令和２年度環境省委託業務　成果報告書

令和２年度　脱炭素社会を支えるプラスチック等資源循環システム構築実証事業

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

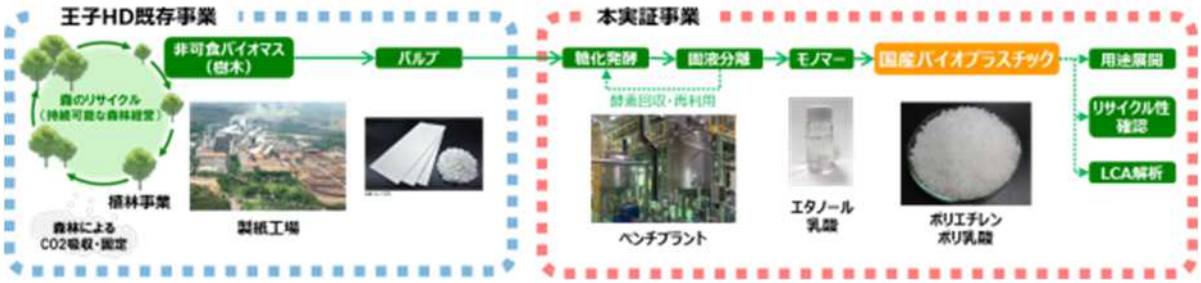
令和３年３月

（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、ポリエチレンについてはエタノールからエチレンへと変換するラボ試験機の基本設計とエチレン製造用として要求品質を満たすエタノール精製方法について検討し、ポリ乳酸についてはパルプを原料とした乳酸生産および精製の検討と、得られたサンプルから実際にポリ乳酸の試作を行った。今年度、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。



LCA 解析では、昨年度に引き続き、ポリエチレンとポリ乳酸のそれぞれについて既存の石油由来ポリエチレンとトウモロコシ由来ポリ乳酸と比較し、CO2 削減効果の推計について精査を実施した。

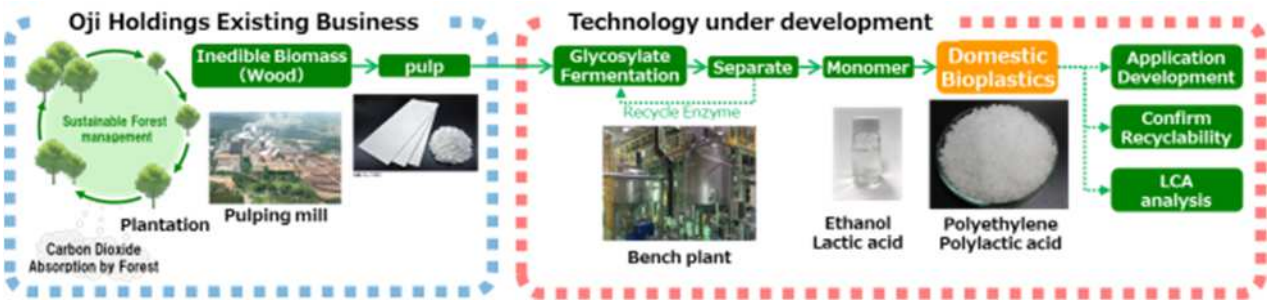
また、来年度に試作予定のバイオマスポリエチレンサンプルのリサイクル性についての評価方針を決定した、あわせて本実証で得られるバイオマスプラスチックに関し、世界および我が国の概況を整理し、マーケティング対象とする分野について調査を実施した。

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, we demonstrated the basic design of a tester that converts ethanol into ethylene to make polyethlene and a method of ethanol purification that meets the quality standards for ethylene production. For polylactic acid, we demonstrated lactic acid production and purification using pulp as a raw material and actually produced a trial piece of polylactic acid from the obtained lactic acid.

In this 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 LCA analysis, polyethylene and polylactic acid were re-compared with existing petroleum-derived polyethylene and corn-derived polylactic acid, respectively. Then, we estimated the CO_2 reduction effect more precisely than what we estimated in the last fiscal year.

We have determined a method for evaluating the recyclability of our bio-polyethylene samples, which are scheduled for next fiscal year, and have investigated the situation of bioplastics producers and the target product segment for bio-polyethylen and polylactic acid.

目次

概要（日本語）　・・・・・　3
概要（英語）　・・・・・　4
目次　・・・・・　5

１．本文　・・・・・　8

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　・・・・・　8
１－１－１　本事業の背景および目的　・・・・・　8
１－１－２　従来技術　・・・・・　9
１－１－２－１　並行糖化発酵　・・・・・　9
１－１－２－２　酵素回収再利用　・・・・・　10
１－１－３　本事業の解決すべき技術課題　・・・・・　12
１－１－３－１　非可食バイオマス由来 PE 樹脂　・・・・・　12
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　エチレンサンプル製造　・・・・・　17
２－１－１－１　エチレン製造ラボ試験機の検討　・・・・・　17
２－１－１－２　外注によるエチレンサンプル検討　・・・・・　19
２－１－２　エチレン用バイオエタノール精製検討　・・・・・　20
２－１－２－１　1000L ジャーによるパルプ由来バイオエタノール製造試験　・・・・・　20
２－１－２－２　パルプ由来バイオエタノール精製　・・・・・　22
２－１－２－２－１　60 段 2 塔蒸留によるエタノールサンプル精製（10Ｌスケール）　・・・・・　24
２－１－２－２－２　60 段 2 塔蒸留によるエタノールサンプル精製（50Ｌスケール）　・・・・・　42
２－１－２－２－３　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）　・・・・・　64
２－１－２－２－３　連続精密蒸留設備の基本設計　・・・・・　85
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）　・・・・・　86

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）　・・・・・　87
２－２－１　乳酸発酵条件の検討　・・・・・　87
２－２－１－１　最適培養条件検討（パルプ濃度検討）　・・・・・　88
２－２－１－２　最適培養条件検討（窒素種類検討）　・・・・・　92
２－２－２　乳酸精製条件の検討　・・・・・　93
２－２－２－１　乳酸大量培養　・・・・・　93
２－２－２－２　乳酸培養液サンプル精製条件検討　・・・・・　95
２－２－３　ポリ乳酸合成検討　・・・・・　96

２－２－３－１　オリゴマー・ラクチド化触媒検討　・・・・・　97
２－２－３－２　ラクチド重合によるポリ乳酸化　・・・・・　99
２－２－３－３　ラクチド化条件検討　・・・・・　101

２－３　ＬＣＡ解析（双日プラネット）　・・・・・　102
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　・・・・・　102
２－３－１－１　評価単位の設定　・・・・・　102
２－３－１－１－１　評価対象製品　・・・・・　102
２－３－１－１－２　機能と機能単位　・・・・・　104
２－３－１－１－３　基準フロー　・・・・・　104
２－３－１－２　評価範囲の設定　・・・・・　105
２－３－１－３　評価対象とした環境影響範囲　・・・・・　107
２－３－１－４　ポリエチレンに関する評価条件（評価対象製品）　・・・・・　108
２－３－１－４－１　原材料調達　・・・・・　108
２－３－１－４－２　生産（セルロース～PE の生産）　・・・・・　109
２－３－１－５　ポリ乳酸に関する評価条件（評価対象製品）　・・・・・　114
２－３－１－５－１　原材料調達　・・・・・　114
２－３－１－５－２　生産（セルロース～PLA の生産）　・・・・・　114
２－３－２　CO2 削減効果の推計　・・・・・　117
２－３－２－１　PE の CO2 排出量削減効果推計　・・・・・　117
２－３－２－１－１　評価対象製品の CO2 排出量　・・・・・　117
２－３－２－１－２　比較製品の CO2 排出量　・・・・・　118
２－３－２－１－３　非可食セルロース由来ポリエチレンによる CO2 排出量削減効果の推計結果　・・・・・　119
２－３－２－２　PLA の CO2 排出量削減効果推計　・・・・・　122
２－３－２－２－１　評価対象製品の CO２排出量　・・・・・　122
２－３－２－２－２　比較製品の CO2 排出量　・・・・・　123
２－３－２－２－３　非可食セルロース由来ポリ乳酸による CO2 排出量削減効果の推計結果　・・・・・　123
２－３－３　普及段階における CO2 削減効果の算定方法の検討　・・・・・　124

２－４　リサイクル性評価（双日プラネット）　・・・・・　125
２－４－１　リサイクル性評価手法　・・・・・　125

２－５　マーケティング（双日プラネット）　・・・・・　126
２－５－１　世界におけるバイオマスプラスチック概観　・・・・・　126
２－５－２　日本におけるバイオマスプラスチック概観　・・・・・　129
２－５－３　バイオポリエチレン　・・・・・　132
２－５－３－１　世界市場　・・・・・　132
２－５－３－１－１　用途別生産能力　・・・・・　132
２－５－３－１－２　企業別生産能力　・・・・・　132
２－５－３－１－３　生産メーカー　・・・・・　133
２－５－３－２　日本国内市場　・・・・・　136
２－５－３－２－１　2020 年用途別需要　・・・・・　136
２－５－３－２－２　製品例　・・・・・　137
２－５－４　PLA（ポリ乳酸）　・・・・・　140
２－５－４－１　世界市場　・・・・・　140
２－５－４－１－１　用途別生産能力　・・・・・　140

２－５－４－１－２　企業別生産能力　・・・・・　141
２－５－３－１－３　生産メーカー　・・・・・　142
２－５－４－２　日本国内市場　・・・・・　145
２－５－４－２－１　2020 年用途別需要　・・・・・　145
２－５－４－２－２　2030 年用途別需要予測とターゲットとすべき分野　・・・・・　147
２－５－５　バイオ PE 及び PLA のさらなる普及にむけて　・・・・・　150
３．研究発表・講演、文献、特許などの状況　・・・・・　151

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。

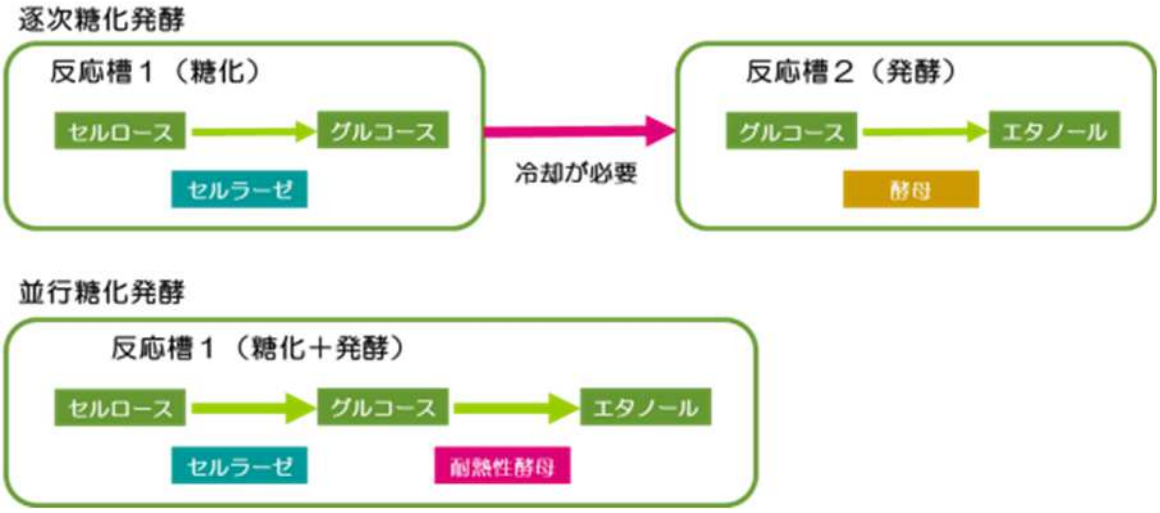


図１－１－２－１－１　セルロース由来エタノール製造方法

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。

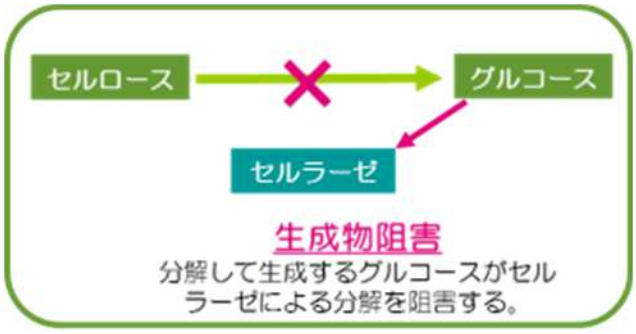


図１－１－２－１－２　セルラーゼにおける生成物阻害

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

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糖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。

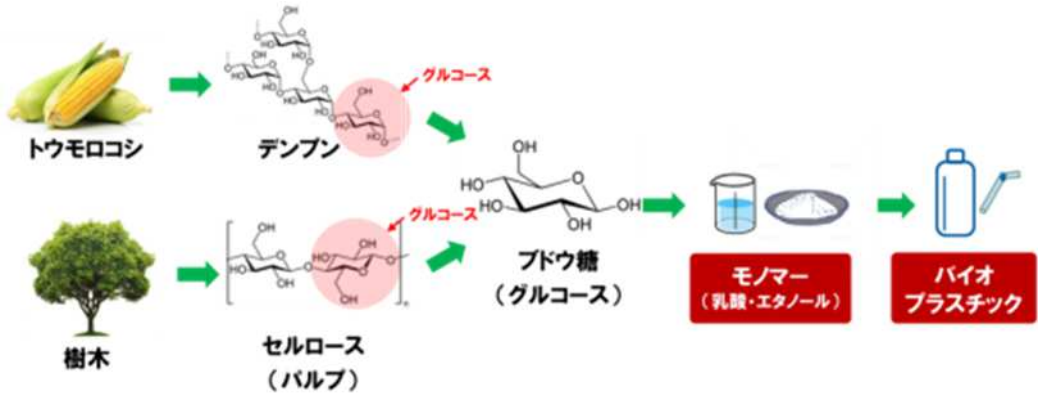


図１－１－２－２－１　デンプンおよびセルロース由来バイオマスプラスチックの変換フロー

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。

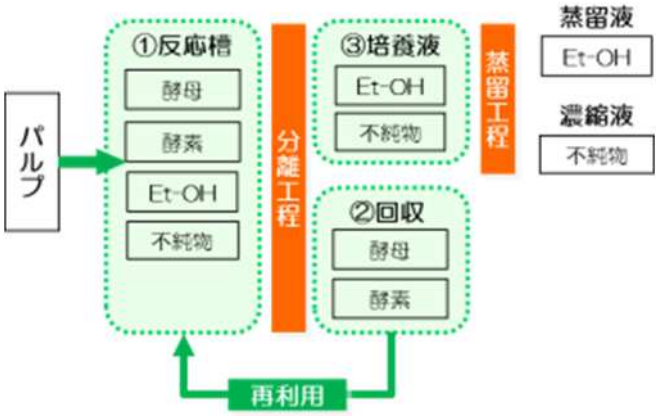


図１－１－２－２－２　エタノール生産における酵素回収工程

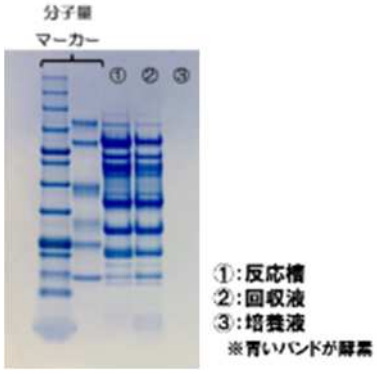


図１－１－２－２－３　酵素回収性確認

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。

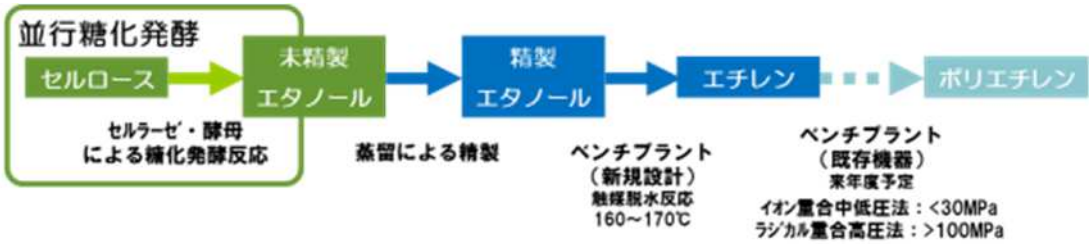


図１－１－３－１－１　ポリエチレン製造フロー

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、今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、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し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。今年度は 1000L ジャーでのパルプ由来バイオエタノール製造と、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とエチレンガスからのバイオポリエチレン重合の事前ラボ検討を実施した。

表１－１－３－１－２

項目	要求品質	前回結果	1段蒸留 (test1)	2段蒸留 (test2)	2段蒸留 (test3)
エタノール(%)	>95	>95	>95	>95	>95
酸度（mg/L）	<20	-	–	–	測定予定
アセトアルデヒド(ppm)	<30	400	110-146	52-84	<19
不揮発性物質(ppm)	<30	-	–	–	測定予定
メタノール(ppm)	<50	**<2.0※**	85-154	**<39**	**<39**
酢酸エチル(ppm)	<80	200	10-654	**<9**	**<9**
イソプロパノール(ppm)	<20	**<2.0※**	**<11**	**<11**	**<11**
N-プロパノール(ppm)	<10	**<2.0※**	**<0.8**	**<0.8**	**<0.8**
N-ブタノール(ppm)	<10	**<2.0※**	**<0.8**	**<0.8**	**<0.8**
アセタール(ppm)	<50	-	**9-34**	**<8**	**<8**
高級アルコール(ppm)	<100	-	**<40**	**<40**	**<40**
硫黄	<0.8	-	–	–	測定予定

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）。

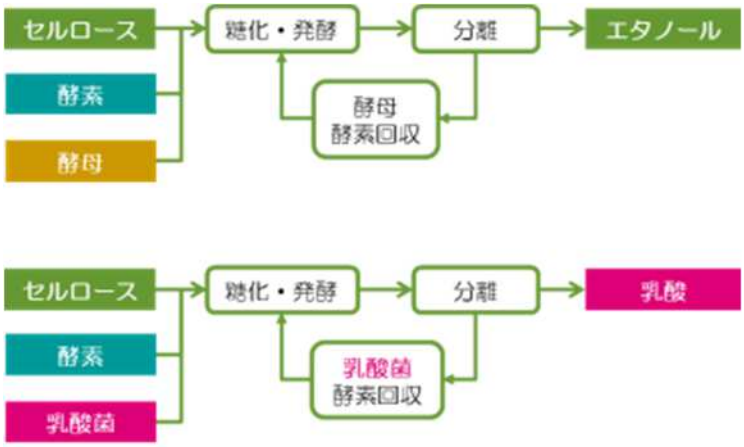


図１－１－３－２－１　エタノール・乳酸生産フロー

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）をはじめ、2L ジャーにて温度、攪拌条件、窒素量など培養条件の検討、30L ジャーによる乳酸培養液サンプルの作成（図１－１－３－２－３）を行ってきた。今年度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検討を実施した。

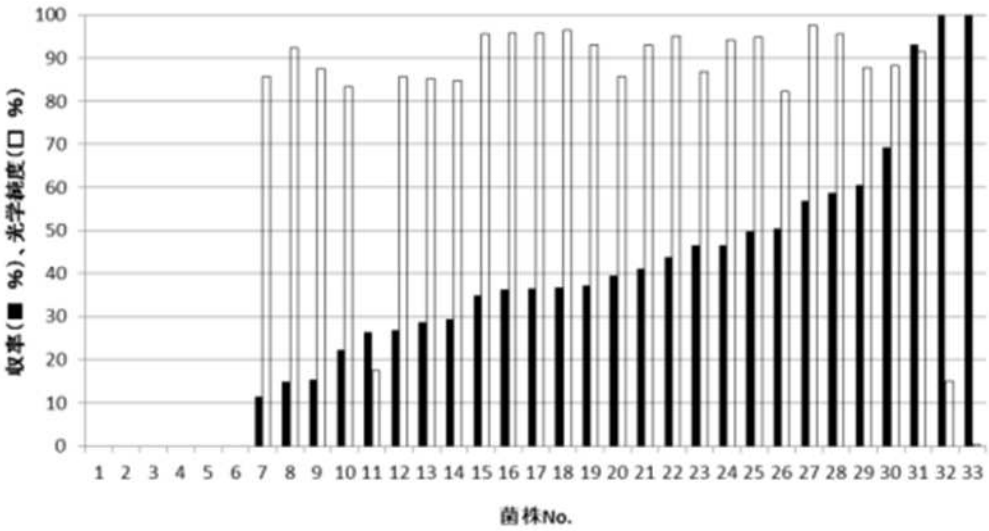


図１－１－３－２－２　乳酸生産菌スクリーニング結果

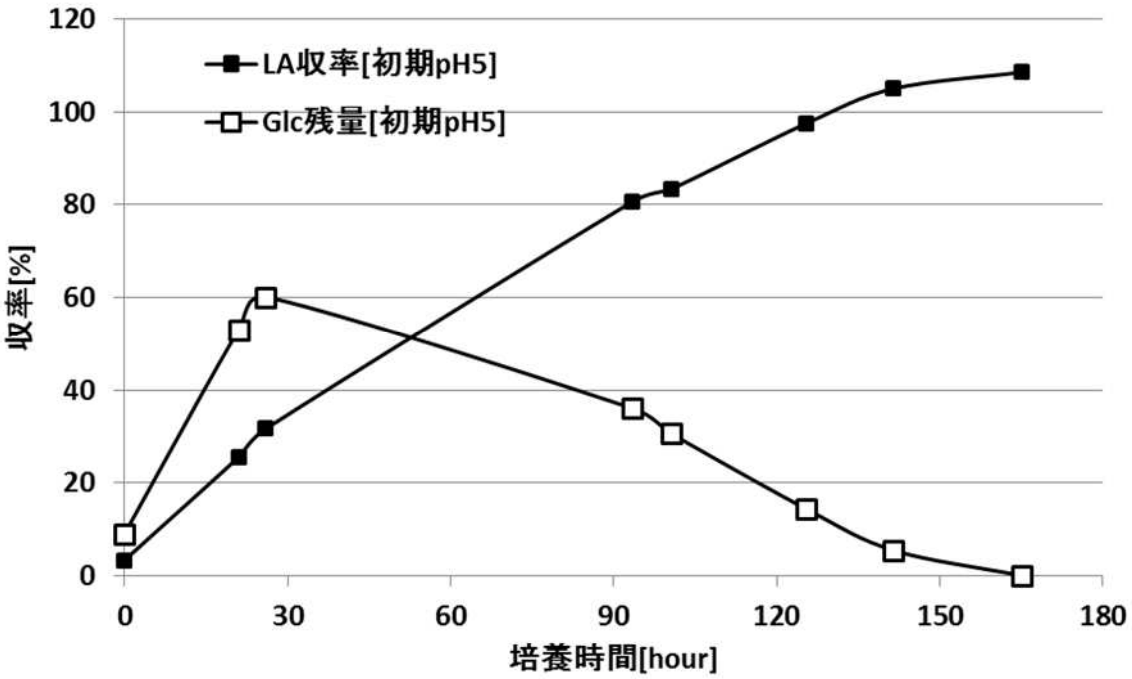


図１－１－３－２－３　30L ジャー乳酸培養試験結果

得られた乳酸は図１－１－３－２－４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１－１－３－２－４　ポリ乳酸製造フロー

昨年度は数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（写真１－１－３－２－５）とラボレベルでのポリ乳酸試作を行ってきた（写真１－１－３－２－６）。今年度は精製条件やポリ乳酸合成条件の検討を実施した。

写真１－１－３－２－５　精製乳酸サンプル

写真１－１－３－２－６　パルプ由来ポリ乳酸

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　エチレンサンプル製造

２－１－１－１エチレン製造ラボ試験機の検討

エタノールからエチレンを製造するラボ試験機は、実証規模においてコスト試算を可能とし、後段のポリエチレン合成ラボ試験においても必要な量・品質を満たすように基本仕様を設定し、当初、表２－１－１－１－１に示すようなスケジュールでの稼働を計画していた。高圧ガス製造となるため、設置場所は高圧ガス工業岡山事業所（写真２－１－１－１－２）を候補とし、高圧ガス保安法や消防法などに所定の申請を行うため、図２－１－１－１－３に示すような配置計画案を設定した。

表２－１－１－１－１　エチレン製造ラボ試験機稼働スケジュール（当初案）

20/3	4	5	6～10	11	12	21/1	2	3
見積 →	★発注 最終確認 →	図面作成 →	製作 →	輸送 →	据付 →	試運転 →	試験開始 →	→

図２－１－１－１－２　設置予定場所（高圧ガス工業岡山事業所）

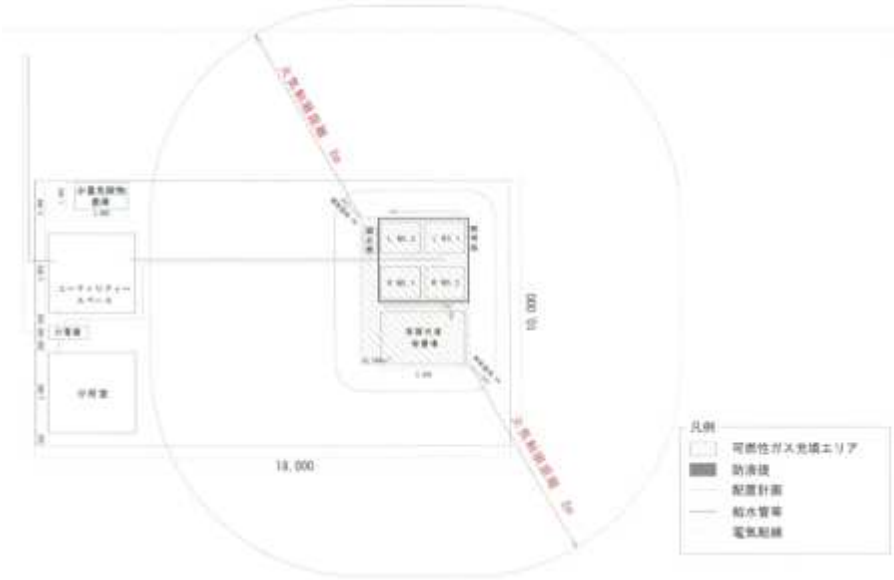


図２－１－１－１－３　設置図案

しかし、コロナ禍の影響で見積書の受領や仕様確認などに遅れが発生し、その後、部品や資材調達などにも時間が必要と製作メーカーから連絡があり、表２－１－１－１－４に示すようにエチレン製造開始時期が大幅に遅れることが判明した。このため、エチレン製造ラボ試験機の導入は見送り、外注によるエチレンサンプル製造を行うこととした。

表２－１－１－１－４　エチレン製造ラボ試験機稼働スケジュール案

２－１－１－２　外注によるエチレンサンプル製造

エチレンラボ試験機の導入を見送ったため、外注によるエチレン製造試験を検討した。サンプルは図２－１－１－２－１に示すフローにて製造することとし、図２－１－１－２－２に示すようなボンベ（内容積 47L）に充填可能し、バイオポリエチレン重合条件検討に供する予定とした。

図２－１－１－２－１　エチレンサンプル製造フロー

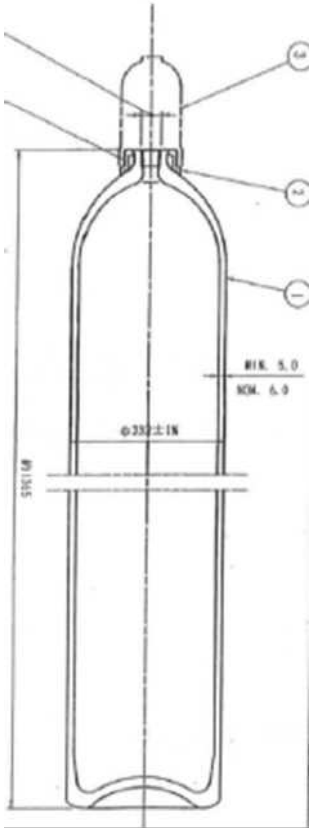


図２－１－１－２－２　エチレン充填ボンベ（47L）

２－１－２　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10Lや50Lジャーによるパルプからのバイオエタノール製造条件の再確認と、得られたバイオエタノールサンプルについて10L蒸留器を用いての精製条件検討を実施したが、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。

２－１－２－１　1000Lジャーによるパルプ由来バイオエタノール製造試験

昨年度は10Lや50Lジャーにおいて王子製紙　国内工場生産の広葉樹パルプを原料としたエタノール生産を確認しているが、今年度は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。

２－１－２－１ａ　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２－１－２－１ａ－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：10%、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２－１－２－１ａ－１　1000Ｌジャーファーメンター

（結果）

1000Ｌジャーファーメンターの槽内エタノール、グルコース、キシロース濃度の経時変化を図２－１－２－１ａ－２に示す。パルプから酵素分解によって生成したグルコースおよびキシロースは酵母によって 48 時間で完全に消費され､エタノールへと変換していることを確認した。

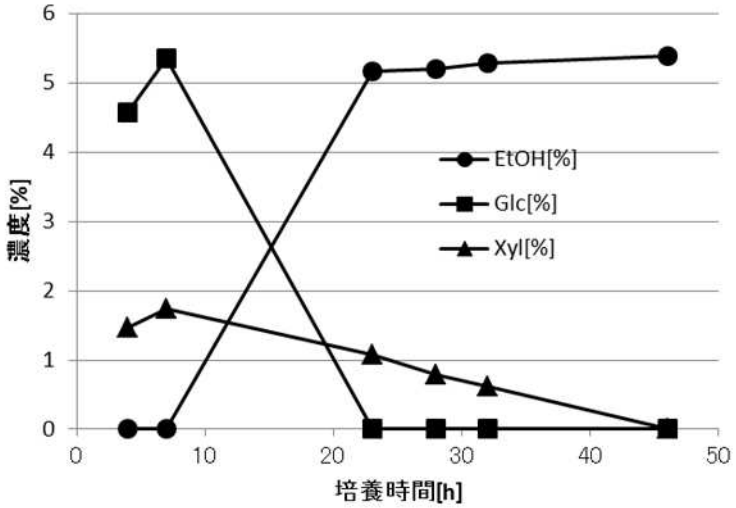


図２－１－２－１ａ－２　1000Ｌジャーファーメンター培養時の経時変化

２－１－２－２　パルプ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為、導入を計画しているラボ試験機では表２－１－２－２－１に示す品質のエタノールを投入する必要がある。

表２－１－２－２－１　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、図２－１－２－２－２に示すように、単蒸留後にて濃縮後、精製を行う 2 塔蒸留と一度に濃縮と精製を行う 1 塔蒸留を検討した。その結果、1 塔蒸留でも 2 塔蒸留でも精製が可能だったが、2 塔蒸留では単蒸留工程が安定せず、1 塔蒸留ではエタノール濃度が高いフラクションでも低沸点及び高沸点の不純物が混入することが判明した。そこで今年度は図２－１－２－２－３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試みた。

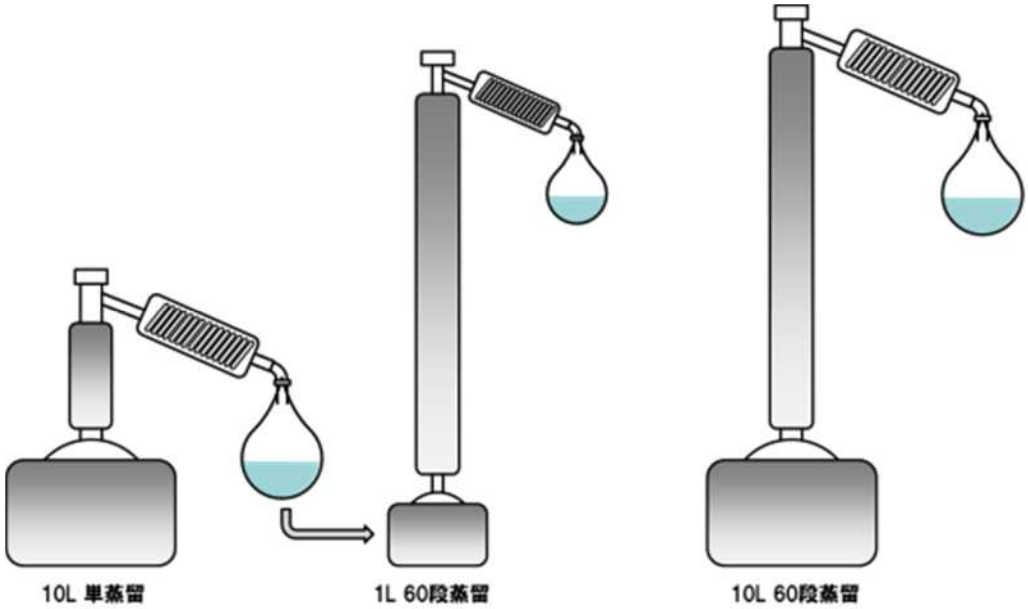


図２－１－２－２－２　昨年度検討した蒸留方法
（左：2 塔蒸留、右：1 塔蒸留）

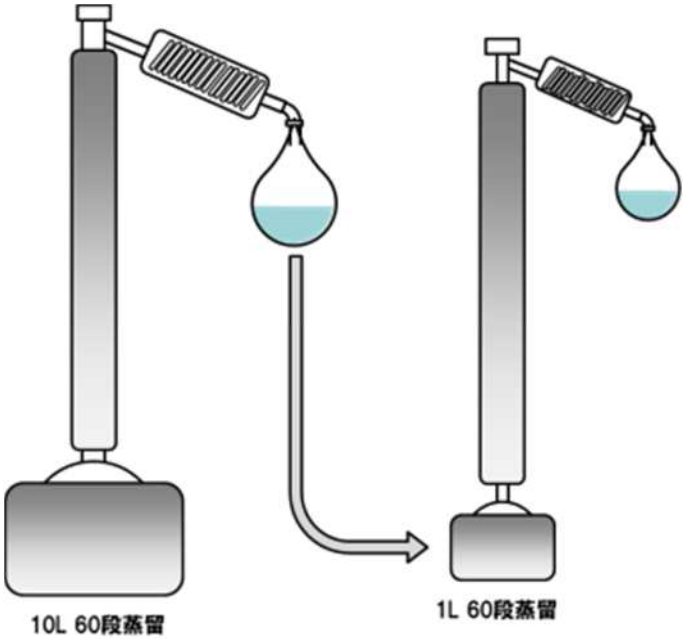


図２－１－２－２－３　今年度検討した蒸留方法（60 段 2 塔蒸留）

２－１－２－２－１　60 段 2 塔蒸留によるエタノールサンプル精製（10Ｌスケール）

エタノール中の沸点の近い不純物を取り除くためには、多段の蒸留塔が必要となる。昨年度に検討した 2 塔蒸留では単蒸留器の第 1 塔で蒸留してから次に 60 段の蒸留を実施したが、単蒸留が安定しないことが判明した。そこで、第 1 塔も 60 段蒸留器にして精製を確認した。

２－１－２－２－１－１　1 塔目 10L60 段蒸留

２－１－２－２－１－１ａ　実施内容及び成果

（方法）

60 段蒸留装置（容量：10L）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、元液：121-Lot3 サンプル 10kg、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 110℃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２－１－２－２－１－１ａ－１に示す。塔頂温度は 79.7～81.2℃と安定しており、Fr.10 を除くサンプルでは 90%以上のエタノール濃度を示した。

表２－１－２－２－１－１ａ－１　単蒸留試験結果

	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	4.9	10,200			
Fr.1	94.8	20.5	110℃	100.4℃	78.7℃
Fr.2	95.4	19.5	110℃	100.6℃	78.9℃
Fr.3	95.2	42.8	110℃	100.9℃	78.9℃
Fr.4	95.5	40.8	110℃	101.2℃	78.8℃
Fr.5	95.4	41.1	110℃	101.4℃	78.8℃
Fr.6	95.4	41.4	110℃	101.5℃	78.8℃
Fr.7	95.6	41.4	110℃	101.5℃	78.8℃
Fr.8	94.5	43.7	115℃	101.6℃	78.9℃
Fr.9	90.6	26.8	115℃	101.5℃	81.2℃
Fr.10	76.8	14.3	115℃	101.5℃	90.9℃
残液	0.0	9,690			

元液および単蒸留の各フラクションの GC 分析結果を図２－１－２－２－１－１ａ－２～１３に示す。元液（図２－１－２－２－１－１ａ－２）では多くの不純物ピークが観察され、Fr.1～2 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２－１－２－２－１－１ａ－３～４）。Fr.3～8 では 5.7 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２－１－２－２－１－１ａ－３～１０）。Fr.10 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２－１－２－２－１－１ａ－１２～１３）。Fr.9 には若干の高沸点不純物が含まれているが、高沸点不純物は 2 塔目の蒸留処理でも留去可能と考え、２塔目は Fr.3～9 をまとめて処理することとした。

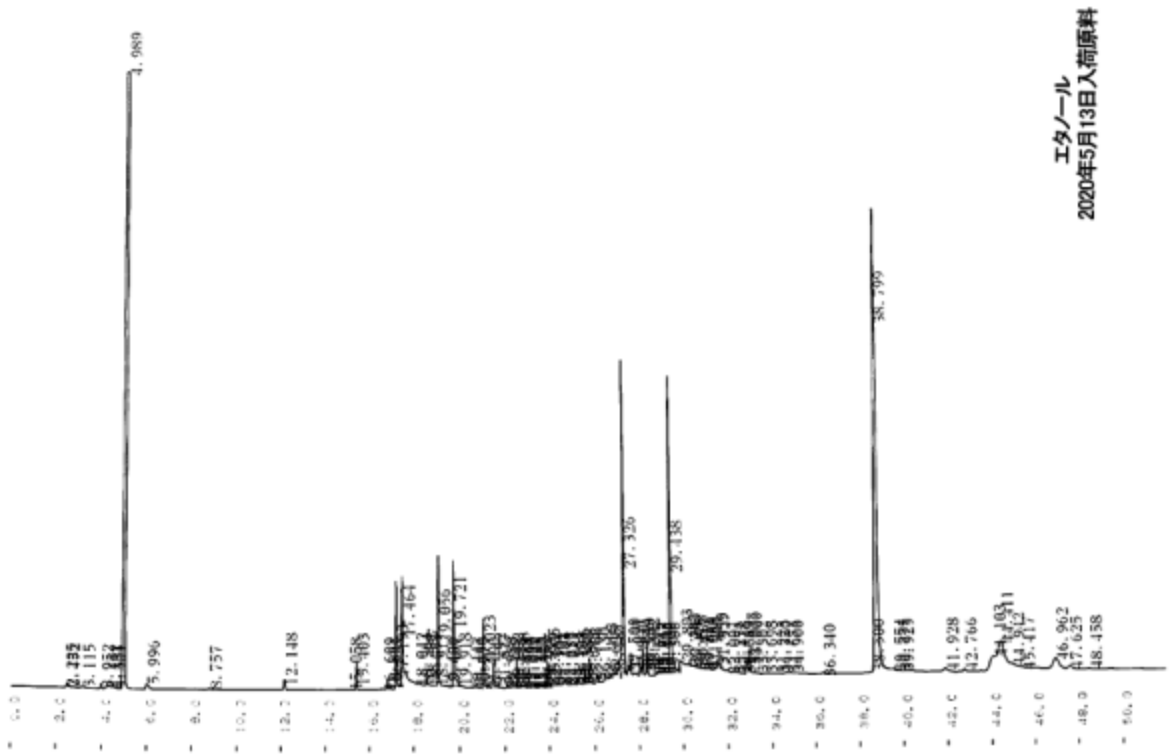


図２－１－２－２－１－１ａ－２　元液 GC チャート

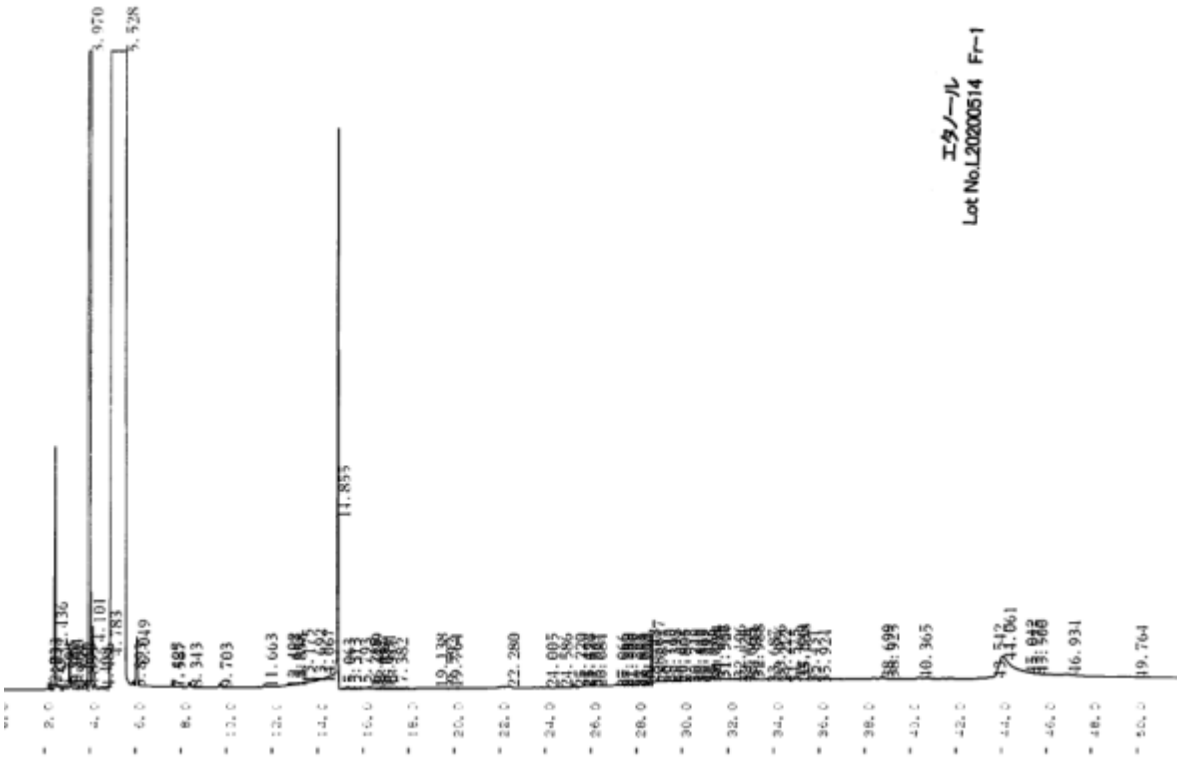


図２－１－２－２－１－１ａ－３　Fr.1 GC チャート

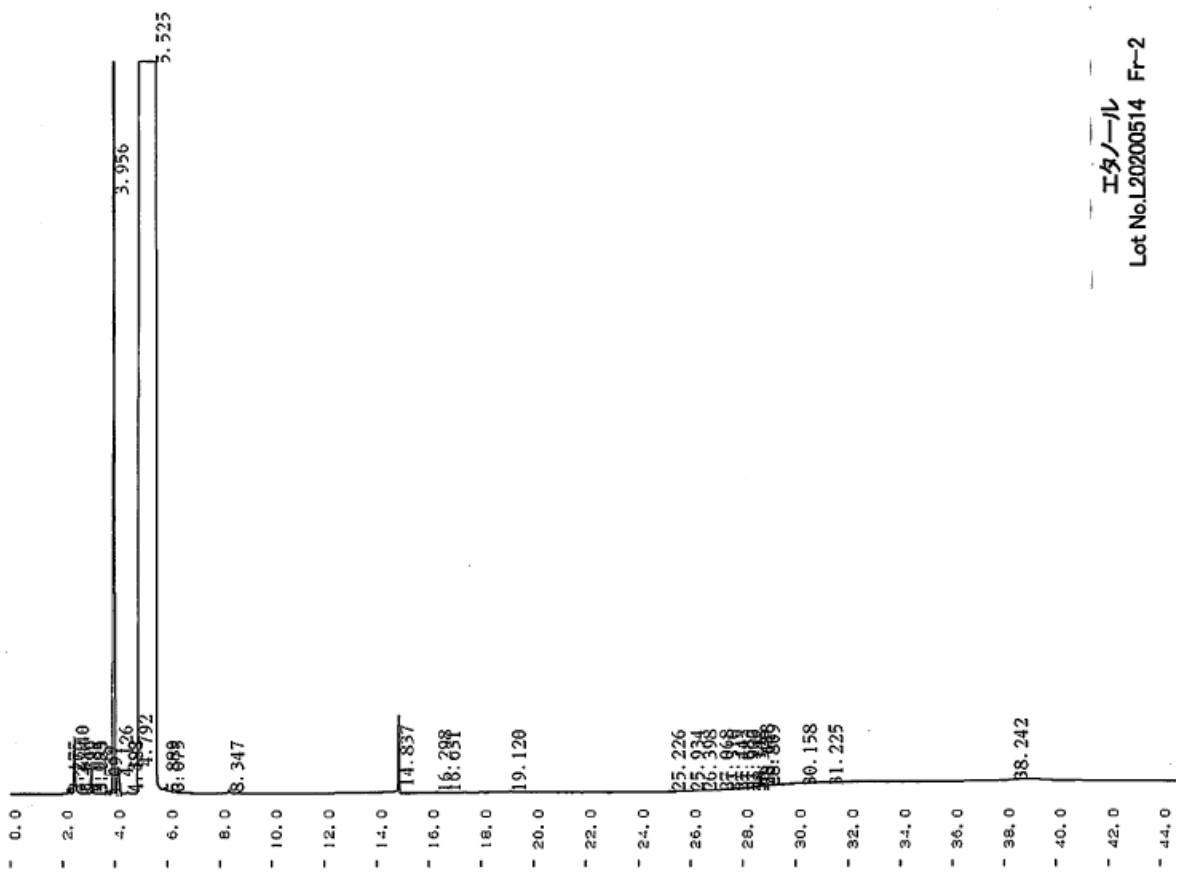


図２－１－２－２－１－１ａ－４　Fr.2 GC チャート

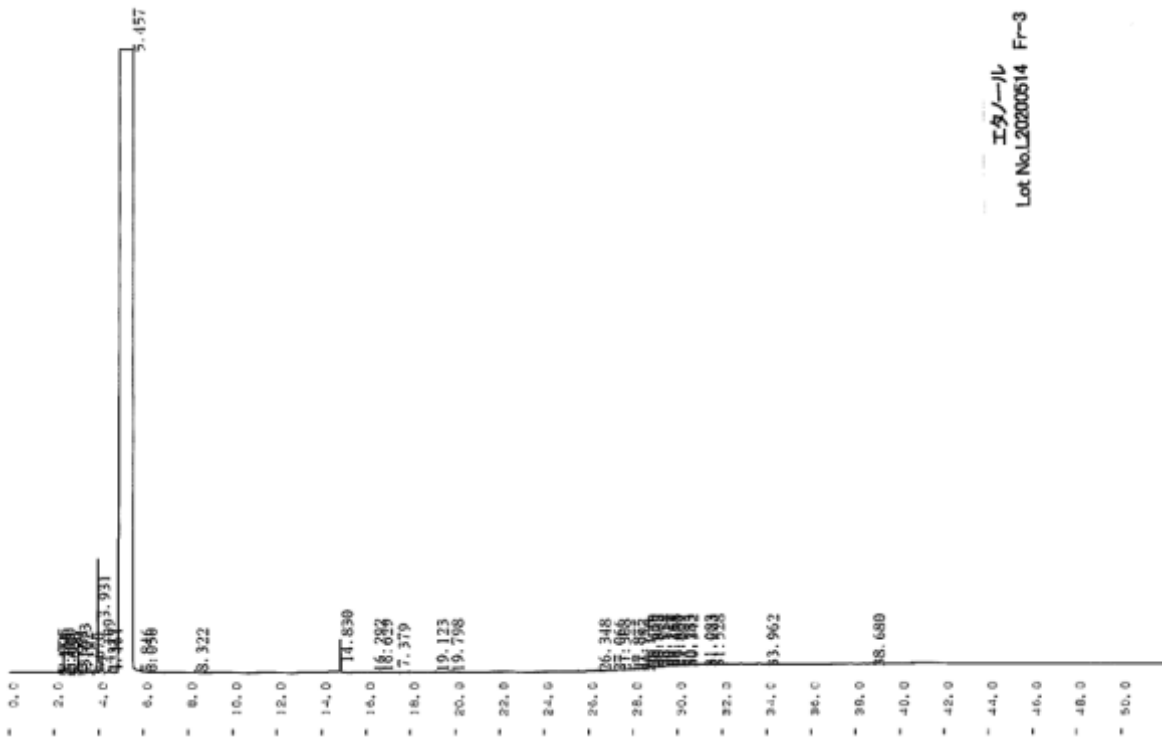


図２－１－２－２－１－１ａ－５　Fr.3 GC チャート

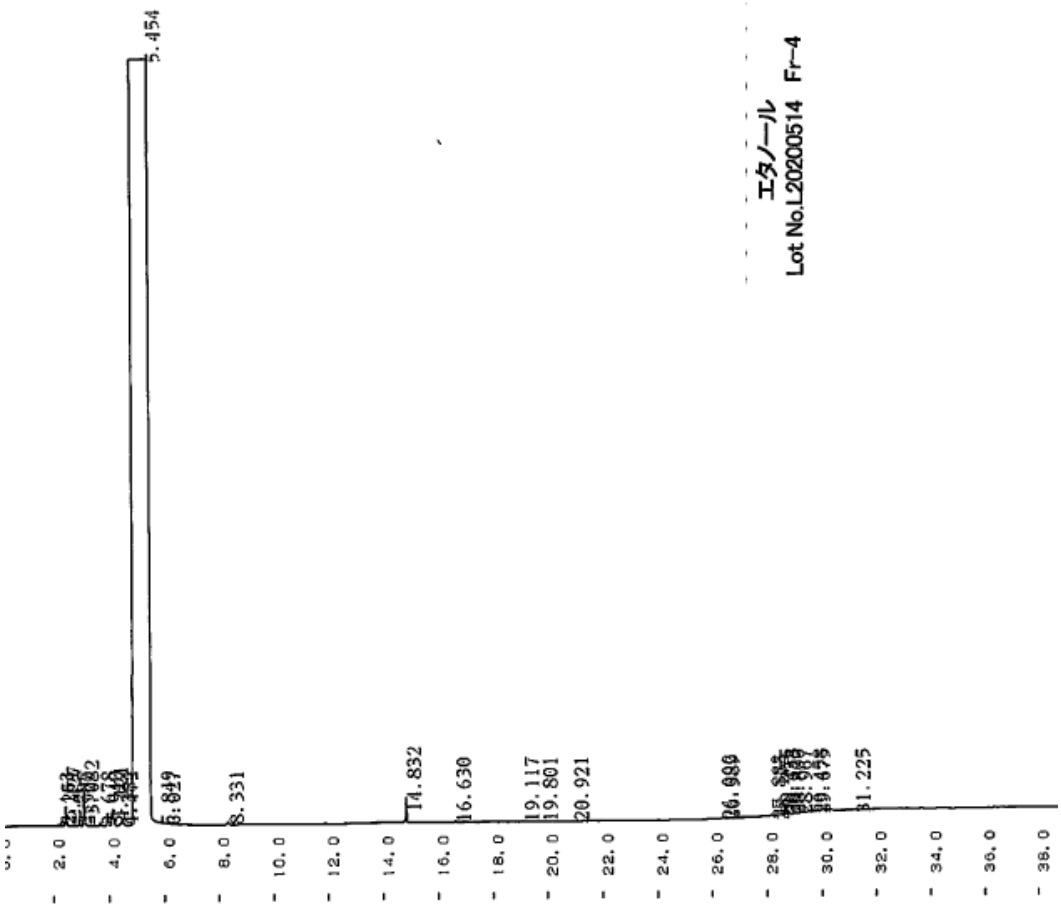


図２－１－２－２－１－１ａ－６　Fr.4 GC チャート

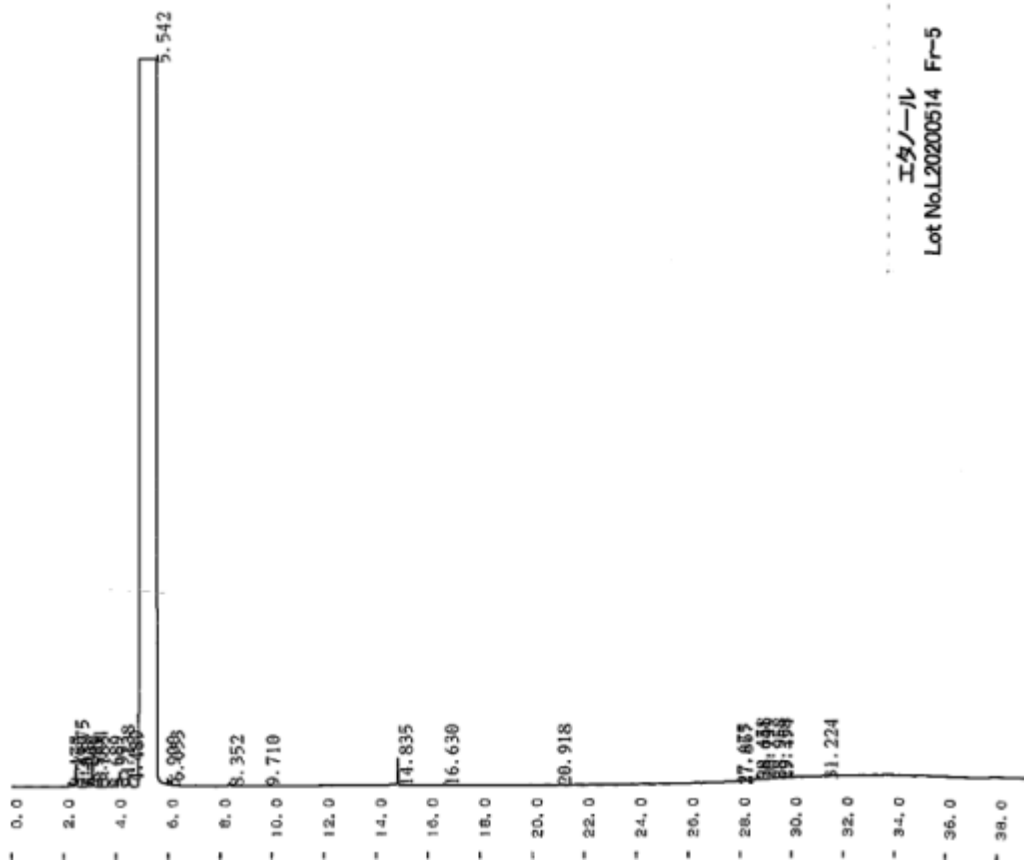


図２－１－２－２－１－１ａ－７　Fr.5 GC チャート

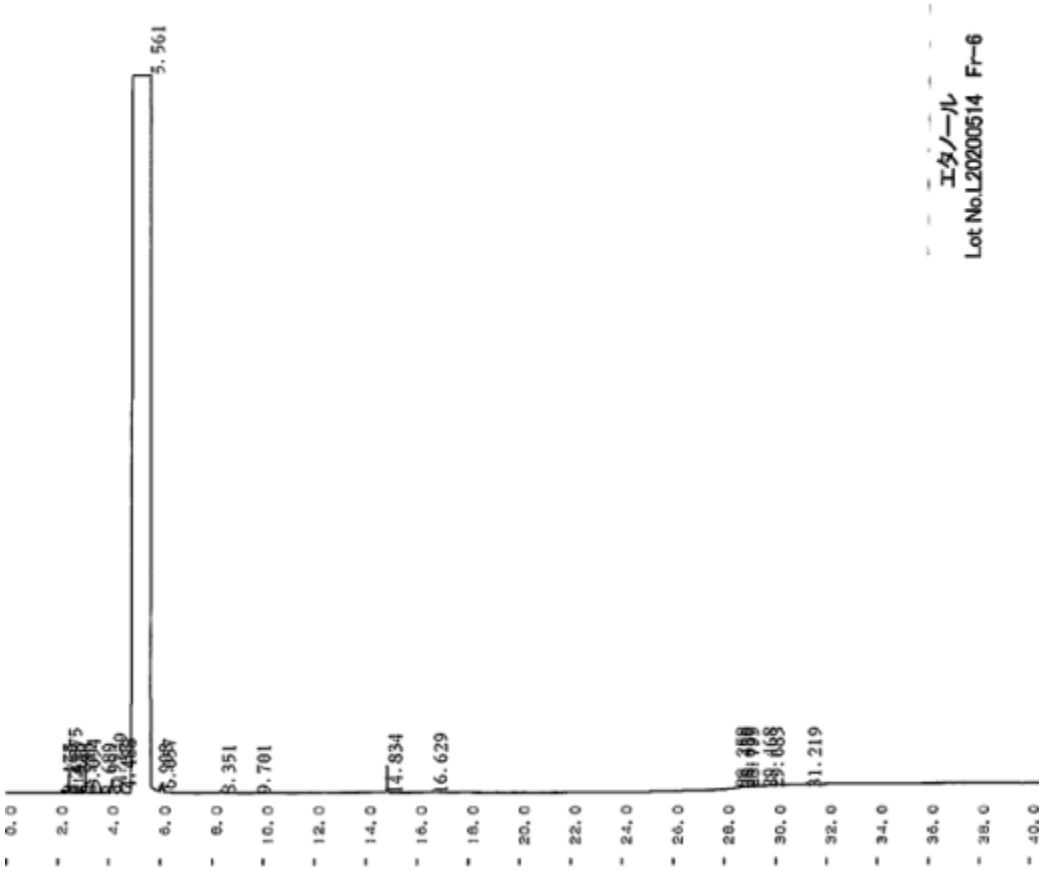


図２－１－２－２－１－１ａ－８　Fr.6 GC チャート

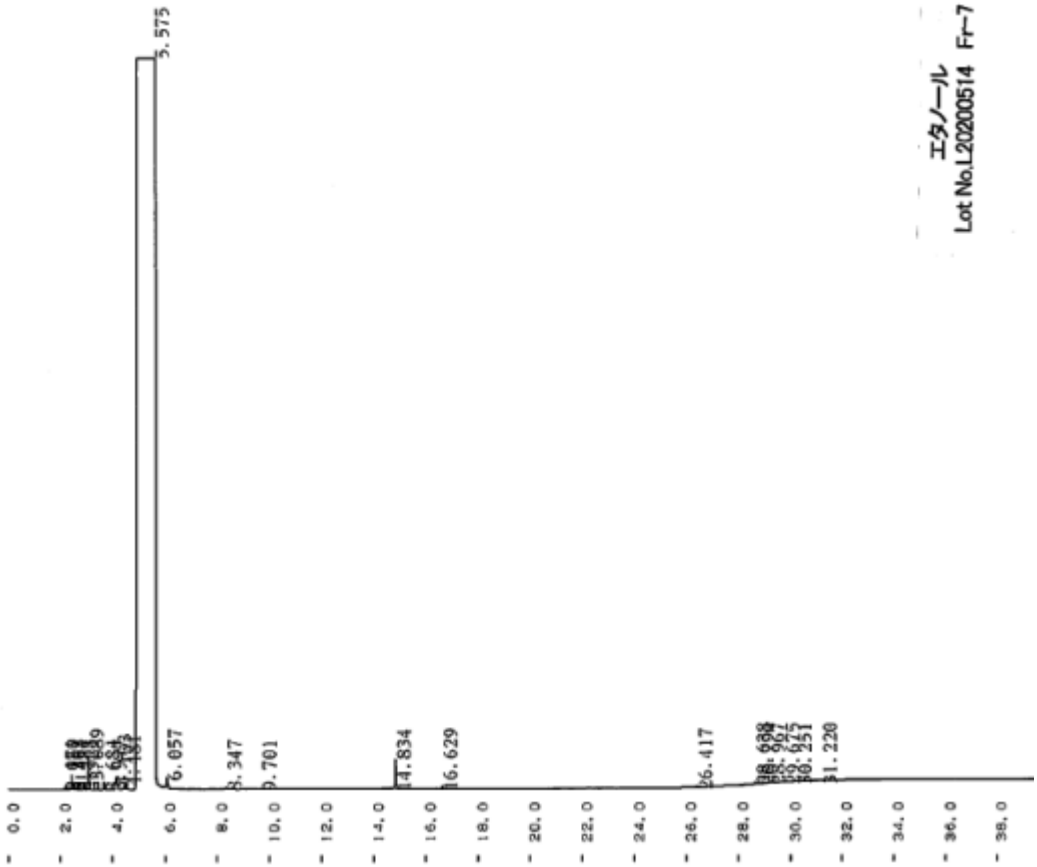


図２－１－２－２－１－１ａ－９　Fr.7 GC チャート

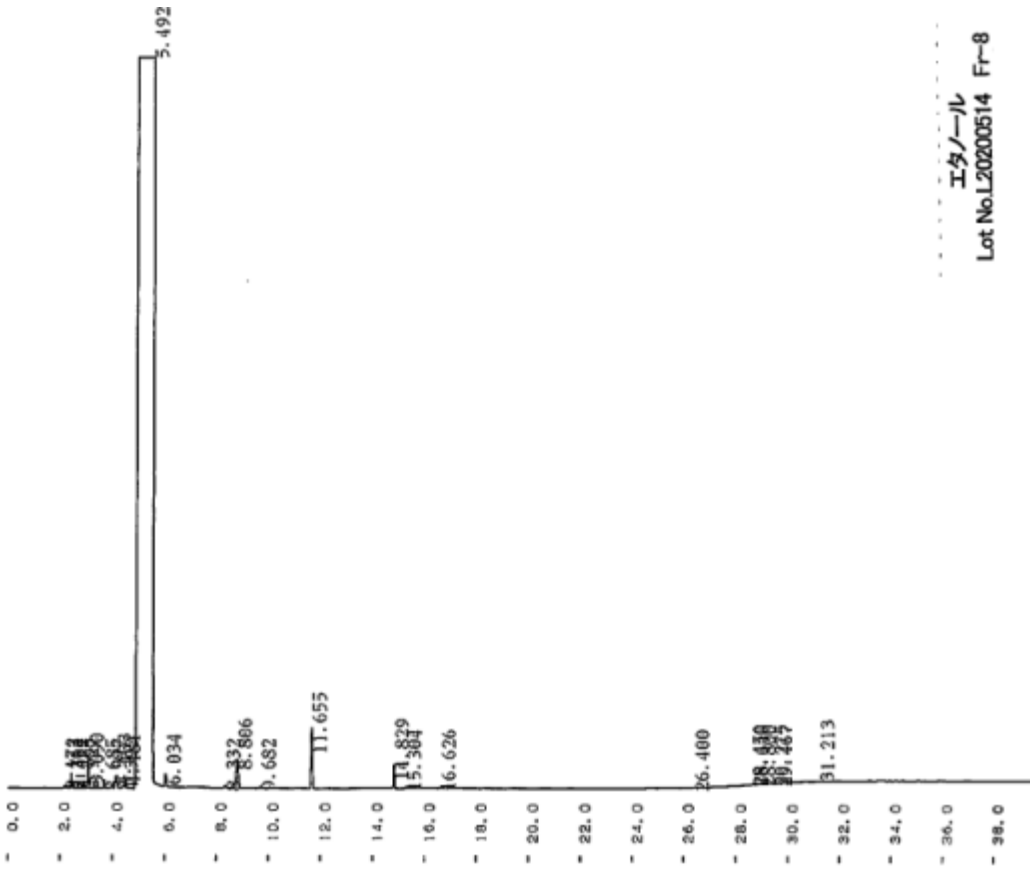


図２－１－２－２－１－１ａ－１０　Fr.8 GC チャート

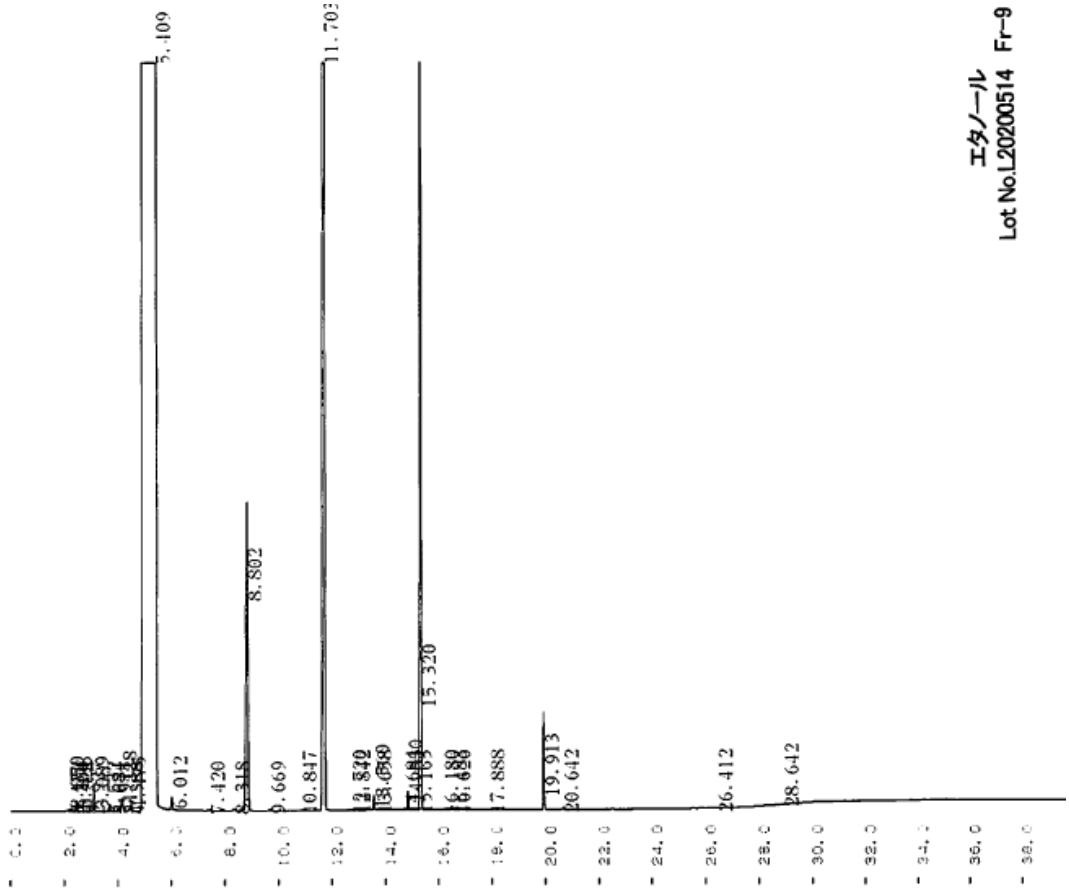


図２－１－２－２－１－１ａ－１１　Fr.9 GC チャート

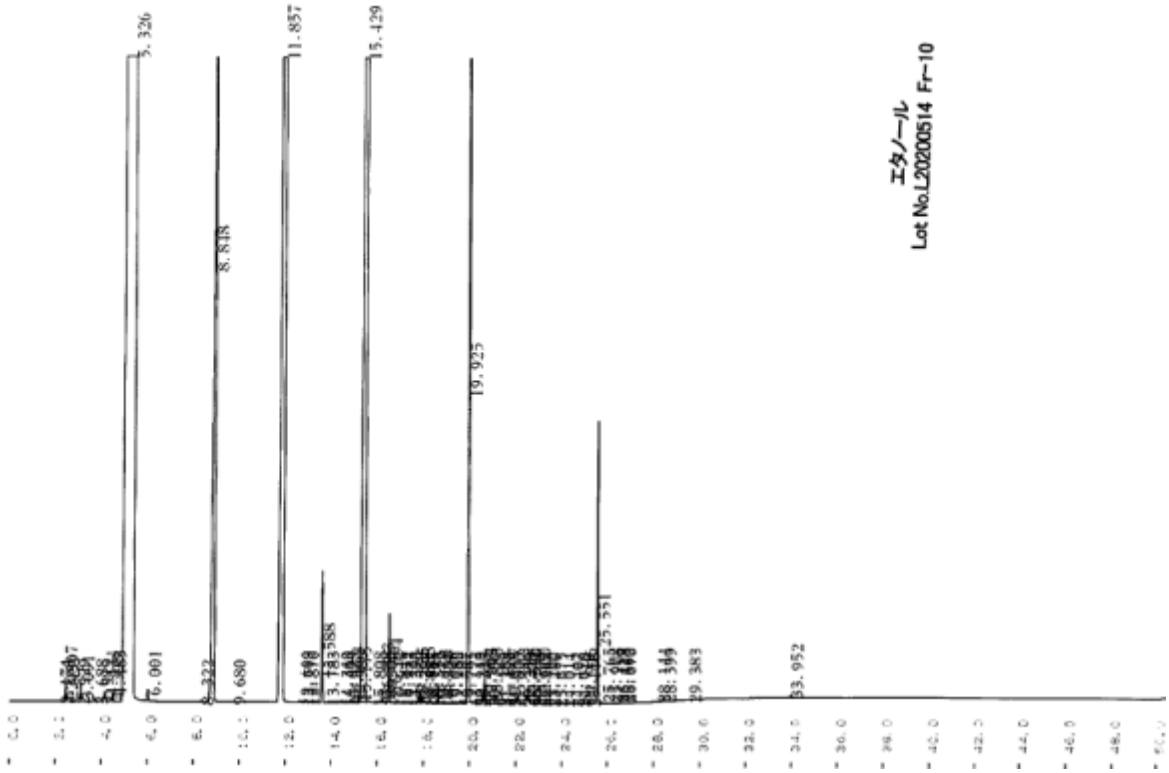


図２－１－２－２－１－１ａ－１２　Fr.10 GC チャート

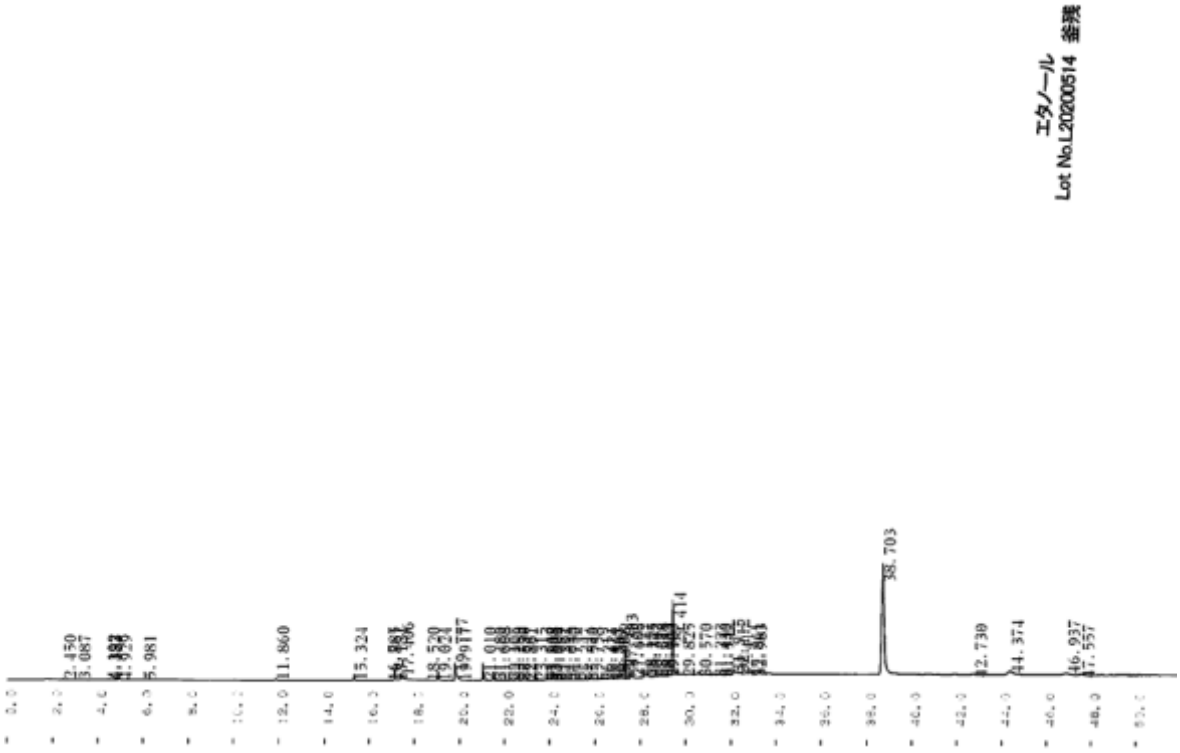


図２－１－２－２－１－１ａ－１３　残液 GC チャート

２－１－２－２－１－２　2塔目1L60段蒸留

２－１－２－２－１－２ａ　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、1L 60段蒸留による処理を行った。試験条件は、元液：Fr.3～9、エタノール濃度92.3%、262.1g、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110～125℃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２－１－２－２－１－２ａ－１に示す。塔頂温度は79-80℃付近で安定し、Fr.2以降で目標である約95%以上のエタノール濃度を示すサンプルを得た。

表２－１－２－２－１－２ａ－１　1L 60段蒸留試験結果

	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	92.3	262.1			
Fr.1	93.8	16.6	110℃	79.8℃	78.4℃
Fr.2	95.2	16.5	115℃	79.8℃	78.4℃
Fr.3	95.7	15.9	118℃	79.9℃	78.5℃
Fr.4	95.2	15.7	118℃	79.9℃	78.4℃
Fr.5	95.5	16.1	118℃	79.8℃	78.4℃
Fr.6	94.7	16.3	118℃	79.9℃	78.4℃
Fr.7	95.3	16.0	118℃	80.1℃	78.5℃
Fr.8	94.4	15.8	118℃	80.0℃	78.4℃
Fr.9	95.1	17.7	118℃	80.0℃	78.3℃
Fr.10	95.3	16.8	120℃	80.3℃	78.4℃
Fr.11	94.5	16.5	122℃	81.1℃	78.3℃
Fr.12	95.3	16.0	125℃	86.5℃	78.3℃
Fr.13	95.3	13.7	140℃	80.9℃	62.3℃
残液	89.4	41.6	150℃		

60段蒸留の各フラクションのGC分析結果を図２－１－２－２－１－２ａ－２～１６に示す。元液(図２－１－２－２－１－２ａ－２)ではいくつかの不純物ピークが観察されていたが、Fr.3～13では5.7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２－１－２－２－１－２ａ－５～１５）。Fr.1～2ではエタノールよりも前にピークが観察され（図２－１－２－２－１－２ａ－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２－１－２－２－１－２ａ－１６）。

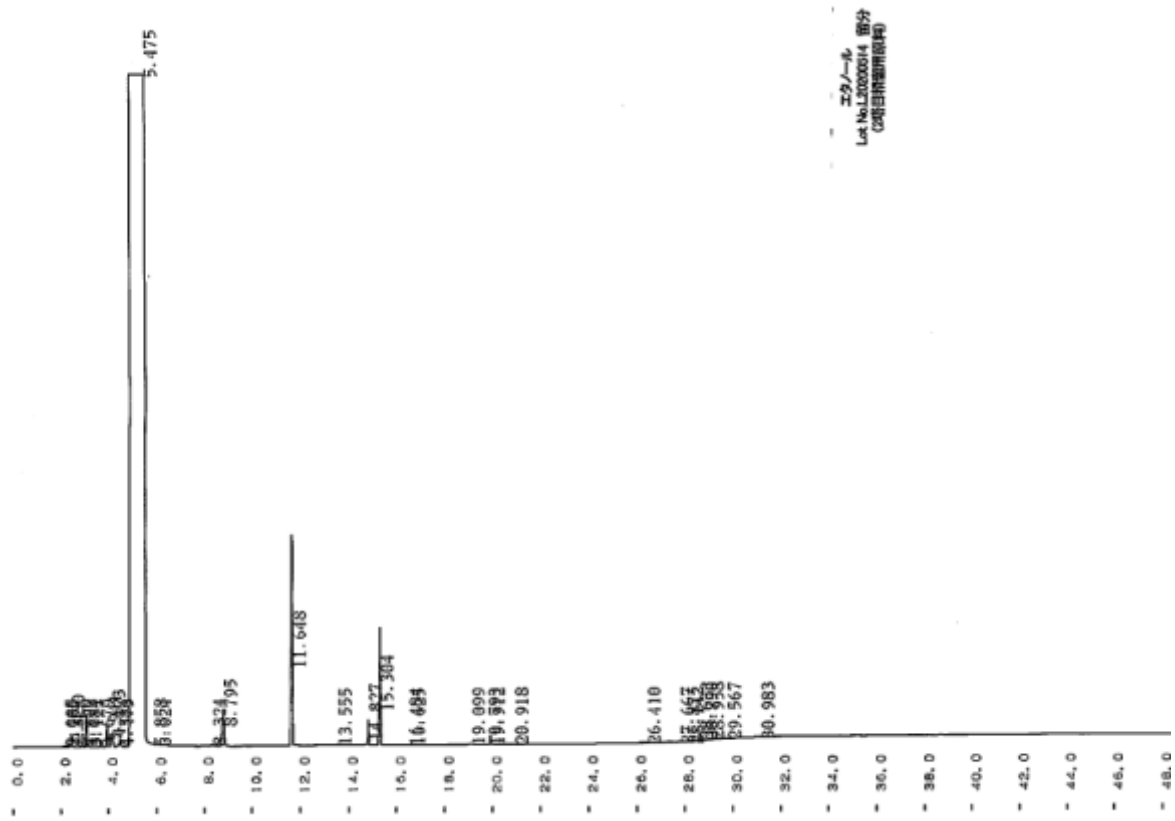


図２－１－２－２－１－２ａ－２　元液 GC チャート

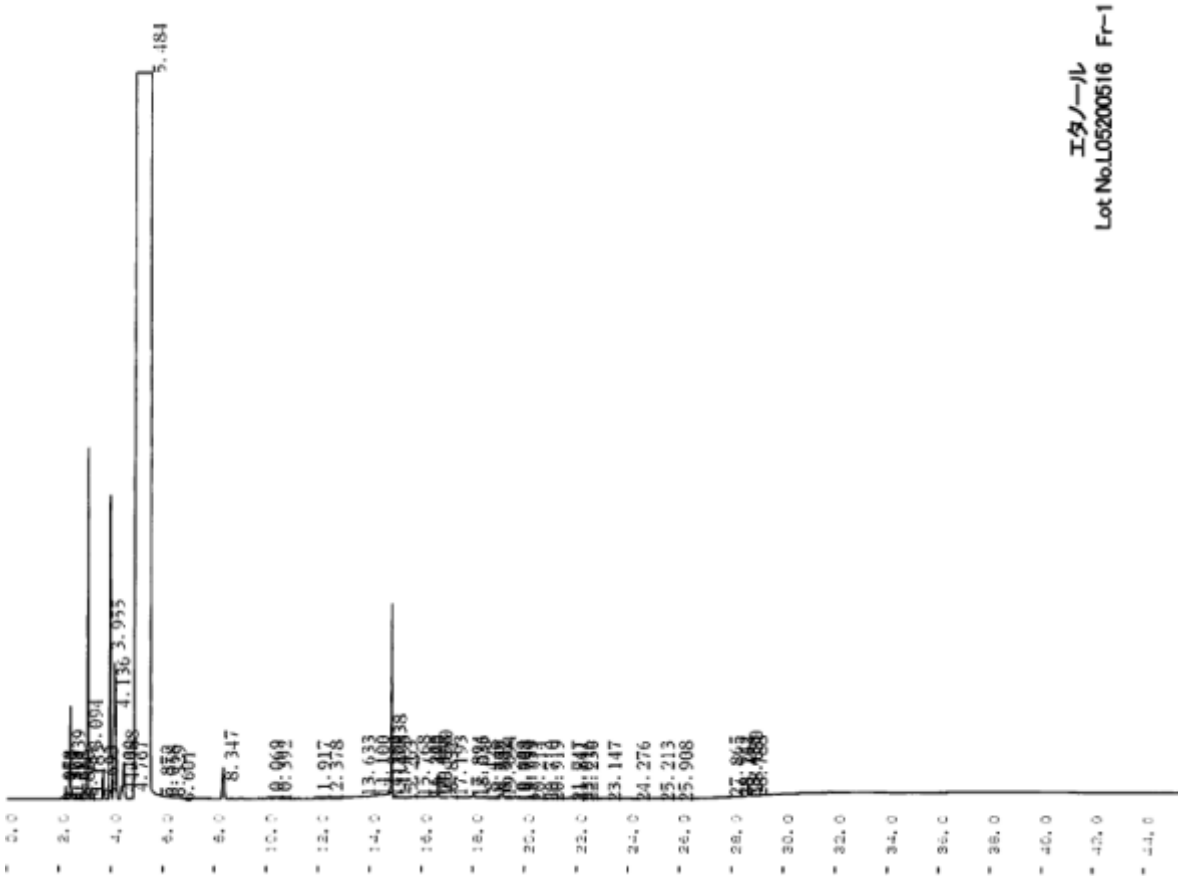


図２－１－２－２－１－２ａ－３　Fr.1 GC チャート

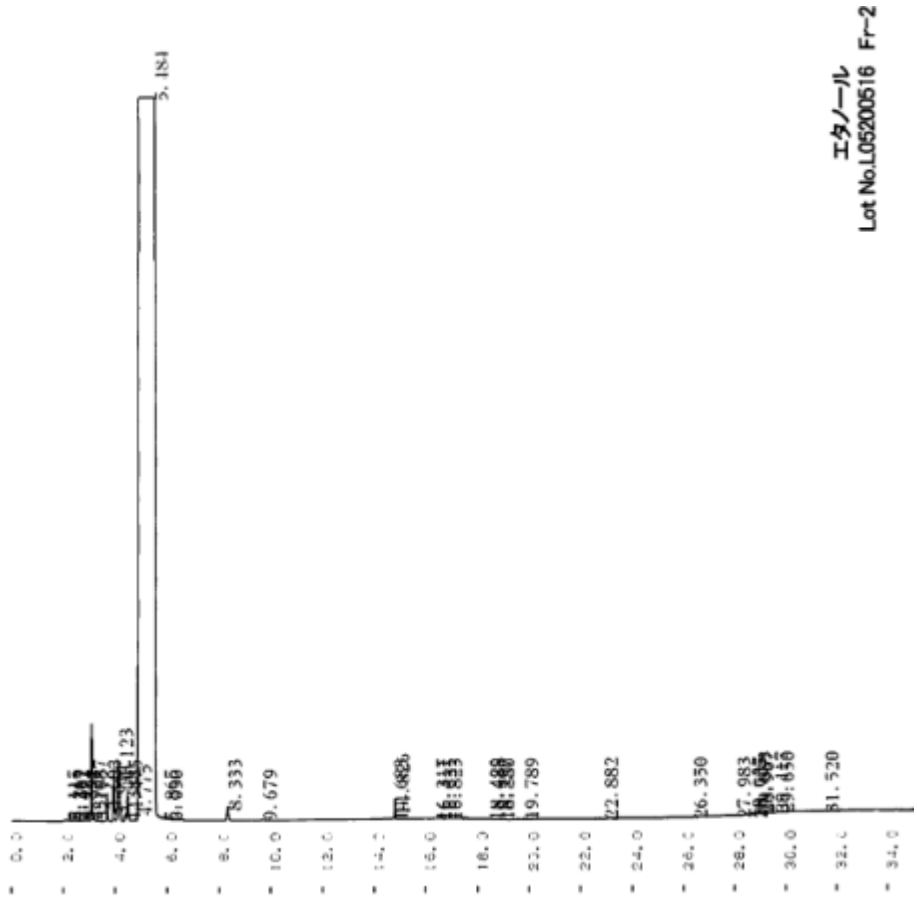


図２－１－２－２－１－２ａ－４　Fr.2 GC チャート

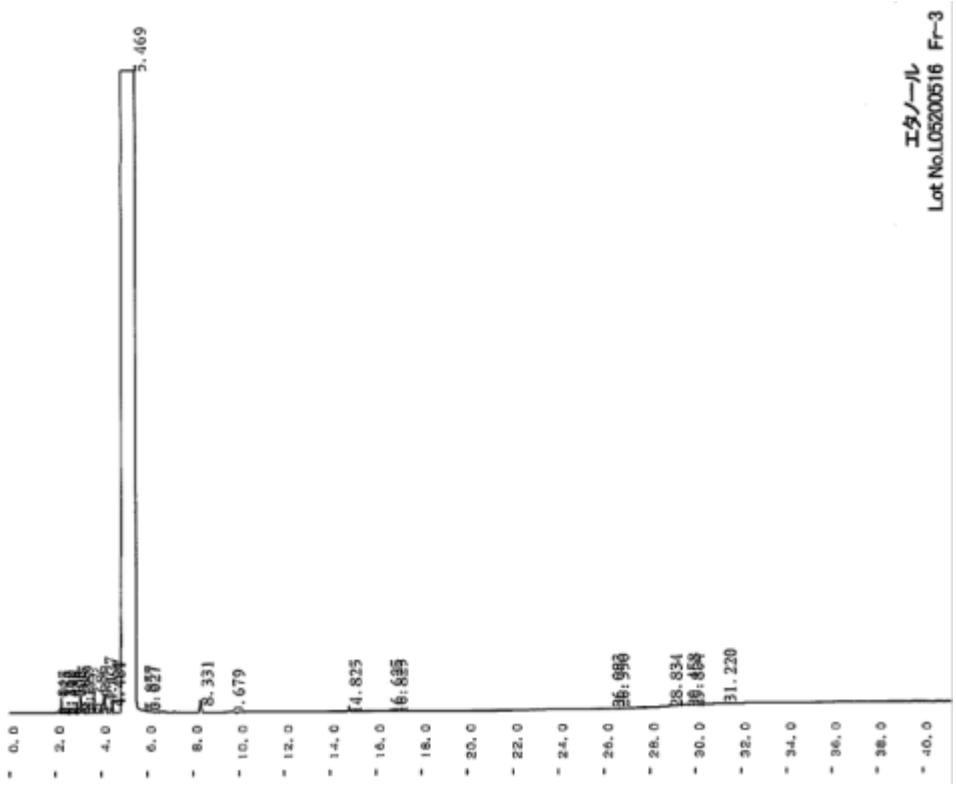


図２－１－２－２－１－２ａ－５　Fr.3 GC チャート

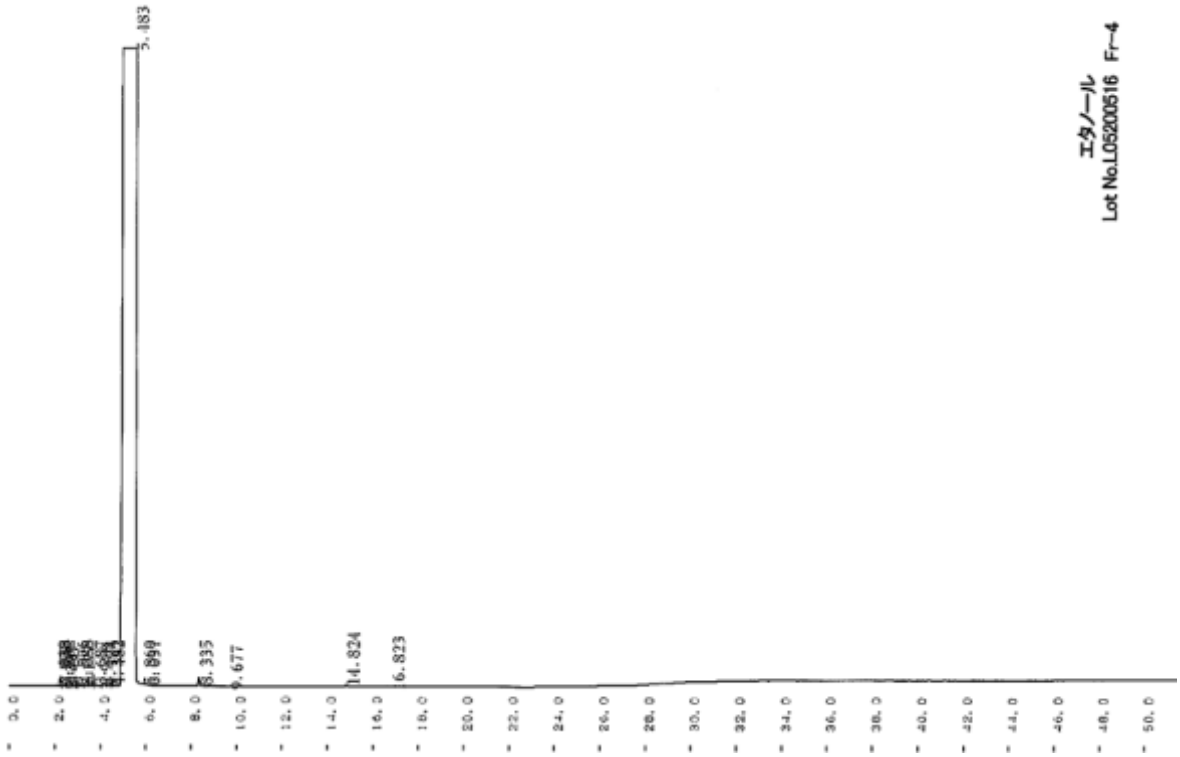


図２－１－２－２－１－２ａ－６　Fr.4 GC チャート

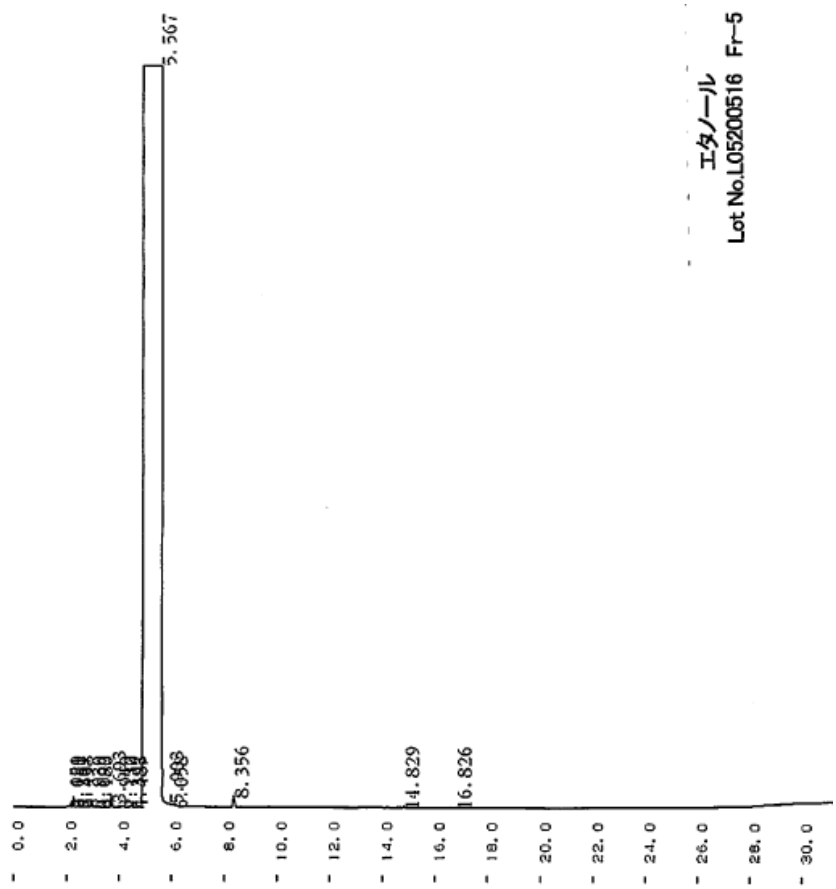


図２－１－２－２－１－２ａ－７　Fr.5 GC チャート

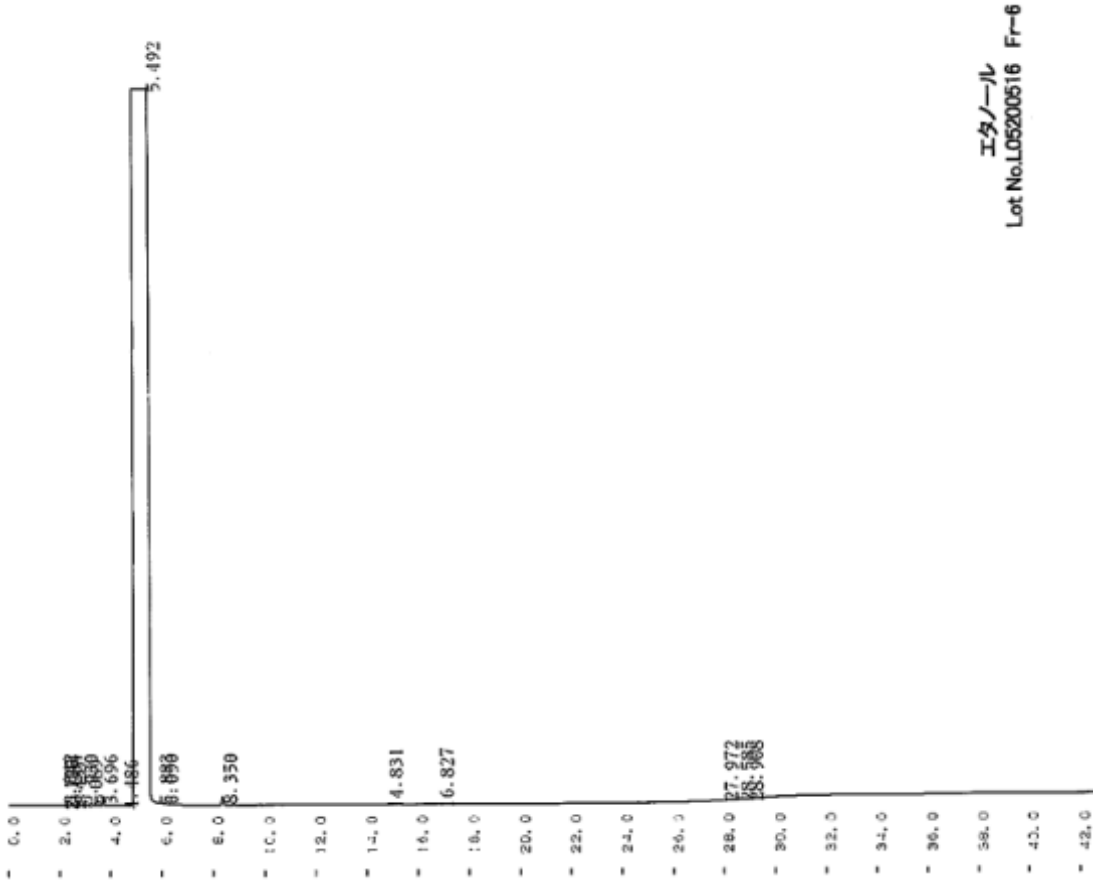


図２－１－２－２－１－２ａ－８　Fr.6 GC チャート

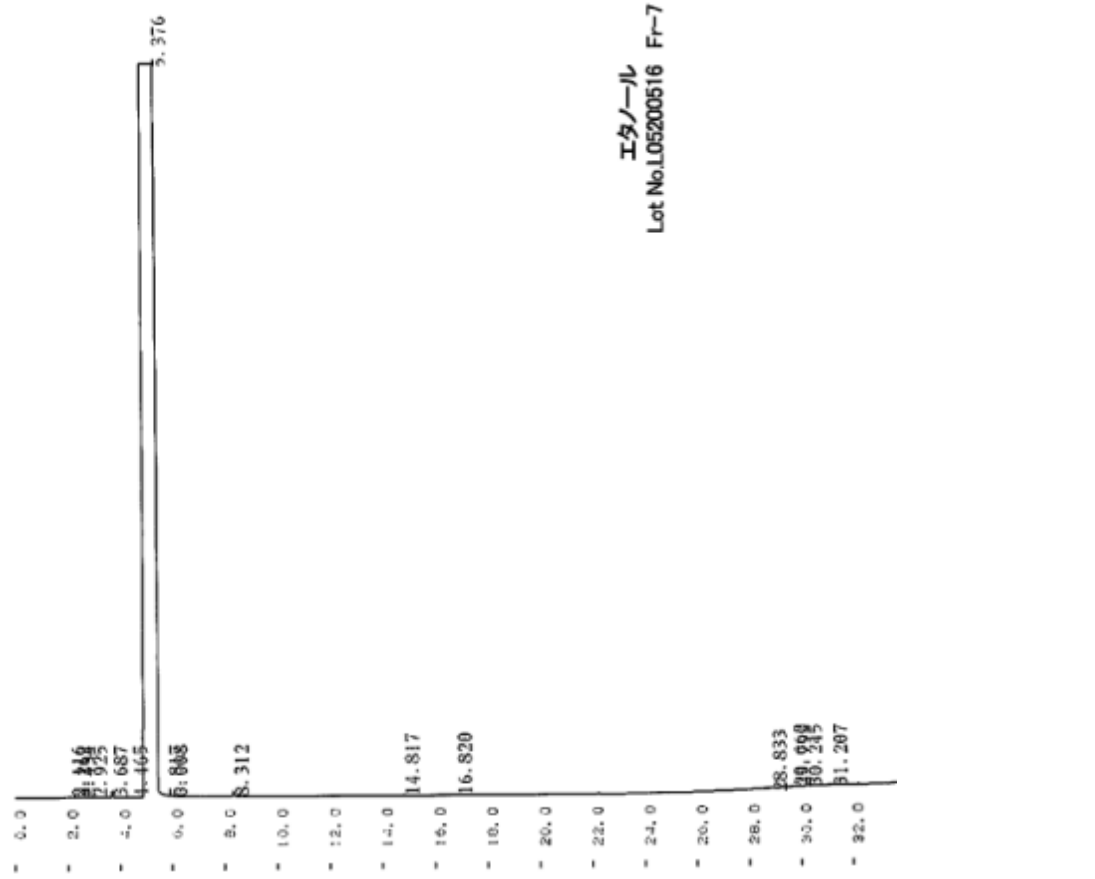


図２－１－２－２－１－２ａ－９　Fr.7 GC チャート

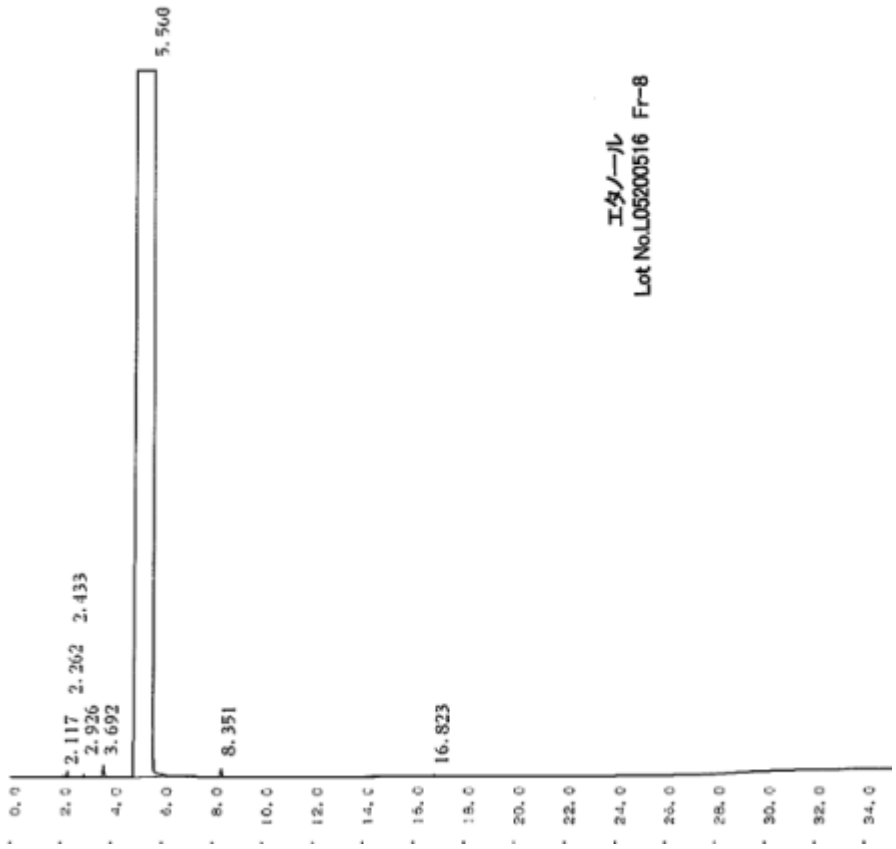


図２－１－２－２－１－２ａ－１０　Fr.8 GC チャート

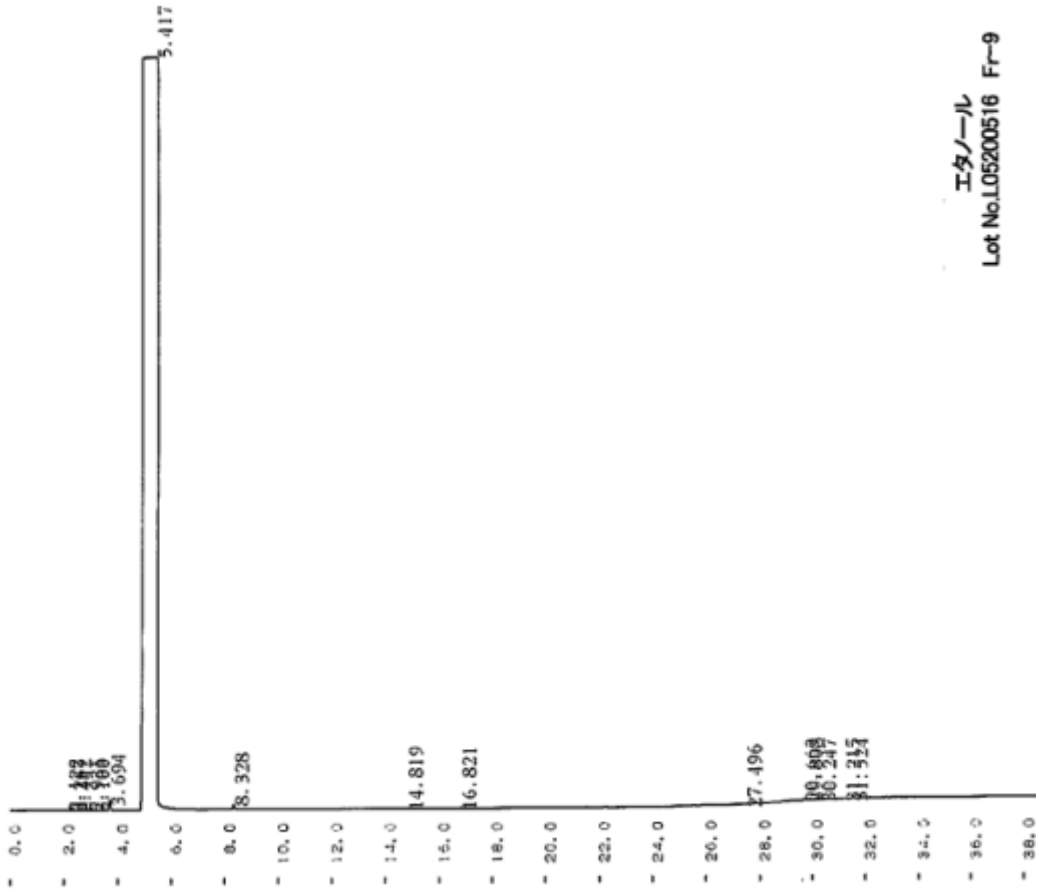


図２－１－２－２－１－２ａ－１１　Fr.9 GC チャート

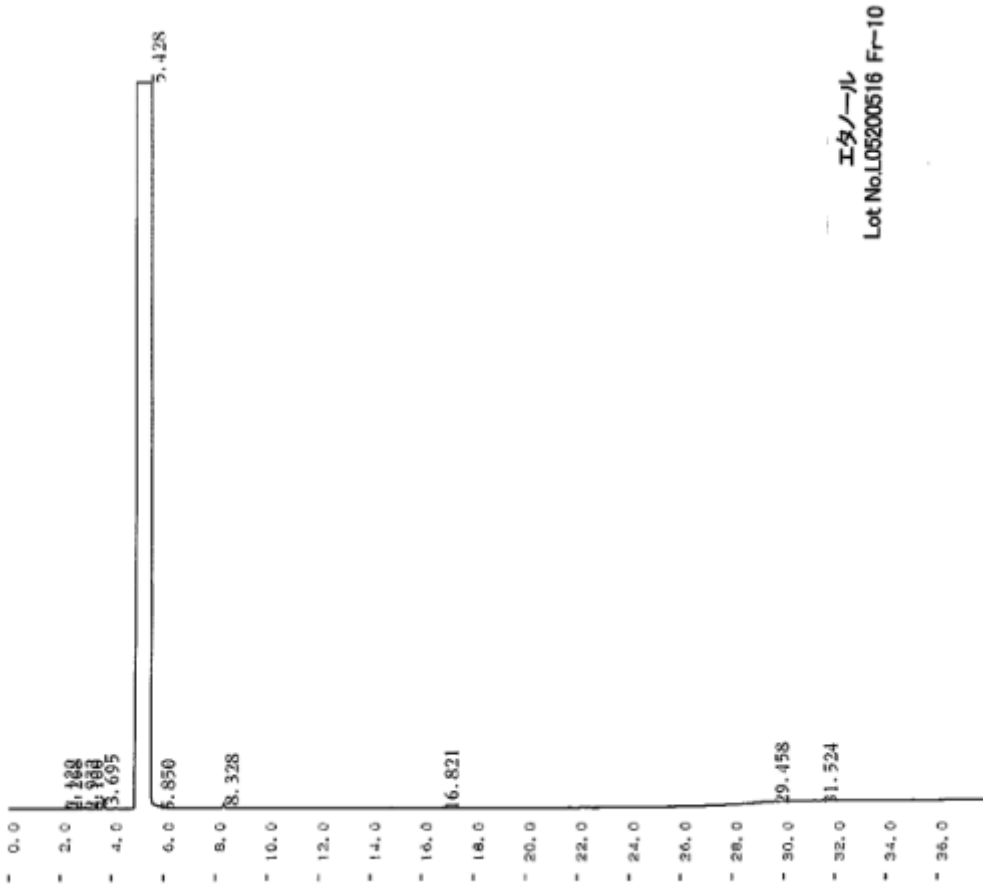


図２－１－２－２－１－２ａ－１２　Fr.10 GC チャート

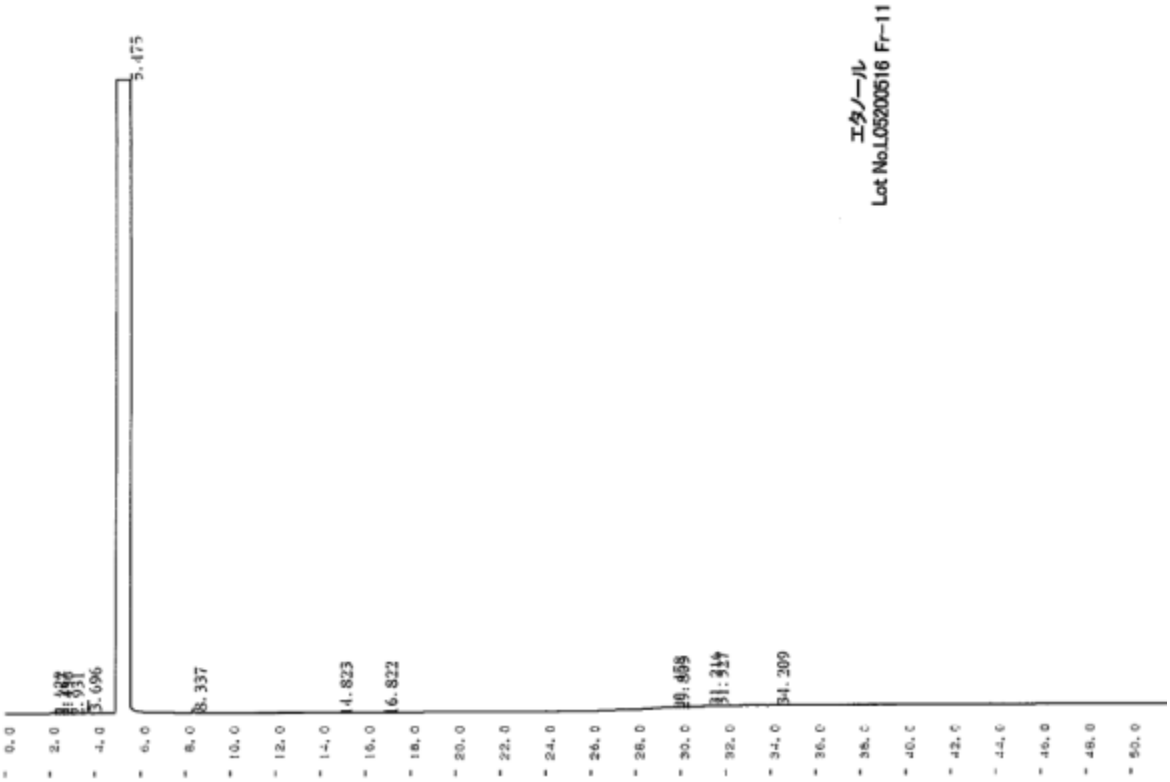


図２－１－２－２－１－２ａ－１３　Fr.11 GC チャート

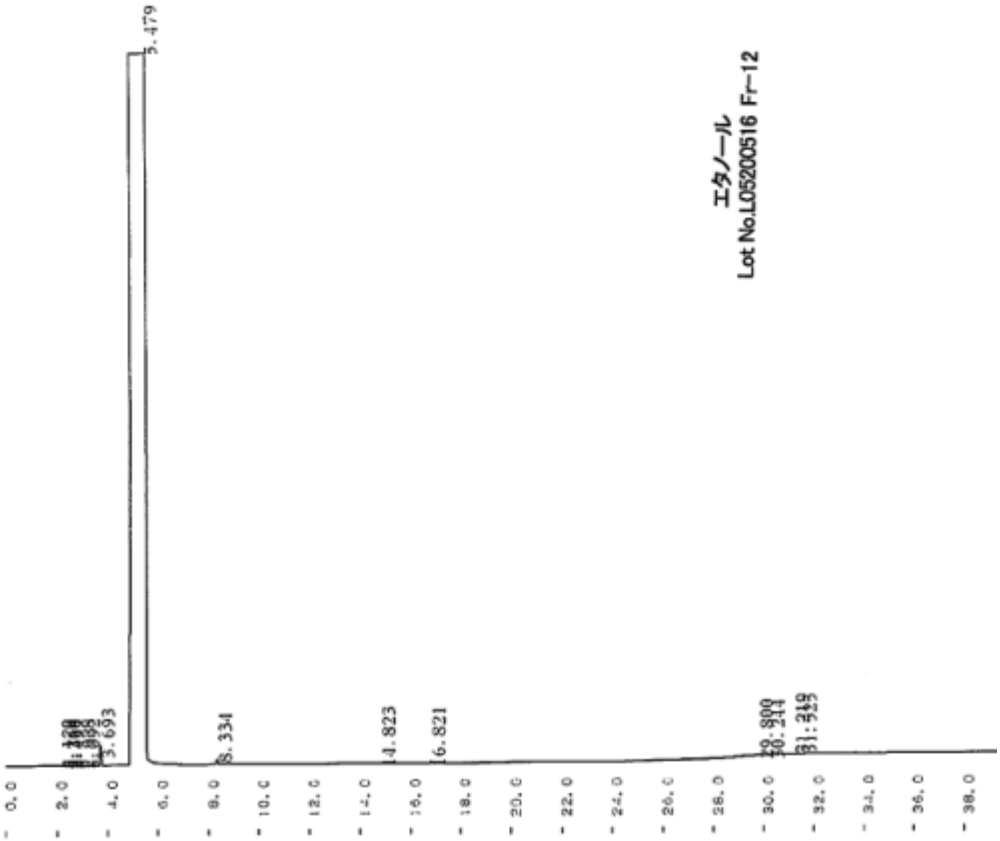


図２－１－２－２－１－２ａ－１４　Fr.12 GC チャート

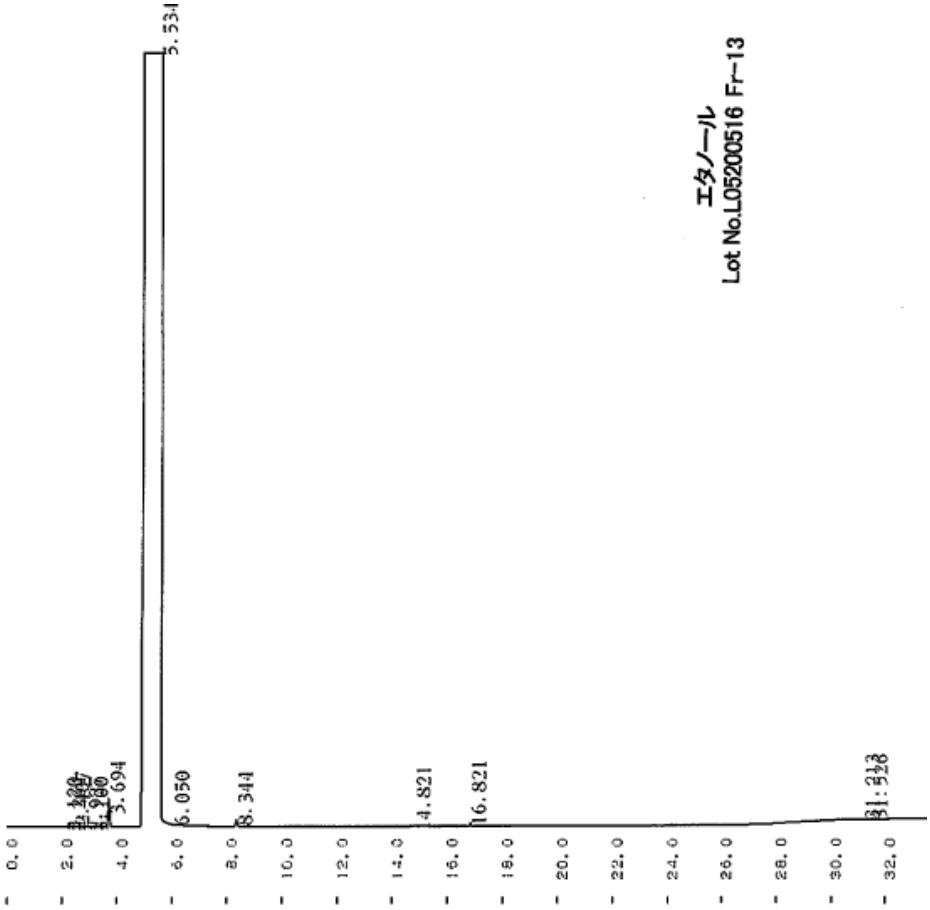


図２－１－２－２－１－２ａ－１５　Fr.13 GC チャート

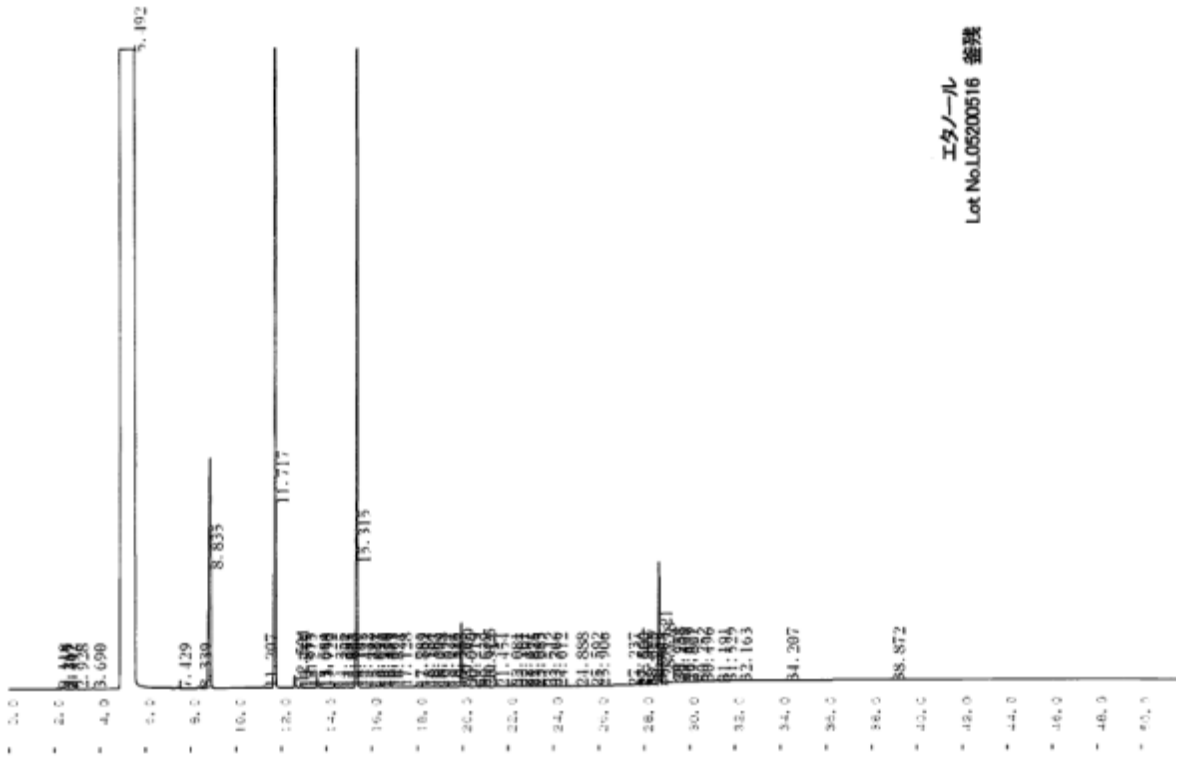


図２－１－２－２－１－２ａ－１６　残液 GC チャート

２－１－２－２－１－３　不純物分析

２－１－２－２－１－３ａ　実施内容及び成果

（方法）

混合標準溶液の調製

(1) 試薬 1mL をそれぞれエタノールで希釈し、10mL とした。

(2) (1)の溶液 1mL を分取し混合して、エタノールで希釈し、10mL とした（約 10000mg/L）。

(3) (2)の溶液をエタノールで適宜希釈し、0～約 1000mg/L とした。

アセトアルデヒド、n-プロパノール、n-ブタノールの定量

HS-GC/MS（ヘッドスペース-ガスクロマトグラフ質量分析法）

検量線用試料

(1) 混合標準溶液の 0～約 1000mg/L 溶液を 100μL 分取し、密栓した。（3～5 水準）

(2) HS-GC/MS(HS 条件：80℃20min)により測定した。

試料

(1) 試料 100μL を HS バイアル(20mL)に採取し、密栓した。

(2) HS-GC/MS(HS 条件：80℃20min)により測定した。

測定条件

使用装置：Agilent HS-GC/MS　HS(7697A)、GC(7890A)、MS(5975C)

GC：カラム DB-HeavyWAX（長さ 30m、内径 0.32mm、膜厚 0.50μm）

注入口 200℃、パルスドスプリット 30psi×1.5min、1：6

キャリヤーガス流量 He 1.8mL/min

加熱条件：OVEN40℃(10min)-10℃/min-260℃(8min)

MS：EI（+）、スキャンモード m/z 30-500、イオン化電圧 70eV

イオン源 230℃、四重極 150℃、ゲイン係数 2

HS：OVEN80℃、LOOP90℃、LINE150℃、試料保温時間 20 分

メタノール、酢酸エチル、イソプロパノール、アセタール、高級アルコールの定量

GC/FID（ガスクロマトグラフ水素炎イオン化検出法）

検量線用試料

(1) 混合標準溶液の 0～約 1000mg/L 溶液を 2mL 分取した。（4～5 水準）

(2) GC/FID により測定した。

試料

(1) 試料を GC バイアル（2mL）に採取した。

(2) GC/FID により測定した。

測定条件

使用装置：Agilent GC（7890A）

GC：カラム CP-PoraPLOT Q-HT（長さ 25m、内径 0.53mm、膜厚 20μm）

注入口 200℃、スプリットレス注入法（注入量 2μL）

キャリヤーガス流量 N2 2.0mL/min

加熱条件：OVEN40℃（2min）-20℃/min-260℃（5min）

FID：温度 260℃、H2 30mL/min、Air 400mL/min、メークアップガス N2　25mL/min

（結果）

2 塔目で得られた各フラクションの不純物濃度を表２－１－２－２－１－３ａ－１に示す。
Fr.4～13 ではエチレン製造ラボ試験の要求品質を満たすことを確認した。

表２－１－２－２－１－３ａ－１　不純物分析結果（単位：ppm）

	アセトアルデヒド	メタノール	酢酸エチル	イソプロパノール	n-プロパノール	n-ブタノール	アセタール	高級アルコール
要求品質	<30	<50	<80	<20	<20	<10	<50	<100
Fr.1	970	938	1110	<12	<0.8	<0.8	43	<40
Fr.2	107	410	188	<12	<0.8	<0.8	23	<40
Fr.3	39	169	27	<12	<0.8	<0.8	17	<40
Fr.4	19	<39	<9	<12	<0.8	<0.8	<8	<40
Fr.5	12	<39	<9	<12	<0.8	<0.8	<8	<40
Fr.6	8	<39	<9	<12	<0.8	<0.8	<8	<40
Fr.7	<7	<39	<9	<12	<0.8	<0.8	<8	<40
Fr.8	<7	<39	<9	<12	<0.8	<0.8	<8	<40
Fr.9	<7	<39	<9	<12	<0.8	<0.8	<8	<40
Fr.10	<7	<39	<9	<12	<0.8	<0.8	<8	<40
Fr.11	<7	<39	<9	<12	<0.8	<0.8	<8	<40
Fr.12	<7	<39	<9	<12	<0.8	<0.8	<8	<40
Fr.13	<7	<39	<9	<12	<0.8	<0.8	<8	<40
残液	8	<39	<9	13	1635	27	<8	990

２－１－２－２－２　60 段 2 塔蒸留によるエタノールサンプル精製（50Ｌスケール）

前章では 10Ｌスケールの 2 塔蒸留でエタノール精製を確認することができた。今後、バイオポリエチレンサンプルを製造するためには大量サンプルが必要となることから、まずは 50Ｌ蒸留器での精製試験を行い、スケールアップ可能かを確認した。

２－１－２－２－２－１　１塔目 50L60 段蒸留

２－１－２－２－２－１ａ　実施内容及び成果

（方法）

60 段蒸留装置（容量：50L）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 140℃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２－１－２－２－２－１ａ－１に示す。Fr.14 採取までは塔頂温度は 78.3～80.0℃と安定しており、Fr.15 を除くサンプルでは 90%以上のエタノール濃度を示した。

表２－１－２－２－２－１ａ－１　単蒸留試験結果

	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	4.9	50,020			
Fr.1	96.9	37.0	140℃	98.3℃	78.3℃
Fr.2	95.2	36.3	140℃	98.6℃	78.5℃
Fr.3	95.4	161.6	140℃	99.0℃	78.5℃
Fr.4	95.6	158.8	140℃	99.6℃	78.7℃
Fr.5	95.9	155.4	140℃	100.1℃	78.8℃
Fr.6	95.2	152.4	140℃	100.1℃	78.8℃
Fr.7	95.4	157.7	140℃	100.6℃	78.8℃
Fr.8	95.6	155.2	140℃	100.7℃	78.7℃
Fr.9	96.1	156.7	140℃	101.3℃	78.9℃
Fr.10	95.5	157.2	140℃	101.7℃	79.0℃
Fr.11	95.5	156.0	140℃	102.1℃	79.0℃
Fr.12	95.4	154.4	140℃	102.2℃	78.8℃
Fr.13	94.9	158.2	140℃	102.5℃	79.1℃
Fr.14	90.5	36.6	140℃	102.6℃	80.0℃
Fr.15	81.2	37.8	140℃	102.6℃	83.2℃
残液	0.0	47,800			

元液および単蒸留の各フラクションの GC 分析結果を図２－１－２－２－２－１ａ－２～１９に示す。元液（図２－１－２－２－２－１ａ－２）では多くの不純物ピークが観察され、Fr.1～2 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２－１－２－２－２－１ａ－３～４）。Fr.3～13 では 5.7 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２－１－２－２－２－１ａ－５～１５）。Fr.14～15 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２－１－２－２－２－１ａ－１６～１８）。２塔目は Fr.3～13 をまとめて処理することとした。

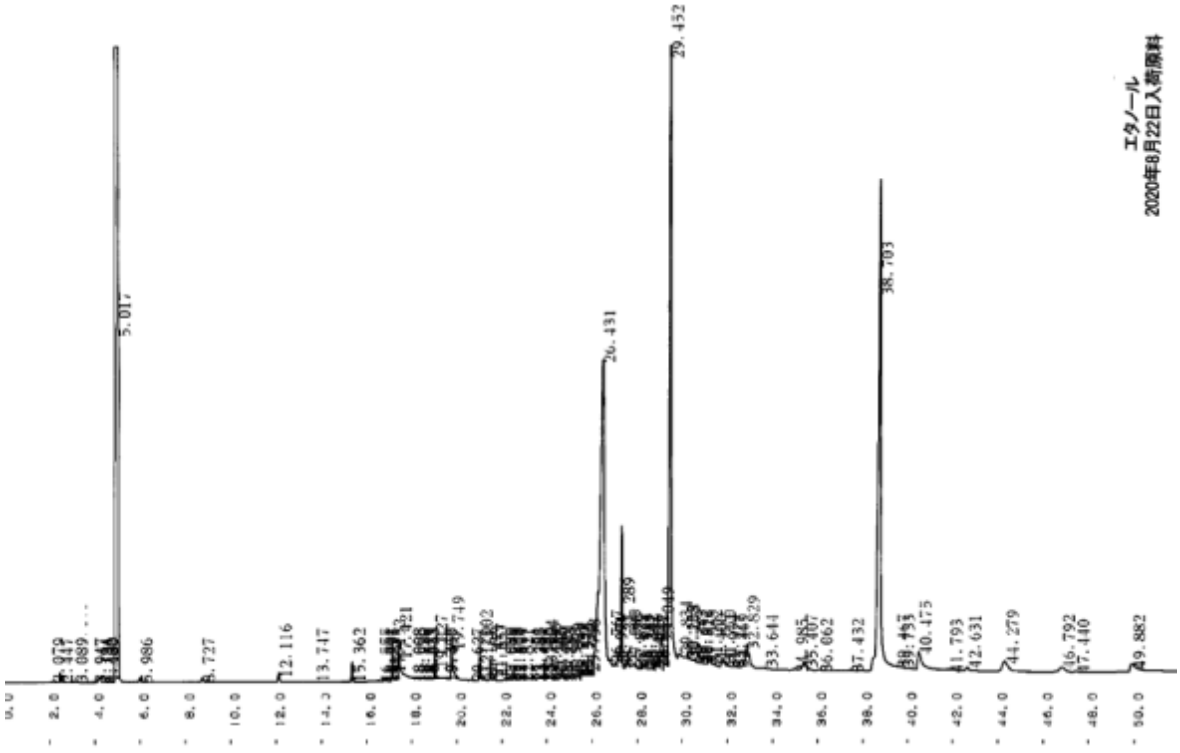


図２－１－２－２－２－１ａ－２　元液 GC チャート

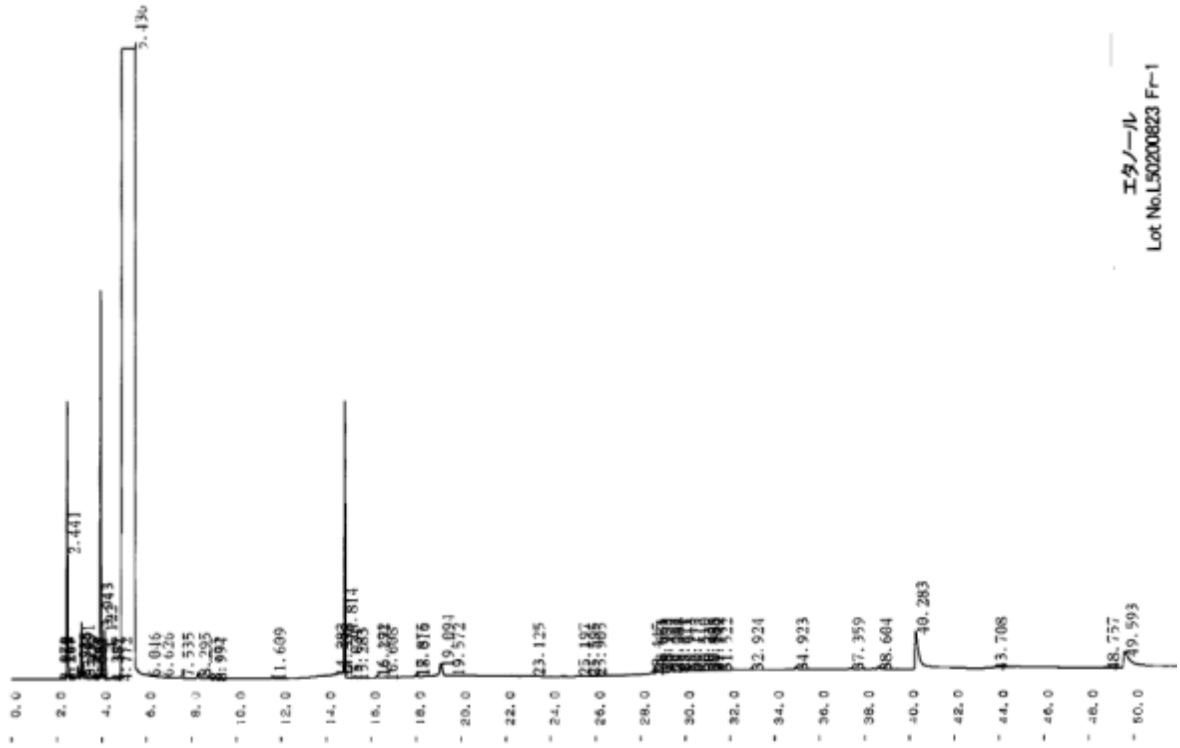


図２－１－２－２－２－１ａ－３　Fr.1 GC チャート

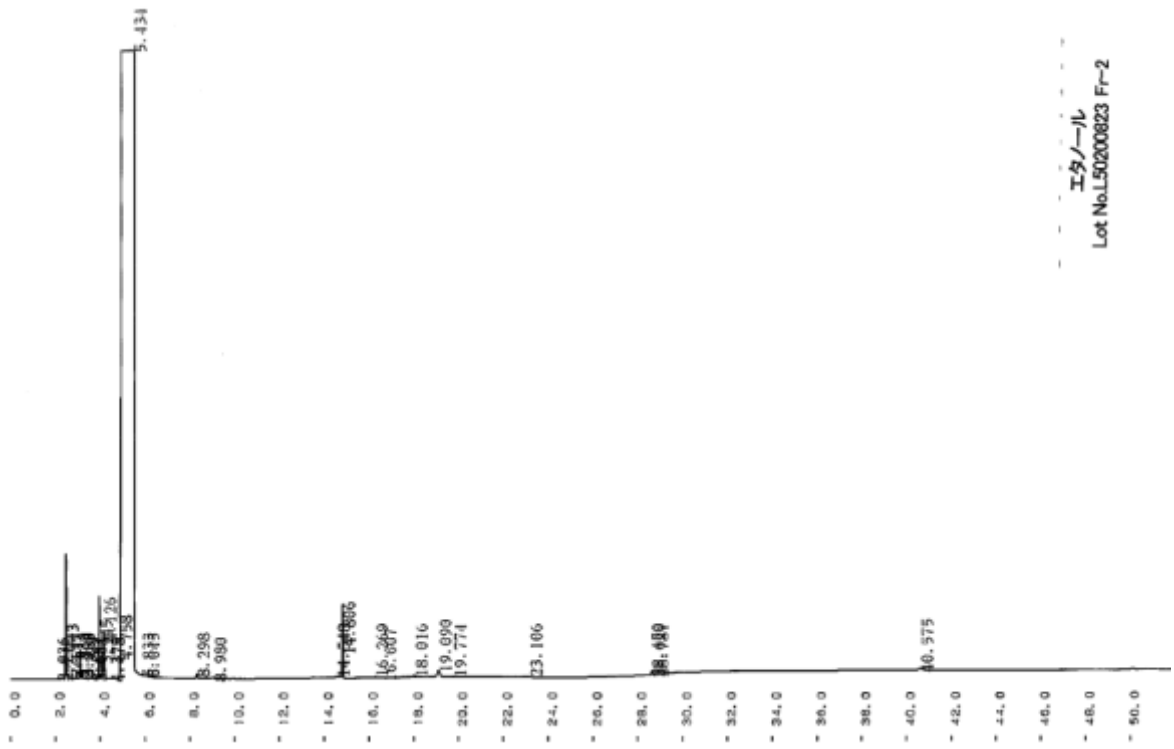


図２－１－２－２－２－１ａ－４　Fr.2 GC チャート

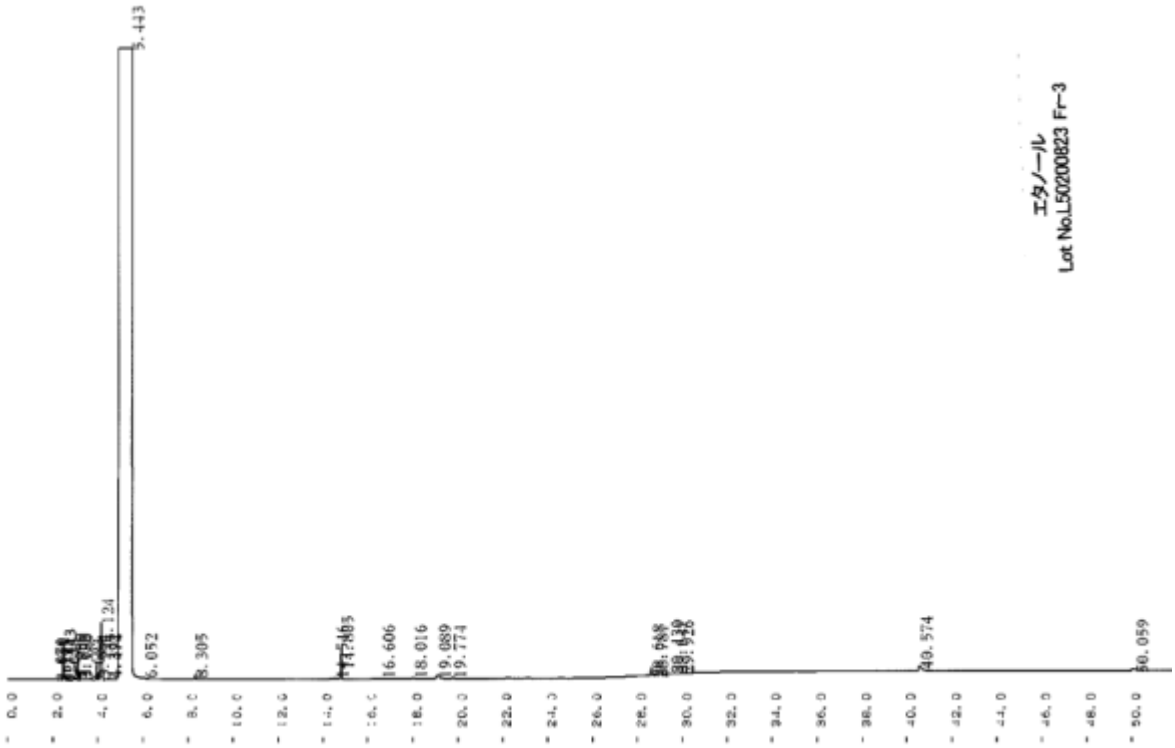


図２－１－２－２－２－１ａ－５　Fr.3 GC チャート

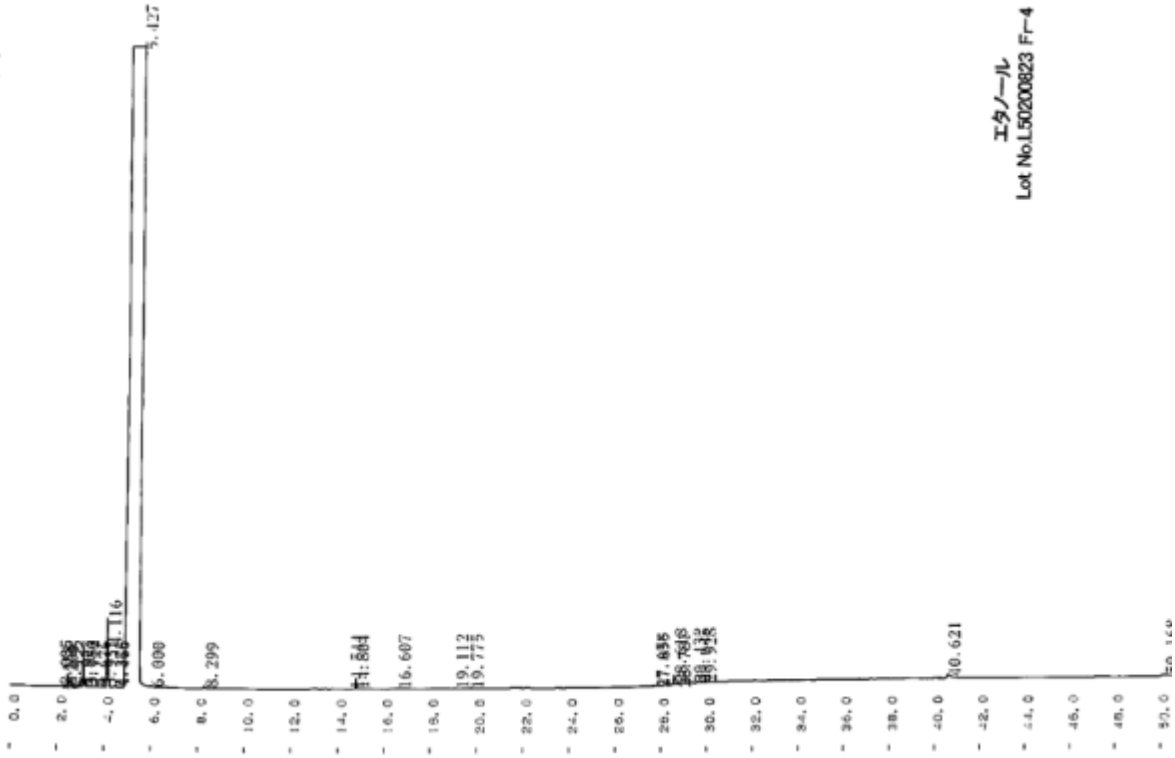


図２－１－２－２－２－１ａ－６　Fr.4 GC チャート

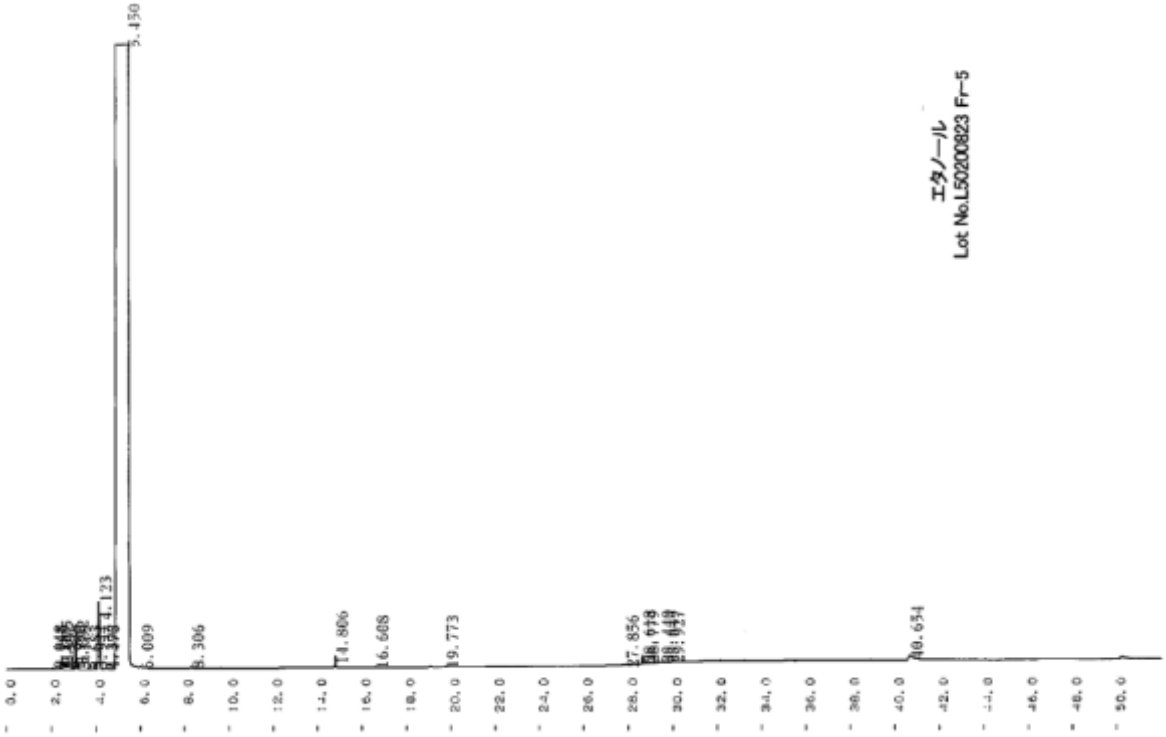


図２－１－２－２－２－１ａ－７　Fr.5 GC チャート

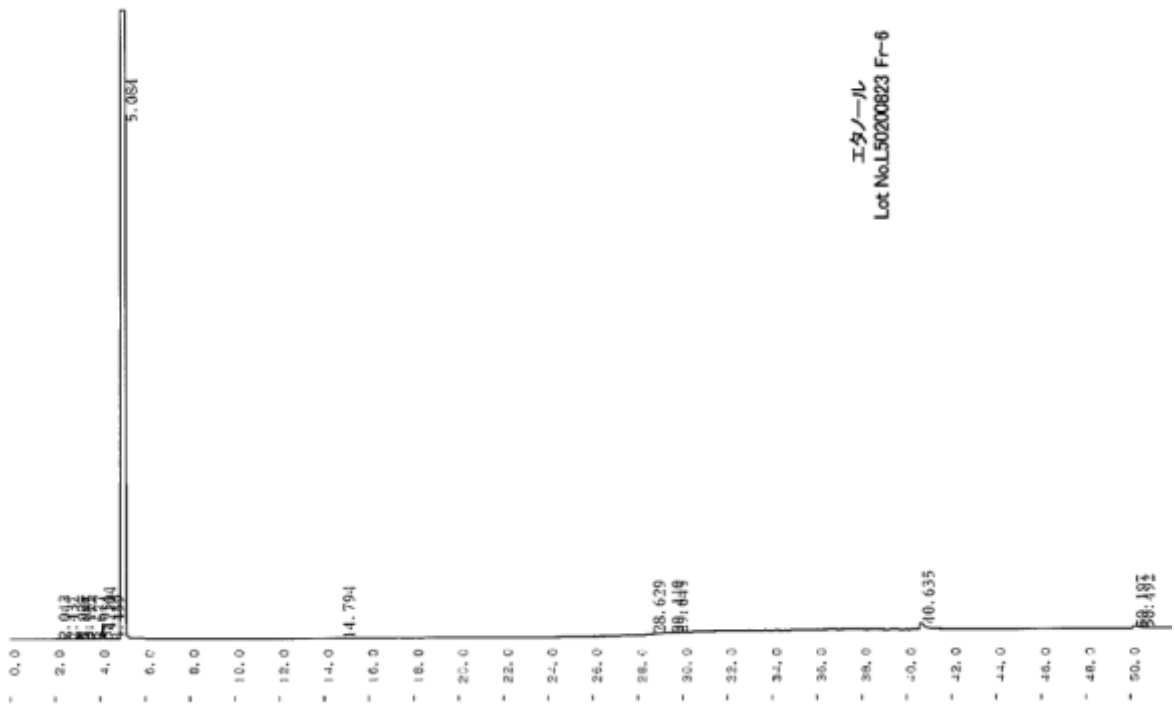


図２－１－２－２－２－１ａ－８　Fr.6 GC チャート

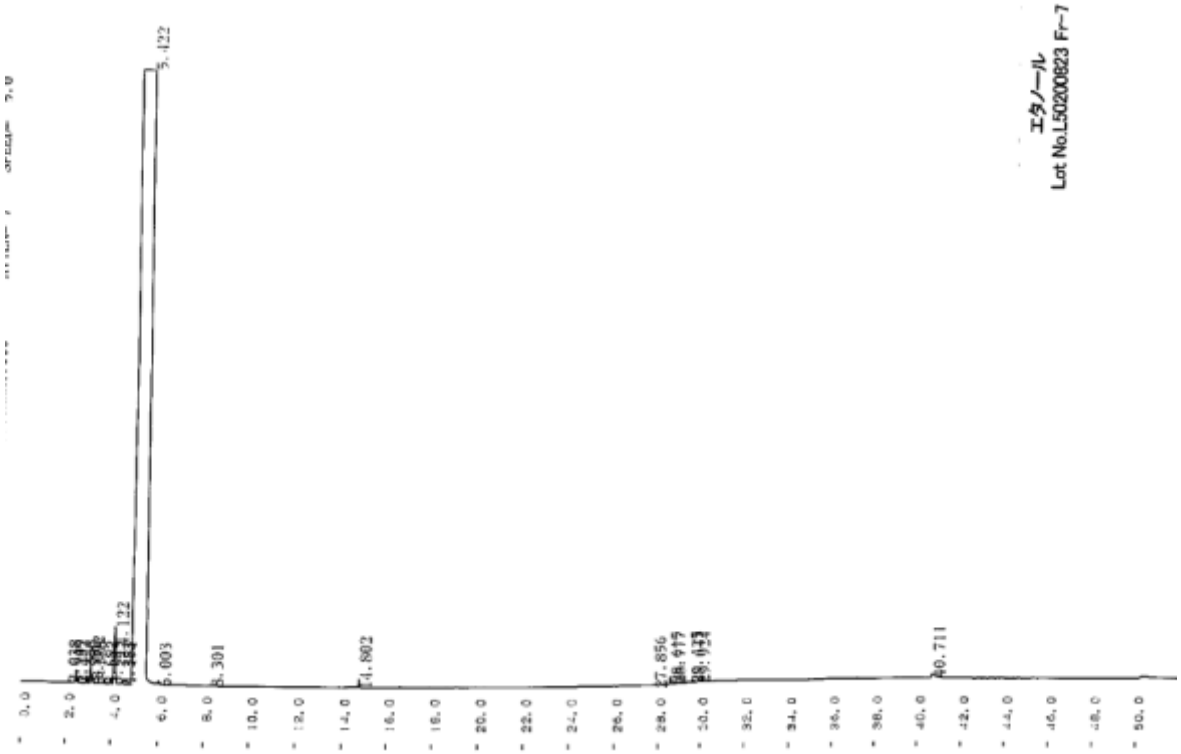


図２－１－２－２－２－１ａ－９　Fr.7 GC チャート

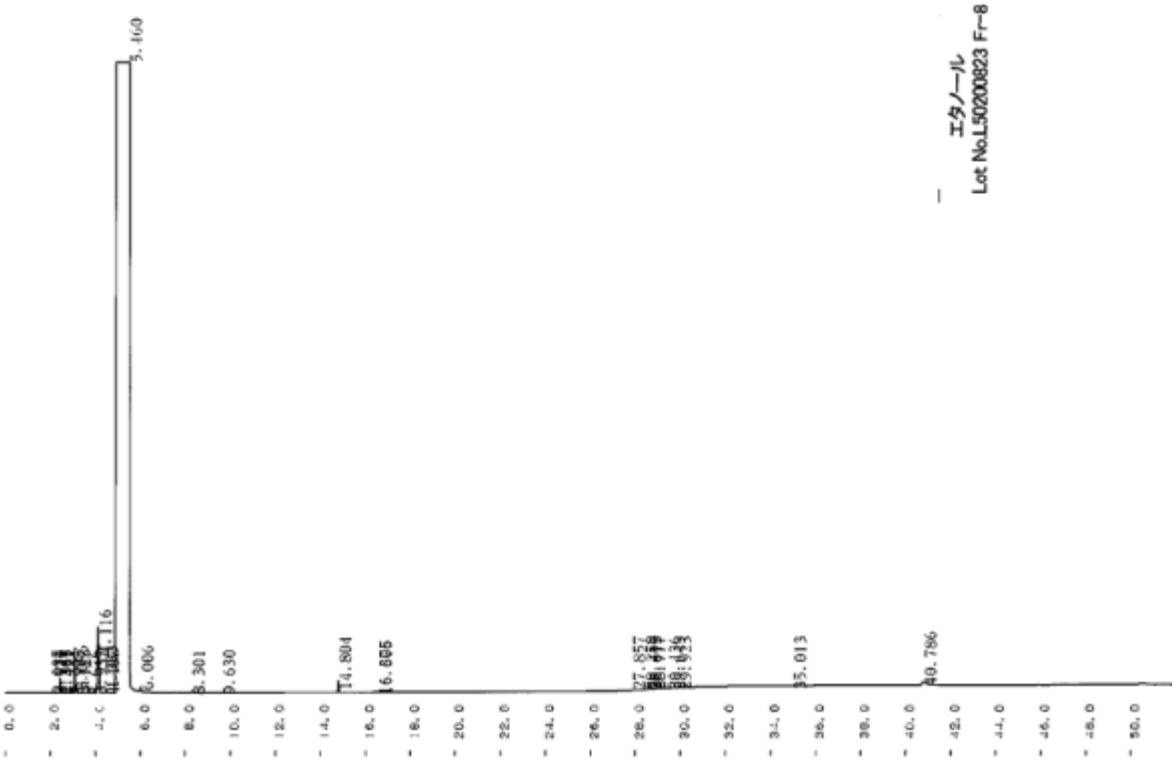


図２－１－２－２－２－１ａ－１０　Fr.8 GC チャート

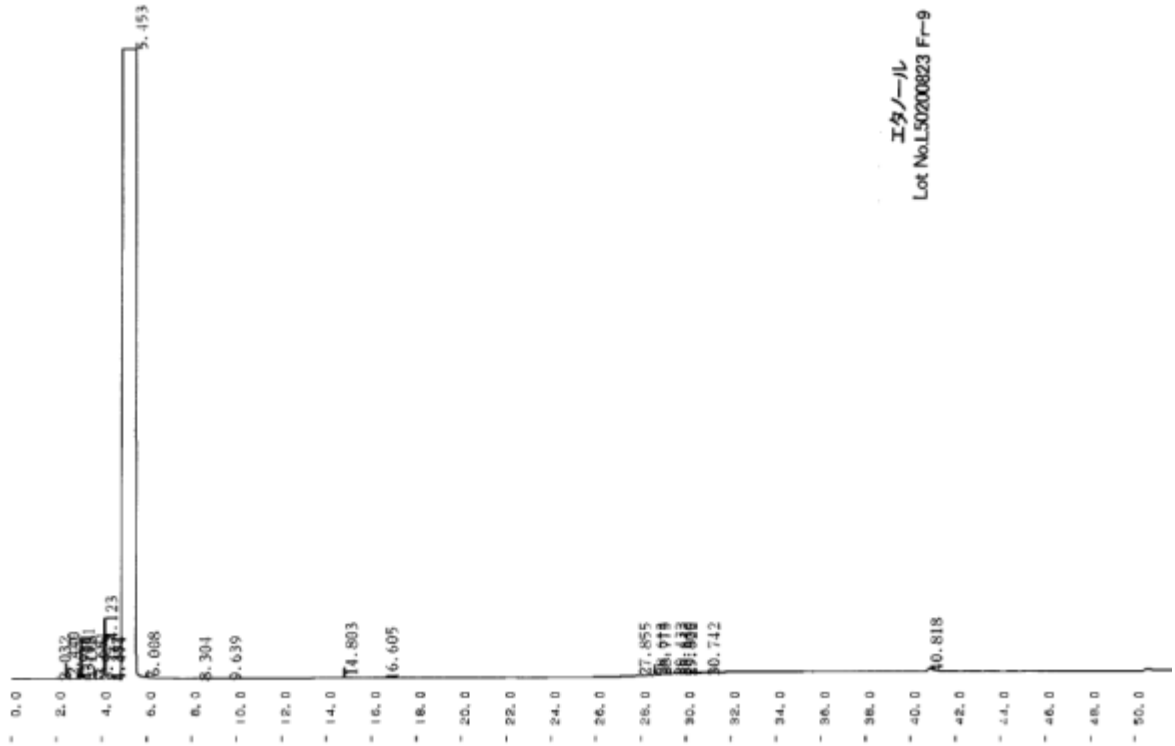


図２－１－２－２－２－１ａ－１１　Fr.9 GC チャート

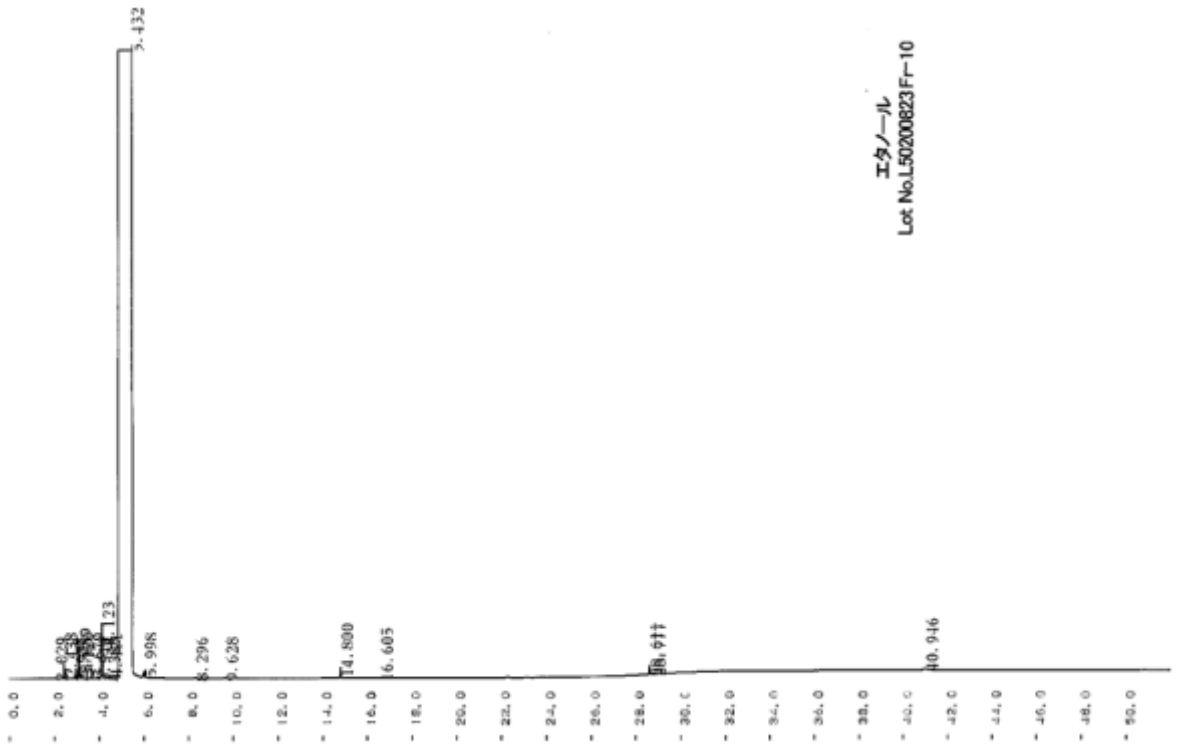


図２－１－２－２－２－１ａ－１２　Fr.10 GC チャート

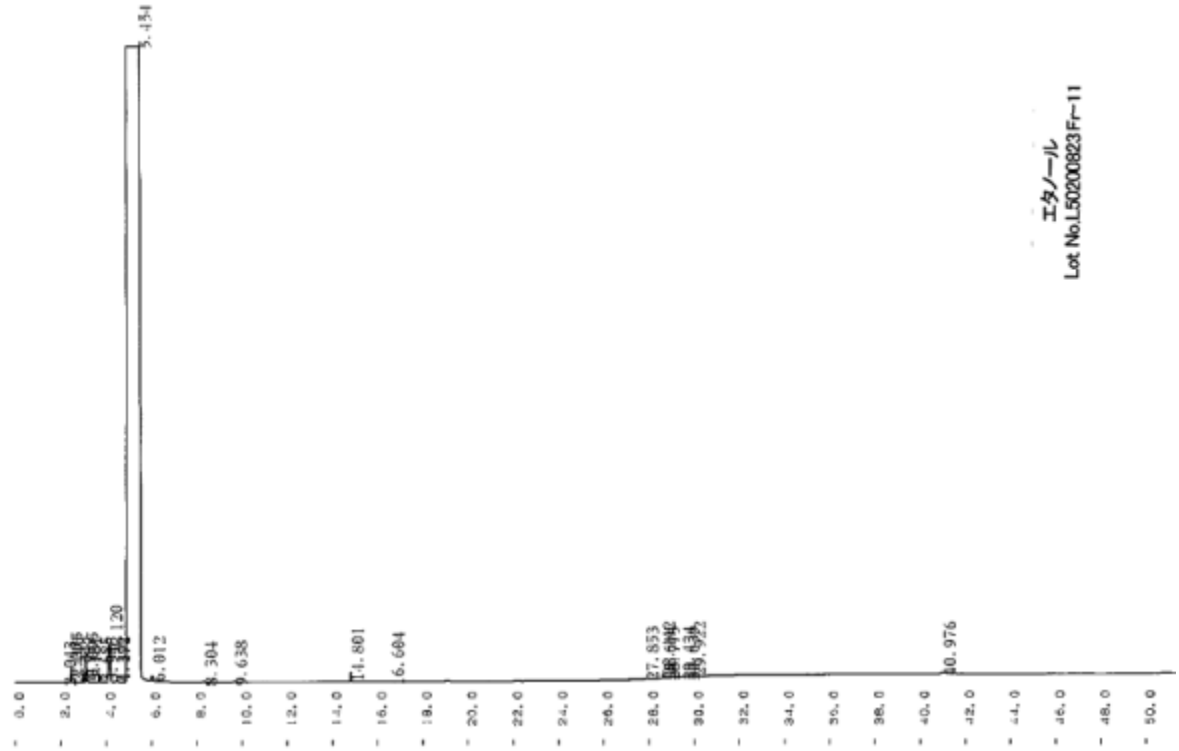


図２－１－２－２－２－１ａ－１３　Fr.11 GC チャート

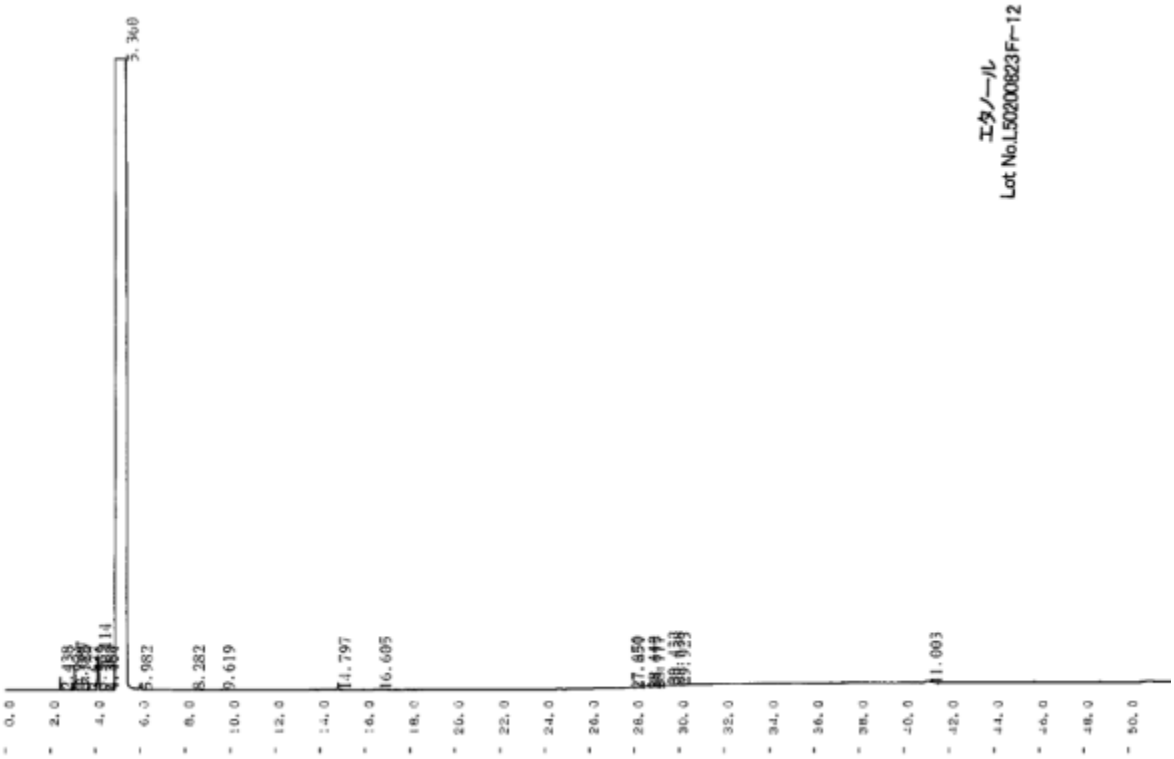


図２－１－２－２－２－１ａ－１４　Fr.12 GC チャート

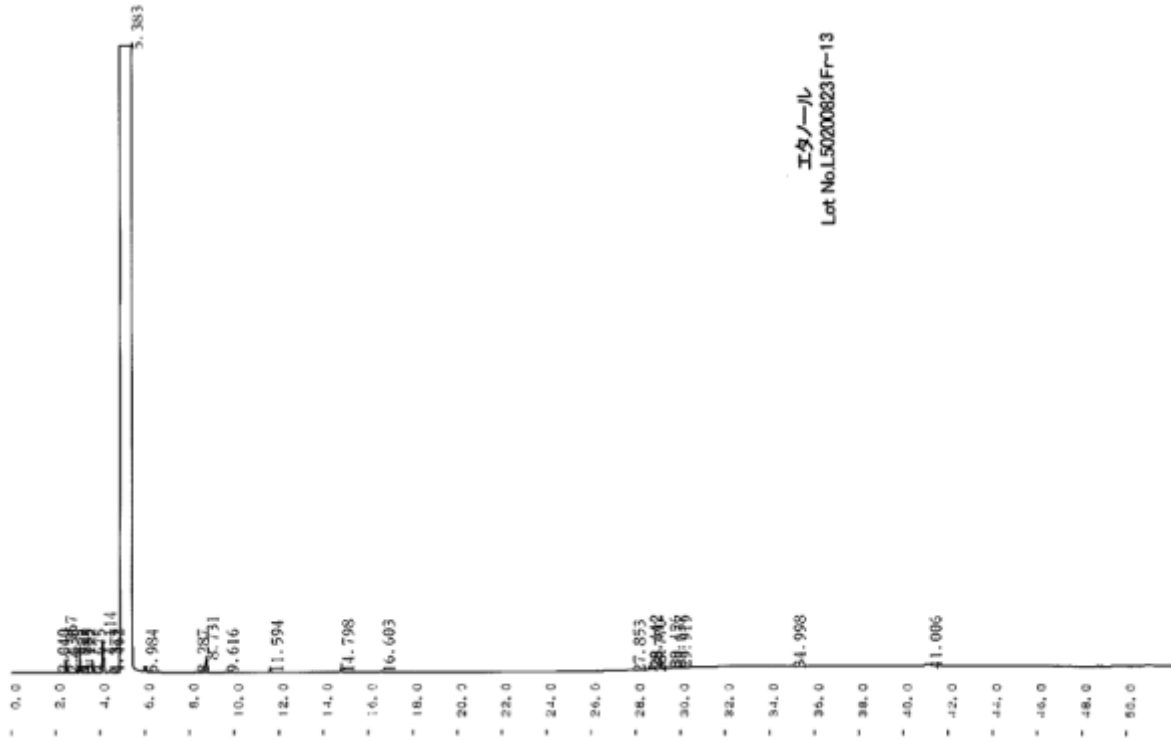


図２－１－２－２－２－１ａ－１５　Fr.13 GC チャート

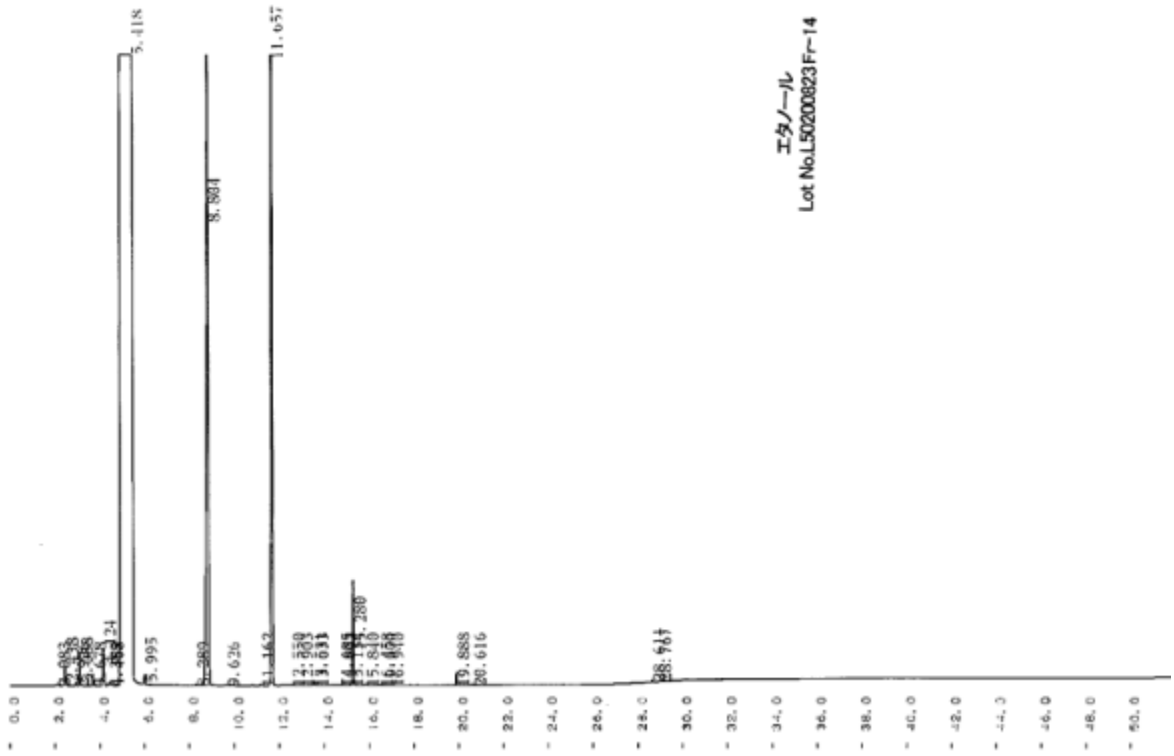


図２－１－２－２－２－１ａ－１６　Fr.14 GC チャート

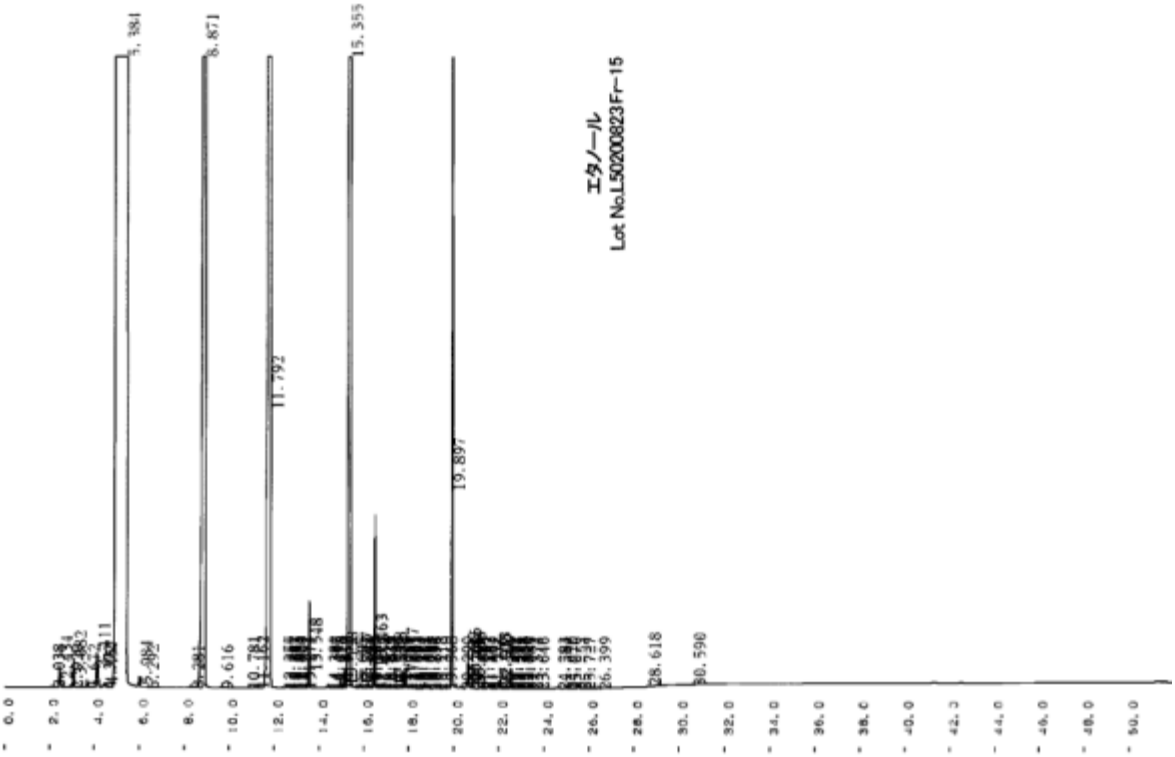


図２－１－２－２－２－１ａ－１７　Fr.15 GC チャート

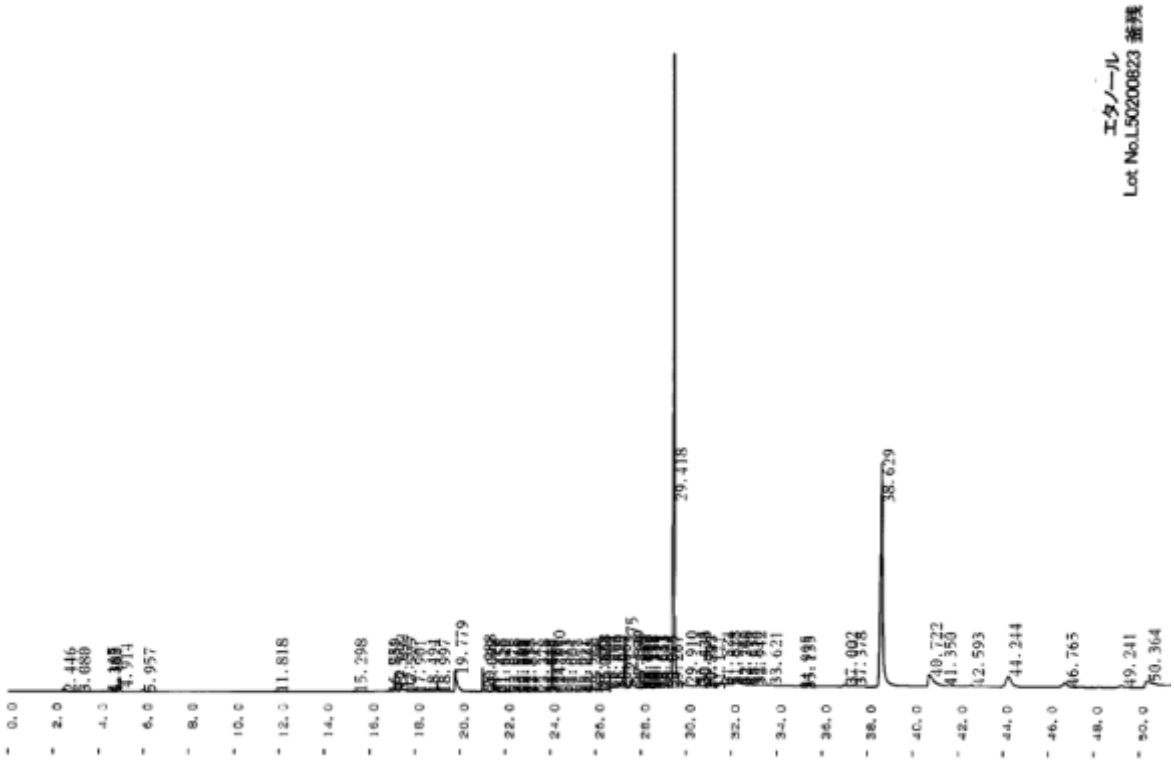


図２－１－２－２－２－１ａ－１８　残液 GC チャート

２－１－２－２－２－２　２塔目 5L60 段蒸留

２－１－２－２－２－２ａ　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、5L 60 段蒸留による処理を行った。試験条件は、元液：Fr.3～13、エタノール濃度 95.0%、1701g、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 110～125℃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２－１－２－２－２－２ａ－１に示す。塔頂温度は 79-80℃付近で安定し、Fr.2 以降で目標である約 95%以上のエタノール濃度を示すサンプルを得た。

表２－１－２－２－２－２ａ－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	95.0	1,701			
Fr.1	95.7	41.7	110℃	82.0℃	78.5℃
Fr.2	95.9	36.3	110℃	81.9℃	78.7℃
Fr.3	95.3	35.5	110℃	81.9℃	78.6℃
Fr.4	95.0	76.6	110℃	81.4℃	78.7℃
Fr.5	95.2	77.4	110℃	80.9℃	78.5℃
Fr.6	95.1	77.7	110℃	81.0℃	78.6℃
Fr.7	95.2	159.6	110℃	81.1℃	78.6℃
Fr.8	95.1	159.6	110℃	81.3℃	78.6℃
Fr.9	95.2	161.8	110℃	81.5℃	78.7℃
Fr.10	95.4	163.8	110℃	81.1℃	78.8℃
Fr.11	95.2	162.5	110℃	81.3℃	78.8℃
Fr.12	95.5	160.9	110℃	83.6℃	78.8℃
Fr.13	94.8	164.1	110℃	80.4℃	78.7℃
Fr.14	94.1	71.4	110℃	80.2℃	78.5℃
Fr.15	95.0	23.4	140℃	83.4℃	78.7℃
Fr.16	94.9	36.2	150℃	92.8℃	78.5℃
Fr.17	94.9	6.3	160℃	101.9℃	78.0℃
残液	0.0	37.8			

60 段蒸留の各フラクションの GC 分析結果を図２－１－２－２－２－２ａ－２～１９に示す。元液(図２－１－２－２－２－２ａ－２)ではいくつかの不純物ピークが観察されていたが、Fr.3～13 では 5.7 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２－１－２－２－２－２ａ－５～１５）。Fr.1～2 ではエタノールよりも前にピークが観察され（図２－１－２－２－２－２ａ－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２－１－２－２－２－２ａ－１９）。

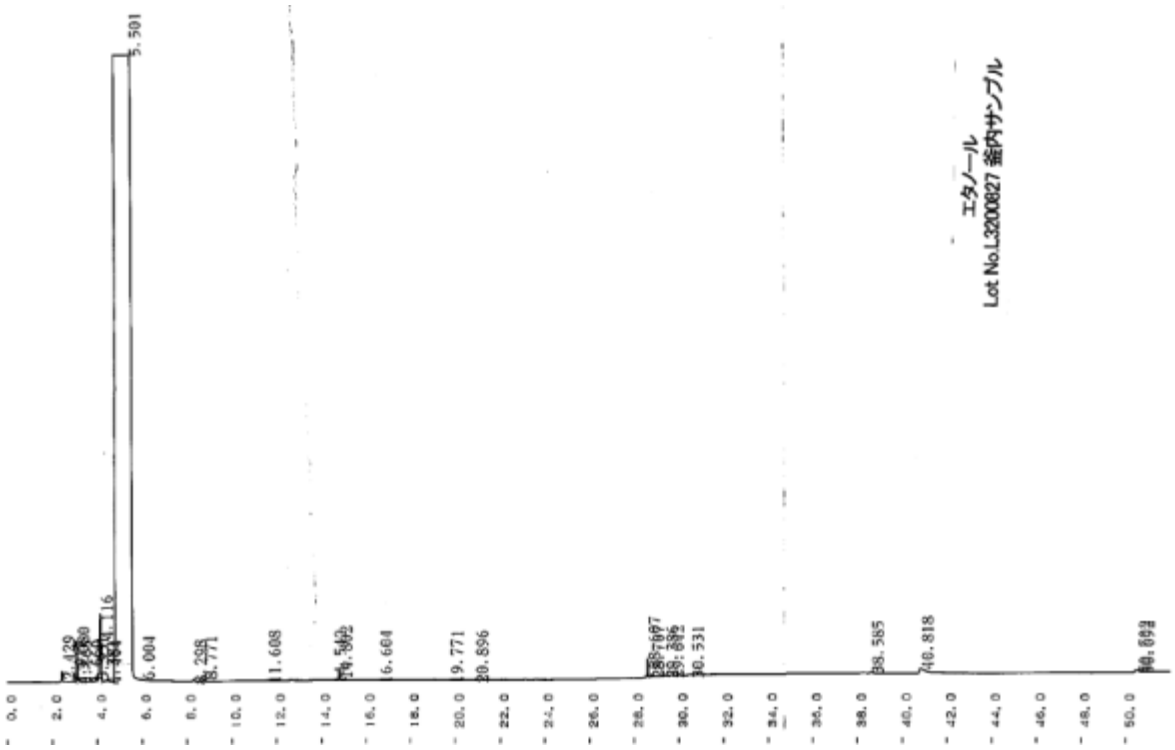


図２－１－２－２－２－２ａ－２　元液 GC チャート

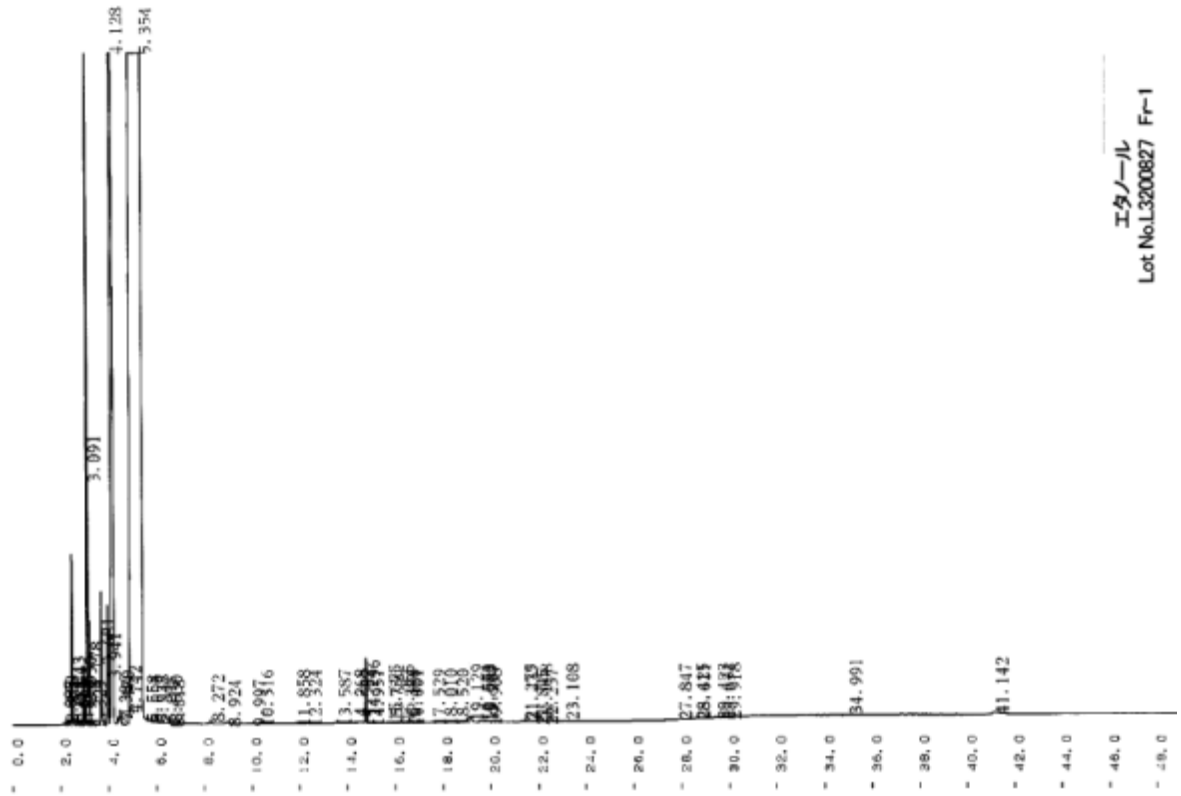


図２－１－２－２－２－２ａ－３　Fr.1 GC チャート

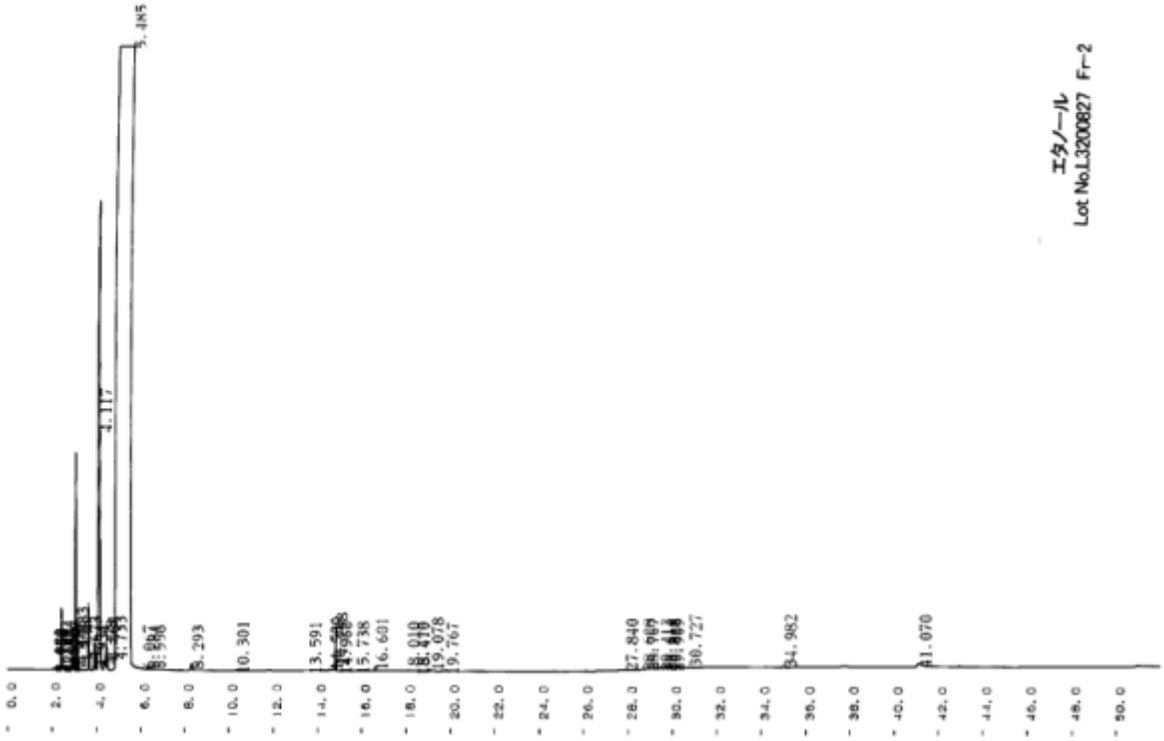


図２－１－２－２－２－２ａ－４　Fr.2 GC チャート

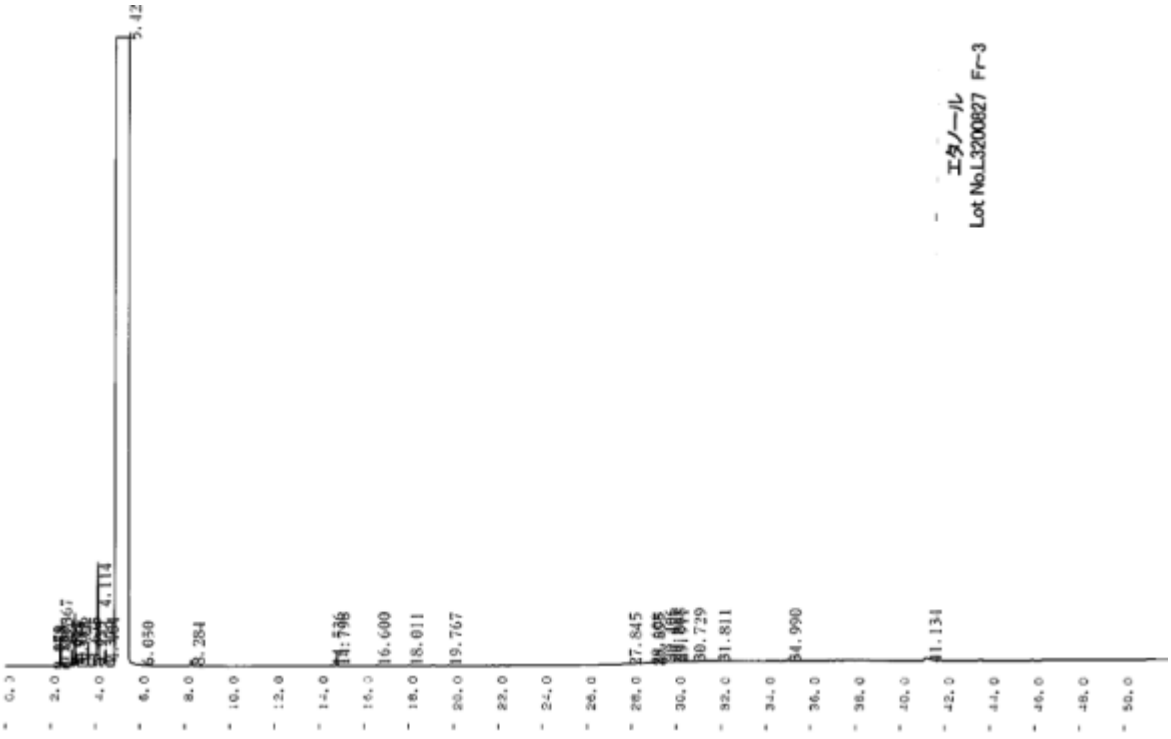


図２－１－２－２－２－２ａ－５　Fr.3 GC チャート

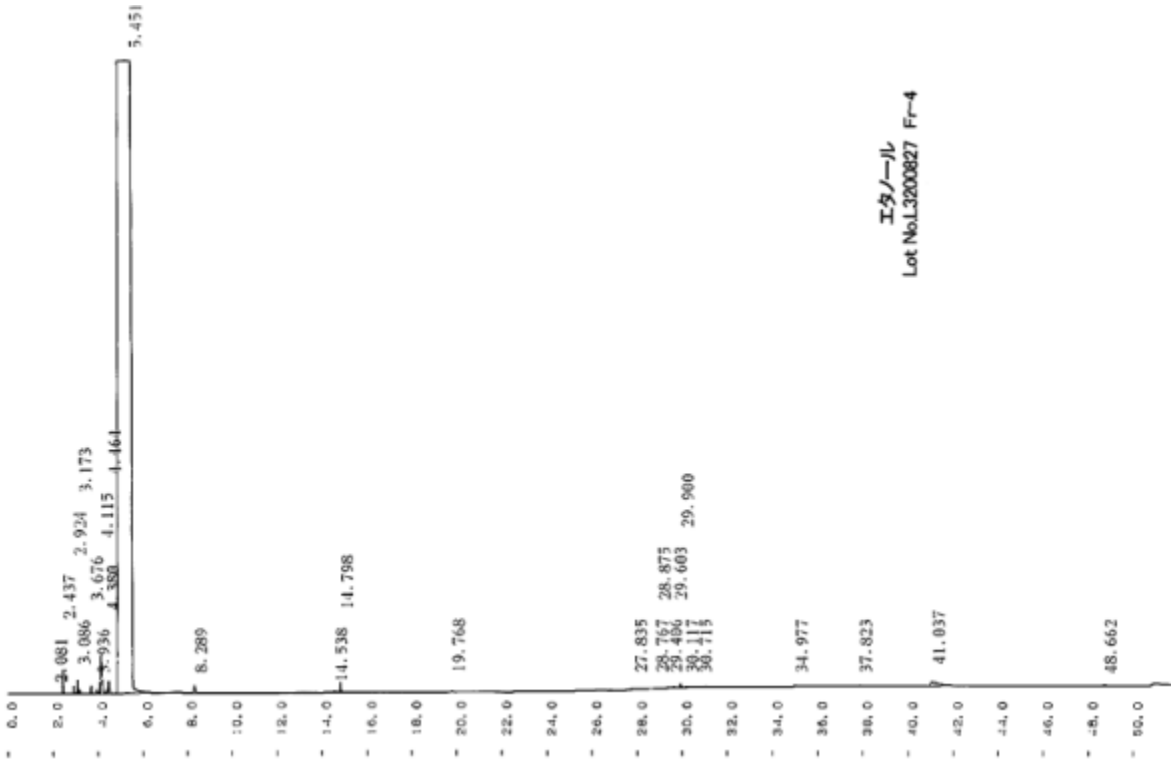


図２－１－２－２－２－２ａ－６　Fr.4 GC チャート

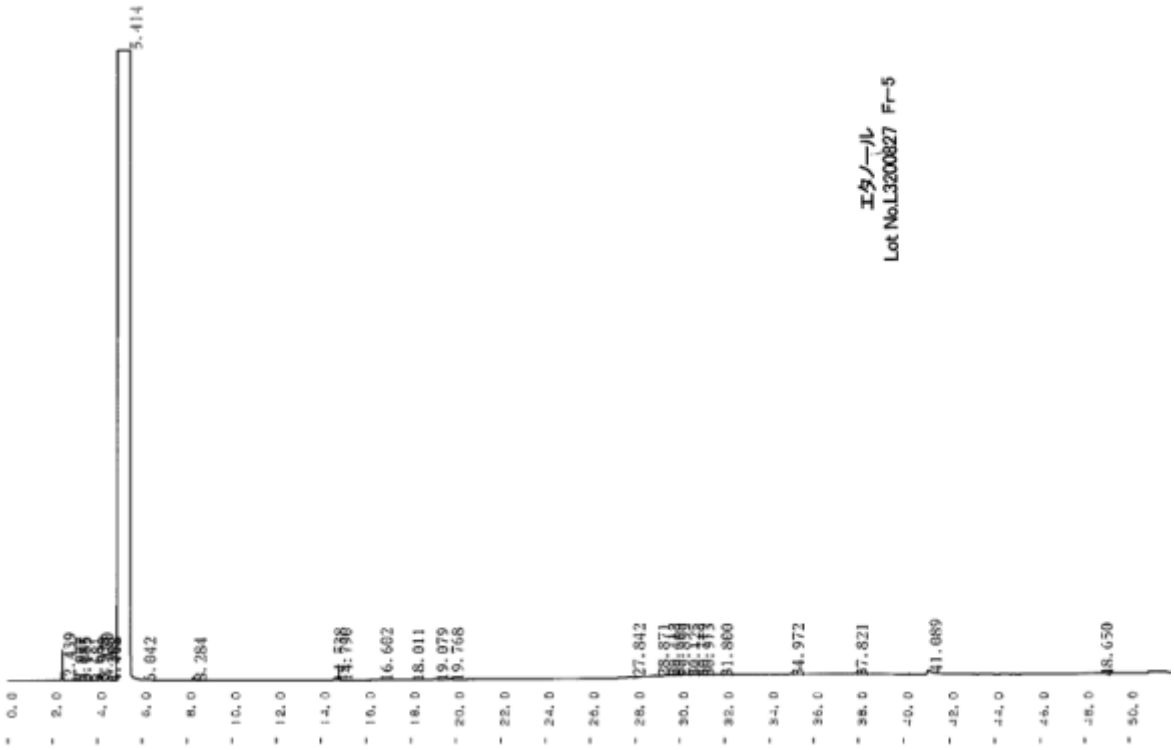


図２－１－２－２－２－２ａ－７　Fr.5 GC チャート

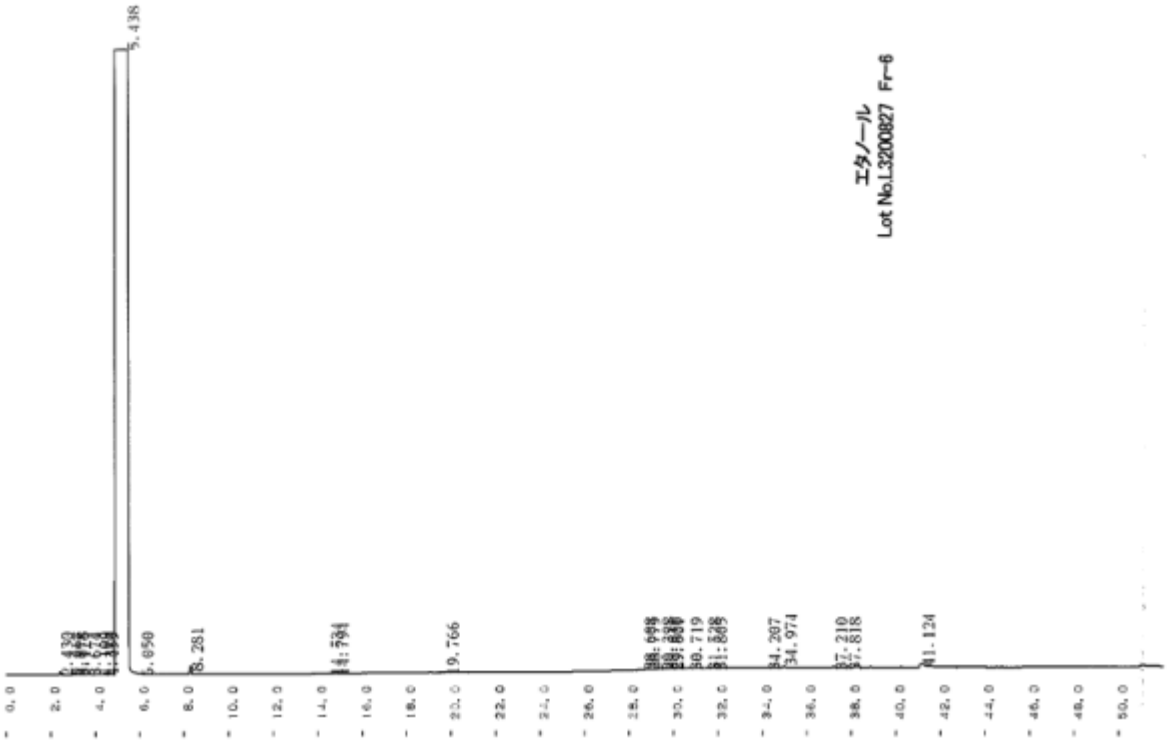


図２－１－２－２－２－２ａ－８　Fr.6 GC チャート

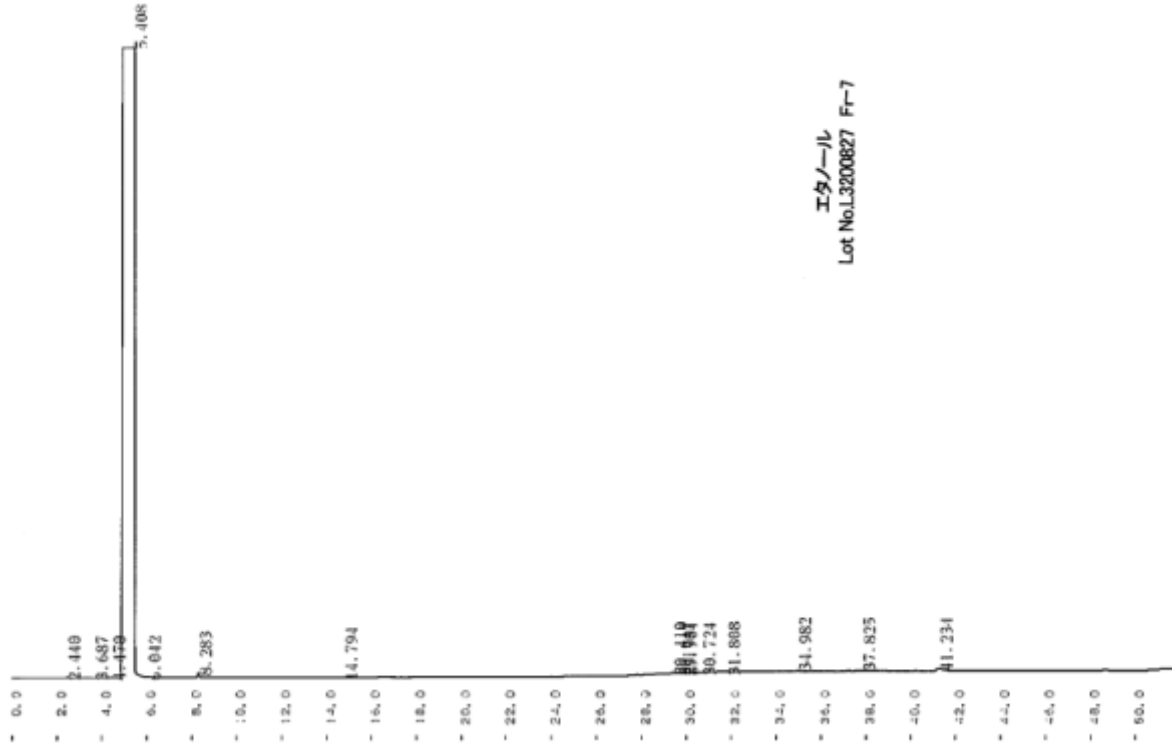


図２－１－２－２－２－２ａ－９　Fr.7 GC チャート

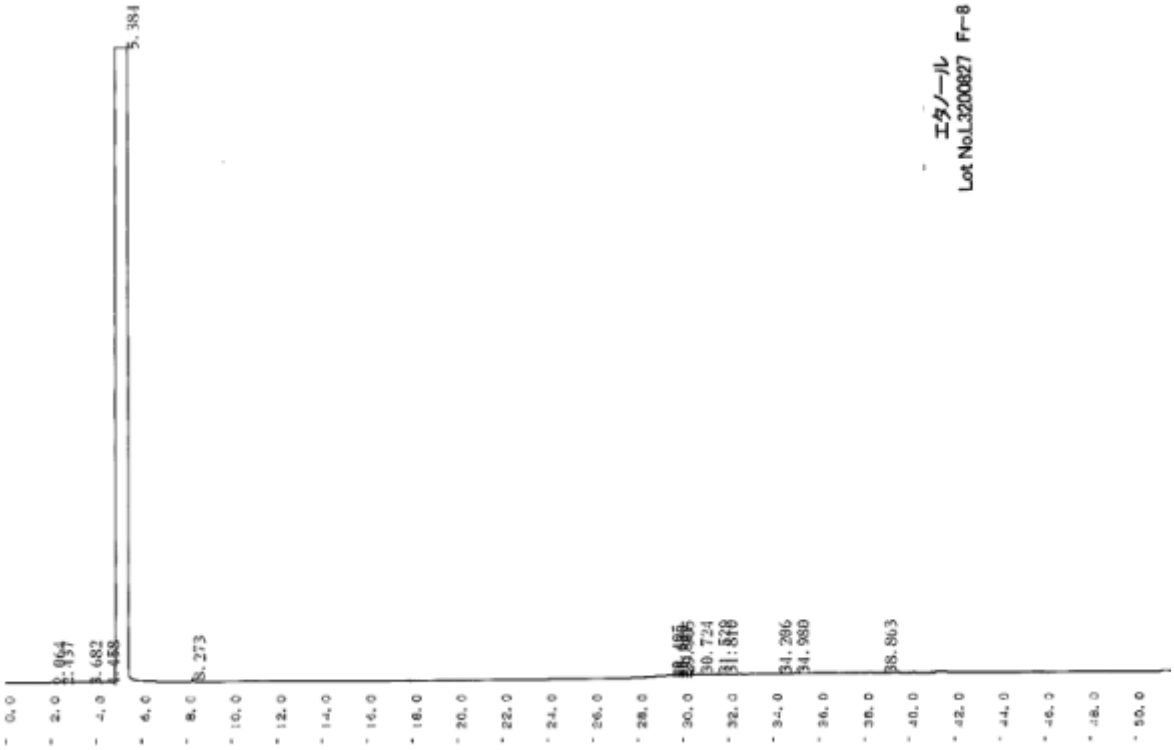


図２－１－２－２－２－２ａ－１０　Fr.8 GC チャート

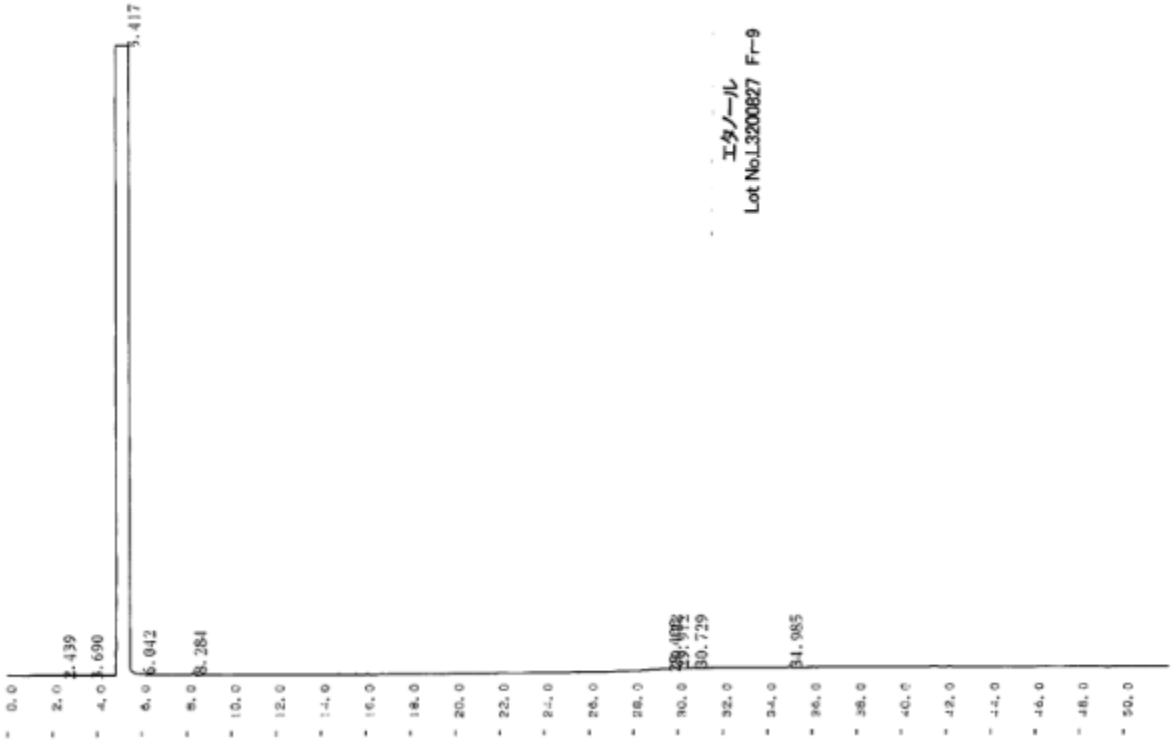


図２－１－２－２－２－２ａ－１１　Fr.9 GC チャート

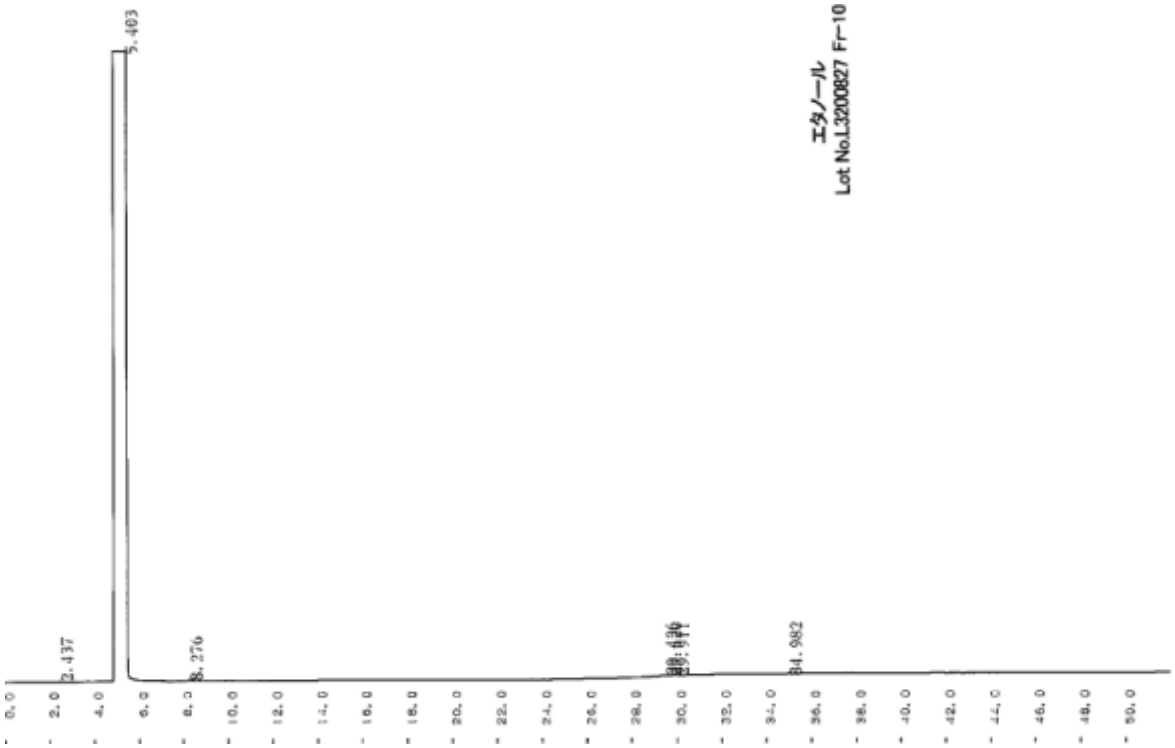


図２－１－２－２－２－２ａ－１２　Fr.10 GC チャート

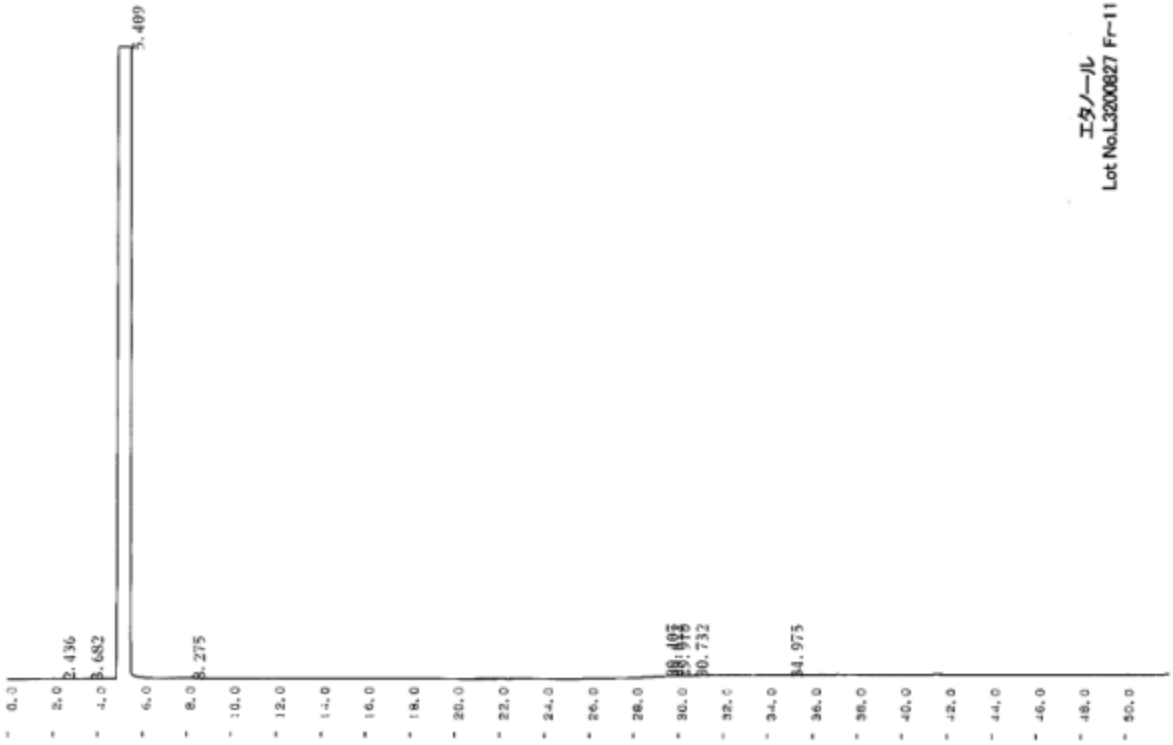


図２－１－２－２－２－２ａ－１３　Fr.11 GC チャート

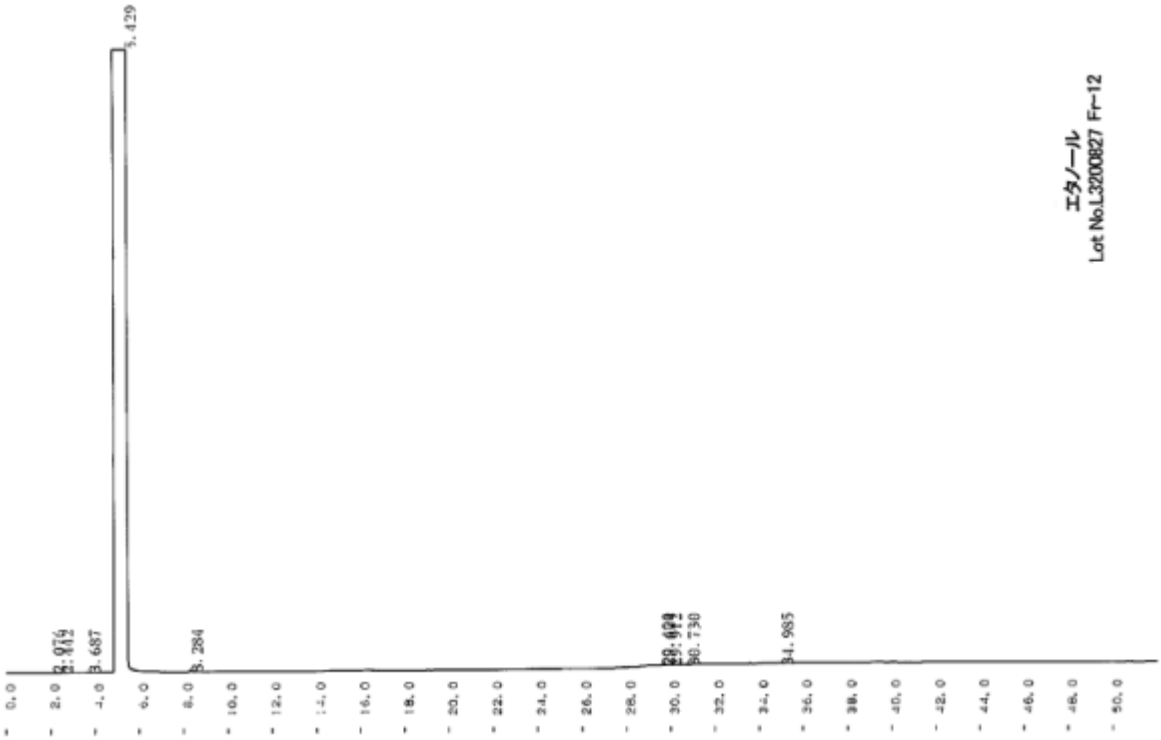


図２－１－２－２－２－２ａ－１４　Fr.12 GC チャート

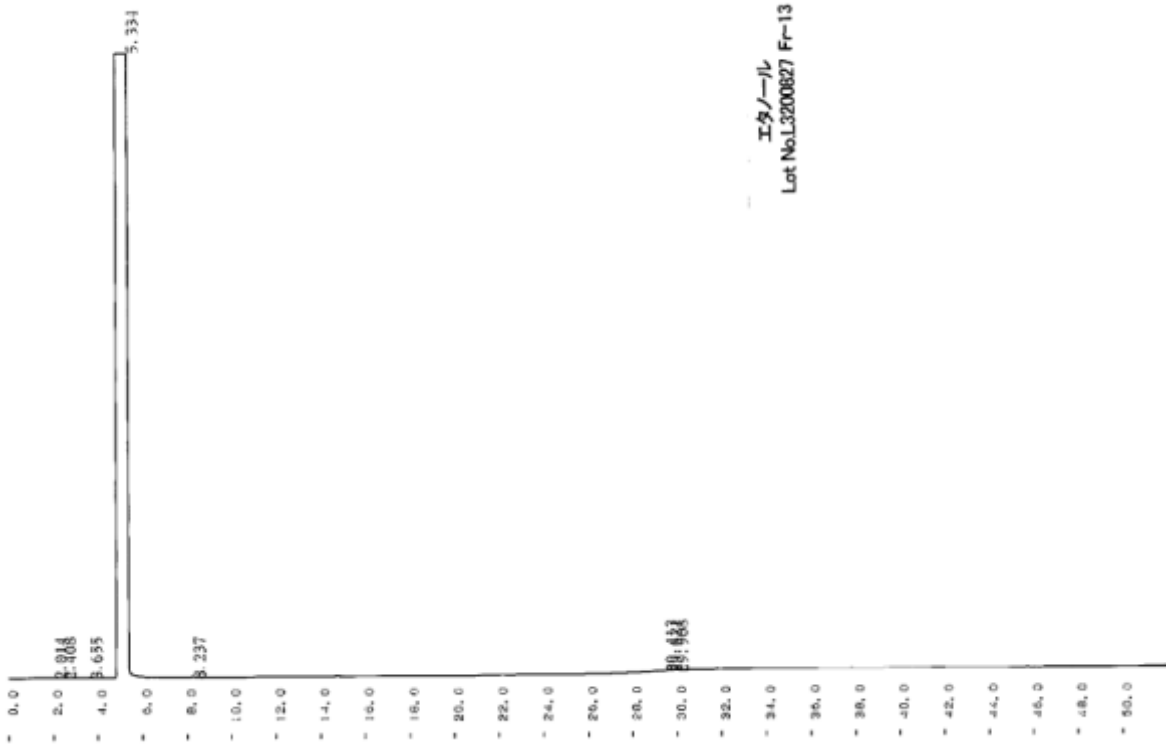


図２－１－２－２－２－２ａ－１５　Fr.13 GC チャート

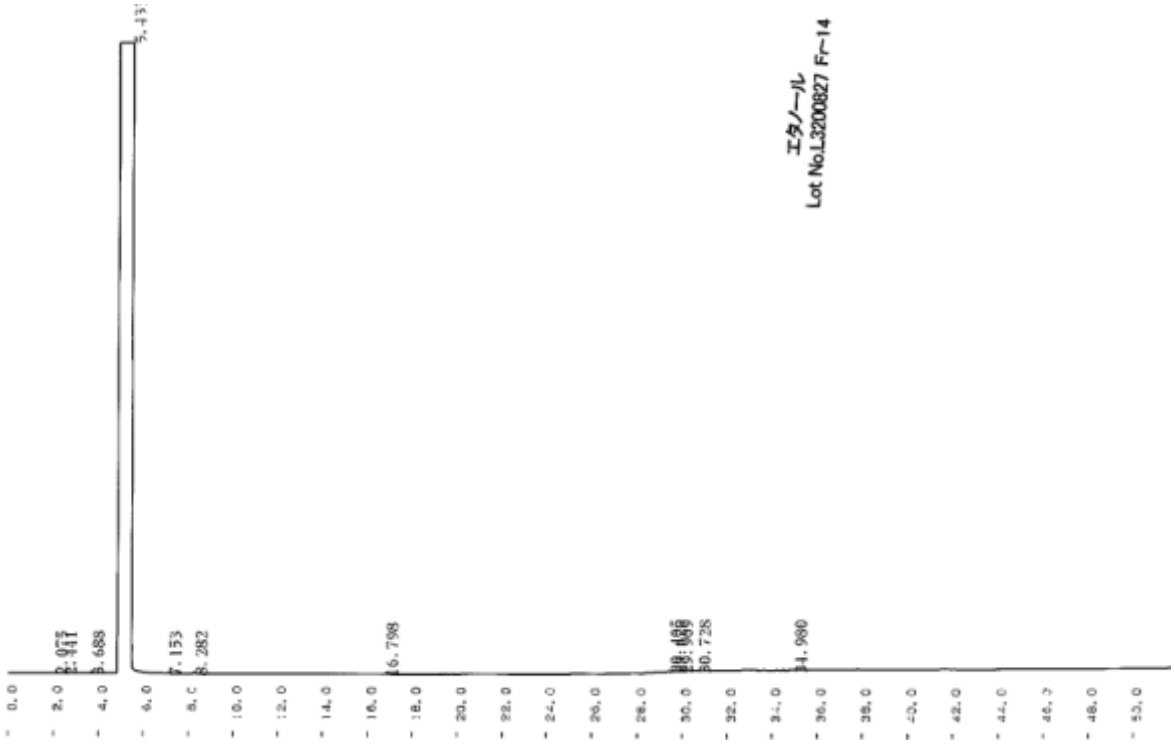


図２－１－２－２－２－２ａ－１６　Fr.14 GC チャート

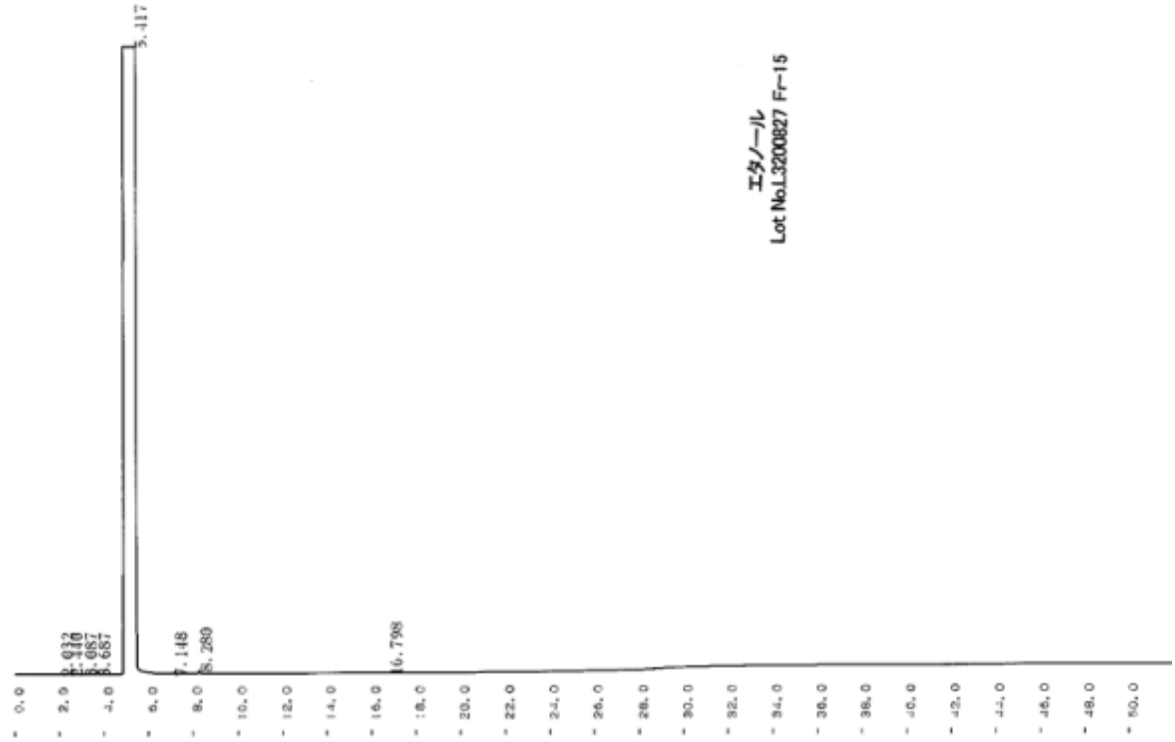


図２－１－２－２－２－２ａ－１７　Fr.15 GC チャート

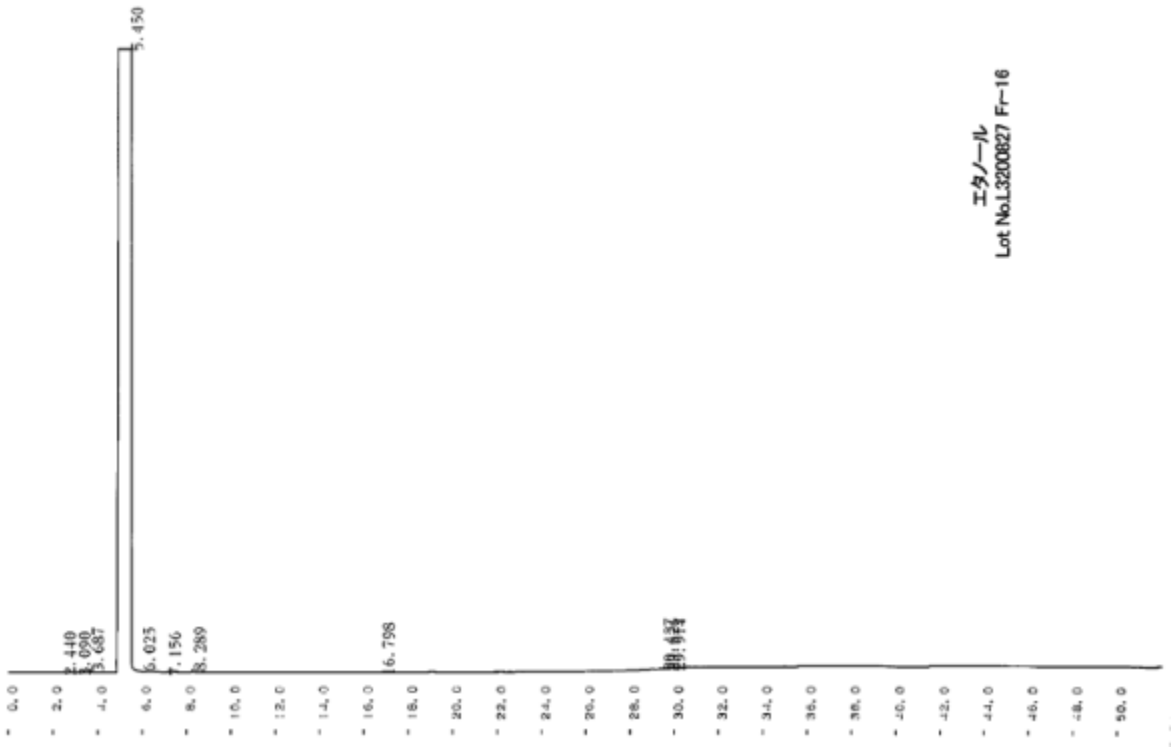


図２－１－２－２－２－２ａ－１８　Fr.16 GC チャート

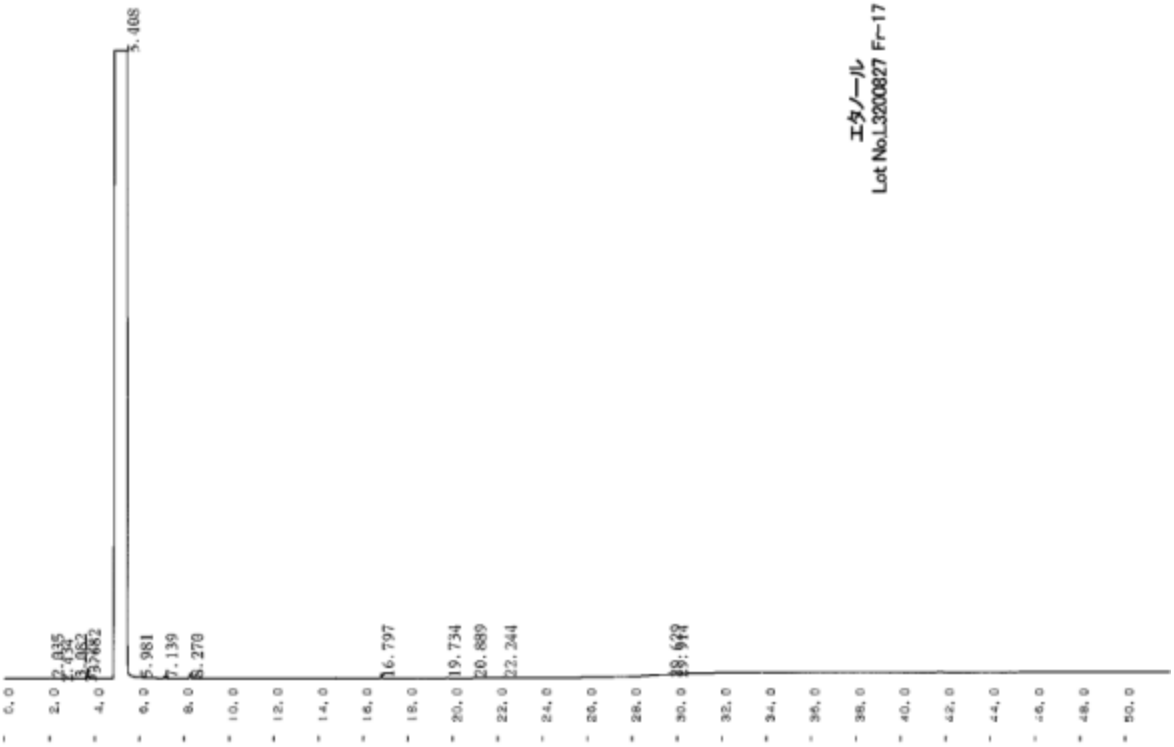


図２－１－２－２－２－２ａ－１９　Fr.17 GC チャート

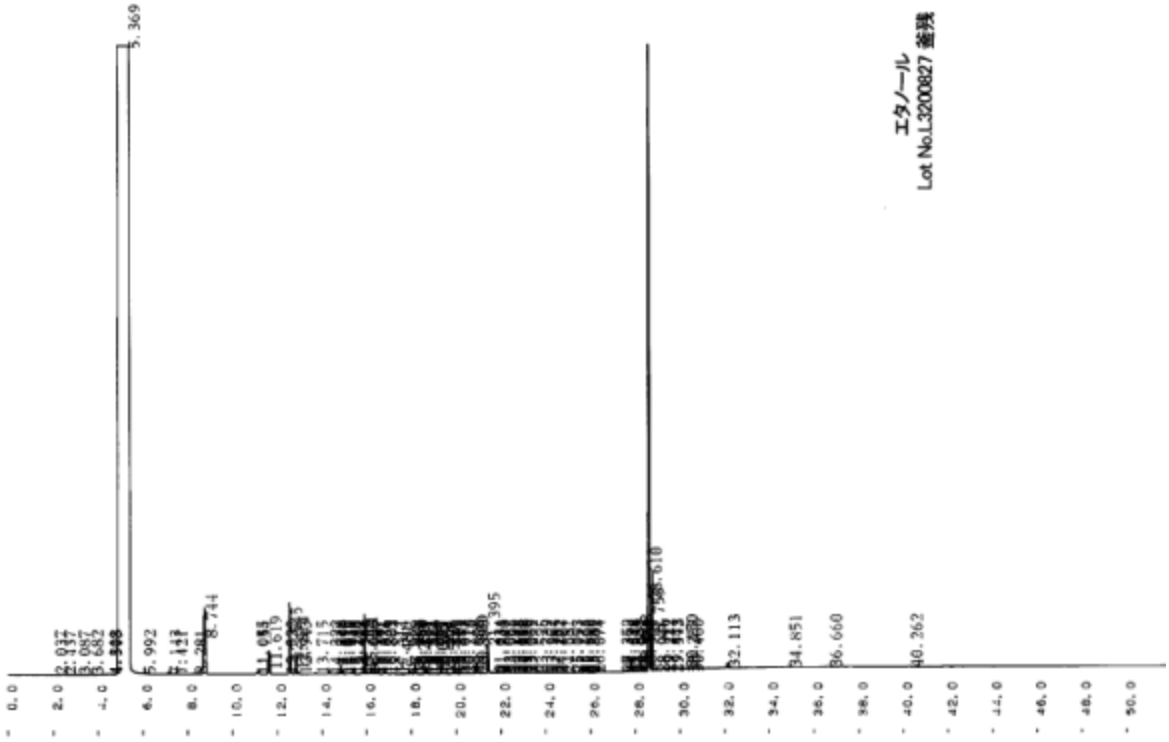


図２－１－２－２－２－２ａ－２０　残液 GC チャート

２－１－２－２－２－３　不純物分析

２－１－２－２－２－３ａ　実施内容及び成果

（方法）

２－１－２－２－１－３ａに記載と同様の測定方法にて分析を行った。

（結果）

2 塔目で得られた各フラクションの不純物濃度を表２－１－２－２－２－３ａ－１に示す。
Fr.6～17 ではエチレン製造ラボ試験の要求品質を満たすことを確認した。

表２－１－２－２－２－３ａ－１　不純物分析結果（単位：ppm）

	アセトアルデヒド	メタノール	酢酸エチル	イソプロパノール	n-プロパノール	n-ブタノール	アセタール	高級アルコール
要求品質	<30	<50	<80	<20	<20	<10	<50	<100
Fr.1	354	15208	833	<12	<0.8	<0.8	17	<40
Fr.2	255	3199	126	<12	<0.8	<0.8	10	<40
Fr.3	168	933	53	<12	<0.8	<0.8	<8	<40
Fr.4	128	379	19	<12	<0.8	<0.8	<8	<40
Fr.5	180	77	<9	<12	<0.8	<0.8	<8	<40
Fr.6	23	<39	<9	<12	<0.8	<0.8	<8	<40
Fr.7	9	<39	<9	<12	<0.8	<0.8	<8	<40
Fr.8	<7	<39	<9	<12	<0.8	<0.8	<8	<40
Fr.9	<7	<39	<9	<12	<0.8	<0.8	<8	<40
Fr.10	<7	<39	<9	<12	<0.8	<0.8	<8	<40
Fr.11	<7	<39	<9	<12	<0.8	<0.8	<8	<40
Fr.12	<7	<39	<9	<12	<0.8	<0.8	<8	<40
Fr.13	<7	<39	<9	<12	<0.8	<0.8	<8	<40
Fr.14	<7	<39	<9	<12	<0.8	<0.8	<8	<40
Fr.15	<7	<39	<9	<12	<0.8	<0.8	<8	<40
Fr.16	<7	<39	<9	<12	<0.8	<0.8	<8	<40
Fr.17	<7	<39	<9	<12	<0.8	<0.8	<8	<40
残液	14	<39	<9	12	389	<0.8	11	<40

２－１－２－２－３　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）

前章では 50Ｌスケールの 2 塔蒸留でエタノール精製を確認することができた。今後、バイオポリエチレンサンプルを製造するためには大量サンプルが必要となることから、400Ｌ蒸留器での精製試験を行い、スケールアップ可能かを確認した。

２－１－２－２－３－１　１塔目 400L60 段蒸留

２－１－２－２－３－１ａ　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２－１－２－２－３－１ａ－１に示す。Fr.8 採取までは塔頂温度は 78.3～80.3℃と安定しており、90%以上のエタノール濃度を示した。

表２－１－２－２－３－１ａ－１　単蒸留試験結果

	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	4.9	400,500			
Fr.1	95.3	441.1	120℃	100.6℃	78.3℃
Fr.2	95.7	1,013.4	120℃	100.9℃	78.3℃
Fr.3	95.7	1,681.1	120℃	100.9℃	78.3℃
Fr.4	95.6	2,425.6	120℃	101.1℃	78.3℃
Fr.5	95.7	3,045.0	120℃	101.0℃	78.2℃
Fr.6	95.8	14,725.0	120℃	101.2℃	78.4℃
Fr.7	95.5	15,276.6	120℃	101.3℃	78.7℃
Fr.8	93.6	15,855.0	120℃	101.3℃	80.3℃
Fr.9	87.1	16,480.6	120℃	101.2℃	92.6℃
Fr.10	60.8	17,370.3	120℃	101.1℃	97.5℃
残液		377,919.0			

各フラクションの GC 分析結果を図２－１－２－２－３－１ａ－２～１３に示す。Fr.1～2 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２－１－２－２－３－１ａ－３～４）。Fr.3～8 では 5.7 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２－１－２－２－３－１ａ－５～１０）。Fr.9～10 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２－１－２－２－２－１ａ－１１～１３）。２塔目は Fr.3～8 をまとめて処理することとした。

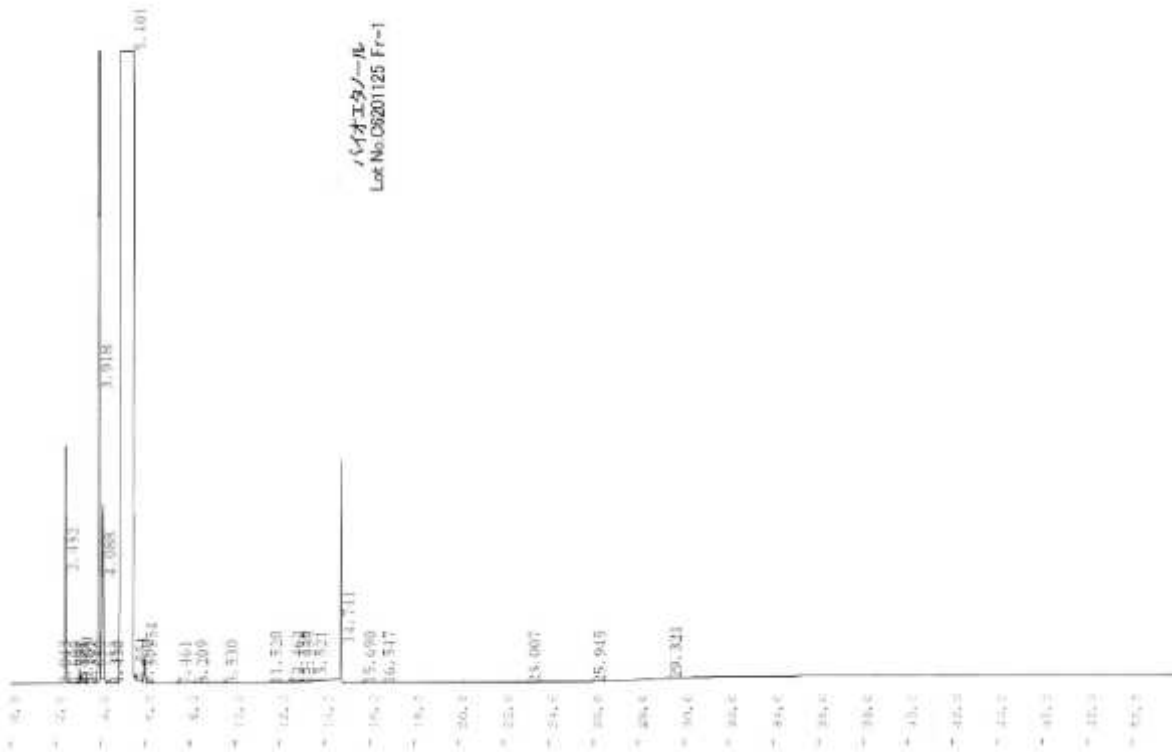


図２－１－２－２－３－１ａ－３　Fr.1 GC チャート

図２－１－２－２－３－１ａ－４　Fr.2 GC チャート

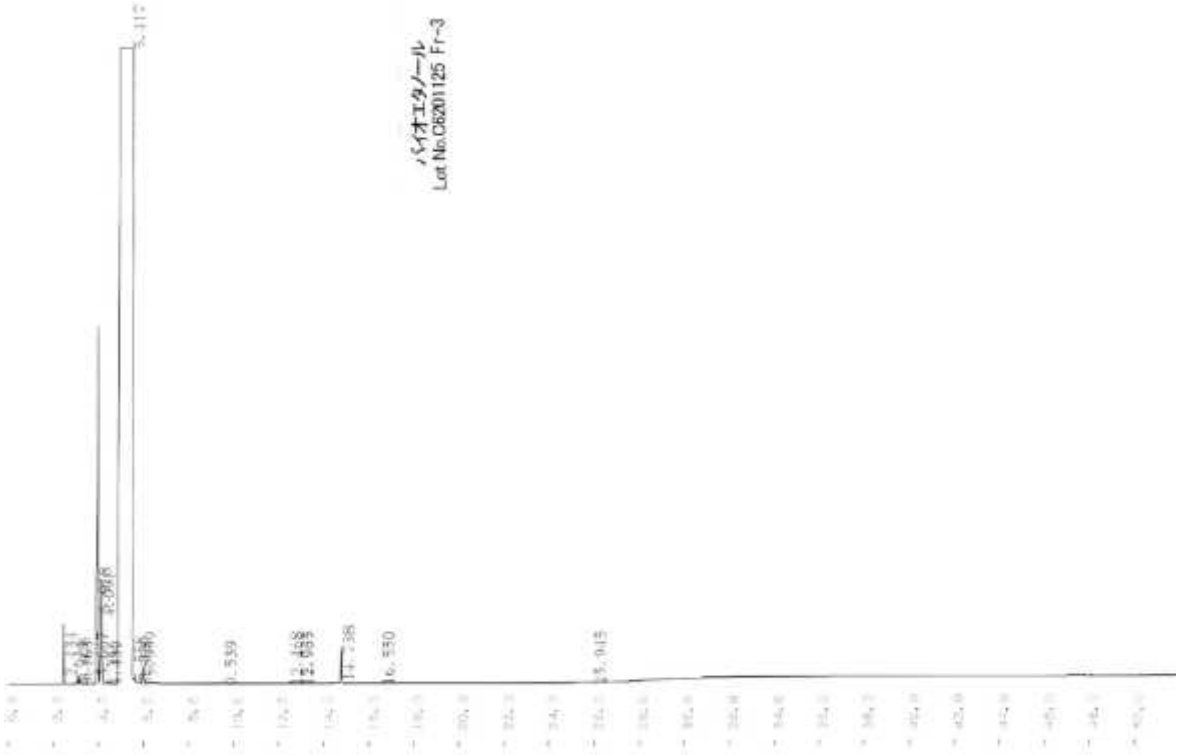


図２－１－２－２－３－１ａ－５　Fr.3 GC チャート

図２－１－２－２－３－１ａ－６　Fr.4 GC チャート

図２－１－２－２－３－１ａ－７　Fr.5 GC チャート

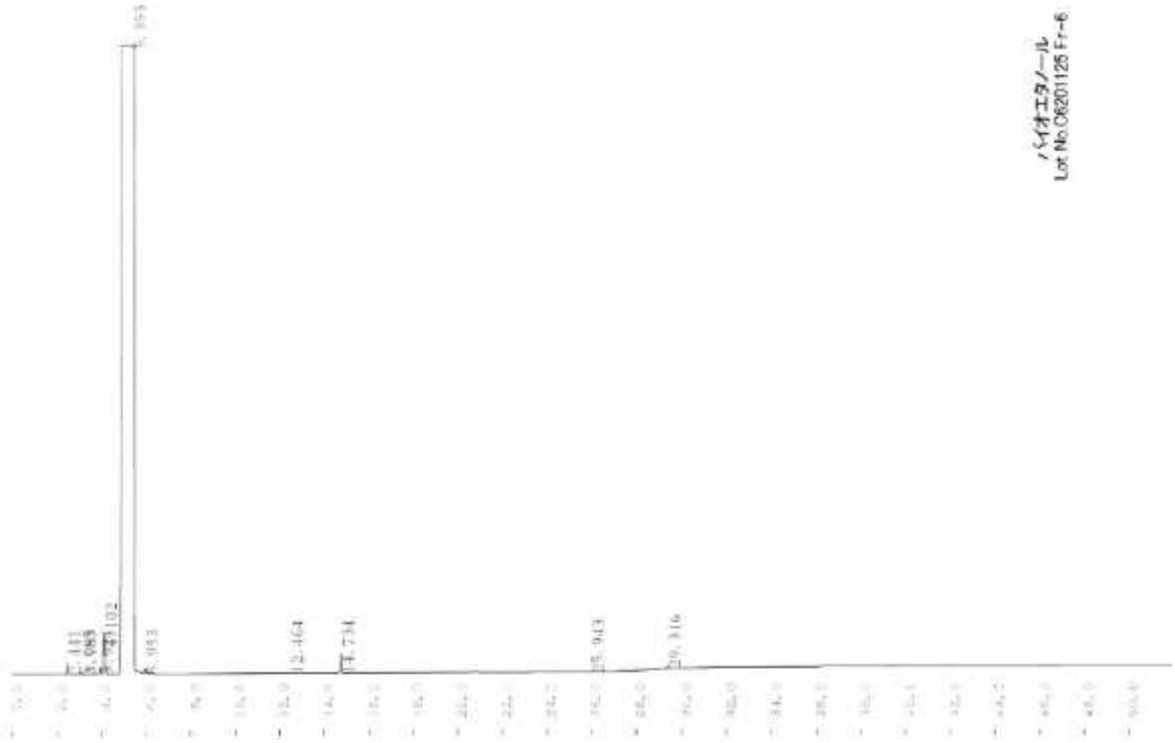


図２－１－２－２－３－１ａ－８　Fr.6 GC チャート

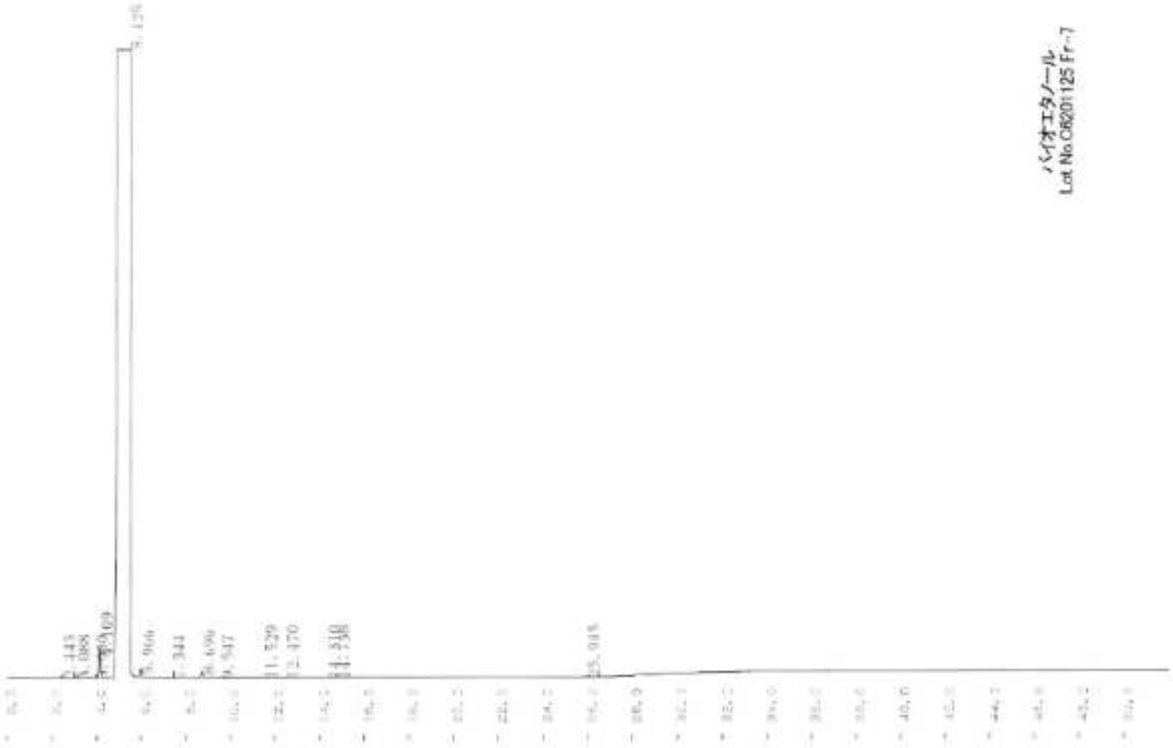


図２－１－２－２－３－１ａ－９　Fr.7 GC チャート

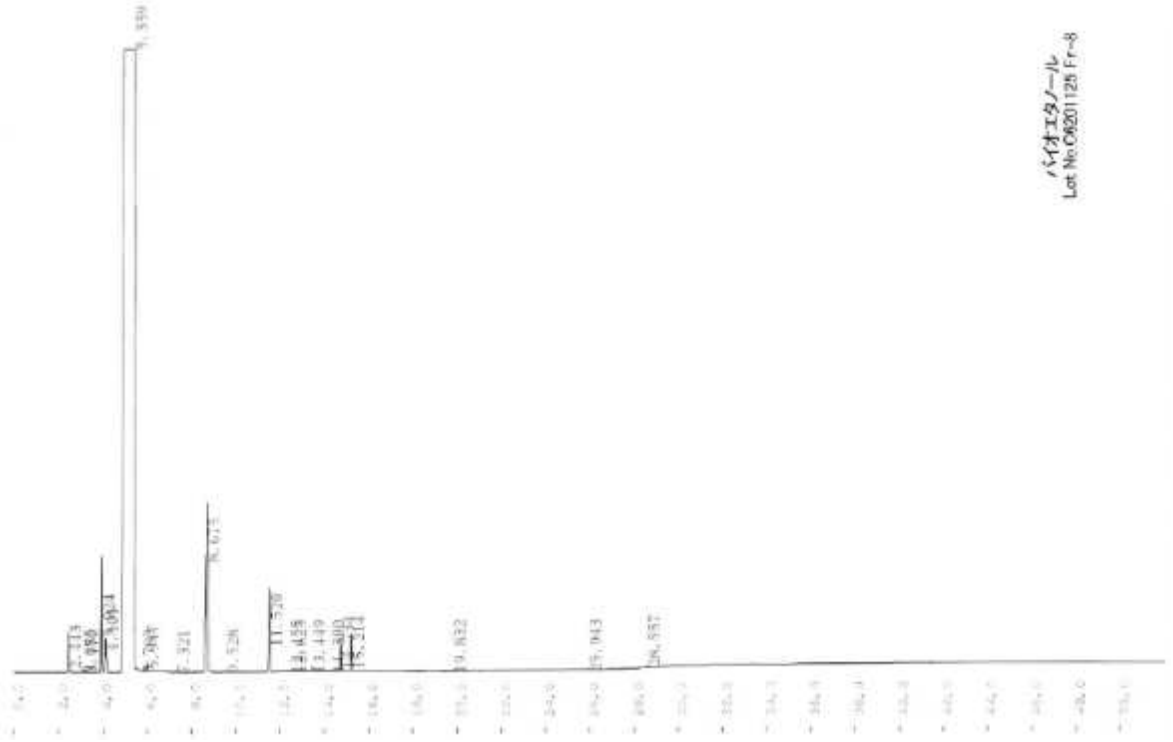


図２－１－２－２－３－１ａ－１０　Fr.8 GC チャート

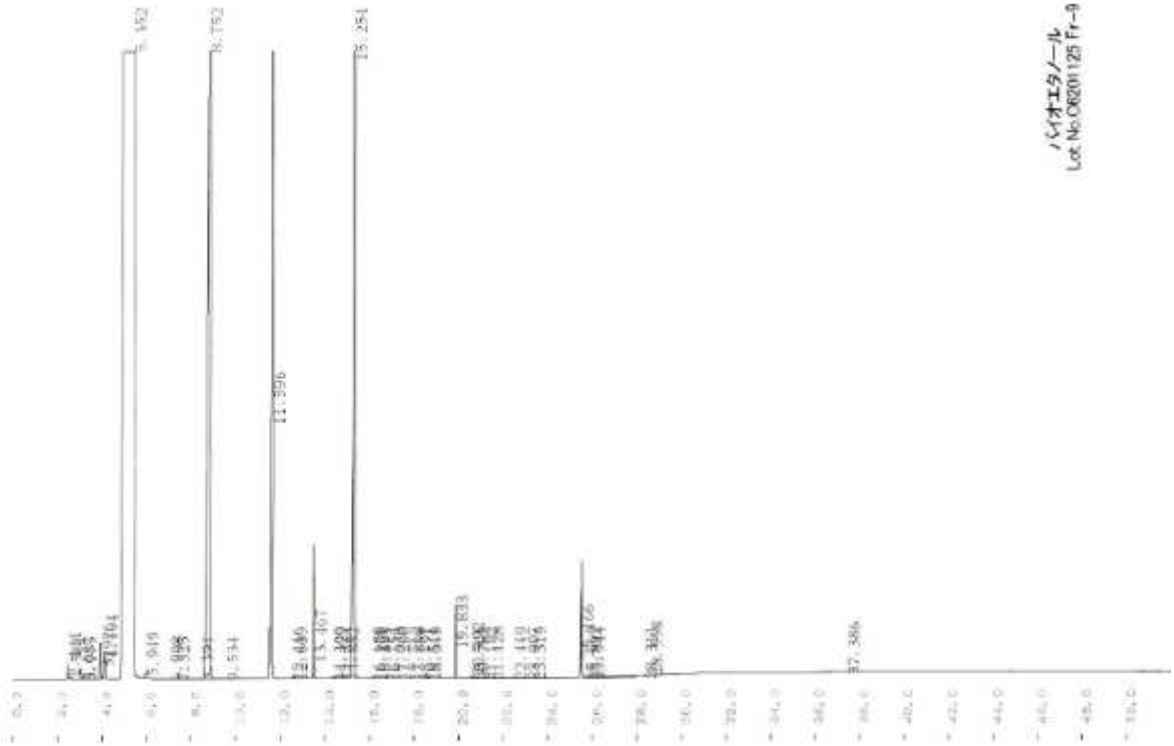


図２－１－２－２－３－１ａ－１１　Fr.9 GC チャート

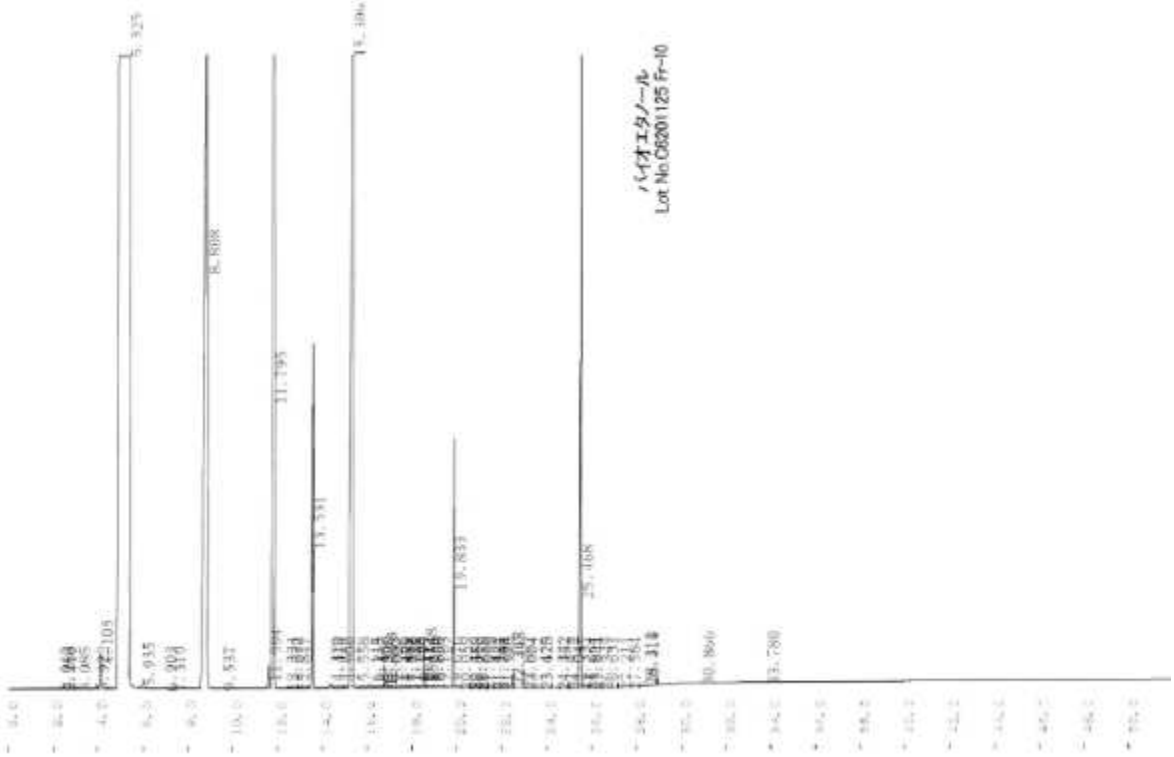


図２－１－２－２－３－１ａ－１２　Fr.10 GC チャート

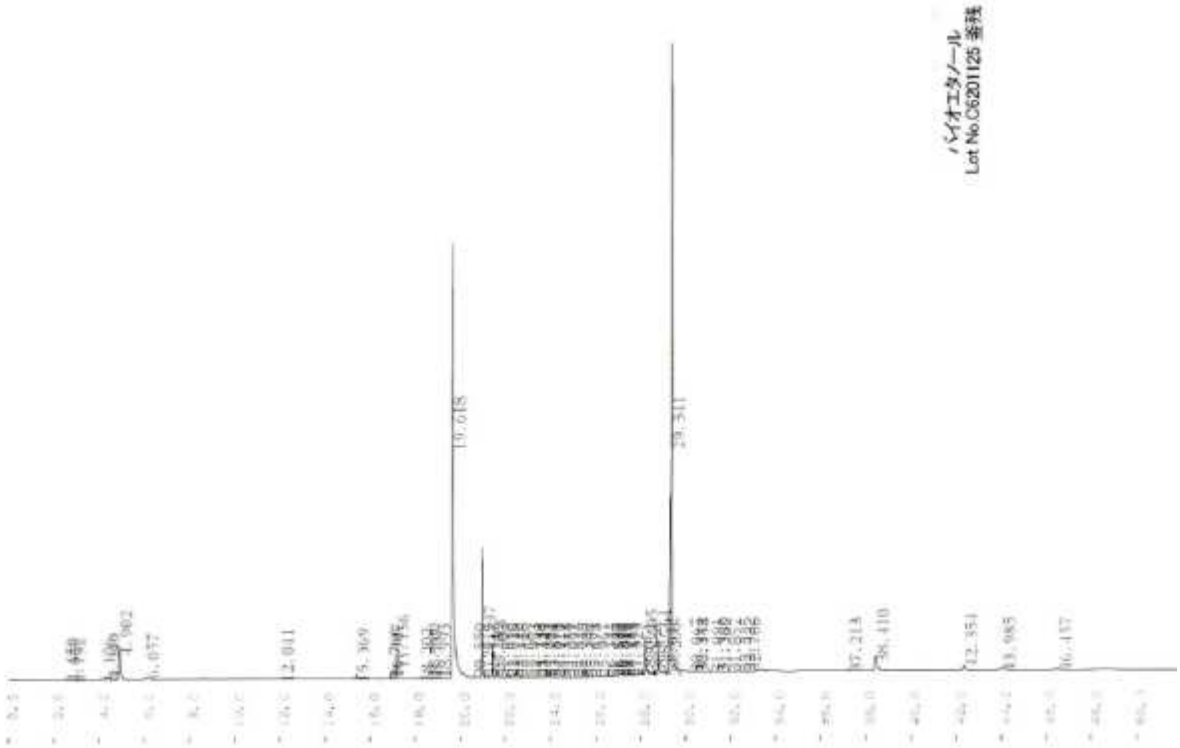


図２－１－２－２－３－１ａ－１３　残液 GC チャート

２－１－２－２－３－２　２塔目 50L60 段蒸留

２－１－２－２－３－２ａ　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.3～8、エタノール濃度 94.5%、14827.9g、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 91～98℃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２－１－２－２－３－２ａ－１に示す。塔頂温度は 79-80℃付近で安定し、Fr.2 以降で目標である約 95%以上のエタノール濃度を示すサンプルを得た。

表２－１－２－２－２－２ａ－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	94.5	1,701			
Fr.1	94.7	84.1	91℃	81.4℃	78.3℃
Fr.2	95.5	219.5	91℃	81.0℃	79.1℃
Fr.3	95.8	323.5	91℃	81.3℃	79.2℃
Fr.4	95.6	332.6	91℃	81.1℃	79.1℃
Fr.5	95.4	338.5	91℃	81.1℃	79.1℃
Fr.6	95.9	345.3	91℃	81.3℃	78.9℃
Fr.7	95.6	292.3	91℃	81.2℃	79.1℃
Fr.8	95.7	320.4	91℃	81.2℃	79.2℃
Fr.9	95.9	313.3	95℃	81.2℃	79.1℃
Fr.10	95.6	340.2	95℃	81.3℃	79.4℃
Fr.11	95.8	313.9	95℃	81.3℃	79.3℃
Fr.12	95.9	348.2	95℃	81.5℃	79.1℃
Fr.13	96.0	298.0	95℃	81.3℃	79.1℃
Fr.14	95.8	341.3	95℃	81.3℃	79.1℃
Fr.15	95.7	1,490.7	97℃	81.2℃	79.1℃
Fr.16	95.4	1,526.9	97℃	81.3℃	79.2℃
Fr.17	95.7	1,471.6	98℃	81.5℃	79.3℃
Fr.18	95.5	1,618.2	98℃	81.8℃	79.1℃
Fr.19	95.6	1,506.1	98℃	81.8℃	79.0℃
Fr.20	95.2	1,527.9	98℃	81.3℃	79.0℃
Fr.21	95.4	1,193.5	150℃	90.1℃	79.2℃
残液	0.0	190.2			

60 段蒸留の各フラクションの GC 分析結果を図２－１－２－２－３－２ａ－２～１９に示す。元液(図２－１－２－２－３－２ａ－２)ではいくつかの不純物ピークが観察されていたが、Fr.3～13 では 5.7 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２－１－２－２－２－２ａ－５～１５）。Fr.1～2 ではエタノールよりも前にピークが観察され（図２－１－２－２－２－２ａ－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２－１－２－２－２－２ａ－１９）。

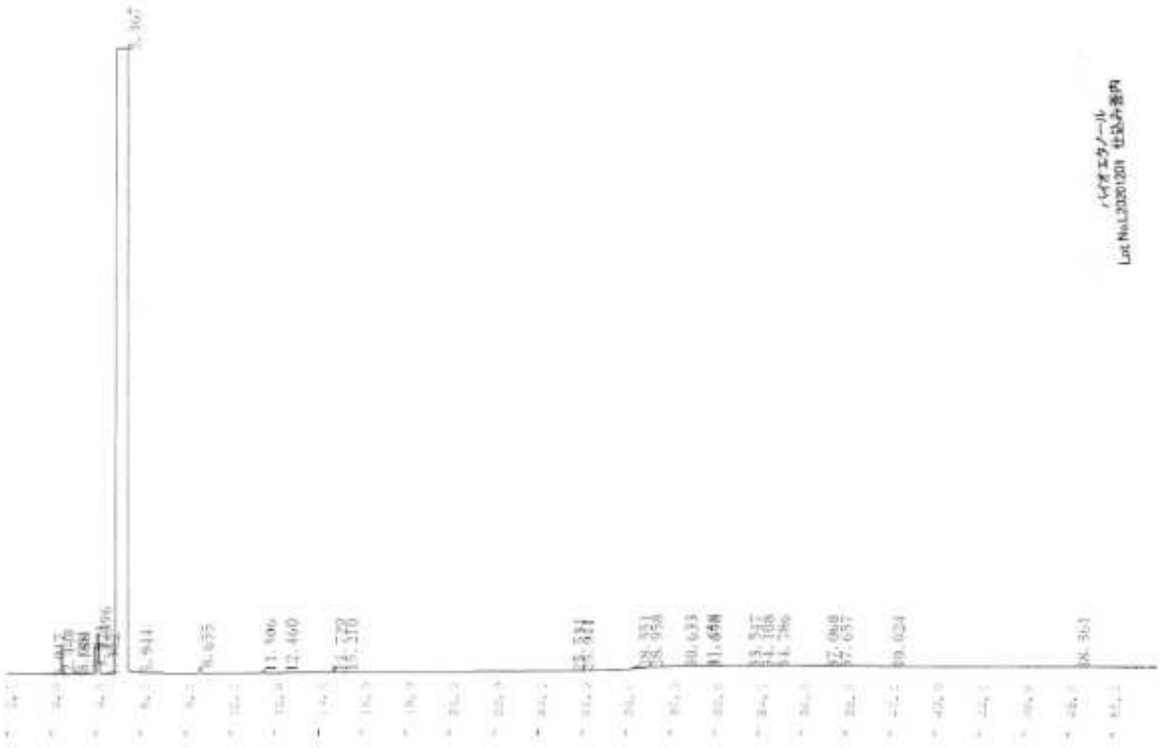


図２－１－２－２－３－２ａ－２　元液 GC チャート

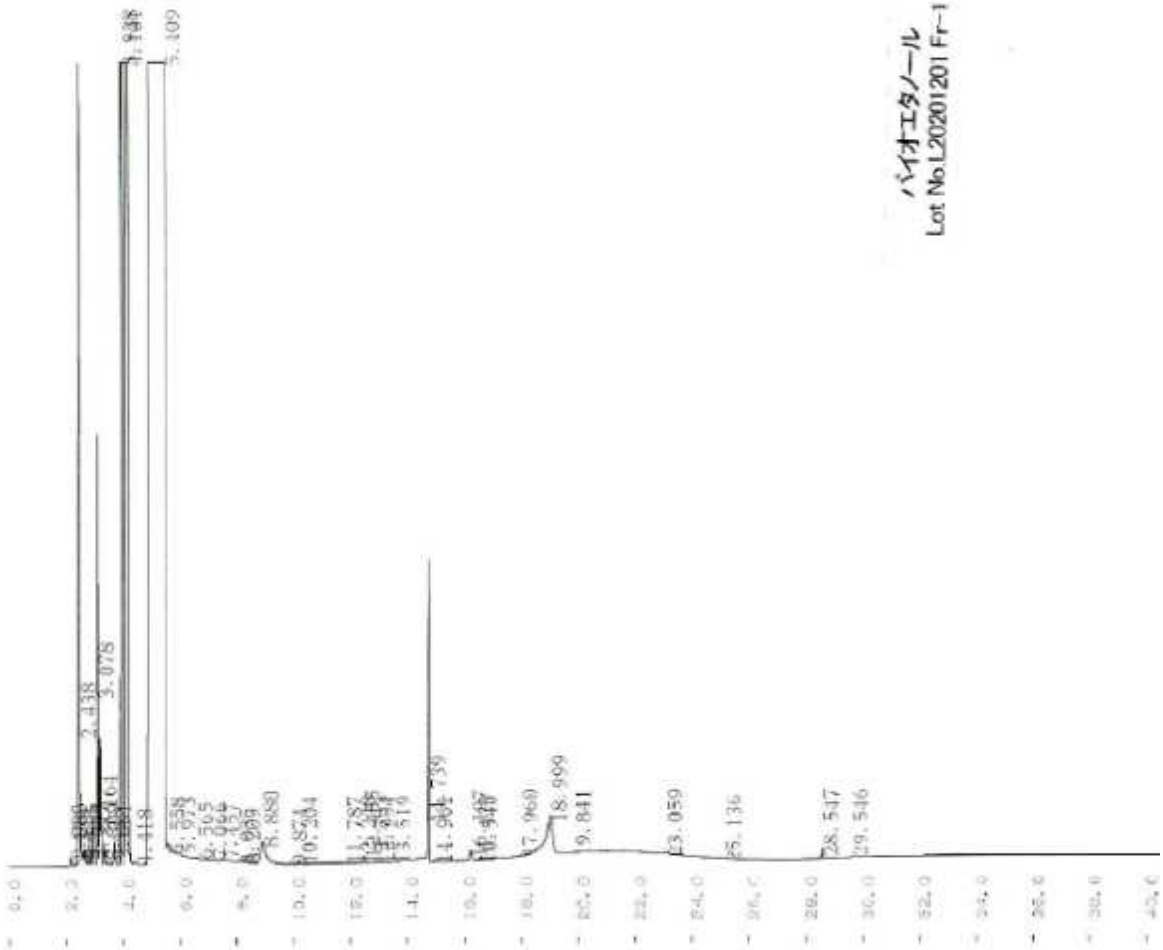


図２－１－２－２－３－２ａ－３　Fr.1 GC チャート

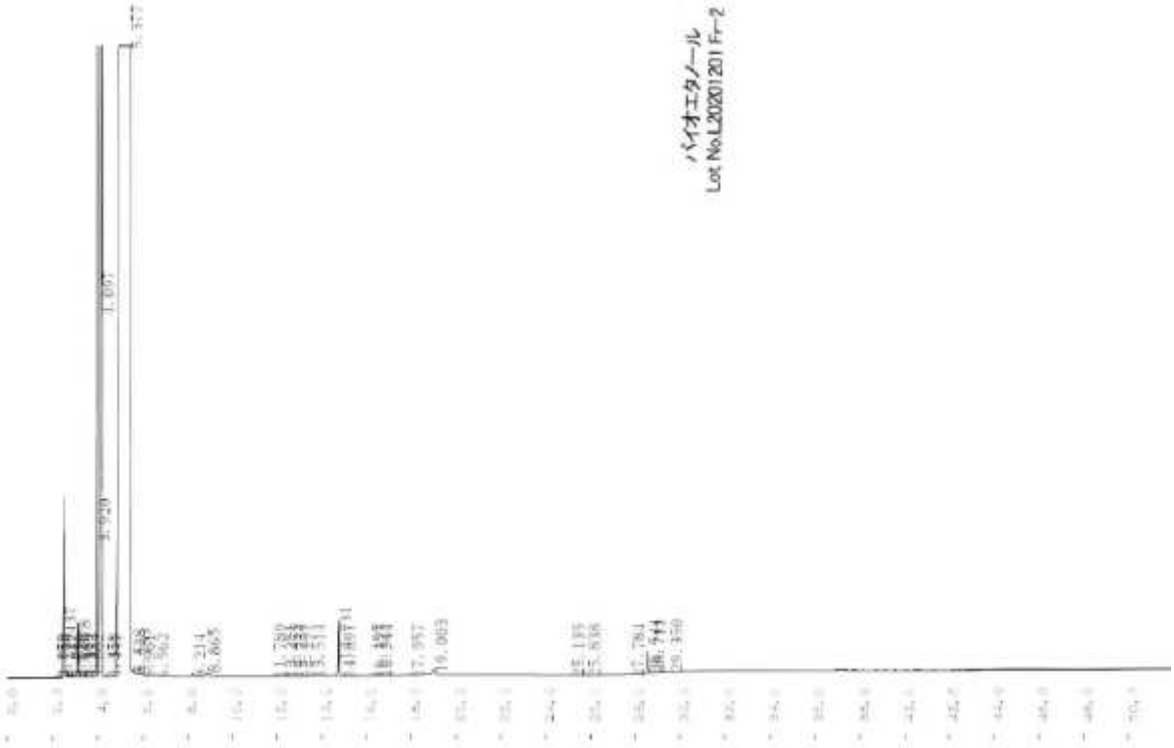


図２－１－２－２－３－２ａ－４　Fr.2 GC チャート

図２－１－２－２－３－２ａ－５　Fr.3 GC チャート

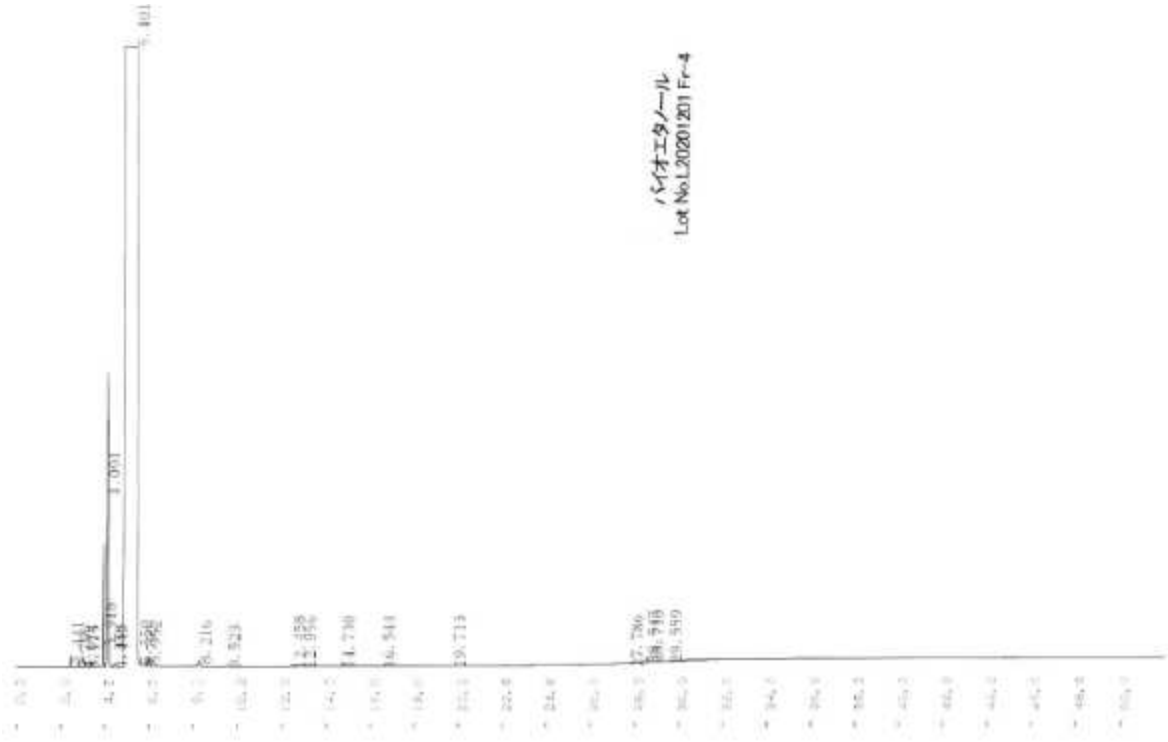


図２－１－２－２－３－２ａ－６　Fr.4 GC チャート

図２－１－２－２－３－２ａ－７　Fr.5 GC チャート

図２－１－２－２－３－２ａ－８　Fr.6 GC チャート

図２－１－２－２－３－２ａ－９　Fr.7 GC チャート

図２－１－２－２－３－２ａ－１０　Fr.8 GC チャート

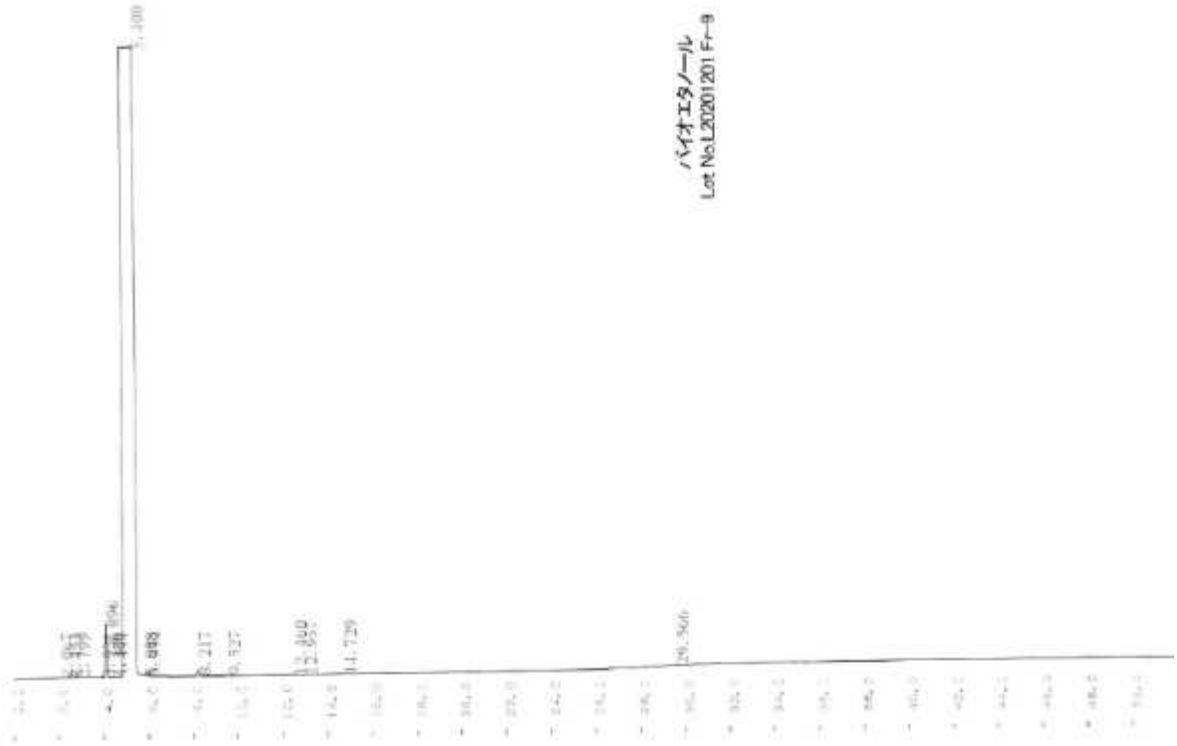


図２－１－２－２－３－２ａ－１１　Fr.9 GC チャート

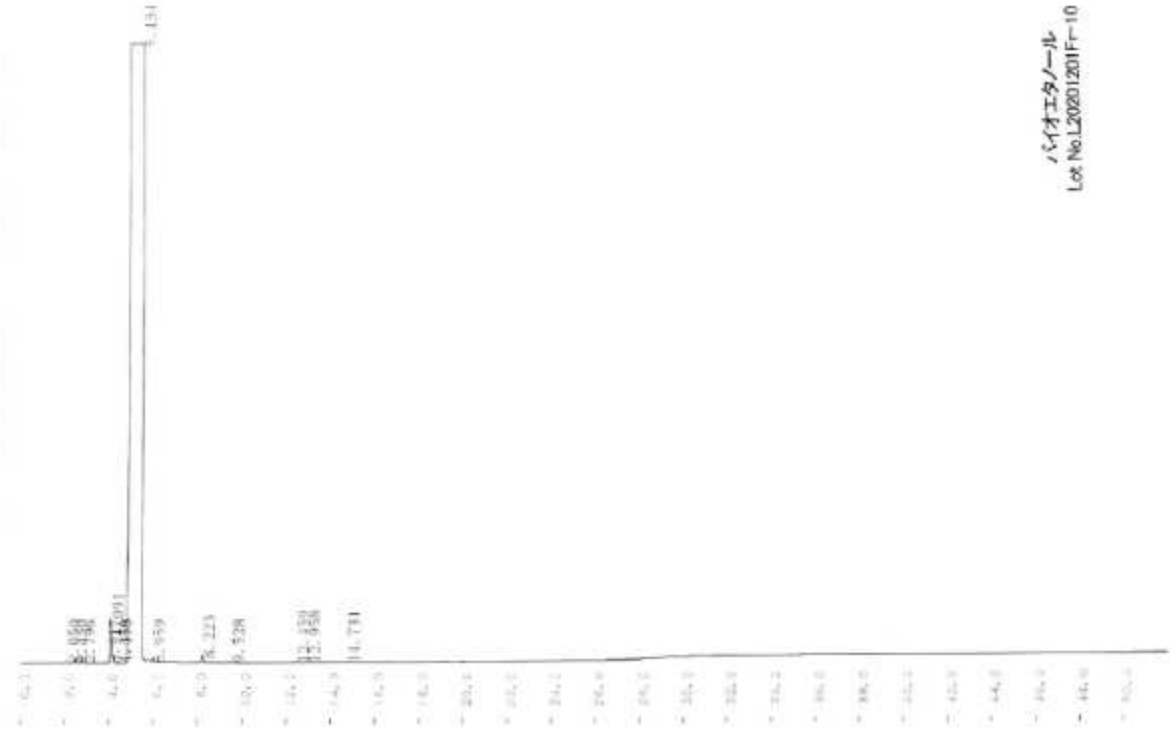


図２－１－２－２－３－２ａ－１２　Fr.10 GC チャート

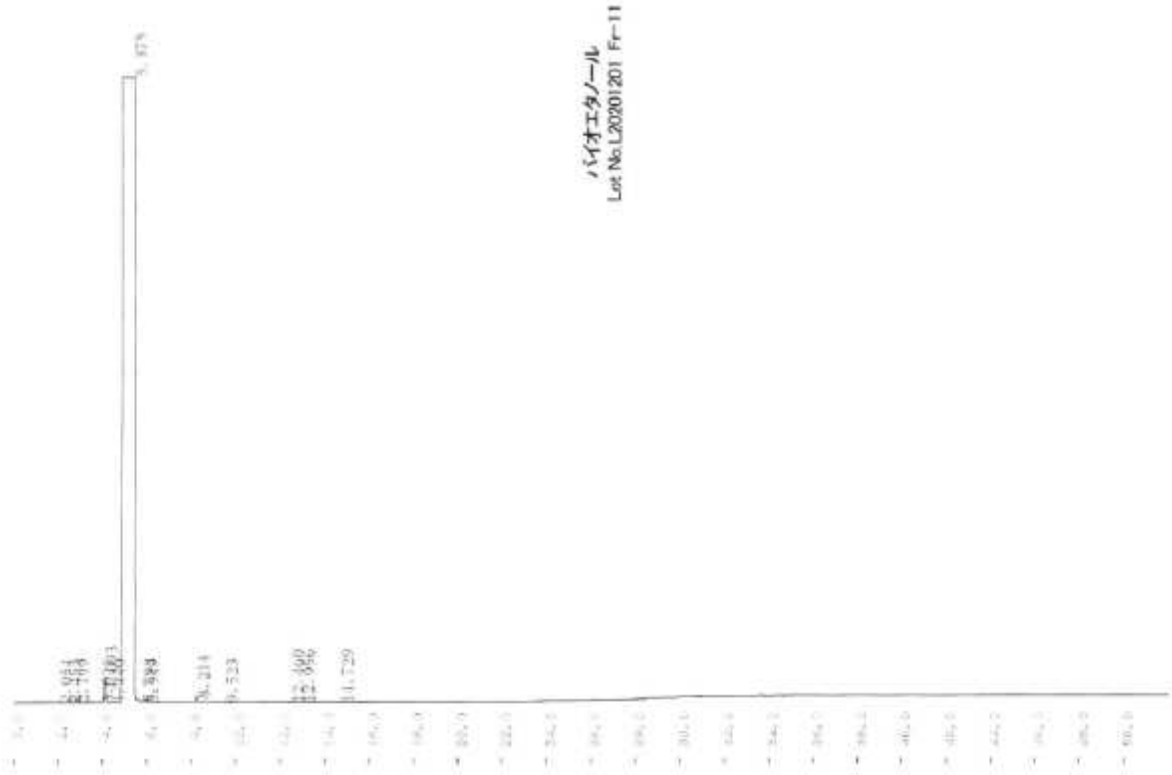


図２－１－２－２－３－２ａ－１３　Fr.11 GC チャート

図２－１－２－２－３－２ａ－１４　Fr.12 GC チャート

図２－１－２－２－３－２ａ－１５　Fr.13 GC チャート

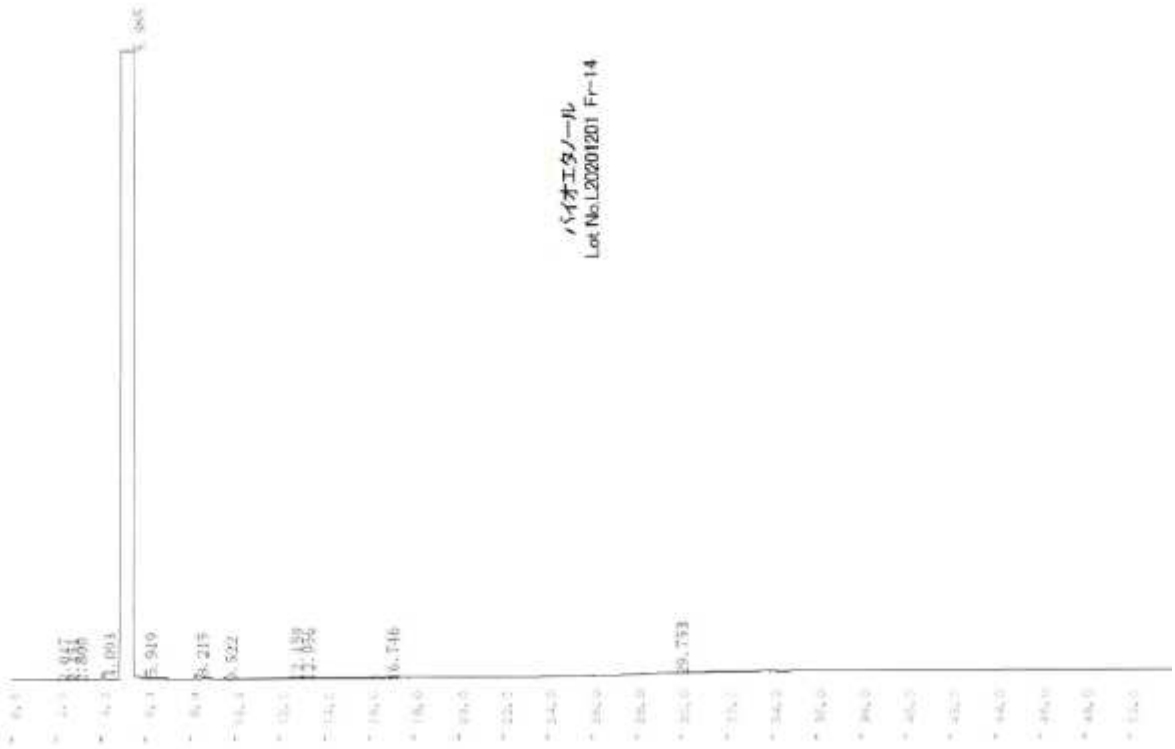


図２－１－２－２－３－２ａ－１６　Fr.14 GC チャート

図２－１－２－２－３－２ａ－１７　Fr.15 GC チャート

図２－１－２－２－３－２ａ－１８　Fr.16 GC チャート

図２－１－２－２－３－２ａ－１９　Fr.17 GC チャート

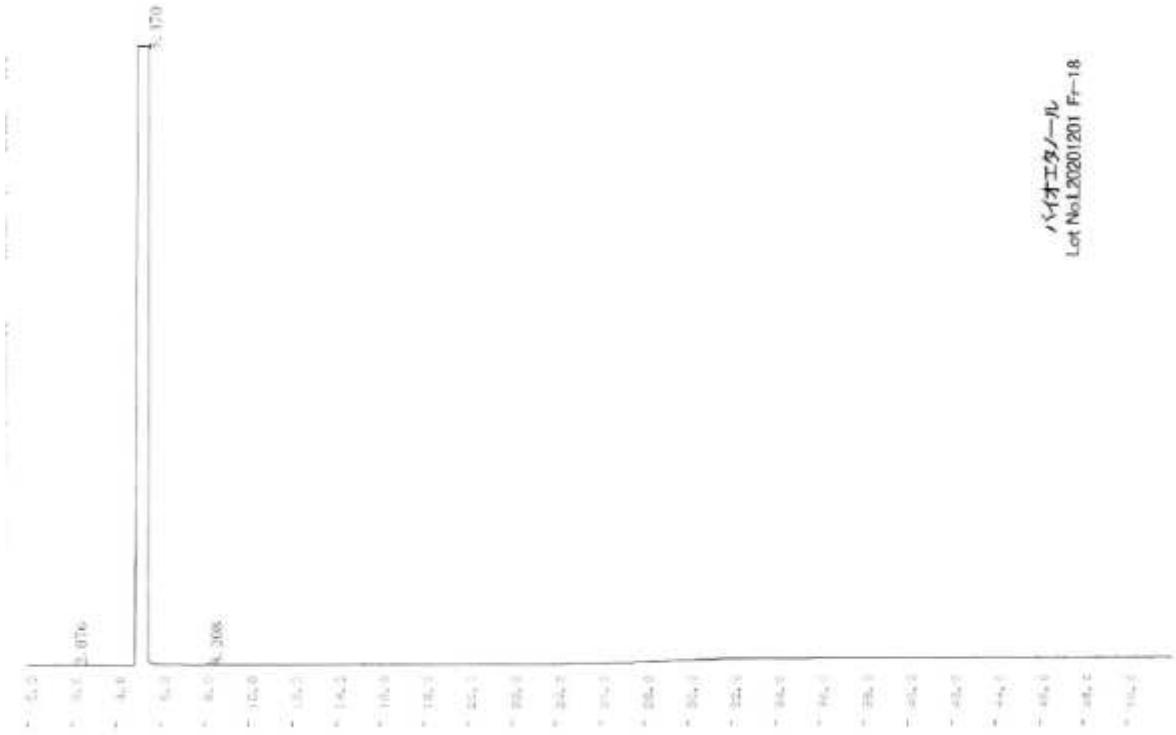


図２－１－２－２－３－２ａ－２０　Fr.18 GC チャート

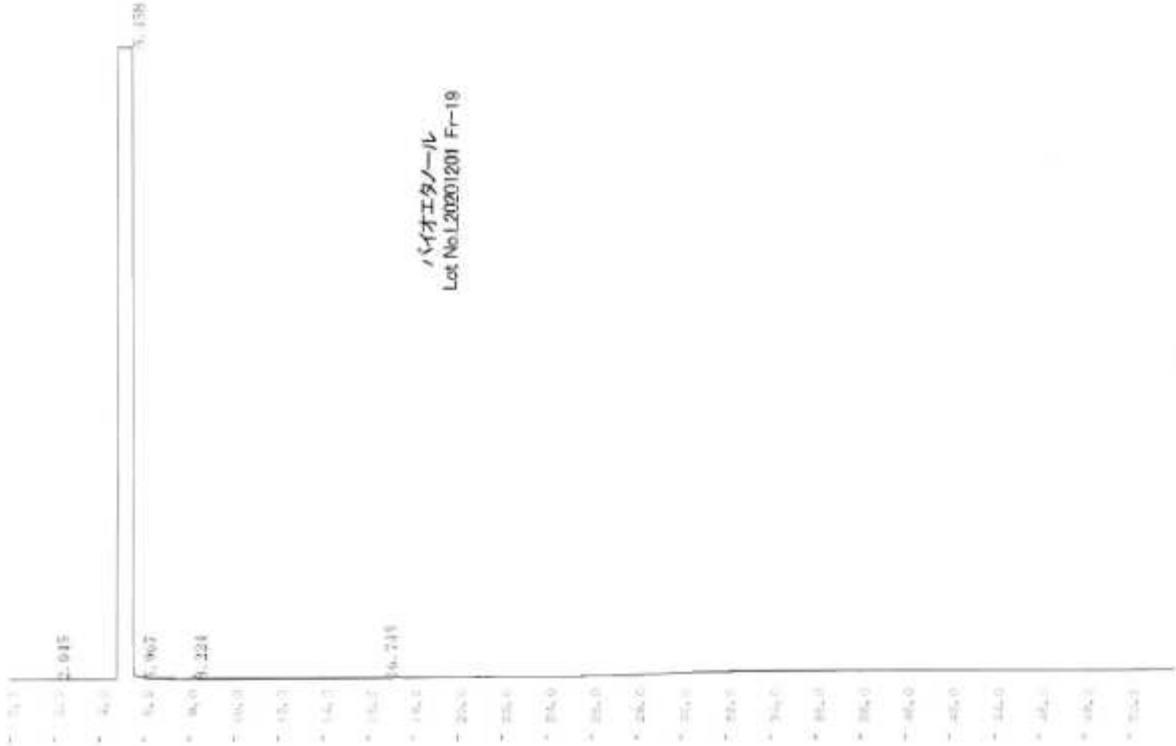


図２－１－２－２－３－２ａ－２１　Fr.19 GC チャート

図２－１－２－２－３－２ａ－２２　Fr.20 GC チャート

図２－１－２－２－３－２ａ－２３　Fr.21 GC チャート

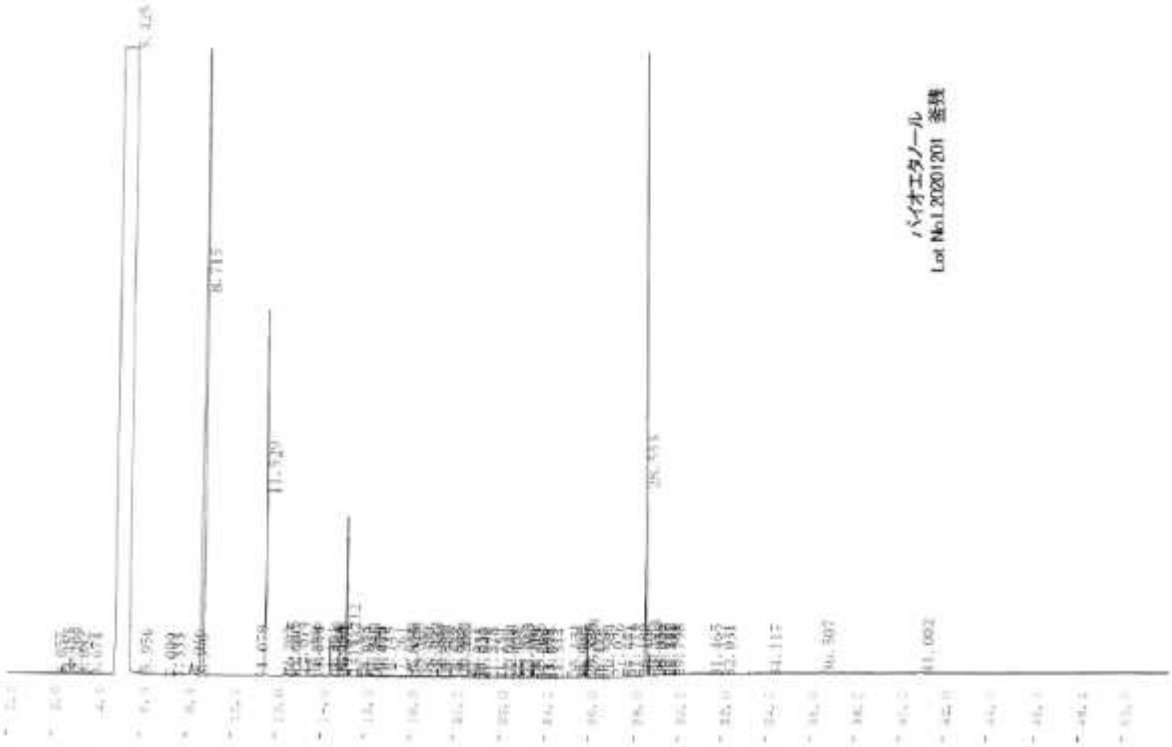


図２－１－２－２－３－２ａ－２４　残液 GC チャート

２－１－２－２－３－３　不純物分析

２－１－２－２－３－３ａ　実施内容及び成果

（方法）

２－１－２－２－１－３ａに記載と同様の測定方法にて分析を行った。

（結果）

2 塔目で得られた各フラクションの不純物濃度を表２－１－２－２－３－３ａ－１に示す。
Fr.15～21 ではエチレン製造ラボ試験の要求品質を満たすことを確認した。

表２－１－２－２－３－３ａ－１　不純物分析結果（単位：ppm）

	アセトアルデヒド	メタノール	酢酸エチル	イソプロパノール	n-プロパノール	n-ブタノール	アセタール	高級アルコール
要求品質	<30	<50	<80	<20	<20	<10	<50	<100
Fr.1	2,701	14,268	1,4187	6	<4	<4	414	<40
Fr.2	1,781	5,501	3,457	<6	<4	<4	189	<40
Fr.3	292	3,362	1,302	<6	<4	<4	141	<40
Fr.4	47	2,595	613	<6	<4	<4	130	<40
Fr.5	18	1,763	245	<6	<4	<4	104	<40
Fr.6	13	1,197	190	<6	<4	<4	83	<40
Fr.7	12	860	53	<6	<4	<4	64	<40
Fr.8	11	770	31	<6	<4	<4	69	<40
Fr.9	10	500	15	<6	<4	<4	58	<40
Fr.10	9	402	9	<6	<4	<4	54	<40
Fr.11	<8	275	<9	<6	<4	<4	46	<40
Fr.12	<8	159	<9	<6	<4	<4	37	<40
Fr.13	<8	104	<9	<6	<4	<4	31	<40
Fr.14	<8	67	<9	<6	<4	<4	20	<40
Fr.15	<8	<39	<9	<6	<4	<4	<8	<40
Fr.16	<8	<39	<9	<6	<4	<4	<8	<40
Fr.17	<8	<39	<9	<6	<4	<4	<8	<40
Fr.18	<8	<39	<9	<6	<4	<4	<8	<40
Fr.19	<8	<39	<9	<6	<4	<4	<8	<40
Fr.20	<8	<39	<9	<6	<4	<4	<8	<40
Fr.21	<8	<39	<9	<6	<4	<4	<8	<40
残液	31	<39	19	<6	2,274	33	<8	447

２－１－２－２－４　連続精密蒸留設備の基本設計

前章までに60段の2塔蒸留によりセルロース由来エタノールからエチレン合成に必要な精製が可能であることが確認できたため、これらのデータを元に連続蒸留設備の基本設計を実施した。

原液エタノール組成を表２－１－２－２－４－１、精製エタノール組成を表２－１－２－２－４－２として設計した。

表２－１－２－２－４－１　原液エタノール組成

項目	条件
エタノール濃度（%V/V）	5.0
アセトアルデヒド（ppm）	30
メタノール（ppm）	80
酢酸エチル（ppm）	16
イソプロパノール（ppm）	9
N-プロパノール（ppm）	330
N-ブタノール（ppm）	47
アセタール（ppm）	20

表２－１－２－２－４－２　精製エタノール組成

項目	条件
エタノール濃度（%V/V）	>95.0
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）	<10
N-ブタノール（ppm）	<10
アセタール（ppm）	<50

基本設計フローを図２－１－２－２－４－３に示す。エタノール濃度を高めるために60段の蒸留塔を2塔設置し、後段に不純物を取り除くための精留塔を2塔設置する構成とした。機器リストから蒸気、冷却水、冷水、動力、計装エアの必要量を算出した。

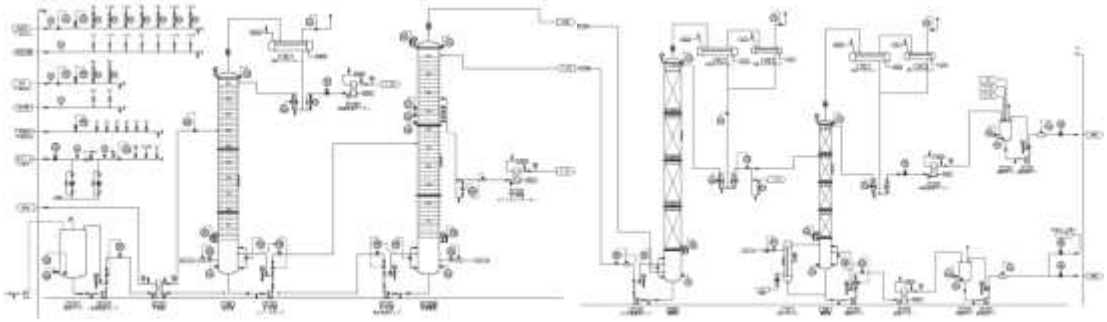


図２－１－２－２－４－３　連続精密蒸留設備フロー

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）

非可食バイオマス由来ＰＥ樹脂に関する技術開発を行うため、エチレンからのポリエチレン重合の条件検討を行うこととした。今年度は予備検討としてスラリー法による石化原料由来エチレンからのポリエチレン重合を実施し、得られたポリマーの品質を評価し、大量サンプル作成に必要な基本的な重合条件について、検討を実施した。

２－１－３－１　事前ラボ検討

２－１－３－１－１ａ　実施内容及び成果

（方法）

図２－１－３－１－１ａ－１に示すようなフローにて、ラボ試験を行い、重合スラリーを調製した。重合はエチレン圧 0.1～0.5MPa、60～90℃にて 1～2 時間の反応を行い、得られた重合スラリーをろ過、乾燥して重合物を回収した後、密度を測定した。

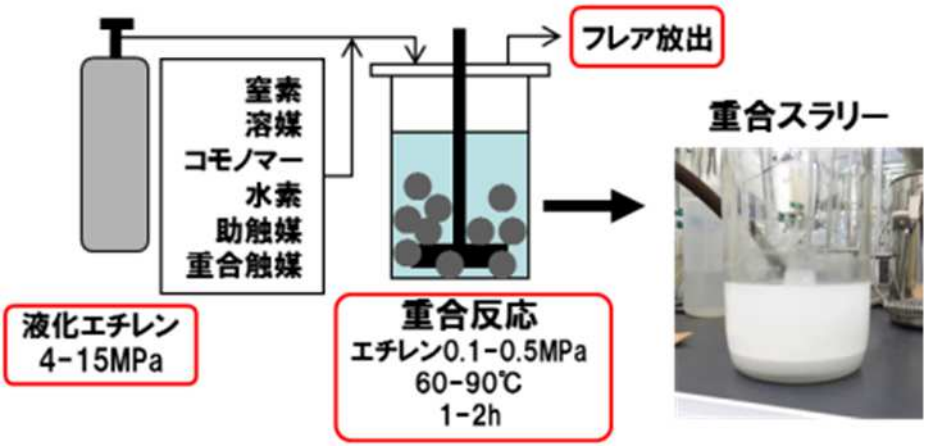


図２－１－３－１－１ａ－１　バイオポリエチレン重合ラボ試験機

（結果）

得られたサンプルを表２－１－３－１ａ－２に示す。ポリマー密度が 0.94g/ml 未満のＴ１およびＴ２サンプルでは凝集が発生したが、ポリマー密度が 0.943g/ml のＴ３サンプルでは凝集が発生せず、良好な重合スラリーが得られた。大量サンプル重合時に凝集が発生すると、反応槽からの排出が困難となることから、目標のポリマー密度を 0.95g/ml に設定することとした。

表２－１－３－１ａ－２　バイオ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			

２－２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。

微生物によって生産される乳酸はＬ体とＤ体があり（図２－２－１－１）、ポリ乳酸製造ではＬ体純度が高いことが必要である。昨年度、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、図２－２－１－２に示すような No.27 および No.31 株を取得した。そこで本年度はパルプ濃度、窒素種類などの検討と、メタボローム解析による生産性の改善、1000L ジャーによるスケールアップ検討を実施した。

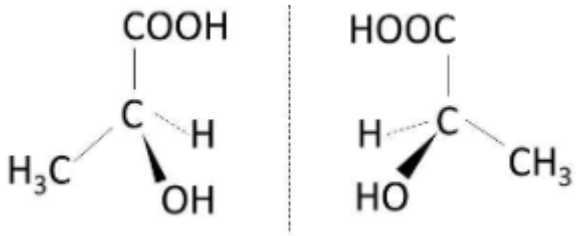


図２－２－１－１　乳酸の光学異性体（左：Ｌ体、右：Ｄ体）

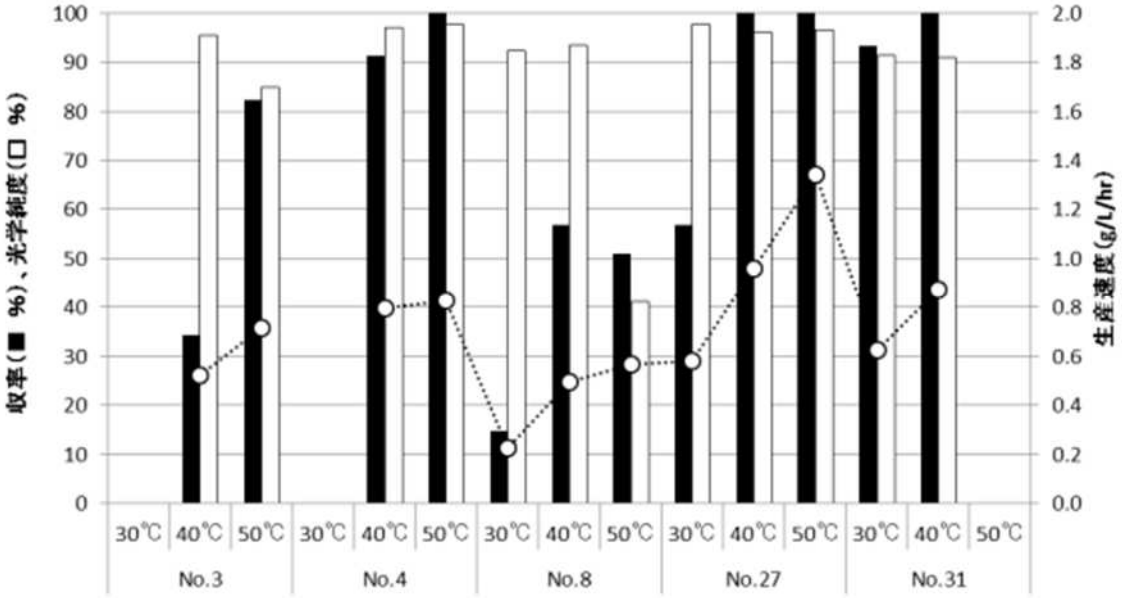


図２－２－１－２　優良株乳酸生産性結果

２－２－１－１　最適培養条件検討（パルプ濃度）

昨年度に実施した優良株のスクリーニングは選抜効率を高めるためにフラスコによる評価を行っている。そこで、本年度はより実際の培養条件に近い条件として、パルプ濃度を高くして選抜を行うこととした。

２－２－１－１－１ａ　実施内容及び成果（培養条件検討）

（方法）

ジャーファメンター（容量：30L）を用いた糖化発酵試験を行い、120 時間後の槽内乳酸濃度を計測した。試験条件は、基質：広葉樹クラフトパルプ 10、20、30%、酵素：所定量、初期乳酸菌量：2000ml、pH：5.0（3% CaCO3 で調整）、窒素量：所定量、撹拌条件：250rpm とし、乳酸菌 No.27 は 50℃、No.31 は 40℃とした。

（結果）

120 時間後の槽内乳酸濃度を図２－２－１－１－１ａ－１に示す。昨年度、3%パルプ濃度、50℃で培養した場合に高い収率を示していた No.27 株はパルプ濃度を高くすると乳酸収率が大幅に減少した。一方、50℃では乳酸生産できなかったが 40℃では高い生産性を示した No.31 株は高いパルプ濃度でも乳酸を生産した。

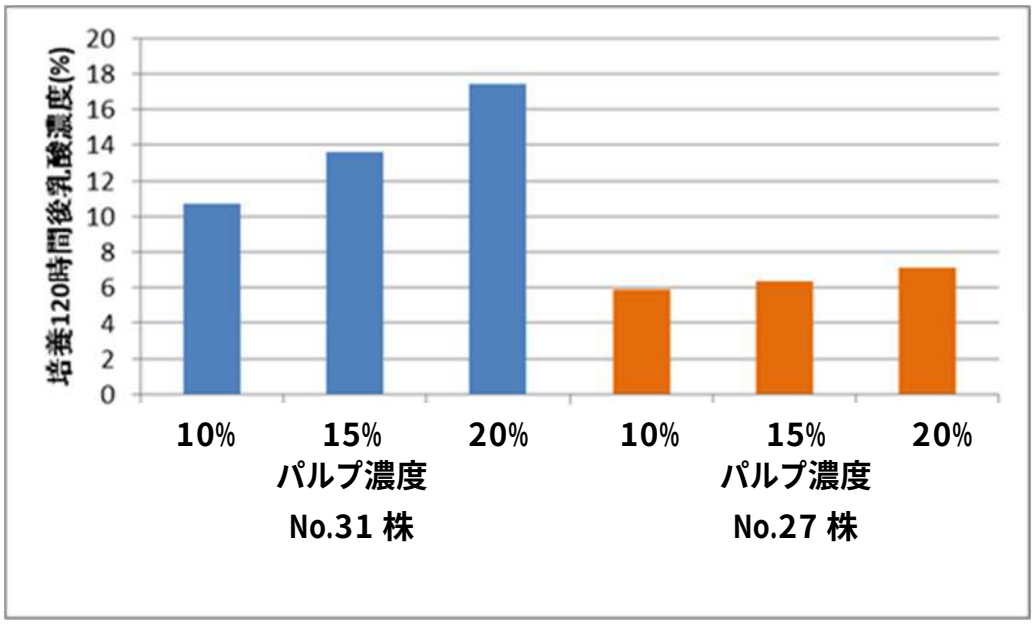


図２－２－１－１－１ａ－１　培養条件検討結果（パルプ濃度）

２－２－１－１－２ａ　実施内容及び成果（メタボローム解析）

前章で高温でも生産性を示す No.27 株が高パルプ濃度培養条件で乳酸収率が大幅に減少した原因を調査するため、メタボローム解析を実施した。

（方法）

ジャーファメンター（容量：30L）を用いた糖化発酵試験を行い、0，8，16，24 時間後の発酵液を回収。メタボライト抽出法にて菌体内の代謝物を抽出し、キャピラリー電気泳動質量分析装置（CE/MS）にて一斉代謝物分析（メタボローム解析）実施した。培養条件は、基質：広葉樹クラフトパルプ 10%、酵素：所定量、初期乳酸菌量：2000ml、pH：5.0（3% CaCO3 で調整）、窒素量：所定量、撹拌条件：250rpm とし、乳酸菌 No.27 は 50℃、No.31 は 40℃とした。

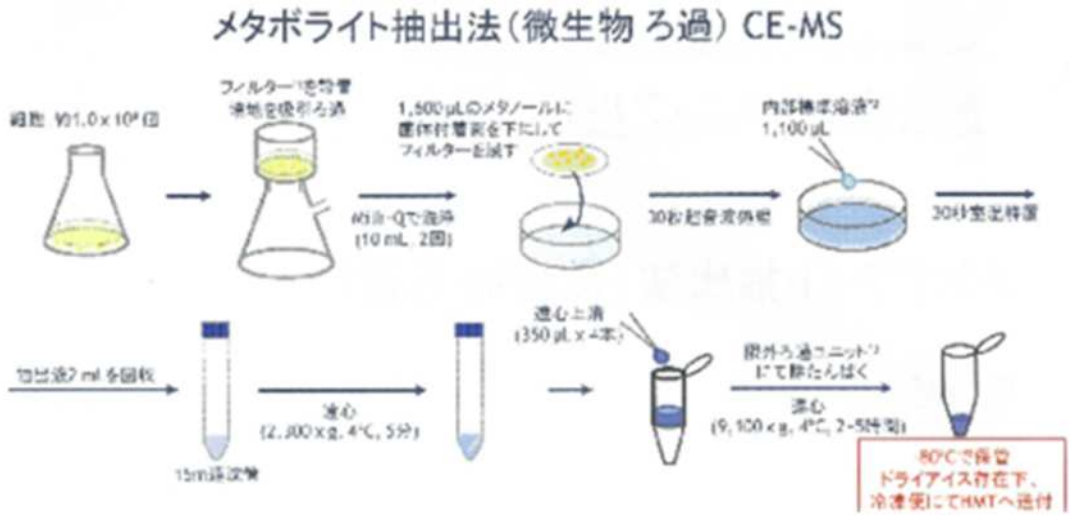


図２－２－１－１－２ａ－１　メタボライト抽出法

（結果）

解析結果を図２－２－１－１－２ａ－２～３に示す。昨年度、3%パルプ濃度、50℃で培養した場合に高い収率を示していた No.27 株はパルプ濃度を高くすると細胞内に乳酸が蓄積していることが判明した（図２－２－１－１－２ａ－２）。一方、50℃では乳酸生産できなかったが 40℃では高い生産性を示した No.31 株は乳酸を積極的に細胞外に排出していた（図２－２－１－１－２ａ－３）。これらの結果から、No.27 株は乳酸の排出機構（エクスポーター）が弱く、細胞内に乳酸が蓄積してしまうことで乳酸生産を停止すると推測された。

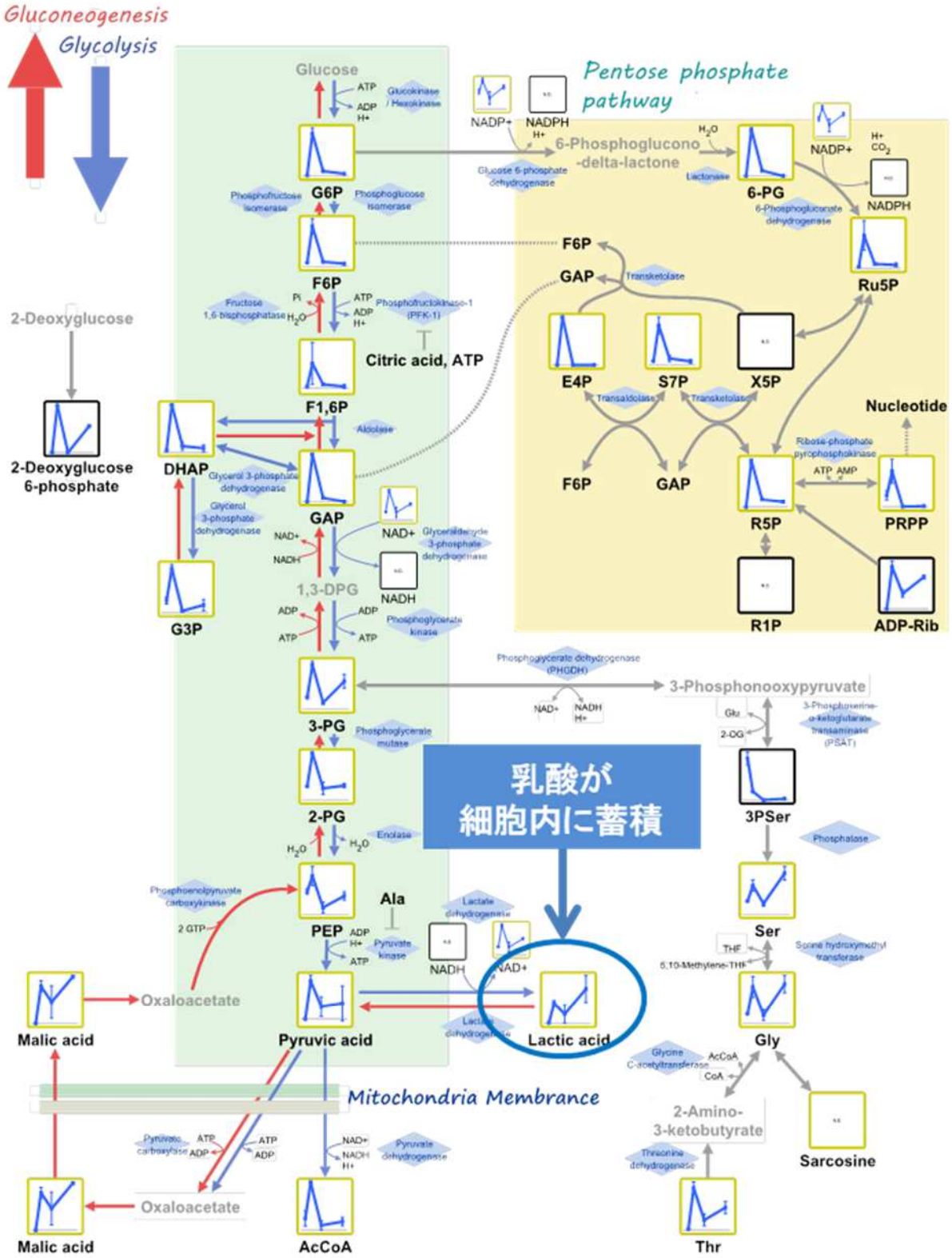


図２－２－１－１－２ａ－２ No.27 株メタボローム解析結果

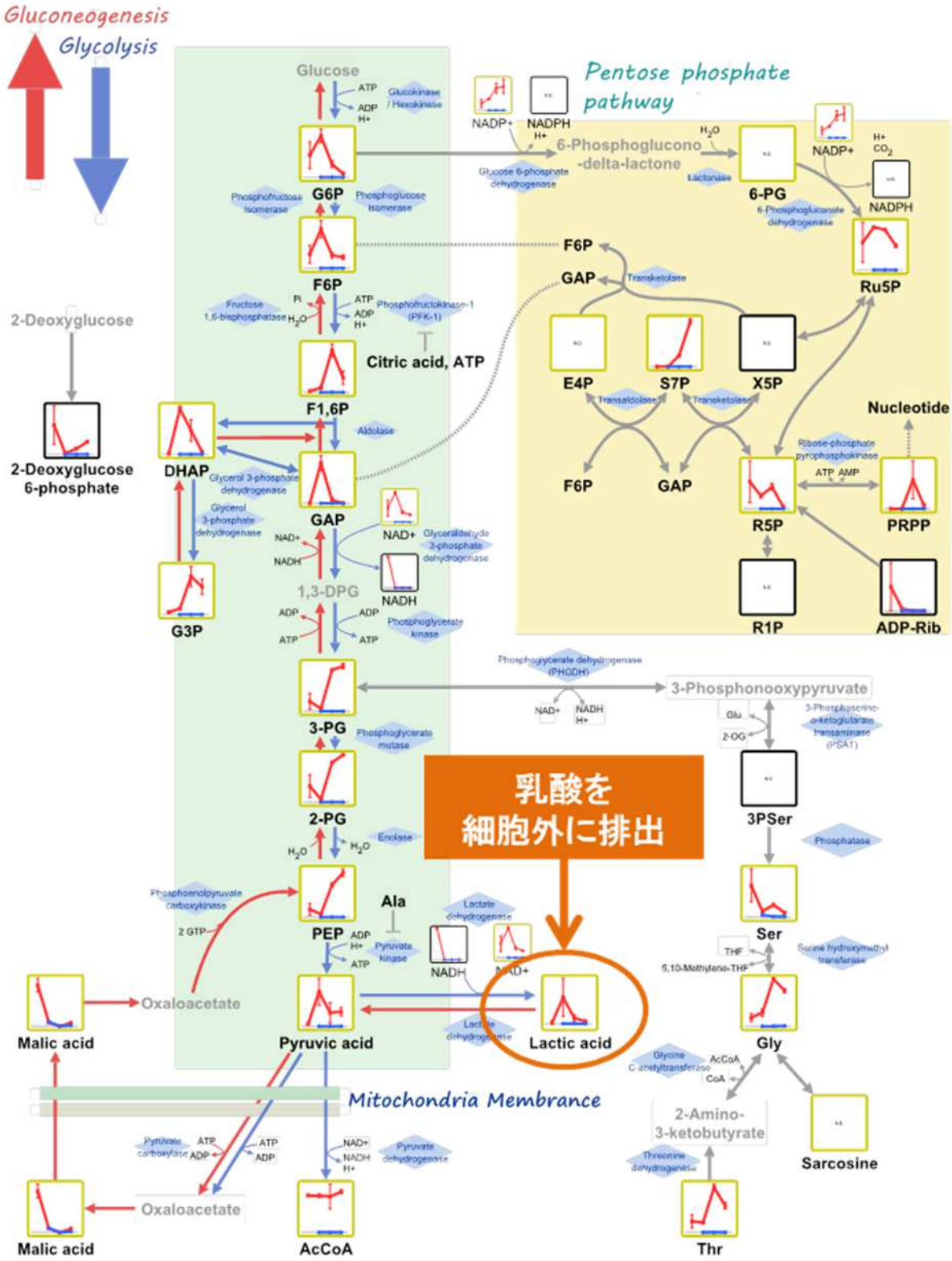


図２－２－１－１－２ａ－３ No.31 株メタボローム解析結果

２－２－１－２　最適培養条件検討（窒素種類検討）

前章までに選抜した優良株の No.31 株は高パルプ濃度でも高い乳酸生産性を示したが、低いパルプ濃度では No.27 と比較して生産速度が低く、光学純度も低い（表２－２－１－２－１）。そこで、No.31 株でも高い生産性および光学純度を示す窒素種類を検討することとした。

表２－２－１－２－１

	No.27 株	No.31 株
至適温度	50℃	40℃
生産速度	1.38g/L/hr	0.89g/L/hr
光学純度	96%	91%
乳酸収率（10%パルプ濃度時）	60%	100%

２－２－１－２ａ　実施内容及び成果

（方法）

フラスコおよびジャーファメンター（容量：30L）を用いた糖化発酵試験を行い、48 時間後の槽内乳酸濃度および光学純度を計測した。試験条件は、基質：広葉樹クラフトパルプ所定濃度、酵素：所定量、初期乳酸菌量：所定量、pH：5.0（3% CaCO3 で調整）、温度：40℃とし、乳酸菌は No.31 を使用した。

（結果）

48 時間後の槽内乳酸濃度から計算した生産速度と光学純度を図２－２－１－２ａ－２に示す。窒素源Ｂにて高い生産性（3.0g/L/hr）及び光学純度（96.5%）を示した。

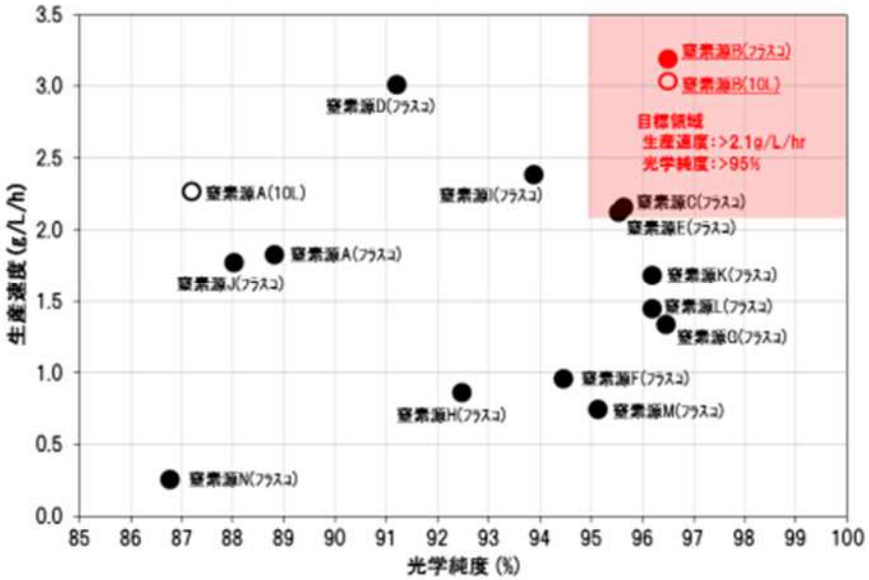


図２－２－１－２ａ－２　窒素源検討結果

２－２－２　乳酸精製条件の検討

昨年度も、30L ジャーでの乳酸培養液サンプル作成を実施しているが、図２－２－２－１に示すように槽内のグルコースが枯渇するまでに 150 時間を必要としている。前章までに窒素種類の検討などを行うことで乳酸生産速度を改善することを見いだしたため、同条件にて 30L ジャーおよび 1000L ジャーでのパルプ由来乳酸生産を検討し、得られた乳酸培養液からの精製を試みた。

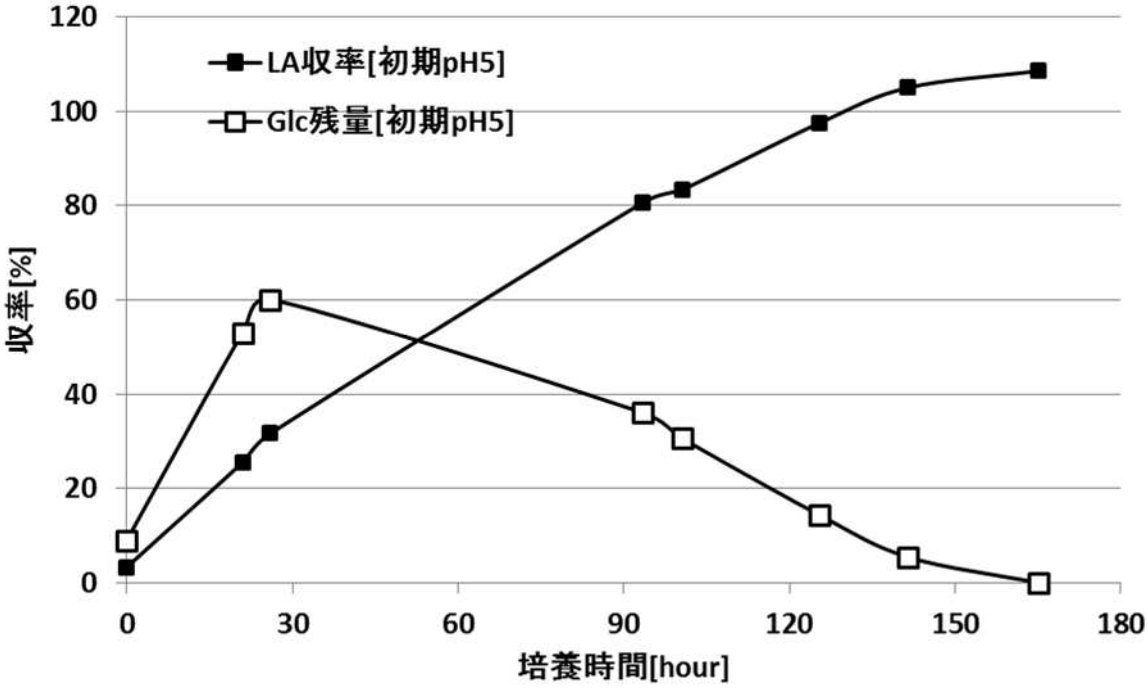


図２－２－２－１　30L ジャー乳酸収率、グルコース残量経時変化

２－２－２－１　乳酸大量培養

前章までに検討した条件にて 30L ジャーおよび 1000L ジャーによる培養液サンプルの作成を行った。

２－２－２－１ａ　実施内容及び成果

（方法）

ジャーファメンター（容量：30L および 1000L）を用いた糖化発酵試験を行い、経時的に槽内乳酸濃度とグルコース濃度を計測した。試験条件は、基質：広葉樹クラフトパルプ 10%濃度、酵素：所定量、初期乳酸菌量：200ml or 20L、pH：5.0（3% 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。

（結果）

経時的な乳酸収率および、グルコース残量を図２－２－２－１ａ－１に示す。乳酸濃度は 30L および 1000L ジャーの両方において、48 時間で 10%に達し、槽内のグルコース残量も枯渇した。

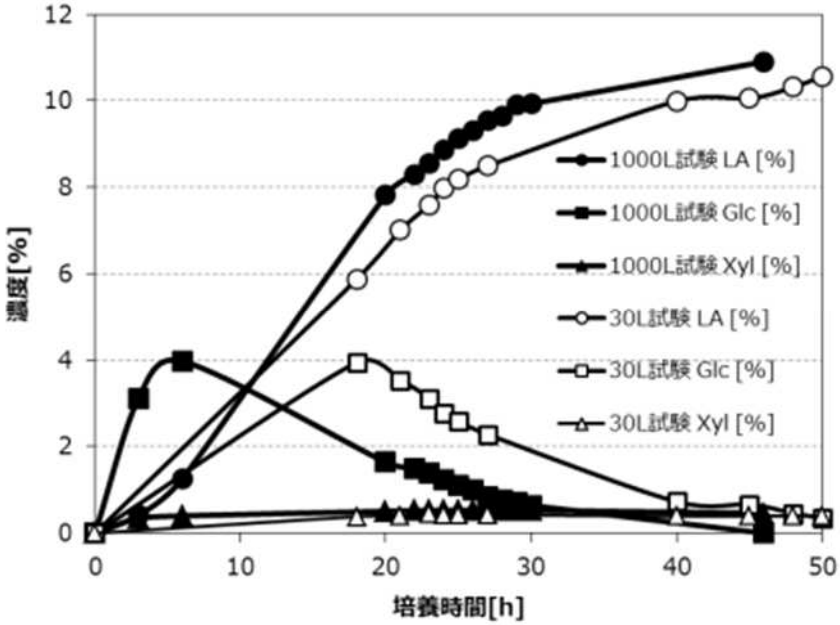


図２－２－２－１ａ－１　乳酸大量培養結果

２－２－２－２　乳酸培養液サンプル精製条件検討

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、図２－２－２－２－１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）。本年度は脱色に用いる活性炭種類の検討を行った。

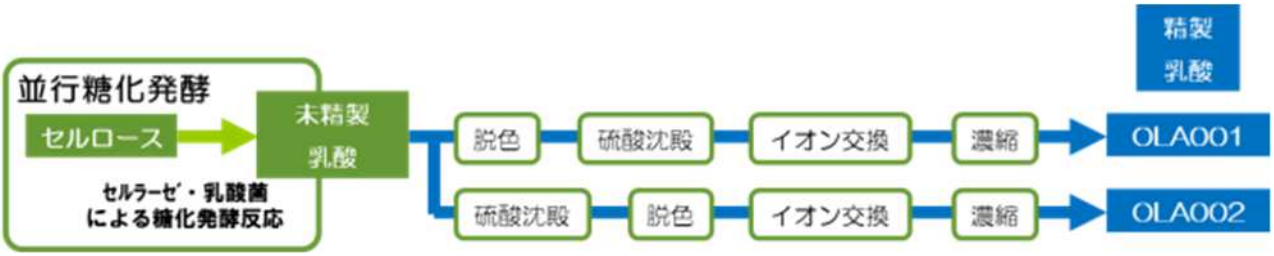


図２－２－２－２－１　乳酸精製手順

写真２－２－２－２－２　精製サンプル

２－２－２－２－１ａ　実施内容及び成果

（方法）

30L ジャーで窒素源ＡおよびＢを用いて発酵を行い、得られた培養液の精製を実施した。精製方法は図２－２－２－２－１に示す OLA002 の手順で行い、脱色工程に使用する活性炭の種類を変更して脱色性について評価した。

（結果）

精製・濃縮後のサンプル着色状況を写真２－２－２－２－１ａ－１に示す。前章で高い生産速度や光学純度を示した窒素源Ｂは従来使用していた窒素源Ａと比較して培養液の着色性が増加したが、脱色効果の高い活性炭Ｂを使用することで無色透明な乳酸溶液が得られることを確認した。

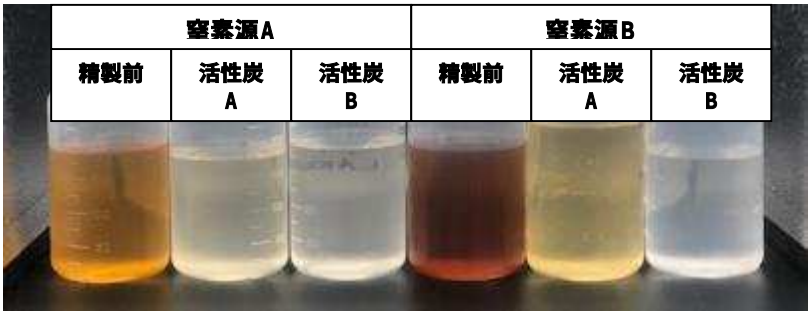


写真２－２－２－２－１ａ　活性炭種類検討結果

２－２－３　ポリ乳酸合成検討

昨年度、図２－２－３－１に示すような合成フローにてポリ乳酸の合成試作を検討し、写真２－２－３－２に示すようなポリ乳酸サンプル（ＯＰＬＡ００１およびＯＰＬＡ００２）を得た。昨年度のサンプルでは着色が見られたことから、本年度は合成反応における触媒種類の変更と、反応条件の検討によるラクチド収率の向上を検討した。

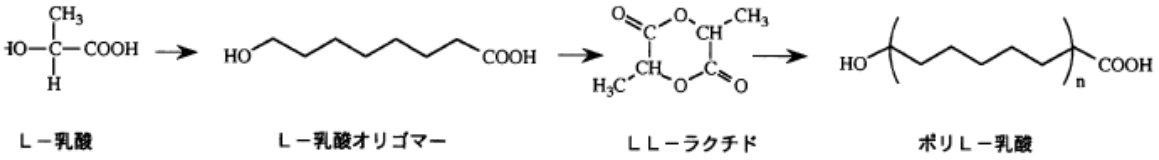


図２－２－３－１　ポリ乳酸合成フロー

写真２－２－３－２　パルプ由来ポリ乳酸

２－２－３－１　オリゴマー・ラクチド化触媒検討

昨年度の合成ではラクチドの異性化が観察されている。そのため、オリゴマー・ラクチド化時に使用している触媒を重合時にも使用している触媒に変更することで異性化の抑制を検討した。

２－２－３－１ａ　実施内容及び成果（乳酸脱水－オリゴマー合成－ラクチド化）

（方法）

乳酸水溶液400g(乳酸相当)に2－エチルヘキサン酸スズ4gを添加し､135℃ x 150min → 150℃ x 30min → 160℃ x 180min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トルエン＋酢酸ブチルを混合し、70℃まで加熱後、5℃まで冷却して発生する沈殿を濾過回収した。

得られたサンプルの純度を確認するためDSC（融点、ガラス転移点）及びＧＣ分析を行った。

DSC分析条件
　温度：25～150℃
　昇温速度：10℃/min
　窒素気流50ml/min

GC分析条件
　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

（結果）

昨年度同様に脱水－オリゴマー合成において、褐色に着色していたが、解重合によって得られるラクチドは精製後には白色の粉末ラクチドが得られた（写真２－２－３－１ａ－１）。

写真２－２－３－１ａ－１　乳酸脱水－オリゴマー合成－ラクチド化状況
（左：オリゴマー、右：精製ラクチド）

DSC 分析結果を図２－２－３－１ａ－２に、GC 分析結果を図２－２－３－１ａ－３示す。精製ラクチドの融点（DSC 吸熱ピーク点）を測定したところ 99.1℃に L ラクチド由来と思われる融点ピークが観察された。キラル GC カラムによるラクチド異性体の定量を行ったところ、ほぼ L ラクチドであることを確認した。

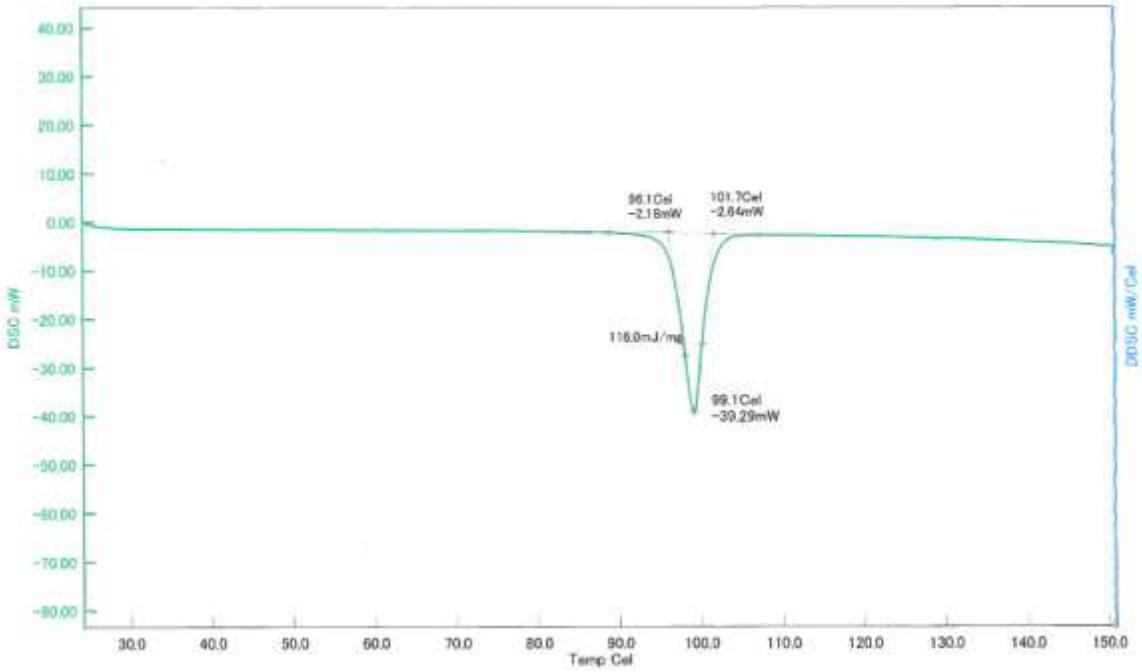


図２－２－３－１ａ－２　DSC 分析結果

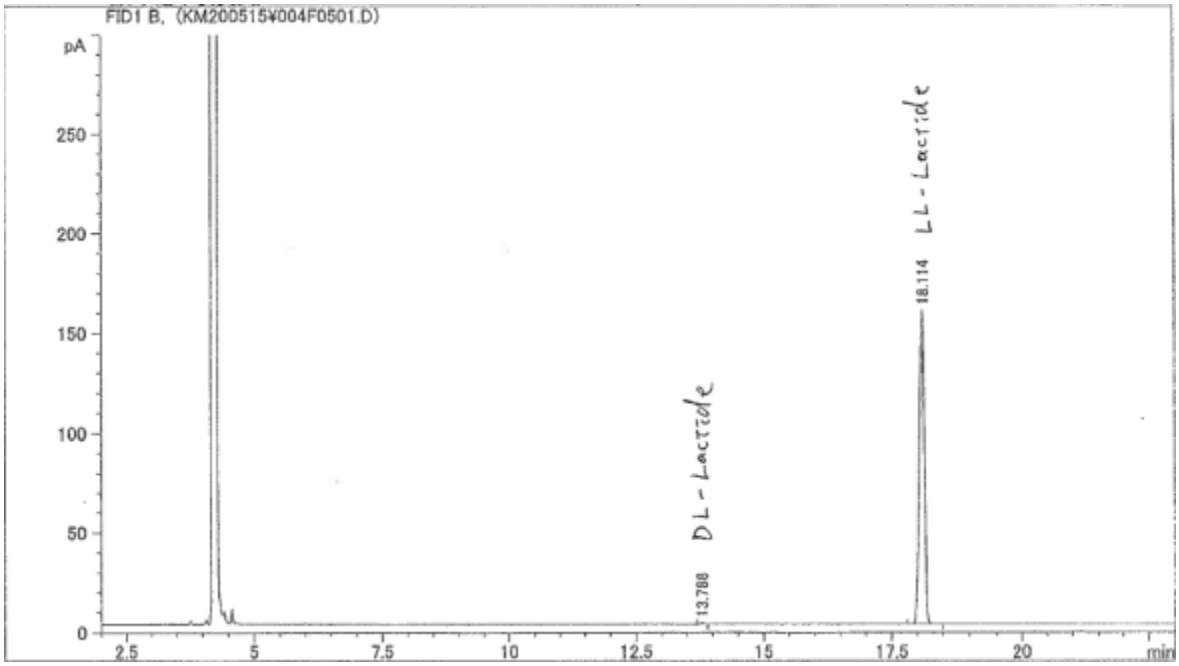


図２－２－３－１ａ－３　OLA002 由来ラクチドの融点

２－２－３－２　ラクチド重合によるポリ乳酸化

前章で得られたラクチドに対し、ポリ乳酸合成を実施した。

２－２－３－２－１ａ　実施内容及び成果

（方法）

精製ラクチド 50g に 2-エチルヘキサン酸スズ 20mg 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

DSC 分析
　温度：25～200℃
　昇温速度：10℃/min
　窒素気流：50ml/min

GPC 分析
　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）

写真２－２－３－２ａ－１に示すような良好なポリ乳酸サンプルを取得できた。ペレット化を行い、非可食原料由来のポリ乳酸に訴求効果があるかなどユーザー評価を開始した。

写真２－２－３－２ａ－１　パルプ由来ポリ乳酸

DSC にて昇温過程で融点、降温過程で結晶化ピークを観察した結果を図２－２－３－２ａ－２に示す。融点 176℃、ガラス転移点 55℃を示し、一般的なポリ乳酸と同等の正常を示した。

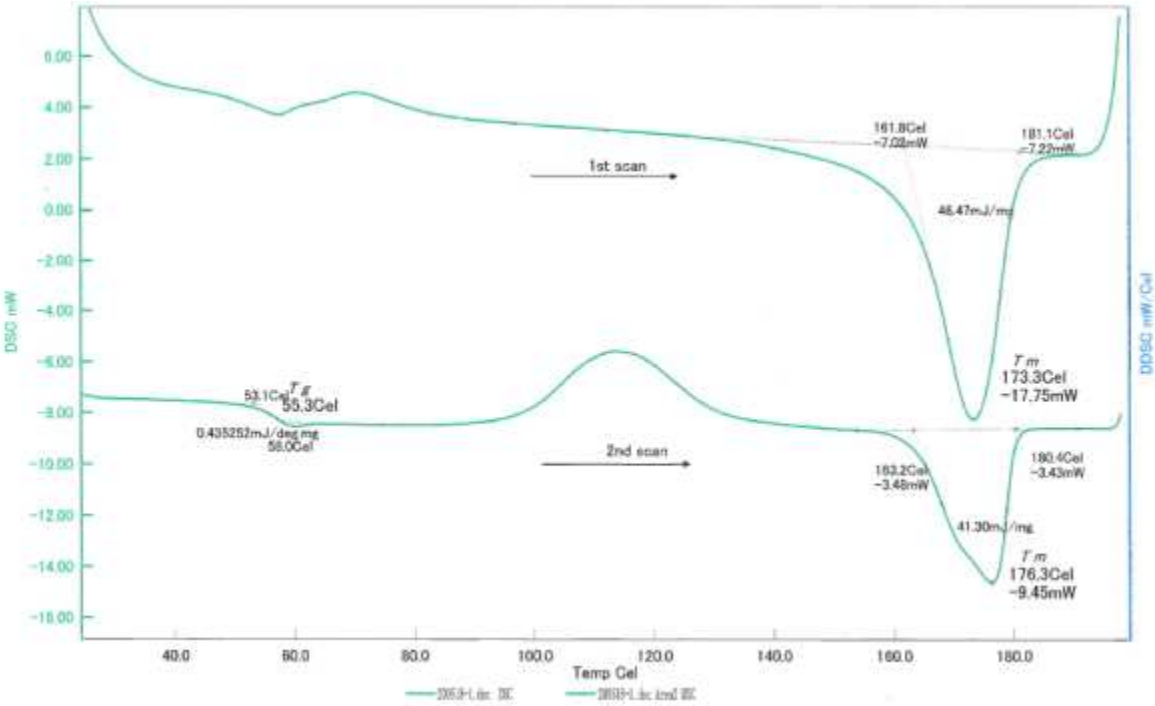


図２－２－３－２ａ－３

GPC 分析した結果を表２－２－３－２ａ－４に示す。昨年度はいずれも分子量 3 万以上の重合体しか得られていなかったが、今年度は分子量 12.1 万の重合体を得た。

表２－２－３－２ａ－４　GPC 分析結果

	重量平均分子量 MW	数平均分子量 Mn	分散度 Mw/Mn
OPLA001	35,600	13,000	2.73
OPLA002	75,500	15,500	4.86
OPLA003	121,000	28,100	4.31

２－２－３－３　ラクチド化条件検討

前章までの検討で、パルプ由来乳酸からポリ乳酸の合成を確認したが収率低いことが判明した（ラクチド収率で 34.8%）。そこで、オリゴマー化時間、解重合温度、触媒濃度、初期乳酸濃度などを変更し、ラクチド収率の向上を検討した。

２－２－３－３－１ａ　実施内容及び成果

（方法）

前章（２－２－３－１）に記載の方法に準拠し、オリゴマー化時間：4.5～6.5ｈ、解重合温度 170～210℃、解重合触媒濃度：0.2～2.0%、初期乳酸濃度：50～70%に変更してラクチド化を行った。

（結果）

合成条件検討結果を表２－２－３－３－１ａ－１に示す。オリゴマー化時間 5.5h、解重合温度 210℃、解重合触媒濃度 1.0%、初期乳酸濃度 70%で高いラクチド収率（72.5%）を確認した

表２－２－３－３－１ａ－１　合成条件検討結果

	OPLA 003	OPLA 004	OPLA 005	OPLA 006	OPLA 007	OPLA 008	OPLA 009	OPLA 010	OPLA 011	試薬乳酸
初期乳酸濃度	50	←	←	←	←	56	←	←	70	>90
オリゴマー化温度	135-160	←	←	←	←	←	←	←	←	←
オリゴマー化時間	4.5	5.5	6.5	5.5	←	←	←	←	←	←
解重合温度	170-190	←	←	200	210	←	←	←	←	←
解重合触媒濃度	1.0	←	←	←	←	0.5	2.0	1.0	←	←
ラクチド収率	34.8	33.1	33.9	41.1	42.8	44.8	45.9	47.2	72.5	88.9

２－３　LCA 解析

２－３－１　CO_2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

本評価では、令和元年度より引き続き、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 CO_2 削減効果の推計を実施した。

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、CO_2 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する。

【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

【評価対象製品・比較対象製品の内容】

① 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（C_2H_4）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、本技術では、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、パルプからエタノールを製造し、ここからエチレン～重合のプロセスでポリエチレンを製造する。製紙に使用されるパルプを原料とすることから、バイオ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（パルプ～エタノール～エチレンのプロセスが新規の技術）。

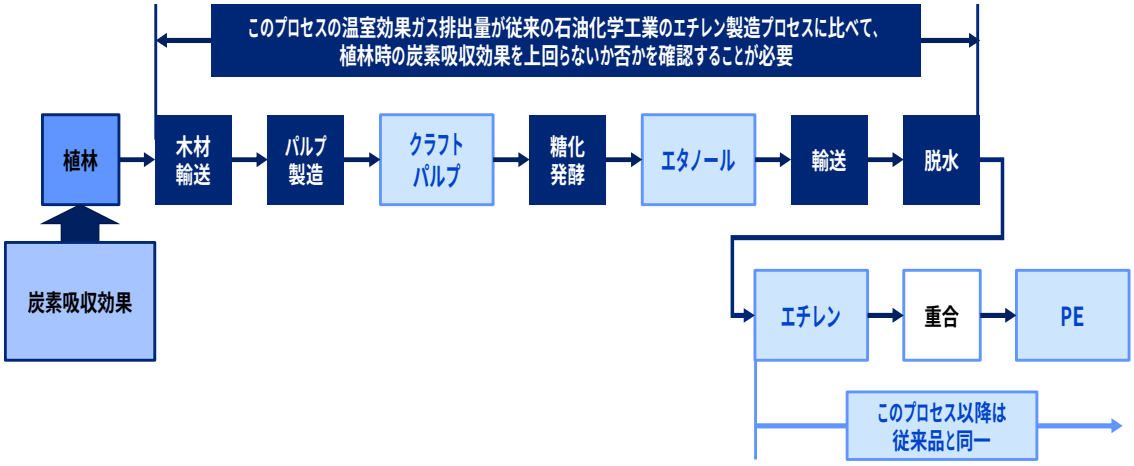
従来、ポリエチレンの原料は、ほぼ原油となっており、原料として多くの化石資源が消費されている。また、ポリエチレンは、使用済みとなった後、産業廃棄物、一般廃棄物として市場より回収され、リサイクルされるものも多いが、一部は焼却処理される。リサイクルされている樹脂についても、いわゆるサーマルリサイクルもしくはエネルギーリカバリーの割合も多く、燃料として燃焼されることになり、ここで化石資源由来の炭素が大気中に排出されることになる。

今回の技術は、この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、現在市場に流通しているポリエチレンが化石資源由来の炭素であるのに対して、本技術の製品では、原料を育成する過程（植林）において大気中より吸収した

ものである。また、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・性状であると推定されるため、使用段階や使用済み以降は、全く同じ処理となる見込み。従って、使用済みのポリエチレンが焼却されたとしても、それは原料育成時に大気中から吸収したもの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なる。化石資源を用いた従来のポリエチレンに比べて、この点のみであれば、温室効果ガス排出・吸収量で大きな差が生じることになる。この差は、エチレンの化学式（C_2H_4）から考えると 1kg のエチレンに対して 3.14kg の CO_2 の量となる。

我が国の 2020 年の年間エチレン生産量は約 7,000 千トン（石油化学協会統計資料より）であることから、これを全て置き換えることができた場合は、年間 20,000 千トン程度の CO_2 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-CO_2）を上回る CO_2 排出ではないことを確認することが必要である。本調査では、この点の確認を行うことが目的となる。



② 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る。乳酸は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。

今回の技術は、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た技術であり、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。

従って、従来のポリ乳酸に対しては、ポリエチレンの際に示した炭素吸収効果による CO_2 削減は見込むことが出来ない。しかしながら、ポリ乳酸自体が他の樹脂の代替となることで CO_2 削減の効果を有することは、すでに証明されていることから、本技術で生産されるポリ乳酸と従来のポリ乳酸で、その製造プロセスの CO_2 排出量が同等程度であれば、社会における

CO_2 削減効果を果たすことが出来る。CO_2 排出量を確認することが出来れば、出発原料であるパルプは、食糧競合の課題の無い原料であり、すでに製紙原料として確立された技術と設備を有することから、新たなポリ乳酸の原料として有望になるものと思われる。本調査では、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、さらなる削減を果たすことが出来るかどうかを検討することが目的となる。

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 あたりとする。

【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　基準フロー

表２－３－１－１－３－１に基準フロー（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されている。このことから、基準フローは、評価対象製品についても重量 1kg とする。

表２－３－１－１－３－１　本評価における基準フロー

	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２－３－１－２－１、図２－３－１－２－２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、樹脂材料である。従って、評価範囲に関しては、基本的には原材料の調達、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、性質は同一と想定されていることから、このうち、材料から製品の製造、製品の輸送、使用及び回収・廃棄・リサイクル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。従って、これらのプロセスは本評価の対象外とした。

なお、図２－３－１－２－１、図２－３－１－２－２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である。

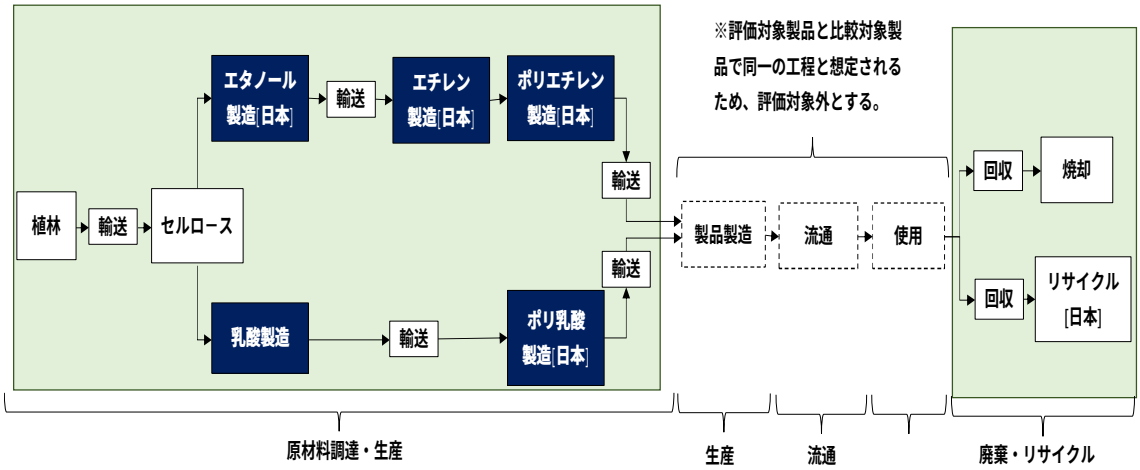


図２－３－１－２－１　評価対象製品の評価範囲

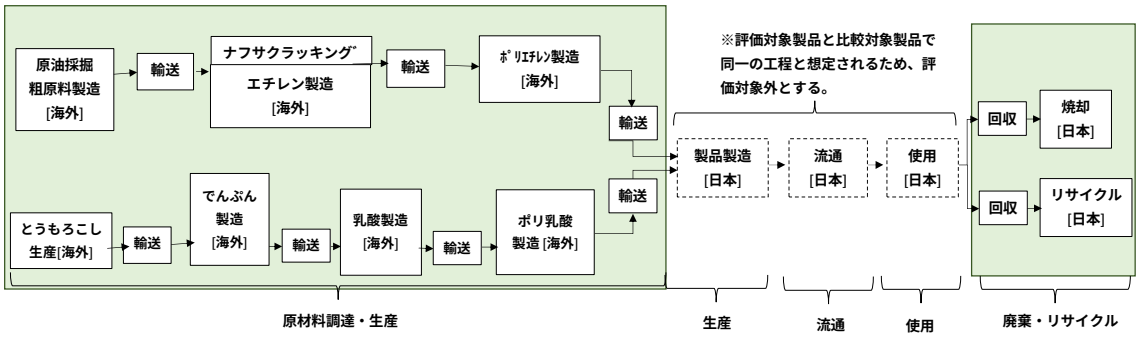


図２－３－１－２－２　比較製品の評価範囲

２－３－１－２－２　評価の対象外としたプロセス

本評価は、比較製品となる従来技術と本技術において差となるプロセスにおいて、今回の技術で CO_2 の削減となるか否かを確認することが目的となっている。従って、図２－３－１－２－１に示した通り、樹脂製造までのプロセスを対象とした Cradle-to-Gate による評価を実施しており、製品製造以降の廃棄・リサイクルまでは評価範囲の対象外としている。

また、各プロセスにおける設備製造に関して、本技術で必要となる設備は、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となるが、いずれも今後、量産過程に入ることで、設備生産能力の増大が図れることから、その影響は限りなく小さくなるものと考える（これらの製紙・化学プロセスで設備製造が LCA で含まれないことが多いことも考慮）。また、輸送に関する設備については、エタノールの輸送の可能性があるが、これも既存の輸送機器を用いることになるため、新規製造の必要性が無いこと、輸送に関するこれまでの評価でも考慮されていないことから、評価の対象外とした。

【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について

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こととして、炭素吸収分を負の排出量として評価範囲に含めることとした。ただし、炭素吸収分はエネルギー起源ではないことから、分けて計上した。

２－３－１－３ 評価対象とした環境影響範囲

本技術開発の目的は、エネルギー起源の CO_2 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、気候変動である。また、対象とした環境負荷項目は、温室効果ガス全般とし、特にエネルギー起源の排出量を特定した。

※評価に用いたデータベースについて
本評価では、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ている。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ている。

２－３－１－４　ポリエチレンに関する評価条件（評価対象製品）

サンプル精製プラントの仕様書をもとに、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 CO_2 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。
２－３－１－４節に評価条件や使用したデータを、２－３－２－１節に CO_2 排出量削減効果の推計結果を示す。

以下に、ポリエチレンの CO_2 排出量の算定に用いた評価条件を示す。以下に示す評価条件は、ことわりの無い限り、本研究開発の中で得られた情報である。

具体的にはセルロース～エタノール～エチレン～ポリエチレンの一部についてフォアグラウンドデータを王子ホールディングス株式会社より収集した。

２－３－１－４－１　原材料調達

（１）パルプ投入量

表２－３－１－４－１－１にエタノール製造時のセルロース使用量を示す。エタノールの原料としては、セルロース（クラフトパルプ）が使用される。パルプからエタノールの収率は、1t のパルプに対して 524L であり、これとエタノールの液密度（約 0.8kg/L）を用いて 1kg のエタノール製造に必要なパルプの量を推定した。

表２－３－１－４－１－１　エタノール製造時のセルロース使用量

	クラフトパルプ投入量 [kg/kg-エタノール]
パルプ投入量	2.39

（２）パルプ製造時の温室効果ガス排出量の算定について

クラフトパルプ製造に伴う CO_2 排出量については、IDEA v2 の数値をベースとして、製紙工場における実態を検討して、評価を実施している。具体的には、以下の①、②の検討を行った。また、図２－３－１－４－１－２に①、②の加工のイメージを示す。

①　漂白プロセスの排除

通常、クラフトパルプは製紙に用いられることから、その過程において漂白が行われる。漂白にあたっては、薬品として過酸化水素水、次亜塩素酸ナトリウム、塩素などが投入される。これに対して、本技術開発においては、クラフトパルプからエタノール製造に必要な糖質を得ることが目的となるため、漂白用の薬品等の投入は必要としないことから、パルプ製造プロセスにおいてこれらの薬品の投入を除外することとした。

②　使用するエネルギー種の変更

通常、パルプの製造においては、その製造プロセスからえられる廃液（黒液）を燃料として有効活用している。しかし、国内の平均的なパルプ製造のエネルギーを見た場合は、必ずしも黒液だけではなく、他の化石燃料も利用しているものと思われる。他方、パルプ・エタノール製造に伴う、物質バランス、エネルギーバランス、炭素バランスを考慮すると、経済的なバランス、炭素収支の少ないバランスなど、いくつかの条件を考えることが出来る。

本年度の評価にあたっては、一旦は、パルプ製造及びその後のエタノール製造において必要となるエネルギーに対しては、パルプ製造時に発生する黒液を活用できるものと想定（CO_2 削減を最大化）し、CO_2 削減のポテンシャルを示すこととした。

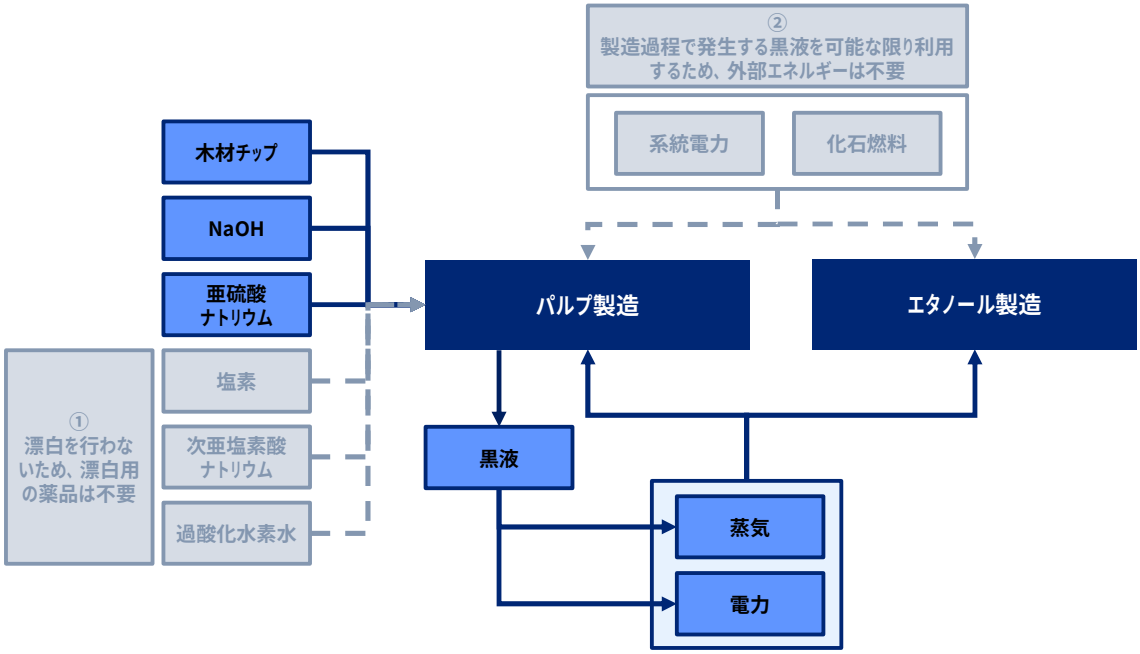


図２－３－１－４－１－２　パルプ製造データ改訂のイメージ

（３）パルプの輸送について

本研究開発では、製紙工場内で製造されたパルプを用いて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、輸送は発生しない。

２－３－１－４－２ 生産（パルプ～ポリエチレンの生産）

（１）エタノール製造

表２－３－１－４－２－１にパルプからエタノールを製造するプロセスの入出力データを示す。パルプからエタノールを製造するプロセスは、製紙工場内で行われる。そのため、現時点では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ている。また、電力、蒸気以外に酵素、水が消費され、廃棄物として排水が生じている。

なお、本プロセスでは、パルプから糖化発酵を経てバイオエタノールが生成される。このとき、パルプから糖まではほぼ 100%の収率であるが、糖からエタノールを製造する際には、糖に含まれる CO_2 が大気へ放出（バイオ起源であるため計上しない）され、以下のマスバランスとなる。

表２－３－１－４－２－１　エタノール製造時の入出力データ

		入出力データ	
投入物	セルロース（パルプ）	2.39	kg
	電力（黒液由来）	3.88	kWh
	蒸気（黒液由来）	0.011	kg
	酵素	0.0048	kg
	工業用水	0.024	m3
廃棄物	排水	0.024	m3
生産物	エタノール	1	kg

（2）エタノール輸送

表２－３－１－４－２－２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２－３－１－４－２－２　エタノール輸送のシナリオ

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%

（3）エチレン製造

表２－３－１－４－２－３にエタノールからエチレンを製造する脱水プロセスの入出力データを示す。エチレン製造プロセスに関しては、エタノール投入量のデータを本研究開発からの予測データを用いたが、これ以外は、現時点では、研究開発におけるデータの蓄積が行われていないことから、文献よりエタノール→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た。

エタノール（C_2H_5OH）からエチレン（C_2H_4）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（$C_2H_5OC_2H_5$）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 になることがわかる。以下の文献においてもほぼ同様の量が与えられていることから、現時点ではこの量を用いて算定を実施した。

エタノール以外の入出力データについては、Environmental Systems Analysis, Chalmers Univ. of Technology, “SPINE LCI dataset: Ethylene production from cane based ethanol. ESA-DBP”, 2009 年より,サトウキビベースのエタノールからエチレンを製造するプロセスのデータを用いた。
なお、これらのデータは、今後、研究開発から得られるデータをもとに精査を行っていく予定である。

表２－３－１－４－２－３　エチレン製造時の入出力データ

		入出力データ	
投入物	エタノール	1.64	kg
生産物	エチレン	1	kg
エネルギー	電力（系統電力）	1.8	MJ
		0.5	kWh
	燃料（石炭を想定）	5.6	MJ
GHG 排出量※	CH_4	1.5	g
	CO_2	327	g
	N_2O	0.012	g

※この排出量に対して、電力、燃料に起因する GHG 排出量を加算する。

（4）ポリエチレン製造

表２－３－１－４－２－４にエチレンからポリエチレンを製造するプロセスの入出力データを示す。ポリエチレン製造プロセスに関しては、エチレン投入量の情報を研究開発より得て、それ以外は、文献（EUROPEAN COMMISSION, “Reference Document on Best Available Techniques in the Production of Polymers”, 2007）よりエチレン→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た。エチレンの重合プロセスは、本研究においても、通常の重合プロセスを用いることが出来ることから、バックグラウンドデータを用いることとした。

表２－３－１－４－２－４　ポリエチレン製造時の入出力データ

		入出力データ	
投入物	エチレン	1.02	kg
生産物	ポリエチレン	1	kg
エネルギー等	電力	1.08	kWh
	工業用水	0.0029	m^3

（5）物量収支の整理

図２－３－１－４－２－５に本研究開発における物質収支について整理した結果を示す。パルプ約 4kg よりポリエチレン 1kg が製造される。

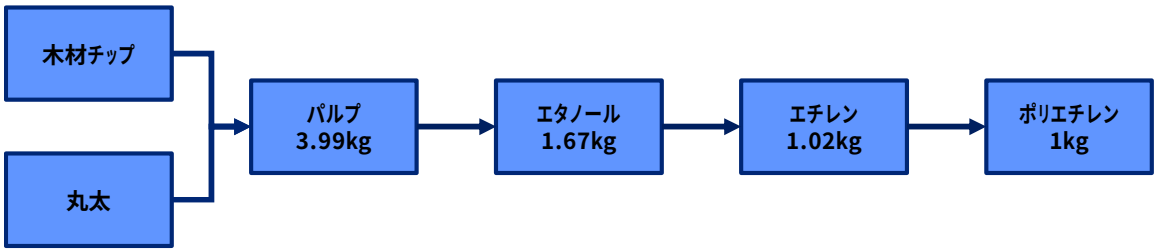


図２－３－１－４－２－５　本研究開発におけるポリエチレン製造時の物質収支

２－３－１－５　ポリ乳酸に関する評価条件（評価対象製品）

ポリ乳酸に関しても、ポリエチレンと同様にサンプル精製プラントの仕様書をもとに、予測値としてフォアグラウンドデータを収集し、CO_2 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。
２－３－１－５節に評価条件や使用したデータを、２－３－２－２節に CO_2 排出量削減効果の推計結果を示す。

以下に、ポリ乳酸の CO2 排出量の算定に用いた評価条件を示す。以下に示す評価条件は、ことわりの無い限り、本研究開発の中で得られた情報である。
　具体的にはセルロース～乳酸～ポリ乳酸の一部についてフォアグラウンドデータを王子ホールディングス株式会社より収集した。

２－３－１－５－１　原材料調達

（１）セルロース使用量
表２－３－１－５－１－１に乳酸製造時のセルロース使用量を示す。乳酸の原料としては、セルロース（パルプ）が使用される。パルプから乳酸の収率は、培養収率 95%、精製収率 90%より総合で 85.5%となる。この収率から 1kg の乳酸の製造に必要なパルプの量を推定した。

表２－３－１－５－１－１　乳酸製造時のセルロース使用量

	クラフトパルプ投入量 [kg/kg-乳酸]
パルプ投入量	1.17

クラフトパルプ製造に伴う CO_2 排出量については、ポリエチレンと同様に IDEA v2 の数値をベースとして、製紙工場における実態（漂白プロセスの排除、黒液の利用）を検討して、評価を実施している（図２－３－１－４－１－２参照）。

（２）パルプの輸送について
本研究開発では、製紙工場内で製造されたパルプを用いて同一の製紙工場内で乳酸を製造することとしているため、輸送は発生しない。

２－３－１－５－２　生産（パルプ～PLA の生産）

（１）乳酸製造
表２－３－１－５－２－１にパルプから乳酸を製造するプロセスの入出力データを示す。パルプから乳酸を製造するプロセスは、製紙工場内で行われる。そのため、現時点では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ている。また、電力、蒸気以外に酵素、生成乳酸を中和するための炭酸カルシウムが消費される。中和により乳酸カルシウムが生成され、ここから乳酸を遊離させる。このとき石膏（硫酸カルシウム）が副生される。この石膏は現状では、砕石の代替品として利用されている。本調査では、このプロセスにおける乳酸と石膏の配分については、システム拡張を行い、石膏の利用により新規の砕石が控除される効果を加えた。
なお、現時点では、乳酸製造のおける電力、蒸気の量は不明であるが、いずれも黒液を燃料として使用していることから、CO_2 排出量の算定には影響しない（排出量は 0 とした）。

表２－３－１－５－２－１　乳酸製造時の入出力データ

		入出力データ	
投入物	セルロース（パルプ）	2.39	kg
	電力（黒液由来）	-	kWh
	蒸気（黒液由来）	-	kg
	酵素	0.0031	kg
	炭酸カルシウム	0.56	kg
副生物	石膏（リサイクル）	0.76	kg
生産物	乳酸	1	kg

（２）乳酸の輸送について

現時点では、製紙工場で製造された乳酸を、同じ製紙工場内でポリ乳酸へ重合したと仮定している。今後の検討においては、他の工場でのポリ乳酸製造した場合と仮定して検討しているが、現時点では乳酸の輸送は発生しないものとして算定を行った。

（３）ポリ乳酸製造

表２－３－１－５－２－２に乳酸からポリ乳酸を製造するプロセスの入出力データを示す。ポリ乳酸製造プロセスに関しては、乳酸投入量のデータを本研究開発からの予測データを用いたが、これ以外は、現時点では研究開発におけるデータの蓄積が行われていないことから、文献より乳酸→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。

ポリ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。表２－３－１－５－２－２の中に CO_2 排出量の数値も記載する。乳酸の重合プロセスでは、まず乳酸より縮重合したオリゴマーを加熱分解し、ラクチドを合成した後、ラクチドを開環重合することでポリ乳酸を得る。文献では、乳酸～ラクチド、ラクチド～ポリ乳酸の 2 段階で温室効果ガス排出量が記載されていることから、
表２－３－１－５－２－２においてもそれらを分けて整理した。

表２－３－１－５－２－２　ポリ乳酸製造時の入出力データ

		入出力データ	
投入物	乳酸	1.25	kg
生産物	ポリ乳酸	1	kg
CO_2 排出量	ラクチド製造	0.54	kg
	開環重合	0.20	kg
	合計	0.74	kg

（４）物量収支の整理

図２－３－１－５－２－３に本研究開発における物質収支について整理した結果を示す。パルプ約 1.5kg よりポリ乳酸 1kg が製造される。

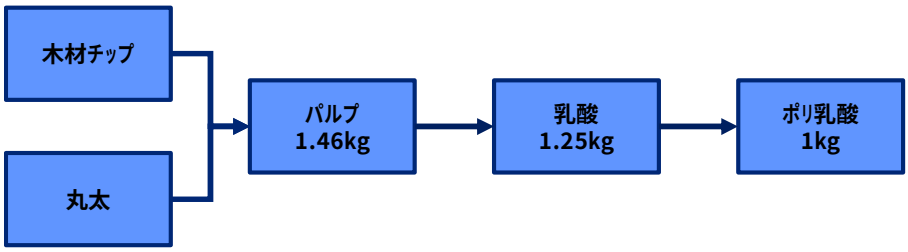


図２－３－１－５－２－３　本研究開発におけるポリエチレン製造時の物質収支

２－３－２　CO2 削減効果の推計

２－３－２－１　ポリエチレンの CO_2 排出量削減効果推計

２－３－２－１－１　評価対象製品の CO_2 排出量

表２－３－２－１－１－１に評価対象である非可食セルロース由来のポリエチレンについて、1kg あたりの CO_2 排出量の算定結果を示す。エタノールの輸送については、24 のシナリオの平均（779km 輸送）を取っている。

炭素吸収分については、ポリエチレンの組成（$(C_2H_4)_n$）から炭素が全て CO_2 として吸収されているとすると、1kg あたり 3.14kg-CO_2 の吸収量となる。これは、製造時の CO_2 排出量に比べて大きい数値となる。

結果として、エネルギー起源の CO_2 排出量は 2.2kg-CO_{2e}、炭素吸収等の非エネルギー起源まで含めた場合には、最終的な回収・廃棄を含めない今回の評価範囲だけでみると-0.4 kg-CO_{2e} 程度となり、製造段階まで見た場合にはネットで負の排出量となることがわかる。

表２－３－２－１－１－１　非可食セルロース由来ポリエチレン 1kg あたりの CO_2 排出量

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	植林（吸収）		-3.140	-3.140
	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	**0.477**	**-3.140**	**-2.663**
生産	パルプ製造～エタノール製造	0.246	0.090	0.336
	エタノール輸送	0.889	0.398	0.090
	エチレン製造			1.197
	ポリエチレン製造	0.603	0.020	0.624
	生産計	**1.738**	**0.508**	**2.246**
合計		**2.215**	**-2.632**	**-0.417**

２－３－２－１－２　比較製品の CO_2 排出量

表２－３－２－１－２－１に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 CO2 排出量を示す。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。今回の評価対象となる非可食セルロース由来ポリエチレンの性状により、妥当な比較相手を検討すべきであるが、現時点では、LDPE、HDPE の両方の結果を示す。

表２－３－２－１－２－１　石油原料由来ポリエチレンの CO2 排出量（製造時）

		1kg あたりの CO_2 排出量 [kg-CO_{2e}/kg-PE]
欧州の事例 1)	LDPE	1.87
	HDPE	1.80
日本の事例 2)	LDPE	1.52
	HDPE	1.33

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)

２－３－２－１－３　非可食セルロース由来ポリエチレンによる CO_2 排出量削減効果の推計結果

（１）CO_2 排出量削減効果の推計結果

表２－３－２－１－３－１に評価対象製品と比較製品のそれぞれ 1kg あたりの製造時 CO_2 排出量を示す。PE1kg あたりの排出量は 1.8～2.3kg-CO_{2e} の削減となる。

表２－３－２－１－３－１　CO_2 排出量削減効果の推計結果

	評価対象製品	比較製品			
		LDPE（欧州）	HDPE（欧州）	LDPE（日本）	HDPE（日本）
CO_2 排出量 [kg-CO_{2e}/kg-PE]	-0.42	1.87	1.80	1.52	1.33
削減効果 [kg-CO_{2e}/kg-PE]	-	2.29	2.22	1.94	1.75

削減効果は各比較製品の CO_2 排出量と評価対象製品の CO_2 排出量の差分

（２）エネルギー起源の CO_2 排出量について

表２－３－２－１－３－２にはエネルギー起源の排出量のみを比較した。石油原料由来のデータが非エネルギー起源も含んでいるため、単純には比較できないが、石油原料由来の CO_2 排出量が全てエネルギー起源としても、今回の評価対象製品の方が、エネルギー起源の CO_2 排出量よりも大きくなっている。つまり、バイオ由来による原材料の育成時における CO_2 吸収分を考慮しなければ、製造プロセス上だけでは、効率化が進んだ化石資源由来のポリエチレン製造よりは非効率と言える。

表２－３－２－１－３－２　CO_2 排出量の推計結果（エネルギー起源のみ）

	評価対象製品	比較製品			
		LDPE（欧州）	HDPE（欧州）	LDPE（日本）	HDPE（日本）
CO_2 排出量 [kg-CO_{2e}/kg-PE]	2.22	1.87	1.80	1.52	1.33

（３）エネルギー起源の CO_2 排出量の考え方と今後の方策について

①エネルギー起源 CO_2 排出量の考え方の考察

図２－３－２－１－３－３に本研究開発のエネルギー起源の CO_2 排出量について考察する。本研究開発においてエネルギー起源の CO_2 排出量とした量は 2.22kg-CO_{2e}/kg-PE であり、これは既存の石油資源を用いたポリエチレンよりも大きな排出量となっている。しかしながら、現在算定している中では、ポリエチレン製造プロセスの中で直接使用していない燃料等が含まれている（例えばパルプ製造時に使用する水酸化ナトリウムの製造に起因する CO_2 排出量など）。また、海外における木材チップ製造に起因する CO_2 排出量も含まれる。これらは温室効果ガス排出量算定・報告マニュアルでは工場等での直接のエネルギー消費に当たらないため、厳密にはエネルギー起源の CO_2 排出量とは異なる。これらを除いた場合、今回の研究開発における CO_2 排出量は 0.723kg-CO_{2e} が除かれ、約 1.5 kg-CO_{2e} となり、既存のポリエチレンと同程度の排出量（表２－３－２－１－３－４参照）となる。

また、ライフサイクルとして化石資源の活用を考慮する場合、比較対象となる石油原料を用いたポリエチレンは、原料として多くの原油を投入している。一方、本研究開発のポリエチレンは木材（植林により CO_2 を吸収）を原料としており、化石資源を使用していないためエネルギー起源の CO_2 として考慮されない。この点において、非エネルギー起源の CO_2 を合わせた合計 CO_2 排出量について貢献がみられる。

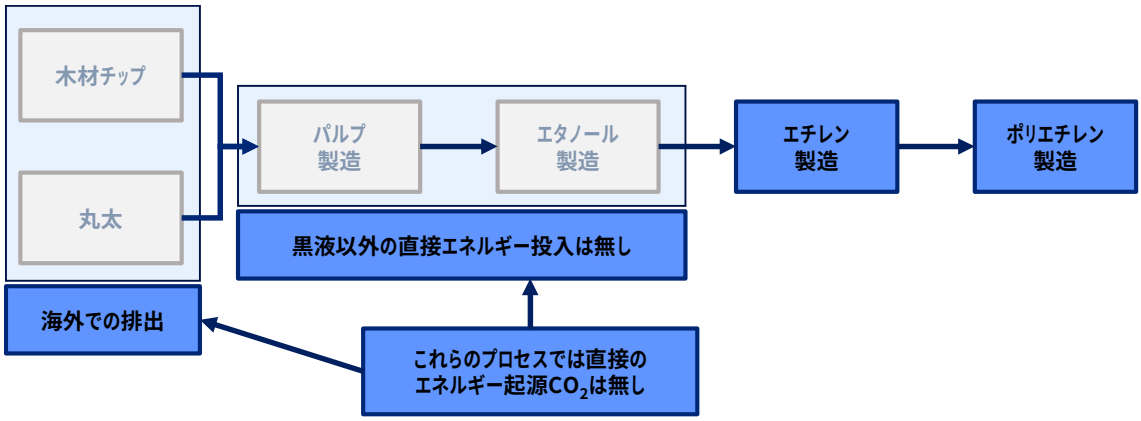


図２－３－２－１－３－３　本研究開発におけるエネルギー起源 CO_2 の考察

表２－３－２－１－３－４　上記考察を踏まえた CO_2 排出量

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	植林（吸収）		-3.140	-3.140
	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		**-2.663**	**-2.663**
生産	パルプ製造～エタノール製造		0.336	0.336
	エタノール輸送	0.889	0.398	0.090
	エチレン製造			1.197
	ポリエチレン製造	0.603	0.020	0.624
	生産計	**1.492**	**0.754**	**2.246**
合計		**1.492**	**-1.909**	**-0.417**

②今後の CO_2 排出量の検討

表２－３－２－１－３－４より、現時点で CO_2 排出量に大きな影響を及ぼしているのは、大きく２点ある。一つはパルプ製造及びエタノール製造における黒液の利用である。パルプ製造プロセスにおいては黒液が発生する。黒液を利用することはバイオマス資源の有効利用（化石燃料の利用を最小限化できる）であるから、積極的に利用することで、温室効果ガス排出量の削減につながる。この点については、今後有効利用可能な範囲などを改めて整理する必要がある。もう一点は、エチレン製造、ポリエチレン製造プロセスにおけるエネルギー投入量及びこれに起因する CO_2 排出量の精査である。特にエタノールの脱水プロセスについて、

現時点では文献のデータを用いているが、このプロセスにおける CO_2 排出量が大きいことから、実際のプロセスのデータを把握して、その削減についても検討することが必要である。以上の２点について、把握・精査を行った上で、更なる効率化を図ることで、本研究開発のコスト面、CO_2 排出量、両面の更なるメリットの増大につながると考えられる。

２－３－２－２　ポリ乳酸の CO_2 排出量削減効果推計

２－３－２－２－１　評価対象製品の CO_2 排出量

表２－３－２－２－１－１に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 CO_2 排出量の算定結果を示す。

炭素吸収分については、ポリ乳酸の組成($C_3H_4O_2$)から炭素が全て CO_2 として吸収されているとすると、1kg あたり 1.83kg-CO_2 の吸収量となる。これは、製造時の CO_2 排出量に比べて大きい数値となる。

結果として、エネルギー起源の CO_2 排出量は 1.28kg-CO_{2e} 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、最終的な回収・廃棄を含めない今回の評価範囲だけでみると-0.21 kg-CO_{2e} 程度と製造段階まで見た場合にはネットで負の排出量となることがわかる。

表２－３－２－２－１－１　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
原材料調達	植林（吸収）		-1.830	-1.830
	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**	**-1.830**	**-1.655**
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**
合計		**1.278**	**-1.489**	**-0.211**

２－３－２－２－１　比較製品の CO_2 排出量

表２－３－２－２－１－１に比較相手となるとうもろこし由来のポリ乳酸 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。文献は、本研究開発製品のポリ乳酸製造に関するデータを引用したものと同じ文献を採用している。なお、この結果にも炭素吸収分（文献値では吸収分は 1.83 ではなく、1.84 となっている）が含まれた数値となっている。従って、評価対象製品と比較製品の違いは乳酸製造までのプロセスに起因している。

表２－３－２－２－１－１　とうもろこし由来ポリ乳酸の CO_2 排出量（製造時）

	1kg あたりの CO_2 排出量 [kg-CO_{2e}/kg]
炭素吸収分	-1.84
生産	2.44
合計	0.60

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

２－３－２－２－３　非可食セルロース由来ポリ乳酸による CO_2 排出量削減効果の推計結果

表２－３－２－２－３－１に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 排出量を示す。PLA1kg あたりの排出量では 0.81kg-CO2e の削減となる。

表２－３－２－２－３－１　CO2 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]	-0.21	0.60
削減効果 [kg-CO_{2e}/kg-PLA]	-	0.81

削減効果は各比較製品の CO2 排出量と評価対象製品の CO2 排出量の差分

（1）エネルギー起源の CO_2 排出量について

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-CO_{2e} 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-CO_{2e} となり、エネルギー起源の CO_2 排出量であっても、本研究開発が優位であることがわかる。

２－３－３　普及段階における CO_2 削減効果の算定方法の検討

本年度は、前年度に引き続き、研究開発段階の設計に基づく情報をもとに、温室効果ガス排出量の影響が大きいパルプ～エタノール製造のプロセスを中心に精査を行った。今後、本実証の結果をもとに、技術普及期の削減効果についても整理していく必要があることから、以下、その課題を整理する。図２－３－３－１にその整理結果を示す。

大きく分けると、実証スケールにおけるプロセスデータ・シナリオの確認（下記①、②、④、⑤、⑦、⑨）、製紙産業における設備規模（パルプ生産能力等）をもとにしたポリエチレン、ポリ乳酸の製造可能量、その際の CO_2 排出量削減ポテンシャルの推計（下記③）、他文献におけるバイオ樹脂の削減効果及びリスク、本研究開発成果への反映（下記⑥、⑧）が挙げられる。これらを次年度の課題と考える。

特にポリエチレンに関しては現状においても石油由来のポリエチレンに比べてエネルギー起源のみの CO_2 排出量においては、大きな優位性を示すことが出来ていないことから、パルプ製造～ポリエチレン製造を通して、数値の精査を行い、可能な限りの CO_2 排出削減の検討を行う。このことで、プロセスにおけるコスト低減を図ることも期待する。

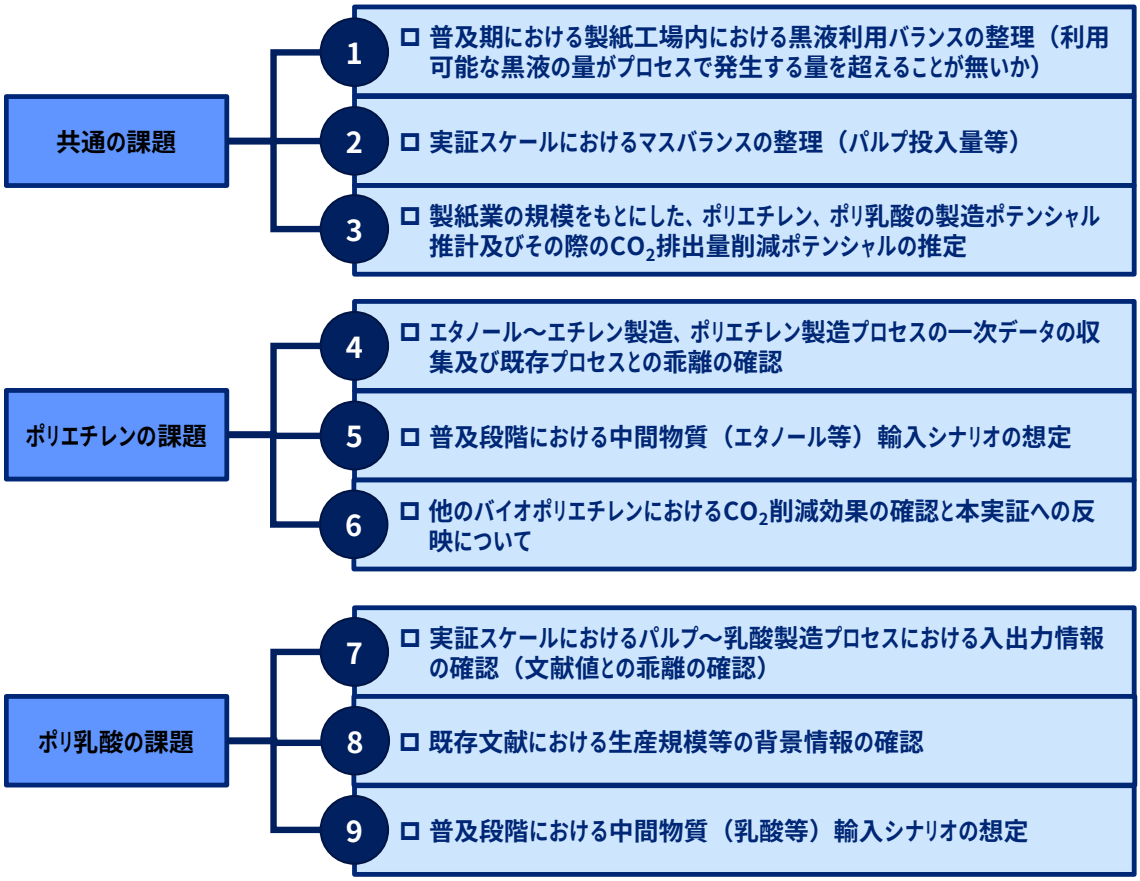


図２－３－３－１　普及段階における CO_2 削減効果算定における課題

２－４　リサイクル性評価

２－４－１　リサイクル性評価手法

２－４－１－１　バイオポリエチレンのリサイクル性評価

一般社団法人プラスチック循環利用協会の資料[2]によると、2018 年にマテリアルリサイクルされた廃プラスチックは 2,080 千トンあり、内 330 千トン（15.9%）がポリエチレンである。今後、本実証事業にて試作を検討しているフィルム製品（現段階ではレジ袋製造を検討中）においてマテリアルリサイクルを模した評価を実施することを検討している。

現段階ではポリエチレンのマテリアルリサイクルを行っている業者において、通常のルートで回収された廃ポリエチレンと、今回の実証で得られるバイオポリエチレンを使用したフィルム製品を混合し、マテリアルリサイクルを実施し、得られたリサイクル樹脂の品質を確認することを想定している。尚、具体的な評価手法、規模については、実証で得られるバイオポリエチレンの数量、性状により、再度検討する必要がある。

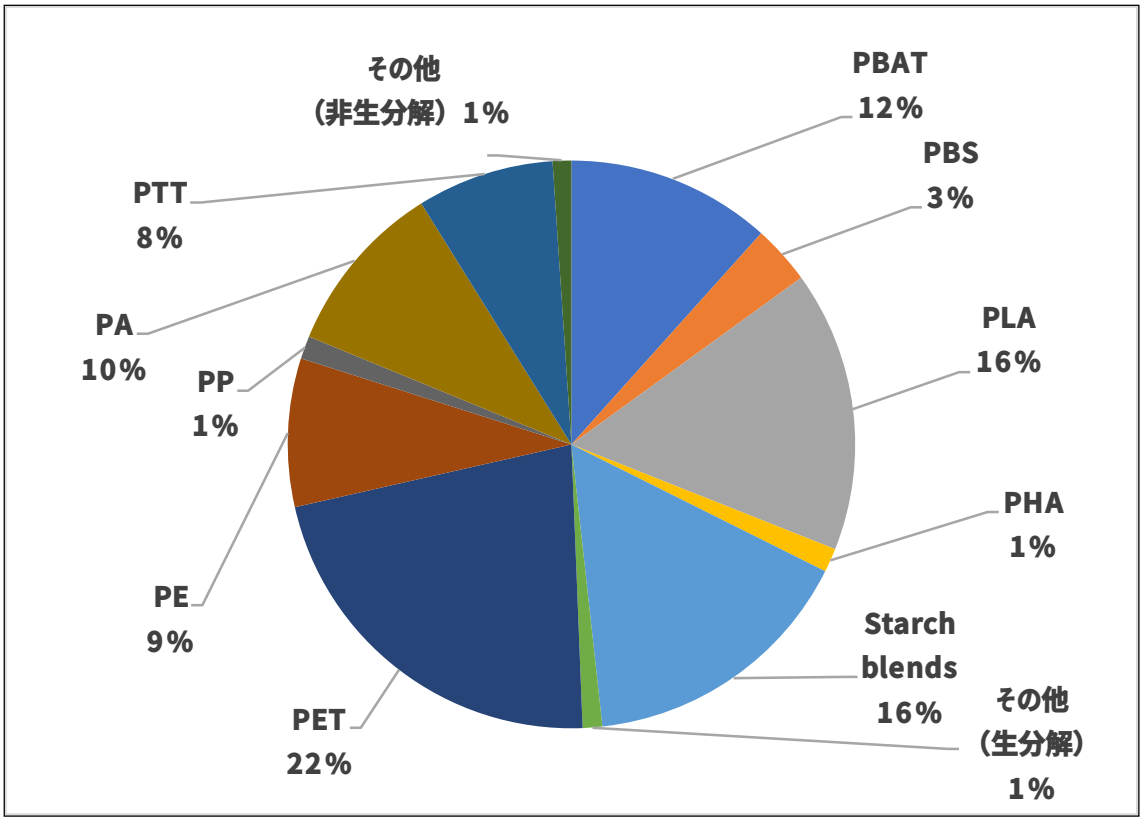
---

[2] 出所：プラスチックリサイクルの基礎知識（プラスチック循環利用協会、2019 年 7 月 23 日、https://www.pwmi.or.jp/pdf/panf1.pdf）

２－５　マーケティング

２－５－１　世界におけるバイオマスプラスチック概観

世界におけるバイオマスプラスチックの生産能力は、2,053 千トン（2017 年）、2,102 千トン（2018 年）、2,409 千トン（2019 年）、2,483 千トン（2020 年）と CAGR[3]6.6%で増大してきている。2020 年における生産能力 2,483 千トンの内訳は、PET（22%）、PLA（16%）、Starch Blends（16%）、PBAT（12%）、PA（10%）、PE（9%）、PTT（8%）の順となっている。PET、PLA、Starch Blends の 3 種類で 50%超を占める。



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

図２－５－１－１　世界のバイオマスプラスチック生産能力の比率（2020 年）[4]

---

[3] CAGR（Compound Annual Growth Rate）年平均成長率
[4] 出所：Bioplastic market data（European Bioplastics）グラフをベースとして、双日総合研究所にて推計。

各プラスチックの 2017 年～2020 年の生産能力の推移をみると、PLA と PBAT が急激に増加している。PLA に関しては、217 千トン（2017 年）、226 千トン（2018 年）、310 千トン（2019 年）、397 千トン（2020 年）となっており、2019 年および 2020 年に大きく伸びている。PBAT に関しては、104 千トン（2017 年）、149 千トン（2018 年）、282 千トン（2019 年）、290 千トン（2020 年）と 2019 年に前年からほぼ倍増している。その他のバイオマスプラスチックの生産能力は、ほぼ横ばいで推移している。

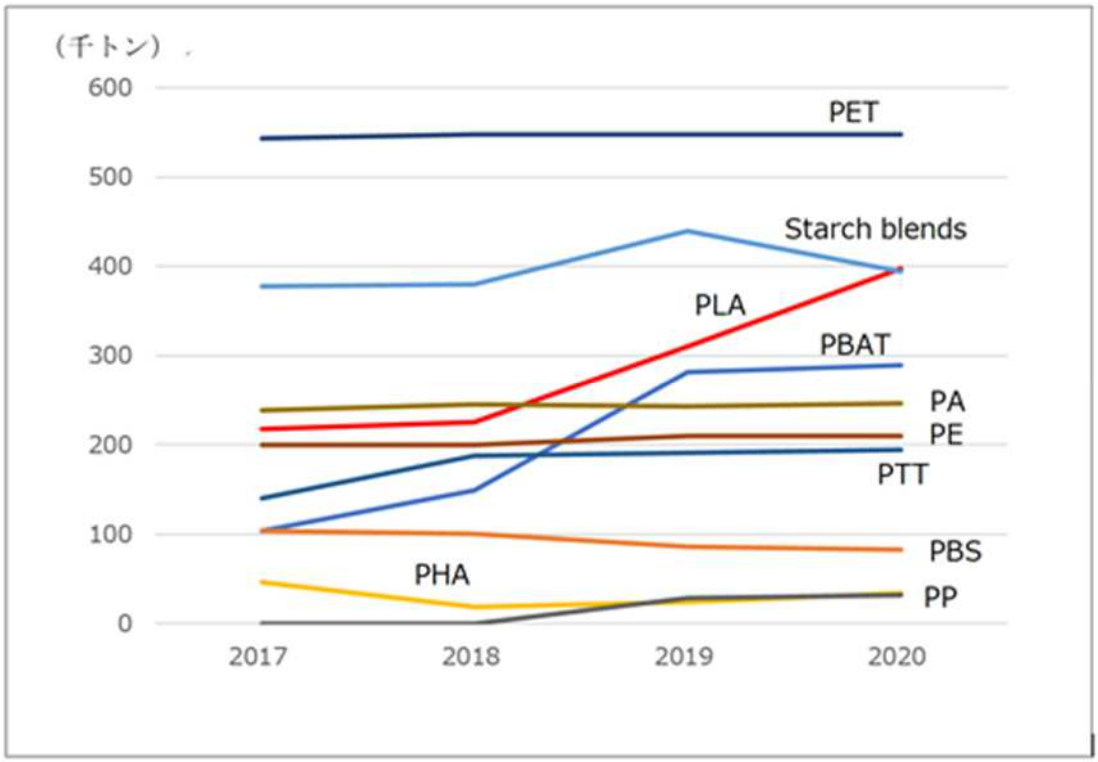


図２－５－１－２　世界のバイオマスプラスチック生産能力の推移[5]

[5] 出所：Bioplastic market data（European Bioplastics）グラフをベースとして、双日総合研究所にて推計。

表２－５－１－３　生分解性プラスチック・非生分解性プラスチックの生産能力推移[6]

用途	生分解性プラスチック																							
	PBAT				PBS				PLA				PHA				Starch blends				その他（生分解）			
	2017	2018	2019	2020	2017	2018	2019	2020	2017	2018	2019	2020	2017	2018	2019	2020	2017	2018	2019	2020	2017	2018	2019	2020
軟質包装材	47	67	130	130	47	43	38	28	41	43	58	77	21	10	10	9	233	230	269	157	0	0	0	0
硬質包装材	21	29	53	55	0	0	0	9	62	67	91	117	5	5	5	9	36	38	43	40	0	0	0	0
各種消費材	0	0	0	0	10	10	9	9	21	24	28	40	5	0	5	6	36	38	43	117	16	14	9	12
繊維	0	0	0	0	0	0	0	3	41	43	62	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
農業＆園芸	26	38	71	71	31	33	28	25	10	14	19	22	5	0	0	6	37	33	43	40	0	0	0	0
自動車＆輸送車両	0	0	0	6	5	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5	5	6
建築材料	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	10	5	9
塗料＆接着剤	0	15	29	28	0	10	5	3	0	10	19	22	0	5	5	3	0	39	43	19	0	0	0	0
電子機器	0	0	0	0	0	0	0	0	10	10	9	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
その他	10	0	0	0	10	0	0	6	25	11	15	58	10	0	0	0	35	0	0	21	0	0	0	0
合計	104	149	282	290	104	101	86	83	217	226	310	397	47	19	24	34	378	379	439	394	31	29	19	28

用途	非生分解性プラスチック																							
	PET				PE				PP				PA				PTT				その他（非生分解）			
	2017	2018	2019	2020	2017	2018	2019	2020	2017	2018	2019	2020	2017	2018	2019	2020	2017	2018	2019	2020	2017	2018	2019	2020
軟質包装材	0	0	0	0	119	121	128	126	0	0	5	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
硬質包装材	488	484	489	496	68	65	68	70	0	0	5	6	0	0	0	0	0	10	10	0	10	0	0	0
各種消費材	0	0	0	0	10	9	12	12	0	0	9	12	47	48	47	25	0	0	0	18	0	0	0	6
繊維	26	24	25	52	0	0	0	0	0	0	0	0	10	14	9	25	140	158	156	158	0	0	0	0
農業＆園芸	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
自動車＆輸送車両	31	29	37	0	0	0	0	0	0	0	5	3	84	87	85	74	0	19	14	19	26	10	14	12
建築材料	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	3	61	62	61	73	0	0	0	0	0	0	0	0
塗料＆接着剤	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
電子機器	0	0	0	0	5	5	4	3	0	0	0	2	10	10	13	37	0	0	0	0	10	10	13	5
その他	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0	12	0	0	10	0	5	0	0	3
合計	543	548	548	548	200	200	210	210	0	0	29	32	238	245	243	246	140	187	191	194	52	19	29	26

用途	生分解性プラスチック合計				非生分解性プラスチック合計				総合計			
	2017	2018	2019	2020	2017	2018	2019	2020	2017	2018	2019	2020
軟質包装材	388	393	504	401	119	121	132	132	507	514	637	533
硬質包装材	125	139	192	231	566	558	572	572	691	697	764	803
各種消費材	88	86	95	185	57	57	69	73	145	143	164	258
繊維	41	43	62	43	176	196	191	234	218	239	252	277
農業＆園芸	110	120	161	164	0	0	0	0	110	120	161	164
自動車＆輸送車両	10	10	9	12	142	145	155	109	152	155	164	121
建築材料	15	14	14	9	61	62	66	76	77	77	80	86
塗料＆接着剤	0	78	101	75	0	24	24	0	0	103	125	75
電子機器	10	10	9	21	25	24	30	46	35	34	39	67
その他	91	11	15	86	30	11	10	15	121	21	25	101
合計	880	903	1,160	1,226	1,173	1,199	1,250	1,257	2,053	2,102	2,409	2,483

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、カーペットなど、（不織布、PTT（ソロナ）繊維）
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

[6] 出所：Bioplastic market data 2016 年～2020 年（European Bioplastics）グラフをベースとして、双日総合研究所にて推計。

２－５－２　日本におけるバイオマスプラスチック概観

日本におけるバイオマスプラスチックの利用は、2010 年の 11,132 トンから CAGR17.3%の高い伸び率で増加し、2019 年には 46,650 トンに達している。2020 年度のデータは入手できていないが、2020 年 7 月 1 日からのレジ袋有料化にともなうバイオマスプラスチック袋の需要増[7]、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マス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。

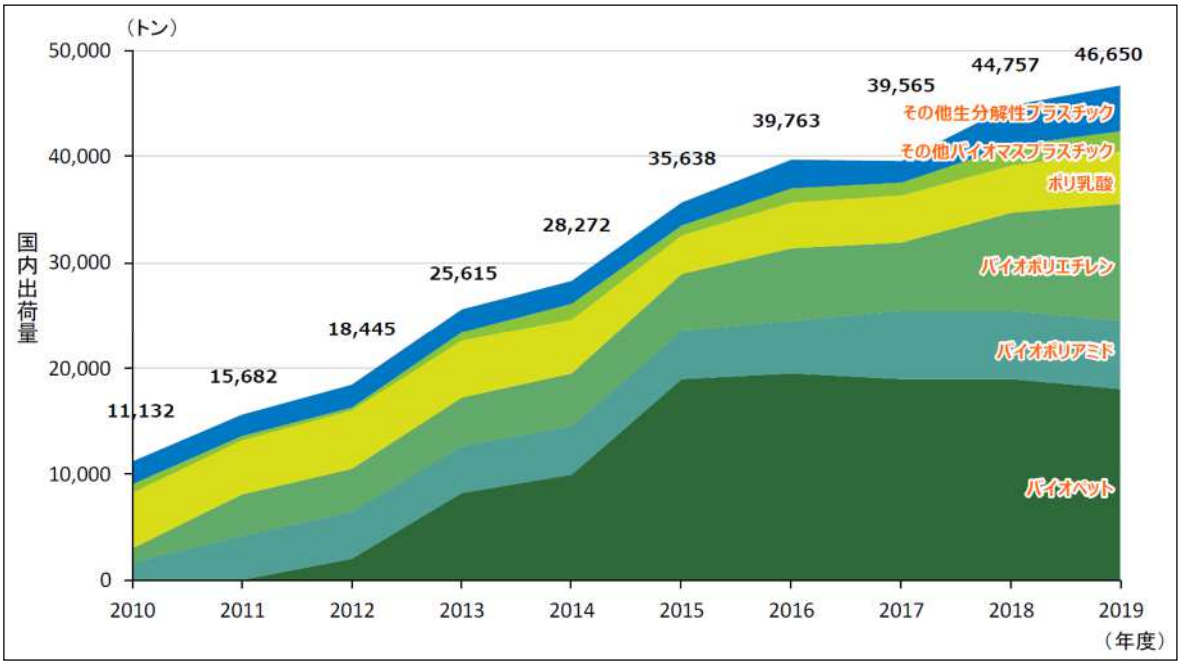


図２－５－２－１　日本のバイオマスプラスチック出荷量の推移[8]

日本におけるバイオマスプラスチック全体の市場規模は、2019 年で約 47 千トンであり、そのうち約 9 割を NBP（Nonbiodegradable Bio-based Plastics、非生分解性バイオマスプラスチック）が占めており、残り約 1 割が BBP（Biodegradable Bio-based Plastics、生分解性バイオマスプラスチック）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 10,500 千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マスプラスチックの割合は 0.4%である。

NBP 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 千トン、バイオポリアミド（部分バイオマス由来のものを含む）6.5 千トン、バイオ PE（バイオポリエチレン）11 千トン、PLA5 千トンとなっている。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、日本バイオマスプラスチック協会の資料では NBP に分類されている。

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）

---

[7] 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。
[8] 出所：「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/mat052212_1.pdf）

などがあり、合計で 1.85 千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である。

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 4.3 千トンの出荷量であったと推計されている。

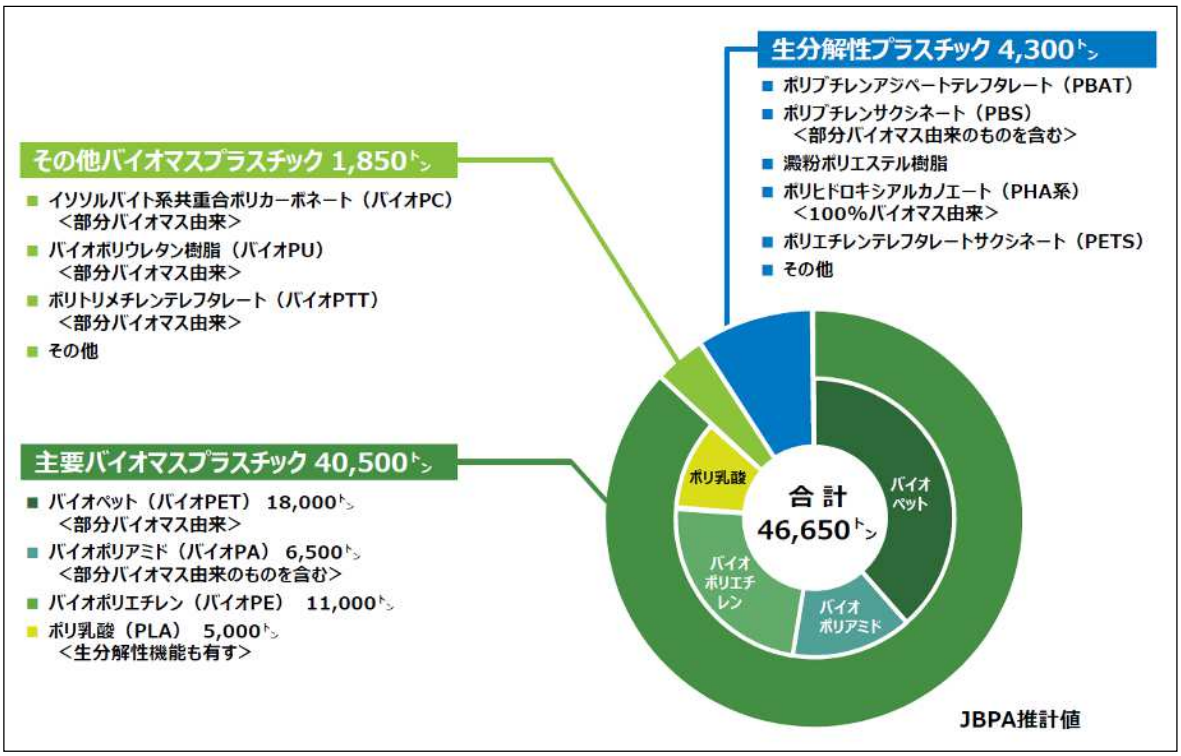


図２－５－２－２　日本のバイオマスプラスチック出荷量（2019 年）の推計[9]

バイオマスプラスチックの主要用途としては、下図のとおり、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。

---

9 出所：「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/mat052212_1.pdf）

図２－５－２－３　バイオマスプラスチックの主要用途[10]

本稿では、本実証事業において推進を目指している、「バイオ PE（バイオポリエチレン）」および「PLA（ポリ乳酸）」に焦点をあてて、以下に詳述する。

---

10 出所：「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、2002 年 5 月 22 日、http://www.env.go.jp/recycle/mat052212_1.pdf）

２－５－３　バイオ PE（バイオポリエチレン）

２－５－３－１　世界市場

２－５－３－１－１　用途別生産能力

2020 年における世界全体でのバイオ PE 生産能力は 222 千トンである[11]。用途別の生産能力は、軟質包装材 133 千トン（60%）、硬質包装材 74 千トン（33%）、各種消費財 12 千トン（6%）、電子機器 3 千トン（1%）となっている。

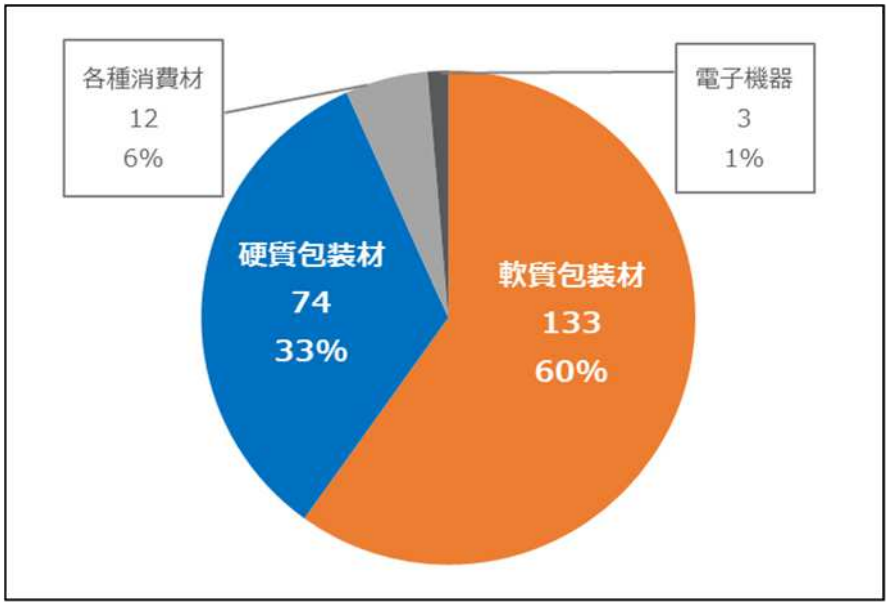


図２－５－３－１－１－１　世界バイオ PE・用途別生産能力（2020 年、単位：千トン）[12]

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。

２－５－３－１－２　企業別生産能力

2021 年 3 月現在、バイオ PE を商業ベースで継続的に生産しているメーカーは Braskem（ブラジル）のみであるが、住友化学、Dow、Royal DSM などはバイオ PE 生産計画を公表している。また、2019 年 6 月 18 日、LyondellBasell と Neste は、Wesseling（ドイツ）においてバイオポリプロピレンおよびバイオ低密度 PE（LDPE）を並行生産する共同プロジェクトを実施し、食品包装で認められたバイオマスプラスチック数千トンを生産したと発表しており、10 千トン程度の生産能力を保有しているのではないかと推測される。

---

[11] 出所：Bioplastics market development update 2020（2020 年 12 月 2 日、European Bioplastics、https://docs.european-bioplastics.org/conference/Report_Bioplastics_Market_Data_2020_short_version.pdf、https://docs.european-bioplastics.org/PR/2020/EUBP_PR_Market_Data_2020_20201202.pdf）

[12] 出所：同上

２－５－３－１－３　生産メーカー

（１）Braskem

ブランド名　　：I ’m Green™
製造拠点　　：ブラジル
生産能力　　：200 千トン／年
原料　　：サトウキビ

調査時点でバイオ PE を商業生産しているメーカーは Braskem 社のみである。同社のバイオ PE プラントは 2 億 9000 万米ドルの投資により建設され、2010 年 9 月から生産を開始している。年間生産能力 200 千トン。商標は「I ’m green™」。

PE は従来、石油や天然ガスなど化石資源を原料として製造されてきたが、同社のバイオ PE は再生可能原料であるサトウキビから製造される。したがって、同社のバイオ PE は大気中の CO_2 を固定して、温室効果ガス排出を低減するとしている。

同社のバイオ PE には、高密度ポリエチレン（HDPE）、低密度ポリエチレン（LDPE）、直鎖状低密度ポリエチレン（LLDPE）の各グレードがある。

（２）住友化学

2020 年 12 月、住友化学は、仏アクセンス社からエタノールを脱水反応によりエチレンに変える技術「Atol」を導入すると発表した。同社は積水化学工業が可燃ごみから作るエタノールをエチレンに変え、ポリオレフィンを製造するプロジェクトを進めており、これに適用する。千葉工場にエタノールからエチレンを製造する設備を建設する計画で、2022 年完成、2025 年商業化を目指している 。

現在、住友化学が千葉工場で生産している主な製品は、アセトアルデヒド、プロピレンオキサイド、イソブチレン、ノルマルブチレン、低密度 PE、ポリプロピレン、エチレン酢ビ共重合樹脂、熱可塑性エラストマー、スチレン・ブタジエンゴム、エチレン・プロピレンゴム、レゾルシン、化合物半導体材料（MO エピウエハ）などであるが、このうちアセトアルデヒド、低密度 PE、エチレン酢ビ共重合樹脂、エチレン・プロピレンゴムなどに利用されていくのではないかと推測される。2025 年以降、「可燃ごみから作ったポリエチレン」として市場に訴求していくものと考えられる。

（３）Dow[13]

ブランド名　　：ELITE 5230GC R
製造拠点　　：オランダ
生産能力　　：不詳
原料　　：トール油（紙パルプ生産時の残渣）

Dow は、木材ベースの「UPM BioVerno」と呼ばれる紙パルプ製造副産物であるトール油由来のナフサを原料とし、Terneuzen（オランダ）プラントにてバイオ PE を製造している。

---

[13] 出所：Dow ホームページ（2019 年 9 月 24 日、https://corporate.dow.com/en-us/news/press-releases/dow-and-upm-partner-to-produce-plastics-made-with-renewable-feedstock.html）

同社の PE 樹脂製造はマス・バランス・アプローチに基づいており、ISCC（国際持続可能性カーボン認証）を取得。マス・バランス・アプローチは、複雑な製造または生産システムでサステナブルな成分の供給源をサポートし、諸産業がさらに持続可能となることを後押しする、としている。

今後の生産予定や生産規模などは発表されていないが、2020 年に以下のとおり、海外フィルム・包装材メーカーにより製品化している。

2020 年 5 月、Dow はストレッチフィルムメーカーの Doxa Plast と共同で、よりサステナブルなソリューションの需要増大に応える高性能バイオストレッチフィルムを商品化したと発表した[14]。Doxa Plast の新たなストレッチフィルムシリーズ「Reborn（リボーン）」は、再生可能原料である Dow の直鎖状低密度 PE「ELITE™ 5230GC R 」（UPM BioVerno を原料として製造されたバイオ PE）を使用している。

また、2020 年 7 月、Dow はマレーシアの包装材メーカーThong Guan 社と、植物由来 PE 製品をアジア太平洋地域に導入したと発表した[15]。同地域での再生可能原料由来プラスチック製品の商品化では画期的な事例である。Thong Guan 社の新しいストレッチフィルム「Nano Bio」は、ダウの直鎖状低密度 PE「ELITE™ 5230GC R 」を使用している。

（備考）マス・バランス・アプローチ[16]

バリューチェーンの開始時（インプット）に再生原料が同量のバージン原料に置き換わるという考え方。入出力が一致するよう製品（出力）に割り当てる。循環型経済を実現するために重要な要素ととらえられている。
バイオマス・バランス・アプローチは、BASF（ドイツ）、TÜV SÜD（テュフズード、ドイツ）が共同開発した手法である。
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を、化学品生産の第一段階で化石資源とともに使用後、認証された方法でバイオベースの量を算出し、特定製品に割り当て、独立機関によって認証されるものである。

（4）Royal DSM

ブランド名　　：不詳（バイオ PE）
製造拠点　　：オランダ
生産能力　　：不詳
原料　　：廃棄物や残渣

2019 年 10 月、Royal DSM は、エンジニアリングプラスチックスの既存ポートフォリオの全て

---

14 出所：ダウ 再生可能資源のストレッチフィルムを共同で供給（2020 年 5 月 25 日、日刊ケミカルニュース、https://chemical-news.com/2020/05/25/%e3%83%80%e3%82%a6%e3%80%80%e5%86%8d%e7%94%9f%e5%8f%af%e8%83%bd%e8%b3%87%e6%ba%90%e3%81%ae%e3%82%b9%e3%83%88%e3%83%ac%e3%83%83%e3%83%81%e3%83%95%e3%82%a3%e3%83%ab%e3%83%a0%e3%82%92%e5%85%b1%e5%90%8c/）

15 出所：ダウ バイオ PE 使用のストレッチフィルムをアジア展開（日刊ケミカルニュース、2020 年 7 月 30 日）

16 出所：BASF ジャパンホームページ（https://www.basf.com/jp/ja/who-we-are/sustainability/key-topics/biomass-balance.html）

に2030年までにバイオ及びリサイクルベースの素材を利用した製品を導入すると発表した[17]。バイオ及びリサイクルベースの含有物を重量ベースで25%以上使用した製品を、2030年までにすべてのポートフォリオに導入するとしている。

同社は最初のステップとして、バイオベースを原料として、マス・バランス・アプローチによるバイオ製品として、「Arnite bio-based grades」(熱可塑性コポリエステル)および「Stanyl bio-based grades」（ポリアミド）を発売した。[18]。なお、「Stanyl bio-based grades」は、世界的に認められているサステナビリティ認証「ISCC Plus」を取得している。

（5）LyondellBasell / Neste
ブランド名　：『Circulen』および『Circulen Plus』
製造拠点　　：ドイツ
生産能力　　：不詳
原料　　：廃棄物や残渣

Nesteは、廃棄物や残渣から再生可能軽油を製造する世界最大のメーカーである。同社リリース[19]によると、Nesteは、プラスチック・化学品・石油精製の大手メーカーであるLyondellBasellと共に、バイオPPおよびバイオ低密度ポリエチレン（LDPE）を並行生産する共同プロジェクトを実施している。生産拠点はWesseling（ドイツ）。

この共同プロジェクトでは、廃棄物や残渣などの持続可能なバイオ原料から生産されるNesteの再生可能炭化水素を使用し、食品包装で認められたバイオマスプラスチックを数千トン生産、LyondellBasellのサーキュラーエコノミー製品の新ブランド『Circulen』、『Circulen Plus』として販売予定である。独立した第三者がカーボントレーサーを用いてポリマー製品をテストし、30%以上の再生可能物質を含んでいることが確認されている。ただし、今後の生産予定や生産規模などについては発表されていない。

２－５－３－２　日本国内市場

バイオPEはBraskemが生産開始した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・店舗業態にわたっている。

---

[17] 出所：DSMホームページ（2019年10月19日プレスリリース抄訳、「DSM社、バイオ及びリサイクルベース製品をエンジニアリングプラスチックスの全ポートフォリオに導入へ」）
[18] 出所：日刊ケミカルニュース、2019年11月14日
[19] 出所：Nesteホームページ、2019年6月18日
https://www.neste.com/releases-and-news/neste-and-lyondellbasell-announce-commercial-scale-production-bio-based-plastic-renewable-materials）

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。

２－５－３－２－１　2020 年用途別需要

2020 年のバイオ PE の国・地域別供給量は、北米 70 千トン、欧州 70～80 千トン、アジア 30 千トン（うち日本は 22 千トン）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 千トン（JBPA 推計）と比較するとほぼ 2 倍に増大したと推定される。

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た場合、軟質包装材 13.1 千トン（60%）、硬質包装材 7.3 千トン（33%）、各種消費財 1.2 千トン（6%）、電子機器 0.3 千トン（1%）程度と推計される。

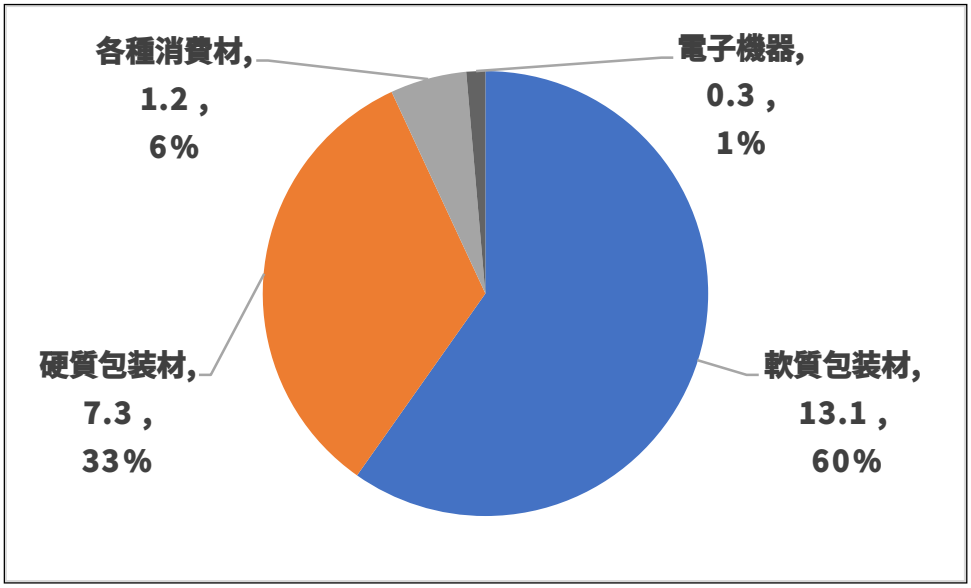


図　２－５－３－２－１－１　2020 年の日本のバイオ PE 需要推計（単位：千トン）[20]

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）[21]。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。

２－５－３－２－２　製品例

日本バイオマスプラスチック協会（JBPA）では、地球温暖化防止の観点と、化石資源消費縮減の重要性を鑑み、バイオマスプラの識別表示制度を制定している。一般消費者が、バ

---

[20] 出所：Bioplastic market data 2016 年～2020 年（European Bioplastics）グラフをベースとして、双日総合研究所にて推計。

[21] 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）

イオマスプラスチック製品を容易に識別できるよう、同協会が定める基準に適合する製品を「バイオマスプラ」として認証し、シンボルマークの使用を許可する制度である[22]。

このバイオマスプラ識別表示制度によるマーク取得製品は、2021 年 1 月 1 日時点で 706 件が登録されている。このうち、バイオ PE を使用していると考えられる製品（一部使用を含む）は 340 件ほどである[23]。この登録製品リストから、バイオ PE を使用（一部使用を含む）したと推定される用途例を抽出したものを次の表に示す。

表２－５－３－２－２－１　バイオ PE を使用したと推定される用途例[24]

包装用資材 レジ袋 ポリ袋ロール ゴミ袋・新聞整理袋 ファッションバッグ ラッピングフィルム シュリンクフィルム（熱収縮フィルム） 食品包装（パン・おにぎり等） 錠剤包装 青果包装ネット 緩衝材（気泡・発泡） 宅配袋 結束紐	**容器** 食品容器・包装 （弁当・惣菜・菓子等） 調味料容器・ボトルキャップ 真空保存容器 食器用洗剤、シャンプー・リンス等容器 医薬品容器
日用雑貨・文具 カトラリー（スプーン、フォーク等） ストロー・スパウト（パック飲料、流動食パウチ等の飲み口） ポリエチレン手袋、エプロン 封筒（DM 用包装フィルム、窓付き封筒フィルム、クッション封筒）	**繊維製品** モノフィラメント（単繊維）、繊維不織布 紙おむつ等衛生用品材料 帽子用芯材
農林水産・土木・建築資材 農業ハウス用遮光フィルム 幼齢木保護ネット 法面保護マット 流木止めネット 人工芝	**その他** スイミング用レーンフロート 書籍用コーティングフィルム

登録件数としては、包装用資材が最も多く、中でもレジ袋の件数が多数となっている。その背景として、小売企業などブランドオーナーごとに登録されるものがあること、バイオマス配合率の違いによって 1 社で複数登録している場合があることなどが挙げられる。

レジ袋は、登録件数もさることながら、バイオマス配合率を 90%として登録されているものもある。現在流通しているものはバイオマス配合率 25%のものが多数とみられるが、今後バイオ PE の供給が拡大し、より調達しやすい環境になっていけば、バイオ PE の配合

---

22 出所：日本バイオマスプラスチック協会（http://www.jbpaweb.net/identification/）
23 出所：日本バイオマスプラスチック協会（http://www.jbpaweb.net/bplist/）より、双日総合研究所推計
24 出所：バイオマスプラ製品リスト（日本バイオマスプラスチック協会、2021 年 1 月 1 日現在）など

率が上げられることも予想される。

また、JBPA のバイオマスプラ認証を取得せず、企業の独自デザインでバイオマスプラスチック使用を製品表示にうたう企業もある。バイオマス配合率 50%のレジ袋などが流通しており、環境経営の視点から、自主的にバイオマスプラスチックを採用する取り組みが見られるようになった。
なお、Braskem 社バイオ PE の欧州における販売企業 FKuR 社ホームページにバイオ PE 製品カタログが掲載されており、ブローフィルム、キャストフィルム押出、押出成形（線材）、射出成型、ブロー成型、チューブ加工等、様々な加工適性を有するバイオ PE 製品群が紹介されている。

図２－５－３－２－２－２　バイオ PE 用途例[25]

また、FKuR 社は、バイオ PE の用途として、飲料・食品・化粧品・衛生用品・ホームケア製品等の容器包装、ポリ袋、バッグ類、農業・産業用などの分野を挙げ、HDPE（高密度ポリエチレン）、LDPE（低密度ポリエチレン）、LLDPE（直鎖状低密度ポリエチレン）の種類別に以下の使用例を示している[26]。

---

[25] 出所：FKuR 社ホームページ（https://fkur.com/wp-content/uploads/2018/01/FKuR-Bioplastic-Biokunststoff-Polyethylene-Braskem-Im_green_Broschure-2020.pdf）
[26] 出所：FKuR 社ホームページ（https://fkur.com/wp-content/uploads/2018/01/FKuR-Bioplastic-Biokunststoff-Polyethylene-Braskem-Im_green_Broschure-2020.pdf）

表２－５－３－２－２－３　HDPE、LDPE、LLDPE 別の使用例[27]

HDPE	包装用多層フィルム、ボトル、キャニスター、ボトルキャップ、ケース、チューブ容器、化粧品容器、箱、ボトル、ソープディスペンサー、手提げバッグ
LDPE	耐熱ボトル、シャンパンボトル栓
LLDPE	ポリ手袋、チューブ型容器、食品包装、人工芝

[27] 出所：FKuR 社ホームページ
（https://fkur.com/wp-content/uploads/2018/01/FKuR-Bioplastic-Biokunststoff-Polyethylene-Braskem-Im_green_Broschure-2020.pdf）

２－５－４　PLA（ポリ乳酸）

２－５－４－１　世界市場

２－５－４－１－１　用途別生産能力

PLA の用途別生産能力は下図のとおりとなる。PLA の用途別世界全体の生産能力では、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）が 117 千トン（29%）と最も大きく、次いで、軟質包装材（レジ袋、食品包装フィルム、ラベルなど）が 77 千トン（19%）、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）40 千トン（10%）、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、カーペットなど）40 千トン（10%）の順となっている。

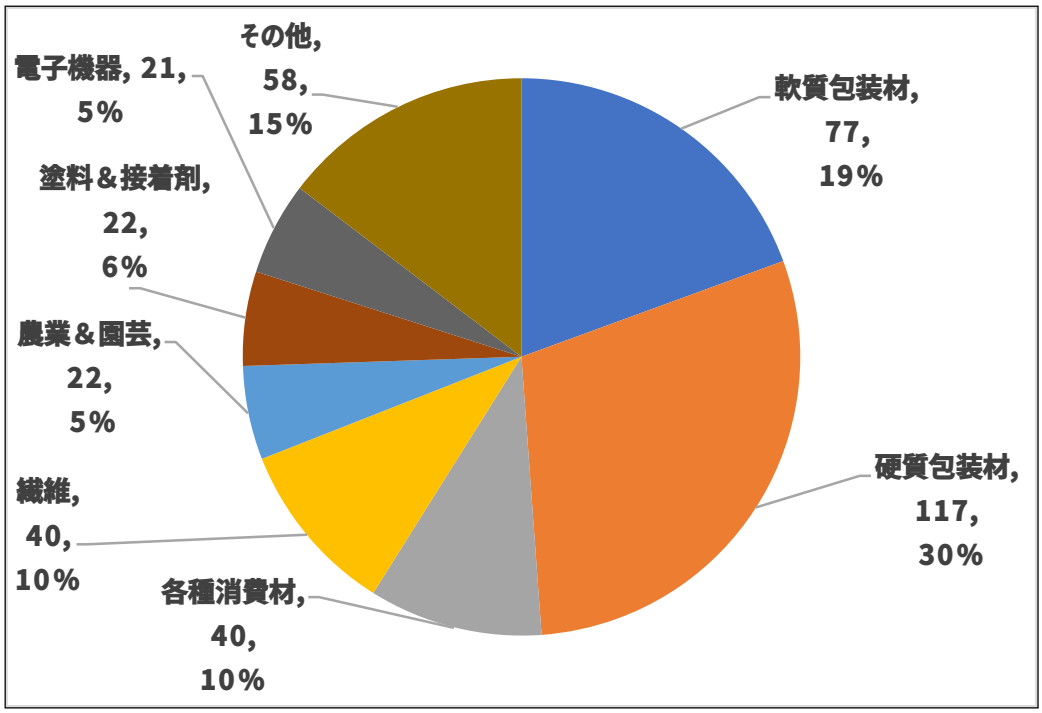


図２－５－４－１－１－１　PLA・用途別世界生産能力（2020 年。単位：千トン）[28]

２－５－４－１－２　企業別生産能力

PLA の生産能力は、現在、世界全体で 360 千トンである。NatureWorks（米国）150 千トン、Total Corbion PLA （タイ）75 千トン、Hisun（中国）45 千トン、BBCA & Galactic（中国）40 千トンなどとなっており、NatureWorks が 42%、Total Corbion PLA が 21%の生産能力を保有している。

[28] 出所：Bioplastics market development update 2020（2020 年 12 月 2 日、European Bioplastics、https://docs.european-bioplastics.org/conference/Report_Bioplastics_Market_Data_2020_short_version.pdf、https://docs.european-bioplastics.org/PR/2020/EUBP_PR_Market_Data_2020_20201202.pdf）

表２－５－４－１－２－１　PLA の生産能力[29]

企業	プラント所在国	能力（千トン）
NatureWorks	米国	150
Total Corbion PLA JV	タイ	75
Hisun	中国	45
BBCA & Galactic	中国	40
COFCO	中国	10
Hengtian	中国	10
SuPLA	中国	10
TongJieLiang	中国	10
Synbra	オランダ	5
TianRen	中国	3
Futerro (under Galactic)	ベルギー	1
Jiangxi KeYuan	中国	1
Sulzer	スイス	<1
Pyramid (under Udhe)	ドイツ	<1
その他（XinNing, HongDa, TongBang, YouChengなど）	中国	N/A
合計		360

また、2019 年の PLA 生産量は世界全体で推定 190 千トン/年ゆえ、上記能力から計算すると稼働率は 52.7%ということになる。NatureWorks LLC と Total Corbion PLA の 2 社で世界の生産量の約 90%を占めている。

Total Corbion が能力 75 千トン/年のプラントの稼働を開始させたのは、2019 年 9 月であったため、2019 年の生産量は 23 千トン程度とみられる。また、2020 年の稼働率も 7 割程度の 53 千トン程度とみられている。2021 年にフル稼働となる見込みである。[30]

---

[29] 出所：The development and challenges of poly (lactic acid) and poly（glycolic acid）（Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, Volume 3, Issue 2, April 2020, Pages 60-70、https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542504820300026?via%3Dihub）

[30] 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/）

２－５－４－１－３　生産メーカー

（1）NatureWorks LLC

ブランド名　　：Ingeo™ （インジオ）
製造拠点　　：ネブラスカ州・ブレア（米国）
生産能力　　：約 150 千トン/年
原料　　：主にトウモロコシ

世界の穀物メジャーのカーギルおよびタイ最大の化学メーカーである PTT Global Chemical を出資者とする企業。Blair（米国ネブラスカ州）に生産能力が約 150 千トン/年の工場を有し、2002 年から稼働させている。

2020 年 9 月 22 日、同社は、PLA バイオマテリアルのポートフォリオ全体の供給力を 10%高めると発表した。ラクチドモノマー精製効率化を含めた製造技術プロジェクトであり、ネブラスカ州ブレアの製造施設において導入が進められている。2021 年末までに完成予定としている。また、同発表において、同社はインジオの特徴である高性能な特性を必要とする市場の成長に対応する。これらの市場には、3D プリントや不織布衛生マスク、堆肥化可能なコーヒーカプセル、ティーバッグ、塗工紙製フードサービス用食器などが含まれると述べている。[31]

なお、同社は PLA の第 2 プラントとして、タイで年産能力 75 千トンのプラント建設を検討しているが、2020 年に予定していた最終意思決定を、2021 年に先延ばしするもよう、との報道がある。[32]

（2）Total Corbion PLA

ブランド名　　：Luminy
製造拠点　　：ラヨン県（タイ）
生産能力　　：75 千トン/年（2018 年時点）
原料　　：主にサトウキビ

フランスの総合石油化学会社で、スーパー・メジャー[33]（国際石油資本）6 社のうちの一つである Total 社と、オランダの乳酸大手メーカーであるコービオン社の折半出資により設立された企業。2018 年にタイのラヨン県に生産能力 75 千トン/年の工場を設立し、主にサトウキビを原料として PLA を製造している。なお、2019 年のプラント稼働率は 3 割程度であったが、2020 年は 7 割、2021 年にフル稼働を想定している、との報道がある[34]。しかし、中国の乳酸メーカーが自社で PLA を製造し始めたことにより、Total Corbion PLA における原料（＝乳酸）の輸入手当が充分にできず、2020 年の稼働も 25 千トン程度ではないかとの推測情報もある。

---

31 出所：NatureWorks ホームページ（2020 年 9 月 22 日、https://www.natureworksllc.com/Japan/Press-Releases/2020-09-22-Blair-Investment-Announcement-JA）

32 出所：「PLA、コロナ禍も高成長」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/）

33 石油の探鉱（採掘）・生産・輸送・精製・販売までの全段階を垂直統合で行い、シェアの大部分を寡占する石油系巨大企業複合体

34 出所：「PLA、コロナ禍も高成長」（2020 年 6 月 23 日、化学工業日報、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/）

Total Corbion PLA は、食品容器包装分野で PLA の用途開拓に力を入れている。従来の PLA に乏しかった耐熱性を備えたグレードを展開している。熱による変形の目安となる熱軟化点が 100～110 度のグレードでは、電子レンジでの加熱に対応した容器を作ることが可能であり、弁当容器やカップの素材として利用可能である。軟包装向けに PLA を用いて多層フィルムをモノマテリアルに近づけることも技術的には可能としている。[35]

2020 年 9 月、Total Corbion PLA は能力 100 千トン/年という世界第 2 の規模となる PLA プラントの建設を開始した、と発表した。プラントは親会社である Total 社の拠点の一つである Grandpuits（フランス）で 2024 年稼働の予定。欧州における商業ベースの PLA プラントはこれが最初となる。[36]

一方、2021 年 1 月、親会社である Corbion 社は、Corbion は Blair（米国・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。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おり、この需要に対応するものとしている。Corbion 社は、米国以外にも、オランダ、ブラジル、スペイン、タイで乳酸を製造している。[37]　PLA 需要の増大にともない、世界的に乳酸がタイトになりつつあると推測される。

（３）安徽豊原（安徽豊原福泰来聚乳酸有限公司（BBCA Group & Futerro）

拠点　　：蚌埠市（Bengbu）（中国）
生産能力　　：50 千トン/年（2023 年までに 700 千トンとする計画）
原料　　：トウモロコシなど

中国の大手食品添加物メーカーBBCA Group とベルギーの乳酸メーカーGalactic の合弁会社。2020 年 8 月、中国において PLA 生産プラントの稼働を開始した。PLA の生産能力は 50 千トン/年。隣接地には、PLA の原料となる乳酸の製造プラント（生産能力 80 千トン）、および乳酸を原料とした食品添加物の製造プラントが併設されている。さらに、2020 年 2 月には、別のプラント建設にも着工している。2023 年までに PLA 生産能力を合計で 700 千トンまでとする計画である。[38]　これが実現すれば、世界最大の PLA 生産能力を有する企業となる。
なお、化学品の日中貿易を手掛ける、ハイケム株式会社（東京都港区）は安徽豊原集団有限公司と事業戦略パートナーシップを提携し、安徽豊原集団の子会社である安徽豊原福泰来聚乳酸有限公司が生産する PLA の日本での販売を 2020 年 8 月より開始している。押出成形用途、射出成形用途、繊維・不織布用途の 3 種類としている。また PBAT（ポリブチレンアジペート

---

[35] 出所：「トタルコービオンＰＬＡ　耐熱性生かし用途開拓　弁当容器・カップ狙う」（2020 年 6 月 4 日、化学工業日報、https://www.chemicaldaily.co.jp/%E3%83%88%E3%82%BF%E3%83%AB%E3%82%B3%E3%83%BC%E3%83%93%E3%82%AA%E3%83%B3%EF%BD%90%EF%BD%8C%EF%BD%81%E3%80%80%E8%80%90%E7%86%B1%E6%80%A7%E7%94%9F%E3%81%8B%E3%81%97%E7%94%A8%E9%80%94%E9%96%8B%E6%8B%93/）

[36] 出所：”Total Corbion builds Europe’s first world-scale PLA plant”（2020 年 9 月 30 日、https://www.european-bioplastics.org/total-corbion-builds-europes-first-world-scale-pla-plant/）

[37] 出所：”Corbion to Expand Lactic Acid Capacity in North America”（2021 年 1 月 21 日、Corbion 社のプレスリリース、http://www.corbion.com/media/press-releases?newsId=2443404）

[38] 出所：bioplastics MAGAZINE.COM（2020 年 10 月 22 日、https://www.bioplasticsmagazine.com/en/news/meldungen/20201022-FUTERRO-launches-the-first-fully-integrated-PLA-plant-in-China.php）および NIKKEI Asia（2021 年 2 月 13 日、https://asia.nikkei.com/Spotlight/Environment/China-aims-to-go-as-big-in-bioplastics-as-it-did-in-solar-panels）

テレフタレート）など他の生分解性材料についてもマーケティング活動を行うとしている。[39]

（4）浙江海正（浙江海正生物材料股份有限公司、Zhejian Hisun Biomaterials）

ブランド名　　：REVODE
拠点　　：中国
生産能力　　：45 千トン/年（2020 年 12 月時点）
原料　　：トウモロコシ、キャッサバ

浙江海正グループ（Zhejiang Hisun Group Co., Ltd）、中国科学院長春応用化学研究所（Changchun Institute of Applied Chemistry (CIAC) of Chinese Academy of Science (CAS)）、台州市椒江区国有資産経営有限公司（Taizhou Jiaojiang State-owned Assets Management Co., Ltd.）の 3 つの企業・機関により、2004 年に浙江省台州市に設立された企業。PLA を製造した中国で初の企業である。当初の生産能力は 5 千トン/であったが、2018 年に 15 千トン/年まで増強した。さらに 2020 年には 45 千トンまで増強している。[40]

（5）その他

上記の中国メーカーの増産計画に加え、浙江省友誠控股集団（Zhejiang Youcheng Holding Group）など 10 社近くが PLA の生産能力増強を計画していると、報じられている。これは 2020 年 1 月に、国家発展改革員会が生分解性のないプラスチックの使用を制限する政策を発表したことに端を発するものである。また、2020 年 11 月に公表された、中国共産党による第 14 次 5 ヶ年計画（2021 年～2025 年）の草案にも「白色汚染（白いレジ袋などによる環境汚染）のガバナンス強化」が盛り込まれている。[41]

２－５－４－２　日本国内市場

２－５－４－２－１　2020 年用途別需要

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 千トンである。

日本における PLA の用途は、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 2.5 千トン（42%）、②軟質包装材（レジ袋、食品包装フィルム、ラベル）が約 2.5 千トン（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。これら以外では、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。

---

[39] 出所：ハイケム(株)ホームページ（2020 年 8 月 19 日、https://highchem.co.jp/topics/2020-08-19/）
[40] 出所：The development and challenges of poly (lactic acid) and poly（glycolic acid）（Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, Volume 3, Issue 2, April 2020, Pages 60-70、https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542504820300026?via%3Dihub）
[41] 出所：「環境プラ、過当競争の懸念　中国で増産計画相次ぐ」（2021 年 2 月 13 日、日本経済新聞・朝刊）

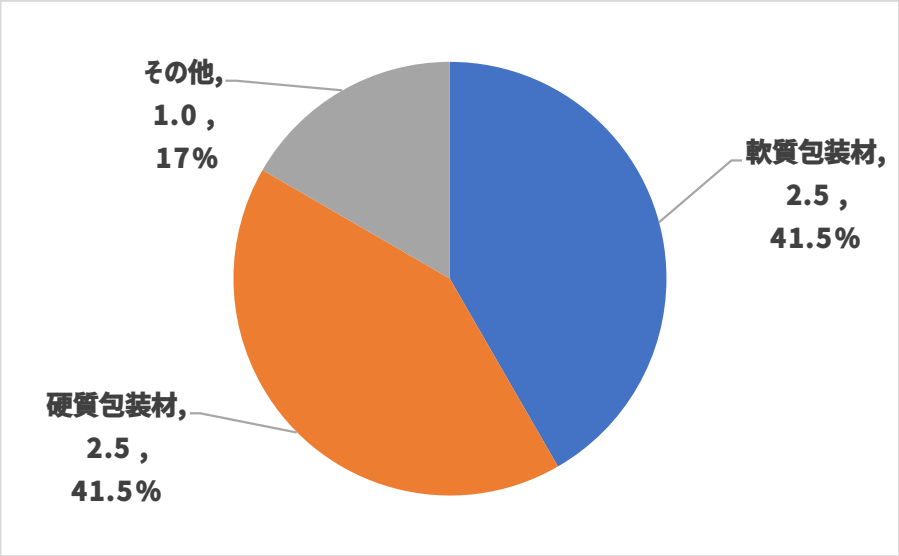


図２－５－４－２－１－１　2020 年の日本の PLA 需要推計（単位：千トン）[42]

表２－５－４－２－１－２　PLA の用途[43]

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、カーペットなど、（不織布、PTT（ソロナ）繊維）
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

42　出所：双日総合研究所推計

43　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）

貿易統計によると、輸入量は、4,001 トン（2016 年）、4,697 トン（2017 年）、4,926 トン（2018 年）、4,519 トン（2019 年）、5,976 トン（2000 年）と CAGR10.6%という成長率で伸びてきている。

国別でみると、米国からの輸入は、3,964 トン（2016 年）、4,644 トン（2017 年）、4,824 トン（2018 年）、3,779 トン（2019 年）、4,009 トン（2020 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、216 円/kg（2016 年）、224 円/kg（2017 年）、235 円/kg（2018 年）、253 円/kg（2019 年）、288 円/kg（2020 年）と 300 円/kg 以下ではあるものの、徐々に上昇してきている。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（2016 年）、ゼロ（2017 年）、3 トン（2018 年）、467 トン（2019 年）、1,710 トン（2020 年）と 2020 年に入り急激に増加している。輸入単価をみると、246 円（2018 年）、303 円/kg（2019 年）、398 円/kg（2020 年）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、2020 年で約 110 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、37 トン（2016 年）、53 トン（2017 年）、98 トン（2018 年）、272 トン（2019 年）、239 トン（2020 年）と、近年は 250 トン前後で推移している。輸入単価をみると、236 円/kg（2016 年）、237 円/kg（2017 年）、236 円/kg（2018 年）、247 円/kg（2019 年）、374 円/kg（2020 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、供給がタイトとなっており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と推測される。

表２－５－４－２－１－３　PLA の輸入量、輸入金額（CIF[44]価格）、平均単価推移[45]

	2016			2017			2018			2019			2020		
	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	3,964	855,056	216	4,644	1,040,293	224	4,824	1,132,914	235	3,779	956,544	253	4,009	1,152,786	288
タイ	0	0	0	0	0	0	3	737	246	467	141,468	303	1,710	681,252	398
中国	37	8,745	236	53	12,572	237	98	23,160	236	272	67,204	247	239	89,365	374
その他	0	19,726	0	0	8,395	0	1	12,922	12,922	1	40,331	40,331	18	24,675	1,371
合計	4,001	883,527	221	4,697	1,061,260	226	4,926	1,169,733	237	4,519	1,205,547	267	5,976	1,948,078	326

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

45 出所：財務省貿易統計（https://www.customs.go.jp/toukei/srch/index.htm?M=01&P=0,2,,,,,,,4,1,2019,0,0,0,2,390770,,,,,,,,,1,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,20)）なお、数値は CIF 価格（保険料・運賃込み価格）で輸入関税は含まれない。

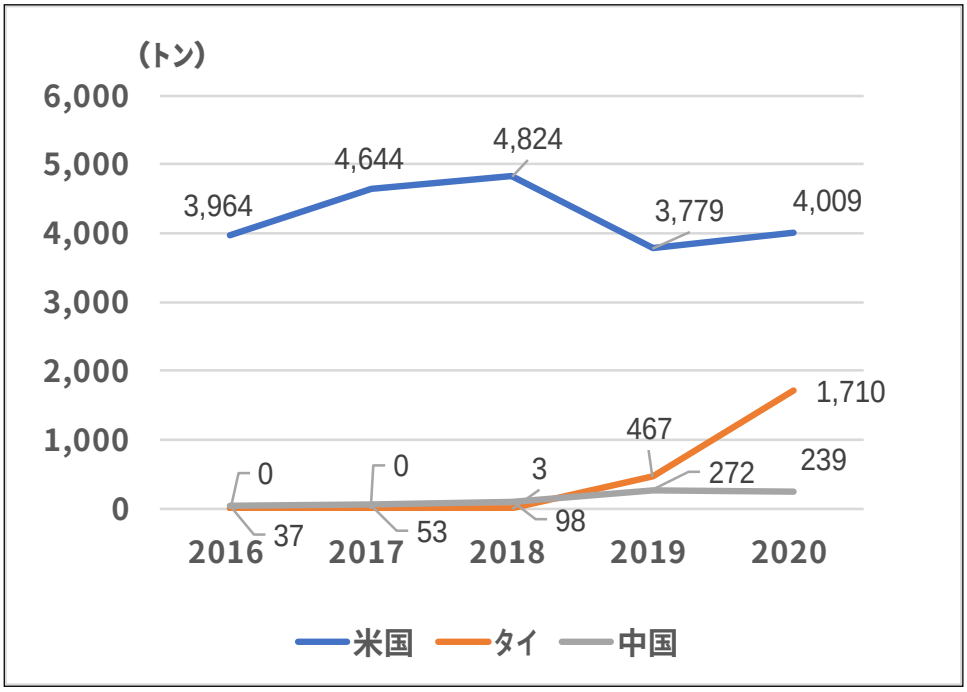


図２－５－４－２－１－４　日本の PLA の輸入量推移[46]

[46] 出所：財務省貿易統計
（https://www.customs.go.jp/toukei/srch/index.htm?M=01&P=0,2,,,,,,,4,1,2019,0,0,0,2,390770,,,,,,,,,1,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,20））

２－５－４－２－２　2030 年用途別需要予測とターゲットとすべき分野

世界の PLA の生産能力が 360 千トン～390 千トン。2019 年の生産量が約 190 千トン。2020 年の日本市場が約 6 千トンであるため、日本における PLA の流通量は相対的に少ないと言える。欧州や米州における PLA の流通量は各々約 70 千トンレベルと推定される。

表２－５－４－２－２－１　日本の PLA 用途別需要予測（単位：千トン）[47]

	用途	用途例	世界の PLA生産能力（2020年。用途別）	日本のPLA流通量（2020年）	日本のPLA需要予測（2030年）
1	軟質包装材	レジ袋、食品包装フィルム、ラベルなど	77	2.5	3.9
2	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	117	2.5	5.9
3	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	40	僅少	2.0
4	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、カーペットなど、（不織布、PTT（ソロナ）繊維）	40	僅少	2.0
5	農業＆園芸	マルチフィルム、育苗ポット、ネットなど	22	僅少	1.1
6	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	0	僅少	0.0
7	建築材料	人工芝、床材、防水材など	0	僅少	0.0
8	塗料＆接着剤	塗料、接着剤など	22	僅少	1.1
9	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	21	僅少	1.1
10	その他	-	58	僅少	2.9
	合計		397	6.0	20.0

米国の人口が 3.2 億人、EU の人口が 4.5 億人、日本の人口が 1.2 億人から計算すると、日本における潜在需要は、20 千トン程度と考えられる。今後、日本においては、軟質包装材、硬質包装材を軸として成長していくと考えられる、世界の PLA 用途比率からすると、繊維分野および農業&園芸分野において伸びしろが大きいと考えられる。

世界の PLA 用途別生産能力（2020 年）で日本の推計 20 千トンの PLA 需要（潜在需要含む）を按分すると下表のようになる。軟質包装材が 3.9 千トン、硬質包装材 5.9 千トン、各種消費財 2.0 千トン、繊維 2.0 千トン、農業&園芸 1.1 千トン、塗料&接着剤 1.1 千トン、電子機器 1.1 千トンなどの需要が見込まれる。潜在需要が 2030 年にかけて顕在化していくと仮定した場合、2030 年における日本の PLA の用途別需要は上表のとおりとなる。

日本における PLA 需要の増加が期待される分野、すなわちターゲットとすべき分野につき、以下に述べる。

---

47 出所：（世界の PLA 生産能力）は Bioplastic market data 2016 年～2020 年（European Bioplastics）グラフをベースとして、双日総合研究所にて推計。（日本の PLA 流通量）および（日本の PLA 需要（潜在需要含む）は双日総合研究所推計。

（1）軟質包装材

レジ袋そのものは有料化施策により使用量の伸びは鈍化することが予想されるが、バイオマス度 25 度以上だと無料で配布可能なため、業態・業種によっては、バイオ素材配合のレジ袋が採用されている。PE やでんぷん系が主流であるが、PLA 配合のレジ袋もある。生分解性の意識が強まれば、採用は増加する可能性がある。食品包装フィルムやラベルも、環境意識の更なる高まりから、ブランドオーナーによる PLA の採用例が増加していくことが予測される。

（2）硬質包装材

2020 年は、新型コロナウィルスの流行で外出や飲食店営業が自粛要請されたことにより、国民の食生活が内食にシフトし、加工食品の消費や宅配サービス・持ち帰りサービスの利用が増加した。そのため、食品包装材の需要が伸びているが、環境意識の高まりから PLA 配合の食品トレーを利用する小売店も増加している。新型コロナの流行/終息状況に影響を受けると考えられるが、今後も硬質包装材における PLA 需要は増加していくと予測される。

（3）繊維

2020 年、新型コロナウィルスの流行で、不織布マスクの需要も急増した。従来、不織布マスクに関し、日本は輸入ポジションであったが、需要の急増により供給が滞ったことにより、複数の日本企業が不織布マスク市場に参入を表明した。これら企業の中には、生分解性をアピールするため、あるいは、環境に優しいことをアピールするために PLA を配合した（あるいは PLA100%の）生地を使用している企業もある。新型コロナウィルスの流行/終息に関わらず、マスク着用の生活習慣は数年継続すると考えられることから、不織布マスク向けの PLA 需要は増大～維持で推移すると予測される。

（4）農業用マルチフィルム

土壌中の微生物によって分解されるフィルムで、使用後はロータリーなどで土に鋤き込むことによって処理できるため、回収コストと廃棄処理コストを節約できる。[48]
生分解マルチフィルムの原料としては、PBAT（ポリブチレンアジペートテレフタレート）が最も多く用いられているが、PBS（ポリブチレンサクシネート）や PLA も配合したマルチフィルムも多い。生分解性マルチフィルムは、価格が通常のポリマルチフィルムの 2～3 倍であることが普及を妨げている。回収コストと廃棄処理コストを加味した場合、同等コストであるため、価格低減が可能となれば、一気に普及が進む分野と考えられる。

（5）3D プリンタ用フィラメント

3D プリンタとは、通常の紙に平面的に印刷するプリンタに対して、3DCAD、3DCG データを元に立体を造形する機器。造形方式で「光造形法」「粉末法」「熱溶解積層法」「シート積層法」「インクジェット法」などがある。[49]　3D プリンタ用のフィラメント材料としては各種樹脂が利用されているが、PLA 樹脂と ABS 樹脂が主流を占めている。今後、個人用 3D プリンタから産業用 3D プリンタ市場が拡大していくものと考えられる。

なお、新型コロナウィルス流行により、不足する医療器具を 3D プリンタを活用して製造する企業・機関が多数現れた。3D プリンタで造る物で最も多いのはフェースシールドであるが、

---

[48] 出所：農材ドットコム（https://www.nouzai.com/agri-shizai/poly-multi/multi/seibunkai-multi）
[49] 出所：3D 用語辞典（日本 3D プリンティング産業技術協会ホームページ、https://3dprint.or.jp/3dprint_glossary/）

エアバス（Airbus）社は、3D プリンタで造形するフレームの材料に PLA を用いている。[50]

（6）エマルジョン（塗料・インキ）

生分解性容器の表面にラベルや装飾を施す場合に必要な接着剤あるいはインキなどは生分解性を阻害する要因となっている。これら接着剤やインキなども生分解性とすることでラベルや装飾も含めて生分解性と謳えることとなる。PLA エマルジョンの市場も徐々に増大しつつある。

２－５－５　バイオ PE および PLA のさらなる普及に向けて

バイオマスプラスチック需要が世界的に拡大する中、輸入依存度の高いバイオ PE および PLA の供給および価格が国内普及のボトルネックとなって潜在需要を取り込めていない状況であり、早急な改善策が求められる。

バイオ PE に関しては、商業生産を継続的に行っているのは Braskem（ブラジル）1 社だけであり、拡大する日本国内の需要量を充分確保できていない状況である。また、PLA に関しては、NatureWorks（米国）と Total Corbion（タイ工場）が輸入の 2 本柱ではあるが、世界的な乳酸不足も一因として、PLA 供給がタイト化し、日本の潜在需要をカバーしきれていない。

中国では、プラント生産能力の拡大計画や新設計画が複数発表されており、世界的な供給逼迫が緩和する可能性はあるものの、中国国内供給が優先される可能性が高く、日本の需要家を満足させるだけの量や価格が提示されか不安が残る。

今後の市場成長を見据え、日本においてバイオ PE メーカーおよび PLA メーカーが出現することが強く望まれる。そのためには、開発、FS（Feasibility Study）、プラント設立の各段階において、政府の補助金等の支援が有効と考えられる。

---

[50] 出所：日経 XTECH（2020 年 4 月 14 日、https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/01272/00011/）

３．研究発表・講演、文献、特許などの状況

なし