

令和 4 年度環境省委託業務

令和 4 年度脱炭素社会を支えるプラスチック等資源循環システム構築実証事業
(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)
(海洋生分解性プラスチックによる水耕栽培用ウレタン培地代替事業) 委託業務

成果報告書

令和 5 年 2 月

プランツラボラトリー株式会社

概要

野菜などの水耕栽培に用いられるウレタン培地は生分解性を有しないため、その破片あるいは分解物が何らかの原因で海洋あるいは環境中に放出されると環境汚染につながるものが懸念される。本事業では、ウレタン培地の代替となる海洋生分解性を有する新規の培地を開発するとともに、これまで産業廃棄物として廃棄されていた廃培地と植物残渣の混合物を有効利用する方法を検討し、システム全体でのコストと培地製造から廃棄に至るプロセスにおける二酸化炭素排出に対する削減効果を明らかにすることを目的とする。

1. 代替培地の開発及び海洋生分解性の確認試験

令和3年度に試作した繊維化させた澱粉ポリエステル樹脂(Mater-Bi)の量産化のため、綿飴機を用いて繊維化方法の改良を行い製造時間および行程を短縮することができた。作製された培地は綿状の素材であり、これを培地としてリーフレタスの水耕栽培を行ったところ、ウレタン培地と遜色ない発芽および生育を示した。また、量産企業候補による試作培地の評価も行った。培地により播種時の種の植え方や給水量の調節などに工夫が必要であったが、発根後のレタスの生育は問題なかった。

代替培地の海洋生分解性について、澱粉ポリエステル樹脂の海洋生分解性試験をISO19679に従い行った。ISO19679は、浅海域の海底を想定した実験室内での試験法である。3ヵ月間の試験の結果ではあるが、澱粉ポリエステル樹脂はセルロースに対し6割程度の分解率を示した。

2. 代替培地の評価

試作した素材の異なる培地および製法の異なる澱粉ポリエステル樹脂の培地を用い、吸水性および保水性の評価を行った。吸水特性は各素材により異なるが、保水率は多くの培地で高い水準を示した。澱粉ポリエステル樹脂の培地は、形状にもよるが、吸水性および保水性のいずれも培地として必要な特性を備えていた。

また、自社工場から排出されるウレタンの培地微小片についてはほとんど検出されなかったため、屋外に置かれた培地の紫外線による分解を想定し調査した。結果、ウレタンからは微小片の放出が確認されたが、澱粉ポリエステル樹脂からは確認されな

かった。

3. 廃培地の有効利用技術の検討・実証

ウレタン代替培地を含む植物残渣の有効利用により、植物工場による野菜生産のトータルコストを低減する方法を模索した。有効利用法として、廃培地を含む植物残渣のウニ飼育化、堆肥化、バイオガス化について検討した。ウニ飼料化については、ウレタン代替培地およびレタスをウニが食べることが確認され、ウニ養殖コスト試算の結果、条件次第では植物残渣の処理コストが不要となり、ウニの販売により収益が見込めた。しかし、レタス残渣を食べたウニには苦みがあり、品質向上のための工夫が必要であった。また、ウニは培地を完全に消化せず、糞として排出したので、植物残渣と廃培地の分別処理としては有効と考えられた。今回検討した 3 つの選択肢の中では、ウニ飼料化は GHG 削減効果とコスト面で最も効果的であったが、解決すべき課題も残った。

なお、本調査により、ウニは一定の条件下でプラスチック類を食べることが明らかになり、海洋中のプラスチックのマイクロプラスチック化に関与していることが示唆された。

4. コスト評価・コスト削減策の検討

代替培地のトータルコストが、既存ウレタン培地よりも低減され、社会実装時の迅速な普及を目指すべく、既存ウレタン培地と代替培地の調達価格、廃棄費用の調査を行った。また生産コスト削減に向け、代替培地量産化可能である企業の選定および試作品の作成を実施した。

5. ライフサイクルでの温室効果ガス削減効果等の検証・評価

ベースライン（ウレタン製培地）及び評価対象製品（Mater-Bi 製培地）に係るバックグラウンドデータ及びフォアグラウンドデータの収集を行い、プロジェクトシナリオとして、廃培地及び廃根の焼却発電・堆肥化・バイオガス化・飼料化を想定し、ライフサイクルでの温室効果ガス（GHG）削減効果を評価した。その結果、培地素材をウレタンから Mater-Bi に代替することで、GHG 排出量を削減できる可能性があることが分かった。この削減に大きく寄与するのは、樹脂・培地製造時の GHG 排出削減

及び炭素吸収・副産物による GHG 排出削減であった。シナリオ別に GHG 排出量を比較すると、小さい順に、飼料化（昆布重量代替）、飼料化（昆布窒素成分代替）、バイオガス化、発電焼却、飼料化（廃キャベツ代替）、堆肥化、という結果となった。

Summary

Current urethane mediums used for hydroponic cultivation of vegetables are not biodegradable, and there is concern that its fragments or decomposition products may cause environmental pollution if they are released into the ocean or the environment. This project aims to 1) develop a new culture medium with marine biodegradability which can replace the urethane medium, 2) investigate the effective use of the mixture of waste urethane media and plant residues, which is being disposed of as industrial waste, and 3) to clarify the cost of the alternative culture medium and the reduction of carbon dioxide emission in the process from culture media production to disposal.

1. Development of an alternative culture medium and confirmation of its marine biodegradability

For a trial production of fibered starch polyester resin (Mater-Bi) in 2021, we improved the fibers using a cotton candy machine, and were able to shorten the production time and process. The trial medium was a cotton-like material, and when leaf lettuce was hydroponically grown on it, it showed equivalent growth and germination to the urethane medium. We also evaluated a trial culture medium through a company with mass-production capabilities. Although some adjustments were necessary in the way seeds were planted at the time of seeding and in the amount of water supplied, depending on the culture medium, there were no problems with the growth of lettuce after rooting. The marine biodegradability of the alternative culture media was tested in accordance with ISO 19679, which is a laboratory test method that simulates a shallow-water seabed. The results after 3 months of testing showed that the starch polyester resin had a degradation rate of about 60% compared to cellulose.

2. Evaluation of alternative culture media

The water absorption and water retention properties were evaluated using trial mediums made of different materials and of various starch polyester resins. Water absorption characteristics differed among materials, but water retention was high in many of the media. The starch polyester resin media possessed the necessary characteristics as a culture medium in terms of both water absorption and water retention, depending on its shape. Since a few micro fragments were detected in the urethane medium discharged from our plant factory, we assumed that the medium placed outdoors was decomposed by ultraviolet rays and investigated it. We discovered that micro fragments were released from the urethane, but not from the starch polyester resin.

3. Effective utilization of waste culture media

We sought ways to reduce the total cost of vegetable production by plant factories through the effective use of plant residues and culture media mix. We examined the use of the wastes as feed for sea urchins, composting, and biogas conversion. It was confirmed that sea urchins eat the urethane replacement medium and lettuce, and the estimation of sea urchin farming cost demonstrated that, depending on conditions, the cost of processing plant residues became unnecessary, and revenue could be expected through sea urchin sales. However, sea urchins that ate the lettuce residue had a bitter taste, and thus, some additional processes are needed to improve the quality of the sea urchins. In addition, the sea urchins did not digest the medium completely and discharged it as feces, which was considered effective as a separate treatment for plant residues and waste medium. Of the three options examined in this study, sea urchin feeding was the most effective in terms of GHG reduction and cost, but there are still issues to be resolved.

The study also revealed that sea urchins eat plastics under certain conditions, suggesting that they are involved in the conversion of plastics in the ocean into microplastics.

4. Cost evaluation and cost reduction measures

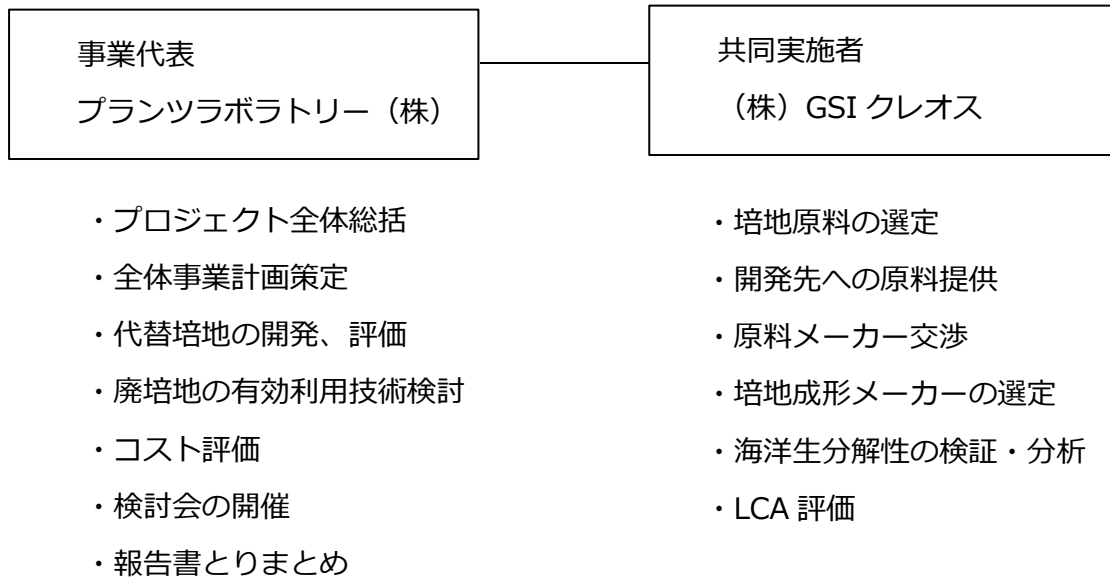
In order to reduce the total cost of the alternative culture media compared to the current one, we researched the cost of the current products and the disposal cost. To reduce the production cost, we have selected manufacturers that can mass-produce alternative culture media and prepared prototypes.

5. Verification and evaluation of lifecycle greenhouse gas reduction

Background and foreground data were collected for the baseline (urethane culture medium) and the product under evaluation (Mater-Bi culture medium) and life-cycle greenhouse gas (GHG) reductions such as incineration power generation, composting, biogas and feeding of waste media and plant residues were evaluated as the project scenario.

As a result, we discovered that replacing urethane with Mater-Bi as the culture medium has the potential to reduce GHG emissions. The major contributors are GHG emission reductions during resin and media production and from carbon absorption and by-products. Ranking GHG emissions by scenario in ascending order, the following results were obtained: feed material (seaweed weight substitution), feed material (seaweed nitrogen component substitution), biogas generation, incineration power generation, feed material (waste cabbage substitution), and composting.

組織図



< 目 次 >

1	はじめに.....	- 11 -
1.1	植物工場の今後の展望.....	- 11 -
1.2	農作物生産において排出されるプラスチック廃棄物.....	- 12 -
1.3	ウレタン代替培地の必要性.....	- 13 -
1.4	産業廃棄物としてのウレタン処分コストについて.....	- 14 -
1.5	本事業の目的.....	- 16 -
1.6	事業体制.....	- 18 -
1.7	事業実施期間.....	- 18 -
2	代替となる樹脂の比較.....	- 19 -
2.1	海洋生分解性プラスチックについて.....	- 19 -
2.2	本事業での代替素材候補.....	- 22 -
2.3	代替素材の生分解性.....	- 29 -
2.4	本事業での代替素材の選定.....	- 30 -
3	澱粉ポリエステル樹脂を用いたウレタン代替培地の開発.....	- 31 -
3.1	緒言.....	- 31 -
3.2	繊維化による培地の試作.....	- 32 -
3.3	綿飴機を用いた Mater-Bi の繊維化培地の試作.....	- 38 -
3.4	量産企業候補による Mater-Bi 加工品を用いた培地の試作.....	- 43 -
3.5	代替培地の機能性評価.....	- 50 -
3.6	まとめ.....	- 57 -
4	代替培地の量産企業の選定.....	- 58 -
4.1	社会実装に向けた取り組み.....	- 58 -
4.2	代替培地量産企業の選定と進捗.....	- 58 -
4.3	量産企業選定のまとめ.....	- 74 -
5	生分解性プラスチック候補素材の海洋生分解性と機能性評価.....	- 77 -
5.1	Mater-Bi の海洋生分解性について.....	- 77 -
5.2	実験室における海洋生分解性試験.....	- 82 -
5.3	流出する培地微少片について.....	- 87 -
6	ウレタン代替培地を含む植物残渣のウニ飼料としての有効利用.....	- 89 -
6.1	はじめに.....	- 89 -
6.2	ウニの養殖用飼料としての活用.....	- 89 -
6.3	海藻およびレタスの給餌がウニの食味に与える影響.....	- 91 -
6.4	水耕レタス植物残渣のウニ飼料としての利用.....	- 93 -
6.5	考察.....	- 94 -
7	廃培地・植物残渣のその他の有効利用方法.....	- 96 -

7.1	嫌気性分解・バイオガス化	- 96 -
7.2	廃培地・植物残渣の堆肥化について	- 101 -
7.3	堆肥化とは	- 101 -
7.4	Mater-Bi の堆肥化試験について	- 102 -
8	ウレタン培地と代替培地のトータルコスト比較.....	- 104 -
8.1	目的	- 104 -
8.2	方法	- 104 -
8.3	結果	- 105 -
8.4	考察とまとめ	- 108 -
9	ウレタン代替培地のライフサイクルアセスメント	- 109 -
9.1	目的及び調査範囲の設定	- 109 -
9.2	インベントリ分析	- 115 -
9.3	環境影響評価	- 118 -
9.4	解釈・結論	- 121 -
9.5	課題と不確実性	- 121 -
10	水耕栽培で使用されている培地の調査.....	- 123 -
10.1	ヒアリング調査	- 123 -
10.2	まとめ	- 126 -
11	本事業のまとめ	- 128 -
11.1	生分解性プラスチックを用いたウレタン代替培地の開発	- 128 -
11.2	生分解性プラスチック候補素材の海洋生分解性評価ならびに代替培地の機能性評価	- 128 -
11.3	ウレタン代替培地を含む植物残渣の有効利用	- 129 -
11.4	ウレタン代替培地利用による生産コスト削減効果	- 130 -
11.5	ウレタン代替培地利用による温室効果ガス削減効果	- 131 -
12	参考資料：バイオプラスチック識別表示制度	- 132 -
12.1	生分解性プラスチック識別認証制度	- 132 -
12.2	日本 / 生分解性プラ識別表示制度	- 132 -
12.3	オーストリア / TÜV Austria	- 133 -
12.4	アメリカ合衆国 / BPI	- 136 -
12.5	ドイツ / DIN CERTCO	- 137 -
13	参考資料：外注先との打合せ履歴.....	- 139 -
14	引用文献.....	- 141 -

1 はじめに

1.1 植物工場の今後の展望

2021 年度における完全人工光型植物工場の運営市場規模は、国内における完全人工光型植物工場の生産品目の 90%以上とみられるレタス類が、工場野菜生産者出荷金額ベースで前年度比 159.8%の 223 億円となった [1]。2022 年度は、前年度比 126.0%の 281 億円を見込む。施設数も 2022 年 2 月時点で全国に 190 施設（人工光型）となり、2012 年 3 月時点の 106 箇所と比較し、その数は約 2 倍にまで拡大してきている[2]。

気候変動や天候不順の激化により、露地野菜の調達相場は変動が激しく、農業従事者の高齢化と相まって、安定的な供給が年々難しくなっている。一方で、植物工場産野菜は閉鎖環境下で栽培されることで、気候変動に左右されず生産量が安定して確保でき、価格や品質が一定であるため、評価を得ている。植物工場産野菜の供給先としては、主に小売（スーパー、コンビニなど）、外食（レストランなど）、中食（惣菜、弁当など）などがあげられる。供給および価格が安定している点、栽培期間中無農薬である点、栽培から袋詰めまで衛生的に管理されている点、洗浄などにかかる手間を軽減できる点、捨てる部分が少なくフードロス軽減につながる点などが評価されている。具体的には、スーパーでの袋売りに加え、コンビニのサラダやサンドイッチ、外食チェーンのサラダや料理の付け合せ、中食のカット野菜や生春巻きなどで需要が拡大している。

現在の栽培品種は、可食部が多い葉菜類（グリーンリーフ、サニーレタス、フリルレタス、ケール、ハウレンソウ、アイスプラントなど）が中心となっているが、今後は差別化のために、ハーブ類、キノコ類、果菜類などへ栽培品種が拡大していくことが予想されている。

需要の拡大が見込まれる植物工場産野菜であるが、植物工場を運用するにあたっての最大の課題は採算性の確保である。特に大型の植物工場については設置コストおよびランニングコストが過大であり、補助金なしでは黒字化達成が難しいのが現状である。加えて昨今の石油価格の上昇により、光熱費の上昇も大きな課題である。他にも、「販路開拓」、「品質の安定化」、「運営管理技術の向上」などが課題として挙げられる。「販路開拓」には、植物工場産野菜のニーズの掘り起こしや認知の強化が必要である。「品質の安定化」には、作業効率を上げ、温度や湿度、養液供給、CO₂濃度などの環境制御を整え、生産物の品質を均一化していくことが必要である。「運営管理技術の向上」については、栽培・運営マニュアルを整備し、顧客の要求に柔軟に応えることができるフレキシブルなシステムの確立などが必要である。

1.2 農作物生産において排出されるプラスチック廃棄物

我が国の農業由来の廃プラスチックは、平成5年（1993年）には189千トン排出されていた[3]が、平成7年（1995年）には農林水産省より「園芸用使用済プラスチックの適正処理に関する基本方針」が発出され、平成6年（1994年）以降は減少傾向にある。平成13年（2001年）に「循環型社会形成推進基本法」が施行され、廃プラスチック処理時における再生処理の割合は上昇傾向にあり、生分解性樹脂による農業用マルチフィルムが徐々に市場で普及を始めており、農業を取り巻く廃プラスチックに係る環境負荷の軽減がはかられている。

国内においては農業従事者や耕地面積の減少傾向[4][5]が続いている一方で施設を利用した水耕栽培は、天候の影響を抑えられることや、連作障害を起こさないこと、単位面積当たりの収穫量が露地栽培と比べ多いことなどから、拡大の傾向にある[6]。しかしながら、これらの水耕栽培では温度管理のためにビニルハウス等の園芸施設を用いることや、土の代わりに養液とウレタン製の培地を用いることなど、露地栽培では使用しないプラスチック製品を多く利用する。そのため、水耕栽培において使用されるプラスチックの排出量が増加していることが懸念される。

1.3 ウレタン代替培地の必要性

現在、国内で広く行われている水耕栽培（ビニールハウス型・植物工場型）においては作物を支える培地としてウレタンあるいはロックウールが用いられる。ロックウールは保水性、通気性などにおいて培地としてすぐれた特性を持ち、作物の生育がよいため世界的に広く用いられている。しかし、使用後のロックウールの適当な処理方法がなく、リサイクルも進められているが最終的には埋め立て処分が必要になる問題がある[7]。一方、ウレタンは保水性においてはロックウールに劣るが安価かつ軽量で加工しやすく、播種用のスリットや窪みを成形しやすい、作業時の取り扱いが容易、吸水させたのちの保水性が良いというメリットがあるため、国内では広く使われている。ウレタンは生産コストが安く安価に販売されているものの、販売価格には廃棄された培地の処理、環境に放出された場合の復帰コストは考慮されていない。

植物の生育に伴いウレタン培地中に根が広がるため、収穫後の培地と根を完全に分離することはできない。通常はウレタン培地から出ている根を切り離し、切り離した根とウレタンと根の絡み合った部分とを分別して、それぞれ産業廃棄物として廃棄している。さらに、多くの事業者では産業廃棄物重量を軽減するため、ウレタン培地に浸透している栽培液を、手で絞る・洗濯機にかける・自然乾燥させるなどの方法で脱水している。このように、根とウレタン培地の廃棄工程は手間・人件費がかかり、生産コストを引き上げる要因のひとつとなっている。

根を取り除く際や脱水する際にウレタン培地の一部がちぎれ、破片が排水に流れることが懸念される。排水はそのまま排水処理後に海域に流出するので、海洋プラスチックになっている可能性がある。また、ウレタンは熱硬化性樹脂であることから廃棄後のリサイクルは困難であり、リユースもできないので、より環境負荷の小さいウレタン代替培地に置き換えることによりリデュースを図ることが求められる。

生分解性素材の培地に対する需要は特にEU市場で高い。EUでは平成31年(2019年)にストローや皿などの使い捨てプラスチック製品の流通を禁止する法案が採択され[8]、既存プラスチック素材からの代替が進むなど、プラスチックによる環境問題に

先進的に取り組んでいる。また、廃棄物の回収・処理のインフラ整備が不十分な新興国では、現地での廃棄物処理が困難なウレタン培地が環境へ放出されるリスクが高く、海洋生分解性プラスチック培地を利用した方が現実的に環境負担の軽減に寄与できる。

1.4 産業廃棄物としてのウレタン処分コストについて

平成 29 年（2017 年）以降アジア諸国などがプラスチックごみの受け入れを規制した影響で廃プラスチックの国内処理量が増加し、廃棄物処理業者の値上げが相次いでいる。全国産業廃棄物廃プラスチックの処理費用は、トンあたり 5 万円程度である（表 1-1）。環境省が令和 2 年（2020 年）に実施した国内の廃プラスチック類の処理に関する状況調査結果によると、処理料金が増加したと回答した事業所は中間処分業で 74%、最終処分業で 42.9%となった[9]。

産業廃棄物として回収されたプラスチック類は、リサイクルできる物とできない物に分別される。リサイクルできる物はペットボトルなどのマテリアルリサイクル、ガス化や油化するケミカルリサイクル、エネルギー回収としてのサーマルリサイクルに分類できる。一方、リサイクルできない物は最終処分場で焼却または埋め立てられている。最終処分場は安定型最終処分場、遮断型最終処分場、管理型最終処分場の 3 つに分類され、廃プラスチック類は安定型処分場で埋め立て処分されている。

表 1-1 全国産業廃棄物廃プラスチックの処理費用

地域	最高価格	最低価格	平均価格
北海道	100,000 円/トン	7,000 円/トン	55,000 円/トン
東北	99,000 円/トン	7,000 円/トン	53,000 円/トン
関東	110,000 円/トン	7,500 円/トン	56,000 円/トン
甲信越	90,000 円/トン	7,500 円/トン	50,000 円/トン
北陸	99,000 円/トン	6,000 円/トン	52,000 円/トン
東海	100,000 円/トン	6,000 円/トン	53,000 円/トン
関西	99,000 円/トン	7,000 円/トン	54,000 円/トン
中国	98,000 円/トン	7,000 円/トン	53,000 円/トン
四国	105,000 円/トン	7,500 円/トン	56,000 円/トン
九州	110,000 円/トン	7,500 円/トン	55,000 円/トン

株式会社大東建設[10]より作成

1.5 本事業の目的

本事業では、海洋生分解性を有する樹脂を用いて野菜等の水耕栽培用の培地を新たに開発し、現在、広く用いられている発泡ポリウレタン製の培地を代替することで、培地から廃根を取り除く際や廃ウレタン培地の風化等により海洋や環境中に非意図的に流出する培地由来のウレタン微細片による環境負荷を低減することを目的とする。これまで産業廃棄物として廃棄されていた廃根と培地を堆肥あるいは飼料として有効利用することにより、システム全体でのコストと CO2 排出を削減することを目的とする。さらに、本事業終了後にすみやかに社会実装を行い国内ならびに海外において既存培地の代替として広く普及させ、世界における水耕栽培由来のプラスチックごみ問題の環境負荷低減・解消に寄与できるように、水耕栽培事業者がウレタン培地から代替培地へ切り替える動機づけ要因（導入時のトータルコスト低減・手間の削減・廃棄の容易さなど）を明確にすることを目的とする。

以上のように、生分解性のウレタン代替培地が開発できれば、①ウレタン培地が海洋プラスチックとなる懸念を払拭できるだけでなく、②培地と根を分離せずにそのまま堆肥化・飼料化が可能であり廃棄物処理コストを削減することができる。そこで本事業では、海洋へ放出される懸念のある水耕栽培用のウレタン培地に代わる海洋生分解性プラスチックからなる培地を開発することを目的とする。さらに、新規開発した培地を導入した場合のトータルコストを削減し、廃培地の処理による CO2 排出を削減するため、廃培地のリサイクル方法を提案する。これらの目的のため、本プロジェクトでは以下の課題に取り組む。

（１）熱可塑化デンブンをを用いたウレタン代替培地の開発

海洋生分解性の素材を加工し、水耕栽培に適した特性をもつ代替培地を開発する。

（２）生分解性プラスチック候補素材の海洋生分解性評価

代替培地に用いる海洋生分解性素材および開発した代替培地の海洋での生分解性を評価する。

（３）代替培地の機能性の評価

代替培地の性能を評価するための項目をリストアップし、それらを用いた

代替培地の性能評価方法を開発する。また、当該性能評価方法に基づき、代替培地による植物生育を行い、開発する代替培地の性能を評価し、開発の検討にフィードバックする。

(4) ウレタン代替培地を含む植物残渣の有効利用技術

ウレタン培地では行われていない廃培地の飼料としての有効利用技術を確立する。

(5) 代替培地導入によるコスト削減

代替培地の製造コストと代替培地の導入により削減されるコスト(手選別費用や産業廃棄物の収集運搬・処理費用等)、飼料としての有効利用により見込まれる収益をそれぞれ明らかにし、本事業全体でのコスト評価を行う。また、本事業全体でのコストが削減される方策を検討する。

(6) ウレタン代替培地利用によるライフサイクルでの温室効果ガスの削減

ウレタン代替培地利用によるライフサイクル(原料調達・製造・使用・廃棄)での温室効果ガス削減効果を定量化し、その有効性を評価する。

1.6 事業体制

		役割
事業代表者	プランツラボラトリー（株）	水耕栽培用代替培地の開発・性能評価・廃培地の活用方法検討・コスト評価
事業代表者の外注先	東京大学大学院農学生命科学研究科附属生態調和農学機構	海洋生分解性素材を用いた代替培地を製造するための基礎技術及び代替培地の性能評価方法の確立
共同実施者	（株）GSI クレオス	海洋生分解性素材に係る情報収と素材提供・海洋生分解性の確認
共同実施者の外注先	三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング（株）	海洋生分解性の代替培地のライフサイクルフローの検討、バックグラウンドデータの引用先とフォアグラウンドデータの収集方針の検討

1.7 事業実施期間

令和2年4月1日から令和5年2月28日

2 代替となる樹脂の比較

2.1 海洋生分解性プラスチックについて

2.1.1 海洋生分解性プラスチックの国内外の開発

現在植物工場で培地として使用されるようなウレタン(エーテル系ポリウレタンフォーム) は一般に生分解しにくい素材といわれている[11, 12]。よって、代替培地の原料候補の選定を行うべく、国内外の生分解性・海洋生分解性樹脂について情報収集を実施し、それらの特徴、生分解性、海洋生分解性、コスト面、供給安定性、年間生産量について以下の通りまとめた。また、代替培地の海洋生分解性を実証するために収集した海洋生分解性の試験方法や条件を定めた規格についての情報も以下に示す。

2.1.2 国内外での海洋プラスチックの状況

全世界で 1950 年以降生産されたプラスチックは 83 億トンを超え[9]、我々の日常には非常に多くのプラスチックがあふれている。プラスチックの軽くて丈夫、さびや腐食に強い、様々な形状に加工できるといった特性の恩恵を様々な状況で受ける一方、リサイクルされるプラスチックは全体の 9%に過ぎず、残りの多くは埋め立てや投棄をされている。近年はプラスチックに関するごみ問題、特に回収が困難な海洋プラスチックの発生が問題視されている。

海洋プラスチックは、陸上から海洋に流出したプラスチックを指す。2010 年推計値では年間 478～1275 万トン/年ものプラスチックが海洋に流出している[10]とされる。

これらのゴミによって、自然環境や我々の社会生活などに様々な影響が出ると懸念されている。海洋生物の健康や生態への影響、船舶への弊害、観光業、漁業への影響などが主な影響例として挙げられる。またプラスチックが紫外線や潮汐による刺激によって経年劣化することによりマイクロプラスチックが生成されることで、人体への影響も懸念されている。

このような状況を背景に、海洋プラスチックごみ問題の解決に向けて、生分解性、特に海洋生分解性プラスチックの使用が世界各国で推奨され始めている。

国内の食品用プラスチック包装材の使用量は年間 150 万トンと推定され、使用期間が短く、使い捨てとして扱われるため、プラスチックごみの代表的存在となっている。そのような中で、ポリブチレンサクシネート（PBS）は、自然界の土中の微生物の力で水と二酸化炭素に自然に分解される特性を持っており、環境問題の解決に貢献する存在として期待されている。また、一般的な生分解性樹脂の中では高い耐熱性を持ち、繊維などとの相溶性が高いという特性を持つ。国内の食品用 PBS 系グリーンプラは、使用時に汚染され、リサイクルが困難な場合や、使用後の回収が難しい農業資材、土木資材、物流包装資材、海洋資材に用いられている[13]。



図 2-1 Novamont 社の生分解性樹脂の採用事例、使用可能用途。
農業用マルチフィルム。（Novamont 社より提供）



図 2-2 生分解性樹脂の採用事例。Novamont 社 Mater-Bi。[14]



図 2-3 生分解性樹脂の採用事例。レジ袋として。Novamont 社 Mater-Bi。
(Novamont 社提供)



図 2-4 生分解性樹脂の採用事例。ゴミ袋として。Novamont 社 Mater-Bi。[15]

2.2 本事業での代替素材候補

現在生産されている生分解性素材のなかから、発泡ポリウレタン代替素材として用いる候補素材を選び、それらの特徴、生分解性、海洋生分解性、供給安定性、年間生産量を以下にまとめた。

a) PLA(ポリ乳酸)

植物由来プラスチックであるポリ乳酸 (Polylactic Acid, PLA) は、透明性が高く、剛性および引張強度が高い。堆肥化装置を使用した場合などの特殊な環境下で生分解性を発揮する。PLA メーカー大手である Nature Works や Total Energies Corbion の生産能力が大きく、世界的な PLA の需要増に対応している。また、中国企業の PLA 生産量も増加している。

ポリ乳酸 (PLA) は、最も一般的な生分解性の高分子材料であり、認知度も高い。近年、微生物を利用した PLA の生分解性や、生化学的な分解プロセスの研究が進んでいるが、PLA の高効率な生分解方法についてはまだ十分な検討がなされていない。PLA の分解性は、主に化学的加水分解(de Jong et al., 2001, Kikkawa et al., 2004, Tsuji and Nakahara, 2002)および光分解(紫外線など)に関して研究されてきた(Ikada, 1997, Tsuji et al., 2006)。PLA は生分解性ポリマーであるが、自然環境中で PLA が

完全に消失するには数年かかることもある(Kimura et al., 2000)。最初に報告された PLA 分解微生物は、Pranamuda ら（1997）によって土壌から分離された *Amycolatopsis* HT-32 である。その後、好気性微生物（放線菌、細菌、真菌）による PLA の生分解性が実験室条件下で研究されてきた。

PLA の分解は主にエステル結合の切断によって起こり、さらに酸化、光分解、熱分解、加水分解、生分解、または酵素分解など、自然界のさまざまな要因によって分解される(Nampoothiri et al. 2010)。PLA の分解の生化学的プロセスには、主に化学的加水分解と微生物による生分解とがある。PLA のエステル結合は化学的加水分解によってカルボン酸とアルコールに断片化されるが、完全な加水分解が進行するには多くのエネルギーと時間が必要である。PLA 材料は、他の生分解性ポリエステルと比較して、自然環境下では微生物により分解されにくい (Tokiwa and Calabia, 2006)。土壌埋設実験によると、PLA 材料は分解が始まるまでに長い時間がかかり、分解速度はかなり遅い(Ohkita and Lee, 2006)。しかし、これまでに土壌や水から PLA を分解できる複数の種類の微生物が分離されている。それらのほとんどは放線菌であり、一部は細菌や真菌であった。

Williams(1981)は、*Tritirachium album* 由来のプロテイナーゼ K による PLA の酵素加水分解を初めて報告した。その後、市販のプロテアーゼ 56 種の PLA 分解活性を Oda ら（2000）がテストした。その結果、アルカリ性プロテアーゼの中には、PLA からかなりの数の乳酸を生成するものがあることがわかった。微生物由来の PLA 分解酵素は、主にプロテアーゼ（セリンプロテアーゼ）であり、少数ではあるがリパーゼ（エステラーゼ）やクチナーゼも存在する。PLA を分解する主要プロテアーゼは、セリンプロテアーゼ（プロテイナーゼ K など）である。微生物由来のセリンプロテアーゼの主要なファミリーは、細菌、古細菌、真菌に分布している[16]。

表2-1 PLA 製造企業と製品の特徴

企業名	本社	ブランド名	生産能力	備考	出典
Nature Works	アメリカ	Ingeo	14万トン/年	植物を原料としている。タイにおける新たな完全統合型 Ingeo PLA製造プラント構築中	[17]
Total Energies Corbion	オランダ	Luminy®	7.5万トン/年	植物を原料としており、フランスに 10 万トン/年規模のプラント建設を発表	[18]
安徽豊原集团有限公司	中国		5万トン/年	安徽豊原集団はハイケム株式会社とパートナーシップ契約を結び、日本国内でPLAを販売。	[19]

b) PBS

ポリブチレンサクシネート（PBS）は、主な取り扱い企業では国内の三菱ケミカル株式会社 BioPBS があるが、特徴として農業用マルチフィルムなどの生分解性用途に加え、FDA が取得されている等、食品包装用途などでの展開も可能な樹脂。

表 2-2 P B S 製造企業と製品の特徴

企業名	本社	ブランド名	生産能力	備考	出典
PTTMCC Biochem	タイ	Bio-PBS™	2万トン/年	植物由来コハク酸と1,4ブタンジオールからなるバイオPBS（商標：BioPBS™）を製造	[20]

康輝新材料科技有限公司	中国	PBS		恒力石油化学有限公司の子会社。ポリエステル系生分解樹脂であるポリブチレンサクシネート（PBS）を製造	[21]
-------------	----	-----	--	--	------

c) PHA (PHBH)

植物油などのバイオマスを原料としており、ストロー、レジ袋、カトラリー、食品包装材などで使用が可能で生分解性を有している。(株)カネカの PHBH、CJ Bio 社の CJ PHA など、本事業で必須である海洋での分解性が既に証明されており、代替素材候補として選定した。

表2-3 PHA (PHBH) 製造企業と製品の特徴

企業名	本社	ブランド名	生産能力	備考	出典
株式会社カネカ	日本	Green planet®	5千トン/年	植物油などのバイオマスを原料とし、微生物発酵プロセスによって生産されるポリマー	[22]
CJ Bio	韓国	PHACT		ポリヒドロキシアルカノエート (PHA) は、細菌発酵によって作られたバイオベースの生分解性ポリエステル	[23]

d) PBAT

PBAT（ポリブチルアジペートテレフタレート）は、引張強度や柔軟性を有している石油由来の生分解性樹脂。PBAT メーカーは後述のように Novamont 社や BASF が主な PBAT メーカーで、農業用マルチフィルム用途や製袋での実績が多数ある。

表2-4 PBAT 製造企業と製品の特徴

企業名	本社	ブランド名	生産能力	備考	出典
BASF	ドイツ	ecoflex®		芳香族ポリエステルの生分解性プラスチック	[24]
Red Avenue New Materials Group	中国		6万トン/年	BASF社のライセンス生産工場を立ち上げ	[25]

e) 澱粉ポリエステル樹脂

澱粉ポリエステル樹脂の主なメーカーとして Novamont 社（伊）Mater-Bi が挙げられる。Mater-Bi は PBAT と熱可塑性澱粉（とうもろこし由来）をコンパウンドした生分解性を有する樹脂。カルドン（キク科アザミ亜科）から抽出されるアゼライン酸、サトウキビより生成されるバイオブタンジオールをもとに自社で PBAT を製造している。物性的に柔らかく、フィルム成型に向いている樹脂。食品包装、レジ袋、カトラリー、農業用マルチフィルムなど様々な用途で実績がある。

表2-5 澱粉ポリエステル樹脂製造企業と製品の特徴

企業名	本社	ブランド名	生産能力	特徴	出典
Novamont	イタリア	Mater-Bi Origo-Bi	20万トン/年 (2022年)	澱粉ポリエステル樹脂(Mater-Bi)の供給だけでなく自社で植物由来のPBATも製造しており、PBAT単体(Origo-Bi)も供給。	[26]

2.3 代替素材の生分解性

生分解性は、特定の環境条件下でのみ発生する認定された特性であるため、その答えはそれほど単純ではなく、体系的な研究が必要である。ポリ乳酸（PLA）、ポリカプロラクトン（PCL）、ラクチド-グリコリド共重合体（PLGA）などの従来の生分解性ポリマー（脂肪族および脂肪族-芳香族ポリエステル）は、マイクロプラスチックの発生源としてはあまり注目されていない。その理由としては、これらのポリマーの用途が限られていることや、どんな環境条件でも分解されるという一般的な誤解が考えられる。したがって、「生分解性ポリマー」と呼ばれているからといって、環境汚染への貢献の可能性を否定するものではない。

しかしながら、水源における生分解性ポリマーの分解性に着目した研究は限られている。多くの研究では、サンプルを海水中の穴の開いたバスケットに入れ、残った材料の重量変化を記録しているが、生分解による重量減少なのか、単にサンプルが分解してマイクロプラスチックになり、二次的なマイクロプラスチックとして海に失われることによる重量減少なのかは区別されていない[27]。辻らは、PCL、PLA（非晶質および結晶）、ポリ（3-ヒドロキシブチレート）（PHB）を太平洋からの海水中で 25℃ で所定の期間劣化させる比較実験を行った[28]。その結果、PCL は 10 週間で 25% 分解されたのに対し、PHB は 9%しか分解されなかった。

Bagheri らは、5 種類の生分解性ポリマー、ポリ乳酸-グリコール酸（PLGA）、ポリカプロラクトン（PCL）、ポリ乳酸（PLA）、ポリ 3-ヒドロキシ酪酸（PHB）、Ecoflex（PBAT）と、非分解性ポリマーであるポリエチレンテレフタレート（PET）を、人工海水および淡水中で 1 年間にわたり制御された条件で比較分解試験を行った[29]。その結果、非晶質 PLGA のみが 100%の分解を示し、次に PHB が数%の分解を示した。一方 PCL、PLA の分解はわずかであった。このように生分解性速度は分析条件により変わり、さらに特定の条件では分解が早かったり遅かったりする。PLA は総じて分解の遅いグループに含まれた。

2.4 本事業での代替素材の選定

上記の代替素材候補の評価・検討により、本事業では Novamont 社の澱粉ポリエステル樹脂（Mater-Bi）で開発を進める。Novamont 社の生分解性樹脂は製品グレードにより海洋生分解性も有しており、バイオマスを含むため生分解性が高く、生産能力が世界トップクラスと大きい。供給も非常に安定しているため、量産製造の素材候補としてふさわしいと考える。

3 澱粉ポリエステル樹脂を用いたウレタン代替培地の開発

3.1 緒言

レタスなど葉菜類の水耕栽培においては、直径1 cm高さ2 cm程度のウレタンあるいはロックウール培地に播種し、育苗ののちに本栽培へ定植する。ウレタン、ロックウールそれぞれにメリットデメリットがある。ロックウールには、1) 親水性があり、養液を吸収しやすいというメリットがある一方、2) 培地が固く、播種後根が培地の中へ貫入せず、芽生えが持ち上がることがあり、それを回避するために適切な深さの穴に播種する必要がある、3) 発がん性はないとされるが、取り扱い時にマスク手袋は必要、4) 製造時に接着剤（バインダー）として少量のフェノール樹脂類を使用する、5) リサイクルが可能ではあるが、再生処理のために処理費、運搬費がかかる、リサイクルを行っている企業が販売したロックウールに限るため手軽ではない、などのデメリットがある[30]。さらに6) 最終的には使用できなくなるため処分の必要があり、多くの国で毎年大量のロックウールが埋め立てられている[7]。

一方、ウレタン(軟質ポリウレタンフォーム)は、1) 安価に入手することができるが、2) 親水性が小さく養液を吸収しにくい。3) 十分に養液を吸わせた後に播種をしないと発芽不良となる、4) 再利用はできず、産業廃棄物となる、5) 太陽光下（紫外線下）で分解が進む、6) 日本の水耕栽培において大量に廃棄される、という問題がある。ネギの水耕栽培により発生するウレタン培地廃棄物については、越智ら[31]の研究がある。

種子の発芽、植物の発達のためには、培地が適度の水分および空気を含むこと、また根が貫入して発達できる物性を有することが求められる。培地全体を水没させることは酸素欠乏を引き起こすため、通常培地の底面側が部分的に培養液に浸された状態におく。この状態で培養液が表面張力により培地内に保持されている必要がある。ウレタン代替培地は、これらの要件を満たす必要がある。

そのために十分な親水性があり、適度なサイズの間隙をもって表面張力により水を吸い上げ、保持できる性質を持ち合わせた素材を開発する。

発泡ウレタンには、硬質ウレタンフォームと軟質ウレタンフォームがあり、ポリウレタンは、液体原料であるポリイソシアネートとジオールを等モルで混合することにより重付加反応により合成される。この反応中に発泡剤を加えることにより気泡を発

生させて樹脂を発泡させたものが発泡ポリウレタンである。こうしてできた硬質ポリウレタンフォームは気泡が独立した泡で気体が閉じ込められた構造をしており、断熱性が高い一方、気泡間に隔壁（セル膜）が存在するために通気性や透水性はない。さらに除膜処理により気泡膜を除いたポリウレタンフォームは、通気性、通水性に優れスポンジなどに用いられる。水耕栽培で用いられるポリウレタンフォームは除膜処理の施されたものである。

熱可塑性の生分解性プラスチックは、常温では固体であり、加熱・液状化して高温で気化する発泡剤と混合することによって発泡させることが可能である。しかし、除膜処理が既知の方法で可能な樹脂の種類は限られる。実際に、予備試験として熱可塑性生分解性プラスチックを加熱により融解し重炭酸ナトリウムを混合させることによって発泡させることはできた。しかし成形物は通気性、透水性は持たなかった。

ウレタン培地が発泡化した素材であるのに対して、ロックウール培地は原料を繊維化して成形したものであり、親水性があるため高い吸水保水性を示す。もし樹脂を繊維化することで培地を作成できれば、素材の発泡化可能な特性に限定されず、幅広い樹脂素材が水耕用培地に利用できる。そこで、本試験では、発泡化に替わる方法として、Mater-Bi を繊維化し、培地とする方法の開発を試みた。さらに、試作した代替培地の吸水性、保水性の定量的な評価を行い、既存の培地と比較した。

3.2 繊維化による培地の試作

3.2.1 ポリ乳酸および Mater-Bi の繊維化による培地の試作

生分解性が確認されている 2 種類の樹脂、ポリ乳酸と Mater-Bi のペレット状樹脂をテフロンコーティングした金属容器に入れてホッププレート上に置き、それぞれ 220℃および 200℃で溶融させた。溶けた樹脂は適度に粘性があり、引っ張ることにより糸状に伸ばすことができた。そこで、溶融した樹脂の一部を糸状に吊り上げ、高さ 1 m の位置でローテータに取り付けた糸巻き器を用いて一定速度で巻き取った。樹脂の太さは 0.2-0.5mm であった。

これらは、冷却後は粘着性を持たないが、100℃程度の温度でも部分的に溶融し、接着させると繊維どうしを溶着させることができた。そこで、試作した繊維を 20 cm 程度に裁断しネットカップに詰め、沸騰水に数秒入れ、直ちに冷水に入れた。この操

作によって繊維状の素材は円筒状に成形された（図 3-1）。この培地は、繊維状であるため十分な空隙が存在し、水耕用培地として利用可能と思われた。Mater-Bi(EF04P)およびポリ乳酸を用いて作製した培地にレタス“グリーンリーフ”を播種し、水耕栽培により育苗した（図 3-2）

ポリ乳酸と Mater-Bi の繊維を比較すると、Mater-Bi の方が、繊維が弾性をもって柔らかかった。一方、ポリ乳酸は弾性の小さい素材であったため、その繊維が太すぎると柔らかい素材とはならず堅く変形しにくい素材となった。また、熔融温度を高めてより細い繊維としても、ポリ乳酸繊維は、成形時に膨張しやすい培地となりまとまりにくかった。

成形後の培地を比較すると、Mater-Bi 培地が親水性をもち水分を保持しやすく、播種後の培地の下部のみを養液に浸漬すれば表面張力によりある程度養液を保持でき、また繊維間空間が十分であったため通気性にも優れていた。一方、ポリ乳酸繊維は親水性が低く、また膨張しやすく密度の十分高い培地をつくれなかったため、水を保持しにくい特性があった。そのためポリ乳酸培地は播種後根が伸びて萌芽するまでは、培地全体をほぼ水中に保持する必要がある。芽生えの水管理のしやすさでは Mater-Bi 培地のほうが優れていた。



図 3-1 Mater-Bi を繊維化し、温湯に入れて成形した培地

MaterBi

ポリ乳酸

ウレタン



図 3-2 Mater-Bi（左）、ポリ乳酸（中）を繊維化し、温湯に入れて成形した培地およびウレタン培地（右）に播種し（上）、水耕栽培により育苗した（下）。

3.2.2 繊維化した Mater-Bi 培地によるレタスの水耕栽培

温湯に入れて成形した Mater-Bi 繊維化培地、およびウレタン、ロックウール培地にレタス“グリーンリーフ”を播種し、各培地をネットカップ（直径 3 cm）に入れ、EC0.4 の養液を与えて発芽させた。1 週間後、NFT 方式の水耕栽培システムへ移植し、4 週間後に収穫した。

発芽は各素材の水分吸収特性の影響を強く受け、給水量を培地により調節する必要があった。ウレタンでは、播種前の水による膨潤が不十分であると培地による吸水が行われず発芽が阻害されることがあり、一方ロックウールは吸水性にすぐれるが培地の隙間が狭くかいたため、発芽した根が培地中へ貫入できないことがあった。一方、Mater-Bi 培地は吸水性がよく繊維の間隙も十分大きかったため、これらの問題は発生しなかった。正常に発芽した株では、その後の 4 週間の成育は培地間に差は認められなかった（図 3-3）

また、熱水以外の成形方法として、糸巻き機で巻き取った Mater-B の繊維を金網で円筒状に包み、側面をヒートガン(HG-01Y, Anesty)で熱し固め成形した（図 3-4）。この培地を用いてリーフレタスを水耕栽培したところ、培地側面から根が広がることができず（図 3-5）、レタスの生育はウレタンに比べ劣り、収穫時の地上部生体重は有意に低かった。

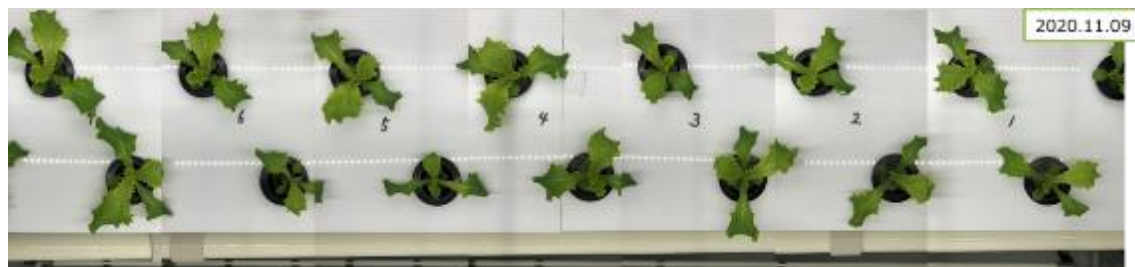
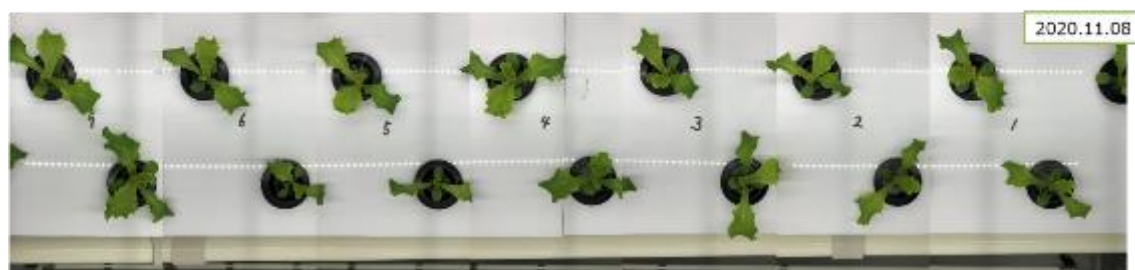
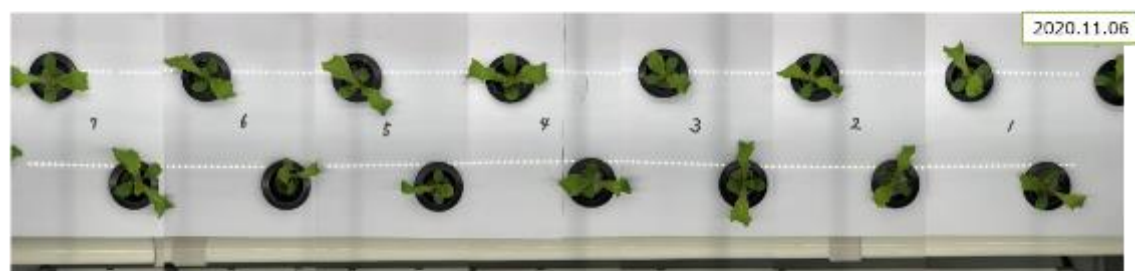
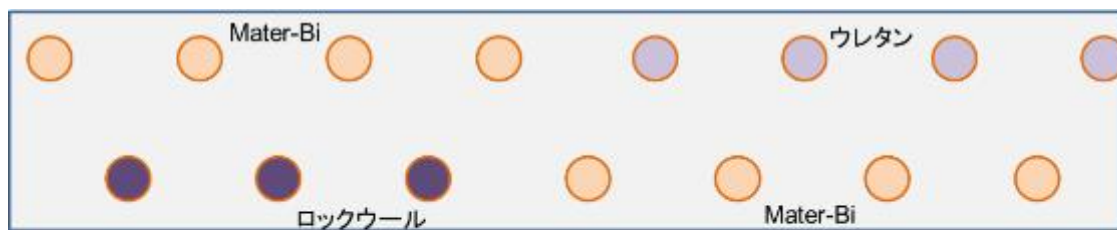




図 3-3 試作した Mater-Bi 培地(試作 I)およびウレタン培地、ロックウール培地による水耕栽培を行ったリーフレタスの生育

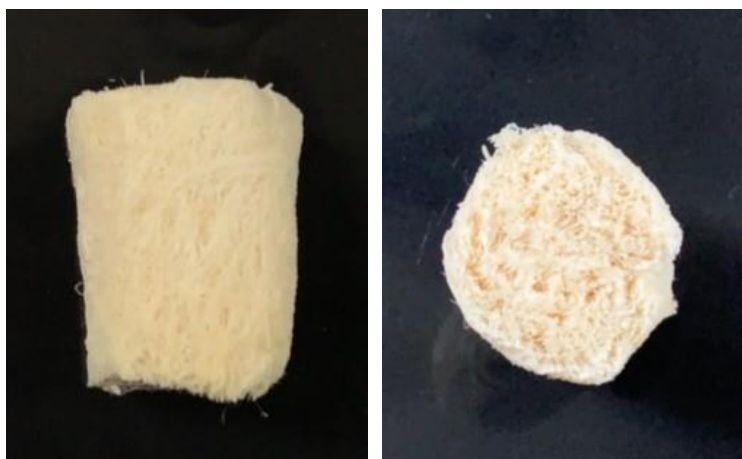


図 3-4 筒状に束ねた Mater-Bi 繊維の側面をヒートガンで固めて成形した培地

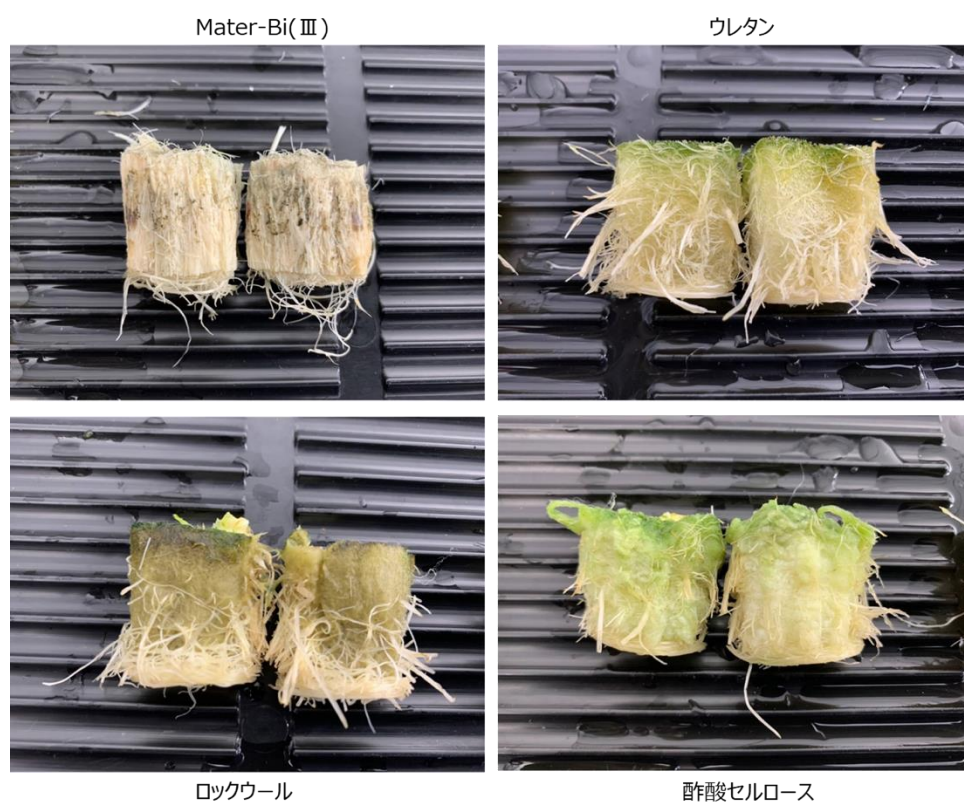


図 3-5 収穫後の Mater-Bi 培地(試作Ⅲ) およびウレタン培地の側面

3.3 綿飴機を用いた Mater-Bi の繊維化培地の試作

Mater-Bi を繊維化することで、水耕栽培に利用できる培地が作られることが確認できたので、より効率的に繊維化する方法として、綿飴機を用いて遠心力による Mater-

Bi の繊維化を試みた。綿飴機では、回転部に入れられた素材は遠心力で回転部の周囲に設置した電熱線熱に押しつけられ、熔融し、さらにその外側にあるメッシュを通して回転部から外側に射出される。射出と同時に糸状に伸ばされつつ冷却されて繊維ができる。

まず、綿飴機 (CA-120, 朝日産業) (図 3-6) の回転部に粒状の Mater-Bi ペレットをそのまま投入した。この場合には、Mater-Bi は繊維化したものの、粒の形が残るフレーク状に射出され、繊維同士が部分的にくっついて一体となったものが受け皿に集積した(図 3-7)。そのため、水耕培地として使うには十分な品質のものではなかった。

つぎに、粒状の Mater-Bi(EF04P)ペレットをホットプレートで 260℃で 30 分程度粒がなくなるまで熔融させ綿飴機の回転部に投入し、15 分程度冷ましたのち綿飴機の電源を入れ、回転部の投入口にヒートガン(HG-01Y, Anesty)をあて材料を溶かしながら繊維を射出させた。綿飴機の受け皿の直径がもとの 60 cm (射出距離 24 c m) と 25 cm (射出距離 6.5 c m) の二通り、さらに、回転部射出口の外側に 60 メッシュ (0.423 mm ピッチ)の金網を巻き付けた場合とメッシュなしの場合を含め、合計 6 通りの組み合わせ (表 3-1) で繊維を作製した。

Mater-Bi繊維化手順

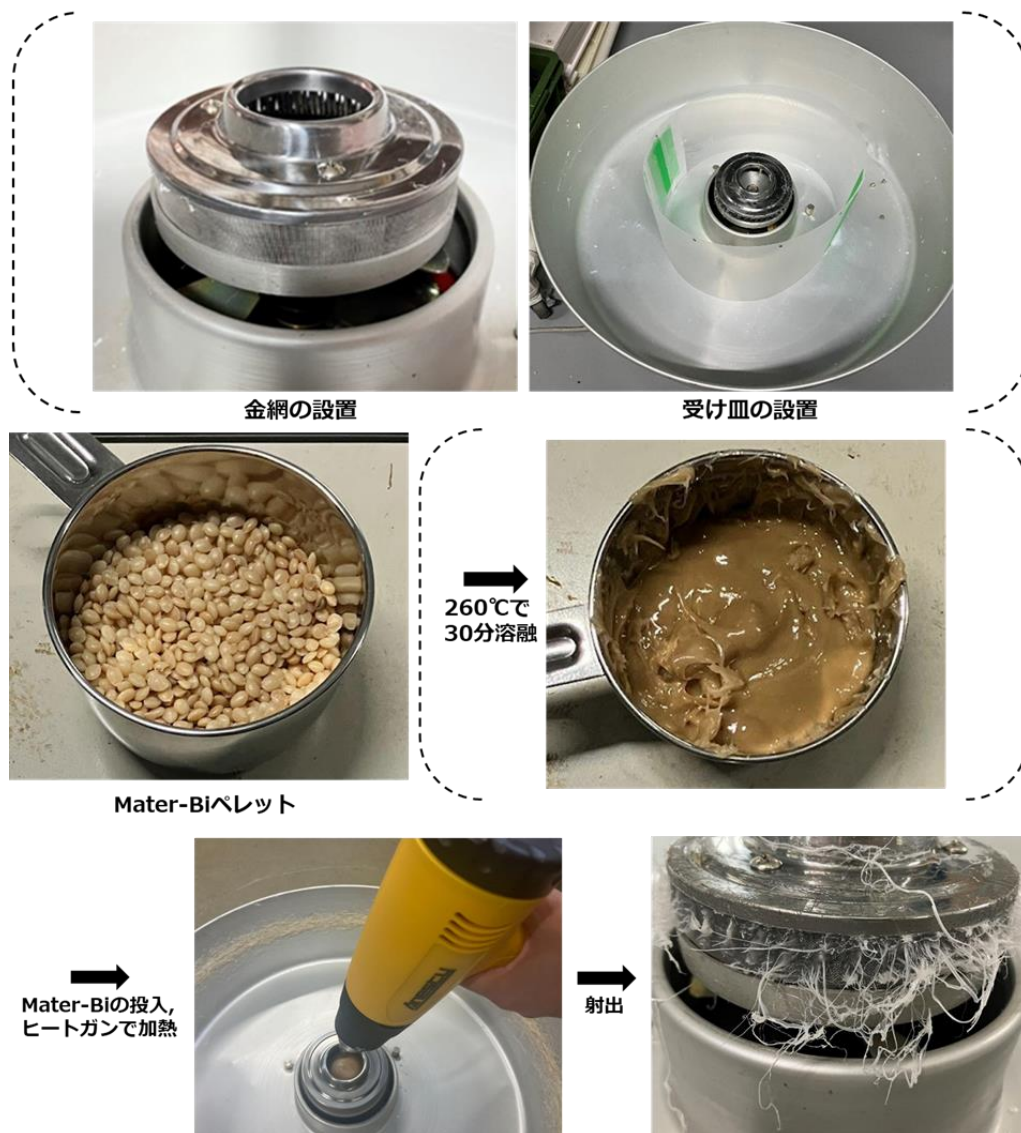


図 3-6 綿飴機を用いた Mater-Bi の繊維化方法

表 3-1 綿飴機回転部に投入する MaterBi の形状および金網の有無、受け皿直径の違いにより作成された 6 種類の繊維

試作繊維	1	2	3	4	5	6
MaterBi の形状	粒	粒	熔融	熔融	熔融	熔融
金網の有無	×	×	×	×	○	○
受け皿の直径	60	25	60	25	60	25

粒状の Mater-Bi を投入した場合には、受け皿の直径が 60 cm のものよりも 25 cm の方がより細かいフレーク状になった（図 3-7 上段）。溶融した Mater-Bi を投入した場合には（図 3-7 中段）、受け皿の直径が 60 cm の場合には厚みの小さい布・綿状の素材が得られたのに対し、25 cm の場合には厚みのあるブロック状の素材が得られた。さらにメッシュの細かい金網を使用したところ、受け皿 60cm のときにより細かい繊維からなる素材が得られた（図 3-7 下段）。この素材が最も軽量で繊維が細かく代替培地として適していると思われた。これを SEM で撮影した画像を図 3-8 に示す。

なお、Mater-Bi（開発品）を用いて同様に作製した素材は、より繊維が細く薄い布のようになった（図 3-9）。

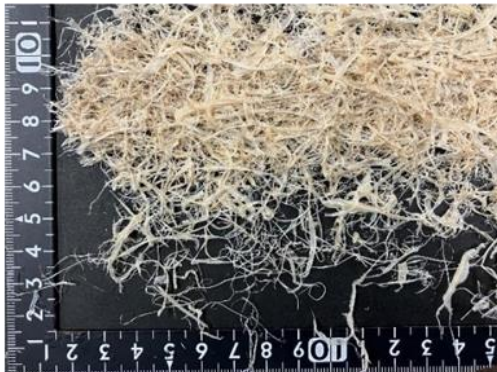
		受け皿の直径	
		60cm	25cm
製造方法	粒	1 	2 
	溶融	3 	4 
	溶融 + 金網	5 	6 

図 3-7 綿飴機での Mater-Bi を用いた繊維化方法を改良し、作製された 6 種類の素材(試作 1~6)

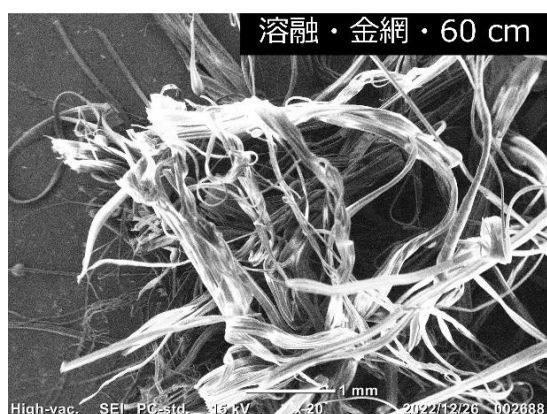


図 3-8 綿あめ機により作成された Mater-Bi 繊維の SEM 像。Mater-Bi を熔融しながらメッシュの細かい金網を使って射出し、直径 60cm の受け皿で回収した。



図 3-9 Mater-Bi (開発品グレード)を綿飴機で繊維化し（左）熱水でブロック化した（右）

3.4 量産企業候補による Mater-Bi 加工品を用いた培地の試作

3.4.1 試作培地

代替培地の量産企業候補の一社であるパネフリ工業による Mater-Bi 加工品(詳細は 4. 代替培地の量産企業の選定に記載)は、加熱熔融された樹脂に圧力を加え、型を通し成形する押出成形技術をもとに作製されており、縮れた細い線状の Mater-Bi が重なる形状の培地である(図 3-10)。2 種類の Mater-Bi グレード、EF04P と ES01G を用いて試作したところ、ES01G のほうが裁断、加工はしやすかった。そこで、ES01G を用いて、使用する樹脂量(目付量)と繊維太さの異なる 8 パターン(図 3-11)の試作品 A~H を作製した。試作 A~H はいずれも厚みが 2.5cm 程度とウレタンと同等であ

る。これらのうち C,G(図 3-12),H の 3 種類の試作品をウレタンと同サイズに裁断し、直径 3cm のネットカップに詰め培地とした。

また、ポリ乳酸(PLA)を細く繊維化した素材、酢酸セルロースから作られるアセテート繊維を網目構造にした素材(図 3-13)を培地としたリーフレタスの水耕栽培を行った。



図 3-10 押出成形による MaterBi 加工品(上; ES01G, 下; EF04P)

“線径”と“目付量”とのイメージ図



図 3-11 線径と目付量

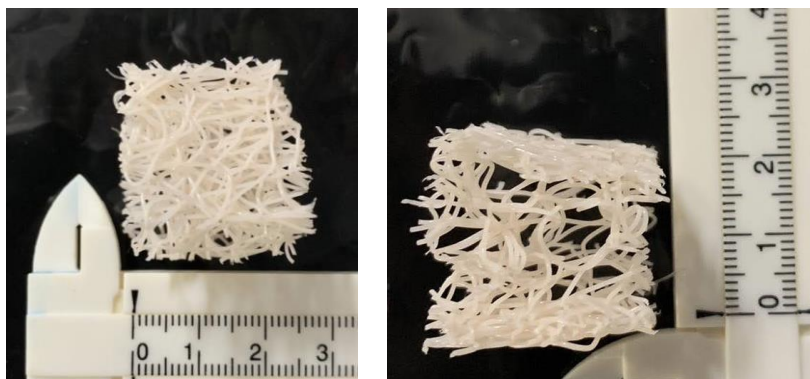


図 3-12 G の表面および断面



図 3-13 綿状の PLA 素材および包帯状の酢酸セルロース素材

3.4.2 試作した培地によるレタスの栽培

こうしてできた培地およびウレタンに養液を十分吸わせてレタス‘リーフレタス’を 1 粒ずつ播種した。その後、NFTプレートにおいて EC2 のエコゲリラ A, B 液または OAT ハウス 1 号 2 号等量混合液による水耕栽培を行った。生育期間中各株の写真を撮影して、各培地における生育を比較した。

綿飴機による射出繊維を用いた Mater-Bi 培地および押出成形による Mater-Bi 培地 (C, G, H) を用いて、リーフレタスの水耕栽培を行った。その結果(図 3-14, 図 3-15)、射出繊維の Mater-Bi 培地によるレタスの発芽はウレタンと同等で、収穫時のレタスの地上部生体重もウレタンと同等であった。押出成形による Mater-Bi 培地(C, G, H) はいずれも繊維の間隙が大きいため、播種時の種の植え方や水分量の調節などに工夫が必要であったが、通気性に優れ発根後のレタスの生育は問題なかった(図 3-16)。C, G, H の中では、線径が細く目付量の少ない G の培地が収穫時の地上部生体重平均が最も高かった。

また、ポリ乳酸(PLA)、酢酸セルロース素材培地では、レタスの生育はいずれの素材でも良好であったが(図 3-17)、発芽は各素材の水分吸収特性の影響を強く受け、給水量を培地により調節する必要があった。

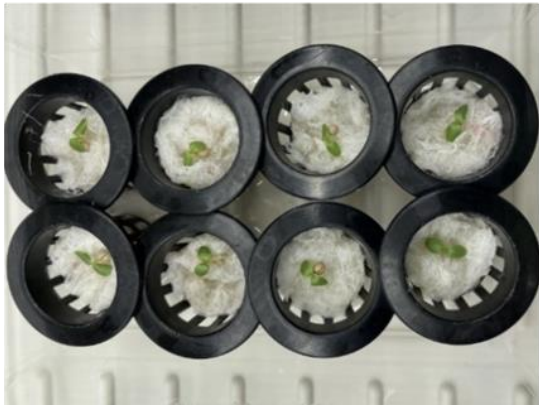
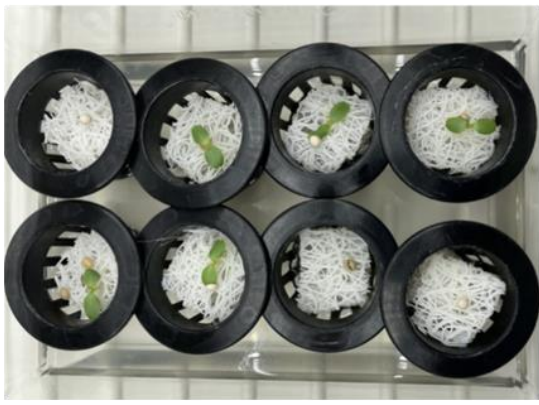
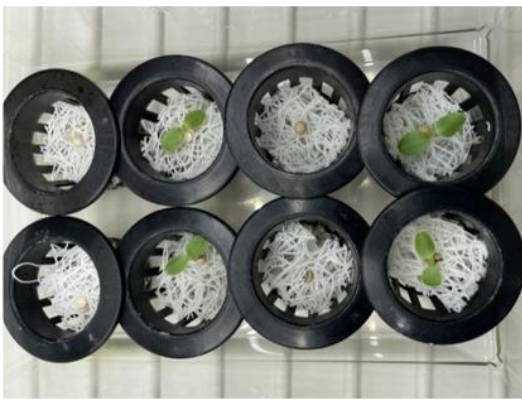
Mater-Bi 試作 5(射出繊維)	Mater-Bi 試作 C(押出成形: 線径;太, 目付量;多)
	
Mater-Bi 試作 H (押出成形: 線径;細, 目付量;多)	Mater-Bi 試作 G (押出成形: 線径;細, 目付量;少)
	
ウレタン	
	

図 3-14 製法の異なる Mater-Bi 培地およびウレタン培地に播種した 1 週間後のリーフレタスの苗

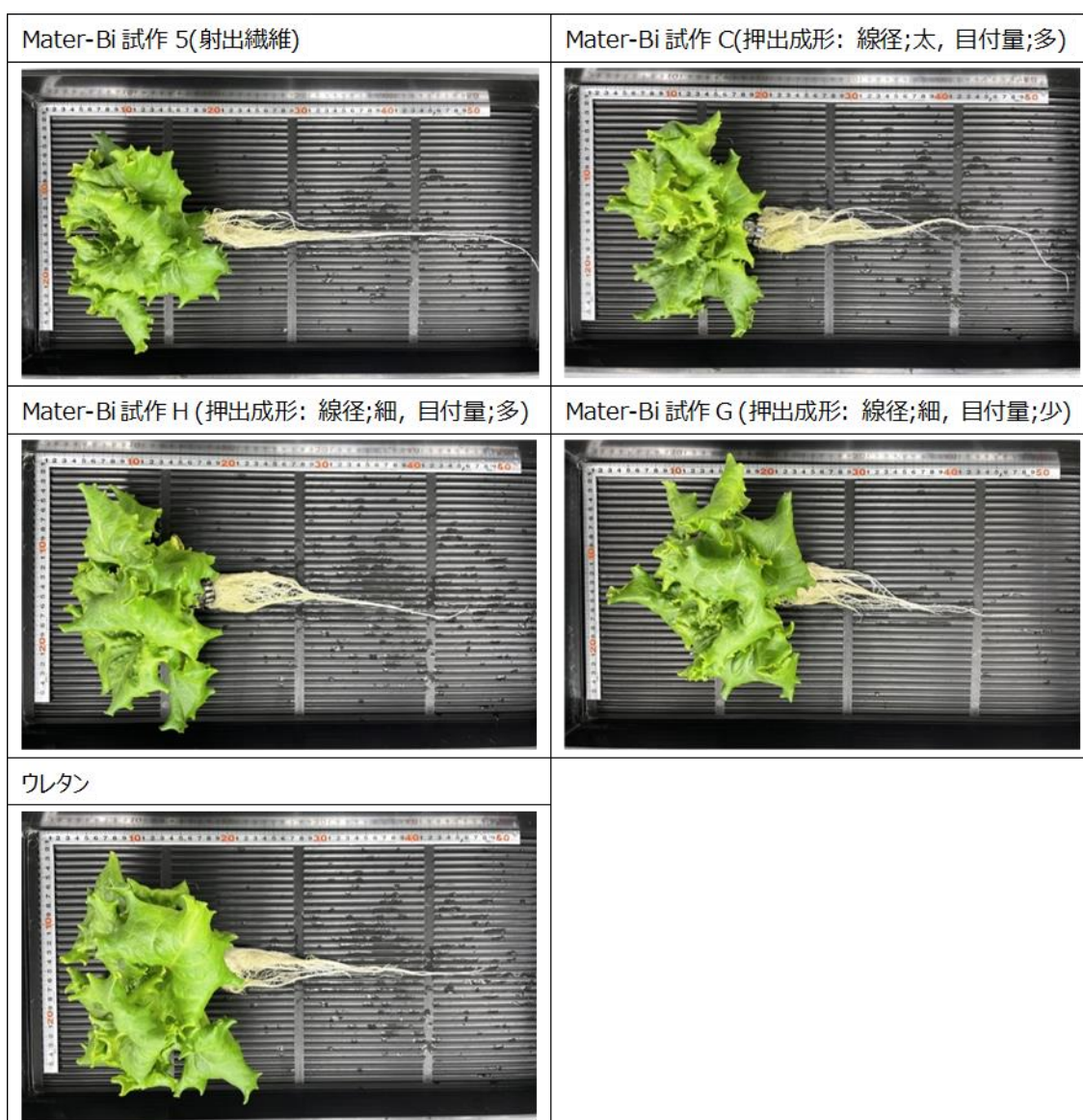


図 3-15 製法の異なる Mater-Bi 培地およびウレタン培地によるリーフレタスの水耕栽培。収穫時のレタス(例)

押出成形による Mater-Bi 培地の発芽率を改善するため、綿飴機で作製した薄い布状の Mater-Bi（開発品）繊維を培地 G の表面重ね、その上に播種した（図 3-16）。その結果、発芽率、収穫時のレタスの地上部生体重いずれも、ウレタンと同等であった。

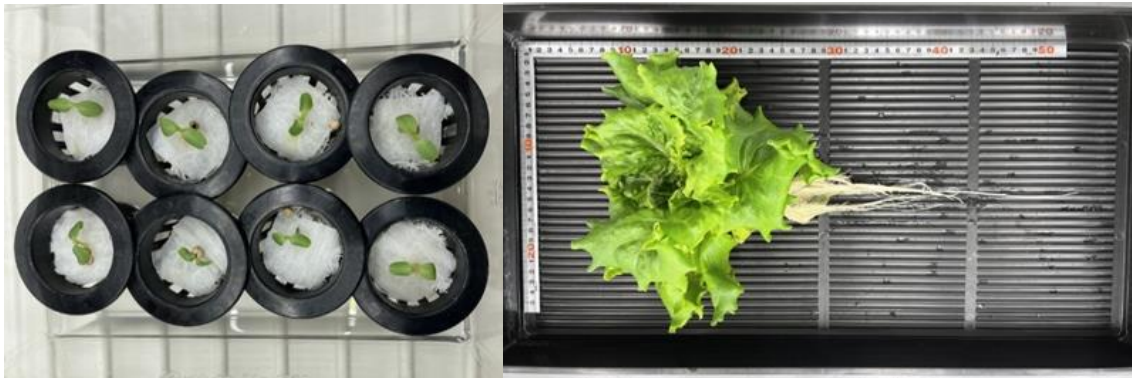


図 3-16 Mater-Bi 培地(押出成形による培地の上に綿飴機による布状射出繊維を重ねたもの)によるリーフレタスの水耕栽培。左；播種 1 週間後のレタス苗、右；収穫時のレタス(例)。



図 3-17 糸巻き器により繊維化した Mater-Bi [Mater-Bi (I)]、綿あめ機で射出生成した Mater-Bi [Mater-Bi (II)]、綿状のポリ乳酸素材 (PLA)、包帯状の酢酸セルロース素材 (酢酸セルロース) およびウレタン培地 (ウレタン) に播種した 1 週間後 (上) お

よび3週間後(下)のリーフレタスの生育

3.5 代替培地の機能性評価

3.5.1 評価方法

代替培地の機能について、リストアップした評価項目(表 3-2)を元に、十分に均一の特性の培地をもちいて、培地による吸水性、保水性の定量的な評価を行った。

吸水性および保水性は、繊維の太さ、密度に依存する。吸水性の評価としては、染色した水を入れたトレイに試験培地を置いて(図 3-18、19)、水の吸い上げた高さ(水面から完全に染色した培地の上端まで)を経過時間ごとに測定した。また保水性の評価として、水で飽和させた培地をネットカップに入れ、薄く水を張ったトレイに置き(図 3-18、20)、培地中の水がどれだけ保持されているか経過時間ごとに重量を測定し、式(1)により保水率を求めた。

$$(\text{保水率}) = \frac{w_t - w}{w_0 - w} \times 100 \cdots (1)$$

w : 吸水前の培地重量、 w_0 : 吸水してすぐの培地重量、 w_t : t 時間後の培地重量

なおトレイは水の蒸発を防ぐために蓋を被せた(図 3-20)。反復はそれぞれ3とし、サンプルは Mater-Bi 繊維培地、酢酸セルロース培地、ウレタン培地、ロックウール、および既存の生分解素材培地(PLA とレーヨンからなる)を入手し比較した。

さらに、綿あめ機により製法および形状の異なる Mater-Bi の培地の吸水性および保水性の評価も行った。反復はそれぞれ3とした。

表 3-2 代替培地の機能性評価項目

保水性	• 表面張力でどの程度吸い上げるか。→撥水性のある直径2－3 c mの透明円筒に培地をつめ、底面から吸水させて何cmまで吸い上げるかを調査する。 • 膨潤された培地の水がどの程度保持されるか。→1と同じく円筒に培地を入れ培地上部まで膨潤させたのち、水位の低下を調査する。
通気性	• 培地に播種した種子が水没することなく、培地中に保持されるか。→播種後の根の発達を継続的に観察する。
芽生えの発達	• 培地の上においた種子から伸びる根が、芽生えを持ち上げることなく培地を貫入することができるか。→発芽の様子を自動撮影により連続的に観察する。自動撮影装置を開発済み。 • 発芽後、子葉が培地の上に障害なく展開することができるか。→同上
耐久性	• 保持容器（ネットカップ）がある場合とない場合で、水耕栽培トレーに培地を置き、一定時間水を循環させたのちに培地の乾燥重変化を計測する。 • 培地が流れないようにネット内に保持した培地を養液栽培中の養液循環トレーに置き、栽培期間中（2週間～5週間）の間に分解されないかを調査する。

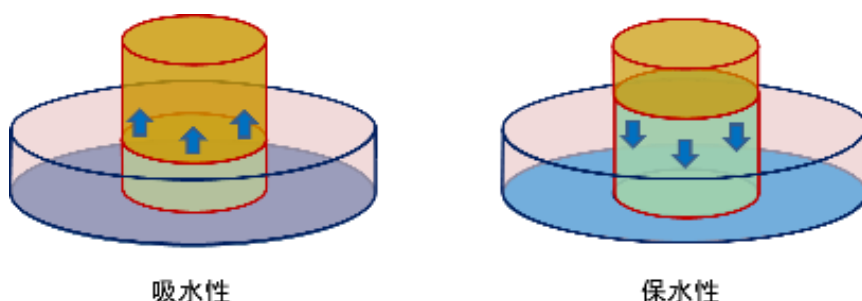


図 3-18 吸水性および保水性評価のイメージ図

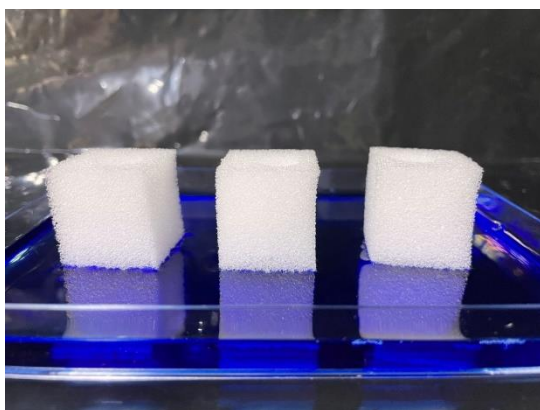


図 3-19 吸水性評価試験。培地が水を吸い上げる高さを計測する。



図 3-20 保水性評価試験。あらかじめ水で飽和した培地を薄く水を張ったトレイにおき、保持する水分量の低下を計測する。

3.5.2 代替培地の機能性評価結果

吸水性

給水開始 19 時間後の吸水状況を図 3-21、吸水 1 時間後および 19 時間後の培地が吸い上げた水の高さを表 3-3 に示した。吸水性はロックウールおよび酢酸セルロース培地が高く、吸水 1 時間後には培地上部まで染色がみられた。Mater-Bi 培地(EF04P)は吸水 19 時間後には、培地上部まで染色がみられたが、PLA レーヨン培地では 19 時間以内では色素は上面に達せず、ウレタン培地は全く吸水しなかった。

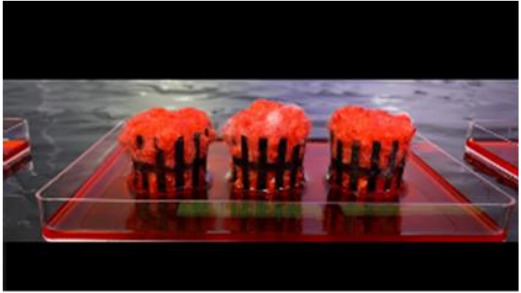
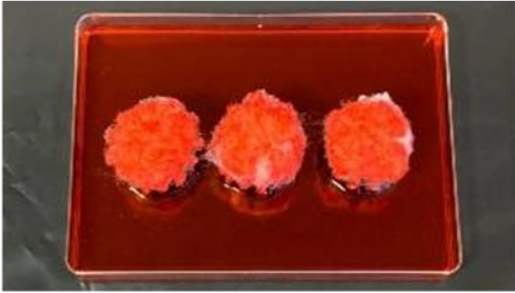
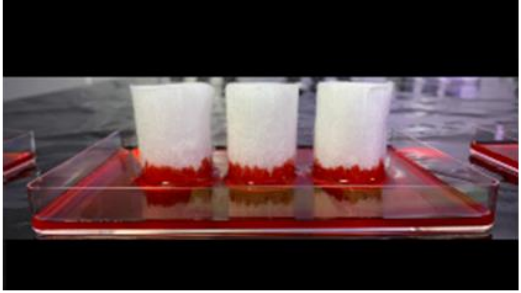
Mater-Bi 綿飴機射出培地も繊維化 Mater-Bi と同様の吸水性を示したが、押出成形による Mater-Bi 培地(G)はほとんど吸水しなかった（図 3-22、表 3-4）。

保水性

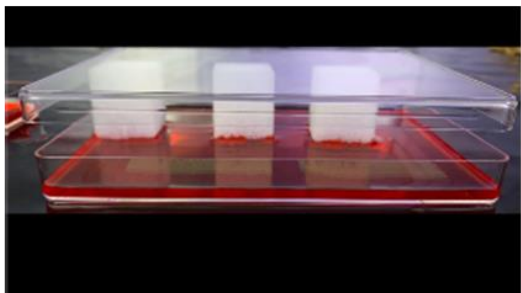
試験開始 1 時間後、22 時間後の保水率を表 3-4 に示した。24 時間以内の保水性

は、いずれの培地も十分高く水は保持された。Mater-Bi 培地は吸水性および保水性のいずれも培地として必要な特性を備えていた。

Mater-Bi 綿飴機射出培地、押出成形による Mater-Bi 培地(G)のいずれも 22 時間内では 95%以上の保水性を示した（表 3-6）。

Mater-Bi(澱粉ポリエステル)	
	
酢酸セルロース	
	
PLA レーヨン	
	

ウレタン



ロックウール

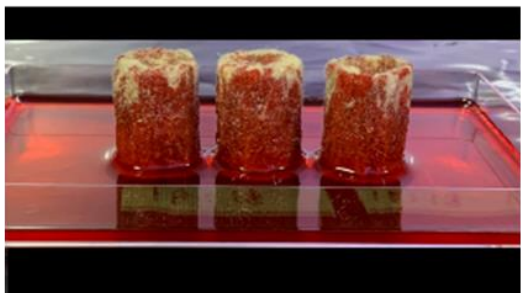


図 3-21 乾燥した Mater-Bi、酢酸セルロース、PLA レーヨンおよびウレタン、ロックウール培地を着色した水に浸けて吸水させ、培地の吸水性を評価した。図は 19 時間後の吸水状況を示す。(左；前からみた図、右；上からみた図)

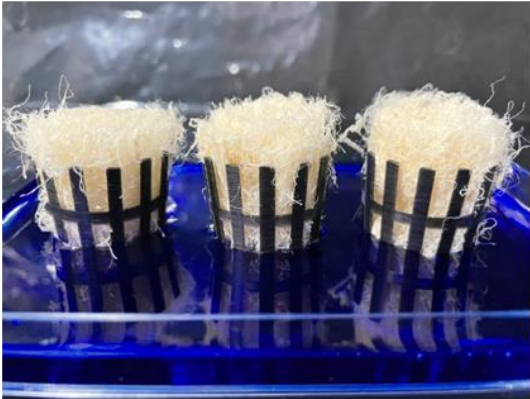
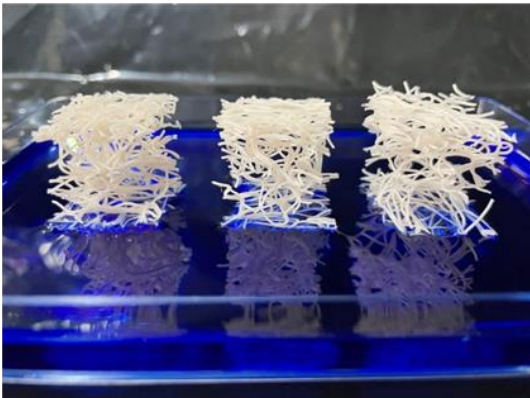
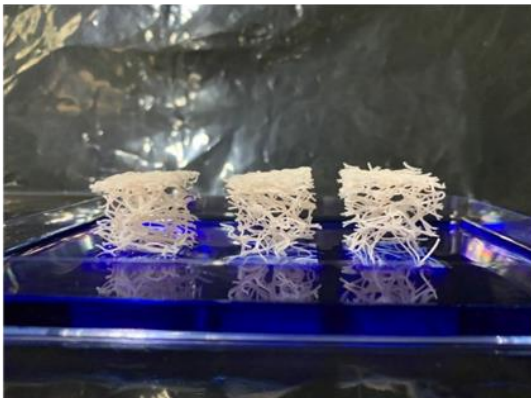
Mater-Bi 培地(試作 5;綿飴機射出繊維による)	
開始時	22 時間後
	
Mater-Bi 培地(試作 G;押出成形による)	
開始時	22 時間後
	

図 3-22 綿飴機射出繊維による Mater-Bi 培地(試作 5)、押出成形による Mater-Bi 培地(試作 G)を着色した水に浸けて吸水させ、培地の吸水性を評価した。図は 22 時間後の吸水状況を示す。

表 3-3 素材の異なる培地の吸水性評価

培地	高さ (cm)	
	1 時間後	19 時間後
繊維化 Mater-Bi	0.2	0.2
酢酸セルロース	1.0	1.6
PLA レーヨン	0	0.3
ウレタン	0	0
ロックウール	1.4	1.5

表 3-4 製法の異なる Mater-Bi 培地の吸水性評価

培地	高さ (cm)	
	4 時間後	22 時間後
Mater-Bi(綿飴機射出繊維)	0	0.1
Mater-Bi(押出成形)	0	0

表 3-5 素材の異なる培地の保水性評価

培地	保水率(%)	
	3 時間後	24 時間後
Mater-Bi(澱粉ポリエステル)	98.9	96.3
酢酸セルロース	86.6	84.0
PLA レーヨン	97.5	96.7
ウレタン	95.4	94.3
ロックウール	93.3	92.3

表 3-6 製法の異なる Mater-Bi 培地の保水性評価

培地	保水率(%)	
	3 時間後	24 時間後
Mater-Bi(綿飴機射出繊維)	89.4	87.8
Mater-Bi(押出成形)	64.0	61.5

3.6 まとめ

生分解性プラスチックを用いてウレタン代替培地の試作を行った。ポリ乳酸と Mater-Bi のいずれでも繊維状に加工することができ、繊維化ののち熱水により成形して培地を作製することができた。特に Mater-Bi を用いて作成した培地は、吸水性、保水性、通気性、成形のしやすさのいずれもすぐれ、リーフレタスの水耕栽培試験結果も良好であった。試作の段階ではあるが、ウレタン代替培地として有望な培地を作成することができた。

量産化に向けて、綿飴機を用いて遠心による繊維化を試みた。綿飴機に溶融した Mater-Bi ペレットを投入し完全に冷ましたあと、投入口にヒートガンの熱を当てながら、目の細かい金網を巻き付けた射出部から繊維を射出させることで、均一な綿状の繊維を作製することができた。

成形方法については、ヒートガンを用いて束上にした Mater-Bi の繊維側面を固めることで熱水成形より製造時間を短縮することができたが、繊維同士が固く結びつくことと根の貫入が妨げられた。

押出成形技術による Mater-Bi 培地を線径や目付量を変えて 8 種類試作した。この培地は繊維が太くて繊維間隙が大きいため、吸水性および保水性は劣っていた。そのため播種時の種の植え方や給水量の調節などに工夫が必要であったが、通気性に優れ発根後のレタスの生育は問題なかった。試作培地の中では線径が細く目付量の少ない培地が収穫時の地上部生体重平均が最も高かった。

培地の吸水性はロックウールおよび酢酸セルロース培地が高く、ウレタン培地は全く吸水しなかった。保水率は、いずれの培地も十分高く水は保持された。Mater-Bi 培地は吸水性および保水性のいずれも培地として必要な特性を備えていた。また、綿飴機射出繊維による Mater-Bi 培地はロックウールより低い吸水性があり、保水率は高かった。押出成形による Mater-Bi 培地は全く吸水せず、24 時間以内の保水率も比較的低かった。

4 代替培地の量産企業の選定

4.1 社会実装に向けた取り組み

令和3年度は候補企業の選定、各企業への事業説明と生分解性ウレタン代替培地の試作依頼を行った。令和4年度は社会実装に向けて試作と改良を進め、生育試験を実施した。量産メーカー候補の企業で、素材、製法の異なるウレタン代替培地を数多く試作し、水耕栽培使用時の野菜の生育状況を確認しながら、コスト削減に向けた検証を行った。

4.2 代替培地量産企業の選定と進捗

使用済みウレタン培地の廃棄時にウレタン小片を土壌、河川、海洋に流出するのを完全に防ぐことは難しい。万が一海洋に流出しても生分解によって環境負荷を最小化するため、ウレタン培地と同等の性能を有する海洋生分解性の培地を新たに開発し、大量生産に向けた素材、培地形状、製造方法の改良を検討した。さらに植物の播種、育苗、定植などの生育試験を行ってきた。

ラボベースで代替培地試作品の播種、育苗、定植などで生育等が確認できたため、代替培地の量産化へ向け、量産可能性の高いモノフィラメント、マルチフィラメント、紡糸、原糸、フィルム等の製造企業をインターネット検索やGSIクレオスの既存の取引先の中から選定し、10社に試作依頼をおこなった。最終的には2社で生育試験の評価を進めた。（表4-1）

1社目：株式会社パネフリ工業

ポリプロピレンなどのプラスチックを主とした家具部材・建材・住宅内装部材の製造と販売を行っている企業。2021年11月に本事業の説明を行い、三次元ファイバースプリング構造体の技術を用いた試作を依頼した。235℃と210℃の成形温度で試作品を作成したが、前者は硬くてもろいため絡みが不十分で、温度を下げた後者は硬くなりすぎて絡まなかった。2022年9月に再度試作の依頼を行い、翌月には1回目の試作品よりも柔らかく目が細かいものが完成した。2022年10月に作成した2回目の試作品は、サイズが1m×0.2m×0.015mで樹脂量が1枚当たり400gとなる。それ

を 3cm×3cm にカットし生育試験を行った。厚みが不十分であったため 2 枚重ねての生育試験をおこない、培地 1 個当たりの樹脂量は 6g/1 個(3cm×3cm×3cm)と計算できる。

さらに 2022 年 11 月にパネフリ工業三重工場に訪問した際に、2 回目の試作品よりさらに培地に適したより高密度で厚みがあるのに加えて、使用する樹脂量を可能な限り削減しての試作品の製造を依頼した。翌月 12 月には樹脂量が異なる 8 パターンの試作品が完成した。

2023 年 1 月には 4 回目の試作品が完成した。コスト削減に向けて樹脂量がより少なくなるよう改良を行い、3 回目の試作品で最も目付量が少なかった G よりも約 0.3kg/m²少ない樹脂量となっている。表と裏で硬さが異なるため、図 4-16 の表の方が柔らかく、図 4-17 の裏の方が硬い。(図 4-1～図 4-17)

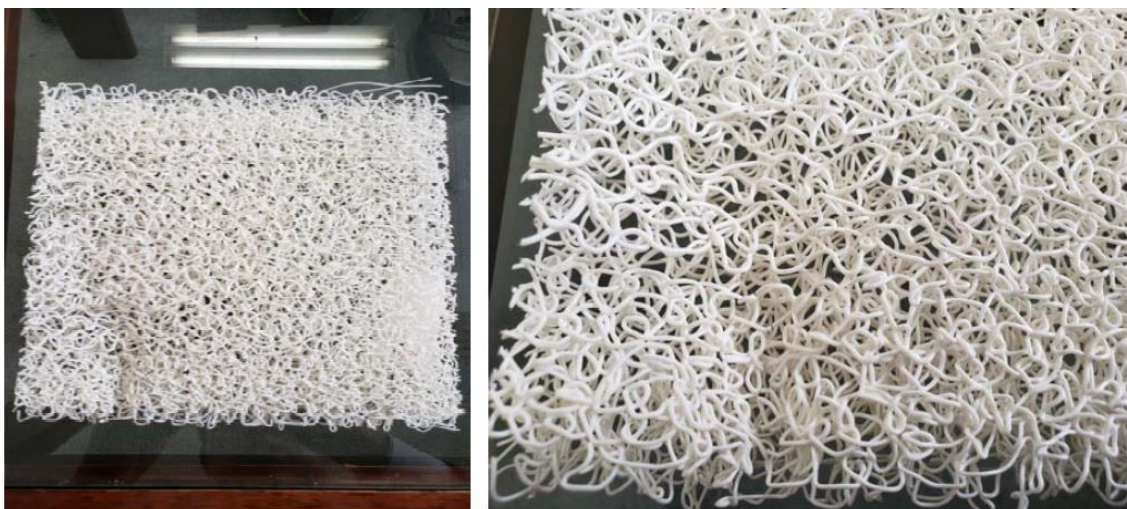


図 4-1 パネフリ工業 1 回目試作① 235℃で成形したもの。硬くてもろいため絡みが不十分だった。



図 4-2 パネフリ工業 1 回目試作② 210℃で成形したもの。温度をやや下げると硬くなりすぎて絡まなかった。



図 4-3 パネフリ工業 2 回目試作①

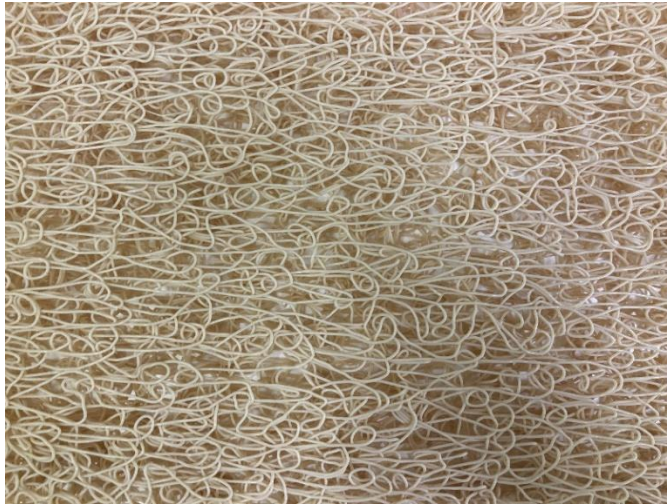


図 4-4 パネフリ工業 2 回目試作②



図 4-5 パネフリ工業作成 3 回目試作品の物性試験データより



図 4-6 パネフリ工業 3 回目試作 B



図 4-7 パネフリ工業 3 回目試作 C



図 4-8 パネフリ工業 3 回目試作 EF04P



図 4-9 パネフリ工業 3 回目試作 D



図 4-10 パネフリ工業 3 回目試作 E



図 4-11 パネフリ工業 3 回目試作 F



図 4-12 パネフリ工業 3 回目試作 G



図 4-13 パネフリ工業 3 回目試作比較



図 4-14 パネフリ工業 3 回目試作 サイズ 1m×0.2m



図 4-15 パネフリ工業 厚み比較。左が 2 回目の試作品で、右が 3 回目の試作品。



図 4-16 パネフリ工業 右 4 回目試作品 表



図 4-17 パネフリ工業 右 4 回目試作品 裏

2 社目：A 社

2022年11月にウレタンフォームと同等の生分解性樹脂の発泡体試作品を製造。本事業では今回の試作品を用いて植物の生育試験、代替培地の吸水試験、代替培地のコスト評価およびLCA計算を行った。

3 社目：B 社

プラスチックシート・フィルム、合成繊維製網製品、その他加工製品、関連商品の販売を行っている企業である。フィルムを数mm幅に裁断するフラットヤーン方式の技術も有しており、その技術を利用して培地の試作を依頼した。1000 デニールモノフィラメントを作成し、釣り糸ほどの細さだが引張強度は問題なかった。モノフィラメントを使用して巻き取り方や固形化など培地にするための加工方法を模索したが、加工が難しいとのことで検討が終了した。

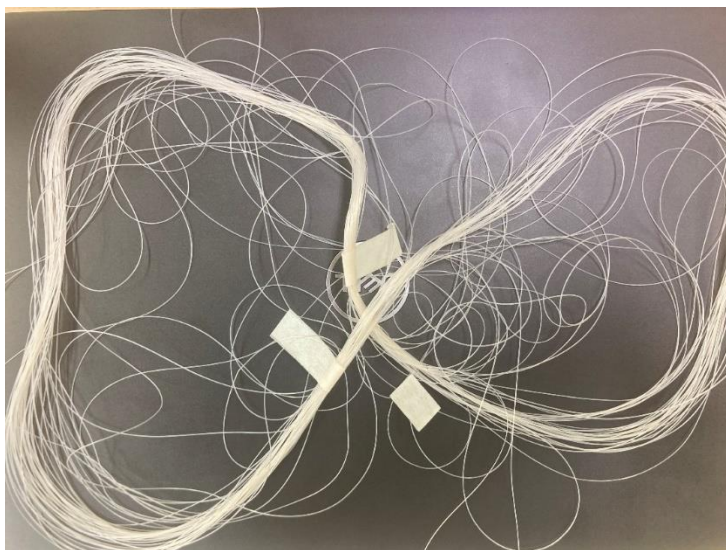


図 4-18 B 社 試作品① 1000 デニールのモノフィラメント

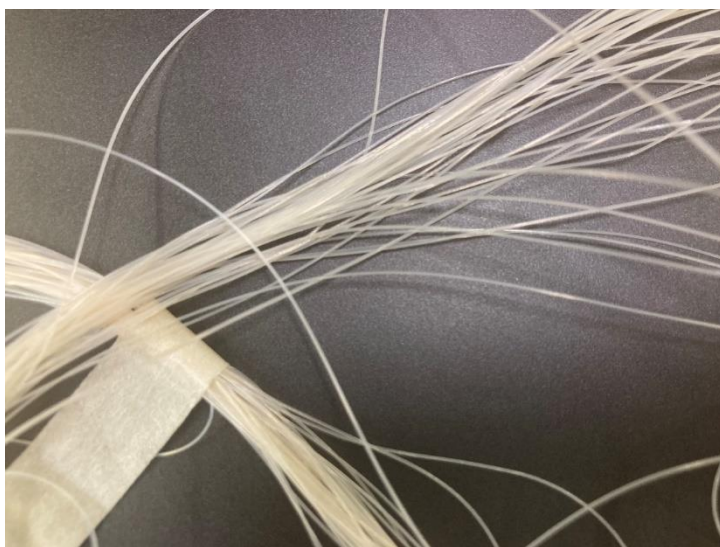


図 4-19 B 社 試作品②

4 社目：C 社

フラットヤーンを用いた関連製品、およびフラットヤーン技術を応用したスリッター等、産業機械の製造・販売を行っている企業。2022 年 8 月に 400 デニールのモノフィラメントの試作品が完成したが、容易な巻き取りの加工の為には、海洋生分解性の悪い PLA の添加が必要となるため培地への加工が難しく、今回の用途には適さないとの判断に至った。



図 4-20 C 社 試作品① 400 デニールのモノフィラメント試作品



図 4-21 C 社 試作品②

5 社目 : D 社

包装、建築土木、雑貨などの産業用プラスチック資材の製造及び販売を行っている。
2022 年 8 月にフィラメントを試作し、シート状のフィルムができた。厚さ一定とならず、50 ミクロン～70 ミクロンとばらつきがでた。野菜の根が張るようにフィルム上に穴を空け、フィルムを重ねて培地を作る予定だったが、穴の間隔が広く根が張れ

ないため培地の製造は難しいとのことで継続での試作を断念した。

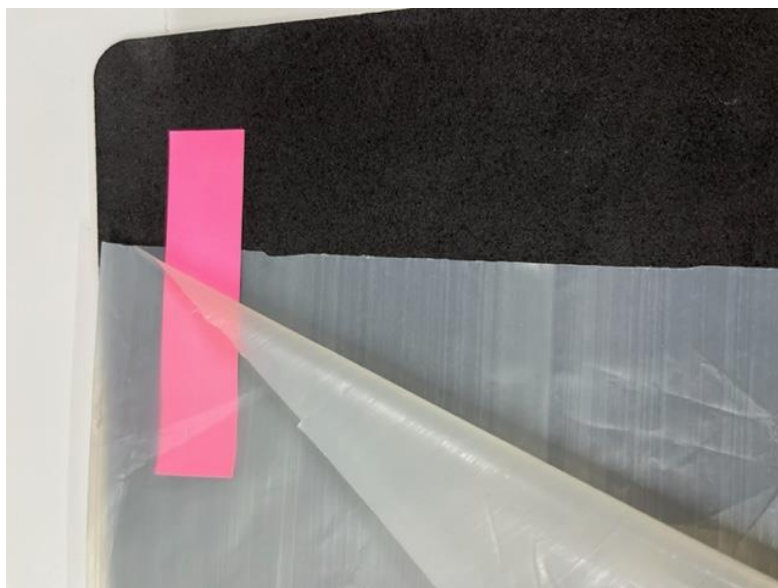


図 4-22 D 社 試作品

6 社目：E 社

ウレタン、ゴム、プラスチック、複合材をベースとした材料開発とその製品化や身近な生活関連商品、コスメ用品など、生活のさまざまな場面に密着した製品を取り扱うウレタン発泡体大手企業。2022 年 7 月に面談を実施し。試作品の依頼をした。発泡体大手で、澱粉ポリエステル樹脂 Mater-Bi (Novamont 社) の発泡技術はあるが、一つ一つの気泡が他の気泡と繋がっていない独立発泡の構造のため、発芽後の根が貫通せず、培地用途には適さない。同社が製造している染出しパッド（虫さされ薬などのスポンジ部分）加工では野菜生育の可能性はあるが、製造において価格が高額になってしまうため今回の用途には適しないと判断した。



図 4-23 染出しパッド（虫さされ薬などのスポンジ部分）[32]

7 社目：F 社

プラスチック容器、各種成形品の企画、製造、輸入、販売、その他各種包装資材のデザイン、企画、製造、輸入、販売を行っている。2021 年 10 月の面談において、プロジェクト内容の説明、生分解性樹脂製培地の試作依頼をした。やや太めのフィラメントが完成した。細めのモノフィラメント製造も可能だが、培地への加工方法が難しく検討を断念した。



図 4-24 F 社 やや太めのフィラメント試作品

8 社目：G 社

ナノファイバー化学繊維の研究開発、生産、販売やナノファイバー繊維を応用した製品の開発、製造、販売を行っている。2021 年 12 月に面談を実施した。不織布を製造する際に用いられるメルトブロー製法で澱粉ポリエステル樹脂 Mater-Bi（Novamont 社）をナノファイバー化したが、マスクのようなふわふわな状態にはならず、塊状のダマが多発し完全に硬化した試作が完成した。隙間もなく、根が張れないので培地に適さないうえ、樹脂の粘度が高くノズル部分が詰まるなど加工が困難で断念した。

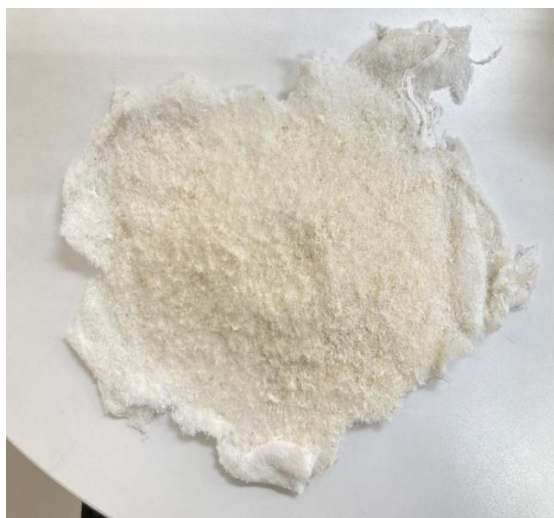


図 4-25 G 社 試作品① メルトブロー製法でナノファイバー化

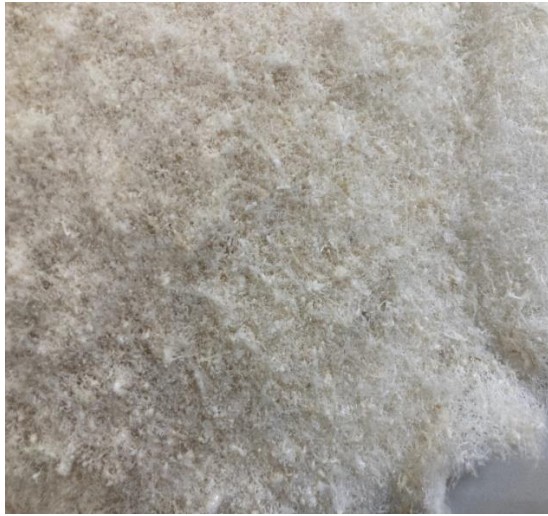


図 4-26 G 社 試作品②

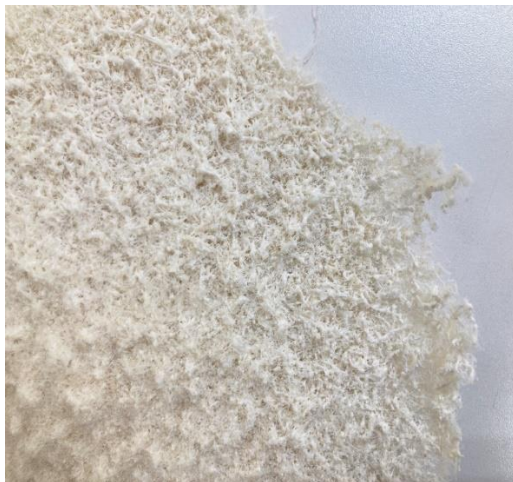


図 4-27 G 社 試作品③

9 社目：H 社

燃料電池セパレータ、高機能性樹脂素材、ウレタン、カーボン製品などの製造および販売を行っている。2021 年 11 月面談を実施し、澱粉ポリエステル樹脂 Mater-Bi（Novamont 社）を発泡させて培地の試作をした。発泡には成功したが高密度で硬いものしか製造できず、根が張れないため培地には適さないとの判断に至った。

10 社目：I 社

繊維製特殊加工品の企画開発・製造・販売を行っている。2022 年 8 月に加工糸の巻き取りを依頼し、同社製品で既に水耕栽培用の培地にも使用されているファイバー

ロッドでの培地製造を予定していたが、PLA が含有していないと加工が難しいため検討を終了した。

4.3 量産企業選定のまとめ

以上の結果と検討により、本事業では 1 社目のパネフリ工業および 2 社目の A 社で作成した試作品を中心にウレタン代替培地の量産に向けて評価を継続する。今後はこれらの試作品をより実用的にするために生育状況やコストを確認しながら改良を進める。

表 4-1 量産企業の進捗状況

企業名	培地製造方法	企業情報と進捗
パネフリ工業	三次元ファイバースプリング構造体	・ 2021 年 11 月に面談及び試作依頼を実施。 ・ PHBH、PBS、PLA など生分解性樹脂での試作経験あり。 ・ 3 度改良した試作品が作成。 ・ 生育試験を実施し、結果次第で試作品を改良予定。
以下は検討終了		
B 社	モノフィラメント (単繊維)、 フラットヤーン	・ 2021 年 10 月、2022 年 6 月に面談実施。 ・ 1000 デニールのモノフィラメントを作成した。釣り糸ほどの細さだが、引張強度は問題なし。 ・ 加工が難しく、継続しての試作は断念。
C 社	モノフィラメント (単繊維)	・ 2022 年 8 月に試作品完成。 ・ 400 デニールのモノフィラメントを試作したが、加工の際に海洋生分解性の悪い PLA の添加が必要となり今回の用途

		では使用できないため断念。
D 社	フィラメント (繊維)	・ 2022 年 8 月に試作品完成。 ・ フィラメント試作でフィルムが完成したが、以降の加工が非常に困難で断念。
E 社	発泡体	・ 2022 年 7 月に面談実施。 ・ 製造方法が独立発泡の構造のため、発芽後の根が貫通せず、培地用途には適さない。 ・ 同社が製造している染出しパッド加工では価格が高額になってしまうため断念。
F 社	モノフィラメント (単繊維)	・ 2021 年 10 月に試作品完成。 ・ やや太めのフィラメントが完成した。 ・ 細めのモノフィラメント製造も可能だが、培地への加工方法が難しく検討を断念。
G 社	メルトブロー製法	・ 2021 年 12 月に試作品が完成。 ・ 不織布を作るメルトブロー製法でナノファイバー化したが、ダマが多発し、完全に硬化した試作が完成した。 ・ 樹脂の粘度が高くノズルに詰まるため、同製法での製造は難しいと断念。
H 社	発泡体	・ 2021 年 11 月に面談実施。 ・ 発泡は成功したが、密度で硬いものしか製造できず、培地には適さないので断念。
I 社	ファイバーロッド	・ 2022 年 8 月に試作依頼。 ・ PLA 含有でないと加工が難しいとのことで断念。

その他

穀類膨張機（ポン菓子機）を用いて培地製造の検討

ポン菓子は密閉した空間で加熱し、窯の内部が高温・高圧状態になったところで、蓋を一気に開け減圧すると水分が沸騰すると共に急激に蒸発し容器の中の水蒸気が膨張する。それによってお米も一気に膨らみ大きくなるという仕組みとなっている[33]。これは米に多量の水分が含まれているためできる製造方法であり、Mater-Bi は水分を 3% 以下程度しか含んでいないため、同様の方法での製造は難しい。さらに、ポン菓子の製造機は大型のものがなく、量産ベースで検討するには製造規模が小さすぎるため大量生産には向いていない。

5 生分解性プラスチック候補素材の海洋生分解性と機能性評価

5.1 Mater-Bi の海洋生分解性について

Novamont 社では Mater-Bi の海洋生分解性に関して、海洋生分解性 (Novamont 研究所にて実施)、海洋環境での崩壊 (Hydra 研究機関にて実施)、および Mater-Bi 製の果物/野菜袋が生分解した際に放出される堆積物の生態毒性 (シエナ大学にて実施) の 3 つの領域にて研究を実施している。

海洋生分解性については Novamont 社の研究所にて、UNI EN ISO 19679 : 2018 の要件に従ってテストされ、(プラスチック材料-海水/砂質堆積物の界面における非変動プラスチック材料の好気性生分解の測定-二酸化炭素分析を使用する方法)、Mater-Bi が海洋微生物にさらされたとき、その分解の程度と速度に関しては他のセルロース系材料と同様の挙動を示すことが実証されている。Mater-Bi は、紙をコントロール材として実施した約一年間の比較試験において、紙と本質的に同レベルの劣化速度であり、粒子のサイズが小さくなると、生分解が起こる速度が速くなることも実証された。(図 5-1) また微小化した粒子は、OECD ガイドラインで要求されているように、20～30 日以内に完全に分解されることも証明されており、これにより Novamont 社は Mater-Bi からは非生分解性のマイクロプラスチックが放出されないと結論づけた [34]。

海洋環境での崩壊性については、エルバ島のドイツの海洋生物学研究および文書化機関である Hydra Marine Sciences GmbH にて実施されたエルバ島のさまざまな沿岸地域から砂質堆積物を採取し、これらを海水のある水族館に導入して、廃棄物が自然に蓄積する傾向がある海底をシミュレートし、Mater-Bi 製の果物/野菜のバッグの崩壊性を確認した。海底の環境にもよるが、Mater-Bi の果物/野菜の袋が完全に崩壊するまでには 4 か月足らずから 1 年強かかることが実証された。なお、コントロールとして比較を行った PE 製の果物/野菜のバッグのサンプルには一切の崩壊は確認されなかった[35]。

生態毒性についてはシエナ大学にて実施された。バイオテストは、Mater-Bi またはセルロースを接種した海底堆積物の抽出物に曝露された生物の3つのモデル種で実施された。堆積物を 28°C でインキュベートし、Mater-Bi の分解の明らかな兆候が見られた 6 か月後、および接種されたサンプルが完全に消失した 12 か月後にテストを実施した。研究のためのモデル生物には、単細胞藻類 (*Dunaliella tertiolecta*)、ウニ (*Paracentrotus lividus*)、およびシーバス (*Dicentrarchus labrax*) が選定された。

単細胞藻類とウニを使用して、成長阻害と胚毒性の考えられる影響を調査し、幼若シーバス標本をテストして、想定致死量以下の影響を評価した結果、接種された堆積物は対象モデル生物に毒性作用を及ぼさないことが示された。これにより、単細胞藻類の成長、ウニの胚毒性、およびシーバスの酸化ストレスまたは遺伝毒性の変化を引き起こす可能性がある物質が Mater-Bi の分解によって生成されることがないことが証明された[36]。

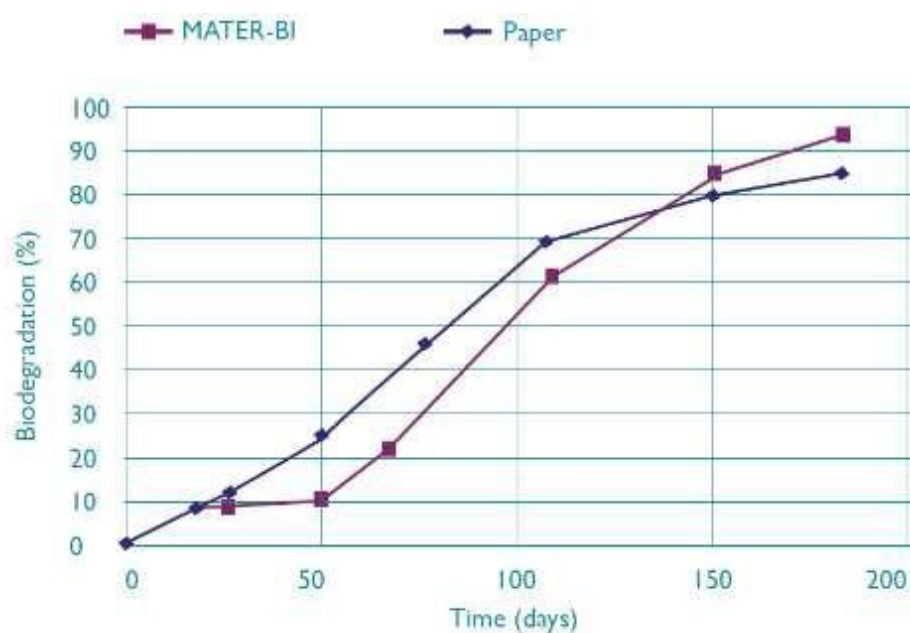


図 5-1 生分解性樹脂 Mater-Bi の海中での分解試験-200 日間の Mater-Bi と紙の分解性の比較 (出典：Novamont 社資料提供)

海洋での分解試験において重要な点として、海洋生分解性試験場所が 1 つ挙げられる。海上、海中、海底、地域により様々な条件が異なるため、どの条件下でも分解できるよう各それぞれの条件で試験をする必要がある。(図 5-2)

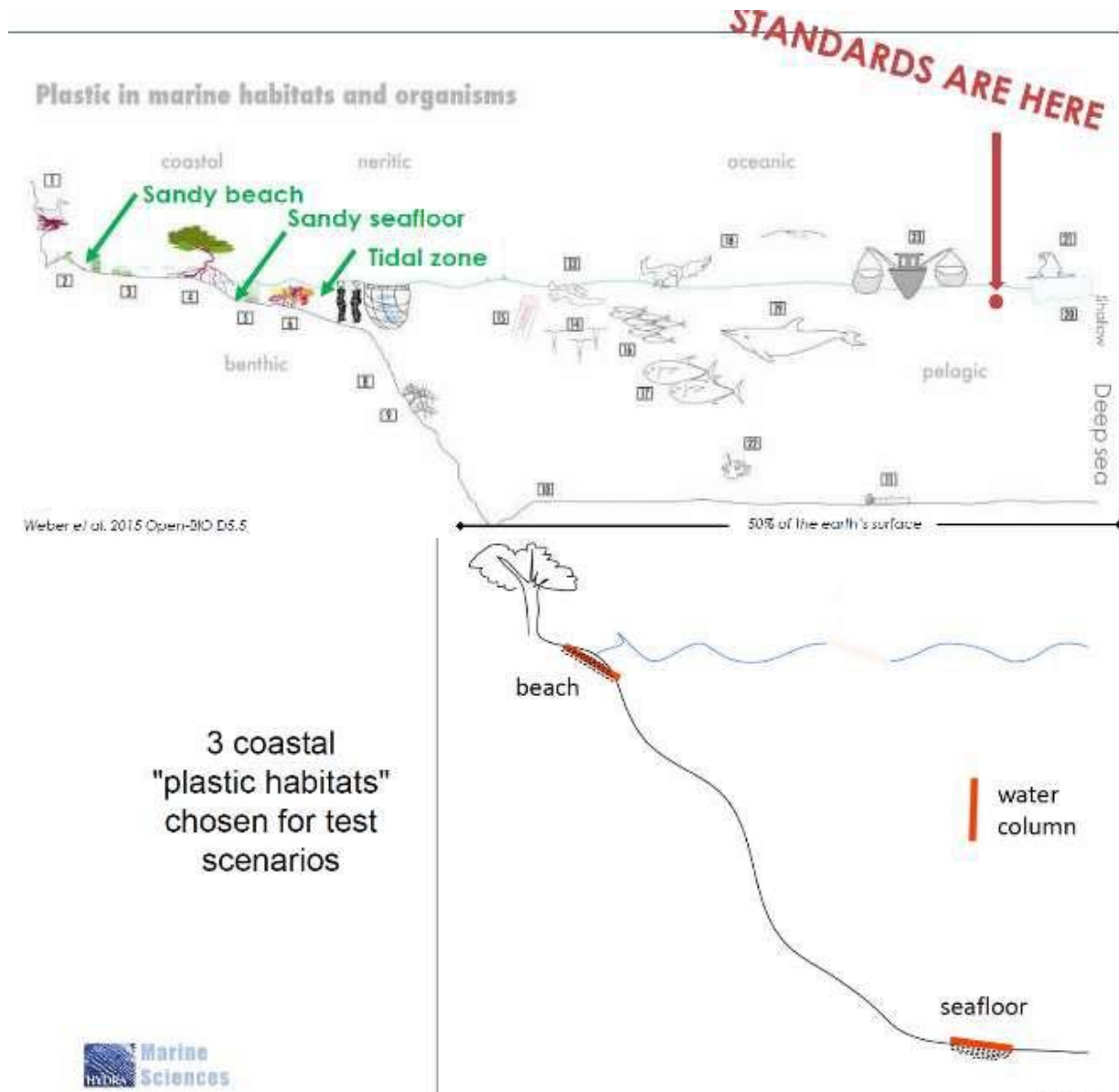


図 5-2 海洋生分解性試験場所[37]

5.1.1 海洋生分解性に係わる国際規格

代替培地の国内での海洋生分解性実証試験に向けて、Novamont 社へのヒアリングなどから、関連する国際規格を以下の通り整理した。

1) ISO22403

2020 年に発行された材料の海洋における生分解性の評価方法を規定した新規格。海洋中の海洋微生物の働きによる本質的生分解性の評価方法を規定しており、海水、および堆積物と共に粉末状サンプルを密封し、生分解によって生じる二酸化炭素発生量をラボにて測定する。海洋生分解性プラスチックへの要求性能としては、2 年以内にサンプルに含まれる炭素のうち 90%以上が二酸化炭素に分解されるか、植物繊維の主成分であるセルロースよりも良好な分解性を有することが規定されている[38]。

2) ISO22766

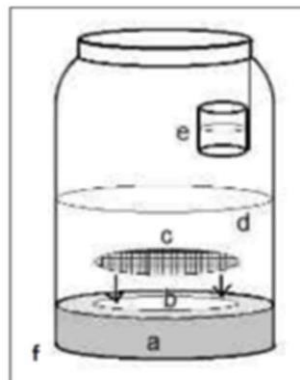
領域真沿岸体（海岸線周辺）と亜潮間帯（海岸線から水深 200m まで）2 点を試験地に想定。生分解性ではなく"崩壊性"を評価する。260mm × 200 mm に切り取られた生分解性のフィルムをプラスチックメッシュでカバーして残留物の面積から崩壊度を測定する。試験期間は最長 3 年だが、崩壊率が 90%以上(残ったフィルムの面積が元のフィルムの 10%未満)になった場合には試験終了とする[39]。

3) ISO19679

本試験は実験室内で浅海域の海底を想定し、採取した海水、堆積物およびシート状試験材料を培養瓶に入れ、シートを堆積物に静置し、そこから発生する CO₂ 量を測定して試験材料の生分解度を測定する。試験期間は最長で 2 年間だが、一定レベルの CO₂ 発生が達成され、それ以上の生分解が予想されない場合、テストは完了したとみなされる[40]。

ISO/DIS 19679

海水／砂堆積物界面 好氣的生分解 二酸化炭素発生



- a. 砂堆積物(砂浜)
- b. 試料
- c. 試料押さえ(プラスチック網)
- d. 人工海水
- e. 二酸化炭素吸収液
- f. 定温器 20-28 °C

生分解度(%)

$$= \frac{\text{発生した二酸化炭素量}}{\text{理論上の二酸化炭素総量}} \times 100$$

図 5-3 ISO/TC61 (プラスチック) 海水中における生分解度測定方法[41]

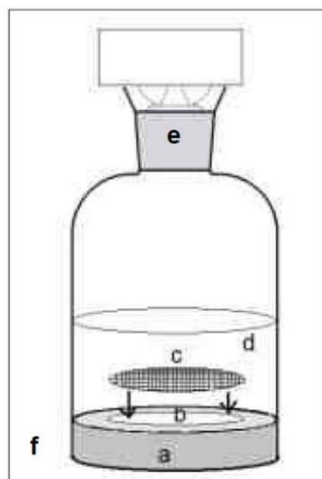
4) ISO18830

ISO19679 同様、実験室内で浅海域の海底を想定した試験法であるが、こちらは O₂ の量を測定することにより試験材料の生分解度を測定する。

試験期間は最長で 2 年間だが、一定レベルの O₂ 発生が達成され、それ以上の生分解が予想されない場合、テストは完了したとみなされる[42]。

ISO/DIS 18830

海水／砂堆積物界面 好氣的生分解 酸素消費



- a. 砂堆積物(砂浜)
- b. 試料
- c. 試料押さえ(プラスチック網)
- d. 人工海水
- e. BODセンサー
- f. 定温器 20-28 °C

$$\text{生分解度(}\%) = \frac{\text{測定BOD値}}{\text{理論BOD値}} \times 100$$

BOD: 生物化学的酸素要求量

図 5-4 ISO/TC61 (プラスチック) 海水中における生分解度測定方法[41]

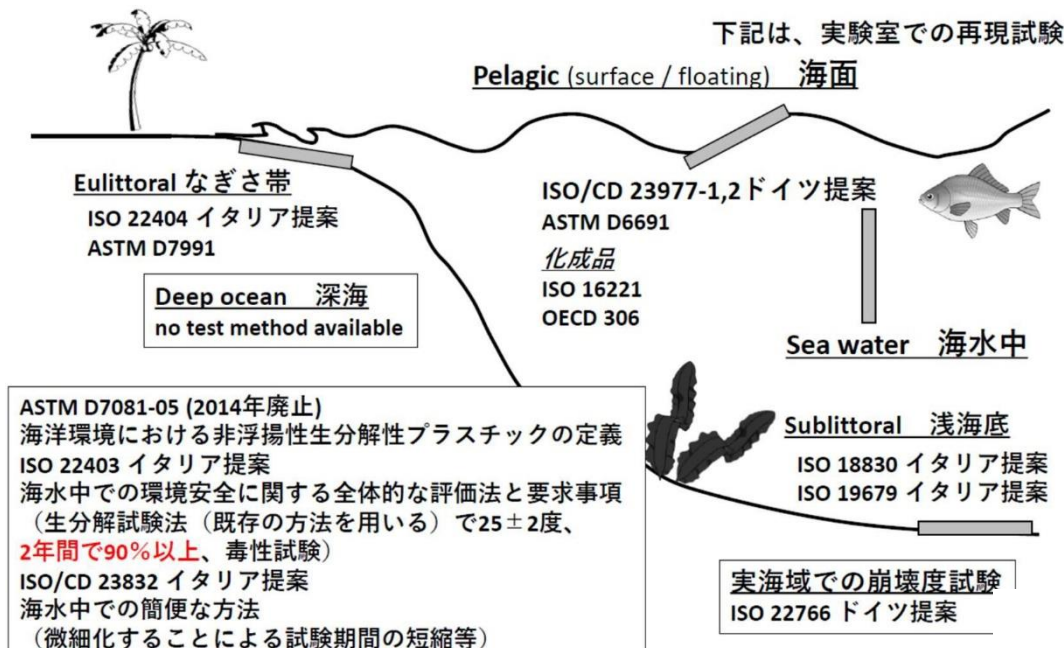


図 5-5 海水中での生分解評価方法[43]

No	ISO番号	概要	状況	対応JIS
14	ISO 18830	海底砂泥面における非浮揚性プラスチック材料の酸素要求量による好氣的生分解評価法	2016に発行 イタリア提案	
15	ISO 19679	海底砂泥面における非浮揚性プラスチック材料の発生二酸化炭素量による好氣的生分解評価法	2016に発行 イタリア提案	
16	ISO 22403	海の微生物による実験室中温条件での本来の好氣的生分解度と環境安全の評価 - 試験方法と要求事項 -	2020に発行 イタリア提案	
17	ISO 22404	海底砂泥中の発生二酸化炭素量による好氣的生分解評価法	2019に発行 イタリア提案	
18	ISO 22766	実海域中での崩壊度測定	2020に発行 ドイツ提案	
19	ISO/CD 23517-1,2	生分解性マルチフィルムの定義	2018に提案・審議中 ドイツ提案 メール審議後、CD投票へ	
20	ISO/CD 23832	海洋条件での生分解速度の求め方	2019に提案・審議中 イタリア提案 CD投票へ	
21	ISO/CD 23977-1,2	海洋浮遊条件での生分解度の求め方	2019に提案・審議中 ドイツ提案 CD投票へ	

図 5-6 発行済み、審議中 ISO 規格一覧 (主に海洋関連), 2020 [44]

5.2 実験室における海洋生分解性試験

海洋における素材の崩壊観察においては、当該素材の崩壊性は評価できても、実際に生分解されているのか分からず、微細化した素材が完全に生分解されるのかも確認できないため、

実験室における海洋生分解性評価試験を行う必要があった。

そこで、令和 3 年度は実験室試験についての検討および手法の確立を行い、ISO19679[45]による海洋生分解性試験を行った。ISO19679 は、実験室内で浅海域の海底を想定した試験法で、採取した海水、堆積物および試験材料を培養瓶に入れ、試験材料を堆積物に静置し、そこから発生する CO₂ 量を測定して試験材料の生分解度を測定する(図 5-7)。

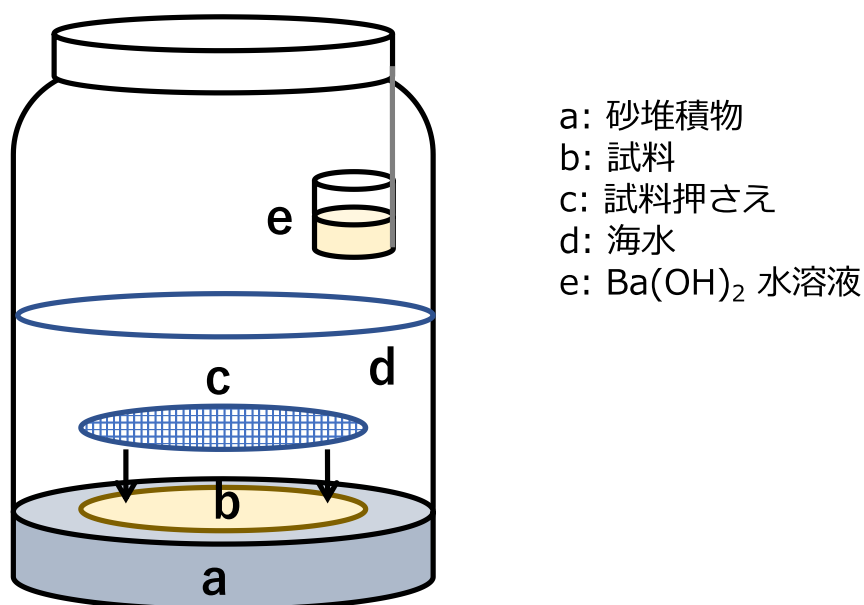


図 5-7 ISO 海洋生分解性測定装置

5.2.1 材料と方法

本試験で用いる海水および堆積物は神奈川県七里ヶ浜の浅海底(図 5-8)から採取し、試験材料は粉末状にした Mater-Bi (EF04P)シートを用いた。採取した海水および堆積物、試料を 250ml 試験瓶に入れ、CO₂ 吸収剤を蓋に吊るして密閉した(図 5-9)。試験瓶を 28℃のインキュベータ内に置き、試料の分解により発生する CO₂ を、瓶内に設置した 20mL 容器に入れた 0.025M 水酸化バリウム水溶液に吸収させた。発生した CO₂ は、水酸化バリウム液を 0.05M 塩酸で滴定して算出した。滴定には自動滴定装置 Orion Star T910 (Thermo Scientific)を使用した(図 5-10)。反復は 3 とし、対照としてセルロース濾紙(5A125mm、ADVANTEC)およびブランクをそれぞれ 3 用意した。

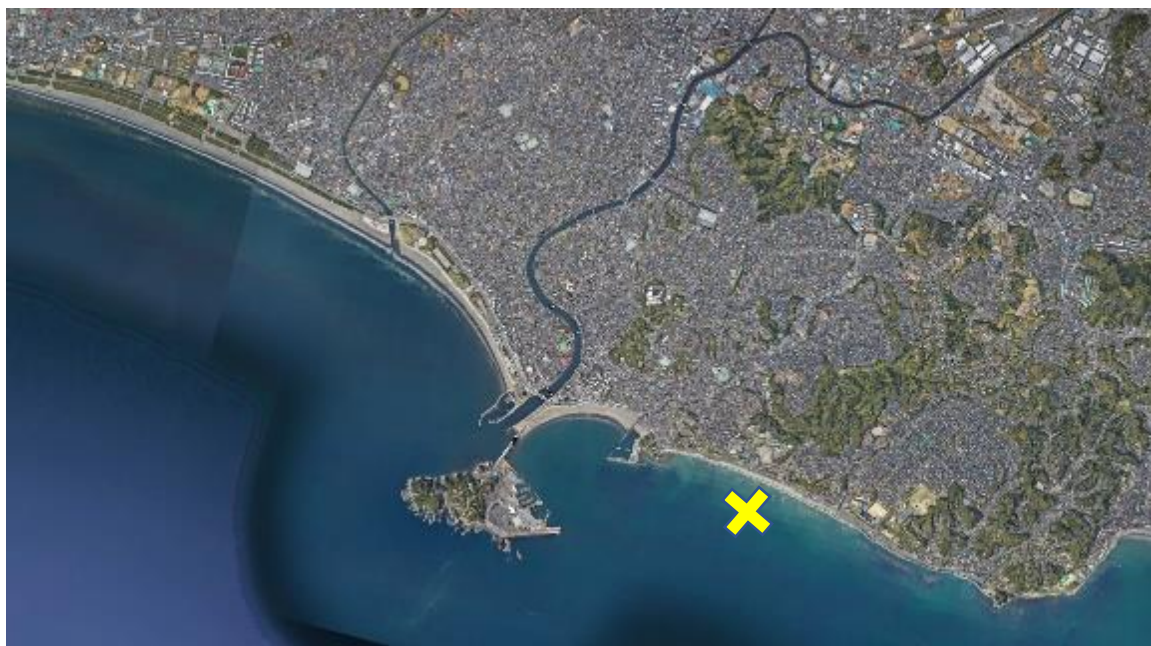


図 5-8 海洋生分解性試験に用いた海水および堆積物の採取場所(x)。大潮の干潮時に採取した。(Google Map より)



図 5-9 海洋生分解性試験瓶



図 5-10 自動滴定装置

5.2.2 結果

代替培地(Mater-Bi)の海洋生分解性試験を ISO19679 により行った。TC-IC 法により測定した Mater-Bi の炭素含有率 0.57 と発生した CO₂ 量をもとに、生分解率を算出した。およそ 3 ヶ月間の試験の結果、Mater-Bi の累積生分解率はセルロースに対し 6 割程度の分解率を示した(図 5-11)。なお、OxiTop(WTW 社)を使用した酸素消費計測による同海水および堆積物を用いた Mater-Bi の好気分解試験では、セルロースと同等程度の分解を示した(図 5-12)。

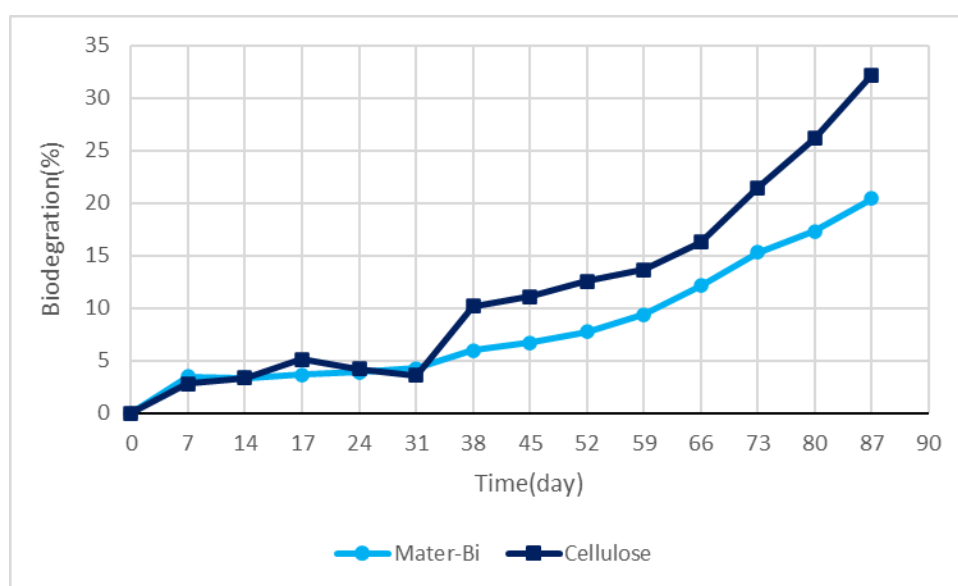


図 5-11 累積生分解率

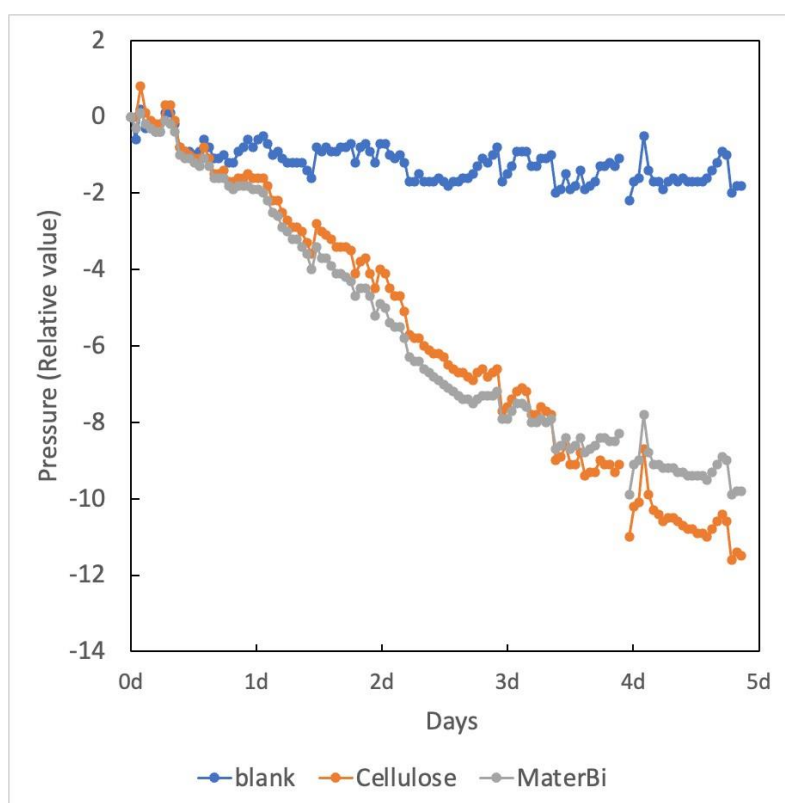


図 5-12 OxiTop による Mater-Bi 好気分解試験での気圧変化。気圧の低下は二酸化炭素発生量にともなう酸素消費に相当する。

5.2.3 まとめ

実海洋における試験においては、微生物の働きによる分解と潮汐の影響などによる崩壊・流失が区別しにくいことや、海水中での長期間にわたる撮影等による多くの費用要因があることから実施は行わず、自社または外部委託先による実験室試験をもって代替培地の海洋生分解性を評価した。

実験室試験として、浅海域の海底を想定した ISO19679 による代替培地 Mater-Bi の海洋生分解性試験を行った。およそ 3 ヶ月間の試験の結果、Mater-Bi の累積生分解率は対照のセルロースに対し 6 割程度に及ぶ分解率を示した。試料の分解のしやすさは使用する海水に含まれる微生物の種類や活性および堆積物の粒子サイズ等にもよるといわれており、本試験においては特に微生物活性を維持するための栄養素の補給等を行わなかった。また、海洋生分解性試験は半年から 1 年以上かけて行われるため、今後 Mater-Bi およびセルロースの分解率が上昇していくことが予想される。なお、OxiTop(WTW 社)を使用した酸素消費計測による同海水および堆積物を用いた Mater-Bi の好気分解試験ではセルロースと同等程度の分解を示した。

5.3 流出する培地微小片について

自社工場の排水に含まれるウレタン培地小片を調査したところ、ほとんど検出されなかった。外部の植物工場および水耕栽培施設等の視察調査をおこなったところ、植物残渣と切り離されたウレタン培地を敷地内土壌上に山積み管理している例もあった。

屋外に置かれた培地が太陽光により分解され河川等へ流出する可能性が考えられたため、培地の紫外線による分解を調査した。ウレタン、または Mater-Bi 培地に UV-B を 11 日間連続照射した。ビーカーに入れた水 20ml に、ウレタンまたは青く染色した Mater-Bi 培地約 1g を浸し、10 回程度指で押して十分吸水させたのち、水中の培地微小片を調査した。UV-B を照射しない培地を対照とした。

その結果、UV-B ライトを照射したウレタンおよび Mater-Bi 培地いずれも変色がみられた(図 5-13)。また、ウレタン培地からは水中に微小片が放出されたが、Mater-Bi 培地からは微片は目視では確認されなかった(図 5-14)。

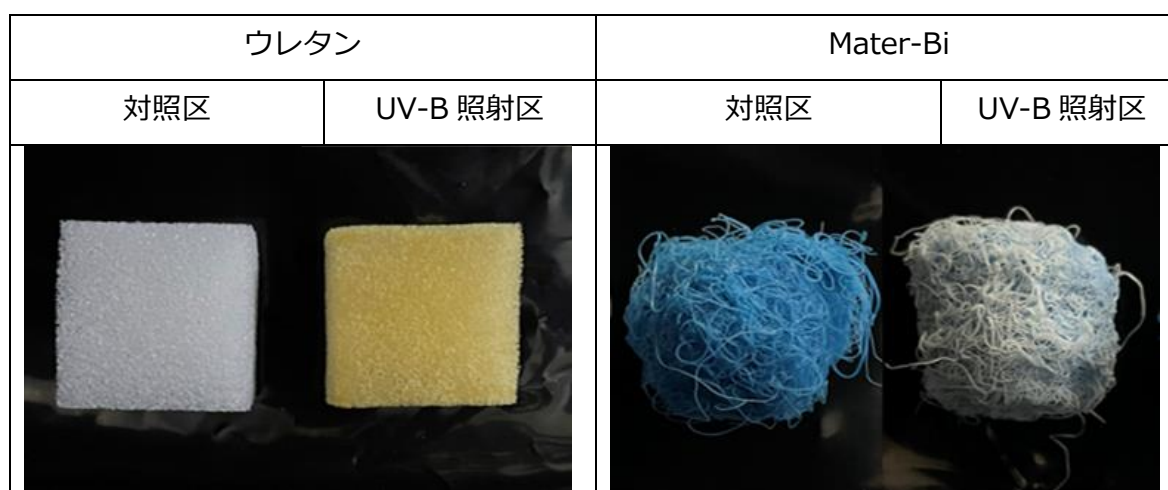


図 5-13 UV-B を照射したウレタンおよび Mater-Bi 培地（CBC で染色したもの）

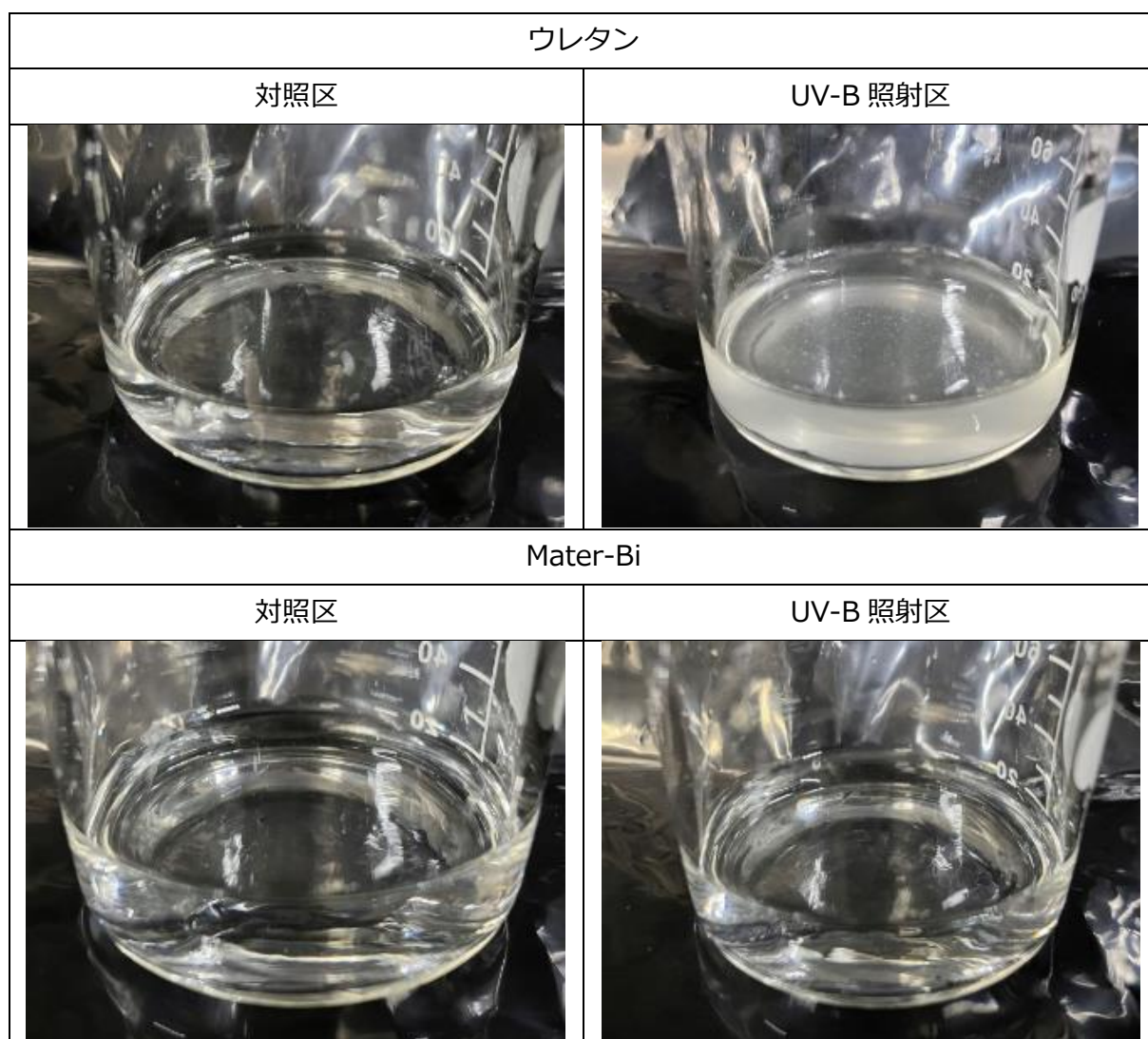


図 5-14 各培地を浸漬した水

5.3.1 考察とまとめ

これまでの検証で植物工場からのウレタンの流出は植物残渣破片にくらべて微量であり、定量にはいたらなかった。しかし、UV-B 照射試験でウレタンは微小片が確認されたため、屋外にある程度の期間放置されたウレタン培地から河川等へ流出する可能性がある。一方で Mater-Bi は UV-B 照射しても素材の崩壊は確認できなかったことから、ウレタン培地より微小片流出の可能性はかなり低いものと推測される。

6 ウレタン代替培地を含む植物残渣のウニ飼料としての有効利用

6.1 はじめに

使用済みの生分解性代替培地は、コンポスト化もしくは土壌還元により処理することを想定しているが、よりトータルパッケージでのコスト削減に寄与できる仕組みとして、水耕栽培野菜の根と廃培地を分離せずに、そのまま飼料として有効利用する可能性を検討した。廃培地が養殖飼料として利用できれば、廃棄コストと養殖の飼料代を削減でき、さらに養殖による収益も見込める。

植物残渣を食用とする生物に関する情報収集の結果、雑食性で藻類などをよく食べるウニが候補にあがった。近年日本近海では浅海の岩礁・転石域において海藻の群落（藻場）が著しく衰退・消失して貧植生状態となる磯焼けが問題化している。磯焼けの原因のひとつは海藻が限度を超えて植食動物に食われることであり、特に北日本ではウニと小型貝類が磯焼けの原因となっている。日本だけでなく 1960 年代にカリフォルニア沿岸においてウニの大発生によるジャイアントケルプ海中林の衰退が報じられて以来、世界各地でウニによる磯焼けが相次いで報告されている。ウニが高密度となって生じた不毛域はウニ焼けとも呼ばれている。

ムラサキウニは雑食性であり、海藻だけでなく野菜類も食べる。神奈川県では、その特性を利用し、近海でウニ焼け対策として捕獲されるウニに、三浦半島で収穫されるキャベツの流通規格外品を与えるウニの養殖が試みられている[46]

そこで、ウニの養殖飼料としての利用の可能性を検討するため、本調査ではムラサキウニの水耕栽培したレタスの植物残渣による養殖を試みるとともに Mater-Bi を飼料としての有効利用についてできるかを検討した。

6.2 ウニの養殖用飼料としての活用

令和 2 年度に養殖の実態について調査を行い、ウニの飼育試験を行った結果、国内で広く食用されているムラサキウニを含む複数種類のウニが、植物の廃根・外葉を食べることを確認できた（図 6-1）。さらに、令和 3 年 4 月から 10 月まで 7 か月間、ムラサキウニを水耕栽培によって収穫された植物残渣のみを与えて飼育し、長期間にわたって植物残渣のみで生育することが確認できた。

水槽内に投入した Mater-Bi をウニが食べるのは、水槽内に植物残渣が無い状況でのみであり（図 6-2）、植物残渣がある状態では Mater-Bi を食べることは無かった。このことから、Mater-Bi を餌として認識はしているものの、植物残渣の方を好んで優先的に食べるこ

とが分かった。

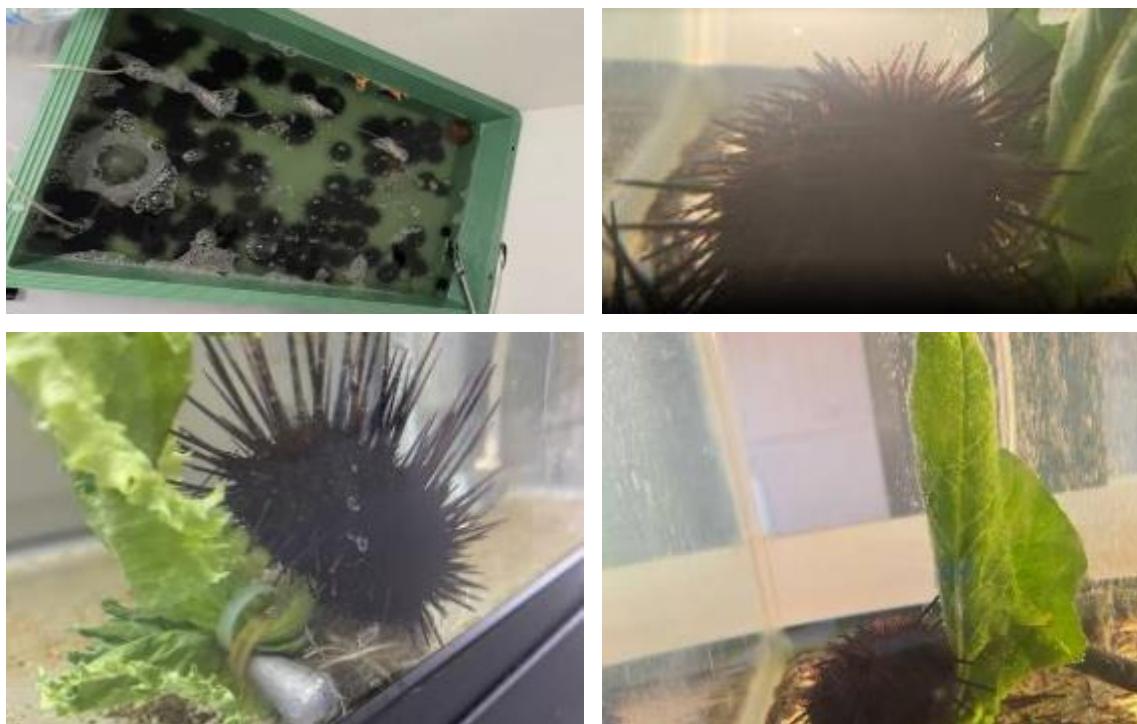


図 6-1 岩手県宮古市重茂漁業協同組合の協力により入手したウニ。管足(吸盤)を伸ばして葉を捕捉し、植物残渣（リーフレタス、ホウレンソウ）を食べる。



図 6-2 水槽内に投入した板状 Mater-Bi(左)と板状 Mater-Bi を食べるウニの様子(右)

6.3 海藻およびレタスの給餌がウニの食味に与える影響

岩手県宮古市重茂漁業協同組合の協力により入手したウニに、海藻（コンブ、ワカメ等）、水耕栽培したレタスの葉、または水耕栽培したレタス根のみを餌として4週間与えたのち、ウニの食味試験（10反復）を行った。

その結果、海藻飼育のウニは、甘味・うま味が植物残差飼育の物より高く、苦みや臭いはなかったが、レタス葉飼育およびレタス根飼育のウニいずれも、甘味・うま味評価が海藻飼育よりも低く、苦味評があった。（表 6-1）

表 6-1 ウニの食味試験結果

餌	甘み ^z	うま味 ^z	苦み ^y	匂い ^y
海藻	1.95 a	1.95 a	0	0
レタス葉	1.10 b	1.00 b	1.0	0
レタス根	1.20 b	1.20 b	0.2	0

^z: 1(最低)–5(最高); 値後の同じ文字は Steel-Dwass の多重検定により 5%水準で有意差が無いことを示す。

^y: 0(無)-1(有); X-test により P<0.001 水準で餌間に有意差あり。

6.3.1 サツマイモ混合 Mater-Bi の給餌試験

ウニが Mater-Bi を食べるのかをより詳細に調べるため、Coomassie Brilliant Blue で青く染色した Mater-Bi に 1mm 立方程度のサツマイモ断片を少量混合して、2mm 厚に成形した 2–3 g の餌を作成した。これを、数日間餌を与えていないウニに与えた（図 6-3）。

ウニが食べた後の Mater-Bi の餌を回収したところ、サツマイモを含んだ部分にウニがかじった跡がみられた（図 6-4）。水槽の底に堆積した糞および残渣を回収したところ、海藻を食べたとみられる糞の他、同様の大きさ、かたちをした Mater-Bi からなる粒があった（図 6-4）。実体顕微鏡下でウニがかじった Mater-Bi を観察したところ、Mater-Bi が引き延ばされて引きちぎられていた（図 6-4,5）。一方、糞に含まれる Mater-Bi は、元の餌が砕けた形態ではなく、引き延ばされて破碎された形態をしており、それが丸まって糞と同様の形状となっていた（図 6-5）。以上の観察から、いったん体内に取り込まれて Mater-Bi がほとんど消化されずに排泄されたものと推測される。

排泄されたウニの糞の C 含量を全有機体炭素分析計で測定したところ、51.8%であり、この割合は Mater-Bi の計測結果である 57.3%より低かった。組成式が CH_2O の炭水化物では C 含量は 40%であるので、ウニの糞には Mater-Bi 以外にも有機物が含まれていたと考えられる。生分解性を ISO19679:2020 により調べたところ（一般財団法人化学物質評価研究機構、CERI）、Mater-Bi と比べて生分解性は同程度であった（図 6-6）。したがって、ウニが Mater-Bi を食べることで、Mater-Bi の生分解が促進されるということはない。



図 6-3 ウニが Mater-Bi を食べる様子



図 6-4 ウニに与えた前（左）および後（右）の Mater-Bi を整形した餌

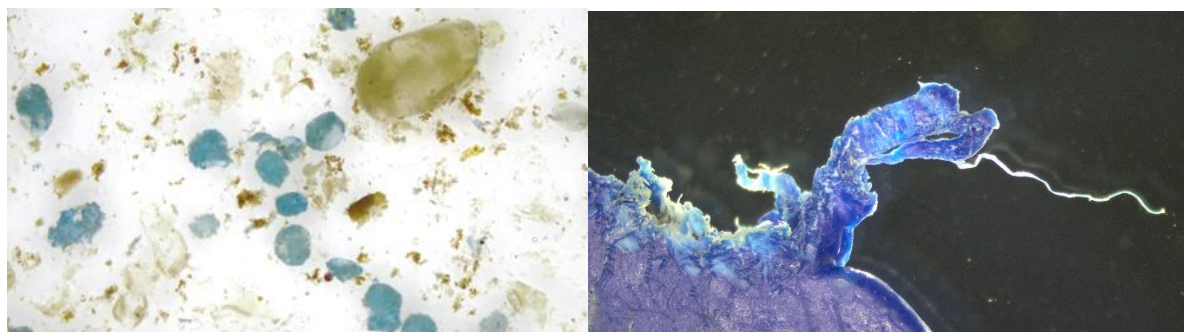


図 6-5 ウニの糞と残渣（左）、およびウニにかじられた Mater-Bi の実体顕微鏡像（右）

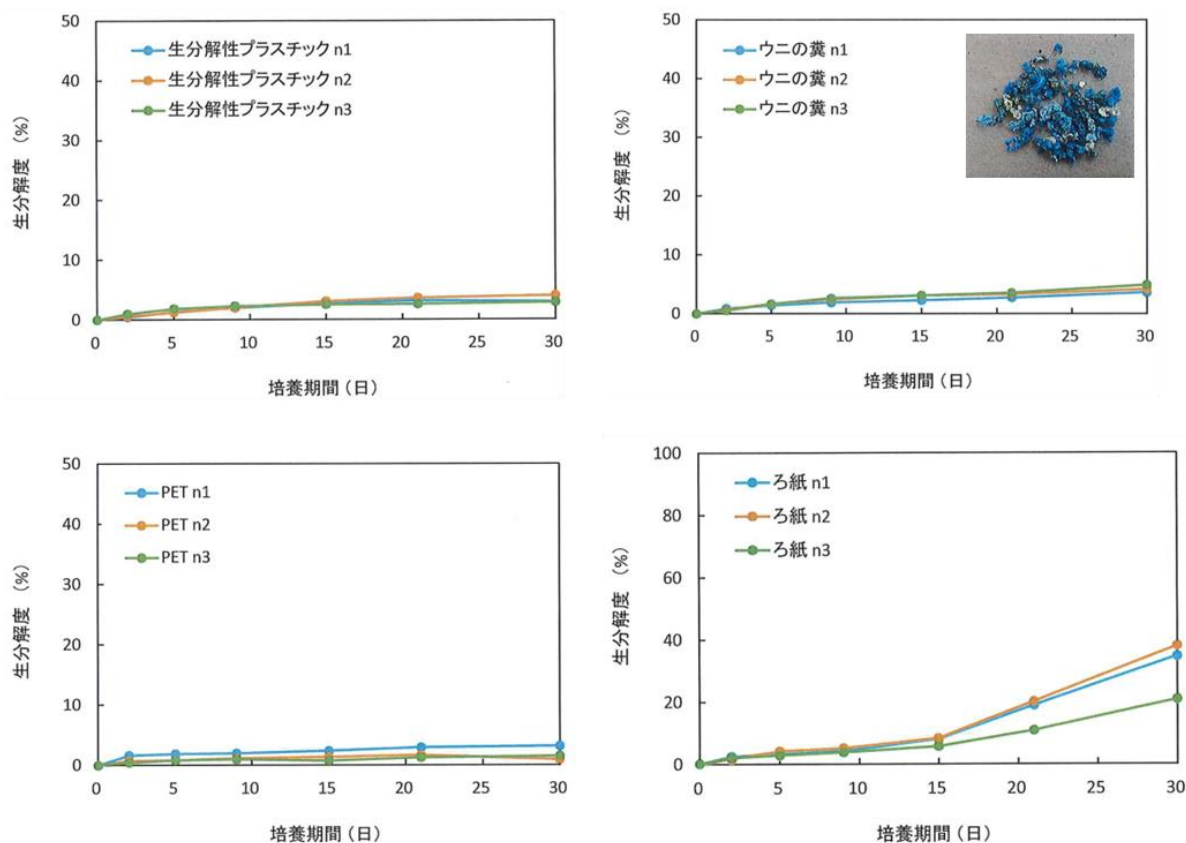


図 6-6 生分解性プラスチック (Mater-Bi) と Mater-Bi を食べたウニの糞の海洋生分解性試験結果 (一般財団法人化学物質評価研究機構、CERI によるデータ)。

6.4 水耕レタス植物残渣のウニ飼料としての利用

ウレタン廃培地および水耕レタス植物残渣のウニ飼料化利用の実現性について、物流、廃棄コストを含め評価した(表6-2)。レタス1kgの生産に対して発生する植物残渣を0.3kgとし、植物残渣の処理費用を見積もると、産廃処理の場合には、レタス1kg生産あたり6.01円であった。一方、植物工場が海の近くにあり海水が容易に入手できる条件において、植物残渣のみを与えるウニの養殖には165円のコストが発生するが、コスト以上の収益が見込めた。ただし、レタスを1日あたり1000株程度生産する規模の植物工場を想定すると、4200個体のウニを飼育する必要があった。その設備をどれだけ安価に抑えられるかが収益性に大きく影響する。また、磯焼け対策として入手するウニの価格設定も収益性に大きく影響する。また、今回は海水が容易に入手でき水交換が容易な場所として海に近い場所を想定しているが、内陸になると海水の入手、浄化に相当なコストが発生する。植物工場の設置場所も収益性に影響する大きな要因である。

表 6-2 ウニの養殖を想定したコスト試算

項目	数値	単位	
レタス残渣	304	g/kg	歩留まり90%, Shoot/Root比=5とした
ウレタン重量	3.2	g/ kg	
ウニが出荷までに食べる量	450	g/個	養殖日数90日として
ウニ養殖コスト	244.4	円/個	
稚ウニ仕入れ代	50	円/個	磯焼け対策で捕獲したウニを入手
養殖光熱費	64.3	円/個	3000kwh/月、単価30円*
養殖人件費	71.4	円/個	100時間/月、単価1000円*
設備減価償却	58.7	円/個	年間100万円減価償却*
ウニ生産物単価	272	円/個	
重量	10	g/個	
単価	34	円/g	250gあたり8500円
歩留まり	80	%	
レタス1kg生産あたり			
ウニ養殖個数	0.68	円	
ウニ養殖コスト	165	円	
ウニ生産物売り上げ	184	円	
産廃処理	6.01	円	20円/1kg、ウニ残渣30 g /個

* 1日あたりリーフレタス1000株出荷の植物工場からの残渣排出量は21kg/日、これを処理するのに必要なウニは1日あたり47個出荷、飼育90日として常時4200個を飼育。この規模の生産を想定してコストを試算。

6.5 考察

本試験では、ウレタン代替培地を含む植物残渣のウニ飼料としての有効利用について検討した。ウニの養殖コスト試算の結果、条件が整えば植物残渣の処理費用がなくなり、ウニの販売により収益が見込めたが、1) ウニの食味、2) ウニによる Mater-Bi の消化、3) ウニによるマイクロプラスチック化、に関して課題が残った。

1) ウニの食味について

養殖ウニを実際に販売するためには、一定基準以上の品質が求められる。しかし、食味試験の結果、ウニにレタスをたべさせると苦みが発生し、求められる品質に達しないことが分かった。レタスには苦み物質としてラクチュコピクリンおよびシュウ酸ラクチュコピクリンが含まれることが報告されている[47]。この物質がウニの食味に影響を与えたと思われる。一方、ウニにキャベツを食べさせた場合には食味が非常に良いことが報告されている[46]。したがって、キャベツなどレタス以外の作物生産であれば、残渣のウニ飼料としての利用の可能性がある。また、ウニがレタスの葉および根を食べることは確認されたので、レタスによってある程度ウニが生育したのちに、餌をキャベツに切り替えて食味を改善することも考えられる。ウニがレタスを食べた後の苦みの消長についてはさらに調査が必要である。

2) ウニによる Mater-Bi の消化について

ウニは植物残渣だけでなく Mater-Bi も食べることが確認出来たが、ほとんど消化されずに糞として放出されていた。さらに、Mater-Bi からなる糞の海洋生分解性試験の結果、生分解性はウニが食べる前と変わらず、ウニに Mater-Bi を食べさせることによって分解を促す効果は確認できなかった。したがって、当初想定していた培地ごとウニに食べさせて分解するというモデルが実現できなかった。ただし、ウニが食べることによって植物残渣は消化され、Mater-Bi と植物残渣をある程度分離することは可能であった。さらに、糞中の Mater-Bi は粉碎されておらず、むしろ固まった粒状になっていた。ウニに食べさせることにより培地と植物残渣を分離させることが可能で、排泄される Mater-Bi を効率的に濾過回収できれば、廃棄物処理の工程を簡略化できるかもしれない。

3) ウニによるマイクロプラスチック化について

ウニは Mater-Bi にサツマイモ断片が付着していると、サツマイモの部分を中心に Mater-Bi も区別せずに食べていた。このことは、ウニは海洋に浮遊するプラスチックに餌となる物質が付着している場合、プラスチックごと食べてプラスチックのマイクロプラスチック化を促進する可能性を示した。海洋に長く浮遊するプラスチック類は表面に有機物が付着し、それをウニが食べようとすることは容易に想像できる。ウニは雑食性が強く、世界中に多数生息する。海洋へ流れたプラスチックは破碎や太陽光などによる物理的な分解だけでなく、ウニによる捕食によってもマイクロプラスチック化されている懸念がある。海洋生分解性プラスチックへの代替の必要性を示している。

7 廃培地・植物残渣のその他の有効利用方法

7.1 嫌気性分解・バイオガス化

7.1.1 廃培地・植物残渣のバイオガス化

本事業で開発中であるウレタン培地代替素材材料である澱粉ポリエステル樹脂 Mater-Bi (Novamont 社) は嫌気性分解性を有しているため、本素材を用いて作成した培地を植物残渣とともに嫌気性分解させてバイオガス化することは、廃培地の有効利用技術として有力である。バイオガスは有機物の嫌気性分解（メタン発酵）によって発生する、メタン、二酸化炭素を主成分とするガスのことをいう。し尿、下水汚泥、生ごみや食品工場廃水などに含まれている有機性物質(バイオマス)を酸素の無い嫌気環境で、微生物によって発酵させると、メタンと二酸化炭素に分解される。発生したメタンガスは発電の燃料として利用可能である。メタン発酵残渣は、そのまま農地等で利用される場合もあるが、一般的には脱水処理をし、脱水固形物は他の燃えるごみと焼却処理もしくは堆肥化利用となる。また、一連のプロセスで発生する熱も再利用が可能である。

収穫後に根が絡み込んだウレタン培地は、手作業で根と培地を分離し、産業廃棄物処理業者に処理を委託している企業が多い。嫌気性分解で処理ができると培地と根の切り離しが不要になることから人件費削減と作業効率の向上が見込まれる。

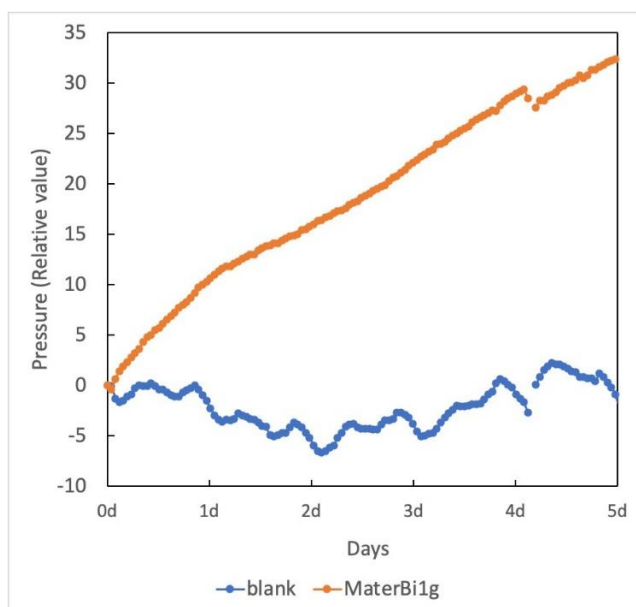


図 7-1 Oxitop による嫌気分解試験結果

Oxitop により 5 日間にわたり嫌気分解試験を実施したところ、嫌気条件汚泥では Mater-Bi 区において気圧が上昇し、メタン発酵されることが確認された。

7.1.2 バイオガス化施設について

畜産糞尿、下水汚泥、食品廃棄物のバイオガス化はすでに実用化されており[48]、国内のバイオガス発電の導入件数は年々増加している（図 7-2、[49]）。一般廃棄物及び下水汚泥や浄化槽汚泥、畜産系汚泥、食品廃棄物等をメタンガス化処理する町村等又は民間事業者の施設は 42 ある[50]。ドイツでは、2020 年で 9,632 のバイオガスプラント施設数があり、バイオガスの年間売上高は 70 億ユーロに達し、その結果、中小産業および農業関連企業で約 4 万人の雇用が確保されている[51]。

バイオガス化することにより、発電に利用してエネルギーが回収できるだけでなく、燃焼により発生する二酸化炭素を植物工場で再利用することも考えられる。愛知県半田市では、畜産ふん尿等を利用してバイオガス発電を行い、その排熱・排ガスを植物工場で利用し、さらにメタン発酵後の残さ物は肥料として利近隣農地へ還元する「バイオマス産業都市構想事業」に基づく事業化プロジェクトを実施している[52][53][54]。

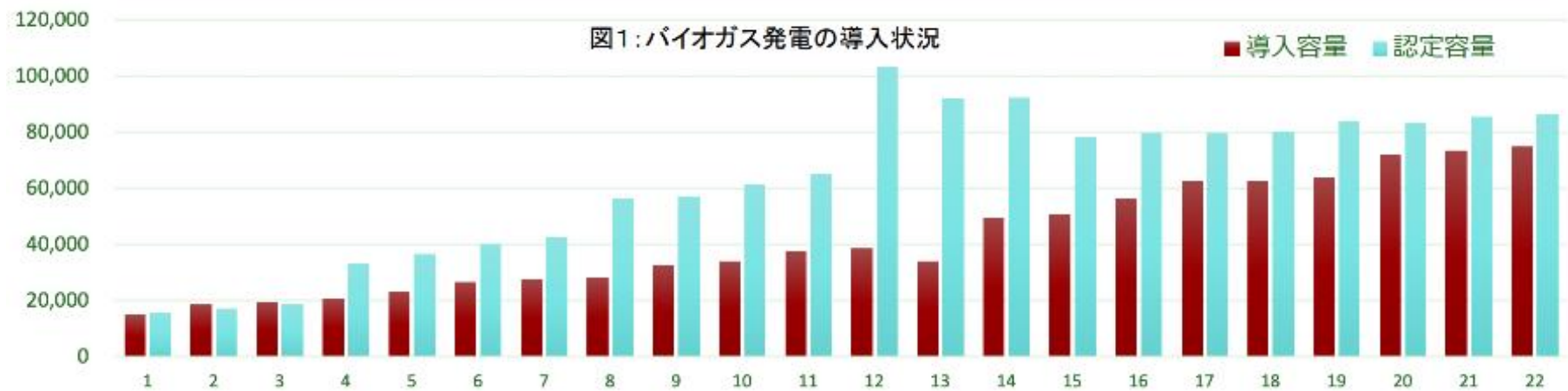


図 7-2 一般社団法人 日本有機資源協会 一般社団法人木質バイオマスエネルギー協会. 国産バイオマス発電の導入見通し(2021 年 3 月 22 日)[49] ※縦軸 k.w、横軸 2001 年～2022 年

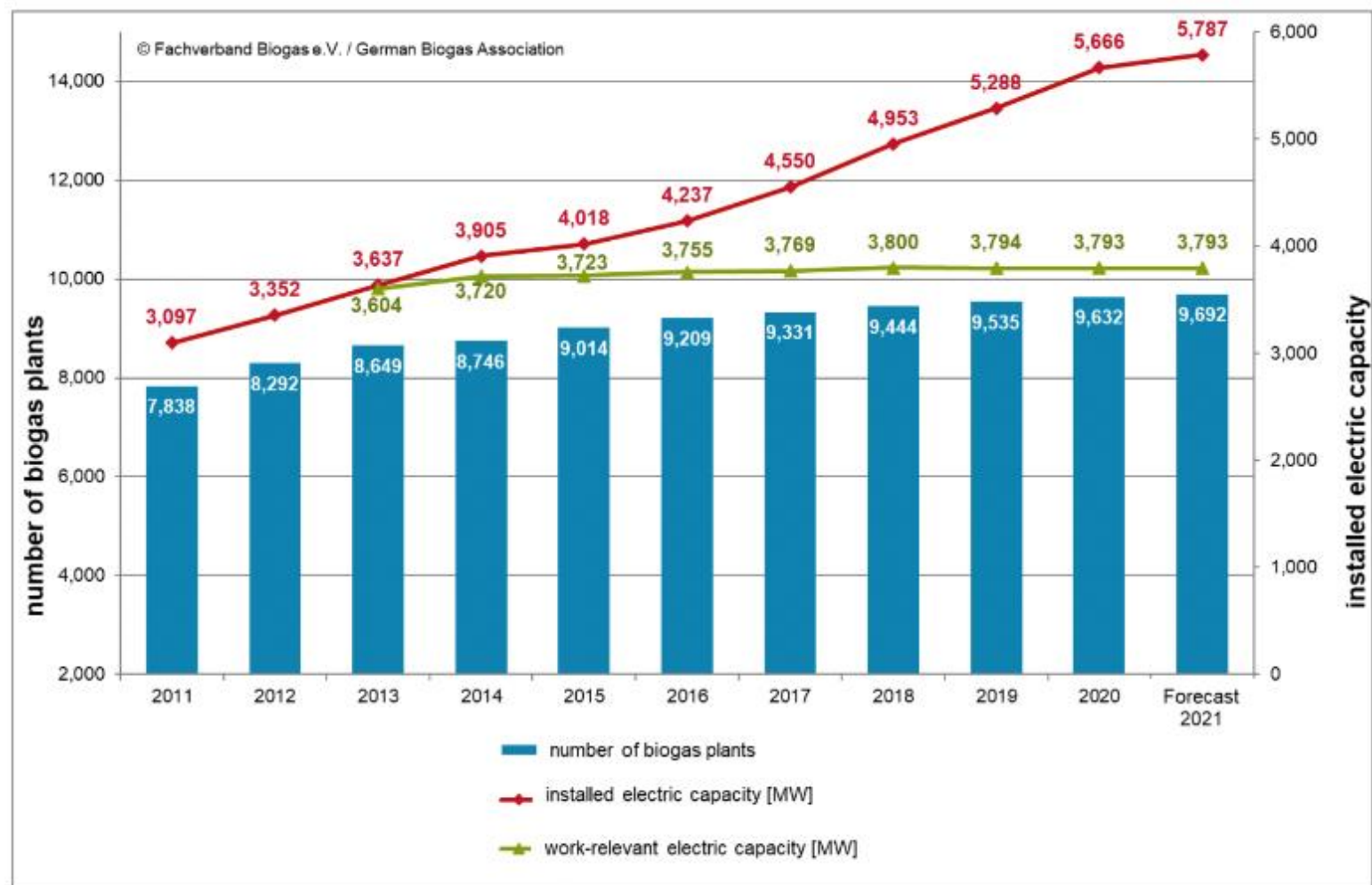


図 7-3 ドイツのバイオガスプラント数の推移[55]

表 7-1 ドイツのバイオガス分野統計一覧（2021 年 10 月時点）

	2020	Forecast 2021
Number of biogas plants (biogas plants with biomethane injection)	9,632(235)	9,692(241)
Installed electric capacity in MW	5,666	5,787
Gross electricity production in TWh per year	33.23	33.23
Households supplied with biogas-based electricity in millions	9.49	9.49
CO2 reduction by biogas in million tonnes	20.1	20.1
Turnover in Germany in Euro	9.7 billion	9.0 billion
Jobs in the biogas sector	46,000	46,000

[55]より引用

7.2 廃培地・植物残渣の堆肥化について

本事業では代替培地の使用後の処理方法として、堆肥化も選択肢の一つと考える。堆肥化の問題点は、単に土壤微生物により分解されるため有機廃棄物のエネルギーを回収することなく二酸化炭素に分解してしまうため、LCA として望ましい選択ではない。しかし、一般の農業から排出される植物残渣廃棄物は土壤に鋤き込まれたり堆肥化により処理されたりしており、土壤生分解性が確認できれば、生分解性の培地を含む植物残渣を産業廃棄物として処理するのではなく、農地で分解し植物残渣が含む肥料成分を回収することが可能となる。

7.3 堆肥化とは

堆肥化（コンポスト化）とは、主に動物の排泄物、生ごみ、汚泥を微生物により分解し堆肥をつくる工程のことを指し[56]、海外、特に欧州ではこの堆肥化施設が豊富に存在している。欧州では、生分解性プラスチックで製袋されたレジ袋、ゴミ袋に生ごみを捨て収集されている。企業、家庭から排出される生ごみの重量のほとんどが水分な為、焼却処理をする場合は一度水分を蒸発させる必要があり、その際に大量なエネルギーが浪費されてしまう。それらの問題が発生せずに堆肥を作ることで、土壤状態の改善ができる、生分解性プラスチックの分解促進などが利点として挙げられる。

堆肥化をする際に、家畜ふん尿を堆積しただけでは長期間かけても良い堆肥にはならない。重要なのは主役である好気性微生物が活発に活動できる条件を整えることで、具体的には、①栄養源、②水分、③酸素、④微生物、⑤温度及び⑥時間が挙げられる。

まず①栄養源について。堆肥化は微生物の働きによるもので、微生物が活動するための菌体を構成する成分、炭素や微生物が増殖するための菌体を構成する成分、窒素などが必要である。次に②水分含量は、55～60%が最適であり、水分がやや高い時は、孔隙ができるようかるく堆積し、水分が低い時は、十分踏み込んで堆積する。また、水分を低下させるためには、おがくずなどの水分調節剤を用いるのも良い[57]。③酸素の供給に関しては、堆肥化に欠かせない好気性微生物が、有機物を分解し発酵熱を発生させ、腐熱と水分蒸発を促進させることであり、そのために十分な酸素の供給が必要になる。④堆肥化は、家畜ふん尿中に存在している、自然由来の微生物のみで十分可能。生ふんの中には 1,000 万～1 億個/g 程度が存在している。現在、コンポスト中の微生物を自由にコントロールできる技術はなく、施設設計と、水分や通気などの条件調整によって、微生物が働きやすい環境条件を整えることがコンポスト技術の中心である[58]。⑤堆肥化において、家畜ふん尿に含まれる易分解性有機物が微生物によって分解され、熱エネルギーが発生する。そのため、堆肥の温度の

上昇は、堆肥化が順調に進んでいる証拠である。管理が適切であれば、温度は 70~80℃程度まで上昇する。⑥堆肥化期間は、切り返しをしても温度が上昇しなくなるまでである。堆肥化期間の一応の目安は、堆積方式で家畜ふんのみが 2 ヶ月程度、作物収穫残さとの混合物が 3 ヶ月程度、木質物との混合物が 6 ヶ月以上である[59]。

栃木県芳賀郡益子町で家庭から排出される生ごみや、事業系生ごみの堆肥化を実施している共和化工(株)では、戻し堆肥と呼ばれる方法で生ごみの堆肥化を行っている。生ごみだけでは含水率が高く堆肥ができないため、収集した生ごみを既に完成した堆肥と混ぜ合わせ、含水率を下げている（図 7-4）。植物工場で排出された廃根も堆肥原料となるが、CO2 削減・プラスチックの有効利用の観点では、バイオガス化を目指すべきと判断される。

堆肥化フロー



図 7-4 栃木県芳賀郡益子町で実施されている家庭系生ごみ、事業系生ごみの堆肥化フロー [60]

7.4 Mater-Bi の堆肥化試験について

日本国内で Mater-Bi のサンプルを堆肥化装置に入れ分解試験を行った。1, 2 週間程度で分解が進んでいると目視でき、3 週間~7 週間程度で袋、容器、カトラリーの分解が大きく進み目視できないくらいまで分解した。

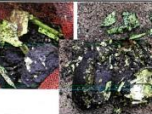
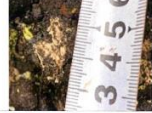
サンプル	試験開始1週間後	試験開始2週間後	試験開始3週間後	試験開始7週間後	
A 袋 Mater-Bi	 袋外に培地が接触した状態で試験を行った。	 原型は留めているが柔らかく、簡単に引き裂くことが可能。	 ボロボロの状態	 ボロボロの状態 からうじて判別可能	 原型無し
B 容器(緑) Mater-Bi	 容器内及び容器外に培地が接触した状態で試験を行った。	 原型は留めているが柔らかく、引き裂くことが可能な強度。	 ボロボロの部分及び原型を留めている部分が確認された。いずれも柔らかい。	 緑色の粒(5cm以下)が確認された	 緑色の細かい粒が多少確認された
B カトラリー Mater-Bi	 製品外に培地が接触した状態で試験を行った。	 原型を留めており、強度も保たれている。	 ボロボロになっており、触ると簡単に碎ける状態。	 2cm程度の破片が見えられた	 目視による確認は不可

図 7-5 生分解性試験結果 ((株) GSI クレオス調べ)

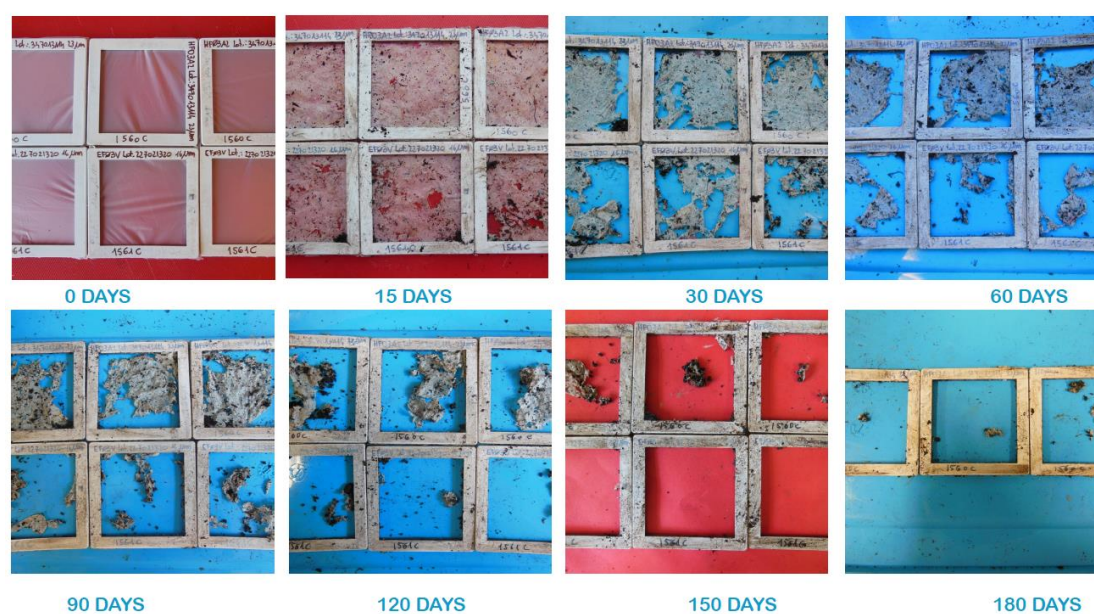


図 7-6 2 種類の Mater-Bi のフィルムを用いた生分解性試験 (2022.10.18 Novamont 社提供)

8 ウレタン培地と代替培地のトータルコスト比較

8.1 目的

本章では海洋生分解性樹脂を用いて代替培地を開発した際の価格と現行のウレタン培地の価格差を検証する。本事業で検討している海洋生分解性樹脂原料はウレタン原料よりも調達価格は高額になるが、使用後の再利用等まで含めた代替培地のトータルコストが、既存のウレタン培地よりも低減されることを目指す。また、社会実装時に水耕栽培事業者・植物工場事業者に対してコストメリットを提供することで迅速な普及に寄与することを目標とする。

8.2 方法

8.2.1 コスト評価

現行のウレタン培地のコストに基づいて、原料費、送料を含む培地の調達価格、廃培地と植物残渣の分別作業人件費、廃棄費用に分類してそれぞれコスト調査を実施する。その後、代替培地の開発の進捗と合わせ、候補原料の原料価格調査・加工費用調査のうえ、廃培地の再利用などのシステムを含めた廃棄費用までを考慮した代替培地のコスト評価をおこなう。

昨年度までに既存ウレタン培地のコスト調査、量産メーカー候補の選定を実施し、令和4年度には選定量産メーカーでの試作を行い、各コストをそれぞれ調査し、ウレタン培地と比較した際の代替培地のコスト評価をおこなった。

8.2.2 ウレタンフォーム原料の価格高騰

昨今、化学品原料不足、原料メーカーのフォースマジジュール（不可抗力）やコンテナ不足、船の遅延、石油原料の値上げなどの様々な要因により化学品原料の価格高騰が進んでいる。40、50%以上の異常なほどの値上げは、川上から川下の企業が苦しんでいる状況にある。ウレタン培地を製造するための原料であるポリオールやイソシアネートについても同じく20～40%程度値上げしている。

8.2.3 値上げによる影響

ウレタンフォーム原料値上げは1個当たりのウレタン培地の調達価格に大きく影響している。実際、現在使用されているウレタン培地の価格は調達価格が1個当たり約0.58円程度であるが、令和3年度に算出した価格は0.3円が最安値であった。

8.3 結果

代替培地の代替検討において培地の吸水性、野菜の生育性など重要視する点はいくつかあるが、社会実装時にはコストも同じく重要となる。培地の量産方法および原料費によって価格が変動するためコスト削減に向けて様々な方法で代替培地を試作している。検討している代替培地原料の価格は、800～1,000 円/kg程度となり、加工費は実機の使用や培地のサイズ、仕様等の条件によって変動するが、メーカーヒアリング調査より今回の試作品段階での加工費は約 4,000 円と計算した。本事業の代替培地はサイズ、密度（重量）や発泡倍率の仕様が決定していないものの、上記価格より送料を含めた調達価格は 1 個当たり 3.63 円と算出でき、ウレタン培地とは約 3 円の差が生じた。

価格検討にあたっては、播種ならびに収穫・廃棄時の作業に係る人件費・処分費も明らかにしてコストを算出した。代替培地は廃棄の際に根と廃培地を切り分ける必要がないため、人件費の削減もメリットとして挙げられる。

現状のウレタン廃培地は産廃業者に廃棄を依頼する方法のみに限られるが、代替培地の廃棄方法はウレタン同様の廃棄処分、堆肥化、バイオガス化、ウニの飼料化の 4 つで検討が可能で、価格比較を表 8-2 にまとめた。

廃棄処分およびウニの飼料化はプランツ社のデータに基づいて試算し、堆肥化およびバイオガス化は業者ヒアリングにより算出した。廃培地量はプランツ社にて 1 か月あたりに排出される植物残渣およびウレタン廃培地量と個数より、代替培地の排出量を試算し、送料を含めて 1 個当たりの価格を計算した。ウニの飼料化による廃棄コストは、第 6 章で分析したように、廃培地と植物残渣を利用してウニの養殖を行い販売を行うことを想定し、その売上と養殖コストの差分である。堆肥化とバイオガス化は、堆肥およびバイオガスとしての処分を想定し、堆肥化施設およびバイオガス化施設の引き取り金額を記入した。処分の際にかかる施設までの送料については、首都圏内で廃培地を堆肥化およびバイオガス化施設へ運搬することを想定した価格となっている。そのため、植物工場と廃棄施設の立地関係によって価格の変動も考えられる。

以上よりウレタン代替培地 1 個当たりのトータルコストは廃棄方法により異なり、2.43 円～5.10 円となる。下記表 8-1 に現行ウレタン培地と代替培地のトータルコストの比較をまとめた。この表から分かるように、生分解性培地に代替することにより、培地と植物残渣とを分別せずに処理できるようになるため、培地価格の増加以上にコストが削減される。廃棄コストについては、堆肥、あるいはバイオガスとして処理できる場所がまだ多くないので、堆肥処理、あるいはバイオガス処理の方が、単なる焼却処分よりかはるかに高くなってしまっているのが現状である。しかし、分別作業が不要になるため、トータルコストは安くなる。また、ウニ飼料化により販売ができれば、トータルコストは半分以下に抑えることができる。

表 8-1 ウレタン培地 1 個（1 株）当たりのコスト比較表

	現行のウレタン培地のコスト (プランツ社工場実績値より)	代替培地のコスト
調達価格（原料費+加工費+送料）	0.58 円	3.63 円
廃培地と植物残渣の分別作業人件費	5.00 円	0 円
廃棄費用（植物残渣含む）	0.44 円	表 8-2 参照
合計	6.02 円	2.43 円～5.10 円

業者ヒアリングによる GSI クレオス調べ

表 8-2 代替培地 1 個当たりの廃棄コスト比較表

	送料込の代替培地の廃棄コスト	出典
廃棄処分	0.44 円	プランツ社データに基づく
堆肥化①	1.47 円	堆肥化業者ヒアリング結果
バイオガス化	1.46 円	バイオガス業者ヒアリング結果
飼料化ウニ飼育コストー収益)	-1.20 円	プランツ社データに基づく

業者ヒアリングによる GSI クレオス調べ

※①参考資料 益子町 堆肥化と焼却にかかる費用実績[61]

8.4 考察とまとめ

令和 2 年度はウレタン培地のコスト調査とコスト評価スケジュールの作成を行った。最終的には、再利用等まで含めたトータルコストが、既存ウレタン培地よりも低減され、社会実装時に水耕栽培事業者・植物工場事業者に対してコストメリットを提供することで迅速な普及に寄与することを目指し、令和 3 年度では様々な候補原料を集め、手作業によりウレタン代替培地を試作し、野菜の生育評価をおこないながら代替培地に係るコスト評価を継続した。令和 4 年度には海洋生分解性原料を候補となる量産企業に送付し試作品を作成、生育試験を繰り返した。またコスト削減に向けてより安価な製造方法を模索し、樹脂量の低減を図った。

現行のウレタン培地（量産品）と代替培地（試作品）のトータルコストは培地 1 個あたり約 1 円～2 円の差で代替培地が安価となっているが、諸費用が上乗せされるため実際の販売価格は算出金額よりやや高くなることが予想される。環境負荷を考慮すると代替培地の社会実装を進める価値があり、今後は社会実装に向け、量産および製造価格の低減を目指す。

社会実装に向けたコスト削減の方策は、廃培地と植物残渣の分別作業や廃培地の廃棄処理コストの削減に加え、素材選定ならびに加工方法の検討、培地 1 つ当たりに使用する素材量の削減などの検討、試作を進めることとする。また、候補原料の価格調査・加工費用は、試作段階と大量生産時では各コストが低下する可能性が高い。現時点では試作段階の原料費用、加工費用の価格を算出しており、今後は社会実装と大量生産に向け素材メーカーや加工メーカーとの検討・評価・改善をおこない、価格の低減を目標とする。

9 ウレタン代替培地のライフサイクルアセスメント

9.1 目的及び調査範囲の設定

水耕栽培においては、ウレタン培地から脱離した微量の培地片が排水中に流出している可能性がある。そこで、培地の素材をウレタンから海洋生分解性を有する素材（Mater-Bi）に置き換えることで、海洋プラスチック問題の緩和を図る。なお、Mater-Bi はポリブチレンアジペートテレフタレート（PBAT）に熱可塑性澱粉を混合したバイオマス複合プラスチックであり、グレードにより異なるが、数十%のバイオマス由来成分を含むため、培地素材をウレタンから Mater-Bi に代替することで廃培地の処理に伴う温室効果ガス（GHG）排出量を削減できる可能性がある。そこで本章では、培地素材をウレタンから Mater-Bi に代替した場合のライフサイクルでの GHG 削減効果を評価した。

9.1.1 評価シナリオ

評価したシナリオを表 9-1 に示す。ベースラインシナリオは、樹脂種類をウレタンとし、廃培地の処理は発電焼却とした。評価対象製品シナリオは樹脂種類を Mater-Bi とし、廃培地の処理は焼却発電を基本に、処理オプションとしてバイオガス化、堆肥化、飼料化を評価した。機能単位は、日本国内で使用される水耕栽培用のウレタン培地量（50 t/年）とした。Mater-Bi 製培地の重量は、メーカーヒアリング結果に基づき、今後の技術開発による成果も見込み、ウレタン培地（1 個あたり 0.2 g）の 1.8 倍（1 個あたり 0.36 g）とした。

表 9-1 評価シナリオ（○は検討した項目を示す）

樹脂種類	発電焼却	バイオガス化	堆肥化	飼料化
ウレタン	○	—	—	—
Mater-Bi	○	○	○	○

9.1.2 システム境界

システム境界の概要を以下に示す。流通・使用段階は各シナリオで共通のため、原料調達・生産と廃棄・リサイクルを評価対象範囲とした。副産物の評価にあたっては、負荷回避法 [62]を用いた。なお、Mater-Bi の生産国（イタリア）からの輸送については、十分なデータが得られなかったため評価範囲外とした。

発電焼却（図 9-1）では、廃培地は培地と廃根に分離され、それぞれ産業廃棄物として処理されると想定した。廃培地の回収・分離・脱水作業は手作業で行われると想定した。

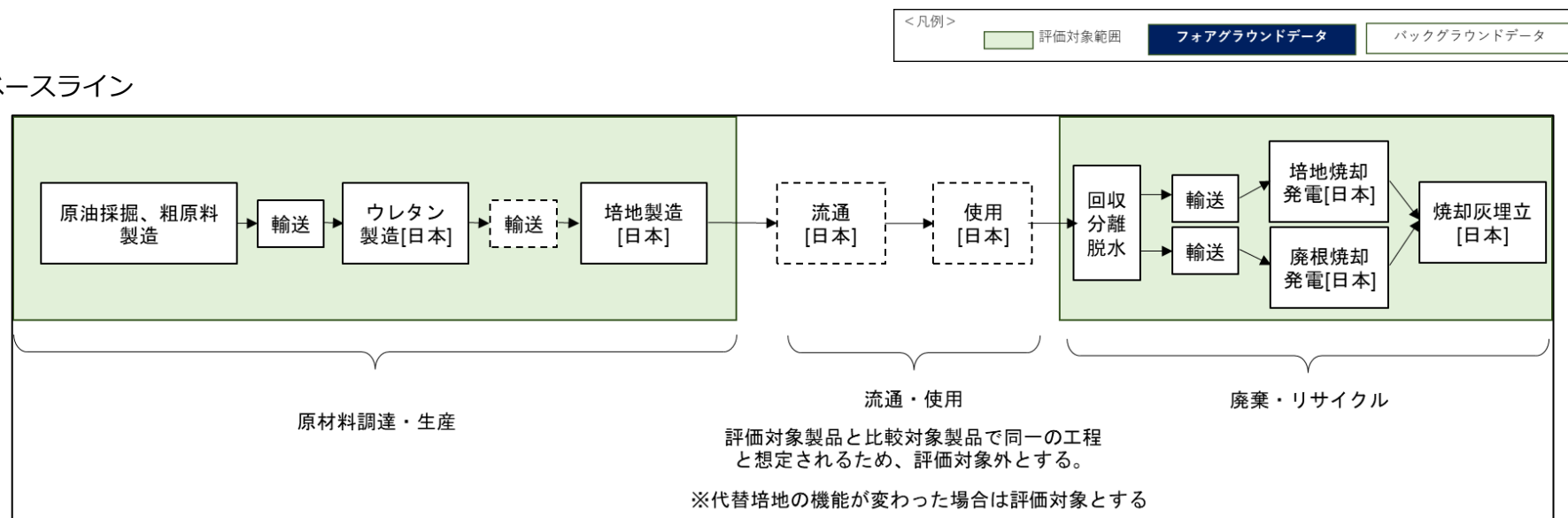
培地及び廃根ともに発電設備を有する産業廃棄物焼却施設で焼却発電され、焼却灰は埋め立てられるとした。

バイオガス化（図 9-2）では、廃培地の分離は行わず、そのままバイオガス化施設でバイオガス化されると想定した。製造されるバイオガスは都市ガスを代替すると想定し、バイオガス残渣は肥料として化学肥料を代替するとした。

堆肥化（図 9-3）では、廃培地の分離は行わず、そのまま堆肥化施設で堆肥化されると想定した。製造される堆肥は化学肥料を代替するものとした。

飼料化（図 9-4）では、廃培地の分離は行わず、そのままウニ養殖施設でウニの餌として摂食されると想定した。ウニが廃培地中の廃根を摂食した後に残存する培地は回収・生分解されると想定した。摂食された廃根は廃キャベツ及び昆布を代替するものとした。

ベースライン



評価対象製品

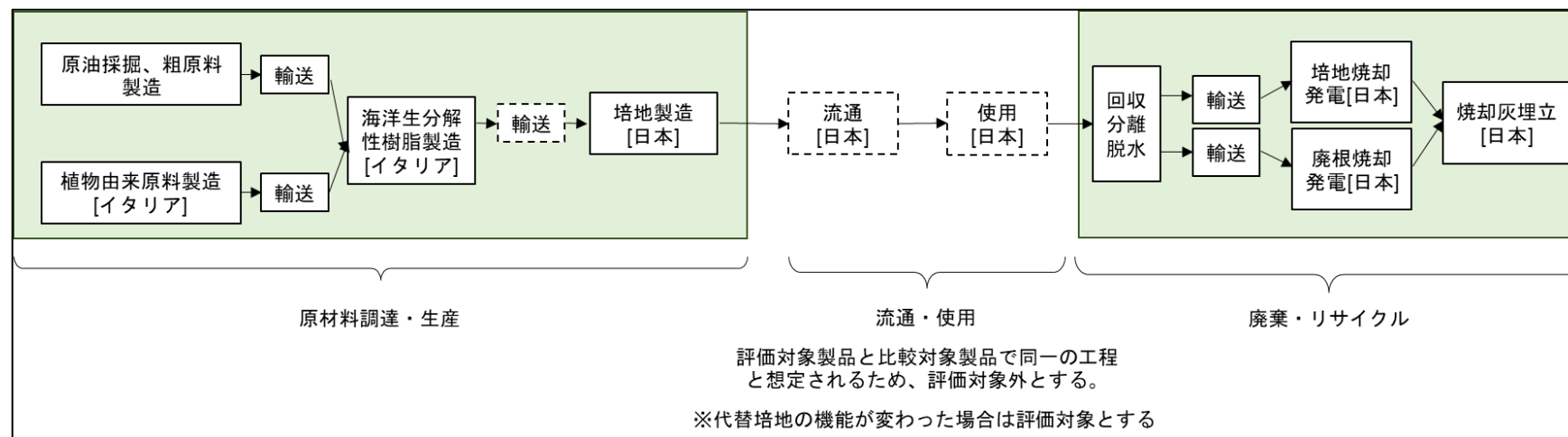


図 9-1 発電焼却のシステム境界

評価対象製品

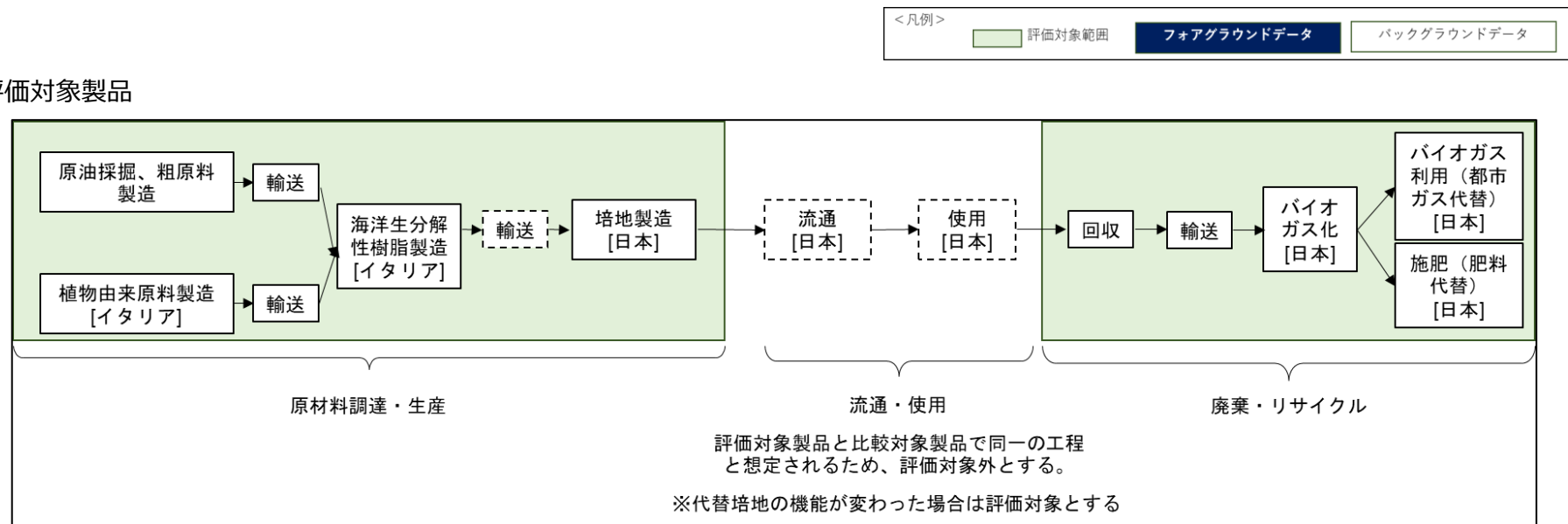


図 9-2 バイオガス化のシステム境界

評価対象製品

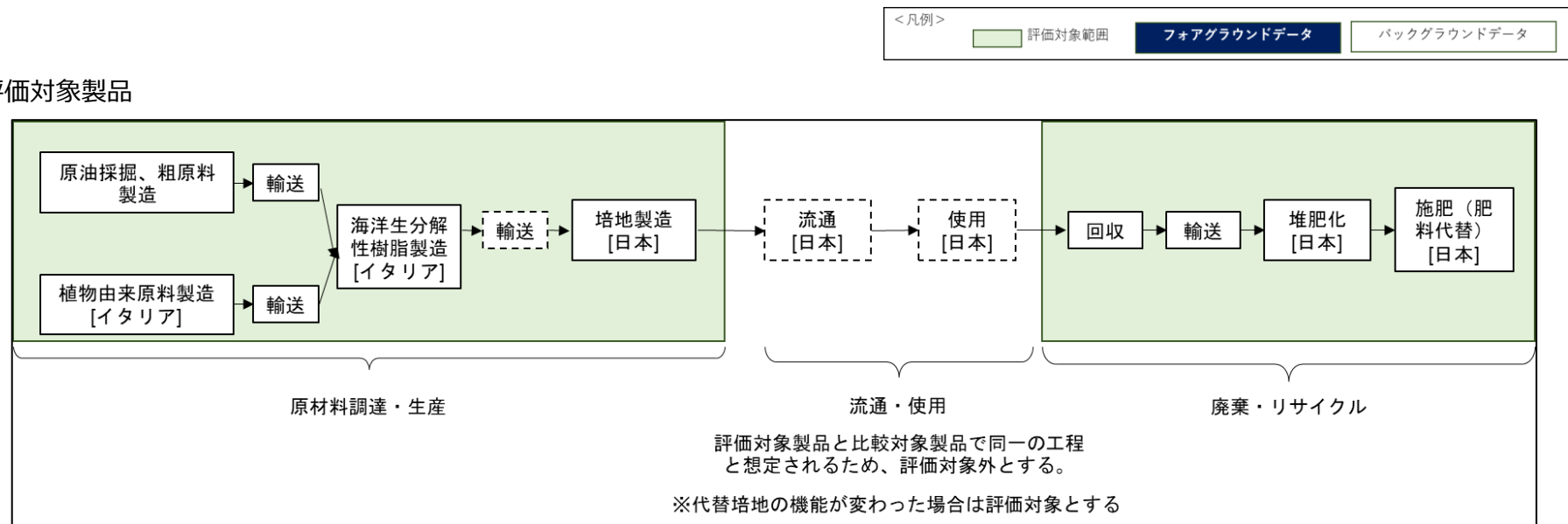


図 9-3 堆肥化のシステム境界

評価対象製品

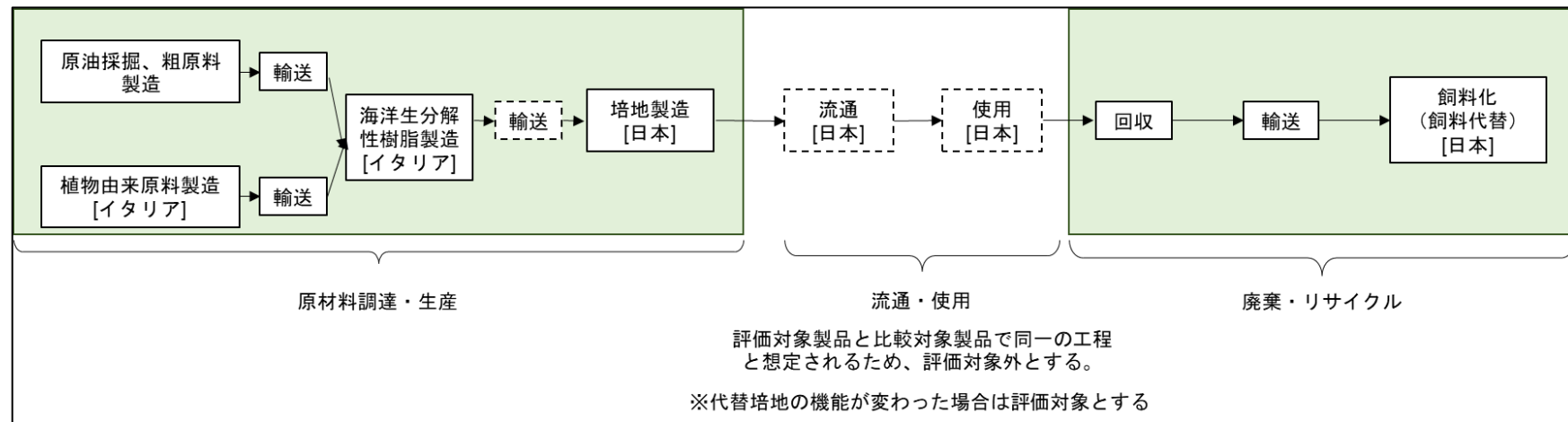


図 9-4 飼料化のシステム境界

9.2 インベントリ分析

9.2.1 樹脂の特性

代表的な Mater-Bi グレードとして Mater-Bi (EF04P) を想定し、文献[63]より元素組成を炭素:57.91%、水素:6.76%とした。その他の成分については酸素とした。

9.2.2 インベントリデータ

a) 原材料調達・製造段階

使用前後の培地・廃根重量は表 9-2 の通り設定した。

表 9-2 使用前後の培地・廃根重量

	量	単位	出典
ウレタン培地重量 (入力、dry)	50,000	kg/年	想定値
ウレタン培地重量 (出力、wet)	954,545	kg/年	乾燥培地重量の 19 倍 (実測値)
Mater-Bi 培地重量 (入力、dry)	90,000	kg/年	想定値
Mater-Bi 培地重量 (出力、wet)	1,718,182	kg/年	乾燥培地重量の 19 倍 (ウレタン培地と同等と想定)
廃根重量 (出力、dry)	1,545,455	kg/年	乾燥ウレタン培地重量の 31 倍 (実測値)
廃根重量 (出力、wet)	123,636	kg/年	専門家判断により乾燥重量比 8%と想定

b) 廃棄・リサイクル段階

植物工場から各処理を行う施設への輸送に伴う燃料使用量は、輸送トンキロあたりの燃料使用量を用いて算定した。燃料使用原単位は 0.124 [L/t-km][64]とし（使用燃料：軽油、積載量：2,000～3,999kg、積載率不明、営業用）、培地・廃根（wet 重量）と輸送距離を乗じて軽油使用量を算定した。工場間の距離（栽培工場～培地焼却所、廃根焼却所、バイオガス化施設、堆肥化施設、ウニ養殖施設）は 10 km と想定した。その他の処理・リサイクル方法ごとに異なるインベントリは以下の通りとした。

1) 発電焼却（ベースライン）

収集した情報を表 9-3 に示す。

表 9-3 収集したデータ（発電焼却）

プロセス	インベントリ	量	単位	出典
培地焼却	電力	0.0126	kWh/kg-培地(wet)	[65]
	都市ガス	0.0158	MJ/kg-培地(wet)	[65]
	A重油	0.00273	MJ/kg-培地(wet)	[65]
	焼却灰	0.1	kg/kg-培地(wet)	[66]
廃根焼却	電力	0.196	kWh/kg-培地(wet)	[67]
	都市ガス	0.158	MJ/kg-培地(wet)	[65]
	A重油	0.00273	MJ/kg-培地(wet)	[65]
	焼却灰	0.1	kg/kg-培地(wet)	[66]
副産物：発電	発電効率	12.81	%	[65]
	ポリウレタンの低位発熱量	23.76	MJ/kg-廃根(dry)	[68]
	ポリウレタンの発電量	0.845	kWh/kg-廃根(dry)	[65], [68]
	Mater-Bi の低位発熱量	21.52	MJ/kg-廃根(dry)	*
	Mater-Bi の発電量		kWh/kg-廃根(dry)	[65], *
	廃根の低位発熱量	1.829	MJ/kg-廃根(dry)	[69]
	廃根の発電量	0.0651	kWh/kg-廃根(dry)	[65], [69]

*1：元素組成をもとに Dulong の式[70]から計算した。

2) バイオガス化

収集した情報を表 9-4 に示す。副産物の肥料成分は、文献[71]の平均値（キャベツ、小松菜、白菜、玉ねぎ、人参、ジャガイモ、長ネギ、大根、かぼちゃくず、メロン、スイートコーンくず）とした。Mater-Bi をバイオガス化する際のメタン発生量は Mater-Bi 中の炭素量から推計した（*2）。なお、1 mol=22.4 L とした。

表 9-4 収集したデータ（バイオガス化）

プロセス	インベントリ	量	単位	出典
バイオガス化	電力	0.100583	kWh/kg-培地(wet), kg-廃根(wet)	[72]
	排水	1.055	m ³ /kg-培地(wet), kg-廃根(wet)	[69]
副産物：肥料	液肥（N 成分）	0.0117	kg-N/kg-廃根(dry)	[71], [73]
	液肥（P 成分）	0.00487	kg-P/kg-廃根(dry)	[71], [73]
	液肥（K 成分）	0.0235	kg-K/kg-廃根(dry)	[71], [73]
副産物：バイオガス	バイオガス	0.7752	Nm ³ -CH ₄ /kg-廃根(wet)	[67], [69]
バイオガス	（都市ガス代替）	0.72	m ³ -CH ₄ /kg-Mater-Bi(dry)	*2
		35.9	MJ/m ³ -CH ₄	[69]

3) 堆肥化

収集した情報を表 9-5 に示す。Mater-Bi を堆肥化する際の二酸化炭素発生量は Mater-Bi 中の炭素量から推計した (*3)。

表 9-5 収集したデータ (堆肥化)

プロセス	インベントリ	量	単位	出典
堆肥化	電力	0.05	kWh/kg- 培地 (wet), kg- 廃根 (wet)	[69]
	生ごみ由来の CH ₄	0.96	kg-CH ₄ /t-廃根(wet)	[74]
	生ごみ由来の N ₂ O	0.27	kg-N ₂ O/t-廃根(wet)	[74]
培地生分解	Mater-Bi 生分解	2.12	kg-CO ₂ /kg-培地(dry)	*3
副産物：	液肥 (窒素成分)	0.0217	kg-N/kg-廃根(dry)	[69], [71]
肥料	液肥 (リン成分)	0.00900	kg-P/kg-廃根(dry)	[69], [71]
	液肥 (カリウム成分)	0.0435	kg-K/kg-廃根(dry)	[69], [71]

なお、地球温暖化係数には、IPCC 第4次報告書に記載されている値(100年平均、CH₄=25、N₂O=298) [75]を採用した。

4) 飼料化

収集した情報を表 9-6 に示す。ウニ養殖の飼料として、昆布を同一重量で代替する場合、窒素成分量が同じになるように代替した場合、廃キャベツを代替した場合の3ケースを評価した。また、Mater-Bi が生分解される際の二酸化炭素発生量は樹脂中の炭素量から推計した (*4)。

表 9-6 収集したデータ (堆肥化)

プロセス	インベントリ	量	単位	出典
飼料化	昆布代替 (廃根、重量基準)	-0.85	kg-昆布/ kg-廃根(dry)	[76]
	昆布代替 (廃根、N 成分基準)	-0.76	kg-昆布/ kg-廃根(wet)	[71], [76]
	廃キャベツ代替	0	kg-廃キャベツ/ kg-廃根(wet)	
培地生分解	Mater-Bi 生分解	2.17	kg-CO ₂ /kg-培地(dry)	*4

9.3 環境影響評価

9.3.1 累積製造原単位

環境影響評価を行うために各プロセスの GHG 排出量原単位を収集した（表 9-7）。なお、焼却に伴う GHG 排出量は、元素組成をもとに算定した（ポリウレタン： $C_9H_6O_2N_2$ （*5）、Mater-Bi（*6））。

表 9-7 累積製造原単位

プロセス名	GHG 排出 量 [kg- CO ₂ eq]	単位	出典
ポリウレタン製造（ウレタンフォーム）	6.47	/kg-培地(dry)	[77]
ポリウレタン焼却	2.28	/kg-培地(dry)	*5
Mater-Bi 製造（植物栽培による炭素吸収を除く）	2.00	/kg-培地(dry)	[78]
Mater-Bi 製造による炭素吸収	1.07	/kg-培地(dry)	[77]
Mater-Bi の培地成型（射出成型）	1.76	/kg-培地(dry)	[79]
Mater-Bi 焼却	2.12	kg-培地(dry)	*6
軽油の燃焼	2.58	/L	[80]
	0.0684	/MJ	[80]
電力	0.452	/kWh	[81]
都市ガス（中圧供給）	2.19	/m ³	[82]
	0.0487	/MJ	[82]
A 重油の燃焼	2.71	/L	[80]
	0.0693	/MJ	[80]
焼却灰埋め立て	0.137	/kg-焼却灰	[83]
排水処理	0.001351	/m ³	[69]
	8		
肥料（窒素）	1.641	/kg-N	[73]
肥料（リン）	1.44	/kg-P	[73]
肥料（カリウム）	0.6	/kg-K	[84]
昆布（養殖）	5.1906	/kg-昆布	[85]
廃キャベツ	0	/kg-廃キャベツ	廃棄物のため

9.3.2 LCIA 結果

LCIA 結果を図 9-8 及び表 9-8 に示す。総 GHG 排出量は小さい順に、飼料化（昆布重量代替）、飼料化（昆布窒素成分代替）、バイオガス化、発電焼却、飼料化（廃キャベツ代替）、堆肥化、となった。飼料化（昆布重量代替）、飼料化（昆布窒素成分代替）、バイオガス化、発電焼却については、ベースライン（ウレタン培地の発電焼却）と比べ、総 GHG 排出量が下回った。エネルギー起源 GHG 排出量については、すべてのシナリオでベースラインを下回った。

バイオガス化はバイオガスによる新規都市ガス代替効果、飼料化は廃根の養殖昆布代替効果が大きい。しかし、堆肥化は生ごみの堆肥化に伴う CH₄ 及び N₂O が発生するため、他の処理方法よりも非エネルギー起源 GHG 排出量が多くなるため、総 GHG 排出量がベースラインよりも増加する結果となった。また、飼料化（廃キャベツ代替）については、廃棄物である廃キャベツの代替となるため GHG 排出量削減効果が小さく、ベースラインよりも総 GHG 排出量が増加する結果となった。

プロセス別の GHG 排出は、樹脂（培地）製造が最も大きく、次いで廃棄（培地焼却・生分解等）という結果となった。

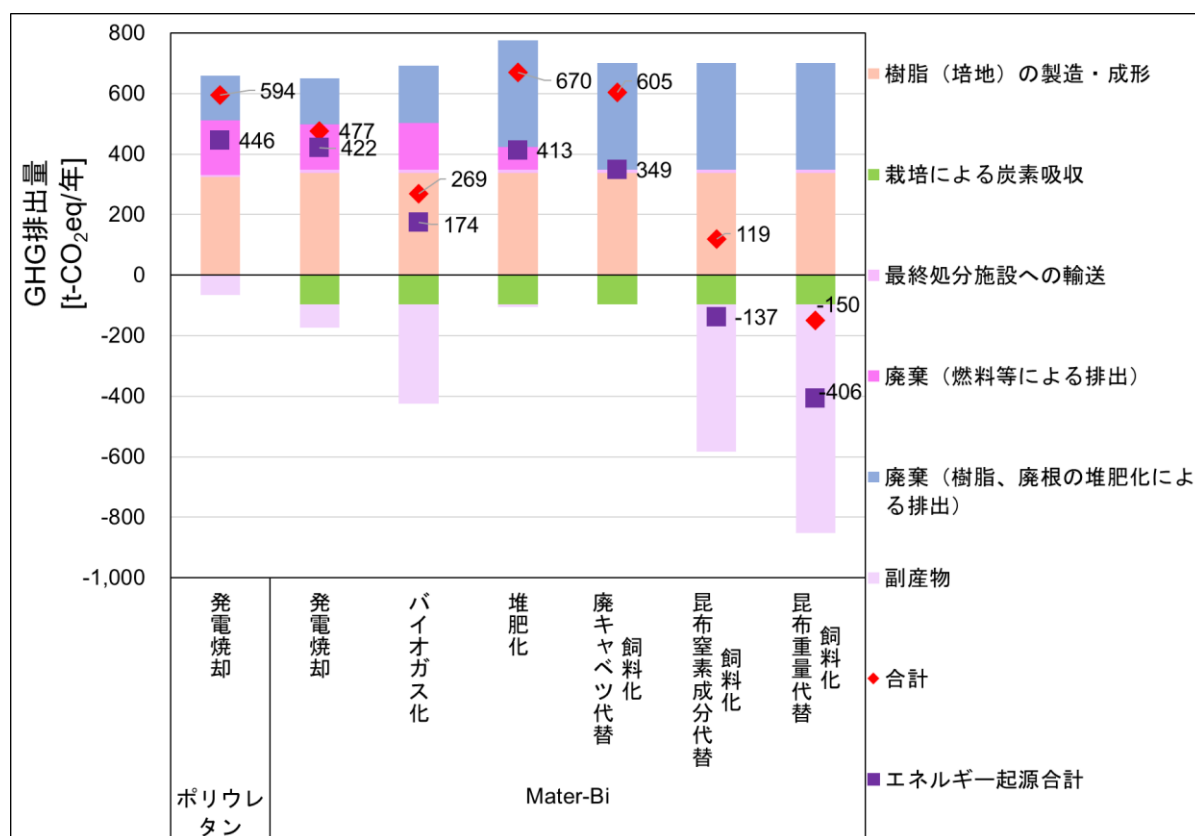


図 9-8 LCIA 結果

表 9-8 LCIA 結果（単位：kg-CO₂eq/年）

プロセス		ウレタン			Mater-Bi			
		発電焼却	発電焼却	バイオガス化	堆肥化	飼料化 廃キャベツ 代替	飼料化 昆布窒素成 分代替	飼料化 昆布重量代替
樹脂（培地）の製造・成形	工ネ起	323,500	338,400	338,400	338,400	338,400	338,400	338,400
栽培による炭素吸収	非工ネ起	0	-96,300	-96,300	-96,300	-96,300	-96,300	-96,300
最終処分施設への輸送	工ネ起	7,998	10,441	10,441	10,441	10,441	10,441	10,441
廃棄（燃料等による排出）	工ネ起	178,997	149,827	153,031	73,758	0	0	0
廃棄（樹脂、廃根の堆肥化による排出）	非工ネ起	148,250	150,880	191,103	352,541	352,541	352,541	352,541
副産物	工ネ起	-64,570	-76,608	-327,602	-9,233	0	-486,157	-754,996
総 GHG 排出量		594,175	476,641	269,073	669,607	605,082	118,925	-149,914
エネルギー起源 GHG 排出量		445,925	422,061	174,270	413,366	348,841	-137,316	-406,155

9.4 解釈・結論

上記の結果より、培地素材をウレタンから Mater-Bi に代替することで、GHG 排出量を削減できる可能性があることが分かった。この削減に大きく寄与するのは、樹脂 (Mater-Bi) ・培地製造時の GHG 排出削減・炭素吸収及び副産物による GHG 排出削減であった。処理方法別に GHG 排出量を比べると、小さい順に、飼料化 (昆布重量代替)、飼料化 (昆布窒素成分代替)、バイオガス化、発電焼却、飼料化 (廃キャベツ代替)、堆肥化、という結果となった。なお、GHG 排出削減が大きいと評価された飼料化については、代替できる昆布量によっては GHG 排出量削減効果があまり得られない可能性があるほか、バイオガス化については、都市ガスを代替できるかどうかで削減効果が大きく異なる点に留意が必要である。

9.5 課題と不確実性

9.5.1 培地重量の設定

今後量産する Mater-Bi 製培地の重量 (密度) に基づき、LCA 算定結果を更新する必要がある。

9.5.2 培地加工時のインベントリの設定

今後、量産プラントにおける Mater-Bi 製培地製造時のインベントリデータが得られるようになった場合は、実際のデータに基づき LCA 算定結果を更新する必要がある。

9.5.3 バイオガス化時の生分解性プラスチックの生分解速度の設定

バイオガス化プロセスにおける生分解性プラスチックの生分解速度は廃根よりも遅いため、バイオガス化残渣に分解途中の生分解性プラスチックが消化液中に残存する可能性がある。今回の計算において、残存した生分解性プラスチック残渣の処理に伴う GHG 排出は考慮せず、消化液はそのまま化学肥料を代替すると取り扱ったが、肥料として利用する場合は、十分に生分解させるための措置 (バイオガス残渣の堆肥化等) が必要となる点に留意する必要がある。それ以外の消化液の用途としては、もみ殻や米ぬか、牛糞堆肥と混合・発酵させることで堆肥化する事例[86]や、消化液の固液分離物を温風で加熱・乾燥させて再生敷料にしている事例[87]がある。

9.5.4 バイオガス化により製造したガスの利用方法の設定

本 LCA では、得られたバイオガス由来のメタンと同等の熱量の都市ガスを代替すると想定したが[88], [89]、メタンの分離・精製効率は考慮していないため、回収できるメタンの量を過剰に計算している可能性がある。また、都市ガス代替以外のメタンの利用方法として、今回は計算を見送ったバイオガス発電[90]や、今後の利用方法としてメタネーションによ

る水素供給[91]等が挙げられる。

9.5.5 堆肥化の代替効果について

今回の算定では、堆肥中の肥効成分と同等量の化学肥料が代替されとしたが、化学肥料と堆肥での肥効の違いについて、今後精査する必要がある。

9.5.6 飼料化の代替効果について

飼料化は代替できる昆布の重量によって GHG 排出削減効果が大きく変化することから、今後、実際に代替可能な重量を精査する必要がある。

10 水耕栽培で使用されている培地の調査

代替培地開発のための市場調査としてウレタン培地使用状況およびその処分方法について、植物工場、水耕栽培事業者に調査を実施した。調査は電話でのヒアリング、植物工場訪問、オンライン面談で行った。

10.1 ヒアリング調査

植物工場の運営及び水耕栽培を行っている企業に「自社で使用している水耕栽培の使用済みの培地をどのような方法で処分しているか」という内容で 33 社に電話調査を行い、17 社より回答を得た。下記はヒアリング調査の結果となっている。

- 産廃業者に回収を依頼し、その後焼却している。根が水分を含み重たくなっているため回収前に可能な限り脱水機にかけて重量を減らす対策をとっている。産廃の排出量は 1 袋 8kg から 10kg のものを 1 日あたり 20 袋出している。
- ウレタンと根の部分を切り離して、業者に委託し廃棄している。
- 収穫後、ウレタンが絡んでいる箇所を切り離し脱水機にかけた後、業者に処分を依頼する。
- 水耕栽培用の設備を販売しているため、実際に植物工場での処分方法は断定できないが、恐らく廃棄物として捨てられる。
- 産廃で処理をしている。業者に引き渡す前に手で絞って乾かしており、乾燥機などは使用していない。
- ウレタンを廃棄する際には手で絞って産業廃棄物として処分している。乾燥機などにはかけておらずそのまま処分する。循環式設備のため排水はさほどでない。

10.1.1 植物工場への訪問調査

令和 3 年 10 月から令和 4 年 1 月にかけて 10 社の植物工場に訪問調査を行った。そのうち掲載許可が得られた 8 社における状況を以下に記す。

10.1.2 F 社

水耕栽培に関する設備の開発、販売や水耕栽培の野菜を販売している企業で、これまで水耕栽培の機械を 1,000 件ほど一般農家に納入している。主な栽培品種はみつばなどのハーブ類、リーフレタスなどのレタス類で、これらの野菜は 30 日程度で出荷する。栽培に使用する排液は 2、3 ヶ月で入れ替えるため、排液中にウレタン培地の微小片が流出することは極めて少ない。ウレタン培地は 1 枚 300 ブロック付きで 150 円から 200 円のものを使用

している。

培地付きの野菜で出荷すると鮮度を保てるうえに廃棄代が削減できるため、F 社では培地を野菜に付けたまま出荷し、消費者に廃棄を委ねている。調査の結果、培地を切り離して出荷する農家では廃培地を敷地に埋めているケースもあることがわかった。

露地栽培は土を耕す作業が重労働で、品質の良い野菜を作るには結構な年数や技術が必要で、販売前に土で汚れた野菜を洗浄する必要があるため手間もかかる。一方で植物工場は土を耕す作業が必要なく、クリーンなため洗浄にはほとんど時間がかからない。また、数値で養液を管理、水を可視、計画生産や安定供給ができることもメリットとして挙げられる。

日本では使用が減りつつあるロックウールはトマトやいちごに使用されることが多い。環境面では良くないが保水性に優れているため栽培には適している。最近は環境負荷が少ないヤシガラ培地に変わってきている。

生分解性代替培地を使用する際には分解してしまう培地の物質が野菜の成長に影響を与えないか、また、養液に溜まっても問題がないか懸念している。代替培地を使用すると根に活力がでるなど付加価値が付けば使用するメリットがあるのではないかと意見を頂いた。

10.1.3 G 社

農家へ水耕栽培の設備を販売している企業で、自社工場ではサンチュ、空心菜の栽培を行っている。また農業における国際認証であるグローバルギャップ（Good Agricultural Practice）を取得している。1 枚 300 ブロック付きで 83 円のウレタンを使用している。

廃棄の際は業者が回収する前にウレタンを天日干しで乾燥し、重量を軽減している。そのため残った野菜の株の処理や発芽不良で株を取り除いたものを処理する際に手作業でウレタン廃培地と野菜を分けるのが面倒に感じている。また収穫の際は 10 枚ずつ手で切り離し梱包をしている。

ウレタン培地は発泡密度による目の粗さで根の伸び方が変わる。種を入れる隙間を指定して製造を依頼しているため、類似の代替培地が望ましい。また水耕栽培用定植パネルに合う培地のサイズ以外の使用は厳しい。夏季は作物の生育が早く労働時間が伸びるとごみの処理に手が回らなくなるため、生分解性の培地を使用することによって処分の手間がかからなくなるのはメリットとのこと。

ウレタン廃培地量が多い場合は焼却炉を導入しているところもある。代替培地の購入費用には処分代が上乗せされた値段として提示すれば企業は買うかもしれないが、個人農家などは見た目の購入金額で判断する可能性が高い。農家でウレタン培地が農地に埋められているのは、安価な野菜を販売しているため、経済的な理由でウレタンの処分費用を削減している

のではないかと意見を頂いた。

10.1.4 H 社

同社が運営する都市型植物工場へ訪問した。主に葉野菜の栽培の展示・実証施設で、リーフレタスが 1 日 1,000 株取れる生産規模となっている。

栽培量が多い植物工場（1 万株/日）では廃培地は産業廃棄物として処分されることが多いが、少ない所では一般可燃ごみとして処分されているとのこと。自社工場では廃棄量が多くないため一般廃棄物可燃ごみで処分している。

大手企業が運営する規模の大きい工場では環境について言及していることがある一方、一般農家では環境については考慮されていないことが多いため、安価なプラスチックが使用されている。自社のウレタン培地は 40 日程度で廃棄するため、廃培地がボロボロになることはほとんどない。特にウレタンは紫外線に当たることで脆くなるため LED を使用している植物工場では劣化しない。また循環養液は一定期間で希釈して排水処分している。

大規模植物工場では移植や定植工程の自動化が行われているので、ロボットでも掴めるようなウレタン代替培地が望ましい。

植物工場におけるウレタン培地の使用は日本が主流だ。例えば欧米の植物工場では、ウレタンの代わりにオアシス培地やバーミキュライトなどが使用されているところが多い。

10.1.5 I 社

水耕栽培でベビーリーフ・レタスなどの葉菜類の生産、販売事業を行っている。ウレタン培地は 1 枚 300 ブロック付き 82 円の物を使用中。

近年、産廃費用が 3 倍ほど値上がりしている。以前は廃培地を乾燥させ減量してから産廃業者に出していた。その際は風で廃培地が飛ばされるのを防止するために廃培地をネットに入れ、広げ乾燥時間を短縮していたため時間と人件費がかかっていた。コストは月 6 万円程度かかる。現在は効率化を目指してコンテナに廃棄物を保管し、アームロール車を使用した回収方法で 2 ヶ月に 1 度のペースで回収している。1 回にかかるコストは 20 万弱だがこの方法で手間はかからなくなった。

生分解性代替培地はコストと、作物の根の張り方が重要になる。限られている面積でどれだけ効率よく発芽できるのか気になる。また法人に作物を出荷しているため欠品は許されず、自社の工場は大型ではないため発芽率 5%でも影響が大きい。季節によって生育が変わる可能性もあり、代替培地を導入するのであれば 1 年を通して試作する必要がある。これまでに培地や養液の栄養剤の話など聞いたことがあるが、導入には至らなかった。ウレタン培地を

定植用の発泡スチロールに入れる機械は M 式水耕栽培を使用している。自社では機械に対応している代替培地でないと使用できないかもしれない。

10.1.6 J 社 α 工場

植物工場プラントのコンサルタント・設計監理、野菜の生産・販売、植物工場における栽培支援を行っている企業で、自社工場では 1 日に約 2,100 株を生産している。担当者は栽培の技術開発、植物工場のプラントの設計と施工を担当し、工場の運用とデータ収集、検証を行っている。

残さ処理は市町村のルールに則り、産廃業者経由で廃棄し、使用後の植物残さは生ゴミ処理機に投入する。生ゴミ処理機は 1 日に約 20 kg 分解できるものを使用しており、処理機に繋がっている配管より直接排水として処理する。

ウレタン培地は 1 枚 190 ブロック付き 150 円の物を 1 日に約 20 枚使用し、収穫後は廃棄している。培地の価格は 1 個当たり 1 円程度のものを使用中。当日は工場見学ができなかったが、同社実証センターに後日訪問し、工場内を見学した。

10.1.7 K 社

植物工場システムの開発設計・販売及び栽培技術面でのサポートを行う会社でミニリーフ、ハーブ類、葉野菜などの野菜、エディブルフラワーなどの生産をしている。農業展示会で年々植物工場への関心の高まりを感じ R3 年度は展示会へ出展後、2 ヶ月ほど見学者が絶えなかった。

自社の植物工場の規模は小さいため、廃棄物は根を付けたまま事業ゴミとして廃棄している。1 日にでるゴミは 2, 3 袋程度となっている。

代替培地を使用する際は浸水性と根の張り方に懸念している。これまでに廃ウレタンの再利用について検討したが、用途が見つからず検討を断念した。生ゴミ処理機で処理出来たり土に入れてなくなったりするなど処分方法が簡単なのは良いとのこと。

10.2 まとめ

今回はヒアリング調査、植物工場への訪問のみで農家への実態調査はできていないが、一部の農地では廃培地が埋められていることが分かった。これらや植物工場で廃培地の廃棄の際に流出する一部が、マイクロプラスチックの一因となっていることが懸念される。本事業で検討している代替培地は、これらの問題を解決するためには海洋生分解性であるとともに土壌でも分解する必要があるため、これらの両方の性能を持っている澱粉ポリエステル樹

脂 Mater-Bi を使用することで、これらの問題を解決することができる。

本調査ではほとんどの植物工場、水耕栽培においてウレタンの廃培地を根と切り離し産業廃棄物として処分していることが判明した。ウレタン廃培地を手で絞る、脱水機にかける、自然乾燥させるなどの方法で産業廃棄物重量を削減しているため、処分に手間や人件費がかかっている。また、本調査によって得た生分解性代替培地の発芽率や根の張り方、浸水性についてなどの意見を今後の代替培地開発に反映させていく。他にもウレタンを発泡スチロールに入れる際に機械が使用されていることも考慮しながら試作品の依頼も行っている。

11 本事業のまとめ

11.1 生分解性プラスチックを用いたウレタン代替培地の開発

海洋生分解性を有する素材を加工し、水耕栽培に適した物理的特性をもつ代替培地を開発および開発した代替培地が水耕栽培により適した物性となるよう、素材やその加工方法を改良することを目的とした。

令和 2 年度は海洋生分解性プラスチックの国内外での使用状況や生分解性プラスチックの認証制度、培地の代替素材に関する調査をおこなった。同時にウレタン培地のコスト調査とコスト評価スケジュールの作成もおこなった。

令和 3 年度は代替培地開発のための市場調査としてウレタン培地使用状況およびその処分方法について、植物工場、水耕栽培事業者に実態調査を実施した。調査は電話でのヒアリング、植物工場訪問、オンライン面談でおこなった。調査の結果、ほとんどの植物工場、水耕栽培においてウレタンの廃培地を根と切り離し産業廃棄物として処分していることが判明した。ウレタン廃培地を手で絞る、脱水機にかける、自然乾燥させるなどの方法で産業廃棄物重量を削減しているため、処分に手間や人件費がかかっている。これらの作業中や廃培地の廃棄方法によってはウレタンの微細片が排水へ流出しマイクロプラスチックとなっていることも懸念されることを把握した。また、生分解性を有する複数の代替培地候補を入手し、令和 2 年度に開発した代替培地の量産化に向け基礎技術の改良にも取り組んだ。

令和 4 年度は試作代替培地による播種、育苗、定植などの生育等が確認できたため、代替培地の量産化へ向け、量産可能性の高い発泡体、モノフィラメント、マルチフィラメント、紡糸、原糸、フィルム等の製造企業 10 社と面談を実施し、本事業の目的、素材詳細、開発目標などを説明のうえで試作品の依頼及び改良をおこなった。最終的には 2 社の試作品を用いて生育試験を実施した。

現時点では量産ベースの用途は立っていないが、準工業的な面で生産の用途がついた。今後は社会実装に向けて引き続き試作品の改良、生育試験を繰り返しながらスケールアップを試み、日本国内のみならず、海外への展開も検討している。

11.2 生分解性プラスチック候補素材の海洋生分解性評価ならびに代替培地の機能性評価

海洋生分解性評価については、代替培地の海洋生分解性について証明することを目的とした。

令和 3 年度は、令和 2 年度において入手した海洋生分解性を有する素材を使用し、代替

培地の海洋生分解性の実験室試験を開始し、試験方法を確立した。現時点において、ある程度の海洋生分解性を確認している。

令和 4 年度は、まず代替培地の開発において、Mater-Bi を利用した大量生産方法の確立に向けて、綿飴機を利用した培地製造方法を策定し、目が細かく密度が均一な 2 つの繊維を作成することに成功した。さらに、量産のための協業候補であるパネフリ工業により、押出成形の技術を利用して製造した培地の提供も受けた。いずれの培地も生育に問題はなく、収穫時の重量は出荷時の目安に到達していた。

次に海洋生分解性試験について、今年度はセルロースとの比較試験を行った。Mater-Bi の分解率は同一時間あたりではセルロースの約 6 割であったが、前述のノバモント社のデータ（5 図 5-1）によると、さらに試験を継続した場合、より分解が進むと推察される。また、オキシトップを使用した好気分解試験においては、セルロースと同様の酸素消費を確認した。

3 つ目に代替培地の吸水性と保水性について、他の素材との比較機能性評価を行い、代替培地に問題がないことを確認した。

最後に、ウレタンおよび Mater-Bi 培地の紫外線による分解の調査を行った。Mater-Bi 培地には変化がなかったが、ウレタン培地は紫外線で変色し、水中で微小片が放出されることが確認された。

結論として、Mater-Bi 培地は機能性においてはウレタン培地と同機能を持ち、代替培地として十分実現性があることが分かった。さらに、Mater-Bi 培地は紫外線による形質変化がないため、河川流出などによるマイクロプラスチック拡散のリスクも少ない。海洋生分解性については、さらなる実験と研究が必要である。

11.3 ウレタン代替培地を含む植物残渣の有効利用

現行ウレタン培地では行われていない廃培地を含む植物残渣の有効利用方法を確立することで、代替培地導入時の水耕栽培事業者のトータルコスト削減ならびに循環型社会の構築への寄与を実現し、社会実装時の速やかな普及・代替を図ることを目的とした。

令和 3 年度はウニを飼育し試験的に植物残渣を与え、ウニの飼料として利用できる可能性はあったが、ウレタン代替培地を好んで食べることはなかったため、ほかの利用方法についても検討していくことが課題となった。

令和 4 年度はウニを飼育し、物流、廃棄コストを含めたトータルパッケージとして飼料利用の実現性について評価した。二酸化炭素排出の削減の観点からはウニ飼料化は堆肥化、バイオガス化に比べて優れていた。ウニの養殖コスト試算の結果、条件が整えば植物残渣

の処理費用がなくなり、ウニの販売により収益が見込めたが、1) ウニの食味、2) ウニによる Mater-Bi の消化に関して課題が残った。レタス残渣を食べたウニには苦みがあり、そのままでは販売は見込めない。ある程度ウニが生育した後に、キャベツなど別の飼料に切り替えることで味の改善が可能かは検討の余地がある。また、ウニは Mater-Bi を完全に消化することはなく、廃棄物がなくなるわけではない。ウニ飼料化以外の方法として畜産飼料化、キノコの菌床としての利用の可能性を探ったが、Novamont 社によると Mater-Bi のデンプン分は熱可塑性材料のポリマー鎖に複合化されているもので、Mater-Bi の分解は難しいとの回答であった。しかし、ウニ飼料化すれば培地と植物残渣を分離することができ、糞として回収される廃培地のみを処分すればよく、廃棄物の大幅削減によるコスト削減になる。

なお、本調査によりウニはプラスチック類も条件によっては食べることが明らかになり、海洋に漂うプラスチックのマイクロプラスチック化に関わっていることが示唆された。

堆肥化あるいはバイオガス化を比較すると、温室効果ガスの排出、エネルギーの有効利用、大規模化においてバイオガス化がすぐれている。今回検討した飼料化、堆肥化、バイオガス化の中では、二酸化炭素排出の削減の観点からはウニ飼料化がすぐれているものの、解決すべき課題が残り、現時点でバイオガス化がもっとも現実的といえる。

廃培地利用のシナリオは調達と廃棄の運搬にかかるコストも大きく関係するため、立地特性により様々な可能性を検討すべきである。今回の実施期間ではシミュレーションするに至らなかったが、例えばバイオガス施設の近くに植物工場を建てれば廃棄の際の運搬費は削減できる。しかし一方で調達の運搬コストや物流コストがかかる可能性があるため、一概にコストを削減できるとは言えない。

11.4 ウレタン代替培地利用による生産コスト削減効果

代替培地の製造コスト並びに代替培地の導入により削減される人件費や廃棄物処理費用等を明らかにし、本事業全体でのコストが削減されるような方策を検討することを目的とした。本事業で算出した代替培地の調達価格は現行のウレタン培地よりも高くなるが、廃棄費用及びそれにかかる人件費を削減することが可能なため、合計価格を比較するとほとんど差は見られないことが明らかになった。また、代替培地の廃棄は、廃棄処分、堆肥化、バイオガス化、飼料化の4つ方法で検討し、比較した。

令和 4 年度は候補原料を量産企業候補に送付し、試作を依頼した。社会実装に向け量産メーカー候補 2 社において素材、製法の異なるウレタン代替培地を数パターン試作し、水耕栽培使用時の野菜の生育状況を確認しながら、コスト削減に向け改良をおこなった。今後は実際の大量生産時の価格について、素材メーカーや加工メーカーとの検討・評価・改善が必要となる。

11.5 ウレタン代替培地利用による温室効果ガス削減効果

ベースライン（ウレタン製培地）及び評価対象製品（Mater-Bi 製培地）に係るバックグラウンドデータ及びフォアグラウンドデータの収集を行い、プロジェクトシナリオとして、廃培地及び廃根の焼却発電・堆肥化・バイオガス化・飼料化を想定し、ライフサイクルでの温室効果ガス（GHG）削減効果を評価した。

その結果、培地素材をウレタンから Mater-Bi に代替することで、GHG 排出量を削減できる可能性があることが分かった。この削減に大きく寄与するのは、樹脂（Mater-Bi）・培地製造時の GHG 排出削減・炭素吸収及び副産物による GHG 排出削減であった。処理方法別に GHG 排出量を比べると、小さい順に、飼料化（昆布重量代替）、飼料化（昆布窒素成分代替）、バイオガス化、発電焼却、飼料化（廃キャベツ代替）、堆肥化、という結果となった。なお、GHG 排出削減が大きいと評価された飼料化については、代替できる昆布量によっては GHG 排出量削減効果があまり得られない可能性があるほか、バイオガス化については、都市ガスを代替できるかどうかで削減効果が大きく異なる点に留意が必要である。

今後、製品化を進めていく段階での対応事項と留意点については、9 章に整理したとおりである。

12 参考資料：バイオプラスチック識別表示制度

12.1 生分解性プラスチック識別認証制度

本事業で開発・量産予定のウレタン培地代替素材に関して、将来的な社会実装に向けて使用する生分解性プラスチック樹脂や製品は、認証を取得する必要があると考える。生分解性プラスチック認証は世界各国様々で詳細は以下の通りになる。

12.2 日本 / 生分解性プラ識別表示制度

運用団体：日本バイオプラスチック協会（JBPA）

生分解性プラ識別表示制度は、1998年度に骨子がまとめられ、1999年度に生分解性プラスチック研究会での運営を前提にした制度案を作成、2000年度通常総会で承認されました。以来20年以上にわたってグリーンプラマーク識別表示制度という名称で運営してきましたが、グリーンプラが植物由来のプラスチックを想起させ、一般消費者の方にとって生分解性プラスチックとして理解しづらいとの意見を踏まえ、2021年度総会で現名称（生分解性プラ識別表示制度）への変更が承認されました。



<生分解性プラの基準の概要>

- 全ての構成材料（成分）は PL に登録されていなければならない。
- 構成材料として PL の分類 A に登録された生分解性合成高分子化合物を含まなければならない。
- 生分解性合成高分子化合物（PL 分類 A）と天然有機材料（PL 分類 B-8）の総計を 50.0 重量または体積%以上含むものでなければならない。
- 1 重量%以上含まれるすべての有機材料は、当委員会が指定する生分解性試験において 60%以上の生分解度が確認されたものでなければならない。
- 1 重量%未満の非生分解性有機材料の合計量は、5 重量%未満でなければならない。

- 含まれる特定元素の量は、上限値を超えてはならない。

引用：日本バイオプラスチック協会ホームページ [92]

12.3 オーストリア / TÜV Austria

TÜV AUSTRIAが実施している生分解性プラスチック認証の種類。TÜV AUSTRIA の OK 環境製品検証マークは、生分解環境ごとにカスタマイズされた認証ラベルを提供する唯一のもの。これらのラベルは両方とも一貫してそれぞれを補完し、拡張可能。

(他の認証機関でも同様の認証種類があり、OWS の試験結果に基づいて認証を取得できる)

認証名 / 概要	認証ラベル
OK compost INDUSTRIAL OK compost INDUSTRIAL ラベルの付いたパッケージまたは製品は、工業用堆肥化プラントで生分解性があることが保証されている。すべてのコンポーネント、インク、および添加物に適用される。認証プログラムの唯一の参照点は、統一された EN 13432 : 2000 規格。EU 包装指令 (94/62/EEC) の要件に準拠している	 The image shows the TÜV Austria OK compost INDUSTRIAL label. It consists of two main parts. On the left is a green square with three white arrows pointing downwards, the text 'OK compost' in white, and a white flower-like graphic at the bottom. On the right is a white rectangle with the 'TÜV AUSTRIA' logo in black and red, and the word 'INDUSTRIAL' in red below it.

OK compost HOME 含まれる廃棄物の量が比較的少ないため、庭の堆肥の温度は、産業用の堆肥化環境よりも明らかに低く、一定ではない。したがって、庭での堆肥化はより難しく、ペースの遅いプロセスである。この課題に対して TÜV AUSTRIA は、庭の堆肥化設備であっても、特定の要件に照らして完全な生分解性を保証する。	 The logo for OK compost HOME is divided into two main sections. The left section is a green square with the word 'HOME' written vertically in white on the left side. Inside the green square, there are three white arrows pointing downwards, the text 'OK compost' in white, and a white flower-like graphic at the bottom. The right section is a white rectangle with the 'TÜV AUSTRIA' logo in black and red at the top, and the word 'HOME' in red at the bottom.
OK biodegradable SOIL 土壌中での生分解性は、使用後にその場で分解することができるため、農産物や園芸製品に大きなメリットをもたらす。製品が土壌中で完全に生分解され、環境に悪影響を及ぼさないことを保証する。	 The logo for OK biodegradable SOIL is divided into two main sections. The left section is a green square with the word 'SOIL' written vertically in white on the left side. Inside the green square, there is a white circular arrow graphic and the text 'OK bio-degradable' in white. The right section is a white rectangle with the 'TÜV AUSTRIA' logo in black and red at the top, and the word 'SOIL' in red at the bottom.
OK biodegradable WATER 認定を受けた製品は、	

自然な淡水環境での生分解を保証するため、河川、湖、またはあらゆる天然淡水での廃棄物の削減に大きく貢献する。海水での生物分解を自動的に保証するものではないことに注意。



OK biodegradable MARINE

海洋ごみの大部分が陸上にある事実を考慮すると、海洋生分解性は、消費される場所に関係なく、**あらゆる製品またはパッケージに付加価値をもたらす**。最終的に海に流出する可能性は常にある。この機能を自社の製品またはパッケージに追加することに投資する組織は、国際基準に従ってこの情報を検証する必要がある。



OK biobased LCA（ライフサイクルアセスメント）とは異なり、OK バイオベース認証の背後にある調査方法は非常に単純であり、正確な値は C14 メソッドによって正確かつ科学的に測定および計算できる。これにより、チェックと再チェックが非常に透過的になる。	
---	--

引用：Tüv Austria HP[93]

12.4 アメリカ合衆国 / BPI

BPI（Biodegradable Products Institute）認証マークは、北米における堆肥化可能な製品の ASTM 規格唯一の第三者機関。20 年以上にわたって運営されている認証プログラムにより、北米におけるコンポストブル製品およびパッケージングの第一人者として知られている。このプログラムとそれに関連する認証マークは、ASTM(Standards of American Society for Testing and Materials)の堆肥化可能性規格を満たしているかどうかを、最も信頼性が高く広く認知されている第三者機関が証明するものである。これは、堆肥化可能性の定義に関する規制言語を持つ米国のすべての州で要求される指標であり、堆肥化可能性に関するすべての主張が科学的根拠によって裏付けられているという FTC の要求を満たすための方法でもある。



引用：BPI HP[94]

12.5 ドイツ / DIN CERTCO

TUV Austria と同じく欧州内で使用される生分解性プラスチック認証。

持続可能なバイオプラスチックから作られた製品に対する認証。

※TÜV AUSTRIA (以前の Vingotte) は、European Bioplastics によって認定された認証機関であるため、EN 13432 に準拠した製品に Seedling ロゴを授与することが可能。OK compost INDUSTRIAL と Seedling ロゴの両方を授与することで、TÜV AUSTRIA の認証保持者は、ヨーロッパ市場全体で堆肥化可能な製品を認知させることができる。

産業用堆肥化でリサイクルできる材料、パッケージ、および製品は、循環型経済において重要な役割を果たす。より厳しい廃棄要件を満たす大きな可能性があるため、生分解性材料から作られた工業的に堆肥化可能な製品の需要は継続的に増加している。

お客様の生分解性製品を DIN EN 13432 および該当する場合はその他の国内および国際規格に従って認証し、国際的に認められた 2 つの認証マークを授与する。バイオプラスチック e. V. 両方のマークは、個別に、交互に、または同時に使用することができ、製品の分解性を文書化する。出発物質が DIN EN 13432 に従って登録されている場合、この物質から作られた最終製品の製造業者は、試験の労力を軽減して認証を取得できる場合がある。



引用 : DIN CERTCO[95]

13 参考資料：外注先との打合せ履歴

	日時	打合せ者	場所
1	2022/4/4	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
2	2022/4/11	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
3	2022/4/18	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
4	2022/4/21	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
5	2022/4/25	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
6	2022/4/28	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
7	2022/5/9	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
8	2022/5/12	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
9	2022/5/23	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
10	2022/5/26	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
11	2022/5/30	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
12	2022/6/2	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
13	2022/6/6	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
14	2022/6/9	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
15	2022/6/13	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
16	2022/6/23	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
17	2022/6/30	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
18	2022/7/4	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
19	2022/7/11	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
20	2022/7/14	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
21	2022/7/21	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
22	2022/7/25	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
23	2022/7/28	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
24	2022/8/1	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
25	2022/8/8	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
26	2022/8/29	プランツラボラトリー・東京大学	オンライン
27	2022/9/5	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
28	2022/9/12	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
29	2022/9/20	プランツラボラトリー・東京大学	オンライン

30	2022/9/26	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
31	2022/9/30	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
32	2022/10/3	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
33	2022/10/13	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
34	2022/10/17	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
35	2022/10/20	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
36	2022/10/24	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
37	2022/10/27	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
38	2022/10/31	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
39	2022/11/2	プランツラボラトリー・東京大学	オンライン
40	2022/11/7	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
41	2022/11/14	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
42	2022/11/17	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
43	2022/11/21	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
44	2022/11/28	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
45	2022/12/1	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
46	2022/12/5	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
47	2022/12/12	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
48	2022/12/15	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
49	2022/12/19	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
50	2022/12/22	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
51	2023/1/5	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
52	2023/1/12	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
53	2023/1/16	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
54	2023/1/19	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
55	2023/1/23	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
56	2023/1/26	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス
57	2023/1/30	プランツラボラトリー・東京大学	東京大学田無キャンパス

14 引用文献

1. 矢野経済研究所。植物工場市場に関する実施(オンライン)2022 植物工場市場に関する調査を実施(2022 年) | ニュース・トピックス | 市場調査とマーケティングの矢野経済研究所 (yano.co.jp)
2. 矢野経済研究所。2022 年版 植物工場の市場実態と将来展望 2022 年版 植物工場の市場実態と将来展望 | 市場調査とマーケティングの矢野経済研究所 (yano.co.jp)
3. 農林水産省. (2019). 農業分野から排出されるプラスチックをめぐる情勢. (オンライン). https://www.maff.go.jp/j/seisan/pura-jun/pdf/haipura_josei.pdf.
4. ー. (2020). 農林業センサス. (オンライン).
5. ー. (2019). 作物統計調査. (オンライン).
6. 矢野経済研究所。養液栽培システム市場に関する調査. 2020 年.
https://www.yano.co.jp/press-release/show/press_id/2552 .
7. Reddy, N., & Crohn, D. M. (2018). Effect of Composted Greenwaste and Rockwool on Plant Growth of Okra, Tomato, and Chili Peppers. *Compost Science & Utilization*, 26(4), 217-224.
8. 日本貿易振興機構. (2019). EU 理事会、使い捨てプラスチック製品禁止法案を採択.
<https://www.jetro.go.jp/biznews/2019/05/53834b4b467aaafb.html>.
9. 環境省. 令和 2 年度国内の廃プラスチック類の処理に関する状況調査結果について.
<https://www.env.go.jp/press/109527.html>.
10. 株式会社大東建設. 全国産業廃棄物処理費用・相場.
<https://www.dai-tou.com/marketprice/industrial-waste>.
11. Martens R, Domsch KH. 1981. Microbial degradation of polyurethane foams and isocyanate based polyureas in different media. *Water Air Soil Poll* 15:503–509.
12. Joyce Álvarez-Barragán, Lilianha Domínguez-Malfavón, Martín Vargas-Suárez, Ricardo González-Hernández, Guillermo Aguilar-Osorio, Herminia Loza-Tavera. 2016. Biodegradative Activities of Selected Environmental Fungi on a Polyester Polyurethane Varnish and Polyether Polyurethane Foams. *Applied and Environmental Microbiology* Vol. 82, No. 17.
13. 沖野義郎. ポリブチレンサクシネート (PBS) 系グリーンプラの特徴と最新情報. (オンライン) https://www.jstage.jst.go.jp/article/jriet1972/34/6/34_6_406/_pdf/
14. Novamont 社 HP Packaging <https://materbi.com/en/solutions/packaging/>
(2022 年 12 月 20 日閲覧)

15. Novamont 社 HP Organic waste collection
<https://materbi.com/en/solutions/waste-management/> (2020 年 3 月 25 日閲覧)
16. Science Direct, International Biodeterioration & Biodegradation
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0964830517300100>
17. Nature works <https://www.natureworksllc.com/>
18. TotalEnergies Corbion. ルミニーPLA® ポートフォリオ(オンライン)2022 年.
<https://www.totalenergies-corbion.com/luminy-pla-portfolio/>
19. ハイケム株式会社 生分解性プラスチック
<https://highchem.co.jp/biodegradable/>
20. PTT MCC Biochem 社 BioPBS のカタログ
https://www.m-chemical.co.jp/products/departments/mcc/sustainable/product/___icsFiles/afieldfile/2020/07/06/BrochurePBS.pdf
21. KANGHUI NEW MATERIAL http://www.ykkhsh.com/?_l=en
22. 株式会社カネカ HP カネカ生分解性ポリマーGreen Planet®の大型能力増強を決定 HP(オンライン)2022 年.
<https://www.kaneka.co.jp/topics/news/2022/nr2202071.html>
23. CJ Bio. HP (オンライン)2022 年. <https://www.cjbio.net/en/products/cjPha.do>
24. BASF HP
https://plastics-rubber.basf.com/global/en/performance_polymers/products/ecoflex.html
25. BASF「Joint news release BASF and Red Avenue New Materials Group collaborate to produce certified compostable co-polyester (PBAT) in China」
<https://www.basf.com/global/en/media/news-releases/2020/05/p-20-205.html>
26. Novamont <https://www.novamont.com/eng/>
27. Krasowska K, Heimowska A, Morawska M (2016) Environmental degradability of polycaprolactone under natural conditions. E3S Web Conf 10:00048
28. H Tsuji, K Nakahara - Journal of Applied Polymer Science, 2002 - Wiley Online Library
29. AR Bagheri, C Laforsch, A Greiner... - Global ..., 2017 - Wiley Online Library
30. 安東赫、中野明正. (2016). 植物工場における残渣利用の展望. 農業および園芸, 9110: 997-1004.

31. 越智資泰, 岡野仁, 中村幸司, 横山詔常, 橋本晃司, 阿部亨, ... & 今井俊治. (2012). ネギの湛液型水耕栽培における再利用可能な培地とその利用法の検討. 広島総研技センター研報, 88: 15 – 20
32. イノアック社 HP <https://www.inoac.co.jp/solution/maps.html>
33. 「ポン菓子機」の進化は止まらない - メシ通 | ホットペッパーグルメ (hotpepper.jp) 第552回 「ポン菓子のしくみ」: でんじろう先生のはぴエネ! : 中京テレビ (ctv.co.jp)
34. Novamont 社 HP SCIENTIFIC RESEARCH CONFIRMS THE MARINE BIODEGRADABILITY OF MATER-BI - Novamont - Press BIODEGRADABILITY IN THE MARINE ENVIRONMENT
35. Novamont 社 HP SCIENTIFIC RESEARCH CONFIRMS THE MARINE BIODEGRADABILITY OF MATER-BI - Novamont - Press DISINTEGRATION IN THE MARINE ENVIRONMENT
36. SCIENTIFIC RESEARCH CONFIRMS THE MARINE BIODEGRADABILITY OF MATER-BI - Novamont – Press
37. GSI クレオス仮訳 How to measure biodegradation in natural environments – 2019/07/02 www.open-bio.eu
38. GSI クレオス仮訳 ISO22403:2020 Plastics — Assessment of the intrinsic biodegradability of materials exposed to marine inocula under mesophilic aerobic laboratory conditions — Test methods and requirements
39. GSI クレオス仮訳 ISO22766:2019 Plastics — Determination of the degree of disintegration of plastic materials in marine habitats under real field conditions
40. GSI クレオス仮訳 ISO19679:2020 Plastics — Determination of aerobic biodegradation of non-floating plastic materials in a seawater/sediment interface — Method by analysis of evolved carbon dioxide
41. ISO/TC61 (プラスチック) 海水中における生分解度測定方法 (JBPA 発行資料「生分解性プラスチックの現状と課題」6)
42. GSI クレオス 仮訳 ISO 18830: Plastics — Determination of aerobic biodegradation of non-floating plastic materials in a seawater/sandy sediment interface — Method by measuring the oxygen demand in closed respirometer
43. 国立研究開発法人 産業技術総合研究所「バイオプラスチックに係るISOでの議論の状況」7)
44. 国立研究開発法人 産業技術総合研究所「バイオプラスチックに係るISOでの議論の

状況」

45. ISO19670:2016. Plastics - Determination of aerobic biodegradation of non-floating plastic materials in a seawater/sediment Interface - method by analysis of evolved carbon dioxide, 2016.
46. 臼井一茂, 田村怜子, 原日出夫, “野菜残渣を餌としたムラサキウニ養殖について.” 神奈川県水産技術センター研究報告, 第 巻 9, pp. 9-15, 2018.
47. R. A. Sessa, M. H. Bennett, M. J. Lewis, J. W. Mansfield, M. H. Beale, “Metabolite profiling of sesquiterpene lactones from Lactuca species: Major latex components are novel oxalate and sulfate conjugates of lactucin and its derivatives.” J.Biol.Chem., 第 巻 275, pp. 2687-2684, 2000.
48. バイオガス発電推進協議会. (オンライン)
<https://biogascouncil.jp/energy/index.php>.
49. 環境省. 国産バイオマス発電の導入見通し.
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/030_03_00.pdf.
50. 一. 全国のメタンガス化施設リスト.
<https://www.env.go.jp/recycle/waste/biomass/data/facilitylist.pdf>.
51. German Biogas Association. Why Biogas? Fachverband Biogas.
<https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/EN-Why-Biogas>.
52. 半田市. 半田市バイオマス産業都市(2016-2025).
<https://www.city.handa.lg.jp/kankyo/baiomasu.html>.
53. 一. バイオマス産業都市構想 進捗状況.
<https://www.city.handa.lg.jp/kankyo/bstk-sinchoku.html>.
54. ビオクラシックス半田. ビオクラシックス半田の取り組み.
<https://biokurasix.jp/biokurasix/>.
55. Fachverband BIOGAS German Biogas Association. Biogas market data in Germany 2020/2021 [https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/EN-German-biogas-market-data/\\$file/21-10-14_Biogasindustryfigures_2020-2021_english.pdf](https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/EN-German-biogas-market-data/$file/21-10-14_Biogasindustryfigures_2020-2021_english.pdf)
56. 共和化工 そもそも堆肥とは何か?
<https://kyowa-kako.co.jp/press/772/> 2021.03.26 閲覧
57. 香川県公式ホームページ 堆肥化について.
<https://www.pref.kagawa.lg.jp/chikusan/keiei/taihi/page8.html>

58. 東北大学大学院農学研究科先端農学センター 教授 中井 裕
コンポスト（堆肥）の中の微生物たち
https://www.leio.or.jp/pdf/11/tcd20_p10.pdf
59. 秋田県公式サイト 美の国あきたネット。堆肥化発酵の6条件
<https://www.pref.akita.lg.jp/pages/archive/1203>
60. 共和化工株式会社 益子事業所
<https://kyowa-kako.co.jp/institution/composting/mashikojigyousho/>
61. 益子町 堆肥化と焼却にかかる費用実績（2023年1月10日閲覧）
https://www.town.mashiko.lg.jp/data/doc/1515648848_doc_101_1.pdf
62. J. Nakatani, "Life Cycle Inventory Analysis of Recycling: Mathematical and Graphical Frameworks," *Sustainability*, vol. 6, no. 9, Art. no. 9, Sep. 2014, doi: 10.3390/su6096158.
63. S. Sforzini, L. Oliveri, S. Chinaglia, and A. Viarengo, "Application of Biotests for the Determination of Soil Ecotoxicity after Exposure to Biodegradable Plastics," *Frontiers in Environmental Science*, vol. 4, 2016, doi: 10.3389/fenvs.2016.00068.
64. 経済産業省 and 国土交通省, "物流分野のCO2排出量に関する算定方法ガイドライン." Accessed: Dec. 26, 2022. [Online].
Available: <https://www.greenpartnership.jp/CO2brochure.pdf>
65. 海洋プラスチック問題対応協議会 (JaIME), "プラスチック製容器包装再商品化手法およびエネルギーリカバリーの環境負荷評価 (LCA)," 2019.
66. 九州地方環境事務所, "モデル市町村における生ごみ資源化モデル調査結果 資料集." Accessed: Dec. 26, 2022. [Online].
Available: https://kyushu.env.go.jp/recycle/data/garbage/h22_2a/mat01_3.pdf
67. T. Matsuda, J. Yano, Y. Hirai, and S. Sakai, "Life-cycle greenhouse gas inventory analysis of household waste management and food waste reduction activities in Kyoto, Japan," *Int J Life Cycle Assess*, vol. 17, no. 6, pp. 743–752, Jul. 2012, doi: 10.1007/s11367-012-0400-4.
68. 日本ウレタン工業協会, "燃焼特性," 日本ウレタン工業協会-Q&A.
http://www.urethane-jp.org/qa/kasai_nanshitsu/tokusei/q_13.html (accessed Dec. 26, 2022).
69. 矢野順也, 平井康宏, 酒井伸一, 出口晋吾, 中村一夫, and 堀寛明, "都市ごみ中の厨芥

類および紙類の利用システムによる温室効果ガスの削減効果,” 廃棄物資源循環学会論文誌, vol. 22, no. 1, pp. 38–51, 2011, doi: 10.3985/jjsmcwm.22.38.

70. 土木学会環境工学委員会 and 環境工学に関わる出版準備小委員会, 環境工学公式・モデル・数値集. 土木学会, 2004.

71. 農林水産省, “堆肥など有機資源の利用.” Accessed: Dec. 26, 2022. [Online]. Available:

https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/h_sehi_kizyun/pdf/ntuti23.pdf

72. R. Inaba, K. Nansai, M. Fujii, and S. Hashimoto, “Hybrid life-cycle assessment (LCA) of CO₂ emission with management alternatives for household food wastes in Japan,” Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA, vol. 28, pp. 496–507, Nov. 2009, doi: 10.1177/0734242X09348528.

73. 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構（農研機構）, “LCA（ライフサイクルアセスメント）による評価.” Accessed: Dec. 26, 2022. [Online]. Available: <https://www.naro.affrc.go.jp/org/nkk/soshiki/soshiki07-shigen/01shigen/pdf/sekkeitoheyoka/4-2.pdf>

74. 環境省, “5.B.1 コンポスト化（Composting）（CH₄, N₂O）.” https://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg-mrv/methodology/material/methodology_5B1_2020.pdf (accessed Dec. 26, 2022).

75. G. Myhre et al., “8 Anthropogenic and Natural Radiative Forcing”.

76. 柴田竜馬, 堀田建治, and 岡本強一, “大型海藻類による環境修復効果に関する研究 - コンブによる CNP 固定効果 CNP 固定効果に関して,” 日本大学理工学部, 2011. Accessed: Dec. 26, 2022. [Online].

Available: <https://www.cst.nihon-u.ac.jp/research/gakujutu/54/pdf/J-17.pdf>

77. A. Marson, M. Masiero, M. Modesti, A. Scipioni, and A. Manzardo, “Life Cycle Assessment of Polyurethane Foams from Polyols Obtained through Chemical Recycling,” ACS Omega, vol. 6, no. 2, pp. 1718–1724, Jan. 2021, doi: 10.1021/acsomega.0c05844.

78. Novamont S.p.A., “Environmental Product Declaration MATER-BI®CF05S, Registration number: S-P-00222.” Sep. 2010.

79. 国立大学法人 大阪大学, “令和元年度 <脱炭素社会を支えるプラスチック等資源循環

- システム構築実証事業> (オールバイオマスプラからなる耐衝撃性樹脂の開発と用途展開) 委託業務成果報告書.” 2020. Accessed: Dec. 27, 2022. [Online]. Available: https://www.env.go.jp/recycle/R01_014_OsakaU.pdf
80. 環境省, “算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧.” 2020. Accessed: Dec. 27, 2022. [Online]. Available: https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/itiran_2020_rev.pdf
81. 東京電力ホールディングス株式会社, “CO2 排出量・排出原単位と販売電力量.” <https://www.tepco.co.jp/corporateinfo/illustrated/environment/emissions-CO2-j.html> (accessed Dec. 27, 2022).
82. 東京ガスネットワーク, “都市ガスの種類・熱量・圧力・成分,” 東京ガスネットワーク. <https://www.tokyo-gas.co.jp/network/gas/shurui/index.html> (accessed Dec. 27, 2022).
83. 財団法人クリーン・ジャパン・センター, “ごみ焼却灰リサイクルの温室効果ガス排出削減・ライフサイクル管理に関する調査研究 一民間施設を活用したごみ焼却灰のリサイクルに関する調査研究 (その 2) — 報告書.” 2010. Accessed: Dec. 27, 2022. [Online]. Available: <https://www.cjc.or.jp/file/CJC-1006.pdf>
84. M. Skowrońska and T. Filipek, “Life cycle assessment of fertilizers: a review,” *International Agrophysics*, vol. 28, no. 1, pp. 101–110, Mar. 2014, doi: 10.2478/intag-2013-0032.
85. 渡邊一仁, “無給餌養殖業のライフサイクルインベントリ分析 一ホタテガイ, コンブ, ワカメの事例として,” *環境情報科学論文集*, vol. ceis25, pp. 1–6, 2011, doi: 10.11492/ceispapers.ceis25.0_1.
86. 三浦玄太 and 中島広志, “メタン発酵処理により発生する消化液の有効利用方法の検討,” *戸田建設株式会社 技術研究報告*, vol. 44, 2018, Accessed: Dec. 27, 2022. [Online]. Available: <https://www.toda.co.jp/lucubration/pdf/v693.pdf>
87. 一般社団法人 地域環境資源センター, “消化液の肥料利用を伴うメタン化事業実施手引 報告書.” 2016. Accessed: Dec. 27, 2022. [Online]. Available: http://www.jarus.or.jp/biomass/topics/methanetebiki_houkokusho01.pdf
88. 国土交通省, “日本初の下水道バイオガス都市ガス導管注入実証事業について.” https://www.mlit.go.jp/report/press/city13_hh_000088.html (accessed Dec. 27, 2022).
89. Daigas グループ, “都市環境分野におけるガス利用、バイオガス製造(ごみ処理・下水処

理),” Daigas グループ.

<https://www.daigasgroup.com> (accessed Dec. 27, 2022).

90. 長岡市, “生ごみバイオガス化事業.”

<https://www.city.nagaoka.niigata.jp/kurashi/cate08/biogas/> (accessed Dec. 27, 2022).

91. 大阪ガス株式会社, “都市部における再エネ由来水素と生ごみ由来バイオガスを活用したメタネーションによる水素サプライチェーン構築・実証事業の開始について,” 大阪ガス: 都市部における再エネ由来水素と生ごみ由来バイオガスを活用したメタネーションによる水素 サ プ ラ イ チ ェ ー ン 構 築 ・ 実 証 事 業 の 開 始 に つ い て , 2022. https://www.osakagas.co.jp/company/press/pr2022/1306105_49634.html (accessed Dec. 27, 2022).

92. 日本バイオプラスチック協会 <http://www.jbpaweb.net/identification/>

93. Tüv Austria HP <https://www.tuv-at.be/green-marks/>

94. BPI HP <https://bpiworld.org/compostability-certification>

95. DIN CERTCO <https://www.dincertco.de/din-certco/en/>