

令和7年度脱炭素型循環経済システム構築促進事業  
(うち、プラスチック等資源循環システム構築実証事業)  
(マイクロプラスチックによる汚染防止のための  
化石資源由来素材からの代替実証事業)  
(産業廃棄バイオマスを利用した  
海洋生分解プラスチックの開発と用途展開)  
委託業務成果報告書

令和8年2月

国立大学法人 大阪大学

## 概要

ポリエチレン (PE) やポリプロピレン (PP) のような汎用プラスチックは安価、軽量、自在な成形性による高い意匠性・デザイン対応性などの特性で、我々の日々の生活を豊かにしてきた。一方でプラスチックの多くが自然環境中で生分解しないことにより海洋プラスチックごみをはじめ、大きな社会問題として注目されている。使い捨てプラスチックによる多数の環境問題の対処法として、ポリ乳酸 (PLA) に代表される既存の生分解性プラスチックの多くは脂肪族ポリエステルであり、良好な海洋生分解性を示すものもあるが刺激応答による分解機能は有さない。また、分解途中におけるマイクロプラスチック化による悪影響も懸念されている。海洋生分解性を有するプラスチックとしてカネカが開発した PHBH に代表される微生物産生ポリエステルは工業化を目指している微生物産生ポリエステル PHBH は 5 千トン/年の製造が計画されているが、全世界のプラスチックの生産量 (3 億トン/年) 規模と比してあまりに少量である。その理由として PHBH の価格が汎用プラスチックと比して高く、物性も劣るため、日用品をはじめとして適用用途が極めて限定されることが挙げられる。一方、脂肪族ポリエステルであるポリブチレンサクシネート (PBS) は三菱ケミカルが工業生産し、増産計画が発表されているが、価格・物性・製造設備等の課題から海洋生分解性プラスチックとして広く普及するには、かなりの時間を要すると考えられている。さらに PHBH、PBS とともに単独での使用は困難な場合が多く、他の樹脂とのブレンドで実用レベルの物性を発現させているのが現状である。このように海洋生分解性プラスチックの開発には脂肪族ポリエステル以外の材料による既存プラスチックの特性限界を超える挑戦が不可欠である。

環境省ら9省庁が令和元年5月に発表した「プラスチック (プラ) 資源循環戦略」には、再生材・バイオプラの利用促進、海洋プラ対策が示され、環境への負荷が低い海洋分解性素材の開発・利用促進が求められている。そのため、本研究では産業廃棄物に含まれるバイオポリマーの中でゼラチンとデンプンに着目し、非生分解の石油由来プラの海洋生分解性プラへの代替を目指して産業廃棄物を利用する海洋生分解性バイオマスプラスチック (Marine-Biodegradable Biomass Plastics、MBBP) を開発する。現在、国内プラ生産量 (約 1 千万トン/年) のうち、国内で流通している生分解性プラは約 7 千トン/年と国内市場に占める割合は 0.07% と極めて小さく、しかも土壌の微生物による分解を前提とした生分解性プラが主流であり、海洋生分解性を有するプラはわずかな種類しか上市されていない。この指針に基づき本研究では海洋生分解性プラの開発に向けて、生分解性ポリエステル (生分解性プラ) に海洋生分解性のバイオポリマー (ゼラチン・デンプン) をブレンド化することで海洋生分解性を付与するとともにプラを高性能化し、実用的な成形技術開発に基づき MBBP を開発し、事業性を実証する。同時にその海洋生分解挙動を評価し、分解機構を明らかにすることで海洋生分解機能のさらなる向上を実現する。

## Abstract

General-purpose plastics such as polyethylene (PE) and polypropylene (PP) have enriched our daily lives with their characteristics, such as low cost, lightweight, and high design flexibility due to flexible moldability. On the other hand, most plastics do not biodegrade in the natural environment and become a major social problem, such as marine plastic pollution. Many of the existing biodegradable plastics, typified by polylactic acid (PLA), are aliphatic polyesters as a way to address the many environmental problems caused by single-use plastics. Although they exhibit good compost biodegradability, they do not biodegrade in marine environments. PHBH, developed by Kaneka as a marine biodegradable plastic, is aiming for industrialization. Production of microbial-produced polyester PHBH is planned to be 5,000 tons/year, but the scale of production is too small compared to the world's plastic amount (300 million tons/year). On the other hand, polybutylene succinate (PBS), an aliphatic polyester, is industrially produced by Mitsubishi Chemical, and plans to increase production have been announced, but due to issues such as price, physical properties, and manufacturing equipment, it is widely used as a marine biodegradable plastic. It is believed that this will take a considerable amount of time. Furthermore, it is often difficult to use both PHBH and PBS alone, and at present, practical properties are achieved by blending them with other resins. In this way, the development of marine biodegradable plastics requires the challenge of using materials other than aliphatic polyester to exceed the property limits of existing plastics.

The "Plastic Resource Circulation Strategy" announced by the Ministry of the Environment and nine ministries in May 2019 promotes the use of recycled materials and bioplastics, and measures to deal with marine plastics. There is a need to promote the development and use of flexible materials. Therefore, in this study, we focused on gelatin and starch among the biopolymers contained in industrial waste and aimed to replace non-biodegradable petroleum-derived plastics with marine biodegradable plastics. Developing degradable biomass plastics (Marine-Biodegradable Biomass Plastics, MBBP). Currently, of the domestic plastic production (approximately 10 million tons/year), biodegradable plastics distributed domestically account for approximately 7,000 tons/year, which accounts for an extremely small 0.07% of the domestic market. The mainstream is biodegradable plastics that can be decomposed by microorganisms, and only a few types of plastics that are biodegradable in the ocean are on the market. Based on this guideline, this research aims to develop marine biodegradable plastic by blending biodegradable polyester (biodegradable plastic) with marine biodegradable biopolymers (gelatin and starch). MBBP will be developed based on the development of practical molding technology, and its business feasibility will be demonstrated. At the same time, we will evaluate its marine biodegradation behavior and clarify the decomposition mechanism to further improve its marine biodegradation function.

## 目次

### 第1章 序論

1-1	海洋生分解性プラスチックの現状	7
1-2	生分解性プラスチック	9
1-3	本事業全体の目的	11
1-4	参考文献	13

### 第2章 産業廃棄バイオマスを利用した海洋生分解プラスチックの開発

2-1	実証手法と目標	15
2-1-1	実証手法	15
2-1-2	目標	16
2-2	熱可塑ゼラチン等を活用した海洋生分解性バイオマスプラスチックの 製品検討	19
2-2-1	環境中に流出しやすいプラスチック製品について調査	19
2-2-1-1	海岸等への漂着ごみ	19
2-2-1-2	環境中に流出しやすいプラスチックの材質	34
2-2-2	養殖資材におけるプラスチックの利用	38
2-2-2-1	カキ養殖用資材	38
2-2-2-2	フジツボ養殖用資材	41
2-2-3	代替対象製品に関する要求品質	43
2-2-3-1	カキ養殖資材	43
2-2-3-2	フジツボ養殖資材	44
2-2-4	代替養殖資材の市場	45
2-2-5	養殖資材における海洋生分解性材料導入の必要性和対象製品の選定理由	47
2-3	熱可塑ゼラチンの製造	50
2-3-1	ゼラチンの加工	50
2-3-2	ゼラチン産業廃棄物	52

2-3-3	令和6年度までの成果	55
2-3-4	令和7年度実施内容	58
2-3-4-1	異なる由来ゼラチンの熱可塑ゼラチンペレットの製造検討	56
2-3-4-2	ペレットの作製および乾燥方法	59
2-3-5	事業終了後の課題と今後の取り組み	61
2-4	熱可塑ゼラチン/PLA 等ブレンドの開発	63
2-4-1	生分解性プラスチックの選択	63
2-4-2	令和6年度までの成果	64
2-4-3	令和7年度実施内容	69
2-4-3-1	コンパウンド化	70
2-4-3-2	コースターの試作	71
2-4-3-3	コンパウンド化した MBBP ペレットの物性評価	73
2-4-3-3-1	引張試験	73
2-4-3-3-2	曲げ試験	75
2-4-3-3-3	MFR	77
2-4-3-3-4	衝撃試験	79
2-4-3-4	コンパウンド化した MBBP ペレットとラボレベルとの比較	80
2-4-3-4-1	引張試験	81
2-4-3-4-2	曲げ試験	82
2-4-4	事業終了後の課題と今後の取り組み	83
2-5	熱可塑デンプン/ゼラチン/PLA 等ブレンドの開発	85
2-5-1	熱可塑性デンプン	85
2-5-2	令和6年度までの成果	86
2-5-3	令和7年度実施内容	88
2-5-3-1	コンパウンド化	89
2-5-3-2	フジツボ養殖資材試作	91
2-5-3-3	コンパウンド化した MBBP ペレットの物性評価	95
2-5-3-3-1	引張試験	95
2-5-3-3-2	曲げ試験	100
2-5-3-3-3	MFR	101
2-5-3-3-4	衝撃試験	103

2-5-4	事業終了後の課題と今後の取り組み	104
2-6	作製した MBBP の海洋生分解評価	106
2-6-1	令和 6 年度までの成果	106
2-6-2	令和 7 年度実施内容	111
2-6-2-1	海水水槽浸漬試験	113
2-6-2-2	熱分析 (TGA/DTG) による分解挙動解析	114
2-6-2-3	BOD 試験による生分解量の定量評価	117
2-6-2-4	バイオフィルム形成とメタゲノム解析	120
2-6-2-5	養殖資材試作品の実海域浸漬試験	124
2-6-3	事業終了後の課題と今後の取り組み	126
2-7	まとめ	127
2-8	参考文献	131

### 第3章 LCA 評価

3-1	概要と目的	138
3-1-1	概要	138
3-1-2	目的	138
3-1-3	本調査の範囲	139
3-2	ベースライン製品の利用状況と機能単位	146
3-2-1	機能単位設定の考え方	146
3-2-2	機能単位の想定	146
3-2-2-1	成型品の PLA 及び PP 射出成形の例	146
3-3	開発品およびベースラインの LCA 調査	148
3-3-1	対象製品	148
3-3-2	機能単位	149
3-3-3	システム境界	149
3-3-4	製品製造のフローとインベントリデータ	150
3-3-4-1	開発品	150
3-3-4-1-1	原材料 (熱可塑ゼラチン) の製造	150

3-3-4-1-2	原料調達・生産段階のサイト間の輸送	151
3-3-4-2	ベースライン	152
3-3-4-3	廃棄処理の考え方について	152
3-3-5	GHG 排出量削減効果の試算	153
3-3-6	開発製品とベースライン製品との比較	158
3-4	まとめ	168
3-5	参考文献	170

## 第1章 序論

### 1-1 海洋生分解性プラスチックの現状

ポリエチレン (PE) やポリプロピレン (PP) をはじめとする汎用プラスチックは安価であり、丈夫で耐久性があるという特徴を活かし、包装材料をはじめ、衣類やカトラリーなど幅広い分野で利用されてきた。しかしながら、自然環境中で分解されにくいいため、さまざまな環境問題を引き起こしている。近年、マクロプラスチック (サイズの大きいプラスチックごみ：レジ袋、PET ボトルなどの成形品) とマイクロプラスチック (サイズの小さいプラスチックごみ：プラスチックの破片や研磨材等といわれている) の海洋汚染が深刻になっている[1-1]。また、フリース等に利用されるポリエステル、ナイロンといった化学繊維のマイクロファイバー (長さ 5 ミリ以下) が洗濯で抜け落ち、川・海に流出することも汚染の原因となっている。現状、海洋に漂流するプラスチックの正確な量は把握されていないが、世界で毎年 900 万トンを超えるプラスチックごみが陸上から海洋へ流出すると報告されている[1-2]。プラスチックごみの中でも、とりわけ海洋へ流出する可能性が高い一度利用して廃棄されるプラスチックや海洋で使用し流出が避けられない漁具は、海洋へ流出しても海洋中で分解されマイクロプラスチック化せず環境への負荷が小さい素材 (海洋生分解性プラスチック) へ代替することが社会的に切望されている。2019 年 5 月に経済産業省からは海洋プラスチックごみ問題の解決に向け、イノベーションを通じた取組みとして、海洋生分解性プラスチックの開発・導入普及を図るための主な課題と対策を取りまとめた「海洋生分解性プラスチック開発・導入普及ロードマップ」が発表された。このロードマップには、海洋生分解性プラスチックの種類を増やすことで製品の適用範囲を増やす (MBBP1.0、MBBP : Marine Bio-degradable Bio-based Plastics) ことのみならず、地球温暖化対策や資源循環の観点から植物由来かつ海洋生分解性を有するプラスチックの普及拡大が言及されている。また、ロードマップには「複合素材の技術開発による多用途化」(MBBP2.0) が言及されており、フィラー等の機能性充填剤との複合化による新用途の創出・普及導入を目指すとされている。海洋生分解性プラスチック複合材料の開発では、機能性充填材についても海洋生分解性が求められる。さらに革新的技術・素材の研究開発 (MBBP3.0) フェーズでは、新素材の開発により実現可能な物性幅を広げ、海洋生分解スピードやタイミングをコントロールする機能等、製品の使用中安定性 (日常生活における使用中は安定、海洋中では生分解が進行) を向上させることにより初めて実現可能な用途が製品イメージとして示されている。

現在、実用化されている海洋生分解性プラスチックは微生物産生ポリエステルをはじめとする一部の脂肪族ポリエステルに限定される。株式会社カネカが工業化した微生物産生ポリエステル (PHBH、ポリヒドロキシアルカン酸 (PHA) の一種) は 5 千トン/年の生産

であるが、全世界のプラスチックの生産（4億トン/年）規模と比してあまりに少量である[1-3]。また、汎用プラスチックと比して、価格、物性、成形性に課題があり、日用品をはじめとして適用範囲が狭い。一方で、脂肪族ポリエステルである、土壌での生分解性を有するポリブチレンサクシネート（PBS）を三菱ケミカルが工業生産し、PBSコンパウンドの海洋生分解が発表されたが、PHBHと同様の課題が指摘されている。

PHBHは、ポリヒドロキシブチレート（PHB）とポリヒドロキシヘキサノエート（PHH）という2種類のモノマーを共重合して作られる。この共重合体は結晶性が高く、機械的強度や耐久性が良好で、比較的柔軟性を持っている。特に生分解性が高く、海洋環境下でも分解が進む特性を持っているため、海洋プラスチック問題の解決策として期待されている[1-4]。PHBHの物性については、結晶性が高いため、機械的強度や硬さが向上する。この特性は包装材料やその他の消費財に利用する際に非常に重要である。PHBHはまた、他のPHA類に比べて柔軟性があり、加工がしやすいため、多様な製品に利用されている。さらに熱的安定性も高く、特に分解過程において高温環境下でも分解が進みやすいという特徴を持っている[1-5]。PHBHの生分解性に関しては、特定の微生物、特にバクテリアや真菌によって分解されることが知られている。これらの微生物はPHBHを二酸化炭素と水に分解する。海洋環境では、PHBHが微生物によって分解され、最終的に環境に有害な残留物を残すことなく無害な物質に変化する。この分解過程は、通常のプラスチックと比べて非常に速く、海洋生物に対する危険性を大幅に低減し、環境負荷を低下できる[1-6]。

PBSはポリブチレンサクシネートという化学物質を基にしたポリマーで、再生可能な資源から合成されることが特徴である。PBSはPHA類に似た特性を持ちつつ、製造コストが比較的低いいため、商業化の面で有利な点がある。PBSは非常に柔軟で、加工性に優れており、これにより包装フィルムや袋、その他の消費財に広く利用されている[1-7]。PBSはポリエステル系のプラスチックであり、特にバイオプラスチックの中でも汎用性が高い素材として注目され、物性も非常に優れている。特に、強度と柔軟性のバランスが良好で、さまざまな製品に適用できる特性を持っている。また、熱的安定性も高く、加工時の温度管理がしやすいため、商業生産において非常に便利である。このため、食品包装や医療用製品など、広範な用途に利用されている[1-8]。PBSの生分解性については、海洋環境でも分解が進むことが知られている。PBSはPHBHと同様に微生物によって分解され、最終的に二酸化炭素と水に変わる。海洋生物に対する影響が少なく、環境に残る有害物質もほとんどないため、PBSは海洋生分解性プラスチックとして非常に有望な素材となっている[1-9]。PBSはPHBHと比較して製造コストが低いいため、広範な商業的応用が期待されている。

PHBHやPBSをはじめとする海洋生分解性プラスチックは、多くの利点を持っているが、いくつかの課題も存在している。まず、分解速度が遅い点である。海洋環境での分解速度は温度、酸素の有無、湿度などの条件に依存するため、分解が進まない場合がある。特に低温や酸素不足の環境では、PHBHやPBSの分解が遅れ、長期間にわたって微小なプラスチック粒子（マイクロプラスチック）として残る可能性がある[1-10]。この課題を解決す

るため、今後の研究によってより安定した分解環境を提供できる方法が模索される必要がある。次に、微生物群の影響もある。海洋生分解性プラスチックは、特定の微生物によって分解されるため、微生物群の多様性や環境によって分解の進行具合が異なる。これが、必ずしも全ての海洋環境で同様な分解が進まない理由である。したがって、分解速度を一定に保つためには、海洋中の微生物群の特性や分解促進のための技術が必要である[1-11]。さらに、商業化とコストの課題も無視できない。PHBH や PBS は生分解性が高いものの、製造には特殊な技術とコストがかかるため、既存の石油由来プラスチックとの価格競争が課題となっている。この点については、製造コストを削減し、より効率的な生産技術を確立することが今後の課題となる[1-12]。それでも、海洋生分解性プラスチックは将来的に非常に大きな可能性を秘めている素材である。展望としては、製造技術の進歩や規模の経済が実現されることで、これらのプラスチックの商業化が進むと考えられる。生分解性プラスチックが広く普及すれば、海洋プラスチック汚染の問題を大きく改善できると考えられる。また、リサイクル技術や代替素材の開発と併せて、環境負荷を減らし、持続可能な社会を実現するための一助となることが期待される[1-13]。

## 1-2 生分解性プラスチック

生分解性プラスチックは、自然環境において微生物によって分解されるポリマーであり、従来の石油由来プラスチックの代替として注目されている。生分解性プラスチックの中でも、ポリ乳酸（PLA）は広く利用されており、他にも PHA や PBS など、さまざまな素材が開発されている。これらのプラスチックは、特に海洋生分解性が求められる場面での利用が注目されており、その物性や生分解性に関する研究が進んでいる。熱可塑性プラスチックである PLA はトウモロコシやイモなどの主成分であるデンプンから合成される代表的なバイオプラスチックの一つで、デンプンを酵素分解し、グルコースを発酵することで乳酸モノマーが得られ、それを重合することで合成される。植物を原料とするため製造過程での CO<sub>2</sub> 発生量と光合成での CO<sub>2</sub> 吸収量が等しいため、カーボンニュートラルな材料として循環型社会の構築に貢献できると考えられている。また、生分解性を有しているため景観保護や廃棄物処理問題の観点からも有用とされており、世界で最も生産されているバイオプラスチックとなっている[1-14,15]。高い生体適合性を持つため、医療用途では内部縫合や組織足場材料としても利用されてきた[1-16]。また PLA の低毒性を活かして包装材料や消費財の分野でも利用が拡大した[1-17]。PLA は透明性が非常に高く、D-リモネンやエチルアセテートなどの有機透過物へのバリア性能はポリエチレンテレフタレート（PET）と同等の値を示す[1-18]。引っ張り強度や曲げ強度は PP、PE およびポリスチレン（PS）といった汎用プラスチックよりも大きいのが、硬く脆い性質のため、衝撃強度や伸びに関してはこれらに劣る。

PLA は、環境中での生分解性を持っており、特に温暖湿潤な条件下で微生物によって分解する。温度や湿度が高い環境では、生分解が早く進むが、低温・乾燥した環境では分解速度が遅くなる[1-19]。これにより、PLAは適切な環境下では比較的早く分解されるものの、海洋環境においては分解速度が遅く、長期間にわたり残留する可能性があることが指摘され、海洋中に流出しても生分解されるような設計が求められている。PLA の海洋生分解性を改善する方法について、いくつかのアプローチが提案されている。PLA は温暖湿潤な環境では比較的速やかに分解されるが、海洋環境などの低温や低酸素条件では分解が遅れ、長期間残留する可能性がある。これを改善するための方法を以下に示す。

#### [1] 共重合体の導入

PLA は結晶性が高く、分解が遅くなる傾向がある。これを改善するために、他のポリマーと共重合する方法が用いられている。例えば、PHA や PBS などを PLA と共重合することで、分解速度を向上させることができる。これらのポリマーは、PLA に比べて柔軟性が高く、微生物による分解が進みやすい特性を持つため、海洋環境下での分解性が向上する。また、PLA に可塑剤や添加物を加えることで、物理的特性を改善し、海洋生分解を促進することが可能になる[1-20]。

#### [2] 分解促進添加物の使用

PLA の分解を促進するため、環境中で微生物の活動を高める成分を加える方法が提案されている。酵素やプロテイン、糖類などのバイオ促進物質を PLA に組み込むことで、微生物が効果的にポリマーを分解できるようになる。これにより、分解速度が向上し、海洋環境でも効果的に分解が進むことが期待される[1-21]。また、酸化促進剤を加えることにより、酸化分解を促進する方法もある。酸化分解は酸素の存在下でポリマーが分解する過程であり、このプロセスを加速することで、海洋環境下での分解速度を向上させることができる[1-22]。

#### [3] マイクロバイオームの最適化

PLA の生分解は主に海洋環境における微生物によって進行する。特定の海洋細菌や真菌を使用することで、PLA の分解を促進する方法が研究されている。PLA を分解する能力を持つ微生物（例：*Ideonella sakaiensis* など）を活用することで、海洋環境下での分解を効率的に進行させることができる[1-23]。

#### [4] 高温および湿潤環境の模倣

PLA の分解を速めるために、高温や湿潤環境を模倣する方法も効果的である。製造時に高温で加工するや、湿潤環境での保存方法を変更することで、微生物が活発に働けるような条件を整え、分解を促進することができる。この方法は、特に陸上や海洋環境で有効である[1-24]。

#### [5] 改良型 PLA（ブレンド型 PLA）の開発

従来の PLA の物性を改善し、海洋生分解性を向上させるために、バイオベースのポリマーや再生可能資源を用いた改良型 PLA の開発が進められている。PLA とポリ乳酸コポリマ

一のブレンドや、PLA をデンプンなどの生分解性ポリマーと混合することで、海洋環境での分解速度を向上させることができる。これにより、PLA が持つ物理的・化学的特性を保持しつつ、海洋環境下での分解性が改善される[1-25]。

しかしながら、従来の汎用プラスチックと比べて高コストであることから完全に代替されるには至っていないことは問題点として挙げられる。本事業では、コスト低減を実現するため、デンプンなどの低価格バイオベースポリマーやゼラチン廃棄物を添加する材料設計方針を確立し、その方針に基づいて開発を進めた。

### 1-3 本事業全体の目的

世界では食品廃棄（食品ロス）の量は 13 億トンとなり、日本でも 1 年間に約 612 万トン（2017 年度推計値）もの食料が捨てられている。また、食品の生産には多くのエネルギーが必要となり、廃棄して燃焼すると大量の CO<sub>2</sub> が発生し、埋め立てでも CO<sub>2</sub> の 28 倍以上温室効果を持つメタンガスが発生する。一定品質の廃棄物が入手できる食品産業の廃棄物は有効利用に好適である。ゼラチン食品廃棄物の一例として、薬剤やサプリメントのソフトカプセルを挙げられる。ソフトカプセルはゼラチンを水/グリセリンに溶解してシート化し、両側から帯状にしたゼラチンシートをダイロールと呼ばれる一對の回転する円筒金型の中に送り、2 枚のシートの中に内容液を注入し、両金型の打ち抜きによってカプセルに成形される。しかしながら、生産ラインの配管残渣や打ち抜き残渣などゼラチンシートの多くが利用されず、ソフトカプセル皮膜材料の廃棄物が 20%~30%を占めて、業界では数百トンのソフトカプセル皮膜の残渣が廃棄されている。本事業では生分解を誘発する成分として産業廃棄物のゼラチンとデンプンを PLA などの生分解性プラに組込むことで海洋生分解機能の付与/向上を達成する。天然多糖類は海洋生分解性を有しており、本学は耐水性に優れたデンプン/セルロース複合シートを開発し、その優れた海洋生分解性を見出している。本事業では熱可塑デンプンに注目し、生分解性プラに高含有かつ均一にブレンドする技術を開発し、その海洋生分解性を明らかにしてきた。しかし、デンプンは可食資源であり、用途に社会的懸念があるため、熱可塑化が可能かつ生分解性に優れる産業廃棄物として、ソフトカプセル廃材のゼラチンと熱可塑デンプンの製造時に発生する廃材（ロス）のデンプンに焦点を当てる。本事業では生分解性プラへのゼラチンあるいはデンプンのブレンドにより海中で生分解を誘発する機能を付与することを提案し、具現化・検証により具体的な製品開発に資するブレンド技術、成形技術を構築する（図 1）。

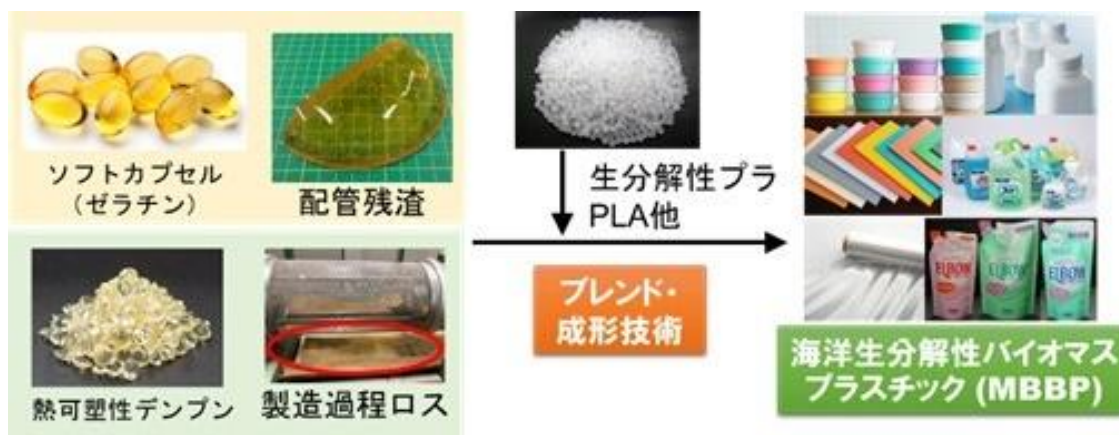


図1 事業概要

ソフトカプセルはゼラチンを水/グリセリンに溶解し、シート化して生産される。加熱による濃縮によりゼラチンが熱可塑化してカプセルが形成できるため、加熱処理により熱可塑ゼラチン（ゼラチン/グリセリン）が得られると考え、本学と共同実施機関のアピ株式会社はソフトカプセル生産時に発生する廃棄物からの熱可塑ゼラチンの開発に着手した。アピで年間数十トンの廃棄ゼラチンがあり、同分野の他企業を含めると数百万トンに達する。一方、熱可塑性デンプンを工業生産工程においてペレットのサイズのムラにより、出荷できないロスが40%以上に達する。本実証では、これら産業廃棄物に着目し、工業化可能な熱可塑ゼラチンとデンプンの製造技術を確立するとともに、PLAをはじめとする生分解性プラとのブレンド技術を構築してMBBPを開発する。MBBP中のゼラチン成分のナノ分散まで視野に入れた観察技術を構築し、開発するMBBPの物性・海洋生分解性を実用レベルまで向上させて事業性を実証する。

#### 1-4 参考文献

- [1-1] 宇山 浩監修、食品包装産業を取り巻くマイクロプラスチック問題、シーエムシー・リサーチ (2021).
- [1-2] 堅達京子、脱プラスチックへの挑戦、山と溪谷社 (2020).
- [1-3] 株式会社カネカ I R・広報部、2018年8月7日、カネカ生分解性プラスチックの生産能力を増強、<https://www.kaneka.co.jp/topics/news/nr201808071/>
- [1-4] Krauss, G., & Jönsson, A. S. Polyhydroxyalkanoates: Biodegradable Plastics and Their Industrial Applications. Springer Science & Business Media. (2016).
- [1-5] Müller, M., et al. Biodegradable Plastics in the Environment: A Review of the Performance of Polyhydroxyalkanoates and Other Biopolymers. *Journal of Polymers and the Environment*, 27(3), 557–576. (2019).
- [1-6] Jendrossek, D., & Handrick, R. Microbial Degradation of Polyhydroxyalkanoates. *Annual Review of Microbiology*, 56, 403–428. (2002).
- [1-7] Sankari, R. Recent Developments in Polybutylene Succinate (PBS) as an Emerging Bioplastic for Sustainable Packaging Materials. *Polymer Testing*, 92, 106883. (2021).
- [1-8] Yuan, Z., & Chen, J. Polylactic Acid and Polybutylene Succinate: Biodegradable Polymers for Packaging Applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(32), 48946. (2020).
- [1-9] Sohail, M., et al. Marine Biodegradation of Poly(butylene succinate) and Other Bio-based Polymers: A Review. *Marine Pollution Bulletin*, 159, 111478. (2020).
- [1-10] Shen, L., & Worrell, E. Biodegradable Plastics: A Review of Technology and Market Opportunities. *Energy Economics*, 75, 490–507. (2018).
- [1-11] Pérez-Guevara, F., & Moreno, Y. Biodegradable Polymers in Marine Environments: A Comprehensive Review. *Environmental Science & Technology*, 55(10), 6741–6755. (2021).
- [1-12] Andrady, A. L. The Plastic in Microplastics: The Presence of Microplastics in the Environment and Their Impact on Human Health. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 1, 64–68. (2017).
- [1-13] Smith, R. D., & Williamson, J. M. Environmental and Economic Benefits of Polyhydroxyalkanoates in Marine Environments: A Review. *Environmental Pollution*, 245, 118–129. (2019).
- [1-14] S. Bocchini et al., Polylactic Acid and Polylactic Acid-Based Nanocomposite Photooxidation, *Biomacromolecules*. 2010, 11, 2919–2926
- [1-15] D. Turan et al., Effects of POSS Particles on the Mechanical, Thermal, and Morphological Properties of PLA and Plasticised PLA, *Journal of Applied Polymer Science*. 2011, 121, 1067–1075
- [1-16] R. Datta et al., Lactic acid: recent advances in products, processes and technologies – a review.

- J. Chem. Technol. Biotechnol. 2006, 81, 1119–1129.
- [1-17] R. Conn et al., Safety assessment of polylactide (PLA) for use as a food-contact polymer. Food Chem Toxicol. 1995, 33, 273-283
- [1-18] R. Auras et al., Sorption of ethyl acetate and d-limonene in poly(lactide) polymers. J Sci Food Agric. 2006, 86, 648-656
- [1-19] Ranjan, P., et al. "Biodegradation of Poly(lactic acid): A review." Journal of Environmental Management, 183, 174–190. (2016).
- [1-20] Nicolas, J., et al. "Poly(lactic acid) and its copolymers: From polymerization to applications." Progress in Polymer Science, 102, 101213. (2020).
- [1-21] Song, J. H., et al. "Biodegradable and bio-based polymers for food packaging." International Journal of Polymer Science, 2009, 1–10. (2009).
- [1-22] Rios, L. M., et al. "Environmental impacts of biodegradable plastics in marine environments." Environmental Pollution, 228, 74–82. (2017).
- [1-23] Rios, L. M., et al. "Marine degradation of PLA and other biodegradable plastics." Environmental Science & Technology, 54(12), 7104–7113. (2020).
- [1-24] Cai, Y., et al. "Marine biodegradation of PLA and other biodegradable plastics." Environmental Pollution, 267, 115456. (2020).
- [1-25] Xia, W., et al. "Enhancing biodegradation of poly(lactic acid) for marine environments." Journal of Environmental Management, 284, 112044. (2021).

## 第2章 産業廃棄バイオマスを利用した海洋生分解プラスチックの開発

### 2-1 実証手法と目標

#### 2-1-1 実証手法

産業廃棄物の廃材ゼラチン・デンプンと生分解性プラのブレンドにより MBBP を開発する。具体的には、廃棄物ゼラチンを熱可塑化する技術を構築するとともに、熱可塑ゼラチン・デンプンと生分解性プラの混練技術の開発、得られるブレンドの分散状態をナノレベルで制御することで、汎用プラと同等以上の物性を獲得する。また、生分解性プラの種類により軟質～硬質の MBBP を作製し、用途に応じた成形技術を開発する。さらに、生分解性プラ中のバイオポリマーの分散性を高める相溶化剤の開発も手掛け、物性向上につなげる。

令和7年度は、これまでに構築してきた熱可塑ゼラチン、熱可塑デンプン、ポリ乳酸(PLA)等とのブレンド技術に基づき、過年度までに得られたペレット試作結果および機械特性・耐水性・透明性・加工性などの物性データを総合的に評価し、海洋生分解性バイオマスプラスチックとして社会実装可能な製品の検討を進める。本事業では、海洋環境中への流出が社会的課題となっているプラスチック製品(漁業資材、農業資材、包装材、日用品など)を対象に、国内外の市場規模、流通構造、使用環境、要求品質(強度、耐久性、耐水性、成形性、コスト許容範囲等)を整理し、MBBPによる代替が技術的・経済的に成立し得る製品群を特定する。また、対象製品の選定にあたっては、①海洋流出リスクの高さ、②既存素材の環境負荷、③MBBPの物性で代替可能な範囲、④製造プロセスの適合性(射出成形・押出成形・フィルム成形等)、⑤市場側の受容性(漁協・事業者・自治体等のニーズ)、⑥コスト構造と価格競争力、といった複数の観点から総合評価を行う。さらに、実装化に向けて必要となる技術的課題(長期耐久性、吸水による物性変化、加工条件の最適化、量産時の安定性、相溶化剤の改良など)および制度的課題(海洋生分解性の認証制度、漁業資材としての規格適合、自治体・省庁との調整、LCA評価など)を抽出し、事業終了後の社会実装に向けた課題解決につなげる。特に、海洋生分解性の評価結果と市場要求品質を突き合わせることで、MBBPが実際の使用環境でどの程度の性能を発揮し、どのような条件で既存プラスチックを代替できるかを明確化する。

これらの検討を通じて、MBBPの社会実装に向けた具体的なターゲット製品を選定し、将来的な量産化・事業化に向けた技術戦略および市場戦略を整理する。これにより、本実証事業が単なる素材開発にとどまらず、海洋プラスチック問題の解決に資する実用的な代替素材の創出へとつながることを目指す。

具体的に、下記の4項目を実施する。

- ① 熱可塑ゼラチンの製造開発：廃棄物ゼラチン中の脱水条件等の検討から生分解性プラにブレンドできる熱可塑ゼラチンを作製
- ② 熱可塑ゼラチン/PLA 等ブレンド・成形：作製した熱可塑ゼラチンと PLA、PBS とのブレンド条件検討、実用レベルの機械的強度・耐水性・透明性付与、成形条件検討
- ③ 熱可塑デンプン（製造時の廃材）・ゼラチン/PLA 等ブレンド・成形：産業廃棄物熱可塑デンプンと PLA、PBS とのブレンド条件検討、実用レベルの機械的強度・耐水性・透明性付与、成形条件検討、モデル製品作製
- ④ 開発 MBBP の海洋生分解評価：開発したブレンド品と成形品を東京湾に浸漬し、海洋生分解性を評価

## 2-1-2 目標

以上を通じ、表 2-1-1 に示す数値目標を達成する新規素材を開発する。物性の数値目標は汎用プラ（硬質成形物は主に PP、軟質フィルムは PE をターゲットに設定）のデータを参考にしたものであり、プラ製品の実用化検証の判断基準である。硬質成形体については、汎用樹脂として広く用いられているポリプロピレン（PP）の一般グレードをベンチマークとし、同等以上の機械特性を有することを目標とした。具体的には、一般的な PP 成形品の曲げ弾性率（約 1500–2000 MPa）、曲げ強度（約 20–30 MPa）、アイゾッド耐衝撃性（数 kJ/m<sup>2</sup>オーダー）を参考にしつつ、実用上の剛性・強度・耐衝撃性を確保する観点から、それぞれ >2000 MPa、>25 MPa、>8 kJ/m<sup>2</sup> を数値目標として設定した。軟質シートについては、包装材やフィルム用途で用いられるポリエチレン（PE）や一部のエラストマー系材料を参考とし、引張強度・剛性・延伸性のバランスが取れた領域を目標とした。市販フィルム材の引張強度（数十 MPa）、ヤング率（数百～千数百 MPa）、破断伸び（数百～数千%）を参照しつつ、実用上十分な強度と柔軟性を両立する観点から、引張強度 >50 MPa、ヤング率 >800 MPa、破断伸び >1000% を目標値とした。海洋生分解性については、従来の PLA や PBS が海水環境下ではほとんど分解が進行しないことが多くの報告で示されている一方で、本事業では“実海域での分解性を有する材料”を明確に特徴づける必要がある。そのため、BOD 法による 1 か月あたりの分解率を 25%以上、実海水中での質量減少（海洋分解）を 1 か月あたり 50%以上とすることで、従来の難分解性ポリエステルとは一線を画すレベルを数値目標として設定した。また、曲げ応力変化については、機械特性の低下を通じて分解進行を評価する指標として導入し、1 か月で初期値の 80%以上の変化が認められることを目標とした。これらを達成することで社会普及できるプラ製品としての事業性を実証する。また、海洋生分解性に関する目標は異なる海洋環境中での分解の可能性を判断するための基礎的尺度として設定した。

表 2-1-1 開発する MBBP の物性・海洋生分解性に関する数値目標

材料物性・機能、成形、モデル製品			数値目標
大項目	小項目	単位	
硬質成形物物性 (射出成形)	曲げ弾性率	MPa	>2000
	曲げ強度	MPa	>25
	Izod耐衝撃性	kJ/m <sup>2</sup>	>8
軟質シート物性 (押出成形)	引張強度	MPa	>50
	ヤング率	MPa	>800
	破断伸び	%	>1000
海洋生分解性	BOD法評価	%/1か月	>25
	曲げ応力変化	%/1か月	>80
	海洋分解	%/1か月	>50

熱可塑ゼラチンの開発は、PLA、PBS 等の生分解性プラと混練することでブレンドを作製、表 2-1-1 の数値目標を達成するために以下の内容を実施した。

- ゼラチン界面のナノレベルで制御と生分解性プラの均一分散における技術の開発
- 界面親和性を高める相溶化剤を開発するとともにブレンド（熱混練）条件の最適化
- 硬質プラ開発を中心として、物性が不足する場合にはフィラーとしてセルロースやタルクの添加
- フィラーの分散性を制御して複合プラの物性を向上させ、硬質系材料の数値目標を達成する。

なお、MBBP における分散性制御はナノレベルまで達成することを目標とした。

軟質シート物性においては、本事業着手前の予備検討で、ソフトカプセル打抜き後のゼラチン残渣を用いて PLA とブレンドしてフィルム化をすることに成功している。ゼラチンの添加によりフィルム強度（ヤング率）は添加前より向上していることを明らかにしており、物性目標値を破断応力 150 MPa 以上、耐水性（含水率）5 %以下、透明性の目標値は曇り度 30 %以下、平行線透過率 65 %以上は過年度に達成した。令和 7 年度は、ブレンドにより作製した MBBP に対する射出成形、押出成形の技術を開発し、実用的な製品モデルを製造する。

海洋生分解性においては、東京海洋大学にて種類（採取場所、微生物量等）の異なる海洋環境を模倣した水槽で浸漬による基礎評価を行い、MBBP の組成・分散構造と分解性との相関を明らかにする。特に、構造と分解特性の関連に着目するため、電子顕微鏡観察を用いた詳細な表面形状解析を行い、その時系列変化を生物化学的酸素要求量（BOD）試験による生分解量とともに調べる。表 2-1-1 記載した海洋生分解性に関する数値目標を達成す

るため、その結果を MBBP 開発にフィードバックする。さらに、分解初期に MBBP 表面に形成されるマイクロコロニーを形成する微生物を分離する。分離株を用いて MBBP と微生物との物理的相互作用を解析し、MBBP への微生物付着効率と MBBP の成分分散性・局在パターンとの関係を明らかにする。また、異なる分解フェーズの MBBP に存在する微生物を同定することによってバイオフィルムの菌叢構造を明らかにする。さらに、MBBP 分解微生物を単離し、分解酵素を精製し同定することで、分解酵素の機能と生産条件を明らかにし、海洋中での分解性目標値は 30℃で 50%以上/月とする。

## 2-2 熱可塑ゼラチン等を活用した海洋生分解性バイオマスプラスチックの製品検討

本節では、熱可塑ゼラチン、熱可塑デンプン、PLA 等とのブレンドによる過年度までのペレットの試作結果や物性特性を踏まえ、本実証事業における代替品として適当なプラスチック製品を特定することを目的とする。大阪大学から公益財団法人地球環境センターに外部委託し、海洋流出リスクの高いプラスチック製品に対する環境負荷低減の方策を提案、実装化に向けた課題の抽出と社会実装への展開を図る。

### 2-2-1 環境中に流出しやすいプラスチック製品について調査

熱可塑ゼラチン、熱可塑デンプン、PLA 等とのブレンド材料による過年度までのペレットの試作結果や物性特性を踏まえ、本実証事業における代替製品として適当なプラスチック製品を特定することを目的に、環境中に流出しやすいプラスチック製品および材質を抽出する。また、主に海域に流出しているごみにおいて、環境省等の調査報告書から情報を抽出し、環境中に流出しやすいプラスチック製品についてまとめた。

#### 2-2-1-1 海岸等への漂着ごみ

令和2年度から令和5年度に、各都道府県及びその委託先が地方公共団体向け漂着ごみ組成調査ガイドライン（以下「調査ガイドライン」という。）に基づき、前年度に各都道府県及びその委託先が実施した漂着ごみの組成調査の結果を取りまとめた「海洋ごみの実態把握及び効率的な回収に関する総合検討業務」から情報をまとめた [2-1~3]。

調査ガイドラインによると、漂着ごみには、内陸から河川を經由して河口の近隣海岸に漂着するものや、海域に流出した後に海流等で運ばれ流出河川から離れた海岸に漂着するものもあるため、本ガイドラインに沿った調査では、漂着ごみによる地域への影響を把握する観点から、他地域からの流出を含めた漂着ごみの全体像を把握するための調査手法がとられている。

調査地点は、全国の海岸（河口付近、島しょ部含む）であり、各年度の調査地点数は表 2-2-1 の通り。

表 2-2-1 漂着ごみの組成調査結果の調査地点数

	R5	R4	R3
調査地点数	76	78	89
うち、河口付近 <sup>※1</sup>	21	26	28
うち、島しょ部 <sup>※2</sup>	11	11	12
<p>※1 河口付近は調査ガイドラインに記載事項を踏まえ、一級河川、二級河川の河口中心から、太平洋側は概ね 3 km、日本海側・瀬戸内海は概ね 1 km 以内にある調査地点が対象[2-2]</p> <p>※2 また島しょ部は離島振興法、奄美群島振興開発特措法、沖縄振興特措法で指定されている有人離島、又は、その他無人島が対象[2-2]</p>			

さらに、令和3年度から令和5年度に実施された全国の漂着ごみ組成調査結果によると[2-4]、回収されたごみのうち、プラスチック回収量と全体に占める割合は個数ベースとして90%以上、重量ベースとして65%となる（表 2-2-2 に示す）。回収された漂流・漂着物のうち、プラスチックが占める割合は、個数ベースと重量ベースで大きく異なる傾向を示している。個数ベースでは、令和3年度から令和5年度にかけて常に9割前後（91～93%）を占めており、回収物の大半がプラスチック製品であることが明確に示されている。これは、プラスチックが軽量で破片化しやすく、環境中で細片として大量に存在することを反映している。特に、漁具片、包装材、発泡スチロール片など、細かく砕けたプラスチック片が多数回収されるため、個数ベースでは極めて高い割合となる。一方、重量ベースではプラスチックの割合は65～72%にとどまり、個数ベースよりも低い値を示している。これは、流木や金属片、ガラス類など、重量のある非プラスチック系漂着物が一定量含まれるためである。特に、台風や豪雨後には木材や大型漂着物が増加し、重量ベースの割合を押し下げる傾向がある。したがって、重量ベースの値は、環境中に存在する「質量としての負荷」を示す指標として重要であり、個数ベースとは異なる視点を提供している。

年度別に見ると、個数ベース・重量ベースともにプラスチックの割合は比較的安定しており、令和3年度から令和5年度にかけて大きな変動は見られない。これは、回収活動の手法や対象範囲が一定であることに加え、環境中に流出するプラスチックの構造的な多さが継続していることを示唆している。特に、個数ベースで9割前後という高い割合が維持されていることは、プラスチックごみが依然として主要な海洋ごみであり続けていることを示す重要な指標である。また、重量ベースのプラスチック割合が令和3年度の65%から令和5年度には72%へと上昇している点は注目に値する。これは、回収活動の効率化や、プラスチックごみの大型化（例：漁具、ロープ、バケツ類など）の影響、あるいは非プラスチック系漂着物の減少など、複数の要因が考えられる。いずれにせよ、重量ベースでの割合上昇は、環境中に存在するプラスチックの「質量としての負荷」が増している可能性を示しており、今後のモニタリングで注視すべき傾向である。

表 2-2-2 プラスチック回収量と全体に占める割合

	個数(個)ベース			重量(kg)ベース		
	R5	R4	R3	R5	R4	R3
総回収量	87,725	118,762	105,962	7,852	7,801	8,028
プラスチック量	81,341	110,532	96,250	5,614	5,199	5,180
プラスチック割合	93%	93%	91%	72%	67%	65%

以上の結果から、個数ベースではプラスチックが圧倒的多数を占め、重量ベースでも過半を大きく上回ることから、プラスチックごみが海洋環境における主要な汚染源であることを明らかとなった。これらの結果は、プラスチックごみの発生抑制、回収体制の強化、漁具管理の徹底、地域ごとの発生源対策など、総合的な施策の必要性を強く示している。

また、環境省の漂着ごみ組成調査ガイドライン（第4版）における漂着ごみの分類表（主にプラスチック）を図 2-2-1 に示す。なお、分類表はガイドライン第2版から第3版（2023年（令和5年）6月）への改訂の際に変更されており、第3版以前に実施された組成調査における漂着ごみの分類表は、下記のものとは異なることに留意が必要である。第3版から第4版へ改訂の際には分類表の変更はない。

図 2-2-1 に示された分類体系は、漂流ごみのうちプラスチック類に関して、品目ごとの識別と用途別の分類を体系的に整理したものであり、海洋ごみの組成分析や発生源推定、政策立案において極めて有用な枠組みを提供している。分類は「大分類」「必須項目」「オプション項目」「プラ分類」の4層構造から成り、現場での記録精度と分析の柔軟性を両立させる設計となっている。

「大分類」は、プラスチック類、釣具、農業資材、発泡スチロール類など、用途や形態に応じた主要カテゴリーが設定されており、これにより海洋流出の経路や発生源の特定が容易になる。たとえば、釣具や漁具に分類されるロープ、浮子、魚籠などは、漁業活動に起因する流出物として明確に識別されており、漁業由来の負荷を定量的に把握するための基盤となる。

「必須項目」は、現場での記録において最低限記載すべき品目を示しており、調査の標準化と比較可能性を担保する役割を果たす。一方、「オプション項目」は、識別精度や数量が高い場合に追加記録が可能な項目であり、調査の柔軟性と詳細化を支える。これにより、調査者の経験や現場状況に応じて記録の粒度を調整でき、実務上の運用性が高い。

「プラ分類」は、各品目を「容器包装」「製品」「海洋流出」「品目による」などの用途別に分類しており、政策的な対応の優先順位を整理する上で重要な指標となる。たとえば、容器包装に分類されるストロー、食品容器、ペットボトルなどは、生活系廃棄物としての性格が強く、陸域からの流出対策（例：分別回収、リデュース施策）が有効である。一方、

海洋流出に分類される漁具類や発泡スチロール破片は、海上での使用・管理に起因するため、漁業者への啓発や資材設計の改善、回収体制の強化が求められる。

「品目による」とされた分類は、現場での識別状況や数量に応じて柔軟に判断される項目であり、調査現場の実態に即した対応を可能にしている。これは、分類体系が一律の枠組みにとどまらず、現場の多様性を尊重した設計であることを示しており、実務的な有効性が高い。

以上の結果から、漂流プラスチックごみの発生源分析、用途別対策、政策的優先順位の整理において、実務と分析の両面で高い汎用性を持つ。今後は、この分類体系を活用した地域別・用途別の組成分析を進めることで、より精緻な発生源推定と対策の最適化が可能となる。また、調査者間での記録精度のばらつきを抑えるため、教育・研修による分類理解の促進や、デジタル記録ツールとの連携による自動分類支援などの技術的補完も検討されるべきである。

大分類	必須項目	オプション項目	プラスチック分類	
プラスチック類	ボトルのキャップ、ふた	ボトルのキャップ、ふた	容器包装	
	ボトル<1L	飲料用(ペットボトル)<1L	飲料用(ペットボトル)<1L	容器包装
		その他のプラスチック<1L	その他のプラスチック<1L	容器包装
		飲料用(ペットボトル)≥1L	飲料用(ペットボトル)≥1L	容器包装
		その他のプラスチック類≥1L	その他のプラスチック類≥1L	容器包装
		ストロー	ストロー	製品
	マドラー、フォーク、ナイフ、スプーン等	マドラー、フォーク、ナイフ、スプーン等	製品	
	食品容器(ファーストフード、コップ、ランチボックス、それに類するもの)	コップ、食器		製品
		食品容器		容器包装
	ポリ袋(不透明、透明)	食品の容器包装		容器包装
		レジ袋		容器包装
		その他プラスチック袋		容器包装
	ライター	ライター	製品	
	テープ(荷造りバンド、ビニールテープ)	テープ(荷造りバンド、ビニールテープ)	製品	
	シートや袋の破片	シートや袋の破片	その他	
	硬質プラスチック破片	硬質プラスチック破片	その他	
	ウレタン	ウレタン	その他	
	浮子(ブイ)(漁具)	浮子(ブイ)(漁具)	海域由来	
	ロープ、ひも(漁具)	ロープ、ひも(漁具)	海域由来	
	アナゴ筒(フタ、筒)(漁具)	アナゴ筒(フタ、筒)(漁具)	海域由来	
	カキ養殖用まめ管(長さ15cm)(漁具)	カキ養殖用まめ管(長さ15cm)(漁具)	海域由来	
	カキ養殖用パイプ(長さ10-20cm)(漁具)	カキ養殖用パイプ(長さ10-20cm)(漁具)	海域由来	
	漁網(漁具)	漁網(漁具)	海域由来	
	その他の漁具(漁具)	かご漁具		海域由来
		その他の漁具		海域由来
	釣具	釣りのルアー、浮き		海域由来
		釣り糸		海域由来
		その他の釣具		海域由来
	たばこ吸殻(フィルター)	たばこ吸殻(フィルター)	製品	
	生活雑貨(歯ブラシ等)	生活雑貨(歯ブラシ等)	製品	
	苗木ポット	苗木ポット	製品	
	その他	花火		製品
		玩具		製品
プラスチック梱包材			容器包装	
シリンジ、注射器			製品	
分類に無いもので多数見つかった場合には記載			品目による	
その他			品目による	
プラスチック類 (発泡スチロール)	コップ、食品容器	食品容器(発泡スチロール)	容器包装	
		コップ、食器(発泡スチロール)	製品	
	発泡スチロール製フロート、浮子(ブイ)	発泡スチロール製フロート、浮子(ブイ)	海域由来	
	発泡スチロールの破片	発泡スチロールの破片	その他	
	発泡スチロール製包装材	発泡スチロール製包装材	容器包装	
	その他	分類に無いもので多数見つかった場合には記載	品目による	
	その他	品目による		

図 2-2-1 漂流ごみのプラスチックの分類項目及び各項目のプラスチック分類

上記漂着ごみ組成調査ガイドラインにおける漂着ごみの分類表に基づき分類された、漂着ごみ全体における分類別プラスチックごみ回収量（個数ベース・重量ベース）を以下に示す。なお、前述の通り分類表は、2023年6月にガイドライン第3版が改訂された際に旧版から変更になっている。環境省の海洋ごみの実態把握及び効率的な回収に関する総合検討業務報告書によると、令和3年度に実施された調査結果は、旧版の分類表を用いて分析されているが、オプション項目ごとの分類は最新の分類表と変更がない旨を確認した。令和4年度および令和5年度に実施された調査結果は、最新の分類表に基づき分析されている。この結果により、個数ベースでは、「海域由来」および「容器包装」のごみの流出が全体的に高い傾向にある。また、重量ベースでは、「海域由来」のごみの割合が高い。

個数ベースで見た漂着プラスチックごみの組成は、令和3年度から令和5年度にかけて大きな構造変化は見られないものの、発生源の特徴や年度ごとの環境条件を反映した微妙な変動が確認できる（表 2-2-3、図 2-2-2）。最も顕著なのは、海域由来のプラスチックが常に最大割合を占めている点であり、令和5年度は47%、令和4年度は48%、令和3年度は38%となっている。特に令和4・5年度では海域由来がほぼ半数を占めており、漁具類や発泡スチロール片など、海上活動に起因するごみが依然として主要な構成要素であることを示している。令和3年度のみ割合が低いのは、台風・豪雨などの影響で陸域由来の容器包装類が増加した可能性が考えられる。

次に、容器包装類は3年間を通じて30～36%前後で推移しており、安定的に高い割合を占めている。これは、ペットボトル、食品包装袋、ストローなど、生活系廃棄物が海岸に流出しやすい構造が継続していることを示す。特に令和3年度は36%と最も高く、陸域からの流出が強く影響した年であったと推察される。一方、令和5年度は32%とやや低下しているが、依然として海域由来に次ぐ主要カテゴリーであり、生活系ごみの流出抑制が依然として重要な課題であることに変わりはない。製品類（歯ブラシ、雑貨、日用品など）は7～10%で推移しており、年度によってやや変動がある。令和3年度に10%と高かったのは、豪雨・洪水などで家庭用品が流出した可能性がある。令和5年度には7%に低下しており、これは回収活動の重点化や、地域での分別・回収意識の向上が影響している可能性がある。「上記以外のプラスチック」は年度によって3～7%と変動が大きく、特に令和4年度は3%と低い。これは、分類が明確な品目が多かったこと、あるいは破片化したプラスチックの割合が相対的に少なかったことを示唆する。一方、令和5年度は7%に増加しており、破片化したプラスチックの流出が増えた可能性がある。

最後に、プラスチック以外のごみは7～9%と低い割合にとどまっており、漂着ごみの大半がプラスチックで構成されている現状が改めて確認できた。個数ベースでは軽量で破片化しやすいプラスチックが圧倒的多数を占めるため、プラスチック対策が漂着ごみ対策の中心であることを明らかとなった。

漂着ごみの個数ベースの組成は、海域由来（漁具等）と陸域由来（容器包装類）が二大要因であり、両者が全体の約8割を占める構造が安定して続いている。このことは、海上

活動と生活系廃棄物の双方に対して対策を講じる必要があることを示しており、特に漁具管理の徹底、容器包装の削減・回収強化、地域ごとの発生源対策が重要である。

表 2-2-3 漂着ごみ全体における分類別プラスチックごみ回収量(個数ベース)

調査年度 分類	R5		R4		R3	
	個数	割合	個数	割合	個数	割合
海域由来	41,251	47%	57,140	48%	39,952	38%
容器包装	27,771	32%	39,450	33%	37,824	36%
製品	6,553	7%	9,994	8%	10,771	10%
上記以外のプラスチック	5,762	7%	3,948	3%	7,696	7%

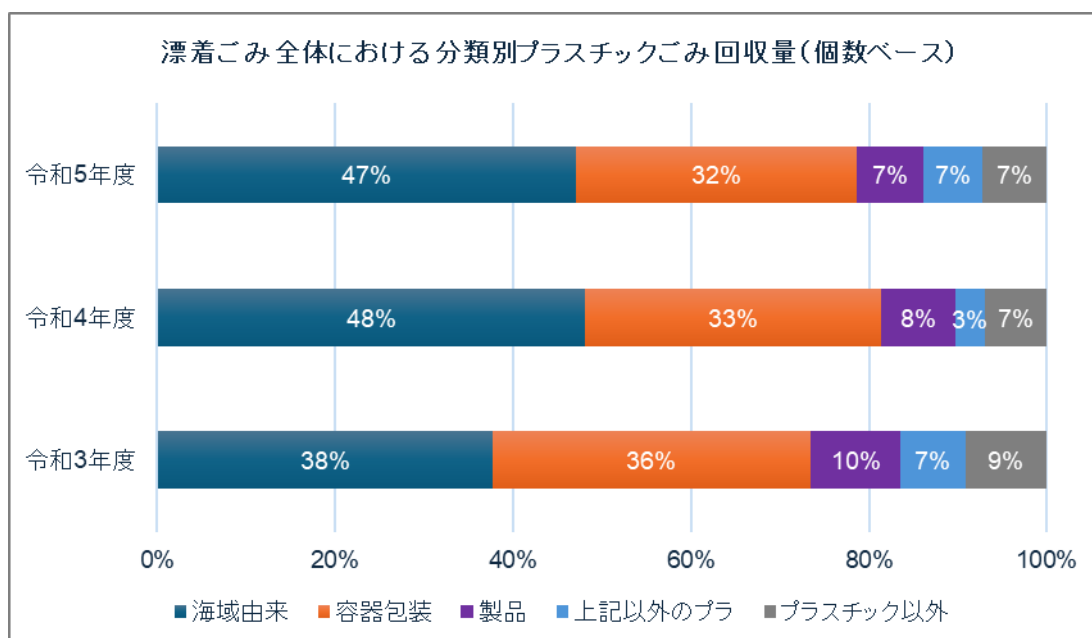


図 2-2-2 漂着ごみ全体における分類別プラスチックごみ回収量(個数ベース)

重量ベースで見た漂着ごみの組成は、個数ベースとは大きく異なる特徴を示しており、特に「海域由来プラスチック」と「プラスチック以外の重量物」の影響が強く現れている(表 2-2-4、図 2-2-3)。令和3年度から令和5年度にかけてのデータを見ると、海域由来のプラスチックは29%から37%、44%へと増加しており、重量ベースでも主要な構成要素となっている。これは、漁具類(ロープ、ブイ、魚籠など)や大型の発泡スチロール塊が重量を持つためであり、海上活動に起因する漂着物が依然として環境負荷の中心であることを示している。

一方、容器包装類は個数ベースでは3割前後を占める主要カテゴリーであったが、重量

ベースでは9～14%にとどまり、相対的に小さな割合となっている。これは、ペットボトルや食品包装袋などが軽量であり、個数としては多くても重量としては小さいためである。したがって、重量ベースの分析は、生活系ごみよりも「大型の海域由来ごみ」が環境負荷の中心であることをより明確に示している。

製品類（歯ブラシ、雑貨、日用品など）は1～2%と非常に低い割合で推移しており、重量ベースでは環境負荷の主要因とは言い難い。ただし、個数ベースでは一定割合を占めるため、重量と個数の両面から評価することで、発生源対策の優先順位を適切に判断できる。「上記以外のプラスチック」は16～20%と比較的高い割合を占めており、破片化したプラスチックや用途不明の大型プラスチック片が重量ベースで無視できない存在であることを示している。特に令和5年度は18%と高く、破片化した漁具や大型プラスチック片の流出が増加した可能性がある。また、プラスチック以外のごみは29～35%と高い割合を占めており、重量ベースでは無視できない存在である。流木、金属片、ガラス類などが含まれ、台風や豪雨などの自然災害の影響を強く受ける。令和3年度に35%と最も高かったのは、自然災害による非プラスチック系漂着物の増加が影響した可能性が高い。

表 2-2-4 漂着ごみ全体における分類別プラスチックごみ回収量(重量ベース)

調査年度	R5		R4		R3	
	重量(kg)	割合	重量(kg)	割合	重量(kg)	割合
海域由来	3,430	44%	2,848	37%	2,358	29%
容器包装	732	9%	1,000	13%	1,141	14%
製品	47	1%	119	2%	108	1%
上記以外のプラスチック	1,405	18%	1,231	16%	1,573	20%

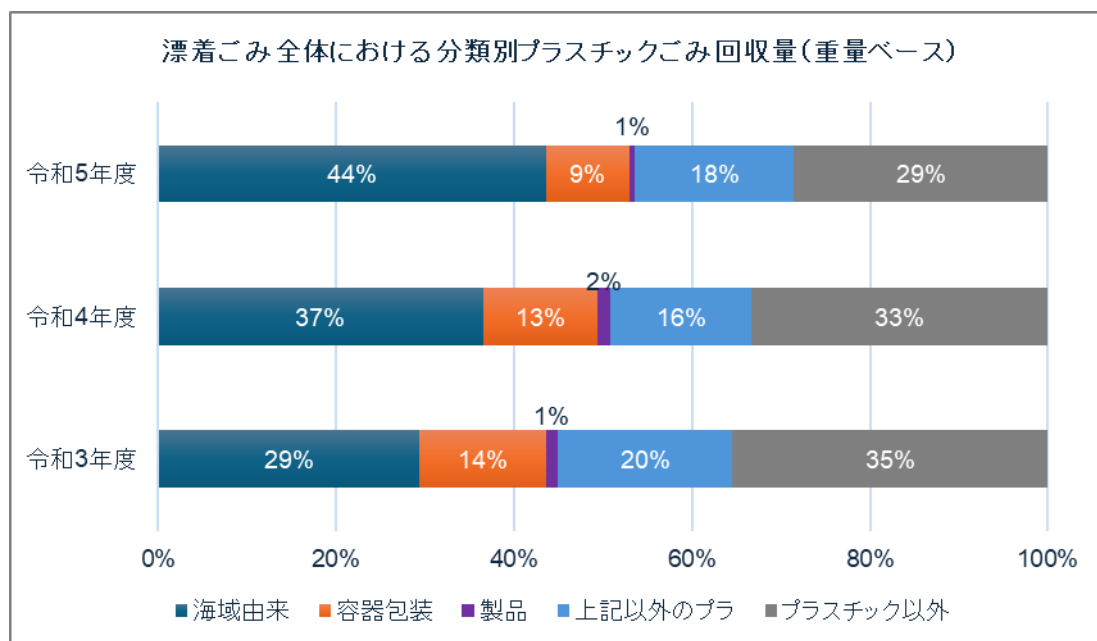


図 2-2-3 漂着ごみ全体における分類別プラスチックごみ回収量(重量ベース)

漂着ごみの組成を個数ベースと重量ベースの両面から分析すると、プラスチックごみの特徴や発生源構造が異なる形で浮かび上がり、双方を併用することの重要性が明確になる。個数ベースでは、軽量で破片化しやすいプラスチックが圧倒的多数を占め、海域由来と容器包装類の二つが主要な構成要素となっていた。特に、漁具片や発泡スチロール片などの海域由来ごみが4～5割を占め、生活系の容器包装類も3割前後で推移していたことから、海上活動と陸域からの流出がいずれも大きな影響を与えていることが示されていた。一方、重量ベースでは、個数ベースとは異なる構造が現れ、海域由来の大型プラスチックと非プラスチック重量物が全体の中心を占めていた。漁具類や大型の発泡スチロール塊などは重量が大きいいため、重量ベースでは海域由来の割合が3～4割台で推移し、個数ベースよりも相対的に高い重要性を持つ結果となっていた。また、流木や金属片などの非プラスチック重量物が3割前後を占めており、自然災害や海象条件の影響が強く反映される点も特徴的であった。

このように、個数ベースは「環境中に存在するプラスチック片の多さ」を、重量ベースは「環境負荷としての質量の大きさ」をそれぞれ示しており、両者は補完的な関係にある。個数ベースでは生活系ごみの影響が強く現れるのに対し、重量ベースでは漁具類など海域由来の大型ごみが主要因となるため、発生源対策の優先順位も異なる視点から整理できる。すなわち、生活系ごみの流出抑制とともに、漁具管理の徹底や海上での資材使用の改善が不可欠であることが、両データの比較から明確に示される。

以上の結果から、漂着ごみ対策を効果的に進めるためには、個数と重量の双方の指標を用いて発生源を多角的に把握し、海域由来・陸域由来の双方に対してバランスの取れた施

策を講じることが重要である。個数ベースが示す「圧倒的多数のプラスチック片」と、重量ベースが示す「大型ごみの環境負荷」の両面を踏まえることで、より実効性の高い対策立案が可能となる。

続いて、令和3年度から令和5年度にかけての全国調査で回収されたプラスチックをガイドラインに沿って品目別にランキングしたプラスチック漂着ごみ組成（個数別（・重量別）を示す。

令和3年度から令和5年度にかけての全国調査に基づくプラスチック漂着ごみの上位20品目を見ると、漁具類と容器包装類がランキングの大半を占める構造が一貫して続いていることが明確に示されている。特に、1位・2位を占める「カキ養殖用まめ管」および「カキ養殖用パイプ」は、いずれの年度でも突出して多く、全国的に見てもカキ養殖由来の細片化プラスチックが主要な漂着ごみとなっていることがわかる。これらは軽量で破断しやすく、海中での摩耗や波浪の影響を受けて細片化しやすい特性を持つため、個数ベースでは極めて高い割合を占めやすい。3位の「プラ製ロープ・ひも」も漁具由来であり、漁業活動に伴う繊維状プラスチックの流出が全国的に広く発生していることを示している。これら上位3品目がいずれも海域由来であることは、個数ベースでは漁具類が最も支配的な発生源であることを強く示唆している。一方、4位以下には「ボトルキャップ」「飲料用ペットボトル」「食品包装容器」など、生活系の容器包装類が継続的にランクインしており、陸域からの流出が依然として大きな割合を占めていることがわかる。これらは河川を通じて海岸に到達する典型的な生活系ごみであり、地域の分別・回収体制やポイ捨て行動の影響を強く受ける。また、「発泡スチロール食品容器」「プラ食器類」「梱包資材」など、軽量で破片化しやすい製品類も上位に含まれており、個数ベースでは破片化プラスチックが多く計上される傾向が確認できる。漁具類と容器包装類の間に位置するこれらの品目は、生活系と海域系の双方の影響を受ける中間的な存在であり、発生源対策の複雑さを示している。さらに、ランキング後半には「ブイ」「アナゴ筒」「漁網」など、より大型の漁具類が含まれており、これらが破片化して細片として計上されている可能性も高い。漁具類は重量ベースではさらに大きな割合を占めるが、個数ベースでも細片化した状態で大量に漂着していることが確認できる。

表 2-2-5 令和3年度から令和5年度プラスチック漂着ごみ品目上位 20 種(全国・個数ベース)

分類	品目	個数		
		R5	R4	R3
海域由来	カキ養殖用まめ管(長さ 1.5 cm程度)(漁具)	15,594	19,639	11,198
海域由来	カキ養殖用パイプ(長さ 10-20 cm程度)(漁具)	11,084	8,201	8,953
海域由来	プラ製ロープ・ひも(漁具)	10,129	7,155	9,239
容器包装	ボトルのキャップ、ふた	9,698	15,858	14,005
容器包装	飲料用(ペットボトル)<1L	6,430	9,311	8,160
容器包装	食品の容器包装	3,577	3,207	2,797
その他	その他(プラスチック製品で上記分類になく数が少ないもの)	3,017	1,217	1,658
製品	発泡スチロール食品容器	2,263	N/D	N/D
容器包装	食品容器	1,629	2,398	3,021
製品	プラ食器類_ストロー	1,611	2,467	1,896
容器包装	飲料用(ペットボトル)≥1L	1,416	2,590	2,008
製品	梱包資材_テープ(荷造りバンド、ビニールテープ)	1,387	1,821	2,128
容器包装	その他のプラボトル<1L	1,206	2,383	2,314
海域由来	ブイ(漁具)	1,170	2,891	3,441
その他	ウレタン	1,093	1,452	2,441
海域由来	その他の漁具	1,083	2,910	1,473
製品	生活雑貨(歯ブラシ等)	1,025	2,340	2,336
その他	プラスチック製品で上記分類になく数が多いもの	926	N/D	N/D
製品	ライター	732	985	1,176
容器包装	その他プラスチック袋	618	1,213	1,535
海域由来	漁網(漁具)	N/D	13,654	N/D
海域由来	アナゴ筒(フタ、筒)(漁具)	N/D	903	3,568
製品	たばこ吸殻(フィルター)	N/D	N/D	871

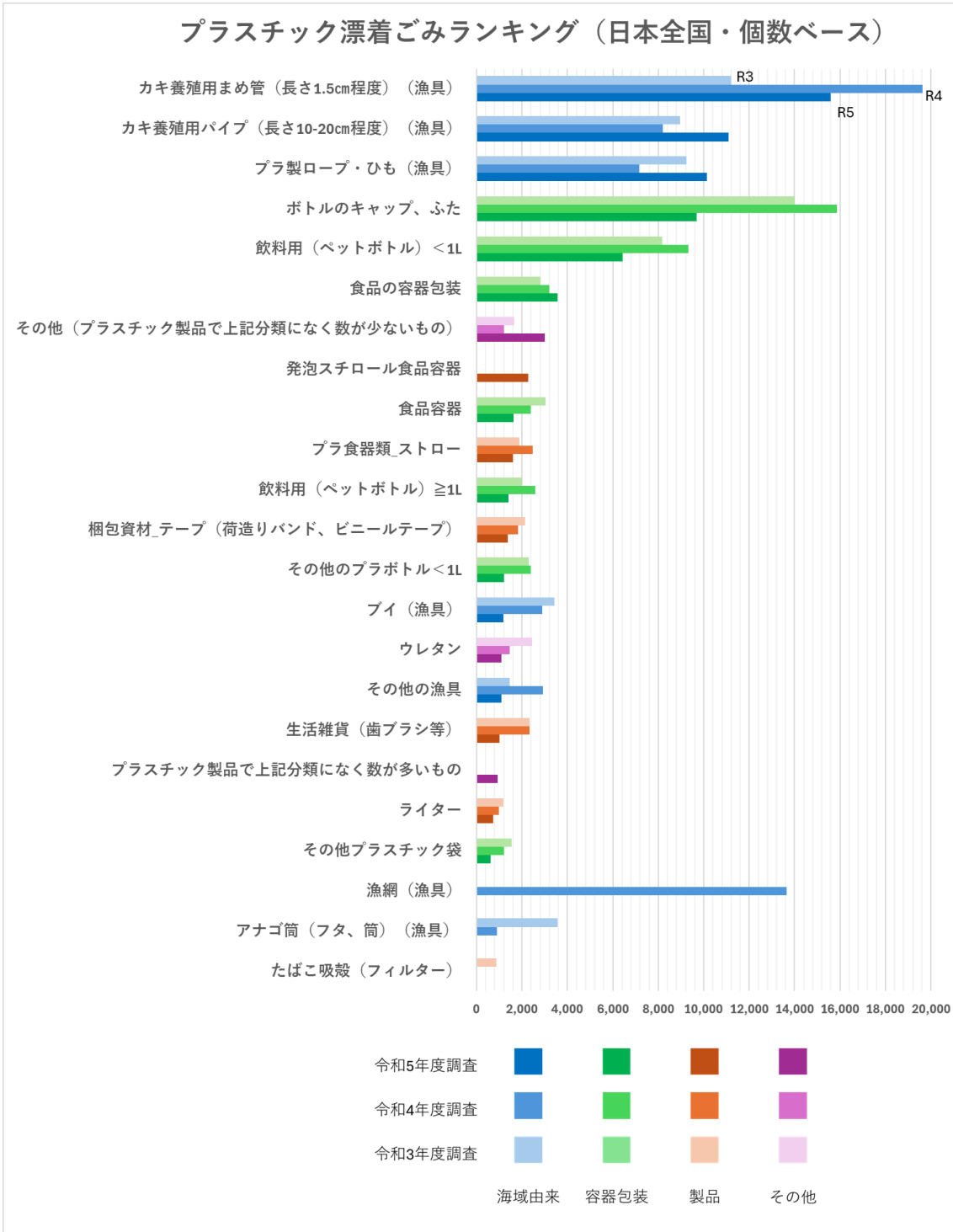


図 2-2-4 令和3年度から令和5年度プラスチック漂着ごみ品目上位 20 種(全国・個数ベース)

重量ベースで見たプラスチック漂着ごみの上位 20 品目は、個数ベースとは大きく異なる構造を示しており、特に海域由来の大型プラスチックが圧倒的に支配的であることが明確に表れている。ランキング上位には「プラ製ロープ・ひも」「漁網」「発泡スチロール製フロート・ブイ」「ブイ」など、漁具類が集中しており、いずれの年度でも重量ベースの主要構成要素となっている。これらは大型で水分を含みやすく、重量が大きいため、個数ベースでは目立たない場合でも重量ベースでは環境負荷の中心として浮かび上がる。特に 1 位の「プラ製ロープ・ひも」は、全国的に大量に回収されており、漁業活動に伴う繊維状プラスチックの流出が継続的に発生していることを示している。3位の「漁網」や5位の「ブイ」も同様に、海上での使用・破損・紛失が重量ベースの漂着ごみを大きく押し上げる要因となっている。これらの品目が上位を占める構造は、重量ベースでは漁具類が最も大きな環境負荷を与えていることを示す重要な指標である。一方、2位の「硬質プラスチック破片」や12位の「発泡スチロール破片」など、破片化したプラスチックも重量ベースで一定の割合を占めており、海域・陸域双方から流出した大型プラスチックが破断・摩耗を経て漂着している実態がうかがえる。破片化したプラスチックは個数ベースでも多く計上されるが、重量ベースで上位に入るということは、比較的大型の破片が多いことを意味しており、海洋中での破碎過程や漂流距離の長さを反映している可能性がある。

容器包装類は、個数ベースでは上位に多く含まれるものの、重量ベースでは順位が大きく下がる。例えば、ペットボトルは 6 位・8 位・10 位と複数ランクインしているが、漁具類と比較すると重量は小さく、重量ベースでは相対的な影響は限定的である。それでも複数の順位に登場していることは、生活系ごみの流出が依然として全国的に広く発生していることを示している。また、ランキング後半には「アナゴ筒」「その他の漁具」「梱包資材」「食品容器」など、多様な用途のプラスチックが含まれており、海域・陸域双方の発生源が複合的に影響していることがわかる。特に「アナゴ筒」などの漁具類が重量ベースで上位に入る点は、特定漁業の地域性や資材管理の課題を反映している。

表 2-2-6 令和3年度から5年度プラスチック漂着ごみ品目上位 20 種(全国・重量ベース)

分類	品目	重量(kg)		
		R5	R4	R3
海域由来	プラ製ロープ・ひも(漁具)	1,404	840	1,038
その他	硬質プラスチック破片	868	783	1,106
海域由来	漁網(漁具)	741	918	234
海域由来	発泡スチロール製フロート・ブイ(漁具)	636	N/D	N/D
海域由来	ブイ(漁具)	427	584	530
容器包装	飲料用(ペットボトル)<1L	338	423	403
その他	その他(プラスチック製品で上記分類になく数が少ないもの)	272	147	56
容器包装	その他のプラボトル類≥1L	152	100	185
その他	プラスチックその他(必須項目)	110	26	N/D
容器包装	飲料用(ペットボトル)≥1L	108	236	207
海域由来	カキ養殖用パイプ(長さ 10-20 cm程度)(漁具)	108	102	75
その他	発泡スチロールの破片	60	N/D	N/D
容器包装	その他のプラボトル<1L	56	109	209
その他	プラスチック製品で上記分類になく数が多いもの	43	53	108
海域由来	アナゴ筒(フタ、筒)(漁具)	39	50	83
海域由来	その他の漁具	35	52	40
容器包装	ボトルのキャップ、ふた	34	59	56
その他	シートや袋の破片	27	58	45
その他	ウレタン	20	26	38
製品	生活雑貨(歯ブラシ等)	13	33	51
容器包装	その他プラスチック袋	N/D	26	16
製品	梱包資材_テープ(荷造りバンド、ビニールテープ)	N/D	21	17
容器包装	食品容器	N/D	N/D	31

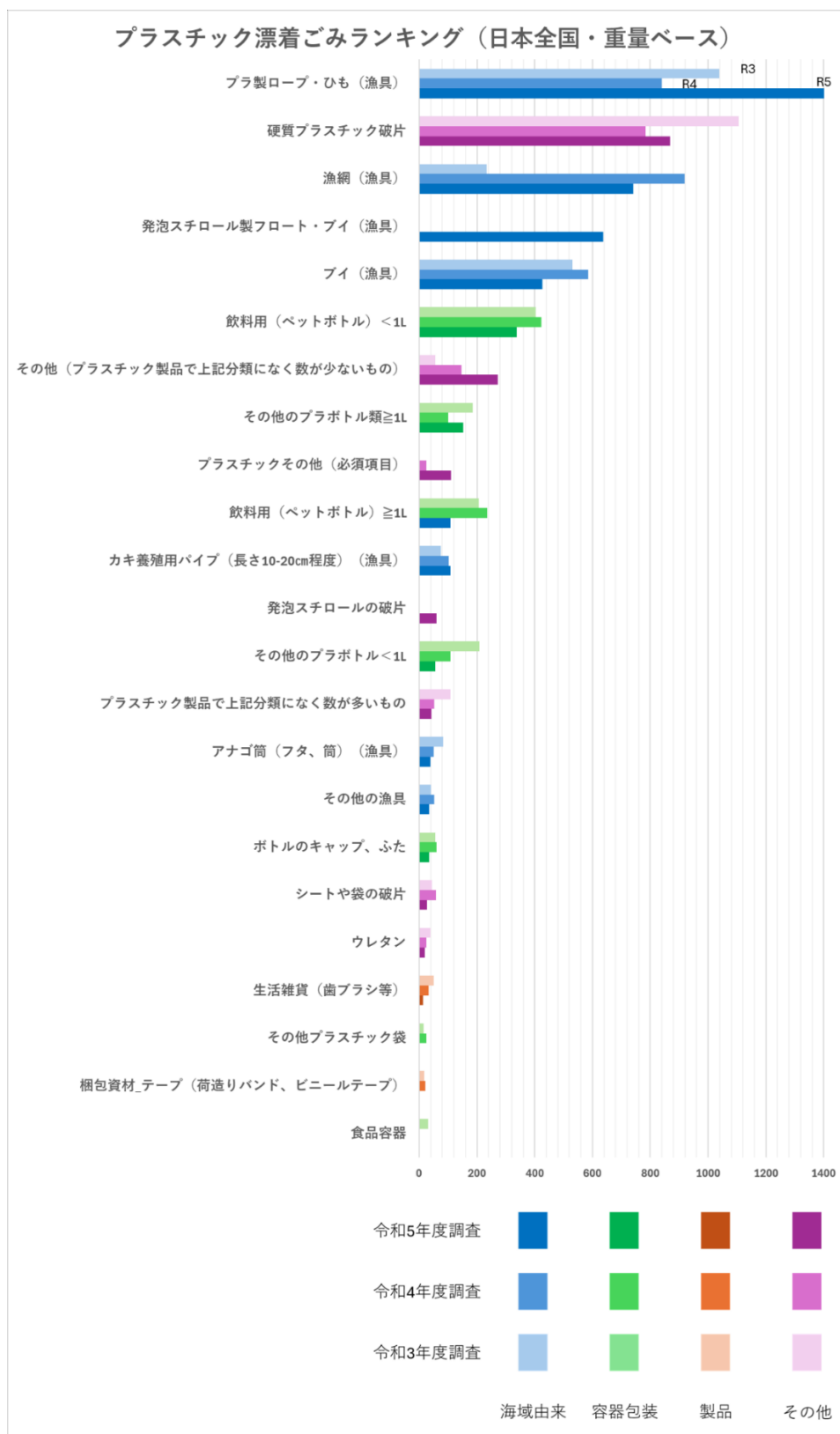


図 2-2-5 令和3年度から5年度プラスチック漂着ごみ品目上位20種（全国・重量ベース）

全国の漂着ごみ調査におけるプラスチック品目上位 20 種を、個数ベースと重量ベースの両面から比較すると、同じ「プラスチックごみ」であっても、環境中での存在形態や発生源の影響が大きく異なることが明確に示される。

まず、個数ベースでは軽量で破片化しやすいプラスチックが圧倒的多数を占める。特に、カキ養殖用のまめ管やパイプ、プラ製ロープ・ひもなど、海域由来の細片化した漁具類が上位を独占しており、全国的にカキ養殖や漁業活動に伴う細片プラスチックが大量に漂着している実態が浮かび上がる。また、ボトルキャップや食品包装容器などの容器包装類も継続して上位に含まれ、陸域からの生活系ごみの流出が依然として大きな割合を占めている。個数ベースのランキングは、「環境中にどれだけ多くのプラスチック片が存在しているか」を示す指標として機能している。一方、重量ベースでは大型で質量の大きい漁具類が支配的な構造となる。プラ製ロープ・ひも、漁網、発泡スチロール製フロート・ブイ、ブイなど、海域由来の漁具類が上位を占め、重量ベースの環境負荷の中心が海上活動にあることが明確に示される。硬質プラスチック破片や大型の発泡スチロール破片も上位に含まれ、海洋中で破断・摩耗した大型プラスチックが重量ベースの漂着ごみに大きく寄与していることがわかる。容器包装類は複数ランクインしているものの、重量としては漁具類に比べて小さく、個数ベースほどの存在感は示さない。このように、個数ベースは「細片化したプラスチックの多さ」を、重量ベースは「大型プラスチックの環境負荷」をそれぞれ反映しており、両者は補完的な関係にある。個数ベースでは生活系ごみと細片化した漁具類が主要因となるのに対し、重量ベースでは漁具類が圧倒的な割合を占めるため、発生源対策の優先順位も異なる視点から整理できる。

以上の結果から、全国の漂着プラスチックごみは、海域由来（漁具類）と陸域由来（容器包装類）の二つが主要な発生源であり、両者が形態の異なる環境負荷をもたらしていることが明確である。特に重量ベースでは漁具類の割合が大きく、海中で使用される漁具の破損・流出が環境負荷の一因となっている。養殖プレートもこの漁具類に含まれ、使用後の破片が海洋ごみとして残留することが問題視されている。しかし、現行の養殖プレートは PP・PE を主材料としており、海洋環境ではほとんど分解しない。このため、海中での使用に耐える物性を保持しつつ、流出時には海洋生分解性を発揮する新規材料の開発が不可欠である。本事業では、低コスト性と大量供給性を両立するため、デンプンなどの低価格バイオベースポリマーやゼラチン廃棄物を添加した材料設計を採用し、PP・PE と同等の物性を有しながら海洋生分解性を付与する養殖プレート材料の開発を進めた。

#### 2-2-1-2 環境中に流出しやすいプラスチックの材質

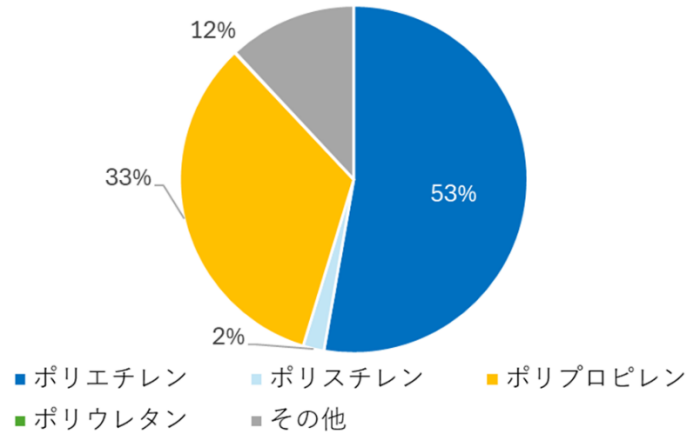
「漂流マイクロプラスチックのモニタリング手法調和ガイドライン」に基づき、全国において、沿岸海域で実施されたマイクロプラスチックの材質別分析調査から、環境中に流出しやすいプラスチックの材質についてまとめた。

環境省の請負事業「令和6年度沿岸海域におけるマイクロプラスチックを含む漂流ごみ実態把握調査業務」において、東京湾にて海水を採取し（令和6年9月から10月）、分析されたを図2-2-6と図2-2-7に示す[2-5]。

東京湾岸で採取したフェレー径0.1～5.0 mmのマイクロプラスチックを材質別に分類した結果、ポリエチレン（PE）とポリプロピレン（PP）が全体の大部分を占めることが明らかとなった。特にPEは50%を超える割合を示し、PPも30%以上を占めており、両者を合わせると総量の約80～90%に達する。これらの材質は包装材、袋類、食品容器、不織布製品など、日常生活で大量に使用される汎用プラスチックであることから、廃棄量の多さが環境中での高い検出割合に直結していると考えられる。また、PE・PPは比重が低く浮遊しやすいため、湾内の表層に滞留しやすい特性も検出割合を押し上げていると推察される。一方、ポリスチレン（PS）やポリウレタン（PU）はいずれも数%以下と低い割合にとどまった。PSは発泡スチロール由来の破片が想定されるが、破砕時に細片化しやすく、採取サイズ範囲（0.1～5.0 mm）に入らない微細片として存在している可能性がある。PUについても、フォーム材やコーティング材として使用されるものの、摩耗時に粉末状・繊維状になりやすく、粒子として検出されにくい点が低い割合の一因と考えられる。また、すべての側線を通じて、PEとPPが常に主要な構成材質であり続けていることが確認できる。材質構成の大枠は安定しており、東京湾岸におけるマイクロプラスチック汚染が、長期的にポリオレフィン系樹脂に強く依存していることを示している。このことは、発生源が特定の年に依存した突発的なものではなく、日常的な生活系廃棄物や都市活動に由来する継続的な負荷である可能性を示唆する。

「その他」に分類される材質は10%前後で推移しており、PET、PVC、ナイロンなど多様な樹脂が含まれると考えられる。これらは用途が特定されやすいため、詳細な材質分析を行うことで、漁具、衣類繊維、飲料ボトルなど、より具体的な発生源推定が可能になると考えられる。

マイクロプラスチックの個数（総量）／材質別



材質別の割合（個数密度）

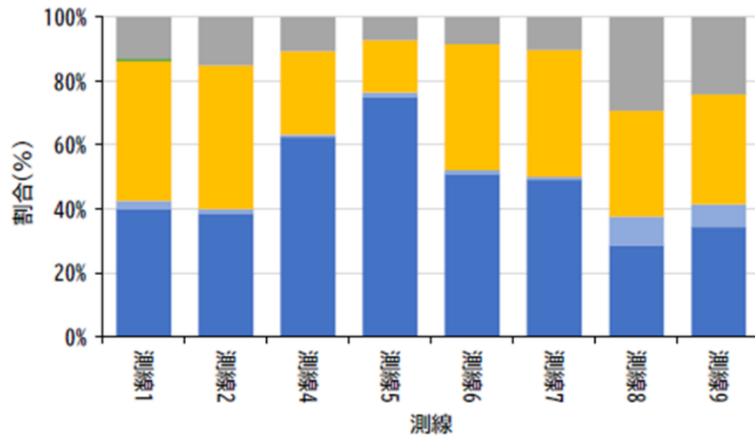


図 2-2-6 東京湾岸におけるマイクロプラスチックの個数総量(材質別)／  
【フェレー径の最大:0.1 mm≦d≦5.0 mm】[2-5]

さらに、環境省の請負事業「令和4年度沿岸海域におけるマイクロプラスチックを含む漂流ごみ実態把握調査業務」において、令和2～4年度にかけて北海道古宇郡泊村沖、石川県羽咋郡志賀町沖、愛知県田原市赤羽根町沖の3地域で季節（春季、夏季、秋季及び冬季）ごとに実施されたマイクロプラスチックの流出分析調査の結果を図2-2-7に示す[2-6]。

令和2～4年度にかけて実施された各海域の調査結果から、マイクロプラスチックの材質構成は、いずれの地点においてもポリエチレン（PE）およびポリプロピレン（PP）が主要な構成要素となっていることが明らかとなった。特にPEは多くの調査回で最大割合を占め、PPもそれに次ぐ高い割合を示しており、両者を合わせると個数密度の大部分を占める傾向が一貫して確認された。これらの材質は包装材、袋類、食品容器、不織布製品など、生活圏で大量に使用される汎用プラスチックであることから、日常的な廃棄物や都市活動に由来する継続的な流出が主要な発生源であると考えられる。

地点別に見ると、沿村沖・志賀町沖・赤羽根町沖のいずれにおいても、PE・PPを中心とする材質構成の大枠は共通しているものの、各地点で「その他」やポリスチレン（PS）、ポリウレタン（PU）の割合にばらつきが見られた。これは、各海域が受ける陸域負荷の違いや、周辺の産業構造、生活排水の流入特性、海流・風向などの環境条件の差異を反映している可能性がある。特にPSやPUは使用用途が限定的であるため、特定の地点で割合が高まる場合には、局所的な発生源の存在が示唆される。

年度別の変動に着目すると、令和2年度から令和4年度にかけて材質構成の大きな変化は見られず、PE・PPを中心とした構成が安定して継続している。このことは、マイクロプラスチックの流出が突発的なイベントに依存するものではなく、日常的かつ慢性的な負荷によって維持されていることを示している。また、年度ごとの微細な変動は、採取時期の気象条件や流況、漂流物の滞留状況など、短期的な環境要因の影響を受けている可能性がある。一方、「その他」に分類される材質は、地点や年度によって割合が変動しており、PET、PVC、ナイロンなど多様な樹脂が含まれると考えられる。これらは用途が特定されやすいため、より詳細な材質分析を行うことで、漁具、衣類繊維、飲料ボトルなど、具体的な発生源の推定が可能になると期待される。

令和2～4年度調査におけるマイクロプラスチックの材質別割合（個数密度）

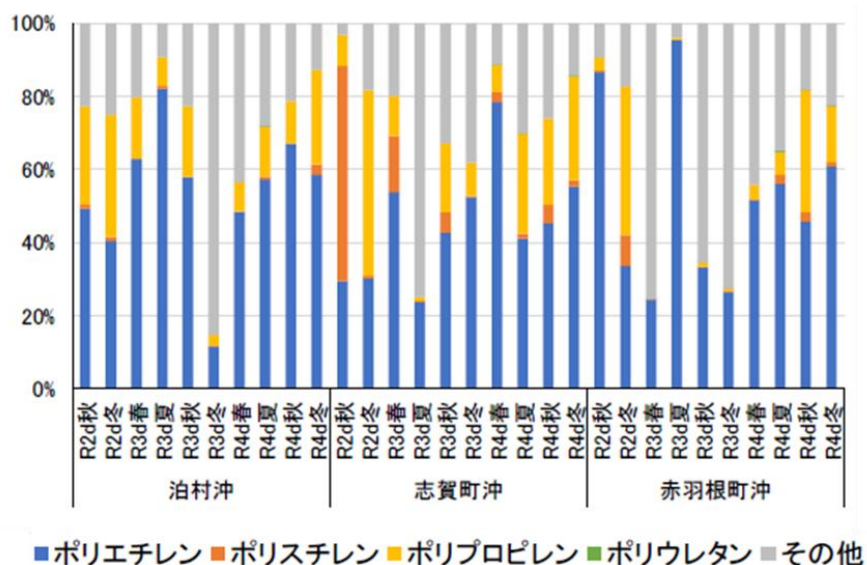


図 2-2-7 令和 2～4 年度調査におけるマイクロプラスチックの材質別割合（個数密度）[2-6]

以上の結果から、東京湾岸および令和2～4年度の各海域調査の結果を総合すると、マイクロプラスチックの材質構成は、地域や年度を問わずポリエチレン（PE）とポリプロピレン（PP）が圧倒的に優勢であることが明らかとなった。これらの材質は生活系・都市系の廃棄物に広く由来し、比重が低く浮遊しやすい特性を持つため、環境中で高い検出割合を

示す傾向が一貫して確認された。一方で、ポリスチレン (PS) やポリウレタン (PU)、および「その他」に分類される材質は、地点や年度によって割合にばらつきが見られた。これらの変動は、各海域が受ける陸域負荷の違い、周辺の産業構造、海流・風向などの局所的な環境条件を反映している可能性がある。また、「その他」には用途が特定されやすい材質が含まれるため、詳細分析により発生源の特定が進むことが期待される。両調査結果は、マイクロプラスチック汚染が突発的ではなく、日常のかつ慢性的な生活系負荷によって維持されていることを示している。

## 2-2-2 養殖資材におけるプラスチックの利用

海域に流出しているプラスチックのうち、漁具の占める割合は高く、個数ベースでは、①カキ養殖用パイプ (まめ管 1.5cm)、②カキ養殖用パイプ (10~20cm)、③ロープ・ひも、と1位から3位までを占めており、重量ベースでも、①ロープ・ひも、③漁網、④フロート・ブイ、⑪カキ養殖用パイプ、となっている (○の数字は流出量順位)。

このように漁具の中でも、特にカキの養殖で使用されるプラスチックの流出が目立っている。カキ養殖、及びその他の貝類等としてフジツボの養殖に用いられるプラスチック製の資材は以下のとおりである。

### 2-2-2-1 カキ養殖用資材

カキ養殖で使用されるプラスチック製品は表 2-2-7 にまとめる。カキ養殖において使用されるプラスチック製品には、カキパイプ (まめ管・長尺管)、クペル、バスケットなど複数の種類が存在するが、これらは用途・材質・管理方法の違いにより、環境中への流出リスクに明確な差が見られる。まず、カキパイプ (まめ管・長尺管) はポリエチレン (PE) 製であり、国内で最も一般的な垂下式養殖に広く使用されている (図 2-2-8~2-2-9) [2-7,8]。大量に使用される一方で、本来は繰り返し使用することが前提であるものの、海中での摩耗や波浪による破断、結束部の劣化などにより破損や脱落が発生した際には回収が困難であることから、環境流出リスクが高いと評価される。特に、長期間の使用に伴う表面摩耗や紫外線劣化は破断を誘発しやすく、マイクロプラスチック化の潜在的な寄与源となる可能性が高い。特に、海中での摩耗や波浪による破断が起こりやすく、マイクロプラスチック化の潜在的な寄与源となる可能性が高い。これに対し、クペルは PE 製であるものの、使用期間が短く、再度使用するために養殖者が確実に回収する運用が定着している点が特徴である (図 2-2-10) [2-9]。繰り返し使用を前提とした管理が行われているため、紛失や破損による流出が抑制されており、環境負荷は相対的に低い。また、採苗工程に特化した

用途であるため、使用量自体も限定的である。バスケットも、個別育成に用いられるため管理が徹底されている（図 2-2-11）。このため、流出リスクは低く、環境中に放出される可能性は限定的である。

以上の結果から、カキ養殖におけるプラスチック流出リスクは、材質・使用量・管理体制等の要素によって大きく左右される。特に、使用量が多く単価の低いカキパイプは、環境中への流出およびマイクロプラスチック化の主要な懸念材料であり、今後の対策としては、耐久性向上、代替素材の検討、回収体制の強化などが求められる。一方で、クペルやバスケットのように管理が徹底されている資材は、環境負荷が限定的であり、適切な管理を継続することで流出リスクを低く保つことが可能である。

表 2-2-7 カキ養殖で使用される主なプラスチック製品

プラスチック製品	材質・用途・特徴	想定される環境中への流出リスク
カキパイプ（まめ管）、 カキパイプ（長さ 10～ 20cm）	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ ポリエチレン(PE)製</li> <li>✓ 日本国内で最も一般的なカキ養殖法（垂下法）で使用</li> </ul>	高
クペル	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 一粒種牡蠣(シングルシード)と呼ばれる個別養殖法で稚貝の採苗に使用</li> <li>✓ PE 製、直径 143mm×高さ 52mm(内ディスク 17mm)×厚さ 1.2mm</li> <li>✓ 海中設置期間は 1 か月程度、回収して繰り返し使用</li> </ul>	低  ※確実に回収される、また一部の養殖漁業者は人工プール内で採苗している
バスケット	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ クペルで採取した稚貝をシングルシードとして個別に育成(殻付き出荷)</li> <li>✓ 高価=3,000～6,000 円/個</li> </ul>	低



図 2-2-8 カキパイプ(まめ管)。稚貝が着生するホタテガイ貝殻を一定間隔に設置するために使用[2-7]

### ③本垂下 (ほんすいか)

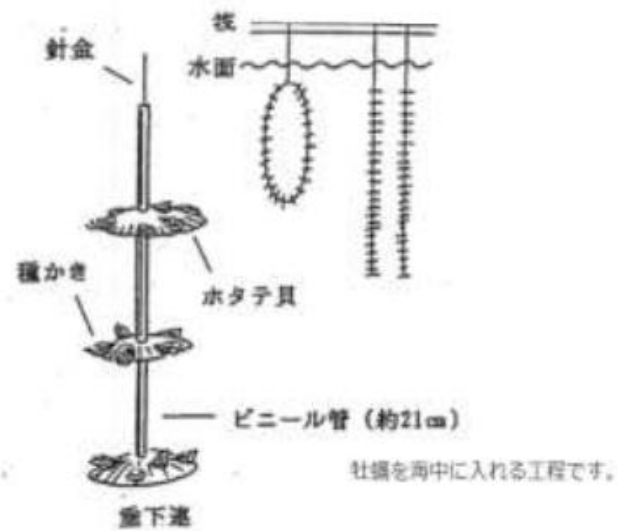


図 2-2-9 垂下式養殖法。カキパイプ(10~20cm)を使用して等間隔に垂下[2-8]



図 2-2-10 クペル(フランス式種牡蠣採苗盤)[2-9]



図 7 バスケット(オーストラリア製)

#### 2-2-2-2 フジツボ養殖用資材

食用フジツボであるミネフジツボという大型の種（直径 4cm 以上に成長）が青森県などで養殖されている。近年、養殖技術が進展し、プラスチックプレートを使用した方法も開発されている（図 2-2-12）。

塩化ビニル（PVC）製のフジツボ養殖プレートは、付着生物の生育状況や成長特性を評価するための標準化された基盤として広く利用されている[2-10]。PVCは耐久性が高く、海水中での化学的安定性にも優れるため、長期間の海中設置に耐え、付着生物の観察に適した素材である。また、表面が均質であることから、フジツボの着生密度や成長速度を比較する際に、基盤条件のばらつきを最小限に抑えることができる。一方で、PVC製プレートは海洋環境中におけるプラスチック使用の一例であり、適切な管理が行われない場合には、破損や紛失による環境流出のリスクが存在する。特に、長期設置や高波浪域での使用では、固定具の劣化やプレートの破断が生じる可能性があり、これがマイクロプラスチック発生源となる懸念がある。そのため、設置・回収の徹底、破損部材の適切な処理、耐久性向上を目的とした素材改良などが重要となる。PVCは他の汎用プラスチック（PE・PP）と比較して比重が高く沈降しやすいため、流出した場合には海底堆積物中に留まりやすい。この特性は、環境中での挙動や回収可能性に影響を与えるため、養殖現場における管理体制の強化が求められる。

PVC製フジツボ養殖プレートは、付着生物研究において有用性が高い一方で、適切な管理が不可欠である。研究目的での使用に際しては、耐久性・回収性・環境負荷のバランスを考慮した運用が重要であり、今後は代替素材の検討やリユース体制の強化など、環境負荷低減に向けた取り組みが期待される。



図 2-2-12 フジツボ養殖プレート(塩化ビニル製)[2-10]

## 2-2-3 代替対象製品に関する要求品質

貝類等の養殖資材について、特にカキ養殖とフジツボ養殖で用いられるプラスチックプレートについて、文献調査、及び水産技術センター、漁業関係者、当該技術開発者等へのヒアリング調査を実施し、それぞれ使用環境と必要とされる品質・機能をまとめた。

### 2-2-3-1 カキ養殖資材

カキ養殖資材として、シングルシード（個別別養殖法）で使用するフランス式採苗盤「クペル」について、使用環境と必要とされる品質・機能を整理した。本事業では、まずカキパイプ（まめ管・長尺管）、バスケット、クペルといった主要資材について、使用実態・材質・流出リスク・要求物性を比較調査し、MBBPの現時点の物性および成形技術で代替可能性が最も高い資材を検討した。その結果、カキパイプは長尺で高い靱性・耐摩耗性が求められ、現段階のMBBPでは代替に必要な強度・耐久性に達していないこと、バスケットは大型で複雑形状であり、初期段階の試作対象としては適さないことが明らかとなった。一方、クペルは比較的小型で形状が単純であり、要求される強度・耐水性がMBBPの物性範囲と整合することから、現実的に代替可能性が高い最初の対象製品として選定した。クペルは、カキ養殖における種苗採取（シングルシード方式）に特化した重要な資材であり、その機能性は養殖工程の効率性と生産性に直結する。特に、カキの稚貝を着生させるため、海中に2週間～1か月程度浸漬し、引き上げ後、着生した稚貝が剥離された後は、一般に室内等で保管される。なお、剥離された稚貝はバスケット等で個別別に養殖される。以上の理由から、本事業ではクペルを要求品質調査の対象として詳細に検討した。

表2-2-8に示された品質・機能からは、クペルが単なる容器ではなく、藻具（付着生物）の着生を促しつつ、回収・再利用を前提とした高度に設計された養殖ツールであることが読み取れる。まず、柔軟性については、適度な柔らかさを持つことで、着生した藻具を容易に剥離できる点が重要である。これは、採苗後の処理作業を効率化し、種苗の品質を損なわずに取り扱うために不可欠である。過度に硬い素材では剥離時に破損や作業負荷が増大し、逆に柔らかすぎると形状保持が困難になるため、適度な弾性を備えた素材選定が求められる。

次に、表面構造として微小突起が設けられている点は、藻具の着生を促進するための工夫である。表面の微細な凹凸は、幼生が付着しやすい環境を提供し、採苗効率を高める。これは、自然界の基盤表面を模倣したバイオミメティクス的な設計ともいえ、クペルの機能性を支える重要な要素である。さらに、形状として「おわん型」の緩やかなカーブを持つことは、水流の影響を受けながらも藻具が安定して着生しやすい環境を形成する点で合理的である。水流が適度に滞留し、幼生が流されにくい構造は、採苗効率の向上に寄与する。最後に、耐久性については、カタログ上の耐用年数が約5年とされているものの、日

本の養殖現場では使用期間が年1か月程度に限定されるため、実質的には約15年の長期使用が可能と見積もられる。この高い耐久性は、クペルが高価であるにもかかわらず養殖者に受け入れられている理由の一つであり、資材の回収率向上にも寄与している。耐久性が高い資材は紛失・破損が少なく、環境流出リスクの低減にもつながる。

表 2-2-8 クペルに求められる品質・機能

項目	品質・機能
柔軟性	✓ 着生した稚貝を剥離しやすい適度な柔らかさ
表面構造	✓ 稚貝が着生しやすい微小突起構造
形状	✓ 緩やかにカーブした「おわん型」。水流などによって稚貝が着生しやすいと考えられる
耐久性	✓ 一般に繰り返し使用するため、耐用年数はカタログ上、約5年となっている。ただし、日本では、使用期間が稚貝の採苗時期の約1か月程度に限定されるため、約15年は使用可能と見積もられる

以上の結果から、クペルに求められる品質・機能は、採苗効率の最大化・作業性の向上・長期的な再利用性・環境負荷の低減という複数の要件を高いレベルで両立させるものである。これらの特性は、シングルシード方式の普及と持続可能なカキ養殖の実現において重要な役割を果たしている。

### 2-2-3-2 フジツボ養殖資材

食用フジツボであるミネフジツボの養殖は、まだ技術が開発されたばかりであり、多くはホタテガイ貝殻に幼生を着生させ、3～5年間、海中で養殖する方法が取られている [2-11]。ホタテガイ貝殻の代わりにプラスチックプレートを用いる方法が、カキ養殖と同様に、個別剥離を目的の一つとして研究されている。ただし、養殖の盛んな青森県陸奥湾ではホタテガイ貝殻は処理に困るほど存在し、敢えてコストのかかるプラスチックプレートを使用する養殖漁業者がいないのが現状である。なお、フジツボ養殖資材の市場規模は限定的であり、全国的な普及が進んでいるとは言い難い。実際、現在モニタとして実証試験を行っているのは数件の養殖事業者にとどまっており、資材利用者全体の母数が小さいことが、ヒアリング調査から明らかとなった。そのため、既存資材の改良や新規材料の導入は、個別事業者の判断に依存しやすく、市場全体としての技術更新が進みにくい構造となっている。

使用環境について、カキ養殖で用いるクペルと異なり、フジツボ幼生が着生してから、出荷できる大きさ（直径 4cm 程度以上）に成長するまで、3～5 年間、海中に浸漬された状態となる。また、必要な品質・機能では、クペルと同様に、剥離しやすさのため柔軟性が必要であり、厚さは 1～2mm 程度が良い [2-12]。また、幼生の着生しやすさについて、色や材質による違いも報告されており、黒>赤>青>黄>白の順で、また貝殻よりも塩化ビニル板やゴム板が着生しやすいとされている。

このように、フジツボ養殖資材は市場規模が小さく、かつ海洋環境に直接曝される用途であるにもかかわらず、海洋生分解性を有する代替資材はほとんど存在していない。したがって、海中での使用に耐える物性を保持しつつ、流出時には海洋生分解性を発揮する新規材料の開発は、環境負荷低減の観点からも重要な課題である。

#### 2-2-4 代替養殖資材の市場

プラスチック代替資材の候補として、貝類養殖クペルの市場について、販売会社及び漁業関係者へのヒアリング等から、表 2-2-9 にまとめた。

シングルシード方式に用いられるクペルは、カキ養殖における高度な生産技術を支える重要な資材であり、その市場は輸入依存、高単価、限定的普及という特徴を持つ独特の構造を形成している。製造面ではフランス製が大半を占め、日本製は全体の割にも満たない。これは、シングルシード方式が欧州で先行して普及した歴史的背景に加え、日本国内の需要規模が小さく、専用金型の製造コストを回収しにくいという産業構造上の制約が影響している。コロナ禍で輸入が一時停止した際には国内で代替生産が行われたものの、その量は極めて限定的であり、国内製造基盤の脆弱さが改めて浮き彫りとなった。価格面では、クペルは 1 本あたり約 3,000 円と高価であり、一般的な養殖資材と比較しても導入コストが大きい。高価格の背景には、耐久性の高さや専用金型による製造コスト、輸入コスト、小規模市場ゆえのスケールメリット不足などがある。こうした価格設定は普及の障壁となる一方で、高価であるがゆえに養殖者が確実に回収し、繰り返し使用するという行動を促し、結果として環境流出リスクを低減するという副次的効果も生んでいる。

国内市場の規模を見ると、販売開始から約 10 年間の累計出荷量は 6,000～10,000 本程度と推定され、総重量にして 6～10 トン規模にとどまる。これは市場が依然として小規模であることを示すが、シングルシード方式を採用する養殖者にとっては不可欠な資材であり、一定の安定需要が存在する。普及状況をみると、クペルを使用する養殖者は 200～300 程度と推定され、国内のカキ養殖者全体の 1～2 割未満にとどまる。従来型の垂下式養殖が主流であること、初期投資の大きさ、技術習得の負担などが普及を妨げている。しかしながら、クペル市場には将来的な拡大の可能性が十分に存在する。殻付きカキの需要増加や外食産業の高付加価値志向、養殖現場の省力化ニーズの高まりなどは、シングルシード方式の導入を後押しする要因となる。また、海外市場との競争力を高めるためにも、品質の揃った

シングルシード生産は重要性を増していくと考えられる。さらに、国内メーカーが参入すれば価格低減や供給安定化が期待でき、普及拡大の大きな転機となり得る。

フジツボ養殖資材については、現時点ではプラスチックプレートの利用が実証試験段階にとどまっており、製品としての市場は存在していない。これは、フジツボの個体別出荷という生産方式が国内ではまだ一般化しておらず、産業としての需要が形成されていないためである。しかし、ミネフジツボのような高付加価値種の個体別出荷の需要が高まれば、カキのシングルシード方式と同様に、付着基盤としてのプラスチックプレートを利用する養殖業者が現れる可能性がある。特に、外食産業や観光地での高級食材としての需要が拡大すれば、フジツボの個体別育成技術が注目され、専用資材の市場が新たに形成される可能性がある。

表 2-2-9 貝類養殖クペルの市場

項目	基本情報	備考
製造	フランス、日本 フランスからの輸入品が大半。日本製も存在するが、出荷量はごくわずか(全体の 1/10 以下と思われる)	コロナ禍で輸入がストップした際に代替的にごく少量が日本で生産された
販売価格	3,000 円/1 本(47 枚入)	単価:約 21g/1 枚から、約 3 円/g
販売実績 (国内)	販売開始約 10 年間の累計出荷数として、約 6,000~10,000 本(約 28 万~47 万枚)	総出荷重量: 約 6,000~10,000kg
使用養殖漁業者	現在のシングルシード養殖漁業者数や全体の割合などは、統計がなく不明 なお、カキ養殖漁業者数(経営体数)は 1,846(2023 年)であり、うちシングルシード養殖者数は上記の累積出荷数と取材養殖漁業者の情報から、多く見積もっても 200~300 程度と推定	国内では従来型の垂下式が主流(剥き身出荷)。今後、フランスやオーストラリアのように「殻付き出荷」の需要が増えればシングルシード養殖者も増えると予想される

このように、貝類養殖クペルは現時点では小規模であるものの、今後の需要拡大の余地は大きく、カキ養殖の構造転換を促す可能性を秘めた成長市場である。一方、フジツボ養殖資材はまだ市場として成立していないが、将来的な需要の高まりによって新たな市場が創出される可能性がある。両者に共通するのは、付加価値の高い個体別出荷方式が普及するかどうかが市場形成の鍵を握るという点であり、今後の消費動向、外食産業の需要、地域ブランド化の取り組みなどが市場の方向性を大きく左右すると考えられる。

## 2-2-5 養殖資材における海洋生分解性材料導入の必要性和対象製品の選定理由

養殖業では、種苗付着・成長・収穫・維持管理のために多様な資材（養殖板、ロープ、ネット、浮き具、支柱等）が使用されており、耐久性・コスト・作業性・海水中での安定性などを踏まえて素材が選定されている。特にプラスチック製資材は軽量・耐腐食性・加工性に優れるため広く普及しているが、長期使用による摩耗・破損に伴う海洋流出が大きな課題となっている。環境省調査では、沿岸漂着ごみのうち漁具・養殖資材由来プラスチックが 10～20%を占め、ロープ片・ネット片・発泡スチロール破片が高頻度で確認されている。発泡スチロール浮き具は紫外線劣化により細片化しやすく、自治体調査では 1 基あたり年間数百～数千個の微細破片が発生する可能性も指摘されている。また、カキ・ホタテ・フジツボ養殖に用いられる付着板・ロープ類の使用量は推計 1,000～3,000 トン/年規模に達し、流出時の環境負荷は極めて大きい。さらに、これらの資材は素材特性上リサイクルが困難で、廃棄物管理の面でも課題が残る。

以上の背景から、海洋流出時の環境負荷を低減できる海洋生分解性素材の導入は、養殖業における喫緊の課題である。本事業では、特に流出リスクが高く市場規模も大きい養殖資材を対象に、MBBP による代替可能性を重点的に検討する。

### (1) 熱可塑ゼラチンの基盤技術と材料特性の体系化

ゼラチンは動物由来のコラーゲン分解物であり、生分解性・生体適合性に優れる一方、通常は水溶性ゲルとして利用される。しかし、適切な可塑剤および水分量を付与することで熱可塑性を示し、押出・射出成形が可能となる。本事業では、ゼラチンの組成、熱特性（DSC）、レオロジー特性、吸湿挙動、成形性に関するデータを体系的に蓄積し、海洋生分解性素材としての応用可能性を検証してきた。熱可塑ゼラチンの基本組成は、ゼラチン 70～85 wt%、可塑剤 15～30 wt%、最終水分 1～12 wt%を基準とし、これらの配合比は由来差に応じて最適化される。可塑剤としては水、グリセリン、ソルビトール等を比較し、成形性・機械特性・吸湿挙動の観点から最適条件を選定した。押出条件はサカナ由来で 50～80 °C、ウシ・ブタ由来で 70～120 °Cを基準とし、射出成形ではシリンダー温度 60～120 °C、金型温度 20～40 °Cを中心に、低背圧・中程度の射出速度が適していることを確認した。

### (2) 原料ゼラチンの由来差が材料設計に及ぼす影響

原料ゼラチンの由来差は、熱可塑化条件および成形性に顕著な影響を及ぼす。ウシ由来ゼラチンは高ブルーム値で熱安定性に優れ、ブタ由来ゼラチンは品質が安定しており一般的な加工に適する。一方、サカナ由来ゼラチンは融点が低く低温加工が可能であるが、熱劣化や変色が生じやすい。これらの特性差は、押出温度範囲、射出成形時の粘度挙動、最終製品の機械特性に直接影響するため、由来別に最適な可塑剤量、水分調整、温度条件を設定する必要がある。特にサカナ由来ゼラチンは低温での加工が可能であるため、PLA や

PBS などの熱履歴に敏感な生分解性プラスチックとのブレンドに適する可能性がある。一方で、熱安定性が低いため、滞留時間の短縮や低せん断条件の設定が不可欠である。このように、由来差を踏まえた材料設計は、MBBP の物性向上および成形安定性の確保に不可欠である。

### (3) 押出・射出成形プロセスの最適化と評価

押出ペレット化試験では、外観、水分量、メルトインデックス (MI) を評価し、可塑剤量および押出条件の最適化を行った。MI は成形性の指標として重要であり、由来差により大きく変動するため、材料設計の基礎データとして活用した。射出成形試験では、成形性、機械特性 (引張強度、曲げ強度、衝撃強度)、吸湿挙動を評価した。ゼラチンは吸湿性が高いため、成形後の寸法安定性や機械特性の変化を考慮する必要がある。これらの評価結果は、海洋環境下での使用を想定した材料設計において重要な指針となる。

### (4) 複合化技術の検討と課題整理

硬質系 MBBP の開発に向けて、セルロースやタルク等のフィラー添加による複合化も検討した。しかし、ゼラチンとの界面相溶性が低く、相分離が発生しやすいことが明らかとなった。相分離は機械特性の低下、外観不良、流動不安定性を引き起こすため、現段階ではフィラー添加を行わず、ゼラチン本来の特性を活かした材料設計を優先する方針とした。

### (5) 養殖資材に求められる機械的特性と MBBP 適用の技術的合理性

養殖資材は海水中で長期間使用されるため、一般的な包装材や日用品とは異なる特性が要求される。MBBP による代替を検討する上では、以下の特性を満たすことが必要である。

- 引張強度：ロープ・ネット用途では 20–40 MPa 程度
- 曲げ強度：付着板用途では PP 相当の 30–50 MPa 程度
- 衝撃強度：シャルピー衝撃値 3–6 kJ/m<sup>2</sup> 程度
- 耐水性：吸水による強度低下を 10~20%以内に抑制
- 耐候性：紫外線・塩分・微生物付着による劣化への耐性
- 成形性：射出・押出成形に適した熔融粘度と寸法安定性
- 海洋生分解性：ISO 18830、ISO 19679、ASTM D6691 等への適合

これらの要求特性は、熱可塑ゼラチンおよび PLA・PBS 等とのブレンドにより達成可能であり、材料設計の方向性が明確である点からも、養殖資材は MBBP の適用対象として極めて合理的である。

本事業では、従来使用されているプラスチック製フジツボ養殖プレートが、海水中での長期使用により腐食・劣化し、最終的には海洋ごみやマイクロプラスチック化するという課題に着目した (図 2-2-13)。実際の回収プレートでは、表面の摩耗や破断が確認されてお

り、環境負荷低減の観点から代替材料の検討が必要であると判断した。そこで、実用環境における形状・使用実績を踏まえ、代替対象としてフジツボ養殖プレートを選定した。本プレートは、フジツボの付着・成長に適した形状を有しており、既存の養殖現場で広く用いられていることから、材料置換による影響評価が行いやすいという利点がある（図 2-2-14）。また、本養殖プレートの鋳型は現在サンスリー株式会社（外注先）にて保有されており、新規に金型を製作することなく試作が可能な体制が整っている。このため、研究初期段階から実寸サイズでの試作品作製が可能となり、材料成形性や海洋環境下での使用を想定した評価を迅速に進めることができた。以上の理由から、本事業ではフジツボ養殖プレートを代替製品として選択し、試作検討を進めた。



図 2-2-13 フジツボ養殖により養殖プレートの劣化（「うみうし通信」No. 116(2022.9)から引用）

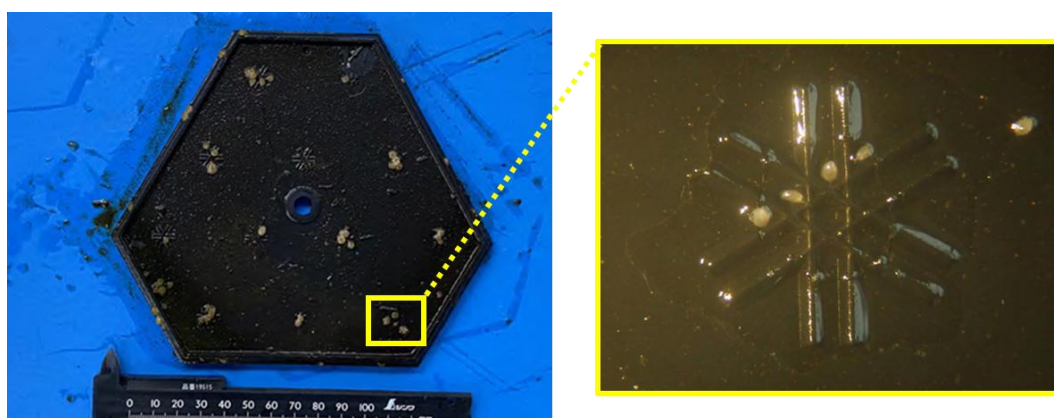


図 2-2-14 フジツボ養殖（「うみうし通信」No. 116(2022.9)から引用）

## 2-3 熱可塑ゼラチンの製造

ゼラチンは、一般的に顆粒状または粉末状で製造されている。また、吸湿性があるため、ゼラチンの吸水能力は乾燥および保管時の相対湿度に依存する。極端な pH と高温では、ゼラチンが変性されてゼラチンの三次元構造を破壊し、ランダムなコイルを形成してゼラチンの粘度や弾性率を低下し、特性が変化される。したがって、高いゼリー強度を有するゼラチンを得るには、加工条件を注意して制御する必要がある。ゼラチンのゲル形成特性により、写真、化粧品、製薬業界で幅広く応用され、乳化剤、発泡剤、コロイド安定剤、生分解性フィルム形成材料、マイクロカプセル化剤など、食品産業でも数多くの用途がある [2-13~16]。ゼラチンは、ブタ [2-17]、ウシ [2-18]、魚 [2-19]、家禽 [2-20]、昆虫 [2-21] など、さまざまなタイプのコラーゲン源から考えられる。世界中の規制について、アメリカ食品医薬品局（FDA）は、伝染性海綿状脳症（TSE）および牛海綿状脳症（BSE）に関連したゼラチンの安全性への懸念に関して、ゼラチンが指定された慣習的な業界プロセスを使用して製造された場合、禁止された牛の原料とはみなされないことを明らかにした [2-22]。さらに、欧州食品安全機関は、骨由来のゼラチンの BSE リスクは小さく、生後 12 ヶ月を超えたウシ動物の頭蓋骨と脊椎骨はゼラチンの製造に使用すべきではないことを明らかにした [2-23]。一方、対象となる食品に対するゼラチンフィルムの効果は、未処理のものと比較して食品の官能特性が優れていることを示している [2-24,25]。したがって、ゼラチンフィルムが酸化作用を最小限に抑え、目的の食品の品質を維持しながら製品の保存寿命を延長できることが証明された。

### 2-3-1 ゼラチンの加工

ゼラチンは優れたフィルム形成特性を有しているため、特にフィルム製造においてフィルム形成能力が広く研究されてきた。食品の水分損失や光や酸素への曝露から保護する優れた紫外線バリア性とガスバリア性により食品包装フィルムとして応用でき、低価格で製造することができる [2-26]。また、ゼラチンは物理ゲルを形成でき、熱可逆性ゲルの作製が研究されている。ゼラチンゲルの形成は、コラーゲンの三重らせん構造を破壊することにより、得られた一本鎖分子を再配置してタンパク質の構造が再形成することによって得られる [2-27]。ゼラチンベースのフィルムは、フィルムの粘弾性、粘度、加工温度に依存するレオロジー特性に大きく影響される。ゼラチンフィルムの調製中、ゼラチンはゼラチンと溶液の形成に応じて異なる転移を起こす可能性がある。 [2-28]。

ゼラチンフィルムの物理特性は、さまざまな加工条件や動物種に由来する、原材料の特性と使用される抽出方法に依存する。さらに、可塑剤 [2-29]、ポリマー [2-30,31]、架橋剤などのフィルム加工法への物質や成分の添加などにより、ゼラチンの特性はフィルム加工における物理パラメーターによっても影響される。可食性ゼラチンフィルムの成形は、キ

キャスト法または押出プロセスによって実行できる。一般的に、製膜プロセスにおいてはキャスト法が広く報告され、バイオポリマーを溶解して可塑剤または添加剤を加えることでフィルム形成溶液が得られる。その後、フィルム形成溶液をプレート上にキャストし、溶液を乾燥させる [2-32]。キャスト法を使用したフィルムの成形は他のプロセスと比較し、金型の簡素化、製造コストの削減、フィルム厚さの均一性の向上、優れた寸法安定性、ピンホール、ゲル、残留応力がないことなどの利点がある。また、平板押出成形に比べて、高度な平坦性と寸法安定性を備えた優れた光学特性も提供できる [2-33~34]。キャストされたフィルムは、製造中にフィルムが延伸されず、典型的な押出プロセスの潤滑剤が存在しないため、等方性配向（機械的および光学的）をもたらす。さらに、溶液キャスト処理は加熱することがないため、熱分解による影響がなく、フィルムの耐用年数が長くなる。

食品包装業界では、キャスト法より押出成形の方が、エネルギー消費量が少なく、処理時間が短く、効率的にフィルムを成形できるため、よく利用されている。この方法はポリマーを加熱により熔融して成形するため、溶媒を一切必要とせず、供給材料の滞留時間と混合度をより適切に制御できる幅広い加工条件を備えている。さらに、プロセス条件と使用するポリマーの種類に基づいて、最終製品の機械的特性を制御できる [2-33, 35]。

押出成形法は、幅広い形状を生成し、溶液キャスト法では提供できないさまざまな膜厚と幅を備えたさまざまな単層または多層フィルムを成形できる。熱熔融押出成形の主な欠点として、フィルム成型する際に、ポリマーが高い温度により熔融する必要があるため、一部のポリマーの熱劣化によりフィルム内に空隙が生じ、均一性、強度、外観に影響を与える可能性がある。さらに、押出成形の機器には多額の初期費用と維持費が必要である [2-33]。

融着性は、食品包装分野での応用をさらに小袋、パウチ、バッグなどの形状に拡張するためのフィルムの成型にとって最も重要な特性と指標の 1 つである。熱融着性は一般に、成形プロセス中の温度、圧力、加熱および冷却時間によって影響される [2-36,37]。さらに、ポリマーブレンドの融着性は、材料の界面親和性や相溶性などの表面化学にも依存する。フィルムの熱接着・熔融界面親和性はその開始温度付近で発生し、通常は示差走査熱量測定（DSC）を使用して測定される。ゼラチンフィルムを熱融着する際に、2枚の原料シートは2本の熱い金属棒の間に十分な時間押し付けられ、高温でポリマーが熔融してからすぐに冷却することにより成形できる [2-37]。このプロセスは、個々の層間の分子相互作用が界面を破壊するのに十分な場合に達成され、新しい均質な層が形成され、熔融したフィルム間の界面相互作用が促進される [2-37,38]。多くの研究では、可塑剤、界面活性剤、天然抽出物、ナノ粒子を利用することにより、フィルムの水分含量と柔軟性が低下してフィルムの融点を低下させる。その結果、単独層のゼラチンフィルムと比較して、破壊に必要なエネルギーが低下し、必要な融着温度とホットタック開始温度が低くなる [2-36,39~41]。

ここ数十年で、ナノテクノロジーは食品包装業界にとって魅力的な技術として重要な

ってきて注目されている。ナノカプセル化、ナノコンポジット、ナノエマルジョン、食用ナノコーティングおよびナノコーティング材料を含むナノ用途は、最近、活性食品包装における従来のナノ粒子用途に代わる可能性があることが浮上している [2-42~43]。ナノカプセル化技術は、必須成分を閉じ込めるために一般的に使用される。ナノカプセルを成形する際に、油は加工中の水分散性、化学的安定性、生物学的利用能、生物活性を高め、フィルムの物理化学的特性の改善によく利用されている [2-31,44]。一方、ナノ材料はその防菌・抗菌性などの理由から、食品包装の特性を改善するためによく使用され、包装材料に欠かせない紫外線バリア効果、酸化防止効果を付与することが期待できる。ナノマテリアルは、内部組成が 1~100 nm の範囲の不溶性材料として定義され、機械的混合法（高速ミキサー、押出機）、電磁場、マイクロ波、超音波、エレクトロスピンニング、エレクトロスプレー法などのさまざまな技術によって適用できる。また、抗原性が低く、生分解性・生体適合性ポリマーを使用することで、生物医学および医薬品への応用が可能である。医薬品への応用例の 1 つとして、ナノベシクル（医薬品有効成分、脂質、可塑剤）をゼラチンハイドロゲルにカプセル化するナノベシクル技術を挙げられる。ゼラチンハイドロゲルは、医薬品有効成分、脂質、可塑剤などを急速なクリアランスから保護し、膜の完全性と機械的安定性を高めることができる。また、ハイドロゲルの物理的、機械的、生物学的特性は、ナノベシクルによるナノ機能化によって改善および調整され、多くの生物医学用途に使用されている放出制御複合ハイドロゲルドラッグデリバリーシステムを形成することができる [2-45,46]。しかしながら、現時点ではナノベシクル技術を用いたゼラチンフィルムパッケージングに関する研究はまだ行われていなかった。

ゼラチンフィルムは透明でガス（O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>）バリア性に優れたため、可食フィルムとしても利用されている。しかし、それらは化学合成フィルムと比較して水蒸気バリアが低く、機械的特性が不十分であることなどの問題点がある [2-47]。したがって、食品包装としてゼラチンのようなタンパク質ベースフィルムでは、コーティング機能を改善および改変するために、架橋剤、可塑剤、抗酸化特性および抗菌特性を有する添加剤などのさまざまな物質または薬剤の添加を含む多くの研究が行われている。

### 2-3-2 ゼラチン産業廃棄物

食品産業をはじめ多くの産業分野における廃棄物の多くが有効利用されることなく廃棄されている。国内の食品廃棄物量は 2,500 万トン（2019 年@環境省資料）に達し、焼却すると CO<sub>2</sub> が発生するだけでなく、CO<sub>2</sub> の約 300 倍の温室効果を有する N<sub>2</sub>O が発生する。さらに、埋め立てすると地球温暖化効果が極めて大きいメタンガスが発生することもある。資源を循環させてゼロカーボン社会を構築するために、産業廃棄物の有効活用が社会的に強く求められている。

中日本カプセル株式会社では、カプセル製造時に発生するゼラチン残渣を肥料に再利用

することに取り組んでいる [2-48]。ソフトカプセル製造時には、カプセルを打ち抜いた後の皮膜残渣（ゼラチンネット）が発生する。このゼラチンネットを焼却処分や埋め立て処理をすることではなく、ゼラチンの持つ特性を活かすことで、肥料、糊料として再資源化する。ゼラチンには窒素が一定量含まれることに着目して開発したもので、10%以上窒素を含む粉碎・乾燥品、同 7%以上の酵素分解品など 3 タイプを商品化し、2021 年秋から販売を開始した。窒素の原料となるアンモニアの世界的な不足を背景に当初から肥料メーカーの関心を呼んでいたが、2023 年 3 月、農林水産省が推進する「みどりの食料システム法に基づく基盤確立事業」に認定されたことで注目度を大きく高めた。化学肥料の使用低減への貢献も期待されている（図 2-3-2） [2-49]。現在、20 を超える肥料メーカーや農家などに出荷しており、出荷先は 2022 年初頭との比較で倍増した。肥料としての効果評価を進めているメーカーも複数存在し、出荷先は今後さらに増える見通しだという。再利用率も大きく高まり、令和 5 年ではすでに再利用率 69%が報告されている。2028 年 9 月まで 5 年間を実施期間とする農水省の基盤確立事業では、地元の農業高校や農家などと連携し、さまざまな農作物に対する肥料としての効果を検証する実証実験を進めたり、PR 活動を充実化して新規顧客の獲得を進めたりする。肥料の生産量を拡大することで、再利用率 100%の達成を目指している。



図 2-3-2 「ゼライクル」を通じて中日本カプセルが取り組む環境循環型ライフサイクルの概念図  
 (<https://wellness-news.co.jp/posts/ゼラチン残渣に価値を見いだす【SDGsと健康食品産業】中日本カプセルの「ゼライクル」に注目から引用>)

本事業ではゼラチン産業廃棄物を注目し、ソフトカプセル被膜廃材の有効活用を目指して生分解性プラスチックの開発に応用する。ソフトカプセル被膜廃材はカプセル製造時に多く発生し、廃棄物が 20~30%を占めている。ソフトカプセル業界で年間数百トンの被膜廃材が出ると予想され、これらの廃材は主成分のゼラチン以外の不純物が少ないため、再利用できる可能性が高く、プラスチック成分としての利用が想定される。生分解性プラスチックとソフトカプセル被膜廃材をブレンドすることが可能となれば、海洋生分解性が期待される高性能生分解性プラスチックが開発できる。さらに、廃棄物利用の新しい手法を提供するものであり、ゼロエミッションや資源循環への貢献が期待され、産業廃棄物の有効利用による生分解性プラスチックの製造により資源循環・脱炭素や海洋ごみ削減への貢献が期待される。

### 2-3-3 令和6年度までの成果

アピ株式会社から提供されたソフトカプセル製造工程のゼラチン配管残渣（図 2-3-1）を対象に、再資源化に向けた前処理および材料化の検討を行った。フィルム状に切り出したゼラチンを減圧乾燥（80℃・3h）とオープン乾燥（100℃・3h）で比較したところ、減圧乾燥は水分除去効率が高く（重量減少率 34.7%）、形状は膨張・気泡を伴うものの、後工程での成形に適した前処理条件であることが確認された。一方、オープン乾燥は形状安定性に優れたが、含水率低減効果は小さかった。減圧乾燥後のゼラチンを切断し、100℃で加熱プレス成形することで、透明で柔軟なフィルムが得られた（図 2-3-2）。添加剤を用いずとも均一な成形が可能であり、廃棄ゼラチンが熱可塑性材料として再利用できることを示した。

実用化を見据え、異なるロット（Lot.2312、Lot.2406）のゼラチン廃棄物を乾燥・粉碎し、PLA に 5 wt% 添加してブレンドフィルムを作製した。引張試験（表 2-3-1）では最大応力・破断伸びともにロット間差は小さく、廃棄ゼラチンを原料とした場合でも一定の材料特性が維持される可能性が示された。さらに、材料機能向上を目的としてフィラーの選定を行った。炭酸カルシウムは混練時に分離したが、タルクおよびセルロースは良好に分散し、熱可塑ゼラチン/PLA ブレンドへの有効な添加候補と判断された。また、PLA（疎水性）とゼラチン（親水性）の相溶性向上に向け、レシチン、PEG、マレイン酸変性 PLA などを候補として整理した。

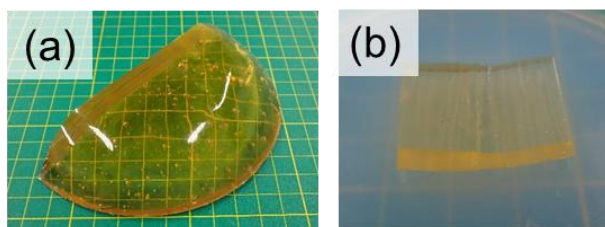


図 2-3-1 (a) アピ株式会社から提供したソフトカプセル製造時のゼラチン配管残渣、(b)配管残渣から切り出したフィルム状ゼラチン

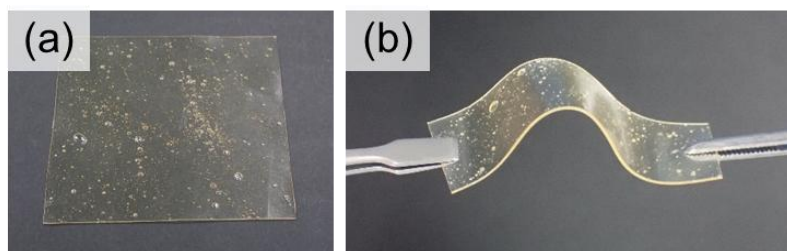


図 2-3-2 (a) 加熱プレスによりゼラチンフィルムの成型、(b) 作製したフィルムの柔軟性

#### 2-3-4 令和7年度実施内容

ゼラチンは動物由来のコラーゲン分解物であり、生分解性・生体適合性に優れる。通常は水溶性ゲルとして利用されるが、適切な可塑剤と水分量を付与することで熱可塑性を示すペレットとして押出・射出成形が可能である。令和6年度までの成果として、硬質系MBBPの開発に向けて、廃棄物ゼラチンにセルロースやタルクなどのフィラーを添加する複合化技術を検討してきた。しかし、これまでの試験において、ゼラチンとフィラーの界面相溶性が低く、相分離が発生しやすいことが明らかとなった。相分離は、成形体の機械特性の低下、外観不良、射出成形時の流動不安定性を引き起こす要因となる。このため、現段階ではフィラーを添加しない方向で検討を進め、ゼラチン単独系の熱可塑性および成形性の最適化を優先することとした。

令和7年度では、これらの知見を基盤として、由来の異なるゼラチンを用いた材料設計の可能性を検討した。まず原料ゼラチンの由来差が熱可塑性および成形性に与える影響を整理し、次に熱可塑性ゼラチンペレットの設計指針と押出・射出成形条件を示す。

##### 2-3-4-1 異なる由来ゼラチンの熱可塑性ゼラチンペレットの製造検討

一般的によく応用されているゼラチンは、下記のように異なるゼラチン源として分類されている。

###### [1] 哺乳類由来のゼラチン

最も豊富なゼラチン源は主に哺乳類であり、特にウ फिल्मブタに由来しており、豚の皮では約46%、牛の皮では29.4%、豚と牛の骨では23.1%を占めている。特に、牛皮と豚皮のゼラチンは、その入手性の高さから食品製造業界全体に普及している。一般に、牛皮のゼラチンはアルカリ処理で生成されるBタイプゼラチンとして知られ、豚皮のゼラチンは酸性処理で生成されるAタイプゼラチンとして知られ [2-50]、等電点はそれぞれpH 4.8~5.5とpH 7~9.4である [2-51]。また、豚皮ゼラチンと牛皮ゼラチンのブルーム値は、それぞれ130~308 g [2-52,53]と227~350 g [2-54,55]の範囲で報告されている。豚皮ゼラチンの粘度値(cP)は6.37~7.28 cP [2-52]であるのに対して、牛皮ゼラチンの粘度値は3.90 cPと報告された [2-55]。ブタゼラチンのアミノ酸組成は、ウシゼラチンと比較してグリシン、プロリン、アルギニンの含有量が高いことが判明されている [2-18]。

哺乳類のゼラチンは、優れたゼリー強度と粘度、または優れたフィルム形成特性により、他の由来のゼラチンと比較してより人気があり、活用されている。しかしながら、哺乳類ゼラチンは宗教制約により、イスラム教徒、ユダヤ教徒、またはヒンズー教徒では使用または摂取できないため、宗教的懸念やハラール問題に関して大きな欠点と問題を抱えていた [2-56]。さらに、前述したように、狂牛病や食口病(FMD)としても知られるウシ海綿状脳症(BSE)に由来する有害な病原体を蔓延させる潜在的なリスクがあるため、ブタお

よびウシゼラチンの代替ゼラチン源が優先されている [2-57]。このように、さまざまな供給源からの代替ゼラチンの利用は食品産業にとって非常に有利になり、加えてハラール認証食品に対する世界市場での関心が急速に高まっている [2-56]。魚、ダイオウイカの皮[2-33]、ウナギの皮 [2-19,59]、鶏の皮、足、骨 [2-20,60]、アヒルの足 [2-61]などの家禽類のゼラチン源は新しいゼラチン源として、哺乳類由来のゼラチンを代替するために増加した。

## [2] 海洋資源からのゼラチン

哺乳類由来のゼラチンの生産に問題を生じるため、魚や海洋生物からのゼラチン抽出に関する数多くの研究が継続的に行われており、多くの研究者から大きな関心を集めている。魚の皮から A タイプゼラチンを抽出するには、弱酸前処理が一般的に使用される [2-62]。一般的に、魚類ゼラチンのブルーム値は哺乳類ゼラチンのブルーム値（130～308 g）と比較して低くなり、約 0～270 g の範囲になる。Cho らの研究では、キハダマグロ皮ゼラチンのゼリー強度はブルーム値が 426 g で記録され、ウシゼラチン（295 g）およびブタゼラチン（216 g）よりも高い値となったと報告されている [2-63]。海洋ゼラチンは、さまざまな種類のコラーゲンに含まれるプロリンとヒドロキシプロリンの含有量の違いと、生息地の温度にも関連するため、広範囲のブルーム値を示す可能性がある。

さまざまな淡水魚種のゼラチン皮について報告されている粘度値の範囲は 1.87～3.63 cP [2-64]であり、粘度値の変動は、魚種、環境、抽出方法の違いによる可能性がある。一般に、魚類のゼラチンは、哺乳類のゼラチンと比較してイミノ酸（プロリンおよびヒドロキシプロリン）の濃度が低くなる。Ninan らの研究では、メバチマグロやティラピアなどの温水魚のゼラチンは、タラ、ホワイティング、オヒョウなどの冷水魚のゼラチンと比較して、イミノ酸含有量が高いことが明らかになった [2-17]。また、Muyonga らの研究では、暖水魚と冷水魚のプロリンとヒドロキシプロリンの含有量がそれぞれ約 22～25 % と 17 % であることが報告された [2-65]。Sila らによって行われた研究では、ヨーロッパウナギ（*Anguilla anguilla*）の皮から調製したゼラチンのアミノ酸プロファイルでは、グリシン残基とイミノ酸残基が高い割合で含まれていることを報告した [2-59]。全体として、魚類ゼラチンは、透明でほぼ無色、水溶性で伸張性の高いフィルムであると同時に、優れたフィルム特性が示されている。

## [3] 家禽源からのゼラチン

鶏や鴨など家禽の皮、足、骨からの新しいゼラチン源は、哺乳類由来ゼラチンの代替品として注目を集めている。使用される家禽の種には、アヒル、ニワトリ、七面鳥などの種類が含まれている。鳥類のゼラチンは、哺乳類のゼラチンとほぼ同様のアミノ酸、二次構造、および分子量を有することが報告されている [2-66]。Sarbon ら [2-20] ニワトリゼラチンのブルーム値が 355 g であることを報告し、ウシゼラチン（229 g）と比較して著しく高いことが報告された。一方、Nik Aisyah らは、さまざまな酸で処理したアヒル足由来のゼラチン

ンのブルーム値が 225.53~334.17 g であり、ブルーム値 216.63 g を示した市販のウシゼラチンよりも高いブルーム強度を有することを報告した [2-67]。高いブルーム強度は、 $\beta$ 鎖と $\alpha$ 鎖の架橋成分の割合が高いため、高い熔融温度と高い粘度に寄与している。Sarboon らの研究では、鶏ゼラチンの粘度が 150 ml/g であることを報告し、ウシゼラチン (127 ml/g) と比較してより高い粘度値を示すと報告した [2-68]。さらに、鶏皮ゼラチンにはグリシン (33.70%)、プロリン (13.42%)、ヒドロキシプロリン (12.13%)、アラニン (10.08%) などのアミノ酸が含まれており、これらがより高いゼリー強度と安定性に寄与していることが報告されている。さらに、鶏皮ゼラチン中のイミノ酸 (プロリンとヒドロキシプロリン) の割合は約 12.66 % であることが知られ、ウシゼラチンのイミノ酸割合 (10.67 %) よりも高いことが報告されている [2-20]。家禽源由来のゼラチンは、高いイミノ酸の含有量によって高いブルーム値を示すため、良好なフィルム形成特性を示している [2-20,67,70]。

以上のようにゼラチンは原料動物や抽出方法によって物性が大きく異なる。ウシ由来ゼラチンは高いブルーム値と熱安定性を持ち、高温加工に適する。ブタ由来ゼラチンは最も一般的で品質が安定しており、熱可塑性の基準材料として扱いやすい。一方、サカナ由来ゼラチンは融点が低く低温加工に適するが、熱安定性が低いため、射出成形時に変色や熱劣化が生じやすいという課題がある。

これらの由来差は、熱可塑性に必要な可塑剤量、押出温度、射出成形時の熔融粘度、さらには成形体の吸湿挙動や機械特性に影響を及ぼす。特にサカナ由来ゼラチンは、低温で熔融する一方で、熱履歴に敏感であるため、加工条件の最適化が不可欠となる。ウシ由来ゼラチンは、比較的広い温度範囲で安定した加工が可能であるが、分子量が高い場合には熔融粘度が高くなり、射出成形時に高い充填圧が必要となることがある。これに対して、豚由来ゼラチンは最も一般的に利用されており、品質が安定していることに加え、熱可塑性に適した分子量分布と熱特性を有する。熔融粘度が適度であり、射出成形時の流動性と成形体の寸法安定性のバランスが良い。また、可塑剤との相互作用が安定しており、再現性の高いペレット製造が可能である。

熱可塑性ゼラチンペレットを設計する際には、ゼラチン、可塑剤、水分量の三要素のバランスが重要となる。一般的に、ゼラチン含量は 70~85 wt% とし、可塑剤として水およびグリセリン、ソルビトールなどの多価アルコールを 15~30 wt% の範囲で配合する。加工時には水分量を 20~30 wt% 程度まで高めることで熔融状態を安定化させ、ペレット化後に 1~12 wt% まで乾燥させることで、射出成形に適した流動性と寸法安定性を確保する。押出条件はゼラチンの由来によって異なり、サカナ由来ゼラチンでは 50~80 °C の低温域から検討を開始する必要がある。一方、ウシおよびブタ由来ゼラチンでは 70~120 °C の範囲で温度プロファイルを設定し、変色や泡立ちが生じない条件を探索する。スクリーンの回転数は中~低せん断を基本とし、滞留時間を短くすることで分子鎖の切断やゲル化を抑制する。射出成形においては、シリンダー温度を 60~120 °C の範囲で設定し、ゼラチンの由来に依

じて調整する。金型温度は 20～40℃とし、冷却速度と寸法安定性のバランスを考慮する。射出速度は中程度とし、背圧は低めに設定することで、材料への過度なせん断を避ける。以上の結果により、豚ゼラチンが最も可塑剤との親和性が高く、熱可塑化後の粘度挙動が安定していることが確認された。ウシ由来ゼラチンでは粘度が高く、サカナ由来ゼラチンでは熱劣化が生じやすいため、射出成形に必要な安定した熔融状態を維持する点で豚ゼラチンが優位である。

押出条件はゼラチンの由来によって異なるが、豚ゼラチンは 70～120℃の範囲で安定した熔融挙動を示し、変色や泡立ちが生じにくい。スクリュウの回転数は中～低せん断を基本とし、滞留時間を短くすることで分子鎖の切断やゲル化を抑制する。

射出成形においても、豚ゼラチンは 60～120℃の範囲で安定した流動性を示し、金型温度 20～40℃で良好な成形体が得られた。ウシ由来ゼラチンでは高粘度による充填不良が発生しやすく、サカナ由来ゼラチンでは熱劣化による変色が確認されたため、射出成形用途において豚ゼラチンが最も適していると判断される。

#### 2-3-4-2 ペレットの作製および乾燥方法

本項目では、産業廃棄物由来ゼラチンを原料とした熱可塑材料を安定的に成形加工へ供することを目的として、原料前処理からペレット化に至る一連の工程を体系的に検討した。特に、ゼラチンは高い吸湿性を有し、含水率の変動が熔融混練性や成形物の外観・物性に大きく影響するため、粉碎および乾燥条件の最適化を含めたプロセス設計が重要となる。図 2-3-3 に示すように、本項目におけるペレット作製工程は、「粉碎」「乾燥」「コンパウンド化」「ペレット化」の 4 段階から構成される。

まず、回収したゼラチン廃棄物（うち抜き残渣）は、網状あるいは不定形塊状であり、サイズや厚みが不均一である。このような形状のままでは、乾燥ムラや押出成形時の供給不安定を引き起こす恐れがあるため、機械的粉碎処理を行った。粉碎には二軸式粉碎機を用い、剪断力および圧縮力を付与することで、比較的均一な破片状試料を得た。粉碎処理により粒径を小さくすることで、試料全体の比表面積が増加し、後工程における水分除去効率の向上および熔融時の熱伝達性の改善が期待される。

次に、粉碎後のゼラチン試料に対して乾燥処理を行った。ゼラチンは親水性が高く、環境中の水分を容易に吸収するため、十分な乾燥を行わずに熔融混練を行った場合、加熱時



図 2-3-3 産業廃棄物由来ゼラチンを用いたペレット作製および乾燥工程の概略

の発泡、材料内部への気泡残存、さらには分解や着色といった不具合が生じる可能性がある。そのため、本項目では粉碎後の段階で乾燥工程を設け、所定温度条件下において一定時間処理を行うことで、自由水および一部の結合水を除去した。乾燥後の試料は、外観が白色から淡黄色を呈し、粉体同士の付着が抑制され、流動性が大幅に向上した。このことから、乾燥工程が原料ハンドリング性の改善にも寄与していることが確認された。

乾燥処理後のゼラチン粉砕試料は、押出成形装置を用いてコンパウンド化を行った。熔融混練工程では、加熱によりゼラチンを熱可塑状態とし、スクリー回転による機械的せん断を付与することで、材料全体を均一に熔融・混練することを目的とした。なお、過去の検討においては、機械的特性の向上や機能付与を目的としてフィラーの添加を試みたが、フィラーが十分に分散せず、混練中にゼラチン相と分離する現象が確認された。この分離は、材料の均一性を著しく低下させる要因となるため、本項目におけるペレット作製工程ではフィラーを添加せず、ゼラチン単独でのコンパウンド化を採用した。

熔融混練後、押出機先端よりストランド状に押し出された材料は、速やかに冷却工程へと移行した。冷却は、材料の形状を安定化させるとともに、後工程での裁断を容易にする目的で実施した。その後、冷却されたストランドを一定長さに裁断することでペレットを作製した。得られたペレットは、形状および粒径が比較的均一であり、目視観察においても顕著な気泡や欠陥は確認されなかった。ペレット化することにより、原料の計量性および供給安定性が向上し、加熱プレス成形や押出成形、さらには射出成形といった各種成形加工への適用が可能となる。また、ペレット形態は保管および輸送時の取り扱い性にも優

れており、産業スケールでの材料利用を想定した場合においても有効な原料形態であると考えられる。

以上の検討により、産業廃棄物由来ゼラチンを原料とした熱可塑性材料について、粉碎・乾燥条件を含めたペレット作製プロセスを確立した。本プロセスは、今後の材料改質、他樹脂とのブレンド検討、ならびに実環境下での評価試験を進める上での基盤技術として位置付けられる。

### 2-3-5 事業終了後の課題と今後の取り組み

本項目では、産業廃棄物として排出されるゼラチンに着目し、脱水・乾燥条件の最適化、粉碎処理および熱可塑性プロセスを検討することで、生分解性プラスチックとブレンド可能な熱可塑性ゼラチンの作製に成功した。特に、減圧乾燥および粉碎工程を適切に組み合わせることで、フィルム化およびペレット化が可能であることを示し、廃棄物ゼラチンの材料利用に関する基盤技術を確立した点は重要な成果である。一方で、事業終了後に向けて解決すべき課題も明確になっている。第一に、廃棄物ゼラチンは産業由来原料であるため、供給源や由来、製造工程の違いにより、分子量分布、灰分含量、含水率、熱的挙動などが変動する可能性がある。本項目では、アピ株式会社より提供された廃棄物ゼラチンについてはロット間差が小さいことを確認したが、今後は異なる供給源や用途由来のゼラチンについても検討を行い、原料ばらつきが材料特性に及ぼす影響を体系的に整理する必要がある。第二に、フィラー添加による材料物性制御に関しては、現段階では基礎的な知見の蓄積に留まっており、より広範なパラメータ探索が求められる。本年度までに炭酸カルシウム、タルク、セルロースの添加効果を検討した結果、炭酸カルシウムはゼラチンとの相分離が顕著であり、均一な混練が困難であることが明らかとなった。一方、セルロースおよびタルクは比較的良好な混練性を示し、今後の主要フィラー候補として有望である。

今後の取り組みとしては、まず、作製したすべての熱可塑性ゼラチンおよびブレンド複合材料について、組成、前処理条件、加工条件と、引張特性、曲げ特性、熱特性、吸水特性などの基本物性を網羅的に整理し、体系的な材料データベースを構築する。このデータベース化により、材料設計の再現性を確保するとともに、スケールアップや用途別最適化に向けた指針を明確化する。

セルロース系フィラーについては、再生可能資源であり生分解性を有する点から、バイオマス度の高い材料設計において中核的な役割を担うと期待される。しかしながら、セルロースはグルコースユニットあたり 3 つのヒドロキシ基を有するため親水性が高く、一般的なポリマーとの親和性が低い。また、セルロース鎖間の水素結合による凝集により、分散性が低下するという課題がある。そのため、化学的に改質されたセルロースの利用が不可欠である。本学グループでこれまでに開発してきたクエン酸変性セルロース (CAC) は、これらの課題を解決する有望なフィラーである。CAC は水系プロセスで簡便に作製可能で

あり、クエン酸とのエステル化反応によりセルロースのヒドロキシ基が部分的に修飾されている。これにより親水性が低下し、ポリマーとの親和性が向上するとともに、分子間水素結合が抑制されることで分散性が改善される。今後は、CAC の置換度や粒径を制御し、熱可塑性ゼラチン中での分散状態、界面相互作用および機械的特性への影響を詳細に検討する。さらに、CAC に対して二次変性を施すことで、ポリエステル系材料との相溶性を高めた複合化技術の展開も検討する。これにより、熱可塑性ゼラチン単独では得られない高剛性・高強度を有する硬質系 MBBP の開発を目指す。また、タルクについては、その層状構造に由来する剛性向上効果、加工性改善効果、耐熱性向上効果を活かし、成形加工性と物性のバランスを最適化する。セルロース系フィラーとのハイブリッド化により、有機・無機フィラーの相乗効果を活用した新規ブレンド設計も重要な検討課題である。

## 2-4 熱可塑ゼラチン/PLA などブレンドの開発

本節では生分解性プラスチック PLA、PBS に熱可塑ゼラチンをブレンドし、組成により物性を制御した MBBP ライブラリーを構築する。混練条件を詳細に調べ、得られたブレンドの分散性の評価方法を電子顕微鏡、X線 CT等を用いて構築し、観察データについて熱的性質・機械的性質を含めた性質や MBBP 組成との関連を調べる。PLA/PBS/熱可塑ゼラチンをブレンドし、代替対象製品を PP 射出成形品として選定した。

### 2-4-1 生分解性プラスチックの選択

合成ポリマーは石油を原料として生産されており、多くの産業分野で使用されている [2-71]。石油由来のプラスチックは軽量で化学的、物理的特性が非常に安定しているため、耐久性に優れている。また、生産方法は確立されており、生産効率が高く、非常に低コストである。その結果、世界中の至るところで幅広く使用されている。しかし、石油プラスチック廃棄物は自然界では分解しないため、環境中への蓄積は今や世界的な大きな問題となっている [2-72]。2018 年の世界のプラスチック樹脂生産量が 359 Mt に達したことにに関して、5.5~14.5 Mt のプラスチック廃棄物が海洋に放出された可能性があり、海洋環境におけるプラスチックの存在は海洋生物に脅威を与えている [2-73]。この問題の解決策として、新素材である海洋生分解性プラスチックへの代替が挙げられる。生分解性プラスチックとはバクテリア、真菌、藻類などの自然界に存在する微生物の働きによって二酸化炭素と水に完全に分解されるプラスチックとして定義されている [2-74]。

生分解性ポリマーの中でも PLA は最もよく研究されているプラスチックの 1 つであり、バイオマス由来であり、リサイクル性、生体適合性などの特性により従来の石油ベースのポリマーの最も有望な代替品とされている (図 2-4-1)。PLA はポリエチレンテレフタレートやポリカーボネートと同等の高い強度と剛性を示すが、脆いという欠点を持ち、また、石油由来のプラスチックより高価であることから商業的に応用する上での大きな欠点を持つ [2-75,76]。

また、PLA に加えて生分解性プラスチックとして用いられている PBS がある (図 2-4-2)。PBS は 1,4-ブタンジオールとコハク酸の縮合重合によって合成できる石油由来のプラスチックであり、柔らかく、強固な材料であり、用途によってはポリエチレンに取って代わることができる。しかし、PBS は結晶化度の高い大きな球晶構造で構成されているため、耐衝撃性などの物理的特性は脆いという欠点を持つ [2-77,78]。前述した PLA や PBS は微生物が豊富に存在するコンポストや土壌中では生分解するが、微生物の少ない海洋条件下では難分解性である [2-79,80]。

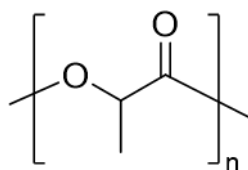


図 2-4-1 PLA

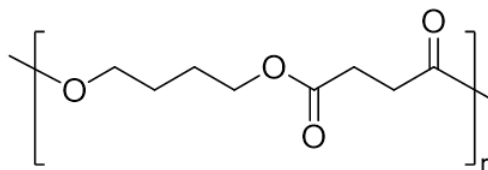


図 2-4-2 ポリブチレンサクシネート

最近では、ポリマーブレンドを用いることで 2 つの材料の欠点を補い合うポリマーの作製が報告されている。ポリマーブレンドは、2 つのポリマーまたはコポリマーを混合して、それぞれのポリマーの相乗的な特性を持つ新しい材料を作ることによって形成される材料である [2-81]。作製方法の一つとして熔融混練法がある。これは完全に熔融させた異種高分子を物理的に混ぜ合わせる手法であり、簡便な方法で大量生産可能なため、工業的に広く利用される [2-82]。PLA に PBS を混ぜ合わせた PLA/PBS ブレンドでは一般的に 4:1 の比率で用いられており、PLA の脆さを減少させ、その結果プラスチックの代替候補と考えられている [2-83]。また、前項で示したように、養殖業ではプラスチック製資材の使用量が多く、摩耗・破損による海洋流出が大きな課題となっている。特にフジツボ・カキ・ホタテ等の付着基盤として用いられるプレート類は、PP・PE を中心とした汎用プラスチックに依存しており、海洋環境中で分解しないことから、流出時の環境負荷が深刻である。また、これらの資材は市場規模が一定程度存在する一方、海洋生分解性を有する代替材料はほとんど流通していない。そのため、本事業では、PLA および PBS を基材とし、産業廃棄物由来ゼラチンとのブレンド材料を設計することで、現行の PP・PE 製養殖資材の代替可能性を重点的に検討し、養殖プレートを中心とした養殖資材を対象に、海中での使用に必要な機械特性を確保しつつ、流出時には海洋生分解性を発揮する新規材料の開発を目指す。

## 2-4-2 令和 6 年度までの成果

本事業では、ソフトカプセル製造工程で発生するゼラチン配管残渣を、これまでの焼却処理から脱却させ、再生可能なバイオマス資源として活用することを目指してきた。特に、生分解性プラスチックである PLA との複合化により、海洋環境負荷の低い新規バイオマス系材料 (MBBP) を創出することを最終的な目標としている。令和 6 年度までに、ゼラチン廃棄物は適切な脱水・乾燥処理を施すことで可塑剤を添加せずとも熱可塑性を示すことが明らかとなり、廃棄物をポリマー原料として再利用できるという基盤的成果が得られた。

まず、熱可塑ゼラチンと PLA の二成分ブレンドについて、ゼラチン添加量を 10~30 wt%とした場合、フィルム成形自体は可能であったものの、ヤング率・最大応力・破断伸びはいずれも低下した。SEM 観察では、ゼラチン由来の空隙や相分離構造が明瞭に確認され (図 2-4-3)、親水性ゼラチンと疎水性 PLA の相溶性の低さ、さらには両者の熔融粘度差が構造不均一性を生むことが示唆された。これらの構造的不均一性は応力集中点となり、

機械特性の低下を引き起こす主要因であると考えられる。一方で、ゼラチン添加量を 5 wt%以下に抑えた場合、フィルム表面は平滑で内部構造も均一であり、最大応力は PLA 単体と同等、あるいはそれ以上の値を示す場合もあった（図 2-4-3、表 2-4-1）。この結果は、少量添加により PLA の特性を損なわずにバイオマス度を向上できる配合設計が可能であることを示しており、実用化に向けた重要な指針となった。

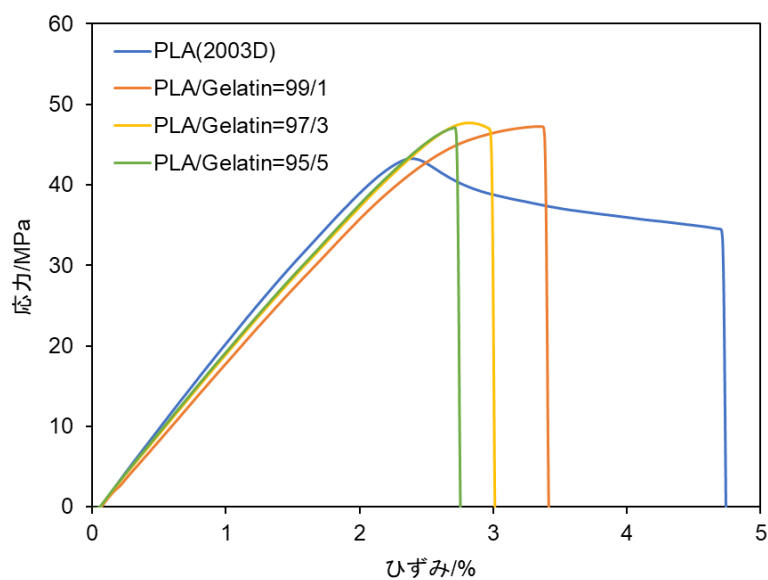


図 2-4-3 作製した熱可塑ゼラチン/PLA フィルムの引張試験結果

表 2-4-1 熱可塑ゼラチン/PLA ブレンドの機械特性評価

PLA/Gelatin	ヤング率 (GPa)	最大応力 (MPa)	破断伸び率 (%)
<b>100/0</b>	2.27 ± 0.09	43.2 ± 1.3	4.5 ± 0.9
<b>99/1</b>	1.89 ± 0.13	45.8 ± 5.0	3.0 ± 0.2
<b>97/3</b>	2.09 ± 0.04	47.3 ± 1.7	2.9 ± 0.2
<b>95/5</b>	2.14 ± 0.14	46.6 ± 3.6	2.8 ± 0.4

材料の再現性についても検証を進めた。異なるメーカー・グレードの PLA (NatureWorks 2003D、FY801) を用いた場合でも、引張強度や破断伸びに大きな差は見られず（図 2-4-4）、PLA の種類が本材料系の物性に与える影響は限定的であることが確認された。また、アピ株式会社から提供された異なるロットのゼラチン廃棄物を用いた場合でも、ブレンド材料の機械特性はほぼ同等であり（図 2-4-5）、同一製造工程に由来するゼラチン廃棄物は工業原料として十分な再現性を有することが示された。廃棄物由来原料の実用化において懸念されるロット差の問題が小さいことは、本事業の大きな成果である。

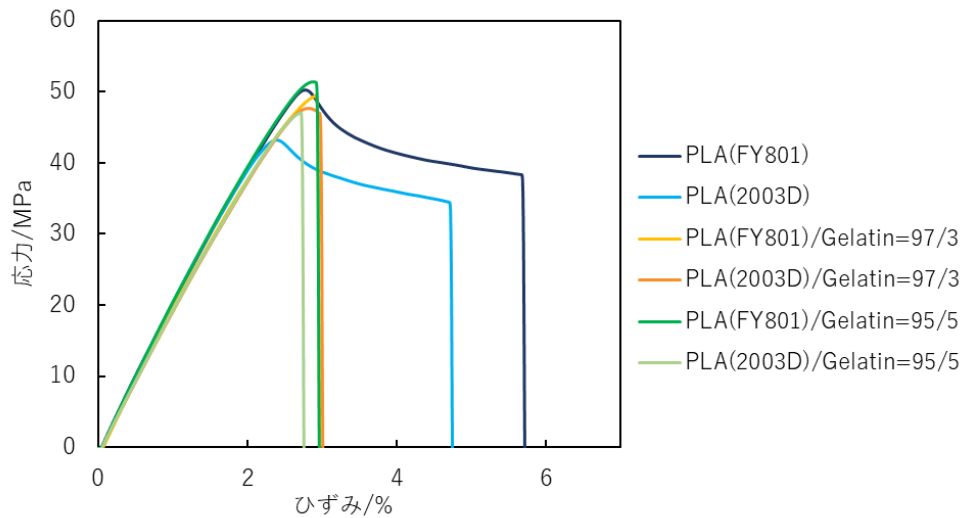


図 2-4-4 作製した熱可塑ゼラチン/異なる PLA ブレンドフィルムの引張試験結果

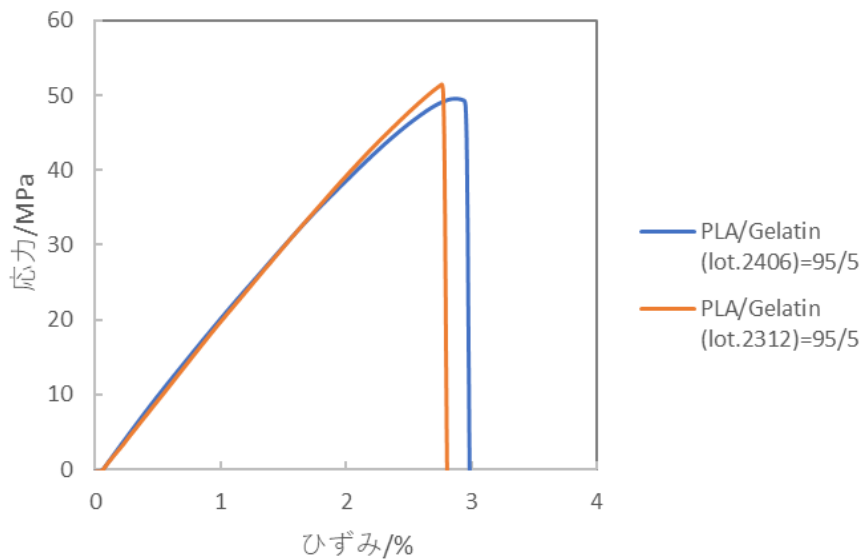


図 2-4-5 作製した異なるロットの熱可塑ゼラチン/PLA ブレンドフィルムの引張試験結果

柔軟性付与を目的として PBS を加えた三成分ブレンドでは、PBS 添加により破断伸びが大幅に向上し (図 2-4-6)、PLA-ゼラチン界面の相溶性改善に寄与することが示唆された。特に PLA/PBS (4:1) に 5 wt% のゼラチンを添加した系では、少量添加であっても延性向上が確認され、フィルム用途に適した材料設計の可能性が示された。ただし、射出成形用途では PBS 添加により曲げ弾性率が低下し (図 2-4-10)、硬質材料としては不適であることも明確となった。用途に応じて材料設計を分岐させる必要性が明確となった点は、今後の開発戦略にとって重要である。

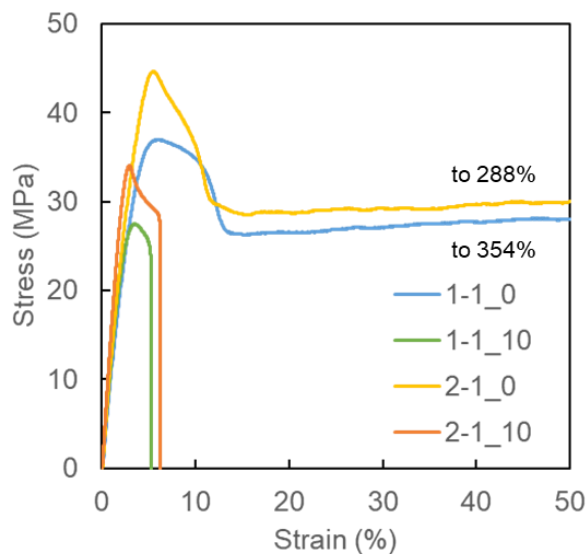


図 2-4-6 熱可塑ゼラチン/PLA/PBS ブレンドの引張試験結果

フィラー添加については、炭酸カルシウム、タルク、セルロースを検討したが、いずれも機械特性が大きく低下し、SEM 観察でもフィラーとゼラチンの相分離が顕著であった（表 2-4-2）。フィラーの有効活用には、表面改質や相溶化剤の導入が不可欠であることが明確となり、今後の材料設計に向けた課題が明確となった。

表 2-4-2 熱可塑ゼラチン/PLA/異なるフィラーのブレンドフィルムの機械特性評価

PLA/Gelatin_フィラー	ヤング率 (GPa)	最大応力 (MPa)	破断伸び率 (%)
100/0_0	2.24 ± 0.09	43.2 ± 1.3	4.7 ± 0.9
80/20_0	1.98 ± 0.10	39.8 ± 2.4	3.5 ± 0.3
80/19_1 (炭カル)	1.87 ± 0.05	28.9 ± 7.4	1.8 ± 0.2
80/19_1 (タルク)	1.60 ± 0.07	19.4 ± 1.3	1.4 ± 0.1
80/19_1 (セルロース)	1.65 ± 0.02	10.8 ± 1.7	0.8 ± 0.1

射出成形体の評価では、PLA に 1~5 wt%の熱可塑ゼラチンを添加した系が曲げ弾性率 2000 MPa 以上という硬質成形品の目標値を満たし（図 2-4-7）、少量添加による補強効果も確認された。これにより、PP 代替を想定した硬質成形品への応用可能性が示され、実製品を想定した試作段階へ移行可能な技術成熟度に到達した。

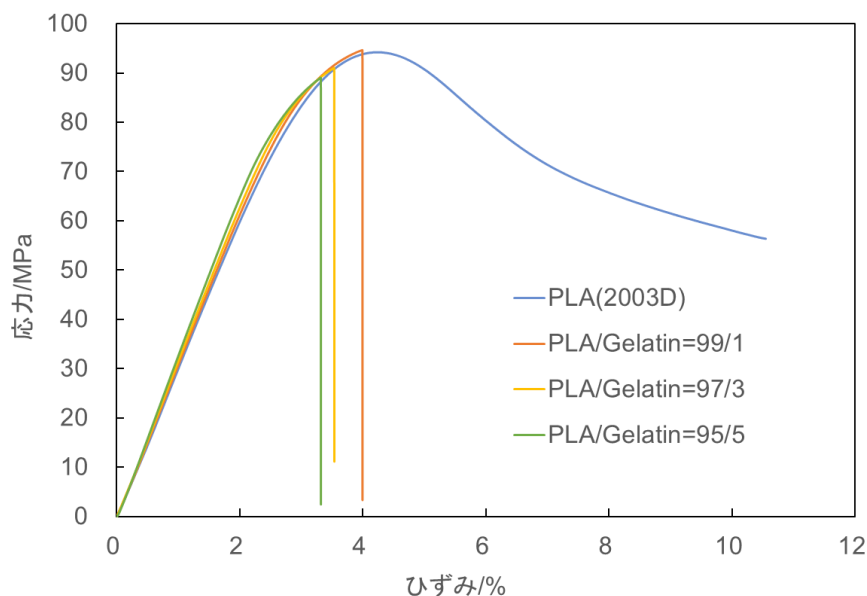


図 2-4-7 作製した熱可塑ゼラチン/PLA ブレンドの曲げ試験結果

一方で、ゼラチン添加量を 5 wt%以下に制御した場合、フィルム表面は平滑で、内部構造も比較的均一であった。引張試験の結果、最大応力は PLA 単体と同等、あるいはそれ以上の値を示す場合もあり、少量の熱可塑ゼラチン添加が材料特性を大きく損なわないことが明らかとなった。SEM 観察により、ブレンドフィルム内部にはゼラチン由来の空隙や相分離構造が確認された (図 2-4-8)。これは、親水性を有するゼラチンと疎水性である PLA との相溶性の低さに加え、両者の熔融粘度や MFR の差に起因すると考えられる。この結果は、廃棄物ゼラチンを少量添加材として利用することで、PLA の特性を維持しつつバイオマス度を向上できる可能性を示している。

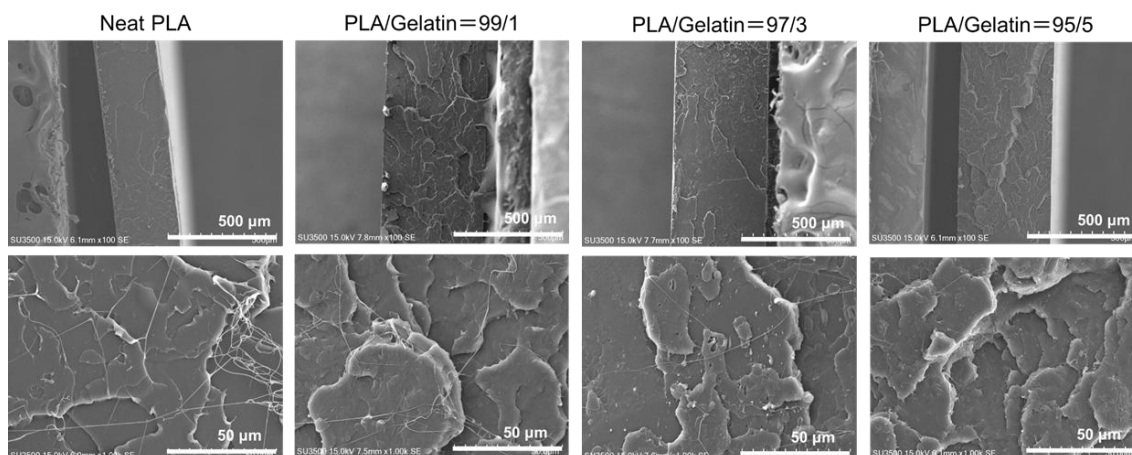


図 2-4-8 熱可塑ゼラチン/PLA ブレンドの引張は断面の SEM 画像

以上の成果により、産業廃棄物由来ゼラチンは、適切な乾燥・粉碎処理を経ることで PLA と複合可能な熱可塑性材料として利用できることが明確に示された。特に、5 wt%以下の少量添加により材料特性を維持したままバイオマス度を向上できる設計指針を確立した点は、本事業の大きな成果である。

### 2-4-3 令和7年度実施内容

令和7年度は、令和6年度までに蓄積した物性評価データおよび成形試験結果を基に、熱可塑ゼラチンを含有する PLA 系ブレンドの実用化可能性を検証する段階として位置付け、材料選定から成形品試作までを一貫して実施した。まず、既存の PLA 単体材料、ならびに熱可塑ゼラチン (Gelatin) を混合した PLA/Gelatin 系と PLA/PBS/Gelatin 系ブレンドについて、引張強度、曲げ特性、弾性率、破断伸び、耐衝撃性などの機械特性を総合的に比較した。その結果、表 2-4-3 に示すとおり、成形品目標値 (PP 代替) を満足し、かつ物性バランスに優れる組成として、PLA/Gelatin =95/5 および PLA/PBS/Gelatin = 76/19/5 の2組成を有利候補として選定した。これらの組成は、PLA の高剛性を維持しつつ、PBS および熱可塑ゼラチンの添加により脆性が緩和され、延性・韌性が向上している点が特徴である。

有利候補に選定した材料については、研究室レベルの試料作製から一段階進め、市販生分解性成形品に通常に使用している PLA および PLA/PBS = 80/20 と比較しながら、工業プロセスへの適用性を見据えたコンパウンド化検討を実施した。二軸押出機を用いた熔融混練により、押出温度、スクリー回転数、滞留時間などの混練条件を検討し、熱可塑ゼラチンの熱劣化を抑制しつつ均一分散を実現する条件の探索を行った。特に、熱可塑ゼラチンは親水性を有するため、PLA および PBS との界面状態が物性に大きく影響することから、混練時のせん断強度および温度管理を重点的に検討した。得られたストランドは冷却後にペレット化し、成形加工用材料として取り扱い可能な形態に加工した。ペレットの外観、粒径分布、色調のばらつきについても確認を行い、射出成形時の供給安定性を考慮した材料品質の評価を実施した。

次に、作製したペレットを用いて、射出成形による成形品試作を行った。成形条件として、シリンダー温度、金型温度、射出速度、保圧条件を段階的に調整し、成形不良 (ショートショット、フローマーク、反り、ヒケ) の発生状況を観察した。これにより、PLA 単体と比較して、PBS および熱可塑ゼラチンを含有するブレンドが、成形時の流動性および充填性において優れる傾向を示すかを検証した。さらに、成形品は PP 製品を代替する用途を想定し、既存の PP 成形品形状を模擬した試作品として作製した。外観観察および寸法測定を行い、成形安定性や再現性について評価するとともに、量産を想定した成形サイクルへの適応可能性についても基礎的な検討を行った。

以上のように本年度は、材料組成の選定、コンパウンド化、ペレット化、射出成形による試作までを一連の流れとして実施し、熱可塑ゼラチンを活用した PLA 系ブレンドの実製

品化を見据えた検証を重点的に行った。

表 2-4-3 熱可塑ゼラチン/PLA と熱可塑ゼラチン/PLA/PBS 系ブレンドの物性まとめ

	曲げ 弾性率 (MPa)	曲げ 強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)	最大 応力 (MPa)	破断 伸び率 (%)	衝撃 強度 (KJ/m <sup>2</sup> )
PLA	2881±5	94.2±0.0	2.24±0.10	61.0±3.3	4.8±1.1	2.69±0.08
PLA/Gelatin=99/1	3023±64	94.3±0.3	1.89±0.13	45.8±5.0	3.0±0.2	-
PLA/Gelatin=97/3	3015±56	91.0±3.0	2.09±0.04	47.3±1.7	2.9±0.2	-
PLA/Gelatin=95/5	3148±72	89.1±2.1	2.14±0.14	46.6±3.6	2.8±0.4	2.38±0.07
PLA/PBS/Gelatin =76/19/5	2394±92	72.1±1.4	1.63±0.16	38.0±1.9	3.8±0.2	2.96±0.13
成形品目標値(PP)	>2000	>25	>0.8	>50	>1000	>8

#### 2-4-3-1 コンパウンド化

本事業では、熱可塑ゼラチンを含有する PLA 系ブレンドの作製を目的として、熔融混練によるコンパウンド化およびペレット化工程を確立した。図 2-4-9 に示すように、本工程は原料供給、熔融混練、押出成形、冷却、切断、回収の一連の連続工程から構成される。まず、PLA、PBS、熱可塑ゼラチンを所定の配合比で秤量し、二軸押出機のホッパー部より供給した。押出機内では、シリンダー各ゾーンを段階的に昇温し、ポリマーを熔融状態としたうえで、スクリーの回転によるせん断力および分散効果を利用して各成分を均一に混練した。特に熱可塑ゼラチンは熱分解および水分残存の影響を受けやすいため、投入前に十分な乾燥処理を施すとともに、押出温度およびスクリー回転数を最適化し、過度な熱履歴を与えない条件で混練を行った。

熔融混練された材料は、ダイ部から連続的にストランド状として押し出された。ダイ出口における吐出状態を安定化させることで、太さが均一なストランドの形成が可能となった。押し出されたストランドは直ちに冷却工程へと導入され、水冷槽内で冷却・固化された。冷却条件は、ストランド表面と内部の温度差を抑え、後工程での切断不良や割れの発生を防止するため、冷却水温および滞留時間を制御した。冷却後のストランドは、引き取り装置により一定速度で搬送され、ペレタイザーへと送られた。ペレタイザーでは、回転刃を用いてストランドを一定長さに切断し、粒径の揃ったペレットを得た。得られたペレットは回収容器に集積し、形状、粒径分布、外観を確認したうえで、成形試験用材料として使用した。

以上の工程により、熱可塑ゼラチンを含有した PLA 系ブレンドを安定的にペレット化することに成功した (図 2-4-10)。本工程は連続生産が可能であり、得られたペレットは射出

成形、押出成形などの一般的な樹脂成形プロセスへの適用が可能であることから、実用化を見据えた材料供給形態として有効である。

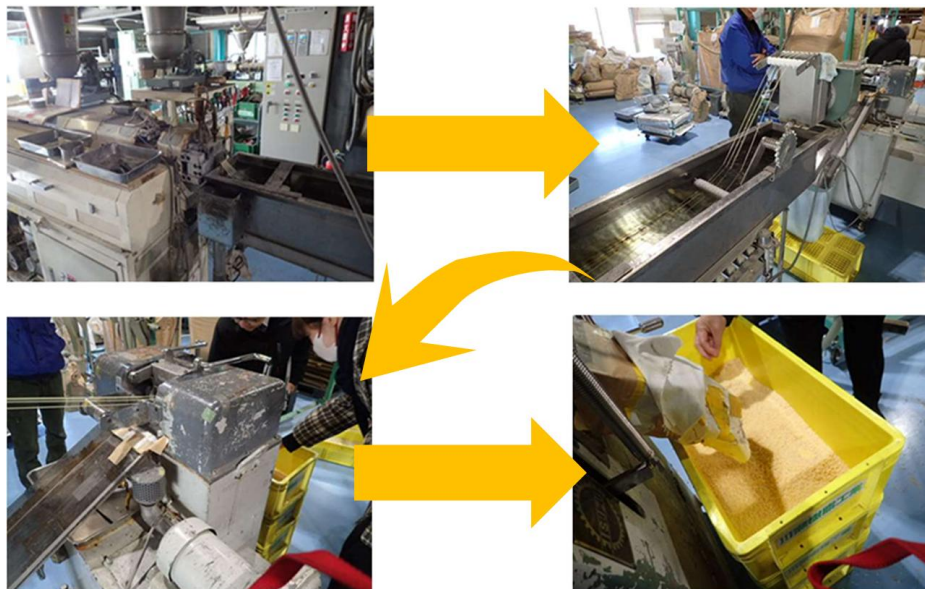


図 2-4-9 PLA／熱可塑ゼラチン系ブレンドのコンパウンドおよびペレット化工程

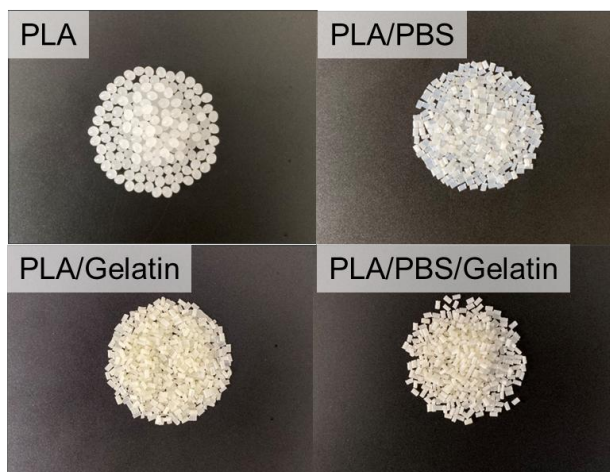


図 2-4-10 PLA および熱可塑ゼラチン配合材料のコンパウンド化により得られたペレット外観

#### 2-4-3-2 コースターの試作

熱可塑ゼラチンを有効利用した生分解性プラスチック材料の実用化可能性を検討するため、PLA を主成分とし、熱可塑ゼラチン、PBS、熱可塑性澱粉などを配合した複数組成のコンパウンド材を作製した。これらの材料について、まず二軸押出機を用いたコンパウンド化試験を行い、材料の混練性、押出時の安定性、ペレット外観（色調・均一性）を評価

した。コンパウンド化後の材料を用いて、射出成型による成形試験を実施し、日用品用途を想定した平板形状の試作としてコースター形状の成型性を検証した。コースター形状の試作を実施した理由は、熱可塑ゼラチンを配合した生分解性プラスチック材料の成形加工性、物性バランス、実用性を総合的に評価するための適切なモデル製品であると判断したためである。

第一に、コースターは比較的単純な形状でありながら、射出成形時の樹脂流動性、充填性、転写性、反りやヒケなどの成形欠陥が顕在化しやすい製品形状である。そのため、PLA に熱可塑ゼラチンや PBS などの異種材料を配合した場合の熔融挙動や流動安定性、金型内での挙動を評価するうえで適した試験体である。複雑すぎない形状であることから、材料起因の問題点を明確に切り分けて把握できる利点がある。

第二に、コースターは日用品として実使用環境に近い条件（耐熱性、耐水性、寸法安定性）を簡易的に評価できる試作品である点が挙げられる。飲料容器の結露水や温度変化に曝される使用環境は、熱可塑ゼラチン配合材料において懸念される吸湿性や寸法変化、外観変化を確認するための実践的な評価条件を提供する。そのため、材料の耐水性や表面状態の変化を短期間で把握できる。

第三に、コースターは製品としての社会実装イメージが明確であり、試作成果を非専門家にも直感的に理解してもらいやすいという利点を有する。熱可塑ゼラチンという未利用資源を活用した材料の価値を説明する際、研究段階の試験片やフィルムではなく、実際の生活用品に近い形状を提示することで、環境負荷低減や資源循環の意義を視覚的に訴求できる。

さらに、コースターは比較的小型で材料使用量が少なく、複数配合条件の試作・比較が容易であることから、限られた材料量や試験時間の中でも効率的に評価を進めることが可能である。これは、研究開発段階において複数組成を横断的に検討する本事業の方針と合致している。以上の理由から、本事業では、熱可塑ゼラチン配合生分解性プラスチック材料の実用可能性を検証する初期段階の試作対象として、コースターを選定した。この試作を通じて得られた成形性および外観評価の知見は、その後のフジツボ養殖資材など、より用途特化型製品への展開に向けた基礎データとして活用している。

射出成型条件としては、成型温度を 180~190°C程度に設定し、材料ごとの熔融粘度差に応じて射出圧力を調整した。成型時には、金型内での樹脂流動性、充填不良やショートショットの有無、反りやヒケなどの外観欠陥について詳細に観察した。また、成型後の試作品について、外観（色調、表面平滑性）、寸法安定性、重量ばらつきなどを比較し、熱可塑ゼラチン配合が成型挙動および成形品特性に与える影響をまとめた。

熱可塑ゼラチンを 5 wt%程度配合した PLA 系材料においても、コンパウンド化および射出成型は概ね安定して実施可能であることが確認された。特に、PLA 単体および PLA/PBS 系と比較しても、成型プロセスそのものに致命的な支障はなく、日用品レベルの成形品（コースター形状）が問題なく得られた。一方で、熱可塑ゼラチンや熱可塑性澱粉を含む

系では、成型時の熱履歴の影響により、ペレット段階よりもやや濃い色調を示す傾向が確認された（図 2-4-11）。

コースター用途のような実用製品においては、色調は必ずしも致命的な問題とはならず、意匠設計や着色材との併用によって十分に対応可能であると考えられる。また、サイズばらつきは条件出し段階ではやや大きいもの（表 2-4-4）の、量産時に成型条件を最適化することで改善可能な範囲であることが示唆された。これらの結果から、熱可塑ゼラチン配合 PLA 系材料は、コースターなどの簡易日用品用途において、実用的な成型加工性を有する材料候補であることが明らかとなった。

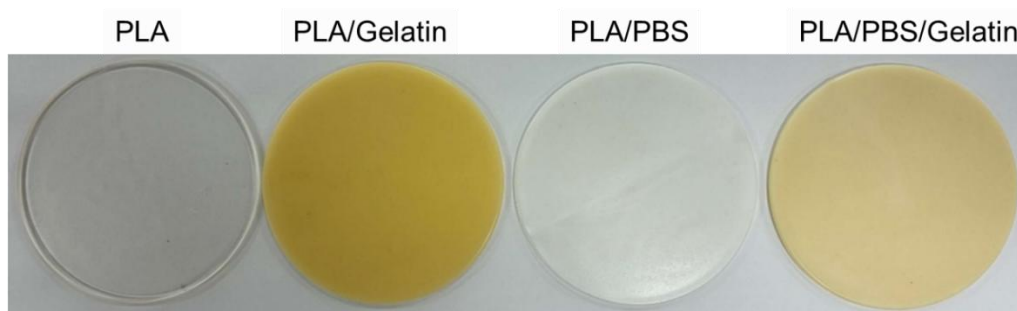


図 2-4-11 射出成型により作製したコースター試作品の外観比較

表 2-4-4 射出成型により作製したコースター試作品のサイズ

測定項目	PLA	PLA/Gelatin	PLA/PBS	PLA/PBS/Gelatin
重量 (g)	24.89	25.31	25.81	25.74
厚み (mm)	3.08	3.08	3.05	2.93
直径 (mm)	93			

### 2-4-3-3 コンパウンド化した MBBP ペレットの物性評価

熱可塑ゼラチンを有効活用した MBBP ペレットの実用化を目的として、PLA、PBS、および熱可塑ゼラチンを組み合わせた複合系について、熔融流動特性、機械特性、ならびに熱的特性の評価を行った。ほん項目では、各組成における引張試験・曲げ試験結果、MFR 測定結果、および熱分析結果を示している。

#### 2-4-3-3-1 引張試験

コンパウンド化した PLA/PBS、熱可塑ゼラチン/PLA、熱可塑ゼラチン/PLA/PBS ブレンドは金型 0.5 mm にしてアルミ板で挟み、手動油圧加熱プレス機（井元製作所）を用いて

170 °C で 5 分間予熱を行い、10 MPa で 5 分間加熱成形し、氷水で急冷しフィルムを作製した。作製した熱可塑ゼラチン/PLA/PBS ブレンドフィルムを SD 型レバー1 式試料裁断機（ダンベル）で全長 50 mm、幅 4 mm の試験片を 5 つ切り取った。作製した各試験片について 3 点の厚みを測定し、その平均値を計算し、小型卓上試験機 EZ Graph（島津製作所）、ロードセルセンサー AGS-X・EZ-X CL1 1kN（島津製作所）を用いて、クロスヘッドの速度は 10 mm/min で引張試験を行い、引張強度を測定した。

図 2-4-12 に、PLA/PBS、PLA/Gelatin、PLA/PBS/Gelatin 各組成の引張試験における応力-ひずみ曲線を示し、表 2-4-5 では測定した曲げ強度の結果をまとめた。PLA/PBS ブレンド（4 : 1）に熱可塑ゼラチンを 5 wt% 添加したことにより、ヤング率（GPa）、最大応力（MPa）が向上し、破断伸び率（%）が低下したことを示した。図中には、初期変形領域を拡大した挙動も併せて示しており、弾性挙動および降伏挙動の違いを詳細に比較した。まず、初期弾性領域に着目すると、PLA/Gelatin 系は他の組成と比較して立ち上がり勾配が最も大きく、弾性率が高いことが確認される。この結果は、ゼラチン添加により PLA マトリクス内の分子間相互作用が増大し、材料の剛性が向上したことを示唆している。一方で、初期降伏点付近において明確な応力ピークが観察され、その後急激な応力低下が生じていることから、塑性変形をほとんど伴わない脆性的破壊挙動を示していることが分かる。これに対して、PLA/PBS 系では、初期弾性率は PLA/Gelatin 系より低いものの、降伏後も応力が急激に低下することなく、比較的安定した塑性流動挙動を示した。これは PBS 添加による延性付与効果に起因するものであり、引張変形に対する追従性が向上していることを示している。ただし、最大応力値および全体の応力レベルは他の組成と比較してやや低く、強度面では一定の制約が残る結果となった。一方、PLA/PBS/Gelatin 系では、初期弾性領域において PLA/Gelatin 系に近い勾配を示しつつ、降伏後の応力低下が緩やかであり、PLA/PBS 系と同様の塑性変形挙動を示した。このことから、ゼラチンによる剛性向上効果と、PBS による延性付与効果が同時に発現していることが明確に確認された。特に、初期拡大図において、降伏点近傍の応力ピークが緩和されている点は、PBS がゼラチン添加による脆化を抑制していることを示す重要な結果である。また、破断挙動に着目すると、PLA/PBS 系および PLA/PBS/Gelatin 系では、破断に至るまで比較的長い塑性変形領域が存在しており、外力に対するエネルギー吸収能力が高いことが示唆される。一方、PLA/Gelatin 系では破断点が早期に現れ、応力集中に対する耐性が低いことが明らかとなった。これらの結果を総合すると、PLA/PBS/Gelatin 系は、引張強度、弾性率、延性のバランスが最も良好な組成であり、単一系材料では達成困難な特性の両立が可能であることが示された。この特性バランスは、成形加工時の割れ抑制や、実使用環境における繰り返し応力・局所応力への耐性向上に直結するものである。

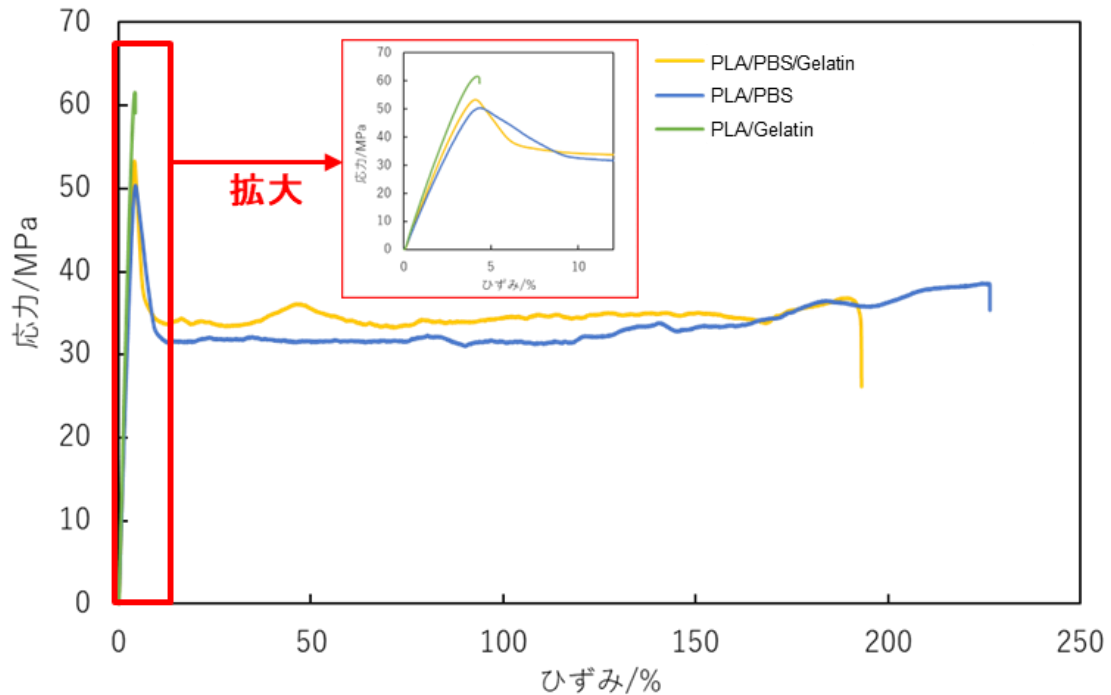


図 2-4-12 熱可塑ゼラチン/PLA/PBS ブレンドの引張試験結果

表 2-4-5 熱可塑ゼラチン/PLA/PBS ブレンドの機械特性評価

	ヤング率 (GPa)	最大応力 (MPa)	破断点 (%)
PLA/PBS/Gelatin=76/19/5	1.67±0.13	53.3±2.2	193.1±91.1
PLA/PBS=80/20	1.53±0.08	50.4±2.0	226.5±34.2
PLA/Gelatin=95/5	1.90±0.05	61.6±1.4	4.3±0.3

以上より、引張特性の観点からも、PLA/PBS/Gelatin 系コンパウンドは、MBBP ペレットとして高い実用適性を有しており、フジツボ養殖資材をはじめとする海洋用途材への展開において、十分な機械的信頼性を備えていることが確認された。本結果は、曲げ試験および熔融流動特性の評価結果と整合しており、本材料設計の妥当性を強く裏付けるものである。

#### 2-4-3-3-2 曲げ試験

コンパウンド化した PLA/PBS、熱可塑ゼラチン/PLA、熱可塑ゼラチン/PLA/PBS ブレンドの曲げ強度を測定した。HAAKE™ MiniJet Pro ピストン式射出成形機 (Thermo Fishre Scientific) のシリンダーを 180 °C、モールドを 45 °C に加熱する。次に、熱可塑ゼラチン/PLA/PBS ブレンド約 10 g をシリンダーに入れ、5 分間放置した。さらに 5 分間押出ノズル

を用いてサンプルの出し入れを繰り返した後、モールド上にセットして 750 bar の圧力で射出し、幅 10.0 mm、厚さ 4.0 mm のダンベル試験片を成形した。曲げ試験の条件は JIS K 7171、ISO 178 に従って試験速度 2 mm/min、支点間距離 64.0 mm で測定した。

図 2-4-13 では三点曲げ試験の結果を示し、表 2-4-6 では測定した引張強度の結果をまとめた。いずれの試料においても、初期領域ではほぼ線形的な挙動を示し、弾性変形領域における曲げ剛性に大きな差は認められない。しかし、最大応力到達後の挙動および破断様式には、組成による顕著な差異が確認され、PLA/PBS ブレンド (4 : 1) に熱可塑ゼラチンを 5 wt% 添加したブレンドでは、曲げ弾性率 (MPa) と曲げ強度 (MPa) がやや上昇したことが分かった。

PLA/Gelatin 系では、最大曲げ応力が最も高く、初期剛性も比較的大きいことから、ゼラチン添加による材料硬化効果が現れていると考えられる。一方で、最大応力到達直後に急激な応力低下が生じ、ほぼ塑性変形を伴わずに破断していることが確認された。この挙動は、ゼラチン添加により PLA マトリクスの分子間相互作用が増大し、剛性は向上するものの、応力集中が生じやすく、脆性的破壊を引き起こした結果であると推察される。したがって、PLA/Gelatin 系は高剛性材料としての特性を示すものの、曲げ負荷が繰り返される用途や変形追従性が要求される用途への適用には制約がある。

PLA/PBS 系では、最大曲げ応力は PLA/Gelatin 系と比較して低下するものの、最大応力到達後も応力が緩やかに低下し、比較的安定した塑性変形挙動を示している。このことから、PBS の添加により PLA の脆性が緩和され、曲げ変形に対する追従性が向上していることが分かる。一方で、曲げ応力のピーク値および曲げ剛性の観点では、強度面において一定のトレードオフが存在することが示唆される。これに対して、PLA/PBS/Gelatin 系では、PLA/PBS 系と同等の最大曲げ応力を維持しつつ、最大応力到達後も急激な破断に至らず、比較的緩やかな応力低下挙動を示した。この結果は、PBS による延性付与効果と、ゼラチンによる剛性向上効果が相補的に作用した結果であると考えられる。すなわち、PBS がゼラチン添加に伴う脆化を抑制し、ゼラチンが PBS 添加による剛性低下を補完することで、曲げ強度と曲げ変形追従性のバランスが最適化された材料設計が実現されたといえる。

特に注目すべき点として、PLA/PBS/Gelatin 系では、最大曲げ応力以降も応力を保持しながら変形が進行しており、実使用環境における局所的な曲げ荷重や衝撃に対して、破断に至りにくい挙動を示すことが示唆される。この特性は、養殖資材や海洋環境下で使用される部材のように、繰り返しの曲げや外力が作用する用途において、極めて重要である。

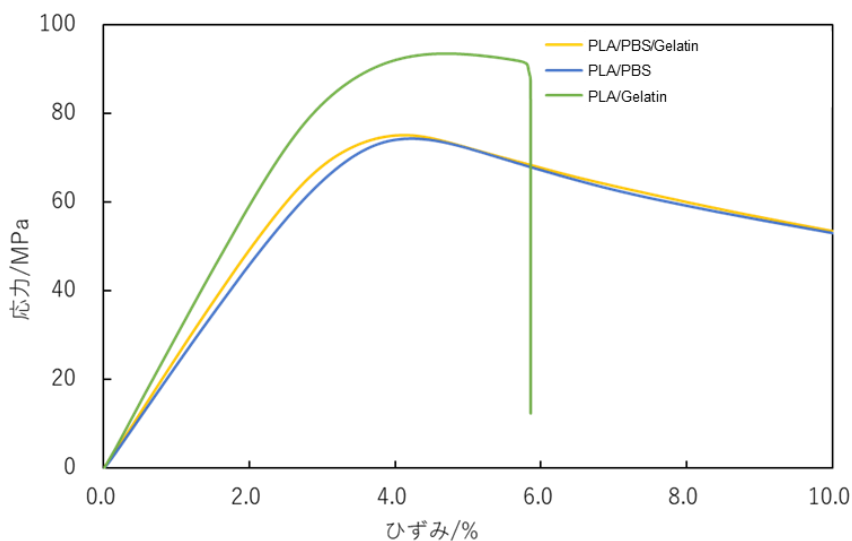


図 2-4-13 熱可塑ゼラチン/PLA/PBS ブレンドの曲げ試験結果

表 2-4-6 熱可塑ゼラチン/PLA/PBS ブレンドの機械特性評価

	曲げ弾性率 (MPa)	曲げ強度 (MPa)
PLA/PBS/Gelatin=76/19/5	2448±88	75.0±0.8
PLA/PBS=80/20	2324±45	74.3±1.5
PLA/Gelatin=95/5	2929±55	93.4±1.8

以上の結果から、曲げ特性の観点においても、PLA/PBS/Gelatin 系コンパウンドは、単一系材料と比較して優れた特性バランスを有しており、MBBP ペレットとしての実用適性が高いことが確認された。

#### 2-4-3-3-3 MFR

MFR の測定は、JIS K 7210-1 に準拠して実施した。測定温度は 190°C、荷重は 2.16 kg とし、PLA 系材料の一般的な評価条件に従った。コンパウンド化した PLA/PBS、熱可塑ゼラチン/PLA、熱可塑ゼラチン/PLA/PBS ブレンドは事前に乾燥機にて十分に乾燥させ、吸湿による熔融粘度の変動を防止した。測定に際しては、所定温度に保持したシリンダー内に試料を投入し、一定時間の予熱後、規定荷重を負荷した。ダイから押し出される熔融樹脂を一定時間ごとに切り出し、その質量を測定することで、10 分間あたりの押出量 (g/10 min) として MFR を算出した。各組成について 6 回の測定を行い、平均値および標準偏差を求めた。

表 2-4-7 に、190°C、2.16 kg 条件下で測定した PLA/PBS、PLA/Gelatin、PLA/PBS/Gelatin 各組成の MFR 測定結果を示す。まず、PLA/PBS および PLA/Gelatin では、MFR の平均値はいずれも約 5.4~5.5 g/10 min とほぼ同等の値を示し、測定間の標準偏差 ( $\sigma$ ) もそれぞれ 0.07 および 0.11 と小さく、安定した溶融流動特性を有していることが確認された。この結果は、PBS 単独添加およびゼラチン単独添加のいずれにおいても、PLA の溶融粘度に対する影響が限定的であることを示唆している。一方、PLA/PBS/Gelatin では、MFR の平均値が 10.5 g/10 min と、他の 2 組成と比較して約 2 倍に増加した。この顕著な MFR の上昇は、PBS とゼラチンの併用による相乗効果により、溶融時の分子鎖運動性が向上し、溶融粘度が低下したことに起因すると考えられる。特に、ゼラチン添加により一部で分子量低下や界面潤滑の効果が生じ、それを PBS が補完する形で溶融流動性が全体として向上した可能性が高い。また、PLA/PBS/Gelatin 系では、標準偏差が 0.53 と他組成に比べてやや大きいものの、すべての測定値が 9.8~11.2 g/10 min の範囲に収まっており、実用上問題となるような極端なばらつきは認められなかった。このことから、本組成は安定したコンパウンド化が達成されており、量産プロセスへの適用可能性を十分に有していると評価できる。

MFR の増加は、射出成形や押出成形といった量産プロセスにおいて、成形圧力の低減、金型充填性の向上、サイクルタイム短縮などに寄与する重要な因子である。本結果より、PLA/PBS/Gelatin (76/19/5) 組成は、従来の PLA 系材料と比較して加工性が大幅に改善されており、薄肉成形品や複雑形状部材への適用においても優位性を有することが示された。一方で、MFR が過度に高い場合には、機械的強度の低下が懸念されるが、本事業で評価した引張試験および曲げ試験の結果からは、PLA/PBS/Gelatin 系において強度および延性のバランスが良好に維持されていることが確認されている。すなわち、本組成は加工性向上と機械特性維持を高いレベルで両立した材料設計であると位置づけられる。

表 2-4-7 熱可塑ゼラチン/PLA/PBS ブレンドの機械特性評価

		MFR(190°C/2.16kg) /g/10min		
		PLA/PBS =80/20	PLA/Gelatin =95/5	PLA/PBS/Gelatin =76/19/5
n	1	5.38	5.51	9.85
	2	5.42	5.41	9.94
	3	5.37	5.39	10.4
	4	5.55	5.60	10.5
	5	5.40	5.56	10.8
	6	5.37	5.67	11.2
average		5.42	5.52	10.5
$\sigma$		0.07	0.11	0.53

\*K7210-1 準拠

以上より、MFR 評価の観点からも、PLA/PBS/Gelatin 組成は、実用化を見据えた MBBP ペレットとして極めて有望であり、フジツボ養殖資材をはじめとする海洋用途部材や成形加工品への展開に適した熔融流動特性を有していることが明らかとなった。本結果は、機械特性評価結果と整合しており、用途別最適設計に向けた基盤データとして重要な成果である。

#### 2-5-3-3-4 衝撃試験

アイゾッド衝撃試験では、PLA を基材とした 4 種類の材料 (PLA、PLA/Gelatin、PLA/PBS、PLA/PBS/Gelatin) についてアイゾッド 衝撃強度を測定し、PBS および熱可塑ゼラチンの添加が PLA の破壊靱性に及ぼす影響を詳細に検討した。衝撃強度は、材料の脆性・延性バランスを評価するうえで重要な指標であり、特に養殖プレートのように波浪衝撃や落下衝撃を受ける用途では、材料選定の基準となる。本試験の結果、材料組成によって衝撃特性が大きく変化することが明らかとなった。

図 2-4-14 に示したように、PLA の衝撃強度は  $2.94 \text{ kJ/m}^2$  であり、PLA が本来有する脆性がそのまま反映された最も低い値となった。PLA は結晶化度が低く、ガラス転移温度が高いため、常温ではガラス状態に近く、外力負荷時に塑性変形がほとんど生じない。このため、クラックが発生すると急速に進展し、破壊に至る脆性破壊挙動を示す。今回の結果も、PLA の脆性材料としての特性を裏付けるものである。PLA/Gelatin の衝撃強度は  $2.49 \text{ kJ/m}^2$  と PLA よりも低下した。熱可塑ゼラチンはタンパク質由来で極性が高く、PLA との相溶性が低いため、熱可塑化後もマトリクス中に微細な分散相として存在する。この熱可塑ゼラチン分散相は、界面接着が弱いため応力集中点となり、外力負荷時に界面剥離やマイクロクラックの発生を誘発する。さらに、熱可塑ゼラチンは熱安定性が低く、加工時の熱履歴によって部分的に変性・劣化が生じる可能性があり、これが界面強度の低下を助長したと考えられる。これらの要因により、PLA/Gelatin は PLA 単体よりも脆化し、衝撃強度が低下したと推察される。一方、PLA/PBS の衝撃強度は  $4.50 \text{ kJ/m}^2$  と大幅に向上した。PBS は PLA よりも柔軟性と延性に優れ、外力負荷時に塑性変形を伴うエネルギー吸収が可能である。PLA と PBS は完全相溶ではないものの、部分的に相溶性を有することが知られており、界面接着が比較的良好である。このため、PBS が PLA マトリクス中に適切に分散することで、クラック進展を抑制し、破壊靱性を向上させる 靱性向上効果が発現したと考えられる。また、PBS の分散相がクラックの進展経路を屈曲させることで、破壊に必要なエネルギーが増加し、衝撃強度の向上につながったと推察される。PLA/PBS/Gelatin の衝撃強度は  $3.57 \text{ kJ/m}^2$  であり、PLA/PBS よりも低下したものの、PLA 単体より高い値を示した。これは、熱可塑ゼラチン添加による脆化が PBS の延性向上効果によって部分的に相殺されていることを示している。ただし、三元系では相構造がより複雑化し、熱可塑ゼラチンが PLA/PBS の界面に干渉することで PBS の分散状態が乱れ、PBS 単独ブレンドほどの靱性向上効果が

得られなかったと考えられる。また、熱可塑ゼラチンの熱安定性の低さにより、加工時に微細な劣化が生じ、界面接着の低下を引き起こした可能性もある。これらの要因が複合的に作用し、PLA/PBS/Gelatin の衝撃強度は PLA/PBS より低い値となったと推察される。

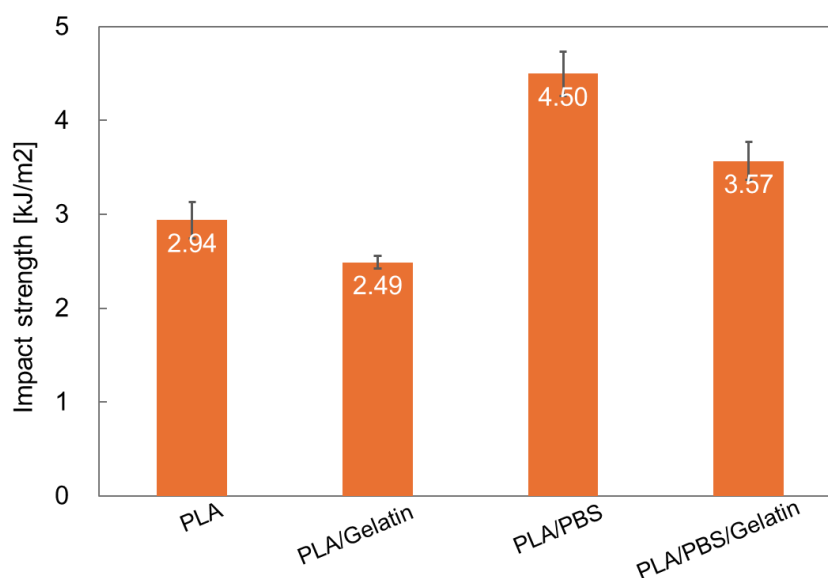


図 2-4-14 各配合組成により作製したフィルムのアイゾッド衝撃試験

以上の結果から、PLA 系材料の衝撃特性を改善するうえで PBS の添加は極めて有効であり、熱可塑ゼラチン添加は生分解性向上の観点では有望であるも。特に養殖プレート用途では、海中での耐久性、衝撃強度、長期安定性のバランスが求められるため、PBS の効果を最大限活かしつつ、熱可塑ゼラチンの分散状態を制御することが、材料開発の鍵となる。

#### 2-4-3-4 コンパウンド化した MBBP ペレットとラボレベルとの比較

PLA/PBS/Gelatin (76/19/5) 組成について、ラボレベルで作製した試験片と、実機スケールのコンパウンド装置を用いて製造した MBBP ペレット由来の試作品の機械特性を比較した。本検討では、引張試験および曲げ試験の応力-ひずみ挙動を詳細に解析し、コンパウンド工程が材料特性に与える影響を多角的に評価した。その結果、コンパウンド工程によって得られた試作品は、ラボレベル試料と比較して特性の再現性が高く、さらに延性或破壊抵抗性において顕著な向上が認められた。これらの結果は、実用化を見据えた材料設計において、コンパウンド工程が極めて有効であることを示している。

#### 2-4-3-4-1 引張試験

図2-4-15では三点曲げ試験の結果を示し、表2-4-8では測定した引張強度の結果をまとめた。引張試験では、弾性率および最大応力の両方において、試作品がラボレベル試料を上回った。弾性率は1.62 GPaから1.67 GPaへ、最大応力は45.0 MPaから53.3 MPaへと向上しており、コンパウンド工程によって材料の引張強度が確実に改善されていることが確認された。特筆すべきは破断ひずみの大幅な増加である。ラボレベル試料の破断ひずみが4.8%であったのに対し、試作品では193.1%と約40倍に達した。この劇的な延性向上は、コンパウンド工程における混練効率の高さを反映している。具体的には、PBSの柔軟性がPLAマトリックスにより効果的に伝達され、ゼラチンが界面相溶化剤として機能することで、相界面の強度が向上し、破断に至るまでの変形を大きく許容できる構造が形成されたと考えられる。また、試作品の破断ひずみのばらつきが大きい点は、延性が高い材料に典型的に見られる挙動であり、破壊モードが脆性破壊から延性破壊へと移行したことを示唆している。これは、材料内部の微細構造がコンパウンド工程によって安定化し、応力が局所的に集中しにくい構造へと変化した結果である。

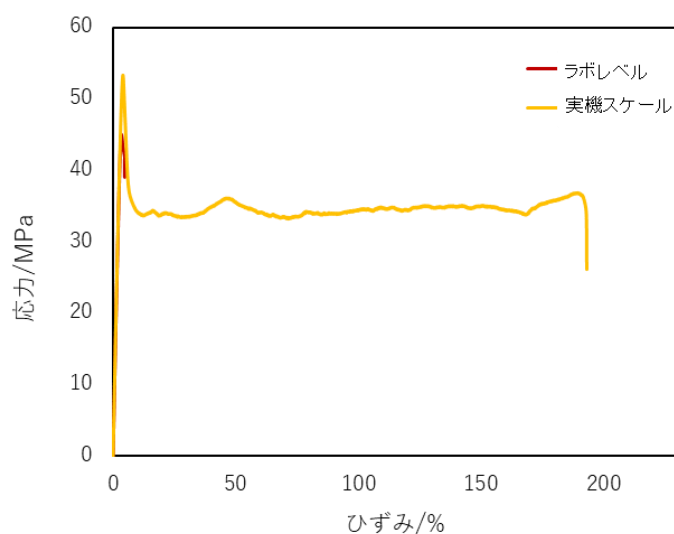


図 2-4-15 熱可塑ゼラチン/PLA/PBS ブレンドの引張試験結果

表 2-4-8 熱可塑ゼラチン/PLA/PBS ブレンドの機械特性評価

PLA/PBS/Gelatin=76/19/5	ヤング率 (GPa)	最大応力 (MPa)	破断点 (%)
ラボレベル	1.62±0.036	45.0±0.4	4.8±0.2
実機スケール	1.67±0.13	53.3±2.2	193.1±91.1

#### 2-4-3-4-2 曲げ試験

図2-4-16では三点曲げ試験の結果を示し、表2-4-9では測定した曲げ強度の結果をまとめた。曲げ試験において、ラボレベル試料の最大応力は 57.1 MPa であったのに対し、MBBPペレット由来の試作品では 75.0 MPa と大幅に増加した。これは約 30%以上の向上に相当し、コンパウンド工程によって材料内部の分散状態が改善され、応力集中が緩和された結果であると考えられる。特に PBS およびゼラチンの分散均一性が向上することで、局所的な脆弱部位が減少し、曲げ荷重に対する耐性が高まったと推察される。

弾性率については、ラボレベル試料が 2394 MPa、試作品が 2448 MPa とほぼ同等であり、剛性そのものは大きく変化していない。このことは、コンパウンド工程が材料の基本的な剛性を損なうことなく、破壊に至るまでの耐荷重性を向上させていることを示している。さらに、試作品では破断点が明確に得られず、曲げ変形に対して破壊が生じにくい挙動を示した。これは、材料がより延性的に振る舞い、外力に対して塑性変形を許容する能力が高まったことを意味する。これらの結果から、コンパウンド工程は曲げ特性において、剛性を維持しつつ破壊抵抗性を向上させるという、材料設計上極めて望ましい効果をもたらしていると評価できる。

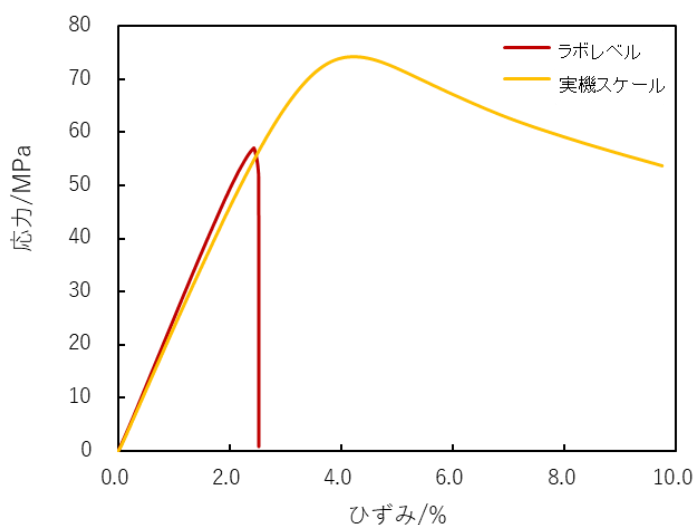


図 2-4-16 熱可塑ゼラチン/PLA/PBS ブレンドの曲げ試験結果

表 2-4-9 熱可塑ゼラチン/PLA/PBS ブレンドの機械特性評価

PLA/PBS/Gelatin=76/19/5	曲げ弾性率 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	破断伸び (%)
ラボレベル	2394±64	57.1±1.7	2.5±0.0
実機スケール	2448±88	75.0±0.8	-.-

以上の結果により本検討において最も重要な知見は、コンパウンド工程によって得られた試作品が、ラボレベルで得られた材料特性を高い精度で再現しつつ、さらに機械特性を向上させている点である。特に以下の点が、コンパウンド工程の優位性を示している。

1. 混練の均一性が高く、PBS およびゼラチンの分散が安定している → 応力集中が緩和され、破壊抵抗性が向上。
2. 界面構造が安定化し、延性が大幅に向上 → 引張破断ひずみの劇的な増加につながった。
3. 剛性を維持しながら強度を向上させるバランスの良い材料設計が実現 → 実用化に適した力学特性を示す。
4. ラボレベルの特性を再現しつつ、スケールアップによる劣化が見られない → 工業的生産における信頼性が高い。

これらの点から、コンパウンド工程は単なるスケールアップ手法ではなく、材料特性を安定化・向上させるプロセスとして機能していることが明らかとなった。本事業で得られた結果は、PLA/PBS/Gelatin (76/19/5) 組成が、ラボレベルでの材料設計を実機スケールのコンパウンド工程においても高い再現性で実現できることを示している。さらに、コンパウンド工程によって材料特性が向上している点は、実用化に向けた大きな利点である。

今後は、成形条件（温度、圧力、冷却速度）の最適化や、界面改質技術の導入によって、さらなる機械特性の向上が期待される。また、動的粘弾性解析（DMA）、破壊靱性試験、微細構造観察（SEM）などを組み合わせることで、コンパウンド工程がもたらす構造変化をより詳細に理解し、材料設計の高度化につなげることができる。

#### 2-4-4 事業終了後の課題と今後の取り組み

産業廃棄物由来ゼラチンを熱可塑化し、PLA および PBS との複合化によって新規 MBBP の創出を目指して研究開発を進めてきた。その結果、材料物性の体系的な評価、コンパウンド化・射出成形プロセスの確立、さらに試作品（コースター）による実用性検証までを達成し、研究段階から社会実装段階へと移行しつつある技術基盤を構築した。令和6年度までの成果を踏まえ、令和7年度には実製品を想定した成形品試作が本格化し、複数企業との共同開発が具体的に進展している点は、本事業における大きな前進である。現在、以下の2件について、試作品を基にした商品化検討が進んでいる。

##### 1. 株式会社東北総合研究社（青森県）

フジツボ養殖板への応用を目的として、海洋環境下での分解性および耐久性の評価を実施中である。MBBP 材料を海洋資材として社会実装することを視野に入れた共同開発が進行している。

## 2. 株式会社新進化学（大阪府）

釣り用ルアーに取り付ける部材としての利用を検討しており、令和 8 年 3 月より試作開始が予定されている。軽量性・耐衝撃性・環境配慮性を兼ね備えた新素材として期待されており、試作品は実釣環境での評価に加えて、第 74 回インターナショナル・プレミアム・インセンティブショーへの展示が予定されている。

これらの取り組みは、MBBP 材料が単なる研究成果に留まらず、実際の製品開発プロセスに組み込まれつつあることを示す重要な進展である。一方で、社会実装を本格化させるためには、依然として解決すべき課題が存在する。材料設計面では、熱可塑ゼラチンの親水性に起因する相溶性の低さが、PLA との二成分系では空隙や相分離として現れ、機械特性の低下を招くことが確認された。PBS を含む三成分系では分散性が改善し延性が向上したものの、界面構造の最適化にはさらなる検討が必要である。また、フィラー添加系では相分離が顕著であり、機械特性が大きく低下したことから、フィラー表面改質や相溶化剤の導入など、界面制御技術の確立が今後の重要課題となる。

成形加工面では、熱可塑ゼラチンの熱履歴依存性が課題として残る。コンパウンド化および射出成形において、ゼラチンの熱劣化や吸湿による粘度変動が外観や色調のばらつきとして現れる場合があり、量産時の品質安定性を確保するためには、乾燥条件、混練温度、滞留時間などのプロセス管理をより精緻化する必要がある。また、成形品の寸法ばらつきについても、成形条件の最適化により改善可能であるものの、量産スケールでの再現性検証が今後の課題である。さらに、用途展開に向けては、耐水性・耐湿性の評価が不可欠である。熱可塑ゼラチンは吸湿性を有するため、実使用環境における寸法安定性や機械特性の変化を詳細に評価する必要がある。コースター試作により初期的な耐水性評価は可能となったが、海洋資材、日用品、農業資材など、用途ごとに求められる耐久性評価を体系的に進める必要がある。

今後の取り組みとしては、まず、界面制御技術の高度化により、熱可塑ゼラチンと PLA/PBS の相溶性を改善し、機械特性のさらなる向上を図る。具体的には、相溶化剤の探索、ゼラチンの化学修飾、フィラー表面処理技術の導入などが挙げられる。また、成形加工プロセスの最適化に向けて、二軸押出機のスクリーンデザイン、温度プロファイル、乾燥条件の最適化を進め、量産スケールでの安定生産を可能とする技術基盤を構築する。さらに、企業との共同開発を加速し、試作品の実証試験から商品化へとつなげることが最重要課題である。フジツボ養殖板や釣り具部材といった具体的な用途での評価を通じて、MBBP 材料の社会的価値を明確化し、環境配慮型製品としての市場展開を目指す。

## 2-5 熱可塑デンプン/ゼラチン/PLA 等ブレンドの開発

本節では熱可塑デンプン、熱可塑ゼラチンに PLA 等の生分解性プラスチックをブレンドする。多成分の組成により物性を制御した MBBP ライブラリーを構築し、機械的性質を含めた性質や MBBP 組成との関連を調べた。

### 2-5-1 熱可塑デンプン

前述した通り、生分解性プラスチック PLA あるいは PBS はコンポストや土壌中での生分解性は認証されているが、海洋では難分解性であるため、近年問題視されている陸上で不適切に処理されたプラスチックゴミの海洋中への流れ込みによる、生態系への影響への懸念は改善されない。この問題の解決策として、新素材である海洋生分解性プラスチックへの代替として海洋生分解性をもつ天然素材の一つとしてデンプンが挙げられる。

デンプンはイモ、小麦、トウモロコシなどから得られる植物由来のポリマーであり、自然界に豊富に存在しているため、大量かつ安価に入手することができるため、プラスチックの代替材料構成要素として適している。また、そのデンプンや加工デンプンは食品素材として幅広く用いられてきたため、ハンドリング性が高い [2-84]。しかし、通常のデンプンは融点を持たず、加熱しても軟化しないため、可塑化せず、プラスチックとしての実用化が困難という欠点を持つ。そこで、水酸基を持つグリセリンやポリビニルアルコール (PVA) と混ぜたり、デンプンの水酸基を変性したりすることで熱可塑性を付与したデンプンがプラスチック材料として用いられるようになった [2-85,86]。また、熱可塑性を付与したデンプンであっても海洋生分解性の発現は確認されている。しかし、熱可塑デンプンは非常に脆いため成型性がなく、吸湿性も大きいいため単体での利用には制限されている [2-87]。そこで、成形性があり、高い汎用性を持つ非海洋生分解性プラスチックにデンプンをブレンドすることで、実用化可能かつ海洋性分解性を持つ材料の作製が可能と考えられた。

デンプンのブレンドによる海洋生分解性は以下のメカニズムで進行すると考えられる。

(1) デンプンの存在によりプラスチック表面に微生物が繁殖、(2) 微生物によるアミラーゼの生産によりデンプンが分解、(3) バイオフィルムが形成され、そこから生産された酵素により非海洋生分解性プラスチック部分が分解。つまり、海洋生分解性を誘発するトリガーとしてデンプンを用いることができると考えられる [2-88]。海洋中の菌では、デンプン分解酵素アミラーゼを持つ菌と比較して、ゼラチン分解酵素を持つ菌がより多く存在しているため、同様なメカニズムでゼラチンの海洋生分解性を誘発するトリガーとして作用することを期待できる。

## 2-5-2 令和6年度までの成果

令和6年度までに実施した一連の検討では、熱可塑ゼラチンおよび熱可塑デンプンをPLA および PLA/PBS ブレンドに添加し、機械特性、モルフォロジー、耐水性、さらには射出成形体としての実用性までを総合的に評価した。その結果、両添加材が材料に与える影響は明確に異なり、剛性向上と延性向上という役割分担が浮き彫りとなっただけでなく、混練条件や成形条件が最終物性に及ぼす影響についても詳細な知見が得られた。

まず、熱可塑ゼラチンおよび熱可塑デンプンを PLA/PBS に添加したブレンド材料の評価では、両者の特性が対照的に現れた。熱可塑デンプンを添加したブレンドでは、破断伸び率が 200%を超える大幅な増加が見られ、デンプン中のグリセリンが可塑剤として作用することで材料全体の延性が飛躍的に向上した。一方で、ヤング率の向上はほとんど見られず、PLA/PBS 本来の剛性は維持されるものの、補強効果は限定的であった。これに対して熱可塑ゼラチンを添加したブレンドでは、ヤング率が 1.36~1.61 GPa へと明確に増加し、剛性向上効果が顕著であったが、破断伸び率は 5~6%にとどまり、延性向上はほとんど見られなかった。SEM 観察 (図 2-5-1) では、熱可塑ゼラチン添加系ではゼラチンの凝集が確認され、これらが応力集中点となって破断伸びを制限していることが示唆された。一方、熱可塑デンプン添加系ではフィブリル状の延性破壊構造が観察され、グリセリンの可塑化作用が構造的にも裏付けられた。

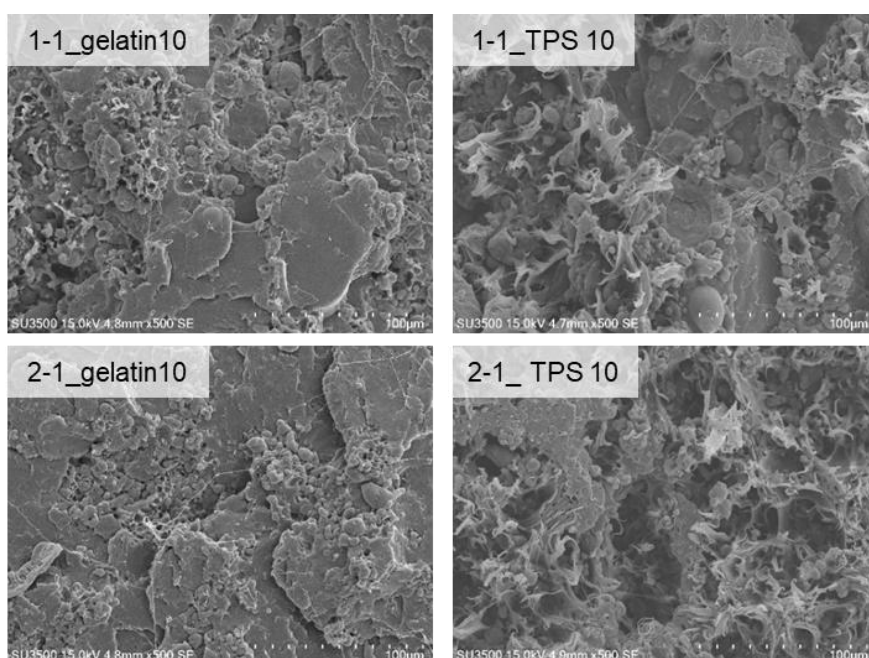


図 2-5-1 熱可塑ゼラチン/PLA/PBS ブレンドと熱可塑デンプン/PLA/PBS ブレンドの引張試験断面の SEM 観察

さらに、熱可塑ゼラチンと熱可塑デンプンを併用した PLA ブレンドの開発では、両者の相乗効果を検証した。熱可塑デンプンを 5 wt% 添加した範囲では、熱可塑ゼラチン/PLA ブレンドの機械特性に大きな変化は見られず、ヤング率、最大応力、破断伸びはいずれも熱可塑ゼラチン/PLA ブレンドと同程度であった。これは、少量の熱可塑デンプンではマトリックス構造に大きな影響を与えず、熱可塑ゼラチンによる剛性向上効果が優先的に現れることを示している。

射出成形体としての実用性についても詳細に評価した。HAAKE MiniJet Pro を用いた射出成形体の三点曲げ試験では、熱可塑ゼラチンの添加量が増加するにつれて曲げ弾性率が増大し、剛性が向上する一方で、曲げ強度はやや低下する傾向が見られた。しかし、いずれの組成も曲げ弾性率 2000 MPa 以上、曲げ強度 25 MPa 以上という実用目標値を満たしており、ポリプロピレン射出容器の代替材料として十分な性能を有していることが確認された。衝撃強度については、熱可塑デンプンを 5 wt% 添加することで PLA より向上したものの、目標値には到達せず、さらなる改善には相溶化剤の導入や混練条件の最適化が必要であることが明らかとなった。

耐水性評価では、ゼラチン単独フィルムが 60 分で崩壊したのに対し、熱可塑ゼラチン/熱可塑デンプン/PLA フィルムは 1 週間浸漬しても膨潤が見られず、PLA フィルムと同等の高い耐水性を示した (図 2-5-2)。これは、熱可塑ゼラチンおよび熱可塑デンプンが PLA マトリックス内に均一に分散し、水溶性成分の溶出が抑制されたためであり、食品容器などの用途において極めて重要な特性である。

以上の成果により、熱可塑ゼラチンは剛性向上、熱可塑デンプンは延性向上という明確な役割を持ち、両者を適切に組み合わせることで、用途に応じた材料設計が可能であることが示された。また、射出成形体としての性能も実用レベルに達しており、PLA/PBS 系バイオプラスチックの高機能化に向けた重要な基盤が整った。さらに、耐水性の大幅な改善により、食品容器や日用品など、実用的な用途への展開が現実的な段階に到達したといえる。

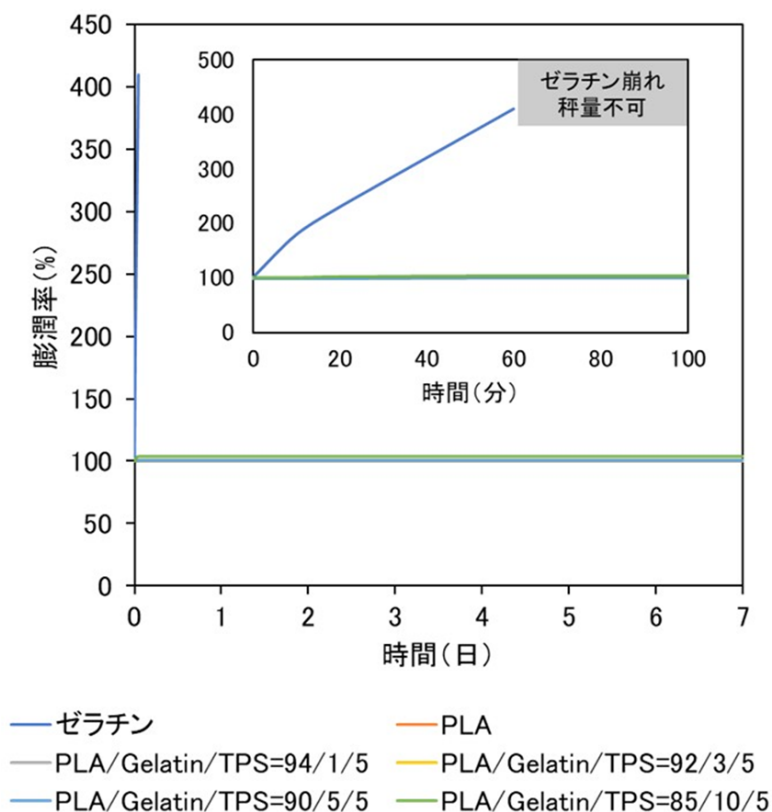


図 2-5-2 ゼラチン、PLA、熱可塑ゼラチン/熱可塑デンプン/PLA ブレンドフィルムの膨潤率結果

### 2-5-3 令和 7 年度実施内容

本事業では、熱可塑ゼラチンを配合した生分解性 PLA 系材料の実用化可能性を検証するため、実機スケールでのコンパウンド化および射出成形によるフジツボ養殖資材の試作を実施した。大学内での基礎検討結果を踏まえ、実際の産業設備を用いた検証を行うことで、材料の量産適性および成形加工性を評価した。令和 6 年度までに蓄積した物性評価データおよび成形試験結果を基に、熱可塑ゼラチンと熱可塑デンプンを含有する PLA 系ブレンドの実用化可能性を検証する段階として位置付け、材料選定から成形品試作までを一貫して実施した。まず、既存の PLA 単体材料と PLA/PBS ブレンド材料、ならびに熱可塑ゼラチン/PLA、熱可塑ゼラチン/PLA/PBS、熱可塑デンプン/ゼラチン/PLA 系ブレンドについて、引張強度、曲げ特性、弾性率、破断伸び、耐衝撃性などの機械特性を総合的に比較した (表 2-23)。その結果、成形品目標値 (PP 代替) を満足し、かつ物性バランスに優れる組成として、熱可塑ゼラチン/PLA=5/95 および熱可塑ゼラチン/PLA/PBS=5/76/19 および熱可塑ゼラチン/熱可塑デンプン/PLA/=5/5/90 の 3 組成を有利候補として選定した (表 2-5-1)。これらの組成は、PLA の高剛性を維持しつつ、PBS および熱可塑ゼラチンの添加により脆性が

緩和され、延性・靱性が向上している点が特徴である。

有利候補に選定した材料については、研究室レベルの試料作製から一段階進め、市販生分解性成形品に通常に使用している PLA および PLA/PBS = 80/20 と比較しながら、工業プロセスへの適用性を見据えたコンパウンド化検討を実施した。二軸押出機を用いた熔融混練により、押出温度、スクリー回転数、滞留時間などの混練条件を検討し、熱可塑ゼラチンの熱劣化を抑制しつつ均一分散を実現する条件の探索を行った。特に、熱可塑ゼラチンは親水性を有するため、PLA および PBS との界面状態が物性に大きく影響することから、混練時のせん断強度および温度管理を重点的に検討した。得られたストランドは冷却後にペレット化し、成形加工用材料として取り扱い可能な形態に加工した。ペレットの外観、粒径分布、色調のばらつきについても確認を行い、射出成形時の供給安定性を考慮した材料品質の評価を実施した。

以上のように本年度は、材料組成の選定、コンパウンド化、ペレット化、射出成形による試作までを一連の流れとして実施し、熱可塑ゼラチンと熱可塑デンプンを活用した PLA 系ブレンドの実製品化を見据えた検証を重点的に行った。

表 2-5-1 熱可塑ゼラチン/PLA と熱可塑ゼラチン/PLA/PBS と熱可塑ゼラチン/熱可塑デンプン/PLA 系ブレンドの物性まとめ

	曲げ 弾性率 (GPa)	曲げ 強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)	最大 応力 (MPa)	破断 伸び (%)	衝撃 強度 (KJ/m <sup>2</sup> )
PLA	2881±5	94.2±0.0	2.24±0.10	61.0±3.3	4.8±1.1	2.69±0.08
PLA/PBS=80/20	2324±45	74.3±1.5	1.57±0.04	54.6±1.7	181±48	4.50±0.24
PLA/Gelatin=95/5	3148±72	89.1±2.1	2.14±0.14	46.6±3.6	2.8±0.4	2.38±0.07
PLA/PBS/Gelatin =76/19/5	2394±92	72.1±1.4	1.63±0.16	38.0±1.9	3.8±0.2	2.96±0.13
PLA/Gelatin/Starch= 90/5/5	2211±88	46.9±2.5	2.21±0.09	46.9±2.5	2.5±0.1	2.29±0.21
成形品目標値(PP)	>2000	>25	>0.8	>50	>1000	>8

### 2-5-3-1 コンパウンド化

本事業では、廃棄物由来熱可塑ゼラチンを配合した生分解性 PLA 系材料の実用化を見据え、実機スケールでのコンパウンド化試験を実施した。大学内で得られた基礎検討結果を踏まえ、産業用二軸混練押出機を用いて 10 kg スケールでの混練およびペレット化を行い、材料設計の妥当性、工程安定性、ならびに量産工程への適用可能性を検証した。

本試験では、PLA (FY801) を主成分とし、熱可塑ゼラチン、PBS、熱可塑性澱粉を組み合わせた複数の配合系を設定した。具体的には、2-4-3-1 の図 2-25 と同様に、PLA 単体、

PLA/熱可塑ゼラチン、PLA/PBS/熱可塑ゼラチン、PLA/PBS、PLA/熱可塑性澱粉/熱可塑ゼラチンといった系について検討を行い、各配合条件において熔融混練、ストランド引取りおよびペレット化を実施した。

その結果、熱可塑ゼラチンを 5 wt%程度配合した系においても、熔融混練時に顕著なゲル化、焼け、あるいは押出不安定といった重大なトラブルは認められず、連続的なコンパウンド製造が可能であることを確認した。特に、PLA/熱可塑ゼラチン系および PLA/PBS/熱可塑ゼラチン系および熱可塑ゼラチン/熱可塑デンプン/PLA では、熔融状態での流動性が安定しており、実機条件下においても均一なストランド形成およびペレット化が達成された。得られたペレットの外観について観察した結果、配合成分の違いに応じて色調に明確な差異が認められた (図 2-5-3)。PLA/PBS ブレンドでは透明感のある白色のペレットが得られたのに対し、熱可塑ゼラチンを配合した熱可塑ゼラチン/PLA では、多少黄色味を帯びた色調を示した。この色調変化は、熱可塑ゼラチン由来成分の影響によるものであり、異物混入や熱劣化に起因する黒点や焼け斑とは異なり、全体として均一な色合いを有していた。また、熱可塑ゼラチン/PLA に PBS を併用した配合系では、PBS の影響で熱可塑ゼラチン/PLA より多少白味が強い傾向が確認された。熱可塑ゼラチン/PLA に可塑性澱粉を併用した配合系では、ペレットを混練時熱可塑性澱粉が熱の影響で褐色化し、ペレットの色が褐色味を帯びたことが確認された。これらの結果から、熱可塑ゼラチン配合による色調変化は一定範囲で制御可能であり、用途に応じた配合最適化や顔料添加による対応も十分に検討可能であると考えられる。

ペレットの形状については、いずれの配合系においても大きなばらつきは認められず、粒径および形状は概ね均一であった。破碎や過度な変形は見られず、保管・輸送・成形工程への供給においても実用上問題のないハンドリング性を有していることを確認した。さらに、複数配合条件を同一設備・同一運転条件下で製造したことにより、配合比の違いが押出挙動、ペレット外観および色調に及ぼす影響を比較評価することが可能となった。これにより、熱可塑ゼラチン単独配合系と PBS 併用系、ならびに熱可塑性澱粉添加系の違いについて、実機レベルでの基礎的知見を得ることができた。

以上より、熱可塑ゼラチンを配合した生分解性 PLA 系材料について、①安定した熔融混練およびペレット化が可能であること、②複数配合系において実機スケールでの再現性が確認されたこと、③後工程である射出成形試作へ円滑に接続可能な材料形態を確保できたことを明らかにした。本成果は、廃棄物由来バイオマス資源の高付加価値化と、生分解性材料の社会実装に向けた製造基盤技術の確立に寄与するものである。



図 2-5-3 PLA および熱可塑ゼラチンと熱可塑デンプン配合 PLA 系材料のコンパウンド化により得られたペレット外観

### 2-5-3-2 フジツボ養殖資材試作

フジツボ養殖資材の試作を実施した理由は、熱可塑ゼラチンを配合した生分解性 PLA 系材料の特性を、海洋環境下での実用用途に近い条件で評価できる対象製品であると判断したためである。フジツボ養殖資材は長期間にわたり海水中に曝される用途であり、材料には耐水性、寸法安定性、機械的強度に加えて、表面特性や生物付着性が求められる。そのため、本事業で開発を進めている熱可塑ゼラチン配合材料について、海洋環境における劣化挙動や形状保持性、生物との相互作用を評価するための適切な試験対象となる。

第一に、フジツボ養殖資材は比較的単純な板状・プレート形状で構成され、射出成形やプレス成形など一般的な樹脂成形法による試作が容易である点が挙げられる。プレート形状は樹脂の流動性、充填性、冷却時の収縮挙動、反りや内部応力の発生といった成形加工上の課題が顕在化しやすく、PLA に熱可塑ゼラチンや PBS、熱可塑性澱粉などの異種材料を配合した際の熔融挙動や流動安定性を把握するうえで適した試験体である。複雑すぎない形状であることから、材料起因の問題点を明確に切り分けて評価でき、研究段階で得られたコンパウンド材料の加工適性を直接検証することが可能となる。

第二に、フジツボ養殖資材は海中で長期間使用されるため、実使用環境に近い条件で材料特性を評価できる点が重要である。海水中では吸水による膨潤、加水分解、微生物付着、潮流による機械的負荷など、熱可塑ゼラチン配合材料に特有の劣化要因が複合的に作用する。フジツボは付着生物として自然界に広く存在し、その付着特性は材料表面の化学的・物理的性質に強く依存することが知られている。熱可塑ゼラチンはタンパク質由来であり、従来の石油系プラスチックとは異なる表面特性を有するため、生物付着挙動に影響を及ぼす可能性がある。したがって、フジツボ養殖資材として成形試作を行うことで、材料表面特性と生物付着の関係を実環境に近い形で検証することができ、海洋用途における材料適性を総合的に評価するうえで極めて有効である。

第三に、フジツボ養殖資材は海洋プラスチックごみ問題が深刻化する中で、流出時の環境影響が特に懸念される分野であり、生分解性材料の社会的意義を示すうえで象徴的な用途である点が挙げられる。従来の PP・PE 製養殖資材は海中で分解せず、破損・流出した

場合に長期的な海洋汚染源となることが指摘されている。未利用資源である熱可塑ゼラチンを活用した生分解性材料を養殖資材に適用することは、環境負荷低減や資源循環の観点から社会的意義が高く、MBBP 材料の価値を示すうえでも効果的である。また、フジツボ養殖資材は比較的小型で材料使用量が少ないため、複数配合条件の試作・比較が容易であり、研究開発段階において効率的に評価を進められる点も、本事業の方針と合致している。

以上の理由から、本事業では熱可塑ゼラチン配合生分解性 PLA 系材料の応用可能性を検証する対象として、フジツボ養殖資材の試作を実施した。本試作を通じて得られる成形性、耐環境性および生物付着挙動に関する知見は、将来的な海洋用途材料の開発に向けた重要な基礎データになると考えられる。

外注先の株式会社サンスリーに保有しているフジツボ養殖資材用金型を用い、PLA 単体、PLA/熱可塑ゼラチン、PLA/PBS/熱可塑ゼラチン、PLA/PBS、PLA/熱可塑性澱粉/熱可塑ゼラチンといった複数配合系について射出成型試験を実施した（図 2-5-4）。射出成型では、実際の養殖資材製造工程と同等の条件を設定し、スクリュウ押出方式による熔融・射出を行った。成型温度、射出圧力、金型温度を調整しながら、各配合系について 25 枚程度の試作品を作製し、成型可否、成型安定性、外観品質を評価した。成型後には、試作品の重量測定を行い、配合組成ごとの重量分布を比較した。また、成型品については、実海域での生物付着性評価および生分解性評価を目的として、東京湾での浸漬試験に供するための試料準備を行った。



図 2-5-4 フジツボ養殖資材用金型を用いた射出成型工程の概略

すべてのサンプルにおいて、フジツボ養殖資材形状の射出成型が可能であることが確認された。特に、熱可塑ゼラチンおよび熱可塑性澱粉を含む系においては、初期条件出しにやや時間を要したものの、最終的には安定した成型が可能となり、実用上十分な成型性を有することが示された。熱可塑ゼラチン配合系では、成型時の熱負荷により成型品の色調がやや濃くなる傾向が見られたが、養殖資材用途では外観よりも機能性が重視されるため、実用上大きな問題とはならないと判断された(図 2-5-5)。重量については、試験区間および同一試験区内で若干のばらつきが認められた(表 2-5-2)が、これは条件出し段階特有のものであり、量産工程における条件固定化によって改善可能である。

本試作により、熱可塑ゼラチンを配合した生分解性プラスチック材料が、フジツボ養殖資材という海洋用途においても加工・成型可能であることが実証された。今後、実海域(株式会社東北総合研究社(青森県八戸市))におけるフジツボ着床性評価および生分解挙動の検証を通じて、従来材料との差別化や環境負荷低減効果の定量化が期待される。

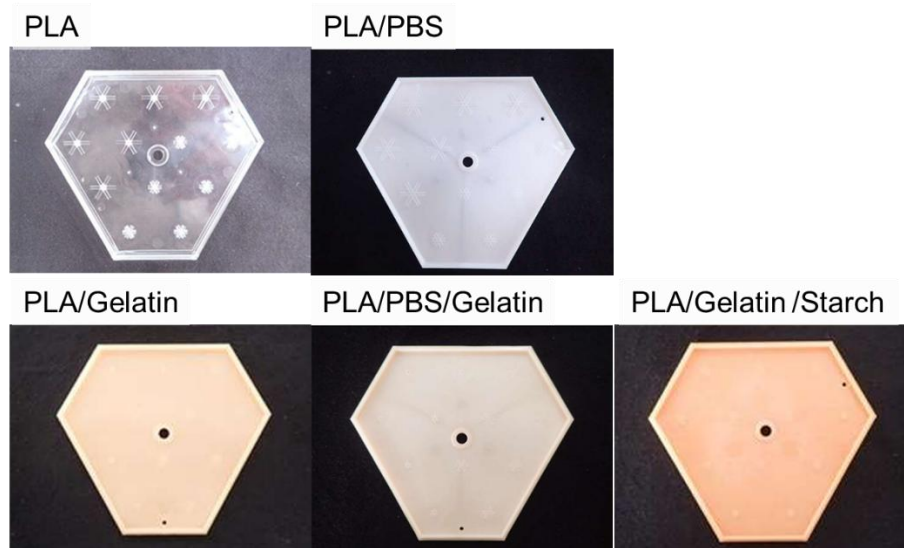


図 2-5-5 各配合組成により作製したフジツボ養殖資材試作品の外観

表 2-5-2 配合組成の違いによる成形品重量分布の比較

重量 (g)	PLA	PLA/ Gelatin	PLA/PBS	PLA/PBS/ Gelatin	PLA/Gelatin/ Starch
①	72.51	76.80	72.66	71.57	72.80
②	72.44	76.88	72.71	71.59	73.91
③	72.51	74.80	72.65	71.60	73.00
④	72.45	71.54	72.67	71.64	72.97
⑤	72.43	74.34	72.69	71.59	72.49
平均	72.47	74.87	72.68	71.60	73.03

### 2-5-3-3 コンパウンド化した MBBP ペレットの物性評価

コンパウンド化した PLA/PBS、熱可塑ゼラチン/PLA、熱可塑ゼラチン/PLA/PBS ブレンド、熱可塑ゼラチン/熱可塑デンプン/PLA の物性を、PLA 単体、PLA/PBS と比較しながら評価した。これにより、コンパウンド工程が材料特性に与える影響だけでなく、PLA 系材料における PBS、熱可塑ゼラチン、熱可塑デンプンの役割を総合的に明らかにした。

#### 2-5-3-3-1 引張試験

コンパウンド化した PLA/PBS、熱可塑ゼラチン/PLA、熱可塑ゼラチン/PLA/PBS ブレンド、熱可塑ゼラチン/熱可塑デンプン/PLA は金型 0.5 mm にしてアルミ板で挟み、手動油圧加熱プレス機（井元製作所）を用いて 170℃ で 5 分間予熱を行い、10 MPa で 5 分間加熱成形し、氷水で急冷しフィルムを作製した（図 2-5-6）。

PLA、PLA/PBS、PLA/Gelatin、PLA/PBS/Gelatin、PLA/Gelatin/Starch の 5 種類のフィルムについて外観観察を行い、透明性、色調、表面均質性、相分離の有無などを比較した。観察結果から、添加成分の種類および相溶性が外観に大きく影響することが明らかとなった。まず、PLA 単体フィルムは最も透明性が高く、均質で滑らかな外観を示した。これは PLA が単一成分であり、相分離が生じないためである。次に PLA/PBS フィルムでは、PLA 単体と比較してわずかに白濁が見られた。PBS は PLA と部分的に相溶するものの完全には混ざり合わず、微細な相分離構造が光散乱を引き起こしたと考えられる。ただし、表面は比較的均質であり、PBS 添加による大きな外観劣化は認められなかった。それに対して、PLA/Gelatin フィルムでは、PLA/PBS よりも白濁が顕著であり、局所的な濃淡や微小な不均一領域が確認された。これは、熱可塑ゼラチンが PLA と十分に相溶しないため、ゼラチンの凝集が生じ、光散乱が増加したことによるものである。外観の不均一性は、後述する機械特性における破断伸び低下とも整合する。PLA/PBS/Gelatin フィルムでは、PLA/Gelatin よりも白濁が抑制され、外観が均質化していた。PBS が PLA と熱可塑ゼラチンの界面相溶化剤として働き、ゼラチン凝集を部分的に解消したためと考えられる。表面の滑らかさも改善されており、三元系ブレンドにおける PBS の分散安定化効果が外観にも反映されている。

PLA/Gelatin/Starch では、白濁が最も強く、全体的に不透明度が高かった。熱可塑デンプンは PLA および熱可塑ゼラチンと相溶性が低く、複数の相分離構造が形成されるため、光散乱が大きくなる。また、表面にも微細な凹凸が見られ、混合成分の不均一性が外観に強く現れていた。

以上の結果から、外観の透明性および均質性は、成分間の相溶性に強く依存することが明らかとなった。PLA 単体が最も良好な外観を示し、PLA/PBS/Gelatin は三元系でありながら比較的均質な外観を維持していた。一方、熱可塑ゼラチン/PLA および PLA/熱可塑ゼラチン/デンプンでは相溶性不足により白濁や不均一性が顕著であった。

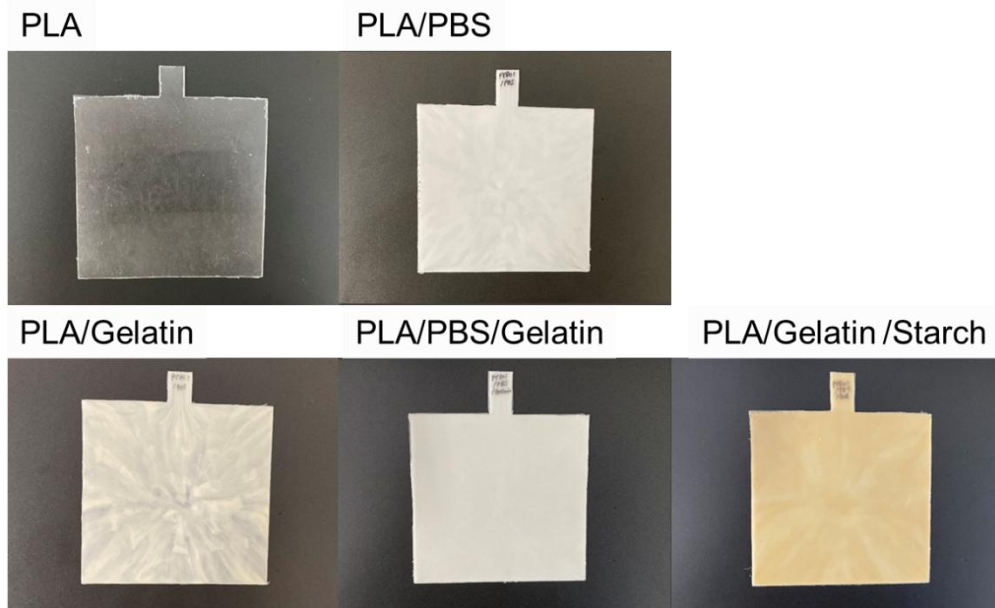


図 2-5-6 各配合組成により作製したフィルムの外観

作製した PLA/PBS、熱可塑ゼラチン/PLA、熱可塑ゼラチン/PLA/PBS ブレンド、熱可塑ゼラチン/熱可塑デンプン/PLA フィルムを SD 型レバー1 式試料裁断機（ダンベル）で全長 50 mm、幅 4 mm の試験片を 5 つ切り取った。作製した各試験片について 3 点の厚みを測定し、その平均値を計算し、小型卓上試験機 EZ Graph（島津製作所）、ロードセルセンサー AGS-X・EZ-X CL1 1kN（島津製作所）を用いて、クロスヘッドの速度は 10 mm/min で引張試験を行い、引張強度を測定した。

図 2-5-7 に、PLA/PBS、PLA/Gelatin、PLA/PBS/Gelatin、PLA/Gelatin/Starch 各組成の引張試験における応力-ひずみ曲線を示し、表 2-25 では測定した曲げ強度の結果をまとめた。PLA を基材とした 4 種類のブレンド材料について引張応力-ひずみ挙動を比較したものであり、熱可塑ゼラチン、PBS、熱可塑デンプンの添加が材料の強度および延性に与える影響を明確に示している。全体の応力-ひずみ曲線から、各材料は初期弾性域、最大応力、破断ひずみのいずれにおいても大きく異なる挙動を示し、添加成分の役割が明確に反映されている。

PLA/Gelatin は、4 種類の中で最も脆性的な挙動を示した。最大応力は比較的高いものの、破断ひずみは小さく、PLA 単体に近い脆性破壊を示している。これは、熱可塑ゼラチンが PLA と十分に相溶せず、界面で応力集中が生じやすいためであり、ゼラチン凝集が破断を早める要因となっていると考えられる。PLA/PBS、PLA/Gelatin よりも延性が向上しているが、最大応力はやや低下している。PBS は PLA と部分的に相溶するため、延性改善には寄与するものの、分散状態が不十分な場合には強度低下が生じる。本図でも、PLA/PBS は比較的滑らかな応力-ひずみ曲線を示すが、破断ひずみは限定的であり、延性改善は中程度

にとどまっている。PLA/Gelatin/Starch は、破断ひずみが大きく増加し、柔軟性が顕著に向上している。これは、熱可塑デンプンに含まれるグリセリンが可塑剤として作用し、材料全体の塑性変形を促進したためである。しかし、最大応力は PLA/PBS よりも低く、強度と延性のトレードオフが明確に現れている。すなわち、柔軟性は高いが、構造材としての強度は低下する傾向にある。

PLA/PBS/Gelatin は、4 種類の中で最もバランスの取れた機械特性を示した。最大応力は PLA/PBS より高く、PLA/Gelatin よりも延性が大幅に改善されている。特に破断ひずみは他の材料を大きく上回り、200%近い大変形に耐える延性を示している。この挙動は、PBS が PLA と熱可塑ゼラチンの界面相溶化剤として働き、分散状態を均質化するとともに、熱可塑ゼラチンが界面接着を強化することで、強度と延性が同時に向上した結果であると考えられる。また、図中の拡大図（ひずみ 15%まで）からは、初期弾性域における最大応力の差が明確に確認できる。PLA/PBS/Gelatin は初期応力の立ち上がりが最も高く、これは界面強化による応力伝達効率の向上を示唆している。一方、PLA/Gelatin/Starch は初期応力が低く、可塑剤の影響により剛性が低下していることがわかる。

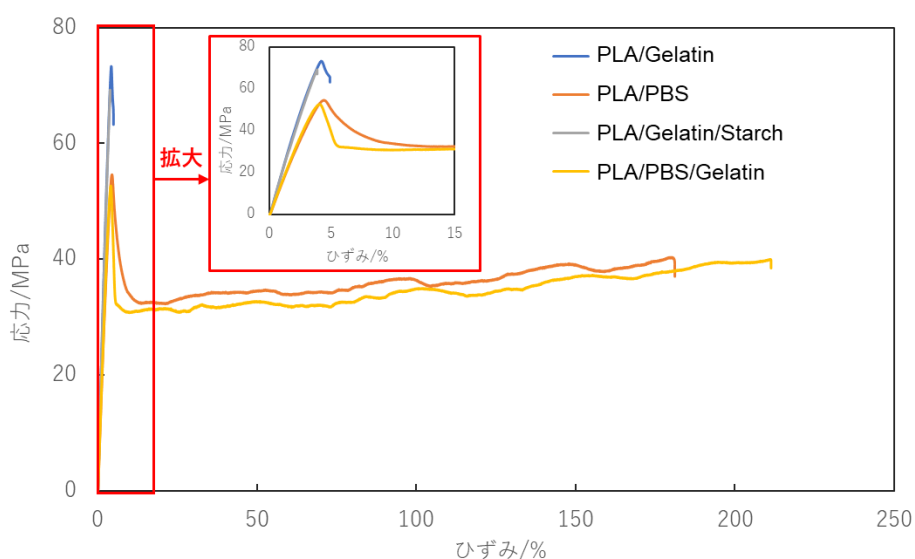


図 2-5-7 各配合組成により作製したフィルムの引張試験結果

表 2-5-3 各配合組成により作製したフィルムの機械特性評価

	ヤング率 (GPa)	最大応力 (MPa)	破断点 (%)
PLA/Gelatin=80/20	2.12±0.11	73.3±2.4	4.9±0.3
PLA/PBS=80/20	1.57±0.04	54.6±1.7	181±48
PLA/Gelatin/Starch=95/5/5	2.11±0.09	69.2±3.1	3.9±0.2
PLA/PBS/Gelatin=76/19/5	1.58±0.08	52.7±2.7	211±41

PLA を基材とした 4 種類のブレンド材料について外観 (図 2-5-8) および断面の SEM 観察 (図 2-5-9) を行った結果、添加成分の種類と相溶性の違いが微細構造に明確に反映されていることが確認された。これらの構造的特徴は、引張試験で得られた力学特性と密接に関連しており、材料ごとの破壊挙動を理解する上で重要な知見を与えている。

PLA/Gelatin では、表面に微細な凹凸や不均一な模様が観察され、熱可塑ゼラチンが PLA と十分に相溶しないまま凝集した領域が残存していた。断面においても、ゼラチン凝集に起因する空隙や界面剥離が確認され、破断面は鋭く脆性的であった。これらの観察結果は、引張試験で示された低い破断ひずみと一致しており、界面接着不良が応力集中を引き起こし、材料が塑性変形をほとんど許容しないまま破断に至ったことを示している。PLA/PBS では、表面は P PLA/Gelatin よりも均質であったものの、PBS の微細な分散相が点在し、部分的な相分離が確認された。PBS は PLA と部分的に相溶するため、延性改善には寄与するが、完全な均質化には至らず、海島構造に近い形態を形成していた。断面観察では、PBS ドメインが比較的均一に分散しているものの界面が滑らかではなく、破断面には脆性と延性が混在した特徴が見られた。これは、引張試験で得られた中程度の延性と強度低下の傾向と整合している。

PLA/Gelatin/Starch では、表面に粗い凹凸が見られ、デンプン由来の粒子状構造が明確に観察された。熱可塑デンプンは PLA および熱可塑ゼラチンとの相溶性が低く、複数の相分離構造が形成されていた。断面では、破断面が粗く繊維状に引き伸ばされた形態を示し、これは高い延性を示す材料に典型的な延性破壊の特徴であった。熱可塑デンプン中のグリセリンが可塑剤として作用し、材料全体の塑性変形を促進したことが明確に示されている一方で、界面接着は十分ではなく、強度低下の要因となる空隙や剥離も観察された。

PLA/PBS/Gelatin では、表面が最も均質であり、PBS および熱可塑ゼラチンの凝集はほとんど確認されなかった。高せん断混練によって分散が均一化し、相分離が抑制されたことが示唆される。断面観察では、破断面が滑らかで、延性的な破壊特有の引き伸ばされた構造が確認された。PBS が PLA と熱可塑ゼラチンの界面相溶化剤として働き、界面接着が強化された結果、応力が材料全体に均等に伝達され、破断に至るまで大きな変形を許容したと考えられる。この均質な微細構造は、引張試験で観察された高い破断ひずみと高い最大応力と一致しており、強度と延性の両立が達成されていることを裏付けている。

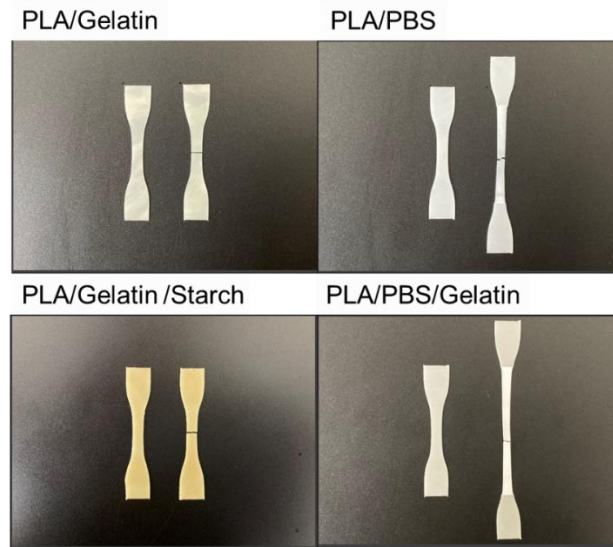


図 2-5-8 各配合組成により作製したフィルムの引張試験後の外観

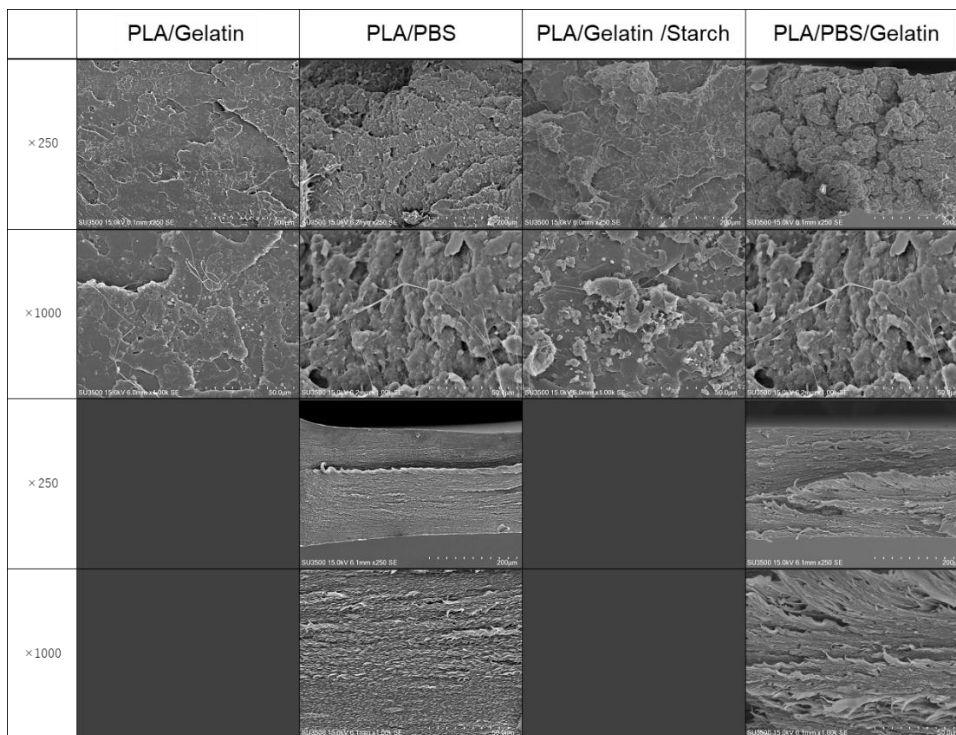


図 2-5-9 各配合組成により作製したフィルムの引張試験後の SEM 観察

以上の結果から、PLA/PBS/Gelatin は、PLA 系バイオプラスチックの中でも最も実用化に適した組成であり、外観、微細構造、機械特性のすべてが高いレベルで整合していることが確認された。特に、コンパウンド工程による分散均一化の効果が顕著であり、量産化においても安定した物性が期待できる材料であると結論づけられる。

### 2-5-3-3-2 曲げ試験

作製した PLA を基材とした 4 種類のブレンド材料 (PLA/PBS、PLA/Gelatin、PLA/PBS/Gelatin、PLA/Gelatin/Starch) 曲げ試験を行い、曲げ試験後の外観と切断面の SEM 観察を総合的に評価した。ブレンド材料は HAAKE™ MiniJet Pro ピストン式射出成形機 (Thermo Fishre Scientific) のシリンダーを 180 °C、モールドを 45 °C に加熱する。次に、熱可塑ゼラチン/PLA/PBS ブレンド約 10 g をシリンダーに入れ、5 分間放置した。さらに 5 分間押出ノズルを用いてサンプルの出し入れを繰り返した後、モールド上にセットして 750 bar の圧力で射出し、幅 10.0 mm、厚さ 4.0 mm のダンベル試験片を成形した。曲げ試験の条件は JIS K 7171、ISO 178 に従って試験速度 2 mm/min、支点間距離 64.0 mm で行った。曲げ試験後の外観と切断面の SEM 観察の結果では、材料内部の分散状態や界面構造の違いが曲げ破壊挙動に明確に反映されていることが確認された (図 2-5-10)。

まず、PLA/Gelatin では、曲げ試験後の破断部が鋭く、破断面は滑らかで脆性的な破壊形態を示した。外観上も大きな塑性変形は見られず、破断部周辺にはほとんど変形が生じていなかった。SEM 観察では、ゼラチンが PLA 中で凝集した領域が多数確認され、界面剥離や空隙が形成されていた。これらの構造は応力集中を引き起こし、曲げ荷重に対して塑性変形を許容できないまま破断に至ったことを示している。PLA/Gelatin/Starch では、曲げ試験後の試験片に大きな変形が見られ、破断部は繊維状に引き伸ばされた延性破壊特有の外観を示した。SEM 観察では、デンプン由来の粒子状構造や複数の相分離が確認され、可塑剤として作用するグリセリンの影響により材料全体が大きな塑性変形を伴って破断したことが明らかであった。しかし、界面接着は十分ではなく、破断面には空隙や剥離が散見され、曲げ強度の低下につながっていた。PLA/PBS では、曲げ試験後の外観において、PLA/Gelatin よりも明確な塑性変形が見られたものの、破断部は比較的滑らかで、脆性と延性が混在した破壊形態を示した。SEM 観察では、PBS が PLA 中に海島構造として分散しており、部分的な相溶性により延性が改善されている一方で、界面の不均一性が破断の起点となる領域を形成していた。これにより、曲げ強度は PLA 単体より低下する傾向が見られた。

これらの材料と比較して、PLA/PBS/Gelatin は、曲げ試験後の外観において最も大きな塑性変形を示し、破断部には顕著なくびれが形成されていた。破断面は滑らかで、延性的な破壊特有の引き伸ばされた構造が確認された。SEM 観察では、PBS と熱可塑ゼラチンが PLA マトリックス中に均一に分散し、界面接着が強化された均質な微細構造が形成されていた。相分離や凝集はほとんど見られず、破断面にも空隙や剥離が少ないことから、応力が材料全体に均等に伝達され、曲げ荷重に対して高い耐性を示したことがわかる。

以上の結果から、曲げ試験後の外観および切断面 SEM 観察は、材料内部の分散状態と界面構造が曲げ破壊挙動を強く支配していることを示している。PLA/Gelatin は界面不良により脆性破壊を示し、PLA/Gelatin/Starch は高延性だが強度低下が顕著であった。PLA/PBS は中程度の延性を示すものの分散不良が残り、強度向上には限界があった。一方、

PLA/PBS/Gelatin は最も均質な微細構造を有し、曲げ強度と延性の両立が達成されていた。これらの結果は、PLA/PBS/Gelatin が PLA 系材料の中で最も実用性の高い組成であることを示しており、構造と物性の両面からその優位性が裏付けられた。

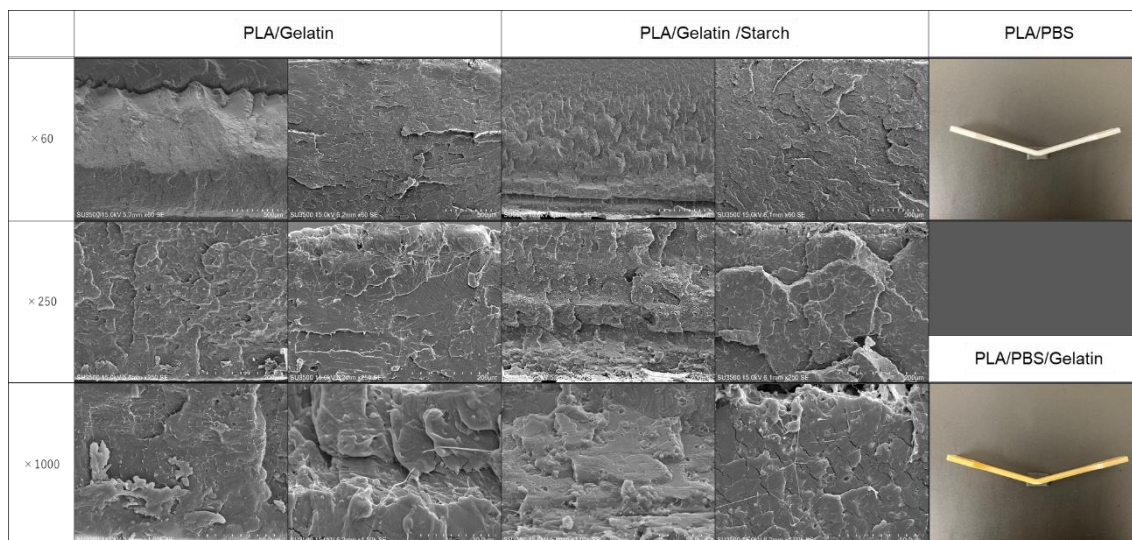


図 2-5-10 各配合組成により作製したフィルムの引張試験後の SEM 観察と外観

### 2-5-3-3-3 MFR

MFR の測定は、JIS K 7210-1 に準拠して実施した。測定温度は 190°C、荷重は 2.16 kg とし、PLA 系材料の一般的な評価条件に従った。試料は事前に乾燥機にて十分に乾燥させ、吸湿による熔融粘度の変動を防止した。測定に際しては、所定温度に保持したシリンダー内に試料を投入し、一定時間の予熱後、規定荷重を負荷した。ダイから押し出される熔融樹脂を一定時間ごとに切り出し、その質量を測定することで、10 分間あたりの押出量 (g/10 min) として MFR を算出した。各組成について 6 回の測定を行い、平均値および標準偏差を求めた。

表 2-5-4 に、190°C、2.16 kg 条件下で測定した PLA、PLA/PBS、PLA/Gelatin、PLA/PBS/Gelatin、PLA/Gelatin/Starch の 5 組成の MFR 測定結果を示す。PLA を基材とした各種ブレンド材料の MFR を 190°C・2.16 kg 条件で測定した結果、PLA 単体の MFR は 5.29 g/10 min であり、PLA/PBS および PLA/Gelatin はいずれも 5.4~5.5 g/10 min の範囲に収まり、PLA 単体とほぼ同等の流動性を示した。これらの二元系ブレンドでは、添加量が比較的少ないことに加え、PBS や熱可塑ゼラチンが PLA の熔融粘度に強く影響しないため、PLA 本来の流動性が維持されていると考えられる。また、標準偏差が 0.07~0.11 と小さいことから、混練状態が安定しており、材料の均質性が高いことが示唆された。一方、PLA/PBS/Gelatin では MFR が 10.0 g/10 min と PLA 単体の約 2 倍に増加し、PLA/Gelatin/Starch

ではさらに高い 11.16 g/10 min を示した。これらの三元系ブレンドでは、PBS や熱可塑ゼラチン、熱可塑デンプンが PLA マトリックスの熔融粘度を大きく低下させ、流動性が著しく向上していることが明らかである。PBS は PLA より低粘度であり、熱可塑ゼラチンや熱可塑デンプンは PLA との界面相互作用を変化させるため、複数成分が同時に存在することで分子運動が促進され、熔融状態での粘度低下が顕著に現れたと考えられる。また、PLA/PBS/Gelatin および PLA/Gelatin/Starch では標準偏差が 0.48~0.53 と他の組成より大きく、流動性のばらつきが増加していた。これは、PBS や熱可塑ゼラチン、デンプンの分散状態がロット間で微妙に異なることや、界面構造のわずかな変化が熔融粘度に影響しやすいことを示している。ただし、いずれのロットでも PLA 単体より高い MFR を示しており、流動性向上という傾向は一貫していた。

表 2-5-4 熱可塑ゼラチン/PLA/PBS ブレンドの機械特性評価

		MFR(190°C/2.16kg) /g/10min				
		PLA	PLA/PBS =80/20	PLA/Gelatin =95/5	PLA/PBS/Gelatin =76/19/5	PLA/Gelatin/Starch =90/5/5
n	1	5.31	5.38	5.51	9.85	11.40
	2	5.18	5.42	5.41	9.94	10.48
	3	5.38	5.37	5.39	10.4	10.84
	4	5.24	5.55	5.60	10.5	10.98
	5	5.43	5.40	5.56	10.8	11.48
	6	5.22	5.37	5.67	11.2	11.80
average		5.29	5.42	5.52	10.5	11.16
σ		0.10	0.07	0.11	0.53	0.48

\*K7210-1 準拠

以上の結果から、PLA 単体および二元系ブレンド (PLA/PBS、PLA/Gelatin) は PLA 本来の熔融粘度をほぼ維持しているのに対し、三元系ブレンド (PLA/PBS/Gelatin、PLA/Gelatin/Starch) は流動性が大幅に向上しており、射出成形や押出成形において加工性が高い材料であることが明らかとなった。特に、PLA/PBS/熱可塑ゼラチンは、PBS と熱可塑ゼラチンの相乗効果により熔融粘度が低下し、成形時の充填性が改善されることが期待される。一方で、ばらつきがやや大きい点は、分散状態の最適化や混練条件のさらなる検討が必要であることを示している。

PLA/PBS/Gelatin は高い流動性を有する加工性に優れた材料であり、量産成形に適した組成であると評価できる。

#### 2-5-3-3-4 衝撃試験

アイゾッド衝撃試験では、PLA を基材とした 5 種類のブレンド材料についてアイゾッド衝撃強度を測定し、ゼラチン、PBS、熱可塑デンプンといった添加成分が衝撃吸収能に与える影響を評価した。添付表に示されるように、各材料の衝撃強度には明確な差異が認められ、材料内部の相溶性、分散状態、界面構造が衝撃破壊挙動に強く影響していることが確認された。

図 2-5-11 に示したように、PLA 単体の衝撃強度は平均  $2.94 \text{ kJ/m}^2$  であり、PLA 特有の脆性的破壊挙動を反映した比較的低い値を示した。PLA/Gelatin では衝撃強度が  $2.49 \text{ kJ/m}^2$  と PLA より低下しており、ゼラチン添加による韌性向上効果は認められなかった。これは、ゼラチンが PLA 中で凝集しやすく、界面剥離や空隙が衝撃破壊の起点となるためであり、引張試験や SEM 観察で確認された相溶性の低さと整合する結果である。一方、PLA/PBS は  $4.50 \text{ kJ/m}^2$  と最も高い衝撃強度を示した。PBS は PLA より柔軟性が高く、部分的に相溶することで応力集中を緩和し、衝撃エネルギー吸収能を向上させる効果を示した。降伏後の塑性変形領域が広いという引張試験の結果とも一致しており、PBS 添加が PLA の脆性を効果的に緩和していることが確認された。

PLA/PBS/Gelatin では衝撃強度が  $3.57 \text{ kJ/m}^2$  となり、PLA/PBS よりは低下したものの、PLA/Gelatin 単独系よりは高い値を示した。これは、PBS がゼラチン凝集を部分的に緩和し、界面構造を改善することで、ゼラチン添加による脆化を一定程度抑制したためと考えられる。ただし、PBS 単独添加系ほどの均質化には至らず、局所的な界面剥離が衝撃破壊の起点となった可能性がある。PLA/Gelatin/Starch は  $2.29 \text{ kJ/m}^2$  と最も低い衝撃強度を示した。デンプンは PLA およびゼラチンとの相溶性が低く、複数の相分離構造が形成されるため、衝撃負荷時に界面剥離が生じやすく、エネルギー吸収能が著しく低下したと考えられる。SEM 観察で確認された粗い断面構造や空隙の存在とも一致する結果である。

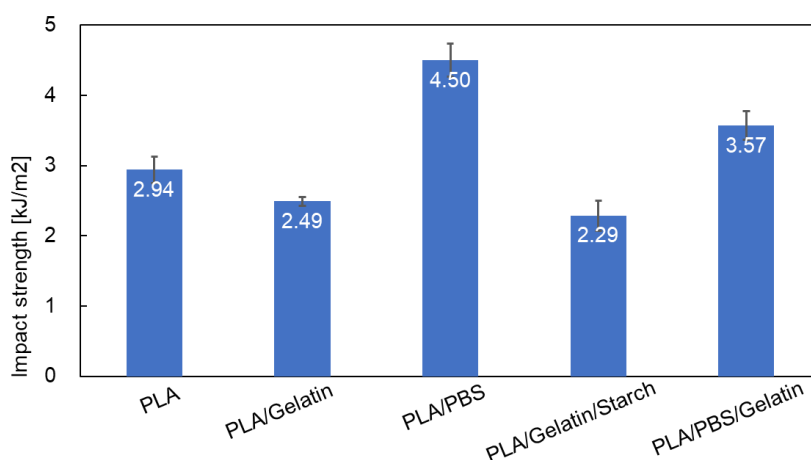


図 2-5-11 各配合組成により作製したフィルムのアイゾッド衝撃試験

以上の結果から、撃強度の向上には材料内部の均質な分散状態と界面接着の改善が不可欠であることが明らかとなった。特に PBS は PLA の脆性を緩和し、衝撃吸収能を向上させる有効な添加成分である一方、ゼラチンや熱可塑デンプンは相溶性の低さから衝撃特性を低下させる傾向がある。ただし、PBS とゼラチンを適切に組み合わせた PLA/PBS/Gelatin 系では、剛性・延性・衝撃強度のバランスを調整できる可能性が示されており、PLA 系材料の靱性改善に向けた有効な設計指針となる。

PLA 系バイオプラスチックの衝撃特性向上に向けた配合設計の重要性を示すものであり、今後の材料開発において PBS を中心とした相溶化戦略や界面制御技術の導入が有効であることを示唆している。

#### 2-5-4 事業終了後の課題と今後の取り組み

熱可塑ゼラチンおよび熱可塑デンプンを活用した PLA 系ブレンド材料の開発を進め、機械特性、耐水性、モルフォロジー、成形加工性の観点から体系的な評価を行った。その結果、熱可塑ゼラチンは剛性向上、熱可塑デンプンは延性向上という明確な役割を持つことが示され、両者を適切に組み合わせることで、用途に応じた材料設計が可能であることが明らかとなった。また、実機スケールでのコンパウンド化および射出成形試験を通じて、量産工程への適用可能性が確認され、研究段階から社会実装段階へと移行するための基盤が整った。一方で、事業終了後の実用化・量産化を見据えると、依然として解決すべき課題が複数存在する。材料設計面では、熱可塑ゼラチンおよび熱可塑デンプンの親水性に起因する相溶性の低さが、PLA マトリックス中での相分離や空隙形成として現れ、衝撃強度や破断伸びの低下につながる場合がある。特に、熱可塑デンプン添加系では複数の相分離構造が形成され、衝撃特性が低下する傾向が確認された。これらの課題に対しては、相溶化剤の導入、フィラー表面改質、ゼラチンの化学修飾など、界面制御技術の高度化が必要である。

成形加工面では、熱可塑ゼラチンの熱履歴依存性や吸湿性が、色調変化や粘度変動として現れることがあり、量産時の品質安定性を確保するためには、乾燥条件、混練温度、滞留時間などのプロセス管理をより精緻化する必要がある。また、射出成形品の寸法ばらつきについても、成形条件の最適化により改善可能であるものの、量産スケールでの再現性検証が今後の課題として残る。さらに、用途展開に向けては、耐水性・耐湿性・長期耐久性の評価が不可欠である。熱可塑ゼラチン/熱可塑デンプン/PLA ブレンドは高い耐水性を示したものの、海洋環境や屋外環境における長期劣化挙動については、実環境試験を通じた検証が必要である。特に、海洋生分解性の観点では、デンプンおよびゼラチンが微生物付着のトリガーとして機能する可能性が示唆されており、今後は海洋環境での分解挙動を定量的に評価する必要がある。一方、本事業の成果として、社会実装に向け、株式会社東北総合研究社（青森県）と株式会社新進化学（大阪府）に試作品を基にした商品化検討が

挙げられる。これらの取り組みは、MBBP 材料が実際の製品開発プロセスに組み込まれつつあることを示しており、試作品の実証試験から商品化を目指す。

今後の取り組みとしては、①界面制御技術の高度化による材料特性の安定化、②成形加工プロセスの最適化と量産スケールでの品質保証、③用途別の耐久性・生分解性評価の体系化、④企業連携による実証試験の加速、⑤市場投入に向けた製品設計・コスト評価の実施が挙げられる。特に、漁具用途・日用品用途・釣具用途といった具体的な市場をターゲットとした製品開発を進めることで、MBBP 材料の社会実装を加速させることができる。

以上のように、本事業で得られた成果は、廃棄物由来バイオマス資源の高付加価値化と、生分解性材料の社会実装に向けた重要な基盤となった。今後は、技術課題の解決と企業連携の深化を両輪として、MBBP 材料の実用化・商品化を推進し、環境負荷低減と資源循環型社会の実現に貢献していく。

## 2-6 作製した MBBP の海洋生分解評価

これまでに作製した MBBP 材料について、海洋環境を模した条件下での生分解挙動を総合的に評価する。海洋中に流出したプラスチックが長期間残存することが国際的な課題となる中、MBBP が実際の海洋環境でどの程度分解し得るかを明らかにすることは、社会実装に向けた重要な検証工程である。本事業では、2-4 および 2-5 で作製した各種試作品を対象に、海水水槽を用いた長期浸漬試験を実施し、外観変化、表面モルフォロジー、微生物付着、ならびに生分解量を多角的に解析することで、MBBP の海洋生分解性を体系的に評価した。

作製した MBBP 材料を代表的な海洋環境を模した水槽中に一定期間静置し、浸漬期間中の外観変化を経時的に観察した。透明性の低下、白濁化、表面粗面化、剥離構造の形成など、材料の劣化を示す視覚的指標を記録し、素材組成による違いを比較した。さらに、浸漬後のフィルム表面について走査型電子顕微鏡 (SEM) によるモルフォロジー観察を行い、微細構造の変化や空隙形成の程度を解析した。これにより、ゼラチンやデンプンなどの天然高分子の溶出が材料内部構造に与える影響を明確化した。また、海洋環境における生分解の初期段階として重要なバイオフィルム形成については、フィルム表面から採取した微生物試料を凍結保存し、メタゲノム解析により微生物群集構造を解明した。特に、デンプン分解菌やタンパク質分解菌、さらには PLA や PBS のエステル結合を加水分解する酵素を産生する微生物の存在を解析し、素材組成と微生物応答の関連性を評価した。さらに、生分解量の定量評価として BOD 試験を実施し、海水中で発生する CO<sub>2</sub>量を指標として材料の生分解度を算出した。BOD 試験結果と表面モルフォロジー変化を組み合わせることで、微生物付着・酵素分泌・材料崩壊の連続的プロセスを明らかにし、生分解を促進する素材組み合わせの特性を抽出した。

これらの評価を総合することで、MBBP 材料が海洋環境においてどのように分解し、どの素材が分解誘発に寄与するかを明確にし、今後の材料設計に向けた指針を得ることを目的とした。本節では、長期間の海水浸漬試験、微生物メタゲノム解析、モルフォロジー観察、BOD 試験の結果を統合し、MBBP の海洋生分解性を多面的に評価した成果を示す。

### 2-6-1 令和 6 年度までの成果

令和 5 年度から令和 6 年度にかけて実施した海洋生分解性評価研究は、熱可塑ゼラチンおよび熱可塑デンプンという天然高分子が、PLA や PBS といった海洋環境ではほとんど分解しないポリエステルに対して、極めて重要な「生分解性トリガー」として機能することを体系的に示した点に最大の意義がある。本事業の特徴は、単に材料の分解挙動を観察するだけでなく、海洋微生物の付着・増殖、材料内部構造の変化、化学的分解プロセスの可視化、閉鎖系と実海域の分解挙動の差異など、多角的な視点から海洋生分解性の発現メカ

ニズムを明らかにした点にある。これらの成果は、海洋プラスチック問題に対する新しい材料設計指針を提示するものであり、従来の PLA・PBS 研究では到達し得なかった領域に踏み込んだものである。

熱可塑ゼラチン/PLA ブレンドの海水浸漬試験では、ゼラチンが海洋微生物の付着・増殖を強力に誘発し、PLA の分解を実際に進行させることが確認された。浸漬前後の外観変化は図 2-6-1 に示されており、透明で均質だったフィルムが、1 か月後には白濁し、赤色の微小斑点が多数出現している。これらの斑点は SEM 観察と微生物培養により、海水中の微生物がフィルム表面に付着・増殖した痕跡であることが明らかとなった。重量減少率の変化（図 2-6-2）では、ゼラチン含有量 5 wt% に対し、1 か月で約 10% の減少が観察され、単純なゼラチン溶出量を大きく上回った。さらに、GPC 測定では PLA の分子量が 100,000 から 85,000 へと低下しており、PLA 部分の加水分解が進行していることが確認された。ゼラチン溶出に伴うフィルム内部の空隙形成は、SEM 観察により微細な孔や剥離構造として捉えられ、光散乱による白濁とともに、PLA 表面積の増加が微生物付着をさらに促進するという、材料科学と微生物生態学が連動した分解プロセスが明確に示された。

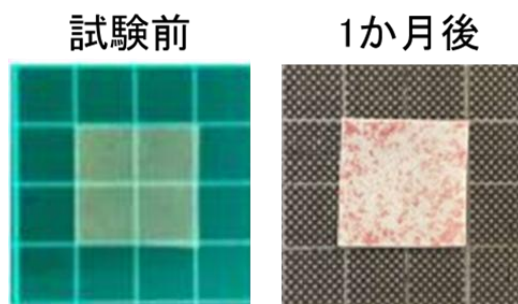


図 2-6-1 海水生分解性試験前と後のフィルム

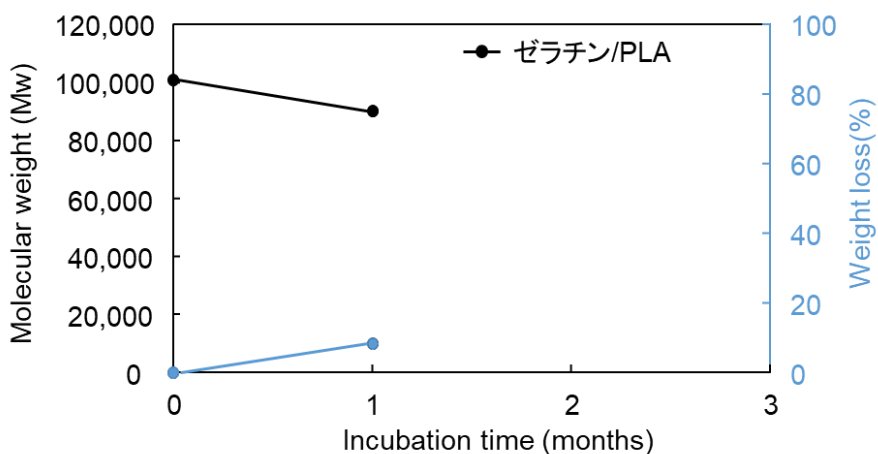


図 2-6-2 海水生分解性試験前と後の重量損失と分子量減少

一方、熱可塑デンプン/PLA ブレンドでは、デンプンが微生物の代謝活性を強く刺激し、PLA の分解を誘発する「生化学的トリガー」として機能することが明らかとなった。実海域浸漬3か月後の外観（図 2-6-3）では、PLA 単体がほぼ無変化であるのに対し、デンプン/PLA ブレンドは多数の空洞や剥離構造を形成し、表面が大きく崩壊していた。重量減少率（図 2-6-4）は約 15%に達し、デンプン含有量（10 wt%）を上回る減少が観察された。微生物群集解析では、デンプン分解酵素アミラーゼを産生する *Reinekea marina* に加え、PLA のエステル結合を加水分解する *Aliiroseovarius sediminilitoris* や *Corallincola holothuriorum* が検出され、デンプンが微生物群集の構造を大きく変化させていることが明らかとなった。さらに、BOD 試験（図 2-6-5 および図 2-6-6）では、PLA 単体がほぼゼロであった CO<sub>2</sub> 生成量が、デンプン/PLA ブレンドでは PLA の 240 倍に達し、PLA 部分の分解が明確に進行していた。これは、デンプンが微生物の代謝を強力に刺激し、PLA 分解酵素の産生を誘発するという、従来の PLA 研究では見られなかった新しい分解メカニズムを示す重要な成果である。

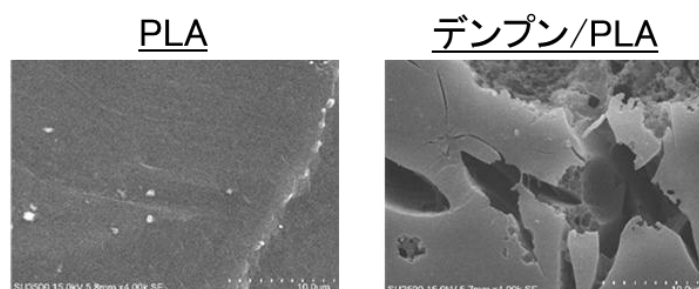


図 2-6-3 PLA フィルムと熱可塑デンプン/PLA ブレンドフィルムの海水生分解性試験前と後の SEM 観察

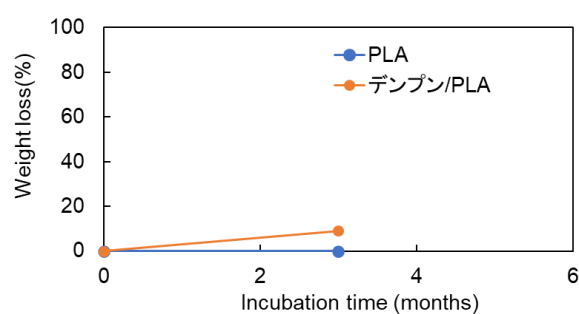


図 2-6-4 海水生分解性試験前と後の重量損失と分子量減少

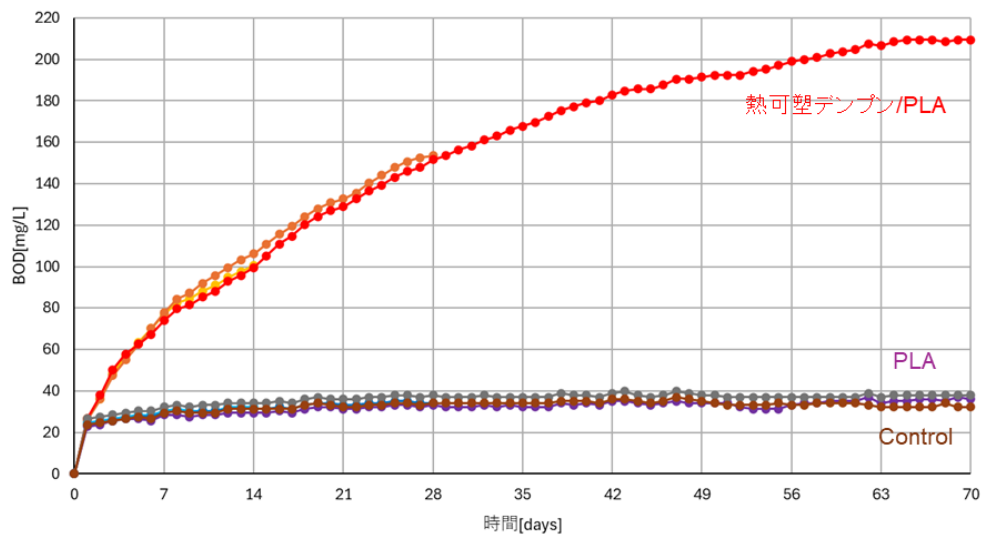


図 2-6-5 各サンプルの BOD 変化

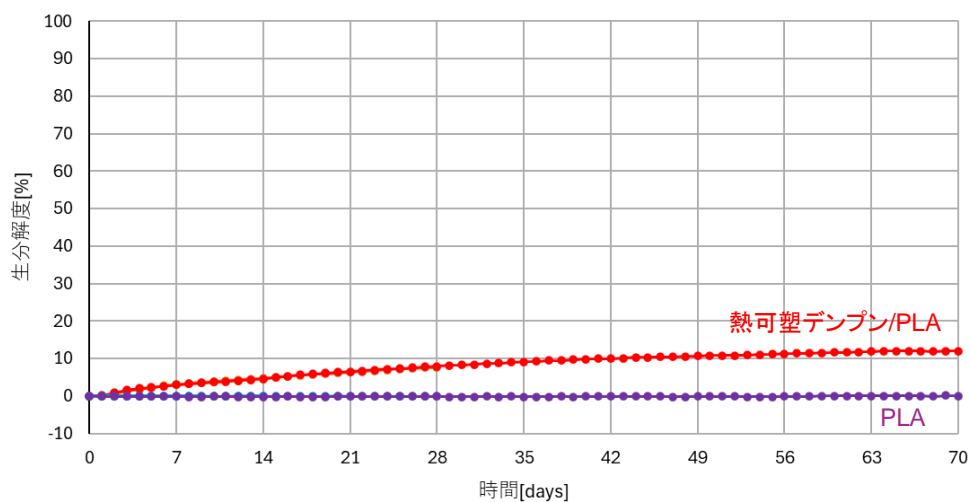


図 2-6-6 各サンプルの生分解度変化

さらに、PLA/PBS/Gelatin ブレンドでは、PBS が海洋環境で部分的に分解するという従来研究にない現象が確認された。TGA/DTA 解析 (図 2-6-7) では、PBS の熱分解ピークが浸漬後に大きく減少し、12 週間で約 60% の分解率に達した。PBS は一般に PLA 以上に海洋環境で安定とされるが、ゼラチンの存在により PBS の分解が誘発されるという新しい知見が得られた。浸漬後の外観 (図 2-6-8) では、ゼラチン溶出によりフィルムが白濁し、表面にバイオフィルムが形成されていた。重量減少率 (図 2-6-9) では、ゼラチン/PLA 系よりも減少率が低いものの、PBS 部分の分解が進行していることが確認された。

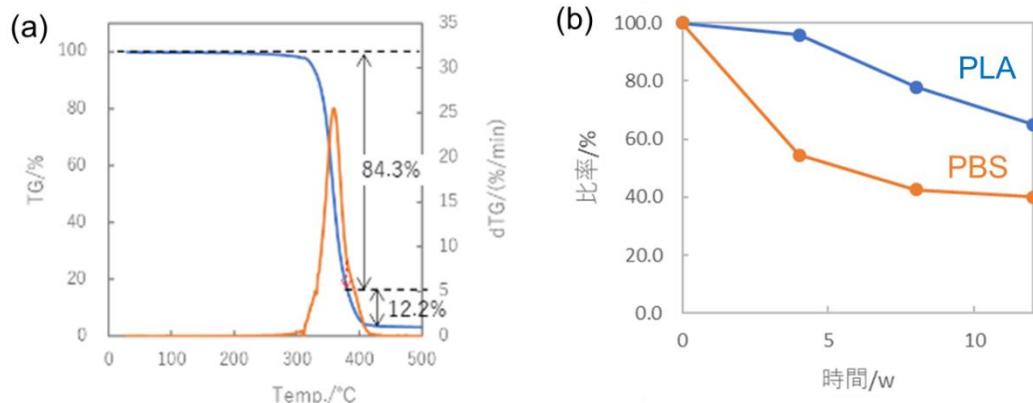


図 2-6-7 熱可塑ゼラチン/PLA/PBS ブレンド (PLA / PBS / Gelatin = 76/19/5)の(a) 12 週水槽浸漬後の TGA (青線)と DTA (オレンジ線)の結果、(b) DTA から計算した PLA と PBS の分解比率

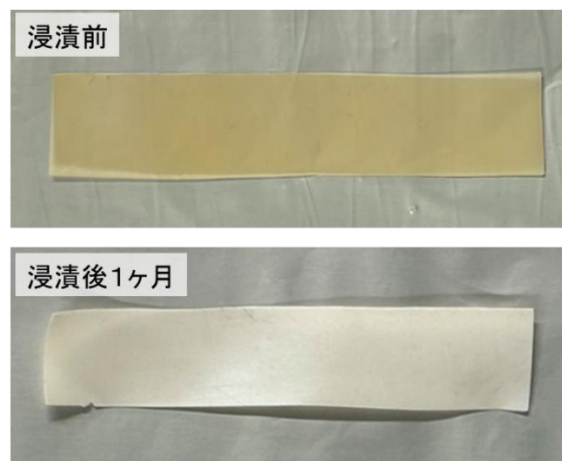


図 2-6-8 海水水槽浸漬 1ヶ月前後の様子

海水水槽（閉鎖系）と実海域（開放系）では分解挙動が大きく異なることも明らかとなった。閉鎖系ではゼラチンやデンプンが希釈されず蓄積するため、微生物の増殖が加速し、PLA や PBS の分解が顕著に進行した。一方、実海域では溶出成分が海水により急速に希釈されるため、分解は緩やかであった。実海域浸漬後の SEM 観察（図 2-6-10）では、ゼラチン溶出による表面粗面化が確認され、PBS の部分分解が進行していた。これは、実海域でもゼラチンが微生物付着を誘発し、PBS の分解を促進する可能性を示す重要な知見である。

以上の成果をまとめ、熱可塑ゼラチンは微生物付着を誘発する「生物学的トリガー」、熱可塑デンプンは微生物代謝を活性化する「生化学的トリガー」として機能し、両者は異なる経路で PLA および PBS の分解を促進する。これらの知見は、海洋生分解性材料の設計において、天然高分子を少量添加するだけで難分解性ポリエステル分解を誘発できると

いう新しい材料設計概念を確立したものであり、海洋プラスチック問題の解決に向けた革新的なアプローチとして高く評価されるべき成果である。

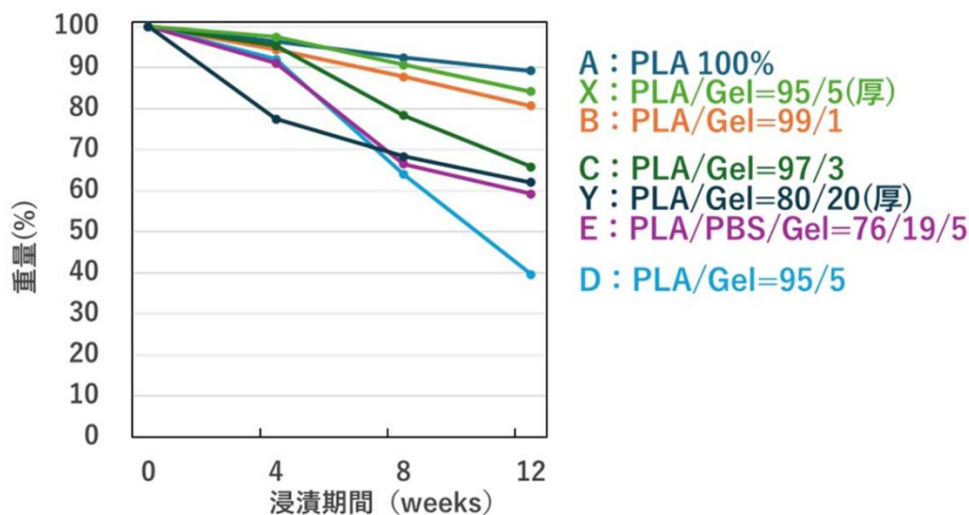


図 2-6-9 海水水槽浸漬により重量減少

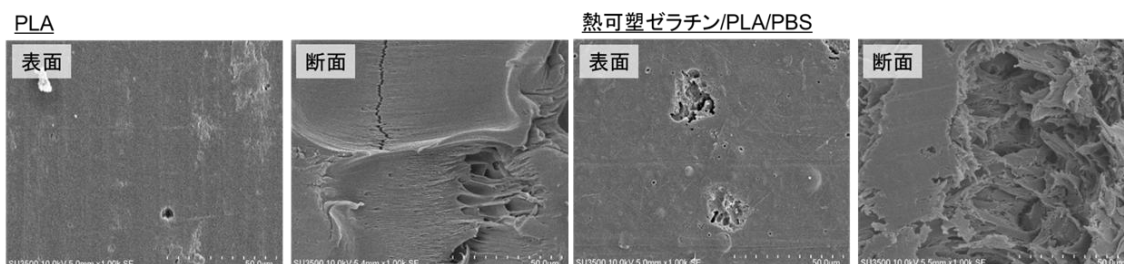


図 2-6-10 ブレンドフィルムの海中浸漬 12 週後の SEM 観察

## 2-6-2 令和 7 年度実施内容

令和 5～6 年度までに蓄積された基礎的知見を踏まえ、作製した MBBP 材料の海洋生分解性をより実環境に近い条件で検証し、その分解挙動を科学的に解明することを中心的な目的として進めた。これまでの研究により、熱可塑ゼラチンおよび熱可塑デンプンが PLA および PBS の海洋生分解性を誘発する「生物学的・生化学的トリガー」として機能することが明らかとなったが、これらの知見は主として水槽浸漬試験や短期間の海中浸漬試験に基づくものであり、長期間にわたる分解挙動、微生物群集の推移、材料内部構造の変化、さらには分解速度に影響する環境因子の詳細については未解明の部分が多く残されていた。

令和 7 年度では、これらの未解明領域を体系的に明らかにするため、海洋環境を模した長期浸漬試験、バイオフィーム形成のメタゲノム解析、材料表面および内部構造のモルフ

オロジー解析、BOD 試験による生分解量の定量化を組み合わせ、MBBP 材料の海洋生分解性を多角的に評価した。特に、海洋生分解性の科学的背景として重要な「微生物付着」「酵素分泌」「バイオフィーム形成」「材料内部への浸透」「エステル結合の加水分解」という一連のプロセスを、材料組成ごとに比較しながら解析することに重点を置いた。令和7年度の研究は、単なる材料評価にとどまらず、海洋生分解性の発現メカニズムを分子レベル・微生物レベル・材料工学レベルの三層構造で理解することを目指したものであり、これにより、MBBP 材料の社会実装に向けた材料設計指針を確立することが期待される。さらに、実用化を見据えた試作品（フジツボ養殖板、釣具部材など）を対象とした海洋浸漬試験も開始し、材料の分解挙動が実製品形状においてどのように現れるかを検証した点に大きな特徴がある。

本節では、令和7年度に実施した研究内容を、材料選定、海洋生分解性評価、微生物解析、熱分析、モルフォロジー観察、BOD 試験、実海域浸漬試験の順に詳細に述べるとともに、得られた知見が今後の材料開発および社会実装にどのように寄与するかについて考察する。

材料選定と実験設計の背景について、令和7年度の海洋生分解性評価に用いた材料は、令和6年度までの機械特性評価、成形加工性評価、コンパウンド化試験の結果を踏まえて選定した。具体的には、PLA 単体、PLA/Gelatin (95/5)、PLA/PBS/Gelatin (76/19/5)、PLA/Gelatin/Starch (90/5/5) の4種類を中心とし、これらはいずれも海洋生分解性の発現に寄与する可能性が高い組成として選ばれた。

PLA 単体は海洋環境ではほとんど分解しないことが知られており、比較対象として必須である。PLA/Gelatin はゼラチンが微生物付着を誘発し、PLA の分解を促進することが過去の研究で示されている。PLA/PBS/Gelatin はPBSの柔軟性とゼラチンの生分解性誘発効果が組み合わせられることで、PLA とは異なる分解挙動を示すことが期待される。PLA/Gelatin/Starch はデンプンが微生物の代謝活性を強く刺激し、PLA の分解を誘発することが示されており、最も高い生分解性を示す可能性がある。これらの材料を選定した背景には、海洋生分解性が単一の要因によって決定されるものではなく、材料組成、微生物群集、溶出成分、表面構造、内部構造、環境条件など複数の要因が複雑に相互作用するという科学的理解がある。したがって、材料組成の違いが海洋生分解性にどのように影響するかを比較するためには、異なる分解誘発メカニズムを持つ材料を体系的に評価する必要がある。

実験設計では、海洋生分解性の評価を「外観変化」「表面モルフォロジー」「熱分析」「微生物群集解析」「生分解量の定量化」という五つの観点から行い、これらを統合することで材料の分解挙動を総合的に理解することを目指した。特に、バイオフィーム形成のメタゲノム解析は、海洋生分解性の初期段階である微生物付着の実態を明らかにするうえで重要であり、令和7年度の研究の中心的な位置を占める。

### 2-6-2-1 海水水槽浸漬試験

海水水槽浸漬試験は、海洋環境を模した条件下で材料の分解挙動を評価するための基礎的かつ重要な試験である。本事業では、ASTM D6691 に準拠した人工海水を用い、温度 30°C、攪拌条件 150 rpm の環境下で材料を最大 6 か月間浸漬した。人工海水には塩化アンモニウムおよびリン酸二水素カリウムを添加し、海洋微生物の増殖に必要な栄養塩を補った。水槽浸漬試験は、実海域浸漬と異なり、温度、塩分濃度、微生物密度、溶存酸素量などの環境条件を厳密に制御できる点にある。実海域では季節変動や潮流の影響が大きく、材料の分解挙動を定量的に比較することが難しい。一方、水槽浸漬では条件を一定に保つことができるため、材料組成の違いが分解挙動に与える影響を純粋に評価することが可能である。水槽浸漬試験では、PLA 単体、PLA/Gelatin (95/5)、PLA/PBS/Gelatin (76/19/5)、PLA/Gelatin/Starch (90/5/5) の 4 種類の材料を対象とし、浸漬 0 か月、2 か月、6 か月の時点で試料を回収した。回収した試料は、外観観察、重量測定、SEM 観察、TGA/DTG 解析、微生物分離、メタゲノム解析に供した。浸漬後の外観変化では、PLA 単体では 6 か月浸漬後も外観変化がほとんど見られず、海洋環境における PLA の安定性が再確認された。一方、PLA/Gelatin および PLA/Gelatin/Starch では、浸漬 2 か月時点で既に表面が白濁化し、微生物付着によるバイオフィーム形成が確認された。特に PLA/Gelatin/Starch では、デンプンをゼラチンの溶出により材料内部に空隙が形成され、PLA の分解が誘発されていることが明らかとなった。

材料表面のモルフォロジー変化は、海洋生分解性の進行を視覚的に捉えるうえで極めて重要である。浸漬前 (0M)、2 か月後 (2M)、6 か月後 (6M) の各時点で材料表面を SEM により観察し、表面構造の変化を詳細に解析した。代表的な SEM 画像を図 2-6-12 に示す。PLA 単体では、浸漬 6 か月後でも表面は平滑であり、微生物付着や表面劣化はほとんど観察されなかった。これは、PLA が海洋環境では加水分解速度が極めて遅く、微生物付着も限定的であることを示す。PLA/Gelatin では、ゼラチン溶出に伴い表面に微細な凹凸が形成され、2 か月時点で既にバイオフィーム形成が確認された。6 か月後には、ゼラチン溶出による空隙形成が進行し、PLA 表面が粗面化していた。PLA/Gelatin/Starch では、デンプンをゼラチンの溶出により材料内部に空洞が形成され、PLA/Gelatin よりも顕著な表面劣化が観察された。デンプンをゼラチンは海水中で膨潤・溶出しやすく、微生物の代謝活性を強く刺激するため、PLA の分解がより早期に進行したと考えられる。PLA/PBS/Gelatin では、PBS 相の崩壊が表面構造に反映され、PBS が優先的に分解されていることが示唆された。PBS は PLA より柔軟であり、微生物酵素の作用を受けやすい可能性がある。

これらの SEM 観察結果は、材料組成が分解挙動に与える影響を視覚的に示すものであり、ゼラチンおよびデンプンが海洋生分解性を誘発する重要な役割を果たすことを裏付ける。

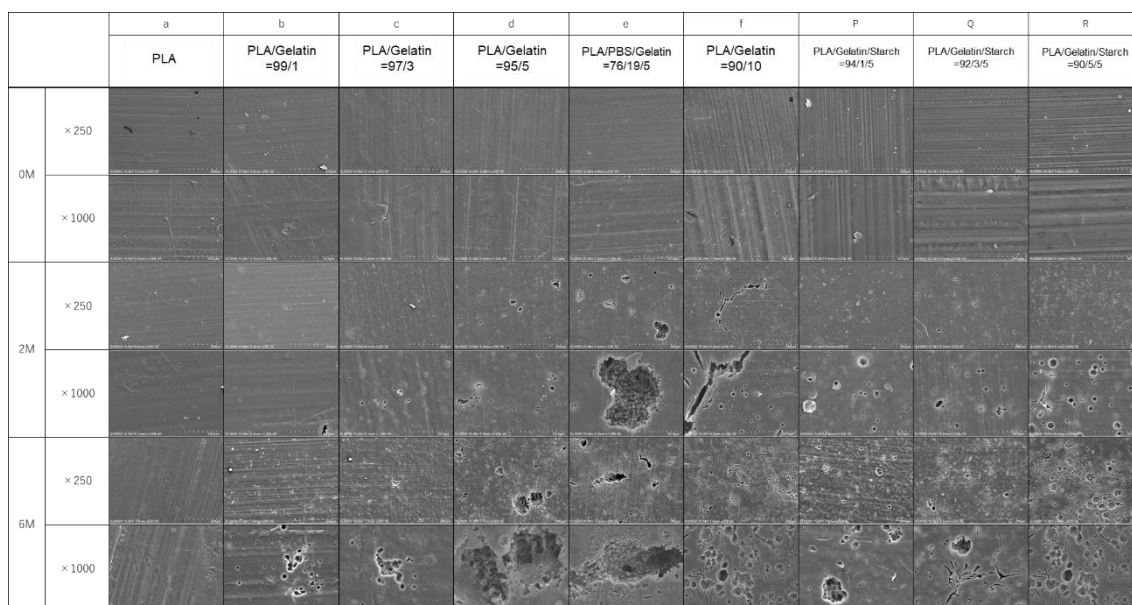


図 2-6-12 各配合組成により作製したフィルムの海中浸漬 SEM 観察

#### 2-6-2-2 熱分析 (TGA/DTG) による分解挙動解析

海洋生分解性の進行を材料内部の化学的変化として捉えるため、浸漬前後の試料について熱重量分析 (TGA) および示差熱重量分析 (DTG) を実施した。TGA/DTG は、材料を加熱しながら重量変化を測定することで、構成成分の熱分解温度、残渣量、分解ピークの変化を解析できるため、海水浸漬による材料劣化を定量的に評価するうえで極めて有効である。本節では、図 2-6-13 から図 2-6-15 に示した各材料の熱分析結果をもとに、材料組成が熱分解挙動に与える影響と、海水浸漬による化学構造変化を詳細に考察する。

まず、PLA 単体の TGA/DTG 曲線では、浸漬 0 か月、2 か月、6 か月のいずれにおいても主分解ピークは約 364°C 付近に位置し、ピークトップ温度の変動は±0.5°C 以内であった (図 2-6-13)。この結果は、PLA が海洋環境では化学的に極めて安定であり、加水分解や微生物分解がほとんど進行しないことを示す。PLA はエステル結合を有するが、海水中の中性条件では加水分解速度が極めて遅く、また海洋微生物が PLA を直接分解する能力を持つ例は限られているため、熱分析においても分解挙動の変化がほとんど現れない。一方、PLA/Gelatin では、浸漬前の TGA/DTG 曲線において、熱可塑ゼラチン単独で観察されるはずの分解ピーク (通常 250~320°C 付近) が明瞭に確認されなかった (図 2-6-14)。この現象は、単にゼラチンの含有量が少ないためにピークが埋没したのではなく、熱可塑ゼラチンが PLA マトリックス中で相溶化し、ゼラチン本来の熱分解挙動が PLA の熱分解挙動へとシフトしたことを示す重要な指標である。一般に、相溶性を有する高分子ブレンドでは、各成分の熱分解ピークが独立して現れず、主成分側へ統合されることが知られている。

PLA/Gelatin系においても同様の挙動が確認され、熱可塑ゼラチンの分解開始温度がPLAの分解温度域へと引き上げられた結果、ゼラチン由来のピークが消失したと解釈できる。これは、熱可塑ゼラチンがPLA鎖と分子レベルで相互作用し、PLAのエステル鎖との混合状態が均質化したことを示唆する。

浸漬後の試料では、ゼラチン由来ピークが完全に消失し、PLAのピークトップ温度がわずかに低温側へシフトしていた。これは、海水浸漬によりゼラチンが溶出し、PLAの分子量が低下したことを反映している。すなわち、浸漬前のピーク消失は「相溶化によるピーク統合」、浸漬後のピーク変化は「ゼラチン溶出とPLA分解の進行」を示すものであり、両者は異なるメカニズムに基づく現象である。

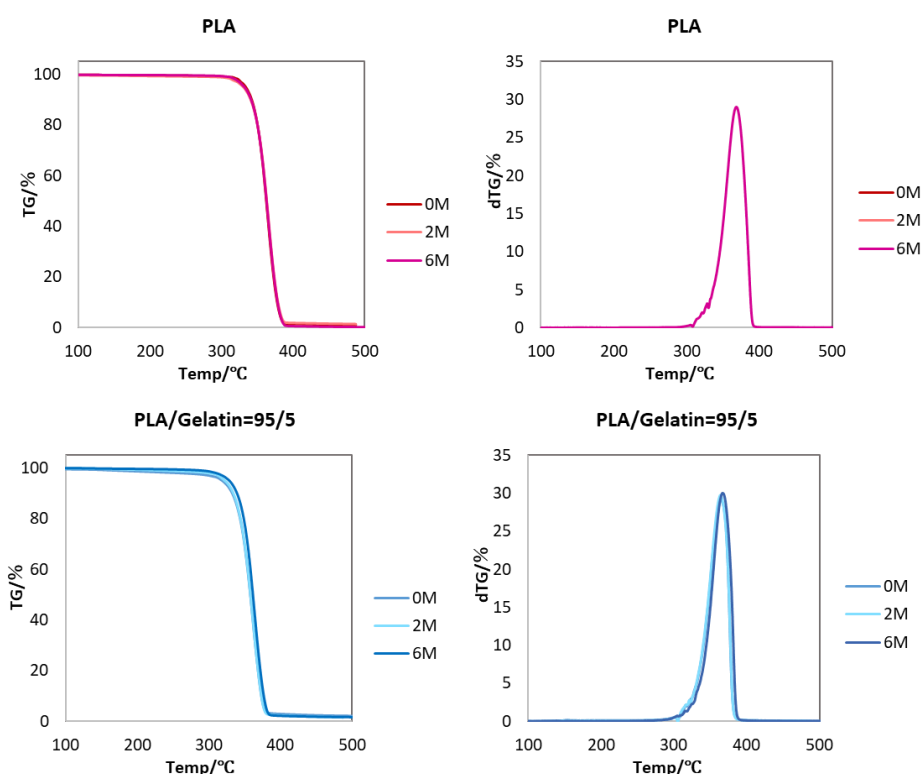


図 2-6-13 PLAと熱可塑ゼラチン/PLAブレンドの水槽浸漬前後のTGA、DTA評価

PLA/PBS/Gelatinでは、PBSの分解ピーク（約398°C）が浸漬後に大きく減少し、PBSが海水中で部分的に分解していることが示された（図2-6-14）。PBSはPLAより柔軟であり、微生物酵素の作用を受けやすいことが知られているため、PBS相が優先的に分解されるという結果は科学的に整合的である。特に6か月浸漬後にはPBSの残存率が約70%まで低下しており、ゼラチンの存在がPBS分解を誘発している可能性が高い。PBSは脂肪族ポリエステルであり、エステル結合がPLAよりも酵素攻撃を受けやすいため、バイオフィルム形成が進行した環境下ではPBSが先に分解されることが多い。

PLA/Gelatin/Starchでは、熱可塑デンプン由来の分解ピーク（約320°C）が浸漬後に完全

に消失し、PLA の主分解ピークが一時的に低温側へシフトした (図 2-6-15)。これは、デンプンの溶出に伴う PLA の分子量低下や表面劣化が熱分解挙動に反映されたものであり、デンプンが PLA 分解を促進する「生物化学的トリガー」として機能していることを裏付ける。デンプンは海水中で膨潤・溶出しやすく、微生物の代謝活性を強く刺激するため、PLA の分解がより早期に進行したと考えられる。

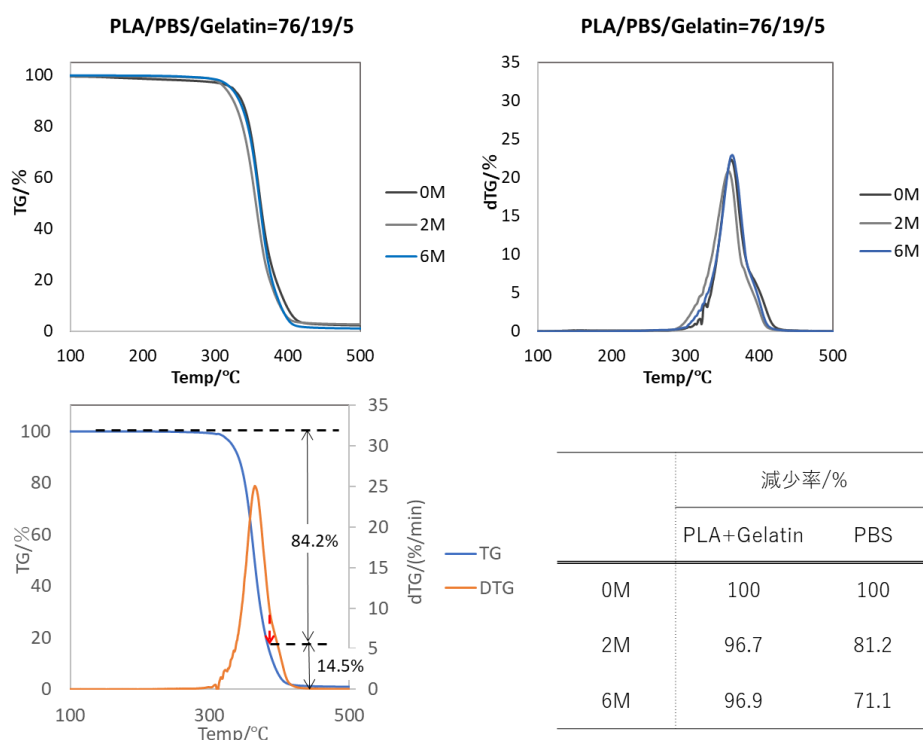


図 2-6-14 熱可塑ゼラチン/PLA/PBS ブレンドの水槽浸漬前後の TGA、DTA 評価

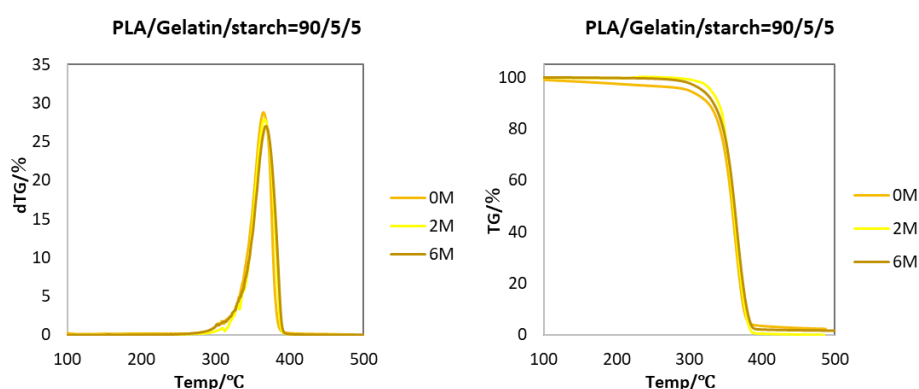


図 2-6-15 熱可塑ゼラチン/熱可塑デンプン/PLA ブレンドの水槽浸漬前後の TGA、DTA 評価

以上の TGA/DTG 解析結果は、海洋生分解性が材料内部の化学構造にどのように影響するかを明確に示しており、ゼラチンおよびデンプンが海洋生分解性を誘発する重要な役割を果たすことを科学的に裏付けるものである。特に、熱可塑ゼラチンのピーク消失は、相

溶化による熱分解挙動の統合という材料科学的に重要な現象であり、海洋生分解性の初期段階におけるゼラチン溶出挙動や微生物付着の均一性にも影響を与える可能性がある。これらの知見は、MBBP 材料の設計において、相溶性、溶出性、微生物誘発性を総合的に考慮する必要性を示している。

### 2-6-2-3 BOD 試験による生分解量の定量評価

海洋生分解性を定量的に評価するため、OxiTop®システムを用いた BOD (Biochemical Oxygen Demand) 試験を実施した。BOD 試験は、材料が微生物により分解される際に消費される酸素量を指標とするものであり、海洋環境における生分解の進行を直接的に反映する。本事業では、PLA 単体、PLA/Gelatin、PLA/PBS/Gelatin、PLA/Gelatin/Starch の 4 種類の材料を対象とし、人工海水中で 84 日間の酸素消費量を測定した。得られた結果を図 2-6-16 に示す。PLA 単体では、試験期間を通じて酸素消費量がほぼゼロであり、海水中での生分解がほとんど進行していないことが確認された。これは、PLA が中性条件の海水中では加水分解速度が極めて遅く、また海洋微生物が PLA を直接分解する能力をほとんど持たないという既知の知見と一致する。PLA は海洋環境において極めて安定であり、自然状態では長期間残存することが改めて示された。PLA/Gelatin では、ゼラチンの分解に伴い酸素消費量が増加し、PLA 単体と比較して明確な BOD 上昇が観察された。ゼラチンは海水中で速やかに溶出し、プロテアーゼ産生菌の増殖を誘発するため、微生物の代謝活性が高まり、酸素消費が増加したと考えられる。ただし、酸素消費量はゼラチンの分解にほぼ対応しており、PLA 部分の生分解は限定的であった。これは、ゼラチンが微生物付着の足場として機能する一方で、PLA の分解を直接的に促進する効果は限定的であることを示す。PLA/PBS/Gelatin では、PLA/Gelatin よりも高い酸素消費が観察された。PBS は脂肪族ポリエステルであり、PLA よりも酵素分解を受けやすいことが知られている。ゼラチンの溶出により微生物付着が促進されると、PBS が優先的に分解され、その結果として酸素消費量が増加したと考えられる。BOD 曲線の立ち上がりが PLA/Gelatin よりも早いことは、PBS が海洋微生物にとってより分解しやすい基質であることを反映している。PLA/Gelatin/Starch では、4 種類の中で最も高い酸素消費量が観察され、BOD 曲線は急峻な立ち上がりを示した。熱可塑デンプンは海水中で膨潤・溶出しやすく、アミラーゼ産生菌の代謝活性を強く刺激するため、微生物群集全体の活性が大幅に向上する。熱可塑デンプンおよびゼラチンが速やかに分解されることで、微生物密度が増加し、PLA のエステル結合に作用するエステラーゼやリパーゼの産生が誘発される。その結果、PLA 部分の分解も進行し、熱可塑デンプンおよびゼラチンの ThOD 到達後も酸素消費が継続した。この現象は、熱可塑デンプンが PLA 分解を誘発する「生物化学的トリガー」として機能していることを強く示唆する。

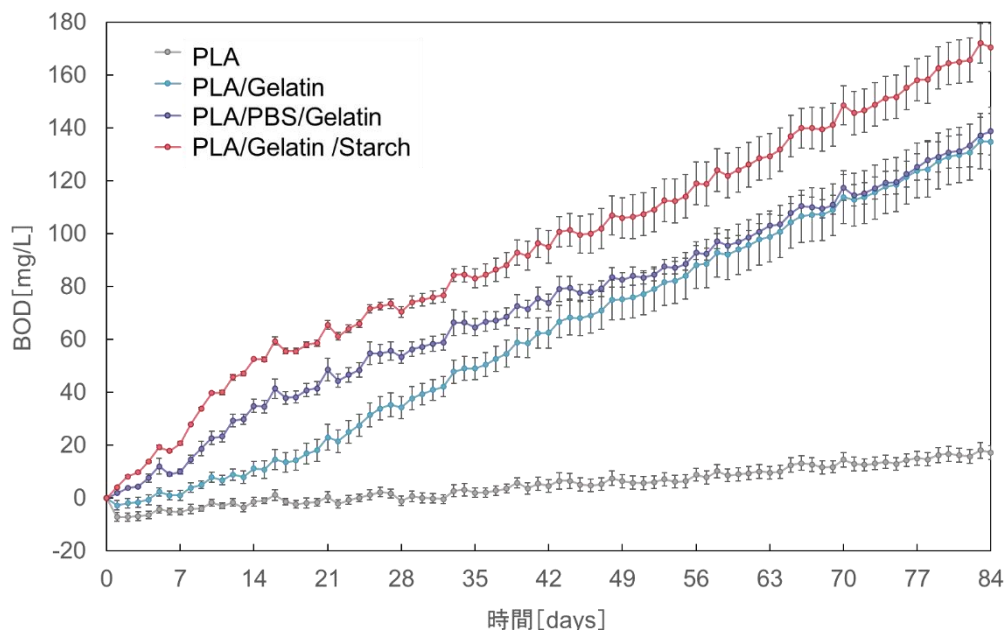


図 2-6-16 各配合組成により作製したフィルムの BOD 試験

図 2-6-17 は、BOD 試験により得られた酸素消費量の経時変化に対し、PLA を除いたシート構成成分（ゼラチン、デンプン、PBS）の理論的酸素要求量（ThOD）を基準線として重ね合わせたものである。この基準線は、シート中の天然高分子および PBS が完全に生分解された場合に必要となる酸素量を示しており、測定された酸素消費量がこの値を超過した場合、PLA 部分の分解が開始していると判断できる。本解析は、複合材料の生分解挙動を成分ごとに分離して評価するうえで極めて有効であり、PLA の海洋生分解性を直接的に検出する指標として機能する。

PLA/Gelatin系では、酸素消費量はゼラチンの ThOD 基準線に近づくものの、明確に超過することはなかった。これは、ゼラチンが速やかに分解され微生物活性を高める一方で、PLA 部分の分解はほとんど進行していないことを示す。ゼラチンは微生物付着を誘発する「生物学的トリガー」として機能するが、PLA のエステル結合に直接作用する酵素の誘導は限定的であり、PLA の分解開始には至らなかったと考えられる。

PLA/PBS/Gelatin系では、PBS の ThOD 基準線に近い酸素消費が観察され、PBS が優先的に分解されていることが示唆された。しかし、酸素消費量は PBS+ゼラチンの ThOD を大きく超えることはなく、PLA 部分の分解は限定的であった。PBS は PLA よりも酵素分解を受けやすい脂肪族ポリエステルであるため、ゼラチンの溶出により微生物付着が促進されると PBS が先に分解される。この挙動は TGA/DTG 解析で PBS ピークが大きく減少した結果とも整合しており、PBS の分解が PLA 分解に先行することが確認された。

PLA/Gelatin/Starch系では、酸素消費量がゼラチン+デンプンの ThOD 基準線を明確に超過し、PLA 部分の分解が進行していることが示された。デンプンは海水中で膨潤・溶出し

やすく、アミラーゼ産生菌の代謝活性を強く刺激するため、微生物群集全体の活性が大幅に向上する。デンプンおよびゼラチンが速やかに分解されることで微生物密度が増加し、PLAのエステル結合に作用するエステラーゼやリパーゼの産生が誘発される。その結果、PLA部分の分解が開始し、ThOD基準線を超える酸素消費が観察された。この挙動は、PLA/Gelatin/Starchが最も高い生分解性を示した図2-6-16の結果とも一致している。

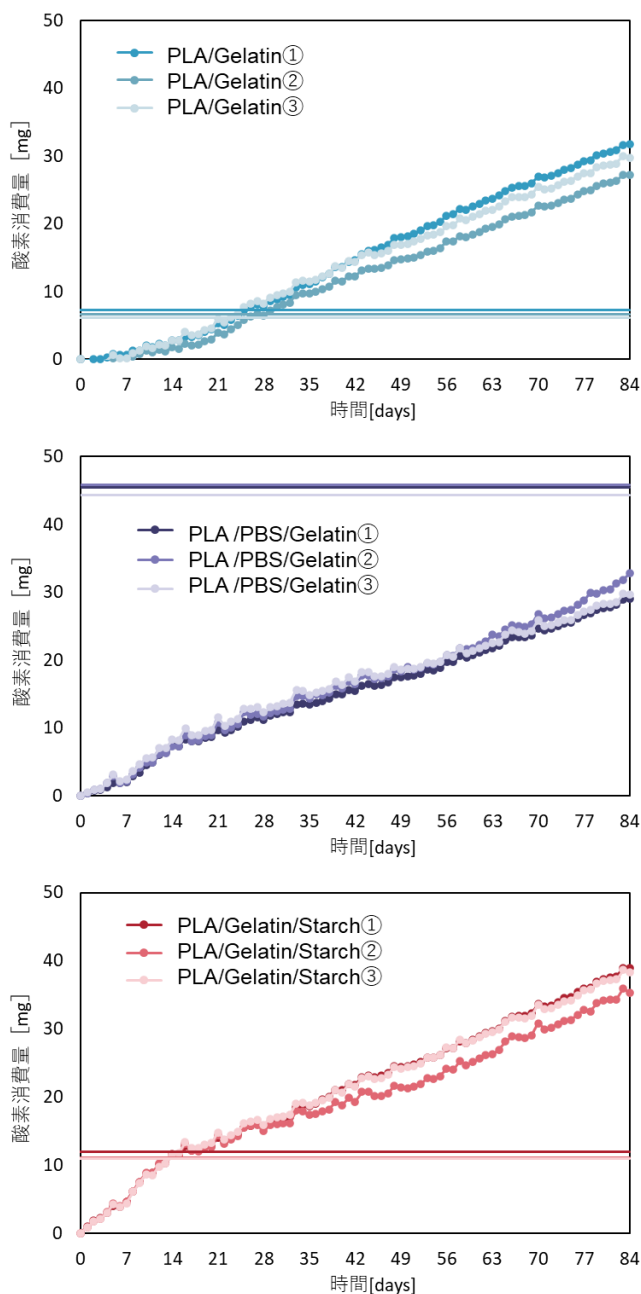


図 2-6-17 BOD 試験における酸素消費量とシート構成成分(ゼラチン・デンプン・PBS)の ThOD 基準線の比較

以上の結果から、ThOD 基準線を用いた解析は、複合材料中の PLA 分解を明確に判定するうえで極めて有効であることが示された。特に、PLA/Gelatin/Starch 系では PLA 分解が実際に進行していることが定量的に確認され、デンプンが PLA 分解を誘発する「生化学的トリガー」として機能することが強く裏付けられた。一方、PLA/Gelatin および PLA/PBS/Gelatin では、ゼラチンや PBS の分解は進行するものの、PLA 分解には至らず、PLA の海洋生分解性の発現にはデンプンの存在が重要であることが明確となった。BOD 試験は材料組成が海洋生分解性に与える影響を明確に示しており、特にデンプン併用系が最も高い生分解性を示すことが明らかとなった。ゼラチンは微生物付着を促進する「生物学的トリガー」として機能し、デンプンは微生物代謝を活性化する「生化学的トリガー」として作用する。PBS は PLA よりも酵素分解を受けやすいため、ゼラチン存在下では PBS が優先的に分解される。これらの相互作用により、PLA/Gelatin/Starch が最も高い生分解性を示したと結論づけられる。

#### 2-6-2-4 バイオフィーム形成とメタゲノム解析

海洋生分解性の初期段階において最も重要な現象のひとつが、材料表面への微生物付着とバイオフィーム形成である。バイオフィームは、微生物が材料表面に定着し、細胞外多糖 (EPS) を分泌して形成される複合構造であり、材料分解の起点となる。バイオフィームが形成されると、微生物が産生するエステラーゼ、リパーゼ、プロテアーゼなどの酵素が材料表面に高濃度で保持され、PLA や PBS のエステル結合が加水分解されやすくなる。浸漬後の材料表面からバイオフィームを採取し、凍結保存した後、メタゲノム解析を実施した。採取したバイオフィームは、SDS 処理による細胞分散、希釈培養、寒天培地での単離培養を経て、16S rRNA 遺伝子のメタゲノム解析に供した。

図 2-6-18 ではメタゲノム解析の結果をまとめた。Hahella 属の相対存在量は、浸漬 2 か月時点でゼラチン含有率の高いシートにおいて顕著に増加していた (図 2-6-18-①)。Hahella chejuensis は細胞外多糖 (EPS) を大量に産生することが知られており、EPS はバイオフィーム形成の初期段階において微生物の定着を促進する。ゼラチンは海水中で速やかに溶出し、タンパク質分解菌の基質として利用されるため、Hahella 属の増殖を誘発したと考えられる。実際、SEM 観察でもゼラチン含有シートでは早期からバイオフィーム形成が確認されており、Hahella の増加は材料表面の粗面化および微生物付着の加速と密接に関連している。一方、Stappiaceae 科 (特に *Roseibium aggregatum*) の相対存在量は、浸漬 2 か月時点ではゼラチン含有率の高いシートで増加し、6 か月時点では重量減少が大きかったシートで優占化していた (図 2-6-18-②)。Stappiaceae 科は海洋環境に広く分布し、複合有機物の分解に関与することが知られている。2 か月時点でゼラチン含有シートに多く検出されたことは、ゼラチン溶出に伴う有機物供給が微生物群集の選択圧として作用したことを示す。一方、6 か月時点で重量減少の大きいシート (特に PLA/Gelatin/Starch) で相対存在量が増

加したことは、Stappiaceae 科が PLA 分解の後期段階に関与する可能性を示唆する。PLA/Gelatin/Starch では熱可塑デンプンの溶出により微生物活性が大幅に高まり、PLA 分解に関与する菌群が誘導されるが、Stappiaceae 科はその過程で生じる低分子有機酸や分解中間体を利用して増殖したと考えられる。

また、ゼラチンやデンプンを含むシートでは、Rhodobacteraceae、Pirellulaceae、Gammaproteobacteria など、海洋バイオフィーム形成に関与する複数の菌群が増加していた。これらの菌群は、海洋環境における有機物分解や EPS 産生に関与することが知られており、材料表面における微生物生態系の成熟を反映している。特にデンプン含有シートでは、アミラーゼ産生菌の増加に加え、PLA 分解に関与する可能性のある菌群（Shewanella、Tenacibaculum、Vibrio 属）が増加しており、デンプンが微生物代謝を強く刺激し、PLA 分解を誘発する「生化学的トリガー」として機能していることが裏付けられた。

以上の結果では、材料組成が微生物群集構造に直接的な影響を与え、結果として生分解挙動を規定することを明確に示した。ゼラチンは微生物付着を誘発する「生物学的トリガー」として機能し、デンプンは微生物代謝を活性化し PLA 分解を誘発する「生化学的トリガー」として作用する。PBS は PLA よりも酵素分解を受けやすいため、PBS 含有シートでは PBS 分解に関与する菌群が優先的に増加した。これらの微生物群集の変化は、SEM 観察、TGA/DTG 解析、BOD 試験の結果とも整合しており、海洋生分解性の発現が材料科学と微生物生態学の相互作用によって決定されることを示している。

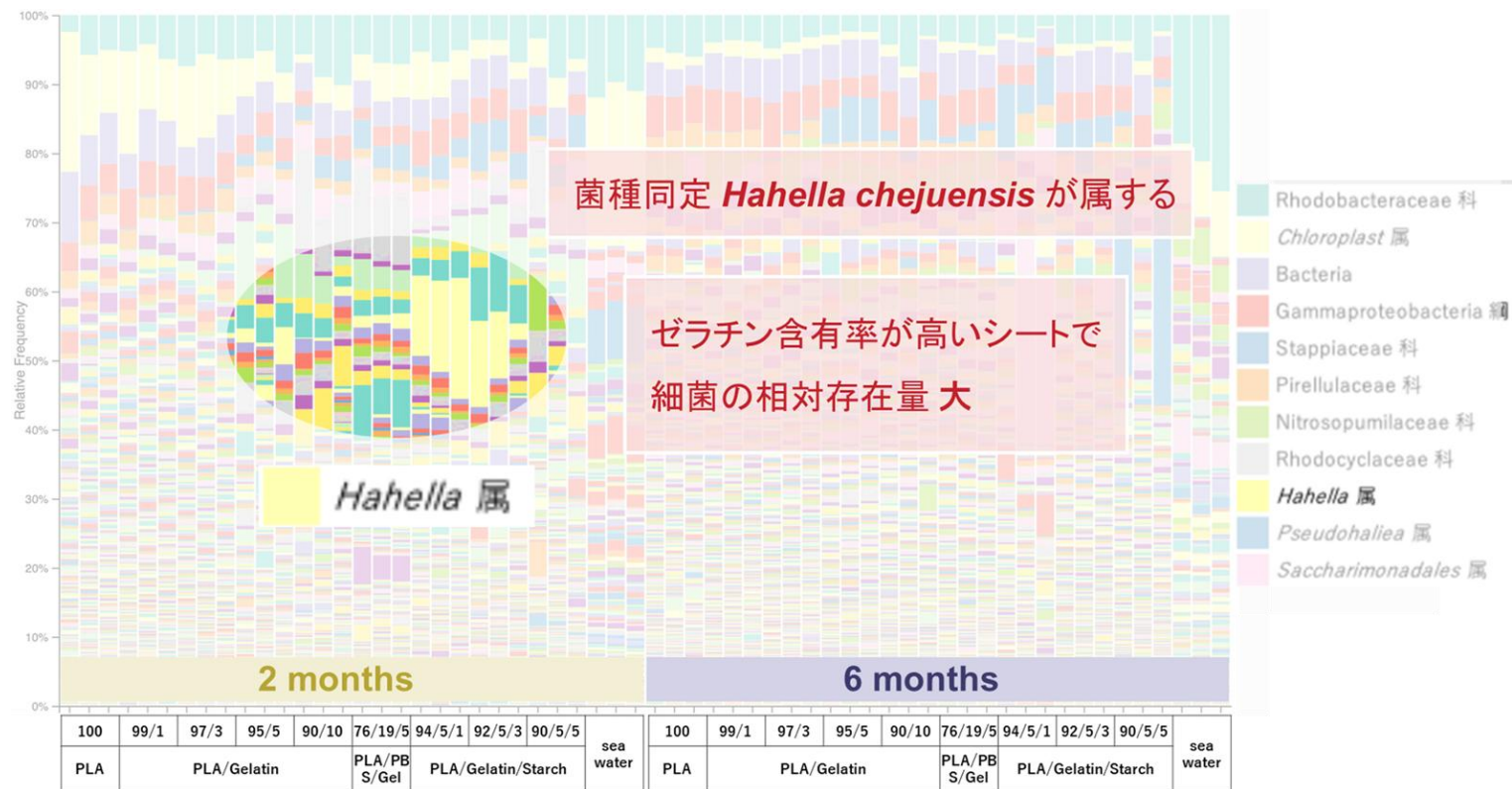


図 2-6-18-① 各配合組成によりメタゲノム解析(*Hahella* 属)

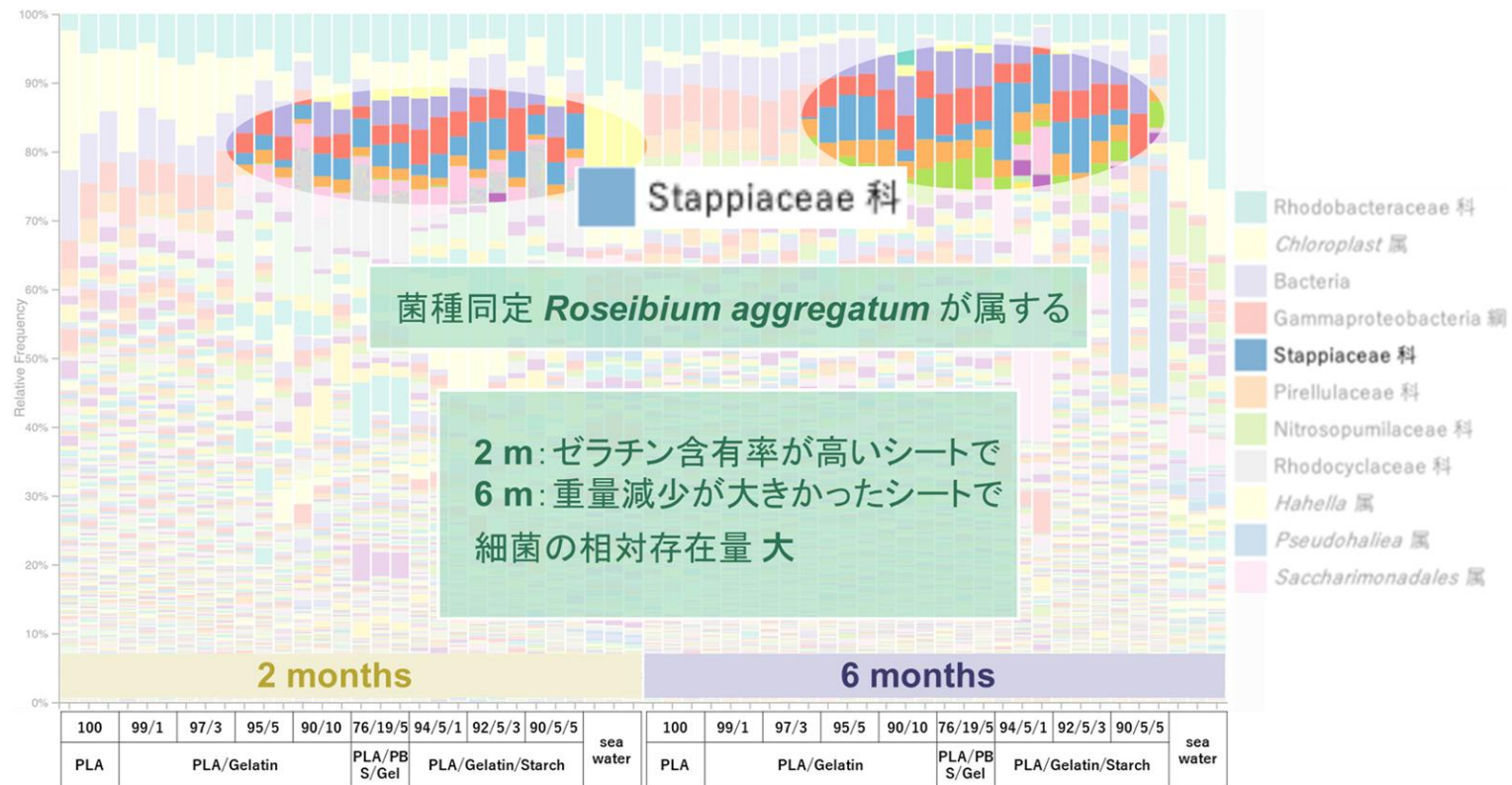


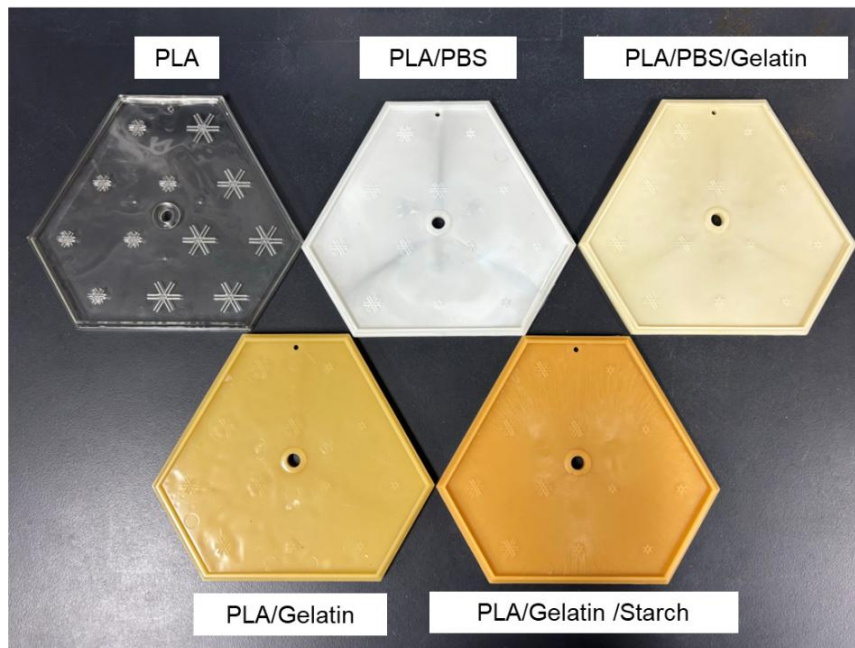
図 2-6-18-② 各配合組成によりメタゲノム解析(Stappiaceae 科)

#### 2-6-2-5 養殖資材試作品の実海域浸漬試験

令和7年度には、人工海水水槽での制御環境下の評価に加え、実海域における材料の初期分解挙動を把握するため、東京海洋大学係船場にて1か月間の海中浸漬試験を実施した

図2-6-19では浸漬前と浸漬後の外観をまとめた。1か月浸漬後の外観観察では、PLA単体とPLA/PBSはほとんど変化を示さず、表面は平滑なままであった。付着生物はわずかに観察されたものの、材料表面に顕著な劣化や白濁化は見られず、人工海水水槽での結果と同様に、PLAが海洋環境において極めて安定であることが確認された。1か月という短期間では、PLAの加水分解や微生物分解はほとんど進行しないことが再確認された。PLA/Gelatinでは、浸漬1か月時点で既に表面に薄いバイオフィームが形成されていた。ゼラチンは海水中で速やかに溶出し、タンパク質分解菌の基質として利用されるため、微生物付着が早期に誘発されたと考えられる。人工海水水槽試験でも同様の傾向が確認されており、ゼラチンが微生物付着の「初期誘発因子」として機能することが実海域でも再現された。ただし、1か月時点ではゼラチン溶出に伴う顕著な空隙形成やPLA表面の侵食は観察されず、分解は初期段階にとどまっていた。PLA/PBS/Gelatinでは、PBS相の一部に白濁化や微細な凹凸が観察され、PBSがPLAよりも早期に海洋微生物の作用を受けている可能性が示唆された。PBSは脂肪族ポリエステルであり、PLAよりも酵素分解を受けやすいため、1か月という短期間でも初期劣化が進行したと考えられる。ただし、PBS相の崩壊や大きな重量減少はまだ確認されておらず、分解はごく初期段階にとどまっていた。PLA/Gelatin/Starchでは、最も顕著な初期変化が観察された。熱可塑デンプンは海水中で膨潤・溶出しやすく、微生物代謝を強く刺激するため、浸漬1か月時点で表面に白濁化が生じ、局所的な侵食痕が確認された。人工海水水槽試験でも熱可塑デンプン含有系は最も早期に分解が進行したが、実海域では海洋微生物密度が高く、付着生物相も多様であるため、初期劣化がより顕著に現れたと考えられる。ただし、PLA部分の本格的な分解はまだ確認されておらず、熱可塑デンプン溶出に伴う表面変化が主であった。

## 浸漬前



## 1ヶ月浸漬後

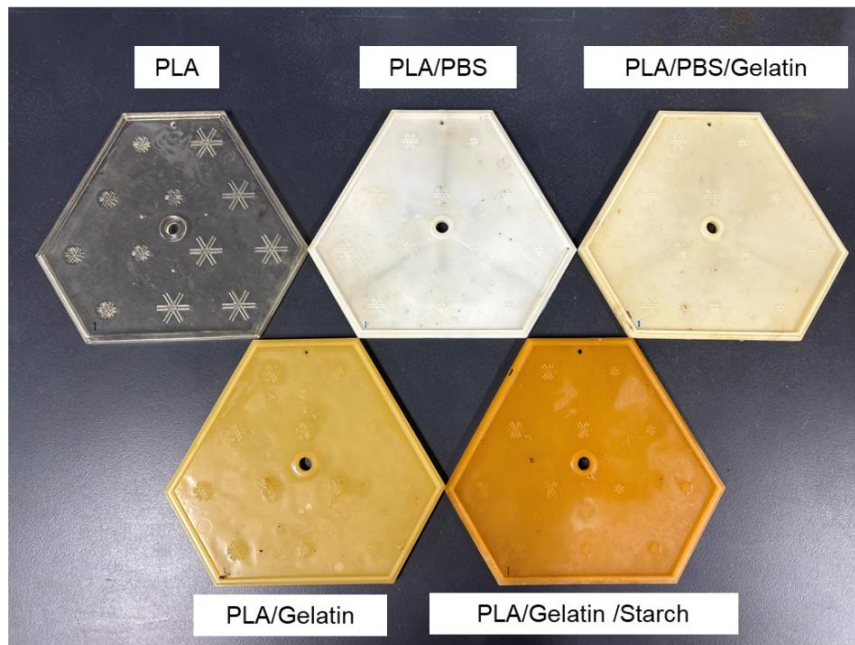


図 2-6-19 浸漬前と浸漬後の外観

以上の結果から、1 か月時点の実海域浸漬試験では、材料組成による初期挙動の差異が明確に現れた。PLA はほぼ不変であり、ゼラチン含有系では微生物付着が早期に進行し、PBS 含有系では PBS 相の初期劣化が観察された。熱可塑デンプン含有系では最も顕著な初期変化が確認され、今後の長期浸漬において PLA 分解が進行する可能性が高いことが示唆

された。

なお、本試験は1か月時点の初期評価であり、今後2～6か月の長期浸漬試験を継続して実施することで、材料表面の侵食、内部構造の変化、重量減少、微生物群集の推移、PLA分解の進行度を総合的に評価する予定である。これにより、人工海水水槽試験で得られた知見との比較検証が可能となり、実海域におけるMBBP材料の分解メカニズムをより精緻に明らかにすることが期待される。

### 2-6-3 事業終了後の課題と今後の取り組み

本事業により、MBBP材料の海洋生分解性に関する基礎的知見は大きく前進したが、実用化に向けては以下の課題が残されている。

第一に、PLA分解を担う微生物群および酵素の特定が不十分である点が挙げられる。メタゲノム解析によりPLA分解に関与する可能性のある菌群が示唆されたものの、実際にPLAのエステル結合を切断する酵素の同定には至っていない。今後は、分離培養、酵素活性測定、メタトランスクリプトーム解析を組み合わせ、PLA分解の分子機構を明確にする必要がある。

第二に、デンプン含有量やゼラチン含有量の最適化が課題として残る。デンプンはPLA分解を誘発する一方で、材料の機械特性や耐水性を低下させる可能性があるため、分解性と実用性のバランスを考慮した配合設計が求められる。PBSとの三元系における相互作用も未解明であり、相溶性、相分離構造、微生物付着性の観点から詳細な検討が必要である。

第三に、実海域での長期分解挙動の追跡が不可欠である。本年度は1か月時点の初期評価にとどまったため、今後2～6か月の長期浸漬を継続し、外観変化、重量減少、内部構造変化、微生物群集の推移を総合的に評価する必要がある。特に、人工海水水槽試験で確認されたPLA分解誘発現象が実海域でも再現されるかどうかは、実用化に向けた重要な検証項目である。

第四に、実製品形状における分解挙動の評価が求められる。本年度はシート試験片を中心に評価を行ったが、フジツボ養殖板や漁具部材など、実際の使用環境に近い形状では分解挙動が異なる可能性がある。今後は、成形品の厚み、形状、表面粗さが分解に与える影響を体系的に評価する必要がある。

最後に、海洋生分解性材料の社会実装に向けては、分解速度の制御、安全性評価、環境影響評価、コスト評価など、材料開発以外の観点も重要となる。特に、分解過程で生成する中間生成物の環境影響や、海洋生態系への影響評価は今後の重要な研究課題である。

以上の課題を踏まえ、事業後は微生物・酵素レベルの分解機構解明、配合設計の最適化、実海域での長期評価、実製品形状での検証を重点的に進め、海洋環境において確実に分解する次世代バイオプラスチックの設計指針を確立することを目指す。

## 2-7 まとめ

産業廃棄バイオマスを活用した海洋生分解性バイオマスプラスチック（MBBP）の開発に向けた技術的基盤の構築と、令和7年度に実施した材料評価・製品検討の成果を総合的にまとめた。MBBPは、廃棄物ゼラチンや熱可塑デンプンといった未利用バイオマスを有効活用し、PLAやPBSなどの生分解性プラスチックとブレンドすることで創製される新規材料であり、海洋流出時の環境負荷低減と資源循環の両立を目指すものである。本章では、熱可塑ゼラチンの製造技術、ブレンド材料の成形性と物性、海洋生分解性評価、微生物学的解析、製品化可能性の検討を体系的に取りまとめた（表2-7-1）。

まず、熱可塑ゼラチンの製造技術については、原料ゼラチンの由来差（ウシ・ブタ・サカナ・家禽）に応じた可塑剤量、水分調整、押出・射出条件の最適化を行い、安定した熱可塑化プロセスを確立した。ゼラチンは本来水溶性であるが、適切な可塑剤と水分量を付与することで熱可塑性を示し、押出ペレット化および射出成形が可能となる。本事業では、ゼラチンの熱特性、レオロジー特性、吸湿挙動を詳細に解析し、PLAやPBSとのブレンドに適した条件を明確化した。特にサカナ由来ゼラチンは低温加工性に優れ、熱履歴に敏感な生分解性プラスチックとの複合化に適することが示された。

次に、熱可塑ゼラチンおよび熱可塑デンプンとPLA・PBSとのブレンド技術については、分散構造の制御と相溶化剤の開発を通じて、機械特性・耐水性・透明性の向上を図った。ブレンド材料の分散状態をナノレベルで制御することで、汎用プラスチックに匹敵する物性を実現することを目標とし、押出・射出成形条件の最適化を進めた。予備検討では、廃棄ゼラチン残渣を用いたPLAフィルムの作製に成功し、ゼラチン添加によるヤング率向上が確認された。これらの成果は、MBBPが実用的な物性を備えた代替素材として成立し得ることを示すものである。さらに、海洋生分解性評価では、人工海水水槽試験、実海域浸漬試験、SEM観察、TGA/DTG解析、BOD試験、ThOD基準線解析、メタゲノム解析を組み合わせ、材料の分解挙動を多角的に評価した。PLA単体は海洋環境でほとんど分解しないことが再確認された一方、ゼラチンは微生物付着を誘発する「生物学的トリガー」として機能し、熱可塑デンプンは微生物代謝を活性化してPLA分解を誘発する「生化学的トリガー」として作用することが明らかとなった。特にPLA/Gelatin/熱可塑デンプン系では、BOD試験においてThOD基準線を超える酸素消費が確認され、PLA部分の分解が実際に進行していることが示された。メタゲノム解析では、熱可塑デンプン含有系でPLA分解に関与する可能性のある菌群が増加しており、材料組成が微生物群集構造を通じて分解挙動を規定することが明確となった。

製品化可能性の検討では、養殖資材（フジツボ養殖プレート、ロープ、ネット等）を中心に、海洋流出リスク、要求物性、コスト構造、市場受容性を総合的に評価した。養殖資材は海洋流出量が多く、環境負荷が大きいことから、海洋生分解性素材の導入効果が高い分野である。既存のプラスチック製養殖プレートの劣化状況を踏まえ、MBBPによる代替

の技術的合理性が確認された。また、既存金型を活用した試作体制が整っていることから、研究初期段階から実寸サイズでの評価が可能であり、社会実装に向けた優位性が高い。

さらに、本事業で得られた成果の中でも特に重要な点として、ゼラチン添加が PLA 系材料の機械特性および海洋環境下での分解挙動に与える影響が体系的に明らかとなったことが挙げられる。熱可塑ゼラチンは、PLA に対して少量（1～5 wt%）添加するだけで、PLA の高い剛性を維持しつつ、曲げ弾性率の向上や最大応力の保持といった補強効果を示すことが確認された。これは、ゼラチンが PLA マトリクス中で微細に分散し、分子間相互作用を強化することで、材料内部の応力伝達効率が向上するためである。特に PLA/Gelatin = 95/5 系では、PLA 単体を上回る曲げ弾性率を示し、硬質成形品としての要求性能を十分に満たすことが明らかとなった。

一方で、ゼラチンはタンパク質由来の高い親水性を有するため、海水中では吸水・膨潤を起点として微生物付着が促進され、PLA 単体ではほとんど進行しない海洋環境下での分解プロセスを誘発する「生物学的トリガー」として機能することが示された。人工海水浸漬試験では、ゼラチン含有系で白濁や微細亀裂などの表面劣化が早期に観察され、8～24 週間の浸漬で質量減少率が PLA 単体よりも明確に増加した。また、TPS を併用した PLA/Gelatin/TPS 系では、BOD 試験において ThOD 基準線を超える酸素消費が確認され、PLA 部分の分解が実際に進行していることが示された。メタゲノム解析でも、TPS 含有系で PLA 分解に関与する可能性のある菌群が増加しており、材料組成が微生物群集構造を通じて分解挙動を規定することが明確となった。

これらの結果は、ゼラチンが「機械特性の調整因子」と「海洋分解性の付与因子」という二つの役割を同時に果たすことを示しており、代替プラスチックに求められる“使用中の強度確保”と“流出時の確実な分解”という相反する要求を両立できる材料設計が可能であることを意味している。特に PLA/Gelatin = 95/5 および PLA/PBS/Gelatin = 76/19/5 の 2 組成は、曲げ弾性率 2400～3000 MPa 程度の硬質材料としての性能を維持しながら、海水中での質量減少、表面粗化、生物付着の進行が確認されており、海洋用途に最も適した材料候補として位置付けられる。

このように、ゼラチン添加による機械特性と海洋生分解性の両立は、MBBP が単なる生分解性材料ではなく、海洋流出リスクの高い用途において実際に機能する「海洋生分解性バイオマスプラスチック」として成立し得ることを示す重要な成果である。これらの知見は、養殖資材をはじめとする海洋関連製品への適用可能性を裏付ける強固な技術的基盤となり、今後の社会実装に向けた材料選定および製品設計において中心的な役割を果たすと考えられる。

総合すると、本章で示した成果は、MBBP の材料設計から海洋生分解性評価、製品化検討までを一貫して体系化したものであり、海洋プラスチック問題の解決に資する新規素材の創出に向けた重要な基盤を形成した。特に、ゼラチン・デンプンと PLA・PBS の複合化技術、微生物誘発型の海洋生分解メカニズムの解明、養殖資材への適用可能性の検証は、

今後の社会実装に向けた大きな前進である。

今後は、PLA分解菌および分解酵素の特定、熱可塑デンプン含有量の最適化、PBSとの三元系における相互作用の解明、実海域での長期浸漬評価、実製品形状での分解挙動の検証を進めることで、海洋環境において確実に分解する次世代バイオプラスチックの設計指針を確立する必要がある。また、これらの基礎研究と並行して、コンパウンド化と射出成形の連続試験を体系的に実施し、材料配合から成形加工までの一連のプロセスを最適化することも重要である。特に、二軸押出機による連続コンパウンド化試験では、熱可塑ゼラチンや熱可塑デンプンを含む配合系における混練安定性、熔融粘度の変動、相分散状態の再現性を評価し、量産を見据えた加工条件の確立が求められる。さらに、得られたペレットを用いた射出成形の連続試験では、金型内での流動性、充填性、反り・ヒケなどの成形欠陥の発生傾向を把握し、材料特性と成形条件の相関を明確化することで、実製品製造に耐えうる加工プロセスの確立につなげることができる。これらの連続試験は、材料開発と成形技術の両面から実用化可能性を高めるうえで不可欠である。また、海洋生分解性認証制度、漁業資材規格、LCA評価など、制度面の課題にも対応し、技術と社会の両面から実装可能性を高めていくことが求められる。本章で得られた知見は、MBBPの社会実装に向けた技術戦略および市場戦略の基盤となり、持続可能な海洋利用と資源循環型社会の実現に向けて重要な役割を果たすものである。

表 2-7-1 各組成の物性まとめ

	ヤング率 (GPa)	最大応力 (MPa)	破断伸び (%)	曲げ弾性率 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	衝撃強度 (kJ/m <sup>2</sup> )	MFR	質量減少率 (8週)	質量減少率 (24週)	表面劣化	生物付着
PLA	2.31±0.09	74.7±1.9	5.5±0.6	2592±167	99.3±1.3	2.94±0.19	5.29±0.10	0-1%	0-1%	変化なし	少ない
PLA/PBS 80/20	1.57±0.04	54.6±1.7	181±48	2324±45	74.3±1.5	4.50±0.24	5.42±0.07	0-2%	0-3%	変化なし	少ない
PLA/Gelatin 95/5	2.12±0.11	73.3±2.4	4.9±0.3	2929±55	93.4±1.8	2.49±0.07	5.52±0.11	5-10%	10-20%	白濁・ 微細亀裂	多い
PLA/PBS/Gelatin 76/19/5	1.58±0.08	52.7±2.7	211±41	2448±88	75.0±0.8	3.57±0.20	10.5±0.53	3-5%	5-10%	表面粗化・ 剥離	中程度
PLA/Gelatin/Starch 90/5/5	2.11±0.09	69.2±3.1	3.9±0.2	2546±66	83.0±3.3	2.29±0.21	11.16±0.48	10-15%	15-20%	表面粗化・ 剥離	多い

## 2-8 参考文献

- [2-1] 環境省, 日本エヌ・ユー・エス株式会社, 令和6年度海洋ごみの実態把握及び効率的な回収に関する総合検討業務 報告書, 2025年3月
- [2-2] 環境省, 日本エヌ・ユー・エス株式会社, 令和5年度海洋ごみの実態把握及び効率的な回収に関する総合検討業務 報告書, 2024年3月
- [2-3] 環境省, 日本エヌ・ユー・エス株式会社, 令和4年度海洋ごみの実態把握及び効率的な回収に関する総合検討業務 報告書, 2023年3月
- [2-4] 環境省, 地方公共団体向け漂着ごみ組成調査ガイドライン, 2025年5月第4版
- [2-5] 環境省「令和6年度沿岸海域におけるマイクロプラスチックを含む漂流ごみ実態把握調査業務報告書」(令和7年3月)
- [2-6] 環境省「令和4年度沿岸海域におけるマイクロプラスチックを含む漂流ごみ実態把握調査業務報告書」(令和5年3月)
- [2-7] 笹川平和財団 Ocean Newsletter 第447号「生分解性プラスチックを用いたカキ養殖用パイプへの取り組み」(2019.03.20発行)
- [2-8] Ostrea「牡蠣の養殖の方法」
- [2-9] クペルカタログ(株式会社マツイ)
- [2-10] 八戸学院地域連携研究センター『食べるフジツボ』研究プロジェクト「フジツボを育てる」
- [2-11] 加戸隆介(1991),「幼生の行動と付着 フジツボ」, 海洋生物の付着機構, 恒星社厚生閣, 85-100., 再引用元, 川村要ら(2001),「ミネフジツボ養殖手法開発試験」, 青森県水産増殖センター事業報告第30号
- [2-12] 柳谷智・田中淳也(2002),「ミネフジツボ養殖手法開発試験」, 青森県水産増殖センター事業報告第31号
- [2-13] Gómez-Guillén, M. C.; Giménez, B.; López-Caballero, M. E.; Montero, M. P. Functional and Bioactive Properties of Collagen and Gelatin from Alternative Sources: A Review. Food Hydrocolloids. 2011, 25, 1813–1827.
- [2-14] Transparency Market Research (2013). Gelatin Market by Raw Material (Pig Skin, Bovine Hide, Bones and Others) for Food & Beverage, Nutraceuticals, Pharmaceuticals, Photography, Cosmetics and Other Applications - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends and Forecast, 2012 – 2018. Retrieved from <https://www.prnewswire.com/news-releases/global-gelatin-market-is-expected-to-reach-usd-279-billion-in-2018-transparency-market-research-213992871.html>
- [2-15] Nur Hanani, Z. A.; (2016). Gelatin. The Encyclopedia of Food and Health, 3, 191–195.
- [2-16] Gelatin Manufacturers Institute of America Gelatin Handbook. Gelatin Manufacturers Institute of America Inc., 2012; America, p. 1–25.

- [2-17] Nur Azira, T.; Amin, I.; Che Man, Y. B. Differentiation of Bovine and Porcine Gelatins in Processed Products via Sodium Dodecyl Sulphate-Polyacrylamide Gel Electrophoresis (SDS-PAGE) and Principal Component Analysis (PCA) Techniques. *Int. Food Res. J.* 2012, 19(3), 1175–1180.
- [2-18] Hafidz, R. N.; Yaakob, C. M.; Amin, I.; Noorfaizan, A. Chemical and Functional Properties of Bovine and Porcine Skin Gelatin. *Int. Food Res. J.* 2011, 18, 813–817.
- [2-19] Rosli, N.; Sarbon, N. M. Physicochemical and Structural Properties of Asian Swamp Eel (*Monopterus Albus*) Skin Gelatin as Compared to Bovine Gelatin. *Int. Food Res. J.* 2015, 22(2), 699–706.
- [2-20] Sarbon, N. M.; Badii, F.; Howell, N. K. Preparation and Characterisation of Chicken Skin Gelatin as an Alternative to Mammalian Gelatin. *Food Hydrocolloids.* 2013, 30(1), 143–151. DOI: 10.1016/j. foodhyd.2012.05.009.
- [2-21] Mariod, A. A.; Fadul, H. Extraction and Characterization of Gelatin from Two Edible Sudanese Insects and Its Applications in Ice Cream Making. *Food Sci. Technol. Int.* 2014, 21(5), 380–391. DOI: 10.1177/ 1082013214541137.
- [2-22] European Food Safety Authority (EFSA). Quantitative Assessment of the Human BSE Risk Posed by Gelatine with respect to Residual BSE Risk. *EFSA J.* 2006, 312, 1–29.
- [2-23] FDA (2016) Transmissible Spongiform Encephalopathies Advisory Committee (CJDSAC). As retrieved from
- [2-24] Kakaei, S.; Shahbazi, Y. Effect of Chitosan-Gelatin Film Incorporated with Ethanolic Red Grape Seed Ledward, D. A.; Gelatin. In *Handbook of Hydrocolloids*; Philips, G.O., William, P.A. (Eds.). CRC Press: Boca Raton, 2000; pp 67–86.
- [2-25] Aguirre-Alvarez, G.; Pimentel-González, D. J.; Campos-Montiel, R. G.; Foster, T.; Hill, S. E. The effect of drying temperature on mechanical properties of pig skin gelatin films El efecto de la temperatura de secado sobre las propiedades mecánicas de películas de gelatina de cerdo. *CyTA - J. Food.* 2011, 9(3), 243–249. DOI: 10.1080/ 19476337.2010.523902.
- [2-26] Nor, M. H. M.; Nazmi, N. N. M.; Sarbon, N. M. Effects of Plasticizer Concentrations on Functional Properties of Chicken Skin Gelatin Films. *Int. Food Res. J.* 2017, 24(5), 1910–1918.
- [2-27] Soo, P. Y.; Sarbon, N. M. Preparation and Characterization of Edible Chicken Skin Gelatin Film Incorporated with Rice Flour. *Food Pack. Shelf Life.* 2018, 15, 1–8. DOI: 10.1016/j. fpsl.2017.12.009.
- [2-28] Nazmi, N. N.; Isa, M. I. N.; Sarbon, N. M. Preparation and Characterization of Chicken Skin Gelatin/CMC Composite Film as Compared to Bovine Gelatin Film. *Food Biosci.* 2017, 19, 149–155. DOI: 10.1016/j. fbio.2017.07.002.
- [2-29] Jomlapeeratikul, P.; Poomsa-Ad, N.; Wiset, L. (2013). The Effects of Drying Temperatures

- and Oil Contents on Properties of Biodegradable Film from Konjac Flour. The 14th TSAE National Conference and the 6th TSAE International Conference: TSAE 2013. Bangkok, Thailand.
- [2-30] Suhag, R.; Kumar, N.; Petkoska, A. T.; Upadhyay, A. Film Formation and Deposition Methods of Edible Coating on Food Products: A Review. *Food Res. Int.* 2020, 136, 109582.
- [2-31] Rosseto, M.; Krein, D. D.; Balbé, N. P.; Dettmer, A. Starch–Gelatin Film as an Alternative to the Use of Plastics in Agriculture: A Review. *J. Sci. Food Agric.* 2019, 99(15), 6671–6679. DOI: 10.1002/jsfa.9944.
- [2-32] Hyvärinen, M.; Jabeen, R.; Kärki, T. The Modelling of Extrusion Processes for Polymers—A Review. *Polymers.* 2020, 12(6), 1306. DOI: 10.3390/polym12061306.18 N. S. SAID ET AL.
- [2-33] Tongnuanchan, P.; Benjakul, S.; Prodpran, T.; Pisuchpen, S.; Osako, K. Mechanical, Thermal and Heat-Sealing Properties of Fish Skin Gelatin Film Containing Palm Oil and Basil Essential Oil with Different Surfactants. *Food Hydrocolloids.* 2016, 56, 93–107. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2015.12.005.
- [2-34] Suh, J. H.; Ock, S. Y.; Park, G. D.; Lee, M. H.; Park, H. J. Effect of Moisture Content on the Heat-Sealing Property of Starch Films from Different Botanical Sources. *Polym. Test.* 2020, 89, 106612. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2020.106612.
- [2-35] Prateepchanachai, S.; Thakhiew, W.; Devahastin, S.; Soponronnarit, S. (2017) Improvement of Mechanical and Heat-Sealing Properties of Chitosan Films via the Use of Glycerol and Gelatin Blends in Film-Forming Solution. The 18th TSAE National Conference and 10th TSAE International Conference. 2017; Impact Exhibition and Convention Centre: Bangkok, Thailand.
- [2-36] Jamróz, E.; Kulawik, P.; Krzyściak, P.; Talaga-Ćwiertnia, K.; Juszczak, L. Intelligent and Active Furcellaran-Gelatin Films Containing Green or Pu-Erh Tea Extracts: Characterization, Antioxidant and Antimicrobial Potential. *Int. J. Biol. Macromol.* 2019, 122, 745–757. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2018.11.008.
- [2-37] Abdorreza, M. N.; Cheng, L. H.; Karim, A. A. Effects of Plasticizers on Thermal Properties and Heat Sealability of Sago Starch Films. *Food Hydrocolloids.* 2011, 25(1), 56–60. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2010.05.005.
- [2-38] Abdorreza, M. N.; Nassiri, R.; Sheibani, S.; Ariffin, F.; Karim, A. A. Preparation and Characterization of Bionanocomposite Films Filled with Nanorod-Rich Zinc Oxide. *Carbohydr. Polym.* 2013, 96(1), 233–239. DOI: 10.1016/j.carbpol.2013.03.055.
- [2-39] Primožič, M.; Knez, Ž.; Leitgeb, M. (Bio) Nanotechnology in Food Science—Food Packaging. *Nanomaterials.* 2021, 11(2), 292. DOI: 10.3390/nano11020292.
- [2-40] Müller, K.; Bugnicourt, E.; Latorre, M.; Jorda, M.; Echegoyen Sanz, Y.; Lagaron, J. M.; Miesbauer, O.; Bianchin, A.; Hankin, S.; Böhlz, U.; et al. Review on the Processing and

- Properties of Polymer Nanocomposites and Nanocoatings and Their Applications in the Packaging, Automotive and Solar Energy Fields. *Nanomaterials*. 2017, 7(4), 74. DOI: 10.3390/nano7040074.
- [2-41] Fahmy, H. M.; Eldin, R. E. S.; Serea, E. S. A.; Gomaa, N. M.; AboElmagd, G. M.; Salem, S. A.; Elsayed, Z. A.; Edrees, A.; Shams-Eldin, E.; Shalan, A. E. Advances in Nanotechnology and Antibacterial Properties of Biodegradable Food Packaging Materials. *RSC Adv*. 2020, 10(35), 20467–20484. DOI: 10.1039/D0RA02922J.
- [2-42] Chawla, R.; Sivakumar, S.; Kaur, H. Antimicrobial Edible Films in Food Packaging: Current Scenario and Recent Nanotechnological Advancements-A Review. *Carbohydr. Polym. Technol. Appl*. 2021, 2, 100024. DOI: 10.1016/j.carpta.2020.100024.
- [2-43] Marvizadeh, M. M.; Oladzadabbasabadi, N.; Nafchi, A. M.; Jokar, M. Preparation and Characterization of Bionanocomposite Film Based on Tapioca Starch/Bovine Gelatin/Nanorod Zinc Oxide. *Int. J. Biol. Macromol.* 2017, 99, 1–7. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2017.02.067.
- [2-44] Elkhoury, K.; Koçak, P.; Kang, A.; Arab-Tehrany, E.; Ellis Ward, J.; Shin, S. R. Engineering Smart Targeting Nanovesicles and Their Combination with Hydrogels for Controlled Drug Delivery. *Pharmaceutics*. 2020, 12(9), 849. DOI: 10.3390/pharmaceutics12090849.
- [2-45] Prodpran, T.; Benjakul, S.; Vittayanont, M.; Nalinanon, S. (2013). Physico-Chemical Properties of Gelatin Films Incorporated with Different Hydrocolloids. 2nd International Conference on Nutrition and Food Sciences IPCBEE. IACSIT Press: Singapore, 2013; 53(16).
- [2-46] 農林水産省『SDGs×食品産業』記事- 中日本カプセル株式会社「ゼラチン×リサイクル=ゼライクル®プロジェクトの推進」
- [2-47] 『ウェルネスマンスリーレポート』2023年9月号（第63号）ゼラチン残渣に価値を見いだす 【SDGsと健康食品産業】中日本カプセルの「ゼライクル」に注目
- [2-48] Nisha Mohanan et al. *Front. Microbiol.* 2020, 11, 58079.
- [2-49] Chloe Wayman, and Helge Niemann. *Environ Sci Process Impacts*. 2021, 23, 198-212.
- [2-50] Sompie, M.; Surtijono, S. E.; Pontoh, J. H. W.; Lontaan, N. N. The Effects of Acetic Acid Concentration and Extraction Temperature on Physical and Chemical Properties of Pigskin Gelatin. *Procedia Food Sci.* 2015, 3, 383–388. DOI: 10.1016/j.profoo.2015.01.042.
- [2-51] Dinçer, M. T.; Erdem, Ö. A.; Kalkan, H.; Üçok, M. Ç. Comparison of Recovered Carp Scales (*Cyprinus Carpio*) Gelatin and Commercial Calf and Pork Skin Gelatins. *Ege J. Fish. Aquat. Sci.* 2016, 33(4), 335–341. DOI: 10.12714/egejfas.2016.33.4.05.
- [2-52] Ninan, G.; Joseph, J.; Aliyamveetil, Z. A. A Comparative Study on the Physical, Chemical and Functional Properties of Carp Skin and Mammalian Gelatins. *J. Food Sci. Technol.* 2014, 51(9), 2085–2091. DOI: 10.1007/s13197-012-0681-4.
- [2-53] Mahmoodani, F.; Ardekani, V. S.; See, S. F.; Yusop, S. M.; Babji, A. S. Optimization and

- Physical Properties of Gelatin Extracted from Pangasius Catfish (*Pangasius Sutchi*) Bone. *J. Food Sci. Technol.* 2014, 51(11), 3104–3113. DOI: 10.1007/s13197-012-0816-7.
- [2-54] Karim, A. A.; Bhat, R. Fish Gelatin: Properties, Challenges, and Prospects as an Alternative to Mammalian Gelatins. *Food Hydrocolloids.* 2009, 23(3), 563–576. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2008.07.002. *FOOD REVIEWS INTERNATIONAL* 17
- [2-55] Jongjareonrak, A.; Benjakul, S.; Visessanguan, W.; Prodpran, T.; Tanaka, M. Characterization of Edible Films from Skin Gelatin of Brownstripe Red Snapper and Bigeye Snapper. *Food Hydrocolloids.* 2006, 20(4), 492–501. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2005.04.007.
- [2-56] Uriarte-Montoya, M. H.; Santacruz-Ortega, H.; Cinco-Moroyoqui, F. J.; Rouzaud-Sández, O.; PlascenciaJatomea, M.; Ezquerro-Brauer, J. M. Giant Squid Skin Gelatin: Chemical Composition and Biophysical Characterization. *Food Res. Int.* 2011, 44(10), 3243–3249. DOI: 10.1016/j.foodres.2011.08.018.
- [2-57] Sila, A.; Martinez-Alvarez, O.; Krichen, F.; Gómez-Guillén, M. C.; Bougatef, A. Gelatin Prepared from European Eel (*Anguilla Anguilla*) Skin: Physicochemical, Textural, Viscoelastic and Surface Properties. *Colloids Surf. A.* 2017, 529, 643–650. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2017.06.032.
- [2-58] Nik Aisyah, N. M.; Nurul, H.; Azhar, M. E.; Fazilah, A. Poultry as an Alternative Source of Gelatin. *Health Environ. J.* 2014, 5(1), 37–49.
- [2-59] Abedinia, A.; Ariffin, F.; Huda, N.; Nafchi, A. M. Preparation and Characterization of a Novel Biocomposite Based on Duck Feet Gelatin as Alternative to Bovine Gelatin. *Int. J. Biol. Macromol.* 2018, 109, 855–862. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2017.11.051.
- [2-60] Norland, R. E.; Fish Gelatin. In *Advances in Fisheries Technology and Biotechnology for Increased Profitability*, Voigt M.J., Botta J.R. (Eds.) Technomic Publisher Co. Inc.: Lancaster, 1990; pp 325–333.
- [2-61] Cho, S. M.; Gu, Y. S.; Kim, S. B. Extracting Optimization and Physical Properties of Yellowfin Tuna (*Thunnus Albacares*) Skin gelatin Compared to Mammalian Gelatins. *Food Hydrocolloids.* 2005, 19(2), 221–229. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2004.05.005.
- [2-62] Ratnasari, I.; Firlianty. Physico-Chemical Characterization and Skin Gelatin Rheology of Four Freshwater Fish as Alternative Gelatin Source. *AAFL Bioflux.* 2016, 9(6), 1196–1207.
- [2-63] Muyonga, J. H.; Cole, C. G. B.; Duodu, K. G. Extraction and Physico-Chemical Characterisation of Nile Perch (*Lates Niloticus*) Skin and Bone Gelatin. *Food Hydrocolloids.* 2004, 18(4), 581–592. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2003.08.009.
- [2-64] Alfaro, A. D. T.; Balbinot, E.; Weber, C. I.; Tonial, I. B.; Machado-Lunkes, A. Fish Gelatin: Characteristics, Functional Properties, Applications and Future Potentials. *Food Eng. Rev.* 2014, 7(1), 33–44. DOI: 10.1007/s12393-014-9096-5.
- [2-65] Nik Aisyah, N. M.; Huda, N.; Karim, A. A.; Nafchi, A. M. Effects of Acid Type Extraction on

- Characterization and Sensory Profile of Duck Feet Gelatin: Towards Finding Bovine Gelatin Alternative. *J. Food Meas. Charact.* 2018, 12(1), 480–486. DOI: 10.1007/s11694-017-9661-8.
- [2-66] Sarbon, N. M.; (2011). *Nutritional and Physicochemical Properties of Chicken Proteins and Peptides*, University of Surrey, Thesis.
- [2-67] Abedinia, A.; Nafchi, A. M.; Sharifi, M.; Ghalambor, P.; Oladzadabbasabadi, N.; Ariffin, F.; Huda, N. *Poultry Gelatin: Characteristics, Developments, Challenges, and Future Outlooks as A Sustainable Alternative for Mammalian Gelatin.* *Trends Food Sci. Technol.* 2020, 104, 14–26. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.08.001.
- [2-68] Jorge, M. F. C.; Alexandre, E. M. C.; Flaker, C. H. C.; Bittante, A. M. Q. B.; Sobral, P. J. D. A. *Biodegradable Films Based on Gelatin and Montmorillonite Produced by Spreading.* *Int. J. Polym. Sci.* 2015, 9, 1–9. DOI: 10.1155/2015/806791.
- [2-69] Yang, Z.; Hemar, Y.; Hilliou, I.; Gilbert, E. P.; McGillivray, D. J.; Williams, M. A. K.; Chaieb, S. *Non-Linear Behaviour of Gelatin Networks Reveals a Hierarchical Structure.* *Biomacromolecules.* 2015, 17(2), 590–600. DOI: 10.1021/acs.biomac.5b01538.
- [2-70] Tabatabaei, R. H.; Jafari, S. M.; Mirzaei, H.; Nafchi, A. M.; Dehnad, D. *Preparation and Characterization of Nano-Sio<sub>2</sub> Reinforced Gelatin-K-Carrageenan Biocomposites.* *Int. J. Biol. Macromol.* 2018, 111, 1091–1099. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2018.01.116.
- [2-71] Tadahisa Iwata. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2015, 54, 3210-3215.
- [2-72] Shuangshuang Ding et al. *Macromolecules.* 2023, 56, 5089-5100.
- [2-73] Rui Zhu et al. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2012, 51, 7786-7792.
- [2-74] Min Soo Kim et al. *Chem. Rev.* 2023, 123, 9915-9939.
- [2-75] Guan-Chen Liu et al. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2013, 52, 1591-1599.
- [2-76] Tobias P. Haider et al. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2019, 58, 50-62.
- [2-77] Yutaro Kimura et al. *Environ Microbiol.* 2023, 25, 2834-2850.
- [2-78] Ajitha A.R et al. *Compatibilization of Polymer Blends.* 2020.
- [2-79] Ce Zhou et al. *ACS Omega.* 2019, 4, 9957-9963.
- [2-80] Rungsima Homklin, and Nattakarn Hongsrphan. *Energy Procedia.* 2013, 34, 871-879.
- [2-81] A. Hartwig et al., *polyvinyl chloride (PVC)/chloroethene.* *The MAL collection for Occupational Health and Safety.* 2017, 2, 1551-1567
- [2-82] M. Rahman et al., *The plasticizer market: an assessment of traditional plasticizers and research trends to meet new challenges.* *Prog. Polym. Sci.* 2004, 29, 1223-1248
- [2-83] J.A. Tickner et al., *Health Risks Posed by Use of Di-2-Ethylhexyl Phthalate (DEHP) in PVC Medical Devices: A Critical Review.* *American Journal of Industrial Medicine.* 2001, 39, 100-111
- [2-84] Luciana C. de Azevedo, Suzimara Rovani, Jonnatan J. Santos, Djalma B. Dias, Sandi S.

- Nascimento, Fábio F. Oliveira, Leonardo G. A. Silva, and Denise A. Fungaro, *ACS Appl. Polym. Mater.* 2020, 6, 2160–2169.
- [2-85] Qiangxian Wu, Zhengshun Wu, Huafeng Tian, Yu Zhang, and Shuilian Cai, *Ind. Eng. Chem. Res.* 2008, 24, 9896–9902.
- [2-86] H el ene Angellier, Sonia Molina-Boisseau, Patrice Dole, and Alain Dufresne, *Biomacromolecules* 2006, 2, 531–539.
- [2-87] Aneta Wo zniak-Braszak, Monika Knitter, Ewa Markiewicz, Wade F. Ingram, and Richard J. Spontak, *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2019, 19, 16050–16059.
- [2-88] 宇山 浩, 徐 于懿, *生産と技術* 2021, 73, 100-103.
- [2-89] ASTM D6691-17, Standard Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials in the Marine Environment by a Defined Microbial Consortium or Natural Sea Water Inoculum, ASTM International: West Conshohocken (2018 updated). <https://doi.org/10.1520/D6691-17>.

## 第3章 LCA 評価

### 3-1 概要と目的

#### 3-1-1 概要

「海洋生分解プラスチックの開発と用途展開」において、令和7年度の目標である「熱可塑ゼラチン/PLA（ポリ乳酸）等ブレンドの LCA 評価、製造方法の精査による LCA 精度の向上」を目的として中心に GHG 排出量を試算・検討した。試算に用いた製品は、海洋生分解性の特徴を活かすことができるフジツボ養殖用資材とした。令和6年度の報告では、消費者が手にすることを想定とした製品（ペットボトルキャップとマイバケット）で試算のシナリオを用いたが、令和7年度は海洋養殖産業で用いられる製品としたことで、廃棄リサイクル段階の想定も見直した。

ベースラインの PP 樹脂との GHG 排出量を比較した結果、以下が判明した。

- ・ 開発品はベースラインに比べ、廃棄・リサイクル段階において GHG 削減が見込まれる。
- ・ 開発品の原材料の熱可塑ゼラチンの配合を高めることでシステム全体の GHG 削減が可能である。

本章では、温室効果ガスに関する略号を以下のように用いる。

GHG（Green House Gas）＝CO<sub>2</sub>e＝CO<sub>2</sub> 換算

#### 3-1-2 目的

本章では、「廃棄物を組み込んだ海洋生分解性バイオマスプラスチック（MBBP）」を用いたフジツボ養殖用資材の生産方法に関して、研究段階のベンチ・スケールで使用する機器とその製造方法の温室効果ガス削減効果（GHG: Green House Gas）をライフサイクルアセスメント（LCA）手法を用いて算定を行い、今後の社会実装に向けたベンチ・スケール、さらにパイロット・スケールに移行する際の温室効果ガス排出削減の向上について検討することを目的とする。この検討結果は、開発品が利用される各種製品などの温室効果ガス削減量の具体的な目標を示すので、重要な検討となる。

LCA評価については、大阪大学から株式会社LCAエキスパートセンターに外部委託し、事業で用いる海洋生分解性バイオマスプラスチックのGHG排出量と、ベースラインとして、PLA樹脂において、次の通り実施した。

- ・ 令和5年度：熱可塑ゼラチンと熱可塑デンブンのLCA評価

- ・ 令和6年度：熱可塑ゼラチン/PLA等ブレンドのLCA評価、製造方法の精査によるLCA精度の向上
- ・ 令和7年度：熱可塑デンプン・ゼラチン/PLA等ブレンドのLCA評価、製造方法の精査によるLCA精度の向上

本年度は、上記のように開発中の「熱可塑ゼラチン/PLA等ブレンドのLCA評価、製造方法の精査によるLCA精度の向上」を実施する。ただし、量産体制は整備されていないので、ベンチ・スケールの実験機器を用いて開発品のGHG排出量に及ぼす各種の変動要因を取りまとめる。なお、令和6年度から本LCA評価事業は、一般社団法人サステナブル経営推進機構から、株式会社LCAエキスパートセンター<sup>1</sup>が引継ぎ実施をする。

### 3-1-3 本調査の範囲

図 3-1-1 に示すプロセスで製造される「熱可塑ゼラチン/PLA ブレンド（コンパウンド品）」を用いた成型品フジツボ養殖用資材が最終的な対象製品である。開発品の廃棄・リサイクル段階も対象とする。成型品（フジツボ養殖用資材）に関しては、ベースライン製品は、PP（ポリプロピレン）成型品として、素材となる熱可塑ゼラチン/PLA 等のブレンドの配合を①参考の PLA と、②～⑤の配合の違うコンパウンドを評価対象とする。

- ① PLA = 100・・・参考
- ② PLA：熱可塑ゼラチン = 95：5
- ③ PLA：PBS（ポリブチレンサクシネート）：熱可塑ゼラチン = 76：19：5
- ④ PLA：PBS = 76：19（≒ 80：20）
- ⑤ PLA：熱可塑デンプン：熱可塑ゼラチン = 90：5：5
- ⑥ PP = 100・・・ベースライン

ベースライン製品は図 3-1-1 に示すように、PLA 樹脂を設定し、開発品と比較する。

---

<sup>1</sup>株式会社 LCA エキスパートセンターは、令和 5 年 10 月に一般社団法人サステナブル経営推進機構の出資を受けて、LCA 検証・評価事業などを行うために設立した組織（2024 年 4 月事業開始）である。

<参考：ポリ乳酸成形品>

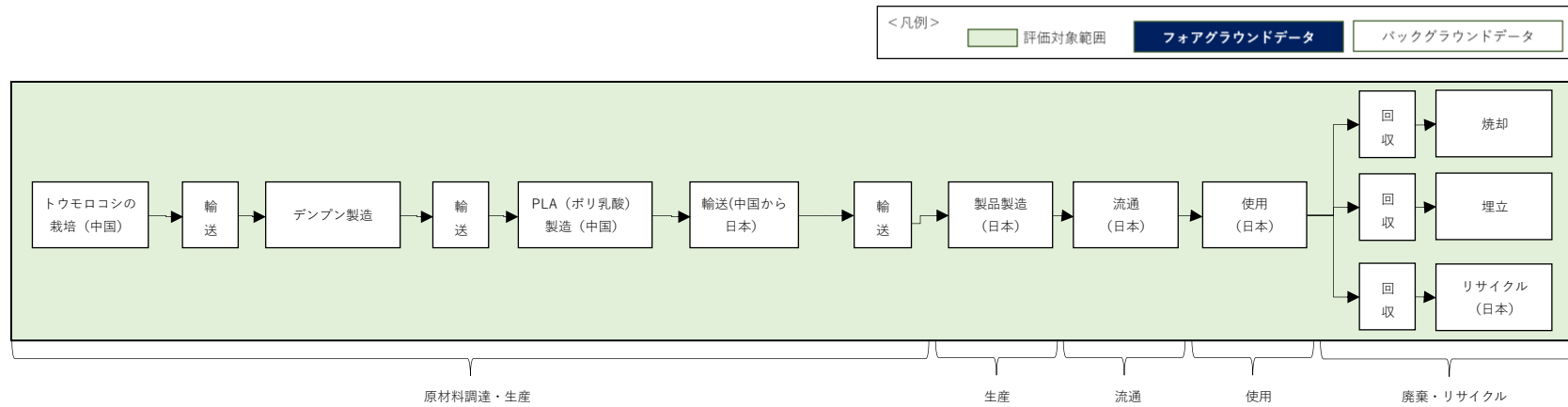


図 3-1-1-① PLA 製品製造のフローとシステム境界



<評価対象製品：熱可塑ゼラチン/PLA/PBS ブレンド成形品[代替素材]>

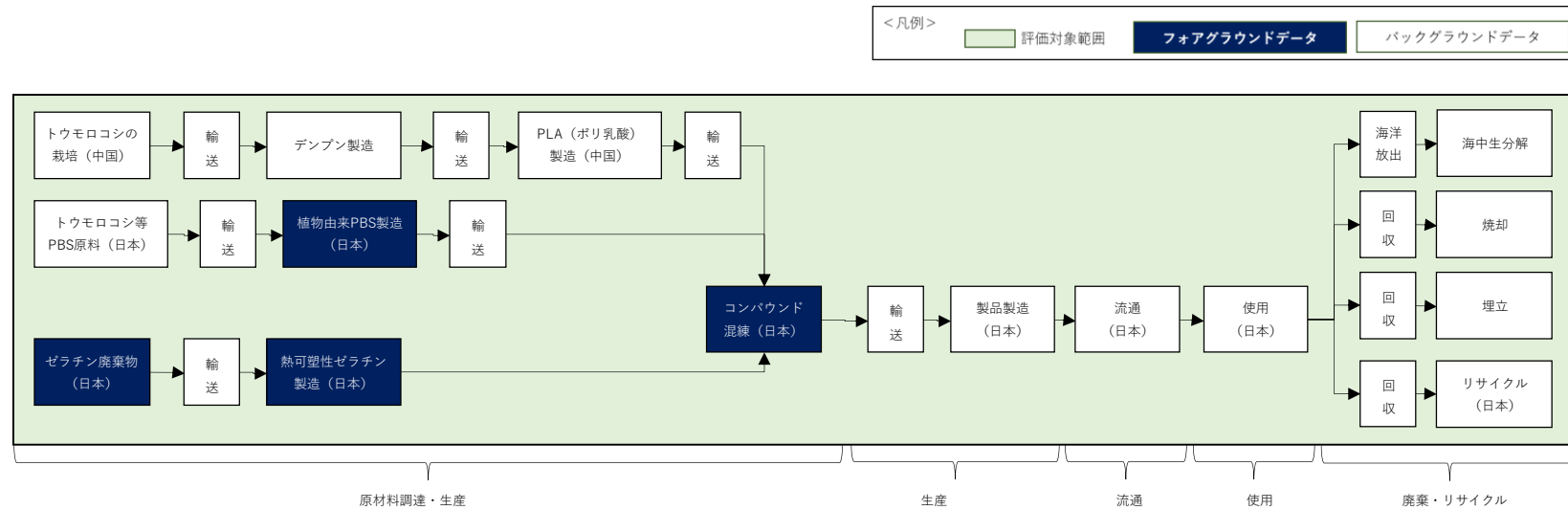


図 3-1-1-③ 海洋生分解プラスチック(PLA:PBS:熱可塑ゼラチン = 76:19:5)製品製造のフローとシステム境界

<評価対象製品：PLA/PBS ブレンド成形品[代替素材]>

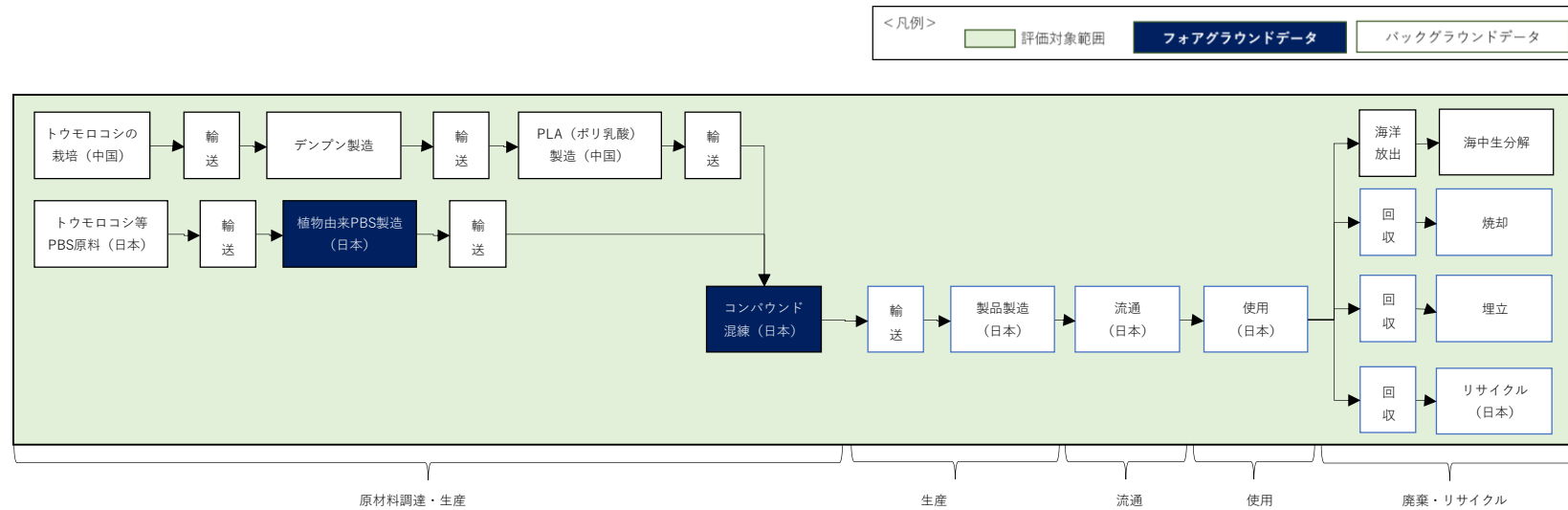


図 3-1-1-④ 海洋生分解プラスチック(PLA:PBS = 76:19 (≒ 80:20))製品製造のフローとシステム境界

<評価対象製品：熱可塑ゼラチン/熱可塑デンプン/PLA ブレンド成形品[代替素材]>

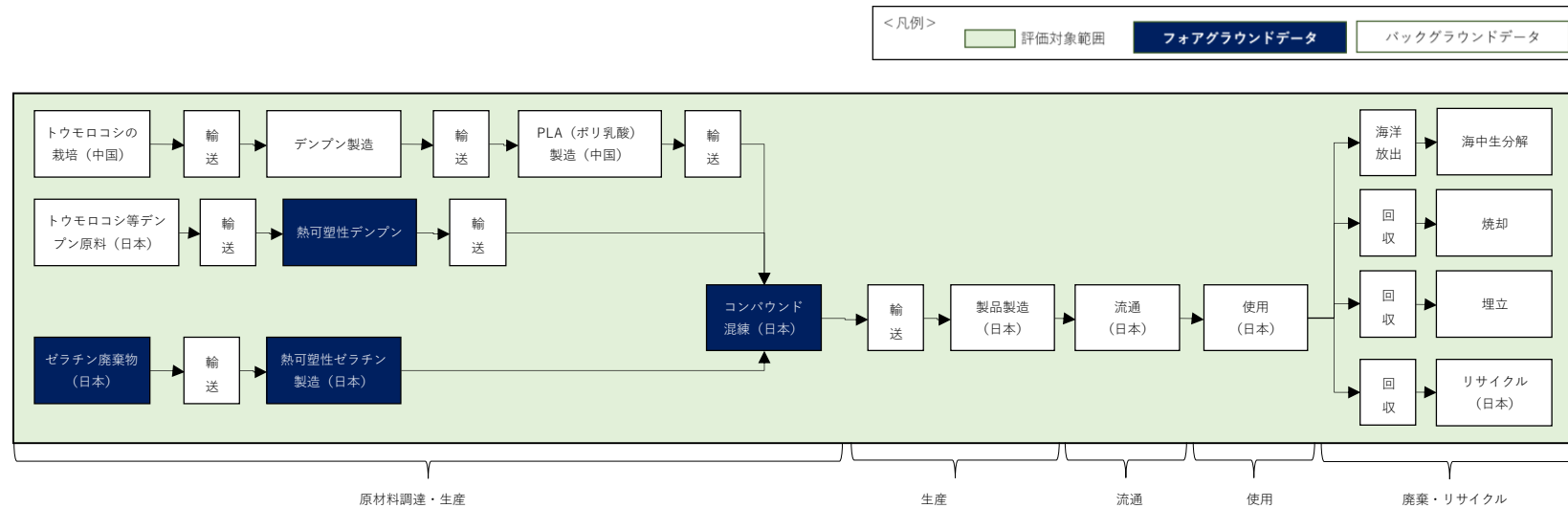


図 3-1-1-⑤ 海洋生分解プラスチック(PLA:熱可塑デンプン:熱可塑ゼラチン = 90 : 5 : 5) 製品製造のフローとシステム境界

<ベースライン：ポリプロピレン成形品>

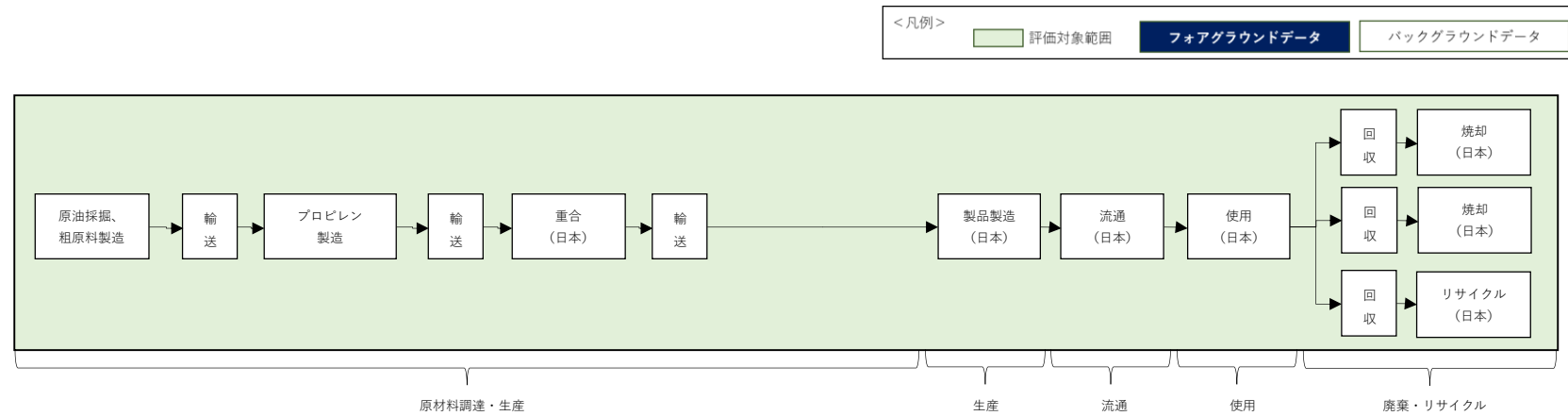


図 3-1-2 ベースライン(PP 樹脂)のフローとシステム境界

なお、LCA 評価の基準となる機能単位は、以下のように設定する。

- ・ 機能単位：1kg（フジツボ養殖用資材、ベースライン製品PP（ポリプロピレン）1個51.8g）と設定する。
- ・ 廃棄・リサイクル段階：産業用として使用するフジツボ養殖用資材は、産業廃棄物の廃プラスチック製品の廃棄リサイクルの処理割合で評価する。

### 3-2 ベースライン製品の利用状況と機能単位

令和7年度のベースラインはPP（ポリプロピレン）成型品を設定する。

#### 3-2-1 機能単位設定の考え方

ベースラインとして利用される汎用樹脂のPPは、用途によって異なるリサイクル手法が採用される。本開発品のフジツボ養殖用資材に特定し、生分解性プラスチック素材となるコンパウンドを原材料とした「フジツボ養殖用資材」1kgを機能単位とする。フジツボ養殖用資材は、フジツボの育種から生育までの養殖時に使用して繰り返し使用され、その後廃棄と、一部が破損により、海洋に貯留され分解するまでを機能単位とする。フジツボ養殖用資材は繰り返し使用され、破損など形状を保たない状況を廃棄とする。

破損など形状を保たない状況に関しては、欧州における漁具・養殖ギアからの海洋流出のデータの廃プラスチックの約15%が海洋へ流出（ASC, 2019）を用いて、本開発製品も海洋養殖として使用するフジツボ養殖用資材も同様に、15%が破損し海洋に残存すると想定し、85%を回収する。回収後の廃棄リサイクル処理は、産業廃棄物のプラスチック製品の廃棄処理と同じ、焼却処理（直接焼却、サーマルリサイクル）：72%、埋立処理：3%、リサイクル処理のシナリオ（マテリアルリサイクル、ケミカルリサイクル）：25%で算定を行う（一社プラスチック資源利用協会 2024年公表値より試算）。令和6年度の試算では、一般消費財を想定（ペットボトルキャップ、マイバケット）していたため、廃棄シナリオは、焼却処理92%、埋立処理3%、リサイクル処理5%を想定していたが、フジツボ養殖用資材は産業で使用するため、廃棄リサイクルのシナリオを上記に修正した。

#### 3-2-2 機能単位の想定

##### 3-2-2-1 成型品のPLA及びPP射出成形の例

###### 射出成形品

射出成型法は、熱可塑性プラスチックを加熱溶融し、低温に維持された金型内に流し込み、冷却固化させて製品を得る成形方法である（図 3-4-1）。成形に用いられる射出成形機

は原料を溶融させる可塑化機構と、溶融プラスチックを金型内に送り出す射出機構、金型の開閉を行う型締機構、およびこれらを制御する制御機構から構成されている。複雑な形状のものでも短時間安価に成形でき、後加工が不要な特徴を持つため、プラスチック加工で多く用いられる。

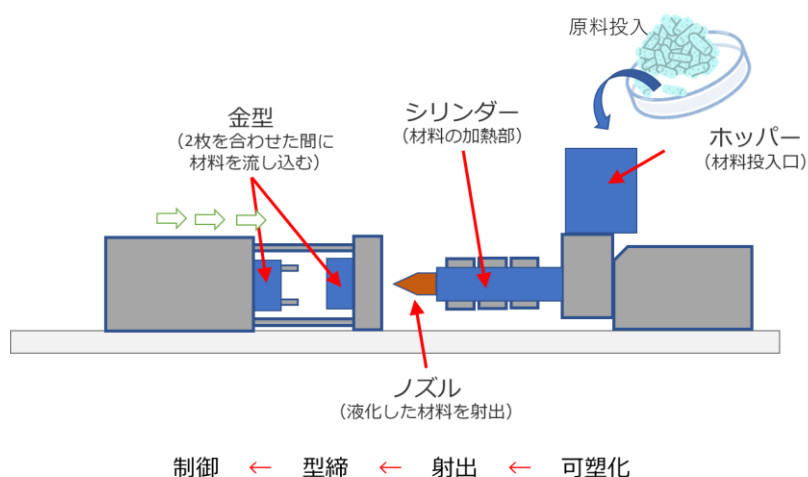


図 3-2-1 一般的な射出成型法のイメージ

### 成型品

フジツボ養殖用資材の (図 3-4-2) 生産段階は、射出成形の製品として、フジツボ養殖用資材を LCA 分析しカーボンフットプリント (CFP) の数値を算定した。

### ベースライン

#### フジツボ養殖用資材

製品仕様：1 個 (重量ベースラインは 51.4g)  
 開発製品の素材により、重量に差が出た  
 試算は 1kg あたりで評価  
 製品構成：本体 (フジツボ養殖用資材)  
 ① PP = 100%      ベースライン製品  
 生産歩留率：99%  
 流通段階距離：500km  
 廃棄処理：焼却処理：72 %  
 埋立処理：3 %  
 リサイクル処理の：25 %

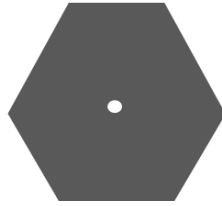


図 3-2-2 フジツボ養殖用資材(養殖板)のイメージ

### 3-3 開発品およびベースラインの LCA 調査

本章では、「熱可塑ゼラチンと熱可塑デンプン」原料製造方法に着目した GHG 排出量およびベースラインと比較した削減量を、LCA 手法を用いて算定する。対象とする環境カテゴリは気候変動（地球温暖化）である。また、製品製造時にブレンドされる基材は、生産量の大きい NatureWorks（米）製の PLA[3-1]と仮定する。この算定にあたっては、ベースラインとして PP 樹脂製品との代替効果を対象として分析を実施する。

#### 3-3-1 対象製品

本事業で開発される成型品の具体的な用途はフジツボ養殖などの養殖用資材を最終決定されている。本章では「製品の原料」と設定する。現状のベースライン製品として、ポリプロピレン（PP）樹脂を取り上げる（図 3-3-1）。

対象製品：フジツボ養殖用資材 **(PP = 100%)** 製品 1kg 当たり

CFP 算定結果	<b>6.95 kg</b>	ライフサイクル全体の CO2 排出量
----------	----------------	--------------------

内訳（ライフサイクル段階別）

段階	エネルギー起源	非エネルギー起源	構成率
原材料調達	<b>2.27</b> kg-CO2e	— kg-CO2e	32.6%
コンパクト化（加工工程）	— kg-CO2e	— kg-CO2e	0.0%
生産	<b>0.81</b> kg-CO2e	— kg-CO2e	11.7%
流通	<b>0.21</b> kg-CO2e	— kg-CO2e	3.0%
使用	<b>0.00</b> kg-CO2e	— kg-CO2e	0.0%
廃棄・リサイクル	<b>0.11</b> kg-CO2e	<b>3.55</b> kg-CO2e	52.7%

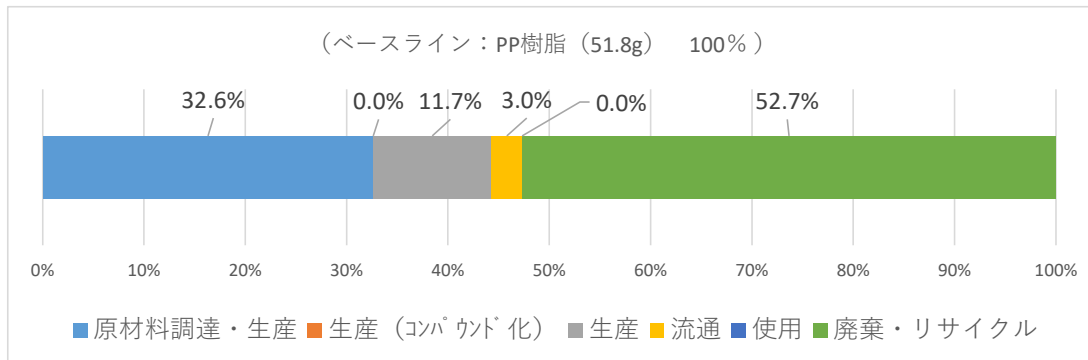


図 3-3-1 フジツボ養殖用資材(PP = 100%)製品のライフサイクル段階別内訳

### 3-3-2 機能単位

LCA の機能単位は、重量など様々な単位が用途に応じ適切に選択されるが、本事業では「1kg 相当の成型品」と設定する。なお、樹脂ペレットは重量単位を用いて整理されている場合が多いので、重量ベースのデータが採用しやすいというメリットがある。なお、PLA、PP 樹脂の比重は、それぞれ 1.24、0.91 と設定する。

### 3-3-3 システム境界

LCA は、「ゆりかごから墓場まで」の環境側面を評価するツールであるが、比較対象製品と同一と推測されるプロセスは省略して、比較することができる。そのため、3-1-3 で掲載した図 3-1-1-②~⑤及び図 3-1-2 のプロセスで、同等と推測される「製品生産 (加工)、流通、使用」の各段階と「廃棄・リサイクル」の環境負荷は検討する対象のプロセスから除外する。したがって、比較するプロセスは「原料から製品製造」と設定する。

なお、システム境界内で消費される原料や燃料の GHG 排出量には、直接収集した 1 次データを使用し、特定が困難な場合にはシナリオを想定して、産業技術総合研究所が開発している IDEAv.3.5.1 の LCA データベース[3-2]をバックグラウンドデータとして利用する。IDEAv.3.5.1 はわが国で開発された代表的な積み上げ型 LCA データベースであり、日本国内で多くの産業が利用している。ただし、同データベースに付属する個別プロセスの入出力データや排出原単位は公開が制約されているので、以下の分析では「算定の結果」のみを記載する。

### 3-3-4 製品製造のフローとインベントリデータ

#### 3-3-4-1 開発品

##### 3-3-4-1-1 原材料（熱可塑ゼラチン）の製造

図 3-1-1-①の基本製造フローに記載のとおり、PLA とブレンドされる原料である「熱可塑ゼラチン」は、ゼラチン廃棄物と、トウモロコシである。この原料に熱可塑性を付与するため、グリセリン（学術名は、グリセロールであるが、汎用名称を用いる）がブレンドされ、開発原料が製造される。

令和7年度は、令和6年度算定のブレンドに対する収率を用いる。乾燥させた熱可塑ゼラチンと PLA の比率を 20 対 80 と仮定し算定する。なお、熱可塑ゼラチンの製造において、ゼラチンとグリセリンと水の配合比率を次のように用いる。

#### ゼラチン廃棄物の配合

・ゼラチン廃棄物：グリセリン：水＝50:30:20
---------------------------

乾燥後のゼラチン配合 ※グリセリンは乾燥工程で水分が蒸発し減量（30→20）する

・ゼラチン：グリセリン＝50:20
-------------------

ここで、削減効果などを算出する LCA 計算シートには、この配合比率を採用する。

・グリセリン：グリセリンは植物や動物の油脂を加水分解する製造方法と、石油クラッキングの副産物であるプロピレンから化学合成する方法がある。しかし、年間約 100 万トン生産されるグリセリンの代表的な製造方法は大豆を主原料とする植物原料であることが知られている。そこで、本章では植物油脂を主原料とする製造方法と設定する。

#### <熱可塑ゼラチン>

熱可塑ゼラチン原料製造までの GHG 排出量は以下のように算出した。

$$A*(50/70)+B*(20/70)+C*\times D*=[Z1]kg-CO2e$$

ここで、A:ゼラチン廃棄物の GHG 排出原単位

B:グリセリンの GHG 排出原単位 (IDEA)

C:熱可塑ゼラチン製造時 (ベンチ・スケール) のエネルギー投入量

D:各投入エネルギーの GHG 排出原単位 (IDEA)

[Z1]:熱可塑ゼラチンの GHG 排出量

C:熱可塑ゼラチン製造時 (ベンチ・スケール) のエネルギー投入量

熱可塑ゼラチンを製造するにあたり、現状のベンチ・スケールにて製造する際の使用機器とエネルギー使用量は次の通りとする。



図 3-3-2 熱可塑ゼラチン製造のフロー

乾燥工程は、令和 6 年度の LCA 報告より、ゼラチン廃棄物の乾燥工程（1kg あたり）の消費電力量=0.585kWh を用いる。

<PLA>

令和 6 年度の算定では PLA の GHG 排出量を、令和 5 年度の LCA 評価実績の 2.44kg-CO2/kg-PLA を使用する。

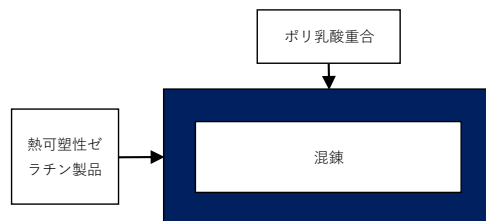


図 3-3-3 混練工程のフロー

<混練工程>

ゼラチン廃棄物から製造する熱可塑ゼラチンとトウモロコシから製造する PLA のブレンド成形品を製造するための混練工程のエネルギー使用量は次の通りとする。

また、上述の通り PLA、PP 樹脂の比重は、それぞれ 1.24、0.91 と設定する。

混練工程は、令和 6 年度の LCA 報告より、1kg あたりの消費電力量=0.883kWh を用いる。

3-3-4-1-2 原料調達・生産段階のサイト間の輸送

トウモロコシの栽培地（アメリカ想定）から、デンプン製造工場、PLA 重合工場までの輸送と、ゼラチン廃棄物の発生地から熱可塑ゼラチン製造工場までの輸送、さらにポリ乳酸重合製品と熱可塑ゼラチン製品を混練する工場までの輸送は次の通りとする。

<ul style="list-style-type: none"> <li>トウモロコシの栽培地(アメリカ想定)から混練工場まで アメリカ国内の陸送 → アメリカから日本への船舶輸送 → 国内輸送</li> <li>ゼラチン廃棄物の発生地から混練工場までの輸送 国内の陸送(大阪) → 国内輸送(岐阜)</li> </ul>
---

熱可塑ゼラチン/PLA 等ブレンドは、令和 6 年度の LCA 報告より、1kg あたりの原料調達・生産段階のサイト間の輸送による CO2 排出量=0.0714kg-CO2e/kg を用いる。

[1] 成形段階

ペレットからフジツボ養殖用資材を成形するには、用途に応じて射出成形やインフレーション成形の算定を用いる。

[2] 使用段階

フジツボ養殖用資材は、使用段階の消費エネルギーおよび投入物は無しとする。

[3] 廃棄・リサイクル段階

開発する「海洋生分解性バイオマスプラスチック」を用いるフジツボ養殖用資材は、繰り返し使用できるが、海洋使用時に 15%が破損し海洋に残存すると想定し、85%を回収する。回収した質量 85%の製品は、産業廃棄物処理を行うため算定では、廃棄処理の割合を、焼却処理：72 %（単純焼却：8 %、サーマルリサイクル：64%の合計）、埋立処理：3 %、リサイクル処理：25 %（マテリアルリサイクル：22%ケミカルリサイクル：3%の合計）の処理配分を用いる。

### 3-3-4-2 ベースライン

#### (1) PP 樹脂

令和 7 年度の開発品の代替素材は PP 樹脂と設定した。

[1] 成形段階

ペレットからフジツボ養殖用資材を成形するには、射出成形とインフレーション成形の算定を用いる。

[2] 使用段階

フジツボ養殖用資材は、使用段階の消費エネルギーおよび投入物は、無しとする。

[3] 廃棄・リサイクル段階

ベースラインのフジツボ養殖用資材は、繰り返し使用できるが、海洋使用時に 15%が破損し海洋に残存すると想定し、85%を回収する。回収した質量 85%の製品は、産業廃棄物処理を行うため算定では、廃棄処理の割合を、焼却処理：72 %（単純焼却：8 %、サーマルリサイクル：64%の合計）、埋立処理：3 %、リサイクル処理：25 %（マテリアルリサイクル：22%ケミカルリサイクル：3%の合計）の処理配分を用いる。

### 3-3-4-3 廃棄処理の考え方について

プラスチック製品の廃棄処理方法は、焼却処理、埋立処理、リサイクル処理がある。プラスチック製品に関しては、本年度の「フジツボ養殖用資材」は、自治体にて回収される一般廃棄物とは違い、産業廃棄物処理として回収し処理される。今回の試算では、一般社団

法人プラスチック循環利用協会が「2023年「プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況(マテリアルフロー図)」2024年12月」で公表する、焼却処理(72%)、埋立処理(3%)、リサイクル処理(25%)の割合を用いた。なお、本章では、CO2排出量を比較するため、公表資料のサーマルリサイクル(64%)は、焼却処理に区分している。

廃棄処理の割合：

① 焼却処理：72%

注) 単純焼却：8%、サーマルリサイクル：64%の合計

② 埋立処理：3%

③ リサイクル処理：25%

注) マテリアルリサイクル：22%ケミカルリサイクル：3%の合計

### 3-3-5 GHG 排出量削減効果の試算

開発品(フジツボ養殖用資材)の原料のGHG排出量を試算し、ベースラインのPP製品(市場・スケール)のライフサイクルでのGHG排出量との差から削減効果を試算する。

評価対象製品

フジツボ養殖用資材：熱可塑ゼラチン/PLAブレンド(コンパウンド品)配合の4製品  
評価対象製品

① PLA：熱可塑ゼラチン=95%：5%

1個当たり質量：75.5g

② PLA：PBS：熱可塑ゼラチン=76%：19%：5%

1個当たり質量：71.6g

③ PLA：PBS=80%：20%

1個当たり質量：72g

④ PLA：熱可塑デンプン：熱可塑ゼラチン=90%：5%：5%

1個当たり質量：71.3g

生産歩留率：99%

流通段階距離：500km

廃棄処理：焼却処理：72%

埋立処理：3%

リサイクル処理の：25%

②対象製品：フジツボ養殖用資材 製品 1kg 当たり

(原材料② PLA：熱可塑ゼラチン=95：5 コンパウンド品 1kg)

CFP 算定結果	4.95 kg	ライフサイクル全体の CO2 排出量
----------	---------	--------------------

内訳 (ライフサイクル段階別)

段階	エネルギー起源	非エネルギー起源	構成率
原材料調達	2.66 kg-CO2e	— kg-CO2e	54.3%
コンパウンド化 (加工工程)	0.05 kg-CO2e	— kg-CO2e	1.1%
生産	0.56 kg-CO2e	— kg-CO2e	11.4%
流通	0.21 kg-CO2e	— kg-CO2e	4.3%
使用	0.00 kg-CO2e	— kg-CO2e	0.0%
廃棄・リサイクル	0.04 kg-CO2e	1.37 kg-CO2e	28.9%

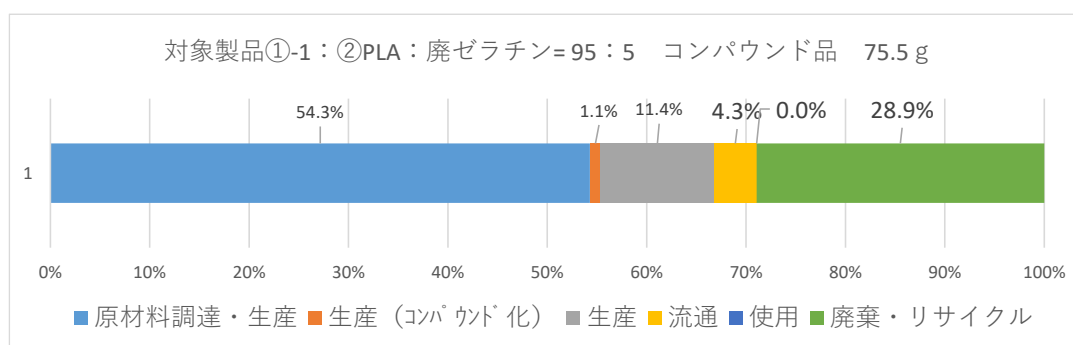


図 3-4-3 フジツボ養殖用資材(PLA:熱可塑ゼラチン=95:5)製品のライフサイクル段階別内訳

ベースラインの PP 樹脂及び参考の PLA にはないコンパウンド化の工程が追加となり GHG 排出量は増加する。また、PP 樹脂に比べ 1 製品当たりの質量が 1.46 倍となり原材料の重量が重くなった。廃棄リサイクル段階では PP 樹脂から置き換えたことで石油由来の CO2 排出量の削減に繋がった。

③対象製品：フジツボ養殖用資材 製品 1kg 当たり

(対象製品：③PLA：PBS：熱可塑ゼラチン = 76：19：5 コンパウンド品 1 kg)

CFP 算定結果	4.96 kg	ライフサイクル全体の CO2 排出量
----------	---------	--------------------

内訳（ライフサイクル段階別）

段階	エネルギー起源	非エネルギー起源	構成率
原材料調達	2.64 kg-CO2e	— kg-CO2e	53.1%
コンパウンド化（加工工程）	0.05 kg-CO2e	— kg-CO2e	1.1%
生産	0.59 kg-CO2e	— kg-CO2e	11.8%
流通	0.21 kg-CO2e	— kg-CO2e	4.2%
使用	0.00 kg-CO2e	— kg-CO2e	0.0%
廃棄・リサイクル	0.04 kg-CO2e	1.43 kg-CO2e	29.7%

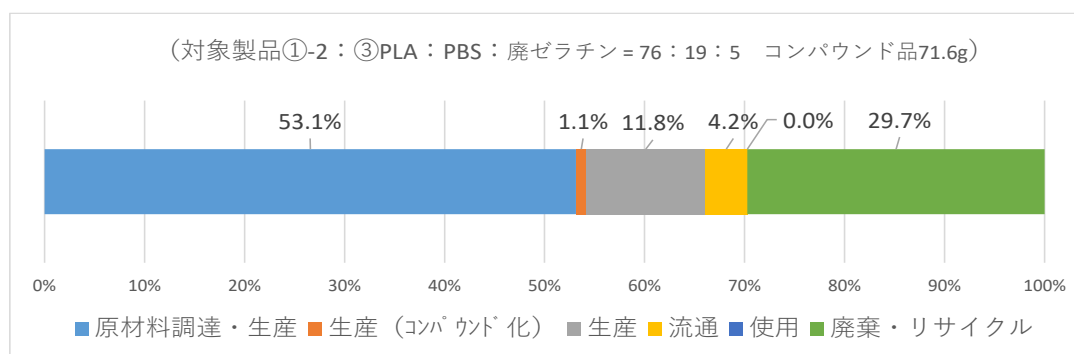


図 3-4-4 フジツボ養殖用資材 (PLA:PBS:熱可塑ゼラチン = 76:19:5) 製品のライフサイクル段階別内訳

ベースラインの PP 樹脂及び参考の PLA にはないコンパウンド化の工程が追加となり GHG 排出量は増加する。また、PP 樹脂に比べ 1 製品当たりの質量が 1.38 倍となり原材料の重量が重くなった。廃棄リサイクル段階では PP 樹脂から置き換えたことで石油由来の CO2 排出量の削減に繋がった。

④ 対象製品：フジツボ養殖用資材

(対象製品：④PLA：PBS = 80：20 コンパウンド品 1 kg)

製品 1kg 当たり

CFP 算定結果	5.14 kg	ライフサイクル全体の CO2 排出量
----------	---------	--------------------

内訳（ライフサイクル段階別）

段階	エネルギー起源	非エネルギー起源	構成率
原材料調達	<b>2.68</b> kg-CO2e	— kg-CO2e	53.5%
コンパウンド化（加工工程）	<b>0.05</b> kg-CO2e	— kg-CO2e	1.1%
生産	<b>0.58</b> kg-CO2e	— kg-CO2e	11.7%
流通	<b>0.21</b> kg-CO2e	— kg-CO2e	4.2%
使用	<b>0.00</b> kg-CO2e	— kg-CO2e	0.0%
廃棄・リサイクル	<b>0.04</b> kg-CO2e	<b>1.43</b> kg-CO2e	29.5%

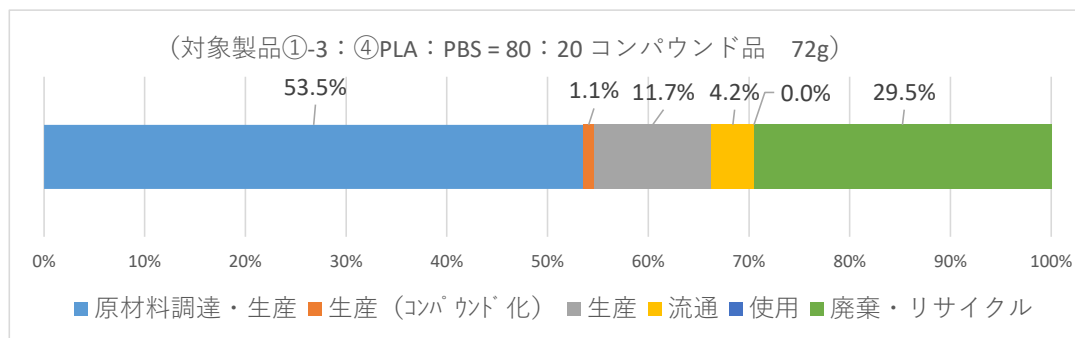


図 3-4-5 フジツボ養殖用資材 (PLA:PBS:熱可塑ゼラチン = 76:19:5) 製品のライフサイクル段階別内訳

ベースラインの PP 樹脂及び参考の PLA にはないコンパウンド化の工程が追加となり GHG 排出量は増加する。また、PP 樹脂に比べ 1 製品当たりの質量が 1.39 倍となり原材料の重量が重くなった。さらに、熱可塑ゼラチンを原材料に加えていないことから、原材料の GHG 排出量は対象製品②③⑤)に比べて多くなった。廃棄リサイクル段階では PP 樹脂から置き換えたことで石油由来の CO2 排出量の削減に繋がった。

⑤ 対象製品：フジツボ養殖用資材

(対象製品：⑤PLA：熱可塑デンプン：熱可塑ゼラチン=90：5：5コンパウンド品 1kg)

製品 1kg 当たり

CFP 算定結果	4.97 kg	ライフサイクル全体の CO2 排出量
----------	---------	--------------------

内訳（ライフサイクル段階別）

段階	エネルギー起源	非エネルギー起源	構成率
原材料調達	2.64 kg-CO2e	— kg-CO2e	53.0%
コンパウンド化（加工工程）	0.05 kg-CO2e	— kg-CO2e	1.1%
生産	0.59 kg-CO2e	— kg-CO2e	11.9%
流通	0.21 kg-CO2e	— kg-CO2e	4.2%
使用	0.00 kg-CO2e	— kg-CO2e	0.0%
廃棄・リサイクル	1.47 kg-CO2e	1.47 kg-CO2e	29.7%

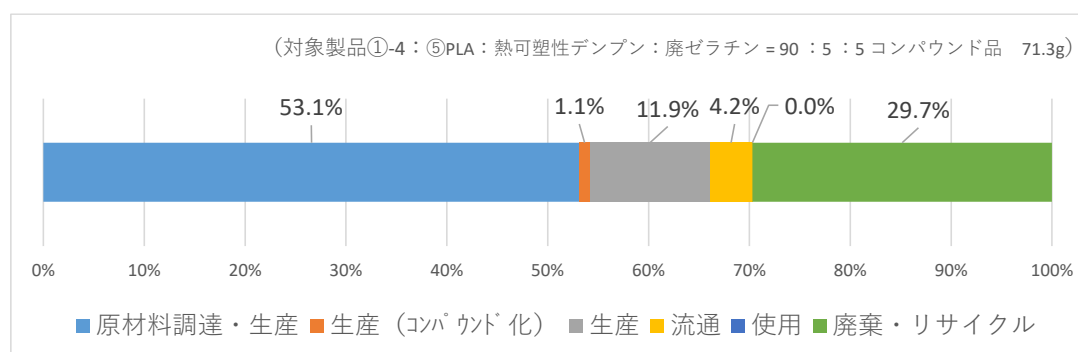


図 3-4-6 フジツボ養殖用資材 (PLA:熱可塑デンプン:熱可塑ゼラチン = 90:5:5) 製品のライフサイクル段階別内訳

ベースラインの PP 樹脂及び参考の PLA にはないコンパウンド化の工程が追加となり GHG 排出量は増加する。また、PP 樹脂に比べ 1 製品当たりの質量が 1.38 倍となり原材料の重量が重くなった。廃棄リサイクル段階では PP 樹脂から置き換えたことで石油由来の CO2 排出量の削減に繋がった。

比較参考データ

フジツボ養殖用資材：熱可塑ゼラチン/PLA ブレンド（コンパウンド品）配合製品 ① PLA = 100%・・・参考 1個当たり質量：71.4g  生産歩留率：99% 流通段階距離：500km 廃棄処理：焼却処理：72% 埋立処理：3% リサイクル処理の：25%
--

対象製品：フジツボ養殖用資材 製品 1kg 当たり

(原材料①PLA = 100%)

CFP 算定結果	4.97 kg	ライフサイクル全体の CO2 排出量
----------	---------	--------------------

内訳（ライフサイクル段階別）

段階	エネルギー起源	非エネルギー起源	構成率
原材料調達	2.70 kg-CO2e	— kg-CO2e	54.3%
コンパウンド化（加工工程）	— kg-CO2e	— kg-CO2e	0.0%
生産	0.56 kg-CO2e	— kg-CO2e	11.8%
流通	0.21 kg-CO2e	— kg-CO2e	4.2%
使用	0.00 kg-CO2e	— kg-CO2e	0.0%
廃棄・リサイクル	0.04 kg-CO2e	1.43 kg-CO2e	29.7%

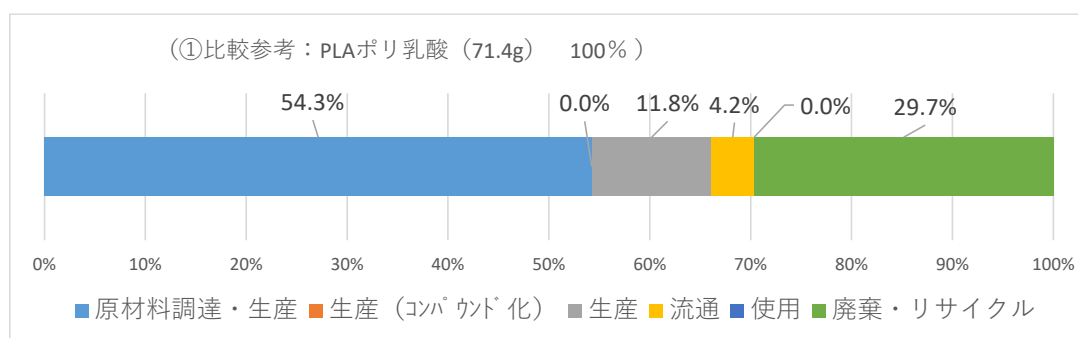


図 3-4-7 フジツボ養殖用資材(PLA = 100%)製品のライフサイクル段階別内訳

3-3-6 開発製品とベースライン製品との比較

開発品とベースラインの PP 製品のライフサイクルでの GHG 排出量との差から削減効果を示す。

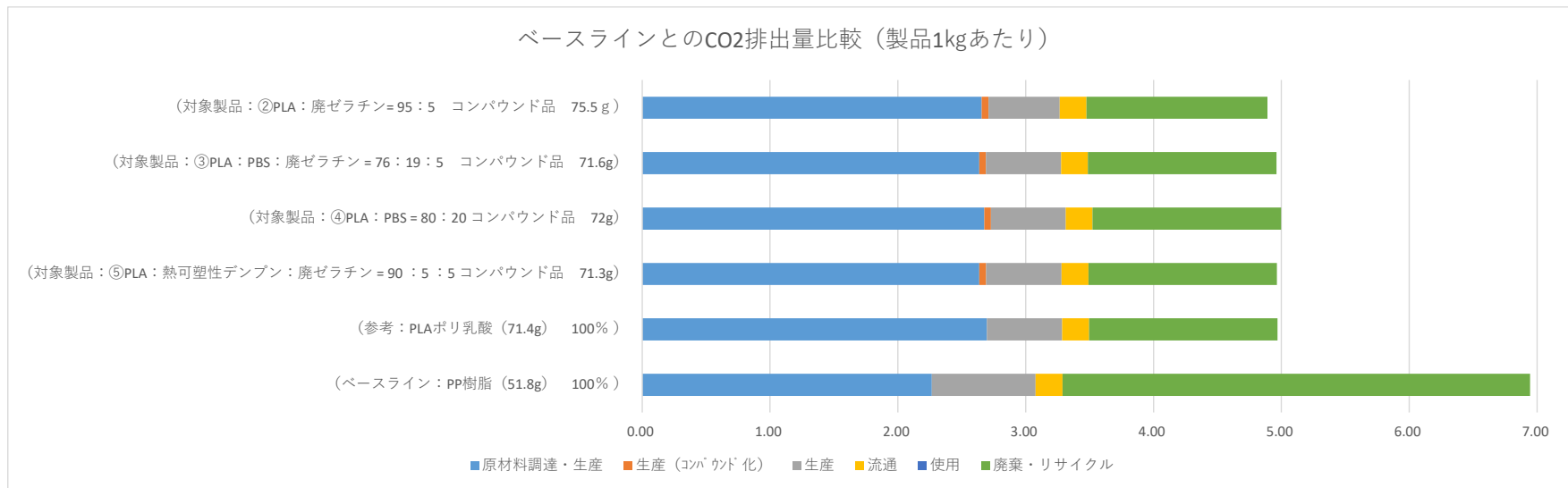


図 3-4-8 CO2 排出量削減比較(製品 1 kgあたり)

フジツボ養殖用資材のベースライン PP 樹脂の成型品（100%）は、素材の排出原単位が最も小さいため、原材料調達の段階では最も GHG 排出量が少ない結果となった。また、PP 樹脂及び参考の PLA にはないコンパウンド化の工程が評価対象製品②③④⑤には追加となり GHG 排出量はその工程分増加する。廃棄リサイクル段階において、ベースライン（PP 樹脂）は、焼却処理による石油由来の CO2 排出量が多くなるため、全ライフサイクルでは評価対象製品はすべて GHG 排出量削減効果が得られた。

表 3-4-1-①-1 開発品とベースラインの GHG 排出量比較 (製品: 1 kgあたり)

(対象製品: ②PLA: 熱可塑ゼラチン= 95: 5 コンパウンド品 75.5 g)

①-1 評価対象製品		(対象製品: ②PLA: 熱可塑ゼラチン= 95: 5 コンパウンド品 75.5 g)			データ源	備考 (評価の進捗等)
		エネルギー起源	非エネルギー起源	合計		
実証事業 終了時点 (kg-CO2/ 年)	原材料調達・生産	2.66	0.00	2.66	配合 (PLA: 熱可塑性ゼラチン=95:5) に基づく。PLA文献、IDEA利用	PLA: 熱可塑ゼラチン= 95: 5
	生産 (コンパウンド化)	0.05	0.00	0.05	コンパウンド工程。IDEA利用	
	生産	0.56	0.00	0.56	射出成形工程投入エネルギー。IDEA利用	プラスチック成型品の射出成形工程のエネルギー量を算定に使用
	流通	0.21	0.00	0.21	輸送距離500km+輸送資材。IDEA利用	国内移動を想定し輸送距離500km
	使用	0.00	0.00	0.00	エネルギー投入なし	
	廃棄・リサイクル	0.04	1.37	1.42	回収量 (85%) の廃棄処理	回収量85%を、焼却処理72%、埋立処理3%、リサイクル処理25%
	合計	3.52	1.37	4.89		
普及段階 2030年時 点 (kg- CO2/年)	原材料調達・生産	2.66	0.00	2.66	配合 (PLA: 熱可塑性ゼラチン=95:5) に基づく。PLA文献、IDEA利用	PLA: 熱可塑ゼラチン= 95: 5
	生産 (コンパウンド化)	0.03	0.00	0.03	コンパウンド工程 ベンチスケールから生産工程向上で50%削減。IDEA利用	コンパウンド化工程 消費電力50%削減
	生産	0.45	0.00	0.45	射出成形工程投入エネルギー 生産工程80%に削減。IDEA利用	プラスチック成型品の射出成形工程のエネルギー量を算定に使用 生産効率80%に削減
	流通	0.21	0.00	0.21	輸送距離500km+輸送資材。IDEA利用	国内移動を想定し輸送距離500km
	使用	0.00	0.00	0.00	エネルギー投入なし	
	廃棄・リサイクル	0.04	1.37	1.42	回収量 (85%) の廃棄処理	回収量85%を、焼却処理72%、埋立処理3%、リサイクル処理25%
	合計	3.38	1.37	4.75		

②ベースライン		(ベースライン: PP樹脂 (51.8g) 100%)			データ源	備考 (評価の進捗等)
		エネルギー起源	非エネルギー起源	合計		
実証事業 終了時点 (kg-CO2/ 年)	原材料調達・生産	2.27	0.00	2.27	IDEA利用。PP比重 (0.9) とPLA比重 (1.24) から算定。	PP (ポリプロピレン) 100%
	生産 (コンパウンド化)	0.00	0.00	0.00	コンパウンド工程は無し	
	生産	0.81	0.00	0.81	射出成形工程投入エネルギー。IDEA利用	プラスチック成型品の射出成形工程のエネルギー量を算定に使用
	流通	0.21	0.00	0.21	輸送距離500km+輸送資材。IDEA利用	国内移動を想定し輸送距離500km
	使用	0.00	0.00	0.00	エネルギー投入なし	
	廃棄・リサイクル	0.11	3.55	3.66	回収量 (100%) の廃棄処理	回収量85%を、焼却処理72%、埋立処理3%、リサイクル処理25%
	合計	3.40	3.55	6.95		
普及段階 2030年時 点 (kg- CO2/年)	原材料調達・生産	2.27	0.00	2.27	IDEA利用。PP比重 (0.9) とPLA比重 (1.24) から算定。	PP (ポリプロピレン) 100%
	生産 (コンパウンド化)	0.00	0.00	0.00	コンパウンド工程は無し	
	生産	0.81	0.00	0.81	射出成形工程投入エネルギー。IDEA利用	プラスチック成型品の射出成形工程のエネルギー量を算定に使用
	流通	0.21	0.00	0.21	輸送距離500km+輸送資材。IDEA利用	国内移動を想定し輸送距離500km
	使用	0.00	0.00	0.00	エネルギー投入なし	
	廃棄・リサイクル	0.11	3.55	3.66	回収量 (100%) の廃棄処理	回収量85%を、焼却処理72%、埋立処理3%、リサイクル処理25%
	合計	3.40	3.55	6.95		

③削減量 (②-①)		エネルギー起源	非エネルギー起源	合計
実証事業 終了時点 (kg-CO2/ 年)	原材料調達・生産	(0.443)	0.000	(0.443)
	生産 (コンパウンド化)			
	生産	0.255	0.000	0.255
	流通	0.000	0.000	0.000
	使用	0.000	0.000	0.000
	廃棄・リサイクル	0.066	2.177	2.242
	合計	(0.123)	2.177	2.054
普及段階 2030年時 点 (kg- CO2/年)	原材料調達・生産	(0.417)	0.000	(0.417)
	生産 (コンパウンド化)			
	生産	0.366	0.000	0.366
	流通	0.000	0.000	0.000
	使用	0.000	0.000	0.000
	廃棄・リサイクル	0.066	2.177	2.242
	合計	0.015	2.177	2.192

表 3-4-1-①-2 開発品とベースラインの GHG 排出量比較 (製品: 1 kgあたり)

(対象製品: ③PLA: PBS: 熱可塑ゼラチン = 76: 19: 5 コンパウンド品 71.6g)

①-2評価対象製品		(対象製品: ③PLA: PBS: 熱可塑ゼラチン = 76: 19: 5 コンパウンド品 71.6g)			データ源	備考 (評価の進捗等)
		エネルギー起源	非エネルギー起源	合計		
実証事業 終了時点 (kg-CO2/ 年)	原材料調達・生産	2.64	0.00	2.64	配合 (PLA:PBS:熱可塑性ゼラチン=76:19:5)に基づく。PLA文献、IDEA利用	PLA: PBS: 熱可塑ゼラチン = 76: 19: 5
	生産 (コンパウンド化)	0.05	0.00	0.05	コンパウンド工程。IDEA利用	
	生産	0.59	0.00	0.59	射出成形工程投入エネルギー。IDEA利用	プラスチック成型品の射出成形工程のエネルギー量を算定に使用
	流通	0.21	0.00	0.21	輸送距離500km+輸送資材。IDEA利用	国内移動を想定し輸送距離500km
	使用	0.00	0.00	0.00	エネルギー投入なし	
	廃棄・リサイクル	0.04	1.43	1.47	回収量 (85%) の廃棄処理	回収量85%を、焼却処理72%、埋立処理3%、リサイクル処理25%
	合計	3.53	1.43	4.96		
普及段階 2030年時 点 (kg- CO2/年)	原材料調達・生産	2.64	0.00	2.64	配合 (PLA:PBS:熱可塑性ゼラチン=76:19:5)に基づく。PLA文献、IDEA利用	PLA: PBS: 熱可塑ゼラチン = 76: 19: 5
	生産 (コンパウンド化)	0.03	0.00	0.03	コンパウンド工程 ベンチスケールから生産工程向上で50%削減。IDEA利用	コンパウンド化工程 消費電力50%削減
	生産	0.47	0.00	0.47	射出成形工程投入エネルギー 生産工程80%に削減。IDEA利用	プラスチック成型品の射出成形工程のエネルギー量を算定に使用 生産効率80%に削減
	流通	0.21	0.00	0.21	輸送距離500km+輸送資材。IDEA利用	国内移動を想定し輸送距離500km
	使用	0.00	0.00	0.00	エネルギー投入なし	
	廃棄・リサイクル	0.04	1.43	1.47	回収量 (85%) の廃棄処理	回収量85%を、焼却処理72%、埋立処理3%、リサイクル処理25%
	合計	3.39	1.43	4.82		
②ベースライン		(ベースライン: PP樹脂 (51.8g) 100%)				
		エネルギー起源	非エネルギー起源	合計	データ源	備考 (評価の進捗等)
実証事業 終了時点 (kg-CO2/ 年)	原材料調達・生産	2.27	0.00	2.27	IDEA利用。PP比重 (0.9) とPLA比重 (1.24) から算定。	PP (ポリプロピレン) 100%
	生産 (コンパウンド化)	0.00	0.00	0.00	コンパウンド工程は無し	
	生産	0.81	0.00	0.81	射出成形工程投入エネルギー。IDEA利用	プラスチック成型品の射出成形工程のエネルギー量を算定に使用
	流通	0.21	0.00	0.21	輸送距離500km+輸送資材。IDEA利用	国内移動を想定し輸送距離500km
	使用	0.00	0.00	0.00	エネルギー投入なし	
	廃棄・リサイクル	0.11	3.55	3.66	回収量 (100%) の廃棄処理	回収量85%を、焼却処理72%、埋立処理3%、リサイクル処理25%
	合計	3.40	3.55	6.95		
普及段階 2030年時 点 (kg- CO2/年)	原材料調達・生産	2.27	0.00	2.27	IDEA利用。PP比重 (0.9) とPLA比重 (1.24) から算定。	PP (ポリプロピレン) 100%
	生産 (コンパウンド化)	0.00	0.00	0.00	コンパウンド工程は無し	
	生産	0.81	0.00	0.81	射出成形工程投入エネルギー。IDEA利用	プラスチック成型品の射出成形工程のエネルギー量を算定に使用
	流通	0.21	0.00	0.21	輸送距離500km+輸送資材。IDEA利用	国内移動を想定し輸送距離500km
	使用	0.00	0.00	0.00	エネルギー投入なし	
	廃棄・リサイクル	0.11	3.55	3.66	回収量 (100%) の廃棄処理	回収量85%を、焼却処理72%、埋立処理3%、リサイクル処理25%
	合計	3.40	3.55	6.95		

③削減量 (②-①)		エネルギー起源	非エネルギー起源	合計
実証事業 終了時点 (kg-CO2/ 年)	原材料調達・生産	(0.424)	0.000	(0.424)
	生産 (コンパウンド化)			
	生産	0.224	0.000	0.224
	流通	0.000	0.000	0.000
	使用	0.000	0.000	0.000
	廃棄・リサイクル	0.066	2.118	2.184
	合計	(0.134)	2.118	1.984
普及段階 2030年時 点 (kg- CO2/年)	原材料調達・生産	(0.397)	0.000	(0.397)
	生産 (コンパウンド化)			
	生産	0.342	0.000	0.342
	流通	0.000	0.000	0.000
	使用	0.000	0.000	0.000
	廃棄・リサイクル	0.066	2.118	2.184
	合計	0.010	2.118	2.128

表 3-4-1-①-3 開発品とベースラインの GHG 排出量比較 (製品: 1 kgあたり)

(対象製品: ④PLA : PBS = 80 : 20 コンパウンド品 72g)

①-3 評価対象製品		(対象製品: ④PLA : PBS = 80 : 20 コンパウンド品 72g)			データ源	備考 (評価の進捗等)
		エネルギー起源	非エネルギー起源	合計		
実証事業 終了時点 (kg-CO2/ 年)	原材料調達・生産	2.68	0.00	2.68	配合 (PLA:PBS = 80:20) に基づく。 PLA文献、IDEA利用	PLA : PBS = 80 : 20
	生産 (コンパウンド化)	0.05	0.00	0.05	コンパウンド工程。IDEA利用	
	生産	0.58	0.00	0.58	射出成形工程投入エネルギー。IDEA 利用	プラスチック成型品の射出成形工程の エネルギー量を算定に使用
	流通	0.21	0.00	0.21	輸送距離500km+輸送資材。IDEA利用	国内移動を想定し輸送距離500km
	使用	0.00	0.00	0.00	エネルギー投入なし	
	廃棄・リサイクル	0.04	1.43	1.47	回収量 (85%) の廃棄処理	回収量85%を、焼却処理72%、埋立処理 3%、リサイクル処理25%
合計	3.57	1.43	5.00			
普及段階 2030年時 点 (kg- CO2/年)	原材料調達・生産	2.68	0.00	2.68	配合 (PLA:PBS = 80:20) に基づく。 PLA文献、IDEA利用	PLA : PBS = 80 : 20
	生産 (コンパウンド化)	0.03	0.00	0.03	コンパウンド工程 ベンチスケールから 生産工程向上で50%削減。IDEA利 用	コンパウンド化工程 消費電力50%削減
	生産	0.47	0.00	0.47	射出成形工程投入エネルギー 生産工 程80%に削減。IDEA利用	プラスチック成型品の射出成形工程の エネルギー量を算定に使用 生産効率80% に削減
	流通	0.21	0.00	0.21	輸送距離500km+輸送資材。IDEA利用	国内移動を想定し輸送距離500km
	使用	0.00	0.00	0.00	エネルギー投入なし	
	廃棄・リサイクル	0.04	1.43	1.47	回収量 (85%) の廃棄処理	回収量85%を、焼却処理72%、埋立処理 3%、リサイクル処理25%
合計	3.42	1.43	4.85			
②ベースライン		(ベースライン: PP樹脂 (51.8g) 100%)			データ源	備考 (評価の進捗等)
		エネルギー起源	非エネルギー起源	合計		
実証事業 終了時点 (kg-CO2/ 年)	原材料調達・生産	2.27	0.00	2.27	IDEA利用。PP比重 (0.9) とPLA比重 (1.24) から算定。	PP (ポリプロピレン) 100%
	生産 (コンパウンド化)	0.00	0.00	0.00	コンパウンド工程は無し	
	生産	0.81	0.00	0.81	射出成形工程投入エネルギー。IDEA 利用	プラスチック成型品の射出成形工程の エネルギー量を算定に使用
	流通	0.21	0.00	0.21	輸送距離500km+輸送資材。IDEA利用	国内移動を想定し輸送距離500km
	使用	0.00	0.00	0.00	エネルギー投入なし	
	廃棄・リサイクル	0.11	3.55	3.66	回収量 (100%) の廃棄処理	回収量85%を、焼却処理72%、埋立処理 3%、リサイクル処理25%
合計	3.40	3.55	6.95			
普及段階 2030年時 点 (kg- CO2/年)	原材料調達・生産	2.27	0.00	2.27	IDEA利用。PP比重 (0.9) とPLA比重 (1.24) から算定。	PP (ポリプロピレン) 100%
	生産 (コンパウンド化)	0.00	0.00	0.00	コンパウンド工程は無し	
	生産	0.81	0.00	0.81	射出成形工程投入エネルギー。IDEA 利用	プラスチック成型品の射出成形工程の エネルギー量を算定に使用
	流通	0.21	0.00	0.21	輸送距離500km+輸送資材。IDEA利用	国内移動を想定し輸送距離500km
	使用	0.00	0.00	0.00	エネルギー投入なし	
	廃棄・リサイクル	0.11	3.55	3.66	回収量 (100%) の廃棄処理	回収量85%を、焼却処理72%、埋立処理 3%、リサイクル処理25%
合計	3.40	3.55	6.95			

③削減量 (②-①)		エネルギー起源	非エネルギー起源	合計
実証事業 終了時点 (kg-CO2/ 年)	原材料調達・生産	(0.463)	0.000	(0.463)
	生産 (コンパウンド化)			
	生産	0.228	0.000	0.228
	流通	0.000	0.000	0.000
	使用	0.000	0.000	0.000
	廃棄・リサイクル	0.066	2.118	2.184
合計	(0.170)	2.118	1.948	
普及段階 2030年時 点 (kg- CO2/年)	原材料調達・生産	(0.437)	0.000	(0.437)
	生産 (コンパウンド化)			
	生産	0.344	0.000	0.344
	流通	0.000	0.000	0.000
	使用	0.000	0.000	0.000
	廃棄・リサイクル	0.066	2.118	2.184
合計	(0.027)	2.118	2.091	

表 3-4-1-①-4 開発品とベースラインの GHG 排出量比較(製品:1 kgあたり)

(対象製品: ⑤PLA:熱可塑デンプン:熱可塑ゼラチン=90:5:5 コンパウンド品

71.3g)

①-4評価対象製品		(対象製品: ⑤PLA:熱可塑性デンプン: 廃ゼラチン = 90 : 5 : 5 コンパウンド品 71.3g)				
		エネルギー起源	非エネルギー起源	合計	データ源	備考(評価の進捗等)
実証事業 終了時点 (kg-CO2/ 年)	原材料調達・生産	2.64	0.00	2.64	配合(PLA:PBS:=80:20)に基づく。 PLA文献、IDEA利用	PLA:熱可塑性デンプン: 廃ゼラチン = 90 : 5 : 5
	生産(コンパウンド化)	0.05	0.00	0.05	コンパウンド工程。IDEA利用	
	生産	0.59	0.00	0.59	射出成形工程投入エネルギー。IDEA 利用	プラスチック成型品の射出成形工程のエ ネルギー量を算定に使用
	流通	0.21	0.00	0.21	輸送距離500km+輸送資材。IDEA利用	国内移動を想定し輸送距離500km
	使用	0.00	0.00	0.00	エネルギー投入なし	
	廃棄・リサイクル	0.04	1.43	1.47	回収量(85%)の廃棄処理	回収量85%を、焼却処理72%、埋立処理 3%、リサイクル処理25%
	合計	3.53	1.43	4.97		
普及段階 2030年時 点(kg- CO2/年)	原材料調達・生産	2.64	0.00	2.64	配合(PLA:PBS:=80:20)に基づく。 PLA文献、IDEA利用	PLA:熱可塑性デンプン: 廃ゼラチン = 90 : 5 : 5
	生産(コンパウンド化)	0.03	0.00	0.03	コンパウンド工程 ベンチスケールから 生産工程向上で50%削減。IDEA利 用	コンパウンド化工程 消費電力50%削減
	生産	0.47	0.00	0.47	射出成形工程投入エネルギー 生産工 程80%に削減。IDEA利用	プラスチック成型品の射出成形工程のエ ネルギー量を算定に使用 生産効率80% に削減
	流通	0.21	0.00	0.21	輸送距離500km+輸送資材。IDEA利用	国内移動を想定し輸送距離500km
	使用	0.00	0.00	0.00	エネルギー投入なし	
	廃棄・リサイクル	0.04	1.43	1.47	回収量(85%)の廃棄処理	回収量85%を、焼却処理72%、埋立処理 3%、リサイクル処理25%
	合計	3.39	1.43	4.82		
②ベースライン		(ベースライン: PP樹脂 (51.8g) 100%)				
		エネルギー起源	非エネルギー起源	合計	データ源	備考(評価の進捗等)
実証事業 終了時点 (kg-CO2/ 年)	原材料調達・生産	2.27	0.00	2.27	IDEA利用。PP比重(0.9)とPLA比重 (1.24)から算定。	PP(ポリプロピレン) 100%
	生産(コンパウンド化)	0.00	0.00	0.00	コンパウンド工程は無し	
	生産	0.81	0.00	0.81	射出成形工程投入エネルギー。IDEA 利用	プラスチック成型品の射出成形工程のエ ネルギー量を算定に使用
	流通	0.21	0.00	0.21	輸送距離500km+輸送資材。IDEA利用	国内移動を想定し輸送距離500km
	使用	0.00	0.00	0.00	エネルギー投入なし	
	廃棄・リサイクル	0.11	3.55	3.66	回収量(100%)の廃棄処理	回収量85%を、焼却処理72%、埋立処理 3%、リサイクル処理25%
	合計	3.40	3.55	6.95		
普及段階 2030年時 点(kg- CO2/年)	原材料調達・生産	2.27	0.00	2.27	IDEA利用。PP比重(0.9)とPLA比重 (1.24)から算定。	PP(ポリプロピレン) 100%
	生産(コンパウンド化)	0.00	0.00	0.00	コンパウンド工程は無し	
	生産	0.81	0.00	0.81	射出成形工程投入エネルギー。IDEA 利用	プラスチック成型品の射出成形工程のエ ネルギー量を算定に使用
	流通	0.21	0.00	0.21	輸送距離500km+輸送資材。IDEA利用	国内移動を想定し輸送距離500km
	使用	0.00	0.00	0.00	エネルギー投入なし	
	廃棄・リサイクル	0.11	3.55	3.66	回収量(100%)の廃棄処理	回収量85%を、焼却処理72%、埋立処理 3%、リサイクル処理25%
	合計	3.40	3.55	6.95		

③削減量 (②-①)		エネルギー起源	非エネルギー起源	合計
実証事業 終了時点 (kg-CO2/ 年)	原材料調達・生産	(0.425)	0.000	(0.425)
	生産(コンパウンド化)			
	生産	0.222	0.000	0.222
	流通	0.000	0.000	0.000
	使用	0.000	0.000	0.000
	廃棄・リサイクル	0.066	2.118	2.184
	合計	(0.137)	2.118	1.981
普及段階 2030年時 点(kg- CO2/年)	原材料調達・生産	(0.398)	0.000	(0.398)
	生産(コンパウンド化)			
	生産	0.340	0.000	0.340
	流通	0.000	0.000	0.000
	使用	0.000	0.000	0.000
	廃棄・リサイクル	0.066	2.118	2.184
	合計	0.007	2.118	2.125

表 3-5-1-①-5 比較参考 PLA の GHG 排出量比較(製品:1 kgあたり)

①比較参考		(参考: PLAポリ乳酸 (71.4g) 100%)			データ源	備考(評価の進捗等)
		エネルギー起源	非エネルギー起源	合計		
実証事業 終了時点 (kg-CO2/ 年)	原材料調達・生産	2.70	0.00	2.70	NatureWorks文献から引用 中国から輸送	PLA(ポリ乳酸) 100%
	生産(コバウンド化)	0.00	0.00	0.00	コンパウンド工程は無し	
	生産	0.59	0.00	0.59	射出成形工程投入エネルギー。IDEA 利用	プラスチック成型品の射出成形工程のエネルギー量を算定に使用
	流通	0.21	0.00	0.21	輸送距離500km+輸送資材。IDEA利用	国内移動を想定し輸送距離500km
	使用	0.00	0.00	0.00	エネルギー投入なし	
	廃棄・リサイクル	0.04	1.43	1.47	回収量(100%)の廃棄処理	回収量85%を、焼却処理72%、埋立処理3%、リサイクル処理25%
	合計	3.54	1.43	4.97		
普及段階 2030年時 点(kg- CO2/年)	原材料調達・生産	2.70	0.00	2.70	NatureWorks文献から引用 中国から輸送	PLA(ポリ乳酸) 100%
	生産(コバウンド化)	0.00	0.00	0.00	コンパウンド工程は無し	
	生産	0.59	0.00	0.59	射出成形工程投入エネルギー。IDEA 利用	プラスチック成型品の射出成形工程のエネルギー量を算定に使用
	流通	0.21	0.00	0.21	輸送距離500km+輸送資材。IDEA利用	国内移動を想定し輸送距離500km
	使用	0.00	0.00	0.00	エネルギー投入なし	
	廃棄・リサイクル	0.04	1.43	1.47	回収量(85%)の廃棄処理	回収量85%を、焼却処理72%、埋立処理3%、リサイクル処理25%
	合計	3.54	1.43	4.97		
②ベースライン		(ベースライン: PP樹脂 (51.8g) 100%)			データ源	備考(評価の進捗等)
		エネルギー起源	非エネルギー起源	合計		
実証事業 終了時点 (kg-CO2/ 年)	原材料調達・生産	2.27	0.00	2.27	IDEA利用。PP比重(0.9)とPLA比重 (1.24)から算定。	PP(ポリプロピレン) 100%
	生産(コバウンド化)	0.00	0.00	0.00	コンパウンド工程は無し	
	生産	0.81	0.00	0.81	射出成形工程投入エネルギー。IDEA 利用	プラスチック成型品の射出成形工程のエネルギー量を算定に使用
	流通	0.21	0.00	0.21	輸送距離500km+輸送資材。IDEA利用	国内移動を想定し輸送距離500km
	使用	0.00	0.00	0.00	エネルギー投入なし	
	廃棄・リサイクル	0.11	3.55	3.66	回収量(100%)の廃棄処理	回収量85%を、焼却処理72%、埋立処理3%、リサイクル処理25%
	合計	3.40	3.55	6.95		
普及段階 2030年時 点(kg- CO2/年)	原材料調達・生産	2.27	0.00	2.27	IDEA利用。PP比重(0.9)とPLA比重 (1.24)から算定。	PP(ポリプロピレン) 100%
	生産(コバウンド化)	0.00	0.00	0.00	コンパウンド工程は無し	
	生産	0.81	0.00	0.81	射出成形工程投入エネルギー。IDEA 利用	プラスチック成型品の射出成形工程のエネルギー量を算定に使用
	流通	0.21	0.00	0.21	輸送距離500km+輸送資材。IDEA利用	国内移動を想定し輸送距離500km
	使用	0.00	0.00	0.00	エネルギー投入なし	
	廃棄・リサイクル	0.11	3.55	3.66	回収量(100%)の廃棄処理	回収量85%を、焼却処理72%、埋立処理3%、リサイクル処理25%
	合計	3.40	3.55	6.95		

フジツボ養殖用資材の市場規模の想定に関して、「令和5年度漁業種類別プラ系漁具海洋流出量調査」のデータを元に、プラ系漁具年間使用量（海面）108,379t の内、漁網、浮子、ロープ・テグス以外のプラ系漁具使用量(11,703t)（非網養殖（カキ・ホタテを除く）、漁業種類（サンマ棒受、はえ縄、ほか））を用いる。対象製品の「フジツボ養殖用資材」は、非網養殖に含まれ、漁網やロープ・テグス以外のプラスチック系の漁具は「フジツボ養殖用資材」と同様に海中使用され、この年間1万1700トンのプラ系漁具の使用を「熱可塑ゼラチン/PLA（ポリ乳酸）等ブレンド」の素材に置き換えることが可能として市場規模を9,000トンで試算を行った[3-4]。

表 3-4-2-①-1 普及段階開発品とベースラインの GHG 排出量比較(製品:9,000t)  
普及段階 2030 年時点：年間販売量 9,000t（市場規模 1,740,000t のシェア予測 0.5%）  
（対象製品：②PLA：熱可塑ゼラチン=95：5 コンパウンド品）

③削減量 (②-①)		エネルギー起源	非エネルギー起源	合計
実証事業 終了時点 (t-CO2/ 年)	原材料調達・生産	(3,990)	0	(3,990)
	生産(コンパウンド化)			
	生産	2,292	0	2,292
	流通	1	0	1
	使用	0	0	0
	廃棄・リサイクル	590	19,062	19,652
	合計	(1,107)	19,062	17,955
普及段階 2030年時 点(t-CO2/ 年)	原材料調達・生産	(3,751)	0	(3,751)
	生産(コンパウンド化)			
	生産	3,295	0	3,295
	流通	1	0	1
	使用	0	0	0
	廃棄・リサイクル	590	19,062	19,652
	合計	134	19,062	19,196

表 3-5-2-①-2 普及段階開発品とベースラインの GHG 排出量比較(製品:9,000t)  
普及段階 2030 年時点：年間販売量 9,000t（市場規模 1,740,000t のシェア予測 0.5%）  
（対象製品：③PLA：PBS：熱可塑ゼラチン=76：19：5 コンパウンド品）

③削減量 (②-①)		エネルギー起源	非エネルギー起源	合計
実証事業 終了時点 (t-CO2/ 年)	原材料調達・生産	(3,814)	0	(3,814)
	生産(コンパウンド化)			
	生産	2,020	0	2,020
	流通	1	0	1
	使用	0	0	0
	廃棄・リサイクル	590	19,062	19,652
	合計	(1,205)	19,062	17,857
普及段階 2030年時 点(t-CO2/ 年)	原材料調達・生産	(3,575)	0	(3,575)
	生産(コンパウンド化)			
	生産	3,076	0	3,076
	流通	1	0	1
	使用	0	0	0
	廃棄・リサイクル	590	19,062	19,652
	合計	91	19,062	19,153

表 3-5-2-①-3 普及段階開発品とベースラインの GHG 排出量比較(製品:9,000t)  
 普及段階 2030 年時点:年間販売量 9,000t (市場規模 1,740,000t のシェア予測 0.5%)  
 (対象製品:④PLA:PBS=80:20 コンパウンド品)

③削減量 (②-①)		エネルギー 起源	非エネルギー 起源	合計
実証事業 終了時点 (t-CO2/ 年)	原材料調達・生産 生産(コンパウンド化)	(4,168)	0	(4,168)
	生産	2,049	0	2,049
	流通	1	0	1
	使用	0	0	0
	廃棄・リサイクル	590	19,062	19,652
	合計	(1,529)	19,062	17,533
普及段階 2030年時 点(t-CO2/ 年)	原材料調達・生産 生産(コンパウンド化)	(3,929)	0	(3,929)
	生産	3,100	0	3,100
	流通	1	0	1
	使用	0	0	0
	廃棄・リサイクル	590	19,062	19,652
	合計	(239)	19,062	18,823

表 4-4 2-①-4 普及段階開発品とベースラインの GHG 排出量比較(製品:9,000t)  
 普及段階 2030 年時点:年間販売量 9,000t (市場規模 1,740,000t のシェア予測 0.5%)  
 (対象製品:⑤PLA:熱可塑デンプン:熱可塑ゼラチン=90:5:5 コンパウンド品)

③削減量 (②-①)		エネルギー 起源	非エネルギー 起源	合計
実証事業 終了時点 (t-CO2/ 年)	原材料調達・生産 生産(コンパウンド化)	(3,824)	0	(3,824)
	生産	1,997	0	1,997
	流通	1	0	1
	使用	0	0	0
	廃棄・リサイクル	590	19,062	19,652
	合計	(1,236)	19,062	17,826
普及段階 2030年時 点(t-CO2/ 年)	原材料調達・生産 生産(コンパウンド化)	(3,584)	0	(3,584)
	生産	3,058	0	3,058
	流通	1	0	1
	使用	0	0	0
	廃棄・リサイクル	590	19,062	19,652
	合計	65	19,062	19,127

### 3-4 まとめ

対象とした製品のGHG排出量には、開発品およびベースラインの実際のリサイクルの評価が必要である。本年度は原料の製造過程に関してベンチ・スケールの機器から投入エネルギーを計測し、ベンチ・スケールを想定した機器を使用するシナリオで分析を実施した。今後はより市場スケールに近づくようにパイロット・スケールを想定した生産方法を調査し、開発品の用途の明確化、その用途に対する回収リサイクルの現状を把握することによって、精度の高いLCAが可能となる。

開発品の製造技術はベンチ・スケールでは確率できているものの、原料の配合率など仮定の下にLCAを実施したが、パイロット・スケールの成型品製造との乖離があることも想定され、本分析の限界である。

対象とした製品のLCAに関して「実証済みの要素」と「試算・仮定による要素」を区別を示す。

表 3-5-1 LCAの「実証済みの要素」と「試算・仮定による要素」の区別

区分	要素
実証済みの要素	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 原材料の質量と配合比</li> <li>・ 原材料生産時のエネルギー投入量</li> </ul>
試算・仮定による要素	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 原材料の輸送距離と輸送手段</li> <li>・ 生産段階のエネルギー投入量</li> <li>・ 製品の輸送距離と輸送手段</li> <li>・ 使用時の海中分解の比率</li> <li>・ 使用済み製品の廃棄リサイクル処理施設への輸送距離と輸送手段</li> <li>・ 廃棄リサイクルの処理比率</li> </ul>

令和7年度の目標である「熱可塑ゼラチン/PLA（ポリ乳酸）等ブレンドのLCA評価と製造方法の精査によるLCA精度の向上」に関して、熱可塑ゼラチン/PLA（ポリ乳酸）等ブレンドの成型品「フジツボ養殖用資材」をベンチ・スケールの設備条件から、製造方法の精査を行うためにベンチ・スケールを想定したGHG排出量を算定した。

その結果、ブレンド製品を製造する際、熱可塑ゼラチンとPLAの混練工程のエネルギー消費量が著しく多いことが分かった。量産化を目指す際には開発品の製造工程の混練工程の省エネルギー化を考慮した設計が必要である。さらに、2030年の普及段階時において、エネルギー起源のCO<sub>2</sub>排出量がベースラインを超える〔④PLA：PBS（植物性）=76：19=80：20〕と、ベースラインと同排出量となる、〔②PLA：熱可塑ゼラチン=95：5〕と、〔⑤PLA：熱可塑性デンプン：熱可塑ゼラチン=90：5：5〕に関して削減可能性を検討したところ、PLAの生産が、国内で全量生産されると仮定すると次の結果となり、対象製品のエネルギー起源のCO<sub>2</sub>排出量がベースラインを下回る。

表 3-6-2 エネルギー起源の CO2 排出量削減の仮定

	2023 年普及段階		PLA の国内生産時 (仮定)	
	原材料の 輸送比率	原材料輸送 CO2 排出量(kgCO2)	原材料輸送 CO2 排出量(kgCO2)	エネルギー起源 CO2 排出量 (kgCO2)
①PLA = 100	4.49%	0.15 kg-CO2	0.06 kg-CO2	3.32 kg-CO2
②PLA : 熱可塑ゼラチン = 95 : 5	4.33%	0.15 kg-CO2	0.06 kg-CO2	3.34 kg-CO2
③PLA : PBS (植物性) : 熱可塑ゼラチン = 76 : 19 : 5	3.83%	0.13 kg-CO2	0.05 kg-CO2	3.34 kg-CO2
④PLA : PBS (植物性) = 76 : 19 = 80 : 20	3.89%	0.13 kg-CO2	0.05 kg-CO2	3.37 kg-CO2
⑤PLA : 熱可塑性デンプ ン : 熱可塑ゼラチン = 90 : 5 : 5	4.36%	0.15 kg-CO2	0.06 kg-CO2	3.33 kg-CO2
⑥ベースライン PP=100	1.45%	0.05 kg-CO2	-	3.40 kg-CO2

ベースラインの PP 樹脂との GHG 排出量を比較した結果、以下が判明した。

- ・ 開発品はベースラインに比べ、廃棄・リサイクル段階において GHG 削減が見込まれる。
- ・ 開発品の原材料の熱可塑ゼラチンの配合を高めることでシステム全体の GHG 削減が可能である。

### 3-5 参考文献

- [3-1] Erwin T.H. Vink, Steve Davies : Life Cycle Inventory and Impact Assessment Data for 2014 Ingeo Polylactide Production, VOL. 11 NO. 3, (JUNE 2015). INDUSTRIAL BIOTECHNOLOGY
- [3-2] 産業技術総合研究所：IDEA データベース
- [3-3] 一般社団法人サステナブル経営推進機構 環境ラベルプログラム：PCR プラスチック製容器包装
- [3-4] 「令和5年度漁業種類別プラ系漁具海洋流出量調査」の結果(公益財団法人海と渚環境美化・油濁対策機構)