令和３年度環境省委託業務　成果報告書

令和３年度　脱炭素社会を支えるプラスチック等資源循環システム構築実証事業

非可食バイオマスを活用した国産バイオマスプラスチック製造実証事業

令和４年２月

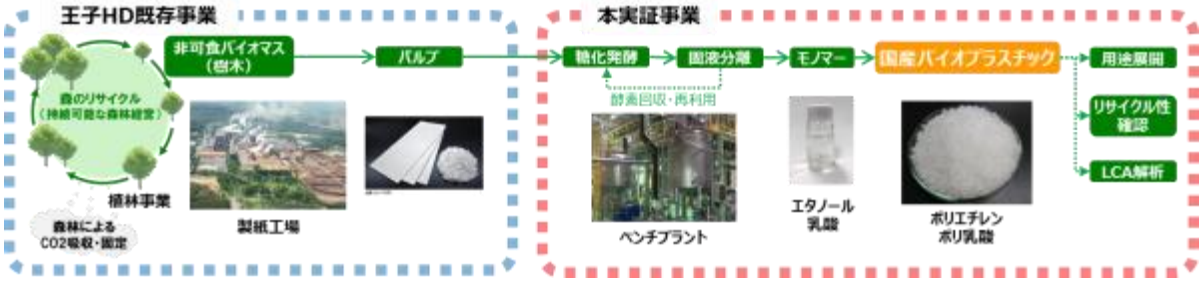
（代表実施者）　王子ホールディングス株式会社

概要（日本語）

バイオマスプラスチック普及を目的として、国内で調達可能なパルプを原料としたポリエチレン、ポリ乳酸製造実証に着手した。製造方法としては、王子ホールディングスが有する並行糖化発酵や酵素回収技術を特徴としたパルプ由来燃料用エタノール製造技術を応用して得られるエタノールや乳酸をバイオマスプラスチック原料モノマーとして生産し、得られたモノマーを合成してバイオマスプラスチックに変換する計画とした。

昨年度まで、ポリエチレンについてはエチレン合成に必要なエタノール精製のスケールアップや、外注によるエチレンサンプル製造検討、エチレンガスからのバイオポリエチレン重合の事前検討を行い、ポリ乳酸については窒素種類検討やメタボローム解析による生産性の改善や 1000L ジャーによるスケールアップ培養検討、乳酸精製やポリ乳酸合成条件の検討を実施した。

今年度、ポリエチレンについては 1000L ジャーから得られた培養液を原料としたエタノール精製を実施し、品質の再現性と、得られた非可食バイオマス由来バイオエタノールを原料に作製したエチレンサンプルから実際に非可食バイオマス由来 PE 樹脂サンプルの製造を検討した。ポリ乳酸については 1000L ジャーを用いた大量培養の再現性の確認、得られた乳酸サンプルの精製条件検討およびポリ乳酸合成への影響評価、大量サンプル合成について検討した。



LCA 解析では、ベンチ、及び商業機の設計データから想定されるエネルギー使用量、想定収率などを反映し、CO2 削減効果の推計について精査を実施した。

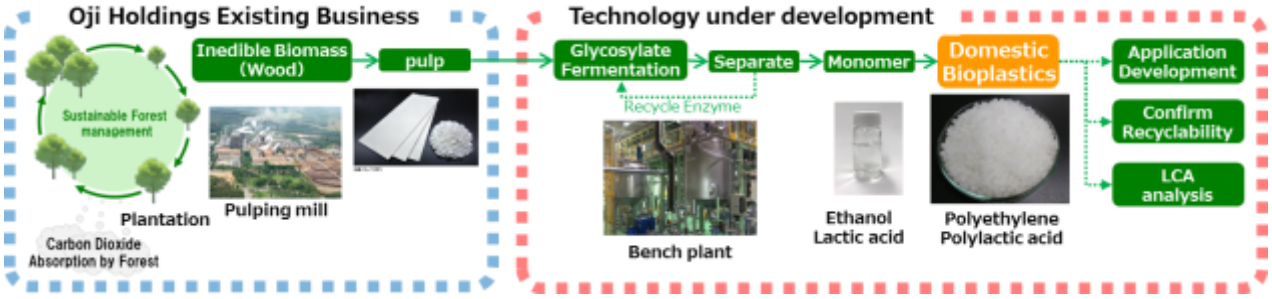
また、ポリエチレンについてはリサイクル性評価を実施し、あわせて本実証で得られるバイオマスプラスチックに関し、バイオマスバランス方式の導入など、世界および我が国の概況を整理し、各樹脂のマーケティング対象とする新たな製品分野について調査を実施した。

Summary

With the aim of increasing the use of biomass plastics, we have started a new project producing and demonstrating polyethylene and polylactic acid derived from pulp that is provided domestically.

In the previous fiscal year, for polyethylene, we scaled-up of purification of ethanol that was necessary for polyethylene synthesis, studied ethylene sample production by outsourcing, and conducted a preliminarily study of bio-polyethylene synthesis from ethylene gas. In the case of polylactic acid, we improvemed lactic acid productivity by studying the nitrogen source and a metabolomic analysis, a study of scaled-up culture in a 1000L jar, and studies of lactic acid purification and synthesis condtion of polylactic acid.

In this fiscal year, for polyethylene, we confirmed the preporoducibility of purification bioethanol quality, from culuture in a 1000L jar, and examined ethylene and polyethylene synthesis. In the case of polylactic acid, we confirmed the preporoducibility of lactic acid of 1000L jar, and, examined the purification condition, and investigated the effects on polylactic acid synthesis, and considered synthesizing large samples.



In LCA analysis, we recalculated the CO2 reduction effect of each plastics, considering estimated energy consumption of bench scale and pilot scale and estimated yields.

Regarding, recyclability we demonstrated recyclability test to bio-polyethylene. In marketing, we investigated the latest situation of bioplastics in the world and Japan, including the situation of bio-mass balance approach and new target product segments for each plastic.

目次

概要（日本語）・・・・・ 2
概要（英語）・・・・・ 3
目次・・・・・ 4

１．本文・・・・・ 7

１－１　非可食バイオマスを活用した国産バイオマスプラスチック製造実証事業・・・・・ 7
１－１－１　本事業の背景および目的・・・・・ 7
１－１－２　従来技術・・・・・ 8
１－１－２－１　並行糖化発酵・・・・・ 8
１－１－２－２　酵素回収再利用・・・・・ 9
１－１－３　本事業の解決すべき技術課題・・・・・ 11
１－１－３－１　非可食バイオマス由来 PE 樹脂・・・・・ 11
１－１－３－２　非可食バイオマス由来 PLA 樹脂・・・・・ 14

２．研究開発項目ごとの成果・・・・・ 17

２－１　非可食バイオマス由来 PE 樹脂に関する技術開発（王子ホールディングス）・・・・・ 17
２－１－１　エチレン用バイオエタノール精製検討 17
２－１－１－１　1000L ジャーによるパルプ由来バイオエタノール製造試験 17
２－１－１－２　非可食バイオマス由来バイオエタノール精製・・・・・ 18
２－１－１－２－１　60 段 2 塔蒸留によるエタノールサンプル精製（400Ｌスケール再現性）・・・・・ 20
２－１－２　バイオエチレン製造検討・・・・・ 45
２－１－２－１　エチレン試験製造・・・・・ 45
２－１－２－２　エチレンサンプル分析・・・・・ 47
２－１－２－３　エチレン製造設備ユーティリティー算出検討・・・・・ 49
２－１－３　バイオポリエチレン重合条件検討（日本ポリエチレン）・・・・・ 50
２－１－３－１　重合条件設定・・・・・ 50
２－１－３－２　バイオエチレン重合評価（Test4 サンプル）・・・・・ 52
２－１－３－３　バイオエチレン重合評価（Test5 サンプル）・・・・・ 53
２－１－３－４　バイオポリエチレンペレット化および品質評価・・・・・ 54
２－１－３－５　バイオエチレン不純物定性分析・・・・・ 57

２－２　非可食バイオマス由来 PLA 樹脂に関する技術開発（王子ホールディングス）・・・・・ 61
２－２－１　乳酸発酵条件の検討・・・・・ 61
２－２－１－１　乳酸大量培養（一回目）・・・・・ 62
２－２－１－２　乳酸大量培養（二回目）・・・・・ 63
２－２－２　乳酸精製検討・・・・・ 64
２－２－２－１　乳酸精製スケールアップ検討・・・・・ 64
２－２－２－２　乳酸サンプル評価・・・・・ 69

２－２－２－３　乳酸精製工程検討（有機不純物低減）　・・・・・　71
２－２－２－４　乳酸サンプル評価　・・・・・　74
２－２－２－５　乳酸精製工程検討（無機塩除去工程改善）　・・・・・　75
２－２－２－６　乳酸サンプル評価　・・・・・　77
２－２－２－７　乳酸サンプル大量精製検討　・・・・・　78
２－２－３　ポリ乳酸合成検討　・・・・・　80
２－２－３－１　ポリ乳酸合成条件検討　・・・・・　80
２－２－３－２　ポリ乳酸大量サンプル合成検討　・・・・・　81
２－２－３－３　ポリ乳酸大量サンプル品質評価　・・・・・　83
２－２－３－４　ポリ乳酸大量サンプル純度分析　・・・・・　87

２－３　ＬＣＡ解析（双日プラネット）　・・・・・　91
２－３－１　CO2 削減効果推計に関する評価条件・評価範囲の設定　・・・・・　91
２－３－１－１　評価単位の設定　・・・・・　91
２－３－１－１―１　評価対象製品　・・・・・　91
２－３－１－１―２　機能と機能単位　・・・・・　93
２－３－１－１－３　評価単位　・・・・・　93
２－３－１－２　評価範囲の設定　・・・・・　94
２－３－１－２－１　評価範囲の考え方　・・・・・　94
２－３－１－２－２　評価の対象外としたプロセス　・・・・・　95
２－３－１－２－３　炭素吸収効果の考え方　・・・・・　95
２－３－１－３　評価対象とした環境影響範囲　・・・・・　95
２－３－１－４　評価に用いたデータベース　・・・・・　95
２－３－２　ポリエチレンに関する CO2 削減効果の推計　・・・・・　96
２－３－２－１　評価条件（評価対象製品）　・・・・・　96
２－３－２－２　CO2 排出量削減効果　・・・・・　100
２－３－２－２－１　非可食セルロース由来ポリエチレン　・・・・・　100
２－３－２－２－２　石油由来ポリエチレン　・・・・・　103
２－３－２－１－３　CO2 排出量削減効果の推計　・・・・・　103
２－３－３　ポリ乳酸に関する CO2 削減効果の推計　・・・・・　105
２－３－３－１　評価条件　・・・・・　105
２－３－３－２　CO２排出量削減効果　・・・・・　106
２－３－３－２－１　非可食セルロース由来ポリ乳酸　・・・・・　106
２－３－３－２－２　トウモロコシ由来ポリ乳酸　・・・・・　106
２－３－３－２－３　CO2 排出量削減効果の推計　・・・・・　107
２－３－４　普及段階における CO2 削減効果の算定方法の検討　・・・・・　107

２－４　リサイクル性評価（双日プラネット）　・・・・・　108

２－５　マーケティング（双日プラネット）　・・・・・　111
２－５－１　バイオプラスチック概観　・・・・・　111
２－５－２　バイオポリエチレン　・・・・・　115
２－５－２－２　新用途候補　・・・・・　117
２－５－２－２－１　ボトルキャップ　・・・・・　117
２－５－２－２－２　自動車用燃料タンク　・・・・・　120
２－５－２－２－３　シーラントフィルム　・・・・・　122
２－５－２－３　バイオマス度認証方式　・・・・・　125
２－５－２－３－１　現行のバイオマス度認定方式　・・・・・　125

２－５－２－３－２　日本国内の認証制度　・・・・・　127
２－５－２－３－３　米国の認証制度　・・・・・　129
２－５－２－３－４　欧州の認証制度　・・・・・　130
２－５－２－３－５　マスバランス方式によるバイオマス度認定方式　・・・・・　131
２－５－２－３－６　バイオマスバランス・アプローチ　・・・・・　133
２－５－２－３－７　マスバランス方式の認証機関　・・・・・　135
２－５－２－３－８　マスバランス方式のメリットとデメリット　・・・・・　136
２－５－２－３－９　認証方式を巡る今後の展開　・・・・・　136
２－５－３　ポリ乳酸　・・・・・　137
２－５－３－１　ポリ乳酸市場　・・・・・　137
２－５－３－２　ポリ乳酸の新規用途（不織布）　・・・・・　137
２－５－３－２－１　用途別需要　・・・・・　141
２－５－３－２－２　不織布代替として期待される用途分野　147
２－５－３－２－３　リサイクルについて　148
２－５－４　乳酸および乳酸エステル　149
２－５－４－１　生産　149
２－５－４－２　用途別需要（世界）　150
２－５－４－３　用途別需要（日本）　151
２－５－４－４　2030 年の需要予測　152

３．研究発表・講演、文献、特許などの状況　・・・・・　154

１．本文

１－１非可食バイオマスを活用した国産バイオマスプラスチック製造実証事業

１－１－１　本事業の背景及び目的

日本政府が 2,000 千トン/年のバイオマスプラスチックの普及を掲げている中、既存石化樹脂の国内流通量の 24%がポリエチレンであり、バイオポリエチレンが日本におけるバイオマスプラスチック普及のキーアイテムであると言える。一方、バイオポリエチレンは Braskem 社（ブラジル）、ポリ乳酸は NatureWorks（アメリカ）、海正生物材料（中国）などが生産して世界中の需要に対応しているが、その生産量は 10～20 万 t/年と限定的であり、日本への供給量が不足していることも普及における問題点であると考えられる。

このような状況下でバイオマスプラスチック普及の目標量（200 万 t/年）を達成するためには、日本市場に特化した新たなバイオマスプラスチック供給システムが必要だが、十分な量を確保可能とするバイオマス資源が見当たらないことから、国産でのバイオマスプラスチックの製造の実現は困難とされてきた。

しかし、今回、国内で調達可能なバイオマス原料として、製紙会社が製造するパルプを原料としたバイオマスプラスチック製造に着目した。近年、国内パルプ製造はスマートフォンやタブレット普及が進む中、特に印刷用紙の需要が減少しており、日本国内で調達可能なバイオマスとしては、十分な量が確保可能と考えられる。そこで、本実証事業はパルプからのバイオマスプラスチック製造技術開発において、いくつかの技術的課題を克服することにより、日本市場向けに特化した、国産バイオマスプラスチック供給を実現することを目的とした。

１－１－２　従来技術

王子ホールディングスでは 2015 年 4 月から 2018 年 3 月まで NEDO 事業によるバイオ燃料開発「木本バイオマスを原料とする日本の持続可能性基準に適合するセルロース系エタノールの一貫生産技術開発及び事業性評価」を実施してきた[1]。

１－１－２－１　並行糖化発酵

当該事業ではセルロースを酵素（セルラーゼ）によってグルコースに分解しつつ、同一の反応槽で酵母によってグルコースをエタノールに変換する並行糖化発酵工程（図１－１－２－１－１下）を構築した。

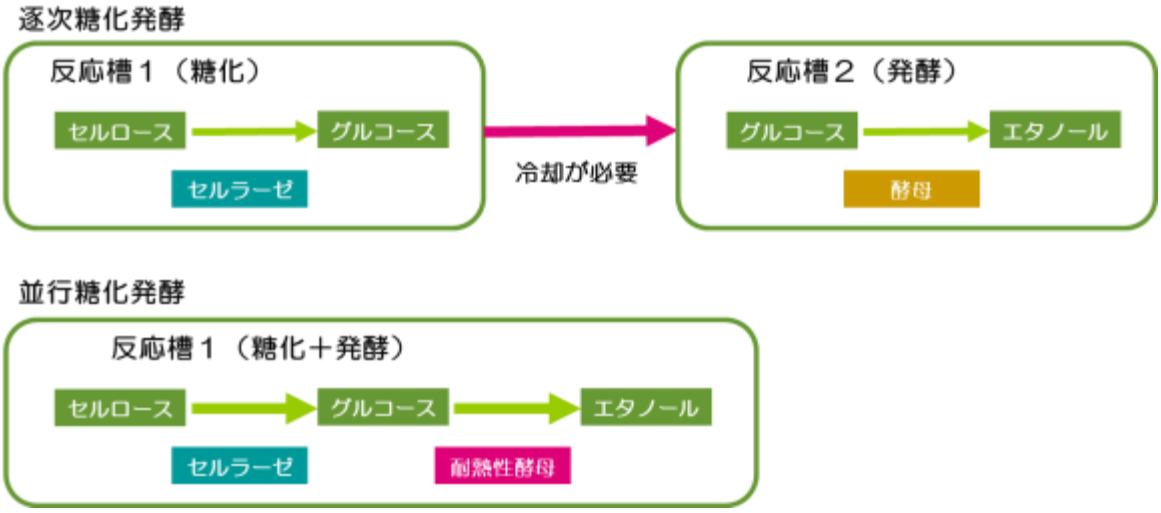


図１－１－２－１－１　セルロース由来エタノール製造方法

一般的にセルラーゼによるセルロースの分解では、生成するグルコースが酵素反応を阻害する生成物阻害（図１－１－２－１－２）が発生する為、従来の逐次糖化発酵では原料濃度を低く設定する必要があったが、王子 HD で構築した並行糖化発酵法では生成したグルコースが速やかにエタノールに変換される為、生成物阻害が発生せず、反応時間の短縮と、原料濃度を高めることが可能となった。

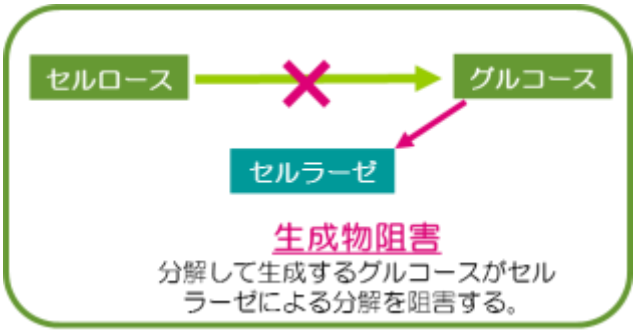


図１－１－２－１－２　セルラーゼにおける生成物阻害

また、セルラーゼは通常の至適温度が 50℃であり、逐次糖化発酵では発酵反応時に移行する際、冷却が必要であった。さらに並行糖化発酵においても酵母が生育可能な 30℃以下の温度

[1] 出展：NEDO 成果報告書 https://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201708/20170000000768.html

では反応時間が長くなる問題点があったが、30℃以上でも発酵が可能な耐熱性酵母をスクリーニングすることで、並行糖化発酵時の温度を 30℃以上で行うことを可能とした。これらにより、原料濃度や反応時間を改善することが可能となった。（表１－１－２－１－３）。

表１－１－２－１－３　逐次糖化発酵と並行糖化発酵の処理条件

	原料濃度	反応温度	反応時間
従来法 （逐次糖化発酵）	3～5%	糖化：50℃ 発酵：30℃以下	糖化：72 時間 発酵：24 時間
並行糖化発酵	10～15%まで可能	30～40℃	33～48 時間

１－１－２－２　酵素回収再利用

現在のバイオマスプラスチックは主にトウモロコシやサトウキビなど、可食性の植物から得られる糖（グルコースやシュークロース）を原料としている。セルロースもその構成単語はデンプンと同じくグルコースだが（図１－１－２－２－１）、でん粉を分解する酵素（アミラーゼ）と比較して、大量の酵素が必要だった。

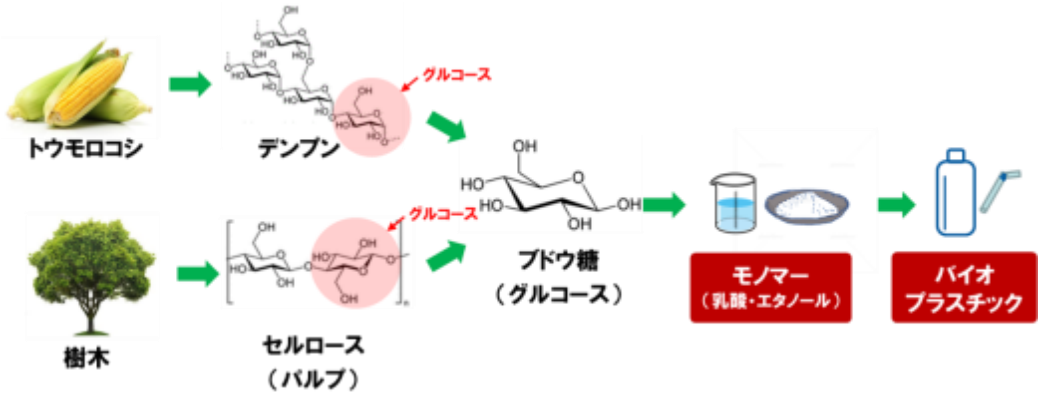


図１－１－２－２－１　デンプンおよびセルロース由来バイオマスプラスチック変換フロー

そこで、並行糖化発酵の反応液からエタノールだけを分離し、酵素と酵母を回収して再利用する工程を構築した（図１－１－２－２－２）。図１－１－２－２－３に示すように酵素はほぼ完全に回収されており、この方法を採用することで、使用する酵素量を大幅に削減することが可能となった。

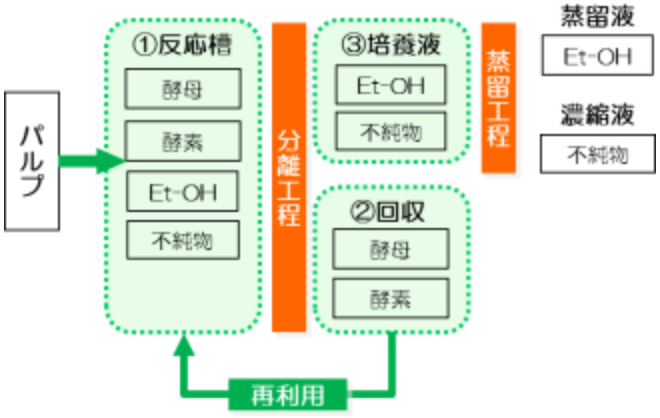


図１－１－２－２－２　エタノール生産における酵素回収工程

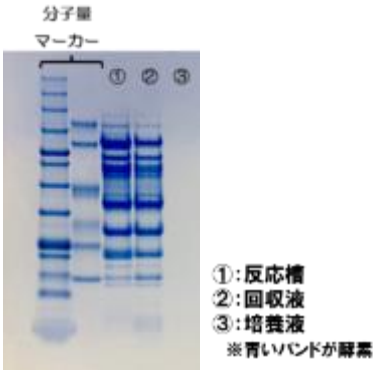


図１－１－２－２－３　酵素回収性確認

１－１－３　本事業の解決すべき技術課題

前章に記載の従来技術を応用し、非可食バイオマスであるパルプから、ポリエチレン・ポリ乳酸を製造するために解決すべき技術課題を検討した。

１－１－３－１　非可食バイオマス由来 PE 樹脂

NEDO 事業ではセルロースから燃料用途としてのバイオエタノール製造を検討し、品質確認や製造コスト算出を行ってきたが、バイオエタノールからポリエチレン製造に関する知見はない。

技術的には図１－１－３－１－１に示すように、エタノールを脱水して得られるエチレンガスからポリエチレンは製造可能だが、バイオエタノールやエチレンに含まれる不純物が触媒反応に影響することが予想される。そこで、パルプから実際に得られたバイオエタノールを精製し、エチレンガスへと変換した後に、ポリエチレンを合成し、品質や収率などを確認することとした。

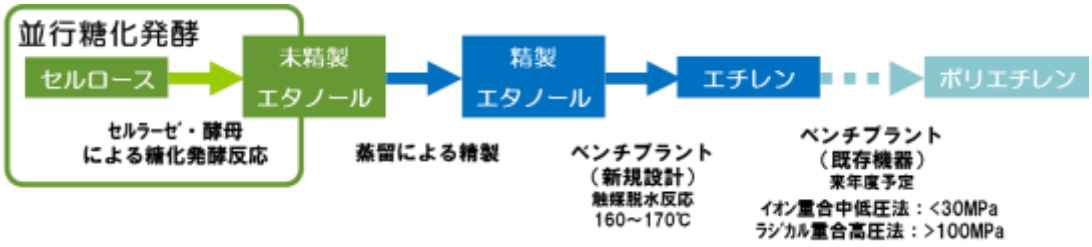


図１－１－３－１－１　ポリエチレン製造フロー

一昨年度はエタノールからエチレンガスを製造するラボ試験機の基本設計と、ラボ試験機に供給するバイオエタノールをパルプから生産する培養条件と精製条件を検討した。ラボ試験機は昨年度に基本設計を行い、昨年度に製作および設置を検討していたが、コロナ禍により部品などの資材調達遅れによるラボ試験機納入時期が遅れることが判明したため、昨年度は外注によるエチレンサンプル製造を検討することとした。

エチレン用バイオエタノール精製検討としては一昨年度に 10L および 50L ジャーによるパルプ由来バイオエタノール製造を行い、得られた培養液から 10L 蒸留器での精製試験を実施、エチレン合成用としての要求品質を満たす精製（表１－１－３－１－２　test3）を確認した。昨年度はスケールアップを行い、1000L ジャーでの非可食バイオマス由来バイオエタノールの製造と、50L および 400L 蒸留器での精製試験を実施し、大量サンプル作成に必要なスケールアップデータの取得（図１－１－３－１－３、表１－１－３－１－２　test4 および 5）を実施した。

表１－１－３－１－２　エタノールサンプル精製結果

項目	要求品質	1段蒸留 10L test1	2段蒸留 10L test2	2段蒸留 10L test3	2段蒸留 50L test4	2段蒸留 400L test5
エタノール(%)	>95	>95	>95	>95	>95	>95
酸度（mg/L)	<20	–	–	測定予定	測定予定	測定予定
アセトアルデヒド(ppm)	<30	110-146	52-84	<19	<23	<23
不揮発性物質(ppm)	<30	–	–	測定予定	測定予定	測定予定
メタノール(ppm)	<50	85-154	<39	<39	<39	<39
酢酸エチル(ppm)	<80	10-654	<9	<9	<9	<9
イソプロパノール (ppm)	<20	<11	<11	<11	<11	<11
N-プロパノール(ppm)	<10	<0.8	<0.8	<0.8	<0.8	<0.8
N-ブタノール(ppm)	<10	<0.8	<0.8	<0.8	<0.8	<0.8
アセタール(ppm)	<50	9-34	<8	<8	<8	<8
高級アルコール(ppm)	<100	<40	<40	<40	<40	<40
硫黄	<0.8	–	–	測定予定	測定予定	測定予定

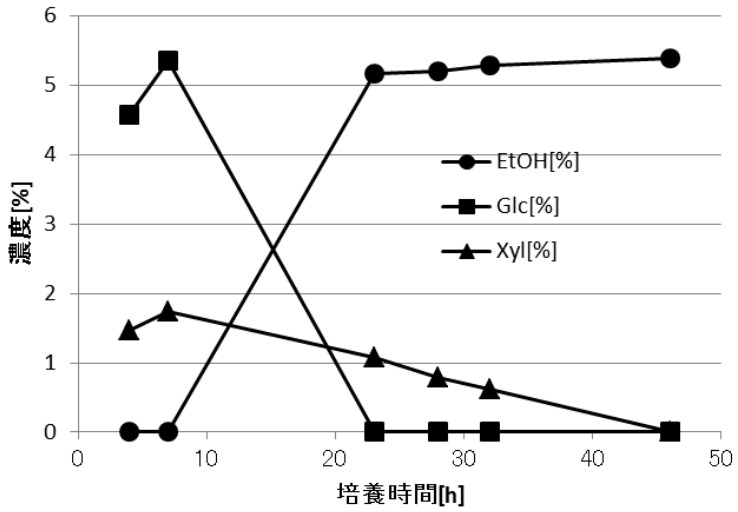


図１－１－３－１－３　1000L 培養槽エタノールサンプル製造結果

更に昨年度はスラリー法による石化原料由来エチレンガスからのポリエチレン重合の事前ラボ検討を実施（図１－１－３－１－４）し、大量サンプル作成に必要な基本的な重合条件について検討した。今年度は 1000L ジャーから得られた培養液を原料としたエタノール精製を実施し、品質の再現性と、得られた非可食バイオマス由来バイオエタノールを原料に作製したエチレンサンプルから実際に非可食バイオマス由来 PE 樹脂サンプルの製造を検討した。

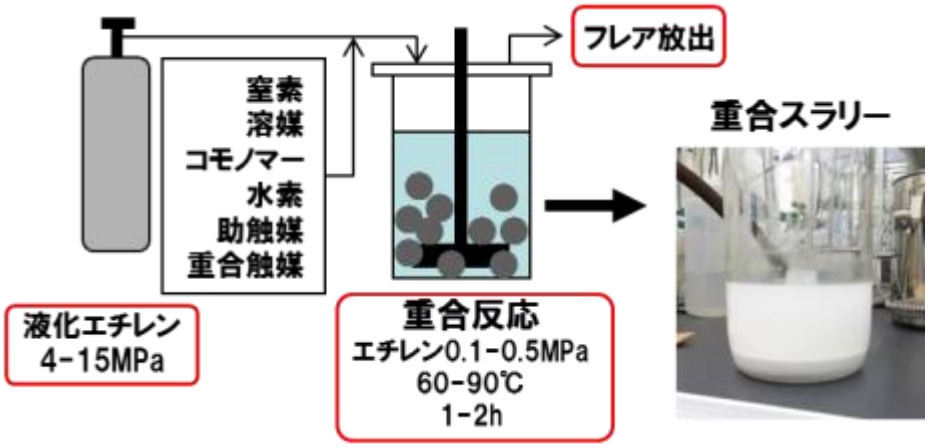


図１－１－３－１－４　ポリエチレン重合ラボ試験機

１－１－３－２　非可食バイオマス由来 PLA 樹脂

NEDO 事業では反応槽にセルラーゼと酵母を添加することでエタノールを生産していたが、酵母の代わりに乳酸菌を添加することで、乳酸の生産が理論的には可能である（図１－１－３－２－１）。

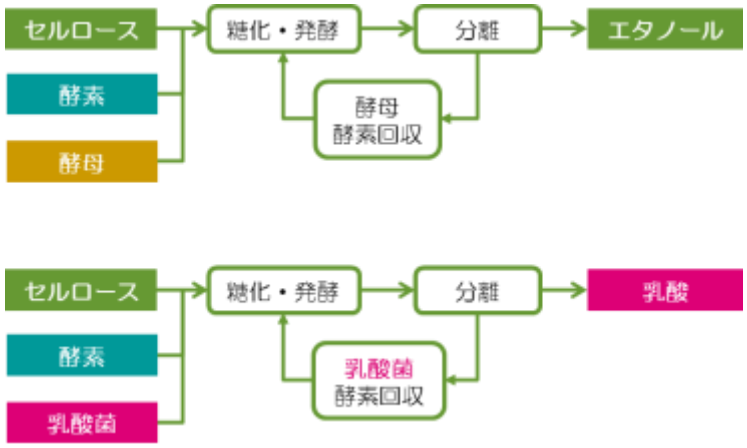


図１－１－３－２－１　エタノール・乳酸生産フロー

一昨年度に、フラスコによるパルプを原料とした場合の菌株スクリーニング（図１－１－３－２－２）を行い、非可食バイオマスから乳酸収率が高く、L 純度も高い菌株（No.31）を見いだした。昨年度は温度、攪拌条件、窒素量など培養条件の検討を実施し、窒素現種類の検討では高い生産性と光学純度を示す窒素源 B を選定した（図１－１－３－２－３）。これらの結果で選定した条件で 1000L ジャーによるスケールアップ培養による乳酸生産を確認した（図１－１－３－２－４）。

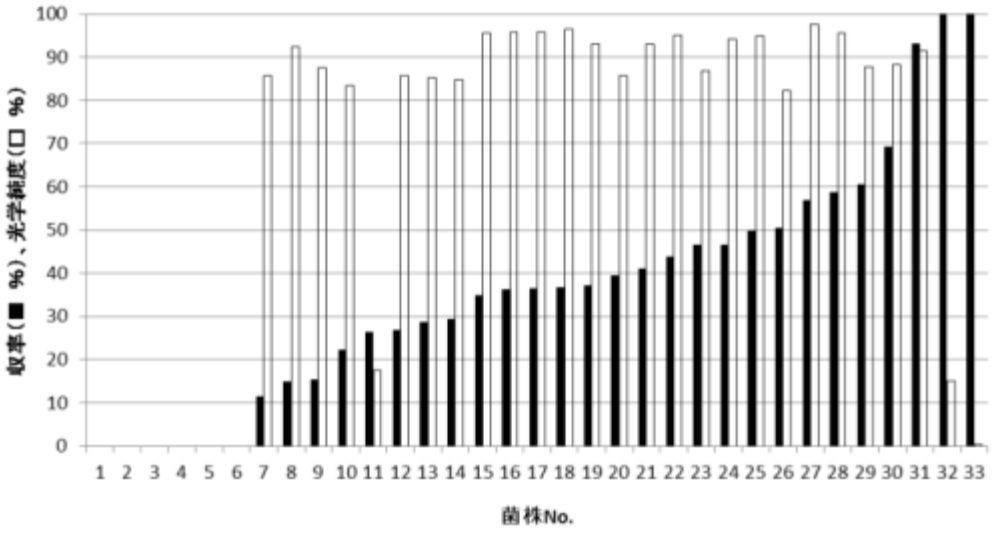


図１－１－３－２－２　乳酸生産菌スクリーニング結果

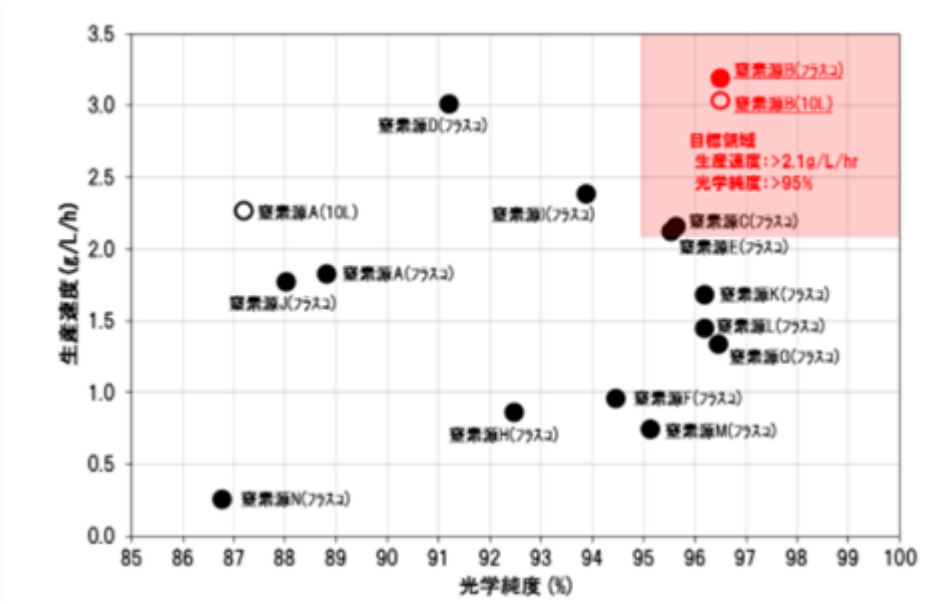


図１－１－３－２－３　窒素源種類検討結果

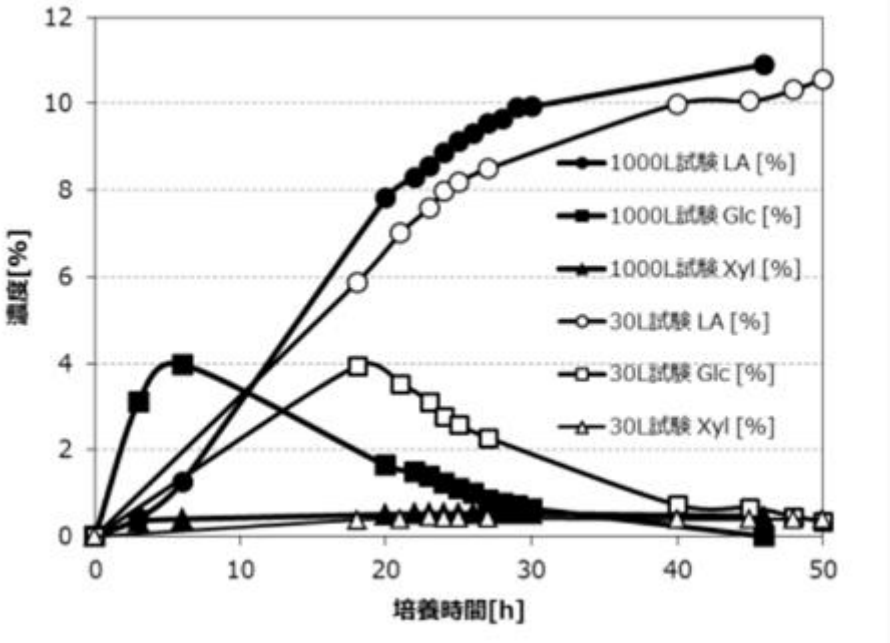


図１－１－３－２－４　乳酸大量培養試験結果

得られた乳酸は図１－１－３－２－５に示すように、精製した後にラクチドを経由してポリ乳酸を合成することが可能だが、乳酸培養液に含まれる不純物が触媒反応に影響することが予想される。そこで、パルプから実際に得られた乳酸培養液を精製し、ラクチドへと変換した後に、ポリ乳酸を合成し、品質や収率などを確認することとした。

図１－１－３－２－５　ポリ乳酸製造フロー

昨年度までに数Ｌスケールにおける培養条件の検討を開始し、得られた培養液からの乳酸精製とポリ乳酸の予備合成試験を行ってきた（写真１－１－３－２－６）。今年度は乳酸大量培養の再現性の確認、乳酸精製条件の検討およびポリ乳酸合成への影響評価、大量サンプル合成について検討した。

写真１－１－３－２－６　非可食バイオマス由来ポリ乳酸

２．研究開発項目ごとの成果

２－１非可食バイオマス由来 PE 樹脂に関する技術開発

２－１－１　エチレン用バイオエタノール精製検討

エチレン製造用のエタノールは NEDO 事業にて開発した燃料用バイオエタノール製造法を用いることとした。昨年度は 1000L ジャーでのパルプ由来バイオエタノールサンプル製造と 50L および 400L 蒸留器での精製試験を実施することで、大量サンプル作成に必要なスケールアップデータの取得を実施した。今年度は 1000L ジャーでのパルプ由来バイオエタノールサンプルの作成し、得られたバイオエタノールサンプルについて精製を行った。

２－１－１－１　1000L ジャーによるパルプ由来バイオエタノール製造試験

昨年度と同様に 1000L ジャーでのパルプ由来バイオエタノール製造試験を実施した。

２－１－１－１ａ　実施内容及び成果

（方法）

王子ホールディングスが有する 1000Ｌジャーファメンター（写真２－１－１－１ａ－１）を用いた糖化発酵試験を行い、48 時間後の槽内エタノール濃度を計測した。試験条件は、基質：広葉樹クラフトパルプ：20%、酵素：所定量、初期酵母量：20Ｌ、pH：4.5（6N NaOH で調整）、温度：30℃とした。

写真２－１－１－１ａ－１　1000Ｌジャーファーメンター

（結果）

48 時間後、1000Ｌジャーファーメンターの槽内エタノール濃度を測定したところ、エタノール濃度は 9.6%であることを確認した。得られたエタノール収率や投入酵素量、試薬量などから変動費のコスト試算を実施した。コスト試算の結果、変動費の大部分は原料費（パルプ）をしめることが判明した。

２－１－１－２　非可食バイオマス由来バイオエタノール精製

エチレン製造では純度が高く、不純物の少ないエタノールを投入する必要がある。そこで表２－１－１－２－１に示す品質のエタノールを取得するため、蒸留による精製を実施した。

表２－１－１－２－１　ラボ試験機基本仕様

項目	条件
密度（kg/m3、20℃）	<811.0
アルコール濃度（%V/V）	>95
酸度（ppm）	<20
不揮発物（ppm）	<30
アセトアルデヒド（ppm）	<30
メタノール（ppm）	<50
酢酸エチル（ppm）	<80
イソプロパノール（ppm）	<20
N-プロパノール（ppm）	<20
N-ブタノール（ppm）	<20
アセタール（ppm）	<50
高級アルコール（ppm）	<100
硫黄（ppm）	<0.8

昨年度までに図２－１－１－２－２に示すように、60 段蒸留を 2 塔用いることで、収率が高く、不純物混入が少ないエタノールサンプルを得ることを確認し、最終的には 1 塔目 400L、2 塔目 50L の蒸留器を用いたスケールアップ試験でも精製が可能であることを確認した（図２－１－１－２－３）。

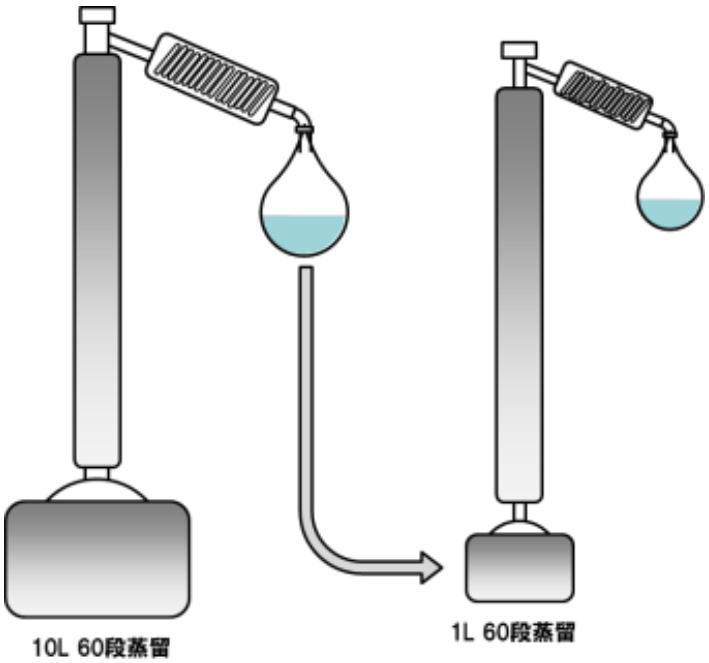


図２－１－１－２－２　60 段 2 塔蒸留

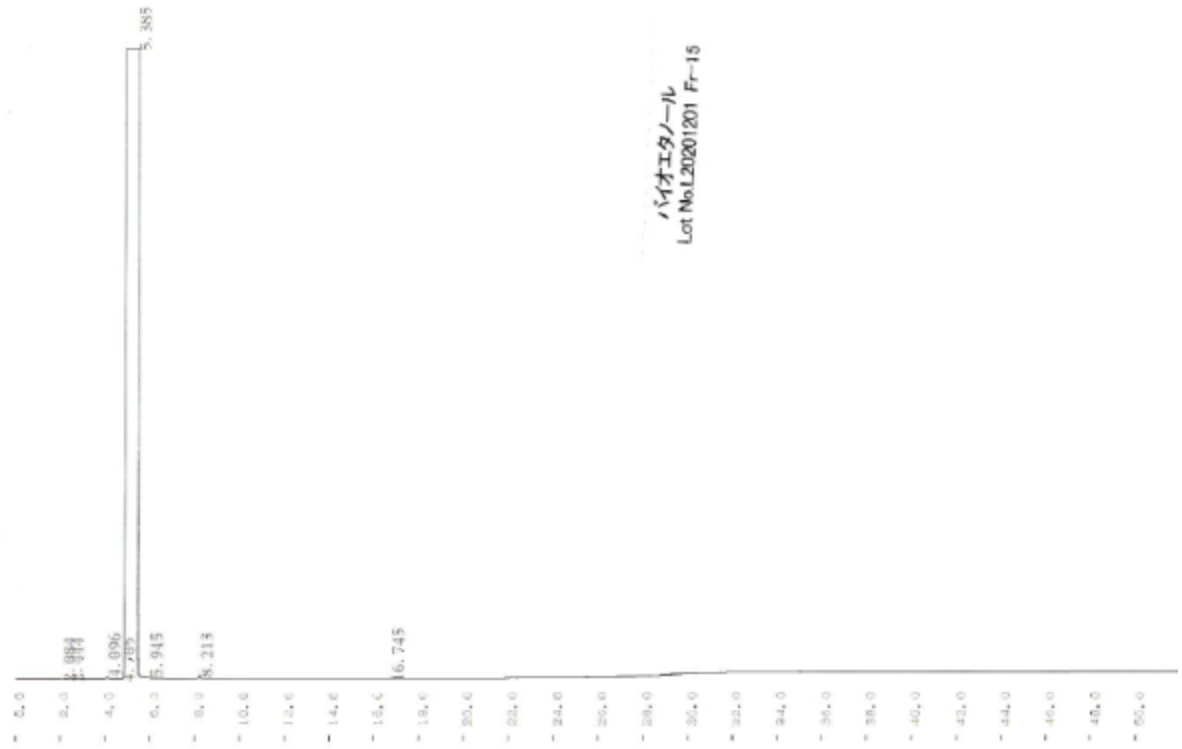


図２－１－１－２－３　スケールアップ蒸留精製エタノール GC チャート

２－１－１－２－１　60 段 2 塔蒸留によるエタノールサンプル精製（400Ｌスケール再現性）

昨年度に 400Ｌ蒸留器での試験を行い、スケールアップでの精製が可能かを確認した。今年度は昨年度の再現性の確認し、次章で検討するエチレン製造用の原料としての非可食バイオマス由来バイオエタノールを確保することとした。

２－１－１－２－１－１　1 塔目 400L60 段蒸留

２－１－１－２－１－１ａ　実施内容及び成果

（方法）

60 段蒸留装置（容量：400L）を用いた蒸留試験を行い、所定時間後のエタノール濃度を計測した。試験条件は、エタノールの沸点は 78.3℃であることから、塔頂温度 78-79℃に設定する為、加熱温度 120℃とし、後段の 60 段蒸留の原料を作成した。

（結果）

所定時間後のエタノール濃度、サンプル収率を表２－１－１－２－１－１ａ－１に示す。Fr.2～18 までは塔頂温度は 77.9～78.6℃と安定しており、90%以上のエタノール濃度を示した。

表２－１－１－２－１－１ａ－１　蒸留試験結果

	エタノール(%)	サンプル量(g)	加熱温度	下部温度	塔頂温度
元液	9.6	384,990			
Fr.1	76.3	300.8	120℃	97.5℃	77.8℃
Fr.2	90.4	495.3	120℃	97.8℃	77.9℃
Fr.3	94.6	693.5	120℃	98.1℃	78.0℃
Fr.4	95.4	605.2	120℃	98.0℃	77.9℃
Fr.5	95.3	433.7	120℃	98.2℃	78.1℃
Fr.6	95.4	745.7	120℃	98.3℃	78.0℃
Fr.7	95.5	642.1	120℃	98.5℃	78.1℃
Fr.8	95.5	587.2	120℃	98.5℃	78.1℃
Fr.9	95.5	561.6	120℃	98.8℃	78.0℃
Fr.10	95.5	585.3	120℃	99.0℃	78.0℃
Fr.11	95.5	586.6	120℃	99.0℃	78.0℃
Fr.12	95.6	649.0	120℃	99.0℃	78.1℃
Fr.13	95.5	589.1	120℃	98.9℃	78.2℃
Fr.14	95.5	538.2	120℃	98.6℃	78.2℃
Fr.15	95.5	618.0	120℃	99.0℃	78.2℃
Fr.16	95.5	12,740.0	120℃	101.0℃	78.4℃
Fr.17	95.4	8,420.0	120℃	100.8℃	78.1℃
Fr.18	94.7	401.3	120℃	100.7℃	78.6℃
Fr.19	89.9	881.1	120℃	100.6℃	84.9℃
Fr.20	75.4	504.7	120℃	100.6℃	95.1
残液		349,030			

各フラクションの GC 分析結果を図２－１－１－２－１－１ａ－２～２１に示す。Fr.1～15 ではエタノールよりも前に溶出する低沸点不純物がみられた（図２－１－１－２－１－１ａ－３～４）。Fr.16～17 では 6.1 分付近に観察されるエタノール以外のピークは減少している（図２－１－１－２－１－１ａ－１７～１８）。Fr.19～20 ではエタノールは少し残っているが、20 分以降の高沸点不純物が多く、残液にはエタノールもなく、高沸点不純物だけが残存していた（図２－１－１－２－１－１ａ－１９～２１）。２塔目は Fr.15～16 をまとめて処理することとした。

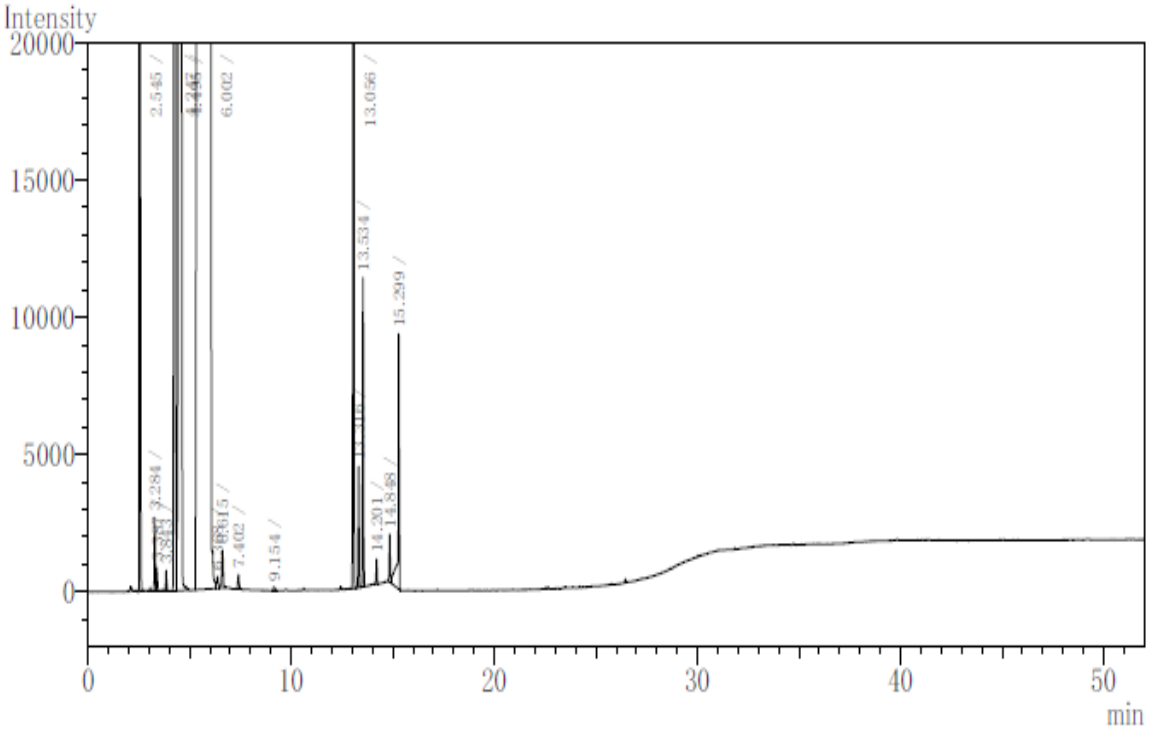


図２－１－１－２－１－１ａ－２ Fr.1 GC チャート

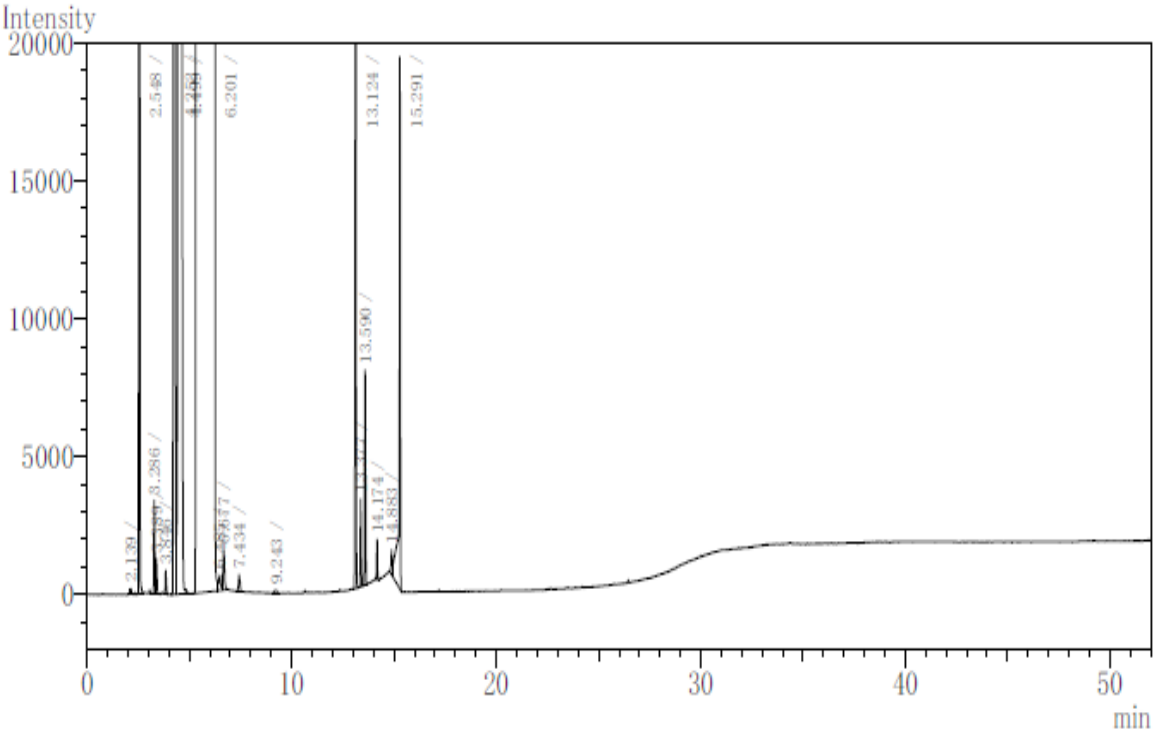


図２－１－１－２－１－１ａ－３ Fr.2 GC チャート

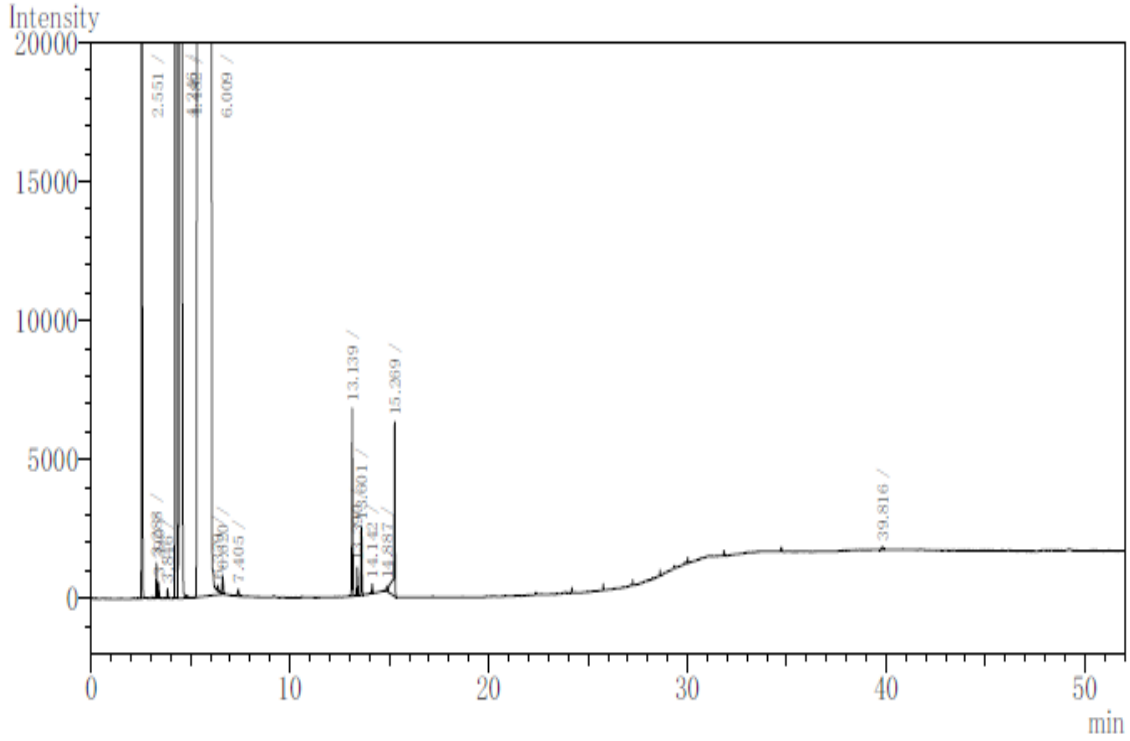


図２－１－１－２－１－１ａ－４　Fr.3 GC チャート

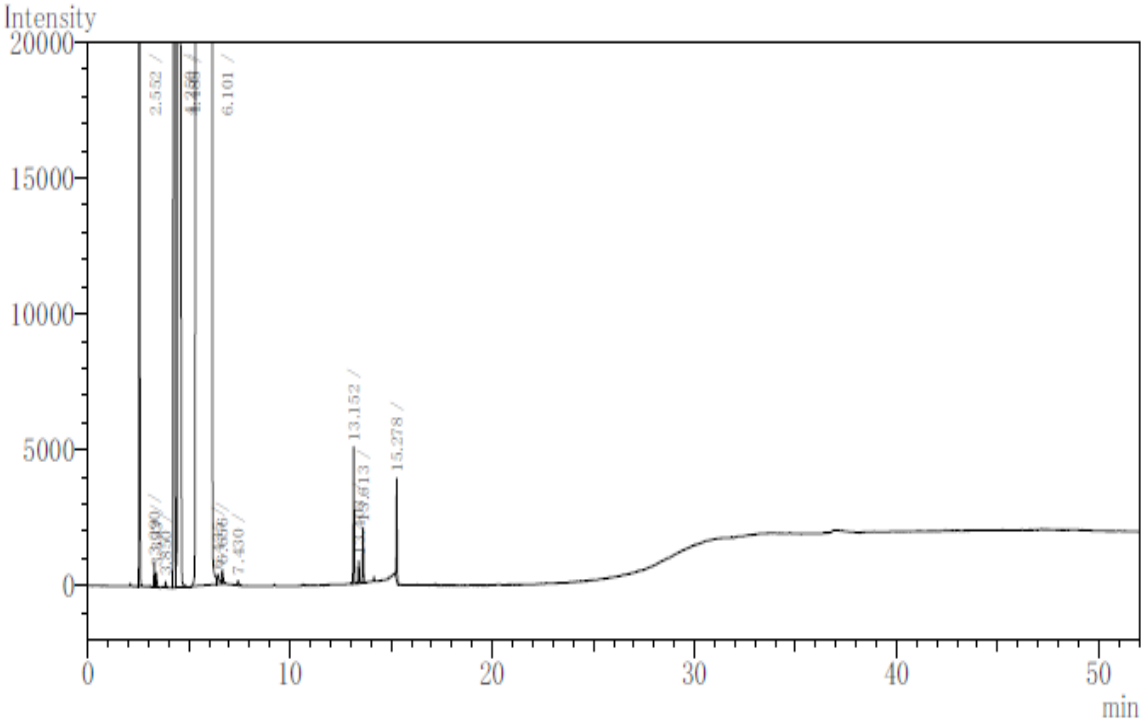


図２－１－１－２－１－１ａ－５　Fr.4 GC チャート

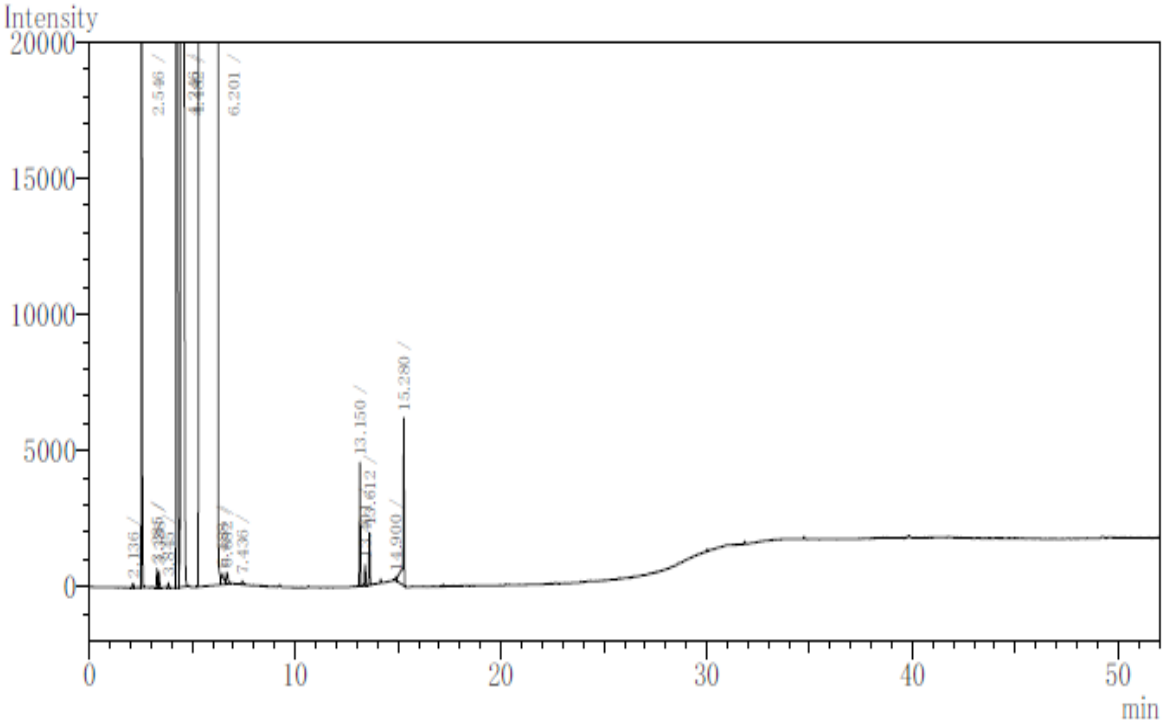


図２－１－１－２－１－１ａ－６ Fr.5 GC チャート

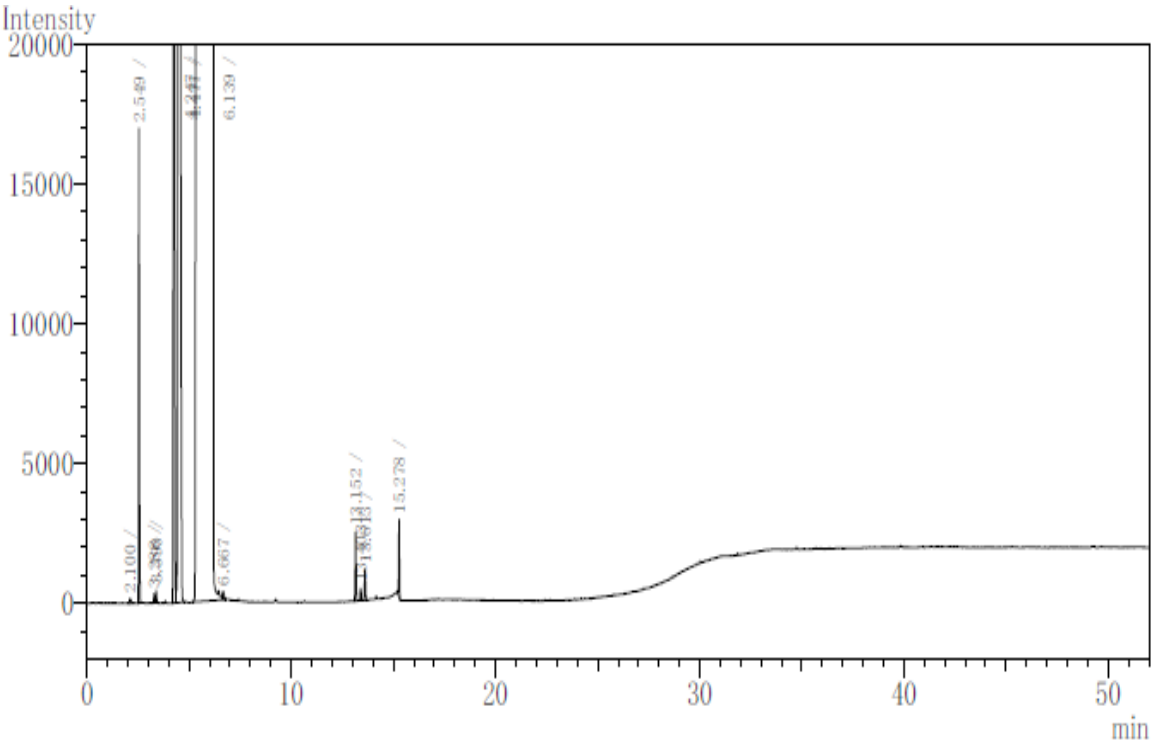


図２－１－１－２－１－１ａ－７ Fr.6 GC チャート

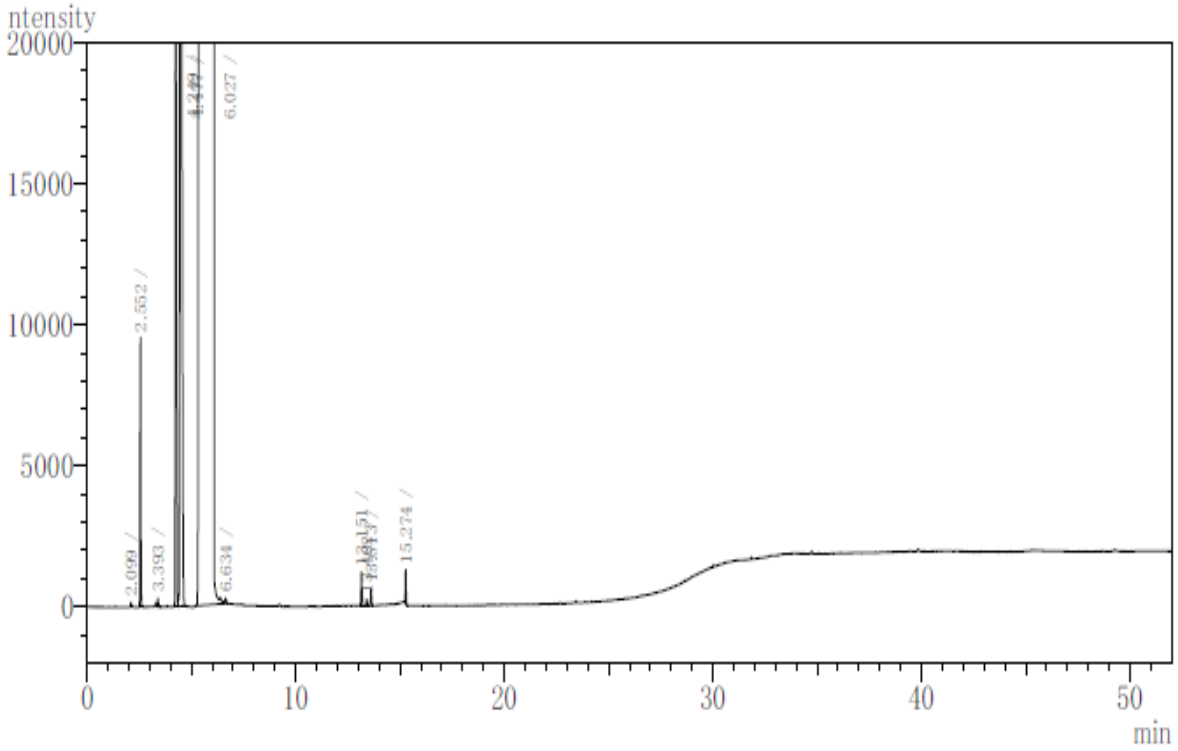


図２－１－１－２－１－１ａ－８　Fr.7 GC チャート

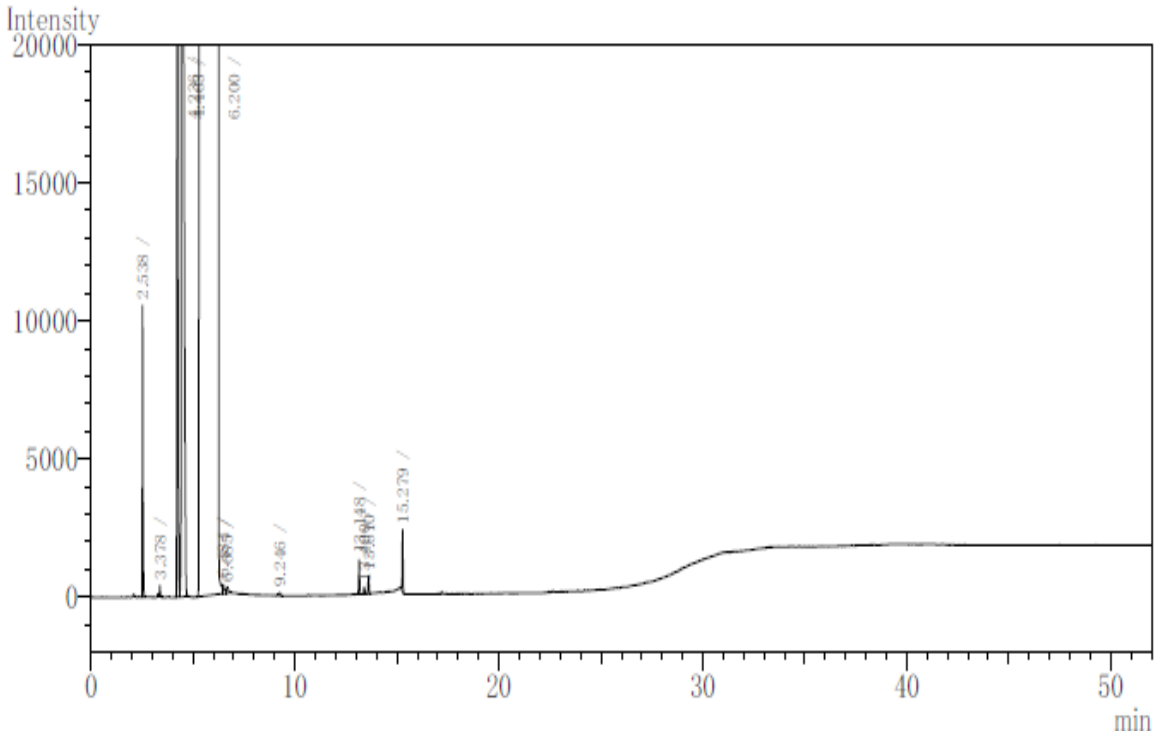


図２－１－１－２－１－１ａ－９　Fr.8 GC チャート

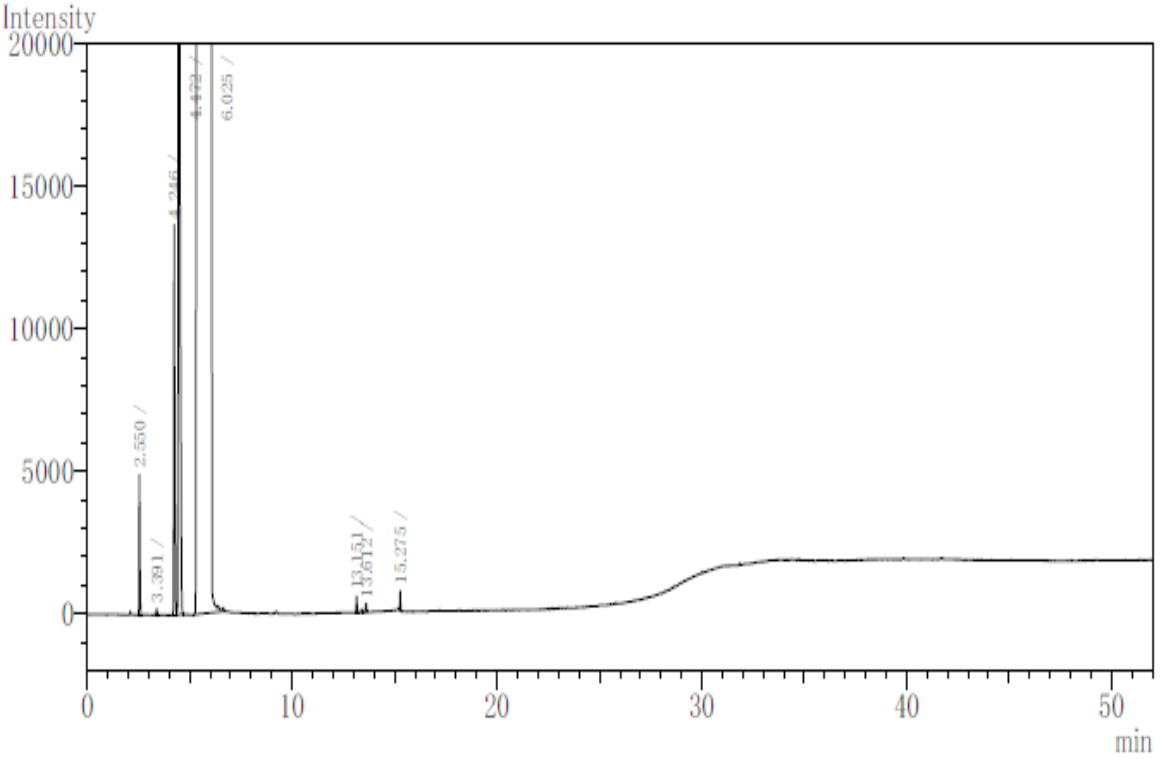


図２－１－１－２－１－１ａ－１０ Fr.9 GC チャート

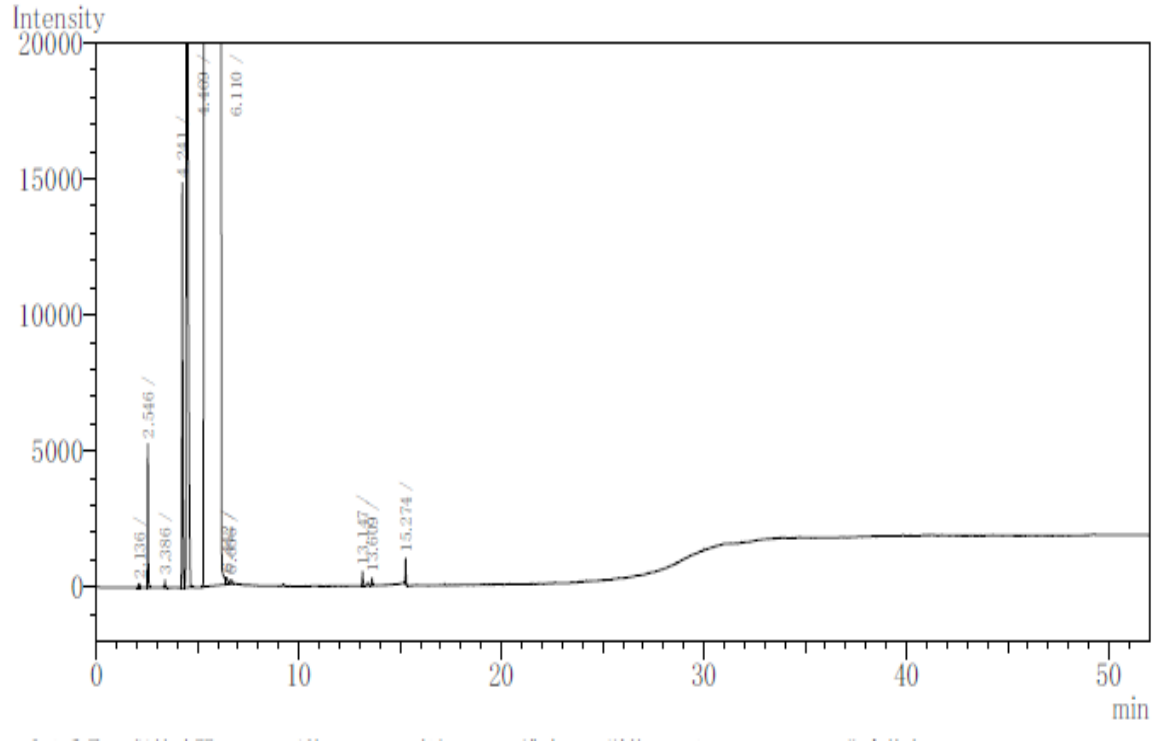


図２－１－１－２－１－１ａ－１１ Fr.10 GC チャート

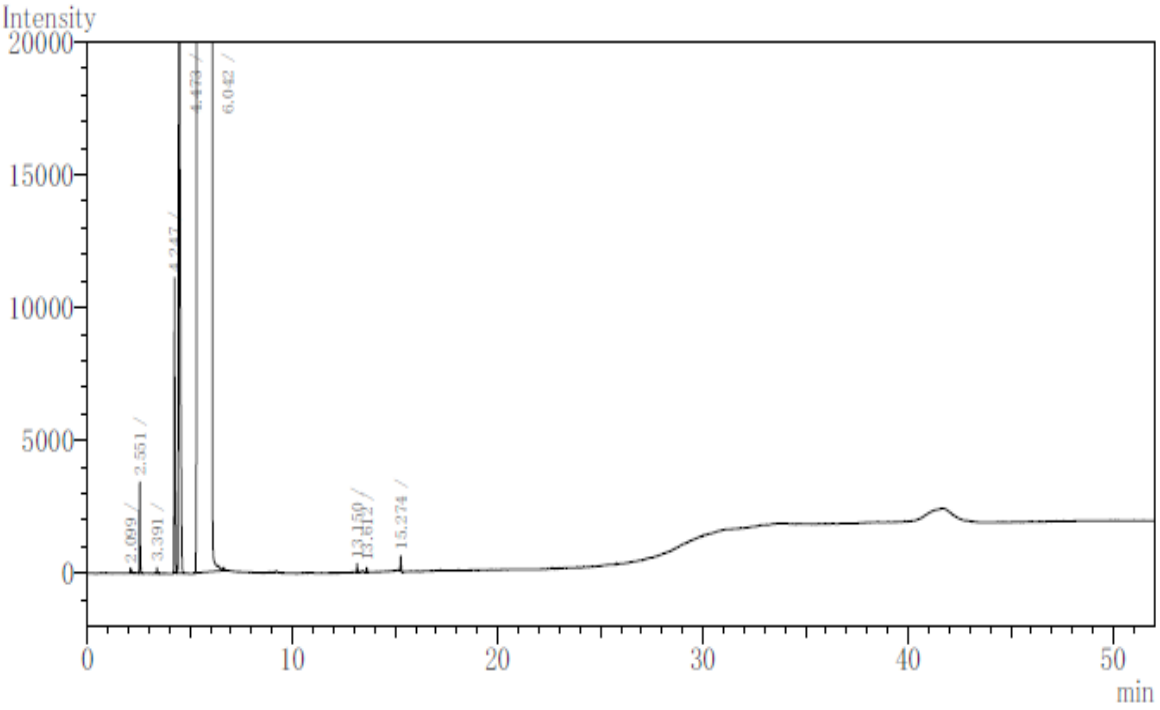


図２－１－１－２－１－１ａ－１２　Fr.11 GC チャート

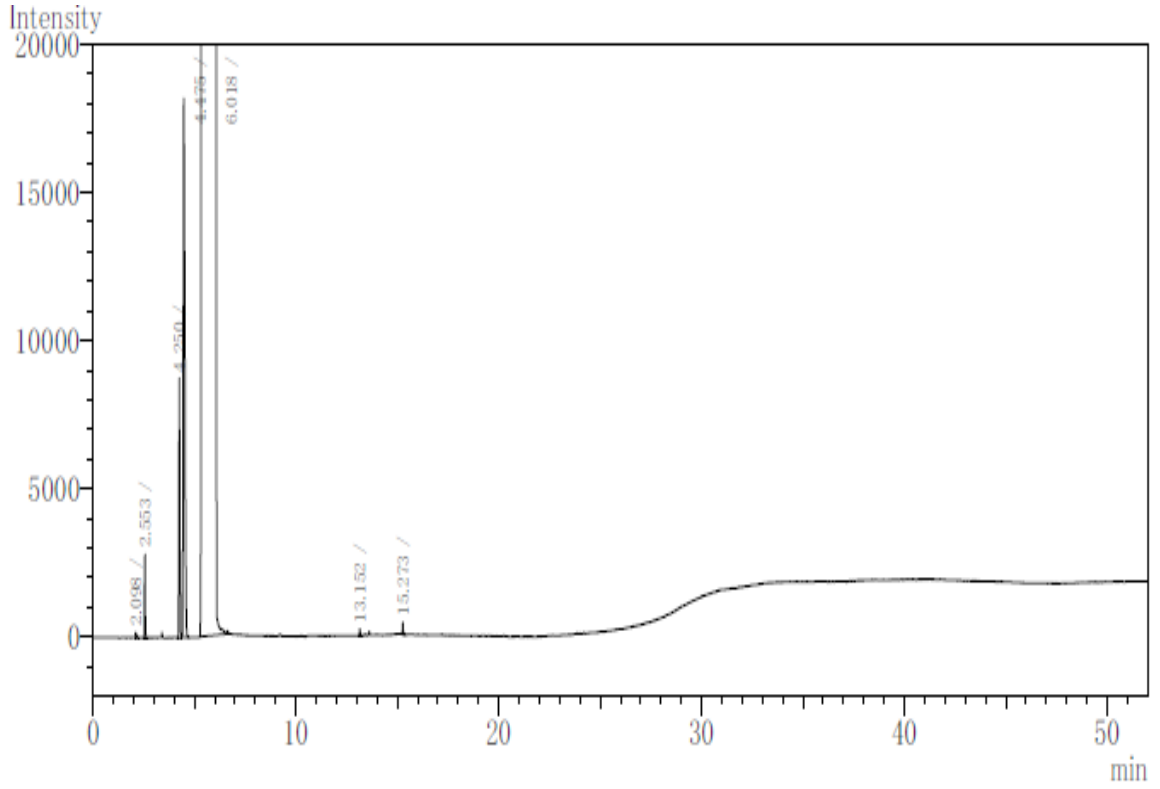


図２－１－１－２－１－１ａ－１３　Fr.12 GC チャート

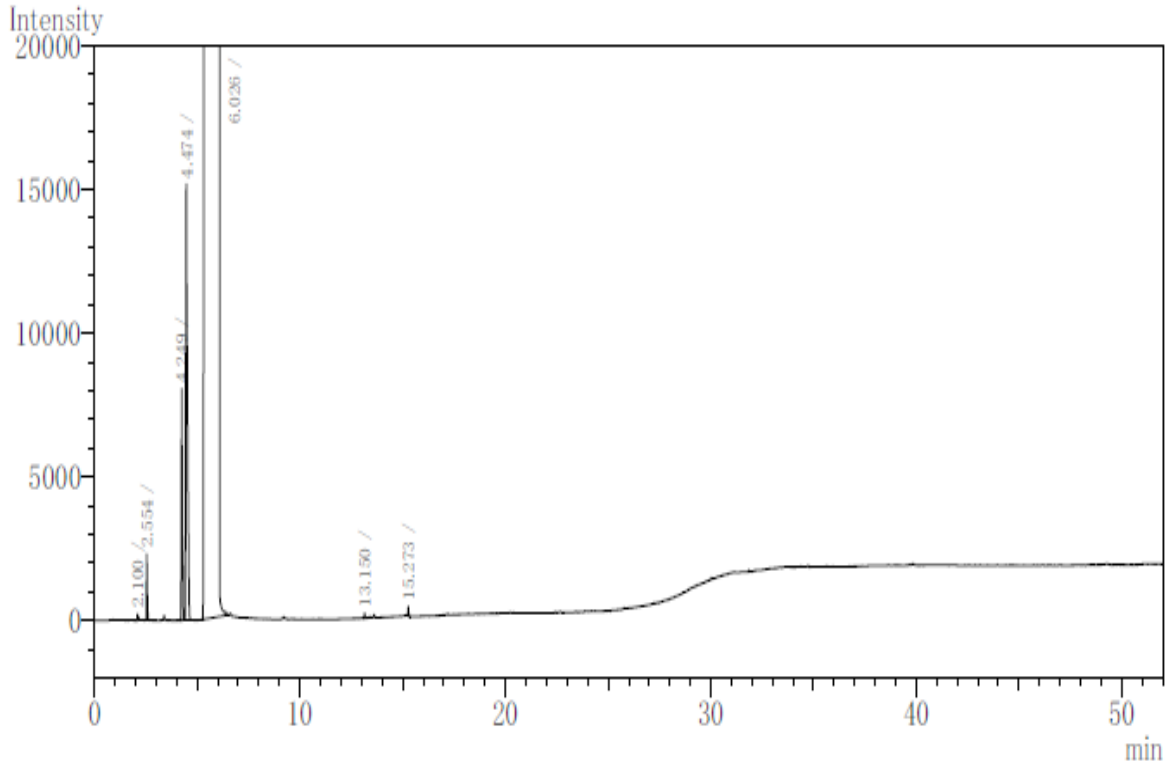


図２－１－１－２－１－１ａ－１４　Fr.13 GC チャート

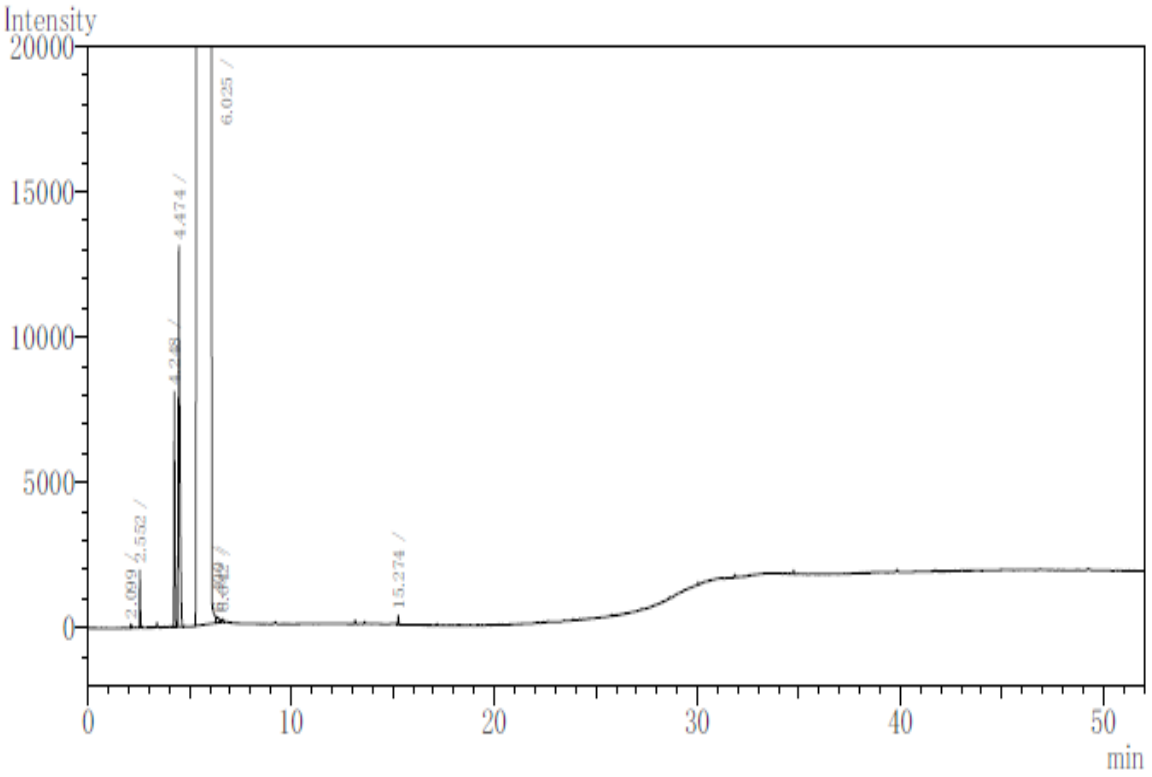


図２－１－１－２－１－１ａ－１５　Fr.14 GC チャート

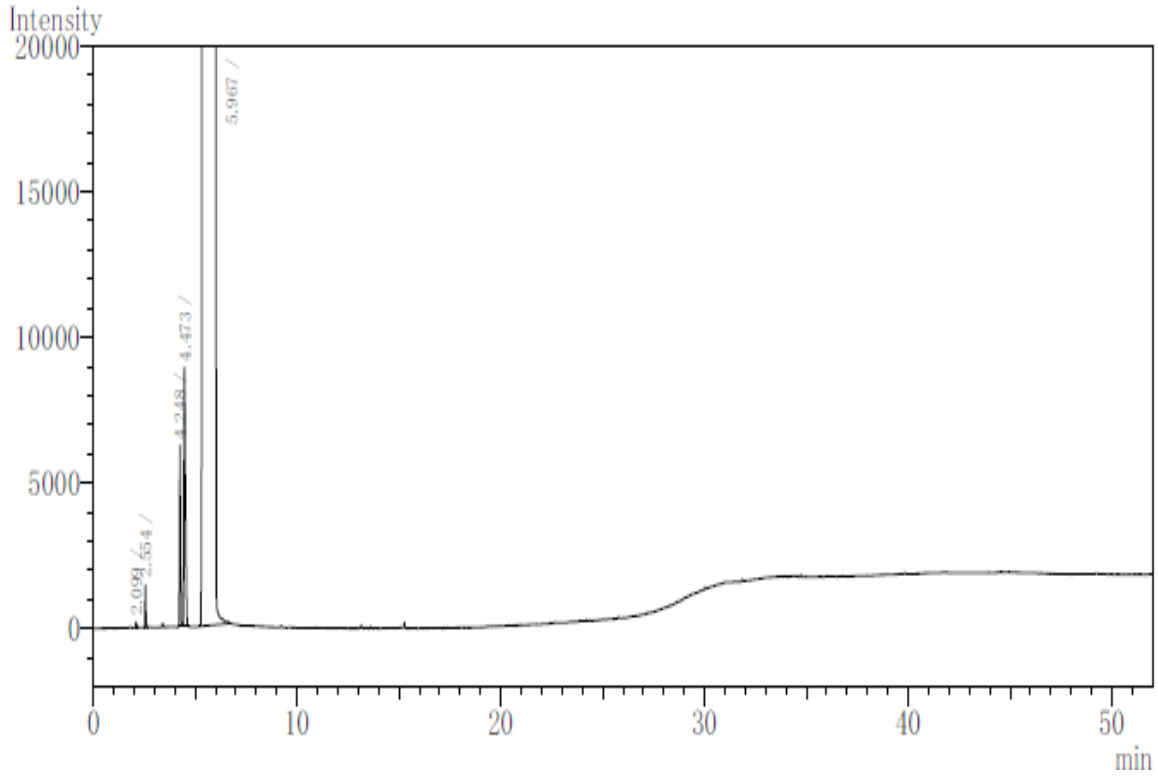


図２－１－１－２－１－１ａ－１６ Fr.15 GC チャート

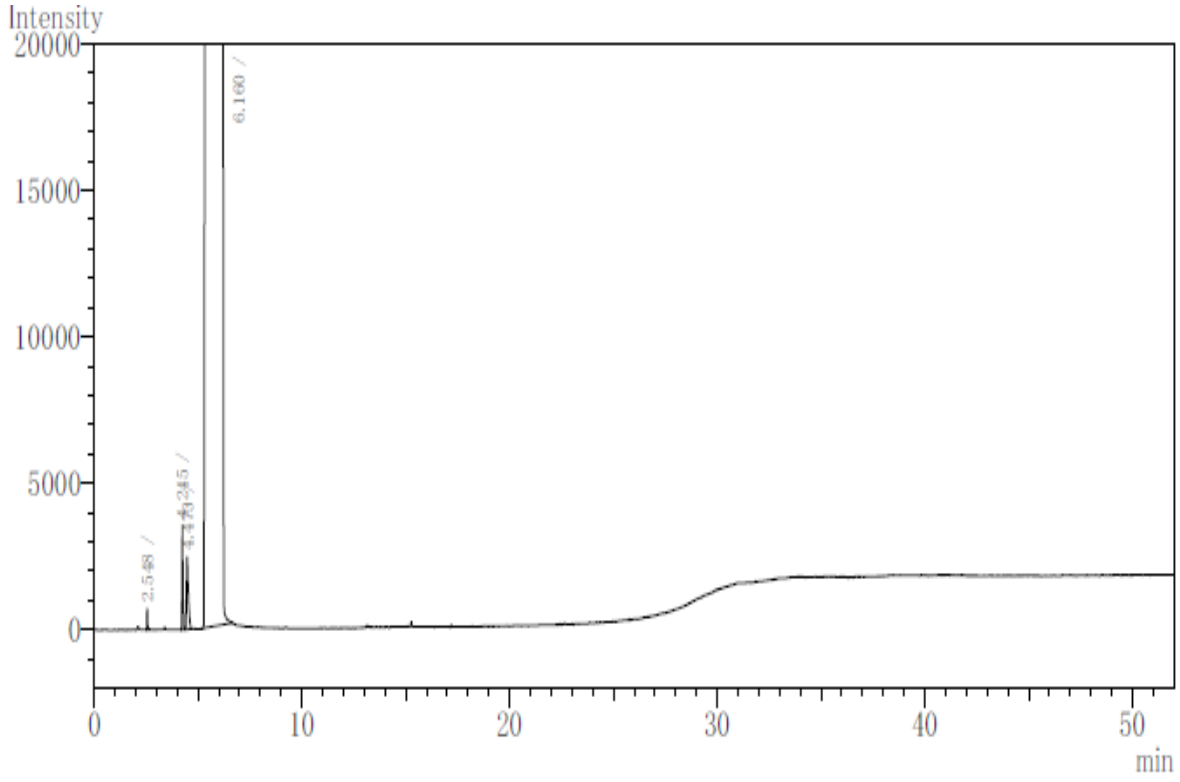


図２－１－１－２－１－１ａ－１７ Fr.16 GC チャート

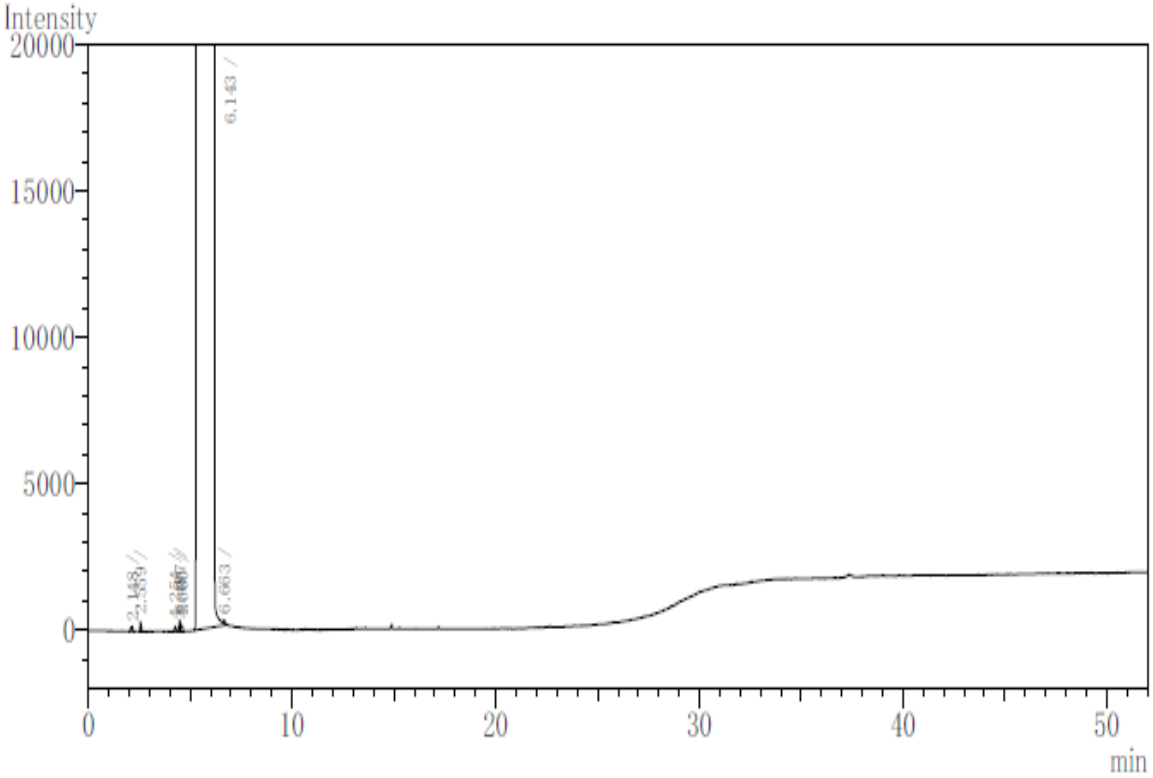


図２－１－１－２－１－１ａ－１８ Fr.17 GC チャート

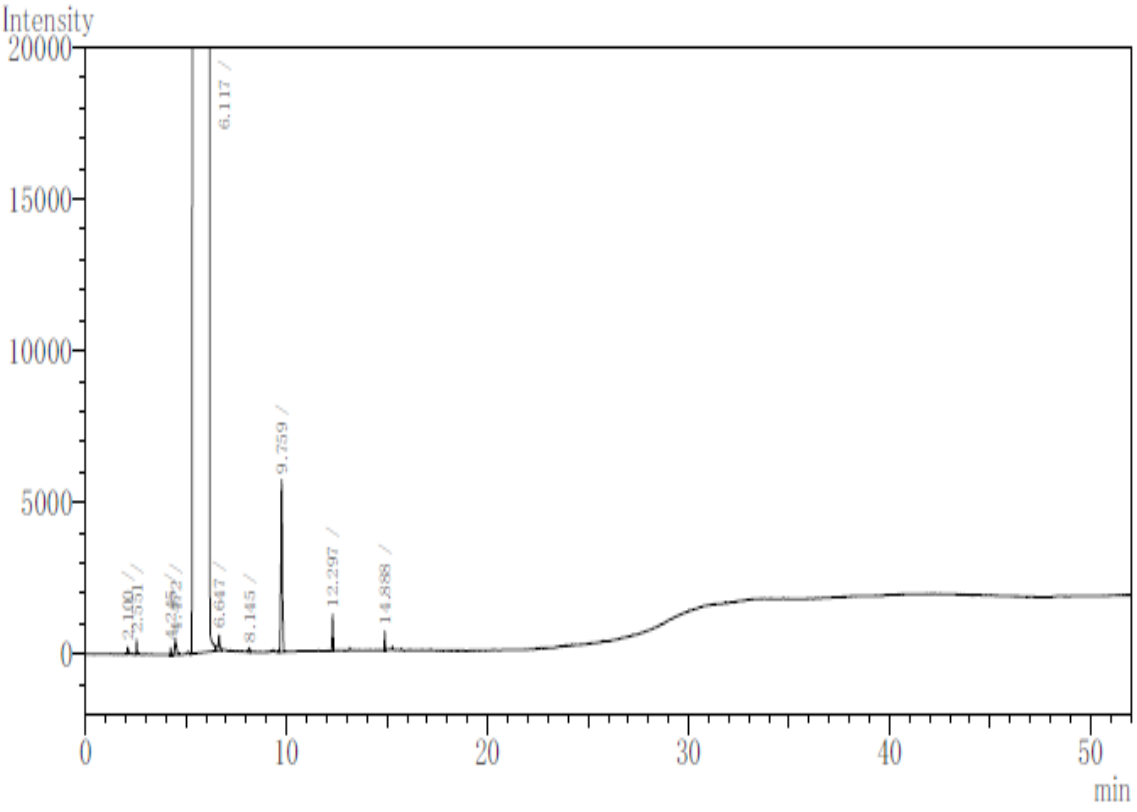


図２－１－１－２－１－１ａ－１９ Fr.18 GC チャート

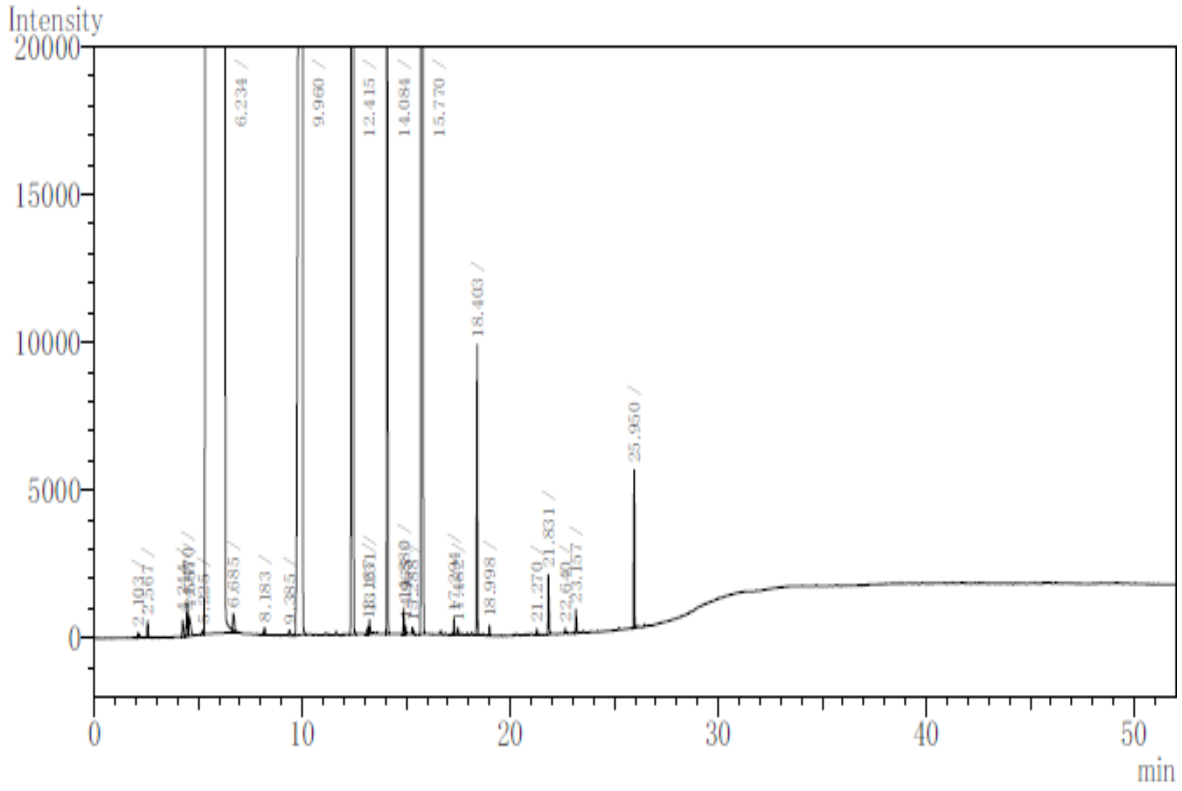


図２－１－１－２－１－１ａ－２０ Fr.19 GC チャート

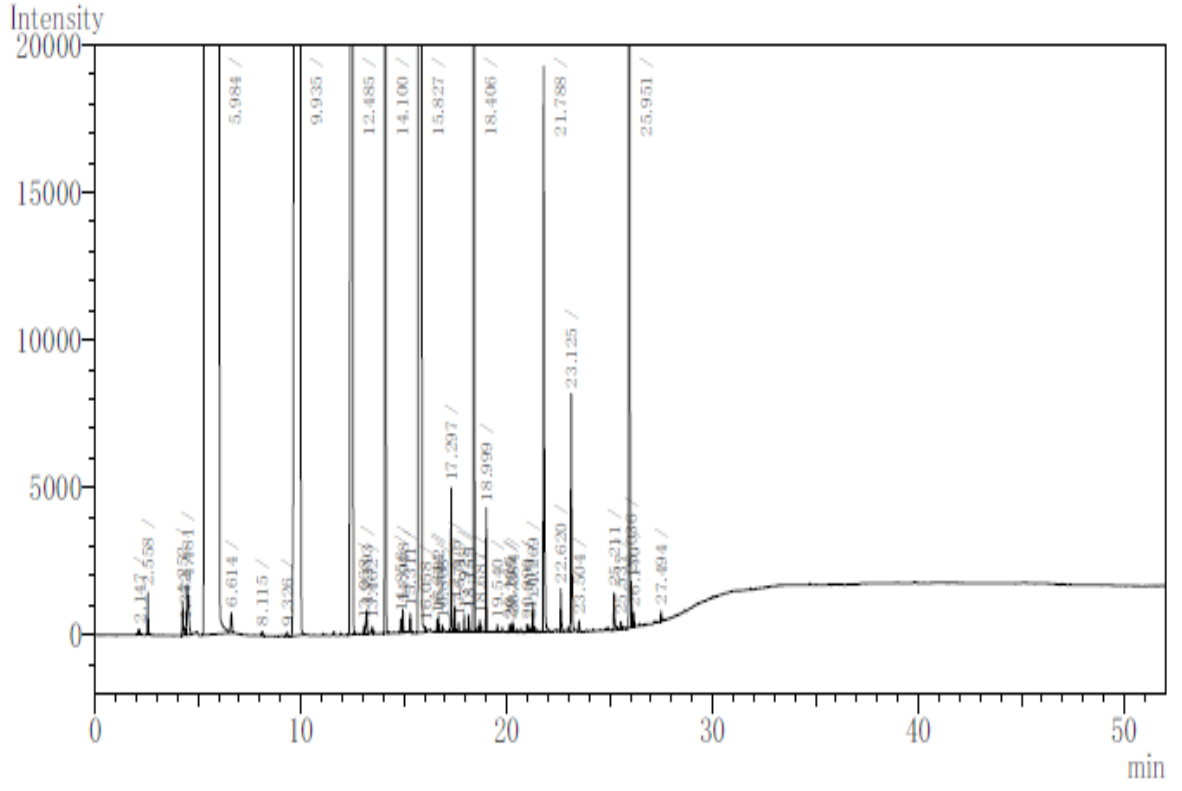


図２－１－１－２－１－１ａ－２１ Fr.20 GC チャート

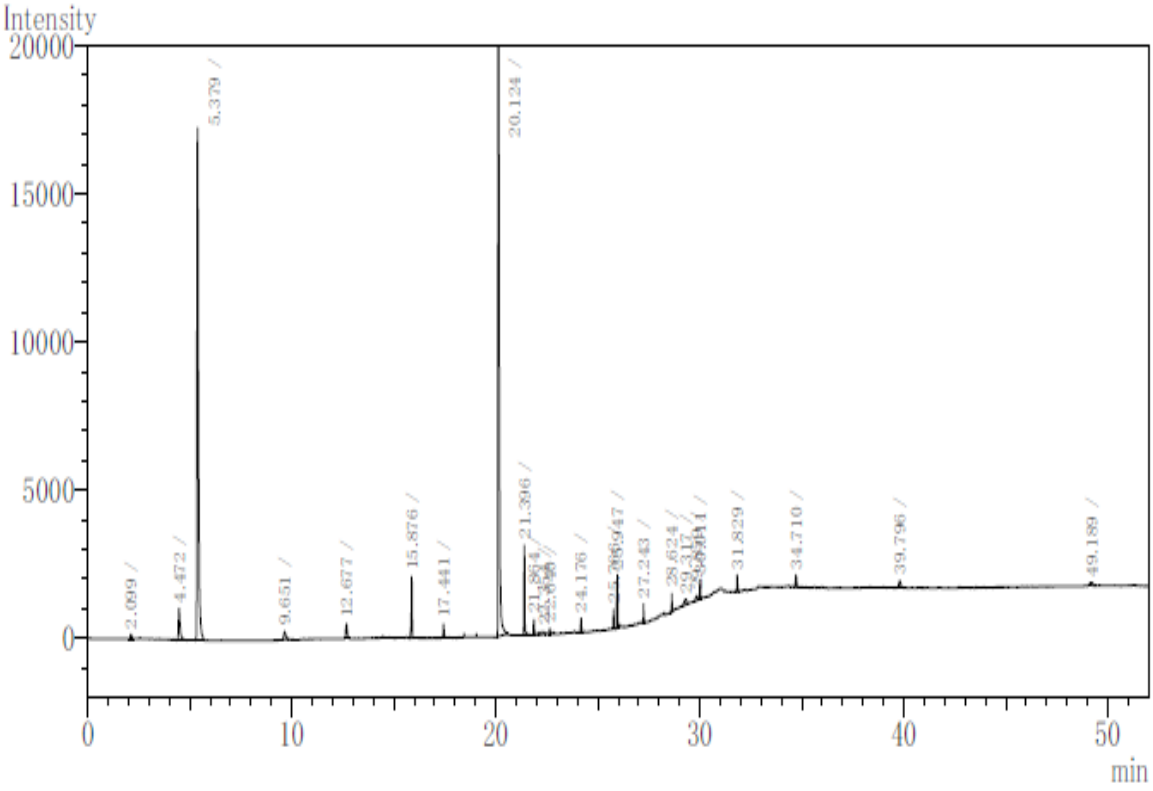


図２－１－１－２－１－１ａ－２２　残液 GC チャート

２－１－１－２－１－２　２塔目 50L60 段蒸留

２－１－１－２－１－２ａ　実施内容及び成果

（方法）

前章で得られたサンプルを更に精製するため、50L 60 段蒸留による処理を行った。試験条件は、元液：Fr.16～17、エタノール濃度 95.6%、17,460g、エタノールの沸点は 78.3℃であることから、塔頂温度 79-81℃に設定する為、加熱温度 90～100℃とした。

（結果）

所定時間後のエタノール濃度、サンプル収率を表２－１－１－２－１－２ａ－１に示す。塔頂温度は 78-79℃付近で安定し、全てのフラクションで目標である約 95%以上のエタノール濃度を示すサンプルを得た。

表２－１－１－２－１－２ａ－１　蒸留試験結果

	エタノール(%)	サンプル量(g)	加熱温度	下部温度	塔頂温度
元液	95.6	17,460			
Fr.1	95.9	158.1	90℃	79.8℃	78.8℃
Fr.2	95.8	410.5	90℃	79.8℃	78.9℃
Fr.3	95.8	408.3	90℃	79.7℃	78.9℃
Fr.4	95.8	419.0	90℃	79.8℃	78.9℃
Fr.5	96.0	404.7	90℃	79.6℃	78.7℃
Fr.6	96.4	414.0	90℃	79.6℃	78.7℃
Fr.7	95.6	402.1	90℃	79.7℃	78.9℃
Fr.8	97.0	404.2	90℃	79.6℃	78.6℃
Fr.9	95.7	410.2	90℃	79.7℃	78.9℃
Fr.10	95.7	392.2	90℃	79.7℃	78.6℃
Fr.11	95.6	400.2	90℃	79.8℃	78.8℃
Fr.12	95.8	408.5	90℃	79.6℃	78.8℃
Fr.13	95.6	409.5	95℃	79.7℃	78.7℃
Fr.14	95.6	1540.8	97℃	79.6℃	78.5℃
Fr.15	96.3	1536.6	100℃	79.7℃	78.5℃
Fr.16	95.7	1573.9	100℃	79.8℃	78.6℃
Fr.17	95.7	1503.7	100℃	79.8℃	78.7℃
Fr.18	95.8	1535.9	100℃	79.8℃	78.6℃
Fr.19	95.8	1420.4	105℃	79.9℃	78.7℃
Fr.20	96.5	1559.7	130℃	79.9℃	78.7℃
Fr.21	95.7	1460.3	160℃	111.2℃	78.8℃
残液	0.0	219.7			

60 段蒸留の各フラクションの GC 分析結果を図２－１－１－２－１－２ａ－３～２４に示す。元液（図２－１－１－２－１－２ａ－２）ではいくつかの不純物ピークが観察されていたが、Fr.14 以降では 6.1 分付近のエタノールを示すピーク以外の不純物は減少し、精製が進んでいることを確認した（図２－１－１－２－１－２ａ－１６～２３）。Fr.1～13 ではエタノールよりも前にピークが観察され（図２－１－１－２－１－２ａ－３～４）、低沸点の不純物が含まれていることが判明した。残液には高沸点不純物が多く残存していた（図２－１－１－２－１－２ａ－２４）。

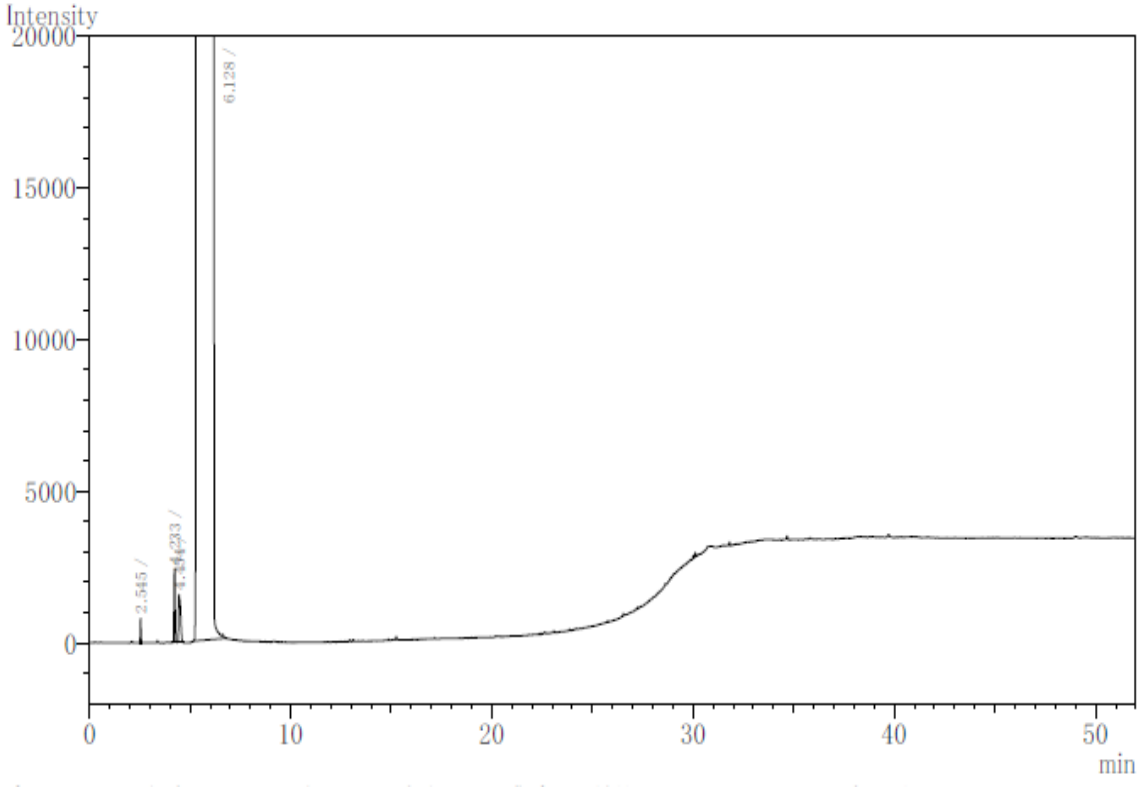


図２－１－１－２－１－２ａ－２　元液 GC チャート

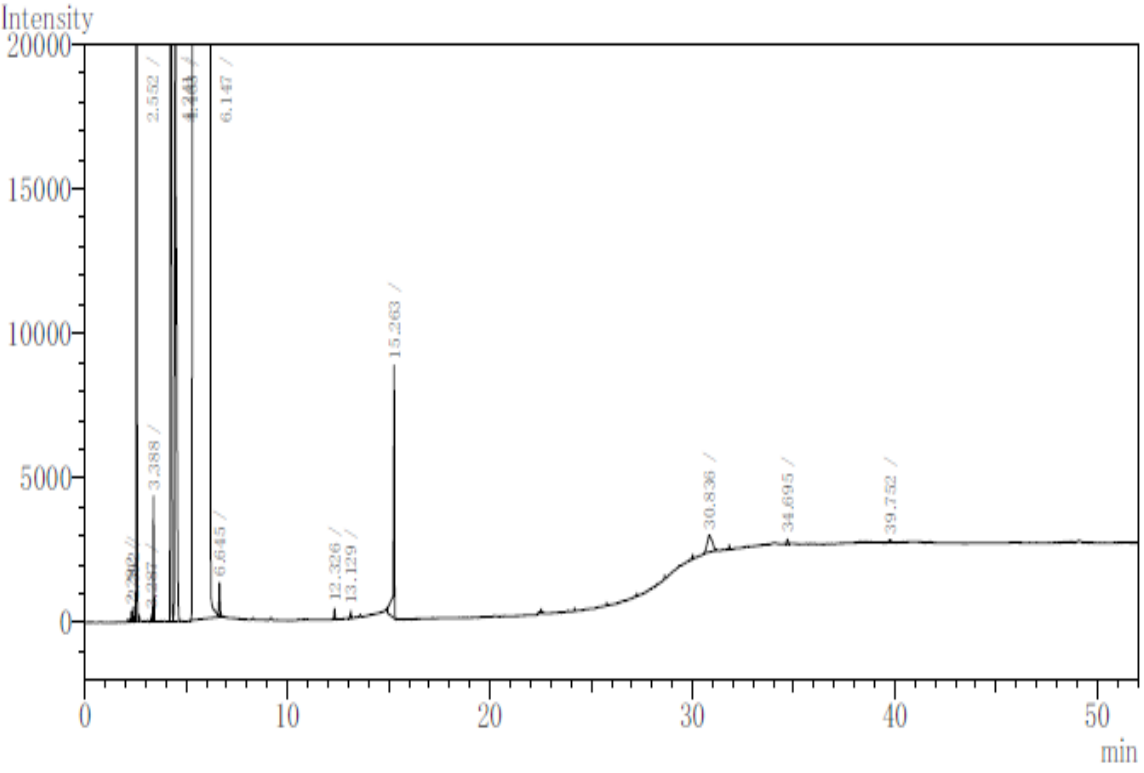


図２－１－１－２－１－２ａ－３　Fr.1 GC チャート

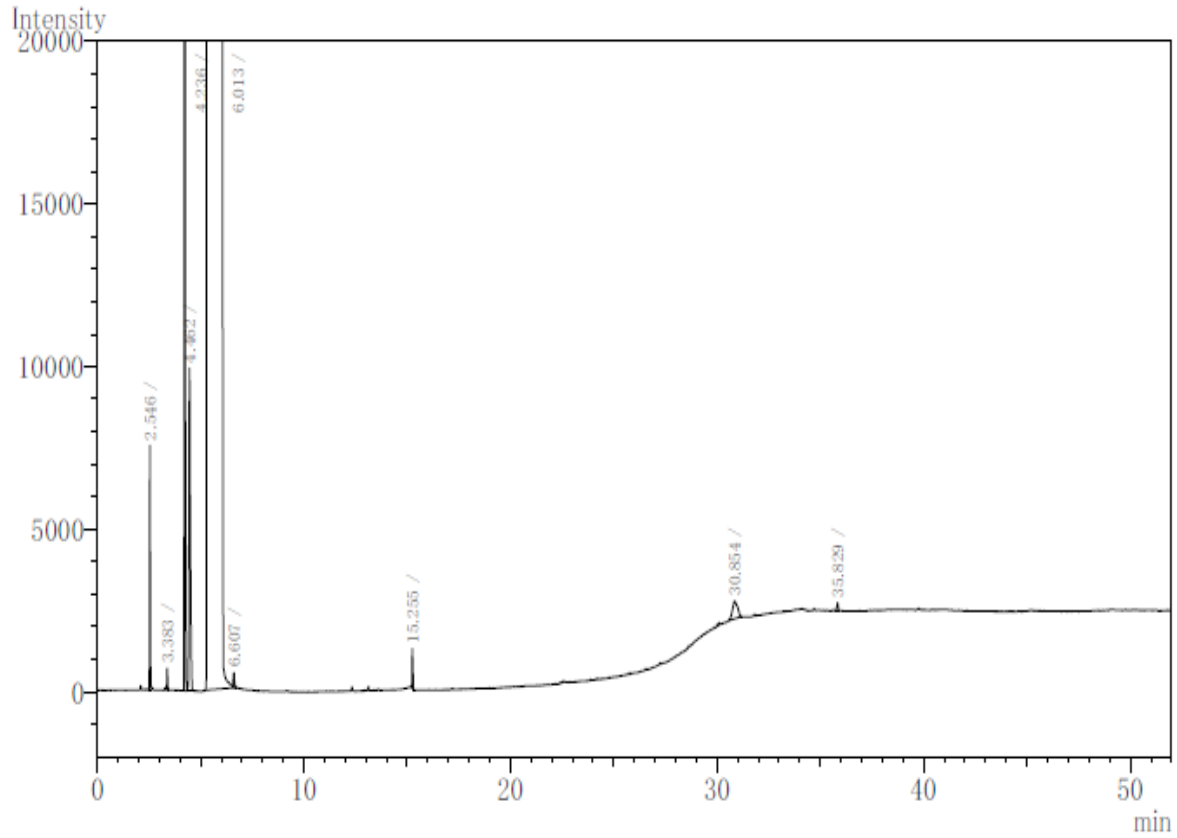


図２－１－１－２－１－２ａ－４　Fr.2 GC チャート

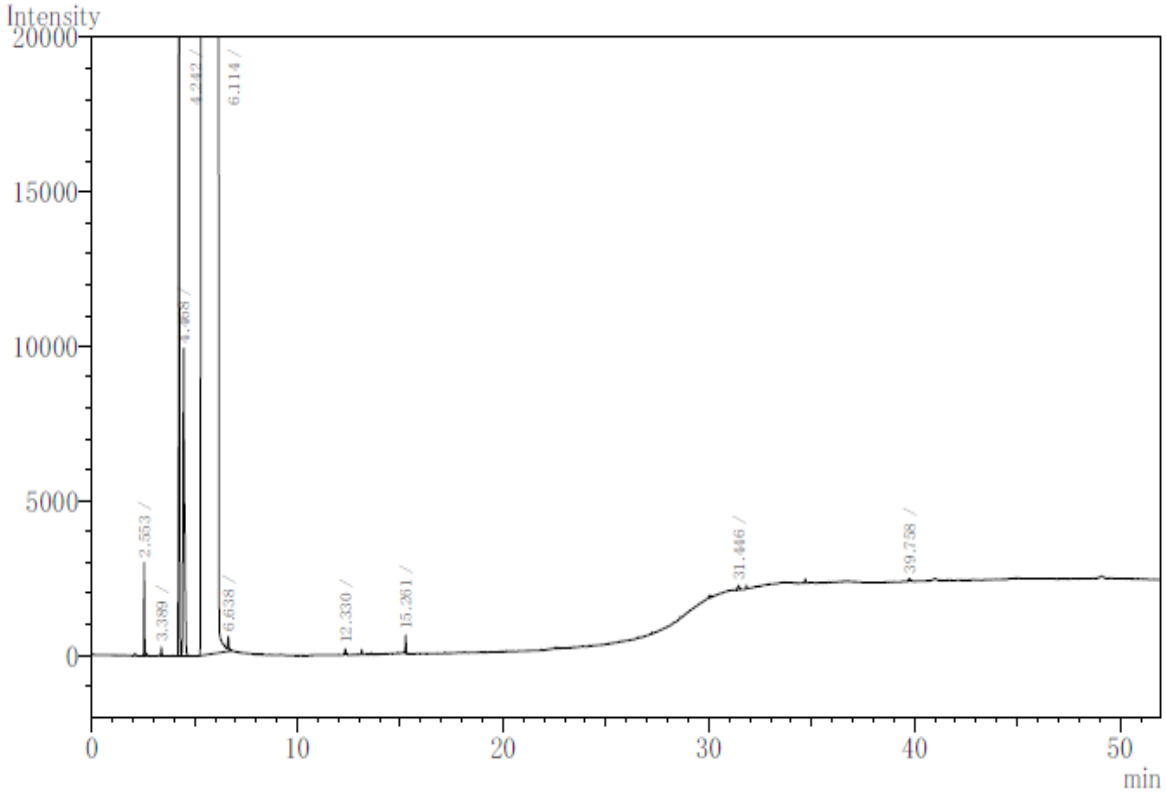


図２－１－１－２－１－２ａ－５　Fr.3 GC チャート

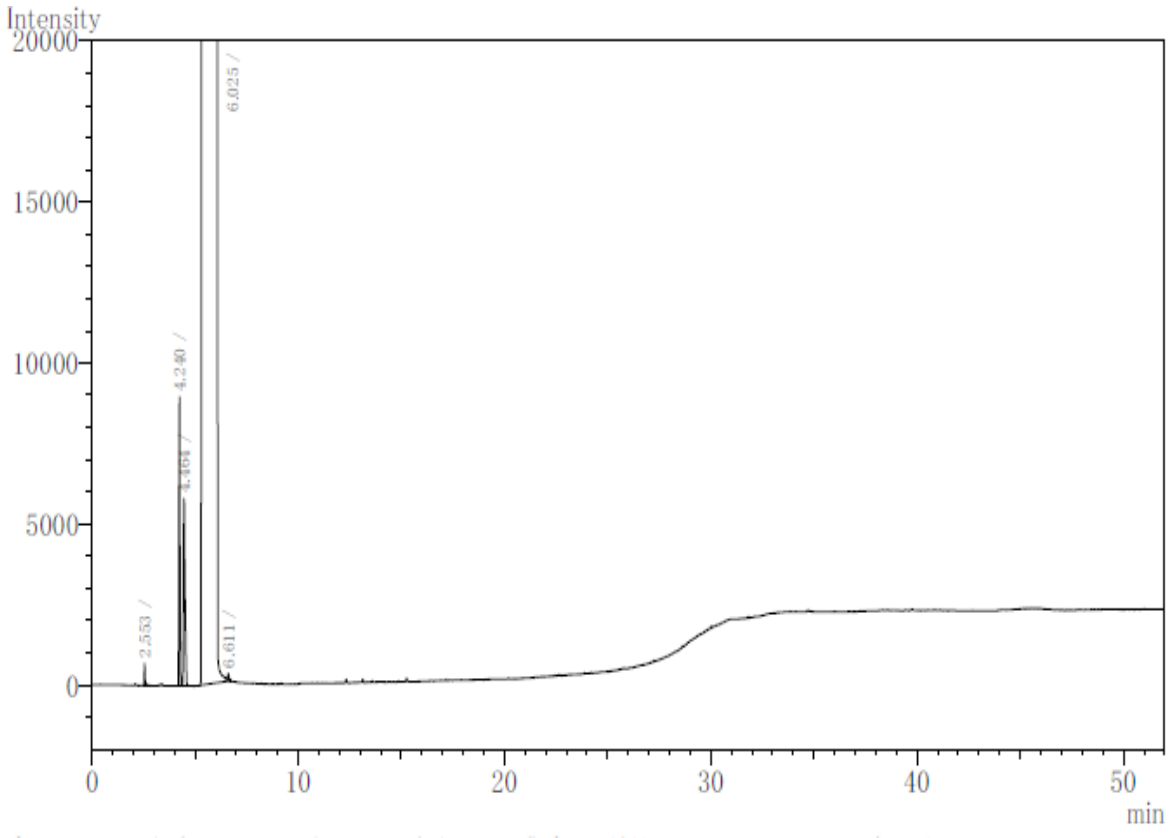


図２－１－１－２－１－２ａ－６　Fr.4 GC チャート

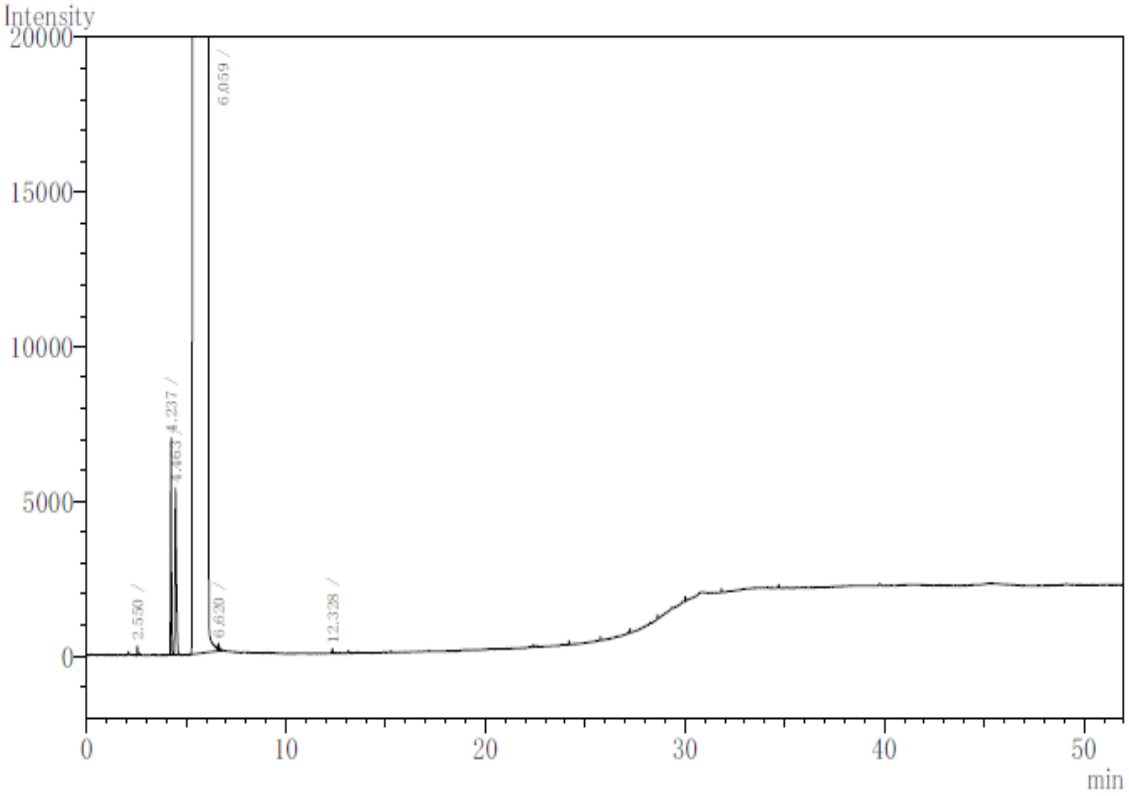


図２－１－１－２－１－２ａ－７　Fr.5 GC チャート

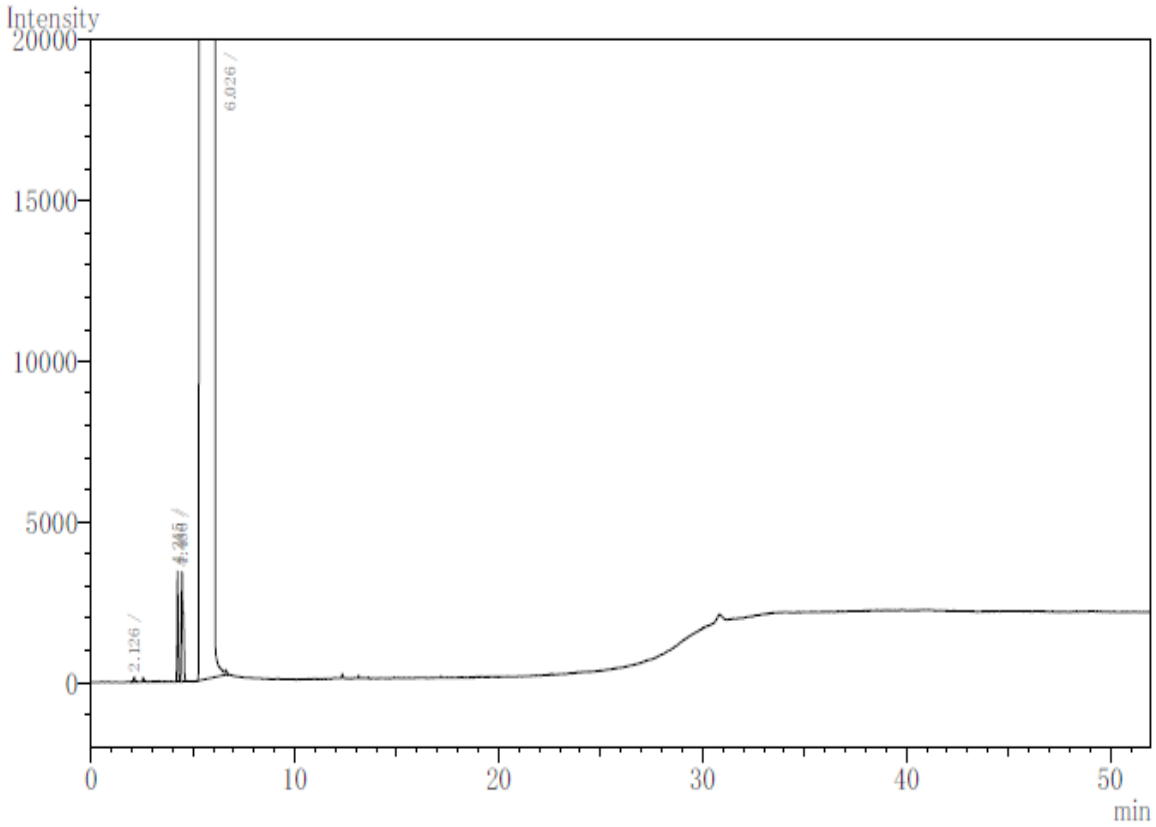


図２－１－１－２－１－２ａ－８　Fr.6 GC チャート

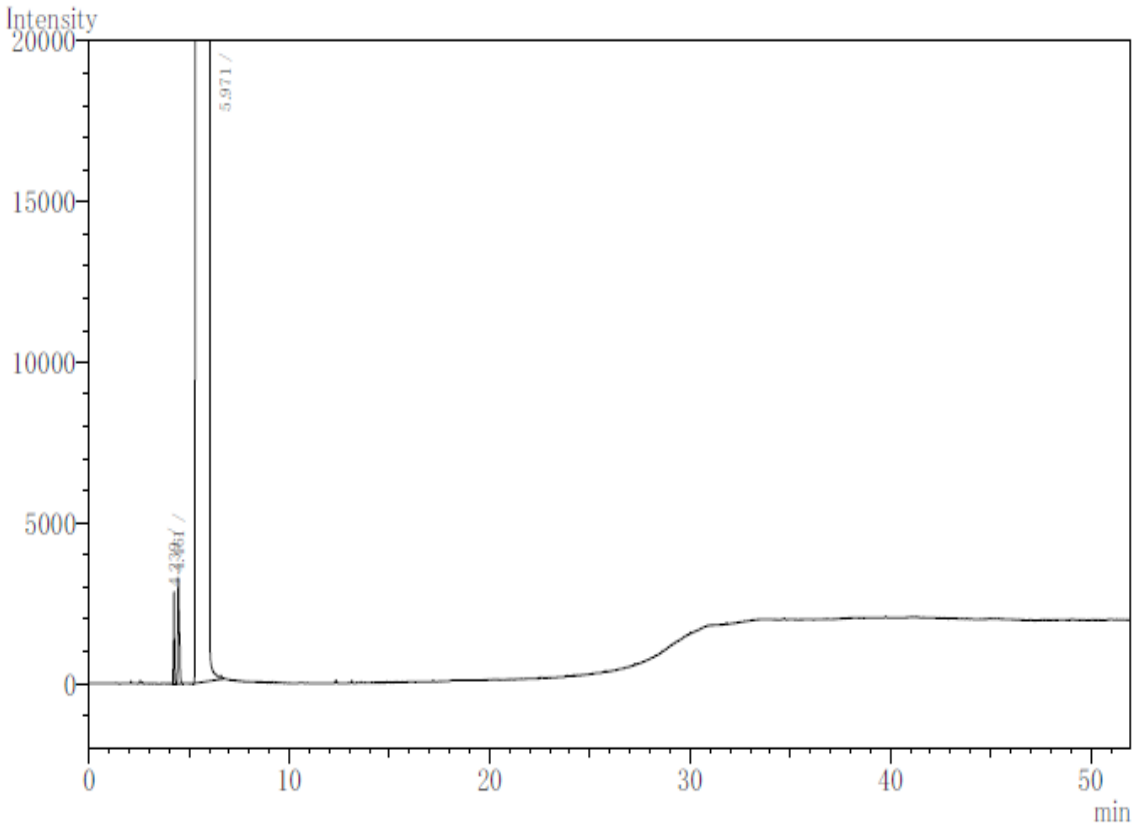


図２－１－１－２－１－２ａ－９　Fr.7 GC チャート

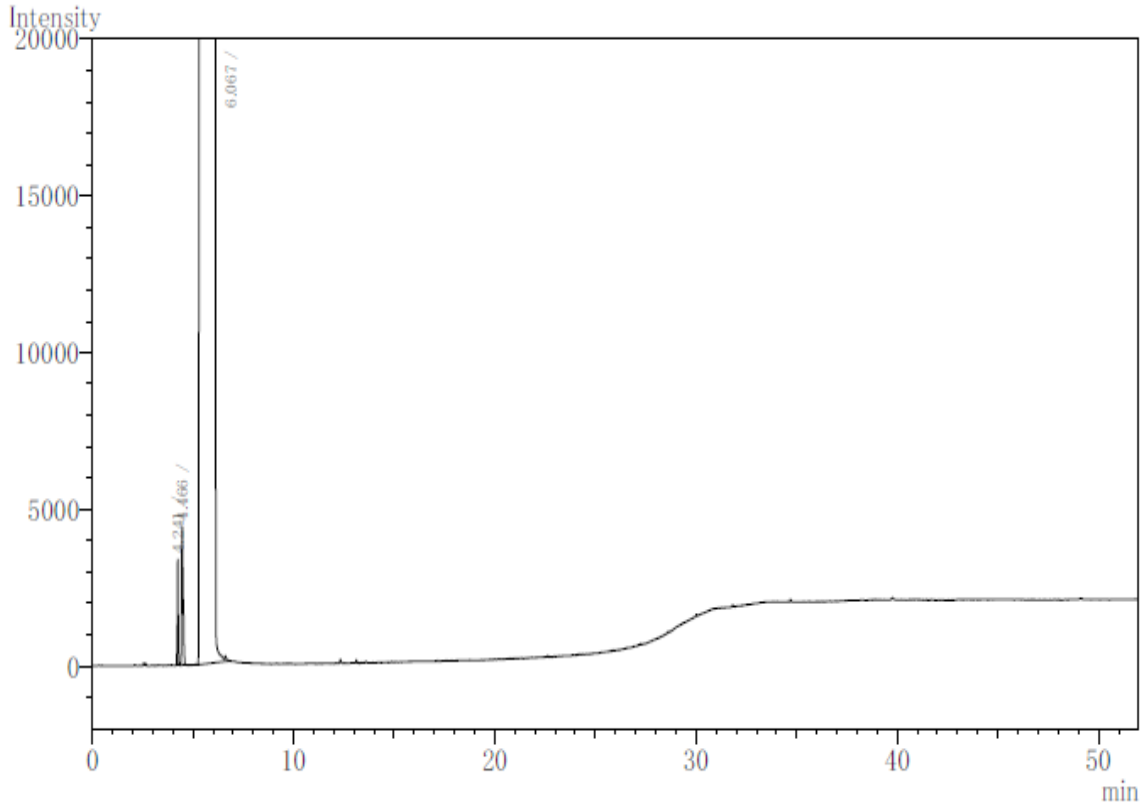


図２－１－１－２－１－２ａ－１０　Fr.8 GC チャート

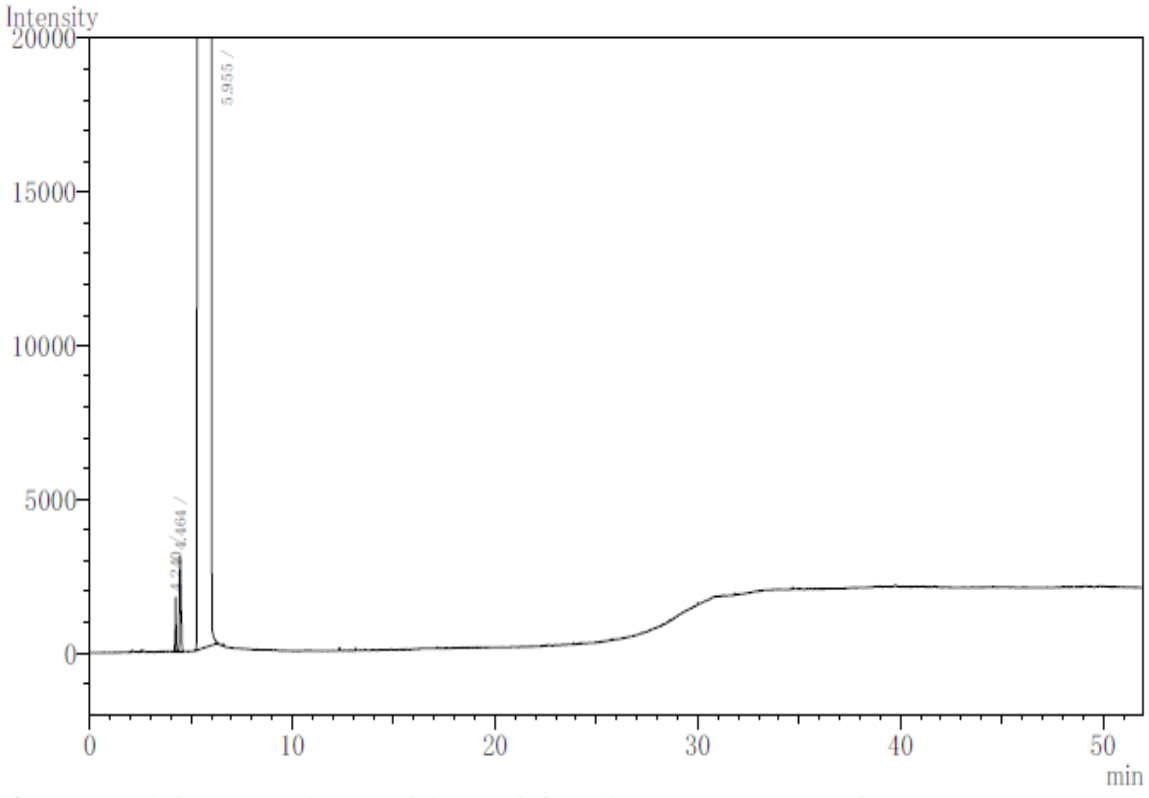


図２－１－１－２－１－２ａ－１１　Fr.9 GC チャート

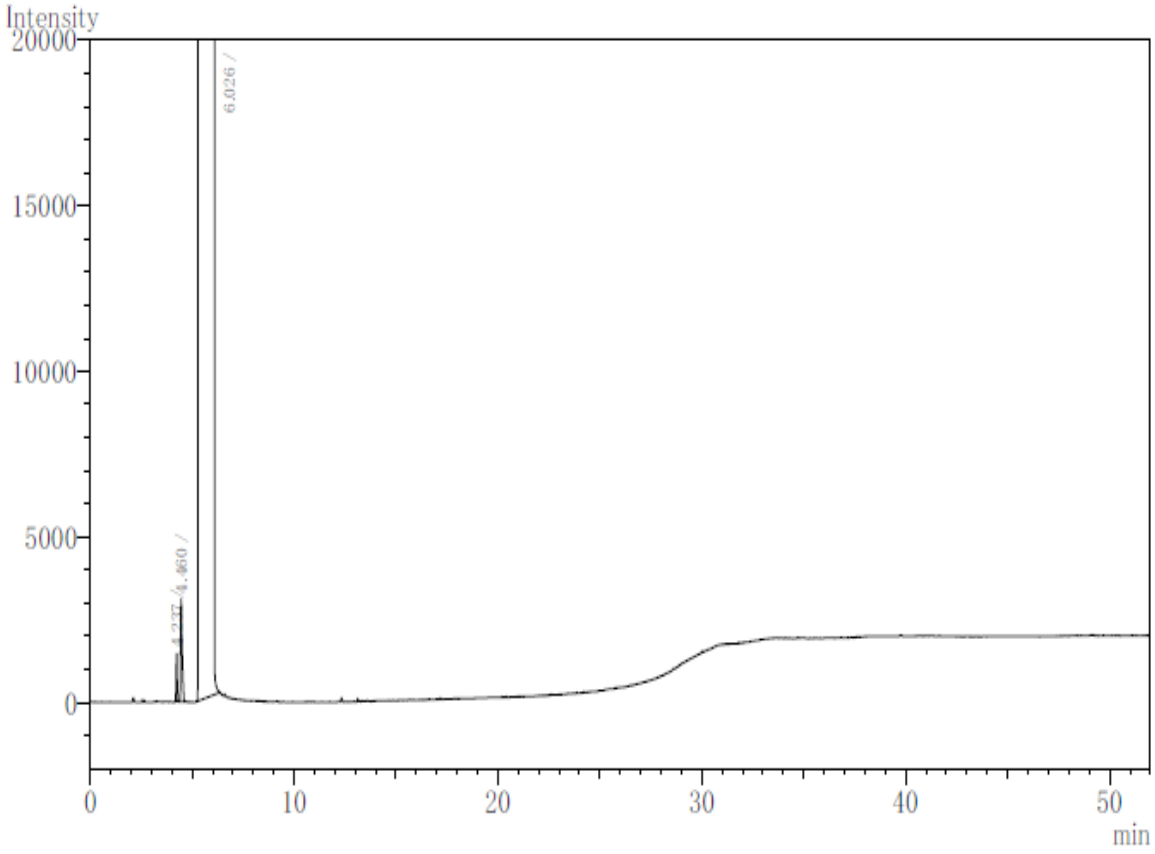


図２－１－１－２－１－２ａ－１２　Fr.10 GC チャート

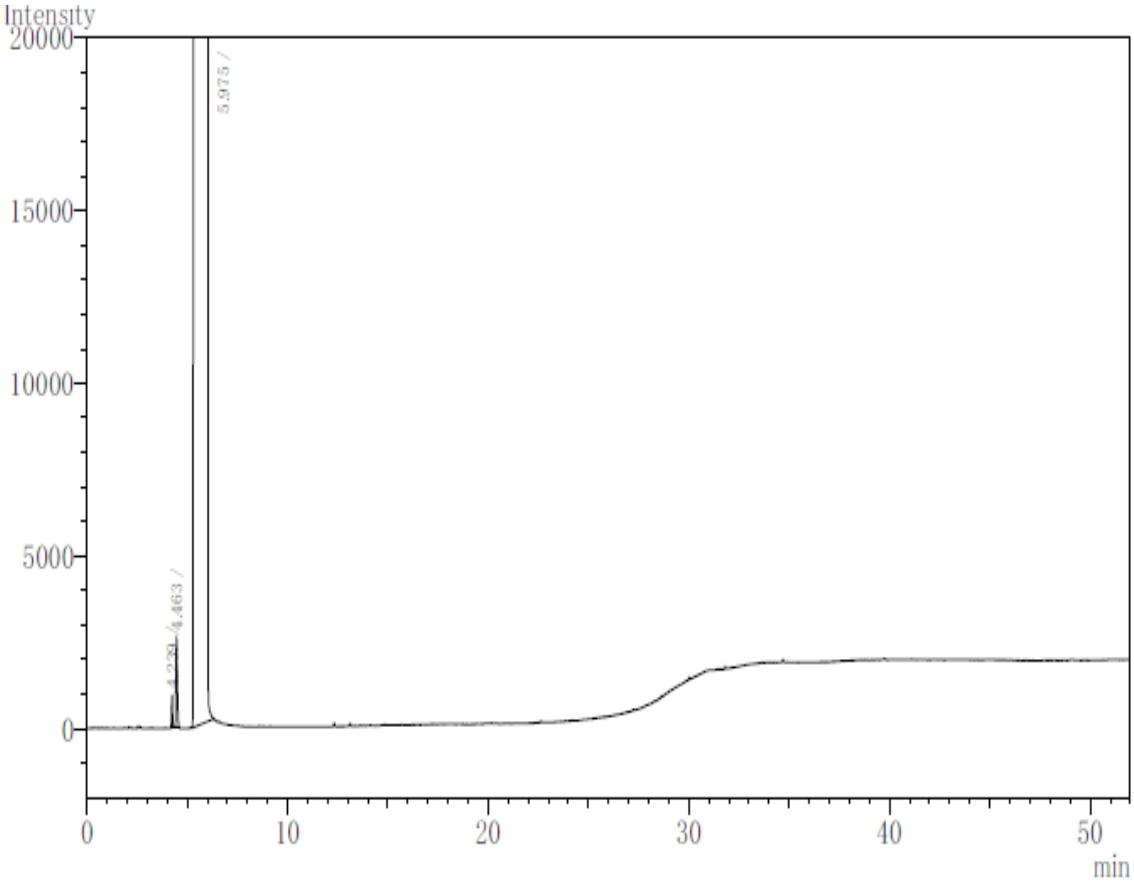


図２－１－１－２－１－２ａ－１３　Fr.11 GC チャート

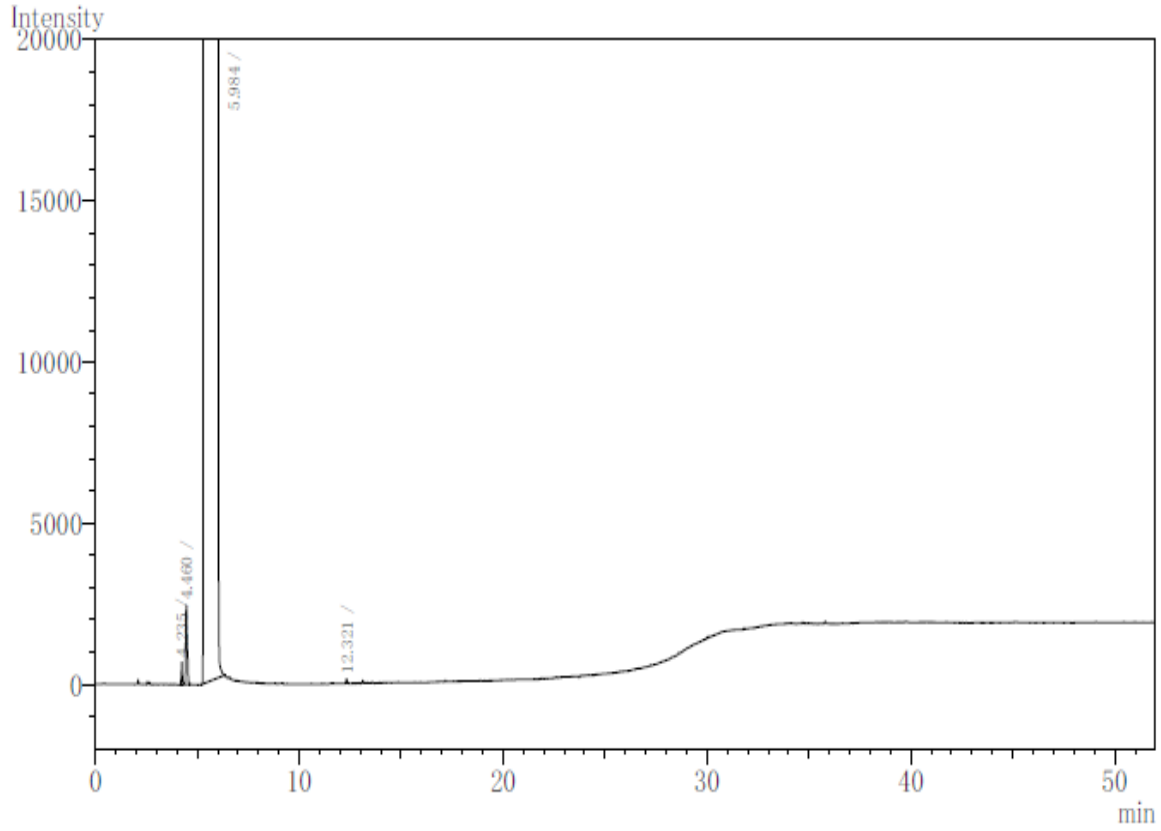


図２－１－１－２－１－２ａ－１４　Fr.12 GC チャート

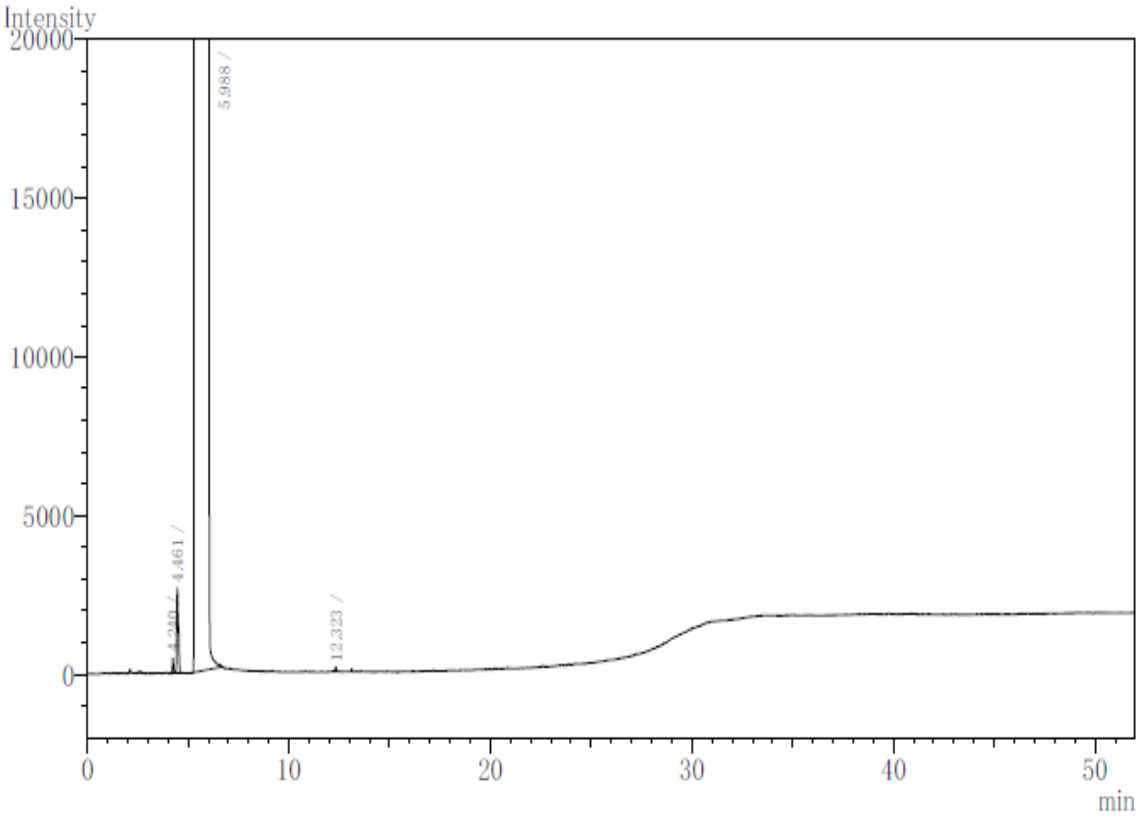


図２－１－１－２－１－２ａ－１５　Fr.13 GC チャート

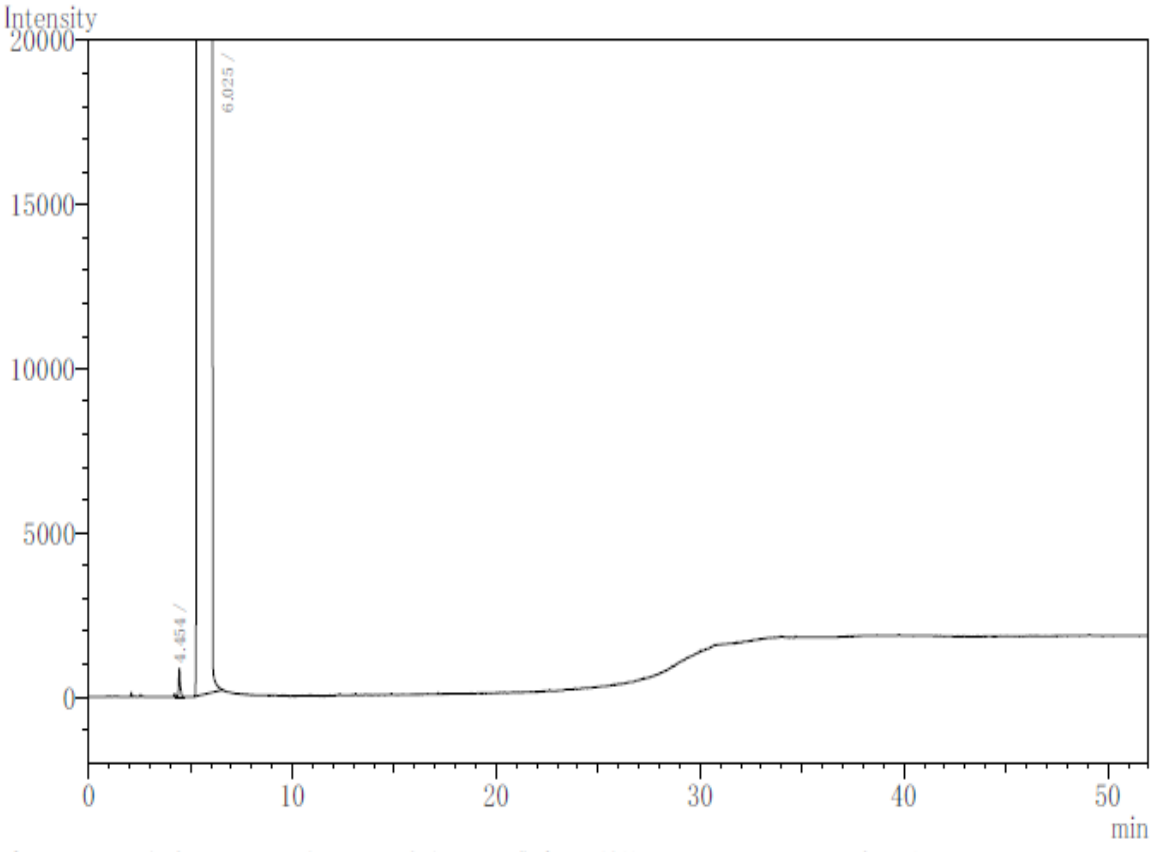


図２－１－１－２－１－２ａ－１６　Fr.14 GC チャート

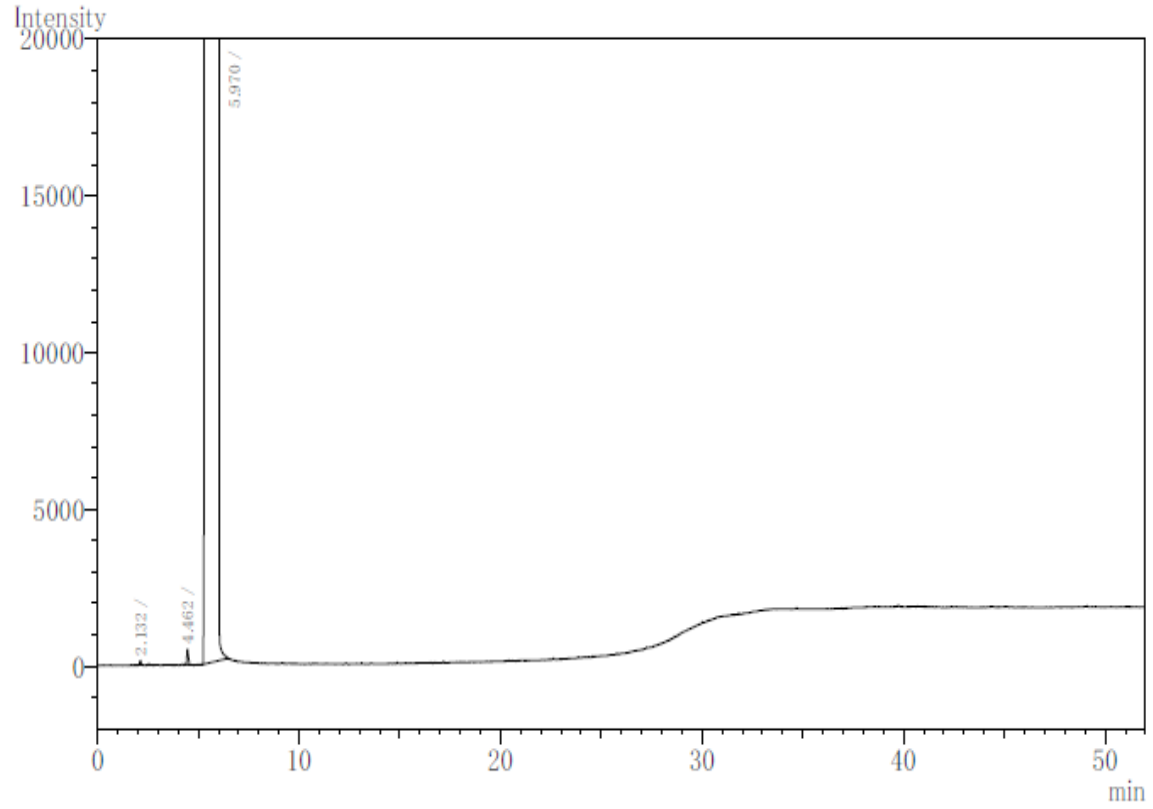


図２－１－１－２－１－２ａ－１７　Fr.15 GC チャート

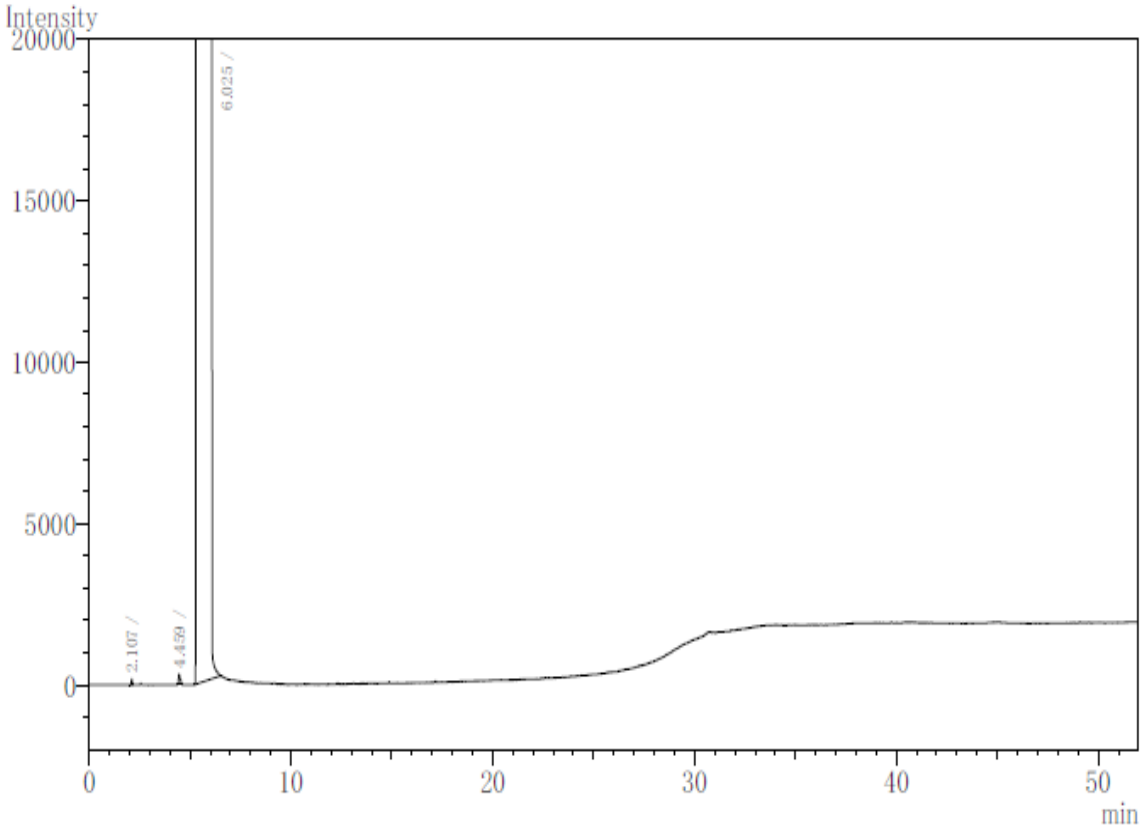


図２－１－１－２－１－２ａ－１８　Fr.16 GC チャート

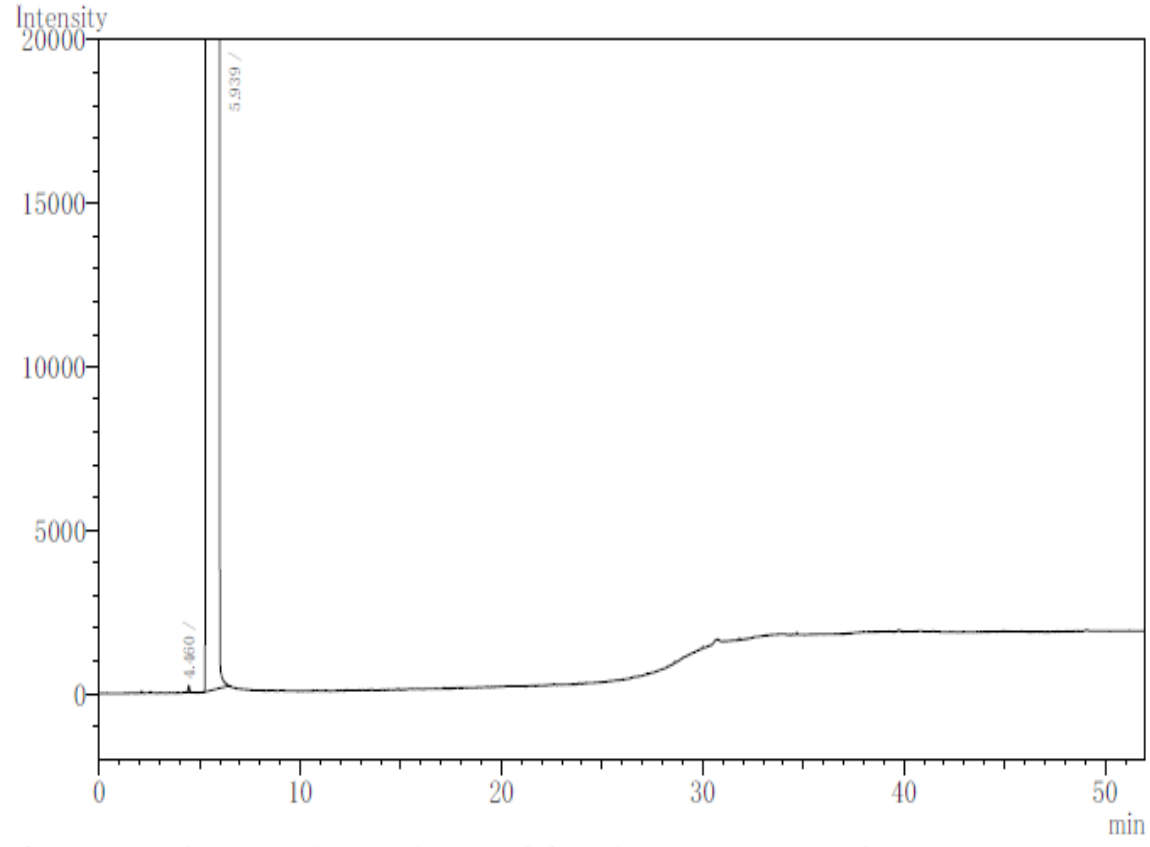


図２－１－１－２－１－２ａ－１９　Fr.17 GC チャート

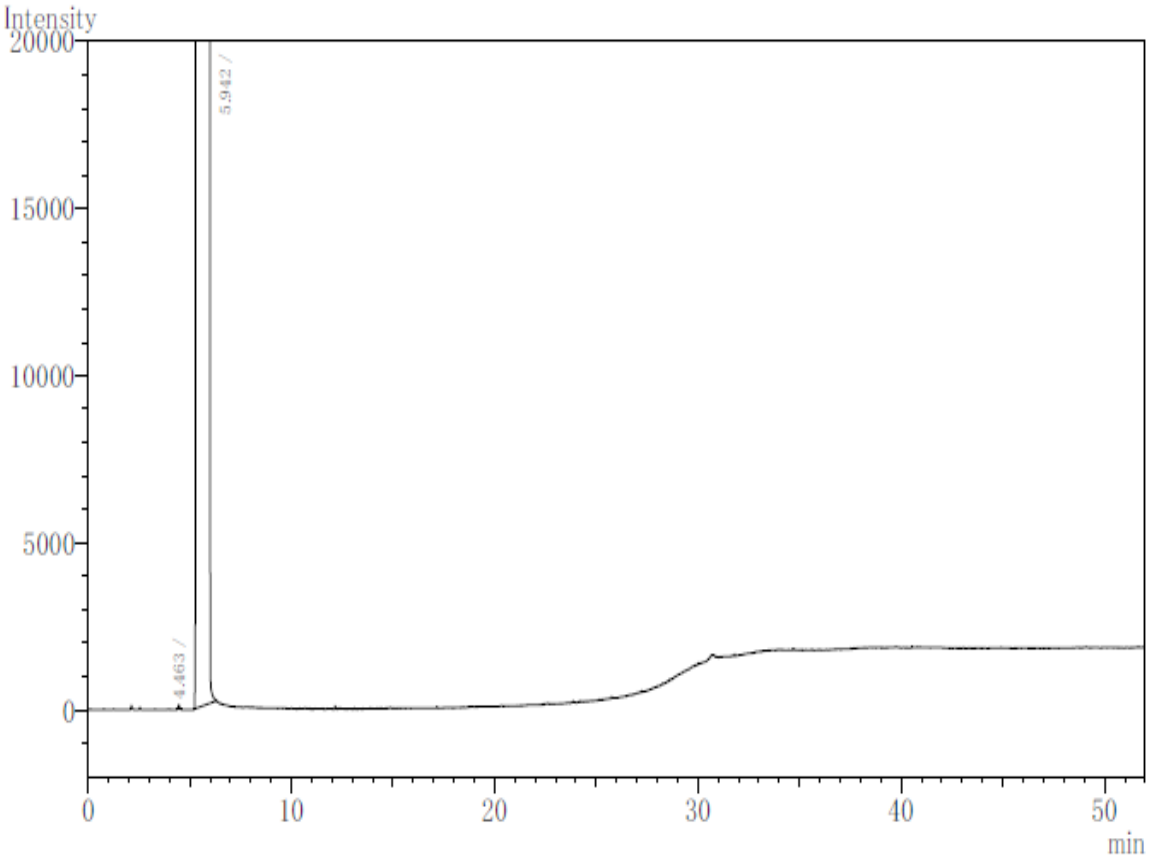


図２－１－１－２－１－２ａ－２０　Fr.18 GC チャート

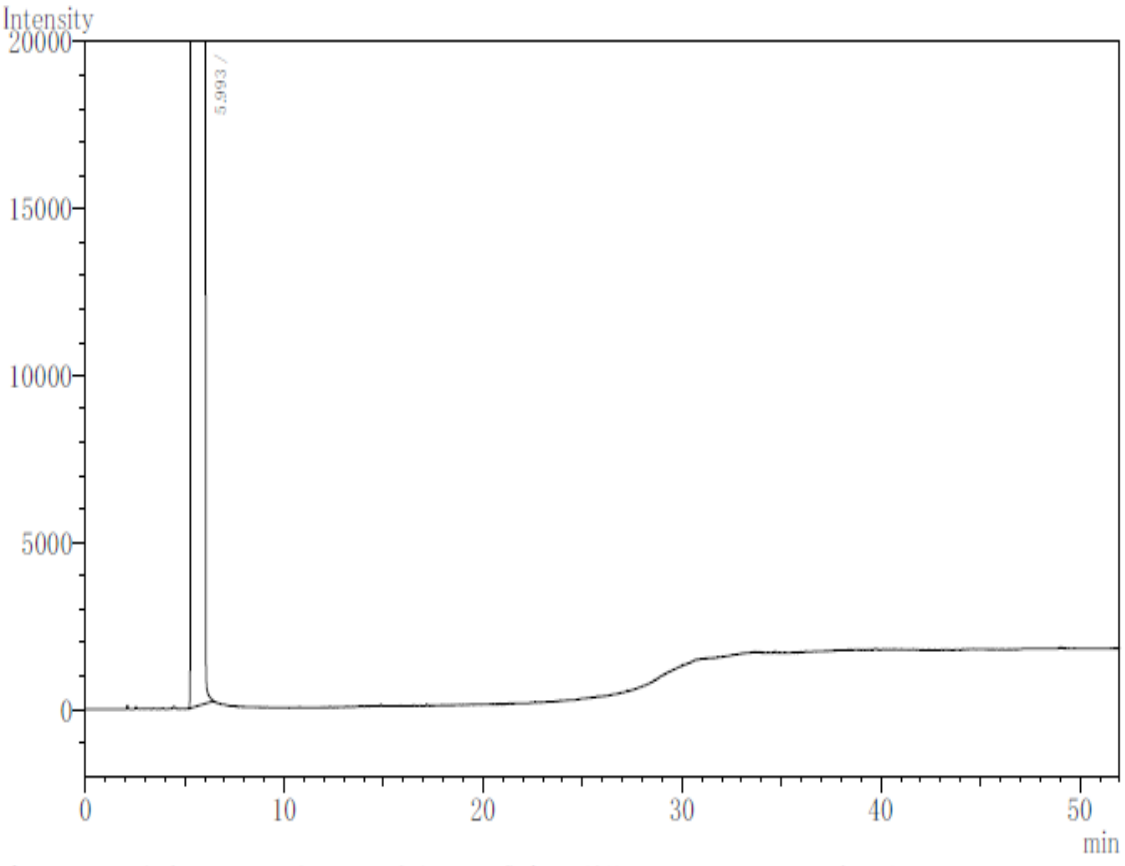


図２－１－１－２－１－２ａ－２１　Fr.19 GC チャート

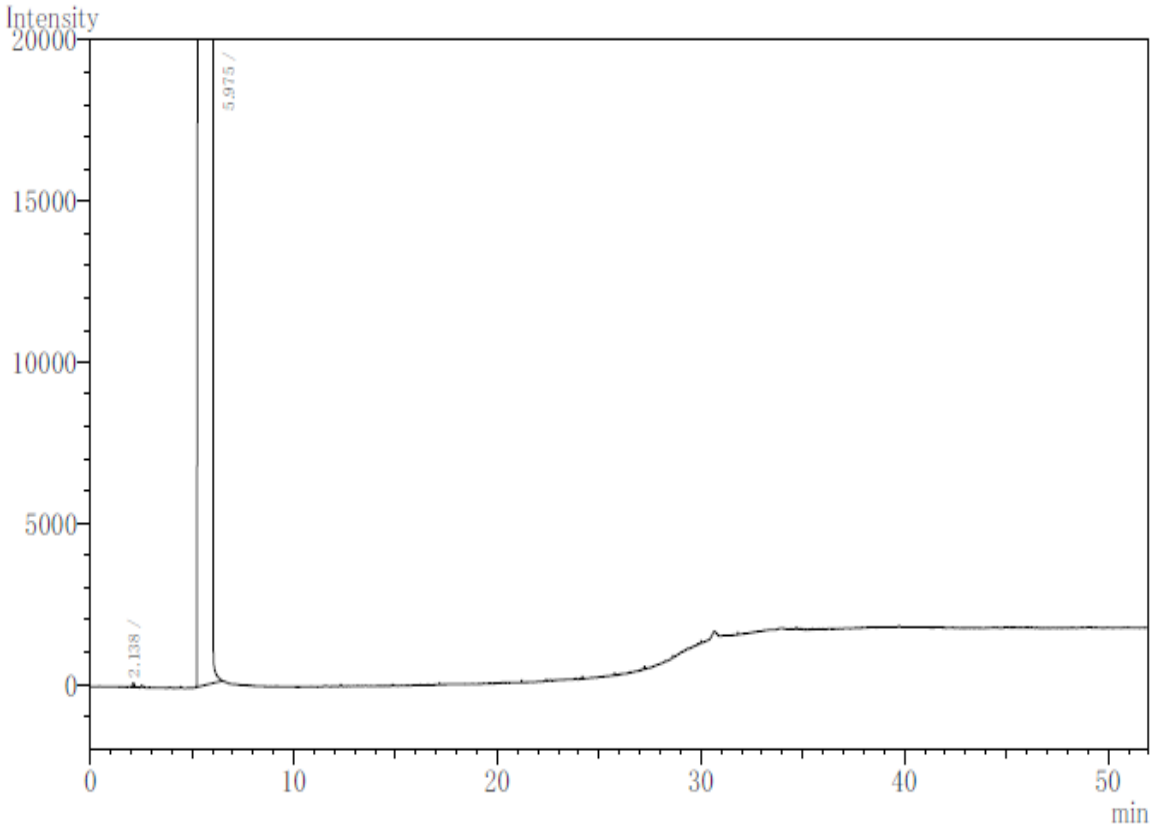


図２－１－１－２－１－２ａ－２２　Fr.20 GC チャート

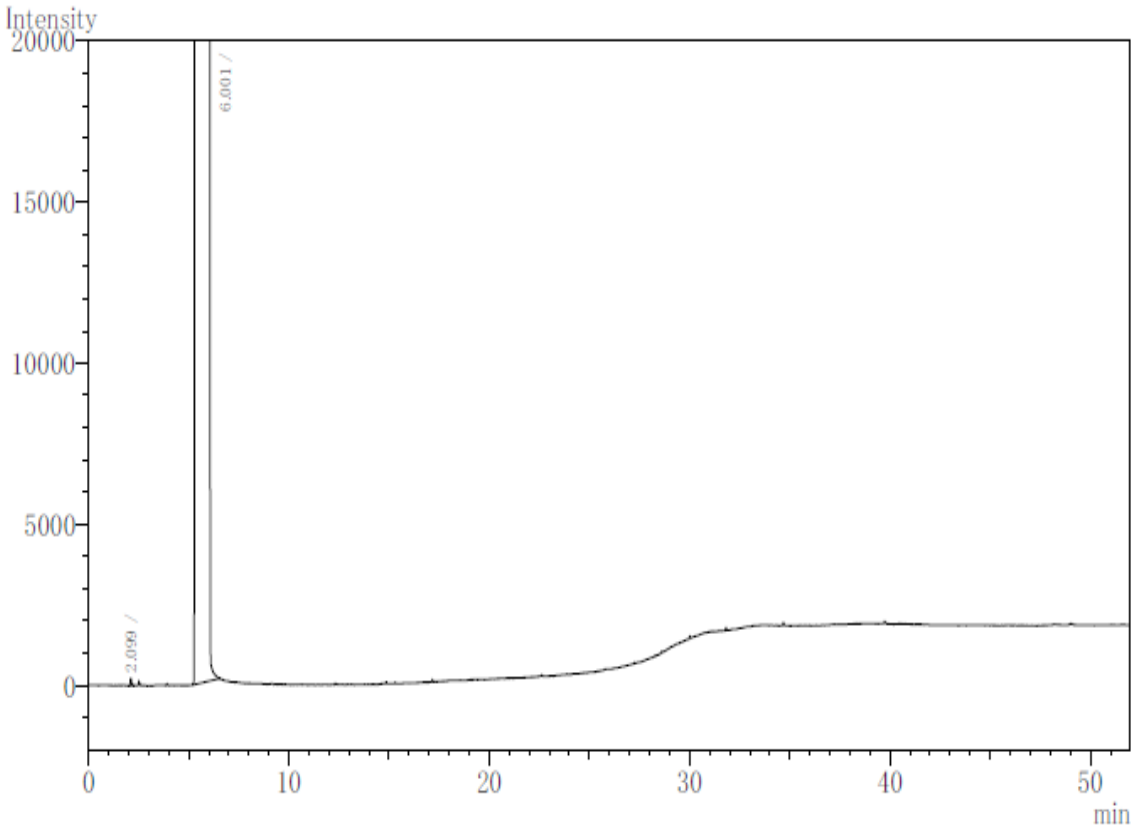


図２－１－１－２－１－２ａ－２３　Fr.21 GC チャート

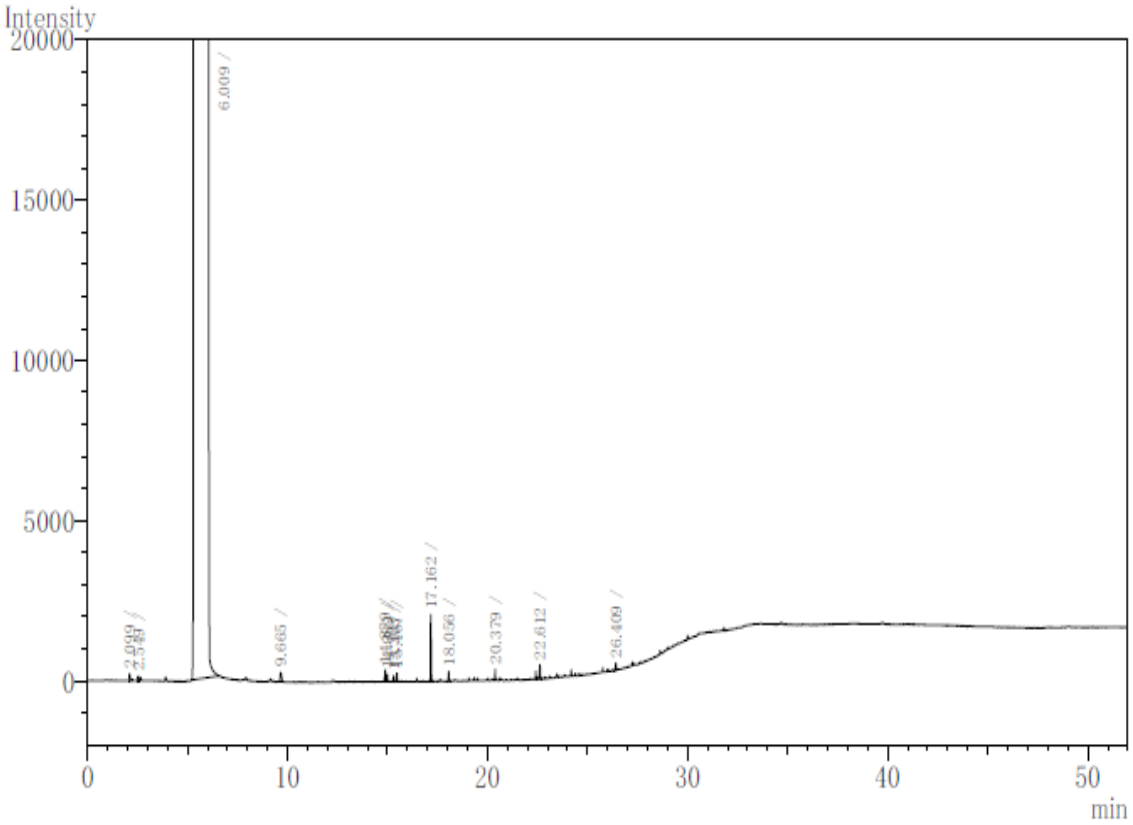


図２－１－１－２－１－２ａ－２４　残液 GC チャート

２－１－２　バイオエチレン製造検討

前章（２－１－１）で精製した非可食バイオマス由来バイオエタノールからのバイオエチレン製造について検討した。

２－１－２－１　エチレン試験製造

ポリエチレン製造用のバイオエチレンサンプルを製造するため、エチレン製造試験を実施した。サンプルは図２－１－２－１－１に示すフローにて製造することとした。

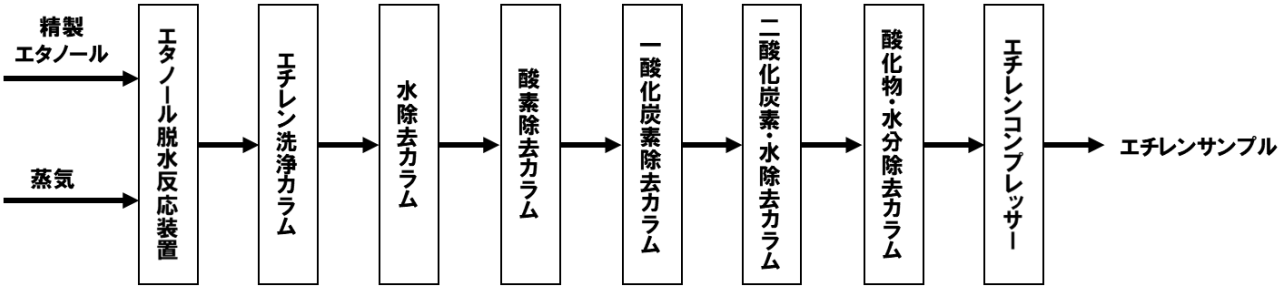


図２－１－２－１－１　エチレンサンプル製造フロー

２－１－２－１ａ　実施内容及び成果

（方法）

エチレン製造試験機（写真２－１－２－１ａ－１）を用いた糖化発酵試験を行い、エチレンサンプルの製造を実施した。試験条件は、温度 400℃以上、圧力 0.7MPa とした。

写真２－１－２－１ａ－１　エチレン製造試験機

（結果）

サンプル製造結果を表２－１－１－１ａ－２に示す。Test1～3 までは機器不調により、流量が安定せず、漏れなども発生したため、収率の算出はできなかったが、Test4、Test5 では安定した運転を確認することができた。特に Test5 では温度計の校正により脱水反応装置の温度が改善したため、モル収率も改善した（34→74%）

表２－１－２－１ａ－２　サンプル製造結果

	脱水反応装置温度（℃）	C2H5OH 投入速度（kg/h）	C2H4 生産速度（kg/h）	重量収率（%）	モル収率（%）	取得サンプル（kg）
設計値	420-450	2.72	1.5	55	91	
Test1	-※	-※	-※	-※	-※	3.7
Test2	402	-※	-※	-※	-※	3.9
Test3	378	-※	-※	-※	-※	3.8
Test4	354	1.8	0.37	21	34	3.7
Test5	428	2.5	1.13	45	74	3.8

※：機器不安定のためデータ無し

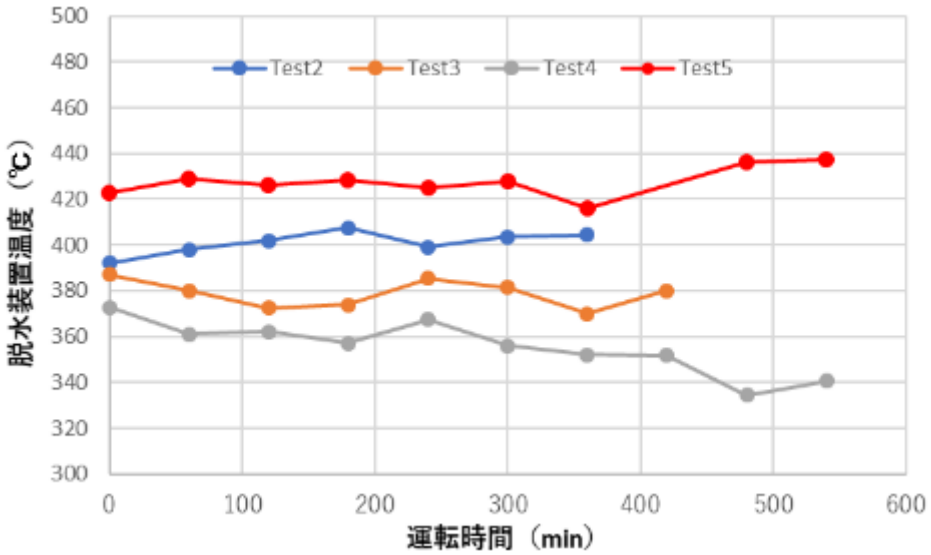


図２－１－２－１ａ－３　脱水反応装置温度データ

２－１－２－２　エチレンサンプル分析

エチレン製造試験機で得られたバイオエチレンサンプルは後段のポリエチレン合成である一定以上の品質が必要である。今回は表２－１－２－２－１に示す品質を目標としていたことから、得られたサンプルに対し、エチレン濃度および不純物の分析を行った。

表２－１－２－２－１　目標エチレン品質

項目	目標値
エチレン純度（%）	>99.9
O2（ppm）	<5.0
N2（ppm）	<50
CO2（ppm）	<10
CO（ppm）	<0.1
H2S（ppm）	<0.1
C2H2（ppm）	<0.1
露点（℃）	-70℃

２－１－２－２ａ　実施内容及び成果

（方法）

エチレン濃度および不純物の含有量を測定するため、ガスクロマトグラフィーによる分析を実施した。検出器は分析項目によって異なり、質量分析装置、熱伝導検出器、水素炎イオン化検出器、炎光高度検出器などを用いて測定した。また、水分については露点計を使用して算出した。また、エチレン製造試験機では表２－１－２－２－１に示す目標品質以外に、H2、CH4、C2H6 などの不純物が発生する可能性があるため、分析項目に追加した。

N2、H2、O2、CO2 分析条件
- 装置：GC/MS(キャノンアネルバ AGS-7000U)
- 質量数範囲：2～400 a.m.u
- イオン化方式：電子衝撃法(EI 方式)
- 質量分析部：四重極型質量分析計
- キャリアガス：ヘリウムガス

C2H2、C2H6 分析条件
- 装置： GC-TCD(島津製作所 TCD-2014)
- 検出器：熱伝導検出器(TCD：Thermal Conductivity Detector)
- キャリアガス：ヘリウムガス

CH4、CO 分析条件
- 装置：GC-FID（ジェイ・サイエンス・ラボ GAS1000FW)
- 検出器：水素炎イオン化検出器(FID:Hydrogen Flame Ionization Detector)
- キャリアガス：窒素ガス
- 燃焼ガス：水素ガス
- メタン化装置：ジェイ・サイエンス・ラボ CH4-201

H2S 分析条件

装置：GC-FPD(ジェイ・サイエンス・ラボ GC7100FPD)

検出器：炎光光度検出器(FPD:Flame Photometric Detector)

キャリアガス：窒素ガス

露点分析条件

装置：露点計(GE センシング Moisture Monitor Series 35IS)

センサープローブ：GE セシング M2

本体：GE セシング MMS35IS

測定範囲：-10℃～-90℃(2565ppm～0.096ppm)

（結果）

バイオエチレンサンプルの分析結果を表２－１－２－２ａ－１に示す。安定運転が確認できなかった Test1～3 ではエチレン純度が低く、ポリエチレン重合での影響が大きい酸素濃度が高いことが判明した。安定運転が可能となった Test4 と Test5 では窒素が残存するものの、酸素系の不純物は目標以下であることが確認できたことから、得られたエチレンサンプルについてポリエチレン重合評価を実施した。

表２－１－２－２ａ－１

	目標値	Test1	Test2	Test3	Test4	Test5
エチレン (%)	>99.9	94.8	97.4	94.0	99.4	99.9
O2 (ppm)	<5	14,000	15,000	9,000	<5	<5
N2 (ppm)	<50	61,00	62,000	58,000	5,100	84
CO2 (ppm)	<10	未測定		870	<1	<1
CO (ppm)	<0.1			50	<0.1	<0.1
H2S (ppm)	<0.1			<0.1	<0.1	<0.1
C2H2 (ppm)	<0.1			<100	<100	<100
露点 (℃)	<-70			-30	-35	未測定
H2 (ppm)				10,000	<200	380
CH4 (ppm)				19	13	6
C2H6 (ppm)				<1,000	<1,000	<1,000

２－１－２－３　エチレン製造設備ユーティリティー必要量の推定

エチレン製造時の LCA 解析を実施する場合、ベンチスケールでのユーティリティー使用量で計算すると、熱回収などが行われていないため、多くの二酸化炭素を排出する計算値となり、LCA 評価としては適切でないと言える。そこで商業機スケールの設備概算設計を行い、ユーティリティー必要量を推定した。

２－１－２－３ａ　実施内容及び成果

（方法）

エチレン生産量を 50,000 トン/年（ポリエチレン生産量として約 30,000 トン/年）と設定し、エタノールからエチレンへと脱水反応から精製までの工程について設計を行った。手順としてはプロセスフローダイアグラムを構築した上で機器を選定し、必要ユーティリティー量を推定した。

（結果）

構築したプロセスフローダイアグラムを図２－１－２－３ａ－１に示す。商業機スケールの場合は多数の熱交換器を配置可能であり、熱回収が効率的にフローを構築可能であることを確認した。抽出した機器リスト（ポンプ 10 台以上、圧縮機数台など）から、必要なユーティリティー量を算出し、後述する LCA 解析で使用した。

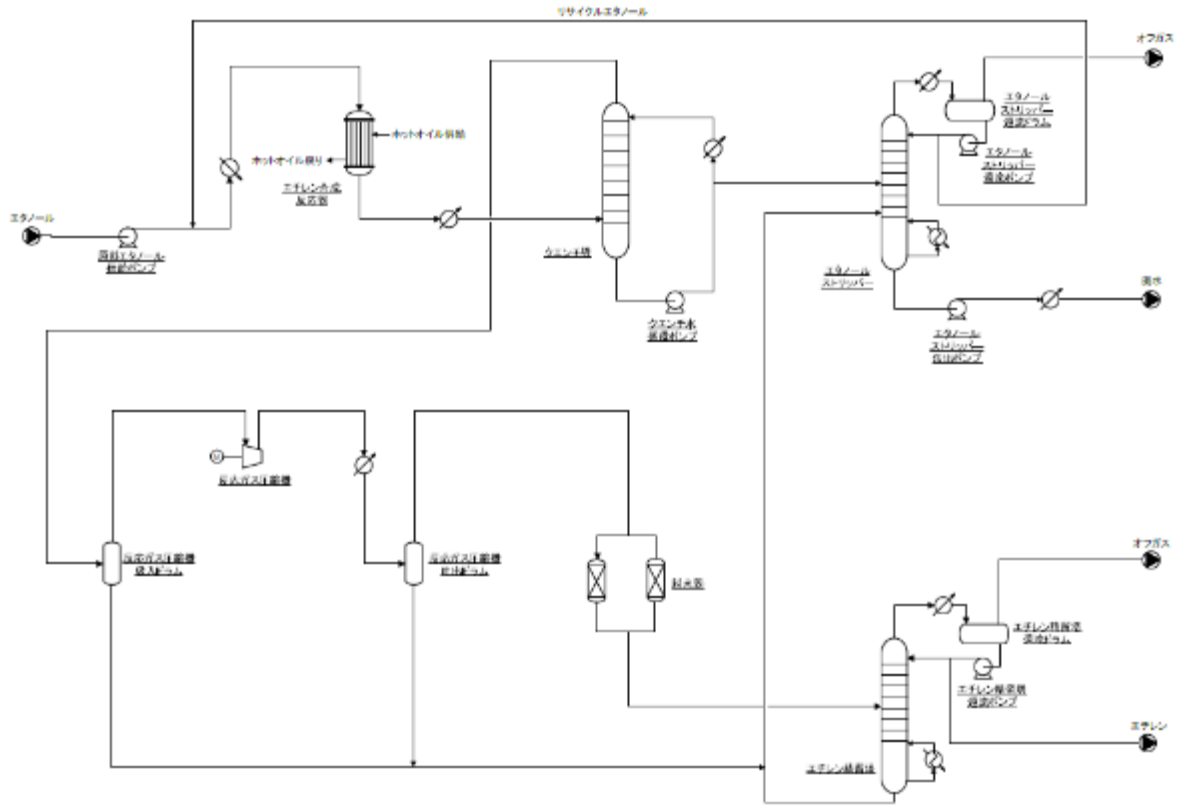


図２－１－２－３ａ－１　エチレン製造商業規模設備プロセスフローダイアグラム

２－１－３　バイオポリエチレン重合条件検討（日本ポリエチレン株式会社）

昨年度、本プロジェクトで得られるバイオマス由来のエチレン（以下、バイオエチレン）を用いてポリエチレンを製造する重合プロセスとして、サンプル量、ポリエチレン重合後にフィルム成形を行う上で必須となるペレット化工程、および実在する重合反応器サイズを考慮し、スラリー法を選択した。今年度は重合条件の設定と、実際に得られたバイオエチレンからのバイオポリエチレン重合評価およびバイオポリエチレンサンプルの作成を実施した。

２－１－３－１　重合条件設定

スラリー法においては、炭化水素系の重合溶媒を用いるため、ポリエチレン品質と重合温度の関係によっては、ポリエチレンの一部成分が溶融することによって発生する重合パウダーが凝集し、重合の継続が困難になったり、反応器からのサンプルの排出が困難になったりする場合がある。昨年度の検討で重合パウダーの凝集がなく良好な重合スラリーが得られるポリエチレンは高密度領域（>0.94g/cm3）に設定することが適切であると判断した（表２－１－１－３－１－１）。今年度はポリエチレンの品質として密度に加え、溶融時の流動性指標であるMFR目標値を弊社市販品（ノバテックTMHD HY331）と同等値（1.0g/10min）に品質改善可能な重合条件を検討した。

表２－１－３－１－１　ポリエチレン重合ラボ予備試験結果

項目	Ｔ１	Ｔ２	Ｔ３
密度 (g/ml)	0.918	0.932	0.943
凝集	有	有	無
写真			

２－１－３－１ａ　実施内容及び成果

（方法）

目標品質（密度＝0.950g/cm3、MFR＝1.0g/10min）のポリエチレンを製造するため、適用するオレフィン重合触媒に応じたエチレン圧力、コモノマー量、助触媒量、重合温度などを設定することとした。重合条件はエチレン圧0.25MPa、温度80℃、1.5時間とし、コモノマー量の最適化を行った。今回の検討では石化エチレンを使用し、コモノマーとして１－ヘキセン（石化由来）を用いた。ポリエチレンの品質はポリエチレン鎖中に１－ヘキセンが取り込まれた量（共重合量）により制御することが可能であることから、13C-NMRによって定量し、最適な共重合量を確認することとした。

＜測定サンプルの調整＞

約150ｍｇの試料を、ｏ－ジクロロベンゼン／重水素化臭化ベンゼンの混合溶液2.4mlおよび化学シフトの基準物質であるヘキサメチルジシロキサンと共に内径１０ｍｍφのＮＭＲ試料管に入れ、１５０℃で均一に溶解させ、以下の条件でNMR測定を実施した。

＜測定条件＞
装置：ブルカージャパン社製　ＡＶＡＮＣＥ４００
測定プローブ：１０ｍｍφクライオプローブ
観測核：13C
測定方法：プロトンブロードバンドデカップリング法
測定温度：１２０℃
フリップ角：４５度
パルス繰り返し時間：27.5 秒
積算回数：1024 回以上

（結果）
得られたサンプルの密度、共重合量測定結果を表２－１－３－１ａに示す。今回の検討で得られたサンプル（5 点）の共重合量の平均値は 1.5wt%だった。密度が上がると 1－ヘキセン共重合量は減少するため、密度＝0.950g/cm3、MFR＝1.0g/10min を目標とする場合、コモノマー量は 1.2～1.5wt%とすることとした。

表２－１－３－１ａ　共重合量測定結果

	Ｓ１	Ｓ２	Ｓ３	Ｓ４	Ｓ５
密度（g/cm3）	0.946	0.944	0.946	0.945	0.946
MFR（g/10min）	2.1	0.9	1.0	1.3	0.7
共重合量（wt%）	1.8	1.7	1.5	1.3	1.2

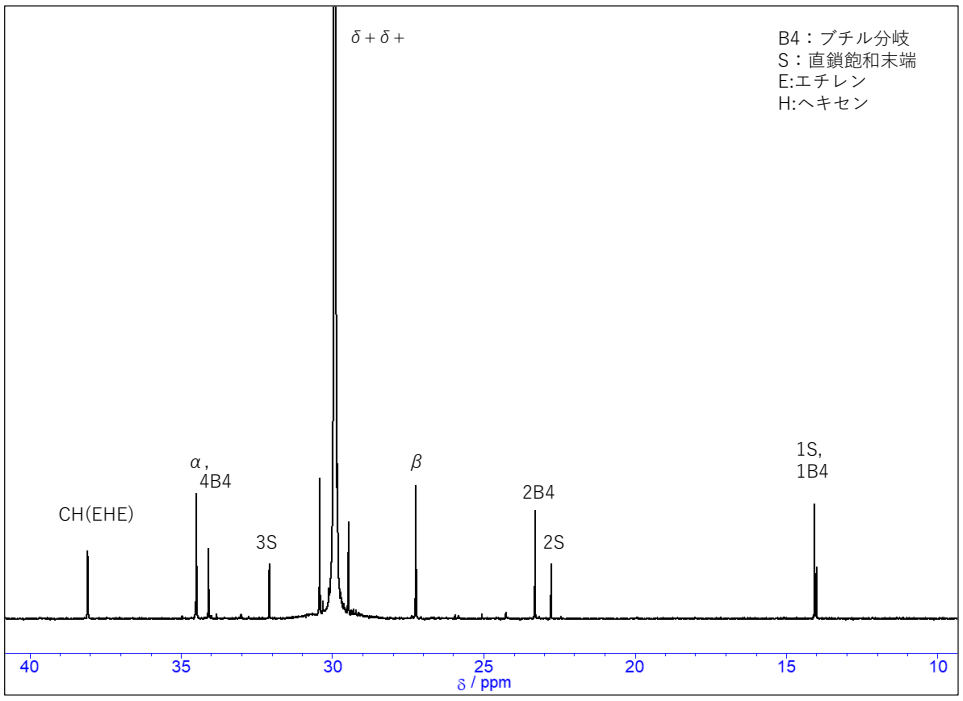


図２－１－３－１ａ　^{13}Ｃ－ＮＭＲスペクトル（サンプルＳ３）

２－１－３－２　バイオエチレン重合評価（Test4 サンプル）

前章（２－１－２－１）で得られたエチレンサンプル（Test4　濃度 99.4%）についてスラリー法による重合評価を実施した。

２－１－３－２ａ　実施内容及び成果

（方法）

Test4 エチレンサンプルからバイオポリエチレンを製造することを検討した。試験条件は、前章（２－１－３－１）と同様としたが、バイオエチレンに含有することが懸念される不純物を除去するため、図２－１－３－２ａ－１に示すように精製塔を試験機に追加した。反応終了後に得られるポリエチレン量を測定し、同条件で石化由来エチレンから得られるポリエチレン量を基準として重合活性値とした。

重合活性値（%）＝バイオポリエチレン量／（同条件で得られる石化由来ポリエチレン量）

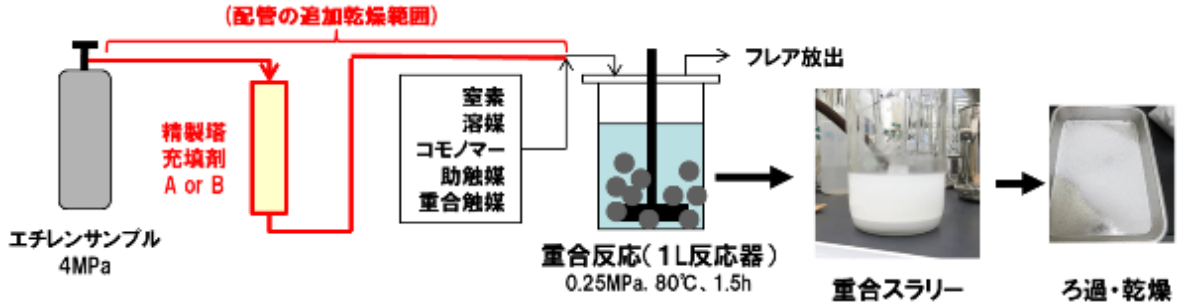


図２－１－３－２ａ－１　バイオエチレン重合装置概略

（結果）

重合評価結果を表２－１－３－２ａ－２に示す。石化由来のエチレンからバイオ由来エチレンである Test4 サンプルに変更したところ、重合活性は全く発現しなかった（Test4-01）。重合活性が発現しない主な理由はバイオエチレンに含まれる不純物により触媒の活性点が被毒されることであるため、重合計への不純物を極力抑制することを目的に、精製塔充填剤、エチレン流量、配管の追加乾燥を行うことで、ようやく石化エチレン並みの重合活性を発現可能であることを確認した（Test4-04）。

表２－１－３－２ａ－２　バイオエチレン（Test4）重合評価結果

	コントロール	Test4-01	Test4-02	Test4-03	Test4-04
エチレン種類	石化由来	バイオ由来	バイオ由来	バイオ由来	バイオ由来
精製塔充填剤	A	A	B	B	B
エチレン流量	～9g/min	←	←	0.2-0.3g/min	←
配管の追加乾燥	無	無	無	無	有
重合活性値（%）	100	0	0	80	100
総合評価	大量サンプルの製造可能	重合不可	重合不可	少量サンプルなら可能	少量サンプルなら可能
写真					

２－１－３－３　バイオポリエチレンサンプル作成（Test5 サンプル）

前章（２－１－２－１）で得られたエチレンサンプル（Test5　濃度 99.9%）についてスラリー法によるバイオポリエチレンサンプル作成を実施した。

２－１－３－３ａ　実施内容及び成果

（方法）

Test5 からバイオポリエチレンサンプルを作成することを検討した。試験条件は前章（２－１－３－１および２－１－３－２）と同様とし、精製塔については図２－１－３－３ａ－１に示すように充填剤ＡとＢを直列に配置することとし、エチレン流量の低減、配管の追加乾燥も前章（２－１－３－２）と同様に実施した。反応終了後に得られるポリエチレン量を測定し、同条件で石化由来エチレンから得られるポリエチレン量を基準として重合活性値とした。

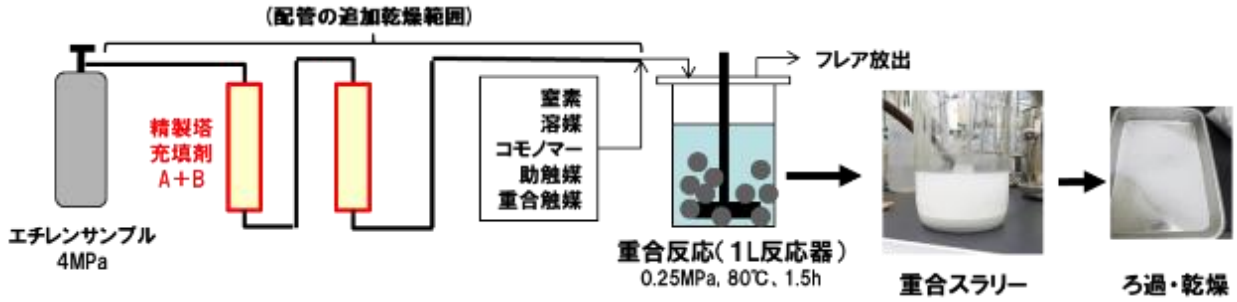


図２－１－３－３ａ－１　バイオエチレン重合装置概略

（結果）

重合評価結果を表２－１－３－３ａ－２に示す。石化由来エチレンで試験系の健全性を確認した後、Test5 サンプルに変更したところ、Test5-03 から重合活性の低下がはじまり、Test5-05 および Test5-06 では重合活性が発現しなかった。石化由来エチレンに切り替えたところ、重合活性が発現したことから、Test5 のエチレンにも触媒活性種を被毒させる不純物が含まれると考えられたため、重合活性が低下した場合は充填剤の交換と配管を分解洗浄することで Test5 品からポリエチレンサンプルを取得した。

表２－１－３－３ａ－２　バイオエチレン（Test5）重合評価結果

	配管洗浄	充填剤交換	活性値（%）
Control			100
Test5-01			94
Test5-02			90
Test5-03			48
Test5-04			16
Test5-05			0
Test5-06			0
Test5-07	（配管窒素パージ強化）		98
Test5-08			0
Test5-09	有	有	87
Test5-10			82
Test5-11			97
Test5-12	有	有	95
Test5-13			52

２－１－３－４　バイオポリエチレンペレット化および品質評価

リサイクル性評価および物性評価を行うため、前章で得られたバイオポリエチレンサンプルについて、ペレット化を行った。

２－１－３－４ａ　実施内容及び成果

（方法）

前章（２－１－３－３）で得られたバイオポリエチレンのうち、高収量の８バッチを混合してペレット化を実施した。粉末状のポリエチレンサンプルに酸化防止剤、中和剤を配合しブレンド化を実施した（写真２－１－３－４ａ－１）。ブレンド品を混練機に投入し、溶融混連によりストランドの作成を行った（写真２－１－３－４ａ－２）。ストランド状のサンプルを裁断し（写真２－１－３－４ａ－３）、ペレット状とした（写真２－１－３－４ａ－４）。得られたサンプルの MFR、密度はそれぞれ JIS K6922-2 および K6922-1 に準拠し、分子量は以下の条件で測定した。

＜測定条件＞

測定装置：Waters 社製 GPC（ALC/GPC 150C）
検出器：FOXBORO 社製 MIRAN 1A IR 検出器（測定波長：3.42μm）
溶離液：o-DCB
標準物質：東ソー社製 PS
カラム：昭和電工社製 AD806M/S（3 本）
カラム温度：140℃
流速：1.0ml/min

写真２－１－３－４ａ－１　酸化防止剤、中和剤ブレンド状況

写真２－１－３－４ａ－２　混練機およびストランド作成状況

写真２－１－３－４ａ－３　ペレット作成状況

写真２－１－３－４ａ－４　ポリエチレンペレットサンプル

（結果）

品質評価結果を表２－１－３－４ａ－５に示す。目標品質である MFR1.1g/10min、密度 0.947g/cm3 のサンプルを確保できた。また、GPC により分子量を測定した結果、数量平均分子量（Mn）が 21,510、重量平均分子量（Mw）が 138,400、分子量分布（Mw/Mn）は 6.4 であり、弊社の市販製品（ノバテック TMHD HY331）と同等の品質であることを確認した。

表２－１－３－４ａ－５　品質評価結果

項目	今回サンプル	市販製品 （TMHD HY331）
MFR（g/10min）	1.1	0.9
密度（g/cm3）	0.947	0.950
分子量（Mw）	138,400	138,700
（Mn）	21,500	22,800
分散度（PDI）	6.4	6.1
備考	酸化防止剤、中和剤配合	酸化防止剤、中和剤配合

２－１－３－５　バイオエチレン不純物定性分析

前章（２－１－３－３）までの結果、Test5 のエチレンサンプルにも触媒活性種を被毒させる不純物が含まれると考えられた。活性値の低下は配管の追加乾燥により改選されたことから原因は揮発性有機化合物と予想されたため、Test3～5 のエチレンサンプルについて分析を実施した。

２－１－３－５ａ　実施内容及び成果

（方法）

揮発性有機化合物を測定するため、ガスクロマトグラフィー質量分析による分析を実施した。測定は分子量 45～300 までの全てのイオン種を分析する Total ion choromatogram モードで測定し、ピーク面積として上位 10 成分について、NIST※ライブラリーに登録されている質量スペクトルデータベースとの一致率により化合物の推定を実施した。

※ 米国国立標準技術研究所（National Institute of Standards and Technology）

不純物分析条件

装置：GC/MS(キャノンアネルバ AGS-7000U)
質量数範囲：45～500 a.m.u
イオン化方式：電子衝撃法(EI 方式)
質量分析部：四重極型質量分析計
キャリアガス：ヘリウムガス

（結果）

検出した成分をトルエンとして換算した半定量結果を表２－１－３－５ａ－１に、Test3～5 における上位 10 成分の推定化合物名を表２－１－３－５ａ－２～４に、ガスクロマトグラムを図２－１－３－５ａ－５～７に示す。機器不調がみられた Test3 では、図２－１－３－５ａ－５に示されるように多くのピークが観察され、トルエン換算で 6.0ppm の揮発性有機化合物が含まれることが判明した。安定した運転が観察された Test4、5 では揮発性有機化合物は大幅に減少し、脱水反応装置の温度が改善した Test5 では不純物はさらに減少した。含有する揮発性化合物はその多くは炭化水素系の化合物だったが、一部に酸素を含有する化合物も確認され、これらがポリエチレン合成時において、触媒活性種を被毒させる原因であることが予想された。

表２－１－３－５ａ－１　揮発性有機化合物分析結果（トルエン換算　半定量）

	Test3	Test4	Test5
揮発性有機化合物量（トルエン換算 ppm）	6.0	0.22	0.11

表２－１－３－５ａ－２　Test3 サンプル有機不純物上位 10 成分

	物質名	分子式	類似度(%)	濃度(ppm)
1	n-Dodecane	$C_{12}H_{26}$	99	0.61
2	n-Tridecane	$C_{13}H_{28}$	98	0.30
3	3-hydroxy-Butyraldehide	$C_4H_8O_2$	78	0.15
4	Benzene	C_6H_6	92	0.15
5	1-methyl-Cyclopentene	C_6H_{10}	96	0.13
6	2,6-dimethyl-Undecane	$C_{13}H_{28}$	94	0.12
7	2,6-dimethyl-Heptadecane	$C_{19}H_{40}$	94	0.12
8	1-Ethoxybutane	$C_6H_{14}O$	98	0.08
9	n-Undecane	$C_{11}H_{24}$	96	0.08
10	1-propylnonyl-cyclohexane	$C_{18}H_{36}$	90	0.08

表２－１－３－５ａ－３　Test4 サンプル有機不純物上位 10 成分

	物質名	分子式	類似度(%)	濃度(ppm)
1	n-Tridecane	$C_{13}H_{28}$	98	0.04
2	Phenol	C_6H_6O	97	0.02
3	n-Dodecane	$C_{12}H_{26}$	98	0.02
4	Hexane	C_6H_{14}	98	0.01
5	2,6-dimethyl-Heptadecane	$C_{19}H_{40}$	94	0.01
6	Ethylbenzene	C_8H_{10}	98	0.01
7	n-Nonadecane	$C_{19}H_{40}$	91	0.01
8	n-Tetradecane	$C_{14}H_{30}$	95	0.01
9	Toluene	C_7H_8	95	0.01
10	Xylene	C_8H_{10}	97	0.01

表２－１－３－５ａ－４　Test5 サンプル有機不純物上位 10 成分

	物質名	分子式	類似度(%)	濃度(ppm)
1	2,2,4-Trimethyl-1,3-pentadiol diisobutyrate	$C_6H_{30}O_4$	96	0.05
2	Hexane	C_6H_{14}	98	0.02
3	Phenol	C_6H_6O	97	0.02
4	1,2,4-Trimethyl-Bnezene	C_9H_{12}	87	0.01
5	n-Undecane	$C_{11}H_{24}$	96	0.01
6	2-Pentene	C_5H_{10}	94	0.01
7	Ethylbenzene	C_8H_{10}	96	<0.01
8	1-ethyl-3-methyl-Bnezene	C_9H_{12}	95	<0.01
9	Toluene	C_7H_8	95	<0.01
10	Hexanal	$C_6H_{12}O$	92	<0.01

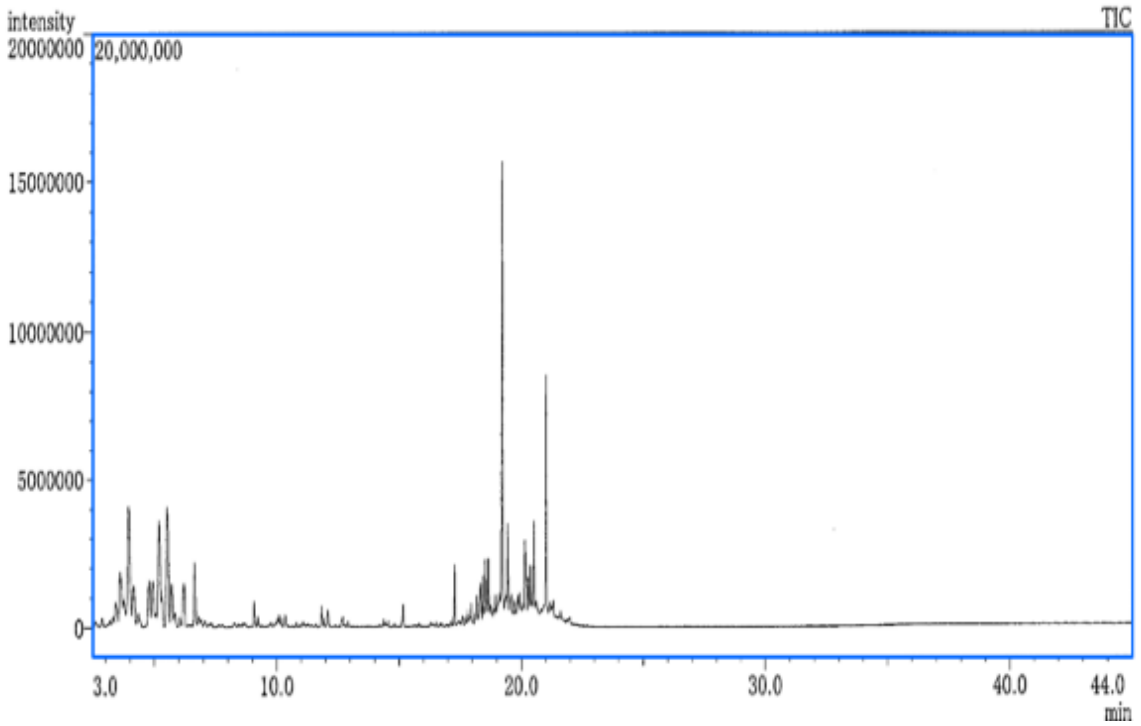


図２－１－３－５ａ－５　Test3 サンプルガスクロマトグラム

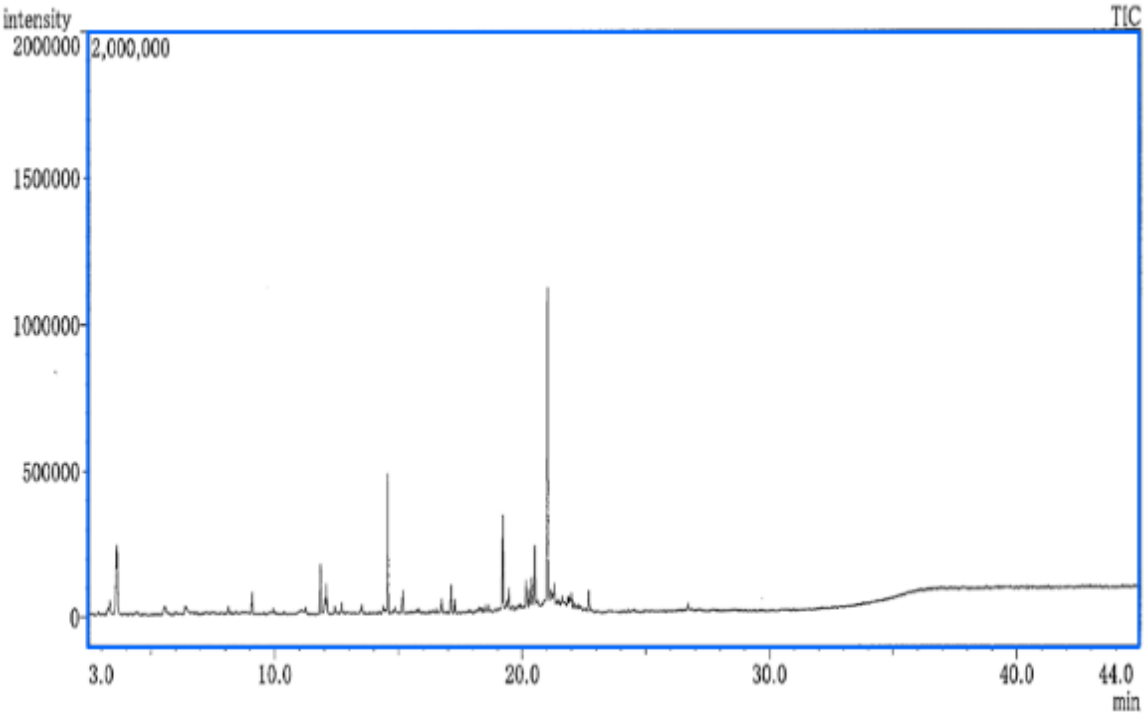


図２－１－３－５ａ－６　Test4 サンプルガスクロマトグラム

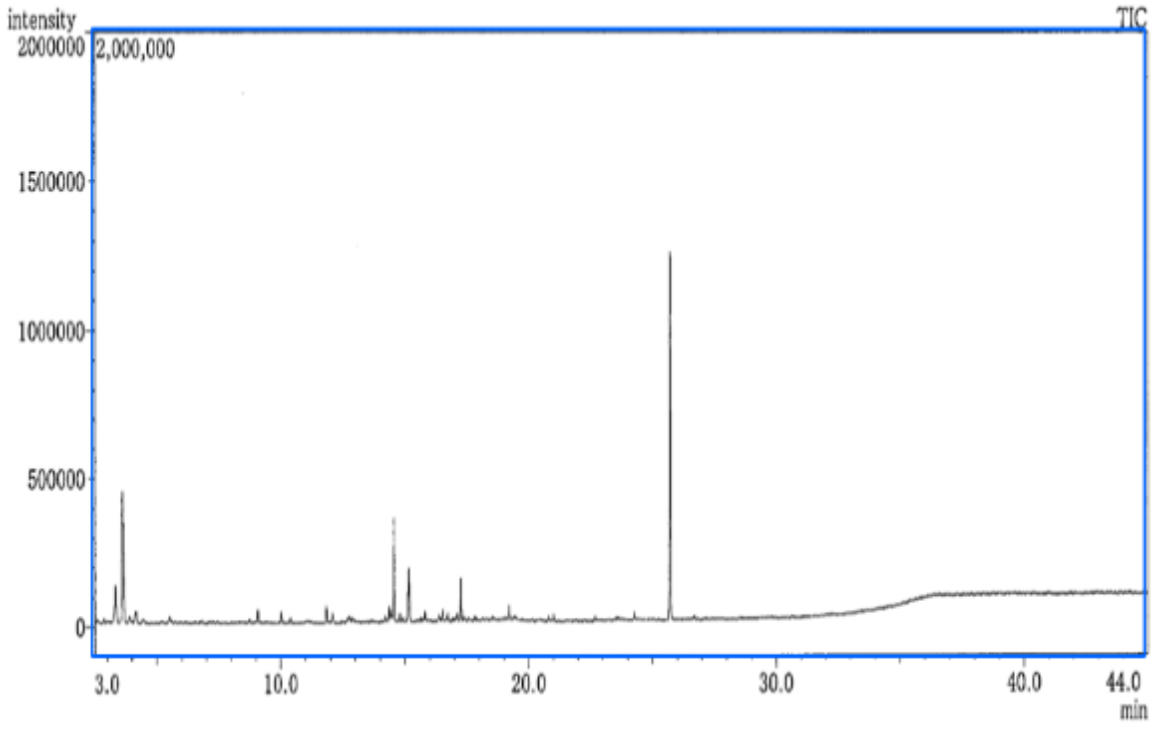


図２－１－３－５ａ－７　Test5 サンプルガスクロマトグラム

２－２非可食バイオマス由来 PLA 樹脂に関する技術開発

２－２－１　乳酸発酵条件の検討

ポリ乳酸合成用の乳酸は NEDO 事業にて開発した燃料用バイオエタノール製造法を応用することとし、乳酸菌と酵素による糖化発酵にてパルプに含まれるセルロースから乳酸を生産する方法を採用している。

昨年度までに、様々な菌株でパルプからの乳酸生産を行い、収率および光学純度、生産速度が高い優良株として得られた No.31 株を取得し、写真２－２－１－１に示すような 1000L ジャーによるスケールアップ検討を実施した。今年度は大量サンプルを作製するため、昨年度までに得られた最適な培養条件にて培養し、再現性も含め、1000L ジャーにより乳酸発酵条件を確認することとした。

写真２－２－１－１　1000L ジャーファーメンター

２－２－１－１　乳酸大量培養（一回目）

２－２－１－１－１ａ　実施内容及び成果

（方法）

1000L ジャーファーメンターを用いた糖化発酵試験を実施した。試験条件は、基質：広葉樹溶解パルプ 10%濃度、酵素：所定量、初期乳酸菌量：20L、pH：5.0（5% CaCO3 で調整）、窒素源Ｂ：所定量、撹拌条件：150rpm、温度：30℃とし、乳酸菌は No.31 を使用した。培養終了後、酵素と乳酸菌をろ別して得られた培養液 OLA003 に対し、HPLC により乳酸量を分析した。

乳酸分析条件

装置：HPLC（アジレント HP1100）
溶離液：5mM H2SO4
流量：0.6ml/min
注入量：20ul
カラム温度：45℃
検出器：RI
カラム：Aminex HPX-72H

（結果）

培養終了後の培養液 HPLC 分析結果を図２－２－１－１－１ａ－１に示す。12.7 分付近の乳酸を示すピーク以外に 9.0～11.5 分付近に糖類など有機不純物に由来するピークが若干観察されたが、投入したパルプの大部分が乳酸に変換されたことを確認した。

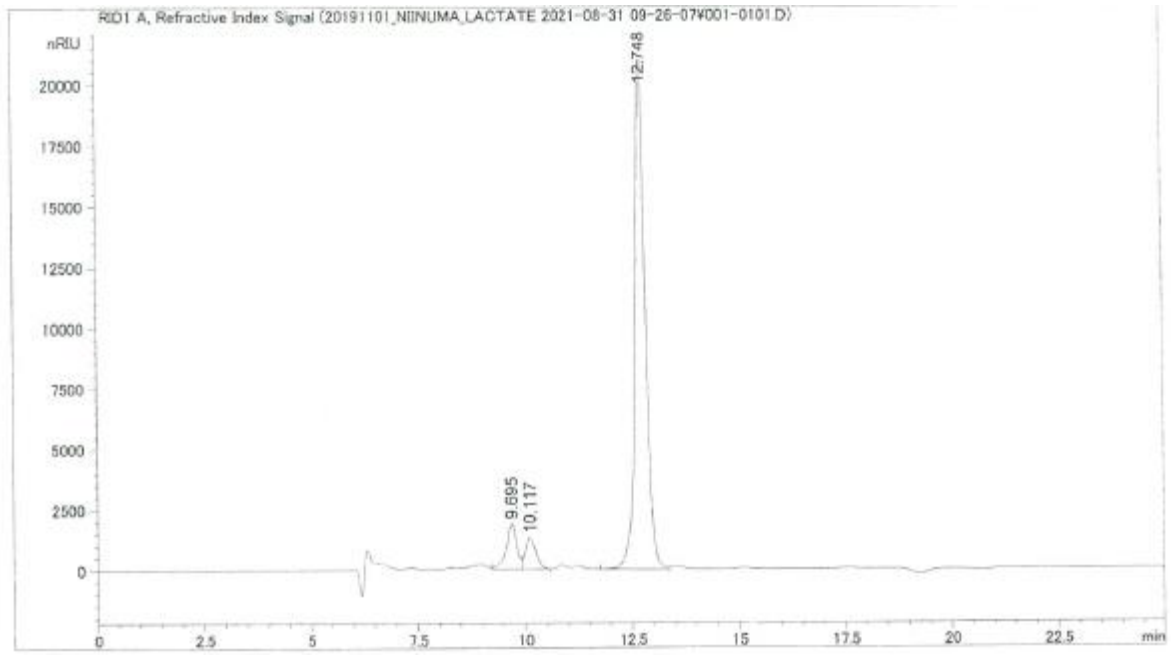


図２－２－１－１－１ａ－１　培養液 HPLC チャート（OLA003）

２－２－１－２　乳酸大量培養（二回目）

２－２－１－２－１ａ　実施内容及び成果

（方法）

大量培養での再現性を確認するため、1000L ジャーファーメンターを用いた糖化発酵試験を実施した。試験条件は、前章（２－２－１－１）と同様とし、培養終了後、得られた培養液 OLA004 に対し、HPLC により乳酸と有機不純物を分析した。

（結果）

培養終了後の培養液 HPLC 分析結果を図２－２－１－２－１ａ－１に示す。前回と同様のクロマトグラムが得られ、大量培養での再現性が確認された。

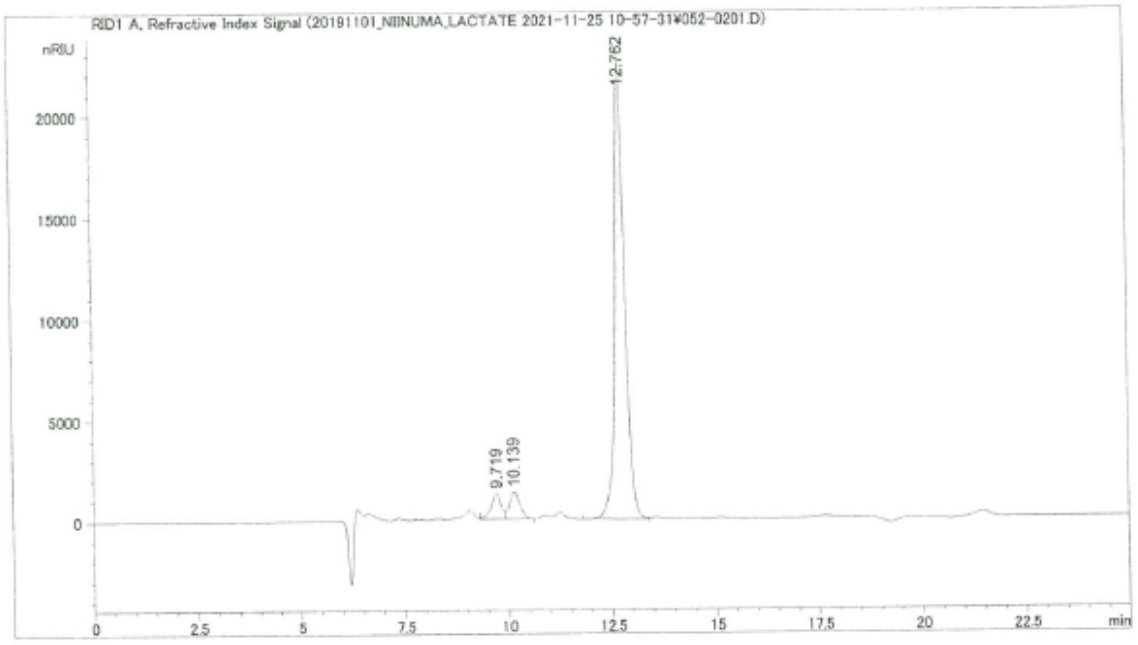


図２－２－１－２－１ａ－１　培養液 HPLC チャート（OLA004）

２－２－２　乳酸精製検討

乳酸培養液からポリ乳酸を合成するためには、乳酸の精製が必要である。昨年度までに図２－２－２－１に示すような手順で乳酸の精製検討を行い、硫酸沈殿の後に脱色工程を実施する OLA002 の脱色性が良好だった（写真２－２－２－２－１）。本年度は脱色性に加え、有機・無機不純物含有量を低減するために、工程の最適化について検討を行った。

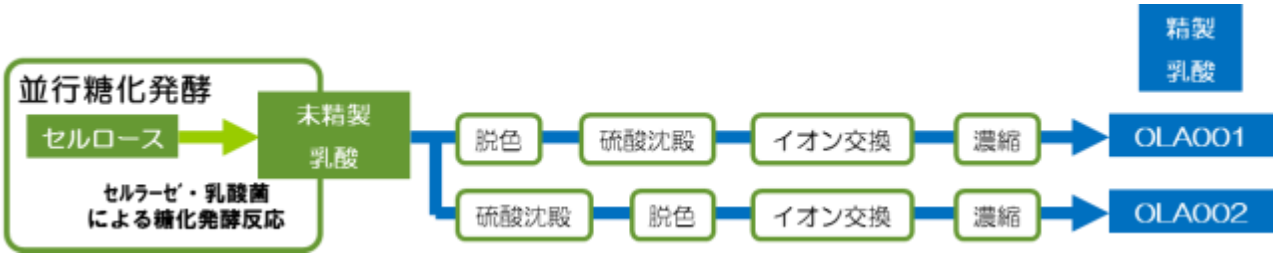


図２－２－２－１　乳酸精製手順

写真２－２－２－２－２　精製サンプル

２－２－２－１　乳酸精製スケールアップ検討

昨年度は写真２－２－２－１－１に示すような容量１L のカラムで乳酸精製を実施していた。今年度はスケールアップを確認するため、写真２－２－２－１－２に示すような容量 6L のカラムで精製し、写真２－２－２－１－３に示すような濃縮機（大河原製作所製　エバポール CEP-1）にて濃縮した。

写真２－２－２－１－１　１L カラム

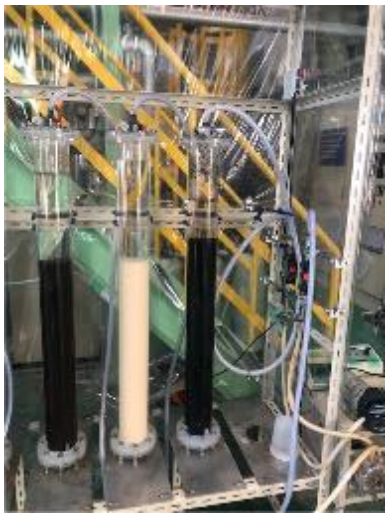


写真２－２－２－１－２　６L カラム

写真２－２－２－１－３　濃縮機

２－２－２－１ａ　実施内容及び成果

（方法）

前章で調製した大量培養サンプルについて６L カラムでの精製を実施した。精製条件は、図２－２－２－１ａ－１に示すようなスキームで実施し、精製後、濃縮機により濃縮したサンプルについて HPLC 分析により乳酸量を、イオンクロマト分析により有機不純物残存量を、ICP-MS 分析により無機不純物量を、キラル HPLC 分析により L 純度を測定した。また、濃縮サンプルの色度についても測定を実施した。

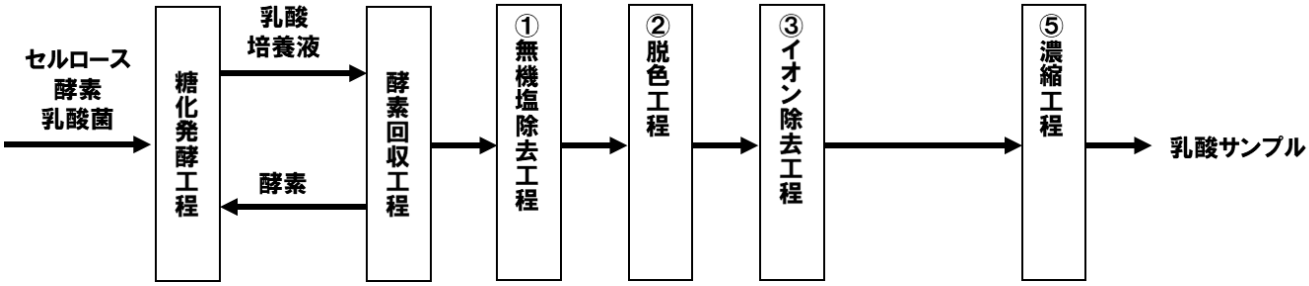


図２－２－２－１ａ－１　精製スキーム

乳酸分析条件

装置：HPLC（アジレント HP1100）
溶離液：5mM H2SO4
流量：0.6ml/min
注入量：20ul
カラム温度：45℃
検出器：RI
カラム：Aminex HPX-72H

有機不純物分析条件
　装置：イオンクロマト（サーモフィッシャーサイエンス IC6000）
　溶離液：1mM KOH
　流速：0.38ml/min
　検出器：電気化学検出器
　カラム：DIONEX CarboPac SA10-4um　2×250mm

無機不純物分析条件
　装置：ICP-MS（サーモフィッシャーサイエンス iCAP Q）
　検出器：シングル四重極
　前処理：HNO3+H2O2 加圧酸分解（CEM 製 MARS5）

L 純度分析条件
　装置：キラル HPLC（サーモフィッシャーサイエンス Ultimate3000）
　溶離液：2mM CuSO4/イソプロパノール（95/5）
　流量：1.0ml/min
　注入量：5ul
　カラム温度：25℃
　検出器：UV 254nm
　カラム：SUMICHIRAL OA-5000

色度分析装置
　装置：
　評価手法：ハーゼン単位色数（APHA）
　セル長：50mm

（結果）

精製・濃縮後の乳酸量、有機不純物量、無機不純物量を表２－２－２－１ａ－２に、HPLC 分析結果を図２－２－２－１ａ－３～４に、キラル HPLC 分析結果を図２－２－２－１ａ－５～６に示す。カラム精製による脱色工程・イオン除去工程、濃縮機による濃縮工程の条件を変更することで無機不純物と色度の低減が確認された。

表２－２－２－１ａ－２　乳酸サンプル分析結果

項目	Test-1	Test-2
乳酸（%）	93.9	83.9
有機不純物（ppm）	>40,000	>30,000
無機不純物（ppm）	>3,000	>350
L 純度（%）	96.7	96.7
色度	415	156
写真		
備考		精製・濃縮条件変更

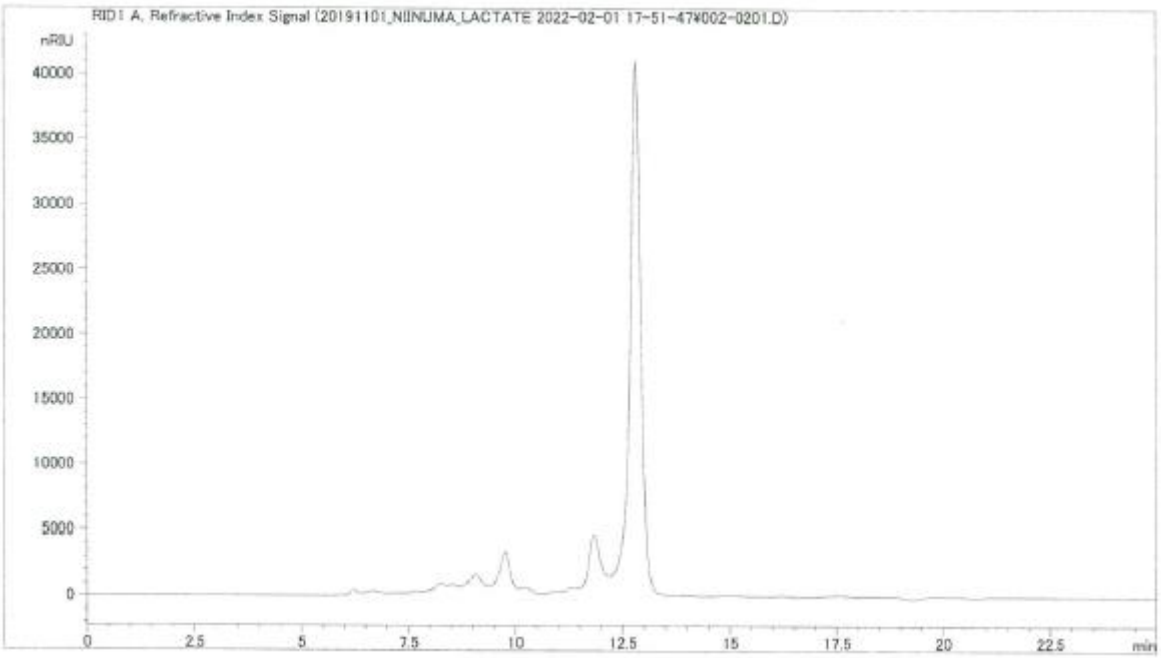


図２－２－２－１ａ－３　精製乳酸 HPLC チャート（Test-1）

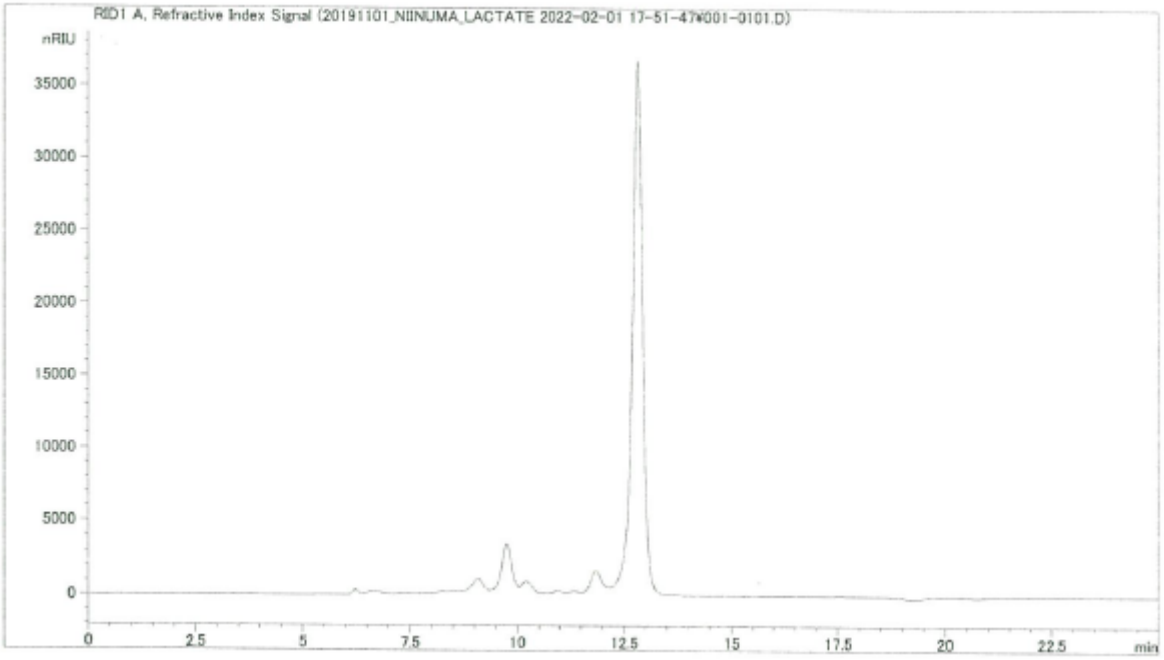


図２－２－２－１ａ－４　精製乳酸 HPLC チャート（Test-2）

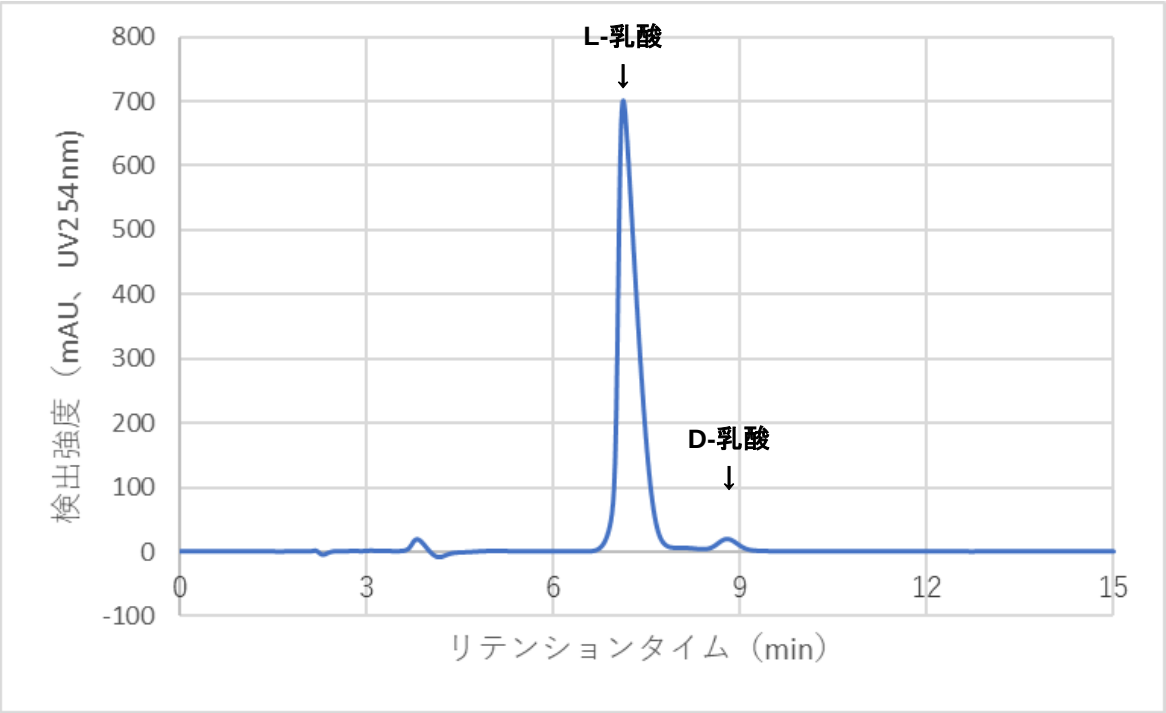


図２－２－２－１ａ－５　精製乳酸キラル HPLC チャート（Test-1）

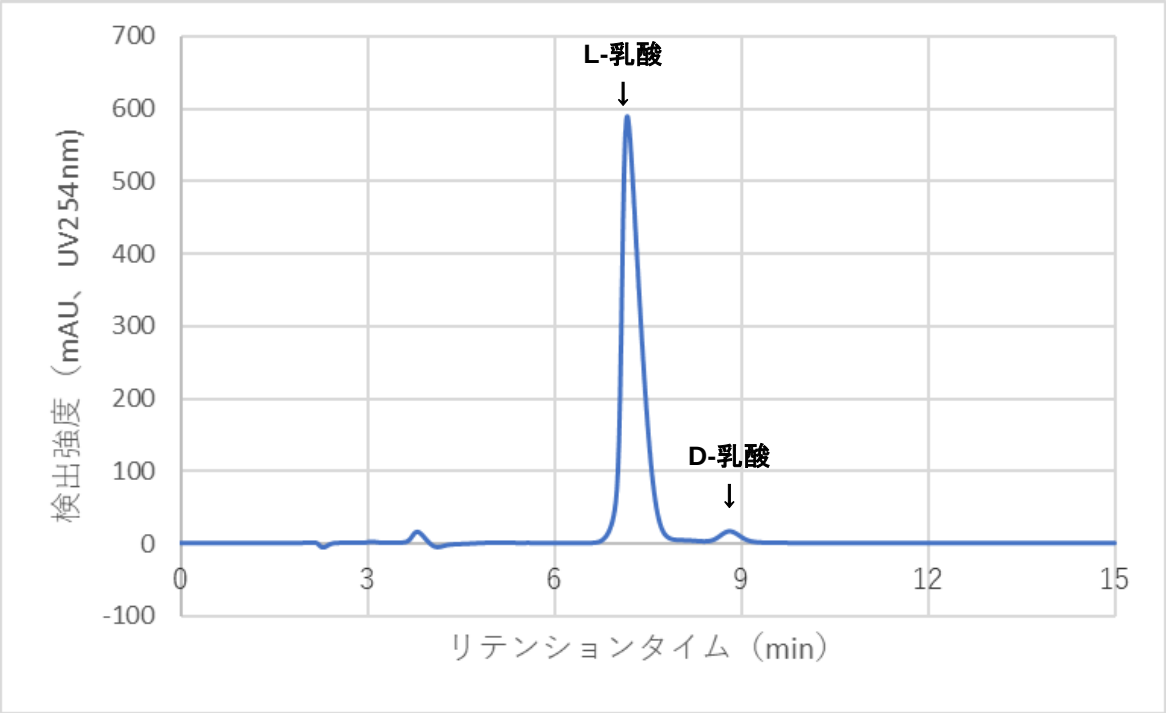


図２－２－２－１ａ－６　精製乳酸キラル HPLC チャート（Test-2）

２－２－２－２　乳酸サンプル評価

前章（２－２－２－１）で得られた乳酸サンプルから図２－２－２－２－１に示すような合成フローでポリ乳酸合成を行い、ポリ乳酸収率や分子量、融点を確認した。

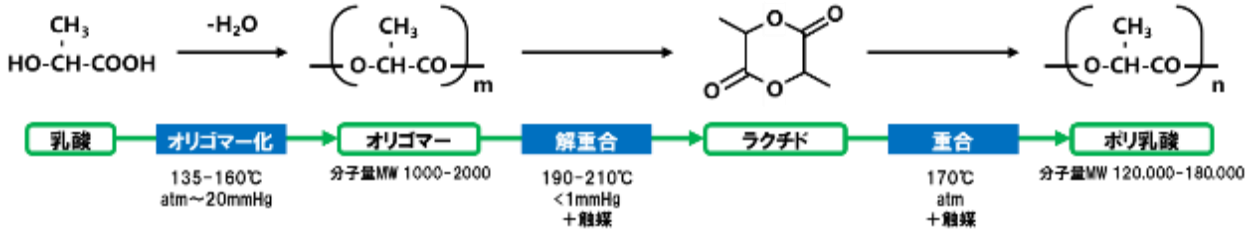


図２－２－２－２－１　ポリ乳酸合成フロー

２－２－２－２ａ　実施内容及び成果

（方法）

乳酸水溶液に2－エチルヘキサン酸スズを添加し、135℃ x 150min → 150℃ x 30min → 160℃ x 150min でオリゴマーを合成し、170-190℃ x 180min でラクチドへの解重合を行った。精製は粗ラクチドにエタノールを混合し、65℃まで加熱後、室温まで冷却して発生する沈殿を回収し、得られた沈殿に対しさらにトルエン＋酢酸エチルを混合し、65℃まで加熱後、室温まで冷却して発生する沈殿を濾過回収した。得られたラクチドに 2-エチルヘキサン酸スズを添加し、170℃ x 480min で反応させた後、室温まで冷却し、重合物を得た。

得られたサンプルの純度、分子量を確認するため DSC（融点、ガラス転移点）、GPC（分子量）分析を行った。分析条件は以下の通り

融点分析
　測定装置：熱分析装置（日立ハイテクサイエンス DSC7020）
　温度：25～200℃
　昇温速度：10℃/min
　窒素気流：50ml/min

純度分析条件
　測定装置：ガスクロマトグラフ（アジレントテクノロジ　6890plus）
　キャリアガス：ヘリウム
　注入量：1ul
　オーブン温度：150℃（30min）
　注入口温度：250℃
　検出器：FID
　カラム：CP-Cyclodextrin B-2,3,6-M-19

分子量分析
　測定装置：GPC（東ソー　HLC-8420GPC）
　溶離液：THF
　標準物質：ポリスチレン
　カラム：Shodex GPC KF-806L x3
　カラム温度：40℃
　流速：1.0ml/min
　検出器：RI

（結果）

乳酸サンプルのポリ乳酸合成評価結果を表２－２－２－２ａ－１に示す。Test-1 では分子量 10 万以上のポリ乳酸を得ることができたが、純度や融点が低く、一方で Test-2 では純度や融点は改善したが、分子量が 3 万程度と低いポリ乳酸しか得られなかった。

表２－２－２－１ａ－２　ポリ乳酸合成評価結果

項目	Test-1	Test-2
分子量（Mw）	113,000	30,300
（Mn）	59,600	11,800
分散度（PDI）	1.89	2.56
融点（℃）	152.7	173.4
L 純度（%）	96.6	99.8
収率（%）	24.1	18.0

２－２－２－３　乳酸精製工程検討（有機不純物低減）

前章（２－２－２－１）で精製した乳酸サンプルで、色度や無機不純物含有量が改善したにもかかわらず、ポリ乳酸合成評価では得られたサンプルの純度、分子量、融点のばらつきが観察された。両サンプルともに有機不純物が 3,000～4,000ppm 以上と高いことから、有機不純物を低減することを検討した。

２－２－２－３ａ　実施内容及び成果

（方法）

有機不純物を低減するため、微量不純物除去工程を追加した。全工程は図２－２－２－３ａ－１に示すようなスキームで実施し、精製後、濃縮機により濃縮したサンプルについて前章（２－２－２－１）と同様の分析を実施した。

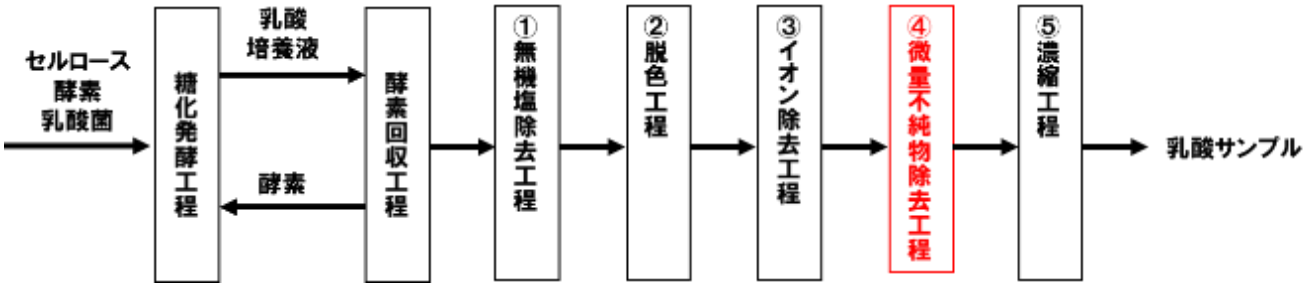


図２－２－２－３ａ－１　精製スキーム

（結果）

精製・濃縮後の乳酸量、有機不純物量、無機不純物量を表２－２－２－３ａ－２に、HPLC 分析結果を図２－２－２－３ａ－３～４、キラル HPLC 分析結果を図２－２－２－３ａ－５～６に示す。微量不純物除去工程を追加することによって、Test-3 では有機不純物を大幅に低減することを確認した。さらに、同工程での条件を検討することによって、色度も改善することを見いだした。

表２－２－２－３ａ－２　乳酸サンプル分析結果

項目	Test-3	Test-4
乳酸（%）	74.8	84.2
有機不純物（ppm）	>5,500	>4,550
無機不純物（ppm）	46.5	20
L 純度（%）	96.8	97.5
色度	70	14
写真		
備考		微量不純物除去工程条件変更

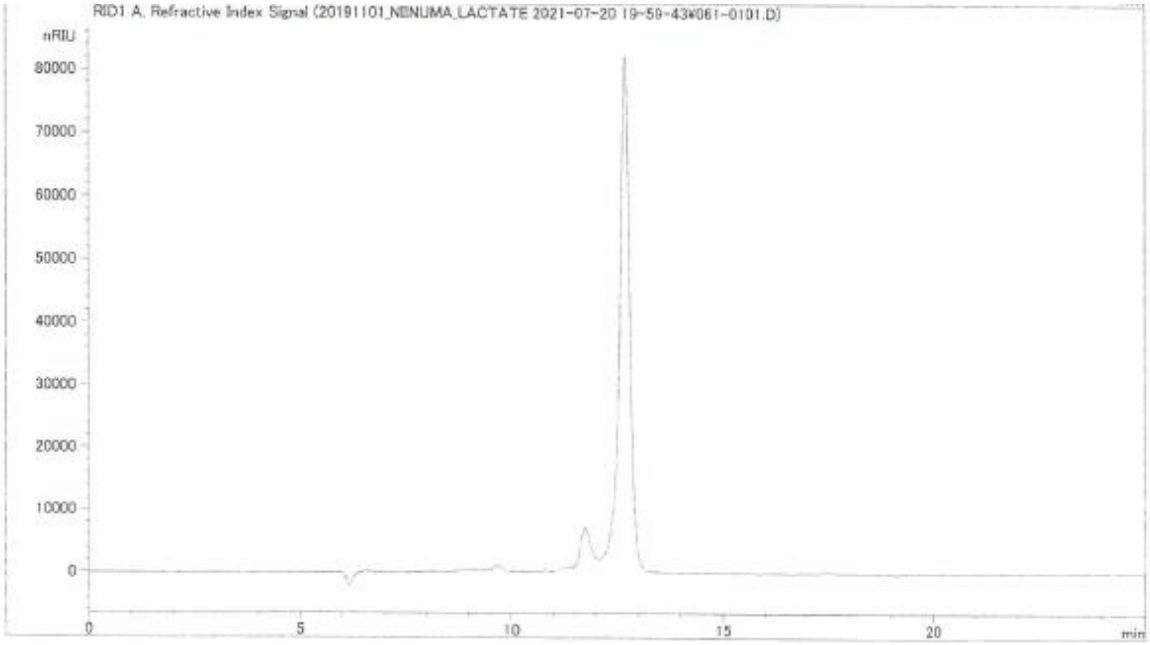


図２－２－２－３ａ－３　精製乳酸 HPLC チャート（Test-3）

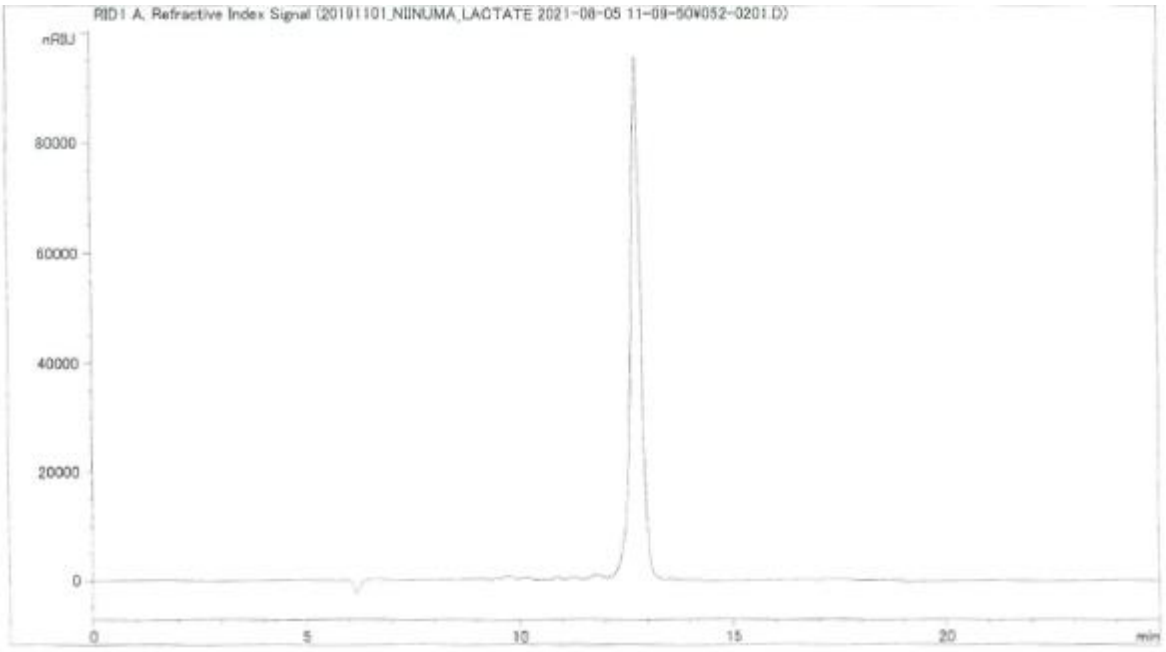


図２－２－２－３ａ－４　精製乳酸 HPLC チャート（Test-4）

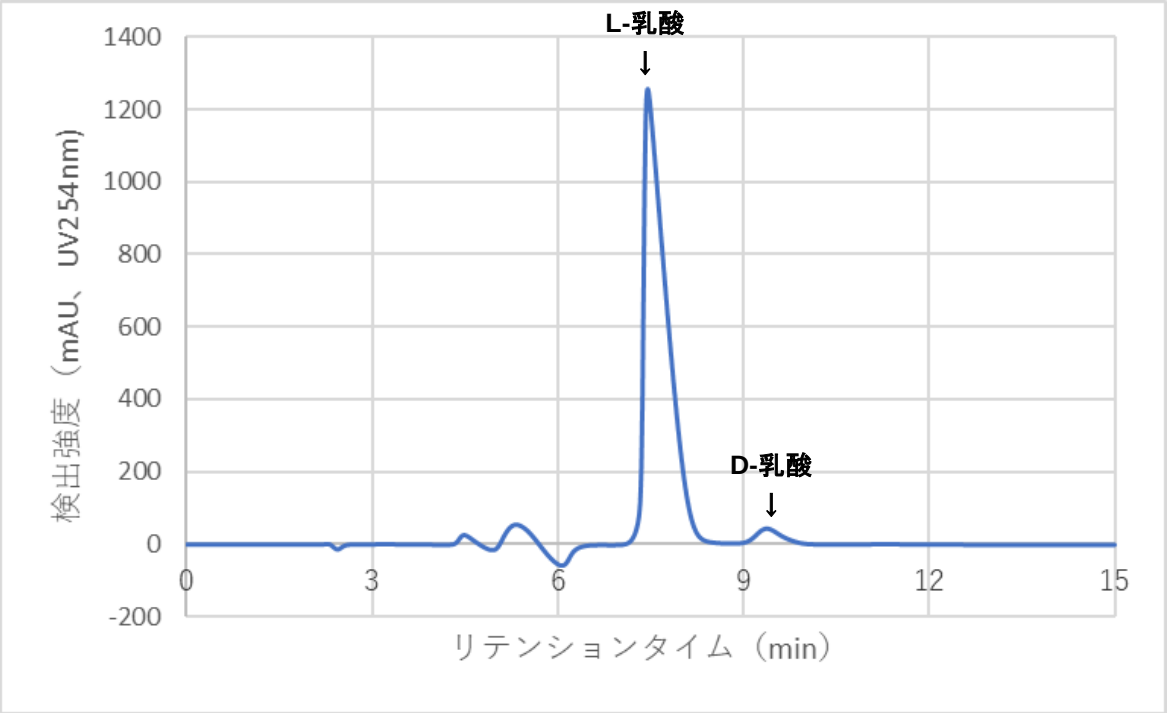


図２－２－２－３ａ－５　精製乳酸キラル HPLC チャート（Test-3）

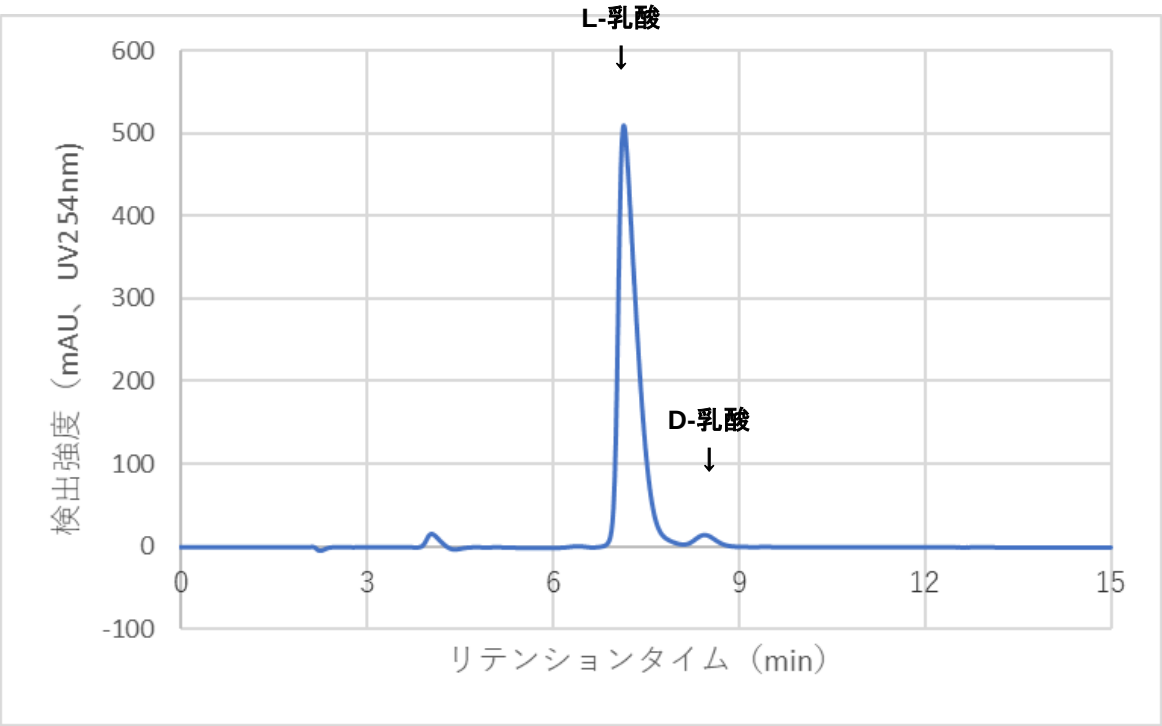


図２－２－２－３ａ－６　精製乳酸キラル HPLC チャート（Test-4）

２－２－２－４　乳酸サンプル評価

前章（２－２－２－３）で得られた乳酸サンプルからポリ乳酸合成を行い、ポリ乳酸収率や分子量、融点を確認した。

２－２－２－４ａ　実施内容及び成果

（方法）

前章（２－２－２－２）と同様にポリ乳酸合成を行い、得られたサンプルの純度、分子量を確認するためDSC（融点、ガラス転移点）、GPC（分子量）分析を行った。

（結果）

乳酸サンプルのポリ乳酸合成評価結果を表２－２－２－４ａ－１に示す。有機不純物を低減することでポリ乳酸収率は改善し、分子量や融点においても若干改善した。さらに微量不純物除去工程の条件を検討（Test-4）することで、分子量は更に改善することを確認した。

表２－２－２－４ａ－１　ポリ乳酸合成評価結果

項目	Test-3	Test-4
分子量（Mw）	51,800	92,500
（Mn）	32,600	55,700
分散度（PDI）	1.59	1.66
融点（℃）	177.1	180.2
L純度（%）	99.8	99.8
収率（%）	33.9	32.1

２－２－２－５　乳酸精製工程検討（無機塩除去工程改善）

前章までに精製した乳酸サンプルで、色度や無機不純物含有量が改善したにもかかわらず、ポリ乳酸合成評価では得られたサンプルの純度、分子量、融点のばらつきが観察された。両サンプルともに有機不純物が 3,000～4,000ppm 以上と高いことから、有機不純物を低減することを検討した。

２－２－２－５ａ　実施内容及び成果

（方法）

有機不純物をさらに低減するため、無機塩除去工程の改善を追加した。全工程は図２－２－２－５ａ－１に示すようなスキームで実施し、精製後、濃縮機により濃縮したサンプルについて前章（２－２－２－１）と同様の分析を実施した。

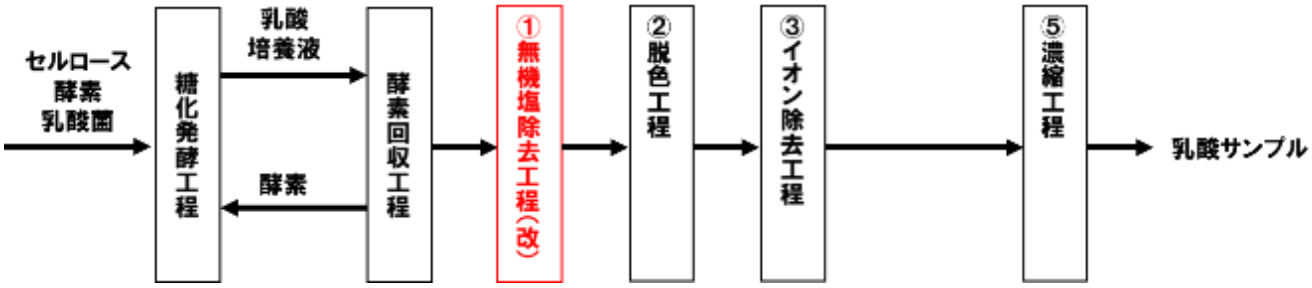


図２－２－２－５ａ－１　精製スキーム

（結果）

精製・濃縮後の乳酸量、有機不純物量、無機不純物量を表２－２－２－５ａ－２に、HPLC 分析結果を図２－２－２－５ａ－３に、キラル HPLC 分析結果を図２－２－２－５ａ－４に示す。無機塩除去工程を改善することによって、有機不純物を大幅に低減することを確認した。

表２－２－２－５ａ－２　乳酸サンプル分析結果

項目	Test-5
乳酸（%）	74.8
有機不純物（ppm）	>5,500
無機不純物（ppm）	46.5
L 純度（%）	96.8
色度	70
写真	

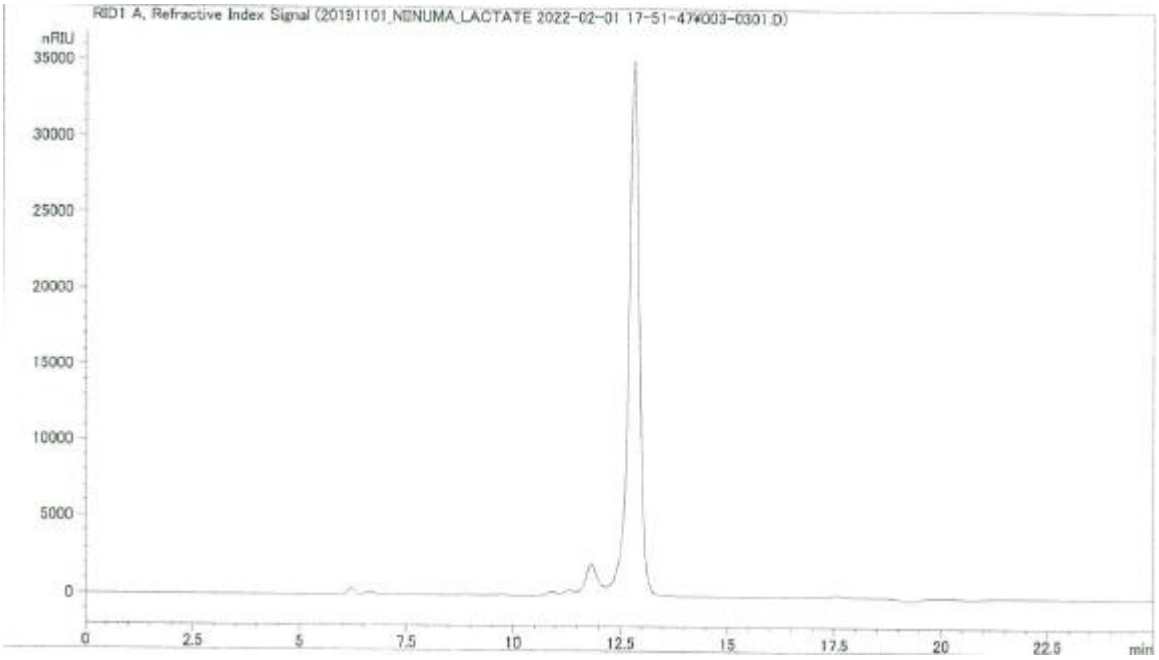


図２－２－２－５ａ－３　精製乳酸 HPLC チャート（Test-5）

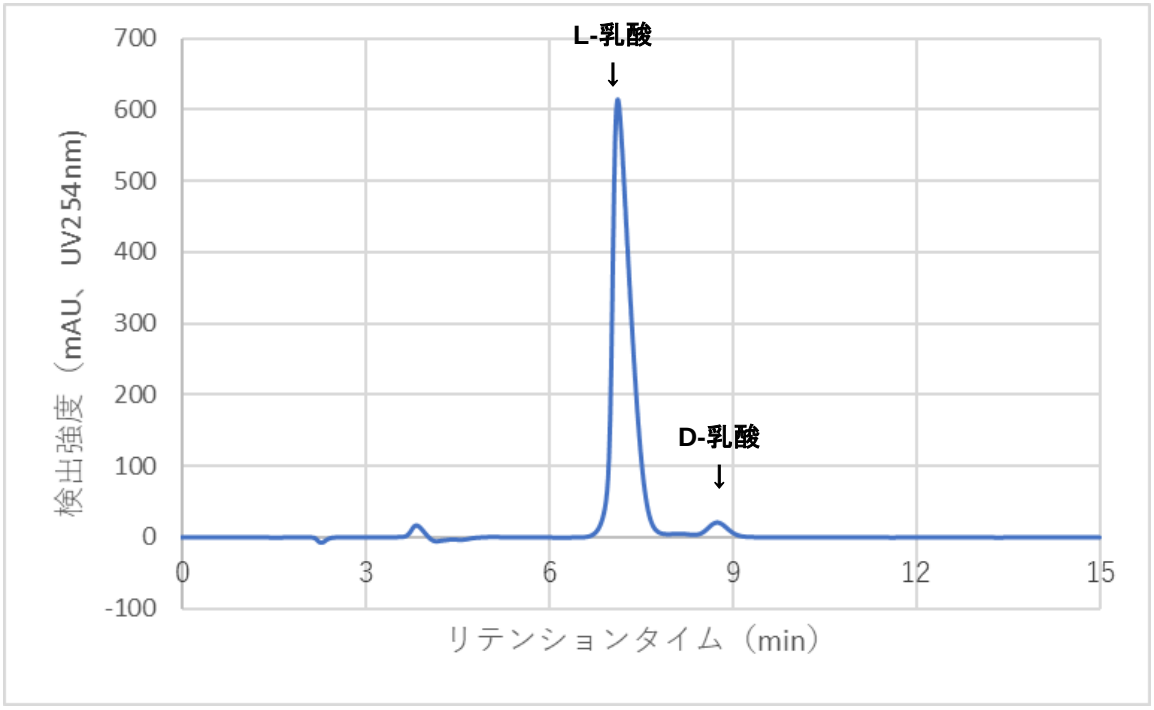


図２－２－２－５ａ－４　精製乳酸キラル HPLC チャート（Test-5）

２－２－２－６　乳酸サンプル評価

前章（２－２－２－５）で得られた乳酸サンプルからポリ乳酸合成を行い、ポリ乳酸収率や分子量、融点を確認した。

２－２－２－６ａ　実施内容及び成果

（方法）

前章（２－２－２－２）と同様にポリ乳酸合成を行い、得られたサンプルの純度、分子量を確認するためDSC（融点、ガラス転移点）、GPC（分子量）分析を行った。

（結果）

乳酸サンプルのポリ乳酸合成評価結果を表２－２－２－６ａ－１に示す。有機不純物を低減することでポリ乳酸収率は改善した。

表２－２－２－６ａ－１　ポリ乳酸合成評価結果

項目	Test-5
分子量（Mw）	105,000
（Mn）	62,300
分散度（PDI）	1.68
融点（℃）	178.1
L純度（%）	99.8
収率（%）	38.4

２－２－２－７　乳酸サンプル大量精製検討

前章（２－２－２－１～６）までに検討した結果、Test-4 もしくは Test-5 で精製した乳酸サンプルのように、有機不純物や無機不純物をある程度除去することでポリ乳酸の収率が向上することを確認できたことから、大量サンプルの精製について検討した。

２－２－２－７ａ　実施内容及び成果

（方法）

大量サンプル精製を実施するにあたり、作業効率の関係上、全工程は Test-4 と同様のスキーム（図２－２－２－７ａ－１）で実施した。精製後、濃縮機により濃縮したサンプルについて前章（２－２－２－１）と同様の分析を実施した。

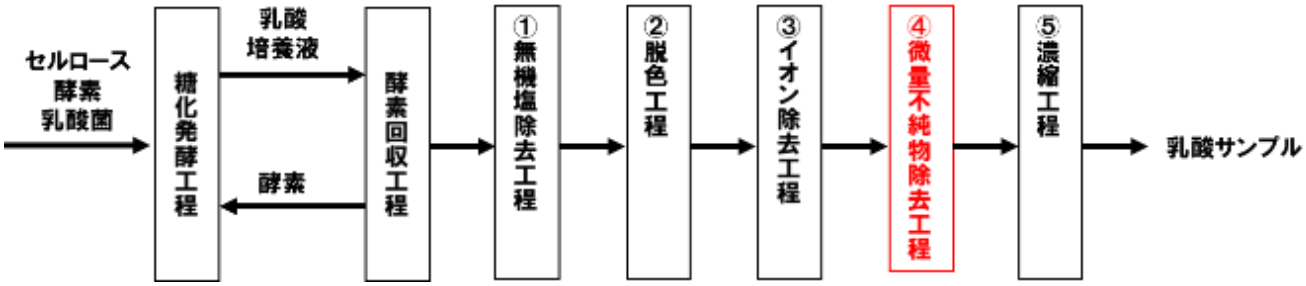


図２－２－２－７ａ－１　精製スキーム

（結果）

精製・濃縮後の乳酸量、有機不純物量、無機不純物量を表２－２－２－７ａ－２に、HPLC 分析結果を図２－２－２－７ａ－３に示す。精製をスケールアップすることで、Test-4 と比較して、無機不純物、色度が若干悪化したが、L 純度や有機不純物の含有量はほぼ同等のサンプルを調製することを確認した。

表２－２－２－７ａ－２　乳酸サンプル分析結果

項目	Test-4（参考）	Test-6
乳酸（%）	84.2	84.7
有機不純物（ppm）	>4,550	1,665
無機不純物（ppm）	20	246
L 純度（%）	97.5	97.0
色度	14	100
写真		

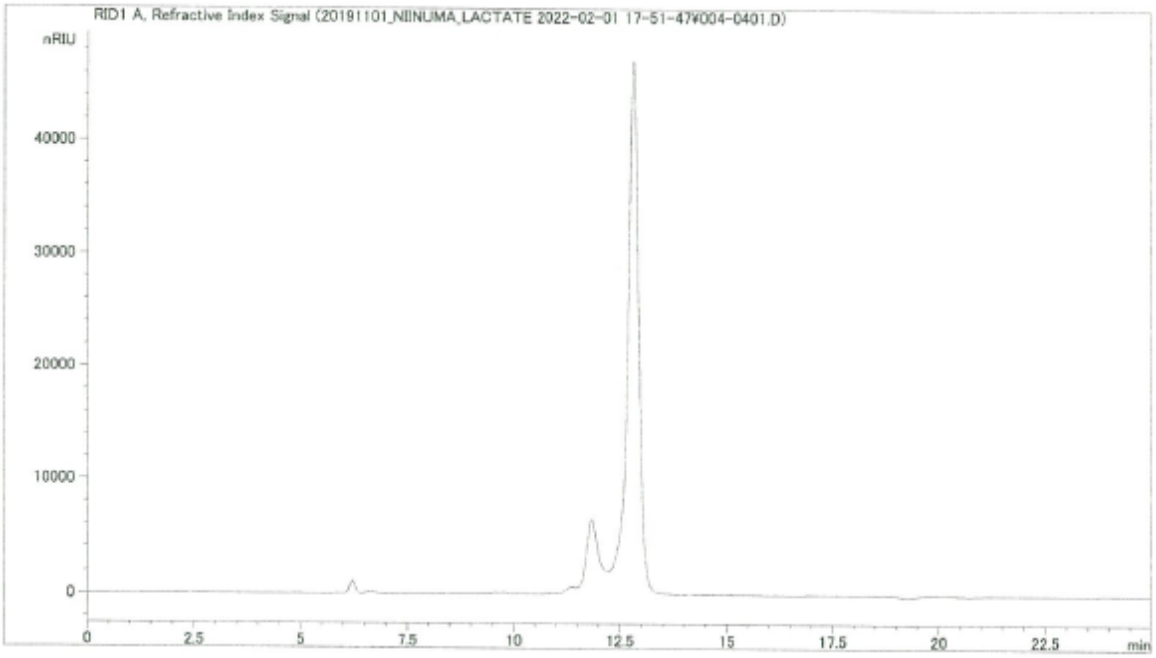


図２－２－２－７ａ－３　精製乳酸 HPLC チャート（Test-6）

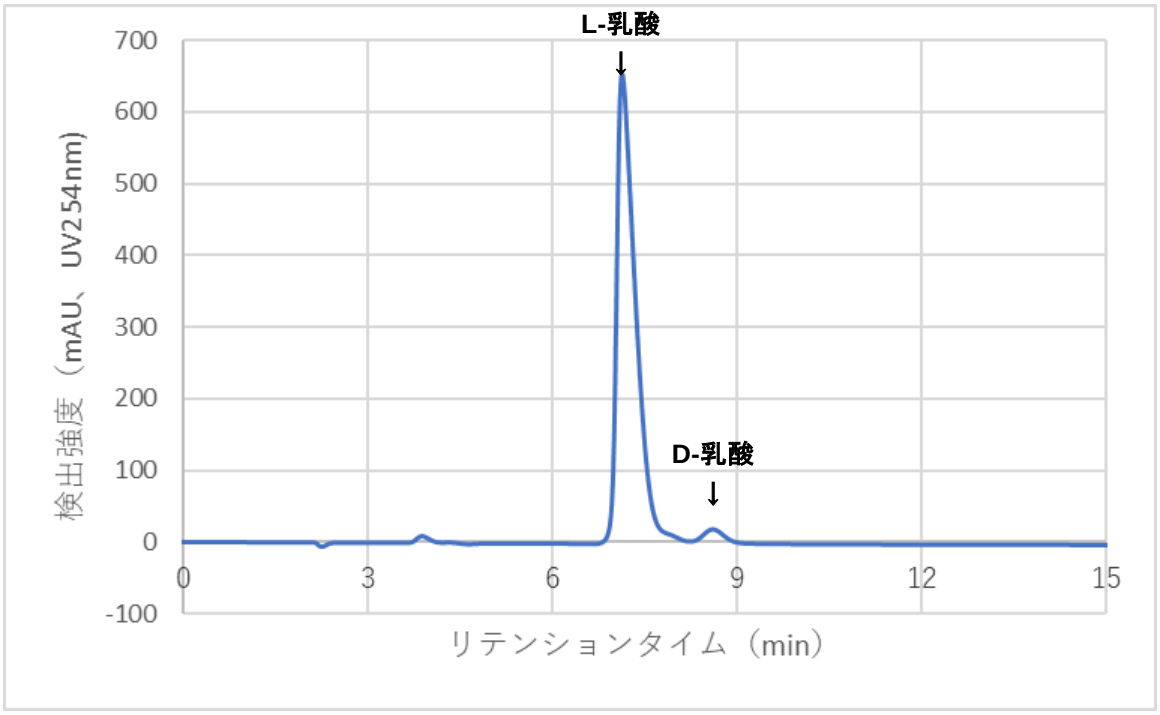


図２－２－２－７ａ－４　精製乳酸キラル HPLC チャート（Test-6）

２－２－３　ポリ乳酸合成検討

前章までに乳酸精製条件を検討することで、ポリ乳酸合成評価では得られたサンプルの収率、純度、融点は改善し、分子量のばらつきも改善された。更に高分子のサンプルを合成するために合成条件の検討を行い、大量サンプルを作成するためにスケールアップの検討を実施した。

２－２－３－１　ポリ乳酸合成条件検討

前章（２－２－２－３）で得られたポリ乳酸サンプルでは分子量が低く（Mw92,500）、マーケティング調査から広く使用されていることが判明した市販品（Mw100,000 以上）と同等の品質が得られていないことから、分子量が改善するような合成条件の検討を実施した。

２－２－３－１ａ　実施内容及び成果

（方法）

前章（２－２－２－２）の条件をベースにポリ乳酸合成条件の検討を実施した。得られたサンプルの純度、分子量を確認するため DSC（融点、ガラス転移点）、GPC（分子量）分析を行った。

（結果）

乳酸サンプルのポリ乳酸合成評価結果を表２－２－３－１ａ－１に示す。様々なポリ乳酸合成条件を検討したところ、特にポリ乳酸重合条件を変更（温度および時間）することで、分子量が向上することを確認した。

表２－２－３－１ａ－１　ポリ乳酸合成評価結果

項目	Test-4（参考）	Test-4-1
分子量（Mw）	92,500	184,000
（Mn）	55,700	102,000
分散度（PDI）	1.66	1.81
融点（℃）	180.2	178.0
L 純度（%）	99.8	99.8
収率（%）	32.1	34.5

２－２－３－２　ポリ乳酸大量サンプル合成検討

前章（２－２－２－７）で調製した精製乳酸サンプルからポリ乳酸の大量サンプル合成を検討した。

２－２－３－２ａ　実施内容及び成果

（方法）

前章（２－２－３－１）の条件にてポリ乳酸大量サンプル合成を実施した。合成は写真２－２－３－２ａ－１に示すような装置を用い、得られたサンプルの分子量を確認するため、GPC（分子量）分析を行った。

写真２－２－３－２ａ－１　大量サンプル合成装置

（結果）

乳酸サンプルのポリ乳酸合成評価結果を表２－３－２ａ－２に示す。スケールアップにより収率が減少し、Test6-2、Test6-3 では分子量の低下も観察されたが、写真２－２－３－２ａ－３に示すようなポリ乳酸サンプルを取得した。

表２－２－３－２ａ－２　ポリ乳酸合成評価結果

項目	Test-4-1 (参考)	Test-6-1	Test-6-2	Test-6-3	Test-6-4	Test-6-5
分子量（Mw）	184,000	134,000	72,800	75,900	162,000	108,000
（Mn）	102,000	73,900	41,600	47,400	79,300	59,800
分散度（PDI）	1.81	1.81	1.75	1.60	2.05	1.80
収率（%）	34.5	22.1	9.1	13.6	22.2	22.0

写真２－２－３－２ａ－３　取得したポリ乳酸サンプル

２－２－３－３　ポリ乳酸大量サンプル品質評価

前章（２－２－３－２）で調製したポリ乳酸サンプルについて品質評価をおこなった。サンプルは大量サンプル合成で分子量が 10 万以上であった Test6-1，6-4，6-5 を混合した高分子品サンプルと、6-2，6-3 を混合した低分子品サンプルについて分析を行った。

２－２－３－３ａ　実施内容及び成果

（方法）

ポリ乳酸サンプルの融点、ガラス転移温度、MFR を測定するため、DSC、メルトインデクサーによる分析を実施した。

融点・ガラス転移温度分析条件

測定装置：DSC（日本ハイテクサイエンス　DSC600）

温度：10℃（10℃/min）→200℃（1min 保持）→10℃（10℃/min）→200℃（1min 保持）

MFR 分析条件（JIS K7210-1 A 法準拠）

測定装置：メルトインデクサー（日本ダイニスコ　D4003）

温度：190℃

荷重：2.16kg

測定時間：10min

（結果）

今回調製したポリ乳酸サンプル（高分子品、低分子品）と、市販のポリ乳酸 3 種について融点・ガラス転移温度、MFR を測定した結果を表２－２－３－３ａ－１に示す。今回調製したサンプルは高い融点を示し、高融点として販売されている市販品１と MFR も含め、同等の品質を示した。低分子品は高い融点を示したが、低分子量の影響で高い MFR を示したと考えられた。

表２－２－３－３ａ－１　ポリ乳酸品質分析結果

	高分子品	低分子品	市販品１	市販品２	市販品３
ガラス転移温度 (℃)	58.4	56.7	58.2	57.2	57.3
融点 (℃)	173.8	173.0	174.1	152.4	149.7
MFR (g/10min)	13.6	93.7	13.2	4.7	3.2
分子量 (Mw)	142,000	84,800	133,000	197,000	240,000
分子量 (Mn)	70,000	51,400	74,100	97,000	122,000
分散度 (PDI)	2.02	1.65	1.80	2.03	2.00

今回調製したポリ乳酸サンプル（高分子品、低分子品）と、市販のポリ乳酸３種の DSC チャートを図２－２－３－３ａ－２～６に示す。今回調製したサンプルは高分子品、低分子品の両方で明確なガラス転移点、融点が観察され、高分子品については 103.8℃付近において結晶化も観察された。

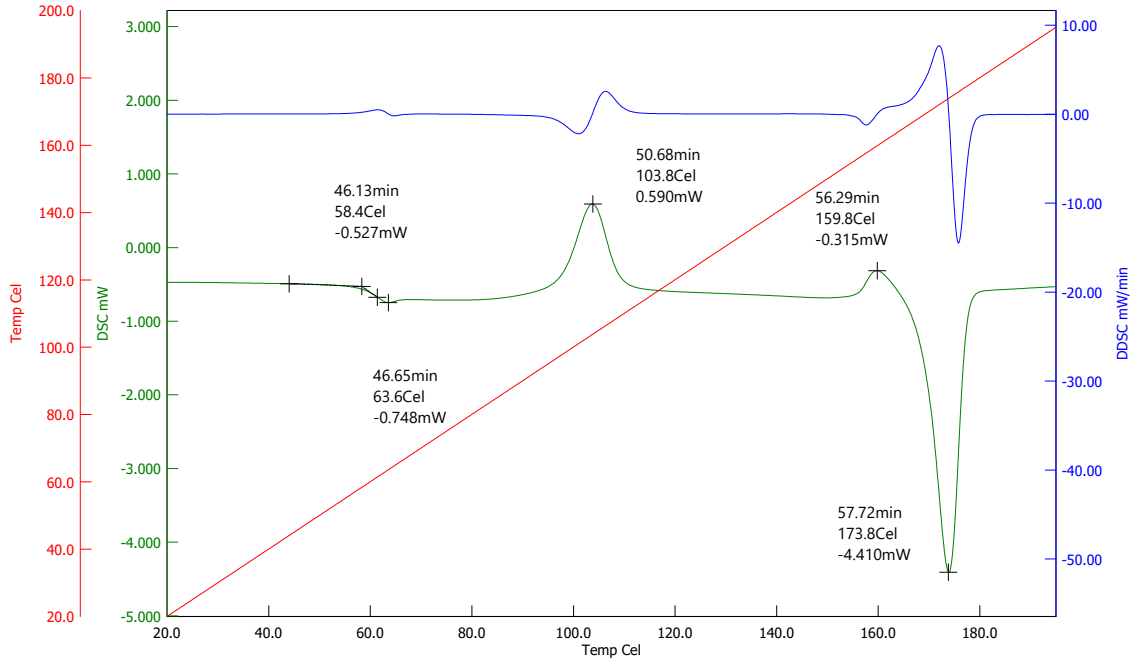


図２－２－３－３ａ－２　高分子品 DSC チャート

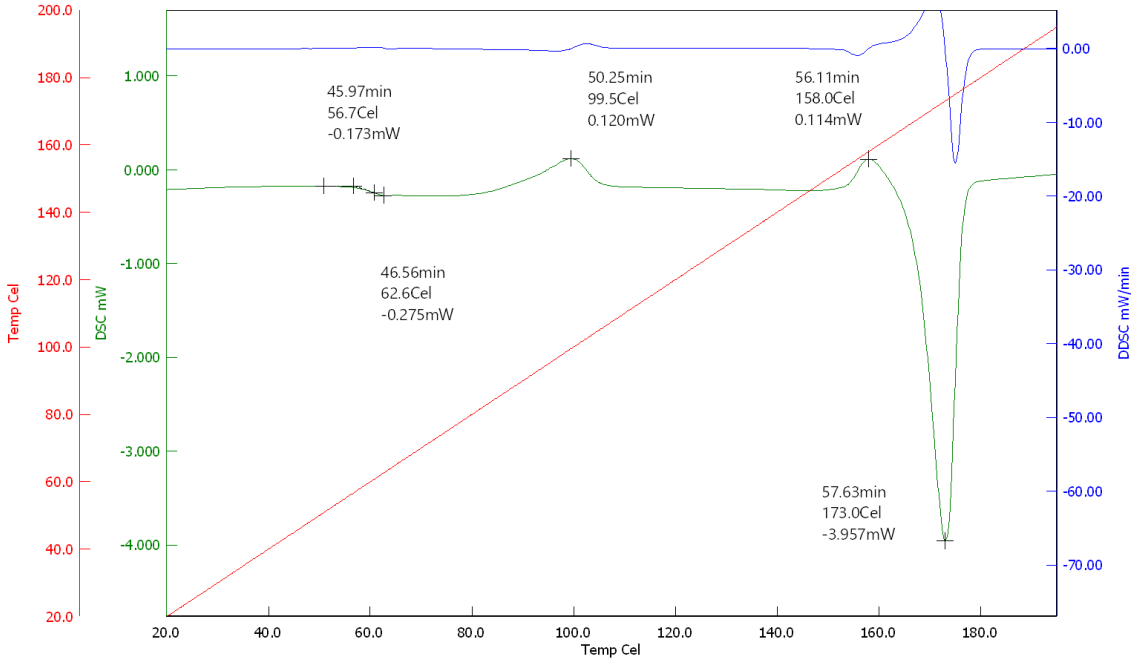


図２－２－３－３ａ－３　低分子品 DSC チャート

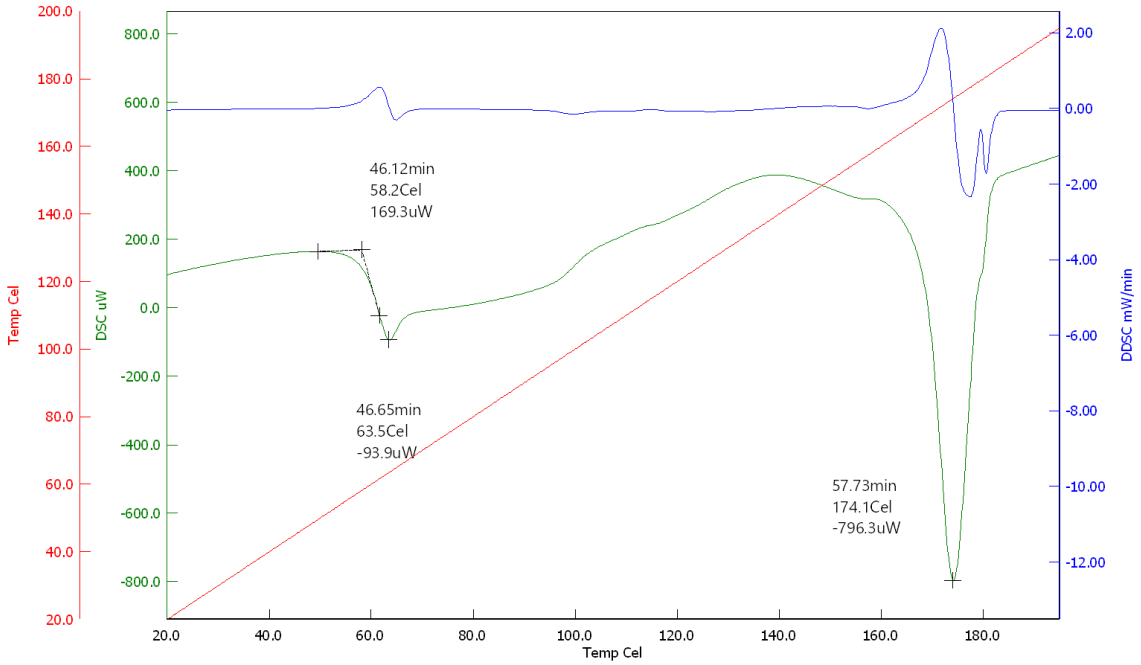


図２－２－３－３ａ－４　市販品１DSC チャート

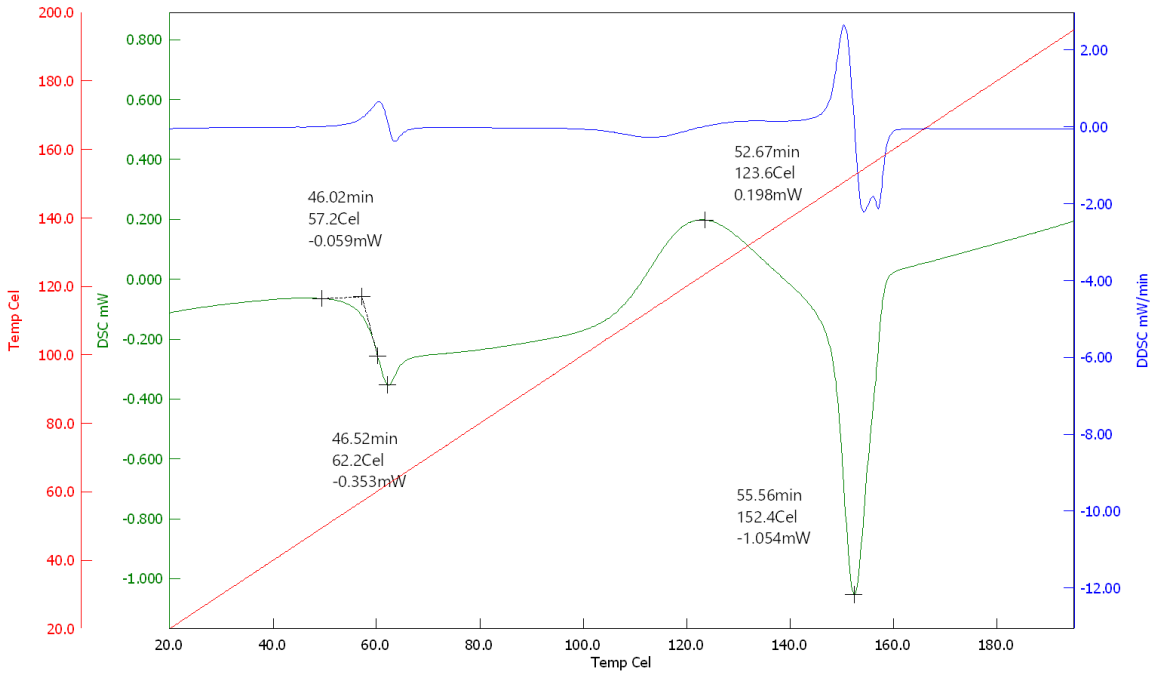


図２－２－３－３ａ－５　市販品２DSC チャート

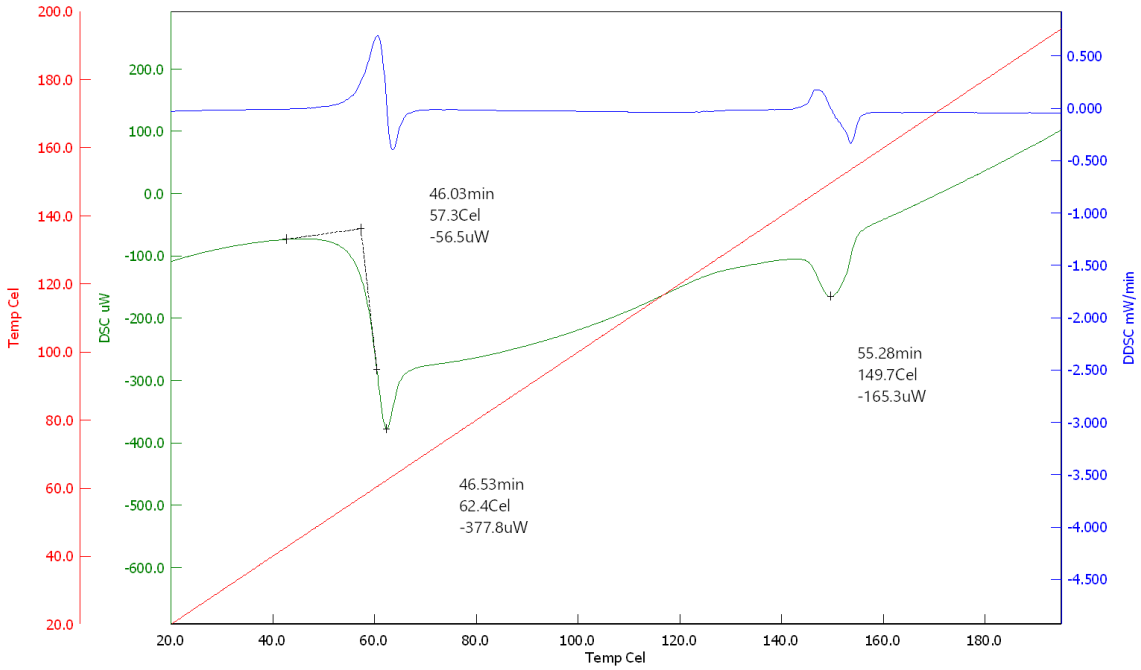


図２－２－３－３ａ－６　市販品３DSC チャート

２－２－３－４　ポリ乳酸大量サンプル純度分析

前章（２－２－３－３）で評価したポリ乳酸サンプル（高分子品、低分子品）について純度分析を行った。

２－２－３－４ａ　実施内容及び成果

（方法）

ポリ乳酸サンプルの純度を分析するためNMR測定を実施した。

純度分析条件

装置　　：NMR(JEOL JNM-ECZ600R)
観測核：1H
溶媒　　：重クロロホルム
温度　　：室温
積算回数：16回
緩和時間：60秒

（結果）

今回調製したポリ乳酸サンプル（高分子品、低分子品）についてNMRにて純度を測定した結果を表２－３－３－４ａ－１に、NMRチャートを図２－３－３－４ａ－２～７に示す。いずれのサンプルにおいても乳酸オリゴマーがわずかではあるが残存していた。さらに低分子品ではラクチドがごくわずかであるが含まれていた。

表２－３－３－３ａ－１　ポリ乳酸純度分析結果

	高分子品	低分子品
ポリ乳酸（%）	99.5	99.2
ラクチド（%）	-	0.04
乳酸オリゴマー（%）	0.5	0.8
乳酸モノマー（%）	-	-

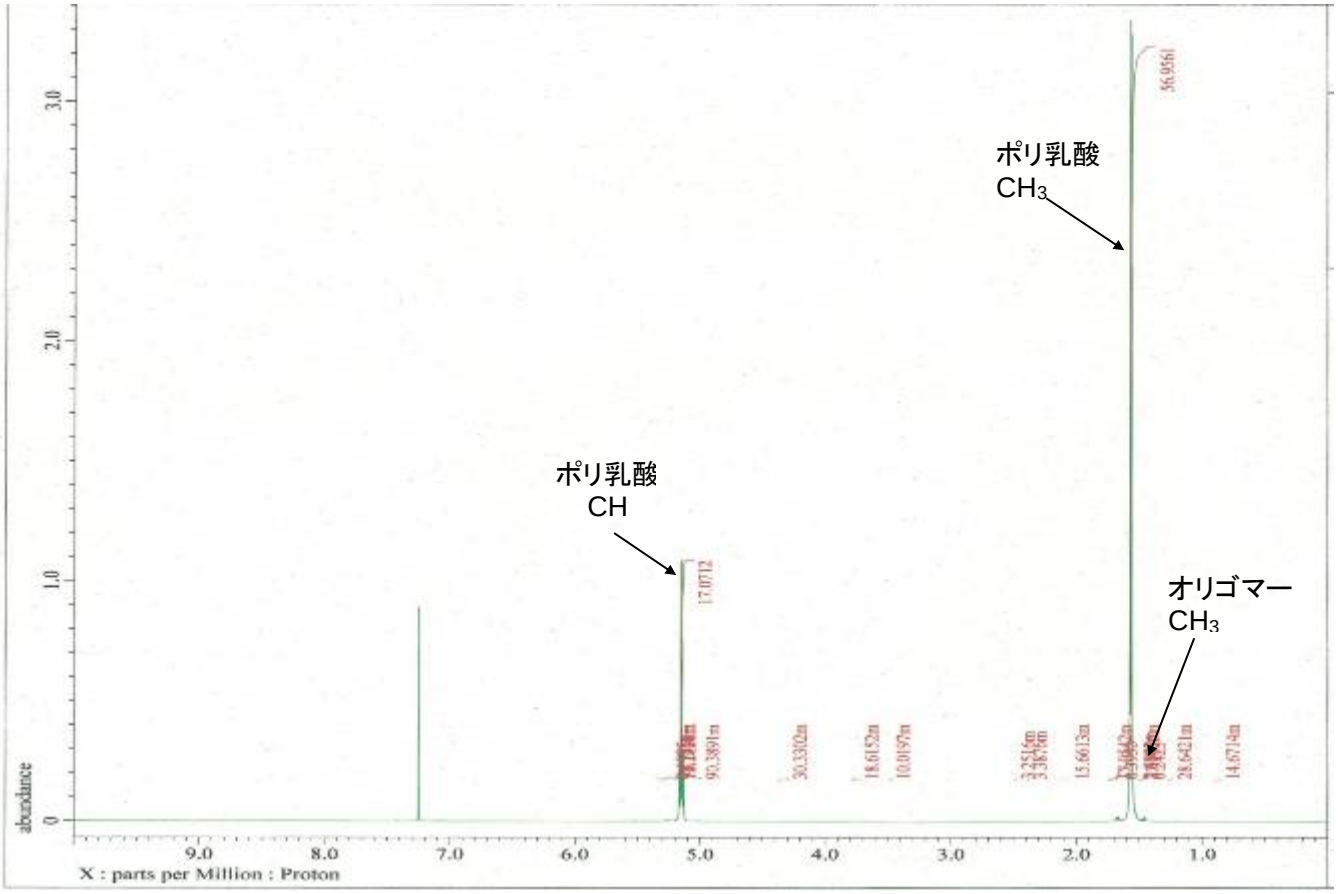


図２－３－３－４ａ－２　高分子品 NMR スペクトル（全体）

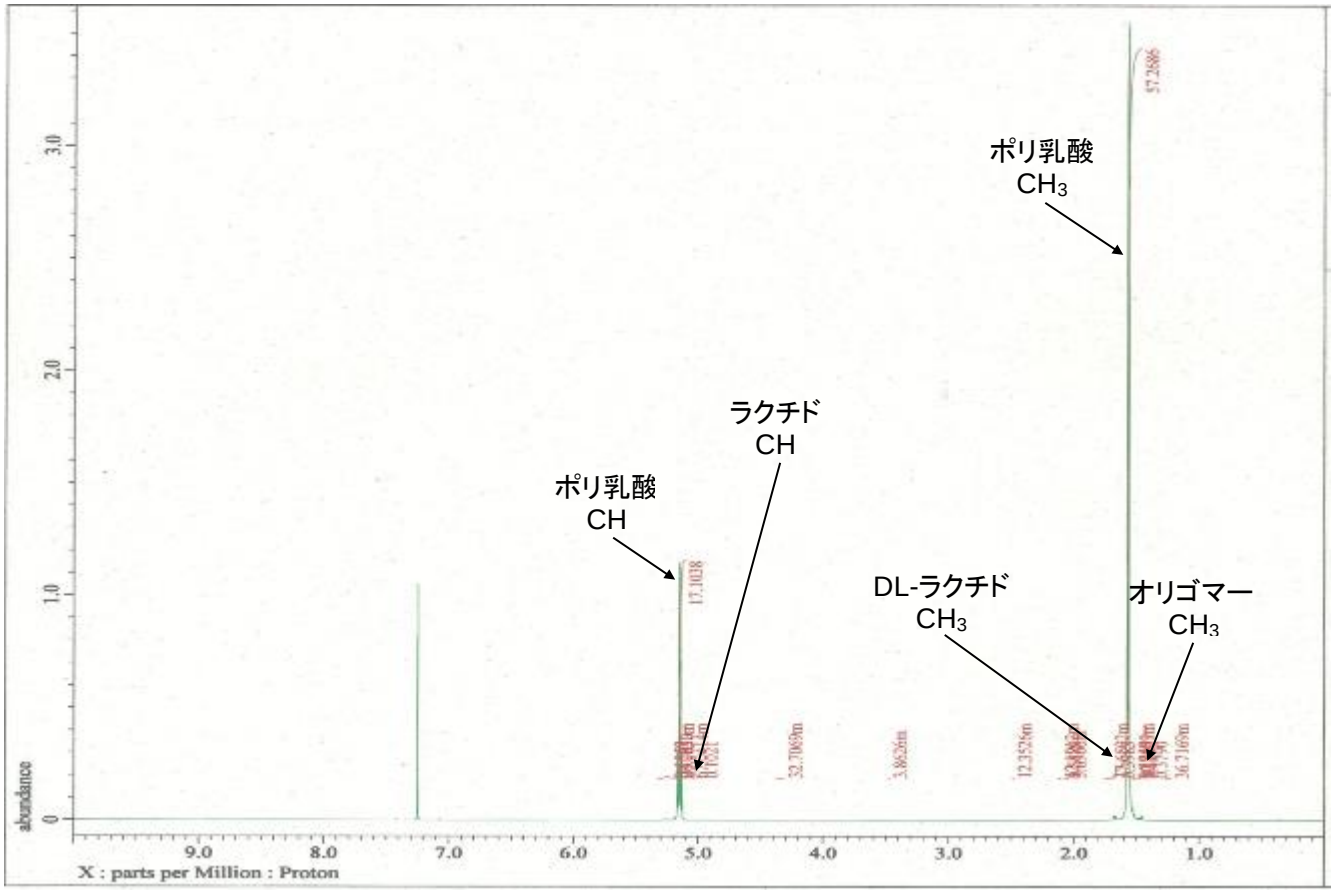


図２－３－３－４ａ－３　低分子品 NMR スペクトル（全体）

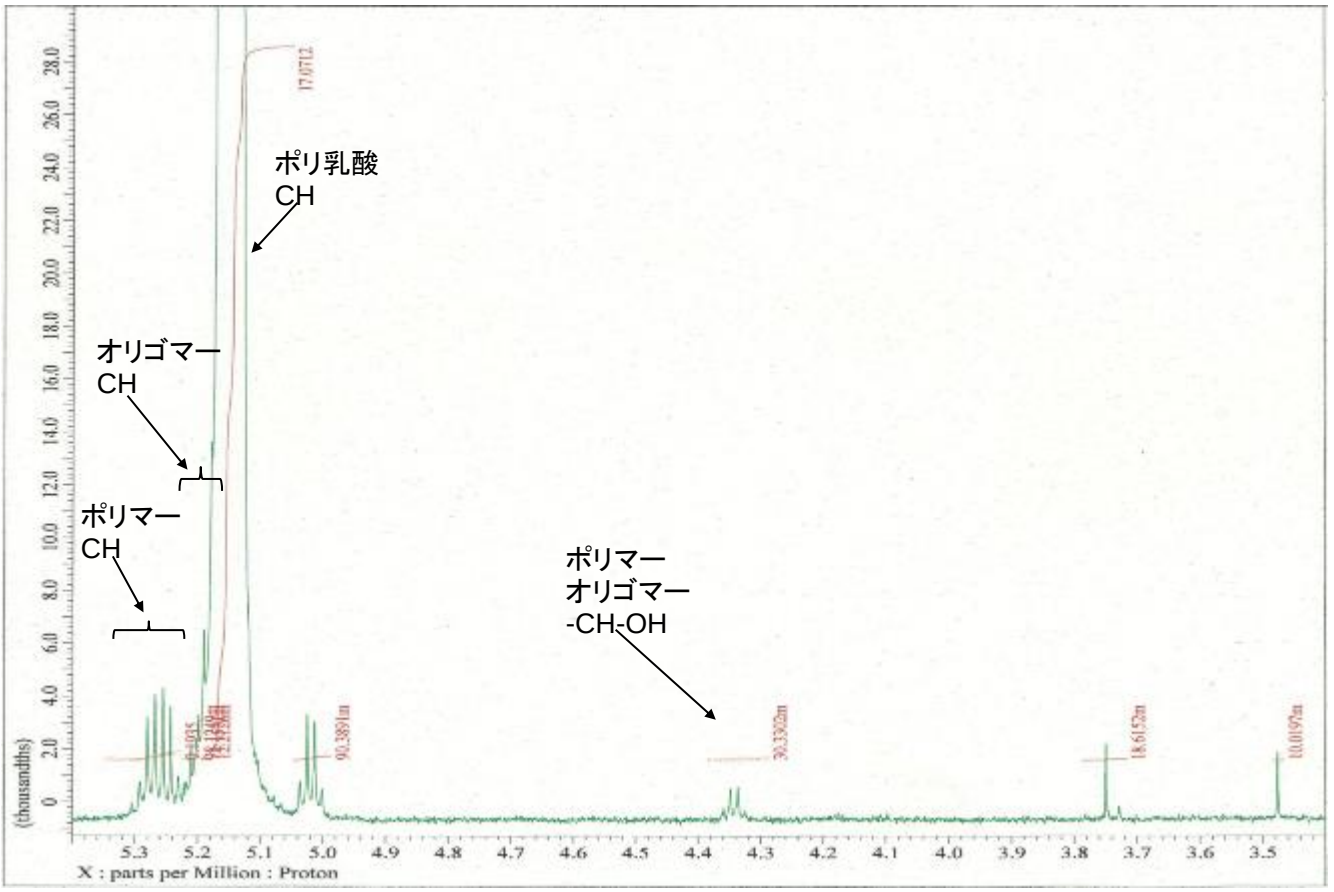


図２－３－３－４ａ－４　高分子品 NMR スペクトル（5.4～3.4ppm 拡大）

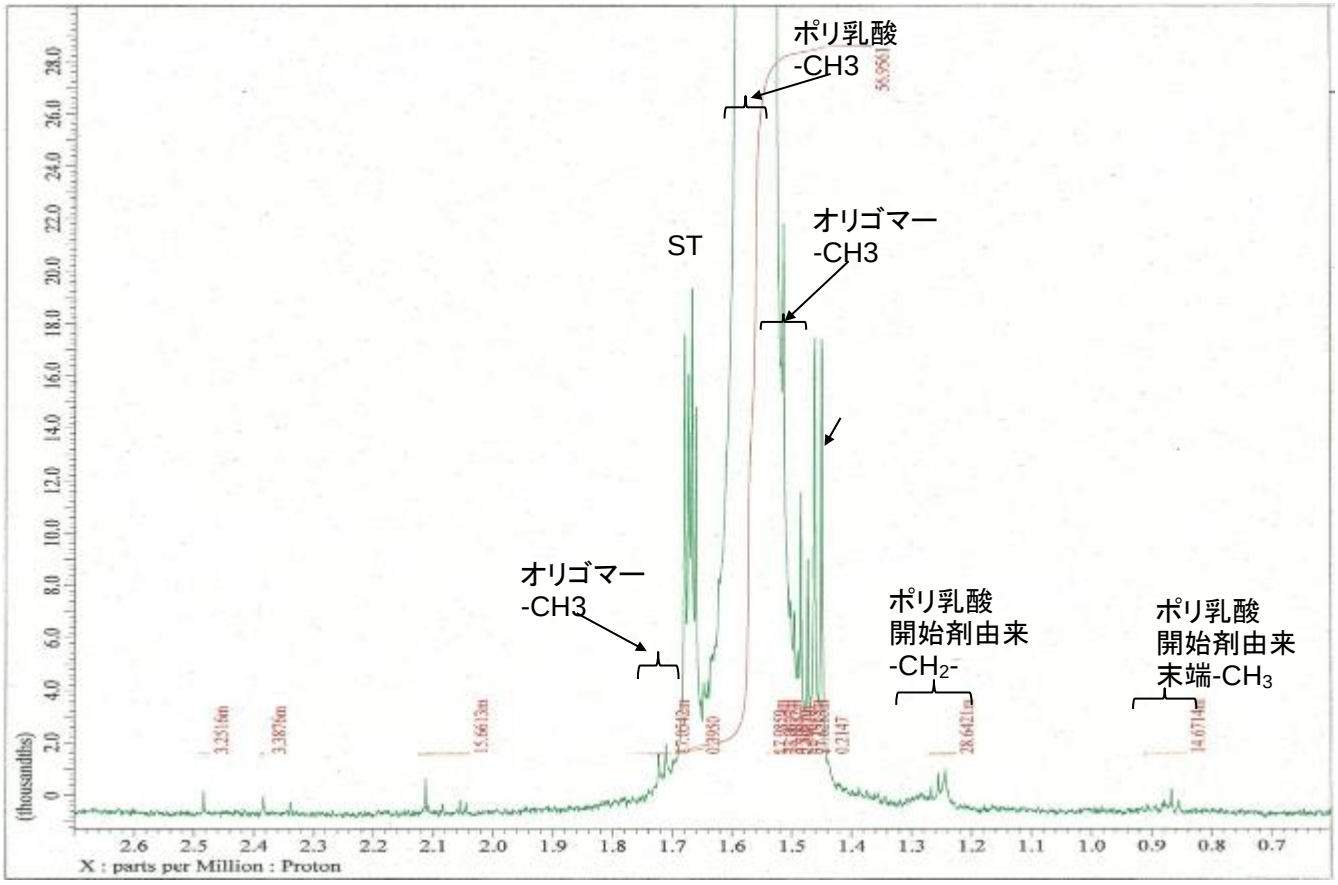


図２－３－３－４ａ－５　高分子品 NMR スペクトル（2.7～0.6ppm 拡大）

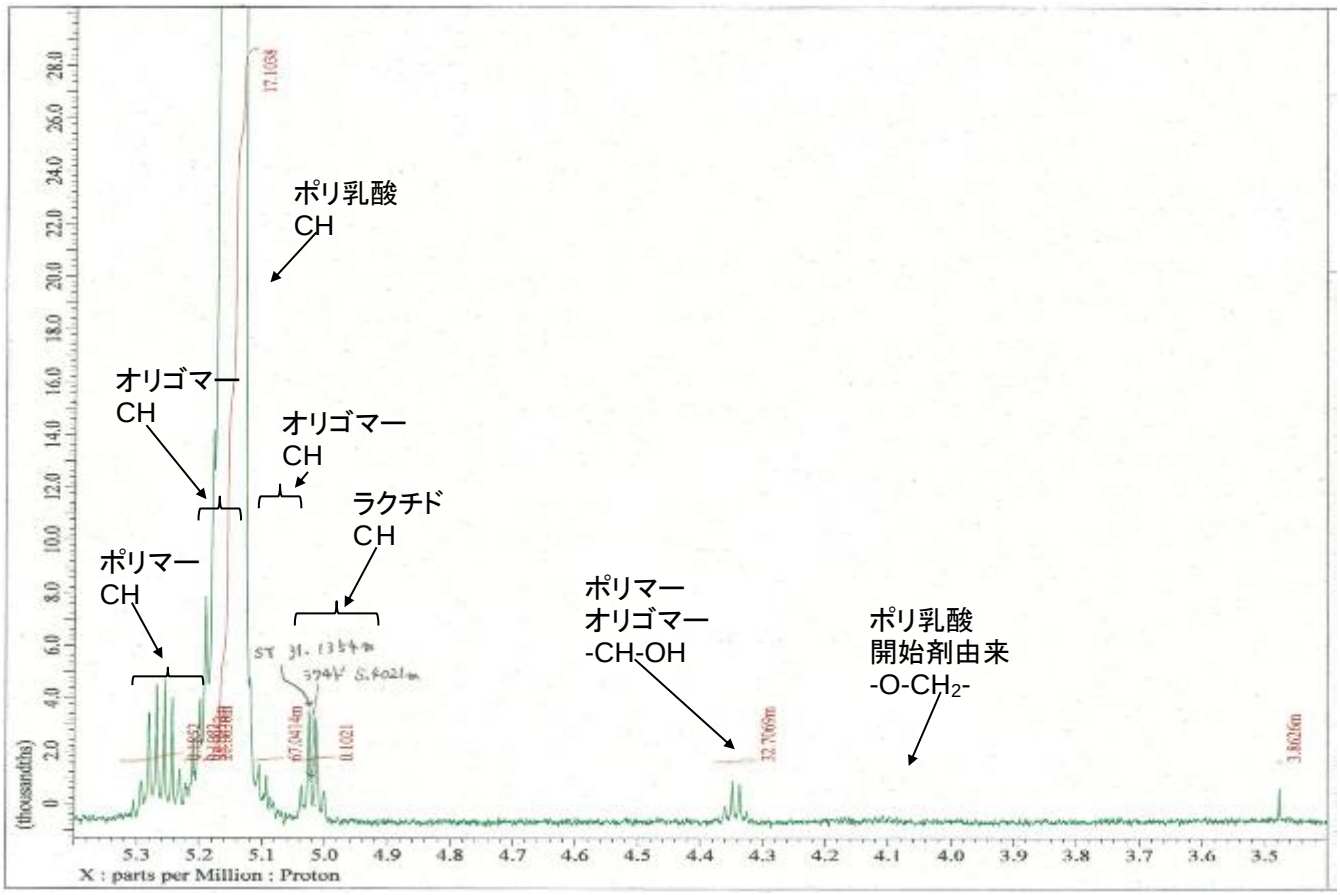


図２－３－３－４ａ－６　低分子品 NMR スペクトル（5.4～3.4ppm 拡大）

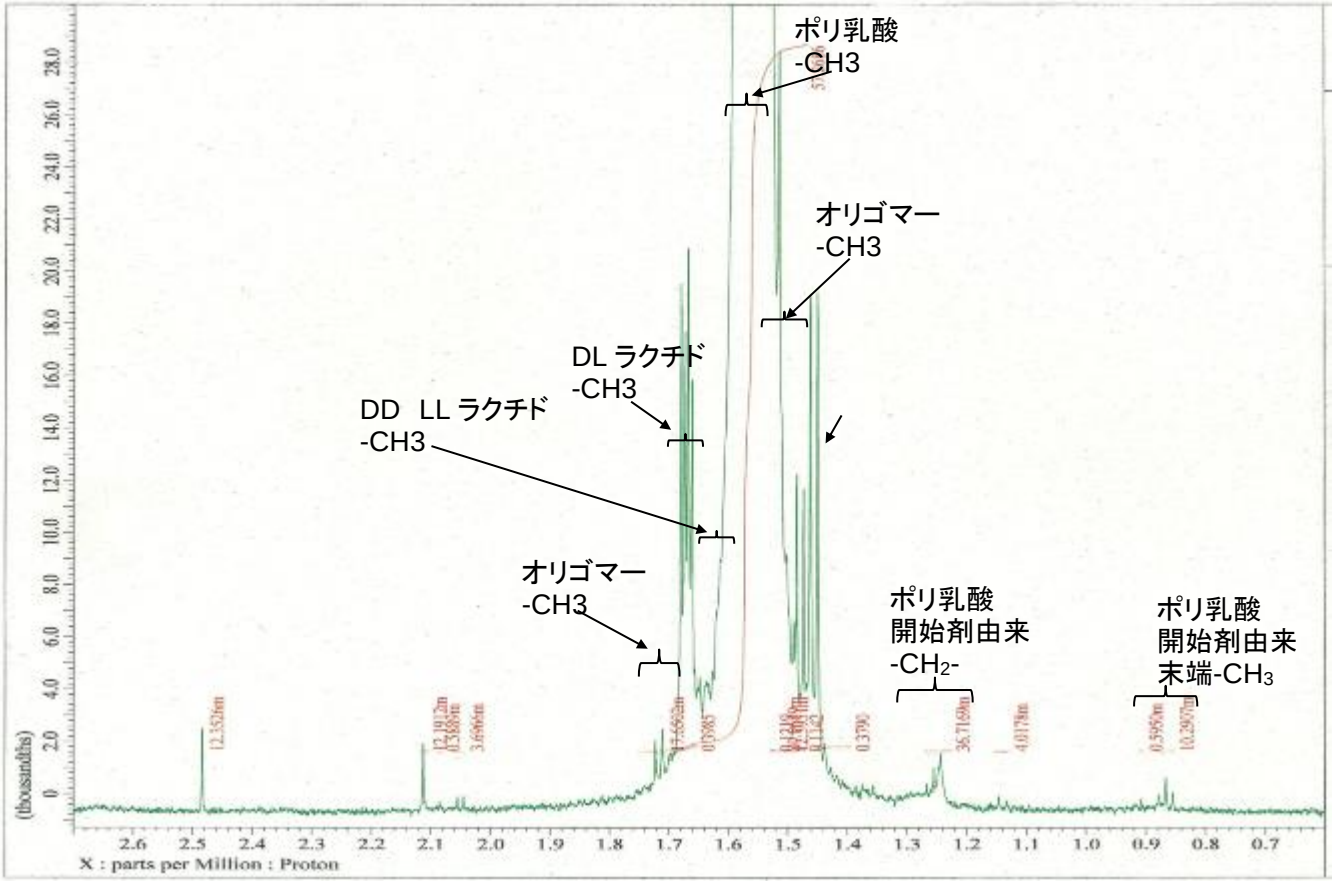


図２－３－３－４ａ－７　低分子品 NMR スペクトル（2.7～0.6ppm 拡大）

２－３　ＬＣＡ評価

２－３－１　CO2 削減効果推計に関する評価条件・評価範囲の設定

２－３－１－１　評価単位の設定

２－３－１－１－１　評価対象製品

昨年度は表２－３－１－１－１－１に示すような非可食セルロース由来のバイオエタノール製造技術を用いたポリエチレン、そして同じく非可食セルロース由来のポリ乳酸の２種類の樹脂を対象として、それぞれの樹脂について、そのライフサイクルまで含めた CO2 削減効果の推計を実施した。本年度は、技術開発対象となるエタノール→エチレンの製造プロセスについてベンチ試験機および商業機を想定したプラント設計から得られたデータについてもデータを反映することとした。

評価対象とした製品は、現在、流通しているポリエチレン、ポリ乳酸を代替することが期待される。現在、市場で使用されているポリエチレン、ポリ乳酸はポリエチレンが石油原料由来、ポリ乳酸はいくつかのバイオ原料のうちトウモロコシを原料とするものが主流であることから、CO2 削減効果を推計する際の比較の対象としては、石油原料由来のポリエチレンとトウモロコシ原料由来のポリ乳酸を選定した。

表２－３－１－１－１－１　本調査における評価対象製品・比較対象製品

樹脂種類	ポリエチレン	ポリ乳酸
評価対象製品	非可食セルロース由来のバイオエタノール製造技術を用いたポリエチレン	非可食セルロース由来のポリ乳酸
比較対象製品	石油原料由来のポリエチレン	トウモロコシ原料由来のポリ乳酸

２－３－１－１－１ａ　ポリエチレン

現在、市場に流通しているポリエチレンは、石油化学コンビナートにおいて、主には原油から精製するナフサを原料として、ナフサクラッキングからエチレン（C2H4）を製造し、このエチレンを重合することで製造される。これに対して本事業の検討では、製紙業で汎用的に用いられているクラフトパルプを原料として発酵によりエタノールを製造し、脱水によりエチレン、重合によりポリエチレンを製造することとした。この工程では製紙産業に使用されるパルプを原料とすることから、一般的にバイオ系の材料で課題となる食糧競合に関する問題は発生しないこと、パルプ製造時までは既存の製紙業における既存設備や成熟した技術を用いることが可能であるという利点がある。

従来、ポリエチレンの原料は、ほぼ原油となっており、原料として多くの化石資源が消費されている。また、ポリエチレンは、使用済みとなった後、産業廃棄物、一般廃棄物として市場より回収され、一部は焼却されるが、リサイクルされることが多い。リサイクルされている樹脂については、RPF ボイラーなどによるエネルギー回収の割合が多いことから、燃焼により化石資源由来の炭素が大気中に排出されることになる。

本事業で検討した技術は、エチレンをバイオエタノールより製造するため、製造されるポリエチレン中に含まれる炭素は、原料を育成する過程（植林）において大気中より吸収したも

のと考えることができる。ポリエチレンとなった後は、現在流通しているポリエチレンと同品質・性状であると想定されるため、使用段階や使用済み以降の段階は全く同じプロセスとなる。従って、使用済みのポリエチレンが焼却された場合、原料育成時に大気中から吸収した炭素が排出されるのみであり、地球の炭素循環の上ではカーボンニュートラルと考えることができ、図２－３－１－１－１ａ－１に示すように化石資源を用いた従来のポリエチレンに比べて、焼却時に温室効果ガス排出・吸収量で大きな差が生じると考えられ、エチレンの化学式（C_2H_4）から計算すると 1kg のエチレンに対して 3.14kg の CO_2 の量となる。

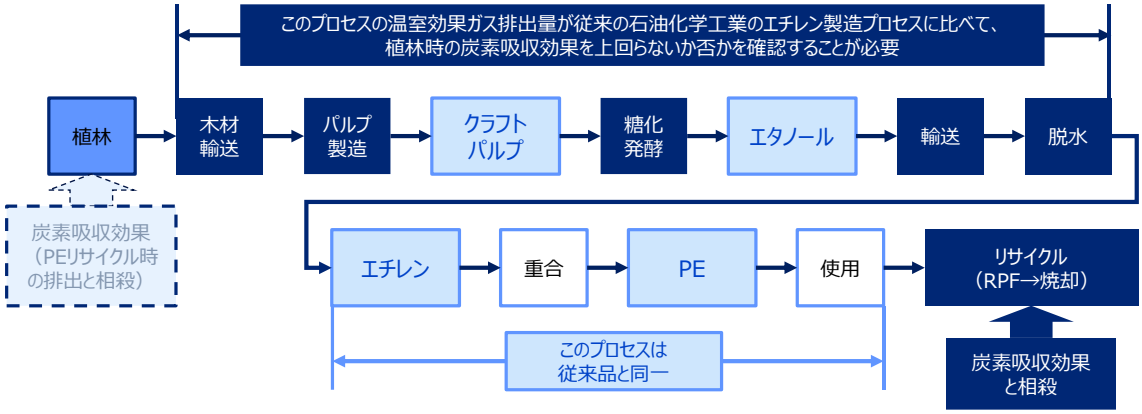


図２－３－１－１－１ａ－１　非可食由来 PE 樹脂生産スキーム

我が国の 2020 年の年間エチレン生産量は約 700 万トン（石油化学協会統計資料より）であるから、これを全て置き換えることができた場合は、年間 2,000 万トン程度の CO2 排出量削減に寄与することになる。

ただし、本技術で製造されるポリエチレンはエチレンの製造までのプロセスが従来の石油化学原料を用いたエチレン製造プロセスとは大きく異なる。そのため、この過程において、従来のエチレン製造プロセスに対して、先の植林による炭素吸収効果（3.14kg-CO2）を上回る CO2 排出ではないことを確認することが必要であり、本検討ではこの点について確認を行うことを目的とした。

２－３－１－１－１ｂ　ポリ乳酸

ポリ乳酸は、乳酸（$C_3H_6O_3$）を重合して製造する樹脂であり、トウモロコシなどのでんぷんを発酵させて製造するため、他の樹脂に比べて化石原料を使用しないという利点を有している。また、分解された後の乳酸は、人体にとって安全性が高いというメリットも持っている。従来、乳酸の原料となる糖質は、トウモロコシ、サトウキビなどが用いられており、特にトウモロコシは米国で大きな収穫量があり、食糧競合の課題はあるが、安定した原料である。このトウモロコシから得られるグルコースをもとに、発酵処理した乳酸を用いたポリ乳酸はすでに市場化されている。

本事業で検討した技術は、トウモロコシなどの食糧競合する原料ではなく、ポリエチレンと同様に、製紙原料であるクラフトパルプを出発原料としており、パルプから乳酸を製造することにより、食糧競合の課題の無いポリ乳酸の製造が可能となる。本事業では、従来のトウモロコシ由来のポリ乳酸を参照としつつ、今回の技術で得られるポリ乳酸の CO_2 排出量を確認し、さらなる削減が可能かどうかを検討することを目的とした。

２－３－１－１－２　機能と機能単位

今回の開発技術におけるポリエチレン、ポリ乳酸は、ともに既存のポリエチレン、ポリ乳酸と同等の利用方法が期待されていることから、用途による差異は無いものとして、LCA の評価における機能は既存樹脂が持つ機能そのもの、機能単位は石油原料由来のポリエチレンとトウモロコシ原料由来のポリ乳酸のそれぞれの重量 1kg あたりとした。

【機能】
・従来の各樹脂が持つ各種機能・耐久性など

【機能単位】
・従来の各樹脂 1kg が果たす機能

２－３－１－１－３　評価単位

表２－３－１－１－３－１に評価単位を示す。本技術開発で製造されるポリエチレン、ポリ乳酸の性質、性状は、既存の原料と全く同じであると想定し、評価単位は評価対象製品、比較対象製品共に重量 1kg とした。

表２－３－１－１－３－１　評価単位

	基準フロー	
	評価対象製品	比較製品
ポリエチレン（PE）	非可食セルロース由来 PE 重量 1kg	石油原料由来 PE 重量 1kg
ポリ乳酸（PLA）	非可食セルロース由来 PLA 重量 1kg	トウモロコシ由来 PLA 重量 1kg

２－３－１－２　評価範囲の設定

２－３－１－２－１　評価範囲の考え方

図２－１－１－２－１－１、図２－３－１－２－１－２に評価対象製品と比較製品それぞれの評価範囲を示す。本評価の対象製品は、樹脂材料であり、評価範囲に関しては、原材料の調達、原材料から樹脂材料（製品）の生産、生産された材料の輸送、材料から製品の製造、製品の流通、使用、製品の回収・廃棄となる。なお、生産された材料の重量、性質は同一と想定していることから、材料から製品の製造、製品の輸送、使用については評価対象製品と比較製品の間で差が生じないため、これらのプロセスは本評価の対象外とした。

ただし、比較製品が化石資源由来であるのに対して、評価対象製品では、原料を育成する過程（植林）において大気中より吸収した炭素であり、排出量を相殺する（ゼロとして扱う）ことから、製品のリサイクル時（RPF として焼却される）における排出（PE に含まれる炭素が CO2 として排出される）については対象範囲に含めることとした。なお、本評価では、廃棄・リサイクルに関しては RPF 焼却を考慮した。

なお、図２－１－１－２－１－１、図２－３－１－２－１－２において白抜き文字で表したプロセスは、今回の技術開発におけるデータ（フォアグラウンドデータ）の取得を行う箇所、そのほかは、データベース・文献等の数値（バックグラウンドデータ）をもとに算定を行う箇所として示した。

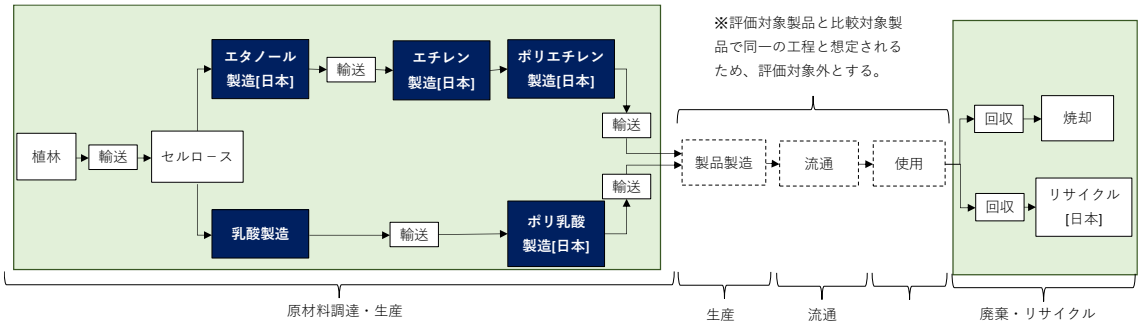


図２－１－１－２－１－１　評価対象製品の評価範囲

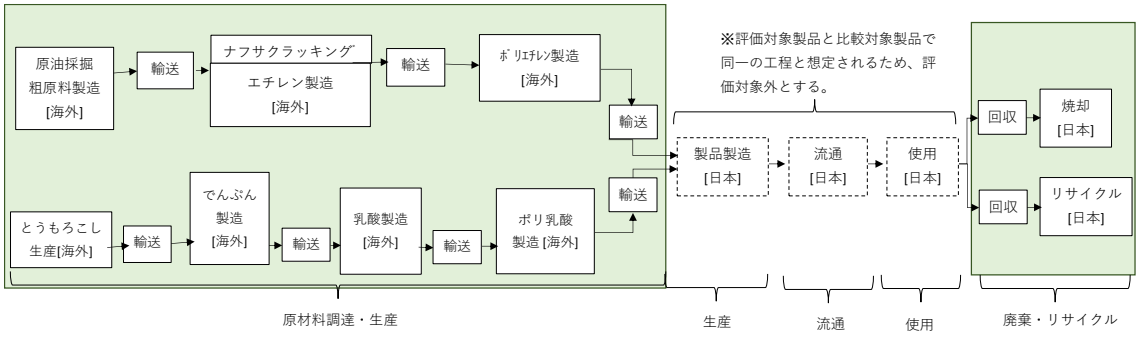


図２－１－１－２－１－２　比較製品の評価範囲

２－３－１－２－２　評価の対象外としたプロセス

本評価では、樹脂製品の製造から出荷までの評価を実施しており、製品のリサイクル処理場への輸送までは評価の対象外とした。また、本技術で必要となる設備（パルプ製造・エタノール製造・エチレン製造・ポリエチレン製造・乳酸製造・ポリ乳酸製造及び輸送）についても、量産過程に入ることで、設備生産能力の増大が図れ、その影響は限りなく小さくなるものと考えることから対象外とした。

【対象外としたプロセス】
- 製品製造以降のプロセス（製品製造・輸送、製品使用、製品廃棄・リサイクル）
- 製造・輸送等に関する設備・機器の製造・廃棄・リサイクル

２－３－１－２－３　炭素吸収効果の考え方

本研究開発で用いられるパルプの原料は、木材であることから、その製造時に炭素の吸収が生じる。ここでは、最終的にポリエチレンに含まれる炭素分が吸収される。前記の通り、炭素吸収分はリサイクル（RPF 焼却）時の排出と相殺されることから、リサイクル時の排出量をゼロとして評価した。

２－３－１－３　評価対象とした環境影響範囲

本事業の目的は、エネルギー起源の CO2 排出量の削減に資する材料の開発にある。従って、評価の対象とした環境影響領域は、気候変動とし、対象とした環境負荷項目は、温室効果ガス全般、特にエネルギー起源の排出量を特定することとした。

２－３－１－４　評価に用いたデータベース

本事業では、技術開発から得られたデータのほか、公開文献からの引用データと有料のデータベースを用いた評価を実施した。有料のデータベースについては、国立研究開発法人産業技術総合研究所が開発した IDEA v2 を用いて評価を行った。

２－３－２　ポリエチレンに関する CO2 削減効果の推計

植林やパルプ製造など予測値としてフォアグラウンドデータを収集し、ポリエチレンの CO2 削減効果の推計を行った。なお、比較製品については、既存の文献値を整理して数値を引用した。

２－３－２－１　評価条件（評価対象製品）

２－３－２－１ｂ　パルプ製造時の CO2 排出量の算定

クラフトパルプ製造に伴う CO2 排出量については IDEA　v2 の数値をベースとして評価を実施した。ただし、一般的なパルプ製造工程における算出とは異なり、本検討においては図２－３－２－１ｂ－１に示すように、漂白プロセスを排除し、パルプ製造時に産生される黒液を燃焼したエネルギーを活用することとして評価を実施した。

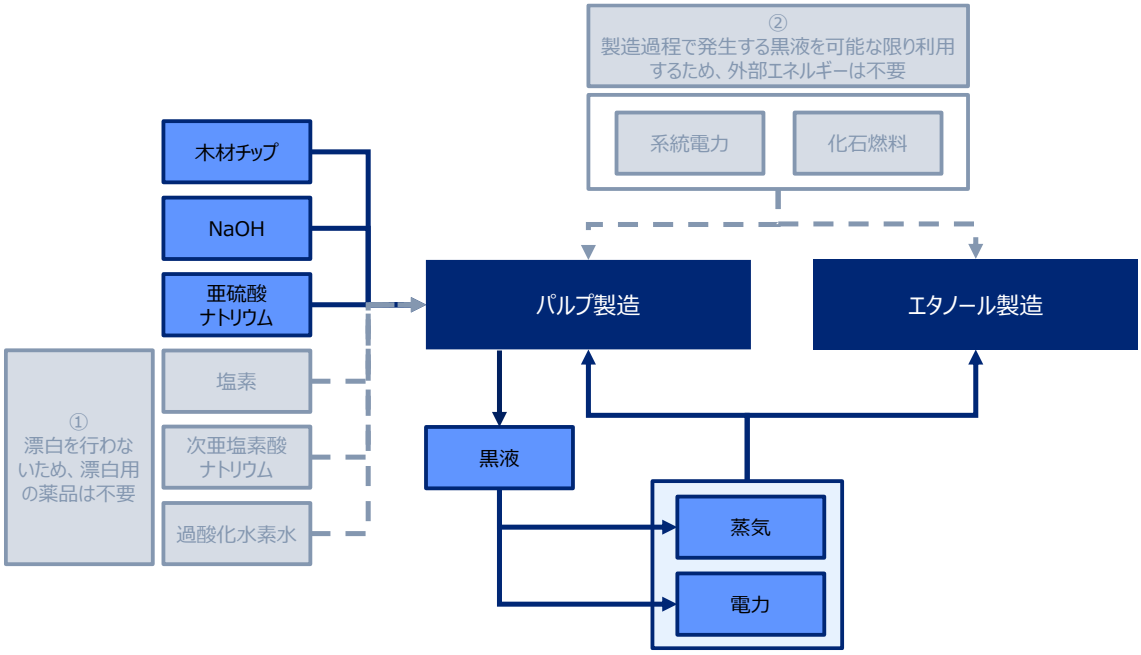


図２－３－２－１ｂ－１　パルプ製造時の CO2 排出量算定範囲

２－３－２－１ｃ　パルプ輸送

本研究開発では、製紙工場内で製造されたパルプを用い、同一の製紙工場内でエタノールを製造することとしているため、パルプ輸送は発生しないこととした。

２－３－２－１ｄ　エタノール製造

パルプからエタノールを製造するプロセスは製紙工場内で行うため、パルプ製造時に得られる黒液をプロセスで投入される電力・蒸気に充てて製造するモデルとした。また、電力、蒸気以外に酵素、水が消費され、廃棄物として排出される排水についても考慮した。なお、エタノール発酵反応で放出される二酸化炭素についてはバイオ起源であるため、計上しないこととした。

２－３－２－１ｅ　エタノール輸送

表２－３－２－１ｅ－１にエタノールの輸送シナリオを示す。製紙工場で製造されたエタノールは、ポリエチレン製造を行う工場まで輸送され、ここでエチレンを経てポリエチレンとなる。エタノールの輸送経路としては、現時点では、本研究開発の実施者である王子製紙株式会社及び日本ポリエチレン株式会社の工場間の輸送（以下 24 ケース）を想定した。輸送経路の出発地は王子製紙もしくは王子マテリアの 6 製紙工場（米子工場、日南工場、春日井工場、苫小牧工場、富岡工場、王子マテリア呉工場)、到着地は日本ポリエチレン（鹿島工場、川崎工場、水島工場、大分工場）の 4 工場である。

これら 24 のルートの輸送距離は、Google Map をもとに自動車移動の距離を推測した。結果としては、最短の輸送距離は 142km（王子マテリア呉工場～日本ポリエチレン水島工場)、最長の輸送距離は 2,124km（王子製紙苫小牧工場～日本ポリエチレン大分工場）となり、単純平均では 779km であった。最短から最長では約 15 倍の差が生じている。算定では、この 24 ルートの単純平均値（779km）を採用した。

表２－３－２－１ｅ－１　エタノール輸送シナリオ

シナリオ項目	シナリオ	
輸送経路・距離	1. 米子→鹿島	843km
	2. 米子→川崎	729km
	3. 米子→水島	156km
	4. 米子→大分	448km
	5. 日南→鹿島	1,501km
	6. 日南→川崎	1,387km
	7. 日南→水島	519km
	8. 日南→大分	714km
	9. 春日井→鹿島	454km
	10. 春日井→川崎	340km
	11. 春日井→水島	367km
	12. 春日井→大分	828km
	13. 苫小牧→鹿島	1,070km
	14. 苫小牧→川崎	1,116km
	15. 苫小牧→水島	1,648km
	16. 苫小牧→大分	2,124km
	17. 富岡→鹿島	774km
	18. 富岡→川崎	660km
	19. 富岡→水島（最短）	151km
	20. 富岡→大分	641km
	21. 王子マテリア呉→鹿島	916km
	22. 王子マテリア呉→川崎	803km
	23. 王子マテリア呉→水島（最短）	142km
	24. 王子マテリア呉→大分	365km
平均距離（単純平均）		779km
使用する輸送手段		20t トラック
積載率		100%

２－３－２－１ｆ　エチレン製造

エタノール（C2H5OH）からエチレン（C2H4）の製造は、エタノールの加熱・脱水反応により、ジエチルエーテル（C2H5OC2H5）を経由してエチレンが生成される。エタノールの分子量は46.07、エチレンの分子量は28.05であり、化学反応上1molのエタノールからエチレン1molが生成される。このことから1kgのエチレンに対するエタノール投入量は1.64kgになる。これらの値と文献から得られるデータを元に算定した。

本年度は、エチレン製造について、ベンチ試験機での結果と前章（２－１－２－３）で検討した商業機ユーティリティー必要量の推定から再計算を実施した。エチレン収率は、昨年度まではモルベースで100%（重量で61.0%）の収率としてきたが、ベンチ試験機の実績と商業機設計の推定では同じエチレン 1kg を製造する際のエタノールの投入量は増加することから、ポリエチレン1kgに対するエタノール製造までのプロセスのCO2排出量もこの比率で修正した。

２－３－２－１ｇ　ポリエチレン製造

エチレンからポリエチレンを製造するプロセスについて、昨年度までは文献（EUROPEAN COMMISSION, “Reference Document on Best Available Techniques in the Production of Polymers”, 2007）よりエチレンからのポリエチレン製造プロセスのバックグラウンドデータを用いて算定を行ってきた。しかし、ポリエチレン製造プロセスのデータが比較対象と同等ではない可能性があったため、本年度は、エチレンの重合プロセスについて IDEA v2 のデータを用いて算定を行うこととした。

２－３－２－１ｈ　ポリエチレンの使用後処理

ポリエチレンの使用後処理は、単純焼却やマテリアルリサイクルなども含めて、いくつかのケースが考えられるが、ここではRPF化、RPF焼却のシナリオを想定した。評価対象製品の炭素分は、原料育成時に大気中より吸収した炭素であるため、RPF焼却時のCO_2排出はゼロと考え、比較対象製品については、PE の化学式（C_2H_4）より PE 中の炭素含有量を想定し、焼却時に3.14kgのCO_2が排出されるものとした。ただし、RPF化のプロセス、使用済みプラの輸送、RPFの輸送に係るCO_2排出量は評価対象製品と比較対象製品で同一のプロセスであることから、評価の対象外とした。

２－３－２－２　CO2 排出量削減効果

２－３－２－２－１　非可食セルロース由来ポリエチレン

２－３－２－２－１ａ　評価対象製品の CO2 排出量（文献値推計）

評価対象である非可食セルロース由来のポリエチレン 1kg あたりの CO2 排出量の文献値からの算定結果を表２－３－２－２－１ａ－１に示す。エタノールの輸送については、前章（シナリオの平均値（779km 輸送)、エチレン製造プロセスについては理論値ベースの数値、ポリエチレン製造時の CO2 排出量については IDEA データベース値を用いて算定を行った。結果として、エネルギー起源の CO2 排出量は 2.0kg-CO2e、非エネルギー起源まで含めた場合には、2.582 kg-CO2e 程度となった。

表２－３－２－２－１ａ－１　非可食セルロース由来ポリエチレン CO2 排出量(文献値推計)

プロセス名		CO_2 排出量[kg-CO_{2e}/kg-PE]		
		エネルギー起源	非エネルギー起源	合計
原材料調達	丸太製造	0.003		0.003
	木材チップ製造	0.284		0.284
	丸太・木材チップ輸送	0.190		0.190
	原材料調達計	**0.478**	**0.000**	**0.478**
生産	パルプ製造～エタノール製造	0.235	0.100	0.336
	エタノール輸送	1.292	0.476	1.768
	エチレン製造			
	ポリエチレン製造			
	生産計	**1.528**	**0.576**	**2.104**
使用後処理	RPF 焼却・熱利用	0.000		0.000
	使用後処理計	**0.000**		**0.000**
合計		**2.005**	**0.576**	**2.582**

２－３－２－２－１ｂ　評価対象製品の CO2 排出量（ベンチ試験機）

評価対象である非可食セルロース由来のポリエチレン 1kg あたりの CO2 排出量のベンチ試験機からの算定結果を表２－３－２－２－１ｂ－１に示す。

エチレン製造プロセスの電力消費量が大きいため、エネルギー起源の CO_2 排出量は結果として、37.2kg-CO_{2e}（うち 97%がエチレン製造時の CO_2 排出量）となり、非エネルギー起源まで含めた場合には、37.4 kg-CO_{2e} 程度となった。

表２－３－２－２－１ｂ－１　非可食セルロース由来ポリエチレン CO2 排出量
（ベンチ試験機）

プロセス名		CO_2 排出量[kg-CO_{2e}/kg-PE]		
		エネルギー起源	非エネルギー起源	合計
原材料調達	丸太製造	0.004		0.004
	木材チップ製造	0.320		0.320
	丸太・木材チップ輸送	0.214		0.214
	原材料調達計	**0.539**	**0.000**	**0.539**
生産	パルプ製造～エタノール製造	0.266	0.113	0.379
	エタノール輸送	36.403	0.078	36.481
	エチレン製造			
	ポリエチレン製造			
	生産計	**36.669**	**0.191**	**36.860**
使用後処理	RPF 焼却・熱利用	0.000		0.000
	使用後処理計	**0.000**		**0.000**
合計		37.208	0.191	37.399

２－３－２－２－１ｃ　評価対象製品の CO2 排出量（商業機）

評価対象である非可食セルロース由来のポリエチレン 1kg あたりの CO2 排出量の商業機条件による算定結果を表２－３－２－２－１ｃ－１に示す。

エネルギー起源の CO_2 排出量は結果として、2.8kg-CO_{2e}、非エネルギー起源まで含めた場合には、3.0 kg-CO_{2e} 程度となった。

表２－３－２－２－１ｃ－１　非可食セルロース由来ポリエチレン CO2 排出量（商業機）

プロセス名		CO_2 排出量[kg-CO_{2e}/kg-PE]		
		エネルギー起源	非エネルギー起源	合計
原材料調達	丸太製造	0.004		0.004
	木材チップ製造	0.310		0.310
	丸太・木材チップ輸送	0.208		0.208
	原材料調達計	**0.522**	**0.000**	**0.522**
生産	パルプ製造～エタノール製造	0.257	0.110	0.367
	エタノール輸送	2.016	0.078	2.094
	エチレン製造			
	ポリエチレン製造			
	生産計	**2.274**	**0.188**	**2.461**
使用後処理	RPF 焼却・熱利用	0.000		0.000
	使用後処理計	**0.000**		**0.000**
合計		2.795	0.188	2.983

２－３－２－２－２　石油由来ポリエチレン

２－３－２－２－２ａ　CO2 排出量

比較相手となる石油原料由来のポリエチレン 1kg の製造時 CO_2 排出量を表２－３－２－２－２ａ－１示す。石油原料由来のポリエチレンについては、複数の文献を整理し、このうち欧州と日本のデータを整理した。なお、既存文献におけるポリエチレンは、大きく低密度ポリエチレン（LDPE）、高密度ポリエチレン（HDPE）に分かれている。今回、評価対象製品のエチレン製造、ポリエチレン製造に用いた IDEAv2 では、PE1kg の製造時の排出量は欧州の事例の数値よりも大きな数値となった。

表２－３－２－２－２ａ－１　石油原料由来ポリエチレンの CO_2 排出量（製造時）

		1kg あたりの CO_2 排出量 [kg-CO_{2e}/kg-PE]		
		製造	RPF 焼却・熱利用	合計
欧州の事例 1)	LDPE	1.87	3.14	5.01
	HDPE	1.80	3.14	4.94
日本の事例 2)	LDPE	1.52	3.14	4.66
	HDPE	1.33	3.14	4.47

出典：1) PlasticsEurope, “Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers” (2016)
2)一般社団法人プラスチック循環利用協会, “LCA を考える「ライフサイクルアセスメント」考え方と分析事例”(2019)

２－３－２－２－３　CO2 排出量削減効果の推計

２－３－２－２－３ａ　CO2 排出量合計（エネルギー起源＋非エネルギー起源）

評価対象製品と比較製品のそれぞれ 1kg あたりの製造時 CO2 排出量を表２－３－２－２－３－１に示す。PE1kg あたりの排出量は、評価対象の商業機で 2.983kg-CO2e であり、比較製品の文献値のいずれよりも低い。IDEAv2 の PE の数値が欧州の文献値よりも高い（非公開データのため未記載）ことから、商業機でも表中の最大である LDPE（欧州）から 2kg 程度の CO2 排出量削減になると推察された。

表２－３－２－２－３ａ－１　CO_2 排出量削減効果の推計結果

	評価対象製品			比較製品			
	文献値	ベンチ	商業機	LDPE 欧州	HDPE 欧州	LDPE 日本	HDPE 日本
CO_2 排出量 [kg-CO_{2e}/kg-PE]	2.582	37.399	2.983	5.01	4.94	4.66	4.47

２－３－２－２－３ｂ　CO2 排出量合計（エネルギー起源）

エネルギー起源の CO2 排出量のみを比較した結果を表２－３－２－２－３ｂ－１に示す。商業機の結果では、LDPE（欧州）の結果から PE1kg あたり 2.2kg 以上の削減となっており、商業機レベルの仕様であってもエネルギー起源のみで石油由来 PE 樹脂より CO2 削減が期待できることが予想された。

表２－３－２－２－３ｂ－１　CO_2 排出量削減効果の推計結果（エネルギー起源のみ）

	評価対象製品			比較製品			
	令和２年度	パイロット	商業機	LDPE 欧州	HDPE 欧州	LDPE 日本	HDPE 日本
CO_2 排出量 [kg-CO_{2e}/kg-PE]	2.005	37.208	2.795	5.01	4.94	4.66	4.47

商業機では、エネルギー起源 CO_2 排出量全体の約 60%がエタノールからエチレンを製造するプロセスに集約されており、このプロセスの省エネ、再エネ化を図ることが大幅な効率化に寄与すると期待できる。特にエチレン製造プロセスにおける CO2 排出量の 2/3 は蒸気の製造に由来しているため、今後、エチレンプラントにおける蒸気の利用に関して、未利用熱の利用やコジェネレーションの設計などのエネルギーの最適化設計を行うことで、更なる CO_2 排出量の削減効果が予想された。

２－３－３　ポリ乳酸に関する CO2 削減効果の推計

ポリ乳酸に関してもポリ乳酸と同様にフォアグラウンドデータを収集し、推計を行った。なお、比較製品については、既存の文献値を整理して数値を引用した。

２－３－３－１　評価条件

２－３－３－１ｂ　パルプ製造時の CO2 排出量の算定

クラフトパルプ製造に伴う CO2 排出量については前章（２－３－２－１ｂ）と同様に IDEA v2 の数値をベースとして評価を実施した。

２－３－３－１ｃ　パルプ輸送

パルプ輸送に伴う CO2 排出量についても前章（２－３－２－１ｃ）と同様に、製紙工場内で製造されたパルプを用い、同一の製紙工場内でエタノールを製造することとしているため、パルプ輸送は発生しないこととした。

２－３－３－１ｄ　乳酸製造

パルプから乳酸を製造するプロセスは前章（２－３－２－１ｄ）と同様に製紙工場内で行う工程と設定したため、パルプ製造時に得られる黒液をプロセスで投入される電力・蒸気に充てて製造するモデルとした。電力、蒸気以外に酵素、水が消費され、廃棄物として排出される排水についても考慮し、生成乳酸の中和に必要な炭酸カルシウムについては考慮することとした。

２－３－３－１ｅ　乳酸輸送

本検討では製造した乳酸を同じ製紙工場内でポリ乳酸へ重合するモデルを設定したため、乳酸の輸送は発生しないものとして算定を行った。

２－３－２－１ｆ　ポリ乳酸製造

ポリ乳酸製造プロセスに関しては、文献より乳酸からポリ乳酸製造プロセスのバックグラウンドデータを用いて算定を行った。乳酸の重合プロセスにおける入出力データは文献においても不明であったことから、ここでは単純に乳酸～ポリ乳酸製造時の温室効果ガスの排出量の情報を、Erwin T.H. Vink, Steve Davies, “Life Cycle Inventory and Impact Assessment Data for 2014 Ingeo Polylactide Production”, 2015 年より引用した。

２－３－２－１ｇ　ポリエチレンの使用後処理

ポリ乳酸の使用後処理についても、RPF 化、RPF 焼却のシナリオを想定した。RPF 化のプロセス、使用済みプラの輸送、RPF の輸送に係る CO2 排出量は評価対象製品と比較対象製品で同一のプロセスであることから、評価の対象外とし、ポリ乳酸に含まれる炭素分は評価対象製品も比較製品も同様に RPF の利用（焼却）により 100%大気へ放出されるものと想定した。

２－３－３－２　CO2 排出量削減効果

２－３－３－２－１　非可食セルロース由来ポリ乳酸

２－３－３－２－１ａ　評価対象製品の CO2 排出量

評価対象である非可食セルロース由来のポリ乳酸について、1kg あたりの CO2 排出量の算定結果を表２－３－３－２－１ａ－１示す。使用後処理については、PE と同様に、原料育成時に大気中より吸収した炭素分であることから排出量をゼロとして評価した。結果として、エネルギー起源の CO2 排出量は 1.28kg-CO2e 程度、炭素吸収等の非エネルギー起源まで含めた場合には、1.619kg-CO2e 程度となった。

表２－３－３－２－１ａ－１　非可食セルロース由来ポリ乳酸 1kg あたりの CO_2 排出量

プロセス名		CO_2 排出量[kg-CO_{2e}/kg-PLA]		
		エネルギー起源	非エネルギー起源	合計
	丸太製造	0.001		0.001
	木材チップ製造	0.104		0.104
	丸太・木材チップ輸送	0.070		0.070
	原材料調達計	**0.175**	**0.000**	**0.175**
生産	パルプ製造～乳酸製造	0.363	0.341	0.704
	ポリ乳酸製造	0.740		0.740
	生産計	**1.103**	**0.341**	**1.444**
使用後処理	RPF 焼却・熱利用	0.000		0.000
	使用後処理計	**0.000**		**0.000**
合計		**1.278**	**0.341**	**1.619**

２－３－３－２－２　トウモロコシ由来ポリ乳酸

２－３－３－２－２ａ　比較製品の CO2 排出量

比較相手となるトウモロコシ由来ポリ乳酸 1kg の製造時 CO_2 排出量を示す。とうもろこし由来のポリ乳酸について、文献の数値から整理した。

表２－３－３－２－２ａ　トウモロコシ由来ポリ乳酸の CO_2 排出量

	1kg あたりの CO_2 排出量 [kg-CO_{2e}/kg]
生産	2.44
使用後処理	0.00
合計	2.44

出典：1) Erwin T.H. Vink, Steve Davies “Life Cycle Inventory and Impact Assessment Data for 2014 Ingeo Polylactide Production”(2015)

２－３－３－２－３　CO2 排出量削減効果の推計

２－３－３－２－３ａ　CO2 排出量合計（エネルギー起源＋非エネルギー起源）

評価対象製品と比較製品のそれぞれ 1kg あたりの製造時 CO2 排出量を表２－３－３－２－３－１に示す。PLA1kg あたりの排出量では 0.82kg-CO_{2e} の削減となった。

表２－３－３－２－３ａ　CO_2 排出量削減効果の推計結果

	評価対象製品	比較製品
CO_2 排出量 [kg-CO_{2e}/kg-PLA]	1.619	2.44
削減効果 [kg-CO_{2e}/kg-PLA]	-	0.82

２－３－３－２－３ｂ　CO2 排出量合計（エネルギー起源）

エネルギー起源を今回の評価結果で比較した場合、非可食セルロース由来のポリ乳酸では 1kg あたりの温室効果ガス排出量が 1.278kg-CO2e であるのに対して、文献値で得られるとうもろこし由来のポリ乳酸では 1kg あたり 2.44kg-CO2e となった。

２－３－４　普及段階における CO2 削減効果の算定方法の検討

推計した CO2 削減効果の内容を基に、普及段階での CO2 削減効果の算定方法を検討し、想定される課題を表２－３－４－１に示す。現状から大きな変更は必要ないと考えられるが、実証スケールにおける運用データや各種工程における条件設定の検討などが課題と考えられた。

表２－３－４－１　普及段階での CO_2 削減効果算定における課題

	算定時の課題
共通	✓ 製紙工場内におけるエタノール、乳酸製造プロセスにおけるエネルギーバランスの精査（黒液利用可能量の確認） ✓ 実証スケールプラントにおける収率、エネルギー効率等をもとにした再算定
ポリエチレン	✓ 実証スケールプラントにおけるエチレン製造プロセスにおける入出力データの確認（通常のエチレン製造プロセスの入出力データとの乖離について） ✓ 普及段階の輸送プロセスの検討 ✓ ポリエチレンの廃棄・リサイクルシナリオの検討（国内平均）
ポリ乳酸	✓ 比較対象となるとうもろこし等の CO_2 排出量の評価条件の分析と比較評価の精査（同等条件での算定についての検討） ✓ 普及段階の輸送プロセスの検討

２－４　リサイクル性評価

木質由来ポリエチレンが市場に流通することを想定し、本検討にて作製した木質由来バイオポリエチレンサンプルを容器包装リサイクル法に基づいて回収されたポリエチレン樹脂と混合し、各種物性を測定することで、そのリサイクル性について評価することを目的とした。

２－４ａ　実施内容および成果

（方法）

容器包装リサイクル法に基づいて回収されたポリエチレン樹脂 36kg から無作為に 6kg を採取し、2kg ずつに分割し、前章（２－１－３－４）で作成したバイオポリエチレンサンプルと混合し、ストランドペレットを作成した。比較対象として回収ポリエチレンのみのサンプルと石化由来である市販ポリエチレン（ノバテック TMHD HV331）を混合したサンプルを調製した。

サンプルＡ；回収ポリエチレン（2kg）のみ
サンプルＢ：回収ポリエチレン（2kg）＋市販ポリエチレン（200g）
サンプルＣ：回収ポリエチレン（2kg）＋バイオポリエチレン（200g）

市販ポリエチレン⇒　MFR:　0.9g/10min（190℃）
密度:　0.950g/cm3

バイオポリエチレン⇒　MFR:　1.1g/10min（190℃）
密度:　0.947g/cm3

調製した評価資料に対し、写真２－４ａ－１～３に示すような試験を作成し、表２－４ａ－４に示すような各種測定を実施した。

表２－４ａ－４測定項目及び試験方法規格

測定項目	試験方法
MFR	JIS K7210
比重	JIS K7112
曲げ強度	JIS K7171
曲げ弾性率	JIS J7171
引張強度	JIS K7161
引張破断伸度	JIS K7161
引張ヤング率	JIS K7161
アイゾット衝撃（23℃）	JIS K7110

写真２－４ａ－１　試験片及びサンプルストランドペレット（サンプルＡ）

写真２－４ａ－２　試験片及びサンプルストランドペレット（サンプルＢ）

写真２－４ａ－３　試験片及びサンプルストランドペレット（サンプルＣ）

（結果）

サンプルの測定結果を表２－４ａ－５に示す。サンプルＢ（回収ポリエチレン＋市販ポリエチレン）、サンプルＣ（回収ポリエチレン＋バイオポリエチレン）の測定値を比較すると、大きな物性劣化は見られず、作成したバイオポリエチレンのリサイクル性に関しては通常の市販ポリエチレンと大きな差はないと考えられた。

表２－４ａ－５　サンプル測定結果

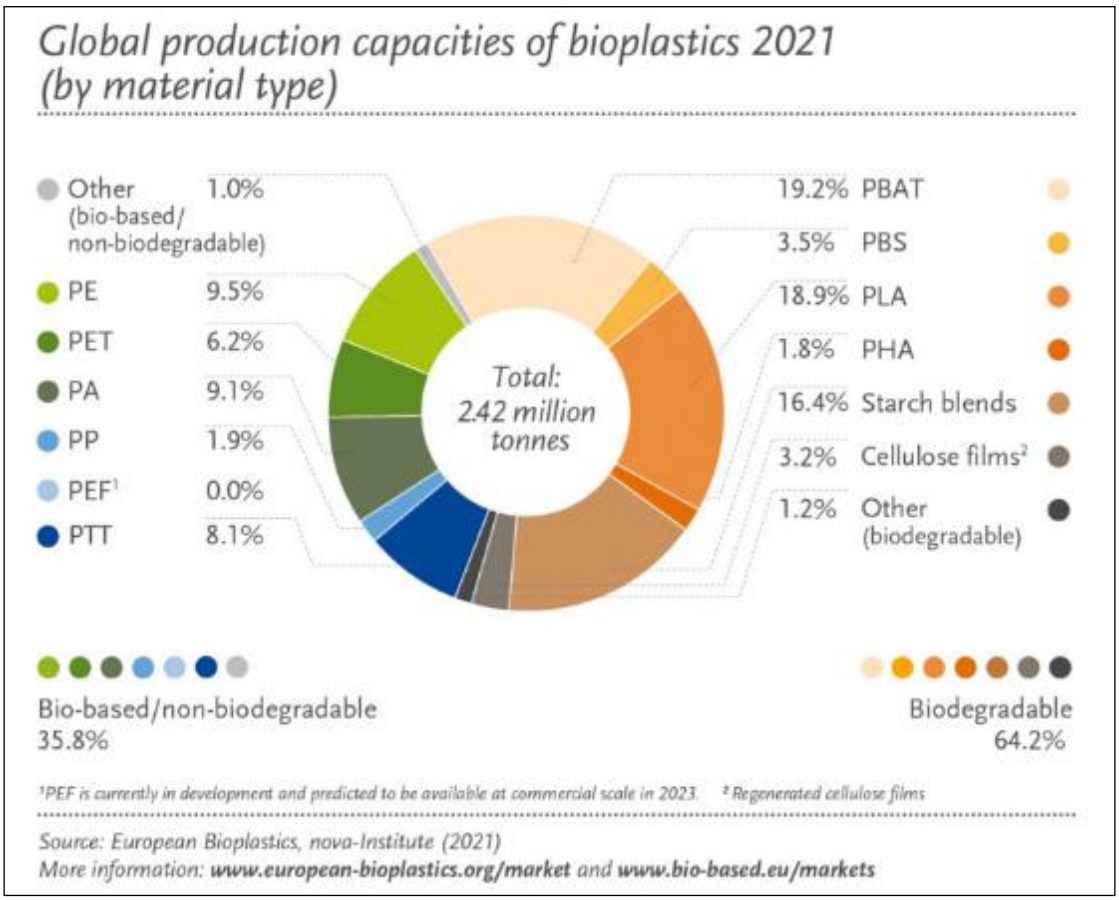
測定項目	単位	サンプルA	サンプルB	サンプルC
MFR	g/10min	0.62	0.64	0.77
比重	g/cm3	0.960	0.960	0.960
曲げ強度	MPa	17.0	18.0	18.0
曲げ弾性率	MPa	661	710	681
引張強度	MPa	14.8	15.5	15.5
引張破断伸度	%	399.0	406.5	339.0
引張弾性率	MPa	824	856	788
アイゾット衝撃（23℃）	KJ/m2	13.5	11.8	11.9

２－５　マーケティング

２－５－１　バイオプラスチック外観

２－５－１ａ　世界におけるバイオプラスチック外観

欧州バイオプラスチック協会のデータによる世界におけるバイオプラスチックの生産能力を図２－５－１ａ－１に示す。全体の生産量は 2020 年時点で 2,087 千トンだったが、2021 年には 2,417 千トンと約 16%増加している。2021 年時点における内訳をみると、生分解性プラスチックの生産能力が 64.2%、バイオマス非分解性プラスチックの生産能力が 35.8%の比率となっており、個別の生産能力をみると、大きい順に、PBAT（19.2%）PLA（18.9%）、Starch blends（16.4%）、PE（9.5%）、PA（9.1%）、PTT（8.1%）となっている。PBAT、PLA、Starch Blends の 3 種類で 50%超となっている。



＊PE（ポリエチレン）　＊PBAT（ポリブチレンアジペートテレフタレート）
＊PET（ポリエチレンテレフタレート）＊PBS（ポリブチレンサクシネート）
＊PA（ポリアミド）　＊PLA（ポリ乳酸）
＊PP（ポリプロピレン）　＊PHA（ポリヒドロキシアルカノエート）
＊PEF（ポリエチレンフラノエート）　＊Starch blends（でんぷんブレンド）
＊PTT（ポリトリメチレンテレフタレー ト）

図２－５－１ａ－１　世界のバイオプラスチック生産能力の比率（2021年）[2]

---

[2] 出所：Bioplastic market data（European Bioplastics、https://www.european-bioplastics.org/market/）

また、同協会による世界のバイオプラスチック生産能力の 2026 年予測データを表２－５－１ａ－２に示す。予測データでは PBS（14.3 倍）、PHA（11.2 倍）、PP（6.8 倍）、PA（5.4 倍）が各々顕著な伸びを示すと予測されている。

表２－５－１ａ－２　世界のバイオプラスチック生産能力（2021 年実績および 2026 年予測）[3]

	2021年実績		2026年予測		伸び率（倍）
	比率	生産能力（百万トン）	比率	生産能力（百万トン）	
PBAT	19.2%	0.46	30.0%	2.28	4.9
PBS	3.5%	0.08	16.0%	1.21	14.3
PLA	18.9%	0.46	10.4%	0.79	1.7
PHA	1.8%	0.04	6.4%	0.49	11.2
Starch blends	16.4%	0.40	5.2%	0.39	1.0
Cellulose films	3.2%	0.08	1.2%	0.09	1.2
Other（biodegadable）	1.2%	0.03	0.4%	0.03	1.0
PTT	8.1%	0.20	2.6%	0.20	1.0
PEF	0.0%	0.00	0.1%	0.01	-
PP	1.9%	0.05	4.1%	0.31	6.8
PA	9.1%	0.22	15.6%	1.18	5.4
PET	6.2%	0.15	1.2%	0.09	0.6
PE	9.5%	0.23	6.5%	0.49	2.1
Other（bio-based/non-biodegradable）	1.0%	0.02	0.3%	0.02	0.9
Total	100.0%	2.42	100.0%	7.59	3.1

[3] 出所：Bioplastic market data（European Bioplastics、https://www.european-bioplastics.org/market/）

２－５－１ｂ　日本におけるバイオプラスチック外観

日本におけるバイオプラスチックの利用は、図２－５－１ｂ－１に示すように 2010 年の 11,132 トンから年平均成長率（CAGR[4]）17.3%の高い伸び率で増加し、2019 年には 46,650 トンに達している。また、2020 年 7 月 1 日からレジ袋有料化が実施されており、これにともなうバイオプラスチック袋の需要増[5]、および COVID-19 によるスーパーマーケット等における個包装（フィルム）や容器類へのバイオプラスチック利用により、大きな伸びを見せているものと推測される。

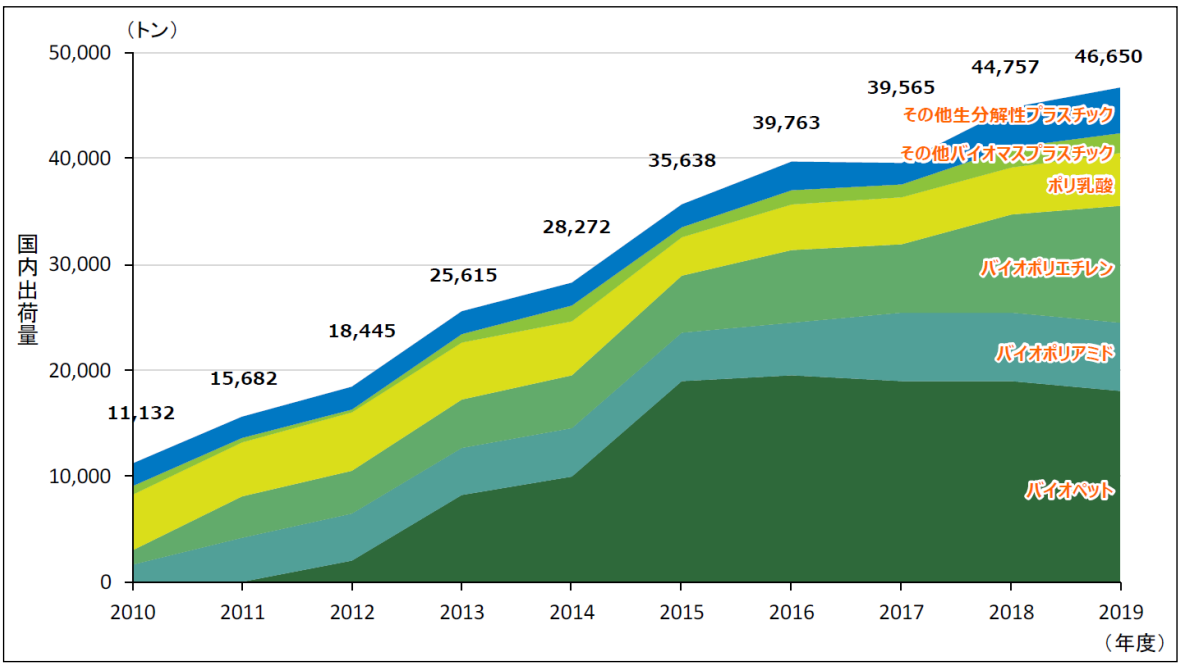


図２－５－１ｂ－１　日本のバイオプラスチック出荷量の推移[6]

日本におけるバイオプラスチック全体の市場規模は、2019 年で約 4 万 7 千トンであり、そのうち約 9 割を非生分解性バイオマスプラスチック（以下、NBP：Nonbiodegradable Bio-based Plastics）が占めており、残り約 1 割が生分解性バイオプラスチック（以下、BBP：Biodegradable Bio-based Plastics）となっている。2019 年の日本のプラスチック原材料生産実績は 1,050 万トンであることから、国内プラスチック市場に占めるバイオプラスチックの割合は 0.4%である。

非生分解性バイオマスプラスチックを個別に見ると、2019 年の出荷量で、バイオ PET（部分バイオマス由来）18,000 トン、バイオポリアミド（部分バイオマス由来のものを含む）6,500 トン、バイオ PE（バイオポリエチレン）11,000 トン、PLA5,000 トンとなっている。なお、現在、PLA の国内での用途は生分解性という機能よりも、融点や熱収縮性などの物理的・化学的特性を活かした用途に利用されていることから、日本バイオプラスチック協会の資料では NBP に分類されている。

---

4 CAGR: Compound average growth rate、年平均成長率

5 レジ袋のなかで、①植物由来の原料を 25%以上含むもの、②厚さ 0.05 ミリメートル以上のもの、③微生物によって分解される生分解性素材など、いずれかの条件を満たすものは「レジ袋有料化」の対象外となる。

6 出所：「バイオプラスチック概況」（日本バイオプラスチック協会、2020 年 5 月 22 日、http://www.env.go.jp/recycle/mat052212_1.pdf）

その他のバイオマスプラスチックには、イソソルバイト系共重合ポリカーボネート（バイオPC）、バイオポリウレタン樹脂（バイオPU）、ポリトリメチレンテレフタレート（バイオPTT）などがあり、合計で1,850トンの出荷量であった（これらはすべて部分バイオマス由来）。生分解性プラスチックには、PBAT、PBS、澱粉ポリエステル樹脂、PHA、PETS（ポリエチレンテレフタレートサクシネート）などがあり、合計で4,300トンの出荷量であったと推計されている。

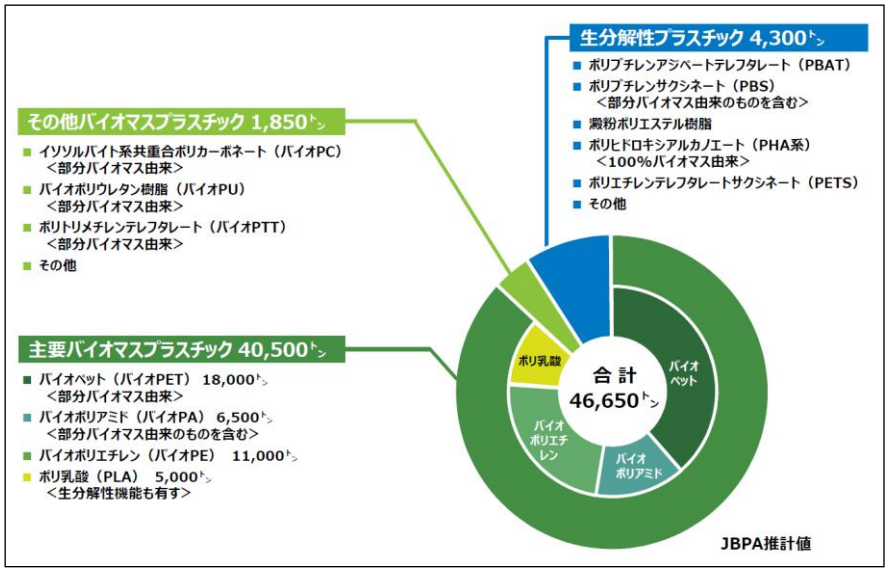


図２－５－１ｂ－２　日本のバイオプラスチック出荷量（2019年）の推計[7]

バイオプラスチックの主要用途は図２－５－１ｂ－３に示したとおり、農業土木資材食品残渣（生ごみ）回収袋、食品容器包装、非食品容器包装、医療繊維、電気・情報機器、OA機器、自動車などが挙げられる。このうち、バイオポリエチレンおよびポリ乳酸に焦点をあてて、以下に詳述する。

図２－５－１ｂ－３　バイオプラスチックの主要用途[8]

---

7 出所：「バイオプラスチック概況」（日本バイオプラスチック協会、2020年5月22日、http://www.env.go.jp/recycle/mat052212_1.pdf）
8 出所：「バイオプラスチック概況」（日本バイオプラスチック協会、2002年5月22日、http://www.env.go.jp/recycle/mat052212_1.pdf）

２－５－２　バイオポリエチレン

２－５－２－１ａ　世界市場

2021 年における世界全体でのバイオポリエチレン生産能力を図２－５－２－１ａ－１に示す。生産能力は約 23 万トンであり、用途別では軟質包装材 140,000 トン（61%）、硬質包装材 75,000 トン（33%）、各種消費財 10,000 トン（4%）、電子機器 5,000 トン（2%）となっており、包装材としての用途で約 94%を占める。

軟質包装材としては、レジ袋、食品包装フィルム、ラベルなどが挙げられる。硬質包装材としては、食品トレー、弁当トレー、ストロー、カトラリー（スプーン・フォーク等）、ファストフード容器、飲料ボトルなどが挙げられる。

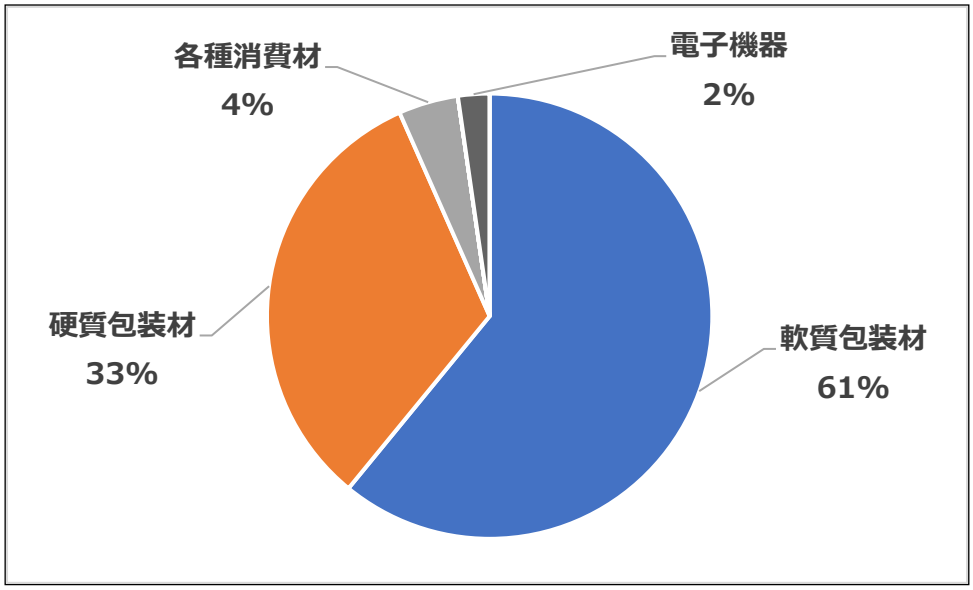


図２－５－２－１ａ－１　世界バイオポリエチレン生産能力（2021年、単位：1,000トン）[9]

２－５－２－１ｂ　日本国内市場

バイオ PE は Braskem が生産開始を開始した 2010 年から徐々に日本市場に浸透してきていたが、2019 年 5 月に環境省等によって策定された「プラスチック資源循環戦略」が需要の伸びを加速させた。

同戦略は、使い捨てプラスチックの削減を目的として、レジ袋をはじめプラスチック袋の使用規制方針を示したものである。同戦略に基づき、2020 年 7 月から商品購入の際に小売店が提供する持ち手つきのプラスチック袋が有償と定められた。

ただし、バイオマス由来のプラスチックを 25%以上配合したものは有償化対象から除外されるため、バイオ PE を配合したレジ袋に転換する小売店も増加した。レジ袋などにバイオ PE を採用している企業は、総合スーパー、スーパーマーケット、コンビニエンスストア、ドラッグストア、ホームセンター、百貨店、専門店など、幅広い業種・店舗にわたっている。

---

[9] 出所：Bioplastics market development update 2021（2021 年 11 月、European Bioplastics、https://docs.european-bioplastics.org/publications/market_data/2021/Report_Bioplastics_Market_Data_2021_short_version.pdf）

また、2020 年には新型コロナウィルスの感染拡大を受けた外出自粛や飲食店の営業時間短縮の影響でテイクアウト需要が高まった。大手飲食チェーンをはじめ持ち帰り用袋にバイオ PE を配合したレジ袋を採用するケースが増えている。

2020 年のバイオ PE の国・地域別供給量は、北米 7 万トン、欧州 7 万～8 万トン、アジア 3 万トン（うち日本は 2.2 万トン）程度と推定される。2019 年の日本におけるバイオ PE の出荷量 11,000 トン（日本バイオプラスチック協会推計）と比較するとほぼ 2 倍に増大したと推定される。

日本の用途別需要に関する統計データは存在しないが、世界のバイオ PE 用途別生産能力比率を日本の需要比率に適用して推計した結果を図２－５－２－１ｂ－１に示す。軟質包装材 13.3 千トン（61%）、硬質包装材 7.1 千トン（33%）、各種消費財 1.0 千トン（4%）、電子機器 0.5 千トン（2%）程度と推計される。

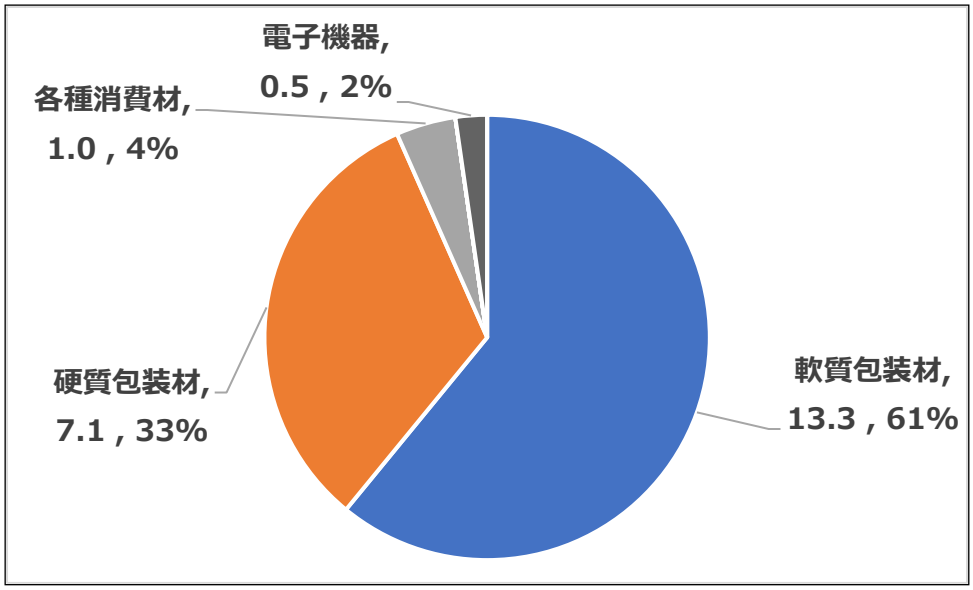


図２－５－２－１ｂ－１　2020年の日本のバイオPE需要推計（単位：1,000トン）[10]

なお、国内で流通しているバイオ PE は全量 Braskem 社（ブラジル）からの輸入品である。貿易統計上、「バイオポリエチレン」は、ポリエチレンの内数として独立した統計番号（HS コード）が定められ、2019 年 4 月 1 日付輸入品目統計表に初掲載された。該当する HS コードは、3901.10（比重 0.94 未満）、うち 3901.10 - 021（塊・粉・粒・フレークなど）/3901.10 - 061（バイオポリエチレン）/3901.10 - 091（バイオポリエチレン）、3901.20（比重 0.94 以上）、3901.40（エチレン - アルファ - オレフィン共重合体）で、いずれも輸入関税は無税となっている（2021 年 1 月 1 日現在）[11]。ただし、輸入通関統計において、当該データは秘匿処理されている模様で、数量・金額とも非表示となっており、輸入数量・金額データは不明である。

---

10 出所：Bioplastics market development update 2021（2021 年 11 月、European Bioplastics、https://docs.european-bioplastics.org/publications/market_data/2021/Report_Bioplastics_Market_Data_2021_short_version.pdf）データをベースとして、双日総合研究所にて推計。

11 出所：財務省税関ホームページ（https://www.customs.go.jp/tariff/2021_1/data/j_39.htm）

２－５－２－２　新用途候補

バイオ PE の新規用途として、ボトルキャップ、燃料タンク、シーラントフィルム等が考えられる。これらの用途は、まだ、充分に普及が浸透していなが、逆に言えば伸びしろの大きい用途と考えられる。各々の用途につき、現状を把握したうえで需要予測などを検討した。

２－５－２－２－１　ボトルキャップ

２－５－２－２－１ａ　日本における PET ボトル出荷量および生産量

日本における PET ボトルの出荷本数は、図２－５－２－２－１ａ－１に示すように、2004 年の約 148 億本から 2020 年には約 217 億本と約 1.47 倍となっており、年平均で計算すると約 2.4%/年で増加している。PET ボトル 1 本に対して PET ボトルキャップ 1 個が対応するので、PET ボトル本数は PET ボトルキャップ個数と同数であると考えられ、PET ボトルキャップの重量（約 2.3g/個）から計算すると、2020 年の PET ボトルキャップ出荷量は重量で約 49,910 トンと推計される。

		2004年度	2020年度	2020/2004比
PETボトル出荷本数	億本	148	217	1.47倍
環境負荷（CO_2排出量）	千トン-CO_2	2,089	1,992	0.95倍

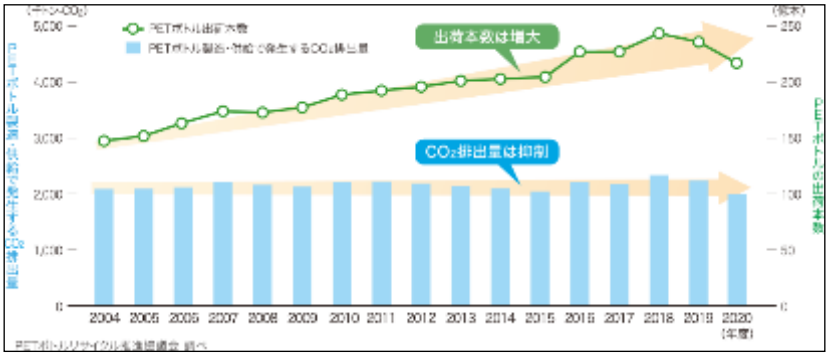


図２－５－２－２－１ａ－１　清涼飲料用PETボトルの出荷本数とCO2排出量の推移[12]

キャップに使われる樹脂材質は HDPE と PP が主体だが、日本においては HDPE が約 65%、PP が約 35%となっている[13]。したがって、2020 年の PET ボトルキャップ出荷量は、HDPE の PET ボトルキャップ約 32,000 トン、PP の PET ボトルキャップ約 17,000 トンと推計される。

なお、清涼飲料用の PET ボトル以外に酒類用 PET ボトル、調味料用 PET ボトル、乳製品用 PET ボトルなどがあるが、本稿では、清涼飲料[14]用の PET ボトルのみに焦点を充てることとする。

12　出所：PET ボトルリサイクル推進協議会ホームページ（https://www.petbottle-rec.gr.jp/data/weight_saving.html）

13　出所：ボトル用プラスチックキャップ店頭回収・リサイクル実証報告書（2015 年 3 月、日本スーパーマーケット協会、日本チェーンストア協会、一般社団法人　全国清涼飲料工業会、PET ボトルリサイクル推進協議会、一般社団法人　日本キャップ協会、全日本プラスチックリサイクル工業会、プラスチック容器包装リサイクル推進協議会、https://cap-jca.com/wp-content/uploads/2015/03/a37c542e51697baf4069a7a0c7e5385a.pdf）

14　乳製品類とアルコール飲料以外の、炭酸飲料、果実飲料、野菜飲料、コーヒー飲料、茶系飲料、ミネラルウォーター、スポーツドリンク、乳性飲料（乳固形分 3 パーセント未満のもの）、機能性飲料などの総称（サントリーホームページ）

２－５－２－２－１ｂ　世界における PET ボトル出荷量および生産量

ガーディアン紙（2017 年 6 月 28 日）[15] によると、「Euromonitor International’s global packaging trends report によると、世界における飲料ボトル販売量は 2016 年で 4800 億本以上であり、10 年前の約 3000 億本から大きく増大している。2021 年までに 5833 億本まで増加すると予測される。」としている。

2016 年 4800 億本、2021 年 5833 億本とすると、2016 年～2021 年の間の年平均成長率（CAGR）は 4.0%/年となる。PET ボトルキャップの重量を約 2.3g と仮定し、HDPE と PP の比率を日本と同様に約 65%：約 35%と仮定すると、2021 年の世界における PET ボトルキャップ生産量は、HDPE の PET ボトルキャップ約 872,000 トン、PP の PET ボトルキャップ約 470,000 トンと推計される。

２－５－２－２－１ｃ　需要予測

2030 年における日本および世界の、PET ボトルキャップに使用される HDPE および PP の需要を、表２－５－２－２－１ｃ－１～２に示す前提条件のもとで予測した。

日本の PET ボトルキャップに使用される HDPE の需要予測結果を表２－５－２－２－１ｃ－３に示す。2020 年の約 32,000 トンから 2030 年には約 36,000 トンと約 12%増と予測され、PP も 2020 年の約 17,000 トンから 2030 年には約 19,000 トンと約 12%増と予測する結果となった。

同様に世界の PET ボトルキャップに使用される HDPE の需要予測結果を表２－５－２－２－１ｃ－４に示す。2021 年の約 872,000 トンから 2030 年には約 1,094,000 トンと約 26%増と予測され、PP も 2021 年の約 470,000 トンから 2030 年には約 589,000 トン[16] と約 26%増と予測する結果となった。

表２－５－２－２－１ｃ－１　前提条件（日本）

	項目	数値	備考
①	2019 年の PET ボトルキャップ出荷個数	236 億個	2019 年の PET ボトル出荷本数を PET ボトルキャップ出荷個数と同一とみなした。
②	年平均成長率	3.2%	2004 年～2019 年までの年平均成長率を採用。
③	ボトルキャップリサイクルの普及による生産減少	2019 年～2021 年：0.0% 2022 年～2025 年：－1.0% 2026 年～2030 年：－2.0%	
④	PET ボトルキャップ重量	2.3g	
⑤	HDPE ボトルキャップと PP ボトルキャップの比率	65:35	

15 出所:The Guardian（2017 年 6 月 28 日、https://www.theguardian.com/environment/2017/jun/28/a-million-a-minute-worlds-plastic-bottle-binge-as-dangerous-as-climate-change）

16 この数値は、2017 年の世界における HDPE の総生産量 42,153,000 トンの 1.3%に相当する。（世界の石油化学製品の今後の需給動向（2019 年 10 月、経済産業省）商品別集計データ表① https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/chemistry/sekaijukyuudoukou201910.html）

表２－５－２－２－１ｃ－２　前提条件（世界）

	項目	数値	備考
①	2021 年の PET ボトルキャップ出荷個数	5833 億個	2021 年の PET ボトル生産量を PET ボトルキャップ生産個数と同一とみなした。
②	年平均成長率	4.0%	2016 年～2021 年までの年平均成長率を採用。
③	ボトルキャップリサイクルの普及による生産減少	2019 年～2021 年：0.0% 2023 年～2025 年：－1.0%、 2026 年～2030 年：－2.0%	
④	PET ボトルキャップ重量	2.3g	
⑤	HDPE ボトルキャップと PP ボトルキャップの比率	65:35	

表２－５－２－２－１ｃ－３　PET ボトルキャップ用 HDPE および PP 需要予測（日本）

	2020	2021	2022	2023	2024	2025
需要増加率（%）	-	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
リサイクル普及による生産減少（%）	0.0	0.0	0.0	-1.0	-1.0	-1.0
PETボトル（億本）＝ボトルキャップ（億個）出荷数	217	222	228	231	234	237
PETボトルキャップ重量換算（トン）	49,910	51,108	52,334	53,067	53,810	54,563
HDPE重量（トン）（65%）	32,442	33,220	34,017	34,494	34,977	35,466
PP重量（トン）（35%）	17,469	17,888	18,317	18,573	18,834	19,097

	2026	2027	2028	2029	2030	2020 vs 2030
需要増加率（%）	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	
リサイクル普及による生産減少（%）	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	
PETボトル（億本）＝ボトルキャップ（億個）出荷数	238	239	240	241	242	
PETボトルキャップ重量換算（トン）	54,782	55,001	55,221	55,442	55,663	
HDPE重量（トン）（65%）	35,608	35,751	35,894	36,037	36,181	111.5%
PP重量（トン）（35%）	19,174	19,250	19,327	19,405	19,482	111.5%

表２－５－２－２－１ｃ－４　PET ボトルキャップ用 HDPE および PP 需要予測（世界）

	2020	2021	2022	2023	2024	2025
需要増加率（%）	n.a.	-	4.0	4.0	4.0	4.0
リサイクル普及による生産減少（%）	n.a.	0.0	0.0	-1.0	-1.0	-1.0
PETボトル（億本）＝ボトルキャップ（億個）出荷数	n.a.	5,833	6,066	6,248	6,436	6,629
PETボトルキャップ重量換算（トン）	n.a.	1,341,590	1,395,254	1,437,111	1,480,225	1,524,631
HDPE重量（トン）（65%）	n.a.	872,034	906,915	934,122	962,146	991,010
PP重量（トン）（35%）	n.a.	469,557	488,339	502,989	518,079	533,621

	2026	2027	2028	2029	2030	2021 vs 2030
需要増加率（%）	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	
リサイクル普及による生産減少（%）	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	
PETボトル（億本）＝ボトルキャップ（億個）出荷数	6,761	6,897	7,035	7,175	7,319	
PETボトルキャップ重量換算（トン）	1,555,124	1,586,226	1,617,951	1,650,310	1,683,316	
HDPE重量（トン）（65%）	1,010,831	1,031,047	1,051,668	1,072,701	1,094,155	125.5%
PP重量（トン）（35%）	544,293	555,179	566,283	577,608	589,161	125.5%

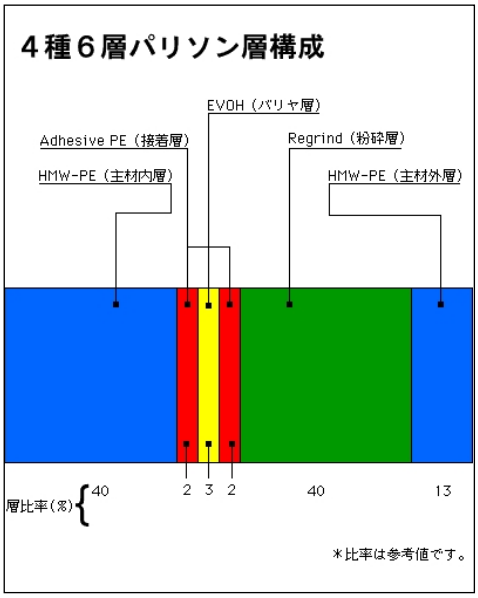
２－５－２－２－２　自動車用燃料タンク

２－５－２－２－２ａ　樹脂製燃料タンクの採用比率および使用される HDPE 重量

自動車のガソリンタンクは金属製が主流であったが、写真２－５－２－２－２ａ－１に示すように樹脂製の燃料タンク（PFT＝Plastic Fuel Tank）の採用が進んでおり、欧州、北米、日本では 70～75%程度、世界全体でも約 70%が樹脂製とみられる。樹脂製燃料タンクを採用するメリットとしては、(1)軽量化できる、(2) 錆びない、(3) 自由な形に成形しやすい、という点が挙げられる。

写真２－５－２－２－２
ａ－１　樹脂製燃料タンク[17]

樹脂製燃料タンクは、図２－５－２－２－２ａ－２に示すように、燃料透過を抑えるバリヤ層として EVOH 層を層中央に配置し、主材の HDPE 層との間に接着層、工程内リサイクル材を使った再生層の 4 種 6 層で構成されている。[18]



---

[17] 出所：本田技研工業ホームページ（https://www.honda.co.jp/environment/face/case77/02.html）
[18] 出所：トヨタ自動車 75 年史
（https://www.toyota.co.jp/jpn/company/history/75years/data/automotive_business/products_technology/technology_development/body/details.html）

図２－５－２－２－２ａ－２　自動車向け樹脂製燃料タンクの層構成（一例）[19]

各層に使用される材料の使用量については、一例として、内側に HDPE40% / Tie 2% / EVOH 3% / Tie 2% / 再生 HDPE40% / HDPE 13%、外側に EVOH 3%で 345g との情報があることから、燃料タンク 1 個あたり使用される HDPE は約 6kg と推計される。

２－５－２－２－２ｂ　世界の新車販売台数から予想される燃料タンク用 HDPE 使用量

世界の新車販売台数を表２－５－２－２－２ｂ－１に示す。2019 年の約 90 百万台から、2020 年は新型コロナウィルス感染拡大の影響を受けて前年比 13.8%減の 77 百万台まで落ち込んでいる。2021 年のデータはまだ公表されていないが、半導体不足や新型コロナウィルス禍による部品調達難の影響により、2020 年数値と同レベル程度と考えられる。一方、日本の新車販売台数をみると、5.2 百万台から、2020 年は前年比 11.5%減の 4.6 百万台となっている。

表２－５－２－２－２ｂ－１　世界の新車販売台数（2019 年-2020 年）[20]

（単位：台）

	2019	2020	2020年の比率
欧州	20,928,769	16,705,645	21.4%
- うち、EU27	18,430,753	14,080,139	18.1%
- うち、ロシア、トルコ、その他	2,498,016	2,625,506	3.4%
北米	20,334,190	16,956,845	21.7%
中南米	4,497,526	3,288,621	4.2%
アジア・オセアニア・中東	43,483,277	40,107,260	51.4%
-うち,日本	5,195,216	4,598,611	5.9%
アフリカ	1,179,925	912,863	1.2%
	90,423,687	77,971,234	100.0%

燃料タンク 1 個あたり使用される HDPE を 6kg/個、新車販売に占める樹脂燃料タンク比率を、世界全体 70%、日本も 70%と仮定すると、2020 年における燃料タンク向けの HDPE 使用量は、世界：327,600 トン（= 6kg/台×78 百万台×70%）、日本： 19,320 トン（＝6kg/台×4.6 百万台×70%）と推計される。

現時点で、燃料タンク向けにバイオ HDPE は使用されていないが、世界において CO2 排出量削減が叫ばれるなか、植物由来のバイオ HDPE が採用される可能性はあると考えられる。仮に、2020 年の燃料タンク向けの HDPE の 10%がバイオ HDPE に将来置き換わると仮定すると、バイオ HDPE の需要は世界：32,600 トン（= 327,600 トン×10%）、日本： 1,932 トン（＝19,320 トン×10%） と推計される。

今後、新型コロナウィルス蔓延継続による消費低迷および新車販売台数の停滞や電気自動車の普及による液体燃料車の新車販売台数の停滞などがネガティブ要素となるが、自動車メーカーによるバイオ HDPE 採用の突破口が開かれれば、一定量のバイオ HDPE 需要が継続して生まれることとなろう。

---

19 出所：日本製鋼所ホームページ
（https://www.jsw.co.jp/ja/product/molding_machine/blow/features.html）

20 出所：国際自動車工業連合会（(仏) Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles）統計データ（https://www.oica.net/category/sales-statistics/）

２－５－２－２－３　シーラントフィルム

２－５－２－２－２ａ　市場規模

プラスチックフィルムなどの基材に樹脂層を重ねて積層化させたものをラミネート製品と呼ぶ。ラミネート製品は、食品や医薬品等（カレー、ハンバーグなどのレトルト食品、インスタント袋めん、生めん、食パン・菓子パン、もち、米・削りぶし、インスタントスープ（粉末、液体）、こんにゃく・漬物など水物食品、コーヒー、紅茶、緑茶、冷凍食品、各種医薬、医療品、菓子（スナック、キャンディー、揚菓子、米菓、クッキー）。[21]　の包装材料として使用されている。

シーラントフィルムはラミネート製品のシーラント層に使用されるフィルムのことである。ラミネート製品の基本的な構成は、図２－５－２－２－２ａ－１に示すように表基材（又は中間基材）とシーラント層の組合せである。表基材には中身の食品の要求する特性に加え、商品の見栄えに影響する印刷性が求められる。シーラント層のシーラントとは袋状にするために熱でシールする材料のことである。表基材には、OPP，PET，ナイロンなど、中間層基材にはアルミ箔など、シーラント層には、LDPE、LLDPE、CPP などが使われている。[22]

（注）
OPP　　：Oriented Polypropylene（二軸延伸ポリプロピレン）
PET　　：Polyethylene Terephthalate（ポリエチレンテレフタレート）
LDPE　：Low Density Polyethylene（低密度ポリエチレン）
LLDPE　：Linear Low Density Polyethylene（直鎖状低密度ポリエチレン）

なお、2019 年の日本における、シーラントフィルム向けのバイオ PE 使用量は 200～300 トン/年程度とみられる。

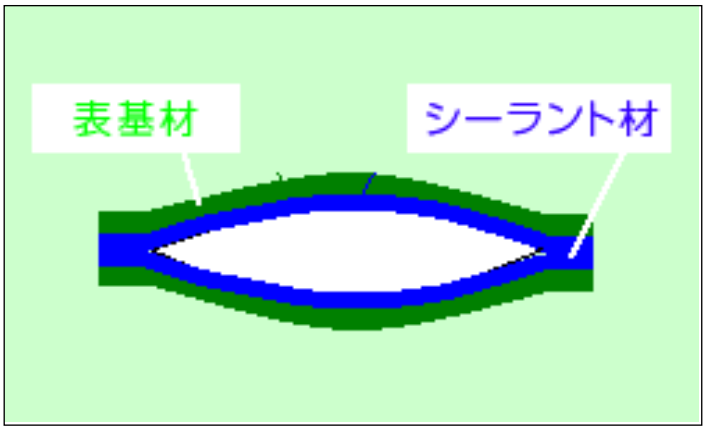


図２－５－２－２－２ａ－１　ラミネート製品のイメージ図[23]

---

[21] 出所：日本ポリエチレン製品工業連合会ホームページ（http://www.jpe.gr.jp/content/133）
[22] 出所：日本ポリエチレン製品工業連合会ホームページ（http://www.jpe.gr.jp/content/133）
[23] 出所：日本ポリエチレン製品工業連合会ホームページ（http://www.jpe.gr.jp/content/133）

日本におけるシーラントフィルム向け LLDPE（直鎖状低密度ポリエチレン）の市場規模は約 30 万トンとみられる。シーラントフィルム向け LLDPE の世界市場規模は統計データがないため、以下の計算により推計を行ったが、約 1900 万トンと推計される。

シーラントフィルム向け世界市場規模推計値
＝シーラントフィルム向け日本市場規模　×
（LLDPE の世界市場規模）÷（LLDPE の日本市場規模推計値）
＝30 万トン×　38.9 百万トン[24]　÷　0.61 百万トン
＝ 約 19 百万トン

（注）LLDPE の日本市場規模推計値＝
日本における LLDPE 生産量（2020 年）
＝日本 LDPE の国内生産量（2020 年）[25]
×（LLDPE の国内生産能力（2020 年）[26]÷LDPE の国内生産能力（2020 年））[27]
＝1,330,831 トン×1,079,000 トン÷2,337,000 トン
＝614,449 トン

２－５－２－２－２ｂ　シーラントフィルムの原料

シーラントフィルムの原料としては、①HAO-LLDPE、および②メタロセン HAO-LLDPE が主流となっている。

① HAO-LLDPE（Higher Alpha Olefin- LLDPE）

フィルム等製品の強度、ヒートシール性、加工性などを改良するためにコモノマーをブテン（C4）からヘキセン（C6）などの炭素数 6 以上のハイヤーαオレフィンに変更した直鎖上低密度ポリエチレンである。[28]　チーグラー―系触媒を用いて重合させたものである。

② メタロセン HAO-LLDPE （Metallocene Higher Alpha Olefin- LLDPE）

---

[24] 出所：Global Polyethylene Outlook　ICIS Global Petrochemicals Outlook Seminar（October　9, 2020、https://cjp-rbi-icis.s3.eu-west-1.amazonaws.com/wp-content/uploads/sites/7/2020/10/13191451/Global-Polyethylene-Outlook.pdf）108 百万トン×36%＝38.9 百万トン
[25] 出所：LDPE の国内生産量（2020 年）：1,330,831 トン
（経済産業省生産動態統計年報　化学工業統計編
https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/seidou/result/gaiyo/resourceData/02_kagaku/nenpo/h2dbb2020k.pdf
）
[26] 出所：LLDPE の国内生産能力（2020 年末）：1,079,000 トン
（LLDPE871 千トン＋LDPE（HPLDPE、LLDPE）専用設備 208 千トン）
我が国の主要石油化学製品生産能力調査(令和 2 年 12 月末時点)結果について（経済産業省、
https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/chemistry/downloadfiles/20210430seisannnouryokutyousa.pdf)
[27] 出所：② LDPE の国内生産能力（2020 年末）： 2,337,000 トン
（LDPE 専用設備 2129 千トン＋LDPE（HPLDPE、LLDPE）専用設備 208 千トン）
我が国の主要石油化学製品生産能力調査(令和 2 年 12 月末時点)結果について（経済産業省、
https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/chemistry/downloadfiles/20210430seisannnouryokutyousa.pdf)
[28] 出所：三井化学ニュースリリース（2011 年 4 月 4 日、
https://jp.mitsuichemicals.com/jp/release/2011/pdf/110404.pdf)

従来のチーグラー系触媒の代わりに、メタロセン系触媒を用いて重合させた HAO-LLDPE である。HAO-LLDPE よりも格段の高強度を達成しており、強度を求められる用途、例えば肥料袋などの重袋、セミ重袋、水物の容器となるバッグ類などには欠かせない材料となっている。[29]

２－５－２－２－２ｃ　シーラントフィルムの製法（T ダイ法とインフレーション法）

LLDPE シーラントフィルムの製法には T ダイ法とインフレーション法がある。シーラントフィルム製造において、石油由来 LLDPE をバイオ由来 LLDPE に置き換える検討が一部の企業で進められている。インフレーション法においての置き換えは成功しているが、T ダイ法においての置き換えは、最終製品の品質面の問題から、現状難しいとの情報がある。

①T ダイ法

細長いスリットをもった金型の T ダイを押出し機に取り付けてフィルムまたはシートを得る方法。この方法は生産性が高く、設備費が安く、厚みの均一な製品や薄いフィルムがつくれる特徴をもっている。また、T ダイから押し出されたフィルムを熱いうちに予熱した紙、セロハン、アルミ箔などと重ねて冷却ロールとプレスロールの間を通せばラミネート製品が得られる。[30]

②インフレーション法

リング状のスリットダイ（注ぎ口）から出たチューブ状の熱可塑性樹脂（ポリエチレン,ポリプロピレンなど）を空気で膨らませる方法。この方法でつくられたチューブは,主として包装用袋として使用されるが、広幅のフィルムをつくる場合、チューブを切り開いてフィルムにする場合が多い。この方法で幅 6m もあるフィルムが容易につくられ,農業用に用いられている。ポリエチレンフィルムの多くはこの方法で製造される。[31]

---

29 包装用メタロセン樹脂（日本ポリエチレン・研究開発センター、2006 年、https://www.pochem.co.jp/jpe/reference/pdf/20061121-1.pdf）
30 出所：印刷用語集（一般社団法人 日本印刷産業連合会ホームページ、https://www.jfpi.or.jp/webyogo/index.php?term=1536）
31 出所：印刷用語集（一般社団法人 日本印刷産業連合会ホームページ、https://www.jfpi.or.jp/webyogo/index.php?term=231）

２－５－２－３　バイオマス度認定方式

2020 年に入り、マスバランス方式によりバイオマス製品を製造・販売すると発表する大手化学メーカーが相次いだ。現行のバイオマス度認定方式を概観したのち、マスバランス方式との長所短所比較を行った。

２－５－２－３－１　現行のバイオマス度認定方式

日本、米国、欧州においては、生分解性プラスチックおよびバイオマスプラスチックに対し、各々バイオマス認証制度が実施されている。主要な認証ラベル、バイオマスプラスチックにおける規格を表２－５－２－３－１－１に、バイオベース度の測定方法およびバイオベース度基準を表２－５－２－３－１－２に示す。

なお、バイオベース度の測定方法の欄にある、バイオマス炭素含有率（C14 法）というのは、生物由来の物質にしか含まれていない炭素（C14）が、どのくらい含まれているかを測ることで、その製品の「バイオマス度」を測定する方法である。[32]

表２－５－２－３－１－１　主要な認証ラベル・生分解性プラスチック[33]

認証機関	TÜV（オーストリア）	DIN CERTCO（ドイツ）	European Bioplastics	BPI（米国）	JBPA（日本）
生分解性プラスチック	－	－	－	－	下記のいずれか JIS K6953 K6955 K6950/6951
コンポスト施設					
家庭用コンポスト			－	－	－
土壌			－	－	－
水中		－	－	－	－
海洋		－	－	－	－

---

[32] C14 法：自然界の炭素には、質量の異なるものがある。存在する割合の大きなものから炭素 12（C12）、炭素 13（C13）、炭素 14（C14）の 3 種類があり、特に炭素 14 は、大気中に常に一定の割合で存在し、決まった間隔で減っていき 5730 年で元の量の半分になるという性質（半減期）がある。加速器質量分析装置（AMS）で測定すると、試料に含まれる炭素の種類と、それぞれの割合が分かる。植物は成長のため、大気中の二酸化炭素を取り込むので、植物に含まれる炭素 14 も大気中と同じ割合になる。しかし、石油のような化石資源には炭素 14 が含まれていない。石油や石炭などは大昔の生物が地中に埋まり、長い時間をかけて作られ、この間に炭素 14 が減り続けてなくなったものと考えられているからである。（日本有機資源協会ホームページ、https://www.jora.jp/faq/7074/）

[33] 出所：バイオプラスチック導入ロードマップ検討会配付資料「バイオマスプラスチック概況」（日本バイオマスプラスチック協会、2020 年 5 月 22 日、http://www.env.go.jp/recycle/plastic/bio/20200522_1.html）

表２－５－２－３－１－２　主要な認証ラベル・バイオマスプラスチック[34]

認証機関	JBPA	JORA	TÜV Austria (旧VINÇOTTE)	DIN Certco	USDA (米国 農務省)
認証制度	バイオマスプラ	バイオマスマーク	OK biobased	DIN Geprüft Biobased	BioPreferred
マーク					
規格	ISO 16620-3	ISO16620-4	ASTM D 6866 ISO 16620-2	ASTM D 6866 ISO 16620-2 CEN/TS 16137	ISO 16620-2
バイオベース度の測定方法	バイオマスプラスチック度	バイオマス質量含有率	バイオマス炭素含有率（C14法）	バイオマス炭素含有率（C14法）	バイオマス炭素含有率（C14法）
バイオベース度基準等	バイオマスプラスチック度が25%以上	バイオマス度が10%以上	バイオ由来炭素の含有量により4段階で認定 1ツ星: 20-40% 2ツ星: 40-60% 3ツ星: 60-80% 4ツ星: > 80%	バイオ由来炭素の含有量により3段階で認定 1 : 20 - 50% 2 : 50 - 85% 3 : > 85%	商品類型により異なる（7～95%）

[34] 出所：バイオプラスチック導入ロードマップ検討会配付資料「バイオマスプラスチック概況」（日本バイオマスプラスチック協会、2020 年 5 月 22 日、http://www.env.go.jp/recycle/plastic/bio/20200522_1.html）

２－５－２－３－２　日本国内の認証制度

① バイオプラスチック識別表示制度（日本バイオプラスチック協会）

バイオプラスチック識別表示制度は、一般消費者に、生分解性プラスチックの製品「グリーンプラ」と、バイオマスプラスチック製品「バイオマスプラ」の正しい理解、正しい使用法、および製品の普及促進を図るために、日本バイオプラスチック協会が制定している 2 つの識別表示制度（(a)生分解プラ識別表示制度、および(b)バイオマスプラ識別表示制度）である。

(a) 生分解性プラ識別表示制度[35]

生分解性プラスチックの製品と一般プラスチックの製品との識別を明確にし、シンボルマークを認証することで、分別回収を可能とすることを目的とする制度である。2000 年 6 月発足。2021 年 12 月 1 日現在の登録件数は 252 件となっている。

図２－５－２－３－２－１　生分解性プラマークおよび生分解性バイオマスプラマーク[36]

生分解性プラの基準概要は下記のとおりである。

1. 全ての構成材料（成分）は PL（ポジティブリスト）に登録されていなければならない。
2. 構成材料として PL の分類 A に登録された生分解性合成高分子化合物を含まなければならない。

---

[35] 2021 年 6 月 9 日、日本バイオプラスチック協会は、グリーンプラ識別表示制度に関し、制度名称、制度内容、マークデザインを変更すると発表した。監督官庁から、「グリーンプラという名称が植物由来のプラスチックを想起させる 。一般消費者の方は生分解性プラスチックと理解しないのではないか 」 との指摘を受けて検討・変更したものである。変更内容は下記のとおりである。
①制度名称の変更：グリーンプラ識別表示制度を生分解性プラ識別表示制度と名称を変更。
②制度内容の変更：グリーンプラという名称を廃止し、生分解性プラと称する。また、生分解性プラの中で同協会のバイオマスプラ識別表示基準を満たす製品を生分解性バイオマスプラと称する。
③マークデザインの変更：グリーンプラマークを廃止し、新たに生分解性プラマーク、生分解性バイオマスプラマークの 2 種類を制定。（日本バイオプラスチック協会ホームページ（http://www.jbpaweb.net/wp-content/uploads/2021/06/Change_of_green_plastic_identification.pdf））

[36] 出所：日本バイオマスプラスチック協会ホームページ（http://www.jbpaweb.net/wp-content/uploads/2021/06/Change_of_green_plastic_identification.pdf）

3. 生分解性合成高分子化合物（PL 分類 A）と天然有機材料（PL 分類 B-8）の総計を 50.0 重量または体積%以上含むものでなければならない。
4. １重量%以上含まれるすべての有機材料は、当委員会が指定する生分解性試験において 60%以上の生分解度が確認されたものでなければならない。
5. １重量%未満の非生分解性有機材料の合計量は、5 重量%未満でなければならない。
6. 含まれる特定元素の量は、上限値を超えてはならない。[37]

(b) バイオマスプラ識別表示制度

定められた基準に適合する製品を「バイオマスプラ」として認証し、認証マークの使用を許可することにより、一般消費者がバイオマスプラスチックの製品と一般プラスチックの製品との識別を容易に識別できるようにすることを目的とする制度。2006 年 7 月発足。2021 年 12 月 1 日現在の登録件数は 726 件である。

図２－５－２－３－２－２　バイオマスプラスチック度25.0wt.%の場合の認証マーク[38]

バイオマスプラの基準概要は下記のとおりである。

1. PL 分類 A に登録されたバイオマス由来合成高分子化合物、又は、分類 E に登録されたバイオマス由来熱硬化性プラスチック原料組成中のバイオマス由来成分を、25.0 重量%以上含まなければならない。
2. 全ての構成材料（成分）は当協会指定の使用禁止物質に該当しないこと。
3. 特定有害物質は使用しないこと。意図的使用がない場合でも 指定する最大許容濃度を超えないこと。[39]

なお、認証マークにおいて数値なしの場合は、最低でも 25.0wt%以上を意味する。数値記載の場合は、バイオマスプラスチック度に応じて、25，50，75，90 の 4 段階で表示される。

② バイオマスマーク（日本有機資源協会）[40]

バイオマスマークは、生物由来の資源（バイオマス）を利活用し、品質及び関連法規、基準、規格等に合致している環境商品の目印である。バイオマスマークにはバイオマス含有率を表す「バイオマス度」が表示されている。下限設定値 10 に始まり「10、15、20・・・95、100」

---

37 出所：日本バイオマスプラスチック協会ホームページ（http://www.jbpaweb.net/identification/）
38 出所：プラスチック製買物袋有料化実施ガイドライン（経済産業省、環境省、2019 年 12 月、https://www.meti.go.jp/press/2019/12/20191227003/20191227003-2.pdf）
39 出所：日本バイオマスプラスチック協会ホームページ（http://www.jbpaweb.net/identification/）
40 出所：一般社団法人日本有機資源協会ホームページ（https://www.jora.jp/biomassmark/）

と 5%刻みで最大値 100 まで設定されている[41]。

２－５－２－３－３　米国の認証制度[42]

米国においては、米国農務省（United States Department of Agriculture（USDA））が、バイオマス由来製品の市場の発展と拡大の支援を目的として、バイオプリファードプログラムを運用している。本プログラムは、①政府機関を対象とした義務的なバイオマス製品調達制度と、②民間企業の自主的な認証・ラベリング制度の 2 本柱で構成されている。

①（政府機関）義務的なバイオマス製品調達制度

(a) 調達側（連邦政府機関および連邦政府機関と契約する業者）

連邦政府機関・請負業者が、米国農務省の調達対象製品データベースから調達製品を選択する制度である。データベースの登録対象となるのは、洗剤、カーペット、潤滑油、塗料等の 139 商品類型であり、それぞれにバイオマス度の最低基準が設定されている。バイオマス度は自己申告に基づいており、検査機関による試験は行われない。

(b) 供給側（製品製造事業者・販売業者（海外企業も含む））

139 商品類型に該当する場合は、米国農務省に製品の登録を申請する。139 商品類型に該当しない場合は、まず、商品類型の新規申請を行い、新たな商品類型が設定された後に製品の登録を申請する。

②（民間企業）自主的な認証・ラベリング制度

(b) 供給側（製品製造事業者・販売業者（海外企業も含む））

ラベル付与を希望する製品のバイオマス度試験を認定検査機関に依頼する。認定検査機関は、ASTM D6866 に基づきバイオマス度を試験し、最低基準を満たしていれば米国農務省に結果を通知する。米国農務省は通知に基づき当該製品へのラベル使用を許可する。バイオマス度の最低基準は、義務的なバイオマス製品調達制度の 139 商品類型に該当する製品の場合、商品類型別に設定されるバイオマス度の最低基準が適用される。それ以外の製品の最低基準は 25%が適用される。

---

41 出所：一般社団法人日本有機資源協会ホームページ（https://www.jora.jp/wp-content/uploads/2021/02/190901hyouki-unyou5.pdf））

42 出所：バイオプラスチック導入ロードマップ検討会配付資料「バイオプラスチックを取り巻く国内外の状況」（2020 年 7 月 28 日、http://www.env.go.jp/recycle/plastic/bio/20200728_2.html）

２－５－２－３－４　欧州の認証制度

欧州においては、①DIN CERTCO、②TÜV AUSTRIA、③Seedling log などの識別表示制度がある。

① DIN CERTCO

ドイツ規格協会が認証するもので、生分解性プラスチックに対しては、コンポスト施設、家庭用コンポスト、土壌における生分解性について各々認証している。バイオマスプラに対してはバイオマス由来炭素の含有量により、20～50%、50～85%、85%超の 3 段階で認定している。

図２－５－２－３－４－１　DIN CERTCOの家庭用コンポスト認証マーク[43]

② TÜV AUSTRIA

ベルギーに本部を置く、TÜV AUSTRIA Belgium NV（旧 Vinçotte）[44]が認証するもので、生分解性プラスチックに対しては、コンポスト施設、家庭用コンポスト、土壌、水中、海洋における生分解性について各々認証している。バイオマスプラに対しては、バイオマス由来炭素の含有量により、20～40%、40～60%、60～80%、80%超の 4 段階で認定している。

図２－５－２－３－４－２　TÜV AUSTRIAの家庭用コンポスト認証マーク[45]

---

[43] 出所：DIN CERTCO ホームページ（https://www.dincertco.de/din-certco/en/main-navigation/products-and-services/certification-of-products/environmental-field/products-made-of-compostable-materials-for-home-and-garden-composting/）

[44] 2017 年 12 月、認証業務は、Vinçotte 社から TÜV AUSTRIA Belgium NV に引き継がれている。

[45] 出所：TÜV AUSTRIA ホームページ（https://www.tuv-at.be/green-marks/）

③ Seedling logo

欧州バイオプラスチック協会が認証するもので、EN 規格[46]である、EN 13432 にしたがって工業的にコンポスト可能であることを認証するものである。

図２－５－２－３－４－３　欧州バイオプラスチック協会のSeedling logo[47]

２－５－２－３－５　マスバランス方式によるバイオマス度認定方式

「マスバランス（物質収支）」の概念そのものは、すでに紙（FSC 認証など）、パーム油、電力など多様な業界で使われてきている。原材料が混合される際に、その比率を認証済みの手法で最終製品に割り当てる手法である。

このマスバランス方式の概念を化学産業に適用した認証方式が「バイオマスバランス・アプローチ」である。世界大手総合化学メーカーである BASF が、第三者認証機関である TÜV SÜD（テュフズード）と共同で開発したものであり、化学産業では初めて開発されたものである。

バイオマスバランス・アプローチでは、有機廃棄物や植物油由来のバイオナフサやバイオガスなどの再生可能原料が、化学品生産の第一段階で化石資源とともに使用され、その後、認証された方法でバイオベースの量が算出され、特定製品に割り当てられる。[48]

使用する再生可能原料から最終製品に至るまで、一貫した原料管理システムを確立しており、BASF の製造拠点にて化石原料の代わりに使用された再生可能原料投入量とバイオマスバランス製品出荷量は厳密に管理され、独立機関によって認証されている。BASF ではバイオマスバランス・アプローチを一部製品で用いている。[49]

---

[46]「European Norm」の略称。European Standards とも呼ばれ、日本語では「EN 規格」や「欧州規格」と呼ばれている。EN 規格は、EU 各国での国家規格とするように義務付けられている統一規格。
[47] 出所：TÜV AUSTRIA ホームページ（https://www.tuv-at.be/green-marks/）
[48] 出所：BASF ジャパン株式会社「BASF のバイオマスバランス・アプローチ」（https://www.basf.com/jp/ja/who-we-are/sustainability/key-topics/biomass-balance.html）
[49] バイオプラスチック導入ロードマップ検討会配付資料「バイオプラスチックを取り巻く国内外の状況」（2020 年 7 月 28 日、http://www.env.go.jp/recycle/plastic/bio/20200728_2.html）

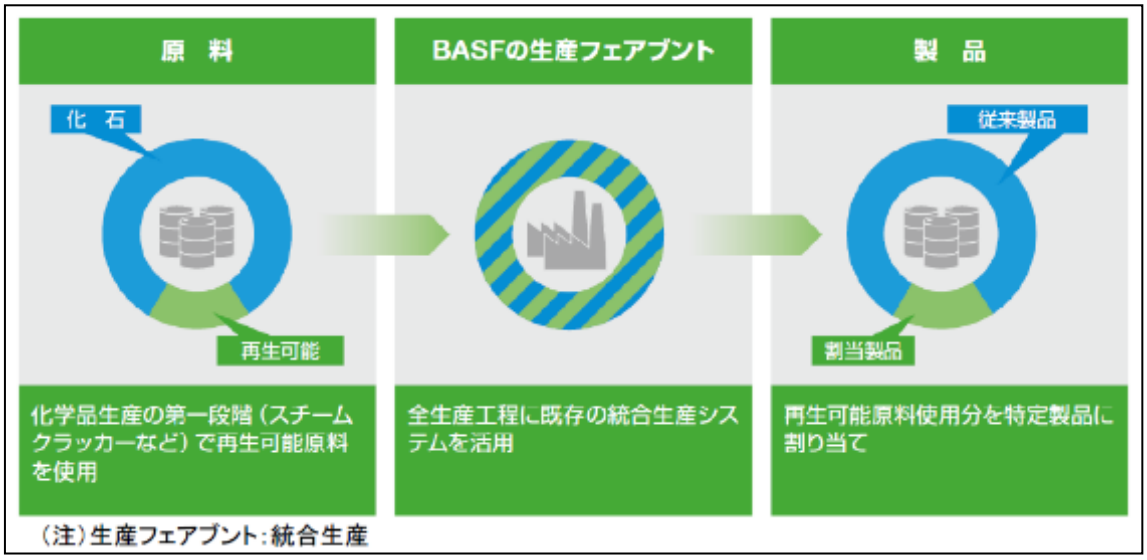


図２－５－２－３－５－１　　欧BASFのバイオマスバランス・アプローチ概念図[50]

なお、BASF はバイオマスバランス・アプローチのメリットとして、以下を挙げている。
①再生可能原料の使用を促進
②化石資源使用量を削減
③温室効果ガスの排出を低減
④独立機関による認証
⑤従来と変わらない製品品質および特性
⑥お客様へのレディーメイドのソリューション[51]

[50] 出所：バイオプラスチック導入ロードマップ検討会配付資料「バイオプラスチックを取り巻く国内外の状況」（2020 年 7 月 28 日、http://www.env.go.jp/recycle/plastic/bio/20200728_2.html）
[51] 出所：BASF ジャパン株式会社「BASF のバイオマスバランス・アプローチ」（https://www.basf.com/jp/ja/who-we-are/sustainability/key-topics/biomass-balance.html）

２－５－２－３－６　バイオマスバランス・アプローチ

2020 年～2021 年にかけて、化学業界においてマスバランス方式の採用事例が多数発表されている。

表 0-1　マスバランス方式の採用事例

	企業名	製造拠点	概要
1	LyondellBasell	オランダ	NESTE から供給される、廃食油等由来の炭化水素を原料としてバイオポリプロピレン（PP）および低密度ポリエチレン（LDPE）を製造。[52]
2	Borealis	ベルギー	2020 年 3 月に、バイオポリプロピレン（PP）の商業生産を開始し、欧州をはじめ世界へ拡販を進めている。原料となるバイオプロパンを製造するためのバイオプロパンは NESTE から供給されている。[53]
3	BASF SE	ドイツ	廃タイヤの熱分解を専門とするテクノロジー企業、Pyrum Innovations AG 社に 1,600 万ユーロを投資し、Pyrum がディリンゲンに持つ熱分解工場の拡張およびその技術のさらなる発展を支援する。 BASF は、「ChemCyclingTM」プロジェクトの一環として、その熱分解油の大半を入手し、マスバランス方式を用いて新しい化学品の製造に使用する。[54]
4	SABIC（サウジ基礎産業公社）	サウジアラビア	ドイツの化粧品大手バイヤスドルフ社が同社の美顔用クリーム「ニベア」の新たな「Naturally Good」シリーズの包装・容器で、国際持続可能性カーボン認証（ISCC）を取得した SABIC 製造の再生ポリプロピレン（PP）を採用。[55]
5	三井化学およびプライムポリマー	日本	2021 年度下期より、大阪工場のナフサクラッカーに投入するバイオマスナフサを原料とする誘導品・製品群を、認証制度（ISCC PLUS）に基づいたマスバランス方式によって割り当て、バイオマス化学品およびバイオマス樹脂の販売を開始。[56] ISCC PLUS 認証での展開可能な製品群として、三

[52] 出所：LyondellBasell ニュースリリース（2019 年 6 月 18 日、https://www.lyondellbasell.com/en/news-events/corporate--financial-news/lyondellbasell-and-neste-announce-commercial-scale-production-of-bio-based-plastic-from-renewable-materials/）
[53] 出所：NESTE ニュースリリース（2020 年 3 月 10 日、https://www.neste.com/releases-and-news/circular-economy/borealis-producing-certified-renewable-polypropylene-nestes-renewable-propane-own-facilities-belgium）
[54] 出所：BASF ジャパン・ニュースリリース（2020 年 9 月 29 日、https://www.basf.com/jp/ja/media/news-releases/global/2020/09/p-20-311.html）
[55] 出所：SABIC ニュースリリース（2021 年 4 月 29 日、https://www.sabic.com/en/news/29385-beiersdorf-selects-sabic-certified-renewable-pp-for-new-nivea-packaging）
[56] 出所：三井化学およびプライムポリマーのニュースリリース（2021 年 11 月 24 日、https://jp.mitsuichemicals.com/sites/default/files/media/document/2021/211124.pdf）

			井化学のエチレン、プロピレン、ベンゼン、フェノール、アセトン、エチレンオキサイド、尿素、プライムポリマーのポリプロピレンを挙げている。[57] なお、三井化学は、世界有数のバイオマス燃料の製造会社である Neste 社（フィンランド）および豊田通商と 2021 年 5 月にバイオマスナフサの調達に関する売買契約を締結。[58]
6	伊藤忠商事、 ファミリーマート、伊藤忠プラスチックス	日本	2021 年 6 月 8 日から、再生可能資源に紐付いたバイオマスポリプロピレン（バイオ PP）を利用した食品容器の活用を開始。パスタ容器の一部を、バイオ PP を使用した容器に変更し、関東地域から、スタートし、順次アイテムやエリアを拡大。[59]
7	日本触媒	ベルギー	ベルギー子会社 NIPPON SHOKUBAI EUROPE N.V.NSE 社は、バイオマス由来のプロピレンからアクリル酸を生産し、さらにそのアクリル酸を使ってバイオマス SAP[60]を生産することについて、ISCC より ISCC PLUS 認証を取得。今後、顧客の要望に応じてバイオマス SAP を供給する体制を、順次整えていく。[61]
8	LG Chemical	韓国	Neste から供給された廃食油由来のバイオマスナフサを原料として製造した SAP を製造し輸出した。同社は SAP、Polyolefin、ABS（Acrylonitrile Butadiene Styrene），PVC（polyvinyl chloride）を含む 9 つの化学品を 2021 年内に製造・供給する予定。[62]
9	三井物産	米国 テキサス州	都市廃棄ごみから出るバイオガス経由のバイオメタンを調達し、マスバランス（物質収支）方式を用いて現地合弁会社（※）でバイオメタノールを生産するスキームを構築。[63] ※三井物産と米セラニーズとの合弁フェアウェイ・メタノール（テキサス州）

２－５－２－３－７　マスバランス方式の認証機関

---

[57] 出所：三井化学およびプライムポリマーのニュースリリース（2021 年 11 月 24 日、https://jp.mitsuichemicals.com/sites/default/files/media/document/2021/211124.pdf）
[58] 三井化学大阪工場のエチレンプラント製造能力は 45 万 5 千トン/年
[59] 出所：伊藤忠商事ニュースリリース（2021 年 6 月 7 日、https://www.itochu.co.jp/ja/news/press/2021/210607.html）
[60] SAP（Super Absorbent Polymer、高吸水性ポリマー）紙おむつ等に使用される。
[61] 出所：日本触媒ニュースリリース（2021 年 7 月 8 日、https://www.shokubai.co.jp/ja/sp/news/news0484.html）
[62] 出所：LG Chem ニュースリリース（2021 年 8 月 4 日、https://www.lgcorp.com/media/release/23687）
[63] 出所：化学工業日報（2021 年 12 月 7 日、https://www.chemicaldaily.co.jp/%E4%B8%89%E4%BA%95%E7%89%A9%E7%94%A3%E3%80%81%E5%8C%97%E7%B1%B3%E3%81%A7%E3%83%90%E3%82%A4%E3%82%AA%E3%83%A1%E3%82%BF%E3%83%8E%E3%83%BC%E3%83%AB%E7%94%9F%E7%94%A3%E3%80%80%E6%AC%A7%E5%B7%9E%E3%81%AE/）

2009 年に EU において、RED（Renewable Energy Directive、再生可能エネルギー指令）と FQD（Fuel Quality Directive、燃料品質指令）が発令された。これを契機として、パーム油をはじめバイオマス燃料を中心に認証制度が制定されることとなった。バイオマスプラスチックはそれぞれに付随する位置づけとなっている。マスバランス方式に関する認証機関としては以下が挙げられるが、いずれの認証機関も欧州に所在する。

(1) ISCC System GmbH

設立：2006 年
対象：バイオ燃料
概要：International Sustainability and Carbon Certification（ISCC）は持続可能で森林破壊のない追跡可能なサプライチェーンを認証するシステムであり、独立した第三者機関による認証である。ISCC には、①ISCC EU、②ISCC PLUS という 2 つの認証システムがある。ISCC EU は RED と FQD に準拠したものである。ISCC PLUS は、すべての農林産原料、残渣、非バイオの再生可能ではあるがリサイクルされた炭素材料と燃料をカバーする。[64]

(2) REDcert GmbH

設立：2011 年
対象：バイオ燃料
概要：RED に基づき、バイオ燃料に対しての査証を発行すべく、2011 年に EU において先進的役割をとっていたドイツにより組織された。ドイツでの REDcert-DE、EU での REDcert-EU に加えて 2018 に物質目的でバイオマスを使用するケースにおいて REDcert²を制定。[65]

(3) RSB Advanced Products (Roundtable on Sustainable Biofuels)

設立：2007 年
対象：バイオ燃料
概要：同機関は、持続可能なバイオ燃料生産を保証するための社会・環境的に必要な要件の普及につとめる団体である。スイス連邦工科大学ローザンヌ校の呼びかけで組織された。原料生産者、バイオ燃料生産企業、輸送関連企業、NGO、政府機関等の組織がメンバーである。2009 年に「持続可能なバイオ燃料生産のためのグローバルな原則および基準（ver.1）」を発表。規格の内容を実施し、基準を満足するバイオ燃料事業者に認証書を交付している。[66]

---

64 出所：ISCC PLUS version 3.0（2018 年。ISCC System GmbH、https://www.iscc-system.org/wp-content/uploads/2017/02/ISCC-PLUS-System-Document.pdf）
65 出所：REDcert GmbH ホームページ（https://www.redcert.org/en/about-us.html）
66 出所：RSB ホームページ（https://rsb.org/）

２－５－２－３－８　マスバランス方式のメリットとデメリット

マスバランス方式のメリットとデメリットを列挙すると下記のとおりとなる。

(1) メリット

① 既存の石化プラント利用

バイオマス原材料の投入量または再生可能原材料の投入量を厳密に管理することにより、既存の石化プラントにおいて、石化由来原材料と混合して反応プロセスを進めることが可能である。

② 食品との競合回避

石化由来原材料と混合する原材料を、非可食由来バイオマス原材料に限定することにより、非可食由来バイオマスを一定量含有する製品とすることができる。したがって、バイオマス製品で問題視される食品との競合を回避できる。

(2) デメリット

① 物理的な含有量との乖離

バイオマス原材料の投入量または再生可能原材料の投入量を厳密に管理・計算し、トータルとして含有量が合致していることを条件に、複数の最終製品に含まれるバイオマス原材料または再生可能原材料の割合を任意に割り当てることができる。したがって、この任意数値と製品に含まれる実際の物理的含有量とには乖離が生まれる。すなわち、製品におけるバイオマス原材料または再生可能原材料の含有量が実態とはかけ離れたものになる可能性がある。

② 厳密なトレーサビリティの確保

バイオマス原材料の投入量または再生可能原材料の投入量を厳密に管理する必要があり、サプライチェーンの第一歩から最終製品の出来上がりまで、厳密なトレーサビリティを確保する必要がある。これは、メーカーにとって、多大な時間・労力・コストを要する作業となる。

２－５－２－３－９　認証方式を巡る今後の展開

上述のとおり、世界の主要化学メーカーを中心にしてマスバランス方式の普及が急速に進みつつある。今後は、現行のバイオマス度認定方式とマスバランス方式が併存する状況がしばらく継続することとなろう。ただし、量的な問題や大手化学メーカーが普及推進しようとしているという観点から、マスバランス方式が優勢になることも考えられる。

従来は、非可食原料から製造したエタノールを脱水してエチレンとし、これを重合してバイオポリエチレンとする工程が検討されてきた。しかし、マスバランス方式が優勢となってきた場合には、既存のエチレンプラントで得られる石油由来エチレンと非可食原料から得られるエチレンを混合して一定割合のバイオマスエチレンとし、これを重合して最終製品（バイオマスポリエチレン）を製造することも検討しておく必要があろう。

２－５－３　ポリ乳酸

２－５－３－１　ポリ乳酸市場

２－５－３－１ａ　世界市場

2021 年の世界全体での PLA 生産能力は約 46 万トンである。用途別の生産能力を図２－５－３－１ａ－１にしめすが、軟質包装材 45,000 トン（10%）、硬質包装材 184,000 トン（40%）、各種消費材 50,000 トン（11%）、繊維 46,000 トン（10%）、農業&園芸 20,000 トン（4%）、自動車&輸送車両 10,000 トン（2%）、建築材料 20,000 トン（4%）、電子機器 16,000 トン（3%）、その他 72,000 トン（16%）となっており、用途はバイオ PE と比べて多岐にわたっていることがわかる。

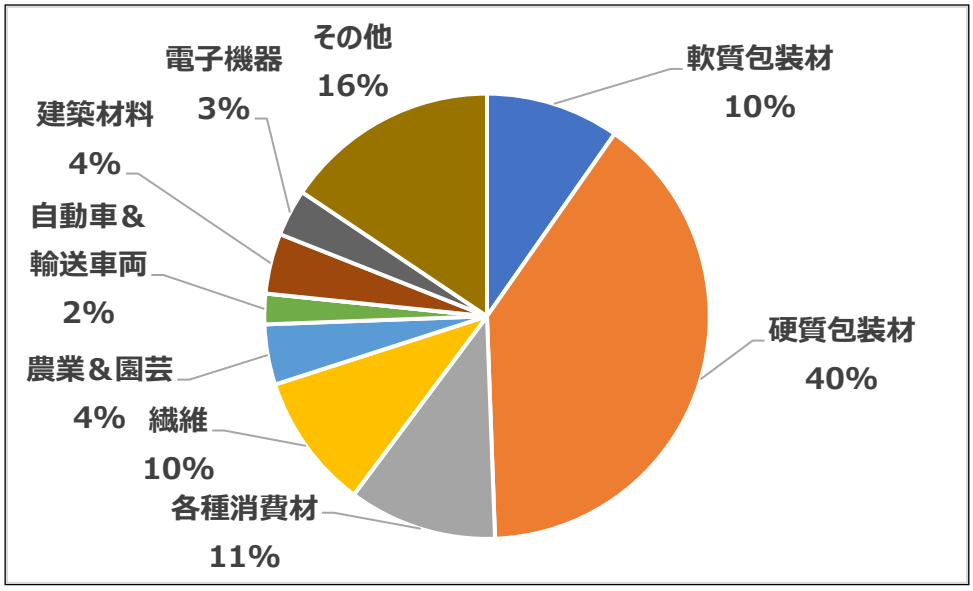


図２－５－３－１ａ－１　PLA・用途別の世界全体の生産能力（2021年。単位：1000トン）[67]

---

67 出所：Bioplastics market development update 2021（2021 年 11 月、European Bioplastics、https://docs.european-bioplastics.org/publications/market_data/2021/Report_Bioplastics_Market_Data_2021_short_version.pdf）

２－５－３－１ｂ　日本国内市場

日本においてPLAの国内メーカーはなく全量輸入されている。日本における国内市場、すなわち輸入量は、2020年で約6,000トン、2021年で約5,200トンである。（PLAのHSコード：3907.70）。2020の輸入量約6,000トンに対応する用途を図２－５－３－１ｂ－１に示す。①硬質包装材（食品トレー、弁当トレー、ボトル、ストロー、カトラリー類、ファストフード容器など）が約2,500トン（42%）、②軟質包装材（レジ袋、食品包装フィルム、ラベル）が約2,500トン（42%）で、この2用途で全用途の83%を占めていると推定される。これら以外の用途としては表２－５－３－１ｂ－２に示すように③各種消費財（文具、歯ブラシやカミソリの柄、各種カード、ハンガーティーバッグなど）、④繊維（不織布）、⑤農業&園芸（マルチフィルム、育苗ポット、ネットなど）が続くと推定される。

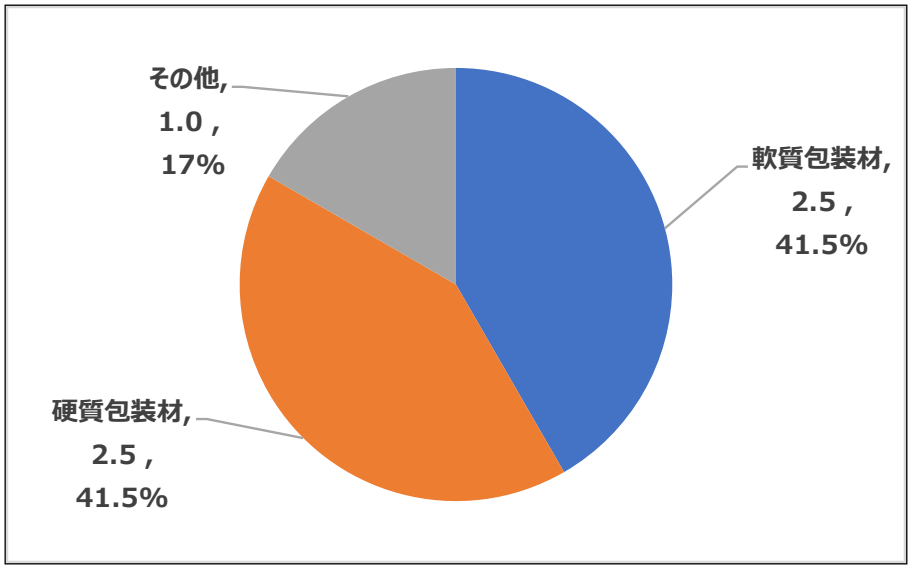


図２－５－３－１ｂ－１　2020年の日本のPLA需要推計（単位：1,000トン）[68]

表２－５－３－１ｂ－２　PLAの用途[69]

用途	用途例
軟質包装材	レジ袋、食品包装フィルム、ラベルなど
硬質包装材	食品トレー、弁当トレー、ストロー、カトラリー類、ファストフード容器、飲料ボトルなど
各種消費材	文具、歯ブラシやカミソリの柄、各種カード、ハンガー、ティーバッグなど
繊維	ユニホーム、Tシャツ、ジャケット、セーター、靴下、ネクタイ、タオル、カーペット、不織布、PTT（ソロナ）繊維など
農業＆園芸	マルチフィルム、育苗ポット、ネットなど
自動車＆輸送車両	冷却ファン、吸気管、ラジエータータンクなど
建築材料	人工芝、床材、防水材など
塗料＆接着剤	塗料、接着剤など
電子機器	PC製品・部品、ヘッドホン、スマートフォン筐体（きょうたい）など

68　出所：双日総合研究所推計
69　出所：Fact Sheet (European bioplastics、（https://docs.european-bioplastics.org/publications/fs/EUBP_FS_Packging.pdf）などから双日総合研究所作成）

貿易統計による輸入量、輸入金額、平均単価推移を表２－５－３－１ｂ－３、図２－５－３－１ｂ－４に示す。輸入量は、4,697 トン（2017 年）、4,926 トン（2018 年）、4,519 トン（2019 年）、5,976 トン（2020 年）、5,218 トン（2021 年）となっている。2020 年に 6,000 トン近くなったものの、2021 年は 5,218 トンまで下落している。

国別でみると、米国からの輸入は、4,644 トン（2017 年）、4,824 トン（2018 年）、3,779 トン（2019 年）、4,009 トン（2020 年）、4,055 トン（2021 年）と、約 4,000 トン前後レベルで推移している。輸入単価をみると、224 円/kg（2017 年）、235 円/kg（2018 年）、253 円/kg（2019 年）、288 円/kg（2020 年）、317 円/kg（2021 年）と上昇してきている。米国からの輸入は全量 NatureWorks 品と考えられる。

一方、タイからの輸入は、ゼロ（2017 年）、3 トン（2018 年）、467 トン（2019 年）、1,710 トン（2020 年）、900 トン（2021 年）と 2020 年に入り急激に増加したものの 2021 年が低減している。輸入単価をみると、238 円/kg（2018 年）、303 円/kg（2019 年）、398 円/kg（2020 年）、414 円/kg と急激に上昇してきている。米国からの輸入単価と比較すると、2021 年で約 100 円/kg 高くなっている。耐熱性グレードなど付加価値の高い商品が中心になっているのではないかと推測される。タイからの輸入は全量 Total Corbion 品と考えられる。

また、中国からの輸入は、53 トン（2017 年）、98 トン（2018 年）、272 トン（2019 年）、239 トン（2020 年）、190 トン（2021 年）と、近年は 200 トン前後で推移している。輸入単価をみると、239 円/kg（2017 年）、236 円/kg（2018 年）、247 円/kg（2019 年）、374 円/kg（2020 年）、391 円/kg（2021 年）と 2020 年に急激に増加している。中国国内需要が旺盛となり、供給タイト感がでてきて価格を上昇させたものと推測される。中国からの輸入は、浙江海正品および安徽豊原品かと推測される。

表２－５－３－１ｂ－３　PLA の輸入量、輸入金額（CIF[70]価格）、平均単価推移[71]

	2017			2018			2019			2020			2021		
	数量（トン）	金額（千円）	単価（円/kg）	数量（トン）	金額（千円）	単価（円/kg）	数量（トン）	金額（千円）	単価（円/kg）	数量（トン）	金額（千円）	単価（円/kg）	数量（トン）	金額（千円）	単価（円/kg）
米国	4,644	1,040,293	224	4,824	1,132,914	235	3,779	956,544	253	4,009	1,152,786	288	4,055	1,286,463	317
タイ	0	0	-	3	737	238	467	141,468	303	1,710	681,252	398	900	372,351	414
中国	53	12,572	239	98	23,160	236	272	67,204	247	239	89,365	374	190	74,353	391
その他	0	8,395	599,643	1	12,922	23,710	1	40,331	27,624	17	24,675	1,413	72	63,481	877
合計	4,697	1,061,260	226	4,926	1,169,733	237	4,519	1,205,547	267	5,976	1,948,078	326	5,218	1,796,648	344

70 CIF（Cost Insurance and Freight）：運賃・保険料込み価格

71 出所：財務省貿易統計・品別国別表（https://www.customs.go.jp/toukei/info/））なお、金額は CIF 価格（保険料・運賃込み価格）で輸入関税は含まれない。

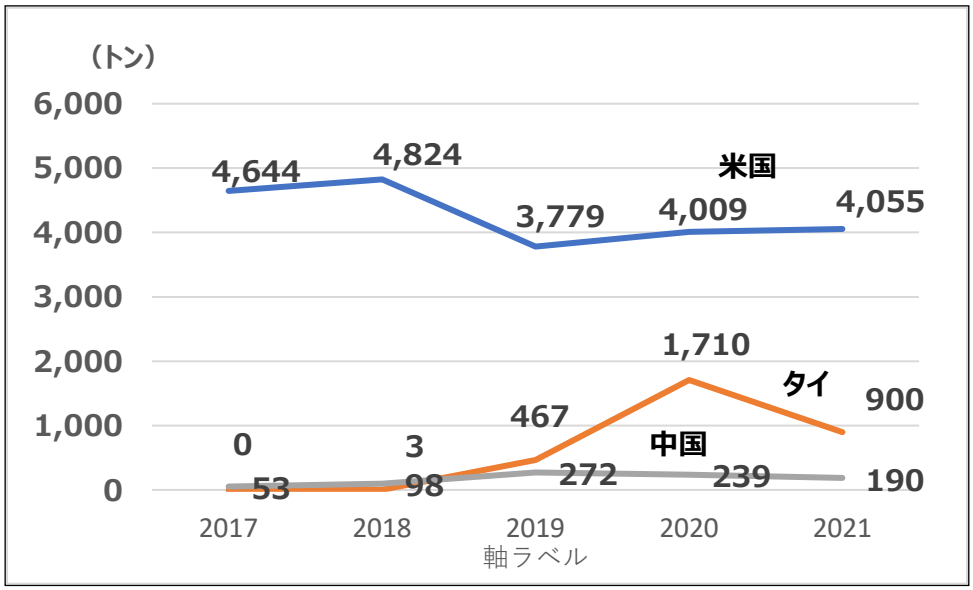


図２－５－３－１ｂ－４　日本のPLAの輸入量推移[72]

[72] 出所：財務省貿易統計・品別国別表（https://www.customs.go.jp/toukei/info/））

２－５－３－２　ポリ乳酸の新規用途（不織布）

PLA の用途としては、食品容器（弁当トレー含む）、ストロー・カトラリー類、軟包装フィルム、PLA 繊維、シェールガス採掘時の目止め材、文具などの用途がある。PLA 繊維の採用事例としては、自動車のフロアマット等があるが、まだまだ普及が浸透していない分野の一つである。PLA 繊維が代替する可能性のある分野としては不織布が挙げられる。ポリ乳酸の新規用途の候補として有望な不織布の最終用途別の国内・海外市場規模について調査を行った。

不織布とは、文字どおり「織らない布」で、繊維を織ったり編んだりせず、絡ませたり、融かしたり、接着するといった物理的・化学的な作用により繊維を結合させてつくられたものである。繊維に加工できる様々な素材を組み合わせることで自由に成形でき、また柔らかさや強度など目的・用途に応じて様々な機能を持たせることができるといった特徴がある。日本の繊維工業は、海外との競争の進展等もあり、国内生産の縮小が続いているが、そうした中でも、不織布は成長分野の一つとなっている。[73]

なお、不織布は JIS-L0222 において、「繊維シート、ウェブまたはパットで繊維が一方向またはランダムに配向しており、交絡、融着、接着によって繊維間が結合されたもの。ただし、紙、織物、編み物、タフト及び縮絨フェルトを除く」と定義されている。

２－５－３－２－１　用途別需要

２－５－３－２－１ａ　用途別需要（世界）

世界における不織布の用途別使用量を表２－５－３－２－１ａ－１に示す。2020 年（予測）数値でみると、医療・衛生材料が 40.3%、家具/生活用品/ワイパー（20.1%）の比率が大きい。一方、2014 年～2020 年の年平均増加率でみると、自動車が 8.2%/年と一番高く、医療・衛生材料の 6.6%/年がそれに続く。

表２－５－３－２－１ａ－１　不織布の用途別使用量の実績と予測（世界）[74]

（単位：千トン）

	2009	2014	2020（予測）	2020年の比率	2014年～2020年の年平均増加率
衣料	271	283	311	2.5%	1.6%
自動車	278	488	782	6.3%	8.2%
土木・建築	1,172	1,312	1,764	14.3%	5.1%
家具/生活用品/ワイパー	1,321	1,861	2,483	20.1%	4.9%
医療・衛生材料	2,323	3,408	4,987	40.3%	6.6%
フィルター・その他	1,055	1,509	2,037	16.5%	5.1%
合計	6,420	8,862	12,364	100.0%	5.7%

[73] 出所：不織布の生産動向（経済産業省ホームページ、2020 年 4 月 2 日、https://www.meti.go.jp/statistics/toppage/report/minikaisetsu/hitokoto_kako/20200402hitokoto.html）
[74] 出所：2021 不織布年鑑のデータを基に一部項目を統合した。

２－５－３－２－１ｂ　用途別需要（日本）

日本における不織布の用途別の需要統計は入手できなかったため、需要（＝生産量＋輸入量-輸出量）を各用途の生産量比率で按分計算することにより推計した。

(1) 用途別の生産量推移（日本）

不織布の用途は多岐にわたるが、経済産業省・生産動態統計において分類された表２－５－３－２－１ｂ－１にあるように、(1)衣料用、(2)産業用（①車両用、②その他産業用）、(3)土木・建築用、(4)農業・園芸用、(5)生活関連用、(6)医療・衛生用、(7)その他用と分類されている。

表２－５－３－２－１ｂ－１　不織布の用途別分類[75]

用途（大項目）	用途（中項目）	用途（小項目）
(1) 衣料用	① 衣料用芯地	紳士服、婦人服、子供服、作業衣、運動衣、帯、ファンデーション、帽子などに使われる芯地
	② 中入綿	ジャンパー、コート、ガウン、キルティングウェアなどに使われるもの
	③ その他	保護衣、防塵衣、販促用ジャンパーなど
(2) 産業用	① 車両用	自動車内装材（カーマット基布、シート補強材、天井補強材、ドアトリム裏材、インシュレーター・フード裏材など）
	② その他の産業用	フィルター(集塵、液体、気体用フィルターなど）、電池セパレーター、電線押巻、リントフリーワイパー、各種ワイピング材、レザー基布、テープ基材、研磨材、油吸着材など
(3) 土木・建築用		アスファルトオーバーレイ、土壌安定材、濾過用資材、浸食防止材、流砂防止材、補強材、植生マット、コンクリート養生シート、人工芝、ルーフィング、ハウスラップ、床材、壁材、遮音材など
(4) 農業・園芸用		遮熱材、風よけ材、日除け材、結実保護材、育苗材、播種基材、被覆材など
(5) 生活関連用	① 包装材・袋物	食品包装材、ショッピング袋、封筒、ティーバッグなど
	② 台所・洗濯・トイレタリー用品	ふきん・タオル・おしぼり・ワイピングクロスなどのクロス類、エプロン、水回りマット・アイロン用マットなどのマット類、たわしなど
(6) 医療・衛生用	① 医療資材	病院用使い捨て用品（マスク、ガウン、シーツ、包帯、ガーゼ、サージカルテープ、白衣、手術用衣、手袋など）、湿布薬基布、粘着テープなど
	② 衛生用品	生理用品、使い捨ておむつ、失禁者用パットなど
(7) その他用（上記①～⑥の需要部門以外の用途向けに生産されたもの）	① 寝装寝具用	毛布、シーツ、ベッドカバー、マクラカバー、ふとん、座ぶとんなど
	② インテリア用	カーペット、カーテン、壁紙、ブラインド、クッション、造花など
	③ 家具緩衝材、音響器材、靴材などの用途向けのもの	

[75] 出所：タフテッドカーペット・フェルト・不織布月報記入要領（2020 年 1 月、経済産業省大臣官房調査統計グループ・鉱工業動態統計室、https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/seidou/gaiyo/chosahyo/2020kinyuyoryo/2_3felt-fusyokufu.pdf）

2020 年の日本国内生産量は 301,566 トン/年であるが、これを用途別にまとめた結果を図２－５－３－２－１ｂ－２に示す。生活関連用（①包装材・袋物、②台所・洗濯・トイレタリー用品）28.4%、医療・衛生用（①医療資材（マスク・ガウン・シーツ・包帯・ガーゼ等）、②生理用品、使い捨ておむつ等））26.3%、産業用（その他産業用）（フィルター、電池セパレーター、レーザー基布、テープ基材等）19.8%、産業用（車両用）（自動車内装材等）14.2%の順となっている。

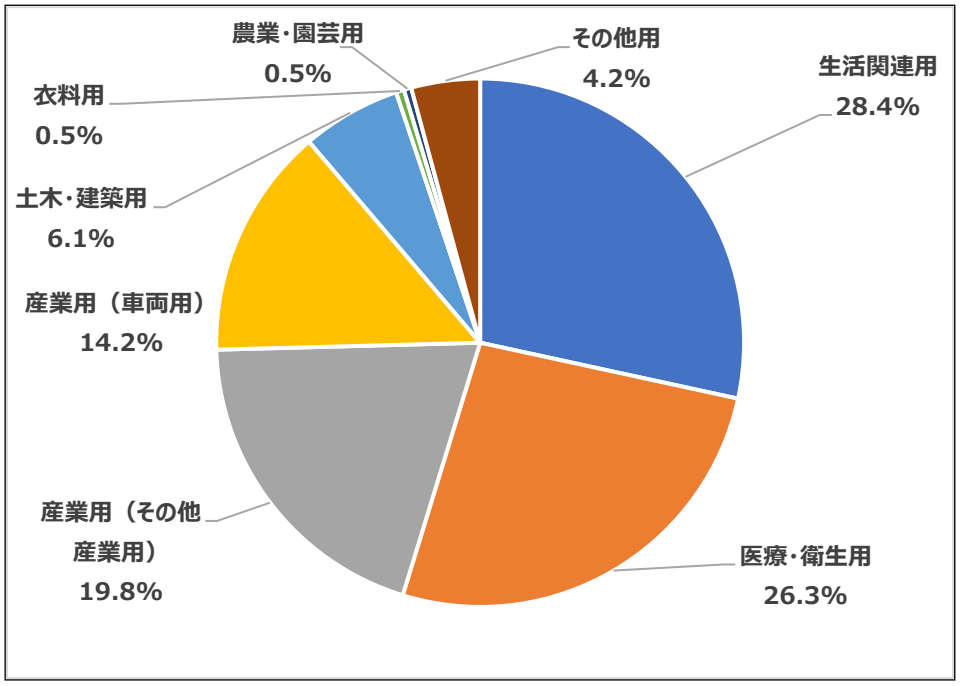


図２－５－３－２－１ｂ－２　不織布の用途別生産量の割合（日本国内、2020年）[76]

76 出所：経済産業省生産動態統計
（https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/seidou/result/ichiran/08_seidou.html）

不織布の用途別生産量推移を表２－５－３－２－１ｂ－３、図２－５－３－２－１ｂ－４に示す。2018 年までは用途別生産量でトップであった、医療・衛生用が、2019 年および 2020 年には第 2 位に落ちている。マスク等の医療用資材の国内生産量が、2020 年初頭から始まるコロナ禍以前から、下落傾向であったことが読み取れる。これは、中国を始めとした海外からの輸入依存度が上昇していたことを示すものである。包装材・袋物や台所・洗濯・トイレタリー用品等の生活関連用については、ほぼ横ばいで推移しており、2020 年のコロナ禍の影響も小さい。それ以外の、産業用（車両用）、産業用（その他産業用）、土木・建築用、農業・園芸用については、2020 年のコロナ禍の影響を受けて下落している。

表２－５－３－２－１ｂ－３　不織布の用途別・国内生産量推移[77]

（トン）

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2020年の用途別比率	2013～2018年年平均増加率	2018年～2020年年平均増加率
衣料用	2,888	2,527	1,934	1,671	1,596	1,619	1,494	1,495	0.5%	-10.9%	-3.9%
産業用（車両用）	49,416	51,344	51,756	51,732	52,780	52,238	49,325	42,805	14.2%	1.1%	-9.5%
産業用（その他産業用）	59,539	59,526	61,203	63,589	64,188	66,595	66,739	59,831	19.8%	2.3%	-5.2%
土木･建築用	23,666	25,233	21,994	21,184	21,611	21,007	21,170	18,304	6.1%	-2.4%	-6.7%
農業･園芸用	2,531	2,571	2,165	2,017	1,949	2,016	1,837	1,366	0.5%	-4.4%	-17.7%
生活関連用	74,408	81,745	82,845	83,033	87,069	86,505	85,195	85,639	28.4%	3.1%	-0.5%
医療･衛生用	104,319	102,473	107,233	102,786	98,798	93,487	77,534	79,433	26.3%	-2.2%	-7.8%
その他用	15,274	12,187	12,398	13,737	15,022	17,285	17,146	12,693	4.2%	2.5%	-14.3%
合計	332,041	337,606	341,528	339,749	343,013	340,752	320,440	301,566	100.0%	0.5%	-5.9%

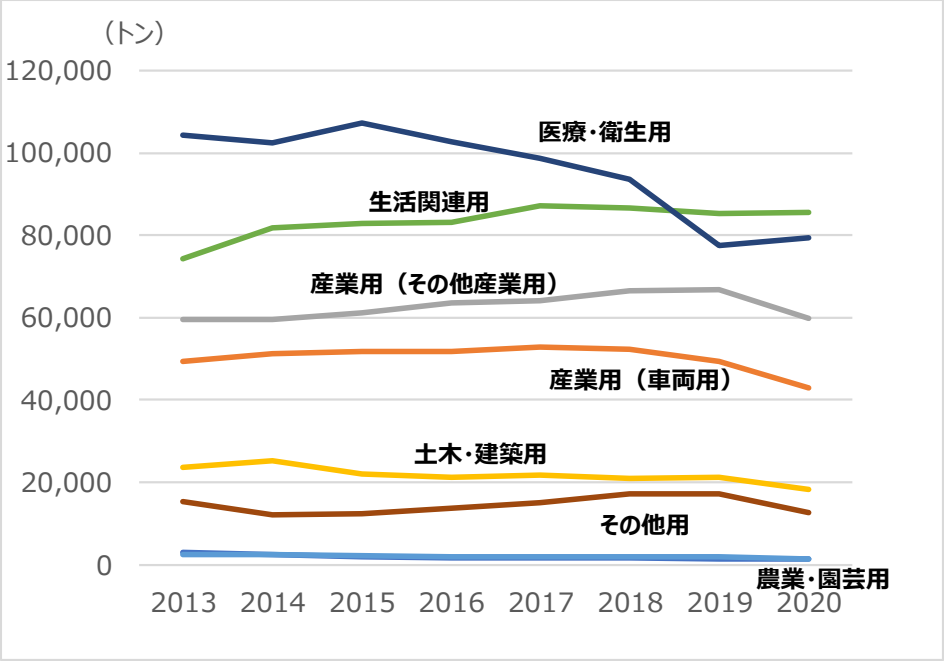


図２－５－３－２－１ｂ－４　不織布の用途別・国内生産量推移

77 出所：経済産業省生産動態統計
（https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/seidou/result/ichiran/08_seidou.html）

(2) 輸出入量推移

不織布の生産量、輸入量、輸出量とこれらから想定される国内需要量の推移を表２－５－３－２－１ｂ－５、図２－５－３－２－１ｂ－６に示す。国内生産量は、2017 年に 343,013 トンと過去最高であったが、2018 年 340,751 トン、2019 年 320,439 トン、2020 年 301,566 トンと漸減してきている。一方、輸入量については、2013 年の 142,784 トンから 2020 年は 269,189 トンと約 1.9 倍まで増加してきている。2013 年の 53,344 トンから 2020 年の 62,140 トンまで少量ずつではあるが漸増してきている。

国内需要と推定される生産量と輸入量の和から輸出量を差し引いた量については、2013 年 421,481 トンから 2018 年 530,887 トンまで、年率平均 4.7%で増大してきていたが、2019 年および 2020 年は、2019 年 512,500 トン、2020 年 508,614 トンと前年比で各々3.5%減、1.0%減となっている。

2019 年の減少は、2019 年 10 月から施行された消費税の増税（8%から 10%へ）によって、2019 年 10 月～12 月の消費が前年比で下落したことによるものと推測される。また、2020 年の減少は、COVID-19 による消費の下落によるものと推測される。

表２－５－３－２－１ｂ－５　不織布の生産量、輸入量、輸出量および国内需要推移[78]

（トン）

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	CAGR (2013-2018)	CAGR (2013-2020)
生産量	332,041	337,606	341,528	339,749	343,013	340,752	320,440	301,566	0.5%	-1.4%
輸入量	142,784	162,971	189,753	211,197	240,514	250,438	252,583	269,189	11.9%	9.5%
輸出量	53,344	56,356	51,252	52,006	54,986	60,303	60,523	62,140	2.5%	2.2%
生産量＋輸入量-輸出量	421,481	444,221	480,029	498,940	528,541	530,887	512,500	508,614	4.7%	2.7%

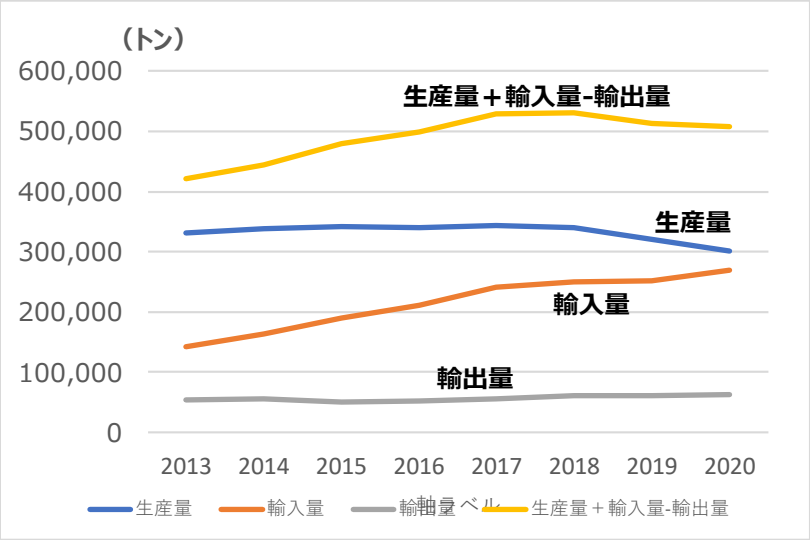


図２－５－３－２－１ｂ－６　不織布の生産量、輸入量、輸出量および国内需要推移[79]

78 出所：経済産業省生産動態統計
（https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/seidou/result/ichiran/08_seidou.html）
79 出所：経済産業省生産動態統計
（https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/seidou/result/ichiran/08_seidou.html）

(3) 用途別の需要

日本における不織布の用途別の需要統計は入手できなかったため、需要（＝生産量＋輸入量-輸出量）を生産量の比率で按分計算することにより推計した結果を表２－５－３－２－１ｂ－７に示す。生活関連用、医療衛生用で多くを消費されている。

表２－５－３－２－１ｂ－７　不織布の用途別・国内需要（2020 年、推計）

	2020年の国内生産量（トン）	2020年の用途別生産量比率	2020年の国内需要（推計）（トン）
衣料用	1,495	0.5%	2,521
産業用（車両用）	42,805	14.2%	72,194
産業用（その他産業用）	59,831	19.8%	100,910
土木･建築用	18,304	6.1%	30,871
農業･園芸用	1,366	0.5%	2,304
生活関連用	85,639	28.4%	144,437
医療･衛生用	79,433	26.3%	133,970
その他用	12,693	4.2%	21,408
合計	301,566	100.0%	508,614

２－５－３－２－２不織布代替として期待される用途分野

世界的な環境意識の高まりにより、CO2 排出量削減および海洋汚染の低減の観点から、不織布分野においても、今後、バイオマス繊維であり、かつ生分解性繊維であるポリ乳酸への置き換えが徐々に浸透していくものと推測される。しかしながら、前述のとおり、不織布の用途は多岐にわたるため、特にどの分野において置き換えが進むかは正確には予測しづらい。

ただし、2013 年～2018 年の国内生産量の推移をみると、生活関連用が CAGR3.1%/年で増加しており、今後も国内生産の増加が期待される分野と考えられ、その一部は素材としてポリ乳酸繊維への置き換えが進むのではないかと推測される。

生活関連用の不織布というのは、分類によると、
① 包装材・袋物　　食品包装材、ショッピング袋、封筒、ティーバッグなど、
② 台所・洗濯・トイレタリー用品　ふきん・タオル・おしぼり・ワイピングクロスなどのクロス類、エプロン、水回りマット・アイロン用マットなどのマット類、たわしなど
である。

また、中国をはじめとした海外からの輸入への依存度上昇から、2013 年～2018 年の国内生産が CAGR-2.2%/年とマイナスとなっていた、医療・衛生用の不織布であるが、2020 年には、79,433 トン/年と前年比 2.4%の増加となっている。これは、2019 年末～2020 年初頭の COVID-19 の発生に伴い、医療用品・衛生用品の国内生産量の確保および生産拠点の国内回帰が重要政策として打ち出され、補助金制度も示されたことにより、複数の企業がマスクやガウン等の医療用品・衛生用品の生産を開始したことによるものである。

COVID-19 の拡大を受けて、国内外で使い捨て不織布マスクの需要が増加した。国内需要は、2019 年の 64 億 5500 万枚から、2020 年には 129 億 9000 万枚と倍増した。コロナは変異しながら断続的に流行を繰り返しており、今後も国内のマスク需要は漸増していくと予測される。

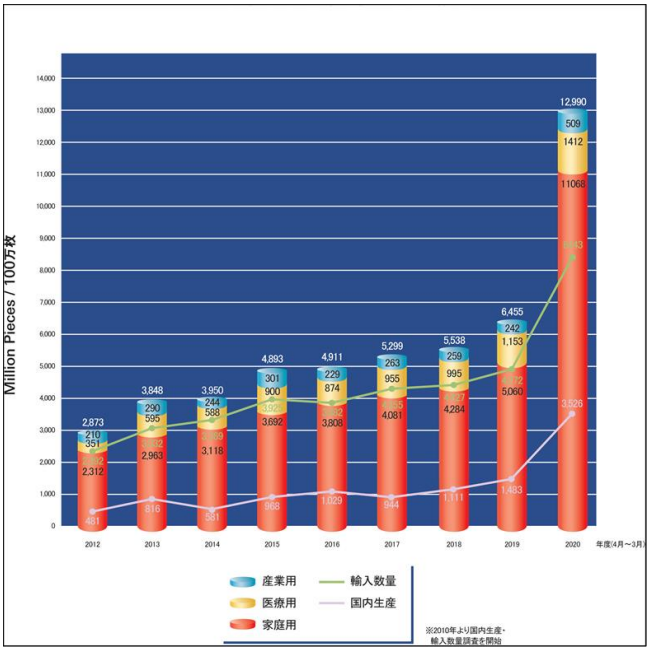


図２－５－３－２－２－１　日本のマスク需要（国内生産・輸入）推移[80]

80 出所：一般社団法人 日本衛生材料工業連合会ホームページ（https://www.jhpia.or.jp/data/data7.html）

一方、この国内外における使い捨て不織布マスクの需要増大に伴い、不織布マスクの川への投棄から海洋汚染に繋がるとして、生分解性の不織布マスクへの期待が高まり、ポリ乳酸繊維をポリプロピレン繊維（PP 繊維）あるいはポリエステル繊維（PET 繊維）の代替として生分解性不織布マスクを製造するメーカーが複数でてきている。

不織布マスクの重量は、1 枚＝約 4g/枚である。仮に不織布部分を 3g/枚と仮定すると、日本におけるマスク需要に占める樹脂量は、2019 年 19,365 トン/年、2020 年 38,970 トン/年となる。

このうち何%がポリ乳酸繊維に置き換えられているという統計的資料はなく、今後の予測も難しいが、2020 年の需要が横ばいで継続すると仮定し、さらに、そのうちの 10%がポリ乳酸繊維に置き換わると仮定すれば、ポリ乳酸繊維の需要は 3,897 トン/年と計算される。

不織布繊維を上市している大手メーカーとしては、ユニチカと旭化成が挙げられる。ユニチカは、1998 年 10 月、カーギル・ダウ・ポリマーズ社からポリ乳酸の供給を受け、自然循環型のバイオマスプラスチック「テラマック」を開発した。テラマックとは、ポリ乳酸（PLA）をユニチカ独自の技術で改質・成形した樹脂、繊維、不織布などのプラスチック製品群である。[81] テラマック不織布は、優れた均一性、柔軟性、高強度、寸法安定性を備えた長繊維不織布で、自然環境下での使用や土中への埋設、コンポスト化といった使用法に応え、農園芸資材、土木資材関連を中心に展開されている。具体的な用途としては、フローリングワックスシート、グランドカバープランツシート[82]、防草シート、ヘッドレスカバー、軟弱地盤安定材[83]が挙げられている。[84]

また、旭化成は、2019 年、植物由来の PLA を主原料とする不織布「ECORISE™」を開発・上市した。優れた生分解性と産業コンポスト条件下での堆肥化が可能なスパンボンド不織布で、ASTM（米国試験材料協会）が定める基準を満たし、米国 Biodegradable Plastic Institute の発行するコンポスト認証を取得している。また日本においては日本バイオプラスチック協会が定める基準を満たし、「グリーンプラ」および「バイオマスプラ」の認証を取得している。[85]　主に生分解性が求められる使い捨て用途にて高い適性を発揮するとしており、食品関連ではティーバッグ、コーヒー立体フィルター、食品包装材料、農業・産業資材関連では植生ポット、乾燥剤包材、使い捨てマスク、ワイパーが挙げられている。[86]

２－５－３－２－３　リサイクルについて

PLA は生分解樹脂であり、ワンウェイ用途が主なターゲット用途であり、本実証においても不織布といったワンウェイ用途での普及可能性について主に調査を行ってきていた。一方で、近年のプラスチックのリサイクル機運の高まりから、Natureworks 社や TotalCorbion 社といった大手ＰＬＡメーカーも直近の業界セミナーなどにおいて PLA がケミカルまたはマテリアルリサイクル可能であることを強調している。リサイクルの普及には PLA 単体での回収/分離が一番の課題となるが、ＰＬＡ単体の分離・回収を前提とできる用途ではＰＬＡのリサイクル利用も進む可能性があると考えられる。

---

81 出所：ユニチカホームページ（https://www.unitika.co.jp/terramac/what/）
82 グランドカバープランツシート：地表を覆うように生育する植物の下に敷くシート
83 **軟弱地盤安定材：埋立地、宅地などさまざまな軟弱地盤を改良する際に使用**
84 出所：ユニチカホームページ（https://www.unitika.co.jp/terramac/products/nonwoven/）
85 出所：旭化成ホームページ（https://www.asahi-kasei.co.jp/fibers/ecorise/）
86 出所：旭化成ホームページ（https://www.asahi-kasei.co.jp/fibers/ecorise/）

２－５－４　乳酸および乳酸エステル

PLA 製造・販売事業において、製造工程における PLA の一歩手前の段階、すなわち、乳酸あるいは乳酸から製造可能な乳酸エステルを商品として外販することも、事業の採算性を検討するうえで、一つの選択肢となる。乳酸および乳酸エステルの世界市場につき以下に纏めた。

２－５－４－１生産

世界における乳酸の生産能力は約 70 万トン/年と推計される。主な乳酸メーカーを表２－５－４－１－１に示す

世界の主要な乳酸メーカーの中で最大の生産能力を有するのは Corbion Purac 社で、タイの能力 14 万トン/年のプラントをはじめとして、オランダ、スペイン、米国、ブラジルも合わせて世界全体で 24 万トン/年の能力を有する。

2 番目は Cargill 社で米国において能力 18 万トン/年のプラントを有する。3 番目は中国の Jindan 社で能力 10 万トン/年のプラントを有する。

Galactic 社はベルギーに能力 1.8 万トン/年のプラントを有するほか、中国・安徽省においては COFCO Biochemical（旧 BBCA Biochemical）との合弁会社 B&G 社が能力 8 万トン/年のプラントを有する。日本メーカーでは、武蔵野化学研究所が、日本と中国の合弁会社を合わせて能力 1 万トン/年のプラントを有する。

なお、2021 年 1 月 21 日、Corbion は Blair（ネブラスカ州）プラントの乳酸生産能力を 40%増強すると発表した。時期については発表していない。同社によると、米国において過去 5 年間、乳酸の食品添加物用途、飲料防腐剤用途、消毒・衛生用途、化粧品用途の需要が拡大しているとしている。一方、タイにおいて、同社は新技術を導入して、石膏（硫酸カルシウム）フリーの乳酸を製造するプラントを建設中である。[87]　現行の工程では、乳酸の製造工程で中和剤として石膏が使用されていると推測される。

表２－５－４－１－１　世界の主要な乳酸メーカー[88]

主な乳酸メーカー	プラント所在国	能力 （千トン）
Corbion Purac	オランダ、スペイン、 米国、ブラジル、タイ	240
Cargill （NatureWorksのPLA向け）	米国	180
Jindan	中国	100
BBCA & Galactic	中国	80
Xinghan	中国	30
Baisheng	中国	20
Galactic	ベルギー	18
Musashino（(株)武蔵野化学研究所）	日本、中国	10
ADM	米国	10
Huakang	中国	10
Golden Corn	中国	4
その他（Tongbang, Youchengなど）	中国	N.A.
合計		702

87 出所：Corbion 社ホームページ（https://www.corbion.com/media/press-releases?newsId=2443404）
88 出所：「The development and challenges of poly (lactic acid) and poly (glycolic acid)」（Advanced

２－５－４－２　用途別需要（世界）[89]

乳酸の用途は多岐にわたるが、その需要は生産量と同等レベルの約 70 万トン/年と推計される。各種資料から 2019 年における用途別の乳酸需要を推計した結果を表２－５－４－２－１に示す。

表２－５－４－２－１　世界の乳酸需要推計（2019 年）[90]

用途	数量（千トン）	比率
PLA原料向け	245	35%
食品･飲料向け	175	25%
パーソナルケア向け	140	20%
医薬向け	70	10%
その他	70	10%
合計	700	100%

PLA 原料向けが近年大幅に伸びたことにより、食品・飲料向けを上回り約 35%のシェアとなっている。食料・飲料向けの約 25%シェアに次いで、パーソナルケア向けが約 20%と推計される。

２－５－４－２ａ　PLA 原料向け

PLA が植物由来プラスチックかつ生分解性プラスチックであることから、食品包装、食品容器、ゴミ袋などを中心に需要が伸びてきている。特に、欧州において、包装用フィルム、レジ袋、カトラリー類などでの需要が増大してきている。

２－５－４－２ｂ　食品・飲料向け

乳酸は有害菌の増殖を抑え品質保持期間を延長することができることから、各種食品の防腐剤、調味料、pH 調整剤として利用される。また、弱酸性のため、漬物、パン、サラダ、飲料の酸味料としても利用されている。乳製品の酸性化剤、チョコレートや菓子の pH 調整剤としても利用されている。乳酸塩（乳酸ナトリウムあるいは乳酸カリウム）は、肉・鶏・魚の品質保持剤として利用されている。

２－５－４－２ｃ　パーソナルケア向け

スキンケアや化粧品分野において、保湿剤、抗ニキビ剤、抗歯石剤、pH 調整剤、美白剤、肌の若返り剤。皮膚の光沢剤、しみ除去補助剤として利用されている。また、コラーゲン産生促進作用があるので、肌のしわを防止し、引き締まった肌を保つことから、アンチエージング剤としても利用されている。

Industrial and Engineering Polymer Research、Volume 3, Issue 2, April 2020、 Pages 60-70、https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542504820300026）

89 乳酸の用途については、Industrial production of lactic acid and its applications（International Journal of Biotech Research、Dec 2018、https://www.researchgate.net/publication/330292057_Industrial_production_of_lactic_acid_and_its_applications）を参考とした。

90 出所：双日総合研究所推計

２－５－４－２ｄ　医薬向け

医薬分野では、非経口静脈内溶液における電解質として利用され、体内の液体を補完する。また、pH 調整剤、不斉中間体、金属イオン封鎖剤としても利用されている。また、無機質製剤、錠剤、人工器官、ドラッグデリバリーシステムのコントロール、外科用縫合糸、人工透析液の調整、口内衛生品にも利用されている。乳酸塩は抗腫瘍機能があるので、乳酸カルシウム、乳酸鉄、乳酸ナトリウムなどの乳酸塩は医薬品製造に利用されている。

２－５－４－２ｅ　その他

その他、化学産業においては、中和剤、洗浄剤、湯垢除去剤、pH 調整剤、抗菌剤として利用される。高い溶解力により樹脂剥離剤としても利用される。また、カルボキシル基（-COOH）とヒドロキシル基（-OH）を有するため、有益な化学品を得るための各種化学反応に利用されている。

２－５－４－３　用途別需要（日本）

日本における、乳酸の生産量は約 1 万トンと推定される。輸入品は 2021 年で 22,212 トン（塩、エステル含む）あり、タイ 9,679 トン/年、中国 7,670 トン/年、オランダ 3,429 トン/年、その他 1,435 トン/年となっている。一方、輸出は 2021 年で、乳酸は 1,016 トンであり、マレーシア、米国、オランダ、タイなどに輸出されている。乳酸塩・乳酸エステルは 2,265 トン/年であり、韓国（約 59%）および台湾（約 26%）向けが多い。

財務省の輸入通関統計では、乳酸関連は HS コード 6 桁までのデータしか示されていないため、乳酸と乳酸塩・乳酸エステルの数値は合算されており、分割不可能であった。一方、輸出通関統計では、乳酸関連は HS コード 9 桁までのデータが示されており、乳酸と乳酸塩・乳酸エステルの数値は個別に取得可能であった。

仮に、2021 年の輸入品 22,212 トンのうち、約 1.1 万トンが乳酸、残り約 1.1 万トンが乳酸塩・乳酸エステルと仮定すると、乳酸の日本国内需要は、約 2 万トンと推計される。（生産量約 1 万トン＋輸入量約 1.1 万トン－輸出量約 1,000 トン）

乳酸塩・乳酸エステルの日本国内生産量のデータは入手できなかったが、仮に約 5000 トン/年と仮定すると、乳酸塩・乳酸エステルの日本国内需要は約 1 万 4000 トン/年と推計される。（生産量約 5,000 トン/年＋輸入量約 1.1 万トン－輸出量 2,297 トン）

表２－５－４－３－１　日本における乳酸および乳酸塩・乳酸エステル輸入数量推移[91]

HSコード：2918.11	2017			2018			2019			2020			2021		
	数量（トン）	金額（百万円）	単価（円/kg）	数量（トン）	金額（百万円）	単価（円/kg）	数量（トン）	金額（百万円）	単価（円/kg）	数量（トン）	金額（百万円）	単価（円/kg）	数量（トン）	金額（百万円）	単価（円/kg）
タイ	8,798	1,335	152	9,752	1,424	146	9,318	1,414	152	8,861	1,414	160	9,679	1,458	151
中国	7,518	1,298	173	7,718	1,350	175	4,343	864	199	5,893	1,107	188	7,670	1,552	202
オランダ	3,785	1,131	299	3,937	1,175	298	4,182	1,212	290	4,040	1,202	298	3,429	1,031	301
その他	1,087	354	325	1,062	326	307	1,205	289	239	1,509	360	239	1,435	372	259
合計	21,189	4,119	194	22,469	4,275	190	19,048	3,778	198	20,302	4,083	201	22,212	4,413	199

91 出所：財務省貿易統計（https://www.customs.go.jp/toukei/info/）

表２－５－４－３－２　日本における乳酸および乳酸塩・乳酸エステル輸出数量推移[92]

HSコード	2017			2018			2019			2020			2021		
	数量（トン）	金額（百万円）	単価（円/kg）	数量（トン）	金額（百万円）	単価（円/kg）	数量（トン）	金額（百万円）	単価（円/kg）	数量（トン）	金額（百万円）	単価（円/kg）	数量（トン）	金額（百万円）	単価（円/kg）
2918.11-100（乳酸）	839	382	456	728	330	453	678	306	451	777	370	476	1,016	452	445
2918.11-900（乳酸の塩およ	2,711	1,010	373	1,333	607	455	1,339	594	444	1,943	767	395	2,265	899	397
合計	3,550	1,392	392	2,062	937	454	2,018	901	446	2,721	1,137	418	3,281	1,351	412

日本における乳酸の需要についても充分なデータを入手できなかったが、現時点で乳酸重合メーカーが存在しないことから、世界の用途需要から PLA 原料向けを除いて 2021 年の乳酸需要約 2 万トンを按分計算した結果を表２－５－４－３－３に示す。食品・飲料向けおよびパーソナルケア向けが多くを占めていることが判明した。

表２－５－４－３－３　日本の乳酸需要推計（2021 年）

用途	数量（千トン）	比率
PLA原料向け	0	0%
食品･飲料向け	8	38%
パーソナルケア向け	6	31%
医薬向け	3	15%
その他	3	15%
合計	20	100%

２－５－４－４　2030 年の需要予測

世界的な環境意識の高まりから、世界の乳酸需要は PLA 原料用途が牽引する形で大幅な増加を見せている。2019 年には需給がタイトとなった。2020 年 6 月の化学工業日報の取材に対し、仏トタルと乳酸大手の蘭コービオンの合弁会社トタル・コービオン PLA のシニア・マーケティング・ディレクターは、「PLA 市場は新型コロナの影響がみられず、10～20%のペースで成長している」と回答している[93]。

PLA 原料用途の成長に加え、フォトレジスト用溶剤、印刷インキ、各種樹脂塗料などに使用される溶剤についても、バイオソルベント（バイオ溶剤）を使用しようとする動きがでてきている。この流れを背景に、乳酸エチルをはじめとする乳酸エステル類も採用候補として注目されている化学品である。欧州、米州、日本などにおいてはこの工業分野の成長も期待される。

また、食品・飲料向けについては、中国、インドをはじめとする新興国において、加工食品の技術向上と人口の大幅増加により、乳酸および乳酸ナトリウム/乳酸カリウムなど食品工業向けの需要が増大していくことが予測される。

上記の状況を勘案して、下記前提のもとに 2030 年の需要を予測した。

【前提】

92 出所：財務省貿易統計（https://www.customs.go.jp/toukei/info/）
93 出所：化学工業日報（2020 年 6 月 23 日、https://www.chemicaldaily.co.jp/%EF%BD%90%EF%BD%8C%EF%BD%81%E3%80%81%E3%82%B3%E3%83%AD%E3%83%8A%E4%B8%8B%E3%82%82%E9%AB%98%E6%88%90%E9%95%B7/）

①世界全体の GDP 成長率
2020～2205 年は IMF 予測[94]、2026～2030 年は 2025 年の IMF 予測の据え置きとした。
②乳酸の需要
PLA 原料向けは環境プレミアム要素が加味され、予測 GDP 成長率＋2%、それ以外向けは予測 GDP 成長率で増加する。

需要予測結果を表２－５－４－４－１に示す。世界においては、PLA 需要が 2019 年の約 25 万トンから 2030 年には約 42 万トンまで増加し、食品・飲料向けが 2019 年の 18 万トンから約 24 万トンまで増加すると予測される。全用途でみると、乳酸需要は 2019 年の 70 万トンから 2030 年には約 106 万トンにまで達すると予測される。

一方、日本においては、現時点で乳酸重合メーカーが存在しないことから、新規 PLA メーカーが設立されない場合、PLA 原料向けの乳酸需要は期待できないが、食品・飲料向け等が増加することにより、乳酸需要は 2021 年の約 2 万トントンから 2030 年には約 3 万トンになると予測される。

表２－５－４－４－１　世界および日本における乳酸の需要予測

（千トン）

	用途	前提	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
予測GDP成長率（%）			2.764	-3.27	6.026	4.415	3.513	3.374	3.335	3.335	3.335	3.335	3.335	3.335
世界														
	PLA原料向け	GDP成長率＋2% で増加	245	242	261	278	293	309	326	343	361	381	401	422
	食品･飲料向け	GDP成長率で増加	175	169	179	187	194	201	207	214	221	229	236	244
	パーソナルケア向け	GDP成長率で増加	140	135	144	150	155	160	166	171	177	183	189	195
	医薬向け	GDP成長率で増加	70	68	72	75	78	80	83	86	89	91	95	98
	その他	GDP成長率で増加	70	68	72	75	78	80	83	86	89	91	95	98
	合計		700	682	728	765	798	831	864	900	937	975	1,015	1,057
日本														
	PLA原料向け	GDP成長率＋2% で増加	n.a.	n.a.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	食品･飲料向け	GDP成長率で増加	n.a.	n.a.	8	8	8	9	9	9	9	10	10	10
	パーソナルケア向け	GDP成長率で増加	n.a.	n.a.	6	6	7	7	7	7	8	8	8	8
	医薬向け	GDP成長率で増加	n.a.	n.a.	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4
	その他	GDP成長率で増加	n.a.	n.a.	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4
	合計		n.a.	n.a.	20	21	22	22	23	24	25	25	26	27

94 出所：IMF ホームページ（https://www.imf.org/en/Publications/WEO/weo-database/2021/April/weo-report?a=1&c=001,&s=NGDP_RPCH,&sy=2019&ey=2026&ssm=0&scsm=1&scc=1&ssd=1&ssc=0&sic=0&sort=country&ds=.&br=1）

３．研究発表・講演、文献、特許などの状況

なし