

令和3年度

脱炭素社会を支えるプラスチック等資源循環システム構築実証事業
(生分解かつバイオマス由来新規プラスチックの農業用フィルム
等開発および実用化実証事業)

委託業務成果報告書

令和4年2月

三菱ケミカル株式会社

共同実施者

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構

静岡県公立大学法人静岡県立大学

国立大学法人東京農工大学

神奈川県農業技術センター

茨城県農業総合センター

山梨県総合農業技術センター

三菱ケミカルアグリドリーム株式会社

要旨

本事業は、エネルギー由来の carbon dioxide (CO₂) 排出やプラスチック廃棄物などの環境への影響を最小限にとどめつつ、農業生産を向上かつ安定化させる新しい農業、社会システムの普及を目指すものである。すなわち産官学の共同作業によって、生分解性を持った石油資源代替のプラスチックを改良し、その分解をプラスチックの配合や生分解性プラスチックを分解する酵素剤などで制御する方法を作り上げ、さらにその妥当性を農業の現場で実証し、ライフサイクルおよび経済性の評価も加えて、廃棄処理が要らない農業用プラスチックフィルムと酵素剤をより多くの作物や地域に拡大していく指針を作る。

事業最終年度に当たる令和 3 年度は、初年度の令和元年度と令和 2 年度の結果を踏まえ、以下の検討を遂行した；

- i. 農業用フィルムに必要な物性において既存の生分解性プラスチックをしのぐ性能を発揮する新規素材の開発を継続した。本年度は、新規素材候補として選抜した素材について、物性と生産性の改良のために構造の最適化を行い、並行して抜本的な製造コストの低減策を検討し、所定の成果を得た。またこの素材を用いて市販品の生分解性マルチフィルムと同等の性能となるよう複数のプラスチックから成る配合を考案し、種々の評価試験に供して本素材が既存製品をしのぐ性能を持つことを確認した。

生分解性マルチフィルムのより広範な普及を狙い、従来品より展張期間を長く保てる耐久性の高いフィルムを製造するため、新規素材を主に用いたプラスチックの配合を複数回考案した。これらの配合を試験装置および商用生産設備で試作し、種々の評価に供した。その結果、最終目標とする 6 か月間の展張期間を実現する配合設計の基礎情報が得られた。これを基に、本年度の農地での展張試験に新たな試作品を提供した。また、試作の過程で新規素材を用いたフィルム製造上の課題を見いだしたので、この課題の解決と、今度新たに様々な素材や配合のプラスチックフィルムを安定かつコストを抑えて製造するために、フィルム成形条件の調整だけでなく、装置の改良を含めた抜本的なプロセスの最適化の方針を立案した。

- ii. 素材開発のための情報取得や酵素剤処理による生分解の制御を適切に把握するため、土壌中に埋設した素材の分解に伴う CO₂ の発生量を、再現性良く高速に評

価する測定方法の開発を進めている。令和元、2年度は、新たに考案した計測システムを改良の上、新規素材を含む種々の素材の生分解を測定することにより、素材ごとの分解速度の差を明らかにした。また土壌中での生分解に伴って素材を構成している化合物がどのような動態を示すかを把握するため、炭素安定同位体で標識した化合物を用いる分析評価方法を開発した。本年度は、安定同位体で標識した試料を用い、土壌中での新規素材の構成成分の分解過程について、圃場展張後、および酵素剤処理後の分析データを用いて解析を行った。結果から、新規素材、およびその配合物の土壌中での分解速度を明らかにするとともに、農業生産において有効な生分解の制御方法を示すことができた。

- iii. 酵素剤製造のコスト低減を目的として、令和元、2年度は酵素を生産する微生物の改良に向け、酵素の生産に関わる遺伝子を選び出すため、酵素生産条件下で発現量が変わる遺伝子のデータベースから選び出された候補遺伝子 100 個余りのそれぞれを破壊した菌株の一群を作出した。本年度は、微生物内の酵素生産スイッチ遺伝子を増やすことによる酵素の生産性向上への効果を確認した。酵素の工業生産に必要な基礎情報を獲得するため、また、酵素剤の生産が可能と思われる国内企業の状況を把握するため、かつ、圃場実験に使用する酵素を試作するため、酵素の小規模生産を行った。
- iv. 新規素材を用いたフィルムと酵素剤処理を組み合わせた野菜栽培を農業者で実証する準備段階として、試験機関において圃場試験を行った。本年度は、神奈川県 2 か所、山梨県 2 か所、茨城県 1 か所の試験圃場と、神奈川県 1 か所、山梨県 2 か所、茨城県 2 か所の農業生産圃場の、計 10 地点 7 種類の作物で、新たに設計した配合のフィルムを中心に実証試験を実施し、所定の結果を得た。神奈川県、山梨県では生分解性マルチフィルムを栽培に使用した後に圃場に鋤込んだ農地で、次の作物栽培に影響がないことを確認した。聞き取りなど現地調査では、生分解性マルチフィルムへの期待が聞かれたが、同時に耐久性がマルチフィルムの色や降雨など天候に左右されやすいことが課題として挙げられた。
- v. フィルムの製造から最終処分までのライフサイクル評価 (life cycle assessment、以下、LCA) と経済性評価を行うため、昨年度までに決定した調査の基本方針と収集した 1 次データ、2 次データを用いて LCA および経済性を評価した。これらを基に CO₂ 削減のシナリオと、作業時間や労働工数などをコスト換算

してそのメリットを示し、新規バイオマス由来生分解性プラスチックとその分解制御を農業用フィルムに適応することが、将来の農業生産において優位であることを明確にした。

Summary

The objective of this project is to promote a new agricultural and social system that increases and stabilizes agricultural production while minimizing the environmental impact of energy-derived carbon dioxide emissions and plastic waste. As an industry-government-academia team, we tried to improve biodegradable plastic mulching films to substitute petroleum ones and control their degradation by selecting appropriate composition of biodegradable plastics and enzyme technologies. Furthermore, we demonstrated that they are effective in vegetable production. Life cycle and economic evaluations also were conducted to help promote this system.

In FY2021, the final year of the project, based on the results of the FY2019 and 2020 year, we strengthened the system by adding new co-implementers and carried out the following studies.

- i. We continued to develop new materials that have higher performance than existing biodegradable plastics when used as raw materials for agricultural mulching films. In this year, we studied how to improve the physical properties and productivity of the material selected as a new material candidate, and how to reduce the production cost. We also designed composite plastic recipes using this new material to achieve the same performance as commercial biodegradable mulching films.

Prototype films made from these recipes were evaluated in various ways to confirm that this material has better performance as an existing commercial product.

To produce a durable film that can last longer than conventional products and support the widespread use of biodegradable mulch films, we developed several recipes for plastics that mainly use the new material. These recipes were prototyped on test equipment and commercial film production facilities and provided for various evaluations. As a result, we obtained basic information for designing recipes to achieve our target of a six-

month usage period. Based on this information, we devised a new recipe for this year's study.

In the process of trial production, we found some problems in the production of the film using the new material. In order to solve this problem and to produce new plastic films with various materials and formulations in a stable and cost-effective manner, we decided to optimize the process by not only adjusting the film forming conditions but also improving the equipment.

- ii. In FY2019 and 2020, we improved the semi-automatic measurement system with integrated process. In FY2019 and 2020, we improved the semi-automatic measurement system with integrated processes, and measured the biodegradation of various materials including new materials, and clarified the difference in degradation rate among materials. In addition, we developed an analytical evaluation method using compounds labeled with stable carbon isotopes to understand the dynamics of the compounds that compose the materials as they biodegrade in soil. In this year, we analyzed the degradation process of the constituents of the new material in soil using samples labeled with stable isotopes, using the data after field spread and enzymatic treatment. From the results, we were able to clarify the degradation rate of the new materials and their blends in the soil, and to show an effective way to control biodegradation in agricultural production.

- iii. In order to improve the microorganisms that produce enzymes for the purpose of cost reduction in the production of enzymatic agents, a group of strains was produced in FY2019 and 2020 by disrupting each of about 100 candidate genes selected from a database of genes whose expression levels vary under enzyme production conditions in order to select genes involved in enzyme production. In this year, we continued our research on enzymes in microorganisms. In this year, we confirmed the effect of

increasing the number of enzyme-producing switch genes in the microorganisms on the productivity of enzymes. We conducted a small-scale trial production of enzymes in order to obtain the basic information necessary for industrial production of enzymes, to determine the status of domestic companies that might be able to produce enzymatic agents, and to produce enzymes for use in field experiments.

- iv. As a preparatory step for farmers to demonstrate vegetable cultivation using a combination of film and enzyme agent treatment using new materials, field trials were conducted at testing institutions. This year, we conducted field trials of the newly designed formulation of the film on seven different crops at ten locations, including test plots in Kanagawa, Ibaraki, and Yamanashi prefectures, and at four agricultural production fields, with predetermined results. In Kanagawa and Yamanashi prefectures, the biodegradable mulch film was plowed into the field after it was used for cultivation, and it was confirmed that it had no effect on the cultivation of the following crops.

- v. In order to life cycle assessment (LCA) and economic efficiency of the film from manufacturing to final disposal, the LCA and economic efficiency were assessed using the basic policy of the survey decided in the last year and the primary and secondary data collected. Based on these data, we presented a scenario of CO₂ reduction and its benefits in terms of cost in terms of working hours and labor man-hours, and clarified that the application of new biomass-derived biodegradable plastics and their degradation control to agricultural films would be advantageous in future agricultural production.

目 次

要旨	i
Summary.....	1
序章	1
1. 本事業の背景と目指すところ	1
2. 解決すべき課題.....	2
3. 技術的課題の解決の目標、本年度の取組、および事業実施項目の設定	4
4. 実施体制.....	7
第1章 新規素材の開発.....	8
1. 検討の概要	8
2. 材料および手法	8
3. 結果および考察	14
第2章 新規生分解性プラスチックの分解制御	20
1. 検討の概要	20
2. 材料および手法	20
3. 結果および考察	29
第3章 生分解性プラスチック分解酵素の生産に関わる基礎的情報の収集	42
1. 検討の概要	42
2. 材料および手法	43
3. 結果および考察	46
第4章 野菜栽培における新規生分解性マルチフィルムの実用化実証	49
1. 検討の概要	49
2. 材料および手法	49
第5章 ライフサイクル検証・評価	75
1. 検討の概要	75
2. 材料および手法	81
3. 結果および考察	83
参考文献	93
【図表】	97

序章

1. 本事業の背景と目指すところ

1-1 本事業の背景と概要

プラスチックは、4分の3世紀にわたる開発により社会に貢献する様々な製品を生み出してきた。例えばプラスチックを薄膜に成形した農業用土壌被覆材(以下、マルチフィルム)は農業の生産性を高め、食料の安定供給を実現している¹⁾。その一方で、農業を取り巻く状況の変化に伴い、使用後のプラスチック廃棄物の回収、処分に関わる労働や経済的な負荷が高まっている。加えて、循環型社会の構築が今後の世界の持続的な発展のために欠かせないとの考え方が広まるにつれ、プラスチックを正しく使用することが求められ、特に使用後のプラスチックについて、より厳しい管理が求められつつある^{2,3)}。国家間のプラスチック廃棄物の移動の制限や、プラスチックの生産から使用後の処理までの環境負荷や経済性の客観的な評価を求める声はその一例である。

プラスチックとその廃棄物の問題の解決手段の一つとして、一般的に普及している polyethylene(以下、PE)製のマルチフィルムを代替すべく生分解性材料の開発、普及が進められている。しかし、現在の生分解性の素材は選択肢が限られ価格も高く、また分解の制御範囲が狭いので、マルチフィルムだけでなく種々の製品への全般的な応用や普及が進まないという課題がある。またフィルムの原料が石油など化石系の資源であれば、生分解性があっても分解に伴ってCO₂排出量は増加となる。

本事業では；

- ・ 再生可能な植物資源由来の生分解性プラスチックである polybutylene succinate(PBS、商品名 BioPBS)を基礎素材として、十分な性能を持った上でコストを抑えられる新たなプラスチック素材(以下、新規素材)、および要求性能を満たすフィルム用の配合、フィルムへの成形加工方法の開発、
- ・ 任意の時点でフィルムの分解を促進できる酵素剤の利用を始めとした、マルチフィルムの生分解性の制御方法とその評価方法の検討、
- ・ 農業生産現場にいち早く応用できるよう、これらのフィルム等を実際の使用環境に近い条件で用いた実証、評価、

を行って、エネルギー由来のCO₂排出などの環境負荷を抑えつつ、農業生産と事業者の収入を安定、向上させる新しい社会システムの普及を目指す(第1図)。特に、環境負荷および経済性の面でPE製フィルムを用いた場合との比較評価を行い、普及促進の材料とする。本事業で得られる知見、実証する技術、素材は、コンポスト袋のように生分

解性がいかなされる用途や、素材としてプラスチックが適しているが回収、分別、リサイクルが困難な用途に展開できる。

1-2 代替素材普及のマイルストーン

マルチフィルムは、地温や水分の維持、雑草の繁茂の抑制、病害虫の抑制、土壌や肥料の流出防止といった機能により、農業生産を増やし、安定させ、また労働力の有効活用に貢献する資材として需要がある。国内だけでなく、欧州、南北米、アジア、特に中国で需要の伸びが見込まれており、100万トン単位の需要増加も予想されている。

現在、国内のマルチフィルム出荷量はおよそ40,000トンといわれており、生分解性素材を用いたフィルムはそのうちの約8%の3,200トンとされる(農業用生分解性資材普及会など、私信)。本事業の成果によって代替が進み、2022年には既存の対象作物向けで4,000トン、2025年には10,000トン、2030年には国内の使用量の50%に当たる20,000トンの普及を見込んでいる。2030年は、本事業で現在想定している代替対象の作物だけでなく、新たな素材とその使いこなし技術によってマルチフィルムそのものの応用範囲が広がる可能性を期待した値である。

また、新規素材とその成形加工方法、および新規素材を速やかに分解できる酵素剤は、マルチフィルム以外の、例えば回収分別が容易でない、あるいは回収分別やリサイクルにより環境負荷が高まってしまうと予想される用途への展開を可能とする。

2. 解決すべき課題

2-1 目的の性能を得るための生分解性プラスチックの選択肢が少ないこと

生分解性を持たない汎用プラスチックの代替用途やその他適切な利用場面に生分解性プラスチックの応用をもくろむ場合の障害になっているのが、現在生産されている主な生分解性プラスチックの一般性質が、汎用プラスチックのそれとは異なっていること、および実用的に利用できる素材の種類が少なく選択肢が限られることである。プラスチックは目的や用途に合わせて押出しや延伸、射出などの成形加工を経て材料化、製品化される。現在の成形加工技術は主にPE、polypropyleneなど汎用プラスチックの利用を基準にして形作られてきた。一方、ここ20年余で次々と現れた生分解性プラスチックは汎用プラスチックと異なる成形加工特性を持つため、汎用プラスチックに合わせて整備されている既存の設備とその運転条件で加工できるとは限らない。

また現在市販されている生分解性プラスチック素材の組合せだけでは、求める物性を発揮する製品を得られないことが多い。

例えば生分解性マルチフィルム(以下、図表等では生分解性マルチ、生分解マルチと略記)を想定する場合、フィルムの製造や農業の現場での利用に適した物性と生分解性制御を調整するために、利用可能な素材の種類が限られており、結果として製造や運用に制限がかかり、普及を妨げている。

2-2 既存材とのコスト差があること

生分解性あるいは植物原料由来のプラスチックの原料として用いられる化学品は、一部を除いて汎用プラスチックの原料より製造コストが高い。これらプラスチックは製造法が特殊、また製造規模が小さいといったことから、代替される、あるいは物性が近い汎用プラスチックと比較すると数倍の経費が製造段階でも必要になる。マルチフィルムの場合、素材でPEに対して3~5倍といわれており、被覆材の形状に成形し製品になった段階でも同様のコスト差がある。さらに生分解性の資材を製造販売する場合、利用者の栽培期間の要望に合わせて多種類の製品をそろえる必要があり、加えて長期の在庫が難しいため製造時期が集中するなどの要因で、コストが押し上げられている。

このような理由で製品の価格が高くなっていることが、マルチフィルムが生分解することの利点は理解されても、農業従事者が導入をためらう原因となっている。加えて、生分解性プラスチックを用いた農業生産について、素材の生産から使用後のフィルムの廃棄までの一貫した経済性の評価が行われた事例が少なく、情報が十分でないため、農業従事者が新たな資材を導入しようとしても、経営に効果があるか経済的な指標を使った検討を行った上での判断を下すことが難しい。

2-3 生分解の制御が十分でないこと

生分解性プラスチックは、使用後の処理の省力化や、万が一環境に放置された場合でも消滅するといった環境対応の素材として期待される。実際には、使用目的によって製品としての機能の維持が必要とされる期間が数週間~数年と幅が広く、使用される条件も様々である。これに対して、現段階では生分解性プラスチックの分解を任意に制御する技術が不十分なため、例えばマルチフィルムの場合、製造中の種々の加工履歴、使用される地域や農地の環境、使用条件などの影響を受け、設計段階の想定どおりに土壤被覆および生分解の機能を発揮させられない場合があることが課題となっている。生分解性のマルチフィルム製品に対するクレームで最も多いのが、想定より早く

フィルムの分解が進んでしまい、本来マルチフィルムに望まれる機能が果たせず、農作物の生産量が予定より少なくなったり、除草などの対応に労力が必要になったりするなど、利用者の期待を裏切ってしまうことだといわれており、これも普及を妨げる大きな要因となっている。また分解が想定より遅い場合は、例えば、栽培の終了後に鋤込み作業のようにフィルムを破碎して土壌中に埋め込むこと（以下、埋設）を行っても、埋設の作業が不十分であったり、後の耕起作業や風の力で掘り起こされたりし、フィルムの断片が風に飛ばされ遠方まで移動する可能性も指摘されている。

また生分解が十分に制御されないために、製造、加工、流通、および購買後に使用者が保管する期間にも加水分解による劣化が進むため、素材やフィルムの製造現場での加工履歴や在庫期間、また販売から農業者が使用するまでの流通と保存期間、保存条件にも配慮を求めざるを得ない。

2-4 素材のライフの最後までを想定した実証が不十分であること

持続可能な循環型社会の構築を目指し、本事業の開発で得られる新規素材の社会実装を進めていくためには、農業生産を行う土地（以下、圃場）に近い条件で材料が所定の性能を発揮し、十分な農業生産が得られ、廃棄物処理を含めた労働生産性が向上することをまず確認するべきである。加えて、素材の生産から農作業の終了、素材の最終処理に至るまでの環境負荷と経済性の解析に関する情報を集積の上で、総合的な評価を行い、利用者や社会一般に適切な情報を公表していくことが求められる。

また、今後の環境保全と産業振興のバランスを考える上で、新たな農業生産システムの普及拡大が、環境と社会にどのような影響を及ぼすかについて明らかにしておく必要がある。すなわち、生分解性かつ植物資源由来の新規素材を用いた農業生産のライフサイクル全体を対象として、例えば枯渇型エネルギーの使用、エネルギー由来の温室効果ガスの発生といった各種環境負荷の指標に基づいた影響調査である。

3. 技術的課題の解決の目標、本年度の取組、および事業実施項目の設定

3-1 目的の製品性能を実現するために生分解性プラスチックの選択肢が少ないことへの対応

既存の生分解性プラスチック（例えば PBS）と比較して、マルチフィルムを製造するための素材として用いた場合、より広い範囲の作物栽培に応用でき、かつ酵素剤を活用した最終処理に適した新規素材を得る。

本年度は、PBS の開発で培った高分子素材の設計、製造に関する知見を活用して令和元、2 年度に開発した新規素材の物性を様々な方法で確認の上、必要に応じて生分解性とフィルム成形などに適した物性のバランスを向上させるためポリマー設計に改良を加える。また、他の実施項目の試験に素材試料を提供する。この新規素材を活用した、マルチフィルムとして求められる物性を実現するためのプラスチックの配合を複数設計し、予備的試験を行う。得られる結果から仮配合を決定し、他の実施項目の試験にフィルム試料を提供する。

この検討を「実施項目 1 新規素材の開発」の一項目とし第 1 章で報告する。

3-2 既存材とのコスト差があることへの対応

目標とする性能を持つ製品を、確実かつ低コストで実生産するプロセスを確立する。安定的な生産のために新規素材の生産プロセスの改良、フィルムの成形加工プロセスの改良を試みる。コストに関しては、素材生産のための原料や製造設備運転の低コスト化、加工性を含む素材の物性の改良、プロセスの改良など総合的なアプローチで抑えることを目指す。分解性があることによって多品種生産とその在庫、短い在庫期間などコストが押し上げられていることに対しては、3-3 に示す分解までの期間の調整で対応する。さらに回収や最終処分まで考慮して、コストの目標を、環境負荷低減による上昇が社会に受け入れられる範囲、例えば製品仕上がり時に既存製品の 1.5~2 倍程度になるように定め、検討を進める。

本年度は、改良された新規素材の生産に向けたプロセスの調整、素材生産のコスト低減のための種々検討、および新規素材を活用したフィルム製造プロセスの効率化の検討を実施する。

この検討を「実施項目 1 新規素材の開発」の一項目とし第 1 章で報告する。

3-3 生分解の制御が十分でないことへの対応

素材の分解の抑制と開始を、利用場面に関わらず、任意に制御する技術の実用化に向けた実証を行う。まず、この開発を進めるための基礎技術として、生分解性素材の土壌環境中での分解性を、より正確に評価する方法を確立する。すなわち素材を土壌に埋設後、分解を経て最終的に CO₂ にまで分解される過程を解析する方法を作出する。その上で、a. 新たな素材、b. 複数素材の複合、c. 分解制御のための添加剤の利用、d. 酵素剤に代表される分解を調整する要素をどのように組み合わせるかの戦略を立て、制御可能な支配因子を見いだす。取得した情報を実施項目 1 の新規素材の開発、および実施項目 4 の実証試験に反映する。

本年度は、昨年度基本操作方法を確立した素材試料の土壌中での分解に伴い発生するCO₂を捕らえる計測法を、安定化かつ効率化するための改良を加える。さらに標識化合物を原料として用いた素材を準備し、標識物質の追跡による土壌中での素材の分解の評価法の確立に着手する。また、酵素剤による使用後のフィルムの処理を普及させるために、酵素剤をより効率良く生産できるよう酵素を生産する微生物を改良する準備と、酵素の工業的な生産のための情報収集を継続する。

これらの検討において、生分解性素材の分解の評価に関わる部分を「実施項目2 新規生分解性プラスチックの分解制御」、また、分解を促進する酵素剤の生産性の向上に関わる部分を「実施項目3 生分解性プラスチック分解酵素の生産に係る基礎的情報の収集」とし、それぞれ第2章、第3章で報告する。

3-4 素材のライフの最後までを考慮に入れた実証が不十分であることへの対応

新規素材を用いたフィルムの製造から開始し、実際の利用と最終処理の条件で実証試験を加えた生分解性マルチフィルムのライフの最後までを想定した評価を行い、その有効性を示す。すなわち、新規素材と酵素剤を組み合わせた技術の普及を目的とし、生分解性マルチフィルムが効果を発揮する栽培手法の普及に力を入れている、国内の多様な地域の試験機関にて評価情報の集積と共有を進める。さらに、生産者の圃場で実際に野菜の栽培試験を行い、生産性と労働負荷、経済性の評価を行って情報を蓄積する。これらの情報を基に、本事業で実証する新たな農業生産システムのリサイクル性、CO₂放出削減効果、LCA および経済性に関わる評価を行う。

令和元年度の予備検討の結果と令和2年度の試験圃場での結果を踏まえ、新規素材を用いた新たな設計の配合で試作したフィルムを、試験圃場と一般生産者の圃場で展開し、作物栽培の経時観察および酵素剤処理の試験を行う。その結果を、フィルム用の樹脂配合の更なる改良と、農業者での実用化に向けた基礎情報とする。

またLCA および経済性評価について、過去の種々のLCAの実例や経済性評価の手法を解析し、前年度までに考察した評価手法にのっとり、素材製造、フィルム製造、および農業者の直接調査を含む情報収集により、LCA と経済性評価を実施する。

これらの検討において、試験圃場と一般生産者における評価に関わる部分を「実施項目4 農地、作物栽培における生分解性マルチ実証試験」、また、LCA、経済性評価に関わる部分を「実施項目5 LCAの検証・評価」とし、それぞれ第4章、第5章で報告する。

4. 実施体制

本事業実施は代表者を三菱ケミカル株式会社(以下、三菱ケミカル)とし、令和元年度から参加の共同実施者として(国研)農業・食品産業技術総合研究機構(以下、農研機構)、(大)静岡県立大学、(大)東京農工大学および神奈川県農業技術センターに加え、令和2年度から参加の茨城県農業総合センター、山梨県総合農業技術センター、および三菱ケミカルアグリドリーム株式会社が、それぞれ業務分担して行う(第2図)。

第1章 新規素材の開発

1. 検討の概要

従来の生分解性プラスチック素材の弱点を克服し、酵素剤との組合せでより広範囲の作物栽培に適応できる物性と価格を備えた生分解性マルチフィルムを構成し得る素材と、その素材を利用しつつフィルム用に最適化した複数のプラスチック素材から成る配合(以下、配合)の設計が必要である。そのために、農業用マルチフィルムとして成形加工した際の物性の向上、酵素剤による分解、および許容されるコストを両立する新規素材、および新規素材を活用して目的とする高耐久のフィルムを製造可能な配合を開発する。

本年度は、PBSの開発で培った高分子素材の設計、製造に関する知見を活用して令和2年度までに開発した新規素材の物性を様々な方法で確認の上、必要に応じて生分解性とフィルム成形などに適した物性のバランスを向上させるためポリマー設計に改良を加える。また、他の実施項目の試験に素材試料を提供する。この新規素材を活用した、マルチフィルムとして求められる物性を実現するための配合を複数設計し、予備的試験を行う。その結果から仮配合を決定し、他の実施項目の試験にフィルム試料を提供する。

2. 材料および手法

検討は大きく分けて四つの項目、すなわち新規生分解性プラスチックの開発、新規素材の製造コスト低減の試み、耐久性が高い新規生分解性マルチフィルムの配合検討、およびフィルムの試作およびフィルム製造コスト低減の試みを行った。

2-1 新規生分解性プラスチックの開発

令和元年度は、市場に流通している生分解性の農業用マルチフィルムと、その製造のために用いられている生分解性プラスチックの素材について調査を行い、フィルムとして求められる物性と生分解性について情報を得た。市場で購入できるほとんどの生分解性マルチフィルムの配合は、脂肪族ポリエステル(aliphatic polyester)に分類される polylactic acid(以下、PLA)、変性 polybutylene terephthalate(以下、PBAT)、PBS および変性 PBS(PBSA)、polycaprolactone(PCL)といった高分子化合物すなわちポリマーを素材としている^{4,5)}。ところが、これらの素材を用いて製造されるマルチフィルムは、主に低密度 PE(以下、LDPE)を用いて製造されている生分解性のない汎用の製

品と比較して、素材をインフレーション式フィルム成形機(以下、インフレーション成形機)等で加工する際および農地で使用する際、ポリマーとしての成形加工性、例えば熔融温度帯における流動性と熱分解性、また、フィルムとしての物性、例えば各種の強度が劣る傾向が見られた。一方、生分解性マルチフィルムを用いた栽培を行っている農業者から発せられる最も多い不満点は、栽培期間中にマルチフィルムとしての機能が維持できない、すなわち想定より早い時期に開裂したり分解したりすることであった(第1表)^{6, 7)}。想定より早くフィルムが破損すると、収穫量に影響するだけでなく、労働力がより多く必要となり、また破損したフィルムが他の作物や近隣の環境に悪影響を及ぼす可能性が生じるとのことであった。これらの課題の克服を目指し、新規の素材を開発する要件を見いだした上で、素材の分子設計を行った。まず PBS の開発と製造の知見をいかし、加工性に優れ、フィルム状に加工した際に強い引裂強度と柔軟性を併せ持つ生分解性プラスチック素材を設計した。PBS を基本として、化合物の配合比率、他の化合物の添加とその割合を調整し、分子構造が異なった複数の素材候補ポリマーを設計し、試験装置にて設計に沿って重合反応を行った(第3図)。これらの反応試験で得られた試料のうち、反応が滞りなく進行した上でポリマーとしての使用に耐えると思われるものについて、簡易的な物性試験を行い、生分解性マルチフィルムの製造において基本的な素材として用いられている PBAT と比較し、同程度の性質をもたらすと思われる分子構造を三つに絞り込み、それぞれ新規素材 A、B、および C とした。これら 3 種の新規素材について、農研機構が有する酵素剤によって分解することを確認し、またフィルムにした場合に PBAT と同等かそれ以上の物性を発揮した新規素材 A を、以降の試験に用いる素材として選定した。

令和 2 年度からは、新規素材 A について設計段階で想定していた物性を確実に発揮させるために、重合条件を綿密に検討し、想定分子量、分子構造に近づける作業を進めた。並行して、より効率的かつ安定した素材の製造を目指し、製造プロセスの要所を再検討し、例えば副反応を抑えるための条件を探索した。また、新規素材を広い用途に応用可能とするために、適切な認証を獲得する準備を開始した。

新規素材 A は PBS をベースとしながらも製造時に共重合による反応遅延や副反応を起こしやすいといった課題があり、試験設備で重合条件の検討を重ねて反応の制御性を高めた。その結果、製造コストの低減につながる幾つかの点で作業手順を改良できた。従来の植物由来原料を用いた生分解性素材と、本年度製造方法を改良した新規素材 A の製造コストを比較したところ、新規素材 A で 8% の削減と算出された。新規素材 A は、引き続き開発を継続しており、シミュレーション上の素材改良では、コストを約 12% 削減可能なことが示された。また、新規素材を用いたマルチフィルムを更に広い

範囲で用いるため、かつそれ以外の用途に展開を容易にするため、主に安全性に関する認証の獲得を目指すこととし、認証に必要な種々分析等の準備を進めた。

本年度は、令和元、2年度に引き続き種々の素材製造条件の改良を継続し、特にバイオマス由来原料について、原料メーカー間での重合性の違いや、低コスト化に向けた原料の選定など、工業的生産の安定化と抜本的なコスト低減のための検討を実施した。また、国内認証への登録など実用化に向けて必要な手続を継続して進めた。

2-2 新規素材の製造コスト低減の試み

新規素材 A は、試験機関での評価試験に用いるため、令和元年度中に少量の中規模試作を行った。その過程で、重合反応器の中で反応を終えたポリマーを器外に取り出す際に、例えば三菱ケミカルの中規模試作設備、あるいは委託先の商業生産設備で粒状の製品(ペレット)化が困難であることを示唆する現象を見いだしていた。そこで、新規素材候補が安定して製造できるよう生産設備の改良を計画し、機器の詳細設計を行い、設備改良の手順を進めた。これらの作業と並行して、製造プロセスの種々条件の調整でペレット化の問題を克服する手立てを探索した。まず、既に第 3 図の設備にて商業規模で生産を行っている PBS、PBSA の製造のための、

- i. 原料の選択と製造プロセスへの仕込み方法、
- ii. 副反応の制御、
- iii. 分子量調整のための重合反応の制御、
- iv. 結晶化の制御方法、

などを見直した。変更を検討する必要がある項目について試験装置および試作設備にて検証を行い、新規素材 A が、ペレット化が困難な理由を探索した。引裂強度の改良のためにフィルムに柔軟性の付与を図ろうと素材の分子を設計した場合の多くで、素材が高温下で熔融状態から糸状に反応器から繰り出され、徐々に冷却されて固体となる過程で、融点温度が低く、結晶化速度が遅くなる傾向があり、製品をペレット状に仕上げる際の深刻な障害となることが経験的に知られており、特に結晶化の調整を中心に検討を続けた。この一連の検討で、新たな添加剤の探索などを行った結果、素材の融点と結晶化速度を制御する方法にめどを立てることができた。この改良された製造方法を試作設備で検証の上、PBS 製造の外注先である PTT MCC Biochem Co., Ltd. (以下、PTTMCC) の商業生産設備に適応し、新規素材 A を生産できる可能性を確認した。

令和 2 年度は、引き続き PTTMCC の設備で適応可能な種々のプロセス改良を試みた。加えて、原料の入手から出荷までの工程全体を再検討し、より安価な原料の入手、設備規模によるスケールメリット、および運転経費などでコスト的に有利となる企業へ製

造委託先を変更するなどの抜本策を並行して検討した。将来の新規素材のコストダウンの一つの策として、Xinjiang Blueridge Tunhe Chemical Industry Co.,Ltd(以下、Tunhe)の採用を検討した。Tunhe を選択した主な理由は、素材の主原料を生産しており、より低コストでの調達が可能であること、加えて、大規模なポリマー製造設備を有していることである。これらの要因によるコストの低減が期待できるため、Tunhe に素材試作を委託した。加えて、試作結果や種々の調査により、三菱ケミカルが主導となり製品仕様の調整を行えば、新規樹脂の製造コストの低減が可能と判断した。現在も様々なケースを想定した製造コストの試算を進めている。一例を示すと、原料調達や重合プロセスの効率化といった Tunhe のアドバンテージをいかして、素材製造の変動費を最大限削減できた場合、従来の植物由来原料を用いた生分解性素材で約 39%、新規素材 A で約 45%のコストを削減できると試算された。

また本年度は、生分解の製品が、素材が製造されたその時点から素材の流通、製品の製造と流通、客先での在庫といったサプライチェーンを渡っていく間に劣化が進むことが原因で、特に素材の製造販売においてコストへの影響が大きい製品の貯蔵寿命あるいは品質保持期限(以下、シェルフライフ)について検討を行った。また 2-3 で設計した R3 配合について、インフレーション法生産用実用機(以下、実機)でのペレット製造条件の検討を行い、配合物としての製造コスト削減について検討を行った。

2-3 新規生分解性マルチフィルムの配合検討

選抜された新規素材 A は、試験機関にてマルチフィルムの素材としての評価を開始するため、まず単一素材のフィルムに成形して評価した。次に新規素材 A が生分解性マルチフィルムの素材として使用可能かどうかを確認するため、また、新規素材以外の、圃場におけるマルチフィルムの生分解の速度を制御する要素を確認するために、新規素材 A を含む複数の生分解性プラスチックおよび添加剤の配合を設計した。配合は、フィルムとしての作業性を含めた物性、および十分な展張期間すなわち耐久性に配慮し配合シリーズ 1 とした。試作には、三菱ケミカルおよび外注先で配合設計に従って複数の素材を混練(以下、複合化)して用いた。複合化された素材は、三菱ケミカルおよび外注先にて、インフレーション成形機を用いてフィルム状に加工した。

令和元年度の複合化素材の配合シリーズ 1 の内容は以下；

配合シリーズ 1

配合 a：市販の生分解性マルチフィルムと同じ配合

配合 b：市販の生分解性マルチフィルムより分解しやすいと想定する配合

配合 c : 配合 a に分解制御添加剤 X を加えた配合

配合 d : 配合 a に分解制御添加剤 Y を加えた配合

配合 e : 新規素材 A を含む配合

これらの試作フィルムを、試験機関の実験室内での酵素剤処理、および試験圃場での展張、小規模の栽培、および使用後のフィルムの土壌への埋設などの試験に供した。本試験の結果、以後の試験は、市販の生分解性マルチフィルムと同等の性能を発揮した配合 e を軸として配合を設計していくことに決定した。

令和 2 年度は、生分解性マルチフィルムの課題の一つである長期間の展張に耐え得る耐久性を実現するための検討に着手した。令和元、2 年度は、市場に流通している生分解性の農業用マルチフィルムの配合を出発点として、新規素材の活用と生分解性に関する知見を得るための検討を実施した(第 4 図)。令和元年度の結果から、既存の生分解性プラスチックを主成分として用いた配合 a よりも新規素材 A を主成分として用いた配合 e で耐久性が高く、添加剤 X を用いた配合 c は更に高い分解抑制効果が見られた(第 5 図)。また、実験室内における各配合シリーズの酵素浸漬実験から、全ての配合で酵素剤による分解促進が可能であることが確認された。令和 2 年度は、新規素材 A の配合率によってフィルムの分解性をコントロールできるという仮説を立て、配合 e をベースとした 3 種類の配合から成る配合シリーズ 2(e シリーズ)でフィルムを製作し、各試験機関の圃場で野菜の栽培を伴う展張試験を実施した。

配合シリーズ 2(e シリーズ)

配合 e-0 : 配合シリーズ 1 の配合 e をベースとした配合

配合 e-1 : 配合 e をベースとして、新規素材 A の配合量を低減した配合(耐久性を弱める方向)

配合 e-2 : 配合 e をベースとして、新規素材 A の配合量を増やした配合(耐久性を強める方向)

その結果、想定どおり新規素材 A の配合量が多い方から e-2>e-0>e-1 の順に分解抑制効果が高いことが分かった(第 5 図)。なお、配合シリーズ 2 で新規素材 A を用いた初めての実機でのフィルム試作を実施したが、成形開始時にフィルムが持ち上がらない、バブルが不安定になり厚み斑が出るなどの製造上の課題が見付かった。

次に、これまでの検討で得られた結果を基盤として、所望の長期耐久性を実現しつつ、生産性と分解性を兼ね備えたフィルムを得る目的で、配合シリーズ 3(R2 シリーズ)

の設計を行い、令和元年度に改良した三菱ケミカルの試験装置を用い混練とインフレーション成形を実施した。成形したフィルムについて三菱ケミカルで初期物性評価を行った上、令和2年度の各圃場での展張試験に提供した。なお配合シリーズ3を製造した際、対照として配合シリーズ2のe-0と同じ配合のe-0_Cも同時に試作した。

配合シリーズ3(R2シリーズ)

配合 R2-1：現行流通している素材を用いた市販品相当の生分解性マルチフィルム
配合

配合 R2-2：現行流通している素材を新規素材 A で置換した配合、ただし配合シリ

配合 R2-3：R2-2 をベースに新規素材 A の半分を新規素材 B で置換した配合

配合 R2-4：R2-2 をベースに新規素材 A を新規素材 B で置換した配合

配合 R2-5：R2-2 配合に添加剤 X を加えた配合

配合 e-0_C：配合シリーズ2のe-0と同じ配合

配合シリーズ3の全ての配合は、三菱ケミカルの試験装置では、混練とインフレーションフィルム成形においてフィルム化することが可能であり、問題なく評価用フィルムが得られた。得られたフィルムの物性は、実使用において重要となる裂け強度とフィルム打ち抜き強度において、高い順に $R2-2 \geq R2-1 > R2-5 > R2-3 > R2-4$ となった。土中での崩壊は早い順に $R2-1 > R2-2 > R2-5 > R2-3 > R2-4$ となり、R2-1、R2-2では長期耐久型としては分解が早く不適と考えられた。また、酵素浸漬処理による分解評価の結果から、 $R2-1 > R2-2 > R2-3 > R2-5 > R2-4$ となったが、R2-4でも分解は進行しており、酵素剤処理と組み合わせることで使用後に必要な生分解性を担保できると考えられた(第2表)。以上の結果から、フィルム強度、展張時耐久性、使用後の酵素での分解促進の観点でバランスの良いR2-5をベースとし、三菱ケミカルアグリドリームとの協力を得て長期耐久生分解性マルチフィルムの新たな配合シリーズ4(R3シリーズ)を設計するに至った。これら配合についても、令和2年度に三菱ケミカルの試験装置を用い混練とインフレーション成形を実施し、種々の試験に提供した。その結果と、初期物性や成形性を考慮してR3-1とR3-2を選定し、押出機実機でのペレット製造と三菱ケミカルアグリドリーム実機でのフィルム成形試作を行った。製造したフィルムは第4章での展張試験に提供した。

配合シリーズ4(R3シリーズ)

R3-1：R2-5をベースに更に新規樹脂Aを増やした配合

- R3-2 : R3-1 に PLA を加えて更に遅い分解を狙った配合
- R3-3 : R3-1 をベースに添加剤 X を更に増やし遅い分解を狙った配合
- R3-4 : R3-1 から更に新規樹脂 A を増やし遅い分解を狙った配合
- R3-5 : R3-2 から添加剤 X を除き、PLA の分解遅延効果を検証するための配合
- 配合 e-0_C : 配合シリーズ 2 の e-0 と同じ配合

長期耐久性を意図した代表的な配合設計で、各素材のコスト推算値などを基にコストの比較を行ったところ、従来の植物由来原料を用いた生分解性素材を主に配合した設計に比べ、2~4%と僅かではあるがコスト低減となると算出された。この値は、例えば汎用マルチフィルムに用いられる PE の約 2.6 倍に当たる。目標としている PE 比 2 倍に向け、他の要素も含めた検討を続ける。例えば、3-2 で示した素材のコスト低減が可能となれば、従来の植物由来原料使用の生分解性素材を主に配合した設計から約 15~20%のコスト削減となり、PE の 2.2~2.3 倍の値となる。以上 2-1 から 2-3 の一連の取組について第 3、4 表にまとめた。

2-4 フィルムの試作およびフィルム製造コスト低減の試み

本年度は、三菱ケミカルにて開発したフィルム用樹脂の配合シリーズ(e シリーズ、R3 シリーズ)を三菱ケミカルアグリドリームの実機にて試験生産を実施した。各配合シリーズとも、試験生産において生産時期による生産性の違いを再確認することができた。これらの試験生産を通じて、生産安定化のための種々の調整および低コスト化の検討を実行した。

3. 結果および考察

3-1 新規生分解性プラスチックの開発

本年度は、バイオマス由来原料樹脂について、異なるメーカーの原料を用いた際の重合性の違いや、低コスト化に向けた原料の選定を実施し、原料価格が安価になることを明らかにした。また、実用化に向けて国内認証への登録などの必要な手続を継続し、実用化にめどを立てた。

3-2 新規素材の製造コスト低減の試み

令和3年度は、コストインパクトの大きい樹脂のシェルライフを中心に検討を行った。その結果、樹脂中の水分量を約300ppmにコントロールすることで、保管期間1年後の熔融粘度 melt flow rate (MFR190°C、2.16kg)の上昇率を7%以内に抑えることが示された(第5表)。

3-3 新規生分解性マルチフィルムの配合検討

2-1に記載のとおり、生分解性マルチフィルムの普及を進める上での大きな課題は、環境、気候条件により想定より早く分解してしまうこと、長期展張が必要な作物栽培への使用が難しいこと、また、製造、流通の各段階で、時間経過によって品質が変化をしてしまうことなど、既存製品の耐久性が低いことに起因した使い勝手の悪さが挙げられる。これらの諸問題を解決するため、令和元、2年度に見いだした配合設計原理に基づき、配合シリーズ4(R3シリーズ)を設計した。配合シリーズ4のうちR3-1~R3-5配合を三菱ケミカルにてインフレーション成形試験装置を用いてフィルムを試作し、第2章の農研機構での展張試験に提供した。また、R3-1およびR3-2は、三菱ケミカルアグリドリームにて実機によるフィルム製造を実施し、令和元年度のe-0と市販品の高耐久品および通常品を対照として加え、各圃場試験場所での展張試験に提供した。本項では、開発したフィルムについて、成形性と倉庫保管性、展張時の耐久性、酵素分解性について物性面から評価を行った。その結果、本事業で設計した配合R3-1、R3-2が長期耐久性フィルムとして有用であることが示されたので以下に報告する。

配合シリーズ4(R3シリーズ)

R3-1：R2-5をベースに更に新規樹脂Aを増やした配合

R3-2：R3-1にPLAを加えて更に遅い分解を狙った配合

R3-3：R3-1をベースに添加剤Xを更に増やし遅い分解を狙った配合

R3-4：R3-1から更に新規樹脂Aを増やし遅い分解を狙った配合

R3-5：R3-2から添加剤Xを除き、PLAの分解遅延効果を検証するための配合

対照

e-0：令和元年度に開発した新規樹脂配合

R2-5：令和2年度に開発した新規樹脂配合

市販品マルチフィルム通常A

市販品マルチフィルム通常B

市販品マルチフィルム通常C

市販品マルチフィルム高耐久 A

まず、製造したフィルムの機械物性について比較を行った。マルチフィルムで実用性に最も影響する、流れ方向(machine direction、以下、MD 方向)の裂け強度、流れ方向に対して垂直な方向(transverse direction、以下、TD 方向)の裂け強度、および打ち抜き時の衝撃強度について検討を行った。その結果、予想どおり令和 3 年度で設計した配合は全ての物性で e-0 を上回ることが分かった(第 6、7 図)。

また、実機生産を行った R3-1 および R3-2 については、ペレット製造時の溶融混練プロセスにて、スクリュウ構成や温度設定、ダイ穴の数について検討を行い、3 度の実機試作を通して、20%だった製造時のロスを 14%まで低減することに成功した。今後、生産量が増えて更に調整を進めることで、ロス率は低下し、数%台のロス率を実現することが可能であると考えられる。

フィルム製造の安定性についても樹脂配合面から考察を行った。配合シリーズ 3 ではインフレーション法によるフィルム成形時に、樹脂の溶融粘度が低いためにフィルムがうまく立ち上げられない、バブルが立ち上がっても厚み斑ができるなど、安定成形に影響する課題が残されていた。複合材料 R3-1、R3-2 を設計する段階で、仮説として、添加剤 X を添加することで耐加水分解性の付与できることに加え溶融粘度と張力を上げることで、インフレーション成形時のバブルを安定化できると考えていた。実際に、新規樹脂 A を主成分として添加剤 X を配合した R3-1 および R3-2 について、三菱ケミカルアグリドリームにてインフレーション成形を行ったところ、立ち上げがスムーズになり、成形時のバブルの安定性が大きく向上することが分かった(第 6 表)。一方で、粘度上昇に伴い成形温度が上昇したことで、冷却が遅れフィルムの口開きが悪化した。そこで、更に口開き改良剤を添加し配合調整を行って配合を決定した。これらの配合を再度実機にて製造したところ、R3-1 と R3-2 は e-0 と比較して、品質面、成形性面で飛躍的に改善していることが確認された。

2-1 で述べたとおり、実使用においてフィルムを一定期間保存してから展張した場合、ポリエステル特有の加水分解によって展張前にフィルム品質が低下している場合がある。そこで、実機で製造した、R3 シリーズのフィルムの保管時のシェルフライフについて検討を行った(第 8 図)。成形したフィルムを 40℃、90%RH の加水分解加速条件下で保管し、経時的な衝撃強度の変化を測定し比較した。その結果、興味深いことに、市販品高耐久対照品 A の初期物性値は R3-1 や R3-2 よりも優位であるが、3 週間経過後には、R3-1 や R3-2 とほぼ同等の強度まで低下することが分かった。一方で、本事業で設計した R3-1 や R3-2 では初期の衝撃強度は大きく低下することなく、3 週間

後も使用可能であることが示唆された。本結果は、R3-1 や R3-2 に配合した添加剤 X が、展張時の耐久性だけでなく、高温高湿度下での加水分解抑制効果を発揮し、フィルムのシェルフライフの延長に寄与したものと考えられる。

以上、本年度は、令和元、2 年度の検討で得た配合設計指針に基づき、フィルムの物性向上および高耐久化、シェルフライフの向上、材料面からのフィルム成形性の改良に着手した結果、これまでの諸問題を全て解決し、生産性や実用性を兼ね備えた新規生分解性マルチフィルムの開発に成功した。なお、本フィルムは第 4 章の展張試験に提供し、展張時の性能に注目した検討を実施した。

3-4 フィルムの試作およびフィルム製造コスト低減の試み

本年度は、新規素材評価のための試料の提供に加えて生産の安定性向上および低コスト化の方針を探るため、開発された各配合シリーズ 2 の試作を令和 3 年 4 月、8 月、12 月に計 3 回行った。試験結果およびこれに基づくフィルム製造コスト低減となる設備最適化の検討結果について以下に記載する。

3-4-1 フィルム試作試験の結果について

本年度は、昨年度の状況を踏まえ e シリーズおよび R3 シリーズにて生産時期(季節性)による生産性の違い、安定生産条件探索等を検証するため 3 回の試験生産を実施した。

e シリーズにおいては、製膜工程でのフィルム破断等の不安があり、e-2 配合にて改良を行い製膜工程の安定化は図れたが、少量試験生産であることからロングラン性の検証が必要と判断された。

また、R3 シリーズにおいては、製膜工程の安定は生産時期を問わず製造を安定化できることを確認できたが、夏場(8 月)の有孔工程での破れ課題および巻取工程にて口開き(チューブ状フィルムを開く工程)性能が悪く、年間通しての安定生産に課題を残す結果となった(第 7、8 表)。

本年度の試験生産の結果、安定生産のためには更なる配合変更、条件探索又は新規素材に適した設備検討が必要と判断された。

3-4-2 新規素材に適した設備検討

昨年度来の試験生産結果から冬期、夏期の両時期の試験生産とも、製膜直後の樹脂溶融安定性、有孔化性能および口開き性が現行の生分解性フィルム製品のそれと比較して悪かったことから、新規素材のインフレーション法による生産性の飛躍的な向上

は、現状の製造設備設計上は困難であり、現行設備並びにプラスチック配合の調整のみでの生産の低コスト化は難しいと結論付けた。よって、製膜プロセスの最適化の検討を三菱ケミカルのエンジニアリング部署の協力の下、シミュレーション技術も応用して取り進めた。新規素材の最適化製膜プロセスの検討は、下記の手順によって実行し設備仕様の確定およびこれに係る投資額の見積り作成まで完了した。

- ① 新規素材を用いた配合候補の選定：R3 配合シリーズとする
- ② 新規素材を用いた配合候補の物性および試験生産結果から必要となる設備仕様決定
- ③ 生産コスト低減目標値策定

三菱ケミカルアグリドリーム生産設備吐出量対比 2 倍以上を目標とする。
設備検討結果：約 2.5 倍の吐出量達成(見込み)

- ④ ①～③項を満足できる技術力および信頼性を有する設備メーカー選定(三菱ケミカルグループ社内実績評価、第 9 図)

- ・ 混合／混練工程 : (株)カワタ
- ・ 製膜行程 : 住友重機械モダン(株)
- ・ 有孔工程 : (株)湘南貿易
- ・ 巻取工程 : (株)不二鉄工所
- ・ 印刷機その他設備 : エムイーシーテクノ(株)

- ⑤ 設備投資見積書作成

設備投資総額：719 百万円

(※土地建屋、工事費は除く。建設地により変動するため)

詳細：

混合・混練工程	43 百万円
製膜行程	400 百万円
有孔工程	50 百万円
巻取工程	200 百万円
印刷機その他設備	26 百万円

このプロセス改良により約 20%の加工コストを低減できた。従来の製造場所で素材を製造した場合と、3-2 で検討した製造場所で素材を製造した場合でそれぞれ約 7～9%、20～26%のフィルム製造コストの削減が可能と推算された。この値は、新規素材を用いた配合が PE と同じ比重だとすれば、フィルムの製造コストは PE の約 2 倍とな

る。しかし実際は、マルチフィルムに用いられる LDPE の比重が 0.92 であるのに対し、代表的な PBS は 1.23 と約 25%大きい。単純計算では、同じ面積のフィルムを製造するために、PE よりも 25%大きい重量の素材を必要とする。よって、新規素材を用いた配合は、PE の約 2.7~2.9 倍のコストとなり、更なる素材開発、プロセス効率化が求められる。

開発のターゲットは幾つか挙げられるが、前述の設備改良と別のアプローチとして、例えば、現時点で新規素材 A が従来の素材と比較して僅かながら比重が低いことに着目し、より低比重の素材を開発する方向がある。比重を 7%、すなわち 1.15 に低減できれば、フィルムの製造コストも約 6.5%削減できる。また、2-1 で述べたように、素材の引裂強度、柔軟性、フィルム加工性をバランス良く改良できれば、現在のフィルムより厚みを薄くすることが期待できる。仮に、フィルムの厚さを 10%薄くできれば、フィルム製造コストも約 10%低下する。これら二つの改良を合わせて達成できれば、コストの削減は約 16%となり、最大で PE のフィルムの約 2.3 倍を実現できる。

以上の検討結果が得られたことにより、三菱ケミカルでは新規素材 A の事業化を進める準備ができた。主な用途をマルチフィルムとし、需要の立ち上がりに合わせて生産計画を立案する予定である。マルチフィルムのための配合は、本事業における県の試験機関と生産者の栽培実績を精査した上で、高耐久仕様の安定性を高める改良を加え、より大規模な圃場での栽培試験を数回繰り返し、新商品として早期の試験販売を目指す。

第2章 新規生分解性プラスチックの分解制御

1. 検討の概要

目的に合わせて分解の抑制と促進を任意に調整することは、生分解性の素材を社会で役立たせる上で欠かせない技術である。生分解性を持ったプラスチックであればすなわち、プラスチックとして使用している間はプラスチックの性能を享受し、分解が求められる場面で速やかに高分子状態から無害な低分子物質に変換することが理想となる。また、ある時点から緩やかに長期間の分解を継続することが求められる用途も存在する。本事業では、実施項目1で分解の制御に有利な性質を持つ素材の獲得を目指し、実施項目3で素材を任意のタイミングで崩壊させる酵素剤の安定製造を狙っている。実施項目2では、これらの試みが正しく行われているかを確認し、かつ検討の速度を高めていくための基礎技術として、土壌環境、圃場環境、酵素剤処理における生分解性素材の分解性をより正確かつ簡便に評価する方法の確立を目指す。

本年度は、昨年度に土壌中での素材の分解性を把握するための新たな評価方法を構築する試みで得られた基本操作方法を改良し、新規素材の土壌中での分解性評価を行う。並行して、安定同位体を原料として試作した素材試料を用い、素材の土壌中での分解過程の解析方法を策定する。また、項目1で設計、試作する新しい配合をフィルムに成形した試作フィルムを圃場で簡易的に評価する。加えて、農研機構が準備する酵素剤、すなわち既存の生分解性素材を速やかに分解できる酵素が、実施項目1で得た新規素材および試作フィルムを分解可能かを検証する⁸⁾。さらに、これらの試験で見られた現象を、効率的に解析するための手段を探索する。

2. 材料および手法

検討は大きく分けて三つの項目、すなわち土壌中での生分解性評価、新たな配合処方試作した複合化素材フィルムに対する酵素剤処理の効果の評価、これら複合化素材フィルムの圃場での分解評価について行った。

2-1 土壌中での生分解性評価

2-1-1 分解で生じるCO₂量評価システムの構築

新規素材を含む生分解性素材の分解性を、より圃場環境に近い条件で正確かつ安定して評価する方法の確立を目指す。現在、生分解に関する主だった認定基準で用いられている生分解性の評価方法は、高温、多湿のコンポスト製造条件下での分解で生じ

る CO₂ 発生量の測定を行う、ISO14855-2 での評価が一般的とされている(第 10 図)。一方、本事業が応用を目指す農業生産の場、すなわち野菜栽培の圃場にマルチフィルム等の生分解性素材を使用する場合は、露地あるいは温室等の設備内の土壤中に鋤込み分解を促すことを想定している。したがって、生分解性の評価は、ISO17556 に示される常温かつ好氣的条件で行われることが求められる。しかしながら、ISO17556 で規定される方法では数多くの試料を正確かつ安定して連続的に測定を行う計測システムは存在しない⁹⁾。そこで、土壤中における生分解性プラスチックの分解に関するシステムティックレビューを行い、レビュー論文として国際学術誌に公表した(Francioni et al., 印刷中)。

生分解性素材の土壤中での分解を評価するためには、基本的に素材が土壤の微生物によって分解される際に生じる CO₂ の発生量を検出する。しかし、評価は数週間から数か月単位の長期にわたる場合があり、また僅かな気体の組成変化の測定を安定して行うことは容易でない。一方、密閉した容器の中では、土壤に埋設した生分解性素材の分解に伴って発生する CO₂ 濃度が上昇し、その中の上昇量を測定することで分解速度を評価できる。この密閉法を応用して、CO₂ 濃度上昇の検出を高精度でかつ効率良く行うシステムを構築できると考えた。そこで、土壤中で生分解性素材が分解する過程を追跡できる小規模の試験容器、環境制御装置、および市販の検出機材を組み合わせた、自動化計測システムの構築を開始した。昨年度は、多検体の計測を確実に行うことができる半自動計測システムの構成の設計、組立て、予備テストを行い、計測器を始めとする機器の構成と基本的な測定条件を決定した。また、測定ごとに人が介して測定機の位置に容器を設置する工程を自動化するため、より多くの試料を継続的かつ正確に計測できるように装置の改良を進めた。具体的には、気密状態で保てるチャンバー(以下、チャンバー)内に土壤と生分解性素材を入れた容器を配置し、高感度で連続的な測定が可能な検出器でチャンバー内の CO₂ を測定する装置を組み上げた。この装置を用いて、種々調整を行い、基本的な測定条件を明らかにした。さらに、より多くの試料を継続的かつ正確に計測できるように、工程の改良を続けた。

本年度はこの計測システムを用いて、供試土壤や供試素材に合わせて必要な調整、改良を行った上で、生分解性のある新規素材を配合した異なる配合比のフィルムの土壤中での分解を、分解に伴う CO₂ 量のモニタリングによって実際に検出、解析し、生分解および分解度の違い、特に添加剤 X による分解抑制効果を明らかにした。

2-1-2 土壤中でのプラスチックの分解過程の追跡

現在の生分解性素材の生分解は、主に素材が微生物によって分解される結果で生じるCO₂の発生量を定量することで評価されている。この評価方法は、生分解という現象をマクロに捉えることには適しているが、例えばプラスチックのような高分子素材の場合、素材を構成する物質がどのような分解過程を経て最終的にCO₂や水といった物質に変換されていくかは追跡できない。

そこで、炭素の安定同位体¹³Cで標識した同位元素標識化合物を用いる試験を計画した。生分解性素材の原料となる複数の化合物を安定同位体で標識したものを準備し、この化合物を用いて重合を行って得た¹³C標識ポリマーを土壌へ埋設すると、土壌微生物による無機化(mineralization)によって形成されたCO₂が放出される。このCO₂は、大気中のCO₂に比べて¹³C/¹²C比が大きいことで検出され、ポリマーに含まれる化合物中の標識された炭素が無機化されたことが証明できる。

試験を行うために、昨年度は炭素の安定同位体を用いた試験の設計および準備を行った。まずポリマーの成分となる化合物のそれぞれについて、1分子に数個含まれる炭素のうち、どの炭素を¹³Cで標識するのかについてデザインした。この標識化合物を用い、ポリマーを構成する化合物のうち一つを¹³C標識し、残りを無標識のものとしたポリマーを三菱ケミカルで試作し、農研機構で土壌中に埋設して分解に伴って放出されるCO₂中の¹²Cと¹³Cを測定し、¹³C/¹²C比を算出することとした。また農研機構では、実験室内での試験のために、安定同位体を用いた土壌埋設試験用のチャンバーを試作した。

本年度は、農研機構の標識化元素測定技術によって、ポリマーを構成する化合物の土壌中での分解に伴うCO₂の発生を、安定同位体の測定によって追跡した。次に、その結果を基に三菱ケミカルにて最適な¹³C/¹²C標識混合比を持つポリマーを試作した。

2-1-3 土壌中の生分解性素材の分解中間体の分析手法の検討

生分解性素材が土壌中で生分解されると、分解中間体として重合度の低い重合体(オリゴマー)が生じる。この土壌中オリゴマーの定性および定量は生分解性素材の土壌中での分解評価につなげられることが期待される。そこで、2種類の土壌、すなわち低地土および黒ボク土における新規素材、PBATおよびPBSの各オリゴマーの分析手法の検討を行った。なお、低地土とは、主に河川周辺に分布しており、河川氾濫により堆積した土砂等が主な母材となっている。河川の氾濫によって堆積物が付加されることにより、土壌母材は常に新しい状態が保たれ土壌養分が豊富なことが多く、一般的には肥沃な土壌として知られる。主に水田に使われる。黒ボク土は、保水性や透水性が良く、ち密度(土の硬さ)が低く、耕起が容易なので他の土壌に比べて物理性は良好である。

化学性としては、活性アルミニウムを多量に含むことから土壌の有機物含量は高くなるが、植物養分として重要なリン酸の吸着力も高い傾向にあり、作物栽培に使うには工夫が必要となる。我が国の畑の約47%には黒ボク土が分布しているとされる。

2-2 複合化素材フィルムに対する酵素剤処理の効果の評価

前年度までと同様、実験室内で、試作フィルムに対して、農研機構が有する *Pseudozyma antarctica* (以下、*P. antarctica*) にて生産したエステル結合加水分解酵素 (以下、PaE) の水溶液 (以下、酵素剤) 処理を行った^{8、10、11、12)}。酵素剤は、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構生物系特定産業技術研究支援センターの委託事業「イノベーション創出強化研究推進事業」の委託研究「畑作の省力化に資する生分解性プラスチック分解酵素の製造技術と生分解性農業資材利用技術の高度化」において見いだされた成果を利用して作出した。第1章3-3で配合を設計して試作したフィルムを試料に用いて、一定温度下で酵素剤処理を行い、フィルムの分解性を酵素剤処理前後の重量変化によって評価した。供試した配合は、配合シリーズ1、配合シリーズ2、配合シリーズ3、および配合シリーズ4とした。

2-3 複合化素材フィルムの圃場での分解評価

本事業では新規素材を用いた生分解性マルチフィルムを展張した圃場で、複数の品目の野菜を栽培する実証試験を行ってきた。これらの試験では、野菜の品目ごとに異なる幅(1m前後)の畝の表面に、長さ数mから数十m程度にフィルムを展張して、数か月間にわたり野菜を栽培し、フィルムの耐久性を調査する。また、野菜収穫後、フィルムへ酵素剤を処理した後、圃場に埋設して土壌中でのフィルムの分解性を調査する。新たに開発した配合はこれらの試験の実績がないので、実証試験を滞りなく進めるために、前もってフィルムの展張作業上の特徴や酵素剤処理の効果を把握しておく予備的検討が必要である。そこで、農研機構の試験圃場にて作物の栽培は行わない試験を行った。この方法により、展張の期間中、フィルム表面はおおむね一様に、太陽光の紫外線、気温や湿度の変化、風雨の影響、および酵素剤処理の影響、土壌埋設後の土壌との接触を受けるので、試験期間中にフィルムの状態変化を詳細に観察し、分析用の試料を採集して分析する際に、フィルムの採集部位による違いを少なくすることができる。

昨年度までに、第1章3-3で作成した配合シリーズ1~3の試作フィルムについて、以下の処理を行って得た試料を解析した。

- i. 展張前：環境暴露無しの新製品状態
- ii. 展張後：太陽光、風雨、温度変化に暴露
- iii. 展張後に酵素剤処理後：展張による環境暴露に加えて酵素による分解促進
- iv. 展張時に埋設(最初から埋設)：一般的に、フィルムを畝に固定するためにフィルムの側面を土壤に埋設する。埋設による被覆を行った場所の分解挙動

本年度作成した配合シリーズ 4 の試作フィルムについては、更に下記の検討を加えた。

- v. 展張後(ii)、若しくは展張後酵素剤処理後(iii)に埋設：事前の各処理が埋設に対して与える影響

本年度使用した配合シリーズは、第 1 章に記載した R3-1~R3-5 に加え、旧年度の試作フィルムを比較対象とするために、配合シリーズ 1 の配合 e(配合シリーズ 2 の e-0 と同じ配合であり、本年度用いる際は名称を e-0 とした)と、配合シリーズ 3 の R2-5 を新たに試作した。展張用の機械であるマルチャーは使わず、人手による展張を行った。また、R3-1 に関しては実機製と試作機製を用意し、両者の比較を可能とした。

昨年度までに行った配合シリーズ 1 から 3 の圃場展張、酵素剤処理並びに試料最終回収のスケジュールと配置を示す(第 9 表、第 11~13 図)。配合シリーズ 1 は約 40 日間、昨年度に展張したのと同じ配合シリーズ 2 および 3 は約 60 日間観察した。

配合シリーズ 4 のフィルムの解析用の試料を得るために、各フィルムの圃場での展張は昨年度からのスケジュールと配置にのっとり圃場に展張を行った(第 10 表、第 14 図)。展張時の作業性を確認後、展張後約 60 日間観察し、その後酵素剤を各酵素剤処理区 iii に散布して翌日の様子を観察した後にフィルムを土壤中に埋設した。さらに本年度は、高耐久マルチフィルムの開発に沿った形で、新たに長期展張処理時の経時変化を確認する評価を加え、約 120 日後、180 日後に観察し、その後酵素剤処理する試験区を設けた。また、フィルムを展張せずに初めから土壤中に埋設する条件を経る試料は、昨年度まではフィルムを固定するために土壤で被覆する部分を「最初から埋設区」として利用していたが、採集できる面積が小さいという課題があった。そこで、本年度は、処理済みの試料を十分量得るために展張と同時に埋設する区を設けた。その埋設期間は約 160 日、240 日間に設定した。

回収したフィルム試料の分解程度の評価方法は、昨年度と同様に、試料の状況の目視や写真撮影画像による評価、および強度の変化の測定により行った。昨年度まで結果の検証に用いてきた地上からの写真撮影では、広く撮影するために位置を変えると

処理区の画像が変形するので都度補正が必要であり、その補正作業に伴って情報の精度が下がる問題があった。そこで、前述の「イノベーション創出強化研究推進事業」で条件設定を行った空撮用のドローンを利用した画像撮影方法を応用した。ドローンを用いてフィルム展張圃場のほぼ真上から高解像度の画像を十分な重ね合わせを考慮して複数枚撮影し、これら画像の合成によって得たより高解像度かつ変形がない画像は、補正を行わずに使用可能であった。この方法は、項目 4 の一部の圃場の撮影と試験結果の解析にも用いた。強度の評価は引張強度試験で行い、フィルムの展張方向に対して MD 方向、および TD 方向に引っ張り、その「引張力」（破断するまでの強度）と「柔軟性」（破断するまで伸びた長さ）の計測を行った。また回収したフィルムのポリマーの状況を解析するために、圃場から採集したフィルムから切り取った断片の試料全体をゲル浸透クロマトグラフィー（以下、GPC）で解析した。

また、本年度も令和元、2 年度に続いて各種の分析方法を使って生分解の過程の解析を試みた。生分解性の高分子が様々な要因で分解していく機構は様々な推定がなされているが、新規素材とそれを用いた試作品が、自然環境下で展張後の太陽光や降雨等による物理化学的な影響に伴う物性の変化、および酵素剤処理に伴ってどのような過程を経て分解に至るかは現時点では正確には知り得ていない。分解に伴って微細レベル、分子レベルで起こっている現象を様々な角度で分析し把握することは、今後、求める物性を持つ製品を得るために必要な新規の高分子素材やそれを用いた新規の複合化素材の配合を設計していくために、貴重な基盤情報となる。また、分析を進めた結果を更に深く解析し、特定の分析方法の結果と試料の物性の変化を関連付けることができれば、生分解性の素材や製品、栽培方法を新たに作り出していく過程で、素早く分解性を判断して開発の時間を短縮し労力を減らすことが可能となる。そこで引き続き圃場展張後に採取したフィルムの試料を用い、農研機構および三菱ケミカルにて以下の装置を用いた多角的な分析を行って、現象の把握と分析方法の評価を行った。

解析に用いた分析機器は、

フーリエ変換赤外分光光度計（以下、FT-IR）、

GPC、低分子領域 GPC、

走査型電子顕微鏡（以下、SEM）、

透過電子顕微鏡（以下、TEM）、

レーザー走査型顕微鏡（以下、LSM）、

走査型プローブ顕微鏡（以下、SPM）、

示差走査熱量測定（以下、DSC）

とした。

令和元、2年度に、i から iv それぞれのフィルム試料表面の様子を分析計測機器で解析した結果では、分析方法により検出感度が異なった。

まず、新規素材で作成したシートの酵素剤処理後の表面の状態を SPM で観察したところ、表面の小さな凹凸の深さの変化を計測することができた。この試料では、LSM による解析では顕著な違いとして示されなかったが、圃場での分解評価に見られる、埋設によって更に分解が進んだ結果生じるような、大きな凹凸の変化であれば計測可能と期待された。

次に、圃場での展張試験で採取した試作フィルムの試料を観察した。FT-IR では、展張時に土に埋設した部分、展張後、および展張後酵素剤処理によって、変化の程度が段階的に大きくなり、早期からフィルム表面のポリマーの分子鎖に変化が生じている様子が示された。FT-IR はポリマーの分子の状態を比較的簡便に把握でき、特に分解に関わる要素を追うことが期待される。しかし、精度を上げた状態で、圃場に展張した試料について単一の試料で複数の部位を測定したところ、部位の間で差が見られ、結果の評価に留意しなければならないことが判明した。SEM を使ったフィルム表面の観察では、展張前後で顕著な変化は検出できなかったが、試料の断面の観察により、フィルムが薄くなっていることが判明した。試料の切片を作製し、TEM を用いて観察することで、展張によって、試料の表面直下の内側に変化が生じていることも観察できた。

展張による環境暴露とともに、埋設もフィルムの表面に変化を与えた。SPM および LSM で、展張処理と埋設処理で表面の変化が起きていることが検出された。特に LSM では、その変化が、フィルムの配合によって異なっている現象が見られた。より詳細に LSM で表面の粗さを測定したところ、展張後に埋設を実施した試料は、展張後に即埋設した試料と比べて、フィルム面が荒れていることが確認された。SEM および TEM では、フィルム表面のひび割れや、表面近くの断面に構造の変化が観察された。SEM による表面観察では主にひび割れとフィルムから粒子が抜けた跡と思われる窪みが観察された。TEM によって各試料の断面を解析したところ、まず展張前は、ポリマーの分子が結晶構造 (crystal structure) と非晶構造 (amorphous structure) が層を成しているラメラ構造 (lamellar microstructure) が観察された。また写真上に白く写る成分と黒く写る成分の 2 種類のポリマー群が存在するように見えた。これは全ての試料の内部で観察された。展張時に埋設した 130 日後、および展張約 40 日後に 90 日間埋設したフィルムでも、同様に最表層にはラメラ構造が見えない構造と、その下部にラメラ構造が観察された。これらの観察結果から、いずれのフィルムでも、展張により最表面では加水分解が進んだと見られる。

また、GPC を用いることでポリマー全体の分子量とその変化を捉えることができる。令和元年度に用いた試料では、僅かであるが展張前と比較して展張後は分子量が低下した。低分子側 GPC による解析では、低分子のオリゴマーが展張によって減少しており、降雨等の影響と考えられた。

DSC では、ポリマーとしての熱的特性とその変化を評価することができるが、供試した試料では、熱的特性に大きな違いは見られなかった。

これらの結果から、配合シリーズ 1 において市販の生分解性マルチフィルムと同じ配合である配合 a と、新規素材を配合している配合 e の試作フィルムの挙動が同等であると結論できた。これまで用いた分析方法からはそれぞれの結果が得られ、素材が受けた刺激に影響された現象が現れていることが示唆されている。しかし、特定の分析方法の結果と試料の物性の変化を関連付けるには至らなかった。

以上のように令和 2 年度まではフィルムの各処理に対するポリマーの変化を大きく解析するために、フィルム全体を GPC、低分子量領域 GPC で解析し、フィルム表面を FT-IR で分析した。

GPC ではフィルムを構成するポリマーの分子量分布を計測することができる。取得したデータから様々な分子量値を算出することで、ポリマーの状態の推定を試みた。これまでに用いてきた分子量値の特徴は以下のとおり。

数平均分子量 (Mn) : 低分子量の存在に影響を受けやすい。

重量平均分子量 (Mw) : 高分子量の存在に影響を受けやすい。

平均分子量 (Mz) : Mw より更に高分子量の存在に影響を受けやすい。

ピークトップ分子量 (Mp) : 分子量分布のピークの頂点を示す。

分散 (Mw/Mn) : ポリマー分子の分散度を示す。ポリマー分子の均一性を示し、値が低いと分子量分布範囲が狭いことを示す。

GPC の解析条件は、ポリマーを構成する分子の分子量を評価する手法として一般的に用いられる条件下での分析法(通常法)で、上記の分子量値、および低分子量部分の割合を算出した。加えて、同じ試料を低分子量領域の分子量分布の分離能に重点を置いた「低分子量領域分析」条件で分析を行った。後者は、分子量分布形状から重合度合いが低く分子量が小さいオリゴマー状態の分子の存在を確認し、ポリマーの分解過程の理解に役立てることを想定して行った。

これらの GPC 分析における検出器は、RI (Refractive Index) と UV (Ultra Violet) の両方を用いた。ポリマー分析で一般的に用いられる RI 検出は、物質の屈折率の差を検

出し、溶液中に含まれる物質全体の分析を行うものである。一方、UV 検出では紫外吸光度を測定するため、溶液中内の紫外線を吸収する物質の分析を行うことができる。フィルムに芳香環を持つポリマーが配合されている場合は、芳香環による紫外線吸収を検出することができる。

FT-IR 分析では、各処理によるフィルム表面のポリマーの分子鎖の変化を計測できる。その分子鎖の検出ピーク波数から芳香族ポリエステル、若しくは脂肪族ポリエステルに分類して、分解により生じる分子鎖がフィルム表面に露出する割合の比が、分解のプロセスを考察する一助になると考えた。

GPC 通常分析の結果から展張処理や埋設処理で Mn は、RI 検出では大きく増大し、UV 検出では減少していたが、低分子量部分 (Log 分子量 3.5 未満) の割合の増減と関連付けられた。RI 検出では展張時には存在した低分子量部分が埋設処理によりほとんど検出できない程度に減少する等の結果から、土壌中で分解しやすい分子が存在していたと考えられた。また、UV 検出では展張処理、展張後埋設処理の工程が重ねられることに伴い、順次低分子量部分の成分が上乘せして増えていた。最初から埋設したフィルムに比べて、展張後に埋設した方が低分子の割合が多かった。

新規素材配合が中心となったシリーズ 3 ではフィルム種ごとに見られる分子量値の変動に、素材の配合による違いが確認されるようになり、それぞれのフィルムの分解の機作が異なっていることを示唆していた。この違いを利用して確認するためにシリーズ 4 は配合の違いによる分析値の変化が確認できる組合せを設定した。

GPC 低分子量領域分析でも各処理によってフィルム種による検出ピークの違いが確認され、増減する物質の分子量予測の考察が可能になってきた。

FT-IR 分析ではどのフィルムでも展張処理により芳香族ポリエステル鎖の割合が大きく減少した。一方で埋設処理ではその初期においてフィルムの配合によりその挙動、特に芳香族ポリエステルの割合が変化していた。しかし、その後継続した埋設によって全てのフィルムで芳香族ポリエステル鎖は減少傾向であった。また、脂肪族ポリエステル鎖の検出は各配合のフィルムで挙動が異なった。

以上のように、表面構造の変化だけでなく各処理による含有分子の増減もある程度考察可能な程度にデータを取得できる手法が確立されてきたので、本年度はより適切な試料の獲得と分析方法の調整を図りながら各種試料の分析を継続し、圃場試験の結果などを加味した総合的な考察を行った。

3. 結果および考察

3-1 土壌中での生分解性評価

3-1-1 分解で生じる CO₂ 量評価システムの構築

土壌中における生分解性プラスチックの分解に関する情報を広く偏りなく、かつ効率的に得るために、システムティックレビュー手法を適応した。令和元年 10 月まで Web of Science でのキーワード検索で 322 編がヒットし、うち 80 編をレビューに用い、その出版年別の論文数および報告される土壌の特性をまとめた(第 15 図)。近年論文数は増加傾向にあるが、土壌中での生分解性評価に重要な土壌特性に関する記載の欠落が多く、記述無しが 3 割以上であった。土壌特性の情報が不十分であることが、分解性と土壌特性との関係解析が進まない理由の一つであることが分かった。

一方で、既存文献 80 編で報告された土壌中での生分解性プラスチックの分解評価に用いた手法は、

- ①残存面積や表面分析
- ②CO₂ 測定
- ③分光法
- ④重量減少

の 4 種類に分類される(第 16 図)。その内訳は、①と④合わせて 78% を占め、生分解後の最終産物である②CO₂ 測定を用いた研究例は 1 割未満であり、CO₂ 測定に基づく分解評価の難しさがうかがわれた。②CO₂ 測定手法を用いた研究例の詳細を見ると、人工的な土壌を供試土壌に用いた研究例が多く、供試試料すなわち生分解性プラスチックと土壌の比率も様々で、試験期間も 14 日~2 年間と大きく異なっていた(第 11 表)。生分解性素材の分解性を、より圃場環境に近い条件で正確かつ安定して評価する CO₂ 測定方法の開発が急務であることが、改めて明らかとなった。

すなわち、生分解性素材の土壌中での分解を評価するためには、基本的に素材が土壌の微生物によって分解される際に生じる CO₂ の発生量を検出する。しかし、評価は数週間から数か月単位の長期にわたる場合があり、また僅かな気体の組成変化の測定を安定して行うことは容易でない。一方、密閉した容器の中では、土壌に埋設した生分解性素材の分解に伴って発生する CO₂ 濃度が上昇し、その中の上昇量を測定することで分解速度を評価できる。そこで本事業では、この密閉法を応用して、CO₂ 濃度上昇の検出を高精度でかつ効率良く行うシステムを構築した。これは高感度で連続的な測定が可能な赤外線吸収スペクトル検出器で、気密状態で保てるチャンバー内に設置した土壌と生分解性素材を入れた容器の CO₂ を測定する装置である。

令和 2 年度は、本システムを用いて、検出精度が保証できる試料の投入量の標準条件を決定するための予備実験を行い、必要に応じ改良を重ねた。続いて、新規素材の土壌中の生分解の確認および化学構造が異なるポリマーの生分解性の差を明らかにするため、粉体化した PBS、PBAT、新規素材 A、B、および C の 5 種類のポリマー試料について、土壌中での分解を調査した。これら測定用の粉体試料は長辺が 300~700 μm になるように調製した。供試する畑土壌は、目開き 2 mm の篩を通して粒径をそろえて準備した。乾燥重量 60g 相当の土壌を容器に入れ、0.3g の粉体試料を埋設し、水分を一定の水準に保って 25°C で保持した。1 試験区の試験は各 4 反復とした。これらの試料の分解に伴って発生する CO_2 の量を定期的に測定することで、土壌中で各試料の分解性と試料間の分解性の差を評価した(第 17 図)。その結果、5 種類の素材のうち PBS が最も分解が早く、PBAT がそれに続き、新規素材 A が 3 番目であった。新規素材 B と C は分解がより遅いが、土壌のみの対照区と有意差が認められ、生分解されていることが確認できた(第 18 図)。

これらの結果により、令和元年度に基本プロセスを開発した計測システムによって土壌中の分解性を精度良く評価できることが確認できた。令和 2 年度は、より多くの試料を継続的かつ正確に計測できるように装置の改良を進めた。

令和 3 年度はこの装置の改良を終え、効率化された測定方法を確立し、素材の土壌中での生分解性を安定的に評価し、新規素材および新規フィルムの継続的開発の基盤を完成させることを目的とした。すなわち、新規素材 A を配合した配合シリーズ 4 の R3-1~R3-5 のフィルムの土壌中での分解を CO_2 測定によって評価し、フィルムへの添加剤 X の添加の有無による分解抑制効果を明らかにし、新規素材の配合比決定に寄与した(第 19 図)。具体的には、供試する畑土壌は令和 2 年度と同じ場所で採取したものをを用いた。供試フィルムは令和 3 年度配合の 5 種類のフィルム以外に、確認のため配合 e シリーズの e-0 および配合 R2 シリーズの R2-5 も用いた。乾燥重量 60g 相当の土壌を容器に入れ、1 cm 角に切断した 0.3g のフィルムを埋設し、水分を一定の水準に保って 25°C で保持した。1 試験区の試験は各 4 反復とした。これらの試料の分解に伴って発生する CO_2 の量を定期的に測定することで、土壌中における各試料の分解性と試料間の分解性の差を評価した(第 19 図)。その結果、7 種類のフィルムのうち添加剤 X を配合しないフィルムである e-0 と R3-5 が最も分解が早く、それに対して添加剤 X を配合した 5 種類のフィルムは有意に分解が遅くなり、添加剤 X 配合による分解抑制効果を確認できた。添加剤 X 配合フィルムは分解がより遅いが、土壌のみの対照区と有意差が認められ、生分解されていることも確認できた(第 19 図)。

3-1-2 土壌中でのプラスチックの分解過程の追跡

生分解性素材を構成する化合物が、素材の分解過程で環境中にどのように移行していくかを調べることは、分解機構を理解するためだけでなく、分解物の環境への影響を理解する上で今後重要になると予想される。物質の移行の測定の原理は、ポリマーが土壌中で微生物によって分解される過程で、 ^{13}C 標識した化合物が、標識された CO_2 ($^{13}\text{C} - \text{CO}_2$ 、第 20 図でマゼンタ色および下線で表示) にまで無機化されると同時に、土壌中では、ポリマー中の別の化合物や土壌中の有機物が分解されて、非標識 CO_2 (炭素は ^{12}C 、青色で表示) が放出される (第 20 図)。放出される CO_2 の $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比を検出することで、ポリマー内部に取り込まれている標識された化合物の分解と移行を捉えることができる。各化合物を個別に標識したポリマーを使った実験を行い、ポリマーを構成する化合物がそれぞれ完全に分解されることを経時的に追跡できれば、例えば、第 20 図の表現では、化合物 $\Delta > \bigcirc > \square$ の順で分解速度が高いことが明らかとなる。

令和 2 年度は、令和元年度に設計・製作した土壌埋設試験用のチャンバーを用い、 ^{13}C 標識したポリマーを構成する化合物を実験室に準備した土壌中に埋設し、放出される CO_2 の ^{12}C と ^{13}C を測定し、 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比を算出することにより実験手法の確認を行った。また、 ^{13}C で標識されたポリマーを作成するために、標識化合物の最適な $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 混合比の見積り推算を行った。

実験手法の確認については、当初土壌埋設試験用のチャンバーを密封するために用いる水が CO_2 を吸収する現象が見られて精度に影響したが、酸性に調整した緩衝液を用いることで安定した測定が可能となった。また CO_2 放出速度から土壌培養時の土壌：ポリマー量および混合比を決定した。 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 混合比の見積りについては、まずポリマーを構成する 2 種類の化合物をそれぞれ単独で土壌に添加することにより、化合物単独の分解速度が算出できた。測定精度は分解速度に依存するため、分解速度に見合った $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 混合比を算出した。この結果を基に三菱ケミカルの重合試験装置にて最適な $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 標識混合比を持つポリマーを合成した。

令和 3 年度は、 ^{13}C で標識を施した化合物 Δ と ^{13}C を加えない化合物 \square の配合比が異なる、 $\Delta \bigcirc \square$ を原料に用いた 2 種類のポリマーを数回作成し、土壌中での分解に伴って生成する $^{13}\text{CO}_2$ を経時的に測定することで化合物 Δ の分解評価を行った。具体的には、供試する畑土壌は第 2 章 3-1-1 と同様のものを用いた。乾燥重量 20g 相当の土壌を容器に入れ、0.1g のポリマー粉体を土壌に混和した。 ^{13}C で標識を施したポリマーについては、 ^{13}C 濃度が 6% になるよう調整した。水分を一定の水準に保って 25°C で保持した。1 試験区の試験は各 3 反復とした。これらの試料の分解に伴って発生する $^{13}\text{CO}_2$ の量を定期的に測定することで、化合物 Δ/\square の配合比が土壌中での化合物 Δ の分解性に与え

る影響を評価した。その結果、△の分解速度は△/□の配合比によって大きく影響を受けることが確認できた(第 21 図)。

3-1-3 土壌中の生分解性素材の分解中間体の分析手法の検討

各土壌の乾土重 8g に対してジクロロメタン(dichloromethane、 CH_2Cl_2)に溶解した各オリゴマー8mg を添加し、ジクロロメタンの揮発後、1 晩 4°C 以下でインキュベーションを行った。その後、クロロホルム：メタノール=8：2 の混合溶媒 40 mL にて浸透抽出 1 時間、引き続き超音波抽出 10 分を行い、45 分間氷上で静置した。この土壌抽出液と土壌固形物を 4°C 下の遠心分離で分け、ろ過後、土壌抽出液の混合溶媒をロータリーエバポレーターで揮発させた。浸透抽出からロータリーエバポレーターまでの工程を 3 回繰り返す、乾固物をクロロホルム 2mL に溶解・定容し、オリゴマー抽出液とした。その 2mL のうち 750 μL を核磁気共鳴分析装置(以下、NMR)分析用のサンプルとして再乾固した。 $^1\text{H-NMR}$ 法を用いて、乾固した抽出物を NMR 用重水素クロロホルム(CDCl_3)に溶解し、 CDCl_3 の特異的なケミカルシフトの積分値を 1 としたときの各オリゴマー由来のケミカルシフトの積分値から抽出オリゴマーの相対的な抽出率を算出した。

その結果、低地土では新規素材および PBAT オリゴマーはほぼ 100%回収できたのに対し、PBS オリゴマーは 50%程度の抽出率であった(第 22 図)。一方、黒ボク土では全てのオリゴマーにおいて 20~25%しか抽出できなかった。しかし、土壌中の各オリゴマーを抽出、分析でき、本手法で生分解性資材の土壌分解をモニタリングできる可能性が示唆された。

3-2 複合化素材フィルムに対する酵素剤処理の効果の評価

新規の生分解性マルチフィルムを使用後に速やかに分解する実用的な酵素剤の処理方法や、新規素材およびこれを用いたフィルムの開発を支援するため、新規素材 3 種のシート、複数の素材を配合した複合化素材のインフレーション成形試作フィルムに対して実験室で酵素剤処理を行い、その重量変化を測定し分解速度を算出して各配合間で比較を行った。昨年度までに新規素材 3 種のシート、配合シリーズ 1、2 および 3 のフィルムの酵素剤による分解性を、本年度は第 1 章 3-3 で試作した配合シリーズ 4 の新規素材利用のフィルムへの酵素剤の作用を、それぞれ調査した(第 12、13 表)。

昨年度までに、新規の生分解性マルチフィルムを使用後に速やかに分解する実用的な酵素剤の処理方法や、新規素材およびこれを用いたフィルムの開発を支援するため、初めに、新規素材シートへの PaE の作用を検証した(第 12 表)。新規素材 A は酵素剤処理により比較的速やかに分解し、重量変化を示した。一方、新規素材 B、C においては

分解による顕著な重量変化は認められなかった。これらを踏まえ新規素材 A は、実施項目 1 で、試作フィルムの基礎素材として選定された。複合化素材を用いた配合シリーズ 1 の試作フィルムを実験室で酵素剤処理し、その重量変化を測定した。酵素剤処理による分解促進において重量変化と強度変化は同様の傾向で現れた。配合品 e は市販品イと同様の挙動を示したので、この配合を 3 年間の試験の基準として利用することとした。

配合シリーズ 2 および 3 のフィルムは、設計時に想定した耐酵素分解と同じ順番の分解速度を示した。供試したフィルムの中で対照として用いた配合シリーズ 1 の配合 e のフィルム (5.0mg/hr)、配合シリーズ 2 の e-0 黒フィルム (5.7mg/hr)、および配合シリーズ 3 の製造時に対照として試作した e-0_G フィルム (6.0mg/hr) は、いずれも同じ配合であるが、実機と試作機という異なる方法でフィルムに成形した。このように配合が同じであれば、異なる成形方法であっても、また試験の時期が異なっても、酵素剤処理でいずれもほぼ同じ分解速度を示した。この結果から、フィルムの酵素剤処理に対する分解性には再現性があることが確認された。

配合シリーズ 2 (e シリーズ) のフィルムの分解速度は、分解が早い順に、黒いフィルムでは、 $e-1 > e-0 > e-2$ であり、透明のフィルムでは $e-0 > e-2$ の順番であった。

配合シリーズ 3 (R2 シリーズ) のフィルムの分解速度は、分解が早い順に、 $e-0$ (対照) $> R2-2 > R2-1 > R2-3 > R2-5 > R2-4$ であった。

配合シリーズ 4 のフィルムの場合、分解が早い順に、 $e-0$ (シリーズ 1、2 対照) $> R3-5 > R2-5$ (シリーズ 3 対照) $> R3-1 \doteq R3-1$ 実機 $\doteq R3-4 > R3-2 > R3-3$ であった。配合設計時に想定した耐酵素分解能と同じ順番の分解速度を示した (第 13 表)。R2-5 (2.2mg/hr; 対照) フィルムと R3-1 フィルム (1.3mg/hr) の結果から、新規樹脂 A の割合を増やすと酵素剤処理に対する分解量が減ることが分かった。同じ配合であるが実機と試作機という異なる方法でフィルムに成形した R3-1 フィルム (1.3mg/hr) と R3-1 の実機フィルム (1.3mg/hr) は、酵素剤処理によって同様の分解速度を示していた。また、比較対象に用いた e-0 フィルム (5.7mg/hr)、R2-5 フィルム (2.2mg/hr) の結果は、昨年度評価した結果とほぼ同じであった。本事業実施期間を通じて行った複数の評価実験から、作製時期や試験の時期が異なっても、酵素剤処理による分解速度は再現性が高いことが確認された。

3-3 複合化素材フィルムの圃場での分解評価

3-3-1 配合シリーズ 1、2、3 の圃場環境暴露済試料の強度評価試験結果の詳細解析

配合の違いによるフィルムの強度の違いを詳細に考察するために、昨年度までに入手した各配合シリーズの強度試験データを用いて、MD(縦)方向とTD(横)方向の中央値データの散布図を作り再解析した。強度試験の結果からは展張方向に対する向き、すなわち縦および横方向に対して「引張力」(破断するまでの強度)と「柔軟性」(破断するまで伸びた長さ)のそれぞれ二つのデータが入手できる。それぞれの値が低下する現象を劣化とし、フィルム種ごとの劣化程度の違いを明確にするために縦方向と横方向の中央値データを用いた散布図を作成した(第23~40図)。縦軸が横方向のデータ、横軸が縦方向のデータを示しており、マーカーの形と色で各処理の区別を示した。フィルム名称に続けて括弧内で示した数字は、各図中で割り振ったフィルム種の番号である。

3-3-1(1) 配合シリーズ1

配合シリーズ1は配合品5種類と市販品2種類を評価したが未使用(▲:青)では「引張力」、「柔軟性」とも市販品イ(7)が高い強度を持ちバランスがとれていた(第23、24図)。

展張処理(■:橙)で「柔軟性」の評価ではc(3)と市販品イ(7)は変化が少ないが他のフィルムは縦方向において劣化が進んだ。一方、「引張力」ではa(1)、c(3)、d(4)で強度が上昇した。e(5)は変化が少なくb(2)市販品ア(6)、市販品イ(7)が大きく劣化が進んだ。

酵素剤処理(●:灰)により「柔軟性」は全てのフィルムは大きく劣化し、c(3)以外はほぼ全て同様の値となった。「引張力」も大きく劣化したがその中でc(3)とe(5)は比較的強度を保っていた(第24図)。

埋設処理(◆:紫)により「柔軟性」はc(3)以外大きく劣化した(第25図)。一方、展張後に埋設する(■:橙)とe(5)市販品ア(6)以外は強度を維持していたが、展張後酵素剤処理して埋設する(●:灰)と市販品イ以外は最初から埋設したものと同程度に劣化した。「引張力」ではc(3)、e(5)以外は大きく劣化した(第26図)。展張処理後の埋設(■:橙)ではb(2)、市販品ア(6)以外は強度を維持していたが、展張後酵素剤処理して埋設する(●:灰)とe(5)市販品イ(7)以外は最初から埋設したもの(◆:紫)と同程度に劣化した。また、c(3)は縦方向のみ強度を維持していた。

以上により添加剤Xを含むc(3)が他のフィルムに比べて各処理に対して劣化を抑制する効果があることが示唆された。また、新規素材を含むe(5)は各処理に対してa(1)と同程度の強度を持ち、酵素剤処理や埋設処理が劣化を進めることが確認できた。

3-3-1(2) 配合シリーズ 2

配合シリーズ 2 は実機で製作した配合品 3 種類と市販品 1 種類を評価し、未使用(▲：青)では「柔軟性」は市販品イ以外が縦方向の強度が半分以下と極端に低くなった(第 27 図)。「引張力」では、e-2(3)以外はバランスがとれていた(第 28 図)。

展張処理(■：橙)は、市販品イ(4)以外は「柔軟性」の評価で急速に劣化したことが示された。一方、「引張力」では e-2(3)以外は強度を維持していた。

酵素剤処理(●：灰)により「柔軟性」は全てのフィルムで大きく劣化し、市販品イ(4)と e-1(2)以外は埋設処理した場合と同様の値となった(第 27 図)。「引張力」も大きく劣化したが。その中で e-2(3)以外は比較的強度を保っていた(第 28 図)。

埋設処理(◆：緑、紫)により「柔軟性」は大きく劣化したがその中で市販品イ(4)と e-2(3)が強度を保ち埋設期間を延ばすと更に劣化が進み全て同様の値へと下がった(第 29 図)。また、展張後に埋設した場合(■：赤、黄土色)と展張後酵素剤処理して埋設した場合(●：紺、濃灰)は最初から埋設したものと同程度に劣化が見られた。埋設期間を延ばしても変化はなかった。「引張力」は大きく劣化し期間を延ばしてもほとんど変化しなかった(第 30 図)。展張処理後の埋設(■：赤、黄土色)と展張後酵素剤処理して埋設する(●：紺、濃灰)と e-1(2)、e-2(3)が強度を維持しており埋設期間の延長で劣化が進行した。e-1(2)以外は最初から埋設したものの(◆：緑、空色)より強度を維持していた。

実機で作製した本シリーズは市販品イに比べて展張および展張酵素剤処理に対して低い強度しか示さなかったが、埋設処理に関しては同様の強度変化を示していた。特に試験開始時直ちに埋設すると「柔軟性」、「引張力」とも大きく劣化が進むが、展張処理を事前に行った場合には「引張力」が維持され、埋設期間延長で e-0(1)が大きく劣化することが明らかになった。

3-3-1(3) 配合シリーズ 3

配合シリーズ 3 は配合品 6 種類を評価し、未使用(▲：青)では「柔軟性」で配合シリーズ 2 の e-0 配合の試作機作製フィルムである e-0_C(6)が実機製作フィルムと同様に、横方向の強度が縦方向の半分以下と 2 方向で強度が偏っていた(第 31 図)。「引張力」では e-0_C(6)が高い強度を持ちバランスがとれていた(第 32 図)。

展張処理(■：橙)で「柔軟性」の評価では R2-1(1)と R2-5(5)は余り変化しないが他のフィルムは劣化が進んだ。一方、「引張力」でも R2-1(1)と R2-5(5)で強度を維持していたが他のフィルムは劣化が進んだ。

酵素剤処理(●：灰)により「柔軟性」は R2-2(2)と R2-5(5)以外は大きく劣化した。「引張力」も R2-3(3)と R2-4(4)以外は劣化が進んだが、R2-5(5)と e-0_C(6)は比較的強度を保った。

埋設処理(◆：緑、紫)により「柔軟性」は R2-5(5)以外大きく劣化した(第 33 図)。「引張力」は R2-5(5)と e-0_C(6)が強度を維持した(第 34 図)。埋設期間を延ばすと回収できたフィルム試料が減ったため評価できたのは R2-5(5)と e-0_C(6)のみであった。R2-5(5)は「柔軟性」では劣化が進行したが「引張力」では強度が上昇した。e-0_C(6)は「柔軟性」は変化なく、「引張力」は縦方向の強度が上昇した。一方、展張後に埋設した場合(■：赤、黄土色)と展張後酵素剤処理した場合(●：紺、濃灰)は劣化の進行が早く、回収できたフィルム試料が僅かとなり評価できたのは e-0_C(6)のみであった。「柔軟性」では最初から埋設した場合(◆：緑、紫)とほとんど値が変わらなかった。「引張力」では事前に酵素剤処理した区(●：紺、濃灰)が劣化の程度が大きく最初から埋設したものと同様の値となっており、期間の延長で劣化は進んだ。

3-3-2 配合シリーズ 4 の圃場環境暴露済試料の強度評価試験結果の詳細解析

展張作業では、フィルムによって作業性に違いは認められなかった。前述のように本年度は長期展張処理時の経時変化を確認するための試験区を設けたが、長期展張期間中に劣化の進行により畝上でフィルムが断裂、飛散してしまい試料が回収できない試験区があった。さらに、長期展張後の酵素剤処理に対する反応の調査も予定していたが、同様に、酵素剤処理が行えなかった試験区があった。

空撮ドローンにより撮影した画像を圃場全体図として再構成した。その画像を確認すると展張 2 か月後ではいずれの配合フィルムでも穴や裂けは確認できなかった。一方で酵素剤処理後翌日には各フィルムにフィルム種類ごとに様子の異なった穴や裂けが観察された。処理区ごとに取得した画像を分割して画像処理を行い、解析を行った。目視からの情報を反映する解析パラメータ(穴の数、穴の面積、裂け方向等)を用いて数値化を行った。この評価はフィルムの劣化が進んで強度試験評価用の試料が取得できない場合、特に埋設処理の試験区に有用と考えるが、強度試験の劣化指標との関連付けまでには至らなかった。情報を蓄積するため引き続き解析件数を増やして検討を継続する必要があると思われた。

3-3-2(1) 回収試料の強度試験

展張期間の進行に伴う「柔軟性」の推移を引張強度によって示した(第 35 図)。以下の文章のフィルム種に続いて括弧内に記載した数字は、図中のフィルムの種類を表す。展張 63 日の処理(■: 橙)では、図中の黄色矢印が指し示すように e-0(1)と R3-5(7)が両方向とも大きく劣化していた。両フィルム以外は図中に赤点線で囲んだように強度は維持した。e-0(1)と R3-5(7)以外は添加剤 X を含んでいることから、添加剤 X は、展張処理の劣化防止に有効であることが示唆された。また R3-1_実機(2)は同一配合で作られている R3-1(3)よりも横方向の柔軟性を 1.5 倍維持していた。120 日の処理(■: 黄)ではほとんどのフィルムがグラフの左下に集束しており、柔軟性を失った。添加剤 X 含有の有無による違いが見られないことから、添加剤 X による劣化防止効果はこの時期に至っては有効でないと考えられた。63 日の処理で他のフィルムに比べて大きな劣化が確認された e-0(1)と R3-5(7)は 120 日では畝表面で大きくフィルムが開裂していたことから劣化が先行していたことが確認できた。さらに 185 日の処理(■: 黄緑)まで展張期間を延長しても、120 日展張処理と測定値が変わらず、この測定方法では、縦横両方向とも劣化の進行が確認できなかった。

展張期間の進行に伴う「引張力」の推移を引張強度によって示した(第 36 図)。展張 63 日の処理(■: 橙)で両方向にて大きく劣化が進んだが、供試したフィルムの中で R3-1_実機(2)は比較的強度を維持しておりその後の 120 日の処理(■: 黄)、185 日の処理(■: 黄緑)でも他のフィルムの劣化が進行する中で比較的高い値を示していた。同一配合で作られている試作フィルム R3-1(3)に比べて実機製は縦方向の強度を 1.5 倍程度維持していた。この違いには、フィルム製造工程の違いによる分子の配向程度の違いが現れていると思われた。

展張 63 日、120 日、および 185 日経過後に酵素剤処理した試料について、「柔軟性」を測定した(第 37 図)。第 35 図の展張 63 日後のフィルムの「柔軟性」の結果と比較すると、第 37 図に示した展張 63 日後の酵素剤処理(●: 灰)では図中に赤点線囲みで示すように、いずれのフィルムも酵素剤処理により劣化が進行した。120 日後(●: 水色)、および 185 日後の処理では劣化が大きく進行しほとんど左下 1 点に集束してしまった。185 日後の処理(●: 紺)では R3-4(6)、R2-5(8)の 2 種類しか評価できなかったが、両者はある程度のフィルム形状をもって回収できた。この結果は、未展張のフィルムの酵素浸漬処理において、添加剤 X の配合が酵素剤処理に耐性を示した結果と異なった(第 13 表)。

展張 63 日、120 日、および 185 日経過後に酵素剤処理した試料について、「引張力」を測定した(第 38 図)。展張 63 日後の酵素剤処理(●: 灰)では PLA を含有する e-0(1)、

R3-2(4)が強度を維持していたが、ほかにも PLA 含有フィルムは存在するので関連は必ずしも明確ではなかった。展張 120 日後の処理(●：水色)では、図中に黄色矢印で示したように PLA を含有している e-0(1)、R3-2(4)、R3-5(7)全てが強度を維持していた。特に e-0(1)、R3-2(4)は 63 日後処理のそれとほとんど値が変化しなかった。以上により PLA を配合すると展張後に酵素剤処理を行っても強度を維持する効果があると示唆された。一方、63 日後の処理(●：灰)と 120 日後の処理(●：水色)の結果で「引張力」では縦方向は変化が少なく横方向に劣化の進行が確認できた。同一配合で作られている R3-1_実機(2)と R3-1(3)は酵素剤処理においても R3-1_実機(2)の方が高い強度を維持していた。185 日後の処理(●：紺)では R3-4(6)、R2-5(8)の 2 種類のみの評価となったが、R2-5(8)の強度が上昇した理由は不明である。長期展張中には畝の上にあるフィルムに裂けが生じたため、裂けた部分に少量の土を乗せるなどの方法でフィルムの配置が変わらないように修復して試験を継続した。しかし、その方法では畝状の場所によって展張の様々な条件が同一に保てず不均一になり、強度変化の解析にはふさわしくなかった可能性があると考えた。

未展張のフィルムを 120 日間埋設処理した試料の「柔軟性」の変化を測定した(第 39 図)。(◆：緑)は添加剤 X を含まない e-0(1)と R3-5(7)が両方向とも大きく劣化していた以外は、未使用(▲：青)の値の周辺にとどまり、変化が少なかった。

未展張のフィルムを 120 日間埋設処理した試料の「引張力」の変化を測定した(第 40 図)。添加剤 X 含有の有無で劣化の進行が異なり、添加剤を含むフィルムでは強度が維持されている傾向が確認された。また、他のフィルムの評価値の挙動で埋設処理(◆：緑)により；

強度が低下するもの：R3-1(3)、R3-2(4)

上昇するもの：R3-4(6)と R2-5(8)

縦方向のみ低下して散布図上で平行移動しているもの：R3-1_実機(2)、R3-3(5)が確認された。この傾向は第 39 図に示した「柔軟性」の評価でもほぼ同様の現象が確認された。これらの結果から、添加剤 X は埋設処理に対して「柔軟性」と「引張力」の両方に劣化抑制効果があることが示唆された。また、同じ配合で添加剤 X の量の多い R3-3(5)の方が R3-1(3)より強度が高いことから、添加量の増加で効力増進が期待できた。R3-1(3)と R3-4(6)の比較により新規素材の含有量から考察すると、新素材量を増やした方が埋設処理には強度を維持できることも推察された。一方で、R3-1(3)と R3-2(4)の比較により PLA の含有の有無では顕著な差は確認できなかった。

3-3-2(2) 回収試料の機器分析

試験開始時点から 120 日間埋設処理したフィルムを GPC 通常分析法にて分析した(第 41 図)。ポリマー全体を観察できる RI 検出では、添加剤 X を含まない e-0 と R3-5 が低分子量分子の変動に影響される Mn の変化が小さい若しくはほとんどない一方、高分子量の変動に影響される Mz の値が減少していた。本データを基に分子量 Log3.5 未満の低分子量部分の割合を算出した(第 42 図)。e-0 と R3-5 では、埋設処理により低分子量部分の割合が増えており、他のフィルムでは逆に減少したことも判明した。UV 検出では Mz は同様の变化であるが Mn では大きく値を減らしており、また低分子量部分の割合も値を増やしていた。さらにはこの両者は未使用状態の Mz の値が小さいことから、添加剤 X によりポリマーの分子量が高分子量側に遷移していることが示唆された。

GPC 通常分析にて、展張処理、展張後酵素剤処理による変化を 2 か月、4 か月の展張期間の異なる試料を用いて、展張期間が延長された効果を含めて調査した(第 43 図)。フィルムは配合の違いを確認できる組合せである R3-1、R3-2、R3-5 を選択した。Mn の変化を確認すると、RI 検出では 2 か月処理では余り差が出なかったが、4 か月の展張処理で大きく値を減らした。一方で酵素剤処理後に未使用状態の程度に値が回復した。UV 検出では展張処理により 2 か月、4 か月で順次値が低下しており、4 か月後の酵素剤処理での値の戻り方が異なっていた。低分子量部分の割合の変動から考察すると、4 か月間展張した場合、UV で検出される低分子が産生されるが、酵素剤処理をきっかけに一気に消失してしまったと考えられた(第 44 図)。この原因として、4 か月目の酵素剤処理から回収までの間に降雨があったため、酵素剤処理で低分子化されたフィルム表面上の物質が、雨水に溶出して失われた可能性が考えられる。以上のように令和 3 年度の試験では、処理期間を長く設定して検討を行うことによって、これまでに捉えられなかった種々の変化を確認することができた。

本年度の検討で配合シリーズ 4 の圃場への展張処理後、展張後酵素剤処理、埋設処理後に回収したフィルム試料の強度フィルムの種類によって、各処理に対する強度劣化の様子に一定の傾向があり、それが配合される物質により一定の傾向を見いだした。令和 4 年 1 月の時点で、配合シリーズ 4 を試験開始時点から 244 日埋設した試料、および 63 日展張後/展張酵素剤処理後に 181 日埋設した試料を回収した。回収時のフィルムの状態の目視確認では未展張のフィルムを 244 日埋設処理したフィルムでは、いずれもフィルム形状を維持している一方、展張処理、展張後酵素剤処理を行ったフィルムは土壌中で分解し穴や裂けが発生して網目状になるほど崩壊していた。同時に圃場に展張した市販品イは、試験開始時点から 244 日埋設したフィルムは網目状に崩壊していたが、展張後に埋設したフィルムは形状を保ったという、シリーズ 4 とは反対

の結果となった。シリーズ 4 は新規素材 A をベースに配合しているため、その性質が現れていると思われた。また、配合の種類により生じた裂けや穴の形状が縦方向や横方向の違いにあることが確認された。埋設処理後に分解が進んでいく過程は、野菜の生産で栽培の後に生分解性マルチフィルムを土壤に鋤込んだ後の断片の変化を模倣した状態に当たり、生分解性プラスチックの分解機能の発揮が最も期待される場面である。

3-3-3 配合シリーズの圃場での分解評価まとめ

本事業では、3 年間に系統立てて四つのシリーズの配合フィルムを作製し評価を行ってきた結果、配合の違いが強度劣化に対して与える影響が示された。また、「展張処理」、「展張後酵素剤処理」、「埋設処理」といった各種の処理もフィルム強度の変化に与える影響が異なり、これら処理の影響とフィルムの配合の違いが加味されて様々な挙動を与えることも明らかになった。

引張強度試験においては「柔軟性」の劣化が先に進行して検出されるが添加剤 X によりある程度強度を維持できることが分かってきた。また今回採用した新規素材 A は市販品にベースとして使用されている素材と展張性、展張処理に対する耐性、さらには酵素剤処理による分解性で遜色のない結果を示しており、配合の工夫次第でより適した性質を持つフィルムを作製できる可能性を示していた。特に埋設処理に対する耐性は、条件によって市販品を上回る性質を示すことが確認された。

圃場での試験後に回収した試料の機器分析においては、2 か月程度の処理で表面上の変化を追うことはできるが回収試料表面の状態が必ずしも一律ではないため測定位置により結果の違いがあった。その差が処理による差を上回る場合があることがあり、結果の判断が難しいことも分かった。GPC 分析等のフィルム全体を利用する分析では、表面のみ変化がある場合には、変化量としては小さくなってしまいフィルム種差、処理の差が検出しにくくなっていた。この点については、本年度の、期間を延ばした処理に対する評価を加味することで 4 か月程度の展張を行えば変化も大きく差を認識することも明らかとなった。またその差は、分解物の種類の違いによる差より、量の差が支配的な要因であった。

今回の事業において配合フィルムの強度評価に利用できる項目やその実施手順について一定の方向性を示すことができた。今後も今回得られた方法を利用して、生分解性マルチフィルムを始めとする各種の生分解性資材の開発や実用場面での課題解決に活用していく。

3-3-4 コスト試算

長期耐久性を意図した代表的な配合設計で、各素材のコスト推算値などを基にコストの比較を行ったところ、従来の植物由来原料を用いた生分解性素材を主に配合した設計に比べ、2~4%と僅かではあるがコスト低減となると算出された。この値は、例えば汎用マルチフィルムに用いられる PE 製資材の約 2.6 倍に当たる。目標としている PE 比 2 倍に向け、他の要素も含めた検討を続ける。例えば、3-2 で示した素材のコスト低減が可能となれば、従来の植物由来原料使用の生分解性素材を主に配合した設計から約 15~20%のコスト削減となり、PE 製資材の 2.2~2.3 倍の値となる。

第3章 生分解性プラスチック分解酵素の生産に関わる基礎的情報の収集

1. 検討の概要

酵素剤を処理することによって、使用後のフィルムなど資材の分解を促進させる技術を広く普及させるためには、まず酵素剤を大量かつ安価に供給することが求められる。そのための最も効果的なアプローチの一つが、酵素をより効率良く生産できるように、本事業で用いる酵素を生産する微生物である *P. antarctica* を改良することである。

微生物による酵素の生産能力を高める方法として参考になるのは、広く酵素生産に用いられている麹菌を始めとした子囊菌での取組である。子囊菌は、遺伝子情報が整備されており、転写因子を増加させることで転写因子の制御下にある酵素生産の高生産化が果たされている。例えば、麹菌 *Aspergillus oryzae* において転写因子を過剰に作るように改変した菌株で、多糖の分解酵素の一つであるマンナーゼの生産量を向上させた報告がある¹³⁾。そこで、本事業の実施期間中に *P. antarctica* の酵素の生産性のスイッチを担う転写因子を見付け出し、転写因子を増加させる手法による酵素の生産能力の向上を目指す。まず、プロモーターを活性化する転写因子を見付けるために、令和元年度は *P. antarctica* の染色体上にコードされている遺伝子情報の中から、転写因子の基本構造に基づき、候補となる 109 個の遺伝子のリスト化を行い、令和2年度にこれらの遺伝子を個々に破壊した菌株セットの作製を完成させた。令和3年度は作出した菌株セットを用いて、酵素を作らなくなるという表現型を示す遺伝子の探索を順次行い、酵素生産スイッチを担う遺伝子の特定を行う。また得られた遺伝子について改変した菌株の作出を行い、酵素生産性の評価を行う。

酵素生産株には *P. antarctica* の野生株若しくは PaE 遺伝子のプロモーターをキシラナーゼ遺伝子のプロモーターと置き換えた組み換え体を用い、50 リットル規模の培養装置による酵素の試作を行った。酵素生産株は、農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業 25017A の課題(平成 25~27 年度)にて得られた成果、および国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構生物系特定産業技術研究支援センターの委託事業「イノベーション創出強化研究推進事業」の委託研究「畑作の省力化に資する生分解性プラスチック分解酵素の製造技術と生分解性農業資材利用技術の高度化」において見いだされた成果を利用して作出した。

2. 材料および手法

検討は令和 2 年度に引き続き、大きく分けて二つの項目、すなわち遺伝子破壊セットの作出と酵素生産性の確認、および酵素生産事業者の調査とした。後者については、現時点で適当と判断された事業者の小規模の設備で、情報の収集と他の実施項目に供する PaE の製造を目的とした酵素の試作を行った。

2-1 遺伝子破壊セットの作出と酵素生産性の確認

2-1-1 使用した微生物株

生分解性プラスチックを素材として用いて作られたマルチフィルムを分解する酵素の存在については早くから知られていた。しかし、その酵素を生産する微生物を国内外の土壌から分離する試みは難航していた。農研機構農業環境技術研究所(実施当時は独立行政法人、以下、農環研)では、マルチフィルムに用いる素材の化学構造と、植物の表面を覆うクチクラ層(cuticular layer)という組織の構成要素であるクチン(cutin)とが、どちらも常温で固体のポリエステル構造を持つ脂肪族系のポリマーであることに着目し、作物等の植物の表面に常在する真菌類の多くが PBS、PBSA を用いたフィルムの分解能力を示すことを発見した。特に、国内の様々な地域で栽培されていたイネ(*Oryza sativa*)から分離した *P. antarctica* が、当時市販されていた生分解性マルチフィルムを強力に分解することを見いだした。さらに、*P. antarctica* が分泌生産する新規の生分解性プラスチック分解酵素を同定の上 PaE と命名し、精製 PaE が、生分解性マルチフィルムに使われる PBS、PBSA、PLA などの素材樹脂に対し広く分解活性を示すことを明らかにした¹⁴⁾。PaE は、PBS や PBSA などのポリマー鎖をランダムに切断し、分子量を低下させ、これらポリマーの原料、すなわちモノマーである succinic acid(コハク酸、 $C_4H_6O_4$) や adipic acid(アジピン酸、 $C_6H_{10}O_4$) が生じるまで分解する性質を持つため、フィルムが崩壊することを示した¹⁵⁾。また、実験室内における小規模な実験ではあるが、市販の生分解性マルチフィルムに PaE を塗布した後に土壌に埋設した場合、PaE を処理しなかった場合に比べてフィルムの分解が早くなることも確認している¹⁶⁾。

PaE の大量生産にも取り組んできた。*P. antarctica* に、様々な種類の炭素源を与えて培養したところ、キシロースを与えると、PaE の生産量が飛躍的に増える現象を見いだした。数リットルのジャー規模の培養装置を用いて、キシロースおよび他の栄養源を少しずつ添加すると、酵素を最初に発見した時と比べて生産される酵素の濃度を約 100 倍高めることができた¹⁷⁾。生産されているタンパク質の種類と量を確認するため

に、この培養液中のタンパク質をポリアクリルアミド電気泳動(SDS-PAGE)で分離したところ、22kDaのPaEのほかに、33kDaのタンパク質が多量に検出され、ヘミセルロース分解酵素であるキシラナーゼ(xylanase)と同定した。続いて、*P. antarctica*の野生株が持つPaE遺伝子のプロモーターをキシラナーゼ遺伝子のプロモーターと置き換えることでPaEの生産性を高めた菌株を作出した(第45図)^{18, 19)}。

本実施項目で用いる酵素生産微生物の菌株は、上記のように農環研がイネから分離同定した菌株とした¹⁴⁾。*P. antarctica*の*URA3*遺伝子を破壊すると、uracil(ウラシル、 $C_4H_4N_2O_2$)を含む培地上でないと増殖できなくなるという栄養要求性を示す。また、*URA3*遺伝子を破壊した株に、細胞外から*URA3*遺伝子断片を導入すると、染色体にその断片を取り込んだ細胞は、uracilを含まない培地上でも生育できるようになる²⁰⁾。

2-1-2 候補遺伝子群の抽出

令和元年度は、酵素生産菌の全ゲノムDNA配列の解読を行い、遺伝子と思われる配列群の整理を行った。また、フラスコ内で、炭素源にグルコースを用いた培地とキシロースを用いた培地で酵素生産菌を培養して、その細胞からRNAを抽出した。RNAの塩基配列を解読し、全ゲノムDNA配列リストと照合しつつ、培養条件間で遺伝子発現を比較することによって、候補遺伝子のリストを作製した。

この際、酵素生産微生物の遺伝子配列と遺伝子発現のデータは、品質を向上させるために最新の配列解析手法を用いて取得した。また、過去の研究で取得したデータも一部用いた。すなわち、酵素生産菌染色体の全DNA配列や遺伝子発現のデータは、農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業25017Aの課題(平成25~27年度)にて、担当者である国立研究開発法人産業技術総合研究所(実施当時は独立行政法人)において解読した結果も用いた。これらの遺伝子配列から候補遺伝子を絞り込む工程の一部は、令和元年度の農研機構高度解析センターの解析支援制度を利用した。

2-1-3 遺伝子破壊セットの作出と酵素生産性の確認

酵素生産菌において、令和2年度までにリスト化した候補遺伝子の破壊株作出を、ゲノム編集技術を用いて効率良く進めることとした。ゲノム編集は、部位特異的なDNA切断酵素によって染色体上の標的部位のDNA配列が切断される。細胞がこの切断部位を修復する間に切断部位の削り込みが生じる機構と、外来のDNA断片を取り込む機構を利用した。

実験方法は、DNA 切断効率が高い Cas9 タンパク質と、標的の DNA 配列に結合する固有の配列を含むガイド RNA 配列の結合物を作製し、細胞内にその結合物を導入する際に、*P. antarctica* の *URA3* 遺伝子断片も加えて、*P. antarctica* の *URA3* 遺伝子を破壊済みの宿主細胞に導入した。この細胞懸濁液を、uracil を含まない寒天培地上に塗布すると、染色体上に *URA3* 遺伝子断片を取り込んだ細胞のみが増殖する。寒天培地に生育したコロニーを複数個拾い、計画どおり *URA3* 遺伝子断片が染色体上に挿入されたことと、該当部位が破壊されたことによって遺伝子断片のサイズが変化したコロニーを、polymerase chain reaction(以下、PCR 法)で選定した。PCR 法は、DNA 配列上の特定の領域を、耐熱性 DNA ポリメラーゼを用いた反応で増幅させる方法である。このようにして、リストに挙げた遺伝子の領域を破壊した株を作出した。

次に、リストした遺伝子の一つが破壊された株において、破壊した遺伝子が PaE 生産性に関わるのかどうかを判定した。この解析は、PBSA のエマルジョンとキシロースを含む寒天培地へコロニーを移植して行った。従来の株は PaE を生産してコロニーの周囲の PBSA エマルジョンを分解して透明の領域(ハロー)を作るのに対して、PaE 生産に関わる遺伝子が壊された場合は、酵素生産菌が PaE 生産能力を失うので、透明の領域が作られないことが期待される。事前に上記のシステムが稼働することを、*P. antarctica* の染色体上に本来存在する PaE 遺伝子を破壊する実験で確かめた²¹⁾。この方法を用い、令和 2 年度から令和 3 年度にかけて、後にスイッチ遺伝子と命名される遺伝子を選び出すため、リストした候補遺伝子を破壊する操作と解析を繰り返し、キシロース培地上で酵素を作らなくなる表現型を示す遺伝子破壊株の探索を進めた。

2-1-4 転写因子高発現株の作出

酵素の生産性を向上させるため、今回見いだしたスイッチ遺伝子のコピー数を増やした株の作出を行った。得られた菌株について PBSA のエマルジョンとキシロースを含む寒天培地で培養を行った。この際、親株よりも大きなハローを形成した菌株について、リアルタイム PCR 法によって菌株に導入されたスイッチ遺伝子のコピー数の定量を行った。寒天培地の画像を取得し、コロニーサイズとハローサイズの計測を行い PBSA の分解を数値化した。また寒天培地上での培養時に PBSA の分解が良好であったスイッチ遺伝子追加導入株について、キシロースを含む液体培地を用いフラスコで震盪培養を行った。この培養上清を回収し、培養液中に含まれる PaE による PBSA エマルジョンの分解を比較することで定量的な酵素活性の評価を行った¹⁶⁾。液体培養は 2 回行い、それぞれの培養液で 3 回活性測定を行った。

2-2 酵素生産事業者の調査および酵素の小規模試作

本事業によって獲得された酵素剤の効果をもって、事業終了後に速やかな事業への移行を可能とするために、PaE の生産と製剤化が可能と思われる国内企業の調査を開始した。*P. antarctica* はこれまでの種々の検討結果から、一般的な制御機能が備わった発酵生産設備によって一定水準の量の PaE を生産することが示唆されている^{10, 17)}。ただし、本菌種を用いた大規模な量産を試みた例が見当たらないため、ある程度の開発能力を持った事業者を選択する必要があると推察した。このような見地に立ち、令和 2 年度は農研機構の研究開発、あるいは三菱ケミカルのバイオ関連製品や酵素の事業を通じて知り得る範囲で、PaE の生産が可能と思われる事業者を調査した(第 14 表)。本年度は調査によって得られた情報を基に、現段階で酵素の試作に適切な事業者を選定し、実際に試作を委託することで更に詳細な情報の獲得を試みた。

選ばれた事業者の 50 リットル規模のジャーファーマンターを中心とする発酵生産設備を用いて、PaE の試作を行った。まずキシロースを含まない初期培地を用い、通気攪拌を行い菌体が十分量になるまで培養を行った。次に、キシロースを含む酵素生産誘導培地を連続的に流加し、培養開始から 72 時間まで培養を続けた。培養液は最終的に遠心分離により菌体と培養上清に分離し、上清を限外ろ過で濃縮した。このろ液を最終的にフィルターに通し除菌を行った。ろ液の酵素活性の測定、保存等は、常法に従った¹⁹⁾。

3. 結果および考察

3-1 候補遺伝子群の抽出

P. antarctica 野生株の染色体 DNA 配列を解読し、グルコース培地とキシロース培地で発現した RNA 配列群の情報を照合して、*P. antarctica* 野生株の遺伝子と想定される約 6,800 個に配列を整理した。続いて、グルコース培地とキシロース培地で発現レベルが異なる遺伝子の情報を ORF (open reading frame) の情報と突き合わせて 109 個の候補遺伝子のリストを作製した。

3-2 遺伝子破壊セットの作出と酵素生産性の確認

2-1-3 に記載の方法に従って、uracil を含まない平板培地に生育したコロニーへの *URA3* 遺伝子の断片の挿入は、*URA3* 断片の上流から下流までの約 2.1kb の DNA 断片の増

幅で確認した(第 46 図 a)。また、標的遺伝子の欠失の確認は、標的遺伝子の上流と下流の遺伝子断片を PCR で増幅させた断片長が、宿主株の長さとは異なることを指標とした(第 46 図 b)。この方法で、リストした 109 個の遺伝子破壊株セットの作出を完了させた。続いて、キシロースと PBSA エマルジョンを含む寒天培地上で、PaE 活性の調査を実施した。その結果、遺伝子の破壊によってハローの消失が見られた変異体を 1 株選定した。一方で、この 1 株以外の遺伝子破壊株 108 種ではいずれも明瞭なハローの消失は見られなかった。この結果から、109 個の候補遺伝子から PaE の生産を制御する可能性がある遺伝子の一つを見いだした。これをスイッチ遺伝子と名付けた。

3-3 転写因子高発現株の作出

一般的に細胞中に含まれる遺伝子のコピー数が多いほど、その制御下にある遺伝子産物の生産量を向上させることができる。そこでスイッチ遺伝子を持つ酵素生産菌(以下、親株)に追加の形でスイッチ遺伝子の導入を行い、スイッチ遺伝子のコピー数を増やした菌株の作出を行った。得られた菌株についてキシロースと PBSA エマルジョンを含む寒天培地上で培養を行い PaE 活性の比較を行った(第 47 図)。その結果、スイッチ遺伝子を追加導入した菌株で PBSA の分解によって生じるハローサイズが、親株と比較して増大することを確認した。また菌体に導入されたスイッチ遺伝子のコピー数増加に伴いハローの大きさも増大しており、コロニーの大きさに対するハローの大きさの比が、親株と比較しスイッチ遺伝子 2 コピー株で約 40%、5 コピー株で約 80%増加していた。

微生物を用いて物質生産を行う場合、固体培養方式と液体培養方式で生産性が異なることがある。そこで寒天培地でのハロー増大が顕著であったスイッチ遺伝子 5 コピー株をキシロースを含む液体培地で培養し、その培養上清中の PaE 活性を測定した(第 48 図)。活性測定の結果、液体培養時でもスイッチ遺伝子追加導入の効果が見られ、親株と比べ約 80%酵素活性が上昇していた。これらのことから、本事業の開始時に目標として定めた *P. antarctica* の酵素の生産性のスイッチを担う転写因子の特定と、コピー数を増やすことによる酵素の生産性向上に成功した。

3-4 酵素生産事業者の調査および酵素の小規模試作

我が国の発酵産業は、長い伝統の上に新たな技術を取り入れつつ、アミノ酸、核酸、抗生物質、アルコール、有機酸、酵素、細胞などを食品、医療医薬品、化学品などの用途に生産するバイオ産業として高い水準にある。したがって、国内には目的に応じた数リットルから数千キロリットルに至る様々な形式、容量の培養装置が存在する。培

養後に生産物を調整するため、培養液を何らかの手段で処理する設備を備えている施設も多い。また、欧米の大学、企業団体、地域振興財団が運営しているような開発請負式の受託企業のスタイルを採り入れた、開発—生産—貫の受注が可能な企業も現れている。本年度は、令和 2 年度にバイオ関係の研究や事業を通じて得られた情報から、*Pseudozyma* 属の培養と酵素の生産誘導、培養液から酵素剤の製造に至るプロセスの各単位操作が可能な設備と技術を有すると判断した事業者から、現時点で酵素の小規模生産を行いつつ、工業的生産を行うために必要な情報を獲得できる事業者を選定した。

11 の事業者、すなわち池田糖化工業株式会社(本社所在地広島県福山市、以下同様)、磐田化学工業株式会社(静岡県磐田市)、エイチビィアイ株式会社 (HBI Enzymes Inc.、兵庫県宍粟市)、神戸天然物化学株式会社(兵庫県神戸市)、サンヨーファイン株式会社(大阪府大阪市)、東洋紡株式会社(大阪府大阪市)、日本マイクロバイオファーマ株式会社(東京都中央区)、ネオファーマジャパン株式会社(東京都千代田区)、北海道糖業株式会社(北海道札幌市)、三菱ケミカル株式会社(東京都千代田区)、および洛東化成工業株式会社(滋賀県大津市)(50 音順)は、企業規模や業態はそれぞれ異なるが、PaE の初期生産に適していると思われる数キロリットル規模の発酵槽と、様々な種類の微生物を使いこなす技術を有すると推測された(第 14 表)。この事業者の中から、

- ・発酵槽の規模が 50 リットル規模程度の小規模生産と、初期の商用生産規模として適当と思われるキロリットル規模の設備を持ち合わせ、
- ・開発途上の生産プロセスに対応可能な弾力性のある運転技術を持ち、
- ・過去に類似の菌株を用いた培養、あるいは酵素の生産の経験がある

事業者を絞り込み、1 社を選定した。

選定した事業者と生産計画、および生産プロセスの情報収集の計画を議論、共有し、50 リットル規模のジャーファーマンターを用いた PaE の試作を行った。生産用の発酵槽における菌体の増殖は、「イノベーション創出強化研究推進事業」等で実施した実験室の数リットル規模の培養、および事業者での 50 リットル規模の培養と同様の推移が観察され、得られた酵素濃度も同程度であった。したがって、本事業で試みた酵素の生産プロセスは再現性が高いことが確かめられた。並行して、種菌株の増殖、生産のための菌体の増殖、酵素の生産、培養液の処理による酵素剤の獲得までの一連の運転操作について詳細な情報を得た。この情報は、商用生産を前提とした今後の酵素生産プロセスの安定化、低コスト化等の検討にいかすことができる。また、得られた酵素剤は、第 2、4 章において農研機構や各県で実施する圃場試験に供した。

第4章 野菜栽培における新規生分解性マルチフィルムの実用化実証

1. 検討の概要

新規素材を用いた生分解性のマルチフィルムと酵素剤を組み合わせた野菜の栽培方法が農業生産者にとって有効であることを評価する実証試験を、令和元、2年度に引き続き進めた(第49図)。第1章 3-3で試作した新規素材を配合したフィルムを用いた種々野菜の栽培試験を、神奈川県農業技術センター、茨城県農業総合センター、および山梨県総合農業技術センターの露地圃場、あるいは施設内にて、それぞれの目的に従って行った。特に、栽培品目は現時点で生分解性マルチフィルムの利用が望ましい、あるいは耐久性向上など生分解性マルチフィルムの課題が現れている各地の代表的な作物、作型を反映できるよう各試験機関が選択した。地域の代表的な作物における様々な作型、すなわち促成と抑制、標高の高低、畑地と水田跡地への展開の可能性、酷暑期や厳寒期を越す長期栽培と長期展張、施設栽培への試用、新たな作型の開発への試用、さらには、農家へ本格導入する前に必要な情報蓄積のための繰り返し試験などを予定した。また一部は、今後の高耐久性の生分解性マルチフィルムの開発を見込み、これまで生分解性マルチフィルムが使われてこなかった作物の栽培への応用も試みた。神奈川県および山梨県では、生分解性マルチフィルムを用いた栽培後にフィルムを土壤に鋤込み、その圃場で続けて作物栽培を行い、生分解性マルチフィルムを用いた影響の有無を確認した。

また本年度は、農業生産者の生産圃場にて実証試験を行った。4県5か所の農家、生産者の協力を得て、地域の代表的な作物、作型の中から、県の試験機関における試験と同様に現時点で生分解性マルチフィルムの利用が望ましいもの、耐久性向上など生分解性マルチフィルムの課題が現れているものを選択し、生分解性マルチフィルムと酵素剤の施用を試みた。

2. 材料および手法

2-1 新規生分解性マルチフィルムを用いた野菜の栽培試験

2-1-1 神奈川県

2-1-1(1) 試験機関圃場におけるエダマメ作

神奈川県農業技術センター(神奈川県平塚市)の露地圃場に新規素材を配合した試作フィルム e-0 黒、試作フィルム R3-2 黒および市販されている生分解性マルチフィルムであるカエルーチ黒(三菱ケミカルアグリドリーム)を展開し、令和3年4月20日にエ

ダマメを畝間 180cm、株間 30cm、条間 40cm(2 条千鳥)で播種した。10a 当たり施肥量は、土壌改良資材として畑のカルシウム 100kg、基肥として CDU 複合燐加安 S555 号 66.7kg、粒状過石 28.6kg を施用し、成分量で $N:P_2O_5:K_2O=10:15:10$ kg とした。7 月 2 日に地上部を収穫し、着莢数や可販収量等について調査した。試験区の全ての収穫が終了した後の 7 月 28 日に酵素剤をフィルム表面に散布した。分解程度を調査するため、8 月 2 日に回収したフィルムのサンプルを農研機構へ送付し、第 2 章 2-2 に供した。また、栽培に供試した試作フィルムの一部を 10cm×10cm に切断して簡易メッシュバッグ法による土壌中での分解過程の追跡を行った。市販の PE 製水切りネットに入れ、8 月 26 日にエダマメ圃場の地下 10cm に埋設し、1 か月ごとに回収して面積推移を調査中である。

2-1-1(2) 生産者圃場におけるエダマメ作

試験機関での試験と同様の方法でエダマメの農家での現地試験を露地圃場(神奈川県三浦市)で行った。露地圃場に新規素材を配合した試作フィルム e-0 黒、試作フィルム R3-2 黒を展張し、飛散対策としてフィルム表面を覆土する栽培方法であったため、定植前の 5 月 18 日に酵素剤をフィルム表面に散布した。5 月 21 日にエダマメを畝間 155cm、株間 39cm、条間 26cm(3 条)で定植した。7 月 26 日に地上部を収穫し、着莢数や可販収量および聞き取り調査を実施した。

2-1-1(3) 試験機関圃場におけるダイコン作

冬作の試験として、神奈川県農業技術センター(神奈川県平塚市)の露地圃場に新規素材を配合した試作フィルム e-0 黒、試作フィルム R3-1 黒、試作フィルム R3-2 黒、および市販されているカエルーチ黒を展張し、9 月 16 日にダイコンを畝間 120cm、株間 27cm、条間 45cm(2 条千鳥)で播種した。10a 当たり施肥量は、土壌改良資材として畑のカルシウム 100kg、基肥として高度化成 444 号 107kg を施用し、成分量で $N:P_2O_5:K_2O=15:15:15$ kg とした。11 月 16 日に収穫し、根重や根部生理障害等について調査した。試験区の全ての収穫が終了した後の 12 月 22 日に酵素剤をフィルム表面に散布した。また、エダマメ作と同様に、土壌中でのフィルムの分解過程の追跡を簡易メッシュバッグ法で開始した。供試した試作フィルムの一部を 10cm×10cm に切断して市販の PE 製水切りネットに入れ、ダイコン圃場の地下 10cm に埋設し、1 か月ごとに回収し、フィルムの分解調査を継続中である。

2-1-1(4) 試験機関圃場におけるカボチャ作

神奈川県農業技術センター(神奈川県三浦市)において、3月3日にカボチャを播種し、新規素材を配合した試作フィルム(R3-1 透明、R3-2 透明、R3-1 黒、R3-2 黒)等を露地圃場に展張し、トンネルを被覆して3月23日に定植した。栽培はベッド部分とつる先部分をフィルムで被覆する通常栽培とつる先部分に緑肥として麦を栽培する麦マルチ栽培で実施し、栽培管理は主茎1本仕立てのUターン整枝、側枝は摘芯した。栽植距離は畝間500cm(ベッド幅1m、つる先4m)、株間50cmとし、10a当たりの施肥量は基肥が牛ふん堆肥1t、顆粒タイニー100kg、硫酸マグネシウム40kg、カボチャ配合133kg(ベッド)、ハイマグB重焼燐39kg(ベッド)、硫酸カリウム14kg(ベッド)、追肥としてNK化成2号62.5kg(つる先)を施用した。10a当たりの成分量は基肥が $N:P_2O_5:K_2O=8:27:15$ kg、追肥が $N:P_2O_5:K_2O=10:0:10$ kg、合計 $N:P_2O_5:K_2O=18:27:25$ kgとした。施肥量2倍区は基肥と追肥をそれぞれ2倍量とした。

生育調査は4月9日に実施した。収穫は開花日からの日平均気温の積算温度が $1,000^{\circ}C$ を超過した時期を目安に行い、収穫調査は収穫できた全ての個体の果実特性を調査し、果実品質は収穫後2週間以上経過した後に実施した。また、カボチャ栽培時の試作フィルムの状態については随時調査するとともに、麦マルチ栽培のベッド部分に展張した試作フィルムの地下10cmの地温を測定した。カボチャ調査終了後の7月12日に酵素(PaE)処理を実施し、7月13日に試作フィルムのサンプリングを行った。採取したサンプルは農研機構へ送付し、引張強度および突刺し強度による強度評価を行った。

また、長期展張試験として、4月19日に新規素材を配合した試作フィルム(R3-1 透明、R3-2 透明、R3-1 黒、R3-2 黒)と対照としてカエルーチ黒(標準タイプ)、カエルーチ黒(高耐久タイプ)をベッド幅1m、長さ7mの2反復で露地圃場に展張し、各区のマルチに裂け等の劣化が認められた日を調査した。

2-1-1(5) 生産者圃場におけるカボチャ作

農家での現地試験として、三浦市内のカボチャ生産者圃場において、新規素材を配合した試作フィルム(R3-2 黒)と対照として生産者慣行のPE製マルチフィルムであるグリーンマルチを用いて比較試験を実施した。畝幅1mのベッドにマルチを被覆し、畝間500cm(ベッド幅1m、つる先2m(両方向))、条間70cm、株間60cmの2条千鳥植え、栽培方法は現地慣行のつる先麦マルチ栽培とし、主茎1本仕立てのUターン整枝、側枝は摘芯した。品種は‘栗五郎’(カネコ)、5月14日に定植した。8月13日に収穫特性を第1果10果、第2果10果の合計20果で調査した。また、果実品質は8月13日

に収穫した果実を各区 3 果ずつ室内に静置し、9 月 3 日に調査した。8 月 24 日に酵素剤処理を実施し、8 月 25 日に試作フィルムのサンプリングを行った。採取したサンプルは農研機構へ送付し、引張強度および突刺し強度による強度評価を行った。

2-1-2 山梨県

2-1-2(1) 低標高地促成作スイートコーンの栽培実証(追試)

令和 2 年度は、配合シリーズ 2 の試作フィルム e-0 および e-1 を対象とした促成作スイートコーンの栽培実証を行った。その結果、e-0、e-1 共にコーンの生育、収量は、PE 製マルチフィルムと同等となり、特に e-0 フィルムは、コーンの栽培期間を通じて十分な耐久性が観察され、本作型における高い実用性が示唆された。そこで令和 3 年度は、異なる気象条件下において令和 2 年度試作フィルム e-0 を用いた促成スイートコーン栽培実証の追試を行い、本作型における実用性を再確認することを目指した。

山梨県においては低標高地に当たる総合農業技術センター(山梨県甲斐市、標高 250m)の水田圃場に試作フィルム e-0、市販生分解性フィルム(市販 A および B)、PE 製マルチフィルムを展張した。供試したフィルムの規格は、色が透明、株間 27cm の 2 条千鳥植え用とした。令和 3 年 3 月 4 日にスイートコーン(品種ゴールドラッシュ)を播種し、山梨県施肥指導基準に基づく慣行的な栽培管理(4 月下旬までトンネル栽培)を行い、6 月 9 日に収穫調査を行った。試験区の全ての収穫が終了した 6 月 14 日に酵素剤をフィルム表面に散布した。6 月 16 日、スイートコーン収穫後の残渣とともに供試フィルムを鋤込み処理し、後作に水稻を栽培して生育への影響を観察した。

2-1-2(2) 生産者圃場における高標高地露地作スイートコーンの栽培実証

令和 2 年度は、山梨県総合農業技術センター八ヶ岳試験地(山梨県北杜市、標高 950m)の露地圃場において、配合シリーズ 2 の試作フィルム e-0 および e-1 を対象としたスイートコーンの栽培実証を行った。その結果、e-0、e-1 共にコーンの生育、収量は、PE 製マルチフィルムと同等となり、特に e-0 フィルムは、コーンの栽培期間を通じて十分な耐久性が観察され、本作型における高い実用性が示唆された。そこで R3 年度は、圃場条件の異なる農家圃場において、昨年度試作フィルム e-0 を用いた露地作スイートコーン栽培実証を行い、栽培現場における実用性を確認することを目指した。

山梨県南都留郡鳴沢村の農家圃場(標高 972m)に令和 2 年度試作フィルム e-0、市販生分解性フィルム(カエルーチ標準、市販 A~C)、PE 製マルチフィルムを展張した。供試したフィルムの規格は、色が黒、株間 35cm の 2 条千鳥植え用とした。令和 3 年 6 月 1 日に農家がスイートコーン(品種恵味ゴールド)を播種し、おおむね山梨県施肥指導

基準に準じた農家の慣行的な栽培管理を行ってもらい、8月18日に収穫調査を行った。試験区の全ての収穫が終了したとの農家からの連絡を受け、9月21日に酵素剤をフィルム表面に散布し、その後スイートコーン残渣とともに供試フィルムを鋤込み処理した。

2-1-2(3) 高標高地露地作スイートコーンによる新規試作フィルムの栽培実証

山梨県総合農業技術センター八ヶ岳試験地の露地圃場に令和2年度試作フィルム e-0 を改良した新規試作フィルム R3 シリーズを展開し、露地作スイートコーンによる栽培実証を行った。供試したフィルムは、R3-1、R3-2、市販生分解フィルム(カエルーチ標準、カエルーチ高耐久)および PE 製マルチフィルムとし、規格は色が黒、株間 35cm の 2 条千鳥植え用とした。令和3年5月31日にスイートコーン(品種恵味ゴールド)を播種し、山梨県施肥基準に基づく慣行的な栽培管理を行い、8月19日に収穫調査を行った。試験区の全ての収穫が終了した8月31日に酵素剤をフィルム表面に散布した。使用後のフィルムの一部を切り取り、メッシュバッグに封入したものを9月30日に土壌埋設した。その後、令和4年1月17日にメッシュバッグを回収し、フィルムの分解程度を評価した。

2-1-3 茨城県

茨城県農業総合センターは、令和2年度に開始したイチゴおよびタマネギを供試した栽培を令和3年度まで継続し、また令和3年度に新たにナスおよびタマネギを供試した栽培を実施し、新規素材を配合した生分解性マルチフィルムの適応性について調査した。

2-1-3(1) イチゴの施設栽培試験

令和2年度の秋期から新規素材を用いた生分解性マルチフィルムの開発品を供試した、施設栽培野菜の長期栽培試験を開始した。茨城県農業総合センター(茨城県笠間市)のパイプハウス内に令和2年9月24日にイチゴ(品種いばらキッス)を畝幅 50cm、株間 25cm、条間 50cm(2 条)で定植し、新規素材を配合した配合シリーズ 2 の試作フィルム e-0 黒、PE 製マルチフィルム、市販生分解性マルチフィルムとしてビオフレックスマルチ(アキレス)を令和2年10月22日に展開した。展開時にフィルムの展開に掛かる作業時間も記録した。施肥量は、「いばらキッス栽培管理マニュアル」を基に施用した。生育調査は第3葉長を定植後1~3か月まで1か月ごとに計3回測定し、頂花房および一次腋花房の開花日を調査した。収穫調査は令和2年12月17日から令和3年4

月 22 日まで果実を収穫し、収穫果実数および果実重量を調査した。試験区の全ての収穫が終了した後の 4 月 27 日に酵素剤をフィルム表面に散布し、散布 1、3、7 日後に回収後、引張強度および突き刺し強度による強度評価を行った。フィルムの強度を農研機構で分析した。

2-1-3(2) タマネギの長期栽培試験

令和 2 年の秋期から冬期、さらに令和 3 年の春期にわたっての、新規素材を用いた生分解性マルチフィルムの開発品を供試した、露地栽培野菜の長期栽培試験を開始した。茨城県農業総合センター(茨城県笠間市)において、令和 2 年 9 月 17 日にタマネギ(品種七宝甘 70)を播種し、令和 2 年 11 月 18 日に令和 2 年度新規素材試作フィルム(e-0 黒、e-2 黒)、PE 製マルチフィルム、市販生分解性マルチフィルムとしてビオフレックスマルチを露地圃場に展張し、同日にタマネギ移植機で、畝幅 120cm、株間 15 cm、4 条植えで定植した。展張時にフィルムの展張に掛かる作業時間も記録した。施肥量は、「茨城県野菜栽培基準」を基に施用した。生育調査は令和 3 年 2 月~4 月までの期間、草丈、葉数、葉鞘径を計 4 回測定した。収穫はタマネギの葉が 8 割倒れた時期を目安に行い、出荷規格別の個数および重量、鱗茎の横径および縦径を 20 株調査した。フィルムの耐久性についてはマルチ展張前、展張後 3 か月、展張後 6 か月(栽培終了後)にマルチフィルムの一部を採取し、強度を測定した。また、それぞれの品目で展張したフィルムの地下 10cm の地温を測定した。

令和 2 年度開始の試験に引き続き、令和 3 年度も新規素材生分解性マルチフィルム開発品の圃場試験を繰り返した。茨城県農業総合センター(茨城県笠間市)において、令和 3 年 9 月 8 日にタマネギ(品種ソニック)を播種し、令和 3 年 11 月 11 日に新規素材を配合した試作フィルム(R3-1 黒、R3-2 黒)、PE 製マルチフィルム、市販生分解性マルチフィルム(カエルーチ)を露地圃場に展張し、同日にタマネギ移植機で、畝幅 120cm、株間 15 cm、4 条植えで定植した。施肥量は、「茨城県野菜栽培基準」を基に施用した。生育調査は令和 4 年 1 月~4 月までの期間、草丈、葉数、葉鞘径の調査を継続する。3 か月を経過した 1 月現在達観ではどの区も異常は見られない。

2-1-3(3) 果菜類であるナスの栽培試験

現在市販されている生分解性マルチフィルムは、展張期間が 2 か月から 4 か月程度のものに限られる。栽培期間が短い葉菜類(葉もの野菜)や、冬期の低温期で生分解性マルチフィルムの分解が抑えられている作型では市販の生分解性マルチフィルムは使用が可能であるが、一般的に栽培期間が長い果菜類(実もの野菜)では、耐久性が不足

してほとんど使用されてこなかった。そこで、茨城県の代表的な果菜類であるナスを取り上げ、新規素材を配合した配合シリーズ 3 の試作フィルムを用いた栽培試験を行った。茨城県農業総合センター(茨城県笠間市)の露地圃場に R3-1 黒、R3-2 黒、長耐久型の市販生分解性マルチフィルム(カエルーチ高耐久)を令和 3 年 4 月 21 日に展張した。同日にナス(品種千両二号)を畝幅 1.2m、株間 60cm で定植した。施肥量は、「JA 常陸大宮地区なす部会 露地・トンネル栽培資料」を基に施用した。生育調査は定植から収穫開始までの期間、2 週間に 1 度計 4 回茎長・展開葉数を、茎幅は収穫開始時と栽培終了後の 2 回調査した。6 月 14 日から 9 月 27 日まで果実を収穫し、収穫日、出荷規格別(A 品)の個数および重量を調査した。試験区の全ての収穫が終了した後の 11 月 2 日に酵素剤をフィルム表面に散布し、散布 3 日後に回収、引張強度および突刺強度による強度評価を農研機構で分析した。

2-1-4 三菱ケミカルアグリドリーム

2-1-4(1) 茨城県の生産者圃場における栽培実証

茨城県県西の生産者に協力いただき長期間の野菜栽培における新規素材を用いた生分解性マルチフィルムの実証試験を実施した。栽培、展張の時期や作目、作型など環境が異なる場合の影響、および酵素剤処理による土壌中でのフィルム分解への効果を検証するため、春作としてレタス、秋作としてミズナの栽培を行った。評価に用いたマルチフィルムは新規素材を配合した R3-1 黒、R3-2 黒、市販品として通常型、高耐久型の生分解性マルチフィルム、および汎用の PE 製マルチフィルムを展張し、作物収穫後には酵素剤散布を実施し分解性評価を実施した。

春作レタス作

地域の代表的な作目、作型で新規素材を用いた高耐久型生分解性マルチフィルムの実用性を評価するため、春から夏にかけてのレタス栽培に配合シリーズ 4(R3 シリーズ)を中心とした栽培試験、および長期展張試験を行った。展張試験には、対照として PE 製マルチフィルムを用い、生分解性マルチフィルムの市販品として、市販高耐久 A、市販標準 A~C を用い、e-0、R3-1、R3-2 との比較を行った。令和 3 年 3 月 12 日に展張を行い、3 月 15 日にレタス苗を定植した。栽培管理は生産者の慣行法で行った。展張から 66 日後の 5 月 20 日に収穫を行い、圃場の約半分を用いて酵素剤の処理を行った。翌日、トラクターにより処理区の鋤込みを実施した。また、残りの部分は展張から約 144 日後の 8 月 2 日まで展張状態を維持した後、フィルムの状態の観察、酵素剤処理、

および試料の収集を行った。翌日、試料の収集の後、トラクターにより全ての試験区の鋤込みを行った。

試験区は新規素材を用いた配合シリーズ 4 (R3 シリーズ) と複数の市販生分解性マルチフィルムとした。色は全て黒とした；

1. PE 製マルチフィルム：慣行
2. 市販生分解性マルチフィルム高耐久 A：市販品のうち、長期間の展張を目的としたもの
3. R3-1：新規樹脂 A に添加剤 X を配合したもの
4. R3-2：R3-1 に PLA を加えて更に分解の遅延を狙ったもの
5. e-0：市販標準品と同等の展張期間を狙った配合
6. 市販生分解性マルチフィルム標準 A：通常の耐久性の市販品
7. 市販生分解性マルチフィルム標準 B：通常の耐久性の市販品
8. 市販生分解性マルチフィルム標準 C：通常の耐久性の市販品

秋作ミズナ作

本事業では高耐久型の生分解性マルチフィルムの開発を主眼に置いているため、これまで県の試験機関で実証を進めてきた作型の多くは、春先から夏までの高温移行期であり、生分解性マルチフィルムにとっては劣化、分解が加速する過酷な条件であった。よって、幾つかの作型では、生分解性マルチフィルムの分解が進んで酵素剤の処理が不要とみなされた。一方、生分解性マルチフィルムの分解は、ポリマー分子の加水分解をきっかけとして始まるので、低温、乾燥状態では、高温、多湿状態より分解速度が遅いことが経験的に知られている。分解が遅いことは耐久性が維持できるという意味で好ましいことである反面、使用後に土壤中に鋤込む場合、強度が高すぎてトラクターのロータリー部分に絡まって作業の障害になったり、鋤込まれた後の分解が進まずに風などにより近隣に飛散したりといった問題が発生する可能性がある。そこで、新規素材を用いて開発した生分解性マルチフィルムを秋から冬にかけての低温移行期に展張し、栽培期間中の耐久性と鋤込み時、および鋤込み後のフィルムの様子を確認した。令和 3 年 9 月 17 日にミズナ栽培向けマルチフィルムの展張を行い、11 月 15 日に収穫を実施し 12 月 1 日に酵素剤散布、翌日にトラクターによる鋤込みを行った。

試験区は新規素材を用いた配合シリーズ 4 (R3 シリーズ) と耐久性が異なる市販生分解性マルチフィルム 2 種とした。色は全て黒とした；

1. R3-1：新規樹脂 A に添加剤 X を配合したもの
2. R3-2：R3-1 に PLA を加えて更に分解の遅延を狙ったもの

3. 市販生分解性マルチフィルム高耐久 A：市販品のうち、長期間の展張を目的としたもの
4. 市販生分解性マルチフィルム標準 A：通常の耐久性の市販品

2-1-4(2) ハヶ岳中央農業実践大学校での栽培実証

標高約 1,300m に位置し、地域の高冷地野菜栽培の拠点の一つとなっている農業生産圃場にて、初夏から秋にかけての主要 3 作目の野菜の栽培に、新規樹脂を用いたマルチフィルム開発品の展張試験を実施した。

セロリ作

長野県原村のハヶ岳中腹の特産品であるセロリは、夏場の栽培時には乾燥を避けるために頻繁な灌水が必要であること、白や銀色のフィルムによって地温の上昇を抑える必要があることなどにより、マルチフィルムは必需品であるが、加水分解しやすい生分解性マルチフィルムは適応できていなかった。一方、周辺生産農家からはプラスチック廃棄物削減のため生分解性マルチフィルムを使用したいとの意見を入手し、本事業で開発した高耐久性生分解性マルチフィルムの適応を試みた。令和 3 年 5 月 10 日に展張を行い、定植は 5 月 25 日に実施し、6 か月の長期展張を想定し評価を行った。

試験区は新規素材を用いた配合シリーズ 4 (R3 シリーズ) 透明と耐久性が異なる市販生分解性マルチフィルム 2 種とした；

1. R3-1 透明：新規樹脂 A に添加剤 X を配合したもの
2. R3-2 透明：R3-1 に PLA を加えて更に分解の遅延を狙ったもの
3. 市販生分解性マルチフィルム高耐久 A 黒：市販品のうち、長期間の展張を目的としたもの
4. 市販生分解性マルチフィルム標準 A 黒：通常の耐久性の市販品

観賞用カボチャ作

通称ハロウィンカボチャとして知られるカボチャ属ペポカボチャ (*Cucurbita pepo*, 品種アトランティックジャイアント) は需要が高く、当生産者が地域最大の生産規模を持つ基幹作物の一つである。このカボチャ品種の栽培には、従来から生分解性マルチフィルムの適応が検討されてきたが、4 か月以上の長期にわたる展張期間のため、十分な物性を持つ製品が求められている。そこで、本事業で開発した高耐久性生分解性マルチフィルムの開発品を応用した圃場栽培試験を実施した。各種マルチフィルムは令和 3 年 6 月 2 日に展張し、6 月 10 日に定植を実施した。酵素剤処理と鋤込み作業を 10

月 24、25 日に実施し、鋤込み用のロータリーへのマルチフィルム断片の絡み具合などを確認し、鋤込み後の土壌表面の確認も行った。

試験区は新規素材を用いた配合シリーズ 4 (R3 シリーズ) と耐久性が異なる市販生分解性マルチフィルム 2 種とした。色は全て黒とした；

1. R3-1：新規樹脂 A に添加剤 X を配合したもの
2. R3-2：R3-1 に PLA を加えて更に分解の遅延を狙ったもの
3. 市販生分解性マルチフィルム高耐久 A：市販品のうち、長期間の展張を目的としたもの
4. 市販生分解性マルチフィルム標準 A：通常の耐久性の市販品

加工用トマト作

実証試験の一带の地域では、冷涼な気候を利用して春から夏にかけてトマトの栽培が盛んで、特に大規模な加工用トマトの露地栽培が加工事業者との連携で行われ、地域の重要な産業となっている。露地栽培トマトでは、定植時の低温がその後の株の生長と収量に悪影響を及ぼすため、安定した収穫を得るためにマルチフィルムが必須のことである。特に、この地域では大規模集約的な露地栽培であることから、機械化に適応させるため、生分解性マルチフィルムの利用が検討されている。本事業では、新規樹脂を使った高耐久性生分解性マルチフィルムの開発品を応用した栽培試験を実施した。マルチフィルムは令和 3 年 5 月 10 日に展張し、5 月 20 日に定植を行った。7 月に収穫した後、フィルムの長期耐久性を確認するため 11 月まで展張状態を維持し、フィルムの状態を確認した上で酵素剤処理と鋤込みを行う予定としていた。

試験区は新規素材を用いた配合シリーズ 4 (R3 シリーズ) 透明と耐久性が異なる市販生分解性マルチフィルム 2 種とした；

1. R3-1 透明：新規樹脂 A に添加剤 X を配合したもの
2. R3-2 透明：R3-1 に PLA を加えて更に分解の遅延を狙ったもの
3. 市販生分解性マルチフィルム高耐久 A 黒：市販品のうち、長期間の展張を目的としたもの
4. 市販生分解性マルチフィルム標準 A 黒：通常の耐久性の市販品

3. 結果および考察

3-1 新規生分解性マルチフィルムを用いた野菜の栽培試験

3-1-1 神奈川県

3-1-1(1) 試験機関圃場におけるエダマメ作の結果

新規素材を配合した試作フィルムを供試したエダマメの生育は順調で、栽培途中で供試フィルムが剥がれることもなかった(第 50 図)。生育中(6月18日~7月2日)の地温(地下15cm)は、試作フィルム R3-2 黒>PE 製マルチフィルム 黒>試作フィルム e-0 黒>カエルーチ 黒の順に高く推移したが、エダマメ収穫開始(7月2日)後の7月10日以降は PE 製マルチフィルム 黒>R3-2 黒>カエルーチ 黒>e-0 黒の順に高く推移した(第 51 図)。7月2日収穫時の可販収量は、e-0 黒、R3-2 黒および、カエルーチ 黒共に PE 製マルチフィルム 黒と同等であった(第 15 表)。e-0 黒およびカエルーチ 黒は収穫前後に裂けたが、R3-2 黒には目立った裂け等は見られなかった(第 52 図)。栽培終了後に簡易メッシュバッグ法により埋設した生分解性マルチフィルムの埋設3か月後(11月26日)の残存面積率は、e-0 酵素剤処理区で87%、e-0 無処理区で83%、R3-2 酵素剤処理区で86%、R3-2 無処理区で81%、カエルーチ 酵素剤処理区で73%、カエルーチ 無処理区で71%あった(第 53 図、第 16 表)。埋設試験については引き続き調査を継続する。

3-1-1(2) 生産者圃場におけるエダマメ作の結果および考察

生産農家の現地試験では、エダマメの生育はおおむね順調で、栽培途中で供試フィルムが剥がれることもなく、全ての区で欠株はなかった。農家への聞き取り調査では、供試フィルム間で農機による展張のしやすさに違いはなく、エダマメの生育にも差はないとのことであった。また、収穫後の飛散が少なくてよかったなどの回答を得た(第 54 図、第 17 表)。酵素剤処理については、処理の翌日には新規素材を配合した試作フィルム e-0 および R3-2 に大きな裂けが入り、酵素剤の効果が認められた。

以上の結果および令和元、2年度の結果も踏まえると、新規素材を配合した供試フィルムによるエダマメの生育および収量は、PE 製マルチフィルムと同等であり、特に R3-2 は耐久性があり、実用性が認められた。なお、酵素剤処理により、一部で分解促進効果が認められたが、より安定的に効果が得られるように引き続き検討が必要と考えられる。

3-1-1(3) 試験機関圃場におけるダイコン作の結果および考察

ダイコンについて、新規素材を配合した試作フィルム生育は順調で、栽培途中で供試フィルムが剥がれることもなかった(第 55 図)。11月16日収穫時のダイコンの根重や品質等は、試作フィルム e-0 黒、R3-1 黒、R3-2 黒、カエルーチ 黒共に PE 製マル

チフィルム 黒と同等であった(第 56 図、第 18 表)。ダイコン収穫後に回収した生分解性マルチフィルムは、簡易メッシュバッグ法による分解評価を継続している。

以上の結果および令和元、2 年度の結果を踏まえると、新規素材を配合した供試フィルムによるダイコンの生育および収量は、PE 製マルチフィルム区と同等であり、栽培途中の飛散もなく、実用性が認められた。また、令和元、2 年度の簡易メッシュバッグ法の結果では、酵素剤処理による分解促進効果が見られるが、より安定的に効果が得られるように引き続き検討が必要と考えられる。

3-1-1(4) 試験機関圃場におけるカボチャ作の結果

カボチャは定植後、順調に生育した。通常栽培におけるカボチャの生育は PE 製マルチフィルム 透明>R3-1 透明=R3-2 透明となった(第 57 図、第 19 表)。また、麦マルチ栽培の生育は PE 製マルチフィルム>R3-1 透明=R3-2 透明=R3-1 黒>R3-2 黒となった(第 59 図、第 20 表)。生育初期における地温は PE 製マルチフィルムが最も高く、新規素材を配合した試作フィルムはやや低かった(第 58 図)。収量性や果実品質は通常栽培では差が見られず、麦マルチ栽培では収量性がやや低くなるものの果実品質は同等だった(第 20 表)。試作フィルムは展張後 2 か月程度でマルチフィルム下に繁茂した雑草により透明フィルムで裂けや破れが生じた。一方、黒色フィルムは栽培終了まで強度を維持し、R3-2 黒は R3-1 黒よりも裂け等が少なく、強度が強かった(第 59 図)。

長期展張試験では 4 月中旬に試作フィルムを展張したところ、R3-1 透明と R3-2 透明の透明フィルムは展張後 1 か月程度強度を保持した。R3-1 透明は R3-2 透明に比べて若干強度を保った(第 60 図、第 21 表)。また、R3-1 黒、R3-2 黒は展張後 3 か月程度強度を保持した。標準としたカエルーチ標準 黒やカエルーチ高耐久 黒に比べて若干強度を保ち、R3-1 黒は R3-2 黒に比べて若干強度を保った(第 21 表)。

3-1-1(5) 生産者圃場におけるカボチャ作の結果および考察

現地試験では R3-2 黒を用いて、現地慣行栽培で PE 製マルチフィルムと比較試験を行ったところ、収量性や果実品質はほぼ同等だった(第 61 図、第 22 表)。栽培終了時まで、R3-2 黒はフィルム強度を維持したことを確認した。

以上の結果およびこれまでの過去から、令和 2 年度において、新規素材を配合した試作フィルム e-0 および e-2 を用いたカボチャ栽培では栽培終了までフィルムの強度を保持できなかったが、令和 3 年度に用いた試作フィルム R3-1 および R3-2 では栽培終了まで黒色フィルムの強度を保持できた。また、酵素剤処理による強度低下も一部

で認められた。収量性や果実品質は、通常栽培ではPE製マルチフィルムと同等であり、現地試験においても慣行と同等であった。長期展張試験の結果からも試作フィルムは市販フィルムと同等以上の強度を保持していた。現地試験を実施した生産者からは鋤込み後のフィルムの残存は気になるものの、フィルム強度に問題はなく、回収労力も要らないため、継続して使用したい旨の希望があることから、新規素材を配合した試作フィルムの実用性はあると思われた。なお、透明フィルムは黒色フィルムよりも耐久性が劣り、栽培終了まで強度を維持できなかったことや、実用上現場で使用しやすいような印字処理等の加工は必須であることなど、更なる改良を行う必要があると考えられた。

3-1-2 山梨県

3-1-2(1) 低標高地促成作スイートコーンによる栽培実証(追試)

新規樹脂を用いた試作フィルム e-0 を供試した促成作スイートコーン栽培における収穫物の穂重は市販生分解性マルチフィルムおよび PE 製マルチフィルムと同等となった(第 23 表)。e-0 フィルムを用いて生産されたコーンの品質は良好であり、収穫適期の遅れは観察されなかった(第 52 図、第 23 表)。栽培終了時まで、e-0 フィルムでは目立った劣化は見られず、被覆効果が持続した(第 63 図)。フィルム鋤込み後の圃場では、後作の水稻が順調に生育し、フィルムを鋤込んだことによる生育への悪影響は観察されなかった(第 64 図)。

3-1-2(2) 高標高地露地作スイートコーンによる農家圃場栽培実証

新規樹脂を用いた試作フィルム e-0 を供試した農家圃場での露地作スイートコーン栽培における収穫物の穂重は、市販生分解性マルチフィルムおよび PE 製マルチフィルムと同等となった(第 23 表)。e-0 フィルムを用いて栽培されたコーンの品質は良好であり、収穫適期の遅れも観察されなかった(第 65 図、第 24 表)。農家の収穫の都合により、収穫調査から酵素剤処理までに 1 か月程度の間隔があったが、e-0 フィルムでは被覆効果が 6 割以上維持され、市販生分解性マルチフィルムの「市販品 A」と同程度の強度が確認された。被覆効果が半分程度まで劣化した「カエルーチ標準」よりは、e-0 の耐久性の方が高いと判断された(第 66 図)。使用した農家からは、市販生分解性マルチフィルムと同等の実用性があるとの感想が聞き取られた。

3-1-2(3) 高標高地露地作スイートコーンによる新規試作フィルムの栽培実証

配合シリーズ 4 の試作フィルム R3-1 および R3-2 を供試した露地作スイートコーン栽培における収穫物の穂重は、市販生分解性マルチフィルム(カエルーチ標準・カエルーチ高耐久)および PE 製マルチフィルムと同等となった(第 25 表)。R3-1 および R3-2 を用いて生産されたコーンの品質は良好であり、収穫適期の遅れは観察されなかった(第 67 図、第 25 表)。栽培終了時には、R3-1 フィルムでは複数の裂け目が入るなど、軽度の劣化が観察されたが、市販生分解性マルチフィルム「カエルーチ標準」よりは劣化程度が軽微であり、露地作スイートコーン栽培に対して、適応可能な耐久性を持つと判断された(第 68 図)。一方、R3-2 はコーンの栽培期間の終わりまで目立った劣化は見られず、強度の高い市販生分解性マルチフィルムである「カエルーチ高耐久」とほぼ同等の耐久性を持つと判断され、より長期の作型に対する適応の可能性が示唆された(第 68 図)。土壌への埋設後 3 か月半が経過した各種マルチフィルムの分解程度は、複数の小さな穴があくなど、いずれも軽度な分解が観察された(第 69 図)。酵素剤処理をしたサンプルでは、酵素剤処理のないものと比較して、分解が促進されており、特に R3-1 とカエルーチ標準では分解程度が大きかった。酵素剤処理と組み合わせることで、鋤込みから厳冬期までの比較的短期間にマルチフィルムの分解が進んだことから、次作の栽培が始まる春先までには、作物の生育に支障がない状態まで分解が進むことが予測される。

3-1-3 茨城県

3-1-3(1) イチゴの施設栽培試験の結果

イチゴ栽培におけるマルチフィルムの展張に掛かる作業時間について 30a を 3 人組で作業した場合で試算した結果、市販生分解性マルチフィルム(32 時間)と PE 製マルチフィルム(32 時間)において差はなかったが、e-0 黒は 40 時間であり、他の試験区より展張に時間が掛かった(第 26 表)。

生育について、第 3 葉長はマルチ展張前(定植 1 か月後)～展張後(定植 2～3 か月後)まで試験区間に大きな差は見られなかった。頂花房の開花・収穫開始日においても、試験区間に差は見られなかった(第 27 表)。

収量(12/27～4/22)は、e-0 黒 3,377kg/10a と市販生分解性マルチフィルム 3,351kg/10a であり、PE 製マルチフィルム 3,603kg/10a と同等であった(第 28 表)。

栽培期間中のマルチフィルムの耐久性は、e-0 黒と市販生分解性マルチフィルムにおいて、展張前から展張中期にかけて突刺し強度の数値が高まったが、その後はおおむね横ばいであった(第 70 図)。

酵素剤処理後の生分解性マルチフィルムの突刺し強度は、e-0 黒と市販生分解性マルチフィルム共に、酵素剤処理無しと比べて値が低下した。酵素剤処理の有無による突刺し強度の数値変化は、処理後 1 日目から 1 週間まで同様の傾向であった(第 71、72 図)。

イチゴの生育期間中(12/15~3/31)における各月の平均地温は、いずれの期間も PE 製マルチフィルムより生分解性マルチフィルムの方が若干低く推移し、生分解性マルチフィルム間の比較では、e-0 黒が、PE 製マルチフィルムに近い地温を維持できた。生育期間中の地温は PE 製マルチフィルム>e-0 黒>ビオフィレックスマルチの順で高く推移したが、いずれのマルチフィルムにおいても適温域(18℃程度)より低かった。生育や収量に影響する厳寒期(12 月~2 月)のマルチフィルム間の地温差は小さかった(第 73 図)。

新規素材を配合した試作フィルム e-0 黒は、大きな穴や土が露出している部分もなく、栽培途中で剥がれることもなかった(第 74 図)。

3-1-3(2) タマネギの長期栽培試験の結果

冬越しの長期にわたるタマネギ栽培の生育について、葉枚数、草丈、葉鞘径は生育調査 1 回目(2 月 26 日)~収穫時(6 月 2 日)まで試験区間に有意な差は認められなかった(第 29 表)。

収量は、e-0 黒 6,895kg/10a と e-2 黒 4,858kg/10a、市販生分解性マルチフィルム 5,261kg/10a であった。各生分解性マルチフィルムの試験区の収量は、PE 製マルチフィルム 6,831kg/10a と同等であった。ただし、茨城県の露地栽培タマネギ標準収量 6,000kg/10a を満たしたのは、PE 製マルチフィルムと e-0 黒であった(第 30 表)。

タマネギ栽培マルチ展張時の作業時間について 10a を 5 人で作業した場合で試算した結果、e-0 黒が 4.7 時間と最も時間が掛かり、PE 製マルチフィルム(4.2 時間)と市販生分解性マルチ(3.6 時間)は同等であった。e-2 黒は 2.8 時間で、どの試験区よりも早かった(第 31 表)。

生分解性マルチフィルムを利用したタマネギ栽培の作業時間は 85.7h/10a であり、PE 製マルチフィルム 87.1h/10a と比べて短くなった。また、使用機械の種類や機械稼働時間と燃費から算出した CO₂排出量の合計値は、PE 製マルチフィルムと生分解性マルチフィルム栽培共に 33,934kgCO₂/10a であり、差は認められなかった(第 32、33 表)。

供試したフィルムは、PE 製マルチフィルムと同様に大きな裂けはなかった。

タマネギ生育期間中(12/16~5/31)における各月の平均地温は、いずれの期間も PE 製マルチフィルムより市販生分解性マルチフィルムの方が若干高く推移し、生分解性

マルチフィルム間の比較では、e-2 黒が、PE 製マルチフィルムに近い地温を維持できた(第 75 図)。生育期間中の地温はビオフィレックスマルチ>e-2 黒>PE 製マルチフィルム>e-0 黒の順で高く推移した(第 75 図)。

3-1-3(3) 果菜類であるナスの栽培試験の結果

これまで生分解性マルチフィルムの適応がほとんどなされてこなかったナス栽培への適応を試みた結果、株の生育について、主茎長、葉枚数および茎幅は、マルチフィルム展張および定植時(4月21日)～収穫開始時(6月14日)まで試験区間に大きな差は見られなかった(第 34 表)。

収量(6/14～9/27)は、R3-1 黒 3,583kg/10a、R3-2 黒 3,760kg/10a と市販生分解性マルチフィルム高耐久品 4,116kg/10a であり、PE 製マルチフィルム 4,056kg/10a と同等であった(第 35 表)。

栽培期間中のマルチフィルムの耐久性は、R3-1 黒が展張後 3 か月で強風により大きな裂けが入った。R3-2 黒と市販生分解性マルチフィルム高耐久品においても、剪定枝の落下による穴や植穴の裂けにより、展張後 4 か月で大きな裂けが入ったが展張後 6 か月までフィルムを保持することができた(第 76～79 図)。

マルチフィルム引張距離は、展張前の未使用マルチの値を 100 としたとき、展張中期において R3-1 黒で-23.4%、R3-2 黒で-24.1%、市販生分解性マルチフィルム高耐久品で 51.3%であり、栽培終了時において R3-1 黒 -49.6%、R3-2 黒 -42.9%、市販生分解性マルチフィルム高耐久品 60.2%であった。マルチフィルム引張強度は、展張前の未使用マルチフィルムの値を 100 としたとき、展張中期において R3-1 黒 -31.5%、R3-2 黒 -35.1%、市販生分解性マルチフィルム高耐久品 47%であり、栽培終了時において R3-1 黒 -54.9%、R3-2 黒 -52.2%、市販生分解性マルチフィルム高耐久品 54.2%であった(第 36、37 表)。

酵素剤処理後のマルチフィルム引張距離は、展張前の未使用マルチフィルムの値を 100 としたとき、酵素剤処理後のマルチフィルムと栽培終了後のマルチフィルムを比べると、R3-1 黒 -4.2%、R3-2 黒 -1.2%、市販生分解性マルチフィルム高耐久品 5.6%であった。酵素剤処理後のマルチフィルム引張強度は、展張前の未使用マルチフィルムの値を 100 としたとき、酵素剤処理後のマルチフィルムと栽培終了後のマルチフィルムを比べると、R3-1 黒 -3.4%、市販生分解性マルチフィルム高耐久品 2.1%であった。一方、R3-2 黒は+1%と増加した。新規素材を配合した試作フィルム R3-1 黒と市販生分解性マルチフィルム高耐久品は、酵素剤処理無しと比べると値が低下した(第 36、37 表)。

ナスの生育期間中(5/14~10/31)における各月の平均地温は、いずれの期間も PE 製マルチフィルムより新規配合生分解性マルチフィルムの方が若干高く推移し、生分解性マルチフィルム間の比較では、市販生分解性マルチフィルム高耐久品が、PE 製マルチフィルムに近い地温を維持できた。生育期間中の地温は R3-1 黒>R3-2 黒>PE 製マルチフィルム>市販生分解性マルチフィルム高耐久品の順で高く推移したが、いずれのマルチフィルムにおいても栽培初期の適温域(15℃~20℃)より高かった(第 80 図)。

令和 2 年度に行ったイチゴ施設栽培と冬期露地タマネギ栽培においては 6 か月間被覆を維持でき、いずれの品目でも収量や生育が慣行と同等だった。令和 3 年度に改良された試作の生分解性マルチフィルムは、夏期露地ナス栽培において展張後 3~4 か月間は被覆が維持できた。果菜類に広く応用していくためには、更に 1、2 か月程度の耐久性が必要であり、今後の開発が期待される。

3-1-4 三菱ケミカルアグリドリーム

3-1-4(1) 茨城県の農業生産圃場における栽培実証

春作レタス作

実機で製造したフィルムの展張期間中の耐久性を実証するため、茨城県内で最も野菜の生産が盛んな地域の一つである県西地区の生産者に御協力いただき、長期間の展張試験を実施した。展張試験には、慣行の対照区として PE 製マルチフィルムを用い、生分解性マルチフィルムの市販品対照として、市販高耐久 A、市販標準 A~C を用い、e-0、R3-1、R3-2 との比較を行った。フィルム色は PE 製マルチフィルムを銀、ほかは黒とした。本展張試験では、令和 3 年 3 月 12 日に展張を行い、3 月 15 日にレタスを定植し、展張 70 日後に 1 回目の酵素剤処理と鋤込みを、展張 144 日後に 2 回目の酵素剤処理を実施した。

令和 3 年 3 月 12 日に実施したマルチャーでの展張作業において、e-0、R3-1、R3-2 共に、他の対照区と同様に、裂けや伸び、しわなどが入ることなく、問題なく展張できることが分かった(第 81 図)。また、本試験では、長期の展張試験を実施する間のフィルムの劣化による飛散を防止するため、フィルムを固定する対策を講じた。

3 月 15 日に実施した定植から 12 日目の観察では、全てのフィルムで外観上の劣化は確認されず、定植直後のレタスも問題なく活着、生育していた(第 82 図)。

定植後 26 日の観察では、全てのフィルムで外観上の劣化は確認されず、レタスが問題なく生育していた(第 83 図)。

定植後 40 日の観察では、PE 製マルチフィルム、市販高耐久 A、R3-2、R3-1、e-0、市販標準 A、市販標準 C には裂けや伸びが見られなかったが、市販標準 B の株元の植え穴に伸びが発生し、劣化が始まっていることが示唆された。レタスは問題なく生育していた(第 84 図)。

定植後 55 日の観察では、PE 製マルチフィルム、市販高耐久 A、R3-2、R3-1、e-0 には伸びや裂けが見られなかったが、市販標準 A では株元に伸びが確認され、市販標準 B、市販標準 C には裂けが発生していることが確認された。レタスは問題なく生育していた(第 85 図)。

定植後 66 日の収穫後の株元の穴周辺のフィルムの観察では、R3-2、R3-1、e-0 は大きく裂けることなく、市販高耐久 A に近い状態を保っていることが確認された。

以上の結果から、日光が直接当たらない株元の耐久性については、新規樹脂を用いた配合の R3-2、R3-1、e-0 は高い耐久性を示し、市場の高耐久品相当の耐久性を実現できることが確認された(第 86 図)。

次に、生育状況について比較を行った(第 87~90 図)。一般的に生分解性樹脂は PE と比べて水蒸気バリア性が低いことが知られており、土壌水分の保持が十分でないために、栽培方法によっては PE 製マルチフィルムと生分解性マルチフィルムで生育速度に差が出るということが知られている。本展張試験においては、展張後 58 日間の生育状況について記録を行ったが、展張した全フィルム間で、レタスの生育に有意差を確認することはできなかった。収穫に当たった生産者の感触も同様であった。ただし、水蒸気バリア性の低さに起因する作物の生育遅延については、生分解性マルチフィルムの主要な課題の一つであり、今後、継続的に研究される必要がある。

次に、畝に展張したマルチフィルムの、畝肩に当たる部分の状態を調査した。畝肩は畝の平面部分の株元と異なり、雨や日光に直接曝され、かつ展張方向と垂直の張力がかかって土壌表面に強く接触していることが多いため、生分解性マルチフィルムで最も劣化が早く進む部分といわれている。生産者によれば、実際に、栽培中に最初に大きな裂けが生じるのが畝肩であることが多く、裂けた場所に風を孕んでフィルムが巻き上がり、被覆の機能を果たせなくなることがあるとのことだった。よって、畝肩の強度は生分解性マルチフィルムの配合の開発において重要なポイントであり、配合によって畝肩の劣化の度合いに差が出ることが予想された。レタス作では実際に展張から 29 日目で、e-0、および市販標準 A、市販標準 B、市販標準 C において、小さな穴や裂け目があいていることが確認された(第 91 図)。

さらに、展張から 58 日目の観察では、PE、市販高耐久品 A には穴や裂けは見られなかったが、R3-2、R3-1、e-0 には僅かに穴があいていることが確認された。市販標準 A、

市販標準 B、市販標準 C においては著しい裂けが発生し、特に市販標準 B、市販標準 C では裂けが畝肩全体に広がり、強度が大きく低下していることが確認された(第 92 図)。

展張から 69 日目のレタスの収穫後の畝肩の状態を確認すると、PE には穴や裂けは見られなかったが、市販高耐久品 A、R3-2、R3-1、e-0 には僅かに穴があいていることが確認された(第 93、94 図)。市販標準 A、市販標準 B、市販標準 C においては裂けや穴が全体に伝播している様子が確認された。本試験では、レタス栽培区の畝を南北方向に設定しており、畝肩は畝の西側と東側に当たる。日の出と日の入りに直接畝肩に日光が当たることを想定し、双方の差を確認したところ、東側で若干劣化が進んでいるように見受けられたが、明らかな差はなかった

以上の結果をまとめると、直射日光に晒される畝肩のフィルム強度は、強い方から順に、PE>市販高耐久 A>R3-2>R3-1>e-0>市販標準 A>市販標準 C>市販標準 B であった。株元と畝肩で耐久性に差が出た原因としては、株元では、レタスの植物体によってフィルムが遮光され、加水分解が分解の主要因となるため、開発品の加水分解抑制配合が効果を発揮したが、直射日光が当たる畝肩では、高エネルギーの紫外線と酸素による酸化分解が進行し、市販品高耐久フィルムと差が生じたと考えられる。

次に、展張の際にフィルムを固定するために土壤中に埋設される部分の分解性について考察した(第 95 図)。畝上から地際部分を含み、埋設されている部分を切り出して確認すると、分解が進行している順に、市販標準 C>市販標準 B>市販標準 A>e-0>市販高耐久 A>R3-1>R3-2>PE であった。埋設された部分のフィルムの分解の様子が、フィルムの厚みが減少し、更に進むと虫食い状を示していることから、典型的な生分解が進行していると考えられる。

レタス圃場での実証試験では、生産者の御厚意によりレタスを収穫後も畝を約 80 日間、計 144 日間の長期間使用する許可を得た。そこで展張 66 日後も畝長の約半分を維持し、観察を続けた。展張 140 日に近づく頃から、e-0 は大きく欠損し、市販高耐久 A、R3-2 で畝肩の劣化が顕著となった(第 96、97 図)。そこで 8 月 2 日に 2 回目の酵素剤処理および鋤込みを行った(第 98、99 図)。144 日後の各フィルムの様子は、被覆の維持という観点では、PE>R3-2≒市販高耐久 A>R3-1>e-0 の順であった(第 97 図)。市販高耐久 A は畝肩の裂けが広がっていたが、畝面は比較的強度が残っており、R3-2 が全体的に劣化は見られるものの被覆を維持していた様子とは異なっていた。R3-1 も一部の畝肩が裂けてその周辺が欠損していた。展張期間の後半は、植物体による日光の遮蔽がなく、また極めて高温の夏期を経ていること考え合わせると、R3-2 と市販高耐久 A は、条件が整えば当初の目標の 6 か月間の耐久性を発揮できることが期待された。

ただし、長雨や強風、作物や病虫害の原因生物が分泌する物質などによって予想外の劣化が進むことがあり得るので、実用的には更に1か月程度の耐久性を加えたい。

2回目の酵素剤処理と試料の収集を終えた各区は、畝全体の鋤込みを行った(第98図)。鋤込み作業に際して、処理区ごとにロータリーを持ち上げてロータリーのブレード部分や機械部分にマルチフィルム断片の巻き付きがないかを確認したところ、R3-1の処理区の一部で僅かにブレードに断片の付着が見られたが、生産者によると、問題はないとのことであった。市販の生分解性マルチフィルムの一部では鋤込み時に長いフィルムの残存部分がロータリーの回転軸に絡まり、最悪の場合は機械の故障につながるとのことだったが、本試験に用いた生分解性マルチフィルムはいずれもその懸念がないとの御意見であった。本試験の鋤込み深さは平均して15cmとのことであり、鋤込み後の圃場の様子を丹念に観察したが、いずれの区においても目立ったマルチフィルム断片は見いだせなかった(第99図)。その後4か月にわたって当圃場の観察を続けたところ、マルチフィルム断片の飛散や用水への流出は見られなかった。このことについて、生産者の御意見も聴取したところでは、高耐久型の生分解性マルチフィルムであっても、夏期を越す使用では十分な分解性を示し、次の作付けには影響がないものと考えられた。

ここまでの実証試験の結果から、高耐久性の生分解性マルチフィルムを設計する基本的な情報を得ることができた。すなわち、畝肩など直射日光によって酸化的な分解が促進され、かつ加水分解が起こる部分では「耐候性」を考慮した配合設計を行う必要があるが、地際においては「加水分解や生分解」を抑制する配合設計が必要であることが示唆された。本年度開発した、新規樹脂Aを主とする配合においては、添加剤Xを用いることで、地際の分解制御では市場の高耐久生分解性マルチフィルム以上の耐久性を実現できた。また、畝肩部分においても、加水分解を抑制することが、耐久性向上に大きく寄与することが分かった。今後、樹脂配合のバランスや添加剤によって耐候性を向上させることで、これまで実現されていなかった6か月程度の長期間の展張に対応可能なマルチフィルムを得ることができると考える。

酵素剤による生分解性マルチフィルムの分解効果の検証

現行の生分解性マルチフィルムでは、耐久性の課題のほかに、鋤込み時にフィルムがロータリーのブレードに巻き付くことや、鋤込み後のフィルムが土中に残存する問題が残っている。特に、本事業で取り組んだフィルムの高耐久化を発展させることによって、一方で上記の課題が顕在化する可能性が懸念される。これらの課題を解決する有力な方法として、展張後のフィルムの分解を加速させ、鋤込み時まで十分に劣

化させておく方法がある。本検討では、第 2 章の評価、解析法に加えて、農研機構で開発された加水分解促進酵素を展張後のフィルムに散布し、その効果を検証した。分解挙動を確認する方法として、走査電子顕微鏡法（以下、FE-SEM）を用いてフィルムの表面の微細な変化を可視化した。

FE-SEM での観察方法は；

- ・ 前処理：各試料を超純水で超音波洗浄した。
- ・ 形態観察（表面）：試料を切り出し、導電処理（0s プラズマコート）して、フィルム表面を FE-SEM にて観察した。
- ・ 装置：日本電子製 JSM-6340F、加速電圧 5kV
- ・ 観察倍率：×5,000

とした。

展張前と展張後の表面 FE-SEM 画像を比較すると、展張後に無機フィラーの欠落によって穴が見られる箇所があるが、全配合とも大きな変化は見られなかった。一方で、酵素剤処理後は裂け目が生じ、明らかに樹脂の分解が促進されていることが確認された。また、配合間での差も確認され、酵素分解が促進された順に市販標準 C>市販標準 A>市販標準 B>R3-1>3-2>e-0>市販高耐久 A となった。本事業で開発した組成について配合面から考察すると、PLA を含む e-0 と R3-2 は、R3-1 と比較して分解が抑制されたと考えられる。また、PLA を含む e-0 と R3-2 は、不規則に崩壊するのではなく、表面の非結晶部が分解されて網目上の構造が露出しているのが確認された。以上の結果から、本事業で開発した新規樹脂 A を用いた組成物は十分な酵素分解性を有し、高耐久化の配合設計や酵素剤処理を活用することで、目標とした長期耐久性と簡便な処理を同時に実現することが可能であることが確認できた（第 100～106 図）。このことは、今度の継続的かつ効率的な生分解性資材の開発の基礎が形作られたという意味で、大きな成果である。

なお、同じ生産者の御協力でお口から実施したミズナを用いた試験においても同様の結果を得ており、開発品の実用性が重ねて実証された。

今後、本事業で開発した R3-1、R3-2 の配合を基本にして、耐候性を付与する処方を開発することで、使用中は高耐久で既存の PE 製マルチフィルムのよう実用性が高く、酵素剤処理と鋤込みによって簡便で安価に処理できる画期的なフィルムの実用化につながると期待される。

秋作ミズナ作

新規試作フィルム R3-1 および R3-2 を供試した露地秋作ミズナ栽培における収穫物の生育状況は、市販標準 A、市販高耐久 A である市販生分解性マルチフィルムと遜色ないことが、生産者からの情報で確認できた(第 107 図)。栽培終了時には、R3-1、R3-2 フィルムでは複数の裂け目が入るような劣化が観察されたが、市販標準 A より劣化程度は軽微であった(第 108 図)。フィルム表面の耐久性を比較すると、市販高耐久 A > R3-2 ≒ R3-1 > 市販標準 A であることを確認し、この結果は他の圃場での実証試験から得られた結果とほぼ同等であった。

マルチフィルム展張から 75 日後に、酵素剤の散布を実施し、その翌日にトラクターを用いた土壌中への鋤込みを行った。酵素剤散布後の様子は、令和 3 年 6 月に実施した春作のマルチフィルムへの酵素剤処理時と比較し低湿度であったことから、酵素剤散布後はフィルム表面の乾燥が若干早いように見受けられたが、処理後一晩経過後は複数の細かい裂けが発生しており、目視でもフィルムの強度低下の徴候が見られ分解が進んでいることが推測された。鋤込みにおいては、フィルムの断片のロータリーのブレードへの巻き付きが一部のフィルムで見られた。フィルムが畝にしっかりと固定されている場合はロータリーで細断化しつつ土の中に鋤込まれるが、畝に固定されていない状態でフィルムに柔軟性が残っている場合は、鋤込み操作によって土と混合する前にロータリーの軸に絡まる可能性があるかと推測した。生産者に依頼して追加の鋤込みを行わず放置した、50 日後の厳冬期の圃場の観察では、風雨により僅かにフィルムの断片が露出している状態だったが、周辺の農地や道路への飛散は見られなかった(第 109 図)。露出したフィルム断片は、市販標準 A、R3-1 で市販高耐久 A、R3-2 より少ない傾向が見られ、また酵素剤処理の効果も確認できた。生産者によると、数週間後にロータリーで転耕することによって、2 月の春作の時点ではほとんどのフィルムが消失しているだろうとのことであった。低温の厳冬期においても、高耐久性生分解性マルチフィルムは的確な酵素剤処理と組み合わせることで強度を低下させることができ、さらに、鋤込みのタイミングを調整することによって分解を進めて次作への影響を避けることで、生産者の圃場で使用できる可能性を示すことができた。

3-1-4(2) ハヶ岳中央農業実践大学校での栽培実証

セロリ作

生産者に依頼して、展張はマルチャーで実施した。R3-1、R3-2 の展張作業は、PE 製マルチフィルムと遜色ない速度、作業性にて展張できたとのことであった。供試した R3-1、R3-2 は地温上昇に適する透明とし、比較として市販高耐久 A、市販標準 A の黒マルチフィルムを展張した。セロリの生育状況を比較すると、R3-1、R3-2 は市販高耐

久 A、市販標準 A と同等であったが、展張 1 か月後から裂けが大きく展開し、そのこと
によって雑草の繁茂が激しく、雑草の抑制の機能は十分に果たせなかった(第 110、111
図)。市販高耐久 A、市販標準 A は、所々に裂けは見受けられたが、強度を保持してい
ることが確認された。

今期、対象の試験地では記録的な降雨と日照不足が続き、生産者によると通常栽培
のセロリも病害に侵され収穫ができなかった。また、透明の R3-1、R3-2 の強度不足、
展張後の獣害、降雨や雑草の繁茂によりフィルムの分解が進行してしまったことから、
収穫量の確認とフィルムの鋤込みとその後の分解性評価は不可能と判断し、展張 4 か
月をもって試験を終了した。本年度のセロリ栽培による実証試験では、加工用トマト
作、神奈川県 3-1-1(4) 試験機関圃場におけるカボチャ作の結果と同様に、透明の新
規開発分解性マルチフィルムの強度が黒色に比べて劣る結果となり、フィルムの色
の違いによる物性の差異の検証と低い耐久性が課題として挙げられた。本試験の結果
も踏まえ、継続した実証作業が望まれる。

観賞用カボチャ作

セロリの場合と同様に、マルチャーを使用した展張作業では、新規開発分解性マ
ルチフィルム R3-1、R3-2 と市販分解性マルチフィルム市販高耐久 A、市販標準 A で
は差が見られず作業性は良好であった。展張から 1 か月後のフィルム表面を観察する
と、R3 シリーズは、市販高耐久 A と比較し、小さな裂けが点在していた(第 112、113
図)。また一つの特徴として、R3-1、R3-2 は、市販品と比較してフィルム表面の水滴の
付き方に違いが見られた(第 114 図)。R3-1、R3-2 は水捌け性が見られ、市販高耐久 A、
市販標準 A は水滴がマルチフィルム表面に付着した。水濡れ性とフィルムの耐久性と
の関係は明らかではないが、供試したフィルムでは、配合や製造方法に起因するポリ
マー分子の配向の違いにより、表面の水濡れ性や裂け強度にも違いが生じたのではな
いかと推測された。

生産者によると、開花、受粉期、果実登熟期のいずれも例年に見られない多量の降雨
に遭い、その結果、結実、登熟不良となって収穫量が例年の 1/10 以下となったとのこ
とである。よって、収穫量に関する評価が行えなかった。一方、栽培終盤で、主に鹿に
よる獣害が深刻となり、畝の表面が荒らされたことから、フィルムの破損は他の試験
圃場よりも激しかった(第 115 図)。フィルムの耐久性は市販高耐久 A ≧ R3-2 > R3-1 >
市販標準 A であった。展張から約 5 か月後に残存しているフィルムを用いて、酵素剤
処理と鋤込み評価を実施した(第 116 図)。ロータリーによる鋤込み性に関しては、生
産者から酵素剤処理区でロータリーの軸やブレードへのフィルム断片の絡みが少ない

旨のコメントを得た。また鋤込み後の空撮による画像解析によっても、表面に残るフィルム残渣に差は見られなかった(第 117 図、第 38 表)。これらのことから、展張から鋤込み後の分解まで生産現場で確実に適応できるようにマルチフィルムを開発するに当たっては、フィルム断片のロータリーへの絡み付きの評価、経時的な分解程度の評価を合わせて評価、考察しつつ行っていく基盤ができた。

加工用トマト作

セロリに供試したマルチフィルムと同様に、R3-1、R3-2 は地温上昇に適する透明マルチフィルムを用い、対照として市販高耐久 A、市販標準 A の黒マルチフィルムを展張した。生産者への聞き取りによってトマトの生育状況を比較すると、初期生育は R3-1、R3-2 は市販高耐久 A、市販標準 A より良好であったが、マルチフィルムと土壌の僅かな隙間から雑草が大きく育ち、R3-1、R3-2 フィルム裂けの原因となった(第 118、119 図)。一方、市販高耐久 A、市販標準 A は所々に細かな裂けが見られたが、強度を保持していることが確認された。トマトの圃場でも他の試験区と同様に、展張開始時から鹿による獣害と天候不順の影響が深刻となり、トマト果実を食べられてしまったこと、畝の表面が荒らされてフィルムが散逸してしまったこと、長雨によりフィルムの分解が想定以上に進行してしまったことから、収穫量の確認、酵素剤処理、フィルムの鋤込み時の分解性評価は不可能と判断し試験を終了とした。セロリ作、神奈川県のカボチャ作における実証試験と同様に、透明の新規開発マルチフィルムは黒色のそれに比べて強度が劣ることが明確になり、フィルムの色に違いによる耐久性の評価と物性の改良について今後検討すべき課題が示された。

3-1-5 新規素材を用いた生分解性マルチフィルムの圃場での実証まとめ

令和元年度から 3 年間にわたり 10 地点の圃場で延べ 21 回の実証を行ってきた(第 49 図)。特に令和 3 年度は、当初の目的であった、実際の農業生産者による本事業で開発した新規の生分解性マルチフィルムの評価を行った。その結果、市販の生分解性マルチフィルムの標準品と同等の性能を求めた配合(配合シリーズ 2 の e-0 など)、および市販の高耐久品を超える耐久性を目指して開発した配合(配合シリーズ 4 の R3-1、R3-2 など)が、酵素剤の適応も併せて行うことによって、作物の収穫、使い勝手、使用後の処理において、市販品と同等あるいはそれ以上の性能であるとの評価を得た。

生産者での実証は、令和元、2 年度に各県の試験機関で行ってきた試験の経験をもって試験機関の指導の下に行われた。県の試験機関は、天候など農業生産に影響を及ぼす要因が年ごとに変動することを前提として、試験機関の圃場における試験と生産者

による試験を数年繰り返した上で、新たな技術として展開する。本事業によって 2 回ないし 3 回の繰り返し実証試験を行った作目、作型では、本事業で開発した生分解性マルチフィルムを独自に準備して実用に向けての試験を繰り返す予定である。また令和 3 年度に実証を開始した作目、作型では、結果を精査の上、繰り返しの試験を開始するとのことであった。本事業の成果が着実に社会実装につながっていく好例といえる。

他方、三菱ケミカルアグリドリームは、野菜の生産が盛んな地域で生分解性マルチフィルムの普及活動を進めている事業者、地域の有力な生産者の協力の下、春～夏作、秋作の実証を行うことができ、貴重な情報を得た。この生産者は、本事業で開発した生分解性マルチフィルムを独自に準備し、冬～春作の検討も予定しており、周年にわたる当該地域での実証を果たす。県の試験機関での取り進めと同様に、このような実証作業を数年繰り返し、地域への展開を徐々に進めていく予定である。

なお、これら生産者には、第 5 章のラフサイクルおよび経済性の評価のための情報収集も依頼し、マルチフィルムの展張から栽培の全ての行程、およびフィルムの最終処分に至る調査に協力いただいた。

各試験拠点で行ってきた実証の要点をまとめる；

- ・全国の産地で生分解性マルチフィルムの実用化が進みつつあるスイートコーンについて、複数地点で異なった作型にて新規の生分解性マルチフィルムと酵素剤の適応を検討し、地域、季節、栽培期間、栽培方法を問わず、問題なく適応可能なことを示した。
- ・新規の生分解性マルチフィルムと酵素剤を用いて栽培とその後の処理を終えた後、次作以降の影響を確認した複数の試験では、次作へ影響がないことを確認した。
- ・社会実装を確実に進めるために、解決すべき課題が明らかになった。すなわち、
 - 盛暑期や果菜類に対応する高耐久製品として、配合シリーズ 4 の耐久性に加えて、更に 1 か月ないし 2 か月の耐久性が必要なこと、
 - 透明のフィルムは、同じ配合であっても黒色等着色の物より、耐久性が劣ること、
 - PE 製マルチフィルムと比較して水蒸気の透過性が高く、土壌水分を高く保ちたい作目、作型に向けて改良が必要なこと、
 - 低温期は生分解の速度が低下すること、あわせて、酵素剤の能力も低温下で低下すること、

などについて、本事業で得られた情報を活用し、引き続き本事業の共同実施者の協力を得つつ解決に向けて取り組んでいくことを望む。

第5章 ライフサイクル検証・評価

1. 検討の概要

持続可能な循環型社会の構築を目指し、本事業の開発で得られる新規素材の社会実装を進めていくためには、素材の生産から農作業の終了、素材の最終処理に至るまでの環境負荷と経済性の解析に関する情報を集積の上で総合的な評価を行い、利用者および社会一般に情報提供していくことが求められる。

また、今後の環境保全と産業振興のバランスを考える上で、生分解性かつ植物資源由来の新規素材を用いた農業生産の広がりが、ライフサイクル全体を対象とした場合に環境と社会にどのような影響を及ぼすかを、例えば枯渇型エネルギーの使用、エネルギー由来の温室効果ガスの発生といった各種環境負荷を指標として明らかにしておく必要がある。

新規素材を用いたフィルムを実際の利用および最終処理に近い条件で実証試験を行うことにより、生分解性農業用フィルム製品のライフの最後までを想定した評価を行ってその有効性を示す。加えて、新規素材と酵素剤の組合せの普及を目指して、本事業が終了後速やかに一般生産者の圃場で生産性評価が行えるよう、生分解性のマルチフィルムが効果を発揮すると想定される多様な地域の試験場を計画的に実証試験に加え、評価情報の集積と共有を進めていく。これらの情報を基に、この新たな農業生産システムのリサイクル性、CO₂放出削減効果、および経済性に関わる評価を行う。

まず令和元年度は、実施すべき評価の手法を、その前提を含めてまとめることを試みた。その結果、過去の種々の LCA 結果を解析して、評価領域とベースラインを検討し、それぞれを決定した。また、関連する文献、農業経営の情報、農家の実態等の予備調査により、評価結果へ影響を与える重要因子やその前提の置き方、得るべき 1 次情報、2 次情報の選択、経済評価項目と評価値算出の方法など、調査の基本方針を決定した。

ベースライン；

ベースラインについては、

- ・事例 A JRC TECHNICAL REPORTS, “Environmental sustainability assessment comparing through the means of lifecycle assessment the potential environmental impacts of the use of alternative feedstock (biomass, recycled plastics, CO₂) for plastic articles in comparison to using current feedstock (oil and gas)”, Draft report for stakeholder

consultation(part1) および (Part2)103-138, Dec. 19. 2018, Joint Research Center

- ・ 事例 B Environmental impact assessments of innovative bio-based product, Task 1 of “Study on Support to R&I Policy in the Area of Bio-based Products and Services”, Dec 2018, COWI A/S and Utrecht University
- ・ 事例 C “Assessing the environmental performance and ecotoxicity effects of biodegradable mulch films”, Francesco Razza, Fernanda Farachi, Maurizio Tosin, Francesco Degli Innocenti, Sara Guerrini (2010), VIIth international conference on life cycle assessment in the agri-food sector, Bari, pp 22-24

の3種の事例を調査したところ、いずれも従来型マルチフィルムとしてLDPEを主原料とする製品を評価し、生分解性との影響を比較していた。LDPEを主とするPE製は現在でも一般的に利用されているマルチフィルムであり、ベースラインとして適当なものであると考えられた。また、事例A、Bの地球温暖化係数(Global Warming Potential、以下、GWP)の評価手法は同じであるが、事例Cは異なっており、事例A、Bに比べメタンガスを過小評価することになる。

評価したマルチフィルム

3事例とも、PE製を従来品として評価していた。事例Bでは、主な製造企業2社の、それぞれ原料の異なる生分解性マルチフィルムのインベントリ分析を行い、この結果を各マルチフィルムの売上比により加重平均して、ヨーロッパ市場の平均的な生分解性マルチフィルムの評価としていた。

機能単位の設定

LCAの一つの基軸となる値である機能単位は、事例A、B、C共に、「1ヘクタール(10,000m²)の圃場のマルチング」としていた。被覆面積すなわちマルチフィルム使用面積は、全て6,000m²となっていた。この根拠は、ヨーロッパの圃場面積当たりのマルチング表面積の平均値としていた。マルチフィルムの厚みは素材により異なるため、機能単位当たりの重量は素材により異なり、PE製は生分解性マルチフィルムの2~3倍の重量となっていた。緒元の情報源は、事例Aでは、従来品のマルチフィルムを文献値から、生分解性マルチフィルムを製造企業からの情報より収集した^{22、23、24、25}。事例Bでは、マルチフィルム製造企業からの聞き取りを行っていた。事例Cは、自社製造の

マルチフィルムを評価対象としており、緒元は自社品のデータであった。このように、マルチフィルムの機能単位は3種の事例とも、1ヘクタール当たりのマルチング、これに対するマルチフィルムの表面積を6,000m²としていた。本事業では、圃場面積当たりの標準的なマルチング表面積を把握する情報がないため、圃場面積を機能単位とするのは困難である。よって、まずはマルチフィルムの単位面積を機能単位として評価を進めることが妥当であると考えられた。

システム境界の設定

3事例とも、システム境界は原料生産から最終処分までとしているが、マルチフィルムの使用段階の取扱いについては、事例ごとに異なっていた。事例Aでは、マルチフィルム製造時に用いる添加剤は情報不足のため評価していなかった。いずれの事例も、マルチフィルムの製造から最終処分までをシステム境界としているが、マルチフィルムの使用については、事例Aはマルチフィルム回収のみ、Bは評価外、Cはマルチフィルムの展張と回収のみを評価していた。また、事例A、Bで使用されるデータベースは、資本財の評価も入れており、すなわち直接投入される原料やユーティリティーだけでなく、設備や機械の評価もされている。本事業では、評価目的であるベースラインとの差異を明確にする上で、これらの評価結果に寄与するインパクトを考慮しつつ、適切なシステム境界を検討する必要がある。

LCシナリオ設定

各事例の評価対象マルチフィルムのLCシナリオは、事例A、Bでは、ヨーロッパの標準的なマルチフィルムの使用方法を評価するという目的で、シナリオ設定には、様々な標準値を使用していた。事例Cでは、自社製造の生分解性マルチフィルムを評価するために、製造についての1次データを収集してシナリオ設定を行っていた。また、マルチフィルムの使用については、システム境界に入れる場合も、詳細なシナリオは設定されなかった。本事業では、1次データ収集により、2種のマルチフィルムの使用時の差の有無についても検討を加えることとした。

最終処分法

最終処分のシナリオについては、事例AではGEN TR 16957(2016)を、BではEASTECHを参照し、ヨーロッパの平均的な農業用プラスチックの処分方法を想定していた^{26,27)}。事例Cでは、イタリアの農業用プラスチックの処分方法を想定して、文献を参照していた^{28,29)}。事例Aでは、生分解性マルチフィルムの土壌分解について、生分解性マル

チフィルムの規格である EU17033 の規格を想定していた。事例 B では、PE 製マルチフィルムの回収時に、フィルム重量に対して 10% の汚れの付着を想定して評価していた。このように従来型マルチフィルムの最終処分については、標準的な処分方法を考慮して、評価していた。処分方法については、不確実な要素が多々存在するため、国内における標準的な処分法の調査、検討とともに、処分方法の変動による感度分析をすることが妥当であると思われる。

使用データ、データ収集方法

ライフサイクルインベントリ用のデータは、LCA 用データベース、文献値、およびマルチフィルム製造企業の 1 次データから収集されていた。事例 C は、生分解性プラスチック MaterBi の製造企業による自社製品の評価のため、cradle to gate の考え方で生分解性マルチフィルム製造までの評価を自社データ収集により実施していた。他の事例は、ヨーロッパの標準的なマルチフィルムのライフサイクルを評価することを目指し、できる限りヨーロッパの平均的なデータを収集し、文献値等で補充していた。バックグラウンドデータは、事例 A では、欧州環境フットプリント用の EF-compliant dataset と Thinkstep 社が開発している LCA 用ソフトウェア GaBi のデータベースを、事例 B では、欧州の ecoinvent プロジェクトの LCA 用データベース ecoinvent3.3 を使用していた。このように、バックグラウンドデータも、ヨーロッパの平均的データが得られるデータベースを使用している。本事業では、事業内で実施されるプロセス、すなわちマルチフィルム製造、使用等の 1 次データの収集を行い、その上流、下流については、供給元のデータの入手、地理的妥当性のあるデータベースを使用することが適切であると考えられた。

各ケーススタディの評価結果概要と評価結果へ影響を与える重要因子

各事例の GWP の評価結果をまとめたところ、事例 B、C のバイオマス由来生分解性マルチフィルムは、デンプンベースコポリマーに分類した。事例 A、B の GWP 評価手法は同じであるが、事例 C は異なっており、事例 A、B に比べメタンガスを過小評価することになる。どの事例でも、デンプンベースの生分解性マルチフィルムは、PE 製マルチフィルムに比べ、ライフサイクルでの温室効果ガス排出が少ない傾向となった。事例 A では、2 種の生分解性マルチフィルムを評価しており、トウモロコシから製造された PLA をマルチフィルムに使用した場合は、PE 製マルチフィルムに対する優位性はほとんど見られないという結果となった。このマルチフィルムは、再生 PE を使うマルチフィルムよりも GWP が高くなる結果となった。また、同じ PE 製マルチフィルムの評価結

果は、三つの事例で異なっていた。特に事例 C の PE 製マルチフィルムは、他の二つの事例の物と重量、最終処分方法、GWP の算出方法が異なるなど、素材以外の違いが多々あるため、結果の差には様々な要因が考えられる。事例 A と B の PE 製マルチフィルムは、重量の差が小さく、処分方法もほぼ同じシナリオであるが、インベントリ分析に使用するデータが異なるため、結果が 3 割ほど異なったものと思われる。

事例 A と B の評価結果から、デンプンベースの生分解性マルチフィルムの各ライフサイクルステージの GWP を考察したところ、事例 A では、バイオマス原料の生産、CO₂ 吸収はポリマー製造に、生分解により排出される温室効果ガスは処分ステージに含まれて評価されていた。事例 B ではポリマー製造はマルチフィルム製造に含まれていた。最も寄与が高いのは、事例 A ではポリマー製造、事例 B ではポリマー製造を含むマルチフィルム製造であった。事例 B の結果では、バイオマス原料の生産による寄与は 5% となっていた。これらの結果より、最も GWP に影響を及ぼすプロセスは、ポリマー製造である可能性が示唆された。事例 B では、土地利用変化の寄与は 8% 程度を占めることが示唆された。一方、事例 A では、土地利用変化の影響がほぼ見られない結果となっていた。このように事例 A、B の評価結果によれば、温室効果ガスに関しては、バイオマス原料を含むマルチフィルムの製造がライフサイクルでの影響に大きな寄与を示す可能性が示唆された。しかし、この内容が十分に示されていない。また、土地利用変化を含めたバイオマス原料の影響も 10% 程度の寄与を示す可能性がある。本年度は、1 次データの収集を通して、これらの寄与を検討すべきと考えられた。

以上のようなケーススタディ事例の解析により、令和 2 年度は実際の情報収集の方法について考察した。特に、事例で記述が十分でない農業関係の情報収集については、詳細な検討に着手した。

想定される農業生産システムにおける投入・産出情報

本事業で対象とする生分解性バイオマスプラスチックのマルチフィルムを用いた農業生産システムと慣行の PE 製マルチフィルムを用いた農業生産システムを LCA と経済的評価によって比較する際に必要となる情報として、まず、標準的な農業経営を想定して各県においてまとめられているデータを収集した。これは、「農業経営指標」、「投入産出指標」等の名称で呼ばれており(以下、農業経営指標)、生産費等の金銭情報に加え、収量、作業時間、投入財に関する物量情報を含む。前者の金銭情報は、本事業における経済性評価に、後者の物量情報は LCA に活用できると考えられたため、これらのデータにより、評価対象システムの構築に着手した。昨年度は、評価対象となる農業生産システムが所在する県、すなわち本事業における現地実証圃場が立地する県であ

る神奈川県から、農業経営指標を入手した³⁰⁾。また山梨県および茨城県の試験機関からも同様の情報の提供を受けた。それらを用いて、マルチフィルムの使用に関する情報の記載状況を確認した。

農業生産システムからの GHG 排出量の概算

農業生産システムからの温室効果ガス (greenhouse gas、以下、GHG) 排出量を、簡易推計プログラム「SimpleAgriLCA-Veg-1.0」³¹⁾を用いて求めた。入力ワークシートに農業経営指標から得られるデータを入力することにより、GHG 排出量を推計した。入力するデータのうち、エネルギー関係に該当するものは、「機械作業・ハウス管理」という項目に振り分けられており、農業経営指標にある光熱動力費に相当する。また、この項目の LCA 用のバックグラウンドデータは、地球温暖化対策の推進に関する法律に基づく「温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度」で定められた係数としており、この係数を使用することでエネルギー起源の CO₂ 排出量を分類して算出することができる³²⁾。上述した農業経営指標のサンプルのデータのの一つを使って、SimpleAgriLCA-Veg-1.0 により、農業生産について、温室効果ガス排出の LCA を行った。なお、使用したマルチフィルムは、従来型の化石資源由来のマルチフィルムであり、10a 当たりの推定マルチフィルム使用量は 360~390m²、重量 6.5~7.8kg である。最も寄与の大きいものは、機械・肥料等の製造時の CO₂ 排出であった。マルチフィルムの製造を含めない場合、この寄与率が 75%、マルチフィルムを含めると 79%であった。エネルギー由来の CO₂ は圃場 10a 当たり 91.6kg で、その寄与率は 19%となった。

農業生産システムの経済性評価

農業生産システムの経済性は、農業経営指標を用いて評価することができる。以下にその基本的な考え方を示す。農業生産システムは農業生産物を得ることを目的としており、その価値を金額換算すると「時間当たりの所得」と整理することができる。

$$\text{「時間当たりの所得」} = \text{「総所得」} / \text{「総労役時間」}$$

ここで、「総所得」は、「収益」つまり農業生産物の市場価格から、農業生産に関わる各種経費を差し引いたものである。従来型マルチフィルムから生分解性マルチフィルムへの転換には、マルチフィルム購入の経費の変動を生むだけでなく、マルチフィルム除去作業の短縮による労役時間の削減や機械作業エネルギーの削減による経費の削減も起こり得る。

$$\text{「時間当たりの所得」} = (\text{「収益」} - \text{「経費」}) / \text{「総労役時間」}$$

もう一つの経済性の評価法には、投入経費に対してどれほどの所得が得られたかという「所得率」を見るものがある。

「所得率」＝「総所得」／「経費」

本事業では、生分解性マルチフィルムを使用した農業生産システムについて、農業経営指標が現実の農業生産と整合していれば、上述する手法により経済性評価を行うことが可能である。

さらに、従来型マルチフィルム使用による農業生産と環境性及び経済性の二軸を加味した比較のための指標として、環境負荷当たりの経済価値を示す「環境効率」を求めることも可能である。

「環境効率」＝「時間当たりの所得」／「環境負荷」

経済性評価については、このような手法を基盤として、本年度以降、農業経営指標に農業関係の試験研究、普及機関、農業者からの情報を加味しつつ取り進めることとした。

本年度は、第4章の実証試験から得られる情報を基に行うLCAと経済性評価の手法を確立するために、昨年度の条件検討の上に、生分解性マルチフィルムのLCAおよび経済性に必要なフォアグラウンドデータ、バックグラウンドデータの収集を実施する。また、このフォアグラウンドデータを使用したLCAおよび経済評価を試み、問題点を洗い出し、今後の生分解性マルチフィルムの改良技術検討の重要な側面を明らかにする。

2. 材料および手法

2-1 LCA および経済性評価のシステム境界およびデータ収集範囲

LCA および経済性評価のシステム境界およびデータ収集範囲を設定した(第120図)。生分解性マルチフィルムの効能を評価するために、従来法による栽培との比較を想定し、PE製マルチフィルムをベースラインとして同様のデータ収集によるLCAおよび経済性評価を行った。機能単位はマルチフィルムの被覆面積、レファレンスフローは100m²とした。

2-2 フォアグラウンドデータおよびバックグラウンドデータ収集

2-2-1 マルチフィルム製造のフォアグラウンドデータ

マルチフィルム製造プロセスのフォアグラウンドデータは、フィルム用素材製造を行う PTTMCC(タイ)、マルチフィルムの製造を行う三菱ケミカルアグリドリーム(茨城県牛久市)にて収集した。

2-1-2 農業生産のフォアグラウンドデータ

農業生産のフォアグラウンドデータは、データ収集に協力いただける農業生産者の圃場および 2 か所の県の農業技術センターの圃場に市販の生分解性マルチフィルムおよび PE 製マルチフィルムを展張し、同じ作物について同じ条件で栽培を依頼し、栽培に投入される肥料、資材、燃料等の量と経費および栽培の労役の評価に必要な時間、人員数を調査した。調査項目は、昨年度の調査で報告した農業経営指標で使用されている指標類を参考にした。農業生産のフォアグラウンドデータ収集には、調査表(以下、農業生産調査表)を準備して用いた(第 39、40 表)。

マルチフィルムに関連する作業のうち、収穫後の PE 製マルチフィルムの剥ぎ取り回収作業と生分解性マルチフィルムの土壌鋤込み作業については、その作業時間と作業人員を動画撮影で確認した(第 121 図)。なお、投入物の輸送については、2 種のマルチフィルムを使う栽培における差異は無視できると推定されるため、評価の対象から除外した。LCA および経済性評価のための情報収集の実施対象を表にまとめた(第 41 表)。

2-2-3 PE 製マルチフィルムの処分

農業の生産活動に由来の廃プラスチックについては、「園芸用使用済プラスチックの適正処理に関する基本方針(平成 7 年 10 月 23 日食品流通局第 4208 号)」に基づき、行政機関および農業者団体が関与して適正処理を推進している³³⁾。PE 製マルチフィルムの処分は、この基本方針に基づいて地域の処理機関が回収、処分法を取り決めている。本調査では、調査圃場を管轄する地域の廃プラスチック処理機関の聞き取り調査により、PE 製マルチフィルムの処分のシナリオを調査した。

2-2-4 バックグラウンドデータ

LCA 実施のためのバックグラウンドデータは、海外の事業所で製造される製品のプロセスには LCA データベース ecoinvent v3³⁴⁾を、日本国内で製造される製品のプロセス、農業生産、マルチフィルムの処分プロセスには、「温室効果ガス排出量の算定方法」(以下、温対法)で定められた係数(以下、温対法係数)および LCA データベース IDEA³⁵⁾を使用した(第 41 表)。また、生分解性マルチフィルム製造の原料のうち、購入先からライフサイクルインベントリ結果が提供されるものについては、この結果を使用した。

2-3 環境影響評価領域

環境影響の評価領域は、エネルギー起源 CO₂ と非エネルギー起源 CO₂ である。エネルギー起源 CO₂ が確認できないプロセスについては、バックグラウンドデータから得られる情報である化石資源由来 CO₂ をエネルギー起源 CO₂ に、それ以外の CO₂ を非エネルギー起源で代替する。また、原料購入先から得たカーボンフットプリント情報では、全ての温室効果ガスを含んだ値しか得られない場合は、分子構造から算出したバイオマス原料起源炭素を非エネルギー起源とし、この炭素数から算出した CO₂ 量と基にカーボンフットプリントの値よりエネルギー起源 CO₂ を推定した。このため、メタン、一酸化二窒素等の温室効果ガスがエネルギー起源 CO₂ に含まれている可能性がある。

2-4 経済性評価

経済性評価は、マルチフィルムは市場価格を基にし、他の農業生産における各投入要素は市場価格を用い、農業生産における労役の量的情報である作業人員と作業時間を計上することにより行った。なお、本年度の調査では農業生産における投入全般の CO₂ 排出の評価を実施しないため、環境効率についての検討は実施しないこととした。

3. 結果および考察

3-1 マルチフィルム製造のライフサイクルインベントリ分析

第 41 表で示したデータ収集方法を基に各マルチフィルムのインベントリ分析を行った。生分解性マルチフィルムは、配合の異なる 2 種類を対象とした。共に、PE 製マルチフィルムに比べ、面積当たりの重量が 3 割程度大きくなった(第 42 表)。

マルチフィルム製造までの LCA の結果は、2 種の生分解性マルチフィルムのエネルギー起源 CO₂ がそれぞれ 10.16、9.96 kg-CO₂/100m²、PE 製マルチフィルムが 4.63 kg-CO₂/100m²、非エネルギー起源 CO₂ は生分解性マルチフィルムがそれぞれ -0.71、-0.92 kg-CO₂/100m²、PE 製マルチフィルムが 0.1 kg-CO₂/100m² となった(第 122 図)。この分析条件では、生分解性マルチフィルムのエネルギー起源 CO₂ が PE 製マルチフィルムの 2.18 倍ほどとなったが、主な要因は原料製造によるものであった。現在の生分解性マルチフィルムは、バイオマス由来の原料と化石資源由来の原料を併用しており、エネルギー起源 CO₂ のうち、バイオマス由来原料の占める割合は生分解性マルチフィルム 1 で 8%、生分解性マルチフィルム 2 で 11%であった。一方、生分解性マルチフィルム

非エネルギー起源 CO₂は、バイオマス原料のもととなる植物による炭素吸収の影響によりネガティブな値となった。

3-2 農業生産におけるマルチフィルム使用のライフサイクルインベントリ分析

農業生産におけるマルチフィルム使用のライフサイクルインベントリ分析は、栽培終了後のマルチフィルムの処理(剥ぎ取り、鋤込み、回収持込み)を対象としている(第120図)。令和2年度に山梨県の農業者の協力で収集したスイートコーン(トウモロコシ)およびブロッコリーの農業生産調査および、本年度に収集した山梨県の試験圃場におけるスイートコーン栽培におけるマルチフィルム処理の調査、茨城県の試験圃場におけるタマネギ、ナスの栽培での農業生産調査を基に行った(第41表)。エネルギー起源 CO₂は、生分解性マルチフィルムの場合で 0.93~8.46 kg-CO₂/100m²、PE製マルチフィルムの場合で 1.3~8.66 kg-CO₂/100m²、非エネルギー起源 CO₂は生分解性マルチフィルムの場合で 0.13~1.20 kg-CO₂/100m²、PE製マルチフィルムの場合で 0.23~1.25 kg-CO₂/100m²となった。マルチフィルム回収には回収前に刈り払い機による機械導入をする場合と手作業のみの場合があり、前者の場合はエネルギー投入によるエネルギー起源 CO₂の増加が見られる。またPE製マルチフィルム回収では、ほかに回収後の輸送を加味している。回収マルチフィルム輸送のエネルギー起源 CO₂は 0.13~0.2 kg-CO₂/100m²、非エネルギー起源 CO₂は 0.03~0.05 kg-CO₂/100m²となった(第43表)。

生分解性マルチフィルムの処分方法である分解に必要な土壌への鋤込みは、本年度の調査では農産物の収穫後の残渣鋤込み作業とともに行われており、マルチフィルムを鋤込むのに作業時間の延長等のエネルギーの投入増加の要因が見られたケースは1件のみであった。

PE製マルチフィルムの剥ぎ取り回収作業については、今回の調査では作業員による手作業のみであり、その後の洗浄作業をしている例は見られなかった。このためPE製マルチフィルムの剥ぎ取り回収によるエネルギー投入は、回収後の廃マルチフィルムの収集場への持込み時の輸送のみであった。

3-3 回収PE製マルチフィルム処分のライフサイクルインベントリ分析

回収後のPE製マルチフィルムについて、令和2年度の調査対象圃場のある山梨県、茨城県、令和3年度の実証実験圃場のある長野県における農業用廃プラスチック処理を管轄する以下の事業所に使用後のマルチフィルムの処分法について聞き取り調査を行った。

- ・ 公益社団法人山梨県農業用廃プラスチック処理センター
- ・ 社団法人園芸いばらき振興協会園芸リサイクルセンター
- ・ 長野県 環境部資源循環推進課資源化推進係
- ・ JA 長野八ヶ岳 農業部
- ・ 直富商事株式会社 JA 事業部(長野県)
- ・ 株式会社水工技建 アクアプラザ上田(長野県)

この調査より、使用後のマルチフィルムのリサイクルには、マテリアルリサイクルを1例、RPFを製造するサーマルリサイクルを1例、マテリアルリサイクル、サーマルリサイクル、および焼却処分に分配される1例を確認した。各地域の使用後のマルチフィルムの処分について処分フローを想定し、インベントリ分析を行った(第123~126図)。RPFの熱量は25.1MJ/kgとし、茨城県のリサイクルの例では同じ熱量の3種の燃料をRPFで代替する場合を想定した。

回収マルチフィルムがマテリアルリサイクル³⁶⁾された場合、エネルギー起源のGHG排出量は0.22 kg-CO₂/100m²、非エネルギー起源CO₂は0.37 kg-CO₂/100m²となった。サーマルリサイクルの場合は、RPFが代替する燃料によりそのCO₂排出量変動する(第126図)。

農林水産省の調査³⁷⁾によれば、農業由来のポリオレフィン系フィルム廃プラのリサイクル率は78%であった。その主なりサイクル法はサーマルリサイクルである。また、ポリオレフィン系フィルム廃プラのうちマルチフィルムは約6割、残りはハウス、トンネル等の土汚れの付きにくい用途向けのフィルムで占められていると推定される^{38)、39)}。

本報告では、PE製マルチフィルムの処分のシナリオとして、68%がリサイクルされ、うちサーマルリサイクルとマテリアルリサイクルの比が8:2、廃棄される32%については、焼却と埋立ての比を1:1と想定し、この結果PE製マルチフィルム処分によるエネルギー起源のGHG排出量を-0.85(-1.42~0.22) kg-CO₂/100m²、非エネルギー起源CO₂を4.12(0.37~5.71) kg-CO₂/100m²とした。

3-4 ライフサイクルインベントリ分析結果の統合

3-1~3-3の結果から、生分解性マルチフィルムおよびPE製マルチフィルムのライフサイクルインベントリ分析結果をまとめた(第44表)。2種の生分解性マルチフィルムは圃場に鋤込んだ状態で完全にCO₂に分解されるものと想定した。

生分解性マルチフィルムのライフサイクルにおけるエネルギー起源CO₂は100m²当たり14.05および13.85 kg-CO₂、非エネルギー起源CO₂は4.98および4.73 kg-CO₂とな

った。これに対し PE 製マルチフィルムのライフサイクルにおけるエネルギー起源 CO₂ は 100m² 当たり 7.56 kg-CO₂、非エネルギー起源 CO₂ は 4.76 kg-CO₂ となった)。PE 製マルチフィルムを生分解性マルチフィルムで代替することにより、エネルギー起源 CO₂ の排出が 83~86%ほど増加することを意味する。この増加の要因は、面積当たりの重量が PE 製マルチフィルムに比べ生分解性マルチフィルムが 3 割ほど大きいこと、生分解性プラスチックの原料である有機酸類やアルコール類の製造時の CO₂ 排出量が、PE の主原料であるエチレンのそれより多いこと、生分解性プラスチックの市場が PE のそれよりはるかに小さく、製造規模が小さいがゆえのプロセスの非効率さなどが指摘される。ライフサイクルのステージ別に見ると生分解性マルチフィルムの原材料調達、生産段階のエネルギー起源 CO₂ の排出が大きくなっている。この改善策としては、

- ・ 素材の選定や組合せによって配合品の比重を下げる、
- ・ 素材と配合を改良することによってフィルムとしての強度を上げ、フィルムの厚さを薄くするなど、面積当たりの素材使用量を減らす、
- ・ 各工程の操作を見直す、加工しやすい素材へ改良するなど、製造プロセスの効率化を図る、
- ・ 素材のバイオマス比率を上げることで炭素吸収量を増加させる

等の検討が考えられる。

3-5 経済評価

生分解性マルチフィルムおよび PE 製マルチフィルムを使用した農業生産について、LCA の対象とした 5 例の栽培の農業生産調査表による調査に基づき、労役(人員数×作業時間)と燃料消費量を整理した(第 45 表)。この結果から算出した各作物栽培にかかる経費と生分解性マルチフィルム、PE 製マルチフィルムの価格、酵素の価格からマルチフィルム 100m² 当たりの経費を算出した(第 127 図)。労働費単価は、農産物生産費統計⁴⁰⁾の令和 2 年産大豆(個別経営)、原料ばれいしょ、かんしょ、てんさい、なたね生産費の労働費と労働時間の平均値より 1,625 円/時間とした。ガソリンおよび軽油価格は資源エネルギー庁の価格調査⁴¹⁾の令和 3 年の平均値からガソリン 155 円/L、軽油 135 円/L とした。PE 製マルチフィルムの価格は、圃場のある地域の農業委員会等の資料を参照した。生分解性マルチフィルムの価格については、新規素材を用いた配合品の導入を想定し、PE 製マルチフィルム既存品の価格の 3 倍と想定した。酵素剤の価格は三菱ケミカルが聞き取りから得た情報を基に想定した販売価格である 500,000 円/kg を用いた。PE 製マルチフィルム処分費³¹⁾は 50 円/kg とした。

どちらの栽培も、マルチフィルム以外の経費、作業時間、労働費については生分解性マルチフィルムに替えることで削減されると推定される。

栽培についての全作業の労働時間・経費と収穫量の調査結果が得られた 3 種の栽培について、昨年度に検討した経済評価法である以下のモデル式を用いて、各マルチフィルム使用による農業生産の経済評価を行った(第 45 表)。

$$\text{「時間当たりの所得」} = (\text{「収益」} - \text{「経費」}) / \text{「総労役時間」}$$

$$\text{「所得率」} = \text{「総所得」} / \text{「経費」}$$

3 種の栽培形態ともマルチフィルムに係る経費以外の経費・労働時間は生分解性マルチフィルムを使用する方が減少する。スイートコーン栽培では、時間当たりの所得は、PE 製マルチフィルムを使用した生産では 7,057 円であるのに対し、生分解性マルチフィルムを使用した生産では 7,415 円と約 5%増加したが、所得率は減少した。ブロッコリー、タマネギ栽培では、時間当たりの所得はそれぞれ生分解性マルチフィルムを使用する方が時間当たりの所得、所得率とも減少する(第 46 表)。

3-6 2030 年における生分解性マルチフィルム改良による環境性能予測および経済性

現在試作している生分解性マルチフィルムの原料は化石資源由来の原料の比率が高い。また、強度・耐久性についても既存の PE 製マルチフィルムに劣るため、厚みを上げることでマルチフィルムの性能を満たす仕様を保持している。今後は、更に環境に配慮した製品開発を目指しており、非可食資源および有機廃棄物であるバイオマス原料を 100%使用し、かつ PE 製マルチフィルムに匹敵する強度・耐久性を維持しつつ、酵素反応による分解が容易な新たな共重合組成、重合プロセスを検討中である。これらの開発技術を導入した際の生分解性マルチフィルムの CO₂ 排出量の推定値を算出した(第 128 図)。改良生分解性マルチフィルムのエネルギー起源 CO₂ 排出量は 11kg-CO₂/100m²と推計された。これは、現在の PE 製マルチフィルムとほぼ同等の排出量であるが、若干の減少につながっている。さらに、非エネルギー起源の CO₂ 排出量は 1.4kg-CO₂/100m²と排出削減効果が見られた(第 129 図)。

経済性を向上させるための生分解性マルチフィルムの改良ポイントは以下である。

- ・ 原料の 100%バイオマス化、非可食資源および有機廃棄物の利用。
- ・ 共重合組成、重合プロセスの改良による PE 製マルチフィルムと同等の耐久性・強度を保持。

また、経済性については、生分解性マルチフィルム、酵素剤の生産能力および生産量の増加とともに低コスト化が可能となる見込みである。一方、農業経営の経費のうち、人件費や燃料費は今後値上がり懸念される。これらの将来コスト変動の予想を考慮し、2030年の2種のマルチフィルムの使用による経費の変化を推定した。2種のマルチフィルムのコストは共に33%減少、分解酵素は60%減少、人件費は30%、燃料は21%のコスト上昇が見込まれると予測している。このシミュレーションでは、経費の面でも生分解性マルチフィルムでも現在のPE製マルチフィルム使用と同等の経費となる可能性がうかがえる(第130図)。主な要因は、人件費の上昇の影響によるPE製マルチフィルムの経費の増加と生分解性マルチフィルムの製造および酵素の経費減少である。特に、酵素製造の効率化が重要になると考えられる。

3-7 農業経営における生分解性マルチフィルム導入の役割と意義

第130図で示したとおり、生分解性マルチフィルムとPE製マルチフィルムを使用する際の農業生産の経費の違いは、生分解性マルチフィルム利用によるマルチフィルム回収、処分の人件費の削減である。

本調査では、PE製マルチフィルムの剥ぎ取りから処分場持込みまでの洗浄や保管等の情報の収集ができなかったが、産業廃棄物であるPE製マルチフィルムは、排出者である農家が経費を負担して適正に処理する義務がある。一方、農家は一般に零細であるが、使用済プラスチックの発地点は分散していることから、農業者個々の努力のみで適正処理を行うのは困難と考えられ、行政機関(国・都道府県・市町村)および農業団体が中心となって、回収と処理の仕組みの整備、農業者への情報提供等、必要な措置を講じており、農家を会員とする市町村協議会を設置して、使用済プラスチックの回収、処分を担う機関としている(第131図)。

このシステムにより、大部分のPE製マルチフィルムは適正に回収されていると考えられるが、その後の処理は十分に監視されていない⁴²⁾。特に中国への廃プラスチック輸出が禁じられて以降、国内で再生処理する施設は不足しており、農業系だけでなく、国内の廃プラスチック全てにおいて、今後の処分は課題となっている。農業系廃プラスチックの場合、現在この課題は引取り価格の値上がりという形で顕現している。令和元年の調査では、20の都道府県で引取り価格の値上げ又は値上げの検討がなされていた⁴³⁾。将来的に、PE製マルチフィルム使用の経費は、この引取り価格の上昇により負担が増えると予想される。

生分解性マルチフィルムの利便性として、収穫後のマルチフィルム剥ぎ取りのための労働時間の削減が大きな要素となっている。この作業は今回の調査では、作業員の

マニュアル作業となっており、エネルギーや資材の投入は見られなかった。大規模農業圃場ではマルチフィルム回収機が導入されている所もあるが、小規模農業経営が主体の日本の農業では、マルチフィルムの剥ぎ取りに機械導入が進むとは考えにくい。一方、基幹的農業従事者の減少する中で高齢化が定着しており、作業の軽減は喫緊の課題である(第47表)。また、昨今のパンデミックで明らかになった農業労働者の外国人非正規雇用化に見るとおり、現在の農業生産量を維持するための労働力がこの先も維持できるかも、懸念される。

このような構造的な課題を抱える農業生産と経営の持続可能性を考えると、様々な観点からの対応策を講ずる必要があり、労働力不足や廃棄物対策を解決できる技術として生分解素材の導入は、一つの対応策の役割を担うことが可能である。

第6章 総合討論

今の、そしてこれからの世代の人々が、永く豊かで安全に過ごせるように、気候変動の抑制や資源枯渇の問題の解決に向けて我々の活動を見直す機運が高まって久しい。これらの課題の次に顕現しているのが、生物多様性の維持であり、我々が生きていくために欠かせない食料生産についても、農林水産業を地球規模で見た場合のプラス面とマイナス面を、客観的に評価しようという機運が世界で高まりつつある。一方、我が国では農業生産とそれに関わる資材が人体や環境に悪影響を及ぼすことが早くから指摘され、かつては農薬や肥料の過剰使用、現在ではプラスチック製の資材の使用とその廃棄処理の課題に対応が急がれている。我が国のこのような活動は、生物多様性の維持という大きな課題へのアプローチを先取りしたものといえる。本事業に参加したメンバーは、事業で目指したプラスチックを取り巻く資源循環の仕組みづくりが、生物多様性の維持に加えて気候変動と資源枯渇の問題への対応も果たせることを理解し、各々の立場で最大の力を発揮して課題に取り組んだ。本事業では特に、プラスチックという素材が循環して環境負荷と枯渇資源の消費を下げることに加え、食料生産の生産性を上げ環境負荷を下げるという、プラスチックから見た avoided emission も明確にできることが期待された。

この検討を進めるための高度な技術や知識は、我が国のアカデミアや地方自治体、企業の中に、居並ぶ孤峰のように点在している。本事業では、開始当初はチェーンとしてつながっていなかったこれらの技術、知識を、循環システムの形に整えて、素材の製造、資材の製造、その利用による食料生産、資材の廃棄までをつなぎ合わせた上で、LCAと経済評価へ収束させることができた。実際の取組では、まず、“耐久性の高い生分解性マルチフィルムと、その分解を促進する酵素剤の組合せは、循環システムの構築とその環境負荷を下げ経済的に有利にする”という仮説を立てた。その仮説の下に、参加メンバーが協力して活動を行った結果、

- ・ 耐久性の高い生分解性マルチフィルムを実現するために、新たな生分解性プラスチック素材を開発し、性能を確認できた。この素材は以降速やかに市場に展開する予定となった。
- ・ 新規素材を使いこなして効率的にマルチフィルムを製造するために、様々な生分解性プラスチックや助剤を使った配合を試し、生分解性プラスチックの耐久性を左右する要素を見付けた。これは、広く生分解性プラスチックの資材開発に応用できる技術の一つとなる。
- ・ 様々な樹脂配合に対応することによって、マルチフィルムの製造工程を抜本的に見直し、設備の改良のためのプラント設計を得た。

- ・ 生分解によって土壌中でプラスチックが完全に消滅するという現象を、確実に手早く把握するため、さらには分子のレベルでその仕組みを把握するため、新たな分析方法を作り上げた。今後の生分解性プラスチックの環境影響の解析や、生分解性プラスチック資材の開発に役立つ。
 - ・ 生分解性プラスチックを速やかに崩壊させる酵素剤の効果を生分解性マルチフィルムの使用場面で確認できた。また、その酵素を安価に作るための一つの重要な要素である遺伝子配列を発見した。これらにより、使用後あるいは使用中の生分解性プラスチックを、自然崩壊を待たずに任意に破壊する手立ての実用化に近づいた。
 - ・ 近い将来に農業生産者で生分解性マルチフィルムと酵素剤の組合せを応用した野菜生産を進めるため、生産者に直接指導する立場の試験機関や企業が栽培の実証を繰り返した。生分解性マルチフィルムと酵素剤の使用についてのデータ、ノウハウが蓄積されて、応用する野菜の幅が確実に広がった。
 - ・ 同時に、生分解素材ならではの課題も把握できた。資材の色がその一例である。
- という結果を得た。そして最終年度には、
- ・ 農業生産者の圃場で、実際に新規素材を使った新しいマルチフィルムを用いて野菜を生産し、問題なく使えることを実証した。資材さえそろえば、今後も使い続けたいとの意向も得た。
 - ・ ただし、今の時点、かつ現在の評価方法では、GHG 排出と経済性は、化石資源由来の資材を使った場合より劣るとの結果を得た。

LCA と経済性評価を綿密に行うことによって、例えば、現在の生分解性プラスチックの GHG 排出ポテンシャルが PE と比較して基本的に高いことや、生分解性資材が生産性と経済性に貢献することを十分に評価できない仕組みになっていることを明らかにできた。

本事業で対照として使用した PE は、年間数千万トンの単位で製造されているのに対し、最も多いバイオマス由来の生分解性プラスチックで数十万トン、PBS に至っては 1 万トン程度である。両者の間には、使いこなしてきた歴史に半世紀の差があり、生分解性プラスチックは正にこれから製造も応用も開拓されるべき素材で、本事業で得られた数多くの知見は、その半世紀のギャップを埋めるために誠に貴重である。

本事業を引き継いで、参加メンバーが再び集い、あるいは単独で、新たな素材と酵素剤を活用した研究活動、経済活動を続けていく計画である。

（本事業の実施に用いた、生分解性マルチフィルムの分解評価方法の一部、および分解酵素の調製には、生研支援センター「イノベーション創出強化研究推進事業」課題番号：01029C「畑作の省力化に資する生分解性プラスチック分解酵素の製造技術と生分解性農業資材利用技術の高度化」の成果を用いた。）

参考文献

- 1) 生分解性マルチの活用事例 ～回収作業の省力化と処理コストの削減を図る～、農林水産省 生産局 農業環境対策課 資源循環推進班、平成 31 年
- 2) プラスチックを取り巻く国内外の状況 参考資料集、中央環境審議会循環型社会部会プラスチック資源循環戦略小委員会(第 5 回)配付資料、平成 31 年
- 3) 農業分野から排出されるプラスチックをめぐる情勢、農林水産省 生産局 園芸作物課、平成 31 年
- 4) Tokiwa et al., Biodegradability of plastics, International Journal of Molecular Sciences, 10, 2009
- 5) 佐野浩、新版 石油化学プロセス、第 14 章 機能性高分子、14.3 生分解性高分子、講談社、2018
- 6) 生分解性マルチについて露地野菜農家アンケート、農業用生分解性資材普及セミナー2017、農業用生分解性資材普及会、2017
- 7) 生分解性マルチによるかんしょ栽培の省力化、鹿児島県経済農業協同組合連合会 園芸事業部 園芸資材課および独立行政法人農畜産業振興機構 調査情報部 企画情報グループ、砂糖類・でん粉情報 2020. 2、2020
- 8) 北本宏子ほか、植物常在微生物の酵素で生分解性の農業用マルチフィルムを素早く分解、バイオサイエンスとインダストリー、74(3)、2016
- 9) ISO 17556:2019 Plastics - Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials in soil by measuring the oxygen demand in a respirometer or the amount of CO₂ evolved、国際標準化機構、2019
- 10) 特許第 4915593 号、生分解性プラスチックを分解する微生物、およびその新規生分解性プラスチック分解酵素製造方法、独立行政法人農業環境技術研究所、2018
- 11) 特許第 6338183 号、生分解性プラスチックを効率良く分解する方法、独立行政法人農業環境技術研究所、2018
- 12) Sato et al., Degradation profiles of biodegradable plastic films by biodegradable plastic-degrading enzymes from the yeast *Pseudozyma antarctica* and the fungus *Paraphoma* sp. B47-9, Polymer Degradation and Stability, 141, 2017
- 13) Ogawa, M., Tetsuo K., and Yasuji K. ManR, a novel Zn (II) 2Cys6 transcriptional activator, controls the β -mannan utilization system in *Aspergillus oryzae*. Fungal genetics and biology 49.12, 987-995 (2012).

- 14) Kitamoto et al., Phyllosphere yeasts rapidly break down biodegradable plastics, *AMB Express* 1, 2011
- 15) Sato et al., Degradation profiles of biodegradable plastic films by biodegradable plastic-degrading enzymes from the yeast *Pseudozyma antarctica* and the fungus *Paraphoma* sp. B47-9, *Polymer Degradation and Stability*, 141, 2017
- 16) Sameshima-Yamashita et al., Pretreatment with an esterase from the yeast *Pseudozyma antarctica* accelerates biodegradation of plastic mulch film in soil under laboratory conditions, *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 127(1), 2019
- 17) Watanabe et al., Xylose induces the phyllosphere yeast *Pseudozyma antarctica* to produce a cutinase-like enzyme which efficiently degrades biodegradable plastics, *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 117, 2014
- 18) Watanabe et al., High-level recombinant protein production by the basidiomycetous yeast *Pseudozyma antarctica* under a xylose-inducible xylanase promoter, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100, 2016
- 19) Sameshima-Yamashita et al., Construction of a *Pseudozyma antarctica* strain without foreign DNA sequences (self-cloning strain) for high yield production of a biodegradable plastic-degrading enzyme, *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 83(8), 2019
- 20) Yarimizu et al., Targeted gene replacement at the URA3 locus of the basidiomycetous yeast *Pseudozyma antarctica* and its transformation using lithium acetate treatment, *Yeast*, 34(12), 2017
- 21) Kunitake et al., CRISPR/Cas9-mediated gene replacement in the basidiomycetous yeast *Pseudozyma antarctica*. *Fungal genetics and biology*, 130, 2019
- 22) OWS, Expert statement on biodegradable mulching film, *Organic Waste System*, 2017
- 23) Scarascia-Mugnozza et al., Plastic materials in European agriculture: actual use and perspectives. *J. Agric. Eng.*, 42, 2011
- 24) BASF, Biodegradation of ecovio® mulch film, Introduction to the LCA mulch film for cotton cultivation in China, 2016
- 25) Novamont Mater-Bi®,

- http://materbi.com/en/wp-content/uploads/sites/2/2018/06/scheda-pacciamatura_EN_LR_TUV.pdf
- 26) CEN TR 16957, Bio-based products-Guideline for Life Cycle Inventory (LCI) for the end-of-life phase-2016
- 27) Technical University of Denmark が開発した LCA 評価用モデル、
<http://www.easetech.dk/>
- 28) Corepla, Quantità riciclate e budget, 2007,
<http://www.corepla.it/articolo.jsp?IdDoc=27&ignoreGest=true>
- 29) Osservatorio Nazionale dei Rifiuti, Rapporto rifiuti 2004,
http://www.apat.gov.it/site/it-IT/APAT/Pubblicazioni/Rapporto_Rifiuti/
- 30) 作物別・作型別経済性標準指標一覧 2017 年度改訂版、神奈川県農業技術センター、2018
- 31) 林清忠、経営指標から環境指標を計算する簡易 LCA プログラム、平成 22 年度「関東東海北陸農業」研究成果情報、
http://www.naro.affrc.go.jp/org/narc/seika/kanto22/01/22_01_09.html
- 32) 環境省、温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度、<https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/>
- 33) 農業分野から排出されるプラスチックをめぐる情勢」、令和 3 年 1 月、農林水産省生産局園芸作物課
- 34) 「ecoinvent v3」, ecoinvent, Switzerland,
<https://www.ecoinvent.org/database/database.html> (2021 年 2 月参照)
- 35) 「インベントリ用データベース IDEA」、独立行政法人産業技術総合研究所、
<https://www.aist-riss.jp/software/40166/> (2021 年 2 月参照)
- 36) マテリアルリサイクル(物質還元リサイクル)は、廃プラスチック類の廃棄物を、破砕溶解などの処理を行った後に同様な用途の原料として再生利用する行為を示す。
経済産業省
https://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/data/research/h16fy/model16-3_5.pdf
- 37) 「農業分野から排出されるプラスチックをめぐる情勢」、令和 3 年、農林水産省
- 38) 農中総研 調査と情報 2021.3(第 83 号)p6
- 39) 農 P0 フィルム懇話会, 農 P0 フィルム排出見込数量(非公開)
- 40) 農業経営統計調査、農産物生産費統計、農林水産省

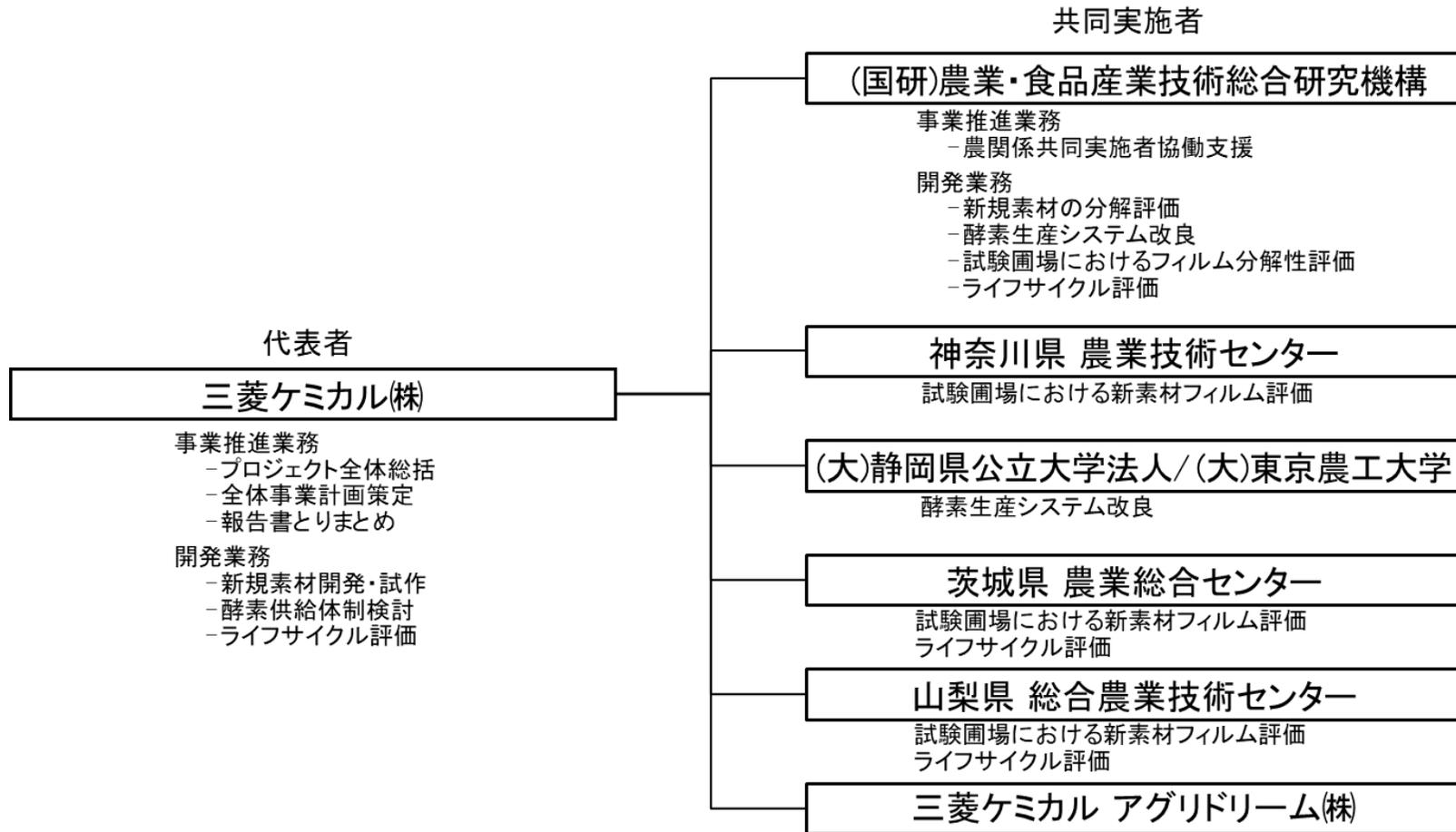
https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/noukei/seisanhi_nousan/ (2022/1/15 参照)

- 41) 石油製品価格調査、給油所小売価格調査(ガソリン、軽油、灯油)、資源エネルギー庁
- 42) 農業用生分解性資材普及セミナー2019 資料
- 43) 竹谷裕之「農業用廃プラスチックをめぐる国内外の動向と適正処理」令和3年度農業用フィルムリサイクル促進協会研修会資料

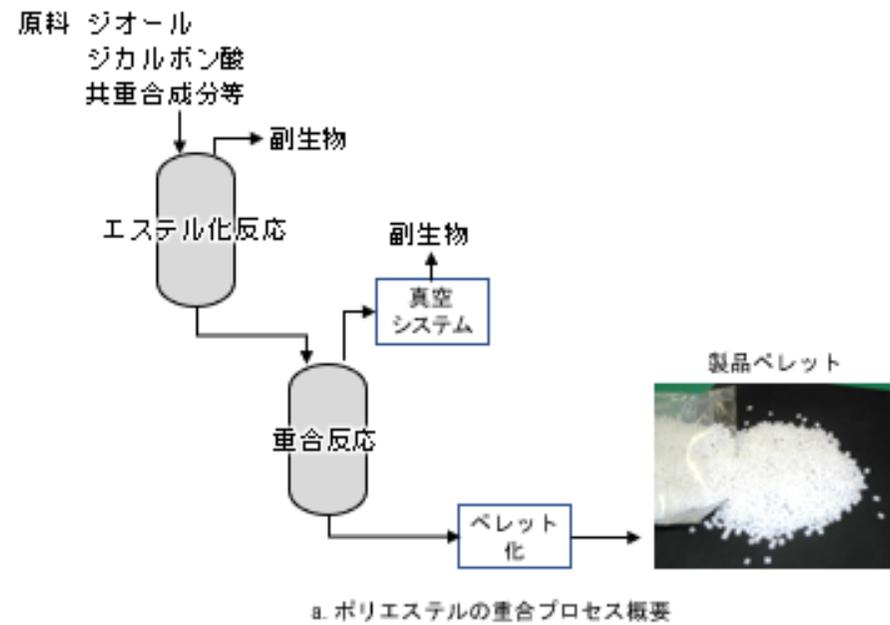
【図表】



第1図 本実証事業の概要
図内の数字は実施項目番号



第 2 図 令和 3 年度の実施体制と業務概要



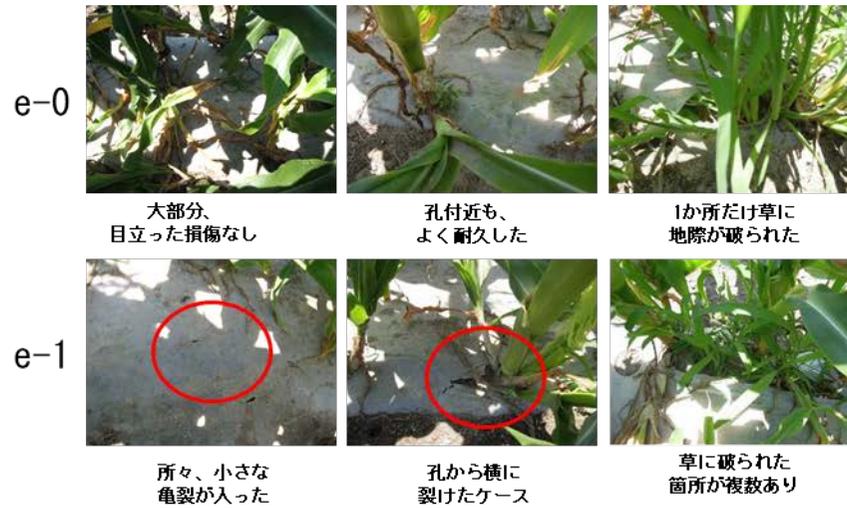
b. 重合試験装置



c. 試作設備

d. PTT MCC Biochem Co.,
Ltd. の生産設備

第3図 ポリエステルの製造プロセスの概要と試験および商業生産設備



山梨県 促成作スイートコーン栽培



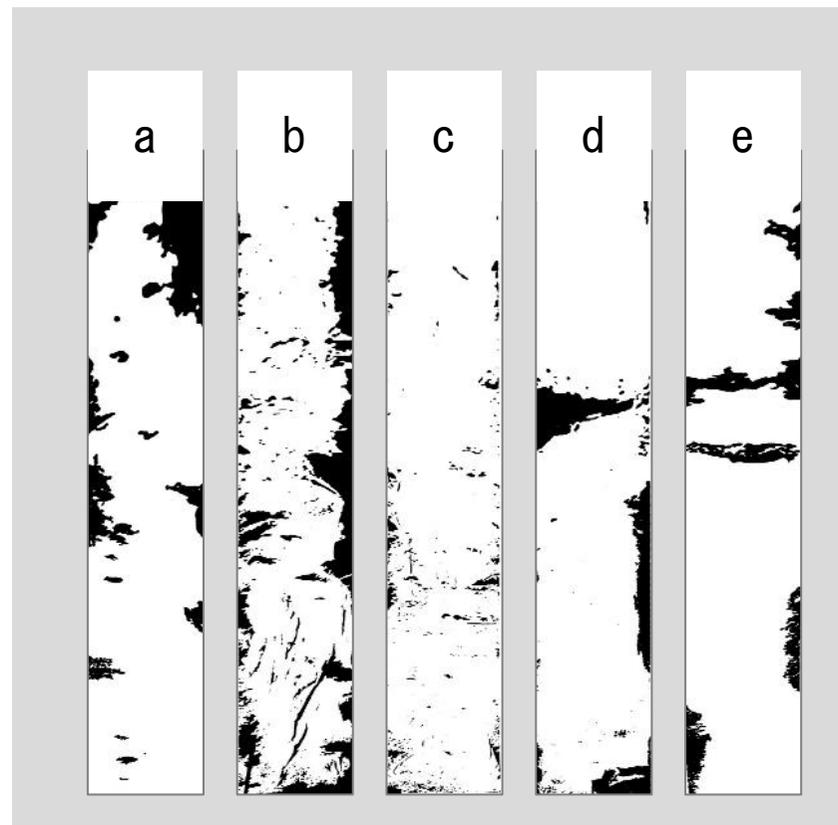
神奈川県カボチャ栽培

第4図 令和2年度 県の試験機関における配合シリーズ2*の展張試験**

結果:新規樹脂A配合量に応じて展張時のマルチフィルムの耐久性が変化した。耐久性は樹脂Aの配合量が多い順に(多)e-2>e-0>e-1(少)となった。耐久性はさらに向上が必要。フィルム製造面では、樹脂張力不足に起因して成形が不安定であり改善が必要。

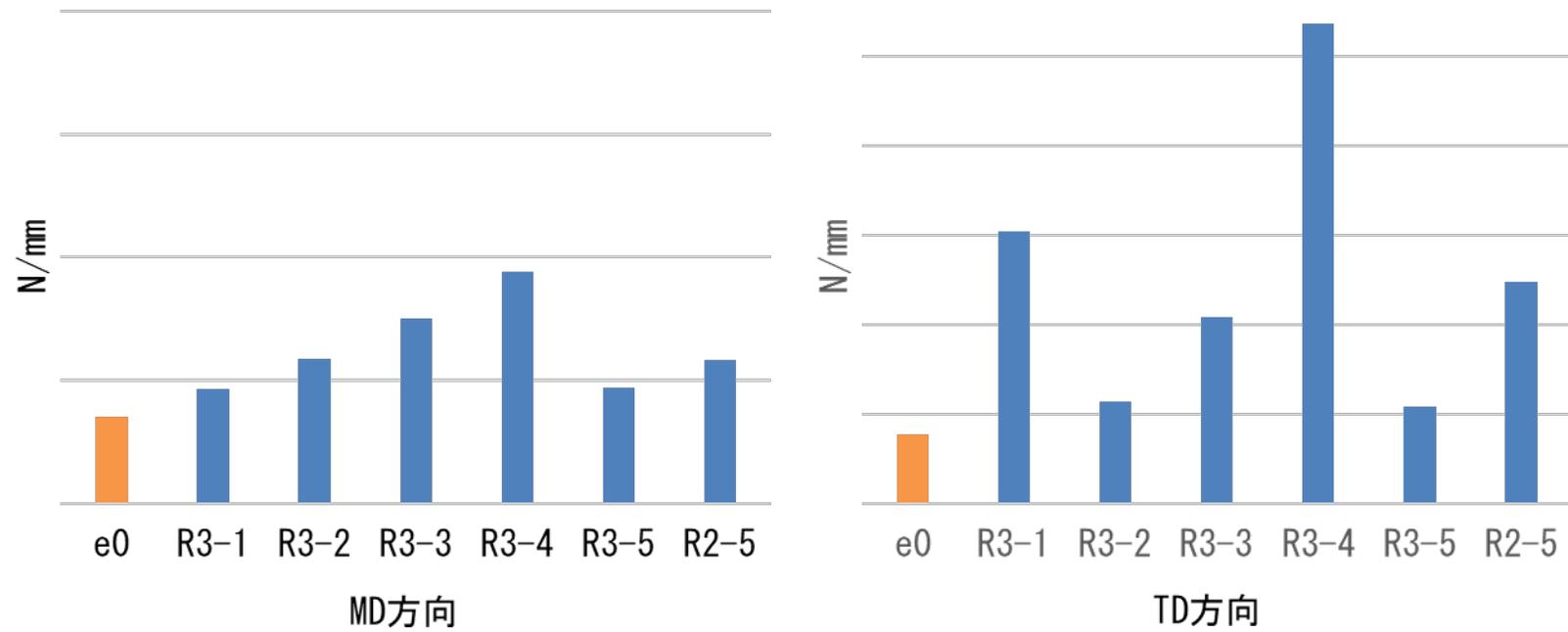
*配合 e-0 を基準に新規樹脂Aの配合量で分解性を調整

**詳細は第4章



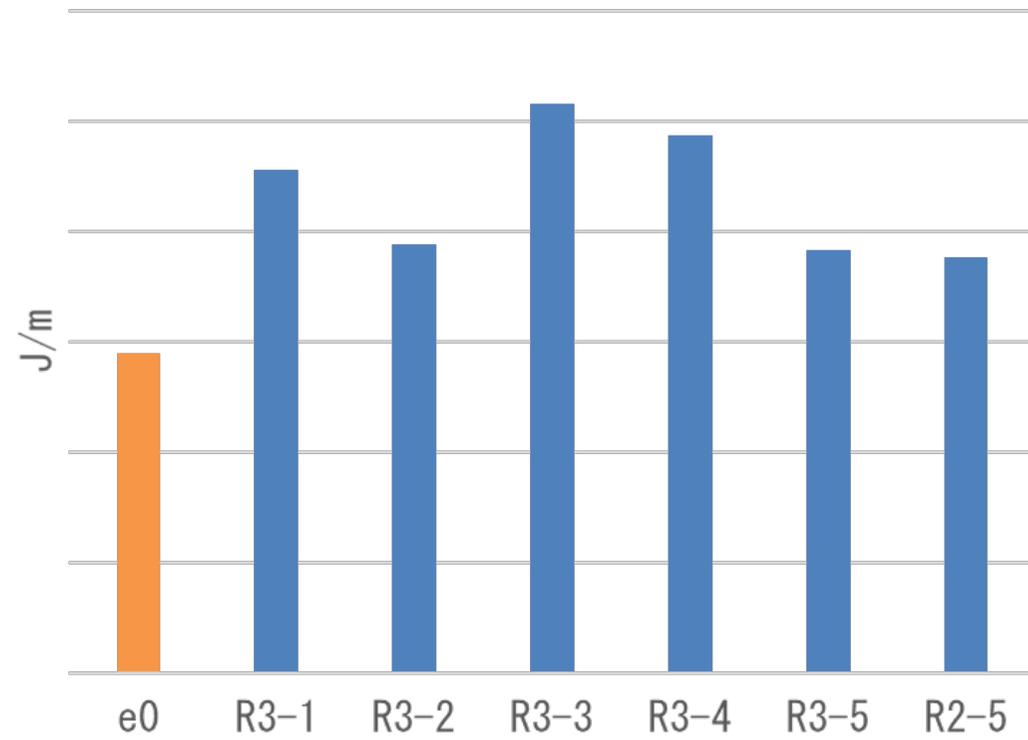
第 5 図 配合シリーズ 1 のフィルムの展張後埋設 6 か月の様子

*黒色部が分解部分を示す

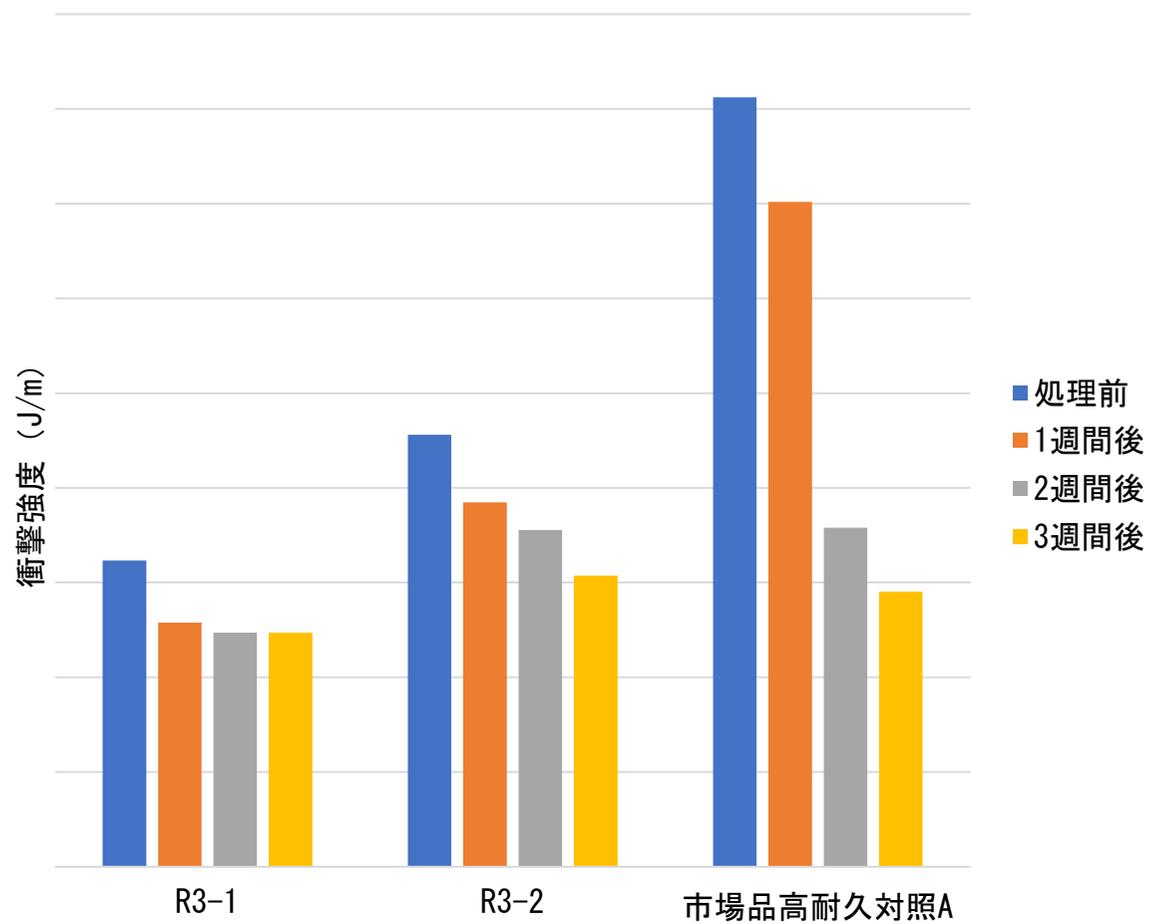


第6図 開発品の裂け強度比較*

*ISO 6383-2 を参考に測定

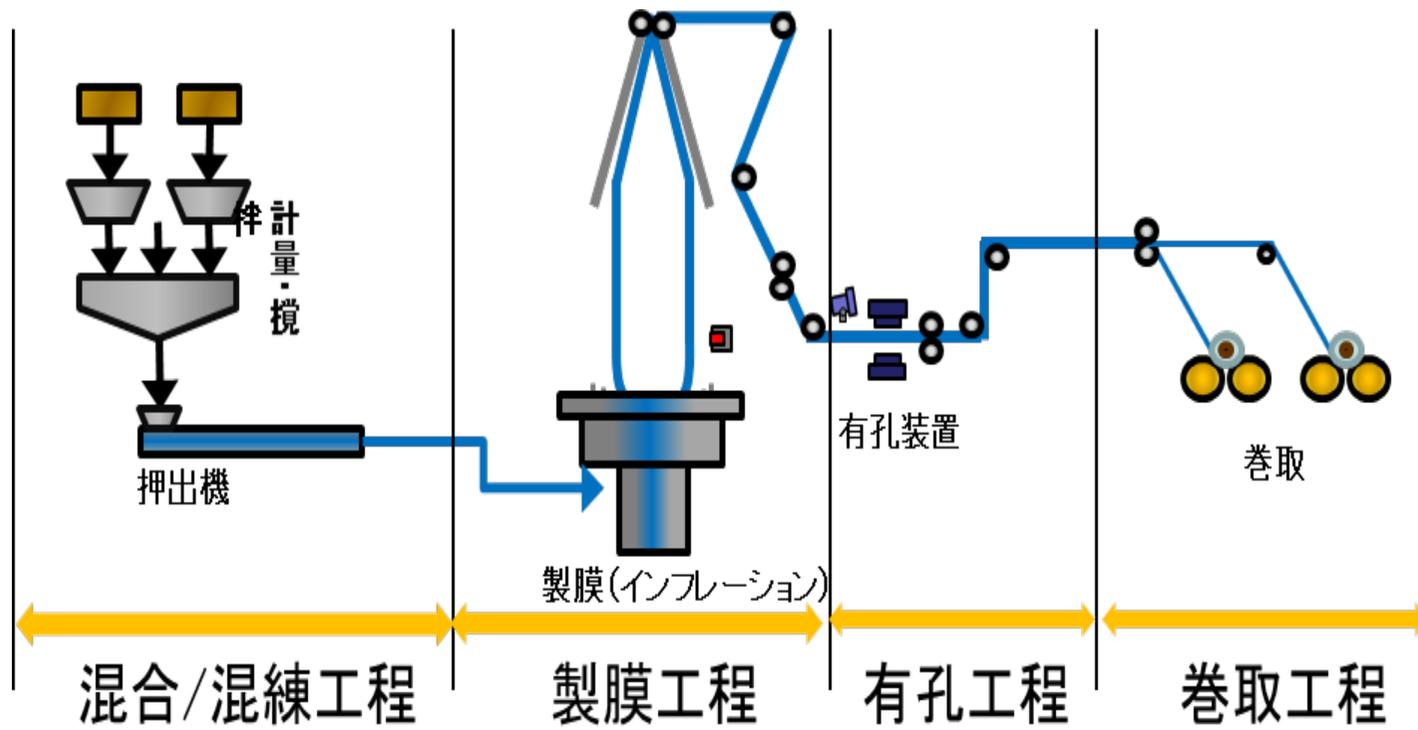


第 7 図 開発品衝撃強度比較

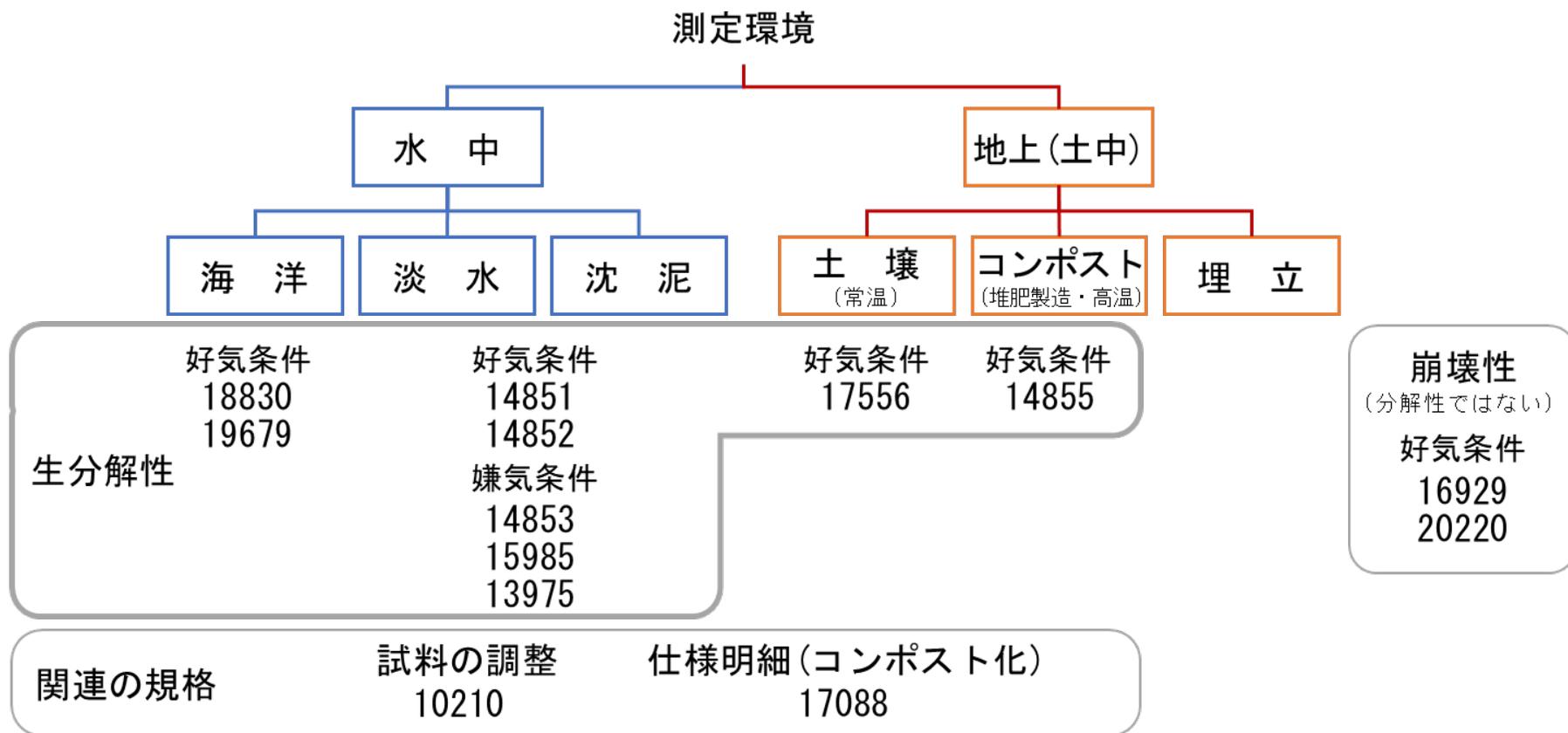


第 8 図 開発品の恒温恒湿下での加水分解耐久性*試験

*衝撃強度：40℃，90%RH 保管時



第9図 製膜プロセスとその単位工程



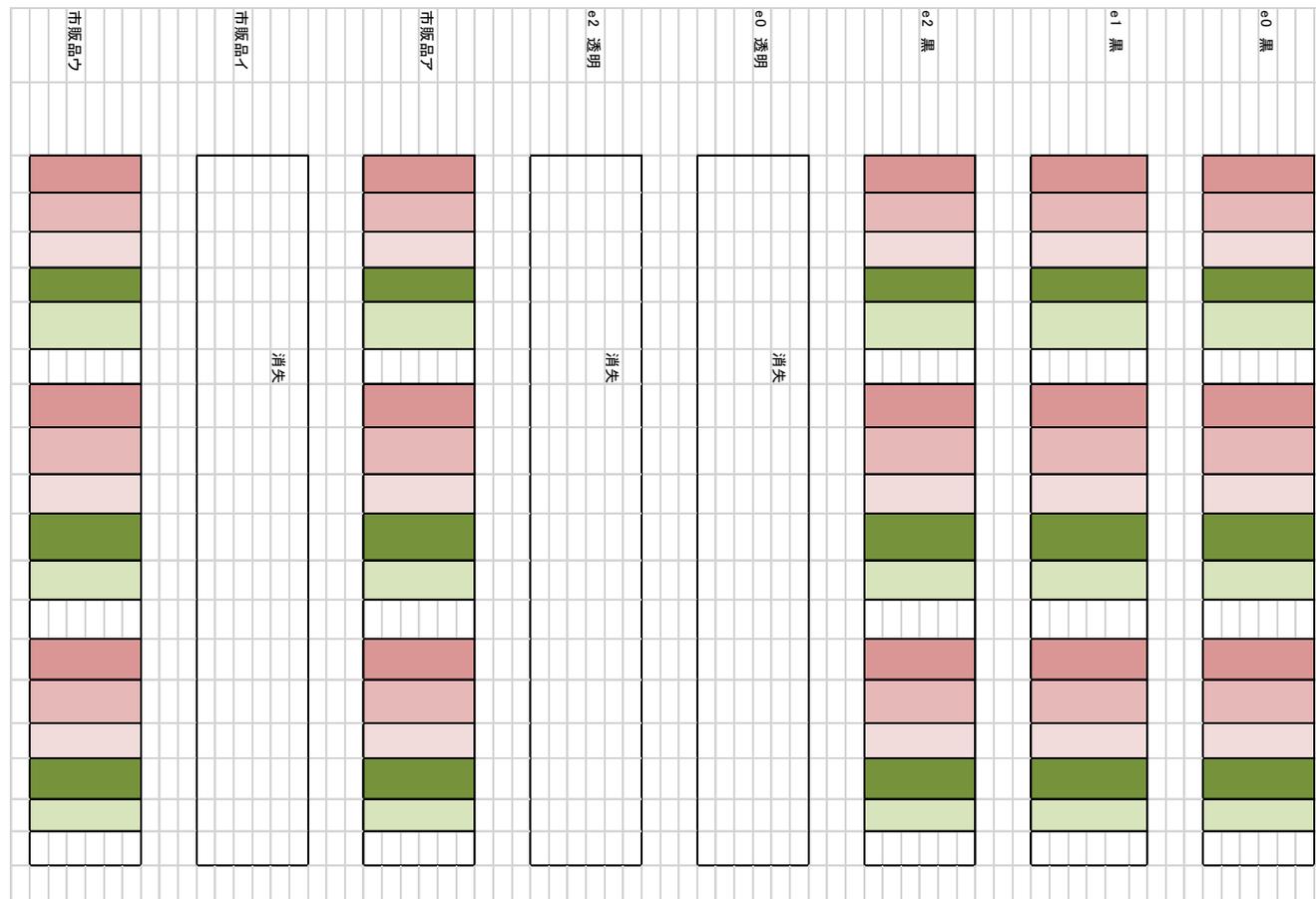
第10図 プラスチック製品の生分解に関わる主なISO規格

配合品										市販品		
a	b		c		d		e			ア	イ	
0.3	1	0.3	1	0.3	1	0.3	1	0.3	1	0.3	1	0.3
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.2												
3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
0.2												

第 11 図 令和元年度に展張した令和元年度試作シリーズ 1 フィルムの配置

各処理区は、約 40 日展張し、酵素処理 1 日後にフィルムを回収する区、および酵素処理後翌日に埋設し、約 90 日後と 180 日後に回収する区をそれぞれ設置し、令和 2 年度にかけて埋設試験を行った。

酵素処理区域
 酵素未処理区域
 (単位: m)

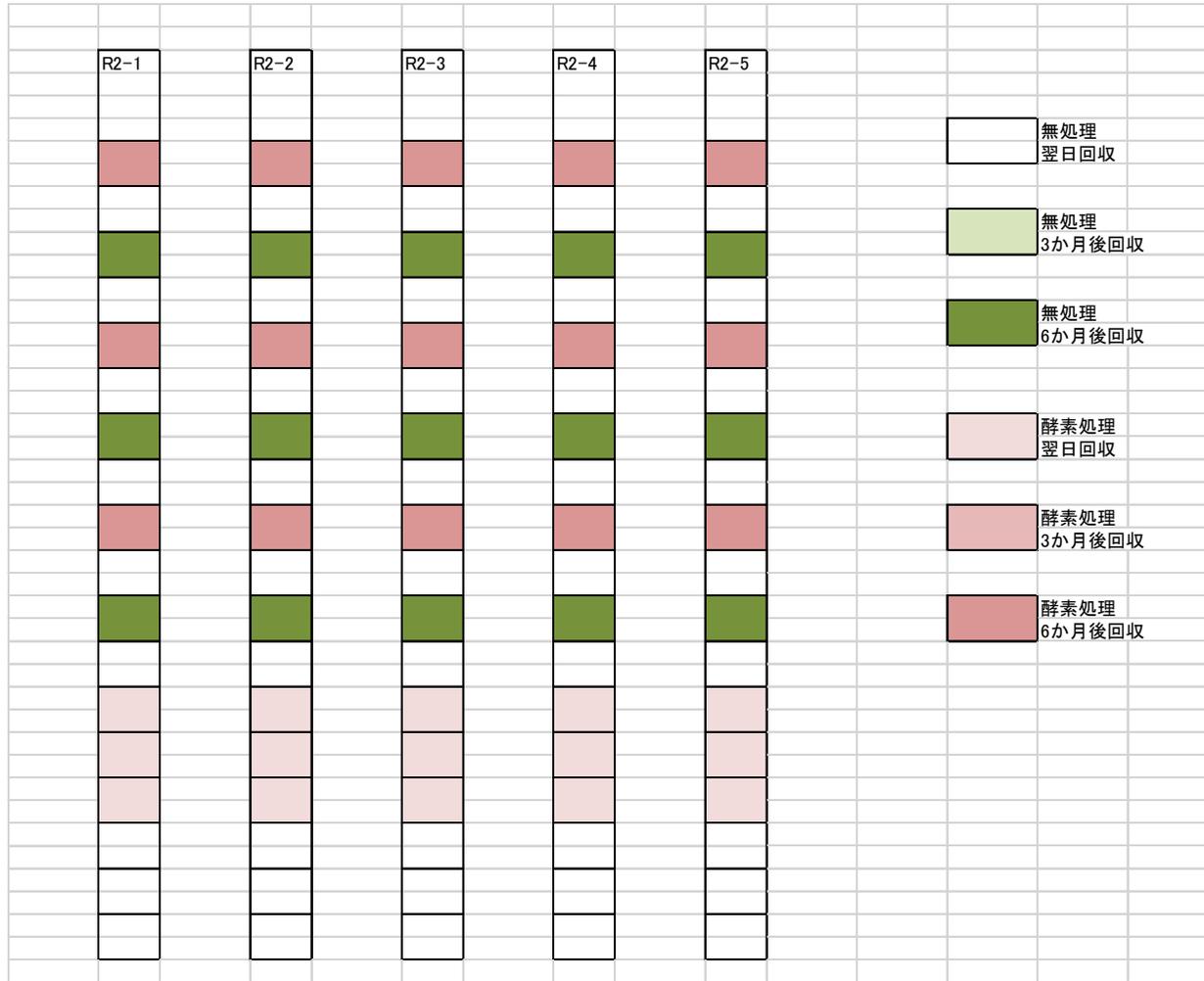


第 12 図 令和 2 年度に展張した R2 実機製シリーズ 2

フィルムの配置

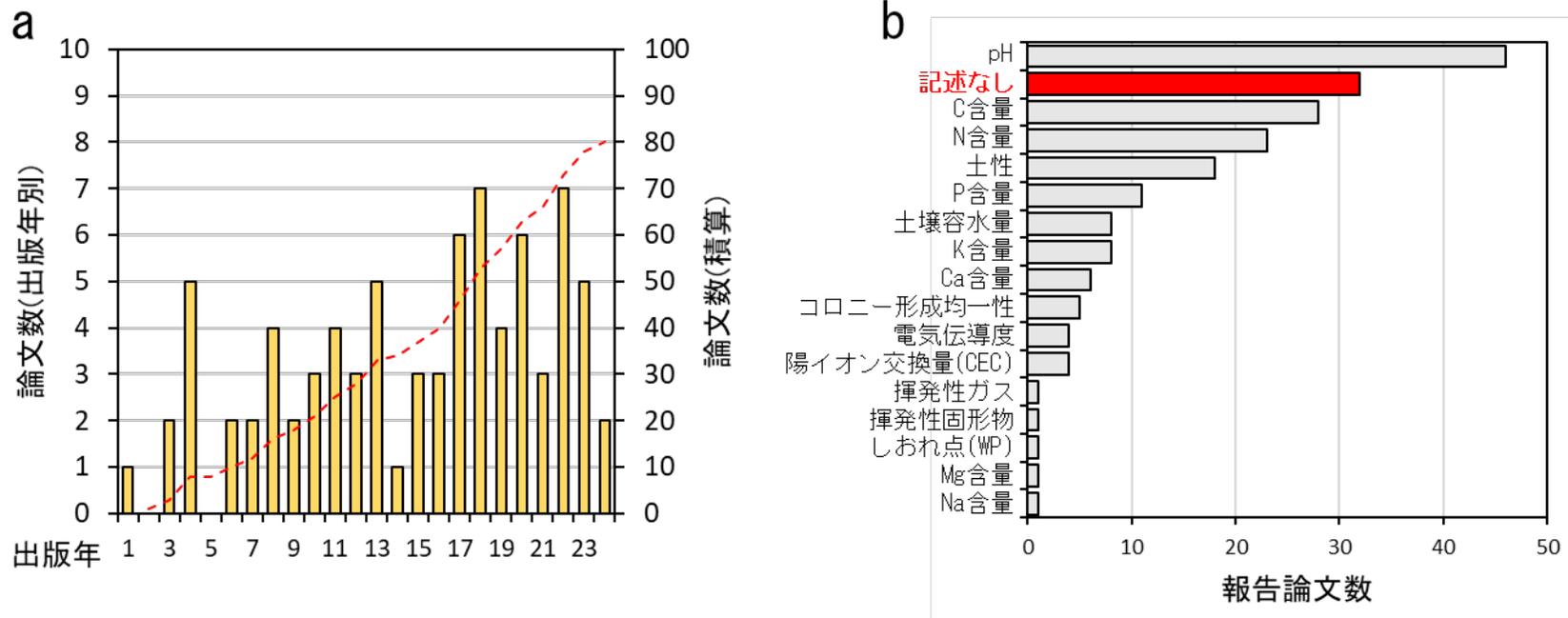
各処理区は、約 60 日展張し、酵素処理 1 日後にフィルムを回収する区、および酵素処理後翌日に埋設し、約 90 日後と 180 日後に回収する区をそれぞれ設置した。

無処理	酵素処理	
		翌日回収
		3か月埋設
		6か月埋設



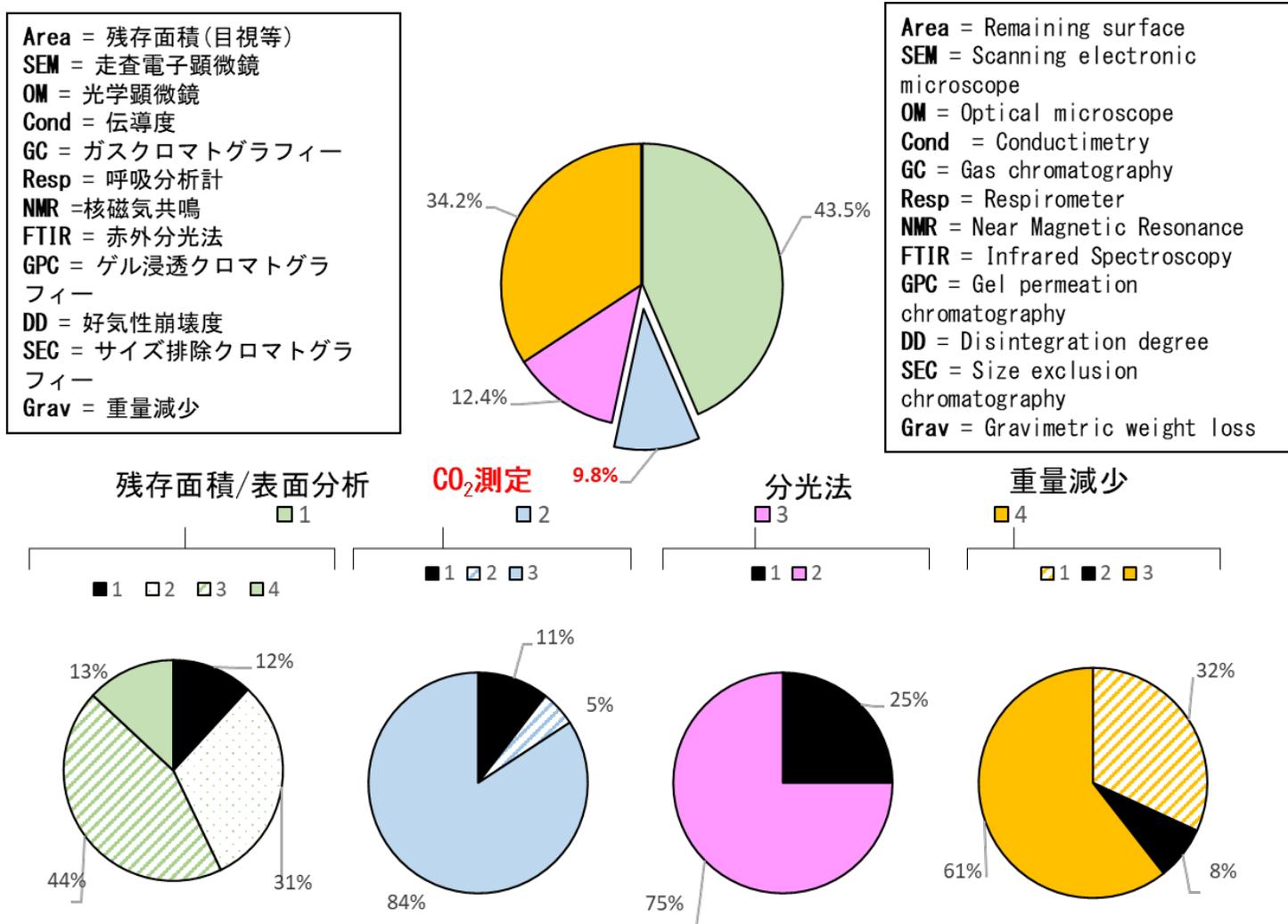
第 13 図 令和 2 年度に展張した R2 試作シリーズ 3 フィルムの配置

各処理区は、約 60 日展張し、酵素処理 1 日後にフィルムを回収する区、および酵素処理後翌日に埋設し、約 90 日後と 180 日後に回収する区をそれぞれ設置した。



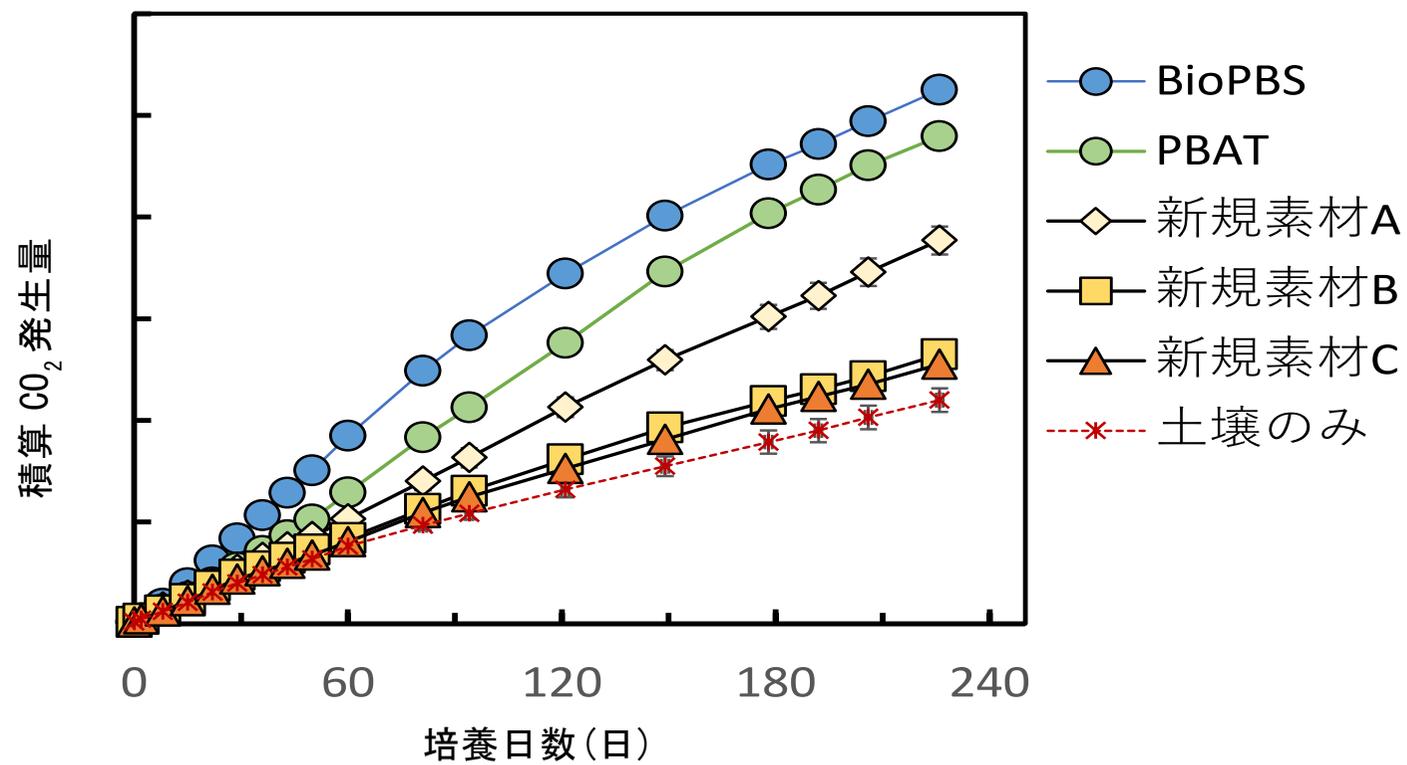
第 15 図 システマティックレビューに用いた論文の構成 (a) およ
び報告された土壌特性の記述項目 (b)

Francioni et al. (印刷中) より改編

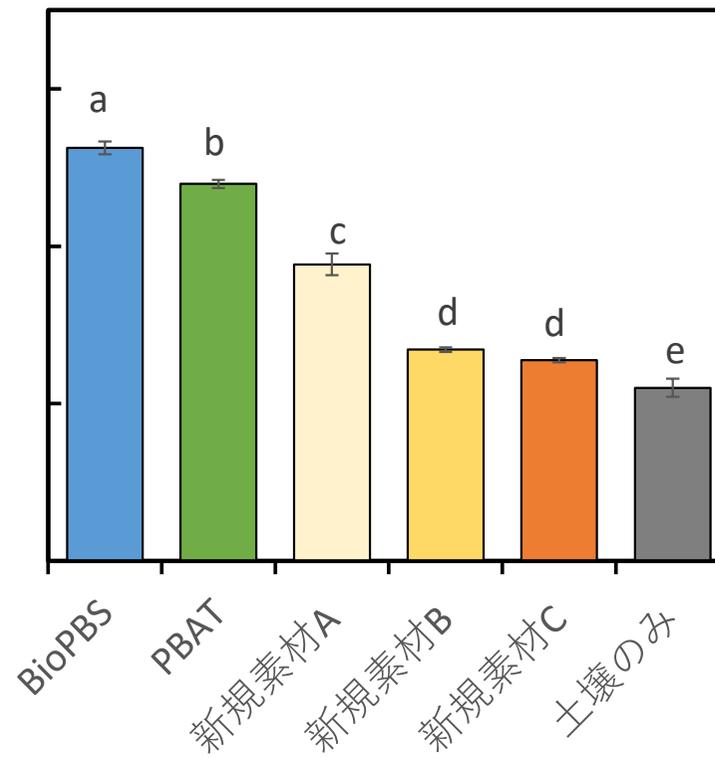


第 16 図 既存文献で報告された土壌中での生分解性プラスチックの分解評価に用いた手法

Francioni et al. (印刷中)より改編

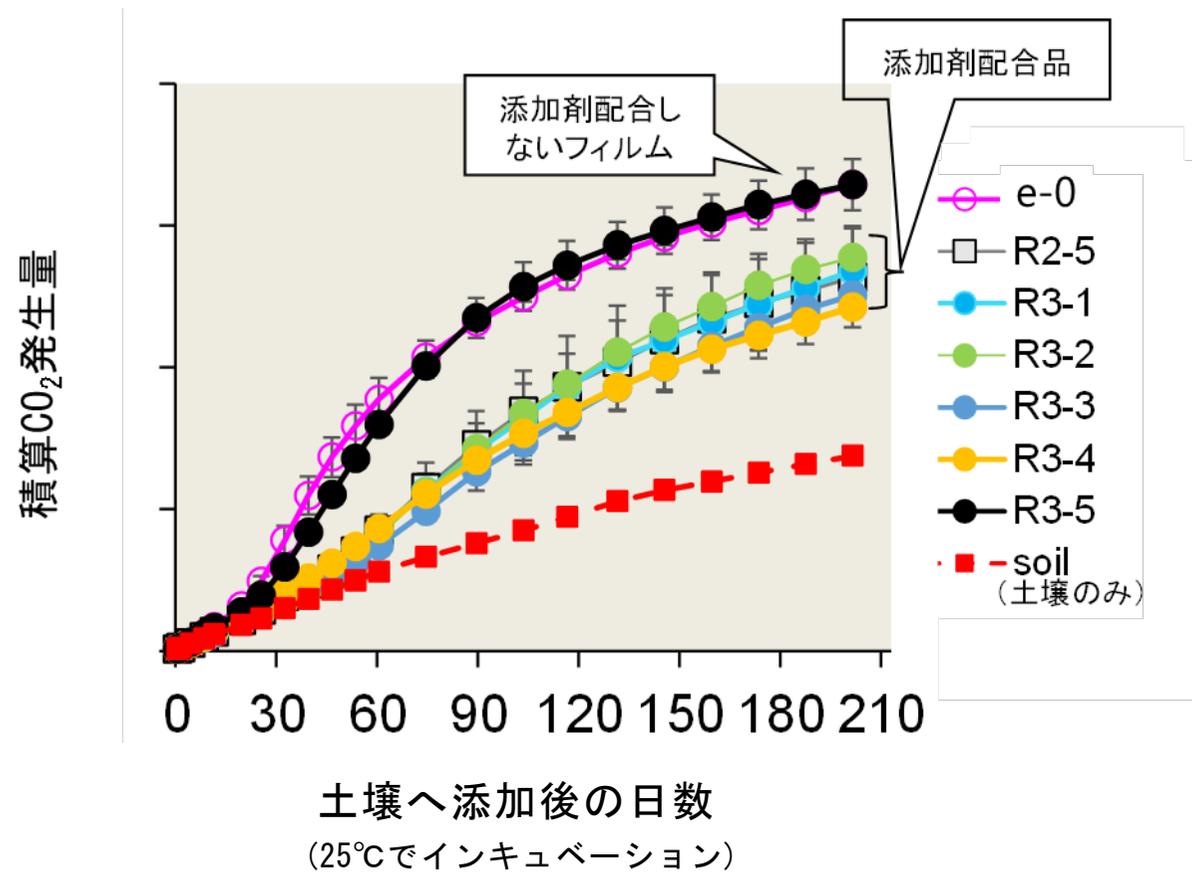


第17図 土壌中での生分解性素材の分解に伴って発生する二酸化炭素量積算

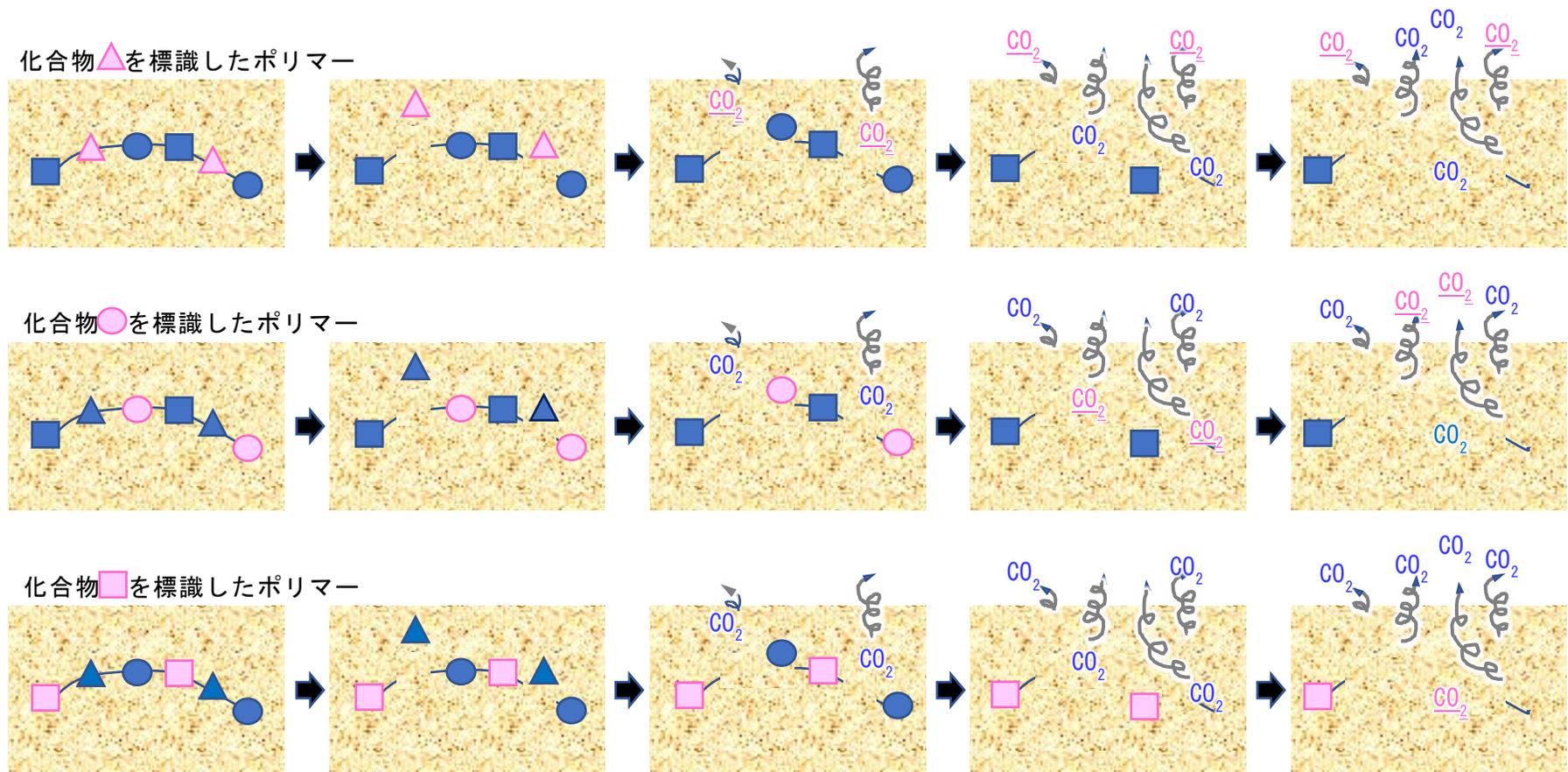


第 18 図 土壌中での生分解性素材の分解に伴って発生する二酸化炭素量積算における有意差検定*

*異なるアルファベットは $P < 0.01$ で有意 (ANOVA Tukey Test)、エラーバーは標準偏差反復数 4



第 19 図 新規素材配合フィルムの土壌中での分解に伴って発生する二酸化炭素量積算

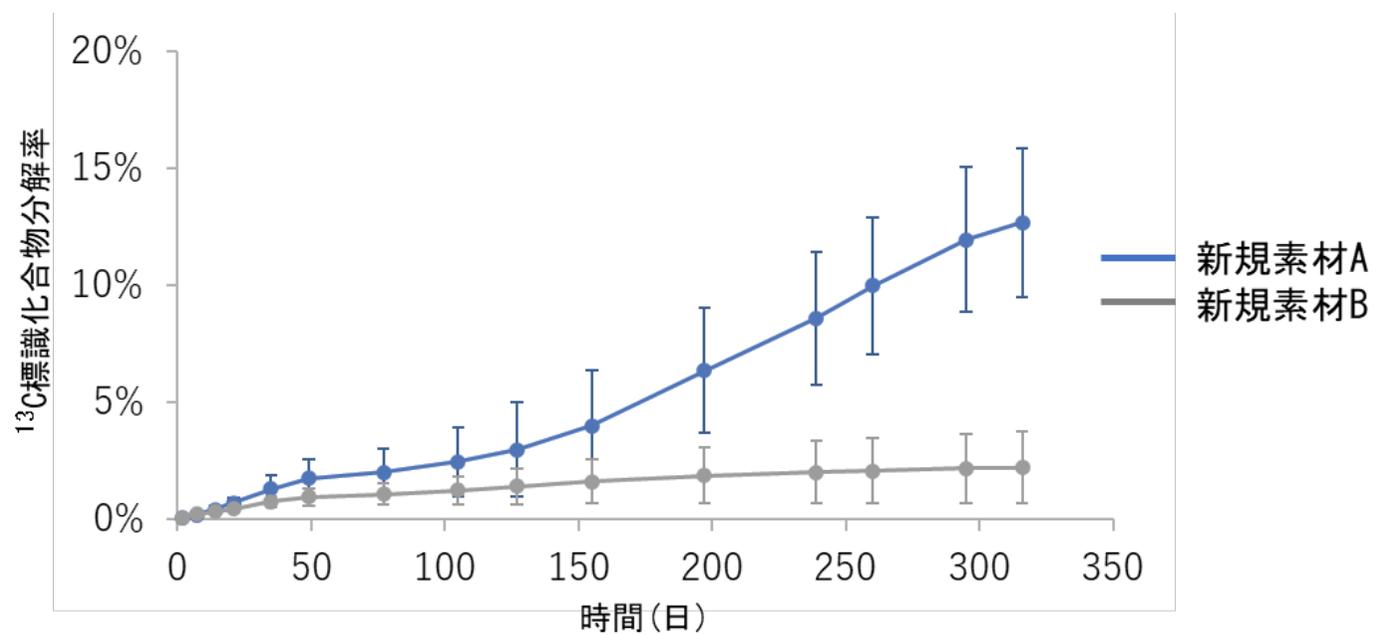


第 20 図 炭素の安定同位体 ^{13}C で標識化した化合物を原料にした生分解性ポリマーから土壤に埋設後の分解によって ^{13}C 標識および非標識 (^{12}C) CO_2 が放出される過程

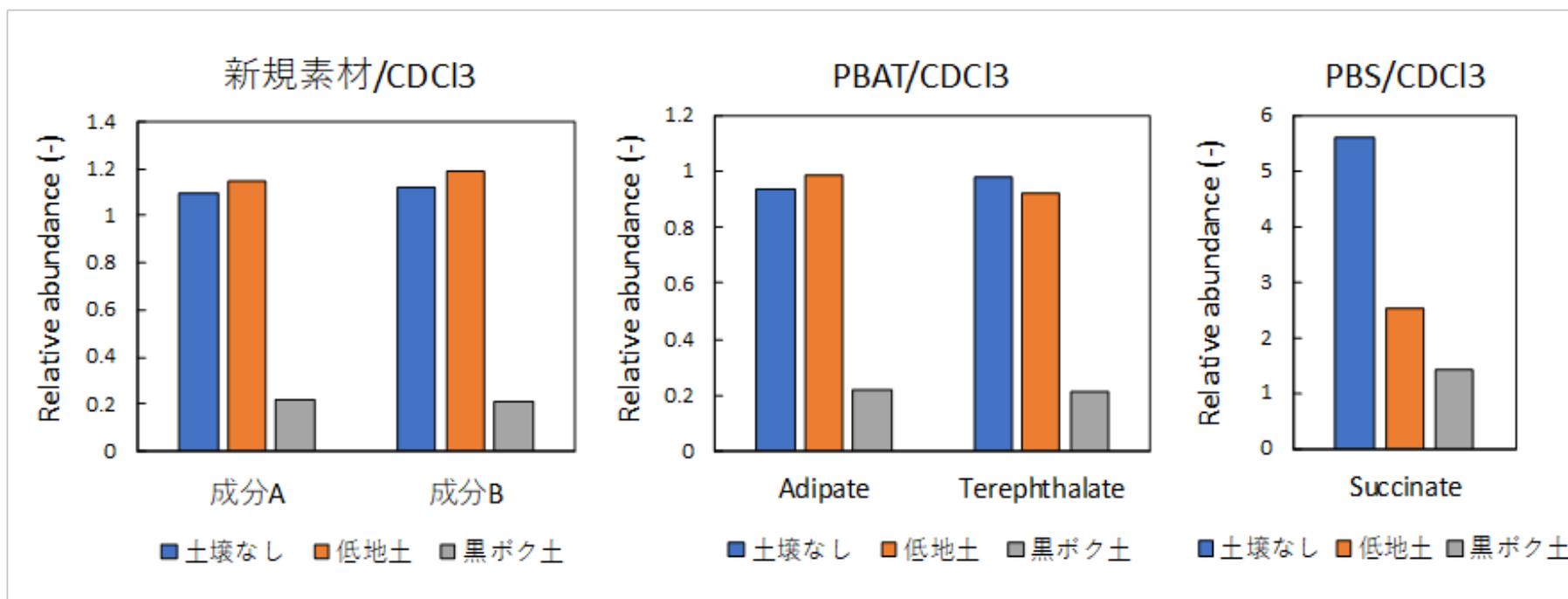
▲ ● ■ : 標識されていない化合物
 CO_2 : 標識されていない CO_2

▲ ● ■ : ^{13}C で標識された化合物
 CO_2 : ^{13}C で標識された CO_2

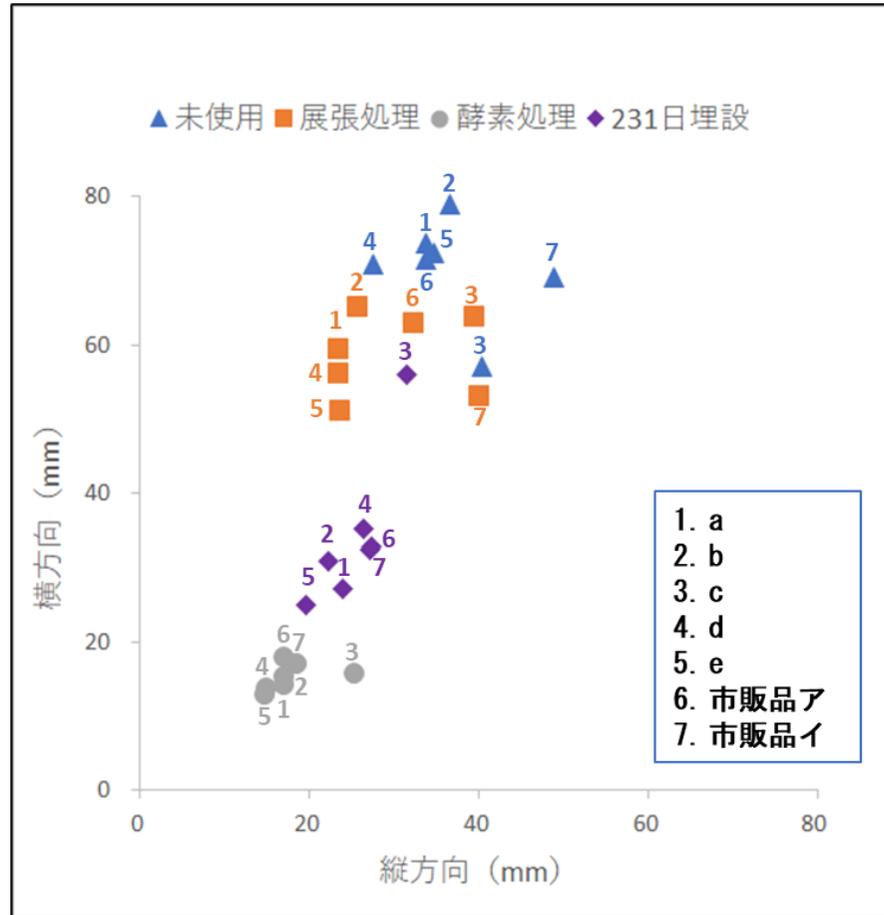
 : 土壤



第 21 図 ^{13}C で標識を施した化合物の分解に伴って発生する $^{13}\text{CO}_2$ 量から求めた分解率

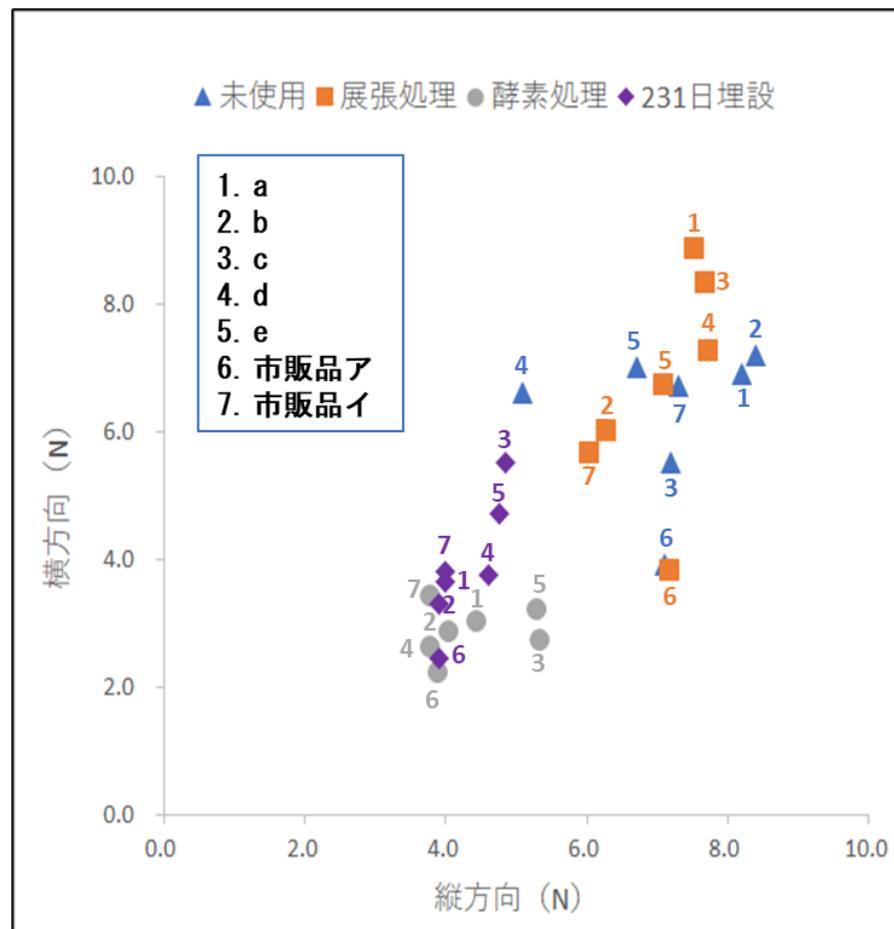


第 22 図 低地土及び黒ボク土からの各生分解性素材オリゴマーの抽出効率



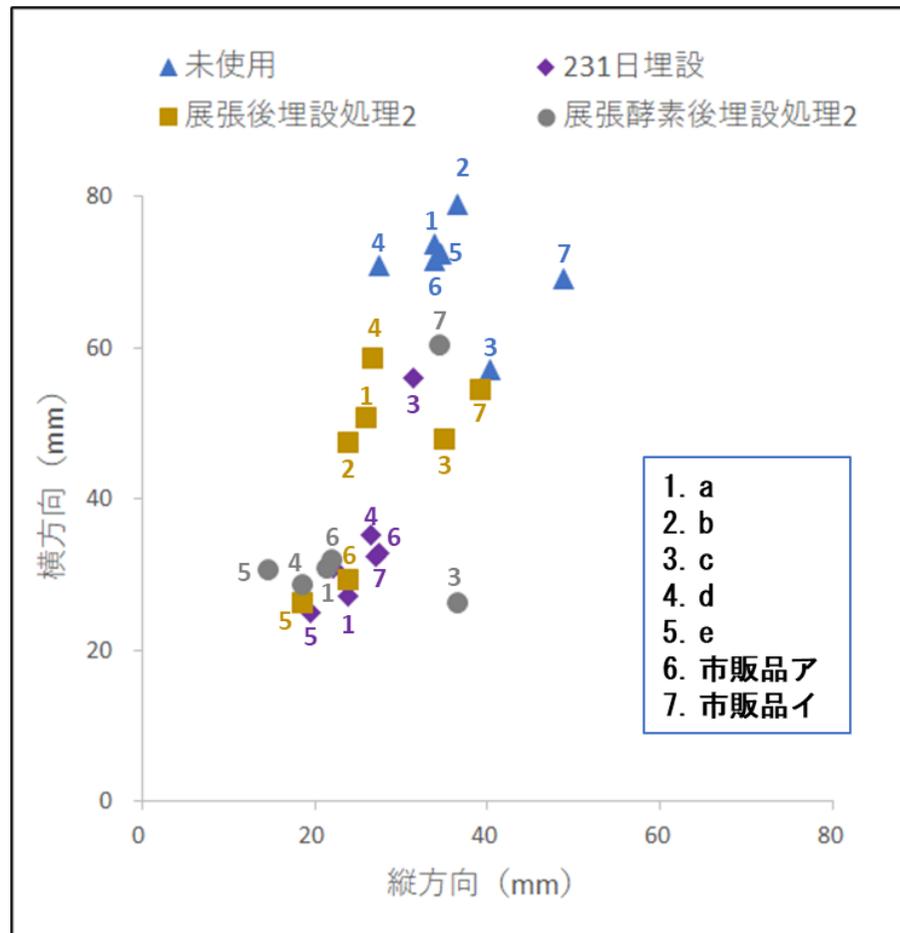
第 23 図 配合シリーズ 1；展張/展張後酵素処理による複合化素材
フィルムの強度変化(引張強度：引張力)

各フィルムの縦方向 と横方向 の評価値(中央値)を散布図で示した。
マーカーの形と色で各処理の区別を示す。



第 24 図 配合シリーズ 1；展張/展張後酵素処理による複合化素材
フィルムの強度変化(引張強度：柔軟性)

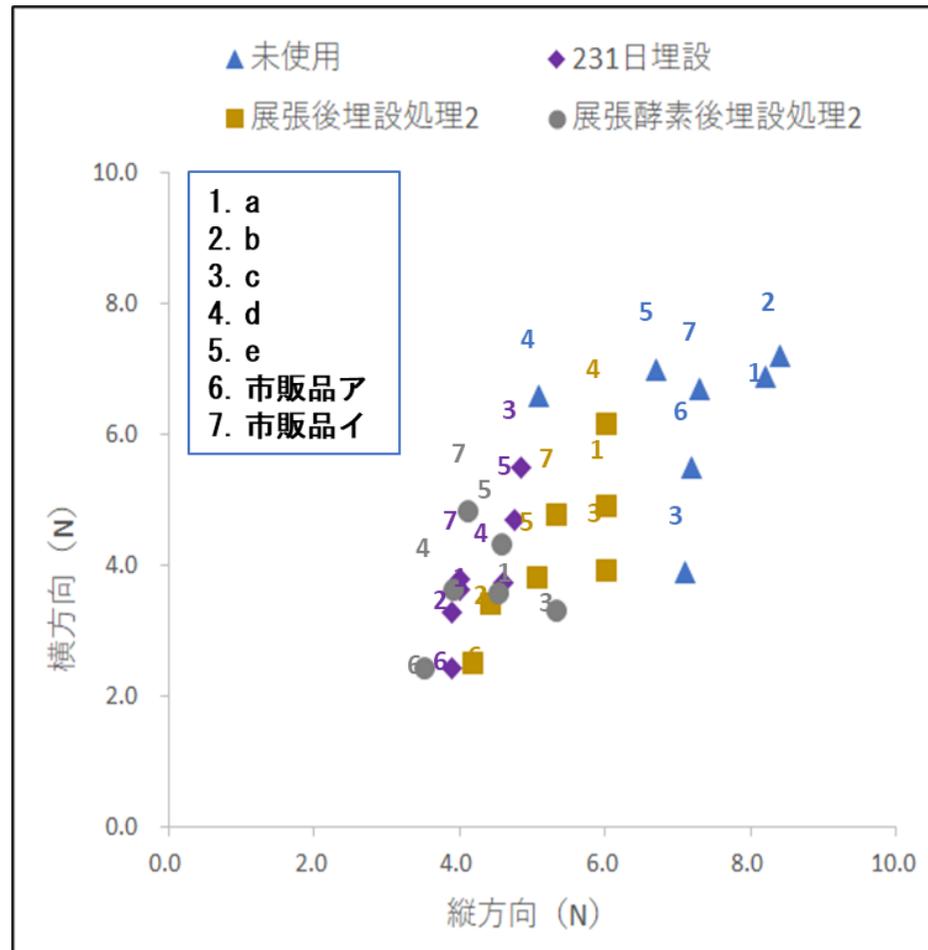
各フィルムの縦方向 と横方向 の評価値(中央値)を散布図で示した。
マーカーの形と色で各処理の区別を示す。



第 25 図 配合シリーズ 1；埋設処理による複合化素材フィルムの強度変化
 (引張強度：柔軟性)

各フィルムの縦方向 と横方向 の評価値(中央値)を散布図で示した。
 マーカーの形と色で各処理の区別を示す。

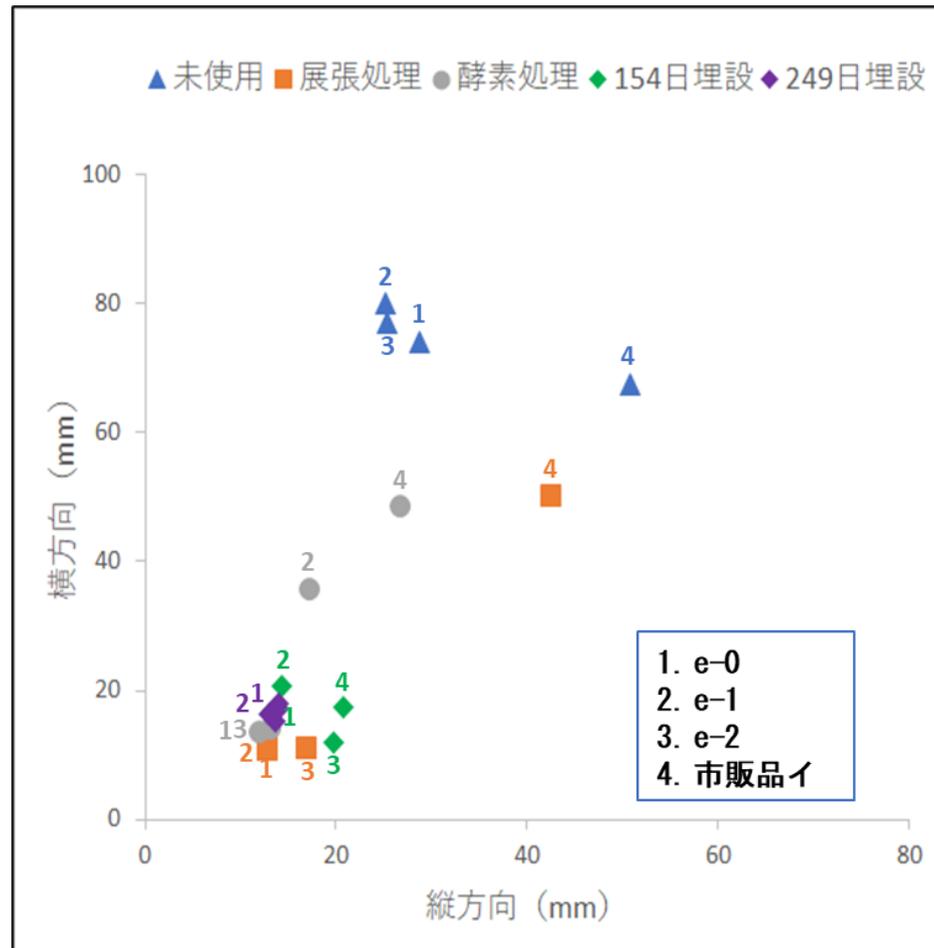
「展張後埋設処理 2」「展張酵素後埋設処理 2」は各処理後 188 日間埋設した。



第 26 図 配合シリーズ 1 ; 埋設処理による複合化素材フィルムの強度変化(引張強度 : 引張力)

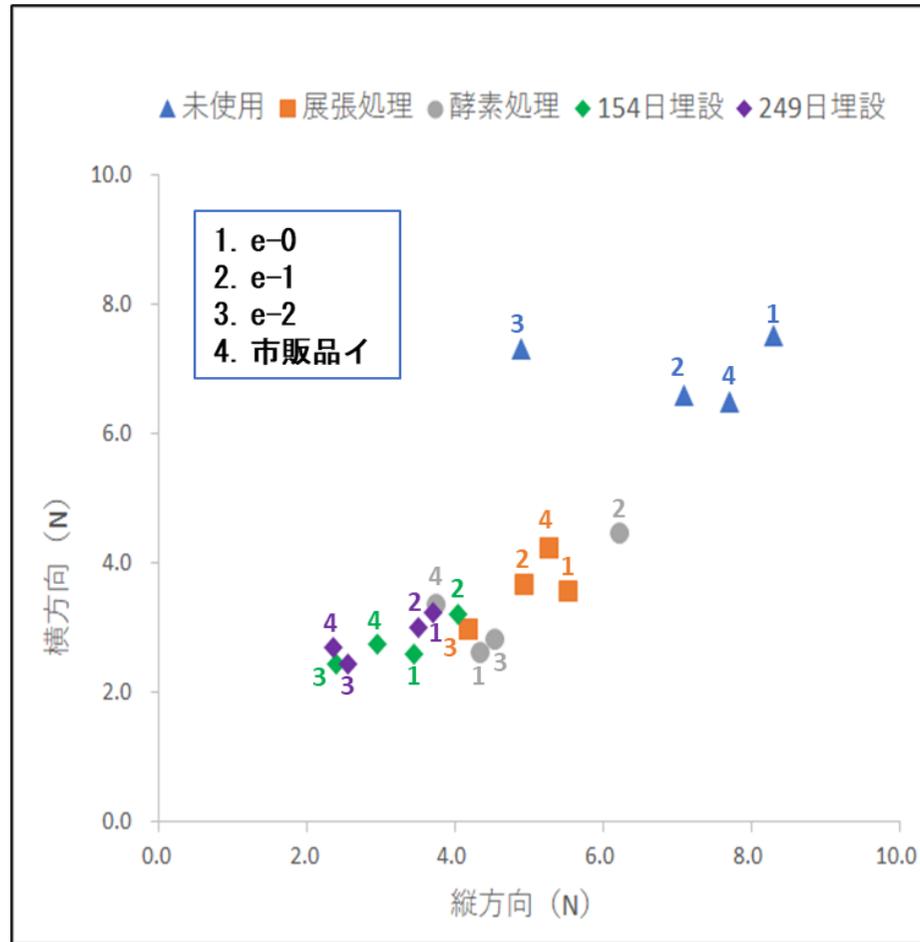
各フィルムの縦方向 と横方向 の評価値(中央値)を散布図で示した。
 マーカーの形と色で各処理の区別を示す。

「展張後埋設処理 2」「展張酵素後埋設処理 2」は各処理後 188 日間埋設した。



第 27 図 配合シリーズ 2；展張/展張後酵素処理による複合化素材フィルムの強度変化(引張強度：柔軟性)

各フィルムの縦方向 と横方向 の評価値(中央値)を散布図で示した。マーカーの形と色で各処理の区別を示す。



第 28 図 配合シリーズ 2；展張/展張後酵素処理による複合化素材
フィルムの強度変化(引張強度：引張力)

各フィルムの縦方向 と横方向 の評価値(中央値)を散布図で示した。
マーカーの形と色で各処理の区別を示す。

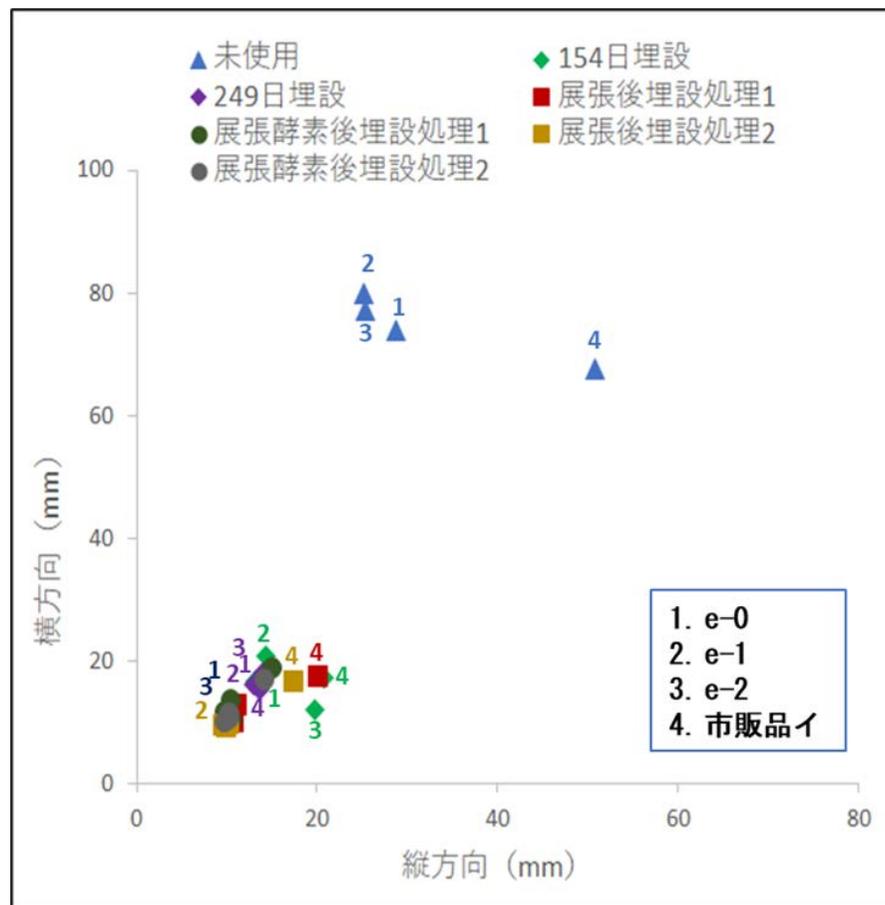
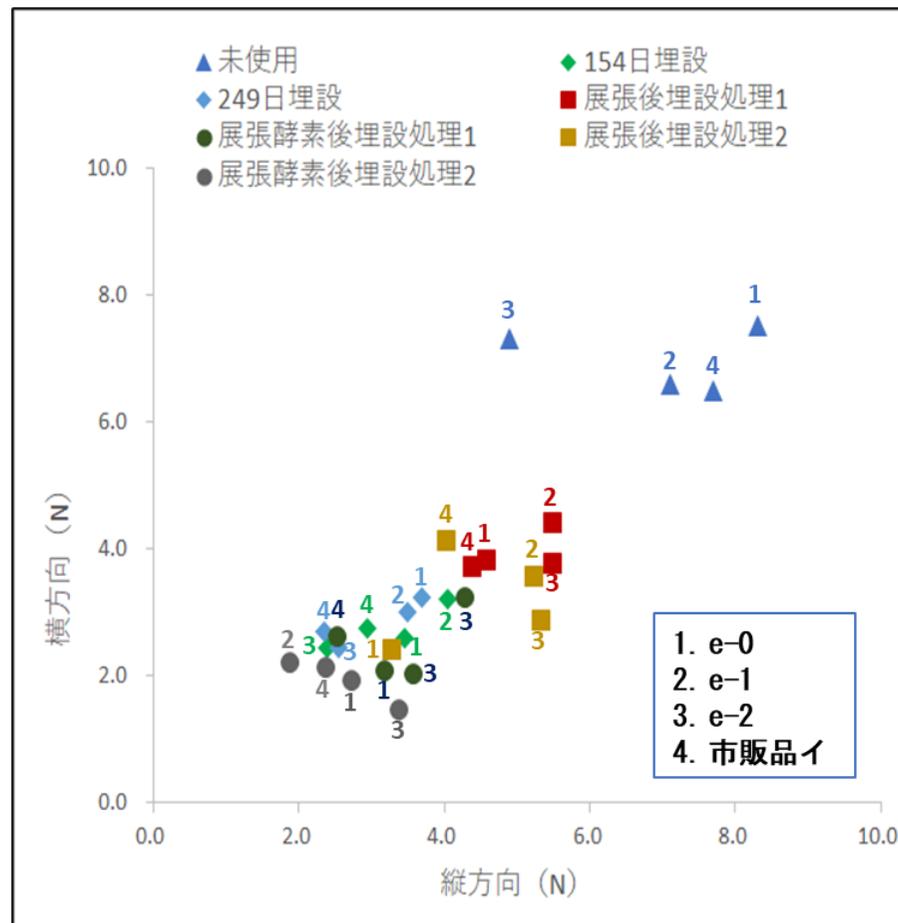


表 29 図 配合シリーズ 2；埋設処理による複合化素材フィルムの強度変化(引張強度：柔軟性)

各フィルムの縦方向 と横方向 の評価値(中央値)を散布図で示した。
 マーカーの形と色で各処理の区別を示す。

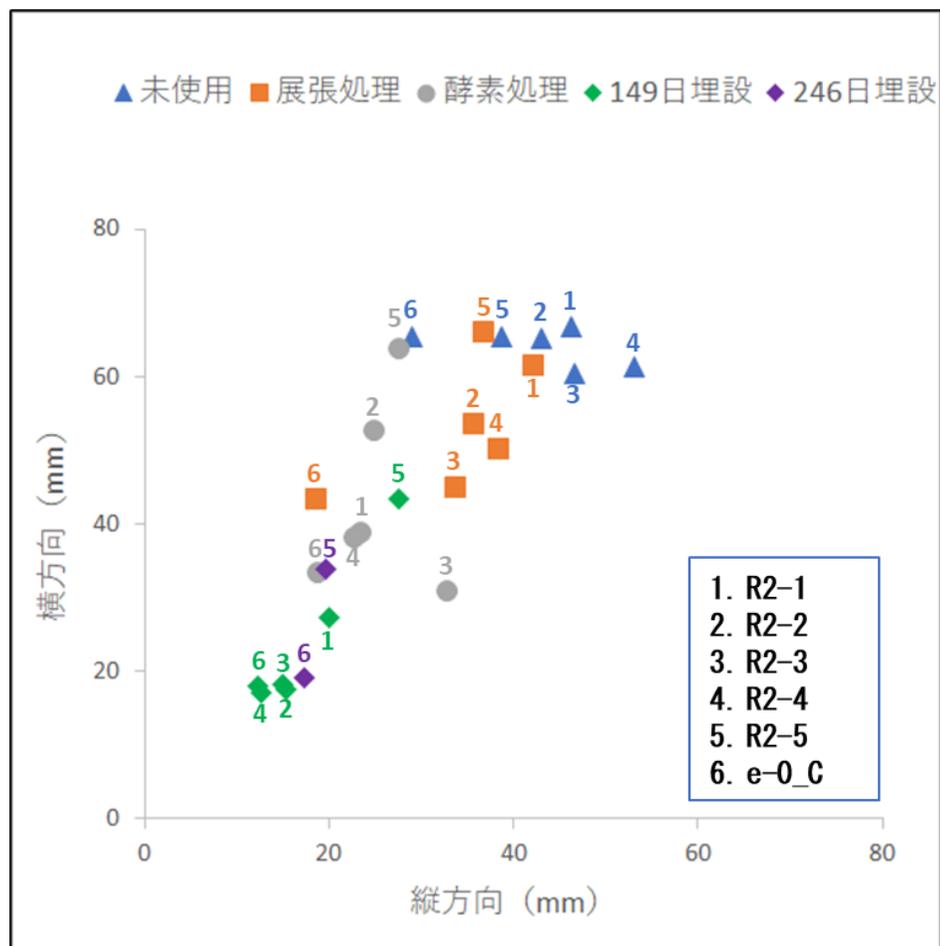
「展張後埋設処理 1」「展張酵素後埋設処理 1」は各処理後 93 日間、
 「展張後埋設処理 2」「展張酵素後埋設処理 2」は各処理後 188 日間埋設した。



第30図 配合シリーズ2；埋設処理による複合化素材フィルムの強度変化
(引張強度：引張力)

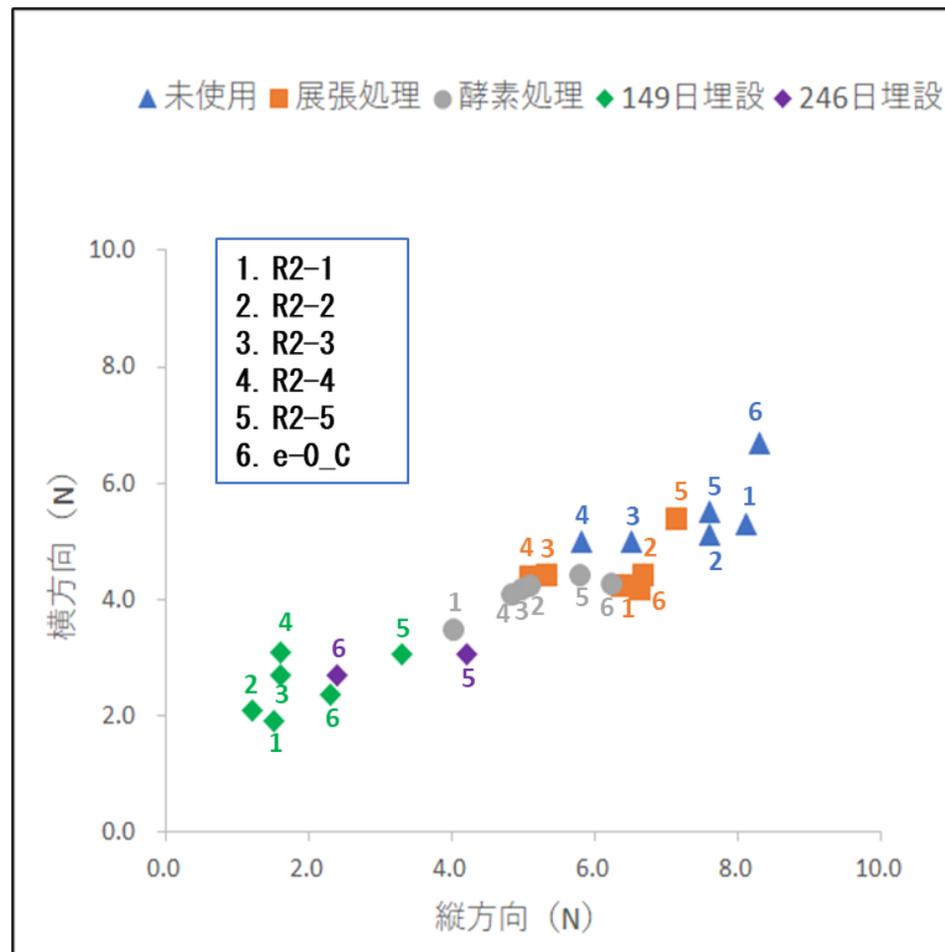
各フィルムの縦方向 と横方向 の評価値(中央値)を散布図で示した。
 マーカーの形と色で各処理の区別を示す。

「展張後埋設処理1」「展張酵素後埋設処理1」は各処理後93日間、
 「展張後埋設処理2」「展張酵素後埋設処理2」は各処理後188日間埋設した。



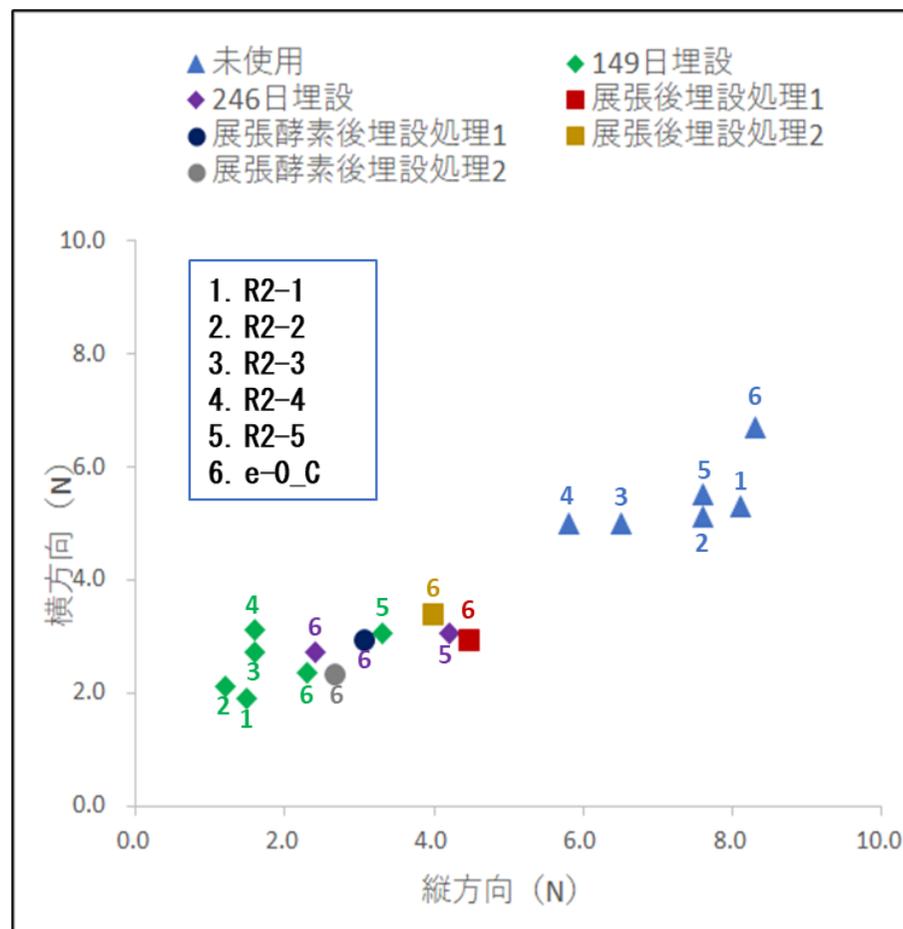
第 31 図 配合シリーズ 3；展張/展張後酵素処理による複合化素材フィルムの強度変化(引張強度：柔軟性)

各フィルムの縦方向 と横方向 の評価値(中央値)を散布図で示した。
 マーカーの形と色で各処理の区別を示す。



第 32 図 配合シリーズ 3 ; 展張/展張後酵素処理による複合化
素材フィルムの強度変化 (引張強度 : 引張力)

各フィルムの縦方向 と横方向 の評価値 (中央値) を散布図で示した。
マーカーの形と色で各処理の区別を示す。



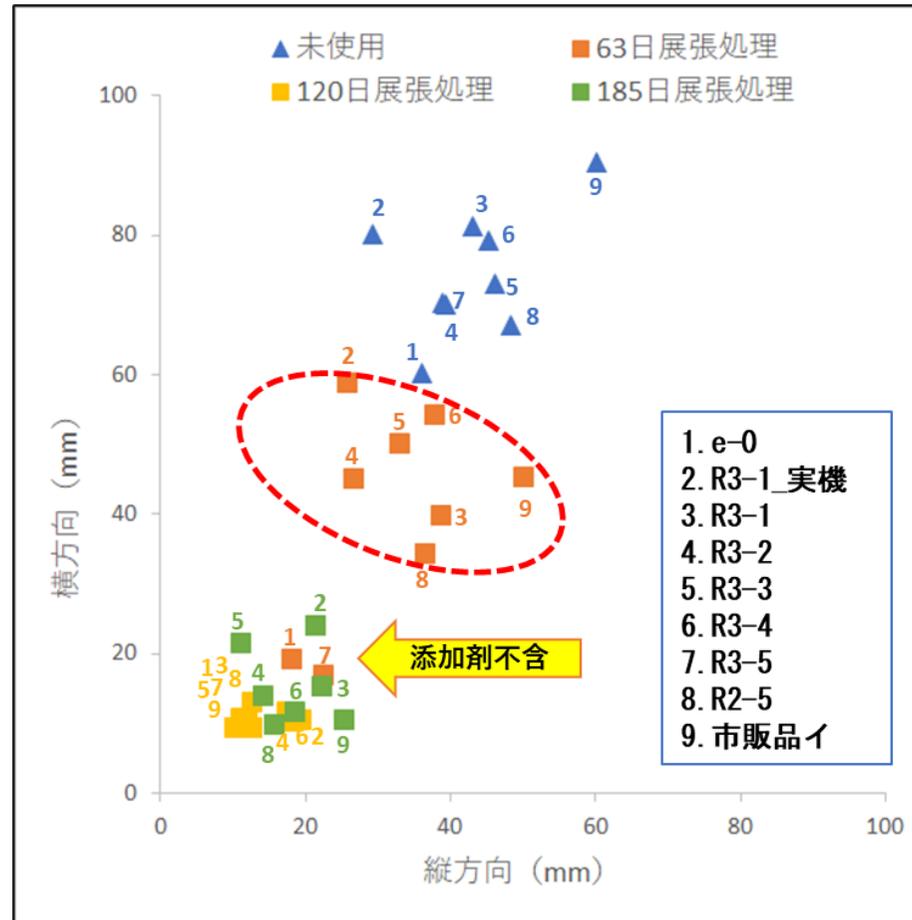
第 34 図 配合シリーズ 3；埋設処理による複合化素材フィルムの強度変化
(引張強度：引張力)

各フィルムの縦方向 と横方向 の評価値(中央値)を散布図で示した。

マーカーの形と色で各処理の区別を示す。

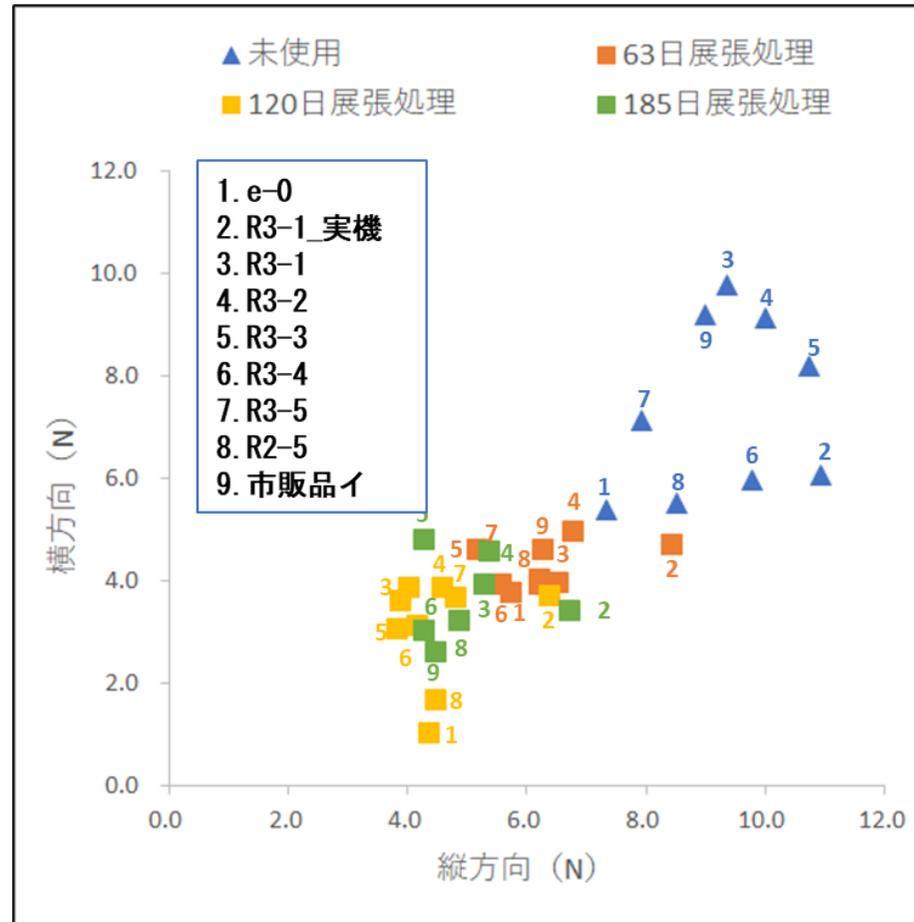
「展張後埋設処理 1」「展張酵素後埋設処理 1」は各処理後 90 日間、

「展張後埋設処理 2」「展張酵素後埋設処理 2」は各処理後 187 日間埋設した



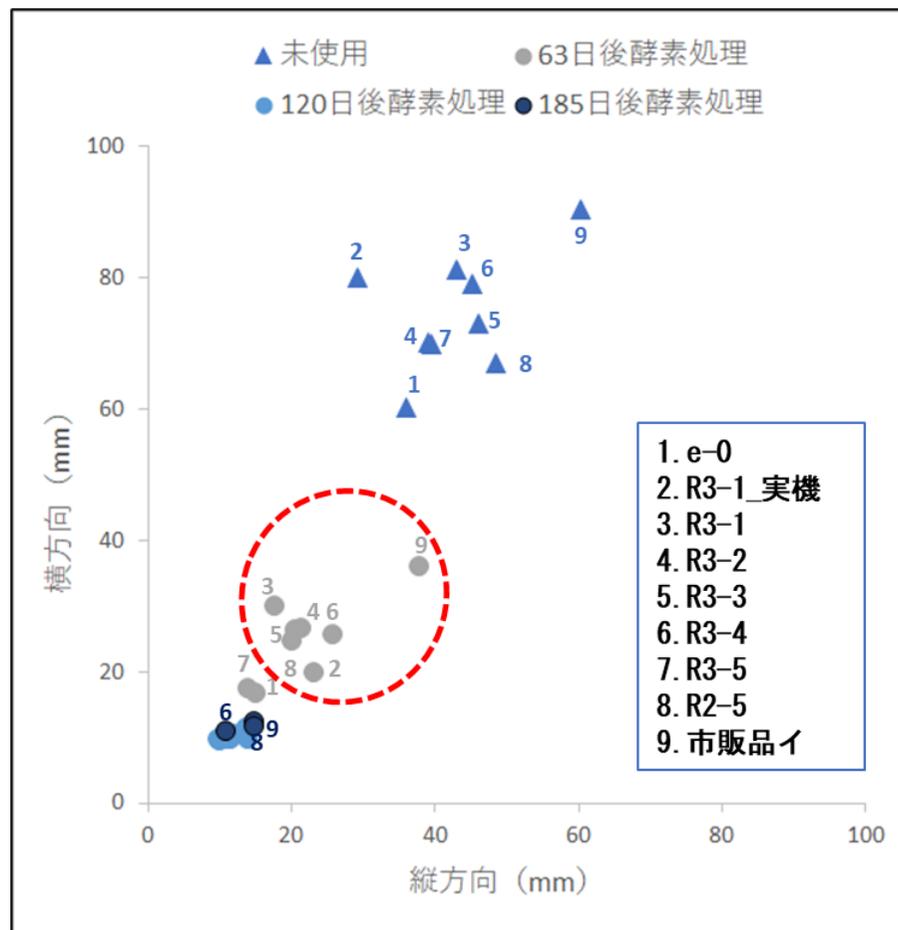
第 35 図 配合シリーズ 4 ; 展張処理による複合化素材フィルムの強度変化
(引張強度 : 柔軟性)

各フィルムの縦方向 と横方向 の評価値(中央値)を散布図で示した。
マーカーの形と色で各処理の区別を示す。



第 36 図 配合シリーズ 4；展張処理による複合化素材フィルムの強度変化(引張強度：引張力)

各フィルムの縦方向 と横方向 の評価値(中央値)を散布図で示した。
 マーカーの形と色で各処理の区別を示す。



第 37 図 配合シリーズ 4 ; 展張後酵素処理による複合化素材フィルムの強度変化
(引張強度 : 柔軟性)

各フィルムの縦方向 と横方向 の評価値(中央値)を散布図で示した。
マーカーの形と色で各処理の区別を示す。

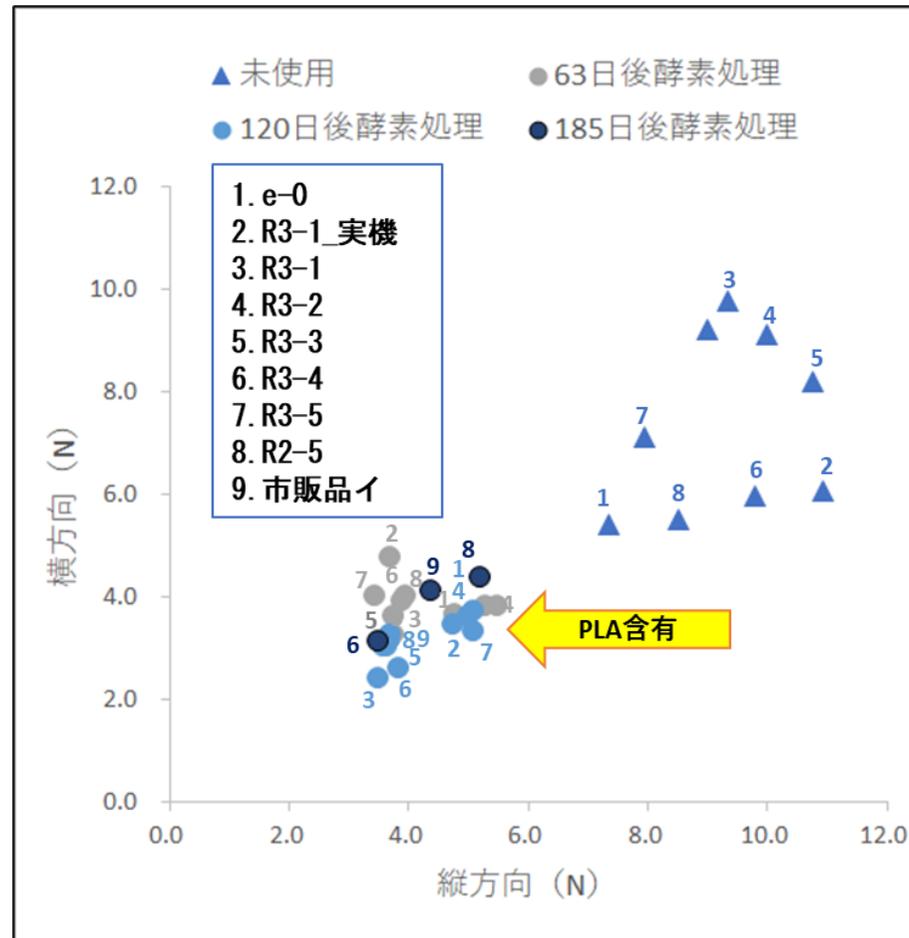
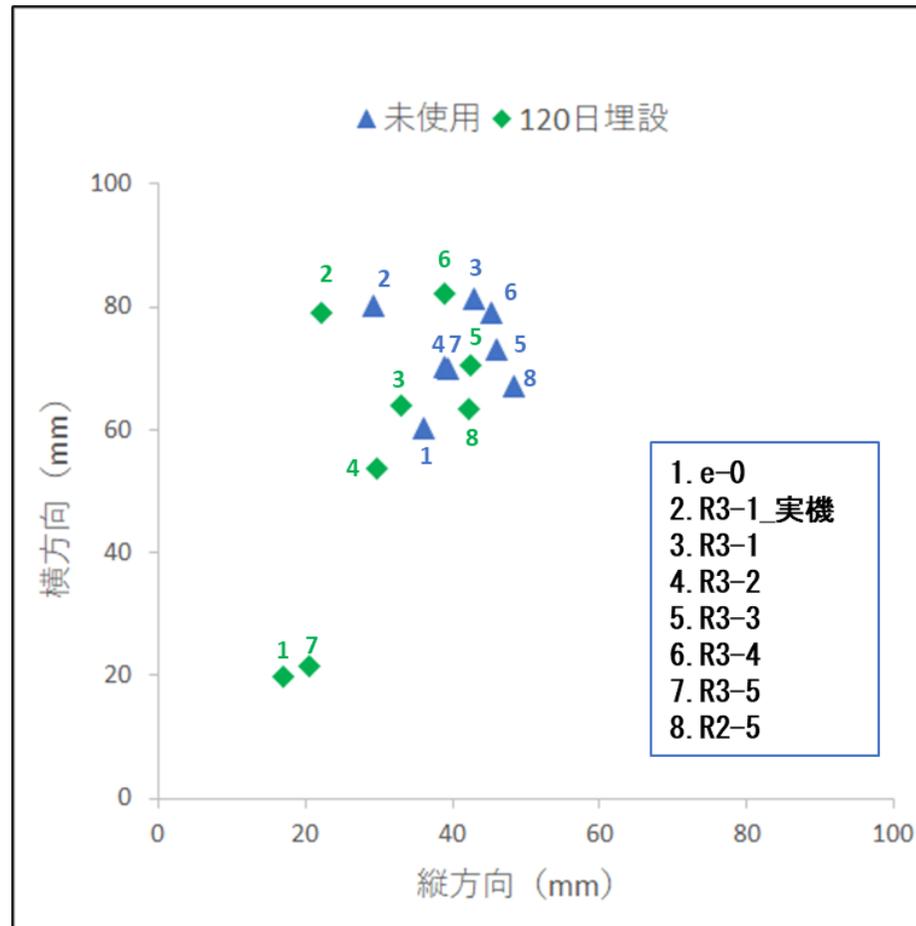


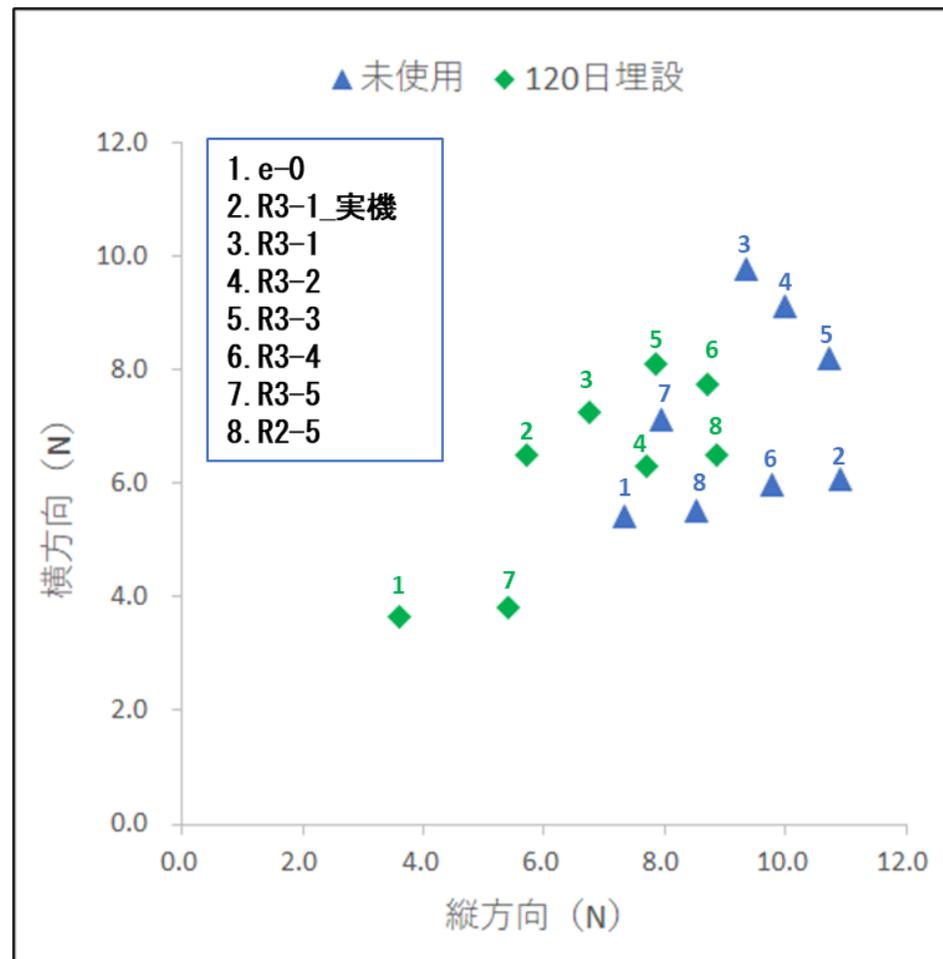
表 38 図 配合シリーズ 4；展張後酵素処理による複合化素材フィルムの強度変化
(引張強度：引張力)

各フィルムの縦方向 と横方向 の評価値(中央値)を散布図で示した。
マーカーの形と色で各処理の区別を示す。



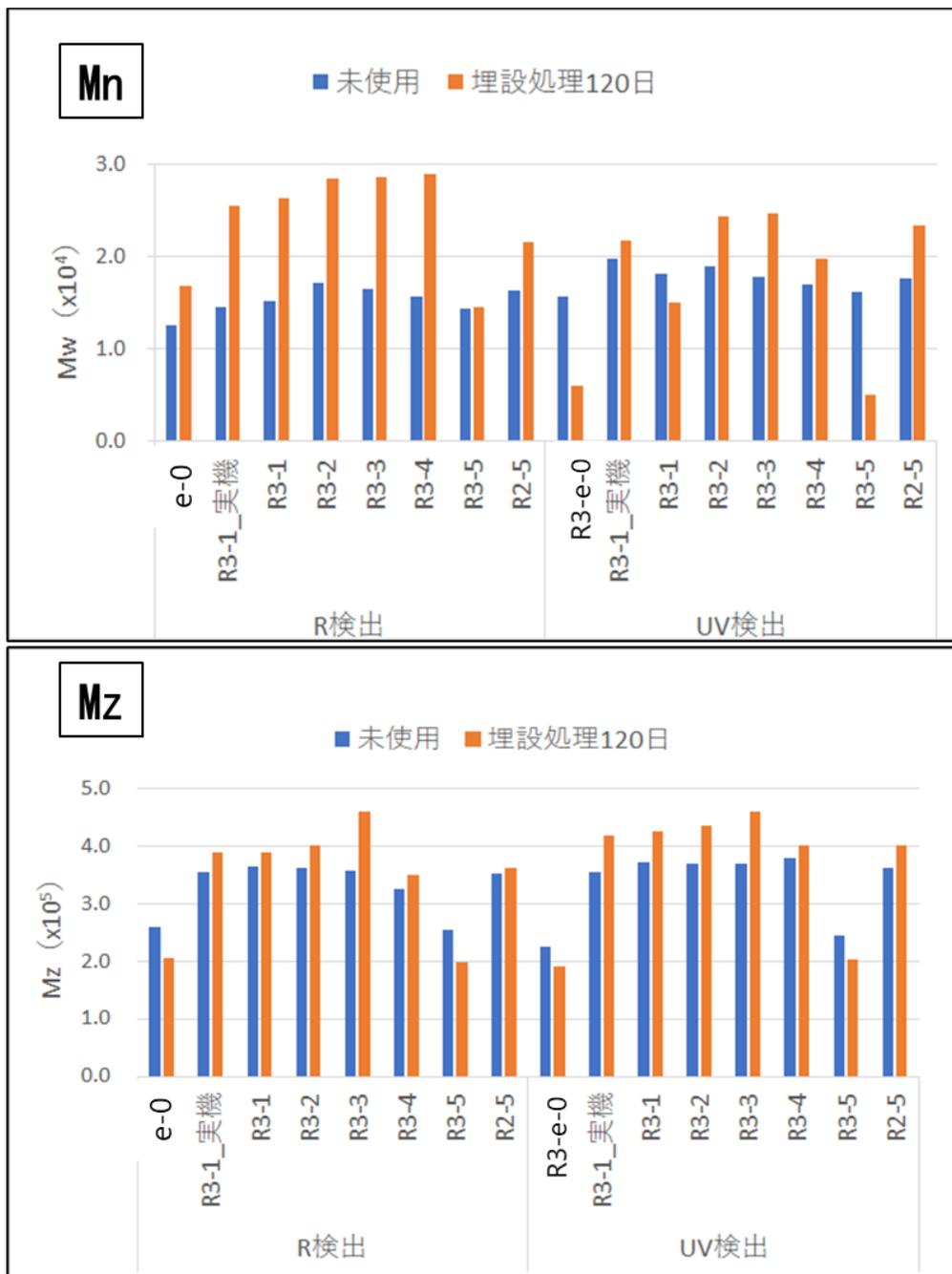
第 39 図 配合シリーズ 4 ; 埋設処理による複合化素材フィルムの強度変化
(引張強度 : 柔軟性)

各フィルムの縦方向 と横方向 の評価値(中央値)を散布図で示した。
マーカーの形と色で各処理の区別を示す。



第40図 配合シリーズ4；埋設処理による複合化素材フィルムの強度変化(引張強度：引張力)

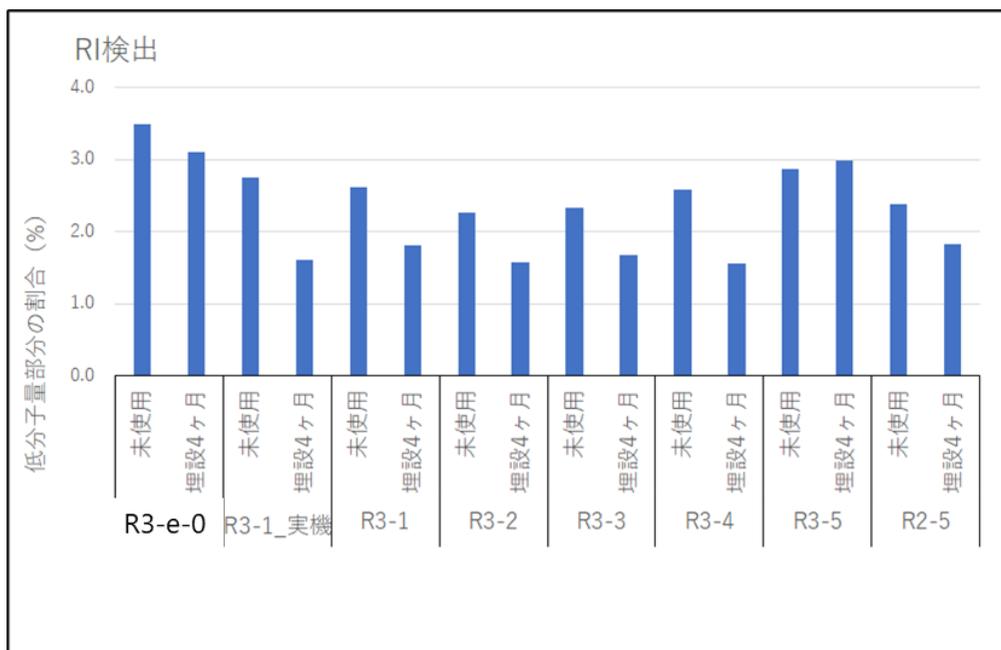
各フィルムの縦方向と横方向の評価値(中央値)を散布図で示した。
 マーカーの形と色で各処理の区別を示す。



第 41 図 配合シリーズ 4 ; 埋設処理による
複合化素材フィルムの分子量変化
(Mn、Mz)

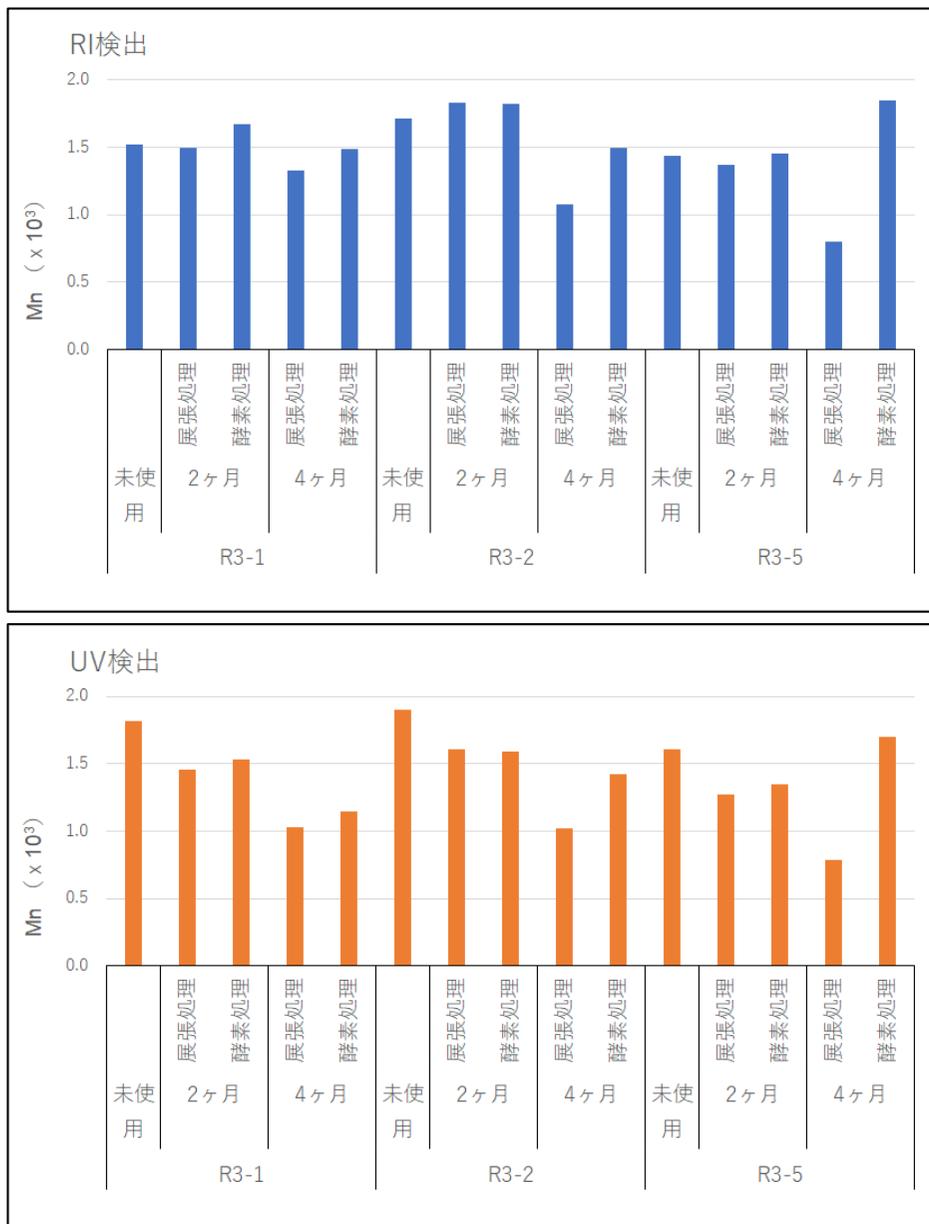
「未使用」時並びに最初から埋設 120 日目の試料の分子量を算出した。検出は RI 並びに UV にて行った。

分子量はポリスチレン (PS) 換算にて算出した。



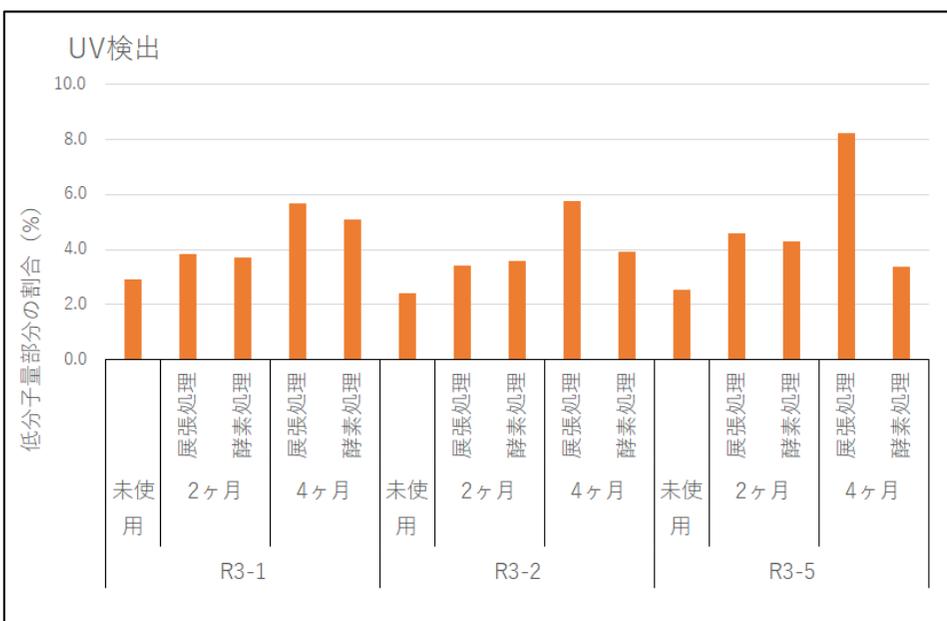
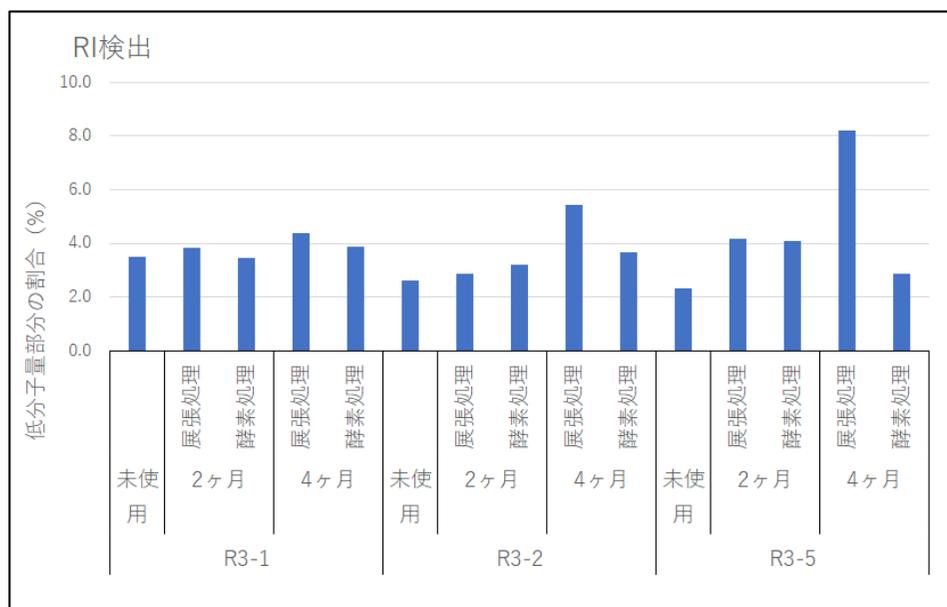
第 42 図 配合シリーズ 4 ; 埋設処理による
複合化素材フィルムの低分子量部分の
割合 (%)

各フィルムの Log 分子量を横軸に $dwt/d(\text{Log}M)$ を縦軸にとるグラフより $\text{Log}M < 3.5$ の面積値より割合を算出(分子量約 3,000 未満の割合となる)。RI 検出、並びに UV 検出の各グラフより算出した。



第43図 配合シリーズ4；展張処理、展張後酵素処理による複合化素材フィルムの分子量変化(Mn)

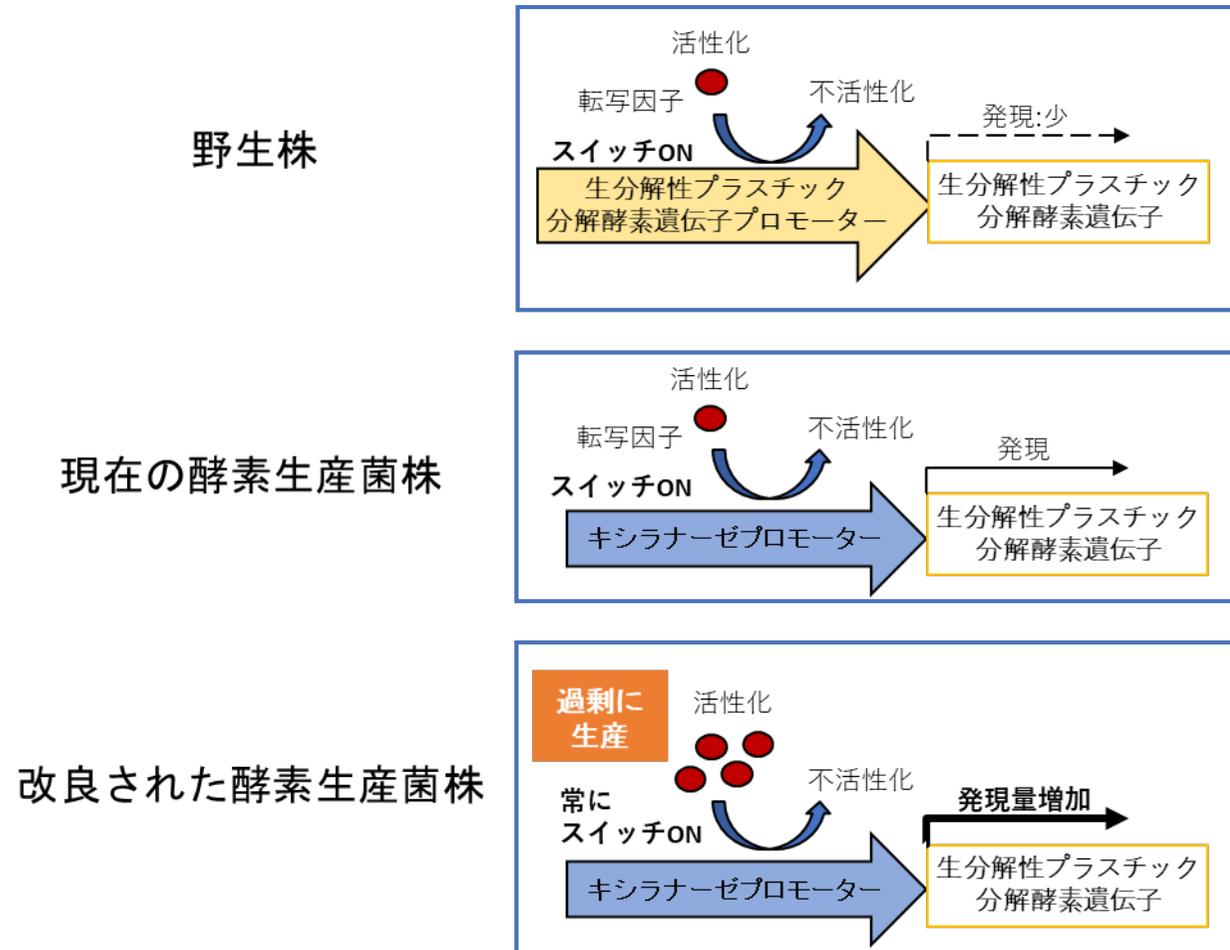
「未使用」時並びに2か月、4か月の展張処理後の試料、及び2ヶ月展張後、4か月展張後の酵素処理の分子量を算出した。検出はRI並びにUVにて行った。分子量はポリスチレン(PS)換算にて算出した。



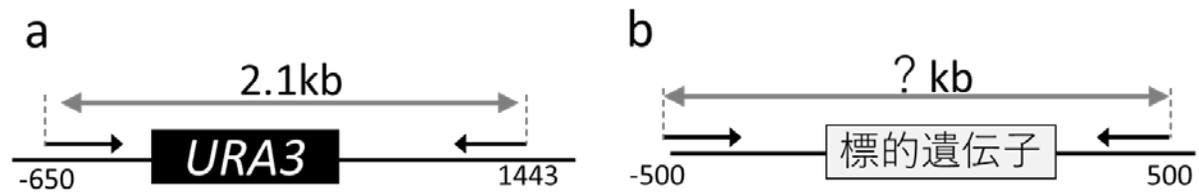
第 44 図 配合シリーズ 4 ; 展張処理/展張後
酵素処理による複合化素材 フィルム
の低分子量部分の割合 (%)

各フィルムの Log 分子量を横軸に、dwt/d(LogM)を
縦軸にとるグラフより LogM < 3.5 の面積値より割
合算出(分子量約 3,000 未満の割合となる)。

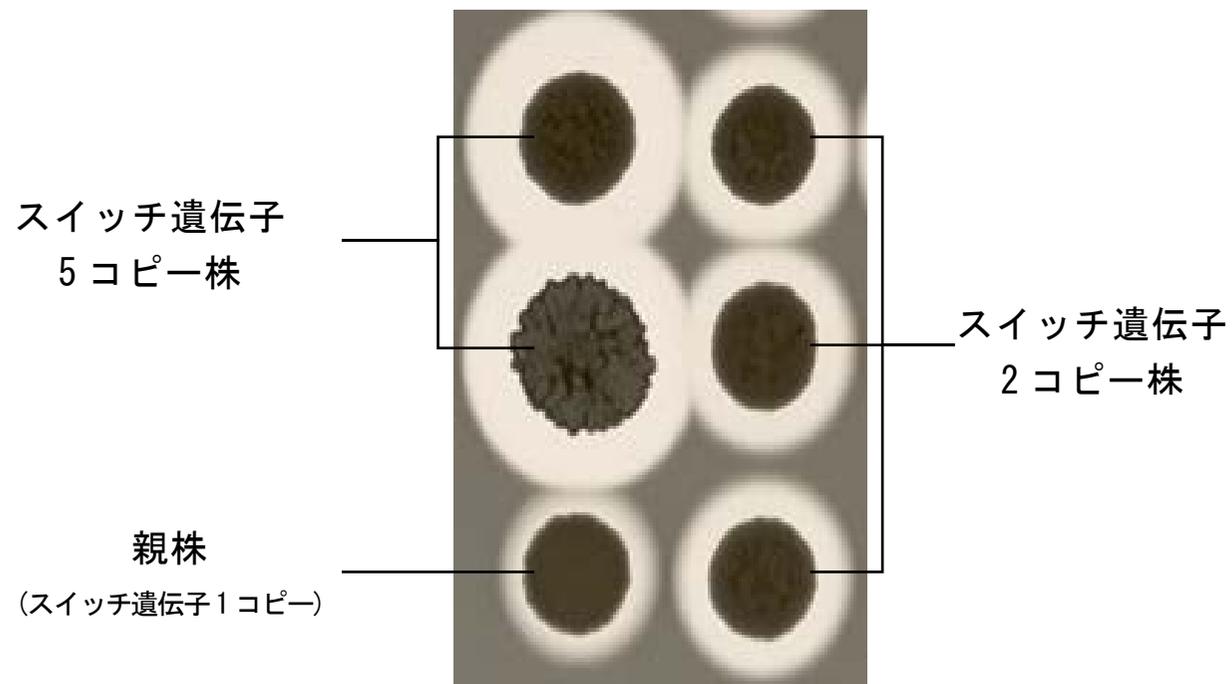
RI 検出、並びに UV 検出の各グラフより算出し
た。



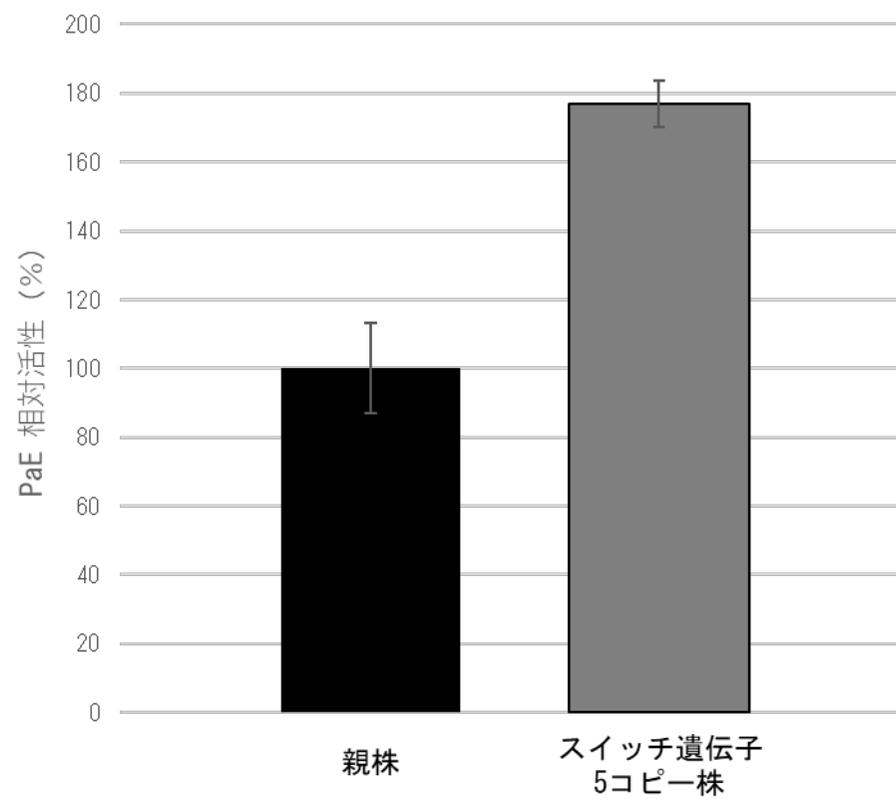
第 45 図 キシラナーゼプロモーターによる PaE 高生産系の概略図



第 46 図 遺伝子破壊株の確認用 PCR 実験のスキーム

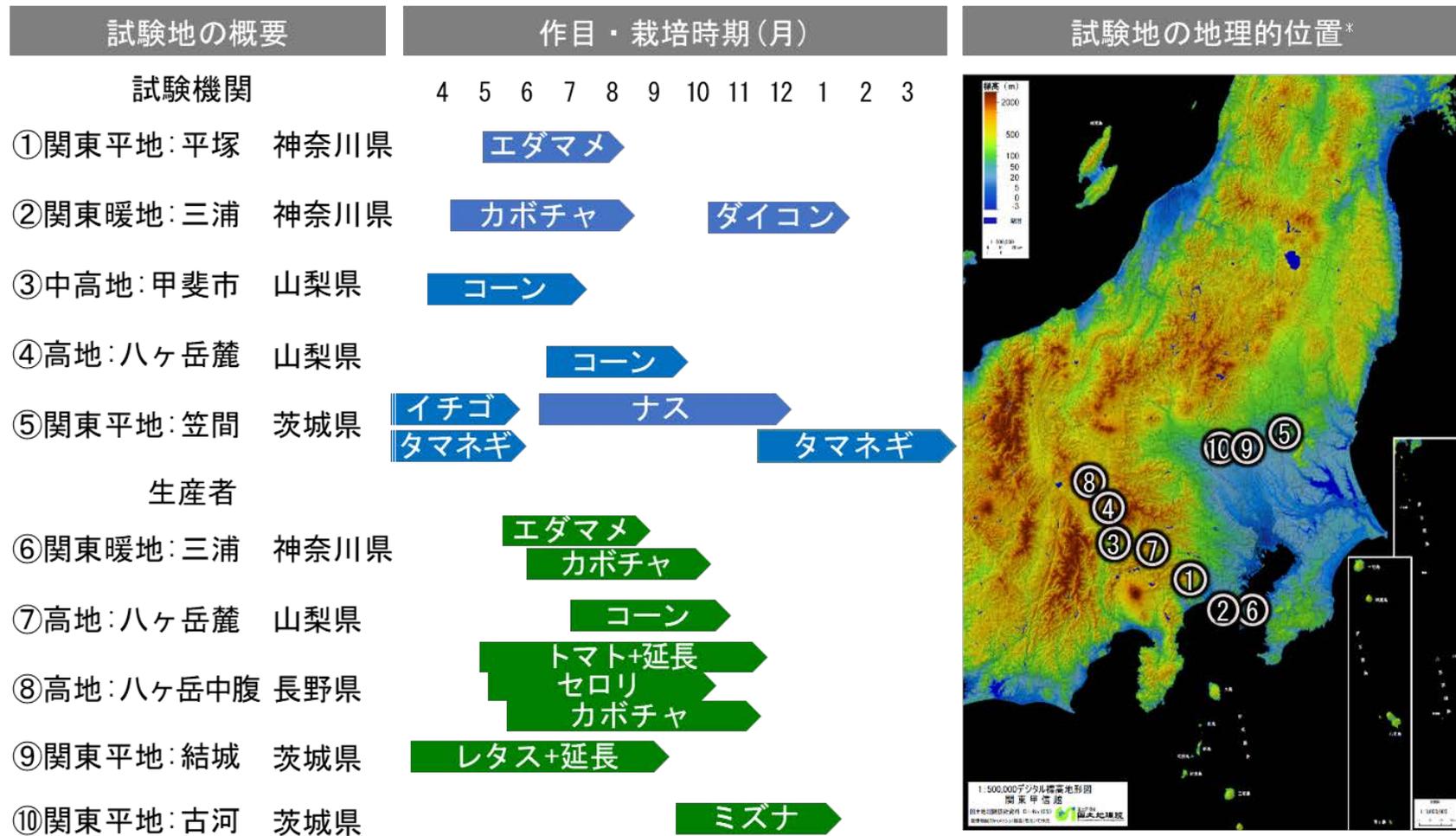


第 47 図 ハローアッセイ法によるスイッチ遺伝子追加導入株の PaE 生産能力の評価



第 48 図 培養液中の PaE 活性の比較

*エラーバーは標準誤差を示す。



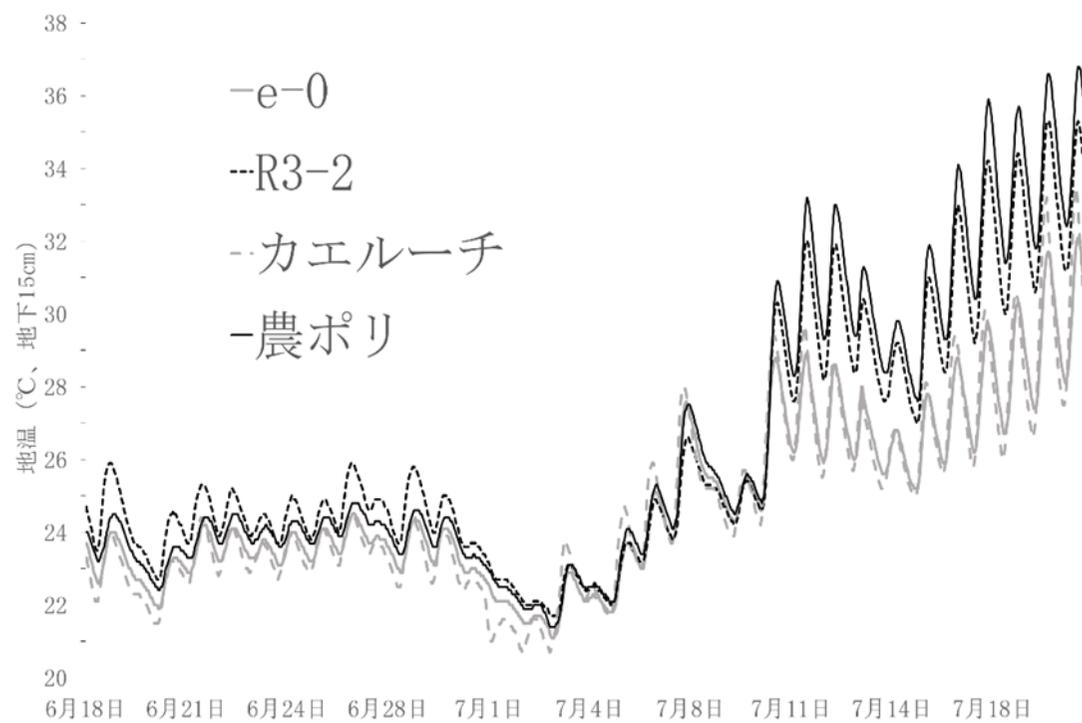
第 49 図 令和 3 年度の新規生分解性マルチを用いた野菜の栽培試験概要

*国土地理院ウェブサイト“デジタル標高地形図「関東」”

(https://www.gsi.go.jp/kankyochiri/degitalelevationmap_kanto.html)に実証試験場所番号を加筆



第 50 図 エダマメの生育状況及びマルチの外観(令和 3 年 6 月 8 日撮影)



第 51 図 地下 15cm の地温の推移 (令和 3 年)



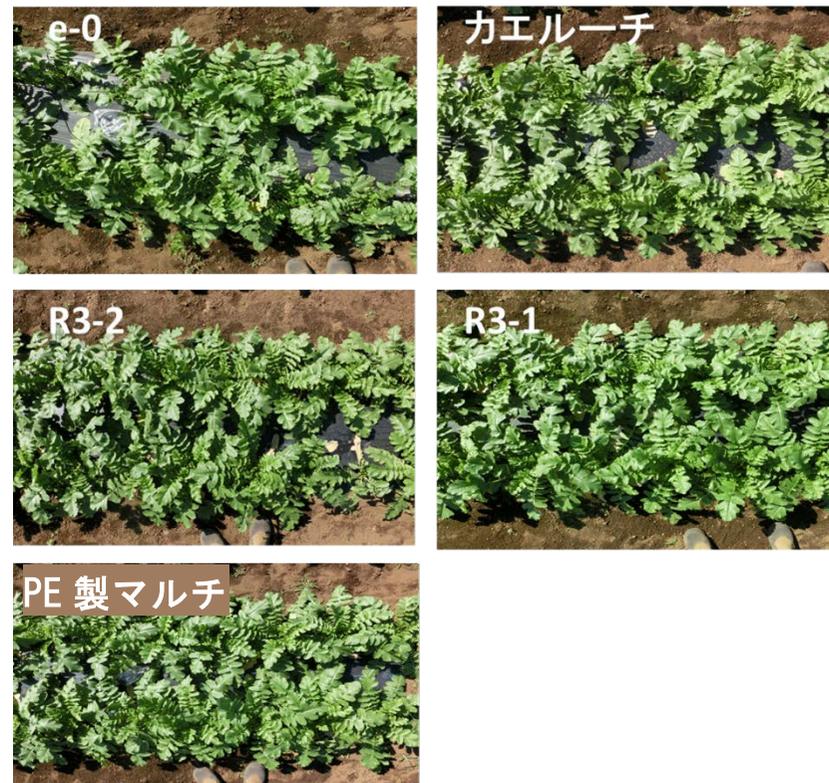
第 52 図 エダマメ収穫後のフィルムの状態(令和 3 年 7 月 9 日撮影)



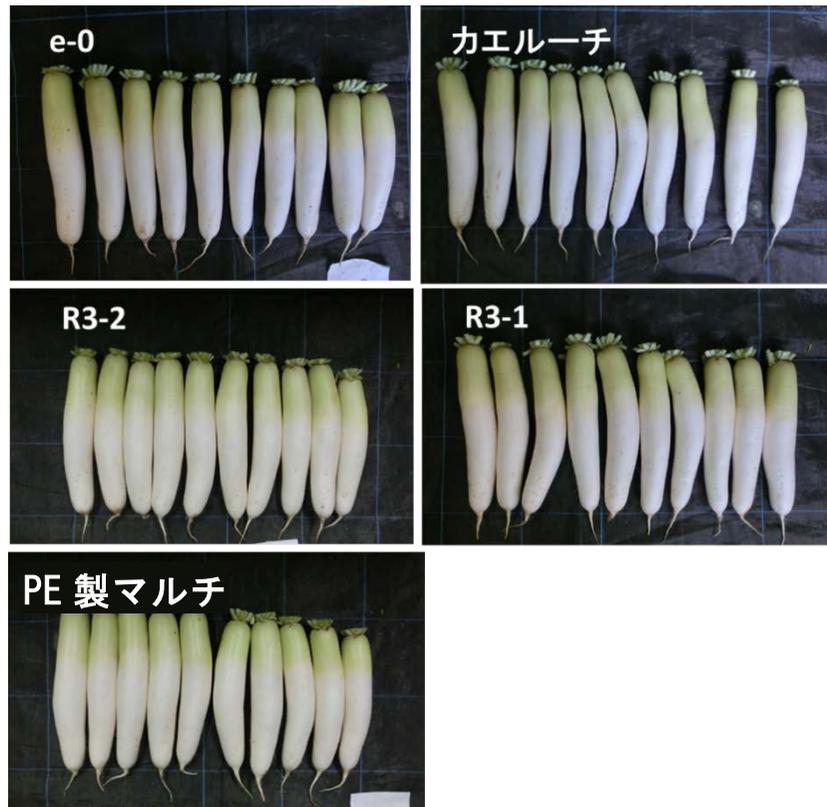
第 53 図 簡易メッシュバッグ法(埋設：令和 3 年 8 月 26 日)



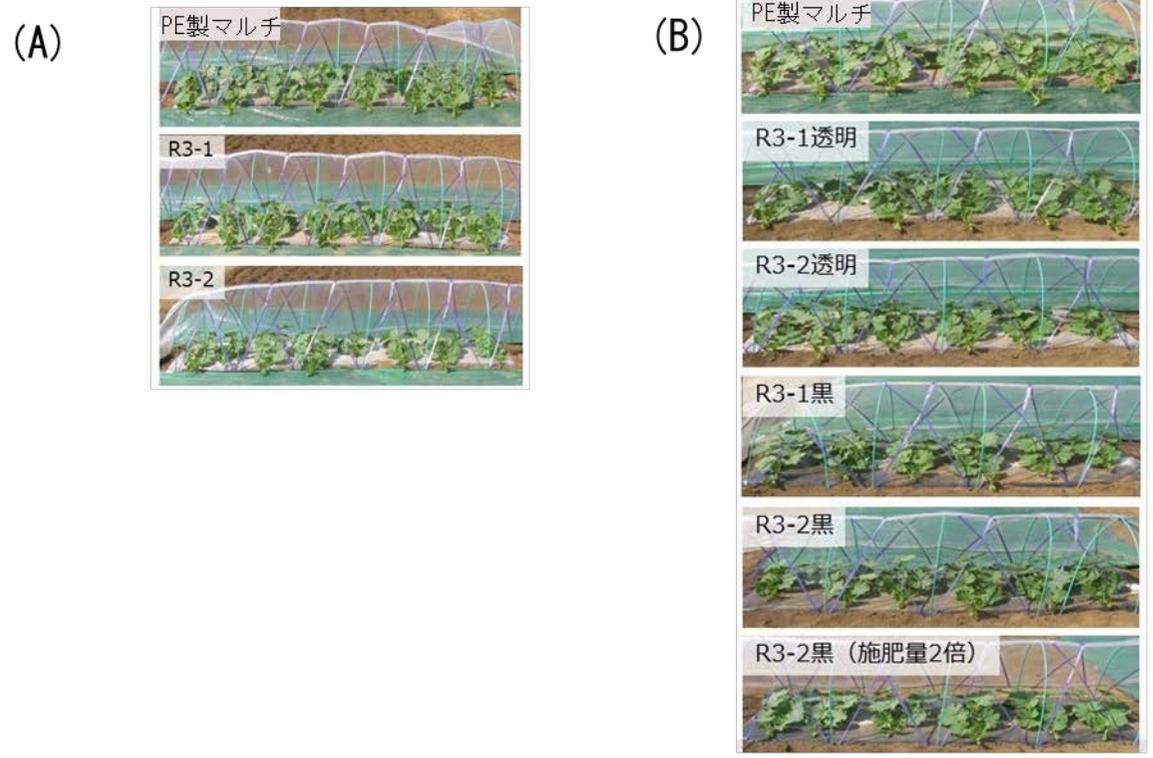
第 54 図 収穫当日のエダマメの生育及びマルチの状況
(令和 3 年 7 月 26 日撮影)



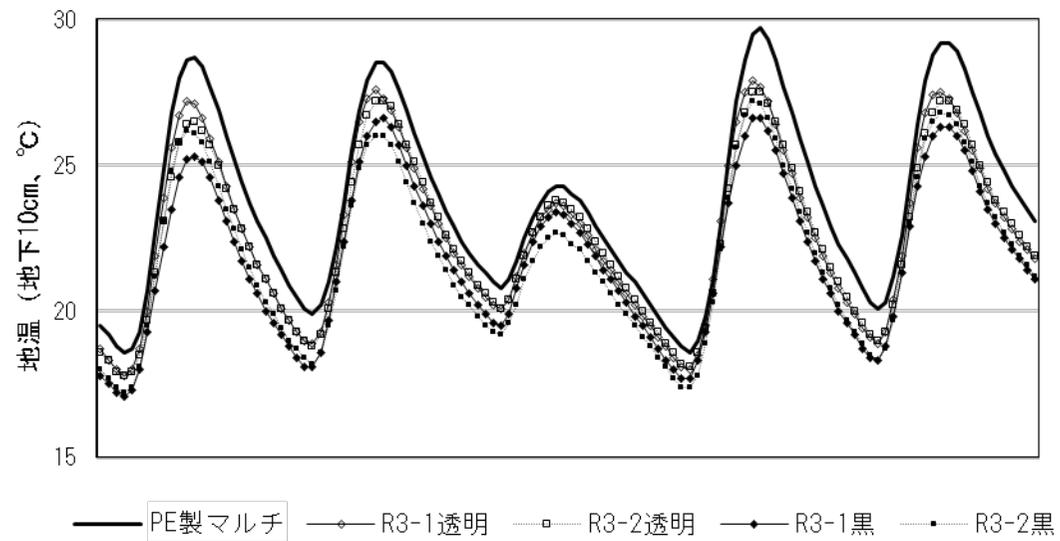
第 55 図 生育中のダイコンのフィルムの状況
(令和 3 年 10 月 15 日撮影)



第 56 図 収穫調査時のダイコン外観
(令和 3 年 11 月 16 日撮影)



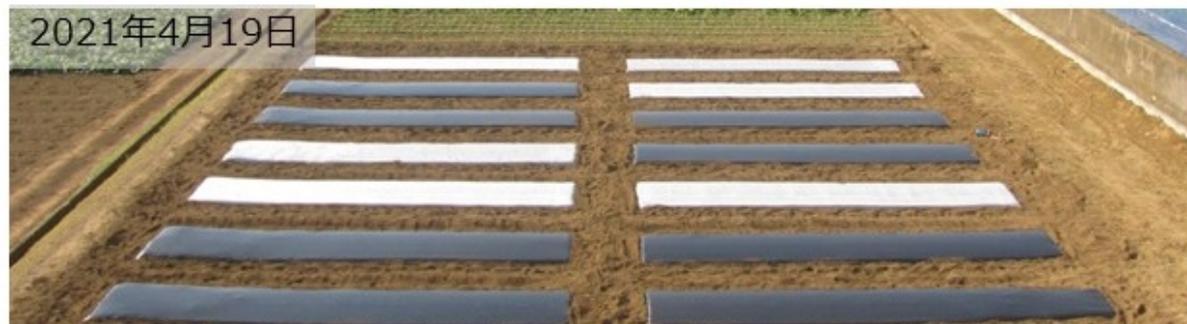
第 57 図 生育調査時の (A) 通常栽培と (B) 麦マルチ栽培の生育状況



第 58 図 麦マルチ栽培各試験区における生育初期のベッド部地温



第 59 図 カボチャ栽培で展張した試作フィルム等の時期別の様子



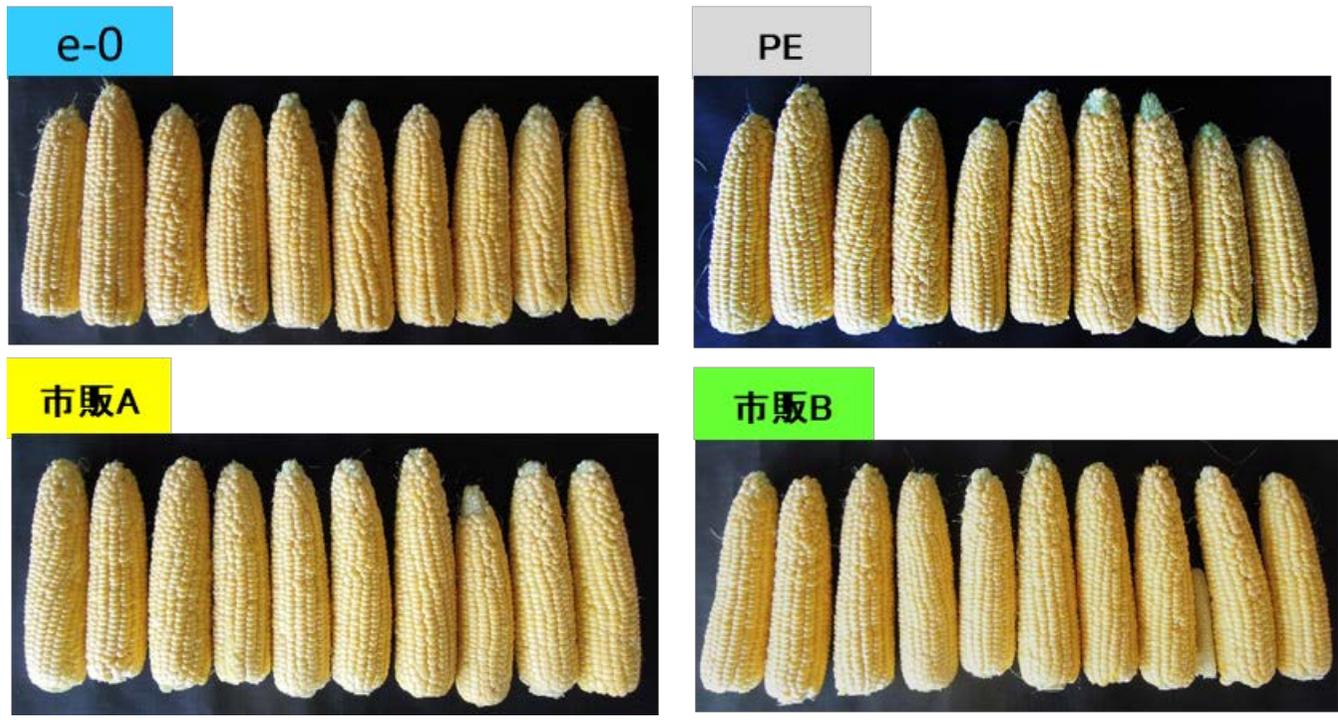
第 60 図 長期展張試験における試作フィルムの様子



PE製マルチ

R3-2黒

第 61 図 農家現地試験における収穫調査時の圃場の様子や収穫物の
外観及び縦断面



第 62 図 収穫されたコーン果実の外観品質



第 63 図 促成作スイートコーン栽培終了時における各フィルムの崩壊程度



鋤込んだマルチは目視されない

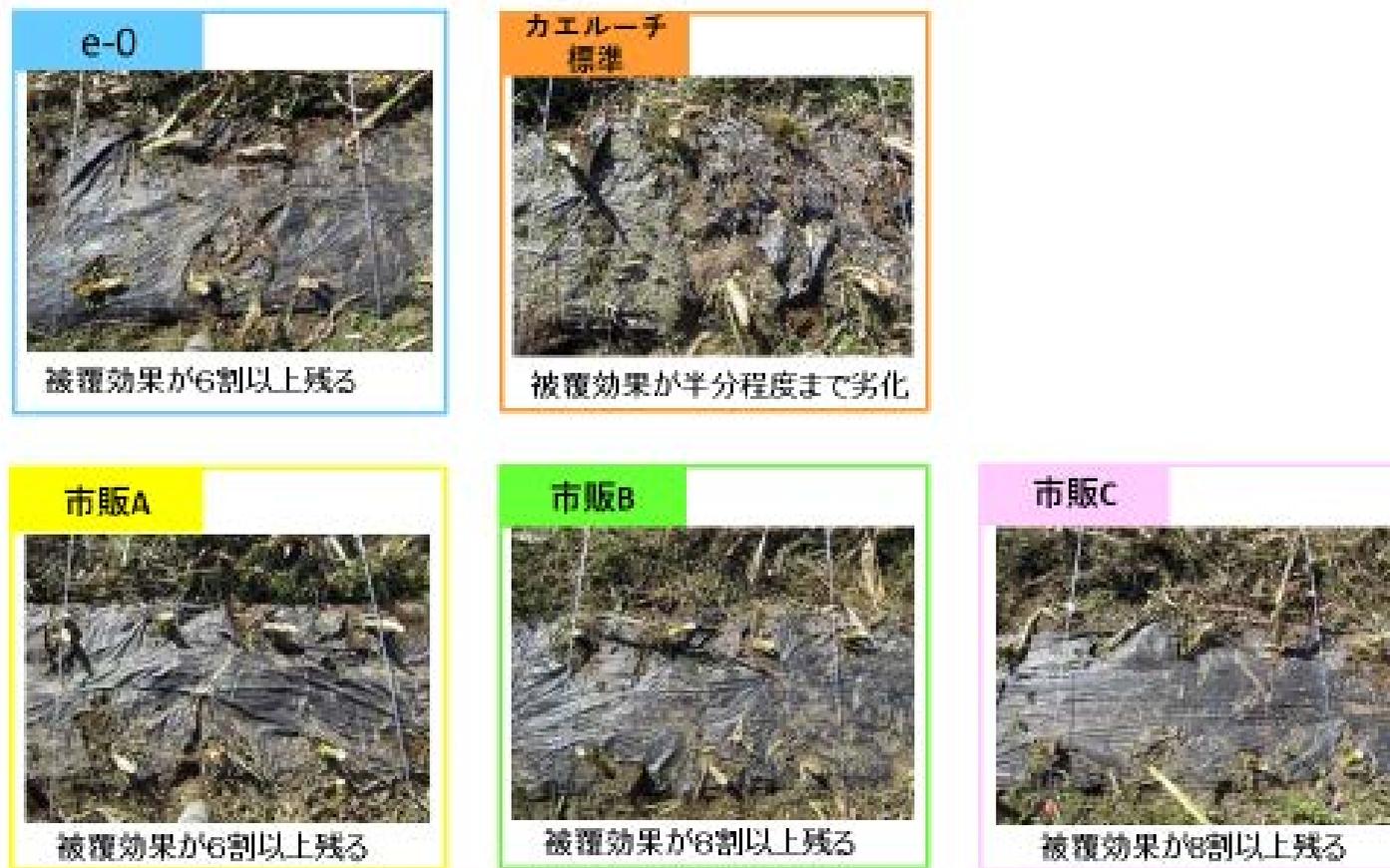


後作水稻への悪影響は見られない

第 64 図 生分解フィルム鋤込みによる後作水稻への影響



第 65 図 収穫されたコーンの外観



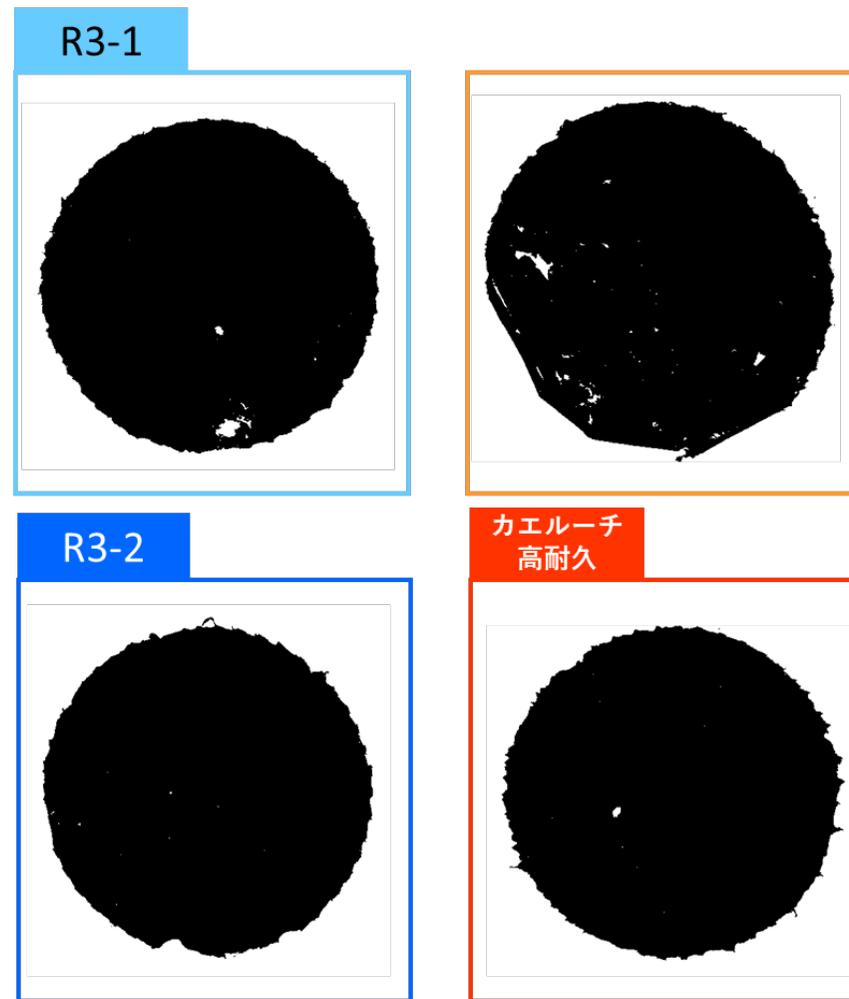
第 66 図 農家圃場におけるスイートコーン栽培終了後の各フィルムの崩壊程度



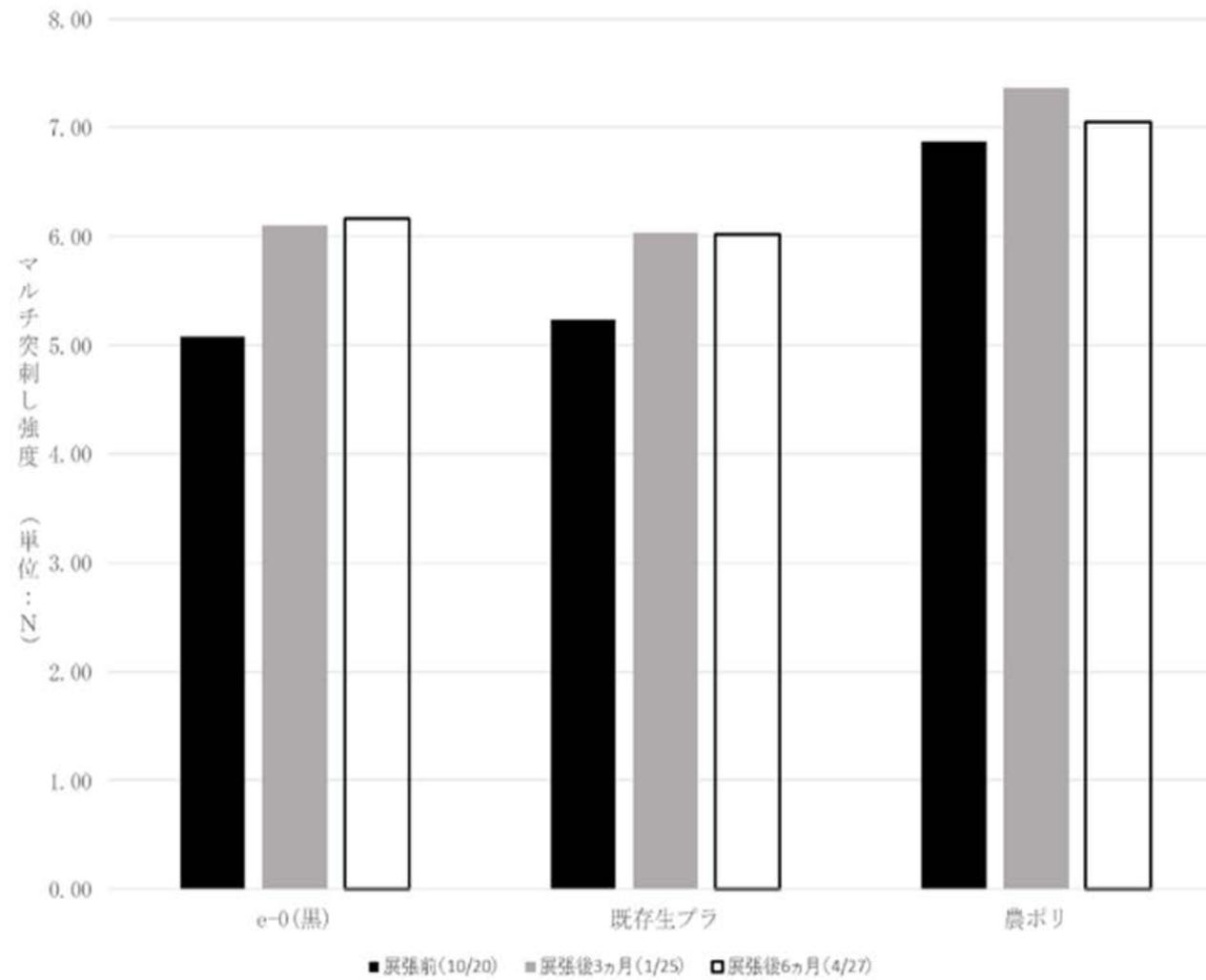
第 67 図 収穫されたコーン果実の外観品質



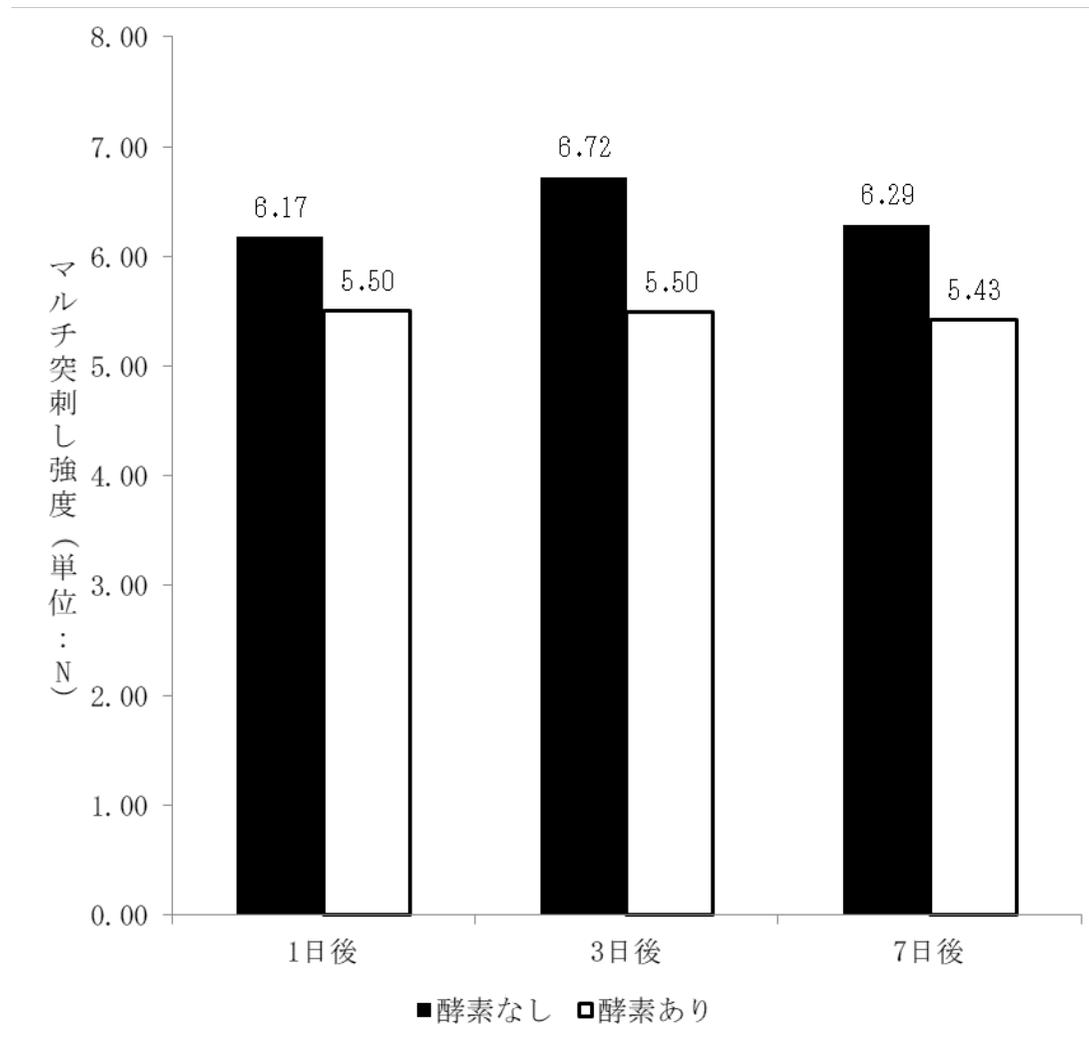
第 68 図 露地スイートコーン栽培終了時における各フィルムの崩壊程度



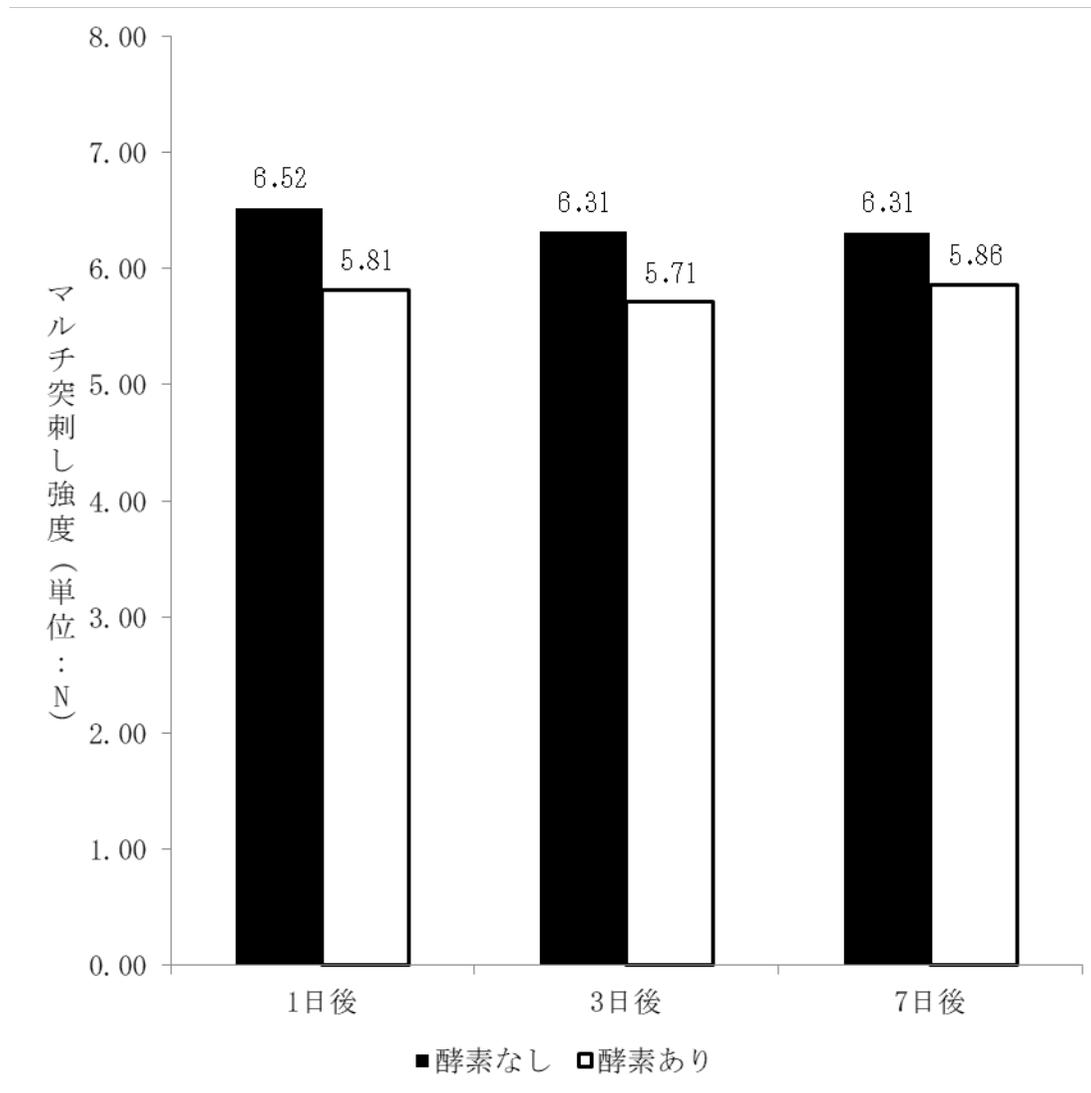
第 69 図 土壤埋設後 3 か月半が経過したマルチフィルムサンプルの分解程度
(令和 2/9/30～令和 3/1/17)



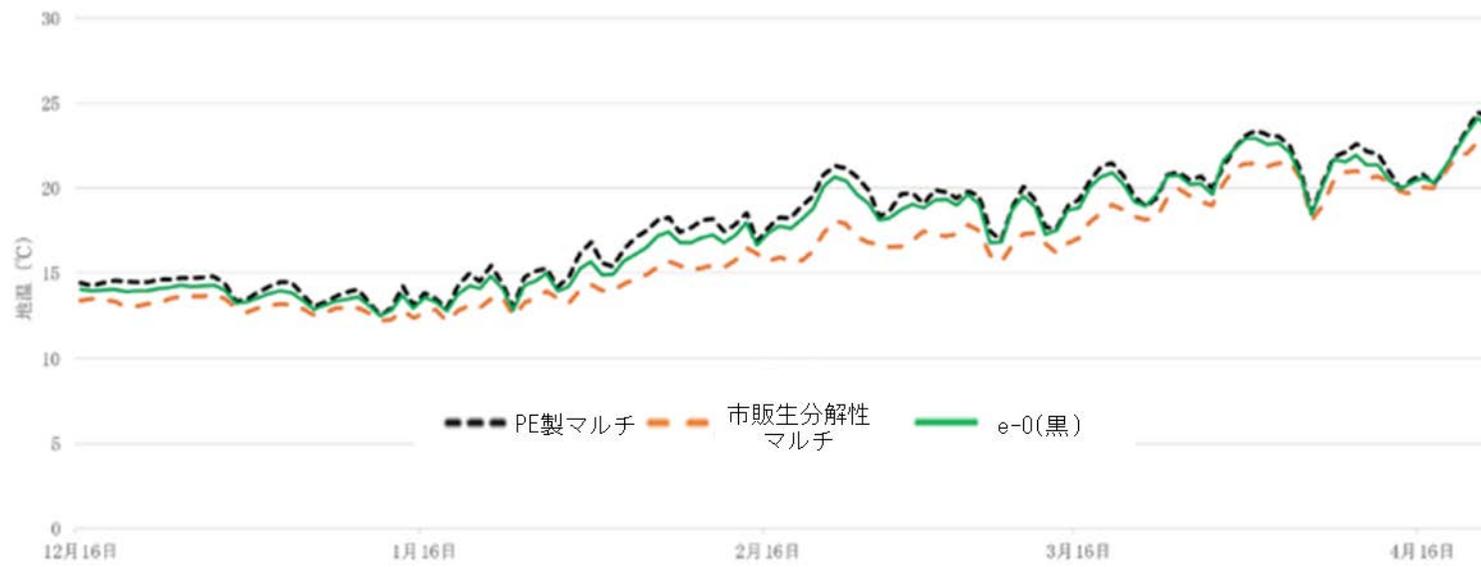
第 70 図 イチゴ栽培期間中の各種マルチの突刺し強度の変化



第 71 図 酵素処理が新規配合 (e-0 黒) マルチの突刺し強度に与える影響



第 72 図 酵素処理が市販生分解性マルチの突刺し強度に与える影響



第 73 図 イチゴ栽培マルチ下 10cm 地温の変化



第 74 図 マルチ展張後 4 か月後 (3 月 10 日) のマルチおよびイチゴの様子



第75図 タマネギ栽培マルチ下10cm地点の地温の変化



第 76 図 マルチ展張後 4 か月後 (2 月 25 日) のマルチおよびタマネギの様子



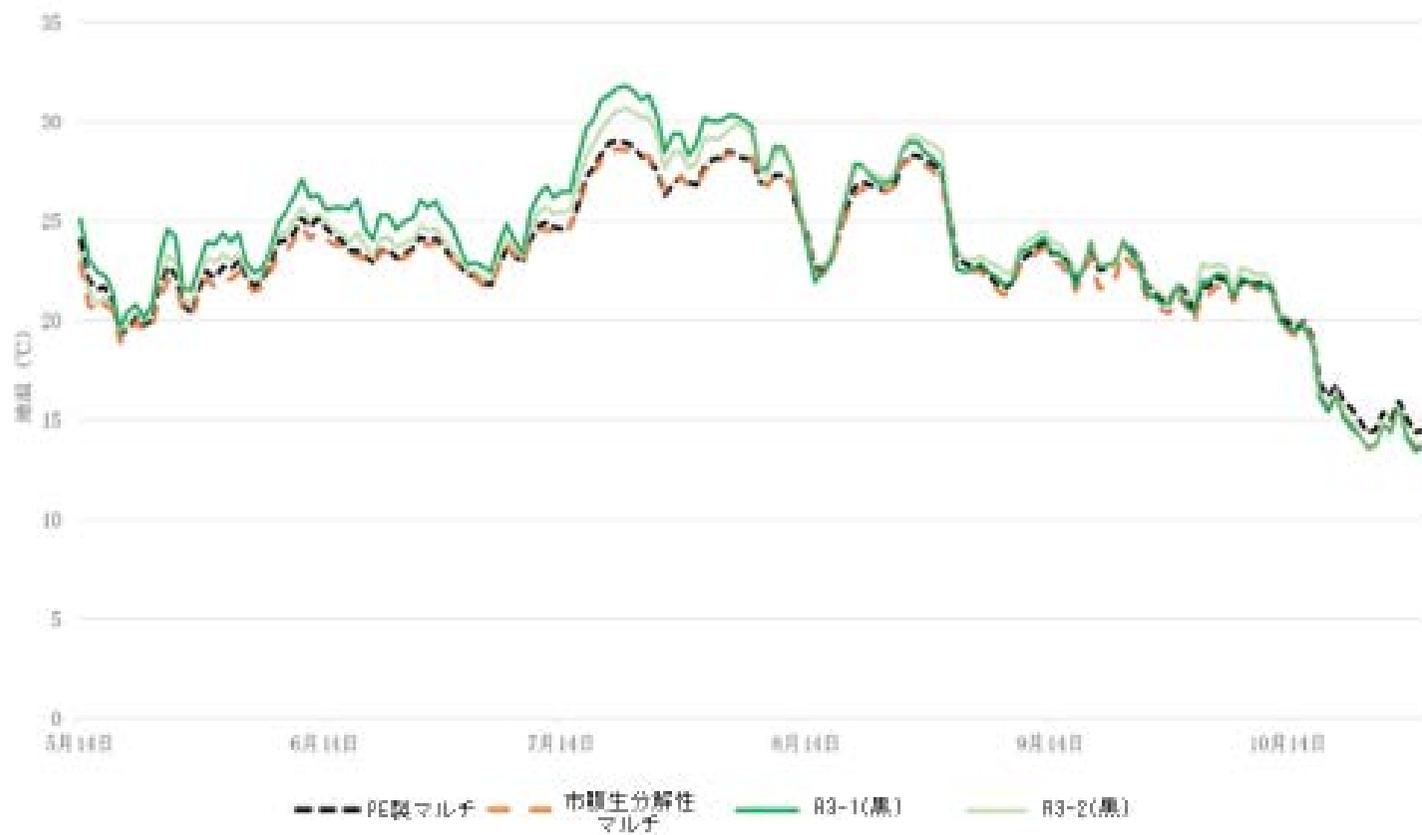
第 77 図 展張 6 か月後(10 月 12 日)の市販生分解性マルチ高耐久品の様子



第 78 図 展張 6 か月後 (10 月 12 日) の R3-1 (黒) の様子



第 79 図 展張 6 か月後(10 月 12 日)の R3-2(黒)の様子



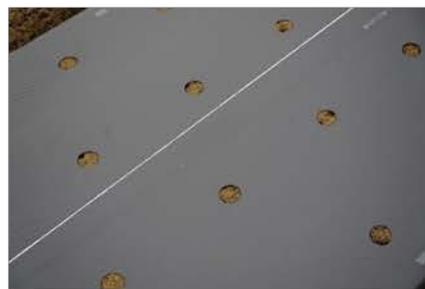
第 80 図 ナス栽培マルチ下 10cm の地温の変化



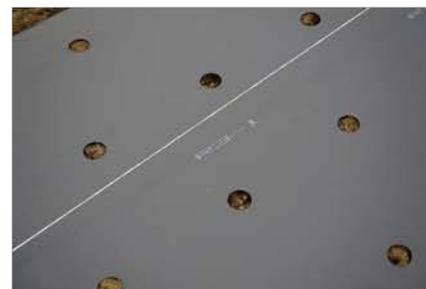
1:PE



2:市販高耐久A



3:R3-2



4:R3-1



5:e-0



6:市販標準A



7:市販標準B

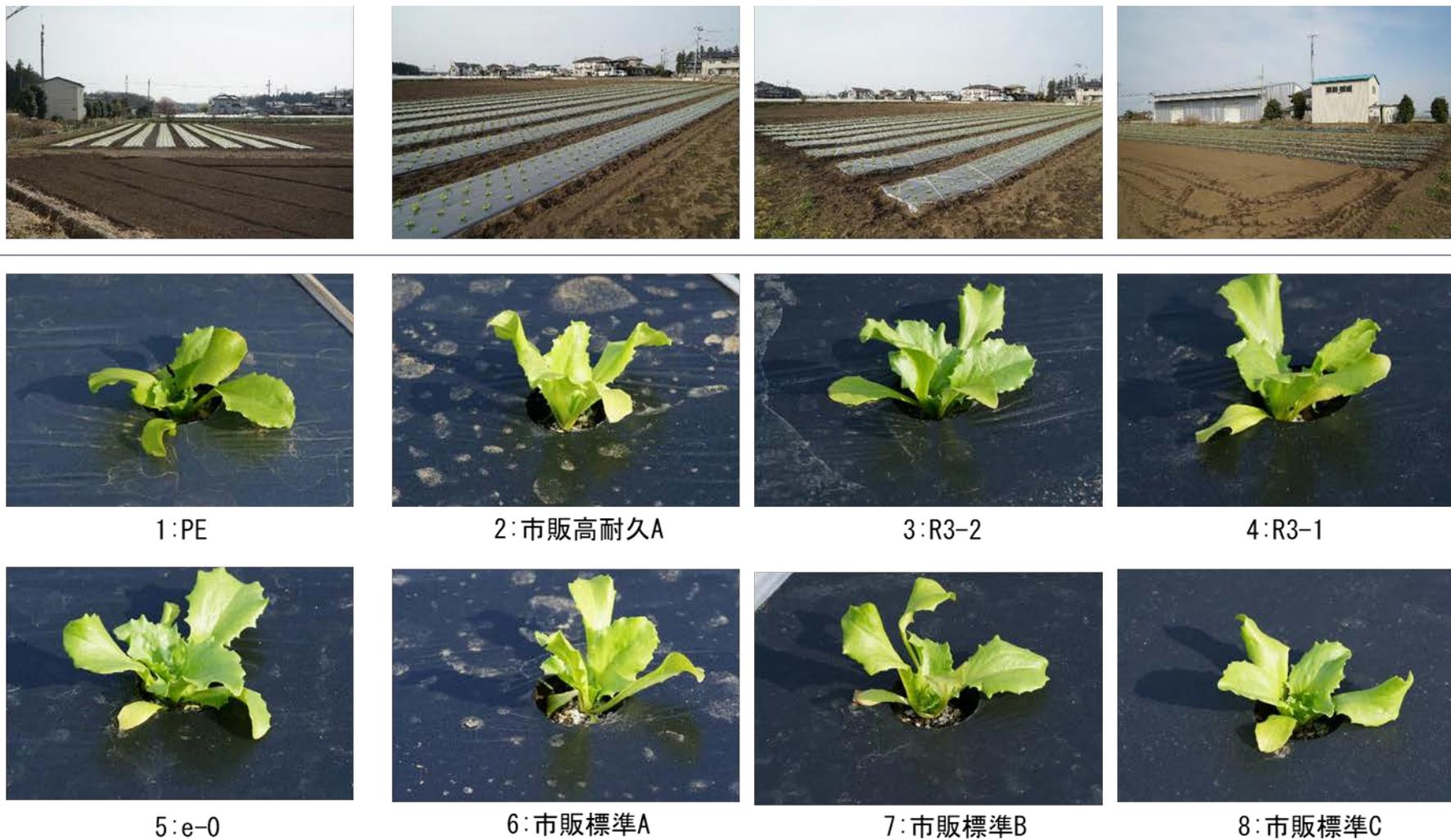


8:市販標準C

第 81 図 生産者によるレタス栽培実証試験におけるマルチフィルム展張時の様子
(展張:令和3年3月12日)



第 82 図 生産者によるレタス栽培実証試験におけるマルチフィルム展張後の様子
 (令和 3 年 3 月 27 日:展張後 15 日 定植後 12 日)



第 83 図 生産者によるレタス栽培実証試験におけるマルチフィルム展張後の様子
(令和 3 年 4 月 10 日:展張後 29 日 定植後 26 日)



1:PE



2:市販高耐久A



3:R3-2



4:R3-1



5:e-0



6:市販標準A



7:市販標準B



8:市販標準C

第 84 図 生産者によるレタス栽培実証試験におけるマルチフィルム展張後の様子
(令和 3 年 4 月 24 日:展張後 43 日 定植後 40 日)



1:PE



2:市販高耐久A



3:R3-2



4:R3-1



5:e-0



6:市販標準A

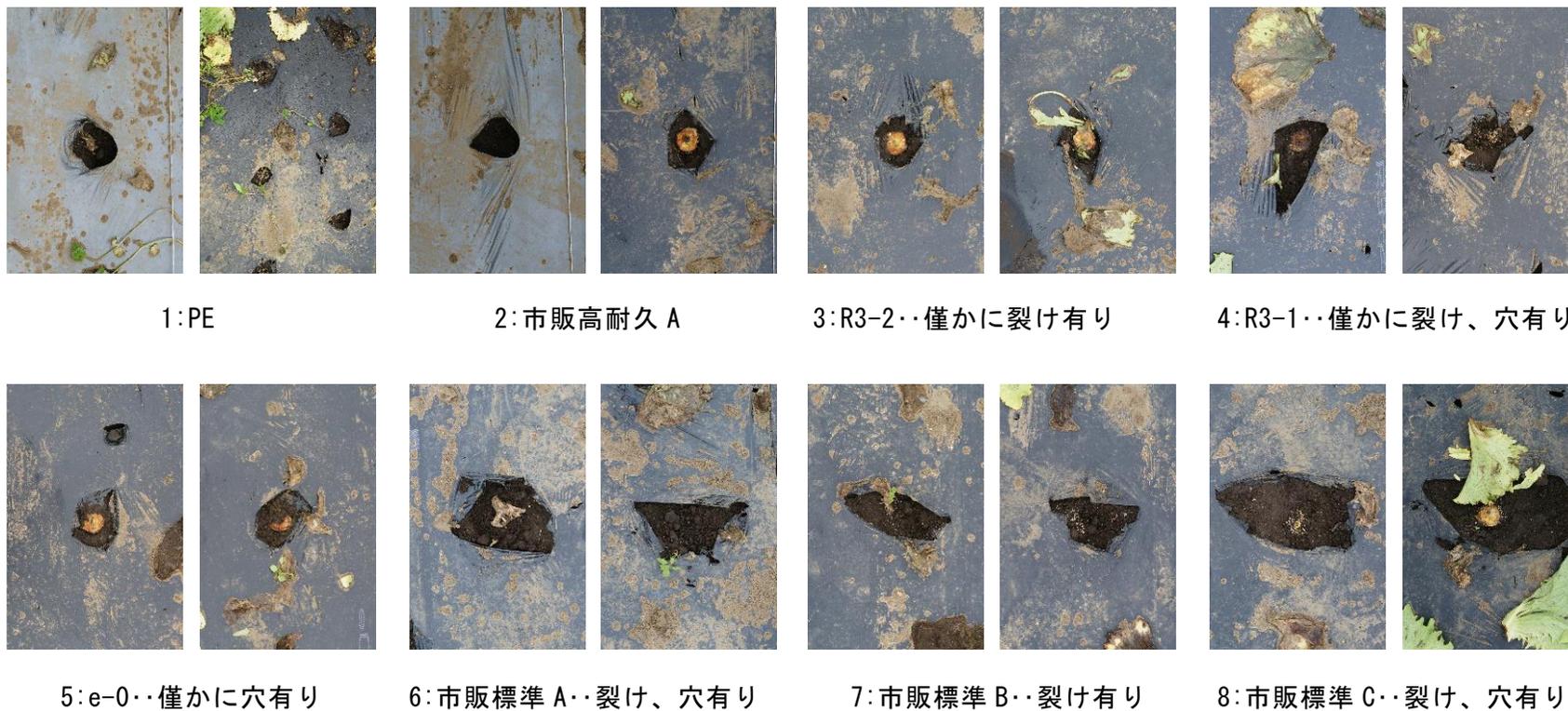


7:市販標準B



8:市販標準C

第 85 図 生産者によるレタス栽培実証試験におけるマルチフィルム展張後の様子
(令和 3 年 5 月 9 日:展張後 58 日 定植後 55 日)



第 86 図 生産者によるレタス栽培実証試験におけるマルチフィルム展張後の外観比較
(令和 3 年 5 月 20 日:展張後 69 日 定植後 66 日)



1:PE



2:市販高耐久A



3:R3-2



4:R3-1



5:e-0



6:市販標準A



7:市販標準B



8:市販標準C

第 87 図 生産者によるレタス栽培実証試験における生育状況
(令和 3 年 3 月 27 日:展張後 15 日 定植後 12 日)



1:PE



2:市販高耐久 A



3:R3-2



4:R3-1



5:e-0



6:市販標準 A



7:市販標準 B



8:市販標準 C

第 88 図 生産者によるレタス栽培実証試験における生育状況
(令和 3 年 4 月 10 日:展張後 29 日 定植後 26 日)



1:PE



2:市販高耐久 A



3:R3-2



4:R3-1



5:e-0



6:市販標準 A



7:市販標準 B



8:市販標準 C

第 89 図 生産者によるレタス栽培実証試験における生育状況
(令和 3 年 4 月 24 日:展張後 43 日 定植後 40 日)



1:PE



2:市販高耐久 A



3:R3-2



4:R3-1



5:e-0



6:市販標準 A



7:市販標準 B



8:市販標準 C

第 90 図 生産者によるレタス栽培実証試験における生育状況
(令和 3 年 5 月 9 日:展張後 58 日 定植後 55 日)



2. 市販高耐久 A: ほぼ切れ無し



3. R3-2: ほぼ切れ無し



4. R3-1: ほぼ切れ無し



5. e-0: 僅かに穴



6. 市販標準 A: 僅かに穴



7. 市販標準 B: 切れ進行



8. 市販標準 C: 僅かに穴

第 91 図 生産者によるレタス栽培実証試験におけるマルチフィルムの様子
(令和 3 年 4 月 10 日: 展張後 29 日 定植後 26 日)



1:PE



2:市販高耐久 A



3:R3-2・・・ごく僅かに穴有り



4:R3-1・・・僅かに穴有り



5:e-0・・・僅かに穴有り



6:市販標準 A・・・所々に裂け有り



7:市販標準 B・・・全体に裂け有り



8・・・市販標準 C:全体に穴有り



第 92 図 生産者によるレタス栽培実証試験におけるマルチフィルムの様子
(令和 3 年 5 月 9 日:展張後 58 日 定植後 55 日)



東側



西側

1:PE



東側



西側

2:市販高耐久 ..ごくわずかに穴有り



東側



西側

3:R3-2 ..ごくわずかに穴有り



東側



西側

4:R3-1 ..ごくわずかに穴有り

第 93 図 生産者によるレタス栽培実証試験におけるマルチフィルムの様子 1
(令和 3 年 5 月 20 日:展張後 69 日 定植後 66 日)



東側



西側

5:e-0...僅かに穴有り



東側



西側

6:市販標準 A...所々に多数の裂け有り



東側



西側

7:市販標準 B...所々に裂け有り



東側



西側

8:市販標準 C:全体に多数の穴有り

第 94 図 生産者によるレタス栽培実証試験におけるマルチフィルムの様子 2
(令和 3 年 5 月 20 日:展張後 69 日 定植後 66 日)



4: R3-1 の一部の地際部分の分解が進んでいる様子



畝上～肩～地際～土壌中の試料のサンプリング



1: PE



2: 市販高耐久 A



3: R3-2



4: R3-1



5: e-0



6: 市販標準 A



7: 市販標準 B



8: 市販標準 C

第 95 図 生産者によるレタス栽培実証試験におけるマルチフィルムの様子 3
(令和 3 年 5 月 20 日: 展張後 69 日 定植後 66 日)



2:市販高耐久 A



3:R3-2



4:R3-1

第 96 図 生産者によるレタス栽培実証試験における収穫後のマルチフィルム
展張延長後の様子(令和 3 年 7 月 24 日:展張後 136 日)



1:PE



2:市販高耐久 A



3:R3-2



4:R3-1



5:e-0

第 97 図 生産者によるレタス栽培実証試験における収穫後のマルチフィルム展張延長終了時の様子(令和 3 年 8 月 2 日:展張後 144 日)



大型トラクターを用いた鋤込み作業



4:R3-1 鋤込み後のロータリー部



3:R3-2 鋤込み後のロータリー部

第 98 図 生産者によるレタス栽培実証試験におけるマルチフィルム展張延長後の
鋤込み作業(令和 3 年 8 月 2 日:展張後 144 日)



1:PE

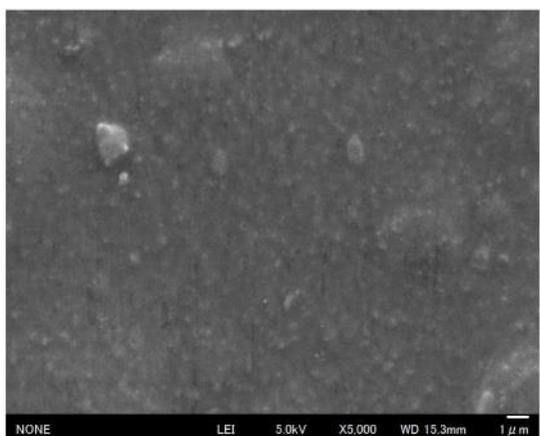
2:市販高耐久 A

3:R3-2

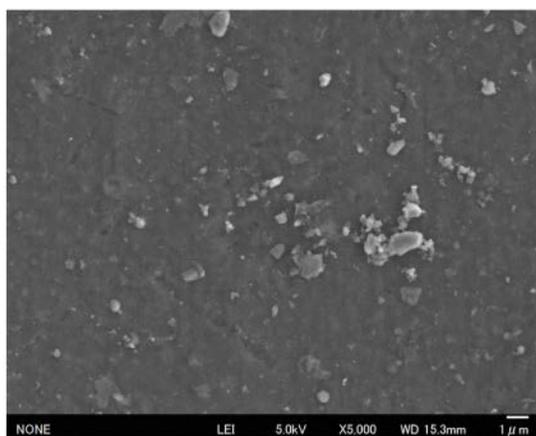
4:R3-1

5:e-0

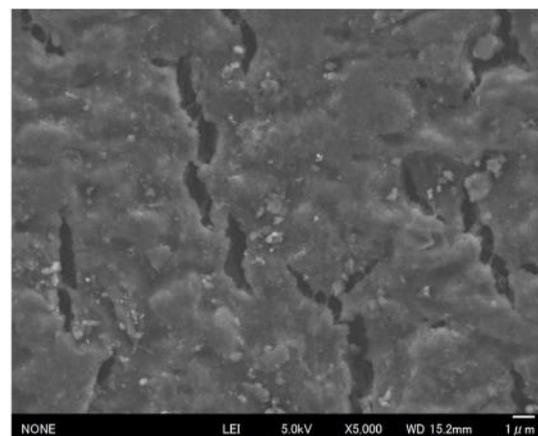
第 99 図 生産者によるレタス栽培実証試験におけるマルチフィルム展張延長後の
の鋤込み後の圃場(令和 3 年 8 月 2 日:展張後 144 日)



市販高耐久対照 A 展張前

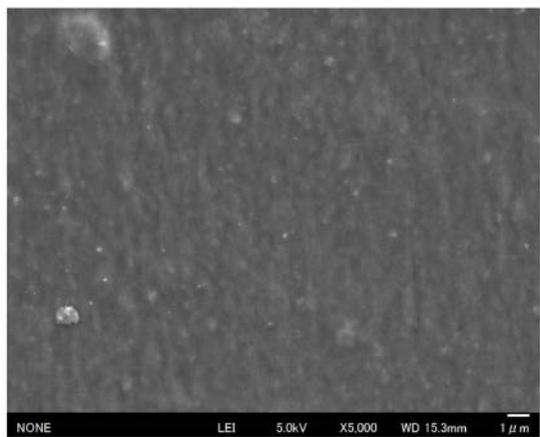


市販高耐久対照 A 展張後

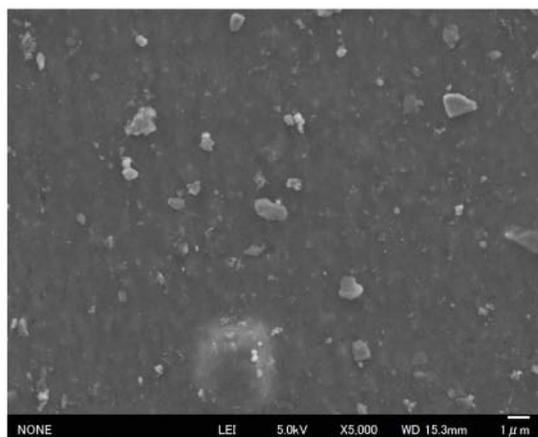


市販高耐久対照 A 酵素処理後

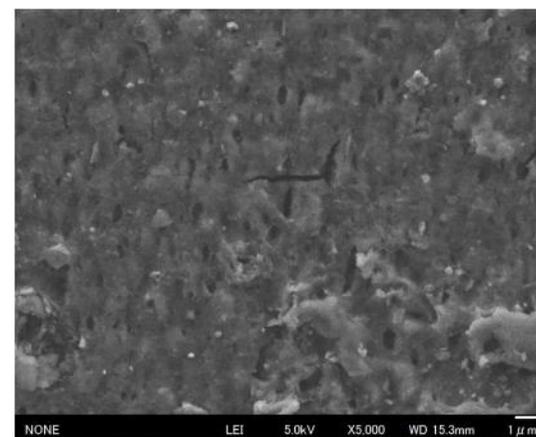
第 100 図 市販高耐久対照 A フィルム SEM 観察結果 × 5000



R3-2 展張前

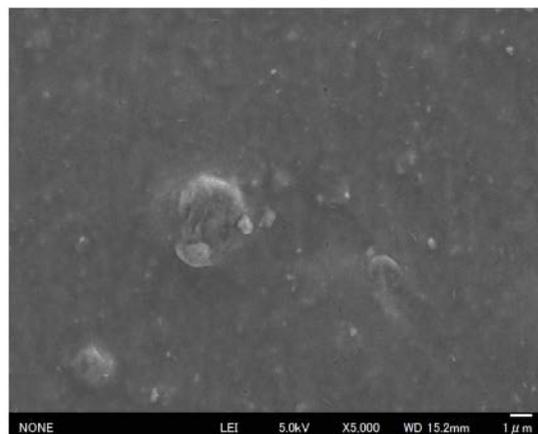


R3-2 展張後

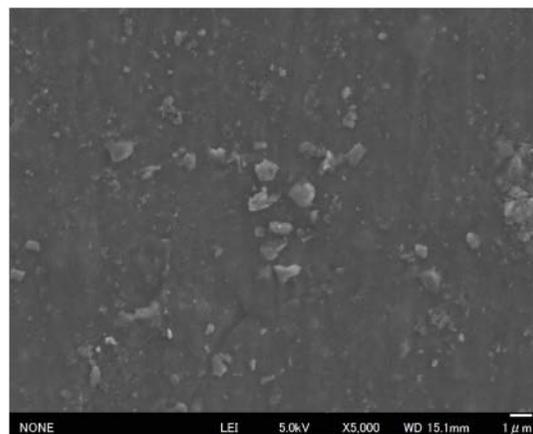


R3-2 酵素処理後

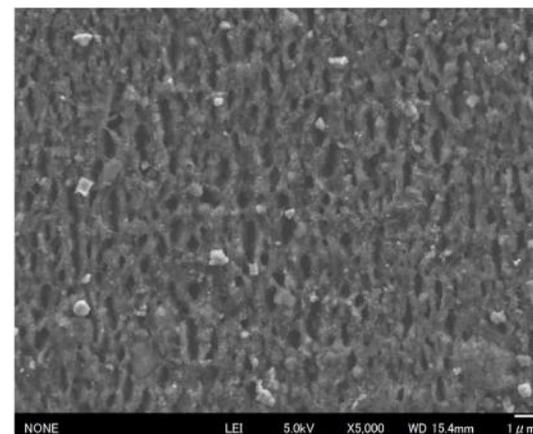
第 101 図 R3-2 フィルム SEM 観察結果 × 5000



R3-1 展張前



R3-1 展張後

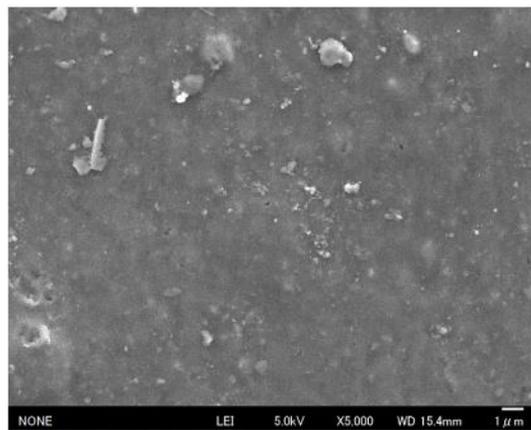


R3-1 酵素処理後

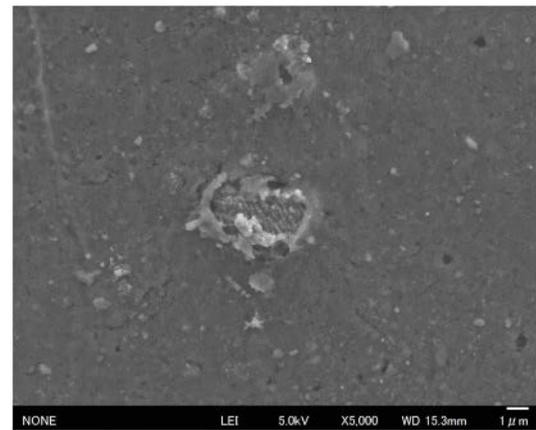
第 102 図 R3-1 フィルム SEM 観察結果 × 5000



e-0 展張前

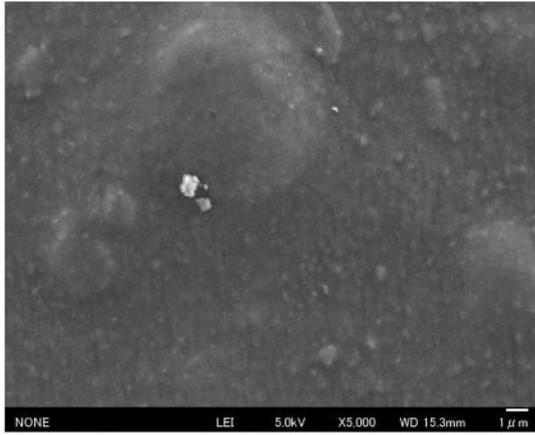


e-0 展張後

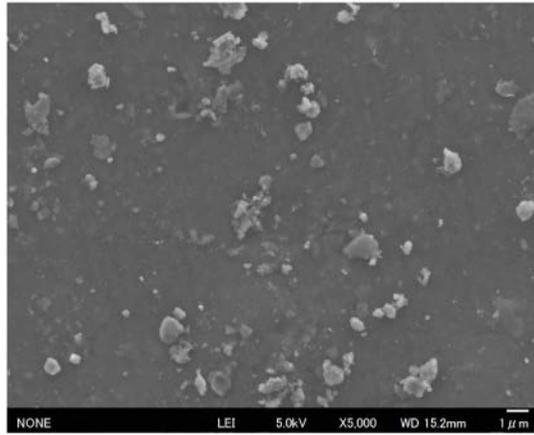


e-0 酵素処理後

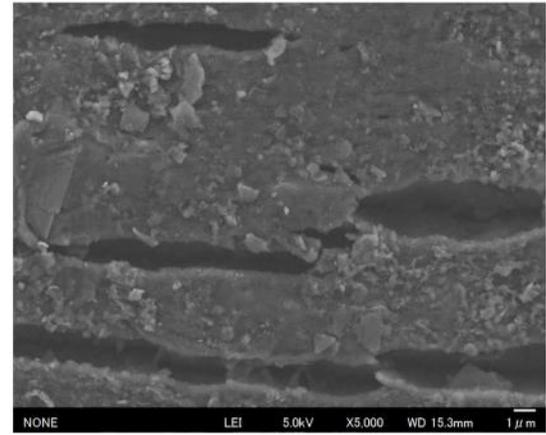
第 103 図 e-0 フィルム SEM 観察結果 × 5000



市販標準対照 A 展張前

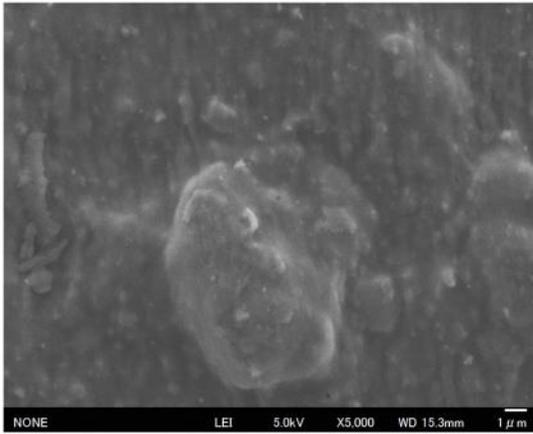


市販標準対照 A 展張後

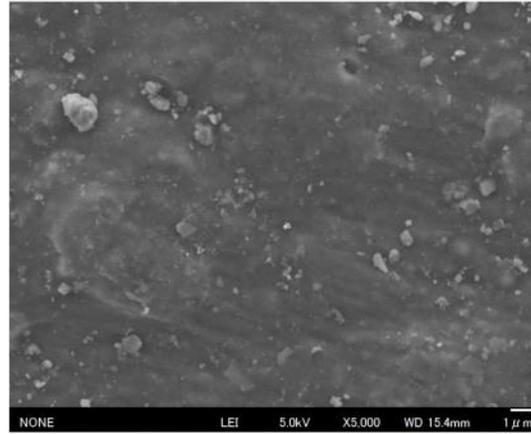


市販標準対照 A 酵素処理後

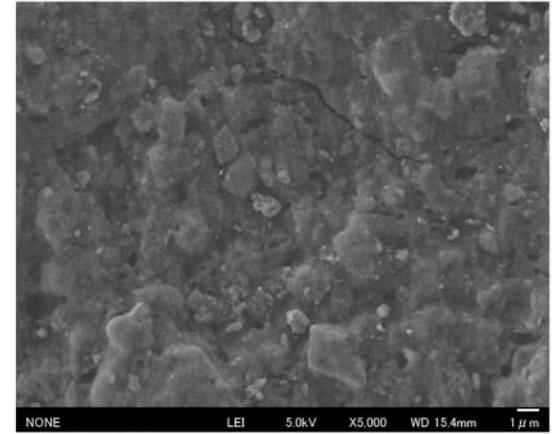
第 104 図 市販標準対照 A フィルム SEM 観察結果 × 5000



市販標準対照 B 展張前

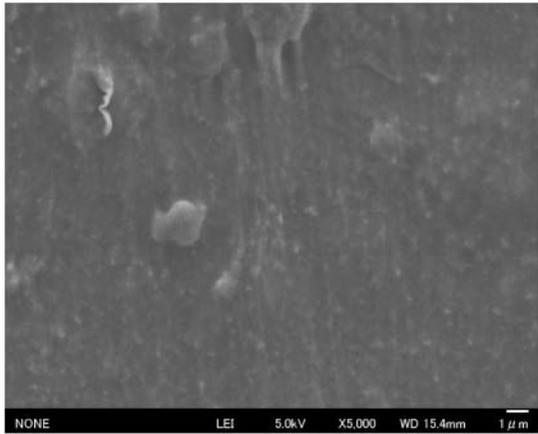


市販標準対照 B 展張後

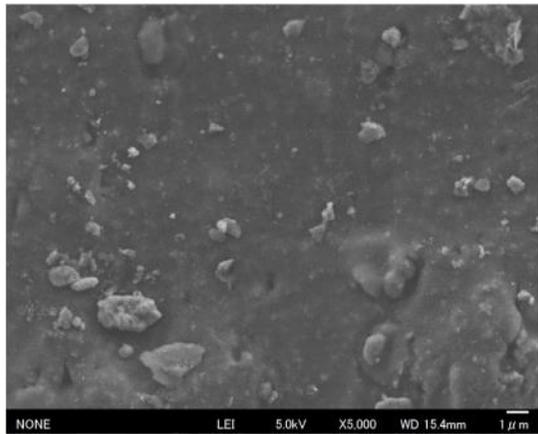


市販標準対照 B 酵素処理後

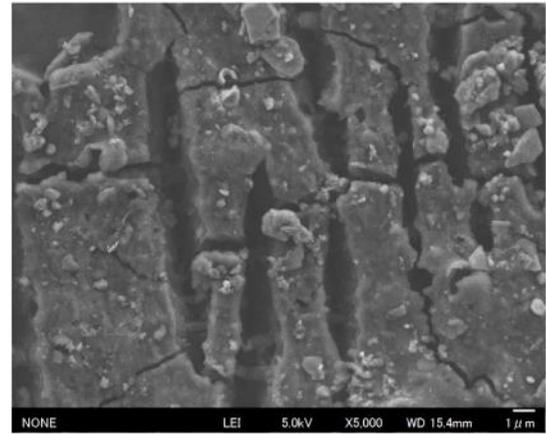
第 105 図 市販標準対照 B フィルム SEM 観察結果 × 5000



市販標準対照 C 展張前



市販標準対照 C 展張後



市販標準対照 C 酵素処理後

第 106 図 市販標準対照 C フィルム SEM 観察結果 × 5000



1:R3-1



2:R3-2



3:市販高耐久 A



4:市販標準 A

第 107 図 生産者によるミズナ栽培実証試験における作物生育の様子
(令和 3 年 10 月 10 日:定植後 23 日)



1:R3-1



2:R3-2



3:市販高耐久 A



4:市販標準 A

第 108 図 生産者によるミズナ栽培実証試験における作物収穫後の
マルチフィルムの様子(令和 3 年 11 月 23 日:定植後 67 日)



隣接する畑地にフィルム断片は見いだせなかった



1:R3-1



2:R3-2



3:市販高耐久 A



4:市販標準 A

第 109 図 生産者によるミズナ栽培実証試験における鋤込み後の圃場の様子(令和 4 年 1 月 21 日:鋤込み後 50 日)



1:R3-1



2:R3-2



3:市販高耐久 A



4:市販標準 A

第 110 図 生産者における実証試験セロリ区の様子(展張期間: 2 か月)



第 111 図 生産者における実証試験セロリ区の新規開発生分解性マルチの様子
(展張期間：2 か月)



降雨過多による道路の被害(左)と獣害
が原因のマルチの裂け(右)



R3-1



R3-2



市販高耐久 A



市販標準 A

第 112 図 生産者における実証試験カボチャ区の生分解性マルチの様子
(展張期間：1 か月)



R3-1



R3-2

第 113 図 生産者における実証試験カボチャ区の新規開発生分解性マルチの表面
(展張期間：1 か月)



R3-1



市販高耐久 A

第 114 図 生産者における実証試験カボチャ区が生分解性マルチのフィルム表面の水滴付着の様子(展張期間: 1 か月)



R3-1



R3-2



市販高耐久 A



市販標準 A

第 115 図 生産者における実証試験カボチャ区の新規開発生分解性マルチの様子
(展張期間：5 か月)



R3-1



R3-2

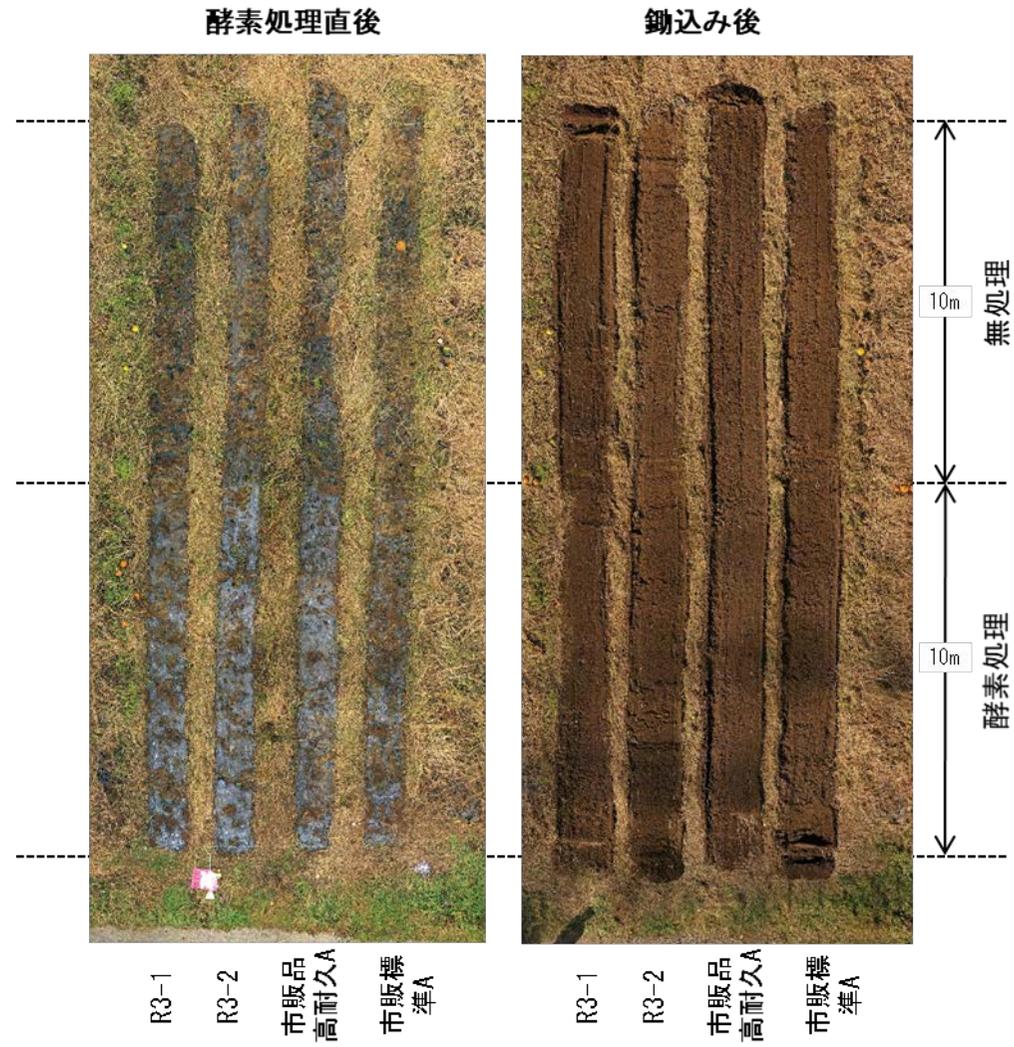


市販高耐久 A



市販標準 A

第 116 図 生産者における実証試験カボチャ区の新規開発生分解性マルチの展張後の鋤込みの様子(展張期間：5 か月)



第 117 図 生産者における実証試験カボチャ区の酵素剤処理後のマルチフィルム空撮画像



R3-1



R3-2



市販高耐久 A



市販標準 A

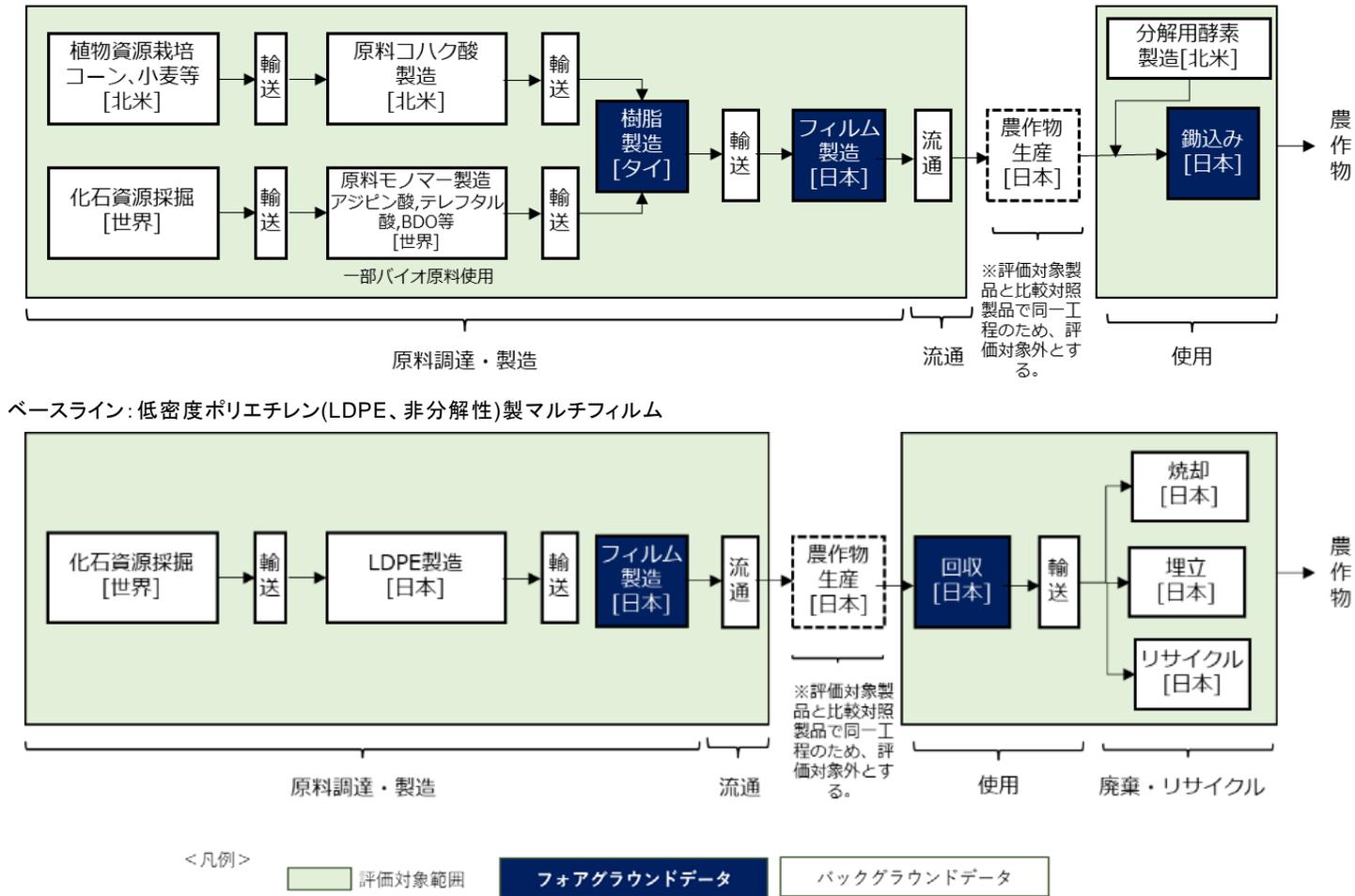
第 118 図 生産者における実証試験トマト区の生分解性マルチの様子
(展張期間：2 か月)



R3-1 に見られる裂け

市販標準 A に見られる鹿の足跡

第 119 図 生産者における実証試験トマト区の生分解性マルチの早期の裂け、
獣害の様子(展張期間：2 か月)



第 120 図 LCA および経済性評価のシステム境界およびデータ収集範囲

(1) 茨城農家農場 PE 製マルチフィルム剥ぎ取り作業



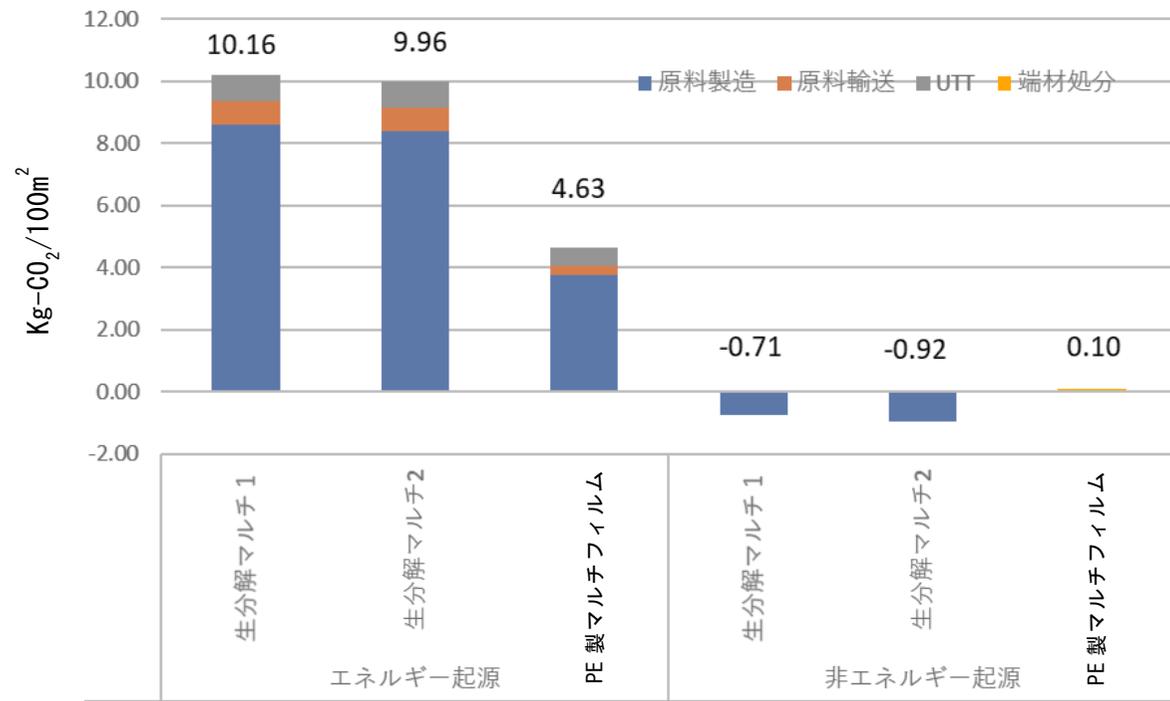
(2) 山梨農家農場 PE 製マルチフィルム剥ぎ取り・生分解マルチ鋤込み作業



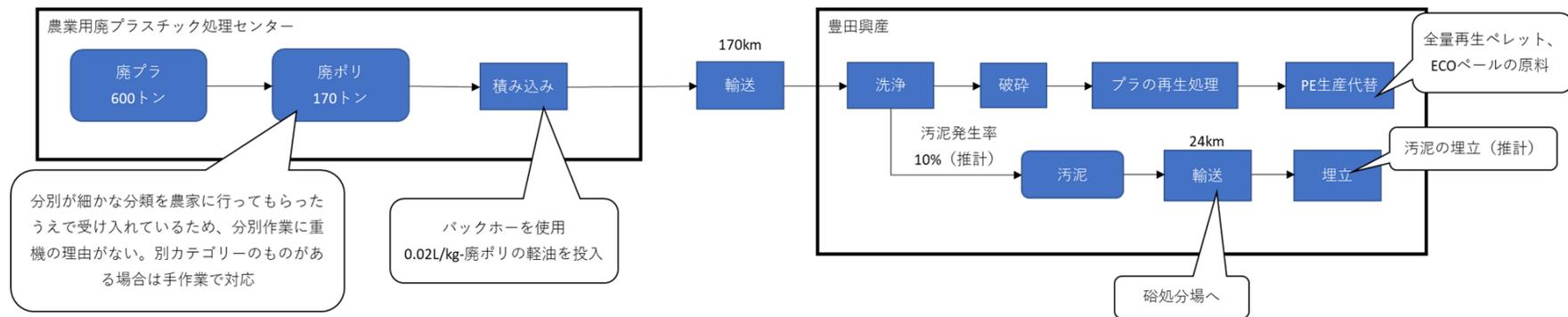
(3) 山梨農家農場 PE 製マルチフィルム剥ぎ取り作業



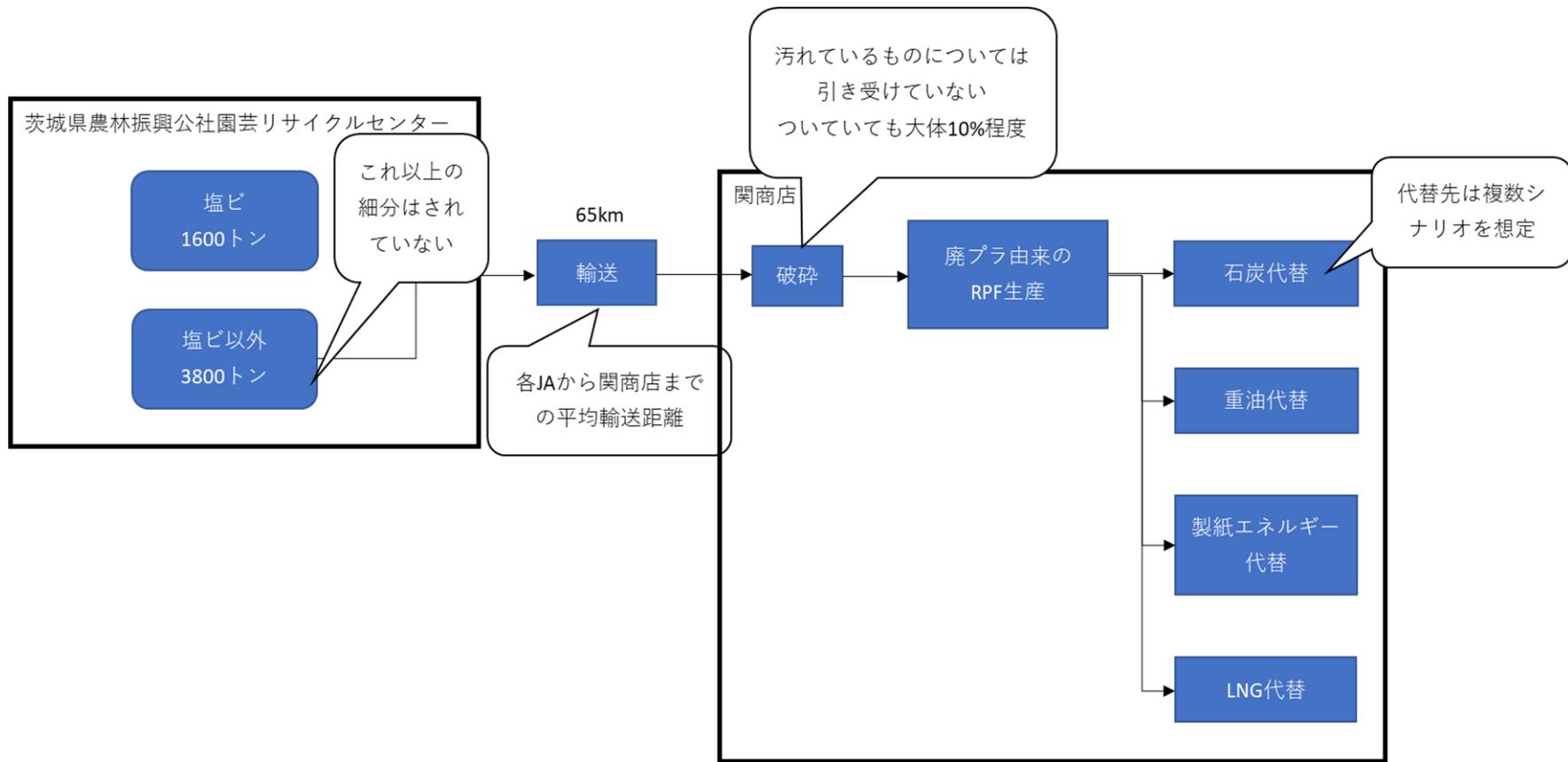
第 121 図 PE 製マルチフィルムの剥ぎ取り回収作業および生分解マルチの鋤込み作業



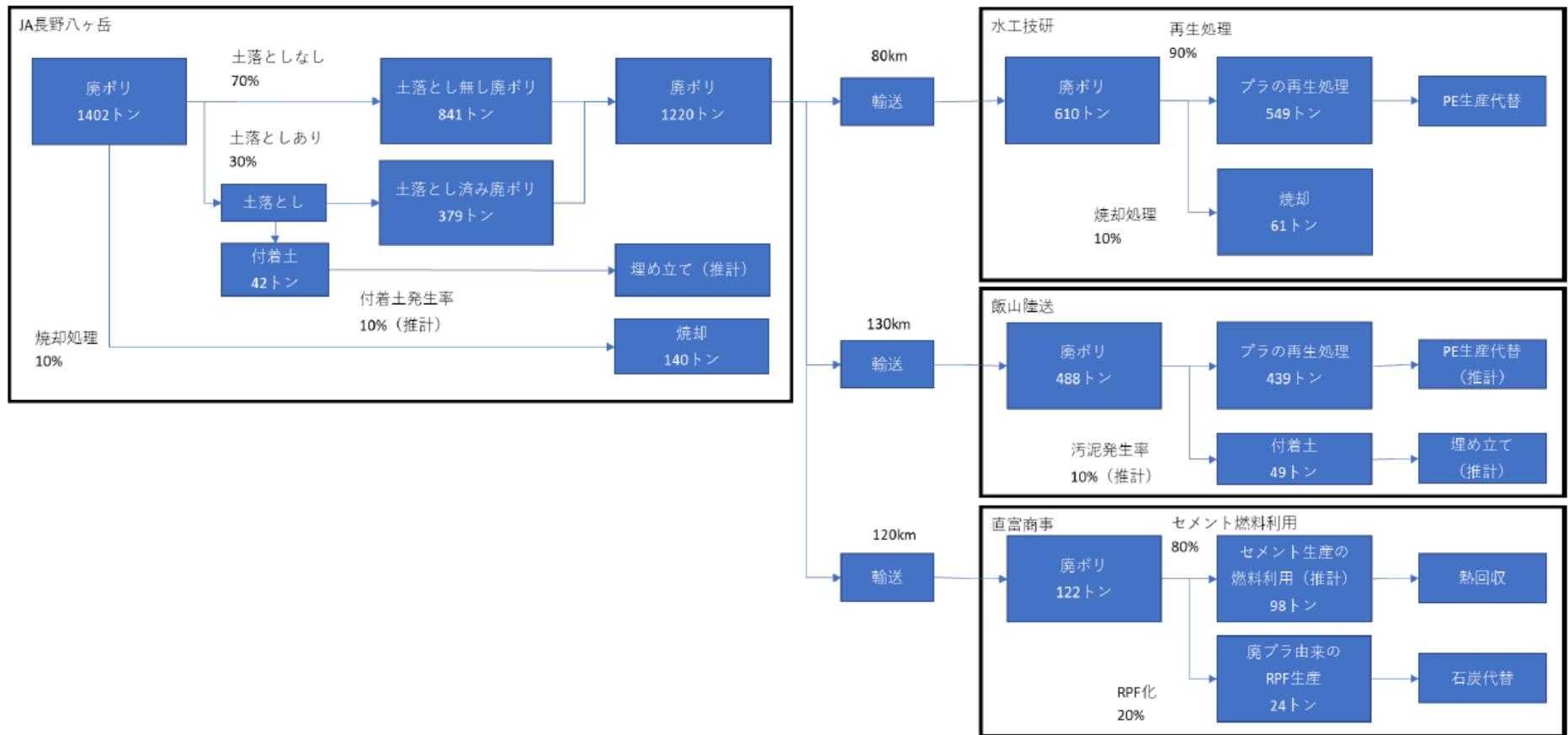
第 122 図 マルチフィルム製造までのインベントリ分析結果



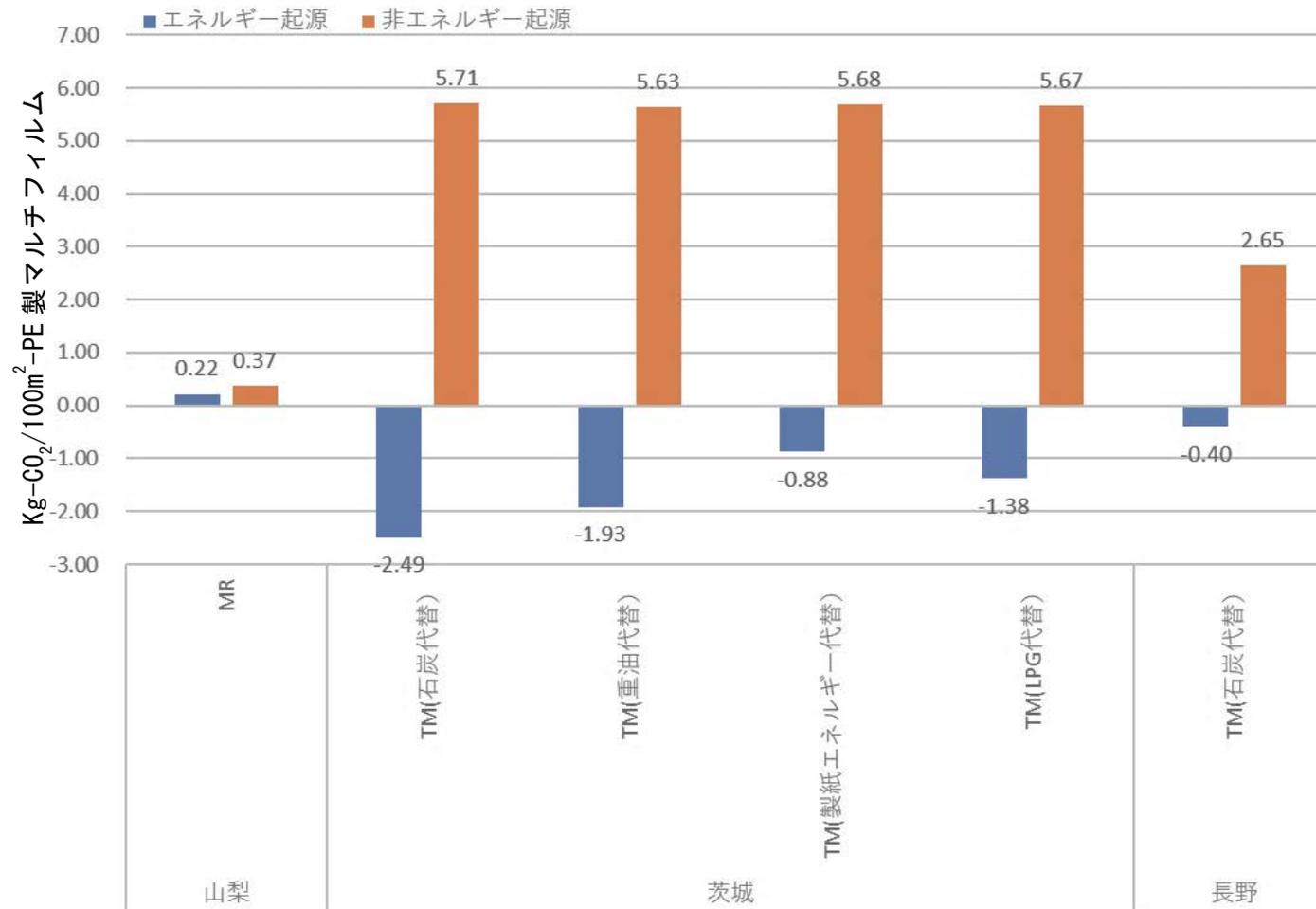
第 123 図 PE 製マルチフィルム処分フロー(1) 山梨県



第 124 図 PE 製マルチフィルム処分フロー(2)茨城県

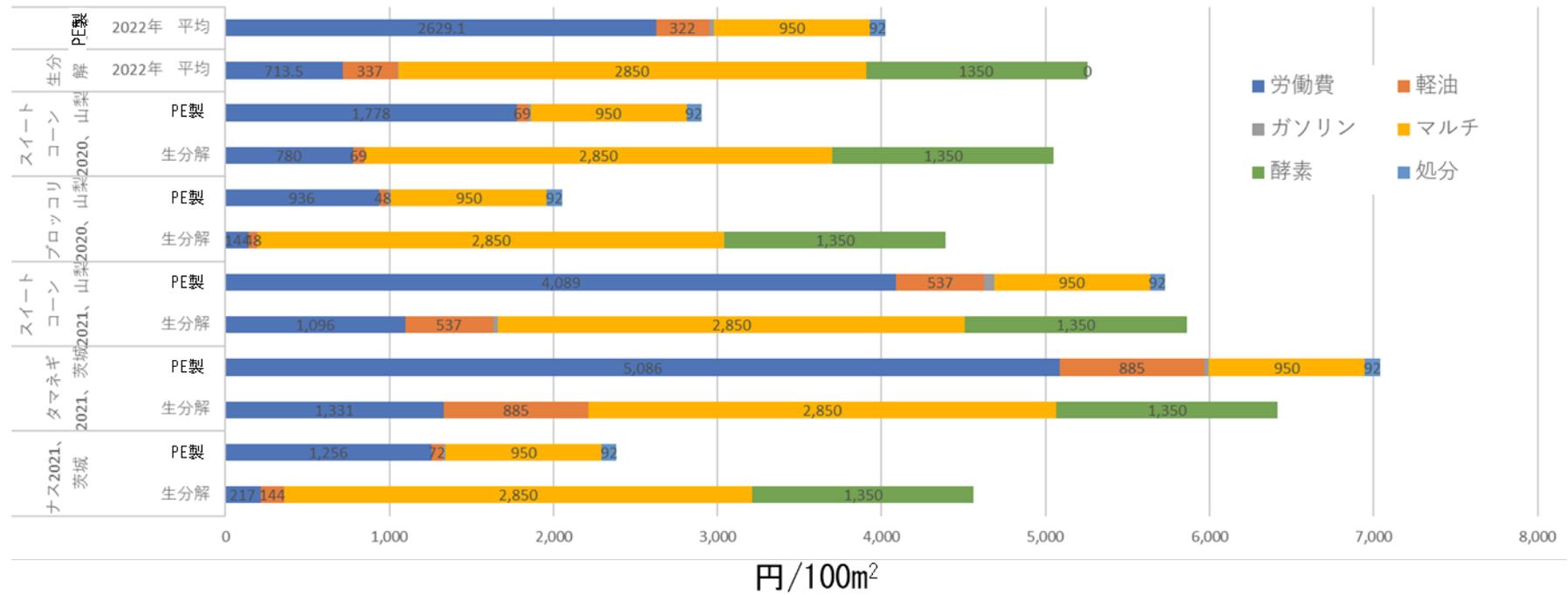


第 125 図 PE 製マルチフィルム処分フロー (3) 長野県

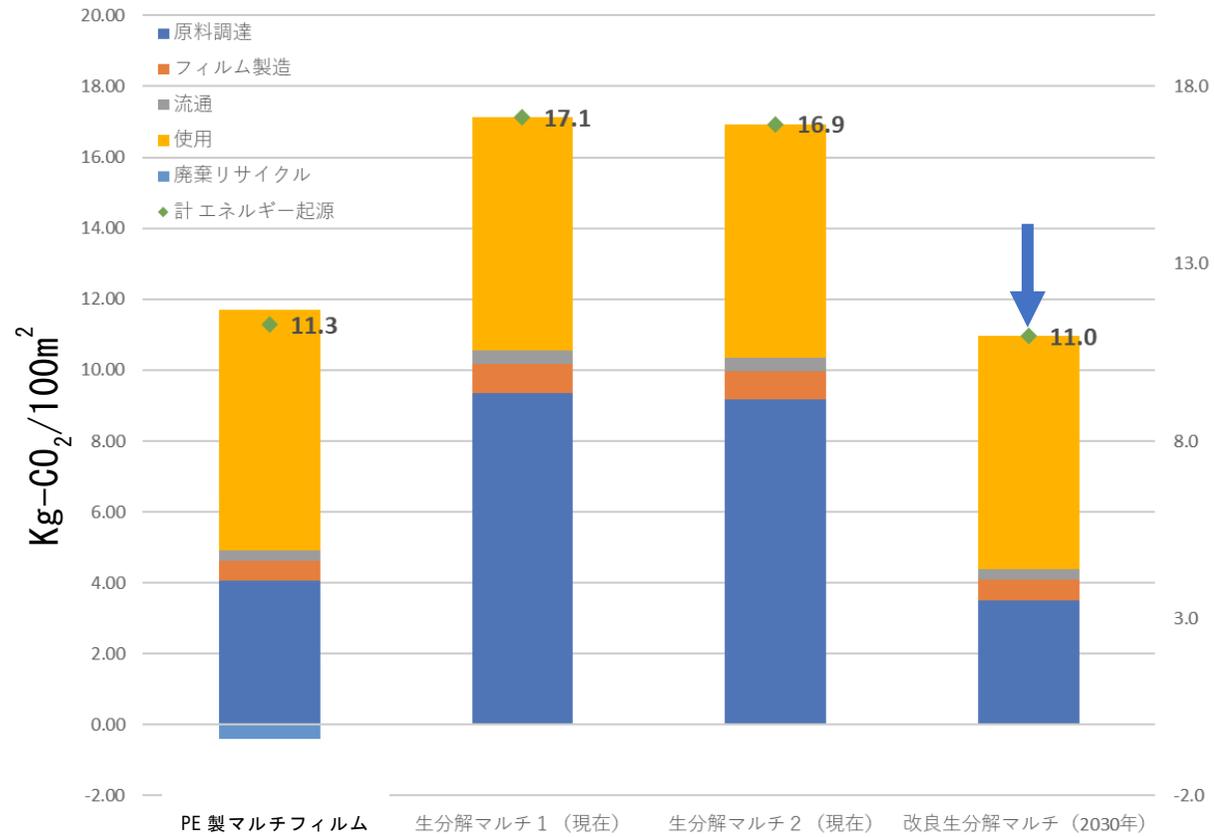


第 126 図 PE 製マルチフィルム処分による CO₂ 排出量

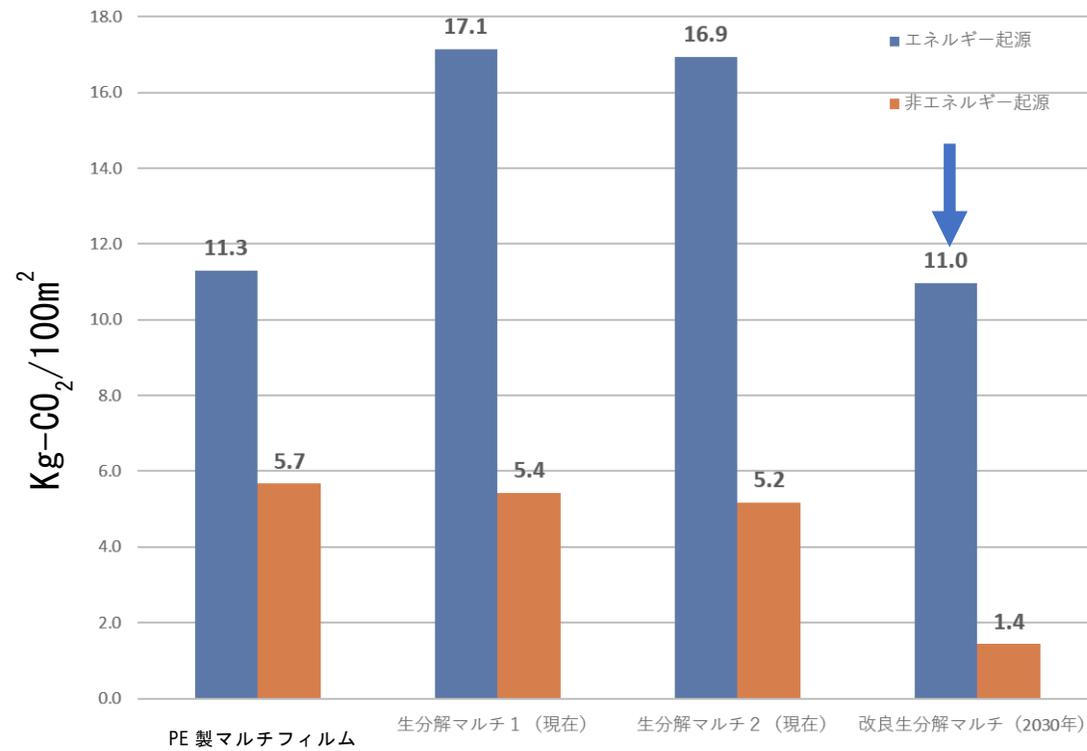
※MR：マテリアルリサイクル、TR：サーマルリサイクル



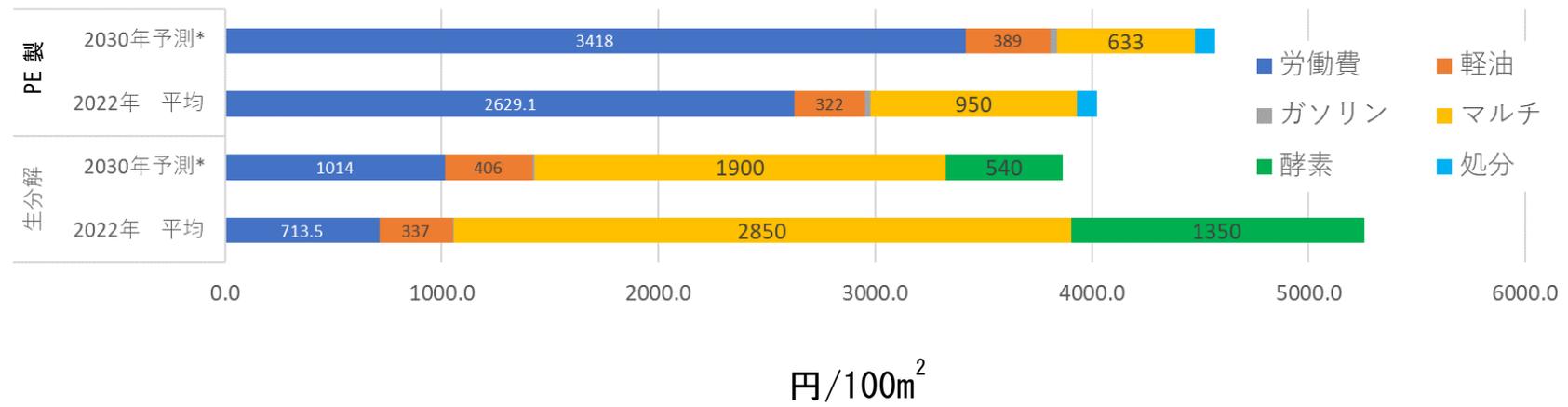
第 127 図 マルチフィルムの使用経費



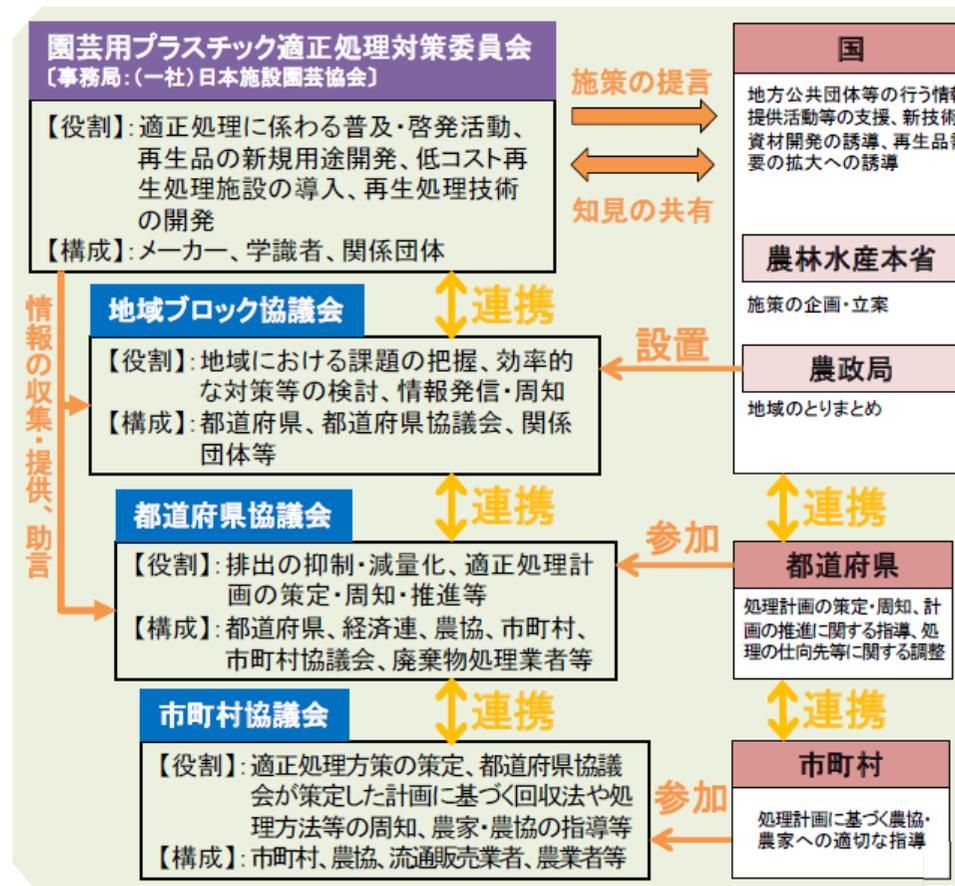
第 128 図 新規生分解性マルチのエネルギー起源 CO₂



第 129 図 新規生分解マルチのライフサイクル CO₂



第 130 図 マルチフィルム使用経費の将来予測



第 131 図 農業系使用済プラスチックの回収処分システム

出典: 「農業分野から排出されるプラスチックをめぐる情勢」、令和 3 年、農林水産省

第1表 生分解性マルチフィルムに関する野菜農家への聞き取り調査結果*

生分解性マルチフィルムに期待する点	
省力化	57%
廃棄物処理負荷の低減	28%
環境への配慮	12%
その他	3%
生分解性マルチフィルムに対する不満点	
価格が高い	53%
強度が足りない	22%
分解時期が予定からずれる	19%
在庫できない	3%
その他	3%

* 出典：農業用生分解性資材普及会 生分解性マルチ
について露地野菜農家アンケート

第 2 表 酵素剤処理による複合化素材フィルムの重量変化(1 時間当たり平均値 $n=3$)

配合シリーズ1

配合名	注記	分解速度 (mg/hr)
配合a	市販品イと同じ配合	4.9
配合c	市販品イと同じ配合 (+添加剤X)	0.2
配合d	市販品イと同じ配合 (+添加剤Y)	3.7
配合e	新規素材 A を配合	5.0

配合シリーズ2

配合名		分解速度 (mg/hr)
e-0透明	配合シリーズ1配合eと同等	6.1
e-2透明	配合e+30%	4.6
e-0黒	配合eと同じ	5.7
e-1黒	配合e+30%	7.3
e-2黒	配合e+30%	3.4

配合シリーズ3

配合名		分解速度 (mg/hr)
R2-1	石油由来配合品	3.5
R2-2	新規素材配合品1	5.4
R2-3	新規素材配合品2	2.5
R2-4	新規素材配合品3	1.6
R2-5	新規素材配合品1+添加剤X	2.0
e-0_C	対照*	6.0

*配合シリーズ1 配合 e、配合シリーズ2 配合 e-0 と同じ配合

第3表 令和元年度および令和2年度開発概要

令和元年度：新規樹脂開発		令和2年度：新規樹脂配合開発	
開発目標	<ul style="list-style-type: none"> ①新規生分解性プラスチックの開発 ②新規素材の試作設備の改良 	開発目標	<ul style="list-style-type: none"> ①新規生分解性プラスチックの開発 ②新規素材を利用したフィルムの試作と低コスト化
期初課題	<ul style="list-style-type: none"> ①市場要求性能の把握 ①新規生分解性プラスチックの品質 ①新規生分解性プラスチックの製造効率 ①新規プラスチックを用いた配合設計 ②フィルム試作機仕様(フィルム幅が狭い) 	期初課題	<ul style="list-style-type: none"> ①生分解性プラスチック複合物分解挙動が不明 ②令和元シリーズ(e-0, e-1, e-2)の展張時耐久性が不明 ②製造コスト
検討内容	<ul style="list-style-type: none"> ①市販品の調査 ①新規樹脂組成と重合条件の検討 ①新規プラスチックを用いた配合の検討 ①商業生産機でのフィルム試作と展張用フィルムの製造(インフレーション式) ②小規模展張用フィルム試作のための設備改造と小規模展張試験用フィルムの製造(農研機構試験場用) 	検討内容	<ul style="list-style-type: none"> ①生産効率化のためのプロセス改良 ②長期耐久性付与のための複合化技術の検討 ①②開発素材の中規模生産と、商業生産機での展張試験用フィルムの試作 ②長期耐久配合について三種類の配合設計思想について小規模展張試験で検証 ②サプライチェーンなど、コスト的に有利となる手段の検討
令和元成果	<ul style="list-style-type: none"> ①重合触媒処方改良により樹脂品質が向上 ①添加剤処方によりプロセス性が改良 ①複数の新規プラスチック材料から候補A、B、Cを選定し、令和元-項目2の生分解性確認テストに提供⇒新規素材Aを主体とする樹脂配合物を設計 ②ラボインフレーション成形機の改良により、成形可能なフィルム幅が拡大⇒小規模展張試験向けサイズのフィルムの取得に成功 ②新規素材を含む生分解性プラスチック複合材料(五種)を作製しフィルムを試作⇒展張試験に提供⇒有望配合eを選定 ②eを軸とした耐久性制御に関する検討用配合を設計 	令和2成果	<ul style="list-style-type: none"> ①②生産効率化のためのプロセス改良と海外製造拠点での樹脂製造試作とコスト試算完了 ②e-0, e-1, e-2の中規模樹脂製造試作と商業用フィルム試作機を用いたフィルム製造実施し各試験場での展張試験用に提供⇒e-0, e-1, e-2では長期展張に適用不可⇒令和2シリーズ配合を設計⇒農研機構小規模展張試験に提供 ②令和2シリーズの展張試験結果から、展張時耐久性制御のための配合指針を獲得 ②e-0, e-1, e-2フィルムを商業機で試作し課題抽出 ②耐久性とフィルム生産性を両立できると期待される配合令和3を設計 ①安定同位体で標識した生分解性プラスチックの試作を行い、生分解性試験に提供

第4表 令和3年度開発概要

令和3(本年度)：新規樹脂配合開発	
開発目標	<ul style="list-style-type: none"> ①新規生分解性プラスチックの開発・・・令和2年度でめど) ②新規素材を利用したフィルムの試作と低コスト化検討
期初課題	<ul style="list-style-type: none"> ②長期耐久向け配合での展張実証試験が必要 ②商業機での生産安定性に関する検証が必要
検討内容	<ul style="list-style-type: none"> ②令和2終盤に設計した長期耐久向け複合材料R3-1, R3-2の中規模試作と商業機でのフィルム生産および項目2～4への提供 ②配合高度化のための検討として、R3-3, R3-4, R3-5を設計し項目2に提供し展張試験を実施
令和3成果	<ul style="list-style-type: none"> ②R3-1は市場通常品より高耐久を実現 ②R3-2は市販品長期展張向けの対照と同等程度の耐久性を実現 ②複合材料の溶融時の張力が改良されたことでフィルムの生産性向上、フィルム品質改善 ②安定製造が可能になることで製造コストを低減

第 5 表 新規素材 A のシェルフライフ

水分量 ppm	MFR*(190°C、2.16kg) g/10 min		変化率
	試験開始時	1年後	
350	4.5	4.8	6.7%
2300	4.5	7.0	55%

* MFR(melt flow rate)が大きいほど分子量が低下

第 6 表 開発品樹脂配合物の成形性評価

	e-0	R3-1	R3-2
MFR (190 °C、2.16 kg) g/10 min	4.2	1.6	1.8
立ち上げ	ダイからフィルム が持ち上がらない	良好	良好
成形安定性	バブルが不安定 未熔融樹脂による バブル破泡	良好	良好
穴あけ	良好	良好	良好
フィルム品質	・厚み斑 ・外観不良 ・カーボン分散斑	良好	良好
口開き	良好	良好 (口開き剤により 改善実施)	良好 (口開き剤により 改善実施)

第7表 試験結果一覧

試験生産月	配合	色	サイズ (厚みμ×幅cm×巻数m)	有孔	本数 (本)	行程別生産性			外観品質	生産性 評価
						製膜	有孔	巻取		
2021年4月	e-1	黒	18×95×100	無し	2	×	--	○	○	×
	e-0	黒	18×95×100	無し	2	△	--	○	×	×
	e-0	黒	18×95×100	45R-45*35*2C	2	△	○	○	×	×
	R3-1	黒	18×95×100	45R-45*35*2C	2	○	○	○	○	○
	R3-1	黒	18×150×100	無し	2	○	--	○	○	○
	R3-2	黒	18×150×100	無し	2	○	--	○	○	○
	R3-2	黒	18×95×100	45R-45*35*2C	2	○	○	○	○	○
2021年8月	e-0	黒	18×95×100	60R-45*27*2C	1	×	○	○	○	×
	e-0	黒	18×150×200	無し	2	×	--	○	○	×
	e-0	黒	18×150×50	無し	1	×	--	○	○	×
	e-2	黒	18×150×50	無し	1	○	--	○	○	○
	e-2	黒	18×150×200	無し	2	○	--	○	○	○
	R3-1	黒	18×150×50	無し	1	○	--	×	○	×
	R3-1	黒	18×95×100	60R-45*27*2C	1	○	×	×	○	×
	R3-1	黒	18×95×100	無し	1	○	--	×	○	×
	R3-2	黒	18×95×100	60R-45*27*2C	1	○	--	×	○	×
	R3-2	黒	18×150×50	無し	1	○	--	×	○	×
	R3-2	黒	18×150×100	45R-37*37*3C	1	○	×	×	○	×
	R3-2	黒	18×150×100	無し	1	○	--	×	○	×
2021年12月	R3-1	黒	18×150×100	45R-37*35*3C	4	○	○	△	○	△
	R3-2	黒	18×150×100	45R-37*35*3C	4	○	○	△	○	△
	R3-6	黒	18×150×100	45R-37*35*3C	4	○	○	△	○	△
	R3-4	黒	18×150×100	45R-37*35*3C	4	○	○	×⇒○	○	△
	e-0	黒	18×150×100	45R-37*35*3C	4	△	○	○	○	△

評価定義：三菱ケミカルアグリドリーム社実機評価

×：安定生産不可 △：改良により生産可の可能性有り、ただしロングラン性確認必要

○：安定生産可能

第 8 表 各配合別評価

配合名	試作月の総合評価			コメント
	4月	8月	12月	
e-1	×	---	---	製膜性の安定性に課題
e-0	×	×	---	製膜性の安定性に課題
e-2	---	○	---	eシリーズとして夏場製膜性課題克服。ロングラン性確認必要
R3-1	○	×	△	生産性悪い(口開き、有孔性)。年間通しての安定生産に課題
R3-2	○	×	△	生産性悪い(口開き、有孔性)。年間通しての安定生産に課題
R3-4	---	---	△	口開き性に不安。夏場の生産性確認必要
R3-6	---	---	△	口開き性に不安。夏場の生産性確認必要

第9表 圃場フィルム展張試験実施計画

	フィルムの種類			
	配合シリーズ1	配合シリーズ2	配合シリーズ3	
フィルム幅	60cm	135cm	60cm	
作業と日程	展張	令和元年 9月19日	令和2年 5月28日	令和2年 6月 9日
	酵素処理	令和元年10月30日	令和2年 7月27日	令和2年 8月 6日
	フィルム回収 一部埋設	令和元年11月 1日	令和2年 7月28日	令和2年 8月 7日
	埋設部一部回収 (約90日後)	令和2年 1月17日	令和2年10月29日	令和2年11月 5日
	残埋設部回収 (約180日後)	令和2年 5月 7日	令和3年 2月 1日	令和3年 2月10日

第10表 令和3年度 圃場フィルム展張試験実施計画

	試作シリーズ	シリーズ4
	フィルム幅	75cm幅
作業日程	展張処理 一部埋設	令和3/04/22
	酵素処理	令和3/06/23
	フィルム一部回収 一部埋設	令和3/06/24
	一部酵素処理 (展張約4か月後)	令和3/08/19
	フィルム一部回収 (埋設部を含む)	令和3/08/20
	一部回収酵素処理 (展張約6か月後)	令和3/10/22
	フィルム一部回収	令和3/10/24
	埋設部回収 (処理後埋設部を含む、処理後約180日後)	令和3/12/22

第 11 表 CO₂ 測定を用いて土壌中での生分解性プラスチックの分解評価を行った研究例の詳細

Francioni et al. (印刷中)より改編

既存文献	土壌タイプ	対応する国際標準	供試試料と土壌比 (g/g)	温度条件 (° C)	土壌水分 (% Vol)	測定期間 (days)
Abe et al., 2010	Manipulated (Commercial andosol, Alles G inoculum, commercial compost, sawdust)	-	1.54/5.5	-	60	14
Apinya et al., 2015	Manipulated (forest soil mixed with mature compost from yard waste)	ASTM D5988-12 (2003)	0.72/200	30 ± 2	45	60
Ardisson et al., 2014	Manipulated (addition of compost + other elements)	ISO 17556 (2012)	10/800	28 ± 2	-	318
Barragán et al., 2012	Natural	ISO 17556 (AENOR, 2005)	0.5/200	25 ± 2	-	90
Gómez and Michel, 2013	Manipulated (mixture of 43% certified organic topsoil, 43% no-till farm soil and 14% sand, ammonium phosphate)	ASTM D5988-03	1 †/300	20 ± 2	60	660
Ho and Pometto, 1999	Manipulated (soil mixture of potting soil, manure soil, sand [1:1:1 (w/w)])	-	1.5/200	28	-	182
Jeszeová et al., 2018	Manipulated (soil and perlite)	ASTM D5988-12 and STN 17556-2012	0.45/200	20	-	365
Mccarthy et al., 1999	Natural	-	-	37	-	45
Mosnáčková et al., 2017	Manipulated (soil and perlite)	ASTM D5988-12 and STN 17556-2012	-/200	20	-	375
Palsikowski et al., 2018	Natural (collected from different areas and mixed)	ASTM D5988-12	-/200	28	47	120
Ratto et al., 1999	Manipulated (mix of potting soil, sand, and composted manure)	-	0.45-0.48/50	30	60 ± 5	368
Šerá et al., 2016	Manipulated (soil, perlite)	-	0.1 /10	25	-	100
Solaro et al., 1998	Manipulated (15:10 mixture of forest soil and agricultural soil, addition of (NH ₄) ₂ HP0 ₄)	-	0.3 †/10-12.5	Room temp.	-	82-125
Thompson et al., 令和元	Manipulated (Biodegradation stimulants, urea, sucrose, nitrogen)	ISO 17556	-/150	23	60	112
Touchaleaume et al., 2016	Natural	ASTM D5988-96	0.002 †/1	28	-	750
Vanharova et al., 2017	Manipulated (clay soil, commercial garden compost (1:5) and 100 ml of liquid medium)	ISO 17556:2012	1/500 §	-	-	70

† grams of carbon instead of grams of material; § volume in cm³ instead of weight in grams

第 12 表 脂肪族ポリエステル分解酵素 PaE による新規素材シートの重量変化 (平均値 $n=3$)

試料名	重量変化率 (%)
新規素材A	20
新規素材B	9
新規素材C	0

PaE 3U/cm²、30°C、3hr の振とうインキュベーション処理を実施。

第 13 表 酵素剤処理による複合化素材フィルムの重量変化(1 時間当たり; 平均値 $n=3$)

配合シリーズ 4		
フィルム名		分解速度 (mg/hr)
配合R3-1	配合R2-5をベースにさらに新規樹脂Aを増やした配合	1.3
配合R3-2	R3-1にPLAを加えてさらに遅い分解を狙った配合	1.0
配合R3-3	R3-1をベースに添加剤Xをさらに増やし遅い分解を狙った配合	0.4
配合R3-4	R3-1からさらに新規樹脂Aを増やし遅い分解を狙った配合	1.3
配合R3-5	R3-2から添加剤Xを除き、PLAの分解遅延効果を検証する為の配合	4.3
配合R3-1_実機	実機製作品のcontrol	1.3
配合e-0	R1年度control	5.7
配合R2-5	R2年度control	2.2

PaE $3\text{U}/\text{cm}^2$ 、 30°C 、3hr の振とうインキュベーション処理を実施。

第 14 表 国内所在の発酵関連企業の例

企業名 (50音順)	本社所在地	発酵事業所在地	微生物、発酵に関する主な商品、サービス	主な発酵槽の容量
池田糖化工業株式会社	広島県福山市	記載なし	食品中間原料、微生物の製造受託サービス	30L、200L、1kL、7.5kL、10kL
磐田化学工業株式会社	静岡県磐田市	磐田工場：静岡県磐田市	食品、飼料、肥料、発酵・加工受託製造	150、200、500、2k、5k、15k、30k、40k、60k、150kL
エイチビィアイ株式会社 (HBI Enzymes Inc.)	兵庫県宍粟市	舞鶴工場：京都府舞鶴市	医薬用原料、食品加工用、飼料用酵素	記載なし
神戸天然物化学株式会社	兵庫県神戸市	KNCバイオリサーチセンター： 兵庫県神戸市	有機化学品の研究・開発・生産ソリューション	2~50~5kL
サンヨーファイン株式会社	大阪府大阪市	尼崎開発チーム：兵庫県尼崎市 松山工場：愛媛県松山市	医薬品原薬・中間体、食品原料	50、300、400、1.5k、3k、36kL
東洋紡株式会社	大阪府大阪市	大津医薬工場：滋賀県大津市	医薬品原料	記載なし
日本マイクロバイオファーマ株式会社	東京都中央区	記載なし	種々物資の発酵生産、菌株・プロセス改良サービス技術	3、5k、100kL
ネオファーマジャパン株式会社	東京都千代田区	袋井工場：静岡県袋井市	医薬原薬・中間体	記載なし
北海道糖業株式会社	北海道札幌市	北見工場：北海道北見市 札幌工場：北海道石狩市	食品素材、食品及び工業用酵素、機能性微生物、医薬用原料等	30、46k、60kL
三菱ケミカル株式会社	東京都千代田区	鶴見工場：神奈川県横浜市	バイオ触媒	記載なし
洛東化成工業株式会社	滋賀県大津市	滋賀県大津市	各種工業用酵素、微生物剤	50~1KL~12kL

第 15 表 エダマメの収穫物特性

試験区	主茎長 (cm)	収穫本数 (本/穴)	着莢数 (個/株)	可販莢重 (g/株)	可販莢割合 ^z (%)	3粒莢割合 ^z (%)	2粒莢割合 ^z (%)	可販収量 ^y (kg/10a)
e-0	29.3	2.0	38.5	100.0	93.6	42.7	40.3	741
R3-2	29.5	2.0	35.1	92.1	93.6	44.1	39.2	682
カエルーチ	30.2	2.0	38.7	108.4	96.1	45.1	41.7	803
PE 製マルチ	33.2	2.0	39.2	98.4	93.8	44.6	38.9	729

z:重量割合。y:栽植密度 7,406 本/10a(畝間 180cm、株間 30cm、条間 40 cm、2 条)として莢収量を算出した。

第 16 表 埋設フィルムの残存面積率の推移 (%)

試験区		9 月 27 日	10 月 26 日	11 月 26 日
e-0	酵素	95	92	87
	無処理	88	84	83
R3-2	酵素	92	89	86
	無処理	89	88	81
カエルーチ	酵素	90	86	73
	無処理	93	86	71

エダマメ栽培に供試した生分解性マルチを 10cm×10cm に切断して市販の PE 製水切りネット
(目合 1mm×3mm)に入れて、令和 3 年 8 月 26 日、地下 10cm に埋設した(n=3)。

第17表 生分解性マルチについての聴き取り調査の結果

項目	感想・評価等
マルチャーでの作業性	<ul style="list-style-type: none"> ・ 展張しやすさに資材間の差はない。 ・ 供試資材よりも慣行マルチは切れやすい。
栽培期間中の分解程度	<ul style="list-style-type: none"> ・ 慣行マルチは途中で分解するが、供試資材は全て強度を保持していた。
エダマメの生育状況	<ul style="list-style-type: none"> ・ 供試資材は慣行マルチと比較して、草丈が小さい傾向にあった。 ・ 供試資材間での生育の差はない。
栽培終了後	<ul style="list-style-type: none"> ・ 収穫後生分解性マルチは畑に鋤込む。 ・ 供試マルチは、慣行生分解性マルチに比べて耐久性があり、収穫後も飛散しにくい。
市販生分解性マルチの問題点	<ul style="list-style-type: none"> ・ 風が強く、乾燥していると飛散しやすい。 ・ 農ポリ(PE製)マルチと比べて保湿性・保温性がないため、梅雨期の少雨時などは生育しにくい。 ・ 値段が高い。
酵素の効果について	<ul style="list-style-type: none"> ・ 思った以上に分解力が強く、覆土する栽培方法の中では使わなくてよさそう。 ・ 生分解性マルチを普及していくためには良い方法かもしれない。
覆土について	<ul style="list-style-type: none"> ・ 生分解性マルチが周辺の畑に飛散すると苦情が来るため、飛散対策として行っている。 ・ エダマメの生育には問題はなく、他県エダマメ産地でも行われていると聞いたことがある。
飛散対策について	<ul style="list-style-type: none"> ・ 覆土が十分にできていない場合は飛散しやすいため、収穫が終わるとすぐにロータリーで鋤込むようにしている。

第 18 表 ダイコンの収穫物特性

試験区	葉重 (g)	根重 (g)	葉長 (cm)	根長 (cm)	根径 (cm)	病害発生率(%)		
						横縞症	亀裂褐変症	岐根
e-0	330	1293	43.7	38.5	7.3	0	0	0
R3-1	311	1297	43.0	38.6	7.3	0	0	0
R3-2	309	1287	43.6	38.7	7.3	0	0	0
カエルーチ	307	1317	42.7	39.3	7.3	0	0	0
PE 製マルチ	308	1313	42.4	38.5	7.3	0	0	0

第 19 表 各栽培方法における試作フィルムがカボチャの生育に及ぼす影響

栽培方法	試験区 ^z	つる長 (cm)	10 節長 (cm)	葉身長 (cm)	葉幅 (cm)	葉柄長 (cm)	茎径 (mm)
通常栽培	PE 製マルチ	100.9	52.2	16.5	24.1	12.7	10.6
	R3-1	82.5	46.6	13.8	19.9	9.6	10.4
	R3-2	81.1	46.1	13.5	19.5	10.2	10.0
麦マルチ 栽培	PE 製マルチ	89.0	51.6	14.5	20.7	10.3	10.4
	R3-1 透明	79.3	47.0	12.6	17.6	9.4	9.6
	R3-2 透明	79.3	46.2	13.0	18.5	9.5	10.0
	R3-1 黒	77.2	48.6	11.9	16.6	8.4	9.8
	R3-2 黒	69.0	47.4	9.9	13.8	7.4	8.6
	R3-2 黒 (施肥量 2 倍)	69.1	47.8	10.2	13.9	7.5	9.0

z : 試験区は通常栽培で使用したマルチはベッド部分/つる先部分として、R3-1 は R3-1 透明/R3-1 黒、R3-2 は R3-2 透明/R3-2 黒、麦マルチ栽培は使用したマルチはベッド部分/つる先部分として、R3-1 透明は R3-1 透明/麦マルチ、R3-2 透明は R3-2 透明/麦マルチ、R3-1 黒は R3-1 黒/麦マルチ、R3-2 黒は R3-2 黒/麦マルチ

第20表 各栽培方法における試作フィルムがカボチャの収量性や果実品質に及ぼす影響

栽培方法	試験区 ^z	開花日	収穫日	着果数/株	着果節位	果重(g)	果高(cm)	果径(cm)	果皮厚 (cm)			糖度(°Brix)	10a 当たり収量 ^y (t/10a)
									赤道部	果梗部	花落ち部		
通常栽培	PE製マルチ	4/19-5/12	6/11-6/28	2.4	22.2	1933	11.1	17.3	2.6	1.9	1.8	16.2	1.84
	R3-1	4/19-5/14	6/11-6/30	2.4	21.6	1895	10.8	17.5	2.6	1.7	1.8	16.4	1.83
	R3-2	4/19-5/14	6/11-6/30	2.4	20.8	1843	11.0	17.2	2.5	1.8	1.9	16.6	1.75
麦マルチ栽培	PE製マルチ	4/21-5/14	6/14-6/30	2.4	22.2	1845	10.9	17.2	2.6	2.0	1.8	18.0	1.78
	R3-1透明	4/19-5/14	6/11-6/30	1.7	19.0	1813	10.7	17.1	2.4	1.8	1.7	16.8	1.21
	R3-2透明	4/21-5/10	6/14-6/28	1.3	19.3	1870	10.9	17.2	2.5	1.8	1.9	18.2	1.00
	R3-1黒	4/19-5/14	6/14-6/30	1.8	17.7	1581	10.2	16.2	2.5	1.8	1.7	18.2	1.11
	R3-2黒	4/19-5/14	6/11-6/30	1.8	19.5	1664	10.4	16.6	2.4	1.7	1.8	17.8	1.16
	R3-2黒 (施肥量2倍)	4/19-5/10	6/11-6/28	1.5	18.4	1558	10.3	16.1	2.4	1.7	1.6	18.8	0.94

z: 試験区は通常栽培で使用するマルチはベッド部分/つる先部分として、R3-1はR3-1透明/R3-1黒、R3-2はR3-2透明/R3-2黒、麦マルチ栽培は使用したマルチはベッド部分/つる先部分として、R3-1透明はR3-1透明/麦マルチ、R3-2透明はR3-2透明/麦マルチ、R3-1黒はR3-1黒/麦マルチ、R3-2黒はR3-2黒/麦マルチ、y: 10a 当たり収量は果重×株当たり着果数×10a当たりの栽植本数で算出した

第 21 表 長期展張試験における試作フィルム等の亀裂を確認した日

供試マルチ	反復①	反復②	平均
PE 製マルチ透明	—	—	—
R3-1 透明	5 月 26 日	5 月 31 日	5 月 28 日
R3-2 透明	5 月 24 日	5 月 26 日	5 月 25 日
R3-1 黒	7 月 26 日	7 月 21 日	7 月 23 日
R3-2 黒	7 月 17 日	7 月 24 日	7 月 20 日
カエルーチ標準黒	7 月 12 日	7 月 17 日	7 月 14 日
カエルーチ高耐久黒	7 月 21 日	7 月 17 日	7 月 19 日

z : 各試験区の展張日は 4 月 19 日

第 22 表 現地試験における試作フィルムがカボチャの収量性や果実品質に及ぼす影響

試験区 ^z	着果数 /株	果重 (g)	果高 (cm)	果径 (cm)	果皮厚 (cm)			糖度 ^y (°Brix)	10a 当たり 収量 ^y (t/10a)
					赤道部	果梗部	花落ち部		
PE 製マルチ	1.94	2182	12.6	18.7	2.9	2.1	1.9	8.7	2.83
R3-2 黒	1.89	2101	12.2	18.4	3.0	2.2	2.4	7.6	2.64

z : 試験区で使用したマルチはベッド部分/つる先部分として、慣行マルチはグリーンマルチ/麦マルチ、R3-2 黒は R3-2 黒/
麦マルチ、y : 10a 当たり収量は果重×株当たり着果数×10a 当たりの栽植本数で算出した

第23表 促成作スイートコーンの生育、収量、および品質

	茎葉重 (g)	穂重 (g)	先端不稔 (cm)	収穫適期
試作フィルムe-0	595±182	445±43	1.0	6月9日
市販生分解性マルチA	532±95	482±44	1.5	6月9日
市販生分解性マルチB	525±107	465±42	1.0	6月9日
PE製マルチフィルム	515±143	445±48	1.6	6月9日

注) 表の±は標準偏差

第24表 農家圃場で栽培された露地作スイートコーンの生育、収量、および品質

	茎葉重 (g)	穂重 (g)	先端不稔 (cm)	収穫適期
試作フィルムe-0	778 ± 91	473 ± 41	1.2	8月19日
市販生分解性マルチ(カエルーチ標準)	1120 ± 113	475 ± 66	1.0	8月18日
市販生分解性マルチA	843 ± 93	491 ± 44	0.5	8月19日
市販生分解性マルチB	728 ± 60	431 ± 33	1.8	8月19日
市販生分解性マルチC	849 ± 57	501 ± 42	1.5	8月18日
PE製マルチフィルム	886 ± 84	504 ± 32	1.2	8月18日

注) 表の±は標準偏差

第25表 露地栽培スイートコーンの生育、収量、および品質

	茎葉重 (g)	穂重 (g)	先端不稔 (cm)	収穫適期
新規試作フィルム R3-1	661± 93	572±30	0.2	8月17日
新規試作フィルム R3-2	700± 86	553±41	0.4	8月18日
市販生分解性マルチ(カエルーチ通常)	687± 92	557±47	0.7	8月18日
市販生分解性マルチ(カエルーチ高耐久)	645±100	572±47	0.4	8月18日
PE製マルチフィルム	671±107	580±36	0.3	8月18日

注) 表の±は標準偏差

第 26 表 マルチフィルムの違いが展張作業に及ぼす影響

試験区	畝毎の作業時間 (h/30a/3人)											
	1畝目			2畝目			3畝目			平均		
	展張	ホチキス	合計	展張	ホチキス	合計	展張	ホチキス	合計	展張	ホチキス	合計
農ポリ	5	23	28	7	25	31	5	31	36	6	26	32
既存生プラ	5	28	32	4	21	25	5	33	37	5	27	32
e-0(黒)	15	23	38	9	29	38	19	25	44	14	26	40

※展張・・・ロールからフィルムを引き出して切り取るまで
 ※ホチキス・・・引き出したフィルムをホチキスで貼り合わせて畝をフィルムで被覆するまで

第 27 表 マルチフィルムの違いがイチゴ生育に及ぼす影響

試験区 ²⁾	第3葉長 (cm) ¹⁾			頂花房		一次腋花房		二次腋花房	
	定植1ヶ月後 (10/22)	定植2ヶ月後 (11/25)	定植3ヶ月後 (12/21)	開花日	収穫開始日	開花日	収穫開始日	開花日	収穫開始日
農ポリ	14.6	17.2	17.4	11/19	12/29	1/2	2/16	2/17	3/20
既存生プラ	14.6	16.8	16.4	11/17	12/28	1/3	2/18	2/21	3/23
e-0(黒)	14.5	16.6	16.6	11/20	1/1	1/3	2/17	2/20	3/23
有意性	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

n. s. は一元配置分散分析で有意差なし

1) 各区10株平均

2) 各区7～10株平均 (果房や株の欠損により調査株が変動した)

第 28 表 マルチフィルムの違いがイチゴ収量に及ぼす影響

試験区	果実重量 (g/株)					収穫果数 (個/株)	1果重 (g)	収量 ¹⁾ (kg/10a)
	12月	1月	2月	3月	4月			
PE製マルチフィルム	34	120	109	169	84	31	17	3603
市販生分解性マルチ	30	128	88	151	82	30	16	3351
e-0 黒	29	108	111	158	77	29	17	3377
有意性	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.

n. s. は一元配置分散分析で有意差なし

※ 12/17～4/22の調査

※ 7g以上の果実を集計

1) 茨城県栽培基準栽植密度 7000株/10a

第 29 表 マルチフィルムの違いがタマネギ生育に及ぼす影響

試験区 ¹⁾	葉枚数 (枚)					草丈 (cm)					葉鞘径 (mm)				
	1回目	2回目	3回目	4回目	収穫時	1回目	2回目	3回目	4回目	収穫時	1回目	2回目	3回目	4回目	収穫時
	2/26	3/16	3/30	4/16	6/2	2/26	3/16	3/30	4/16	6/2	2/26	3/16	3/30	4/16	6/2
農ポリ	2.9	3.6	4.4	6.6	9.0	21.3	29.0	35.9	42.5	63.1	5.9	8.1	11.7	15.7	14.2
既存生プラ	2.7	3.5	4.4	6.3	9.4	21.9	29.7	36.6	42.2	47.5	5.7	8.0	11.4	15.5	12.4
e-0(黒)	2.9	3.6	4.5	6.5	10.5	20.6	27.8	34.9	41.4	53.1	5.6	7.7	10.9	14.9	13.7
e-2(黒)	2.9	3.5	4.3	6.3	8.9	20.7	29.4	36.6	42.7	49.4	5.9	8.3	11.7	16.1	12.8
有意性	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.

n. s. は一元配置分散分析で有意差なし
 1)各区20株3反復の平均値

第 30 表 マルチフィルムの違いがタマネギの品質や収量に及ぼす影響

試験区	調整重 (g)	球径 (cm)		収量 ¹⁾ (kg/10a)
		縦径	横径	
PE製マルチフィルム	262.7	7.5	7.7	6831
市販生分解性マルチ	202.4	7.1	7.0	5261
e-0 黒	265.2	7.5	7.8	6895
e-2 黒	186.8	6.8	6.9	4858
有意性	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.

n. s. は一元配置分散分析で有意差なし
 ※6月2日収穫調査
 1) 茨城県栽培基準栽植密度 26,000株/10a

第 31 表 マルチフィルムの違いが展張作業時間に及ぼす影響

試験区	畝毎の作業時間 (h/10a/5人)									平均		
	1畝目			2畝目			3畝目					
	展張	埋め込み	合計	展張	埋め込み	合計	展張	埋め込み	合計	展張	埋め込み	合計
農ポリ	2.4	1.8	4.2	2.6	2.4	4.9	1.9	1.5	3.5	2.3	1.9	4.2
既存生プラ	1.7	1.7	3.5	2.2	1.4	3.6	2.3	1.4	3.8	2.1	1.5	3.6
e-0(黒)	2.0	3.0	5.0	2.0	3.5	5.5	2.0	1.8	3.8	2.0	2.7	4.7
e-2(黒)	1.3	1.5	2.8	1.3	1.5	2.9	1.2	1.5	2.7	1.3	1.5	2.8

※展張・・・ロールからフィルムを引き出して切り取りまで
 ※埋め込み・・・切り取ったフィルムを埋め込むまで

第 32 表 生分解性マルチを用いたタマネギ栽培の 10a 当たりの作業時間と CO₂排出量

作業名	作業時間 ²⁾ (h/10a)	作業人員 (人/10a)	使用機械	機械稼働時間 (h/10a)	燃料種類	CO ₂ 排出量 ³⁾ (kg CO ₂ /10a)
圃場準備	2.7	1	トラクター	2.7	軽油	7578
土改剤散布	3.6	1	-	-	-	-
耕起・施肥	4.5	3	トラクター	2.7	軽油	7578
耕起・マルチ展張 ¹⁾	8.7	1	トラクター	2.7	軽油	7578
		3	畝上げ機	1.7	軽油	567
		1	運搬車	0.3	ガソリン	244
定植・苗運搬	10.7	5	移植機	10.7	ガソリン	2327
		1	運搬車	0.3	ガソリン	244
除草	13.5	3	-	-	-	-
農薬散布	3.6	1	背負散布機	3.6	電力	-
追肥	26.7	2	-	-	-	-
収穫・調整	9.0	3	運搬車	0.3	ガソリン	244
マルチすき込み・耕耘	2.7	1	トラクター	2.7	軽油	7578
マルチ剥ぎ取り・耕耘	-	-	-	-	-	-
合計	85.7	-	-	27.6	-	33934

1) マルチ展張の作業時間に関して、人の作業時間は3つの生プラマルチの平均作業時間

2) 人の作業時間と機械での作業時間の和

3) 1h 当たり燃料消費量×面積当たり作業時間×二酸化炭素排出係数

※ハイフン (-) ... 人力での作業、必要のない作業を該当なしとした。

第 33 表 PE 製マルチフィルムを用いたタマネギ栽培における 10a 当たりの
作業時間と CO₂ 排出量

作業名	作業時間 ²⁾ (h/10a)	作業人員 (人/10a)	使用機械	機械稼働時間 (h/10a)	燃料種類	CO ₂ 排出量 ³⁾ (kg CO ₂ /10a)
圃場準備	2.7	1	トラクター	2.7	軽油	7578
土改剤散布	3.6	1	-	-	-	-
耕起・施肥	4.5	3	トラクター	2.7	軽油	7578
耕起・マルチ展張 ¹⁾	8.7	1	トラクター	2.7	軽油	7578
		3	畝上げ機	1.7	軽油	567
		1	運搬車	0.3	ガソリン	244
定植・苗運搬	10.7	5	移植機	10.7	ガソリン	2327
		1	運搬車	0.3	ガソリン	244
除草	13.5	3	-	-	-	-
農薬散布	3.6	1	背負散布機	3.6	電力	-
追肥	26.7	2	-	-	-	-
収穫・調整	9.0	3	運搬車	0.3	ガソリン	244
マルチすき込み・耕耘	-	-	-	-	-	-
マルチ剥ぎ取り・耕耘	4.1	2	トラクター	2.7	軽油	7578
合計	87.1	-	-	27.6	-	33934

- 1) マルチ展張の作業時間はポリエチレンマルチ1つの平均作業時間
2) 人の作業時間と機械での作業時間の和
3) 1h 当たり燃料消費量×面積当たり作業時間×二酸化炭素排出係数
※ハイフン (-) ... 人力での作業、必要のない作業を該当なしとした。

第 34 表 マルチフィルムの違いがナス生育に及ぼす影響

試験区	主茎長 (cm)				葉枚数 (枚)				茎幅 (mm)	
	1回目	2回目	3回目	4回目	1回目	2回目	3回目	4回目	1回目	作後
	4/21	5/7	5/21	6/8	4/21	5/7	5/21	6/8	6/8	11/1
PE製マルチフィルム	28.2	37.2	59.7	86.9	9	9	11	13	14.7	23.0
市販生分解性マルチ	28.8	38.0	56.7	86.3	9	8	11	13	14.1	23.2
R3-1(黒)	28.4	36.0	56.5	83.5	9	8	11	13	14.1	22.3
R3-2(黒)	27.9	36.7	59.1	88.9	10	8	11	13	15.0	22.4
有意性	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.

n. s. は一元配置分散分析で有意差なし
1) 各区5株3反復の平均値

第 35 表 ナスにおける各種マルチごとの月別 A 品果実重量および収量

試験区	A 品果実重量 (g/株) ¹⁾				収穫果数 ²⁾ (個/株)	収量 ³⁾ (kg/10a)
	6月	7月	8月	9月		
PE製マルチフィルム	294	296	289	274	70	4056
市販生分解性マルチ	287	266	301	260	72	4116
e-0 黒	252	271	287	267	64	3583
e-2 黒	267	278	289	244	66	3760
有意性	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.

n. s. は一元配置分散分析で有意差なし
 1) 6/14～9/27の調査
 2) A品の果実を集計
 3) 10aあたり725株で計算

第 36 表 マルチの引張距離の変化割合¹⁾ (%)

試験区	展張前 ²⁾	栽培終了後 ³⁾	酵素処理後 ⁴⁾
市販生分解性マルチ	100	39.8	34.2
R3-1 黒	100	50.4	46.2
R3-2 黒	100	57.1	55.9

※引張強度および引張距離（伸び）は、展張方向（タテ）に引っ張ったときに破断するまでの強度・距離を示す

1) 展張前の未使用マルチを100としたときの減少割合
 2) 展張前の未使用マルチを測定
 3) 栽培終了後のマルチ（展張6ヶ月）を測定
 4) 栽培終了後のマルチ（展張6ヶ月）に酵素散布し、3日後のマルチを測定

第 37 表 マルチの引張強度の変化割合 (%)¹⁾ ※

試験区	展張前 ²⁾	栽培終了後 ³⁾	酵素処理後 ⁴⁾
市販生分解性マルチ	100	45.8	43.7
R3-1 黒	100	45.1	41.7
R3-2 黒	100	47.8	48.8

※引張強度および引張距離（伸び）は、展張方向（タテ）に引っ張ったときに破断するまでの強度・距離を示す

- 1) 展張前の未使用マルチを100としたときの減少割合
- 2) 展張前の未使用マルチを測定
- 3) 栽培終了後のマルチ（展張6ヶ月）を測定
- 4) 栽培終了後のマルチ（展張6ヶ月）に酵素散布し、3日後のマルチを測定

第 38 表 カボチャ区の生分解性マルチフィルム分解性評価

	終了時点の フィルムの様子	地際の様子	酵素の効果	ロータリーへの 巻き込み	鋤込み後の フィルム断片
R3-1	5～7割被覆	1/3消滅	◎	ほとんど無し	僅かに有り
R3-2	7～8割被覆	1/4消滅	○	ほとんど無し	僅かに有り
市販 高耐久A	7～8割被覆	1/2消滅	○	ほとんど無し	僅かに有り
市販 標準A	1割被覆 (裂けが最大)	ほぼ消滅	○	ほとんど無し	僅かに有り

第 39 表 農業生産調査表(PE 製マルチフィルム)

No.	作業 時期 (月日)	作業	機械、資材、労働	規格、商品名	単位	単価	使用量	機械稼働	実習生	実習生	備考
							(107-ル)	時間 (107-ル)	人数 (107-ル)	作業時間 (107-ル)	
1		input									
1.1		育苗ハウス準備	電力		kWh						
1.2		播種	種子 ペーパーポット 培養土 育苗箱 実習生		kg パレット kg 箱						
1.3		育苗管理	電力		kWh						
1.4		耕起・基肥散布	トラクター ロータリーソー 軽油(トラクター) 肥料 肥料 肥料 肥料		h L 袋 袋 袋 袋						
1.5		畝立・マルチ展張	トラクター マルチロータリー ポリマルチ 軽油(トラクタ)		h 本 L						
1.6		移 植	苗 実習生		本						
1.7		除草剤散布	除草剤 背負噴霧器 実習生		本台						
1.8		追肥散布(1回目)	肥料 実習生		袋						
1.9		薬剤散布(1回目)	殺虫剤 背負噴霧器 実習生		本台						
1.10		追肥散布(2回目)	肥料 実習生		袋						
1.11		摘果(除房)	実習生								
1.12		薬剤散布(2回目)	殺虫剤 殺虫剤 背負噴霧器 実習生 実習生		本 本台						
1.13		マルチ剥ぎ取り	実習生								
1.14		収 穫	実習生								
1.15		調整・箱詰め	段ボール箱 テープ 実習生		枚 巻						
1.16		使用済マルチ廃棄(持込)	軽トラック ガソリン(軽トラック)		h L						
1.17		すき込み	トラクター ロータリー 軽油(トラクター)		h L						
2		output									
2.1		収穫物	トウモロコシ ヤングコーン		kg kg						

第 40 表 農業生産調査表(生分解マルチ)

No.	作業 時期 (月日)	作業	機械、資材、労働	規格、商品名	単位	単価	使用量 (107-ル)	機械稼働 時間 (107-ル)	実習生 人数 (107-ル)	実習生 作業時間 (107-ル)	備考
1		input									
1.1		育苗ハウス準備	電力		kWh						
1.2		播種	種子 ペーパーポット 培養土 育苗箱 実習生		kg パレット kg 箱						
1.3		育苗管理	電力		kWh						
1.4		耕起・基肥散布	トラクター ロータリーソーワ 軽油(トラクター) 肥料 肥料 肥料 肥料		h L 袋 袋 袋 袋						
1.5		畝立・マルチ展張	トラクター マルチロータリー 生分解マルチまたはポリマルチ 軽油(トラクタ)		h 本 L						
1.6		移 植	苗 実習生		本						
1.7		除草剤散布	除草剤 背負噴霧器 実習生		本 台						
1.8		追肥散布(1回目)	肥料 実習生		袋						
1.9		薬剤散布(1回目)	殺虫剤 背負噴霧器 実習生		本 台						
1.10		追肥散布(2回目)	肥料 実習生		袋						
1.11		摘果(除房)	実習生								
1.12		薬剤散布(2回目)	殺虫剤 殺虫剤 背負噴霧器 実習生		本 本 台						
1.13		収 穫	実習生								
1.14		調整・箱詰め	段ボール箱 テープ 実習生		枚 巻						
1.15		すき込み	トラクター ロータリー 軽油(トラクター)		h L						
2		output									
2.1		収穫物	トウモロコシ ヤングコーン		kg kg						
注:ポリマルチ用調査表には以下の項目を追加											
1.1X		マルチ剥ぎ取り	実習生								
1.1X		使用済マルチ廃棄(持込)	軽トラック ガソリン(軽トラック)		h L						

第 41 表 LCA および経済性評価用調査実施概要

生分解樹脂ーマルチ製造用		フォアグラウンドデータ収集	バックグラウンドデータ
A1	PBS製造	PTT MCC Biochem社(2018年)	ecoinvent v3,原料サプライヤー提供情報
A2	PE製マルチフィルム製造	三菱ケミカルアグリドリーム株式会社(2013年度実績)	IDEA v2.3、温対法係数
A3	生分解マルチ製造	三菱ケミカルアグリドリーム株式会社(令和元年度実績)	IDEA v2.3、温対法係数
農業生産プロセス用		フォアグラウンドデータ収集	バックグラウンドデータ
C1	コーントンネルマルチ/茨城生産者	茨城県農業試験場紹介圃場、令和2年6月15日PE製マルチ回収、現地調査、調査方法：ビデオ撮影 農業生産調査表配布後感染拡大により聞き取り中止	
C2	コーン生分解マルチ/茨城生産者	茨城県農業試験場紹介圃場、令和2年度、感染拡大により調査中止	
C3	ブロッコリー(高冷地・夏秋) 生分解マルチ(慣行)/山梨生産者	令和3年2月5日鎌込、現地調査 農業生産調査表による投入産出情報(物財・金銭情報、作業時間・労役)山梨県農業技術センター 聞き取り作成	
C4	ブロッコリー(高冷地・夏秋) PE製マルチ/山梨生産者	令和3年2月5日鎌込、回収現地調査 農業生産調査表による投入産出情報(物財・金銭情報、作業時間・労役)山梨県農業技術センター 聞き取り作成	
C5	スイートコーン(抑制作) 生分解マルチ/山梨県甲斐市生産者	令和2年12月4日鎌込現地調査 農業生産調査表による投入産出情報(物財・金銭情報、作業時間・労役)山梨県農業技術センター 聞き取り作成	
C6	スイートコーン(抑制作) PE製マルチ/山梨県甲斐市生産者	令和2年12月4日鎌込、回収現地調査 農業生産調査表による投入産出情報(物財・金銭情報、作業時間・労役)山梨県農業技術センター 聞き取り作成	
C7	スイートコーン 生分解マルチ/山梨県試験圃場	令和3年5月マルチ展張調査、7月マルチ鋤込調査 山梨県農業技術センター	
C8	スイートコーン PE製マルチ/山梨県試験圃場	令和3年5月マルチ展張調査、7月マルチ剥ぎ取り・圃場鋤込調査 山梨県農業技術センター	IDEA v2.3、温対法係数
C9	タマネギ 生分解マルチ/茨城県試験圃場	令和2年11月-令和3年8月 農業生産調査表による情報収集(物財・金銭情報、作業時間・労役)茨城県農業総合センター園芸 研究所	
C10	タマネギ PE製マルチ/茨城県試験圃場	令和2年11月-令和3年8月 農業生産調査表による情報収集(物財・金銭情報、作業時間・労役)茨城県農業総合センター園芸 研究所	
C11	ナス 生分解マルチ/茨城県試験圃場	令和3年4月-令和3年11月 農業生産調査表による情報収集(物財・金銭情報、作業時間・労役)茨城県農業総合センター園芸 研究所	
C12	ナス PE製マルチ/茨城県試験圃場	令和3年4月-令和3年11月 農業生産調査表による情報収集(物財・金銭情報、作業時間・労役)茨城県農業総合センター園芸 研究所	
PEマルチ処分		フォアグラウンドデータ収集	バックグラウンドデータ
D1	山梨	公益社団法人山梨県農業用廃プラスチック処理センター聞き取り(令和2年12月)	IDEA v2.2、温対法係数
D2	茨城	社団法人園芸いばらき振興協会園芸リサイクルセンター聞き取り(令和2年12月)	IDEA v2.2、温対法係数
D3	長野	JA八ヶ岳 農業部 聞き取り(令和3年12月)	IDEA v2.2、温対法係数
D3	長野	直富商事JA事業部 聞き取り(令和3年12月)	IDEA v2.2、温対法係数
D3	長野	水工技研 アクアプラザ上田 聞き取り(令和3年12月)	IDEA v2.2、温対法係数

第 42 表 各マルチフィルムの面積当たり重量

	kg/100 m ²
生分解マルチ1	2.52
生分解マルチ2	2.52
PE製マルチフィルム	1.84

第 43 表 マルチフィルム使用のライフサイクルインベントリ分析結果

kg-CO ₂ /100m ²	エネルギー起源		非エネルギー起源		エネルギー起源	非エネルギー起源
	生分解マルチ	PE製マルチ	生分解マルチ	PE製マルチ	うちPE製マルチ輸送	
スイートコーン 令和2 農家	1.34	1.54	0.19	0.24	0.20	0.05
ブロッコリー 令和2 農家	0.93	1.30	0.13	0.23	0.13	0.03
スイートコーン 令和3 山梨	4.44	4.64	0.65	0.70	0.13	0.03
タマネギ 令和3 茨城	8.46	8.66	1.20	1.25	0.19	0.05
ナス 令和3 茨城	2.30	1.34	0.32	0.21	0.19	0.05
平均	3.49	3.50	0.50	0.53	0.19	0.05

第 44 表 マルチフィルムのライフサイクルインベントリ分析結果*

(kg CO ₂ /100m ²)	①評価対象製品 (生分解マルチ1)						②ベースライン (ポリマルチ)						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	9.36	0.80	0.39	3.49	0.00	14.05	4.05	0.57	0.29	3.50	-0.85	7.56	-5.31	-0.23	-0.11	0.00	-0.85	-6.49
非エネルギー起源	-0.74	0.03	0.02	0.50	5.17	4.98	0.06	0.04	0.01	0.53	4.12	4.76	0.80	0.00	0.00	0.03	-1.05	-0.22
合計	8.62	0.84	0.41	3.99	5.17	19.03	4.11	0.61	0.30	4.02	3.27	12.32	-4.51	-0.22	-0.11	0.03	-1.90	-6.70

(kg CO ₂ /100m ²)	①評価対象製品 (生分解マルチ2)						②ベースライン (ポリマルチ)						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	9.16	0.80	0.39	3.49	0.00	13.85	4.05	0.57	0.29	3.50	-0.85	7.56	-5.11	-0.23	-0.11	0.00	-0.85	-6.29
非エネルギー起源	-0.95	0.03	0.02	0.50	5.14	4.73	0.06	0.04	0.01	0.53	4.12	4.76	1.01	0.00	0.00	0.03	-1.01	0.03
合計	8.21	0.84	0.41	3.99	5.14	18.58	4.11	0.61	0.30	4.02	3.27	12.32	-4.10	-0.22	-0.11	0.03	-1.86	-6.26

* マルチフィルム 100m² 当たり

第 45 表 マルチフィルムの使用による労役・燃料投入

作物	マルチ 使用量 (㎡)	マルチ フィル ム	鋤込み				剥ぎ取り		刈り倒し				運搬				洗浄		まとめ (100㎡当たり)					
			人	時間	機械	燃料 (L)		人	時間	人	時間	機械	燃料 (L)		人	時間	機械	燃料 (L)	燃料 (L)	人	時間	人・ 時間	軽油 (L)	ガソ リン (L)
ナス 令和3 茨城	750	生分解	1	1	トラ ク ター	8	軽油															1.00	8	
		PE製	1	0.5	トラ ク ター	4	軽油	2	1.9						1	1	トラ ク ク	0.75	ガソ リン	1	0.5	5.80	4	0.75
タマネギ 令和3 茨城	445.6	生分解	1	3.65	トラ ク ター	29.2	軽油															3.65	29.2	
		PE製	1	3.65	トラ ク ター	29.2	軽油	2	4.4						1	1	トラ ク ク	0.75	ガソ リン	1	0.5	13.95	29.2	0.75
スイートコーン 令和3 山梨	370	生分解	1	1.84	トラ ク ター	14.72	軽油			1	0.66	ハン マー モア	0.66	ガソ リン								2.50	14.72	0.66
		PE製	1	1.84	トラ ク ター	14.72	軽油	2	2.5	1	0.97	ハン マー モア	0.97	ガソ リン	1	1	トラ ク ク	0.51	ガソ リン	1	0.5	9.31	14.72	1.48
ブロッコリー 令和2 山梨	900	生分解	1	0.80	トラ ク ター	3.2	軽油			1												0.80	3.2	0.00
		PE製	1	0.80	トラ ク ター	3.2	軽油	1	1.44	1	1.45	刈り 払い 機	0.95	ガソ リン	1	1	トラ ク ク	0.51	ガソ リン	1	0.5	5.19	3.2	1.46
スイートコーン 令和2 山梨	570	生分解	1	1.11	トラ ク ター	1.30	軽油			1	1.63	ハン マー モア	1.63	軽油								2.74	2.93	
		PE製	1	1.11	トラ ク ター	1.30	軽油	2	1.0	1	1.63	ハン マー モア	1.63	軽油	1	1	トラ ク ク	0.51	ガソ リン	1	0.5	6.24	2.93	0.51

第 46 表 経済評価*に使用した指標

	スイートコーン 令和2 山梨			ブロッコリー 令和2 山梨			タマネギ 令和3 茨城		
	生分解 マルチ	PE製 マルチ	Δ (PE-生 分解)	生分解 マルチ	PE製 マルチ	Δ (PE-生 分解)	生分解 マルチ	PE製 マルチ	Δ (PE-生 分解)
マルチ使用量 (m ²)	570	570		900	900		445.6	445.6	
マルチ経費 (円)	30,495	5,700	-24,795	34,194	5,511	-28,683	14,371	2,785	-11,586
その他の農業経営経費 (円)	83,592	83,662	69	76,897	77,029	132	133,352	133,841	489
作業人員×時間	28	32	4	71	72	1	220	229	9
人件費 (円)**	45,500	52,000	6,500	115,375	117,000	1,625	358,183	372,483	14,300
エネルギー起源CO ₂ (kg-CO ₂)	80	43	-37	126	68	-58	62	34	-29
CO ₂ 排出総量 (kg-CO ₂)	107	70	-37	169	111	-59	84	55	-29
収量 (kg)	1,800	1,800	0	1,333	1,333	0	5,671	6831	1,160
生産金額 (円)***	367,200	367,200	0	402,566	402,566	0	571,670	688,565	116,894
時間当たりの所得 (円/時間)	7,415	7,057	-357	2,480	2,820	340	298	783	485
所得率	130%	160%		78%	102%		13%	35%	

*100m²⁴ 当たり

**農業生産調査表(農水省)より 1,625 円/人・時間とした。

***タマネギ令和 3、茨城の生産金額は、神奈川県農業経営指標(2017)の“タマネギマルチ栽培”の金額を引用

「時間当たりの所得」= (「収益」-「経費」) / 「総労役時間」

「環境効率」= 「時間当たりの所得」 / 「環境負荷」

第 47 表 基幹的農業従事者の数、年齢、性別推移

	H27年	28年	29年	30年	31年	R2年	3年
基幹的農業従事者	175.7	158.6	150.7	145.1	140.4	136.3	130.2
うち女性	75.1	65.6	61.9	58.6	56.2	54.1	51.2
うち65歳以上	114	103.1	100.1	98.7	97.9	94.9	90.5
平均年齢	67.1	66.8	66.6	66.6	66.8	67.8	..

出典：農業水産省 HP、農林水産基本データ集、農業労働力に関する統計

<https://www.maff.go.jp/j/tokei/sihyo/data/08.html>