

## 別紙 4

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 受注生産における段取負荷平準化を考慮した  
フレキシブル・ジョブショップ・スケジューリングに関する研究  
(Flexible job shop scheduling with setup workers' load balance  
in make-to-order manufacturing)

氏 名 森永 泰彦

## 論 文 内 容 の 要 旨

企業は社会システムの重要な担い手であり、その企業の中でも、国内では企業数として 99.7%、常用雇用者数として 69.7%を占める中小企業は、地域コミュニティや経済の持続性に対し重要な役割を担っており、これらの中小企業の持続・活性化は国内外を問わず社会の厚生に資すると考えられる。

ところが、これまで、日本の経済成長を支えてきた輸出型機械組立製造業の海外シフトで、これらの調達先であった多くの国内の中小製造業は従来の取引先からの受注が減少しており、新たな取引先の開拓が必要となっている。このような背景から、国内の取引構造は、限られた取引先を相手にする従来のツリー型構造から多くの取引先を相手にするメッシュ型構造へと変化してきている。これに加え、IT 化によるサプライチェーン・マネジメントの進展により、中小製造業への注文は短納期、小ロット化の傾向が強まっており、また、経済の成熟化による需要の多様化や商品のライフサイクルの短縮化が進み、多品種少量生産、さらには、受注品の種類や生産量が期間毎に変化する変種変量生産が余儀なくされてきている。これらの環境の変化に対し中小企業が進むべき方向として従来の下請け体質から変種変量生産体質への変換が重要な選択肢の一つとなる。

変種変量の製品やサービスを扱う受注生産では、引き合いー見積りー受注ー生産計画ー工程管理を中心とする生産管理の重要性が高く、その中でも生産スケジューリングは納期、コスト、従業員の作業負荷に大きな影響を与える。また、最近では、受注に先立って、引き合い時にも精度の高い納期見積りが要求されることが多く、営業ツールとしてのスケジューリングの重要性も高まっている。

一方、受注生産では、品質・コストに加え納期が重要な管理事項対象となるが、生産管理の重点が納期遵守に偏りがちになると、従業員に過度な負荷を強い勤務のアンバランスを来たすことがある。不適切な生産スケジューリングのもとでは、必要以上に早期にショップ内に材料を投入することや、受注を見込んで不急不要の仕掛け品をショップ内に投入することなどで、工程内在庫を増大させ、キ

キャッシュフローの悪化や工程管理の煩雑さを招いたりすることが多い。その結果、作りすぎのムダによる部品の廃棄、作業のムリやムラなどによる生産性の低下で企業の競争力を損なうのみならず、環境負荷をも増大させることにつながる。即ち、適切な生産スケジューリングは企業競争力を高め、従業員の作業負荷や環境負荷の低減にもつながる。そこで本研究では、受注生産特有の段取り作業の負荷の平準化と工程内在庫の適正化を考慮に入れながら納期遅れを最小化するスケジューリング法の開発を目指す。

この分野は、多目的フレキシブル・ジョブショップ・スケジューリング問題 (Multi-Objective Flexible Job-Shop Scheduling Problem : MO-FJSP) として多くの先行研究が見られるが、ほとんどの先行研究では、与えられた全ての仕事の完了時期 (the make-span), 機械の総稼働時間 (the total workload of machines), 最大負荷機械の稼働時間 (the workload of the most loaded machine) の最小化を目的としており、納期遅れの最小化を目的にしている研究は少ない。工程内在庫に関しては自動車部品や家電製品など見込み生産が行われるフローショップに関する研究は見受けられるが、受注生産を主として行なうフレキシブル・ジョブショップにおける工程内在庫に関する研究は見当たらない。また、段取りに関しては段取り頻度を削減する研究はみられるが、段取り者の作業負荷の平準化を考慮した研究も見当たらない。更に、従来研究では、(8×8), (10×10), (10×15) など仕事数と機械台数の組合せを固定した問題例に対し各種アルゴリズム間の比較が行なわれており、実在企業の生産データに基づく実用的な有用性を確認した事例は極めて少ない。

そこで、本研究では、次の課題 1~3 を設定し取り組む。

課題 1. 先行研究で MO-FJSP への適用が多く、多様な解の導出に優れる遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm : GA) を用い、次の 3 つの目的を評価可能なスケジューリング手法を確立する。特に、段取り作業負荷の平準化評価のため、先行研究では例のない段取り者を組込んだ遺伝子構造を開発する。

- ・納期遅れの最小化
- ・段取り作業負荷の平準化
- ・工程内在庫の最小化

課題 2. MO-FJSP の先行研究では稀な、実存する企業の操業を反映したデータを用いて、上記の開発した手法がスケジューリングのみならず、経営の意思決定に寄与することを確認する。

課題 3. 局所探索に時間がかかるといわれる GA の改善策として、タブー・サーチに用いられるタブー・リストを用い、その有効性を確認する。

課題 1 に対し、島モデルを組み込んだ遺伝的アルゴリズム (Multi-Island Genetic Algorithm : MI-GA) を用いて多目的最適化手法を開発し、実在する企業の操業を模擬したデータにより、その有効性を確認した。

課題 2 に対しては、この開発手法を用いて現実の企業で発生する可能性のある経営上好ましくない事態 (経営リスク) を想定し、操業への影響度、それに対する対策案の効果を定量的に評価するためのシミュレーションを行い意思決定のツールとしても用いることができることを示した。

課題 3 に対しては、冗長な探索を回避し局所探索に優れるタブー・サーチに用いられるタブー・リストの考えを組み込んだ遺伝子アルゴリズム (Tabu Search Hybrid Genetic Algorithm : TS-HGA) を開発し、上記の 2 目的に加え、工程内在庫の最適化を含めた 3 目的での評価を行いその有効性を確認した。以下、各章に関して、概要を述べる。

第 1 章では、本研究が受注型中小企業に焦点を当てていることから、研究の背景として、中小企業の

経営課題から本研究の取り組み動機について述べる。その後、この分野の先行研究に関して触れ、これらから本研究の目的及び特徴を明らかにし、本研究の位置づけを述べた。

第2章では、受注産業における MO-FJSP の構成、問題を評価する目的関数（重みづけ納期遅れ、段取者の負荷の平準化、工程内在庫）に関して説明した。さらに、段取者の負荷の平準化に関しては以下の2つの考えがある点についても示した。

- ・日々の段取者間の負荷の差を最小化し平準化する
- ・段取者間の負荷の差は許容し、日毎の最大負荷を平準化する

第3章では、上記の問題の解法として、MI-GA を提案し、段取者を考慮した遺伝子表現の独自の考え方を簡単な例を用いて説明し、MI-GA の構成の概要を説明した。さらに、「島モデル」と「島モデルを有効に機能させるための移住」の考え方についても解説した。また、今回用いた MI-GA は多目的であることから、アルゴリズムの特徴として、非優越ソート GA（Non-Dominated Sort Genetic Algorithm）を織り込んだランク付け・選択方法、本研究の GA で採用した交叉と突然変異処理に関して述べた。

第4章では、上記で提案した手法を検証する目的で、実在する受注型中小企業 A 社の操業を参考にした生産データを用いて数値計算を行った。数値計算に当たっては、すでに遅れたジョブを抱えている、段取者の技能の差があるなど、実在する企業で遭遇する可能性がある条件を実験に組み込んだ。実験の結果、MI-GA により導出された解は、従来手法であるディスパッチング・ルールの一つである EDD 法（Earliest Due Date：納期が早いジョブ順に作業を優先的に進めるルール）より優れ、最適解に限りなく近い解を導出することが確認された。

また、第2章で上げた段取負荷の平準化の考え方の違いで、どのような結果の差が生じるかについても確認した。段取者に技能差が大きい場合、段取者間の負荷差の最小化を目的にすると、技能の低い段取者に技能の高い段取者の段取り回数が制限され、納期遅れが生じる結果となった。反面、段取者の負荷の差の制限を外すと、納期は早まるものの、技能の高い段取者の負荷が異常に高まることも分かった。一方、日毎の最大負荷の平準化を目的にした場合、日毎の最大負荷と重みづけ納期遅れとの関係を把握することができ、どちらを重点に管理すべきかの選択の意思決定がしやすくなることが示唆された。従って、今回の実験のケースのように段取者間の技能差が大きい場合に限らず、技能差が少ない場合も日毎の負荷の平準化を目的にする必要がある。

第5章では、上記の結果を受け、実在する受注型中小製造企業を例に発生する経営リスクを想定し、最も重要な業績管理指標である重みづけ納期遅れを指標としてリスクの程度とそれに対する対策の効果を定量的に評価した。その結果、影響が大きいと予想されていた高技能の段取者の離脱は他の段取者がその空白を補うことにより重みづけ納期遅れへの影響が表面化しないことが示された。さらに、高技能の段取者の離脱の対策として、低技能の段取者への技能訓練を実施することの効果は、重みづけ納期遅れへの効果よりも段取者間の負荷の平準化への効果が大きいという結果を得た。また、顧客からの納期半減への要求に応えることを想定したリスクの影響は非常に大きく、種々の対策はそれぞれに効果があるものの、これらを行っても現状の重みづけ納期遅れの水準に戻すことはできない結果となった。従って、納期短縮に応える場合、対応可能性のある納期短縮戦略を取ることが必要である。

以上の結果から、本研究の提案手法はスケジューリングに供するのみならず、経営上のリスクやその対策を事前に定量的に評価することができ、客観的な経営判断に供することができると考えられる。

第6章では、MO-FJSP における「重みづけ納期遅れの最小化」、「段取り負荷平準化」、「工程内在庫の最小化」の3目的最適化のために、タブー・サーチの考えを織り込んだ TS-HGA による生産スケジュー

リング法を提案し、これを用いて実在する受注生産型の中小製造企業のデータによる数値実験を行った。

*TS-HGA* の性能評価のため、EDD によるスケジューリングと大域での多様な解を提供する *MI-GA* との比較実験を行い、*TS-HGA* は *MI-GA* と同様に 3 目的とも EDD より優れた解を導出する結果が得られ、その有効性を確認した。更に、*MI-GA* との比較では *TS-HGA* がタブー・リストにより冗長な探索を回避するため、より短時間で *MI-GA* と同等の収束解に達することを確認した。

最後に、第 7 章にて本研究の成果および得られた知見をまとめ、それに基づく生産管理上の今後の課題と展望を述べ結論とした。

