

令和2年度

脱炭素社会を支えるプラスチック等資源循環システム構築実証事業
(PHA系バイオプラスチックのライフサイクル実証事業) 委託業務

成果報告書

令和3年3月

公益財団法人京都高度技術研究所

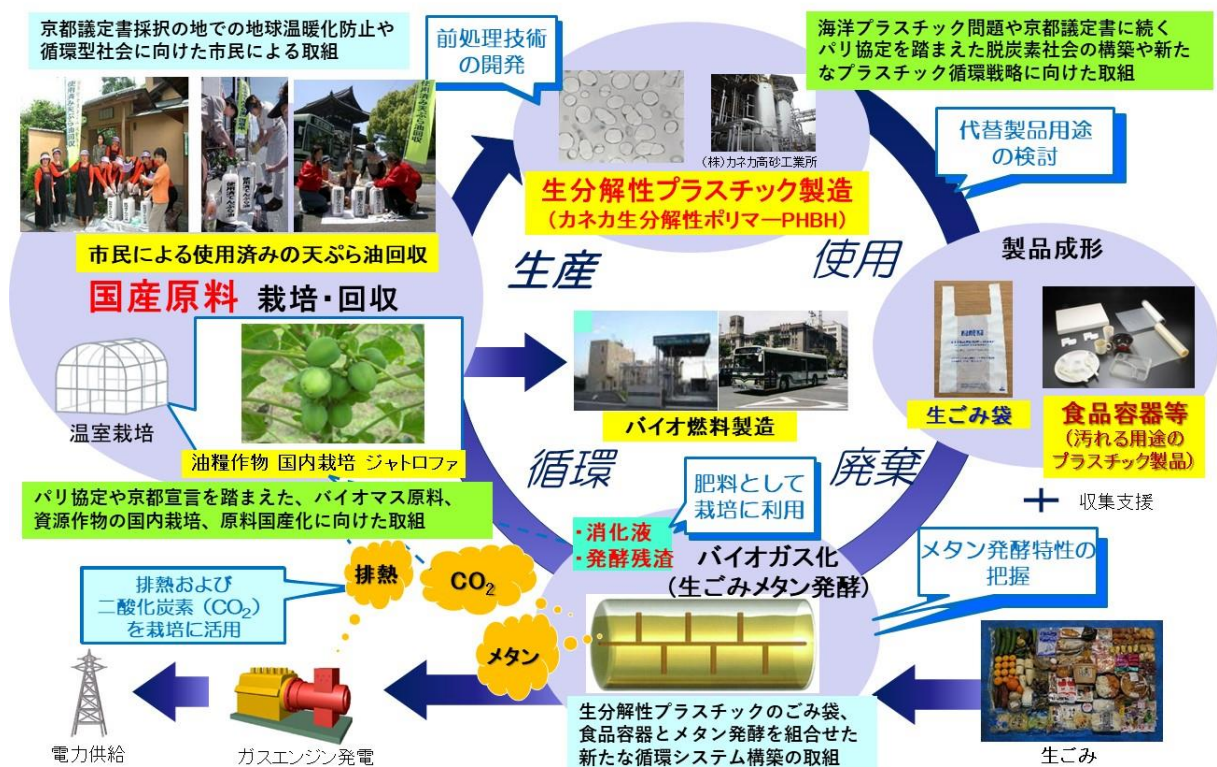
実証事業成果の要旨

令和2年度脱炭素社会を支えるプラスチック等資源循環システム構築実証事業
「PHA系バイオプラスチックのライフサイクル実証事業」

申請法人 (公財) 京都高度技術研究所
共同実施者 (株) カネカ、日立造船 (株)

(1) 本実証事業の概要

本事業は、脱炭素社会・循環型社会の構築や海洋プラスチック対策の推進に向け、ポリエチレンなどの石油系プラスチックに替え、新たに廃食用油等の国産の循環資源を原料に生分解性プラスチックである PHBH (3-ヒドロキシブチレート-co-3-ヒドロキシヘキサノエート重合体) を製造するものである。PHBH を生ごみ袋に利用し、収集した生ごみとともにバイオガス化してエネルギーを回収する新たな循環型ごみ処理システムを、ライフサイクルでの環境影響やコスト解析も踏まえて構築することを目指している。また、生分解性プラスチック原料を中長期的に確保するために、市民による廃食用油の回収率の更なる向上に向けた取組に加え、廃食用油以外の油脂源としてジャトロファ等の油脂作物の国内での栽培可能性を検討する。さらに生ごみ袋以外にも汚れる用途の食品容器などのプラスチック製品への利用拡大に向けた検討も進める。こうした技術実証とともに、成果を広く市民や事業者へ情報発信することで、新たな循環システムの社会実装に取り組むものである。



本事業の概要

(2) 本年度の成果

本年度は、廃食用油を用いた PHBH の培養生産技術の改良を図ることで PHBH の生産性向上を目

指すとともにポリマーの品質管理基準を満たすための精製処方の改良に取り組んだ。また、実機を用いた廃食用油からの PHBH 製造試験により量産時の生産性・品質を確認し、スケールアップ時の課題を抽出できた。さらに、廃食用油排出実態調査、廃食用油以外の国内外の油脂源の利用可能性に関する検討、生ごみ袋に用いる PHBH コンパウンドの試験的開発、PHBH 製生ごみ袋を用いた生ごみ回収実験の方法の検討、それらに関するライフサイクルでの CO₂ 削減効果及びコスト変化の定量化に向けた検討等を行った。

廃食用油を用いた PHBH の培養生産については、本年度開発した改良培養方法及び KNK-新 2 株を用いて実機培養実証試験を行い、廃食用油を単独の原料として PHBH を効率的に生産することに成功し、貴重なスケールアップデータを得ることが出来た。ただし、高油脂濃度維持による発泡という問題点が実機スケールで初めて顕在化したため、その対処方策を検討している。また、原料油脂の受け入れ基準に関して検討を進めた結果、色味、酸価、脂肪酸組成（ヨウ素価）の 3 指標によって管理できる見通しを得ている。

廃食用油前処理検討では、当初想定していた活性白土による簡易精製に期待した品質向上効果は認められなかったが、ポリマー精製処方の改良により、いずれの廃食用油でも PHBH ポリマー品質として重要な熱着色の程度（Yellow Index）と熱安定性を確保可能であることを見出した。

さらに、市中から広く収集した家庭系及び事業系廃食用油の性状（脂肪酸組成、劣化度）の分布等を整理するとともに、先進自治体における家庭系廃食用油の収集事例の調査を行った。

廃食用油以外の国内外の油脂源の利用可能性に関する検討については、油脂製造時の副生成物であるソーダ油滓のサンプルを入手し、脂肪酸分離試験及び分離した脂肪酸の脱色試験を実施し、これらの試験結果をもとに原料前処理コストを求めた。

また、油脂作物であるジャトロファについて、昨年度京都地域に構築した、加温及び CO₂ 富化が可能な実証温室を用いて、ジャトロファの栽培を継続し、栽培管理方法の検討を行った。その結果、国内で実生から生育させたジャトロファ樹に着生した種子からジャトロファ油が搾油できること及びメタン発酵消化液を唯一の肥料としてジャトロファが栽培できること等を確認できた。

PHBH 製生ごみ袋については、改良 PHBH を開発し、ポリマーとして生分解性の高い PHBH のみを用いて、生ごみ袋に必要な機械特性をほぼ満たすことを確認した。この改良 PHBH を用いてインフレーション成形の量産機で試作を行い、ヒートシール性、印刷性が問題ないことを確認した。

バイオガス化試験の結果からは、従来 PHBH フィルムは生分解率が優れているものの、物性改良のために従来 PHBH に市販の生分解性樹脂をブレンドしたコンパウンドフィルムについては生分解率が低下することが分かった。一方、先述の改良 PHBH フィルムは、従来 PHBH フィルムや基準となるセルロースと比べて生分解率が高いことが確認できた。また、バイオガス化連続試験を行った結果、バイオガス発生量が低下することなく安定して PHBH フィルムが分解できることを確認した。さらに分解途中の PHBH を含む消化液が植物の生長へ与える影響をコマツナノ栽培試験で検証したところ、見かけの生育の様子や外観からは生育阻害は認められなかった。

生ごみ袋以外の用途の検討にあたっては、PHBH が汎用プラスチックに比べて優れている点や課題等を整理した。また、リサイクル調和性等を踏まえて PHBH 利用適性を検討するとともに、生分解性と脱炭素性を兼ね備えた PHBH の特性が活かされる用途の具体的な製品例を整理した。

PHBH 製生ごみ袋を用いた生ごみ収集方法については、バイオガス化処理方式と消化液（発酵残渣）の利用状況を整理し、生ごみと紙ごみをバイオガス化の処理対象とする前提で、消化液の農業利用が可能のように異物の混入をなくす分別方法を志向した検討を行った。

本事業で提案するシステムのライフサイクルでの CO₂ 削減効果及びコスト変化の定量化について

は、PHBH 導入効果を評価するために、最新のインベントリデータを入手しプロセスモデルのブラッシュアップを図るとともに、評価シナリオの設定に原料拡大や分別収集、消化液の有効利用等を追加することとした。次年度は、モデルの精緻化を図るとともに実証データを反映することで、本実証結果に基づいた解析へと繋げていく予定である。

以上のように、本年度は各事業の検討課題は概ね計画通りに達成することができた。次年度は、最終年度であり、各要素技術の確立を図るとともに、PHBH 製生ごみ袋を用いた生ごみの分別排出・回収からバイオガス化処理までの一貫したサイクルに向けた実証試験に取り組む予定である。さらにライフサイクルでの CO₂ 削減効果及びコスト変化を明らかにし、システムとしての有効性を実証することで、社会実装に繋がるように意識した取組を進めていきたい。

Summary of the progress of the demonstration project in FY2020

Life cycle demonstration project for PHA-polymers

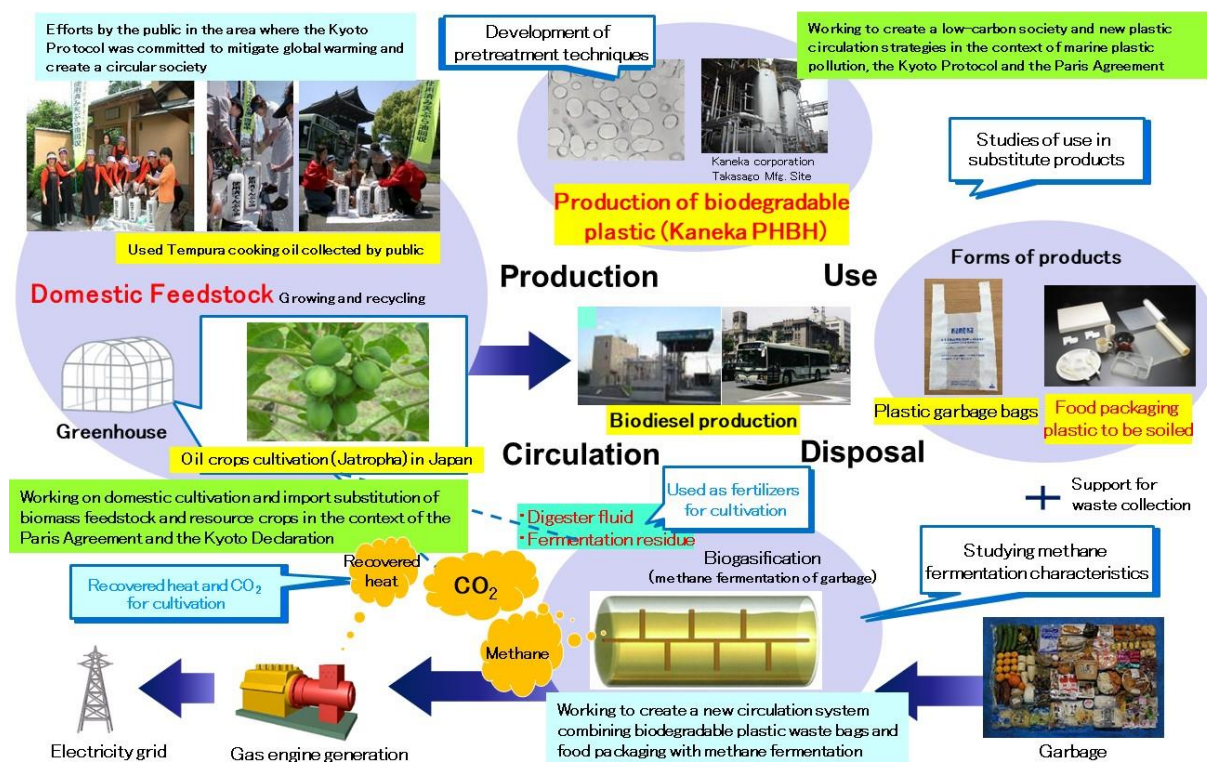
Representative: Advanced Science, Technology & Management Research Institute of KYOTO

Jointly implemented by Kaneka Corporation and Hitachi Zosen Corporation

(1) Outline of the demonstration project

In this project, as a step toward the establishment of a decarbonized society and a sound material-cycle society and reductions in marine plastic pollution, we have started using recycled resources in Japan such as waste cooking oil as feedstock for the manufacture of the biodegradable plastic PHBH (a 3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyalkanoate polymer), to be used as a substitute for petroleum-based plastics such as polyethylene. The objective is to use PHBH for garbage bags and create a new circular waste processing system with considerations of life cycle environmental effects and cost analysis. To recover energy, the new system converts the bags together with the collected garbage to biogas.

In order to assure supplies of feedstock for the biodegradable plastic in the medium and long term, as well as working to further improve the efficiency of waste cooking oil collection from the public, we are investigating the cultivation of oil crops such as jatropha (*Jatropha curcas*) to be used as an alternative oil source. We are also pursuing studies into expanding the scope of uses of the biodegradable plastic beyond garbage bags, to applications such as food packaging that is likely to be soiled. Through conducting these technical demonstrations and publicizing the results widely to the public and business, we are working on social implementation of the new circular system.



Outline of the demonstration project

(2) Results from FY2020

This year, we aimed to improve PHBH productivity by improving fermentative production technology of PHBH using waste cooking oil, and to improve the polymer refining process in order to satisfy quality management standards. By testing production of PHBH from waste cooking oil using commercial scale facility, we verified yield and quality in mass production and identified challenges for scaling up. Our other activities included the following: study of waste cooking oil discharge status; study of the possibilities of using oils other than waste cooking oil from Japan and abroad; experimental development of a PHBH compound to be used in garbage bags; planning of food waste collection experiment using PHBH garbage bags; and study to quantify lifecycle carbon reduction effects and impacts on cost.

We conducted demonstration test of PHBH fermentative production from waste cooking oil in commercial scale facility, using an improved fermentation process and KNK new strain 2 those we developed this year. We succeeded in producing PHBH efficiently with waste cooking oil as the sole feedstock and we obtained valuable data for scaling up. However, the foaming problem caused by maintain a high oil concentration became apparent for the first time with commercial scale facility, and we are currently studying ways to counter this problem. We have made progress in studying acceptance criteria for feedstock oils. We have obtained the prospect that acceptance can be managed by three criteria: color, acid value, and fatty acid composition (iodine value).

In studying preprocessing of the waste cooking oil, simple refining with activated clay that we initially expected did not result in quality improvement. However, we found that improved polymer refining process could secure the important PHBH polymer management indicators, namely coloration after heating (yellow index) and thermal stability, from any waste cooking oil.

In addition, we organized the distribution of properties (fatty acid composition and degradation levels) of household and commercial waste cooking oil widely collected from across the city, and investigated examples of the collection of household waste cooking oil in advanced municipalities.

To study the possibility of oils feedstock other than waste cooking oil from Japan and abroad, we obtained samples of soda soaps, which are byproducts of oil manufacture, and conducted fatty acid separation test and decolorization test of the separated fatty acids. Based on these test results, we calculated feedstock preprocessing costs.

To cultivate the oil crop *Jatropha*, we used the experimental greenhouse developed in the Kyoto region last year, which can create warm and CO₂ rich environment. We continued the cultivation of *Jatropha* and studied cultivation methods. The results confirmed that *Jatropha* oil can be extracted from seeds grown on *Jatropha* plants that have been raised from seedlings in Japan and confirmed that *Jatropha* can be cultivated with digester fluid from anaerobic digestion as the sole fertilizer.

As for the PHBH garbage bags, we developed an improved PHBH for and confirmed that it almost satisfied the mechanical properties of garbage bags, consists only of highly biodegradable PHBH as a polymer. The improved PHBH was used in a trial production of bags using blown film extrusion mass production equipment and confirmed that there were no problems with heat sealing and printability.

From the results of biogasification tests, we found that although the original PHBH film had excellent anaerobic biodegradability, a compound film, in which the original PHBH film was blended with a commercially available biodegradable resin to improve mechanical properties, had lower biodegradability in anaerobic condition. On the other hand, we have confirmed that the improved PHBH film has higher anaerobic biodegradability than the original PHBH film and cellulose as a reference. From continuous biogasification test,

we have confirmed that the PHBH film can be consistently decomposed without biogas production falling. We tested the effects of a digester fluid containing partially decomposed PHBH on plant growth in experimental cultivation of komatsuna (Japanese mustard spinach). From the growth stages and appearance, no growth inhibition was observed.

In studying uses of PHBH other than garbage bags, we reviewed the advantages and challenges of PHBH compared to general purpose plastics. We studied suitable applications of PHBH taking account of impacts on plastic recycling system and showed specific product examples in which the characteristics of PHBH, namely both biodegradability and decarbonization property, can be utilized effectively.

In considering the way of food waste collection using the PHBH garbage bags, we reviewed biogasification processes and utilization status of digester fluids (fermentation residues). Given the assumption that both food waste and waste paper will be subjects of biogasification, we conducted a study aimed at a waste separation method that will eliminate mixing of the foreign materials, so as to enable agricultural use of the digester fluid.

In order to evaluate the effects of introducing PHBH, we have been quantifying CO₂ reduction effects and impacts on cost throughout lifecycle of the system proposed in this project. We obtained the latest inventory data; refined the process model; and added feedstock expansion, separate collection, and effective use of digester fluids to the evaluation scenario specifications. In the next fiscal year, we will refine the model and incorporate the demonstration data, leading to the analyses based on this demonstration results.

As described above, each issue in this project was progressed basically as planned in this fiscal year. In the next fiscal year, which will be the final year of the project, we plan to establish each elemental technology and conduct a demonstration test for an integrated cycle from source separated disposal and collection of food waste using PHBH garbage bags to biogasification treatment. In addition, we will clarify CO₂ reduction effects and impacts on cost throughout lifecycle and will demonstrate the effectiveness of the system, so that we can promote conscious efforts to lead the system to social implementation.

< 目 次 >

1. 本実証事業の概要	1
1.1 実証事業概要	1
1.2 技術及び社会的意義	1
1.3 実施体制と実施計画	2
1.3.1 実施体制	2
1.3.2 実施計画	2
1.4 将来展望	4
1.4.1 実証事業後の実証技術の普及と波及効果	4
1.4.2 事業による普及量（2025 年、2030 年）	4
1.4.3 コスト見通し	5
2. 廃食用油及び再生可能資源を原料とした PHBH 製造に関する実証事業（実証事業 1）	6
2.1 生活系・事業系廃食用油を PHBH 原料に利用するための前処理技術に関する検討	6
2.1.1 目的	6
2.1.2 方法	6
2.1.3 結果	10
2.1.4 まとめと課題	21
2.2 PHBH 原料として利用するための更なる廃食用油の回収率向上を目指した収集方法に関する検討	23
2.2.1 目的	23
2.2.2 方法	23
2.2.3 結果	23
2.2.4 まとめと課題	35
2.3 廃食用油以外の国内外の油脂源の調達可能性及び食料と競合しないジャトロファ等の油糧植物の国内での栽培と特に国内中山間地（耕作放棄地）での原料栽培の検討	36
2.3.1 原料拡大シナリオの検討	36
2.3.2 油脂製造時の副生成物	36
2.3.3 ジャトロファ等の油脂植物	45
2.4 原料の切り替えによる CO ₂ 削減効果及びコスト変化に関する検討	58
2.4.1 CO ₂ 削減効果に関する検討	58
2.4.2 コスト変化に関する検討	60
2.5 まとめと課題	62
3. PHBH のごみ袋及びプラスチック代替製品への利用とバイオガス化に関する実証事業（実証事業	

2)	64
3.1 バイオガス化プラントでの利用に向けた PHBH 製生ごみ袋の製造に関する検討	64
3.1.1 目的	64
3.1.2 方法	64
3.1.3 結果	65
3.1.4 まとめと課題	68
3.2 バイオガス化を見据えた PHBH のプラスチック代替製品への利用可能性の検討	69
3.2.1 PHBH のプラスチック代替製品への利用可能性の検討	69
3.2.2 家庭ごみにおけるプラスチックごみの分別状況、汚れ具合等の調査	74
3.3 PHBH 製生ごみ袋のバイオガス化に関する検討	80
3.3.1 PHBH 製コンパウンドフィルムの嫌気分解性の評価	80
3.3.2 PHBH を含む分解消化液の栽培影響評価	96
3.4 PHBH 製生ごみ袋を用いた生ごみの分別方法等に関する検討	104
3.4.1 目的	104
3.4.2 方法	104
3.4.3 結果	104
3.4.4 まとめと課題	110
3.5 PHBH 製生ごみ袋による CO ₂ 削減効果の定量化に関する検討	113
3.5.1 目的	113
3.5.2 方法	113
3.5.3 結果	113
3.5.1 まとめと課題	114
3.6 まとめと課題	115
4. PHA 系バイオプラスチックのライフサイクルでの環境負荷低減効果に関する実証及びコストの評価（実証事業3）	117
4.1 環境負荷低減効果	117
4.1.1 目的	117
4.1.2 対象とする PHBH 原料と PHBH 素材使用製品	118
4.1.3 システム境界と環境影響領域	118
4.1.4 対象廃棄物と機能単位	119
4.1.5 シナリオ設定	119
4.1.6 単位プロセスモデル作成	121
4.1.7 解析結果と考察	122
4.1.8 まとめと課題	123
4.2 コスト評価	124
4.2.1 目的	124

4.2.2 システムフロー及びシナリオ設定.....	124
4.2.3 機能単位.....	125
4.2.4 コスト評価項目及び収集データ.....	125
4.2.5 評価イメージの具体化.....	126
4.2.6 コスト変化算出（事例分析）.....	126
4.2.7 まとめと課題.....	129
5. まとめと今後の課題.....	130
5.1 廃食用油及び再生可能資源を原料とした PHBH 製造に関する実証事業（実証事業 1）.....	130
5.2 PHBH のごみ袋及びプラスチック代替製品への利用とバイオガス化に関する実証事業（実証事業 2）.....	131
5.3 PHA 系バイオプラスチックのライフサイクルでの環境負荷低減効果に関する実証及びコストの評価（実証事業 3）.....	133

1. 本実証事業の概要

1.1 実証事業概要

本事業は、脱炭素社会・循環型社会の構築や海洋プラスチック対策の推進に向け、ポリエチレンなどの石油系プラスチックに替え、新たに廃食用油等の国産の循環資源を原料に生分解性プラスチックを製造するものである。この生分解性プラスチックを生ごみ袋に利用し、回収した生ごみとともにメタン発酵（バイオガス化）してエネルギーを回収する新たな循環型ごみ処理システムをライフサイクルでの環境影響やコスト解析も踏まえて構築することを目指している。

また、生分解性プラスチック原料を中長期的に確保するために、市民による廃食用油の回収率の更なる向上に向けた取組に加え、廃食用油以外の油脂源の調達可能性を追求する必要がある。そのため、焼却施設やバイオガス化施設からの排熱、排ガス中の CO₂、メタン発酵消化液等を活用し、ジャトロファ等の油脂作物の温室栽培や耕作放棄地での栽培を検討する。さらに生ごみ袋以外にも使い捨て用途のプラスチック製品や汚れる用途の食品容器などへの利用拡大に向けた検討も進める。こうした技術実証とともに、成果を広く市民や事業者へ情報発信することで、新たな循環システムの社会実装に取り組むものである。

1.2 技術及び社会的意義

第4次循環型社会形成推進基本計画、プラスチック資源循環戦略及びバイオプラスチック導入ロードマップでは、プラスチックに係る資源循環対策及び CO₂ 削減対策として、バイオプラスチックの利用促進が位置付けられている。ただし、我が国では、バイオプラスチック原料に適した糖作物や油脂作物の賦存量が諸外国と比べて少ないため、バイオプラスチックモノマー・ポリマーの大半は海外から輸入されたものである。我が国におけるバイオプラスチック利用促進を本格的に進め、バイオプラスチック関連産業の振興を図るには、国産バイオマスを原料としたバイオプラスチックの製造及びその利用先・市場を拡大することが必要である。

生分解性を有するバイオマスプラスチックのうち PHA¹系バイオプラスチックは、主に油脂を原料に微生物反応を利用して製造され、他の生分解性プラスチックよりも高い生分解性を有するという特徴があり、海洋に非意図的に排出されたとしても海洋中の微生物によって生分解される等、海洋プラスチックごみ対策としても注目される素材である。これらの背景を受け、本事業では、廃食用油をはじめ多様なバイオマスを原料とした PHA 系バイオプラスチックの国内での製造及びその普及拡大を図るものである。

また、本事業では、生分解性に優れた生ごみ袋による生ごみ収集・バイオガス化モデルの実現性・有効性を実証するとともに、焼却施設やバイオガス化施設からの排熱、排ガス中の CO₂、メタン発酵消化液の活用を図るものであり、今後、生ごみバイオガス化施設の導入を予定する地方自治体への参考事例になることが期待される。さらに、副次的効果として、廃食用油の回収効率の向上や、国内におけるジャトロファの栽培技術の確立も国産バイオマスの製造・利用拡大に貢献すると考えられる。

¹ Polyhydroxyalkanoate（ポリヒドロキシアルカン酸）の略称

1.3 実施体制と実施計画

1.3.1 実施体制

(公財) 京都高度技術研究所が申請法人として全体をとりまとめ、廃食用油からの生分解性ポリマーPHBH の製造及び PHBH 製生ごみ袋の製造については(株) カネカ、PHBH 製生ごみ袋等のバイオガス化については日立造船(株)、廃食用油の回収システム検討及びジャトロファ栽培については(株) レボインターナショナル、廃食用油等の詳細分析については(株) 島津テクノリサーチ、ソーダ油滓の評価試験については(株) KRI、生ごみの分別方法検討及びメタン発酵消化液調査については(株) エックス都市研究所、PHBH のプラスチック代替製品への利用可能性については三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング(株)、LCA 解析による循環システム環境負荷低減効果の評価については京都大学がそれぞれ主たる担当として構成メンバーとなり、京都市をフィールドとして、幅広い学識経験者の指導の下、全構成メンバーが協同して効率的かつ効果的に実証事業を遂行できる体制を整えている。

図 1 に実施体制表を示すが、メンバー名の横に、表 1 に示すテーマの中の主たる担当を付記する。

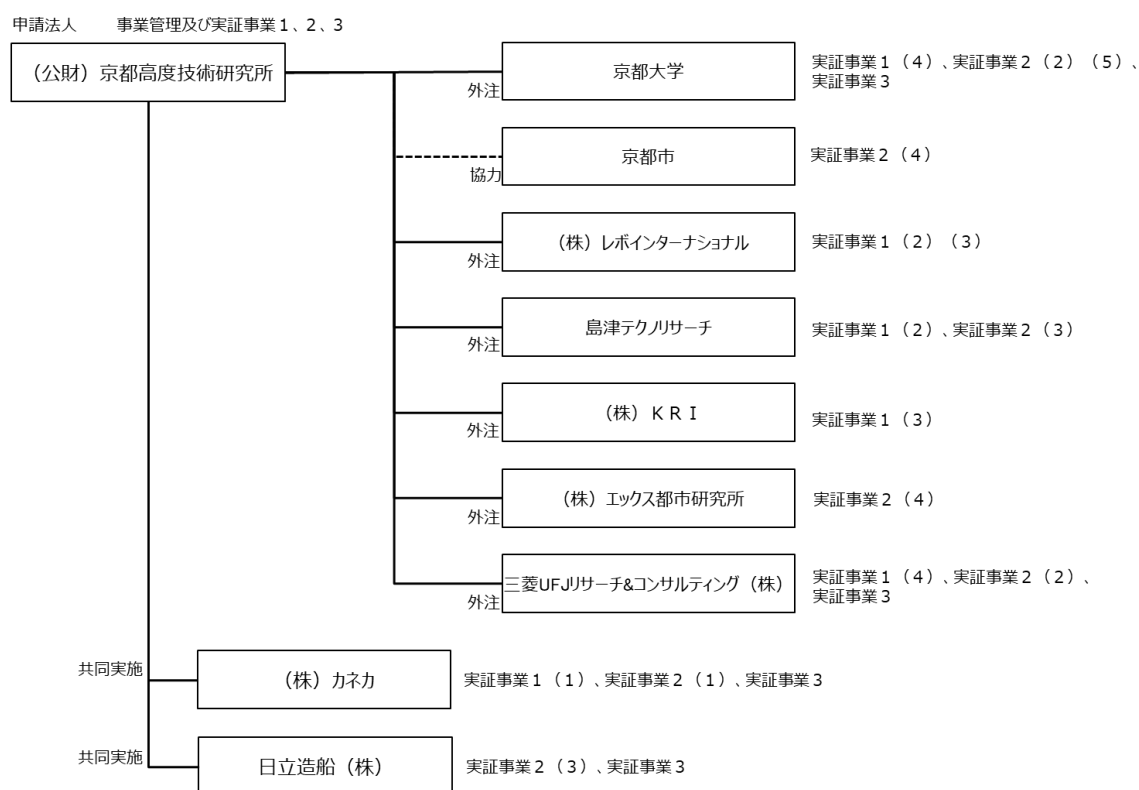


図 1 実施体制表と主たる担当テーマ

1.3.2 実施計画

本事業では、国産バイオマスによるバイオプラスチック製造及びその特性を活かしたごみ処理システムの確立に向け、生分解性バイオマスプラスチックである PHA (ポリヒドロキシアルカン酸) の一種である PHBH (3-ヒドロキシブチレート-co-3-ヒドロキシヘキサノエート重合体) に関して、「廃食用油等からの PHBH 製造」及び「PHBH 製生ごみ袋の利用とバイオガス化」に関する実証を行い、ライフサイクルでの環境負荷低減効果を明らかにすることを目的としている。

本年度は、廃食用油を用いた PHBH の培養生産技術の改良を図ることで PHBH の生産性向上を目

指すとともにポリマーの品質管理基準を満たすための精製処方の改良に取り組む。また、実機を用いた廃食用油からの PHBH 製造試験により量産時の生産性・品質を確認し、スケールアップ時の課題を抽出する。廃食用油排出実態調査、廃食用油以外の国内外の油脂源の利用可能性に関する検討、生ごみ袋に用いる PHBH コンパウンドの試験的開発、PHBH 製生ごみ袋を用いた生ごみ回収試験の方法の検討、それらに関するライフサイクルでの CO₂ 削減効果及びコスト変化の定量化に向けた検討を行うものである。

実証事業は大きく分けて、3 つの実施課題から構成されており、それぞれの実施課題における最終年度目標と本年度の実施計画を次表に示す。

表 1 最終年度目標と本年度の実施計画

実施課題	最終年度目標	本年度の実施計画
【実証事業 1】 廃食用油及び再生可能資源を原料とした PHBH 製造に関する実証事業	(1)PHBH 製造に向けた廃食用油の前処理技術を開発する。 (2)PHBH 原料として活用することを念頭に置いた効率的な廃食用油の回収システムを提案する。 (3)油脂製造時の副産物及び油糧作物について PHBH 原料としての実現可能性を評価する。 (4)原料切り替え（海外産パームオイル→国内廃食用油）に伴う CO ₂ 削減効果及びコスト変化を評価する。	(1)廃食用油生産性向上と品質管理基準を満たす方法の開発の方向性を明らかにする。 (2)生活系及び事業系廃食用油の効率的な回収システムに必要な要件を整理する。 (3)ソーダ油滓の調査、ジャトロファの栽培での収率向上及び消化液の肥料利用を検討する。 (4)パームから廃食用油への原料切り替えによる CO ₂ 削減効果及びコスト変化を検討する。
【実証事業 2】 PHBH 製生ごみ袋及びプラスチック代替製品への利用とバイオガス化に関する実証事業	(1)バイオガス化プラントでの利用に向けた PHBH コンパウンドを開発し、廃食用油を原料とした PHBH 製生ごみ袋を試作する。 (2)バイオガス化を見据えた PHBH 製のプラスチック代替製品への利用可能性を検討する。 (3)PHBH 製生ごみ袋のバイオガス化性能に関する基礎実験及びスケールアップに関する検討を行う。 (4) PHBH 製生ごみ袋の実用性試験及び生ごみの収集に関する検討を行う。 (5)PHBH 製生ごみ袋を導入することによる CO ₂ 削減効果を定量化する。	(1)パームオイルもしくは廃食用油を原料とした PHBH コンパウンドにて、生ごみ袋を試作し性能を評価する。 (2)プラスチックのリサイクル調和性を踏まえ、PHBH の利用適正を整理する。 (3)PHBH コンパウンドフィルムを用いたバイオガス化性能を評価できる試験系を構築する。 (4)PHBH 製生ごみ袋を用いた生ごみの回収及びバイオガス化試験に向けた検討を行う。 (5)PHBH 製生ごみ袋を導入することによる CO ₂ 削減効果を定量化するための基礎データを収集する。
【実証事業 3】 PHA 系バイオプラスチックのライフサイクルでの環境負荷低減効果に関する実証及びコストの評価	(1)国産バイオマスを原料とした PHBH のライフサイクルでの環境負荷低減効果及びコストを定量化し、システム全体での有効性を実証する。	(1)ライフサイクルでの環境負荷低減効果を検討するバウンダリを検討する。 (2)ライフサイクルでの環境負荷低減効果及びコストの評価に用いる基礎データ収集・整理を実施する。

1.4 将来展望

1.4.1 実証事業後の実証技術の普及と波及効果

PHBH 製生ごみ袋は、生ごみ処理にバイオガス化施設の活用を図ろうとする全国の自治体で採用が可能であり、本事業での成果をもとに、積極的に情報・データの提供等を行っていくとともに、多様な関係者に対し情報提供や要請を行っていく予定である。また、政令指定都市で初めて、焼却施設とバイオガス化施設を併設した京都市をフィールドに検討することにより、生ごみなどの食品廃棄物のバイオガス化によるエネルギー回収と循環利用に取り組む全国の自治体等への普及拡大が期待できる。

さらに、使い捨て用途のプラスチック製品や現状では廃棄後のリサイクルが困難で焼却せざるを得ないプラスチック等、循環利用の観点から廃棄後にバイオガス化することが望ましいプラスチック製品についても検討を行う予定であり、これらの結果に基づき、PHBH の利用が波及していくものと考えられる。

加えて、本事業で明らかにするライフサイクルでの環境負荷低減効果やコスト変化等を示しながら、情報発信や環境教育を行っていくとともに、関連プロジェクト等との連携化を積極的に進める予定であり、これによりカーボンプライシングや炭素税等の社会経済システムの変革の必要性を市民や事業者理解してもらうことで、従来のオイルリファイナリー社会からバイオリファイナリー社会へと転換することが期待される。

1.4.2 事業による普及量（2025 年、2030 年）

共同実施者である（株）カネカでは、2019 年 12 月に PHBH 製造能力を約 5,000 トン/年に増強しており、さらに、2025 年頃までに 20,000 トン/年まで増強予定である。また、市場の動向を踏まえ、2030 年頃までに 200,000 トン/年まで製造能力を拡張する可能性がある。

本事業は京都市をフィールドとした実証事業を実施しているものの、生ごみのバイオガス化を実施する全国の自治体に、嫌気条件下で分解する PHBH 製生ごみ袋を普及させることを目指している。



図 2 PHBH 製造能力の増強及び適用拡大計画（出典：カネカ作成資料）

1.4.3 コスト見通し

現在の PHBH 樹脂価格は代替対象樹脂であるポリエチレン等より高価であり、5,000 トン/年に製造能力を拡大した後も大きくは変わっていない。樹脂価格を下げるには、スケールメリットを活かすだけでなく、製造プロセスの更なる合理化を図る必要があり、今後予定する 20,000 トン/年への能力増強の際、プラント設計の抜本的な見直し等が行われる見込みである。

なお、「プラスチック資源循環戦略」に基づくプラスチック対策が今後進められていく中、従来のオイルリファイナリーからバイオリファイナリーへの社会変革に向けて、将来的なカーボンプライシングや炭素税等の強化、ワンウェイプラスチックへの規制等、代替対象樹脂との価格差を埋める施策の導入も重要と考えられる。本事業では、これらの社会変革の必要性を市民や事業者等に理解してもらえよう、LCA による環境負荷低減効果の定量化やライフサイクルでのコストの定量化を進め、情報発信を積極的に行っていくこととしている。

2. 廃食用油及び再生可能資源を原料とした PHBH 製造に関する実証事業（実証事業 1）

2.1 生活系・事業系廃食用油を PHBH 原料に利用するための前処理技術に関する検討

2.1.1 目的

廃食用油を PHBH 原料として利用するための PHBH の培養生産技術の開発検討を目的とした。培養工程においては、特に、品質のバラつきが想定される廃食用油を原料として使いこなす際の、発酵工程及び PHBH 品質に影響を及ぼす要因を洗い出し、未使用の食用油脂同等の生産性、品質を達成するために必要な廃食用油の品質管理基準（受け入れ基準）を明らかにすることを目的とした。

廃食用油精製、ポリマー精製工程では、これまでの検討で、廃食用油を蒸留精製することにより色味等の改善に効果的であることを見出したが、量産設備を想定すると、設備ボリューム、変動コストが大きくなるなど、経済性の面で課題があった。白土処理をベースとした廃食用油簡易精製を検討し、さらに PHBH 精製処方に改良を加えることで、廃食用油を主原料とした PHBH 生産における目標品質、生産性確保を目的とした。

また一部廃食用油に含まれるシリコン系消泡剤に由来し生成すると考えられる微量シロキサンが排水嫌気処理後のバイオガス中に長期にわたって混入した場合、ボイラー排管内で蓄積し、燃焼トラブルを引き起こすリスクが懸念されている。そこで本検討では、排水工程にて適切にシロキサンを除去可能な設備仕様について併せて検討を実施した。なお、ガス化するの低分子量シロキサンのみであることから、環状 D3~D6、鎖状 L2~5 のシロキサン除去を目的とした。

2.1.2 方法

次図に検討の全体フロー及び各々の工程における検討課題を示した。



図 3 廃食用油利用検討の全体フロー

（1）廃食用油を用いた PHBH 培養技術の開発

（株）カネカにて独自に入手した種々の廃食用油（次表）及び（株）カネカにて開発した PHBH 生産微生物（以下、KNK-1 株）を用い、ラボにて PHBH の生産評価を実施することで廃食用油の油種による生産性、品質の差異を確認した。

表 2 検討に使用した廃食用油

		RBD パーム	油脂 A	油脂 B	油脂 C	油脂 D	油脂 E	油脂 F	油脂 G	油脂 I	油脂 J	油脂 K	油脂 H
C12	ラウリン酸										11.2		
C14	ミリスチン酸	1	0	0.2	0.1	0.5	1.1	0.2	2.3	0.3	4.9	0	0.2
C16	パルミチン酸	39.6	6.2	9.5	10.4	19.2	43.0	9.5	19	13.1	27	6.9	8.9
C16:1	パルミトレイン 酸	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.2	0.2	2.4	0.2	0.3	0.2	0.3
C17	マルガリン酸								1.5				
C17:1	ヘプタデセン酸								0.6				
C18	ステアリン酸	4.4	2.5	2.3	3.7	3.5	4.5	2.3	10.7	2.7	5.7	2.6	2.7
C18:1	オレイン酸	42.7	67.2	54	32.5	46.3	40.8	54.4	50.5	57.3	38.2	50.4	54.3
C18:2	リノール酸	11.2	19.1	26.1	44.7	25.0	9.1	25.6	7.8	18.9	8.2	29.4	25
C18:3	リノレン酸	0.2	2.5	5.9	6.9	3.4	0.2	5.9	2.9	5.7	0.7	8.6	6.5
C20	アラキジン酸	0.4	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.5	0.3	0.5	0.4	0.5	0.5
C20:1	エルカ酸	0.2	1	0.8	0.5	0.5	0.2	0.8	0.6	0.9	0.3	0.9	0.9
C22-24		0	0.7	0.4	0.5	0.5	0.1	0.6	0.1	0.4	0.3	0.1	0.7
PHBH 生産性		100	74	74	77	70	91	74	82	88	98	-	-
飽和 脂肪酸 割合(%)		45.4	9.2	12.5	14.6	23.7	49.2	12.5	33.0	16.8	44.1	10	12

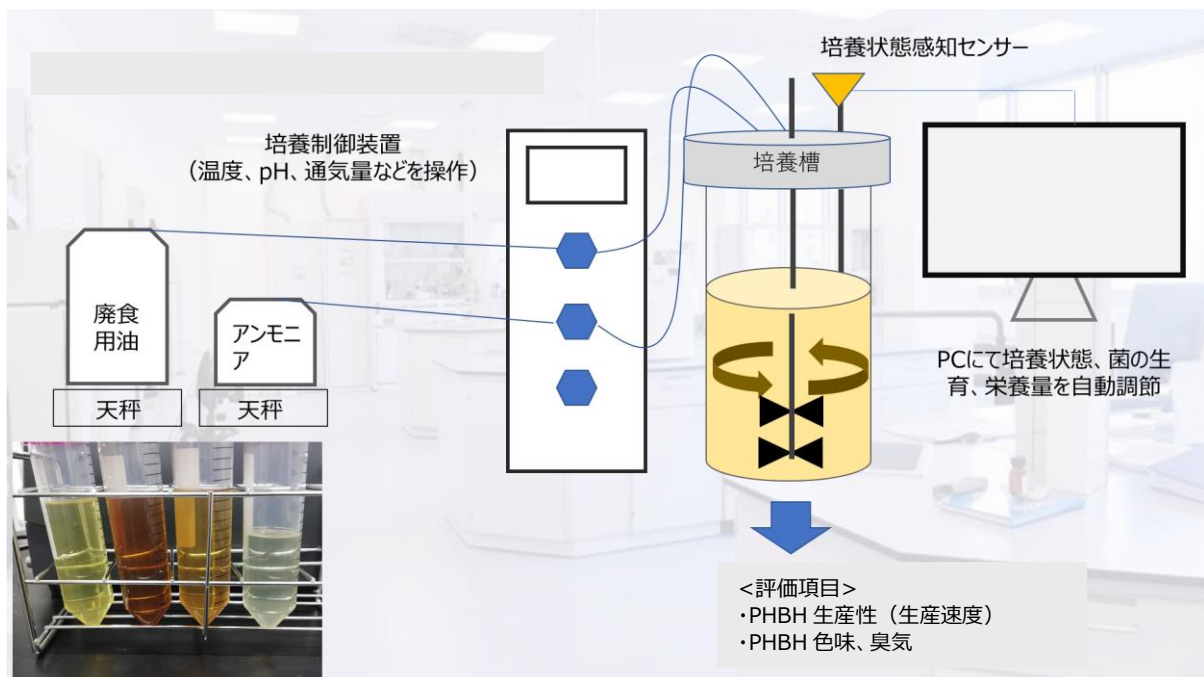


図 4 培養実験のイメージ図



図 5 培養実験装置

2019 年度の検討結果により、油脂構成脂肪酸の組成と PHBH 生産性に相関が認められた。一方で油脂劣化の指標である酸価、過氧化物価、アニシジン価、重合物価と PHBH 生産性には有意な相関は認められなかった。そこで、2020 年度は脂肪酸組成と PHBH 生産性の関係性に関して研究を進め、その原因を特定することで、廃食用油を用いた PHBH 高生産技術開発を達成することを目的とした。更に、2020 年度は実機へのスケールアップ実証により、工業生産時の課題を明らかにすることを目的とした。

なお、入手した廃食用油構成脂肪酸の分析（表 2）、及び日本における食用油脂使用実態から、廃食用油としては飽和脂肪酸含量の低い、すなわち高ヨウ素価油の入手が圧倒的に多いことが判明しているため、高ヨウ素価油の利用技術開発を進めることとした。

（２）廃食用油の前処理検討（白土処理）

白土処理には廃食用油 E 及び I を使用し、それぞれに対油で 10 wt% の活性白土を混合後、温度 90 ～100℃にて 50 分間の処理を実施、その後、吸引濾過にて処理後の廃食用油を分離した。白土処理後の各廃食用油、及び対照として処理無しの廃食用油、パーム油を用いて PHBH 培養を実施し、培養液（以下、培養ブロス）を取得した。各培養ブロスを精製し、PHBH ポリマーを試作、得られたポリマーの熱安定性、色味（yellow index、以下 YI）を指標として品質評価した。

表 3 ポリマーの品質評価項目

項目	概要	評価方法	ポリマー管理指標
熱安定性	加工後の分子量/ 加工前の分子量	160℃で成形加工したフィルムの分子量変化(GPC)	分子量保持率 70% 以上
YI (Yellow Index)	ポリマー成型加工時の熱着色レベル	160℃で成形加工した0.5mm厚フィルムの色調(色差計)	20以下

(3) 精製処方改良によるポリマー品質、生産性の向上

従来精製法からさらに YI を向上させるべく、従来精製法を改良した新処方①の適用を試み、品質への影響を確認した。また、パーム油及び廃食用油 E にて培養した PHBH 培養ブrossを用い調製した PHBH ポリマー中に残存する金属、アミノ酸及び有機酸濃度の分析を実施した。分析結果に基づき、ポリマー品質である熱安定性、YI が改善するよう、新たに精製処方（新処方②）を開発した。さらに実生産での経済性に見合った生産性を確保するため、精製効率改善に効果のある新処方③を併せて開発した。新処方の効果を確かめ、前述と同様の方法にて廃食用油 E を用い、培養ブross取得の後、それぞれの精製処方にてポリマーを調製の上、品質評価を実施した。

(4) 廃食用油中の固形分除去（濾過）の検討

廃食用油は様々な業種からの回収油であり、ほとんどの廃食用油は固形不純物を含んでいることがわかった。PHBH 量産設備に廃食用油を適用するにあたっては事前に廃食用油中から固形分の除去が必要となり、現在のところ濾過設備による固形分分離を想定している。そこで量産時での適切な濾過設備、操作を見極めるため、社外油脂精製業者（Y 社）に廃食用油を提供し、捕捉粒子径 5 μm 及び 25 μm のフィルターを用いて濾過試験を実施した。

(5) シロキサン除去設備仕様の取得

廃食用油中に含まれるシロキサン成分は最大 5 mg/L と想定される。最大量のシロキサンが全量排水処理後の排ガス中に持ち込まれる前提とし、環境設備メーカー（M 社）に依頼し、必要なシロキサン除去設備仕様情報を取得した。

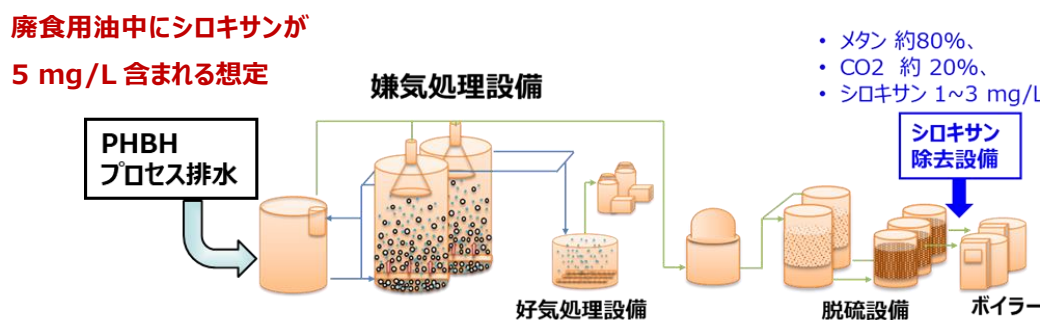


図 6 排水処理工程におけるシロキサン除去設備位置概要

2.1.3 結果

(1) 廃食用油を用いた PHBH 培養技術の開発

1) 廃食用油の PHBH 生産性の評価

事業系廃食用油を計 15 種類調達し、構成脂肪酸分析及び 10 L 培養槽での PHBH 生産試験を実施した（次表、次図）。

表 4 廃食用油を使用した PHBH 生産試験結果

原料	飽和脂肪酸割合(%)	PHBH生産性 (パーム油:100)
パーム油	45	100
廃食用油A	9	74
" B	13	74
" C	15	77
" D	24	70
" E	49	91
" F	13	74
" G	33	82
" H	12	-
" I	17	88
" J	44	98
" K	10	-

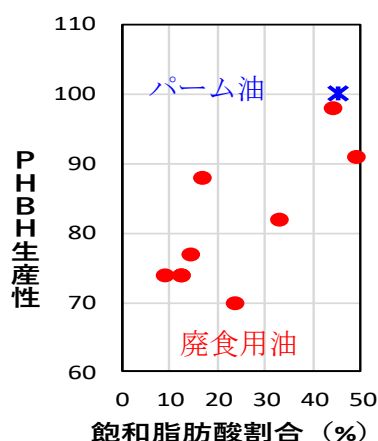


図 7 油脂構成脂肪酸と PHBH 生産性の相関

評価の結果、油脂中の飽和脂肪酸割合が高いほど、PHBH 生産性が高い傾向を確認した。一般的に、油脂構成脂肪酸の飽和脂肪酸割合は、分析が容易なヨウ素価で評価されることが多い。ヨウ素価が高い脂肪酸とは、不飽和脂肪酸が多い脂肪酸であり、逆にヨウ素価が低い脂肪酸とは、飽和脂肪酸が多い脂肪酸である。従って、以後は飽和脂肪酸割合の低い油脂を「高ヨウ素価油」、飽和脂肪酸割合の高い油脂を「低ヨウ素価油」と表記する。

更に、培養挙動の詳細解析によって、高ヨウ素価油は培養初期の酸素消費速度（以下、OUR）が比較対象の飽和脂肪酸含量の高いパーム油（低ヨウ素価油）よりも低いことが明らかとなった（次図）。

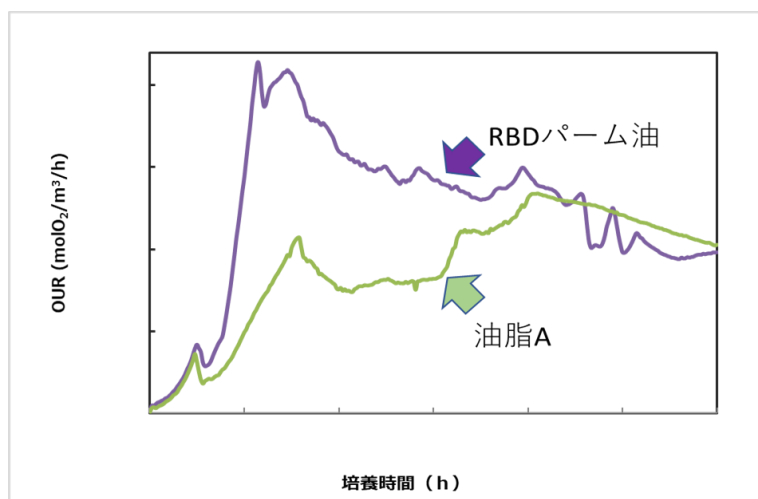


図 8 油脂 A（高ヨウ素価油）とパーム油（低ヨウ素価油）の培養挙動比較

このことから、高ヨウ素価、すなわち不飽和脂肪酸含量の高い油脂は、PHBH 生産微生物にとって資化しにくい油脂であることが示唆された。

2) ハイブリッド培養方法の開発

上記結果を踏まえ、培養初期の細胞増殖期に低ヨウ素価油（パーム油）を用い、PHBH 蓄積期以降は高ヨウ素価油（この場合は廃食用油）を使用する培養方法（以下、ハイブリッド培養方法）により、生産性を高める手法を考案した（特許出願済）。

ハイブリッド培養の結果、使用総量に対し 85 wt%以上の廃食用油を用い、対パーム油比 90%以上の生産性を達成することに成功した（次表）。本培養技術によって、高ヨウ素価の油脂 A や油脂 D を有効に利用できることが証明された。

表 5 ハイブリッド培養結果

炭素源	PHBH 生産性	3HH (mol%)	PHBH 収率
パーム油	100	11.7	100
油脂A	74	10.4	85
ハイブリット 油脂A	91	10.4	90
油脂D	67	10.0	89
ハイブリット 油脂D	90	10.2	93

PHBH 生産性…時間あたり培養液体積あたりの PHBH 生産量をパーム油の場合を 100 として相対値で表したもの

3HH…PHBH を構成する 2 つのモノマー（3HB、3HH）のうち 3HH の割合

PHBH 収率…予め設定した原料油あたりの PHBH 生産量をパーム油の場合を 100 として相対値で表したもの

3) 高ヨウ素価油の単独利用技術（改良培養方法）の開発

ハイブリッド培養技術によって、高ヨウ素価油を用いた効率的な PHBH 生産技術を達成したもの

の、本技術では、一定量の低ヨウ素価油の利用が必須であり、また培養中に炭素源を切り替えるという煩雑な操作が発生してしまう問題が残されていた。そこで、この問題を解決するため、高ヨウ素価油の単独利用技術開発を進めた。

その結果、細胞増殖期において、高ヨウ素価油の添加速度を高めることで、高ヨウ素価油単独使用下において、OUR が大幅に上昇することを発見した（次図）。

この原理を応用し、培養中の油脂濃度を高位に維持する培養方法（以下、改良培養方法）の開発に成功した。改良培養方法では、高ヨウ素価油単独使用において、対パーム油比 90%以上の PHBH 生産性が達成可能であった。本改良培養方法の適用により、高ヨウ素価油脂 B、I、K、H 単独使用にて高 PHBH 生産性を達した（次表）。

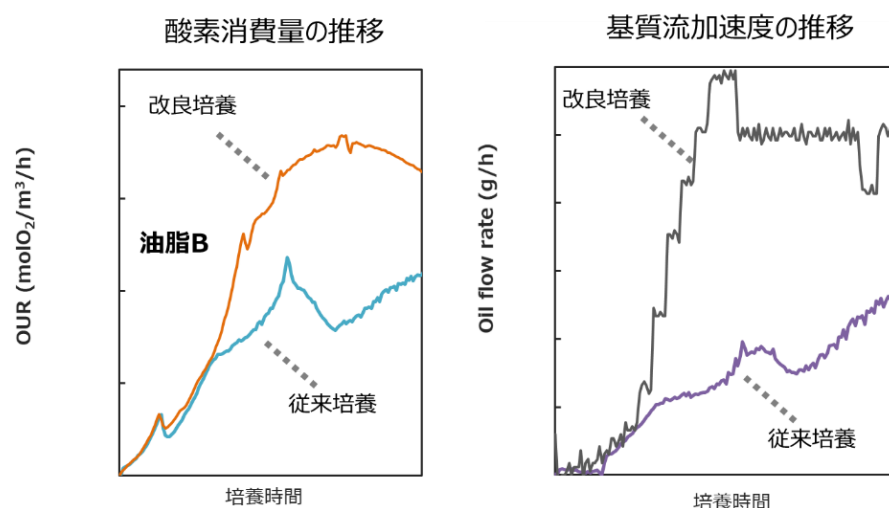


図 9 左：油脂 B 使用における改良培養方法と従来培養方法の酸素消費速度の推移
右：改良培養方法と従来培養方法の油脂添加速度の推移（どちらも油脂 B 使用）

表 6 改良培養方法による培養結果

炭素源	PHBH 生産性	3HH (mol%)	PHBH 収率
パーム油	100	11.7	100
油脂B	74 ->97	11.2	96
油脂I	88 ->93	10.2	96
油脂K	94	10.8	96
油脂H	93	11.4	98

4) 生ごみ袋製造に適した PHBH 生産に向けた PHBH 生産株の育種

次に、2020 年度の目標である実機培養実証を進めるための準備として、生産株の育種を実施した。

本プロジェクトにおいて実証を進める生ごみ袋に使用する PHBH の 3HH 組成規格として 3HH 組成＝6±1%を設定し、カネカ保有の生産株（KNK-2 株）を用い、油脂 B を用いた改良培養方法にて事前試験を実施した。その結果、3HH 組成が 5.0 mol%と規格下限値となった。KNK-2 株はパーム油を原料として使用すると 3HH 組成として約 6 mol%の PHBH を生産するよう設計された株であるが、油脂 B のような高ヨウ素価油では 3HH 組成が約 1 mol%低下することが明らかとなった（次表）。

表 7 油脂 B、改良培養方法を用いた KNK-2 株の培養評価結果

炭素源	菌株	PHBH 生産性	3HH (mol%)	PHBH 収率
パーム油	KNK-2	100	5.8	100
油脂B	KNK-2	94	5.0	98

そこで、PHBH 生産微生物の代謝改変により、3HH モノマー生産経路の増強を進め、KNK-新 2 株を育種した。KNK-新 2 株では目標通り、油脂 B のような高ヨウ素価油を使用した場合においても 3HH 組成として規格値内の PHBH を生産可能であることを確認した（次表）。実機実証試験においては、KNK-新 2 株を利用することとする。

表 8 油脂 B、改良培養方法を用いた KNK-新 2 株の培養評価結果

炭素源	菌株	PHBH 生産性	3HH (mol%)	PHBH 収率
油脂B	KNK-新2	86	6.6	98

5) 実機培養実証試験

廃食用油を用い、実機培養実証試験を行った。培養においては、高ヨウ素価油である廃食用油を 30 kL 購入し、実生産と同じ培養槽（PHBH 製造能力：5,000 トン/年）にて、研究により開発した改良培養方法にて培養を実施した。使用した廃食用油は色味、酸価、ヨウ素価ともに実績範囲内であった（次表）。

表 9 実機培養実証試験にて使用した廃食用油の規格指標値

指標	受入可能な範囲	今回の廃油
色味値	7.4 ~ 18.8	11
酸価	0 ~ 16.9	2.7
ヨウ素価	39 ~ 133	109

実機培養実証試験では今回新たに開発した KNK-新 2 株を使用した。その結果、対パーム油比 90% の生産性、3HH 組成として規格内の PHBH を得ることに成功した（次表）。

表 10 廃食用油を用いた実機培養実証結果

	PHBH 生産性 (対パーム油比%)	3HH 組成 (mol%)	収率 (対パーム油比)
パーム油	100	6±1	100
廃食用油	90	5.76	96

培養生産性の目標は達成したものの、ラボでは対パーム油比の生産性として 93%以上を達成したため、若干の生産性低下が認められている。この原因は発泡であった。改良培養方法では培養中の油脂濃度をパーム油培養に対して約 2 倍高く維持し培養するため、発泡のリスクが懸念されていた。今回の実証試験でも、培養終盤の顕著な発泡により、予定より早く培養を終了する結果となった。高ヨウ素価油が主である廃食用油を用い、安定的に PHBH を工業生産するには、発泡リスク低減策が必須であることが明らかとなったため、次年度は PHBH 生産微生物の不飽和脂肪酸の資化能力強化に取り組み、高ヨウ素価の油脂であっても低ヨウ素価油であるパーム油並みの低い油脂濃度にて培養できることを目標に取り組む。

6) 廃食用油の受け入れ基準の策定

これまでの検討を踏まえると、現状では、生産性の低下、熱安定性の低下、YI の増加、異常臭気等が生じるような受け入れ不可能なレベルの廃食用油は確認されていないものの、今後、多種多様な油脂を受け入れる必要があるため、油脂の劣化度及び脂肪酸組成について、培養結果をもとに受け入れ基準の策定を進めた。

まず、劣化度の指標としては、酸価、過酸化値、アニシジン価、重合物価を測定しているが、これらを油脂の受け入れ毎に分析し判断することは現実的ではないため、より簡便に評価可能な色味による品質管理の可否を調査した。

廃食用油の色味を色味分析計（Gardner 社製）で分析し、劣化度との相関を確認した結果、酸価以外の劣化指標は、色味と相関があることが明らかとなった（次図）。

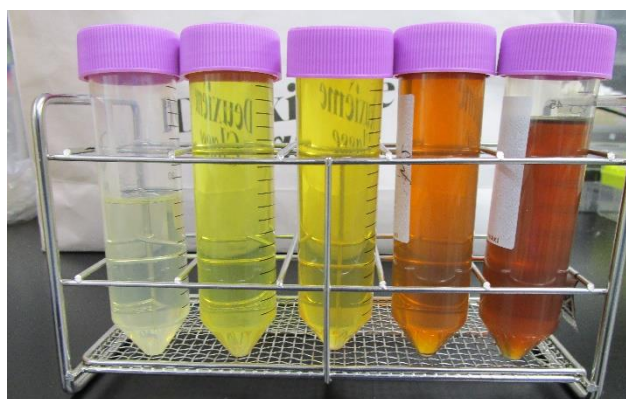


図 10 様々な色味の廃食用油

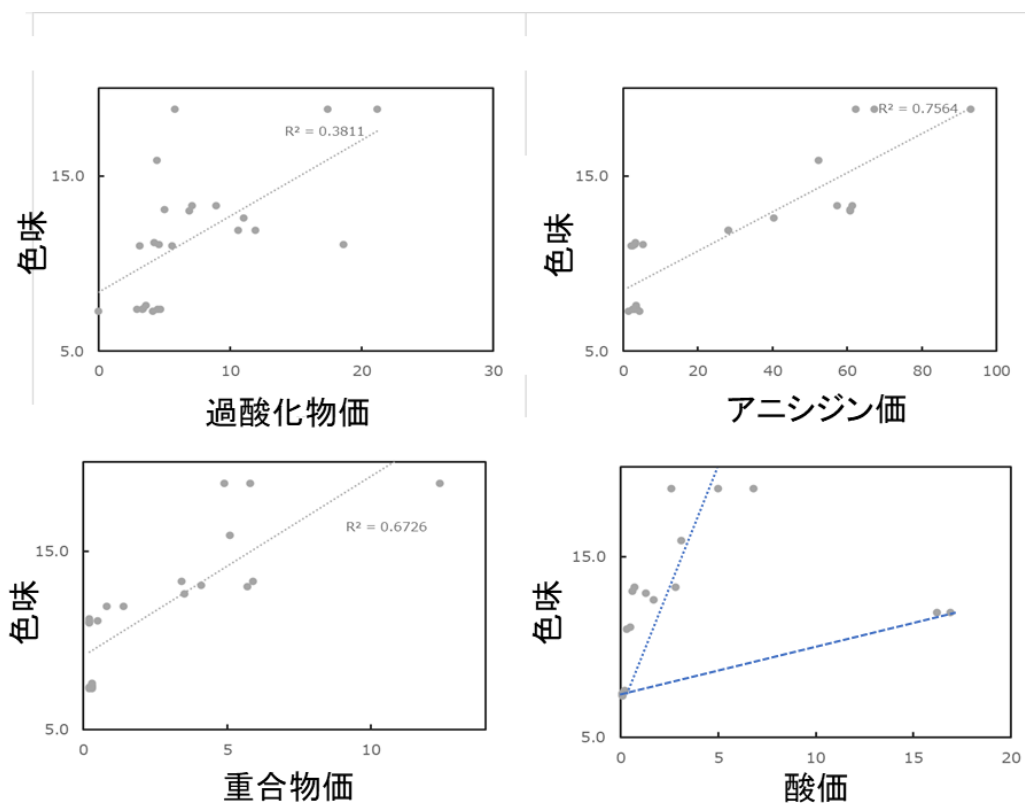


図 11 色味と劣化度の相関

酸価は、色味の増加を伴う上昇、及び伴わない増加があることが判明したため、色味と独立させて管理する必要があることが判明した。本結果より、色味と酸価の値を劣化度として受け入れ管理値として設定できる可能性を得た。

一方で油脂の脂肪酸組成（ヨウ素価）も受け入れ基準として重要であることから、現在までに使用評価し、目標とする生産性で PHBH が生産可能であった油脂の脂肪酸組成をレーダーチャートにまとめた（次図）。

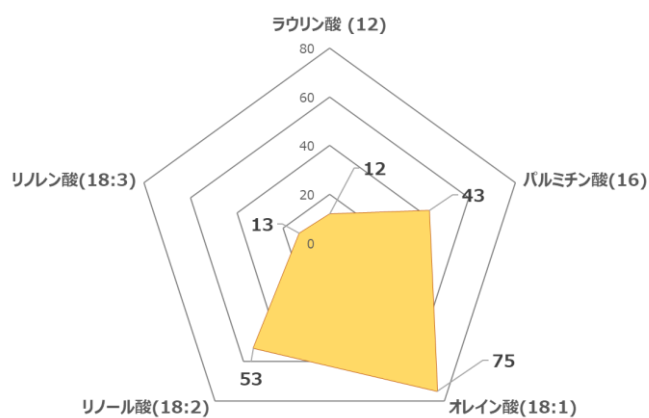


図 12 評価済み廃食用油の構成脂肪酸組成
※数値は構成脂肪酸の最大値（wt%）を示す

今後は前図に示すレーダーチャート内の脂肪酸組成であれば、受け入れ可能であると判断し、チャート外の油脂が入手できた場合には、培養評価により使用可否判断を実施することで、受け入れ可能な脂肪酸組成の精度を高めていく。

また、ヨウ素価の受け入れ基準としては、実績範囲としてヨウ素価 39～133 g/100g であれば利用可能と判断した（60～90 g/100g の範囲の油脂はレアケースであり、ブレンドにて対応する）。

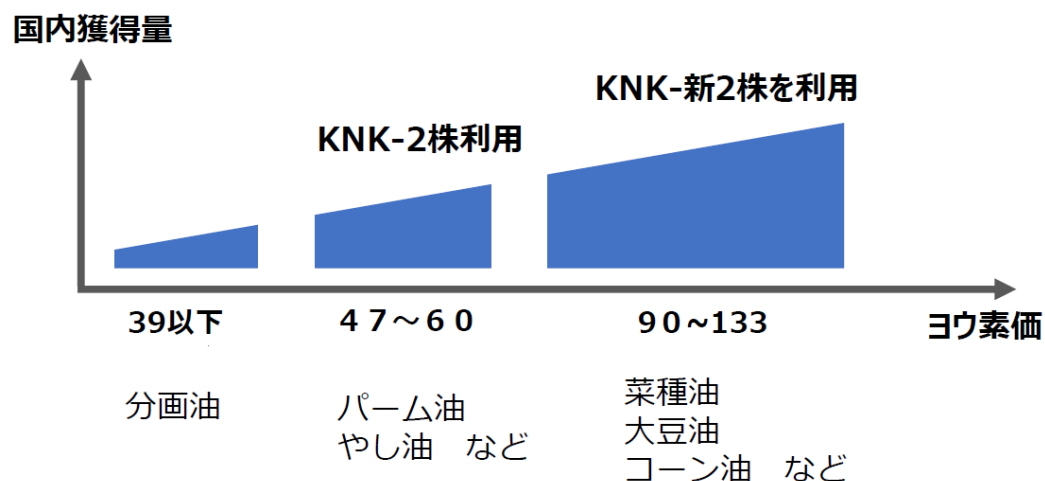


図 13 ヨウ素価の受け入れ基準

(2) 廃食用油の前処理検討（白土処理）

これまでの検討で廃食用油を蒸留精製することにより廃食用油の色味等が改善されることを見出したが、量産を想定すると、蒸留精製設備はボリューム、変動コストが大きく、経済性の面で採用が困難であった。そこで活性白土処理をベースとした簡易精製を計画し、目標の PHBH の製造が可能かを検討することとした。

1) 活性白土による廃食用油の前処理

廃食用油 E 及び I について、白土処理前後の廃食用油外観を比較した。今回試験に用いた廃食用油 E 及び I は、パーム油や他の廃食用油と比べると、色味が濃い特徴を有している。これらの廃食用油に白土処理を実施した結果、明らかに色味が薄くなった。これは白土処理により一部の色素成分等の不純物成分が吸着除去されたためと考えている。次に、白土処理を施した廃食用油を用い、ラボにて PHBH サンプルを取得し、ポリマー品質の評価を実施した。

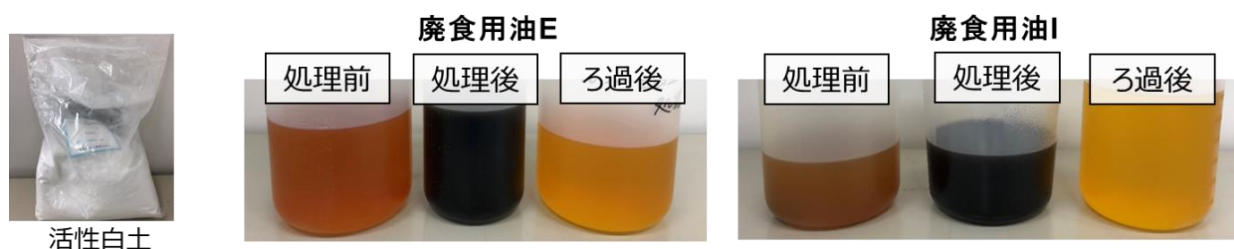


図 14 白土処理前後の廃食用油外観

2) 白土処理廃食用油で調製した PHBH の品質評価

前述の白土処理を実施した廃食用油 E 及び I を用いて PHBH 培養し、それぞれの培養ブロスを取得した。さらに各培養ブロスを精製し PHBH パウダーを調製した。対照として、白土処理なしの廃食用油 E、I、及びパーム油（現行主原料）を使い、同様に培養、精製操作を実施しポリマーを取得、比較した。結果を次表に示す。

表 11 廃食用油白土処理による PHBH 品質の比較
(赤：目標品質達成、青：目標品質未達、黒：品質目標下限)

原料油脂	従来精製法			
	濾過のみ		白土処理	
	熱安定性	YI	熱安定性	YI
パーム油	83	15	-	-
廃食用油E	66	25	68	20
廃食用油I	62	21	70	21

廃食用油に白土処理を施さなかったケースでは、いずれの廃食用油においても目標の熱安定性（目標>70）、YI（目標<20）に未達となった。一方、白土処理を施したケースでは、廃食用油 E において YI は若干改善したものの、熱安定性は目標に達しなかった。廃食用油 I においては熱安定性に改善が見られたものの、YI は目標をやや下回った。これらより、廃食用油を白土処理したにもかかわらず、期待した品質改善効果は得られなかった。

(3) 精製処方改良によるポリマー品質向上、生産性の向上

ここまでの検討で活性白土を用い廃食用油の簡易精製を試みてきたが、廃食用油そのものの色味改善には効果はあるが、精製した PHBH ポリマー品質には期待された品質向上効果は見られなかった。一方、廃食用油を原料とした場合、白土処理よりも精製処方の最適化がポリマー品質改善に効果的であることが推察されたことから、更なる処方改善を実施し、目標ポリマー品質に届いていない廃食用油 E を用いた場合に取得されるポリマーの品質向上を目指すこととした。

1) 新たな精製法（新処方①）の適用

上述の結果を受け、現行精製法に YI がより向上するよう改良を加えた新処方①を開発した。そこで取得した各培養ブロス（廃食用油 E、I を原料に使用）に新処方①を適用し精製を実施、PHBH パウダーを調製し品質評価を行った。結果を次表に示す。

表 12 新処方①適用時の PHBH 品質

原料油脂	従来精製法		新処方①	
	濾過のみ		濾過のみ	
	熱安定性	YI	熱安定性	YI
パーム油	83	15	-	-
廃食用油E	66	25	57	27
廃食用油I	62	21	82	13

廃食用油 E では新処方①による品質改善効果は見られず、むしろ品質は悪化する傾向にあった。一方、廃食用油 I では熱安定性、YI は大きく改善し、現行パーム油を用いた場合と同等の PHBH 品質を得ることができた。

2) 取得ポリマー中の微量成分分析

パーム油及び廃食用油 E に新処方①を適用して調製したポリマー中に残存する金属、アミノ酸及び有機酸濃度の分析を実施した。結果を下図に示す。

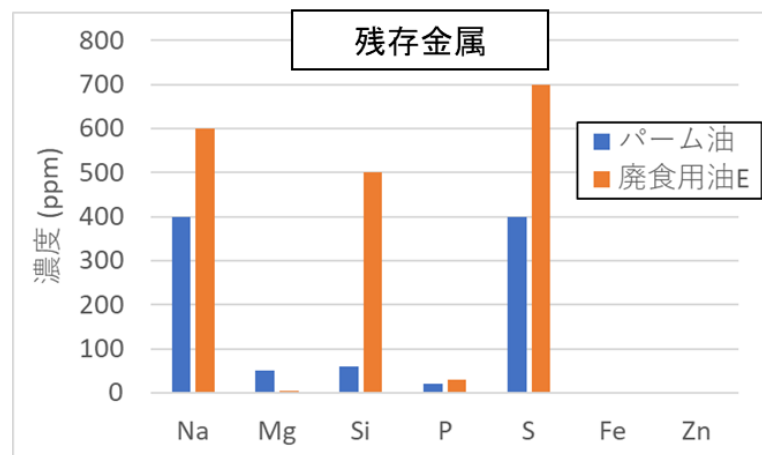


図 15 ポリマー中残存金属量

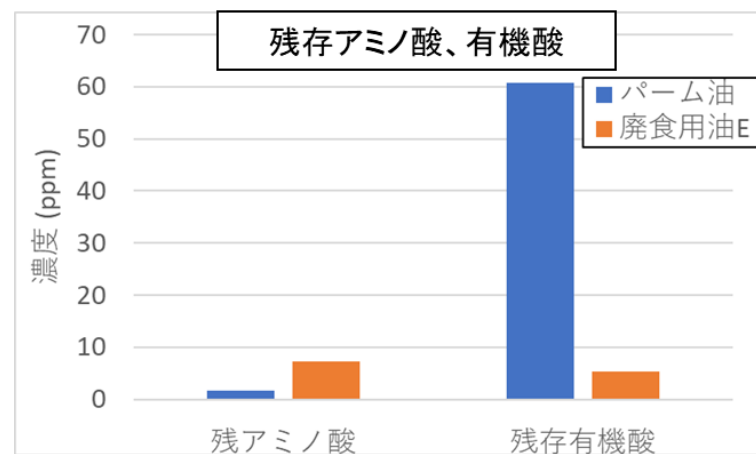


図 16 ポリマー中残存アミノ酸及び残存有機酸

廃食用油 E を原料に調製した PHBH はパーム油由来 PHBH に比べ、残存金属量、アミノ酸量が総じて多いことが分かった。特に残金属量では Na、Si、S が著しく高い傾向にある。残金属量は PHBH ポリマーの熱安定性に影響すると考えられることから、以下で残金属量低減に効果ある処方を検討することとした。

3) 新たな精製法（新処方②、③）の適用

上述の結果を受け、新処方①を改良し残金属量低減に有効な新処方②を開発した。また実生産での経済性の観点から、精製でのポリマーロス削減に有効な新処方③を新たに開発した。そこで廃食用油 E を用いて取得した培養ブロスに新処方②、さらには新処方③を適用し、精製を実施、PHBH パウダーを調製の上、品質評価を行った。結果を次表に示す。

表 13 新処方②及び③適用時の PHBH 品質及び精製効率

原料油脂	従来精製法 (濾過のみ)		新処方② (濾過のみ)			新処方③ (濾過のみ)		
	熱安定性	YI	熱安定性	YI	精製効率	熱安定性	YI	精製効率
パーム油	83	15	-	-	-	82	17	1.00
廃食用油E	66	25	77	17	0.95	83	16	1.00

新処方②を適用することで、廃食用油 E を原料に使用し取得した PHBH ポリマーは、目標の熱安定性、YI を満たすことを確認した。さらに新処方③により精製中のポリマーロスが低減したことから、精製効率（相対値）を向上することができた。

（４）廃食用油中の固形分除去（濾過）の検討

油脂精製業者 Y 社に廃食用油を提供し、ベンチスケールの濾過設備により廃食用油中の固形分除去テストを実施。テストでは捕捉粒子径 5 μm または 25 μm のカートリッジフィルター（糸巻タイプ）を使用し、廃食用油の連続流通濾過テストを実施、濾過性を評価した。

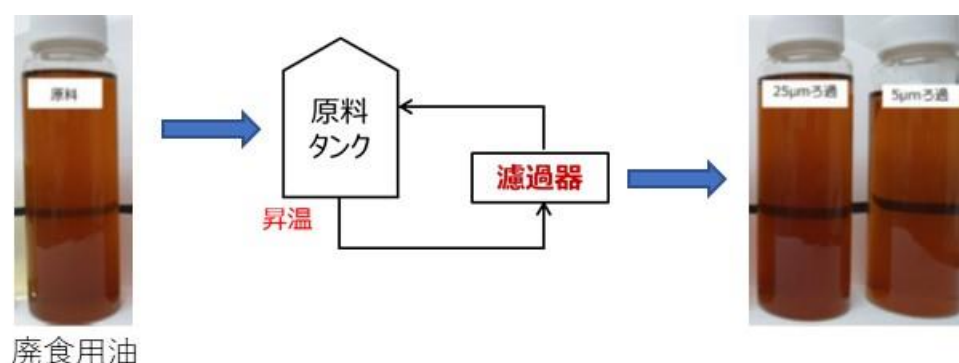


図 17 Y 社での廃食用油連続濾過試験

テストの結果、5 μm フィルターでは閉塞が発生し、長時間、濾過を継続することはできなかった。一方、25 μm フィルターでは4時間継続運転しても閉塞は発生しなかった。25 μm フィルターでは濾過後の廃食用油の清澄度がやや劣る結果となったが、この廃食用油を用いてラボ培養、精製を実施したところ、問題なく所定品質の PHBH パウダーを取得できることを確認した。今回のテストより、量産設備に必要な濾過装置スペックを確認できたが、廃食用油は業者やロットによって混入する固形物量が異なると想定される。そのため今後も継続して廃食用油を用いた濾過テストを実施し、多様な廃食用油を適用可能な設備仕様を見極める。

(5) シロキサン除去設備仕様の取得

環境設備メーカー（M 社）に依頼し、排水嫌気処理工程に必要なシロキサン除去設備仕様情報を取得した。以下に設備仕様決定に使用した前提条件を示す。前提として廃食用油中に 5 mg/L シリコン消泡剤を含むこと、シリコンは全量ガス化し D3 シロキサンに変化することとした。

表 14 シロキサン除去設備仕様の前提

オイル量	33 m ³ /B
オイル比重	0.92
オイル重量	30.36 t/B
シロキサン濃度	5 mg/L
シロキサン重量	0.15 kg/B
生産サイクル	48 h
シロキサン処理量	3.2 g/h
シロキサン分子量	222
シロキサンmol	0.014 mol/h
シロキサンガス化容積	0.000319 Nm ³ /h
嫌気ガス発生量	98 Nm ³ /h
シロキサン濃度	3.3 ppm

結果、下図に記載の小規模の活性炭吸着設備（活性炭 150 kg 充填した吸着塔×2 基）を導入することで、排水嫌気処理工程で想定される最大量のシロキサンの除去が可能との試算を得た。

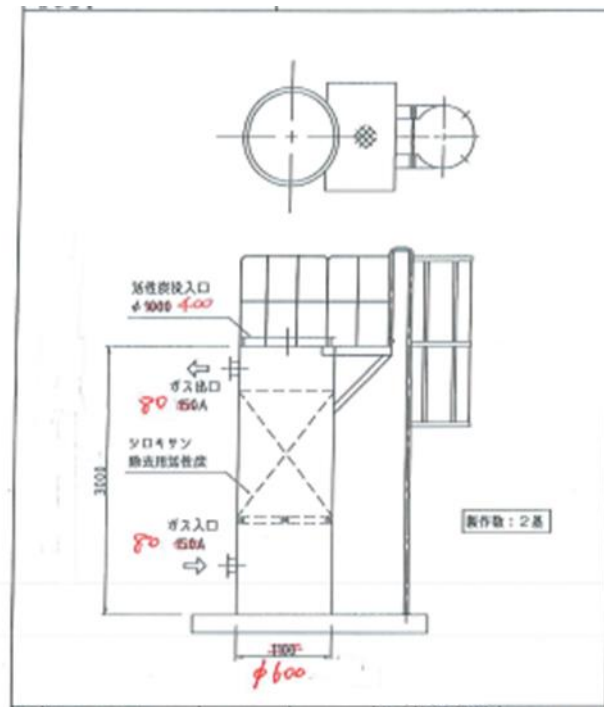


図 18 シロキサン除去設備仕様概要

2.1.4 まとめと課題

(1) 本年度の成果

2020年度の検討の結果、改良培養方法及びKNK-新2株を用いた実機培養実証試験により、廃食用油を単独の原料としてPHBHを効率的に生産することに成功し、貴重なスケールアップデータを得ることが出来た。

一方で、高油脂濃度維持による発泡という問題点が実機スケールで初めて顕在化したが、この問題点を抽出できた意義は大きい。この課題に対処するため、発泡抑制と高生産性を両立させるという、今後の研究の方向性を確認することが出来た。

また、油脂受け入れ基準に関しては、劣化度と脂肪酸組成に絞り込み検討を進めた結果、現状では、色味、酸価、脂肪酸組成の3指標によって管理できる見通しを得ている。今後はより多くの油脂を評価することで、廃食用油品質管理精度を上げるとともに、廃食用油入手経路の中で酸価や脂肪酸組成の指標となるヨウ素価データを入手できるよう、入手先と協議、協働することが重要と考える。

廃食用油前処理検討では、当初想定していた活性白土による簡易精製に期待した品質向上効果は認められなかったが、ポリマー精製処方②の改良（新処方②の適用）により、いずれの廃食用油でも目標のPHBHポリマー品質を確保可能であることを見出した。さらに、精製効率向上を目的に開発した新処方③の効果を実証し、実生産に耐え得る経済性を見込むことができた。

社外油脂精製業者にてベンチスケール設備を用いた廃食用油濾過テストを実施し、分離性を評価した。さらに取得した濾過後の廃食用油が培養、精製に影響しないことを確認した。

排水嫌気処理工程で発生が想定されるシロキサン除去のための設備仕様案を設備メーカーより取得した。

（２）課題と今後の検討

2021 年度の課題と検討内容は以下のとおりである。

① 低油脂濃度で培養するための技術開発

スケールアップにて抽出された高油脂濃度管理による発泡課題につき、高ヨウ素価油を用い、低油脂濃度で培養するための技術開発を進め、発泡抑制と高生産性の両立を実現し、安定した工業生産プロセスの確立を進める。

② 量産時における濾過設備仕様の決定

廃食用油は様々な業種から回収されるものであり、ほとんどの廃食用油に固形不純物の混入が確認されていることから、これを PHBH 生産に適用するにあたっては事前に固形分の除去が必要となる。量産設備での廃食用油使用を想定した場合、廃食用油中の固形分を確実に除去可能な分離装置導入が不可欠であり、今後も濾過試験を継続実施のうえ、適した設備仕様を絞り込んでいく。

③ 200 L パイロット培養槽を用いた廃食用油培養スケールアップ検討

導入した 200 L パイロット培養槽を用いて廃食用油を炭素源とした培養を実施し、期待通りの培養成績を得ることができた。今後、様々な供給元の廃食用油についてパイロット培養槽を用いて培養評価を行うとともに、量産化を想定し培養制御等、操作の最適化を進めていく。

④ 実機を用いた廃食用油からの PHBH 製造試験

本年度に引き続き、実機（PHBH 5,000 トン/年生産設備）に廃食用油を試験的に供し、量産時の生産性、品質等を検証する。特に、次年度開発に取り組む低油脂濃度により発泡を抑制した培養方法の有効性の検証と、排水処理工程でのシロキサン挙動を調査し、量産設備の具体的仕様を絞り込む。

2.2 PHBH 原料として利用するための更なる廃食用油の回収率向上を目指した収集方法に関する検討

2.2.1 目的

廃食用油を生活系及び事業系に分け、その排出実態、廃食用油の性状、不純物の含有状況、脂肪酸組成等を調査分析し、PHBH 原料として利用することを念頭に置いた効率的な廃食用油回収システムに関する検討を行うことを目的とする。

本年度は、廃食用油の詳細分析結果を解析するとともに、文献調査等により、生活系及び事業系廃食用油の回収方法の整理結果から、効率的な生活系及び事業系廃食用油の回収システムの検討を行う。

2.2.2 方法

廃食用油の詳細解析は、収集した廃食用油の組成等を解析することにより行った。また、廃食用油の回収システムの検討は、家庭系においては、昨年度の事例調査に加え、国内の先進自治体による回収事例を調査、整理した。事業系においては、当該分野での業務実績を有するレボインターナショナルの知見をもとに、その課題等について整理した。

2.2.3 結果

(1) 廃食用油の詳細解析

1) 解析対象試料

廃食用油の詳細解析は、令和元年度調査で 61 箇所の事業所から回収した廃食用油の分析結果をもとに実施した。

2) 解析結果

① 業態別油種及び回収見込量

令和元年度調査で回収した事業所の廃食用油について、業態別油種、回収見込量を整理すると次表のとおりで、油種は大豆、なたねが多い。

業態別の排出施設数では、食堂、レストラン、配達飲食サービス業及び酒場・ビアホールなどが多いが、1 施設あたりの平均排出量では、583～1,781 L/施設・年の間にあり、すし、弁当、調理パン製造業や惣菜製造業の 15,210～41,730 L/施設・年に比べると少ないことが伺える。

表 15 事業所からの廃食用油の業態別油種及び回収見込量

業態	形態	油種				施設数	排出見込量 (L/年)	1 施設あたり 排出見込量 (L/施設・年)
パン菓子製造業	パン屋・スーパー内パン屋	加工				4	3,368	842
豆腐油揚げ製造業	スーパー内豆腐屋	なたね				1	605	605
惣菜製造業	惣菜工場	大豆				1	15,210	15,210
すし・弁当・調理パン製造業	弁当工場	大豆、なたね	大豆			5	208,652	41,730
食堂、レストラン	企業食堂・職員食堂・食堂	大豆、なたね	大豆、パーム			12	7,000	583
日本料理店	割烹	大豆、なたね	大豆			3	2,859	953
中華料理店	ラーメン屋	不明				2	1,046	523
その他の専門料理	イタリアン・カレー	大豆、パーム				2	2,875	1,438
そば・うどん店		大豆、なたね	大豆			2	2,470	1,235
酒場・ビアホール	海鮮居酒屋・和風居酒屋・串かつ屋	大豆、なたね	大豆	大豆、パーム		7	6,865	981
持ち帰り飲食サービス業	弁当屋	大豆、パーム	なたね			4	3,500	875
配達飲食サービス業	学校給食業・施設給食・病院給食	大豆、なたね	ひまわり	なたね	米	12	21,370	1,781
一般家庭	集積BOX	不明				6	2,487	415

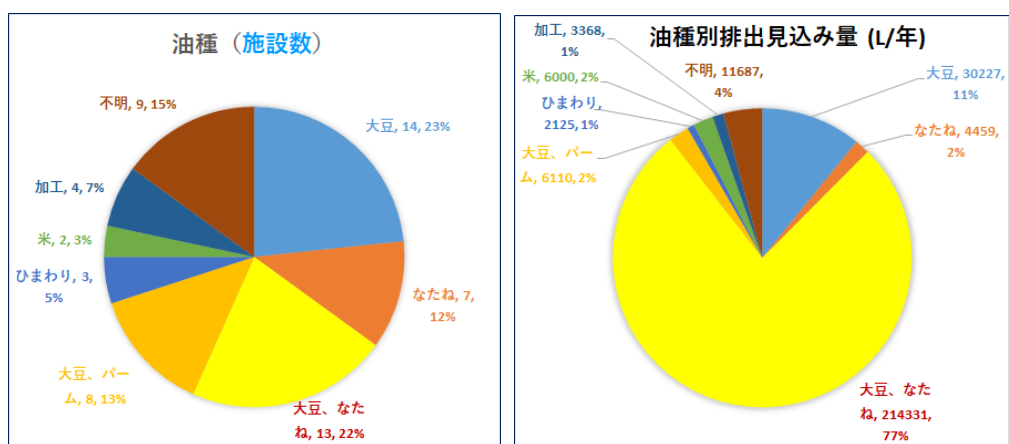


図 19 事業所からの廃食用油の業態別油種及び回収見込量

なお、油種ごとに脂肪酸組成は異なる。後述する脂肪酸組成の分析の結果を以下に示す。

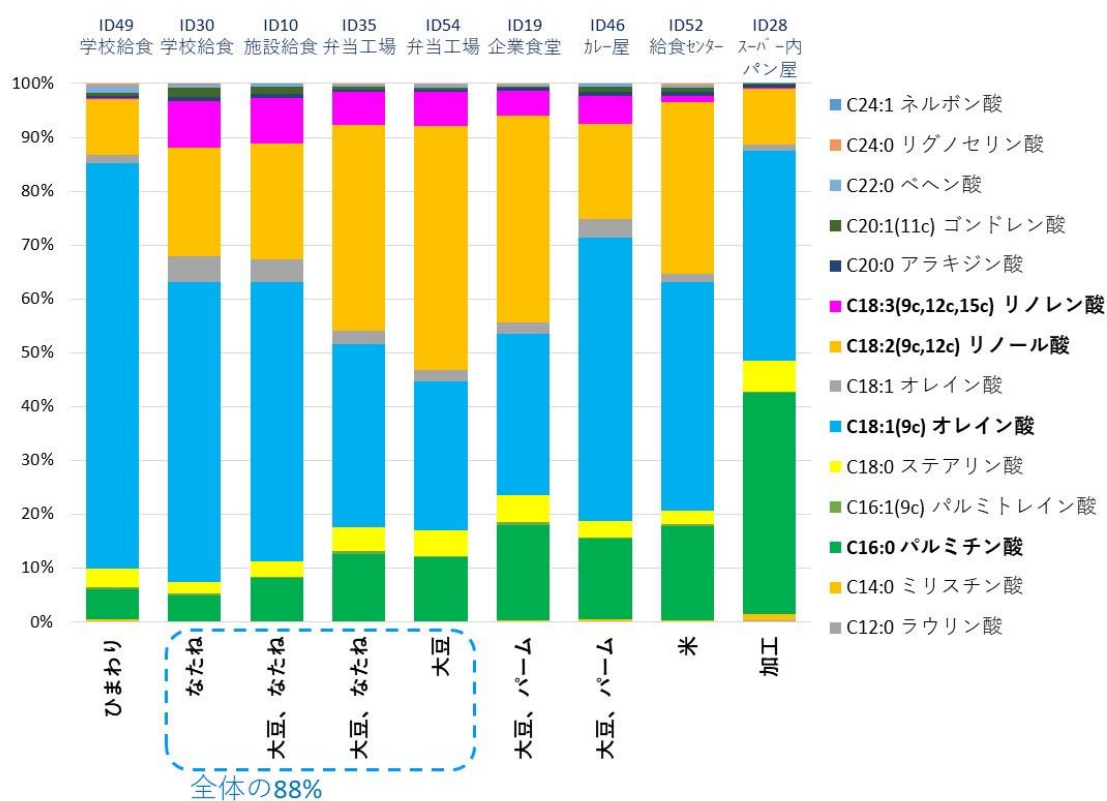


図 20 油種別廃食用油 脂肪酸組成

② 脂肪酸組成

61 箇所の事業所からの廃食用油の脂肪酸組成の分布は次に示すとおりで、オレイン酸が平均で 43.35%と最も多くを占め、リノール酸が次いで 28.64%となっている。

表 16 事業所から回収した廃食用油の脂肪酸組成のばらつき

(単位：%)

脂肪酸名称		最大	最小	平均	中央値	標準偏差
ラウリン酸	C12:0	0.441	0.014	0.116	0.054	0.11
ミリスチン酸	C14:0	1.344	0.05	0.311	0.136	0.37
パルミチン酸	C16:0	41.421	5.076	15.075	13.123	10.71
パルミトレイン酸	C16:1(9c)	1.423	0.1	0.382	0.287	0.28
ステアリン酸	C18:0	6.122	2.306	4.179	4.354	1.27
オレイン酸	C18:1(9c)	74.024	25.119	43.35	41.641	12.83
リノール酸	C18:2(9c,12c)	47.869	9.409	28.64	29.026	11.87
リノレン酸	C18:3(9c,12c,15c)	9.21	0.119	5.377	6.087	3.09
アラキジン酸	C20:0	0.938	0.366	0.629	0.582	0.15
ゴンドレン酸	C20:1(11c)	1.753	0.168	0.815	0.581	0.58
ベヘン酸	C22:0	1.259	0.093	0.449	0.412	0.23
リグノセリン酸	C24:0	0.43	0.094	0.184	0.178	0.08
ネルボン酸	C24:1(15c)	0.21	0.023	0.134	0.16	0.08
	C22:6(4c,7c,10c,13c,16c,19c)	0.569	0.023	0.21	0.037	0.1

③ 劣化度

油脂の基本構造と劣化プロセスは、次に示すとおりで、揚げ油の場合は、160℃以上の高温状態となり、熱酸化により過酸化物ができるが、すぐに分解したり重合物に変化する。この熱重合により二量体など高分子化合物ができるため粘性が増す。

また、水分が影響して油の加水分解がおこり遊離脂肪酸ができるため酸価が上昇する。二重結合が多い脂肪酸で構成されていると酸素が結合しやすい。

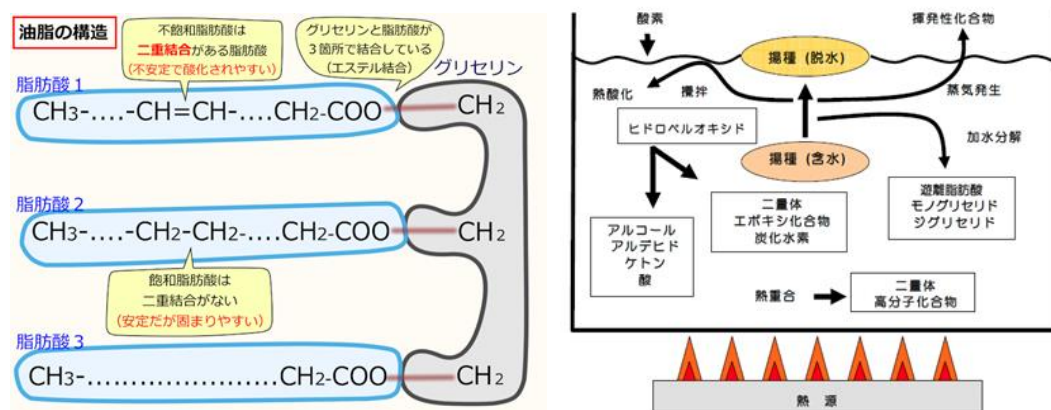


図 21 油脂の基本構造と劣化プロセス

資料) レコメンタンク HP (<https://www.recomtank.com/entry/oil-science>)

一般財団法人日本食品分析センターJFRL ニュース「油脂の劣化について」

(https://www.jfri.or.jp/storage/file/news_vol4_no29.pdf)

業態別の酸化度（劣化度）分布を次図に示した。「食堂、レストラン」区分の劣化度が他業態より高く、一部の社員食堂、一般食堂で10を超過する試料も存在している。加えて、「その他の食品製造業」のうち豆腐油揚げ製造業や、「酒場・ビアホール」で劣化度の高い試料が見られている。

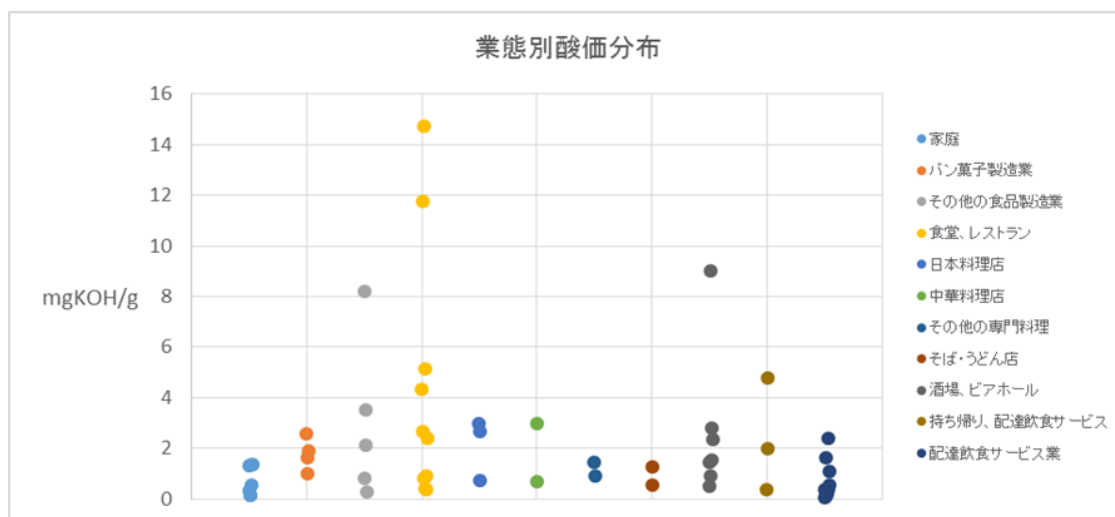


図 22 業態別の酸化度（劣化度）分布

2. 1における（株）カネカが回収し PHBH 製造に用いた廃食用油と、事業所（市中）から回収された廃食用油の分布をみると、事業所から排出される廃食用油には劣化度の高いものが存在することがわかる。また、パン菓子製造業の廃食用油はパーム油及び2. 1で用いた廃食用油に近いものがあつたことが推測される。

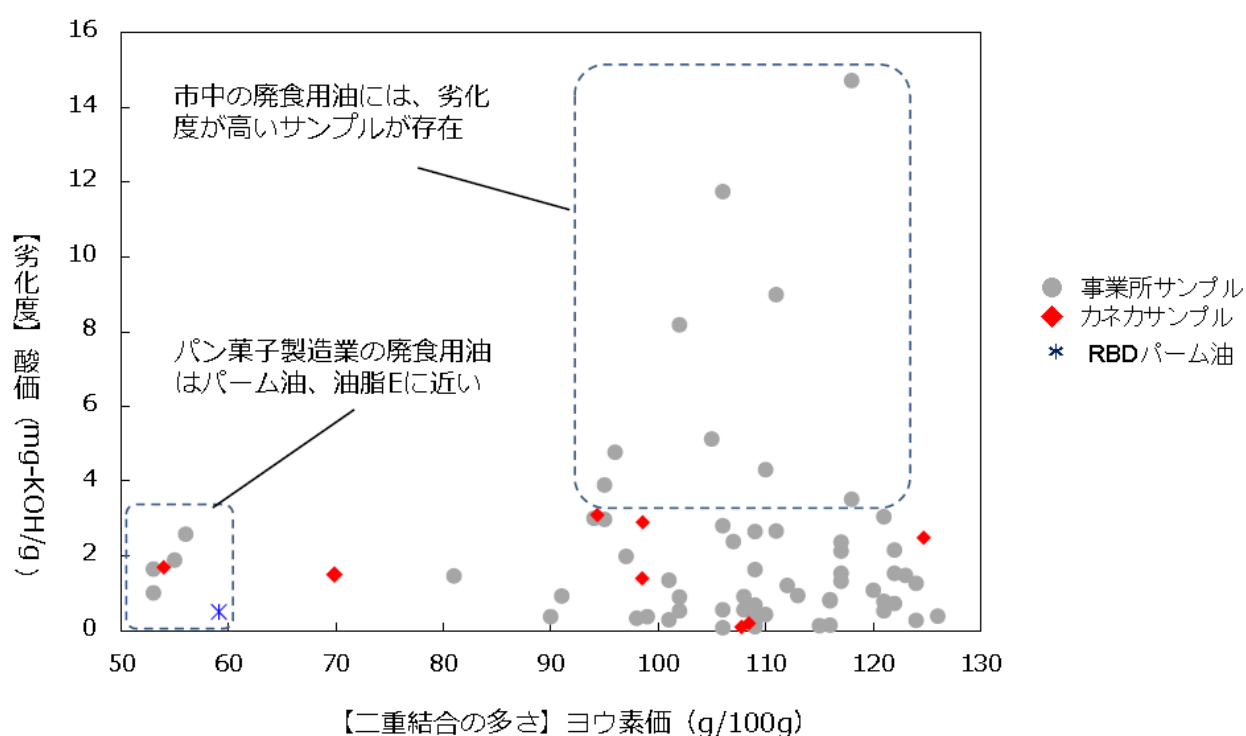


図 23 事業所回収サンプルとカネカ PHBH 原料サンプルの分布

注) カネカ PHBH 原料サンプルのヨウ素価は脂肪酸組成より推計

(2) 家庭系廃食用油の回収方法

令和元年度に実施した事例調査では、家庭からの廃食用油の回収方法は大きく 3 ケースにまとめられ、その特徴を次表のように整理したが、ペットボトル等の容器で持参し、回収拠点またはステーションにそのまま排出する回収方法は、排出者の負担軽減により、廃食用油の回収量の増加につながるという傾向が見られた。

表 17 家庭系廃食用油の回収方法と特徴

廃食用油回収方法	特徴
(ア)家庭から任意の容器で持参した廃食用油を拠点で移し替える方式	・ 収集・処理を行う側からは、廃食用油の回収拠点をバキューム車などで巡回し、短時間で収集することができる。 ・ 排出者側からは、移し替える手間が面倒である。 ・ 持参した容器は、移し替えた後、再使用できるため、廃棄物になるサイクルを延ばすことができる。 ・ 回収拠点の管理方法にもよるが、自由排出としている拠点の場合、回収不可なものを排出者が出した場合、他の廃食用油と混合し、回収した廃食用油全体の質の低下が生じる可能性がある。
(イ)ペットボトルなどの容器を回収拠点に持参し、そのまま排出・回収する方式	・ 収集・処理を行う側からは、回収ボックスの容器を平ボディ車などに積み替える必要があり、回収時間、手間がかかる。 ・ 排出者側からは、そのまま排出できるので手間が軽減される。 ・ 排出されたボトルは、回収後、廃棄物となるため、廃棄物になるサイクルが短くなる。(特に、ペットボトルなど容器包装リサイクル法対象容器を排出指定容器とした場合には、容器包装リサイクル法のリサイクルルートに乗らなくなる。) ・ 排出容器のサイズを指定しない場合には、回収ボックス内への収納スペースを有効に利用できない場合がある。 ・ 排出容器を蓋付きで自由とした場合に、ガラスびんでの排出や容易に開栓してしまうボトルで排出される場合があり、回収時の容器の割れ、漏れなどが生じる可能性がある。 ・ 回収拠点の管理方法にもよるが、自由排出としている拠点の場合、回収不可なものが出される可能性がある。 ・ 処理場でボトルから廃食用油を移し替える際に、不適物などを選別除外することができ、処理対象とする廃食用油の品質を一定に保つことが容易になる。
(ウ)定期ごみ収集を行うステーションにペットボトルなどの容器で持参し、そのまま出す方式	・ 収集・処理を行う側からは、定期ごみ収集時に併せて回収するため、既存のごみ収集ルートを利用することが可能で、新たな回収ルート、スケジュールを組む必要がない。 ・ 排出者側からは、そのまま排出できるので手間が軽減される。 ・ 排出者は、定期収集時の排出となるため、収集日まで家庭で廃食用油を保管しておく必要がある。 ・ 排出容器を蓋付きで自由とした場合に、ガラスびんでの排出や容易に開栓してしまうボトルで排出される場合があり、回収時の容器の割れ、漏れなどが生じる可能性がある。 ・ ステーションへの定期排出であることから、排出時の管理がしやすく、回収不可なものが出される可能性は軽減される。 ・ 処理場でボトルから廃食用油を移し替える際に、不適物などを選別除外することができ、処理対象とする廃食用油の品質を一定に保つことが容易になる。

ペットボトルによる廃食用油の回収については、次に示すように、平塚市や藤沢市など神奈川県自治体で 60～78%と高い回収率を示しており、ペットボトルによる廃食用油の回収を行っている自治体でも回収率には差が見られることが分かった。

表 18 家庭系廃食用油賦存量及び回収量の都市間比較結果

	回収方式	臨時拠点 移し替え	ごみSt ボトル回収				スーパー・公共施設 ボトル回収
		京都市	相模原市	平塚市	藤沢市	岡山市	佐賀市
世帯数	世帯	671,261	295,785	104,113	168,430	292,229	91,672
回収拠点数	回収St	1352	12,500	1,700	3,170	3,705	73
拠点密度	世帯/St	496	24	61	53	79	1,256
回収頻度	回収/月	1	4	2	2	1	30
廃食用油賦存推定量	kg/年	1,034,914	456,025	160,516	259,676	450,543	141,335
廃食用油回収量	kg/年	164,246	93,710	124,465	155,860	100,125	50,725
回収率	%	15.9%	20.5%	77.5%	60.0%	22.2%	35.9%
回収原単位	g/人・年	112	132	478	384	145	214
	g/世帯・年	245	317	1,195	925	343	553
	kg/St・年	121	7	73	49	27	695
	kg/St・月	10.1	0.6	6.1	4.1	2.3	57.9
回収開始時期	-	H9.8	H17.10	H5.4	H19.4	H21.4	H16
備考	-	回収量：H20度	回収量：H19度（出典：同上）	回収量：H20度	回収量：H20度	回収量：H21.5～7月 平均値から概算	回収量：H19度

出典：家庭系廃食用油の賦存量と回収量に関する都市間比較 矢野順也他

そこで、回収率の高い事例として挙げられている平塚市と藤沢市の事例について調査を行った。

1) 平塚市、藤沢市の事例

平塚市における平成 27～30 年度の廃食用油の回収量は次表のとおりで、経年的に減少傾向にあるが、「家庭系廃食用油の賦存量と回収量に関する都市間比較 矢野順也他」での廃食用油の賦存量原単位 1,542 g/世帯を用いて回収率を想定すると、令和元年度で 58.4%と高い水準にある。

表 19 平塚市の廃食用油回収量

項目	単位	平成27年度	平成28年度	平成29年度	平成30年度	令和元年度
世帯数	（世帯）	107,397	108,493	109,938	110,984	112,230
廃食用油賦存量	（t）	166	167	170	171	173
廃食用油回収量	（t）	112	110	109	106	101
廃食用油回収率	（%）	67.5%	65.9%	64.1%	62.0%	58.4%

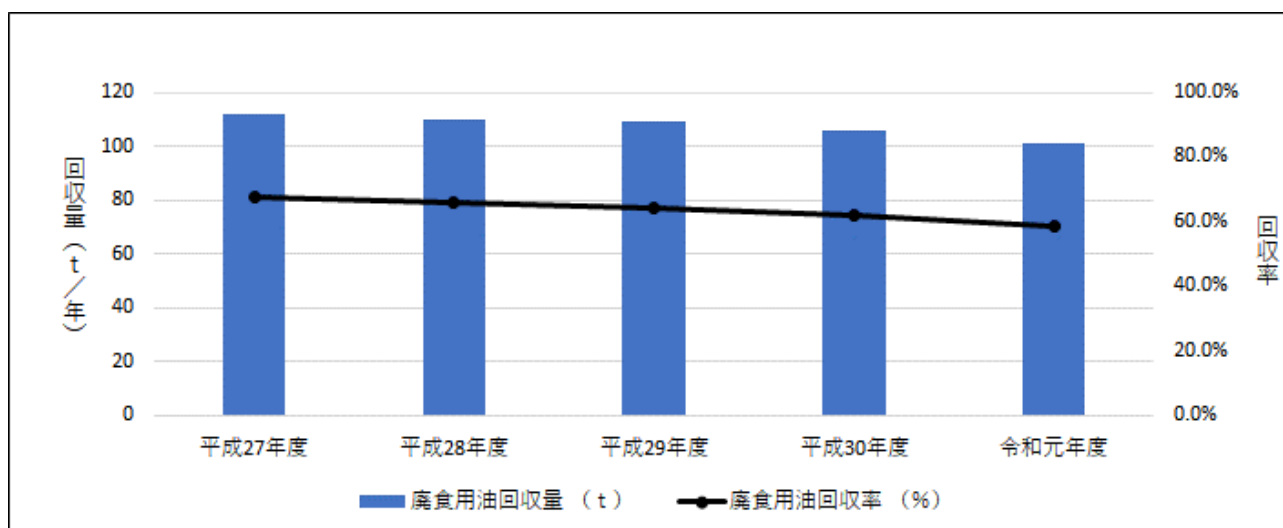


図 24 平塚市の廃食用油回収量

出典：令和元年度 清掃事業の概要 平塚市環境部

藤沢市における平成 22～令和元年度における廃食用油の回収量は次に示すとおりで、回収量は増加傾向を示し、令和元年度の回収率は 83.4%に達している。

表 20 藤沢市の廃食用油回収量

項目	単位	平成22年度	平成23年度	平成24年度	平成25年度	平成26年度	平成27年度	平成28年度	平成29年度	平成30年度	令和元年度
世帯数	(世帯)	171,981	174,752	177,240	178,887	180,758	180,170	182,788	185,282	187,737	190,990
廃食用油賦存量	(t)	265	269	273	276	279	278	282	286	289	295
廃食用油回収量	(t)	142	130	168	193	202	208	209	212	224	246
廃食用油回収率	(%)	53.6%	48.3%	61.5%	69.9%	72.4%	74.8%	74.1%	74.1%	77.5%	83.4%

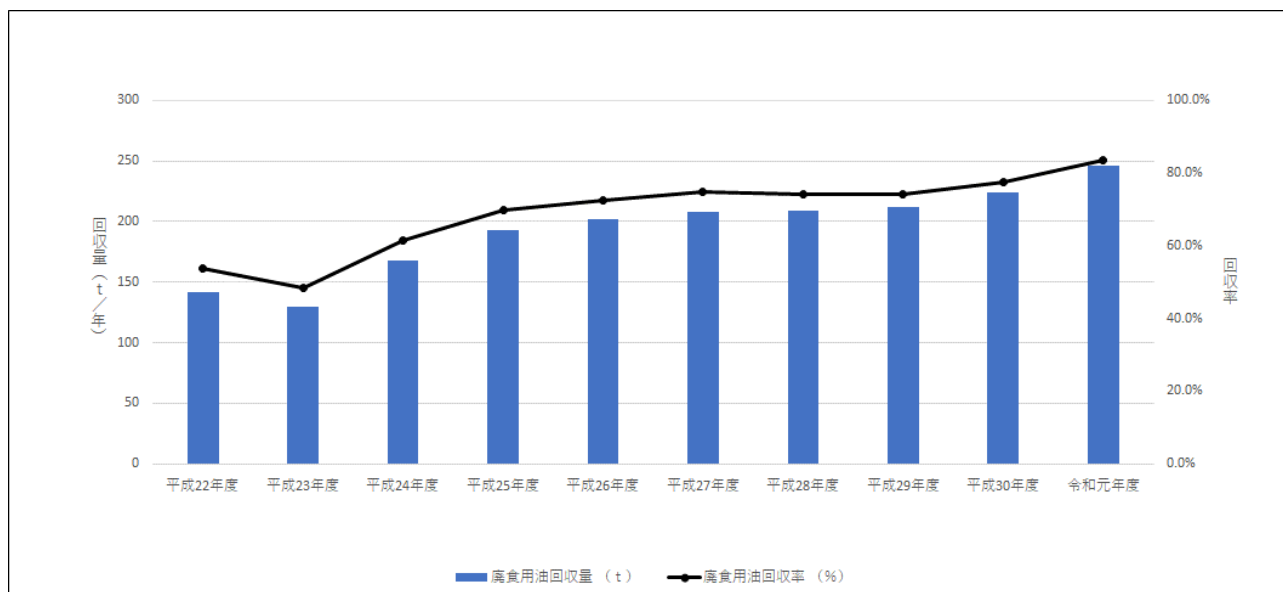


図 25 藤沢市の廃食用油回収量

出典：令和元年度 清掃事業の概要 藤沢市環境部

平塚市における廃食用油の出し方は、次図のとおりで、ペットボトルに入れてふたをして、専用コンテナ（緑色）に出すように指導しており、ペットボトル以外の容器は使用禁止となっている。

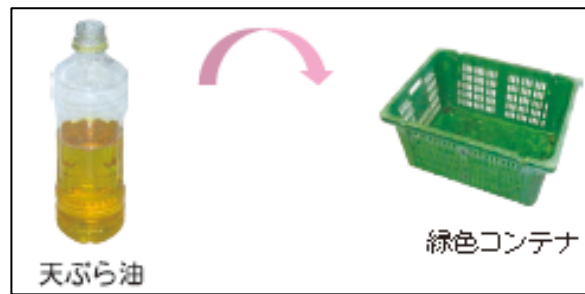


図 26 平塚市の廃食用油の出し方

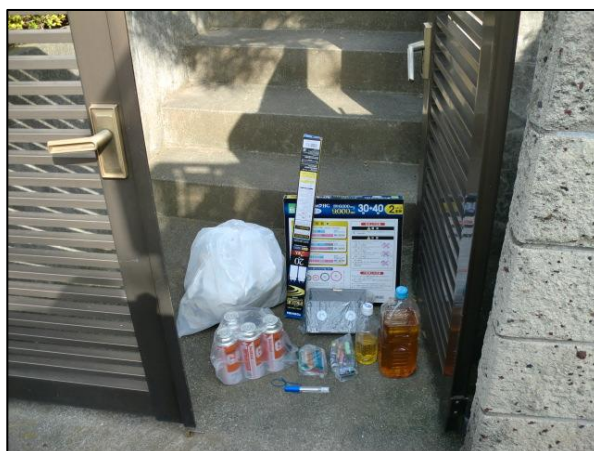
出典：平塚市 HP(<http://www.city.hiratsuka.kanagawa.jp/common/200076287.pdf>)

藤沢市においても、次に示すとおり、ペットボトルのみでの排出となっており、平塚市のように専用コンテナを使用せず、他の資源ごみと一緒に排出する方法となっている。

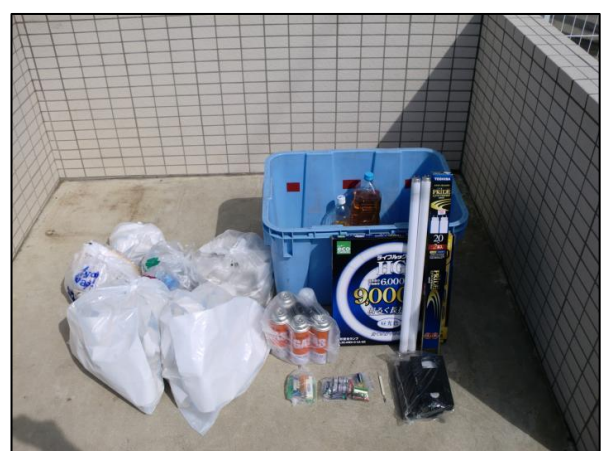


図 27 藤沢市の廃食用油の排出容器

出典：藤沢市 HP(<https://www.city.fujisawa.kanagawa.jp/kankyo-j/kurashi/gomi/wakekata/dasikata/haishoku.html>)



(戸建て住宅の場合)



(集合住宅の場合)

図 28 藤沢市の廃食用油の出し方

出典：藤沢市 HP(<https://www.city.fujisawa.kanagawa.jp/kankyo-j/kurashi/gomi/wakekata/dasikata/haishoku.html>)

一方、平塚市、藤沢市を含む神奈川県を中心に、リユース・リサイクルショップ「WE ショップ」を拠点に資源循環型の社会づくり、世界の人びととの民際協力、世界的な貧困や環境問題を学ぶ場づくりを行う NPO 法人 WE21 ジャパンがあり、37 の NPO が連携して、神奈川県全域で活動を進めている。

川崎エリア

東京エリア

墨田区





図 30 WE21 ショップを中心とした資源の地域循環活動

出典：WE21 ジャパン HP(<http://www.we21japan.org/activities/reuse.html>)



図 31 WE21 ショップに設置された廃食用油専用回収ペール缶

出典：WE21 ジャパン HP(<http://www.we21japan.org/activities/reuse.html>)

(3) 事業所からの廃食用油の回収

事業所からの廃食用油の回収は、業種、規模によって排出形態が様々であり、それぞれに応じた回収方法となっている。

1) 廃食用油の運搬車

廃食用油の運搬車は、次に示すとおり 2 種類の車両を使用している。小規模の排出事業者からの回収には、2 t ～ 3 t 車を使用し、多量排出事業者からの回収には大型のタンクローリーを使用している。



(2 t ～ 3 t 車)



(大型タンクローリー)

図 32 廃食用油の回収に用いる運搬車

出典：(株)レボインターナショナル HP(<https://www.e-revo.jp/使用済食用油の引き取り/>)

2) 飲食店等からの廃食用油の回収

飲食店等からの廃食用油の排出形態は、次に示すとおりで一斗缶による排出、ペール缶等による排出と大きくは 2 種類に分かれている。飲食店はほとんどが小規模排出事業者となるため、運搬車は 2 t ～ 3 t 車を使用している。



(一斗缶)



(ペール缶等)

図 33 飲食店からの廃食用油の排出形態

出典：(株)レボインターナショナル HP(<https://www.e-revo.jp/使用済食用油の引き取り/>)

一斗缶で排出されている場合には、排出事業者が近傍の場合は、一斗缶をそのまま運搬車に積み込み、処理施設まで運搬後、空の一斗缶を産業廃棄物として処分している。排出事業者が遠方の場合には、一斗缶を一旦そのまま運搬車に積み込むが、回収場所で運搬車の廃食用油貯留タンクに積み替えて、空の一斗缶を回収先近傍の産業廃棄物処理業者で処分している。

ペール缶等で排出されている場合には、回収場所で運搬車の廃食用油貯留タンクに積み替えて処理施設まで運搬している。

3) 大型店舗等からの廃食用油の回収

大型店舗からの廃食用油の排出形態は、一斗缶やペール缶などで排出される場合は、飲食店等からの回収方法と同様であるが、廃食用油の量が多い場合には 200 L のドラム缶を貸し出し、回収時にはそのまま運搬車に積み込み、新しい空のドラム缶と交換している。



図 34 大型店舗からの廃食用油の排出形態

出典：(株)レボインターナショナル HP(<https://www.e-revo.jp/使用済食用油の引き取り/>)

4) 食品加工工場からの廃食用油の回収

食品加工工場からの廃食用油の回収は、工場に大型貯蔵貯留タンクが設置されている場合には、大型のタンクローリーに積み替えて回収している。工場に貯蔵タンクが設置されていない場合は、ドラム缶などで排出されている場合が多いが、回収場所で大型のタンクローリーに積み替えて回収している。

また、食品加工工場などに対しては、廃食用油専用のステンレス製タンクを貸し出す場合もある。



(大型貯蔵タンク)



(専用ステンレス製タンク)

図 35 食品加工工場からの廃食用油の排出形態

出典：(株)レボインターナショナル HP(<https://www.e-revo.jp/使用済食用油の引き取り/>)

2.2.4 まとめと課題

事業所から排出される廃食用油のうち、1施設当たりの排出量が少ない業種（食堂、レストラン、配達飲食サービス業及び酒場・ビアホール）では劣化度の高いものが多く見られており、PHBH原料としての受け入れ基準に応じた回収方法の検討が必要である。

家庭からの廃食用油の回収は令和元年度と本年度の調査結果から、ペットボトルでの回収方法で回収率が高くなっているため、回収率を上げるためにはペットボトルなどのふた付き容器を用いた回収方法が有効であると思われるが、回収後の容器が新たな廃棄物として発生することから、令和元年度調査のインスブルック市の事例のように、廃食用油専用容器を用いるなど再利用ができる容器での回収を検討するとともに、廃食用油専用容器に生分解性素材を使用するなど、新たな廃棄物として環境負荷を与えない方策の検討が必要である。

また、本年度調査を行った自治体事例では、ペットボトルでの回収を行っている自治体の中でも回収率が多く、その要因としては、NPOなどの活発な活動で、廃食用油の回収に対する市民意識が向上され、結果的に回収率の増加につながっている側面が伺われることから、家庭からの廃食用油の回収率向上については、行政による啓発のみでなく、市民団体やNPOなどからの働きかけが有効であると考えられ、それらの団体との協調体制の構築が必要と思われる。

事業所からの廃食用油の回収は、業種、事業所の規模によって排出量、排出形態が様々であり、また、業種によって劣化度の高い廃食用油が存在するなど、PHBH原料としての受け入れ基準を考慮すると混合回収の可否を検討する必要がある。

排出時の形態について、多量排出事業者においては、工場への大型貯蔵タンクの設置や専用のステンレス製タンクの貸出などにより、大型のタンクローリーで一括して回収することが可能であり、回収ルートを経率的にすることで、合理的な回収が可能になるとと思われる。

一方、小規模の排出事業者の排出形態は、一斗缶やペール缶が多く、またこれらの業種の立地場所などを考えると大型のタンクローリーでの回収は難しく、2t～3t車で個別に回収する対応をせざるを得ない。しかし、回収場所が処理施設より遠方にあり、一斗缶で排出される場合には、一斗缶のままで処理施設まで運搬することは非効率であることから、回収場所に移し替えて、空の一斗缶を近くの産廃処理業者で処分している現状があり、空の一斗缶を処分することで、回収効率を低下させていることから、遠方の排出業者の排出形態には、ペール缶など処分が不要な排出形態を考える必要がある。

また、事業所からの廃食用油の回収は、現在、排出事業者からの電話連絡または、電話がない場合でも回収時期を想定しての定期回収などを行っている。これらを合理化することは現時点では困難であるが、多量排出事業者においては、大型のタンクローリーで複数の事業者を一括して回収することが可能であることから、IoT技術を活用し、廃食用油の貯留状況をセンサーによりモニタリングし、貯留状況に応じた最適ルートでの合理的な回収とする方策も考えられるため、今後はIoTの導入などにより、回収の効率化の程度について検討を行う必要がある。

2.3 廃食用油以外の国内外の油脂源の調達可能性及び食料と競合しないジャトロファ等の油糧植物の国内での栽培と特に国内中山間地（耕作放棄地）での原料栽培の検討

2.3.1 原料拡大シナリオの検討

次表に示すように、原料拡大のシナリオを整理する枠組みを構築した。

表 21 原料拡大シナリオの整理枠組み

		製造 シナリオ	① 現行	② 全国の生ごみをPHBH袋で回収			③ カトラリー等 に用途拡大	④ カネカ2030 年目標
		仮定等		・生ごみ発生量1,300万トン/年 ・生ごみ袋はPHBH 100%製 ・生ごみ重量比0.3%の袋重量 ・普及率25% ・普及率50% ・普及率100%			・全国の使い捨て カトラリー使用量は4.0万トン	・カネカHPより
		PHBH 製造量	0.5 万トン/年	1 万トン/年	2 万トン/年	4 万トン/年	8 万トン/年	10～20 万トン/年
原料調達シナリオ	賦存量等		製造量拡大					
① パーム油	・(参考)パーム油輸入量:78万トン		0.5	0.5	1.0	2.0	4.0	5～10
② 事業系廃食用油 (カネカ関連)	・数千トン? ・カネカ自社廃油&納入油	原料 拡大	—	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
③ 事業系廃食用油 (カネカ以外)	・年間約40万トン発生 ・主に飼料・工業用途利用		—	—	0.5	1.5	3.5	4.5～9.5
④ 生活系廃食用油	・年間約10万トン発生 ・主に焼却処分		—	—	—	—	?	?
⑤ 現在未使用の 事業系廃食用油 (劣化油、トラップ油等)	・年間2～4万トン発生 (現在、再生利用困難として廃棄)		—	—	—	—	?	?
⑥ 油脂製造時の 副生成物(ソーダ油滓等)	・年間約4万トン		—	—	—	—	?	?
⑦ 国産油脂作物 (ジャトロファ、ナタネ等)	・耕作放棄地の2割を活用した場合、約10万トン/年 ・(参考)食用菜種油は約100万トン生産		—	—	—	—	—	?

注) 原料調達量≒PHBH製造量と想定

2.3.2 油脂製造時の副生成物

(1) 目的

PHA系バイオプラスチック原料の多様化の観点から、廃食用油以外の国内外の油脂源として、油脂製造時の副生成物（ソーダ油滓）について、その調達可能性に関する検討を行うことを目的とする。

令和2年度は、以下の3点の検討を行うことを目的とした。

- ① 油脂製造時の副生成物の排出・利用実態の調査
油脂製造事業者へのヒアリングにより調査を
- ② ソーダ油滓からの脂肪酸分離試験及び成分分析
油脂製造時の副生成物（ソーダ油滓等）から脂肪酸分離試験を実施し、ソーダ油滓を脂肪酸に変換する条件を調査するとともに、ソーダ油滓や生成した脂肪酸、洗浄廃水の性状分析を実施する。
- ③ ソーダ油滓からの脂肪酸変換についてのコスト計算
ソーダ油滓からの脂肪酸変換に係るコストや排水量等について、(1)の試験結果から試算を行う。

(2) 方法

1) 油脂製造時の副生成物の排出・利用実態の調査

油脂製造事業者へのヒアリングを行った。

2) ソーダ油滓からの脂肪酸分離試験及び成分分析

油脂製造事業者より提供いただいた、菜種油由来及び大豆油由来のソーダ油滓サンプル（次図）を試験に使用した。

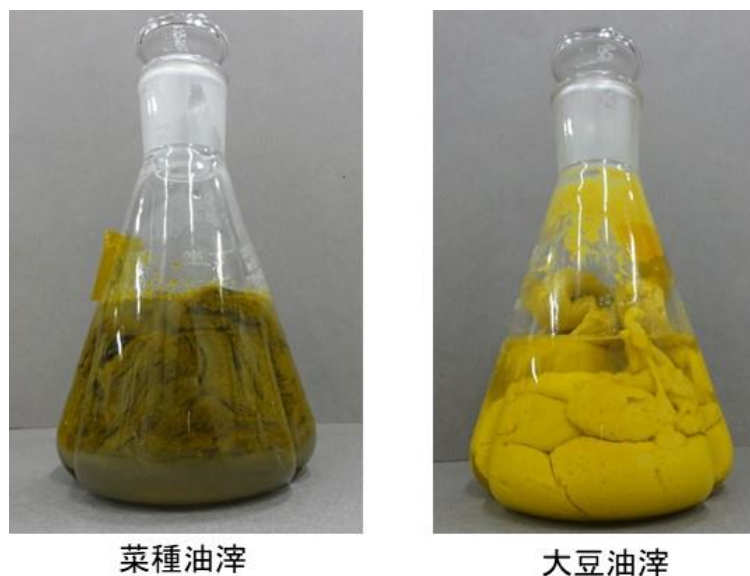


図 36 試験に使用したソーダ油滓サンプル（油脂製造事業者提供）

最初に、菜種油滓及び大豆油滓に硫酸溶液を添加して、脂肪酸を遊離させる検討を以下の条件で実施し、脂肪酸を遊離するための最適条件を探索した。試験は、硫酸濃度 60wt%、反応温度 70℃を標準条件とし、20 g のソーダ油滓に所定量の硫酸水溶液を添加し、反応時間は 2 h にて比較を行った。

- ・ 硫酸添加量の影響（計算値の 50～200%の範囲にて、硫酸濃度は 60wt%、反応温度は 70℃）
- ・ 硫酸濃度の影響（30、60、90wt%にて、硫酸添加量は計算値の 100、110%、反応温度は 70℃）
- ・ 反応温度の影響（50、70、90℃にて、硫酸添加量は計算値の 100、110%、硫酸濃度は 60wt%）

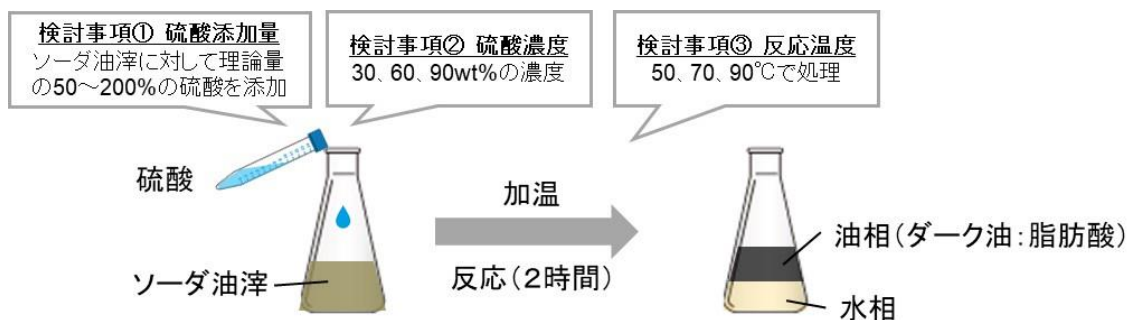


図 37 脂肪酸分離条件の最適化試験の概要

次に、最適条件でスケールアップ実験を行って得た遊離脂肪酸に以下の脱色操作を行った。

- ・活性炭吸着（常温）
- ・活性白土吸着（常温）
- ・水蒸気蒸留（80～120℃程度）
- ・活性白土加熱処理（100～120℃）

最後に、脱色された脂肪酸の分析、分離された廃水の分析を実施した。

3) ソーダ油滓からの脂肪酸変換についてのコスト計算

上記 2)の実験検討で得た情報をもとにして、以下のプロセス設計を行い、ソーダ油滓から脂肪酸を得るコストを試算した。

- ・プロセスブロックフロー（物質収支及びエネルギー収支）
- ・機器リストからの設備投資額の推算
- ・脂肪酸を得るための処理コストの試算（変動費、固定費）

（3）結果

1) 油脂製造時の副生成物の排出・利用実態の調査

油脂製造事業者へのヒアリングにより、副生成物の排出・利用実態及び性状について把握を行った（詳細非公表）。

2) ソーダ油滓からの脂肪酸分離試験及び成分分析

① 硫酸添加量の影響

次の図表に、菜種油滓及び大豆油滓の結果を示す。原料組成から算出した硫酸量が 100%量として、ほぼ 100%付近で分離状態、分離量ともに最適となった。

表 22 菜種油滓の試験結果

No.	硫酸添加水準 (当量に対して)	仕込み重量 [g]		脂肪酸(上相) の体積 [ml]
		菜種油油滓	60wt%硫酸	
1	50%	20.79	1.38	7.0
2	90%	20.42	2.45	10.0
3	100%	20.41	2.72	12.0
4	110%	20.29	2.99	12.5
5	150%	20.46	3.76	12.0
6	200%	20.60	5.46	12.0

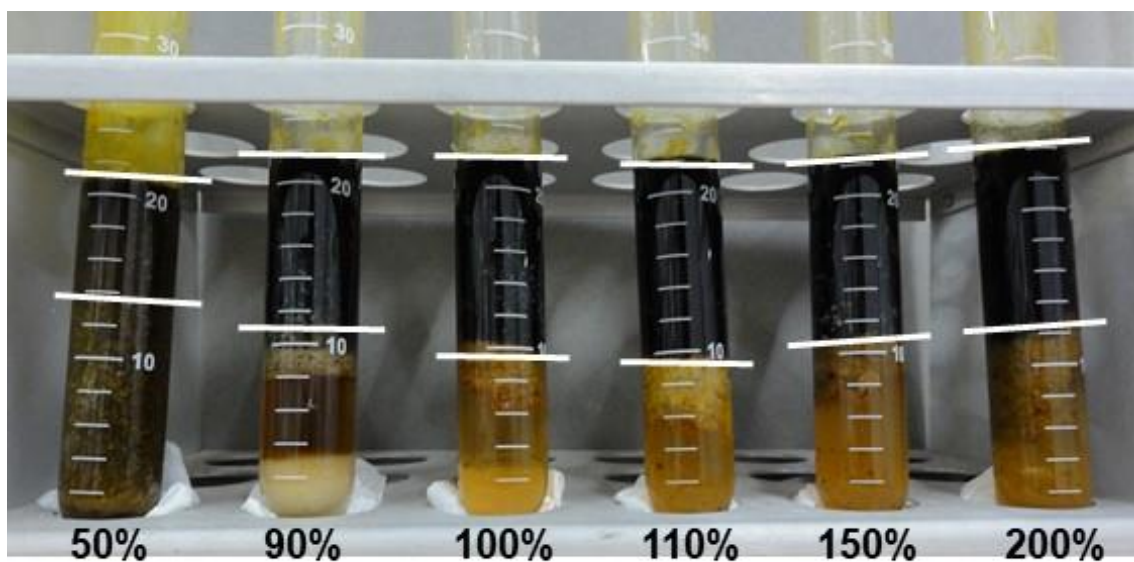


図 38 菜種油滓の分離状況

表 23 大豆油滓の試験結果

No.	硫酸添加水準 (当量に対して)	仕込み重量 [g]		脂肪酸(上相) の体積 [ml]
		大豆油油滓	60wt%硫酸	
1	50%	20.55	1.13	12.0
2	90%	20.70	2.08	13.0
3	100%	20.06	2.24	12.5
4	110%	20.37	2.50	12.0
5	150%	20.40	3.43	12.0
6	200%	20.05	4.48	12.0

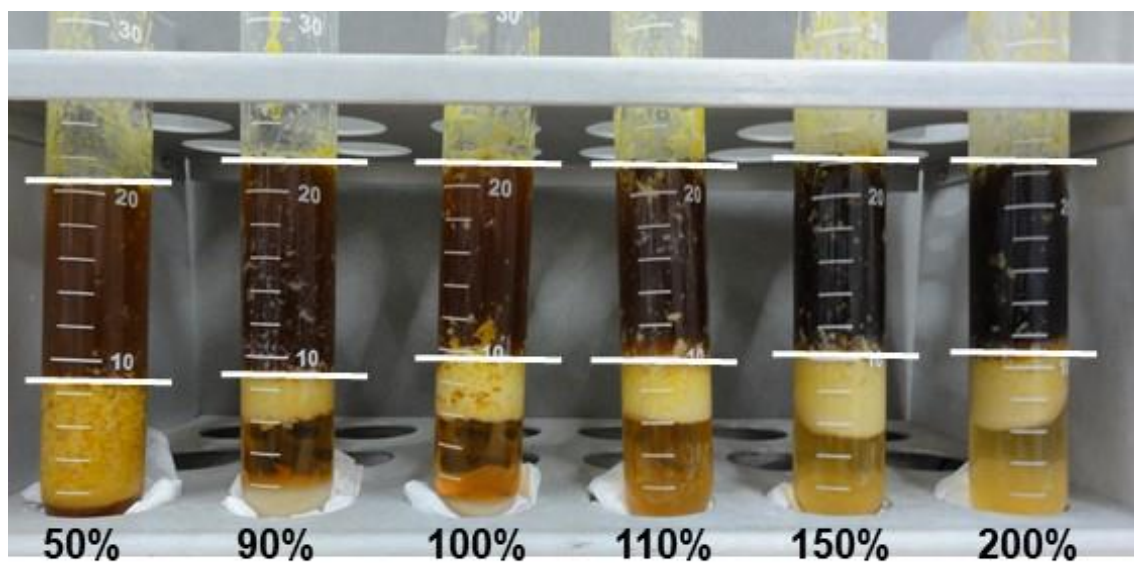


図 39 大豆油滓の分離状況

② 硫酸濃度の影響

菜種油滓、大豆油滓ともに、硫酸添加量は計算値に対して 100%及び 110%の条件にて行っているが、ここでは大豆油滓で 100%添加量の分離状態を次図に示す（30wt%、60wt%、90wt%）。廃水量は若干増えるが、分離状態は 30wt%が最も良い結果となった。

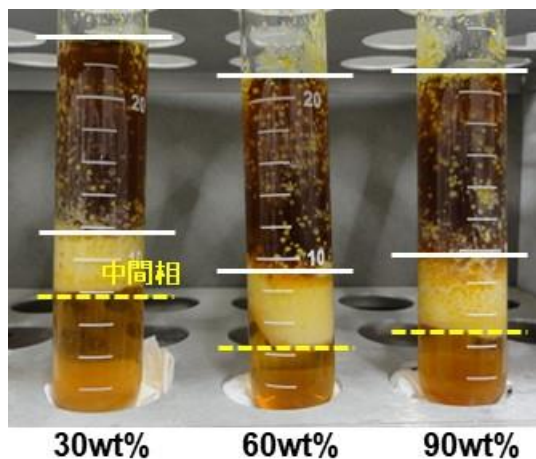


図 40 脂肪酸の分離状態（硫酸濃度の影響）

③ 反応温度の影響

菜種油滓、大豆油滓ともに、反応温度は 100%及び 110%の条件にて行ったが、ここでは、大豆油滓で 100%添加量の分離状態を次図に示す（50℃、70℃、90℃）。温度が低いと分離状態が良くなく、また高くても良くないので、70℃を最適な分離温度とした。

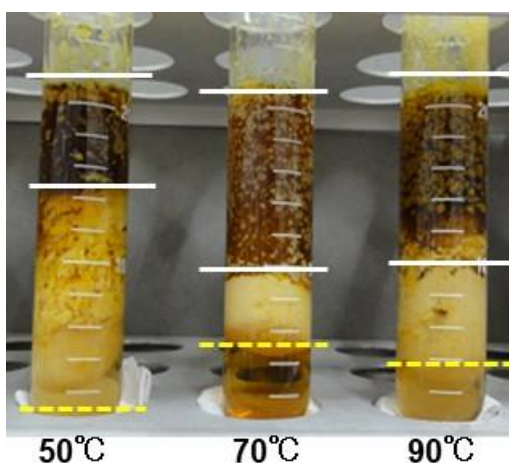


図 41 脂肪酸の分離状態（反応温度の影響）

④ 脂肪酸の脱色

菜種油滓、大豆油滓から分離した脂肪酸に対して、活性炭吸着処理（常温）、活性白土処理（常温）、水蒸気蒸留処理（80～120℃）を行ったが、脱色の効果はほとんど見られなかった。そこで、脂肪酸に活性白土を添加し、100～120℃で加熱処理したところ、次図に示すように脱色の効果が見られた。

脱色後の菜種油脂肪酸は少量の黒い沈殿物が確認された。大豆油脂肪酸は冷却時に飽和脂肪酸と推察される白色結晶物が観察されたが、40℃程度で均一な液に戻った。

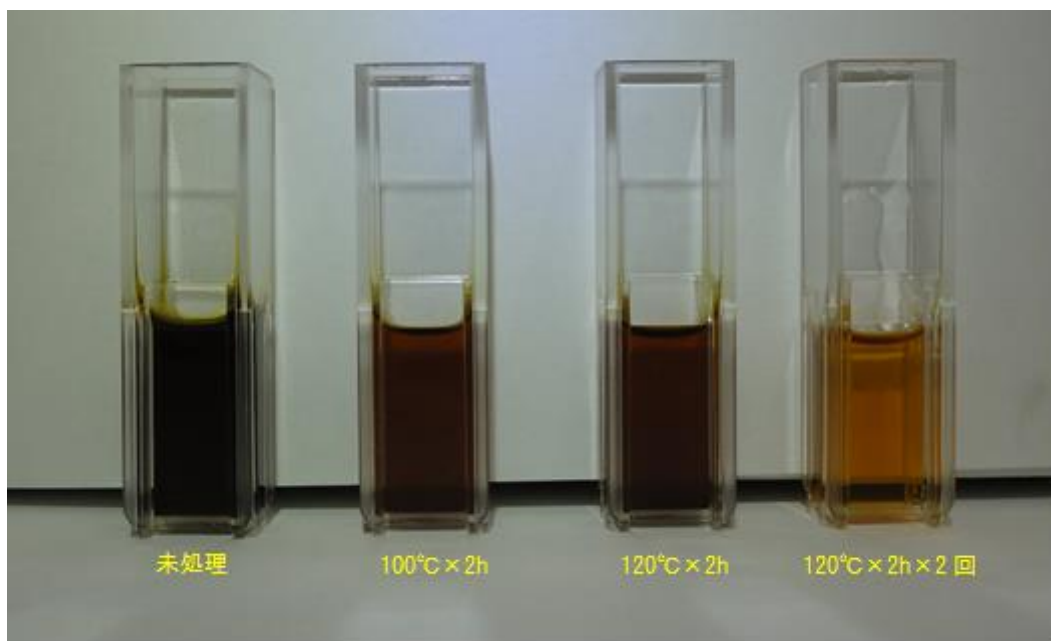


図 42 菜種油滓由来の脂肪酸の脱色状況

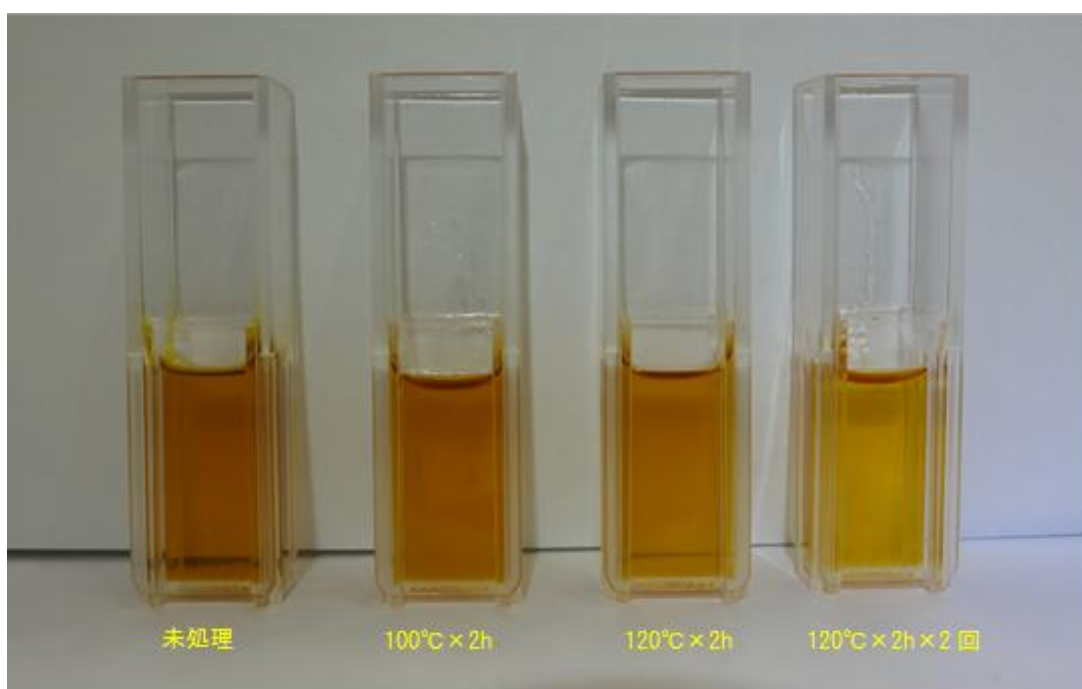


図 43 大豆油滓由来の脂肪酸の脱色状況

⑤ 脂肪酸分析及び廃水の分析

本検討で試用したソーダ油滓の脂肪酸組成分析結果を次表、次図に示す。得られた組成は、文献値及び、廃食用油とよく一致することが確認された。また、PHBH 製造に向けた原料油の受け入れ基準をクリアすることも確認された。

表 24 ソーダ油滓の脂肪酸組成分析結果

化合物名	慣用名	菜種油滓	大豆油滓
		%	%
C16:0	パルミチン酸	6.2	15.1
C16:1(9c)	パルミトレイン酸	0.3	
C17:0	マルガリン酸		0.1
C18:0	ステアリン酸	2.4	4.5
C16:3		0.1	
C18:1(9c)	オレイン酸	53.2	21.1
C18:1		4.9	1.8
C18:2(9c,12c)	リノール酸	22.4	49.3
C19:1		0.1	
C20:0	アラキジン酸	0.7	0.3
C18:3(9c,12c,15c)	α リノレン酸	8.0	6.5
C20:1(11c)	ゴンドレン酸	1.1	0.2
C22:0	ベヘン酸	0.4	0.5
C23:0			0.1
C24:0	リグノセリン酸	0.2	0.3
C18:3			0.1
C18:3			0.1
C24:1(15c)		0.2	
合計		100.0	100.0

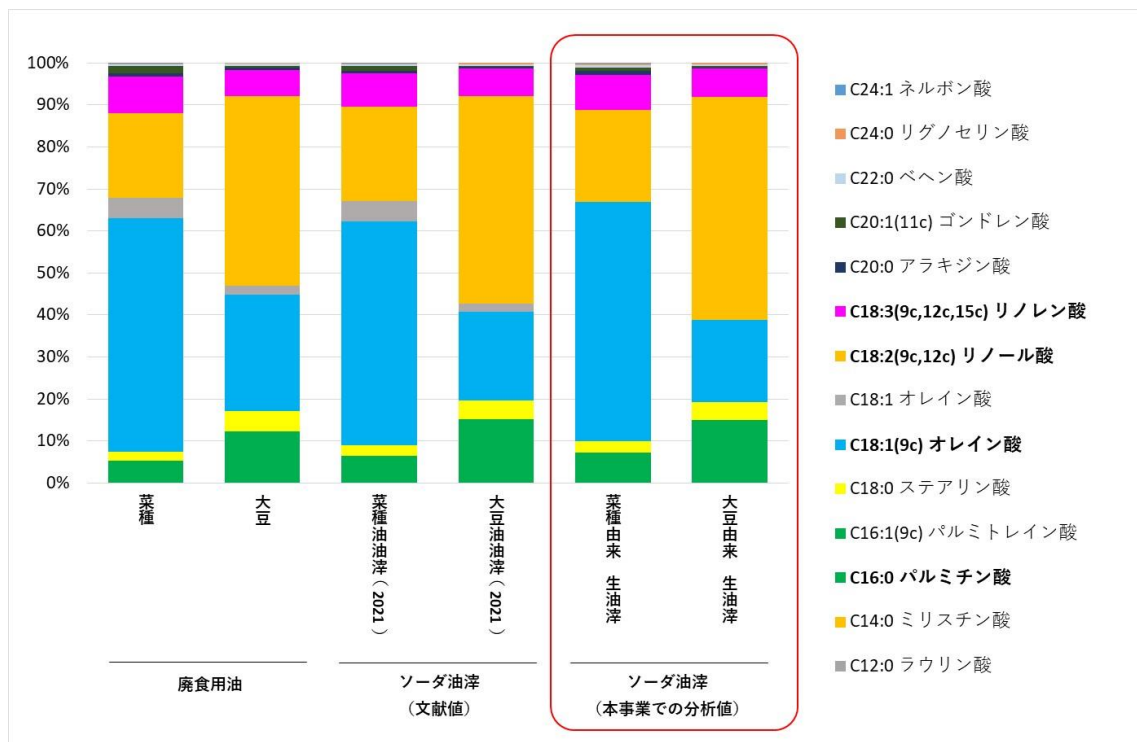


図 44 ソーダ油滓の脂肪酸組成（ソーダ油滓文献値及び菜種油との比較）

以上より、脂肪酸組成の観点からは、ソーダ油滓による PHBH の原料拡大の可能性は十分あると言える。ただし、ソーダ油滓から脂肪酸分離プロセスを経て得られるのはトリグリセリドではなく遊離脂肪酸であることから、PHBH 原料としての利用にはさらなる検討が必要と考えられる。

3) ソーダ油滓からの脂肪酸変換についてのコスト計算

菜種油滓、大豆油滓それぞれ 5,000 トン/年処理するプラント規模にて、脂肪酸を生成するプロセスの物質収支、エネルギー収支、機器リストを作成し、脂肪酸 kg 当たりの処理コストを推算した。次表に、菜種油滓を脂肪酸分離し活性白土脱色処理した場合の処理コスト計算表を示す。また、その次の表には、菜種油滓及び大豆油滓から脂肪酸を分離した場合の処理コスト（脱色処理あり、なし）のまとめを示す。どちらの油滓も脱色処理ありで 100 円/kg-脂肪酸程度、脱色処理なしで 50 円/kg-脂肪酸程度の処理コストとなる。

表 25 菜種油滓の脂肪酸分離、脱色処理コスト

①変動費

		原単位		単価			コスト	
製品	脂肪酸	314.7	kg/h					
原料	油滓	625.0	kg/h	0	円/kg		0.0	円/kg
	30%濃硫酸	166.1	kg/h	20	円/kg	(1)	10.6	円/kg
	48%苛性ソーダ	0.7	kg/h	40	円/kg	(1)	0.1	円/kg
	活性白土	35.0	kg/D	250	円/kg	(4)	27.8	円/kg
	小計						38.4	円/kg
用役	0.2MPaG蒸気	66.9	kg/h	5.0	円/kg	(2)	1.1	円/kg
	冷却水	1.7	t/h	3.0	円/t	(2)	0.0	円/kg
	電力	15.7	kWh/h	15.0	円/kWh	(2)	0.7	円/kg
	小計						0.7	円/kg
廃棄物	廃水	442.2	kg/h	20	円/kg	(2)	28.1	円/kg
	固形廃棄物	69.9	kg/h	20	円/kg	(2)	4.4	円/kg
	小計						32.5	円/kg
合計							71.7	円/kg

②固定費

		生産量		投資額			コスト	
設備費用		2,518	t/年	427	百万円			
減価償却費		10.0	%	42.7	百万円/年	(2)	17.0	円/kg
修繕消耗費		3.0	%	12.8	百万円/年	(2)	5.1	円/kg
人件費		3.0	%	12.8	百万円/年	(2)	5.1	円/kg
その他固定費		2.0	%	8.5	百万円/年	(3)	3.4	円/kg
合計		18.0	%				30.5	円/kg

③変動費＋固定費

処理コスト							102.3	円/kg
-------	--	--	--	--	--	--	-------	------

(1)化学工業日報社編、17019の化学商品(2019)

(2)KRI推定値

(3)その他固定費：法人税以外の税金、工場管理費や一般管理費に充分分

(4)活性白土製造会社からの情報

表 26 菜種油滓、大豆油滓からの脂肪酸分離処理コストの推算

		処理コスト	変動費	固定費	設備投資額
		円/kg-脂肪酸	円/kg-脂肪酸	円/kg-脂肪酸	百万円
菜種油滓	脱色あり	102.2	71.7	30.5	427
	脱色なし	49.0	35.3	13.7	213
大豆油滓	脱色あり	102.0	70.7	31.3	421
	脱色なし	48.1	34.3	13.8	207

※年間固定費=設備投資額×18%として計算

※設備投資額が機器係数法にて推算

(4) まとめと課題

ソーダ油滓の脂肪酸分離は、油滓含有脂肪酸から計算される当量の硫酸量を添加し、70℃、硫酸濃度 30wt%で最も良好に脂肪酸分離されることが分かった。分離した脂肪酸の脱色は、吸着処理、水蒸気蒸留では効果はなく、活性白土を添加し熱処理することで脱色することが分かった。これらの実験の処理条件をベースにソーダ油滓から脂肪酸を分離し、脱色する場合の処理コストを求めると、約 100 円/kg-脂肪酸程度のコストとなった。また、脂肪酸を脱色しない場合の処理コストは、50 円/kg-脂肪酸となった。ソーダ油滓からの脂肪酸分離・脱色プロセスの課題は、

- ① 分離した大豆油脂肪酸は室温で白色結晶が析出する（加温すると再融解する）
- ② 脱色菜種脂肪酸には黒色沈殿物が観察される
- ③ 活性白土の熱処理による脱色の度合いは小さい（条件検討が必要）
今回検討以外の脂肪酸脱色方法も検討すべき
- ④ 活性白土の熱処理による脱色処理コストが高い
活性白土の循環利用などを考慮すべき

である。

2.3.3 ジャトロファ等の油脂植物

(1) 目的

PHA 系バイオプラスチック原料の多様化の観点から、廃食用油以外の国内外の油脂源として、油脂作物であるジャトロファ等について、その調達可能性に関する検討を行うことを目的とする。具体的には、廃棄物焼却施設やバイオガス化施設からの排熱、排ガス中の CO₂、メタン発酵消化液等を活用した国内中山間地域における温室栽培システムの有効性を検証するとともに、全体経費の低コスト化の可能性を実証することを目指す。

令和2年度は、令和元年度に京都地域に構築した、加温装置及び CO₂ 発生装置等を導入した実証温室を用いて、ジャトロファの栽培を継続し、栽培管理方法の検討を行った。また、栽培の更なる低コスト化に向け、新たな資源作物との混植等の探索と消化液中の有効成分の解析及び施肥効果等の検証を行った。

加えて、ジャトロファ以外の油脂作物として、米作の裏作としての菜種の露地栽培等において消化液を活用して効果的に育成する方法の検討を行った。

(2) 方法

1) ジャトロファ

栽培に用いたジャトロファは、ジャトロファ栽培事業に取り組んでいる(株)レボインターナショナルが選抜した株を使用した。同社は10年以上の栽培取組実績を有しており、ベトナムにおいては、優良ジャトロファ品種の選抜を進め、子実生産量が大きく乾燥に耐性のある優良株を開発し、高収率での油脂生産を達成している。

本年度は温室栽培と露地栽培を検討した。温室栽培では、令和元年度に構築した、京都大学構内の温室に加温器、CO₂ 富化装置、センサーを導入した実証用温室を使用し、メタン発酵消化液を肥料として施用した。これは、国内中山間地において、廃棄物焼却施設やバイオガス化施設からの排熱、排ガス中の CO₂、メタン発酵消化液等を活用することを想定した栽培システムとなっている。



図 45 本事業で構築した実証用温室（令和元年度事業報告書より）

温室では、温室内の土壤に直接、または土壤を充填した 10 L 容ポットに植えつけ、温室内に置床した。露地栽培では、上記の京都大学内の実証用温室のすぐ隣に確保した畑（40 m²）を使用した。これにより、温室栽培と露地栽培において土壤条件を同一にして比較することが可能となる。加えて、より大きな規模で栽培を試行するために、修学院離宮の畑 200 m² にて露地栽培を行った。

2) その他の油脂作物（ナタネ）

ジャトロファ以外の油脂作物としてナタネを選定し、修学院離宮の稲作後の水田を用いて栽培を行った。肥料は、令和元年度秋季からの栽培には主に化学肥料を使用し、一部区画でメタン発酵消化液を使用した。令和2年度秋季からの栽培には、メタン発酵消化液だけを使用している。

（3）結果

1) ジャトロファ

① 温室内土壤栽培

令和2年4月に温室内の土壤に実生苗7株を植え付けた。5月にさらに7株を移植した。それぞれの植付け前の土壤に消化液20Lを施用した。下に植付け後の成長の様子を示した（次図）。4月株7株のうち、6株は分枝せずに一本の茎で伸長した。1株は地際で分枝し、7本の茎となって成長

した。7ヶ月後には2.8 m 程度まで成長し、12月に1株が開花した。5月株7株のうち1株は移植後すぐに枯死した。6株はその後成長を続けたが、茎葉が繁茂し相互遮蔽が著しかったため令和2年8月に2株を樹高50 cmで伐採し、樹間を広げた。令和2年10月に散水を止めたところ、新葉の展開が止まり、12月には下位葉から枯死、落葉が始まった。これら14株のうち、13株が活着し樹高2 mを超えて成長したが、開花したのは一株だけであった。



図 46 ジャトロファの温室栽培結果（温室内土壌栽培）

② 温室内ポット栽培

令和元年度から栽培を行っているポット栽培については、本年度も栽培を継続し、新たな実生苗も加えて約 30 ポットを栽培した。全てのポットにメタン発酵消化液を肥料として複数回与えた。全ての個体は順調に生育した。2 年生植物は、6 月から 9 月にかけて開花、着果し、8 株から 280 g の種子を収穫した。この種子を搾油し、約 50 mL の粗油を得ることができた。



図 47 ジャトロファの収穫結果（温室内ポット栽培）

ジャトロファの収量については、先行事例に収穫量に種子／子実、新鮮重／乾燥重、一樹あたり／面積あたり、一年あたり／一作あたりの記載がほとんどなく、採算ラインの正確な設定が難しい。目標を仮に 3 トン-種子/ha（1 トン-油脂/ha）とすると、1 ha あたり 2,000 本植栽する場合、1 本あたり 1,500 g の種子収量（果実 700 個、種子 2,000 個）となる。

本検討では、温室内ポット栽培にて、1 本あたり 47 g の種子収量（果実 22 個、種子 67 個）となった。目標水準まで生産性の向上が望まれ、今後、種子生産量を増やすため、花芽の形成要因の分析や花芽着生数の増加を試みる。

令和 3 年 2 月 1 日から越冬させた温室内のポットに灌水を開始したところ、2 月 16 日に 2 つのポットで新芽の再生が始まったことを確認した（次図）。

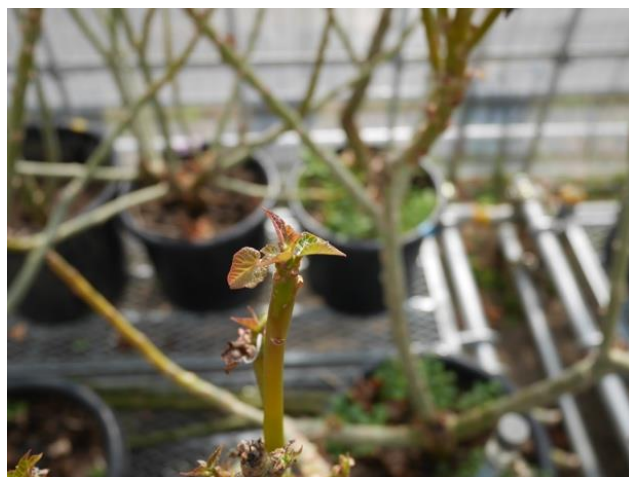


図 48 温室内ポット栽培の新芽の再生

③ 露地栽培

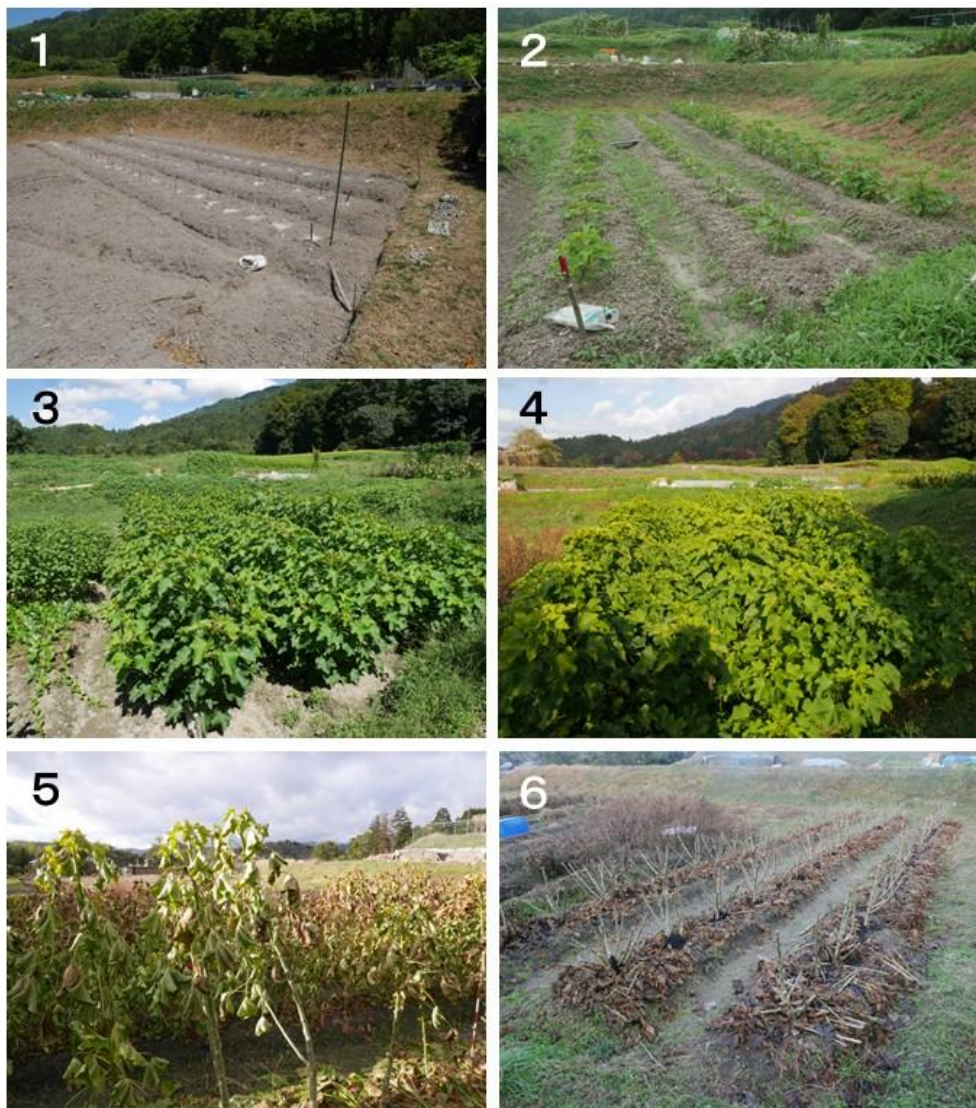
ジャトロファは熱帯起源の作物であるが、令和元年度の試みの結果、日本国内の温室ポット栽培で開花子実着生が可能であることを示した。今後、日本の自然環境下で栽培することが可能かどうかを判断するため、戸外の露地での栽培を試みた。栽培試験は京都大学北部構内の現在ジャトロファ栽培温室と隣接する畑地（図 49）と、京都市左京区修学院の畑地（図 50）で行った。

京大北部構内北白川の畑地では令和 2 年 4 月に幅 1 m、長さ 6 m の畝を 3 本立て、実生苗と令和元年に栽培していたジャトロファ茎を植え付けた。修学院畑地では令和 2 年 2 月に調製した実生苗を植え付け、令和 2 年 5 月には種子も播種した。全ての畑地で、基本レイアウトとして、畝の間隔を 1 m、樹間を 50 cm とした。生育経過は図 49、図 50 に示した通りで、北白川でも修学院でも順調に生育し、令和 2 年 9 月には、北白川で樹高 2 m、修学院で樹高 1.8 m ほどに生育した。しかし最低気温が 10℃を下回るようになった 10 月以降、生育は停滞した。この時、落葉は見られなかったが、12 月 17 日に気温が氷点下まで降下する寒波の影響で、北白川、修学院とも、全ての緑葉が壊死した。その後、地上部を 70 cm 程度に剪定した。

本年度の栽培試験を通じて、ジャトロファが落葉するには乾燥と寒さの 2 つのファクターがあり、温室内のジャトロファは乾燥によって落葉し、露地のジャトロファは低温によって壊死、落葉したと思われた。現在越冬中個体の今春の新芽の再生頻度を観察することでジャトロファ樹が京都で越冬できるかどうか判断できると考える。



図 49 ジャトロファの露地栽培結果（北白川圃場）



1: 圃場準備 苦土石灰で土壌の pH 調整 (5 月 7 日)

2: 移植、播種完了 (7 月 24 日)

3: 生育中 (9 月 15 日)

4: 生育中 (11 月 16 日)

5: 寒波による緑葉壊死 (12 月 17 日)

6: 地上部剪定 (70 cm 高で)

図 50 ジャトロファの露地栽培結果 (修学院圃場)

④ 栽培管理方法の検討

本栽培検討ではすべてのジャトロファには消化液を唯一の肥料として与えた。植え付け前に畝に流し込みを行い、追肥は株の周りのウォータースポットに与えた。



左：ジャトロファ幼植物に消化液を散布した様子
 右：消化液が乾固してマルチ材として蒸散抑制、緩効性肥料として機能した

図 51 ジャトロファの温室内土壌栽培における消化液の施用

ジャトロファの種子収量向上に向けてホルモン剤の施用も検討した。温室内で栽培中のジャトロファの頂芽に対して花芽を増やすと報告されているホルモン剤であるベンジルアデニンを噴霧したところ、葉芽の大幅な増加が認められた。しかし花芽・子実の形成は促進されなかった。さらに茎葉の伸長が停止した。この結果から、ベンジルアデニンはジャトロファ樹に対して何らかの生理作用を発揮していること、しかし、花芽の増加には繋がらず、ホルモン剤を与える時期が重要な因子であることを確認した。



図 52 ジャトロファへのホルモン処理

温室内で栽培する場合、経済性の高い樹種と混植することでジャトロファ栽培の付加価値が高められる可能性がある。本年度はジャトロファの株元でパッションフルーツの苗作りを試みたところ、旺盛に生育し、3月からの戸外での栽培に適した苗が生産できた。



図 53 ジャトロファ樹の株元でパッションフルーツ苗を緑陰栽培している様子
(ただしジャトロファ樹は越冬のため地上部を 70 cm で剪定した後の様子)

⑤ ジャトロファ油の分析結果

ポット栽培より得たジャトロファ粗油について、脂肪酸組成を分析した結果を次表、次図に示す。本検討で得たジャトロファ粗油の脂肪酸組成は、先行研究で示された組成とほぼ同じであることが確認された。

表 27 ジャトロファ油の脂肪酸組成分析結果

化合物名	慣用名	ジャトロファ油 (本事業で収穫)	ジャトロファ油 (文献値)
		%	%
C16:0	パルミチン酸	14.88	14.2
C16:1(9c)	パルミトレイン酸	0.77	
C18:0	ステアリン酸	7.86	
C18:1(9c)	オレイン酸	43.98	43.1
C18:1		1.57	
C18:2(9c,12c)	リノール酸	30.54	34.3
C20:0	アラキジン酸	0.23	
C18:3(9c,12c,15c)	α リノレン酸	0.17	
合計		100	98.5

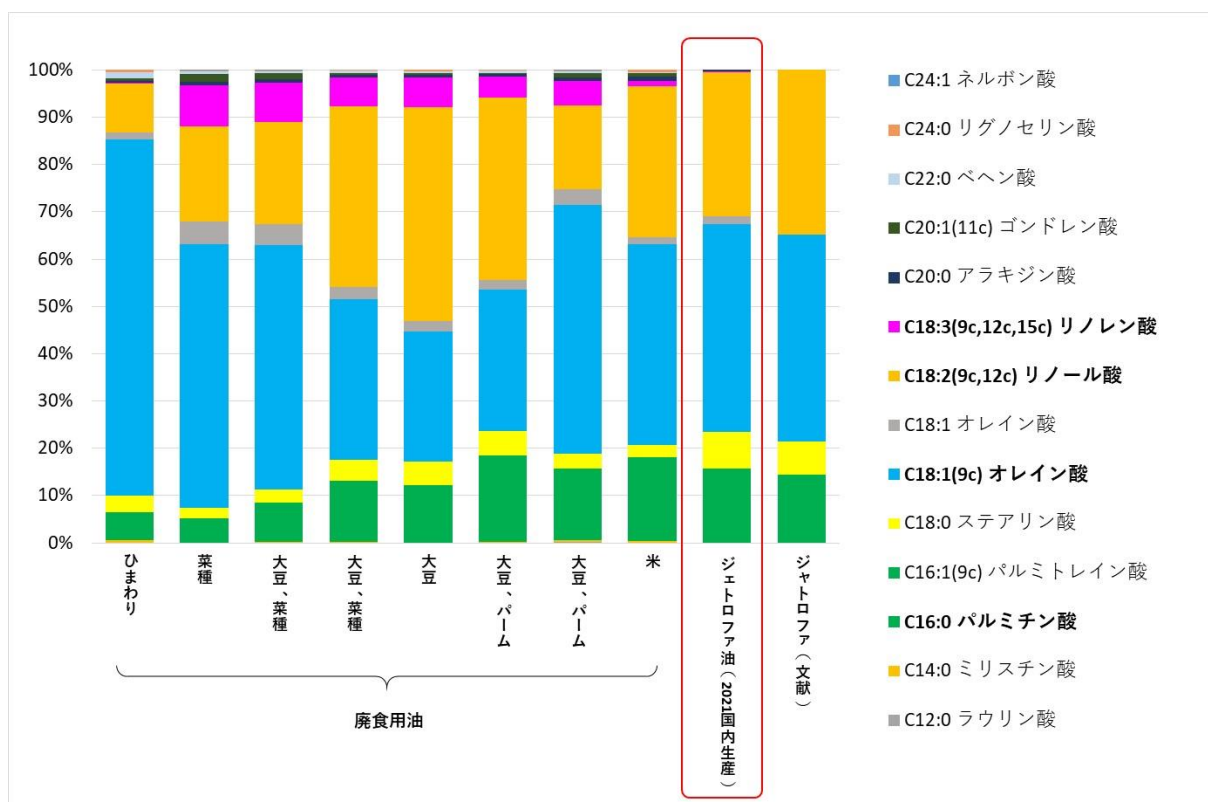


図 54 ジャトロファ油の脂肪酸組成（廃食用油及び文献値との比較）

油糧作物であるジャトロファの油脂の脂肪酸組成は主要な廃食用油にかなり近く、オレイン酸（C18:1）、リノール酸（C18:2）が大半を占める。PHBH 製造に向けた原料油の受け入れ基準をクリアすることも確認された（次図）。以上より、組成の観点からは、ジャトロファによる PHBH の原料拡大の可能性は十分あると言える。

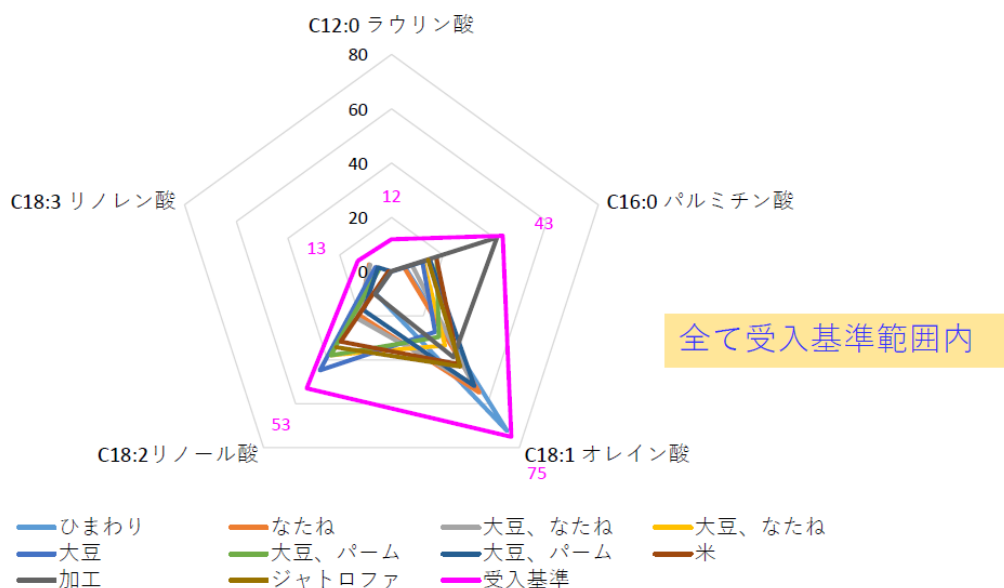


図 55 ジャトロファ油の脂肪酸組成と PHBH 製造原料受け入れ基準の比較

2) その他の油脂作物（ナタネ）

令和元年の米収穫後の水田（10a）においてナタネを播種した。化学肥料を用いて栽培し、翌春に収穫・搾油を行った（次図）。供試した品種は農林 20 号（5a）とななしきぶ（5a）である。両者から合計 70 kg の種子を得て、それぞれを搾油した。農林 20 号 35 kg から約 8 L、ななしきぶ 35 kg から約 7.5 L の菜種油を得た。



図 56 ナタネの栽培結果（令和元年秋～令和 2 年春）

また、化学肥料と窒素施肥量を揃えてメタン発酵消化液を施用した栽培試験も行った。その結果、消化液を施用した区域では、化学肥料区、無施肥区と比較して種子収量が大きくなった。施用にあたって肥料間でアンモニア態窒素量は揃えてあるため、消化液に含まれる有機態窒素が作用した可能性が考えられる（次図）。

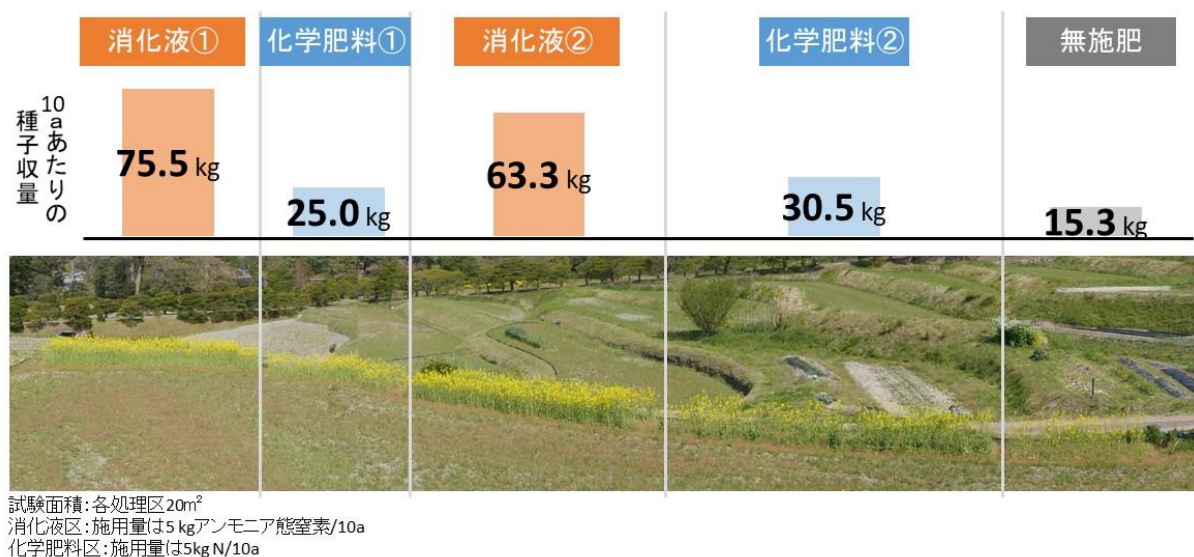


図 57 ナタネの施用肥料別の栽培結果（令和元年秋～令和2年春）

ナタネ（一毛作）の一般的な収量は10aあたり200kgである。一方、米作との二毛作を行う場合は、イネ栽培のためナタネの栽培期間は短くなり収量は低下する。本年度の実績は、消化液を用いた栽培では10aあたり63～75kgとなった。今後は10aの収量を100kg、さらには200kgへと増加させるために、品種（登熟の早い品種の選定）や施肥等の検討を行う必要がある。

またナタネの収穫後の米作は、メタン発酵消化液のみを肥料として実施し栽培・収穫した。これにより消化液を用いた米・菜種の二毛作システムが成立することを実証した。

令和2年秋季からの栽培では、メタン発酵消化液を唯一の肥料として、米収穫後の水田3枚合計10aで早生品種（早生菜種農林32号）を用いて栽培を行い、今春は10aあたり120kg程度の菜種種子の収穫量を予定している。しかし、畑地へは消化液が均一に散布できず、次図に示すように、苗立ちにかなりのバラツキがあった。さらに菜種の発芽が土壌の過湿で阻害されることも一因で、今後検討が必要である。



図 58 栽培中の農林32号（令和3年2月22日）

(4) まとめと課題

1) ジャトロファ

本年度は、以下を示した。

1. 国内で実生から生育させたジャトロファ樹に着生した種子からジャトロファ油が搾油できること
2. メタン発酵消化液を唯一の肥料としてジャトロファが栽培することができること
3. ジャトロファ樹が春から秋にかけて京都の露地で栽培できること

これらの結果を発展させ、さらに露地で越冬させることができるような樹体保護の方策が工夫できれば日本国内でジャトロファ油を継続して調達することが可能になる。本年度の栽培試験を通して、ジャトロファが落葉するには乾燥と寒さの2つのファクターがあり、乾燥の場合は可逆的だが、低温の場合にはポイントオブノーリターン（生存が不可逆的に阻害される温度）が存在することが示唆された。しかし地下部、茎部はおそらく生存しており、春季の新芽の出方で、最適な越冬方法を考案する。

以上の結果を踏まえ、次年度は花芽を多く着生させることができる剪定方法の開発、越冬方法の開発を行う。

2) その他の油脂作物（ナタネ）

ナタネの栽培については、令和元年度からの検討により、消化液を用いた米・菜種の二毛作システムが成立することを実証した。令和2年春季収穫分の収量については、消化液を用いた栽培では10 aあたり63~75 kgとなり、目標の100~200 kg水準に向けてさらに品種や施肥等の検討を行う必要があることが分かった。

令和2年秋季からはメタン発酵消化液を唯一の肥料として、米収穫後の水田10 aで早生品種を用いて栽培を行っている。次年度も引き続き栽培検討を継続し、メタン発酵消化液の肥効及び収量の評価を行う予定である。

以上の結果を踏まえ、次年度はメタン発酵消化液を畑作地にムラなく散布する方法の開発を行う。

2.4 原料の切り替えによる CO₂ 削減効果及びコスト変化に関する検討

2.4.1 CO₂ 削減効果に関する検討

(1) 目的

現在の商用生産 PHBH の原料であるパーム油だけでなく、廃食用油やソーダ油滓等の廃棄油脂や油脂作物ジャトロファの国産原料の利用可能性を検討することで、PHBH 利用製品の生産から使用、廃棄・リサイクルによる資源循環の形成が国内、地域スケールで期待される。初年度は CO₂ 排出量への寄与が特に大きいと考えられる PHBH 収量について、原料の脂肪酸組成の違いに着目して原料候補別の整理を行った。今年度は、原料栽培段階の CO₂ 排出量についてレビューを行い、初年度の成果と組み合わせることで原料別の生産段階の CO₂ 排出量を推定した。

(2) 方法

植物油の原料栽培段階のインベントリを次表に示した既往研究から収集した。これらは植物油からバイオディーゼル燃料 (BDF) を生産することを想定したライフサイクル分析の研究であることから、BDF 1kg 製造当たりの原料栽培時の原単位として比較整理した。BDF の低位発熱量 (LHV) は 39.8 MJ/kg とした。また、廃食用油については収集車軽油消費由来 (収集段階) の CO₂ を計上した。

表 28 原料栽培・収集段階の CO₂ 排出量の算定に用いた先行研究リスト

原料	出典	参考文献
パーム油	トヨタ自動車、みずほ情報総研 (2004)	[1]
	燃料政策小委員会 (2003)	[2]
	輸送用バイオマス燃料の導入促進基礎調査検討委員会	[3]
	蒲原ら (2009)	[4]
ジャトロファ	三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング (2019)、Sarker K. (2016), Eshton B. et al., (2013)	[5-7]
廃食用油	青木 (2016)	[8]

(3) 結果

原料種別の整理結果は次表に示したとおりである。一部の文献では国内輸送の負荷が計上されていない点には注意が必要であるが、パーム油は 503–621 g-CO₂/kg-BDF、ジャトロファは 566 g-CO₂/kg-BDF となった。ジャトロファの海外輸送・国内輸送が未計上である点を考慮すると、ジャトロファはパーム油とくらべ 1~2 割前後 CO₂ 排出量が増える可能性があることが示唆されるものの、パーム油の出典間の違いによる変動幅の範囲におさまっている。また、青木の研究[8]は、京都市の家庭系廃食用油の収集時の CO₂ 排出量を引用した。廃食用油を原料とすることで原料栽培・収集段階の CO₂ を大幅に低減可能であることが期待される。

ただし、今回整理した先行研究は一部の事例に留まっており、引き続き研究レビューを続けることで、産地等の結果に寄与しうる要素とその変動幅を把握することが必要である。

表 29 原料種別の原料栽培・収集段階の CO₂ 排出量整理結果（単位： g-CO₂/kg-BDF）

原料	文献	栽培	海外輸送	国内輸送	合計
パーム油	[1]	573	32	16	621
	[2]	466	60	12	537
	[3]	425	67	11	503
	[4]	474	49	-	523
ジャトロファ	[5-7]	566	0	-	566
廃食用油	[8]	0	0	20	20

（４）まとめと課題

今年度は原料栽培・収集段階のインベントリの比較整理を行い、廃食用油を原料とすることで大幅に CO₂ 排出量を低減しうることが確認された。なお、PHBH 製造当たりの CO₂ 排出量解析結果については 2.2 節で紹介する。本結果を LCA モデルに組み込むことで、ライフサイクルの環境負荷ならびに原料の切り替えによる CO₂ 削減効果の定量化に反映できる。また、よりきめ細かい感度分析を行うことで、植物油においては原料栽培段階で結果の影響が大きいプロセスを特定することが可能となる。

<参考文献>

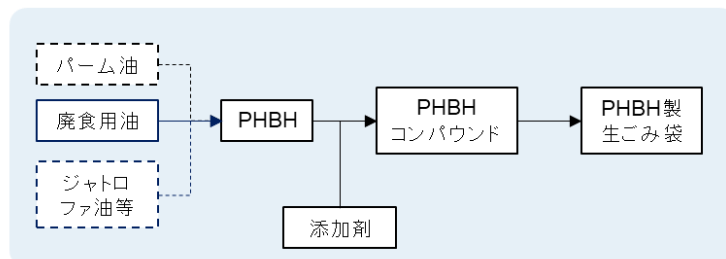
1. トヨタ自動車株式会社、みずほ情報総研株式会社：日本における輸送用燃料製造(Well-to-Tank)を中心とした温室効果ガス排出量に関する研究報告書（2004）
2. 燃料政策小委員会：LCI of Bio-diesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus（2003）
3. 輸送用バイオマス燃料の導入促進基礎調査検討委員会：バイオマス燃料の CO₂ 排出等に関する LCA（ライフ・サイクル・アセスメント）評価について(2) ～ 我が国で想定される導入形態への LCA 適用による試算結果 ～
4. 蒲原弘継、アヌグラ ウィディヤント、熱田洋一、橘隆一、後藤尚弘、大門裕之、藤江幸一：インドネシア産パーム油由来の BDF 生産・輸入に伴う環境負荷、環境科学会誌 22(4)、247-256（2009）
5. 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング:バイオマス燃料の安定調達・持続可能性に係る調査 報告書(2019)
6. Sarker K.: Review and Comparison of Various Properties of Jatropha oil Biodiesel, International Journal of Engineering and Technology, 7(6), 1965-1971 (2016)
7. Eshton B., Katima J. H.Y., Kituyi E.: Greenhouse gas emissions and energy balances of jatropha biodiesel as an alternative fuel in Tanzania, Biomass and Bioenergy, 58, 95-103 (2013)
8. 青木建樹：廃棄物系バイオマスを用いた水素化バイオディーゼル燃料普及拡大のシナリオ分析、京都大学工学研究科都市工学専攻修士論文（2016）

2.4.2 コスト変化に関する検討

(1) 検討状況

PHBH の原料切り替えによるコスト評価のために、シナリオの検討を行った（次図）。

■ 廃食用油等からのPHBH製生ごみ袋の製造シナリオ



■ パーム油からのPHBH製生ごみ袋の製造シナリオ

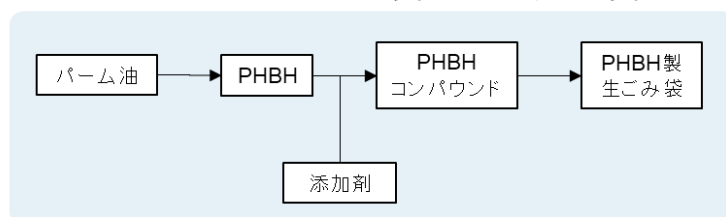


図 59 原料切り替えによるコストの評価システムフロー

原料切り替えによるコスト評価にあたっては収集すべき対象データを次表のように整理した。

表 30 コスト評価の項目と必要な収集データ

費目	収集データ	単位
PHBH 原料調達	廃食用油調達費用	円/L-廃食用油
	廃食用油精製費用	
	ジャトロファ油調達費用	円/kg-ジャトロファ油
PHBH 製造	PHBH 製造費用	円/kg-PHBH
	PHBH 製造収率	kg-PHBH/L-廃食用油
PHBH 製生ごみ袋製造	添加剤調達費用	円/kg-添加剤
	コンパウンド当たり添加剤配合量	kg-添加剤/kg-PHBH コンパウンド
	生ごみ袋当たり PHBH コンパウンド使用量	kg-PHBH コンパウンド/枚
	生ごみ袋成形加工費用	円/枚
	PHBH 製生ごみ袋必要量	枚/トン-生ごみ
PE 製ごみ袋購入	PE 製ごみ袋調達費用	円/枚
	PE 製ごみ袋必要量	枚/トン-ごみ

本年度は、PHBH 製生ごみ袋の製造について、以下の仮定をおき、PHBH の原料をパーム油から廃食用油に切り替えた際のコスト変化を試算した（次図）。試算結果を踏まえ、次年度の廃食用油の調達方法の検討、廃食用油からの PHBH 製造プロセスの検討を引き続き進める。また、次年度は、コスト変化の算出に用いる実証データをさらにアップデート・精査し、より詳細な解析をおこなう予定である。

<仮定>

- ・ 製袋費用は PE 製袋と同等
- ・ 廃食用油を原料とした場合、PHBH 製造収率がパーム油比 0.9、生産性が 0.96 となる（2.1 における廃食用油を用いた実機培養実証データより）
- ・ 廃食用油原料単価には前処理費用も含む

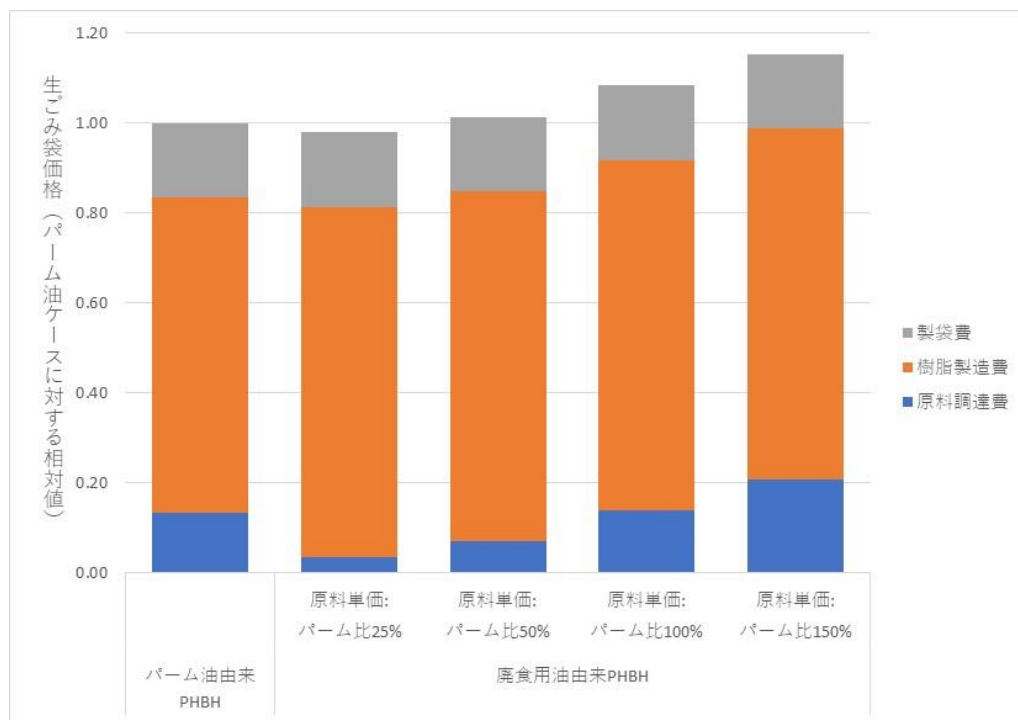


図 60 PHBH 製生ごみ袋の原料変更によるコスト変化試算結果

（２）まとめと課題

コスト変化については、本年度は、廃食用油及び再生可能資源を原料とした PHBH 製造について、その CO₂ 削減効果及びコスト変化を解析するために、システム境界の検討や基礎情報の収集を実施した。また、PHBH 製生ごみ袋の製造について、PHBH の原料をパーム油から廃食用油に切り替えた際のコスト変化を試算した。

次年度は、データ源の適正化を図るとともに、本事業における実証試験結果を踏まえて、原料切り替えによる CO₂ 削減効果及びコスト変化の解析を行う。

2.5 まとめと課題

「実証事業1：廃食用油及び再生可能資源を原料とした PHBH 製造に関する実証事業」では、PHBH 原料として国内で調達可能な廃食用油やその他の再生可能資源を利用することを念頭に、生活系・事業系廃食用油を PHBH 原料に利用するための前処理技術に関する検討、PHBH 原料として利用することを念頭に置いた廃食用油の回収方法の検討、廃食用油以外の国内外の油脂源の調達可能性及び食料と競合しないジャトロファ等の油脂植物の国内外での栽培と特に国内での原料栽培の検討・実証、原料の切り替えによる CO₂ 削減効果及びコスト変化に関する検討を行った。本年度の主な検討成果と次年度の実施内容案は以下に示すとおり。

（１）生活系・事業系廃食用油を PHBH 原料に利用するための前処理技術に関する検討

廃食用油を原料として使用する培養方法として、まずは PHBH 生産微生物の増殖期にあたる培養初期のみパーム油（低ヨウ素価油）を使用するハイブリッド培養法を開発し、続いて、培養中の油脂濃度を高位に維持することで廃食用油（高ヨウ素価油）を単独で使用可能な培養方法（改良培養方法）の開発に成功した。これにより、パーム油を使用することなく、目標とする対パーム油比 90%以上の PHBH 生産性が達成可能となった。

続いて、生ごみ袋製造に適した PHBH 製造に向けて生産株の育種を実施した。生ごみ袋に使用する PHBH の規格として 3HH 組成＝ $6\pm 1\%$ を設定し、カネカ保有の生産株（KNK-2 株）の代謝改変により、廃食用油を原料として使用した場合でも規格値内の PHBH を生産可能な KNK-新 2 株を得た。

改良培養方法及び KNK-新 2 株を用いた実機（製造能力：PHBH 5,000 トン/年）での培養実証試験により、廃食用油を単独の原料として PHBH を効率的に生産することに成功し、貴重なスケールアップデータを得ることが出来た。ただし、高油脂濃度維持による発泡という問題点を実機スケールで初めて顕在化したため、その対処方策を検討している。

また、原料油脂の受け入れ基準に関しては、劣化度と脂肪酸組成に絞り込み検討を進めた結果、現状では、色味、酸価、脂肪酸組成（ヨウ素価）の 3 指標によって管理できる見通しを得ている。

廃食用油前処理検討では、当初想定していた活性白土による簡易精製に期待した品質向上効果は認められなかったが、ポリマー精製処方の改良により、いずれの廃食用油でも PHBH ポリマー品質として重要な熱着色の程度（Yellow Index）と熱安定性を確保可能であることを見出した。

以上を踏まえ、次年度は、低油脂濃度で培養するための技術開発を進め、発泡抑制と高生産性の両立を実現し、安定した工業生産プロセスの確立を進める。

（２）PHBH 原料として利用するための更なる廃食用油の回収率向上を目指した収集方法に関する検討

市中から広く回収した家庭系及び事業系廃食用油試料の脂肪酸構成や性状の分布等を整理するとともに、先進自治体における家庭系廃食用油の回収事例の調査を行った。

家庭系廃食用油については、事例調査の結果、回収率を上げるためにはペットボトル等のふた付き容器を用いた回収方法が有効であると思われるが、回収後の容器が新たな廃棄物として発生することから、再利用ができる専用容器での回収を検討するとともに、素材に生分解性プラスチックを使用するなどの方策の検討が必要である。また、さらなる回収率向上については、行政による啓発のみでなく、市民団体や NPO などからの働きかけが有効であると考えられ、それらの団体との協調体制の構築が必要と思われる。

事業系廃食用油については、業種、事業所の規模によって排出量、排出形態が様々であり、また、業種によって劣化度の高い油が存在することから、PHBH 原料としての受け入れ基準を考慮した混

合回収の可否を検討する必要がある。排出形態については、多量排出事業者は、回収ルート of 効率性的により大型のタンクローリーでの合理的な回収が可能になると思われる。一方、小規模排出事業者については、2 t ~ 3 t 車で個別に回収せざるを得ない。遠方の排出業者の排出形態には、ペール缶など処分が不要な排出形態を考える必要がある。

また、事業所からの廃食用油の回収は、IoT 技術を活用し、廃食用油の貯留状況をセンサーによりモニタリングし、貯留状況に応じた最適ルートでの合理的な回収とする方策も考えられるため、次年度は、IoT の導入などによる回収の効率化について検討を行う。

(3) 廃食用油以外の国内外の油脂源の調達可能性及び食料と競合しないジャトロファ等の油糧植物の国内での栽培と特に国内中山間地（耕作放棄地）での原料栽培の検討

油脂製造事業者へのヒアリングを行い、ソーダ油滓等の油脂製造時の副生成物について排出・利用実態の把握を行った。また、ソーダ油滓のサンプルを入手し、脂肪酸分離試験及び分離した脂肪酸の脱色試験を実施し、これらの試験結果をもとにソーダ油滓から脂肪酸を分離し、脱色する場合の処理コストを求めた。

油脂作物であるジャトロファについて、昨年度京都地域に構築した、加温及び CO₂ 富化ができる実証温室を用いて、ジャトロファの栽培を継続し、栽培管理方法の検討を行った。その結果、国内で実生から生育させたジャトロファ樹に着生した種子から油が搾油できること及びメタン発酵消化液を唯一の肥料としてジャトロファが栽培できること等を確認できた。本年度の結果を踏まえ、次年度は花芽を多く着生させることができる剪定方法の開発、越冬方法の開発を行うとともに、メタン発酵消化液の肥効及び収量の評価を行う予定である。

ジャトロファ以外の油脂作物としてのナタネの栽培については、令和元年度からの検討により、消化液を用いた米・菜種の二毛作システムが成立することを実証した。令和 2 年秋季からは栽培面積を拡大して 10 a で早生品種を用いてメタン発酵消化液を唯一の肥料として栽培を行っており、次年度も継続する予定である。

(4) 原料の切り替えによる CO₂ 削減効果及びコスト変化に関する検討

CO₂ 削減効果については、本年度は原料栽培段階のインベントリの精緻化を行った。本インベントリを用いて、LCA モデルに組み込むことで、ライフサイクルの環境負荷ならびに原料の切り替えによる CO₂ 削減効果の定量化に反映させる。また、よりきめ細かい感度分析を行うことで、原料栽培段階で結果の影響が大きいプロセスを特定することが可能となる。

コスト変化については、本年度は、廃食用油及び再生可能資源を原料とした PHBH 製造について、その CO₂ 削減効果及びコスト変化を解析するために、システム境界の検討や基礎情報の収集を実施した。また、PHBH 製生ごみ袋の製造について、PHBH の原料をパーム油から廃食用油に切り替えた際のコスト変化を試算した。次年度は、データ源の適正化を図るとともに、本事業における実証試験結果を踏まえて、原料切り替えによる CO₂ 削減効果及びコスト変化の解析を行う。

以上より、「実証事業 1：廃食用油及び再生可能資源を原料とした PHBH 製造に関する実証事業」については、予定した検討を概ね計画通りに進めることができた。次年度は、各要素技術を確立するとともに量産化技術の確立に向けて取り組む予定である。

3. PHBH のごみ袋及びプラスチック代替製品への利用とバイオガス化に関する実証事業（実証事業 2）

3.1 バイオガス化プラントでの利用に向けた PHBH 製生ごみ袋の製造に関する検討

3.1.1 目的

2019 年度の検討で、PHBH 単独では、バイオガス化はほぼ 100%進行するが機械特性が不足し、PHBH と市販生分解性樹脂のブレンドでは機械特性は改善するもののバイオガス化率が低下することが分かった。

本年度は、PHBH と市販生分解性樹脂ブレンドの配合最適化、及び、PHBH の構造（組成、分子量、等）を変更した改良 PHBH により嫌気生分解性と機械特性を両立し、実用性のあるバイオガス化可能なフィルムの開発を行うことを目的とした。

3.1.2 方法

（1）PHBH と他の生分解性材料との混合物による実用強度を有するバイオガス化可能な生ごみ袋の開発

PHBH、市販の生分解性樹脂、各種添加剤を二軸押出機にて熔融混合したコンパウンドを用い、T ダイ押出成形にてフィルムサンプルを取得した。

得られたフィルムの機械強度を測定するとともに、フィルムのバイオガス化試験を日立造船（株）にて実施し、各種コンパウンドの生分解性を評価した（詳細は 3.3.1 に記載）。

（2）改良 PHBH による実用強度を有するバイオガス化可能な生ごみ袋の開発

構造（組成、分子量等）を変更した PHBH、従来 PHBH、各種添加剤を二軸押出機にて熔融混合した改良 PHBH を用い、インフレーション成形にてフィルムサンプルを取得した。

得られたフィルムの機械強度を測定するとともに、フィルムのバイオガス化試験を日立造船（株）にて実施し、バイオガス化効率を明確化した（詳細は 3.3.1 に記載）。

さらに、実用的な機械強度を有するコンパウンドを用いて、社外のインフレーション成形機を用い、生ごみ袋の量産化検討を実施した。手順は以下のとおり。

- 1) インフレーション成形工程 インフレーション成形機でのフィルム生産
 - 2) 印刷工程 生ごみ袋生産で実際に使用されるインキを用い、グラビア印刷を実施
 - 3) 製袋工程 2) で作成したフィルムを用い、生ごみ袋形状での製袋を実施
- 得られた袋の印刷特性の評価は、以下の手順にて塗膜密着性評価を実施した。

- 1) メンディングテープを強く圧着
 - 2) 圧着の後、素早く引き離し、剥離した印刷の有無を確認することで評価
- 評価は以下の基準で実施した。

密着性良好：印刷部の剥離なし

密着性不良：印刷部の一部または全面の剥離あり

3.1.3 結果

(1) PHBH と他の生分解性材料とのコンパウンドによる実用強度を有するバイオガス化可能な生ごみ袋の開発

実用強度とバイオガス化可能なフィルムを得るべく、以下のコンパウンドを二軸押出機によりペレット化した。

(評価サンプルの構成)

- ◆ D-0 : PHBH、各種添加剤のコンパウンド
- ◆ D-1~6 : PHBH、市販生分解性樹脂、各種添加剤のコンパウンド

得られたペレットを用い、T ダイ押出機でフィルムを作成した。

得られたフィルムサンプルの機械特性(引張特性)を次表にまとめた。T ダイ押出成形では押出方向(MD と略す)と押出方向に垂直方向(TD と略す)では機械特性が異なるため、MD 及び TD 方向での測定を行っている。

PHBH (D-0) に軟質な素材である市販生分解性樹脂を添加することで引裂破断伸びの改良が認められており、機械特性の改善も可能である目途を得た。

表 31 インフレーション成形フィルムの機械特性

		単位	方向	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-0	JIS Z 1702, 1711 1種B 2種B	
厚み	μm	—		40	50	30	50	40	30	50	27.3~32.7	
引張 弾性率	MPa	MD		930	670	400	690	480	710	1320		
		TD		790	660	320	570	420	850	1500		
引張 破断強度	MPa	MD		26	25	18	25	23	26	21	16.7 以上	29.4 以上
		TD		13	15	7	13	15	19	25	16.7 以上	29.4 以上
引張 破断伸び	%	MD		310	340	240	360	350	330	120	250 以上	150 以上
		TD		160	270	70	220	320	300	7	250 以上	150 以上

作成したインフレーション成形フィルムのバイオガス化試験の結果、PHBH 単独よりも生分解率は下がった。(詳細の評価条件及び生分解性に関するデータは 3.3.1 に記載する)。

以上の結果から、PHBH、市販生分解性樹脂、各種添加剤のブレンドにより昨年度の C1~C3 に対して機械特性及びバイオガス化率の改善を目指したが、機械特性は改善傾向ではあるもののバイオガス化率の低下は避けられないことが分かった。

(2) 改良 PHBH による実用強度を有するバイオガス化可能な生ごみ袋の開発

以下の改良 PHBH を二軸押出機によりペレット化した。

(評価サンプルの構成)

➤ 構造（組成、分子量等）を変更した PHBH、従来 PHBH、各種添加剤

用いた改良 PHBH はインフレーション成形可能であり、得られたペレットを用い、ごみ袋形状に加工可能であることを（株）カネカのラボ検討により確認した。次図（左）は（株）カネカ所有のインフレーション成形機を用いてフィルムを生産している工程を撮影した写真であり、次図（右）は得られたフィルムの写真である。



図 61 インフレーション成形工程



図 62 袋加工したサンプル

得られたフィルムサンプルの機械特性（引張特性、引裂強度）を次表にまとめた。インフレーション成形でも MD と TD では機械特性が異なるため、MD 及び TD 方向での測定を行っている。改良 PHBH は、実用特性では、JIS Z 1702（包装用ポリエチレンフィルム）、及び JIS Z 1711（ポリエチレンフィルム製袋）の 1 種 B を満たし、さらに、ごみ袋の規格として多くの自治体で採用されている 2 種 B を概ね満たす生ごみ袋を得ることができた。

改良 PHBH のラボ評価結果が良好であったため、社外の量産機でインフレーション成形を行ったところ、成形可能であり、ごみ袋形状に加工可能、印刷可能であることを確認した。得られたフィルムサンプルの機械特性（引張特性、引裂強度）も次表にまとめた。ヒートシール性、印刷性が問題ないことも確認した。

表 32 インフレーション成形フィルムの機械特性

	単位	方向	ラボ品 結果	量産機 試作品結果	JIS Z 1702, 1711	
					1種B	2種B
平均厚み	μm	—	30	30	27.3~32.7	
引張破断強度	MPa	MD	28	28	16.7以上	29.4以上
		TD	30	27	16.7以上	29.4以上
引張破断伸び	%	MD	260	370	250以上	150以上
		TD	394	371	250以上	150以上
ヒートシール	N	平	10.8	10.0	6.86以上	21.18以上
	N	ガゼット	11.8	14.3		
ダート試験			70g、 0/10		70 g、 5/10以下	120 g、 5/10以下
塗膜密着性 評価				○		

作成したインフレーション成形フィルムのバイオガス試験の結果、生分解率は PHBH 単独フィルムやセルロースとほぼ同等の結果であった（詳細の試験条件及び生分解率に関するデータは 3.3.3 に記載する）。

以上の結果から、改良 PHBH を用いることで、嫌気生分解性、機械特性を両立できるフィルムが得られる目途を得た。



図 63 改良 PHBH からなる袋（試作品）

3.1.4 まとめと課題

本年度は、改良 PHBH により、嫌気生分解性と機械特性の両立の目途を得た。また、改良 PHBH を用いてインフレーション成形の量産機で試作を行い、ヒートシール性、印刷性が問題ないことを確認した。次年度は引き続き改良 PHBH の検討を行い、機械物性を向上させる。また、安定量産化技術を確立し、ライフサイクル実証に向けた生ごみ分別排出・回収試験で用いるサイズの生ごみ袋の生産を行う。

3.2 バイogas化を見据えた PHBH のプラスチック代替製品への利用可能性の検討

3.2.1 PHBH のプラスチック代替製品への利用可能性の検討

(1) 目的

PHBH については、生分解性に優れるという特性と、100%バイオマス由来(脱炭素性)であるという特性があり、将来的に幅広く活用されることが期待される。一方で、汎用プラスチックを中心に構築された現行のプラスチックリサイクルシステムを阻害する可能性があることから、今後の PHBH 活用の方向性を明らかにすることを目的に以下の検討を行った。

なお、2021 年 1 月に環境省・経済産業省・農林水産省・文部科学省より「バイオプラスチック導入ロードマップ」が公開されており、本検討にあつては、同ロードマップの内容を参考とした。

(2) 結果

1) バイオプラスチックの製品への導入状況の整理

① バイオプラスチックの製品への導入状況

バイオプラスチックの製品への導入状況について、各社のホームページ等を参考に以下のとおり業界ごとに整理した。

表 33 各社におけるバイオプラスチック・代替素材の製品への導入状況について

業界	業種	対象製品	使用される素材		主な企業・ブランド
			代替前	代替後	
小売	コンビニエンスストア	レジ袋	PE	バイオ PE、紙	セブンイレブン、ローソン
		レンジアップしない弁当・総菜容器(サラダ、冷やし麺等)	—	バイオ PET、PLA	セブンイレブン、ローソン、ファミリーマート
		おにぎりのパッケージ	PE	バイオ PE	セブンイレブン
		おにぎり、パンのパッケージ	石油系インキ	バイオマスインキ	セブンイレブン、ローソン、ファミリーマート
		プライベートブランドのパッケージ	PE 等	バイオ PE 等	ローソン
		アイスコーヒー容器	PET	紙	ローソン
	スーパーマーケット	レジ袋	PE	バイオ PE	イオン、ユニー等多数
		持ち帰り専用かご	PE	バイオ PE	イオン
		惣菜容器	—	バイオマスプラスチック	イトーヨーカドー
		青果売り場の容器包装、鶏卵パック	—	バイオマスプラスチック	ユニー

各社におけるバイオプラスチック・代替素材の製品への導入状況について（続き）

業界	業種	対象製品	使用される素材		主な企業・ブランド
			代替前	代替後	
飲食	カフェ・ファストフード・ファミリーストラン	ストロー	PP	紙、バイオマスプラスチック、生分解性プラスチック	スターバックス、マクドナルド、デニーズ、ガスト、ロイヤルホスト等
		レジ袋（持ち帰り用）	PE	紙、バイオ PE	マクドナルド、モスバーガー、松屋フーズ
宿泊	ホテル	ストロー、マドラー、ピック等	PE	紙、木、生分解性素材等	ヒルトン、マリオット、ハイアット、プリンスホテル、ザ・キャピトルホテル 東急
輸送	航空・鉄道	ストロー	PP	バイオプラスチック、紙	ANA、JR
		マドラー、カトラリー（ラウンジ）	PP、PS	木	ANA
		レジ袋	PE	バイオ PE	JR
メーカー	飲料メーカー	ペットボトル	PET	バイオ PET	コカ・コーラ、サントリー、アサヒ飲料
		ペットボトルのラベル	PE 等	PLA	アサヒ飲料、花王
		ペットボトルのキャップ	PE	バイオ PE	サントリー
	食品メーカー	調味料容器	PE 等	バイオマスプラスチック	味の素
		即席めん容器	PS	バイオマスプラスチック、紙	日清食品
	化粧品・トイレットリーメーカー	ボトル、パウチ	PE	バイオ PE	花王、資生堂
	衣料・スポーツ用品メーカー	レジ袋	PE	紙	H&M、ZARA、ユニクロ

出典：各社ホームページをもとに確認（2021 年 2 月時点の確認結果）

② 現時点での各社におけるバイオプラスチック・代替素材の導入傾向の整理

- 代替後のバイオプラスチックの素材として多かったのはバイオ PE・バイオ PET といった、非生分解性の汎用バイオマスプラスチックであった。これらの樹脂は代替前後で素材が同一のため、新たな製造ライン等を設けずに導入することが可能であり、また、樹脂供給量が他の樹脂よりも多く、加えて価格が他のバイオプラスチックよりは低いことが普及の要因と考えられる。

- 生分解性プラスチックが使われている例はあまりなく、レンジアップしない弁当・総菜容器への PLA、ストローへの生分解性樹脂（樹脂種類不明）、ペットボトルのラベル等が確認された。これらが廃棄物となった際にはいずれも回収・焼却されると考えられるため、必ずしも生分解性が活かされているわけではないと考えられる。
- プラスチック製買物袋（ここではレジ袋と表記）のバイオ PE への代替は業種を問わず広く普及しており、2020 年 7 月から施行されたレジ袋有料化制度の影響が大きかったと推察される。これは、レジ袋向けのバイオ PE のバイオマス度の多くが 25%であったことから裏付けられる。
- 一部の用途については、紙・ラミネートや木といった天然素材への代替が見られた。

2) PHBH の特性の整理

① PHBH が汎用プラスチックに比べて優れる点

- 極めて高い生分解性（土壌分解性・好気分解性（堆肥化性）だけでなく、嫌気分解性・海洋生分解性を有する）
- 100%バイオマス由来（廃食用油を原料とした場合はバイオマス由来に加えて循環資源由来という特性も有する）
- 原料の多様性（利用可能な原料の詳細については今後要検証）

② 汎用プラスチックに比べた PHBH の課題

- マテリアルリサイクルに不向き
 - ✧ オープンリサイクルで他のプラスチック種に混合してマテリアルリサイクルされると再生材の品質が劣化する。
 - ✧ クローズドリサイクルでは、現状では数回程度のマテリアルリサイクルが限界。
- 汎用プラスチックと比べると耐加水分解性等の安定性に劣るため、長寿命が求められる用途や長期の保管等が求められる用途には使えない
- 製造拠点が 1 ヶ所かつ当面の供給能力が 5,000 トン/年に限られ、供給リスクがある
- 汎用プラスチックよりも価格が高い（バイオプラスチックの中では中程度の価格帯）

3) PHBH のプラスチック代替製品への利用の考え方

ワンウェイの容器包装・製品をはじめ、回避可能なプラスチックの使用を合理化し、無駄に使われる資源を徹底的に減らすことを前提に、プラスチックのリサイクル調和性を阻害せずに生分解性・脱炭素性を活用するという観点から、PHBH のプラスチック代替製品の利用の考え方を以下に整理した。

＜PHBH のプラスチック代替製品への利用の考え方＞

- 生分解性プラスチックは堆肥化・バイオガス化プロセスや土中で水と CO₂ に生分解されるが（バイオガス化の場合は CH₄ を経由して CO₂ に酸化）、石油を原料として製造された生分解性プラスチックの場合、当該 CO₂ は地球温暖化に負の影響を与えるため、生分解性が求められるプラスチック用途全般にカーボンニュートラルである PHBH の代替利用が適する。
- 生ごみ袋を PHBH で代替した場合、破袋・除去を行わずにそのまま生ごみ・紙くずと一緒に

に堆肥化もしくはバイオガス化に供することが可能なことから、堆肥化・バイオガス化インフラの整備を前提として、積極的な利用が推奨される。(ただし、生ごみの堆肥化等に伴い、生ごみ袋を生分解処理する場合には、生産される堆肥等に未分解のプラスチックが残らないように管理することが求められる。)

- 農業用マルチフィルム等の農業用途については、使用後の徹底した管理のもと、農地へ適切なすき込みを行うことで、回収・処理コストの削減等のメリットがあるため、積極的な利用が推奨される。また、肥料用被覆材については、生分解性プラスチックの利用が適していると考えられ、今後の実用化に向けた検討や社会システム
- 自然環境への非意図的な流出が避けられない用途や漁業用途には、PHBH の海洋生分解性を活かした代替利用が適する。なお、漁業用途については、現状では漁具等水産用生産資材のうち耐久性が求められない用途に限られるため、今後の用途展開に向け、漁具として使用中は必要な物性が保たれるような技術開発が必要である。
- 利用後にオープンリサイクルに仕向けられる容器・包装等の用途については、PHBH の選別等のリサイクル技術・プロセスが十分に確立されておらず、既存のマテリアルリサイクルを阻害するため、現状では PHBH の代替利用は不向きであり、今後のリサイクル技術の開発が求められる。なお、クローズドリサイクルに仕向けられる用途の場合は、他のプラスチックのマテリアルリサイクルを阻害しないという観点から、PHBH の代替利用が認められる。同様に、紙ラミネート等の複合素材のように、リサイクルに不向きで焼却せざるを得ない用途については、カーボンニュートラルである PHBH の代替利用が認められる。
- 長寿命が求められるプラスチック用途については、全般的に生分解性プラスチックの代替利用が向いておらず、PHBH についても同様に不向きであり、今後、製品として使用している間は必要な物性が保たれるような技術開発が必要である。

表 34 プラスチックリサイクルとの調和性を踏まえた PHBH の利用適性

	リサイクル(材料・ケミカル)		堆肥化等の肥料 生産に伴う分解	バイオガス化	焼却 (熱回収含む)
	複数プラスチック種 リサイクル	単一プラスチック種 リサイクル			
PHBH	技術・プロセスが未確立でありリサイクルの阻害要因になり得る	技術・プロセスが確立しておりリサイクル可能	適正に分解するので、良い影響を与える		悪影響なし

表 35 生分解性・脱炭素性が活かされる用途の具体的な製品例

リサイクル・処理方法等	具体的な製品例
堆肥化・バイオガス化	堆肥化用・バイオガス化用ごみ袋、食品容器のうちマテリアル・ケミカルリサイクルに不向きなもの
農地へのすき込み等	農業用マルチフィルム、肥料に用いる被覆材、その他自然環境で利用される製品
自然環境に非意図的流出	人工芝、漁具等水産用生産資材のうち耐久性が求められないもの

(3) まとめと課題

企業のバイオプラスチック製品の活用に向けた取組について調査を行い、各業界のバイオプラスチック・代替素材の導入傾向を整理した。

また、PHBH が汎用プラスチックに比べて優れている点やプラスチックのリサイクル調和性を踏まえた PHBH の代替製品への利用可能性を整理した。なお、上記の整理は現行のプラスチックリサイクルシステムを前提に検討したものであるが、2021 年 3 月に「プラスチックに係る資源循環の促進等に関する法律案」が閣議決定され、今後、プラスチックのリサイクルシステムを取り巻く環境が大きく変わっていく可能性があり、その場合、PHBH の代替製品への利用可能性についてもあらためて検討することが必要と考えられる。

3.2.2 家庭ごみにおけるプラスチックごみの分別状況、汚れ具合等の調査

(1) 目的

PHBH 素材の利用先候補の検討にあたっては、既存のプラスチック製品や紙製品の表面コーティング等のプラ素材など、焼却処理に不向きなもの、生分解性を有することが望ましいもの、などの視点から検討する考え方がある。本研究では、まずはプラスチック製品に着目し、プラスチック代替製品への利用可能性の検討のために、家庭ごみ由来のプラスチック製品の製品種類別の分別状況、汚れ具合等を把握することを目的とした。

(2) 方法

京都市では毎年、京都市家庭ごみ細組成調査（以下「京都市ごみ調」と呼ぶ）をおこなっており、京都市内の 3 地域で家庭ごみとして排出された燃やすごみ、プラスチック製容器包装（以下「プラ容」と呼ぶ）、缶・びん・ペットボトル、小型金属類の 4 分別種を素材や使用用途によって 400 項目程度に分類し、重量・容積を計量することでその詳細組成を調査している。調査対象地区は戸建て住宅地区（以後、A 地区）、中高層住宅地区（以後、B 地区）、町屋住宅地区（以後、C 地区）となっている。本研究での調査は、京都市ごみ調で分類・計量の終了したごみ試料の提供を受け、主に燃やすごみとプラ容を対象にプラスチック製品の素材調査をおこなった。主なサンプリング情報は次表のとおりである。調査世帯数はプラ容、缶・ビン・ペットボトルについてはごみ試料を収集した地域に居住している人数であり、当日にごみを排出しなかった世帯も含まれるのに対し、燃やすごみについては試料の収集時におこなった聞き取り調査をもとに把握した、当日にごみを排出した世帯数および世帯人数である。

表 36 2020 年度京都市ごみ調サンプリング量などの基本情報

	燃やすごみ			プラ容器包装			缶・びん・ペットボトル		
	A地区	B地区	C地区	A地区	B地区	C地区	A地区	B地区	C地区
調査袋数	98	109	101	84	94	76	77	50	60
調査重量(kg)	301.3	301.4	307.7	60.5	56.6	60.1	119.4	64.4	95.2
調査容積(L)	1965	2174	1816	1595	1268	1580	1757	1161	1433
調査世帯数(世帯)	81	156	81	173	192	206	330	192	181
調査世帯人数(人)	220	299	220	360	369	380	687	369	378
前回収集日からの日数	3	4	3	7	7	7	7	7	7
1人当たり重量(g/日/人)	457	252	466	24.0	21.9	22.6	24.8	24.9	36.0
収集日	2020/11/19	2020/11/16	2020/11/26	2020/11/27	2020/11/20	2020/11/24	2020/12/2	2020/11/19	2020/11/25
収集重量(kg)	383.0	437.2	307.7	115.3	56.6	143.3	119.4	64.4	95.2
収集容積(L)	2519	2998	1816	3045	1268	3785	1757	1161	1433

2020 年度の調査では Covid-19 対策として、人員の密集を避けるために京都市ごみ調の作業場所と別の場所で調査をおこなったため、試料の保管容量の都合上、次表に示したとおり調査試料は主に A 地区のものに限って調査をおこなった。

表 37 調査ごみと素材判別実施状況の対応関係

判別方法	燃やすごみ			プラ容器包装		
	A 地区	B 地区	C 地区	A 地区	B 地区	C 地区
素材表記	○	一部のみ	一部のみ	○	一部のみ	一部のみ
AOTF	○	一部のみ	一部のみ	○	一部のみ	一部のみ

＜素材判別手順＞

なお、2019 年度にも同様の調査[1]を行っており、基本的には前回の調査方法に則って調査をおこなった。調査対象とした A 地区の燃やすごみ・プラ容に含まれるプラスチック全てを対象に樹脂素材の調査をおこなった。製品の分類は次表に示す 17 分類でおこなった。ペットボトルのふたやラベルはボトルに付属した状態で排出されている場合は「ペットボトル」に分類し、本体と分離して排出されている場合は「ふた・キャップ」や「食品包装」として分類した。

表 38 樹脂素材調査での製品分類

	分類名	容り法の適用	内容
1	ペットボトル	○	容器包装リサイクル法で指定PETボトルとされているもの
2	その他ボトル	○	容り法で指定外となっているボトル。チューブボトル・スクイーズボトルなども含まれる。
3	レジ袋	○	商品を持ち帰る目的で使用される使い捨てのレジ袋
4	食品容器	○	パック・カップ・コップなどの食品容器(トレイは除く)
5	食品包装	○	食品を包装している菓子類などの袋
6	食品トレイ	○	浅い皿型の容器(ごみ調でトレイとして分類されているもの)
7	ラップ	△	業務用の商品包装の用いられるラップと家庭用のラップ。業務用のみ容り法の対象
8	その他食品系使い捨て	×	容り法範囲外の食品関係の使い捨て製品。ストロー、使い捨てカトラリー、水切りネットなど
9	日用品容器	○	パック・カップ・コップなどの日用品容器
10	日用品包装	○	日用品を包装しているトイレットペーパーなどの袋
11	その他日用品使い捨て	×	容り法範囲外の日用品系の使い捨て製品。綿棒・糸ようじ・バンドエイド等
12	ふた・キャップ	○	ペットボトル等の容器のふたの中で、本体とは分離して排出されたもの
13	緩衝材	○	容器包装とは別に商品を保護するためのもの
14	商品包装以外の袋	×	容り法対象外のDMのプラ袋やポリ袋など
15	対象外の商品付属品	×	容り法対象外の商品付属品。ラベルフィルム・湿布の剥離シートなど
16	その他商品	×	おもちゃ・日用品・文具など
17	指定ごみ袋	×	ごみ排出の際に使用されていた指定ごみ袋

素材の判別は、まず、製品に記載されている素材表記からおこなった。表記されている素材とその製品の重量を記録し、素材の表記がない場合は素材不明として重量の記録をおこなった。複数の素材が表記されている場合は表記のある素材をすべて記録し、次図のように下線で主要な素材が示されている場合は主要素材を区別して記録をおこなった。代表的な素材を次表に示す。ポリスチレンについては発泡性の EPS (expanded polystyrene) とそれ以外を区別した。

次に、素材の表記がなく、素材が不明であったものについては、近赤外分光光度計によって素材の判別をおこなった。使用した分光光度計は AOTF (Acousto-Optic Tunable Filter、音響工学可変波長フィルタ) 分光方式を採用したもので、試料の近赤外吸収スペクトルを測定し、登録された各樹脂のデータセットとの照合結果をスコアとして表示するものである。照合結果のスコアが 0.50 以上（完全一致で 1.00）の樹脂データのうち最も高い値のものを測定結果として採用した。スコアが 0.50 以上となるものがない場合は素材不明として扱った。分光光度計による測定では結果が単一の樹脂で表示されるため、複合素材を区別することができない点に留意が必要である。調査サンプルのうち、京都市分類の中で個数が多く（目安は 150 個以上程度）、かつ個体差が少ないものについては、適せん、縮分をおこなって代表サンプルのみ測定をおこなった。縮分は、対象とする全サンプルを床で十分に攪拌したのち、円状に広げ、扇型に四等分して、無作為に対角線の 2 つを選択することでおこなった。



図 64 プラマークの例[2]

表 39 主要な樹脂素材

略称	名称
PE	ポリエチレン
PP	ポリプロピレン
PS	ポリスチレン
EPS	発泡ポリスチレン
PET	ポリエチレンテレフタレート
PVC	ポリ塩化ビニル
ABS	アクリロニトリル・ブタジエン・ スチレン共重合体

<調査結果の集計方法：含水率や汚れ等付着物の設定>

調査をおこなったごみサンプルの重量にはそれぞれ水分や付着物（食品包装の中身の欠片など）が含まれている。その量は品目によって異なるため、サンプルそれぞれに含水率（重量中の水分割合）と付着物率（重量中の付着物割合）を設定し、サンプル重量中の水分重量・付着物重量・樹脂重量（便宜上、プラスチック樹脂以外の金属なども含むものとする）に分けて集計をおこなった。

含水率については京都市ごみ調で毎年、何品目かに分かれて計測されている。ただし、該当する品目から一部を抽出して計測しているため年度によるばらつきが存在しており、2015年度から2018年度調査の平均値を含水率として用いた。

付着物の量については同じく京都市ごみ調でプラスチック容器包装を対象に毎年、汚れ度調査がおこなわれている。これはプラスチック製容器包装の洗浄状況を把握しているもので、プラスチック容器包装が汚れの状態によって5段階に分類されている。京都市から提供されたプラ容のごみサンプルはすでに汚れ度によって分類されたものであり、本研究では京都市ごみ調で行われた汚れ度調査の結果を用いて付着物割合を設定した。汚れ度の分類基準と設定した付着物割合を表40に示す。燃やすごみについては2013年度に京都市でおこなわれた、燃やすごみ中のプラスチック容器包装の汚れ度調査の結果から設定した。この調査は燃やすごみから排出されたプラ容4分類を、汚れ度と排出状態によって4段階に分類したものである。プラ容と同じく汚れ度の段階ごとに表41のように付着物割合を設定し、形状ごとの付着物割合を求めた。ただし、プラ容以外の商品は調査の対象外であったので、商品の付着物割合は一律で2%と設定した。

分光光度計による測定は素材表記による調査が全て終了した後におこない、調査日時に差があったため、水分の揮発による重量の差が生じた。そのため、結果の集計時には分光光度計調査の結果は素材表記調査時の重量に換算しなおして集計をおこなった。

分光光度計で測定結果が得られなかったものは素材不明として扱ったが、不明分の組成割合を補うため、不明分は、京都市ごみ調で同分類とされているもののうち素材が判明したものと等しい組

成であると仮定して全体の組成の推計をおこなった。

また、京都市の令和元年度の年間ごみ収集量[3]と今回の調査量をもとに、京都市の年間の燃やすごみとプラ容からのプラスチック排出量に換算した全体の集計もおこなった。

表 40 主要な樹脂素材プラ容汚れ度調査の分類基準の付着物割合設定値

汚れ度	分類基準	付着物割合(%)
1	きれいなもの	0.5
2	きれいだがラベルまたはふたがついている	2
3	表面積で49%以下程度の汚れ	15
4	表面積で50%以上の汚れ	30
5	腐敗する可能性が高い物が付着	30

表 41 燃やすごみの汚れ度調査結果と形状ごとの付着物割合

汚れ度	ごみ捨て用の入れ物利用	かなりの汚れ (表面積50%以上 または洗っても落ちにくい汚れ)	やや汚れ (表面積10%以下 または洗って流せる汚れ)	きれい・ほぼきれい (プラ容に排出しても問題ないもの)	付着物割合(%)
本研究で設定した不純物割合(%)	15	30	15	2	
形状	汚れ度の組成割合				
袋・シート等の包装状	38%	19%	8%	35%	13.4
ボトル・パック・カップ等の容器状	5%	19%	28%	49%	11.4
緩衝材等その他	0%	5%	6%	88%	4.3
ごみ袋(指定)	100%	0%	0%	0%	15.0
その他商品	調査対象外				2.0

(3) 結果

素材表記のみでの素材の判明率は、燃やすごみで約 40%、プラ容で約 50%となった。分類別では素材が明らかな「指定ごみ袋」や「ペットボトル」では 90%以上が判明し、「食品容器」や「食品トレイ」、「レジ袋」でも判明率が高かった。容器包装はプラマークの表示が義務付けられており、その近くに素材も合わせて表記されているものが多かった。一方、「商品」や「その他食品系使い捨て」などの商品系や「ふた・キャップ」などの他のものから分離して排出されているものでは判明率が低くなった。また、AOTF 結果を組み合わせることで、燃やすごみ 79%、プラ容 88%の素材を特定することができた。

樹脂素材表記調査と分光光度計による調査を統合し、京都市の年間ごみ収集量から、京都市で燃やすごみとプラ容で排出されるプラスチックごみ全体の組成に換算した結果を次表に示した。全体では含水率 14%、付着物割合は 9%と推定された。製品別の素材では全体重量ベースで「食品容器」が 19.3%、「食品包装」が 15.7%と多くを占めた。樹脂重量ベースでは水分・付着物割合の高い「食品包装」や「ラップ」の割合は全体重量に比べて少ない値となった。また、容器包装の対象となるプラスチック製品は全体重量中・樹脂重量中ともに約 71%（指定ごみ袋は除く）であった。樹脂別では PE が 32.3%と最も多かった。「レジ袋」、「指定ごみ袋」、「食品包装」などフィルム由来の排出がほとんどであった。次いで PP が 28.7%と多かった。PP は PE と同様にフィルム類に用いられているものも多いが、容器や商品にも用いられていた。PS と EPS は合わせて 12.6%を占め、主に容器や商品などに用いられていた。EPS は「食品トレイ」や「緩衝材」に含まれていた。PET は 13.2%を占め、ボトルや容器に多く用いられていた。PVC は 2.4%、PVDC は 2.9%を占めた。主に「ラップ」に用いられており、「ラップ」由来の PVC が 1.0%、PVDC が 2.5%であった。しかし、容器や包装などの割合は分光光度計の誤測定によって過大な値となっている可能性がある点には留意が必要である。ただ

し、錠剤の包装など一部の日用品包装・容器にはPVCが用いられていることが表記されているものも見られた。また、一部のフィルムには金属（主にアルミと思われる）が複合されており、マテリアルリサイクルに不向きなPEやPPが存在することがわかった。

表 42 燃やすごみ+プラ容の樹脂組成

分類名	合計重量(トン)	樹脂量合計(トン)	樹脂・水分等の割合			紙品別樹脂重量割合	樹脂重量割合(不明除く)												
			水分割合	付着物割合	樹脂量割合		PE	PP	PS	EPS	PET	PVC	PVDC	PA	ABS	その他のプラ	金属	タルク	プラ以外の素材
ペットボトル	549	435	9%	11%	79%	1.9%	1.8%	1.6%	0.0%	0.0%	95.5%	0.8%	0.0%	0.0%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%
その他ボトル	2139	1696	8%	12%	79%	7.3%	34.5%	19.5%	11.3%	0.0%	26.3%	1.4%	0.0%	0.1%	0.8%	5.5%	0.5%	0.0%	0.0%
レジ袋	1038	754	15%	12%	73%	3.3%	99.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.6%	0.0%	0.0%	0.0%
食品容器	4670	3987	7%	7%	85%	17.3%	3.5%	21.9%	22.8%	9.5%	34.7%	3.4%	0.6%	0.2%	0.2%	1.6%	0.0%	1.5%	0.1%
食品包装	5733	4098	19%	10%	71%	17.8%	36.1%	48.5%	0.7%	0.0%	3.4%	0.9%	1.1%	3.1%	0.1%	0.1%	5.7%	0.0%	0.4%
食品トレー	1100	953	7%	7%	87%	4.1%	0.0%	14.2%	14.6%	42.8%	28.0%	0.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
ラップ	2253	1014	42%	13%	45%	4.4%	14.9%	4.8%	0.0%	0.0%	0.0%	22.3%	57.8%	0.0%	0.0%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%
その他食品系使い捨て	272	245	8%	2%	90%	1.1%	78.4%	5.1%	16.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
日用品容器	473	414	4%	9%	88%	1.8%	5.8%	34.9%	1.6%	0.0%	52.2%	0.4%	0.0%	0.0%	0.8%	3.0%	1.2%	0.0%	0.0%
日用品包装	2191	1836	6%	10%	84%	8.0%	57.1%	31.3%	0.1%	0.0%	2.3%	0.8%	0.3%	2.1%	0.0%	0.1%	5.8%	0.0%	0.0%
その他日用品使い捨て	290	261	8%	2%	90%	1.1%	19.8%	9.3%	9.6%	0.0%	0.4%	9.5%	1.7%	0.0%	16.2%	33.6%	0.0%	0.0%	0.0%
ふた・キャップ	413	375	6%	3%	91%	1.6%	43.2%	24.4%	17.1%	0.0%	0.9%	12.7%	0.3%	0.0%	0.0%	1.3%	0.0%	0.0%	0.0%
緩衝材	505	440	9%	3%	87%	1.9%	61.2%	10.6%	1.8%	4.8%	0.4%	1.4%	0.0%	0.0%	0.0%	18.7%	0.0%	1.1%	0.0%
商品包装以外の袋	2187	1507	19%	12%	69%	6.5%	83.4%	16.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
対象外の商品付属品	862	768	6%	5%	89%	3.3%	2.6%	86.8%	0.5%	0.0%	9.3%	0.6%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
商品	3400	3069	8%	2%	90%	13.3%	2.9%	46.5%	22.1%	0.0%	2.0%	0.5%	0.3%	0.0%	21.2%	4.5%	0.0%	0.0%	0.0%
指定ごみ袋	1630	1228	12%	12%	75%	5.3%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
全体	29704	23081	14%	9%	78%	100.0%	32.3%	28.7%	9.1%	3.5%	13.2%	2.4%	2.9%	0.8%	3.1%	2.1%	1.5%	0.3%	0.1%

次表は製品分類別の燃やすごみ・プラ容への分別割合を示したものである。ただし、容器包装の対象となる業務用ラップと対象外の家庭用ラップは区別して示している。全体重量ベースで 69%、樹脂重量ベースで 65%が燃やすごみから排出されていた。また、容器包装対象品目のプラ容への分別率は樹脂量ベースで 44%、全体重量ベースで 39%であった。容器包装対象外のプラスチックのうちプラ容として排出されている割合は 11%であった。分別率の向上によってプラスチックのリサイクル量を向上させるポテンシャルが相当量あることがわかった。製品分類ごとでは「食品包装」がプラ容への排出率が 62%（以下、樹脂重量ベースの割合）と高かった。包装は「食品包装」「日用品包装」とともに分別率が 40%以下となった。「食品包装」については汚れを洗浄する手間がかかる包装が多いことが原因かと思われる。しかし、「日用品容器」や「日用品包装」は洗浄が必要なものは少ないと思われる、消費者への啓発によって分別率を向上できる可能性が高いと思われる。また、「レジ袋」についてはごみ袋として用いられることも多く、燃やすごみからの排出が多くなっていると思われる。

表 43 製品別の燃やすごみ・プラ容の分別割合

分類名	樹脂量ベース		全体重量ベース	
	燃やす	プラ容	燃やす	プラ容
ペットボトル	83%	17%	84%	16%
その他ボトル	52%	48%	53%	47%
レジ袋	87%	13%	90%	10%
食品容器	38%	62%	40%	60%
食品包装	62%	38%	68%	32%
食品トレー	42%	58%	45%	55%
業務用ラップ	91%	9%	93%	7%
家庭用ラップ	90%	10%	92%	8%
その他食品系使い捨て	92%	8%	92%	8%
日用品容器	64%	36%	66%	34%
日用品包装	62%	38%	65%	35%
その他日用品使い捨て	93%	7%	93%	7%
ふた・キャップ	41%	59%	42%	58%
緩衝材	66%	34%	69%	31%
商品包装以外の袋	84%	16%	88%	12%
対象外の商品付属品	95%	5%	96%	4%
商品	84%	16%	84%	16%
指定ごみ袋	77%	23%	81%	19%
全体	65%	35%	69%	31%

（４）まとめと課題

本章ではプラスチックごみの樹脂素材表記の調査と分光光度計による調査からプラスチックごみ中の樹脂素材の組成を推定した。調査の結果、主な樹脂の組成は PE が 32.3%、PP が 28.7%、PS が 3.5%、PET が 13.2%、PVC が 2.4%となった。また、含水率 14%、付着物割合は 9%と推定された。本研究ではこれら素材、含水率、付着物割合を 17 品目別に特定することができた。なお、複合素材の樹脂割合を考慮したことによってプラスチック樹脂に金属なども一定量混入することがわかっている。また、全体重量ベースで 69%、樹脂重量ベースで 65%が燃やすごみから排出されていると推定された。こうした分別状況や汚れ（付着物割合）、素材情報は PHBH 代替用途の検討を進める際の基礎情報となる。

＜参考文献＞

1. 西村健太郎：製品系を含む家庭系プラスチック廃棄物の素材別フロー推定、京都大学工学部地球工学科特別研究（2020）
2. プラスチック容器包装リサイクル推進協議会、http://www.pprc.gr.jp/law/ex_pl_indication.html（閲覧日：2021 年 3 月 6 日）
3. 京都市 web site 、<https://www.city.kyoto.lg.jp/index.html>（閲覧日：2021 年 3 月 6 日）

3.3 PHBH 製生ごみ袋のバイオガス化に関する検討

3.3.1 PHBH 製コンパウンドフィルムの嫌気分解性の評価

(1) 目的

3.1 で検討する PHBH 製生ごみ袋をバイオガス化プラントに投入する際の前処理及び発酵条件等の探索、実機での運転に向けたバイオガス化性能に関する基礎実験やスケールアップに関する検討を実施することを目的とする。

本年度は、バッチ試験で PHBH 製コンパウンドフィルムの評価、連続試験でスケールアップの基礎検討を実施した。また、PHBH 製のカトラリー類（ストロー、スプーン）の生分解性についても検討した。

(2) 方法

1) 概要

(株) カネカより各種 PHBH 製コンパウンドフィルム（詳細は 3.1 に記載）の提供を受け、恒温槽内に設置した密閉反応容器にて、PHBH 製コンパウンドフィルムのバイオガス化試験を行い、コンパウンド種類の違いによる生分解性の評価を行った。PHBH 製のカトラリー類（ストロー、スプーン）についても同様の方法で生分解性の評価を行った。

試験系列について次表に示す。

表 44 試験系列一覧

バイオガス化 試験方法	素材		サンプル名称
バッチ試験	従来 PHBH	単独 (従来 PHBH のみ)	・ 従来 PHBH フィルム
		コンパウンド (従来 PHBH+添加剤)	・ 従来 PHBH コンパウンド フィルム ➤ D-0
		コンパウンド (従来 PHBH+市販生分解 樹脂+添加物)	・ 従来 PHBH/市販生分解 性樹脂コンパウンドフィ ルム ➤ D-1 ➤ D-2 ➤ D-3 ➤ D-4 ➤ D-5 ➤ D-6
	改良 PHBH (組成、分子量等の構造を変更した PHBH +従来 PHBH+添加剤)		・ 改良 PHBH フィルム
連続試験	従来 PHBH (従来 PHBH のみ)		・ 従来 PHBH フィルム
	改良 PHBH (組成、分子量等の構造を変更した PHBH +従来 PHBH+添加剤)		・ 改良 PHBH フィルム

また、PHBH フィルムを用いてバイオガス化連続試験を行い、実機での運転に向けたバイオガス化性能確認を行った。

2) 評価方法

バイオガス化による生分解性を定量的に評価するため、次式に示す生分解率を定義した。

生分解率 (%) = 試料から発生したバイオガス量 / 試料の理論バイオガス発生量
 試料から発生したバイオガス量 = 試料投入した反応容器から発生したバイオガス量
 - ブランクの反応容器から発生したバイオガス量
 試料の理論バイオガス発生量 = 試料炭素量(g) / 12(g/mol) × 22.4(L/mol)

ブランクは試料を投入しない種汚泥だけのものとした。メタン発酵における二酸化炭素 (CO₂) 及びメタン (CH₄) の理論バイオガス量は、下式で求められる。

$$CcHhOo + c - \frac{h}{4} - \frac{o}{2} H_2O \rightarrow \frac{c}{2} + \frac{dy}{dx} - \frac{dy}{dx} CH_4 + \frac{c}{2} - \frac{h}{8} + \frac{o}{4} CO_2 \quad (\text{出典、JIS K6961:2014})$$

メタン及び二酸化炭素の係数の和は分子式の炭素数 c と等しくなる。したがって、メタンガス及び二酸化炭素ガスの総和のモル数は、分子式の炭素のモル数と一致する。

生分解率は種汚泥の活性にも左右されるため、コントロールとしてセルロースを試料とし、生分解率の基準として比較した。

PHBH の崩壊性評価方法として試験開始 7~15 日後のメタン発酵消化液を 1 mm メッシュでろ過後、肉眼で試料の残存状態を確認した。

(3) 結果

1) PHBH 製コンパウンドフィルムの評価試験結果

① バッチ試験方法

密閉できる反応容器（次図）に、種汚泥、2 cm 角に裁断したフィルム試料を混合し、反応容器内部を窒素ガスで置換後、ガスバッグを取り付け、恒温槽内に静置した。ブランクは種汚泥だけとした。発生したバイオガスはガスバッグに捕集し、バイオガス発生量を測定した。試験は n 数 3 で実施し、測定結果は平均値で示した。



図 65 密閉反応容器

② 試験条件

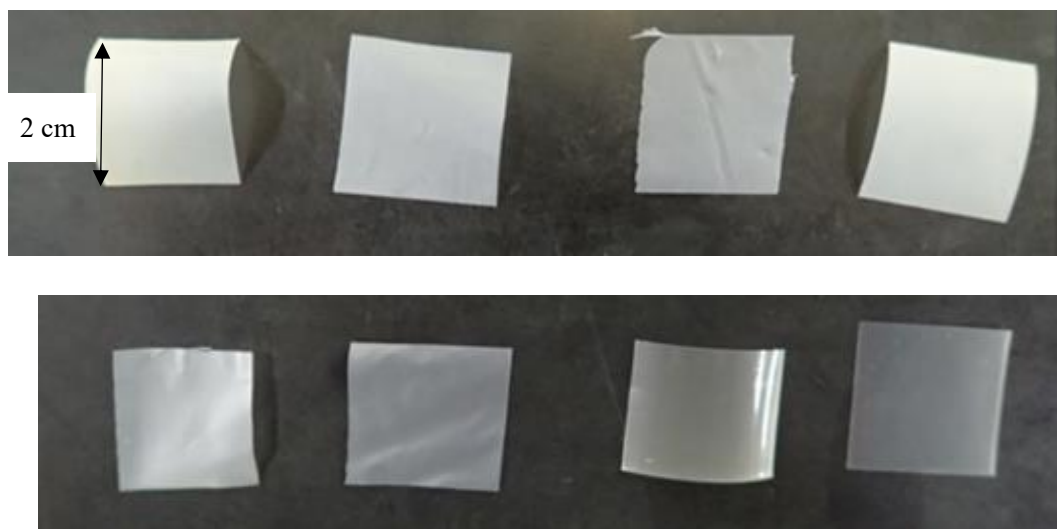
試料 : 従来 PHBH フィルム (以下 PHBH 単独とする)
従来 PHBH コンパウンドフィルム (以下 D-0 とする)
従来 PHBH/市販生分解性樹脂コンパウンドフィルム 6 種 (以下 D-1～D-6 とする)
次図参照

反応規模 : 400 g (前図の密閉容器を使用)

種汚泥 : 中温汚泥

反応温度 : 38℃

試験期間 : 21 日間



上段左から D-1、D-2、D-3、D-4
下段左から D-5、D-6、D-0、従来 PHBH フィルム
図 66 試料写真

③ 結果

次図に各サンプルの生分解率を示す。PHBH コンパウンドフィルム及び PHBH/市販生分解性樹脂コンパウンドフィルムは種類に応じて、従来 PHBH フィルムと比べると生分解率が低下することが分かった。各サンプルの 21 日目の生分解率は従来 PHBH フィルムが 85%、D-1 が 35%、D-2 が 40%、D-3 が 39%、D-4 が 49%、D-5 が 49%、D-6 が 57%、D-0 が 79%となった。

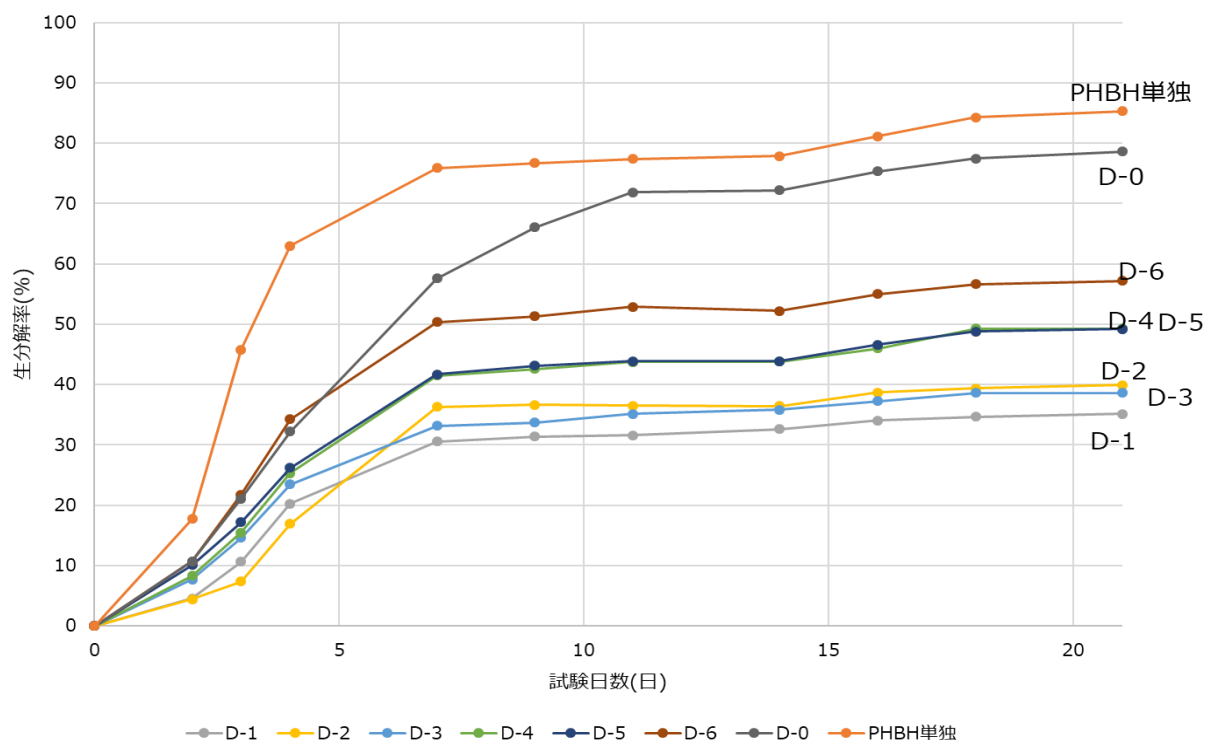


図 67 従来 PHBH フィルム及び各種コンパウンドフィルムの生分解率

次表よりメタン発酵消化液の pH と有機酸の分析結果を示す。pH は 7.5～8.5 の範囲内で安定していた。メタン発酵の不具合を示す指標の一つである有機酸はすべてのサンプルで蓄積しておらず、すべてのサンプルで安定的にメタン発酵が進んでいた。一般的なメタン発酵における分解過程は、①固体等の有機物を低分子有機物に分解する、②低分子有機物から有機酸（プロピオン酸、酪酸等）を生成する、③有機酸から酢酸と水素を生成する、④水素と酢酸等からメタンと二酸化炭素を生成する、4 つの段階からなる。そのため中間生成物である有機酸を測定することでメタン発酵の不具合を確認することができる。

表 45 D-1 の消化液分析結果

	3 日目	7 日目	11 日目	14 日目	21 日目
pH	7.76	7.78	7.91	8.12	8.25
有機酸					
酢酸 (mg/L)	21.48	<5	<5	<5	5.79
プロピオン酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5
n-酪酸 (mg/L)	22.56	<5	<5	<5	<5
iso-酪酸 (mg/L)	11.72	<5	<5	<5	<5
n-吉草酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5
iso-吉草酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5

※<5 は検出限界未満

表 46 D-2 の消化液分析結果

	3 日目	7 日目	11 日目	14 日目	21 日目
pH	7.80	7.79	7.82	8.10	8.24
有機酸					
酢酸 (mg/L)	7.91	6.44	<5	<5	6.41
プロピオン酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5
n-酪酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5
iso-酪酸 (mg/L)	<5	9.06	<5	<5	<5
n-吉草酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5
iso-吉草酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5

※<5 は検出限界未満

表 47 D-3 の消化液分析結果

	3 日目	7 日目	11 日目	14 日目	21 日目
pH	7.75	7.77	7.96	8.12	8.26
有機酸					
酢酸 (mg/L)	10.75	<5	<5	6.8	9.08
プロピオン酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5
n-酪酸 (mg/L)	22.38	<5	<5	<5	<5
iso-酪酸 (mg/L)	13.25	<5	<5	<5	<5
n-吉草酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5
iso-吉草酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5

※<5 は検出限界未満

表 48 D-4 の消化液分析結果

	3 日目	7 日目	11 日目	14 日目	21 日目
pH	7.77	7.71	7.90	8.12	8.18
有機酸					
酢酸 (mg/L)	6.73	<5	<5	<5	6.49
プロピオン酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5
n-酪酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5
iso-酪酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5
n-吉草酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5
iso-吉草酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5

※<5 は検出限界未満

表 49 D-5 の消化液分析結果

	3 日目	7 日目	11 日目	14 日目	21 日目
pH	7.87	7.72	7.99	8.16	8.21
有機酸					
酢酸 (mg/L)	8.7	<5	<5	<5	9.68
プロピオン酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5
n-酪酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5
iso-酪酸 (mg/L)	7.4	<5	<5	<5	<5
n-吉草酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5
iso-吉草酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5

※<5 は検出限界未満

表 50 D-6 の消化液分析結果

	3 日目	7 日目	11 日目	14 日目	21 日目
pH	7.71	7.70	8.00	8.15	8.20
有機酸					
酢酸 (mg/L)	9.68	<5	<5	<5	7.87
プロピオン酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5
n-酪酸 (mg/L)	33.6	<5	<5	<5	<5
iso-酪酸 (mg/L)	21.73	<5	<5	<5	<5
n-吉草酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5
iso-吉草酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5

※<5 は検出限界未満

表 51 D-0 の消化液分析結果

	3 日目	7 日目	11 日目	14 日目	21 日目
pH	7.66	7.65	7.70	7.99	8.18
有機酸					
酢酸 (mg/L)	8.41	<5	<5	<5	<5
プロピオン酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5
n-酪酸 (mg/L)	69.88	<5	<5	<5	<5
iso-酪酸 (mg/L)	41.17	<5	<5	<5	<5
n-吉草酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5
iso-吉草酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5

※<5 は検出限界未満

表 52 PHBH 単独の消化液分析結果

	3 日目	7 日目	11 日目	14 日目	21 日目
pH	7.71	7.73	7.79	7.94	8.15
有機酸					
酢酸 (mg/L)	7.3	<5	5.29	<5	<5
プロピオン酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5
n-酪酸 (mg/L)	75.71	<5	<5	<5	<5
iso-酪酸 (mg/L)	35.39	<5	<5	<5	<5
n-吉草酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5
iso-吉草酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5

※<5 は検出限界未満

次図より各種コンパウンドフィルム (D-1～D-6、D-0) と従来 PHBH フィルムの分解の様子を示す。従来 PHBH フィルムは 7 日目、D-0 は 11 日目に 1 mm メッシュでろ過した結果、投入した試料は肉眼で残存確認できなかった。D-1～D-6 の PHBH／市販生分解性樹脂コンパウンドフィルムは次図に示すように 21 日間では完全に分解しなかった。

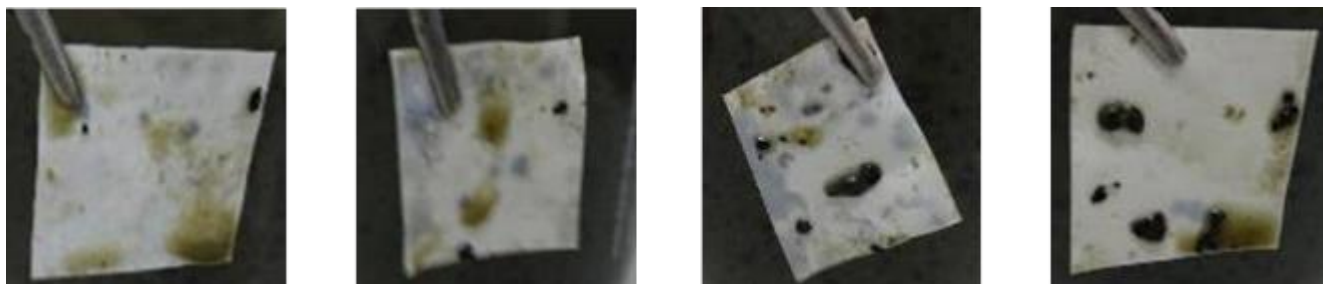


図 68 D-1 の分解の様子（左から 5 日目、10 日目、15 日目、21 日目）

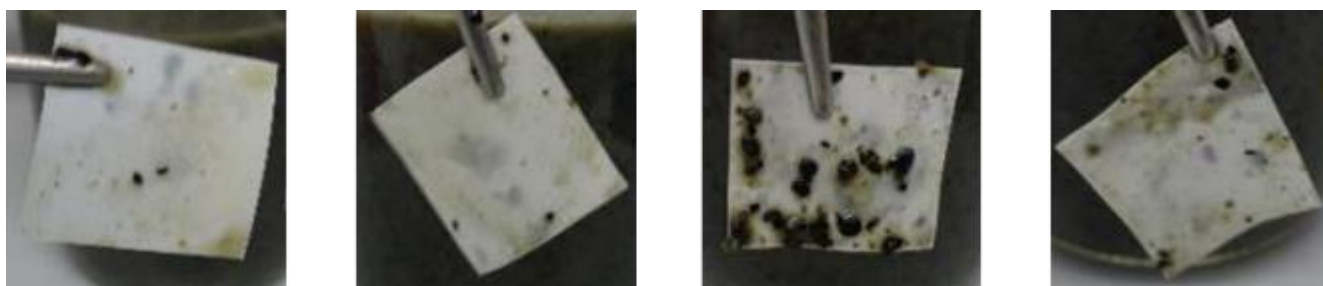


図 69 D-2 の分解の様子（左から 5 日目、10 日目、15 日目、21 日目）

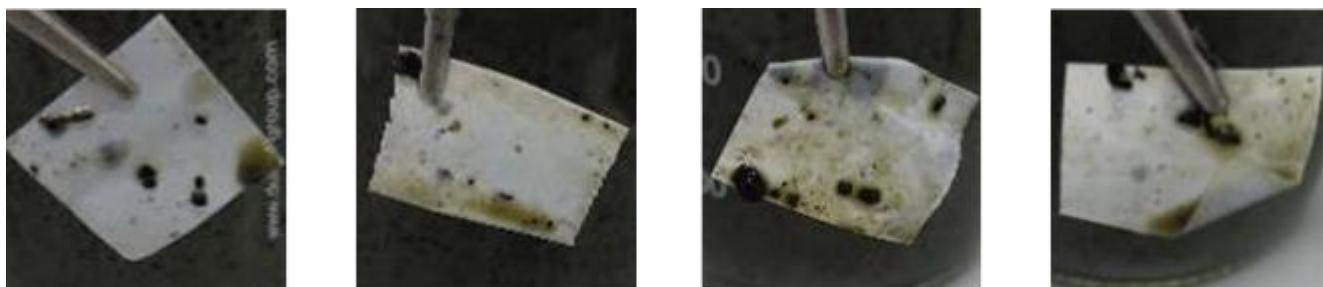


図 70 D-3 の分解の様子（左から 5 日目、10 日目、15 日目、21 日目）

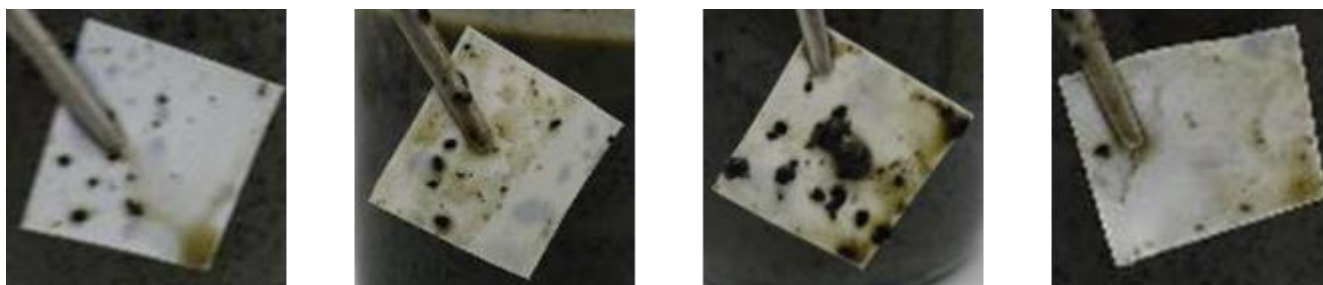


図 71 D-4 の分解の様子（左から 3 日目、7 日目、14 日目、21 日目）

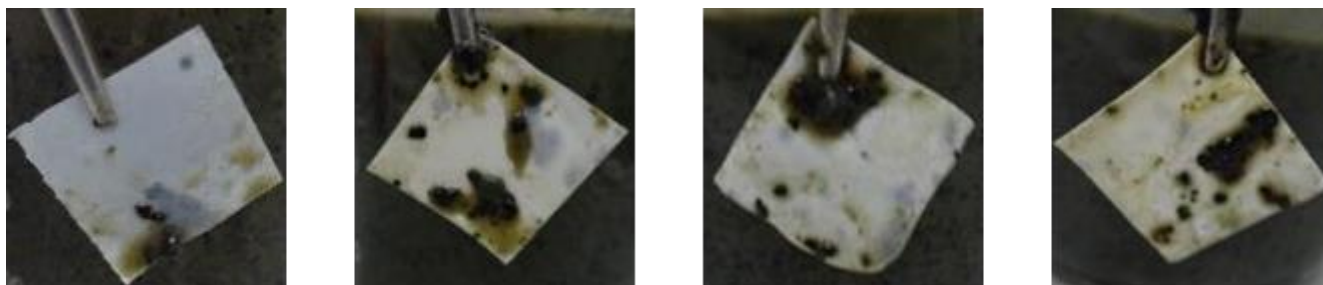


図 72 D-5 の分解の様子（左から 3 日目、7 日目、14 日目、21 日目）



図 73 D-6 の分解の様子（左から 3 日目、7 日目、14 日目、21 日目）

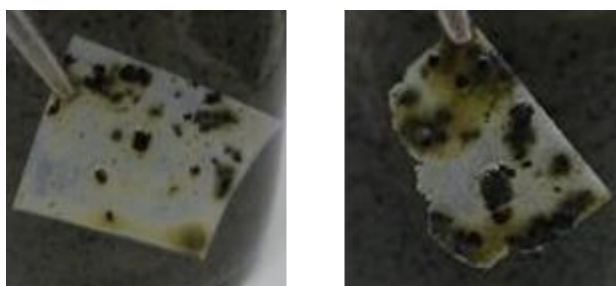


図 74 D-0 の分解の様子（3 日目、7 日目）



図 75 PHBH 単独の分解の様子（3 日目）

2) 改良 PHBH フィルムの評価試験結果

① 試験条件

試料	: 従来 PHBH フィルム 改良 PHBH フィルム セルロース（CAS-No. : 9004-34-6、メルクバイオフーマ株式会社）
反応規模	: 400 g（図 65 の密閉容器を使用）
種汚泥	: 中温汚泥
反応温度	: 38℃
試験期間	: 20 日間
試験方法	: 1)①のバッチ試験方法参照

次図に PHBH フィルムサンプルを示す。



図 76 フィルムサンプル写真（従来 PHBH フィルム、改良 PHBH フィルム）

① 結果

次図に生分解率を示す。改良 PHBH フィルムは、従来 PHBH フィルムと比べると生分解率が高く、問題なく分解することが確認できた。各サンプルの 20 日目の生分解率は従来 PHBH フィルムが 85%、改良 PHBH フィルムが 35%、セルロースが 46%となった。生分解率の数値は全てのサンプルで生分解率が低い結果となった。コントロールであるセルロースとドッグフードの分解率も低いことから汚泥の活性が低いため低くなったと思われる。

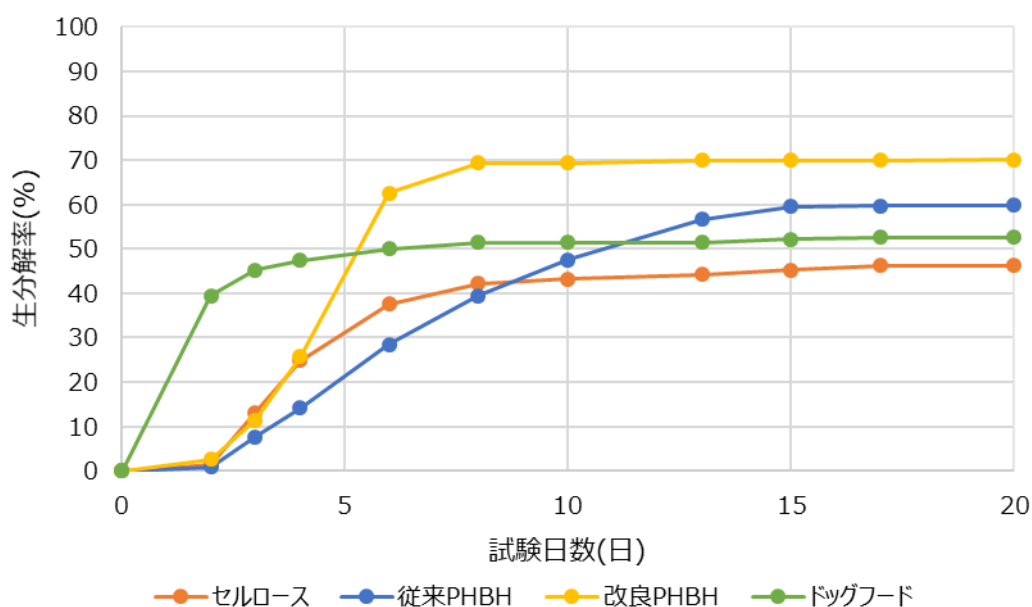


図 77 改良 PHBH フィルムの生分解率

次表より消化液の pH と有機酸の分析結果を示す。pH は 7.5 ～8.5 の範囲内で安定していた。

表 53 セルロースの消化液分析結果

	2 日目	6 日目	10 日目	13 日目	20 日目
pH	7.81	7.40	7.60	7.85	7.90
有機酸					
酢酸 (mg/L)	10.26	<5	<5	5.27	63.5
プロピオン酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5
n-酪酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5
iso-酪酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5
n-吉草酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5
iso-吉草酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5

※<5 は検出限界未満

表 54 従来 PHBH フィルムの消化液分析結果

	2 日目	6 日目	10 日目	13 日目	20 日目
pH	7.84	7.66	7.77	7.97	7.88
有機酸					
酢酸 (mg/L)	45.34	775.81	68.76	28.75	99.3
プロピオン酸 (mg/L)	<5	7.32	<5	<5	<5
n-酪酸 (mg/L)	<5	8.37	<5	<5	<5
iso-酪酸 (mg/L)	<5	7.74	<5	<5	<5
n-吉草酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5
iso-吉草酸 (mg/L)	<5	10.37	<5	<5	<5

※<5 は検出限界未満

表 55 改良 PHBH フィルムの消化液分析結果

	2 日目	6 日目	10 日目	13 日目	20 日目
pH	7.81	7.67	7.78	7.98	7.91
有機酸					
酢酸 (mg/L)	47.94	67.96	5.5	11.76	131.57
プロピオン酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5
n-酪酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5
iso-酪酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5
n-吉草酸 (mg/L)	<5	<5	<5	<5	<5
iso-吉草酸 (mg/L)	<5	9.3	<5	<5	<5

※<5 は検出限界未満

次図より従来 PHBH フィルムと改良 PHBH フィルムの分解の様子を示す。従来 PHBH フィルムは 10 日目、改良 PHBH フィルムは 7 日目に 1 mm メッシュでろ過した結果、投入した試料は肉眼で残存確認できなかった。

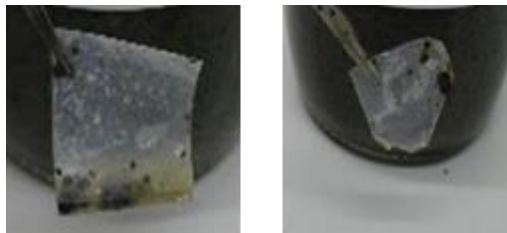


図 78 従来 PHBH フィルムの分解の様子（左から 2 日目、6 日目）



図 79 改良 PHBH フィルムの分解の様子（左から 2 日目、6 日目）

3) カトラリー類の評価試験結果

① 試験条件

試料 : PHBH 製ストロー (以下「ストロー」)
PHBH 製スプーン (以下「スプーン」)
反応規模 : 400 g (図 65 の密閉容器を使用)
種汚泥 : 中温汚泥
反応温度 : 38℃
試験期間 : 22 日間 (ストロー)、28 日間 (スプーン)

次図にサンプル写真を示す。

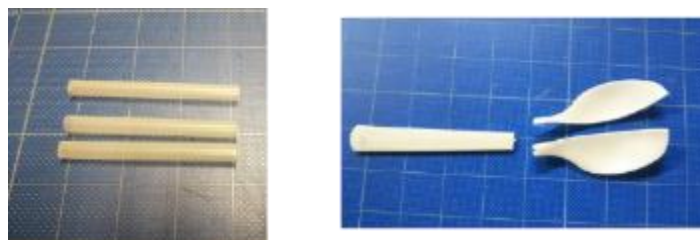


図 80 サンプル写真 (左：ストロー、右：スプーン)

② 結果

次図に各サンプルの生分解率を示す。各試料の 22 日目の生分解率はストローが 79%、スプーンが 43%となった。ストローは 22 日目に試験を終了した。スプーンは試験を継続し、28 日目の生分解率が 52%となった。

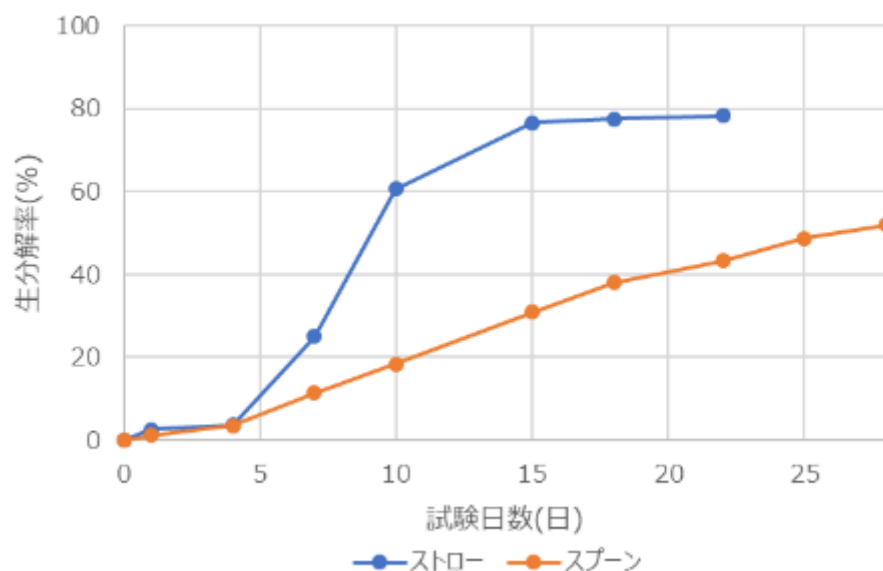


図 81 試料の生分解率

次図よりカトラリー類の分解の様子を示す。ストローは 15 日目に 1 mm メッシュでろ過した結果、投入した試料は肉眼で残存確認できなかった。



図 82 ストローの分解の様子（左から 7 日目、10 日目）

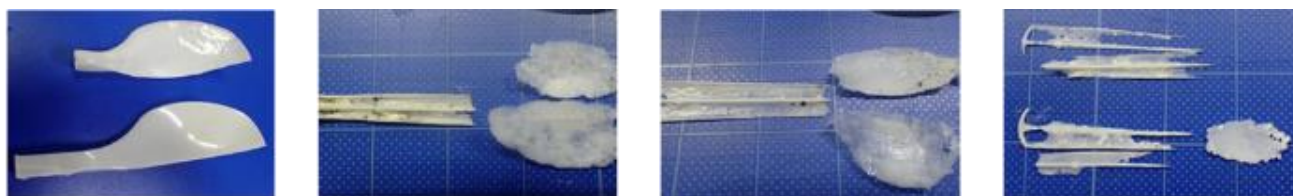


図 83 スプーンの分解の様子（左から 15 日目、20 日目、25 日目、28 日目）

4) PHBH のバイオガス化連続試験

① 連続試験方法

2L 容量の反応容器に、1.5 kg の中温汚泥を投入し、38℃の恒温槽内に静置してメタン発酵を行った。投入原料は「模擬生ごみ」または「模擬生ごみ+PHBH フィルム」を 1 日もしくは 2 日に 1 回投入して混合した。また、メタン発酵消化液の重量が 1.5 kg になるように余剰となった消化液を原料投入前に排出した。発生したバイオガスはセパラブルフラスコ上蓋部からチューブで連結したガス捕集袋に回収した。試験の様子を次図に示す。



図 84 連続試験の様子（左：ガス袋、右：密閉反応容器）

② 模擬生ごみの組成

次表に模擬生ごみ組成を示す。各原料をミキサーにて細分化し、混合して使用した。次図に模擬生ごみの写真を示す。

表 56 模擬生ごみ組成

組成	Wet%
りんごの皮	10.0
グレープフルーツ皮	5.0
オレンジの皮	5.0
バナナの皮	10.0
キャベツ	12.0
じゃがいも	12.0
にんじん	12.0
ひき肉	5.0
魚	5.0
卵	4.0
ご飯	10.0
パン	5.0
うどん	2.5
中華麺	2.5
	100.0



図 85 模擬生ごみ写真（左：細分化前、右：細分化後）

③ 従来 PHBH を用いた連続試験

試験条件

試料 : 模擬生ごみのみ（以下「生ごみのみ」）
 模擬生ごみ＋従来 PHBH フィルム（以下「生ごみ＋従来 PHBH」）

反応規模 : 1,500 g

種汚泥 : 中温汚泥

反応温度 : 38℃

試験期間 : 24 日間（立上げ）、36 日間（定格負荷）

生ごみのみと生ごみ＋PHBH のバイオガス発生量を次図に示す。投入量は安定的に投入できた量を定格負荷とし、この定格負荷を 100 として投入量を相対的に示した。試験開始時は投入量を 10% とし、徐々に投入量を増やし、24 日目に定格の投入量とした。PHBH の投入量は模擬生ごみ固形物比（乾燥重量比）10%を添加した。

生ごみのみと比較して、連続的に PHBH を添加してもバイオガス発生量が低下することはない、

問題なくバイオガス化ができることを確認できた。30日から60日まで定格量期間のガス発生量は、生ごみのみ系で163 mL/g-投入原料、従来 PHBH を添加した系で181 mL/g-投入原料であった。バイオガス発生量の差分の18 mL/g-投入量は、投入した PHBH の理論ガス発生量の94%であった。

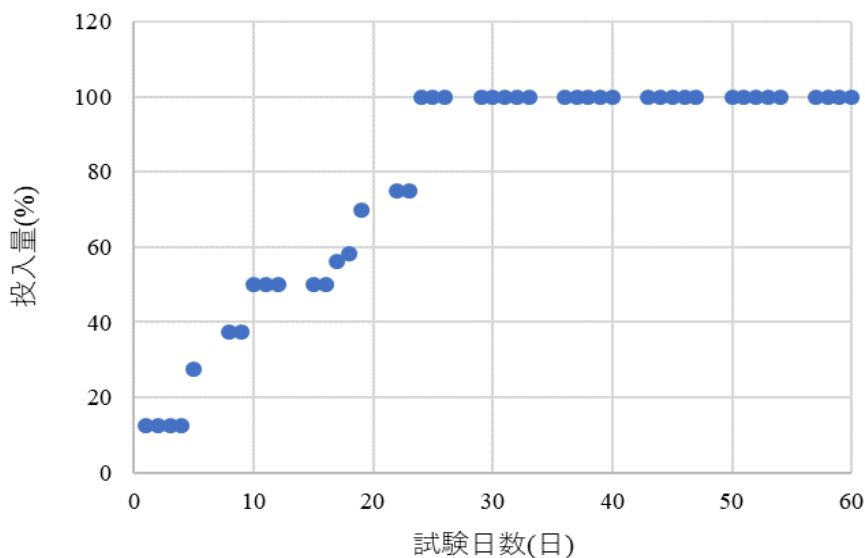


図 86 原料投入量

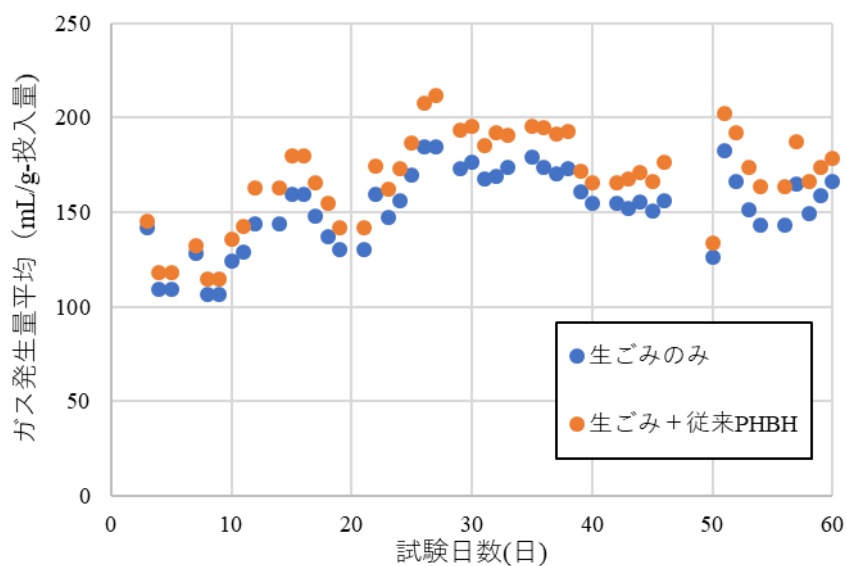


図 87 連続試験のバイオガス発生量

④ 改良 PHBH を用いた連続試験

試験条件

試料 : 模擬生ごみのみ (以下「生ごみのみ」)
 模擬生ごみ+改良 PHBH フィルム (以下「生ごみ+改良 PHBH」)

反応規模 : 1,500 g

種汚泥 : 中温汚泥

反応温度 : 38℃

試験期間 : 27 日間 (立上げ)、26 日間 (定格負荷)

生ごみのみと生ごみ+改良 PHBH のバイオガス発生量を次図に示す。投入量は安定的に投入できた量を定格負荷とし、この定格負荷を 100 として投入量を相対的に示した。徐々に投入量を増やし、27 日目に定格の投入量とした。改良 PHBH の投入量は模擬生ごみ固形物比（乾燥重量比）15%を添加した。

生ごみのみと比較して、連続的に改良 PHBH を添加してもバイオガス発生量が低下することはない、問題なくバイオガス化ができることを確認できた。28 日から 55 日まで定格量期間のガス発生量は、生ごみのみ系で 157 mL/g-投入原料、PHBH を添加した系で 182 mL/g-投入原料であった。バイオガス発生量の差分の 25 mL/g-投入量は、投入した改良 PHBH の理論ガス発生量の 83%であった。

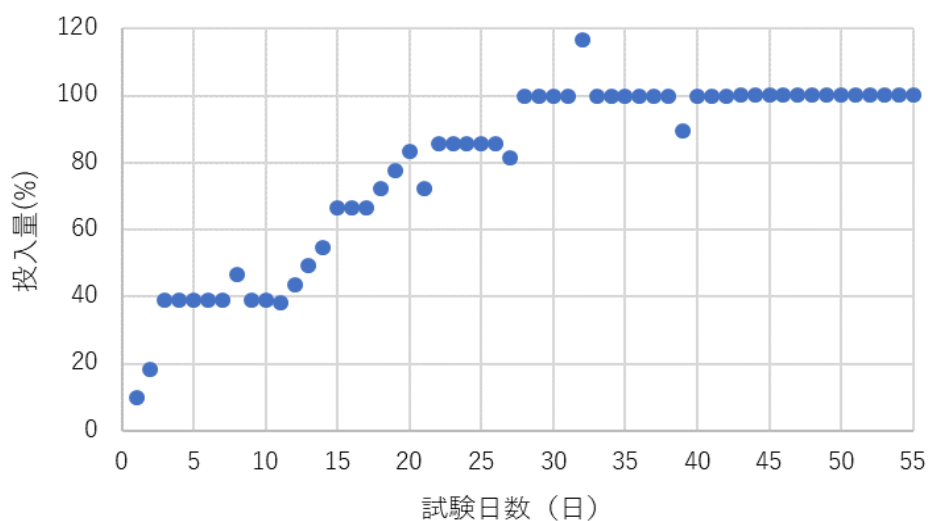


図 88 原料投入量

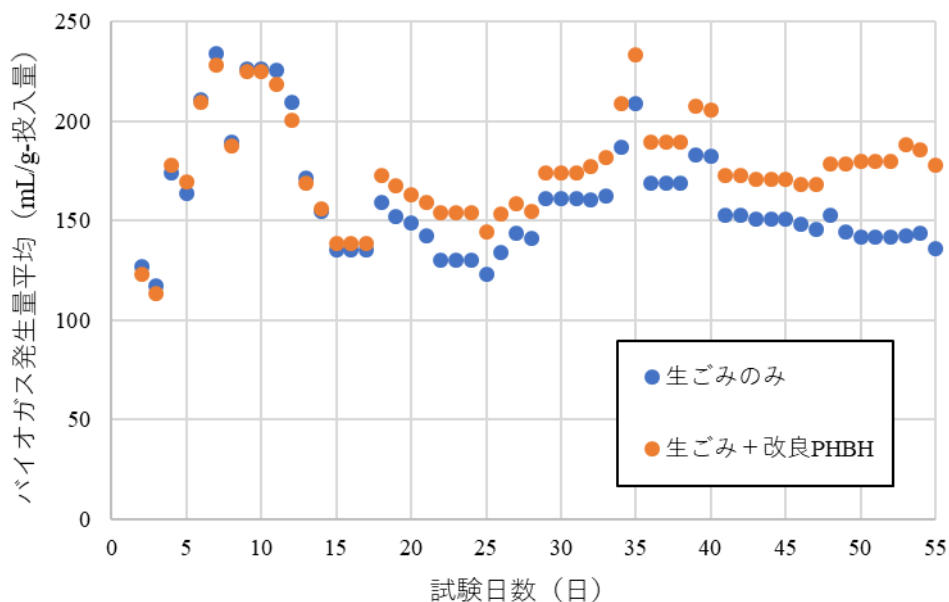


図 89 連続試験のバイオガス発生量

（４）まとめと課題

各種 PHBH フィルム及び PHBH 製のカトラリー類（ストロー、スプーン）についてバイオガス化試験を行い、生分解性の評価を行った。その結果下記のことが分かった。

- ・ PHBH コンパウンドフィルムは種類に応じて、PHBH 単独フィルムと比べると生分解率が低下した。
- ・ 改良 PHBH フィルムは、従来 PHBH フィルムと比べると生分解率が高いことが確認できた。
- ・ PHBH 製カトラリー類については、22 日目の生分解率がストローは 79%、スプーンは 43%となった。

また、PHBH フィルムを用いてバイオガス化連続試験を行った結果、バイオガス発生量が低下することなく分解することを確認した。

連続試験結果を踏まえ、次年度はメタン発酵実機化に向けて、ベンチスケール試験設備でのスケールアップ性の確認に取り組む。

3.3.2 PHBH を含む分解消化液の栽培影響評価

(1) 目的

PHBH を原料に含むメタン発酵消化液が植物の生長へ与える影響を確認することを目的とする。特に、バイオガス化において PHBH が完全に分解せず、消化液中に PHBH の分解残渣が残る場合についても影響の確認を行うこととする。

(2) 方法

1) 試験概要

試験は①バイオガス化（消化液試料調製）、②消化液の成分分析、③栽培試験の3パートで構成される（次図）。

バイオガス化（消化液試料調製）では、PHBH あり・なしの消化液試料を調製した。特に、PHBH の分解生成物の影響を確認するために、PHBH ありの系列については完全分解後の消化液試料に加えて、分解途中の消化液試料も調製した。

成分分析では、消化液中の上澄み液、沈殿物、未分解ポリマーの分析を行った。

栽培試験では、消化液を肥料として用いてコマツナ栽培の影響評価試験を行い、発芽、生長への影響を確認した。

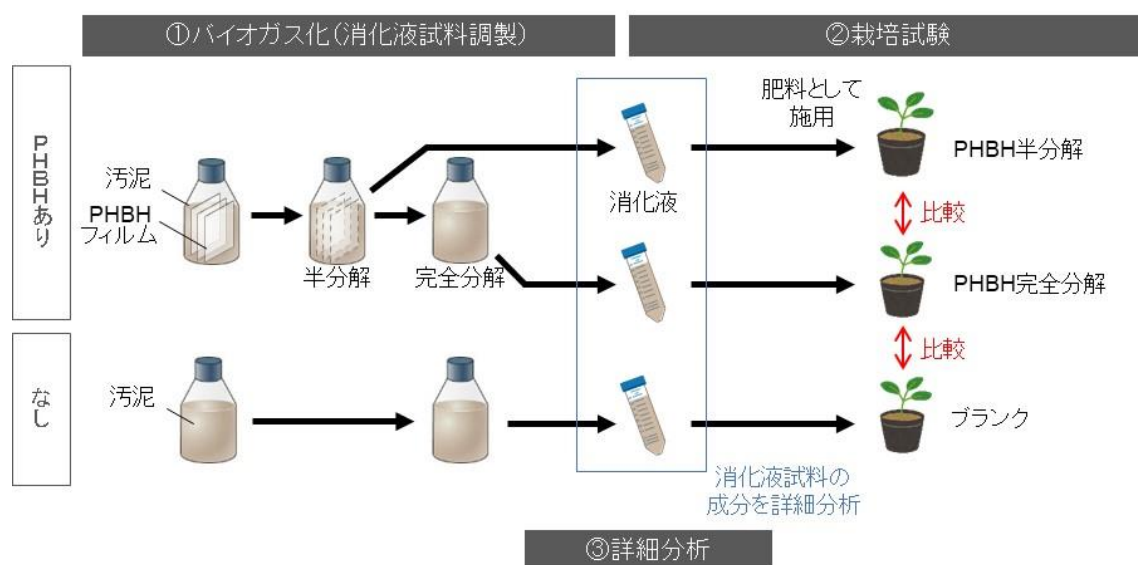


図 90 PHBH を含む消化液の栽培影響評価試験の概要

2) バイオガス化（消化液試料の調製）

次表に示す3つのメタン発酵消化液試料を作成するためにバイオガス化試験を実施した。

表 57 メタン発酵消化液試料

試料名	模擬生ごみ	PHBH 添加	PHBH の分解停止のタイミング
ブランク	あり	なし	—
半分解	あり	あり	半分解
完全分解	あり	あり	完全分解

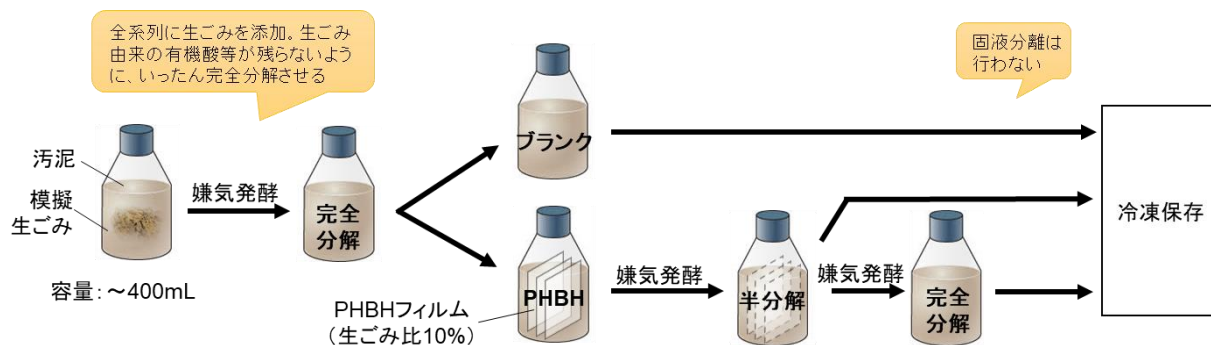


図 91 PHBH を含む消化液試料の調製手順概要

2 L 容量の反応容器 (図 84) に、1.5 kg の中温汚泥を投入し、38℃の恒温槽内に静置してメタン発酵を行った。模擬生ごみ (表 56、図 85) を 30 g 投入して混合した。ガス発生を確認し、10 日後に 2 cm 角の従来 PHBH フィルム 10 g を添加した。半分解のサンプルは PHBH フィルム添加から 5 日後にサンプリングした。ブランクサンプルも同様に模擬生ごみ添加 15 日後にサンプリングした。完全分解サンプルは PHBH フィルム添加後 25 日後にサンプリングした。サンプルは-20℃にて冷凍保存した。

3) 栽培試験

PHBH 嫌気発酵消化液を用いた栽培試験においては、畑地土壌を充填した 1 L 容ポットでコマツナを栽培した。日立造船より冷凍試料として送付された PHBH 嫌気発酵消化液を解凍し、含有されるアンモニア態窒素量によって施用量を決定した (次図)。

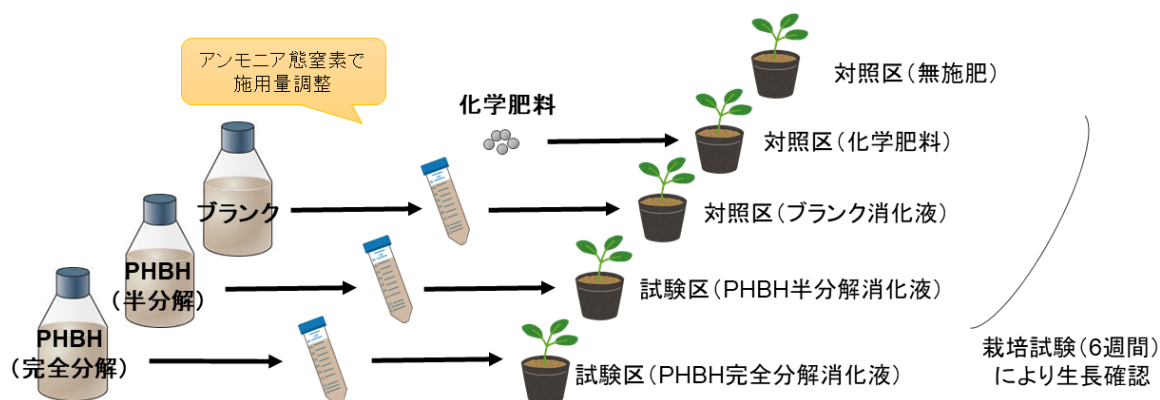


図 92 PHBH を含む消化液試料を用いた栽培試験の概要

栽培試験は 1 L ポット (下穴あり) に 800 g の畑地土壌を充填した。この畑地土壌は花崗岩の風化物を母材とする森林土壌である。別途実施した土壌分析から、この土壌 800 g には有効態リン酸 96 mg と置換性加里 296 mg が含まれていた。また土壌 800 g は 128 g の水分を含んだ状態でポットに充填した。日立造船より提供された 3 種類の消化液、PHBH 完全分解、PHBH 半分解、PHBH なし、にはそれぞれ 1,200 mg/L、1,400 mg/L、1,300 mg/L のアンモニア態窒素が含まれているので、一つのポットあたりのアンモニア態窒素添加量が 50 mg、100 mg となるような消化液量と土壌を混和した。実

際の圃場では地表から消化液を施用して直ちに土壌と消化液を混和するが、ポット栽培の場合には消化液と土壌の混和が簡単ではなく、多くの場合地表に滞留してアンモニアの揮散、土壌の目詰まりを起こすため、ポットに混和する土壌と消化液、添加肥料をポリ袋（ジップロック）内で予め混和した（次図）。窒素あり対照区としてアンモニア態窒素が 50、100、150 mg となるように硫酸アンモニウムを与えた。リン酸と加里は土壌にも含まれているが、消化液から持ち込まれるこれらの量が生育試験に影響しないように、各ポットにリン酸として 74 mg、加里として 100 mg をリン酸一水素二カリウムとして添加した。



図 93 消化液と土壌の混合

表 58 栽培試験の試験系列

系列 No.	系列名	アンモニア態窒素含有量 (mg)	硫酸アンモニウム含有量 (mg)	リン酸水素二カリウム含有量 (mg)
1	無施肥	-	-	183
2	消化液：	50	-	183
3	PHBH 完全分解	100	-	183
4	消化液：	50	-	183
5	PHBH 半分解	100	-	183
6	消化液：	50	-	183
7	PHBH なし	100	-	183
8	無機肥料	50	250	183
9		100	500	183
10		150	750	183

※各系列の繰返し数は 3 とした。

4) 消化液試料の分析

栽培試験に使用した①PHBH 完全分解、②PHBH 半分解、③ブランクについて、ICP（Inductivity coupled plasma）による約 72 元素定性分析を行った。

試料調製方法

- ・メタン発酵残渣（上澄み液）： 試料をろ紙 5A にてろ過し、ろ液を「上澄み液」とした。
- ・メタン発酵残渣（沈殿物）： ろ紙上の残渣を風乾し「沈殿物」とした。

測定分析方法

- ・メタン発酵残渣（上澄み液）： 酸分解-ICP 質量分析法及び ICP 発光分光分析法
- ・メタン発酵残渣（沈殿物）： 灰化法-ICP 質量分析法及び ICP 発光分光分析法
アルカリ融解法-ICP 発光分光分析法(Si)

測定分析装置

- ・ ICP 質量分析装置：7700x（アジレント・テクノロジー）
- ・ ICP 発光分析装置：ICPS-8100（島津製作所）

（３）結果

1) バイオガス化（消化液試料の調製）

バイオガス化試験の生分解率を次図に示す。次表にサンプリングしたサンプルのアンモニア態窒素分析結果を示す。

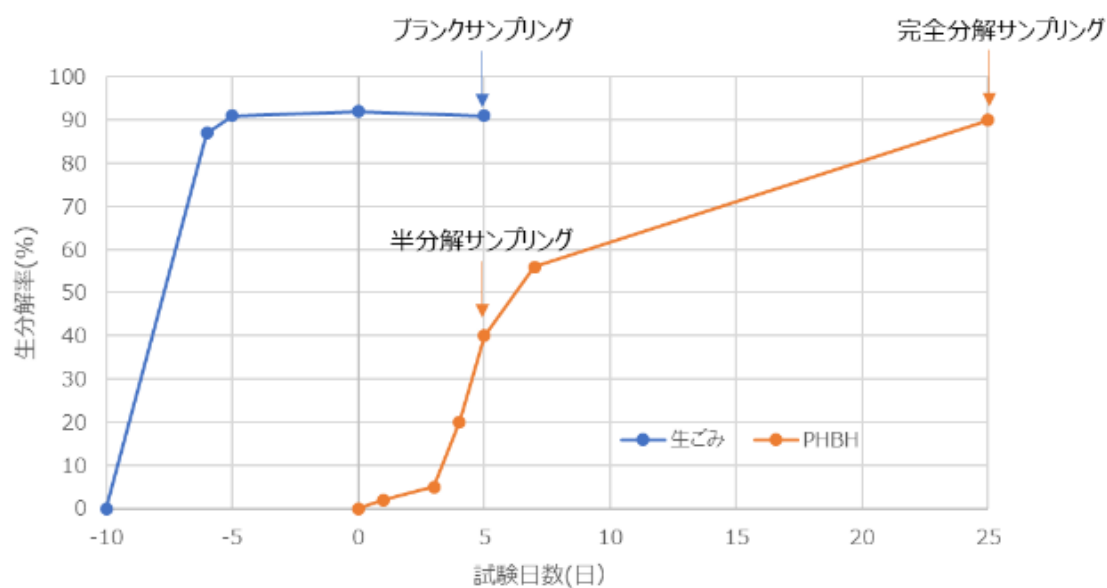
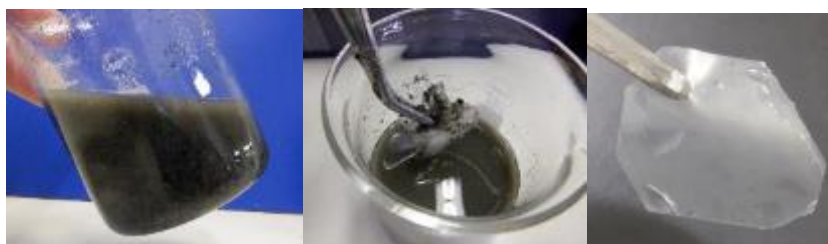


図 94 バイオガス化試験結果（PHBH 添加時を 0 日目とした）

表 59 アンモニア態窒素分析結果

	アンモニア態窒素(mg/L)
ブランク	1,300
半分解	1,400
完全分解	1,200

次図にサンプル写真を示す。



（左：消化液全体、中・右：半分解 PHBH フィルムサンプル）

図 95 調製した PHBH 半分解消化液試料

2) 栽培試験

令和3年1月15日に各ポット6個の種子を播種し4週齢で各ポット3個体に間引いた。栽培時の最低気温が10℃を下回らないようビニルハウスにて栽培し、6週間後の2月25日に収穫した。

下図に、栽培試験準備の様子、2月21日の生育の様子を示した。アンモニア態窒素施肥量に応じた生育が見られ、PHBHによる生育阻害は見かけの生育の様子や外観からは判別できなかった。今後、収穫したコマツナの乾物重、窒素吸収量を測定する予定である。



図 96 栽培試験の結果

(縦の3ポットは繰り返し。写真4の括弧内はアンモニア態窒素の施用量)

3) 消化液試料の分析

消化液の上澄み液、沈殿物のICPによる72元素の分析結果は、それぞれ次表より示すとおり。

結果としては、上澄み液及び沈殿物のいずれも、3試料（PHBH完全分解、PHBH半分解、ブランク）がほぼ同様な結果であり、PHBHフィルムの添加による影響は見られないと言える。

表 60 消化液（上澄み液）の ICP 測定分析結果

元素	①完全分解	②半分解	③ブランク	下限値 (mg/L)
	推定含有量 (mg/L)	推定含有量 (mg/L)	推定含有量 (mg/L)	
Li	N.D.	N.D.	N.D.	2
Be	N.D.	N.D.	N.D.	1
B	N.D.	N.D.	N.D.	2
Na	500	500	500	100
Mg	5	10	8	0.2
Al	0.7	N.D.	N.D.	0.5
Si	3	4	3	1
P	80	100	90	2
S	-	-	-	-
K	90	100	100	20
Ca	30	40	30	10
Sc	N.D.	N.D.	N.D.	0.1
Ti	0.04	0.03	0.04	0.02
V	N.D.	N.D.	N.D.	0.01
Cr	0.02	0.02	0.02	0.01
Mn	0.05	0.09	0.09	0.01
Fe	4	5	3	0.01
Co	0.1	0.1	0.1	0.01
Ni	1	1	1	0.01
Cu	N.D.	N.D.	N.D.	0.05
Zn	0.4	0.4	0.3	0.05
Ga	N.D.	N.D.	N.D.	0.02
Ge	N.D.	N.D.	N.D.	0.05
As	N.D.	N.D.	N.D.	0.05
Se	N.D.	N.D.	N.D.	0.5
Br	-	-	-	-
Rb	0.08	0.09	0.07	0.02
Sr	0.2	0.2	0.2	0.01
Y	N.D.	N.D.	N.D.	0.01
Zr	N.D.	N.D.	N.D.	0.01
Nb	N.D.	N.D.	N.D.	0.01
Mo	0.2	0.1	0.07	0.01
Ru	N.D.	N.D.	N.D.	0.01
Rh	N.D.	N.D.	N.D.	0.01
Pd	N.D.	N.D.	N.D.	0.01
Ag	N.D.	N.D.	N.D.	0.01
Cd	N.D.	N.D.	N.D.	0.01
In	N.D.	N.D.	N.D.	0.01
Sn	N.D.	N.D.	N.D.	0.01
Sb	N.D.	N.D.	N.D.	0.01
Te	N.D.	N.D.	N.D.	0.2
I	-	-	-	-
Cs	N.D.	N.D.	N.D.	0.01
Ba	0.05	0.05	0.03	0.02
La	N.D.	N.D.	N.D.	0.005
Ce	N.D.	N.D.	N.D.	0.005
Pr	N.D.	N.D.	N.D.	0.001
Nd	N.D.	N.D.	N.D.	0.005
Sm	N.D.	N.D.	N.D.	0.005
Eu	N.D.	N.D.	N.D.	0.001
Gd	N.D.	N.D.	N.D.	0.005
Tb	N.D.	N.D.	N.D.	0.001
Dy	N.D.	N.D.	N.D.	0.001
Ho	N.D.	N.D.	N.D.	0.001
Er	N.D.	N.D.	N.D.	0.001
Tm	N.D.	N.D.	N.D.	0.001
Yb	N.D.	N.D.	N.D.	0.001
Lu	N.D.	N.D.	N.D.	0.001
Hf	N.D.	N.D.	N.D.	0.01
Ta	N.D.	N.D.	N.D.	0.01
W	0.07	0.03	0.05	0.01
Re	N.D.	N.D.	N.D.	0.01
Os	N.D.	N.D.	N.D.	0.01

Ir	N.D.	N.D.	N.D.	0.01
Pt	N.D.	N.D.	N.D.	0.01
Au	N.D.	N.D.	N.D.	0.05
Hg	-	-	-	-
Tl	N.D.	N.D.	N.D.	0.05
Pb	N.D.	N.D.	N.D.	0.01
Bi	N.D.	N.D.	N.D.	0.01
Th	N.D.	N.D.	N.D.	0.001
U	N.D.	N.D.	N.D.	0.01

- N.D.は下限値未満を示す。
- S, Br, I, Hg は加熱分解操作による揮発等で低値になるため測定せず。
- 推定含有量は定量値とは異なることに注意。

表 61 消化液（沈殿物）の ICP 測定分析結果

元素	①完全分解	②半分解	③ブランク	下限値 (mg/kg)
	推定含有量 (mg/kg)	推定含有量 (mg/kg)	推定含有量 (mg/kg)	
Li	N.D.	N.D.	N.D.	50
Be	N.D.	N.D.	N.D.	20
B	N.D.	N.D.	N.D.	50
Na	3000	3000	3000	100
Mg	1000	2000	2000	10
Al	2000	2000	1000	10
Si	2000	2000	2000	200
P	4000	4000	4000	200
S	-	-	-	-
K	600	500	600	200
Ca	2000	2000	2000	100
Sc	N.D.	N.D.	N.D.	10
Ti	50	50	50	2
V	6	8	8	1
Cr	20	20	20	1
Mn	40	40	40	1
Fe	10000	20000	20000	1
Co	6	6	7	1
Ni	30	30	30	1
Cu	100	90	90	5
Zn	2000	2000	2000	5
Ga	6	7	7	2
Ge	N.D.	N.D.	N.D.	5
As	10	20	20	5
Se	N.D.	N.D.	N.D.	50
Br	-	-	-	-
Rb	N.D.	N.D.	N.D.	2
Sr	20	20	20	1
Y	N.D.	N.D.	N.D.	1
Zr	4	6	5	1
Nb	N.D.	N.D.	N.D.	1
Mo	40	50	50	1
Ru	N.D.	N.D.	N.D.	1
Rh	N.D.	N.D.	N.D.	1
Pd	N.D.	N.D.	N.D.	1
Ag	N.D.	N.D.	N.D.	1
Cd	N.D.	N.D.	N.D.	1
In	1	2	2	1
Sn	3	4	3	1
Sb	10	10	10	1
Te	N.D.	N.D.	N.D.	20
I	-	-	-	-
Cs	N.D.	N.D.	N.D.	1
Ba	30	30	30	2
La	1	0.8	0.6	0.5
Ce	2	1	1	0.5

Pr	N.D.	N.D.	N.D.	0.1
Nd	N.D.	N.D.	N.D.	0.5
Sm	N.D.	N.D.	N.D.	0.5
Eu	N.D.	N.D.	N.D.	0.1
Gd	N.D.	N.D.	N.D.	0.5
Tb	N.D.	N.D.	N.D.	0.1
Dy	N.D.	N.D.	N.D.	0.1
Ho	N.D.	N.D.	N.D.	0.1
Er	N.D.	N.D.	N.D.	0.1
Tm	N.D.	N.D.	N.D.	0.1
Yb	N.D.	N.D.	N.D.	0.1
Lu	N.D.	N.D.	N.D.	0.1
Hf	N.D.	N.D.	N.D.	1
Ta	N.D.	N.D.	N.D.	1
W	4	4	4	1
Re	N.D.	N.D.	N.D.	1
Os	N.D.	N.D.	N.D.	1
Ir	N.D.	N.D.	N.D.	1
Pt	N.D.	N.D.	N.D.	1
Au	N.D.	N.D.	N.D.	5
Hg	-	-	-	-
Tl	N.D.	N.D.	N.D.	5
Pb	6	7	7	1
Bi	N.D.	N.D.	N.D.	1
Th	N.D.	N.D.	N.D.	0.2
U	N.D.	N.D.	N.D.	1

- ・ N.D.は下限値未満を示す。
- ・ S,Br, I, Hg は加熱分解操作による揮発等で低値になるため測定せず。
- ・ 推定含有量は定量値とは異なることに注意。

なお、汚泥肥料には、有害成分として重金属（ひ素、カドミウム、水銀、ニッケル、クロム、鉛）の許容値が定められている（次表）。今回分析した ICP 測定分析による推定含有量は定量値ではないため単純な比較を行えないが、消化液を肥料として利用するためには、今後、これら重金属の濃度を定量し基準値を下回ることを確認していく必要がある。

表 62 汚泥肥料に含有を許される有害成分の最大量

有害成分	許容含有量 (mg/kg)
As (ひ素)	50
Cd (カドミウム)	5
Hg (水銀)	2
Ni (ニッケル)	300
Cr (クロム)	500
Pb (鉛)	100

（出典）農林水産省「汚泥肥料中の重金属管理手引書」，

https://www.maff.go.jp/j/syouan/nouan/kome/k_hiryo/pdf/kouhyou1.pdf

（４）まとめと課題

原料に PHBH を含む消化液を調製し、コマツナの栽培試験が植物の生長へ与える影響を検証したところ、見かけの生育の様子や外観からは PHBH による生育阻害効果は認められなかった。

また消化液の ICP 測定分析を行い、約 72 元素の定性分析を行ったところ、PHBH 有無による差はみられなかった。

3.4 PHBH 製生ごみ袋を用いた生ごみの分別方法等に関する検討

3.4.1 目的

PHBH 製生ごみ袋を用いた生ごみバイオガス化モデルを確立するために、PHBH 製生ごみ袋を用いた生ごみの分別収集システムに関する検討を行う。また、生ごみ袋の実用性の検証及び改良に向けたフィードバックを得ることを目的に、PHBH 製生ごみ袋（試作品）を用いて生ごみの分別排出・回収試験を実施する。

本年度は、市民や事業者から排出される生ごみだけでなく、紙ごみも視野に入れた上で、PHBH 製生ごみ袋を用いた生ごみの分別方法に関する予備的な検討を行う。また、PHBH 製生ごみ袋（試作品）を用いて生ごみの分別排出・回収試験に向けた検討を行う。

3.4.2 方法

バイオガス化に求められる生ごみ分別の方策を既往文献等により整理するとともに、生ごみの分別システムの方向性について予備的検討を行った。また、生ごみ分別排出・回収試験について、試験方法の企画・立案を行った。

3.4.3 結果

生ごみ分別システムの検討を行うにあたり、バイオガス化処理方式と消化液・発酵残渣の利用状況について条件整理を行った。

（１）バイオガス化処理方式の概要

バイオガス化処理方式は、次表に示すように、大きくは湿式と乾式に分類され、湿式においてはさらに中温発酵（約 35℃）と高温発酵（約 55℃）に分類される。

湿式処理においては、対象物が生ごみ、汚泥、家畜ふん尿などに限られるのに対して、乾式処理においては、紙、植物（剪定枝）などが対象物に加わる。そのため、搬入前の分別収集においては、湿式では、一般的に異物除去のための選別装置を設置することが多く、分別収集時の異物混入条件が厳しいことから、発酵不適物（分別収集時に混入した金属類などの異物など）の選別除去に用いられる。令和元年度に行った事例調査のうち、大木町、みやま市は湿式を採用しているが、生ごみは、収集袋を使わずバケツで分別収集をしていることから、機械選別装置は設置せず、手選別により金属などの異物除去を行うようにしている。また、長岡市、豊橋市でも湿式を採用しているが、生ごみは、生ごみ専用の収集袋により分別収集をしており、施設の選別装置で収集袋の破袋・選別・除去を行っている。

一方、乾式では、発酵対象物の条件が湿式に比べて寛容であることから、一般可燃物と概ね同等の条件で分別収集されることが多く、メタン発酵槽の前に破碎・選別装置を設置し、前処理（プラスチック類選別除去等）を行っている。京都市では、乾式を採用しているが、生ごみや紙ごみを含む可燃ごみを処理対象物とし、前処理選別によって、プラスチック類などの発酵不適物を選別除去した後、発酵処理を行っている。

表 63 バイオガス化処理方式の比較

項目	湿式		乾式
	中温（約 35℃）	高温（約 55℃）	高温（約 55℃）
固形分濃度	10%程度	10%程度	15～40%程度
発酵物	生ごみ（その他、家畜ふん尿、下水汚泥、し尿処理汚泥等の対象）	生ごみ（その他、家畜ふん尿、下水汚泥、し尿処理汚泥等の対象）	生ごみ、紙、植物（剪定枝）（その他、家畜ふん尿、下水汚泥、し尿処理汚泥等の対象）
分別収集機械選別	異物の混入の条件が厳しいため、可燃物の機械選別の採用が難しく、分別収集が原則となる。ただし、異物除去のための選別装置を設置することが一般的である。	異物の混入の条件が厳しいため、可燃物の機械選別の採用が難しく、分別収集が原則となる。ただし、異物除去のための選別装置を設置することが一般的である。	可燃物の機械選別により、発酵不適物の選別除去を行うが、異物の混入条件がゆるいため、発酵装置への影響は少ない。
発酵速度	増殖速度が遅く、発酵期間 20～25 日程度	増殖速度が速く発酵期間 10～15 日程度	増殖速度が速く発酵期間 10～15 日程度
アンモニア阻害	アンモニア阻害に対する安定性が高い	アンモニア阻害に対する対策が必要	アンモニア阻害に対する対策が必要
希釈水・排水量	希釈水量が多い傾向にあり、排水量は多くなる。		希釈水量は少なく、排水量は少なくなる。
残渣処理残渣利用	・ 発酵対象を生ごみ（食品廃棄物）、汚泥等に限定し、分別収集することで液肥としての利用が可能になる。 ・ 液肥として全量利用できれば排水処理、固形物処理設備を軽減できる。 ・ 発酵残渣の脱水後の堆肥としての利用も可能 ・ 液肥利用が出来ない場合は、排水処理が必要となる。		・ 可燃物を収集し、機械選別する場合は、発酵残渣を脱水し、脱水固形物は発酵不適物とともに焼却処理を行う。脱水ろ液は液肥として利用することは可能 ・ 分別収集をすることで発酵残渣を液肥、堆肥として利用することは可能 ・ 一般的に希釈水量が少なく、排水処理量は少ない。

出典：「廃棄物系バイオマス利活用導入マニュアル」環境省大臣官房廃棄物リサイクル対策部 廃棄物対策課 平成 29 年 3 月を加工

（２）バイオガス化施設からの発酵残渣（消化液）利用状況

バイオガス化施設からの発酵残渣・消化液の利用事例は、次表に示すとおりで、生ごみを対象とした国内のバイオガス化施設の事例では、湿式処理が多いが、発酵残渣（消化液）を液肥・肥料として利用している例は少なく、排水処理後下水・河川などへ放流し、脱水後の固形残渣は、土壤改良材、焼却処理としている事例が多い。乾式処理の発酵残渣は、実証施設で固形燃料化を行い利用している事例はあるが、発酵残渣は、前処理選別による発酵不適物と合わせて焼却処理を行っている事例が多い。

表 64 バイオガス化施設からの発酵残渣・消化液利用事例

施設名	処理能力	処理方式	処理対象物	前処理残渣	発酵残渣	排水	備考
北空知衛生センター	16 t/日	湿式高温	生ごみ	焼却・埋立	脱水後焼却	処理後下水放流	
リサイクリーン	55 t/日	湿式中温	生ごみ	焼却・埋立	堆肥化	処理後河川放流	
クリーンプラザくるくる	22 t/日	湿式高温	生ごみ	焼却	土壌改良材利用	処理後下水放流	
城南島食品リサイクル施設	130 t/日	湿式中温	生ごみ、動植物性残渣、汚泥・廃アルカリ・廃油	焼却・溶融後路盤材利用	焼却・溶融後路盤材利用	処理後下水放流	
三浦バイオマスセンター	20.5 t/日	湿式中温	し尿・浄化槽汚泥、農作物残渣、水産残渣、下水道汚泥	焼却・埋立	堆肥化	処理後海域放流	
みやまバイオマスセンタールフラン	130 t/日	湿式中温	生ごみ、し尿、浄化槽汚泥、食品工場汚泥	異物選別処分	液肥として利用	処理後再利用、余剰分のみ水路放流	排水処理はし尿浄化槽汚泥の汚泥濃縮後排水のみ対象
穂高クリーンセンター	7 t/日	乾式高温	生ごみ	鉄類選別	固形燃料化	乾燥時の排水をし尿処理施設で処理	実証施設
京都市南部クリーンセンター第二工場	60 t/日	乾式高温	可燃ごみ	焼却	焼却	処理後下水放流	焼却施設併設

出典：財団法人廃棄物研究財団メタン発酵研究会、自治体パンフレット等

（３）バイオガス化施設の発酵残渣（消化液）の性状

バイオガス化施設からの発酵残渣（消化液）の性状を既往文献等により以下にまとめた。

1) 湿式処理

湿式処理の消化液の性状は次表に示すとおりで、液肥利用を前提とするならば、水分の高い原料を避けることや洗浄水の混入を避けることが望ましいとされており、洗浄水が少ない家畜排せつ物や窒素成分の高い生ごみが主原料だと、全窒素が3,000 mg/L程度と比較的高濃度の消化液が得られ、液肥利用に有利とされている。

生ごみを原料とする堆肥では、塩分や油分の含有率が問題となる場合がある。一方、生ごみを原料とした消化液については、作物の生育に影響を及ぼさない塩分（NaCl）の上限値は、ナトリウム濃度が消化液施用量3 t/10 a の場合 6,600 mg/L、5 t/10 a の場合 3,900 mg/L であり、通常消化液のナトリウム濃度はこの上限値を大きく下回っており、液肥利用に支障がないとされている。油分（粗脂肪）についても、いずれも低濃度であり、液肥利用に支障がないレベルとされている。

表 65 バイオガス化施設からの消化液の性状（湿式処理）

項目	単位	施設 A	施設 B	施設 C	施設 D	施設 E	施設 F
		乳牛ふん尿	乳牛ふん尿	豚ふん尿 (洗浄水含む)	生ごみ	食品加工残渣・ 生ごみ	野菜加工残渣・ 乳牛ふん尿
水分	%	93.9	95.9	98.3	98.2	97.4	97.5
pH		8.03	7.66	7.79	8.04	8.08	7.48
EC	S/m	1.97	1.96	0.82	2.05	1.49	1.43
C/N 比		5.2	2.9	2.8	1.8	2.4	4.5
全炭素	mg/L	17,000	9,790	3,620	4,930	3,900	8,180
全窒素(N)	mg/L	3,270	3,390	1,290	2,710	1,640	1,820
アンモニア態窒素(NH ₄ -N)	mg/L	1,480	1,740	731	1,550	961	798
亜硝酸態窒素(NO ₂ -N)	mg/L	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3
硝酸態窒素(NO ₃ -N)	mg/L	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3
リン酸(P ₂ O ₅)	mg/L	2,175	1,228	612	733	545	926
カリ(K ₂ O)	mg/L	3,542	3,867	590	1,433	2,289	3,096
苦土(MgO)	mg/L	-	1,096	-	13	71	-
石灰(CaO)	mg/L	-	2,239	-	57	34	-
ナトリウム	mg/L	-	850	-	1,480	1,120	-
塩化物イオン	mg/L	1,100	1,390	307	1,520	1,030	786
粗脂肪(油分)	mg/L	-	-	-	17.8	26.2	24.6
SS	mg/L	33,900	26,700	9,630	10,500	15,900	14,900
VSS	mg/L	22,300	17,900	7,510	6,340	10,600	11,000
TS	mg/L	61,200	41,300	17,200	17,800	26,200	24,600
VS	mg/L	40,500	24,200	11,600	8,730	14,800	14,300
CODMn	mg/L	17,800	14,100	3,290	4,200	8,010	7,880
CODCr	mg/L	-	-	-	12,900	18,000	-
BOD	mg/L	2,710	2,320	1,150	1,890	2,430	1,640
TOC	mg/L	6,250	6,220	738	406	1,860	3,840

出典：「メタン発酵消化液の濃縮・改質による野菜栽培利用マニュアル」財団法人 畜産環境整備機構 平成 25 年 2 月

2) 乾式処理

乾式処理後の発酵残渣は、脱水後の固形残渣としての性状事例を次表に示した。

本事例での処理対象物は、ホテル厨芥（ホテルからの残飯）、市場ごみ（きずもの果物、野菜等、段ボール）、紙類（新聞古紙）、草木類（剪定枝、草等）で、スクリーンプレス後の脱水残渣は、脱水後の発酵残渣性状、遠心濃縮機後の遠心ケーキは、脱水後発酵残渣に通気し、コンポスト化に近い処理を行った後の性状として示されている。

プラントから発生する残渣に 1 週間の通気を行った結果では、メタン発酵により有機物がバイオガスとして回収されているため、コンポスト化のような温度上昇はほとんどなかったとされており、また、重金属の全量試験、溶出試験は基準を満足していたが、堆肥として利用するにあたっては、不適物の混入を防止するために、分別収集の徹底が必要であるとされている。

表 66 バイオガス化施設からの発酵残渣（固形残渣）の性状（乾式処理その 1）

		固形物濃度 [%]	有機物濃度 [%-TS]	TOC [%-wet]	T-N [%-wet]	全量試験		
						T-Hg	Cd	As
						[mg/kg-wet]		
脱水残さ (スクリュウ プレス後)	最小	25.5	77.6	10.6	0.398	0.03	0.03	0.32
	最大	38.9	88.7	18.0	0.719	0.1	2.8	0.91
	平均	32.5	85.0	12.7	0.523	－	－	－
	標準偏差	3.0	1.8	1.5	0.059	－	－	－
遠心ケーキ (遠心濃 縮機後)	最小	13.2	67.7	5.3	0.424	<0.05	0.06	<0.31
	最大	31.9	82.6	13.3	0.725	0.15	0.93	1.4
	平均	22.3	75.6	9.22	0.624	－	－	－
	標準偏差	4.6	3.3	2.0	0.078	－	－	－
基準※		－	－	－	－	<2	<5	<50

※全量試験の基準：肥料取締法「普通肥料の公定規格」のうち汚泥肥料等の含有を許される有害成分の最大量

出典：「京都バイオガス化技術実証研究プラント実証試験報告書」バイオガス研究会 平成 15 年 10 月

表 67 バイオガス化施設からの発酵残渣（固形残渣）の性状（乾式処理その 2）

項目		単位	サンプル 1	サンプル 2	基準
含水率		%	56.6	57.4	—
有機物濃度		%-TS	88.0	87.7	—
電気伝導度		mS/cm	1.71	1.94	—
C/N 比		—	18.9	19.5	20※1
窒素濃度		g-N/kg-dry	24.4	25.6	—
リン		g-P ₂ O ₅ /kg-dry	7.44	8.98	—
カリウム		g-K ₂ O/kg-dry	4.94	4.61	—
全量試験 ※2	ヒ素	mg/kg-dry	0.69	0.87	<50
	カドミウム	mg/kg-dry	0.83	0.89	<5
	水銀	mg/kg-dry	0.058	0.052	<2
溶出試験 ※3	ヒ素	mg/L	<0.005	<0.005	<1.5
	カドミウム	mg/L	<0.005	<0.005	<0.3
	水銀	mg/L	<0.005	<0.005	<0.005
	鉛	mg/L	<0.005	<0.005	<3
	有機リン	mg/L	<0.01	<0.01	<1
	六価クロム	mg/L	<0.02	<0.02	<1.5
	シアン	mg/L	<0.1	<0.1	<1
	PCB	mg/L	<0.0005	<0.0005	<0.03

※1 C/N 比の基準：「ごみ処理施設性能指針」(環境省)による

※2 全量試験の基準：肥料取締法「普通肥料の公定規格」のうち汚泥肥料等の含有を許される有害成分の最大量

※3 溶出試験の基準：肥料取締法「普通肥料の公定規格」のうち汚泥肥料等の原料に関する制限事項

出典：「京都バイオガス化技術実証研究プラント実証試験報告書」バイオガス研究会 平成 15 年 10 月

前述と異なる乾式処理方式の発酵残渣の肥料成分分析事例は、次表のとおりで、本事例での処理対象物は、生ごみと紙ごみで、発酵残渣は固形残渣のみで、加温乾燥により含水率 42.7%とした場合の性状を示している。

発酵残渣の乾燥品中には、窒素、リン、カリウムの肥料 3 成分をいずれも含んでおり、参考として示したきゅう肥（牛ふん尿）に近い成分量であると思われる。

表 68 バイオガス化施設からの発酵残渣（固形残渣）の肥料成分（乾式処理その２）

項目		窒素	リン	カリウム	備考
乾式メタン発酵残渣乾燥品		0.9%	0.9%	0.4%	含水率 42.7%
参考	きゅう肥(牛ふん尿)	0.7%	0.7%	0.7%	有機廃棄物資源課大辞典 (農文協) より
	きゅう肥(豚ふん尿)	1.4%	2.0%	1.1%	

出典：「バイオマスエネルギー地域システム化実験事業」先進型高効率乾式メタン発酵システム実験事業 エネルギー転換・利用技術 乾式メタン発酵装置の運転結果について 平成 20 年 9 月 19 日 栗田工業株式会社

また、同事例では、肥料としての評価試験も実施しており、コマツナをプランターで栽培し、無施肥、化成肥料施肥、メタン発酵残渣乾燥品施肥の 3 ケースで、施肥を行うケースは施肥量をそれぞれ変えて 3 パターンずつ試験を行っている。

その結果は次図のとおりで、メタン発酵残渣乾燥品の施肥量を 12 g-N/m とした場合の収穫量（地上部、湿重量）は、化成肥料の施肥量を 16 g-N/m とした場合と同等程度の成果が現れている。



図 97 メタン発酵残渣乾燥品による栽培実験状況

出典：「バイオマスエネルギー地域システム化実験事業」先進型高効率乾式メタン発酵システム実験事業 エネルギー転換・利用技術 乾式メタン発酵装置の運転結果について 平成 20 年 9 月 19 日 栗田工業株式会社

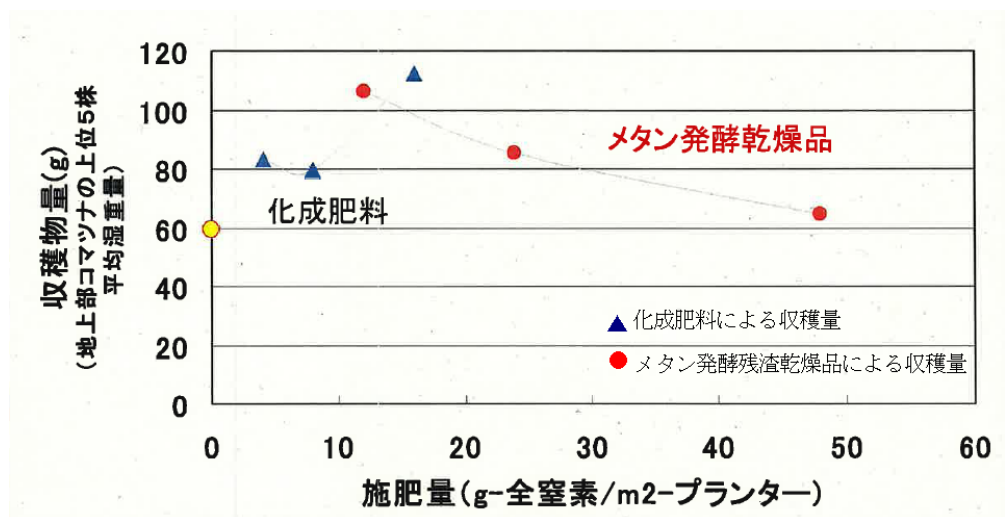


図 98 メタン発酵残渣乾燥品による栽培実験収穫物量

出典：「バイオマスエネルギー地域システム化実験事業」先進型高効率乾式メタン発酵システム実験事業 エネルギー転換・利用技術 乾式メタン発酵装置の運転結果について 平成 20 年 9 月 19 日 栗田工業株式会社

3.4.4 まとめと課題

(1) バイオガス化施設の処理方式と分別方式の検討

バイオガス化施設の処理方式は、湿式と乾式に大別され、湿式では生ごみを、乾式では生ごみと紙ごみを処理対象物としている。

事例調査の結果では、何れの処理方式も発酵残渣（消化液）の肥料価値は高いと判断できるため、バイオガス化処理方式を生ごみのみを対象とした湿式処理方式だけでなく、紙ごみも併せて処理する乾式処理方式についても検討を行う必要がある。

それぞれの処理方式による分別タイプとその評価・課題を次に整理した。

湿式処理の場合は対象物を生ごみに限定できるため、中小規模自治体での住民協力が比較的得られやすい生ごみ袋での分別収集方法が有効であると考えられるが、従来素材の生ごみ袋の場合、メタン発酵槽、消化液へのプラスチック素材の混入の可能性が考えられることから消化液の液肥利用時の市場価値の低下やマイクロプラスチックの系外排出などの課題が考えられる。一方、生ごみ袋の素材を本事業で実証を進めている PHBH 製に代替した場合、PHBH 製生ごみ袋のメタン発酵槽での分解性が担保されれば、従来素材で挙げられた消化液の液肥利用時の市場価値の低下やマイクロプラスチックの系外排出などの課題が払拭されるものと考えられる。

乾式処理の場合は、対象物を生ごみに紙ごみを加えることになるが、生ごみと紙ごみを合わせた分別を行う場合には分別条件が多くなり、住民協力が得られにくくなる可能性が考えられる。また、乾式処理時の生ごみと紙ごみの混合比率を調整することができないため、バイオガス発生量の変動が大きくなる可能性があり、バイオガス利用の観点から課題が生じる可能性がある。

発酵残渣（消化液）利用の観点からの評価は、湿式処理の場合と概ね同等で、袋収集を行う場合の従来素材を PHBH 素材に代替した場合に得られる効果も概ね同等であると考えられるが、生ごみと紙ごみを同一の PHBH 製ごみ袋で混合排出する場合の PHBH 素材強度については、さらに検討が必要である。

表 69 バイオガス化施設の処理方式と分別方式の検討結果

処理方式	対象物	分別方法	評価・課題等
湿式処理	生ごみ	バケツなどへの分別排出	・収集時に袋を使用しないため、収集袋の破袋、選別除去が不要となる。 ・メタン発酵槽内にプラスチック類が混入する確率が極めて少なくなり、消化液の市場価値を高めることが可能となる。 ・生ごみをそのままバケツに排出する方法は、小規模自治体でコミュニティが確立しているところで実施可能であり、中規模以上の自治体では住民協力を得られにくい。
		生ごみ袋での分別排出(従来素材の場合)	・生ごみ袋で収集した生ごみをバイオガス化施設で破袋及び袋の選別除去を行う必要がある。 ・選別除去率によってはメタン発酵槽内にプラスチック類が混入する可能性が高く、消化液の市場価値を高めるためには、後処理での固形分除去等の措置が必要となる。 ・生ごみを専用の袋に分別して排出する方法は、中規模以上の自治体でも比較的協力を得られやすいと考えられるが、生ごみ袋で分別した生ごみをステーションで集積する方策を検討する必要がある。
		生ごみ袋での分別排出(PHBH素材の場合)	・PHBH 製生ごみ袋がバイオガス化施設(湿式処理)で分解するという前提で考えると、生ごみ袋で収集した生ごみは、そのまま、または破袋を行うのみでメタン発酵槽に投入できるため袋の選別除去が不要となる。 ・メタン発酵槽内に移送された PHBH 製生ごみ袋が分解されれば、消化液に異物が混入する確立は極めて低くなり、バケツなどで生ごみを分別した場合と同等程度の市場性を確保することができる。 ・生ごみを専用の袋にて分別して排出する方法は、中規模以上の自治体でも比較的協力を得られやすいと考えられるが、生ごみ袋で分別した生ごみをステーションで集積する方策を検討する必要がある。
乾式処理	生ごみ・紙ごみ	バケツなどへの分別排出	・メタン発酵槽内へのプラスチック類混入の可能性及び消化液の市場価値については、湿式の場合と同等である。 ・生ごみと資源化できない紙ごみを混合してバケツなどで排出する場合、分別条件が増加するため、プラスチック以外の発酵不適物の混入可能性が増加し、バイオガス化施設での選別負荷が増加する。 ・乾式処理時の適正な紙ごみ混合比率を調整することができないため、バイオガス化施設でのバイオガス量の変動が大きくなる可能性がある。 ・生ごみをそのままバケツに排出する方法は、小規模自治体でコミュニティが確立しているところで実施可能であり、中規模以上の自治体では住民協力を得られにくい。
		生ごみと紙ごみを混合で袋排出(従来素材の場合)	・生ごみと紙ごみを同一の袋で収集した場合、バイオガス化施設で破袋及び袋の選別除去を行う必要がある。 ・選別除去率によってはメタン発酵槽内にプラスチック類が混入する可能性が高く、消化液の市場価値を高めるためには、後処理での固形分除去等の措置が必要となる。 ・乾式処理時の適正な紙ごみ混合比率を調整することができないため、バイオガス化施設でのバイオガス量の変動が大きくなる可能性がある。 ・生ごみ・紙ごみを専用の袋にて分別して排出する方法は、中規模以上の自治体でも比較的協力を得られやすいと考えられるが、分別条件が増加するため、プラスチック以外の発酵不適物の混入可能性が増加し、バイオガス化施設での選別負荷が増加する可能性がある。また、生ごみと紙ごみを分別した袋をステーションで集積する方策を検討する必要がある。
		生ごみと紙ごみを混合で袋排出(PHBH素材の場合)	・PHBH 製生ごみ袋のバイオガス化施設での破袋選別、消化液の市場性については湿式の場合と同等である。 ・乾式処理時の適正な紙ごみ混合比率を調整することができないため、バイオガス化施設でのバイオガス量の変動が大きくなる可能性がある。 ・生ごみ・紙ごみを専用の袋に分別して排出する方法は、中規模以上の自治体でも比較的協力を得られやすいと考えられるが、分別条件が増加するため、プラスチック以外の発酵不適物の混入可能性が増加し、バイオガス化施設での選別負荷が増加する可能性がある。また、生ごみと紙ごみを分別した袋をステーションで集積する方策を検討する必要がある。 ・紙ごみを生ごみと混合利用する際に袋の破損等を考慮する必要がある、PHBH 素材の強度についての検討が必要である。

（２）次年度の生ごみ分別排出・回収試験に向けた検討

大都市のみならず中小規模の自治体への社会実装を加速するために、次年度は PHBH 製生ごみ袋を用いた分別排出・回収試験を実施し、PHBH 製生ごみ袋の使用感を把握し実用性を検証する。さらに、分別回収を行った PHBH 製生ごみ袋＋生ごみを用いて、ベンチスケールのバイオガス化プラントで試験を行うことにより、スケールアップ性と安定な連続運転を確認するとともに、消化液の成分分析、肥料利用の可能性の評価を行うこととしている。

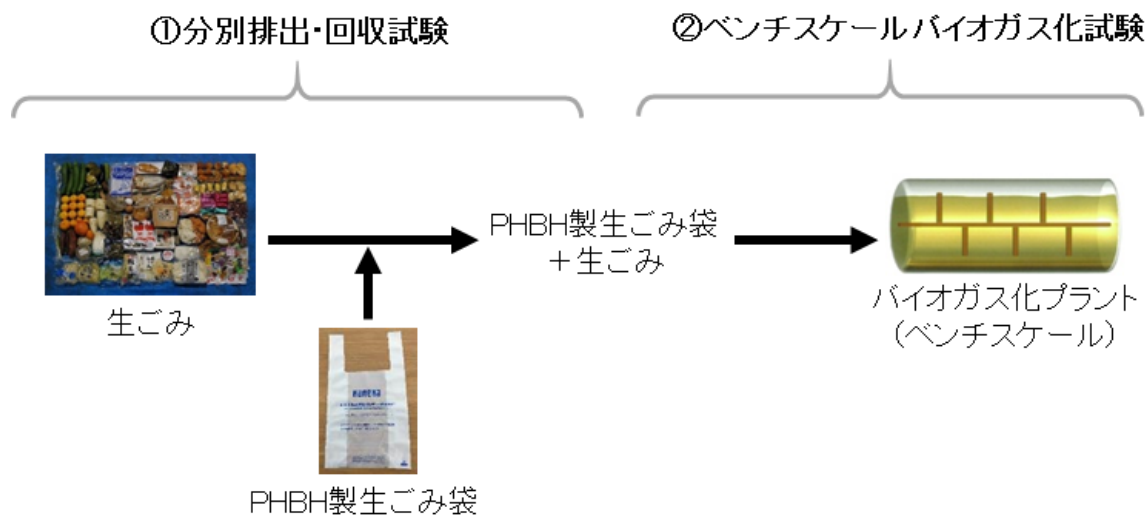


図 99 生ごみ分別排出・回収試験及びベンチスケールバイオガス化試験

策定した生ごみ分別排出・回収試験計画の概要は次表のとおりで、京都市内で、生ごみの堆肥化を実施している区域をフィールドとして、PHBH 製生ごみ袋による分別排出の協力求め、排出時に使用する袋の種類やユーザビリティを調査することにより、社会実装に向けた課題を抽出・整理する。

表 70 生ごみ分別排出・回収試験の概要

項目	内容
フィールド	京都市内堆肥化実施地域 (対象世帯：約 20 世帯、回収生ごみ量：約 380 g/世帯・日)
調査方法	- 実施期間：3 カ月 - 回収頻度：週 2 回（排出頻度は堆肥化実施時の頻度と同様を想定） - 使用する生ごみ回収袋：PHBH 製生ごみ袋（2 L、5 L、10 L の 3 種類）
結果解析	- 袋のサイズ別使用頻度、袋の使用感などにより、生ごみ分別収集に適した PHBH 製生ごみ袋の仕様検討を行う - PHBH 製生ごみ袋を用いた生ごみ分別収集の社会実装に向けた課題を抽出・整理する

3.5 PHBH 製生ごみ袋による CO₂ 削減効果の定量化に関する検討

3.5.1 目的

PHBH 製生ごみ袋による CO₂ 削減効果の定量化に関する検討に向けて、PHBH 及び化石燃料由来プラスチックの製造プロセスに係る基礎データを収集・整理することを目的とする。今年度は、原料別の PHBH 樹脂製造段階の CO₂ 排出量を算出した。

3.5.2 方法

結果は製造樹脂 1 t 当たりの樹脂製造段階ならびに燃焼時の CO₂ 排出量原単位として比較整理し、原料間に差がないため PHBH 樹脂から袋製造までの負荷は対象外とした。PHBH 原料はパーム油に加え、ジャトロファ油ならびに廃食用油に原料を拡大した。PHBH 製造のインベントリについては、昨年度同様、Akiyama et al. (2013) の論文の大豆油を原料とした PHBH 樹脂製造(Case.5)のイベントリデータを使用し、以下の補正を加えた。

- 本研究での PHBH 製造樹脂原料はパーム油、ジャトロファ油、廃食用油等を想定しているため、大豆栽培段階のイベントリデータは使用しない。代わりにパーム油の栽培、マレーシアからの輸入に関するイベントリデータを収集し使用した。
- 大豆油からの PHBH 収量 0.8g-PHBH/g-oil を基に、脂肪酸に関する組成データからパーム油からの PHBH 収量を推定した。
- 有機酸発酵段階、PHA 生成菌培養段階のイベントリデータを収率で除して補正した。
- 消費電力由来の CO₂ 排出係数を 2018 年度の実績値に変更した。
- PHBH 製造の加温に焼却処理及び GE 発電の排熱を利用することを想定しているため、蒸気由来の消費エネルギー及び CO₂ 排出を除いた。

パーム油のマレーシア産に対し、ジャトロファ油は本実証事業で国内栽培を目指していることから国産とした。廃食用油も同様に国内の廃食用油を想定している。また、PHA 生成菌による PHBH 生成収率は、パーム油に対してジャトロファ油、廃食用油それぞれ 100%、90%とした。なお、パーム油・ジャトロファ油と廃食用油はそれぞれ別株の生成菌の開発を本実証事業の中で進めており、その研究進捗を踏まえて設定している。菌株の違いは収率のみであり、消費エネルギー等は同じと仮定した。

3.5.3 結果

結果は次図に示したとおり、PHBH 1kg の製造ではパーム油、ジャトロファ油、廃食用油それぞれ 3.28 kg-CO₂/kg-PHBH、3.17 kg-CO₂/kg-PHBH、2.72 kg-CO₂/kg-PHBH となった。ただし、土地利用変化は含まれていないものとなる。比較として、化石由来（原油由来）の PE 製造も併記した。化石資源由来 PE と比べて 31.9–43.5% の CO₂ 削減効果と試算された。また、PHBH の原料間比較では、原料をパーム油から廃食用油に切り替えることで、約 17% の CO₂ 削減が期待される。プロセス別には PHA 生成菌の培養～PHA 生成過程の負荷の方が原料栽培・収集の負荷と比べて大きいことが確認された。

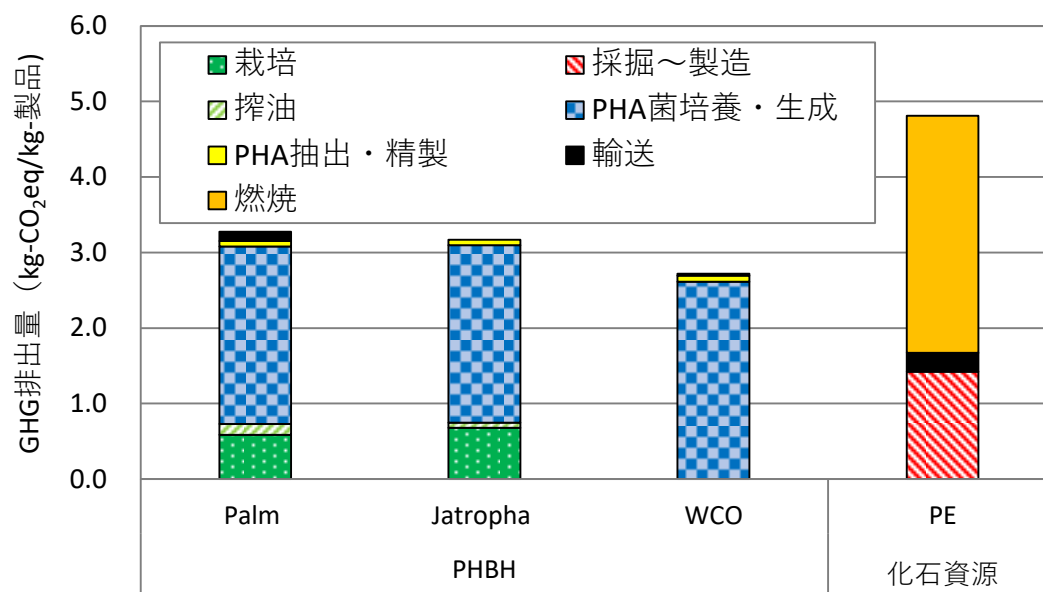


図 100 原料別の PHBH 樹脂製造、燃焼時の CO₂ 排出量結果

3.5.1 まとめと課題

PHBH 樹脂、化石資源由来 PE 樹脂からのごみ袋成形が共通しており、袋製造段階の消費エネルギー等のユーティリティが同じだと仮定すると、PHBH 製ごみ袋の原料を廃食用油にすることで、化石資源 PE と比べ約 32–44%の GHG 削減が期待された。PHBH 製造時のインベントリの多くは Akiyama et al. (2003)に基づいており、近年の技術動向を踏まえた更新が望まれる。また、PE と PHBH でごみ袋製造（成形加工）時のプロセス、エネルギー消費量が異なるようであれば、袋製造時の負荷を評価対象に含める必要があり、情報収集することが今後の課題となる。

<参考文献>

Akiyama M., Tsuge T., Doi Y.: Environmental life cycle comparison of polyhydroxyalkanoates produces from renewable carbon resources by bacterial fermentation, *Polymer Degradation and Stability*, 80:183-194 (2003)

3.6 まとめと課題

実証事業 2 : PHBH のごみ袋及びプラスチック代替製品への利用とバイオガス化に関する実証」では、実証事業 1 で開発を進める廃食用油等を原料とした PHBH の有効な利用先として生ごみ袋を想定し、PHBH 製生ごみ袋を回収した生ごみとともにバイオマス化してエネルギー回収する新たなごみ処理システムを確立することを目標に、バイオガス化施設への投入に向けた PHBH 製生ごみ袋の製造に関する検討、バイオガス化を見据えた PHBH のプラスチック代替製品への利用可能性の検討、PHBH 製生ごみ袋のバイオガス化に関する検討、PHBH 製生ごみ袋の実用性試験及び生ごみの収集方法等に関する検討、PHBH 製生ごみ袋による CO₂ 削減効果の定量化に関する検討を行った。本年度の主な検討成果と次年度の実施内容案は以下に示すとおり。

(1) バイオガス化プラントでの利用に向けた PHBH 製生ごみ袋の製造に関する検討

PHBH は嫌気分解性に優れるが、PHBH 単独では生ごみ袋に必要な機械特性を満たすことが難しいため、PHBH と市販の生分解性樹脂をブレンドすることで機械特性、嫌気生分解性の両立を目指した。両者の配合率を変化させた複数のフィルムサンプルを試作し試験した結果、機械特性、嫌気生分解性ともに目標水準に達しない結果となった。

そのため、改良 PHBH 開発を行った結果、市販の生分解性樹脂を含まずポリマーとして改良 PHBH 単独で、生ごみ袋に必要な機械特性をほぼ満たすことを確認した。さらに(3)のバイオガス化試験により、改良 PHBH フィルムは嫌気生分解性にも優れることが確認できた。この改良 PHBH を用いてインフレーション成形の量産機で試作を行い、ヒートシール性、印刷性が問題ないことを確認した。

次年度は引き続き改良 PHBH 配合検討を行い、機械特性を向上させる。また、安定量産化技術を確立し、ライフサイクル実証に向けた生ごみ分別排出・回収試験で用いるサイズの生ごみ袋の試作を行う。

(2) バイオガス化を見据えた PHBH のプラスチック代替製品への利用可能性の検討

企業のバイオプラスチック製品の活用に向けた取組について調査を行い、各業界のバイオプラスチック・代替素材の導入傾向を整理した。

生ごみ袋以外の用途については、PHBH が汎用プラスチックに比べて優れている点や汎用プラスチックに比した課題等を整理した。また、令和 3 年 1 月に環境省から公開された「バイオプラスチック導入ロードマップ」にて示されたプラスチックのリサイクル調和性等を踏まえて PHBH 利用適性を検討するとともに生分解性と脱炭素性を兼ね備えた PHBH の特性が活かされる用途の具体的な製品例を整理した。

PHBH 代替用途の検討を進める際の基礎情報となる、プラスチックごみの分別状況や汚れ(付着物割合)、素材の調査を行った。その結果、17 品目のプラスチック製品について、樹脂・水分・付着物の割合及び樹脂組成を特定することができた。

(3) PHBH 製生ごみ袋のバイオガス化に関する検討

従来 PHBH と市販の生分解性樹脂を異なる配合率でブレンドした複数の PHBH 製コンパウンドフィルムについてバイオガス化のバッチ試験を行い、嫌気生分解性の評価を行った。その結果、市販の生分解性樹脂とブレンドしたコンパウンドフィルムは PHBH 単独フィルムと比べると生分解率が低下することが分かった。一方、(1)で開発した生ごみ袋に求められる機械特性をほぼ満たす改良 PHBH フィルムは、従来 PHBH フィルムや基準となるセルロースと比べて生分解率が高いことが確

認できた。

続いて、バイオガス化連続試験として、2L 容量の反応容器を用いて 60 日間の試験を行った結果、バイオガス発生量が低下することなく安定して PHBH フィルムが分解できることを確認した。

また、原料に PHBH を含む消化液が植物の生長へ与える影響をコマツナノ栽培試験で検証したところ、見かけの生育の様子や外観からは PHBH による生育阻害効果は認められなかった。

加えて、PHBH 製のカトラリー類（ストロー、スプーン）についてもバイオガス化バッチ試験を行い、生分解性を評価した。

次年度はメタン発酵実機化に向けて、ベンチスケール試験設備でのスケールアップ性の確認に取り組む。

（４）PHBH 製生ごみ袋を用いた生ごみの分別方法等に関する検討

PHBH 製生ごみ袋を用いた生ごみ収集方法については、バイオガス化処理方式と消化液・発酵残渣の利用状況を整理した。湿式処理は生ごみを、乾式処理は生ごみと紙ごみをバイオガス化の処理対象物とする前提で、各方式に応じて消化液の農業利用を可能とするように異物の混入をなくす分別方法を志向した検討を行った。

大都市のみならず中小規模の自治体への社会実装を加速するために、次年度は実際に PHBH 製生ごみ袋を用いて生ごみの分別排出・回収試験を実施すべく計画を策定した。

（５）PHBH 製生ごみ袋による CO₂ 削減効果の定量化に関する検討

PHBH 樹脂、化石資源由来 PE 樹脂からのごみ袋成形が共通しており、袋製造段階の消費エネルギー等のユーティリティが同じだと仮定すると、PHBH 製ごみ袋の原料を廃食用油にすることで、化石資源由来 PE と比べ約 37% の GHG 削減が期待された。袋製造時の環境負荷と原料との関係性について情報収集することが今後の課題となる。

4. PHA 系バイオプラスチックのライフサイクルでの環境負荷低減効果に関する実証及びコストの評価（実証事業 3）

4.1 環境負荷低減効果

4.1.1 目的

本実証事業では地域循環共生圏モデルとして、PHBH 素材の生分解性プラスチックを導入することで厨芥類とのメタン発酵・バイオガス化によるエネルギー回収を行うとともに、発酵残渣・消化液の農地還元やガスエンジン（GE: gas engine）発電時の排熱利用、CO₂ 富化技術により PHBH 原料の 1 つである油脂作物栽培に利活用する、地域資源循環システムの実現を目指している。また、PHBH 原料として油脂作物以外にも家庭系・事業系の廃食用油も対象とすることで国産の PHBH 生産を目指していることも特徴の 1 つと言える。こうした社会システムの実現による環境負荷削減効果を定量的に評価する上では、ライフサイクルの視点から評価を行うことが肝要である。今年度は、昨年度に引き続き既往研究からデータを収集・活用し、ライフサイクル分析のためのプロセスモデル作成・改良を行いつつ、京都市をケーススタディとしてそのモデルを利用したシナリオ分析によって環境負荷削減効果を定量化することを目的とした。初年度は京都市ケーススタディとしたため、生ごみを家庭ごみとして混合収集した後に機械選別によって発酵適物と発酵不適物に分別し、メタン発酵させるシナリオとしていた。今年度は、これに生ごみの分別収集シナリオを加えることとした。また、分別収集によってメタン発酵槽への異物混入の低減が期待され、発酵残渣の堆肥利用が期待されることから、発酵残渣の堆肥化利用の効果も考慮することで、資源循環システムの基礎シナリオとした。

なお、シナリオ設計やプロセスモデルの多くは昨年度と変更がないため、詳細は昨年度報告書も参照のこと。ただし、機能単位や投入ごみ質、対象 PHBH 製品など解析設計上特に重要な前提条件については再掲している。昨年度からの変更点の概要を次表にまとめた。詳細は次項以降を参照のこと。

表 71 解析枠組みの昨年度からの変更点概要

項目	昨年度からの変更点概要
機能単位	・ 変更なし
システム境界	・ 基本的に変更なし ・ ただし、今後の国産ジャトロファの原料利用を見込んで、昨年度解析では土地利用変化をシステム境界に含めていた。現段階ではジャトロファを評価対象に加えておらず、シナリオ間に差はないことから、今年度はシステム境界外とした。
PHBH 原料	・ 廃食用油を追加
PHBH 素材使用製品	・ 変更なし
シナリオ	・ 家庭系一般ごみの分別収集・AD利用、発酵残渣の循環利用シナリオを追加。
個別プロセス設計	・ 焼却施設発電効率見直し ・ 廃食用油原料の PHBH 製造追加 ・ メタン発酵槽投入量を混合収集・機械選別シナリオ（S3）と分別収集シナリオ（S4）で揃えるため、S3 の機械選別、メタン発酵利用量（発酵槽投入量）を修正 ・ メタン発酵プロセスにおける PHBH 分解率修正

4.1.2 対象とする PHBH 原料と PHBH 素材使用製品

PHBH 原料は PHBH の商業生産において実用済みのパーム油、原料の国産化を目指して本事業でも検討を進めている廃食用油を対象とした。

対象とする PHBH 素材使用製品としては、ごみ収集袋（以下、「ごみ袋」）を想定することとした。さらに、他の代替製品候補として、ごみ収集袋と性状が比較的近く、家庭で内袋として使用されることもあるレジ袋についても先行して本年度解析の対象とした。化石資源由来のごみ袋、レジ袋と同等の強度機能を有するためには、実際には他の生分解性樹脂との配合（コンパウンド）が必要と見込まれ、本事業においても検討中のところであるが、本解析においては、素材代替率は 100%（コンパウンドなし）と仮定した。

4.1.3 システム境界と環境影響領域

システム境界は次図の PHBH 導入・分別収集 AD シナリオ（今年度の追加シナリオ。詳細は後述）の例に示したとおり、「原油採掘、ジャトロファの栽培、植物油精製から PHBH 製造、輸送及びごみの収集から処理、回収資源・エネルギーの利活用、残渣等の最終処分まで」とした。設備投入やインフラ整備等は対象外とし、対象製品であるごみ袋・レジ袋の使用段階は含めないものとした。

評価する環境影響領域は地球温暖化とした。地球温暖化の特性化係数としては、GWP100 年値を用い、AR4（IPCC 第 4 次報告書（京都議定書第二約束期間における GWP 値）の値に従った。

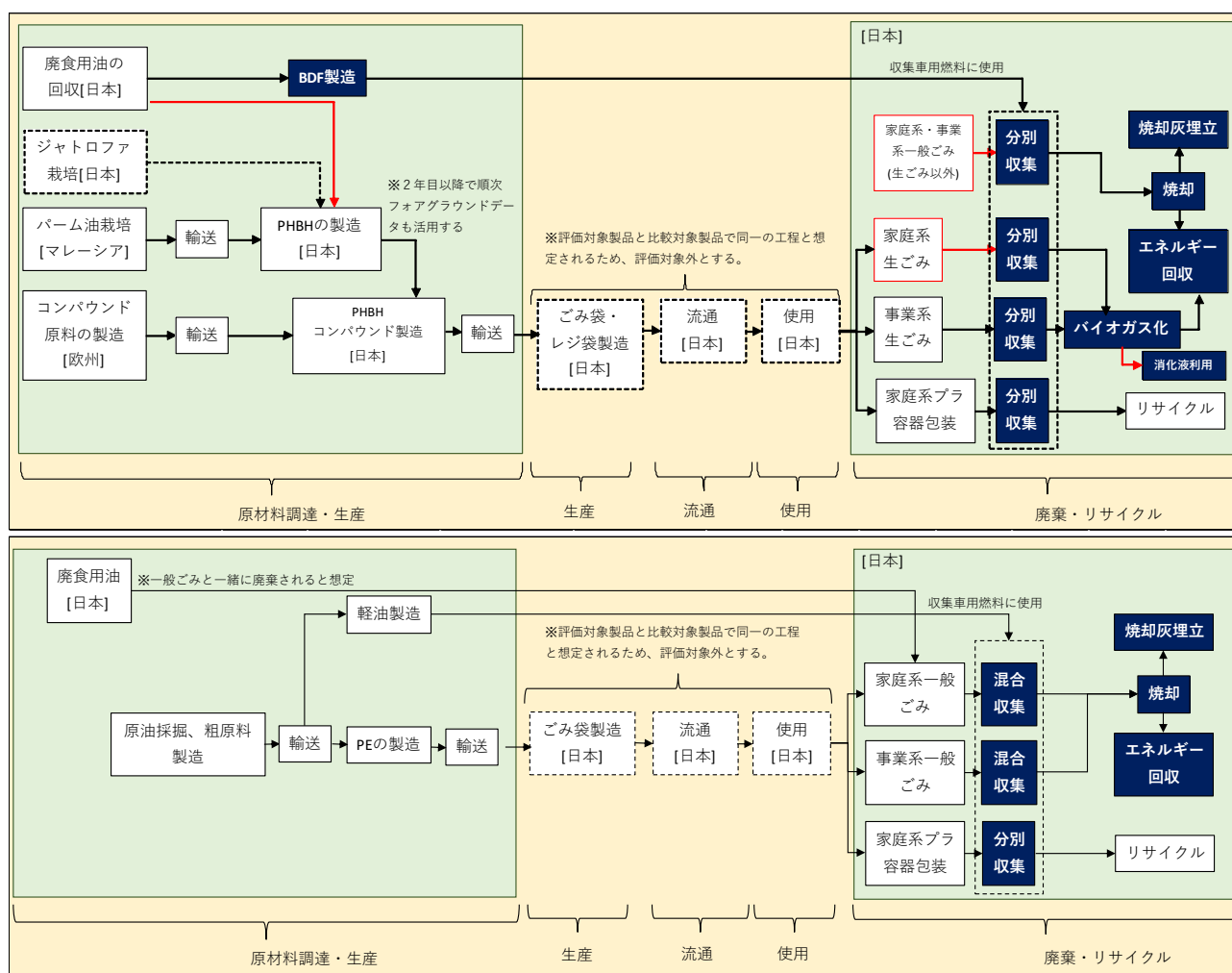


図 101 システム境界とフローイメージ（PHBH 導入・分別収集 AD シナリオを例に）

4.1.4 対象廃棄物と機能単位

廃棄物処理機能の対象としてとして、家庭系一般ごみ、事業系一般ごみ、家庭系プラスチック製容器包装（以下、「プラ容」）の年間発生量（2017 年）の処理を設定し、PHBH の利用用途として、家庭・事業系ごみのごみ袋、レジ袋の供給を設定した。

また、京都市では廃食用油を廃食用油燃料化施設（処理能力 1,500 kL/yr）により BDF 製造に利用している。廃食用油は PHBH 原料としても利用することを検討していることから、本解析の機能単位の対象に含めた。したがって、本解析では処理能力分の BDF 燃料の供給を機能単位として設定した。

以上から機能単位は、以下のように初年度と同じ機能単位として設定し、その概要は表 72 に整理した。ただし、家庭系及び事業系一般ごみ量にはごみ袋、レジ袋を含む。対象廃棄物の性状は表 73 に示したとおりである。

機能単位：「家庭系一般ごみ 186,342t、家庭系プラ容 10,008t、事業系一般ごみ 167,189t の処理」及び「家庭系事業系ごみ袋 4,741t、家庭系事業系レジ袋 3,681t 並びにごみ収集車用 BDF 発熱量 49.2 TJ 相当の供給」

表 72 機能と機能単位

対象	対応量	機能
家庭一般ごみ	186,342t	処理
家庭プラ容	10,008t	
事業一般ごみ	167,189t	
家庭系事業系ごみ袋	4,741t	供給
家庭系事業系レジ袋	3,681t	供給
BDF	49.2TJ	供給

表 73 対象廃棄物の性状

	水分率	可燃分率	灰分率	fossil.C.	bio.C	H	N	O	蛋白質	脂質	糖質	繊維質	LHV
	%-wet	%-wet	%-wet	%-wet	%-wet	%-wet	%-wet	%-wet	%-wet	%-wet	%-wet	%-wet	MJ/t-wet
家庭一般(混合)ごみ袋、レジ袋除く	46.2%	46.3%	7.5%	7.4%	17.4%	3.5%	0.6%	17.1%	1.7%	1.2%	3.2%	23.3%	9,284
家庭一般(分別)ごみ袋、レジ袋除く	40.8%	49.6%	9.6%	11.2%	16.8%	3.9%	0.6%	16.6%	1.4%	1.0%	2.6%	18.9%	11,059
家庭ごみ袋	6.6%	97.5%	2.6%	77.4%	0.0%	12.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	42,171
家庭レジ袋	6.6%	97.5%	2.6%	77.4%	0.0%	12.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	42,171
PHBH(100%代替)	6.6%	97.5%	2.6%	0.0%	56.0%	7.5%	0.0%	29.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	24,470
家庭分別厨芥	77.6%	18.8%	3.6%	0.0%	9.8%	1.3%	0.7%	6.9%	4.4%	3.1%	8.0%	3.2%	2,137
家庭分別紙類	30.9%	64.4%	4.8%	2.5%	27.6%	4.4%	0.2%	29.5%	0.0%	0.0%	0.0%	59.5%	11,012
事業一般(分別)ごみ袋、レジ袋除く	38.3%	49.3%	10.2%	15.7%	14.1%	4.2%	0.5%	13.9%	1.5%	1.0%	2.8%	16.4%	12,516
事業ごみ袋	6.6%	97.5%	2.6%	77.4%	0.0%	12.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	42,171
事業レジ袋	6.6%	97.5%	2.6%	77.4%	0.0%	12.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	42,171
PHBH(100%代替)	6.6%	97.5%	2.6%	0.0%	56.0%	7.5%	0.0%	29.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	24,470
事業分別厨芥	77.8%	18.8%	3.4%	0.0%	9.8%	1.3%	0.7%	6.9%	4.4%	3.1%	8.4%	2.8%	2,129
事業分別紙類	29.7%	65.5%	4.8%	1.8%	28.8%	4.5%	0.2%	30.0%	0.0%	0.0%	0.0%	62.0%	11,312
家庭プラ容 ごみ袋、レジ袋除く	9.1%	80.6%	10.3%	63.6%	1.7%	9.5%	0.1%	3.0%	0.0%	0.0%	0.1%	1.4%	33,097
家庭プラ容ごみ袋	6.6%	97.5%	2.6%	77.4%	0.0%	12.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	42,171
家庭プラ容レジ袋	6.6%	97.5%	2.6%	77.4%	0.0%	12.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	42,171
PHBH(100%代替)	6.6%	97.5%	2.6%	0.0%	56.0%	7.5%	0.0%	29.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	24,470

4.1.5 シナリオ設定

次表にシナリオ別の収集～処理概要を示す。全焼却シナリオ以外はプラ容のマテリアルリサイクル（MR、material recycling）、ケミカルリサイクル（CR、chemical recycling）を考慮したシナリオとなる。

収集、焼却、搬出、埋立プロセスは共通プロセスとなっている。石油採掘、石炭採掘や種々の燃料製造に起因する環境負荷は各プロセス内で評価し、計上した。

表 74 シナリオ別の原料～処理方法

		ごみ袋・レジ袋素材	収集車燃料	収集			処理		
				事業系可燃	家庭系可燃	家庭系プラ容	事業系可燃	家庭系可燃	家庭系プラ容
S1	全量焼却	化石資源	軽油	分別収集	混合収集		焼却		
S2	一般自治体現状	化石資源	軽油	分別収集	混合収集	分別収集	焼却		MR, CR
S3	PHBH導入・機械選別AD	PHBH (パーム油)	BDF	分別収集	混合収集	分別収集	焼却、 機械選別・AD		MR, CR
S4	PHBH導入・分別収集AD	PHBH (パーム油、 廃食用油)	BDF	分別収集	分別収集	分別収集	生ごみ・雑紙:AD その他可燃:焼却		MR, CR
...									

*AD(Anaerobic digestion : メタン発酵) :

※プラ容リサイクルプロセスでは、PHBH 製ごみ袋、レジ袋のみ選別工程で除去され AD 利用されると仮定

(1) シナリオ 1「全焼却シナリオ」 S1

家庭一般ごみは家庭プラ容と共に混合収集、事業一般ごみ及びは分別収集され、回収された廃食用油とともに焼却で処理され、蒸気タービン発電でごみ発電を行う。化石燃料由来のプラスチック製造がプラ供給機能を、軽油がごみ収集車熱量供給機能を担っている。

(2) シナリオ 2「一般自治体現状シナリオ」 S2

一般的な自治体の現状を想定したシナリオとなっている。家庭プラ容は分別され、それ以外の家庭一般ごみは混合収集されとした。化石燃料由来のプラスチック製造がプラ供給機能を、軽油がごみ収集車熱量供給機能を担っている。

(3) シナリオ 3「PHBH 導入(原料輸入)・機械選別シナリオ」 S3

パームは主にマレーシアからの輸入を想定し、輸入パーム油から PHBH を製造する現状の技術を想定したシナリオである。代替品目はごみ袋、レジ袋である。家庭プラ容に排出された PHBH 製品は選別・梱包され、メタン発酵槽に投入されとした。家庭系の可燃ごみは混合収集され、機械選別を経て発酵槽に投入され、事業系の生ごみ・紙ごみは分別収集（分別収集率 50%）されとした。発酵残渣は焼却処理されと想定した。

(4) シナリオ 4「PHBH 導入(廃食用油)・分別収集シナリオ」 S4

原料に廃食用油を加え、ごみ収集車に必要な量を BDF 利用し、余剰分をごみ袋・レジ袋製造に使用するとしたシナリオである。代替品は S3 と同じである。家庭系・事業系ともに生ごみ・紙ごみは分別収集され、メタン発酵利用されとし、分別収集率は 50%とした。脱水後の発酵残渣、消化液は堆肥化プロセスを経て堆肥・液肥として循環利用されとした。

4.1.6 単位プロセスモデル作成

本項では、昨年度の作成モデルから変更がないプロセスについては割愛し、修正・追加したプロセスについて紹介することとする。

(1) PHBH 製造プロセス

パーム油に加えて廃食用油も原料とし、2.4.1 で報告した解析モデル・結果を用いた。S3 ならびに S4 の原料消費量を次表にまとめた。

表 75 シナリオ別の PHBH 製造時の原料消費量

	パーム油	廃食用油
S3	10,535 t	-
S4	8,796 t	2,156 t

(2) 収集プロセス

S4 については事業系一般ごみに加えて、プラスチック製容器包装を分別後の家庭系一般ごみについても分別収集されるとし、分別収率を設定した。分別収集の対象は、厨芥類、紙類とし、各 50%の分別収集率とした。

(3) 焼却プロセス

焼却プロセスにおける消費電力原単位は 150 kWh/t とし、ごみ熱量に発電効率を乗じることで発電電力量を算出した。昨年度の解析では、全量焼却シナリオ (S1) ならびに一般自治体現状シナリオ (S2) の発電効率 15%、メタン発酵利用を伴う S3 は焼却施設の更新も期待されることから、平成 30 年度の実績値 20%[1]を用いた。今年度の解析においては、S1、S2 については全国平均 2018 年度実績値 13.6%[2]、S3 ならびに S4 については昨年度同様 20%の発電効率とした。

(4) メタン発酵プロセス

本プロセスでは京都市で導入している乾式高温メタン発酵方式を採用しており、S3 ならびに S4 においてメタン発酵利用される。両シナリオにおいて、メタン発酵施設の処理能力を揃えるため、S4 で分別収集される生ごみ・紙ごみのメタン発酵槽投入量約 13.3 万 t (約 360 t/日) を処理能力とした。S3 シナリオの機械選別後の発酵適物 (主に生ごみおよび紙ごみ) の発酵槽投入量も同量とし、メタン発酵利用できない余剰分については、混合収集後は機械選別を経ることなく焼却処理されるとした。

また、バイオガス発生量は化学量論式と有機物種ごとに設定した VS 分解率を用いて推定している。昨年度の解析では、PHBH の VS 分解率は 80%と設定したが、今年度の本事業の実証結果を踏まえ 87%と修正した。

(5) 堆肥化プロセス

本プロセスは発酵残渣から堆肥 (以下、有機肥料)、消化液から液肥を製造するプロセスである。メタン発酵プロセスの前処理として機械選別プロセスのない S5 が対象となる。消費電力、軽油燃焼及び堆肥化過程での消費エネルギー及び CO₂、N₂O 排出を評価し、堆肥化プロセスの分解率は 50.0%と仮定した。液肥製造の消費エネルギーや分解率も堆肥化と同じと仮定した。また、施肥後の農地利用時における CH₄、N₂O を計上した。堆肥・液肥は窒素等量の化学肥料を代替するとした。

4.1.7 解析結果と考察

地球温暖化（GHG）結果を次図に示した。現状シナリオ（S2）と比較して、PHBHを導入し、機械選別後にメタン発酵利用する S3 シナリオは 27.5%（3.4 万 t-CO₂eq/yr）の削減効果が期待された。S2 の発電効率を下方修正したことで、昨年度と比べ削減量が大きくなっており、焼却発電および GE 発電による電力代替効果が 4.4 万 t-CO₂eq/yr と試算された。仮に S2 が S3 と同程度の発電効率（20%）であったとしても、焼却発電・GE 発電による電力代替効果は 2.0 万 t-CO₂eq/yr と試算されることから、比較的新しい焼却施設であってもメタン発酵施設を新設することが有効である可能性が示唆される。分別収集した上でメタン発酵利用する S4 シナリオは S2 と比較して 4.5 万 t-CO₂eq/yr の削減効果と試算され、混合収集以上の削減効果が期待された。焼却発電・GE 発電の発電電力量合計は S3、S4 でそれほど大きく変わらないものの、焼却量が低減することによる焼却時の消費電力の削減効果の方が大きく寄与した。パーム油に比べて PHBH 製造時の GHG が小さい廃食用油も原料に加えることで、分別収集にともなうごみ袋消費量の増加（PHBH 生産量の増加）の影響も小さく抑えられることが確認された。

エネルギー起源別にみると、S2 と比較したエネルギー起源 GHG の削減量は、S3 シナリオ 1.9 万 t-CO₂eq/yr、S4 シナリオ 2.3 万 t-CO₂eq/yr となった。

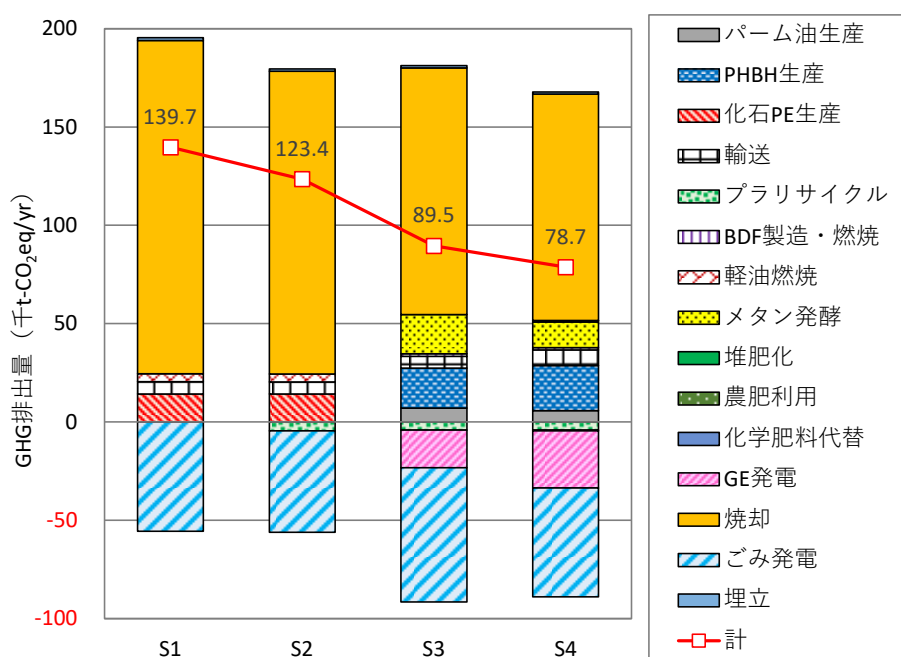


図 102 地球温暖化結果（プロセス別）

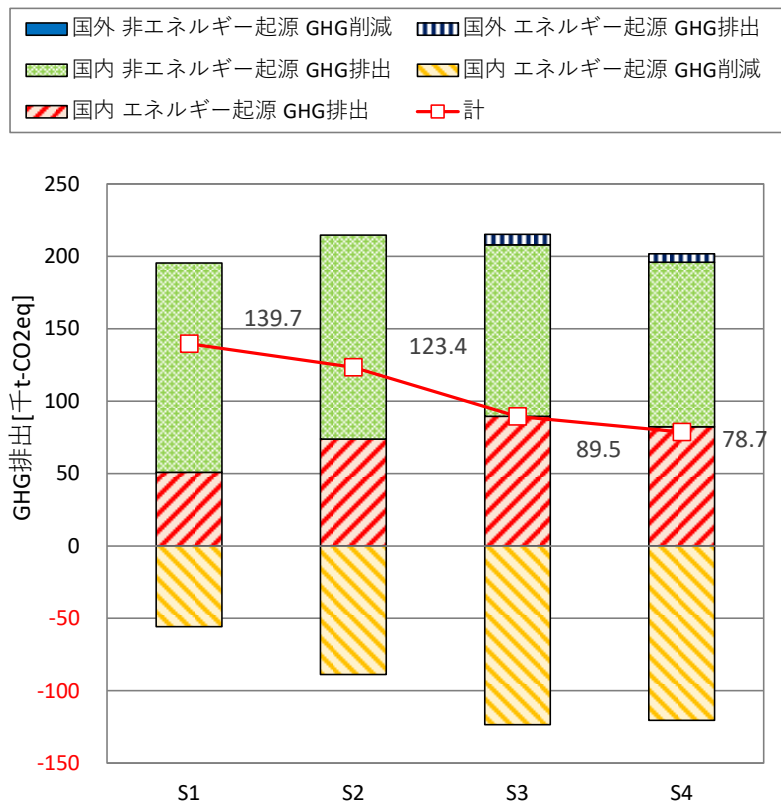


図 103 地球温暖化結果（エネルギー起源別）

4.1.8 まとめと課題

本年度は、プロセスモデルの改善と追加をしつつ、PHBH 原料に廃食用油を加え、生ごみの分別回収、発酵残渣・消化液の有効利用を追加することとした。次年度以降、引き続き各実証データを反映させることで、本実証結果に基づいた解析へと繋げていく予定である。京都市をケーススタディとしたシナリオ分析結果から、PHBH 製ごみ袋を厨芥類・紙類と一緒にメタン発酵利用する本システムによってライフサイクルの国内エネルギー起源の GHG 削減が期待されることを明らかにした。分別や資源循環の視点を考慮した評価を前提に、中小都市モデルでの検討も進めることで、国内普及効果の評価を視野にした解析を目指していく。

<参考文献>

- 1) 京都市南部クリーンセンター：ヒアリング 平成 31 年度実績値
- 2) 環境省：令和 2 年度環境白書・循環型社会白書・生物多様性白書

4.2 コスト評価

4.2.1 目的

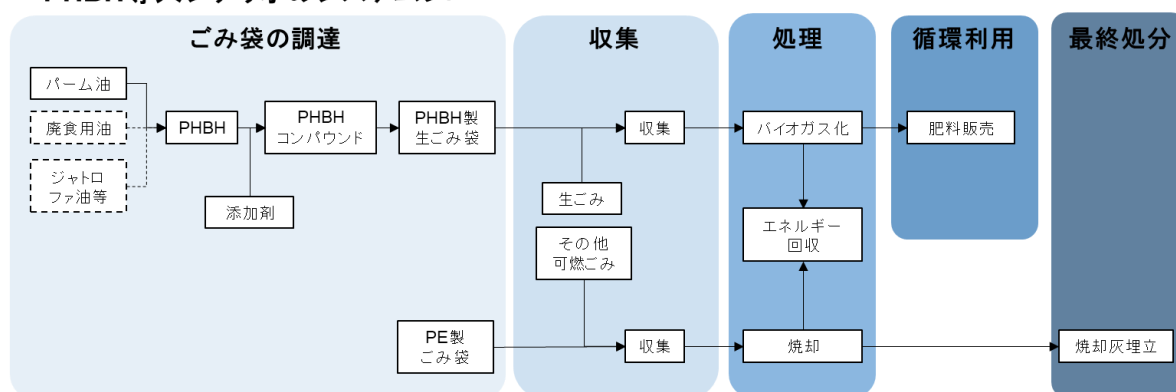
PHBH の原料を現行のパームオイルから廃食用油等の国産油脂源に切り替えるとともに、PHBH 製生ごみ袋を製造し、生ごみの分別収集に用い、生ごみと一緒にバイオガス化するシステムのコストを評価する。

令和2年度は、既存情報の収集とシナリオ、システム境界の検討を行った。

4.2.2 システムフロー及びシナリオ設定

次図に評価対象のシステムフローを示す。システム境界は、「ごみ袋の調達から、ごみ収集、処理、循環利用、最終処分まで」とした。なお、PHBH 製生ごみ袋は本事業で開発するものであり市場価格が存在しないため、調達コストの評価にあたっては原料調達から、PHBH 製造、PHBH コンパウンドの製造、PHBH 生ごみ袋の製造までのフローを考慮することとした。

■ PHBH導入シナリオのシステムフロー



■ ベースラインシナリオのシステムフロー

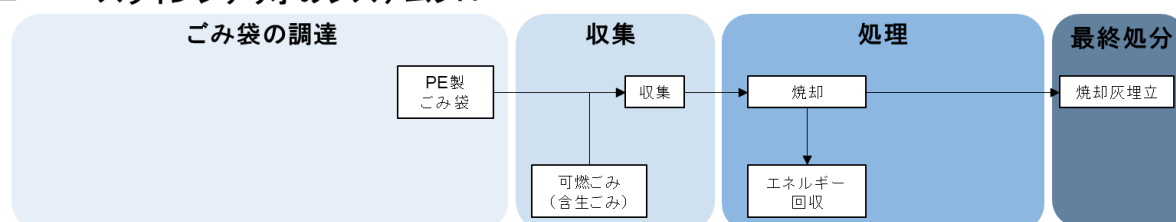


図 104 システムフロー（PHBH 導入シナリオ、ベースラインシナリオ）

評価シナリオは、本事業で目指す「PHBH 導入シナリオ」と、PHBH 製生ごみ袋を用いない「ベースライン」シナリオとした。

（１）PHBH 導入シナリオ

パーム油もしくは廃食用油から製造した PHBH を用いて PHBH 製生ごみ袋を製造し、生ごみを分別収集後、袋ごとバイオガス化し、バイオガス化残渣は肥料利用する。その他の可燃ごみ（プラスチック容器包装を除く）については、PE 製ごみ袋で収集後、焼却処理し、焼却灰を埋立することとした。

（２）ベースラインシナリオ

一般的な自治体の現状を想定したシナリオとなっている。プラスチック容器包装を除く家庭一般

ごみは混合収集され、焼却処理されるとした。

4.2.3 機能単位

評価対象とする地域スケールは「京都市の規模を想定したモデル自治体」とし、機能単位は、京都市の家庭ごみの処理量（2017 年）をもとに、以下のように設定した。

表 76 機能単位

対象	量
可燃ごみ（生ごみ含む）	186,342 トン／年

4.2.4 コスト評価項目及び収集データ

収集すべきデータを下表のように整理した。

表 77 コスト評価の項目と必要な収集データ

分類	費目	収集データ	単位
ごみ袋の 調達	PHBH 原料調 達	廃食用油調達費用	円/L-廃食用油
		廃食用油精製費用	
		ジャトロファ油調達費用	円/kg-ジャトロファ油
	PHBH 製造	PHBH 生産費用	円/kg-PHBH
		PHBH 生産収率	kg-PHBH/L-廃食用油
	PHBH 製 生ごみ袋製造	添加剤調達費用	円/kg-添加剤
		コンパウンド当たり添加剤配合量	kg-添加剤/kg-PHBH コンパウン ド
		生ごみ袋当たり PHBH コンパウン ド使用量	kg-PHBH コンパウンド/枚
		生ごみ袋成形加工費用	円/枚
		PHBH 製生ごみ袋必要量	枚/トン-生ごみ
	PE 製ごみ袋 購入	PE 製ごみ袋調達費用	円/枚
		PE 製ごみ袋必要量	枚/トン-ごみ
収集	ごみ収集・運 搬	ごみ収集・運搬費用（分別収集）	円/kg-生ごみ
		ごみ収集・運搬費用（混合収集）	円/kg-生ごみ
処理	バイオガス化	メタン発酵処理能力	kg-生ごみ/日
		メタン発酵処理費用	円/日
		メタン発酵消化液発生量	m ³ -消化液/日
		メタン発酵消化液処理費用	円/m ³ -消化液
	焼却	焼却費用	円/kg-可燃ごみ
	エネルギー回 収	バイオガス発生効率	m ³ /kg-生ごみ
		バイオガス発生効率	m ³ /kg-PHBH
		発電効率	kW/m ³ -バイオガス
循環利用	肥料売却益	メタン発酵消化液の売却益（液 肥）	円/m ³ -消化液
最終処分	焼却灰埋立	焼却灰処分費用	円/トン-焼却灰

4.2.5 評価イメージの具体化

最終的に次図に示すようにコスト評価を行う。

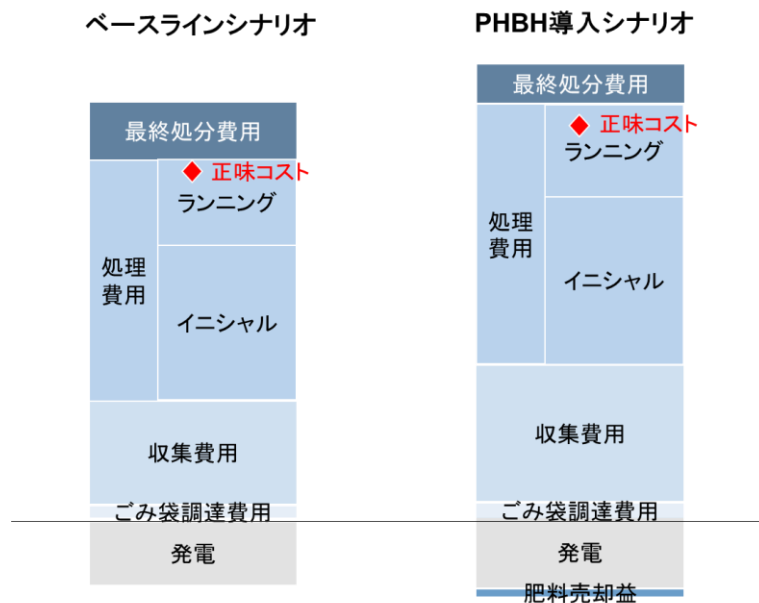


図 105 コスト評価イメージ

4.2.6 コスト変化算出（事例分析）

環境省委託業務「平成 26 年度廃棄物系バイオマス利活用導入促進事業委託業務」²では、穂高広域施設組合のごみ焼却施設を対象として、焼却施設とバイオガス化施設の新設を同時に行い、メタンコンバインドシステムを構築するケースについて、全量焼却方式と比較検討がなされた。

新システムの収集方式は以下の 2 ケースが検討された。

ケース 1（機械選別）：可燃ごみ収集→機械選別→バイオガス化

ケース 2（分別収集）：食品廃棄物＋紙ごみ分別収集（残渣消却）→バイオガス化

検討システム別の処理規模は次表のとおり。

表 78 検討システム別処理規模等

処理対象物		可燃ごみ(家庭系ごみ・事業系ごみ)		
検討システム		乾式メタンコンバインドシステム		全量焼却
搬入量	t/年	32,120		
検討ケース		ケース1 (機械選別)	ケース2 (分別収集)	全量焼却
		—	—	—
処理規模	280日	—	—	—
乾式メタン	t/日	49.8	31.6	0
焼却炉	t/日	105.7	102.6	119.6
平均処理量	365日	—	—	—
乾式メタン	t/日	36.7	23.3	0
焼却炉	t/日	77.9	75.5	88.1

² http://www.env.go.jp/recycle/waste/biomass/data/report_h26-1.pdf

比較対象とする全量焼却ケースも含め、3 ケースについて経済性評価が行われた（次表、次図）。その結果、年間の合計費用は、ケース 1（機械選別）で 406,532 千円／年、ケース 2（分別収集）で 366,851 千円／年、全量焼却で 424,777 千円／年となり、ケース 1 で 4.3%、ケース 2 で 13.6%それぞれ安価となり、経済性による優位性が確認された、としている。

表 79 経済性評価結果

項目		ケース1 (機械選別)	ケース2 (分別収集)	全量焼却
		コンバインド	コンバインド	焼却施設
処理規模		バイオガス化 施設50t/日 焼却施設 106t/日	バイオガス化 施設32t/日 焼却施設 103t/日	120t/日
イニシャルコスト				
施設整備費	千円	4,829,000	4,136,000	3,367,000
減価償却費	千円/年	241,450	206,800	168,350
増減率	%	43.4	22.8	—
ランニングコスト				
電力費	千円/年	33,026	29,535	27,764
燃料費	千円/年	6,205	5,844	5,589
上水道費	千円/年	4,789	4,489	4,209
下水道費	千円/年	0	0	0
薬品費	千円/年	57,861	55,038	54,919
最終処分費	千円/年	46,059	45,116	50,367
修繕費	千円/年	207,066	193,336	178,026
計	千円/年	355,005	333,358	320,873
増減率	%	10.6	3.9	—
年間合計費用	千円/年	596,455	540,158	489,223
増減率	%	21.9	10.4	—
収入				
発電	千円/年	189,923	173,307	64,446
増減率	%	194.7	168.9	—
合計費用				
費用	千円/年	406,532	366,851	424,777
増減率	%	-4.3	-13.6	—

※-1施設整備費 50%の交付金を想定

※-2減価償却費 期間20年間

※-3各増減率=(各ケース-全量焼却)/全量焼却

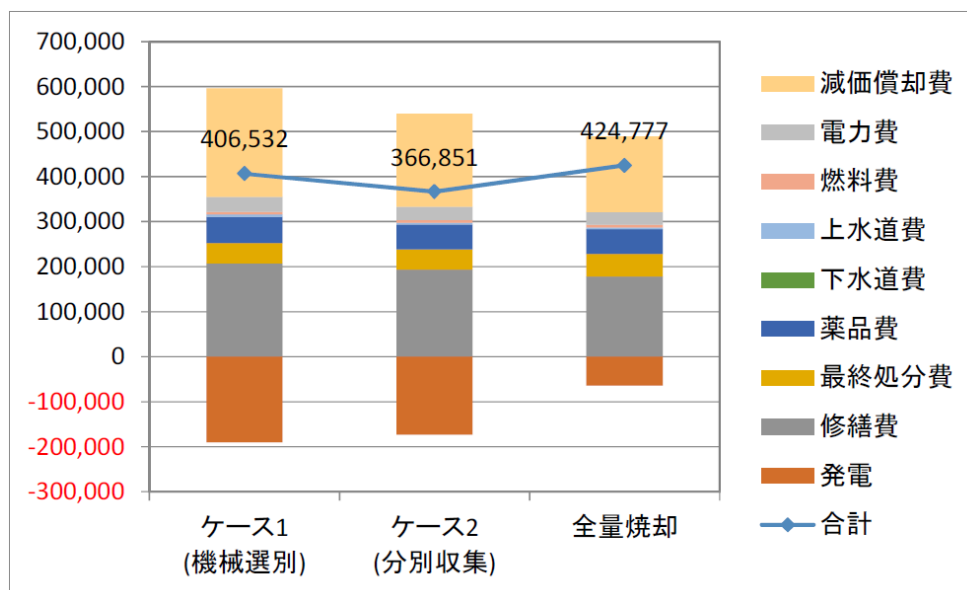


図 106 経済性評価結果

以上、既往調査事例におけるコスト変化の算定結果を示した。ただし、上記の結果は、施設の人件費や、ごみ収集プロセスが含まれていない点に留意が必要である。いずれも、本事業で目指すシステムではコスト増が想定される。

人件費については、宮城県「みやぎ地域循環資源エネルギー高度利用 モデル作成事業（市町村主体モデル）調査書」に、廃棄物受入量 45 トン/日（内訳は以下のとおり）のバイオガス化施設についての設定条件が示されている。焼却処理＋バイオガス化処理のコンバインド方式を想定すると、追加的に必要になるのは特に「運転」に係る人員であり、計 36,000 千円/年と設定されている。

＜バイオガス化施設の廃棄物受入量＞

生ごみ（家庭） 20 トン/日

生ごみ（事業系） 10 トン/日

下水汚泥 15 トン/日

表 80 バイオガス化施設の事業性評価の設定条件（人件費）

	職位	職務	単価(千円)	人件費 (千円/年)
管理	電気主任技術者	法定、兼日勤整備班班長	7,000	7,000
	事務員A	経理関係事務	4,500	4,500
			管理小計	11,500
運転	運転所長		8,500	8,500
	運転班長	交代勤務班長 1人×1班	5,500	5,500
	運転員	4人×1班	4,500	18,000
	日勤整備班		4,000	4,000
			運転小計	36,000
計量	計量員	計量受付、データ集計	3,500	3,500
			計量小計	3,500
受入班	受入班長	受入業務リーダー(非計上)	5,000	0
	プラントホーム要員	車両誘導、清掃、不適物発見	3,500	3,500
			受入班小計	3,500
整備	整備監督	整備計画、設備管理	6,000	6,000
	整備担当	整備現場担当	8,000	8,000
			整備小計	14,000
			人件費総計	68,500

（出典）宮城県「みやぎ地域循環資源エネルギー高度利用 モデル作成事業（市町村主体モデル）調査書」，

<https://www.pref.miyagi.jp/uploaded/attachment/739436.pdf>

以上より、先述の穂高広域施設組合の経済性評価結果に人件費の増分を考慮すると次表のようになる。ケース1（機械選別）は、全量焼却ケースよりも合計費用が上回ることとなった。一方ケース2（分別収集）の場合は、全量焼却に比べて依然として経済優位性がみられる。

表 81 焼却＋バイオガス化の事業性評価（人件費増分考慮）

	項目	ケース1 (機械選別)	ケース2 (分別収集)	全量焼却	出典
①	合計費用 (人件費未考慮)	406,532	366,851	424,777	環境省委託業務「平成26年度廃棄物系バイオマス利活用導入促進事業委託業務」
②	人件費増分	36,000	36,000	-	宮城県「みやぎ地域循環資源エネルギー高度利用 モデル作成事業（市町村主体モデル）調査書」（2019年2月）
③	合計費用 (人件費考慮後)	442,532	402,851	424,777	①＋②

生ごみ分別収集については、例えば、一般財団法人日本環境衛生センターの資料によれば、生ごみ分別収集は分別収集しない場合と比べて経費が1割ほど増加するものとされている。このような要因も踏まえ、次年度は詳細な評価につなげていく。

表 82 収集運搬経費

設定人口 (人)	生活系収集 運搬量 (g/人・日)	生活系年 間収集量 (t/年)	収集運搬 経費単価 (千円/収 集量t)	収集運搬 経費 (千円/年)	生ごみ分別に伴う収集 量削減後		可燃ごみの み収集経費 (分別無し) 千円/年	生ごみ分別後 の収集経費 千円/年
					収集運搬経 費単価 (千円/年)	収集運搬 経費上昇 額 (千円/年)		
500,000	680	124,100	25.3	3,139,730	3,453,703	313,973	2,511,784	2,825,757
200,000	614	44,822	20.7	927,815	1,020,597	92,782	742,252	835,034
75,000	607	16,617	20	332,340	365,574	33,234	265,872	299,106
30,000	579	6,340	16.5	104,610	115,071	10,461	83,688	94,149
5,000	523	954	30.8	29,383	32,321	2,938	23,506	26,444

備考：収集運搬経費単価については、九州管内市町村で委託収集を行っている市町村の人口規模別平均値を用いた。また、可燃ごみ単独の経費は不明なため、可燃ごみ収集を月8回、その他のごみを月2回収集するものとして按分した。

(出典) https://kyushu.env.go.jp/recycle/data/100331a_2.pdf

4.2.7 まとめと課題

PHBHの原料を現行のパームオイルから廃食用油等の国産油脂源に切り替えるとともに、PHBH製生ごみ袋を製造し、生ごみの分別収集に用い、生ごみと一緒にバイオガス化する処理システムのコスト評価に向けて、既存情報の収集を進めるとともに、LCAの検討条件を踏まえ、シナリオ、システム境界の検討を行った。また、既存のコスト評価事例をもとにコスト変化の試算を行った。次年度は、実証試験データやフィージビリティスタディ結果等も取り込みコスト変化の定量化を行う予定である。

5. まとめと今後の課題

本年度は、廃食用油を用いた PHBH の培養生産技術の改良を図ることで PHBH の生産性向上を目指すとともにポリマーの品質管理基準を満たすための精製処方の改良に取り組んだ。また、実機を用いた廃食用油からの PHBH 製造試験により量産時の生産性・品質を確認し、スケールアップ時の課題を抽出できた。さらに、廃食用油排出実態調査、廃食用油以外の国内外の油脂源の利用可能性に関する検討、生ごみ袋に用いる PHBH コンパウンドの試験的開発、PHBH 製生ごみ袋を用いた生ごみ回収試験の方法の検討、それらに関するライフサイクルでの環境負荷低減効果及びコスト変化の定量化に向けた検討等を行った。

5.1 廃食用油及び再生可能資源を原料とした PHBH 製造に関する実証事業（実証事業 1）

（1）生活系・事業系廃食用油を PHBH 原料に利用するための前処理技術に関する検討

廃食用油を原料として使用する培養方法として、まずは PHBH 生産微生物の増殖期にあたる培養初期のみパーム油（低ヨウ素価油）を使用するハイブリッド培養法を開発し、続いて、培養中の油脂濃度を高位に維持することで廃食用油（高ヨウ素価油）を単独で使用可能な培養方法（改良培養方法）の開発に成功した。これにより、パーム油を使用することなく、目標とする対パーム油比 90%以上の PHBH 生産性が達成可能となった。

続いて、生ごみ袋製造に適した PHBH 製造に向けて生産株の育種を実施した。生ごみ袋に使用する PHBH の規格として 3HH 組成＝ $6 \pm 1\%$ を設定し、カネカ保有の生産株（KNK-2 株）の代謝改変により、廃食用油を原料として使用した場合でも規格値内の PHBH を生産可能な KNK-新 2 株を得た。

改良培養方法及び KNK-新 2 株を用いた実機（製造能力：PHBH 5,000 トン/年）での培養実証試験により、廃食用油を単独の原料として PHBH を効率的に生産することに成功した。ただし、高油脂濃度維持による発泡という問題点が実機スケールで初めて顕在化したため、その対処方策を検討している。

また、原料油脂の受け入れ基準に関しては、劣化度と脂肪酸組成に絞り込み検討を進めた結果、現状では、色味、酸価、脂肪酸組成（ヨウ素価）の 3 指標によって管理できる見通しを得ている。

廃食用油前処理検討では、ポリマー精製処方の改良により、いずれの廃食用油でも PHBH ポリマー品質として重要な熱着色の程度（Yellow Index）と熱安定性を確保可能であることを見出した。

以上を踏まえ、次年度は、低油脂濃度で培養するための技術開発を進め、発泡抑制と高生産性の両立を実現し、安定した工業生産プロセスの確立を進める。

（2）PHBH 原料として利用するための更なる廃食用油の回収率向上を目指した収集方法に関する検討

市中から広く回収した家庭系及び事業系廃食用油試料の脂肪酸構成や性状の分布等を整理するとともに、先進自治体における家庭系廃食用油の回収事例の調査を行った。

家庭系廃食用油については、事例調査の結果、回収率を上げるためにはペットボトル等のふた付き容器を用いた回収方法が有効であると思われるが、回収後の容器が新たな廃棄物として発生することから、再利用ができる専用容器での回収を検討するとともに、素材に生分解性プラスチックを使用するなどの方策の検討が必要である。また、さらなる回収率向上については、行政による啓発のみでなく、市民団体や NPO などからの働きかけが有効であると考えられ、それらの団体との協調体制の構築が必要と思われる。

事業系廃食用油については、業種、事業所の規模によって排出量、排出形態が様々であり、また、

業種によって劣化度の高い油が存在することから、PHBH 原料としての受け入れ基準を考慮した混合回収の可否を検討する必要がある。排出形態については、多量排出事業者は、回収ルート of 効率的により大型のタンクローリーでの合理的な回収が可能になると思われる。一方、小規模排出事業者については、2 t～3 t 車で個別に回収せざるを得ない。遠方の排出業者の排出形態には、パール缶など処分が不要な排出形態を考える必要がある。

また、事業所からの廃食用油の回収は、IoT 技術を活用し、廃食用油の貯留状況をセンサーによりモニタリングし、貯留状況に応じた最適ルートでの合理的な回収とする方策も考えられるため、次年度は、IoT の導入などによる回収の効率化について検討を行う。

(3) 廃食用油以外の国内外の油脂源の調達可能性及び食料と競合しないジャトロファ等の油糧植物の国内での栽培と特に国内中山間地（耕作放棄地）での原料栽培の検討

油脂製造事業者へのヒアリングを行い、ソーダ油滓等の油脂製造時の副生成物について排出・利用実態の把握を行った。また、ソーダ油滓のサンプルを入手し、脂肪酸分離試験及び分離した脂肪酸の脱色試験を実施し、これらの試験結果をもとにソーダ油滓から脂肪酸を分離し、脱色する場合の処理コストを求めた。

油脂作物であるジャトロファについて、昨年度京都地域に構築した、加温及び CO₂ 富化ができる実証温室を用いて、ジャトロファの栽培を継続し、栽培管理方法の検討を行った。その結果、国内で実生から生育させたジャトロファ樹に着生した種子から油が搾油できること及びメタン発酵消化液を唯一の肥料としてジャトロファが栽培できること等を確認できた。本年度の結果を踏まえ、次年度は花芽を多く着生させることができる剪定方法の開発、越冬方法の開発を行うとともに、メタン発酵消化液の肥効及び収量の評価を行う予定である。

ジャトロファ以外の油脂作物としてのナタネの栽培については、消化液を用いた米・ナタネの二毛作システムが成立することを実証した。

(4) 原料の切り替えによる CO₂ 削減効果及びコスト変化に関する検討

CO₂ 削減効果については、本年度は原料栽培段階のインベントリの精緻化を行った。本インベントリを用いて、LCA モデルに組み込むことで、ライフサイクルの環境負荷ならびに原料の切り替えによる CO₂ 削減効果の定量化に反映させる。また、よりきめ細かい感度分析を行うことで、原料栽培段階で結果の影響が大きいプロセスを特定することが可能となる。

コスト変化については、本年度は、廃食用油及び再生可能資源を原料とした PHBH 製造について、その CO₂ 削減効果及びコスト変化を解析するために、システム境界の検討や基礎情報の収集を実施した。また、PHBH 製生ごみ袋の製造について、PHBH の原料をパーム油から廃食用油に切り替えた際のコスト変化を試算した。次年度は、データ源の適正化を図るとともに、本事業における実証試験結果を踏まえて、原料切り替えによる CO₂ 削減効果及びコスト変化の解析を行う。

5.2 PHBH のごみ袋及びプラスチック代替製品への利用とバイオガス化に関する実証事業 (実証事業 2)

(1) バイオガス化プラントでの利用に向けた PHBH 製生ごみ袋の製造に関する検討

PHBH は嫌気分解性に優れるが、PHBH 単独では生ごみ袋に必要な機械特性を満たすことが難しいため、PHBH と市販の生分解性樹脂をブレンドすることで機械特性、嫌気生分解性の両立を目指した。両者の配合率を変化させた複数のフィルムサンプルを試作し試験した結果、機械特性、嫌気生分解性ともに目標水準に達しない結果となった。

そのため、改良 PHBH の開発を行った結果、市販の生分解性樹脂を含まずポリマーとして改良 PHBH 単独で、生ごみ袋に必要な機械特性をほぼ満たすことを確認した。さらに（３）のバイオガス化試験により、改良 PHBH フィルムは嫌気生分解性にも優れることが確認できた。この改良 PHBH を用いてインフレーション成形の量産機で試作を行い、ヒートシール性、印刷性が問題ないことを確認した。

次年度は引き続き改良 PHBH 配合検討を行い、機械特性を向上させる。また、安定量産化技術を確認し、ライフサイクル実証に向けた生ごみ分別排出・回収試験で用いるサイズの生ごみ袋の試作を行う。

（２）バイオガス化を見据えた PHBH のプラスチック代替製品への利用可能性の検討

企業のバイオプラスチック製品の活用に向けた取組について調査を行い、各業界のバイオプラスチック・代替素材の導入傾向を整理した。

また、生ごみ袋以外の用途については、PHBH が汎用プラスチックに比べて優れている点や汎用プラスチックに比した課題等を整理した。また、令和３年１月に環境省から公開された「バイオプラスチック導入ロードマップ」にて示されたプラスチックのリサイクル調和性等を踏まえて PHBH 利用適性を検討するとともに生分解性と脱炭素性を兼ね備えた PHBH の特性が活かされる用途の具体的な製品例を整理した。

PHBH 代替用途の検討を進める際の基礎情報となる、プラスチックごみの分別状況や汚れ（付着物割合）、素材の調査を行った。その結果、17 品目のプラスチック製品について、樹脂・水分・付着物の割合及び樹脂組成を特定することができた。

（３）PHBH 製生ごみ袋のバイオガス化に関する検討

従来 PHBH と市販の生分解性樹脂を異なる配合率でブレンドした複数の PHBH 製コンパウンドフィルムについてバイオガス化のバッチ試験を行い、嫌気生分解性の評価を行った。その結果、市販の生分解性樹脂とブレンドしたコンパウンドフィルムは PHBH 単独フィルムと比べると生分解率が低下することが分かった。一方、（１）で開発した生ごみ袋に求められる機械特性をほぼ満たす改良 PHBH フィルムは、従来 PHBH フィルムや基準となるセルロースと比べて生分解率が高いことが確認できた。続いて、60 日間のバイオガス化連続試験を行った結果、バイオガス発生量が低下することなく安定して PHBH フィルムが分解できることを確認した。

また、原料に PHBH を含む消化液が植物の生長へ与える影響をコマツナの栽培試験で検証したところ、見かけの生育の様子や外観からは PHBH による生育阻害は認められなかった。

加えて、PHBH 製のカトラリー類（ストロー、スプーン）についてもバイオガス化バッチ試験を行い、生分解性を評価した。

次年度はメタン発酵実機化に向けて、ベンチスケール試験設備でのスケールアップ性の確認に取り組む。

（４）PHBH 製生ごみ袋を用いた生ごみの分別方法等に関する検討

PHBH 製生ごみ袋を用いた生ごみ収集方法については、バイオガス化処理方式と消化液・発酵残渣の利用状況を整理した。湿式処理は生ごみを、乾式処理は生ごみと紙ごみをバイオガス化の処理対象物とする前提で、各方式に応じて消化液の農業利用を可能とするように異物の混入をなくす分別方法を志向した検討を行った。

大都市のみならず中小規模の自治体への社会実装を加速するために、次年度は、実際に PHBH 製

生ごみ袋を用いて生ごみの分別排出・回収試験を実施すべく計画を策定した。

(5) PHBH 製生ごみ袋による CO₂削減効果の定量化に関する検討

PHBH 樹脂、化石資源由来 PE 樹脂からのごみ袋成形が共通しており、袋製造段階の消費エネルギー等のユーティリティが同じだと仮定すると、PHBH 製ごみ袋の原料を廃食用油にすることで、化石資源由来 PE と比べ約 37%の GHG 削減が期待された。袋製造時の環境負荷と原料との関係性について情報収集することが今後の課題となる。

5.3 PHA 系バイオプラスチックのライフサイクルでの環境負荷低減効果に関する実証及びコストの評価（実証事業 3）

本年度は、PHBH 導入効果を評価するライフサイクル分析のために必要なプロセスについて、これまでは既往研究から収集したデータをもとにプロセスモデルを作成していたが、これに最新のインベントリデータを入手してプロセスモデルのブラッシュアップを図った。また、評価シナリオの設定には、これまで PHBH の原料がパーム油だったものから廃食用油やジャトロファ油に置き換えたケース、生ごみの分別収集、消化液の有効利用のケース等を追加することとした。次年度は、各実証データを反映させることで、本実証結果に基づいた解析へと繋げていく予定である。

京都市をケーススタディとしてそのモデルを利用した予備的なシナリオ分析結果では、PHBH 製ごみ袋を厨芥類・紙類と一緒にメタン発酵利用する本システムはライフサイクル全体において国内エネルギー起源の GHG の削減効果が期待されることを明らかにした。次年度は分別や資源循環の視点を考慮した評価を前提に、中小都市モデルでの検討も進めていきたい。

PHBH の原料を現行のパームオイルから廃食用油等の国産油脂源に切り替えるとともに、PHBH 製生ごみ袋を製造し、生ごみの分別収集に用い、生ごみと一緒にバイオガス化する処理システムのコスト評価に向けて、既存情報の収集を進めるとともに、LCA の検討条件を踏まえ、シナリオ、システム境界の検討を行った。また、既存のコスト評価事例をもとにコスト変化の試算を行った。次年度は、実証試験データやフィージビリティスタディ結果等も取り込みコスト変化の定量化を行う予定である。

以上のように、本年度は各事業の検討課題を概ね計画通りに達成することができた。次年度は、最終年度であり、各要素技術の確立を図るとともに、PHBH 製生ごみ袋を用いた生ごみの分別排出・収集からバイオガス化処理までの一貫したサイクルに向けた実証試験に取り組む予定である。さらにライフサイクルでの CO₂削減効果及びコスト変化を明らかにし、システムとしての有効性を実証することで、社会実装に繋がるように意識した取組を進めていきたい。

参考資料

1. 実施記録

本事業における検討を行うために、以下のとおり検討会・現地視察会を開催した。

表 1 検討会・現地視察会実施記録

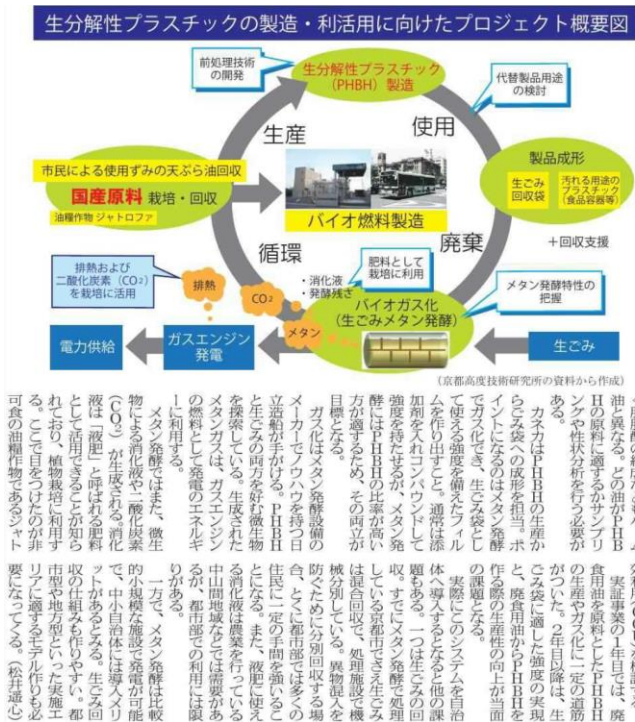
会議名	日時	開催場所	開催内容
第 1 回検討会	8 月 7 日 14:00~16:00	Skype for Business 会議室	(1) 本年度計画及び進捗状況について ・ 事業概要 ・ 廃食用油を用いた PHBH 培養生産方法の開発 ・ 廃食用油の事前精製及びポリマー精製技術の開発 ・ 廃食用油の性状分析結果 ・ PHBH 製生ごみ袋製造技術の開発 ・ PHBH 製生ごみ袋のバイオガス化に関する検討 ・ 新たな生分解性プラ化とバイオ燃料化への取組み ・ ジャトロファ等の油脂作物の国内栽培に関する検討 ・ 消化液の評価試験及びソーダ油滓等の利活用について ・ PHA 系バイオプラスチックの LCA に関する検討
第 2 回検討会 及び現地視察会	10 月 20 日 14:30~17:00	Skype for Business 会議室 及び(株)カネカ 高砂工業所	(1) 本年度の進捗状況について ・ 第 1 回検討会における課題事項 ・ 廃食用油を用いた PHBH 培養生産方法の開発 ・ 廃食用油の事前精製及びポリマー精製技術の開発 ・ PHBH 原料としての油脂原料調達量の拡大に向けたシナリオ検討 ・ ソーダ油滓等の利活用に向けた検討 ・ ジャトロファ等の油脂作物の国内栽培に関する検討 ・ PHBH 製生ごみ袋製造技術の開発 ・ PHBH 製生ごみ袋のバイオガス化に関する検討 ・ 消化液の評価と利用に向けた検討 ・ PHA 系バイオプラスチックの LCA に関する検討 ・ PHA 系バイオプラスチックのコストに関する検討
第 3 回検討会	2 月 26 日 14:00~16:30	Zoom 会議室	(1) 本年度の進捗状況について ・ 第 2 回検討会における課題事項 ・ 廃食用油を用いた PHBH 培養生産方法の開発 ・ 廃食用油の事前精製及びポリマー精製技術の開発 ・ PHBH 原料としての油脂原料調達量の拡大に向けたシナリオにおけるソーダ油滓等の利活用の検討 ・ ジャトロファ等の油脂作物の国内栽培に関する検討 ・ 廃食用油とジャトロファ油および油脂製造時の副生成物（ソーダ油滓）の脂肪酸分析結果 ・ PHBH 製生ごみ袋製造技術の開発 ・ PHBH 製生ごみ袋のバイオガス化に関する検討 ・ 消化液の評価と利用に向けた検討 ・ PHBH のプラスチック代替製品への利用可能性の検討 ・ PHA 系バイオプラスチックの LCA に関する検討 ・ PHA 系バイオプラスチックのコストに関する検討 (2) 次年度の計画について ・ 生ごみ分別排出・回収試験及びベンチスケールバイオガス化試験概要 ・ 分別排出・回収試験計画（案） ・ ベンチスケールバイオガス化試験計画（案）

また、関係者間での情報共有及び進捗管理等を行うため、以下に示す日程でワーキンググループ会合を実施した。

表 2 ワーキンググループ会合等実施記録

会議名	日時	開催場所	開催内容
第 1 回 WG	4 月 23 日 13:00-15:00	Skype for Business	・ 実施計画について（事業全体）
第 2 回 WG	6 月 1 日 14:00-15:15	Skype for Business	・ 進捗状況報告（PHBH 製造、生ごみ袋製造、 バイオガス化試験、各種分析）
第 3 回 WG	6 月 26 日 10:00-11:15	Skype for Business	・ 進捗状況報告（事業全体）
第 4 回 WG	7 月 14 日 15:00-17:00	Skype for Business	・ 進捗状況報告（PHBH 製造、生ごみ袋製造、 バイオガス化試験）
第 5 回 WG	7 月 15 日 13:00-14:00	Skype for Business	・ 進捗状況報告（ジャトロファ等栽培） ・ 専門家からの指導
第 6 回 WG	8 月 19 日 15:00-16:30	ASTEM 会議室	・ 進捗状況報告（ジャトロファ等栽培）
第 7 回 WG	11 月 4 日 16:30-18:00	Skype for Business	・ 進捗状況報告（ジャトロファ等栽培） ・ 専門家からの指導
第 8 回 WG	11 月 11 日 9:00-10:00	Skype for Business	・ 中間評価審査委員会の事前打ち合わせ
第 9 回 WG	12 月 2 日 16:30-18:00	ASTEM 会議室	・ 今後の検討課題について
第 10 回 WG	2 月 3 日 10:00-12:00	Skype for Business	・ 最終評価審査委員会の事前打ち合わせ ・ 次年度の検討事項について
第 11 回 WG	2 月 22 日 14:00-15:00	Skype for Business	・ 検討会事前打ち合わせ
第 12 回 WG	2 月 22 日 16:30-18:00	Skype for Business	・ 進捗状況報告（ジャトロファ等栽培） ・ 専門家からの指導

2. メディア等掲載実績



カネカの生分解性樹脂「PHBH」 循環システム構築めざす

ASTEMなどが実証事業

「ごみ袋↓メタンガス↓エネ・肥料
捨てることなく利用」

ASTEM(アステム)がまとめた「令和2年度脱炭素社会を実現するプラスチック循環システム構築実証事業」として、環境省から受託している。昨年7月にスタートし、事業期間は2021年度までの最大3年間。

プロジェクトでは、生ごみの天ぷら油や廃食用油を原料としてPHBHを生産する。従来の原料は、パーム油や菜種油から輸入する必要があったが、国内で調達可能な原料から生産できるようにして、循環システムに集めることが狙いだ。

実証事業の舞台は京都市。1997年から廃食用油の回収を行っており、市バスなどのバイオディーゼル燃料として活用している。市内に回収拠点は約180カ所あり、18年度の回収実績は1万5000t。廃食用油は、一様でなく脂肪酸の組成でもパーム油と異なる。どの油がPHBHの原料に適するかはサンプリングや性状分析を行う必要がある。

カネカは、PHBHの生産から、生ごみ袋への成形まで、ポリアミドになるのはメタン発酵でガス化でき、生ごみ袋として使える強度を備え、フィルムを作り出すこと、通常の添加剤を入れコンパウンドして強度を持たせるが、メタン発酵はPHBHの比率が高い方が適するため、その両立が目標となる。

ガス化はメタン発酵設備のメーカーでノウハウを持つ日立造船が手がける。PHBHと生ごみの両方を好む微生物を探索している。生成されたメタンガスは、ガスエンジンの燃料として発電のエネルギーに利用する。

メタン発酵では、微生物による消化液や二酸化炭素(CO2)が生成される。消化液は「液肥」と呼ばれる肥料として活用できることが知られており、植物栽培に利用する。ここで目を付けたのが、非可食の油糧作物であるジャートロファという植物だ。種子から採れる油脂は食用には適さないが燃料になる。また、将来自来はPHBHの原料に使えるかどうかにも興味している。

熱帯・亜熱帯に分布する植物だが、実証事業ではメタン発酵で得られるCO2と排熱、消化液を活用し、国内で温室栽培などができるシステムの構築を目指している。これについては、市から回収した廃食用油の分析と合わせ、知見のあるレボニターナショナルと京都農業の研究所が担当。

ライフサイクルアセスメント(LCA)の解析などに、京都大学、各種分析・検討に、高津テックリサーチがかわる。ほか、有識者から助言も得ている。これらPHBHの国内サプライシステムと、エネルギー回収や二酸化炭素回収有効利用(CCU)を検証する。

実証事業の1年目は、廃食用油を原料としたPHBHの生産やガス化による一定の選別が、2年以降は、生ごみ袋に適した強度の実現と、廃食用油からPHBHを生産する際の生産性の向上が当面の課題となる。

実際にこのシステムを自治体へ導入するとなると他の課題もある。一つは生ごみの回収。すでにメタン発酵で処理している京都市で生ごみを回収し、処理施設で機械分別している。異物混入を防ぐために分別回収する場合、今以上に都市部では多くの住民に一定の手間を強いることになる。また、液肥に使える消化液は農業を行っていない中山間地域などでは必要があるが、都市部での利用には課題がある。

一方で、メタン発酵は比較的小規模な施設で発電が可能で、中小自治体には導入メリットがあるとする。生ごみ回収の仕組みも作りやすい。都市型や地方型といった実施工場型に適するモデル作りも必要になってくる。(松井 達也)

(引用) (株) 化学工業日報社「化学工業日報」(令和2年6月24日)

令和2年度 第2回「プラスチック対策プラットフォーム」

1. 主催

関西広域連合プラスチック対策検討会事務局

2. 開催日時 令和3年3月11日（木） 14：00～16：00

3. 開催方法 オンライン開催（Zoom ミーディング）

4. 内容

（1）話題提供

演題：「ペットボトルの『ボトル to ボトル』リサイクルの取組について」

演者：PET ボトルリサイクル推進協議会

演題：「カネカ生分解性ポリマーPHBHの開発の取組について」

演者：株式会社カネカ Green Planet 推進部

（2）調査報告

演題：「令和2年度プラスチック代替品の普及可能性調査およびプラスチックごみ散乱状況の把握手法等調査事業について」

演者：関西広域連合 本部事務局 プラスチック対策検討会

3. 特許出願状況

特許 1 件を出願中。

出願日 : 令和 2 年 10 月 12 日

出願番号 : 特願 2020-171770

題目 : 「ポリ (3-ヒドロキシアルカノエート) の製造方法」

出願人 : 株式会社カネカ