

# 化学産業における最適化技術の適用

藤田 薫, 江本 源一, 竹下 聡彦, 佐中 俊哉

石油化学およびその川下に位置する樹脂・樹脂加工などを含めた化学産業において、プラントオペレーション、生産計画・スケジューリング、物流計画などに線形・非線形計画法や混合整数計画法などの数理計画法や制約プログラミング手法などの最適化技術がサプライチェーンの効率的運用のためのコア技術として適用されている。本稿では、三菱化学(株)における事例をもとに、化学産業における最適化技術の適用について紹介する。

キーワード：サプライチェーンマネジメント、APS、生産計画、スケジューリング、物流、最適化技術、制約プログラミング

## 1. はじめに

化学産業は、川上においては原油を精製して得られるナフサを主原料としたエチレン、プロピレン、ポリエチレンなどの石油化学製品を製造する大規模な石油化学コンプレックス、川下においては機能性樹脂、樹脂加工品などを製造する多数の多品種小量生産プラントから構成されている(図1)。

石油化学コンプレックスは、分解、反応、圧縮、蒸留などの単位操作をもとに多様な製品を製造する大型の多数のプラントで構成されており、最大効率で生産活動を行うための適切な原料調達計画、生産計画、および物流計画の最適化が要求されている。

末端消費者の近くに位置する川下においては、昨今の消費者ニーズの多様化に応えたスピーディな商品開

発が重要な課題であるとともに、日々変化する需要に対して柔軟に対応できる効率的なサプライチェーンマネジメントの仕組みが不可欠となってきている。

このように化学産業全体を俯瞰すると、川上および川下を含め、また、そのサプライヤやカスタマまでも含めたグローバルな視点でのサプライチェーン全体の効率的運用がますます重要な課題となってきている。

本稿では、総合化学メーカーである三菱化学(株)における適用事例をもとに、化学産業における最適化技術適用の実際について概説する。紙面の都合上、それぞれの詳細は参考文献を参照されたい。

## 2. 化学産業における最適化技術の適用事例

### 2.1 全体概要

オペレーションズ・リサーチにおける代表的な最適化技術は、化学産業における様々な分野において活用されている。すなわち、プラントオペレーションのリアルタイム最適化、生産計画・スケジューリング、ロジスティクスにおける計画の最適化、他社とのアライアンスや設備統廃合などの経営意思決定支援、サプライチェーン最適化などのビジネス分野に活用されている。また、反応メカニズムの推定や反応条件の最適化、ゲノム創薬などの研究開発分野にも適用されているが、本分野については別紙に譲ることとする。

図2に三菱化学(株)におけるビジネス分野への最適化技術適用の変遷を示す。プラントオペレーションの領域においては、石油化学プラントを対象に、90年代前半には、LP (Linear Programming) による多変数制御システムと連携した反応器や蒸留塔などのユニットプロセスの最適化がなされるようになったが、90

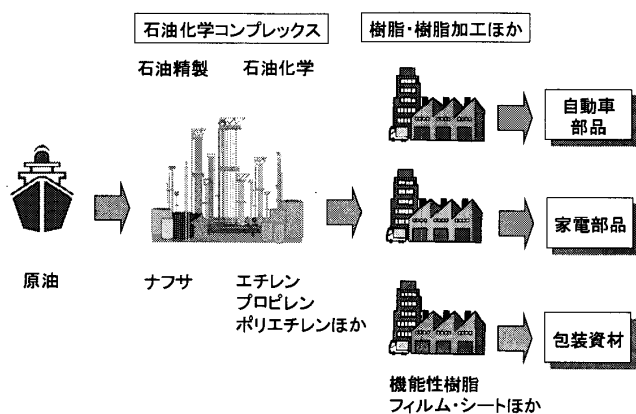


図1 化学産業における流通

ふじた かおる, えもと げんいち, たけした としひこ,  
さなか としや  
三菱化学(株) 技術・生産センター 技術部  
〒712-8054 倉敷市潮通3-10

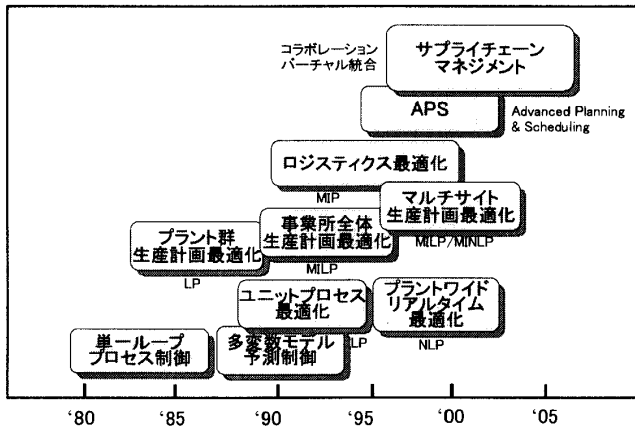


図2 最適化技術適用の変遷

年代後半には、NLP (Non-linear Programming) ベースのプラントワイドのリアルタイム最適化技術 RTO (Real-time Optimization) が適用され、プラント全系にわたりオンラインで最適化が実現されるようになった。石油化学コンプレックスにおける生産計画立案支援システムとしては、80年代からLPによる最適化が行われていたが、主要なプラント群ごとの部分最適化であった。90年代には、全プラントを網羅し、かつ高精度で高機能の大規模なMILP (Mixed Integer Linear Programming) による最適化が実現された。2000年には、このようなシステムをベースとしたマルチサイトの生産計画最適化も実現された。非線形プロセスに対しては、MINLP (Mixed Integer Non-linear Programming) の技術も利用されている。ロジスティクスの領域では、MIP (Mixed Integer Programming) を用いた生産・物流拠点配置の最適化、日々の業務支援である配車計画などに活用されている。化学産業における多品種製造プロセスの生産スケジュールの立案は、その複雑さから、ほとんどが熟練者による手作業に依存していたが、近年のスピード経営の要請により、化学産業に適した生産計画・スケジューリングシステムを開発し、順次適用を開始した。いわゆる先進的スケジューリング技術APS (Advanced Planning and Scheduling) [1, 2] が適用され始めた。さらに、企業間のコラボレーション、バーチャル統合などを意識したサプライチェーンの最適化なども実現されようとしている。

上述のような最適化技術を適用した化学産業におけるビジネスプロセス最適化システムの概念図を図3に示す[3]。

各プラントレベルにおいては、プロセスの状態量が秒単位で収集され自動制御がDCS (分散型制御シ

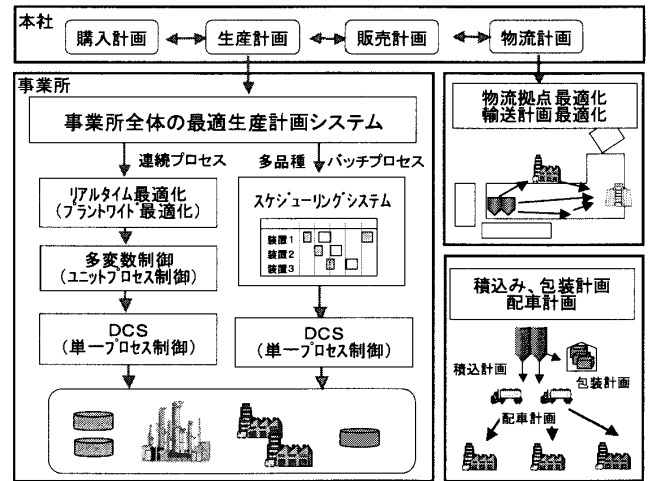


図3 化学産業における最適化システムの概念図

テム) において行われる。比較的大型の連続プラントにおいては、ユニットプロセスの安定化のための多変数制御、およびプラントワイドに利益を最大化するリアルタイム最適化制御が適用されている。バッチプラントなどの品種切替のある多品種製造プラントでは、生産スケジューリングシステムによるスケジュール立案支援が行われている。本社と連携した生産計画システムが構築され、事業所全体の生産バランス最適化が実施されている。また、物流の領域においては、日々の出荷計画だけでなく、戦略、計画レベルの物流拠点配置、輸送計画の最適化を支援するシステムが構築されている。このように、本社、事業所、各プラントの各階層において、戦略、計画、オペレーションのそれぞれの意思決定を支援する垂直統合がなされつつ、かつサプライヤからカスタマまでのサプライチェーンを意識した水平統合がなされている。

次節より、プラントオペレーション、生産計画、多品種プラントの生産スケジューリング、物流計画の最適化に関する適用事例について述べる。

## 2.2 プラントオペレーションのリアルタイム最適化

プラントオペレーションの最適化の事例として、石油化学コンプレックスにおける電気・蒸気を供給する発電プラントのリアルタイム最適化について紹介する。

図4に電気・蒸気を供給する発電プラントのプロセスフローの一例を示す。本発電プラントは、複数のボイラ(1B, 2B, 3B, ..., nB), 複数のタービン(1T, 2T, 3T, ..., mB) からなり、蒸気圧力レベルは、ボイラ主蒸気(SP1)のほか、各プラントに複数の圧力レベルの蒸気(SP2, SP3, SP4, SP5)

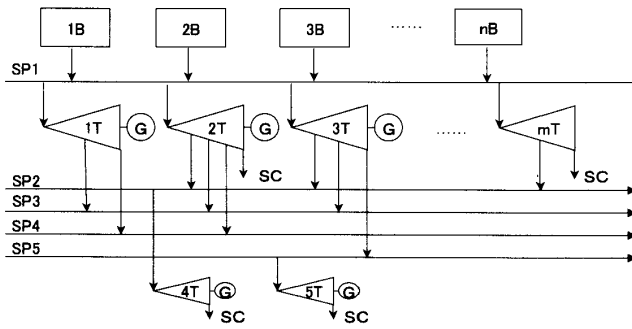


図4 発電プラントのプロセスフロー

を供給している。

このような発電プラントにおける最適化システムでは、制約条件(2)式を満たす範囲で目的関数(1)式を最小化する問題に定式化し、非線形計画法の代表的手法である逐次2次計画法 (SQP: Successive Quadratic Programming) [4]を用いて最適解を求めている。

$$\text{Minimize } f(z) \quad (1)$$

$$\text{Subject to } h(z)=0, z^l \leq z \leq z^u \quad (2)$$

目的関数  $f(z)$  は、主としてボイラの燃料コストからなる発電プラント全体の運転コストを表現している。発電プラントのボイラ、タービンなどの特性は、物質収支、熱収支などの厳密な非線形の物理モデルで表され、(2)式の等式制約の形で表現される。等式制約式の数約10,000である。ここで、 $z$ はプロセス変数、 $z^l, z^u$ はそれぞれプロセス変数の下限値、上限値である。

例えば、タービンの発電量モデルは(3)式にて表現される。タービン効率は(4)式にて定義される。

$$E = \eta(H_{in} - H_{isent})F \quad (3)$$

$$\eta = (H_{in} - H_{out}) / (H_{in} - H_{isent}) \quad (4)$$

ここで、 $E$ : 発電量、 $\eta$ : タービン効率、 $F$ : 蒸気流量、 $H_{in}$ : タービン入口エンタルピ、 $H_{out}$ : タービン出口エンタルピ、 $H_{isent}$ : 等エントロピ変化した場合のタービン出口エンタルピ。

本システムにより、蒸気、電気の需要変化に対応して、複数のボイラ、タービンの負荷配分の最適化が約10分周期で行われ、15秒周期で制御演算される下位の多変数制御システムと協調し、オンラインかつリアルタイムで最適化制御を行うことで燃料使用量の削減など大幅な省エネを実現した[5, 6]。

発電プラントにおける事例を紹介したが、その他の主要化学プラントにおいても、このようなリアルタイムの最適化制御が行われている[7~9]。

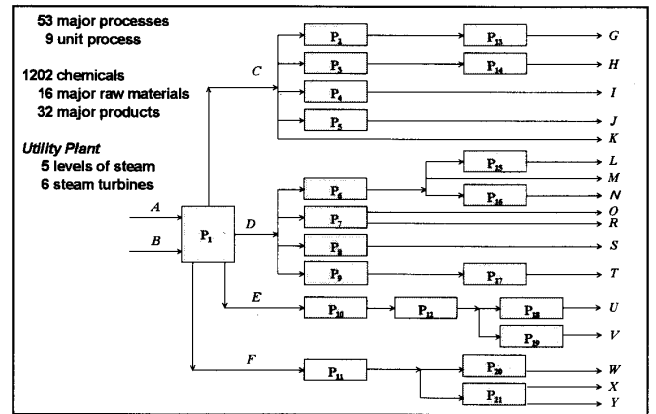


図5 石油化学コンプレックスのモデル

### 2.3 生産計画の最適化

石油化学コンプレックスにおいては、図5に示すように、多数のプラントが複雑に組み合わせられ、留分やエネルギーの授受が行われているため、プロダクトミックスの観点からの適切な生産管理が不可欠である。

三菱化学(株)水島事業所においては、1,200品目以上におよぶ原料、燃料、ユーティリティ、および製品のバランスを最適化し事業所全体として利益を最大化するための生産計画最適化システムを構築し、1998年より運用している[10]。

本システムは、年間および月間の生産計画策定に利用されているのに加え、最適な生産バランスの計画値を各プラントに毎日オンラインで提供している。また、原料やユーティリティの供給制約が発生した場合などの突発生産対応、プラント新增設検討などケーススタディとしての機能も重視し開発した。

生産管理上、非線形特性を無視できない場合があるため、生産量に応じて非線形に変化する生産特性を区分的に線形化してモデル化した。また、プラントやタービンの起動/停止の判断も最適化の対象とするため、混合整数型線形計画問題 (MILP) として定式化した。大規模最適化問題を効率的に解くために、モデルの定式化や解法に工夫を加えた結果、モデルの規模は1年間(365日間)のマルチピリオドの生産計画問題で、式の数で約780,000、整数(0-1)変数の数で約2,800となりCPU 450 MHzのパソコンで約1時間と実用的な時間で最適解を得ることができる。米国GAMS Development社の最適化ソフトGAMSによりモデル化し最適化ソルバとしてCPLEXを採用した[11]。

加えて、各プラントの年間の定期修理計画、言い換えると稼働計画を立案する機能も開発した。石油化学プラントは、法令等により定期的に点検・修理を行う

必要がある。各プラントの定期修理期間、すなわち停止期間は点検や工事に必要な期間であるが、多数のプラントの定期修理が集中しすぎると工事要員の制約上、実現不可能となる場合や工事コストが増大する場合は発生する。逆に、定期修理が離散しすぎると石油化学コンプレックス内の生産バランスが取れなくなる。したがって、生産バランスの制約と要員の制約を同時に考慮した上で、各プラントの定期修理開始日を意志決定変数として、生産コストと工事要員コストからなる総コストを最小化する最適化問題として定式化した。ここでも、プラントの稼動/停止の変数、定期修理開始日を表現する整数 (0-1) 変数を導入することにより、混合整数型線形計画問題 (MILP) として定式化した。

4ヶ月間の定期修理計画の最適化問題は、式の数で約400,000、整数 (0-1) 変数の数で約2,000の数理モデルとなった。計算時間は、CPU 450 MHz のパソコンで、約90分で解くことができる。図6に最適な定期修理計画の結果の一例を示す。このような大規模な石油化学コンプレックスにおける定期修理計画の事例は、これまで世界的にも報告例がない。

図7は本生産計画最適化システムの構成図である。本システムにおいては、原料、製品バランスなどの入出力関係は、パソコンのWindowsベースのGUIで定義することができ、各プラントの生産特性を表現する生産量と原料、ユーティリティなどの関係式およびそのパラメータは、ネットワークを介して事業所内の各製造課のパソコンから設定することができる。また、最適化された計画の計算結果を参照することもできる。

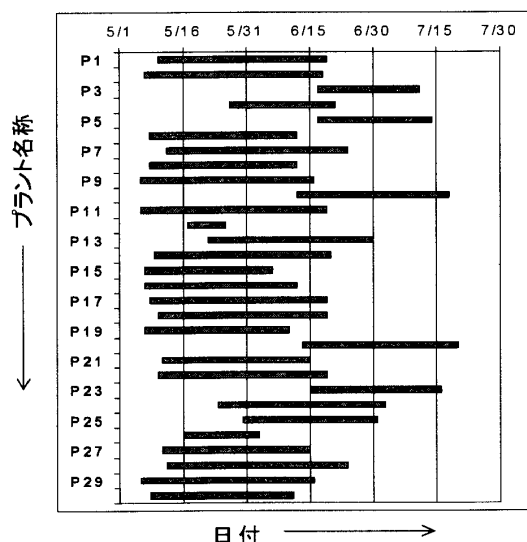


図6 最適定期修理計画

本システムは、石油化学部門の生産管理の効率化、高度化に不可欠な情報システムとなっている。

#### 2.4 多品種プラントの生産スケジューリング

機能性樹脂や樹脂加工品などの複数品種を製造するプラントの生産管理においては、顧客からのオーダーや販売予測を基に生産・物流コストを考慮し、生産拠点を決定する生産計画問題とともに、各製品を日々の設備で、どのようなシーケンスで生産すべきかの生産スケジューリングの良否が当該事業の生産性を左右する重要な要素となっている。

そこで、このような多品種プラントのニーズに対応すべく、化学産業に見られるバッチ反応条件、品種切替条件、要員制約など複雑な制約条件を考慮し、かつ最適化を指向する生産スケジューリングシステムを開発した[12]。

生産スケジューリングの問題は、一般的には膨大な組合せ最適化問題となるが、今回のシステムは様々な制約条件を満足する実行可能なスケジュールを即座に立案すること、またユーザが希望する評価基準に基づき最適化されたスケジュールを立案することを重視し、スケジューリングのエンジンとして制約プログラミングの手法を用い開発した。制約プログラミングは、各変数間の制約伝播によりあらかじめ探索すべき組合せの数を制約条件などの情報をもとに効率的に絞り込む手法であるが、本手法を利用することにより短時間で実行可能解および近似最適解を求めることが可能となった。制約プログラミングのためのC++ソフトウェアコンポーネントとして仏国ILOG社のILOG SolverおよびILOG Schedulerを利用した[13]。

上述の生産スケジューリングシステムを、樹脂製造プラントにおいて、原料を調合する調合工程と、製品を製造する製品製造工程の2工程を対象として適用し

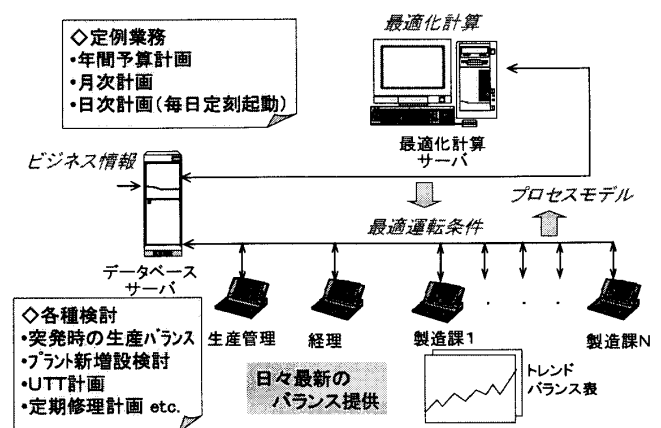


図7 生産計画最適化システム

た事例について以下に述べる。調合工程は、ブレンダーに配合すべき原料を投入して混合する工程であり、製品製造工程は6系列の設備からなり、調合された原料を処理して製品を連続運転で製造する工程であるが品種切替が必要である。調合工程は昼間勤務の作業要員で対応しており、製品製造工程はシフト勤務の作業員で対応し24時間連続運転となっている。また品種切替作業には作業要員が必要であるが、要員数の制約から同時に複数系列の切替作業はできない場合がある。また、切替時間は切替前後の品種の組合せに依存するため、製品の納期や在庫の制約を満たした上で、より良いスケジュールを立案することが要求される。製造する製品の種類が約400、原料の種類が1製品に対して平均約15、オーダー数が約100、スケジューリング対象期間を1ヶ月間とし1時間刻みでスケジューリング計算を実施した場合、CPU 1GHzのパソコンで、10秒以内で計算できる。

図8は上段に製品毎に製造する設備をあらかじめ決定してスケジューリングしていた従来の方法と、下段に今回開発したスケジューリングシステムを利用し、製品毎の代替設備を考慮した上でスケジュール期間の最小化を評価基準として最適化した結果を比較した図である。この場合、スケジュール期間が約15%短縮されることからスループット向上に有用であることが示された。

なお、飛び込みオーダーなどの突発に即座に対応できるよう、使いやすいユーザインターフェイスを開発し、計画立案者の手動によるスケジュールの微調整なども容易に行えるようにしたこと、また、品種の追加や切替時間の変更などに伴うデータベースのメンテナンスを容易にしたことも実用上重要なポイントである。

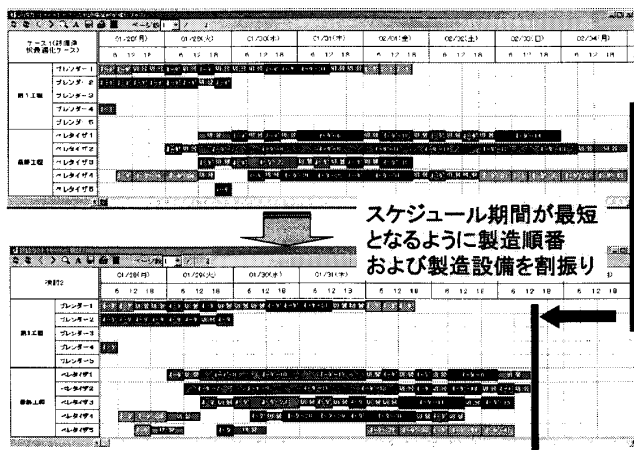


図8 スケジューリング結果

## 2.5 物流計画の最適化

化学製品の出荷計画として、サイロからタンクローリへのバルク品の積込み計画、サイロから取り出される製品の包装計画、および配車計画などがあり、これらの業務を支援するスケジューリングシステムを開発し1999年より運用している[14]。

例えば、タンクローリの配車計画においては、品質管理の観点から前荷、後荷の製品品種の組合せでの洗浄の度合いや禁止の条件、車両の運行状況など全ての制約を考慮し、日々受注されるオーダーに対して車両を効率的に迅速に割り付けている。

これらの問題は、制約を満たし、かつコスト最小となるように整数計画問題として定式化した。本システムは、CPU 700 MHzのパソコンで、約1分で最適解を導出することが可能であり、日々のお荷業務に活用されている。

一方、戦略、計画レベルの問題として、図9に示すような物流に係わる輸送費(転送費、配送費)、保管費、荷役費の総コストが最小となるように、製造プラントの拠点、ストックポイントなどの物流拠点の配置を最適化する問題、いわゆる物流ネットワークの設計問題にも取り組んだ。

このような物流合理化検討を効率的に行うために物

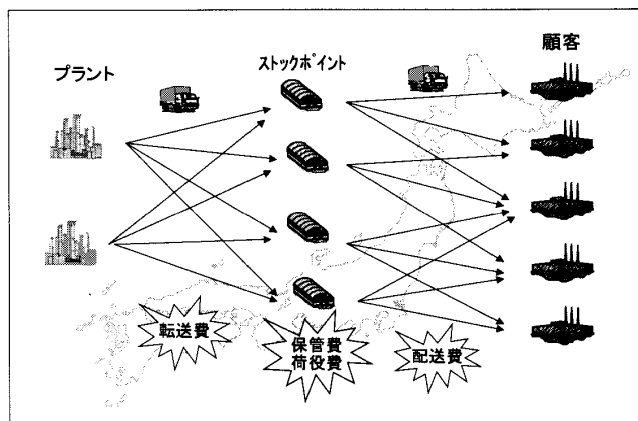


図9 物流ネットワークの設計

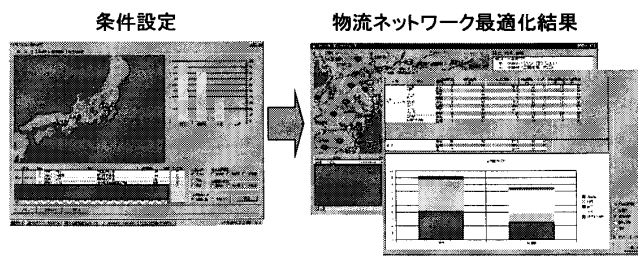


図10 物流ネットワーク最適化システム

流ネットワーク最適化システムを開発した[15].

本システムにおいては、上述の総コストが最小となるように数理計画法を用いて物流拠点を最適化している。拠点配置の判断を伴うため、整数(0-1)変数を導入し整数計画法(MIP)を採用した。

また、図10に示すようなユーザインタフェースを介して、条件設定および最適化計算の結果を確認することができる。物流拠点や顧客の住所から拠点間の距離を自動的に算出したり地理情報を可視化したりするための地理情報システム、各種輸送モードに対応する輸送コスト計算を行うための各種料金テーブルを組んでいるため、効率的かつ高度な物流合理化検討が行えるようになった。

### 3. おわりに

化学産業には連続プロセス、バッチプロセス、加工プロセスなど多様なプロセスが存在するが、それぞれにオペレーションから計画、戦略のレベルにわたり、様々な意思決定問題が存在する。本稿では、これらの問題に数理計画法や制約プログラミングなどの最適化技術がサプライチェーンマネジメントのコア技術として活用されていることを概説した。これらの事例は最適化技術だけで成し得たものではなく、情報システム部門や利用部門、ソフトウェアベンダ、大学・研究機関等との連携による幅広い技術の融合が重要であることは言うまでもない。

化学産業には多数の企業がサプライチェーンを構成している。今後は、企業内にとどまらず、企業間のコラボレーションによる、より高度なサプライチェーンの最適化などの新しいビジネスモデルの構築を目指し挑戦していきたい。本稿が、オペレーションズ・リサーチに携わる研究者、技術者の一助となれば幸いである。

**謝辞** 本稿中の生産スケジューリングシステムの開発に協力いただいた松川公司氏(三菱化学エンジニアリング株)、および物流ネットワーク最適化システムの開発に協力いただいた小塩隆之氏(三菱化学物流株)に感謝します。なお、生産スケジューリングシステムは登録商標 Dr. Planner としてリリースされているので、詳細は関連のホームページ

<http://www.i-emu.com/>

を参照されたい。

### 参考文献

- [1] 黒田充, 村松健児: 生産スケジューリング, 朝倉書店, (2002).
- [2] 西岡靖之: APS, 日本プラントメンテナンス協会, (2001).
- [3] 藤田薫: 石油化学プラントにおける最適化技術の適用, 2001年度日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会アブストラクト集, (2001), pp. 30-31.
- [4] 茨木俊秀, 福島雅夫: 最適化の手法, 共立出版, (1996).
- [5] Emoto, G., A. Tsuda, T. Takeshita, M. T. Monical, S. Nakagawa and K. Fujita: Integrated large-scale multivariable control and real-time optimization of a power plant, In Proceedings of IEEE Conf. On Control Applications, (1998).
- [6] 藤田, 江本, 竹下, 津田, 小野寺, 中川: 石油化学工場における発電プラントのエネルギー最適化制御, 計装, 43-5, (2000), pp. 34-37.
- [7] 小河, 江本: 化学プラントにおけるプラントワイド最適化制御の実現, 計測と制御, 35-10, (1996), pp. 788-792.
- [8] 高津春雄編著: プロセス制御, コロナ社, (2003).
- [9] 伊藤利昭編著: 化学産業における制御, コロナ社, (2002).
- [10] 竹下, 朝倉, M. Turkay, 藤田: 大規模石油化学工場における生産計画最適化システム, 2000年度日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会アブストラクト集, (2000), pp. 216-217.
- [11] Brooke A., D. Kendrick and A. Meeraus: GAMS a user's guide, (1998).
- [12] 竹下, 藤田, 佐中, 松川: 化学プロセスにおける生産スケジューリングシステムの開発, スケジューリング・シンポジウム2002講演論文集, (2002), pp. 56-61.
- [13] ILOG SA, ILOG Optimization Suite White Paper, (2001).
- [14] 佐中, 西森, 黒田, R. Raman, 藤田: 製品サイロ出荷スケジュール最適化, 2000年度日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会アブストラクト集, (2000), pp. 98-99.
- [15] 佐中, 小塩: 物流ネットワーク最適化システムの開発, 第11回計測自動制御学会中国支部学術講演会論文集, (2002), pp. 152-153.