

令和2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3年3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

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 2 年目に当たる令和 2 年度は、初年度の結果を踏まえ、新たな共同実施者を加えて体制を強化し、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今後の開発の基礎的な素材として十分な性能を持つことを確認した。

- ii. 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、来年度の試験のために新たな配合を考案した。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、今後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てた。

- iii. 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モニターするため、土壤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。本年度は昨年度プロセスを組み上げた半自動計測システムを改良した上で、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。また土壤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た分析評価方法を開発した。この標識化合物を素材の一部として取り込んだ試料を作成し、来年度の試験に備えた。さらに、新規素材を用いた配合のフィルムに対する酵素剤の分解促進効果を実験室にて検証した。評価試験を通じて得られた試料に関し、種々の分析方法によって強度や構造の変化を解析し、新たな配合設計のための基礎資料とした。
- iv. 酵素剤製造のコスト低減を目的として、酵素を生産する微生物の改良に向けた準備に昨年度から着手している。本年度は、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。また、本事業で得られた酵素生産に関する成果をいかし事業化するための準備として、酵素剤の生産が可能と思われる国内企業を調査した。
- v. 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、茨城県、山梨県の試験圃場の計 5 地点 7 種類の作物で、新たに設計した配合のフィルムの実証試験を実施し、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すき込み、その次の作物栽培に影響がないことを確認した。また、生分解性マルチフィルムの利用実態把握と啓発のための農業関係者への聞き取り調査を継続し、生分解性マルチフィルムへの期待と課題が受け取れた。
- vi. 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と経済性評価を行うため、昨年度決定した調査の基本方針にのっとり、1 次データ、2 次データの収集を進めた。詳細な 1 次データの調査が必要な化学品製造、フィルム製造、作物裁

培については、関係先から直接情報を得た。これらの情報を用いてライフサイクルでの CO₂削減効果を試算し、今後検討すべき課題を明らかにした。

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 will try 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 will demonstrate that they are effective in vegetable production. Life cycle and economic evaluations will also be conducted to help promote this system.

In FY2020, the second year of the project, based on the results of the previous year, we strengthened the system by adding new co-implementers and carried out the following studies.

1. Development of new biodegradable and biomass plastic

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 fiscal 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 sufficient performance as a basic material for future development.

2. Process improvement for efficient polymer production

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 the next 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.

3. Development of technologies to support the control of biodegradation of biodegradable plastics

To obtain information for material development and to properly monitor the control of biodegradation by enzymatic treatment, we are developing a measurement method to reproducibly and rapidly evaluate the amount of CO₂ generated by the decomposition of materials buried in soil. In this fiscal year, we improved the semi-automatic measurement system that we developed last year, and measured the biodegradation of various materials, including new materials, to clarify the difference in the decomposition speed of the materials.

We also developed an analytical evaluation method using carbon stable isotope labeled compounds to understand the dynamics of the compounds in the soil during biodegradation. Samples incorporating the labeled compounds as part of the material were prepared for the next year's test.

Furthermore, we verified in the laboratory that the film of the recipe using the new material was decomposed by the enzyme. The samples obtained through the evaluation tests were analyzed for changes in strength and structure using various analytical methods, and the results were used as basic information for designing new recipes.

4. Collection of basic information related to the production of degradable plastic decomposing enzymes

In FY2019, we started to prepare for the improvement of enzyme-producing microorganisms to reduce the cost of enzymatic agent production. In this fiscal year, in order to select the genes involved in enzyme production, we created a group of strains in which each of the 100 or so candidate genes selected from a database of genes whose expression level changes under enzyme production conditions was disrupted.

To prepare for the start of a business utilizing the results of the enzyme production obtained in this project, we surveyed domestic companies that might be able to produce enzyme agents.

5. Preparation for the field trial of biodegradable mulching film system

As a preparatory step for demonstrating vegetable cultivation using a combination of films made of new materials and enzymatic treatment with agricultural workers, field tests were conducted at a test institute. This year, field trials of films with new recipes were conducted on seven different crops at a total of five test sites in Kanagawa, Ibaraki, and Yamanashi prefectures. In Kanagawa and Yamanashi prefectures, the biodegradable mulching film was crushed and embedded in the field after it was used for cultivation, and it was confirmed that the film had no effect on the cultivation of the following crop.

In addition, we continued to conduct interviews with people involved in agriculture to understand the actual use of biodegradable mulch film and to raise awareness of the issue, and received their expectations and issues regarding biodegradable mulching film.

6. Preparation of LCA and economic evaluation from film production to final disposal

To evaluate the LCA and economic efficiency of film from manufacturing to final disposal, we proceeded with the collection of primary and secondary data in accordance with the basic policy of the survey decided last year. For chemical manufacturing, film manufacturing, and crop cultivation, which require detailed primary data, information was obtained directly from the related parties. Using this information, we made a preliminary estimation of the lifecycle CO₂ reduction effect and clarified the issues to be considered in the next fiscal year and beyond.

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	12
第2章 新規生分解性プラスチックの分解制御	17
1. 検討の概要	17
2. 材料および手法	17
3. 結果および考察	24
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	31
1. 検討の概要	31
2. 材料および手法	31
3. 結果および考察	34
第4章 農地、作物栽培における生分解性マルチフィルム実証試験の準備	36
1. 検討の概要	36
2. 材料および手法	36
第5章 ライフサイクル検証・評価	43
1. 検討の概要	43
2. 材料および手法	49
3. 結果および考察	51
参考文献	55
【図表】	59

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に対して、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価格が高く選択肢も限られ、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(以下、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にされる用途や、プラスチックという素材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30%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 目的の性能を実現す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異なっていること、および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PE、polypropyleneなど汎用プラスチックを利用すること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、生分解性マルチ)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、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、経営にどのような効果があるか正しく経済的な判断を行うことが難しい。

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。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、製造中の種々加工の履歴、地域、農地の環境、使用する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、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、栽培の終了後にフィルムを破砕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。

また生分解の制御が十分でないために、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分解が進むため、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）と比較してより広い範囲の作物栽培に応用でき、かつ酵素剤での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昨年度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。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。

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

目標とする製品を確実に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。コストについ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で抑えることを目指す。分解性があることよって多品種生産とその在庫、短い在庫期間などでコストが押し上げられていることには、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 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、利用場面に問わず、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の計測法を、安定化かつ効率化するために半自動化を試みる。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を継続する。

この検討において、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想定し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を使用し、実際の利用および最終処理に近い条件での実証試験を加えた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、新規素材と酵素剤を組み合わせた技術の普及を目指し、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、情報を蓄積する。そのために、国内の多様な地域で、生分解性の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試験機関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、ライフサイクル評価(life cycle assessment 以下、LCA)および経済性に関わる評価を行う。

昨年度の予備検討の結果を踏まえ、本年度は農地を模した試験機関の圃場において、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、圃場の土壌表面へ展張し、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、フィルム用の配合の更なる改良、および来年度に予定している農業者での試験計画の基礎情報とする。また、農業者での試験に備え、昨年度実施した生分解性マルチを使用している農業者へのヒアリングの結果を解析する。

また LCA および経済性評価の初期段階として、昨年度、過去の種々の LCA の実例や経済性評価の手法を解析してまとめ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と、LCA の 1 次評価を実施する。

これらの検討において、試験圃場における評価と農業者への聞き取り調査に関わる部分を「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(以下、静岡県立大学)、および神奈川県農業技術センターに加え、本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用できる物性と価格を備えた素材と、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に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昨年度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、高耐久マルチフィルム用の配合の検討、およびフィルムの試作と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

昨年度は、まず現在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。市場で購入できる生分解性マルチのほとんどが、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(以下、PBSA)、polycaprolactam(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、例えば溶融温度帯における流動性と熱分解性、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。また、序章 2-3 で述べたように、生分解性マルチ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、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。これらの結果から、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。

本年度は新規素材 A について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ことを検討した。並行して、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。

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、昨年度中に少量、中量試作を行った。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 MCG Biochem Co., Ltd. (以下、PTTMCC) の商業生産設備に適用し、新規素材 A を生産できる可能性を確認した。

本年度は、昨年度に引き続いて PTTMCC の設備で適用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。

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、早速試験機関でマルチフィルムの素材としての評価を開始するため、昨年度中にフィルムに成形して評価を進めた。新規素材 A が生分解性マルチ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。

昨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と同じ配合

配合 b：市販の生分解性マルチ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。

本年度は、生分解性マルチ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。昨年度と本年度は、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ベースとして、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。昨年度の結果から、既存の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 4 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(第 2 章 3-2 参照、第 2 表)。2 年目に当たる本年度は、まず新規素材 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)でフィルムを作製し、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。

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

昨年度の結果を基に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 2 を三菱ケミカルアグリドリームインフレーション法試作機および生産用実用機(以下、実機)にて試験生産した。配合シリーズ 2 の試験生産は、生産時期による生産性の違いを確認するため、冬季として昨年度 2 月、および夏季として本年度 7 月の 2 回試みた。これらの試験生産を通じ、生産の安定性向上および低コスト化の方針を検討した。

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

新規素材 A は PBS をベースとしながら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、昨年度に引き続き、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。物性の改良とともに、このコスト削減目標に近づけるよう開発を進める予定である。

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。

3-2 新規素材の製造コスト低減の試み

本年度は、昨年度に引き続いて PTTMCC の設備での新規素材の生産に適用可能な種々のプロセス改良を継続した。加えて、抜本的な製造コストの低減を図るため、設備規模、原料の入手、運転経費、物流、安定生産などでコスト的に有利となる手段を検討した。その一つの策として、将来の新規素材のコストダウンを目的として Tunhe 社の採用を検討した。Tunhe 社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、より大規模なポリマー製造プラント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 社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、三菱ケミカル主導で製品仕様の調整を行えば、新規樹脂の製造コスト低減が可能と判断した。現在、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。原料調達や重合プロセスの効率化といった Tunhe 社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。

3-3 新規生分解性マルチフィルムの配合検討

序章 2-3 で述べたように、生分解性マルチの普及を進める上での最大の課題の一つ

は、環境などの影響で想定より早く分解してしまうこと、長期の展張が必要な作物の栽培に使用できないこと、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、既存の製品の耐久性が低いことに起因している。そこで本事業では、長期間の保管や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。昨年度、配合シリーズ 1 を用いた最初の検討により、新規素材 A を配合した配合 e が既存品に遜色のない耐久性を発揮することと、添加剤の効果を確認した。これらの結果から、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 をベースとした配合シリーズ 2 (e シリーズ) の e-0、1、2 の 3 種類の配合でフィルムを作製し、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、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)。次に、これまでの検討で得られた結果を基に、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新規配合として配合シリーズ 3 (R2 シリーズ) の設計を行い、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、第 3 章 2-2 の試験に提供した。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場品相当の生分解性マルチ配合

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、ただし配合シリーズ 2 の e-2 よりも新規素材 A の割合が多い

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、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、 $R2-1$ 、 $R2-2$ では長期耐久には分解が早いと考えられた。また、第 2 章 3-2 での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の協力も得て長期耐久生分解性マルチ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。現在、配合シリーズの生産性の確認と展張試験実施用のフィルム確保のため、三菱ケミカルアグリドリームの実機でフィルム成形試作を行っている。来年度は、試作したフィルムを用いて展張試験と各種評価を行い、実用性について明らかにする。

配合シリーズ 4 ($R3$ シリーズ)

配合 $R3-1$: $R2-5$ をベースに更に新規樹脂 A を増やした配合

配合 $R3-2$: $R3-1$ に PLA を加えて更に遅い分解を狙った配合

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

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

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

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。

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

昨年度末から本年度初頭にかけて、第 4 章 2-2 に試料を提供するため、また生産の安定性向上および低コスト化の方針を探るため、配合シリーズ 2 の試作を冬季、夏季

の2回行った。

さらに、来年度の各種実証試験に提供するため、マルチフィルムとしての性能を保持できる期間が展張後3~4か月程度の設計である配合シリーズ2(eシリーズ)をベースに、更に分解までの期間を延ばした設計の配合シリーズ4(R3シリーズ)の試作を、本年度2月に実施した。供試できるフィルムの獲得を最優先とし、現状のインフレーション成形設備で可能な範囲の調整を行い、フィルム成形を完了した。この際、成形難度の高い配合シリーズ4の成形に関する種々情報を収集した。この情報は、フィルム製造コスト低減の検討に活用した。

主に配合シリーズ2の2回の試作で得た情報から、生産の安定性向上および低コスト化の方針を検討した。冬季、夏季の両時期の試験生産とも、製膜直後の樹脂溶融安定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。経験的に、設定した配合では夏季よりも冬季は溶融安定が高い傾向があることを把握しているが、このような結果となったことから、配合シリーズ2を対照とした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、設備や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。このようにコスト低減には、製造プロセスの見直しや、それに伴う設備の仕様変更すなわち改造や能力増強も含め、最適な製造条件の探索が必要と判明したので、本年度実施が可能なこととして、まず配合シリーズ4(R3シリーズ)の試作時に、特に慎重に情報を収集した。本年度着手した設備仕様の改変を含めた製膜プロセスの最適化の検討は、来年度は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る。すなわち、配合、混練、押出、拡張(延伸)、冷却、巻取回収、事後処理など、一連のプロセスの抜本的見直しを行った後、費用対効果の検討を経て、設備仕様の確定とこれに係る投資額の見積作成までを来年度中の完了を目標として行う方針とした。

このプロセス改良により、仮に20%の加工コストを低減できたと仮定すると、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%低減、すなわち 1.15 にできれば、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。来年度は、この低コスト化の方針も念頭に配合設計を進める。

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くべからざる技術である。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半自動化、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の素材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。また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、新たな配合処方で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内での分解で生じる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6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、露天あるいは温室等の設備内の土壌中にすき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、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⁾。

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。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、昨年度から土壌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を設計の上、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チャンバー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の検討を開始した。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)内に土壌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赤外線吸収スペクトル検出器(CO₂ガスアナライザー EGM-5、PP Systems)でチャンバー内のCO₂を測定する装置を組み上げた(第7図)。この装置を用いて、チャンバーの密閉性の向上、チャンバー外の環境中のCO₂濃度の調整、検出データを処理するソフトウェアの改良などの種々調整を行い、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、測定ごとに人が介してチャンバーの位置に容器を配置する工程を自動化する装置の改良を開始した。

本年度はこの半自動計測システムについて、供試土壌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の土壌中での分解を、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を明らかにした。

2-1-2 土壌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。

この試験を行うために、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標識したもの、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、まず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。

2-2 複合化素材フィルムに対する酵素剤処理の効果の評価

昨年度同様、試作フィルムを実験室内で、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。フィルムの分解性の評価は、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、処理前後の重量変

化から算出した分解速度を指標として行った。供試した配合は、配合シリーズ 1、配合シリーズ 2、および配合シリーズ 3 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予定している。この試験では、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 10m 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、野菜収穫し、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。新たに開発した素材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検討が必要である。そこで、昨年度は、農研機構の試験圃場にて予備検討を行った。

本年度は第 1 章 3-3 で作成した配合シリーズ 1、2、3 の三つのシリーズ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)：フィルムを固定するために土壌で被覆する部分

評価方法は圃場に展張したときの展張性、展張後、昨年度に展張した配合シリーズ 1 は約 40 日間、本年度に展張した配合シリーズ 2 および 3 は約 60 日間観察した。なお、配合シリーズ 2 は第 1 章に記載した e-0、e-1、e-2 の黒、e-0、e-2 透明、および市販品 3 種をマルチャーという展張作業のための機械により展張し、また、配合シリーズ 3 は、第 1 章に記載した R2-1~R2-5 と、配合シリーズ 1 の配合 e および配合シリーズ 2 の e-0 と同じ配合の e-0_C の試作フィルムを、人手により展張した。(第 8 図)。その後、酵素剤を酵素剤処理区 iii に散布し、翌日の様子を観察した後、フィルムを土壌中に埋設した。これら一連の試験の間に、フィルムを解析するための試料を得た。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図にのっとり行った(第 3 表、第 9、10、11 図)。なお本試験では、展張過程でフィルム表面に一樣に光線や風雨の影響や酵素剤処理の影響を受けるようにすることで、フィルムの状態変化を詳細に観察するため、また試験期間中に分析用の試料を得るために、作物の植付けと栽培は行わなかった。

回収したフィルム試料の評価は、昨年度に引き続き分解の指標として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。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縦および横方向に引っ張り、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、フィルム全体をゲル浸透クロマトグラフィー（以下、GPC、低分子量領域 GPC）で解析し、フィルム表面をフーリエ変換赤外分光光度計（以下、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る。今回用い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。

z 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」条件でも分析を行った。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、溶液中の紫外線に吸光度を持つ物質の分析を行うことができる。今回の実験に用いたフィルムに、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た。

なお、本年度の結果を考察するための材料として、解析の基本的な考え方と昨年度配合シリーズ1を用いて解析を行った結果を示す。

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。そこで圃場展張後の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試みた。解析に用いた分析機器は、

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)、

示差走査熱量計(以下、DSC)

である。

i~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、圃場での評価で採取した試作フィルムの試料を観察した。FT-IR では、まず展張時に土に埋設した部分、次に展張後、最後に展張後酵素剤処理という経過を経るにしたがって、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を測定した場合は、単一の試料で複数の部位を測定した結果、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、展張前後で大き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、まず展張前のポリマー分子においては結晶構造 (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晶構造が見えない構造と、その下部にラメラ晶構造が観察された。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。昨年度用いた試料では、僅かであるが展張前に比べて展張後は分子量が低下した。低分子量領域の GPC 分析では、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る。

DSC では、試料の、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、今回用いた試料では、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。今回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表されていることを示唆している。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。試料の設定や分析方法の調整を

継続し、圃場試験の結果などを含め、総合的な情報の蓄積とその解析を検討していく必要がある。

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

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。この密閉法を応用して、昨年度は 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。すなわち、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、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 を測定する装置を組み上げた。このチャンバーは、チャンバー上部の空気圧駆動のアクチュエーターによって、遠隔操作で半自動的に開閉することができる。

本年度は、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 BioPBS、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 CO₂ 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 12 図)。その結果、5 種類の素材のうち BioPBS 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 13 図)。

これらの結果により、昨年度開発した半自動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。現在、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ている。

来年度はこの装置改良を終え、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。

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 14 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 14 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 14 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。

本年度は、昨年度設計・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う。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、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。

来年度は、これら実際に標識を施したポリマーの土壌中での分解に伴う CO_2 を経時的に測定する予定である。

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、本年度第1章3-3で試作した配合シリーズ2および3の新規素材利用のフィルムへの酵素剤の作用を検証した。これら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各配合間で比較を行った(第2表)。比較のため昨年度実施した配合シリーズ1の配合で試作したフィルムの酵素剤処理の結果についても同様に、酵素分解速度を算出した。その結果、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の製造時に対照用として試作したe-0_C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、分解されやすい順番に、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)のフィルムの場合は、分解されやすい順番に、e-0_C(対照)、R2-2、R2-1、R2-3、R2-5、R2-4であった。

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のフィルム埋設後回収試料の評価結果

昨年度に展張した配合シリーズ1のフィルムを長期にわたって埋設後、本年度に掘り起こし、試料の回収を行ったので、その評価結果と合わせて、配合シリーズ1の未展張、展張、埋設、および初めから埋設したフィルムの変化を記述した。

3-3-1(1) 回収試料の強度試験

引張強度試験の結果、展張処理によりほとんどのフィルムの「引張力」(破断するまでの強度)が増大したが、配合eのフィルムは変化が少なかった(第15図、第4表)。一方、「柔軟性」すなわち破断するまで伸びた長さに関しては、配合cフィルム以外の試料では、いずれも減少した。展張後にフィルムを埋設すると、ほとんどの試料が、展張処理により増加した分を含めて「引張力」が減少した。埋設期間が長くなると更に

「引張力」の減少が進み、ほとんどのフィルムの「引張力」が、展張開始時から埋設していた試料と近い値を示した。この埋設処理による変化は「柔軟性」の変化でも同様であった。

3-3-1 (2) 回収試料の機器分析

GPC 通常分析の結果、最初から埋設したフィルムや、展張後 6 か月埋設したフィルムの Mn は、RI 検出では大きく増大するのに対して UV 検出では減少していた(第 16 図、第 5 表)。Mn は低分子量の分子数に影響を受けるため、分子量分布のグラフから算出した低分子量部分(Log 分子量 3.5 未満)の割合の増減からも裏付けられた。供試したフィルムの中で、配合 e は展張処理、埋設処理においても変化が少ない傾向があった(第 17 図、第 6 表)。

GPC 低分子量領域分析の RI 検出、UV 検出結果の分子量分布をグラフに示した(第 18 図 1~4)。これらの結果から、未使用時(展張時)に含まれていた Log 3.5 未満の領域に検出される複数の分子種が展張処理によって消失することが、RI 検出、UV 検出両方において確認できた。また UV 検出では、配合 a、配合 e のみ Log 2.0 未満の分子が確認され各処理の過程が進行するにつれ増えること、配合 d においては Log 3.0~3.5 の分子が展張処理により増大すること、長期埋設により配合 a、配合 e で Log 3.0~3.5 の分子が増えること等、配合により異なった分子量分布を示した。これは配合の差により各処理により起こる分解過程で生じる分子種が異なることを示していると考えられた。

FT-IR 分析ではその分子鎖の検出ピーク波数から分類した芳香族ポリエステル、若しくは脂肪族ポリエステルそれぞれのピークの増減を確認した(第 7 表)。配合 a、配合 e のフィルムは、埋設初期で芳香族ポリエステルが増大するのに対し、配合 c、配合 d のフィルムは変化がなかった。しかし、その後継続した埋設によって全てのフィルムで減少傾向であった。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。

3-3-2 配合シリーズ 2 のフィルムの評価結果

3-3-2 (1) 展張性の評価

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。展張期間中の約 20 日経過時において破断が始まり、透明フィルム 2 種は完全に畝から剥離してしまった。剥離したフィルムの強度を測定すると特にフィルムの伸びの低下が大きいことが確認された。フィルムの破損は、本年度は初夏において強風を伴った台風の到来の

頻度が多かったことも影響していると考えられたが、比較のために展張した 3 種類の市販フィルムのうち、2 種類は破損せず、1 種類は破損した。これらのことから今回試作した配合シリーズ 2 のフィルムは、本年度の試験では圃場の被覆機能という面で基準を満たしているものはなかった。

3-3-2(2) フィルム試料の強度評価

配合シリーズ 2 のフィルムは、いずれも展張期間中に破断したが、黒着色フィルムは、展張期間終了時に圃場に残っているフィルムを回収することができた(第 19 図、第 8 表)。しかし全てのフィルムで、強度が大きく下がっていた。特に「柔軟性」は展張開始時の半分以下の数値を示した。先に述べたように、展張している過程で、台風の強風とあいまって破断を起こしたのは、柔軟性を失っていたことが原因の一つであると考えられた。また、埋設処理によって、全てのフィルムで強度の低下が示された。このうち、展張処理を行った後に埋設処理を行った場合は展張処理での強度劣化の程度が大きい場合はその後の埋設処理で更に強度が下がる「上乗せ効果」は計測できなかった。これは、強度の変化が測定限界以下であった可能性も考えられる。

3-3-2(3) 回収試料の機器分析

通常の GPC 分析では、約 3 か月埋設処理したフィルムは、最初から埋設した場合も展張してから埋設した場合も、RI で検出された Mn 値が増大した(第 20、21 図、第 9、10 表)。一方、展張処理後のフィルムの Mn 値は、RI 検出結果では e-2 以外のフィルムで 2 倍に増えているが、UV 検出では大きく下がった。また、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していた。この結果から、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乗せして増えていた。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。これらの結果は、配合シリーズ 2 のフィルムの分子量に対して、展張処理が与える影響が大きいことを示していると考えられた。

GPC 低分子量領域分析 RI 検出の結果では、e-0 と e-1 のフィルムは展張処理によって Log 2.5~3.5 の比較的小さい分子が顕著に増えるのに対し、e-2 フィルムは比較的增加が少なかった(第 22 図-1、2)。一方、展張処理後に埋設すると e-0、e-1、e-2 いずれのフィルムも Log 3.0 以下の分子が大きく減少し、互いに類似した分子量分布形状を示した。また展張開始時に埋設した場合、e-1 フィルムは展張処理と類似した様子で比較的小さい分子が増えるのに対し、e-0 フィルムではむしろ比較的小さい分子が

減少した。e-2 フィルムは余り変化が見られなかった。UV 検出時には各フィルム間に差は生じず、いずれのフィルムも各処理が進むにつれ Log 3.5 以下の分子が増えた。

FT-IR 分析では全てのフィルムで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(第 11 表)。

3-3-3 配合シリーズ 3 のフィルムの評価結果

3-3-3(1) フィルム試料の強度評価

配合シリーズ 3 の多くのフィルムが展張処理により引張強度や柔軟性が下がったが、「柔軟性」では R2-2 と R2-5 が、「引張力」では R2-5 が強度を維持してした(第 23 図-1、2、第 12 表-1、2)。試験開始時から埋設処理をした全てのフィルムの強度が下がった。さらに、展張処理後に 3 か月間埋設処理した試料では、劣化が激しく土壌中から試料を回収することが難しい状態であったが、目視でフィルム配合ごとの違いが観察できた(第 24 図)。また、展張開始時から埋設処理した試料においても回収は行えたが、劣化が激しく強度測定機器の検出限界以下の値となる試料が多く存在した。その割合が特に R2-1、R2-2 で多かった。配合シリーズ 3 のフィルムは、未使用時の強度が様々なものに関わらず、展張開始時から埋設した試料の強度は一定の値に集束する傾向が認められた。特に「柔軟性」は R2-5 以外のフィルムでは、縦方向、横方向とも-0.6~-0.7 前後に下がっていた。対照として試作した e-0_C は昨年度に試作した配合シリーズ 1 の配合 e と同じ配合かつ試作機で作製されており、展張処理や埋設処理を経た強度劣化の挙動は昨年度に展張試験を行った配合 e の結果と同様であるが、その劣化程度は本年度の e-0_C のフィルムの方が大きかった。これは昨年度の試験に比べて本年度は、展張期間が 15 日ほど長かったこと、試験開始時期が 3 か月ほど早く夏季の高温多湿の時期を含んでおり、展張期間中の平均気温が高かったこと等が要因となったと考えられる。

3-3-3(2) 回収試料の機器分析

GPC 分析の結果から、RI 検出における Mn 値は、e-0_C 以外のフィルムでは、埋設処理により大きく下がった。UV 検出における Mn 値は、R2-3、R2-4、e-0_C のフィルムでは、展張後に埋設すると増大する一方、他のフィルムは値が下がった。その他の分子量値については、展張処理によって R2-5 では Mz が増大したり R2-2、R2-3、R2-4 では Mp が減少したり等、フィルムの種類ごとに異なる変動を示しており、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。低分子量部分の割合を算出すると、RI 検出では、R2-1 以外のフィルムは埋設処理によりほとんど確認できないほどま

で減少した。一方、UV 検出では展張処理で全てのフィルムにて低分子量部分の割合が増大するものの、展張後に埋設すると R2-1 と R2-2 以外は更なる増大は認められなかった(第 25、26 図、第 13、14 表)。

GPC 低分子量領域分析結果からは、展張処理で全ての配合で Log 2.5 の比較的小さい分子が減少していたが、埋設処理では R2-1、R2-2、R2-5 のみ Log 3.0~Log 3.5 の分子種が増えた(第 27 図-1、2)。その中で R2-5 のフィルムのみ、埋設処理前の展張処理の有無により埋設処理で生じる分子が異なっていた。また、UV 検出では R2-1、R2-5、e-0_C のフィルムで展張時からの埋設処理により Log 2.8、Log 3.0 の特異的な大きな二つのピークが確認された。

FT-IR 分析では、全てのフィルムで展張処理により芳香族ポリエステル割合が大きく減少していた(第 15 表)。

本年度の検討で、昨年度に展張を開始した配合シリーズ 1 のフィルムと、本年度に展張した配合シリーズ 2 および 3 の、合わせて 3 系統のフィルムに関して圃場への展張、埋設後に回収したフィルム試料の強度、分子量、および FT-IR の分析を行った。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るように見受けられた。また、埋設処理による影響も、埋設前に展張を行うか、最初から埋設するかにより、変化が異なる場合が確認できた。埋設処理後に分解が進んでいく過程は、農業生産で栽培の後に生分解性マルチを土壌にすき込んだ後の状態に当たり、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。令和 3 年 2 月現在、配合シリーズ 2、3 を展張後に 180 日埋設した試料の回収を終えた。今後、これらの試料の評価結果を得ることで生分解性素材の配合と生分解という現象に関する考察を進めたい。

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普及させていくためには、まず酵素剤を安価かつ大量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、微生物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ために、本事業の実施期間中に酵素の生産性を大きく変え得る遺伝子を見付け出し、この遺伝子の改変を試みる。そこで昨年度は、酵素生産微生物である *P. antarctica* の染色体上にコードされている遺伝子情報から該当遺伝子の候補を選び出し、更に絞り込みを行った。本年度は目的の遺伝子を特定するための準備として、これらの遺伝子候補を個々に破壊した菌株セットの作製を完成させる。得られた菌株群を用い、本年度から来年度にかけて、遺伝子が破壊されて酵素を作らなくなるという表現型を示す菌株の探索を順次行い、求めている遺伝子を見付け出す。最終的に *P. antarctica* の該当遺伝子を改変することにより、酵素生産性が増加するかどうかを明らかにする。

また、酵素生産の事業化を前提に、酵素の供給体制の整備を検討する基礎情報を得るため、当該酵素の生産が可能と推定される国内の企業について調査する。

2. 材料および手法

検討は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おり、その酵素を生産する微生物の分離が国内外の土壌で試みられてきたものの、難航していた。農研機構(実施当時は独立行政法人農業環境技術研究所、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)中のクチン(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て、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、生分解性マルチに使われる PBS、PBSA、PLA などに対し広く分解活性を示すことを明らかにした¹³⁾。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¹²⁾。

酵素剤としての実用場面を想定し、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、xylose 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。ジャー規模の培養装置を用いて、xylose 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¹⁴⁾。この培養液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。このタンパク質の遺伝子のプロモーター部位を利用した *P. antarctica* の遺伝子組み換えにより、更に PaE の生産量を増加させる方法も開発している^{15、16)}。

本事業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¹³⁾。*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い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¹⁷⁾。この仕組みを利用し、後で述べる遺伝子破壊株セット作成に使用する宿主には、*P. antarctica* の *URA3* 遺伝子破壊株を用いた。

2-1-2 候補遺伝子群の抽出

昨年度は、酵素生産菌の全ゲノム DNA 配列の解読を行い、約 6,800 個の遺伝子と思われる DNA 配列群の整理を行った。また、フラスコ内で、炭素源に glucose を用いた培地と xylose 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た結果から遺伝子の位置を確認し、全ゲノム DNA 配列リストと照合しつつ、100 個以上の候補遺伝子のリストを作製した。

これら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、本事業にて最新の配列解析手法を用いて取得した。また、一部のデータについては過去に取得したものを活用した。すなわち、酵素生産菌の染色体の全 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課題 25017A(平成 25～27 年度)において、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)にて解読した結果も併せて用いた。これらの遺伝子配列から候補遺伝子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、2-1-2 にてリスト化した候補遺伝子を破壊した株の作出を効率良く進めるために、ゲノム編集技術を用いることとした。ゲノム編集では、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、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、PCR(polymerase chain reaction)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、リストに挙げ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 の生産性に関わるかどうかを判定した。この解析は、エマルジョン化した PBSA と xylose を含む培地へ菌株のコロニーを移植して行った。PaE 生産に関わる遺伝子が破壊されていない株は PaE を生産してコロニーの周囲の PBSA を分解して透明の領域を作るのに対して、当該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。このシステムが想定どおり稼働することを、*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事前に確かめた¹⁸⁾。この方法を用いて、本年度中に、候補遺伝子を順次破壊し、xylose 培地上で酵素を作らないという表現型を示す遺伝子破壊株の探索を進める。

2-2 酵素生産事業者の調査

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商業生産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、14)}。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、本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。

3. 結果および考察

3-1 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上に生育したコロニーへの *URA3* 遺伝子の断片の挿入は、PCR 法で *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 28 図 a)。また、標的遺伝子の欠失の確認は、標的遺伝子上流と下流の遺伝子断片を PCR 法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 28 図 b)。この方法で、遺伝子破壊株セット、すなわちリストに挙げた 100 個以上の遺伝子それぞれについて、1 遺伝子当たり 6 個以上の遺伝子破壊株のクローン群を得て、xylose とエマルジョン化 PBSA を含む培地上で、PaE 活性の調査を実施している(第 29 図)。来年度は候補遺伝子の選定を進め、目的遺伝子を特定する試みを継続する。

3-2 酵素生産事業者の調査

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、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、国内には数リットルから数千キロリットルに至る様々な容量、形式の培養装置が存在する。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・生産一貫の受注が可能な企業も現れている。本年度は、バイオ関係の研究や事業を通じて得ら

れる情報から、*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思われる企業を選出した。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)の11の企業は、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16表)。今後、これら候補を中心として、来年度に酵素剤の試作を委託する企業を探索、選定を行う予定である。

第4章 農地、作物栽培における生分解性マルチフィルム実証試験の準備

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、農業者にとって有効であることを評価する実証試験の準備を行う。昨年度神奈川県内の農業者、農業関係法人等を対象に実施した、生分解性マルチの利用状況の把握および課題抽出のためのアンケート調査の結果を集計および解析する。また、農業者の生産圃場での実証試験に備えて、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において、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行い、情報を収集、蓄積する。栽培品目は現時点で生分解性マルチの施用が望ましいと思われる各地の代表的な作物、作型を反映できるように各試験機関が選択した。また、促成と抑制、標高の高低、厳寒期を越す栽培、施設栽培など、多様な栽培条件をそろえた。神奈川県および山梨県では、生分解性マルチを栽培で使用後に土壌にすき込み、次作の作物栽培の様子も観察した。

2. 材料および手法

検討は二つの項目、すなわち農業者等へのアンケート調査、および試作フィルムを供試した各種野菜の栽培試験を行った。

2-1 農業者等へのアンケート調査

神奈川県内の12の農協を対象に、廃プラスチックの処理、生分解性マルチの導入状況およびその課題に関するアンケート調査を実施した。なお、アンケート調査は、生分解性マルチの名称を“生分解性プラスチックマルチフィルム(略称は生プラマルチ)”として実施した。

2-2 新規素材生プラマルチを供試した野菜の栽培試験

2-2-1 神奈川県

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配合シリーズ2の試作フィルム e-0(黒)および e-1(黒)を展張し、令和2年4月22日にエダマメを畝間180cm、株間30cm、条間40cm(2条)で播種した。10a当たり施肥量は、土

壤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 S666 号 66.7kg、粒状過石 28.6kg を施用し、成分量で N:P205:K20=15:10:15kg とした。7 月 1 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 13 日に酵素剤 (PaE) をフィルム表面に散布した。分解程度を調査するため、7 月 14 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 に切断して市販の PE 製水切りネットに入れ、8 月 11 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。同様に試作フィルム e-0(黒)および e-1(黒)を展開し、令和 2 年 9 月 16 日にダイコンを畝間 140cm、株間 27cm、条間 45cm(2 条)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:P205:K20=15:15:15kg とした。11 月 24 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 14 日に酵素剤をフィルム表面に散布した。また、栽培に供試した試作フィルムの一部を 10cm×10cm に切断して市販の PE 製水切りネットに入れ、12 月 22 日にダイコン圃場の地下 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。同様に試作フィルム e-0(黒)および e-1(黒)を展開し、令和 2 年 9 月 24 日にタマネギを 200 穴セルトレイに播種し、11 月 26 日に畝間 180cm、株間 15cm、条間 15cm(5 条)で定植し、現在生育中である。

神奈川県農業技術センター(神奈川県三浦市)において、令和 2 年 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(e-0 透明、e-2 透明、e-0 黒、e-2 黒)等を露地圃場に展開し、トンネルを被覆して 3 月 24 日に定植した。トンネルは 5 月 27 日に除去した。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。栽植距離は通常栽培が畝間 500cm(ベッド幅 1m、つる先 4m)、株間 50cm、麦マルチ栽培は畝間 450cm(ベッド幅 1m、つる先 3.5m)、株間 50cm とした。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(麦マルチ栽培のつる先麦マルチは除く)。10a 当たりの成分量は通常栽培では基肥が N:P205:K20=8:27:15kg、追肥が N:P205:K20=10:0:10kg、合計 N:P205:K20=18:27:25kg とした。なお、麦マルチ栽培のつる先麦マルチは追肥を行わなかったため、基肥が N:P205:K20=8:27:15kg、追肥無し、合計 N:P205:K20=8:27:15kg とした。

生育調査は 4 月 17 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

1000℃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 13 日に麦マルチ栽培圃場から試作フィルムのサンプリングを行った。採取したマルチサンプルは農研機構へ送付して 7 月 29 日に室内で酵素剤 (PaE) 処理を実施し、翌日に回収後、引張強度および突き刺し強度による強度評価を行った。

2-2-2 山梨県

2-2-2(1) 低標高地促成作スイートコーンによる栽培実証

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、e-1 フィルム)ほかを展張した。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 2 年 3 月 2 日にスイートコーン(品種はゴールドラッシュ)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 10 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 15 日に酵素剤をフィルム表面に散布した。6 月 17 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すき込み処理し、後作に水稻を栽培して生育への影響を観察した。

2-2-2(2) 高標高地露地作スイートコーンによる栽培実証

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)の露地圃場に新規素材を配合した試作フィルム(e-0、e-1 フィルム)ほかを展張した。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 2 年 6 月 4 日にスイートコーン(品種は恵味ゴールド)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 25 日に収穫調査を行った。試験区の全ての収穫が終了した 9 月 10 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劣化程度を調査するため、9 月 11 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 に供試した。

2-2-3 茨城県

茨城県農業総合センターは、タマネギおよびイチゴ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の適用性について調査した。

2-2-3(1) タマネギ栽培試験の概要

長期越冬型のタマネギ栽培において、マルチフィルムは、慣行ポリエチレン製マルチ、石油由来既存生分解性マルチ(ビオフィレックス普通タイプ)、配合シリーズ 2 のバイオマス由来新規生分解性 e-0、e-2 配合の試作マルチの 4 種類を用い、各 3 反復で栽培試験を行った。耕種概要は、タマネギ(品種：七宝甘 70)を 288 穴セルトレイに播種(令和 2 年 9 月 17 日)し、11 月 18 日にマルチフィルムを展張した後、同日に定植した。現在栽培中であり収穫は 5 月頃を予定している。生育調査は、生葉数、葉長、葉鞘径について、2 月中旬から実施予定である。

2-2-3(2) イチゴ栽培試験の概要(施設栽培)

ビニールハウスを用いたイチゴの施設栽培において、マルチフィルムは、慣行ポリエチレン製マルチ、石油由来既存生分解性マルチ(ビオフィレックス普通タイプ)、バイオマス由来新規生分解性 e-0 マルチの 3 種類を用い、各 3 反復で栽培試験を行った。耕種概要は、イチゴ(品種：いばらキッス)をセンター内ハウスに定植(令和 2 年 9 月 24 日)し、10 月 22 日にマルチフィルムを展張した。収穫は、12 月 17 日に開始し、現在栽培を継続中である。収量調査は収穫開始時(12 月 17 日)から週に 2 回行った。生育調査は、第三葉柄長、第三葉長について、10 月から月に 1 回実施し、4 月に終了予定である。

マルチフィルムに対する酵素剤の散布は、両試験栽培終了後に実施する。また、酵素処理後の分解度合いの調査は、散布後 1 日、3 日、7 日後のフィルムをサンプリングし強度試験を実施する予定である。

3. 結果および考察

3-1 農業者等へのアンケート調査

神奈川県内の 12 農協にアンケート調査を実施し、12 農協全てから回答があった。県内 12 農協において廃プラ回収業務を実施しており、回収頻度は 1~2 回/年が 9 割を超えていた(第 30 図)。約 6 割は廃プラ回収時にマルチフィルムとその他プラスチックに分別しており、大半の農協で農業者が農協に搬入し処分業者が引取りに来る回収方法を採用していた。マルチ回収量は 2016 年と比較して「増加」および「減少」の回答が同数であるものの、処理金額については増加傾向にあった。マルチの回収および処理の課題でも「処理金額が高くなった」と回答する割合が高く、次いで「業者へ引き渡すまでの保管場所の不足」が挙げられた(第 31 図)。廃プラ処理を取り巻く環境が変化する

中、8割を超える農協が廃プラ対策の必要性を感じており、その対策として生分解性マルチの普及は有効な方法であると回答していた(第32図)。生分解性マルチを普及する上での課題として10農協が「価格が高い」と回答し、次いで「保管期間が短い」との回答が多かった(第33図)。省力的栽培方法として生分解性マルチと酵素剤を組み合わせた方法が検討される中で、現地に普及させるために必要な情報として、「生プラマルチの基本特性」「後作への影響」が多かった(第34図)。

3-2 新規素材生プラマルチを供試した野菜の栽培試験

3-2-1 神奈川県

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35図)。生育初期(4月24日~30日)の地温は、農ポリ、試作フィルム e-1、試作フィルム e-0 の順に高い傾向であった(第36図)。7月1日収穫時の可販収量は、試作フィルム e-0(黒)、e-1(黒)共に農ポリマルチと同等であった(第17表)。エダマメ収穫後から酵素剤処理までの暴風雨により、試作フィルム e-0 の一部が剥がされた(第37図)。

新規素材を配合した試作フィルムを供試したダイコンの生育は順調で、栽培途中で供試フィルムが剥がれることもなかった(第38図)。生育初期(9月30日~10月6日)の地温は、農ポリ、試作フィルム e-0、試作フィルム e-1 の順に高い傾向であった(第39図)。11月24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)、e-1(黒)共に農ポリマルチと同等であった(第40図、第18表)。

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慣行マルチ>e-0>e-2 となった(第41図、第19表)。また、麦マルチ栽培の生育は慣行マルチ>e-0 透明=e-2 透明>e-0 黒=e-2 黒となった(第41図、第19表)。生育初期における地温は慣行マルチが最も高く、次いで e-0 透明、e-2 透明となり、e-0 黒、e-2 黒は他のマルチと比べて地温がやや低かった(第42図)。生育初期の差はその後の生育で維持されるものの、気温上昇とともに順調に生育し、開花日や収穫日に大きな違いは見られなかった。通常栽培では収量性や果実品質に差は見られず、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3か月程度で亀裂や破れが生じ始め、黒色マルチより透明マルチが強度劣化は早かった(第43図)。また、栽培期間中に試作フィルムは強度を維持できなかったが、慣行マルチは亀裂や破れは生じなかった(第43図)。

3-2-2 山梨県

3-2-2(1) 低標高地促成作スイートコーンによる栽培実証

新規素材を配合した試作フィルム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、新規素材を含む e-0 および e-1 で、PE 製マルチフィルムおよび市販生プラマルチと同等となった(第 21 表)。新規素材を含む e-0、e-1 では先端不稔がやや目立ち、e-1 フィルムでは収穫適期が PE 製マルチフィルムよりも 2 日遅れた(第 21 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 44 図)。e-1 フィルムは植穴付近で一部裂けた箇所が見られたが、被覆効果はおおむね保たれた。

フィルムすき込み後の圃場で、後作の水稻は順調に生育し、フィルムすき込みによる生育への悪影響は観察されなかった。

3-2-2(2) 高標高地露地作スイートコーンによる栽培実証

新規素材を配合した試作フィルム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および品質は、新規素材を含む e-0 および e-1 で、PE 製マルチフィルムおよび市販生プラマルチと同等となった(第 22 表)。e-0 フィルム、e-1 フィルム共に、栽培終了時までに植え穴付近や地際部で、ややフィルムの分解が始まったが、被覆効果は最後までおおむね維持された(第 45 図)。

測定機械による強度測定の結果、展張後の試作フィルムは、展張前と比較して伸縮性が大きく低下していることが示された(第 46 図)。

3-2-3 茨城県

茨城県農業総合センターで実施した栽培試験は、タマネギ栽培およびイチゴ栽培共に栽培途中である。ここではビニールハウス施設内でのイチゴ栽培試験における 1 月末までの結果を報告する。

イチゴの収量に関して令和 2 年 2 月時点の結果、および各マルチを被覆した地温の日変化を図表にまとめた(第 47 図、第 23 表)。

12 月から 1 月までの収量に関して、慣行ポリエチレン製マルチが 1,003kg/10a に対し、石油由来生分解マルチが 1,006kg/10a であり、バイオマス由来新規生分解性 e-0 マルチの収量がやや少なかったが、3 マルチとも統計的に有意な差は見られなかった。

厳寒期(12 月～1 月)の平均地温の日変化に関して、慣行ポリエチレン製マルチは最高地温が 17 時から 19 時に 16.1℃、最低地温が 9 時から 10 時に 12.7℃、と供試マルチの中で最も地温が高く推移した。石油由来既存生分解性マルチは最高地温が 18 時か

ら 20 時に 14.1℃、最低地温が 9 時から 11 時に 12.3℃と最も低く推移した。バイオマス由来新規生分解性 e-0 マルチは最高地温が 17 時から 18 時に 15.7℃、最低地温が 9 時に 12.3℃で慣行ポリエチレン製マルチよりもやや低い温度で推移した。

地温の変化に関して慣行ポリエチレン製マルチを標準とすると、石油由来既存生分解性マルチは 12 時からゆっくり上昇を始め、21 時からゆっくり下がり始める。一方バイオマス由来新規生分解性 e-0 マルチは日光が当たり始めた 10 時頃から急激に上昇し、日没後いち早く低下する。この地温の変化はフィルムの日光の透過性に関する可能性が考えられる。引き続き調査を行い、データを収集する。

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使用して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。

昨年度は、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製を評価し、生分解性との影響を比較していた。LDPE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)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；

三つの事例とも、LDPE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、LDPE製は生分解性マルチの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、生分解性マルチを製造企業の情報から収集した^{19、20、21、22}。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入れることとした。

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^{23、24}。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^{25、26}。事例Aでは、生分解性マルチの土壌分解について、生分解性マルチの規格であるEU17033の規格を想定していた。事例Bでは、LDPE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な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は、LDPE 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、LDPE 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 LDPE 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 LDPE 製マルチフィルムは、他の二つの事例のものと重量、

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 LDPE 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、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 LDPE 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、評価対象の県において標準的な農業経営を想定し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²⁷⁾。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」²⁸⁾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²⁹⁾。上述した農業経営指標のサンプルのデータの一つを使って、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の環境性と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、来年度の実証試験におけるLCAおよび経済評価への適用を検討する。

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48図)。生分解性マルチ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(以下、ポリマルチ)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PTT MCC Biochem社(タイ、バンコク)、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社筑波(茨城県牛久市)にて収集した。

2-2-2 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に市販の生分解性マルチおよびポリマルチを展張し、同じ作物を同じ条件での栽培を依頼し、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、人員数を調査する。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24表)。

マルチフィルムに関連する作業のうち、収穫後のポリマルチの剥ぎ取り回収作業と生分解マルチの土壌すき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49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、評価の対象としなかった。第25表にLCAおよび経済性評価用調査実施概要を示す(第25表)。

2-2-3 ポリマルチの処分

農業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^{脚注1}。ポリマルチの処分は、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、ポリマルチ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 v3^{脚注2}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IDEA^{脚注3}を使用した(第25表)。また、生分解性マルチ製造の原料のうち、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。

¹ 「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

² 「ecoinvent v3」, ecoinvent, Switzerland, <https://www.ecoinvent.org/database/database.html> (2021年2月参照)

³ 「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)

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 および CO₂ 以外の温室効果ガスとし、バイオマス起源の CO₂ は評価に含めないこととした。全温室効果ガスのうちエネルギー起源 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 で代替する。

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。

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 25 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。生分解マルチは、配合の異なる 2 種類を対象とした。共に、ポリマルチに比べ、重量が 3 割程度大きくなった(第 26 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のエネルギー起源 CO₂ がそれぞれ 10.30、10.31kg-CO_{2eq}/100m²、ポリマルチが 4.39kg-CO_{2eq}/100m²、非エネルギー起源 CO₂ は生分解性マルチがそれぞれ -0.13、-0.54kg-CO_{2eq}/100m²、ポリマルチが 0.45kg-CO_{2eq}/100m² となった(第 50 図)。この分析条件では、生分解性マルチのエネルギー起源 CO₂ がポリマルチの 2.35 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。一方、生分解マルチ非エネルギー起源 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

山梨県の農業者にスイートコーン(トウモロコシ)およびブロッコリーの生産に際して協力いただき、農業生産調査のフォアグラウンドデータを収集した(第 49、50 図、第 27 表)。生分解マルチとポリマルチの使用で収穫量に差は見られなかった。また作物種により、マルチフィルムの被覆面積は異なっていた。本年度の報告では、機能単位をマルチフィルム面積としているため、被覆面積の小さい栽培形態では、LCA 評価全体

に占めるマルチフィルムの影響は小さくなる。

LCA 用のフォアグラウンドデータを収集できた 2 例について、インベントリ分析を行った(第 28 表)。生分解性マルチとポリマルチの差は、使用後のマルチフィルムの回収以外の投入量では見られず、エネルギー起源 CO₂ は共に 47.3~94.5kg-CO_{2eq}/100m²、非エネルギー起源 CO₂ は 3.6~16.8 となった。マルチフィルム回収には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。マルチフィルム回収では、他に回収後の輸送を加味している。この結果、エネルギー起源 CO₂ は 0.2~0.4kg-CO_{2eq}/100m²、非エネルギー起源 CO₂ は 0.1 となった(第 28 表)。

本年度の調査では、使用時における生分解性マルチとポリマルチの差は回収の有無だけであったが、作物によっては収穫後のすき込みの必要のないもの、作物残渣と生分解性マルチを共にすき込む際に破片をより微小化するために、生分解性マルチを使用しない場合に比べてすき込み作業が多く必要な場合等、生分解性マルチ使用に起因した生産活動へ影響を及ぼす可能性がある。また、ポリマルチの回収についても、生分解性マルチの場合必要のない作物残渣の撤去作業や、天候による圃場の土壌水分の違いにより回収作業の負荷が変動する可能性がある。今後は、標準となる作型に沿った典型的な作業の工程を軸に据えて、環境要因やそれに伴って影響を受ける作物の生長具合、土壌の状態の違いによる作業の変動を反映した、幅を持った LCA 評価をしておく必要がある。

3-3 回収ポリマルチ処分のライフサイクルインベントリ分析

回収後のポリマルチについて、本年度の調査対象圃場のある山梨県、茨城県それぞれの農業用廃プラスチック処理を管轄する以下の事業所に回収マルチ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

この調査より、各地域の回収マルチの処分について処分フロー(第 51 図-1、2)を想定し、3-2 でフォアグラウンドデータを収集した山梨県の事例を想定したインベントリ分析を行った(第 52 図)。

回収マルチフィルムがマテリアルリサイクル^{脚注 4}された場合、エネルギー起源の GHG 排出量は 0.21kg-CO_{2eq}/100m²、非エネルギー起源 CO₂ は 0.57kg-CO_{2eq}/100m²となった(第 52 図)。

今回の山梨県農業用廃プラスチック処理センターへの聞き取り調査では、分別回収

されたりサイクル可能なポリマルチの処分法を想定したが、同センターのホームページやパンフレット上には、農業廃プラスチックの分別回収について詳細に記載されており、この情報からはマルチフィルムはリサイクルされない廃プラスチックとして分別することとなっている。作物栽培に使用後のマルチフィルムには、土壌や水分、作物残渣が付着し、時にはフィルムの重量を40%以上増加させてしまうこともある。一般的に汚れのある廃プラスチックは再生素材の品質低下防止のため、マテリアルリサイクルのフローからは取り除かれる傾向にあり、マルチフィルムの廃棄処理に関しては、より詳細な調査が必要と思われる。

3-4 ライフサイクルインベントリ分析結果の統合

3-1 から 3-3 の結果から、生分解性マルチおよびポリマルチのライフサイクルインベントリ分析結果をまとめた(第 29 表)。2 種の生分解性マルチは圃場にすき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 58~105kg-CO₂、非エネルギー起源 CO₂ は 21~27kg-CO_{2eq} となった。これに対しポリマルチ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 52~100kg-CO₂、非エネルギー起源 CO₂ は 18~23kg-CO_{2eq} となった(第 29 表)。これは、ポリマルチを生分解マルチで代替することにより、エネルギー起源 CO₂ で 10%、非エネルギー起源 CO₂ は 13~15%ほど増加することを意味する。この増加の一因として、面積当たりの重量がポリマルチに比べ生分解マルチが 3 割ほど大きいことが指摘される。ライフサイクルのステージ別に見ると生分解マルチの原材料調達、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、あるいは各工程の操作を見直す、加工しやすく素材を改良するなど、製造プロセスの効率化を図る、さらには、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

生分解性マルチおよびポリマルチを使用した農業生産について、LCA の対象とした 2 例の農業生産調査表による調査に基づき、肥料、農薬、資材、燃料等の経費、作業時間と人員数を整理した(第 30 表)。農業生産調査表による調査で得られない情報については、圃場のある地域の農業委員会等の資料を参照した。本年度は、生分解性マルチの価

格については、新規素材を用いた配合品の導入を想定し、ポリマルチ既存品の価格の3倍と想定した。農業生産に直接投入されない経費については、考慮しないものとした。どちらの栽培も、マルチフィルム以外の経費、作業時間、人件費については生分解性マルチに替えることで削減されると推定される。

第30表の情報を基に、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31表)。

「時間当たりの所得」＝(「収益」－「経費」)／「総労役時間」

「所得率」＝「総所得」／「経費」

「環境効率」＝「時間当たりの所得」／「環境負荷」

スイートコーン栽培では、時間当たりの所得は、ポリマルチを使用した生産では4,155円であるのに対し、生分解マルチを使用した生産では4,487円と約8%増加した。一方、所得率、環境効率はやや低減した。ブロッコリー栽培では、2種のマルチフィルムの使用による経済指標の差は、ほとんど見られなかった(第31表)。

新規素材を用いた生分解マルチの価格については、原料コスト等の不確実な要素があるため、この価格の農業生産への影響を探るため、生分解マルチの価格が既存ポリマルチの4倍となった場合についても、上述した方法で評価を試みた(第32、33表)。

生分解性マルチの価格上昇により、スイートコーン栽培では時間当たりの所得は、ポリマルチとの差が小さくなり、所得率、環境効率はより低減した。ブロッコリー栽培では、若干ではあるが、全ての経済評価法で生分解マルチの使用による評価がポリマルチに比べ劣る結果となった(第33表)。

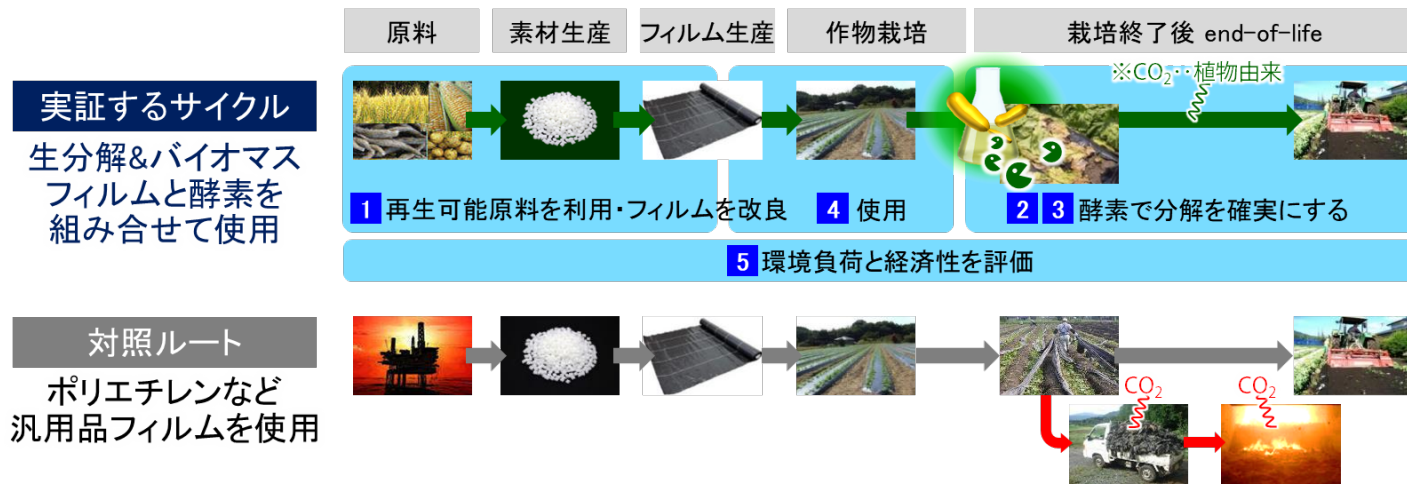
一方、今回の経済評価では、3-3に述べたとおりポリマルチの廃棄処分について十分検討できなかった。農業廃プラスチックの処分については、多くの地域で有料化されており、近年、料金の上昇が指摘されている。来年度は、ポリマルチの廃棄段階についても詳細な調査を実施し、経済評価に含める検討を行う予定である。

参考文献

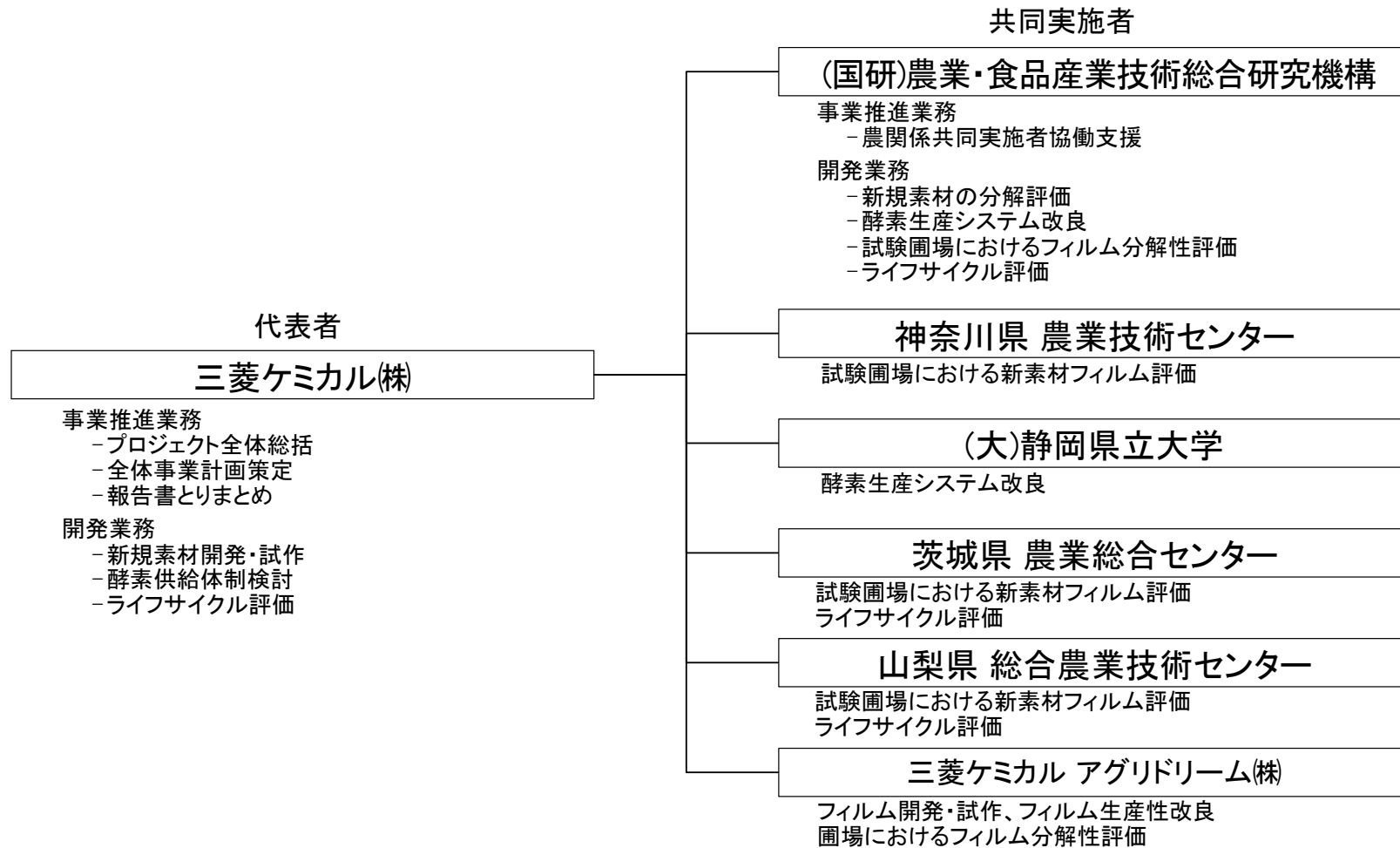
- 1) 生分解性マルチの活用事例 ～回収作業の省力化と処理コストの削減を図る～、農林水産省 生産局 農業環境対策課 資源循環推進班、平成 31 年
- 2) プラスチックを取り巻く国内外の状況 参考資料集、中央環境審議会循環型社会部会プラスチック資源循環戦略小委員会(第 5 回)配付資料、平成 31 年
- 3) 農業分野から排出されるプラスチックをめぐる情勢、農林水産省 生産局 園芸作物課、平成 31 年
- 4) Tokiwa et al., Biodegradability of plastics, International Journal of Molecular Sciences, 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、及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) Kitamoto et al., Phyllosphere yeasts rapidly break down biodegradable plastics, AMB Express 1, 2011

- 14) 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
- 15) 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
- 16) 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
- 17) 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
- 18) Kunitake et al., CRISPR/Cas9-mediated gene replacement in the basidiomycetous yeast *Pseudozyma Antarctica*, *Fungal genetics and biology*, 130, 2019
- 19) OWS, Expert statement on biodegradable mulching film, *Organic Waste System*, 2017
- 20) Scarascia-Mugnozza et al., Plastic materials in European agriculture: actual use and perspectives, *J. Agric. Eng.*, 42, 2011
- 21) BASF, Biodegradation of ecovio® mulch film, Introduction to the LCA mulch film for cotton cultivation in China, 2016
- 22) Novamont Mater-Bi®, http://materbi.com/en/wp-content/uploads/sites/2/2018/06/scheda-pacciamatura_EN_LR_TUV.pdf
- 23) CEN TR 16957, Bio-based products-Guideline for Life Cycle Inventory (LCI) for the end-of-life phase-2016
- 24) Technical University of Denmark が開発した LCA 評価用モデル、
<http://www.easetech.dk/>
- 25) Corepla, Quantità riciclate e budget, 2007,
<http://www.corepla.it/articolo.jsp?IdDoc=27&ignoreGest=true>
- 26) Osservatorio Nazionale dei Rifiuti, Rapporto rifiuti, 2004,
http://www.apat.gov.it/site/it-IT/APAT/Pubblicazioni/Rapporto_Rifiuti/

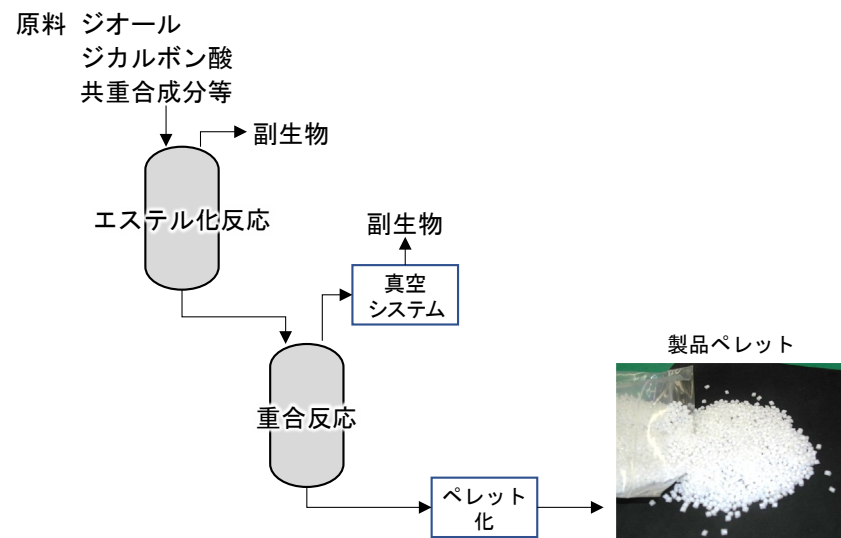
- 27) 作物別・作型別経済性標準指標一覧 2017年度改訂版、神奈川県農業技術センター、2018
- 28) 林清忠、経営指標から環境指標を計算する簡易 LCA プログラム、平成 22 年度「関東東海北陸農業」研究成果情報、
http://www.naro.affrc.go.jp/org/narc/seika/kanto22/01/22_01_09.html
- 29) 環境省、温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度、<https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/>



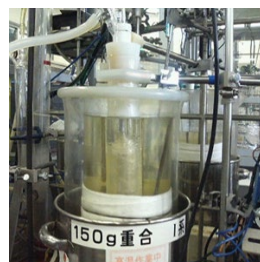
第1図 事業の概要



第2図 令和2年度の実施体制と業務概要



a. ポリエステルの重合プロセス概要



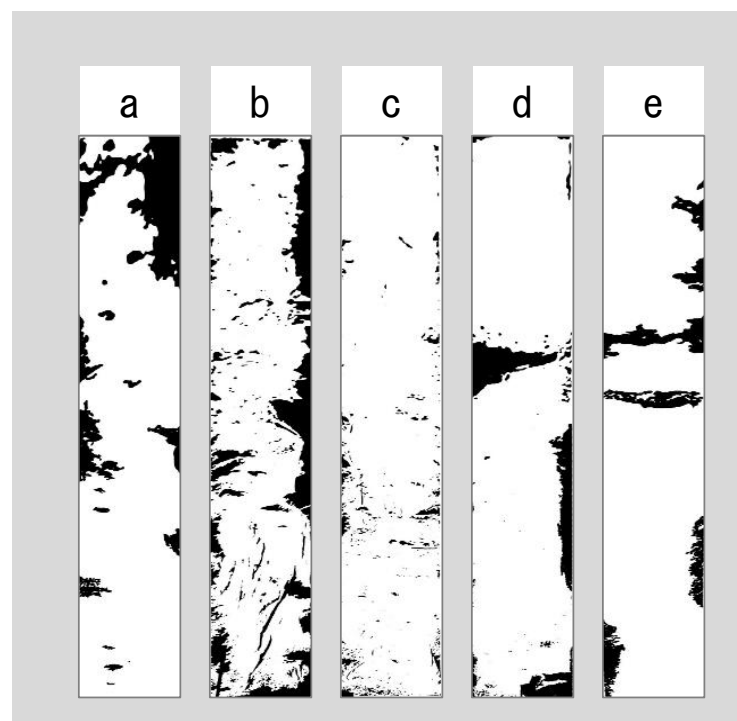
b. 重合試験装置



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



第4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



山梨県 促成作スイートコーン栽培(第44図から)



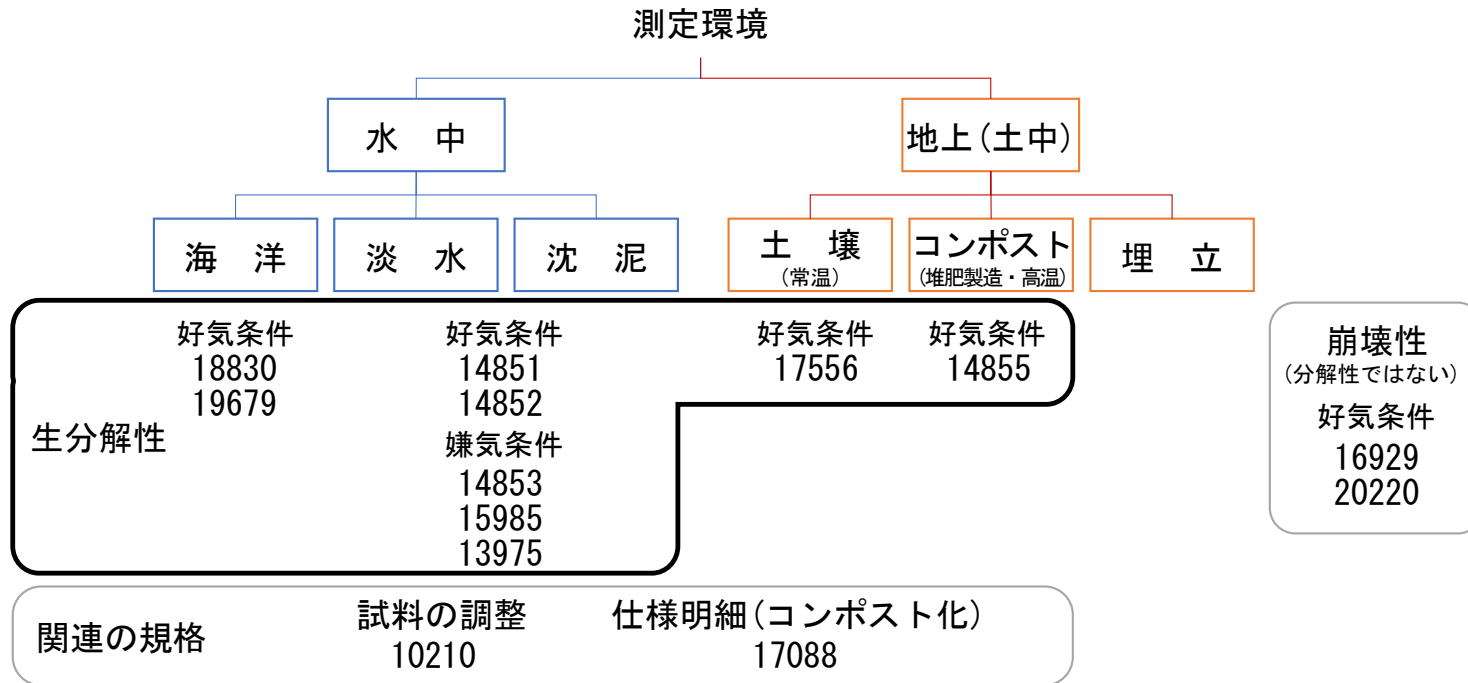
神奈川県カボチャ栽培(麦マルチ栽培、第43図から)

第5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**

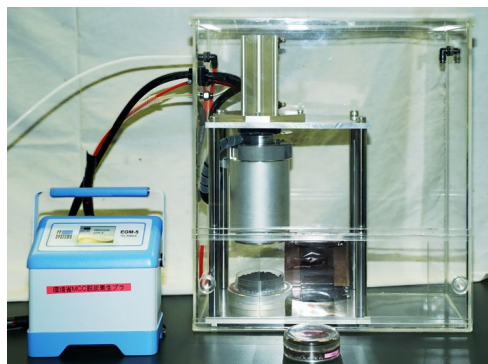
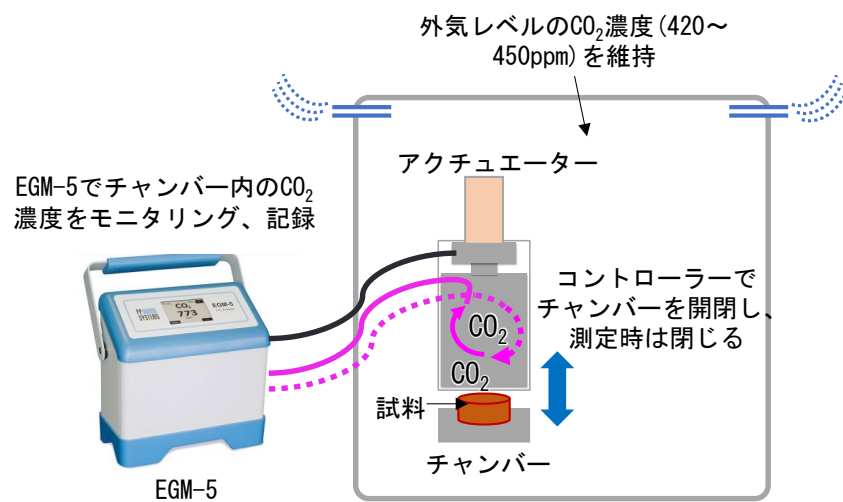
結果:新規樹脂A配合量に応じて展張時のマルチフィルムの耐久性が変化した。耐久性は樹脂Aの配合量が多い順に(多) $e-2 > e-0 > e-1$ (少)となった。耐久性は更に向上が必要。フィルム製造面では、樹脂張力不足に起因して成形が不安定であり改善が必要。

*配合e-0を基準に新規樹脂Aの配合量で分解性を調整

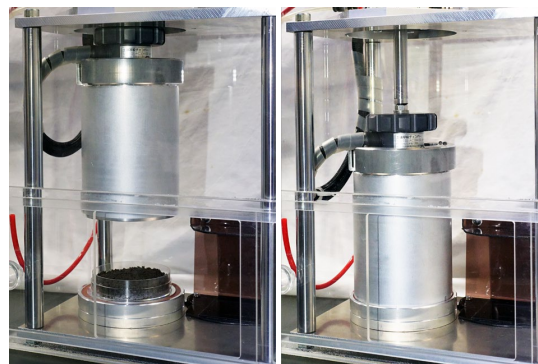
**詳細は第4章



第6図 プラスチック製品の生分解に関わる主なISO規格



装置全景



チャンバー開状態

チャンバー閉状態

第7図 土壤中での生分解性素材の分解に伴って発生するCO₂量測定装置

配合シリーズ2



マルチャーによる機械展張

配合シリーズ3

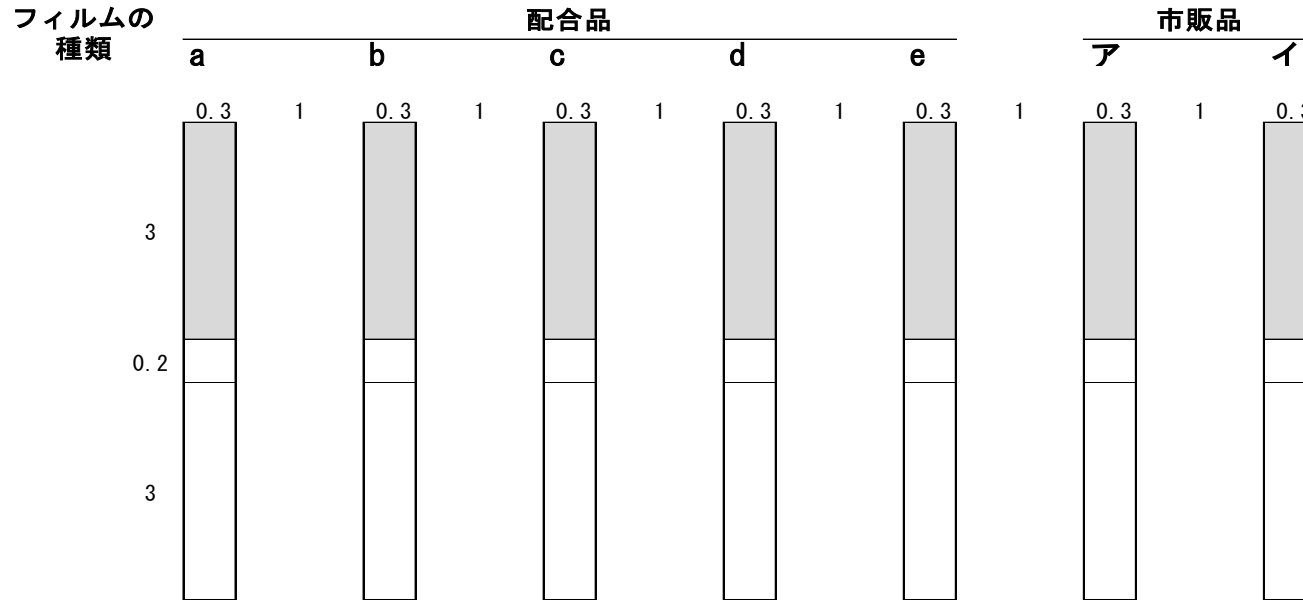


試作フィルム

人手による展張

展張作業終了後の様子


第8図 配合シリーズ2および3の試作フィルムの展張作業



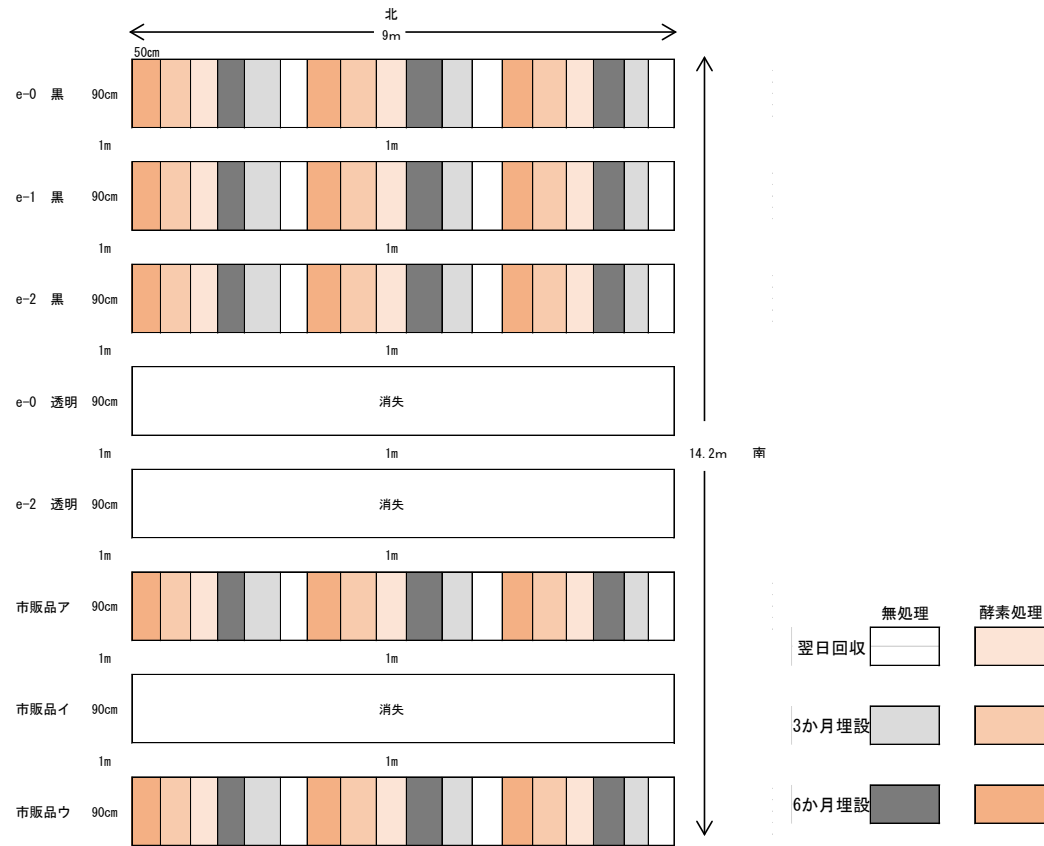
第9図 令和元年度に展張した配合シリーズ1のフィルムの配置

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

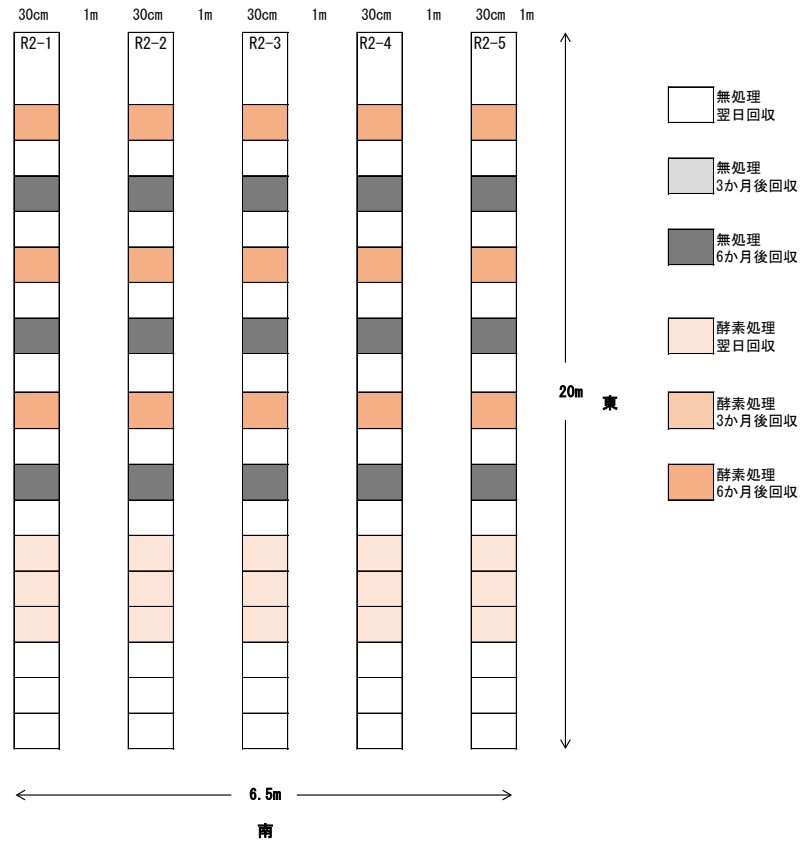
 酵素未処理区域

数字：長さ(単位 m)



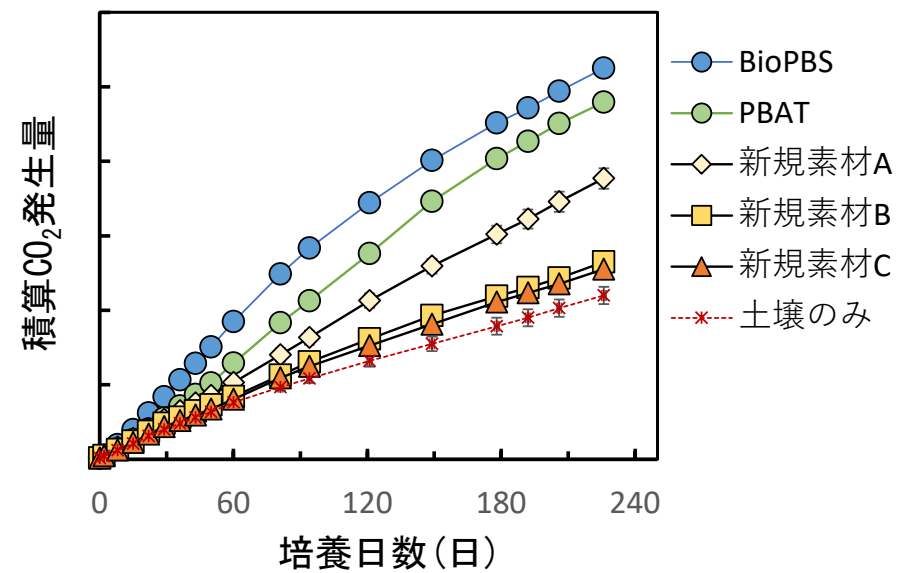
第10図 令和2年度に展張した配合シリーズ2のフィルムの配置

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。

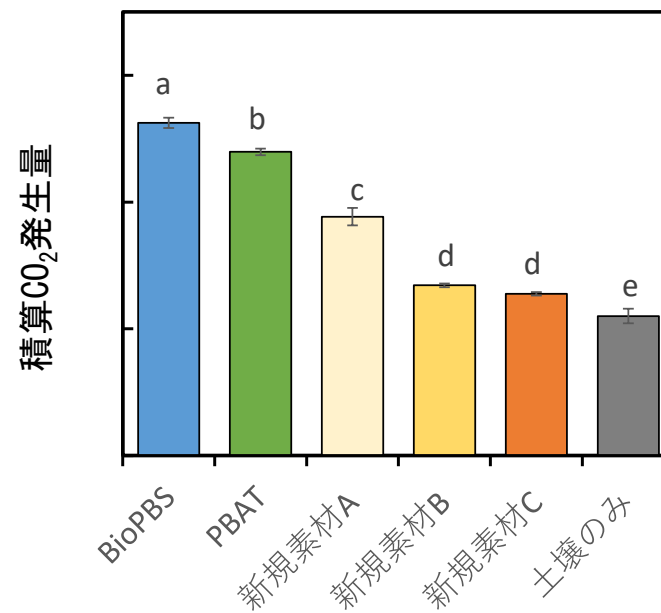


第11図 令和2年度に展張した配合シリーズ3のフィルムの配置

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。

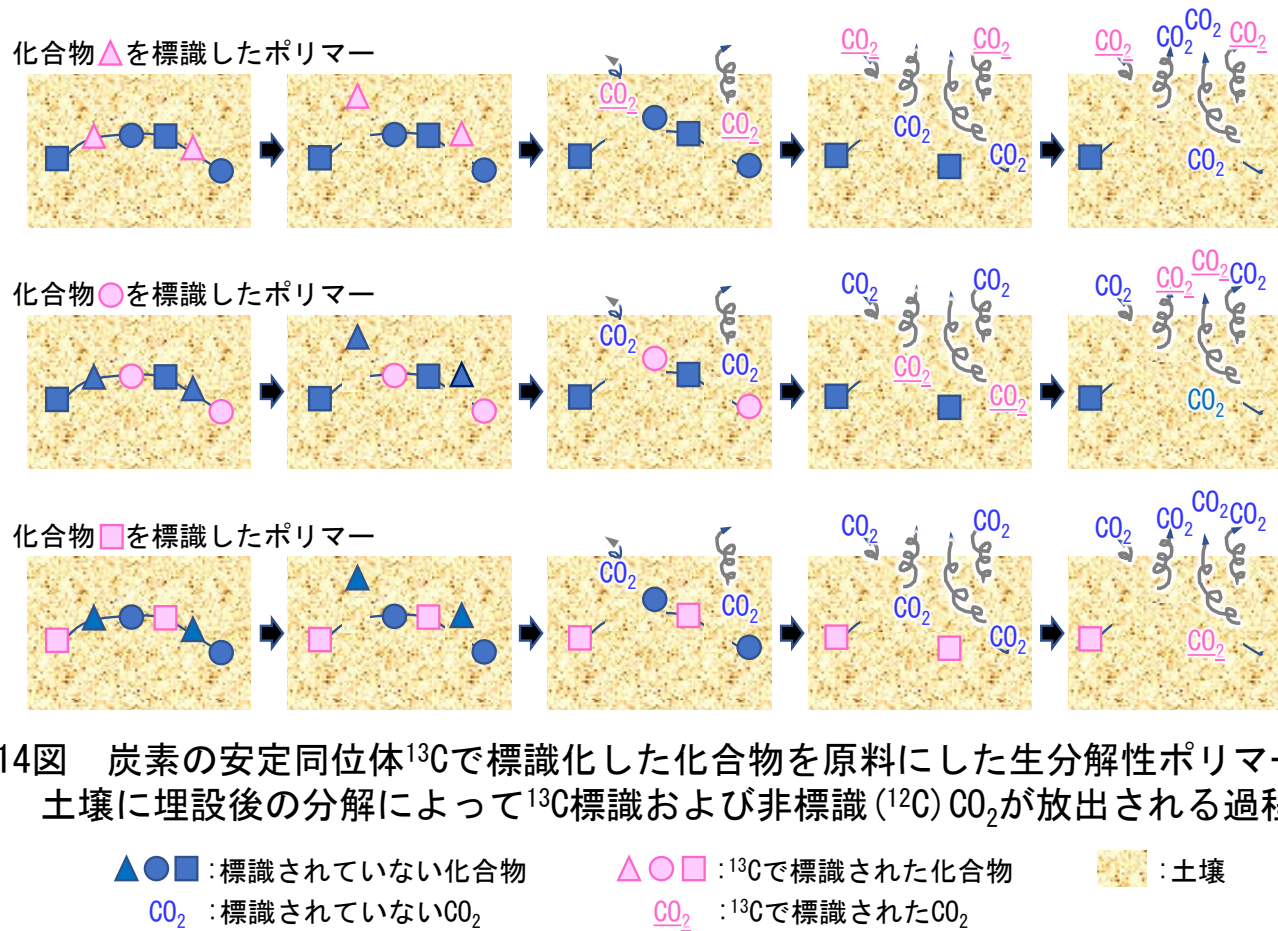


第12図 土壌中での生分解性素材の分解に伴って発生する二酸化炭素量積算

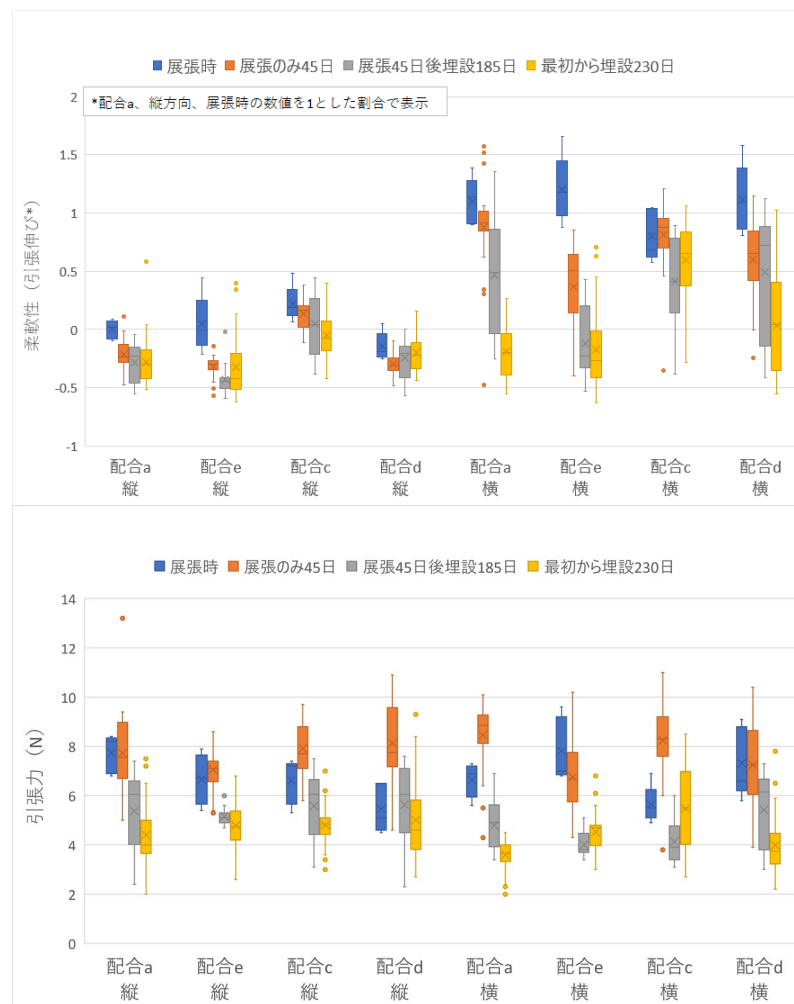


第13図 土壌中での生分解性素材の分解に伴って発生する二酸化炭素量積算における有意差検定*

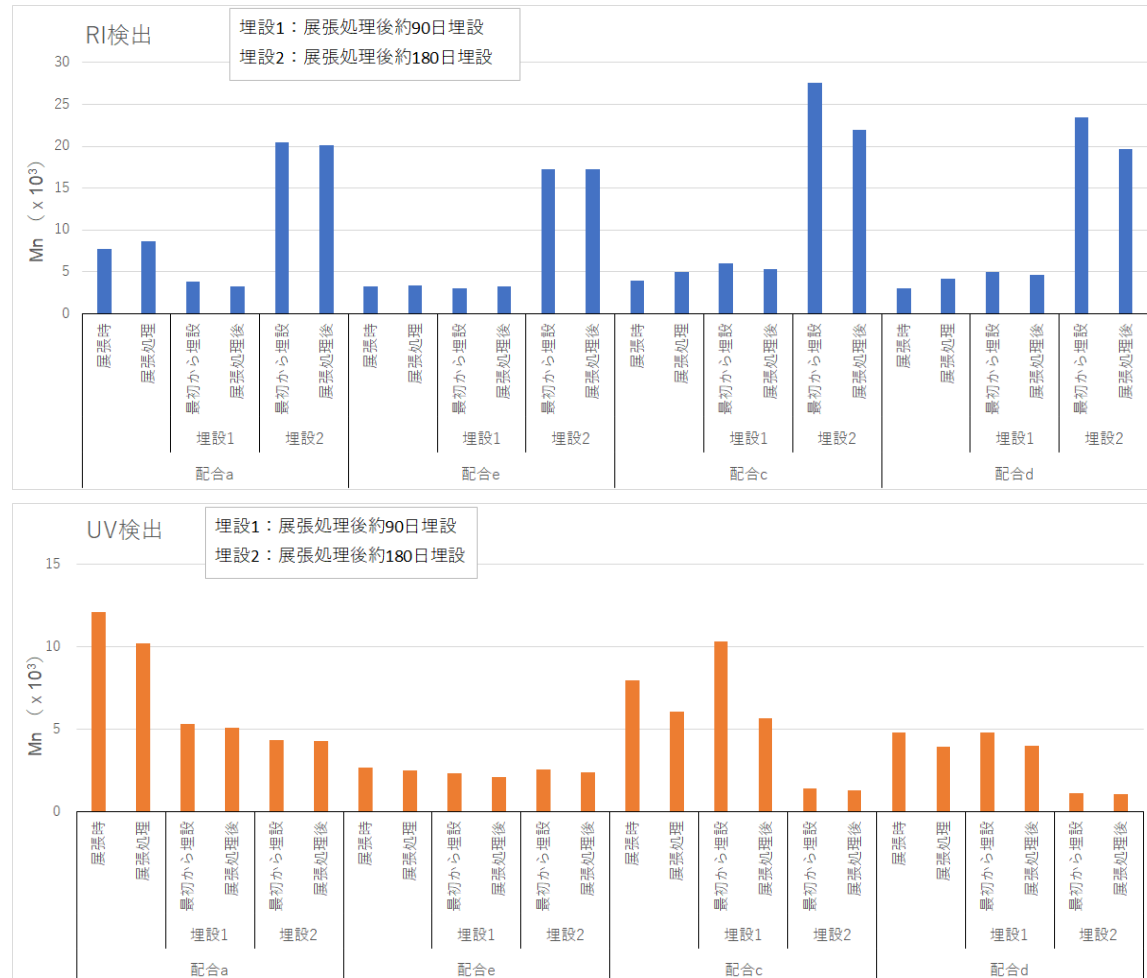
*異なるアルファベットは $P < 0.01$ で有意 (ANOVA Tukey Test)、エラーバーは標準偏差反復数4



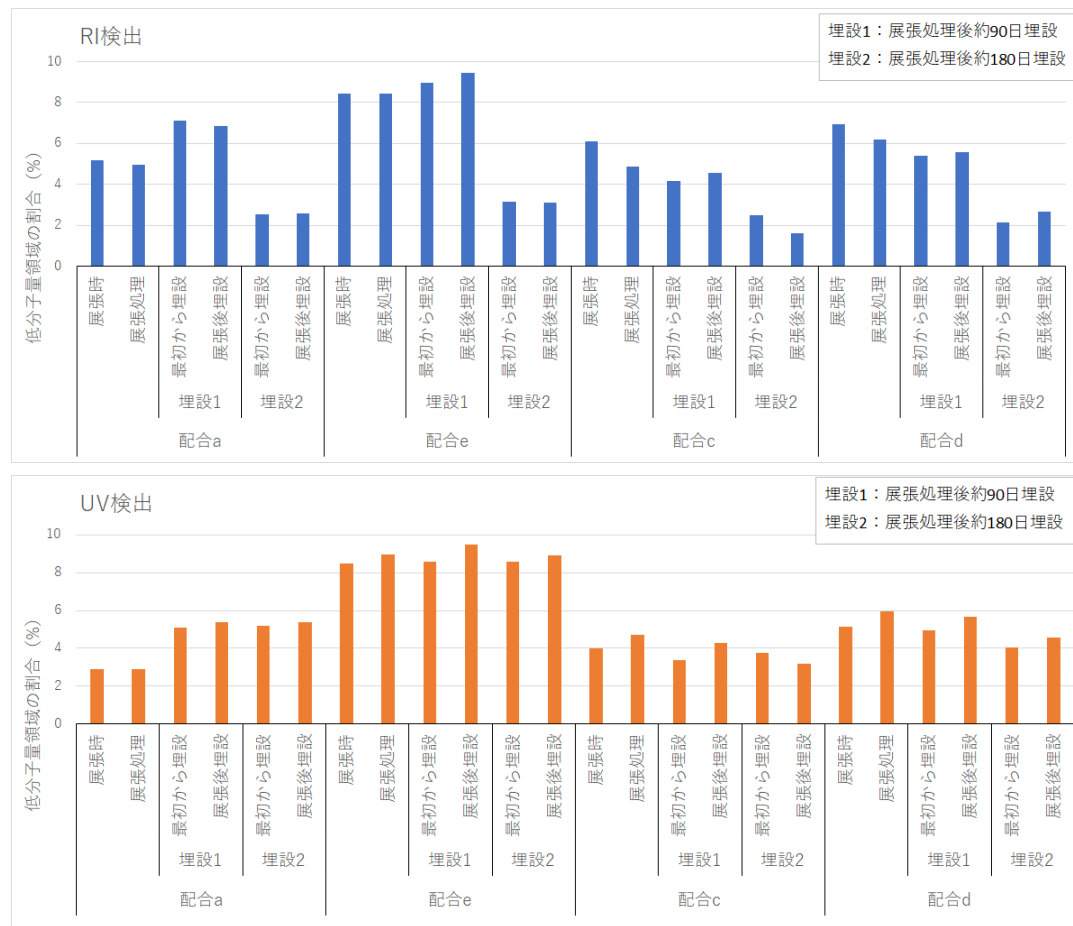
第14図 炭素の安定同位体 ^{13}C で標識化した化合物を原料にした生分解性ポリマーから土壌に埋設後の分解によって ^{13}C 標識および非標識(^{12}C) CO_2 が放出される過程



第15図 配合シリーズ1のフィルムの展張、埋設過程での強度の評価(引張力と伸び)
 試料を引っ張った方向；縦：展張方向に平行、横：展張方向に垂直

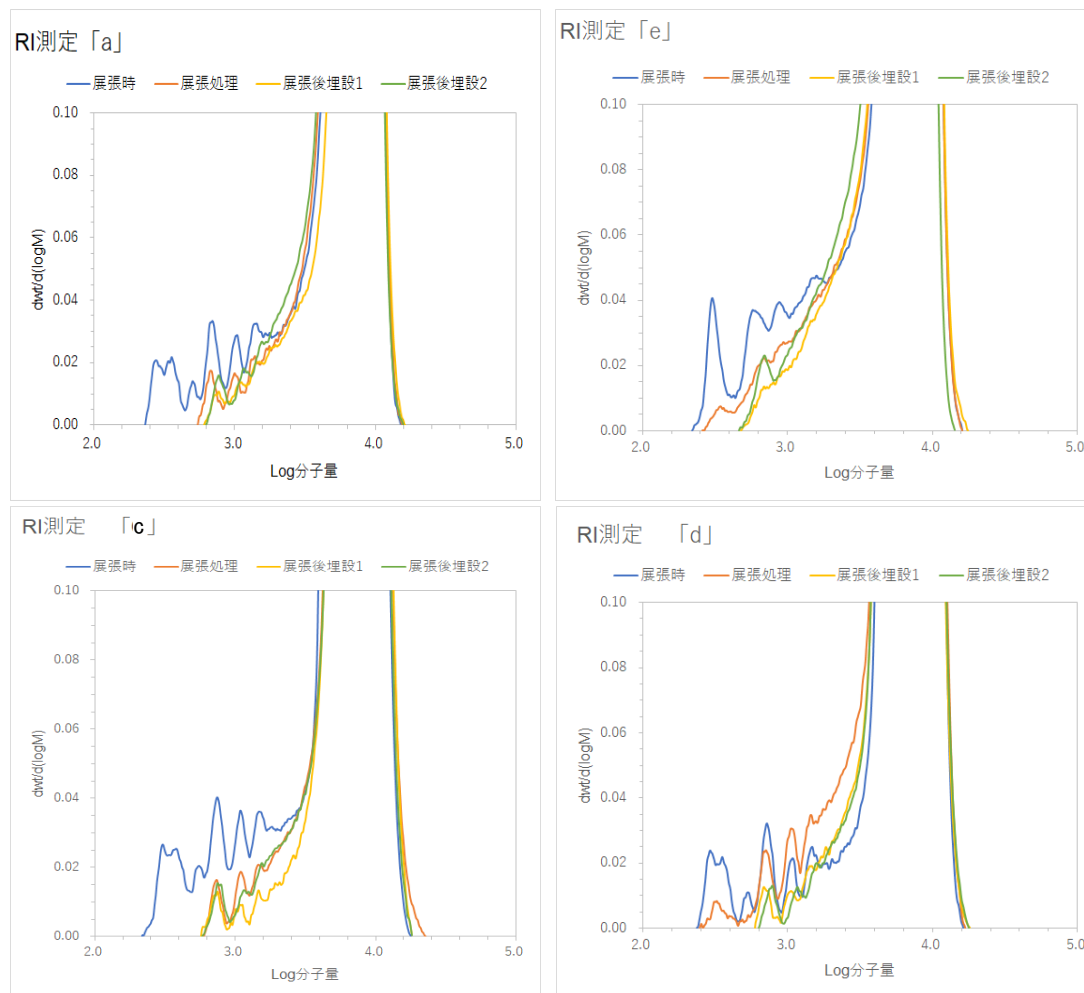


第16図 配合シリーズ1のフィルムのGPC通常分析 -数分子量(Mn)値-



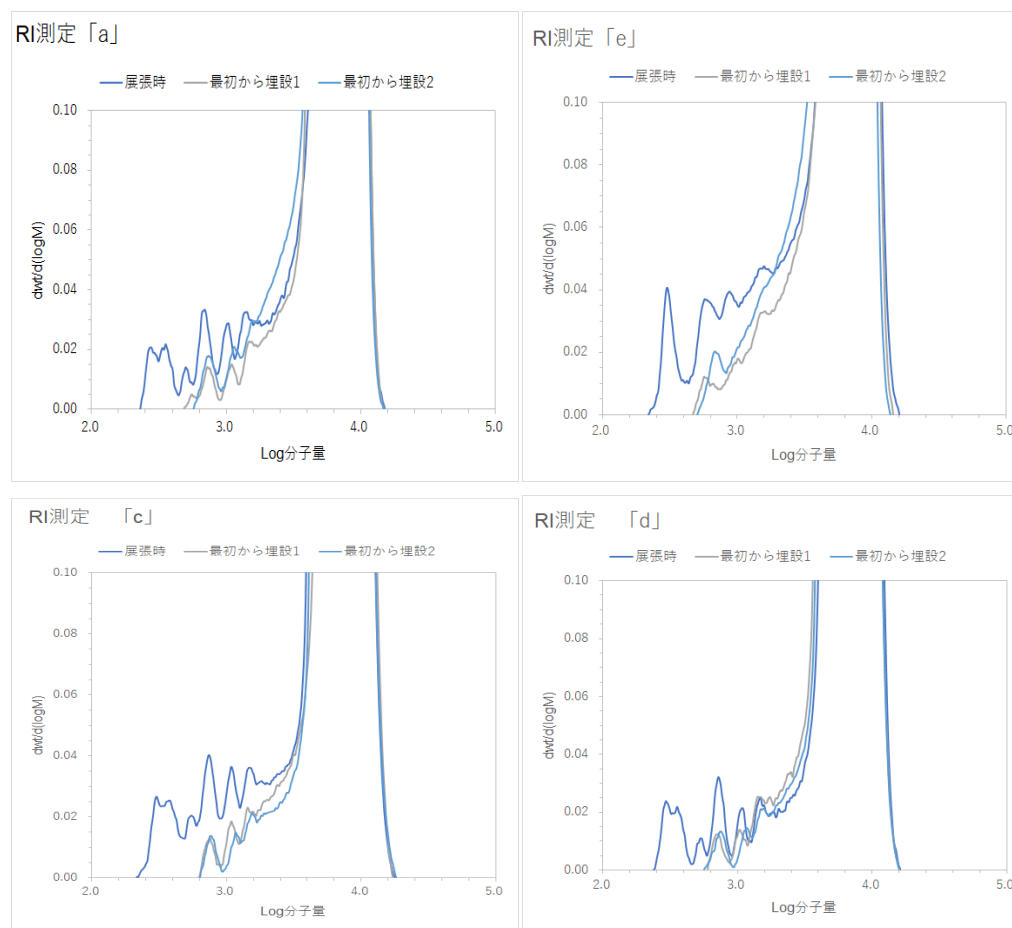
第17図 配合シリーズ1のフィルムのGPC通常分析 -低分子量部分の割合-

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の面積値より割合を算出(分子量約3,000未満の割合となる)。

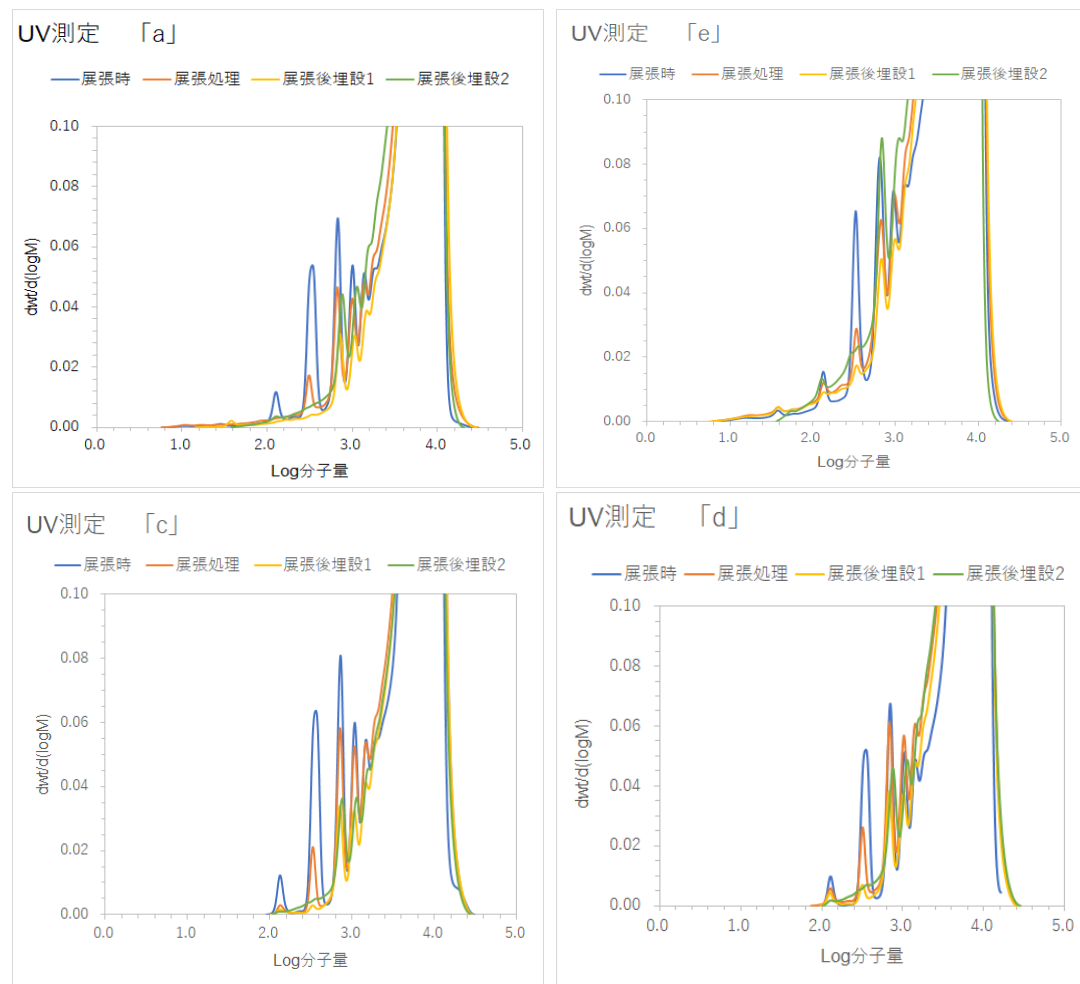


第18図-1 配合シリーズ1のフィルムGPC低分子量領域分析 -RI検出-
展張処理後に埋設処理

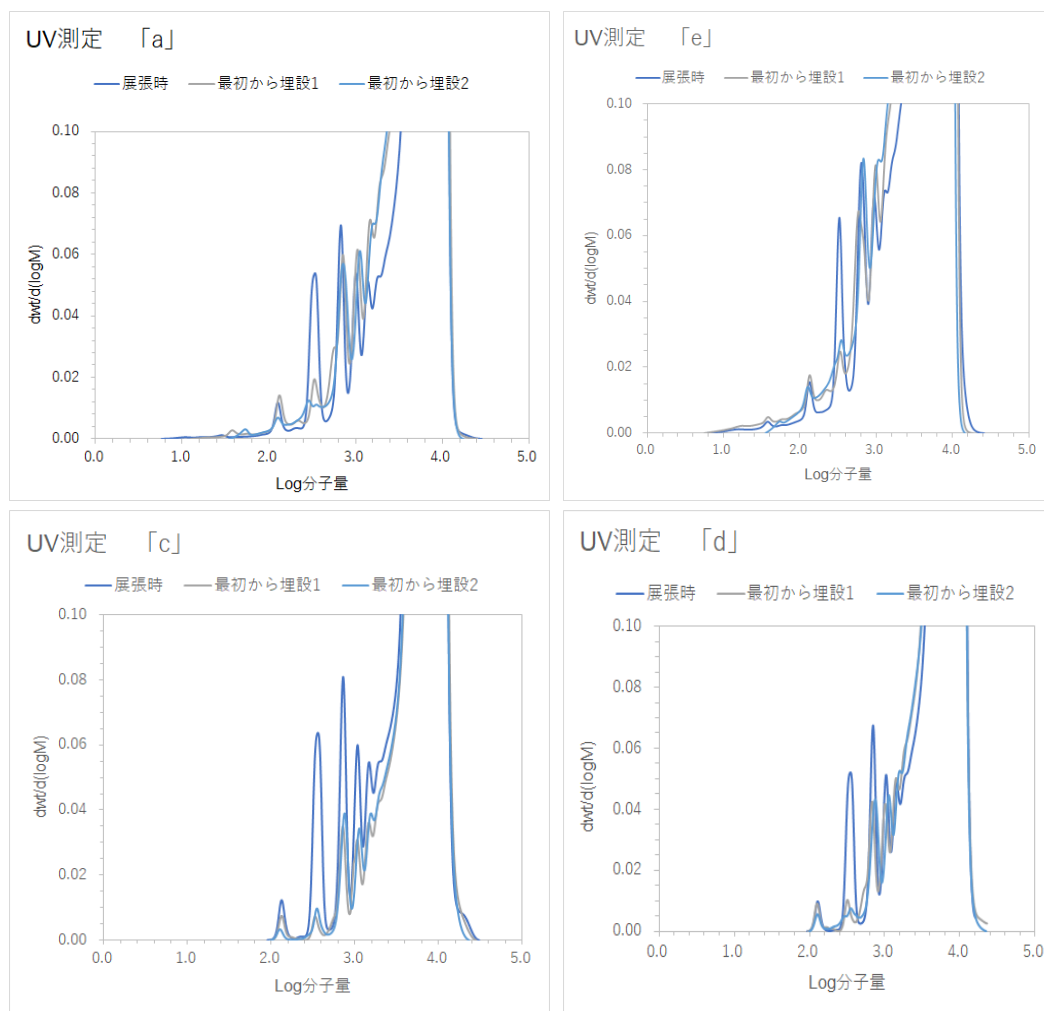
GPC低分子量領域分析：特に分子量1万以下の分子の分離、検出力に重きを置いたカラムを使用した。



第18図-2 配合シリーズ1のフィルムGPC低分子量領域分析 -RI検出-
展張処理開始時から埋設処理

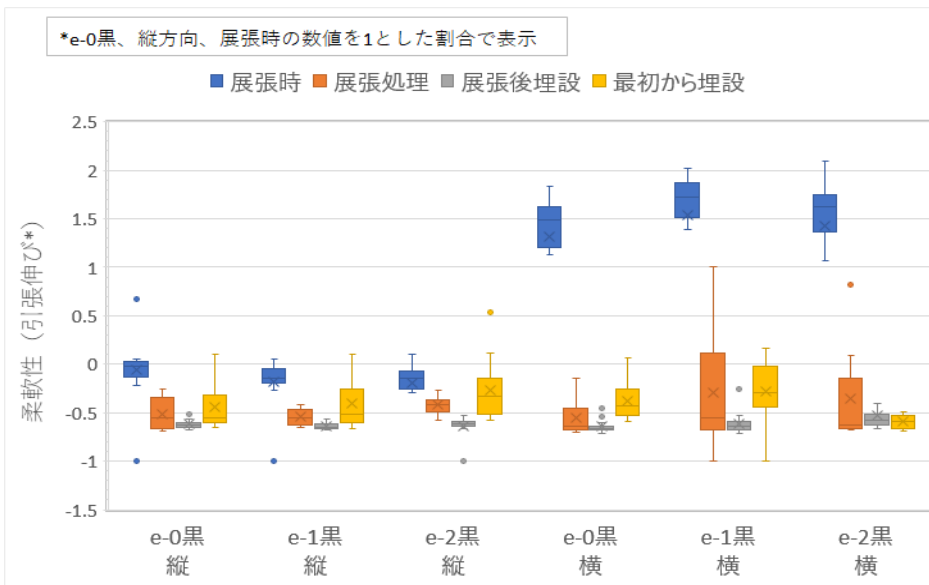


第18図-3 配合シリーズ1のフィルムGPC低分子量領域分析 -UV検出-
展張処理後に埋設処理

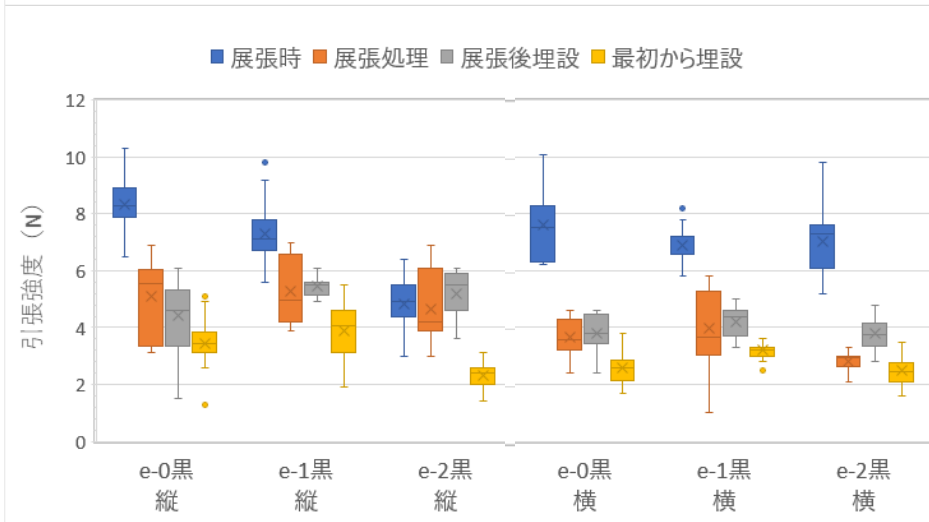


第18図-4 配合シリーズ1のフィルムGPC低分子量領域分析 -UV検出-
展張処理開始時から埋設処理

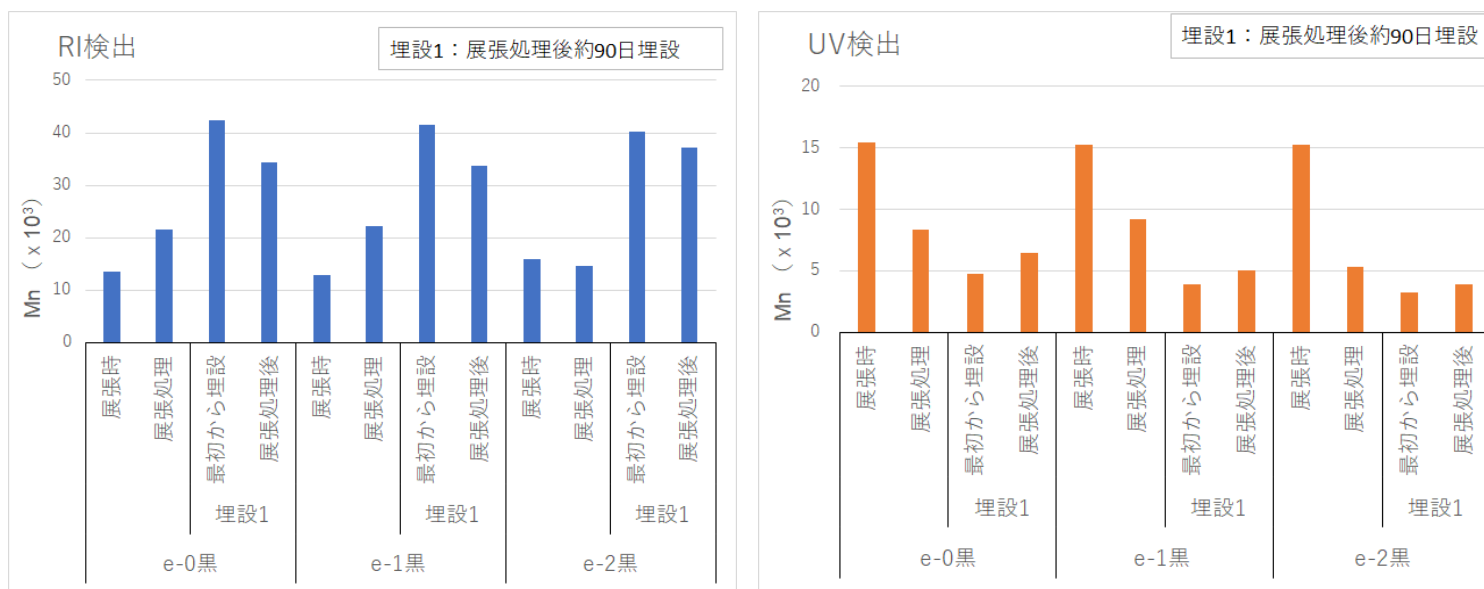
柔軟性(引張伸び)



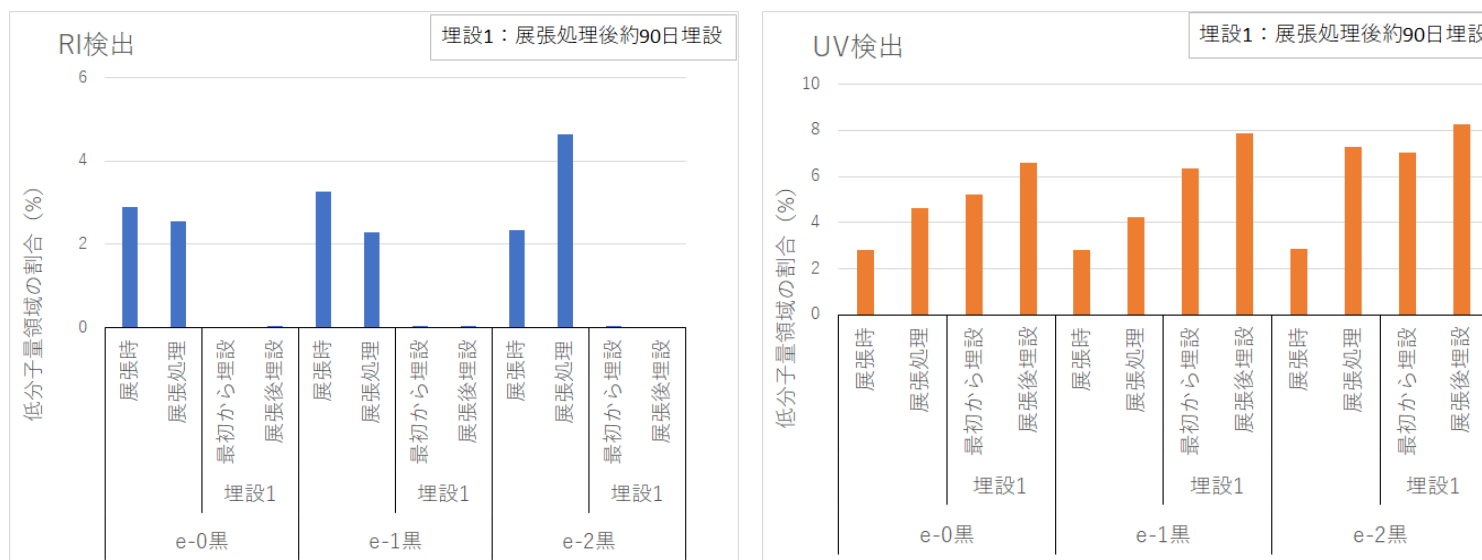
引張強度



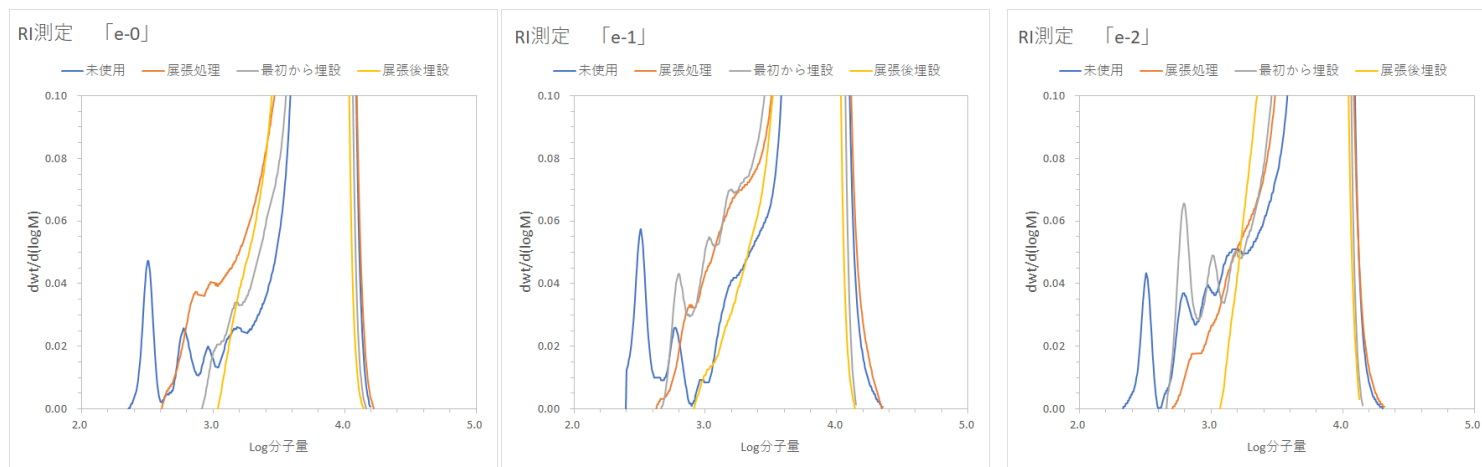
第19図 配合シリーズ2のフィルム強度の評価



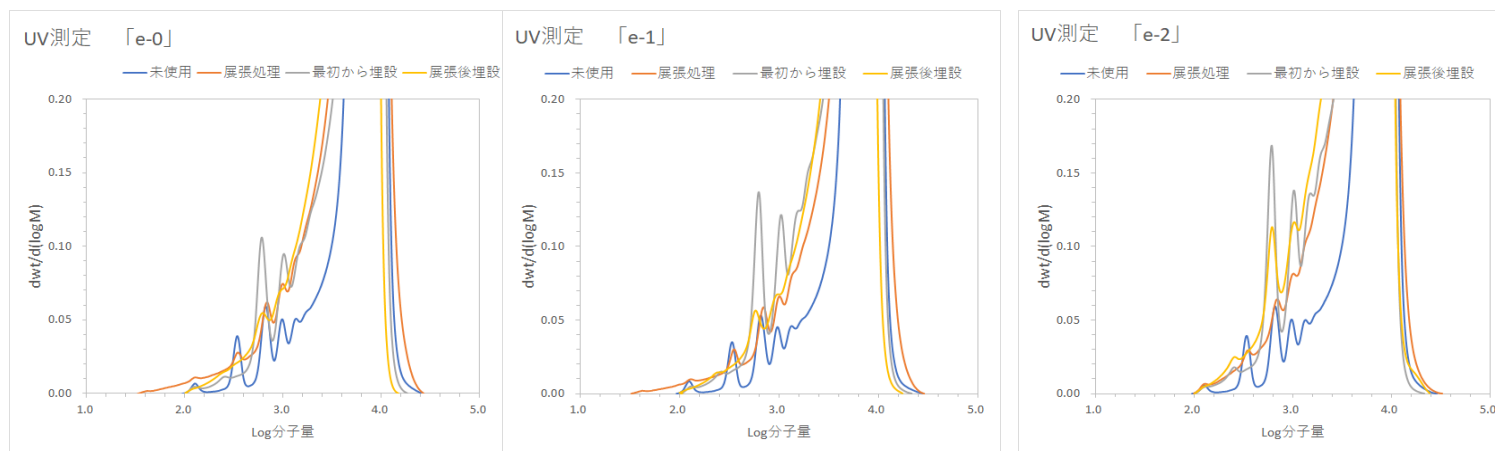
第20図 配合シリーズ2のフィルムのGPC通常分析 -数分子量(Mn)値-



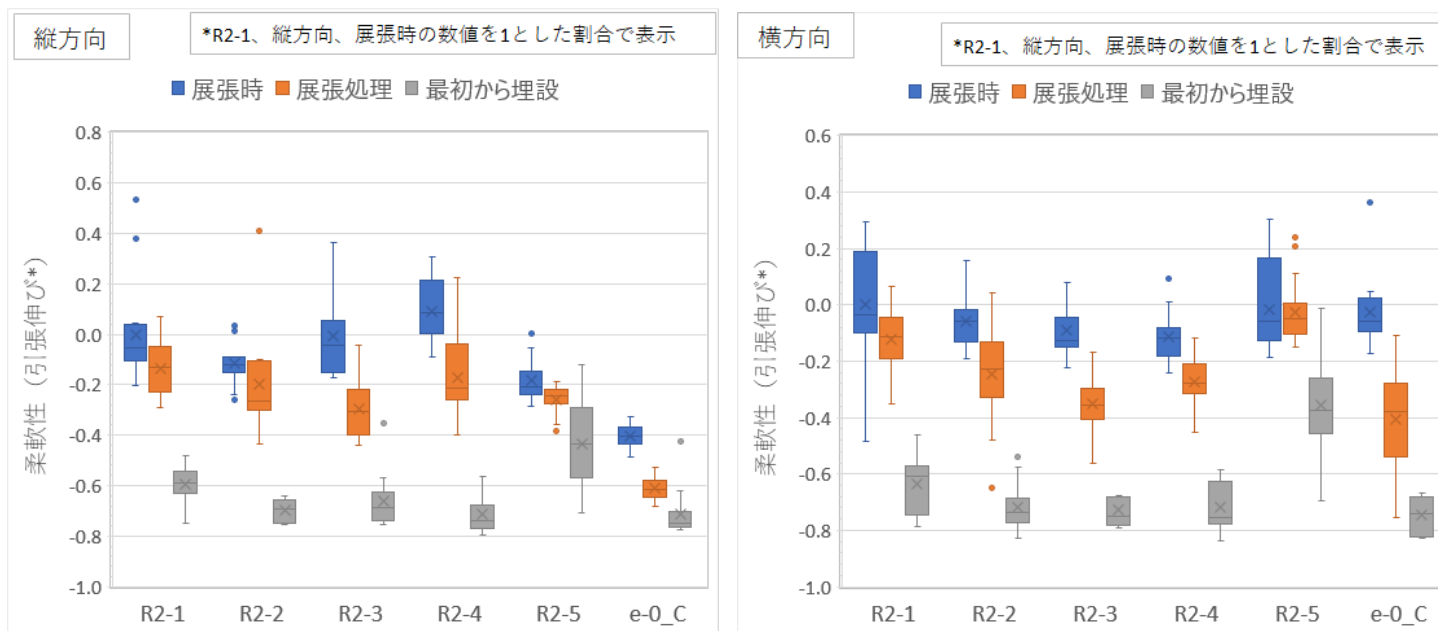
第21図 配合シリーズ2のフィルムのGPC通常分析 -低分子量部分の割合-
各フィルムのLog分子量を横軸に、dwt/d(LogM)を縦軸にとるグラフよりLogM<3.5の面積値より割合を算出(分子量約3,000未満の分子の割合となる)。



第22図-1 配合シリーズ2のフィルムGPC低分子量領域分析 -RI検出-



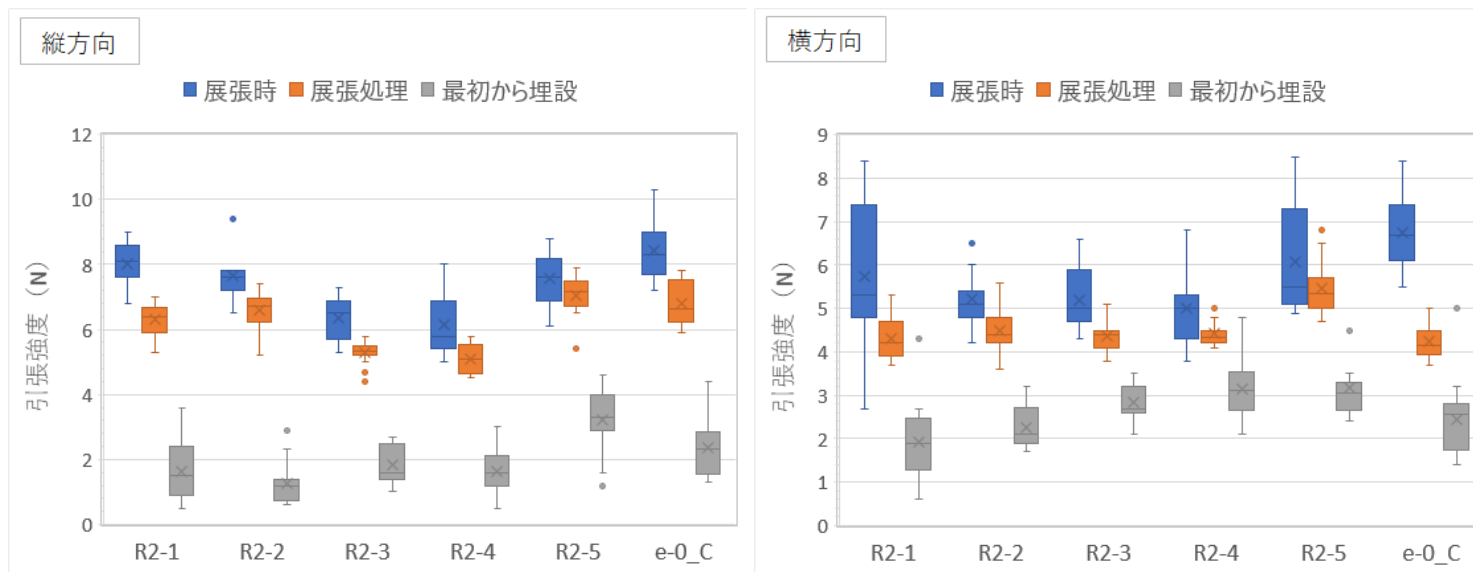
第22図-2 配合シリーズ2のフィルムGPC低分子量領域分析 -UV検出-



第23図-1 配合シリーズ3のフィルム強度試験 ー柔軟性(引張伸び)ー

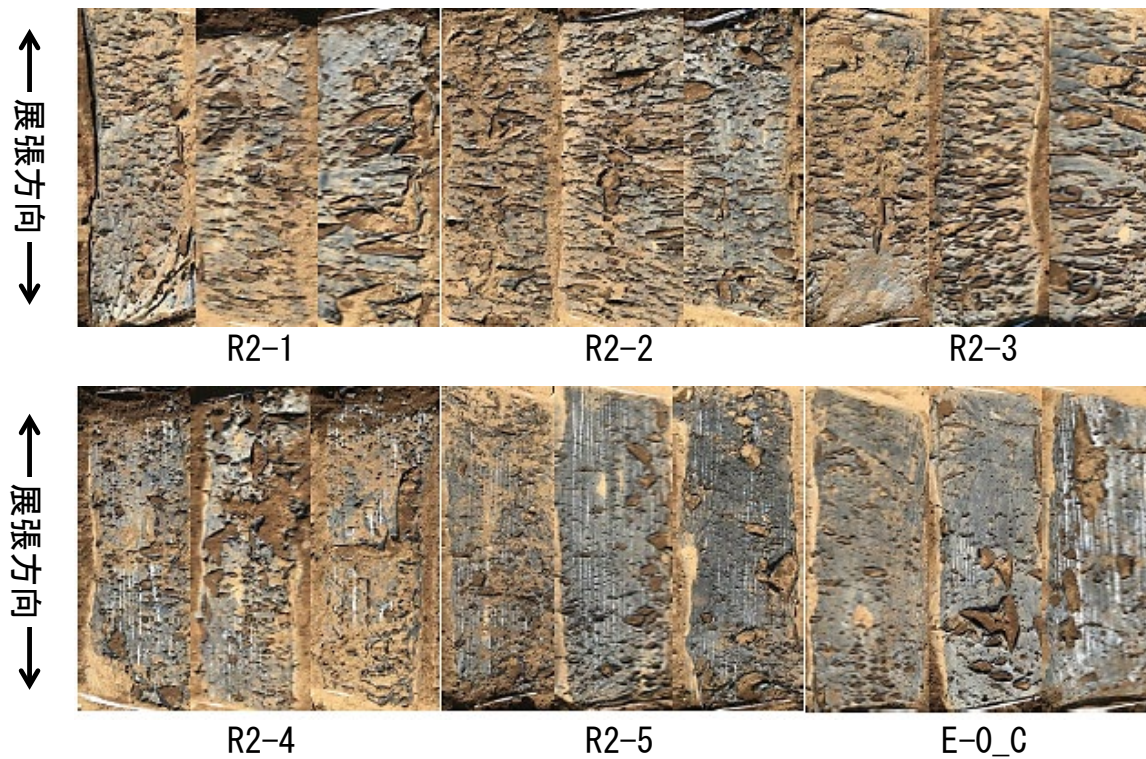
*測定不能サンプル：サンプルの劣化が激しいため強度測定機の検出限界以下の強度しか得られないサンプル

	測定不能サンプルの割合	
	縦方向	横方向
R2-1	44%	19%
R2-2	44%	0%
R2-3	6%	0%
R2-4	19%	0%
R2-5	0%	0%
e-0_C	0%	6%

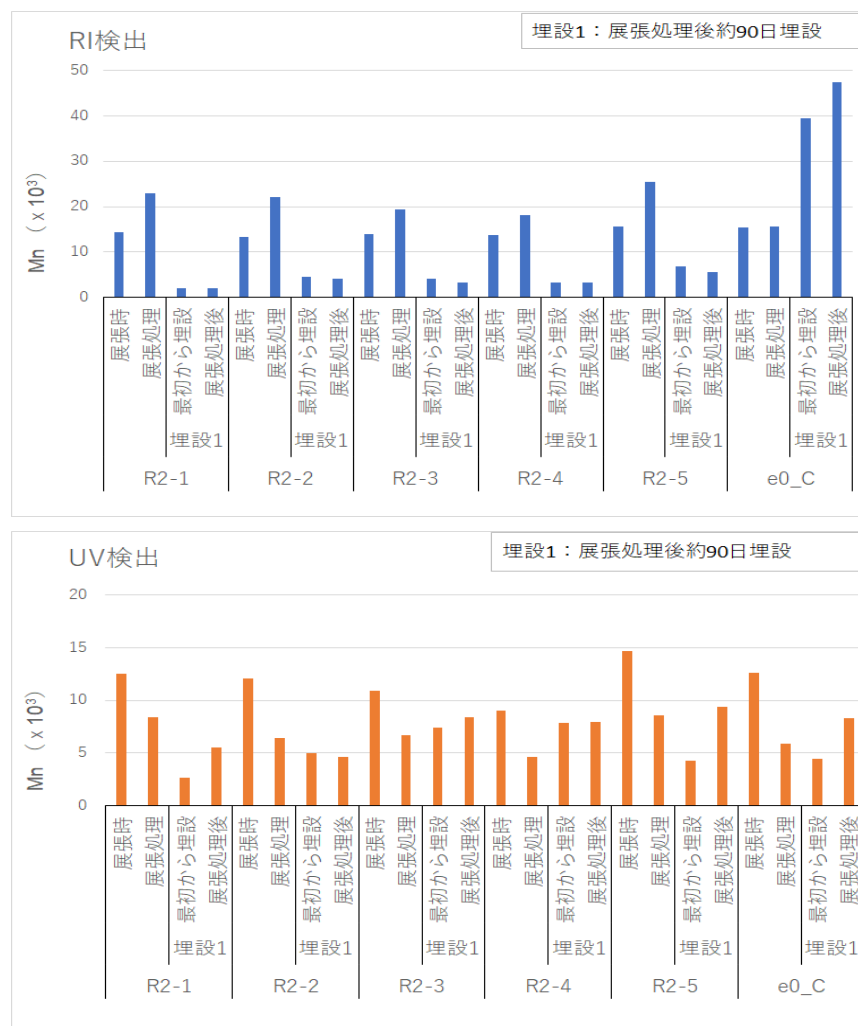


第23図-2 配合シリーズ3のフィルム強度試験 —引張強度—

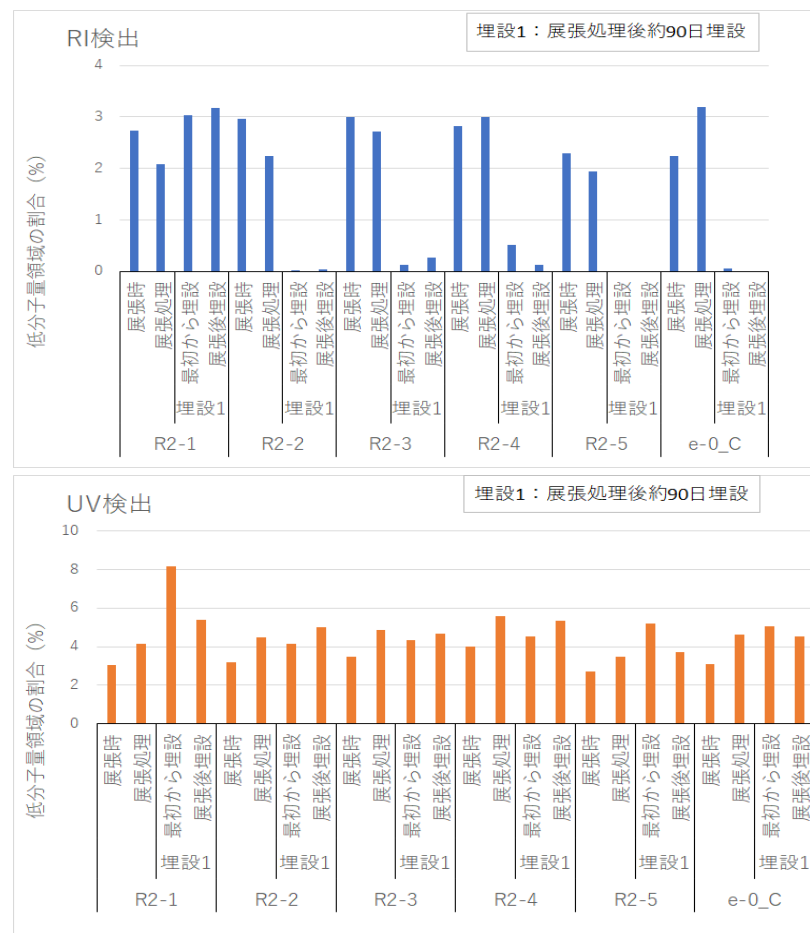
*「展張後埋設」のフィルムは劣化が進み試験サンプル片が作製できなかったためデータは無し(引張強度、柔軟性とも)。



第24図 配合シリーズ3のフィルムの展張後埋設区90日後の様子
各区約30cm×100cm、 $n=3$

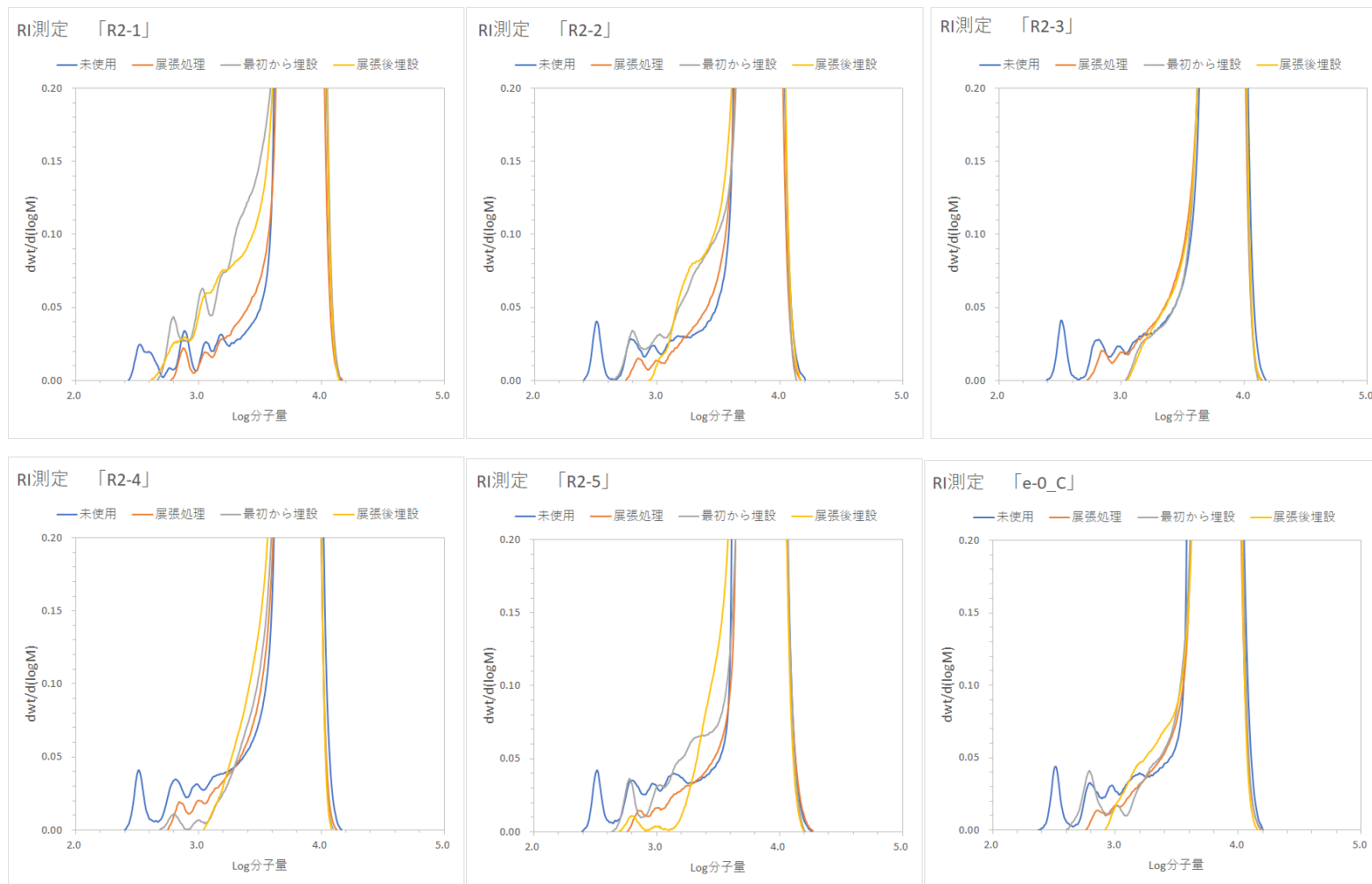


第25図 配合シリーズ3のフィルムのGPC通常分析 一数分子量(Mn)値一

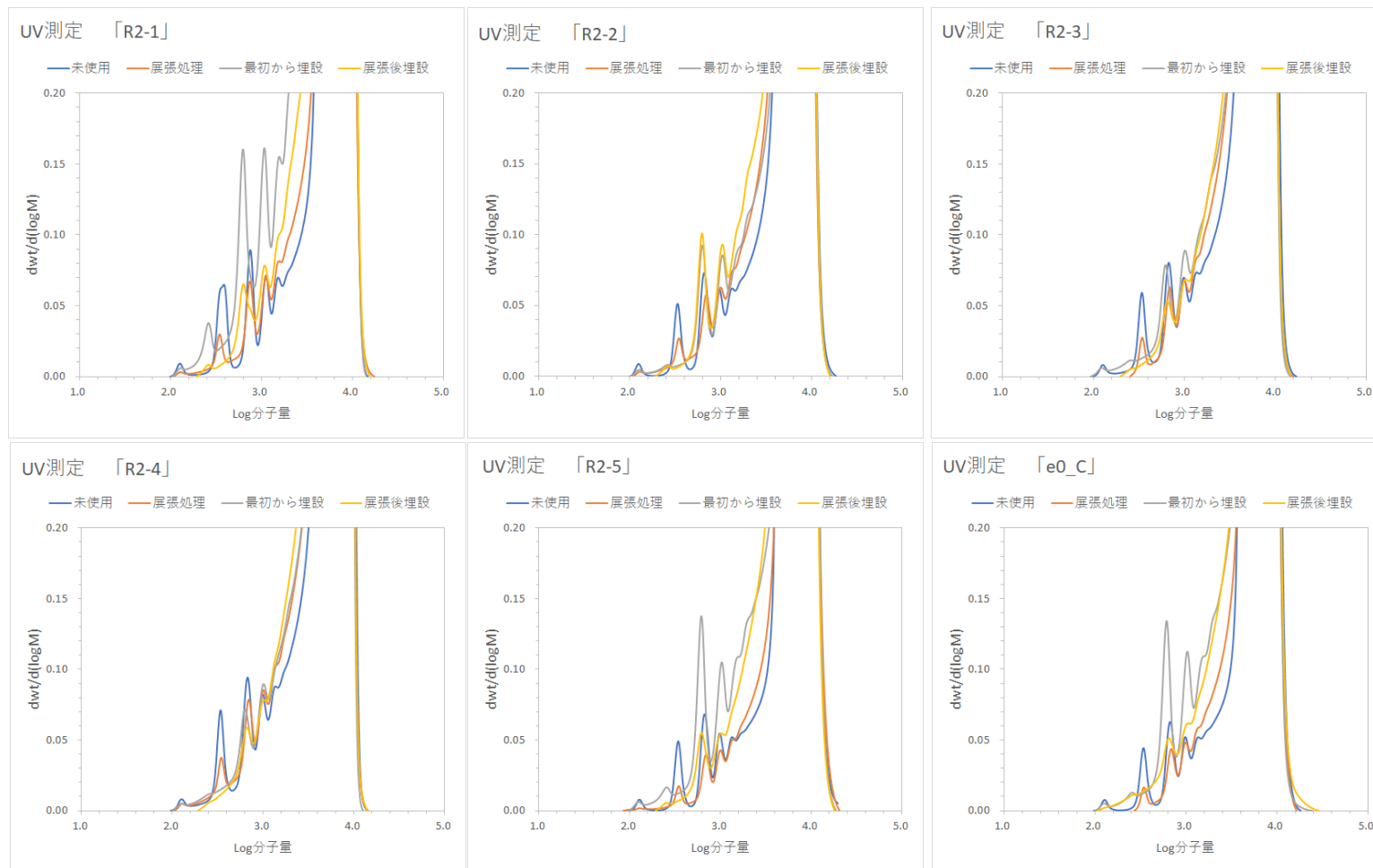


題26図 配合シリーズ3のフィルムのGPC通常分析 —低分子量部分の割合—

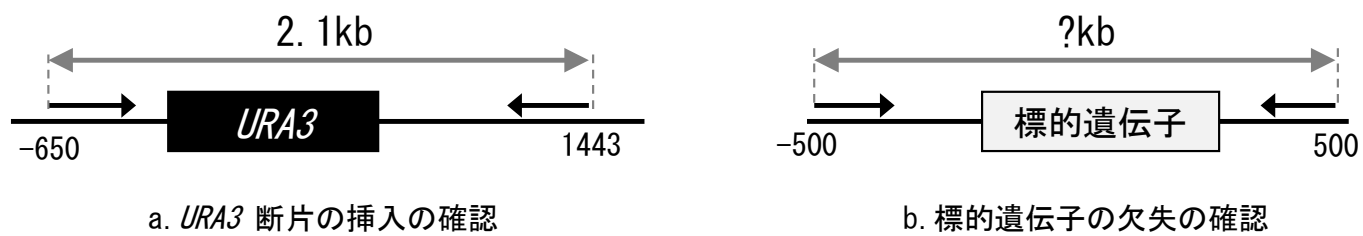
各フィルムのLog分子量を横軸に、dwt/d(LogM)を縦軸にとるグラフよりLogM<3.5の面積値より割合を算出(分子量約3,000未満の割合となる)。



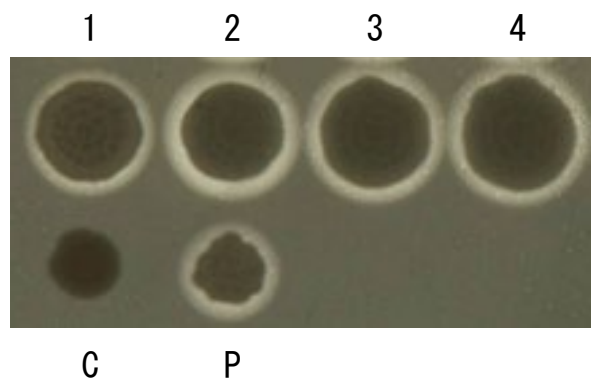
第27図-1 配合シリーズ3のフィルムのGPC低分子量領域分析 —RI検出—



第27図-2 配合シリーズ3のフィルムのGPC低分子量領域分析 —UV検出—

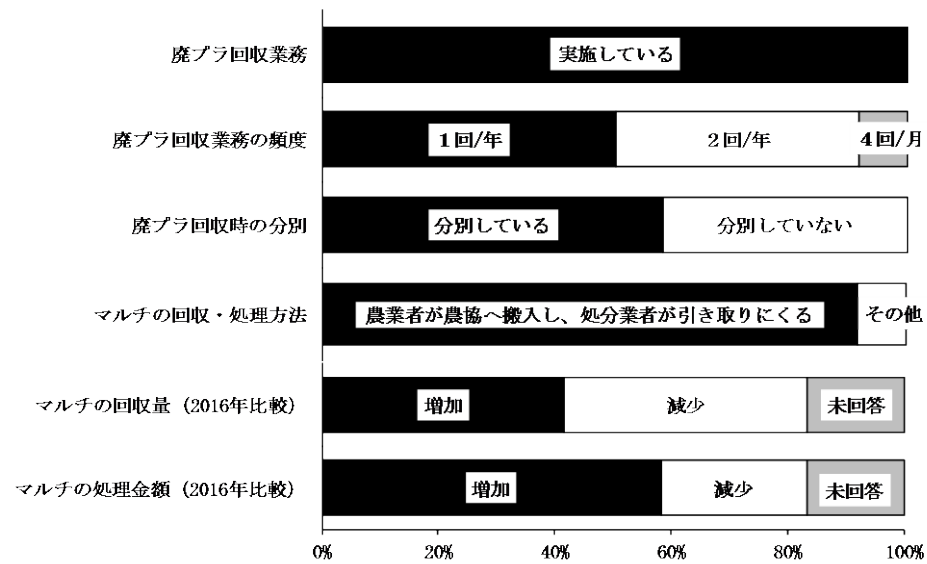


第28図 遺伝子破壊株の確認用PCR実験のスキーム

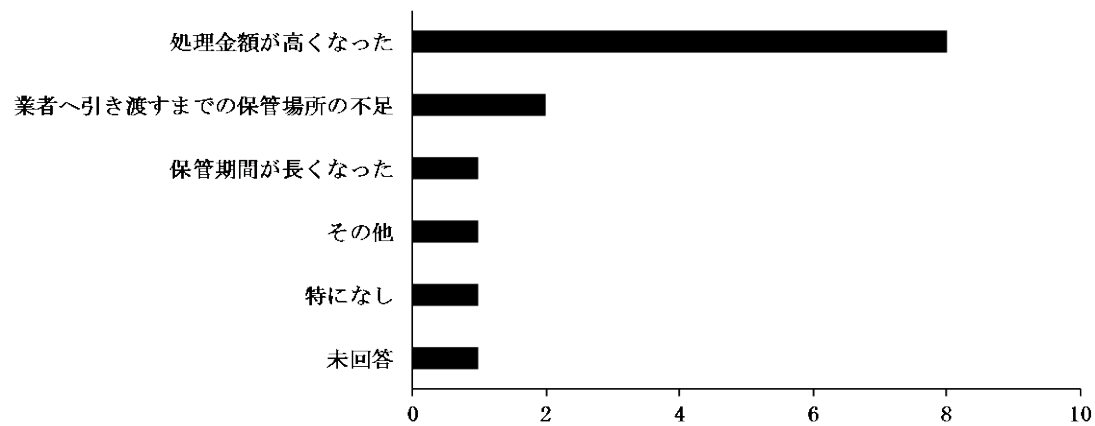


第29図 酵素を生産しない標的遺伝子破壊株を探索するためのエマルジョン化PBSAプレートを用いた実験

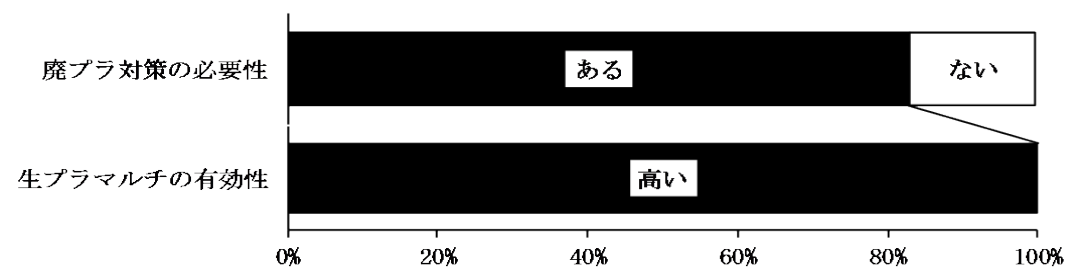
1~4: 標的遺伝子破壊株 P: 遺伝子破壊株の親株
C: PaE非生産株(対照)



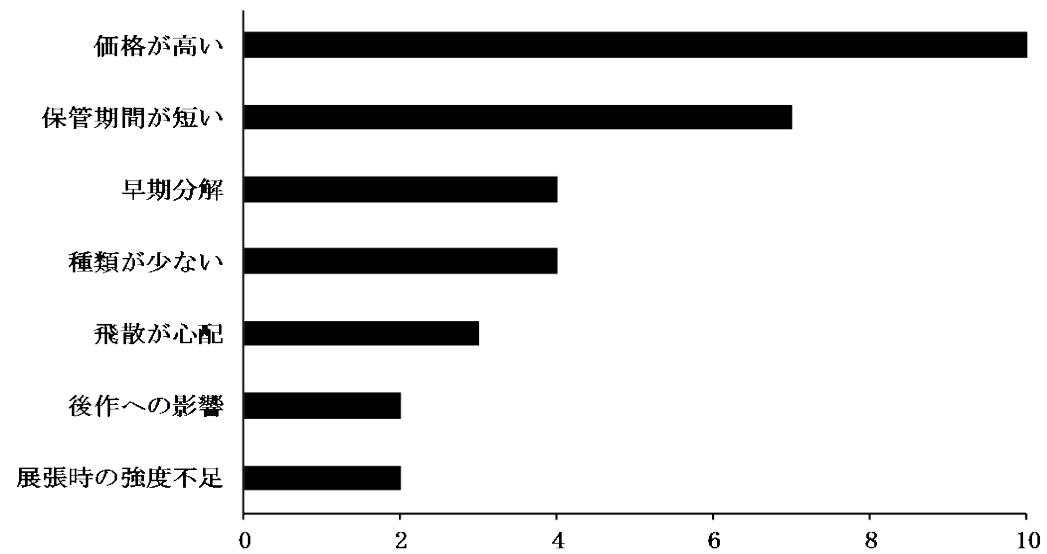
第30図 廃プラの回収および処理状況について (n=12)



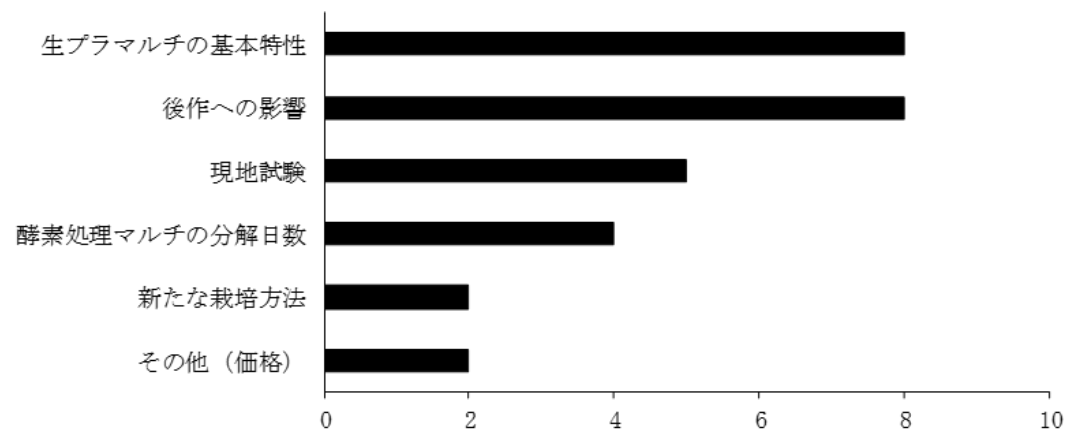
第31図 廃マルチの回収および処理の課題(複数回答)



第32図 廃プラ対策の必要性および生プラマルチの有効性 (n=12)



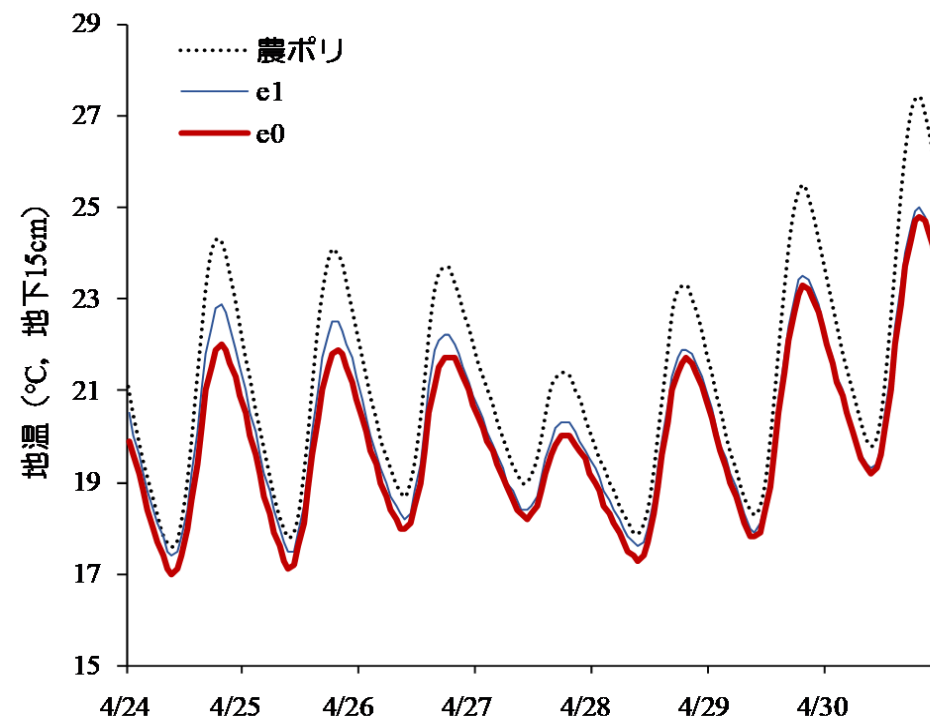
第33図 生プラマルチの普及課題(複数回答)



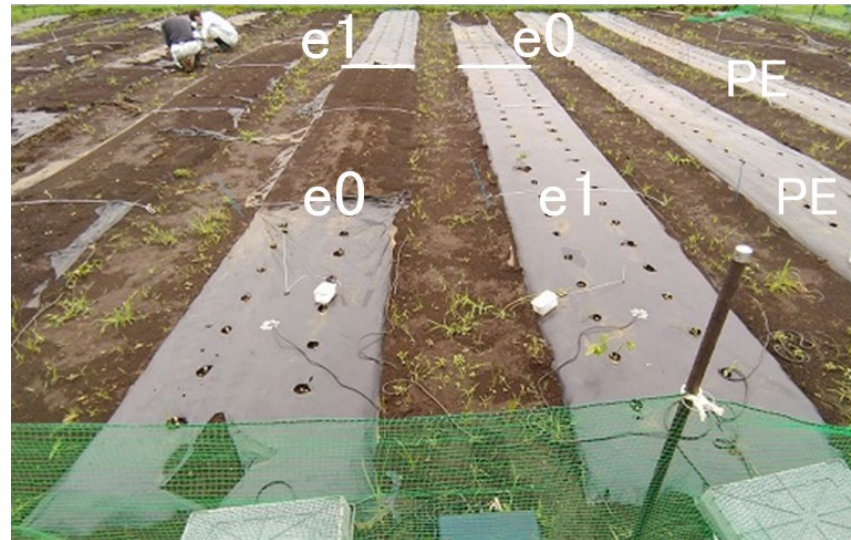
第34図 生プラマルチと酵素剤を組み合わせた栽培方法の普及に向けて必要な情報(複数回答)



第35図 エダマメの生育状況(左からe-0、e-1、農ポリ、6月5日撮影)



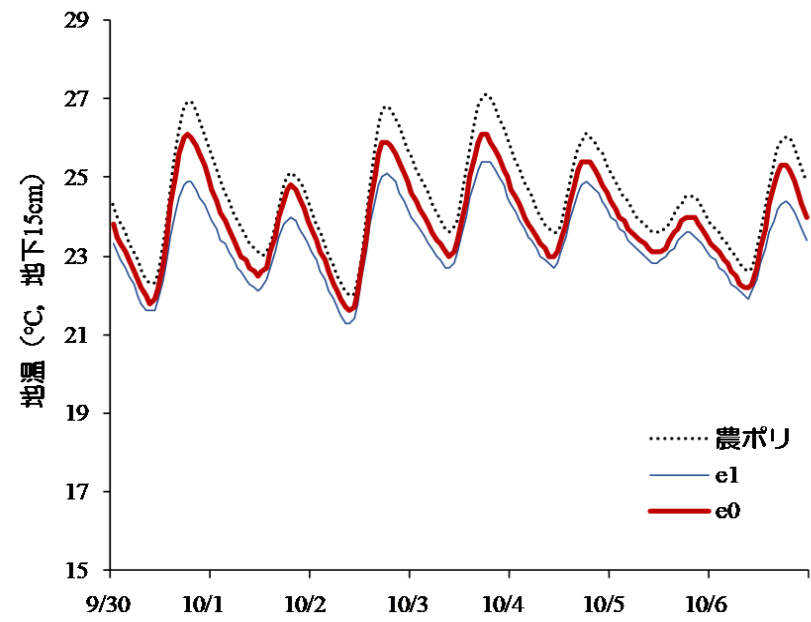
第36図 エダマメ播種後の地温推移(地下15cm)



第37図 エダマメ収穫後の暴風雨後の状況
(7月13日撮影、7月11日最大瞬間風速6.9m/s)



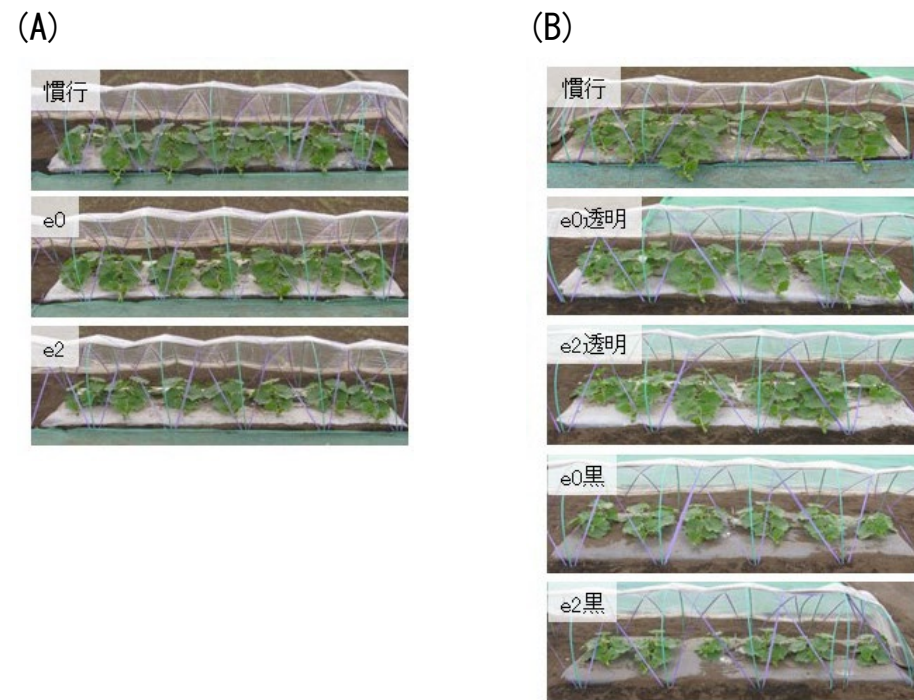
第38図 ダイコンの生育状況(10月16日撮影)



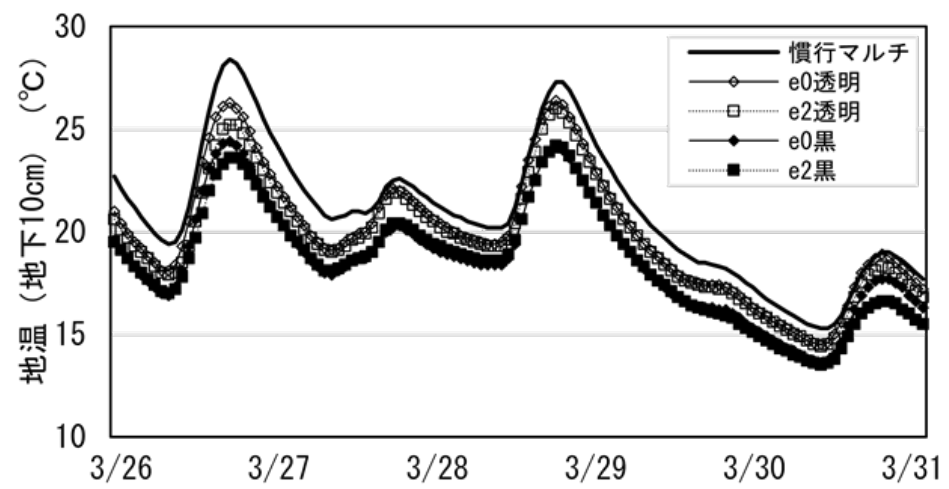
第39図 ダイコン播種後の地温推移(地下15cm)



第40図 収穫調査時のダイコン外観
(左からe-0、e-1、農ポリ、11月24日撮影)



第41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42図 麦マルチ栽培の各試験区における生育初期の地温



第43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



植え穴付近も比較的よく耐久した

一部に軽度のヒビ割れが見られる

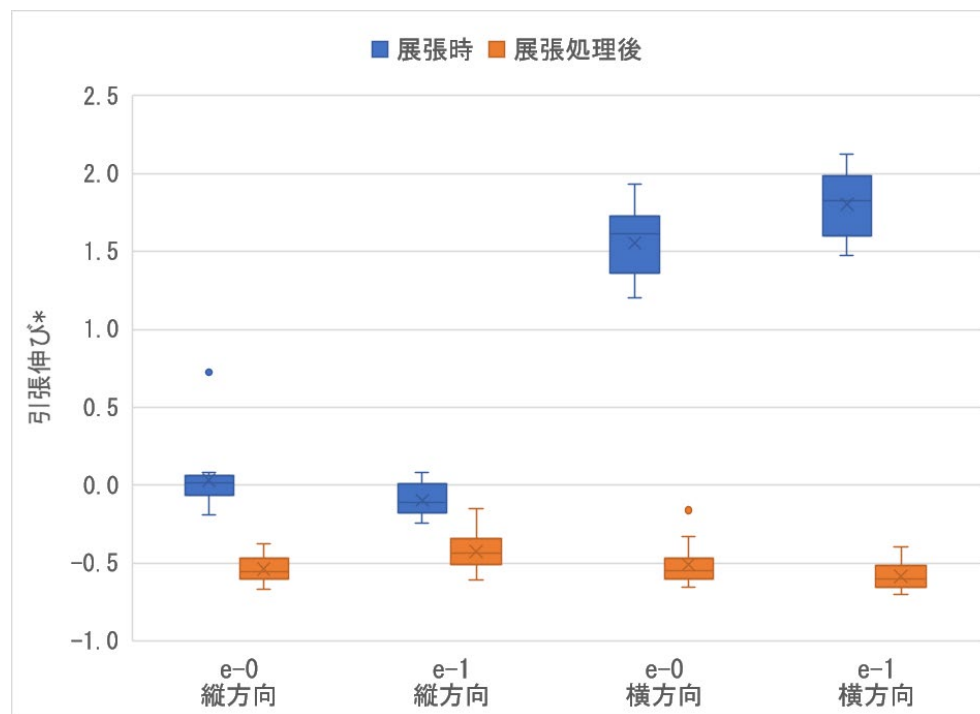
大きな亀裂の入った箇所があった

第44図 低標高地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



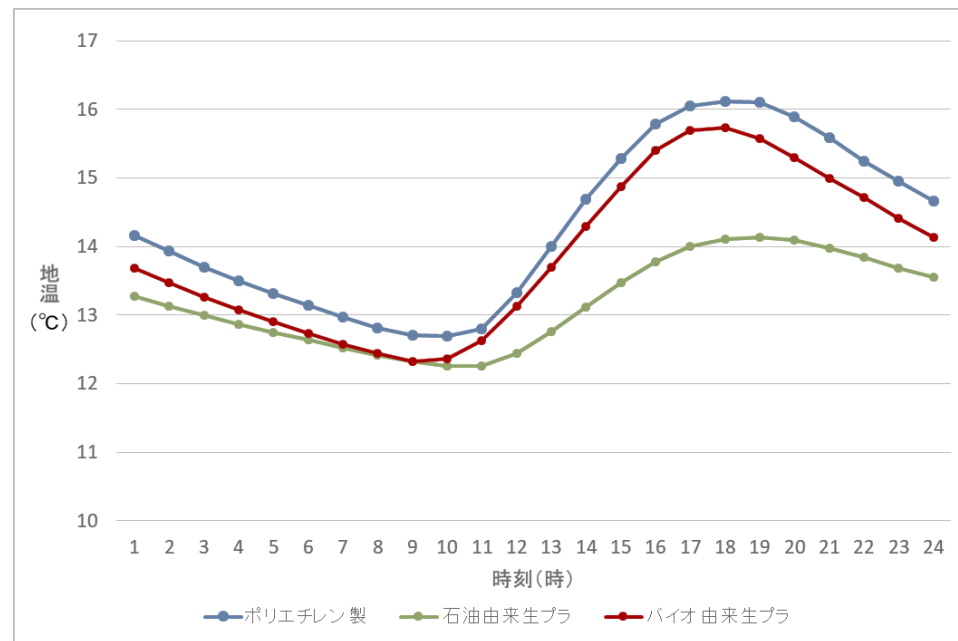
地際部で少し分解が始まっている 植え穴に小さな亀裂が見られる 植え穴から裂ける場合がある

第45図 高標高地露地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



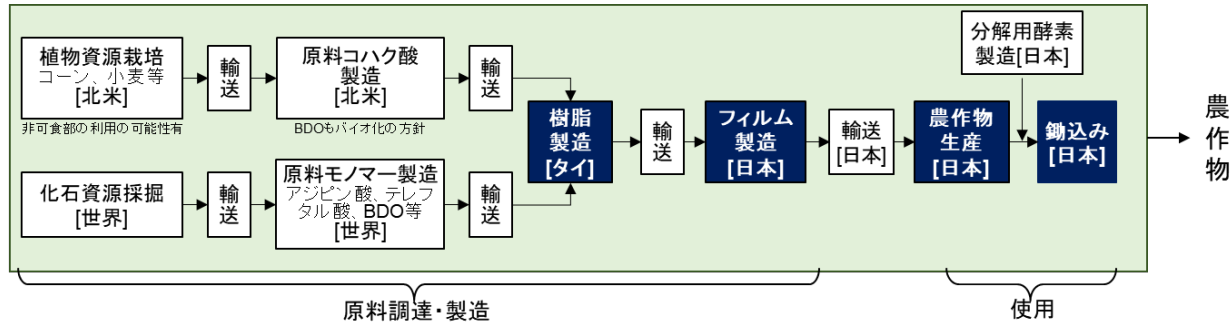
第46図 展張前後における試作フィルムの強度変化
(高標高地露地作スイートコーン)

*引張伸びは「e-0」縦方向、展張時の数値を1とした割合で表示

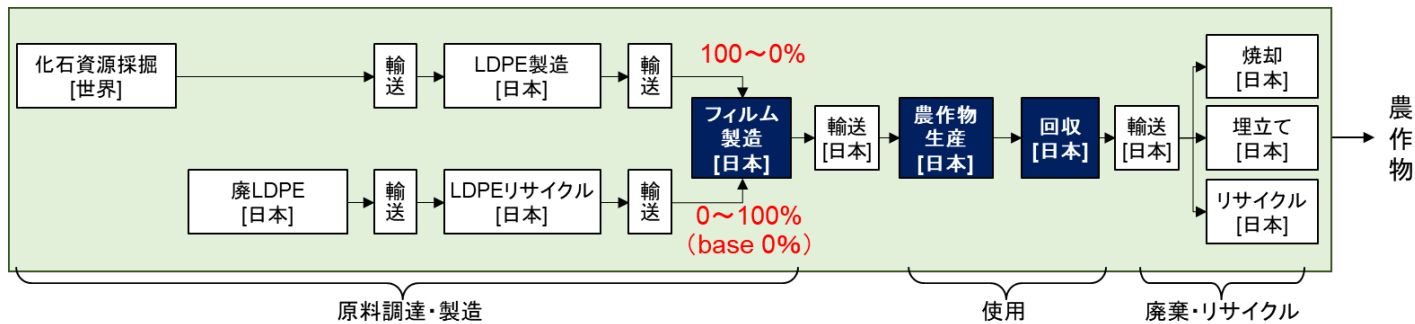


第47図 厳寒期(12月～1月)の平均地温の日変化

評価対象製品：バイオマス由来かつ生分解性のマルチフィルムを用いた作物栽培（今年度は酵素剤散布は考慮しない）



ベースライン：低密度ポリエチレン（LDPE、非分解性）製マルチフィルムを用いた作物栽培



第48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

機能単位：マルチフィルム面積 100m²





第49図-1 山梨県の農業者における情報収集の様子

上段:計測、録画対象の作業、下段:録画の様子(いずれも録画画像から映像を抽出)



第49図-2 山梨県の農業者における情報収集の様子
スイートコーンのポリマルチ剥ぎ取り作業の記録

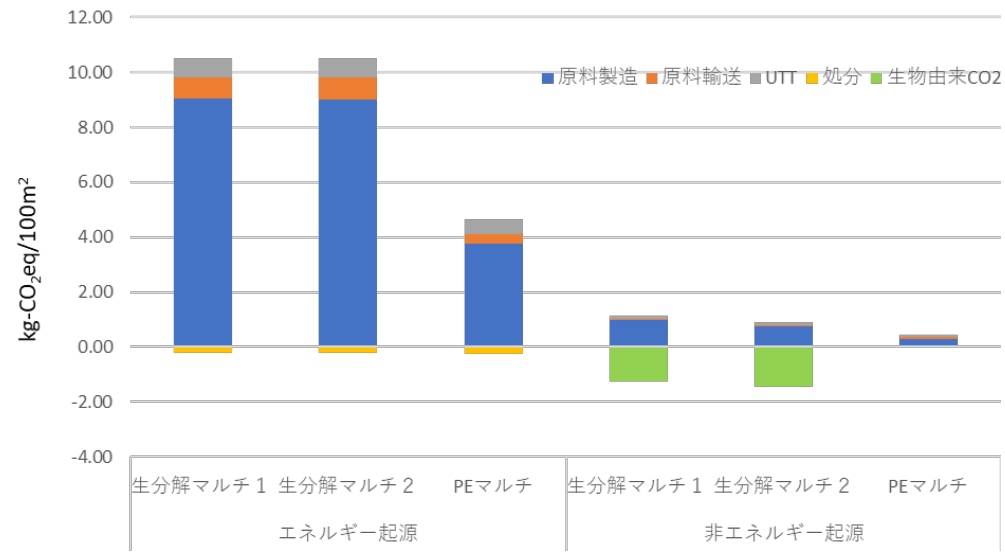


第49図-3 山梨県の農業者における情報収集の様子
スイートコーンの栽培後のすき込みの記録

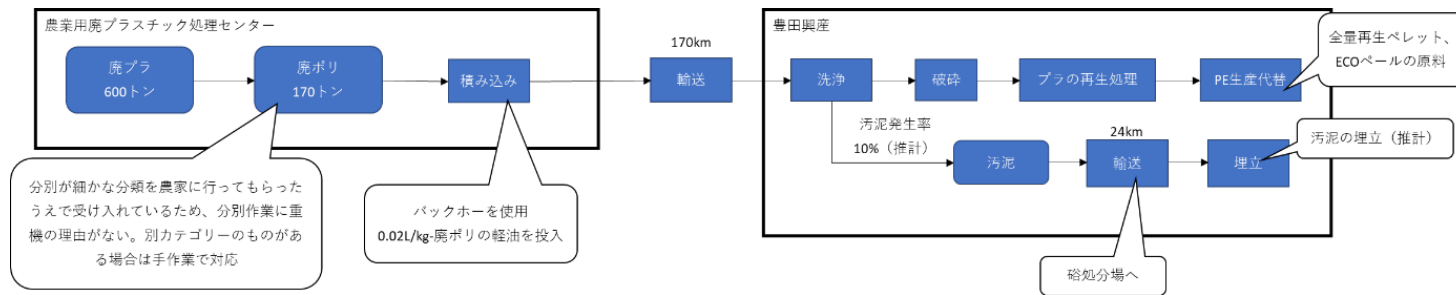


第49図-4 山梨県の農業者における情報収集の様子

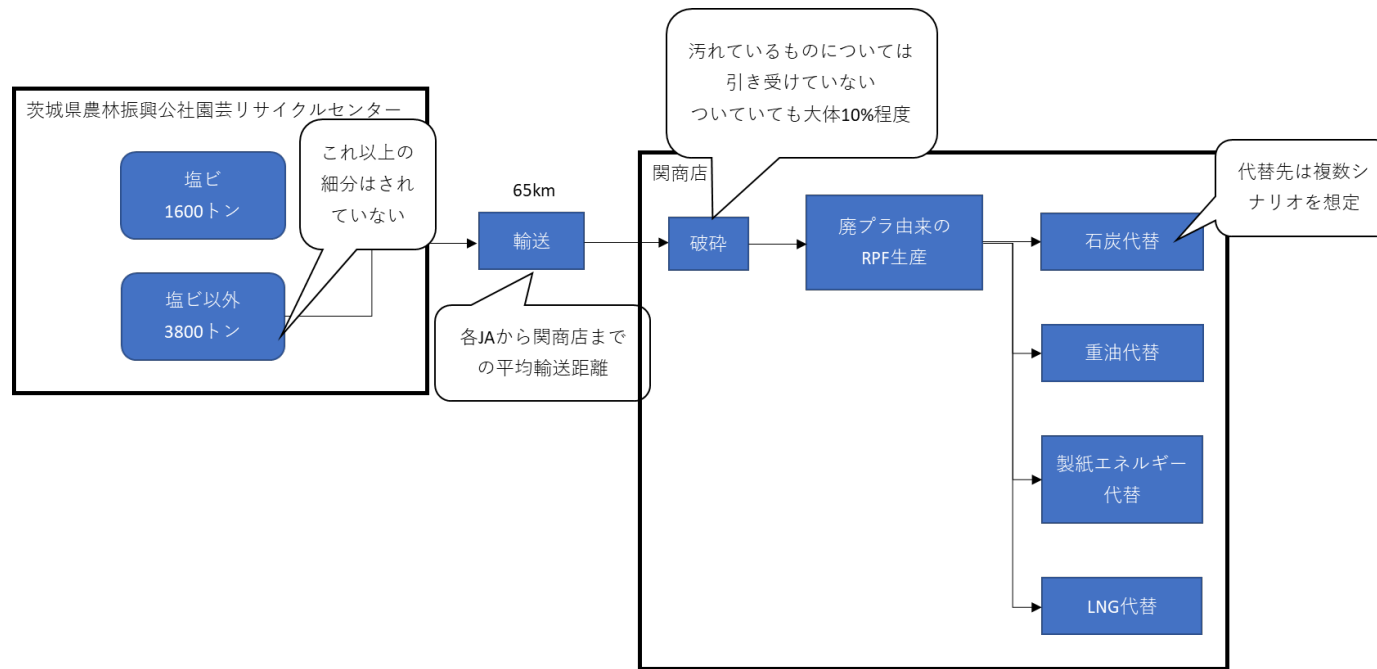
上段：ブロッコリーのポリマルチ剥ぎ取り作業、
下段：同、栽培後のすき込みの記録



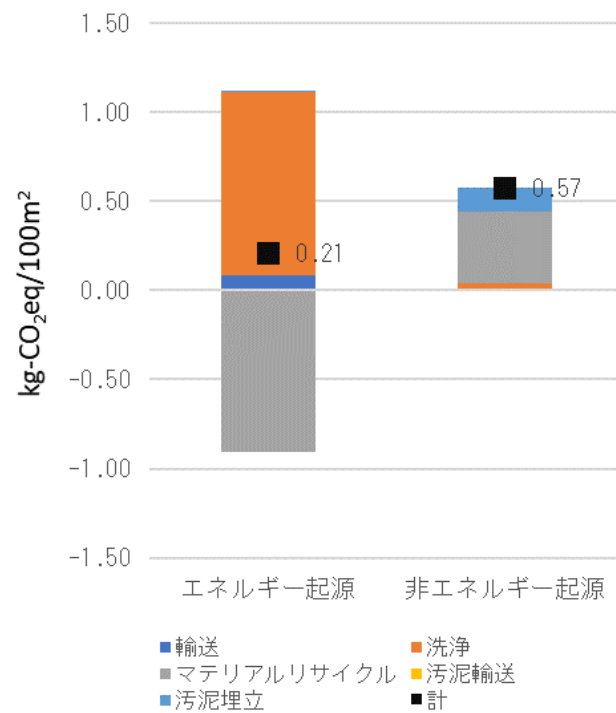
第50図 マルチフィルム製造におけるGHG排出量



第51図-1 回収ポリマルチの処分フローシナリオ推定(山梨県)



第51図-2 回収ポリマルチの処分フローシナリオ推定(茨城県)



第52図 山梨県の回収ポリマルチの処分(マテリアルリサイクル)におけるGHG排出量

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 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4表 配合シリーズ1のフィルムの強度変化(まとめ)

評価項目	サンプル名	評価方向	展張処理 <展張時から>	展張処理後埋設 <展張処理から>	最初から埋設 <展張時から>
柔軟性 (引張伸び)	配合a	縦	減少	減少	減少
		横	減少	減少	減少
	配合e	縦	減少	減少	減少
		横	減少	減少	減少
	配合c	縦	不変	減少	減少
		横	不変	減少	減少
	配合d	縦	減少	不変	不変
		横	減少	不変	減少
引張力	配合a	縦	不変	減少	減少
		横	増大	減少	減少
	配合e	縦	不変	減少	減少
		横	減少	減少	減少
	配合c	縦	増大	減少	減少
		横	増大	減少	不変
	配合d	縦	増大	不変	不変
		横	不変	減少	減少

第5表 配合シリーズ1のフィルムのGPC通常分析 一分子量算出まとめ一

		Mn		Mw		Mz		分散 (Mw/Mn)		Mp	
		RI検出	UV検出	RI検出	UV検出	RI検出	UV検出	RI検出	UV検出	RI検出	UV検出
配合a	展張処理	増大	減少	不変	不変	不変	増大	減少	増大	不変	不変
	展張後埋設1	減少	減少	減少	減少	不変	減少	増大	増大	不変	不変
	展張後埋設2	増大	不変	不変	不変	不変	不変	減少	増大	不変	不変
	最初から埋設1	減少	減少	減少	減少	減少	減少	増大	増大	不変	不変
配合e	最初から埋設2	増大	不変	不変	不変	不変	不変	減少	増大	不変	不変
	展張処理	不変	不変	不変	不変	不変	不変	減少	不変	不変	不変
	展張後埋設1	不変	減少	不変	不変	不変	不変	不変	増大	不変	不変
	展張後埋設2	増大	増大	不変	不変	減少	不変	減少	減少	不変	不変
配合c	最初から埋設1	不変	減少	減少	不変	減少	不変	不変	不変	不変	不変
	最初から埋設2	増大	不変	不変	不変	不変	不変	減少	減少	不変	不変
	展張処理	増大	減少	不変	不変	増大	増大	減少	増大	不変	不変
	展張後埋設1	不変	不変	不変	不変	不変	不変	不変	増大	不変	不変
配合d	展張後埋設2	増大	減少	不変	不変	不変	不変	減少	増大	不変	不変
	最初から埋設1	増大	増大	増大	不変	増大	不変	減少	減少	不変	不変
	最初から埋設2	増大	減少	不変	不変	減少	不変	減少	増大	不変	不変
	展張処理	増大	減少	不変	不変	不変	不変	減少	増大	不変	不変
配合d	展張後埋設1	増大	不変	不変	不変	不変	不変	不変	不変	不変	不変
	展張後埋設2	増大	減少	不変	不変	不変	不変	減少	増大	不変	不変
	最初から埋設1	増大	不変	不変	不変	不変	不変	減少	不変	不変	不変
	最初から埋設2	増大	減少	不変	不変	不変	不変	減少	増大	不変	不変

「展張後埋設1」「最初から埋設1」は約90日、
 「展張後埋設2」「最初から埋設2」は約180日埋設した。
 「展張処理」「最初から埋設1」は「展張時」、「展張後埋設1」は「展張処理」、「展張後埋設2」は「展張後埋設1」、
 「最初から埋設2」は「最初から埋設1」と比較した。

第6表 配合シリーズ1のフィルムのGPC通常分析 一低分子量部分の割合まとめ一

		LogM <3.5の割合	
		RI検出	UV検出
配合a	展張処理	不変	不変
	展張後埋設1	増大	増大
	展張後埋設2	減少	不変
	最初から埋設1	増大	増大
	最初から埋設2	減少	不変
配合e	展張処理	不変	不変
	展張後埋設1	増大	不変
	展張後埋設2	減少	不変
	最初から埋設1	不変	不変
	最初から埋設2	減少	不変
配合c	展張処理	減少	増大
	展張後埋設1	不変	減少
	展張後埋設2	減少	減少
	最初から埋設1	減少	減少
	最初から埋設2	減少	不変
配合d	展張処理	減少	増大
	展張後埋設1	不変	不変
	展張後埋設2	減少	減少
	最初から埋設1	減少	不変
	最初から埋設2	減少	減少

「展張処理」「最初から埋設1」は「展張時」、「展張後埋設1」は「展張処理」、「展張後埋設2」は「展張後埋設1」、「最初から埋設2」は「最初から埋設1」と比較した。

第7表 配合シリーズ1のフィルムのFT-IR分析結果

		認められる赤外吸収スペクトル	
		芳香族ポリエステル型	脂肪族ポリエステル型
配合a	展張処理	不変	不変
	展張後埋設1	増大	増大
	展張後埋設2	減少	不変
	最初から埋設1	増大	増大
	最初から埋設2	減少	不変
配合e	展張処理	不変	不変
	展張後埋設1	増大	不変
	展張後埋設2	減少	不変
	最初から埋設1	不変	不変
	最初から埋設2	減少	不変
配合c	展張処理	減少	増大
	展張後埋設1	不変	減少
	展張後埋設2	減少	減少
	最初から埋設1	減少	減少
	最初から埋設2	減少	不変
配合d	展張処理	減少	増大
	展張後埋設1	不変	不変
	展張後埋設2	減少	減少
	最初から埋設1	減少	不変
	最初から埋設2	減少	減少

「展張処理」「最初から埋設1」は「展張時」、「展張後埋設1」は「展張処理」、「展張後埋設2」は「展張後埋設1」「最初から埋設2」は「最初から埋設1」と比較した。

第8表 配合シリーズ2のフィルムの強度変化(まとめ)

評価項目	サンプル名	評価方向	展張処理 ＜展張時から＞	展張処理後埋設 ＜展張処理から＞	最初から埋設 ＜展張時から＞
柔軟性 (引張伸び)	e-0黒	縦	減少	減少	減少
		横	減少	不変	減少
	e-1黒	縦	減少	減少	減少
		横	減少	減少	減少
	e-2黒	縦	減少	減少	減少
		横	減少	不変	減少
引張力	e-0黒	縦	減少	不変	減少
		横	減少	不変	減少
	e-1黒	縦	減少	不変	減少
		横	減少	不変	減少
	e-2黒	縦	不変	減少	減少
		横	減少	減少	減少

「展張処理」「最初から埋設」は「展張時」、「展張処理後埋設」は「展張処理」と比較した。

第9表 配合シリーズ2 のフィルムのGPC通常分析 一分子量算出まとめ

		Mn		Mw		Mz		分散 (Mw/Mn)		Mp	
		RI検出	UV検出	RI検出	UV検出	RI検出	UV検出	RI検出	UV検出	RI検出	UV検出
e-0 黒	展張処理 <展張時から>	増大	減少	不変	不変	増大	増大	減少	増大	不変	不変
	展張後埋設1 <展張処理から>	増大	減少	減少	減少	減少	減少	減少	減少	増大	増大
	最初から埋設1 <展張時から>	増大	減少	減少	減少	減少	減少	減少	増大	増大	増大
e-1 黒	展張処理 <展張時から>	増大	減少	不変	不変	不変	増大	減少	増大	不変	不変
	展張後埋設1 <展張処理から>	増大	減少	減少	減少	減少	減少	減少	増大	増大	増大
	最初から埋設1 <展張時から>	増大	減少	減少	減少	減少	減少	減少	増大	増大	増大
e-2 黒	展張処理 <展張時から>	不変	減少	減少	不変	増大	増大	不変	増大	不変	減少
	展張後埋設1 <展張処理から>	増大	減少	減少	減少	減少	減少	減少	減少	増大	増大
	最初から埋設1 <展張時から>	増大	不変	減少	減少	減少	減少	減少	増大	増大	増大

「展張後埋設1」「最初から埋設1」は約90日埋設した。
 「展張処理」「最初から埋設1」は「展張時」、「展張後埋設1」は「展張処理」と比較した。

第10表 配合シリーズ2 のフィルムのGPC通常分析
—低分子量部分の割合まとめ—

		LogM <3.5の割合	
		RI検出	UV検出
e-0黒	展張処理 <展張時から>	減少	増大
	展張後埋設1 <展張処理から>	減少	増大
	最初から埋設1 <展張時から>	減少	増大
e-1黒	展張処理 <展張時から>	減少	増大
	展張後埋設1 <展張処理から>	減少	増大
	最初から埋設1 <展張時から>	減少	増大
e-2黒	展張処理 <展張時から>	増大	増大
	展張後埋設1 <展張処理から>	減少	増大
	最初から埋設1 <展張時から>	減少	増大

「展張処理」「最初から埋設1」は「展張時」、「展張後埋設1」は「展張処理」と比較した。

第11表 配合シリーズ2のフィルムのFT-IR分析結果

		認められる赤外吸収スペクトル	
		芳香族ポリエステル型	脂肪族ポリエステル型
e-0黒	展張処理 <展張時から>	大きく減少	不変 一部減少
e-1黒	展張処理 <展張時から>	大きく減少	不変 一部減少
e-2黒	展張処理 <展張時から>	大きく減少	不変 一部減少

第12表-1 配合シリーズ3のフィルムの強度試験まとめ1 ー柔軟性(引張伸び)ー

評価項目	サンプル名	評価方向	展張処理 <展張時から>	最初から埋設 <展張時から>
柔軟性 (引張伸び)	R2-1	縦	減少	減少
		横	減少	減少
	R2-2	縦	不変	減少
		横	不変	減少
	R2-3	縦	減少	減少
		横	減少	減少
	R2-4	縦	減少	減少
		横	減少	減少
	R2-5	縦	不変	減少
		横	不変	減少
	e-0_C	縦	減少	減少
		横	減少	減少

第12表-2 配合シリーズ3のフィルムの強度試験まとめ2 ー引張力ー

評価項目	サンプル名	評価方向	展張処理 ＜展張時から＞	最初から埋設 ＜展張時から＞
引張力	R2-1	縦	減少	減少
		横	減少	減少
	R2-2	縦	減少	減少
		横	減少	減少
	R2-3	縦	減少	減少
		横	減少	減少
	R2-4	縦	減少	減少
		横	減少	減少
	R2-5	縦	不変	減少
		横	不変	減少
	e-0_C	縦	減少	減少
		横	減少	減少

第13表 配合シリーズ3のフィルムのGPC通常分析 一分子量算出まとめ

		Mn		Mw		Mz		分散 (Mw/Mn)		Mp	
		RI検出	UV検出	RI検出	UV検出	RI検出	UV検出	RI検出	UV検出	RI検出	UV検出
R2-1	展張処理	増大	減少	不変	減少	不変	不変	減少	増大	不変	不変
	展張後埋設1	減少	減少	不変	不変	不変	減少	不変	増大	不変	不変
	最初から埋設1	減少	減少	減少	減少	減少	減少	減少	増大	不変	不変
R2-2	展張処理	増大	減少	減少	減少	減少	不変	減少	増大	減少	減少
	展張後埋設1	減少	減少	不変	不変	不変	減少	減少	増大	不変	不変
	最初から埋設1	減少	減少	減少	減少	減少	減少	減少	増大	不変	不変
R2-3	展張処理	増大	減少	減少	減少	減少	不変	減少	増大	減少	減少
	展張後埋設1	減少	増大	不変	減少	減少	減少	減少	減少	減少	不変
	最初から埋設1	減少	減少	減少	減少	減少	減少	減少	増大	減少	減少
R2-4	展張処理	増大	減少	減少	減少	不変	不変	減少	増大	減少	減少
	展張後埋設1	減少	増大	不変	減少	減少	減少	減少	減少	減少	不変
	最初から埋設1	減少	減少	減少	減少	減少	減少	減少	不変	減少	減少
R2-5	展張処理	増大	減少	不変	不変	増大	増大	減少	増大	不変	不変
	展張後埋設1	減少	不変	減少	減少	減少	減少	減少	減少	不変	不変
	最初から埋設1	減少	減少	不変	不変	不変	不変	減少	増大	不変	不変
e-0_C	展張処理	不変	減少	減少	減少	減少	不変	減少	増大	不変	減少
	展張後埋設1	増大	増大	不変	減少	減少	減少	減少	減少	減少	減少
	最初から埋設1	増大	減少	減少	減少	減少	減少	減少	増大	減少	減少

「展張後埋設1」「最初から埋設1」は約90日埋設した。

「展張処理」「最初から埋設1」は「展張時」、「展張後埋設1」は「展張処理」と比較した。

第14表 配合シリーズ3のフィルムのGPC通常分析
—低分子量部分の割合まとめ—

		LogM <3.5の割合	
		RI検出	UV検出
R2-1	展張処理	減少	増大
	展張後埋設1	増大	増大
	最初から埋設1	増大	増大
R2-2	展張処理	減少	増大
	展張後埋設1	減少	増大
	最初から埋設1	減少	増大
R2-3	展張処理	不変	増大
	展張後埋設1	減少	不変
	最初から埋設1	減少	増大
R2-4	展張処理	不変	増大
	展張後埋設1	減少	不変
	最初から埋設1	減少	増大
R2-5	展張処理	減少	増大
	展張後埋設1	減少	不変
	最初から埋設1	減少	増大
e-0_C	展張処理	増大	増大
	展張後埋設1	減少	不変
	最初から埋設1	減少	増大

「展張処理」「最初から埋設1」は「展張時」、「展張後埋設1」は「展張処理」と比較した。

第15表 配合シリーズ3のフィルムのFT-IR分析結果

		認められる赤外吸収スペクトル	
		芳香族ポリエステル型	脂肪族ポリエステル型
R2-1	展張処理 <展張時から>	大きく減少	大きく減少
R2-2	展張処理 <展張時から>	大きく減少	大きく減少
R2-3	展張処理 <展張時から>	大きく減少	大きく減少
R2-4	展張処理 <展張時から>	大きく減少	不変
R2-5	展張処理 <展張時から>	大きく減少	大きく減少
e0_C	展張処理 <展張時から>	減少	減少

第16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	記載無し	食品中間原料、微生物の製造受託サービス	30、200、1k、7.5k、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	記載無し
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	記載無し
日本マイクロバイオファーマ株式会社	東京都中央区	記載無し	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	記載無し
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	記載無し
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	~12kL

試験区	主径長 (cm)	収穫本数 (本/穴)	着莢数 (個/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	31.9	2.0	40.1	96.1	41.0	41.7	716
e-1	30.3	2.0	39.1	96.0	48.8	34.8	691
農ポリ	33.0	2.0	41.4	96.6	45.4	40.2	766
有意性 ^x	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

^z重量割合. ^y栽植密度3,703穴/10a (畝間180cm, 株間30cm, 2条) として莢収量を算出した^z. Tukeyの多重検定 (n=3) によりn.s.は有意差なしを示す.

試験区	葉重 (g)	根重 (g)	葉長 (cm)	根長 (cm)	根径 (cm)	発生率(%)		
						横縞症	亀裂褐変症	岐根
e-0	271	1,412	38.2	38.8	7.6	0	0	0
e-1	292	1,407	39.3	39.3	7.6	0	0	0
農ポリ	287	1,323	38.6	37.2	7.5	0	0	0
有意性 ^z	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

^zTukeyの多重検定 (n=3) によりn.s.は有意差なしを示す.

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	慣行マルチ	91.9	33.6	17.0	25.9	16.8	10.1
	e0	76.9	32.1	15.1	22.8	14.4	10.0
	e2	71.0	31.5	14.1	21.1	12.9	9.9
麦マルチ 栽培	慣行マルチ	79.3	35.1	15.5	22.9	15.0	10.1
	e0透明	71.7	32.8	14.4	21.5	12.8	9.8
	e2透明	66.3	30.0	14.1	21.0	13.5	9.6
	e0黒	57.2	33.6	11.6	16.7	9.0	9.3
	e2黒	56.1	28.7	12.4	18.1	10.8	9.4

z: 試験区は通常栽培で使用了したマルチはベッド部分/つる先部分として、e0はe0透明/e0黒、e2はe2透明/e2黒、麦マルチ栽培は使用了したマルチはベッド部分/つる先部分として、e0透明はe0透明/麦マルチ、e2透明はe2透明/麦マルチ、e0黒はe0黒/麦マルチ、e2黒はe2黒/麦マルチ

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)	第1果			果皮厚 ^y (cm)			糖度 ^y (Brix)	10a 当たり収量 ^x (t/10a)
									果重(g)	果高(cm)	果径(cm)	赤道部	果梗部	花落ち部		
通常栽培	慣行マルチ	4/29-5/18	6/17-7/2	3.2	28.8	1821	11.2	17.0	1858	10.8	17.4	2.3	1.3	1.9	13.1	2.36
	e0	4/27-5/18	6/17-7/2	3.1	27.6	1790	11.2	17.0	1697	11.0	16.9	2.3	1.3	1.8	13.1	2.25
	e2	4/29-5/18	6/17-7/2	3.2	27.7	1751	11.1	16.7	1816	11.1	17.2	2.3	1.4	1.9	13.1	2.27
麦マルチ栽培	慣行マルチ	4/27-5/18	6/17-7/2	2.3	27.4	1590	10.9	16.0	1757	11.1	16.9	2.2	1.3	1.9	12.0	1.65
	e0透明	4/27-5/18	6/17-7/2	1.9	25.3	1420	10.2	15.3	1449	10.0	15.4	2.0	1.2	1.5	12.7	1.21
	e2透明	4/29-5/18	6/17-7/2	1.7	23.8	1475	10.4	15.7	1586	10.4	16.3	2.2	1.4	1.8	12.7	1.09
	e0黒	4/29-5/18	6/17-7/2	1.8	21.9	1454	10.2	15.8	1473	10.0	15.9	2.1	1.2	1.8	12.5	1.13
	e2黒	4/29-5/18	6/17-7/2	1.8	25.5	1420	10.5	15.3	1455	10.5	15.4	2.0	1.5	1.7	11.7	1.10

z: 試験区は通常栽培で使用了マルチはベッド部分/つる先部分として、e0はe0透明/e0黒、e2はe2透明/e2黒、麦マルチ栽培は使用了マルチはベッド部分/つる先部分として、e0透明はe0透明/麦マルチ、e2透明はe2透明/麦マルチ、e0黒はe0黒/麦マルチ、e2黒はe2黒/麦マルチ、y: 果皮厚と糖度は第1果で測定した値の平均値、x: 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 低標高地促成作スイートコーンの生育、収量、および品質

	茎葉重	穂重	先端不稔	収穫適期
	(g)	(g)	(cm)	
試作フィルム e-0	516±80	433±37	1.6	6月10日
試作フィルム e-1	529±110	447±50	1.3	6月11日
市販生プラマルチフィルム	481±123	429±39	0.6	6月10日
PE製マルチフィルム	516±98	430±37	0.1	6月9日

z:表の±は標準偏差

第22表 高標高地露地作スイートコーンの生育、収量、および品質

	茎葉重	穂重	先端不稔	収穫適期
	(g)	(g)	(cm)	
試作フィルム e-0	436±48 ^z	437±47	1.4	8月24日
試作フィルム e-1	439±48	431±43	1.2	8月24日
市販生プラマルチフィルム	438±45	454±42	0.7	8月24日
PE製マルチフィルム	438±32	446±39	1.0	8月23日

z:表の±は標準偏差

第23表 施設栽培イチゴにおけるマルチフィルムの違いと収量

フィルム	10a当たり収量(kg/10a) ¹⁾		
	12月 ²⁾	1月	計
ポリエチレン製マルチ	221	782	1003
石油由来生分解性マルチ	192	814	1006
バイオマス由来生分解性マルチ	181	689	871

注1) 間口15.4mのハウス、株間25cmで8条に定植する場合10a当たり6,350株

注2) 12/17~12/31

第24表-1 農業生産フォアグラウンドデータ収集用調査表
(農業生産調査表、生分解性マルチフィルム用)

作付け品種：味来(生分解マルチ栽培)
(参考)
生分解マルチ(透明)栽培面積：
生分解マルチ(黒)栽培面積：
トンネル+生分解マルチ(透明)栽培面積：
トンネル+生分解マルチ(黒)栽培面積：

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-ℓ)	機械稼働 時間 (107-ℓ)	実習生 人数 (107-ℓ)	実習生 作業時間 (107-ℓ)	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 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 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		取 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						

第24表-2 農業生産フォアグラウンドデータ収集用調査表
(農業生産調査表、ポリマルチ用)

作付け品種：味来(ポリマルチ栽培)
(参考)
ポリマルチ(透明)栽培面積：
ポリマルチ(チョコ)栽培面積：
ポリマルチ(黒)栽培面積：
トンネル・ポリマルチ(透明)栽培面積：
トンネル・ポリマルチ(チョコ)栽培面積：
トンネル・ポリマルチ(黒)栽培面積：

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-kg)	機械稼働 時間 (107-h)	実習生 人数 (107-h)	実習生 作業時間 (107-h)	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 除草土 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・マルチ展開	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		摘葉(除草)	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		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25表 LCAおよび経済性評価用調査実施概要

生分解樹脂-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 MGC Biochem社(2018年)	ecoinvent	
A2	ポリマルチ製造	三菱ケミカルアグリドリーム社(2013年度実績)	IDEA、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社(2019年度実績)		
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	スイートコーントネルマルチ /茨城生産者	茨城県農業試験場紹介圃場、2020年6月15日ポリマルチ回収、現地調査、 調査方法：ビデオ撮影 実施予定：投入産出情報(物財・金銭情報)、ただし調査表配布後延期	n/a	
C2	スイート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、2020年度調査延期		
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	2021年2月5日すき込み現地調査 投入産出情報(物財・金銭情報)山梨県農業技術センター聞き取り作成	IDEA 温対法係数	
C4	ブロッコリー(高冷地・夏秋) ポリマルチ /山梨生産者	2021年2月5日すき込み、回収現地調査 投入産出情報(物財・金銭情報)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	2020年12月4日すき込み現地調査 投入産出情報(物財・金銭情報)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) ポリマルチ /山梨県甲斐市生産者	2020年12月4日すき込み、回収現地調査 投入産出情報(物財・金銭情報)山梨県農業技術センター聞き取り作成		
PEマルチ処分用		フォアグラウンドデータ収集		バックグラウンドデータ
D1	山梨県	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(2021年12月)		IDEA、温対法係数
D2	茨城県	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(2021年12月)		

第26表 評価対象マルチフィルムの重量

	kg/100m ²
生分解マルチフィルム1	2.50
生分解マルチフィルム2	2.50
PEマルチフィルム	1.84

第27表 圃場10a当たりの作物収穫量とマルチフィルム被覆面積

作物 (品種)	栽培地	収量 (kg/10a)	マルチフィルム被覆面積* (m ² /10a)
スイートコーン (ゴールドラッシュ90)	山梨県	1,800	570
ブロッコリー (おはよう)	山梨県	1,333	900

*マルチフィルム投入量より推定

第28表 二つのケースの農業生産におけるGHG排出量

作物		GHG排出 (kg-CO ₂ eq/100m ² -マルチ)			
		エネルギー起源		非エネルギー起源	
		生分解マルチ	ポリマルチ	生分解マルチ	ポリマルチ
スイートコーン	マルチフィルム回収	0.0	0.2	0.0	0.1
	マルチフィルム回収以外	47.3	47.3	21.7	21.7
	計	47.3	47.5	21.7	21.8
ブロッコリー	マルチフィルム回収	0.0	0.4	0.0	0.1
	マルチフィルム回収以外	94.5	94.4	16.8	16.8
	計	94.5	94.8	16.8	16.9

第29表 生分解マルチフィルムおよびポリマルチのライフサイクルインベントリ分析結果

生分解性フィルム配合1

(単位)	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	9.80	0.49	0.39	47.3~ 94.5	0.00	57.9~ 105.2	4.12	0.27	0.29	47.5~ 94.8	0.21	52.3~ 99.7	-5.68	-0.22	-0.11	0.20~ 0.25	0.21	-5.65~ -5.60
非エネルギー起源	-0.25	0.12	0.02	16.8~ 21.7	5.19	21.9~ 26.8	0.36	0.08	0.01	16.9~ 21.8	0.57	17.9~ 22.8	0.61	-0.04	0.00	0.05~ 0.06	-4.62	-4.01~ -4.00
合計	9.55	0.61	0.41	69.0~ 111.3	5.19	84.7~ 127.1	4.48	0.35	0.30	69.2~ 111.6	0.79	75.2~ 117.5	-5.08	-0.26	-0.11	0.25~ 0.31	-4.41	-9.66~ -9.60

生分解性フィルム配合2

(単位)	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	9.82	0.49	0.39	47.3~ 94.5	0.00	58.0~ 105.2	4.12	0.27	0.29	47.5~ 94.8	0.21	52.3~ 99.7	-5.70	-0.22	-0.11	0.20	0.21	-5.67~ -5.62
非エネルギー起源	-0.66	0.12	0.02	3.6~ 16.8	5.13	21.4~ 26.3	0.36	0.08	0.01	16.9~ 21.8	0.57	17.9~ 22.8	1.02	-0.04	0.00	0.05	-4.55	-3.53~ -3.52
合計	9.16	0.61	0.41	50.9~ 111.3	5.13	84.3~ 126.6	4.48	0.35	0.30	69.2~ 111.6	0.79	75.2~ 117.5	-4.68	-0.26	-0.11	0.25	-4.34	-9.20~ -9.14

第30表 経済評価に使用した指標(ケース1)

(/10a)	スイートコーン			ブロッコリー		
	生分解マルチ	ポリマルチ	Δ(ポリ-生分解)	生分解マルチ	ポリマルチ	Δ(ポリ-生分解)
マルチフィルム使用量 (m ²)	570	570		900	900	
マルチフィルム経費 (円)	17,100	5,700	-11,400	16,533	5,511	-11,022
その他経費 (円)	83,592	83,662	69	76,897	77,029	132
作業人員×時間	28	32	4	71	72	1
人件費 (円)*	28,000	32,000	4,000	71,000	72,000	1,000
農地賃借料 (円)**	12,868	12,868		12,868	12,868	
農業機械 減価償却***	100,000	100,000		100,000	110,000	
エネルギー起源GHG (kg-CO ₂ eq)	331	298	-32	945	897	-48
GHG総量 (kg-CO ₂ eq)	482	429	-53	1,143	1,058	-86
収量 (kg)	1,800	1,800		1,333	1,333	
生産金額 (円)	367,200	367,200		402,566	402,566	

*甲斐市農業委員会、令和2年度甲斐市農繁期労働賃金より1,000円/人・時間とした

**甲斐市農業委員会、平成30年農地賃借料情報より12,868円/10a・年とした

***推定値

第31表 経済評価結果(ケース1)

(/10a)	スイートコーン			ブロッコリー		
	生分解マルチ	ポリマルチ	Δ(ポリー生分解)	生分解マルチ	ポリマルチ	Δ(ポリー生分解)
時間当たりの所得(円/時間)	4,487	4,155	-332	1,764	1,738	-26
所得率	52%	57%	5%	45%	45%	0%
環境効率(エネルギー起源GHG)(円/時間・kg-CO ₂ eq)	13.6	13.9	0.4	1.9	1.9	0.1
環境効率(総GHGベース)(円/時間・kg-CO ₂ eq)	9.3	9.7	0.4	1.5	1.6	0.1

第32表 経済評価に使用した指標(ケース2)

(/10a)	スイートコーン			ブロッコリー		
	生分解マルチ	ポリマルチ	Δ(ポリー生分解)	生分解マルチ	ポリマルチ	Δ(ポリー生分解)
マルチフィルム使用量(m ²)	570	570		900	900	
マルチフィルム経費(円)	22,800	5,700	-17,100	22,044	5,511	-16,533
その他経費(円)	83,592	83,662	69	76,897	77,029	132
作業人員×時間	28	32	4	71	72	1
人件費(円)*	28,000	32,000	4,000	71,000	72,000	1,000
農地賃借料(円)**	12,868	12,868		12,868	12,868	
農業機械 減価償却***	100,000	100,000		100,000	110,000	
エネルギー起源GHG(kg-CO ₂ eq)	331	298	-32	945	897	-48
GHG総量(kg-CO ₂ eq)	482	429	-53	1,143	1,058	-86
収量(kg)	1,800	1,800		1,333	1,333	
生産金額(円)	367,200	367,200		402,566	402,566	

*甲斐市農業委員会、令和2年度甲斐市農繁期労働賃金より1,000円/人・時間とした

**甲斐市農業委員会、平成30年農地賃借料情報より12,868円/10a・年とした

***推定値

第33表 経済評価結果(ケース2)

(/10a)	スイートコーン			ブロッコリー		
	生分解マルチ	ポリマルチ	Δ(ポリー生分解)	生分解マルチ	ポリマルチ	Δ(ポリー生分解)
時間当たりの所得(円/時間)	4,284	4,155	-128	1,687	1,738	52
所得率	49%	57%	8%	42%	45%	3%
環境効率(エネルギー起源GHG)(円/時間・kg-CO ₂ eq)	13.0	13.9	1.0	1.8	1.9	0.2
環境効率(総GHGベース)(円/時間・kg-CO ₂ eq)	8.9	9.7	0.8	1.5	1.6	0.2