令和元年度環境省委託業務

令和元年度

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 2 年 3 月

三菱ケミカル株式会社

要旨

本事業は、エネルギー由来の carbon dioxide(CO_2)排出やプラスチック廃棄物など環境への影響を最小限にとどめつつ、農業生産を安定化かつ向上させる新しい農業、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、生分解性かつ石油資源代替のプラスチックを改良し、その分解を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フィルムをより多くの作物や地域に拡大していく指針を作る。

事業初年度である令和元年度は第 2 四半期から事業遂行の体制を整えた上で、以下の検討を遂行した；

i. マルチフィルムの応用拡大を可能とする新規素材を獲得する目的で、本年度は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質の新規素材候補を複数得ることを試みた。その結果、新規に開発検討した複数の新規素材候補から 3 種類の素材に絞り込むことができた。これらを少量試作し、素材の評価試験に供した。この評価の結果から一つの新規素材候補を選択し、本候補を用いて農業用フィルムに適した配合を考案し、この配合でフィルムを試作してフィルムの評価試験に供した。これをもって本年度の予定は達成された。

ii. フィルムの製造コストを抑える素材や加工法を獲得する目的で、本年度は生産設備の改良による素材の生産性の効率化を試みた。課題は、求める性能を発揮する素材を効率良く生産しようとするとペレット化が難しいことであった。試作設備の改良を検討し、設計を終えた。同時に、ペレット化に関わる素材製造段階の諸条件を詳細に検討することによって、生産条件の改変を計画した。この新たな生産条件に沿って、商用生産設備にて新規素材の試験生産を試み、所定の性能を持つ素材が生産できることを確認した。これをもって本年度の予定は達成された。

iii. 素材の選択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目的で、本年度は、土壌中に埋設した素材の分解に伴う CO_2 の発生量を、再現性良く高速に評価するため、測定方法の半自動化を試みた。その結果、高感度かつ自動測定が可能な計測装置と、試料から放出される気体を精度高く採取できる機構を組み合わせ、測定に係る諸条件を検討することにより、半自動化測定システムの基盤が整った。また、土壌中での生分解性素材の分解の動態を把握するため、炭素安定同位体を用いた分析評価方法の準備を行った。さらに、試作した素材およびフィルムについて、酵素剤によって分解することを確認する試験方法を開発し、新規素

材やこれを用いたフィルムの酵素による分解の程度を評価した。複数の試験圃場にて新規素材を用いた試作フィルムを実際の屋外環境下に曝した上で酵素剤処理も行い、新規素材がマルチフィルムに適した性質を持っていること、酵素剤処理が有効な可能性があることを明らかにした。これらをもって本年度の予定は達成された。

iv. 酵素剤の低コスト化のため効率的な生産にめどを立てる目的で、本年度は酵素を生産する微生物の改良に向けた準備を行った。その結果、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を整えた。さらに、これらの遺伝子配列情報を基に種々の準備を経てデータベースから選び出された候補遺伝子について、染色体上の部位特異的な遺伝子破壊方法と簡便な酵素生産性の検出方法を使った遺伝子の検証を開始した。これらをもって本年度の予定は達成された。

v. 新規な生分解性素材を用いたフィルムと酵素剤の組合せを廃棄処理までを想定して農地で実証、評価する目的で、本年度は、フィルムの展張とこれを用いた野菜の栽培および酵素剤処理の予備検討、並びに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開始した。その結果、試験圃場での新規素材を使った試作フィルムを用いたダイコン栽培における収穫物は、分解しない polyethylene 製フィルムと同等であり、新規素材をマルチフィルムに用いる場合の特性および酵素剤処理の予備的な情報が得られた。また、農家および農業関係団体への聞き取りでは、生分解性マルチフィルムへの期待と要望が受け取れた。これらをもって本年度の予定は達成された。

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(life cycle assessment 以下 LCA)と経済性評価を行う目的で、本年度は、今後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 の結果を解析して、評価領域とベースラインを検討し、それぞれを決定した。また、関連する文献、農業経営の情報、農家の実態等の予備調査により、評価結果へ影響を与える重要因子やその前提の置き方、得るべき 1 次情報、2 次情報の選択、経済評価項目と評価値算出の方法など、調査の基本方針を決定した。これらをもって本年度の予定は達成された。

Summary

The purpose of this project is to promote a new agricultural system. The new system minimizes environmental impacts such as energy-derived CO2 emissions and plastic waste while stabilizing and improving agricultural production. We try to improve biodegradable plastics as a substitute for petroleum resources and control the degradation of these plastics by enzymatic treatment. In order to integrate this new technology into an agricultural system, we will use it in real agriculture field, and evaluate LCA and economics.

Since the second quarter of this year, we have set up a project working team and have performed the following tasks:

1. Development of new biodegradable and biomass plastic

   We have developed new aliphatic polyester polymers to improve the performance of agricultural mulching films. From several polymers, three polymers, "Polymers A, B, and C," with the properties needed to make films, were selected.

   One of the three, "Polymer A", had a good preliminary evaluation. We used this "Polymer A" to produce new formulations of film on a trial facility and provided it for subsequent tasks.

2. Process improvement for efficient polymer production

   Various attempts are needed to reduce the production cost of mulching film. This task sought to improve the final process of polymer production so that new polymers could be produced stably. To ensure that new polymers are pelletized stably, part of the trial facilities need to be modified. Therefore, we designed the remodeling and drafted the remodeling plan.

   In parallel with the remodeling job, we reviewed the polymerization conditions of the polymer in detail and found a new recipe. Using this recipe, we confirmed that a new polymer would be produced in a commercial plant.

3. Development of technology to support the imperilment of polymer and enzyme treatment

We need windows to properly monitor the control of biodegradation by enzyme treatment. Four approaches have been tried. This year, we devised a measurement system to detect CO2 released when biodegradable polymer mixed in soil decomposes. This system can perform measurement work semi-automatically.

When the polymer decomposes in the soil, the substances released from the polymer migrate. We planned to make polymers incorporating stable isotopes of carbon to track this migration.

A procedure was created to confirm that newly made polymers and films were decomposed by enzymes. This procedure allowed the selection of good polymer candidates.

We did not only work in the lab, but also field tests on mulching films made with the new polymers. Before testing on real farmland, we checked the properties of the new film and the effect of the enzyme treatment. The new polymer performed almost as well as existing products. In addition, the effect of the enzyme treatment became clear.

4. Preparation for improvement of the microorganism producing the enzyme

In order to reduce the cost of enzyme preparations, we are trying to select genes that the microorganism has that are strongly involved in enzyme production. This year, a database of genes specific to enzyme production was established. From this database, more than 100 target gene candidates were selected.

In next step, we need to prove that the candidate gene is indeed involved in enzyme production. We created the proof system and started checking candidate genes.

5. The preparation for the verification test of the new system

We would like to conduct field trials using the new biodegradable mulching film and enzyme treatment including final processing of the film. Vegetables (radish) grew as well as controls in a preliminary test of this new system conducted by the agricultural experiment organizations. We have learned that enzymatic treatment may also be effective.

We also interviewed farmers who currently use biodegradable mulching films. As a result, it became clear that the biodegradable material was satisfactory and unsatisfactory. This information is important for promoting the application of the new system.

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

This year, we tried to systematize the evaluation methods to be implemented including assumptions. Assessment areas and baselines were determined by analysis of various LCAs in the past.

In addition, the basic policy of the study was determined based on a preliminary survey of related literature, information on farm management, and the actual situation of farmers. We believe it is particularly important to determine the important factors that influence the evaluation results, how to make assumptions about the factors, and the primary and secondary information to be obtained.

We have also decided where to get the numerical values and how to use them to make an economic assessment.

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 6
第 1 章　新規素材の開発 7
1. 検討の概要 7
2. 材料および手法 7
3. 結果および考察 8
第 2 章　新規生分解性プラスチックの分解制御 11
1. 検討の概要 11
2. 材料および手法 11
3. 結果および考察 15
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 22
1. 検討の概要 22
2. 材料および手法 22
3. 結果および考察 25
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 26
1. 検討の概要 26
2. 材料および手法 26
3. 結果および考察 27
4. 実証試験の拡充のための取組 27
第 5 章　ライフサイクル検証・評価 28
1. 検討の概要 28
2. 材料および手法 28
3. 結果および考察 34
図表 38
参考 1　本事業に関わる共同実施者等との打合せ記録 131
参考 2　文献 135
謝辞 138

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 世紀にわたる開発の成果によって様々な用途で社会に貢献する製品を生み出し、例えば農業用土壌被覆材(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、使用後に廃棄される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 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、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 CO_2 排出量は増加となる。

本事業では；

- 再生可能な植物資源由来の生分解性プラスチックである polybutylene succinate(PBS、商品名:BioPBS)を基礎素材として、十分な性能を持った上でコストを抑えられる新たなプラスチック素材（以下、新規素材）やフィルム用の配合、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 CO_2 の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 polyethylene(以下、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 3,400 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 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。これは、本事業で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ている。

また、新規素材とその成形加工方法は、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製品化される。現在の成形加工技術は PE、polypropylene(以下、PP)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を行うことは容易ではない。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向上させ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に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コスト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、コストが押し上げられている。

このような要因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要因となっている。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、経済的な判断を正しく行うことが難しい。

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、想定どおりの土壌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。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、後の耕起作業や風の力で掘り起こされたりして、フィルムの断片が風に飛ばされて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、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在庫期間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、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た場合、そ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、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て明らかにしておく必要がある。

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、生分解性とフィルム成形などに適した物性のバランスが優れた新規のプラスチックを新たに複数開発する。また、他の実施項目の試験に素材試料を提供する。

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の低コスト化、加工性を含む物性の改良、プロセスの改良などで抑えることを目指す。分解性があることによって多品種生産とその在庫、短い在庫期間などコストが押し上げられていることには、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、新規素材の生産に適したプロセスを検討し、これを基に素材製造プロセスおよび素材試作設備の改良を実施する。

この検討を「実施項目 1 新規素材の開発」の一項目とする。

3-3　生分解の制御が十分でないことへの対応

素材の分解の抑制と開始を、利用場面に関わらず、任意に制御する技術の実用化に向けた実証を行う。まず、この開発を進めるための基礎技術として、生分解性素材の土壌環境中での分解性を、より正確に評価する方法を確立する。すなわち素材を土壌に埋設後、分解を経て、最終的に CO_2 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 4 の実証試験に反映する。

本年度は、素材試料を土壌に埋設後の一定時間内に発生する CO_2 を、自動計測による赤外線吸収スペクトル測定などで安定かつ効率的に評価する方法の確立を試みる。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開始する。

この検討において、生分解性素材の分解の様子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関わる基礎的情報の収集」とする。

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、新規素材と酵素剤を組み合わせた技術の普及を目指して、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、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

すると考えられ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、CO_2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。

本年度はフィルムの分解性評価の予備検討を主に行う。すなわち、農地を模した試験機関の圃場において、新規素材候補を用いて試作したフィルムを、圃場の土壌表面へ展開(以下、展張)した後に、経時観察および酵素剤処理の試験を行い、その結果を令和 2 年度の試験計画の基礎情報とする。並行して、令和 2 年度以降の農業者での試験に備え、生分解性マルチフィルムを使用している農業者にヒアリングを行う。

また LCA および経済性評価の準備として、過去の種々の LCA の結果、経済性評価の手法を解析し、評価結果へ影響を与える重要因子やその前提の置き方を明らかにし、実施すべき評価前提を含む手法をまとめる。

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「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」、また、LCA、経済性評価の準備に関わる部分を「第 5 章 ライフサイクル検証・評価」とする。

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、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が、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素材を開発する。

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、生分解性とフィルム成形などに適した物性のバランスが優れた新規生分解性プラスチック素材（新規素材）を新たに複数開発する。また新規素材の生産に関わる課題を洗い出した上で製造プロセスを検討、設計し、試作設備の改良を行う。これらの素材、設備を利用して、他の実施項目の試験で用いる種々の素材試料を試作し、提供する。

2.　材料および手法

検討は大きく分けて二つの項目、すなわち新規生分解性プラスチックの開発および新規素材の試作設備の改良について行った。

2-1　新規生分解性プラスチックの開発

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。その結果から、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。設計の情報を基に、三菱ケミカルにて、複数の新規素材候補を少量試作した。また、これら新規素材候補を同研究所にてシート状に加工し、実施項目 2(第 2 章)の試験に提供した。

実施項目 2 の評価によって得られた情報から、今後の検討の目的に適合していると思われる素材を選抜した。選抜された新規素材候補を用いて、実施項目 2 および 4(第 4 章)で評価を行うフィルムを試作した。フィルムの試作には、フィルムの物性および耐久性を考慮して新規素材候補を含む複数の素材の配合を設計し、三菱ケミカルおよび外注先で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、インフレーション式フィルム成形機(以下、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。

2-2　新規素材の試作設備の改良

農研機構および神奈川県農業技術センターにて実施項目 2 および 4 の試験に用いるため、2-1 で設計し実施項目 2 で選抜した新規素材候補の試作を行った。

ただし、2-1 の少量試作の際、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、令和 2 年第 1 四半期の運転開始を目指した。具体的には、まず 3-1 の結果から新規素材候補の物性情報を収集し、設備改良の内容を決定した。次に、この内容を実現すべく改良対象の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、設備の改良だけでなく、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。幾つかのプロセス条件の変更を三菱ケミカルにて検証した上で、委託先の設備で試作を行い、その効果を確認した。

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

市場で購入できる生分解性マルチフィルムのほとんどが、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(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、種々情報収集の結果、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、生分解性マルチフィルムを用いた栽培を行っている農業事業者から発せられる価格以外の最も多い不満点は、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持期に開裂したり分解したりすることであった(第 1 表)[6、7)]。想定より早くフィルムが破損すると、収穫量に影響するだけでなく、労働力がより多く必要となり、また破損したフィルムが他の作物や近隣の環境に悪影響を及ぼす可能性が生じるとのことであった。

これらの課題に対して、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った[8)]。

現在、生分解性マルチフィルムの製造において基本的な素材として用いられている PBAT と比較し、同等およびフィルム用途として用いた場合に優れた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。

次に、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た。本検討は実施項目 2 で行うため、試験に適した形状の試料を調製し供試した。

実施項目 2　3-3 の結果から、フィルムに加工した場合に十分な性能が得られると予想され、かつ酵素剤で分解が見られる新規素材 A を、本年度および令和 2 年度のフィルム試作に用いる素材として選定した。

新規素材 A が生分解性マルチフィルムの素材として使用可能かどうかを確認するため、また、新規素材以外の、圃場におけるマルチフィルムの生分解の速度を制御する要素を確認するために、新規素材 A を含む複数の生分解性プラスチックおよび添加剤を配合した複合化素材を混練試験装置で作り、三菱ケミカルのインフレーション成形試験機にて幅 60cm のフィルムを試作した(第 4 図)。

複合化素材の内容は以下；

配合 a：市販の生分解性マルチフィルムと同じ配合

配合 b：市販の生分解性マルチフィルムより分解しやすいと想定する配合

配合 c：配合 a に分解制御添加剤 X を加えた配合

配合 d：配合 a に分解制御添加剤 Y を加えた配合

配合 e：新規素材 A を含む配合

これらの試作フィルムを、実施項目 2 の農研機構における室内実験による酵素剤による分解試験に、また実施項目 2、4 の農研機構と神奈川県農業技術センターの試験圃場における展張、小規模の栽培、酵素剤処理、および使用後のフィルムの農地土壌への埋設試験に供した。

さらに、実施項目 4 の試験圃場での実証試験を目的として、令和 2 年 2 月以降に展張試験を行う場所と、作付けする作物の品目を設定した上で、実施項目 2、4 の結果から配合 e を軸とした配合を設計した。この配合に沿って外注先にて複合化素材を生産し、商用のインフレーション成形機でフィルムを生産した。

3-2　新規素材の試作設備改良

3-1 で開発、選定した新規な生分解性プラスチック素材等の製造を可能とするため、またコストを最適化するため、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った結果、一つの課題、すなわち新規素材はペレット化が困難で安定した製品生産が見込めないことが明らかになった。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、素材が高温下で溶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っている。

まずこの課題を設備、装置の変更で克服するために、試作設備の改造計画を立案した(第 5 図)。この計画に沿って、新規素材候補が製造可能な設備の設計、および設備改造に伴う諸手続を詳細に検討した。その結果、新たに機械装置を製造しなければならないこと、2020 年に国内で行われる予定の最大級の総合スポーツ大会であるオリンピックの影響で設備工事が予定どおり進まない可能性が高いことが明らかになった。これらの問題に対して、種々の作業を前倒しで行い、機械メーカーの見積りを取得し、また、三菱ケミカル社内の特別措置により機械の納期の短縮を図る計画とした。

一方、設備改造の完成および運用開始が当初予定の令和 2 年第 1 四半期から大きく遅れることが明らかになった時点で、事業の進行に遅延が生じないよう、新規素材のような軟質の素材を安定してペレット化する他の方策の検討を開始した。試験装置を用いた重合特性の検討を進め、特に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。この新規素材の製造方法を試作設備で検証の上、PBS 製造の外注先である PTT MCC Biochem Co., Ltd.(以下、PTTMCC)の商業生産設備に適用し、新規素材 A を生産できる可能性を確認した。

このほか、素材の生産コストの低減と製品の品質安定化のために、例えばポリエステルの重縮合の過程で生じる副反応の制限や、素材ポリマー分子の末端官能基数の制御を試みた。これら条件検討の情報を総合して、新規素材を製造する標準条件を作ることができた。

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。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、土壌中での素材の分解性を把握するために、新たな評価方法の構築を開始する。また、令和 2 年度の本格的な圃場での評価試験の準備のために、新しい配合の複合化素材で作っ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[9)]、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 で得た新規素材候補および試作フィルムを分解可能かについて検証する。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、圃場での分解評価、実験室規模での酵素剤処理の効果の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 CO_2 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。そのために、生分解性の各種の認定基準で用いられている高温、多湿のコンポスト製造条件、すなわち ISO14855-2 での評価ではなく、ISO17556 に示される常温かつ好気的条件での評価が求められる(第 6 図)。しかし、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[10)]。

そこで、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、自動化測定システムの構築を試

みた。まず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、組立てを行った。これを用いて常温下で土壌中における生分解性素材の反応を測定し、課題を洗い出しつつ改良を加えるとともに、測定評価に必要な基礎的な情報を入手した。さらにこの半自動計測システムを基に全自動化の検討を行った。

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 CO_2 の発生量を定量することで評価されている。この評価方法では、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 CO_2 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 ^{13}C で標識した同位元素標識化合物(以下、安定同位体)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に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 ^{13}C 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 CO_2 が放出される。この CO_2 は、大気中の CO_2 に比べて $^{13}C/^{12}C$ 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、まず三菱ケミカルの試験装置にてポリマーを試作する準備、および農研機構の標識化元素測定技術によって、分解に伴うポリマーからの各化合物由来の CO_2 の発生を安定同位体で追跡する準備を行った[11)]。

2-2　圃場での分解評価

本事業では、令和 2 年度以降に、新規素材を用いた生分解性マルチフィルムを展張した圃場で、複数の品目の野菜を栽培する実証試験を予定している。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、野菜収穫後、フィルムへ酵素剤を処理した後、圃場に埋設して、土壌中での分解性を調査する。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、令和元年度は、農研機構の試験圃場にて予備検討を行った。具体的には、実施項目 1 3-1 で試作した 5 種類の試作フィルム(配合 a～e)、および対照として 2 種類の市販生分解性マルチフィルム(市販品ア、イ)を展張し、約 40 日間観察した(第 7 図)。その後、酵素剤を酵素剤処理区に散布し観察の後、フィルムを土壌中に埋設した。これら一連の試験の間に、フィルムの物性や構造を解析するた

めの試料を得た。なお本試験では、フィルム表面に一様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して、フィルムの状態変化を詳細に観察するため、および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。

本圃場試験は以下のような日程で行った；

令和元年 9 月 18 日	圃場準備(耕起によって栽培前の状態にする)
同 19 日	各試験区にフィルムを展張
10 月 30 日	酵素剤の処理
11 月 1 日	一部の試験区でフィルム試料を回収
	フィルムを埋設
令和 2 年 1 月 27 日	土壌を取り除きフィルムの状態を観察、試料を回収

酵素剤は、農研機構が有する *Pseudozyma antarctica*(以下、*P. antarctica*)の選抜株を用い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)を用い、フィルム表面に一定量散布した[9、12、13)]。

回収したフィルム試料の評価は、市販の生分解性マルチと同じ素材配合の配合 a のフィルムと比較し、「農業資材としての強度維持」と「酵素剤処理による分解促進」という二つの視点で行った。分解の指標は酵素剤処理前後の形態を目視、および強度の変化の測定により確認した。フィルムの評価には、実施項目 4 3-1 にて得られた試料も用いた。

なお、PaE を含む *P. antarctica* 培養ろ液(酵素液)に市販の生分解性マルチフィルムを浸漬すると、フィルムが分解することは確認済みである(第 8 図)。

2-3　酵素剤処理の効果の評価

農研機構が有する PaE は、脂肪族ポリエステルを自然条件での分解より遥かに速い速度で分解する酵素として知られている[9、12、14)]。本事業では、新規素材を用いたマルチフィルムを使用後に確実に分解するために、酵素剤の活用を前提にしている。本酵素剤の処理の効果は、以下の三つの方法で評価を試みた；

2-3-1　新規素材シートの酵素剤処理による分解性評価

実施項目 1 2-1 で試作した新規素材候補である新規素材 A、B、および C それぞれを、熱融解し圧力を加えることによってシート状に成形した試料を供試した。これらの試料に対して、酵素剤処理前後の重量変化により、素材の分解性を確認した。

2-3-2　複合化素材フィルムの酵素剤処理による分解性評価

実施項目 1　2-1 で配合を設計した複合化素材を用い、インフレーション成形機によって試作したフィルムを試料に用いた。これらフィルムに対し、実験室で酵素剤処理を行い、フィルムの分解性を、酵素剤処理前後の重量および強度の変化により確認した[14、15、16)]。

2-3-3　各種機器分析による圃場に展張した試作フィルムの変化の検出

生分解性の高分子が様々な要因で分解していく機構は多くの文献で述べられているが、新規素材とそれを用いた試作品が、自然環境下で展張後の太陽光や降雨等による物理化学的な影響に伴う物性の変化、および酵素剤処理に伴ってどのような過程を経て分解に至るかは現時点では正確には知り得ない[17)]。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更なる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 2-2 で得られた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、

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)、
フーリエ変換赤外分光度計(以下、FT-IR)、
ゲル浸透クロマトグラフィー(以下、GPC、低分子側 GPC) 、
示差走査熱量測定(以下、DSC)
である。

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 CO_2 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 CO_2 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 CO_2 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、CO_2 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、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(CO_2 ガスアナライザー EGM-5、PP Systems)で、気密状態で保てるチャンバー(以下、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 CO_2 を測定する装置を組み上げた(第 9 図)。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。

測定用試料の調製は以下のように行った。畑土壌は 2 mm篩を通して粒径をそろえて準備した。乾燥重量 60g 相当の土壌の水分を適宜調節し容器に入れ、市販の生分解性マルチフィルムを 0.3g 埋設して 25 degree C で保持した。この試料から発生する CO_2 の量を測定することで、装置の作動を確認した。

まず、チャンバーの密閉性の向上、チャンバー外の環境中の CO_2 の濃度の調整、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、上記試料の測定を繰り返したところ、時間経過と CO_2 検出量の相関関係の線形性や傾きから、チャンバー内の CO_2 濃度の上昇率が安定して検出できたと判断した(第 10 図)。また、同じ処理の繰り返しでは、密閉後の CO_2 量の上昇の傾きの再現性が良く、異なる処理間の差が確実に検出できることが分かった。このことから、チャンバー周辺の CO_2 濃度を外気と同レベルに維持することを含めた基本的な装置構成は、土壌から発生する CO_2 を検出するシステ

ムとして正しいといえる。今後はテストを重ね、検出精度が保証できるフィルム投入量の標準条件を決定し、新素材の分解性評価に資する。

計測器とチャンバーの構成と基本的な測定条件を明らかにしたので、次に、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部分を自動化するため、より多くの試料を継続的かつ正確に計測できるように装置の改良を検討し、設計と追加デバイスの制作を行った。

令和 2 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する。

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が、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。本年度は、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 ^{13}C 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た試験は、三菱ケミカルにて、ポリマーを構成する化合物のうち一つを ^{13}C 標識したものを用い、残りの化合物は無標識のものを用いて重合したポリマーを作製し、農研機構でこれらの試料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 を測定して、$^{13}C/^{12}C$ の算出を行うこととした。農研機構では、こ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(第 11 図)。

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}C - CO_2、第 12 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 12 図)。放出される CO_2 の $^{13}C/^{12}C$ 比を検出することで、ポリマー内部の標識された化合物の分解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 12 図の場合では、化合物△＞○＞□の順で分解速度が高いことが明らかとなる。令和 2 年度は、安定して測定ができる条件を検討した後、実際に標識をした生分解素材の分解に伴う CO_2 を経時的に測定する予定である。

3-2　圃場での分解評価

農研機構の試験圃場にて各種試作フィルムの展張作業を行ったところ、フィルムの間で作業性に違いは認められなかった。また、展張期間中において目視による差も見られなかった(第 13 図)。

酵素剤処理後、各処理区のフィルムの一部の区画を試料として回収し、残りの区画は土壌に埋設した。埋設後、一定期間後に観察、試料の回収を行いつつ分解の進行の様子を目視等で確認した(第 2 表、第 14 図)。

展張後に回収した試料を用いてフィルム強度の変化を確認したところ、i.市販の生分解性マルチフィルムと同じ配合である配合 a のフィルムと a に分解制御添加剤 X 又は Y を加えた配合 c、および配合 d のフィルム、また、新規素材 A を含む配合 e のフィルムは、ほぼ同等の強度を示した。市販の生分解性マルチフィルムよりも分解しやすいと想定される配合 b のフィルムは、予想したとおり他のフィルムよりも低い強度を示した。展張後の試作フィルムの強度は市販品と比べて高く、市販品アは、市販品イや配合 b に比べても強度が弱く、市販品イは配合 b と同等程度であった。ii.酵素剤処理により、全てのフィルムで強度が低下した。

i.の結果は、フィルムを実際の農場に使用した場合に農業資材としての機能維持の指標となり、試作品は市販品と同等か同等以上の強度を示したことから、試作がおおむね妥当であったことを示す。また、新規素材 A を含む配合 e は、現在販売されている市販品と同じように栽培現場での実用性があることが期待できるため、配合 e を基本にして、令和 2 年度の栽培実験へと計画を進めることが妥当である。

ii.の結果から、酵素剤は、いずれのフィルムにも作用した。一方で、3-3 で述べる実験室で行った未展張のフィルムに対する酵素剤処理の結果では、配合 a に分解制御添加剤 Y を加えたフィルムでは、酵素による重量変化率は顕著ではなかった。3-2 で得た展張後のフィルムに対する圃場での酵素剤処理試験と、3-3 の未展張フィルムに対する実験室での試験の結果の違いは、フィルムが、圃場に展張することにより太陽光や風雨に曝されて、物理化学的変化を受けていたことなどが要因となり、展張後は酵素剤の作用を受けやすくなったことが示唆される。

3-3　酵素剤処理の効果の評価

新規の生分解性マルチフィルムを使用後に速やかに分解する実用的な酵素剤の処理方法や、新規素材およびこれを用いたフィルムの開発を支援するため、新規素材へのPaEの作用を検証した。

3-3-1 新規素材シートの酵素剤処理による分解性評価

新規素材Aは酵素剤処理により比較的よく分解し、重量が減少した(第3表)。一方、新規素材BではAに比べて重量の減少が少なく、新規素材Cは重量変化がほとんど認められなかった。これらの結果を踏まえ、新規素材Aを、酵素と相性が良いポリマーとして選定した。

この情報から、実施項目1　2-1において、新規素材Aを令和元年度の試作フィルムの基礎材料に選定した。

3-3-2　複合化素材フィルムの酵素剤処理による分解性評価

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た(第4表)。

酵素剤処理に伴って分解が促進されたことを示すように、重量変化と強度変化は同様の傾向が表れた。新規素材Aを含む配合eは、市販品と同じ配合で試作したaと同様の挙動を示した。このことから、配合eのフィルムに十分な実用性があることが期待できる。

3-3-3　各種機器分析による圃場に展張した試作フィルムの変化の検出

分析には、配合aと配合eの試作フィルムに関して以下の処理を行った試料を供した(第15図)。

i. 展張前：新品
ii. 展張後：太陽光、風雨、温度変化に暴露
iii. 展張後酵素剤処理後：酵素による分解
iv. 展張時に埋設：フィルムを固定するために土壌で被覆する部分

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、3-3-1で得た新規素材シートの酵素剤処理による分解性評価で作出されたシート表面を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(第16、17図)。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、3-2 の圃場での分解評価のように、埋設によって更に分解が進んだ結果生じる、大きな凹凸の変化であれば計測可能と期待された。

次に、3-2 の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、展張時に土に埋設した部分が展張後、展張後酵素剤処理によって、変化の程度が段階的に大きくなり、早期からフィルム表面のポリマーの分子鎖に変化が生じている様子が示された(第 18 図)。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いことが判明した(第 19 図)。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(第 20 図上段)、断面の観察により、フィルムが薄くなっていた（第 20 図下段)。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(第 21 図)。展張後の酵素剤処理で更に進んだ表面構造の変化の様子は、SPM を使った観察でも判別できた(第 22 図)。処理の後に表面に付着した粒状の物質やフィルム内部から露出した粒子と思われる像も含まれるが、処理を進めるに従って、低い突起状の構造が増えることが見て取れた。これは、展張や酵素処理によってポリマーの分子が表面に向かって盛り上がった、あるいは突起状の部分以外で分解等によって体積が減少して陥没したかのいずれかであると考えられる。この表面の凹凸の状態を LSM にて面粗さ、線粗さとして測定した結果、酵素剤処理をしない展張前と展張後のフィルムの表面と裏面で顕著な差は見られなかった(第 23 図)。展張後に酵素剤処理を行った表面は、同裏面および酵素剤処理無しの表面に比べて面粗さおよび線粗さ共に 2～3 倍程度大きい数値となった。酵素剤が直接接触した面に、そうでない面と比較して凹凸が多くできていたことが示された。なお、裏面は、展張前の試料と同程度の粗さであった。

展張や酵素剤処理とともに、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(第 24、25 図)。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、展張後の酵素剤処理の有無、配合 a および b の違いに関わらず、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(第 26 図)。また、配合 a は酵素剤の処理の有無で顕著な差は見られなかったが、配合 e は酵素剤処理で表面の粗さが大きくなった。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(第 27、28 図)。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。配合 a のフィルムの表面では、40 日間の展張では変化がないが、その後 90 日間の埋設によって、ひび割れが生じた。また、展張時に埋設した部分の表面も、埋設後 130 日でひび割れが観察された。裏面にはいずれの処理でも変化が見られなかった。配合 e のフィルムは表面、裏面共にいずれの処理でも変化が見られなかった。配合 c のフィルムの表面は、40 日間の展張とその後の 90 日間埋設した試料では変化が観察されなかった。一方、展張時に埋設した部分の表面には、埋設後 130 日でひび割れが生じていた。配合 d のフィルムの表面は、40 日間展張し 90 日間埋設した試料でひび割れが見られた。展張時から埋設した部分の表面には、埋設 130 日後でも顕著な変化がなかった。TEM によって各試料の断面を解析したところ、まず展張前は、ポリマーの分子が結晶構造(crystal structure)と非晶構造(amorphous structure)が層を成しているラメラ構造(lamellar microstructure)が観察された。また写真で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。配合 a は、展張前はラメラ構造が明確に観察され、展張 40 日後には、最表面にラメラ構造が見られない領域が 2um まで生じた。拡大像では、フィルムを黒色にするために添加したカーボンブラックと思われる粒子のほか、ラメラ構造の濃淡が観察された。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。配合 c、d、および e は、展張時に埋設した 130 日後の断面にラメラ構造が観察されて、ラメラ構造が見えない領域は観察されなかった。展張 40 日後および展張 40 日後に 90 日間埋設した区では、最表面にラメラ晶構造が見えない構造が観察された。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。また配合 a は展張時に埋設、あるいは展張後に埋設した場合に加水分解が生じているが、添加剤 X や Y を加えることによって、展張時に埋設した場合の加水分解が抑制されたと推測される。一方、配合 e では、添加剤を加えることなく展張時に埋設した場合で加水分解が抑制されたと考えられる。

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。今回用いた試料では、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(第 29 図)。低分子側 GPC による解析では、低分子のオリゴマーが展張によって減少しており、降雨等の影響と考えられる。また、酵素剤処理によって低分子物質が増加することが示された。

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。

以上 3-2 および 3-3 で行った分析の結果共に、市販の生分解性マルチフィルムと同じ配合である配合 a と、新規素材を配合している配合 e の試作フィルムの挙動が同等であると結論した。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っていない。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。

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。そのための一つのアプローチとして、酵素をより効率良く生産できるように、微生物を改良する必要がある。

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、これを改変する。そこで、令和元年度は、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の中から、該当遺伝子を見付けるための作業を開始する。酵素生産菌は、glucose(グルコース、ブドウ糖、$C_6H_{12}O_6$)を加えると酵素の生産が抑制されて、xylose(キシロース、$C_5H_{10}O_5$)を加えると酵素を多く生産することが知られている[16)]。そこで、xylose を加えた培地でのみ発現している遺伝子群を候補として、これらの遺伝子を個々に破壊した菌株セットの作製を開始する。このセットの完成は令和 2 年を予定しており、期間中に菌株の作成を継続的に進めつつ、並行して、得られる菌株を用いて xylose 培地上で酵素を作らなくなるという表現型を示す遺伝子の探索を順次行い、該当遺伝子として見付け出す。

2.　材料および手法

2-1　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、その生産菌の分離が国内外の土壌で試みられてきたが、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が、植物の表面を覆うクチクラ(cuticula)層中のクチン(cutin)と同じく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フィルムを強力に分解することを見いだした。さらに、*P. antarctica* が分泌生産する新規の生分解性プラスチック分解酵素(PaE と命名)を同定し、精製 PaE が、生分解性マルチフィルムに使われる PBS、PBSA、PLA などに対し広く分解活性を示すことを明らかにした[18)]。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[14)]。

PaE の大量生産にも取り組んできた。*P. antarcica* 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、酵素発見時に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[16)]。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。そこで、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. antarcica* の遺伝子組み換えにより、さらに PaE の生産量を増加させる方法も開発している[19、20)]。

なお、圃場に展張した生分解性マルチフィルム、および PBS や PBSA 製のフィルムに対して、*P. antarcica* から得た酵素の溶液を散布することにより、フィルムに亀裂を生じさせるなどの劣化効果を確認するとともに、劣化程度を評価するための実験系も構築している[21)]。また、実験室内における小規模な実験ではあるが、市販の生分解性マルチフィルムに PaE を塗布した後に土壌に埋設した場合、PaE を処理しなかった場合に比べてフィルムの分解が早くなることも確認している[15)]。

本実施項目で用いる酵素生産微生物株は、上記のように農環研がイネから分離同定した菌株を用いた[18)]。*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[22)]。そこで、後で述べる遺伝子破壊株セット作成に使用する宿主株は、*P. antarctica* の *URA3* 遺伝子破壊株を用いた。

2-2 候補遺伝子群の抽出

初めに、酵素生産菌の全ゲノム DNA 配列の解読を行い、遺伝子と思われる配列群の整理を行った。また、フラスコ内で、炭素源に 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、全ゲノム DNA 配列リストと照合しつつ、培養条件間の遺伝子発現を比較することによって、候補遺伝子のリストを作製した。

この際、酵素生産微生物の遺伝子配列と遺伝子発現のデータは、本課題において、品質を向上させるために最新の配列解析手法を用いて取得した。また、一部過去に取得

したデータも用いた。すなわち、酵素生産菌染色体の全 DNA 配列や遺伝子発現のデータは、農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業課題 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を絞り込む工程の一部は、令和元年度の農研機構高度解析センターの解析支援制度を利用した。

2-3　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、2-2 にてリスト化した候補遺伝子を破壊した株の作出は、ゲノム編集技術を用いて効率良く進めることとした。ゲノム編集は、部位特異的な DNA 切断酵素によって染色体上の標的部位の DNA 配列が切断される。細胞がこの切断部位を修復する間に切断部位の削り込みが生じる機構と、外来の DNA 断片を取り込む機構を利用した(第 30 図)。

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 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、リスト化した遺伝子の一つが破壊された株において、破壊した遺伝子が PaE 生産性に関わるのかどうかを判定した。この解析は、PBSA のエマルションと xylose を含む培地へコロニーを移植して行った。従来の株は PaE を生産してコロニーの周囲の PBSA エマルションを分解して透明の領域を作るのに対して、PaE 生産に関わる遺伝子が壊された場合は、酵素生産菌が PaE 生産能力を失うので、透明の領域が作られないことが期待される。事前に上記のシステムが稼働することを、*P. antarctica* の染色体上に本来存在する PaE 遺伝子を破壊する実験で確かめた[23)]。このように、令和 2 年までの期間中に、候補遺伝子を順次破壊し、xylose 培地上で酵素を作らなくなる表現型を示す遺伝子破壊株の探索を進める。

3. 結果および考察

3-1 使用した微生物株

P. antarctica の *URA3* 遺伝子を破壊し、uracil を含まない培地上で増殖できない株を作出した。

3-2 候補遺伝子群の抽出

P. antarctica 野生株の染色体 DNA 配列を解読し、glucose と xylose 培地で発現した RNA 配列群の情報を照合して、遺伝子と想定される約 6,800 個に配列を整理した。続いて、glucose と xylose 培地で発現レベルが異なる遺伝子の情報を DNA 配列情報と突き合わせて、100 個以上の候補遺伝子のリストを作製した。

3-3 遺伝子破壊セットの作出と酵素生産性の確認

2-3 に記載の方法に従って、uracil を含まない平板培地に生育したコロニーへの *URA3* 遺伝子の断片の挿入は、*URA3* 断片の上流から下流までの約 2.1kb の DNA 断片の増幅で確認した(第 31 図 a)。また、標的遺伝子の欠失の確認は、標的遺伝子の上流と下流の遺伝子断片を PCR で増幅させた断片長が、宿主株の長さと異なることを指標とした(第 31 図 b)。既に 17 個の遺伝子破壊を終えており、xylose と PBSA エマルションを含む培地上で、PaE 活性を調査している(第 32 図)。この 17 個の遺伝子破壊株から PaE 活性を失った株は取得できていないため、引き続き令和 2 年度にかけて、リスト化した遺伝子を破壊し、目的遺伝子を見付ける試みを継続する。

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が有効であることを評価するための実証試験の準備を行う。生分解性マルチフィルムの利用状況の把握および課題抽出のため、神奈川県内の農業者等への聞き取りおよびアンケート調査を実施する。また、予備的な実証試験として、神奈川県農業技術センターの露地圃場において、実証項目 1 3-1 で試作した新規素材を配合したフィルムを用いたダイコンの栽培試験および酵素剤の散布試験を行う。

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聞き取りおよびアンケート調査、および試作フィルムを供試したダイコン栽培試験を行った。

2-1　農業者等への聞き取りおよびアンケート調査

神奈川県内の農業者 5 名を対象に、生分解性マルチフィルムの導入理由および課題について聞き取り調査を実施した。そのうちの 1 名に対しては、生分解性マルチフィルムを使用したカボチャ栽培終了後に酵素剤をフィルム表面に散布し、散布後に農業者が行う鋤き込み作業における酵素剤の効果について聞き取り調査を行った。

また、神奈川県内の 12 の農協(JA)を対象に、廃プラスチックの処理、生分解性マルチフィルムの導入状況および課題に関するアンケート調査を実施した(第 33 図)。

2-2　新規素材生分解性マルチフィルムを供試したダイコン栽培試験

神奈川県農業技術センターの露地圃場に新規素材を配合した試作フィルムほかを展張し、令和元年 9 月 18 日にダイコンを播種、11 月 29 日に収穫物調査を行った(第 34 図)。試験区の全ての収穫が終了した 12 月 24 日に酵素剤をフィルム表面に散布した。分解の程度を調査するため、12 月 25 日に回収したフィルムのサンプルを農研機構へ送付し、実施項目 2 2-2 に供した。

3. 結果および考察

3-1 農業者等への聞き取りおよびアンケート調査

農業者を対象に聞き取り調査を実施したところ、生分解性マルチフィルムの導入理由として生分解性を持たないマルチフィルムの回収時の労力を削減することが挙げられた。生分解性マルチフィルムを利用する上での課題として、栽培期間中の崩壊、鋤き込み後の分解程度の不均一性、汎用のマルチフィルムに対して価格が高いことが挙げられた。また、酵素剤の散布後に土壌への鋤き込み作業を行った農業者は、生分解性マルチフィルムの鋤き込み時のロータリー部分への絡まり程度や鋤き込み後の圃場表面への露出程度が少ないように感じたとのことであった。

農協に対するアンケート調査については、回答を受けて集計を行っている。

3-2 新規素材生分解性マルチフィルムを供試したダイコン栽培試験

新規素材を配合した試作フィルムを供試したダイコン栽培における収穫物の根重は、新規素材を含む配合 e で PE 製マルチフィルムと同等、配合 a は小さかった(第 34 図、第 5 表)。栽培終了後の酵素剤処理による試作フィルムの分解程度の測定結果は、実施項目 2 3-3 に示した。

4. 実証試験の拡充のための取組

次年度以降に、新規素材を用いたマルチフィルムと酵素剤の処理の実証試験、および LCA と経済性評価の情報収集のための事例を増やし、また全国各地の農業事業者に情報を広げていくために、共同実施者を加えることを前提とした活動を行った。

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)は、既に生分解性マルチフィルムの導入や製造を手掛けており、令和 2 年度からの本事業へ参加の意向であった。後者は、生分解性マルチフィルム製造のための配合やフィルムの製造、販売を行っている企業である。また、全国農業協同組合連合会(以下、全農)、および八ヶ岳中央農業実践大学校も、生分解性マルチフィルムの効用とその課題について理解されており、今後の開発や普及の面で、適宜協力を頂くこととなった。

第 5 章　ライフサイクル検証・評価

1.　検討の概要

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

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

新規素材を用いたフィルムを実際の利用および最終処理に近い条件で実証試験を行うことにより、生分解性農業用フィルム製品のライフの最後までを想定した評価を行ってその有効性を示す。加えて、新規素材と酵素剤の組合せの普及を目指して、本事業が終了後速やかに一般生産者の圃場で生産性評価が行えるよう、生分解性のマルチフィルムが効果を発揮すると想定される多様な地域の試験場を計画的に実証試験に加え、評価情報の集積と共有を進めていく。これらの情報を基に、この新たな農業生産システムのリサイクル性、CO_2放出削減効果、および経済性に関わる評価を行う。

本年度は、上述する実証試験から得られる情報を基に行う LCA と経済性評価の準備として、過去の生分解性マルチを対象とした LCA の結果や種々の経済性評価の手法を解析し、評価結果へ影響を与える重要因子やその前提の置き方を明らかにし、実施すべき評価前提を含む手法をまとめる。また、LCA および経済性評価に必要な実証試験からの情報の収集方法についての検討を行う。

2.　材料および手法

2-1　生分解性かつバイオマスプラスチックに関する LCA の先行事例調査、解析

マルチフィルムの LCA の手法検討のため、欧州におけるマルチフィルムを対象とした LCA のケーススタディ事例を調査した。これらのケーススタディについて、主に機能単位の設定、システム境界の設定、ライフサイクルシナリオ(以下、LC シナリオ)設定、最終処分法、使用データ、データ収集方法等の情報を収集し、整理した。

2-1-1　調査対象のケーススタディ事例

調査した事例は、以下の 3 種とした。

【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, CO_2) 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 Innocent2, Sara Guerrini (2010), VIIth international conference on life cycle assessment in the agri-food sector, Bari, pp 22-24

2-1-2　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(第 6 表)。事例 B では、主な製造企業 2 社の、それぞれ原料の異なる生分解性マルチフィルムのインベントリ分析を行い、この結果を各マルチフィルムの売上比により加重平均して、ヨーロッパ市場の平均的な生分解性マルチフィルムの評価としていた。

2-1-3　機能単位の設定

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 6,000m^2 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[24、25)]から、生分解性マルチフィルムを製

造企業からの情報[26、27)]から収集した。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(第 7 表)。

2-1-4　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(第 8 表)。事例 A、B では、フィルムの使用段階は LDPE 製と生分解性のマルチフィルムに大きな差がないと判断し、評価対象から省いていた。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。(第 35 図～第 37 図)

2-1-5　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 がヨーロッパの代表的なライフサイクルを、C がマルチフィルム製造については、実施者による情報収集に基づき、使用以降はイタリアの代表的なシナリオとなっていた(第 9 表)。

2-1-6　最終処分法

最終処分のシナリオ（第 10 表参照）については、事例 A では CEN TR 16957(2016)[28)]を、B では EASTECH[29)]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。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、文献値[30、31)]を参照していた。事例 A では、生分解性マルチフィルムの土壌分解について、生分解性マルチフィルムの規格である EU17033 の規格を想定していた。事例 B では、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。

なお、事例 A、C では LDPE 製マルチフィルムの最終処分方法を焼却、埋立て、リサイクルの単一法にした場合の変動についても検討していた。

2-1-7　使用データ、データ収集方法

ライフサイクルインベントリ用のデータは、LCA 用データベース、文献値、およびマルチフィルム製造企業の 1 次データから収集されていた。事例 C は、生分解性プラスチック MaterBi の製造企業による自社製品の評価のため、cradle to gate の考え方で生分解性マルチフィルム製造までの評価を自社データ収集により実施していた。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(第 11 表)。事例 C については、バックグラウンドデータのデータ源についての記載が見られなかった。

2-1-8　環境影響評価法

各事例の環境影響評価項目と方法について、事例 A、B の評価方法は類似しているが、C は LCA 実施時期がかなり異なっており、評価領域・手法共にかなり異なっていた(第 12 表)。

2-1-9　各ケーススタディの評価結果概要

ここでは、各事例の気候変動(以下、GWP)の評価結果をまとめた(第 13 表)。事例 B、C のバイオマス由来生分解性マルチフィルムは、デンプンベースコポリマーに分類した。事例 A、B の GWP 評価手法は同じであるが、事例 C は異なっており、事例 A、B に比べメタンガスを過小評価することになる[脚注 1]。どの事例でも、デンプンベースの生分解性マルチフィルムは、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フィルムを評価しており、トウモロコシから製造された PLA をマルチフィルムに使用した場合は、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の重量、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

---

[1] IPCC2013[32]の GWP100 の評価方法では、メタンガスの係数がバイオ由来で 34、化石由来で 36.5 となっているが、IPCC2007 では、この係数は 25 である。

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 の評価結果より、デンプンベースの生分解性マルチフィルムの各ライフサイクルステージの GWP を図に示した(第 38 図)。事例 A では、バイオマス原料の生産、CO_2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。

2-2. 農業関係 LCA の基本情報収集

製造されたマルチフィルムの使用段階である農業生産システムを対象として､LCA を実行するために必要となるデータ収集を開始した。

2-2-1 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、標準的な農業経営を想定して各県においてまとめられているデータを収集した。これは､「農業経営指標」、「投入産出指標」等の名称で呼ばれており(以下、農業経営指標)、生産費等の金銭情報に加え、収量、作業時間、投入財に関する物量情報を含む。前者の金銭情報は、本事業における経済性評価に、後者の物量情報は LCA に活用できると考えられたため、これらのデータにより、評価対象システムの構築に着手した。

農業経営指標に含まれる関連項目は、投入資材、農薬、農作業名などそれぞれ細分類された項目と金額、物量が記載される(第 14 表)。データ公開の程度は、県により異なるが、肥料や農薬の種類が特定できる場合も多い。

本年度は、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。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(第 15 表)。農業経営指標の例

を第 39、40 図に示す[33]。

2-2-2　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」[34]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[35]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 CO_2 排出量を分類して算出することができる。

2-2-1 で示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(第 16 表、第 41 図)。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 360～390m^2、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 CO_2 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 CO_2 は圃場 10a 当たり 91.6kg で、その寄与率は 19%となった。

2-2-3　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。

「時間当たりの所得」＝「総所得」／「総労役時間」

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

「時間当たりの所得」＝（「収益」－「経費」）／「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だけ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」

具体的に農業経営指標から経済性評価に関わる情報を用いる例として、2-2-2 に示した神奈川県農業技術センターのダイコン春まきマルチ栽培の農業経営指標(第39図、第40図)の関係する項目を抽出し、経済性評価の各項目を試算した(第17表)。

3. 結果および考察

3-1 生分解性かつバイオマスプラスチックに関するLCA手法の検討

本年度のマルチフィルムに関するLCAケーススタディ調査により、本事業で実施するLCA評価の手法について、以下の知見を得た。

i.ベースラインについて

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る。

ii.機能単位の設定

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6,000m^2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る。

iii.システム境界の設定

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。

vi.LC シナリオ設定

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

vi.最終処分法

各事例とも、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。

vii.使用データ、データ収集方法

事例 C は、自社製マルチフィルムの評価を行っていたため、製造プロセスまでのデータを 1 次データ収集により評価していた。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も、ヨーロッパの平均的データが得られるデータベースを使用している。本事業では、事業内で実

施されるプロセス、すなわちマルチフィルム製造、使用等の 1 次データの収集を行い、その上流、下流については、供給元のデータの入手、地理的妥当性のあるデータベースを使用することが適切であると考える。

viii.評価結果へ影響を与える重要因子

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かった。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。次年度は、1 次データの収集を通して、これらの寄与を検討したい。

3-2　マルチフィルムを用いた農業生産システムの LCA のための情報収集方法

生分解性バイオマスプラスチックマルチフィルムを導入すると想定される農業生産システムの LCA および経済性評価を行うための基礎資料として、金銭および物量情報を含む農業経営指標等の名称で公開されている会計情報が活用できることが確認できた。これらの情報を用いた簡易 LCA を実施することにより、GHG 排出量に占めるマルチフィルム製造に起因する負荷の割合等も確認できた。

次年度には、実証実験を行う圃場において実際に生分解性バイオマスプラスチックを用いたマルチフィルムが活用可能であることを確認した上で、実際の栽培シナリオとより整合的なデータを収集する。とりわけ、従来のマルチフィルムを使った場合の栽培と異なる場面、作業、例えば収穫後のマルチフィルムの処理作業等においては、作業時間や物財投入に関する詳細なデータ収集を行う。調査方法としては、生分解性バイオマスプラスチックマルチフィルムを導入すると想定される農業経営者、関連する農業普及、研究機関等からの聞き取り調査、並びに実証圃場等での計測調査を実施する。

LCA については、生分解性バイオマスプラスチックマルチフィルム、既往のプラスチックマルチフィルムの製造プロセス、並びにプラスチックマルチフィルムの廃棄プロセスのインベントリデータと接続し、評価対象システムのシナリオと整合的な LCA の実施に取り組む。

また、経済性評価については、2-2-3 の手法を基盤として、令和 2 年度以降、農業経営指標に農業関係の試験研究、普及機関、農業生産者からの情報を加味しつつ取り進めることとした。

3-3　予備的検討の結果

予備的検討として、3－1、2 に先立ち PTTMCC が行った PBS 製造の LCA(非公開)、および農業用生分解性資材普及会が行ったマルチフィルムの製造と廃棄に関する調査(非公開)の情報を用い、一般社団法人産業環境管理協会および大学等の協力を得て CO_2 排出量を概算したところ、

・原料の製造からフィルムの製造に至るまでに；
　PE 製のマルチフィルムの場合 3.2kg-CO_2/kg-製品、
　BioPBS を用いた生分解性バイオマスプラスチックマルチフィルムの場合 2.3kg。

・うちエネルギー起源 CO_2 排出量が；
　PE 製マルチで 1.2kg、
　BioPBS マルチで 0.7kg。

・マルチフィルムとしての使用を終えた後廃フィルムの輸送における排出量が；
　PE 製マルチで 1.0kg、
　BioPBS マルチは回収不要で 0kg。

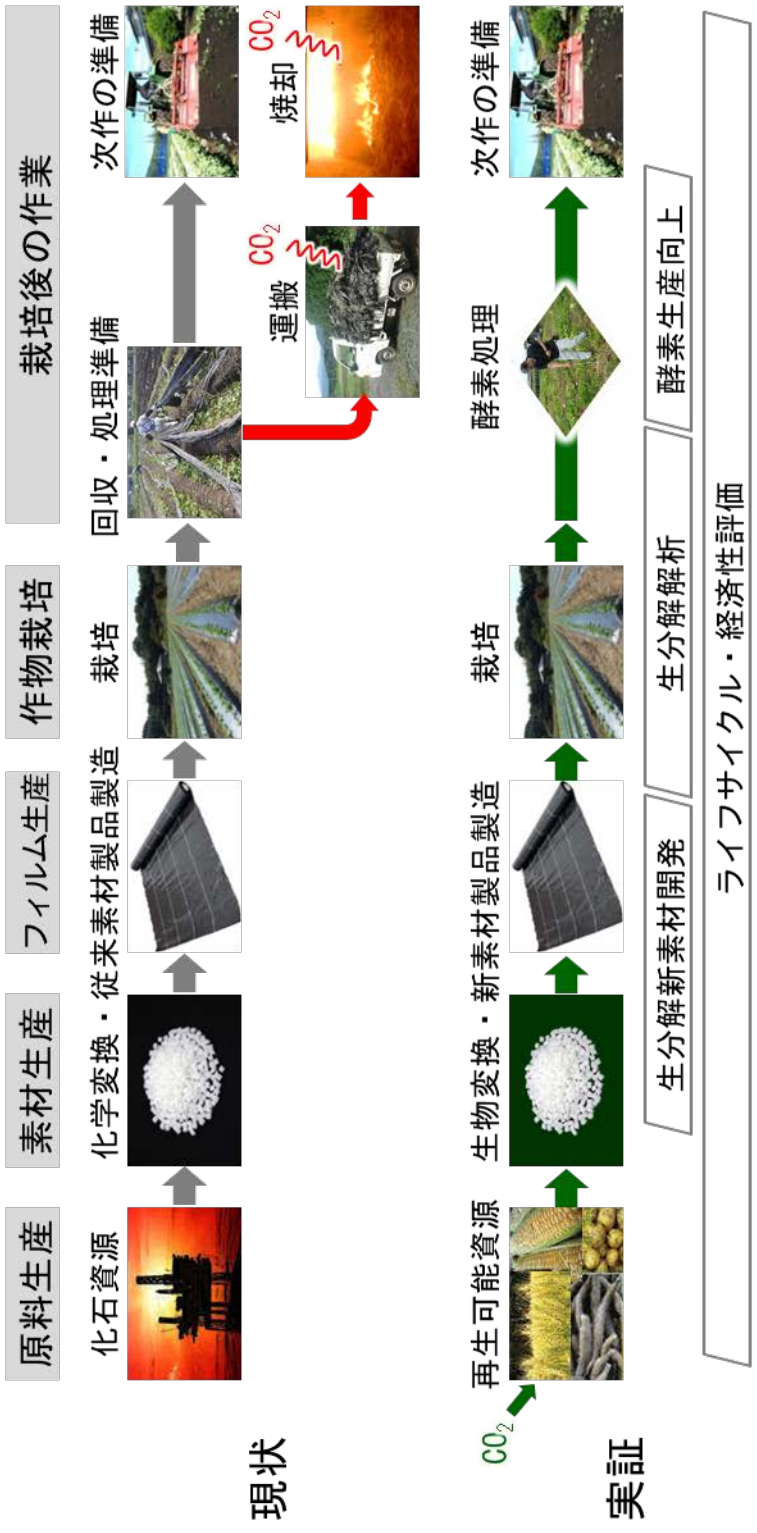
・全量を焼却あるいは分解させた場合；
　BioPBS マルチは 0.7kg が植物が固定した炭素量に当たる CO_2 量となる。

・CO_2 の総排出量は；
　PE 製マルチで 4.2kg、
　BioPBS マルチで植物が固定した CO_2 量を引いた場合 1.60kg。

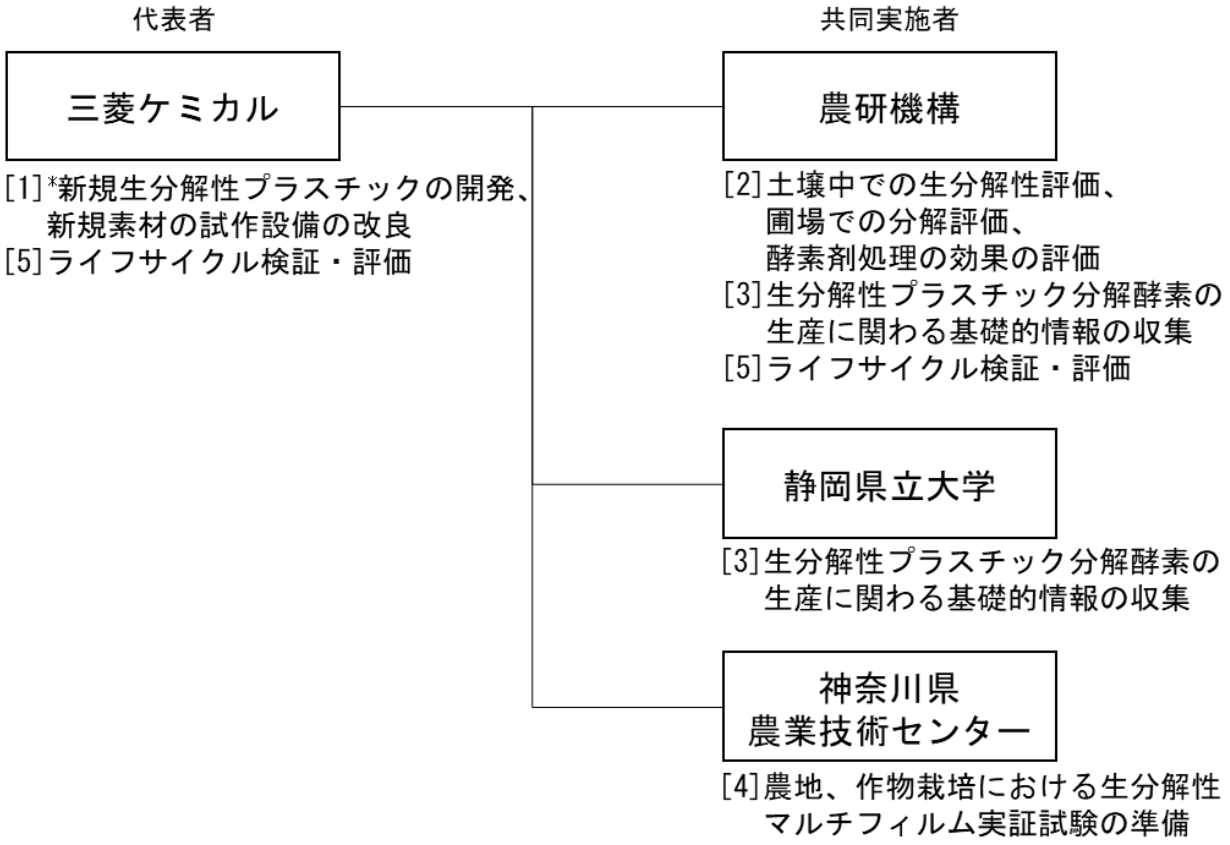
・総排出量のうちエネルギー由来は；
　PE 製マルチで 2.2kg、
　BioPBS マルチは 0.7kg。

となった。序章 1-2 に述べたマイルストーンを達成できれば、2022 年には 6,000 トン、2025 年には 15,000 トン、2030 年に 30,000 トンのエネルギー由来の CO_2 が削減できる。なお、この検討ではマルチフィルムを用いた栽培の準備から終了までの CO_2 排出量について二つのケースの比較が十分でなく、また、植物由来の原料からの化学品製造、BioPBS の製造やフィルムの製造プロセスが改良されているため、本事業で情報を更新したい。

図表


原料生産
素材生産
フィルム生産
作物栽培
栽培後の作業
現状
化石資源
化学変換・従来素材製品製造
栽培
回収・処理準備
運搬
CO_2
焼却
CO_2
次作の準備
実証
CO_2
再生可能資源
生物変換・新素材製品製造
栽培
酵素処理
次作の準備
生分解新素材開発
生分解解析
酵素生産向上
ライフサイクル・経済性評価

第1図　事業の概要



第2図　本事業の実施体制と主な担当項目

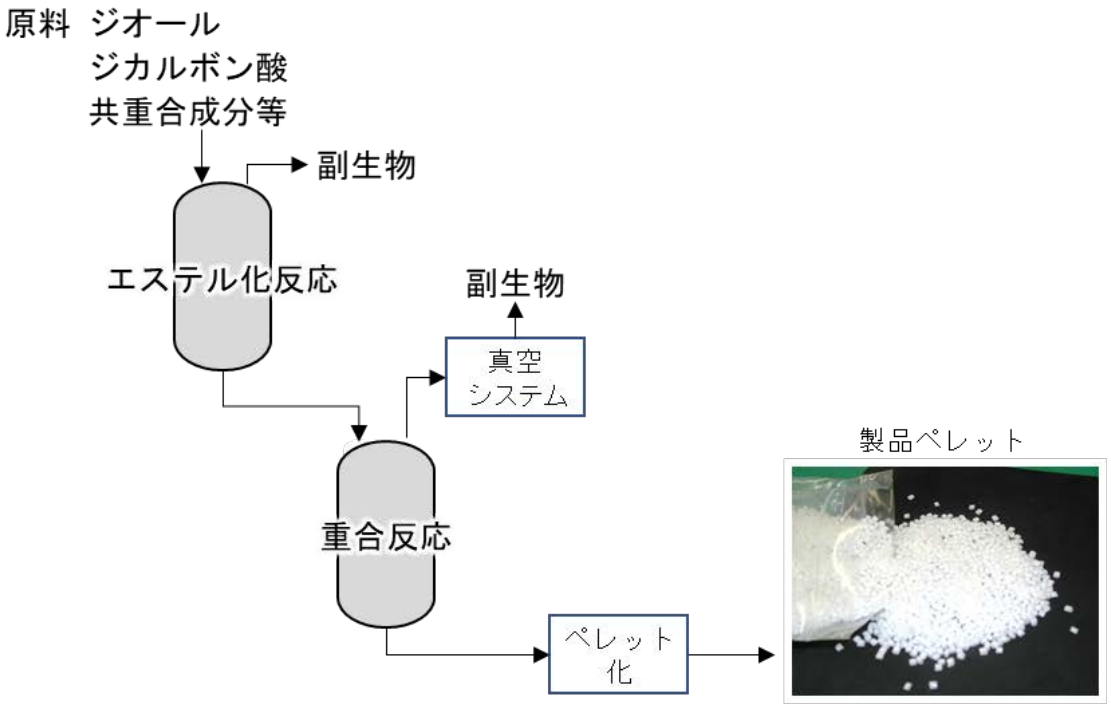
*[ ]内数字は実施項目番号

第1表　生分解性マルチフィルムに関する蔬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[6)]



a.ポリエステルの重合プロセス概要

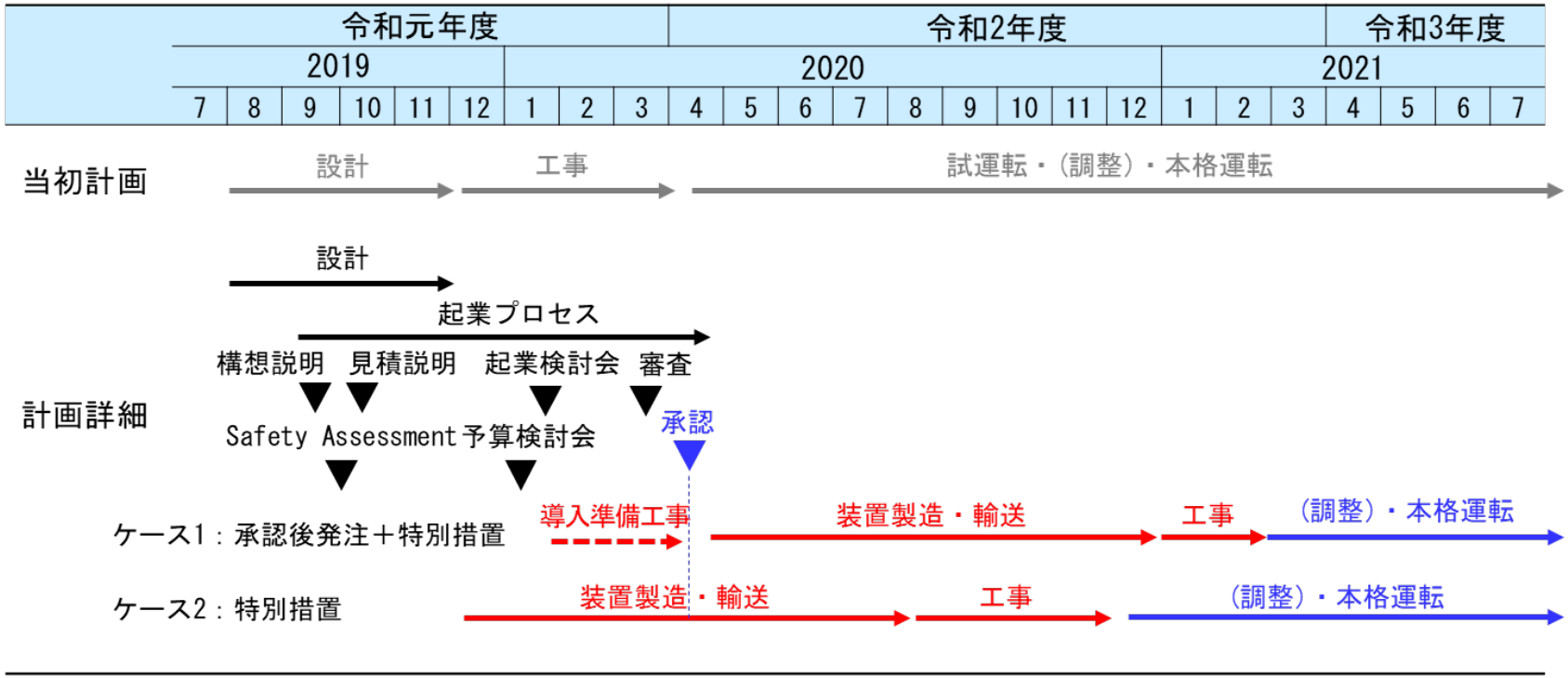
b.重合試験装置

c.試作設備

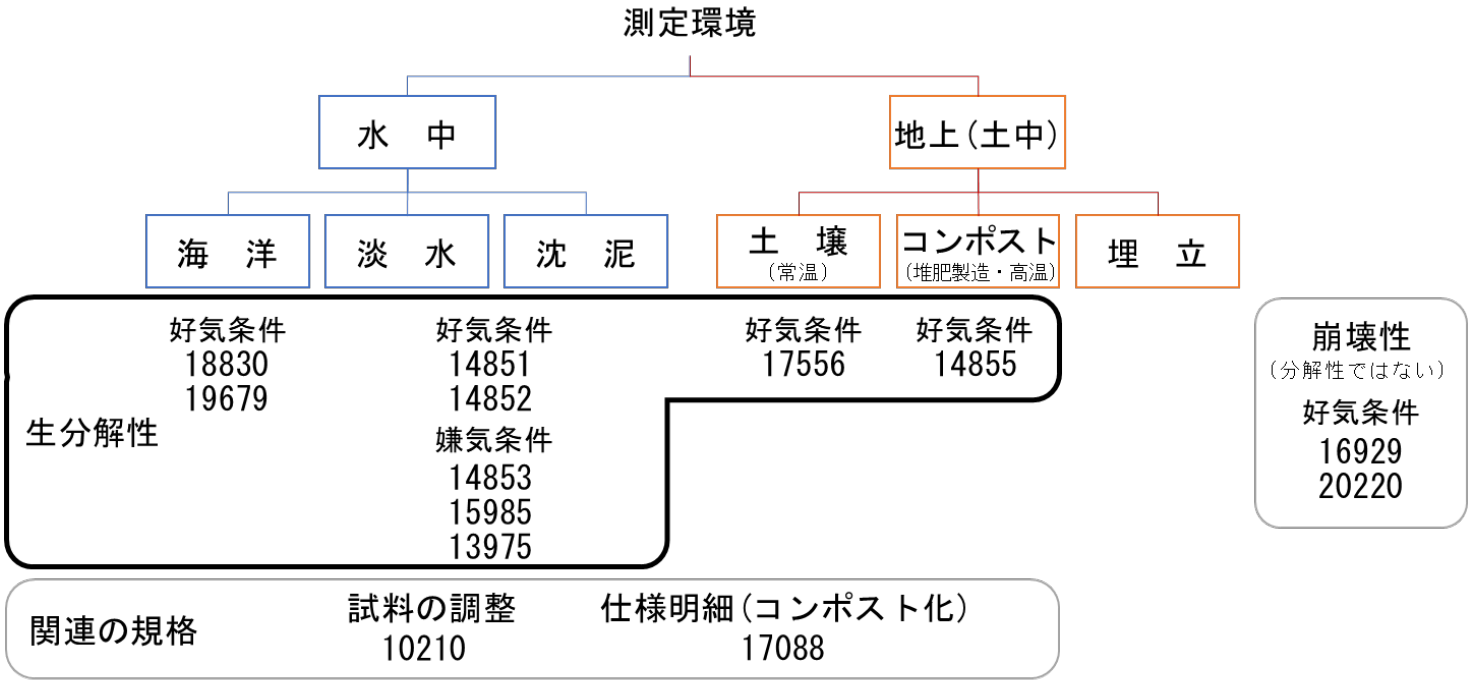
d.PTT MCC Biochem Co., Ltd.の生産設備

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

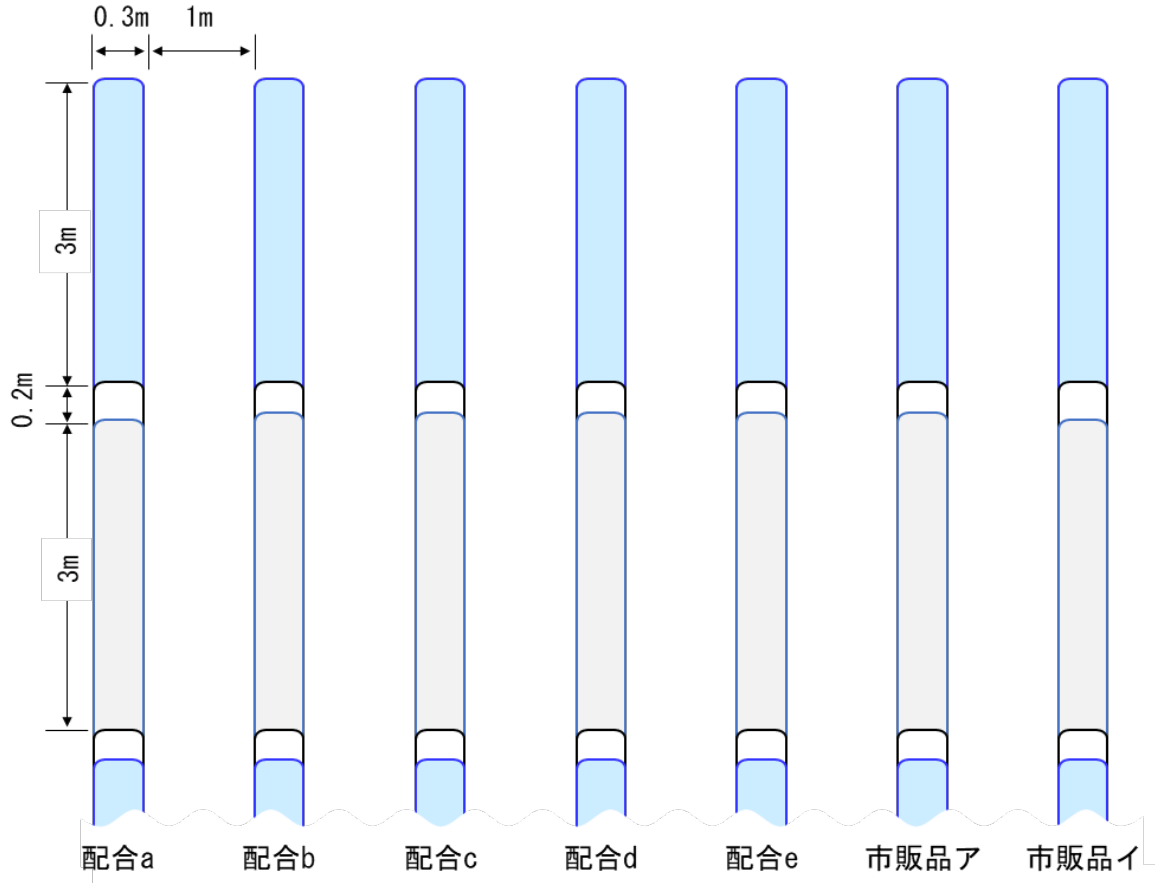
第4図　インフレーション成形試験機で試作した
生分解性マルチフィルム試作品



第5図　ポリエステル試作設備の改造計画

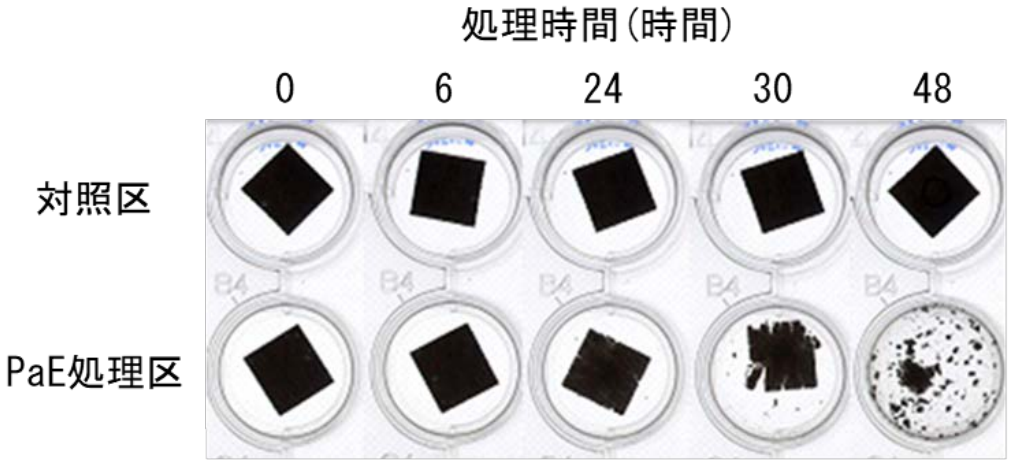


第6図　プラスチック製品の生分解に関わる主なISO規格



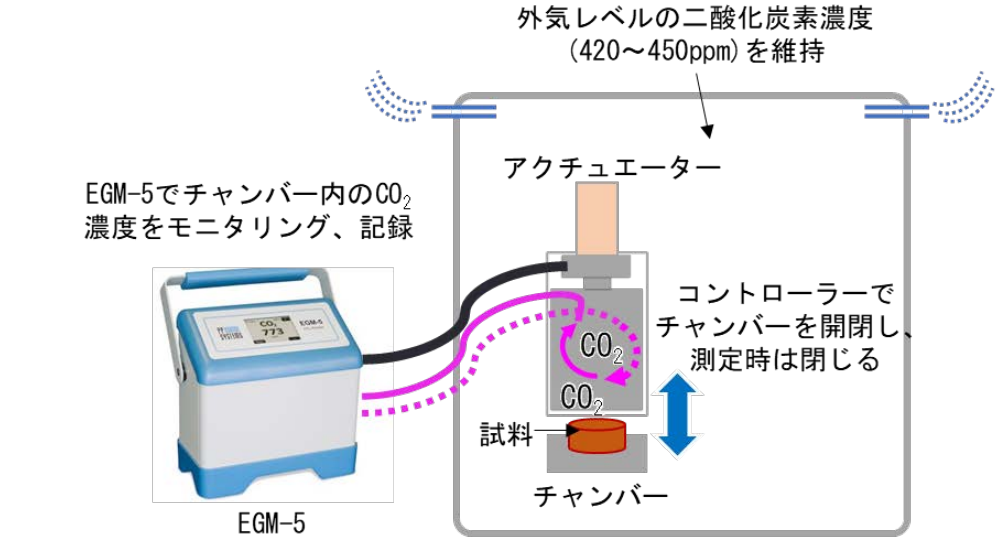
第7図　農研機構の圃場における令和元年度の生分解性マルチフィルム展張試験の配置

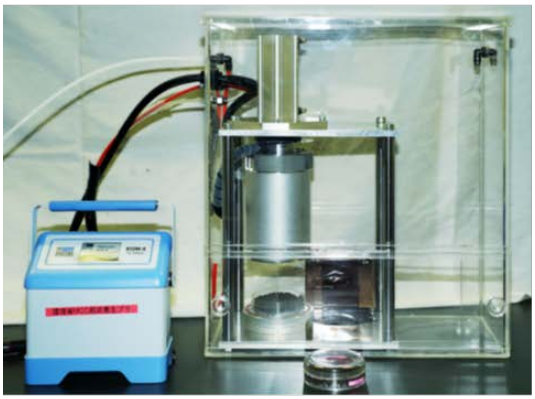
※各処理区は、酵素処理1日後にフィルムを回収する区、および酵素処理後に埋設しその後に回収する区それぞれを設定した



第8図　PaEによる市販生分解性マルチフィルムの分解の様子*

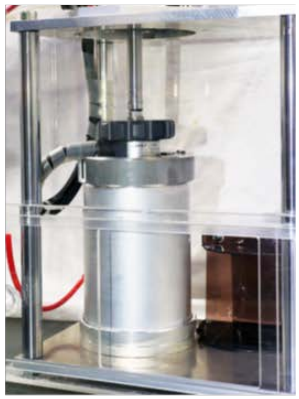
*出典：Watanabe et al., Xylose induces the phyllosphere yeast *Pseudozyma antarctica* to produce a cutinase-like enzyme which efficiently degrades biodegradable plastics, Journal of Bioscience and Bioengineering, 117, 2014[16)]





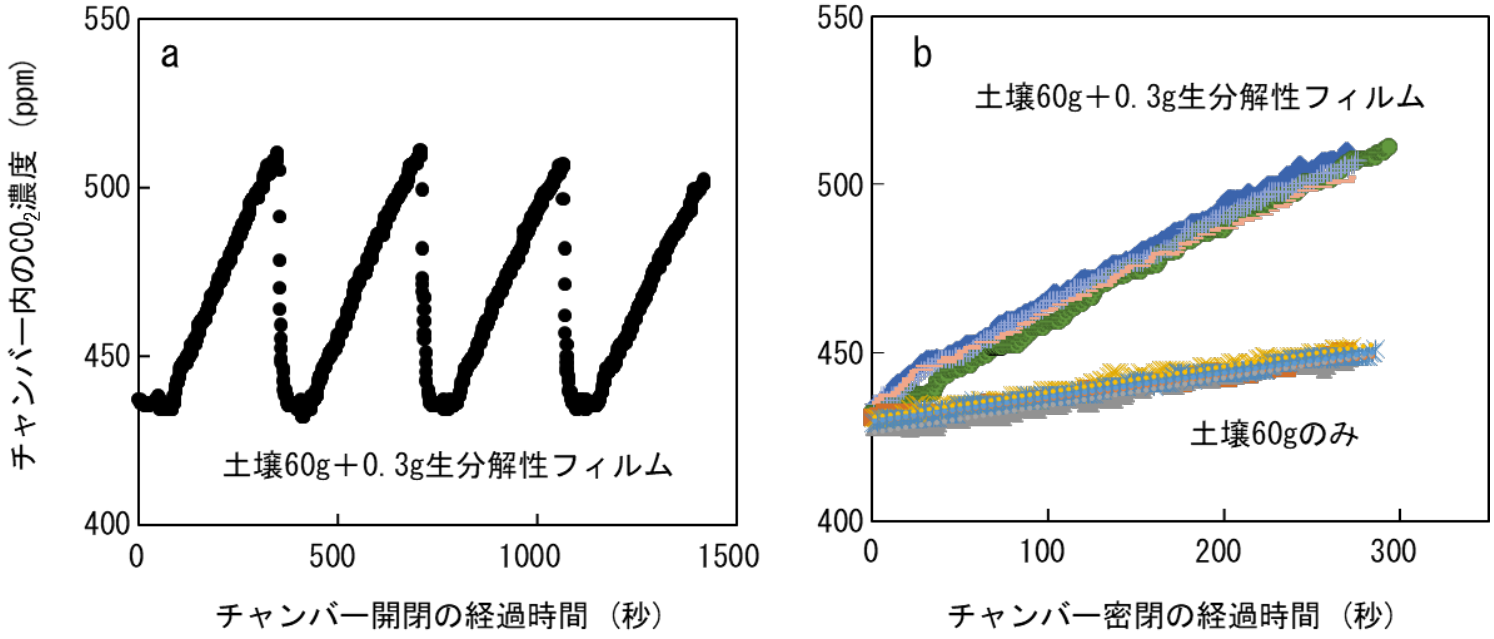
装置全景

チャンバー開状態



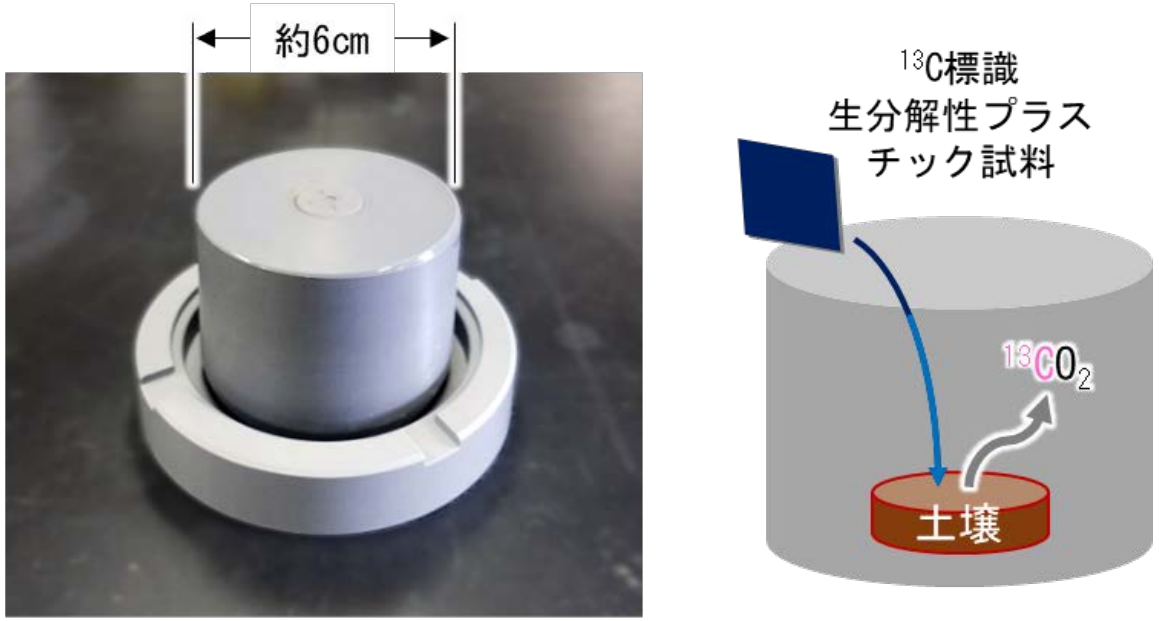
チャンバー閉状態

第9図　土壌中での生分解性素材の分解に伴って発生するCO_2量測定装置

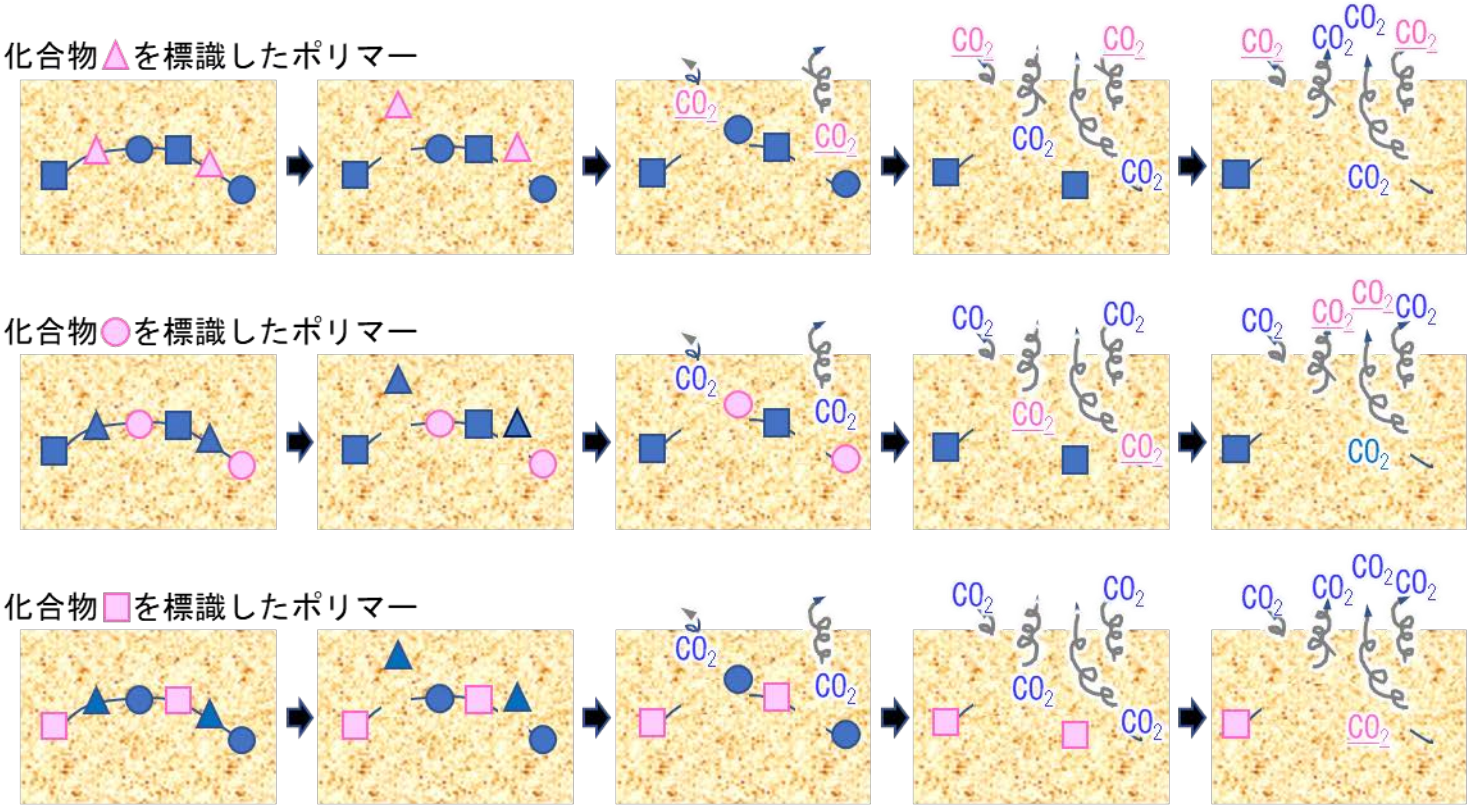


第10図　本事業で開発したCO_2量測定装置を用いた予備的評価テストの結果

a CO_2検出の再現性確認：同じ試料を3回測定、チャンバー開1分間、閉5分間
b CO_2測定による分解性評価：2処理区、各4サンプルを計測



第11図　安定同位体で標識した炭素を含む生分解性プラスチックの
分解に伴って発生するCO_2を測定するチャンバー



第12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

▲●■：標識されていない化合物　△○□：^{13}Cで標識された化合物　：土壌

CO_2：標識されていないCO_2　CO_2：^{13}Cで標識されたCO_2

9月19日作業

展張作業

フィルム側面の土壌被覆

展張後の圃場

10月8日作業

土寄せによるフィルム固定の強化

10月13日作業

台風によるフィルムのめくれ

固定作業後

第13図　農研機構の試験圃場における新規生分解性マルチフィルムの予備展張試験*

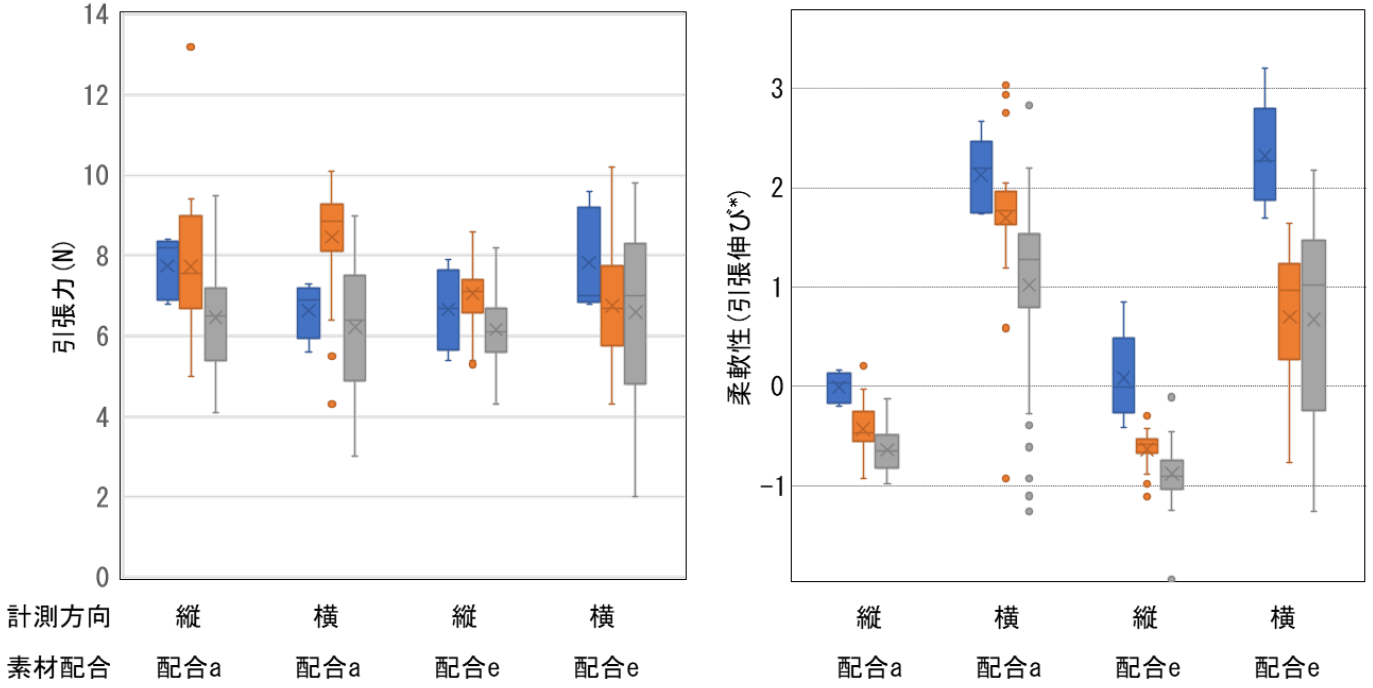
*試作品は市販のマルチフィルムに比べて幅が狭く、めくれ防止に端を土で押さえるためのフィルム幅が十分ではないので、畝の肩まで土で固めフィルムを固定した。また、台風による強風に耐えるように被覆するなど、試験が滞りなく進むよう対策を行った。

第2表　新素材を含む配合で試作したフィルムの圃場試験結果*

試　料		酵素剤処理による分解促進		展張後の被覆性
		形態変化	強度変化	
配合し試作したフィルム**	配合a	○	◎	◎
	配合b	○	◎	○
	配合c	○	◎	◎
	配合d	○	◎	◎
	配合e	○	◎	◎
市販フィルム	市販品ア	○	○	△
	市販品イ	○	○	○

*評価は形態変化と展張後の被覆性は目視にて、強度変化は一般的な評価装置を用いた。
表示は、マルチフィルムとして　◎:十分にあった、○:良好であった、△:十分ではなかった。

**第1章 3-1参照



第14図　新素材を含む試作フィルムの圃場試験後の簡易物性評価

展張時　農環研圃場：展張のみ45日間　神奈川県圃場：ダイコン栽培105日間

*配合a、縦方向、展張時の数値を1とした割合で表示

第3表　PaE処理による新素材の重量変化

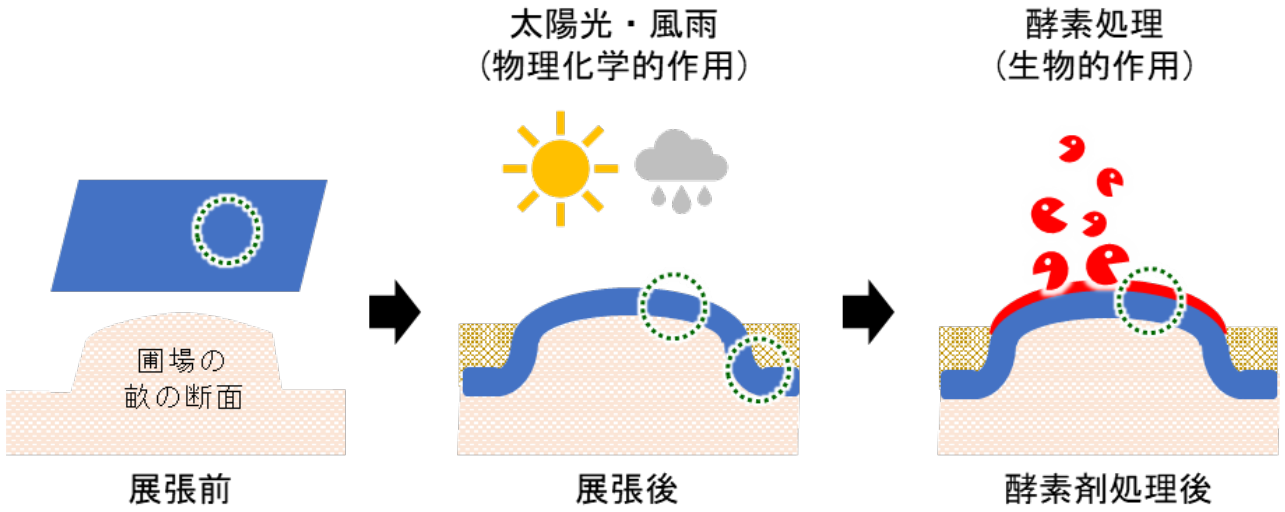
試料*	重量変化率（%）
新素材A	20
新素材B	9
新素材C	0

*第1章 3-1参照

第4表　PaE処理による新素材利用の試作フィルムの重量変化

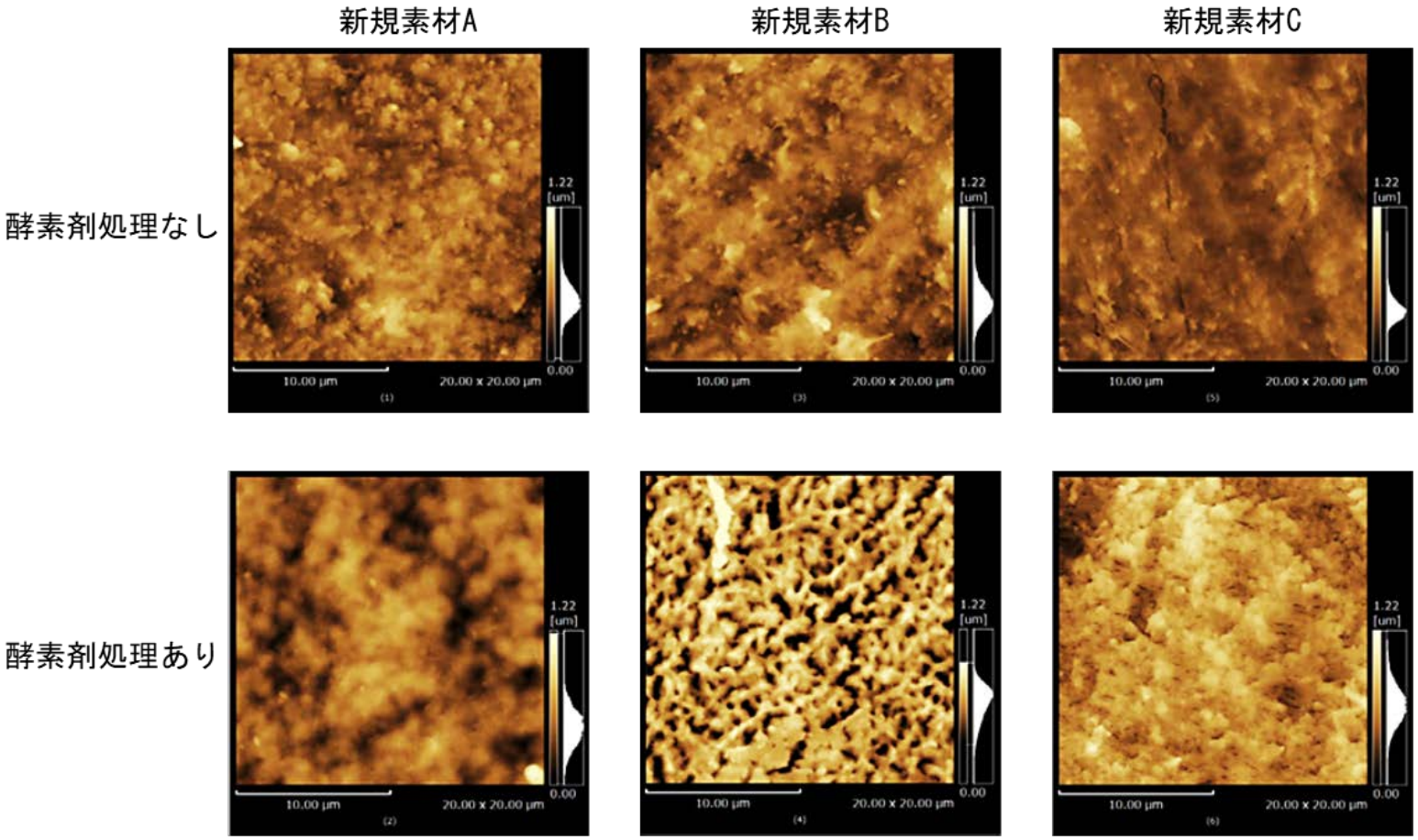
試　料		重量変化率（%）
配合し試作したフィルム*	配合a	68
	配合b	約90**
	配合c	3
	配合d	64
	配合e	68
市販フィルム	市販品ア	56
	市販品イ	43

*第1章 3-1参照
**フィルムが過度に分解し、秤量が困難だったため。



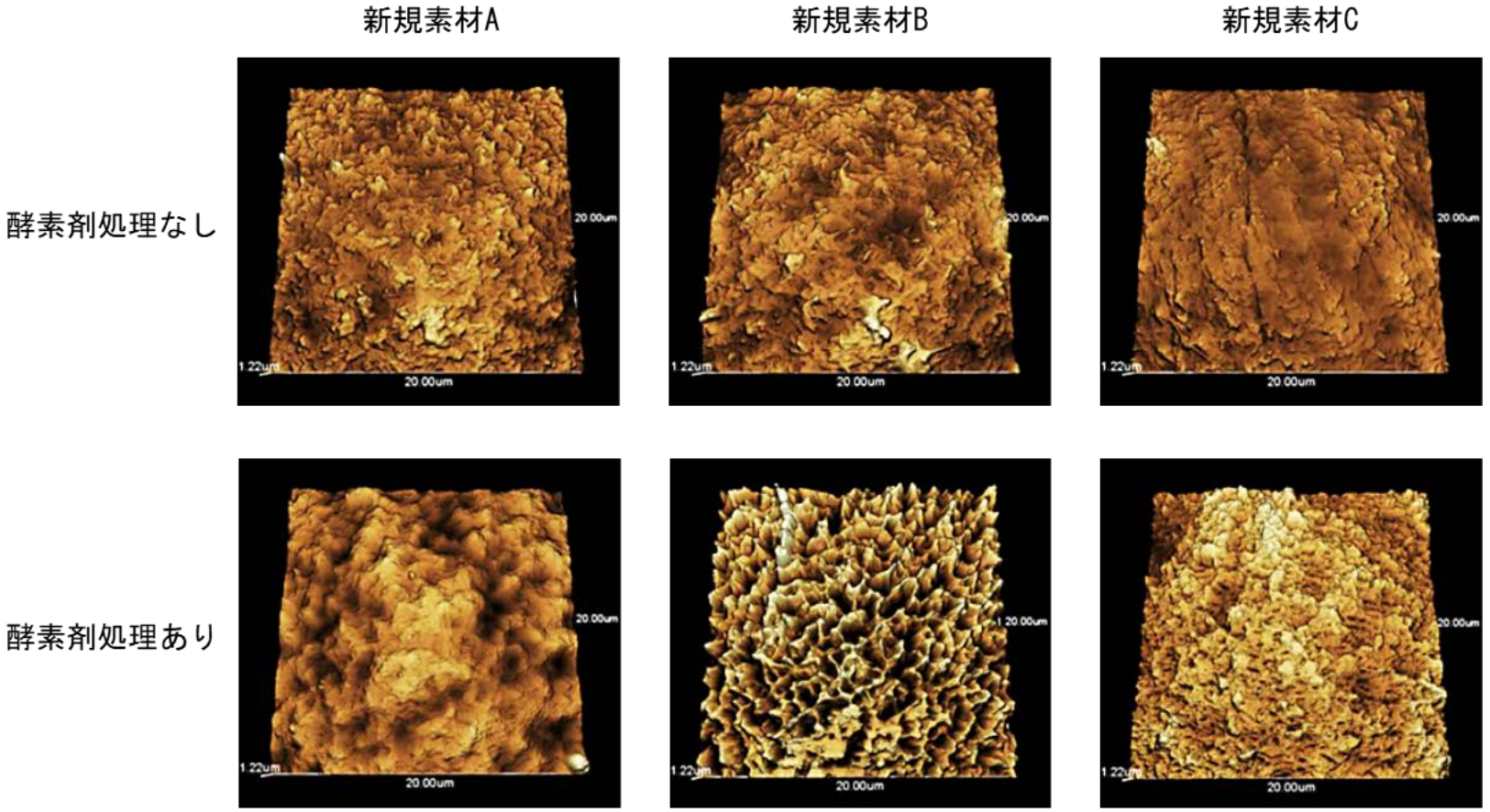
第15図　マルチフィルムが置かれる環境と刺激

：フィルム　：調査する部位



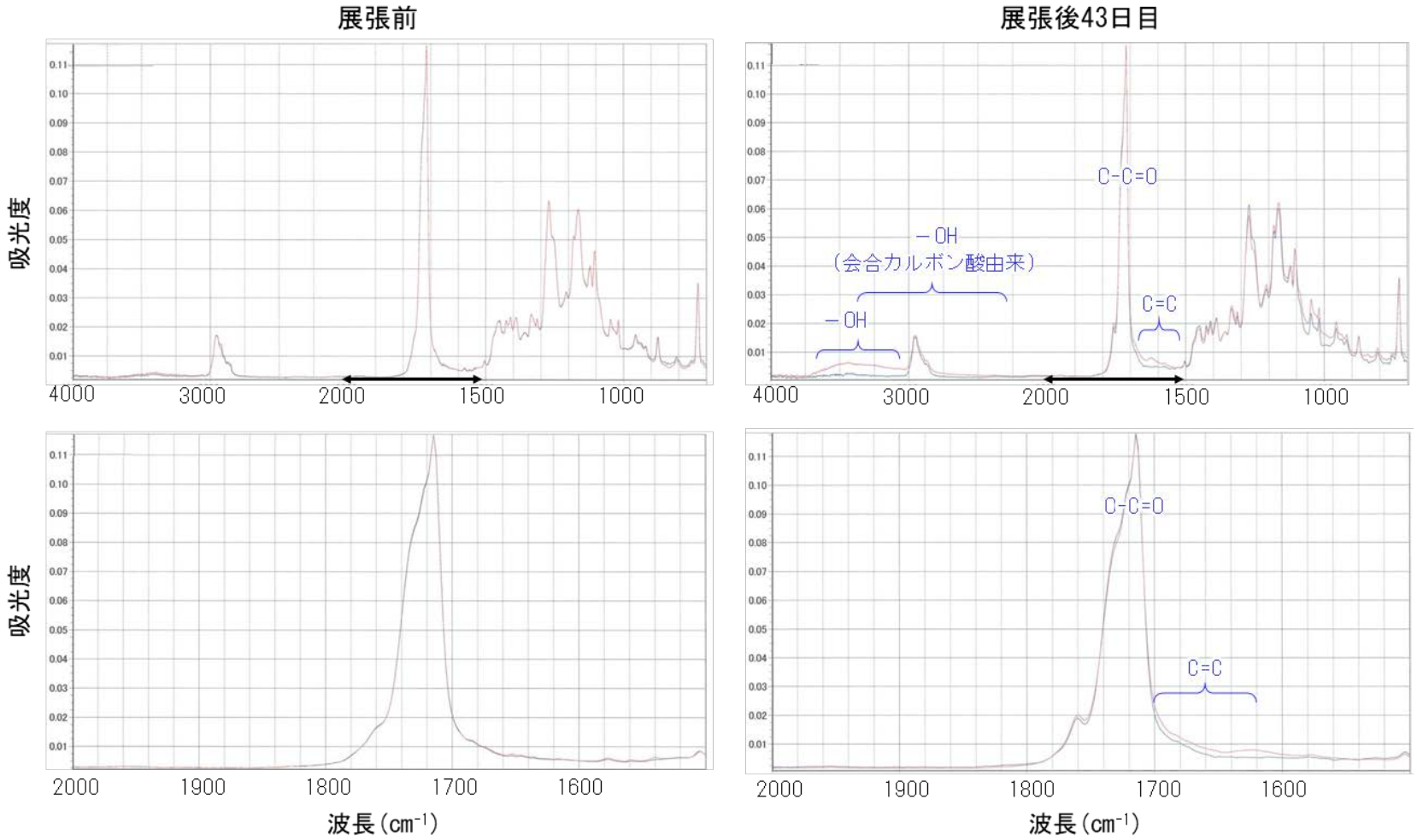
第16図　酵素処理を施した新規素材のシート表面の2次元SPM観察*の結果

*SPM観察方法1による

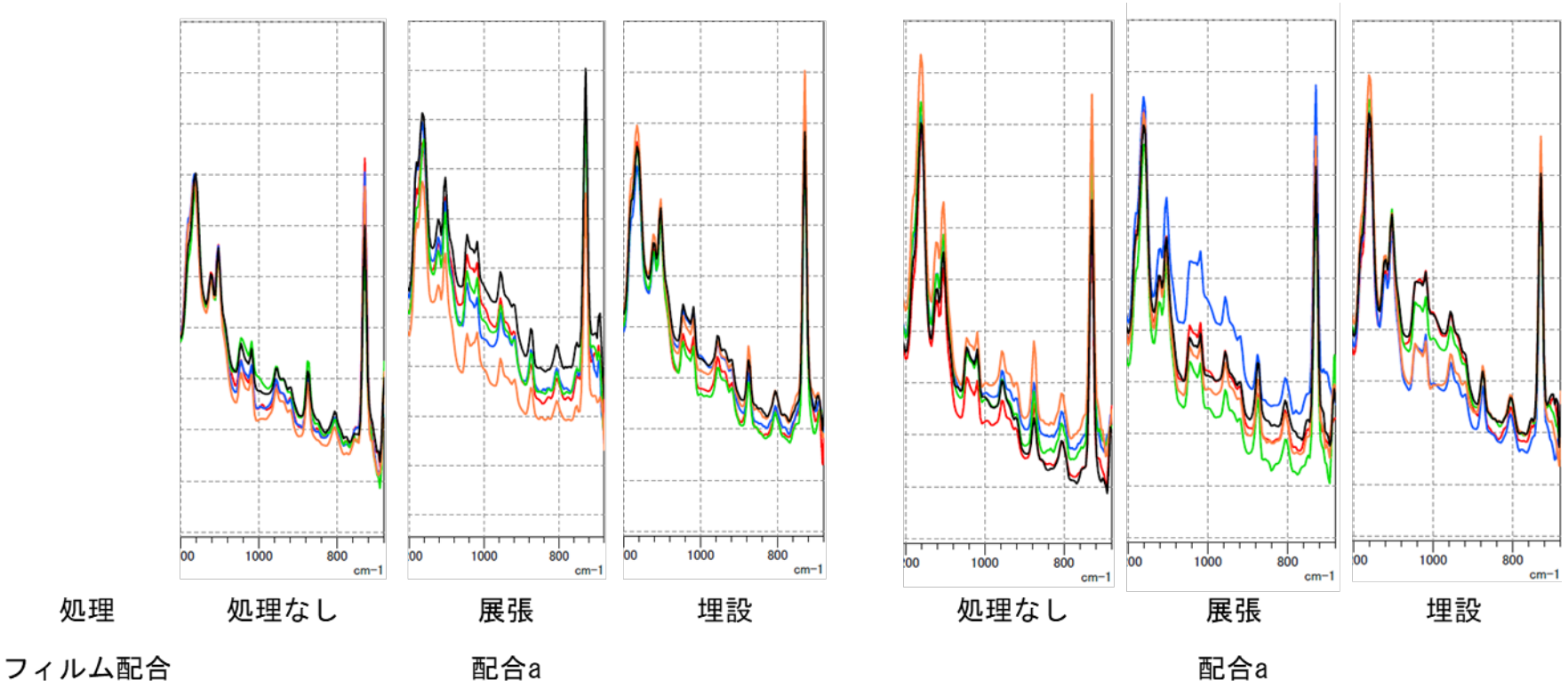


第17図　酵素処理を施した新規素材のシート表面の3次元SPM観察*の結果

*SPM観察方法1による

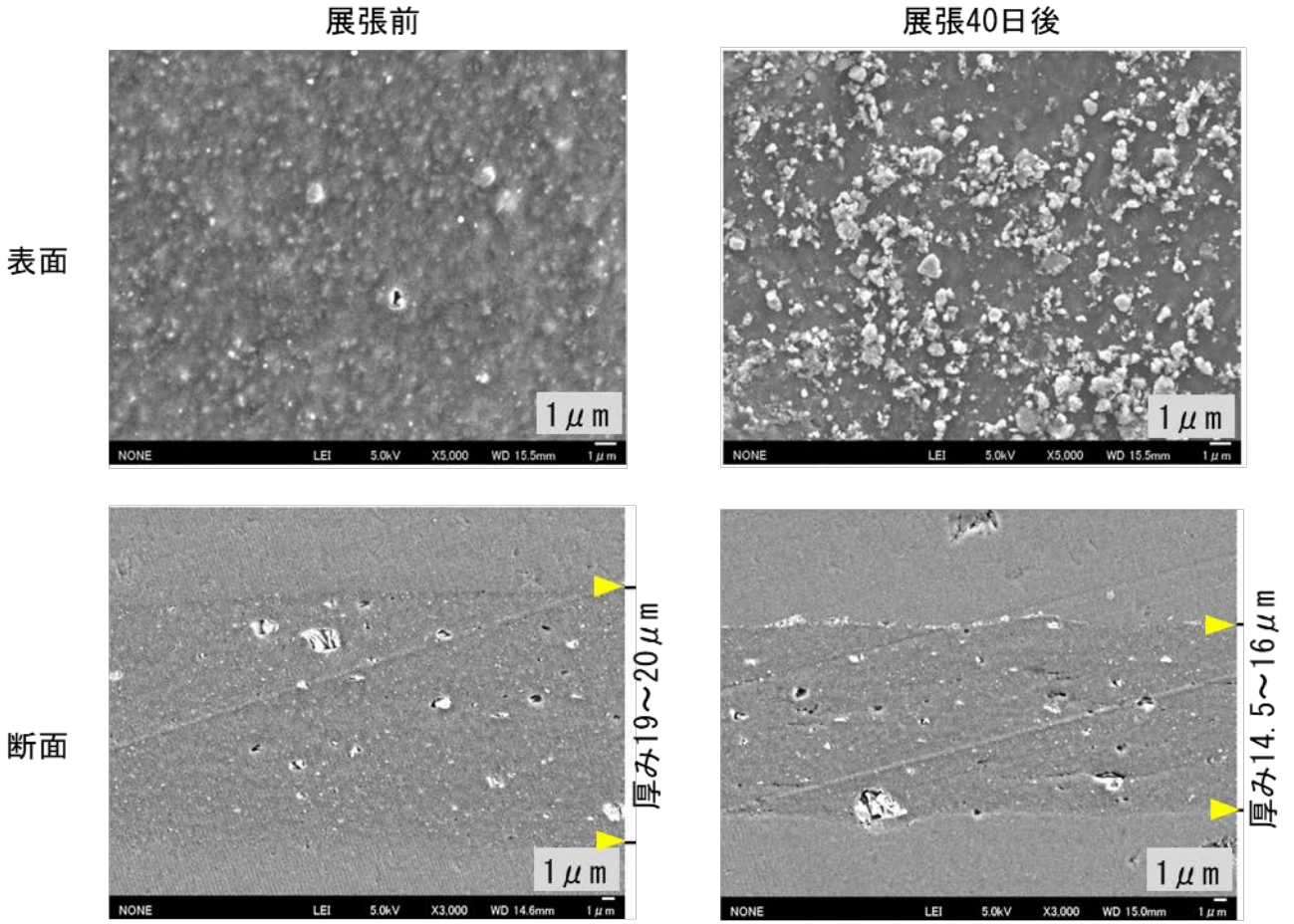


第18図　展張前後の生分解性マルチフィルム表面のFT-IR分析の結果

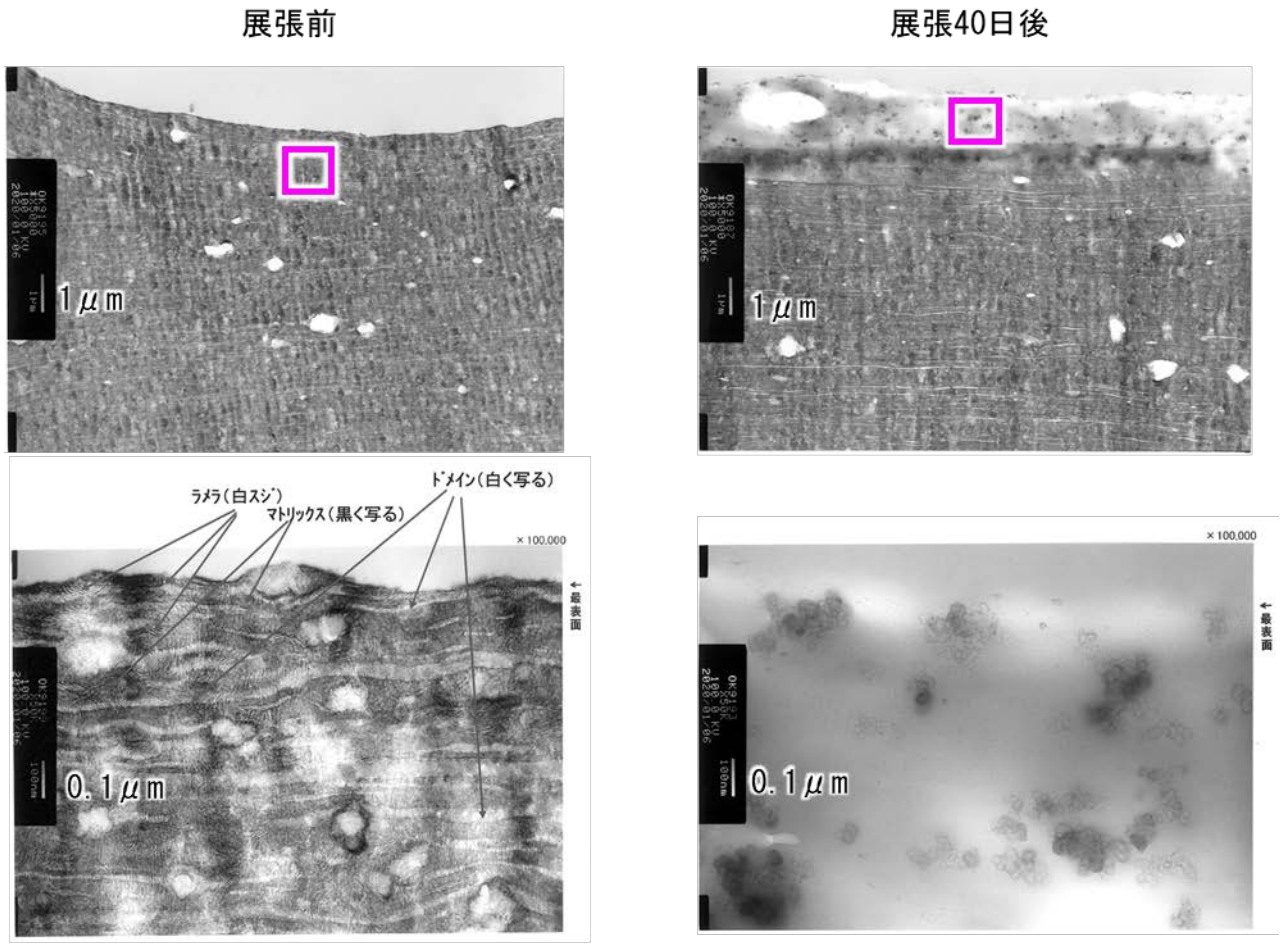


第19図　展張前後の生表面の顕微FT-IR(ATR)分析の結果

※5本のスペクトルは、同一資料の別部位を測定した結果

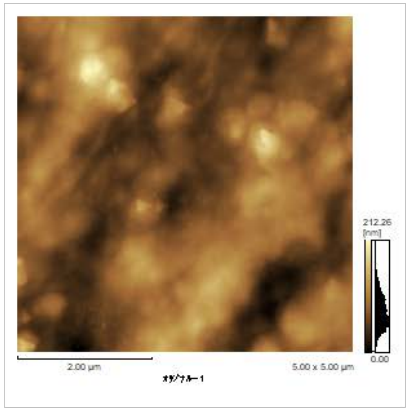


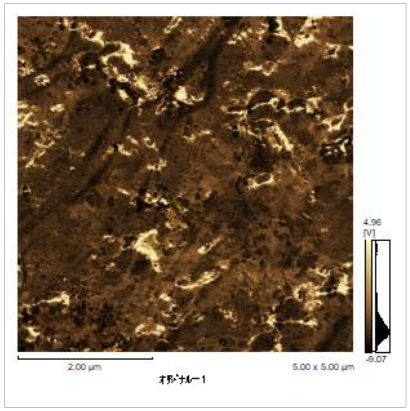
第20図　展張前後の生分解性マルチフィルムのSEM観察の結果

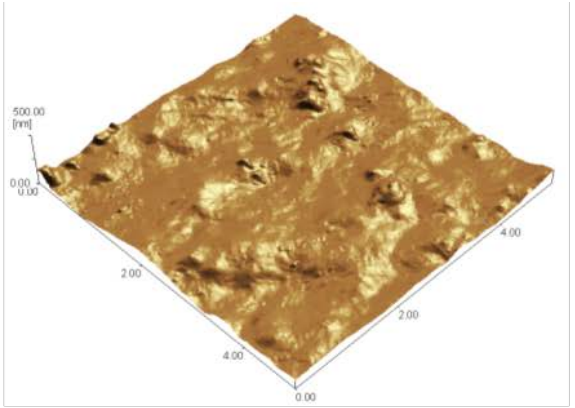


第21図　展張前後の生分解性マルチフィルム断面のTEM観察の結果

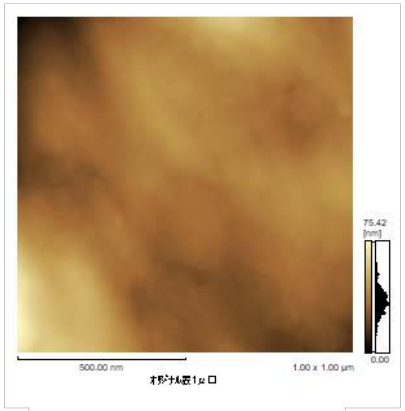
5×5μm

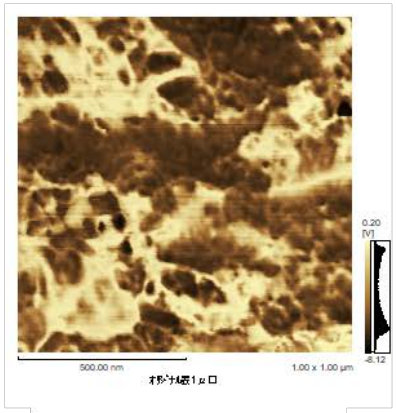


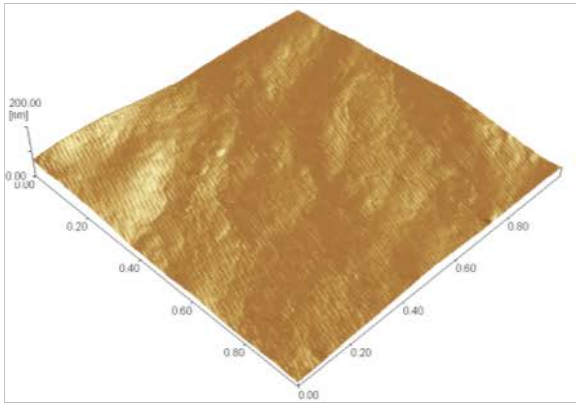




1×1μm





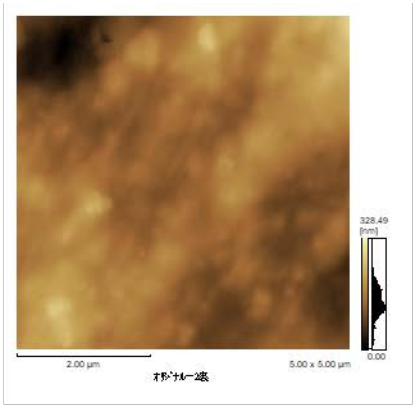


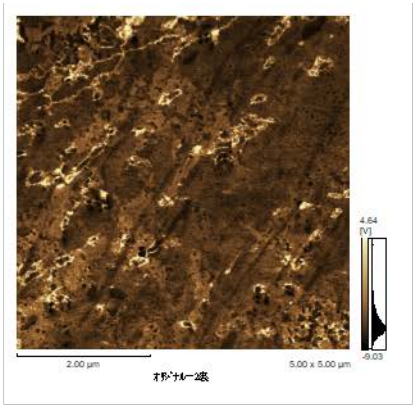
表面形状像　　位相像　　3次元表示

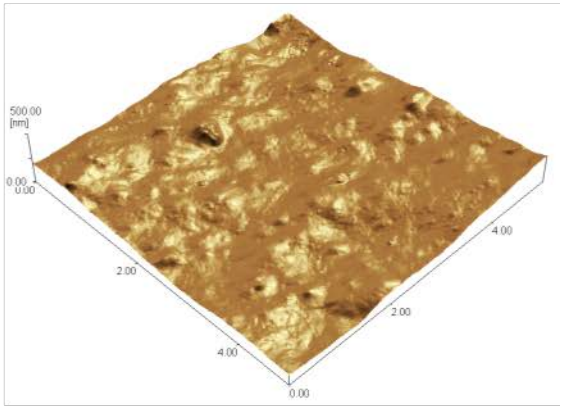
第22図　1　展張前後の生分解性マルチフィルム表面のSPM測定*の結果　1/6

※配合a、未処理、表面　　*SPM観察方法2による

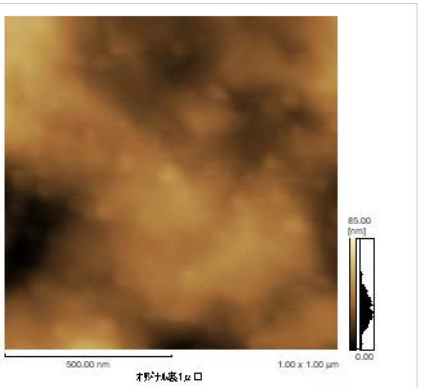
5×5μm



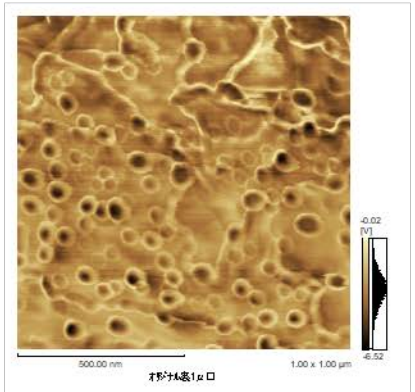




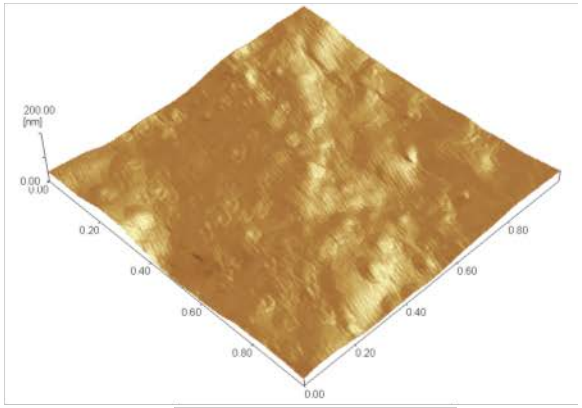
1×1μm



表面形状像



位相像

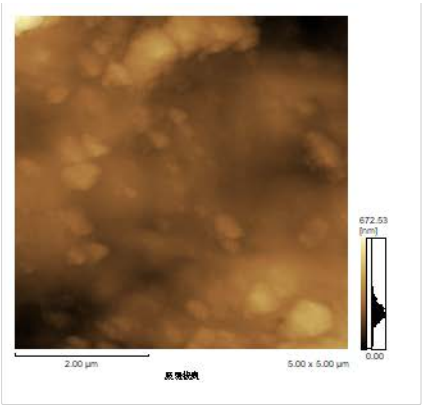


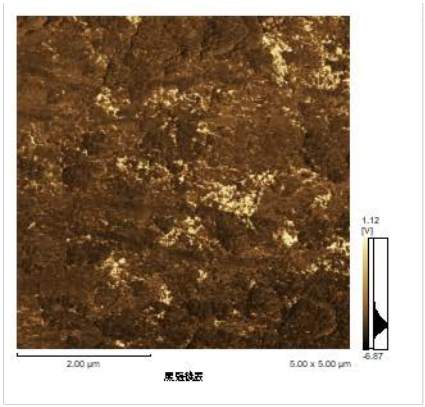
3次元表示

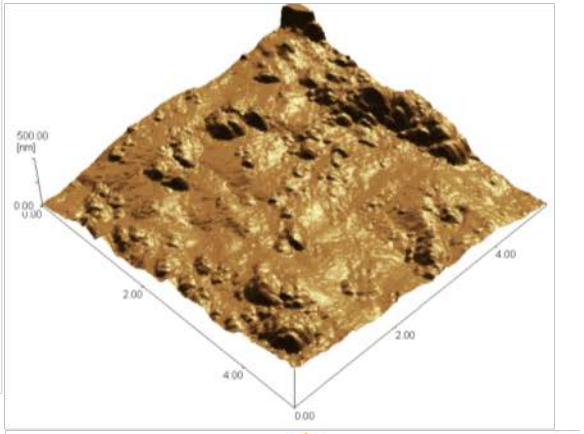
第22図　2　展張前後の生分解性マルチフィルム表面のSPM測定*の結果　2/6

※配合a、未処理、裏面　　*SPM観察方法2による

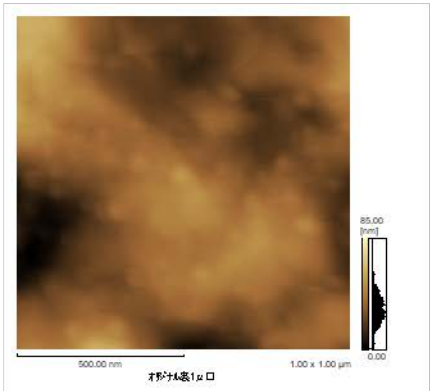
5×5μm



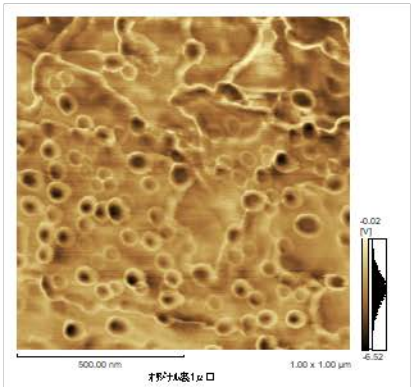




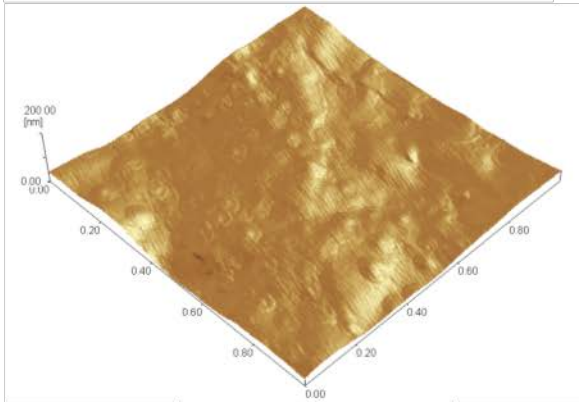
1×1μm



表面形状像



位相像

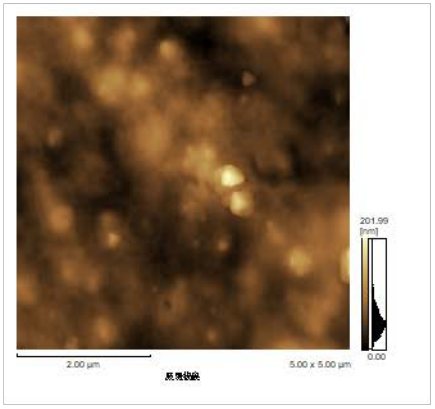


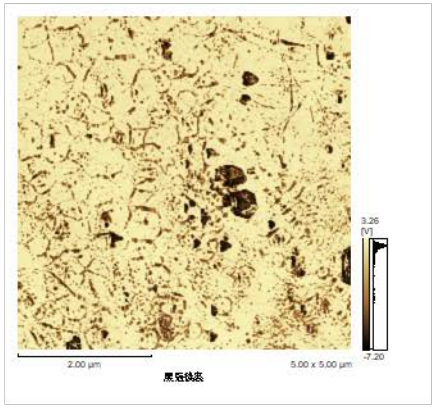
3次元表示

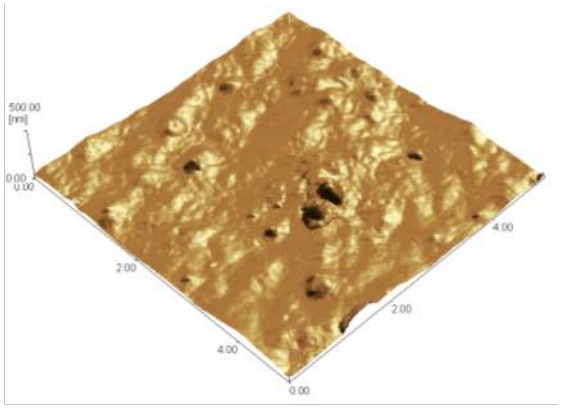
第22図 3　展張前後の生分解性マルチフィルム表面のSPM測定*の結果　3/6

※配合a、展張40日後、表面　　*SPM観察方法2による

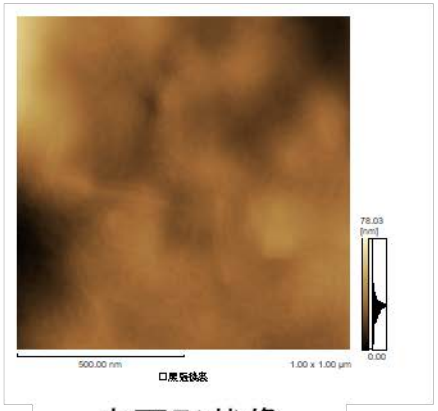
5×5μm

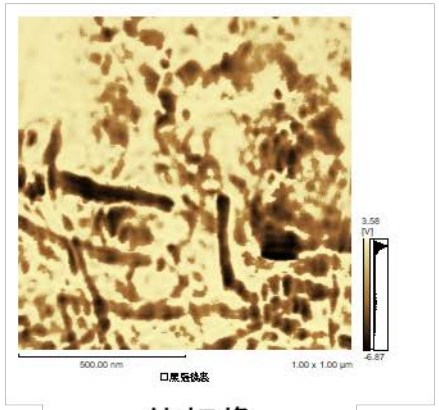


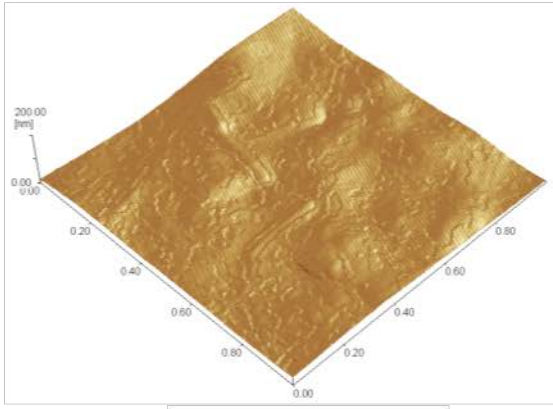




1×1μm





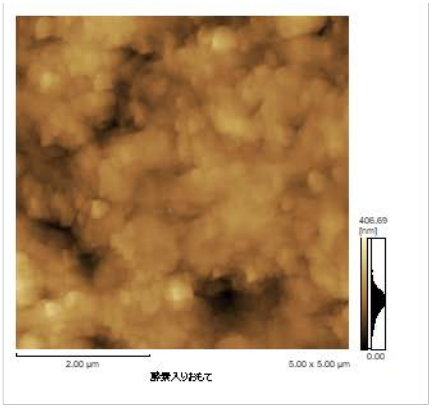


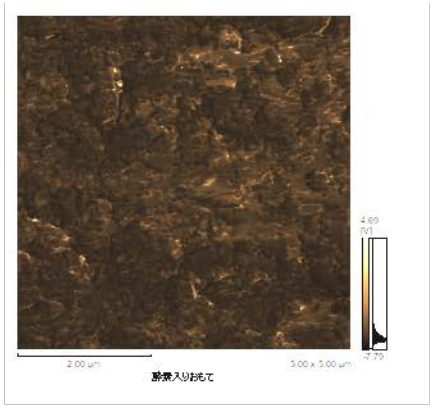
表面形状像　　位相像　　3次元表示

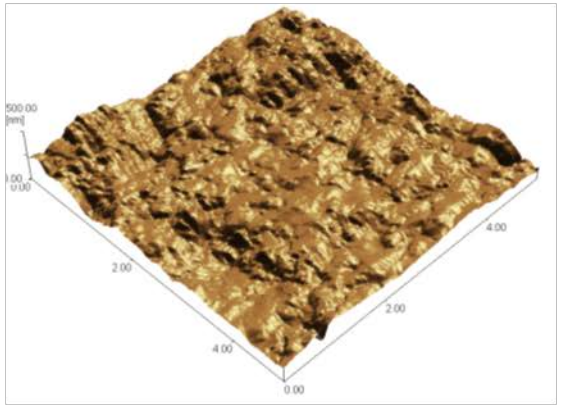
第22図　4　展張前後の生分解性マルチフィルム表面のSPM測定*の結果　4/6

※配合a、展張40日後、裏面　　*SPM観察方法2による

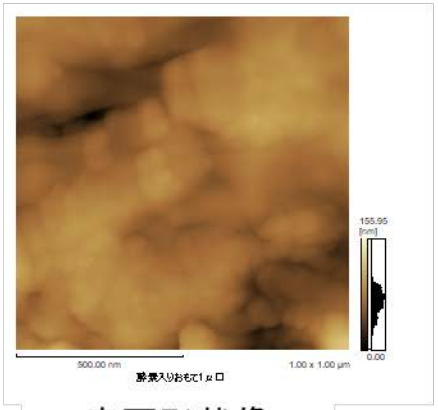
5×5μm

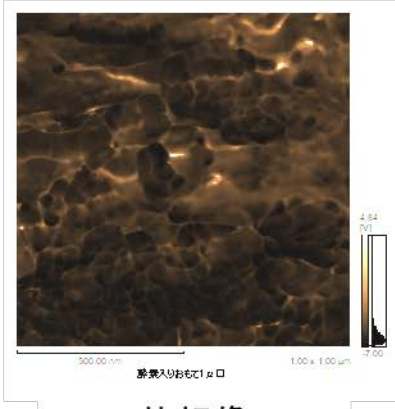


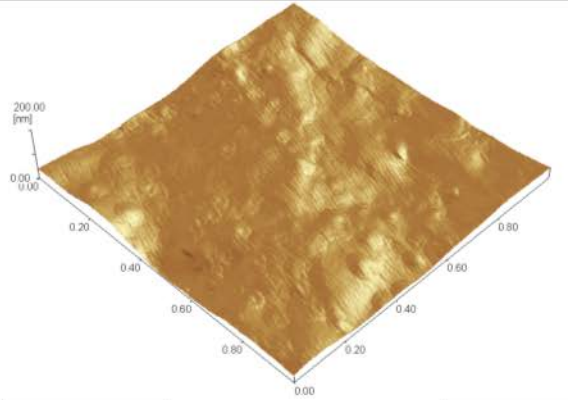




1×1μm







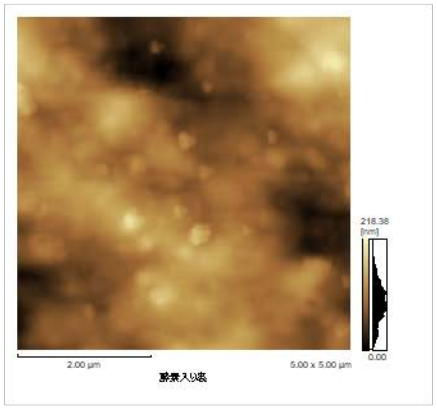
表面形状像　　位相像　　3次元表示

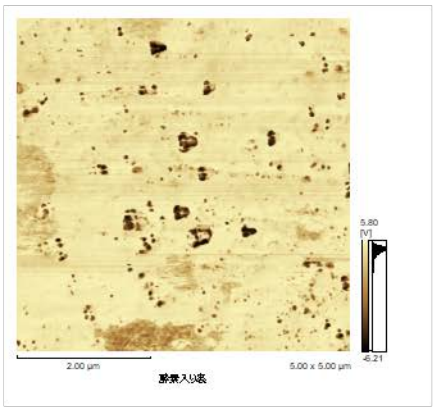
第22図 5　展張前後の生分解性マルチフィルム表面のSPM測定*の結果　5/6

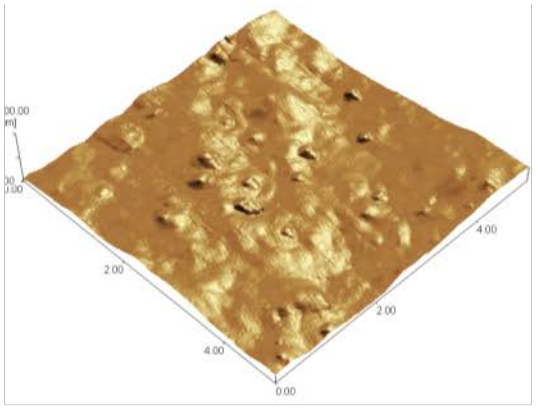
※配合a、展張40日後、酵素剤処理、表面　　*SPM観察方法2による

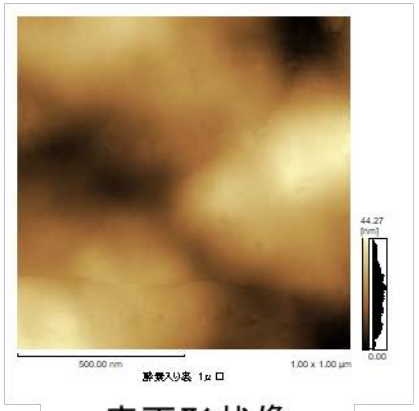
5×5μm

1×1μm

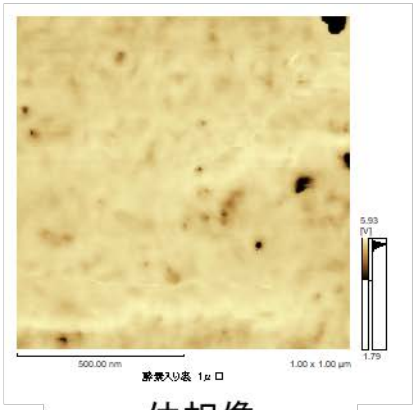




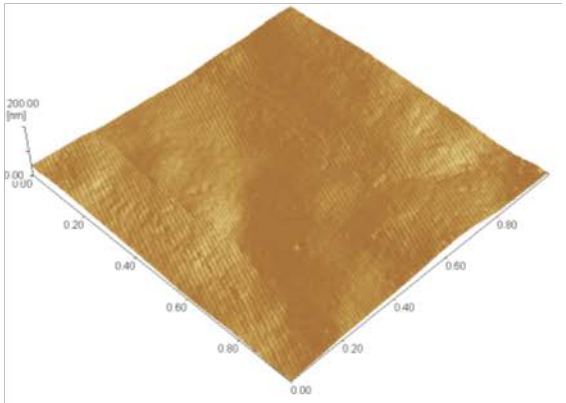




表面形状像



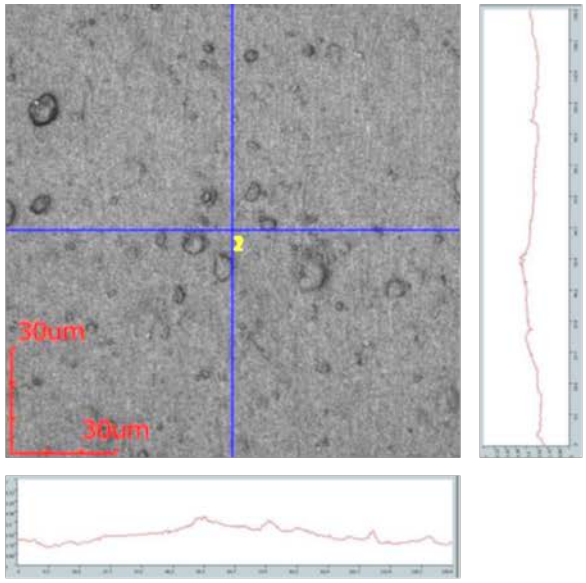
位相像



3次元表示

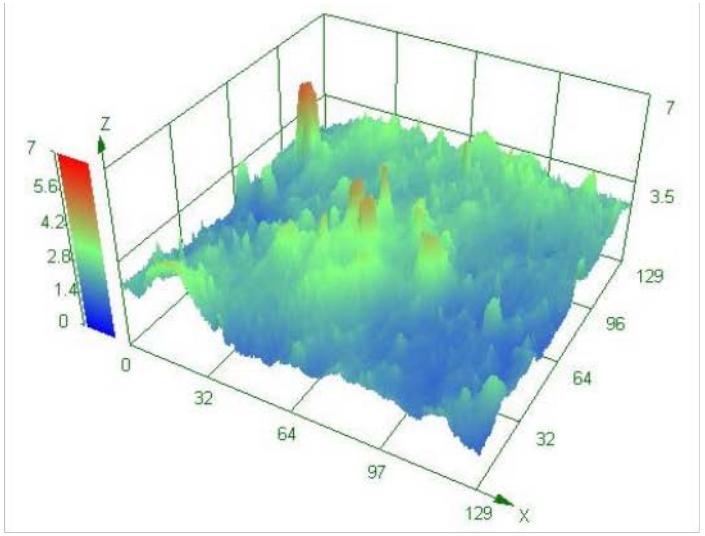
第22図 6　展張前後の生分解性マルチフィルム表面のSPM測定*の結果　6/6

※配合a、展張40日後、酵素剤処理、裏面　　*SPM観察方法2による



縦方向線粗さ測定値
Sq=0.04　Sa=0.03

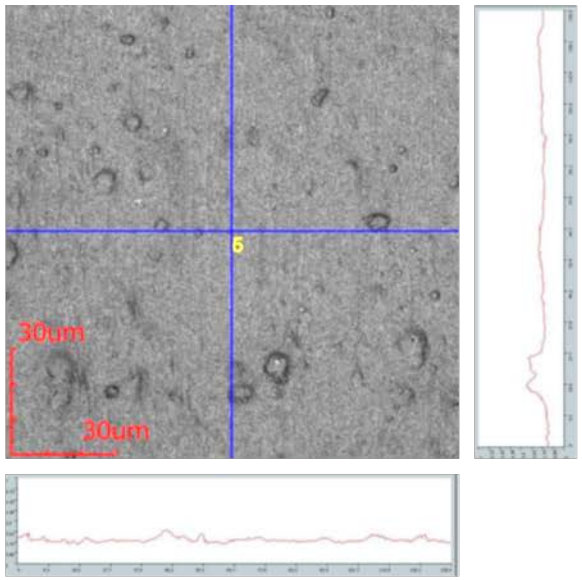
横方向線粗さ測定値**
Sq=0.06　Sa=0.04



面粗さ測定値
Sq=0.08　Sa=0.05

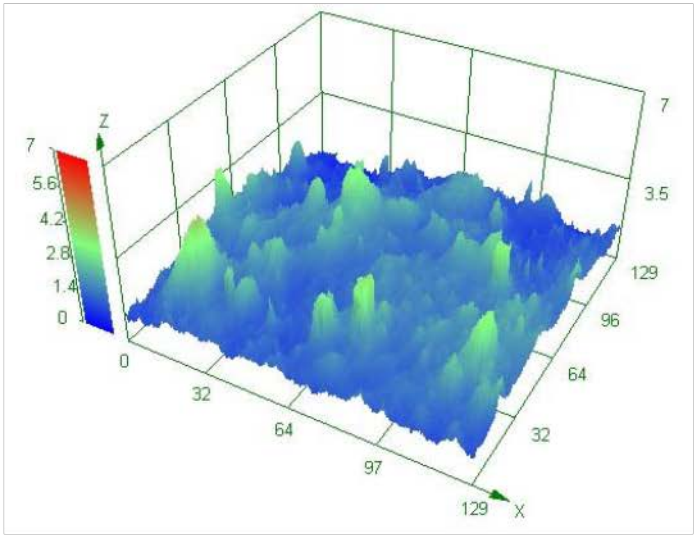
第23図 1　展張および酵素剤処理後の生分解性マルチフィルム表面のLSM測定*の結果　1/6

※配合e、未処理、表面
*LSM測定方法1による
**Sq：二乗平均平方根高さ、Sa：算術平均高さ、単位はμm



縦方向線粗さ測定値
Sq=0.04　Sa=0.03

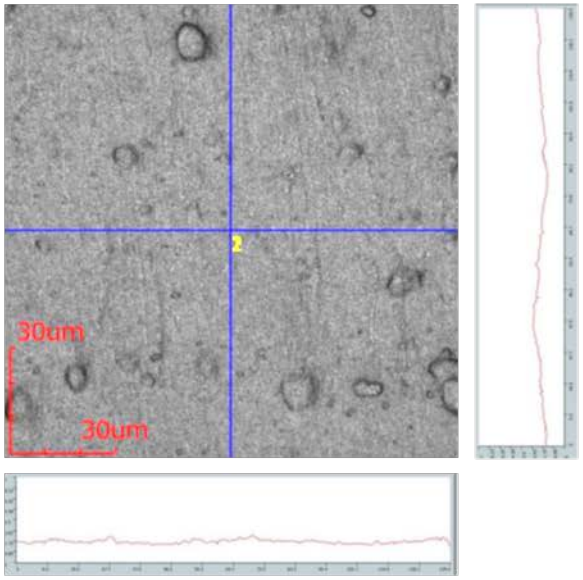
横方向線粗さ測定値**
Sq=0.06　Sa=0.05



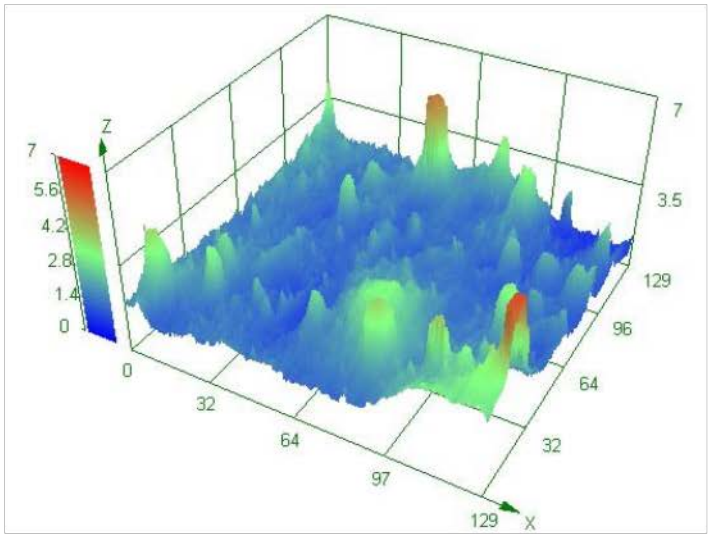
面粗さ測定値
Sq=0.07　Sa=0.05

第23図 2　展張および酵素剤処理後の生分解性マルチフィルム表面のLSM測定*の結果　2/6

※配合e、未処理、裏面
*LSM測定方法1による
**Sq：二乗平均平方根高さ、Sa：算術平均高さ、単位はμm



縦方向線粗さ測定値
Sq=0.03　Sa=0.03

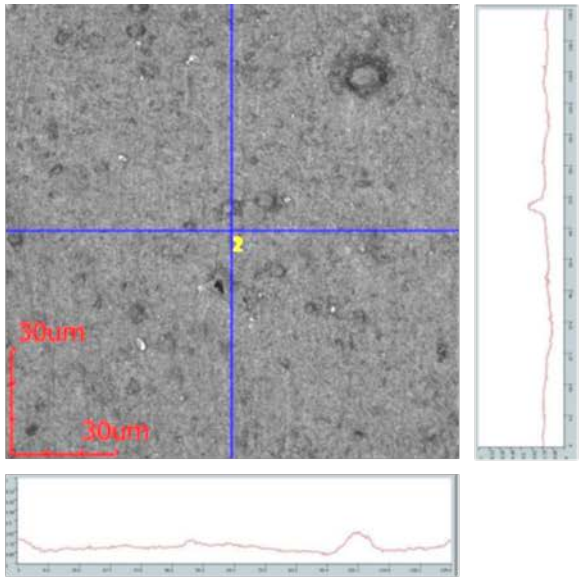


横方向線粗さ測定値**
Sq=0.05　Sa=0.04

面粗さ測定値
Sq=0.08　Sa=0.05

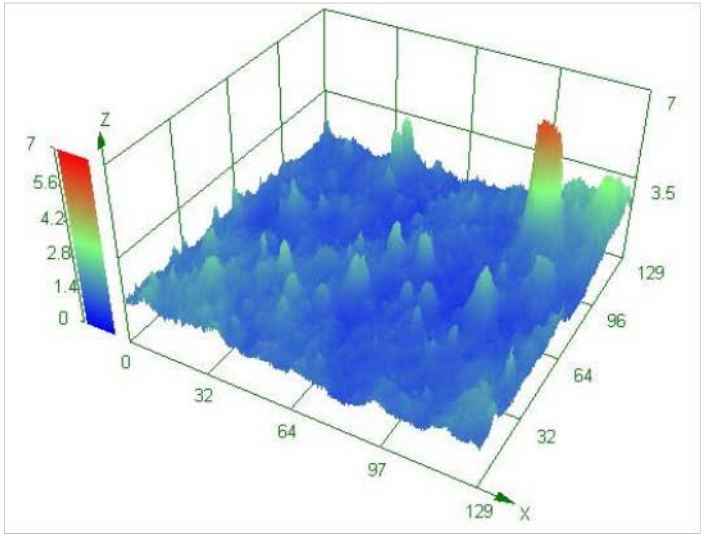
第23図 3　展張および酵素剤処理後の生分解性マルチフィルム表面のLSM測定*の結果　3/6

※配合e、展張処理後、表面
*LSM測定方法1による
**Sq：二乗平均平方根高さ、Sa：算術平均高さ、単位はμm



縦方向線粗さ測定値
Sq=0.05　Sa=0.04

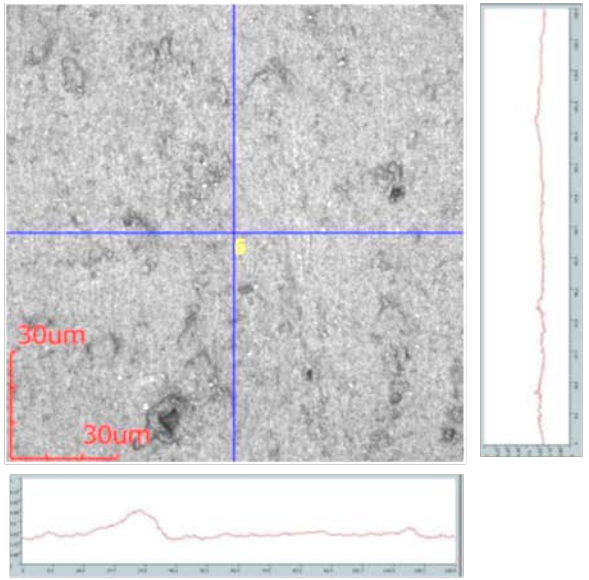
横方向線粗さ測定値**
Sq=0.05　Sa=0.04



面粗さ測定値
Sq=0.07　Sa=0.05

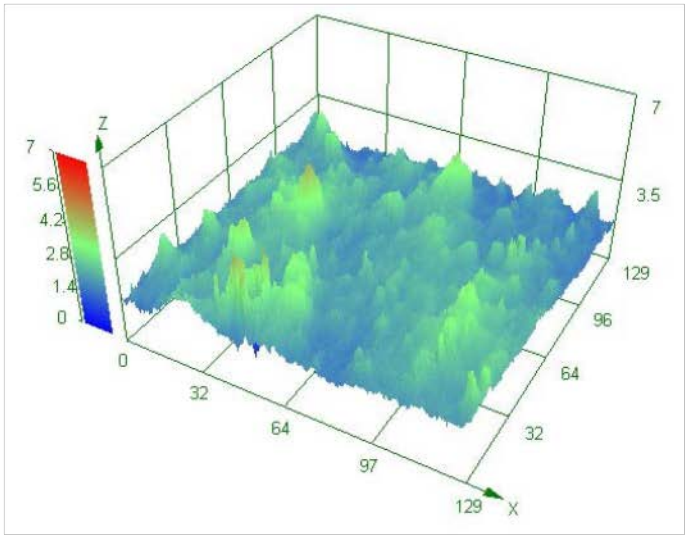
第23図　4　展張および酵素剤処理後の生分解性マルチフィルム表面のLSM測定*の結果　4/6

※配合e、展張処理後、裏面
*LSM測定方法1による
**Sq：二乗平均平方根高さ、Sa：算術平均高さ、単位はμm



縦方向線粗さ測定値
Sq=0.05　Sa=0.03

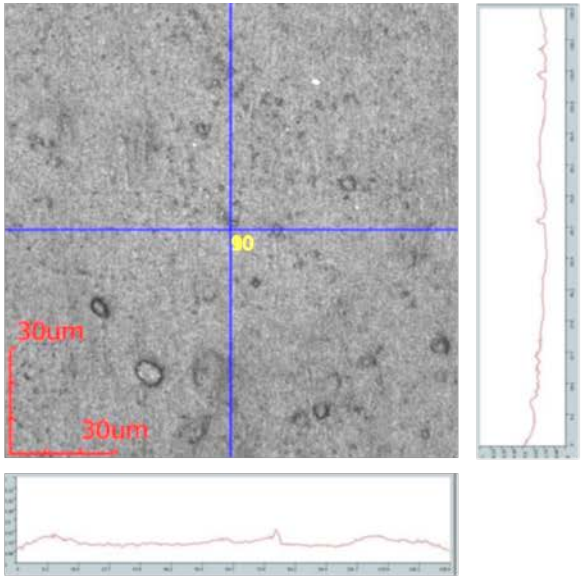
横方向線粗さ測定値**
Sq=0.05　Sa=0.04



面粗さ測定値
Sq=0.08　Sa=0.05

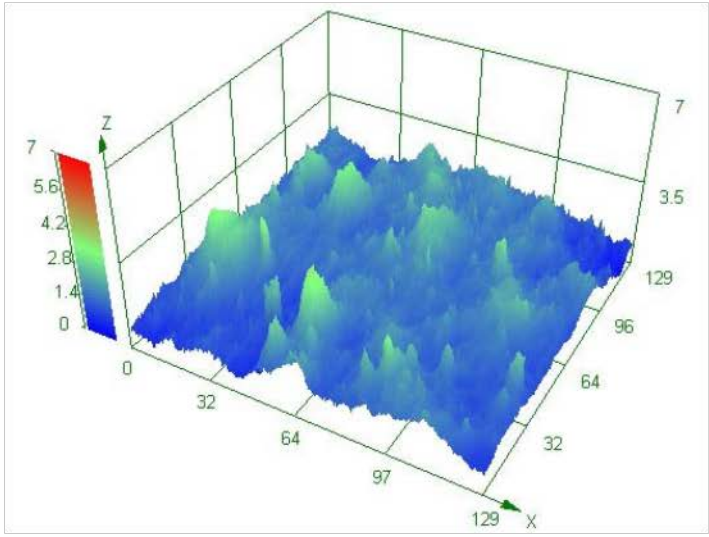
第26図 5　埋設および酵素剤処理後の生分解性マルチフィルム表面のLSM*の結果　5/6

※配合e、展張処理、埋設処理、表面
*LSM測定方法1による
**Sq：二乗平均平方根高さ、Sa：算術平均高さ、単位はμm



縦方向線粗さ測定値
Sq=0.05　Sa=0.04

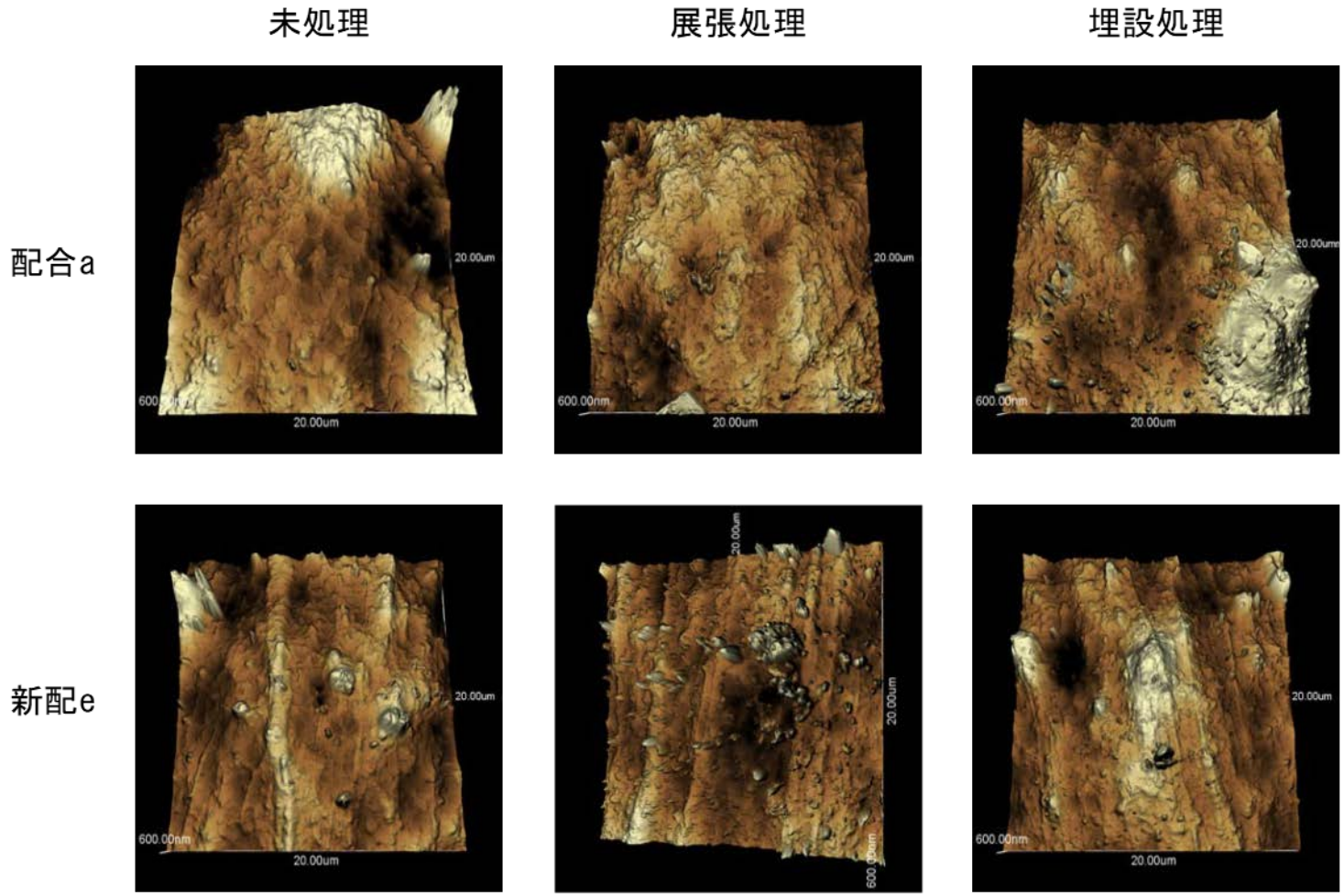
横方向線粗さ測定値**
Sq=0.05　Sa=0.04



面粗さ測定値
Sq=0.07　Sa=0.05

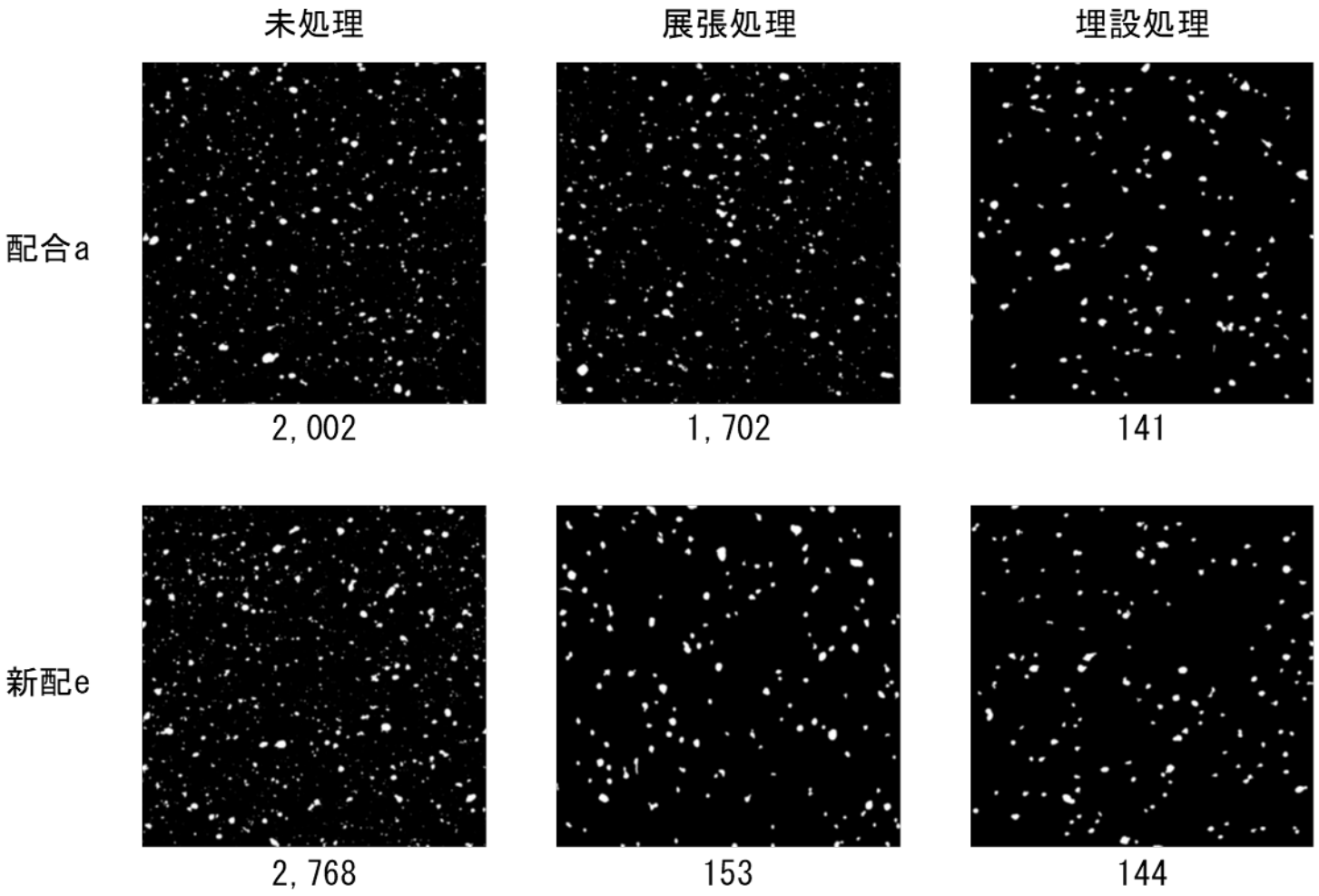
第23図　6　展張および酵素剤処理後の生分解性マルチフィルム表面のLSM測定*の結果　6/6

※配合e、展張処理後、酵素剤処理後、裏面
*LSM測定方法1による
**Sq：二乗平均平方根高さ、Sa：算術平均高さ、単位はμm



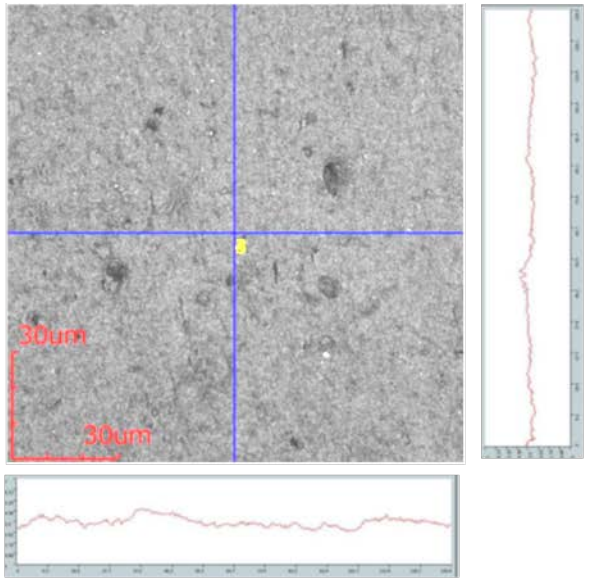
第24図　展張および埋設処理後の生分解性マルチフィルム表面のSPM測定*の結果

*SPM測定方法1による、3次元表示



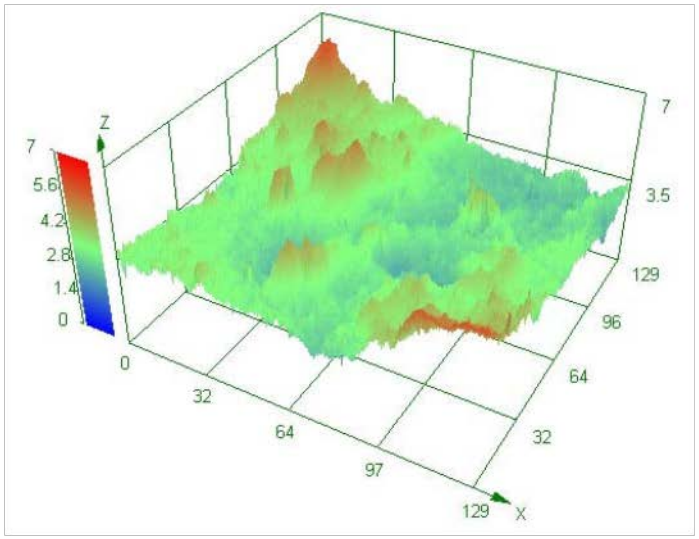
第25図　展張および埋設処理後の生分解性マルチフィルム表面のLSM測定*の結果

※1.5μm以上の高さを持つ粒子あるいは突起の高さ像を抽出した粒子解析
*LSM測定方法2による
**数値は計測された粒子数



縦方向線粗さ測定値
Sq=0.06　Sa=0.05

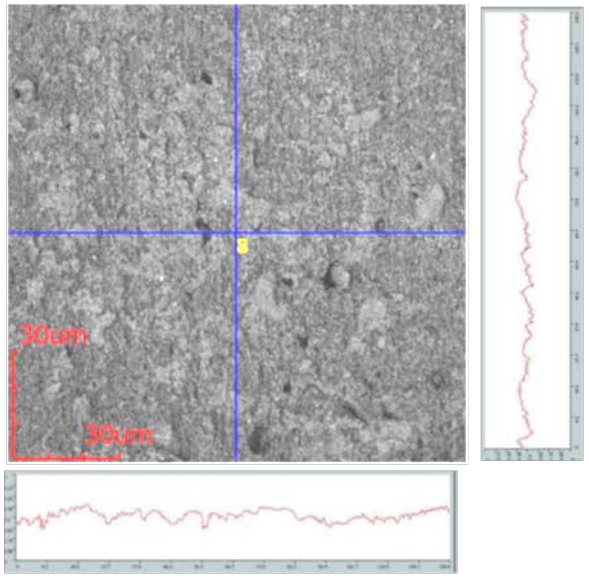
横方向線粗さ測定値**
Sq=0.07　Sa=0.06



面粗さ測定値
Sq=0.10　Sa=0.07

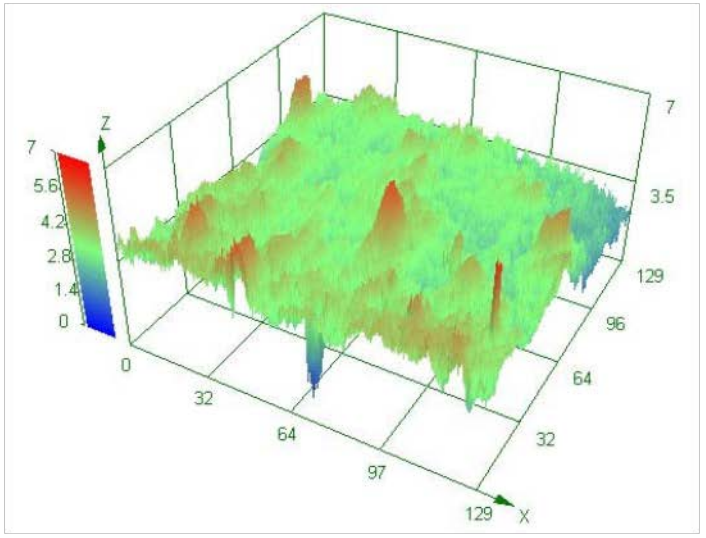
第26図 1　埋設および酵素剤処理後の生分解性マルチフィルム表面のLSM*の結果　1/6

※配合a、展張時埋設処理、表面
*LSM測定方法1による
**Sq：二乗平均平方根高さ、Sa：算術平均高さ、単位はμm



縦方向線粗さ測定値
Sq=0.09　Sa=0.08

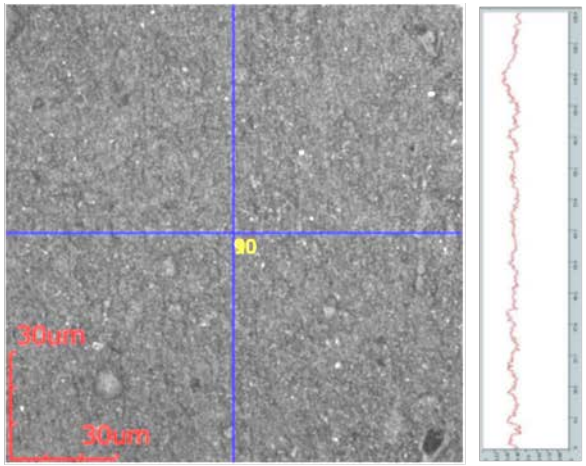
横方向線粗さ測定値**
Sq=0.13　Sa=0.10



面粗さ測定値
Sq=0.15　Sa=0.11

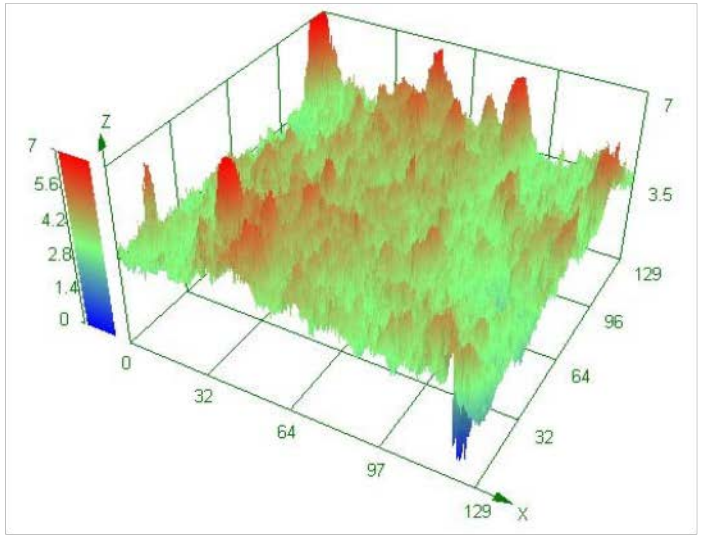
第26図 2　埋設および酵素剤処理後の生分解性マルチフィルム表面のLSM*の結果　2/6

※配合a、展張処理後埋設処理、表面
*LSM測定方法1による
**Sq：二乗平均平方根高さ、Sa：算術平均高さ、単位はμm



縦方向線粗さ測定値
Sq=0.12　Sa=0.10

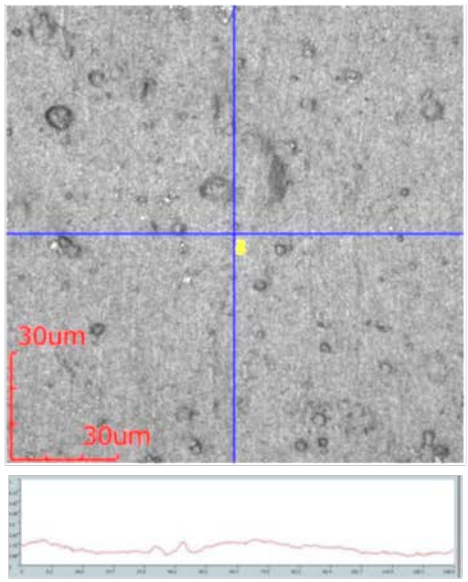
横方向線粗さ測定値**
Sq=0.13　Sa=0.10



面粗さ測定値
Sq=0.17　Sa=0.13

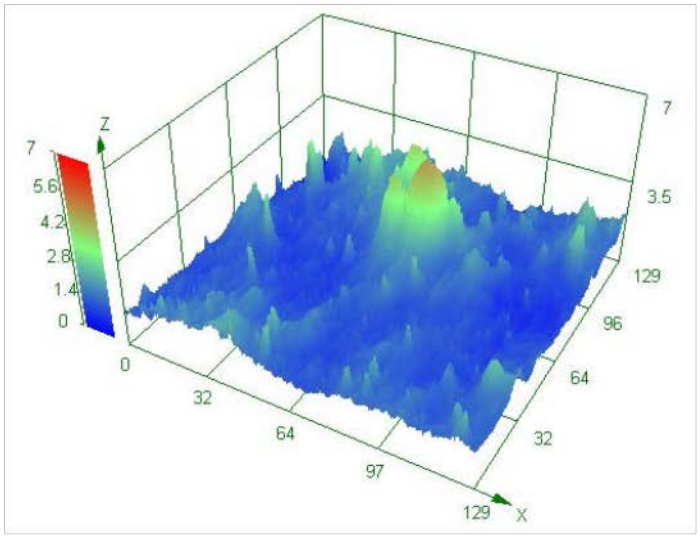
第26図 3　埋設および酵素剤処理後の生分解性マルチフィルム表面のLSM*の結果　3/6

※配合a、展張処理、酵素剤処理、埋設処理、表面
*LSM測定方法1による
**Sq：二乗平均平方根高さ、Sa：算術平均高さ、単位はμm



縦方向線粗さ測定値
Sq=0.04　Sa=0.03

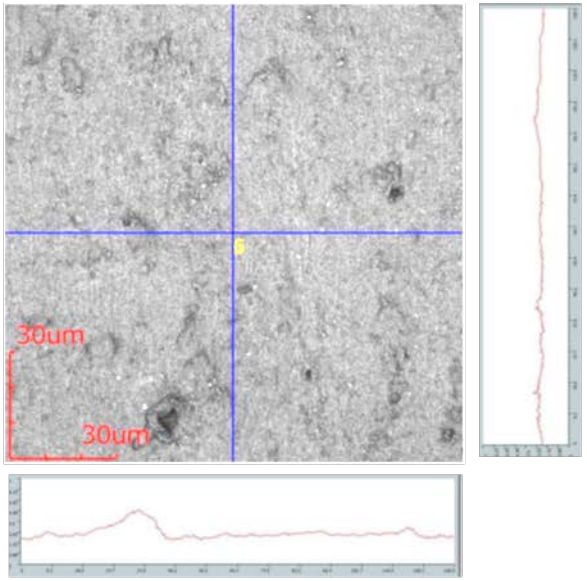
横方向線粗さ測定値**
Sq=0.05　Sa=0.04



面粗さ測定値
Sq=0.07　Sa=0.05

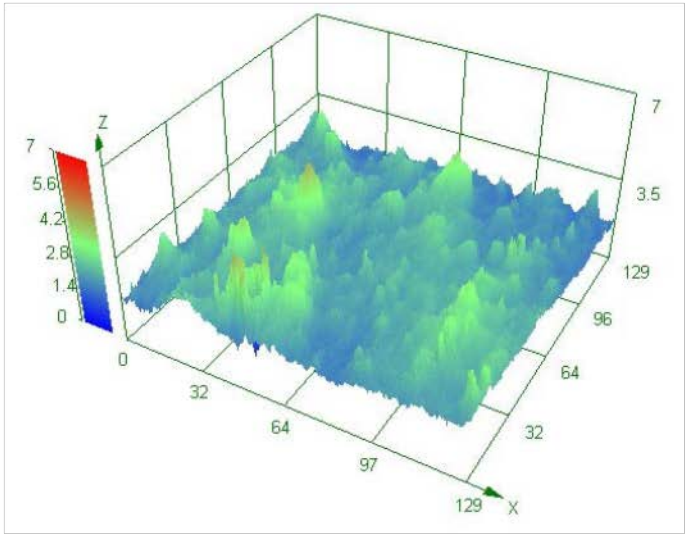
第26図 4　埋設および酵素剤処理後の生分解性マルチフィルム表面のLSM*の結果　4/6

※配合e、展張時埋設処理、表面
*LSM測定方法1による
**Sq：二乗平均平方根高さ、Sa：算術平均高さ、単位はμm



縦方向線粗さ測定値
Sq=0.05　Sa=0.03

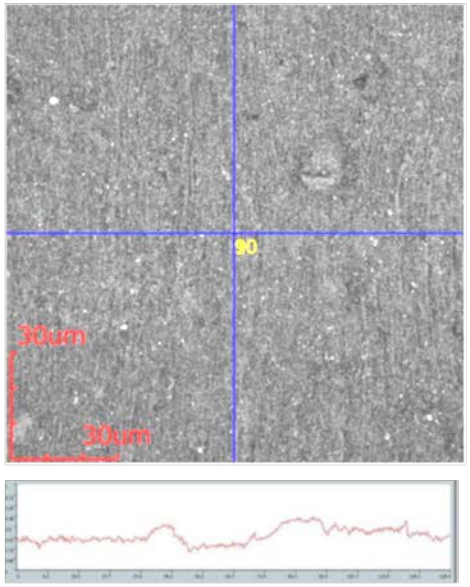
横方向線粗さ測定値**
Sq=0.05　Sa=0.04



面粗さ測定値
Sq=0.08　Sa=0.05

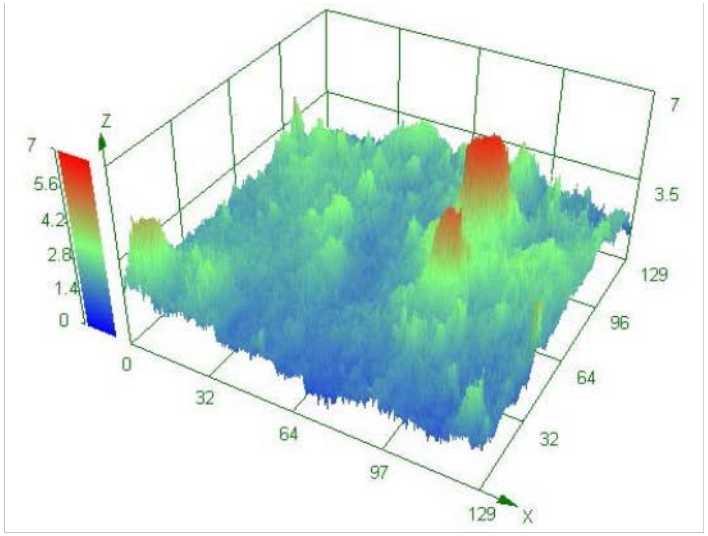
第26図 5　埋設および酵素剤処理後の生分解性マルチフィルム表面のLSM*の結果　5/6

※配合e、展張処理、埋設処理、表面
*LSM測定方法1による
**Sq：二乗平均平方根高さ、Sa：算術平均高さ、単位はμm



縦方向線粗さ測定値
Sq=0.09　Sa=0.08

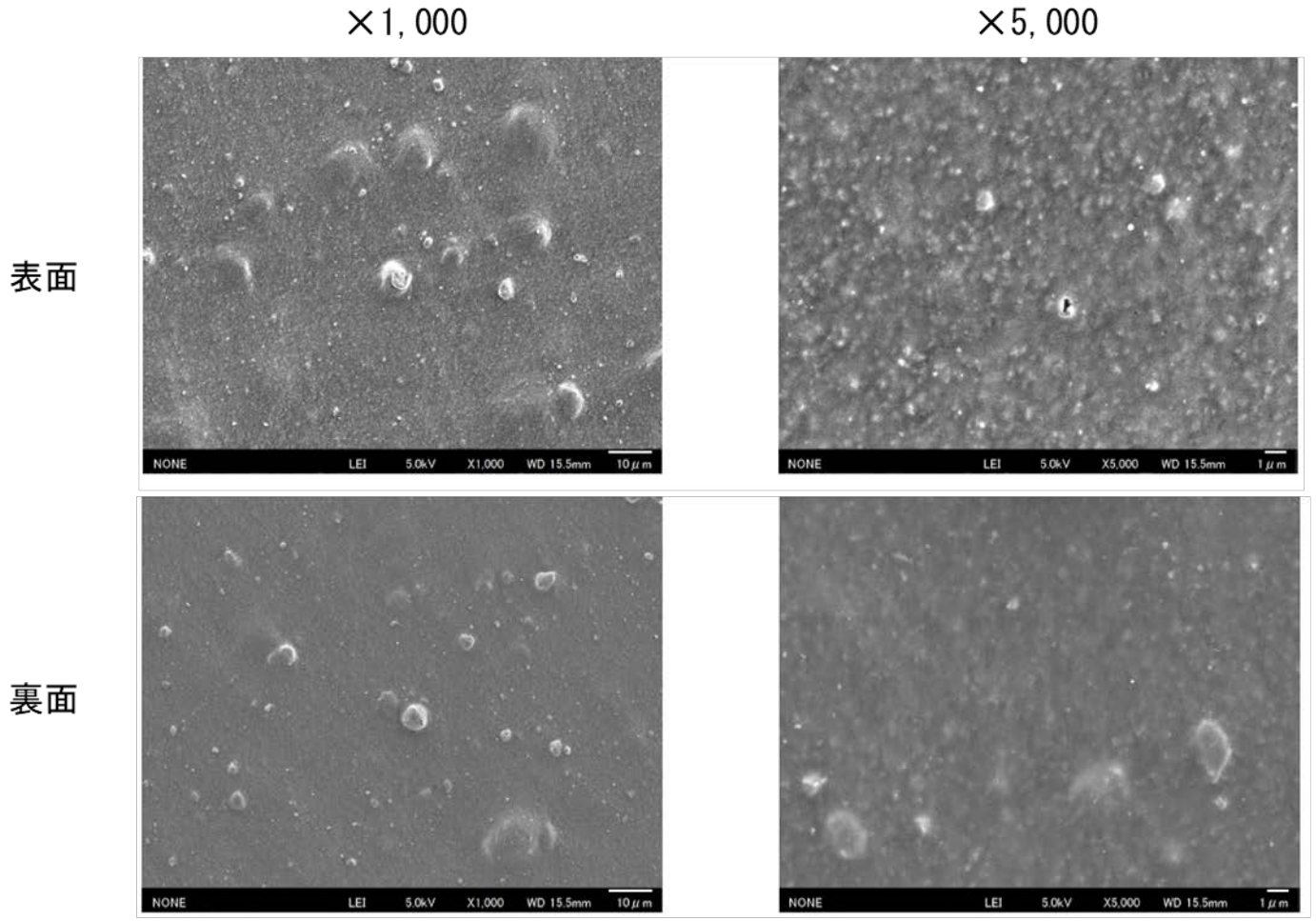
横方向線粗さ測定値**
Sq=0.12　Sa=0.09



面粗さ測定値
Sq=0.14　Sa=0.11

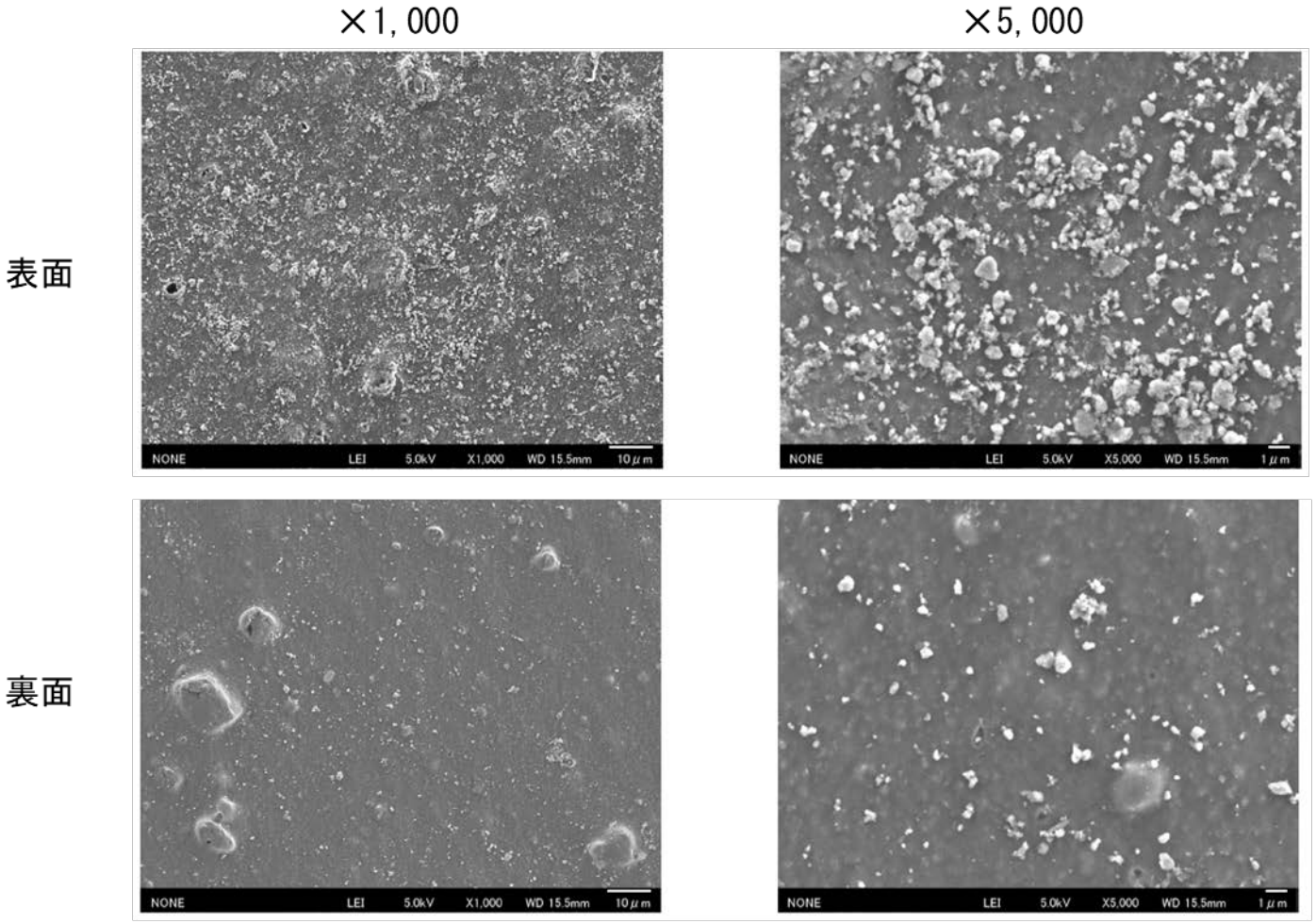
第26図 6　埋設および酵素剤処理後の生分解性マルチフィルム表面のLSM*の結果　6/6

※配合e、展張処理、酵素剤処理、埋設処理、表面
*LSM測定方法1による
**Sq：二乗平均平方根高さ、Sa：算術平均高さ、単位はμm



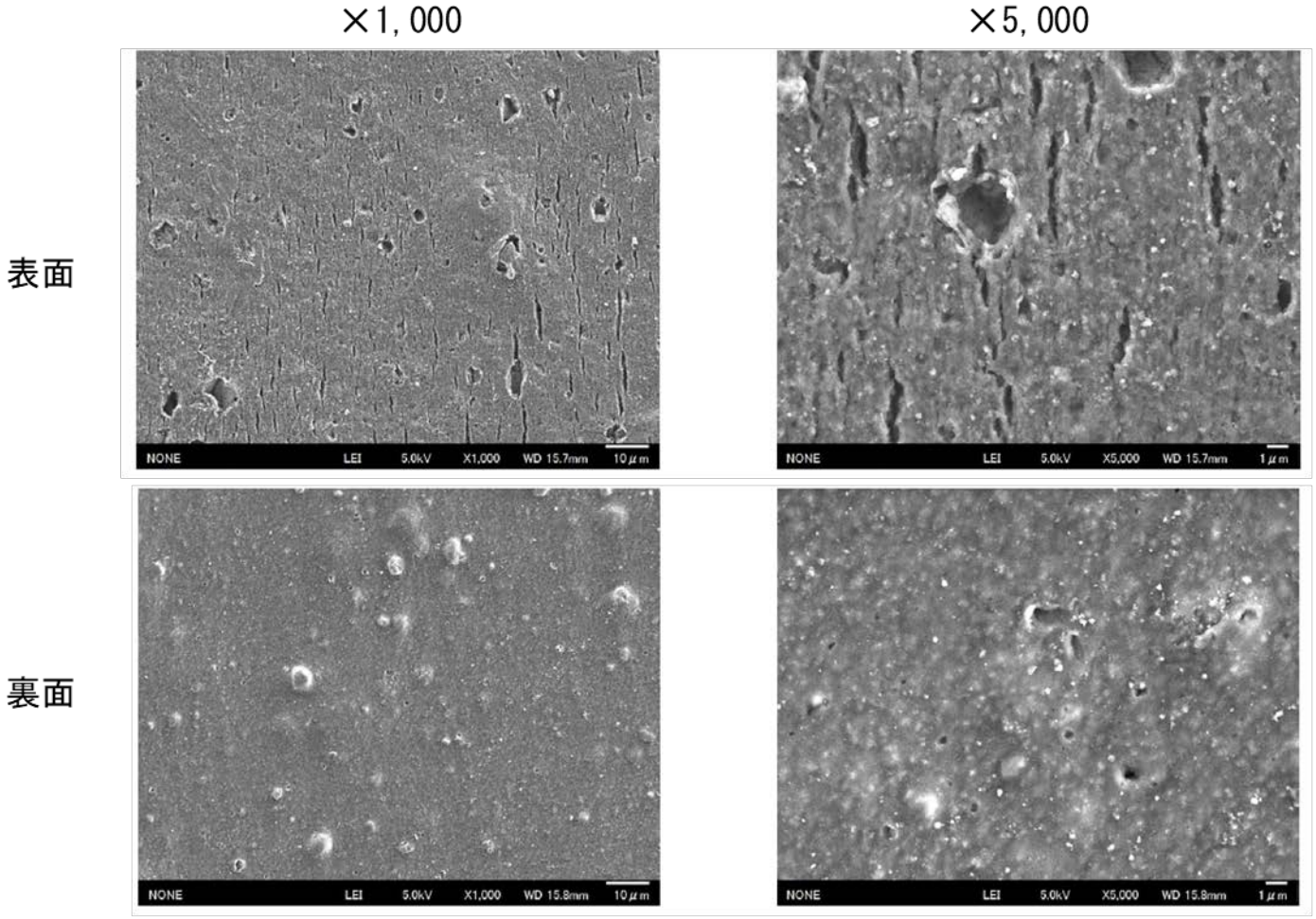
第27図 1　埋設および酵素剤処理後の生分解性マルチフィルム表面のSEM観察の結果 1/12

※配合a、未処理



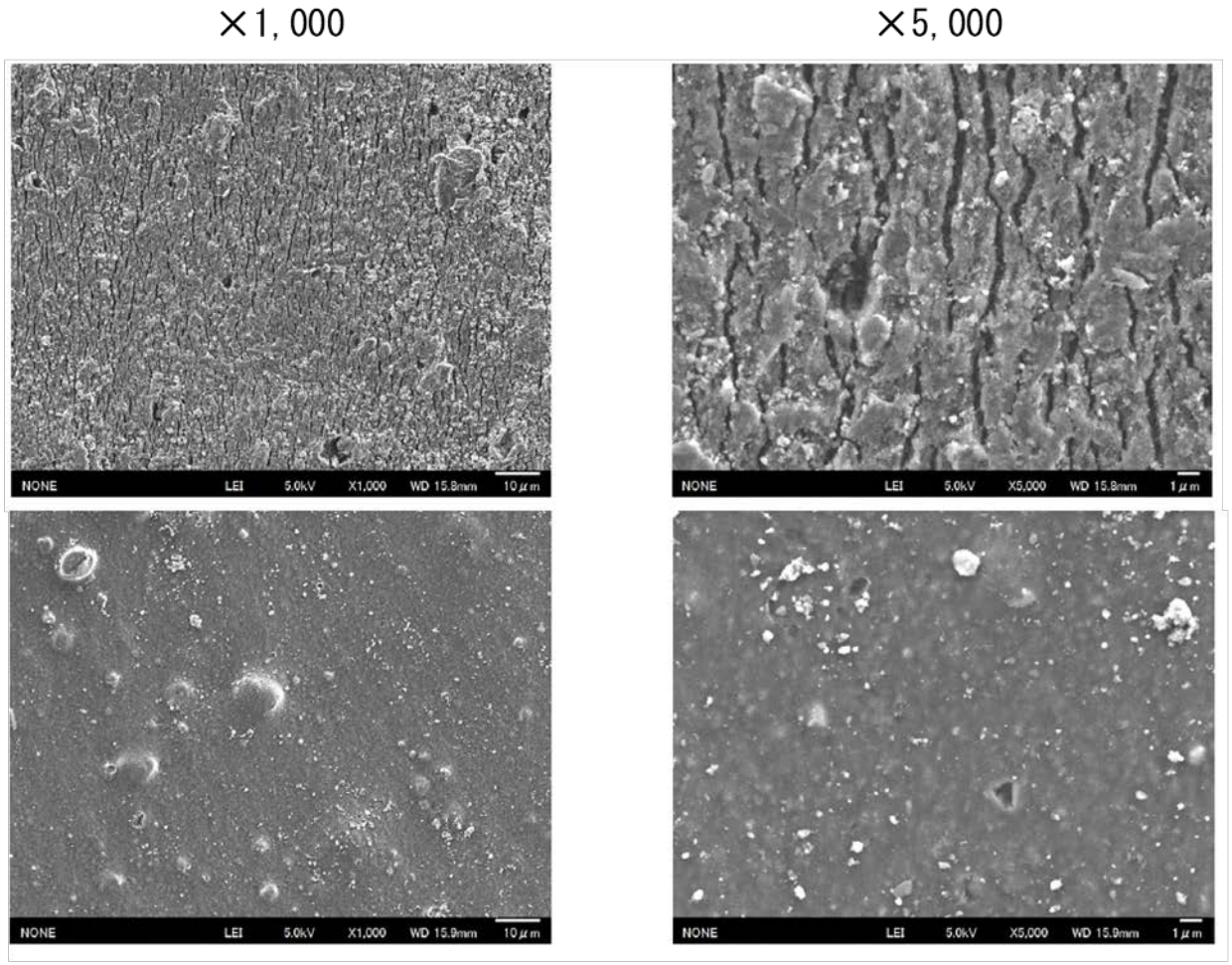
第27図 2　埋設および酵素剤処理後の生分解性マルチフィルム表面のSEM観察の結果 2/12

※配合a、展張処理40日



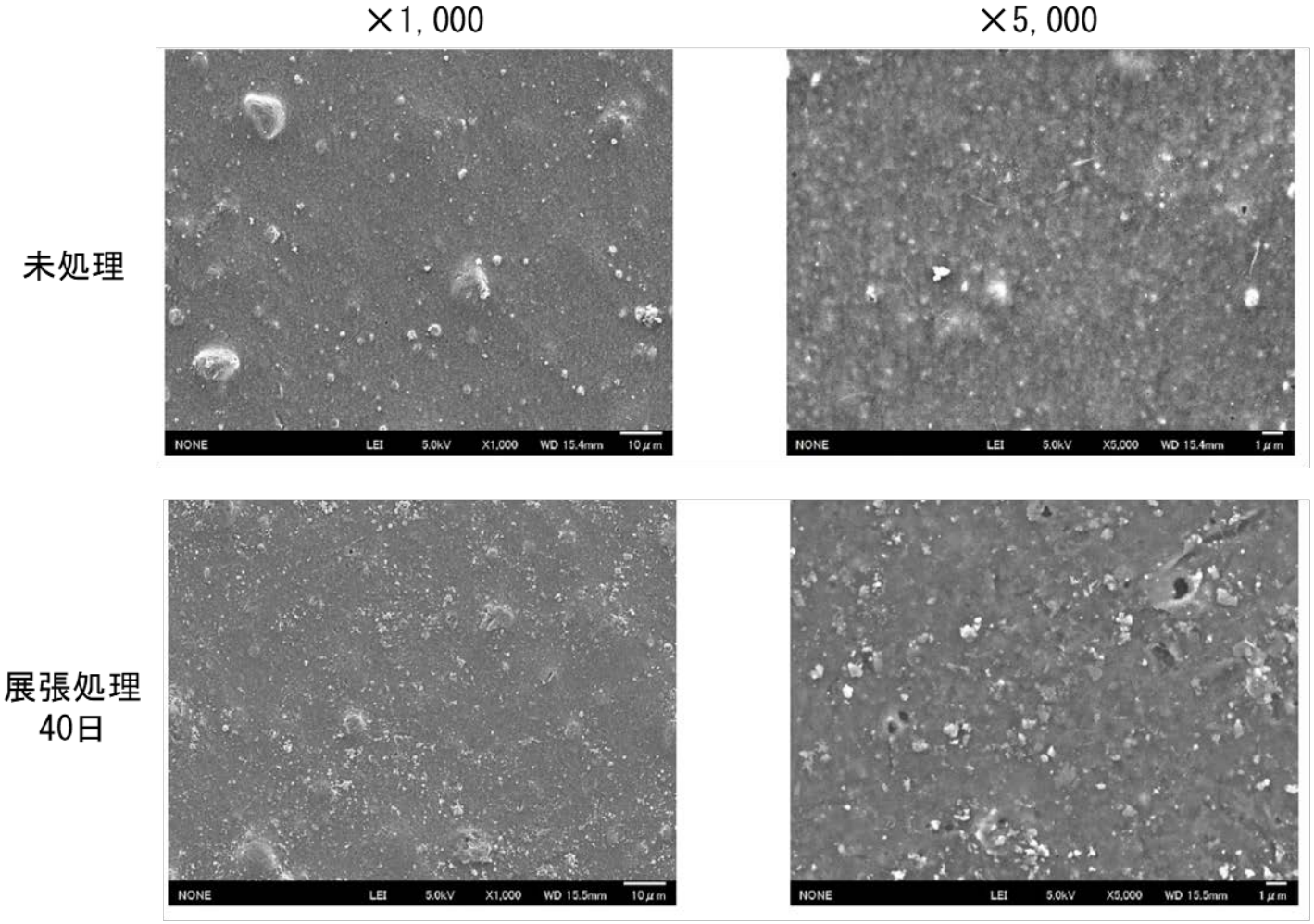
第27図 3　埋設および酵素剤処理後の生分解性マルチフィルム表面のSEM観察の結果 3/12

※配合a、展張時埋設処理、130日



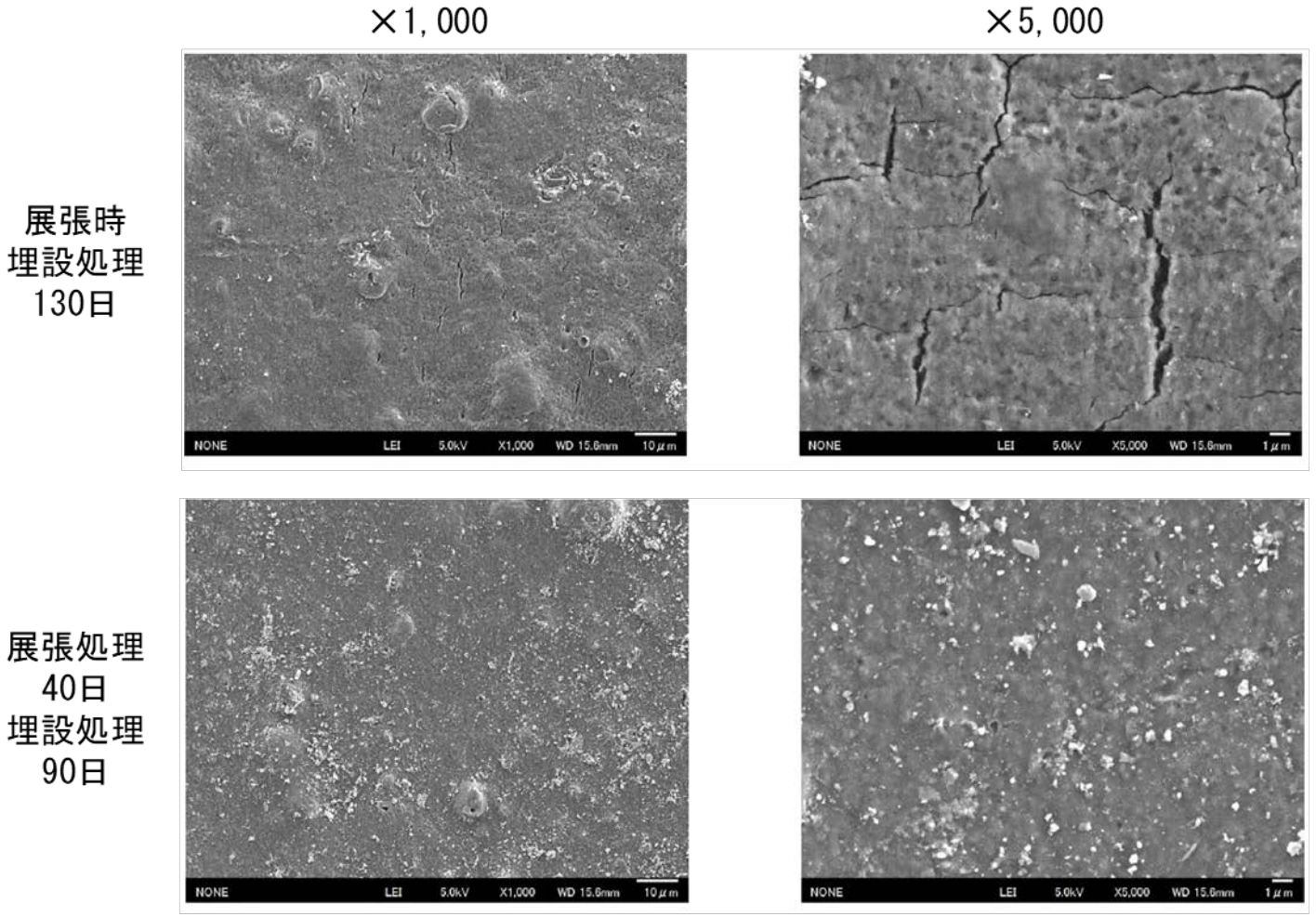
第27図 4　埋設および酵素剤処理後の生分解性マルチフィルム表面のSEM観察の結果 4/12

※配合a、展張処理40日、埋設処理90日



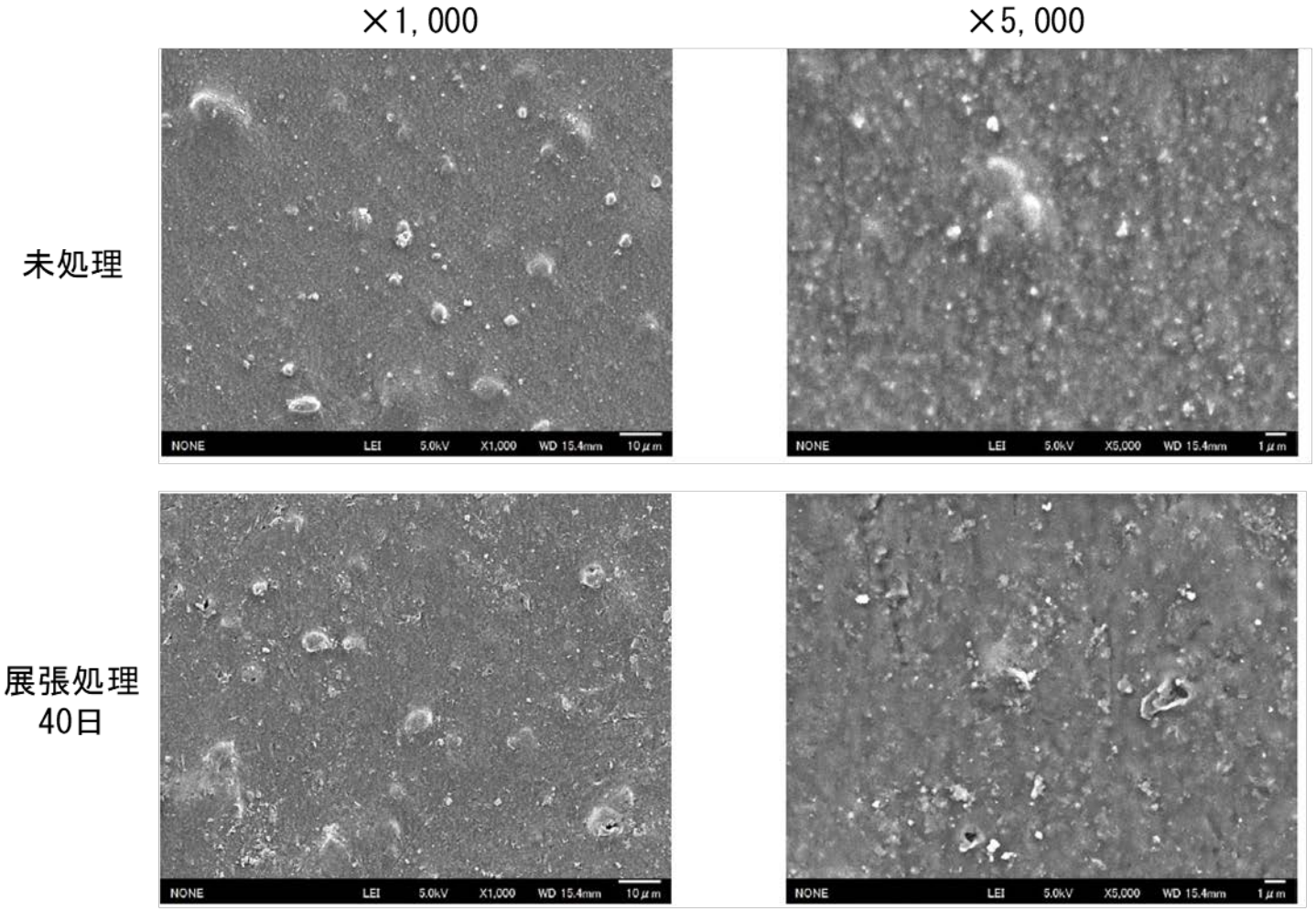
第27図 5　埋設および酵素剤処理後の生分解性マルチフィルム表面のSEM観察の結果 5/12

※配合c、表面



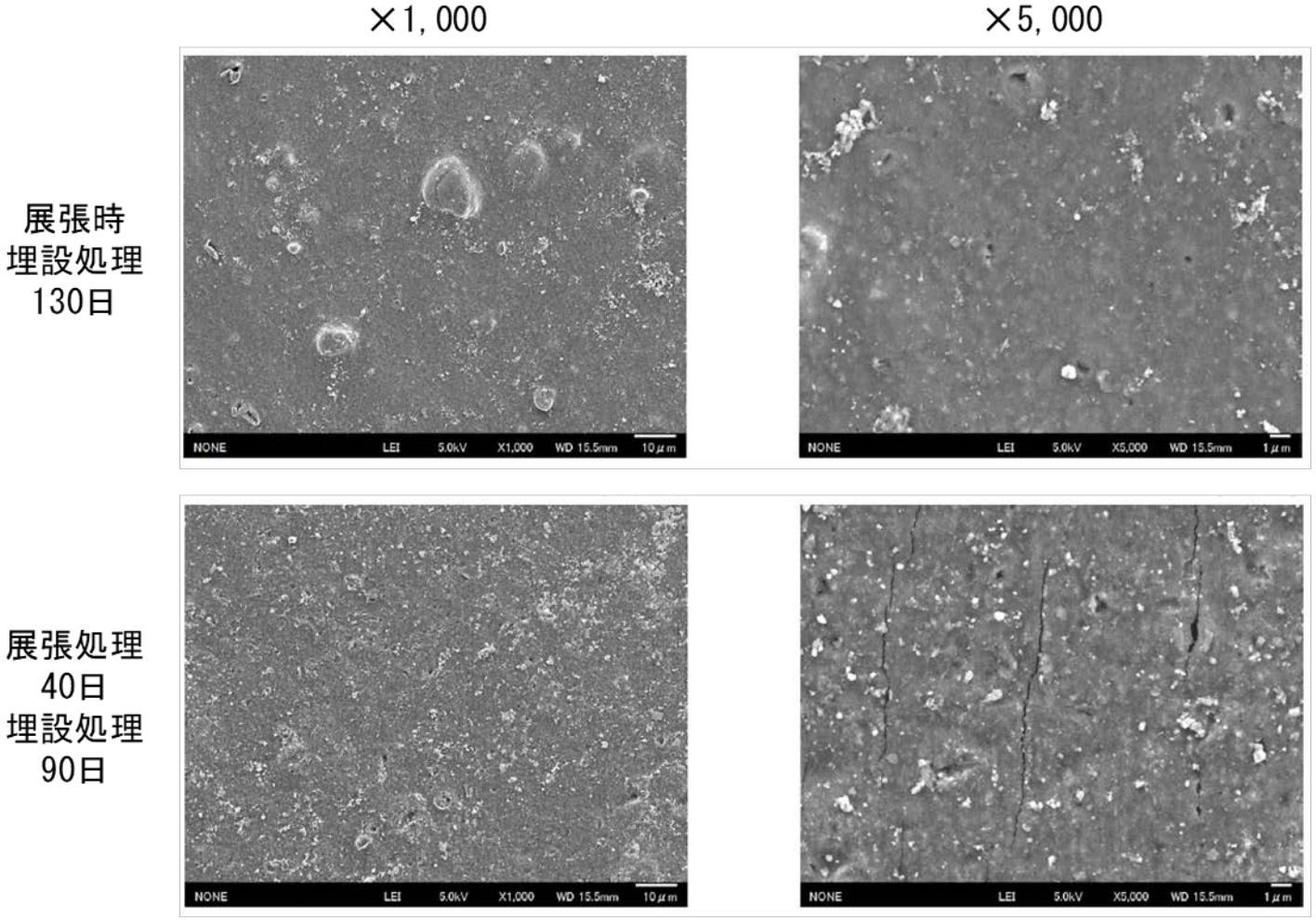
第27図 6　埋設および酵素剤処理後の生分解性マルチフィルム表面のSEM観察の結果 6/12

※配合c、表面



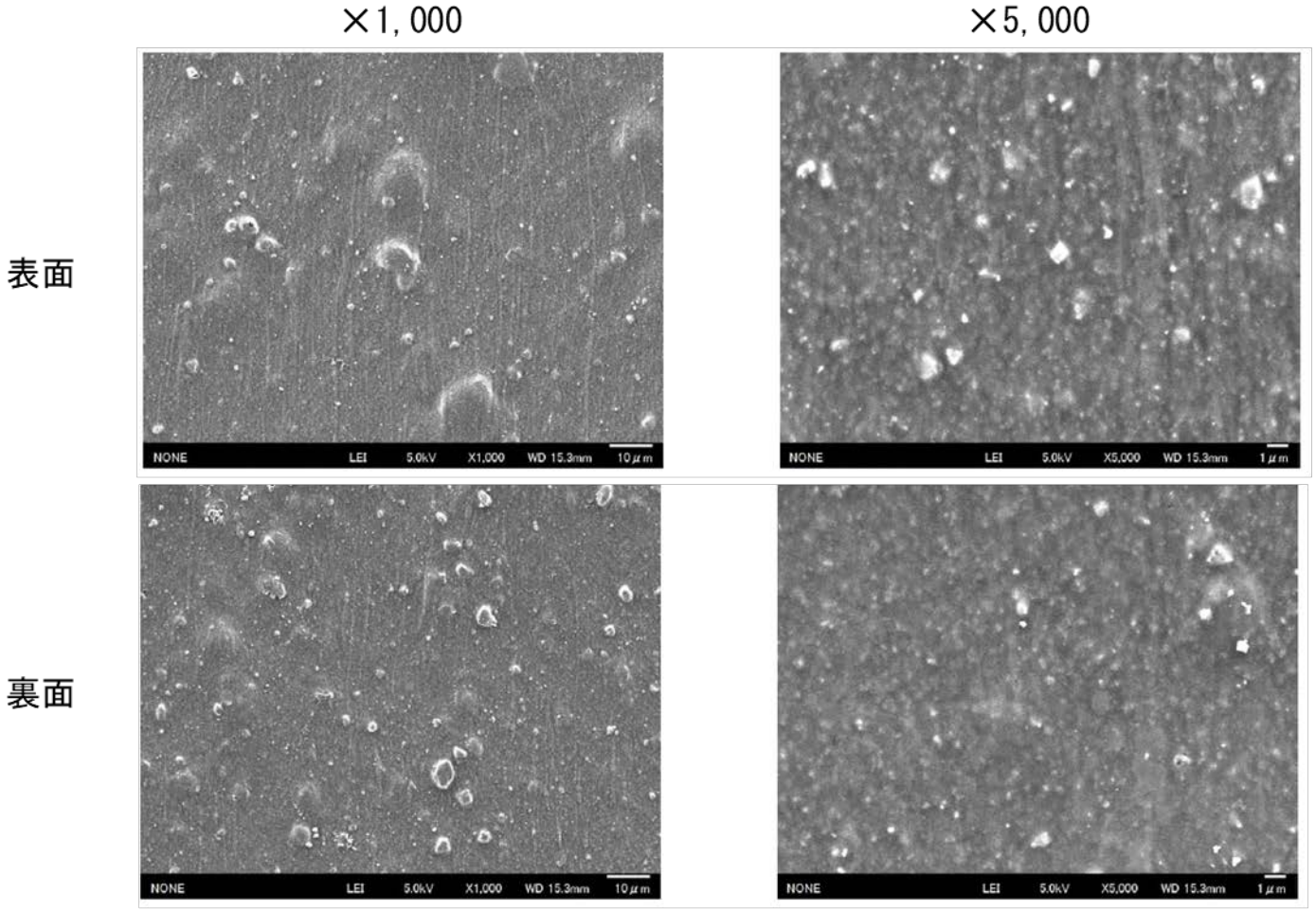
第27図 7　埋設および酵素剤処理後の生分解性マルチフィルム表面のSEM観察の結果 7/12

※配合d、表面



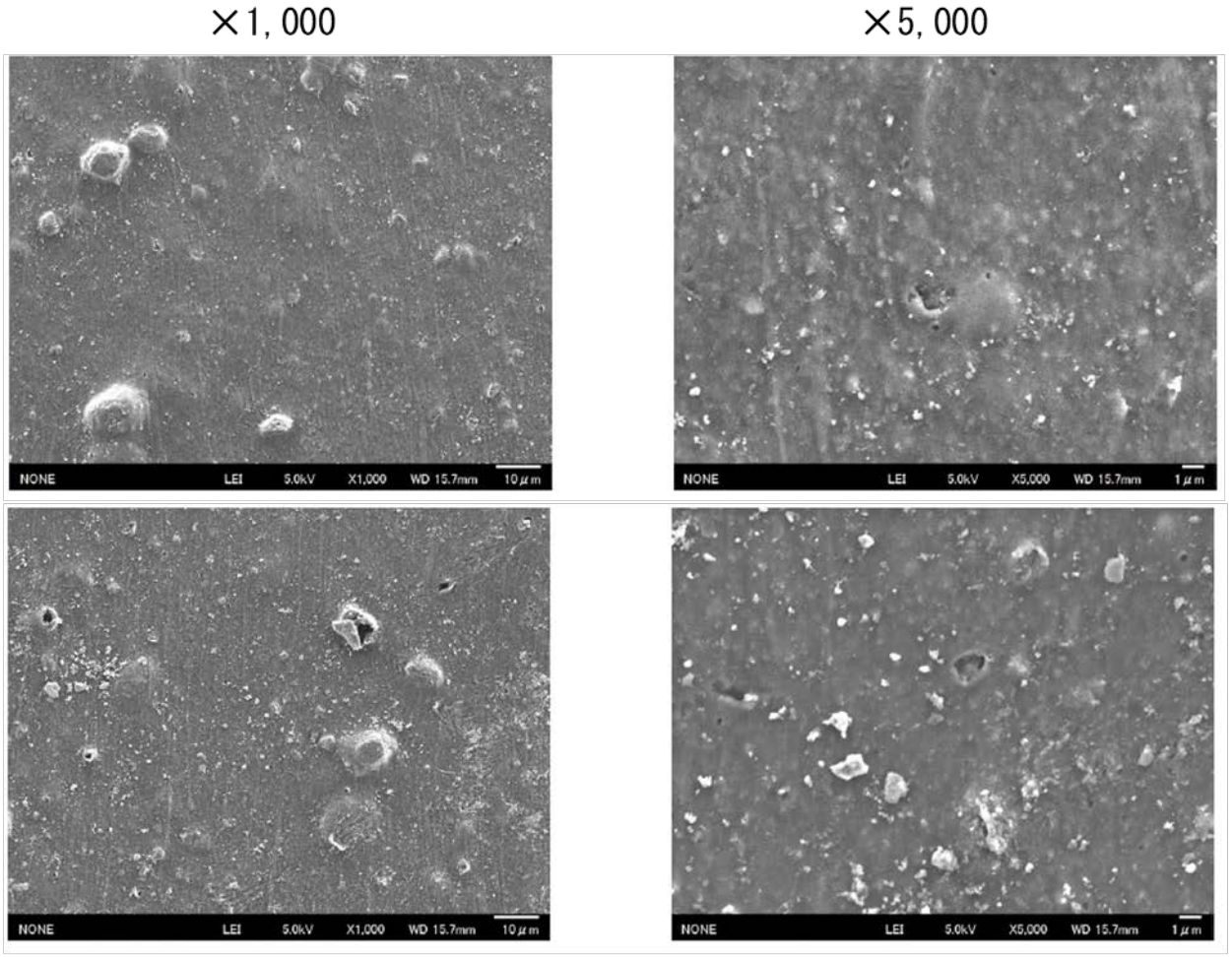
第27図 8　埋設および酵素剤処理後の生分解性マルチフィルム表面のSEM観察の結果 8/12

※配合d、表面



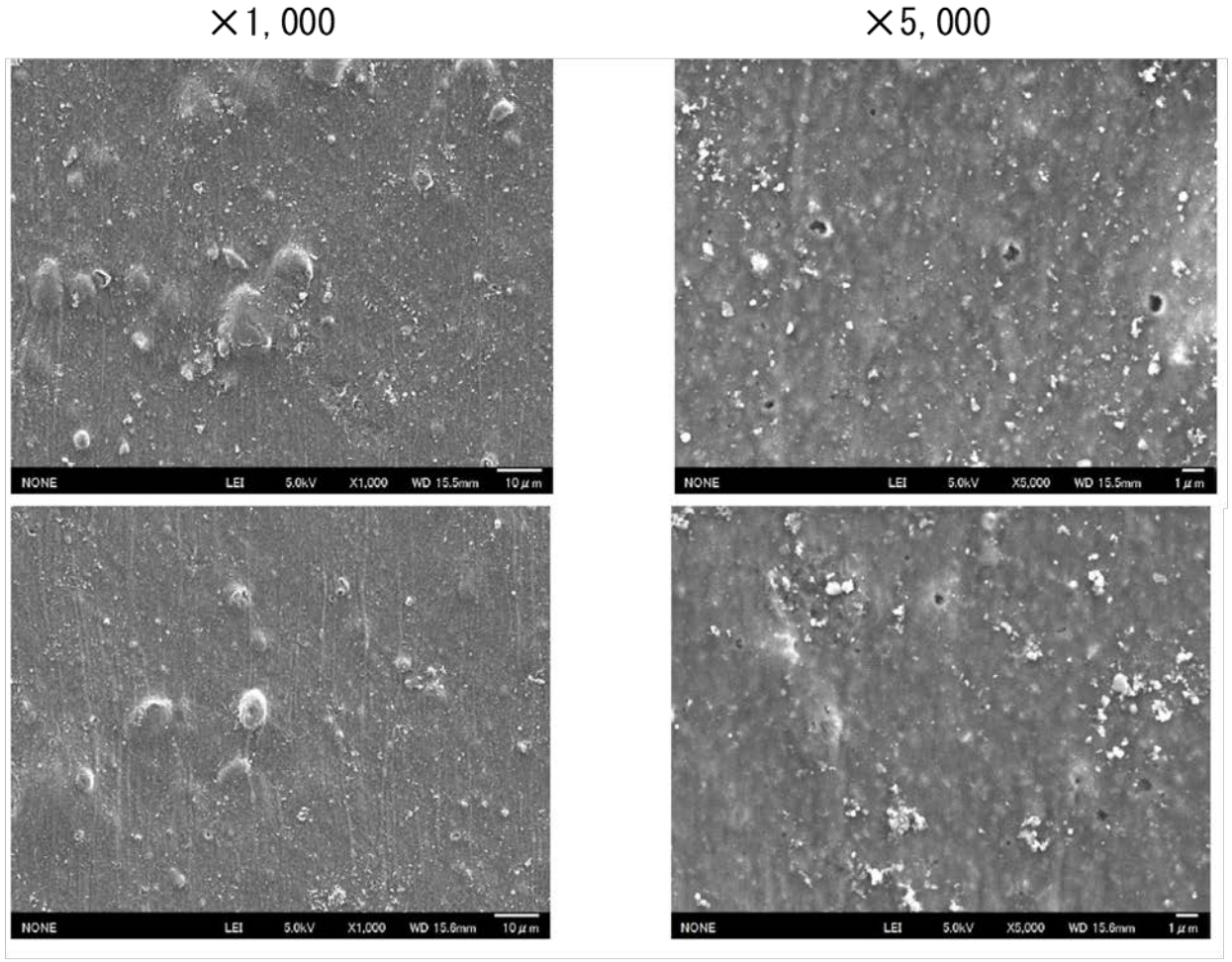
第27図 9　埋設および酵素剤処理後の生分解性マルチフィルム表面のSEM観察の結果 9/12

※配合e、未処理



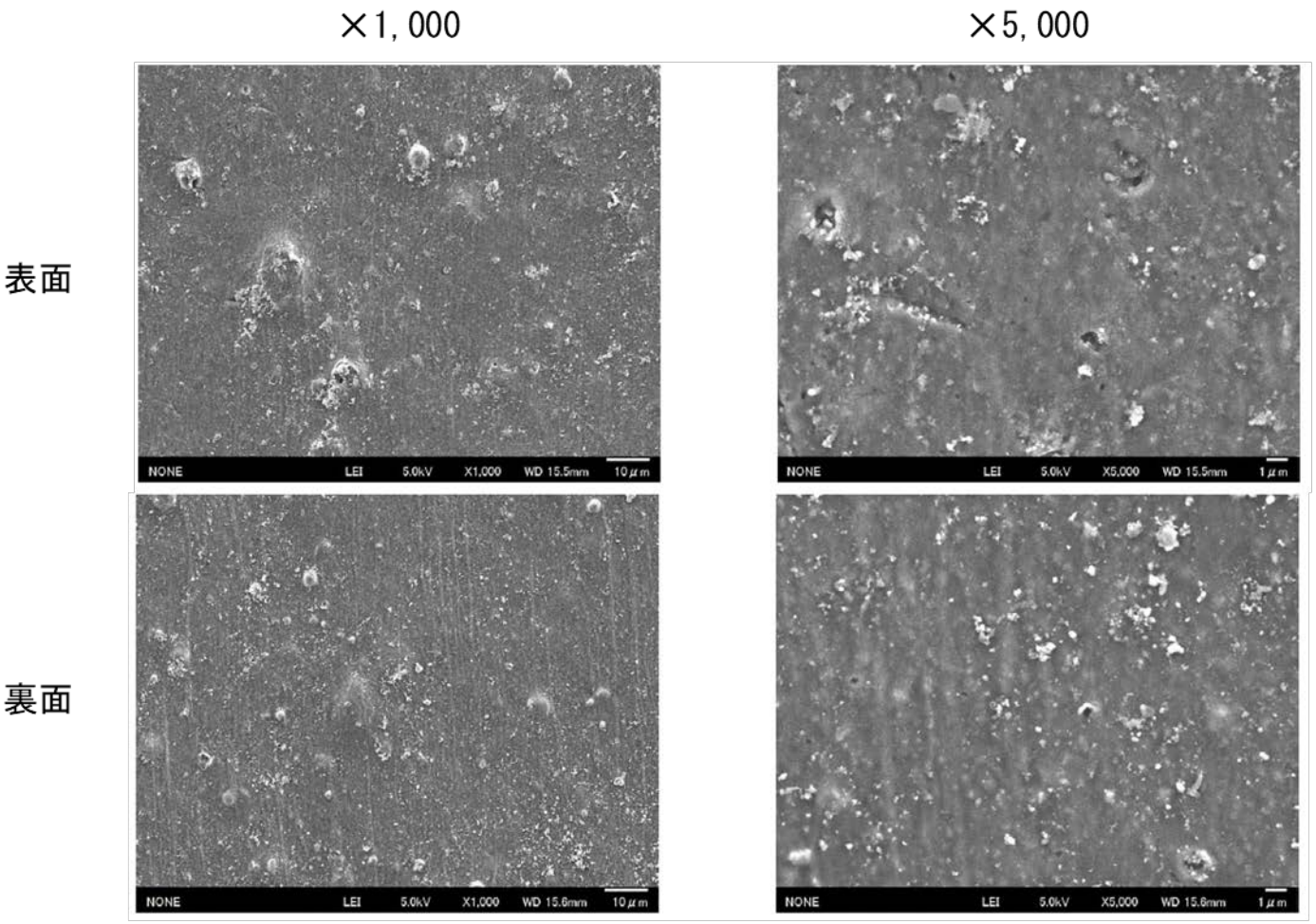
第27図 10　埋設および酵素剤処理後の生分解性マルチフィルム表面のSEM観察の結果 10/12

※配合e、展張処理40日



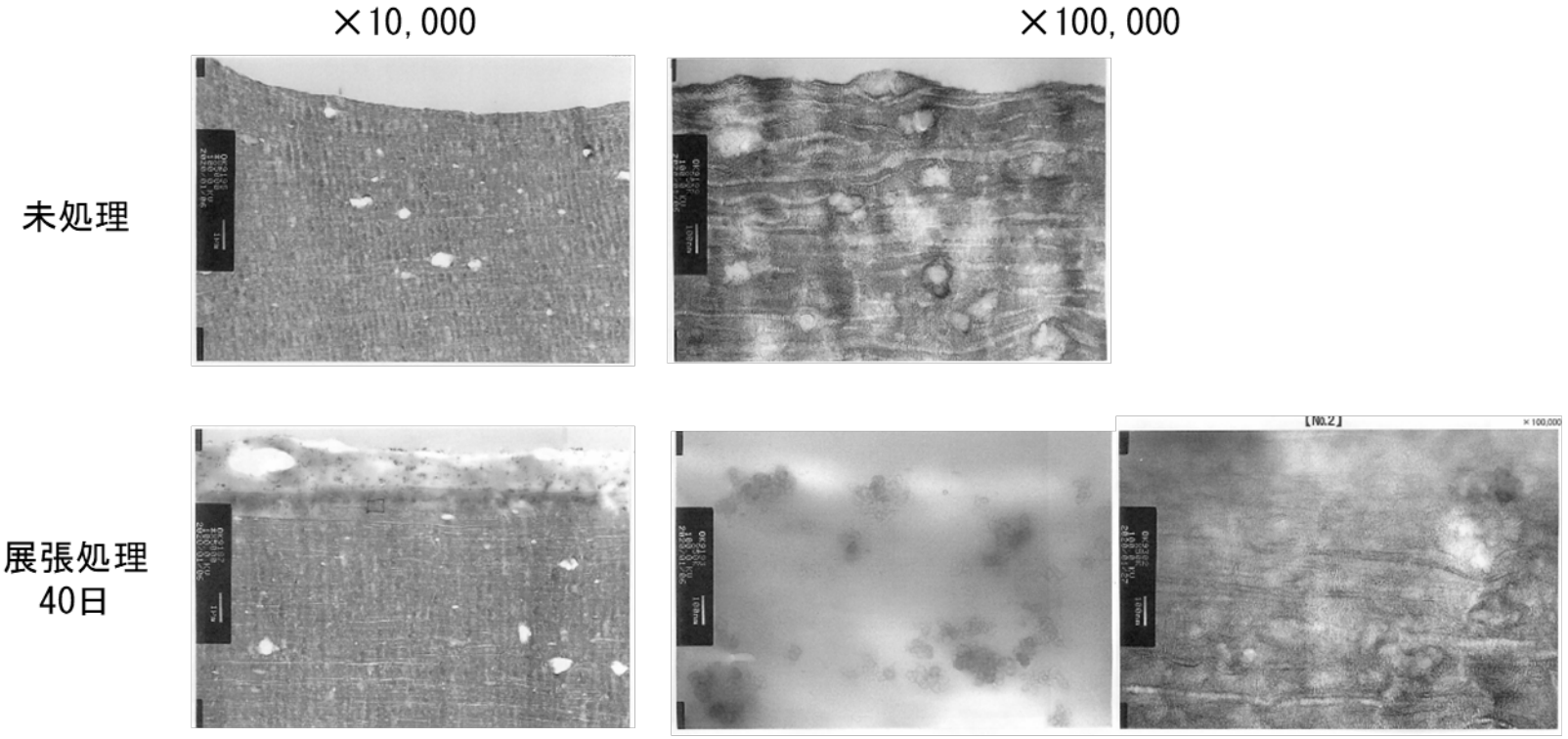
第27図 11　埋設および酵素剤処理後の生分解性マルチフィルム表面のSEM観察の結果 11/12

※配合e、展張時埋設処理、130日



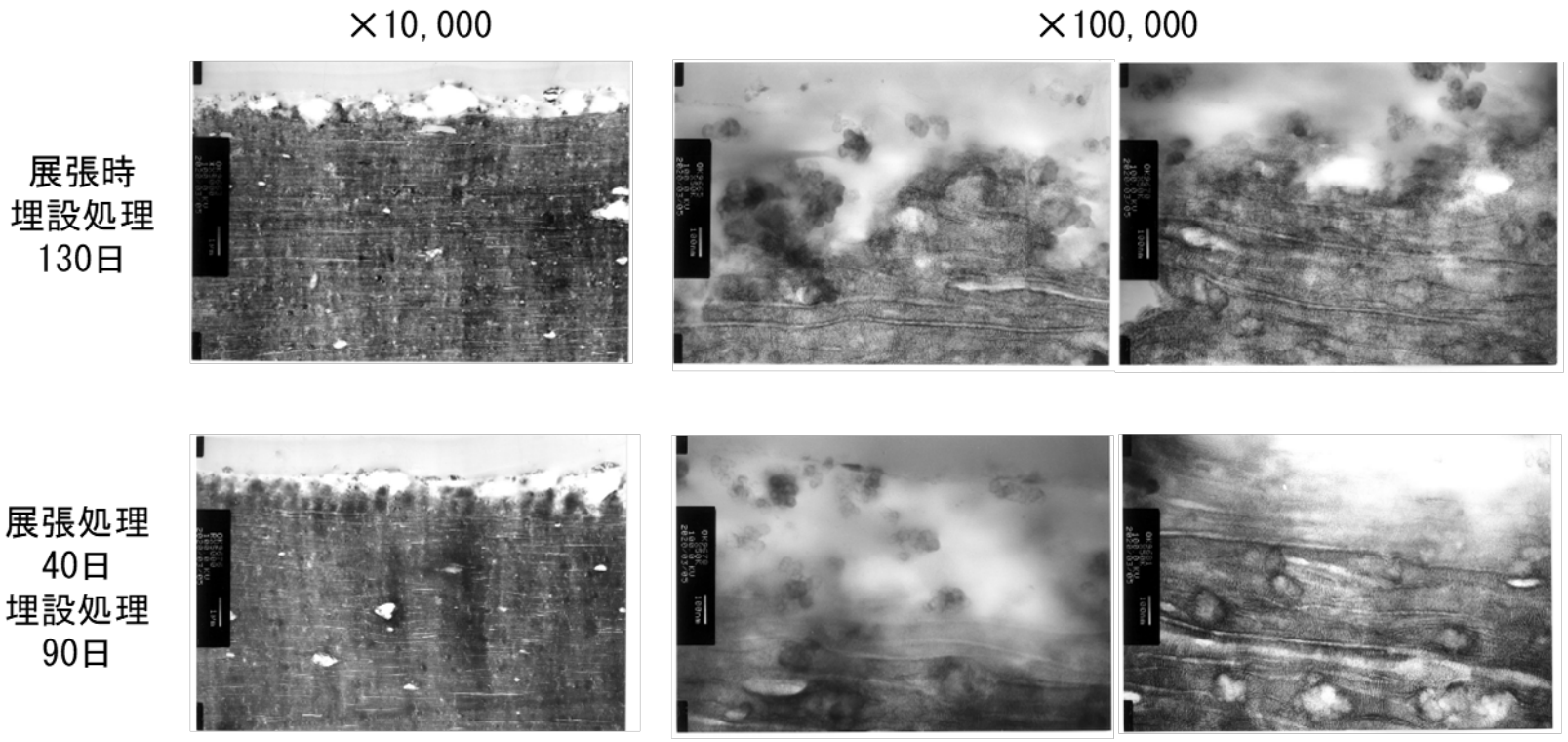
第27図 12　埋設および酵素剤処理後の生分解性マルチフィルム表面のSEM観察の結果 12/12

※配合e、展張処理40日、埋設処理90日



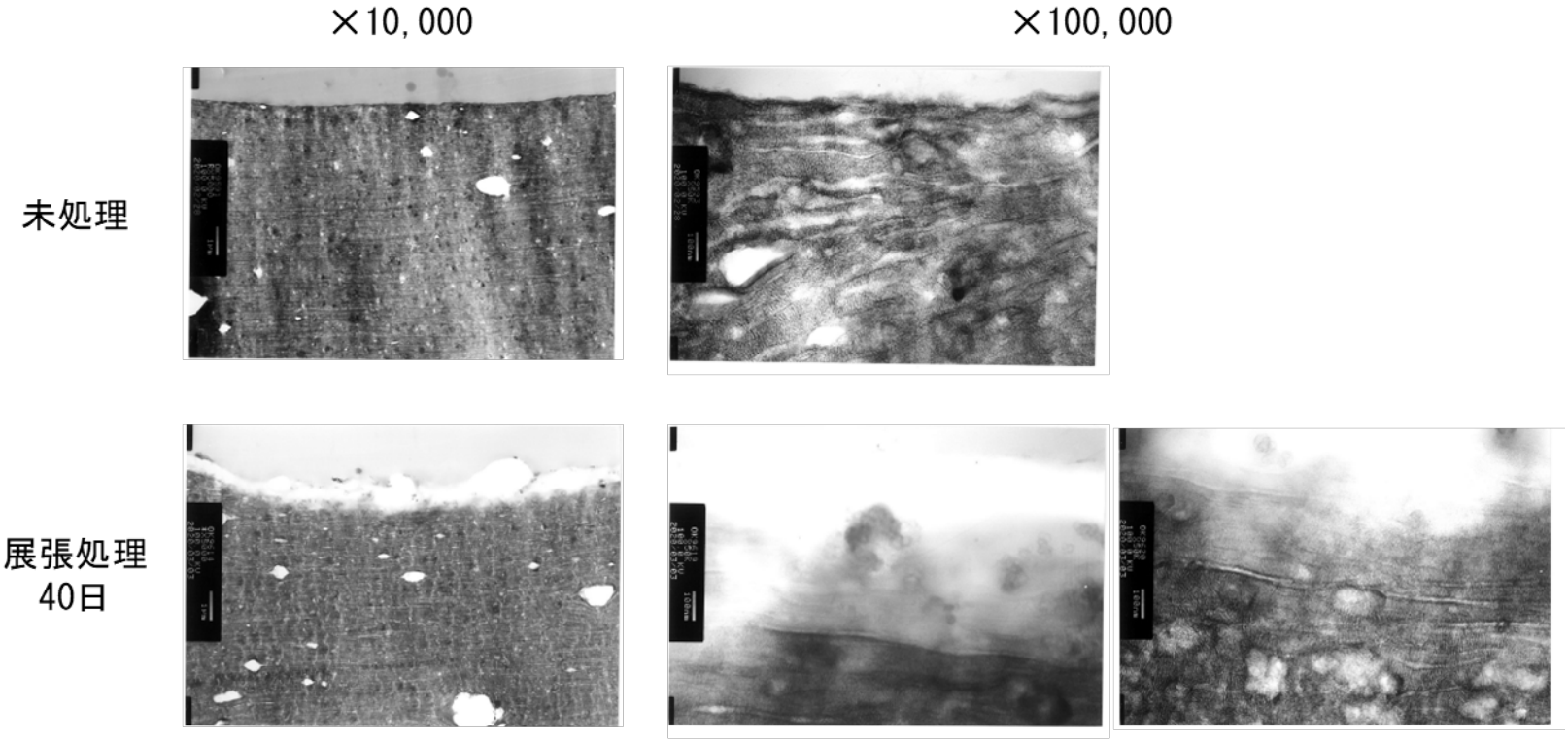
第28図 1　埋設および酵素剤処理後の生分解性マルチフィルム表面のTEM観察の結果 1/8

※配合a、表面



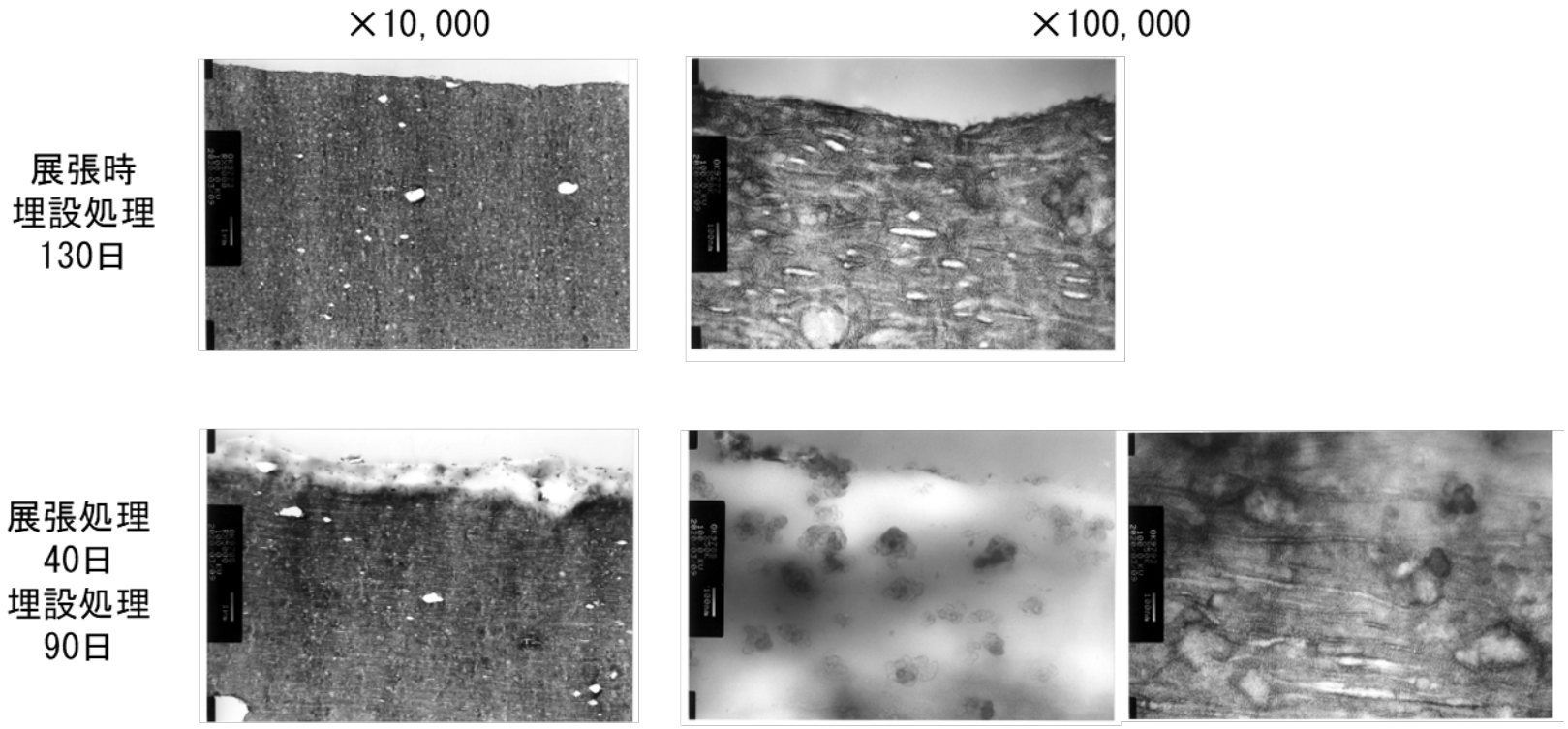
第28図 2　埋設および酵素剤処理後の生分解性マルチフィルム表面のTEM観察の結果 2/8

※配合a、表面



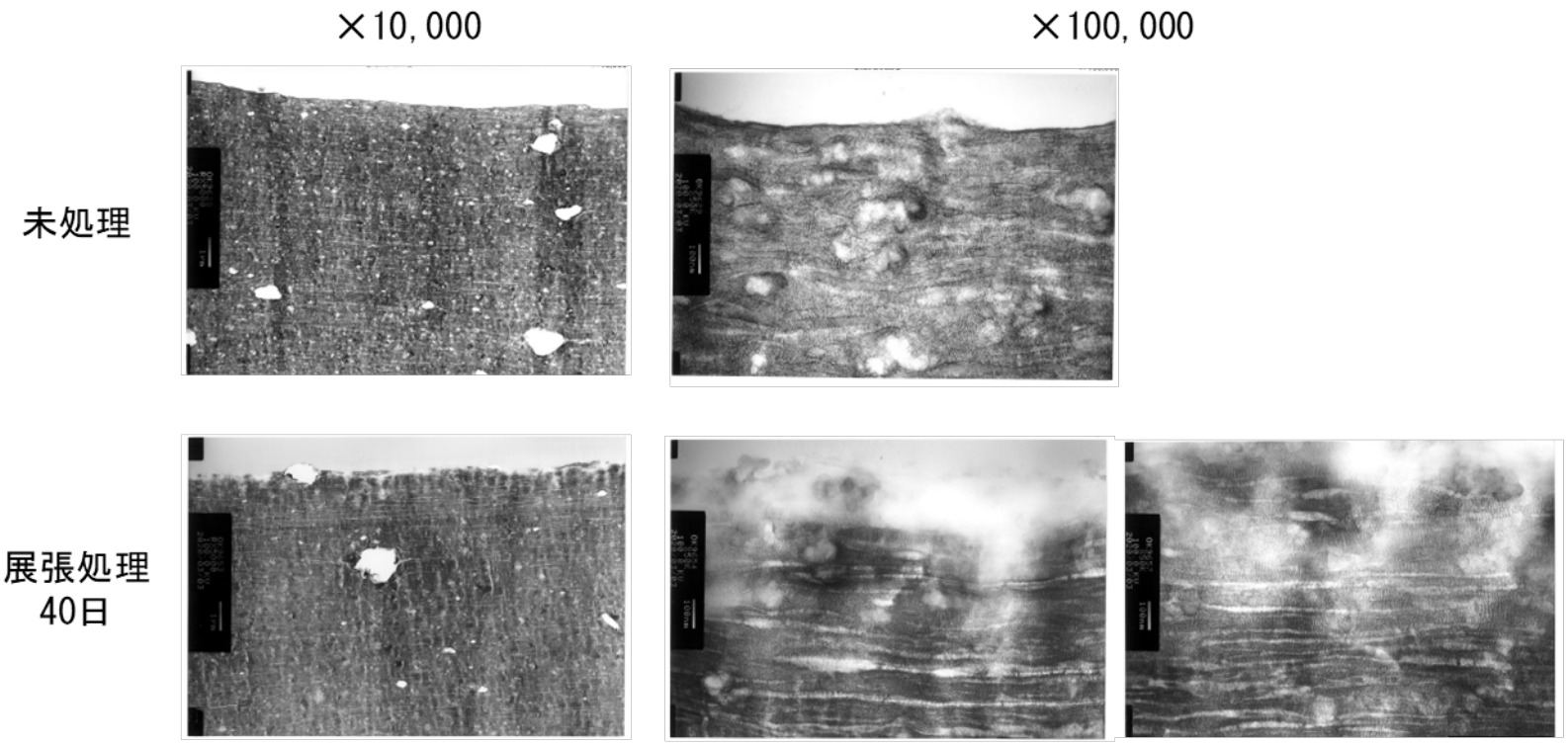
第28図 3　埋設および酵素剤処理後の生分解性マルチフィルム表面のTEM観察の結果 3/8

※配合c、表面



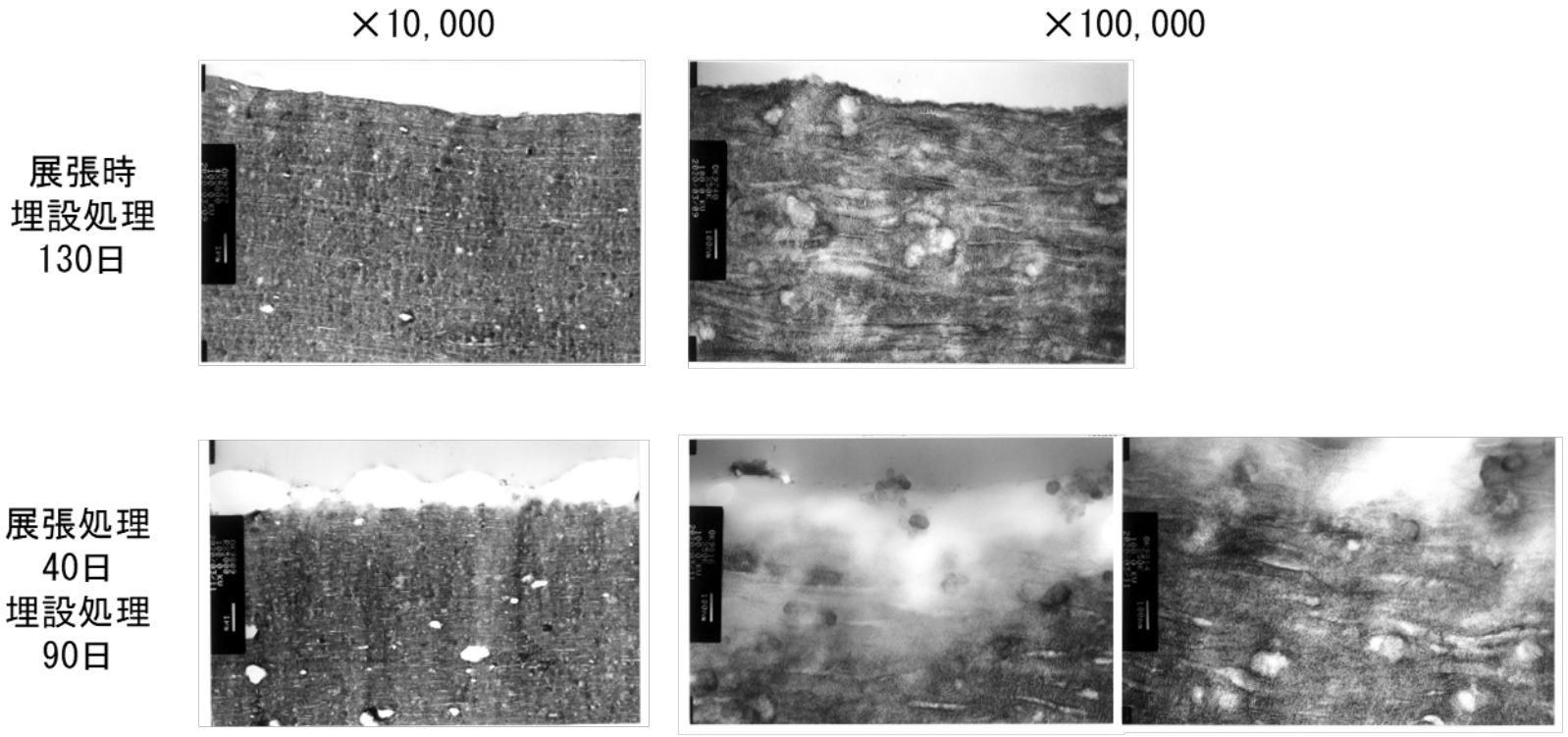
第28図 4　埋設および酵素剤処理後の生分解性マルチフィルム表面のTEM観察の結果 4/8

※配合c、表面



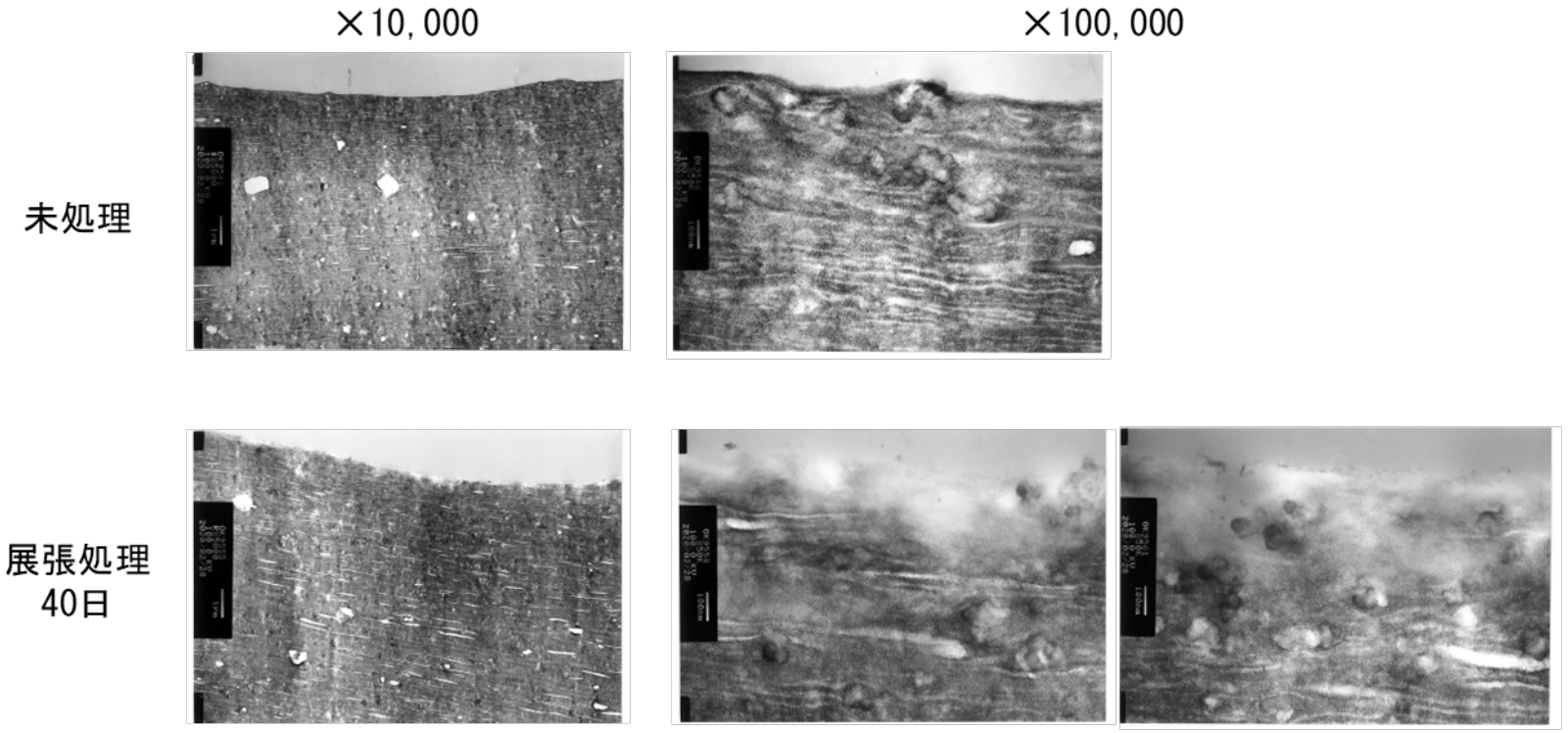
第28図 5　埋設および酵素剤処理後の生分解性マルチフィルム表面のTEM観察の結果 5/8

※配合d、表面



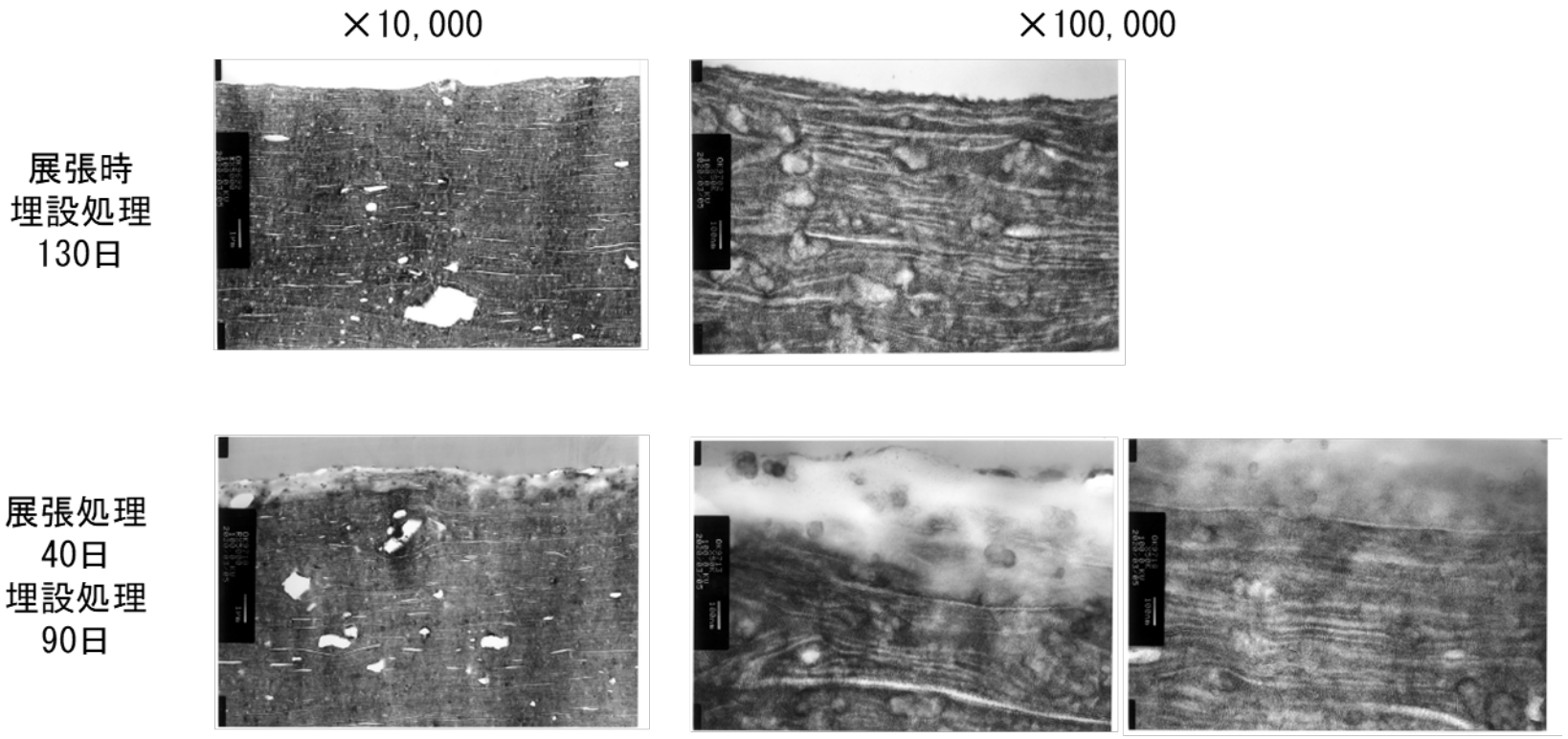
第28図 6　埋設および酵素剤処理後の生分解性マルチフィルム表面のTEM観察の結果 6/8

※配合d、表面



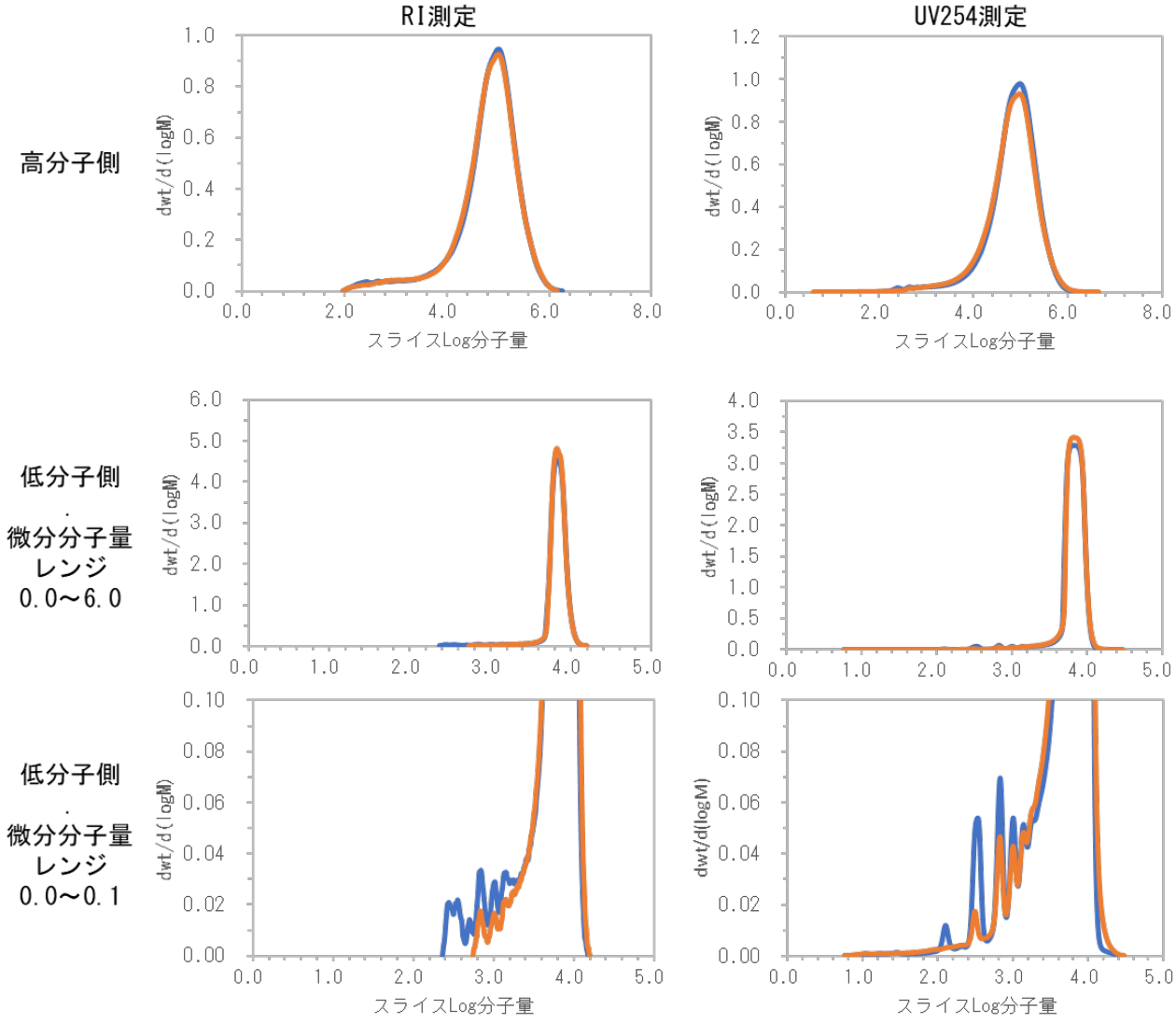
第28図 7　埋設および酵素剤処理後の生分解性マルチフィルム表面のTEM観察の結果 7/8

※配合e、表面

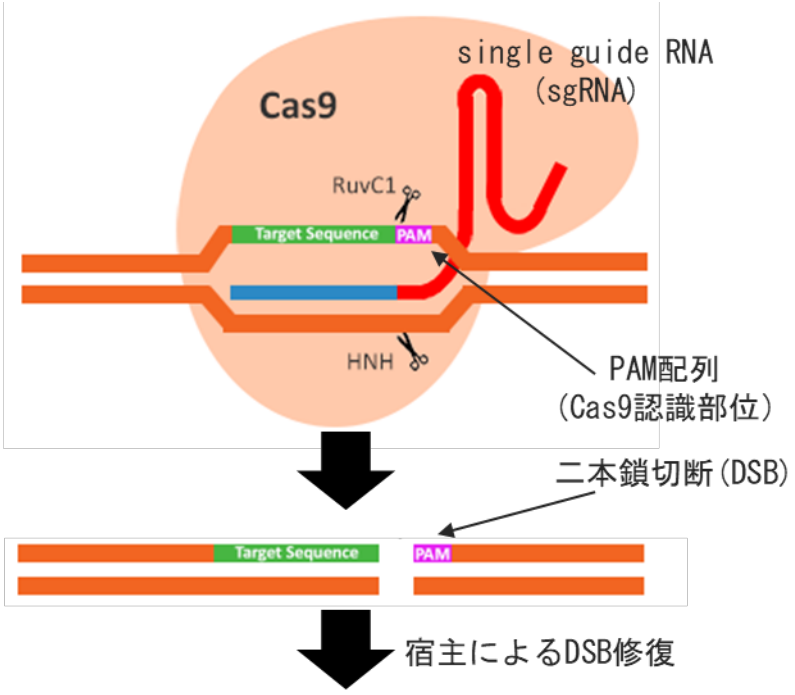


第28図 8　埋設および酵素剤処理後の生分解性マルチフィルム表面のTEM観察の結果 8/8

※配合e、表面

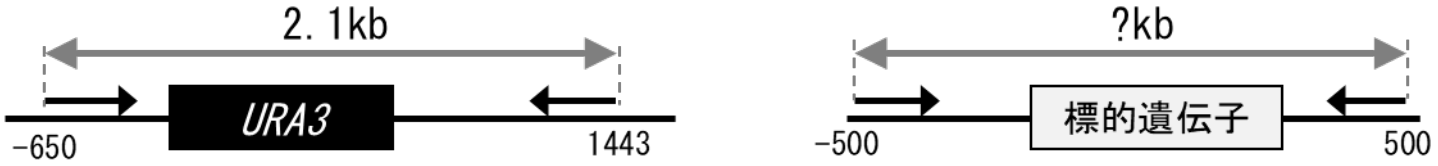


第29図　GPCによる生分解性マルチフィルムの分子量分析の結果



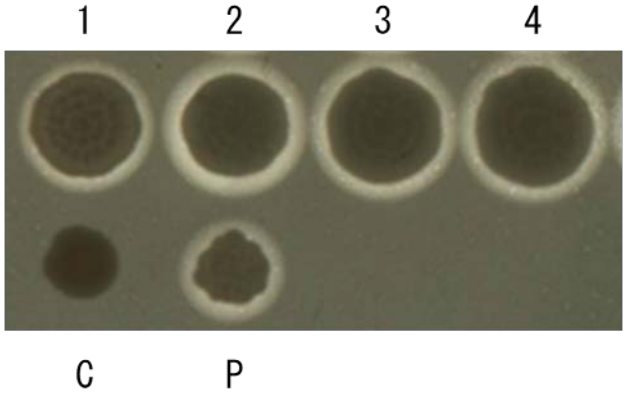
第30図　CRISPR-Cas9を用いたゲノム編集技術の概要

※出典:コスモ・バイオ株式会社ウェブサイト
https://www.cosmobio.co.jp/product/category/bunshiseibutsu/genome-editing/より引用・改変



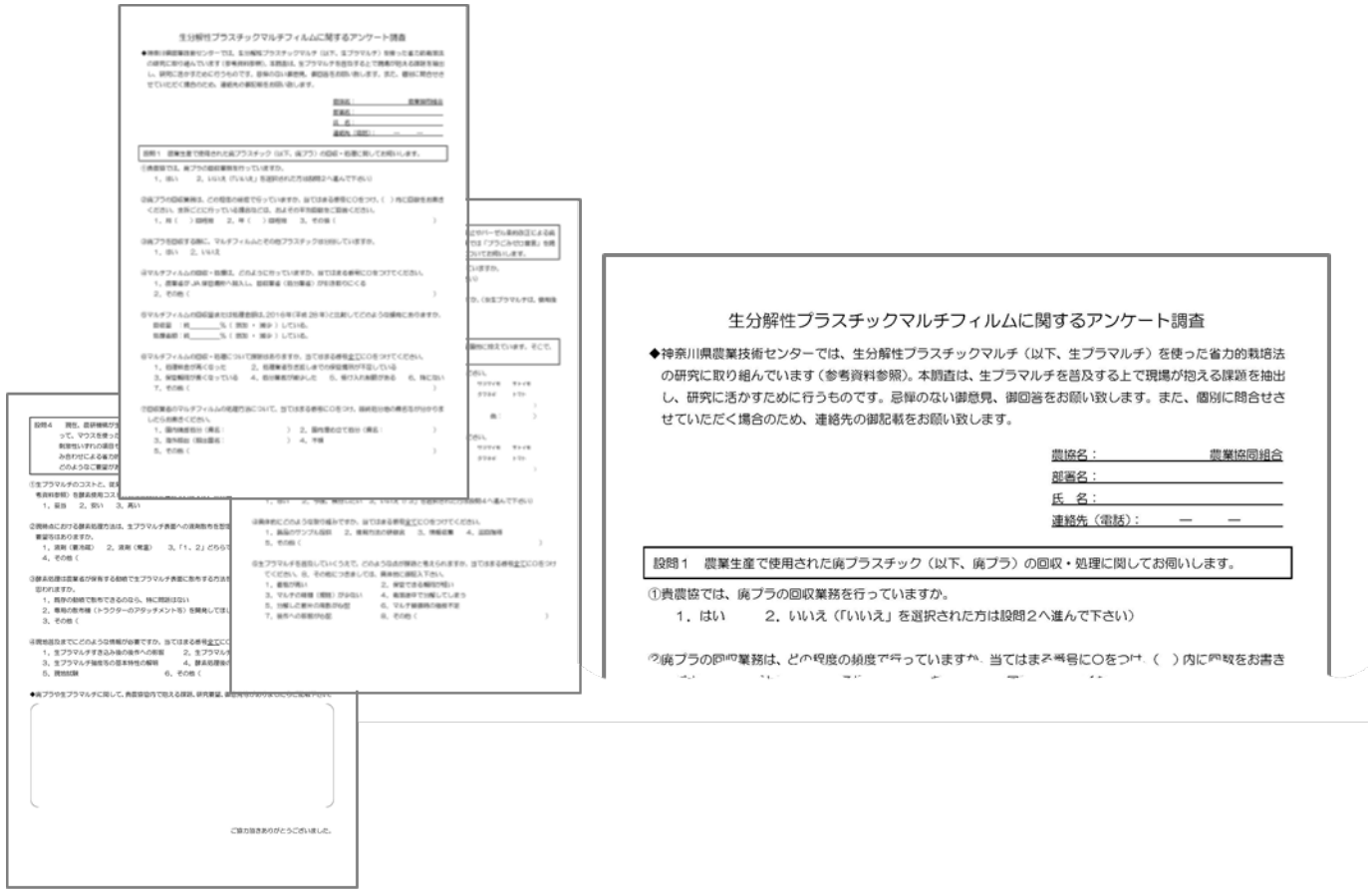
a. *URA3* 断片の挿入の確認　　b. 標的遺伝子の欠失の確認

第31図　遺伝子破壊株の確認用PCR実験のスキーム



第32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
PBSAエマルション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)



生分解性プラスチックマルチフィルムに関するアンケート調査

◆神奈川県農業技術センターでは、生分解性プラスチックマルチ（以下、生プラマルチ）を使った省力的栽培法の研究に取り組んでいます（参考資料参照）。本調査は、生プラマルチを普及する上で現場が抱える課題を抽出し、研究に活かすために行うものです。忌憚のない御意見、御回答をお願い致します。また、個別に問合せさせていただく場合のため、連絡先の御記載をお願い致します。

農協名：　　農業協同組合
部署名：
氏　名：
連絡先（電話）：　　－　　－

設問１　農業生産で使用された廃プラスチック（以下、廃プラ）の回収・処理に関してお伺いします。

①貴農協では、廃プラの回収業務を行っていますか。
　１．はい　　２．いいえ（「いいえ」を選択された方は設問２へ進んで下さい）

②廃プラの回収業務は、どの程度の頻度で行っていますか。当てはまる番号に○をつけ、（　）内に回数をお書き

第33図　アンケート調査用紙とその一部

第34図　神奈川県農業技術センターにおけるダイコン栽培状況および収穫物の外観
（令和元年11月29日）

PE:PE製マルチフィルム、e:配合e、a:配合a

第5表　ダイコンの収穫物特性

試験区	葉重 (g)	根重* (g)	葉長 (cm)	根長 (cm)	根径 (cm)	障害発生度**		
						横縞症	亀裂褐変	岐根
試作フィルム　配合e	514	1,485 ab	48.3	39.3	7.8	0.0	0.0	0.0
試作フィルム　配合a	413	1,388 b	44.2	38.8	7.8	0.0	0.1	0.0
対照　PEマルチフィルム	518	1,634 a	49.3	41.5	7.9	0.0	1.4	0.0

*根重の異なるアルファベットはTukey法による0.05%で有意差があることを示す。
**障害程度を無(0)～甚(4)の5段階評価し、障害発生度＝Σ(障害程度×発生数)/(調査個数×4)×100から算出した。

第6表　本事業で取り上げた事例で評価対象となったマルチフィルム

事例	使用素材	ポリマーの種類	ポリマーの原料	最終処分
A	従来品	LDPE	エチレン	リサイクル/焼却/埋立
	再生ポリマー	リサイクルLDPE（以下、rLDPE）	リサイクルPE	リサイクル/焼却/埋立
	バイオ原料生分解性	デンプンベースコポリマー	トウモロコシ（EU）原油/天然ガス	鋤き込み（生分解）
	バイオ原料生分解性	PLAベースコポリマー	トウモロコシ（US）原油/天然ガス	鋤き込み（生分解）
B	従来品	LDPE	エチレン	リサイクル/焼却/埋立
	バイオ原料生分解性	デンプンベースコポリマー	トウモロコシ(EU)2/3+バレイショ1/3(EU)バイオポリマー（トウモロコシ由来、US)/原油/天然ガス	鋤き込み（生分解）
C	従来品	LDPE	エチレン	リサイクル/焼却/埋立
	バイオ原料生分解性（Matar-Bi）	デンプンベースコポリマー	明記せず	鋤き込み（生分解）

第7表　本事業で取り上げた事例で評価対象のマルチフィルムの機能単位当たりの緒元

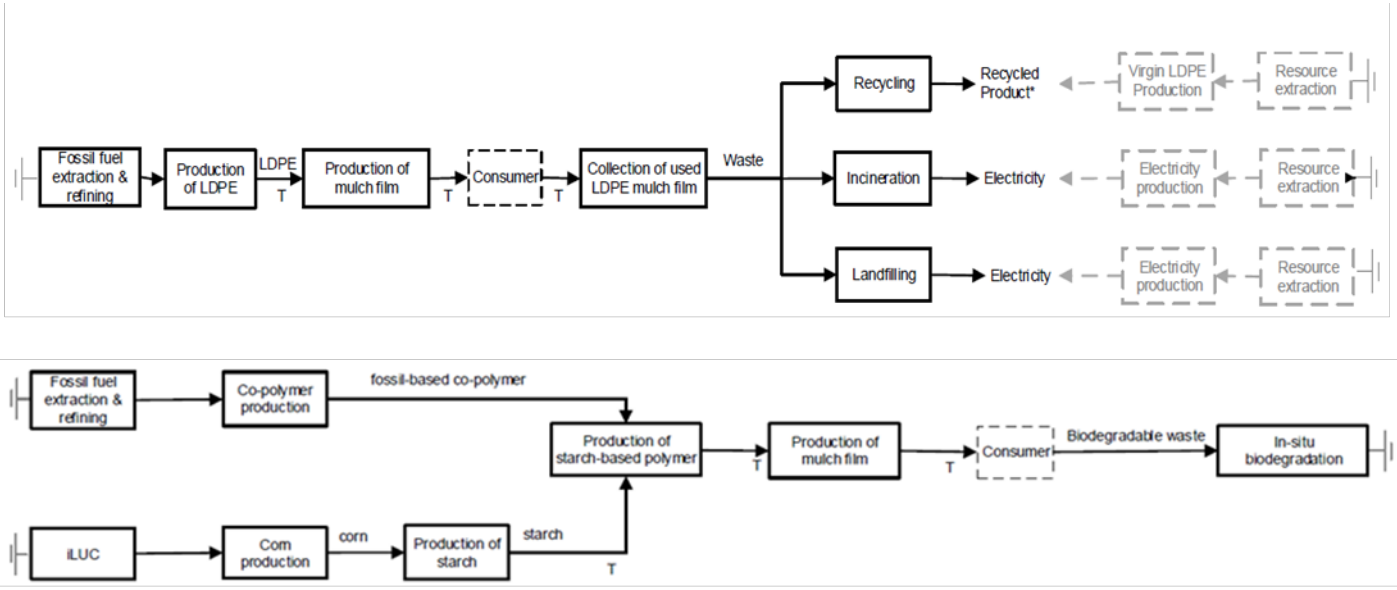
事例	マルチフィルムの素材	厚さ（μm）	密度（kg/m3）	重量（kg/FU*）
A	LDPE/rLDPE	35(15～50)	0.925(0.92～0.93)	194.3
	デンプンベースコポリマー	12(15～18)	1.27(1.23～1.29)	91.4
	PLAベースコポリマー	10	1.34(1.34～1.40)	82.8
B	LDPE	35	0.9	189
	デンプンベースコポリマー	12	1.27	91.4
C	LDPE	52	n/a	288
	デンプンベースコポリマー	13	n/a	96

*Functional Unit=機能単位

第8表　本事業で取り上げた各事例のシステム境界の評価対象プロセス

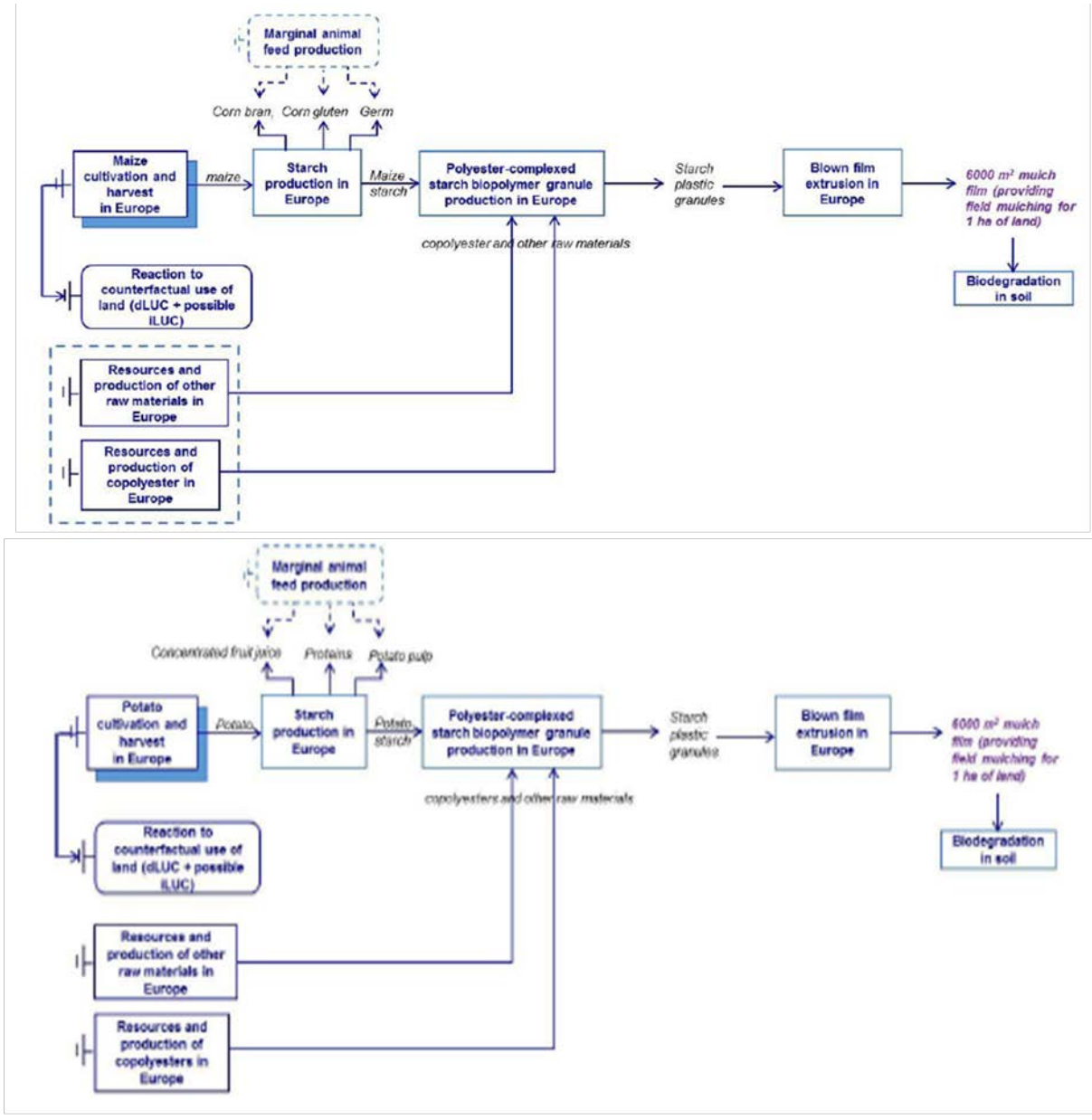
事例	マルチフィルムの素材	土地利用変化	原料製造	原料輸送	マルチフィルム製造	製品輸送	マルチ展張	マルチ回収	最終処分
A	LDPE/rLDPE	○	○	○	○	○	×	×	○
	バイオ原料生分解性	○	○	○	○	○	×	×	▲（土壌分解）
B	LDPE	○	○	○	○	○	×	×	○
	バイオ原料生分解性	○	○	○	○	○	×	×	▲（土壌分解）
C	LDPE	n/a	○	○	○	○	○	○	○
	バイオ原料生分解性	n/a	○	○	○	○	○	×	▲（土壌分解）

○:評価対象、×:対象外、▲:骨格炭素による評価、n/a:記載なし

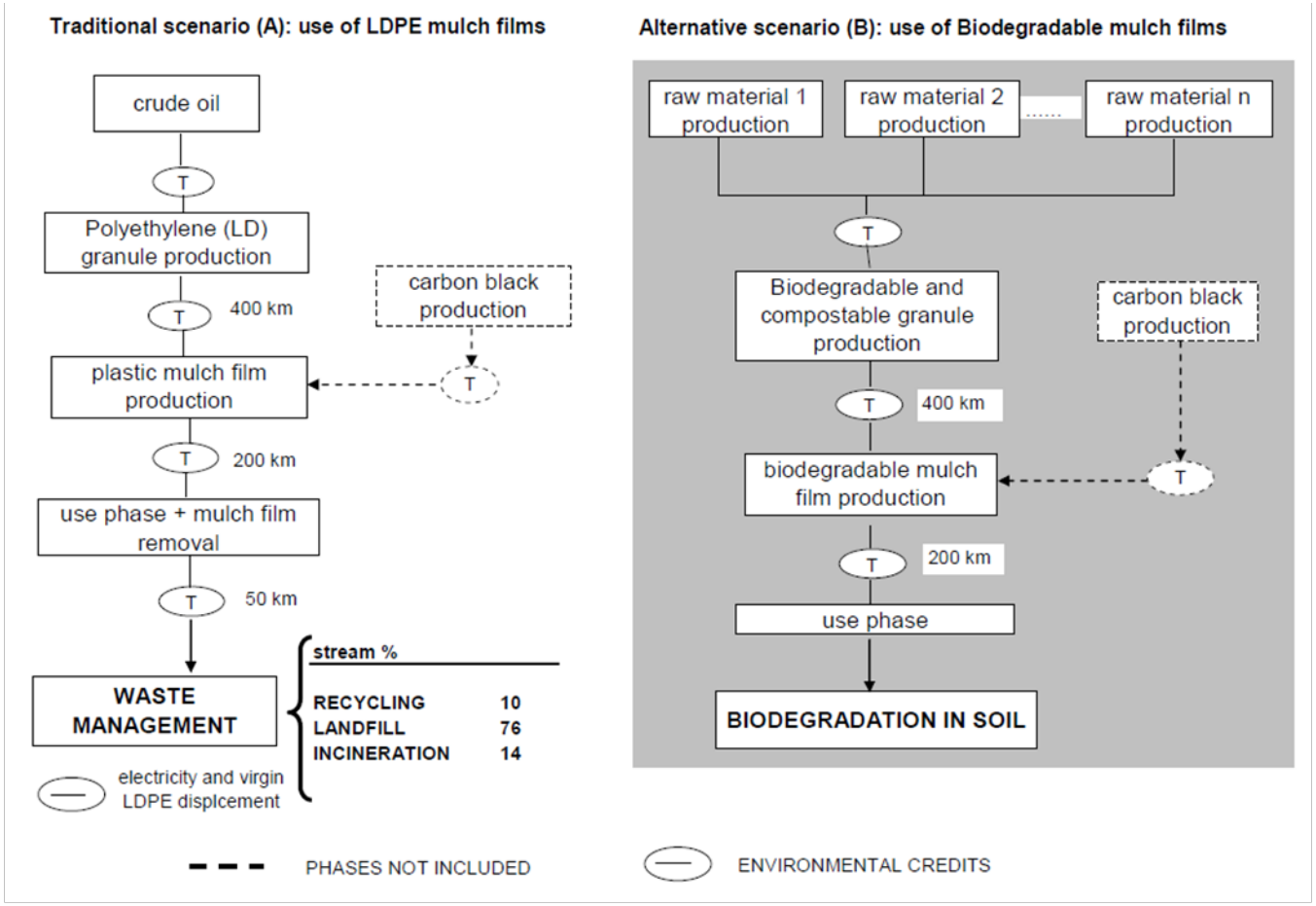


第35図　事例AにおけるLDPE製マルチフィルム(上)と生分解性マルチフィルム(下)*のシステム境界

*掲示図版はデンプンコポリマーの場合。PLA製の場合は、トウモロコシ生産の後、PLA生産のプロセスとなる



第36図　事例Bにおけるトウモロコシ使用生分解性マルチフィルム(上)、バレイショ使用生分解性マルチフィルム(下)のシステム境界



第37図　事例Cにおける LDPE製マルチフィルム(左)と生分解性マルチフィルム(右)のシステム境界

第9表　本事業で取り上げた各事例のLCシナリオ

事例	マルチフィルムの素材	参考資料	土地利用変化	原料製造	原料輸送	マルチフィルム製造	製品輸送	マルチ展張	マルチ回収	最終処分
A	LDPE/rLDPE	(欧州)プロダクト環境フットプリント法(PEF、EC2013)とガイダンス(PEFCR、EC2018)に準拠。	×	LDPE：原油採掘⇒ポリマー合成 rLDPE:LDPE回収、リサイクル (EF(PPのプロセスで代替))	EF(トラック輸送130km、鉄道貨物240km、コンテナ船270km)	EF(ブロー押出成形フィルム)	EF(トラック輸送1200km，小売り用自動車輸送250km往復)	×	圃場フィルム回収、90%	焼却53%(EF(発電代替、熱利用代替を含む))、埋立(EF)42%、 リサイクル5%(新規LDPE(EF)代替90%)
	デンプンベースコポリマー		直接利用はPAS2050(2012)、間接利用はEU指令(EU2015/1513,annexV,VII(EC,2015))に基づき作成した、面積当たりのGHG排出量より算出	EUトウモロコシ生産(EF)⇒デンプン(Agrifootprint)⇒デンプンベースポリマー(EI)	EF(トラック輸送130km、鉄道貨物240km、コンテナ船270km)			×	×	▲ (土壌分解)
	PLAベースコポリマー			PBAT:原油採掘⇒ポリマー合成(EF) PLA:US Ingeo PLA(GaBi) コポリマー：EIのpolyester-complexed Starch biopolymerの原料を取りかえ	PLA:EF(トラック輸送1000km、コンテナ船6,000km(ニューヨーク⇒ロッテルダム)、トラック輸送1000km)			×	×	▲ (土壌分解)
B	LDPE	欧州プロダクト環境フットプリントカテゴリールール(PEFCR,v6.3)に基づく評価方法に1部追加項目を入れている。	×	PlasticEurope(2016)	生分解性マルチと同じと仮定			×	×	焼却53%、埋立42%、 リサイクル5%
	バイオ原料生分解性		(PEFCR,v6.3)に従い、バレイショ、トウモロコシ生産について評価する	トウモロコシおよびデンプン：イタリアで生産、デンプン製造時の副産物も評価に入れる。トウモロコシデンプン原料の最終樹脂はイタリアで製造される。 バレイショ、バレイショデンプン：ドイツで生産、コポリマー原料PLA：アメリカで製造、PBATは特定されない。最終樹脂はヨーロッパで製造される。	原料製造地からイタリアまでトラック、コンテナ船、貨物列車輸送	ヨーロッパで製造、Novamontの製法を採用	ヨーロッパ内に輸送	×	×	▲ (土壌分解)
					PLA：アメリカからヨーロッパにコンテナ船、トラック、貨物列車輸送。他は原料製造地からトラック輸送。	ヨーロッパで製造、Novamontの製法を採用	ヨーロッパ内に輸送			
C	LDPE	n/a	×	n/a	400km(起点不明、終点イタリア)	n/a	200km	n/a	n/a	埋立84%、焼却16%(イタリア標準)
	バイオ原料生分解性	製造までは、自社シナリオ(Novamont、2009)	n/a	○	○	イタリア(Novamont)で製造	○	n/a	×	▲ (土壌分解)

第10表　本事業で取り上げた各事例の最終処分方法

事例	マルチフィルムの素材	参考資料	焼却	埋立	リサイクル	LDPE削減効果	土壌生分解（生物由来）	土壌生分解（化石由来）
A	LDPE/rLDPE	CEN TR 16957(2016) Bio-based products-Guideline for Life Cycle Inventory(LCI) for the end-of-life phase	53%、エネルギー回収含む	42%	5%	リサイクル効率90%		
	バイオ原料生分解性						標準分解率90%	標準分解率90%/非分解残渣
B	LDPE	EASTECH	53%、エネルギー回収(41.45MJ/kg)を含む	42%	5%(リサイクル効率37%)			
	バイオ原料生分解性						100%	100%
C	LDPE	Corepla,2007, Rifiuti O. N, 2004	14%,エネルギー回収含む	76%	10%			
	バイオ原料生分解性						n/a	n/a

第11表　本事業で取り上げた各事例の使用データ源*

事例	マルチ素材	データ収集							バックグラウンドデータ
		土地利用変化	原料生産	ポリマー製造	マルチフィルム製造	輸送	マルチ使用	最終処分	
A	LDPE	×	EF		EF	EF	GaBi	EF	EF、GaBi
	rLDPE	×	EF	EF	EF	EF	GaBi	EF	
	デンプンベースコポリマー	直接利用: PAS2050 (2012)、間接利用:EU指令 (EU2015/1513,annexV ,VIII(EC,2015)	ecoinvent , EF		EF	EF	×	×	
	PLAベースコポリマー		EF,GaBi	ecoinvent	EF	EF	×	×	
B	LDPE	×	EcoProfile,PlasticsEurope(2016)		生分解性マルチと同じであると想定	生分解性マルチと同じであると想定	×	ecoinvent 3.4	ecoinvent 3.3
	バイオ原料生分解性	PEFCR,v6.3	トウモロコシ：Novamont	Novamont、ecoinvent 3.3	Razza et al.,2010	Novamont	×	×	
			バレイショ：Agri-footprint, Broeren at al., 2017	PLA：Vink et al.、2015, PBAT:Broeren at al., 2017	Broeren at al., 2017, ecoinvent3.3,	Broeren at al., 2017			
C	LDPE	×	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	バイオ原料生分解性	n/a	自社シナリオ (Novamont、2009)	自社シナリオ (Novamont、2009)	自社シナリオ (Novamont、2009)	自社シナリオ (Novamont、2009)	n/a	×	

*EF：EF-compliant dataset。欧州環境フットプリント用データベース

GaBi：Thinkstep社が開発したLCAソフトウェアGaBiに搭載されたデータベース

ecoinvent: ecoinvent プロジェクト(欧州)のLCA用データベース

Novamont：生分解性マルチフィルムMaterBi製造企業

Broeren at al., 2017：Broeren, M.L.M., Kuling, L., Worrell, E., Shen, L., Environmental impact assessment of six starch plastics focusing on wastewater-derived starch and additives, Resources, Conservation and Recycling, 127, 246-255, 2017

Vink et al.、2015：Vink, E. T. & Davies, S., Life cycle inventory and impact assessment data for 2014 Ingeo™ polylactide production, Industrial Biotechnology, 11(3), 167-180, 2015　　0

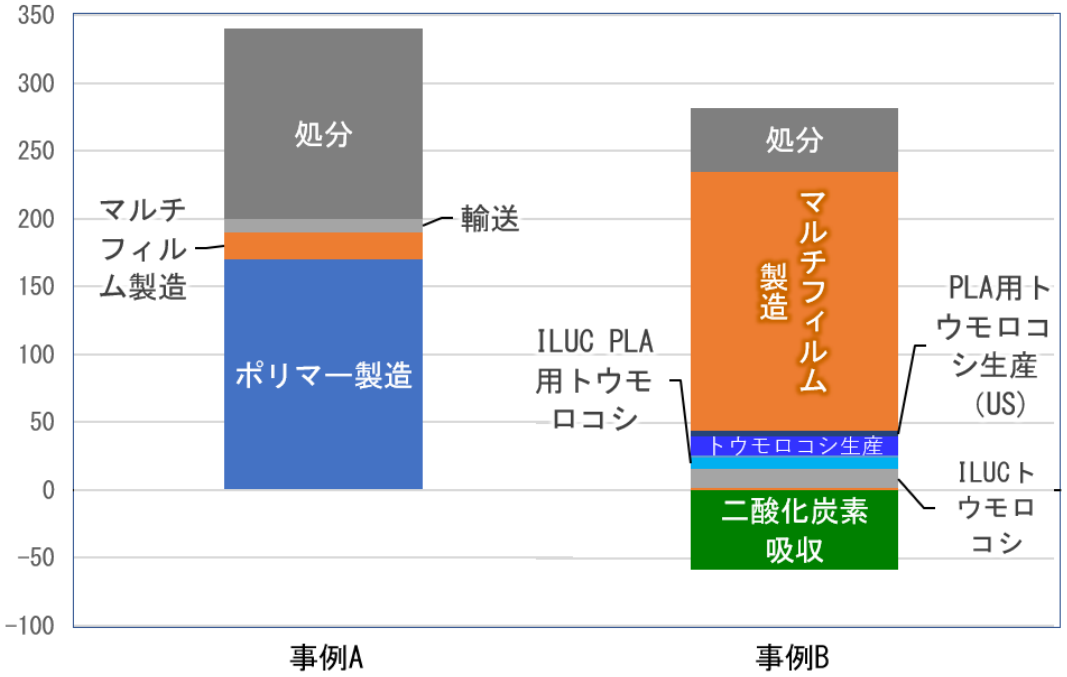
第12表　本事業で取り上げた各事例の環境影響評価項目と方法

評価領域	評価手法		
	事例A	事例B	事例C
Climate Change	GWP 100, IPCC 2013		GWP 100, IPCC 2007
Ozone Depletion	ILCD2011(WMO, 1999)		
Human Toxicity -cancer effects	USEtox model		
Human Toxicity -non cancer effects	USEtox model		
Particulate Matter	UNEP, 2016	ILCD2011(Rabi et al 2014)	
Ionising Radiation -human health	Dreicer et al.,1995	ILCD2011(Frischnecht et al 2000)	
PhotochemicalOzone Formation	ILCD(Van Zelm et al., 2008)		
Acidification Accumulated Exceedance	ILCD(Seppälä et al., 2006;Posch et al., 2008)		International EPD system
Eutrophication -terrestrial	ILCD(Seppälä et al., 2006;Posch et al., 2008)		
Eutrophication -freshwater	ILCD(Struijs et al., 2009)		International EPD system
Eutrophication -marine	ILCD(Struijs et al., 2009)		
Ecotoxicity -freshwater	USEtox(Rosenbaum et al, 2008)		
Water use User deprivation	AWARE		
Resource use -minerals and metals	ILCD2011/CML-IA baseline Van Oers et al. (2002)		CML2001
Resource use -fossils	ILCD2011/CML-IA baseline Van Oers et al. (2002)		
Land Use	Soil quality index basedon LANCA (Beck et al.,2010 and Bos et al.,2016)	soil organic matter model)Mila I Canals et al, 2007)	
Non renewable energy use		Cumulative energy demand	IMPACT2002+
GTP(end point)		IPCC 2013 WG I, chapter8	

第13表　本事業で取り上げた各事例のGWPの評価結果

事例	評価方法	LDPE	rLDPE	デンプンベース コポリマー	PLAベース コポリマー
A	GWP100, IPCC2013	600*	470	340	560
B	GWP100, IPCC2013	876		223 (199)	
C	IPCC2007	943		402	

*単位は$kg\text{-}CO_2$等量/ヘクタール-マルチング



第38図　デンプンベースの生分解性マルチフィルムの事例A、Bにおける各ライフサイクルステージのGWPへの寄与割合

第14表 農業経営指標における関連記載項目

科目			再分類
費用内訳（/10a）	物財費	種苗費	種苗毎の金額・物量
		肥料費	肥料毎の金額・物量
		農薬費	農薬毎の金額・物量
		諸材料費	材料毎の金額・物量
		光熱動力費	光熱動力毎の金額・物量
		減価償却費	対象資財毎の金額
		その他管理費	
		土地改良費・水利費	
		賃料料金	
		公課諸負担	
		修繕費	
		共済掛金	
	労働費	家族（自家労賃）	
		雇用	
	出荷経費	出荷資材	資材毎の金額・物量
		出荷手数料等	
		その他出荷経費	
	支払地代		
	その他		
労働時間（hr/10a）	家族労働時間		作業名ごとの時間
	雇用労働時間		

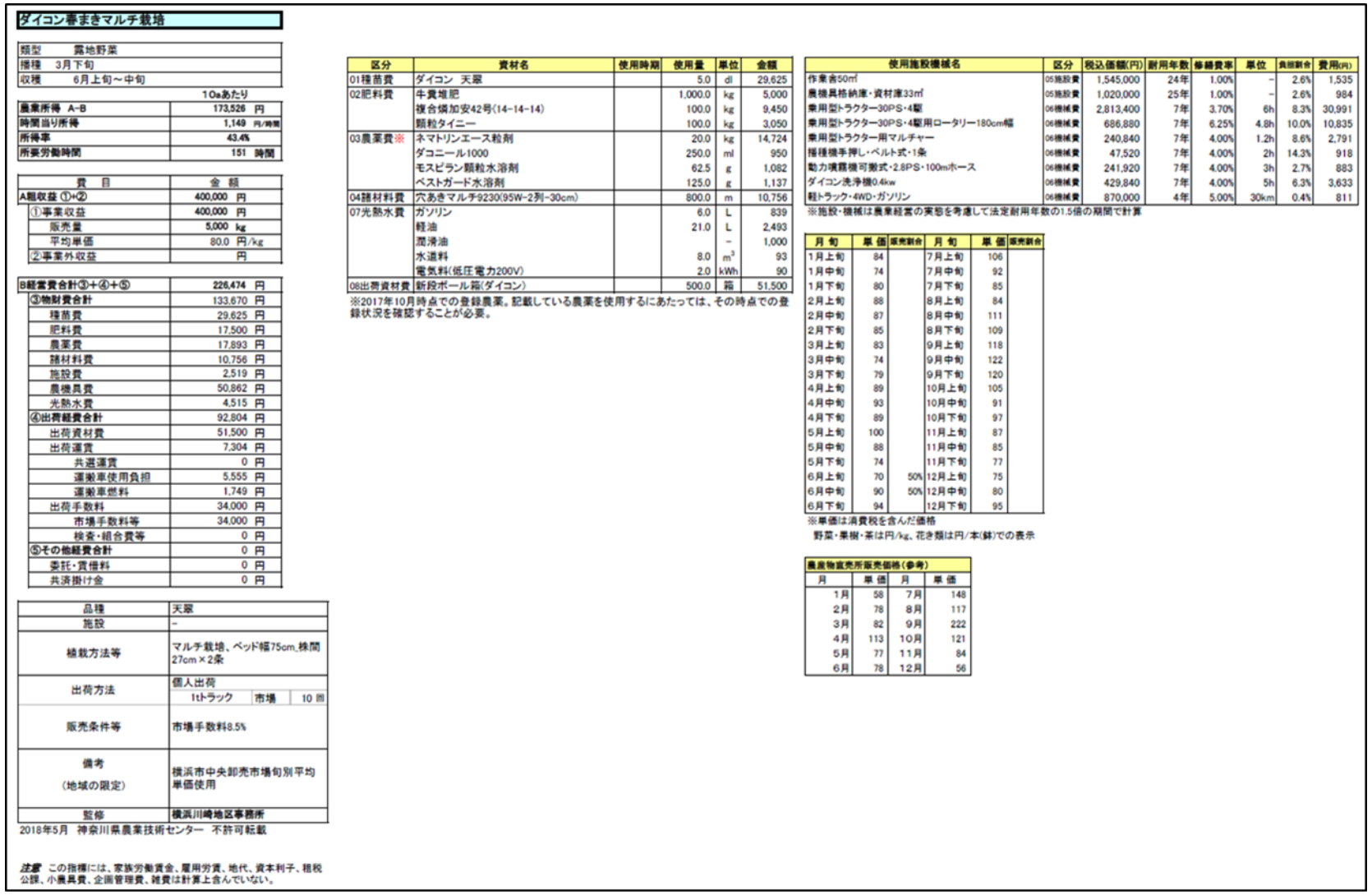
第14表　農業経営指標における関連記載項目

科　目			再分類
費用内訳（/10a）	物財費	種苗費	種苗毎の金額・物量
		肥料費	肥料毎の金額・物量
		農薬費	農薬毎の金額・物量
		諸材料費	材料毎の金額・物量
		光熱動力費	光熱動力毎の金額・物量
		減価償却費	対象資財毎の金額
		その他管理費	
		土地改良費・水利費	
		賃料料金	
		公課諸負担	
		修繕費	
		共済掛金	
	労働費	家族（自家労賃）	
		雇用	
	出荷経費	出荷資材	資材毎の金額・物量
		出荷手数料等	
		その他出荷経費	
	支払地代		
	その他		
労働時間（hr/10a）	家族労働時間		作業名ごとの時間
	雇用労働時間		

第15表　農業経営指標におけるマルチ使用に関する情報の例*

栽培型	マルチ使用	マルチ価格（円）	マルチ幅（cm）	マルチ長さ（m）	マルチ除去含む後片付け作業時間（hr）
カボチャトンネル早熟栽培	○	3,369、5,205	150、135	170、510	20
ダイコン春まきマルチ栽培	○	10,756	95	800	4
ダイコン冬まきトンネル栽培	○	11,274	130	600	1
ダイコン夏まき栽培					4
ダイコン秋まき栽培					0
ダイコン初秋まきマルチ栽培	○	10,756	95	800	4

*出典：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[33)]



ダイコン春まきマルチ栽培

類型	露地野菜
播種	3月下旬
収穫	6月上旬～中旬

	10aあたり
農業所得 A-B	173,526 円
時間当り所得	1,149 円/時間
所得率	43.4%
所要労働時間	151 時間

費 目	金 額
A粗収益 ①+②	400,000 円
①事業収益	400,000 円
販売量	5,000 kg
平均単価	80.0 円/kg
②事業外収益	円
B経営費合計③+④+⑤	226,474 円
③物財費合計	133,670 円
種苗費	29,625 円
肥料費	17,500 円
農薬費	17,893 円
諸材料費	10,756 円
施設費	2,519 円
農機具費	50,862 円
光熱水費	4,515 円
④出荷経費合計	92,804 円
出荷資材費	51,500 円
出荷運賃	7,304 円
共選運賃	0 円
運搬車使用負担	5,555 円
運搬車燃料	1,749 円
出荷手数料	34,000 円
市場手数料等	34,000 円
検査・組合費等	0 円
⑤その他経費合計	0 円
委託・賃借料	0 円
共済掛け金	0 円

品種	天翠
施設	-
植栽方法等	マルチ栽培、ベッド幅75cm_株間27cm×2条
出荷方法	個人出荷 1tトラック　市場　10 回
販売条件等	市場手数料8.5%
備考 (地域の限定)	横浜市中央卸売市場旬別平均単価使用
監修	横浜川崎地区事務所

2018年5月　神奈川県農業技術センター　不許可転載

注意　この指標には、家族労働賃金、雇用労賃、地代、資本利子、租税公課、小農具費、企画管理費、雑費は計算上含んでいない。

区分	資材名	使用時期	使用量	単位	金額
01種苗費	ダイコン 天翠		5.0	dl	29,625
02肥料費	牛糞堆肥		1,000.0	kg	5,000
	複合燐加安42号(14-14-14)		100.0	kg	9,450
	顆粒タイニー		100.0	kg	3,050
03農薬費※	ネマトリンエース粒剤		20.0	kg	14,724
	ダコニール1000		250.0	ml	950
	モスピラン顆粒水溶剤		62.5	g	1,082
	ベストガード水溶剤		125.0	g	1,137
04諸材料費	穴あきマルチ9230(95W-2列-30cm)		800.0	m	10,756
07光熱水費	ガソリン		6.0	L	839
	軽油		21.0	L	2,493
	潤滑油			-	1,000
	水道料		8.0	m^3	93
	電気料(低圧電力200V)		2.0	kWh	90
08出荷資材費	新段ボール箱(ダイコン)		500.0	箱	51,500

※2017年10月時点での登録農薬。記載している農薬を使用するにあたっては、その時点での登録状況を確認することが必要。

使用施設機械名	区分	税込価額(円)	耐用年数	修繕費率	単位	負担割合	費用(円)
作業舎50㎡	05施設費	1,545,000	24年	1.00%	-	2.6%	1,535
農機具格納庫・資材庫33㎡	05施設費	1,020,000	25年	1.00%	-	2.6%	984
乗用型トラクター30PS・4駆	06機械費	2,813,400	7年	3.70%	6h	8.3%	30,991
乗用型トラクター30PS・4駆用ロータリー180cm幅	06機械費	686,880	7年	6.25%	4.8h	10.0%	10,835
乗用型トラクター用マルチャー	06機械費	240,840	7年	4.00%	1.2h	8.6%	2,791
播種機手押し・ベルト式・1条	06機械費	47,520	7年	4.00%	2h	14.3%	918
動力噴霧機可搬式・2.8PS・100mホース	06機械費	241,920	7年	4.00%	3h	2.7%	883
ダイコン洗浄機0.4kw	06機械費	429,840	7年	4.00%	5h	6.3%	3,633
軽トラック・4WD・ガソリン	06機械費	870,000	4年	5.00%	30km	0.4%	811

※施設・機械は農業経営の実態を考慮して法定耐用年数の1.5倍の期間で計算

月 旬	単 価	販売割合	月 旬	単 価	販売割合
1月上旬	84		7月上旬	106	
1月中旬	74		7月中旬	92	
1月下旬	80		7月下旬	85	
2月上旬	88		8月上旬	84	
2月中旬	87		8月中旬	111	
2月下旬	85		8月下旬	109	
3月上旬	83		9月上旬	118	
3月中旬	74		9月中旬	122	
3月下旬	79		9月下旬	120	
4月上旬	89		10月上旬	105	
4月中旬	93		10月中旬	91	
4月下旬	89		10月下旬	97	
5月上旬	100		11月上旬	87	
5月中旬	88		11月中旬	85	
5月下旬	74		11月下旬	77	
6月上旬	70	50%	12月上旬	75	
6月中旬	90	50%	12月中旬	80	
6月下旬	94		12月下旬	95	

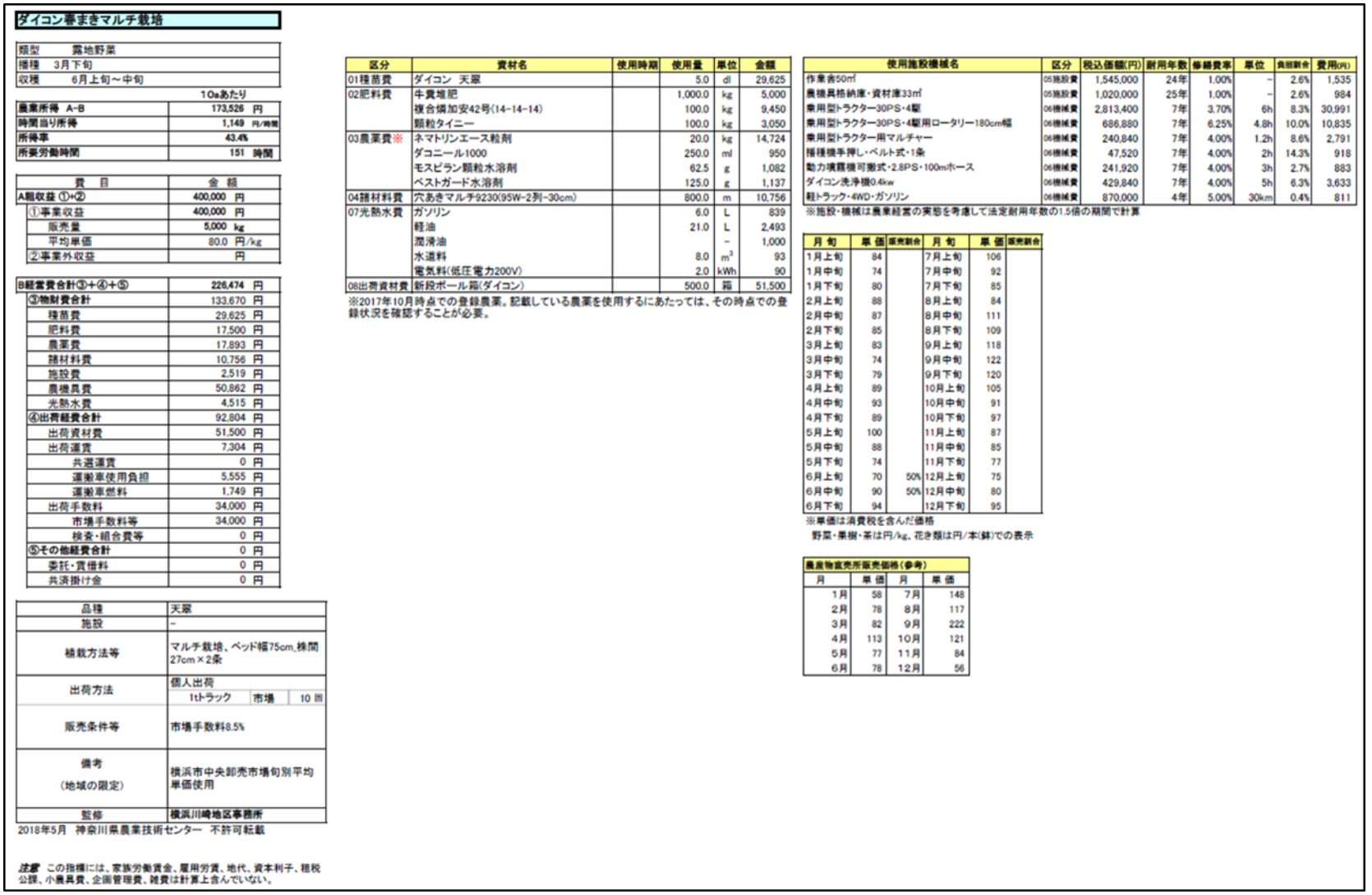
※単価は消費税を含んだ価格
野菜・果樹・茶は円/kg、花き類は円/本(鉢)での表示

農産物直売所販売価格(参考)

月	単 価	月	単 価
1月	58	7月	148
2月	78	8月	117
3月	82	9月	222
4月	113	10月	121
5月	77	11月	84
6月	78	12月	56

第39図　農業経営指標の例*

*出典：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[33)]



ダイコン春まきマルチ栽培

類型	露地野菜
播種	3月下旬
収穫	6月上旬～中旬

	10aあたり
農業所得 A-B	173,526 円
時間当り所得	1,149 円/時間
所得率	43.4%
所要労働時間	151 時間

費 目	金 額
A粗収益 ①+②	400,000 円
①事業収益	400,000 円
販売量	5,000 kg
平均単価	80.0 円/kg
②事業外収益	円
B経営費合計③+④+⑤	226,474 円
③物財費合計	133,670 円
種苗費	29,625 円
肥料費	17,500 円
農薬費	17,893 円
諸材料費	10,756 円
施設費	2,519 円
農機具費	50,862 円
光熱水費	4,515 円
④出荷経費合計	92,804 円
出荷資材費	51,500 円
出荷運賃	7,304 円
共選運賃	0 円
運搬車使用負担	5,555 円
運搬車燃料	1,749 円
出荷手数料	34,000 円
市場手数料等	34,000 円
検査・組合費等	0 円
⑤その他経費合計	0 円
委託・賃借料	0 円
共済掛け金	0 円

品種	天翠		
施設	-		
植栽方法等	マルチ栽培、ベッド幅75cm,株間27cm×2条		
出荷方法	個人出荷		
	1tトラック	市場	10 回
販売条件等	市場手数料8.5%		
備考（地域の限定）	横浜市中央卸売市場旬別平均単価使用		
監修	横浜川崎地区事務所		

2018年5月 神奈川県農業技術センター 不許可転載

注意 この指標には、家族労働賃金、雇用労賃、地代、資本利子、租税公課、小農具費、企画管理費、雑費は計算上含んでいない。

区分	資材名	使用時期	使用量	単位	金額
01種苗費	ダイコン 天翠		5.0	dl	29,625
02肥料費	牛糞堆肥		1,000.0	kg	5,000
	複合燐加安42号(14-14-14)		100.0	kg	9,450
	顆粒タイニー		100.0	kg	3,050
03農薬費※	ネマトリンエース粒剤		20.0	kg	14,724
	ダコニール1000		250.0	ml	950
	モスピラン顆粒水溶剤		62.5	g	1,082
	ベストガード水溶剤		125.0	g	1,137
04諸材料費	穴あきマルチ9230(95W-2列-30cm)		800.0	m	10,756
07光熱水費	ガソリン		6.0	L	839
	軽油		21.0	L	2,493
	潤滑油			-	1,000
	水道料		8.0	m^3	93
	電気料(低圧電力200V)		2.0	kWh	90
08出荷資材費	新段ボール箱(ダイコン)		500.0	箱	51,500

※2017年10月時点での登録農薬。記載している農薬を使用するにあたっては、その時点での登録状況を確認することが必要。

使用施設機械名	区分	税込価額(円)	耐用年数	修繕費率	単位	負担割合	費用(円)
作業舎50㎡	05施設費	1,545,000	24年	1.00%	-	2.6%	1,535
農機具格納庫・資材庫33㎡	05施設費	1,020,000	25年	1.00%	-	2.6%	984
乗用型トラクター30PS・4駆	06機械費	2,813,400	7年	3.70%	6h	8.3%	30,991
乗用型トラクター30PS・4駆用ロータリー180cm幅	06機械費	686,880	7年	6.25%	4.8h	10.0%	10,835
乗用型トラクター用マルチャー	06機械費	240,840	7年	4.00%	1.2h	8.6%	2,791
播種機手押し・ベルト式・1条	06機械費	47,520	7年	4.00%	2h	14.3%	918
動力噴霧機可搬式・2.8PS・100mホース	06機械費	241,920	7年	4.00%	3h	2.7%	883
ダイコン洗浄機0.4kw	06機械費	429,840	7年	4.00%	5h	6.3%	3,633
軽トラック・4WD・ガソリン	06機械費	870,000	4年	5.00%	30km	0.4%	811

※施設・機械は農業経営の実態を考慮して法定耐用年数の1.5倍の期間で計算

月 旬	単 価	販売割合	月 旬	単 価	販売割合
1月上旬	84		7月上旬	106	
1月中旬	74		7月中旬	92	
1月下旬	80		7月下旬	85	
2月上旬	88		8月上旬	84	
2月中旬	87		8月中旬	111	
2月下旬	85		8月下旬	109	
3月上旬	83		9月上旬	118	
3月中旬	74		9月中旬	122	
3月下旬	79		9月下旬	120	
4月上旬	89		10月上旬	105	
4月中旬	93		10月中旬	91	
4月下旬	89		10月下旬	97	
5月上旬	100		11月上旬	87	
5月中旬	88		11月中旬	85	
5月下旬	74		11月下旬	77	
6月上旬	70	50%	12月上旬	75	
6月中旬	90	50%	12月中旬	80	
6月下旬	94		12月下旬	95	

※単価は消費税を含んだ価格
野菜・果樹・茶は円/kg、花き類は円/本(鉢)での表示

農産物直売所販売価格(参考)

月	単 価	月	単 価
1月	58	7月	148
2月	78	8月	117
3月	82	9月	222
4月	113	10月	121
5月	77	11月	84
6月	78	12月	56

第39図　農業経営指標の例*

*出典：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[33)]

ダイコン春まきマルチ栽培労働作業時間

単位:時間

作業区分	作業名	1月			2月			3月			4月			5月			6月		
		上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
2本圃準備	1土壌消毒/トラクター						3												
	2土壌消毒/ガス抜き・トラクター								1										
	3施肥/堆肥・元肥散布、トラクターで耕起									7									
	4マルチング/トラクター・マルチャー									2									
本圃準備集計		0	0	0	0	0	3	0	1	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3本圃管理	1播種/手播き 1ヶ所3~4粒点播									8									
	2間引き										20								
	3防除/動力噴霧機3回											2		2		2			
	4後片付け/マルチ除去等・トラクターで整地																		4
本圃管理集計		0	0	0	0	0	0	0	0	8	20	2	0	2	0	2	0	0	4
4収穫出荷	1収穫/掘り取り・運搬																6	6	
	2調製/機械洗浄・段ボール箱10kg詰め																39	39	
	3出荷/市場出荷10回																5	5	
収穫出荷集計		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	50	0
総計		0	0	0	0	0	3	0	1	17	20	2	0	2	0	2	50	50	4

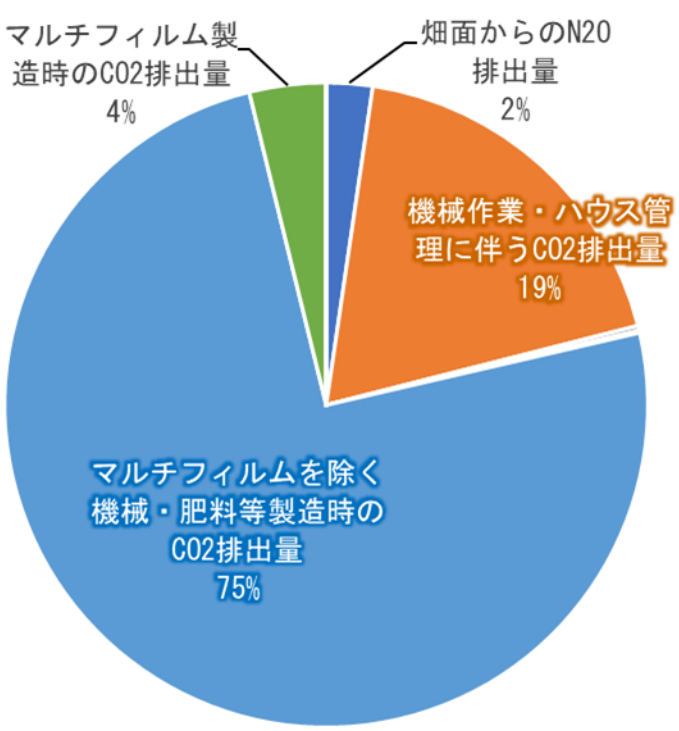
作業区分	作業名	7月			8月			9月			10月			11月			12月			総計
		上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	
2本圃準備	1土壌消毒/トラクター																			3
	2土壌消毒/ガス抜き・トラクター																			1
	3施肥/堆肥・元肥散布、トラクターで耕起																			7
	4マルチング/トラクター・マルチャー																			2
本圃準備集計		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13
3本圃管理	1播種/手播き 1ヶ所3~4粒点播																			8
	2間引き																			20
	3防除/動力噴霧機3回																			6
	4後片付け/マルチ除去等・トラクターで整地																			4
本圃管理集計		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	38
4収穫出荷	1収穫/掘り取り・運搬																			12
	2調製/機械洗浄・段ボール箱10kg詰め																			78
	3出荷/市場出荷10回																			10
収穫出荷集計		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
総計		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	151

第40図　農業経営指標の例*

*出典: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[33)]

第16表　「スイートコーン(マルチ)」農業経営指標のデータを使ったLCA試算結果

由来	温室効果ガス排出量 ($kg\text{-}CO_2$等量/10a)	エネルギー起源CO_2
畑面からのN_2O排出量	11.34	
機械作業・ハウス管理に伴うCO_2排出量	91.60	○
機械作業・ハウス管理に伴うCH_4排出量	1.22	
機械作業・ハウス管理に伴うN_2O排出量	0.51	
マルチフィルムを除く機械・肥料等製造時のCO_2排出量	365.66	
マルチフィルム製造時のCO_2排出量	18.85	
機械・肥料等製造時のCH_4排出量	0	
機械・肥料等製造時のN_2O排出量	0	
合計	489.18	



第41図　「スイートコーン(マルチ) 農業経営指標」のデータを使った
LCA試算結果における各由来の寄与率

第17表　神奈川県のダイコン春まきマルチ栽培農業経営指標*およびLCAによる経済性評価関連指標の試算

項目	単位	数量	うち マルチ関連	うち ガソリン	うち軽油
A.事業収益	円	400,000			
B.支出	円	226,474	10,756	839	2,493
所得 A-B	円	173,526			
C.労働時間	時間	151	6		
時間当たり所得 (A-B)/C	円/時間	1,149			
所得率　(A-B)/A		43%			
D.温室効果ガス排出量**	kg-CO_2等量/10a	510.01			
環境効率　[(A-B)/C]/D	(円/時間)/(kg-CO2等量/10a)				2.253

*第39図[30)]

**排出量は第39図のデータを用いて算出

参考１　本事業に関わる共同実施者等との打合せ記録

本事業の実施に当たっては、第 2 図に示す体制で実施し、必要に応じて実施者間で打合せを行った。

日時：令和元年 7 月 19 日
場所：農研機構会議室
参加者：三菱ケミカル、農研機構
目的と成果：事業運営方針の確認。三菱ケミカルと共同実施者の実施内容を調整。特に試料のやり取りがある場合について。

日時：令和元年 7 月 24 日
場所：三菱ケミカル会議室
参加者：三菱ケミカル、農研機構
目的と成果：LCA および経済性評価取り進め方針の議論。基本方針と実施体制の決定。農業に関する調査、評価項目での農研機構の貢献の可能性を明確化。

日時：令和元年 7 月 29 日
場所：農研機構会議室
参加者：三菱ケミカル、農研機構、神奈川県農業技術センター、静岡県立大
目的と成果：実務者打合せ。全体の進め方とスケジュールの共有。

日時：令和元年 8 月 8 日
場所：茨城県つくば市
参加者：農研機構、農林水産省、三菱ケミカルほか
目的と成果：カゴメ㈱委託農業事業者による生分解性マルチフィルムの使用状況視察。トマトの収穫と生分解性マルチフィルムの取扱いを確認。

日時：令和元年 8 月 23 日
場所：三菱ケミカル会議室
参加者：三菱ケミカル、農研機構、分析機器会社
目的と成果：生分解性の機構解明に向けた分析業務の方針議論。スケジュールの確認。

日時：令和元年 8 月 29 日
場所：三菱ケミカル会議室
参加者：三菱ケミカル、化学品製造会社
目的と成果：安定同位体標識化合物の製造についての打合せ。製造の可能性、納期の確認。

日時：令和元年 9 月 20 日
場所：農研機構会議室、茨城県農業総合センター
参加者：農研機構、三菱ケミカル、茨城県
目的と成果：茨城県の生分解性マルチフィルム導入の実態調査。情報収集と茨城県の来期からの事業参加を打診。

日時：令和元年 10 月 1 日
場所：農研機構会議室、茨城県つくば市
参加者：農研機構、三菱ケミカル
目的と成果：圃場試験、農業事業者の視察、および LCA 関連の調整打合せ。農環研圃場での試験進捗の確認、茨城県内農業事業者の生分解性マルチフィルム利用状況の視察。LCA 用情報収集の項目確認。

日時：令和元年 10 月 1 日
場所：三菱ケミカル会議室
参加者：三菱ケミカル、農研機構、分析機器会社
目的と成果：生分解性の機構解明に向けた分析業務の実施計画確認。試料の種類と分析項目の確認。

日時：令和元年 10 月 15 日
場所：三菱ケミカル会議室
参加者：三菱ケミカル
目的と成果：LCA および経済性評価関連打合せ。フィルム製造に関わる情報の入手について議論。

日時：令和元年 10 月 16 日
場所：分析機器会社会議室
参加者：三菱ケミカル、分析機器会社、分析受託会社
目的と成果：分析業務取り進め基本的スケジュール確認。

日時：令和元年 10 月 24 日
場所：三菱ケミカル会議室
参加者：三菱ケミカル、農研機構、神奈川県農業技術センター
目的と成果：全体打合せ。成果報告および現地視察の進め方確認。茨城県と山梨県が公開情報部分のみオブザーバー参加。

日時：令和元年 10 月 31 日
場所：農研機構会議室および農環研
参加者：環境省、三菱ケミカル、農研機構、神奈川県農業技術センター、事務局
目的と成果：現地視察会。7～10 月の成果報告および圃場視察。今後の取り進め方の議論。

日時：令和元年 11 月 18 日
場所：農研機構会議室
参加者：農林水産省、農研機構、三菱ケミカル
目的と成果：分析業務詳細打合せ。分析項目確定、スケジュールと報告方法の議論。

日時：令和元年 12 月 4, 5 日
場所：分析機器会社会議室、分析受託会社会議室
参加者：農研機構、三菱ケミカル、分析機器会社、分析受託会社
目的と成果：環境省事業に関する聞き取り。事業概要説明と普及に向けた取組依頼。

日時：令和元年 12 月 12 日
場所：新東京ビル会議室

参加者：環境省、三菱ケミカル、農研機構、神奈川県農業技術センター、事務局
目的と成果：中間検討会。7～12 月の成果報告および今後の取り進め方の議論。

日時：令和 2 年 1 月 10 日
場所：全農会議室
参加者：全農、三菱ケミカル
目的と成果：全農における生分解性マルチフィルム普及の取組調査。試験機関にて実績有り。

日時：令和 2 年 1 月 10 日
場所：三菱ケミカル会議室
参加者：三菱ケミカル、農研機構、神奈川県農業技術センター、茨城県、山梨県
目的と成果：令和 2 年度実証試験準備打合せ。作付け計画および必要なマルチフィルムの議論。

日時：令和 2 年 1 月 21 日
場所：三菱ケミカル会議室
参加者：三菱ケミカル、三菱ケミカルアグリドリーム
目的と成果：令和 2 年度からの参加可否。事業内容の説明および三菱ケミカルアグリドリームの業務案提示。参加の方向で手続を開始。

日時：令和 2 年 1 月 27 日
場所：山梨県総合農業技術センター甲府および高地試験地
参加者：山梨県、農研機構、三菱ケミカル
目的と成果：山梨県の生分解性マルチフィルム導入の実態調査。情報収集と山梨県の来期からの事業計画を確認。

日時：令和 2 年 1 月 27 日
場所：八ヶ岳中央農業実践大学校
参加者：八ヶ岳中央農業実践大学校、農研機構、三菱ケミカル
目的と成果：長野県、山梨県高地の生分解性マルチフィルム導入の実態調査。

日時：令和 2 年 2 月 10 日
場所：新東京ビル会議室
参加者：環境省、三菱ケミカル、農研機構、神奈川県農業技術センター、事務局
目的と成果：最終検討会。7～2 月の成果報告および来期の取り進め方の議論。

日時：令和 2 年 2 月 18 日
場所：農研機構会議室
参加者：農研機構、三菱ケミカルアグリドリーム、三菱ケミカル
目的と成果：令和 2 年度の取り進め方確認。農研機構の活動紹介および来期の試験概要議論。

日時：令和 2 年 2 月 18 日
場所：三菱ケミカル会議室
参加者：三菱ケミカル、農研機構
目的と成果：令和元年度 LCA および経済性評価の成果まとめおよび令和 2 年度取り進め確認。

日時：令和 2 年 2 月 20 日
場所：三菱ケミカル四日市事業所会議室、分析受託会社会議室
参加者：三菱ケミカル、農研機構
目的と成果：樹脂の製造および加工に関する農研機構研究員による視察、安定同位体利用の樹脂試作打合せ、分析業務進捗確認。

日時：令和 2 年 2 月 25 日
場所：神奈川県農業技術センター
参加者：神奈川県農業技術センター、三菱ケミカル
目的と成果：神奈川県における生分解性マルチフィルム普及の取組調査。来期の試験計画確認。

日時：令和 2 年 2 月 25 日
場所：全農営農・技術センター
参加者：全農、三菱ケミカル
目的と成果：全農における生分解性マルチフィルム普及の取組調査。評価の実績有り。

日時：令和 2 年 3 月 10 日
場所：宮崎県経済連、宮崎県立農業大学校
参加者：宮崎県経済連、神奈川県農業技術センター、三菱ケミカル、三菱ケミカルアグリドリーム
目的と成果：宮崎県における生分解性マルチフィルム普及の取組調査。応用可能場面と課題確認。

参考 2　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)生分解性マルチフィルム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)日本工業規格 JIS K7128、プラスチック-フィルム及びシートの引裂強さ試験方法、1998

9)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

10)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 CO_2 evolved、国際標準化機構、2019

11)Zumstein et al., Biodegradation of synthetic polymers in soils: Tracking carbon into CO_2 and microbial biomass, Science Advances, 4(7), 2018

12)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

13)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

14) 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

15)Sameshima-Yamashita et al., Pretreatment with an esterase from the yeast *Pseudozyma antarctica* accelerates biodegradation of plastic mulch film in soil under laboratory conditions, Journal of Bioscience and Bioengineering, 127(1), 2019

16) 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

17)Ali Shah et al., Biological degradation of plastics: A comprehensive review, Biotechnology Advances, 26, 2008

18)Kitamoto et al., Phyllosphere yeasts rapidly break down biodegradable plastics, AMB Express 1, 2011

19)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

20)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

21)Koitabashi et al., Phylloplane Fungal Enzyme Accelerate Decomposition of Biodegradable Plastic Film in Agricultural Settings, Japan Agricultural Research Quarterly, 50(3), 2016

22)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

23) Kunitake et al., CRISPR/Cas9-mediated gene replacement in the basidiomycetous yeast *Pseudozyma antarctica*. Fungal genetics and biology, 130, 2019

24)OWS, Expert statement on biodegradable mulching film, Organic Waste System, 2017

25)Scarascia-Mugnozza et al., Plastic materials in European agriculture:

actual 29 use and perspectives. J. Agric. Eng., 42, 2011
26)BASF, Biodegradation of ecovio® mulch film, Introduction to the LCA mulch film for cotton cultivation in China, 2016
27)Novamont Mater-Bi®, http://materbi.com/en/wp-content/uploads/sites/2/2018/06/scheda-pacciamatura_EN_LR_TUV.pdf
28)CEN TR 16957, Bio-based products-Guideline for Life Cycle Inventory(LCI) for the end-of-life phase, 2016
29)Technical University of Denmark が開発した LCA 評価用モデル、http://www.easetech.dk/
30)Corepla, Quantità riciclate e budget, 2007, http://www.corepla.it/articolo.jsp?IdDoc=27&ignoreGest=true
31)Osservatorio Nazionale dei Rifiuti, Rapporto rifiuti 2004, http://www.apat.gov.it/site/it-IT/APAT/Pubblicazioni/Rapporto_Rifiuti/
32)Stocker et al., IPCC, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, 2013
33)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
34)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
35)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/

以上

謝辞

本事業の実施に当たり、共同実施者の御担当の皆様におかれましては、熱心かつ的確に取り組んでいただきました。ここに皆様のお名前を掲げ、深謝の意を表します。

国立研究開発法人　農業・食品産業技術総合研究機構
林清忠殿
北本宏子殿
小板橋基夫殿
岸本文紅殿
米村正一郎殿
山元季実子殿
中島泰弘殿
Francinoni Matteo殿
植田浩一殿
竹内明彦殿
三浦敦宏殿
鈴木健殿
堀田光生殿

公立大学法人　静岡県立大学
田中瑞己殿

神奈川県農業技術センター
高田敦之殿
小泉明嗣殿
太田和宏殿
丹羽香織殿　　（順不同）

令和2年3月31日　三菱ケミカル株式会社　土井武之