

令和 3 年度脱炭素社会を支えるプラスチック等資源循環システム構築実証事業
(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
(公開版)

令和 4 年 3 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ことを懸念される。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 (MaterBi) のほか、ポリ乳酸(PLA)および酢酸セルロース由来繊維を網目構造にしたものについて、播種ができる培地に成型してウレタン代替培地としての評価を行った。また、澱粉ポリエステル樹脂については、量産化に向けて繊維状に加工する方法の検討と、培地ブロックとして成型する方法を検討した。

また、澱粉ポリエステル樹脂の海洋性分解性試験を 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。測定の結果、日本近海で想定される 22℃では 1 日あたり 0.1~0.2%、28℃では 1%の分解速度であった。

2. 代替培地の評価

試作した生分解性培地のうち、澱粉ポリエステル樹脂 (MaterBi) を繊維状にして試作した培地が親水性に優れて水分を保持しやすく、表面張力による吸水性がよく、繊維状であるため培地内の空隙が十分であり通気性にも優れていた。一方、ポリ乳酸を繊維状にした培地は親水性が低く、水を保持しにくい特性があった。培地はその素材により保水吸水特性に差があったため、播種時にはそれぞれの特性に応じた水管理が必要であったが、根が発達した後は、供試した材料いずれでも葉菜の生育は良好であった。また、自社植物工場から排出される培地微小片の定量化を行う予定であったがこ

れに至らなかった。水耕栽培由来の海洋流出プラスチック量の推計を行う目的で、植物工場以外の施設栽培を含め視察し、養液栽培におけるウレタン培地の使用状態・処分方法の現状を調査した。

3. 廃培地の有効利用技術の検討・実証

廃培地を含む植物残渣をウニ等の海産動物の飼料としての利用する可能性を探るため、ウニへの給餌試験を行った。その結果、植物残渣だけでなく澱粉ポリエステル樹脂 (MaterBi) やウレタンも食べることが確認された。ウニに食べられた澱粉ポリエステル樹脂のその後の消長については確認できていないが、最終的に培地が完全に消化されずに排泄されたとしても海洋生分解性のため最終的には分解されると予想される。したがって、植物残渣を培地ごと飼料として利用できる可能性があった。また、ウレタンもウニが食べたことから、海洋に放出されたプラスチックがウニにより微細断片化される可能性があることが示唆された。飼料化以外の利用方法として植物残渣および培地の嫌気性分解・バイオガス化についても検討した。

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、既存ウレタン培地のコスト調査、廃棄費用料などの聞き取り調査を行った。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を行った。

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

令和3年度は、令和2年度に検討したベースライン及び評価対象製品である海洋生分解性の代替培地のライフサイクルフローに基づき、バックグラウンドデータの引用先並びにフォアグラウンドデータの収集を行った。具体的には、プロジェクトのシナリオとして、廃培地及び廃根の堆肥化、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の試行的な算定を行った。その結果、バイオガス化がもっとも温室効果ガス排出が削減されることが示唆された。堆肥化については、堆肥化プロセスから発生する CH_4 及び N_2O の影響により、ベースラインシナリオと比べて温室効果ガス排出量が増加する結果となった。

Summary

A Urethane medium used for hydroponic cultivation of vegetables is not biodegradable, and there is a concern that its fragments or decomposition products may cause environmental pollution if they are released into the ocean or the environment for some reason. This project is aimed to 1) develop a new culture medium with marine biodegradable which can be replaced the urethane medium, 2) investigate the effective use of the mixture of waste urethane media and plant residues, which has been 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 test of its marine biodegradability

In addition to the fibrous starch-polyester resin (MaterBi) developed in FY2020, polylactic acid (PLA) and cellulose acetate-derived fibers with a mesh structure were molded into a sowing medium and evaluated as a substitute medium for urethane foam. As for starch polyester resin, we studied ways to process it into a fiber form for mass production and to mold it as a culture block.

In addition, a marine degradability test of starch polyester resin was conducted according to ISO19679, which is a laboratory test method that assumes a shallow seabed. The results showed that the degradation rate was 0.1-0.2% per day at 22 degrees C, which is expected in the seas around Japan, and 1% at 28 degrees C.

2. Evaluation of alternative culture media

Among the biodegradable media tested, the one made of starch polyester resin (MaterBi) in fibrous form had excellent hydrophilicity, easy water

retention, good water absorption by surface tension. Because it is fibrous, there are sufficient spaces in the medium and it had excellent air permeability. On the other hand, the fibrous polylactic acid (PLA) medium had low hydrophilicity and did not retain water well. Since the water-absorbing properties of culture media differed depending on the material, it was necessary to manage water supply according to the characteristics of culture media at the time of sowing, but after the roots had developed, the growth of leafy greens was good with all the materials tested. Since the amount of the micro fragments of culture media released from the plant factory could not be quantified, we visited several hydroponic cultivation farms in addition to plant factories and investigated the status of the use and the disposal method of urethane culture media in hydroponic cultivation.

3. Study and demonstration of effective utilization technology of waste culture media

To explore the possibility of using plant residues including waste culture media as feed for sea urchins and other marine animals, we conducted sea urchin feeding test. As a result, it was confirmed that the sea urchins ate not only plant residues but also starch polyester resin (MaterBi) and urethane. We have not been able to confirm the subsequent disappearance of the starch polyester resin eaten by sea urchins, but even if the culture medium is not completely digested and excreted, it is expected to be eventually decomposed due to its marine biodegradability. Therefore, there is a possibility to use the whole medium with plant residues as feed. The fact that the sea urchins also ate urethane suggests that the plastic released into the ocean could be microfragmented by the sea urchins. We also investigated the potential use of plant residues and waste culture media for anaerobic decomposition and biogasification.

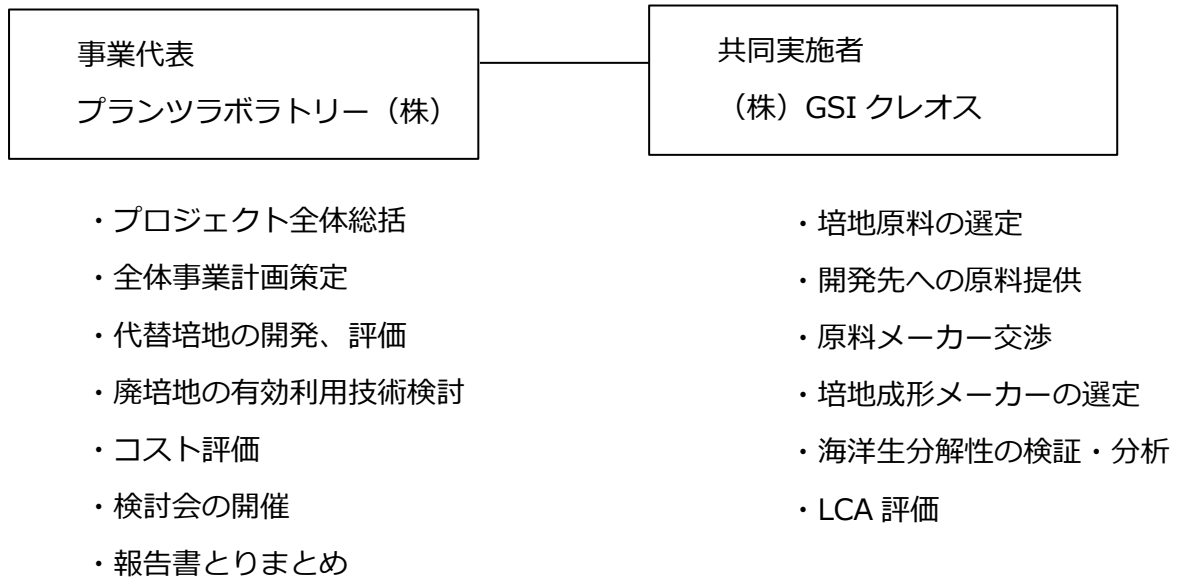
4. Cost evaluation and cost reduction measures

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 made prototypes.

5. Verification and evaluation of lifecycle greenhouse gas reduction

In FY2021, background and foreground data for lifecycle greenhouse gas estimation were collected based on the lifecycle flow of the baseline and project scenario which were developed in FY2020. Especially, trial calculation of lifecycle greenhouse gas emissions with the following project scenarios such as composting, anaerobic digestion, and feeding of waste media and roots, were conducted. As a result, it was suggested that the anaerobic digestion would have the best potential of greenhouse gas reduction among possible scenarios. In the case of composting, greenhouse gas emissions increased compared to the baseline scenario due to the methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) generation from composting process.

組織図



< 目 次 >

1	はじめに	- 3 -
1.1	農作物生産において排出されるプラスチック廃棄物	- 3 -
1.2	ウレタン代替培地の必要性.....	- 3 -
1.3	産業廃棄物としてのウレタン処分コストについて.....	- 4 -
1.4	本事業の目的	- 6 -
1.5	事業体制	- 8 -
1.6	事業実施期間	- 8 -
2	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	- 9 -
2.1	緒言	- 9 -
2.2	材料と方法.....	- 11 -
2.3	結果	- 14 -
2.4	考察と今後の課題	- 35 -
3	代替培地の量産化に向けた検討	- 36 -
3.1	量産化に向けた今後の取り組み.....	- 36 -
3.2	代替培地量産企業の選定	- 36 -
4	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	- 38 -
4.1	実海洋での海洋崩壊性試験.....	- 38 -
4.2	実験室における海洋生分解性試験.....	- 38 -
5	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	- 46 -
5.1	ウニの養殖用飼料としての活用.....	- 46 -
5.2	令和 3 年度の実施事項.....	- 46 -
5.3	課題と今後の対応	- 48 -
6	廃培地・植物残渣のその他の有効利用方法	- 49 -
6.1	嫌気性分解・バイオガス化.....	- 49 -
6.2	廃培地・植物残渣の堆肥化について	- 53 -
7	ウレタン代替培地利用による生産コスト削減効果	- 54 -
7.1	目的	- 54 -
7.2	方法	- 54 -
7.3	結果 令和 4 年度における取り組み	- 55 -
7.4	考察	- 56 -
8	ウレタン代替培地のライフサイクルアセスメント	- 57 -
8.1	目的及び調査範囲の設定	- 57 -
8.2	インベントリ分析	- 63 -

8.3	環境影響評価	- 67 -
8.4	解釈・結論	- 73 -
8.5	今後の課題	- 73 -
8.6	注意事項	- 74 -
9	水耕栽培で使用されている培地の調査	- 75 -
9.1	ヒアリング調査	- 75 -
9.2	まとめ	- 78 -
10	まとめと今後の課題	- 79 -
10.1	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	- 79 -
10.2	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	- 79 -
10.3	ウレタン代替培地を含む植物残渣の有効利用	- 80 -
10.4	ウレタン代替培地利用による生産コスト削減	- 80 -
10.5	ウレタン代替培地利用による温室効果ガス削減効果	- 81 -
11	参考資料：プラスチックに対する法規制に関する最近の動向	- 83 -
11.1	欧州（EU）での使い捨てプラスチックに対しての法規制	- 83 -
11.2	グリーンプラ識別表示制度の変更について	- 84 -
11.3	バイオプラスチック識別表示制度	- 85 -
11.4	識別表示基準	- 87 -
11.5	シンボルマーク運用基準	- 90 -
12	引用文献	- 98 -

1 はじめに

1.1 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 年には 189 千 t 排出されていた [1]が、平成 7 年に農林水産省より発出された「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」等の影響により平成 6 年以降は減少の傾向にある。加えて、平成 13 年施行の「循環型社会形成推進基本法」等により、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ることや、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るなど、一見すると農業を取り巻く廃プラスチックに係る環境負荷は軽減してきているように見える。

国内においては農業従事者や耕地面積の減少傾向 [2] [3]が続いているが、このような中において養液栽培市場は、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 [4]。しかしながら、これらの養液栽培における利点は、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して得られている側面がある。そのため、養液栽培において使用されるプラスチックの排出量および環境負荷については、農業全体の減少傾向が反映されていないことが懸念される。

1.2 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などの問題がある [5]。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り容易に分離できない状態となるため、収穫後の培地と根を分離しようとするウレタンを破断しやすく、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、微細化して排水に流れていることが懸念され、これらの排水はそのまま排水処理後に海域に流出していたり、降雨により公共用水域に流出していたりなど、結果として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・リサイクルが困難であるため、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海外市場で高い可能性がある。とりわけ EU では 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 [6]、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、現地で廃棄物処理が困難なウレタン培地を用いるよりも、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。

1.3 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 [7]。

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 [8]より作成

1.4 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とともにこれまで産業廃棄物として廃棄されていた廃根を有効利用するほか、システム全体でのコスト削減効果並びに培地製造プロセス及び培地処理プロセス等における CO2 排出削減効果を明らかにする。

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、世界における溶液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、溶液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における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並びに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）や、飼料などの再利用用途としての販売により見込まれる収益等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ような方策を検討する。

（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。

1.5 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の確立及び代 替培地の性能評価方法の確立に向けた 検討
共同実施者	（株）GSI クレオス	海洋性分解性素材に係る情報収集並び に素材提供・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 データの引用先並びにフォアグラウン ドデータの収集方針の検討

1.6 事業実施期間

令和 3 年 4 月 1 日から令和 4 年 3 月 31 日

2 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

2.1 緒言

レタスなど葉菜類の養液栽培においては、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もあり、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 [9]。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 [5]。

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) 日本の養液栽培において大量に廃棄される、という問題がある。ネギの養液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 [10]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。養液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、常温では個体であり、加熱して液状に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、除膜処理は既知の方法では難しい。実際に、初年度の予備試験におい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。

本課題では、ロックウールと類似の繊維を固めた形状の培地を試作した、生分解性プラスチックとして、大量に作られており入手も容易であるポリ乳酸（PLA）と、同様に入手可能であったポリエステル化デンプンである MaterBi(Novamont)を用いた。PLA は海洋生分解性が比較的遅い種類であるが、生分解性だけでなく培地としての適性も含めて評価するため、PLA も試作素材に含めた。

昨年度においては、ポリ乳酸と MaterBi を繊維状にしたのち(ポリ乳酸 220℃、MaterBi200℃で熔融させ、糸状に吊り上げローテータを用いて 0.2-0.5mm 程度の太さで巻き取る)、熱水により成形して培地を作成し、ロックウールと同様の繊維状の培地を試作した。さらにこれらにレタス‘グリーンリーフ’を播種し、養液栽培における生育状況をポリウレタンフォーム、ロックウール培地と比較した。その結果、MaterBi 培地による栽培ではウレタン培地、ロックウール培地と比較して全く遜色はなかった。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たいため、発芽した根が培地中へ伸張できないことがある。MaterBi 培地は吸水性がよく間隙も十分大きかったので、これらの問題は発生しなかった。ポリ乳酸と MaterBi のいずれでも繊維状にしたのち熱水により成形して培地を作成することができた。特に MaterBi 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、作物栽培培地として優れていた。こうしてできた培地を用いてレタスの養液栽培を行ったところ、ウレタン培地やロックウール培地と比較して同等以上の生育を示した。

今年度において、ウレタン代替培地の新たな候補として、A) 細く繊維化したポリ乳酸(PLA)素材と、B)酢酸セルロース(ダイセル社製「アセテート・トウ」)素材を入手し、すでに入手し繊維状に試作した MaterBi 培地を含め実験を行った。また、MaterBi 培地の作成において、昨年度の課題であった大量生産のための製造方法の簡易化・効率化について、ロックウールの形成方法(高速で回転するローター上に融液を落とし、遠心力で引き伸ばされた繊維を高速空気で捕集ネットに集積する)を参考に、綿あめ機を用いて培地作成を行った。

他に、昨年度同様の手法(ホットプレート融解)で繊維状にした MaterBi を、アルミ製のメッシュで筒状に包み、周囲をヒートガンで熱し固め、培地成形を行った。

2.2 材料と方法

2.2.1 ポリ乳酸および MaterBi の 3 次元構造化（繊維化）による培地の試作

生分解性プラスチックとして、ポリ乳酸(PLA)とポリエステル化デンプンである MaterBi(Novamont)を用いた。これらをアルミカップに置いて、ホットプレート(ND-1A, アズワン)に置き、プレート温度をポリ乳酸は 220℃、MaterBi は 200℃に設定して熔融させた。熔融した素材表面から割り箸を使って糸状に材料をつり上げ、約 1m の高さで糸巻き機を用いて巻き取った。糸の太さは 0.2-0.5mm 程度であった。巻き取ったのち、糸を長さ 20 cm 程度に裁断し、ほぐして綿状とした。これを直径 2 cm の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。この操作によって綿状の素材は円筒状に成形された。

また、上記の方法による MaterBi の繊維化をより簡易化し、大量生産に向けた製造方法の改良を図るため、ロックウール培地の作成方法(高温で融解した原料を遠心力で繊維化する)を参考に、綿あめ機(図 2-1)を用いて MaterBi ペレットを繊維状に加工した。また、昨年度同様の手法(ホットプレートで溶かし糸巻き機で巻き取る)で糸状にした MaterBi を筒状に束ね、周囲をヒートガンで熱し固め成形した培地も試作した。



図 2-1 澱粉ポリエステル樹脂の繊維化に用いた綿飴機の回転部

2.2.2 PLA および酢酸セルロースによる培地の試作

細く繊維化されたPLA素材(図 2-2)は綿のような形状をしており、適当なサイズにカットした後、直径2cmのネットカップに詰めて成型した。また、酢酸セルロース素材(図 2-3)は包帯状に伸びた綿のような形状をしており、はさみで適当なサイズにカットし、ネットカップに詰めて成型することができた。



図 2-2 PLA



図 2-3 酢酸セルロース

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‘グリーンリーフ’を1粒ずつ播種した。その後、NFTプレートにおいてEC2程度のエコゲリラA、B等量混合液により養液栽培を行った。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。なお昨年度の結果を踏まえ、吸水性、保水性、通気性、成型のしやすさのいずれもすぐれていたMaterBi培地も比較に加えた。

2.2.3 代替培地の機能性評価

代替培地の機能について、昨年度リストアップした評価項目（表2-1）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（図2-4）。吸水性、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容器に試験培地を置いて水の吸い上げた高さを測定した。また保水性の評価として、水で飽和させた培地をトレイにおいて、培地中の水が一定時間でどれだけ保持されているか重量を測定し、比較した。試験は反復を3とした。

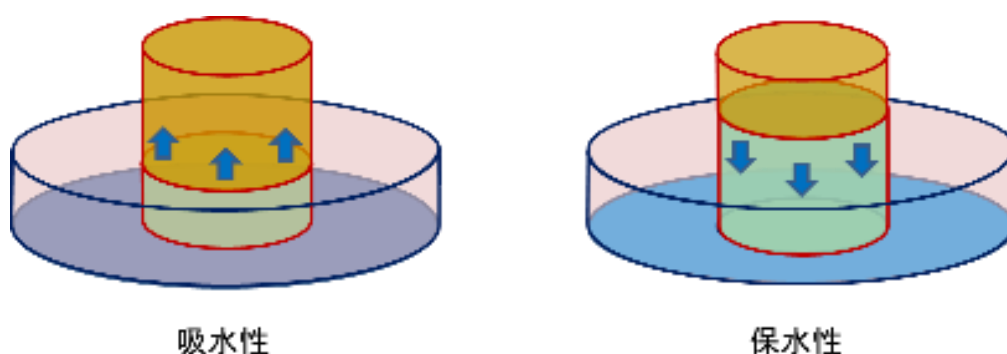


図 2-4 吸水性および保水性評価

表 2-1 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 cm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。

2.3 結果

2.3.1 ポリ乳酸および MaterBi による繊維質培地の試作

ポリ乳酸および MaterBi を用い、繊維状の培地を試作した。ポリ乳酸は 220℃、MaterBi は 200℃で溶融した。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つまんで引き上げ、糸巻き取り機により巻き取らせることでポリ乳酸、MaterBi いずれも繊維状にすることができた。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 0.2-0.5mm 程度の太さに引き延ばした繊維を裁断しネットカップの型に押し込み、熱湯中に入れると繊維同士が接着するとともに全体に収縮してブロック状の成形体できた（図 2-5）。この培地は繊維状であるため十分な空隙が存在し培地として利用可能と思われた。

綿あめ機で成型された繊維(図 2-6)は、繊維同士が部分的に融合して塊になりやすく、また昨年試作した培地に比べ、繊維が太いため熱湯処理による成形が難しい点が課題となった。一方、ホットプレートで融かし糸巻き取り機で繊維化した MaterBi を筒状に束ね、側面をヒートガンで固めた培地は、はさみで容易にカットでき、熱湯処理に比べ成形もよくなった（図 2-7）。



図 2-5 MaterBi を繊維化しブロック化した



図 2-6 綿あめ機で繊維化した MaterBi 培地



図 2-7 繊維化した MaterBi を筒状に束ね、側面をヒートガンで固めた培地

2.3.2 ポリ乳酸培地と MaterBi 培地の比較

ポリ乳酸と MaterBi の繊維を作成したところ、MaterBi 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。そのためポリ乳酸の繊維をつくるために、熔融温度を高めてより細い繊維とした。これらを裁断後型にいれる際、ポリ乳酸の方が膨張しやすく繊維密度の低い培地となりやすかった。培地を型（ネットポット）に入れて熱水に数秒間浸漬すると、繊維が収縮するとともに繊維同士が融着して円筒状に成形することができた。

さらに MaterBi 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あった。根が発達した後は MaterBi と同様に培地の下部のみを養液に浸漬した状態で栽培可能であった。芽生えの水管理は MaterBi 培地のほうが優れていたが、根が発達したあとは、いずれの培地でも生育は良好であった。

2.3.3 MaterBi 培地によるレタスの栽培

MaterBi 培地を用いた養液栽培におけるレタス‘グリーンリーフ’の生育を、ウレタン培地およびロックルール培地と比較した（図 2-8）。その結果、MaterBi 培地による栽培ではウレタン培地、ロックルール培地と比較して全く遜色はなかった。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、一方ロックルールは吸水性にすぐれるが培地の隙間が狭くかたいため、発芽した根が培地中へ伸張できないことがある。MaterBi 培地は吸水性がよく間隙も十分大きかったので、これらの問題は発生しなかった。

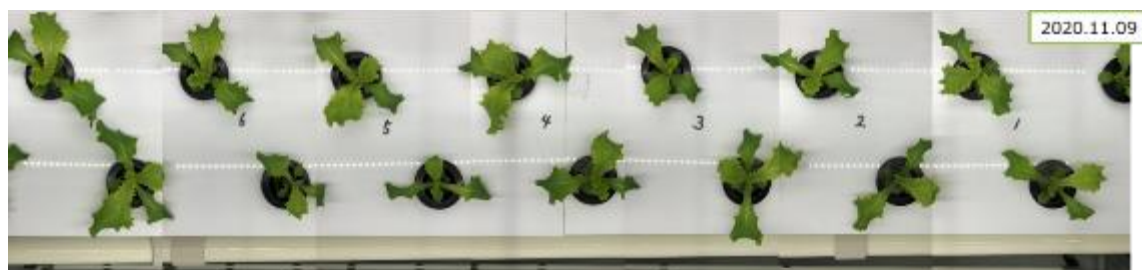
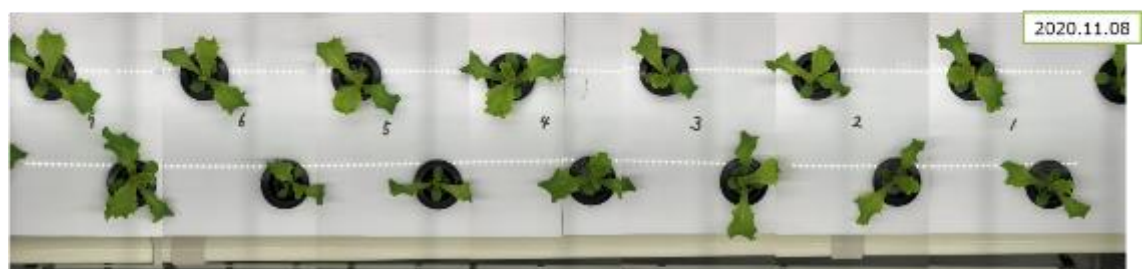
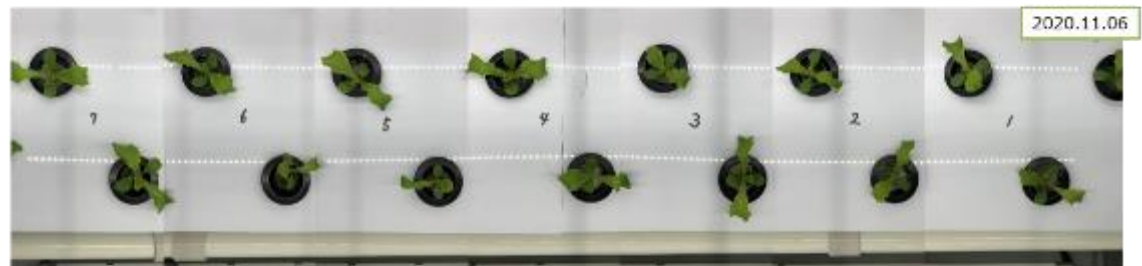
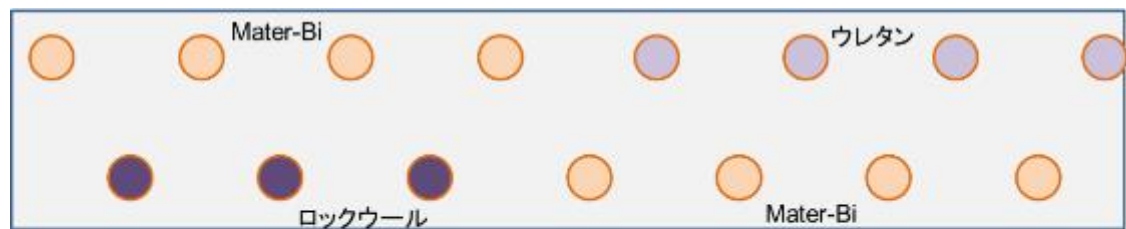




図 2-8 試作した培地(MaterBi)およびウレタン培地、ロックウール培地による養液栽培を行ったレタス‘グリーンリーフ’の生育

2.3.4 製造方法を改良した MaterBi 培地によるレタスの栽培

製造方法の簡易化のため、綿あめ機やヒートガンを使用し改良した MaterBi 培地を用いた養液栽培におけるレタス‘グリーンリーフ’の生育を行い、ウレタン培地およびロックウール培地、酢酸セルロース培地と比較した（図 2-9、図 2-10）。綿あめ機で成型された培地は

繊維が太いため熱湯処理による成形が難しかったが、試作された培地によるレタスの発芽・生育は良好であった。

昨年度同様の手法(ホットプレートで溶かし糸巻き機で巻き取る)で糸状にした MaterBi を筒状に束ね、周囲をヒートガンで熱し固め成形した培地は、熱した培地側面が固くなり、根の貫入が弱くなることが課題であった(図 2-11)。



図 2-9 ウレタン培地、改良した MaterBi 培地、ロックウール培地、および酢酸セルロース培地に播種したレタス'グリーンリーフ'の苗。



図 2-10 ロックウール培地、酢酸セルロース培地、ウレタン培地、および筒状 MaterBi 培地、およびに播種したレタス'グリーンリーフ'の養液栽培。

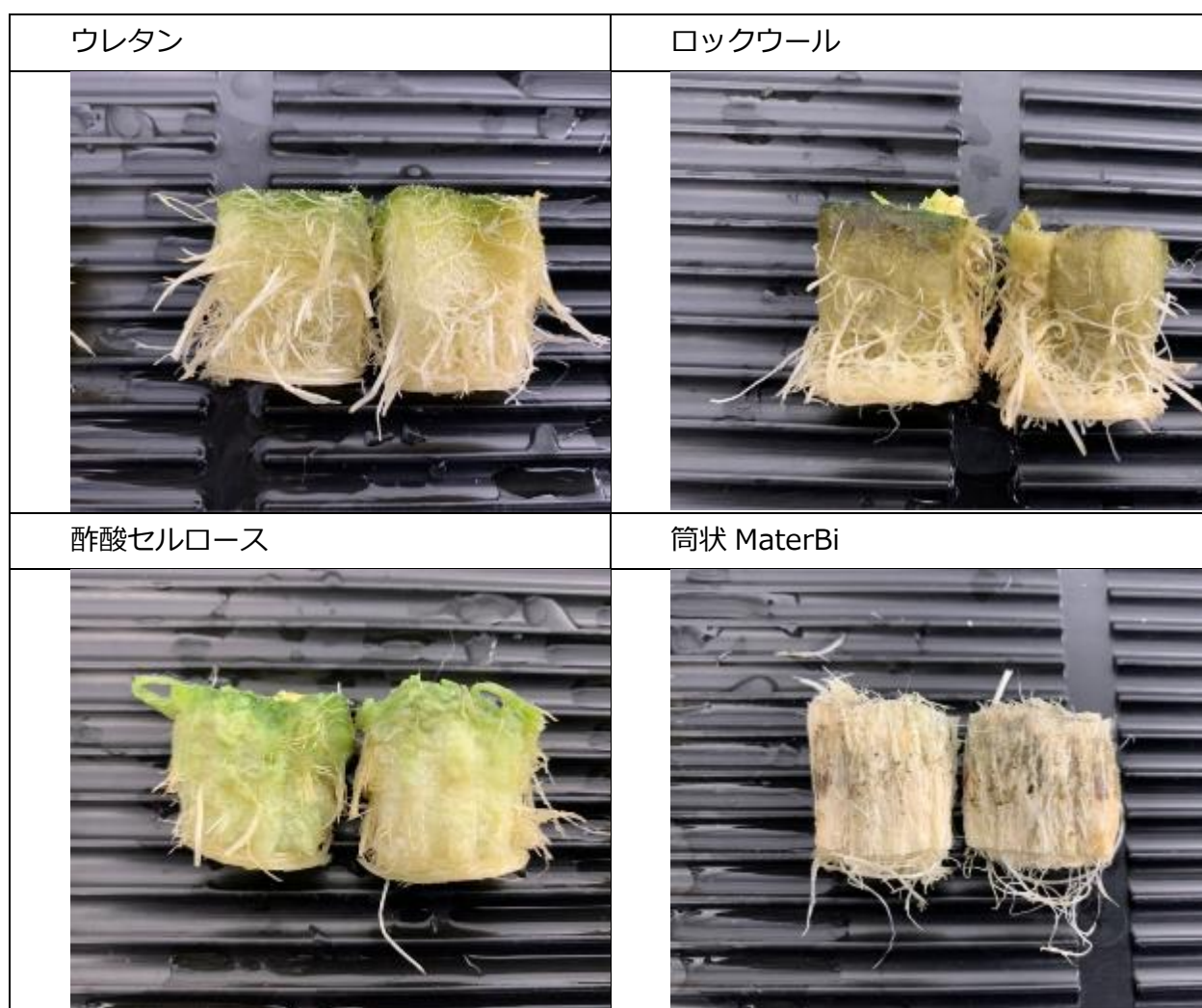


図 2-11 収穫後の培地の側面

2.3.5 細く繊維化された PLA および酢酸セルロース培地によるレタスの栽培

各培地をネットカップ(直径 3 cm)に入れ、EC0.7 の養液を与えて発芽させた(図 2-12、図 2-14)。1 週間後、NFT 方式の養液栽培システムへ移植し、4 週間後に収穫した(図 2-13、図 2-15)。種子の発芽、生育はいずれも素材でも良好であったが、発芽率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。



図 2-12 PLA 培地におけるレタスの発芽



図 2-13 PLA および MaterBi 培地によるレタス養液栽培



図 2-14 酢酸セルロースおよび MaterBi 培地におけるレタスの発芽



図 2-15 酢酸セルロースおよび MaterBi 培地によるレタス養液栽培

2.3.6 代替培地の機能性評価

各培地を用いた栽培試験では、根が発達すればその後の成育に差は見られなかったが、培地の種類ごとに吸水・保水特性が異なるため、同じ給水方法では播種時に培地が含む水の量は一定とならなかった。そこで、発芽率をそろえるために適切な播種時の水位の検討を行った。吸水性が劣る培地では水位を深くしないとレタスは発芽しなかった（図 2-16）。

吸水性試験では、着色した水を培地底面から吸水させ（図 2-17, 図 2-18）、保水性試験では、十分に水を含ませた培地を、水を張ったシャーレに入れ、その後の水位の低下を計測した（図 2-19）。なお、水面から十分に染色した培地部分の上端までの高さを水位とした。

その結果（表 2-2、表 2-3）、ロックウールと酢酸セルロースは吸水性が高く、ウレタン、PLA レーヨン、MaterBi は吸水性が低かった。また、保水性は、PLA レーヨンが特に高く、次に酢酸セルロースと MaterBi が高く、ウレタンとロックウールは相対的に低かった。MaterBi はゆっくりではあるが最終的には培地上面まで水を吸い上げ、吸水時間を十分に取った場合、MaterBi 培地では培地上部まで一部染色がみられた（図 2-18）。また保水性も高く、養液栽培用の培地としては優れていた。PLA レーヨンは、保水性は高いがほとんど吸水性がないことが難点である。酢酸セルロースは吸水性が特に高かった。

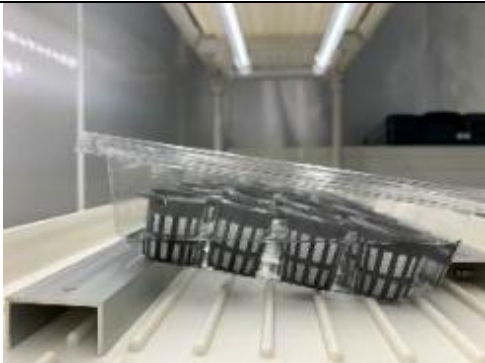
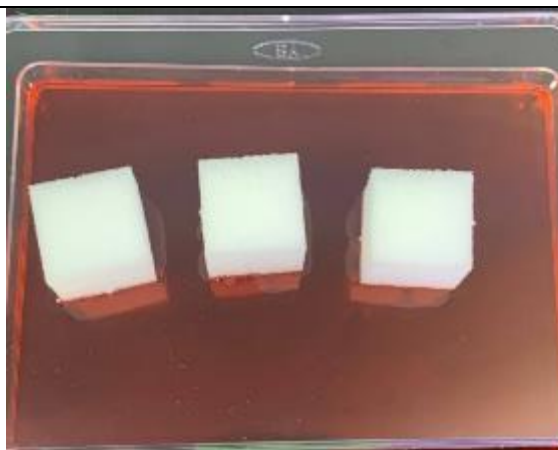
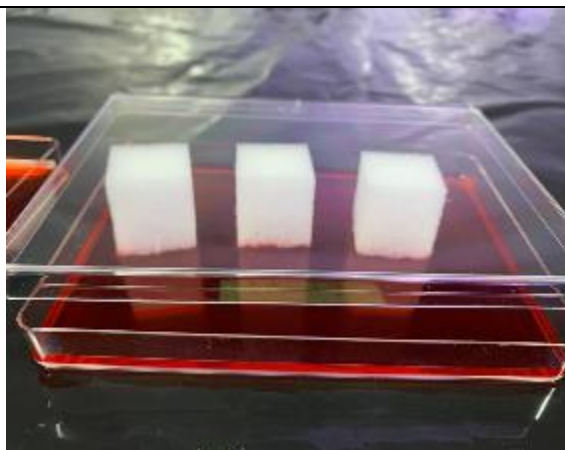
ウレタン	
	
ロックウール	
	
酢酸セルロース	
	
PLA レーヨン	
	

図 2-16 播種時の水位に傾斜をつけて発芽率の違いを調べた。

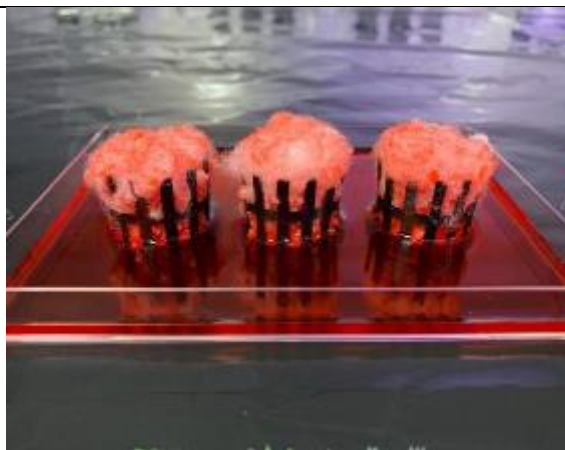
ウレタン



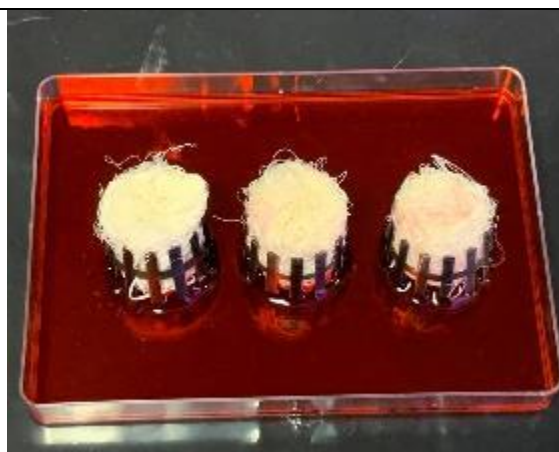
ロックウール



酢酸セルロース



MaterBi



PLA レーヨン

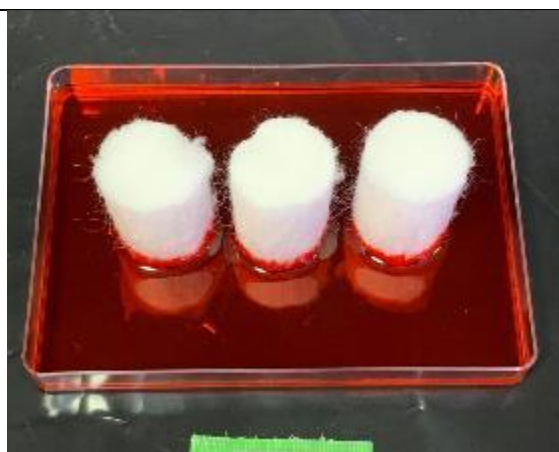
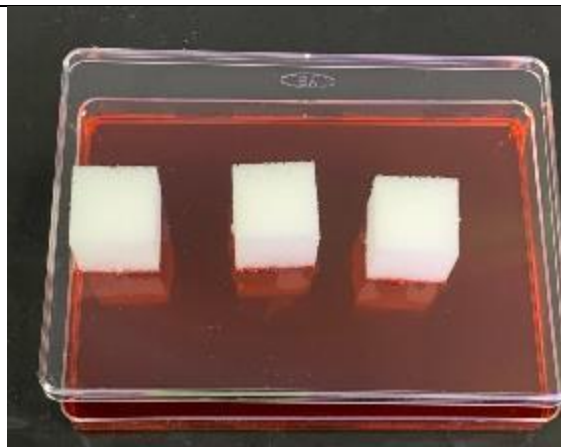
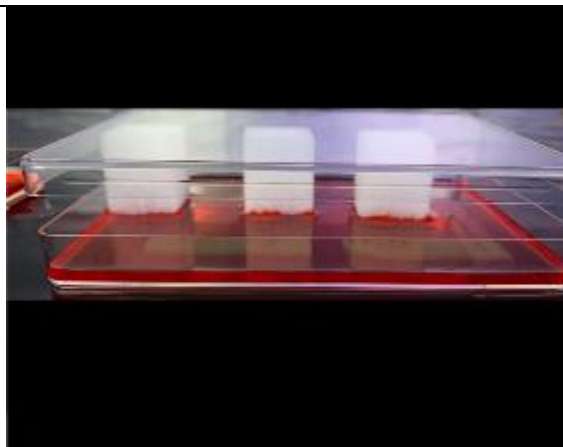
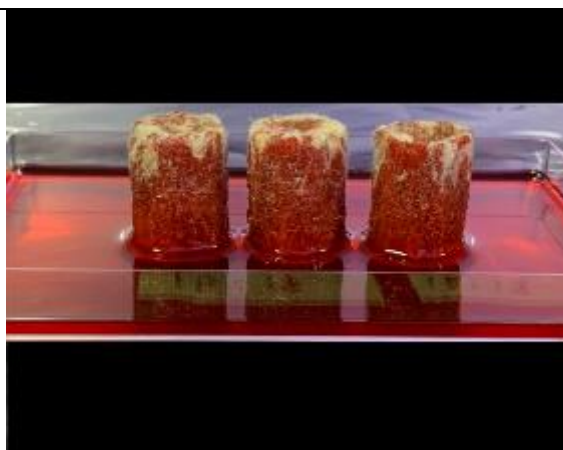


図 2-17 乾燥したウレタン、ロックウール、酢酸セルロース、MaterBi、PLA レーヨン
培地を着色した水に浸けて吸水させ、培地の吸水性を評価した。図は 1 時間後の吸水状
況を示す。

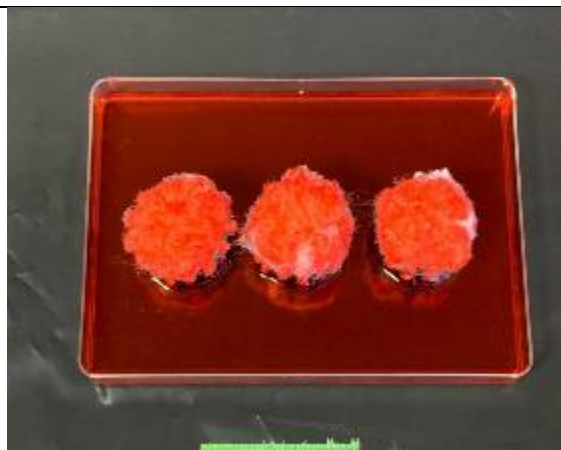
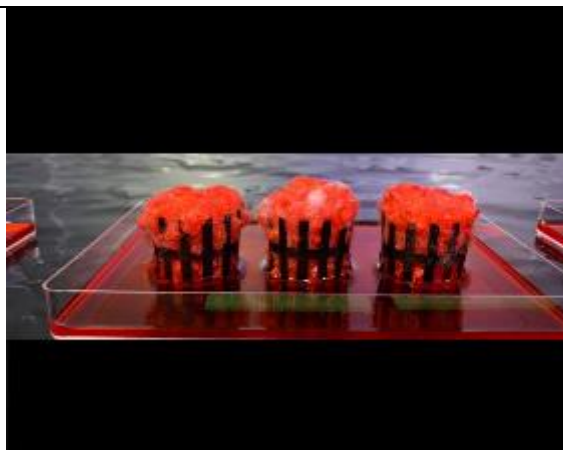
ウレタン



ロックウール



酢酸セルロース



MaterBi



PLA レーヨン

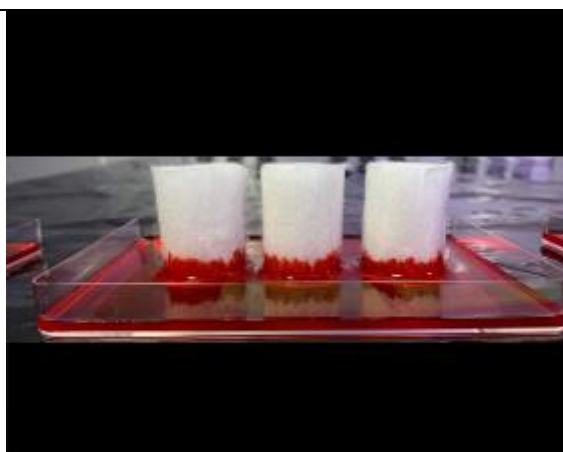
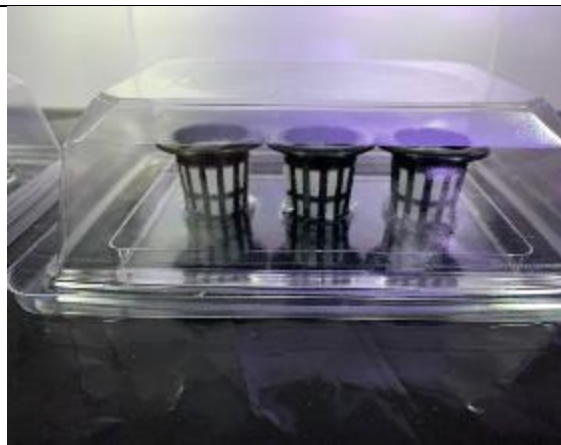
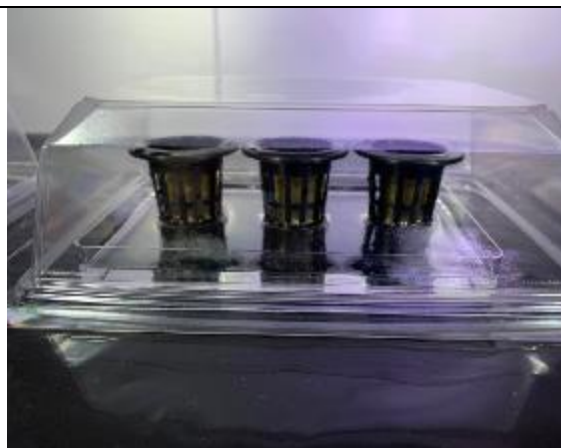


図 2-18 乾燥したウレタン、ロックウール、酢酸セルロース、MaterBi、PLA レーヨン
培地を着色した水に浸けて吸水させ、培地の吸水性を評価した。図は 19 時間後の吸水
状況を示す。

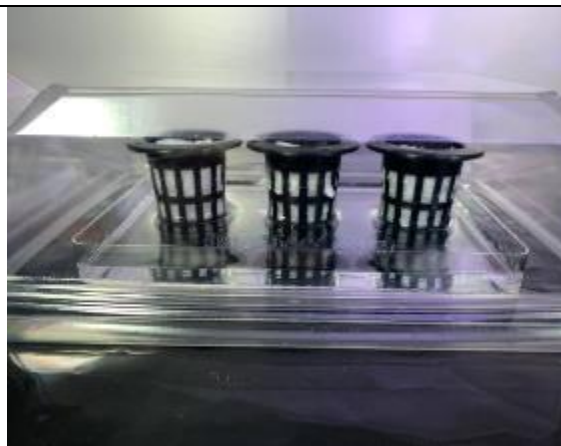
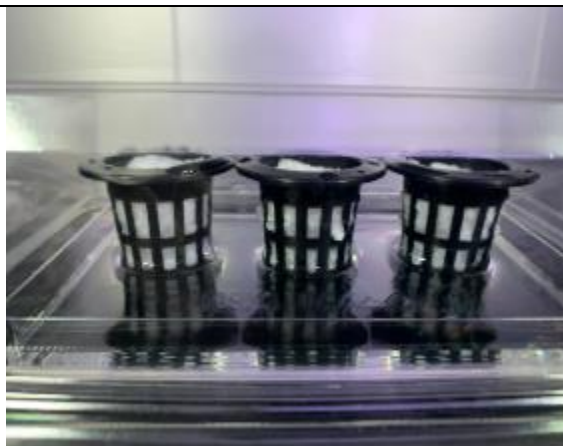
ウレタン(左: 開始時、右: 21 時間後)



ロックウール(左: 開始時、右: 21 時間後)



酢酸セルロース(左: 開始時、右: 21 時間後)



MaterBi (左: 開始時、右: 21 時間後)



PLA レーヨン(左: 開始時、右: 21 時間後)

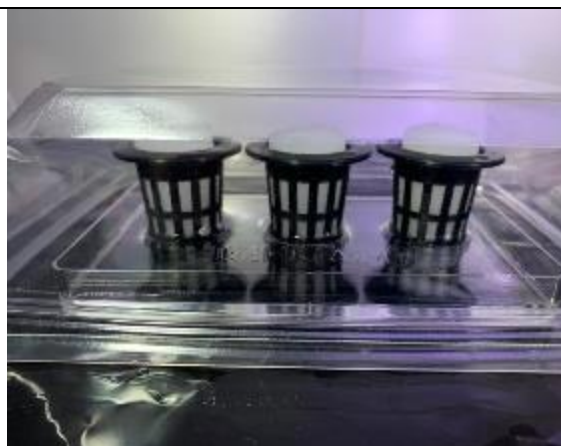
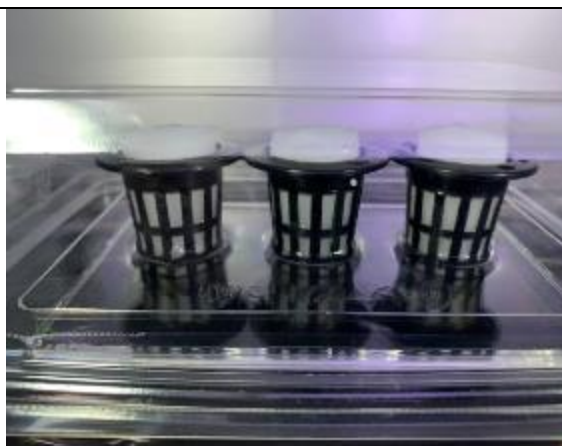


図 2-19 十分に吸水させたウレタン、ロックウール、酢酸セルロース、MaterBi、PLA レーヨン培地の底を水に浸けて、培地の保水性を評価した。図は 21 時間後の保水状況を示す。

表 2-2 吸水性試験

培地	水位 (cm)	
	1 時間後	19 時間後
ウレタン	0	0
ロックウール	1.4	1.5
酢酸セルロース	1.0	1.6
PLA レーヨン	0	0.3
MaterBi(澱粉ポリエステル)	0.2	0.2

表 2-3 保水性試験

培地	吸水時の 培地重 (g)	水位 (cm) *	
		4 時間後	21 時間後
ウレタン	14.0	13.5±0.18	13.2±0.18
ロックウール	9.8	9.3±0.19	9.3±0.23
酢酸セルロース	18.1	17.1±0.24	16.8±0.27
PLA レーヨン	21.9	21.2±0.15	21.1±0.23
MaterBi(澱粉ポリエステル)	17.4	16.6±0.33	16.7±0.24

* 平均±標準誤差

2.4 考察と今後の課題

2.4.1 ウレタン代替培地の試作

昨年度では、生分解性プラスチック素材であるポリ乳酸および MaterBi を用いてウレタン代替培地の試作を行った。予備実験により発泡させた生分解性プラスチックでは透水性・通気性に難があったため、ロックウールと類似の繊維を固めた形状の培地を試作した。

ポリ乳酸と MaterBi のいずれでも繊維状にしたのち熱水により成形して培地を作成することができた。特に MaterBi 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、作物栽培培地として優れていた。こうしてできた培地を用いてレタスの養液栽培を行ったところ、ウレタン培地やロックウール培地と比較して同等以上の生育を示した。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。

本年度における実験では、入手した細く繊維化された PLA 素材や酢酸セルロース素材、MaterBi を使用した培地において、発芽率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。また、PLA や酢酸セルロースによる試作培地は、MaterBi 培地のように熱湯処理による成形ができず、成形方法に関しても検討する必要があった。

代替培地量産化に向け、MaterBi 培地を用いた製造方法の簡易化に取り組み、綿あめ機やヒートガン等を使用し試作した培地において、今後は、十分に均一な密度や品質を保持する方法について検討することが課題となった。

2.4.2 代替培地の機能性評価

本実験から、各培地の吸水性・保水性の評価を行ったが、今後はその他の評価項目や生育性との関連について検討する。昨年度の栽培試験において良好な結果を示した MaterBi 培地だが、現段階では繊維の太さを制御するまでには至っておらず、均一な品質の培地を作成することが今後の課題である。

2.4.3 培地微少片の定量

自社工場から排出される培地小片に関しては、ほとんど検出されなかった。次年度は、通常のハウスにおける養液栽培から排出されるウレタン量を見積もるため、太陽光下あるいは工場内に一定時間おいたポリウレタンフォームを分画し、ウレタン破片量を推定する計画である。

3 代替培地の量産化に向けた検討

3.1 量産化に向けた今後の取り組み

令和３年度は候補企業の選定、各企業への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量産時の製造コストを可能な限り削減する必要がある。そのため、量産メーカー候補数社で、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、コスト削減に向けた検証を続けていく。また、スムーズな社会実装を目指すため、生分解性ウレタン代替培地の開発、量産に目途が付いたら、これまで訪問した農家、植物工場への培地の紹介、サンプル提供を行いたい。

3.2 代替培地量産企業の選定

ウレタン培地廃棄時のウレタン小片の土壌、河川、海洋流出を完全に防ぐことは難しいため、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、海洋流出後は生分解により環境負荷を最小化できる代替培地の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、植物の播種、育苗、定植などの生育試験を行ってきた。

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や取引先の中から９社を探索し、最終的に５社（表 3-1）を選定した。

各企業と打ち合わせを行い、本事業の目的、素材詳細、開発目標などを説明し、生分解性樹脂の糸化、代替培地製造の可否を確認し、一部企業には生分解性樹脂サンプルを提供し、試作試験を開始した。他の企業にも生分解樹脂サンプルを提供し、試作を依頼する予定。

表 3-1 代替培地量産企業の選定

企業名	進捗状況
A 社	化学メーカー 発砲樹脂タイプ 2021 年 11 月面談実施 プロジェクト内容の説明、生分解性澱粉ポリエステル樹脂での培地試作を依頼 発泡体試作に成功したが、根が貫入せずポリエステル代替培地として発芽・生育試験は困難。根が容易に貫入し、水を十分に保持する沢山の気泡を持つ培地の試作を継続する
B 社	原糸メーカー モノフィラメント(原糸)タイプ 2021 年 10 月面談実施 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 細めのモノフィラメント製造は可能だが、培地状に固形化する方法を試行中 生分解性澱粉ポリエステル樹脂サンプルを送付し、試作を依頼予定
C 社	樹脂繊維メーカー 3 次元構造体タイプ 2021 年 11 月面談実施 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 3 次元構造体の製造は可能。PHBH、PBS、PLA など生分解性樹脂での試作経験あり 生分解性澱粉ポリエステル樹脂サンプルを送付し、試作を依頼予定
D 社	化学繊維メーカー 2021 年 11 月面談実施 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 生分解性澱粉ポリエステル樹脂のナノファイバー化試作のため、サンプルを送付済
E 社	化学繊維メーカー 2021 年 11 月面談実施 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 生分解性澱粉ポリエステル樹脂のマルチフィラメント試作を相談したが、非常に困難ということで断念

4 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

4.1 実海洋での海洋崩壊性試験

養液栽培用の培地は、使用後に根などの植物残渣と手作業で分別し、脱水処理を行う工程が必要となることから、微細片の脱離を完全に防ぐことが困難で、発生した微細片が海洋など環境中へ流出する可能性がある。そのため海洋、土壌などの自然環境へ流出したとしても、生分解される環境への負荷が小さい素材へ代替していくことが必要である。

本事業では、海洋生分解性樹脂を候補原料とした代替培地を開発し、その微細片が実際に流出する可能性がある日本沿岸域におけるその挙動（分解性）について明らかにすることを目的とした。なお、2020 年 11 月実施の当事業における中間報告会にて、審査委員より実験室試験を優先し、その試験結果を踏まえて実海洋での試験実施について場所の選定などの条件設定を再度検討するよう助言を受けたことをふまえ、令和 3 年度は実験室試験についての検討を行った。また、海洋分解性試験は、令和 3 年度下期以降に実施の必要性及び実施する場合の諸条件の検討を行うこととした。

4.2 実験室における海洋生分解性試験

海洋において素材の分解性を観察したとしても、その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は分からない。そのため、実験室における海洋生分解性評価試験を行う必要がある。

本年度から、実験室における海洋性分解性試験を ISO19670 [11]に従い行った。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（図 4-1）。

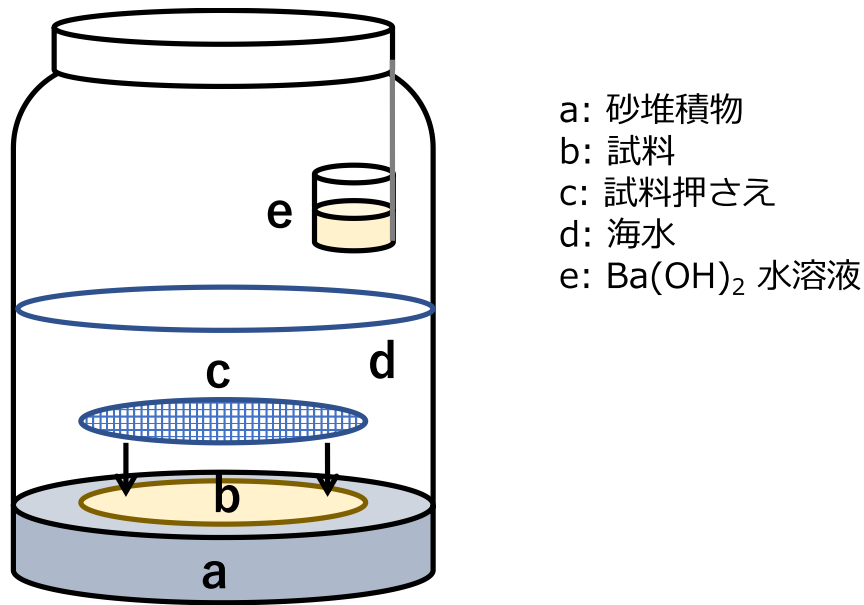


図 4-1 ISO19679 による生分解測定装置概要。ISO 19679: Determination of aerobic biodegradation of non-floating plastic materials in a seawater/sediment interface – method by analysis of evolved carbon dioxide respirometer.

$$\text{生分解度 (\%)} = (\text{吸着された二酸化炭素量}) / (\text{理論上の二酸化炭素発生量}) \times 100$$

4.2.1 材料と方法

代替培地(MaterBi)の海洋性分解性試験を、ISO19679 により行った。250mL 瓶(図 4-4)に神奈川県浅海底(図 4-2、図 4-3)から採取した海水と堆積物を入れ、MaterBi シートを堆積物上に静置し、ゴム栓で密閉した(図 4-4)。瓶を 22℃または 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 量を、瓶内に設置した 20mL 容器にいった水酸化バリウム水溶液に吸収させた。発生した二酸化炭素量は、水酸化バリウム液を希釈塩酸で滴定して算出した。反復は 3 とし、対照として MaterBi サンプルを入れないもの、空瓶もそれぞれ 3 用意した。ISO19679 では試験期間は最長で 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。なお、インキュベータ内の温度に関しては、日本近海における夏季平均表層水温を予想し 22℃、または Novamont 社における MaterBi の海洋生分解性のラボ試験と同様の 28℃と設定した。

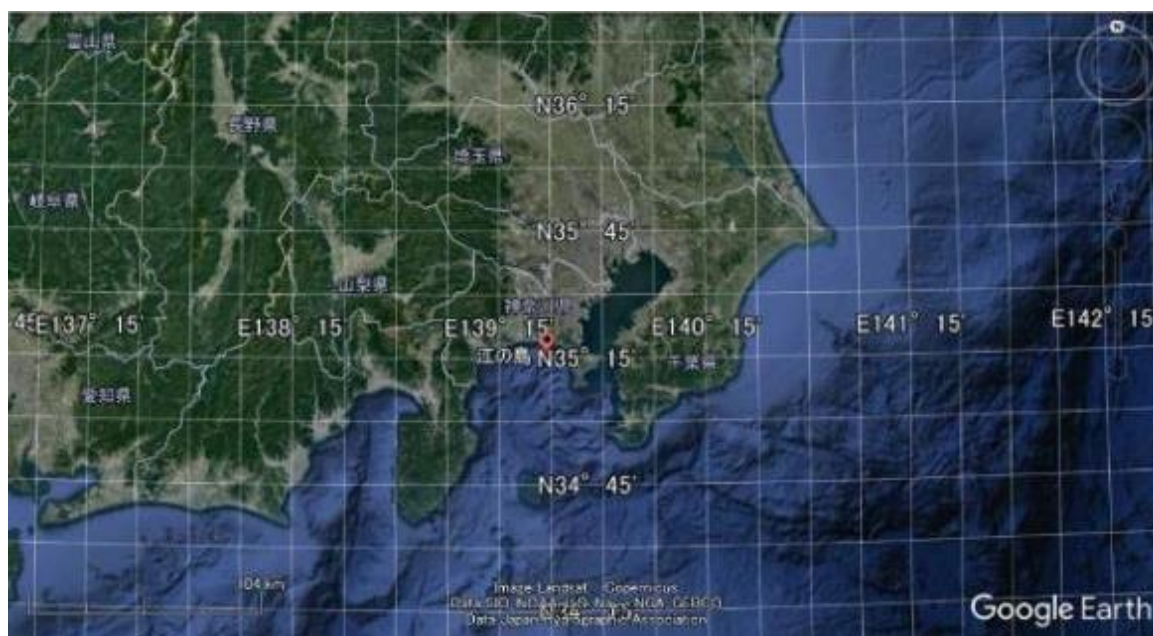


図 4-2 海洋生分解性試験に用いた海水および堆積物の採取場所

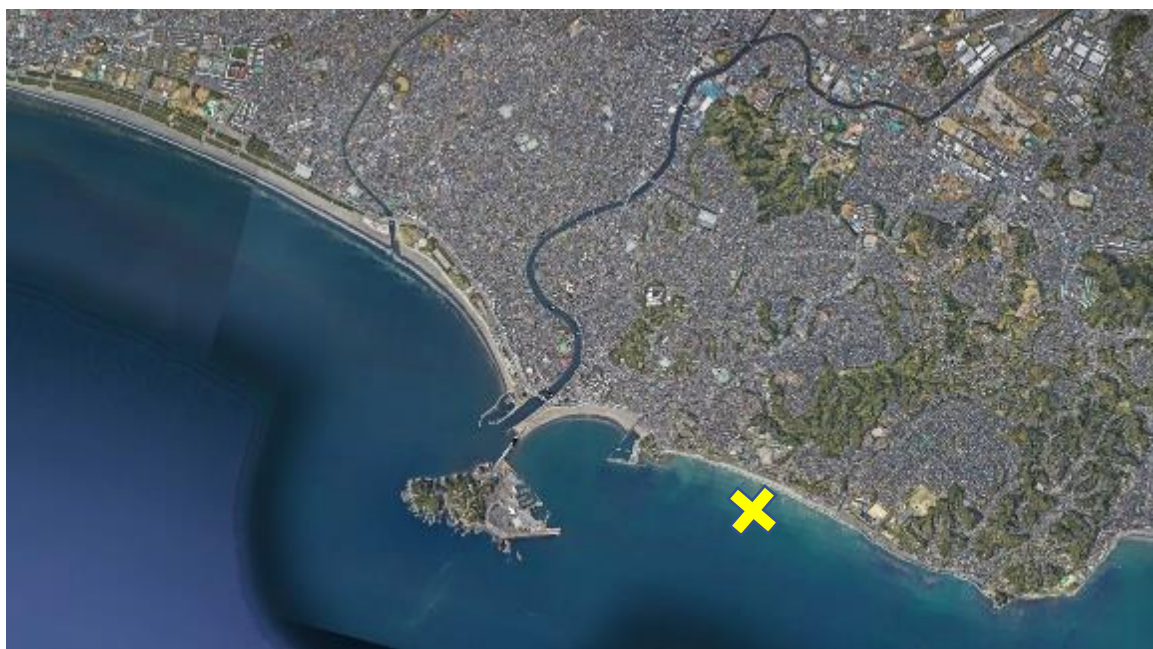


図 4-3 海洋生分解性試験に用いた海水および堆積物の採取場所(x)。大潮の干潮時に採取した。



図 4-4 試料を入れた瓶



図 4-5 試料(MaterBi シート)



図 4-6 滴定測定

4.2.2 結果

滴定の結果から、現時点の1日あたりの生分解度は、22℃では開始から約6ヶ月で平均して約0.1~0.2%(図 4-7、図 4-8)、28℃では開始から約2ヶ月で平均して約1%(図 4-9、図 4-10)となっている。図 4-7 について、当初瓶の気密性による誤差が大きかったため、数値が大きめに出ているが、蓋部を改良した10月以降は安定的にデータを取得できている。図 4-9 について、はじめ約2週間の生分解度は予備反応によるものと思われる。2月現在、目視での分解はどちらも確認されていないが、データ推定で約30%(図 4-8)または約55%(図 4-10)生分解しているものと思われる。

また、図 4-7 の試験において、開始から約4か月経過後、インキュベータ内温度を22℃から28℃に変更したところ、1日あたり生分解度の上昇がわずかに見られた。

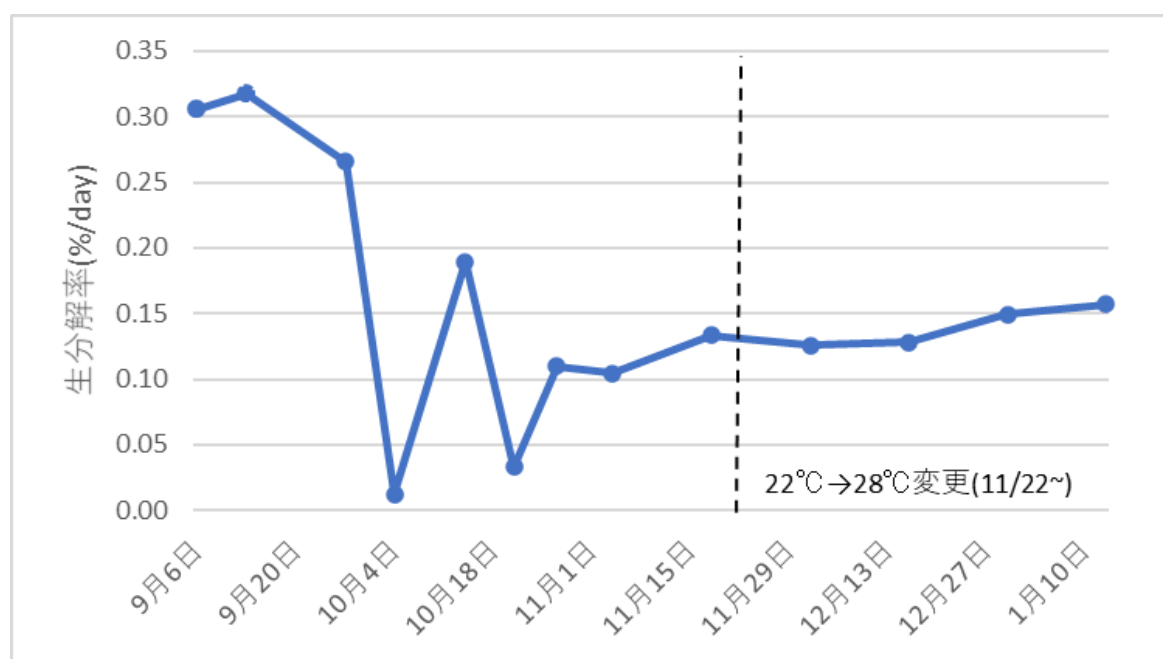


図 4-7 1日あたりの生分解率(22℃-28℃)

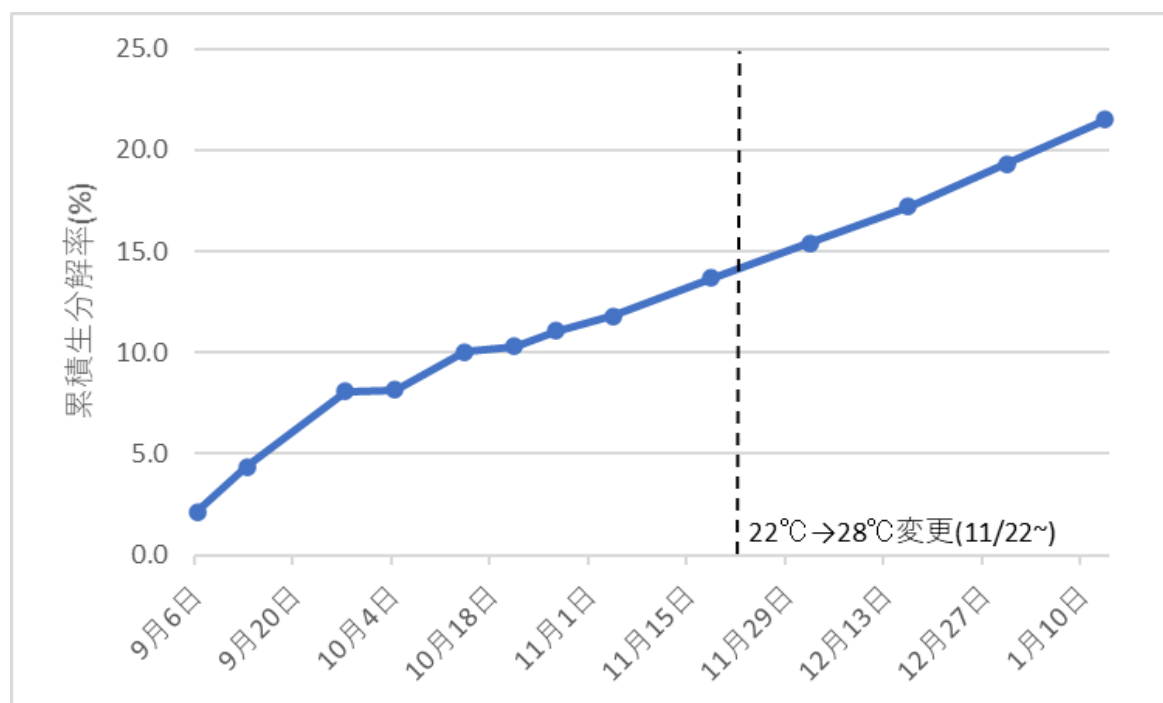


図 4-8 累積生分解率(22℃-28℃)

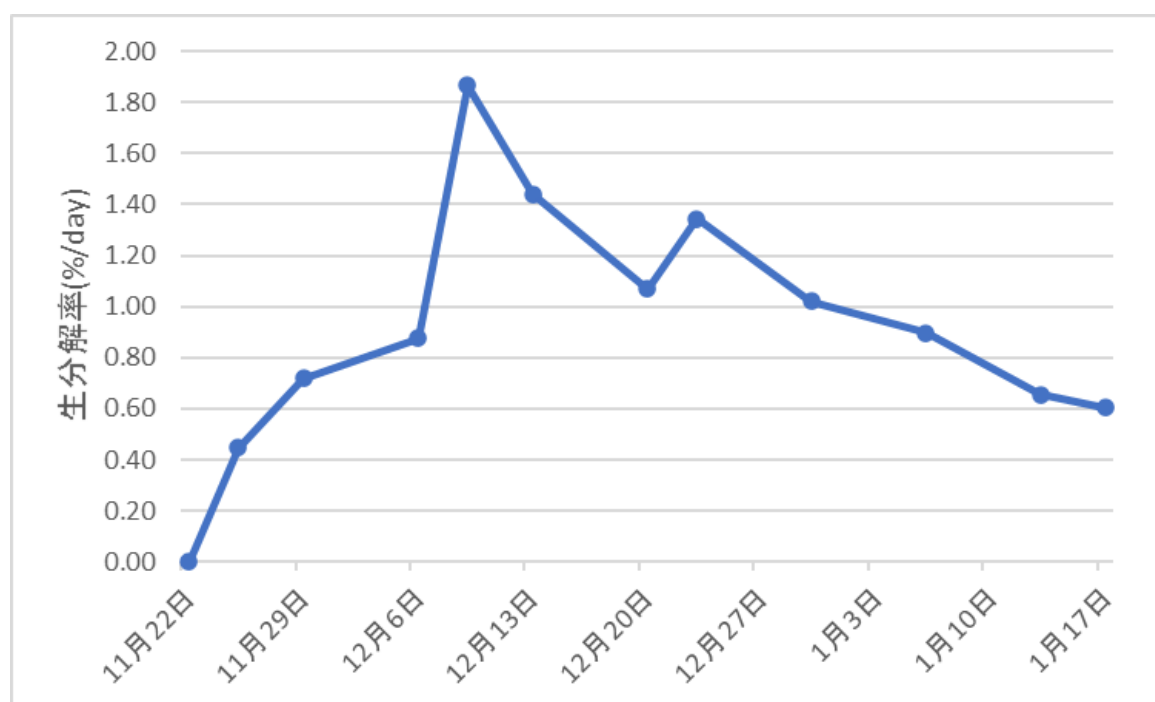


図 4-9 1 日あたりの生分解度(28℃)

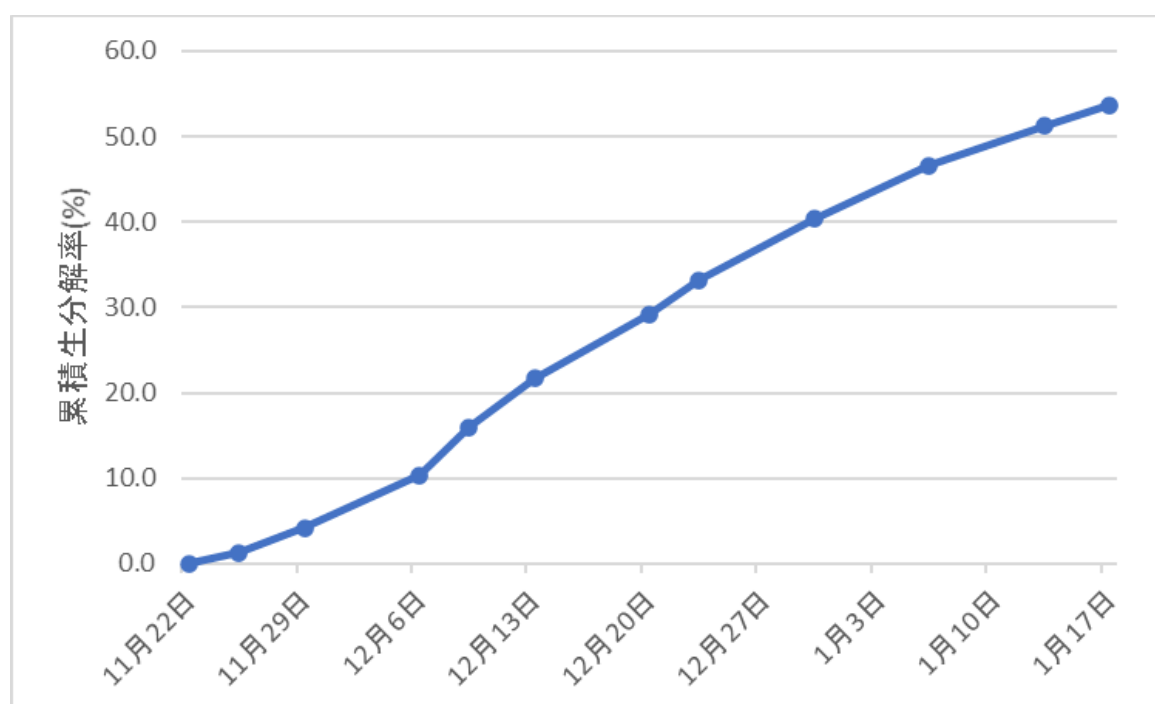


図 4-10 累積生分解度(28℃)

4.2.3 今後の課題

本実験から、現時点においてある程度選定素材の海洋生分解性を確認したが、経過観察を引き続き行い、サンプルの電子顕微鏡での観察も検討し、令和 4 年度において選定素材の海洋生分解性の評価をまとめる。

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が行われたのか、潮汐の影響などによる崩壊・流失なのかが正確に区別できないことや、海水中での長期間にわたる撮影は専用の撮影機器の確保、ダイバーによるカメラの保守（レンズ交換）や、荒天時対応、電源やインターネット回線の設置など、多くの費用要因があることから、また自社の実験室試験において選定素材の海洋生分解性をある程度確認しているため、令和 3 年度検討の結果、実施は行わず、実験室試験の信頼性をより保証する場合は、外部委託による実験室試験の検討を最優先することとした。ただし、外部委託した場合の費用や実施期間については、費用が高額となり実施期間も 180 日などと長期にわたることから、慎重に候補素材の選定や試験条件の設定について検討する必要がある。

5 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

5.1 ウニの養殖用飼料としての活用

使用済みの代替培地は、コンポスト化もしくは農地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の検討として、水耕栽培野菜の根は飼料となり得ることから、廃培地ごと飼料として与えるような有効利用技術を開発し、その効果の実証をはかる。

令和 2 年度には、植物残渣を食用とする生物に関する情報収集の結果、雑食で藻類などをよく食べるナマコとウニが対象となりうる可能性があると考え、養殖の実態について調査を行い、植物残渣を好物とする例があるウニに対し水耕栽培レタスの残渣を与える給餌試験を行った結果、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において、植物の廃根・外葉を食することを確認できた。

5.2 令和 3 年度の実施事項

5.2.1 長期給餌試験

令和 3 年度には、令和 2 年度に引き続き水耕栽培によって収穫された植物残渣のみを 4 月から 10 月まで 7 か月間ムラサキウニに給餌し、長期間にわたって植物残渣のみで生育するかの試験を行った。

5.2.2 生分解性樹脂の給餌試験結果

水槽内に投入したマタビーについても、ムラサキウニが食することが確認できた。

一方で、水槽内のすべてのウニが水槽内に植物残渣が無い状況でのみマタビーを食べており、植物残渣がある状態ではマタビーを食べることは無かった。このことから、マタビー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。

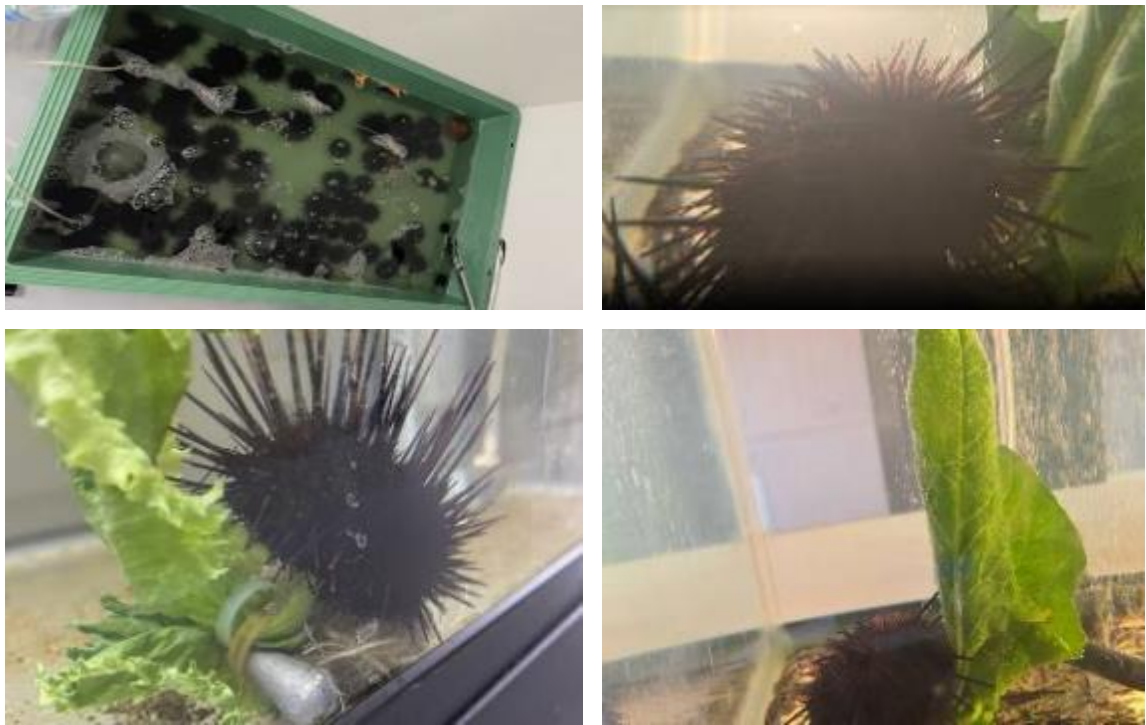


図 5-1 岩手県宮古市重茂漁業協同組合の協力により入手したウニ。管足(吸盤)を伸ばして葉を捕捉し、植物残渣（リーフレタス、ホウレンソウ）を食べる。



図 5-2 水槽内に投入した板状 MaterBi(左)と板状 MaterBi を食べるウニの様子(右)

5.3 課題と今後の対応

ウニが植物残渣を食し、長期間飼育できることを確認した成果をふまえ、来年度は飼料化技術の事業化に向けたコストや市場規模などの調査を行い飼料化の事業性を評価する。

また、並行して、飼料化以外の廃培地の有効利用技術（堆肥化等）の具体化についても、代替培地の社会実装時のコストメリット提示・ライフサイクル CO2 排出量削減に向けた最適な方法について、飼料化による再利用だけでなく幅広い活用方法の可能性について継続して検討する。

6 廃培地・植物残渣のその他の有効利用方法

6.1 嫌気性分解・バイオガス化

6.1.1 廃培地・植物残渣のバイオガス化

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。本事業で開発中であるウレタン培地代替素材材料の一つである澱粉ポリエステル樹脂（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。

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。

6.1.2 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 [12]、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 6-1、[13]）。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 [14]。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 [15]。

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 [16] [17] [18]。

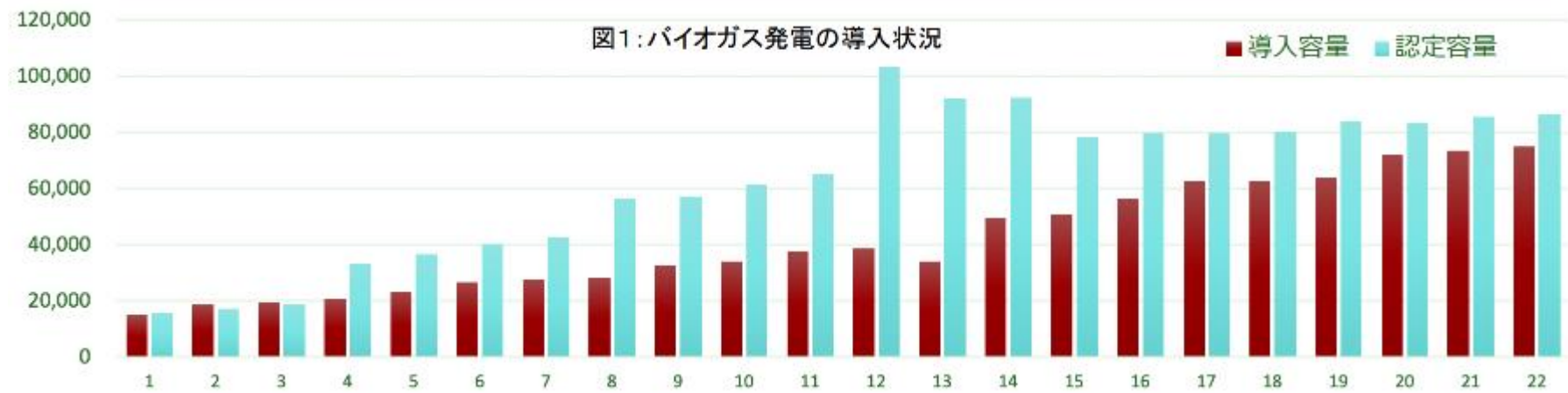


図 6-1 バイオガス発電の導入状況。 [13]より引用

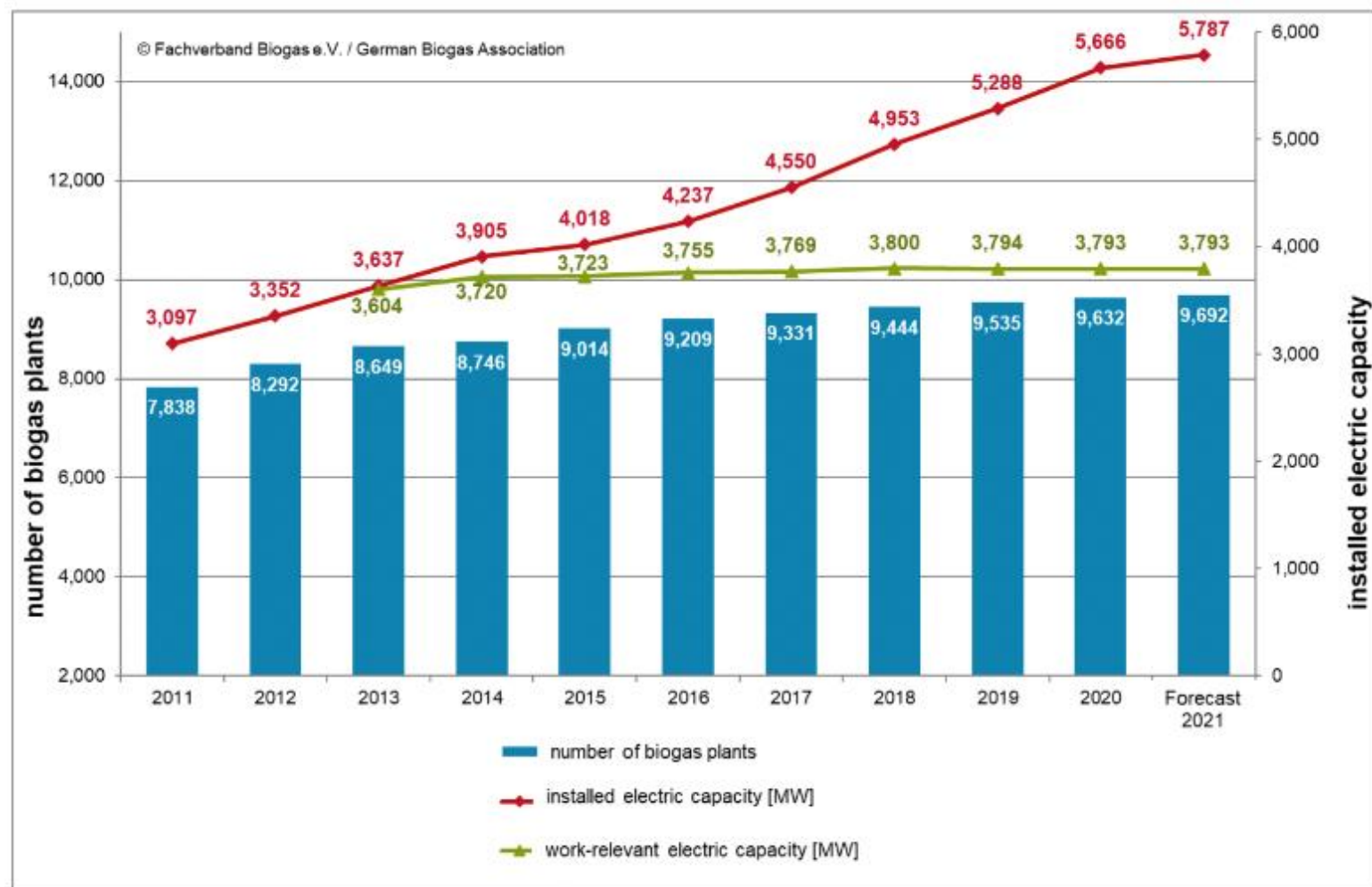


図 6-2 ドイツのバイオガスパラント数の推移。 [19]より引用

表 6-1 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

Biogas market data in Germany 2020/2021 [19]より引用

6.2 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。令和4年度では代替培地の堆肥化による分解度合い、速度、分解後の使用先などを検討していく(表6-2)。

堆肥化の問題点としては、単に土壌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ことになり、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壌に鋤き込まれるか堆肥化により処理されており、土壌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。

表 6-2 堆肥化試験予定表

令和 4 年度	第 1 四半期	第 2 四半期	第 3 四半期	第 4 四半期
代替培地分解試験				
分解後の堆肥利用先検討				
実地試験 （実際にウレタン培地を既に使用している水耕栽培企業、農家などの農地に実施に埋め分解度合いの検討）				

7 ウレタン代替培地利用による生産コスト削減効果

7.1 目的

海洋生分解性樹脂は既存ウレタンよりも原料価格が高額になることが想定される。そのため、加工費用などの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コスト（手選別費用や産業廃棄物の収集運搬・処理費用等）や、再利用方法（飼料としての販売等）により見込まれる収益等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。

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標とする。

7.2 方法

7.2.1 コスト評価

コスト評価については、現行のウレタン培地のコストについて、調達コスト・使用時の人件費コスト・収集運搬コスト・廃棄コストに分類してそれぞれ調査をおこなう。

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・候補原料の加工費用調査をおこない、廃培地の再利用などのシステムを含めた収集運搬コスト・再利用時のコストまでを考慮した代替培地のコスト評価をおこなう。

令和2年度から令和3年度には、下記スケジュール表のように上記に向けた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た。令和4年度以降には、選定量産メーカーでの試作を行い、スケジュール表に基づき必要な項目についてそれぞれ調査・評価をおこない、ウレタン培地と比べた際の代替培地のコストについて評価をおこなう。

7.2.2 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高官能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。

7.2.3 値上げによる影響

現行のウレタン培地では生育後の根と培地の分別等の作業人件費や収集運搬、廃棄コストの割合が大きいことに加え、ウレタンフォーム原料値上げにより1個当たりのウレタン培

地価格に大きく影響があるのではと考える。現行ウレタン培地の価格は 1 個当たり 0.3 円～1 円程度であるが、原料価格の値上げにより、人件費、運搬費等を抜いた価格で 1 個当たり 0.4 円～1.5 円程度と見込める。それに人件費、運搬、廃棄コストを加えることで、本事業で検討している代替培地と比較しそこまで差が出ないのではないかと考える。

7.3 結果 令和 4 年度における取り組み

代替培地の事業化において吸水性、生育性など重要視する点はいくつかあるが、コストに関しても同じく重要であり、令和 4 年度ではより具体的な代替培地の単価を設定していく必要がある。検討している代替培地原料について、素材にもよるが 600～800 円/kg 程度が想定され、それに加工賃 800 円/kg（想定）が必要となる。代替培地のサイズならびに密度（重量）の仕様が決定していないものの、ウレタン同様（約 0.22g/個）であると仮定すると原料調達価格 線維化加工費で 0.31 円～ 0.35 円/個となる。この金額に、大量生産時の成形費用を加えた価格がウレタン培地価格（0.3～0.5 円/個 とどの程度上昇するかを検討する。

令和 3 年度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、野菜の生育評価を行った。令和 4 年度は候補原料を量産企業候補に送付し、試作を依頼する予定。企業、形状、製法、代替原料樹脂の使用量によるコストを評価し、生産コスト削減を検討する予定である。

【コスト評価スケジュール】

令和 3 年度	第 1 四半期	第 2 四半期	第 3 四半期	第 4 四半期
ウレタン培地の コスト調査				
候補原料の原料価格調査				
候補原料の培地試作				
候補原料の加工費用調査				
代替培地量産企業 候補選定				
令和 4 年度	第 1 四半期	第 2 四半期	第 3 四半期	第 4 四半期
量産企業候補での 代替培地試作				
代替培地のコスト 評価				
量産企業選定 量産委託				

7.4 考察

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標とし、令和 3 年度以降に代替培地に係るコスト評価を、令和 4 年度にコスト削減策を作成することとする。

社会実装時に向けたコスト削減の方策としては、分別作業や廃棄処理コストの削減に加え、コストを意識した素材選定ならびに加工方法の検討、培地 1 つあたりに使用する素材量の調整などを行うこととする。この際に、候補原料の原料価格調査・加工費用調査については、開発段階と大量生産時では数値が大きく変わる可能性があるため、留意して調査を行う。また、代替培地の原料の選定に対し、原料価格調査結果をフィードバックする必要がある。

8 ウレタン代替培地のライフサイクルアセスメント

8.1 目的及び調査範囲の設定

水耕栽培において、ウレタン培地の廃棄（または不法投棄）および海洋流出が問題となっている。そこで、ウレタン培地を海洋生分解性プラスチックに変えることで、廃棄の簡易化、海洋流出への緩和策を図る。一方、プラスチック利用に伴う温室効果ガス（GHG）排出も問題となっており、バイオマス由来成分を含むプラスチックを使用することで、GHG 排出量を削減できる可能性がある。

以上より、本 LCA ではウレタン培地を海洋生分解性プラスチックに代替した場合の GHG 排出量を評価した。

評価するシナリオは表 8-1 の通り。従来のポリウレタンを使用する場合は発電焼却を行うとした。一方、海洋生分解性プラスチックである Mater-Bi、PHBH、酢酸セルロースを使用する場合は、バイオガス化、堆肥化、飼料化するとした。

日本国内で使用されている培地量を年間 50 t と仮定し、これを機能単位として設定した。

表 8-1 評価シナリオ（○は検討した項目を示す）

樹脂の種類	発電焼却	バイオガス化	堆肥化	飼料化
ポリウレタン	○	—	—	—
Mater-Bi	—	○	○	○
PHBH	—	○	○	○
酢酸セルロース	—	○	○	○

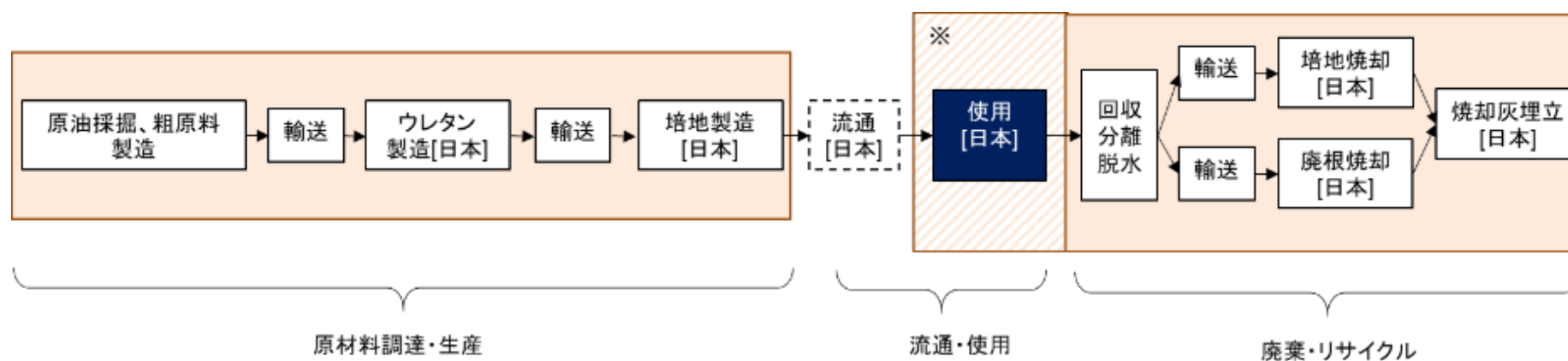
システム境界は以下の通り。流通・使用段階はどのシナリオでも共通のため、原料調達・生産と廃棄・リサイクルを評価範囲とした。

発電焼却（図 8-1）では、培地は産業廃棄物として、培地（ポリウレタン）と廃根に分けて廃棄される。培地および廃根は発電焼却され、焼却灰は埋め立てられる。

バイオガス化（図 8-2）では、培地は廃根を含んだ状態で回収され、そのままバイオガス化施設でバイオガス化される。バイオガス化は都市ガス代替とし、残渣は肥料として化学肥料を代替するものとした。

肥料化（図 8-3）では、培地は廃根を含んだ状態で回収され、そのまま堆肥化施設で肥料化される。肥料は化学肥料を代替するものとした。

飼料化（図 8-4）では、培地は廃根を含んだ状態で回収され、そのまま飼料化施設でウニ養殖のエサとして使用される。ウニが培地中の廃根をエサとして食べた後、培地は回収され、生分解される。ウニ養殖におけるエサは昆布を代替するものとした。



※代替培地の機能が変わった場合は評価対象とする

図 8-1 発電焼却のシステム境界

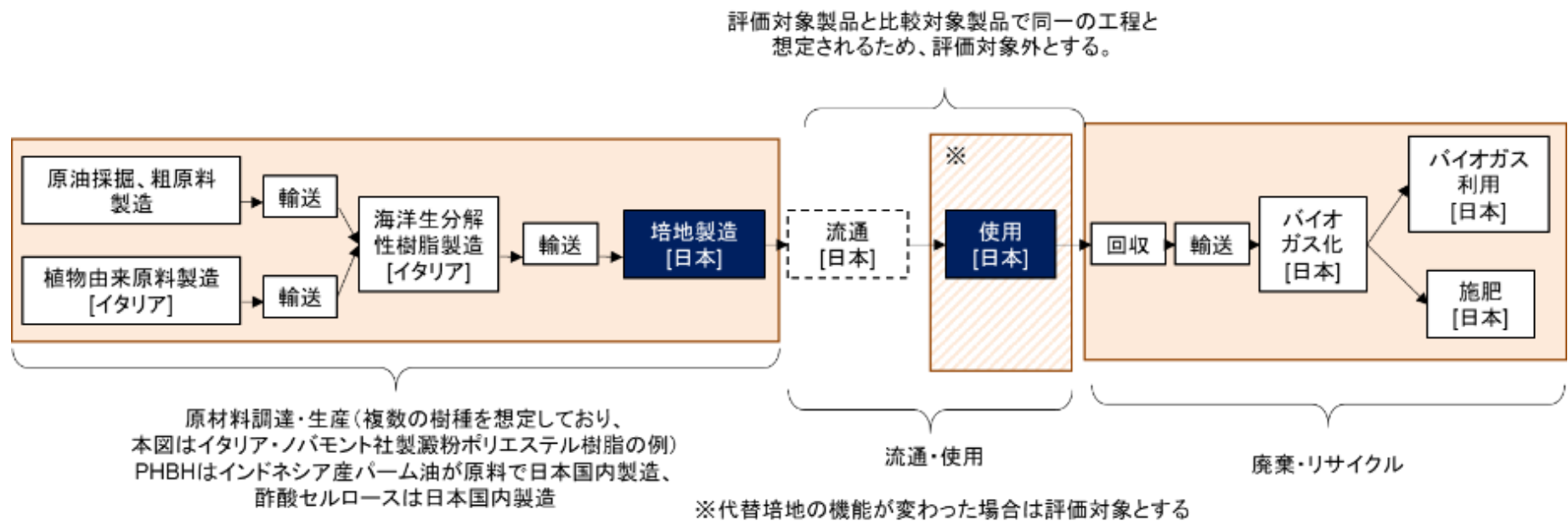


図 8-2 バイオガス化のシステム境界

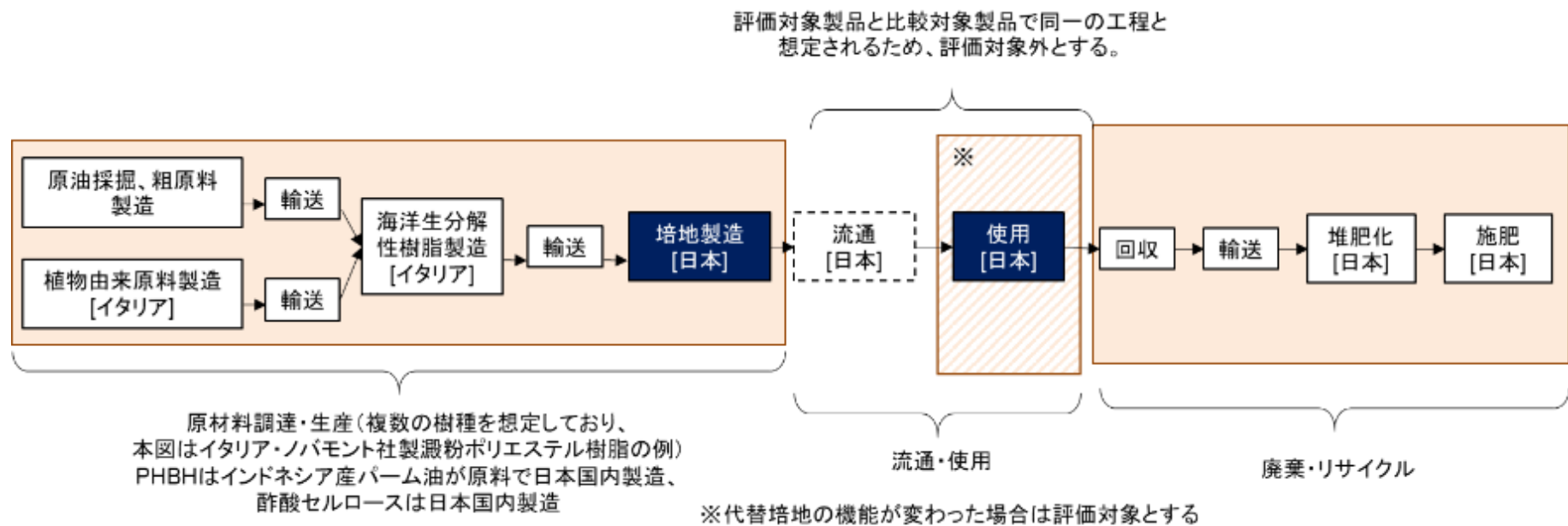


図 8-3 堆肥化のシステム境界

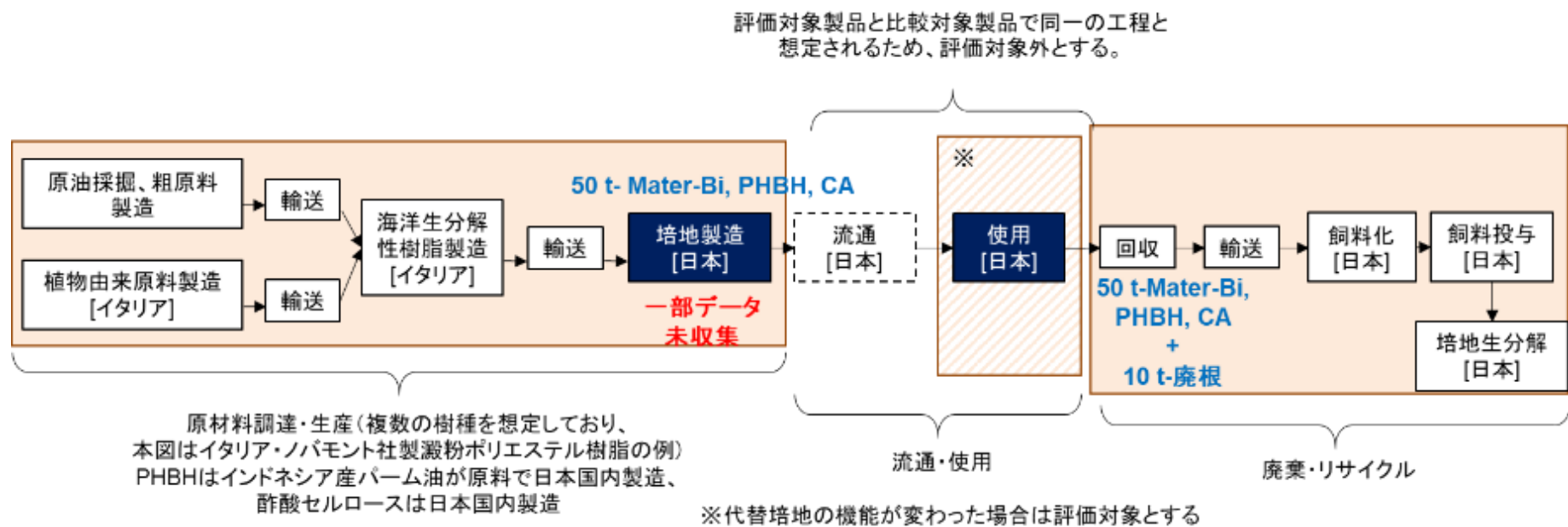


図 8-4 飼料化のシステム境界

8.2 インベントリ分析

8.2.1 樹脂の特性

各樹脂の特性を文献情報から収集した。なお、Mater-Bi は化学式が公表されていないことから、とうもろこし由来でんぷんと同等だと仮定した。また、酢酸セルロースは水酸基が CH_3CO または H の 2 種類があるが、本評価では、50%ずつ含まれると仮定した。

Mater-Bi : $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$ [20]

PHBH : $(\text{C}_{4.2}\text{H}_{6.4}\text{O}_{2.0})_n$ [21]

酢酸セルロース : $(\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_2((\text{OH})_3)_{0.5}(\text{CH}_3\text{CO})_3)_{0.5})_n$ [22]

8.2.2 インベントリデータの取得

a) 原材料調達・製造

使用前後の培地・廃根重量は表 8-2 の通り。培地の種類が変化しても培地重量は変化しないと仮定した。

表 8-2 使用前後の培地・廃根重量

	量	単位	出典
培地重量（入力、dry）	50000	kg/年	想定値
培地重量（出力、wet）	954545	kg/年	実測値（乾燥培地重量の 19 倍）
廃根重量（出力、dry）	1545455	kg/年	実測値（乾燥培地重量の 31 倍）
廃根重量（出力、wet）	123636	kg/年	乾燥重量比 8 % と仮定 （河鱒先生による専門家判断）

b) 廃棄・リサイクル

各リサイクル方法で共通の植物工場からリサイクル工場への輸送は輸送トンキロあたり燃料使用量から計算した。軽油、積載量 2000～3999kg、積載率不明、営業用と仮定して 0.124 [L/t-km] として、培地・廃根（wet 重量）と輸送距離を乗じることで、軽油使用量を算出した。工場間距離は 10 km と仮定した。

その他、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。

1) 発電焼却（ベースライン）

収集した情報は表 8-3 の通り。

表 8-3 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)	[23]
	都市ガス	0.0158	MJ/kg-培地(wet)	[23]
	A 重油	0.00273	MJ/kg-培地(wet)	[23]
	焼却灰	0.1	kg/kg-培地(wet)	[24]
廃根焼却	電力	0.196	kWh/kg- 培 地 (wet)	[25]
	都市ガス	0.158	MJ/kg-培地(wet)	[23]
	A 重油	0.00273	MJ/kg-培地(wet)	[23]
	焼却灰	0.1	kg/kg-培地(wet)	[24]
副産物：発電	発電効率	12.81	%	[23]
	培地の低位発熱量	23.76	MJ/kg-廃根(dry)	[26]
	培地の発電量	0.845	kWh/kg- 廃 根 (dry)	上記より
	廃根の低位発熱量	1.829	MJ/kg-廃根(dry)	[27]
	廃根の発電量	0.0651	kWh/kg- 廃 根 (dry)	上記より

2) バイオガス化

収集した情報は表 8-4 の通り。

副産物の肥料成分は、文献 [28]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。

樹脂をバイオガス化した際に発生するメタン発生量は樹脂中に含まれる炭素量から推算した(*)。なお、1 mol=22.4 L とした。

表 8-4 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)	[29]
	排水	1.055	m ³ /kg-培地(wet), kg-廃根(wet)	[27]
副産物：肥料	液肥（窒素成分）	0.0117	kg-N/kg-廃根(dry)	[30] [28]
	液肥（リン成分）	0.00487	kg-P/kg-廃根(dry)	[30] [28]
	液肥（カリウム成分）	0.0235	kg-K/kg-廃根(dry)	[30] [28]
副産物：バイオガス	バイオガス	0.7752	Nm ³ -CH ₄ /kg-廃根(wet)	[25] [27]
バイオガス代替）	（都市ガス	0.83	m ³ -CH ₄ /kg-Mater-Bi(dry)	*
		1.06	m ³ -CH ₄ /kg-PHBH(dry)	*
		0.73	m ³ -CH ₄ /kg-酢酸セルロース(dry)	*
		35.9	MJ/m ³ -CH ₄	[27]

3) 堆肥化

収集した情報は表 8-5 の通り。

樹脂を堆肥化した際に発生する二酸化炭素発生量は樹脂中に含まれる炭素量から推算した(**)。なお、1 mol=22.4 L とした。

表 8-5 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)	[27]
	生ごみ由来の CH ₄	0.96	kg-CH ₄ /t-廃根(wet)	[31]
培地生分解	生ごみ由来の N ₂ O	0.27	kg-N ₂ O/t-廃根(wet)	[31]
	Mater-Bi 生分解	2.17	kg-CO ₂ /kg-培地(dry)	**
	PHBH 生分解	2.39	kg-CO ₂ /kg-培地(dry)	**
	酢酸セルロース生分解	1.80	kg-CO ₂ /kg-培地(dry)	**
副産物：肥料	液肥（窒素成分）	0.0217	kg-N/kg-廃根(dry)	[27] [30]
	液肥（リン成分）	0.00900	kg-P/kg-廃根(dry)	[27], [30]
	液肥（カリウム成分）	0.0435	kg-K/kg-廃根(dry)	[27], [30]

4) 飼料化

収集した情報は表 8-6 の通り。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 パターンを評価した。また、樹脂を生分解した際に発生する二酸化炭素発生量は樹脂中に含まれる炭素量から推算した(**)。

表 8-6 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)	[32]
	昆布代替 (廃根、窒素成分基準)	-0.0606	kg-昆布/ kg-廃根(wet)	[32]
	廃キャベツ代替	—	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)	**
	PHBH 生分解	2.39	kg-CO ₂ /kg-培地(dry)	**
	酢酸セルロース生分解	1.80	kg-CO ₂ /kg-培地(dry)	**

8.3 環境影響評価

8.3.1 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温室効果ガス（GHG）排出量原単位を調査した（表 8-7）。

表 8-7 累積製造原単位

プロセス名	GHG 排出量 [kg-CO2eq]	単位	出典
ポリウレタン製造 （～ポリウレタンフォーム）	6.47	/kg-培地(dry)	[33]
ポリウレタン焼却	2.28	/kg-培地(dry)	C9H6O2N2 を仮定
Mater-Bi 製造 （植物栽培による炭素吸収を除く）	5.10	/kg-培地(dry)	[34]
Mater-Bi 製造による炭素吸収	1.09	/kg-培地(dry)	バイオマス度 50% を仮定
PHBH 製 （植物栽培による炭素吸収を除く）	4.36	/kg-培地(dry)	[21]
PHBH 製造による炭素吸収	2.39	/kg-培地(dry)	[21]
酢酸セルロース製 （植物栽培による炭素吸収を除く）	4.86	/kg-培地(dry)	[35]
酢酸セルロース製造による炭素吸収	1.05	/kg-培地(dry)	バイオマス度 58.4%を仮定
Mater-Bi, PHBH, 酢酸セルロースの 培地成型（射出成型）	1.76	/kg-培地(dry)	バイオマス度 58.4%を仮定
軽油	2.58	/L	[37]
電力	0.441	/kWh	[38]
都市ガス	0.0497	/MJ	[39]
A 重油	2.71	/L	[37]
焼却灰埋め立て	0.137	/kg-焼却灰	[40]
排水処理	0.0013518	/m3	[27]
肥料（窒素）	1.641	/kg-N	[28]
肥料（リン）	1.44	/kg-P	[28]
肥料（カリウム）	0.6	/kg-K	[41]
昆布	1.4973	/kg-昆布	[42]
廃キャベツ	0	/kg-廃キャベツ	廃棄物のため

8.3.2 LCIA 結果

上記原単位をもとにした LCIA 結果を樹脂ごとに示す。なお、副産物は各シナリオでマイナスして控除することとした。

a) Mater-Bi

LCIA 結果を図 8-5、図 8-6 に示す。図 8-5 はプロセスの内訳ごとに、図 8-6 はエネルギー起源/非エネルギー起源の内訳ごとに示したものである。

GHG 排出量は飼料化（昆布重量代替）、バイオガス化、飼料化（昆布窒素成分代替）、飼料化（廃キャベツ代替）、ベースライン、堆肥化の順に小さかった。よって、飼料化およびバイオガス化が有力な選択肢となる。

堆肥化はベースラインよりも GHG 排出量が増加したが、これは生ごみを堆肥化したことで、焼却では発生しない CH₄ や N₂O が発生するためである。堆肥化時にこれらを回収できれば、堆肥化も有力な選択肢になる可能性がある。

飼料化は代替できる昆布の重量によって GHG 排出量削減効果が大きく変化することから、代替可能な重量を詳しく調査する必要がある。

プロセス別では樹脂（培地）製造が最も大きく、次いで培地焼却や生分解が大きかった。バイオガス化は樹脂や廃根が持つ熱量をガス化して活用できるのに対し、発電では発電効率が低いため、不利になる。また、堆肥化はこれらを有効利用できないため不利になる。

また、図 8-6 より、いずれのリサイクル方法でもベースラインと比較するとエネルギー起源 GHG を削減できることが分かった。

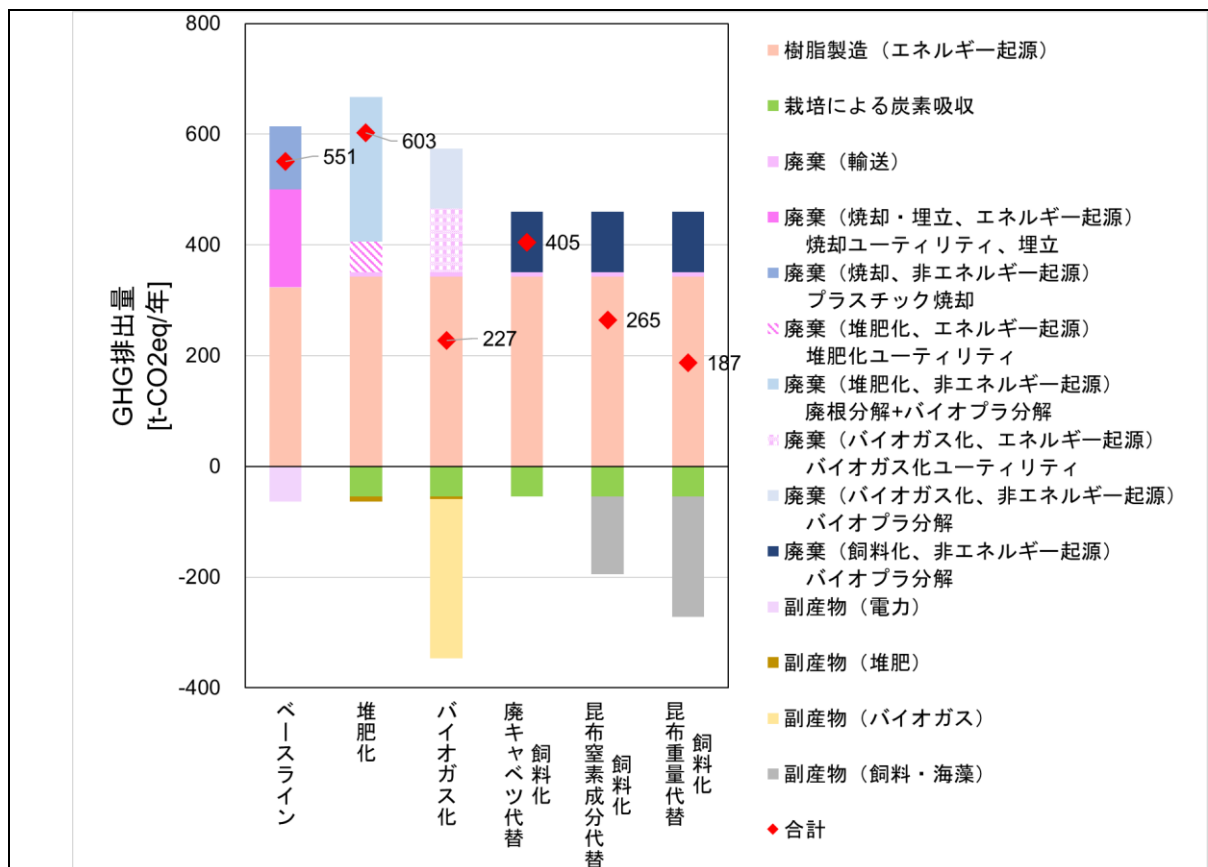


図 8-5 LCIA 結果（Mater-Bi、プロセスごと）

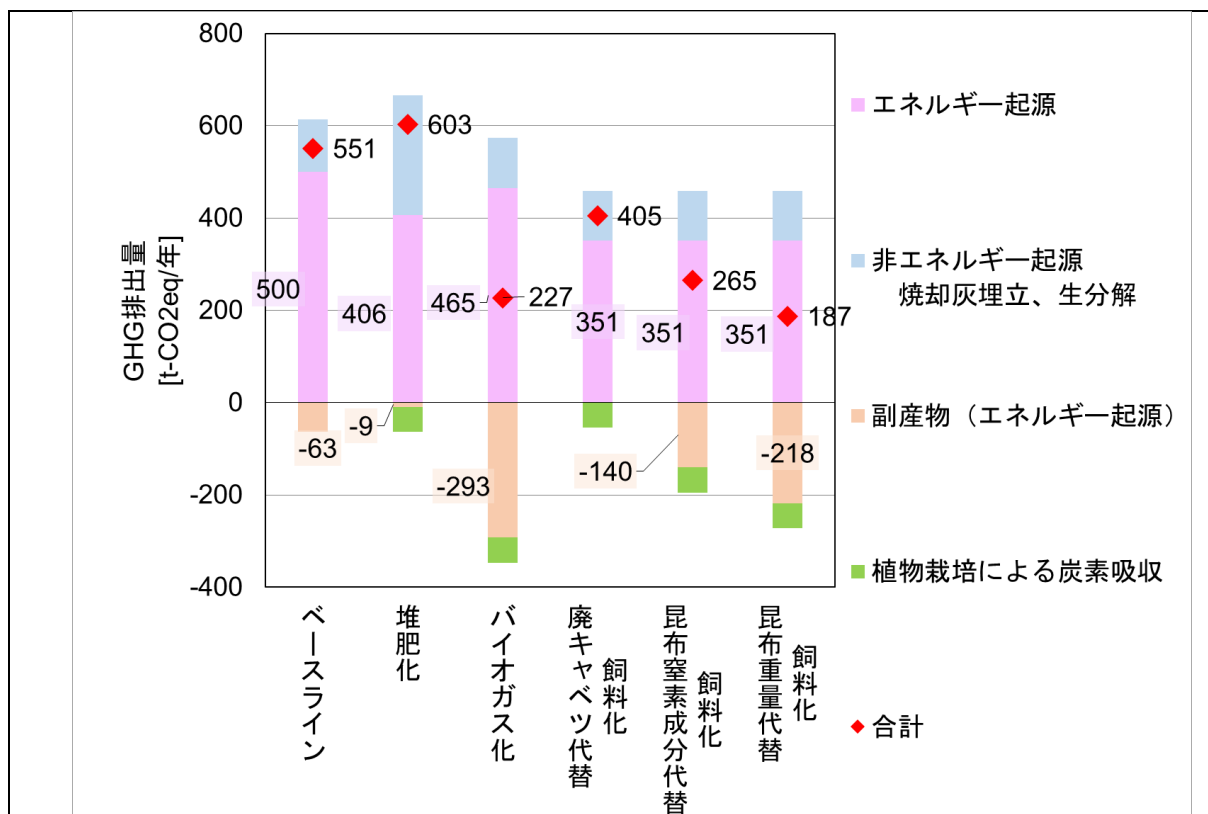


図 8-6 LCIA 結果（Mater-Bi、エネルギー起源/非エネルギー起源ごと）

b) PHBH

LCIA 結果を図 8-7、図 8-8 に示す。図 8-7 はプロセスの内訳ごとに、図 8-8 はエネルギー起源/非エネルギー起源の内訳ごとに示したものである。

GHG 排出量は飼料化（昆布重量代替）、バイオガス化、飼料化（昆布窒素成分代替）、飼料化（廃キャベツ代替）、堆肥化、ベースラインの順に小さくなった。

Mater-Bi は一部が化石資源から製造されているため固定されている炭素が少ないが、PHBH は植物原料のみから製造されているため、固定されている炭素が多いことで、ベースラインと堆肥化の順序が入れ替わったと考えられる。

また、図 8-8 より、いずれのリサイクル方法でもベースラインと比較するとエネルギー起源 GHG を削減できることが分かった。

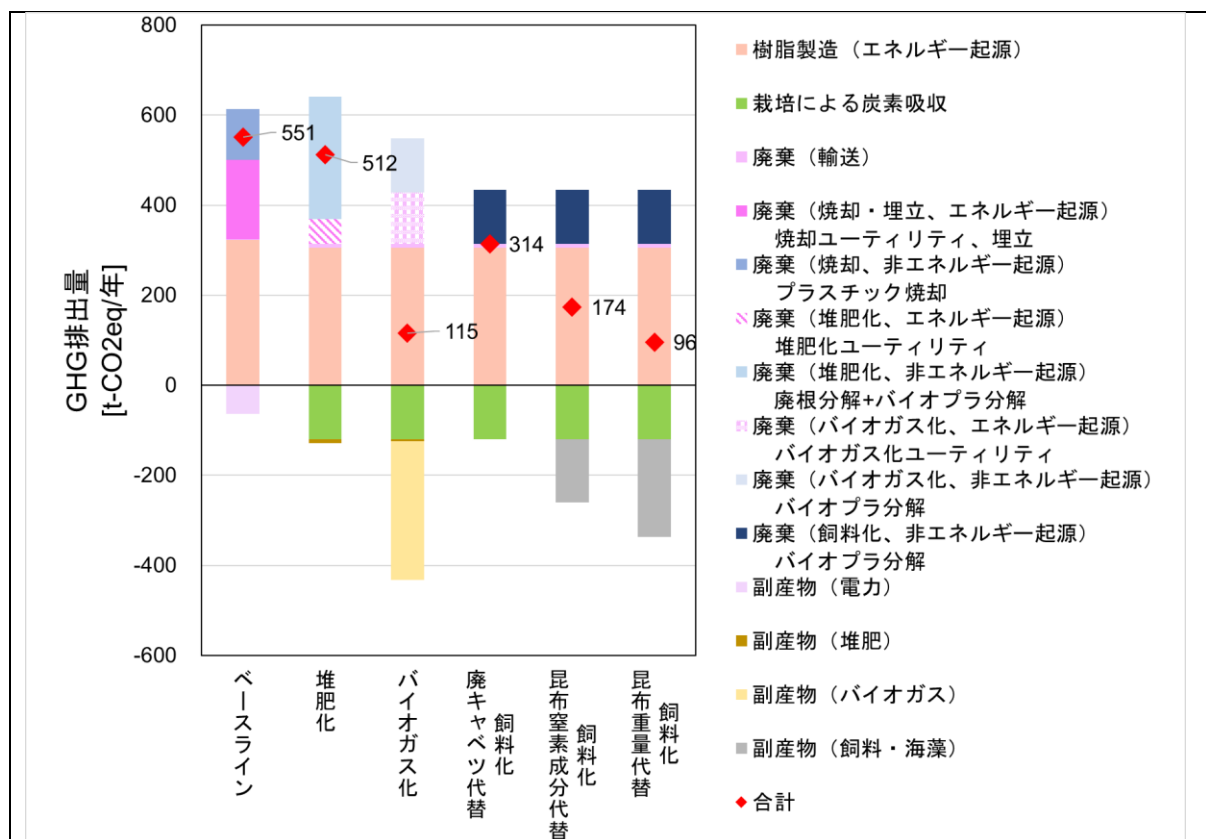


図 8-7 LCIA 結果 (PHBH、プロセスごと)

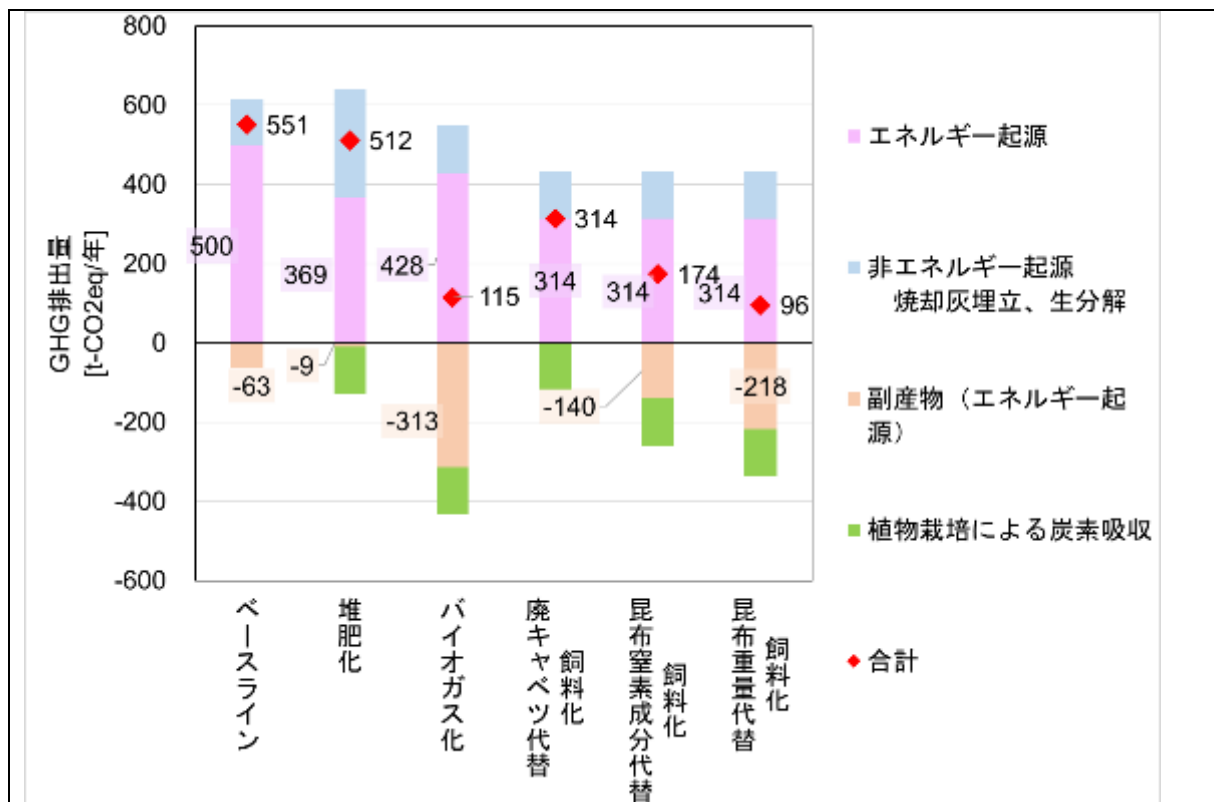


図 8-8 LCIA 結果（PHBH、エネルギー起源/非エネルギー起源ごと）

c) 酢酸セルロース

LCIA 結果を図 8-9、図 8-10 に示す。図 8-9 はプロセスの内訳ごとに、図 8-10 はエネルギー起源/非エネルギー起源の内訳ごとに示したものである。

GHG 排出量は飼料化（昆布重量代替）、バイオガス化、飼料化（昆布窒素成分代替）、飼料化（廃キャベツ代替）、ベースライン、堆肥化の順に小さく、Mater-Bi と同様の傾向を示した。

酢酸セルロースは Mater-Bi 同様、一部が化石資源から製造されているため固定されている炭素が少ないため、ベースラインと飼料化の順位が PHBH と入れ替わってしまうと考えられる。

また、図 8-10 より、いずれのリサイクル方法でもベースラインと比較するとエネルギー起源 GHG を削減できることが分かった。

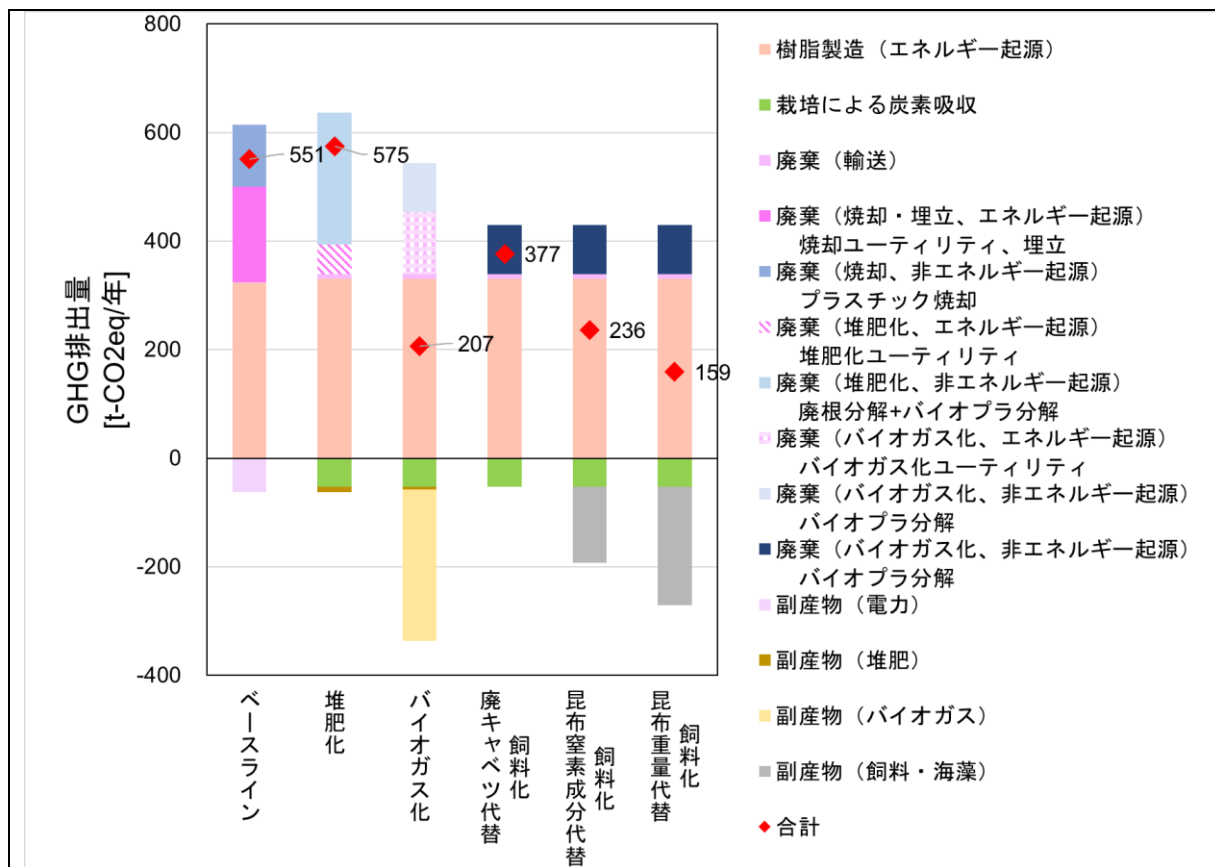


図 8-9 LCIA 結果（酢酸セルロース、プロセスごと）

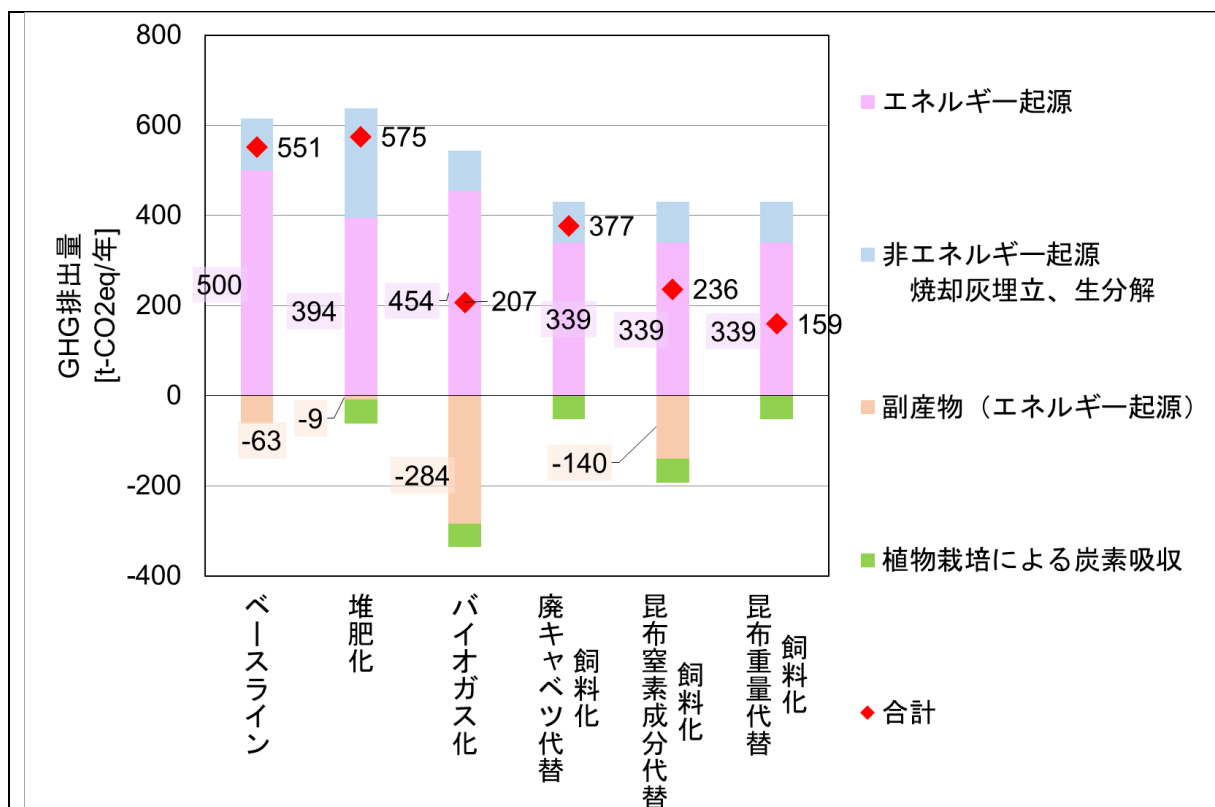


図 8-10 LCIA 結果（酢酸セルロース、エネルギー起源/非エネルギー起源ごと）

8.4 解釈・結論

以上より、GHG 排出量削減のためには、発電焼却からバイオガス化または飼料化に移行することが GHG 排出削減のためには望ましいことが分かった。ただし、飼料化は代替できる昆布量によっては期待したほどの GHG 排出量削減効果が得られない可能性があることから、代替できる昆布量の詳細な調査を実施する必要がある。

堆肥化は CH_4 や N_2O の発生により、非エネルギー起源 GHG 排出量が増加することで、ベースラインよりも GHG 排出量が大きくなってしまった。樹脂の植物原料割合が大きいものを使用することで、ベースラインよりも GHG 排出量を削減できる可能性があるが、個別に評価することが必要である。

8.5 今後の課題

8.5.1 培地重量について

現在、ポリウレタンで培地製造した場合と、バイオマスプラスチックで培地製造した場合、どちらも培地は同一重量と仮定している。しかし、実際には製造方法や密度の違いから、培地重量は異なることが予想される。これらは次年度に実証実験を通じて実測し、本 LCA に反映する。

8.5.2 培地加工について

現在、バイオマスプラスチックの培地加工は押出成形としているが、実際の製造方法は、バイオマスプラスチックの特性に応じて異なることが予想される。次年度に実証実験を通じて培地加工のライフサイクルインベントリを取得する予定である。

8.5.3 バイオガス化時のバイオマスプラスチックの生分解速度について

バイオガス化において、バイオマスプラスチックの生分解速度が廃根よりも遅い可能性がある。例えば、Mater-Bi の生分解速度は 300 日で 80% 程度であり [43]、バイオガス化施設に残存してしまう可能性がある。次年度に生分解速度とバイオガス化施設への影響を調査する必要がある。

8.5.4 バイオガス化の都市ガス代替について

本 LCA では、得られたバイオガス中のメタンと等量の都市ガスを代替できると仮定しているが、分離・精製等のプロセスが想定されておらず、GHG 排出量が過小評価されている可能性がある。バイオガス化によって得られたメタンを都市ガスとして利用している例は存在する [44] [45] が、次年度はバイオガス発電を含め、副産物の取り扱いについて検討する

必要がある。

8.5.5 バイオガス化の残渣である堆肥の取り扱いについて

本 LCA では、バイオガス化の残渣である堆肥はそのまま化学肥料代替として利用されるものと仮定した。しかし、現実には消化液の見た目やにおいから、農地への直接投与が敬遠されている。消化液をもみ殻や米ぬか、牛糞堆肥と混合・発酵させることで堆肥として利用する例[27]が存在することから、次年度は消化液の取り扱いについて検討する必要がある。

8.6 注意事項

今回使用したライフサイクルインベントリは各種文献の値を使用しており、実際の設備条件（発電効率など）やユーティリティ使用量の違いに注意する必要がある。

堆肥化、バイオガス化の残渣による肥料代替は本評価では同等分量の化学肥料代替としているが、化学肥料と堆肥では成分吸収量が異なることから、代替できる化学肥料の重量が過剰評価されている可能性がある。

また、樹脂原料製造の GHG 排出量は文献値をもとにしており、同一条件で評価されたものではないことに注意が必要である。本評価は個別の樹脂の優劣を比較するものではなく、リサイクル方法の違いを評価するものである。

9 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。

9.1 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 社に電話をかけ、17 社より回答を得た。下記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 日あたり 20 袋で 1 袋は 8 から 10kg。

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。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それほどでない。

9.1.1 植物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 6 社における状況を以下に記す。

9.1.2 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がある。これらの野菜は 30 日程度で出荷している。2、3 ヶ月で水耕栽培の排水を入れ替えるため、排水中にウレタン培地の微小片が流出することはほとんどない。使用しているウレタン培地の価格は 1 枚 300 ブロック付きで 150 円から 200 円となっている。

培地付きの方が野菜の持ちが良く廃棄代が削減できるため、培地を野菜に付けたまま出荷し、消費者がごみとして廃棄している。調査の結果、培地を切り離して出荷する場合、農家

で廃培地を敷地に埋めるケースもあることがわかった。

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適している。最近は環境負荷が少ないやし培地に変わってきている。

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だ。また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。

生分解性代替培地を使用する際に分解した物質が野菜の成長に影響を与えないか、養液に溜まりこんで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の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。

9.1.3 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。廃棄前にウレタンだけをよけて天日干しで乾燥させてから廃棄する。残ったサンチュの株の処理や発芽不良ではじいたものを処理するときにウレタンだけを分けるのが面倒だ。また収穫の際は10枚ずつ手で切り離し梱包している。

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作ってもらっているため、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でないと自社での使用は厳しい。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りにくくなる。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嬉しいとのことだ。

ウレタンの廃培地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処分代が上乗せされた値段だと提示すれば企業は買うかもしれないが個人農家などを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、単価の低い野菜を販売しているため、経済的な理由でウレタンが処分されていないのではないかと意見を頂いた。

9.1.4 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聞く。自社工場では廃棄量がそれほど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、一般農家では問題意識は利益のみで環境までは考えられていな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使い捨てで、40 日程度で廃棄する。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などでは、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。

9.1.5 J 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 円の物を使用中だ。

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重量を減らしてから産廃業者に出していた。風で廃培地が飛ぶのを防止するためにネットに入れ、早く乾燥するように広げていたため手間と人件費がかかっていた。コストは月 6 万円だった。現在は効率化を目指してコンテナに廃棄物を保管し、アームロール車ですくって 2 ヶ月に 1 度のペースで回収してもらう。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が高いのと、根の張り方が気になりだ。限られている面積でどれだけ効率よく、発芽するのか気になる。また法人に作物を出荷しているため欠品は許されない。自社の工場は大型ではないため発芽率 5%の変動も影響が大きい。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が導入には慎重の姿勢だった。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。

9.1.6 K 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、産廃業者に回収してもらい廃棄している。ごみ袋代と回収代が費用としてかかっている。使用後の植物残さは生ゴミ処理機（ゴミサー）に投入する。生ゴミ処理機は1日に約20kg分解できるものを使用している。処理機は配管に繋がっており、そのまま排水として流している。

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個当たりおよそ1円だ。当日は工場見学ができなかった。工場見学のために同社実証センターに後日訪問した。

9.1.7 M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、用途はなさそうだった。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思う。

9.2 まとめ

農家への実態調査はできていないが、廃培地を農地に埋めることによってマイクロプラスチック流出の一因となることが懸念される。本事業で検討している代替培地は海洋生分解性であるとともに土で分解する必要がある。

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、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る。令和4年度は令和3年度で調査した内容をもとに開発した代替培地のサンプルを各植物工場に送付し、社会実装に向けて試験を続ける。

10 まとめと今後の課題

10.1 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し、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目的とした。

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、現地訪問、オンライン面談で行った。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。これらの作業中に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。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 5 社を選定した。各企業と打ち合わせを行い、本事業の目的、素材詳細、開発目標などを説明した。また、生分解性樹脂の糸化、代替培地製造の可否を確認し、一部企業には生分解性樹脂サンプルを提供、試作試験も開始している。

令和 4 年度以降に向けては、候補材における培地の密度や物性が植物生育に最適な構造となる開発をすることが課題となる。他の企業にも生分解樹脂サンプルを提供し試作を依頼する予定であり、令和 3 年度で調査した内容をもとに開発した代替培地のサンプルを必要に応じて各植物工場に送付し、社会実装に向けて試験を続ける予定。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、海洋生分解性代替培地の使用によって環境負荷の低減に繋げる。

10.2 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 年度以降に向けては、令和 3 年度に引き続き、現在実施中の代替培地の海洋生分解性に係る試験を引き続き行い、海洋生分解性の評価を行う。

また代替培地の機能性については、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し、当該性能評価方法を用いて、自社の植物工場等において代替培地による植物生育を行い、開発状況の検討にフィードバックすることで効率的な事業の進捗に寄与することを目的とした。

令和 3 年度は、令和 2 年度リストアップした培地の性能評価項目を元に様々な候補原料を集め、複数の代替培地をもちいて、吸水性、保水性の定量的な評価を行い、候補原料を絞り込んだ。

令和 4 年度以降に向けて、令和 2 年度に開発した代替培地は現段階では繊維の太さを制御するまでには至っていないため、均一な品質の培地を作成し評価を行うことが課題である。また、植物工場からの培地微小片の定量化について、通常のハウスにおける養液栽培から排出されるウレタン量を見積もるため、太陽光下あるいは工場内に一定時間おいたポリウレタンフォームを分画し、ウレタン破片量を推定する計画である。

10.3 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、代替培地導入時の溶液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 年度以降に向けては、物流なども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するとともに、他の用途展開についても検討する必要がある。

10.4 ウレタン代替培地利用による生産コスト削減

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コスト（手選別費用や産業廃棄物の収集運搬・処理費用等）や、飼料などの再利用用途としての販売により見込まれる収益等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こと。また、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する。

令和 3 年度はウレタン培地の原料価格の調査、市場調査を行うことで、ウレタンフォーム

の原料価格が高騰していることを確認したが、海洋生分解性樹脂は既存ウレタンよりも原料価格が高額になることが想定される。

令和 4 年度は候補原料を量産企業候補に送付し、試作を依頼する。企業、形状、製法、代替原料樹脂の使用量によるコストを評価し、生産コスト削減を検討する予定である。社会実装に向け量産メーカー候補数社で、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、コスト削減に向けた検証を続けていく。また、加工費用などの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コスト（手選別費用や産業廃棄物の収集運搬・処理費用等）や、再利用方法（飼料としての販売等）により見込まれる収益等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。

10.5 ウレタン代替培地利用による温室効果ガス削減効果

本事業の最終年度（令和 4 年度）において、海洋生分解性を有する澱粉ポリエステル樹脂等の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ウレタン製の培地を代替すること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ことを最終目標とする。

①培地重量について：現在、ポリウレタンで培地製造した場合と、バイオマスプラスチックで培地製造した場合、どちらも培地は同一重量と仮定している。しかし、実際には製造方法や密度の違いから、培地重量は異なることが予想される。これらは次年度に実証実験を通じて実測し、本 LCA に反映する。②培地加工について：現在、バイオマスプラスチックの培地加工は押出成形としているが、実際の製造方法は、バイオマスプラスチックの特性に応じて異なることが予想される。次年度に実証実験を通じて培地加工のライフサイクルインベントリを取得する予定である。③バイオガス化時のバイオマスプラスチックの生分解速度について：バイオガス化において、バイオマスプラスチックの生分解速度が廃根よりも遅い可能性がある。例えば、Mater-Bi の生分解速度は 300 日で 80%程度であり [43]、バイオガス化施設に残存してしまう可能性がある。次年度に生分解速度とバイオガス化施設への影響を調査する必要がある。④バイオガス化の都市ガス代替について：本 LCA では、得られたバイオガス中のメタンと等量の都市ガスを代替できると仮定しているが、分離・精製等のプロセスが想定されておらず、GHG 排出量が過小評価されている可能性がある。バイオガス化によって得られたメタンを都市ガスとして利用している例は存在する [46] [44]が、次年度はバイオガス発電を含め、副産物の取り扱いについて検討する必要がある。⑤バイオガス化の残渣である堆肥の取り扱いについて：本 LCA では、バイオガス化の残渣である堆肥はそのまま化学肥料代替として利用されるものと仮定した。しかし、現実には消化液の見た

目やにおいから、農地への直接投与が敬遠されている。消化液をもみ殻や米ぬか、牛糞堆肥と混合・発酵させることで堆肥として利用する例 [45]が存在することから、次年度は消化液の取り扱いについて検討する必要がある。

11 参考資料：プラスチックに対する法規制に関する最近の動向

本事業で開発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生分解性プラスチック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前回報告した内容になる。2021 年(令和 3 年)の日本 JBPA（日本バイオプラスチック協会）が発表した変更点や海外の環境認証制度などを記載する。

11.1 欧州（EU）での使い捨てプラスチックに対しての法規制

欧州では 2019 年 6 月 5 日に「特定のプラスチック製品の環境への影響に関する EU 指令 2019/904」を公布した。この法案は 2021 年までに使い捨てプラスチック製品の流通を禁止するというもので、主な目的として、1 回または短期的に利用しその後廃棄されるプラスチックごみの流出を防ぐことを挙げている。2021 年 7 月 3 日より既に制定されており、EU 加盟国はこの措置を実施している。以下品目が禁止になった製品である [47]。

- 綿棒の軸
- カトラリー
- 皿
- ストロー
- マドラー
- 風船の棒
- 発泡ポリスチレン製の一部の製品（カップ、食品、飲料容器）
- 包装紙
- ウェットティッシュ、生理用品
- たばこの吸殻
- オキシ分解性のプラスチック製のすべての製品

欧州（EU）として、製品のプラスチック含有量、避けるべき廃棄方法、プラスチック製品が自然環境に流出した場合の影響についてなどより消費者に状況理解してもらうためのラベル表示を義務付けている。

今後の具体的な目標としては、

- 2025 年までにペットボトルの分別回収率 77%
- 2029 年までに 90%への引き上げ
- 2025 年からペットボトル飲料に 25%、2030 年からすべてのペットボトル飲料に 30%の再生プラスチックを使用

11.2 グリーンプラ識別表示制度の変更について

日本バイオプラスチック協会（以下 JBPA）は、2000 年（平成 12 年）以来 20 年以上にわたって生分解性プラスチック製品の正しい使用方法と普及促進を目的にグリーンプラマーク識別表示制度を運営してきたが、2020 年 6 月に監督官庁より「グリーンプラという名称が植物由来のプラスチックを想起させる。一般消費者の方は生分解性プラスチックと理解しないのではないか」との指摘があり、生分解性プラスチックと容易に認識できるような名称への変更を検討するように要請があった。

それを受け、2020 年 9 月より JBPA 内において名称変更とそれに係る一部制度の変更につき検討してきた。その改定案が、2021 年 6 月 8 日に開催され、2021 年度日本バイオプラスチック協会通常総会において承認された。[48]

a) 変更内容

1) 制度名称の変更

グリーンプラ識別表示制度を「生分解性プラ識別表示制度」と名称を変更する。

2) 制度内容の変更

グリーンプラという名称を廃止し、生分解性プラと称する。また、生分解性プラの中で JBPA のバイオマスプラ識別表示基準を満たす製品を生分解性バイオマスプラと称する。

3) マークデザインの変更

グリーンプラマークを廃止し、新たに生分解性プラマーク、生分解性バイオマスプラマークの 2 種類を制定する（図 11-1）。

4) 切り替えスケジュール

新しい制度、新しいマークへの切り替えは 2021 年 7 月からとする。

- ① あらたに認証された製品で、2021 年 7 月以降にマークを使用する製品はすべて新しいマークとする。
- ② 2021 年 7 月以降、更新される製品は新マークへの切り替えを進める。また、更新時期に関わらずより早く新マークへ切り替えることもできる。
- ③ 切り替えは 2024 年 3 月までに終了するように進める。[48]

1) 生分解性プラマーク



2) 生分解性バイオマスプラマーク



図 11-1 マークデザインの変更 [48]

11.3 バイオプラスチック識別表示制度

11.3.1 バイオプラスチック識別表示制度とは

一般消費者が バイオプラスチックである事を容易に識別できるように、日本バイオプラスチック協会（以下 JBPA）が定めるバイオプラスチック識別表示基準を満足するプラスチック製品（中間製品を含む；以下同じ）に シンボルマークの使用を許可する制度。

JBPA のバイオプラスチック識別表示制度（以下 当制度）で取り扱うバイオプラスチック製品は、自然環境中の微生物のはたらきにより分解されて最終的に二酸化炭素や水になる生分解性合成高分子化合物を成分として含む生分解性プラスチック製品「生分解性プラ」と、再生可能な有機資源由来物質を原料とする合成高分子化合物を成分として含むバイオマスプラスチック製品「バイオマスプラ」に分類され、いずれも資源循環型社会の形成に寄与する製品。[49]

11.3.2 制度発足の背景と経緯

生分解性プラスチック研究会（現・日本バイオプラスチック協会（JBPA））は、通商産業省基礎産業局長諮問機関（当時）であった“生分解性プラスチック実用化検討委員会”の提言（報告書：新プラスチック時代の幕開け（1995））に基づき、一般プラスチック製品との識別のための基準作りを1996年から進めてきた。

生分解性プラ識別表示制度は、同省生物化学産業課が（財）バイオインダストリー協会（J

B A) に 委託した「バイオインダストリー安全性向上調査—生分解性プラスチックの安全性等に関する調査—」の中で制定した原案を規準としており、第三者性（公開性・中立性）が極めて高い認証制度の一種といえ、さらに、日本に先行して市場の成立しているEU及び北米における同種認証制度との整合性も高いことにも特徴がある。本制度は、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た。

一方、2002年12月に発表された政府のバイオテクノロジー戦略大綱、バイオマスニッポン総合戦略において、化石資源の使用量縮減により地球温暖化を防止するために、植物原料、生分解素材の積極的利活用を推進する方針が明示された。

JBPAでは、かかる状況を踏まえ、幅広い会員会社の知識と努力を結集し、バイオマスプラ識別表示検討ワーキンググループ等で精力的な検討を行なった結果を取りまとめ、2006年度通常総会でバイオマスプラ識別表示制度が承認された。[49]

11.3.3 制度の目的

生分解性プラスチックは、その微生物分解性により使用後の環境負荷低減につながる環境配慮型のプラスチック。しかしその機能を有効に活用するためには一般の非生分解性プラスチック製品との識別、分別回収が必要な事に加え、分解した後も土壌などに悪影響を与えない安全性の保障が必要。生分解性プラ識別表示制度は、こうした生分解性の基準と、環境適合性の審査基準を満たした製品に「生分解性プラ」のマークと名称の使用を認め、一般消費者への正しい理解を広め、正しい使用法と製品の普及促進を目的とする制度。

バイオマスプラとは、再生可能なバイオマス（植物等）由来有機物質をプラスチック構成成分として所定量以上含む、バイオマスプラスチック製品のこと。バイオマスプラ識別表示制度は、当協会が定める基準を満足するバイオマス由来成分の割合（バイオマスプラスチック度）が確認され、かつ安全性の審査基準に合格した製品に「バイオマスプラ」のマークと名称の使用を認めることで、一般消費者にとってバイオマスプラスチック製品を既存の化石原料由来のプラスチック製品と容易に識別可能とし、製品の普及促進を目的とする制度。

[49]

11.3.4 制度の概要

生分解性プラ 及び バイオマスプラとして認定され、シンボルマークの使用が許可される製品は、必ず 生分解性プラ・ポジティブリスト 及び バイオマスプラ・ポジティブリストの 分類 A、分類 C、分類 E、もしくは 分類 F に登録された原材料を使用します。基本となる生分解性合成高分子化合物、バイオマス由来合成高分子化合物およびバイオマス由来熱硬化性プラスチック原料を登録する企業は、JBPA に対して 品質保証を前提とした JBPA の

正会員 又は 賛助会員でなければならない。

また その製品の認定を受ける企業は、識別表示制度の規約遵守を前提とした JBPA の会員（正会員・賛助会員・マーク会員・期間限定マーク会員）である必要がある。

ポジティブリストへの登録申請と シンボルマークの使用承認についての申請は、毎月開催される審査部会に上程され、審議される。審査結果は、遅滞なく申請者に連絡し（原則として Email）、許可証等は郵送される。また 翌月上旬（ポジティブリストについては 奇数月の月上旬）の JBPA のホームページの改訂時に併せて、リスト類の改訂が公開される。[49]

11.3.5 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。[49]

11.3.6 バイオマスプラの基準の概要

PL 分類 A に登録されたバイオマス由来合成高分子化合物、又は、分類 E に登録されたバイオマス由来熱硬化性プラスチック原料組成中のバイオマス由来成分を、25.0 重量%以上含まなければならない。

全ての構成材料（成分）は当協会指定の使用禁止物質に該当しないこと。

特定有害物質は使用しないこと。意図的使用がない場合でも 指定する最大許容濃度を超えないこと。[49]

11.4 識別表示基準

生分解性プラ 2000 年 4 月 （第 1 版）

2009 年 10 月 （改定）

2012 年 7 月 （改定）

バイオマスプラ 2006 年 6 月 （第 1 版）

2009 年 10 月 （改定）

2011 年 9 月 （改定）

2012 年 7 月 (改定)
 2018 年 11 月 (統合・改定)
 2021 年 6 月 (改定) [50]

11.4.1 生分解性プラ識別表示基準

- a) 「生分解性プラ」の全ての構成材料(成分)は PL に登録されていなければならない。
- b) 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。
- c) 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%以上, または 50.0 体積%以上含むものでなければならない。
- d) 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。
- e) 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。
- f) 含まれる特定元素の量は、別表 1 の上限値を超えてはならない。
- g) 「生分解性バイオマスプラ」表記を用いる場合は、バイオマスプラ PL 分類 A に登録されたバイオマス由来合成高分子化合物を使用し、当該バイオマス由来成分が製品全体の 25.0 重量%以上でなければならない。 [50]
- h)

別表 1 特定元素の含有量上限値 [50]

元素名	製品中の含有 上限量(ppm)	元素名	製品中の含有 上限量(ppm)
カドミウム(Cd)	0.5	セレン(Se)	0.75
鉛(Pb)	50.0	ニッケル(Ni)	25.0
クロム(Cr)	50.0	亜鉛(Zn)	150.0
砒素(As)	3.5	モリブデン(Mo)	1.0
水銀(Hg)	0.5	フッ素(F)	100.0
銅(Cu)	37.5		

参 考 CEN/TC261/SC4/WG2 N4 ; Requirements for packaging recoverable through composting and biodegradation - Test scheme and evaluation criteria for the final acceptance of packaging 昭和 2 5 年農林省告示第 1 7 7 号(肥料取締法に基づ

く特殊肥料等) 平成3年環境庁告示第46号「土壌の汚染に係わる環境基準」(農用地における土壌) 昭和48年総理府令「金属等を含む産業廃棄物に係わる判定基準を定める総理府令」

11.4.2 コンポスト化可能生分解性プラ識別表示基準

- 1) 「コンポスト化可能生分解性プラ」の全ての構成材料(成分)は PL に登録されていなければならない。
- 2) 構成材料として PL 分類 A-2 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。
- 3) 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%以上、または 50.0 体積%以上含むものでなければならない。
- 4) 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。
- 5) PL 分類 A-1 と 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。
- 6) PL 分類 B,C の構成材料の最大寸法は 2 mm 未満でなくてはならない。
- 7) 肉厚は、構成する各生分解性合成高分子化合物が崩壊性試験に合格した肉厚のうち最小値を超えてはならない。
- 8) 含まれる特定元素の量は、別表 1 の上限値を超えてはならない。[50]

11.4.3 バイオマスプラ識別表示基準

- 1) 「バイオマスプラ」の全ての構成材料(成分)は、別表 2 に定める使用禁止物質に該当してはならない。
- 2) PL 分類 A に登録されたバイオマス由来合成高分子化合物中、又は、分類 E に登録されたバイオマス由来熱硬化性プラスチック原料組成中のバイオマス由来成分を、25.0 重量%以上含まなければならない。
- 3) 鉛・カドミウム・水銀・六価クロムを含む化合物の使用を禁止する。意図的使用がない場合でも、これら特定有害物質の製品中に於ける含有量は、別表 3 に示す値を超えてはならない。[50]

別表 2 使用禁止物質 [50]

最新の「化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律（略称化審法）」で第 1 種及び 第 2 種特定化学物質に指定されているもの。

最新の「労働安全衛生法」に定める製造禁止物質。

最新の「毒物及び劇物取締法」において毒物に指定されているもの。

IARC（国際がん研究機関）の化学物質の発がん性についての評価分類でグループ 1 に 分類された化学物質。

当協会が特に使用が好ましくないとしたもの。

別表 3 特定有害物質の最大許容濃度（閾値） [50]

有害物質	最大許容濃度（ppm）
鉛	1000
カドミウム	100
水銀	1000
六価クロム	1000

参考 E U 指令（RoHS（電気電子機器の特定有害物質使用規制）指令，
E L V（使用済み自動車）に関する指令、）を参考に決定。

11.5 シンボルマーク運用基準

11.5.1 シンボルマーク運用基準

- 日本バイオプラスチック協会（以下 JBPA）は、バイオプラスチック識別表示制度の運用についての一切を判断する。シンボルマークの使用の許可を受ける者（以下被許可者）は、対象となる識別表示に関して、JBPA の指示に従わなければならない。
- 被許可者は、申請書を以て当委員会にその使用内容を予告し、使用許可を受けなければならない。
- シンボルマークを表示する場合は、登録番号を付記することを原則とする。
- 被許可者は、許可を受けたシンボルマークを 当委員会に無断で第三者に使用させてはならない。シンボルマークが表示された材料・部品が そのまま その顧客の商品に使用される場合には、その顧客企業は 当委員会にシンボルマークの使用許可を受ける必要はない。その場合には、その被許可者が その事実を事前に文書で当委員会に届け出なければならない。
- 被許可者は、当該製品を当委員会に寄託しなければならない。申請時に製品サンプ

ルが用意できない場合は、その旨を当委員会に届け出て、その指示に従わなければならない。

- f) シンボルマークの使用有効期間は、使用許可を受けた日から 3 カ年とする。ただし、期限内に使用継続の申請を行った場合はこの限りではない。
- g) シンボルマークの使用内容を変更する場合は、予め変更内容を当委員会に届け出なければならない。
- h) 「生分解性プラ」・「バイオマスプラ」の構成（成分、形状）内容を変更し、JBPA が使用を認めた製品内容と異なるものとなった場合は、直ちに当該製品へのシンボルマークの使用を中止しなければならない。ただし、予め変更内容について新たにシンボルマークの使用許可を申請するか、あるいは当委員会に連絡し、その承認を受けた場合はこの限りではない。
- i) シンボルマークの使用について疑義が生じた場合は、JBPA に諮った上で、その指導を受なければならない。
- j) バイオマスプラで、そのシンボルマークに「バイオマスプラスチック度」の表示を付する場合は、別途定める表示方法に従うものとする。
- k) マーク使用承認を得た上市製品、及びその紹介文書等の記載内容に疑義が認められた場合、その被許可者は JBPA からの問い合わせに対し 3 ヶ月以内に回答した上、その疑義を晴らさなければならない。
- l) 前項において、3 ヶ月以内に回答が得られなかった場合、JBPA はマーク使用許可証の失効を課する事が出来る。その場合、マーク使用者に失効を通知し、その事実をホームページに掲載する。
- m) シンボルマークの使用については、被許可者が全ての責任を負う。
- n) 被許可者が JBPA を退会した場合、退会した期日を以ってシンボルマークの使用許可は無効となる。JBPA はその事実をホームページに掲載する。[51]

11.5.2 シンボルマークの使用申請

- a) 新規にシンボルマークの使用許可を受けるか、あるいは既得のシンボルマークの使用について申請内容の変更を希望する場合は、識別表示基準ならびに運用基準に従って申請しなければならない。
- b) 正会員、賛助会員及びマーク会員（期間限定マーク会員を含む）は、シンボルマークの使用について下記に従い申請することができる。
- c) 申請対象となるプラスチック製品を構成する全ての材料（成分）と使用量を申請書（「生分解性プラ」は様式 X-1、「バイオマスプラ」は様式 X-2）に記載する。
- d) 「生分解性プラ」を申請する場合、主たる生分解性合成高分子化合物については、備考欄に○を記入する。その主たる生分解性合成高分子化合物は、生分解性プラ製品データベースに記載し、JBPA ホームページ上などで公開される。尚、複数の生分解性合成高分子化合物を使用する場合は最大量使用するものを主たる生分解性合成高分子化合物とする。「生分解性バイオマスプラ」表記を申請する場合、バイオマスプラ・ポジティブリストで規定されるバイオマスプラスチック度から誘導

されるバイオマスプラスチック度を小数点第一位（第二位を切り捨て）まで記入する。

- e) 「バイオマスプラ」を申請する場合、使用するバイオマス由来合成高分子化合物、中間製品、バイオマス由来熱硬化性樹脂原料、及び バイオマス由来熱硬化性樹脂中間製品について、バイオマスプラ・ポジティブリストで規定されるバイオマスプラスチック度から誘導されるバイオマスプラスチック度を小数点第一位（第二位を切り捨て）まで記入する。
- f) 申請対象となる「生分解性プラ」「バイオマスプラ」を成形（加工）する方法等について、特記事項があれば申請書（様式 X-1 及び X-2）に記載する。
- g) シンボルマークの使用法欄（様式 X-1 及び X-2）には、シンボルマークの使用内容（説明文、該当部分の表記文等）、使用範囲（表示場所、表示媒体等）を記載する。
- h) 申請者は、原則として申請する製品のサンプルとともに申請書を識別表示委員長に提出する。その時点でサンプルが用意できない場合は、提出時期を当委員会に示さなければならない。
- i) 審査結果は、当委員会が発行するシンボルマークの使用許可証（不許可の場合はその理由）を以って申請者に通知する。
- j) 申請書、添付書類、寄託されたサンプルは当委員会が厳重に保管し、申請内容の秘密は厳守する。ただし、シンボルマークが使用されている「生分解性プラ」「バイオマスプラ」については、名称・用途・提供元・有効期間などを、ホームページ上等で紹介する場合がある。[51]

11.5.3 部分限定シンボルマーク使用承認基準

① 部分限定生分解性プラ

生分解性プラと PL 未登録材料との複合製品であって、次の条件を満たすものについては、生分解性プラ部分に限定しシンボルマークの使用を認める。

- 1) PL 未登録であるが、一般に生分解性とされている材料（申請者は生分解性であるとの合理的説明が必要）との複合製品で、生分解性プラスチック部分の識別が容易な場合は、生分解性プラスチック部分に対してシンボルマークの使用を認めるものとする。シンボルマークの使用を許可された者は、シンボルマークの対象（或いは対象外）を明示しなければならない。また、シンボルマーク対象外についても、その安全性と生分解性に関しての責任を負わなければならない。
- 2) 非生分解性材料との複合製品であっても、非生分解性材料と生分解性プラスチック部分との識別及び物理的分離が容易な場合は、生分解性部分に対してシンボルマークの使用を認めるものとする。

② 部分限定バイオマスプラ

全体としてはバイオマスプラの認証基準に未達の製品であっても、バイオマスプラ部分とその他の部分との識別が容易な場合は、バイオマスプラ部分に対してシ

ンボルマークの使用を認める。いずれも、申請者は申請に際して、識別が容易なることを証明しなければならない。シンボルマークの使用を許可された者は、シンボルマークの対象（或いは対象外）を明示しなければならない。[51]

4. 各国の最新環境認証

1. 堆肥化認証

製品の堆肥化性能は、多くの国際的な第三者機関が試験とモニタリングを定期的を実施し、認定している。一般的に、堆肥化に関する規格への適合証明は義務づけられていない。しかし、一部の国では、特定の用途（例えば、キャリーバッグ、青果用袋など）に対して、これらの規格への適合証明を義務付ける法律が施行されている。産業用堆肥による廃棄を伴う用途に使用されるすべてのグレードは、図 11-2 に示す 4 つの認証のうち少なくとも 1 つを取得している。

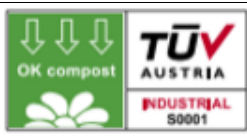
ロゴ	説明	認証機関	認証基準
	イタリアにおける産業用コンポスタビリティ。これにより、堆肥化可能な物品を明確に識別することができる。	Certiquality (イタリア)	EN 13432 + CIC による 認証スキーム
	欧州で認められた産業用生分解性認証	TÜV AUSTRIA (ベルギー)	EN 13432 EN 14995
	米国では、工業用堆肥化プラントでの堆肥化を保証	BPI (米国)	ASTM D6400
	工業的堆肥化性。ヨーロッパおよびオーストラリア	DIN CERTCO (ドイツ)	EN 13432 AS 4736

図 11-2 堆肥化認証例

EN 13432 : 堆肥化および生分解により回収可能な包装材に対する要求事項、
包装材の最終受入れに関する試験計画および評価基準

EN 14995 : プラスチックの堆肥化性能評価、試験計画および規格

ASTM 6400 : 堆肥化可能としてデザインされたプラスチックのラベリング規格

AS 4736 : 堆肥化およびその他微生物処理に適した生分解性プラスチック

2. 環境認証

サステナブルな製品の市場拡大に取り組むうえで、さまざまな環境認証制度も増加している。企業や消費者がより意識できるよう、透明性が高く、製品のサステナビリティ・パフォーマンスに関する詳細な情報が記載された下記のような環境認証が活用されている

2.1 e-Label !



本事業でウレタン培地代替素材の一つである熱可塑化でんぷん「Mater-Bi」は、京都クラブが推進する環境商標「e-Label !」のマルチラベルを取得した最初の製品である。e-Label ! は、原材料の再生可能エネルギー含有量、環境・社会的持続可能性、温室効果ガス排出量、回収方法といった客観的かつ透明性の高いパラメータに関して、製品の環境・社会的パフォーマンスを認証するタイプ 1 の環境認証である。

2.2 ISCC PLUS



ISCC PLUS は、プロダクションチェーンにおけるトレーサビリティの要件を確認することで、製品の持続可能性を監視・証明することを可能にする仕組みです。例えば、生物多様性の高い土地でバイオマスを栽培していないか、農法や人権が尊重されているかなどがチェックされます。本事業でウレタン培地代替素材の一つである熱可塑化でんぷん「Mater-Bi」はこの自主的な認証制度に基づき ISCC PLUS 認証を受けた。

2.3 Mezzi Tecnici AIAB



Mezzi Tecnici AIAB は、AIAB（イタリア有機農業協会）が開発した、有機農業で認められている技術的手段の製造に関するラベル。既存の規制を遵守するだけでなく Mezzi Tecnici AIAB 認証製品は、有機農業で認められている技術的手段であり、環境に適合し、厳しい安全要件を満たしている。特に、再生可能な原材料を最大限に使用すること、NON-GMO、再生可能な天然素材を使用すること（つまり、製品に組み換え DNA の痕跡があってはならず、原材料には適切な NON-GMO 証明書が必要）、製品が土壌中で完全に生分解され、悪影響を及ぼさないことを保証することがこの基準の目的となっている。

2.4 Ecolabel



EU エコラベルは、高い性能水準を保証しながら、ライフサイクルを通じて環境への負荷が少ないことを特徴とする製品やサービスを区別する、欧州連合のエコロジー品質ラベルである。このラベルは、禁止物質や制限物質の含有、水への毒性、生分解性および生物濃縮の可能性に関する要求事項、再生可能な成分に関する要求事項、包装に関する要求事項、および性能に関する特定の基準が定義されている。

(引用文献) Novamont 社 2020 年サステナビリティレポート

https://www.novamont.com/public/Bilancio%20di%20sostenibilit%C3%A0/Novamont_Sustainability%20Report%202020_web.pdf

12 引用文献

1. **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.
2. ー. (2020). 農林業センサス. (オンライン).
3. ー. (2019). 作物統計調査. (オンライン).
4. **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.
5. **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.
6. **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>.
7. **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>.
8. **株式会社大東建設**. 全国産業廃棄物処理費用・相場. <https://www.daitou.com/marketprice/industrial-waste>.
9. **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.
10. **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.
11. **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.
12. **バイオガス発電推進協議会**. (オンライン)<https://biogascouncil.jp/energy/index.php>.
13. **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.
14. ー. 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>.

15. **German Biogas Association.** Why Biogas? Fachverband Biogas.
<https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/EN-Why-Biogas>.
16. **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>.
17. ー. 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>.
18. **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/>.
19. **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).
20. **Merck KGaA.** デンプン トウモロコシ由来.
<https://www.sigmaaldrich.com/JP/ja/substance/starchfromcorn123459005258>.
21. **Amasawa, E., Yamanishi, T., Nakatani, J., Hirao, M., & Sato, S.** (2021). Climate change implications of bio-based and marine-biodegradable plastic: evidence from poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyhexanoate). Environmental Science & Technology, 55: 3380-3388.
22. **株式会社ダイセル.** 酢酸セルロースの生分解性について.
https://www.daicel.com/cell_ac/cellulose/ca_biodegradable.html.
23. **海洋プラスチック問題対応協議会 (JaIME) .** (2019). 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) .
https://www.nikkakyo.org/system/files/JaIME%20LCA%20report_0.pdf.
24. **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.
https://kyushu.env.go.jp/recycle/data/garbage/h22_2a/mat01_3.pdf.
25. **Matsuda, T., Yano, J., Hirai, Y., & Sakai, S. I.** (2012). Life-cycle greenhouse gas inventory analysis of household waste management and food waste reduction activities in Kyoto, Japan. The International Journal of Life Cycle Assessment, 17: 743-752.
26. **日本ウレタン工業協会.** 軟質ポリウレタンフォームの燃焼速度は他材料に比べて速いですか? http://www.urethane-jp.org/qa/kasai_nanshitsu/tokusei/q_13.html.
27. 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. 矢野順也、平井康宏、酒井伸一、出口晋吾、中村一夫、堀寛明. (2011). 廃棄物資源循環学会論

- 文誌, 22: 38-51.
28. **農研機構** . バイオマス利活用システムの設計と評価.
<http://www.naro.affrc.go.jp/org/nkk/soshiki/soshiki07-shigen/01shigen/sekkeitoheyoka.html>.
29. **Inaba, R., Nansai, K., Fujii, M., & Hashimoto, S.** (2010). Hybrid life-cycle assessment (LCA) of CO2 emission with management alternatives for household food wastes in Japan. *Waste Management & Research*, 28(6), 496-507.
30. **農林水産省**. V 堆肥など有機資源の利用.
https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/h_sehi_kizyun/pdf/ntuti23.pdf.
31. **環境省**. 5.B.1 コンポスト化 (Composting) (CH₄, N₂O) .
http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg-mrv/methodology/material/methodology_5B1_2020.pdf.
32. **柴田竜馬、堀田建治、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 固定効果に関して. 日本大学理工学部, 平成 22 年度. 学術講演会論文集.
33. **Marson, A., Masiero, M., Modesti, M., Scipioni, A., & Manzardo, A.** (2021). Life Cycle Assessment of Polyurethane Foams from Polyols Obtained through Chemical Recycling. *ACS omega*, 6: 1718-1724.
34. **Choi, B., Yoo, S., & Park, S. I.** (2018). Carbon footprint of packaging films made from LDPE, PLA, and PLA/PBAT blends in South Korea. *Sustainability*, 10: 2369.
35. **Shen, L., Worrell, E., & Patel, M. K.** (2012). Comparing life cycle energy and GHG emissions of bio-based PET, recycled PET, PLA, and man-made cellulose. *Biofuels, bioproducts and biorefining*, 6: 625-639.
36. **国立大学法人大阪大学**. 委託業務成果報告書. 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).
http://www.env.go.jp/recycle/R01_014_OsakaU.pdf.
37. **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.
https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/itiran_2020_rev.pdf.
38. **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>.

39. **東京ガス株式会社**. 都市ガスの種類・熱量・圧力・成分.
<https://home.tokyo-gas.co.jp/gas/userguide/shurui.html>.
40. **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 ― 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. <http://www.cjc.or.jp/file/CJC-1006.pdf>.
41. **Skowrońska, M., & Filipek, T.** (2014). Life cycle assessment of fertilizers: a review. *International Agrophysics*, 28: 1.
42. **van Oirschot, R., Thomas, J. B. E., Gröndahl, F., Fortuin, K. P., Brandenburg, W., & Potting, J.** (2017). Explorative environmental life cycle assessment for system design of seaweed cultivation and drying. *Algal research*, 27, 43-54.
43. **Bettas Ardisson, G., Tosin, M., Barbale, M., & Degli-Innocenti, F.** (2014). Biodegradation of plastics in soil and effects on nitrification activity. A laboratory approach. *Frontiers in microbiology*, 5, 710.
44. **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, .
45. **三浦玄太、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. 出版地不明: 戸田建設株式会社, 技術研究報告第44号(2018).
46. **バイオエナジー株式会社**. バイオガスの都市ガス導管への注入・受入の開始について.
<http://www.bio-energy.co.jp/news/バイオガスの都市ガス導管への注入・受入の開始>.
47. **European Commission**. Single-use plastics.
https://ec.europa.eu/environment/topics/plastics/single-use-plastics_en.
48. **日本バイオプラスチック協会**. グリーンプラ識別表示制度の変更について.
http://www.jbpaweb.net/wp-content/uploads/2021/06/Change_of_green_plastic_identification.pdf
49. **日本バイオプラスチック協会**. バイオプラスチック識別表示制度とは. 制度発足の背景と経緯. 制度の概要. <生分解性プラの基準の概要>. <バイオマスプラの基準の概要>. <http://www.jbpaweb.net/identification/>
50. **日本バイオプラスチック協会**. 識別表示基準. 生分解性プラ識別表示基準. 特定元素の含有量上限値. コンポスト化可能生分解性プラ識別表示基準. バイオマスプラ識別表示基準. 使用禁止物質. 特定有害物質の最大許容濃度(閾値).
http://www.jbpaweb.net/wp-content/uploads/2021/05/GP_01.pdf
51. **日本バイオプラスチック協会**. シンボルマーク運用基準. シンボルマークの使用申請.

部分限定シンボルマーク使用承認基準

http://www.jbpaweb.net/wp-content/uploads/2021/05/GP_02.pdf