

特集事例

早稲田大学 生産システム工学研究室の紹介

谷 水 義 隆*

Introduction of Manufacturing Systems Engineering Laboratory at Waseda University

Yoshitaka TANIMIZU

キーワード：生産スケジューリング，サプライチェーン，動的最適化，進化型計算

1. はじめに

この度は、経営システム誌への寄稿の機会を頂きまして、たいへん光栄に思います。私は、2018年4月に早稲田大学創造理工学部経営システム工学科に着任しました。経営システム工学科は、早稲田大学理工学術院の3学部の一つ、創造理工学部にあります。本学科では、生産システム、経営管理システム、数理情報システムなどのあらゆる機能システムを対象としたマネジメント手法や分析技術の習得を目指して、実験・実習に重点を置いた教育活動を行っています。また、大学院は、経営システム工学専攻と経営デザイン専攻の2専攻を設置しており、より高度な教育・研究活動を推進しています。教員の専門分野は、経営管理から、生産管理、品質管理、設備管理、人間工学、ロジスティクス、オペレーションズ・リサーチ、最適化、統計学、情報統計、人工知能、システム理論、ネットワーク科学に至るまで多岐にわたり、経営工学の問題を解決するための幅広い知識を提供しています。研究室はどことも個性的で楽しい雰囲気を醸し出しています。

私の研究室（生産システム工学研究室）は、高度情報化社会における次世代生産システムのあり方

について研究を行っています。20世紀初頭の大量生産の時代には、生産システムに求められたのは「最適性」でした。20世紀末の多品種少量生産の時代になると、「柔軟性」が必要とされました。当研究室では、21世紀型の生産システムとして、最適性と柔軟性を兼ね備えた「適応性」をキーワードの一つと考え、「高度変動適応型生産システム」の構築を目指しています。以下では、これまでに従事してきた動的環境における生産スケジューリング手法やサプライチェーンマネジメントの研究について紹介します。

2. リアクティブ・スケジューリング

生産スケジューリングの研究は、Johnson法[1]などこれまでに様々な最適化手法が提案されてきました。しかし、実際の生産現場では、ちょっとした機械の停止や特急仕事の追加など、事前に計画に含めることができない様々な外乱が生産活動中に頻繁に発生します。そのため、あらかじめ作成した生産スケジュールどおりに生産活動を行えないという実態が問題視されていました。製造企業は、このような外乱が発生した場合でも、納期を遵守し、決められた生産量を確保する責任があります。そこで、多くの生産現場では、予定外の残業や作業者の

* 早稲田大学創造理工学部経営システム工学科
受付：2019年10月20日

補充により、それを満たしているのではないでしょう。しかし、そのために余分なコストや人材が必要になり、望ましい対策であるとはいえません。

既存の研究には、生産スケジュールにあらかじめ余裕時間を持たせたスケジューリング手法 [2] や、あらかじめ生産スケジュールを持たずに生産活動時に選択肢のなかから優先順位を決定するリアルタイムスケジューリング (Real-time scheduling) 手法 [3] などが提案されてきました。私の研究室では、生産活動中に外乱が発生した場合、図 1 に示すように、生産活動を停止しないで、事前に作成した生産スケジュールを逐次改善するリアクティブ・スケジューリング (Reactive scheduling) 手法の開発に従事してきました [4], [5]。本研究で開発した手法は、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA) による再スケジューリングプロセスを生産活動と並行して短いサイクルで繰り返すことで、より良い生産スケジュールへ迅速に改善することができます。この手法では、生産活動が進行しても、生成した個体の多くを継承することで遺伝的アルゴリズムによる解の改善能力を保持するところに特長があります。これまでに、特急仕事や設備故障など様々な外乱に対応した適用範囲の拡張、組立工程や分解工程を含むスケジュールモデルの拡張、遺伝的アルゴリズムのハイブリッド化や共進化プロセスによる最適手法の高度化 [6] などの研究課題に取り組んできました。今後は、IoT や AI の技術発展にともない、知能ロボットやスマート工作機械など、豊富な知識や高度な意思決定能力を持った実機との相互連携を示すことで、実環境における有効性の検証に取り組んでいきたいと考えています。

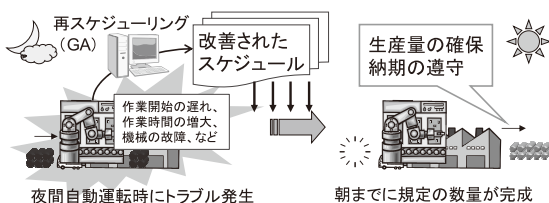


図1 リアクティブ・スケジューリングの概要

3. 次世代セル生産システム

前述の生産システムは、主に機械化された工場を対象としていました。しかし、生産システムから人間を完全に取り除くことはまだ難しいと考えられます。そこで、人間を中心とした生産システムに対する高度な生産管理手法にも取り組んでいます。

20世紀末には、人間中心型の柔軟性の高い生産方式として「セル生産方式」が提案されました。セル生産方式とは、一人または複数の作業者が製造の初工程から最終工程までを行う生産方式です [7]。セル生産方式では、作業者のモチベーションの向上により、生産性の向上が期待される一方で、作業者の能力に依存しすぎるといった問題があり、生産性をコントロールすることは困難であるといわれています。そこで、私の研究室では、作業の習熟や遅延など作業者の能力の変化に基づいて、作業の再配分と再スケジューリングを動的に行う生産管理システムの開発に取り組んできました [8]。

現在は、作業中における作業者の生体情報を収集し、解析することで、作業者の学習・習熟の程度を認識したり、疲労やモチベーションの程度を予測したりする方法について検討しています [9]。これにより、作業者ごとの作業時間の正確な予測や、作業者の適材適所の利活用など、QOL (Quality of Life) を考慮して、人を活かした生産管理手法の構築を目指したいと考えています。

4. 動的サプライチェーンマネジメント

ここまでの話は、単一の工場（生産システム）内の動的最適化に関する研究でした。次は、その外側を含めた系（システム）の動的最適化に関する研究について紹介します。原材料供給企業から部品製造企業、最終組立企業、顧客までの供給活動の一連の繋がりをサプライチェーン (Supply chain) とよびます。また、複数の企業や顧客で形成される多重の供給活動網をサプライネットワーク (Supply network) やサプライチェーンネットワーク (Supply chain network) とよびます。

4.1 動的サプライチェーンモデルの概要

私の研究室では、サプライネットワーク環境下で、状況に応じてサプライチェーンを逐次組み替える供給連鎖の動的形成の手法として動的サプライチェーンモデル (Dynamic supply chain model) の研究に取り組んできました [10]。ここでは、完成品在庫を持たない MTO (Make to Order) 型あるいは BTO (Build to Order) 型のサプライチェーンを対象として、製造企業が需要側および供給側の企業と交渉を繰り返しつつ、生産の進捗状況を考慮して自身の生産スケジュールを逐次改善することで、適切な契約先と契約条件をリアルタイムに決定する手法を提案しました。これにより、各企業が自身の利益の向上を追求することで適切なサプライチェーンが形成されるとともに、各企業が製造する部品や製品の適切な納期と価格を決定する手法を提案しました。

本研究では、納期遅れによるペナルティコストを製品の見積価格に加える価格モデルを提案しました。これは、原材料費や加工費などを積算するコストプラス法に基づく価格決定法と、需要側の要求に基づくデマンドベースの価格決定法の特徴を組み合わせた価格モデルになります。これを用いることで、製造企業は自身の生産スケジュールを改善することにより、利益を向上させることができます。これを検証するため、複数台の計算機を用いた分散シミュレーションシステムを開発しました。ここでは、以下の3つの異なる戦略で、顧客からの受注を取りあう競争入札の計算機実験を行いました。

- (1) 単純交渉モデル：稼働率など生産現場の大きな繁忙状況を見てできるだけ多くの受注を取ろうとする「営業主導型」の戦略。
- (2) 座席予約型生産モデル：契約済みの製品が納期遅れを起こさないように既存の生産スケジュールを崩さずに受注を取ろうとする「現場主導型」の戦略。
- (3) 提案モデル：生産スケジュールを変更してでも良い受注は取ろうとする「生産管理主導型」の戦略。

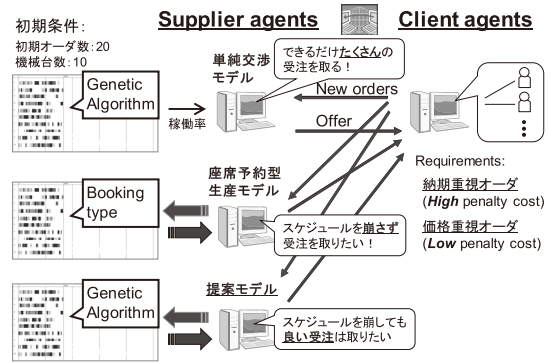


図2 分散シミュレーションシステムの概要

シミュレーションシステムの概要を図2に示します。実験の結果、単純交渉モデルを用いた製造企業は、一番多くの売上を獲得しましたが、受注した製品の多くは納期を守ることができず、多額の納期遅れペナルティコストを支払うことになり、利益を十分に獲得することはできませんでした。次に、座席予約型生産モデルを用いた製造企業は、製品に納期遅れが発生することはありませんが、獲得できる受注量が少ないため売上が最も低く、得られる利益も一番少なくなりました。一方、提案モデルを用いた製造企業は、自身の生産スケジュールを変更しながら、これに適した受注を獲得することで最も高い利益が得られることを示しました [11]。

以上の話は、計算機シミュレーションのなかの話であり、現代の商習慣や情報通信技術では、現実的ではないことも多く含まれています。しかし、近い将来に技術的課題が解決されたとき、サプライチェーンにおける真の Win-Win の関係を構築するための参考になれば嬉しく思います。

4.2 持続可能型サプライチェーン研究への拡張

近年、私の研究室では、持続可能型のサプライチェーンの研究にも取り組んでいます。ここ数年来の環境問題に対する意識の高まりとともに、大量消費型の社会は崩壊しつつあり、SDGs (Sustainable Development Goals) に代表される持続可能型社会の構築が希求されています。そこで、二酸化炭素排出量の削減と製造企業の利益の最大化を同時に考慮した生産・輸送モデルによる「グリーンサプライ

チェーン (Green supply chain)」の研究 [12] や、二次電池など耐久消費財のリユース率向上のための「循環型サプライチェーン (Closed-loop supply chain)」の研究 [13] などを行っています。さらに、大規模災害のように、発生する頻度は極めて少ないが、与える影響が甚大な外乱に対する動的なサプライチェーンマネジメント手法として、「サプライチェーンレジリエンス (Supply chain resilience)」の研究にも着手しています [14]。

5. サイバーマルシェ

JST/RISTEX の「漁業と魚食がもたらす魚庭 (なにわ) の海の再生」プロジェクト (研究代表者: 大塚耕司・大阪府立大学教授) [15] に参加したことで、近海魚を中心とした生鮮魚の流通・販売に関する研究を行いました。これを契機に新たな試みとして、少量かつ不揃いで短納期が要求される生鮮食料品の電子市場、サイバーマルシェ (Cyber Marche) の開発に着手しています。これまで行ってきた製造企業のサプライチェーンの場合、ある程度まとまったロット数の製品に対する広域の生産・流通に関するグローバル・サプライチェーン (Global supply chain) の構築・運用方法が研究の主題となります。しかし、サプライチェーンが整備され、巨大化するほど、既存のサプライチェーンに乗らないモノあるいは乗せにくいモノが生まれていることが問題として理解されました。これは特に、生鮮食料品のサプライチェーンで見られる問題と考えられます。例えば、形や大きさが異なる不揃いの野菜や、単一品種では1ロットに満たない多種少量の魚介類などは卸売市場で正規に流通・販売することができずに廃棄される場合があります。また、巨大なスーパーマーケットが幹線道路沿いに建設される一方で、地方都市では高齢者を中心として買物難民とよばれる人達の増加が社会問題になりつつあります。そこで、今後は、高度な情報通信技術と経営工学の最適化手法を活用して、これらの問題を解決するローカルでパーソナルなサプライチェーンの構築・運用方法の研究にも取り組みたいと考えています。

6. ま と め

今回、「経営工学を深める大学・経営工学を活用する企業」という小特集で執筆させていただきましたが、私はこれまでは機械工学の分野に所属しておりました。そのため、研究の切り口は経営工学の王道から外れており、諸先輩方にはかなり奇妙な研究内容に思われるところもあったかと思いますがどうかご容赦願います。

この研究室は、まだまだ歴史の浅い研究室です。図3は今年初めて行った軽井沢合宿の集合写真です。私はこれまでは大阪の地で学び、教育研究活動を行ってきました。現在は早稲田大学西早稲田キャンパス 51 号館という歴史的な高層ビルの一室が新たな研究開発拠点となっています。当研究室の取り組みに興味を持たれた方はぜひ一度お立ち寄りください。これからも新たな生産システムの構築・運用方法の研究開発に取り組んでまいりますので、ご支援くださいますようによろしくお願いいたします。



図3 軽井沢合宿の集合写真

参 考 文 献

- [1] Johnson, S. M.: "Optimal Two- and Three-Stage Production Schedules with Setup Times Included", Nav. Res. Logist. Q., Vol.1, Issue 1, pp.61- 68 (1954)

- [2] 諏訪晴彦, 森田大輔, 三道弘明: “プロジェクト管理におけるダミーに基づくクリティカルチェーン・スケジューリング”, システム制御情報学会論文誌, Vol.22, No.12, pp.407-415 (2009)
- [3] 江口 透, 大場史憲, 小崎慎太郎, 村山 長: “定期的最適化とリアルタイムスケジューリングの融合による処理時間の不確実性を考慮した動的スケジューリング”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.72, No.717, pp.1630-1637 (2006)
- [4] 谷水義隆, 阪口龍彦, 杉村延広: “遺伝的アルゴリズムを用いたリアクティブスケジューリング (第 1 報, 作業の遅延に対する生産スケジュールの変更)”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.69, No.685, pp.234-239 (2003)
- [5] Tanimizu, Y., Sakaguchi, T., Iwamura, K. and Sugimura, N.: “Evolutional Reactive Scheduling for Agile Manufacturing Systems”, Int. J. Prod. Res., Vol.44, No.18-19, pp.3727-3742 (2006)
- [6] Tanimizu, Y., Sakamoto, M. and Nonomiya, H.: “A Co-evolutionary Algorithm for Open-shop Scheduling with Disassembly Operations”, Procedia CIRP, Vol.63, pp. 289-294 (2017)
- [7] 岩室 宏: 「セル生産システム」, 日刊工業新聞社 (2002)
- [8] Tanimizu, Y., Sakashita, Y., Iwamura, K. and Sugimura, N.: “Human-Oriented Dynamic Task Reallocation and Rescheduling in Cellular Manufacturing Systems”, Service Robotics and Mechatronics, Springer, pp.217-222 (2009)
- [9] Tanimizu, Y., Katsumaru, T. and Tanaka, D.: “A Basic Study on Analysis of Heart Rate Variability in Workers for Dynamic Production Management in Cellular Manufacturing Systems”, Proc. of International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, CD-ROM (2018)
- [10] 谷水義隆, 山中聖彦, 小澤知里, 岩村幸治, 杉村延広: “動的サプライチェーンにおける適応戦略の構築に関する研究 (フレームワークと 2 階層モデルの提案)”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.75, No.756, pp.2351-2358 (2009)
- [11] 貝原俊也, 谷水義隆, 西 竜志: 「企業間の戦略的提携—マルチエージェント交渉による次世代 SCM—」, 朝倉書店 (2011)
- [12] Tanimizu, Y., Amano, K., Harada, K., Ozawa, C. and Sugimura, N.: “Multi-Objective Production and Transportation Scheduling Considering Carbon Dioxide Emissions Reductions in Dynamic Supply Chains”, Int. J. Autom. Technol., Vol.6, No.3, pp.322-330 (2012)
- [13] Tanimizu, Y. and Shimizu, Y.: “A Study on Closed-Loop Supply Chain Model for Parts Reuse with Economic Efficiency”, J. Adv. Mech. Des., Syst., Manuf., Vol.8, No.5, 12 pages (2014)
- [14] Sugimoto, M. and Tanimizu, Y.: “Outsourcing Strategy for Supply Chain Resilience to Unexpected Production Disruptions”, Proc. of the International Symposium on Flexible Automation, pp.414-419 (2018)
- [15] 持続可能な多世代共創社会のデザイン,
https://www.jst.go.jp/ristex/i-gene/projects/h28/project_h28_1.html

谷 水 義 隆

1994 年大阪大学大学院工学研究科電子制御機械工学専攻博士前期課程修了, 1995 年同博士後期課程中途退学, 同年大阪府立大学工学部機械システム工学科助手, 2004 年大阪府立大学大学院工学研究科機械系専攻講師, 2007 年同准教授, 2016 年同教授, 2018 年より早稲田大学創造理工学部経営システム工学科教授. 現在に至る. 博士 (工学, 大阪大学).