

バイオマスを原料とする化成品製造のための サプライチェーン最適化技術

外輪 健一郎

1. はじめに

日本各地で限界集落や耕作放棄地の問題が顕在化して久しい。これは、少子化に加え、地方から大都市圏への人口流出が原因であると言える。地方では店舗の閉鎖や地域コミュニティの破壊といった課題が生まれ、一方で人口が集中する都市部では都市型災害や感染症拡大のリスクが大きくなっている。

人口を地方にも分散させるためには、地方に活発な産業を増やすことが重要である。産業によって地域を中心とするモノやサービスの流れを生み出せば、それに係る仕事が生まれ、地方での生活を望む人が増えると期待できる。

地方でのモノづくりを考える時、バイオマスはその有力な原料である。現在の化学産業の主要な原料である化石資源は二酸化炭素の放出に繋がるとして使用量の削減が叫ばれている。化石資源はやがて枯渇していく資源であり、いつまでも活用できるわけではない。一方で、バイオマスは再生可能な資源であるため、使用量をバイオマスの成長速度以下に抑えれば、枯渇する恐れがない。また、バイオマスは成長の過程で空気中の二酸化炭素を固定するため、上手く活用すればカーボンネガティブな産業を構築できる可能性もある。

バイオマスを原料として付加価値の高い化学物質を得るための反応技術の研究が、世界で活発に進められている。それらの反応技術を組み合わせれば、バイオマスから多様な化学物質を製造できる反応ネットワークを構築できる。しかし、化石資源を原料とする産業と同様に集中生産型の

大型生産設備を構築するわけにはいかない。地域のバイオマスを利用する生産システムは、地域の特性に合わせた小規模且つ地域分散型システムになるであろう。そのような生産システムは通常の化学プロセスとは異なり、原料となるバイオマスの収集や輸送計画も併せて最適に設計されなければならない。

本稿では、まずバイオマスを起点に複数の変換工程を経て化成品を生産するサプライチェーンの最適化におけるモデルの特徴について述べる。そして、そのようなサプライチェーンの設計に活用できる最適化システムを紹介する。

2. バイオマスを原料とする物質生産システム設計問題

前述した通り、地域のバイオマスを原料とする物質生産体制は、化石資源を利用した産業とは異なる特徴がいくつかある。石油は1つの井戸から大量に採取できる流体である。一方、バイオマスは広く薄く存在する固体であるため収穫や、収集、輸送に比較的大きなコストが生じる。このため、バイオマスを利用する際には、その集積場所、変換工場の建設場所、輸送計画を最適化する必要がある。

バイオマスの種類によっては収穫できる時期が限定されている。生産システム設計の際には、年間を通した運転計画を考慮する必要がある。

バイオマスから化成品を得るための反応技術は多く開発されている。このため、ある目的の物質を合成するルートが複数存在する場合があります。生産システム設計の際に最適なルートを選択する必要がある。

このように、バイオマス由来の化成品を生産するプロセスを設計する場合には、反応ルート、輸送ルート、工場建設場所、生産計画を同時に最適化する必要がある。このような問題の最適化にはスーパーストラクチャの考え方が活用できる¹⁾。スーパーストラクチャとは、ルートや配置を決定する問題において、可能性のある工場建設場所、輸送ルート、反応ルートの全てを含むネットワークを指す。スーパーストラクチャ内の全ての輸送量や処理量を変数として



Supply Chain Optimization Technology for the Production of Chemical Products from Biomass
Ken-ichiro SOTOWA (正会員)
1997年 英国Leeds大学化学工学科博士課程修了(Ph.D.)
現在 京都大学大学院工学研究科化学工学専攻 教授
連絡先: 〒615-8510 京都府京都市西京区京都大学桂
E-mail sotowa@cheme.kyoto-u.ac.jp

2023年6月2日受理

最適化計算をおこない、変数の値が0となった箇所を排除すると最適な輸送および反応ネットワーク、それに運用計画を得ることができる。

最適化における指標としてはいくつか考えられるが、経済性を求める場合には費用と収入の差となる。指標を輸送量や処理量の線形関数で表現すると、物質収支が線形の式であることから、最適化問題全体を線形計画問題として定式化できる。区分的線形関数などによって非線形性を考慮すると混合整数計画問題となる。これらの最適化問題は市販の強力なソルバーを使って解を求めることができる。

バイオマスを起点とするサプライチェーンでは、反応経路が多数存在するだけでなく物質の種類が多い。更にスーパーストラクチャによって考慮すべきルートが増え、バイオマス収穫量の季節変動までもを考慮すると最適設計問題に含まれる変数や式の数が千や万のオーダーになることも珍しくない。幸いなことに現代のソルバーではそのような大規模な問題であっても解を容易に求められる。しかし、ソルバーへの入力ファイルの作成は容易ではない。バイオマスに関するサプライチェーン最適化の研究では、問題に応じて入力ファイルを作成するのが主流である。繰り返し記号を使えたりするので多くの数式を1つずつ記述するわけではないが、それでも問題ファイルの構築に多くの労力を必要とする。

数十年に亘って運用するサプライチェーンの設計において、最適条件を導出するのみでは危険である。原料や製品の価格などの変動要因を取り上げ、複数のシナリオに基づくケーススタディを実施し、安全に操業できる条件を見出しておく必要がある。ケーススタディの中には、新しい反応技術が開発された場合を想定して新しい反応ルートを付与したり、工業団地新設の効果を検討するために輸送経路を増やして計算をおこなったりする場合が想定される。また、採算が取れない場合に地域を広げて設計をやり直す場合もある。

価格の変更は、パラメータの修正で対応が可能であるが、ルートの変更や工場建設候補地の追加、対象地域の拡張といった場合には問題を表す数式を大幅に書き換える必要がある。1つの問題を記述するだけでも多くの労力を要するため、多様なケーススタディを実施するのは容易ではない。このため設計を支援する最適化システムの開発が望まれている。

3. 最適化システム開発

筆者は、バイオマス由来の化成品を製造するシステムにおけるサプライチェーンの最適化システムを開発した^{2,3)}。サプライチェーンには、バイオマスの成長、収穫、集積、

表1 サプライチェーンの構成要素の分類

要素名	説明	表現できる要素
貯蔵要素	流入と流出の差によって物質を蓄積	物質の貯蔵
変換要素	物質や用役を別の物質や用役へ変換	乾燥、チップ化、反応、分離、包装
輸送要素	通過する物質の量から費用を計算	収穫、輸送、製品出荷、廃棄物処理
用役要素	変換に対して、用役を供給または回収	用役の融通、再利用、余剰の売却

輸送、乾燥、貯蔵、裁断(チップ化)、各種反応、電力購入、熱のカスケード利用、廃棄物処理、出荷をはじめとする多様な要素が含まれる。多様な事例に対応できるシステムを開発するにはこれら全てのモデルを備えておく必要がある。

最適化システムの開発に当たって、モデルの特徴について考察したところ、表1に示すように全ての要素を貯蔵、変換、輸送、用役の4種類の基本的な要素のいずれかで表現できることに注目した。

貯蔵要素は、基本的には1種類の物質の貯蔵庫を表現する。このモデルは、要素への流入量と流出量の差によって物質が蓄積するという積分型の数式となる。これは単に物質の蓄積だけでなく、植え付けや収穫によって農地や山林の未使用の面積が変化する様子も表現できる。

変換要素は、主として反応技術を表現し、そのモデルは反応における反応物と生成物の両論関係を表す数式となっている。変換要素は反応物や生成物となる物質の貯蔵要素や後述する用役要素と接続される。変換要素で表現できるのは化学反応だけではない。乾燥や裁断といった操作も前後が別の物質であると捉えればこれで表現が可能である。反応物の量をその数ヶ月後の生成物の量と結びつける数式を記述すると、バイオマスの成長や発酵といった比較的長い時間を要する変換も表すことができる。

輸送要素は、物質の輸送量に応じてコストが生じるというモデルである。本システムにおいては、その始点と終点の少なくとも一方に貯蔵要素を接続するルールとした。始点に貯蔵要素がない場合には、その輸送要素は系への物質の流入を表している。バイオマスの収穫や、バイオマス以外の原料物質の購入なども表現できる。終点に貯蔵要素がないものは、系からの排出を表し、そのコストは廃棄物の処理費用ということになる。製品の出荷も系からの排出であるが、その場合はマイナスのコストが生じるとして取り扱う。

用役要素は、用役の購入、売却を表現するモデルである。また変換工程で余剰に発生する熱や電気を別の変換要素で再利用するといった様子を表現することも可能である。

問題設定の見通しを良くするため、変換要素、貯蔵要素、

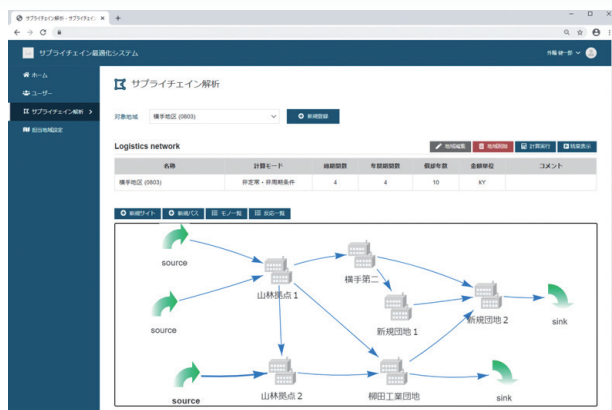


図1 開発したサプライチェーン最適化システムのユーザーインターフェース

用役要素のまとまりをサイト、始点と終点と同じ輸送要素のまとまりをパスとして定義した。サイトは工業用地、パスは道路に相当する概念である。

表1の4種の要素の組み合わせで多様なサプライチェーンを表現できるとの考えに基づき、最適化システムを開発した。これはインターネット上のシステムであり、2020年8月に公開した。ユーザーは図1に示すようにウェブブラウザ上のGUIで各要素を接続してスーパーストラクチャを構築する。数式で問題を記述するのに比べて作業が容易であるだけでなく、入力内容に誤りがないかを容易に確認できる。入力したデータはシステムのバックエンドであるデータベース上に整理される。最適化計算を実行する際にはそのデータから混合整数計画問題が自動生成され、最適解が計算される。最適化における評価関数は各種費用と装置コストの和から出荷額などを差し引いたもので、最適化計算によってこれが最小となる条件が得られる。得られた最適な輸送計画や変換要素の運転計画は図2に示すようにGUI上で確認できる。

4. 計算例

日本有数の穀倉地帯である秋田県横手盆地を想定した計算の例を示す⁴⁾。活用できる反応技術は、5段階の変換工程によってグルコースをはじめとする6種の化成品が得られるものとした。横手盆地に実在するカントリーエレベータと工業団地の位置は図3に示す通りである。原料のもみ殻は各カントリーエレベータから600トン/年が使用できるとし、工業団地でのもみ殻の処理量の上限を4,000トン/年とした。横手盆地における考え得る全ての輸送経路から成るスーパーストラクチャをシステム上に表現した様子を図4に示す。原料や製品の価格、装置コスト、輸送コスト等のデータに妥当と考えられる値を設定し最適化計算をおこなった。ここでは、バイオマス収獲量の季節変動を考

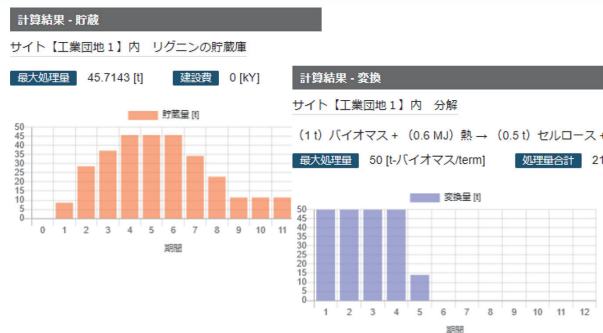


図2 最適な操業計画を表す画面の例



図3 横手盆地のカントリーエレベータと工業団地の位置

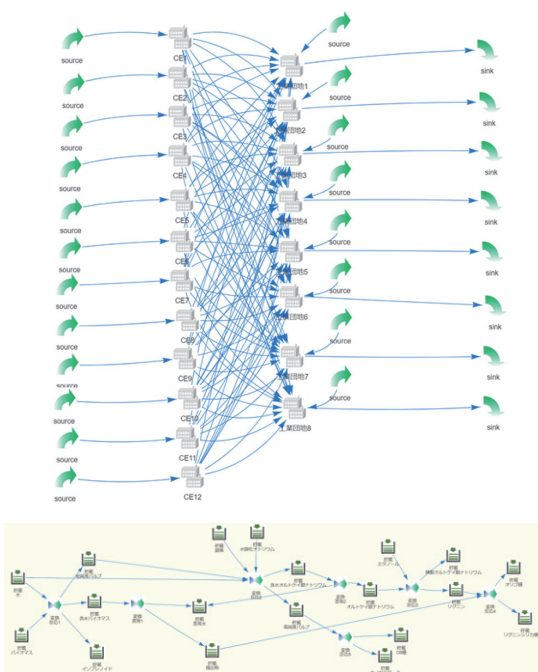


図4 横手市における輸送経路のスーパーストラクチャ(上)と工業団地内の処理ネットワーク(下)

慮していないが、最適化問題の変数は6,413個であり、制約式は6,124個となった。計算の結果、工場の建設場所を工業団地4と6とし、5段階の変換の全てをおこなって6種

の製品を製造するのが最適であるという結果が得られた。

最適条件の感度解析をおこなった。まず、もみ殻の価格を変更したが最適な工場建設場所や運転計画に影響しないことが示された。各カントリーエレベータから得られるもみ殻の量の上限を変化させると最適な工場建設場所が変化した。使用できるもみ殻の量が400トン/年以下の場合には、工業団地1に集約する解が、800トン/年では工業団地4、6に加えて工業団地1にも工場を建設する解が得られた。

製品の価格を変更して同様の感度解析をおこなった。製品の1つとして想定したナノセルロースの価格を変化させたところ、200円/kg以下では、ナノセルロースを製造する反応はおこなわず、更に工場は工業団地を1のみに集約する方が有利となった。ナノセルロースは6種の製品の中で最も出荷額が大きいので、価格の変動が最適な生産戦略に影響を与えたと考えられる。

同様の化成品生産システムを横手盆地内の横手市だけに構築する場合についての計算もおこなった。もみ殻は横手市内の5つのカントリーエレベータから得られるとした。工場建設場所としては横手市内の2つの工業団地を候補とした。横手盆地の場合と同様に輸送経路のスーパーストラクチャを構築し、各工業団地内に処理の流れを入力して最適化計算をおこなった。工場の最適な建設場所を特定することができ、サプライチェーンの規模の縮小に伴って、利益が縮小してしまう様子も確認できた。

計算の一例を紹介したが、使用者が操作法を理解し、問題構築に必要なデータが全て明らかになっていれば、横手盆地を対象とした大規模な最適化問題であっても1~2時間で構築できる。GUI上でのパラメータやネットワークの構造を変更することは容易であり、多くのケーススタディを実施できる。

5. 最適化システムの応用可能性

本システムは、バイオマスを原料として多数の化成品を

製造するサプライチェーンの最適設計をおこなうために開発した。一方で、開発に当たってサプライチェーン内の要素を抽象化したことで、物質の変換と輸送を含む多様なネットワークの最適化にも活用可能となっている。現在は本システムをバイオマス由来の化成品生産システム設計に活用すると共に、更なる展開の可能性について検討を進めている。

現代社会においては物質のリサイクル利用や炭素の循環に代表されるように、社会における物質の流れを適切に制御して、環境へのインパクトを抑制できるシステムの構築が求められている。このような循環システムも物質の変換と貯蔵、輸送からなるネットワークと捉えることができるので、その設計に本システムが活用できると期待される。

更に前述したように、本システムの変換要素は植物の成長を表現できる。この特徴を利用すると長期に亘る農地や森林の利用計画の設計にも活用できると考えられる。

6. おわりに

地域に生産システムを実装する際には、地域の特性に合わせてそれぞれに最適なシステムを明らかにする必要がある。その際、想定し得る変動要因が経済性に及ぼす影響を検討するために多様なケーススタディの実施が求められる。本稿で紹介した最適化システムは迅速に問題を構築できるため、短時間で多くのケーススタディを実施することが可能である。

なお、本システムの開発に当たっては、内閣府戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「スマートバイオ産業・農業基盤技術」(管理人:農研機構生研支援センター)の支援を受けた。ここに記して感謝する次第である。

参考文献

- 1) Alcántara-Avila, J. R. : *J. Chem. Eng. Japan*, **56** (1), 2188112 (2023), <https://doi.org/10.1080/00219592.2023.2188112>
- 2) 外輪健一郎:第63回自動制御連合講演会要旨集, 2D3-5 (2020)
- 3) Sotowa, K.-I. : *Comput. Aided Chem. Eng.*, **49**, 577-582 (2022)
- 4) 木下真:京都大学卒業論文 2023年3月