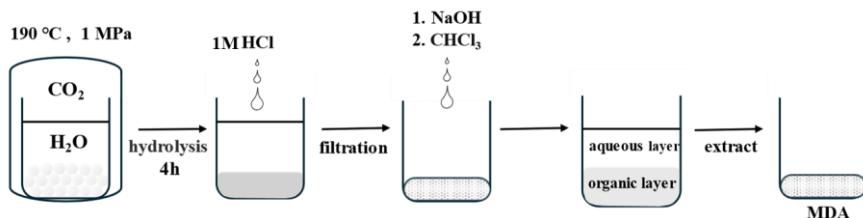


図44 ポリウレタンの解重合実験の流れ

まず、ウレタンサンプルと水を 1 MPa の CO_2 存在下、 190°C で 4 hr 解重合させた。反応後、得られたウレタン分解物の混合液に塩酸を加え、アミンを塩酸塩として水に溶解させた。未反応物等をろ過した後、得られた水溶液を水酸化ナトリウム水溶液で処理してアミンを遊離させ、これをクロロホルムにて抽出することによりジアミンサンプルを得た。反応前後の様子を図45に示した。

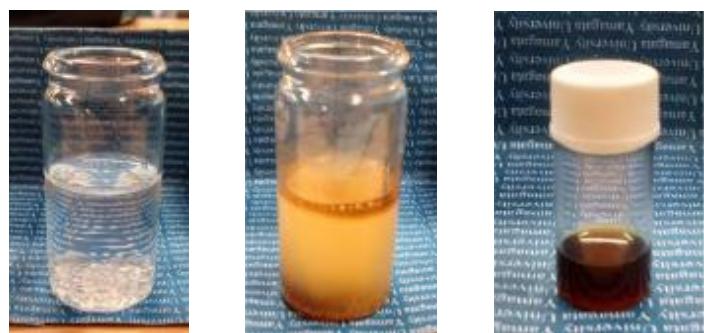


図 45 反応前のウレタンサンプル (左)

反応後のウレタンサンプル (中)

抽出したジアミン (右)

ポリウレタンの解重合反応後に得られる混合液はジアミンとジオールの混合物であるため、このままではジアミン、ジオールの単離が難しい状態であったが、希塩酸で処理して塩酸塩にすることで可溶化させた後、水酸化ナトリウム水溶液によって pH を調整してジアミンを遊離させることでジオールと分離させることができた。続いて水相からクロロホルムによってジアミンを抽出し、溶媒を留去することでジアミンを単離した。原料のポリウレタンの量から計算して、約 30 wt% のジアミンを回収することができた。得られたジアミンの ^1H NMR スペクトルを確認したところ、ジアミンを高純度で抽出できていることが確認された (図 46)。

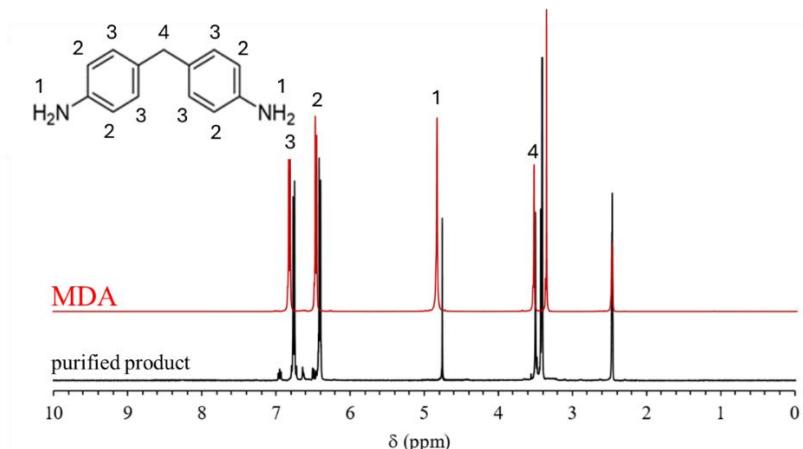


図 46 回収したジアミンの構造と ^1H NMR チャート

(3) まとめと課題

CR 技術は現在各所で検討が続けられており、本項でも簡易かつ高効率な手法の開発に取り組んだ。まず、ポリウレタンを解重合可能な温度、圧力条件を探索した。種々検討の結果、ポリウレタンと水を 1 MPa の CO_2 存在下、190°C で 4 時間反応させると、ポリウレタンを効率よく分解できることを見出した。また、後処理の工程を工夫することでジアミンの単離に成功した。さらに、今後 CR の効率を評価していくために、ポリウレタンから単離したジアミンの定量方法についても検討した。解重合後に塩酸塩として水に溶解させ、さらに水酸化ナトリウム水溶液で処理することによりジアミンを遊離させることができ、高純度のジアミンが得られ、精度よく定量できる手法を確立した。

実際の廃材を利用した解重合検討を進めて行くにあたって、今後様々な履歴をもった廃材各々の反応性の違いや、含まれる不純物の種類や量、その影響を確認していく必要がある。

3.2.8 廃自動車由来の使用済みプラスチック製品のリサイクル技術の開発：CFRP を含むもの等

(1) 方法

炭素繊維複合材料（CFRP）は軽量で強靭なうえ耐熱性、耐薬品性に優れるため、燃費の向上や安全性を求める自動車への応用も徐々に進んでいる。令和 6 年度は、MR に不向きな複合材料としての CFRP から、有用成分のみを効率よく回収する技術の開発に着手した。特に、市中から回収された CFRP に含まれる樹脂成分と炭素繊維等の再利用可能な有価物を温和な条件で回収する手法（加溶剤分解法）を確立するために、自社保有の CFRP をモデル原料として用いて分解実験を行った。

(2) 結果及び考察

CFRP に使用されている代表的な熱硬化性樹脂はエポキシ樹脂またはビニルエステル樹脂である。今年度実験に使用した CFRP はビニルエステル樹脂が用いられたものであったため、3.2.3 で検討したエポキシ樹脂硬化物の加溶媒分解法が適用できなかった。そこで新たにビニルエステル樹脂分解可能な液組成を開発した。加温した分解液 B に CFRP を浸漬することで、ビニルエステル樹脂分が分解され、炭素繊維を回収することができた。

表 42 CFRP の分解実験と結果の概要

	写真	反応性	反応残渣の様子
参照 ¹		分解液 A ○	 エポキシ樹脂硬化物が分解され可溶化している様子
CFRP ¹		分解液 A × 分解液 B ○	 回収されたガラス繊維

¹ エポキシ樹脂硬化物、3.2.2 より

(3) まとめと課題

今回開発したビニル樹脂の加溶媒分解法に 3.2.3 で検討したエポキシ樹脂硬化物の加溶媒分解法も合わせると、エポキシ樹脂からなる CFRP およびビニル樹脂からなる CFRP から炭素繊維を回収する手法にめどが立ったと言える。従来、CFRP からの炭素繊維の回収については、主として CFRP を高温で燃焼し樹脂成分を焼失させ、残存した炭素繊維を回収する手法が主流であった。この方法の場合、高温に暴露させることによって炭素繊維の繊維長が変化してしまうため、回収された炭素繊維は元の物性を維持していない。本項で検討した手法は温和な条件で CFRP を分解させることができるために、分離、回収される炭素繊維の物性は損なわれていないことが期待される。今後はバージンの炭素繊維及び CFRP の物性の比較を行ったうえで、その再利用法についても検討する予定である。

3.2.9 廃自動車由来の使用済みプラスチック製品のリサイクル技術の開発：汚れや金属、塗料等の分離が困難な成分を含むもの等

(1) 方法

3.2.8 までの各項目において、廃自動車由来の様々な使用済プラスチック製品を構成する素材別のリサイクル手法の確立に向けて種々検討を行ってきた。その中で、実際の使用済プラスチック製品を調達するにあたり、自動車解体現場から発生する ASR 様の廃プラスチックが相当量発生している現実を目の当たりにした。特にその中には、自動車解体の過程において必然的に発生する端材やプラスチック屑が含まれているだけでなく、油脂等による汚れや塗装のためにリサイクルが困難と思われる様々な複合物がみられた。今後自動車の精緻解体が進んでいく過程においても、一定量排出され続けると推定される混合プラをリサイクルすることを想定し、これらの組成と存在形態を調査することとした。

(2) 結果及び考察

最初に、調達した混合廃プラスチックをその外観にもとづいて分類し、かつ FT-IR を用いて素材の種類を把握した。まず、形状、外観で分類すると 43 種類となり、それら一つ一つを分析することによって、内容物を明らかとした。サンプルによっては複合状態となっているものも存在していたため、その場合は別々にスペクトルを取得して分類を行った。合計約 1.2 kg の混合廃プラスチックを分類することで、結果として PP、タルク、SBR、ABS、PVC、ナイロンが一定量含まれることが明らかとなった（図 47）。

No.	2	3	4	5	6	7	8	9	10
写真									
重量(g)	480	113.5	206	6.2	56.3	26.2	10	28	16
割合(%)	40.0	9.5	17.2	0.5	4.7	2.2	0.8	2.3	1.3
特徴	灰色～黒色。硬い。 力を入れると少し曲がる。	灰色～黒色。硬い。	黒色。ゴムのような弾力がある。	灰色～黒色。柔らかく布のよう。	白色～灰色。硬い。 力を入れると少し曲がる。	白色～灰色。硬い。	少し光沢がある灰色。硬いが少し曲がる。	黒地に灰色?銀色?の表裏。力を入れると少し曲がる。	黒地に黄ばんだ白色の表裏。力を入れると少し曲がる。
IR結果	PP, タルク	ABS(ニトリル、C=C、芳香環)、炭酸塩	ポリプロピレン、タルク、SBR(C=C、芳香環)、炭酸塩	PET	ナイロン	PVC	ABS(Acrylonitrile-butadiene-styrene)	タルク(with polyethylene, C=O, chlorinated/Chlorine)	PP, タルク

No.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
写真										
重量(g)	15	4	22	0.3	14.5	5.5	5.7	2	4.7	3.6
割合(%)	1.3	0.3	1.8	0.0	1.2	0.5	0.5	0.2	0.4	0.3
特徴	灰色～黒色。柔らかい。 2mmくらいの薄さ。	黒色のシート状。ペラペラしている。	黒色に灰色の表裏。 ゴムのような弾力がある。	直径1mmくらいの筒状。 鋼線?が入っている。曲げられる。	スポンジ状のものがついている。黒い部分はより堅い力で曲げられる。	白い部分は硬い黒い座席シートのようないわゆるシート状。	灰色。2mm程度の厚さで硬いが曲げられる。	白い布が汚れて茶色っぽくなつた?	オレンジ色はツルツルしている。裏面は白い糸が見られる。	ねじのような形。硬い。片方は緑色の樹脂に見えるものが入っている。
IR結果	CaCO ₃ 、ポリエチレンかエチレン/プロピレンジエングム?	PVC	PVC?	PVC with Phthalate	PVC with Phthalate (スポンジ部分)	PET (布部分)	PP (白い部分)	PP, タルク	PET	PVC (オレンジ箇所測定)

No.	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
写真										
重量(g)	0.1	0.1	19.8	6.3	8	3.5	4.6	2.3	14.3	15
割合(%)	0.0	0.0	1.7	0.5	0.7	0.3	0.4	0.2	1.2	1.3
特徴	針金状。鋼線?曲げられ。	青～半透明の破片。 白色で硬い。車の部品のよう。	オレンジ色(黄ばんだような色)チューブ。 柔軟性で曲げられる。	半透明。柔らかいシート状。	茶色。もともとは透明?柔らかく弾力がある。	黒い筒の中に鋼線?が入っていたように見える。②の鋼線より太い。黒い部分は曲げられる。	赤い樹脂。硬い。	灰色の樹脂。硬い。	白色～灰色に表面が青色～黒色。硬い。	
IR結果	x	ガラス	PP, タルク、ポリアミド	PVC with Phthalate	PVB(ポリビニルブチラル)	PVC with Phthalate	PVC with Phthalate (黒)	ステレンアクリロニトリル or スチレンブチルメタクリレート or ABS	ABS, C=O, C-O-C(ポリアクリル酸ブチル)	ABS

No.	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
写真										
重量(g)	0.7	2.3	1	2.2	12	0.3	4.5	9.5	2	1
割合(%)	0.1	0.2	0.1	0.2	1.0	0.0	0.4	0.8	0.2	0.1
特徴	赤い半透明の破片。硬い。	半透明の破片。硬い。	白地に緑色の模様がある。硬い。	青い部品の一部?硬い。	表面が光沢がある銀色。灰色。青い色の破片で下地は黒～灰色。硬い。	薄いフィルムのよう。	表面が光沢がある銀色。下地は灰色～白色。硬い。	灰色に白い表面。硬い。	灰色の破片。硬い。	灰色の破片。表面が白っぽい。⑦よりも曲げられる。
IR結果	PMMA	ポリカーボネート	エポキシ、ガラス繊維	ナイロン	ABS	ポリエチレン	ABS	ABS	Polyphenylene oxide/Polyamid	ポリカーボネート

No.	41	42	43
写真			
重量(g)	3	3.4	4
割合(%)	0.3	0.3	0.3
特徴	白い破片。硬い。	灰色～青色の破片。硬い。	灰色。表面が白くなっている部分が多い。硬い。大きいものは何回も折りたまれたような形が見られる。
IR結果	PP	PP, タルク	x

図 47 混合廃プラスチックの分類結果

自動車に使われている樹脂総量のうち、過半がポリオレフィン類 (PE、PP) であることを踏まえると、自動車解体現場から回収された混合廃プラスチックの構成も類似の結果となつたことには納得がいく。自動車由来廃プラスチックの徹底的なリサイクルに向けては、これらのようないわゆる混合廃プラスチックをも回収ターゲットに見据えたリサイクル手法の構築が必要であると考えられる。

表 43 混合廃プラスチックの調査結果

混合廃プラスチックに含まれていたプラスチック種	存在比
PP、タルク	46.72
PP、タルク、SBR (C=C、芳香環)、炭酸塩	22.18
ABS (ニトリル、C=C、芳香環)	14.91
PVC	7.48
ナイロン	5.18
CaCO ₃ 、ポリエチレン or エチレンプロピレンジエンゴム	1.25
PET	0.81
PVB (ポリビニルブチラール)	0.67
ポリカーボネート	0.28
スチレンアクリロニトリル or スチレンブチルメタクリレート or ABS	0.19
Polyphenyleneoxide/Polyamide	0.17
エポキシ、ガラス纖維	0.08
PMMA	0.06
ポリエチレン	0.03
ポリウレタン	0.03
ガラス	0.01
不明	0.64

(3) まとめと課題

今回入手した混合廃プラスチックのサンプルには様々な素材が含まれていた。明らかに自動車由来でないものと思われる紙や木屑といったものも含まれていた。実際の混合廃プラスチックのサンプルの組成、形態については都度分類、分析、解析が必要になると思われる。特に不純物（金属）の有無や形態、状態の確認を含めた事前の分類・分別がどこまで精緻にできるかが混合廃プラスチックのリサイクルの効率に大きく影響すると予想される。

3.3 バイオマスプラスチックの素材や由来の検出技術の開発

3.3.1 目的

自動車解体現場でのプラスチック素材判別は主に素材マークの目視により行われているところ、素材判別装置を用いることで、効率と精度の向上が期待される。事業2①では近赤外線樹脂判別センサーを活用するが、同方式は黒色プラスチック部品の素材を判別できないことから、近赤外領域での高感度化と高度判別アルゴリズムの可能性を検討し、併せて中赤外領域での装置小型化の可能性についても検討し、黒色プラスチックを含むプラスチック素材判別技術を高度化することを目的とする。

また、AMS や LSC に代わり、回収されたプラスチック部品のバイオマス割合を自動車解体現場で計測できる CRDS 等の革新的な光学的計測手法の検討を行う。加えて、前処理や不純物の解析についても検討し、複合的な計測により由来判定技術を確立することを目指す。

令和6年度は、黒色プラスチックの素材判別のため、近赤外領域での高感度化と高度判別アルゴの可能性を検討すること、及び、AMS や LSC に代わる CRDS 等の光学的計測手法の適用可能性について整理することを目的とした。

3.3.2 バイオマスプラスチックの素材の検出技術の開発

(1) 方法

1) 近赤外線、中赤外線での樹脂判別評価

黒色サンプル (PP、PE、PVC、PS、ABS、PP/PE)、グレーサンプル (カーボンブラック濃度振り、PP、PE、PP/PE)、添加剤入りサンプル (タルク、ガラスファイバー、カーボンファイバー、セラミックファイバー) を作成し、近赤外線、中赤外線での分光測定を実施した。

2) 黒色樹脂に対応した樹脂判別技術の開発

黒色樹脂判別が可能なセンサー方式選定を行い、評価用実験機の立ち上げ、特性評価を実施する。

(2) 結果

近赤外線、中赤外線での樹脂判別評価

・黒色サンプル、グレーサンプルの評価

図 48 に作成したグレーサンプル (カーボンブラックの濃度振りサンプル) の写真と弊社の近赤外方式の樹脂判別センサーでの判別結果を示す。結果としては、カーボンブラック含有量が約 1%以下であれば判別が可能であるがそれ以上では判別ができない結果となった。測定できたグレーの色合いとしては写真中の赤枠で囲ったものである。また、判別は可能であったカーボンブラック 1%以下のサンプルであっても、判別時の相関係数は低下が見られ、PP/PE 比率算出結果も誤差が大きくなっている。これらのカーボンブラック濃度であっても反射光量が減少している。表 44 にカーボンブラック含有量と近赤外方式センサーでの測定結果のまとめを示した。

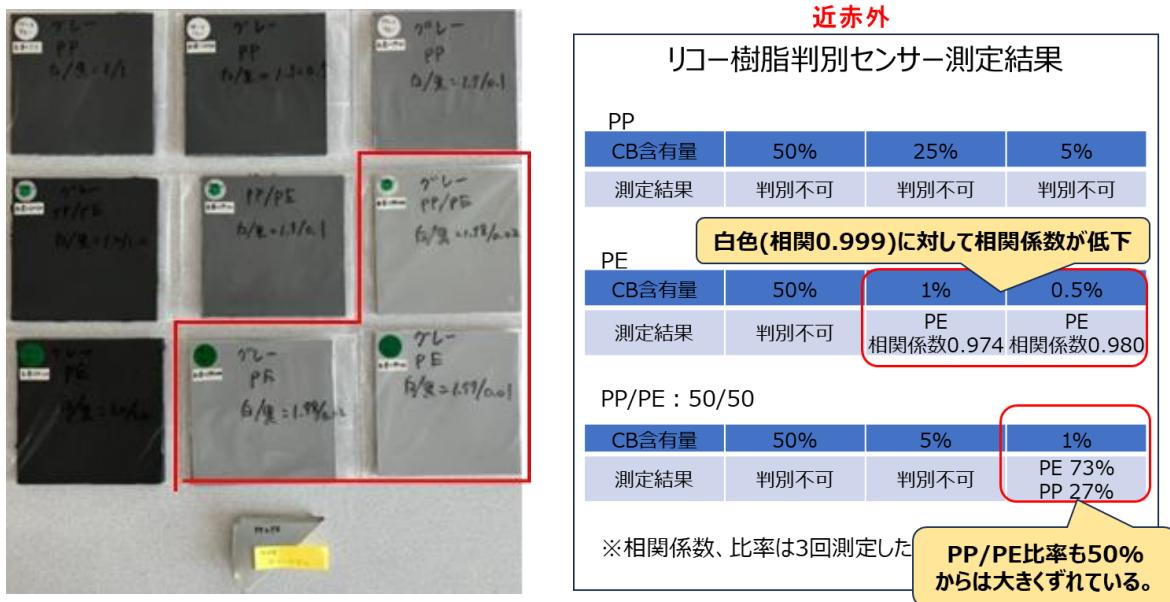


図 48 作成したグレーサンプル（カーボンブラック濃度振りサンプル）写真
及び近赤外方式の樹脂判別センサーでの判別結果

表 44 カーボンブラック含有量と測定結果まとめ

カーボンブラック (CB)含有量	リコー樹脂判別センサー測定結果
50%	判別不可
25%	判別不可
5%	判別不可
1%	判別可
0.5%	判別可

図 49 に、作成した黒色サンプルの中赤外領域での測定結果を示す。このように中赤外領域ではカーボンブラックの濃度に依らず樹脂のスペクトルが測定できている。詳細データは示さないが作成したその他の黒色樹脂サンプル（PVC、PS、ABS、PP/PE）についてもスペクトル測定は問題ない。

以上より、近赤外線方式ではカーボンブラック含有量が約 1%を超えてくると測定が困難であり、近赤外線がカーボンブラックに吸収されるという原理的な問題もあるため、黒色樹脂への対応としては近赤外分光の改良ではなく、中赤外分光を中心に検討を進めていく。

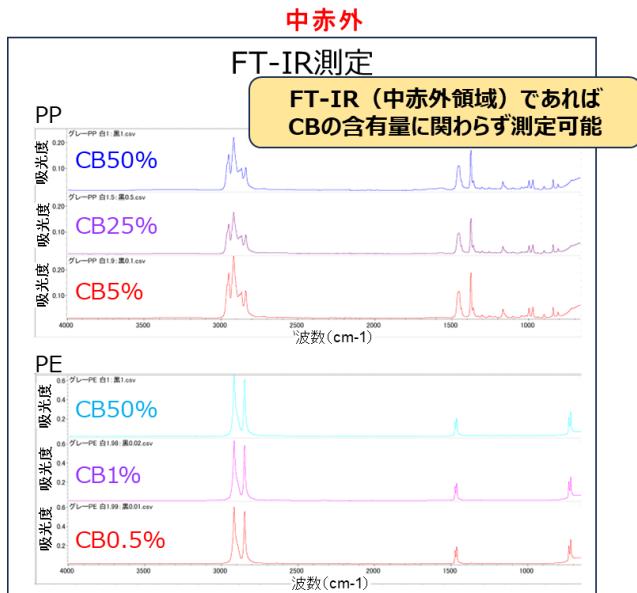


図49 黒色サンプルの中赤外領域測定結果

・添加剤入りサンプルの評価

添加剤入りのサンプルはタルク、ガラスファイバー、カーボンファイバー、セラミックファイバーをそれぞれ 10%、20%、30%の含有量として作成した。以下の図 50～53 にそれらのサンプルを近赤外線、中赤外線で測定した結果を示す。タルクに関しては近赤外、中赤外どちらでも判別が可能であった。近赤外線領域では 1390nm 付近に吸収ピークが見られた。タルクは無機物であるが分子構造中に H_2O を含んでおりその吸収ピークが検出されていると考えられる。ガラスファイバー、カーボンファイバー、セラミックファイバーに関しては近赤外線では判別はできなかった。これらは無機物であり、カーボンファイバーはさらに黒色であるため近赤外線領域では判別ができない。一方で中赤外線領域では、波数 1200～650 cm^{-1} 付近（点線赤枠部）で右肩上がりにスペクトルが傾く傾向が得られており、添加剤の有無、含有量に関しては判別できる可能性が確認できた。この可能性も含めて中赤外分光方式の技術開発を進めていく。表 45 に添加剤入りサンプルの近赤外線領域、中赤外線領域での評価結果のまとめを示した。

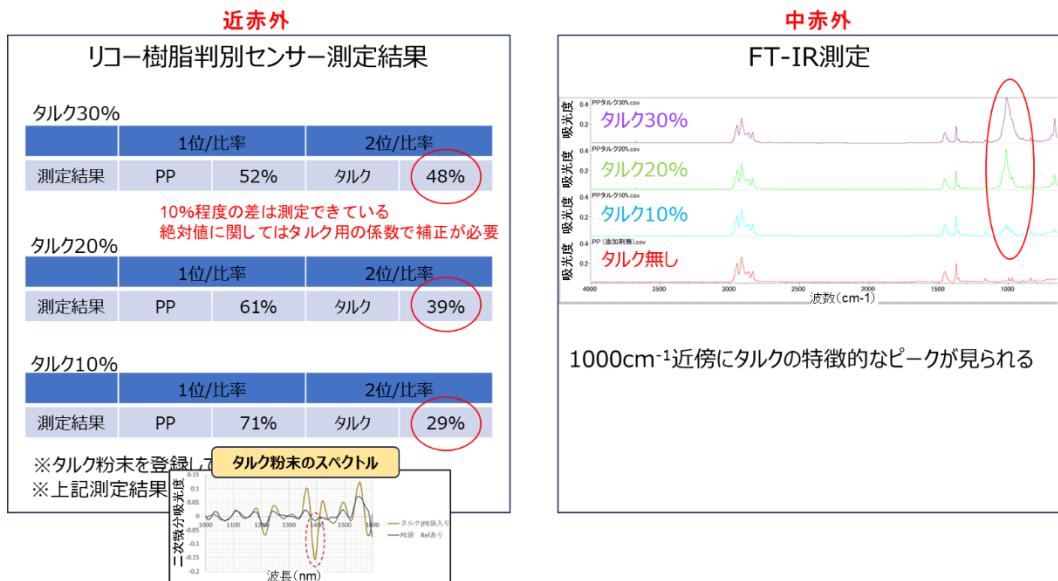


図 50 タルク含有サンプル測定結果

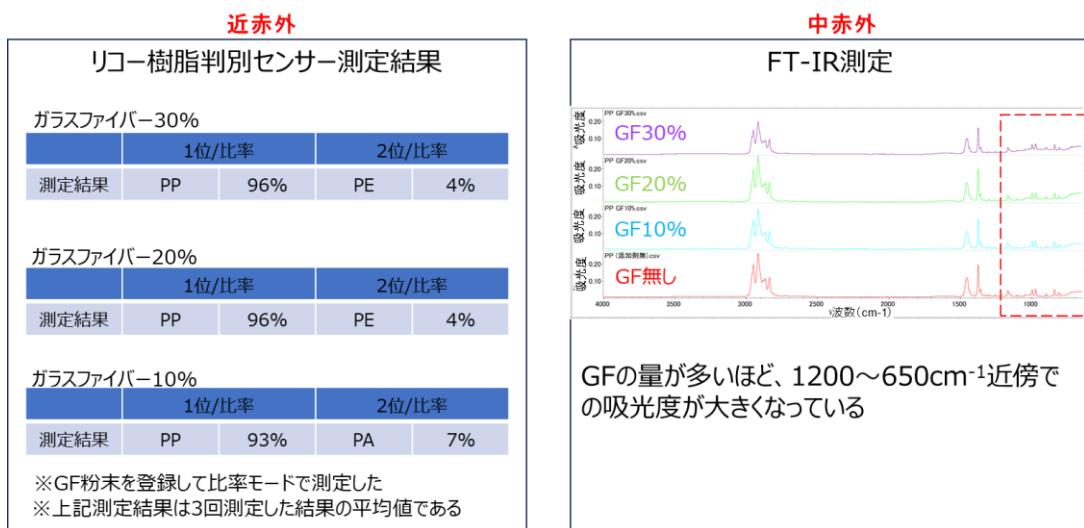


図 51 ガラスファイバー含有サンプル測定結果

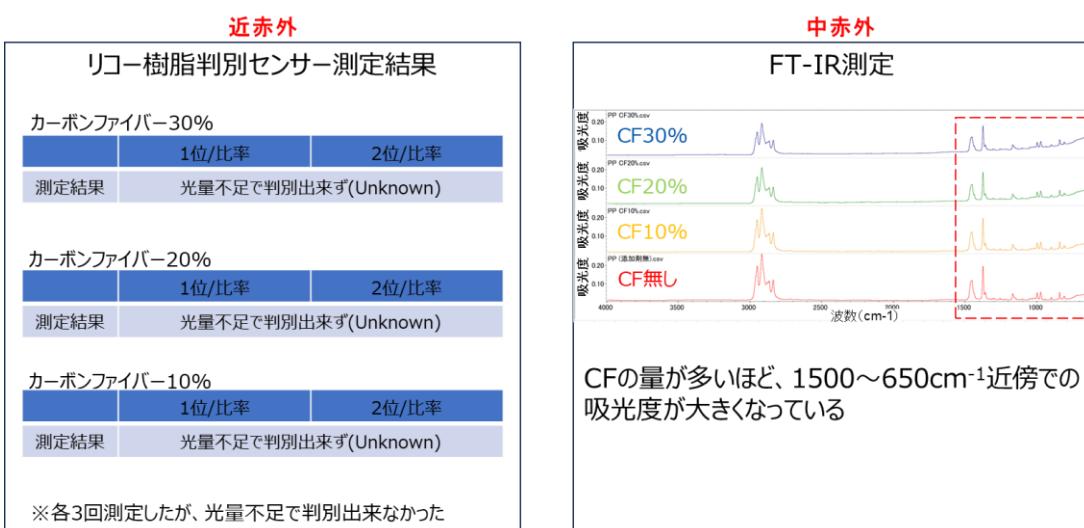


図 52 カーボンファイバー含有サンプル測定結果

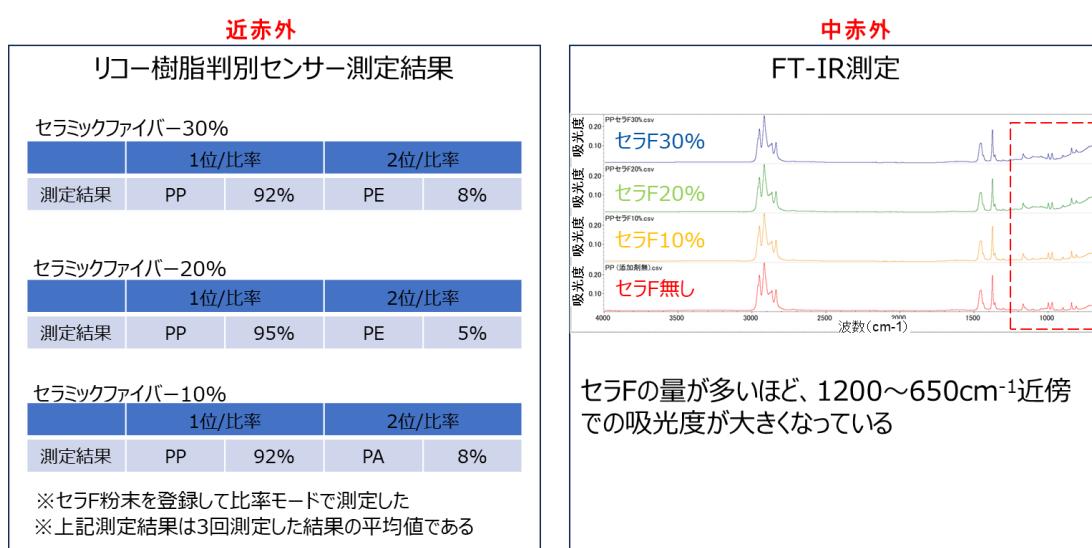


図 53 セラミックファイバー含有サンプル測定結果

表 45 添加剤入りサンプルの測定結果まとめ

	近赤外	中赤外
	リコー樹脂判別センサー測定結果	FT-IR測定結果
タルク	検出可	検出可
ガラスファイバー	検出不可	検出可能性あり
カーボンファイバー	検出不可	検出可能性あり
セラミックファイバー	検出不可	検出可能性あり

黒色樹脂に対応した樹脂判別技術の開発

・方式選定

表 46 に各種方式の比較表を示す。黒色樹脂に対応可能な方式としては、中赤外分光方式かラマン分光方式となる。ラマン分光は光源にレーザーを使用するためオンサイトでのハンディ使用を考慮すると安全性に懸念がある。また、蛍光や散乱の影響を受けやすく樹脂によってはスペクトルの取得ができない場合がある。中赤外線領域は樹脂の分子振動の基本吸収帯であるため、樹脂特有の吸収が強く表れ非常に感度が高い。中赤外分光の ATR 方式は黒色樹脂判別としては比較的良好く使用される方式であるがサンプルと ATR クリスタルの接触状態に影響を受けるためオンサイトでの測定時は影響が懸念される。拡散反射方式は非接触測定も可能であり、オンサイト測定での利便性にメリットがある。前項での中赤外分光による黒色樹脂判別評価、添加剤含有サンプル評価の結果も併せて、開発する方式としては中赤外分光の拡散反射方式を中心進める。受光量が少ないデメリットはあるがそこは開発課題として本実証事業の中で取り組んでいく。

表 46 各方式の比較表

方式	優先度	黒色樹脂判別	メリット	デメリット
近赤外分光	一	×	・小型、安価 ・サンプル前処理不要 ・ガラス影響なし	・水分影響あり ・微量成分は測定不可
中赤外分光 拡散反射 ATR パッシブ型	◎ ○ ○ △	○ ○ △	・サンプル前処理不要 ・非接触測定が可能 ・高感度 ・光源が不要	・水分影響あり、ガラス吸収あり ・反射光量が少ない ・サンプル接触状態の影響あり ・センサーとサンプルの温度差必要
ラマン分光	△	△	・サンプル前処理不要 ・水分、ガラス影響がない	・光源にレーザーを使用する（安全性） ・蛍光、散乱の影響が大きい
蛍光X線	一	×	・異物等の元素分析可能	・樹脂の判別ができない

・評価用実験機の立ち上げ

図 54 に基本構成（干渉光学系）、図 55 に評価用実験機の構成を示す。分光方式としては光利用効率が高いフーリエ変換型とし、干渉光学系はオンサイト使用での安定性と小型化実現のため光学素子が少なく光路分岐のないシングルパス方式を採用した。評価用実験機は基礎特性の評価が目的であり、各光学素子を光学定盤上に配置しアライメントした簡易的なものとなっている。本実験機の構成で干

涉系の光学シミュレーションを行い、基本信号であるインターフェログラムが取得できることを確認した。図 56 に光学シミュレーションで得られたインターフェログラムを示す。図 57 試作した価用実験機の外観写真を示す。光学ブレッドボード上に各光学素子を配置し、光学アライメントを実施している。図 58 に評価用実験機で取得したインターフェログラムを示す。サンプルは黒色の PP フィルム、測定は透過方式で実施し、インターフェログラムが取得できることを確認できた。今後は継続して黒色樹脂の吸光度スペクトルの取得および反射型測定での評価を実施する。

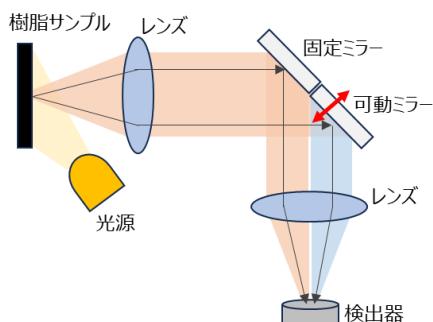


図 54 基本構成（干渉光学系）

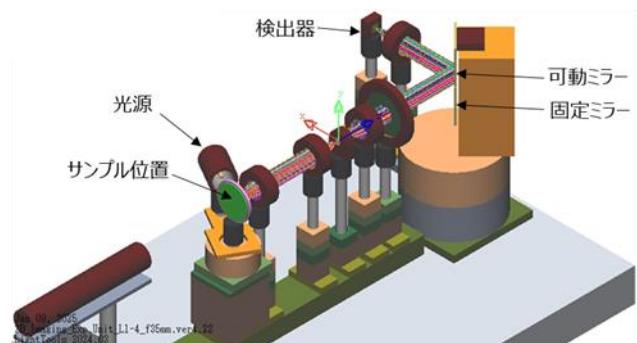


図 55 評価用実験機の構成

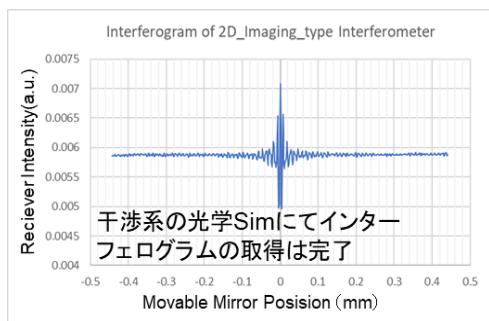


図 56 光学シミュレーション結果

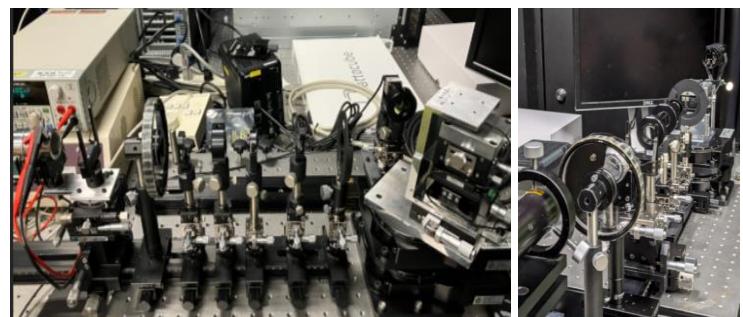


図 57 評価用実験機の外観写真

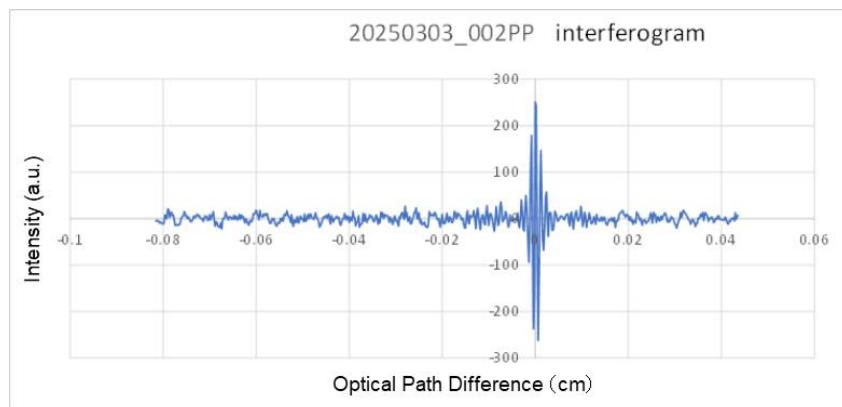


図 58 評価用実験機で取得したインターフェログラム

(3) まとめと課題

1) まとめ

弊社の樹脂判別ハンディセンサーを用いて、近赤外線方式での樹脂判別性能と黒色樹脂のカーボンブラック含有量との関係を評価した。結果としてはカーボンブラック含有量が約1%程度までであれば判別は可能であるが、それ以上の含有量であれば判別が困難であることが分かった。カーボンブラック含有量が約1%程度の場合、見た目では薄いグレーであるがそれでも判別が困難なものがある。グレー、黒の自動車部品プラスチックの判別には近赤外方式の判別センサーは使用できないことを改めて確認できた。また、中赤外線を用いた分光では黒色樹脂の判別が可能であることを確認した。

黒色樹脂のオンサイト分別に向けた判別技術方式の検討を行った。既存のラボ用分析装置での黒色樹脂判別性能、小型化のポテンシャル、オンサイト分析における利便性や安全性の面から拡散反射型の中赤外線方式を第一案として選定した。

分光方式としては光利用効率が高いフーリエ変換型とし、干渉光学系はオンサイト使用での安定性と小型化実現のため光学素子が少なく光路分岐のないシングルパス方式とした。評価用実験機の立ち上げ、透過測定にて黒色PPフィルムのインターフェログラムの取得が可能であることを確認した。

自動車の樹脂部品はタルクや各種ファイバーなどの添加剤を含有するものが多く、リサイクルのためにこれらを検出し分別する必要がある。中赤外線を用いた分光でこれらの添加剤の検出可能性を評価し、中赤外線領域での添加剤の含有有無を検出できる可能性があることを確認できた。

2) 課題

現状の評価用実験機は基礎特性評価用のため、小型化、低コスト化についてはまだ考慮できていない。次年度はオンサイト測定の実現に向けて少なくとも現場に持ち込めるサイズの試作機を実現する必要がある。また、現在検討している拡散反射方式の場合は反射光量が少ないため、小型化と同時に光利用効率を向上していく必要がある。

3.3.3 バイオマスプラスチックの由来の検出技術の開発

(1) 方法

大気中の CO_2 には一定割合で放射性炭素同位体 (^{14}C) が含まれている。この割合は、植物の光合成により内部へ固定化される。一方、化石由来の場合は、半減期が 5,730 年であり、地中に埋蔵されている間にはほぼ全量が崩壊しており、 ^{14}C 濃度を測定することはできない。この ^{14}C を測ることで、非化石由来、つまりバイオマス由来かが判別できる。ただし、大気中の ^{14}C の濃度である 1×10^{-12} とかなり微量のため計測が非常に困難である。

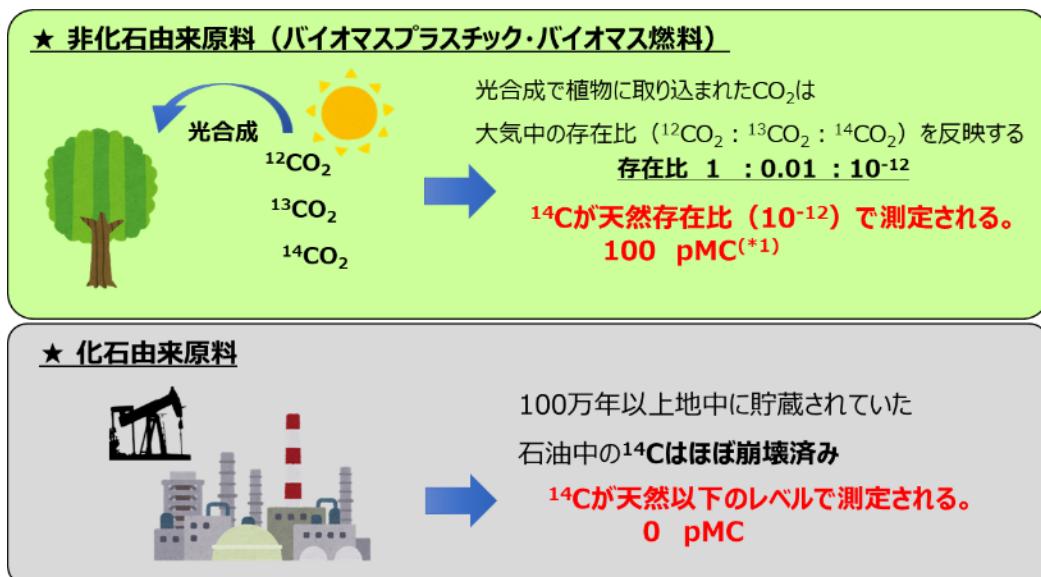


図 59 由来による放射性炭素同位体濃度の違い

(*1) pMC (Percent Modern Carbon) : 1950 年のバイオマス中の $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比を 100pMC と定義

この ^{14}C 濃度測定法は米国試験材料規格 ASTM D6866-12、ヨーロッパ規格 CEN/TS16137、ISO 国際標準規格 ISO/CD16620 で規定されており、具体的な手法として、加速器質量分析法 (AMS)、液体シンチレーションカウンタ法 (LSC : Liquid Scintillation Counter) 等がある。

一方、廃自動車解体現場でのプラスチック素材判定するためには、前処理や装置自体の大きさ、測定環境や時間を考慮する必要がある。そこで、上記の AMS と LSC に関して前処理などを含めて比較表にした。その中で、解体現場での計測を可能とする、レーザー分光法であるキャビティリングダウン分光法 (CRDS : Cavity Ring-Down Spectroscopy) を有力候補として挙げている。

(2) 結果

独自に、AMS と LSC、CRDS に関して、バイオベース度計測の前処理などの比較しその結果を表 50 に示した。現場での計測を考慮し、測定感度および精度を確保つつも、前処理に手間がかからず自動化が可能なことを考慮すると、テーブルトップサイズである CRDS が最有力候補となる。

表 47 バイオベース度計測手法の比較（独自調査結果）

	測定装置		
	AMS	LSC	CRDS
前処理	ガス化	ガス化	ガス化
	夾雑ガストラップ	夾雑ガストラップ	夾雑ガストラップ
	グラファイト化	ベンゼン変換	不要
前処理時間	約2日	～10日	数時間
計測時間	10～30分	4～12時間	～10分
測定感度	10^{-15}	10^{-13}	10^{-14}
測定精度(pMC)	0.2%～2%	2%～5%	5%
設置サイズ等	大型施設 (超高真空)	シールドが必要	テーブルトップ (前処理含む)

さらに、各前処理から計測までの過程を図 60 に示した。

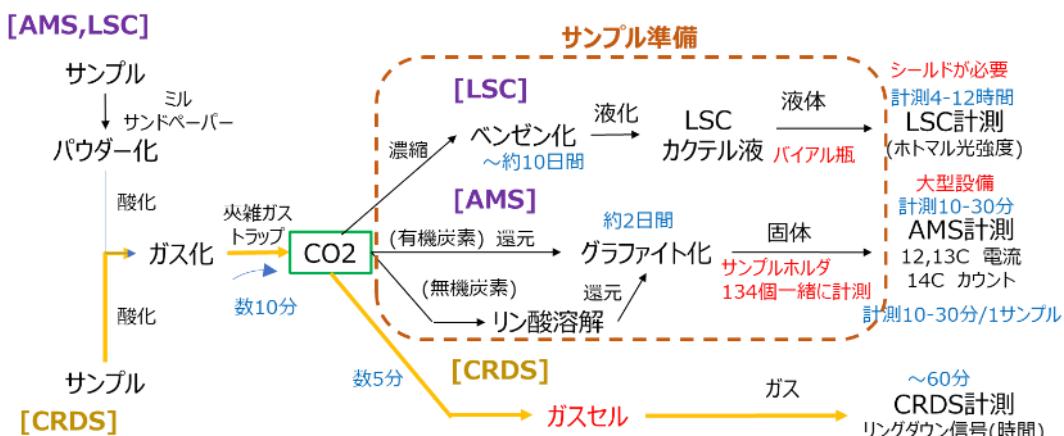


図 60 計測装置別計測過程（前処理から計測まで）

AMS は、試料を CO_2 に変換してさらにグラファイトに還元した後、このグラファイトをイオン化して炭素 12、13 及び 14 の割合が測定できる加速器にかけて質量分析し、 14C の割合を計測する。測定時間は数十分であるが、前処理のグラファイト化には数日を要する。また、LSC は試料を CO_2 に変換し、さらにベンゼンに転換して液体シンチレータと混合してシンチレーションカウンタにかけ、 14C 数をカウントする。外部放射線の影響を受けるため、完全なシールドが必要であり、前処理としてベンゼンへの転換に数日以上の時間を要し、露光時間も 4 時間以上必要となっている。以上のように現場では計測手法として、前処理の手間、測定時間、設置場所、運用コストなどが挙げられる。一方、CRDS は開発段階ではあるが、現行手法と同様に前処理は試料を CO_2 に変換する必要があるが、測定時間が 10 分程度で済むこと、また卓上サイズであることなど現場での計測装置の最有力候補となる。

(3) まとめと課題

今回、現場での 14C 計測に適した計測手法の検討を行った。その結果、CRDS が候補として有力

であることがわかった。今後は装置に必要な仕様に関して調査を継続する。

具体的には、下記項目を実施することとしたい。

- オンサイト（自動車解体現場）での要件調査
- オンサイト計測に適した手法の検討
- 夾雑ガスの調査
- CO₂ガス選択分離手法の調査
- 実際のサンプル計測によるバイオベース度の調査（純バイオマスプラスチック、使用済みバイオマスプラスチック等）

3.4 事業2の成果の要点

「事業2：長寿命用途バイオマスプラスチックのリサイクル技術開発」では、廃自動車からの回収量が確保できかつ回収が容易なパーツを回収候補として、一次手解体と一次ニブラ解体の2業者で精緻解体を実施した。その結果、手解体の方が、確実に回収ができる、解体時に欠損が生じないといった理由から回収量が多くなる一方、ニブラ解体では単位時間で回収できるのに要した時間が短くなるという結果が得られた。

また、回収されたバイオエンプラでMRに不向きな低品質なものや不純物（金属や塗料など）を含むもの、素材別に分別が難しい複合材料などを想定し、ポリマー成分やモノマー成分のみを効率よく回収できるCR技術の開発に取り組んだ。

黒色の自動車部品プラスチックの判別には近赤外方式の判別センサーは使用できないが、中赤外線を用いた分光では判別が可能であるとともに、タルクや各種ファイバー等の添加剤の含有有無を検出できる可能性があることを確認した。また、回収するプラスチックのバイオベース度を計測する方式として、現場での計測で前処理に手間がかからず自動化が可能なことを考慮し、テーブルトップサイズであるCRDSを最有力候補として選定した。

本年度の各課題に対する主な検討成果は以下に示すとおりである。

3.4.1 自動車用途バイオマスプラスチックの解体・判別技術の開発

PP材を中心に、回収量が確保できる、もしくは回収が容易であるパーツを回収候補として選択し、一次手解体と一次ニブラ解体の2業者で9台ずつ、計18台の廃自動車を解体し、その解体性や回収量について調査した。その後、同じ型式の廃自動車3台ずつ、計6台から100g以上の小さなパーツまで解体・回収し、その解体性や回収量を調べた。その結果、車種、パーツによる回収量、回収時間のばらつきが大きく、精度を上げるにはさらにデータ数が必要であるが、小さなパーツまで含めた精緻解体により回収量は増加すること、回収量が期待できるPPパーツはバンパー、ドアパネル、インストルメントパネル次いでトランクコンポーネント、ピラー、ヒーティングシステム等であること、手解体とニブラ解体（一次）を比較すると、確実に回収ができる、解体時に欠損が生じないといった理由から手解体の方が回収量が多くなることが判明した。一方、ニブラ解体では単位時間で回収できるのに要した時間が短い結果となった。回収量を確保しつつ短時間で回収できるようにするには、回収が容易なパーツの一次手解体とその他のパーツの一次ニブラ解体の組合せ、二次解体が容易になるようなパーツ設計が必要と考えられる。

3.4.2 自動車用途バイオマスプラスチックのケミカルリサイクル技術の多様化

自動車用途のバイオエンプラが廃自動車から回収された後の再利用技術としてMRに不向きなバイオエンプラのCR技術の開発に取り組んだ。具体的には、バイオPCであるDURABIOの二軸押出処理における処理回数と劣化度合いの相関を検証。エポキシ樹脂硬化物を分解可能な分解液組成を開発し、加温した分解液にプリント基板を浸漬することでエポキシ樹脂硬化物以外の樹脂についても分解できることを確認。金属やガラス繊維も回収した。またPET、PBT、ABS、PCを溶解する二種の溶媒の組合せでこれらの混合物からそれぞれの樹脂を分離できることを確認。ワイヤーハーネスから溶媒によりリサイクルPVCとリサイクル銅を高収率で回収できた。またこの溶媒の活用等により、ウェザーストリップの材質判断（PVC製かゴム製）が可能となった。またポリウレタンの解重合可能な温度、圧力条件の選定により効率よく分解とともに後処理によりジアミンの単離に成功し

た。さらに汚れや金属、塗料の分離が困難な成分を含む混合廃プラスチックに対し、外観検査、FT-IR による素材判別等により分類できることを示した。

3.4.3 バイオマスプラスチックの素材や由来の検出技術の開発

樹脂判別ハンディセンサーを用いて、近赤外線方式での樹脂判別性能と黒色樹脂のカーボンブラック含有量との関係を評価した。結果としてはカーボンブラック含有量が約 1%程度までであれば判別は可能であるが、それ以上の含有量であれば判別が困難であることが分かった。カーボンブラック含有量が約 1%程度の場合、見た目では薄いグレーであるがそれでも判別が困難なものがある。グレー、黒の自動車部品プラスチックの判別には近赤外方式の判別センサーは使用できないことを確認した。一方、中赤外線を用いた分光では黒色樹脂の判別が可能であること、小型化のポテンシャル、オンライン分析における利便性や安全性の面から拡散反射型の中赤外線方式を黒色樹脂の判別方式の第一案として選定した。また、添加剤の含有有無を検出できる可能性があることを確認した。

回収するプラスチックのバイオベース度を計測する方式として、AMS、LSC 及び CRDS の比較評価を行った結果、現場での計測を想定し、測定感度および精度を確保つつも、前処理に手間がかからず自動化が可能なことを考慮すると、テーブルトップサイズである CRDS が最有力候補となった。

4. 脱炭素化資源保全時代のライフサイクル設計の在り方検討（事業3）

4.1 バイオマスプラスチック国産原料開発

4.1.1 目的

国内での栽培実績がある資源作物の一つとしてソルガムを取り上げ、汎用バイオマスプラスチック・バイオエンプラの国産原料として活用することを目的に、収量増とコスト削減を実現するソルガム栽培方法を検討する。具体的には、温暖かつ台風影響が少ない暖地での栽培に適した糖分高含有品種を選定するとともに、安価に調達可能なバイオガス化残渣（消化液）を肥料に用い、既存の作業機を援用した栽培管理・生産性向上技術の確立に向けた検討を行う。また、ソルガム搾汁残渣を肥料として活用し、ソルガムが吸収した窒素・リン酸等の植物栄養素の循環利用技術の開発を進める。

令和6年度は、国内で入手可能な高糖分ソルガム3品種を国内の温暖かつ台風の影響が少ない暖地（瀬戸内の圃場を想定）において各1a程度の規模にて試験栽培し、栽培に適した糖分高含有品種を選定することを目的とした。また、収穫したソルガムからバイオエタノールを試験的に製造し、事業1①の検討に供した。さらに、バイオガス化残渣（消化液）を肥料に用いることや既存の作業機の援用等による生産性向上に向けた技術の有効性を検証した。

4.1.2 ソルガムの試験栽培と搾汁液調製

（1）方法

これまでのわが国でのソルガムを材料としたバイオエタノール製造に関する文献を調査し、「スイートソルガム研究会報告書」((一社)アルコール協会編、平成28年)と「バイオ燃料農業生産を基盤とした持続型地域社会モデル」(環境省、茨城大学農学部)に基づき、甘味ソルゴー(カネコ種苗、本稿中ではCANと省略)、クミアイソルガムハチミツ(タキイ種苗、本稿中ではTACと省略)、スーパーシュガーソルゴー(雪印種苗、本稿中ではYUCと省略)の3品種を使用することにした。

栽培には西日本から、京都市（2圃場）、岡山県笠岡市、愛媛県東温市の3カ所を選んだ（図61）。京都市は花崗岩風化物から構成される水田転換畑で3a、笠岡市は笠岡湾干拓地の海成粘土から構成され、一部に建築廃材のコンクリート片が混入した高pH土壤で30a、東温市は沖積地水田のハダカラムギ跡地10aで今年は水田にせずソルガムを播種した。栽培試験に用いることができる圃場はなんらかの訳ありの土壤であり、栽培による土壤改良も本試験の主題でもある。



図61 西南日本での栽培試験地

播種密度や最適施肥量を知るため、京都市圃場1で先行栽培を実施した。その結果に基づき、条間は1m、株間は1mに30g種子、播種深度3cmとなるよう自動播種機を設定し、1条ずつ播種機を動かした。施肥は10aあたり窒素-リン酸-加里がそれぞれ10kgとなるよう高度化成肥料15-15-15を与えた。石灰は与えなかった。

2024年7月、用意したソルガム3品種を3つの栽培試験地に播種した。京都圃場2では圃場1に準拠して播種した。笠岡市圃場では7月、圃場整備を進め8月1日に3品種を播種した。肥料として牛糞堆肥を10aあたり5トン与え、化学肥料は与えなかった。東温市圃場でも7月を待って播種した。施肥は京都圃場に倣った。

(2) 結果

京都圃場1で先行栽培したソルガムは順調に生育し稈長3mを超えたが出穂はせず、稈を収穫して搾汁しブリックス糖度を測定したが5程度であった。8月に入ると品種CANで出穂が始まり、9月にはTAC、YUCでも出穂が始まった。出穂が始まって2週間ほどで開花した(図62)。この時期になると稈搾汁液のブリックス糖度が上昇し始めCANでは10を超えるようになり、8月末には15近くの試料も得られるようになってきた。そこで一部をGreen Earth研究所に試料として送付した。京都市圃場2の様子を図63に示した。順調に生育していたが8月下旬の強雨によって一部倒伏した。



図62 京都第一圃場でのソルガムの生育の様子(2024年8月)
写真右手3列が品種CANであり、この品種だけ出穂しているのがわかる。

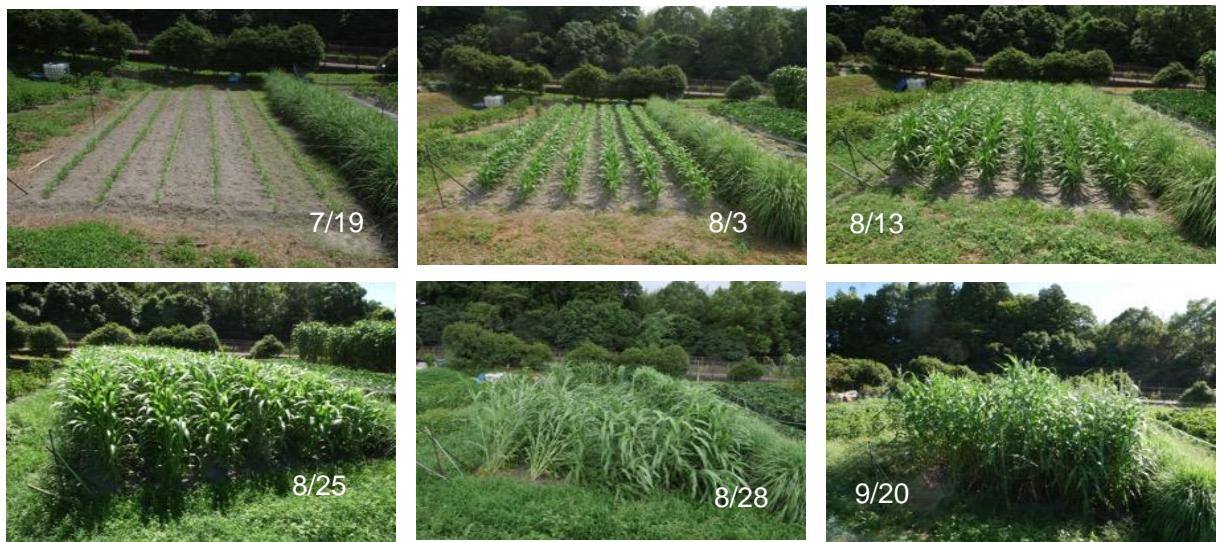


図 63 京都第二圃場でのソルガムの生育の様子。

8月 28 日の強雨強風で倒伏した。9月 20 日でも出穂しなかった。

笠岡圃場でも生育は順調であったが、生育速度が遅く、品種 CAN では葉の黄化が顕著で、鉄欠乏が疑われた。笠岡での栽培の様子を図 64 に示した。土壤 pH を測定したところ 8.9 で干拓地での塩類集積も疑われた。しかし品種 TAC、YUC は成長し 11 月には稈長 4m 程度まで生育した。出穂には時間がかかり、10 月に入って CAN で出穂、11 月に入り TAC、YUC で出穂した。11 月に一部をサンプリングして生育量と糖度を測定、12 月に全てを収穫した。10、11 月の様子を図 65、図 66 に示した。

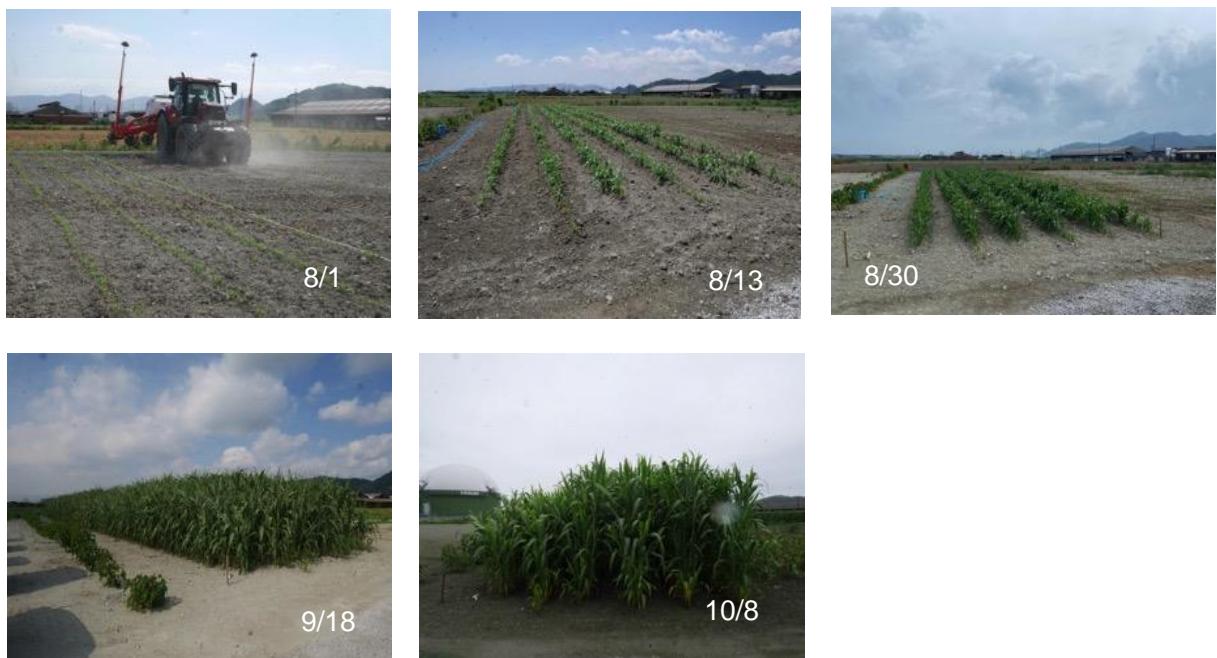


図 64 笠岡圃場における甘性ソルガム 3 品種の栽培の様子。8月 1 日播種機付きトラクターで播種した。順調に生育したが 10 月 8 日ではまだ出穂していなかった。



図 65 笠岡圃場、10月に入ると出穂が始まった。
品種 CAN (手前) は土壤高 pH の影響を受けやや小さかった。



図 66 笠岡圃場。品種 CAN (右側) は土壤高 pH の影響を受けたが
TAC、YUC (中、左側) はあまり影響されず大きくなつた。

東温圃場では発芽が遅れ生育もゆっくりしていた(図 67)。水田跡地を転用したため湿害を受け生育が遅かったと推察した。



図 67 東温圃場でのソルガムの生育の様子。見えている列は品種 YUC. TAC、YUC は 12 月まで出穂しなかった。さらに全体的に小さく、湿害を受けたのではないかと推定した。

2024 年のソルガムの栽培試験の結果を表 48 にまとめた。生育量の調査では任意の一条で 10m にわたって全ての個体を根際で刈り取り新鮮重量を測定し、その重さを 1a あたりの栽培列 110m あたりに換算して 1a あたりの生育量とした。この数値を 10 で割ると、1 ha あたりの新鮮重トン数とな

る。

京都、笠岡、東温で最も収量の多かったのは、京都7月植のYUC28トンで、TACが25トンでそれに続いた。笠岡では7月植のTACが12月に26トン、YUCが25トンの収穫量であった。東温ではやや不調でTAC、YUCで18トンであった。ブリックス糖度が高かったのは京都で栽培したCAN、笠岡で栽培したCANで16~17%を達成した。

表48 2024年甘性ソルガム栽培のまとめ。

試験地	播種日	収穫日	品種						備考	
			CAN		TAC		YUC			
			収量 (kg新鮮重/a)	糖度	収量 (kg新鮮重/a)	糖度	収量 (kg新鮮重/a)	糖度		
京都	2024.7	2024.8	180	17	200	14	190	12	先行栽培参考値	
		2024.11	220	17	250	14	280	14	CAN:強風で倒伏	
笠岡	2024.7	2024.10	140	16	200	14	220	13	土壌塩類のため 生	
		2024.12	140	16	260	15	250	13	育遅い	
東温	2024.7	2024.10	140	6	180	8	180	8	水田のため湿害	

ここではサトウキビジューサーを用いて搾汁液を調製したが、全ての試行を通して、新鮮稈からの搾汁液の回収率は30%であった。すなわちhaあたり40トンの新鮮稈が収穫できると、その稈からブリックス糖度16程度の搾汁液を12トン調製できる。

(3) まとめと課題

これらの数値は7月に播種した結果であり、本来のシーズンである5~11月に栽培して、一番刈り、2番刈りを実施すればこの数値の2倍程度、haあたり新鮮重50トンは達成できそうである。さらに、一旦出穂し開花するとブリックス糖度は1ヶ月は高いまま維持されるので、収穫期の自由度が高く、労働集中を避けることができる。しかし、一方で、出穂するまでは糖度は上昇しないので、出穂を決める因子(日長、気温、栄養状態)を知り、播種から出穂までの時間を短くできるよう肥培管理を行うことになると考えられる。

また、搾汁後に発生する稈の残渣の利用法として、牛飼料、バガス発電、土壌改良剤としての利用方法を模索する。バイオエタノール原料として甘性ソルガム栽培を軌道に載せるためにはコストダウンが必須であり、搾汁残渣の高度利用、高付加価値利用方法を模索することが重要である。来年度はチップ裁断機(図68)を用い、飼料として、バガス原料として、土壌改良剤原料として利用する。



図 68 チッパー。甘性ソルガム搾汁後の稈を粉碎して牛飼料とするため、チッパー車を導入した

4.1.3 ソルガム搾汁液を用いたエタノール発酵

(1) 方法

1) ソルガム搾汁液の調整と分析

京都農業の研究所（株）より入手した3種類のソルガム搾汁液（Tac0925、Can0928、Yuc1013）はGreen Earth研究所に到着直後より試験開始3日前までの期間は冷凍倉庫にて保管した。試験開始4日前より冷凍倉庫よりGreen Earth研究所内の低温倉庫(4°C)に移動し緩やかに解凍した。試験開始当日に解け残りがあったため、容器ごと温水に浸し完全解凍後によく攪拌し各試験に使用した。

解凍後のソルガム搾汁液は解凍後の重量、pH、ブリックスを測定後、それぞれより一部を採取し糖分析用高速液体クロマトグラフィー（分析カラム：Amine HPX-87P、検出器：RID）を用いて糖濃度を測定した。



図 69 3種類のソルガム搾汁液

2) ソルガム搾汁を用いたエタノール発酵試験

全容10L培養装置（エイブル社製）に解凍したソルガム搾汁液を1試料あたり半量（約5L）投入し、培地成分としてトリプトン50gおよび酵母エキス50gを添加した。培養槽温度を35°C、攪拌速度を47 rpm、pHをpH 5.0市販乾燥酵母（図70）50g添加後に十分に拡散させた後を培養開始としオートサンプラーを用いて0時間目、6時間目、12時間目、18時間目、20時間目のサンプルを回収した。回収したサンプルは遠心分離により菌体を取り除いた後、残糖濃度を糖分析用高速液体クロマトグラフィー（分析カラム：Aminex HPX-87P、検出器：RID）、エタノール濃度をエタノール分析用高速液体クロマトグラフィー（分析カラム：Aminex HPX-87H、検出器：RID）を用いて分析した。

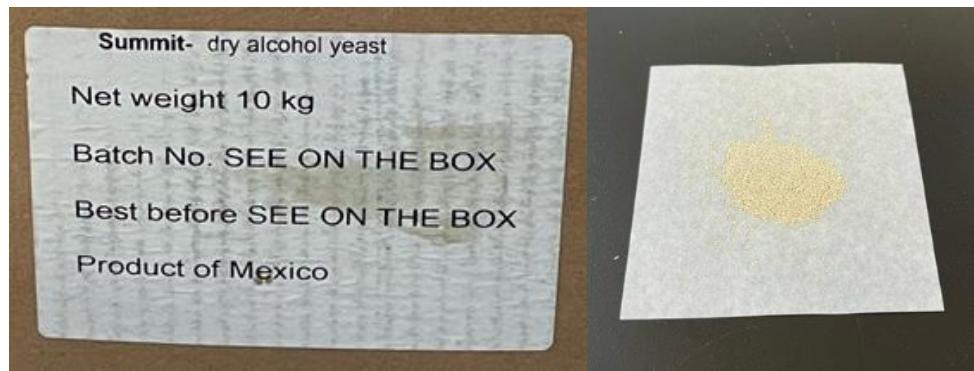


図 70 市販乾燥酵母

3) 菌体分離

20 時間目のサンプルは大型遠心分離機 (Thermo Fisher SCIENTIFIC 製) を用いて菌体と発酵液上清の分離を実施した。専用の 2L 容量の容器に分注し、5000 G で 30 分間遠心分離を行い沈降した固形分を除いた発酵液上清を回収した。

4) 発酵液上清の濃縮・蒸留

発酵液上清を薄膜式フラッシュエバポレーターにより一次濃縮した後、5L 蒸留装置を用いて蒸留を行った。運転条件については全還流を 1 hr 実施後、還流比 4 で蒸留開始し、留出液約 40 ml 毎に分取し、TOP 温度が上昇し始めた後に終了とした。エタノール濃度は密度比重計で計測し、各フラクションの臭いを確認した。

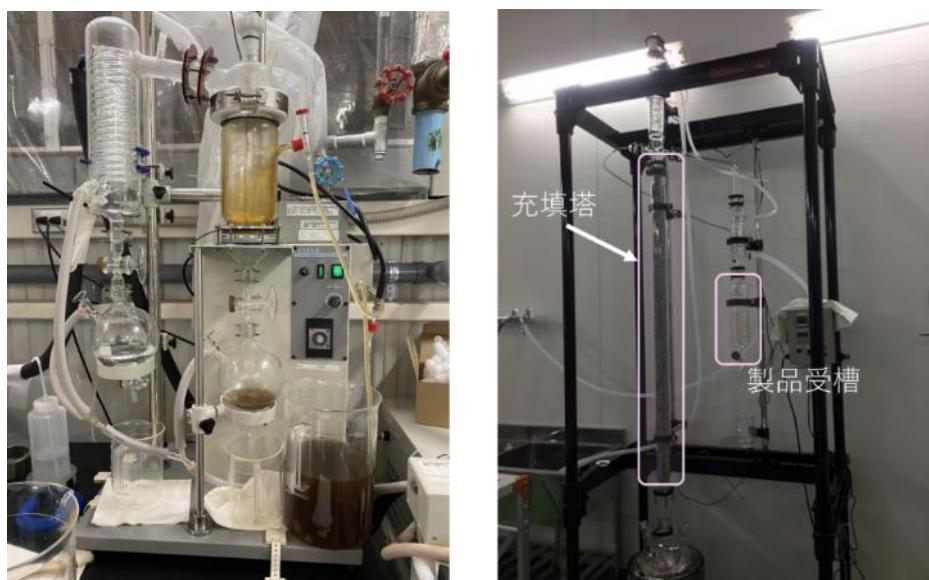


図 71 薄膜式フラッシュエバポレーター (左) と 5L 蒸留装置 (右)

蒸留装置（充填塔）の詳細を表 49 に示す。

表 49 ガラス製蒸留装置（充填塔）詳細

釜容量	5 L
塔内径	68 mm
充填高さ	1,400 mm
充填物	SUS ネット
理論段数	約 50 段

5) エタノール分析

蒸留操作によって得られたエタノール溶液の臭いの少ないフラクションを混合し、(一社) 日本海事検定協会に分析を依頼した。

(2) 結果

1) ソルガム搾汁液の糖分析結果

解凍後の搾汁液の重量を表 50、ソルガム搾汁液の各分析結果を表 54 に示した。

ソルガム搾汁液中には、酵母によるエタノールへの変換が可能であるスクロース、グルコース、フルクトースが含まれていることが確認された。

表 50 ソルガム搾汁液の重量

試料名	重量
Tac0925	10.09 kg
Can0928	9.96 kg
Yuc1013	10.95 kg

表 51 ソルガム搾汁液の分析結果

	Tac0925	Can0928	Yuc1013
pH	5.150	5.182	5.182
Sucrose	74.3 g/L	122.1 g/L	70.1 g/L
Glucose	29.2 g/L	24.5 g/L	32.3 g/L
Fructose	21.7 g/L	16.1 g/L	27.7 g/L
Brix	12.0	15.6	12.0

2) エタノール発酵試験

エタノール発酵試験中の培養装置の写真を図 72 に示した。また、発酵中のエタノール濃度の経時変化を図 73 に示した。一つの試料あたり約 5 L ずつ用いて 2 回に分割して発酵試験を実施したため、一回目の試験を（1）、2 回目の試験を（2）と表記した。すべての搾汁液において発酵は 6 時間目までにほぼ終了した。また目立った発酵阻害は認められなかった。また、1 回目および 2 回目間の比較においてエタノール濃度の経時変化に大きな差がないことが確認された。Tac0925、Can0928、Tuc1013 それぞれの発酵液より得られたエタノール濃度は 47.5g/L、67.6g/L、46.7g/L であり、糖濃度より算出した収率はそれぞれ 88.5%、88.2%、87.2% であった（発酵試験 1 回目、2 回目の平均）（表 55）。



図 72 全容 10L 培養装置を用いたエタノール発酵試験の様子

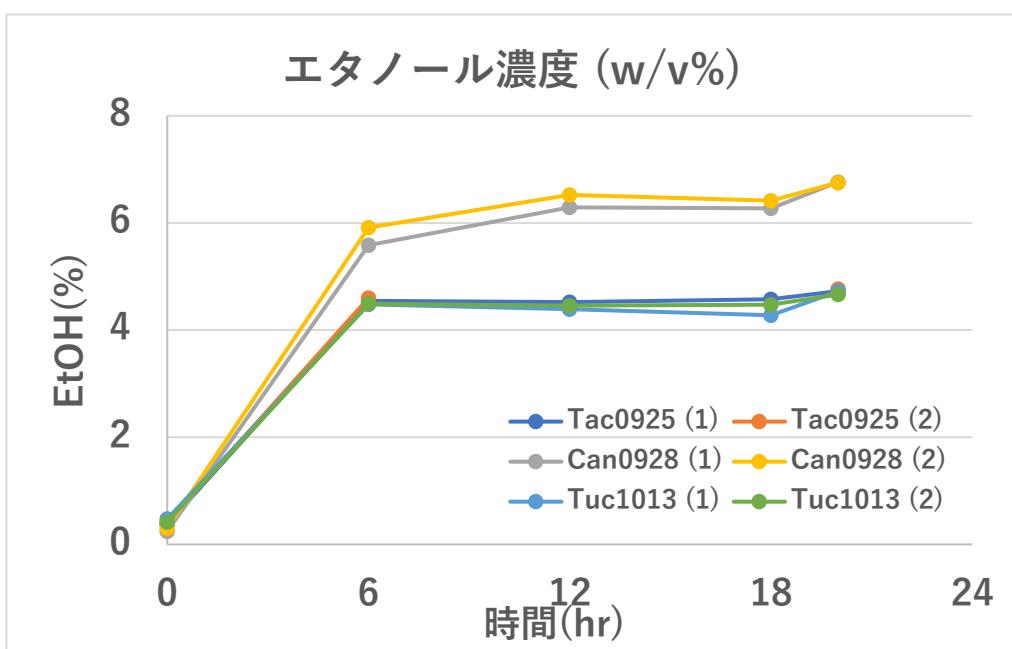


図 73 発酵中のエタノール濃度の経時変化

表 52 エタノール濃度及び収率

		Tac0925	Can0928	Tuc1013
EtOH 濃度(g/L)	1回目	47.3	67.6	47.2
	2回目	47.7	67.5	46.7
	平均	47.5	67.6	46.7
収率 (対理論値)		88.5%	88.2%	87.2%

3) 菌体分離

遠心分離機で固形分を分離し、各発酵液より約 5L ずつ上清を取得した。



図 74 遠心分離前後の比較

4) 発酵液上清の濃縮・蒸留

蒸留時に採取したサンプルについて各フラクションの採取量及びエタノール濃度を示す。また、蒸留塔頂部及び釜部の温度の経時変化を示す。

採取した低臭分サンプルについては三菱ケミカル（株）及び（一社）日本海事検定協会に 50 mL ずつ送付した。

表 53 Tac0925 由来エタノール

サンプリング(mL)	総計(mL)	濃度(Vol %)	低臭分量(mL)
40	40	97.4	
40	80	97.4	
40	120	97.2	
40	160	97.1	
40	200	97	
40	240	96.9	
40	280	96.9	
40	320	96.8	
40	360	96.8	
40	400	96.7	
50	450	95.4	
10	460	85.4	

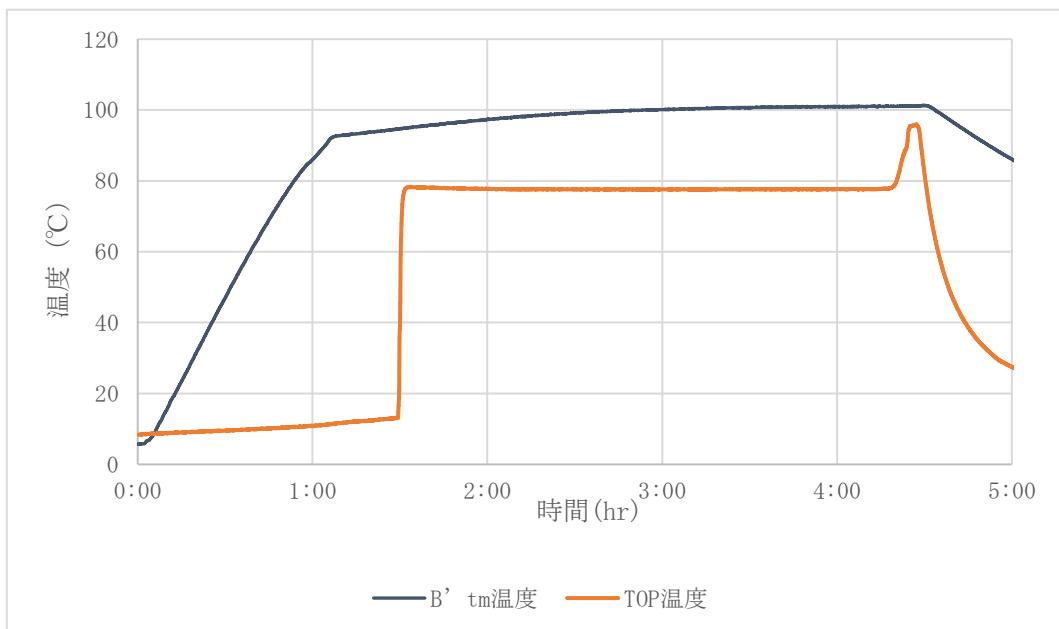


図 75 5L 蒸留塔の温度変化(Tac0925 由来発酵液)

表 54 Can0928 由来エタノール

サンプリング(mL)		総計 (mL)	濃度(Vol %)	低臭分量(mL)
30		30	96.3	
40		70	97.1	
42.5		112.5	97.1	
40		152.5	97.1	
40		192.5	97.1	
40		232.5	97	
40		272.5	97	
45		317.5	97	
37.5		355	96.9	
40		395	96.9	
40		435	96.9	
40		475	96.9	
40		515	96.8	
40		555	96.6	
40		595	95.8	
25		620	89.7	
				442.5

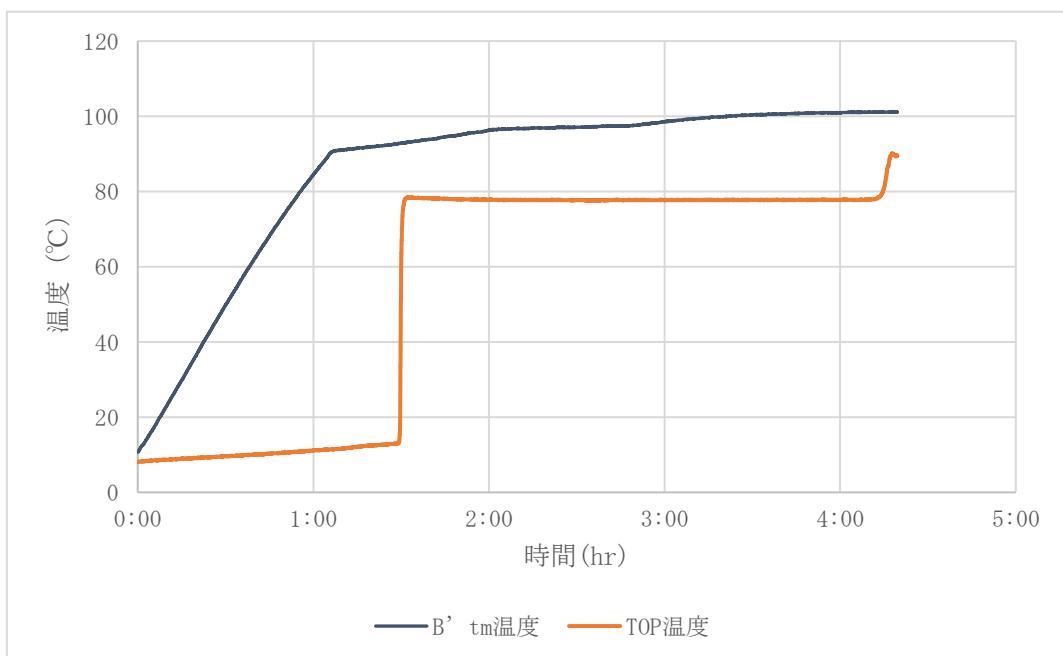


図 76 5L 蒸留塔の温度変化(Can0928 由来発酵液)

表 55 Tuc1013 由来エタノール

サンプリング(mL)	総計(mL)	濃度(Vol %)	低臭分量(mL)
40	40	95.5	
40	80	95.8	
48	128	95.8	
40	168	95.8	
40	208	95.9	
42.5	250.5	95.9	
40	290.5	95.9	
40	330.5	95.9	
40	370.5	95.8	
40	403	93.6	
			202.5

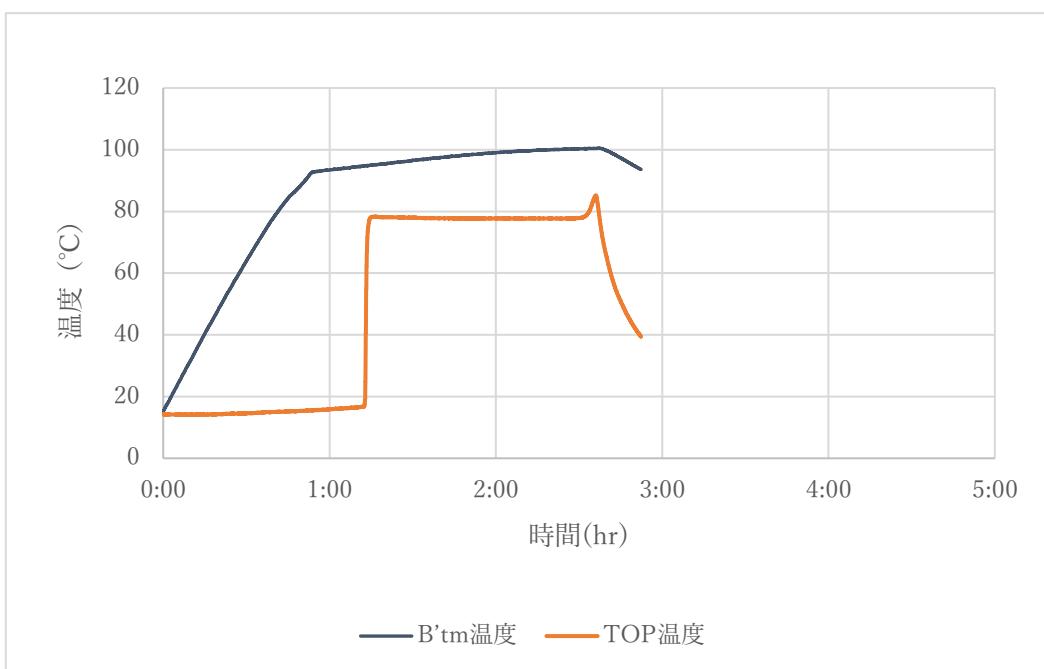


図 77 5L 蒸留塔の温度変化(Tuc1013 由来発酵液)

5) 分析結果

3種類の低臭分サンプルを日本海事検定協会にて分析した結果を表56に示す。

全窒素分においてわずかに高い数値が検出された。

表56 蒸留精製品の分析結果

分析項目	分析結果			分析方法
	試料2由来	試料1由来	試料3由来	
1. アルコール分、体積分率%	96.9	96.8	96.0	JIS K 2190
2. 有機不純物、% (w/v)				GC-FID
酢酸エチル	0.0005未満	0.0005未満	0.0005未満	
アセトアルデヒド	0.0024	0.0010	0.0013	
アセトニトリル	0.0005未満	0.0005未満	0.0005未満	
メタノール	0.0008	0.0009	0.0023	
1-ブロパノール	0.0005未満	0.0005未満	0.0005未満	
2-ブロパノール	0.0005未満	0.0005未満	0.0005未満	
1-ブタノール	0.0005未満	0.0005未満	0.0005未満	
2-ブタノール	0.0005未満	0.0005未満	0.0005未満	
2-メチル-1-ブロパノール	0.0005未満	0.0005未満	0.0005未満	
2-メチル-1-ブタノール	0.0005未満	0.0005未満	0.0005未満	
3-メチル-1-ブタノール	0.0005未満	0.0005未満	0.0005未満	
アセタール	0.0005未満	0.0005未満	0.0005未満	
3. 全硫黄分、mg/kg	1.0未満	1.0未満	1.0未満	紫外蛍光法
4. 全窒素分、mg/kg	1.3	1.4	2.1	化学発光法
5. 全塩素分、mg/kg	0.7未満	0.7未満	0.7未満	微量電量滴定法

(3) まとめと課題

3種類の搾汁液のいずれも発酵収率は高く、エタノール発酵への阻害は無いと考えられる。また、糖濃度が最も高かったCan0928由来の発酵液においてエタノール濃度が最も高くなり、蒸留後のエタノール量も多く採取された。

蒸留後の全窒素分が高めに検出されたが、この窒素分が汎用バイオマスプラスチック製造に与える影響について調査し、必要に応じて対策を検討する必要がある。

また、量産化を目指す際には、汎用バイオマスプラスチック原料としての適正なエタノール品質を明らかにするとともに、より適正な発酵条件、濃縮精製条件の検討およびスケールアップの検討が必要である。

4.2 ライフサイクルに応じたバイオプラスチックのシステム開発

4.2.1 目的

ライフサイクルに応じたバイオプラスチックのシステム開発に関わる業務では、使用と処理を通じたライフサイクルでのバイオプラスチックの耐久性を統合的に評価するため、劣化指標、機械的特性指標および生分解性指標それぞれの間の関係性を調査し、劣化に伴う機械的特性と生分解性の変化を説明可能な指標を絞り込むことを目的とした。

まず、PBS、PHBH がそれぞれ使用されているごみ袋をそれぞれの実験用途別の形状にカットしたものを試験片として、加水分解の促進を意図した高温多湿条件に制御されたチャンバーに設置し、促進劣化試験を実施した。

先行研究では、ポリ乳酸（PLA）や PBS などの生分解性プラスチックにおいて、劣化指標と機械的特性、および生分解性との関係が議論されている。例えば、加水分解の進行度を制御した PBS を用いた研究では、機械的特性と土壤中での生分解速度が調査され 1)、PBS の引張強さおよび生分解速度が、加水分解による平均分子量の変化に依存することが示されている。一方、PLA に関しては、結晶化度の上昇が引張強度の低下 2) や、堆肥化環境における生分解速度の低下 3) と関連することが報告されている。これらの知見を踏まえ、本業務では、特に加水分解に伴う分子量および結晶化度の変化に着目し、それらに関連する劣化指標を中心に調査を行った。具体的には加水分解によるエステル結合の構造変化の把握を目的として FT-IR 分析を、結晶化挙動の変化の把握を目的として DSC および XRD 分析を、分子量変化の把握を目的として TG-DTA 分析をそれぞれ実施した。

さらに、劣化試験前の試験片および異なる条件での促進劣化試験を経た試験片を、引張強度試験、メタン発酵試験にそれぞれ使用し、各条件での指標の数値を取得した。取得したデータを整理し、劣化指標と引張強度、メタン発酵分解性それぞれとの相関性を評価した。

4.2.2 方法

（1）バイオプラスチック試験片の高温多湿促進劣化試験

PBS および PHBH 試験片を表に示す条件でそれぞれ劣化試験を実施した。表 57 の通り、暴露条件は温度 3 通り、湿度 2 通り、暴露時間 3 通りに変化させた。図に示す温度、湿度を制御可能なチャンバー内にはステンレス製のラックが複数あり、ラックの格段に試験片を設置し、指定された暴露時間経過後に取り出した。

機械的特性の評価に使用する試験片は、各バイオプラスチックのシートを JIS Z 1702 に基づき、長さ 120 mm、幅 25 mm のアレイ型に打ち抜いたものを使用した。劣化指標向けの試験片は、10×50 mm の長方形にカットしたものを、発酵試験向けの試験片は 50×50 mm の正方形にカットしたものを作成して使用した。

表 57 促進劣化試験条件

条件	温度 (°C)	湿度 (%)	暴露時間 (週)
1	40	85	1
2	40	85	2
3	40	85	3
4	50	85	1
5	50	85	2
6	50	85	3
7	60	50	1
8	60	50	2
9	60	50	3
10	60	85	1
11	60	85	2
12	60	85	3

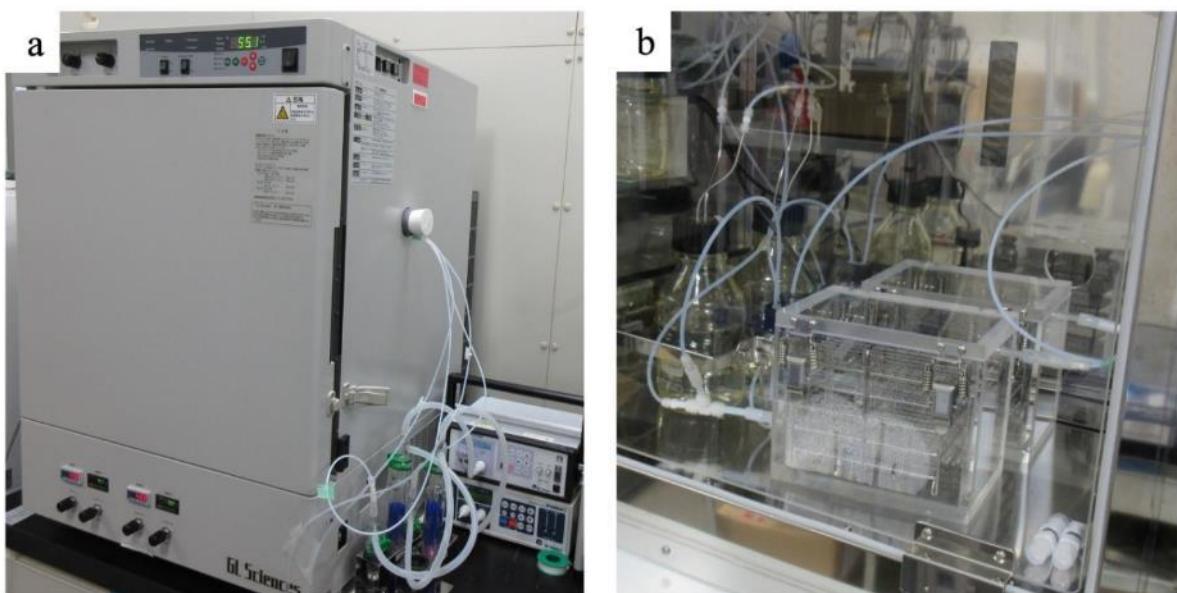


図 78 促進劣化試験の温度・湿度制御チャンバー
(a: 加温装置の外観、b: チャンバー及びその内部のラックの様子)

(2) 劣化指標分析の方法

劣化指標向けの試験片は、より小さく裁断したものを積層させて各分析に使用した。DSC は、NETZSCH 社製 DSC200 F3 を使用し、雰囲気ガスは窒素、流速 20 mL/min、昇温/降温速度は 6°C で分析を行った。TG-DTA は、島津製作所製 DTG-60H で雰囲気ガスは空気、流速 100 mL/min、昇温速度 10°C/min で分析した。FT-IR は、サーモフィッシュ・サイエンティフィック社製 Nicolet iN10 MX を使用し、顕微 ATR 法によって分析した。XRD 分析は、リガク社製 広角 X 線回折装置 RINT2500HL (広角 X 線回折)、リガク社製 高分解能 X 線薄膜評価装置 SuperLab (小角 X 線散乱) をそれぞれ使用した。

(3) 引張試験

引張試験島津製作所製オートグラフ AG-100kNG を使用し、引張試験条件は、次の通りの条件で実施した。試験速度 : 500 mm/min、標線間距離 : 40 mm、つかみ間距離 : 80mm、試験温度 : 室温 23°C。

(4) メタン発酵分解試験

発酵試験では、植種汚泥として食品廃棄物を処理する中温発酵バイオガスプラントの消化液を採取し、1 mm 目開きのステンレスふるいに3回通して、大きな夾雑物を取り除いた上で使用した。試験は、ブチルゴム栓付きのスクリューキャップバイアル（日電理化硝子）に試験片と汚泥 30 mL を投入し、気相部を1分間窒素ガスで置換した後、シェイキングインキュベーターに設置し、35°C、180 rpm の条件で20日間培養した。

生成ガス量は1~4日ごとに針付きのガラスシリンジで測定し、標準状態に換算した。また、ガス組成はガスクロマトグラフ GC-8A（島津製作所）を用いて分析した。プラスチックを投入しない、消化液だけのブランクの系でも同時に試験を行い、消化液自体からのメタン生成量をサンプルありの系のそれから減算して、プラスチックからの正味のメタン生成量を算出してデータを整理した。

20日間の培養終了後、消化液を再び1 mm 目開きのステンレスふるいに通し、ふるい上に残留した物質を蒸留水とエタノールで数回すすいだ。その後、ふるい上に残ったプラスチック片をピンセットで回収し、あらかじめ秤量した磁製皿に投入した。回収した試料は80°Cで1日間乾燥させた後、再度秤量し、発酵後の残留プラスチック片の重量を算出した。その残留重量の、発酵試験に投入した試験片の重量に対するパーセントを発酵後のプラスチック片の残存率として評価した。累積メタン生成量のカーブを以下の修正 Gompertz モデルにフィットして、メタン生成収束時の累積生成メタン量の80%に到達する時点での日数 (T_{80}) を算出した。

$$G(t) = G_0 \cdot \exp \{-\exp[R_m \cdot \exp \cdot (\lambda - t)/G_0 + 1]\} \quad \text{式 3.3.1}$$

ここで G は累積メタン生成量、 G_0 は収束時の累積メタン生成量、 R_m は最大メタン生成速度、 λ は遅滞時間を示す。

4.2.3 結果

(1) 劣化指標の変化

PBS および PHBH はポリエステル系のプラスチックであるため、高温多湿条件下における加水分解の進行によるエステル結合の変化を理解するため、各試験片の FT-IR による分析を行い、C=O の伸縮振動に帰属するピークの強度を比較した。図 79 は劣化試験前後の PBS および PHBH サンプルを用いて取得した C=O 帰属ピーク付近の FT-IR スペクトルを示している。1715~1730 cm⁻¹ のピークはエステルの C=O 結合に、1760 cm⁻¹ のピークは炭酸や環状エステルの C=O 結合にそれぞれ帰属する。PBS では、特に 1730 cm⁻¹ のピークと 1760 cm⁻¹ のピーク強度に関して、劣化試験の条件に対応した変化の傾向が認められた。一方、PHBH では、1715、1730 cm⁻¹ のピーク強度に関してサンプル間で違いが認められたが、劣化試験の条件に対応した関係は見出せなかった。図 80 には PBS の各サンプルにおける 1715~1760 cm⁻¹ のピーク頂点での吸光度を比較した。1760 cm⁻¹ のピークに関して、50、60°C の条件における吸光度の増大が顕著であり、60°C での3週間の劣化試験を経たサンプルの 1760 cm⁻¹ におけるピーク吸光度は、試験前と比較して1.4倍程度まで増大した。それと比較すると小さな変化であるが、1730 cm⁻¹ のピークにも 60°C 劣化のサンプルにおける変化が認められる。60°C、3週間の条件で、湿度 50 および 85% のサンプルにおける吸光度は、試験前のそれと比較してそれぞれ 0.84 倍、0.94 倍まで減少した。したがって、高温条件での劣化試験により PBS のエステル構造の一部が炭酸エステルや環状エステルに変化するような構造変化が起きている可能性が示唆された。一方、カルボン酸やアルコールの O-H 結合に帰属するピーク強度にはサンプル間でほとんど変化が認められず、エステル結合の加水分解を通してそれらが生成したことを示す結果は確認できなかった。

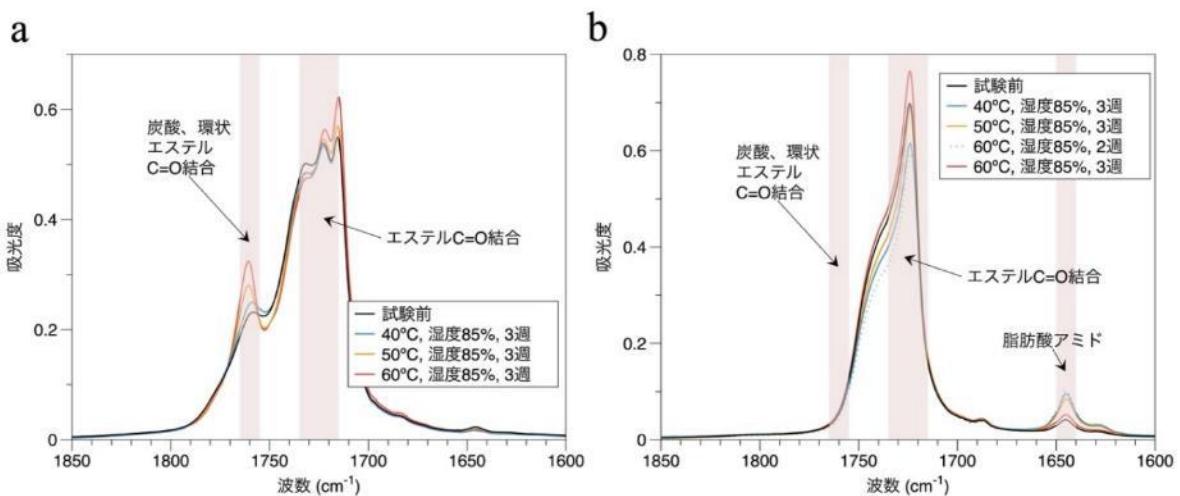


図 79 FT-IR による C=O 帰属ピーク付近のスペクトル (a: PBS, b: PHBH)

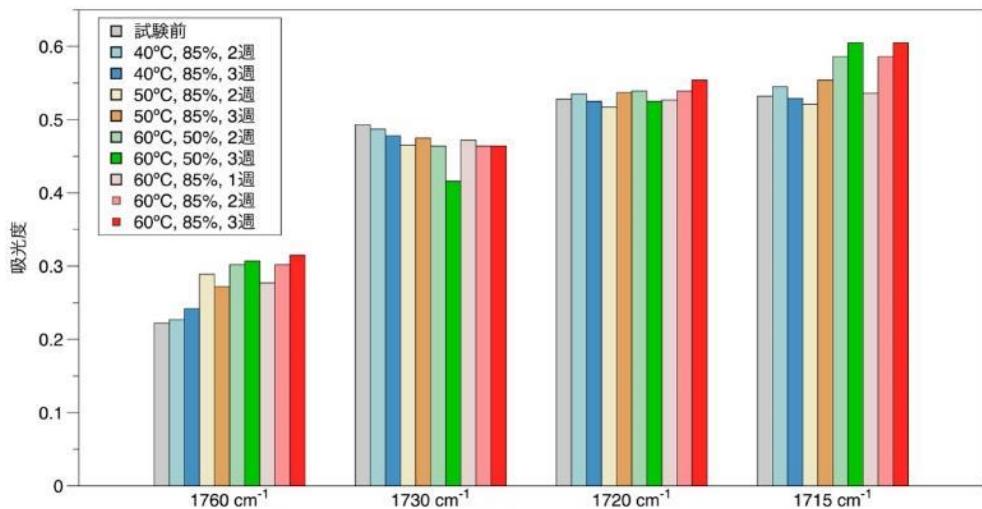


図 80 PBS に関する FT-IR での C=O 帰属ピーク頂点の吸光度

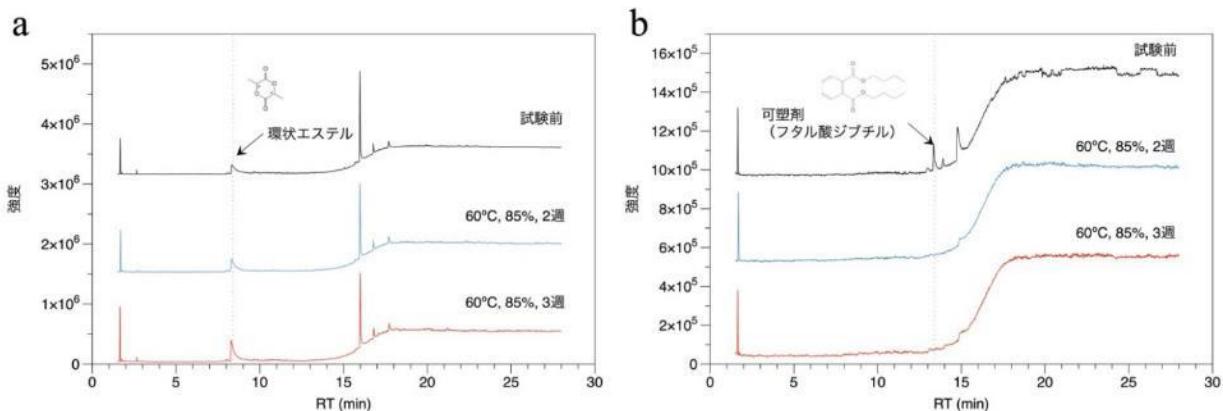


図 81 热分解 GCMS における各サンプルのパイログラム (a: PBS, b: PHBH)

図 81 には熱分解 GCMS による分析結果を示している。PBS では、環状エステル (ラクチドと推定) 由来のピークが検出され、劣化試験後のサンプルではピーク強度が増大する傾向が確認された。このことは、FT-IR における劣化試験後サンプルの 1760 cm^{-1} でのピーク増大と符合している。一方、

PHBH では、試験前のサンプルから可塑剤のピークが検出されたものの、劣化後のサンプルからはそのピークが検出されなかった。このことは、劣化試験中に試験片から可塑剤が喪失し、脆化する可能性を示唆している。

図 82 には劣化試験前後の試験片サンプルを、DSC で 200°C まで昇温後、-50°C までの降温する操作を 2 回繰り返した際の、DSC 曲線の一例を示している。PBS サンプルには融点に由来するピークが 2 本あり、劣化サンプルにおける結晶化に由来するピークも 2 本であった。高温側の融点と結晶化の温度はそれぞれ約 168°C、100°C であって PLA のそれと同一である。上述のように、熱分解 GCMS でサンプルを分析した際にも、ラクチド由来のピークが検出されている。以上から、本サンプルは PBS と PLA との複合素材であると推定された。可塑剤や相溶剤といった添加剤が劣化過程で失われたことにより、試験前のサンプルでは結晶化挙動が同一であったのに対し、劣化後は各素材で別々の挙動を示した可能性がある。

劣化試験前後で大きな変化が現れたのは、PBS、PHBH 両サンプルとも降温過程での結晶化温度であった。図 91 は、劣化試験前後の各サンプル間での、降温過程で生じる結晶化に起因する放熱ピーク頂点の温度 (T_c) の比較を示している。PBS では、60°C での劣化進行時にはピークが 2 つに分離するが、PBS 由来と思われる、より低温で現れるピークを対象とした。PBS では、劣化試験の条件に関して、時間および温度に応じてピーク温度が低下する傾向が認められた。湿度 50% と 85% を比較すると、より高湿度の条件で温度の低下幅が大きかった。すなわち、より長時間、より高温、より高湿度の劣化試験でサンプルの T_c が低下する傾向がある。PHBH は、図 83 が示す各測定におけるエラーバーの数値が大きいことからも明らかなように、同条件のサンプル間の結果のばらつきが大きかったので、条件ごとの測定の平均値の間に有意差を見出すことが難しい。3 週間経過後の結果で比較すると、試験前と比較して、 T_c は大きく低下することがわかった。 T_c の低下幅は、温度に応じて大きくなる傾向があるものの、60°C、湿度 85% の結果は例外的であった。この条件におけるピーク形状は、図 84 に示すように、他の条件におけるピークと比較して高温から低温まで大きく広がっていた。DSC での T_c の低下は結晶化開始温度の低下を意味しており、それが起こる要因として、ポリマーの低分子量化や分解生成物による核形成阻害、結晶核剤等の添加剤の分解等が挙げられる。PBS に関しては、本研究と同様の劣化試験 (50°C、湿度 90%、30 日) を経たサンプルに関して、分子量の低下に伴う結晶化ピークの低温へのシフトが報告されている⁴⁾。PHBH に関して同様の研究例を確認できないが、PHBH を構成するヒドロキシヘキサン酸 (HH) の含有率の増大が結晶化挙動に大きく影響し、HH 含有率が大きい場合に図に見られるようなブロードなピークが形成することが報告されている⁵⁾。本サンプルにも同様のことが起きているとすると劣化による鎖配列の変化や切断が影響している可能性がある。

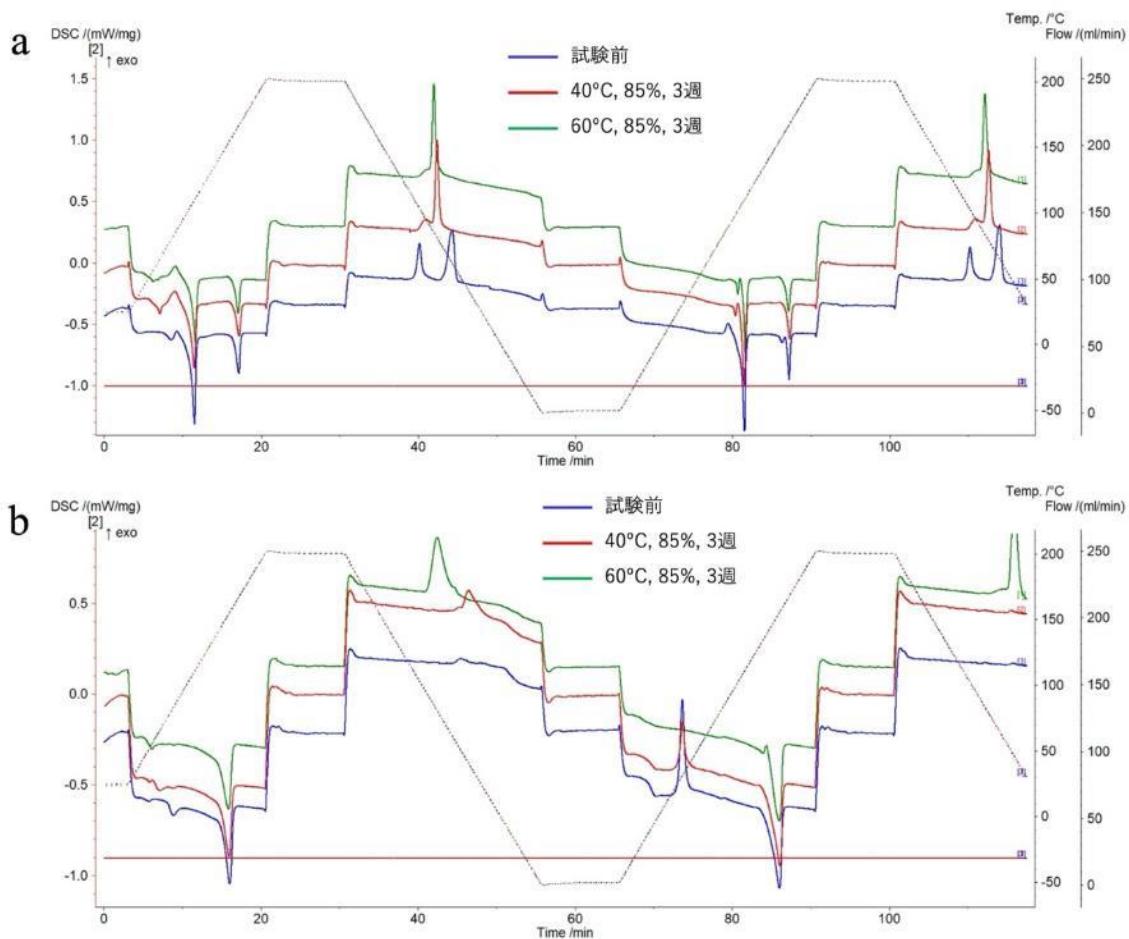


図 82 昇温降温サイクルにおける DSC 曲線の一例 (a: PBS, b: PHBH)

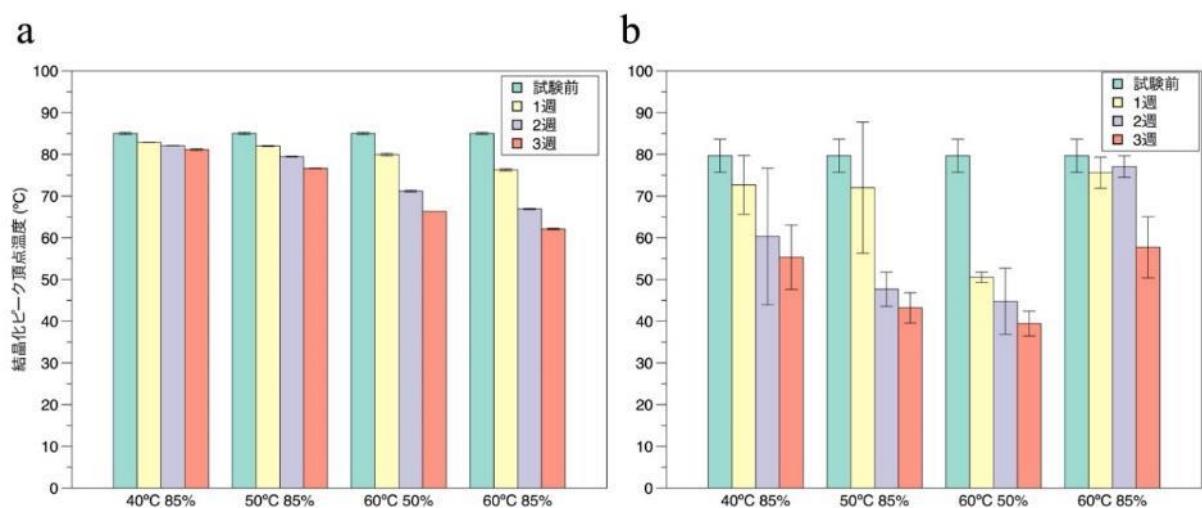


図 83 昇温降温サイクルにおける降温時の結晶化に起因する放熱ピーク頂点温度の変化
(a: PBS, b: PHBH)

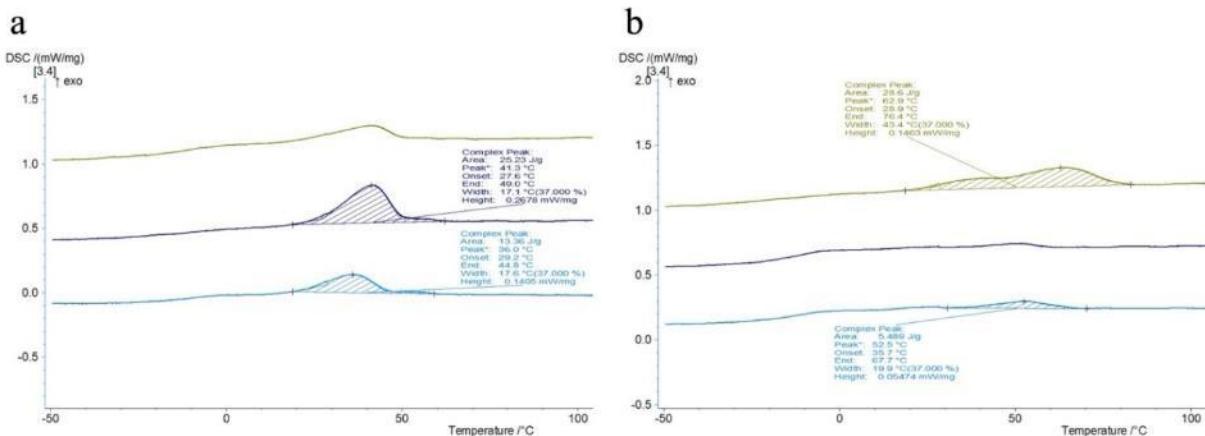


図 84 60°C、湿度 50%、3 週経過後の PHBH サンプル (a) と 60°C、湿度 85%、3 週経過後の PHBH サンプル (b) とでの降温時 DSC プロファイルの比較 (それぞれ同条件で 3 サンプルを分析)

図 85 と図 86 には、PBS と PHBH それぞれの DSC における融解と結晶化に関連するピーク面積 (熱量) をまとめた。図に示す融解のピーク面積は二度目の昇温時に現れるものであり、一度目の降温で形成された結晶が影響している。PBS は、ピークが 2 本に分離するため、2 本を合計した面積で評価している。PHBH は、融解と結晶化で熱量が大きくずれている箇所があるが、それらの条件では降温中に十分に結晶が形成できず、再昇温時にも結晶化ピークが現れるが、グラフでは降温時のピークのみ考慮しているためである。図の結果から、PBS に関しては、より長時間、高温、高湿度の条件でピーク面積が増大する傾向がある。このことは、劣化に伴いサンプルにおける結晶化部分が広範囲化し、全体として結晶化度が増大することを示唆している。上述の通り、PHBH は降温時に結晶化遅滞が顕著なサンプルがいくつか観察された。昇温時の融解ピークに着目すると、PHBH でも、暴露時間に伴いピーク面積がやや増大する傾向があるので、結晶化範囲の増大が起きている可能性がある。

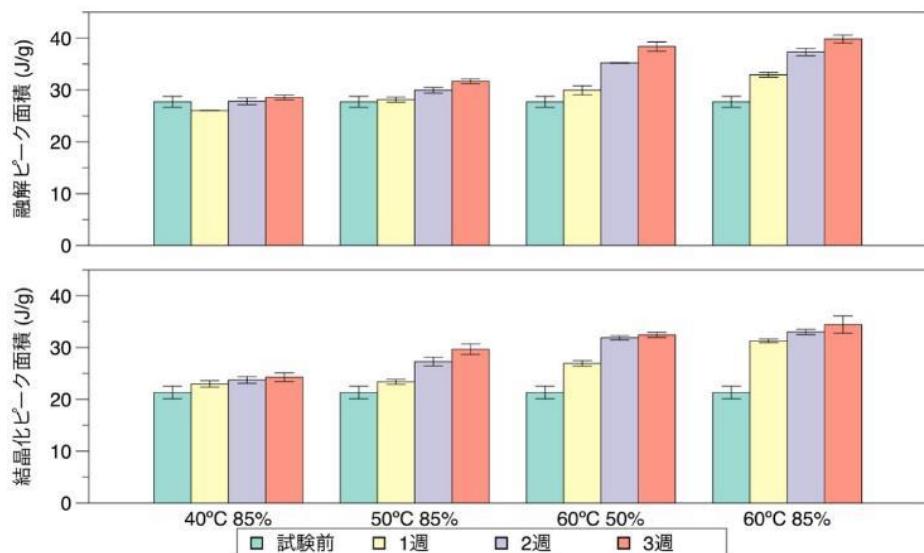


図 85 PBS サンプルの DSC における昇温降温それぞれで検出された主な融解ピークおよび結晶化ピークの合計面積 (融解ピークは二度目の昇温、結晶化ピークは降温時のみ考慮)

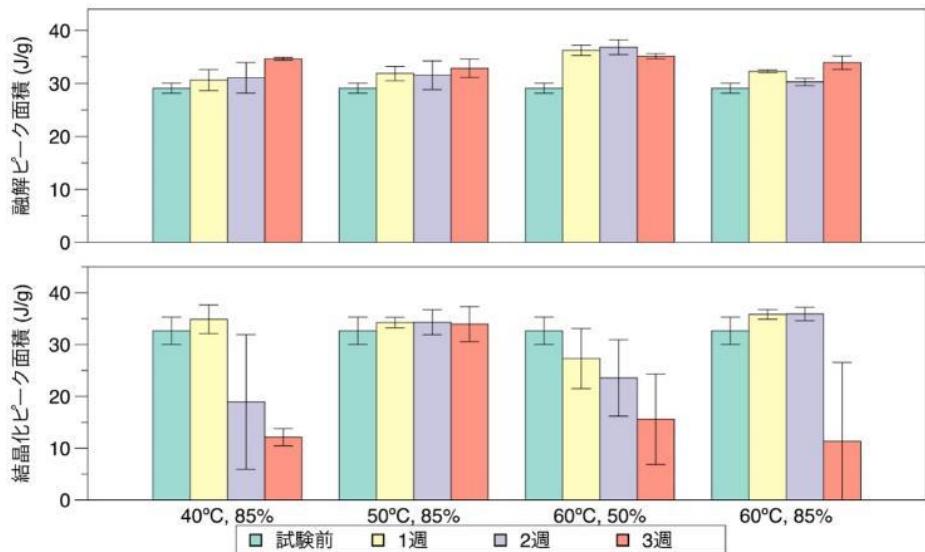


図 86 PHBH サンプルの DSC における昇温降温それぞれで検出された主な融解ピークおよび結晶化ピーク面積（融解ピークは二度目の昇温、結晶化ピークは降温時のみ考慮）

劣化試験に伴うバイオプラスチックの結晶化度の定量的な把握のため、各サンプルを XRD 分析に供した。図 87 および図 88 はそれぞれ PBS および PHBH サンプルの広角 X 線回析プロファイルを示している。PBS のサンプルでは試験前にそれぞれ (020 面)、(110 面)、(111 面) の回析ピークが検出された。これらは PBS の典型的なピークであるが、9.5° に検出されるピークは、既往のプラスチックに関する研究で検出例がなく、その帰属は不明であった。劣化の前後で、PBS に帰属するピークの強度には顕著な変化は認められなかったが、50 および 60°C の条件で劣化させたサンプルにおいて、 $2\theta = 16.5^\circ$ の位置に強い回析ピークが出現した。16.5° は PLA の(110/200 面)のピークと一致する。上述のように、DSC の結果から劣化に伴う複合剤からの相溶剤等の喪失により、PLA が分離して単独で結晶化したことを推定したが、XRD においても同様のことを示唆する結果であった。一方、PHBH に関しても、試験前は PHBH の (020 面)、(110 面)、(111 面)、(040 面) の回析ピークがそれぞれ検出された。劣化後には(111 面)のピーク強度が増大しており、PHBH の結晶化度の上昇を示唆していた。次に、それぞれのサンプルの結晶化度を、全ピークの積分強度総和に対する結晶質ピークの積分強度総和を計算することで求めた。図 89 には、各サンプルの結晶化度を示している。PBS では、50°C と 60°C の条件のサンプルにおける結晶化度の上昇が顕著で、試験前と比較して 1.5~1.8 倍程度上昇した。この上昇は、16.5° に位置するピークの面積増大に依存しているため、上述の PLA の分離、結晶化によるものと推察された。PHBH では PBS ほど顕著な変化は認められなかった。PBS サンプルと同様に、50°C と 60°C の条件のサンプルにおける結晶化度の上昇が認められ、試験前と比較して約 1.1 倍であった。

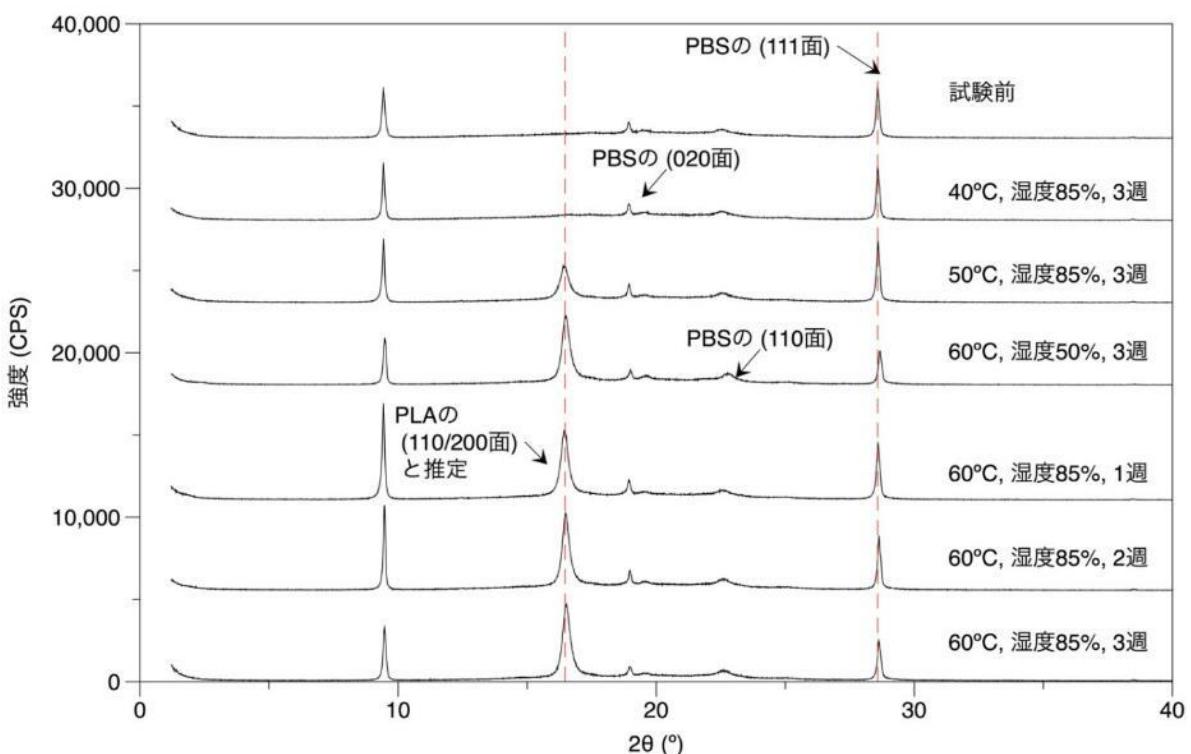


図 87 PBS に関する広角X線回折プロファイル

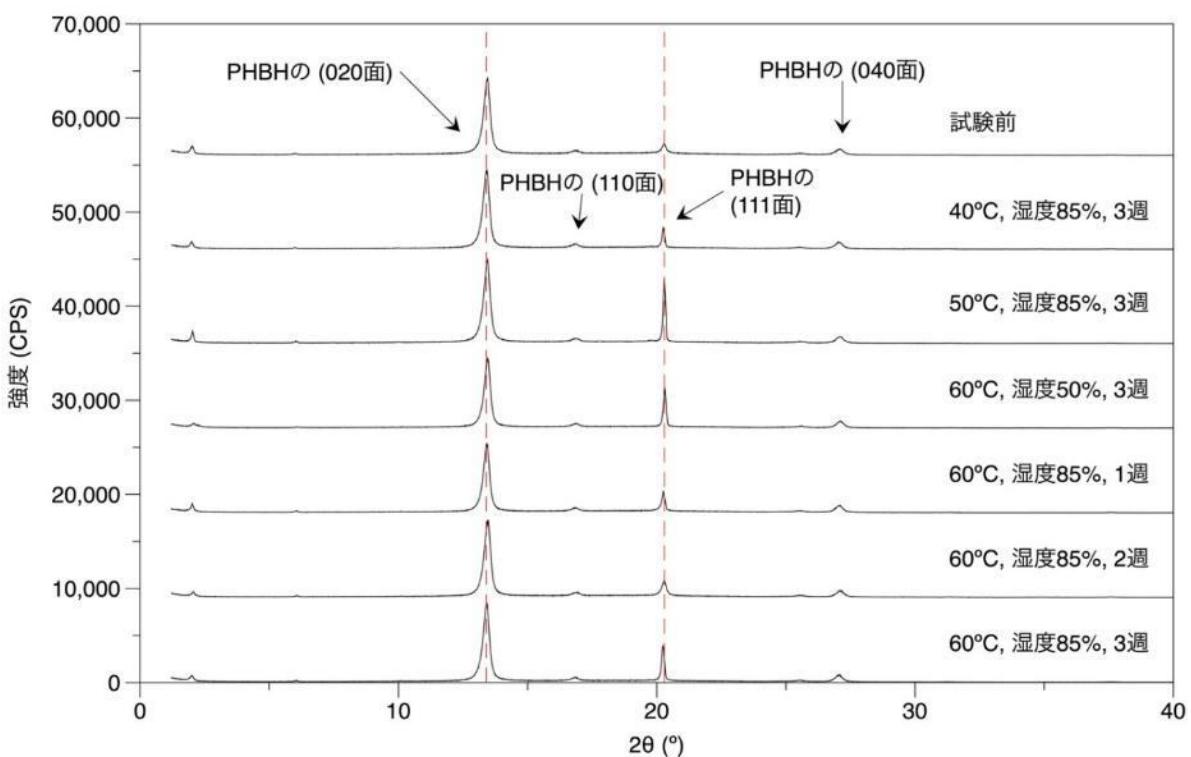


図 88 PHBH に関する広角X線回折プロファイル

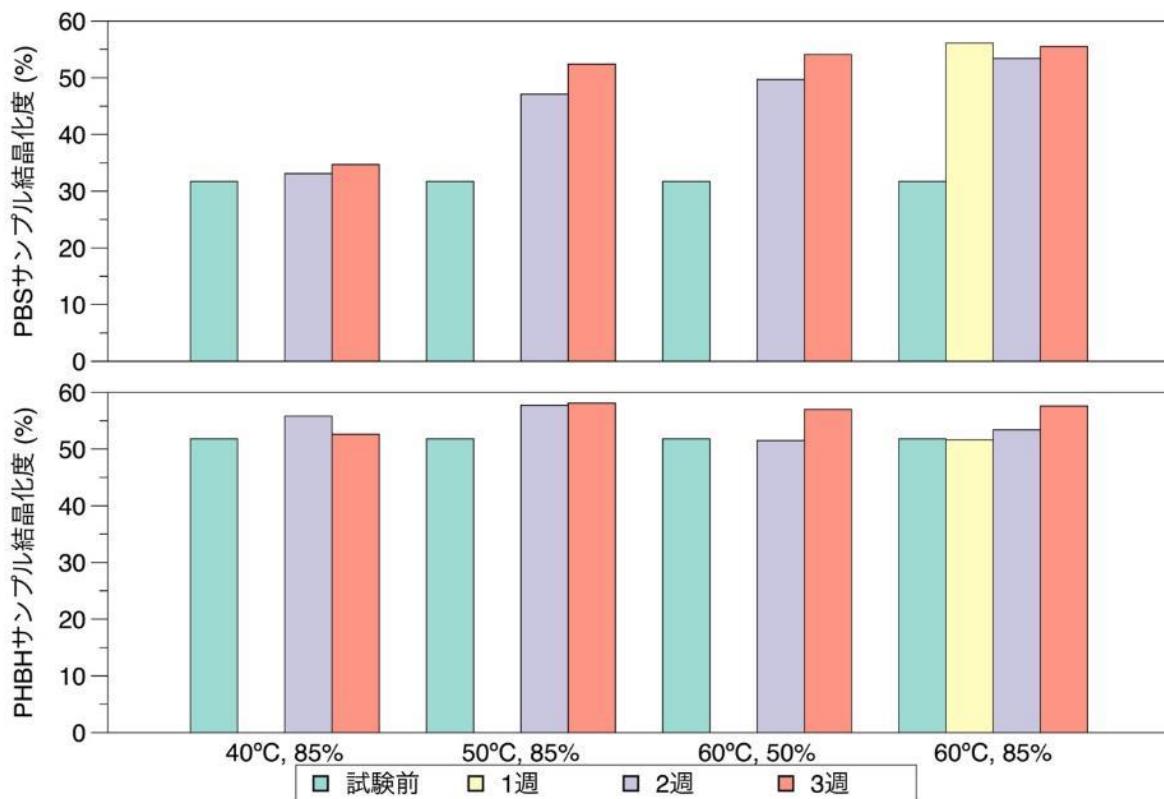


図 89 広角 XRD 分析に基づく各サンプルの結晶化度
(暴露 1 週のサンプルは 60°C、湿度 85% 条件のみ分析)

小角散乱 X 線回析は、バイオプラスチックのラメラ厚の変化を把握するために行った。しかしながら、十分な強度のピークは取得できず、定量的な回析は困難であった。PBS サンプルでは、0.7° 付近にピークの存在が確認され、試料の面内方向に 15 nm 程度の周期構造の存在が示唆された。PHBH サンプルでは、1° 付近にピークが確認され、8 nm 程度の周期構造の存在が示唆された。このピーク強度は劣化条件との間に対応関係を見出すことはできず、劣化とラメラ厚の関係を特定することはできなかった。

DSC および XRD の結果から、高温条件での劣化に伴う結晶化の進行が示唆された。低分子量化もまた、機械的強度と生分解性双方に影響する因子である。樹脂の TG-DTA 分析において、熱分解によるサンプルの重量 10% 減少時点での温度 (T_{10}) が平均分子量との間に正の相関を持つことが知られている。すなわち、サンプルの劣化に伴い低分子量化が進行しているのであれば、 T_{10} も低下していることが予想される。図 90 では、PBS サンプルに関する TG での重量減少の測定例と各サンプルの T_{10} をまとめている。分析の結果、PBS では明確な T_{10} の低下が確認され、60°C、湿度 85%、3 週間暴露のサンプルは、試験前と比較して T_{10} が 22°C 減少していた。FT-IR の結果が示す PBS での環状エステル等の形成と低分子量化は符合する。一方、PHBH には T_{10} の低下は認められなかった。

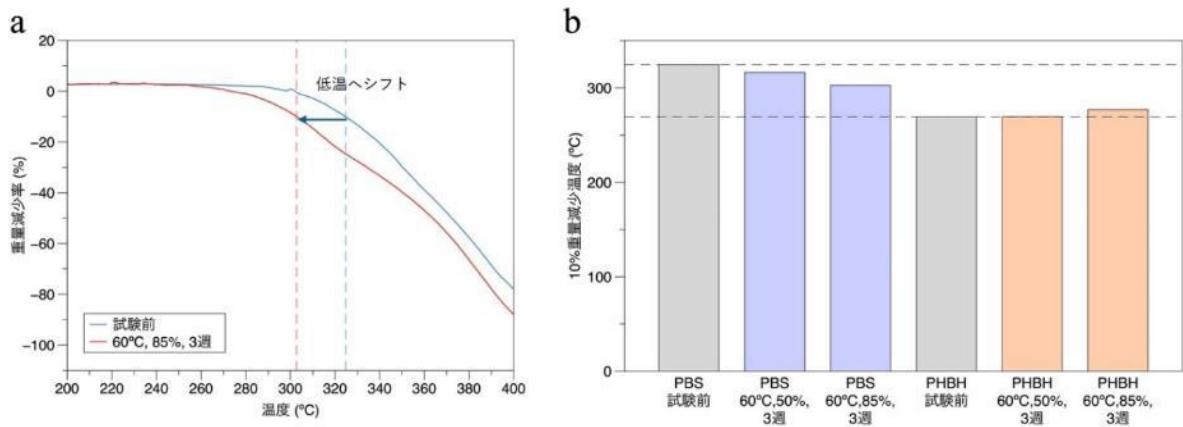


図 90 TG による 10%重量減少温度 (T_{10}) の測定例 (a) と 60°C での劣化試験前後の PBS および PHBH サンプルにおける T_{10} の比較 (b)

(2) 機械的特性の変化

劣化前後でのサンプルの機械的特性の変化を理解するため、引張試験を実施し、引張強さと伸びをそれぞれ求めた（図 91）。PBS の 60°C、湿度 85%、3 週間目のサンプルは、試験片が極めて脆く、試験に供することが困難であった。それゆえ 60°C、湿度 85% の条件は、1、2 週目のサンプル、それ以外の条件は、2、3 週目のサンプルでの測定値をそれぞれ比較している。PBS と PHBH サンプルそれぞれで、劣化試験後のサンプルの引張強さは、試験前と比較して減少していることが確認された。特に、PBS では、60°C、湿度 85%、2 週間暴露後のサンプルの引張強さは、試験前と比較して 40%程度大きく減少した。

伸びの測定値は、サンプル間の変動がより顕著であった。PBS の劣化試験後のサンプルの伸びは、試験前と比較して 5~96% の範囲で減少し、特に高温かつ長期間の条件で減少量が顕著であった。PBS の 60、85%、2 週間目のサンプルの伸びが最も小さく、試験前のその 5.7% の水準まで減少した。PHBH の劣化試験後のサンプルの伸びは、試験前と比較して 12~79% の範囲で減少し、60°C、85%、2 週間目の伸びが最小で、試験前と比較して 20.5% の水準まで減少した。以上のように、PBS の 60°C、湿度 85% の劣化試験条件で引張強度にやや大きな減少が、PBS、PHBH 両方の 60°C、湿度 85% の条件において伸びに極めて大きな減少が起きることが明らかとなった。

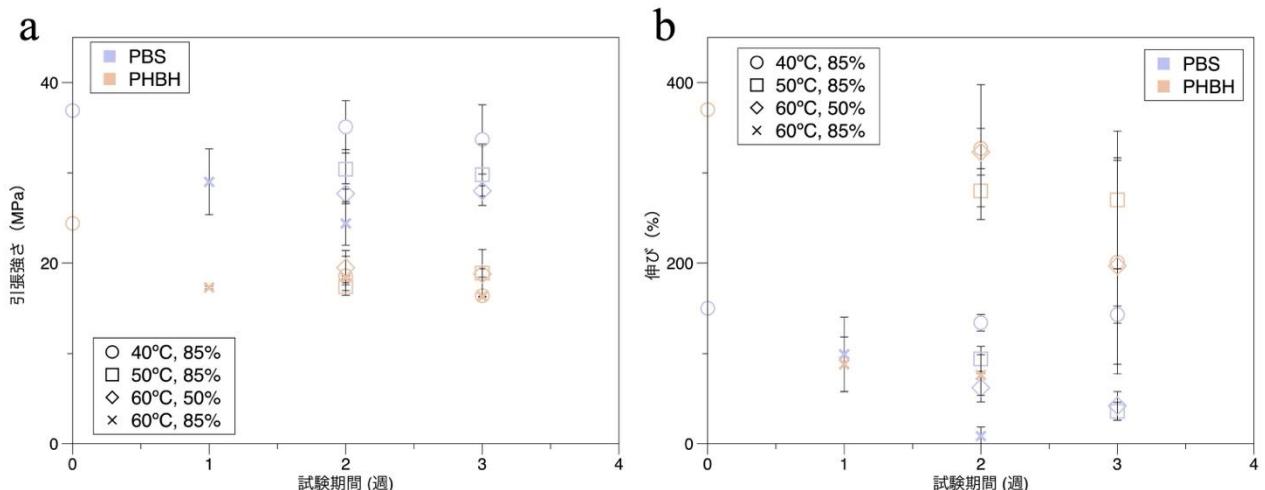


図 91 劣化前後の試験片を用いた引張試験における引張強さ (a) と伸び (b) の比較

(3) メタン発酵分解性の変化

劣化試験前後のサンプルを用いてメタン発酵試験を行い、投入重量あたりのメタン収率と試験後のふるい上残留物重量とで分解性を評価した。劣化試験後のサンプルは、3週間暴露後のものだけ使用した。図92は、各サンプルの20日間の発酵でのメタン収率、試験前と比較したふるい上残留物の残存率をそれぞれ示している。PBSに関しては、60°C、湿度85%の条件のみ、メタン収率および残存率において、劣化試験前のサンプルでの結果と比較して有意な差が認められた。その条件で、試験前サンプルと比較してメタン収率の平均値は1.73倍に増大し、残存率は6%低下した。しかしながら、サンプルの化学的酸素要求量(COD)から推定されるメタン収率の理論的最大値は504NmL/gであって、試験で得られた最大値でさえ、その10%程度であって、メタンへの変換は十分には進行していないことを示している。PBSは従来、メタン発酵における分解性が低いことが知られている。PBSに関してポリマーとモノマーを別々に分解速度を測定した事例⁶⁾では、ポリマーの分解速度定数は、モノマーよりも1桁小さく、加水分解段階が律速段階であると推定される。一般的には、劣化指標で示された結晶化度の上昇は生分解速度に対してネガティブに影響し、分子量の減少はポジティブに影響する。しかしながら、60°C、湿度85%の分解が最も進んだ条件のサンプルのメタン発酵後の消化液を観察すると、他の条件とは明確な違いが確認された。試験では5cm四方の試験片を投入したところ、他の条件では、PBS試験片は投入した時点と同じ1枚の試験片が残留していたのに対して、分解が最も進んだ条件における試験片は、1cm未満の細かな破片が多数存在していた。これは、脆化した試験片が発酵液の攪拌に伴う剪断力で破断された結果であると推測された。このような微細化が進行すると、発酵液中の基質の分散や、断面の増加に応じた表面積の増大が加水分解や酵素分解を促進する可能性がある。

一方、PHBHはどの条件においても高い分解性を示すことから、メタン収率と残存率の両方の点で、劣化の有無に関わらずメタン発酵原料として優れた性能を示すことが明らかとなった。CODから推定したPHBHの理論的な最大メタン収率は491NmL/gであることから、図92に示すメタン収率は100%をやや超過する水準であって、メタン生成は収束しているといえる。修正Gompertzモデルに対して全てのサンプルで $R^2 = 0.94$ 以上の良いフィットが可能であった。モデルをもとに算出したT₈₀を比較すると、図93が示すように、分解速度の点ではサンプル間に差異が確認された。試験前サンプルと比較して、40~60°Cの湿度85%での劣化サンプルではT₈₀が7~12%減少し、より早くメタン生成量が増大していることが示唆された。

(4) 各指標間の関係

これまで述べてきたように、機械的特性、メタン発酵分解性のどちらにおいても、PBSとPHBHの両方が温度、湿度が最も高い条件において、変化が顕著であった。劣化指標のうち、結晶化の進行が高温多湿条件で特に大きかった。劣化指標の分析結果から、PBSサンプルでは結晶化の進行が大きく、低分子化を示唆する結果も得られている。PHBHに関しては、結晶化の進行と、可塑剤の喪失を示唆する結果が得られた。機械的特性に関して、引張強度の減少量と比較して伸びの減少量がより大きいことは、結晶化の進行と可塑剤の喪失の結果、サンプルの硬化・脆化が進行したことが大きく影響している。メタン発酵に対しても、サンプルの脆化が攪拌を伴う培養では基質の微細化を促進し、生分解を促進する可能性がある。しかしながら、PBSに関しては、十分なメタン変換を達成するほどには、劣化に伴う分解の促進硬化は大きくはなかった。本劣化試験では、加水分解による分子鎖の破断などの大きな分子量の減少を示唆する劣化指標の変化が確認できなかった。生分解をより大きく促進するためには、さらに長い試験時間や過酷な条件を設定する必要がある可能性がある。指標間

の関係性を定量的に解析し、統合的な指標としてまとめるために、今後より多数の測定データを収集することが必要である。

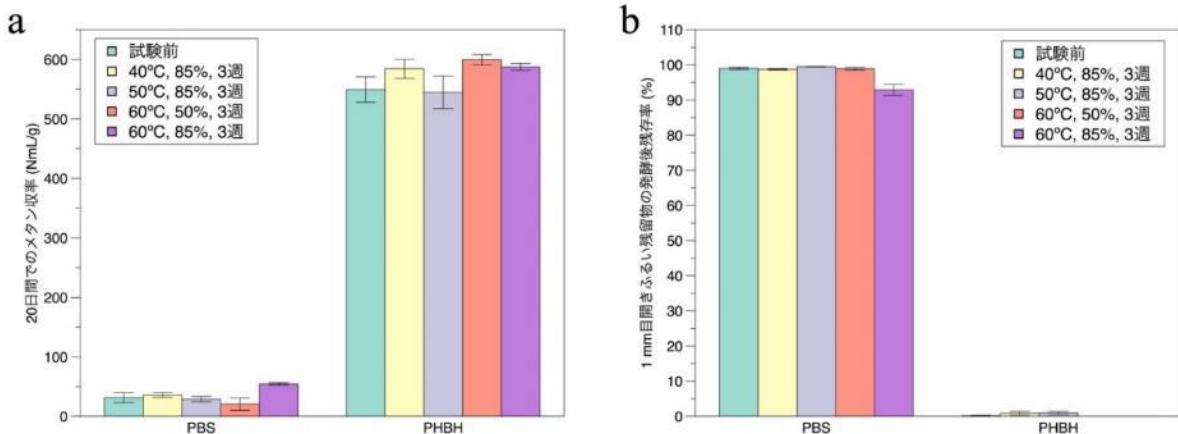


図 92 PBS および PHBH サンプルのメタン発酵試験におけるメタン収率 (a) と 1 mm 目開きのふるい通過後の残留物重量に関する発酵試験前と比較した残存率 (b)

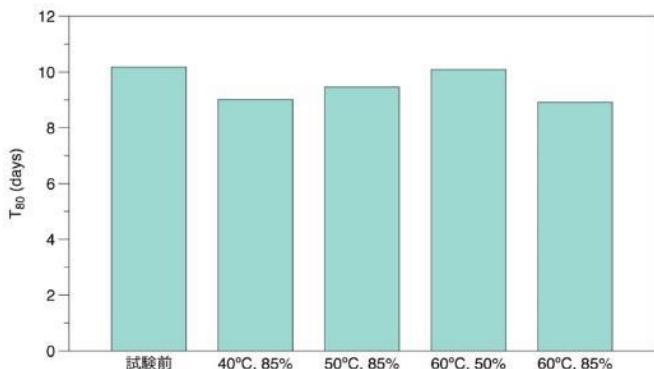


図 93 PHBH のメタン発酵における対最大メタン収率 80% 到達時の日数 (T_{80})

4.2.4 まとめと課題

本課題では、バイオプラスチックとして PBS と PHBH を対象に、耐久性を統合的に評価するため、高温多湿の劣化促進環境を想定して、劣化指標、機械的特性指標および生分解性指標それぞれの間の関係性を調査した。PBS サンプルは PHBH サンプルと比較して高温多湿環境での影響を受けやすく、より高温、高湿度の条件に長時間暴露されることにより結晶化度の上昇が顕著である他、環状エステル等の形成に基づく低分子量化が進行している可能性も示唆された。引張試験に関しては、PBS の 60°C、湿度 85% の劣化試験条件で引張強度にやや大きな減少が、PBS、PHBH 両方の 60°C、湿度 85% の条件において伸びに極めて大きな減少が起きることが明らかとなった。メタン発酵試験の結果、60°C、湿度 85% の条件で劣化が進行した PBS サンプルでは、メタン収率の増大と、プラスチック片の崩壊の進行が確認された。劣化に伴う結晶化の進行や可塑剤の喪失は、プラスチックの脆化を引き起こし、伸びの顕著な減少を引き起こすとともに、メタン発酵においてプラスチックの微細化を促進し、分解の促進に寄与している可能性が示唆された。

課題として、PBS に関してはより長い暴露時間と過酷な条件での検討が必要である。劣化条件として、屋外での耐久性の視点から、紫外線の影響も検討する必要がある。指標間の定量的な解析を行うため、より多くの測定データを収集することが必要である。

参考文献

- 1) Eckel, F., Van Opdenbosch, D., Schandl, K.S. et al. (2024) Dependency of tensile properties and biodegradation on molecular mass during hydrolysis of poly(butylene succinate). *npj Mater Degrad*, 8, 97.
- 2) Ma, E., Wang, X., Yong He, Z., Dong, X., Zhang, X., Chen, X., Liu, T. (2021) Effect of poly(lactic acid) crystallization on its mechanical and heat resistance performances. *Polymer*, 212, 123280.
- 3) Pantani, R., Sorrentino, A. (2013) Influence of crystallinity on the biodegradation rate of injection-moulded poly(lactic acid) samples in controlled composting conditions. *Polymer Degradation and Stability*, 98, 1089–1096.
- 4) Nath, D., Misra, M., Al-Daoud, F., Mohanty, A.K. (2025) Studies on poly(butylene succinate) and poly(butylene succinate-co-adipate)-based biodegradable plastics for sustainable flexible packaging and agricultural applications: a comprehensive review. *RSC Sustainability*, DOI: 10.1039/D4SU00193A.
- 5) Jikihara, Y., Saito, T., Yamane, H. (2006) Effect of thermal history on the crystallization behavior of bacterial poly(3-hydroxybutyrate-co-hydroxyhexanoate) and the cold drawability of melt spun fibers. *Sen'i Gakkaishi*, 62, 115-122.
- 6) Nelson, T.F., Baumgartner, R., Jaggi, M. et al. (2022) Biodegradation of poly(butylene succinate) in soil laboratory incubations assessed by stable carbon isotope labelling. *Nature Communications*, 13, 5691.

4.3 ライフサイクル観点から見た実証事業展開

4.3.1 目的

事業1、事業2及び事業3の要素を一つの循環システムとした動静脈ライフサイクル実証を通じて、脱炭素化と資源循環に資する次世代の長寿命用途プラスチック素材の利活用モデルを構築することが求められる。そのため、事業1・2・3の各関連技術を構成するシステムのライフサイクルでのGHG削減効果を定量化し、ライフサイクル実証を通じて、脱炭素化と資源循環の実現に資する次世代の長寿命用途プラスチック素材の利活用モデルを構築することを目的とする。具体的には、自動車のPP素材やポリカーボネート素材の動的フローモデルを作成し、フローモデル解析に関連する化学成分組成等の基礎情報ならびにリサイクル過程の収率等の実証情報を用いてバイオプラスチック転換によるGHG削減効果や資源保全効果等を算定する。また、事業1③で開発するバイオマス加飾フィルムを用いた自動車塗装の代替技術による環境負荷低減効果を試算する。

令和6年度は、文献収集・調査を行うとともに、自動車のPP素材・PP使用部品等の動的フローモデルを作成した。また、LCAのためのプロセスモデルの開発を行い、開発モデルに基づいてGHG削減効果の試算を行った。

4.3.2 自動車のプラスチックならびにPPの動的フローモデル開発

(1) 方法

バイオプラスチックの代替によるGHG削減効果を定量化するに先立って、自動車フロー中のプラスチック量を把握しておく必要がある。そのため、2050年までの新車販売台数から国内ストック台数、ELV発生台数を推定し、これに解体調査によって得られた自動車部品プラスチック重量を乗じることで、自動車の新車販売（入口）からELV（出口）までのプラスチック使用量を推定した。

＜台数推定＞

ELVs発生量の将来推定は、2030年までを推定期間としたYanoら（2016）¹⁾や2040年までを推定期間としたLiuら（2019）²⁾等の先行研究がある。本年度はLiuら（2019）²⁾の推定モデルの時点更新と改良を行い、2050年までを推定期間とした。Liuら（2019）²⁾と比べたモデルの改良点は次のとおりである。

- ELV規則案が求める自動車への再生プラスチック利用割合（25%）においては、国内販売向けに加えて輸出向けの新車販売台数も加味したプラスチック需要量の把握が必要である。そのため、新車販売台数として国内新車販売台数と国外への新車輸出台数を推定対象とした。
- 2024年の自動車の平均使用年数は普通車が13.3年³⁾、軽自動車が16.2年⁴⁾であり、軽自動車の方が3年程度長い。製品寿命分布が両者で異なると考えられるため、軽自動車の残存率関数を推定し、普通車、軽自動車を区別した。

新車販売台数は国内新車販売台数と国外への新車輸出台数の合計を推定した。いずれも統計データがある過年度分は統計値を用いた。また、将来推定について、2024年度以降の国内新車販売台数は2023年度人口に対する将来人口比で変化（減少）すると仮定した。新車輸出台数については直近の2023年度統計値と同じと仮定した。

新車販売台数のうちの国内新車販売台数を用いて、国内ストック台数（国内で使用中の自動車保有台数）と国内の自動車リサイクルルートに流れる ELV 台数を以下の手順で推定した。

- ① 国内新車販売台数及び初度登録年別保有台数の統計データ（普通車は報告書³⁾から 1973-2022 年度のデータを使用、軽自動車は軽自動車検査協会へヒアリングした 2019-2022 年度のデータを使用）より、初度登録年から i 年後の残存率を求める残存率関数の推定を後述のとおり行った。
- ② 各年の国内新車販売台数に推定した残存率関数を乗じて、国内ストック台数を推定した。集計年 t 年の保有台数はその年までの初度登録年別の保有台数を合計して求めた。
- ③ 各販売年度の登録年別保有台数の前年との差を $t-1$ 年度まで足し合わせた台数が使用済台数となる。ここから、財務省貿易統計から得た t 年の中古自動車輸出台数を差し引くことで、 t 年に国内の自動車リサイクルルートに流れる ELV 発生台数推定した。

普通車と軽自動車の残存率関数について、2 種類の残存率関数を検討し、統計値から求めた残存率と最も当てはまりが良い方の残存率関数を採用することとした。具体的には、普通車はワイブル分布を適用した残存率関数、軽自動車はロジスティック曲線をハザード関数に適用した残存率関数を採用した。ワイブル分布として表した残存率関数 $S(t)$ は式 (1) で表される。ここで、 t は使用年数、 λ は尺度パラメータ、 α は形状パラメータである。

$$S(t) = \exp\left\{-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^\alpha\right\} \quad (1)$$

一方、ハザード関数 $h(t)$ をロジスティック曲線で表した

$$h(t) = \frac{K}{1 + \exp\{rK(t_0 - t)\}} \quad (2)$$

に対し、一般に残存率関数は、

$$S(t) = \exp\left\{-\int h(t)dt\right\} \quad (3)$$

となることが知られており、これを適用し表したハザード関数を用いた残存率関数 $S(t)$ は

$$S(t) = \left\{ \frac{1 + \exp(-rKt_0)}{1 + \exp\{rK(t - t_0)\}} \right\}^{\frac{1}{r}} \quad (4)$$

と表される。普通車、軽自動車について最小二乗法を用いて式(1)と式(4) のパラメータを推定した。

普通車については、初度登録年別の統計データが得られていることから、統計値がある 2023 年度までは初度登録年別にそれぞれ推定した α 、 λ を用いた。ただし、統計値があってもデータ数が不足していると、残存率関数を精度よく推定できないことが知られている。そのため、普通車の平均使用年数を考慮し、2008 年度以降は 2008 年度の α 、 λ を用いた。

軽自動車については、初度登録年別の残存率関数を推定できるほどの十分なデータ数が得られなかつたことから、初度登録年に依らず残存率関数は同じとして扱い推定した t_0 、 r 、 K を用いた。

普通車、軽自動車の残存率関数に用いたパラメータは表 58 のとおりである。ただし、推定結果の集計時には、統計値がある 2023 年度までは残存率関数を用いた推定値ではなく、統計値を用いた。

表 58 普通車、軽自動車の残存率関数の設定パラメータ

車種	期間	パラメータ
普通車	2007 年度まで	年度毎に推定した α 、 λ
	2008 年度以降	$\alpha=2.19$ 、 $\lambda=16.06$
軽自動車	~2050 年度	$t0=16.4$ 、 $r=0.88$ 、 $K=0.39$

※期間は初度登録年を指す

<プラスチックならびに PP 使用部品モデル開発>

自動車フロー中のプラスチック量を推定するにあたって、自動車1台当たりのプラスチックならびに PP 使用部品モデルを作成した。自動車は普通車と軽自動車を区別し、プラスチック使用部品モデルを構成する対象部品としては、3.1.2 自動車解体性の検討で A2MAC1 から検討した 10 部品と「その他」の計 11 の部品区分とした。ここで、センターコンソールとスクリーンエアロダイナミクスについては、自動車によっては実装されていない場合があることから、別に調査した 18 台（普通車 9 台、軽自動車 9 台）で実装していた割合を「実装率」と定義し、設定した。そして、今年度解体調査で計量した各部品のプラスチック重量・PP 重量に対して、式(5)を用いて前述 18 台の平均重量で補正を行い、表 62 のとおり一般化させたプラスチック使用部品モデルを作成した。PP 重量では普通車 55 kg/台、軽自動車 31 kg/台となり、軽自動車の方が 24 kg 少ない。自動車中のプラスチック部品重量に関する先行研究事例は多くないものの、バンパーは日本 ELV リサイクル機構の解体調査⁵⁾によると普通車 7.4-8.2kg、軽自動車で 4.6-5.2 kg、いその（株）の解体調査⁶⁾では普通車 7.4-7.9 kg、（一社）日本自動車工業会の「再生材活用促進に向けた自工会の取組みについて」（以下、中長期ロードマップという。）での設定値は 10 kg であった。また、ピラーは MURC の解体調査⁷⁾では 1.1-2.3 kg である。これらは本実証事象で作成した部品モデルの各部品重量と概ね同様であった。一方、自動車 1 台当たりのプラスチック重量合計では、Yano らの解体調査⁸⁾では普通車 57-114 kg、軽自動車 56-62 kg、自動車工業会の中長期ロードマップでの設定値は 150 kg であり、本研究の軽自動車 60 kg、普通車 89 kg も含めて事例によって相当幅があることが分かる。なお、本研究では座席シート内側のウレタン材（約 20 kg 程度）が調査対象外である点に留意が必要である。また、燃料タンクのポリエチレン化が近年進んでおり、2000 年の 15% から 2020 年には 77%（生産台数に占める割合）に増加しており⁹⁾、自動車 1 台当たりのプラスチック重量にはこうした燃料タンク等の部品の樹脂化も影響する。次年度以降も解体調査を継続しデータを蓄積して精査する必要がある。

$$Unit_P_{adjst_i}^{type} = Unit_P_{obsrv_i}^{type} \times \frac{W_{avrg_i}^{type}}{W_{obsrv_i}^{type}} \quad (5)$$

$type$: 車種（普通車、軽自動車）
i	: 部品種類（全 11 部品区分）
$Unit_P_{adjst_i}^{type}$: 一般化（補正）後の車種別のプラスチック部品 i の重量 [kg/台]
$Unit_P_{obsrv_i}^{type}$: 解体調査で計量した車種別のプラスチック部品 i の重量 [kg/台]
$W_{obsrv_i}^{type}$: 解体調査で計量した車の重量（普通車 1,019 kg、軽自動車 877 kg） [kg/台]
$W_{avrg_i}^{type}$: 別に調査した 18 台（普通車 9 台、軽自動車 9 台）の 平均重量（普通車 1,000 kg、軽自動車 807 kg） [kg/台]

表 59 自動車 1 台当たりのプラスチックならびに PP 使用部品モデル

(a) 普通車

	PP	PP 以外	小計	実装率
バンパー	7.7	0.0	7.7	100%
ピラー	2.5	0.0	2.5	100%
ドアパネル	8.5	0.0	8.5	100%
トランクコンパートメント	2.9	0.0	2.9	100%
インストルメントパネル	8.5	1.2	9.7	100%
カウルサイドトリム	0.2	0.0	0.2	100%
スカッフプレート	0.6	0.0	0.6	100%
スクリーンエアロダイナミクス	3.0	0.0	3.0	33%
センターコンソール	0.3	2.0	2.3	56%
ヒーティングシステム	3.6	0.6	4.1	100%
その他	17.4	29.9	47.3	100%
合計	55.2	33.7	88.9	-

(b) 軽自動車

	PP	PP 以外	小計	実装率
バンパー	5.1	0.0	5.1	100%
ピラー	1.6	0.0	1.6	100%
ドアパネル	3.8	1.8	5.5	100%
トランクコンパートメント	1.7	0.0	1.7	100%
インストルメントパネル	5.1	0.8	5.9	100%
カウルサイドトリム	0.2	0.0	0.2	100%
スカッフプレート	0.6	0.0	0.6	100%
スクリーンエアロダイナミクス	0.0	0.1	0.1	11%
センターコンソール	1.0	0.0	1.0	33%
ヒーティングシステム	2.1	0.3	2.4	100%
その他	10.4	25.6	36.0	100%
合計	31.3	28.6	60.0	-

<自動車フロー中のプラスチック量推定>

前述までの台数推定、プラスチックならびに PP 使用部品モデルを用いて、2050 年までの自動車フロー中のプラスチック量を式(6)のとおり推定した。ここで、自動車 1 台当たりに使用されるプラスチック重量は 2050 年まで変化がないと仮定している。

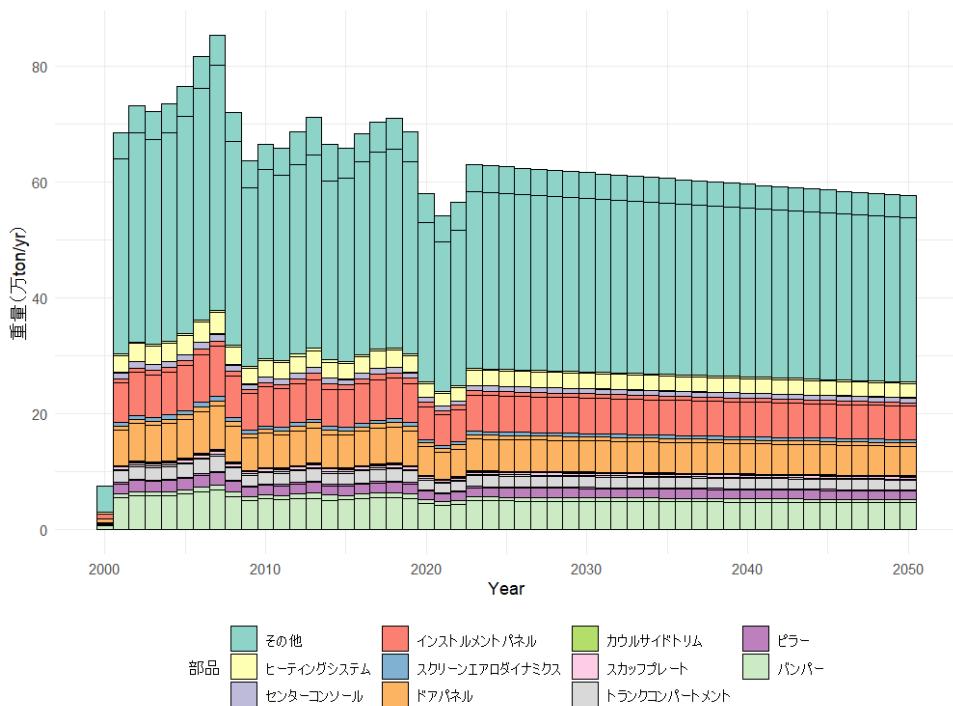
$$P_T^f = \sum_{type=1}^2 \sum_{t=1973}^T \sum_{i=1}^{11} (N_{type,t}^f \times Unit_{P_{adjst_i}^{type}}) \times 10^{-7} \quad (6)$$

- T : 集計年 [年]
 t : 初度登録年 [年]
 f : 自動車ストック・フロー段階
 (新車輸出、新車国内販売、国内ストック、中古輸出、ELV)
 P_T^f : 集計年 T 年の自動車ストック・フロー f に含まれるプラスチック重量 [万 ton/年]
 $N_{type,t}^f$: 初度登録年 t 年の自動車 $type$ が自動車ストック・フロー段階 f に
 存在する台数 [台/年]

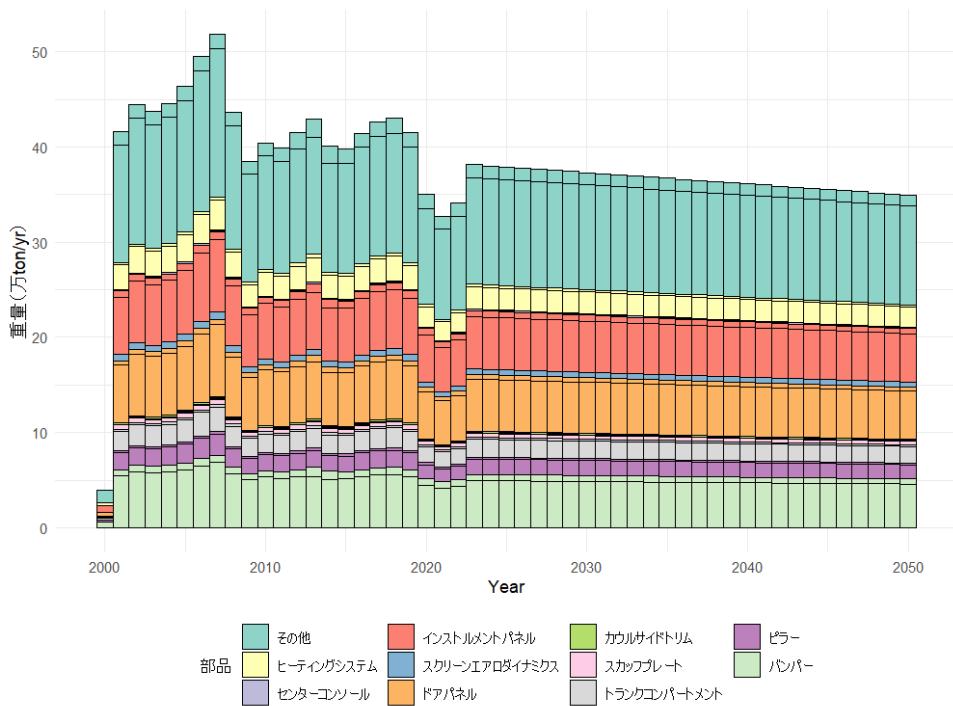
(2) 結果

新車中（新車輸出、新車国内販売）、国内ストック中、ならびに中古輸出を除いた国内リサイクルルートに流れる ELV 中プラスチック、PP 重量の推定結果を図 94～図 96 に示した。2030 年の PP 重量に着目すると、新車中 37 万 ton/年（国内販売 17 万 ton/年、新車輸出 20 万 ton/年）、国内ストック 254 万 ton/年、ELV13 万 ton/年と推定された。また、中古輸出は 4.2 ton/年であった。いずれの自動車フロー・ストック段階においても人口減少の影響で 2050 年にかけて減少傾向が確認されるが、新車中のプラスチック量の減少はより緩やかであった。これは、新車輸出が今後も一定と仮定しているためであり、国外に流れるフローの寄与が大きいことを示唆している。なお、過年度 2008 年や 2020 年頃の凹凸は、リーマンショックやコロナ禍によって輸出台数が減少したことの影響による。

2030 年の ELV 中の PP は、対象とした 10 部品が 67%（8.5 万 ton/年）を占める結果となった。バンパー 1.9 万 ton/年、ドアパネル 1.9 万 ton/年、インストルメントパネル 2.1 万 ton/年の寄与が大きいことが確認された。易解体性の視点も踏まえて実際の回収可能性について検討が必要である。

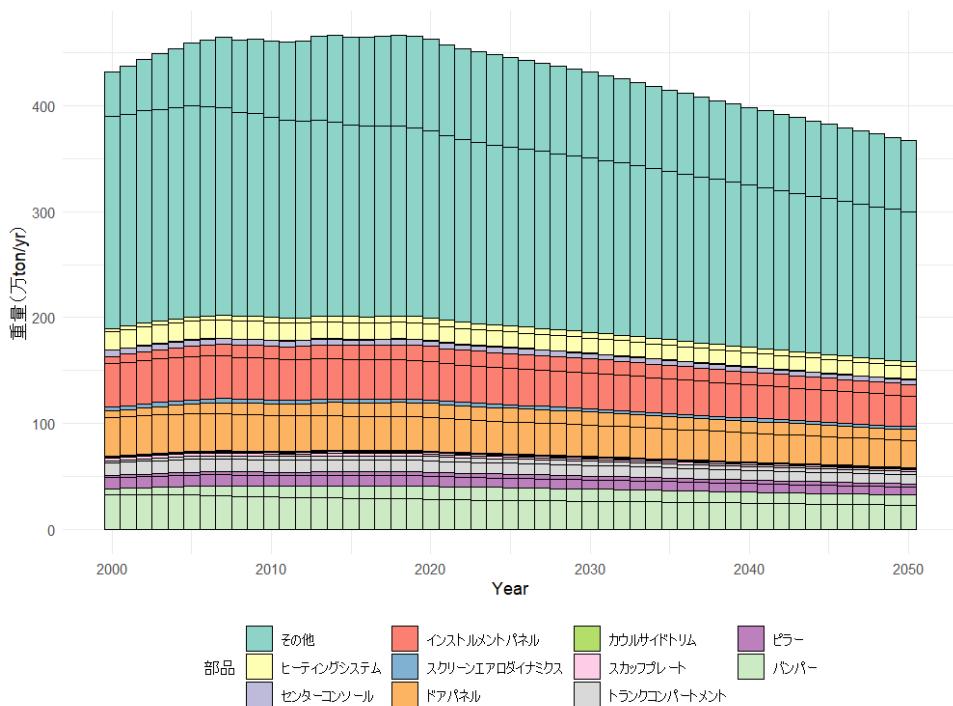


(b) プラスチック全量

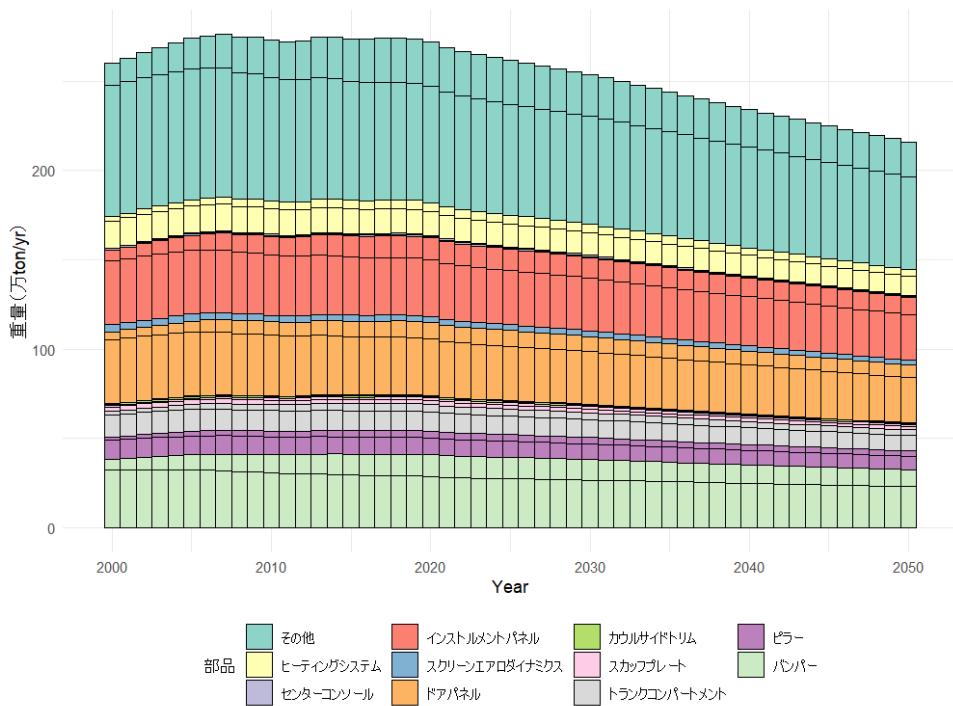


(a) PP

図 94 新車中プラスチックの経年推移（部品別内訳）

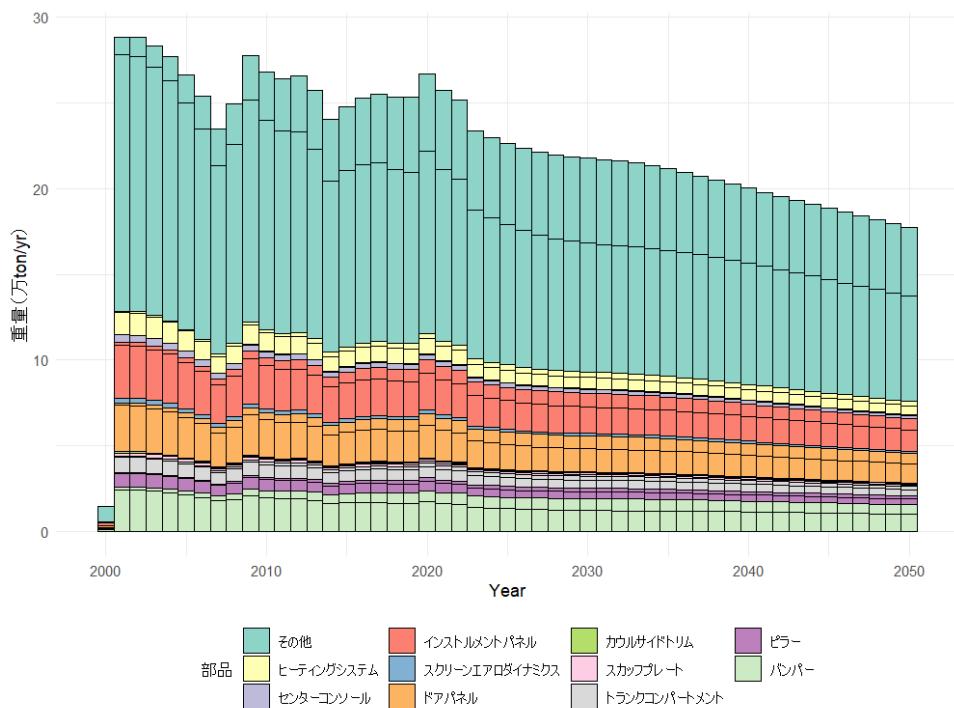


(b) プラスチック全量

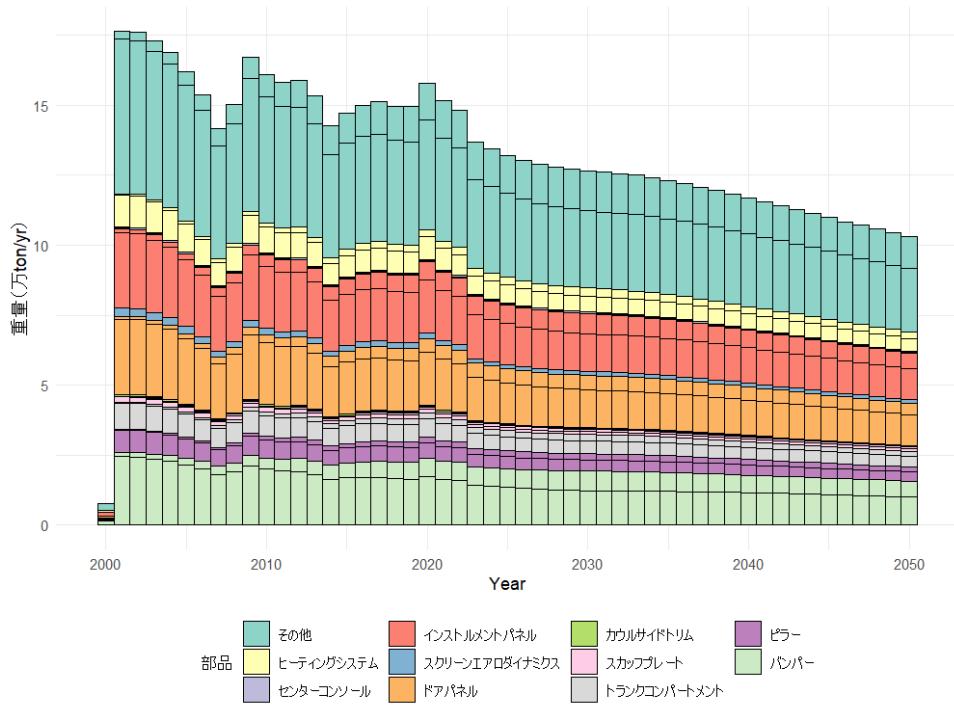


(a) PP

図 95 国内ストック自動車中プラスチックの経年推移（部品別内訳）



(b) プラスチック全量



(a) PP

図 96 ELV 中プラスチックの経年推移（部品別内訳）

(3) まとめと課題

今年度は自動車の PP 素材・PP 使用部品等のプラスチック使用量を推定する動的フローモデルを開発した。今回作成した自動車のプラスチック使用部品モデルの 10 部品で、PP 重量全体 7 割程度をカバーするモデルとなっている。解体段階の歩留まりを考慮して、実際に回収可能なプラスチック量を

推定する必要がある。また、本推定で得られたプラスチック量と、バイオプラスチックの代替によるライフサイクル GHG 削減効果解析モデルを連結させて自動車へのバイオプラスチック導入効果の推定精度を上げる必要がある。

¹ Yano J., Muroi T., Sakai S. (2016) Rare earth element recovery potentials from end-of-life hybrid electric vehicle components in 2010–2030. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 18:655-664.

² Liu H., Yano J., Kajiwara N., Sakai S. (2019) Dynamic stock, flow, and emissions of brominated flame retardants for vehicles in Japan. *Journal of Cleaner Production*, 232:910-924

³ 自動車検査登録情報協会：わが国の自動車保有動向、平均使用年数、

<https://www.airia.or.jp/publish/file/v19mrm00000019lz.pdf> (閲覧日：2025年3月1日)

⁴ 軽自動車検査協会：軽自動車の平均車齢・平均使用年数、軽自動車の平均使用年数、

https://www.keikenkyo.or.jp/Portals/0/files/information/statistics/average_data/heikinsui2005-2024.pdf (閲覧日：2025年3月1日)

⁵ 日本ELVリサイクル機構 (2015) 平成26年度低炭素型3R技術・システム実証事業 自動車又は自動車部品に含有されるレアメタル等有用金属、ガラス、プラスチックの事前選別、高度選別等によるリサイクルの促進業務報告書

⁶ いその株式会社 (2017) 平成28年度低炭素型3R技術・システム実証事業 使用済自動車由来PP部品の効率的な再生材生産プロセスの検証報告書

⁷ 三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社 (2016) 平成27年度低炭素型3R技術・システム実証事業 自動車リサイクルの全体最適化を念頭においた解体プロセスの高度化実証事業報告書

⁸ Yano J., Xu G., Liu H., Toyoguchi T., Iwasawa H., Sakai S (2019) Resource and toxic characterization in end-of-life vehicles through dismantling survey. *Journal of Material Cycles and Waste Management* 21:1488-1504

⁹ 松本律哉 (2018) 自動車の電装化に伴う樹脂製燃料タンクの動向、次世代ポリオレフィン総合研究 Vol. 12

4.3.3 バイオマスプラスチック代替による GHG 削減効果の試算

(1) 目的及び調査範囲の設定

自動車に使用されるプラスチックを化石資源由来プラスチックからバイオマスプラスチックに代替することによる GHG 削減効果を定量化するため、令和 6 年度はバイオ PP 及びバイオエンプラを対象として試算を行った。

<システム境界>

機能単位は「国内の廃自動車に使用されていたプラスチックの生産と処理・リサイクル」と設定し、ベースラインを「化石資源由来プラスチックを使用した自動車の製造、廃棄・リサイクル」(図 97)、評価対象製品を「バイオマスプラスチックを使用した自動車の製造、廃棄・リサイクル」(図 98)とした。

なお、今回の試算では、廃自動車が海外に輸出・使用された後、現地で廃自動車由来の廃プラスチックが処理・リサイクルされる際の CO₂削減効果も算定対象に含んでいる。

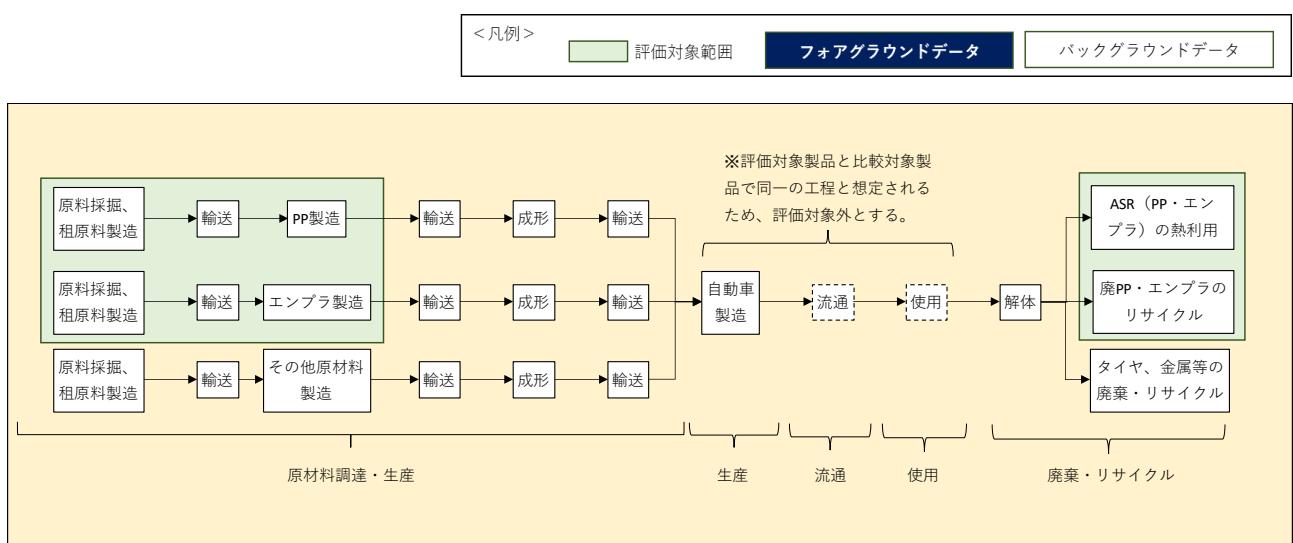


図 97 ベースラインのシステム境界

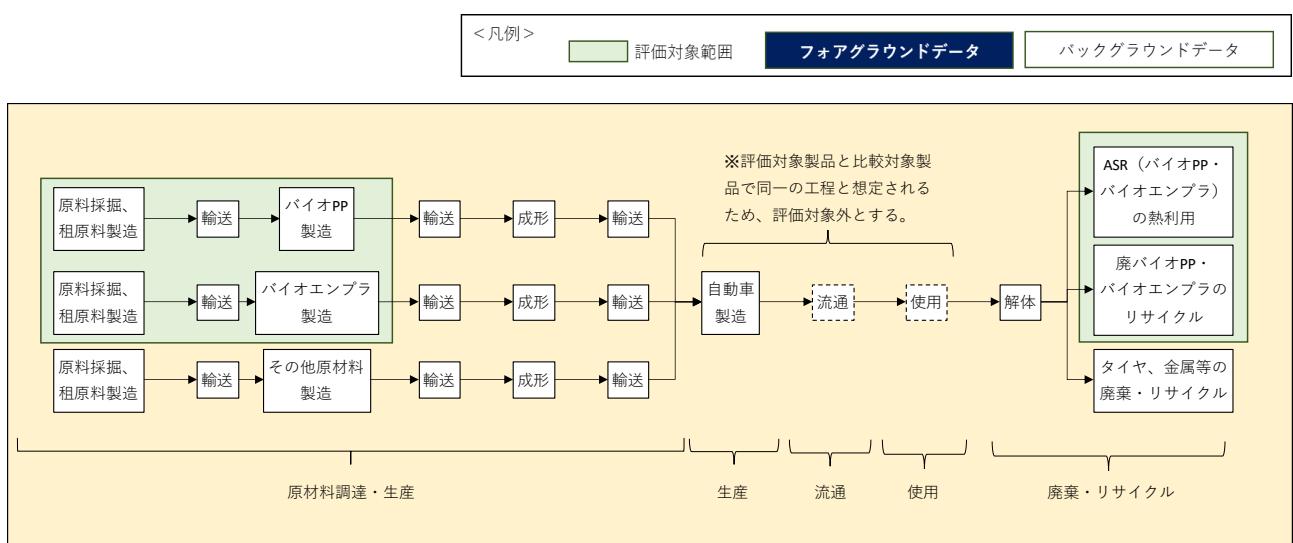


図 98 評価対象製品のシステム境界

なお、評価対象製品におけるバイオ PP (図 99) 及びバイオエンプラ (図 100) のシステム境界の詳細は以下の通り。

バイオ PP はブラジル産廃糖蜜ないし国産ソルガムを原料としたバイオエタノールを用いて脱水によりエチレンを製造し、化石資源由来ブテンと反応させることで、バイオプロピレン (バイオマス度 33%) を得るプロセスを想定した。バイオプロピレンの重合によりバイオ PP を得るまでをシステム境界とした。

バイオ PC については、バイオマスを原料として加水分解等によりグルコースを製造・イソソルバイドに転換し、重合によりバイオ PC を得るプロセスを想定した。

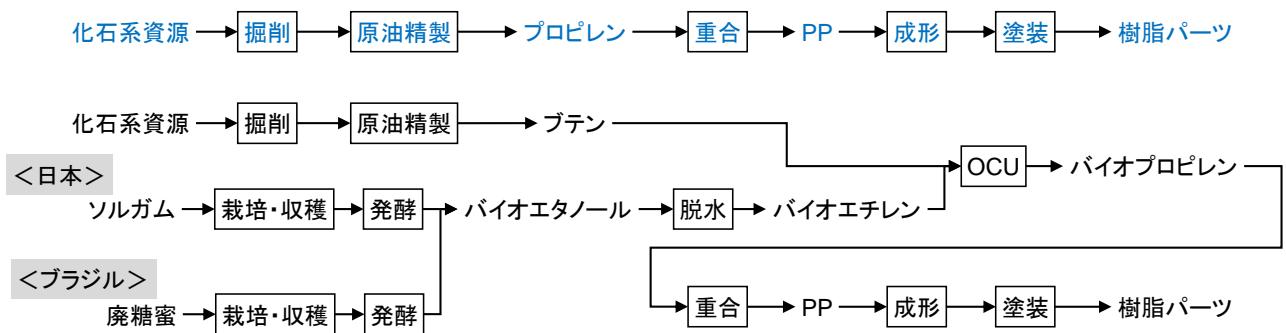


図 99 バイオ PP のシステム境界

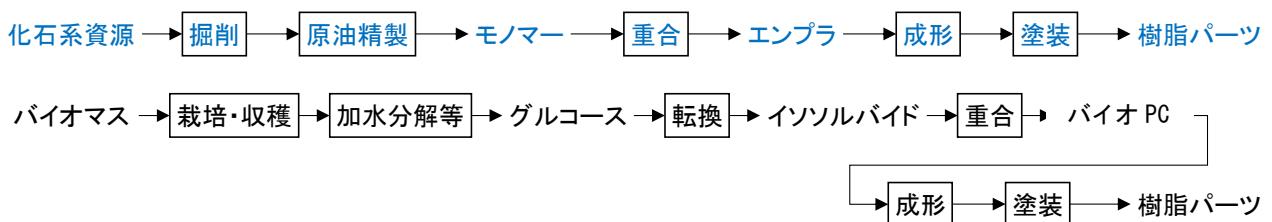


図 100 バイオエンプラのシステム境界

(2) Cradle-to-gate GHG 排出量の試算

＜バイオ PP 製造による GHG 排出量＞

バイオ PP については、以下の通り Cradle-to-gate GHG 排出量を試算した。

・バイオエタノール製造

ブラジル産廃糖蜜を原料とするバイオエタノールに製造については、RenovaBio 制度における事業者からの報告値の平均を用いて算定された値を引用した²。バイオエタノールの発熱量は 29.68 MJ/kg を用いた³。ブラジルから日本への輸送については、約 2 万 km の輸送を仮定した。なお、国内の輸送は考慮していない。

² 資源エネルギー庁、「エネルギー供給構造高度化法に基づく次期判断基準の方針（案）＜改訂版＞」，https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/bio_nenryo/pdf/010_02_00.pdf

³ 資源エネルギー庁、「エネルギー源別標準発熱量・炭素排出係数(2018 年度改訂)の解説」，https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/pdf/stte_028.pdf

国産ソルガムを原料とするバイオエタノール製造については、既往文献から栽培⁴及びバイオエタノール製造⁵データを取得した。なお、ソルガムからバイオエタノール生成時の収量については、実証結果を踏まえ、2.56 t/ha (エタノール濃度 6.4%) と設定した。なお、国内での輸送は考慮していない。

・脱水によるバイオエチレン製造

ブラジル産廃糖蜜又は国産ソルガムから製造したバイオエタノールを原料として、脱水により、バイオエチレンを製造する。脱水のデータは文献⁶より収集した。

・OCU によるバイオプロピレン製造

バイオエチレンと化石資源由来ブテンを反応させることで、部分的 (33.3%) にバイオマス由来炭素を含むバイオプロピレンを製造することができる。製造にあたっては、エチレンと C4 ラフィネートからプロピレンを製造するオレフィンコンバージョンユニット (OCU) を使用することを想定した。本プロセスのデータはバイオエチレンから 100%バイオプロピレンを製造するプロセスのデータ⁷で代替し、原料の一部 (33.3%) をバイオマスエチレンから、残り (66.7%) を化石資源由来エチレンから製造すると仮定した。

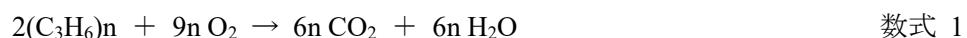
・重合によるバイオ PP 製造

バイオプロピレンを原料とするバイオ PP 製造については、IDEA のデータ (163518000pJPN ポリプロピレン, JPN) を使用した。プロピレンを上記で製造したバイオプロピレンに置換した。

・GHG 排出量

以上の活動量をもとに、ブラジル産廃糖蜜由来バイオ PP 及び国産ソルガム由来バイオ PP の GHG 排出量を試算した。試算の内訳はそれぞれ表 64、表 68 の通り。なお、LCI データベースは IDEA v3.3 (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 IDEA ラボ) を使用した。

その結果、GHG 排出量は、ブラジル産廃糖蜜由来バイオ PP は 4.41 kg-CO₂eq/kg-バイオ PP (図 101)、国産ソルガム由来バイオ PP は 4.84 kg-CO₂eq/kg-バイオ PP (図 102) となった。なお、33.3%がバイオマス由来炭素であることから、式 1 より、1.05 kg-CO₂eq/kg-バイオ PP の吸収分が存在する (原子量は C:12、H:1、O:16 とした)。



ただし、いずれの原料においても、製造方法によって種々のパラメータは幅を持つと考えられるところから、文献レビューを継続し不確実性分析を実施することが今後の課題である。また、国産ソルガムについては本実証事業を通じて引き続き一次データを収集する。

⁴ Fu, J., Yan, X., & Jiang, D. (2021). Assessing the sweet sorghum-based ethanol potential on saline-alkali land with DSSAT model and LCA approach. In *Biotechnology for Biofuels* (Vol. 14, Issue 1). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1186/s13068-021-01896-z>

⁵ Cai, H., Dunn, J. B., Wang, Z., Han, J., & Wang, M. Q. (2013). Life-cycle energy use and greenhouse gas emissions of production of bioethanol from sorghum in the United States. In *Biotechnology for Biofuels* (Vol. 6, Issue 1, p. 141). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-6-141>

⁶ Zanon-Zotin, M., Bergman-Fonte, C., Nogueira Morais, T., Barbosa Maia, P. L., Carvalho, L., Angelkorte, G., Oliveira Fiorini, A. C., Rua Rodriguez Rochedo, P., Portugal-Pereira, J., Szklo, A., & Schaeffer, R. (2023). Unpacking bio-based alternatives to ethylene production in Brazil, Europe, and the United States: A comparative life cycle assessment. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 428, p. 139376). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139376>

⁷ Kikuchi, Y., Oshita, Y., Mayumi, K., & Hirao, M. (2017). Greenhouse gas emissions and socioeconomic effects of biomass-derived products based on structural path and life cycle analyses: A case study of polyethylene and polypropylene in Japan. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 167, pp. 289–305). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.179>

表 60 ブラジル産廃糖蜜由来バイオ PP の試算条件 [kg-バイオ PP]

プロセス	製品名	活動量	単位	IDEA 製品コード	製品名
原料製造	バイオエタノール	0.676	kg		バイオエタノール製造
原料製造	化石資源由来エチレン	0.771	MJ	163111000pJPN	エチレン, ナフサ分解
輸送	ブラジル国内輸送	0.676	Kg		バイオエタノールのブラジル国内輸送 ⁸
輸送	サントス (ブラジル) ~東京の船輸送	14.2	tkm	451200102pJPN	原油タンカー輸送, >8 万 DWT
脱水	燃料	0.608	MJ	171116801pJPN	A 重油の燃焼エネルギー
脱水	スチーム	0.541	MJ	351211100pJPN	蒸気
脱水	電力	0.207	kWh	331111015pJPN	電力, 日本平均, 2020 年度
プロピレン製造	水素	0.000650	kg	162312000mJPN	水素ガス (単位は kg に換算した)
プロピレン製造	A 重油	4.17	MJ	171116801pJPN	A 重油の燃焼エネルギー
プロピレン製造	電力	2.66	kWh	331111015pJPN	電力, 日本平均, 2020 年度
プロピレン製造	エチレン (燃焼のみ) (33.3%バイオマス由来)	0.0186	kg		エチレン (燃焼のみ)
プロピレン製造	エチレン (燃焼のみ) (33.3%バイオマス由来)	0.00907	kg		C5H12 (燃焼のみ)
プロピレン製造	エチレン (燃焼のみ) (33.3%バイオマス由来)	0.00907	kg		C6H14 (燃焼のみ)
重合		1	kg	163518000pJPN	プロピレンをバイオプロピレンに置換した

⁸ 資源エネルギー庁, 「エネルギー供給構造高度化法に基づく次期判断基準の方針 (案) <改訂版>」, https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/bio_nenryo/pdf/010_02_00.pdf

表 61 国産ソルガム由来バイオ PP の試算条件 [kg-バイオ PP]

段階	製品名	活動量	単位	IDEA 製品コード	IDEA 製品名
原料製造	ソルガム製造 (窒素肥料)	0.0143	kg	161100200mJPN	肥料 (窒素質分)
原料製造	ソルガム製造 (リン肥料)	0.0214	kg	161100201mJPN	肥料 (りん酸質分)
原料製造	ソルガム製造 (カリウム肥料)	0.0178	kg	161919200mJPN	肥料 (カリ質分)
原料製造	ソルガム製造 (除草剤)	0.000940	kg	169229200pJPN	除草剤, 2,4-PA, ソーダ塩
原料製造	ソルガム製造 (殺虫剤)	0.000198	kg	169211000pJPN	殺虫剤
原料製造	ソルガム製造 (軽油)	0.0177	kg	171115801pJPN	軽油の燃焼エネルギー
原料製造	バイオエタノール製造 (エネルギー: A 重油)	7.88	MJ	171116801pJPN	A 重油の燃焼エネルギー
原料製造	バイオエタノール製造 (電力)	1.20	MJ	331111015pJPN	電力, 日本平均, 2020 年度 (単位: MJ)
原料製造	バイオエタノール製造 (酵母)	0.00417	kg		(カットオフ)
原料製造	化石資源由来エチレン	0.771	MJ	163111000pJPN	エチレン, ナフサ分解
脱水	燃料	0.608	MJ	171116801pJPN	A 重油の燃焼エネルギー
脱水	スチーム	0.541	MJ	351211100pJPN	蒸気
脱水	電力	0.207	kWh	331111015pJPN	電力, 日本平均, 2020 年度
プロピレン製造	水素	0.000650	kg	162312000mJPN	水素ガス (単位: kg)
プロピレン製造	A 重油	4.17	MJ	171116801pJPN	A 重油の燃焼エネルギー
プロピレン製造	電力	2.66	kWh	331111015pJPN	電力, 日本平均, 2020 年度
プロピレン製造	エチレン (燃焼のみ) (33.3%バイオマス由来)	0.0186	kg		エチレン (燃焼のみ)
プロピレン製造	エチレン (燃焼のみ) (33.3%バイオマス由来)	0.00907	kg		C5H12 (燃焼のみ)
プロピレン製造	エチレン (燃焼のみ) (33.3%バイオマス由来)	0.00907	kg		C6H14 (燃焼のみ)
重合		1	kg	163518000pJPN	プロピレンをバイオプロピレンに置換した

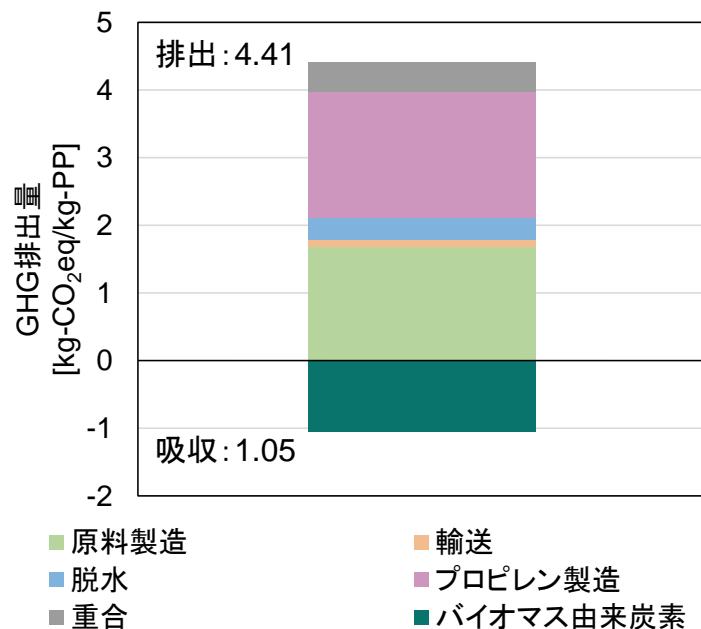


図 101 ブラジル産廃糖蜜由来バイオ PP の試算結果

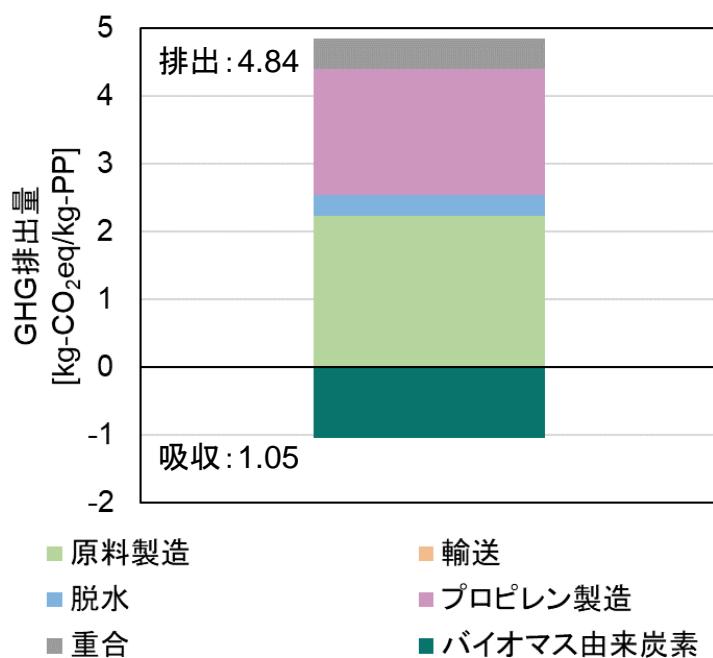


図 102 国産ソルガム由来バイオ PP の試算結果

<バイオエンプラ製造による GHG 排出量>

バイオエンプラについては Cradle-to-gate GHG 排出量が 4.77 kg-CO₂eq/kg-バイオエンプラと報告されている⁹ことから、この値を使用した。

⁹ 三菱化学株式会社（社名は当時のもの）（2018 年公開）、「植物由来原料を用いた高機能透明プラスチックの開発と商業化」, https://www.jaci.or.jp/gscn/img/page_19/gsc_guide_no4.pdf

(3) 国内の廃自動車中のプラスチック生産と処理・リサイクルによる GHG 削減効果

(2) で試算したバイオ PP 及びバイオエンプラの Cradle-to-gate GHG 排出量をもとに、国内の廃自動車中のプラスチック生産と処理・リサイクルによる GHG 削減効果を試算した。試算条件は以下の通り

(表 62、表 63)。自動車中のプラスチック重量や PP、バイオエンプラ重量については、本実証事業の解体調査で得られたプラスチック組成に関する知見は次年度以降に本解析モデルに反映予定である。リサイクルによるバージン材の代替効果の算定は負荷回避法を用いて算定した。負荷回避法はリサイクルやエネルギー回収の LCA で用いられる評価手法であり、リサイクルによって影響を受けたプロセスを特定し、回避された負荷を控除する評価手法である¹⁰。なお、バイオ PP・バイオエンプラのリサイクル性については、化石資源由来 PP・エンプラと同等と想定した。

その結果、ブラジル産廃糖蜜を原料とするバイオ PP による GHG 削減量は 53.4 万 t-CO₂eq/年(表 64)、バイオエンプラによる GHG 削減量は 49.2 万 t-CO₂eq/年(表 65) と試算された(下 3 行は四捨五入)。バイオ PP 及びバイオエンプラについて、バイオマスプラスチック採用による GHG 削減量とリサイクルによる GHG 削減量の内訳はそれぞれ表 66、表 67 の通り。バイオエタノール由来バイオエチレンと化石資源由来ブテンを使用したバイオ PP 製造からの GHG 排出量が多いため、バイオ PP への転換だけでは必ずしも GHG 排出量を削減できないことが明らかになった。現在はバイオマスの栽培やバイオエタノール製造、OCU 等は文献値を使用していることから、データの精緻化が必要である。また、バイオマス栽培の低環境負荷化も求められる。

なお、国産ソルガムを使用したバイオ PP についても試算を行ったところ、GHG 削減量は 44.9 万 t-CO₂eq/年(表 68) となった。ブラジル産バイオエタノールからバイオ PP を製造した場合より GHG 削減量が約 4 万 t-CO₂eq/年小さくなったものの、ベースラインよりは GHG を削減できることが確認できた。国産ソルガムの方が栽培時・バイオエタノール製造時の負荷が大きくなるためである。現在はソルガム栽培のデータは文献値を使用していること、種々のパラメータは幅を持つと考えられることから、文献レビューを継続し、不確実性分析を行う予定である。

¹⁰ 中谷隼、「LCA によるプラスチック資源循環の評価方法の基本と課題」、日本 LCA 学会誌/19 卷 (2023) 3 号

表 62 廃自動車中のバイオ PP 生産と処理・リサイクルによる GH 削減効果の試算条件

設定内容	設定内容詳細	評価対象製品		ベースライン		出典・根拠等
		値	単位	値	単位	
廃車台数	廃車として引き渡し (国内)	272.6	万台	272.6	万台	公益社団法人自動車リサイクル促進センター (JARC), 自動車リサイクルデータ book 2023 https://www.jarc.or.jp/renewal/wp-content/themes/jarc/assets/pdf/databook2023.pdf
	中古車として海外輸出	157.1	万台	157.1	万台	
廃車中 PP 量	自動車 1 台あたりのプラスチック量	0.15	t/台	0.15	t/台	設定値 (今後、実証結果を踏まえて更新)
	自動車用プラスチックに占める PP 割合	60%	%	60%	%	設定値 (今後、実証結果を踏まえて更新)
	廃自動車中の PP 量 (国内発生量)	386,730	t/年	386,730	t/年	
バイオ PP 条件設定	自動車用 PP におけるバイオ PP 採用率	100%	%	0%	%	設定値
	バイオ PP の平均バイオマス度	33.3%	%	33.3%	%	設定値
廃車中 PP 利用方法	残渣を ASR 化	50%	%	90%	%	設定値
	MR・CR 向けに部品を取り外し	50%	%	10%	%	設定値
MR・CR 条件設定	MR・CR 時の収率	100%	%	100%	%	設定値 (今後、実態に合わせて更新)
	MR・CR 由来の再生プラ品質 (対バージン PP 比)	100%	%	100%	%	設定値 (今後、実態に合わせて更新)
廃車由来 PP 利用量	ASR 化 (燃料利用)	化石資源由来 PP 量	0	t/年	348,057	t/年
		バイオ PP 量	193,365	t/年	0	t/年
	MR・CR 化	化石資源由来 PP 量	0	t/年	38,673	t/年
		バイオ PP 量	193,365	t/年	0	t/年
	合計		386,730	t/年	386,730	t/年

表 63 廃自動車中のバイオエンプラ生産と処理・リサイクルによる GHG 削減効果の試算条件

設定内容	設定内容詳細	評価対象製品		ベースライン		出典・根拠等
		値	単位	値	単位	
廃車台数	廃車として引き渡し（国内）	272.6	万台	272.6	万台	公益社団法人自動車リサイクル促進センター（JARC），自動車リサイクルデータ book 2023 https://www.jarc.or.jp/renewal/wp-content/themes/jarc/assets/pdf/databook2023.pdf
	中古車として海外輸出	157.1	万台	157.1	万台	
廃車中 PC 量	自動車 1 台あたりのプラスチック量	0.15	t/台	0.15	t/台	設定値（今後、実証結果を踏まえて更新）
	自動車用プラスチックに占めるエンプラ割合	10%	%	10%	%	設定値（今後、実証結果を踏まえて更新）
	廃自動車中のエンプラ量（国内発生量）	64,455	t/年	64,455	t/年	
バイオ PC 条件設定	自動車用エンプラにおけるバイオエンプラ採用率	100%	%	0%	%	設定値
	バイオエンプラの平均バイオマス度	80%	%	80%	%	設定値
廃車中 PC 利用方法	残渣を ASR 化	70%	%	100%	%	設定値
	MR・CR 向けに部品を取り外し	30%	%	0%	%	設定値
MR・CR 条件設定	MR・CR 時の収率	100%	%	100%	%	設定値（今後、実態に合わせて更新）
	MR・CR 由来の再生プラ品質（対バージンエンプラ比）	100%	%	100%	%	設定値（今後、実態に合わせて更新）
廃車由来 PC 利用量	ASR 化（燃料利用）	化石資源由来 PC 量	0	t/年	64,455	t/年
		バイオエンプラ量	45,119	t/年	0	t/年
	MR・CR 化	化石資源由来 PC 量	0	t/年	0	t/年
		バイオエンプラ量	19,337	t/年	0	t/年
	合計		64,455	t/年	64,455	t/年

表 64 廃自動車中のバイオ PP (ブラジル産廃糖蜜由来) 生産と処理・リサイクルによる GHG 削減効果の試算結果

(単位 t-CO ₂ / 年)	①評価対象製品					②ベースライン					③削減量 (②-①)							
	原材料調達・生 産	生産	流通	使用	廃棄・リサ イクル	合計	原材料調 達・生産	生産	流通	使用	廃棄・リサ イクル	合計	原材料調 達・生産	生産	流通	使用	廃棄・リサ イクル	合計
エネルギー起源	1,704,000	0	0	0	-447,000	1,257,000	775,000	0	0	0	1,016,000	1,791,000	-929,000	0	0	0	1,463,000	534,000
非エネルギー起源	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
合計	1,704,000	0	0	0	-447,000	1,257,000	775,000	0	0	0	1,016,000	1,791,000	-929,000	0	0	0	1,463,000	534,000

表 65 廃自動車中のバイオ PC 生産と処理・リサイクルによる GHG 削減効果の試算結果

(単位 t-CO ₂ / 年)	①評価対象製品					②ベースライン					③削減量 (②-①)							
	原材料調達・生 産	生産	流通	使用	廃棄・リサ イクル	合計	原材料調 達・生産	生産	流通	使用	廃棄・リサ イクル	合計	原材料調 達・生産	生産	流通	使用	廃棄・リサ イクル	合計
エネルギー起源	307,000	0	0	0	-67,000	240,000	553,000	0	0	0	179,000	732,000	246,000	0	0	0	246,000	492,000
非エネルギー起源	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
合計	307,000	0	0	0	-67,000	240,000	553,000	0	0	0	179,000	732,000	246,000	0	0	0	246,000	492,000

表 66 廃自動車中のバイオ PP (ブラジル産廃糖蜜由来) 生産と処理・リサイクルによる GHG 削減効果の内訳

[t-CO ₂ eq/年]
バイオ PP 採用による GHG 削減量
-241,000
リサイクルによる GHG 削減量
774,000
合計
534,000

※ 下 3 行は四捨五入しているため、合計は一致しない

表 67 廃自動車中のバイオエンプラ生産と処理・リサイクルによる GHG 削減効果の内訳

[t-CO ₂ eq/年]
バイオエンプラ採用による GHG 削減量
399,000
リサイクルによる GHG 削減量
92,000
合計
491,000

表 68 廃自動車中のバイオ PP (国産ソルガム由来) 生産と処理・リサイクルによる GHG 削減効果の試算結果

(単位 t-CO ₂ / 年)	①評価対象製品					②ベースライン					③削減量 ((②)-(①))							
	原材料調 達・生産	生産	流通	使用	廃棄・リサ イクル	合計	原材料調 達・生産	生産	流通	使用	廃棄・リサイ クル	合計	原材料調達・ 生産	生産	流通	使用	廃棄・リサイ クル	合計
エネルギー起源	1,873,000	0	0	0	-531,000	1,342,000	775,000	0	0	0	1,016,000	1,791,000	-1,098,000	0	0	0	1,547,000	449,000
非エネルギー起源	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
合計	1,873,000	0	0	0	-531,000	1,342,000	775,000	0	0	0	1,016,000	1,791,000	-1,098,000	0	0	0	1,547,000	449,000

表 69 廃自動車中のバイオ PP (国産ソルガム) 生産と処理・リサイクルによる GHG 削減効果の内訳

	[t-CO ₂ eq/年]
バイオ PP 採用による GHG 削減量	-410,000
リサイクルによる GHG 削減量	859,000
合計	449,000

※ 下 3 行は四捨五入しているため、合計は一致しない

（4）まとめと課題

バイオ PP 及びバイオエンプラの採用により、GHG 削減効果があることが確認できた。ブラジル産バイオエタノールより国産ソルガム由来バイオエタノールの方が GHG 削減量はやや小さくなつたが、文献によりサトウキビやソルガム栽培時の負荷は大きく異なるため、今後、精査を行う。リサイクル工程における再生材の収率・品質等は仮定値を使用していることから、仮定を精査したうえで、ライフサイクル全体の CO₂ 削減効果の試算を進める予定である。また、事業3（2）で開発する耐久性指標などをベースに、MR の可能性に関する検討を行う。次年度以降、素材ごとの GHG 削減効果の試算結果と動的フローモデルを組み合わせることで、バイオマスプラスチック転換による GHG 削減効果を算定する。

4.4 事業3の成果の要点

「事業3：脱炭素化資源保全時代のライフサイクル設計の在り方検討」では、中長期的視点から、バイオマス原料の国産化を図るため、国産バイオマスの一つとしてソルガムを取り上げ、京都、笠岡、東温の3ヶ所での試験栽培とその搾汁液のエタノール発酵試験を実施した。その結果、1ha当たりのソルガムの新鮮重量ベースで最大28トンの収量が得られた。また搾汁液のBrix糖濃度は16～17%程度、得られたエタノールの濃度は67.6g/L、収率は88.5%であり、エタノール発酵に利用できることが確認された。また、バイオプラスチックとしてPBSとPHBHを対象に、高温多湿の劣化促進環境を想定して、劣化指標、機械的特性指標および生分解性指標それぞれの間の関係性を調査した結果、劣化に伴う結晶化の進行や可塑剤の喪失は、プラスチックの脆化を引き起こし、伸びの顕著な減少を引き起こすとともに、メタン発酵においてプラスチックの微細化を促進し、分解の促進に寄与している可能性が示唆された。さらに自動車のPP素材・PP使用部品等のプラスチック使用量を推定する動的フローモデルを開発するとともに、化石資源由来プラスチックからバイオPP及びバイオエンプラへの転換によるGHG削減効果について試算し、バイオPPとバイオエンプラ合計で103万t-CO₂eq/年の削減効果が確認できた。

本年度の各課題の主な検討成果は以下に示すとおりである。

4.4.1 バイオマスプラスチック国産原料開発

国内での栽培実績がある資源作物の一つとしてソルガムを取り上げ、汎用バイオマスプラスチック・バイオエンプラの国産原料として活用することを目的に、京都市（2圃場）、岡山県笠岡市、愛媛県東温市の3カ所で高糖度の3品種を選定して試験栽培を実施した。京都、笠岡、東温の中で1ha当たりのソルガムの新鮮重量ベースでの収量が最も多かったのは、京都7月植のYUC28トンで、TACが25トンでそれに続いた。笠岡では7月植のTACが12月に26トン、YUCが25トンの収穫量であった。東温ではやや不調でTAC、YUCで18トンであった。搾汁液のBrix糖濃度が高かったのは京都で栽培したCANで17%、笠岡で栽培したCANは16%程度であった。（YUC：雪印種苗、TAC：タキイ種苗、CAN：カネコ種苗）これら3品種のソルガム搾汁液を用いたエタノール発酵試験を実施した結果、得られたエタノールのBrix糖濃度高かったCANのエタノール濃度は67.6g/Lで、TACは、47.5g/L、YUCは46.7g/Lであった。また糖濃度より算出した収率はいずれも87～88%程度でエタノール発酵への阻害はないと考えられる。

4.4.2 ライフサイクルに応じたバイオプラスチックのシステム開発

バイオプラとしてPBSとPHBHを対象に、耐久性を統合的に評価するため、高温多湿の劣化促進環境を想定して、劣化指標、機械的特性指標および生分解性指標それぞれの間の関係性を調査した。PBSサンプルはPHBHサンプルと比較して高温多湿環境での影響を受けやすく、より高温、高湿度の条件に長時間暴露されることにより結晶化度の上昇が顕著である他、環状エステル等の形成に基づく低分子量化が進行している可能性も示唆された。引張試験に関しては、PBSの60°C、湿度85%の劣化試験条件で引張強度にやや大きな減少が、PBS、PHBH両方の60°C、湿度85%の条件において伸びに極めて大きな減少が起きることが明らかとなった。メタン発酵試験の結果、60°C、湿度85%の条件で劣化が進行したPBSサンプルでは、メタン収率の増大と、プラスチック片の崩壊の進行が確認された。劣化に伴う結晶化の進行や可塑剤の喪失は、プラスチックの脆化を引き起こし、伸びの顕著な減少を引

き起こすとともに、メタン発酵においてプラスチックの微細化を促進し、分解の促進に寄与している可能性が示唆された。

4.4.3 ライフサイクル観点から見た実証事業展開

自動車フロー中のプラスチック量を把握しておくため、2050年までの新車販売台数から国内ストック台数、ELV発生台数を推定し、これに解体調査によって得られた自動車部品プラスチック重量を乗じることで、自動車の新車販売からELVまでのプラスチック使用量を推定した。その結果、2030年のPP重量に着目すると、新車中35万ton/年、国内ストック254万ton/年、ELV13万ton/年と推定された。いずれの自動車フロー・ストック段階においても人口減少の影響で2050年にかけて減少傾向が確認されるが、新車中のプラスチック量の減少はより緩やかであった。これは、新車輸出が今後も一定と仮定しているためであり、国外に流れるフローの寄与が大きいことを示唆している。化石資源由来プラスチックからバイオPP及びバイオエンプラへの転換によるGHG削減効果について、国内の廃自動車中のプラスチック生産と処理・リサイクルを機能単位として試算した結果、バイオPPで53.4万t-CO₂eq/年、バイオエンプラで49.1万t-CO₂eq/年、合計で103万t-CO₂eq/年の削減効果が確認できた。なお、バイオPPの試算前提是ブラジル産廃糖蜜を原料とした場合であるが、国産原料の一つとしてソルガムを用いた場合についても同様の削減効果が確認された。

5. 事業全体の令和6年度の成果と今後の課題

本年度は、国産バイオマス由来エタノール中の不純物を分析し、化学品原料として利用可能か評価するとともに、エタノールを原料に各種固体触媒用いて、メタクリル酸メチルの原料となるメタクロレンおよびイソブチレンを合成できる可能性を確認した。開発材であるバイオ PP 材の諸物性と基礎データを基に、自動車内装部品向けの原料として妥当性を確認した。新たなバイオエンプラとしてバイオポリカーボネート、バイオエポキシ樹脂、バイオポリエステルの開発に取り組んだ。またスプレー塗装を代替する加飾フィルム基材としてバイオ TPU を開発した。PP 材を中心に、回収量が確保できかつ容易であるパーツを回収候補として、一次手解体と一次ニブラ解体の 2 業者で精緻解体を実施した。黒色の自動車部品プラスチックの素材判別に中赤外線を用いた分光で判別が可能であり、タルク等の添加剤の含有有無も検出できる可能性があることを確認した。回収するプラスチックのバイオベース度を計測する方式として、CRDS を最有力候補として選定した。中長期的視点からバイオマス原料の国産化を図るため、ソルガムを取り上げ、京都、笠岡、東温の 3 ケ所での試験栽培とその搾汁液のエタノール発酵試験を実施した。バイオプラスチックとして PBS と PHBH を対象に、高温多湿の劣化促進環境を想定して、劣化指標、機械的特性指標および生分解性指標それぞれの間の関係性を調査した。自動車の PP 素材・PP 使用部品等のプラスチック使用量を推定する動的フローモデルを開発し、化石資源由来プラスチックからバイオ PP 及びバイオエンプラへの転換による GHG 削減効果について試算した。

5.1 長寿命用途バイオマスプラスチック導入拡大に向けた素材開発（事業 1）

5.1.1 自動車用途プラスチックのバイオマス化：汎用バイオマスプラスチック（バイオ PP 等）の実装促進に向けた検討

ソルガム由来エタノールには、不純物として 300~1000 ppm オーダーのエチレンとアセトアルデヒドが、50 ppm 程度のジエチルエーテル、1 ppm 程度の窒素成分が含まれていることが明らかとなった。その他の不純物（無機物）としては Al が検出されたもののコンタミネーションと判断した。また、Al 以外の金属成分については検出限界以下であった。これらのこと踏まえ、ソルガム由来エタノールは十分に精製しさえすれば化学品原料として利用可能であると判断された。

また、ソルガム由来バイオエタノールを活用し、自動車のテールライト、インストルメントパネルに用いられるポリメタクリル酸メチルのモノマーであるメタクリル酸メチルの製造可能性を検討した。そのため市販のエタノールを原料に各種固体触媒用いて、メタクリル酸メチルの原料となるメタクロレンおよびイソブチレンを合成する反応が進行するか評価した結果、低収率ではあるがその可能性が確認できた。

5.1.2 自動車用途プラスチックのバイオマス化：バイオエンプラ等の素材開発に向けた検討

バイオマスを原料とするエンジニアリングプラスチック（エンプラ）について、バイオマス由来という価値だけでなく、素材そのものの性能という価値から自動車用途プラスチックへ採用されることも目指して、新たなバイオエンプラの開発に取り組んだ。その結果、バイオポリカーボネートでは、種々のモノマーを用いて重合反応を検討したところ、新規バイオモノマー共重合品 2 種とポリオール共重合品 3 種を開発した。いずれの樹脂も、耐熱性に関しては十分なものが得られたため、機械特性次第では、自動車の内装用途への応用が期待される。特にポリオール共重合品は、優れた耐薬品性を

示すことが明らかとなつたため、内装材の中でも人の手が良く触れる部材への応用が期待でき、バイオマス度はいずれも既存のグレードから 10% 程度向上した。バイオエポキシ樹脂では、構造接着剤向けに選定したバイオ原料 2 種（天然糖由来、植物油由来）にて、エポキシ化の合成を試みた。天然糖由来原料使用した場合は、反応時にゲル化し、液状のエポキシ樹脂を得ることができなかつた。一方、植物油由来原料を使用したケースでは、液状のバイオエポキシ樹脂を得ることができた（バイオ化度約 60-70%）。バイオポリエステルについては、種々のモノマーを用いて重合反応を検討したところ、バイオマス由来の共重合成分の添加によって結晶化速度も調整することができ、二軸延伸フィルムの高延伸倍率化に成功した。

5.1.3 自動車用途プラスチックの環境配慮設計に向けた検討

スプレー塗装が施される自動車用途のプラスチック部品に対し、剥離性のある加飾フィルムを用いてスプレー塗装を代替することを目的に、加飾フィルム基材として印刷性に優れるバイオ TPU を開発することができた。特に、TPU 層にインキ密着層として PC 層を用い、多層化することで、印刷性に優れるクリアフィルムの開発に繋がつた。また、本樹脂は透明性、耐候性、耐久性にも優れている。加飾フィルムとして活用する上では、バイオ TPU フィルムへの印刷加飾や保護コーティング、製品形状への貼合などの後加工を伴うため、ベースフィルムに対する印刷、コーティングなどの 1 次加工性および製品に貼り合わせるための賦形、貼合、トリミングなどの 2 次加工性に加え、市場での使われ方を想定した耐久性、リサイクル性まで加味したフィルム積層体の材料設計が必要となるが、バイオ TPU フィルムは自動車外装製品をはじめとする長寿命用途での使用に耐えうる基本性能を有していることを確認した。カラートレンドと社会的価値観の関係性を分析することにより、2030 年の自動車業界予測として、ブルー系カラー重視かつ、リサイクル性を考慮した無機顔料開発の方向性が示唆された。

本年度の調査結果を踏まえ、今後はコスト構造分析を実施し、外板塗装代替の加飾フィルムの社会実装に向けたバリューチェーン構築可能性の検証、及び設備投資とスケールメリットの試算を実施する。

5.2 長寿命用途バイオマスプラスチックのリサイクル技術開発（事業 2）

5.2.1 自動車用途バイオマスプラスチックの解体・判別技術の開発

本年度は、将来的にバイオマスプラスチック化が見込まれる自動車用プラスチック部品を選定することを目的に、PP 材を中心に、回収量が確保できる、もしくは回収が容易なパーツを回収候補としてリストアップし、一次手解体と一次ニブラ解体の 2 業者で廃自動車の精緻解体並びに部品回収を実施し、その解体性や回収量を調べた。その結果、小さなパーツまで含めた精緻解体により回収量は増加すること、回収量が期待できる PP パーツはバンパー、ドアパネル、インストルメントパネル次いでトランクコンポーネント、ピラー、ヒーティングシステム等であること、手解体とニブラ解体（一次）を比較すると、確実に回収ができる、解体時に欠損が生じないといった理由から手解体の方が回収量が多くなることが判明した。一方、ニブラ解体では単位時間で回収できるのに要した時間が短い結果となつた。これらのこととは一定の時間内、すなわち一定のコストの制約のもとではニブラ解体の方が回収量が多くなることになり、回収量を確保しつつ短時間で回収できるようにするには、回収が容易なパーツの一次手解体とその他のパーツの一次ニブラ解体の組合せ、二次解体が容易になるようなパーツ設計が必要と考えられる。

今後は、車種、パーツによる回収量、回収時間のばらつきを抑え、精度を上げるためにデータ数を増やすし、手解体とニブラー解体の最適な組み合わせの検証とともに、易解体設計及び適切なプラスチック素材判別技術の効果的な活用方法を検討する必要がある。また、バイオマス由来の自動車用部品を用いたリサイクルコンパウンド開発についても検討を進めたい。

5.2.2 自動車用途バイオマスプラスチックのケミカルリサイクル技術の多様化

自動車用途のバイオエンプラが廃自動車から回収された後の再利用技術として MR に不向きなバイオエンプラの CR 技術の開発に取り組んだ。具体的には、バイオ PC である DURABIO の二軸押出処理における処理回数と劣化度合いの相関を検証。エポキシ樹脂硬化物を分解可能な分解液組成を開発し、加温した分解液にプリント基板を浸漬することでエポキシ樹脂硬化物以外の樹脂についても分解できることを確認。金属やガラス繊維も回収した。また PET、PBT、ABS、PC を溶解する二種の溶媒の組合せでこれらの混合物からそれぞれの樹脂を分離できることを確認。ワイヤーハーネスから溶媒によりリサイクル PVC とリサイクル銅を高収率で回収できた。またこの溶媒の活用等により、ウェザーストリップの材質判断 (PVC 製かゴム製) が可能となった。またポリウレタンの解重合可能な温度、圧力条件の選定により効率よく分解とともに後処理によりジアミンの単離に成功した。さらに汚れや金属、塗料の分離が困難な成分を含む混合廃プラスチックに対し、外観検査、FT-IR による素材判別等により分類できることを示した。今後、これらの技術を市中から回収された自動車において使用されていた廃プラスチックで検証することを積み重ねるとともに、バージンヒントの配合による品質確保等に取り組んでいきたい。

5.2.3 バイオマスプラスチックの由来や素材の検出技術の開発

自動車解体現場で効率的かつ精度よく素材判別を行うことが求められるため、自動車用途に多く採用されている黒色プラスチックの素材判別性能を評価した。一般的に採用されている近赤外線方式での樹脂判別性能と黒色樹脂のカーボンブラック含有量との関係を評価した結果、カーボンブラック含有量が約 1% 程度以上であれば判別が困難であることが分かった。カーボンブラック含有量が約 1% 程度の場合、見た目では薄いグレーであるがそれでも判別が困難なものがあることからグレー、黒の自動車部品プラスチックの判別には近赤外方式の判別センサーは使用できないとの結論のもと、新たに中赤外線を用いた分光方式を検討した結果、黒色樹脂の判別が可能であること、小型化のポテンシャル、オンライン分析における利便性や安全性の面から拡散反射型の中赤外線方式を黒色樹脂の判別方式の第一案として選定した。今後は評価用の実験機を用いて、基礎特性を把握とともに小型化、低コスト化を検討する必要がある。また、タルクやファイバー等の添加剤の含有有無を検出できる可能性があることからその検証を行っていきたい。

一方、回収するプラスチックのバイオベース度を計測する方式として、AMS、LSC 及び CRDS の比較評価を行った結果、現場での計測を想定のもと、測定時間が 10 分程度と短いこと、感度および精度を確保しつつも前処理に手間がかからず自動化が可能なこと、卓上サイズであることなどを考慮すると、CRDS が最有力候補との結論を得た。今後は、装置に必要な仕様決定のため、自動車解体現場での要件調査、夾雜ガスの調査、CO₂ ガス選択分離手法の検討に取り組んでいく予定である。

5.3 脱炭素化資源保全時代のライフサイクル設計の在り方検討（事業3）

5.3.1 バイオマスプラスチック国産原料開発

中長期的な視点や資源安全保障等の観点から国産原料確保のため、国内での栽培実績がある資源作物の一つとしてソルガムを取り上げ、汎用バイオマスプラスチック・バイオエンプラの国産原料として活用することを目的に、京都市（2圃場）、岡山県笠岡市、愛媛県東温市の3カ所で高糖度の3品種を選定して試験栽培を実施した。京都、笠岡、東温の中で1ha当たりのソルガムの新鮮重量ベースでの収量が最も多かったのは、京都7月植のYUC28トンで、TACが25トンでそれに続いた。笠岡では7月植のTACが12月に26トン、YUCが25トンの収穫量であった。東温ではやや不調でTAC、YUCで18トンであった。搾汁液のBrix糖濃度が高かったのは京都で栽培したCANで17%、笠岡で栽培したCANは16%程度であった。（YUC：雪印種苗、TAC：タキイ種苗、CAN：カネコ種苗）これら3品種のソルガム搾汁液を用いたエタノール発酵試験を実施した結果、得られたエタノールのBrix糖濃度高かったCANのエタノール濃度は67.6g/Lで、TACは、47.5g/L、YUCは46.7g/Lであった。また糖濃度より算出した収率はいずれも87~88%程度でエタノール発酵への阻害はないと考えられる。

今後は、国産バイオマスの対象を広げて収量増とコスト削減につながる国産バイオマス資源の栽培方法を検討したい。具体的には、安価に調達可能なバイオガス化残渣（消化液）やエタノール発酵廃液を肥料として活用する栽培管理技術の検討のほか、残渣の嫌気発酵によるエネルギー・肥料回収方法の検討等を行う。また、バイオPPやバイオPCの原料となるエタノール発酵やソルビトール合成を想定したバイオマス搾汁液（糖）の適性評価及び搾汁残渣の化成品原料や家畜飼料としての利用など、現行の農業システムに内包できる栽培システムに係る調査を行うこととした。

5.3.2 ライフサイクルに応じたバイオプラスチックのシステム開発

バイオプラとしてPBSとPHBHを対象に、耐久性を統合的に評価するため、高温多湿の劣化促進環境を想定して、劣化指標、機械的特性指標および生分解性指標それぞれの間の関係性を調査した。PBSサンプルはPHBHサンプルと比較して高温多湿環境での影響を受けやすく、より高温、高湿度の条件に長時間暴露されることにより結晶化度の上昇が顕著である他、環状エステル等の形成に基づく低分子量化が進行している可能性も示唆された。引張試験に関しては、PBSの60°C、湿度85%の劣化試験条件で引張強度にやや大きな減少が、PBS、PHBH両方の60°C、湿度85%の条件において伸びに極めて大きな減少が起きることが明らかとなった。メタン発酵試験の結果、60°C、湿度85%の条件で劣化が進行したPBSサンプルでは、メタン収率の増大と、プラスチック片の崩壊の進行が確認された。劣化に伴う結晶化の進行や可塑剤の喪失は、プラスチックの脆化を引き起こし、伸びの顕著な減少を引き起こすとともに、メタン発酵においてプラスチックの微細化を促進し、分解の促進に寄与している可能性が示唆された。

今後は、バイオプラスチックを対象に温度、湿度、暴露期間等をパラメータとして耐候性試験を実施し、機械的強度、分解性、劣化に関わる指標、特に、劣化に伴う結晶化の進行や低分子化の進行等に着目し、それらの関係性を整理するとともに統合的指標の抽出を試みることとした。

5.3.3 ライフサイクル観点から見た実証事業展開

バイオプラスチックの代替によるGHG削減効果の定量化にあたり、自動車フロー中のプラスチック量を把握しておくため、2050年までの新車販売台数から国内ストック台数、ELV発生台数を推定し、これに解体調査によって得られた自動車部品プラスチック重量を乗じることで、自動車の新車販売か

ら ELV までのプラスチック使用量を推定した。その結果、2030 年の PP 重量に着目すると、新車中 35 万 ton/年、国内ストック 254 万 ton/年、ELV13 万 ton/年と推定された。いずれの自動車フロー・ストック段階においても人口減少の影響で 2050 年にかけて減少傾向が確認されるが、新車中のプラスチック量の減少はより緩やかであった。これは、新車輸出が今後も一定と仮定しているためであり、国外に流れるフローの寄与が大きいことを示唆している。化石資源由来プラスチックからバイオ PP 及びバイオエンプラへの転換による GHG 削減効果について試算した結果、リサイクル工程における GHG 削減効果を含めて、バイオ PP で 53.4 万 t-CO₂eq/年、バイオエンプラで 49.1 万 t-CO₂eq/年、合計で 103 万 t-CO₂eq/年の削減効果が確認できた。なお、バイオ PP の試算前提はブラジル産廃糖蜜を原料とした場合であるが、国産原料の一つとしてソルガムを用いた場合についても同様の削減効果が確認された。文献によりソルガム栽培時の負荷は大きく異なるため、引き続き精査を行う考えである。リサイクル工程における再生材の収率・品質等は仮定値を使用していることから、今後、その仮定を精査とともに、素材ごとの GHG 削減効果の試算結果と動的フローモデルを組み合わせることで、ライフサイクル全体の GHG 削減効果の評価を進める予定である。さらに、バイオマス加飾フィルムを用いた自動車塗装の代替技術による GHG 削減効果についても試算することとした。

參考資料

1. 実施記録

本事業における検討を行うために、以下のとおり検討会・現地視察会を開催した。

表 1 検討会・現地視察会実施記録

会議名	日時	開催場所	開催内容
第1回検討会	10月22日 13:30~16:00	Zoom会議室	<p>(1) 事業概要と本年度の計画概要</p> <p>(2) 本年度計画及び進捗状況について</p> <p>1) 長寿命用途バイオマスプラスチックの導入拡大に向けた素材開発（事業1）</p> <p>① 自動車用途プラスチックのバイオマス化：バイオエンプラ等の素材開発に向けた検討</p> <p>② 自動車用途プラスチックの環境配慮設計に向けた検討</p> <p>2) 長寿命用途バイオマスプラスチックのリサイクル技術開発（事業2）</p> <p>③ 自動車用途バイオマスプラスチックの解体・判別技術の開発</p> <p>④ 自動車用途バイオマスプラスチックのケミカルリサイクル技術の多様化</p> <p>⑤ バイオマスプラスチックの由来や素材の検出技術の開発</p> <p>3) 脱炭素化資源保全時代のライフサイクル設計の在り方検討（事業3）</p> <p>⑥ バイオマスプラスチック国産原料開発</p> <p>⑦ ライフサイクルに応じた生分解性プラスチックのシステム開発</p> <p>⑧ ライフサイクル観点から見た実証事業展開</p>
第2回検討会及び現地視察会	2月4日 12:30~16:15	三菱ケミカル (株)九州事業所及びZoom会議室	<p>(1) 事業概要と本年度の進捗状況 ((公財)京都高度技術研究所)</p> <p>(2) 各事業の本年度の進捗状況について</p> <p>1) 自動車用部品のバイオマス化とリサイクル技術開発関連</p> <p>① 自動車内外装部品に向けた新たなバイオプラスチックの開発</p> <p>② 廃自動車由来の使用済みプラスチックのリサイクル技術の開発</p> <p>③ 自動車向けリサイクルコンパウンドの開発</p> <p>④ バイオマス複合エンプラの自動車部品適用検討</p> <p>⑤ 自動車向け塗装代替バイオマス加飾フィルム材料/適用開発</p> <p>2) バイオマスプラスチックの解体・判別技術関連</p> <p>⑥ 自動車用途バイオマスプラスチックの解体・判別技術の開発</p> <p>⑦ バイオマスプラスチックの素材や由来の検出技術の開発</p> <p>3) 脱炭素化資源保全時代のライフサイクル設計の在り方検討（事業3）</p> <p>⑧ バイオマスプラスチック国産原料開発</p> <p>⑨ ライフサイクルに応じた生分解性プラスチックのシステム開発</p> <p>⑩ ライフサイクル観点から見た実証事業展開</p> <p>現地視察</p>

また、関係者間での情報共有及び進捗管理等を行うため、以下に示す日程でワーキンググループ会合を実施した。

表 2 ワーキンググループ会合等実施記録

日時	開催場所	開催内容
7月8日 13:00-15:00	WARC	廃自動車解体試験計画打合せ
7月11日 11時~12時30分	KMI	廃自動車解体試験計画打合せ
7月23日 10時~17時	WARC	廃自動車解体試験立会
8月19日 13時~14時	Zoomによる会議	エタノール発酵試験計画打合せ
8月27日 16時~17時30分	WARC	廃自動車解体試験進捗確認打合せ
10月4日 16時~17時	Zoomによる会議	研究進捗状況確認打合せ
10月15日 15時~17時30分	MCC	研究進捗状況確認打合せ
10月16日 11時~12時	Zoomによる会議	エタノール発酵試験計画打合せ
11月13日 16時~16時30分	AP新橋	研究方針確認打合せ
11月22日 10時~12時	WARC	廃自動車解体試験計画打合せ
12月3日 10時~17時	KMI	廃自動車解体試験立会
12月10日 10時~17時	WARC	廃自動車解体試験立会
12月19日 10時~17時	KMI	廃自動車解体試験立会
12月24日 13時~17時	WARC	廃自動車解体試験立会
1月10日 10時~11時30分	Zoomによる会議	研究計画打合せ
1月23日 15時~16時	MCC	研究進捗状況確認打合せ
2月10日 10時30分~11時	AP東京丸の内	研究方針確認打合せ
2月21日 16時~18時	ASTEM	研究方針確認打合せ

注) ASTEM : 公益財団法人京都高度技術研究所会議室

MCC : 三菱ケミカル(株)会議室

WARC : 西日本オートリサイクル(株)会議室&現場

KMI : KMI(株)会議室&現場

2. 成果（特許、論文、学会発表等）

2.1 特許権

特になし

2.2 学会発表

特になし

2.3 その他

特になし

3. 精緻解体部品回収記録簿例（自動車 B）

(1) 回収部品情報(1/4)

区分	部品	商品名	VARG実績結果										合計		
			一次重量 (kg)	作業時間 (s)	回収効率 (kg/s)	二次重量 (kg)	作業時間 (s)	解体効率 (kg/s)	累計 (kg)	素材コード	作業時間 (s)	解体効率 (kg/s)	歩留		
			(1)	(2)	(3)=(1)/(2)	(4)	(5)	(6)=(4)/(5)	(7)=(1)-(4)	(8)=(1)+(5)	(9)=(4)/(8)	(10)=(4)/(1)			
①吸気関係 41~44															
	41	ニアインテークレゾネーター													
	42	ニアクリーナーボックス	0.560	197.88	0.003	0.460	51.35	0.006	0.10	>PF-TD20C	279.23	0.002	0.82		
	43	ニアフィルター ボックスリッド	0.820	71.00	0.012	0.500	55.40	0.014	0.02	>PF-TD40C	129.40	0.006	0.98		
	44	ニアコン吸気ダクト	0.100	12.00	0.008	0.100	10.00	0.010	0.00	>PF-TD40C	22.00	0.005	1.00		
②エンジン/足回り 45~46															
	45	エンジンインテークマニホールド	1.360	1458.90	0.001	1.360	99.72	0.014	0.00	>PA5-GF30C	1555.62	0.001	1.00		
		ホイールキャップ													
③バッテリー/燃料系 65~67															
	65	バッテリーケース サポート台	0.360	67.38	0.005	0.360	10.00	0.036	0.00	>PF-TD20C	77.38	0.005	1.00		
		燃料パイプコネクション													
	67	燃料タンク キャニスター	0.440	119.20	0.004	0.160	125.54	0.001	0.26	>PA66C	244.74	0.001	0.36		
④ドアパネルGr. 68~77															
	75-1	右サイドミラーカバー	0.560	77.04	0.007	0.440	312.82	0.001	0.12	>PF	389.86	0.001	0.79		
	75-2	左サイドミラーカバー	0.560	31.30	0.018	0.440	270.66	0.002	0.12	>PF	301.96	0.001	0.79		
	75-3	右サイドミラーベゼル	0.040	4.61	0.009	0.040	8.00	0.005	0.00	>PF	12.61	0.003	1.00		
	75-4	左サイドミラーベゼル	0.040	2.00	0.020	0.040	8.00	0.005	0.00	>PF	10.00	0.004	1.00		
⑤バンパーGr. 78~85															
	78	Fバンパー グリル	0.120	46.24	0.003	0.120	8.00	0.015	0.00	>PF	54.24	0.002	1.00		
	79	Fバンパー	2.860	28.69	0.100	2.700	168.68	0.016	0.16	>PF+EPN-ID15C	197.37	0.014	0.94		
		Fバンパー プロテクトラベル													
		Fバンパー コアトリム													
	82	Fバンパー フェンダーライナー右	0.320	72.84	0.004	0.320	12.00	0.027	0.00	>PF-SN3C	84.84	0.004	1.00		
	83	Fバンパー フェンダーライナー左	0.300	27.38	0.011	0.300	12.00	0.025	0.00	>PF-SN3C	39.36	0.008	1.00		
	84	Rバンパー	2.080	24.52	0.085	2.060	145.06	0.014	0.02	>PF+EPN-ID15C	169.55	0.012	0.99		
	85	Rバンパー マッドラップ リア左	0.180	21.82	0.008	0.180	8.00	0.023	0.00	>PF	29.32	0.006	1.00		
	86	Rバンパー マッドラップ リア右	0.180	20.00	0.008	0.180	8.00	0.020	0.00	>PF	28.00	0.006	1.00		
⑥樹脂フレーム・カバー 87~89															
	87	カウルトップパネル	1.020	79.96	0.013	0.560	161.06	0.005	0.16	>PF	241.04	0.004	0.54		
	88	スクリーン エアロダイナミクス エンジン右側	0.100	39.58	0.003	0.100	10.00	0.010	0.00	>PF-TD15C	49.58	0.002	1.00		
		スクリーン エアロダイナミクス エンジン左側													
⑦ワイパー 90~92															
		フロント ワイパー/アーム ウォッシャー バイブ													
		フロント ワイパー/アーム													
	92	フロントガラス ワッシャーダンク	0.340	354.90	0.001	0.260	68.06	0.004	0.08	>PF	422.96	0.001	0.76		
⑧リアランプ類 93															
	93-1	ハイマウントストップランプ	0.140	12.56	0.011	0.140	36.34	0.004	0.00	>PF	48.90	0.003	1.00		
	93-2	R右テールランプ	0.700	18.76	0.037	0.700	94.44	0.007	0.00	>ASAC	113.20	0.006	1.00		
	93-3	R左テールランプ	0.700	36.68	0.019	0.700	49.62	0.014	0.00	>ASAC	56.30	0.008	1.00		
	93-4	ヘッドラップ右	1.760	74.03	0.024	1.540	1203.76	0.001	0.22	>PF-T30C	1277.79	0.001	0.88		
	93-5	ヘッドラップ左	1.760	73.06	0.024	1.540	114.26	0.013	0.24	>PF-T30C	187.32	0.008	0.87		
⑨冷却系クーリングシステム 94~96															
	94	ラジニーターファン	0.160	8.00	0.020	0.160	10.00	0.016	0.00	>PF-GF25C	18.00	0.009	1.00		
	95	エクスパンションタンク(膨張タンク)	0.160	23.88	0.007	0.160	8.00	0.020	0.00	>PF-GF20C	31.88	0.005	1.00		
		冷却装置 エアガイド 左右													
	97	冷却装置 右/下部ウォーターエンドタンク	0.220	91.59	0.002	0.200	122.69	0.002	0.02	>PF-SN3C	214.25	0.001	0.91		
	98	冷却装置 左/上水槽タンク	0.200	91.59	0.002	0.200	122.69	0.002	0.00	>PA66-GF25C	214.25	0.001	1.00		
⑩追加回収部品 99~118															
	116	E/G側ヒューズボックス	0.600	196.70	0.004	0.360	556.84	0.001	0.44	>PF-T20C	753.54	0.000	0.45		
	117	E/Gコンビューター	0.640	20.40	0.031	0.140	659.68	0.000	0.50	>PBT-G30C	650.08	0.000	0.22		
	118	ブレーキマスター/シンクリンガー用リザーバータンク	0.680	109.06	0.005	0.100	148.40	0.001	0.48	>PF	254.46	0.000	0.17		
		外装・モータールーム 合計	20.16kg	59.05分	0.006	17.20kg	78.45分	0.004	2.96kg		137.54分	0.002	0.85		

(1) 回収部品情報 (2/4)

区分	No.	画像	部品名	VAR試験結果								合計		
				一次重量 (kg)	作業時間 (s)	回収効率 (kg/s)	二次重量 (kg)	作業時間 (s)	削除効率 (kg/s)	累計 (kg)	素材コード	作業時間 (s)	削除効率 (kg/s)	歩留
				(1)	(2)	(3)=(1)/(2)	(4)	(5)	(6)=(4)/(5)	(7)=(1)-(5)	(8)=(7)-(4)	(9)=(1)+(2)	(10)=(4)/(9)	(11)=(1)/(10)
①インサートパネルGr. 1~12														
			アッパースキン											
2-1			エアコンセンター吹き出し口 左右	0.100	12.00	0.008	0.100	51.04	0.002	0.00	>ABSK	63.04	0.002	1.00
2-3			エアコンセンター吹き出し口 右	0.040	6.00	0.007	0.040	12.00	0.003	0.00	>ABSK	18.00	0.002	1.00
2-4			エアコン吹き出し口 左	0.040	6.00	0.007	0.040	12.00	0.003	0.00	>ABSK	18.00	0.002	1.00
3			ダッシュボード	5.180	626.52	0.008	3.240	457.94	0.007	1.94	>PP+EPN-TD25<	1084.46	0.003	0.63
4			ダッシュボード 連接部側 アッパーパネル	0.180	12.00	0.015	0.180	18.00	0.010	0.00	>PP+EPN-TD25<	30.00	0.006	1.00
5			ステアリングコラムアンダーカバー	0.340	9.76	0.035	0.340	10.00	0.034	0.00	>PP+EPN-TD25<	19.76	0.017	1.00
			ダッシュボード 助手席側 アッパーパネル											
			ダッシュボード 助手席側 フットウェルトリム											
8			ダッシュボード 助手席側 下パネル	0.520	38.38	0.014	0.520	12.00	0.043	0.00	>PP+EPN-TD25<	50.38	0.010	1.00
9			方向軽機/ライドスイッチ	0.160	12.00	0.013	0.120	418.56	0.000	0.04	>PA6-GF30<	430.56	0.000	0.75
10			ワイパースイッチ	0.140	12.00	0.012	0.080	290.26	0.000	0.06	>PA6-GF30<	302.26	0.000	0.57
11			エアコンスイッチパネル	0.380	63.32	0.006	0.300	418.46	0.001	0.08	>AEPDS<	481.78	0.001	0.79
12			中央部 簡易収納ボックス	0.860	4.00	0.215	0.220	10.00	0.022	0.64	>PP+EPN-TD25<	14.00	0.016	0.26
②センターコンソールGr. 13~16														
13			センターコンソール フロント	0.600	18.00	0.033	0.600	46.51	0.013	0.00	>PP<	64.51	0.009	1.00
14			センターコンソール リア	0.380	32.00	0.012	0.380	98.46	0.004	0.00	>PP+EPN-TD25<	130.46	0.003	1.00
15			ハンドブレーキ/サイドブレーキ	0.760	375.06	0.002	0.100	190.82	0.001	0.66	>PP-IPN<	565.88	0.000	0.13
			センターコンソール 上段 フロントアッパー											
③室内 内張りGr. 17~33														
17			トランクルーム ラゲッジトレイ	0.160	4.00	0.040	0.160	4.00	0.040	0.00	>PP+EPN-TD25<	8.00	0.020	1.00
18			Rスカッフプレート	0.200	4.00	0.050	0.200	4.00	0.050	0.00	>PP<	8.00	0.025	1.00
			右サイドコンパートメントトロワ アクセスパネル											
20			右コンパートメントトロワ	0.820	10.00	0.082	0.820	10.00	0.082	0.00	>PP<	20.00	0.041	1.00
21			左コンパートメントトロワ	0.780	10.00	0.078	0.780	10.00	0.078	0.00	>PP<	20.00	0.039	1.00
22			Aピラー アッパーパネル右	0.160	4.00	0.040	0.160	8.00	0.020	0.00	>PP<	12.00	0.013	1.00
			Aピラー ロアパネル右											
24			Bピラー アッパーパネル右	0.160	24.00	0.007	0.160	8.00	0.020	0.00	>PP<	32.00	0.005	1.00
25			Bピラー ロアパネル右	0.400	4.00	0.100	0.400	8.00	0.050	0.00	>PP<	12.00	0.033	1.00
26			Cピラー アッパーパネル右	0.140	12.00	0.012	0.140	8.00	0.018	0.00	>PP+EPN-TD15<	20.00	0.007	1.00
27-1			R右スカッフプレート	0.100	4.00	0.025	0.100	8.00	0.013	0.00	>PP<	12.00	0.008	1.00
27-2			R右スカッフプレート	0.200	4.00	0.050	0.200	8.00	0.025	0.00	>PP<	12.00	0.017	1.00
28			Aピラー アッパーパネル左	0.160	4.00	0.040	0.160	8.00	0.020	0.00	>PP-SN3<	12.00	0.013	1.00
			Aピラー ロアパネル左											
30			Bピラー アッパーパネル左	0.160	24.00	0.007	0.160	8.00	0.020	0.00	>PP<	32.00	0.005	1.00
31			Bピラー ロアパネル左	0.380	4.00	0.095	0.380	8.00	0.048	0.00	>PP<	12.00	0.032	1.00
32			Cピラー アッパーパネル左	0.140	12.00	0.012	0.140	8.00	0.018	0.00	>PP+EPN-TD15<	20.00	0.007	1.00
33-1			R左スカッフプレート	0.140	4.00	0.035	0.140	4.00	0.035	0.00	>PP<	8.00	0.018	1.00
33-2			R左スカッフプレート	0.140	4.00	0.035	0.140	4.00	0.035	0.00	>PP<	8.00	0.018	1.00
④室内 ルーフ/フロア 34~40														
34			フロアカーペット	1.380	108.50	0.013	0.960	46.40	0.021	0.42	>PP-SN3<	154.90	0.006	0.70
35			室内天井内張り	1.240	80.12	0.015	1.240	35.26	0.035	0.00	>PP-TD15<	115.38	0.011	1.00
36-1			ヘッドライナーフィラー Rレインフオースメント右	0.020	11.00	0.002	0.020	4.00	0.005	0.00	>PP<	15.00	0.001	1.00
36-2			ヘッドライナーフィラー Rレインフオースメント左	0.020	14.00	0.001	0.020	4.00	0.005	0.00	>PP<	18.00	0.001	1.00
36-3			ヘッドライナーフィラー レインフオースメント右	0.020	11.00	0.002	0.020	4.00	0.005	0.00	>PP<	15.00	0.001	1.00
36-4			ヘッドライナーフィラー レインフオースメント左	0.020	7.00	0.003	0.020	4.00	0.005	0.00	>PP<	11.00	0.002	1.00
36-5			ヘッドライナーフィラー Rレインフオースメント右	0.040	24.00	0.002	0.040	4.00	0.010	0.00	>PP<	28.00	0.001	1.00
36-6			ヘッドライナーフィラー Rレインフオースメント左	0.040	6.00	0.007	0.040	4.00	0.010	0.00	>PP<	10.00	0.004	1.00
			ヘッドライナーフィラー RLインフオースメント											
38			ルームミラー	0.220	24.00	0.009	0.160	286.72	0.001	0.06	>PP<	310.72	0.001	0.73
39			床下断熱材	0.100	4.00	0.025	0.100	4.00	0.025	0.00	>PP-EK<	8.00	0.013	1.00
			助手席側 床下断熱材											

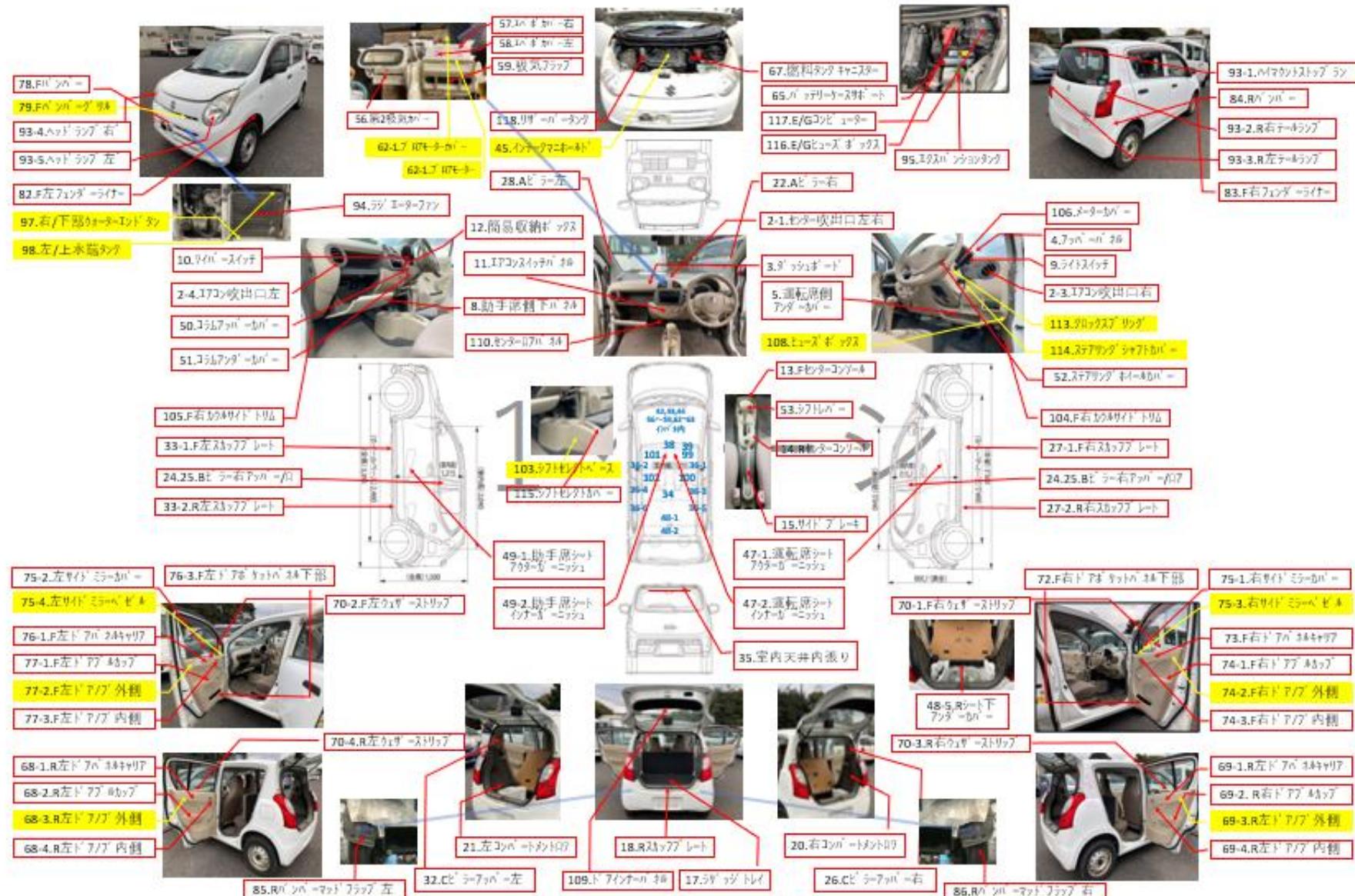
(1) 回収部品情報(3/4)

区分	No.	画像	商品名	VARC実績基準										合計
				一次重量 (kg)	作業時間 (s)	目標効率 (kg/s)	二次重量 (kg)	作業時間 (s)	目標効率 (kg/s)	累計 (kg)	素材ニード	作業時間 (s)	目標効率 (kg/s)	
①	②	③-①/②	④	⑤	⑥	⑦-⑤/⑥	⑧-⑤/⑥	⑨-①-⑦	⑩-①	⑪-①+⑨	⑫-③/⑩	⑬-④/⑪	⑭-③/⑫	
① シート G ~49														
47-1		ドライバーシート アウターサイド ガーニッシュ	0.150	246.76	0.001	0.15	8.00	0.023	0.00	>PP+M50C	254.76	0.001	1.00	
47-2		ドライバーシート インナーサイド ガーニッシュ	0.050	60.52	0.001	0.05	8.00	0.008	0.00	>PPC	68.52	0.001	1.00	
48-1		Rシート パッド 座面	1.800	228.38	0.008	1.400	37.44	0.037	0.40	>PURC	265.82	0.005	0.78	
48-2		Rシート パッド 背面	1.440	228.38	0.006	0.840	60.00	0.014	0.60	>PURC	285.35	0.003	0.58	
48-3		Rシート ガーニッシュ右	0.100	12.00	0.008	0.100	8.00	0.013	0.00	>PPC	20.00	0.005	1.00	
48-4		Rシート ガーニッシュ左	0.100	12.00	0.008	0.100	8.00	0.013	0.00	>PPC	20.00	0.005	1.00	
48-5		Rシート アンダーカバー	0.960	4.00	0.240	0.960	6.00	0.160	0.00	>PPC	10.00	0.096	1.00	
49-1		助手席シート アウターサイド ガーニッシュ	0.180	71.88	0.008	0.180	8.00	0.023	0.00	>PPC	79.88	0.002	1.00	
49-2		助手席シート インナーサイド ガーニッシュ	0.050	32.50	0.002	0.050	8.00	0.008	0.00	>PPC	40.50	0.001	1.00	
② ステアリングコラムGr/シフトセレクト 50~53														
50		ステアリングコラム アッパーカバー	0.050	68.26	0.001	0.050	8.00	0.010	0.00	>PPC	76.26	0.001	1.00	
51		ステアリングコラム アンダーカバー	0.220	68.26	0.003	0.220	8.00	0.028	0.00	>PP+EPDN-TD25	76.26	0.003	1.00	
52		ステアリング ホイールカバー	0.840	375.94	0.002	0.160	245.67	0.001	0.68	>PP+EPDN-TD25	624.61	0.000	0.19	
53		シフトレバー/ギアセレクターノブ	0.180	157.13	0.001	0.120	597.76	0.000	0.06	>TPSK	754.89	0.000	0.67	
③ 吸気関係 54~64														
54		デフロスター中央グレート												
55		ニアインテークカバー												
56		ニアインテークカバー 第3吸気口カバー (Jア)	0.300	174.55	0.002	0.300	319.00	0.001	0.00	>PP-TD20C	493.55	0.001	1.00	
57		エバボレーター カバー右	0.400	269.84	0.001	0.400	64.54	0.006	0.00	>PP-TD20C	334.35	0.001	1.00	
58		エバボレーター カバー左	0.450	218.49	0.002	0.450	55.41	0.008	0.00	>PP-TD20C	274.90	0.002	1.00	
59		ニアインテークダクト内 吸気フラップ	0.140	87.55	0.002	0.140	286.26	0.000	0.00	>PP-TD20C	373.84	0.000	1.00	
60		ブローゲイングユニット アッパー カバー												
61		ブローゲイングユニット ロア カバー												
62-1		ブローウーモーター カバー	0.650	297.83	0.002	0.650	94.55	0.007	0.00	>PP-TD20C	391.89	0.002	1.00	
62-2		ブローウーモーター	0.850	114.90	0.008	0.150	121.94	0.001	0.70	>PP-EP25C	236.84	0.001	0.20	
63		ニアダクト センター	0.340	27.66	0.012	0.34	36.00	0.009	0.00	>PP-TD20C	63.66	0.005	1.00	
64		Fロア ニアパイプ カップリング部 中心												
④ ドアパネルGr. 65~77														
65-1		R左ドア パネルキャリア	1.220	41.00	0.030	1.040	69.96	0.015	0.18	>PP+EPN-T0154	110.96	0.009	0.85	
65-2		R左ドア ドアブルカップ	0.050	12.00	0.005	0.050	8.00	0.008	0.00	>PP+EPN-T0154	20.00	0.003	1.00	
65-3		R左ドアノブ 外側 開閉制御	0.140	44.88	0.003	0.100	31.68	0.003	0.04	>PP+FBT-MF104	76.55	0.001	0.71	
65-4		R左ドアノブ 肩側 開閉制御	0.050	13.26	0.006	0.060	84.60	0.001	0.02	>ABS	97.86	0.001	0.75	
66-1		R右ドア パネルキャリア	1.200	45.68	0.026	1.040	84.06	0.012	0.16	>ASAC	129.74	0.008	0.87	
66-2		R右ドア ドアブルカップ	0.050	8.00	0.005	0.050	8.00	0.008	0.00	>PP+EPN-T0154	16.00	0.004	1.00	
66-3		R右ドアノブ 外側 開閉制御	0.140	73.55	0.002	0.100	20.00	0.005	0.04	>FT+FBT-MF104	93.55	0.001	0.71	
66-4		R右ドアノブ 内側 開閉制御	0.050	18.38	0.004	0.050	18.00	0.003	0.02	>ABS	36.38	0.002	0.75	
70-1		R右ドアバイザー	0.300	24.00	0.013	0.300	4.00	0.075	0.00	>PPMA	28.00	0.011	1.00	
70-2		R左ドアバイザー	0.250	26.90	0.010	0.250	4.00	0.065	0.00	>PPMA	30.90	0.008	1.00	
70-3		R右ドアバイザー	0.250	8.00	0.033	0.250	4.00	0.065	0.00	>PPMA	12.00	0.022	1.00	
70-4		R左ドアバイザー	0.320	12.00	0.027	0.320	4.00	0.080	0.00	>PPMA	16.00	0.020	1.00	
72		R右ドア 内張り(インサート)												
73		R右ドア ドアマップポケットパネル下部	0.120	122.26	0.001	0.120	8.00	0.015	0.00	>PPC	130.26	0.001	1.00	
74-1		R右ドア パネルキャリア	1.920	52.65	0.036	1.450	113.94	0.013	0.44	>ASAC	166.62	0.009	0.77	
74-2		R右ドア ドアブルカップ	0.100	20.00	0.005	0.100	8.00	0.013	0.00	>PP+EPN-T0154	28.00	0.004	1.00	
74-3		R右ドアノブ 外側 開閉制御	0.120	62.45	0.002	0.100	116.50	0.001	0.02	>FT+FBT-MF104	178.95	0.001	0.83	
74-4		R右ドアノブ 内側 開閉制御	0.050	11.22	0.007	0.050	63.60	0.001	0.02	>ABS	74.82	0.001	0.75	
75-1		R左ドア パネルキャリア	1.920	121.76	0.016	1.500	117.55	0.013	0.42	>PPC	239.34	0.006	0.78	
76-1		R左ドア 内張り(インサート)												
76-2		R左ドア ドアマップポケットパネル下部	0.120	41.76	0.003	0.120	2.00	0.060	0.00	>PPC	43.76	0.003	1.00	
77-1		R左ドア ドアブルカップ	0.100	8.00	0.013	0.100	12.00	0.008	0.00	>PP+EPN-T0154	20.00	0.005	1.00	
77-2		R左ドアノブ 外側 開閉制御	0.120	73.00	0.002	0.100	96.86	0.001	0.02	>FT+FBT-MF104	169.85	0.001	0.83	
77-3		R左ドアノブ 内側 開閉制御	0.050	12.00	0.007	0.050	67.04	0.001	0.00	>ABS	79.04	0.001	1.00	

(1) 回収部品情報 (4/4)

区分	部品番号	部品名	VACUUM 測定結果										合計
			一次重量 (kg)	作業時間 (s)	回収効率 (kg/s)	二次重量 (kg)	作業時間 (s)	解体効率 (kg/s)	品目 (kg)	素材コード	作業時間 (s)	解体効率 (kg/s)	
			(1)	(2)	(3)=(1)/(2)	(4)	(5)	(6)=(4)/(5)	(7)=(1)-(6)	(8)=(1)+(6)	(9)=(4)/(8)	(10)=(7)/(9)	
① 通常回収	99~115												
99	11	F ドライバーシートパッド背面	1.100	161.76	0.007	0.900	154.00	0.006	0.20	>PURC	315.76	0.003	0.82
100	12	F ドライバーシートパッド背面	1.380	86.06	0.016	1.060	62.82	0.017	0.32	>PURC	148.88	0.007	0.77
101	13	F 助手席シートパッド背面	1.100	140.68	0.008	1.060	146.04	0.007	0.04	>PURC	256.72	0.004	0.96
102	14	F 助手席シートパッド背面	1.380	128.50	0.011	1.040	84.00	0.031	0.34	>PURC	159.50	0.007	0.75
103	15	シフトセレクトベース	0.900	84.71	0.011	0.460	515.06	0.001	0.44	>PAG-GE30C	599.77	0.001	0.51
104	16	F 右カウルサイドトリム	0.100	6.00	0.017	0.100	4.00	0.025	0.00	>PPC	10.00	0.010	1.00
105	17	F 左カウルサイドトリム	0.100	8.00	0.013	0.100	4.00	0.025	0.00	>PPC	12.00	0.008	1.00
106	18	メーターカバー	0.140	26.00	0.005	0.140	10.00	0.014	0.00	>PP-ID15C	38.00	0.004	1.00
107	19	メーター	0.540	22.70	0.024	0.400	198.90	0.002	0.14	>PP-TC	221.60	0.002	0.74
108	20	ヒューズボックス	1.180	114.96	0.010	0.500	1364.02	0.000	0.68	>PP-T30C	1478.98	0.000	0.42
109	21	バックドライバーナーベル	0.160	26.22	0.006	0.140	8.00	0.018	0.02	-	34.22	0.004	0.58
110	22	インバネセンターヨニアベル	0.320	37.32	0.009	0.250	56.03	0.005	0.04	>PP+EPN-TD25C	93.35	0.003	0.58
111	23	運転席側インバネカバー	0.160	6.00	0.027	0.140	38.26	0.004	0.02	>PP+EPN-TD25C	44.26	0.003	0.58
112	24	助手席側インバネカバー	0.050	21.46	0.004	0.050	8.00	0.010	0.00	>PP+EPN-TD25C	29.46	0.003	1.00
113	25	クモックスピーリング	0.120	116.32	0.001	0.060	211.44	0.000	0.06	>PONC	327.76	0.000	0.50
114	26	ステアリングシャフトカバー(E/GM)	0.040	10.00	0.004	0.040	2.00	0.020	0.00	>PPC	12.00	0.003	1.00
115	27	シフトセレクトカバー	0.050	2.00	0.040	0.050	9.68	0.005	0.02	>ABSC	11.68	0.005	0.75
内製品 合計			44.10kg	104.25分	0.007	34.06kg	135.72分	0.004	10.04kg		182.82分	0.003	0.77

(2) 回收部品装着箇所



(3) 回収部品写真一覧 (1/3)

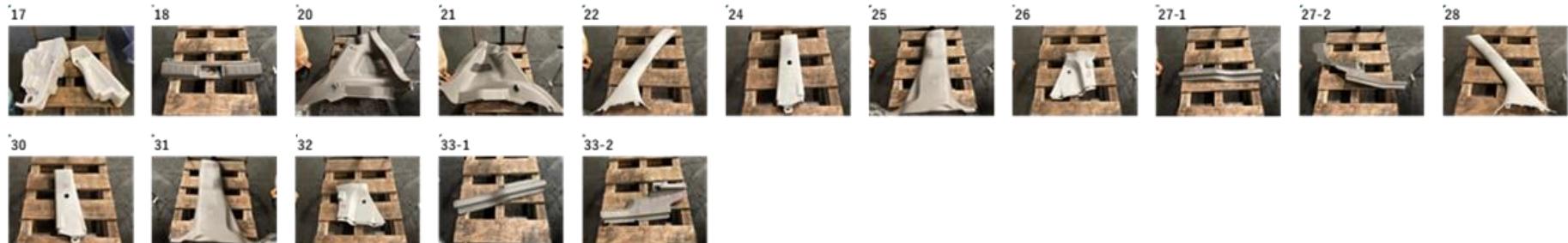
①インストルメントパネルGr. 2~12



②センターコンソールGr. 13~15



③室内 内張りGr. 17~33



④室内 ルーフ/フロア Gr. 34~39



⑤吸気関係 42~44



⑥エンジン・足回り 45



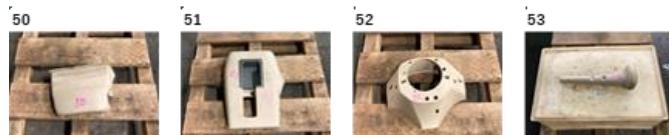
⑦シートGr. 47~49

(3) 回収部品写真一覧 (2/3)

⑦シートGr. 47~49



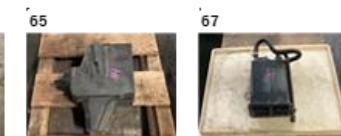
⑧ステアリングGr. 50~53



⑨吸気関係Gr. 56~63



⑩バッテリー・燃料系 65~67



⑪ドアパネルGr. 68~77



(3) 回収部品写真一覧 (3/3)

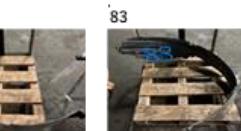
⑫バンパーGr. 78~86



79



82



83



84



85



86



87



88



92

⑬樹脂フレーム・カバー 87~88

⑭ワイパー 92

⑮リアランプ類 93



⑯冷却クーリングシステム 94~98



⑰追加回収部品 99~118

