

## 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

公募区分：革新型研究開発（若手枠）

研究実施期間：令和3（2021）年度～令和5（2023）年度

課題番号：【3RF-2102】

体系的番号：（JPMEERF20213R02）

研究課題名：「油脂産業で大量発生するフーツの完全循環を目指すコルベ電解システムの開発」

Research Title：Development of Kolbe electrolysis system for complete utilization of soapstock discharged from vegetable oil refining

研究代表者名：廣森 浩祐

研究代表機関名：国立大学法人東北大学

研究分担機関名：該当なし

研究協力機関名：該当なし

研究領域：資源循環領域

キーワード：アルカリ再資源化、電解反応、バイオ燃料、フーツ、反応分離

令和6（2024）年5月

## 目次

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書 .....      | 1  |
| [課題概要] .....                   | 3  |
| 1. はじめに（研究背景等） .....           | 5  |
| 2. 研究開発目的 .....                | 5  |
| 3. 研究目標 .....                  | 5  |
| 4. 研究開発内容 .....                | 6  |
| 5. 結果及び考察 .....                | 7  |
| 6. 目標の達成状況と環境政策等への貢献 .....     | 13 |
| (1) 研究目標の達成状況 .....            | 13 |
| (2) 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献 ..... | 14 |
| 7. 研究成果の発表状況 .....             | 15 |
| (1) 成果の件数 .....                | 15 |
| (2) 誌上发表 .....                 | 15 |
| (3) 口頭発表 .....                 | 16 |
| (4) 知的財産権 .....                | 16 |
| (5) 「国民との科学・技術対話」の実施 .....     | 16 |
| (6) マスメディア等への公表・報道等 .....      | 17 |
| (7) 研究成果による受賞 .....            | 17 |
| (8) その他の成果発表 .....             | 17 |
| 8. 国際共同研究等の状況 .....            | 17 |
| 9. 研究者略歴 .....                 | 17 |
| Abstract .....                 | 19 |

## [課題概要]

## &lt;課題情報&gt;

|                   |   |
|-------------------|---|
| 公募区分：             | 革新型研究開発（若手枠）                                |
| 研究実施期間：           | 令和3（2021）年度 ～ 令和5（2023）年度                   |
| 課題番号：             | 【3RF-2102】                                  |
| 研究課題：             | 「油脂産業で大量発生するフーツの完全循環を目指すコルベ電解システムの開発」       |
| 研究代表者：            | 廣森 浩祐（東北大学、助教）                              |
| 重点課題（主）：          | 【重点課題⑩】地域循環共生圏形成に資する廃棄物処理システムの構築に関する研究・技術開発 |
| 重点課題（副）：          | 【重点課題⑪】ライフサイクル全体での徹底的な資源循環に関する研究・技術開発       |
| 行政要請研究テーマ（行政ニーズ）： | 非該当   |
| 研究領域：             | 資源循環領域                                      |

## &lt;キーワード&gt;

|          |
|----------|
| アルカリ再資源化 |
| 電解反応     |
| バイオ燃料    |
| フーツ      |
| 反応分離     |

## &lt;研究体制&gt;

サブテーマ1 「油脂産業で大量発生するフーツの完全循環を目指すコルベ電解システムの開発」

## &lt;サブテーマ1リーダー及び研究分担者&gt;

| 機関名  | 部署名      | 役職名 | 氏名   | 参画期間 |
|------|----------|-----|------|------|
| 東北大学 | 大学院工学研究科 | 助教  | 廣森浩祐 |      |

## &lt;研究経費（間接経費を含む）&gt;

| 年度   | 直接経費    | 間接経費    | 経費合計    |
|------|---------|---------|---------|
| 2021 | 4,139千円 | 1,242千円 | 5,381千円 |
| 2022 | 4,140千円 | 1,242千円 | 5,382千円 |
| 2023 | 4,140千円 | 1,242千円 | 5,382千円 |

|    |          |         |          |
|----|----------|---------|----------|
| 合計 | 12,419千円 | 3,726千円 | 16,145千円 |
|----|----------|---------|----------|

#### <研究の要約>

植物油の製造で副生するものの、従来、有効な利用法がなかったフーツの有効利用を目指し、コルベ電解を利用することで廃棄物なしに全ての成分を炭素源かつ無機塩源として利用できる新たな技術の開発を目指した。本研究では、このアイデアがどの程度、実現性があり、どこに課題があるのかを解明することを主眼とした。生成する炭化水素と苛性ソーダを反応と同時に分離するため膜を導入した電解槽の設計・製作を実施し、効率的に反応を実施する条件の探索を、実験的および数学モデルを駆使した理論的の両面から行った。そして、その検討結果に基づいて、流通電解槽の製作も実施した。ここでも、数学モデルを用いたアプローチを行うことで、実際の装置設計につながる検討結果が得られた。実装を想定した安価電極についても炭素電極が有用な候補であることを明らかにし、炭素材料を選定する上でのキーポイントも明らかにすることができた。

また、原料に関する調査では、文献調査では、情報の不十分であった実原料の構成成分を明らかにし、フーツの発生プロセスに基づいて類型化を行った。得られた不純物成分の情報を基に、電極や膜を被毒しうる成分を用いた電解実験および実サンプルでの電解実験を実施し、その影響を明らかにした。24時間程度の処理試験を実施したところ、この程度では、試薬を用いた試験と比較して大きな影響はないことが明らかとなった。また、以上の実験結果および植物油メーカーへのヒアリングをもとに電解プロセスを設計し、そのプロセスをプロセスシミュレーターで評価した。その結果、本課題で提案するプロセスは、単に廃棄物であるフーツを処理するだけでなく、エネルギー生産も可能となることが示唆された。また、本プロセスを導入した際には、新規に苛性ソーダを購入することや植物油工場で使用する燃料を削減できることから、この影響を考慮することで環境適合性の高いフーツ処理技術となりうると思われる。

## 1. はじめに（研究背景等）

植物油は、食用だけでなく工業用途、燃料用途で利用されており、人々の生活に必要不可欠である。その生産量は、世界で年間2億169万tと、今日でも増加し続けている。植物油の製造では、原料となる大豆や菜種、ひまわりなどの油糧作物から粗油が搾られる。粗油には、非可食成分や、風味などを損なう不純物が含まれるため、これらを除くための、脱ガムや、脱酸、脱臭といった精製プロセスが行われ、各工程で副生物が発生する。現在、植物油産業の持続可能性を高めるため、この副生物の有効利用が検討されている。

精製プロセスのうち、脱酸工程では、油脂分解物である遊離脂肪酸を、苛性ソーダ(NaOH)を投入することで、石鹼化し、除去される。ここで分離除去した石鹼を主成分とする副生物はフーツと呼ばれる。フーツは、植物油製造時に必ず発生する廃棄物であり、その組成は、油分（脂肪酸塩）35-55%程度、水分30-60%程度、無機塩2-8%からなる。熱回収するには不燃成分が多く、廃水処理するにはBODが高いことから、この処理は、植物油メーカーにとって切迫した課題である。

フーツの一部は、強酸添加により脂肪酸塩を分解して油分を回収、蒸留で遊離脂肪酸のみを分離回収して、塗料やインキ原料として利用されている。ただし、採算性が低く、近年その需要も著しく低下している。また、遊離脂肪酸の回収法に関しても、酸分解時の廃水や、蒸留残渣の処理が課題であった。

一方で、油滓に関する既往研究は、Web of Scienceでキーワード：soapstock と検索すると、2001年以降でも文献総数223報（最多：21報/年）と僅少で、バイオマス原料としては、ほとんど着目されていない。油滓の有効利用を目指した研究の大半は、前述のように環境負荷の高い手法で回収した遊離脂肪酸を、触媒や酵素を用いて燃料（バイオディーゼルや航空燃料）や界面活性剤へと変換するというものである。しかし、廃水や残渣処理が依然として課題であり、本質的な解決とはいえない。一方、近年では、遊離脂肪酸を経由せずに油滓を熱分解で直接燃料化する研究があるものの、高温（400-900°C）条件の反応で投入エネルギーが多く、無機塩に由来する残渣の処理は依然として解決されていない。このように、有機物（油分）と無機物（塩）の背反する性質を併せ持つため取り扱いが困難であった。

フーツの主成分である脂肪酸塩に対して、コルベ電解反応に着目した。この反応では、カルボン酸基が陽極で脱炭酸しつつ二量化する反応であり、もう一方のNaイオンは、陰極の水素生成で副生する水酸化物イオンと反応し、苛性ソーダとして回収できる可能性がある。

## 2. 研究開発目的

本研究は、フーツを廃棄物なしに全ての成分を（炭素源かつ無機塩源として）利用できる新たな技術の開発を目指すものである。そのために、開発は以下の項目

「目的反応を進行させるための電解槽の設計指針（電極種や形状、条件等）の決定と、イオン交換膜を介した物質移動の制御理論の確立」、「実サンプルにおける課題抽出」および「フーツ電解プロセスにおけるプロセスの評価」とした。

## 3. 研究目標

|             |   |
|-------------|---|
| <p>全体目標</p> | <p>食用油製造の脱酸工程で大量に発生するリサイクルが困難な可燃性廃棄物フーツ（石鹼水）を原料とし、シンプルなプロセスで、かつ、さらに廃棄物を増やすことなく、含有成分を再資源化するコルベ電解システムを構築する。本研究は、申請者の新たなアイデアに基づく挑戦であり、どの程度の実現性があり、どこに課題があるのかを解明することを主眼とし、次の段階となる実用装置開発に展開させていくことを狙う。具体的には、研究終了時に、以下の項目の達成を目標とする。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・新たにラボスケールでイオン交換膜を隔膜とするコルベ電解システムの装置を設計、製作する。</li> <li>・上記装置を用い、モデル系で石鹼の転化率60%（過去のコルベ電解反応に関する文献での最大値）以上でオレフィン合成と苛性ソーダ回収を実現する。</li> <li>・実原料となるフーツを用いて検討を行い、モデル系での結果と比較し、</li> </ul> |
|-------------|---|

|              |   |
|--------------|---|
|              | 転化率が低下する場合はその原因を解明する。同程度の転化率を達成できる場合、さらに転化率を高めるための因子を明らかにする。  |
| サブテーマ 1      | 油脂産業で大量発生するフーツの完全循環を目指すコルベ電解システムの開発   |
| サブテーマ 1 実施機関 | 東北大学  |
| サブテーマ 1 目標   | <p>食用油製造の脱酸工程で大量に発生するリサイクルが困難な可燃性廃棄物フーツ（石鹼水）を原料とし、シンプルなプロセスで、かつ、さらに廃棄物を増やすことなく、含有成分を再資源化するコルベ電解システムを構築する。本研究は、申請者の新たなアイデアに基づく挑戦であり、どの程度の実現性があり、どこに課題があるのかを解明することを主眼とし、次の段階となる実用装置開発に展開させていくことを狙う。具体的には、研究終了時に、以下の項目の達成を目標とする。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・新たにラボスケールでイオン交換膜を隔膜とするコルベ電解システムの装置を設計、製作する。</li> <li>・上記装置を用い、モデル系で石鹼の転化率60%（過去のコルベ電解反応に関する文献での最大値）以上でオレフィン合成と苛性ソーダ回収を実現する。</li> <li>・実原料となるフーツを用いて検討を行い、モデル系での結果と比較し、転化率が低下する場合はその原因を解明する。同程度の転化率を達成できる場合、さらに転化率を高めるための因子を明らかにする。</li> </ul> |

#### 4. 研究開発内容

＜【サブテーマ 1】「油脂産業で大量発生するフーツの完全循環を目指すコルベ電解システムの開発」の研究開発内容＞

##### I. 電解槽の設計指針の決定および膜を介した物質移動の制御理論の確立

###### **I-1. 回分電解槽の設計**

容積100cm<sup>3</sup>の電解槽に、モデルフーツとしてオクタン酸ナトリウムの水溶液を用い、PtメッキTi基盤電極を用いて電解実験を行った。操作条件の影響について整理した。実験結果から電解メカニズムを考察し、メカニズムに基づいた数学モデルを導出した。そして、モデルパラメータを求め電解槽の設計指針を決定した。電解槽の設計指針に基づき膜ありの電解槽を用いた実験を実施し、膜導入による反応の効率化の効果を検討した。

###### **I-2. 流通電解槽の設計**

前述の回分試験の結果に基づいて、流通電解セルを設計製作した。そして、流通電解槽を用いて電解試験を実施した。

###### **I-3. 電極材料の検討**

Pt電極は、反応活性が高いものの、高価である。そのため、実装の際には、安価な電極の利用が求められる。そこで、陽極および陰極について、電極材料を変化させた条件で前述の基本条件下で電解実験を行い電極材料の影響を検討した。

##### II. 実サンプルにおける課題抽出

###### **II-1. 反応物種の検討**

前述の電解実験で用いるオクタン酸ナトリウムは炭素数が8である。想定される実際のフーツを校正する脂肪酸の炭素鎖長は8から20程度であるが、ボリュームゾーンは12～18である。そこで、まず、反応物を変化させて炭素鎖長の影響を検討した。

## II-2. フーツの類型化

実際のサンプルの構成成分について、文献調査では情報が不足していたため、実際の植物油メーカーよりフルーツサンプルを入手し、成分分析を行った。そして、得られた成分およびフルーツの発生プロセスに基づいて組成の類型化を行った。

## II-3. 実サンプルを用いた際の電極および膜の劣化挙動の検討

原料成分の情報から推定される電極被毒の可能性の高い成分を用いた電解実験を実施し、実サンプルを用いた際の課題抽出を行った。

## III. フーツ電解プロセスにおけるプロセスの評価

### III-1. プロセスシミュレーション

前述の実験結果および植物油メーカーへのヒアリング結果に基づき、フルーツの電解プロセスを設計した。実験結果および文献値を用いて、設計したプロセスについて、プロセスシミュレーションを実施し、本プロセスの有効性について検討した。

## 5. 結果及び考察

### 1. 電解槽の設計指針の決定および膜を介した物質移動の制御理論の確立

#### I-1. 回分電解槽の設計

脂肪酸ナトリウムとして、オクタン酸ナトリウム (C8) を用いた際の実験結果を図1に示す。操作温度および操作電圧を変化させた際の実験結果をプロットで示している。ラインについては、後述する。(a)10°C、20Vでの結果に着目すると、反応開始とともに反応物 (RCOO<sup>-</sup>, ◇) が減少し、一方で炭化水素 (RR, ○)、アルコール (ROH, □)、アルデヒド (R<sup>''</sup>-COH, △) が生成した。これらの化合物が生成するというメカニズムは既往のコルベ電解と同様であった。しかし、いずれの条件においても、反応物が残存するにもかかわらず反応が頭打ちになる傾向が観察された[成果番号1]。

次に効率的な反応条件の探索および電解槽の設計を可能とする数学モデルの構築を行った。実験結果より得られたメカニズム (図2) に基づいて、反応物が電極表面に吸着した後、電極表面で反応 (目的

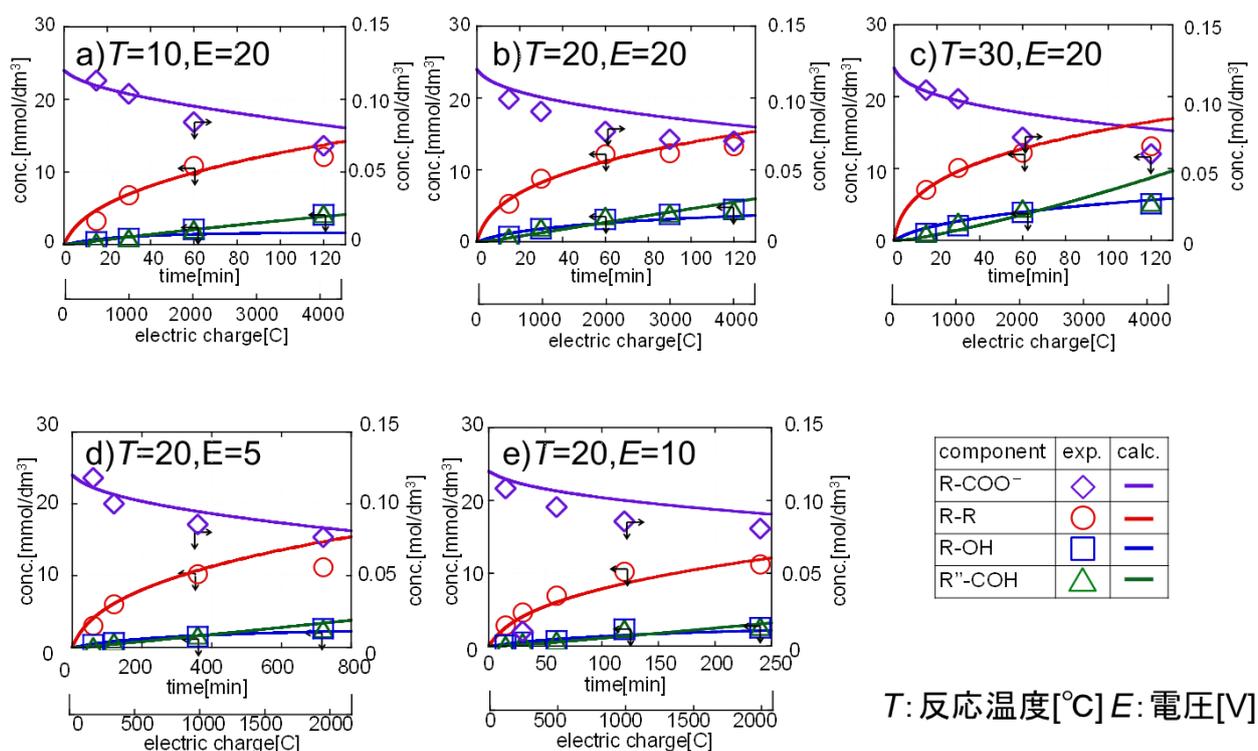


図1 オクタン酸ナトリウムを用いた場合の実験結果

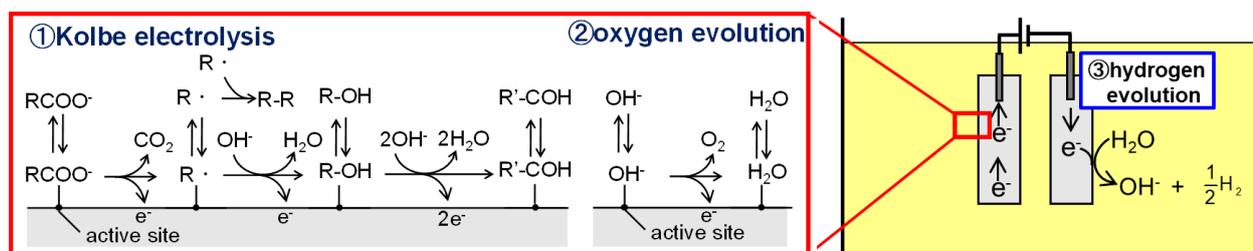


図2 コルベ電解メカニズムの概念図

の①コルベ電解と、併発する②酸素発生)が生じるEley-rideal機構に従うと仮定し、数学モデルを構築した。そして、前述の実験結果を表現可能な反応および吸着に関するパラメータの推算を行った。実験結果へのモデルの適用結果を前述の図1にラインで示した。温度や電圧を変化させたいずれの条件でも反応挙動の傾向を表現できていることが分かる。

本モデルを用いて、前述した反応が頭打ちになる要因について解析を行った。その結果、目的反応の進行に伴い生成する苛性ソーダに由来する水酸化物イオンが電極表面を被覆してしまい目的のコルベ電解が頭打ちになることが明らかとなり、反応器に隔膜を用いることで目的反応が効率的に進行することが示唆された[成果番号2]。

そこで、膜を導入した反応器を用いて電解実験(50°C,10V,2000C)を行った。表1に、その際の転化率を示す。膜を導入することで転化率は大幅に向上した。各生成物の収率に着目すると、膜の導入により新たに脂肪酸の精製が観察された。これは前述した酸素発生に伴うNaイオンの膜を介した移動により、原料の脂肪酸イオンがプロトン

表1 転化率に及ぼす膜の影響

| 膜  | 転化率 [%] | 収率 [%] |      |        |        |
|----|---------|--------|------|--------|--------|
|    |         | R-R    | R-OH | R'-CHO | R-COOH |
| あり | 71.87   | 26.25  | 1.61 | 1.51   | 42.5   |
| なし | 26.72   | 21.84  | 2.52 | 2.32   | n.d.   |

n.d.: not detected

化して生じたためと考えられる。また他の生成物では、炭化水素は増加した、一方で、生成に水酸化物イオンの関与するアルコールやアルデヒドの収率は少し低下した。

表2に反応液のpH変化およびNa濃度の変化を示す。膜を用いた際には、陰極槽のpHが反応により増加した。また、Na<sup>+</sup>濃度に着目すると、陽極槽から陰極槽に移動していることが分かる。従って、脂肪酸ナトリウムに由来するNa<sup>+</sup>がNaOHとして、陰極槽に分離・回収できた[成果番号11]。従って、本手法により、フーツ

表2 溶液pHおよびNa濃度に及ぼす膜の影響

| 膜  | 槽  | pH [-] |       | Na <sup>+</sup> 濃度. [mol/dm <sup>3</sup> ] |      |
|----|----|--------|-------|--|------|
|    |    | 反応前    | 反応後   | 反応前  | 反応後  |
| あり | 陽極 | 8.45   | 6.40  | 0.24                                       | 0.13 |
|    | 陰極 | 12.61  | 12.99 | 0.12                                       | 0.23 |
| なし | —  | 8.51   | 8.76  | 0.12                                       | 0.12 |

主成分である脂肪酸ナトリウムを有機源および無機源として利用できることが示唆された。

一方で、膜を用いた回分電解槽では、高い転化率が得られたものの、反応後期には反応物および電解質が枯渇してしまい反応効率が低下することが明らかとなった。そこで、原料を連続的に供給できる連続電解槽を設計することとした。

### I-2. 流通電解槽の設計

流通電解セルの設計を行うため、前述した数学モデルの拡張を実施した。具体的には、まず、膜を介したNa<sup>+</sup>の移動速度および透過イオンの選択性について、前述の電解挙動と同様にモデル化を行い、電解反応とNa<sup>+</sup>の膜移動の2つの数学モデルを組み合わせることで膜ありの回分電解槽のモデル化を行った。そして、回分モデルに対して、原料の流入と生成物および未反応物の流出を加えることで流通モデルに拡張した。そして、構築したモデルに基づいて、流通反応器を設計・製作した。[成果番号4]

図3に実際に製作した流通電解槽を用いて実験を行った際の結果をモデルによる計算結果と併せて示

す。(a)の滞在時間が5分の結果を見ると、実験開始とともに生成物が流出し始め、操作時間が15分以上、すなわち滞在時間の約3倍以上の運転時間(無次元滞在時間： $\theta > 3$ )では、生成物濃度が定常となって電解槽から流出していることが分かる。また、いずれの条件においても、 $\theta > 3$ で定常状態となった。実験結果と計算結果を比較してみると、いずれの実験におい

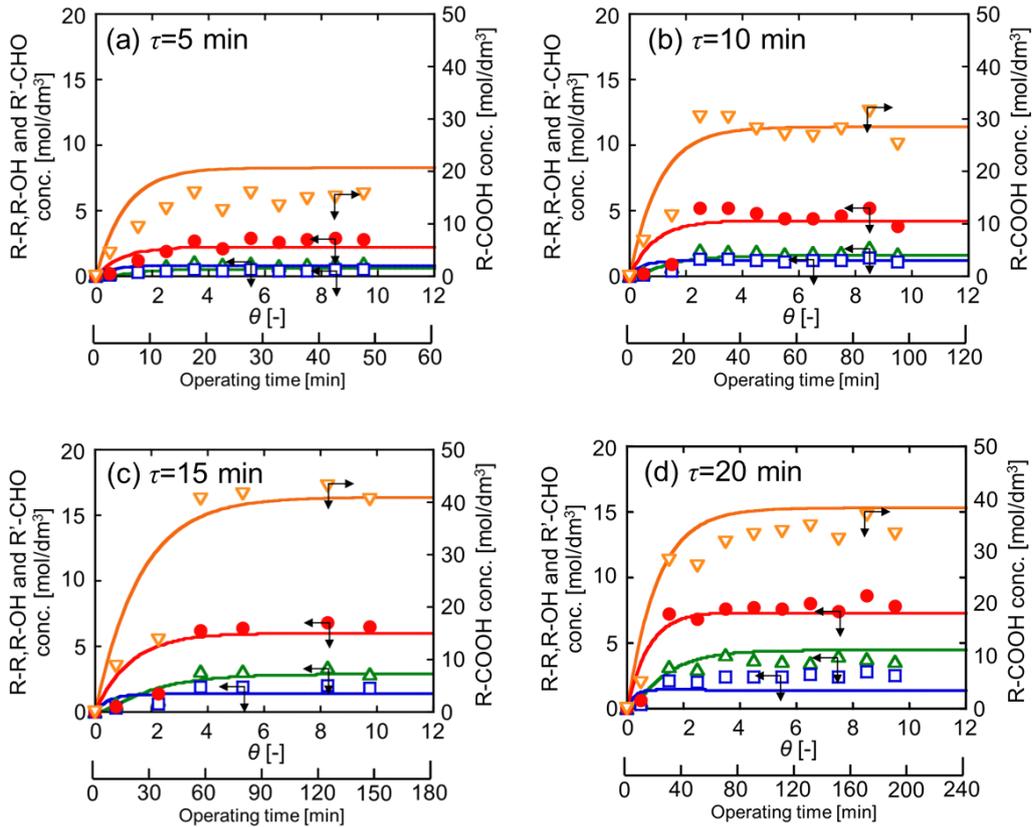


図3 流通電解槽を用いた実験結果

ても、生成物の挙動を良好に表現できており、モデルの構築および装置の設計が良好に実施できた。

また、図4に流通電解槽での生産性を回分電解槽でのものと比較してみると、流通電解槽では、連続的に原料を供給することで、回分系で課

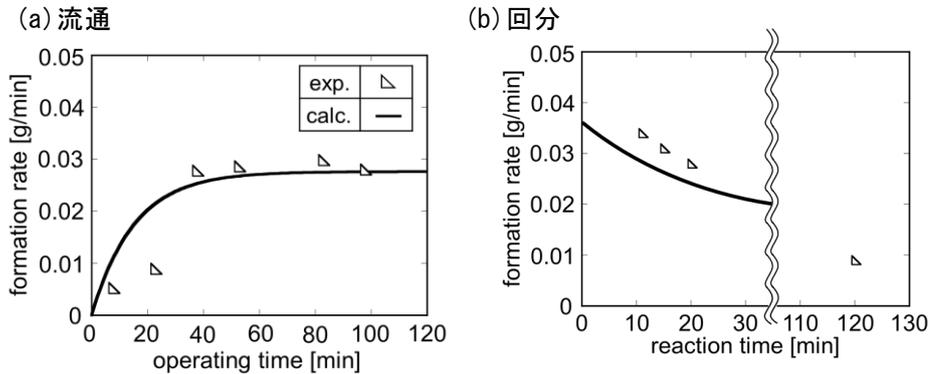


図4 流通系 (a) および回分系 (b) における原料の反応速度

題となっていた生産効率の低下を解決することができた。また、反応速度の実験値は計算値と両項に一致しており、ここからも設計が問題なく行えていることが確認できた。

### I-3. 電極材料の検討

前述の検討は、陽極、陰極ともにPtメッキのTi電極を用いたPt電極は反応活性が高いものの効果であるため、実際に実装される際には安価な電極の利用が望まれる。そこで陽極、陰極共に電極材料の検討を行った。その結果を図5に示す。縦軸は、陽極と陰極をともにPt電極を用いた場合を1とした場合の、生成量の比である。陰極材料を変化させた場合、いずれの材料においても大きな差はなく、NiやSUS (ステンレス) といった汎用の材料で代替可能であることが明らかとなった。一方、陽極を変化させた場合、酸化されにくいCuやAgを用いた場合でも目的のコルベ電解が生じなかったものの、市販の炭素材を用いた際に反応が進行した。その際の、選択率に着目すると、アルカン (炭化水素) が優勢となった。アルカンは、生成に際しての電子消費が少ない (図2参照) ため、高い電流効率 (投入した電気のうち目的反応に使用される割合) で反応が進行すると考えられる [成果番号8]。

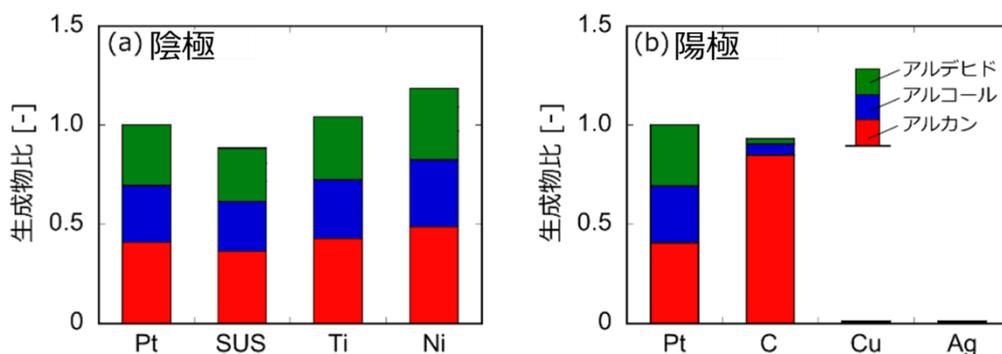


図5 電極材料の検討結果

## II. 実サンプルにおける課題抽出

### II-1. 反応物の検討

図6に原料となる脂肪酸塩の炭素鎖長を変化させて、電解実験を行なった結果を示す。(a) 20°Cでの結果では、系内に投入する電気量は、一定に揃えているにもかかわらず、C8のみで反応が進行する結果となった。特にC12を用いた際には、反応直後から反応液が白濁し、さらにゲル化が生じて流動性を

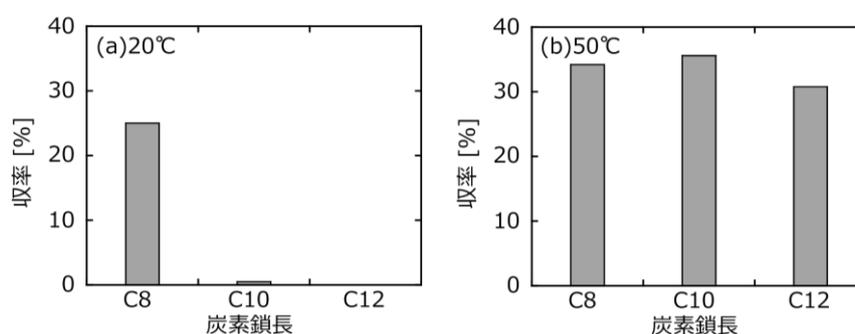


図6 種々の脂肪酸ナトリウムの実験結果

を失い、電流が流れなくなった。このゲル化については、反応物および生成物間に働く水素結合が原因と考えられる。そこで水素結合の緩和される高温でも電解を実施した。操作温度を(b)50°Cにすると、反応液がゲル化する現象は回避され、いずれの反応物の際でも反応が進行した。その際、炭素鎖長による反応性の違いはほとんど観察されなかった。酢酸などの水溶性の反応物を用いた従来のコルベ電解に関する知見では、低温での操作において、効率が高くなるという報告があったものの、植物油由来の原料（非水溶性の脂肪酸）の利用を想定した本系では、高温条件する必要があることが分かった[成果番号9]。

### II-2. フーツの類型化

実際のサンプルの構成成分について、文献調査では情報が不足していたため、実際の植物油メーカーよりフルーツサンプル（11社、21種）を入手し、成分分析を行った。そして、得られた成分に基づき組成の類型化を行った。表3に分析結果の平均値を示す。分析した成分含有量の積み上げ値は、100%となった。また、陽イオンと陰イオンの電荷の比をとるとほぼ1となり、電気的に中を示していることから本分析結果は妥当であると考えられる。各フルーツの類型化を図るため、サンプルごとの発生プロセスに着目すると、図7に挙げた項目ごとに構成因子が異なっており、組成変動に大きな影響を与える因子が『リン酸添加』『塩締め』『油洗浄排水の受け入れ』の3つであることが明らかとなった。

このうち、植物油製造の際にフルーツの分離を容易にするために行われる『塩締め』は、フルーツの粘性が高くなるため、装置設計・ハンドリングの観点で高粘性流体の対応が必要となることが分かった。また、油洗浄排水をフルーツと同じタンクで受け入れている場合には、フルーツが希釈されるため、処理前に濃縮工程を必要とすることが示唆された。

表3 フーツの組成

| 成分               | 組成 [%]        | 価数    |
|------------------|---------------|-------|
| 脂肪酸イオン           | 27.6 ± 10.8   | -1    |
| 水分               | 51.2 ± 16.4   | 0     |
| リン脂質             | 6.46 ± 5.31   | -1.98 |
| リン酸              | 1.23 ± 1.00   | -1.98 |
| 油脂               | 9.63 ± 4.54   | 0     |
| Na <sup>+</sup>  | 3.38 ± 2.13   | +1    |
| K <sup>+</sup>   | 0.035 ± 0.017 | +1    |
| Mg <sup>2+</sup> | 0.016 ± 0.012 | +2    |
| Ca <sup>2+</sup> | 0.069 ± 0.062 | +2    |

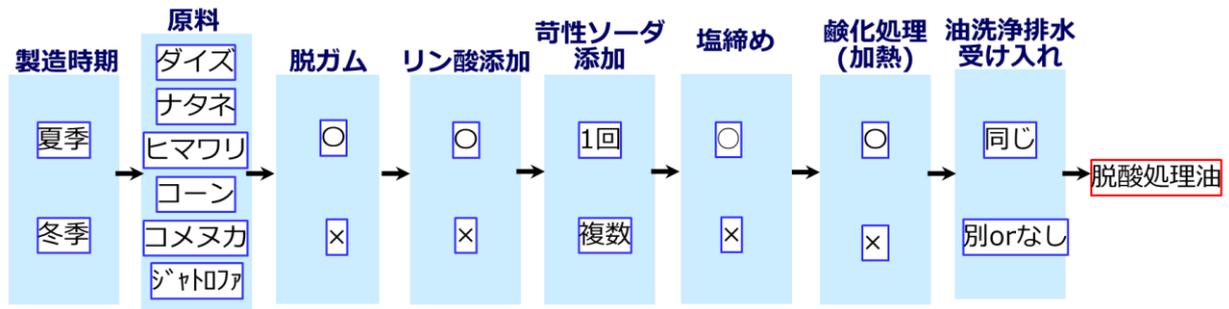


図7 フーツ発生プロセスの類型化

さらに、原料油種ごとの違いによって、脂肪酸イオン種は異なるものの、これについては、前述したように脂肪酸種の及ぼす電解挙動への影響が小さいことから無視可能であると考えられる。

文献調査から、燃料電池においては、含リン成分が電極被毒成分として頻繁に課題となることが明らかとなった。従って、本系でも電極の被毒可能性の高い成分としてリン酸が候補に挙げられた。また、食塩電解メーカーへのヒアリングから、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ といった2価の陽イオンがイオン交換膜の劣化につながりやすい成分であることが分かった。

### II-3. 実サンプルを用いた際の電極および膜の劣化挙動の検討

前述の知見に基づき、陽極：炭素A（JKGHK製）、陰極：SUSを備えた膜ありの回分電解槽を用いて、リン酸（ナトリウム塩）を添加した条件で電解実験を実施した。その結果、リン酸の添加による脂肪酸ナトリウムの転化率への影響はなかった。また、リン酸と接触している炭素電極表面について、EDXにより元素分析を反応前後の電極に対して行ったもののリンに由来するピークは観察されず、リン酸による被毒は無視できることが明らかとなった。

次に、実際に実サンプル（ナタネ由来フーツ）を蒸留水で濃度調整したものを原料に用いて、電解実験を行った。ここでは、陽極：炭素A、陰極：SUSを備えた膜ありの回分電解槽を用いて、24時間(4時間×6回)の反応を行った。

図8に、実験結果を試薬のオクタン酸ナトリウムを用いて、同じ操作条件で行った結果と比較して示す。実サンプルを用いた場合でも、試薬で行った場合と転化率にほとんど差はなかった。一方で、実サンプルを用いて繰り返し実験を行った結果は、繰り返し回数が増加するごとに転化率が高くなった。繰り返し使用することで、炭素電極は、表面が目視で確認できるほど多孔化が進行していた。また、使用前および繰り返し利用後の炭素電極について、表面の元素分析を行ったところ、炭素電極表面のO原子の原子数濃度が、1.7%から14.8%に増加しており、酸化劣化していることが示唆された。従って、繰り返し利用における転化率の増加は、電解への使用により炭素電極が酸化劣化し、電極の表面積が大きくなったことで、単位時間当たりに電極上の触媒活性点にアクセスできる反応物量が増加したためと考えられる。これは、炭素電極が物理的に損傷していることを示しており、長期的に利用する上では望ましくないと考えられる。一方、イオン交換膜についても $Na^+$ の膜透過性について検討した（図9）。この結果より、24時間程度の利用では、膜透過性に大きな変化はないことがわかった。

次に、耐酸化性の高い炭素電極の探索を行うため、市販の炭

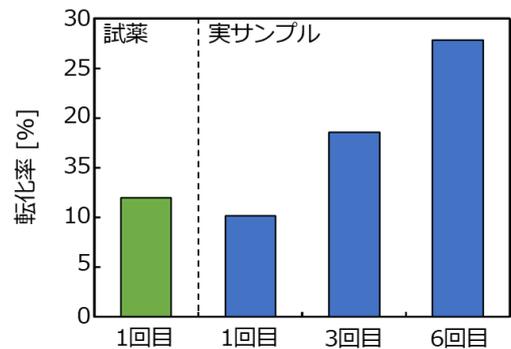


図8 実サンプルでの電解実験結果

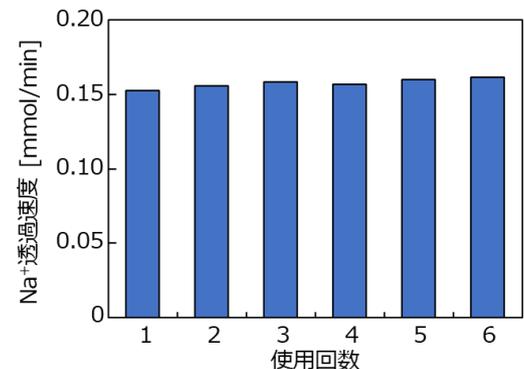


図9 繰り返し利用における膜透過速度

素電極を複数用いて、炭素電極の物性（黒鉛化度、体積抵抗率、かさ密度および燃焼温度）について検討を行い、それらの相関関係を調査した。その結果、耐酸化性の指標となる燃焼温度について、黒鉛化度との間に高い相関関係にあることが分かった（図10）。

そこで、耐酸化性の低い炭素Aおよび高い炭素E（日本テクノカーボン製）を用いて繰り返し利用の試験をした結果を図11に示す。耐酸化性の低い炭素Aでは、利用回数を重ねるごとに収率が增加する結果となった。これは前述したように、酸化劣化により電極表面が削れて多孔化したためであり、物理的な消耗が激しいことを意味すると考えられる。一方で、耐酸化性の高いと考えられる炭素Eを用いた際には、収率が変わらずに維持できていることから、大きな損傷なく繰り返し利用ができていていると考えられる。

III. フーツ電解プロセスにおけるプロセスの評価

III-1. プロセスシミュレーション

ここでは、前述の実験結果および植物油メーカーへのヒアリング結果に基づき、フルーツの電解プロセスを設計した。前述の図4(b)の回分試験結果からも分かるように、長い反応時間は電解質の枯渇につながるため反応効率が下がって低下する。これは、I-2.での検討結果から、滞在時間を長く（40分以上）に設定した流通試験でも確認されている。従って、本系においては、流通電解槽を用いる場合の転化率を50%未満に設定する必要がある。その際、未反応の原料を再利用するため、リサイクルシステムを備えたプロセスを設計した。

フルーツの再資源化において、どのようなシナリオを選択するによって『生成物と未反応物の分離』、『生成物の利用法』、『製造する苛性ソーダ規格』などの構成要素の内訳が決まるため、設計されるプロセスが異なる。シナリオの一例として、最小の循環共生圏（植物油工場内）での資源循環を想定し、生成する炭化水素やオレフィンやユーティリティ向けの燃料として、もう一方の生成物NaOHについては、植物油製造プロセスでの再利用を仮定したプロセスの評価を行った。図12に設計したプロセスの概念図を示す。ここでは、生成物と未反応物の分離は、実験において分析の際に実施しているのと同様に有機溶媒による抽出を選択することとした。

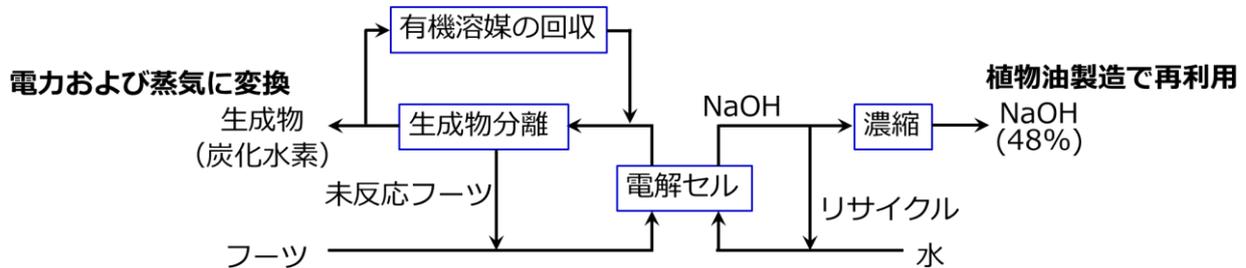


図12 フーツの再資源化プロセスの概念図

前述した要件を満たすプロセスの設計を行い、プロセスシミュレーター（ASPEN PLUS）を用いて、構成する単位操作の運転に必要なエネルギーおよび本プロセスで得られるエネルギーを推算した。フルーツを1時間に10kg処理するとしたケースを想定し、シミュレーションを行い評価した。計算結果の一例を図13に示す。正側の棒グラフは、生成物を燃料利用した際に得られるエネルギーを示し、負側の棒グラフは、各単位操作に要するエネルギーの単純な積み上げである。また獲得および投入のエネルギー収支

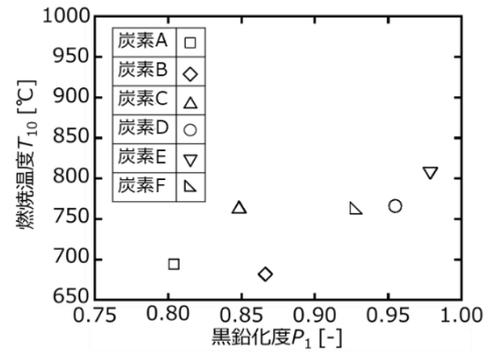


図10 種々の炭素電極における黒鉛化および燃焼温度

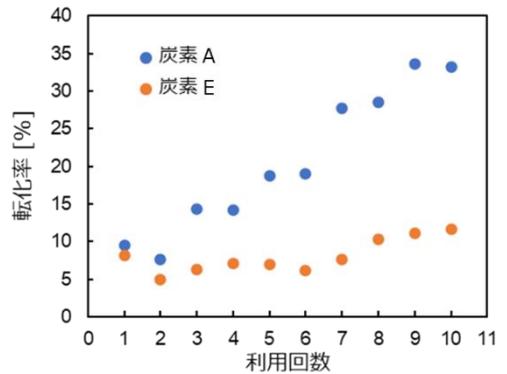


図11 炭素電極の繰り返し利用における転化率の変化

であり、正側と負側の差である。計算結果は正を示した。これは、フーツの処理によって得られるエネルギーが、フーツの処理に必要なエネルギーを上回っていることを示す。この余剰エネルギーについては、植物油製造で利用することで、工場内で使用する重油などのエネルギー源の使用量が削減可能であることを示唆する。また、従来のフーツを産業廃棄物処理する際に際に要していた輸送や処理に関する環境負荷、苛性ソーダを製造・輸送する際に要していた環境負荷も控除されることとなるため。本開発技術が環境適合性および経済性の面からメリットを有することが示唆された[成果番号10]。

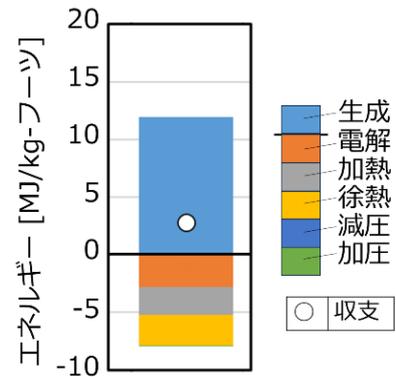


図13 本開発プロセスによるフーツ処理のエネルギー収支

6. 目標の達成状況と環境政策等への貢献

(1) 研究目標の達成状況

<全体の達成状況> . . . . . 1. 目標を大きく上回る成果をあげた

「油脂産業で大量発生するフーツの完全循環を目指すコルベ電解システムの開発」

| 全体目標  | 全体の達成状況  |
|---|--|
| <p>食用油製造の脱酸工程で大量に発生するリサイクルが困難な可燃性廃棄物フーツ(石鹼水)を原料とし、シンプルなプロセスで、かつ、さらに廃棄物を増やすことなく、含有成分を再資源化するコルベ電解システムを構築する。本研究は、申請者の新たなアイデアに基づく挑戦であり、どの程度の実現性があり、どこに課題があるのかを解明することを主眼とし、次の段階となる実用装置開発に展開させていくことを狙う。具体的には、研究終了時に、以下の項目の達成を目標とする。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・新たにラボスケールでイオン交換膜を隔膜とするコルベ電解システムの装置を設計、製作する。</li> <li>・上記装置を用い、モデル系で石鹼の転化率60% (過去のコルベ電解反応に関する文献での最大値) 以上でオレフィン合成と苛性ソーダ回収を実現する。</li> <li>・実原料となるフーツを用いて検討を行い、モデル系での結果と比較し、転化率が低下する場合はその原因を解明する。同程度の転化率を達成できる場合、さらに転化率を高めるための因子を明らかにする。</li> </ul> | <p>実際に膜を導入した電解槽の設計・製作を実施した、そして、膜を導入することで目論見通りに反応効率を向上させることに成功した。この際、目標の転化率についても達成でき、オレフィン(炭化水素)の合成と苛性ソーダの回収を実現できた[成果番号11]。</p> <p>さらに、回分実験の効率化を目論んで構築した数学モデルを拡張させることで、研究開始時には計画していなかった、流通電解槽の設計・製作も実現した。そして、回分系において課題であることが明らかとなった反応後期における生産速度の低下も解決できた[成果番号4]。</p> <p>実原料の構成成分を分析で明らかにすることができた。当初の予定以上にサンプル種を入手できたため、企業(製造プロセスや油種)や季節を考慮した組成変動のデータについて、より信頼度の高いデータが得られた。分析結果に基づいて得られた不純物成分の情報を基に、電極や膜を被毒しうる成分を用いた電解実験および実サンプルでの電解実験を実施し、その影響を明らかにできた。</p> <p>また、実験的知見だけでなく、プロセスシミュレーションを用いた本電解プロセスの評価も実施し、当初の目標にはなかった成果も得られた[成果番号10]。</p> |

<【サブテーマ1】達成状況> . . . . . 1. 目標を大きく上回る成果をあげた

「油脂産業で大量発生するフーツの完全循環を目指すコルベ電解システムの開発」

| サブテーマ1 目標 | サブテーマ1 の達成状況 |
|-----------|--------------|
| 全体目標と同一   | 全体の達成状況と同一   |

## (2) 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献

## ＜得られた研究成果の学術的意義＞

フーツは、植物油製造時に必ず発生する廃棄物であり、その組成は、油分(脂肪酸塩)35-55%程度、水分30-60%程度、無機塩2-8%からなる。熱回収するには不燃成分が多く、廃水処理するにはBODが高いことから、この処理は、植物油メーカーにとって切迫した課題である。

一方で、油滓に関する既往研究は、Web of Scienceでキーワード: soapstock と検索すると、2001年以降でも文献総数223報(最多:21報/年)と僅少で、バイオマス原料としては、ほとんど着目されていない。油滓の有効利用を目指した研究の大半は、前述のように環境負荷の高い手法で回収した遊離脂肪酸を、触媒や酵素を用いて燃料(バイオディーゼルや航空燃料)や界面活性剤へと変換するというものである[Cruz, M. *et al.*, *Renew. Energ.* **2018**, 124, 165-171, Brenna, E. *et al.*, *ACS Sustain. Chem. Eng.* **2023**, 11, 2764-2772]。しかし、廃水や残渣処理が依然として課題であり、本質的な解決とはいえない。一方、近年では、遊離脂肪酸を経由せずに油滓を熱分解で直接燃料化する研究があるものの([Duan, D. *et al.*, *Energy* **2020**, 209, 118454]など20報程度)、高温(400-900°C)条件の反応で投入エネルギーが多く、無機塩(Na<sup>+</sup>)に由来する残渣の処理は依然として解決されていない。本研究では、電解反応により油分は炭化水素として、無機塩(Na<sup>+</sup>)は苛性ソーダとして再資源化する。従って、塩を含んだ残渣を発生することなく油滓の全成分を有効利用できるという点で独創的である。

本研究で着目する電解反応は、古くから知られた電気化学反応(コルベ電解)であり、研究例は多い。しかし、酢酸や酪酸など水溶性の有機酸を対象としたものが大半で、非水溶性の有機酸(脂肪酸)の塩を対象とした系は、皆無であった。脂肪酸塩を対象とした場合、電解によりアルカリが生成し反応系が速やかに塩基性に変化する。塩基条件では水の電気分解のみが生じて、目的のコルベ電解が進行しないことから、反応物として適さないといわれていた[元木信一, *有機合成化学* **1966**, 24(9)755-770]。申請者は、脂肪酸塩の電解を、イオン交換膜によるアルカリ分離と組み合わせることで、電解が途中で進行しなくなるという課題を解消できることを見出した。この点は出願した特許[成果番号11]の国際調査報告でも新規性・進歩性(独創性)ともにありと評価されている。

本研究は、油滓の有効利用を目指して膜を用いた電解プロセスの設計に取り組む研究である。似通ったプロセスに食塩電解プロセスがあるが、これは、産業主導で発展してきた技術で試行錯誤的に装置の設計や改良が行われてきた。しかし、現代では、このようなプロセス開発法は非効率的であると指摘されており、現象解明と並行してモデル化を実施することで開発期間の大幅な短縮が可能である。申請者が専門とする化学工学(速度論)的に数理モデルを用いたアプローチにより電気化学反応を解析し、プロセス設計に繋げる研究例はなく、申請者の独創的な手法である。

## ＜環境政策等への貢献に関する成果＞

本研究で開発を目指した技術は、植物油工場の脱酸工程で発生するフーツを対象とし、苛性ソーダと炭化水素(炭素数30-34)に資源化するものである。苛性ソーダは植物油工場の脱酸工程で再利用し、炭化水素類は工場内のボイラー燃料としての利用を想定している。これまでの研究で、本提案プロセスで産生されるエネルギー量は、プロセスの運転に必要なエネルギーよりも大きく、余剰分を植物油製造プロセスに還元できると試算した。そのため、技術が確立すれば、廃棄物発生量の抑制だけでなく、苛性ソーダやボイラー燃料といった資源の投入量抑制(新規な製造量の控除)が可能となり、真にカーボンネガティブな廃棄物の再資源化プロセスが実現できる。これは、第五次環境基本計画の『重点戦略③地域資源を活用した持続可能な地域づくり』や第四次循環型社会形成推進基本計画に記載の『多種多様な地域循環共生圏形成による地域活性化や廃棄物エネルギーの徹底活用』に対しての貢献が可能となる。

これまで有効な利用法がなかったフーツを、経済性のあるかたちで再資源化する技術が確立すれば、植物油メーカーや廃棄物処理産業に速やかに導入が見込まれる。現状でも日本国内で30万t/y(2000万t/y世界)規模の発生量である。植物油製造は、食用だけでなく燃料や化学品(界面活性剤)などの用途もあり、5~7%程度の市場成長率と製造量は世界全体だけでなく国内でも増加傾向である。従って、将来的にニーズのますます高まることが予想される技術であり、波及効果は大きいと考えられる。

## 7. 研究成果の発表状況

## (1) 成果の件数

| 成果の種別                      | 件数 |
|----------------------------|----|
| 査読付き論文：                    | 1  |
| 査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）： | 0  |
| その他誌上発表（査読なし）：             | 0  |
| 口頭発表（国際学会等・査読付き）：          | 5  |
| 口頭発表（学会等・査読なし）：            | 4  |
| 知的財産権：                     | 1  |
| 「国民との科学・技術対話」の実施：          | 6  |
| マスコミ等への公表・報道等：             | 0  |
| 研究成果による受賞：                 | 2  |
| その他の成果発表：                  | 0  |

## (2) 誌上発表

## &lt; 査読付き論文 &gt;

| 成果番号 | 【サブテーマ1】の査読付き論文  |
|------|--|
| 1    | K.Hiromori*, Y.Konno, K.Katagami, A.Takahashi, N.Shibasaki-Kitakawa<br>Kolbe Electrolysis for Recycling Non-Aqueous Fatty Acid Salts<br>JOURNAL OF CHEMICAL ENGINEERING OF JAPAN. 57, 2332621 (2024) |

## &lt; 査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野） &gt;

| 成果番号 | 【サブテーマ1】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野） |
|------|------------------------------------|
|      | 特に記載すべき事項はない。                      |

## &lt; その他誌上発表（査読なし） &gt;

| 成果番号 | 【サブテーマ1】のその他誌上発表（査読なし） |
|------|------------------------|
|      | 特に記載すべき事項はない。          |

(3) 口頭発表

<口頭発表 (国際学会等・査読付き) >

| 成果番号 | 【サブテーマ1】の口頭発表 (国際学会等・査読付き)   |
|------|--|
| 2    | K.Hiromori, K.Katagami, A.Takahashi, N.Shibasaki-Kitakawa, American Oil Chemistry Society's Annual Meeting & Expo 2022 "Proposal of complete utilization system of soapstock by electrolysis"  |
| 3    | Y.Konno, K.Hiromori, A.Takahashi, Naomi Shibasaki-Kitakawa, Post Symposium of Tokyo Conference on Advanced Catalytic Science and Technology (TOCAT)9 "Kolbe electrolysis system that enables recycling of waste fatty acid salts in the edible oil industry" |
| 4    | K.Hiromori, Y.Konno, K.Katagami, A.Takahashi, N.Shibasaki-Kitakawa, American Oil Chemistry Society's Annual Meeting & Expo 2023 "Kinetic analysis for design of complete soapstock utilization process by Kolbe electrolysis"                                |
| 5    | Y.Konno, A.Takahashi, N.Shibasaki-Kitakawa, K.Hiromori, International Symposium for the 80th Anniversary of the Tohoku Branch of the Chemical Society of Japan "Hydrocarbon synthesis from organic acid salts by electrochemical decarboxylation"            |
| 6    | Y.Konno, K.Hiromori, A.Takahashi, Naomi Shibasaki-Kitakawa, 2023 AIChE Annual Meeting "Upcycling of Organic Acid Salt Waste By Sustainability Applications of Kolbe Electrolysis System"   |

<口頭発表 (学会等・査読なし) >

| 成果番号 | 【サブテーマ1】の口頭発表 (学会等・査読なし)   |
|------|--|
| 7    | 廣森浩祐, 片上佳祐, 高橋厚, 北川尚美, 超異分野学会 東京大会2022「油脂廃棄物の処理を目的とした自立エネルギー型電解システムの提案」        |
| 8    | 今野陽一, 廣森浩祐, 高橋厚, 北川尚美, 第11回 JACI/GSCシンポジウム「食用油産業での脂肪酸塩廃棄物の再資源化を可能とするコルベ電解システム」 |
| 9    | 今野陽一, 廣森浩祐, 高橋厚, 北川尚美, 化学工学会新潟大会「コルベ電解に及ぼす脂肪酸塩の炭素鎖長の影響」                        |
| 10   | 廣森浩祐, 今野陽一, 高橋厚, 北川尚美, 日本油化学会第61回年会「アルカリ油滓の再資源化を目指した電解プロセスの開発」                 |

(4) 知的財産権

| 成果番号 | 発明者              | 出願者  | 名称   | 出願以降の番号          | 出願年月日      |
|------|------------------|------|--|------------------|------------|
| 11   | 廣森浩祐, 北川尚美, 片上佳祐 | 東北大学 | 「アルカリ金属/アルカリ土類金属水酸化物の製造方法、及び、当該製造方法のカルボン酸塩廃棄物再資源化技術への応用」 | JPW02022185975A1 | 2022年2月21日 |

(5) 「国民との科学・技術対話」の実施

| 成果番号 | 実施年度 | 【サブテーマ1】の実施状況  |
|------|------|--|
| 12   | 2022 | R&D支援センター技術セミナー「反応・分離プロセスの設計とスケールアップのポイント」                                   |
| 13   | 2022 | 技術情報協会 技術セミナー 化学反応器スケールアップへ向けた反応速度式の求め方とその活用「反応速度式を用いた反応器およびプロセスの設計とスケールアップ」 |

|    |      |   |
|----|------|---|
| 14 | 2022 | エコプロ2022 「植物油産業の持続可能性を高めるアルカリ再生プロセスの開発」           |
| 15 | 2023 | R&D支援センター技術セミナー「化学プロセスにおける速度式の求め方と設計・スケールアップへの応用」 |
| 16 | 2023 | 第33回化学工学一関セミナー「課題解決のためのプロセス設計-電気化学によるアップリサイクル-」   |
| 17 | 2023 | 令和5年度第3回油化学セミナー「油滓の資源化を目指した電解プロセス開発に関する研究」        |

## (6) マスメディア等への公表・報道等

|          |                  |
|----------|------------------|
| 成果<br>番号 | 【サブテーマ1】のメディア報道等 |
|          | 特に記載すべき事項はない。    |

## (7) 研究成果による受賞

|          |  |
|----------|--|
| 成果<br>番号 | 【サブテーマ1】の研究成果による受賞   |
| 18       | 今野陽一，廣森浩祐，高橋厚，北川尚美，学生特別賞受賞，化学工学会新潟大会「コルベ電解に及ぼす脂肪酸塩の炭素鎖長の影響」2022年11月10日受賞     |
| 19       | 廣森浩祐，第11回若手研究者奨励賞，公益社団法人 日本油化学会関東支部，「油滓の資源化を目指した電解プロセス開発に関する研究」2023年10月26日受賞 |

## (8) その他の成果発表

|          |                   |
|----------|-------------------|
| 成果<br>番号 | 【サブテーマ1】のその他の成果発表 |
|          | 特に記載すべき事項はない。     |

## 8. 国際共同研究等の状況

<国際共同研究等の概要>

特に記載すべき事項はない。

<相手機関・国・地域名>

| 機関名           | 国・地域名（本部所在地等） |
|---------------|---------------|
| 特に記載すべき事項はない。 |               |

## 9. 研究者略歴

<研究代表者略歴>

| 代表者氏名 | 略歴（学歴、学位、経歴、現職、研究テーマ等）   |
|-------|--|
| 廣森浩祐  | 東北大学大学院工学研究科修了<br>博士（工学）<br>東北大学博士研究員を経て、<br>現在、東北大学大学院工学研究科助教 |

|  |                     |
|--|---------------------|
|  | 専門は反応工学、分離工学、プロセス工学 |
|--|---------------------|

## Abstract

[Research Title]

Development of Kolbe electrolysis system for complete utilization of soapstock discharged from vegetable oil refining

|                          |   |
|--------------------------|---|
| Project Period (FY) :    | 2021-2023   |
| Principal Investigator : | Hiomori Kousuke   |
| (PI ORCID) :             | ORCID0000-0001-9223-0871  |
| Principal Institution :  | Tohoku University<br>Aoba 6-6-07, Aoba-ku, Sendai, JAPAN<br>Tel: +81-22-795-7256<br>Fax: : +81-22-795-7256<br>E-mail: kousuke.hiomori.e8@tohoku.ac.jp |
| Cooperated by :          |   |
| Keywords :               | Alkali recycle, electrolysis, biofuel, soapstock, reaction-separation   |

[Abstract]

In the production of vegetable oils, a byproduct known as "soapstock" has traditionally lacked effective utilization methods. This study aimed to develop a new technology that utilizes the Kolbe electrolysis reaction to exploit all components of soapstock as carbon and inorganic salt sources without generating waste. The focus of this research was to determine the feasibility of this idea and identify any challenges. A membrane-integrated electrolytic cell was designed and fabricated to separate the generated hydrocarbons and caustic soda simultaneously with the reaction, and conditions for efficient reaction were explored both experimentally and theoretically using mathematical models. Based on these findings, the fabrication of a flow electrolytic cell was also carried out. The use of mathematical models in this process enabled practical design considerations for the actual device. The investigation also confirmed that carbon electrodes are a viable and economical option, and key points for selecting carbon materials were clarified.

Furthermore, an investigation into the raw materials, which had been insufficiently characterized in the literature, identified the actual components of soapstock and classified them based on the soapstock generation process. Electrolysis experiments using potentially contaminating components and real samples clarified their impact. Tests conducted over approximately 24 hours revealed no significant differences compared to experiments using reagents. Based on these experimental results and consultations with vegetable oil manufacturers, the electrolysis process was designed and evaluated using a process simulator. The results suggested that the proposed process could not only treat soapstock, which is otherwise considered waste, but also generate energy. The introduction of this process could potentially reduce the need for new purchases of caustic soda and fuel used in vegetable oil plants, indicating that this technology could offer a highly environmentally compatible solution for processing soapstock.

[References]

K.Hiomori\*, Y.Konno, K.Katagami, A.Takahashi, N.Shibasaki-Kitakawa  
Kolbe Electrolysis for Recycling Non-Aqueous Fatty Acid Salts

JOURNAL OF CHEMICAL ENGINEERING OF JAPAN. 57, 2332621 (2024)

K.Hiromori, K.Katagami, A.Takahashi, N.Shibasaki-Kitakawa, American Oil Chemistry Society's Annual Meeting & Expo 2022 "Proposal of complete utilization system of soapstock by electrolysis"

K.Hiromori, Y.Konno, K.Katagami, A.Takahashi, N.Shibasaki-Kitakawa, American Oil Chemistry Society's Annual Meeting & Expo 2023 "Kinetic analysis for design of complete soapstock utilization process by Kolbe electrolysis"

This research was funded by the Environment Research and Technology Development Fund (ERTD)

## 別紙

(参考資料) 公募審査・中間評価等への対応

| 指摘等  | 対応状況・非対応理由等  |
|--|--|
| 採択時コメント「展開スキーム等も連携企業と一緒に提案するのが望ましい。」   | サンプル提供を受けた油脂メーカー11社からは、発生量や現行の処理（手法やコスト）に関してヒアリングを行った。うち8社からは、本技術に求める処理量や、製造するバイオ燃料および苛性ソーダに求める規格を得た。そして、この値を目標値として、プロセスシミュレーションの目的値に組み込んで評価を実施した。 |
| 採択時コメント「膜・電極の汚れに対する対応は十分に検討する必要があるのではないか。」   | フーツの組成を明らかにしたのち、不純物成分に当たりをつけた上で膜・電極の汚れに起因する劣化の検討を実施した。   |
| 中間評価コメント「社会実装をめざすことを念頭においているということなので、植物油生産からのフーツの発生量の見通しや物理化学性状の開きを十分に把握していくことが非常に重要であろう。」 | 油脂メーカー11社からはサンプル提供を受け企業や製品などによるフーツの組成変動に関するデータを取得した。   |
| 中間評価コメント「社会実装のための課題抽出（原料ばらつき、プロセス構成、Na 利用など）を期待したい。また、不純物成分の影響についてはさらに検討すべきである。」           | 油脂メーカー11社からはサンプル提供を受け企業や製品などによるフーツの組成変動に関するデータを取得した。フーツの組成を明らかにしたのち、不純物成分に当たりをつけた上で膜・電極の汚れに起因する劣化の検討を実施した。   |
| 中間評価コメント「生産物を燃料では無く原料素材として利用できればより良いと思う。」  | 燃料用途を想定したケースと原料利用を想定したケースで市場調査を行った。本課題では、燃料製造したプロセスの設計および評価まで行った。素材利用を含めた、プロセスの最適化およびそのプロセス評価は、2024年度からの課題【3MF-2401】の中での検討課題の一つとした。                |
| 中間評価コメント「生成物であるオレフィンと苛性ソーダの利用についても市場性のある十分な検討が必要である。この点も含めて社会実装における課題についても視野に入れてもらいたい。」    | サンプル提供を受けた油脂メーカー11社からは、発生量や現行の処理（手法やコスト）に関してヒアリングを行った。うち8社からは、本技術に求める処理量や、製造するバイオ燃料および苛性ソーダに求める規格を得た。  |