

植物油製造過程で発生する未利用バイオマス資源の有効活用に向けた取り組み

加藤 牧子^{*)}, 中林 暁男^{*2)}, 高橋 以都子^{*3)}

1. はじめに

2021年10月から11月にイギリス・グラスゴーで開催されたCOP26では、産業革命前から気温上昇幅を1.5℃に抑えることが世界の公式な目標として合意された。この目標は気候変動に伴う豪雨や強風、干ばつ等による被害が世界中で顕著になっていることを踏まえ、2015年パリ協定の2℃目標からさらに踏み込んだものとなっており、気候変動への対応の加速が求められている。COP26での合意を受け、各国で2050年までのカーボンニュートラル実現に向けて、産業界において再生可能エネルギーの導入や電化の加速など大きな社会変革が求められている。これらカーボンニュートラルの実現と併せて、EUなどを中心に強力に推し進められているのが「サーキュラーエコノミー（循環型経済）社会への移行」である。

サーキュラーエコノミーとは、モノを大量に生産し、使い、あとは捨てるのみという直線型社会から、モノをできる限り捨てず、捨てられたモノはできるだけ資源として使っていく循環型社会の実現を目指す取り組みである。産業界は、歩留まりや工程の改善を通して、製造過程で発生する副産物の抑制と有効活用に取り組んでいるものの、廃棄せざるをえない副産物も存在する。サーキュラーエコノミーの考え方において、従来の焼却・熱利用といった廃棄物処理やりサイクルを超えて、素材選択や製造の在り方、消費の様式など、製品・サービスのライフサイクル全体で循環の思考を取り入れようとする活動が検討されており、炭素負荷を下げる効果のあるカーボンニュートラル型の取り組みが求められている。

このようなカーボンニュートラル型のサーキュラーエコノミーの実現に向けて、ファイトケミカルプロダクツ株式会社（以下、ファイトケミカルプロダクツ）と横河電機株式会社・横河ソリューションサービス株式会社（以下、YOKOGAWA）は、2023年7月に共同開発契約を締結した。ファイトケミカルプロダクツは、植物油の製造工程で生じる未利用のバイオマス資源から、スーパービタミンEなどの機能性成分を回収すると同時に油分をバイオ燃料に変換する技術を保有している。この技術を商用プラントにスケールアップし、分離・回収プロセスを自動化する上で、YOKOGAWAが長年培ってきた計測・制御のノウハウが役立つ。

今回、両社の共同開発により、植物油精製工程で発生する未利用バイオマス資源を有効活用するプロセスを確立し、環境適合性と経済性を両立させる技術の社会実装・普及を目指す。

2. 共同開発に至った背景

YOKOGAWAは計測・制御・情報の技術を軸に、最先端の製品やソリューションを産業界に提供してきた。YOKOGAWAの主力事業である制御事業に

^{*)} KATO Makiko：ファイトケミカルプロダクツ（株）代表取締役

〒980-0845

宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-40

TEL：022-226-8818

FAX：022-226-8818

E-mail：kato.makiko@phytochem-products.co.jp

^{*2)} NAKABAYASHI Akio：横河電機（株）マーケティング本部イノベーションセンター 課長 博士（統計科学）

〒180-8750

東京都武蔵野市中町2-9-32

TEL：0422-52-4472

FAX：0422-52-5928

E-mail：Akio.Nakabayashi@yokogawa.com

^{*3)} TAKAHASHI Itsuko：横河ソリューションサービス（株）ビジネスマーケティング本部

〒180-8750

東京都武蔵野市中町2-9-32

TEL：0422-52-5705

FAX：0422-52-6440

E-mail：Itsuko.Takahashi@yokogawa.com

においては、石油、ガス、化学、電力、鉄鋼、紙パルプ、医薬品、食品などさまざまな業種にわたって製品やソリューションを提供しており、日本国内だけでなく海外においても YOKOGAWA 製品の確かな技術と品質が認められている。2017 年には、未来世代のより豊かな人間社会のために、2050 年に向けて、Net-zero emissions, Well-being, Circular economy の実現を目指すサステナビリティ貢献宣言を発表した（図 1）。長年、産業界の生産プロセスで培ってきた、プロセスの状況を測る計測技術、さまざまな情報を共有し制御する技術を通して、生産性向上、環境負荷の低減、エネルギー効率利用を実現する製品・ソリューションを提供し社会課題の解決に貢献していく方針で、サステナビリティ目標の実現に向け、変化に柔軟に対応できる適応力・回復力を強化し循環型社会に適した価値を創造していくことを宣言している。

ファイトケミカルプロダクツは、東北大学工学部北川研究室発のスタートアップ企業である。基盤技術であるイオン交換樹脂法を用いてさまざまなバイオマス資源からバイオ燃料、日用品、食品、化粧品、医薬品の原料を生み出し、原料に応じたマルチ生産システムの普及を目指している。こめ油やパーム油、菜種油、大豆油など植物油の製造過程で発生する副産物には、抗酸化作用に優れたビタミン E などの有用な成分や、カーボンニュートラルに資するバイオ燃料の原料が含まれているが、それらを分離・回

収するには、通常、高温・高真空環境にする専用装置を使い、手間をかけて処理する必要があるため、その多くが廃棄され、利用が進んでいない。ファイトケミカルプロダクツが保有するイオン交換樹脂法は、既存の技術と比較して高温・高真空環境を必要としない省エネルギーな手法であり、上記副産物から有用成分を効率良く抽出できる。

本共同開発では、ファイトケミカルプロダクツのイオン樹脂交換法の技術の商用化に向けて、YOKOGAWA の計測・制御・情報技術を適用しながら、商用スケールの生産プロセスの早期確立とさらなる省エネルギーの実現を目指す。本稿では、カーボンニュートラル型のサーキュラーエコノミーを実現するプロセス確立に向けた取り組みを紹介する。

3. プロセス技術の紹介（ファイトケミカルプロダクツ）

3-1. イオン交換樹脂法を用いた、未利用油からの機能性成分抽出技術開発の背景

既存産業で大量に発生するものの、有効利用されていない多くの未利用バイオマス資源がある。SDGs やカーボンニュートラルの観点から、この未利用資源の有効活用技術が注目されているが、その技術には経済性と環境適合性の両立が求められる。例えば植物油の製造では、植物原料の搾油で得られた粗油を精製する数々の工程（脱ガム、脱ロウ、脱酸、脱色、脱臭）において、ガム質、ソープストック、脱臭スカムといった副産物が大量に発生する。これらの副産物には多くの機能性成分が含まれており、それらを有効利用するための技術開発が古くから行われてきた。しかしながら、上記のような経済性と環境適合性の両方を満たす技術はほとんどなく、多くの未利用資源が廃棄、焼却されているのが現状である。なお、植物油の製造工程で発生する副産物は国内で年間 33 万トン、国外では 3,800 万トン¹⁾にもおよび、これらを有効利用できる技術の開発が急務である。

ファイトケミカルプロダクツでは、基盤技術であるイオン交換樹脂法を用い、未利用バイオマス資源から日用品、食品、化粧品、医薬品の原料、さらにはバイオ燃料といった

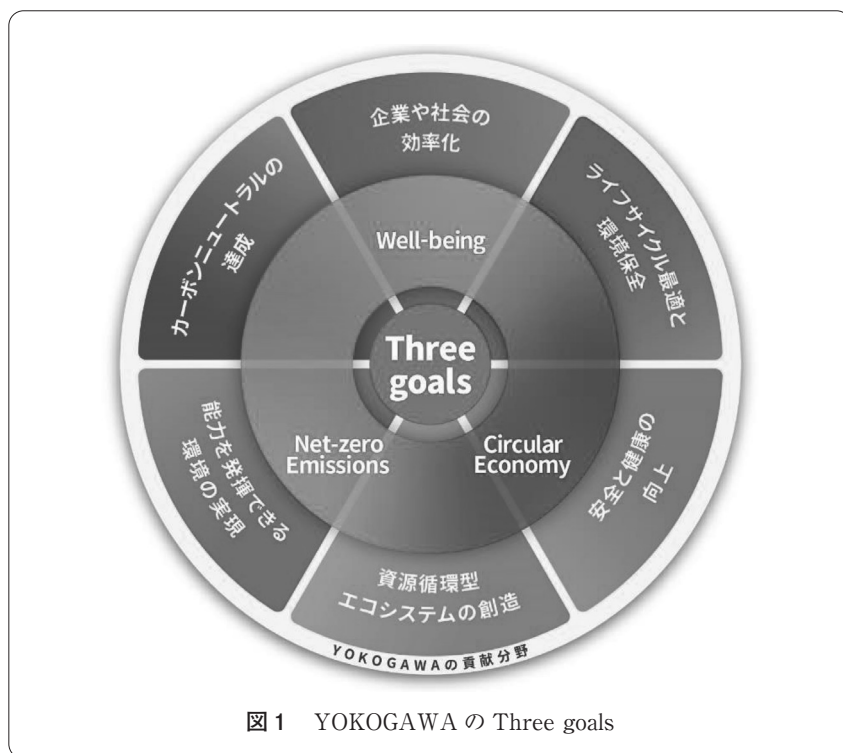


図 1 YOKOGAWA の Three goals



図2 未利用バイオマス資源を活用したマルチ生産システムの普及

多種多様な産業分野の製品を生み出すマルチ生産システムの普及を目指している (図2)。

ファイトケミカルプロダクツは日本の基幹作物である米のぬか(糠)から、食用こめ油を製造する工程で副生する未利用油に着目した。この油にはトコフェロール(ビタミンE)ならびにトコトリエノール(スーパービタミンE)の他、パラフィン、植物ステロール、スクワレンといった機能性成分が含まれている。現在、これらはそれぞれ大豆、パーム、石油、鮫といった別々の原料から異なるプロセスで生産され、高い価値を持って流通している。特に、スーパービタミンEはパーム油やこめ油にしか含まれていない稀少な成分である。ファイトケミカルプロダクツではこれらの成分全てを米ぬか由来の未利用油から抽出することにより、未利用バイオマスに価値を付与し、廃棄物を削減して持続可能な社会への貢献を目指す。

3-2. 省エネルギーかつ石油原料の代替を実現するプロセス技術

東北大学で開発された「イオン交換樹脂法」では、通常水溶液系で用いられているイオン交換樹脂を、油系におけるエステル合成反応の触媒ならびに機能性成分の吸着剤として利用する。食用油の製造工程で多量に副生する未利用油を原料とし、イオン交換樹脂の入ったカラムを通過させるだけの簡便な操作で、油中のビタミンE類を分離回収すると同時に油分をバイオ燃料に変換できる、画期的な

技術である。

ファイトケミカルプロダクツにおける、イオン交換樹脂法を用いた未利用油からのビタミンE類の回収プロセスの概略図を図3に示す。未利用油の主成分は油脂およびその分解生成物である遊離脂肪酸であり、その中に微量のビタミンE類が溶解している。未利用油をエタノールと混合し、陽イオン交換樹脂を通すと、イオン交換樹脂が触媒として働き、脂肪酸が脂肪酸エステルに変換される。この反応は50℃、大気圧下の温和な条件で進行し、エステル変換効率は95%である。また、油中に含まれる不純物も樹脂によって吸着除去される。陽イオン交換樹脂を通過した油は、次に陰イオン交換樹脂を

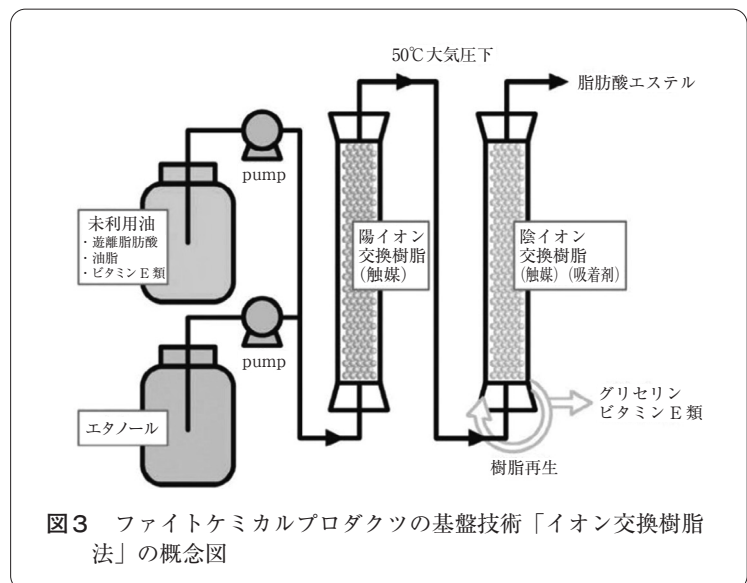
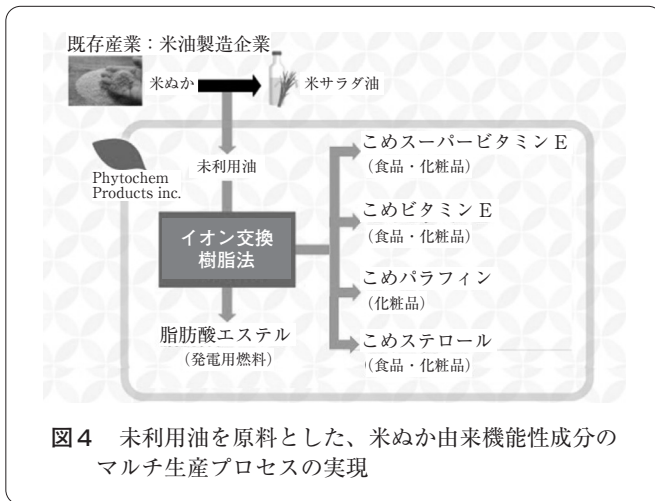


図3 ファイトケミカルプロダクツの基盤技術「イオン交換樹脂法」の概念図



通り、ここでビタミンE類が陰イオン交換樹脂に選択的に吸着すると同時に、油脂がエステル化される。樹脂に吸着したビタミンE類は、樹脂を再活性化させる際に高純度かつ高収率で回収することができる。

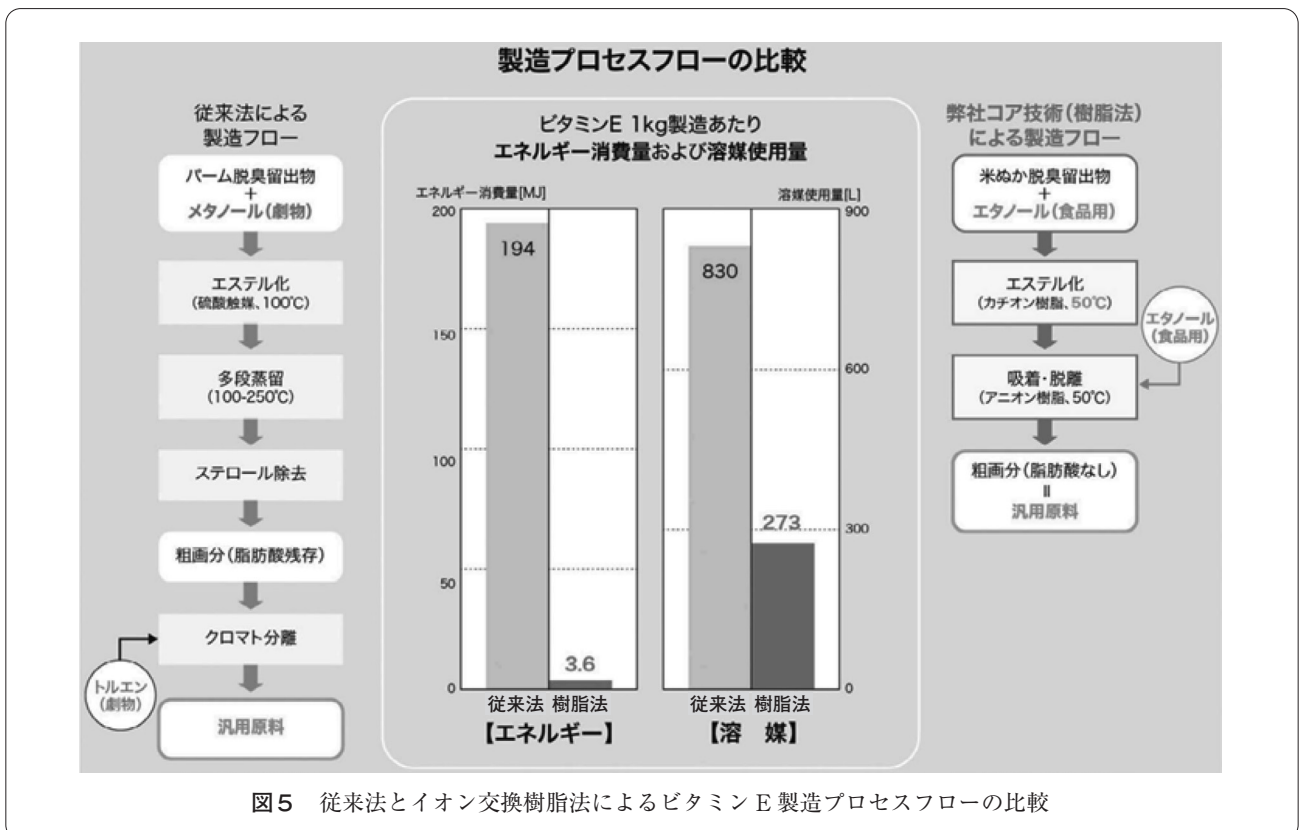
ファイトケミカルプロダクツでは、この技術を実証するためのベンチプラントを2020年7月から稼働させている。米ぬか由来の未利用油を原料として、これまでにスーパービタミンE、ビタミンE、パラフィン、植物ステロール、バイオ燃料の回収と製品化を達成した(図4)。

スーパービタミンEと呼ばれるトコトリエノール

ルは、通常のビタミンEであるトコフェロールの50倍の抗酸化活性を示す。さらに、肌状態の改善、動脈硬化の予防、神経保護作用、脳卒中の予防と改善、毛髪量の増加など、ビタミンEにはない多くの美容・健康に関する効果が報告されている。ファイトケミカルプロダクツでは、米ぬか由来のスーパービタミンEならびにビタミンEを、食品や化粧品の原料、研究用試薬として提供している。また、スーパービタミンEを日常の食事で摂取することは困難であることから、一般向けのサプリメントも製造販売している。

米ぬか由来のパラフィンを製造したのはファイトケミカルプロダクツが世界でも初めてであり、従来の石油由来品に代わる利用が期待されている。この植物由来のパラフィンは、特に化粧品会社から強く関心を持たれている。植物ステロールは古くからLDLコレステロールを下げる効果を持つことが知られており、トクホやサプリメントの成分として利用されている。また、乳化安定化やエモリエント効果を持つコレステロールの代替品として、化粧品に配合することもできる。

上記の機能性成分を回収した後の残りの油分(脂肪酸エステル)は、発電のためのバイオ燃料として宮城県内の企業に提供している。このように、ファイトケミカルプロダクツのプロセスでは未利用油を



余すところなく活用することができる。

3-3. 本技術の優位性、提供価値

本技術の特長は、未利用油から高価値な機能性成分を高効率に回収すると同時に、残った油も全てバイオ燃料に変換することで、これまで廃棄されてきたバイオマス資源の完全利用を達成できる点にある。未利用油からビタミンEを回収する際に要するエネルギーと溶媒の量を、従来法と本技術（イオン交換樹脂法）とで比較したものを、図5に示す。

従来法では、原料の油に劇物であるメタノールを加え、硫酸触媒を用いて100℃でエステル化反応を行う。これは、次の分子蒸留で脂肪酸とビタミンEを分離しやすくするための前処理である。その後、高真空下で200℃以上の熱をかけて多段の分子蒸留を行い、植物ステロール等を分離・除去してビタミンEの粗画分^{*1)}を得る。この粗画分にはまだ脂肪酸が残っているため、さらにトルエンを用いたクロマト分離を行い、最終的なビタミンEを得る。

これに対し、本技術では原料油を食品用のエタノールと混合して、大気圧下で50℃に保たれたイオン交換樹脂カラムに通過させるだけでビタミンEを脂肪酸や他の不純物から分離することができるため、エネルギー消費量を95%、溶媒使用量を65%削減することが可能になる。また、ビタミンEの熱分解も抑制されるため、従来法を用いた場合に比べ収率が2倍以上、生産性も20倍以上増加する。さらに、従来法で用いられてきたようなメタノール、トルエンのような劇物は使用しないため、安全性も高い。

本技術の利点を以下にまとめる。

- (1) 原料が未利用油であるため、食と競合しない。
(現在市場に流通しているスーパービタミンEは、食用のパームを原料としている)
- (2) エネルギー消費量と溶媒消費量を大幅に削減しつつ、収率の向上を達成
- (3) 劇物や毒性のある溶媒を使用しない
- (4) 機能性成分を回収した後の廃棄物がほとんど出ない

これにより、スーパービタミンEのような稀少成分を従来の価格より安価に提供することが可能となった。本技術は、こめ油に限らずあらゆる植物油の製造工程で副生する未利用油（脂肪酸油やスカム油）に対して適用可能な技術であり、パーム、菜種、大豆、ヒマワリなど多くの植物で研究実績がある。

また、調理などで使用され、廃棄された食用油（廃食油）についても、本技術を用いてバイオ燃料に変換することができる。原料油の成分組成や本技術の導入目的に応じて、イオン交換樹脂の種類や量を調整した自在な設備設計が可能であるため、本技術のエンジニアリング・ライセンス事業も開始している。

^{*1)} 混合物を構成する成分に分けた、それぞれの成分のこと。

4. 商用化における課題

今回の共同開発において、両社は、ファイトケミカルプロダクツが所有するベンチプラントで実証実験を行いながら、商用プラントの建設、事業化を目指す。

事業化の実現のためには、バイオマス資源を余すことなくアップサイクルし収率を向上させること、生成物の品質を安定させること、エネルギー利用を最小限に抑えながら、商用ベースにスケールアップしていくことが必須である。ファイトケミカルプロダクツのイオン交換樹脂法の技術は、従来法と比較しエネルギー消費量と溶媒使用量の大幅削減を実現するものであるが、商業用にスケールアップする過程においてはさまざまな課題に直面する。これはファイトケミカルプロダクツのプロセスに限らず、化学プロセス共通の普遍的な課題ともいえる。

4-1. 商用化における普遍的な課題

商用化における普遍的な課題として、以下のよう
にことが挙げられる。

- (1) ラボやベンチスケールにおける人の経験や勘コツによる判断が残ってしまう。
- (2) プロセスの状態をリアルタイムに把握できず安定して処理量を増やすことができない。
- (3) 季節変動や原産地による原料のばらつき、設備の状態、オペレーターのスキルレベルにより、プロセスの制御方法が変動する。
- (4) 人手不足や人件費の高騰によりオペレーションコストの削減が求められる。
- (5) 稼働状況や生産量に合わせたエネルギー使用量がわからない。

商用化においてこれらの課題を解決しつつ、生成物の品質を担保しなければならない。まずベンチプラントで生じている現象を正しく理解、コントロールし、それを商用プラントにおいても再現性をもって実装することが必須となる。ベンチスケールにおいてはプロセス技術に精通した研究者や技術者がオ

ペレーションに立ち合い、原料のばらつきやプロセスの状態を経験から把握し、制御方法を判断することがあるが、当然のことながら商用プラントではこのようなオペレーションは現実的ではなく、ラボやベンチプラントでの経験や知見を運転方法や制御方法に落とし込んでいく必要がある。

生成物の状態とエネルギーコストを考慮し、最適なタイミングで運転を変えたり、終点を判断したりする制御方法も求められる。生成物の品質、収率、人件費やエネルギーコストのトレードオフを考慮しながら、自動化・最適化を前提としたオペレーションコストの低い運転方式・制御方式の開発が必須で、パイロットフェーズにおいてプロセスを確立させることが、早期の商用プラント建設を実現する。

4-2. カーボンニュートラル型サーキュラーエコノミー実現に向けた挑戦

ファイトケミカルプロダクツのプロセス技術では、植物油の製造工程で発生する副生物を活用する。バイオマス資源は原料の季節変動や原産地によるばらつきが特に大きい。先にも述べた通り、既に商用化されている抽出技術では、分離・回収するには高温・高真空環境にする専用装置を使い、手間をかけて処理する必要があるため、有用な成分が含まれる資源にもかかわらず、その多くが廃棄されている。これらの副生物を廃棄せずに活用させるには、従来技術以上のプロセスの効率向上、オペレーションコストの低減が求められる。コスト経済面はもとより、



写真1 YOKOGAWA 製 フーリエ変換近赤外分光分析計 NR800

環境面においても十分に最適化されたプロセスを構築し、展開していくことで、カーボンニュートラル型のサーキュラーエコノミー実現に貢献していく。

上記のような課題を解決しつつ、プロセスの自動化・最適化の確立のための技術検証を行っていく。ファイトケミカルプロダクツでは、自社プラントの分離・回収工程の生産性向上を検討。YOKOGAWA はファイトケミカルプロダクツがもつ、分離・回収工程における計測データに関する知見を参考にしながら、生成物のリアルタイムの成分分析・推定、計測手段の検討を行い、モデリング技術も応用し、未利用油の分離・回収工程の自動化とプロセスの最適化を目指す。

5. YOKOGAWA の自動化・最適化に資する技術

前述のとおり、未利用資源は基本的に価値密度が低いからこそ加工されず廃棄されることが多く、その二次加工においては今まで以上にプロセスの効率が求められることは明らかである。そのような状況において、多くのヒューマンリソースを割くことはコスト面からも難しく、可能な限り自律的なプラントとして商業展開していくことが望ましい。また、循環型社会の実現を見据え、プロセスそのものも高度に効率化され、かつ環境面においてのコストも十二分に最適化されている必要がある。

これらは、もちろん製造業全般における普遍的な課題でもあり、YOKOGAWA は特に、計測・制御・情報という観点からその解決に貢献してきた。本稿では、プロセスの状況を測る計測技術、さまざまな情報を共有し制御する技術、自律化・最適化といった観点に大きく寄与する技術の3つの技術、「近赤外分光分析計によるリアルタイム成分計測」、「物理シミュレーションによるデジタルツイン」、そして、「デジタルツインを用いたプラントの自律制御」について紹介する。

5-1. 近赤外分光分析計によるリアルタイム成分計測

化学プロセスの開発、製造の現場において組成分析値を得るために、サンプリングされた試料をガスクロマトグラフや高速液体クロマトグラフによって、ラボ分析することは一般的である。このアプローチは、組成分析値を高精度で定量できるが、その反面、サンプル採取に要する手間に加え、分析時間が数分から1時間程度かかるため、各種装置における

組成変化のダイナミクスを知ることは難しい。一方で、プロセス設計やオペレーションの最適化に向け、生産プロセスやオペレーションの最適化を求める現場からは、リアルタイムな成分分析計測を求める声は大きい。

YOKOGAWA ではそのようなニーズに応え、1995年に国産としては初となったフーリエ変換近赤外分光分析計 NR500 を上市、その後、2001年に長波長領域の測定を実現した NR800 を後継機として上市した（写真1）。NR800は近赤外領域（概ね900nm-2500nm）の吸収スペクトルを計測するハードウェアを備え、ケモメトリクス（多変量解析）により作成した検量モデルをインストールすることで、インラインもしくはオンラインの形で目的化合物の定量を行うことができる。近赤外領域はC-H結合、N-H結合、O-H結合などに吸収を持つため、多くの有機物がその分析のスコープに含まれる。また、防塵・防滴・防爆仕様などにも対応していることから、現在、石油・石油化学業種をはじめ、半導体/液晶パネル・鉄鋼・医薬品、そして食品加工と製造業に広く利用いただいている。

プロセス開発やオペレーション現場において、製品や中間体の性状のリアルタイム分析が可能となる意義は大きい。例えば、リアルタイムな成分変化点を見出すことで、収率や経済・環境コスト効率を最大化する運転レシピの設計への応用が可能となる。また、熟練の技術を要する温度・流量・圧力などの代替変数からの性状変化の見極めを装置化することは、プラントオペレーションの高度な自律化を可能にするにもつながる。

5-2. 物理シミュレーションによるデジタルツイン

前述のリアルタイム分析計をはじめ、近年、IoT技術の進展によりプラントでは非常に多く計測器が利用されている。多数の計測器からシステムに上がる測定値群はビッグデータ化され、サイバーフィジカルシステム（CPS: Cyber Physical System）としてそのスマート化が進展している。そのサイバー空間側の、現実のシステムがデジタル化されたものをデジタルツインと呼び、広義には多数の計測情報を通し

て現実の状態をリアルに把握することを指す。そして、より狭義には多数の計測情報を通してモデル化され、デジタル空間上においてあたかもさまざまな試行が可能なソフトウェア、すなわちシミュレータを指す。プラントへの計測・制御・情報システムの提供を主な事業としてきたYOKOGAWAでは、一連の言葉が世を賑わす以前から、このようなシミュレータの提供が生産のコアになると確信し、その研究開発の取り組みを継続してきた。

その代表的な事例が「ミラープラント」である。ミラープラントは、物理モデルと多数のセンサデータ・分析計のデータとを、データ同化技術²⁾を通して現実と整合化し、一般的には実運用では利用することが難しいとされていたプラントシミュレータによる現実に即したシミュレーションを可能にする技術である。ここで、物理モデルとは化学工学的な原則、すなわち物質収支やエネルギー収支に、計測系・制御系・装置系の機構モデルを組み入れた微分方程式系を指す。その実際の計算エンジンとしては、横河電機と三井化学の合弁会社であるオメガシミュレーション社によって開発された汎用のプラントダイナミックシミュレータ「Visual Modeler」を利用している。

デジタル空間内においてさまざまな試行や検証が

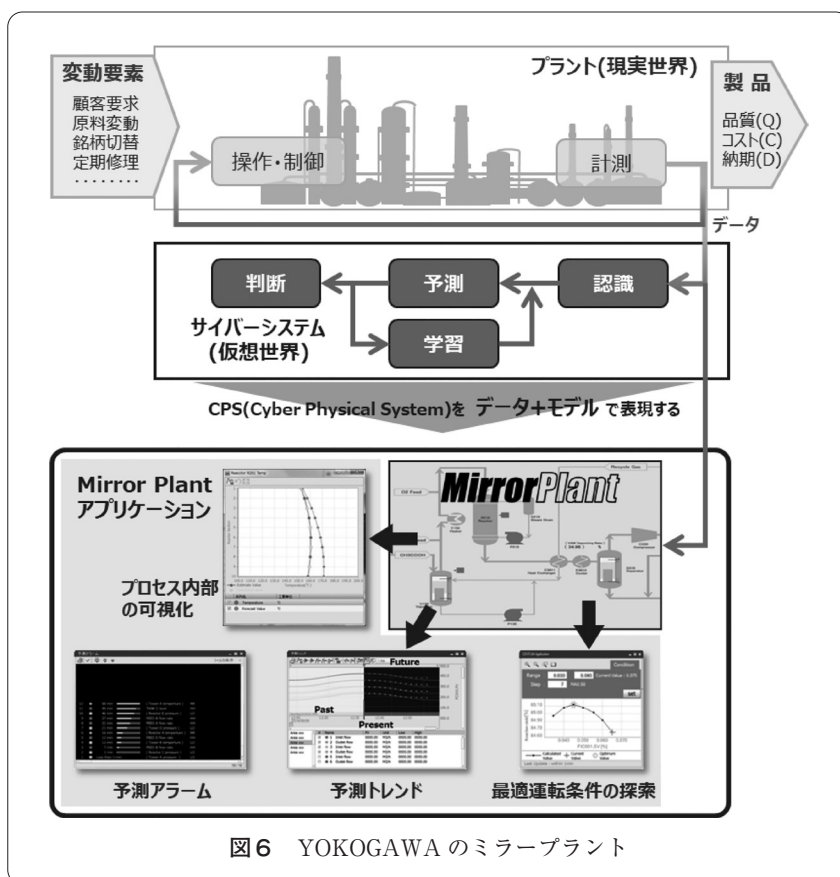


図6 YOKOGAWA のミラープラント

可能な物理シミュレーションに基づくデジタルツインが存在することの意義は、甚だ大きい（図6）。反応器や蒸留塔、吸着装置の内部分布の可視化や、プラント全体の挙動の近未来予測、そして通常の条件とは異なる What-if 分析（もしこのように動かしたらどうなるのか？）によるケーススタディなど、デジタルツインはプラントの挙動を理解し、より高度なオペレーションに向けた最適化や自律的な運用方法を確立していくための重要なツールとなるのである。

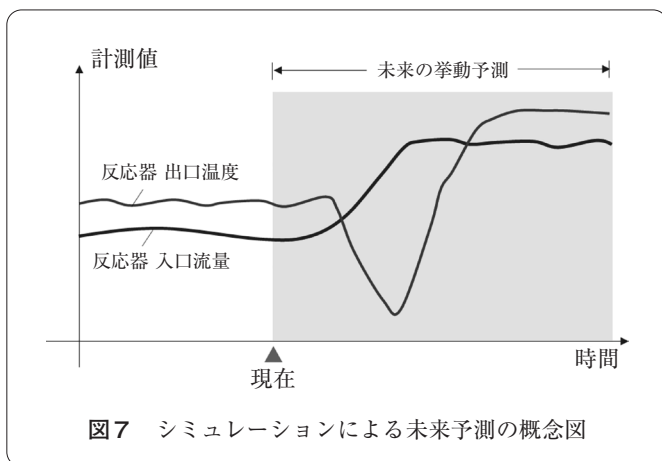
5-3. デジタルツインを用いたプラントの自律制御

最後に、デジタルツインから実際のプラント制御へのアプローチについて述べる。デジタルツインそのものは、現実の鏡像に過ぎず、その鏡像をプロセス開発や生産現場におけるアクション・意思決定につなげて初めて付加価値が生じるものである。その一つの例として、Economic Model Predictive Control³⁾（EMPC, 経済性を考慮したモデル予測制御）について紹介する。

プラントに関して物理シミュレーションモデルを獲得するという事は、例えば、次のような状態空間に表現された時間発展モデルを得るということである。

$$\begin{aligned} \frac{dx_t}{dt} &= f(x_t, u_t), \\ g(x_t, u_t) &= 0, \\ y_t &= h(x_t, u_t) \end{aligned}$$

ここで、 x_t は時刻 t におけるプラントの内部状態、 u_t はプラントに入力される操作量、 f, g はそれぞれ入力に基づく時間発展と、質量保存・エネルギー保存則等に基づく各内部状態変数間の制約を規定するシミュレーションのための物理モデル式、そして h



はプラント内部状態に対する観測系を規定するモデル式であり、その結果として得られる y_t が測定値ということになる。なお、 u_t については一般化されたプラントに対する操作端であり、バルブ開度などプラントに対する直接的な操作量とする場合もあるが、制御システムをモデル側に内包し、制御コントローラへの設定値とする場合もある。このモデル式に対して、プラントの初期状態 x_0 と操作量系列 $\{u_1, \dots, u_T\}$ が与えられる限りにおいて、プラントの挙動およびその計測値の予測は可能となる（図7）。

この基本的なシミュレーション式の上に、EMPC は、たとえば以下のように、最適化問題として定式化される。

$$\begin{aligned} \min_{u_{T_1}, \dots, u_{T_2}} & \frac{\beta_1}{\sigma_1} \cdot EF_1(x_{T_1}, \dots, x_{T_2}, u_{T_1}, \dots, u_{T_2}, y_{T_1}, \dots, y_{T_2}) \\ & + \dots + \frac{\beta_k}{\sigma_k} \cdot EF_k(x_{T_1}, \dots, x_{T_2}, u_{T_1}, \dots, u_{T_2}, y_{T_1}, \dots, y_{T_2}) \\ & + \dots + \frac{\beta_K}{\sigma_K} \cdot EF_K(x_{T_1}, \dots, x_{T_2}, u_{T_1}, \dots, u_{T_2}, y_{T_1}, \dots, y_{T_2}) \end{aligned}$$

Subject to

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^K \beta_k &= 1, \\ x_L \leq x_t \leq x_H, u_L \leq u_t \leq u_H, y_L \leq y_t \leq y_H \end{aligned}$$

ここで、 EF_k とは Economic function（経済性関数）、すなわちプラントの挙動に関するコストを記述するものであり、通常は複数の指標が存在する。例えば、目的品質に対する充足度、投入エネルギー量、排出 CO_2 量などである。 σ_k はそれぞれの指標の規格化のためのスケールであり、 β_k は複数の対立しうる指標に対しての重み係数（利用者の指標に対する選好）となる。これらの指標を、各変数の上下限制約のもとである離散化された時区間 $[T_1, T_2]$ の中で最小化するような操作量系列 $\{u_{T_1}, \dots, u_{T_2}\}$ を得るようにシミュレーションに対する逆問題解析として最適化を行うのが、EMPC である。

プラント制御の現場においては、フィードバック制御理論に基づく PID 制御が一般的に利用されている。PID 制御は、陽にシミュレーションモデルを仮定しないという点で、現場で非常に利用しやすい制御アルゴリズムである。しかし、基本的には被制御量と制御量の 1 対 1 のループを扱い、かつ現時点での制御偏差（設定値と現在値の乖離）にしかフォーカスしない局所的なアルゴリズムである。結果とし

て、時間方向にわたっての制御の最適性や、ある工程単位での工程全体としての最適性を保証するためには、システム全体の挙動や応答を熟知した熟練者の知見が必要であった。熟練者の知見は、製造業の成長を支えた大きな原動力ではあるものの、その喪失は現在深刻な問題となりつつある。EMPCは、デジタルツインというプラントの計算可能な疑似環境において、熟練者の知見をコンピューティングによる試行によって代替しようという試みでもある。ただし、EMPCの難点としては、計算量の問題もある。シミュレーションの規模が比較的小さい場合は、現状の計算リソースでも最適化手法の1つである非線形計画法により、逆問題を解ききれるケースはある。しかし、大規模スケールのプラントシミュレーションモデルは、内部状態の変数の数で言えば、数千から数万に及ぶことも珍しくなく、非線形計画法による解法は困難となる。

大規模プラントにも利用可能な技術として、YOKOGAWAはデジタルツイン上で強化学習を行ったAIを制御に供する方法を開発、提案もしている。強化学習は、AIが自律的にシミュレーションによる学習を行い、行動方法を獲得していくための方法論の1つであり、一般に有名な所では、ゲームAIや自動運転などにも応用されている。2022年3月の横河電機のプレスリリースでは、現場への適用に即した強化学習技術の1つであるFKDPP (Factorial Kernel Dynamic Policy Programming)を採用した制御AIによる35日間の化学プラントの自律制御を実現したことを報告した⁴⁾。さらには、翌2023年3月においては、多様な季節環境や、設備の定期修繕を経てのほぼ年単位での同制御AIによる安定制御も可能であったことの報告も行っている⁵⁾。AI技術は、今後、デジタルツインと現場の橋渡しをするものとして一層の注目を集めていくものと考えられ、YOKOGAWAでもその導入・活用には注力していくものである。

6. 共同開発の成果としての提供価値

ここまで、ファイトケミカルプロダクツのプロセス技術と、YOKOGAWAの「近赤外分光分析計によるリアルタイム成分計測」、 「物理シミュレーションによるデジタルツイン」、そして、「デジタルツインを用いたプラントの自律制御」を紹介した。両社の技術を融合し、ファイトケミカルプロダクツのベンチプラントにおいて、リアルタイム計測の構築、プロセスシミュレーションからの自動制御を構築・

検証していくわけだが、その成果は、ファイトケミカルプロダクツの自社製造事業への適用に留まらない。将来構想として、ファイトケミカルプロダクツのマルチ生産システム技術にYOKOGAWAの自動化・最適化モデルを付加して、両社でライセンス・エンジニアリング事業を展開していく方針だ。原料組成や目的物に合わせた設備設計に加え、その設備設計に応じた計測・制御技術をユーザーに提案していきたい。

このライセンスを植物油の製造工程で排出される副生物の活用もしくは廃棄に課題感を持つ油脂メーカーや食品メーカーに導入いただければ、従来、廃棄費用をかけ処理していた副生物を低コストで資源化できるメリットがある。ファイトケミカルプロダクツとYOKOGAWAは、ESG投資の観点から廃棄物の削減や利用に取り組まれているユーザーに対して、省エネルギーで収率が高いプロセス技術に加えて、最適化されたプラント制御のパッケージを提供し、プラントの早期立ち上げと、原料のばらつきなどの変動に耐えうる継続的なオペレーション改善により、環境負荷、オペレーションコストの低いプロセスを訴求し、カーボンニュートラル型のサーキュラーエコノミーの実現に貢献していく。

7. おわりに

2023年7月に両社の共同開発が開始したばかりである。協業の契機は、2022年12月開催のスタートアップ企業と大企業のマッチングイベントであったが、カーボンニュートラル・サーキュラーエコノミー分野において新規事業を探索していたYOKOGAWAと、植物油の製造工程で発生する未利用油から高機能素材を抽出する技術の社会実装を目指すファイトケミカルプロダクツの方向性が一致し、初回の商談から半年余りで共同開発契約を締結した。今後はベンチプラントでの技術検討・実証を経て、2026年度には商用プラント向けにイオン交換樹脂法のプロセスライセンスおよび計測技術、モデリング技術をお客様に提供していく計画である。

ファイトケミカルプロダクツとYOKOGAWAは、バイオマス資源の無駄をなくし、地球の限界点(プラネタリーバウンダリー)の範囲内で暮らせる循環型社会の実現を目指し、協業を加速させていく所存である。

〈参考文献〉

- 1) 植物油の生産 <https://www.oil.or.jp/kiso/seisan/>

- seisan02_01.html から、ファイトケミカルプロダクツにて推測
- 2) 尾又俊彰ほか, “化学プロセスへのミラープラント適用事例”, 横河技報, Vol.62, No.2, 2019
 - 3) 竹中梓ほか, “プラント運転自動化を目指すモデル予測

- 制御 EMPC”, 横河技報, Vol.61, No.2, 2018
- 4) <https://www.yokogawa.co.jp/news/press-releases/2022/2022-03-22-ja/>
 - 5) <https://www.yokogawa.co.jp/news/press-releases/2023/2023-03-30-ja/>