

重み付け納期遅れの最小化と段取り者の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

森永泰彦^{†1} 長尾征洋^{†1} 佐野充^{†1}

本論では、多品種の製品の受注生産している中小企業におけるフレキシブルジョブショップスケジューリング問題(FJSP)の最適化について述べる。問題の目的関数には重み付けした納期遅れと段取り者の負荷の平準化を組み入れ、最適化手法としては島モデルを組み入れた Genetic Algorithm(GA)を開発し、実在する受注生産型の中小企業の生産データを用いて研究を行った。開発した GA の解と納期のみを優先させる EDD(Earliest due date)などのスケジュールによって得た値とを比較し、本手法の有効性を確認した。また、この手法を用いて実在する企業に発生すると考えられるリスク(段取り者の離脱や顧客からの過度な納期短縮要求)とその対策のための投資に関する数値実験を行い、リスクの影響と対策の効果を定量的に評価できることを確認した。本手法は他の目的関数も織り込むことが可能であるので様々な形態の製品やサービスの受注型中小企業の客観的経営判断に寄与できると考えられる。

Flexible job shop scheduling with weighted tardiness and setup worker load balance in make-to-order manufacturing

YASUHIKO MORINAGA^{†1} MASAHIRO NAGAO^{†1}
MITSURU SANO^{†1}

This paper describes the optimization of flexible job-shop scheduling problem (FJSP) in small and medium-sized companies with make-to-order (MTO) manufacturing many kinds of products. Incorporating weighted tardiness and set-up worker load balance to the objective function of the problem, we develop Genetic Algorithm (GA) using island model and a study of production data in real world make-to-order manufacturing type small business. Comparing the solutions by developed GA with the values obtained by prioritizing due date alone schedule such as EDD (Earliest due date), we confirm the effectiveness of the proposed method. In addition, we conduct numerical experiments on risk, which is general in the enterprise, and countermeasures by using this technique, and confirm that it is possible to quantitatively evaluate the effects. We suggest that the proposed method has potential to contribute to the business judgment in the make-to-order type small business with products and services by incorporating other objective functions

1. はじめに

産業界における中小企業の役割は大きい[1]が、中小企業が競争に勝ち続けていくためには、顧客の様々な要求(需要量の変動や種類の変化)にタイムリーに対応していく必要がある。これらの顧客要求に応えるには、少量多品種の製品を受注生産する方式が選択されることが多く、それにはフレキシブルな生産システムとそれを支えるマネジメントが必要である[2,3]。中小企業の場合フレキシブルな生産システムでは汎用機を主体に構成されたフレキシブルジョブショップ体制がとられており、これを効率的に運営するには有効なスケジューリングとそのスケジューリングに準じた生産が行われていることをモニタリングするシステムが重要となる[4,5,6]。受注生産では、品質やコストと同じく顧客納期に応えることが重要である[7,8,9]ので、受注生産におけるスケジューリングでは、評価項目として納期を織り込むことが要求される。

経営資源の制約の多い中小企業においては設備や人的資源を効率的に活用していかなければならないという考え

方から、ジョブショップスケジューリングでは、それを支えるリソースの負荷の平準化に気を配る必要があり、機械や作業者の負荷の平準化などが考慮される[10]。このように多品種少量品を受注生産で対応するフレキシブルジョブショップをもつ中小企業では複数の目的を考慮した多目的のスケジューリングが必要となる。さらに、受注生産では多様なロットサイズや多品種にも対応することも要求され、このためには品種の切り替え時に発生する段取り作業を考慮することが必要となる[11,12]ので、段取り作業の負荷バランスにも配慮する必要がある。

以上の背景から、この十数年間、FJSPでは多目的を配慮した研究が行われてきた。Kacem et al. [13]は、比較的早い時期に、ファジィロジックと進化的アルゴリズムの組み合わせ手法を用いて、3つの目的(メイクスパン、機械の総負荷、最大負荷機械の負荷)の最適化を研究している。最近でも、この3目的を考慮したメタヒューリスティックを用いた研究[14,15]が見られる。しかし、受注生産で重要な顧客による納期を考慮した論文[16,17]は少なく、また多品種少量生産を円滑に運営するための段取り作業者の負荷に着目した論文は見当たらない。また、先行研究は、[ジョブ数×機械台数]の組み合わせを[8×8],[15×10]などのパターンを対象として取り上げられることが多く実社会での問題に関

^{†1} 名古屋大学 大学院 環境学研究科
Nagoya University Graduate School of Environment Studies

する研究は少ない。

本論では、実在する中小企業における受注生産環境下における多目的(納期遅れと段取り者の負荷平準化)最適化を扱う。納期に関してはジョブ毎に顧客のサプライチェーンにおける位置づけ(生産に直結している組立工場、在庫を持つ商社など)や需要予測に基づく自社における在庫補充などによる複数の重み付けを織り込む。納期を過渡に指向すると、工場のリソースに過度な負担をかけその結果、納期を守れなくなるリスクも生じるので、本論では様々な技能レベルをもつ段取り者の負荷も合わせて考慮する。

最適化の方法は、NSGA II [18]と島モデル[19]を基本とした多目的指向型島モデル GA プログラムを開発し、実在する多品種少量生産の受注型中小企業のショップ内のジョブのデータを用い数値実験によりその有効性を確認する。さらに、中小企業が受けるリスクを想定し、リスクが納期や段取り者の負荷の平準化にどのような影響を与えるのか、また影響を低減するための対策の効果を本手法で評価し、リスクや対策の定量的な評価に適用可能であることを明らかにする。

以降の節は次の構成からなる。2 節は受注生産における FJSP を定義する。3 節では今回の研究で用いた GA の構成について、4 節では実験条件と実験データについて述べ、5 節では、多価値に関する実験結果を示す。6 節では結果に関する考察を加え、7 節では全体のまとめと今後の課題について述べる。

2. 受注生産における FJSP

この節では、多品種少量生産を行う受注型企業の FJSP における一般的な問題の構成とそれを評価する関数(納期関数と段取り者の負荷の平準化関数)について述べる。

2.1 問題の設定

FJSP は与えられたジョブ(仕事)、各ジョブを定められた順序で処理するオペレーション(作業工程)、各オペレーションを実行する機械の組み合わせの下で目的関数を最適化する組み合わせ問題である。さらに、今回は各機械に段取り可能な段取り者の組み合わせも付加する。これを一般化すると、各ジョブのロットサイズ C_k の k 個のジョブ $J_k (J_1, J_2, \dots, J_k)$ が、 m 台の機械 $M_m (M_1, M_2, \dots, M_m)$ で加工されるが、ジョブごとに通過する機械の順番は異なっている。ジョブ J_k はジョブ毎に設定された i 番目のオペレーション O_{ki} のすべてを通過することで完成する。なお、各ジョブは投入以降すでに一部のオペレーションを終了しているものがあるため、スケジューリング時点で完成までに残されたオペレーションを対象とする。

各オペレーション O_{ki} は加工可能な機械 M_m に紐づけられており、オペレーションは中断することなく 1 個当りの加工時間 p_{kim} と C_k との積からなるジョブ毎の加工時間 $P_{kim} (P_{kim} = p_{kim} \times C_k)$ 経過後に終了する。機械 M_m において、あ

るジョブから次のジョブに作業が変更されるとき、前のジョブとの種類が異なっていれば、 w 人の段取り者 $W_w (W_1, W_2, \dots, W_w)$ のいずれかより段取り替えが行われるため、段取り時間 S_{kim} が加工前に発生する。各ジョブには納期 d_k があり、ジョブ J_k の最終オペレーション終了時期 e_k との差を納期遅れ期間 $T_k(\max\{0, e_k - d_k\})$ とする。

2.2 段取り者の負荷平準化の考え方

多品種の受注生産の場合、各 τ 日に n 個のジョブ $J_{\tau, 1-n}$ がショップ内にリリースされ納期 d_k に従って各ジョブが出荷されるので、ショップ内ジョブは日々入れ替わる。図 1 の流動数曲線[20]は説明の便宜上、全ての τ 日にリリースされるジョブに関し、 $n=5, d_k=6$ と等しく設定した場合について示したものである。横軸は日付を示し、縦方向にはジョブを表現する横棒がリリースから出荷までの長さで描かれている。図 1 の中で $J_{\tau, 1-n}$ は τ 日目にリリースされる n 個のジョブの集まりを示している。スケジュールは図示されている様に一定期間毎に更新される。図 1 ではリスケジュールリングの間隔は 1 日と仮定しており、1 日目は $J_{5, 1-5}$ から $J_{1, 1-5}$ がスケジュールの対象になるが、2 日目は $J_{5, 1-5}$ が出荷され $J_{4, 1-5}$ から $J_{2, 1-5}$ がスケジュールの対象になる。このように、1 日目にショップ内に保有されていたジョブは日々通減していき、2 日目以降、新たなジョブが追加されることになる。本論では、スケジュール更新時点でショ

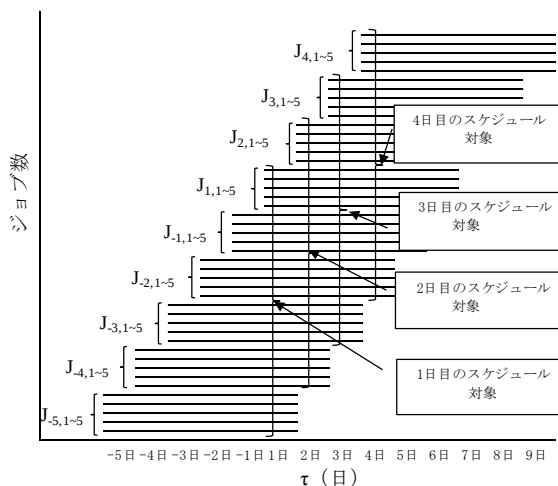


図 1 日々のスケジュール対象ジョブの変化

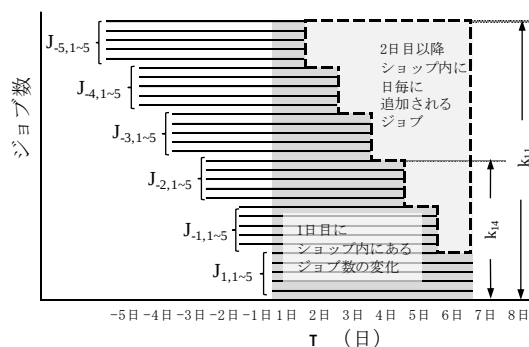


図 2 1 日目のショップ内ジョブ数の日毎の変化

ップ内に投入されている全ジョブを対象とするので、段取り者負荷の平準化を考慮するには当該ジョブの変化を反映した段取りを割り付ける必要がある。

また、段取り負荷の平準化は、段取り者間の負荷の差をなくす平準化の考え方と日毎の段取り負荷の最大値を制約する平準化が考えられる。今回は、後述するように段取り者間の技能レベルの差が大きく、前者の平準化を採用すると、技能レベルの高い段取り者の段取り回数が技能レベルの低い段取り者の段取り回数に制約を受け段取りが先遅れにされることになり納期に支障を来すので、後者の平準化の考え方を採用する。

図2は図1の前提の下で、1日目にショップ内にあるジョブ数の日毎の変化を示す。1日目の当該ジョブ数(k_{11})は τ 日目には $k_{1\tau}$ に変化するので、当該ジョブに対し1日目における段取り提供基準値を L_{11} とすると、当該ジョブに対し τ 日目の段取り提供基準値($L_{1\tau}$)は $(k_{1\tau}/k_{11}) \times L_{11}$ となる。ここで、 $k_{1\tau}/k_{11} = \beta_{\tau}$ ($\beta_1=1$)とおくと $L_{1\tau}/\beta_{\tau} = L_{11}$ となるが、この L_{11} を段取り提供基準値として段取り負荷等価値 SL と考え、 $SL=L_{11}$ と設定し $L_{1\tau}/\beta_{\tau} \leq SL$ の条件で段取り負荷の平準化を考える。

上記の条件の下、重み付納期遅れと、段取り負荷等価値 SL を最小化するジョブの生産順序を決定するFJSPを取り扱う。

2.3 評価関数と制約条件

製品毎の重み付け納期遅れの和（遅れ指数）、 TD と段取り負荷等価値(SL)を評価値とし、最小化を行う多目的最小化問題とする。

$$\min TD = \sum_{k=1}^K \alpha_k T_k \dots\dots\dots (1)$$

$$\min SL = \max \{ L_{\tau_max} / \beta \mid \tau = 1, 2, \dots, T \} \dots\dots (2)$$

$$L_{\tau_max} = \max \{ L_{\tau w} \mid w = 1, 2, \dots, W \} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 α_k はジョブ毎の納期に対する重み係数、 L_{τ_max} は $\tau=1, 2, \dots, T$ における段取り回数の最大値である。

なお、制約条件には次のものを設定する。

- 各ジョブは与えられた全オペレーションを完了する
- 同時刻に同一段取り者が複数段取りしていない
- 1つの機械を複数のオペレーションへ同時に割当できない
- ジョブに先行オペレーションがある場合、それらが終了した後に当該オペレーションが開始できる
- 先行オペレーションより先に当該オペレーションを開始できない
- オペレーション順序に整合性がある

- すべてのオペレーションはいずれか1つの機械に割当てられる

3. 遺伝的アルゴリズム

本研究では、生産スケジューリングにおける最適解の導出法として、遺伝的アルゴリズムを用いる。最適化する指標としては、重みづけされた納期遅れと段取り者の段取り負荷等価値の2評価値を対象とする多目的最小化問題とする。用いる遺伝的アルゴリズムはNSGA IIを基本とし、これに島モデルによる並列分散探索を導入することで、並列分散型多目的のGAの枠組みを導入する。なお、遺伝子の構造は各機械に仕掛かる各ジョブを反映した順番を一次元配列した遺伝子表現とした。

以下にアルゴリズムのフローを説明する。複数の遺伝子からなる個体をランダムに作成し複数の島のいずれかに割り振る。遺伝子表現に基づいてガントチャートを作成し、個体ごとに総納期遅れと段取り負荷等価値を算出し、最小化におけるパレート解を導出する。同一パレート面に含まれる解間のユークリッド距離を算出し混雑度と定義し、この値が大きいほど混雑度が低いとする。この混雑度が低い順にランク付けを行いランクに応じて次世代選択を行う。

次世代を作る複数の親世代から子世代の個体群を再生する方法として、各機械に仕掛かるオペレーションの一次元配列の位置を替える交叉と突然変異処理を行う。交叉と突然変異により新しく生成された個体群を次世代の個体群とし、上記の操作を繰り返す。なお、遺伝的アルゴリズムのパラメーターは上記の中小企業での操業を反映した簡易モデルを設定した厳密解への到達時間等から、個体数(144)、島数(12)、2点交叉率(0.7)、部分一致交叉率(0.5)、突然変異率(0.2)を用いた。

4. 実験

この節では、4.1項で実験対象の受注生産企業の概要と実験データに関する説明を加え、4.2項で提案手法性能を確認する実験条件を述べる。

4.1 実験データ

本研究では金属や樹脂などの材料から縫製機械、光学機械、測定機械などに用いるタイミングベルト用プーリーの受注生産を行う中小企業における生産スケジューリング問題を扱う。円板または円柱状の材料を旋盤で切削し、穴あけや歯切り加工を施し、付属品を組み付け、表面処理（外注：最大リードタイム5日）を施し検査出荷される。

今回対象とする中小企業の事例では、2012年6月4日の時点において、ジョブ当たり1~9オペレーションを持つ72ジョブがショップ内にリリースされ、これらを6名の段取り者と10数名のパート加工者が32台の機械を使用して生産する場合を取り上げる。図3は納期までの日数毎のジョ

プの件数を示しており、納期までの最大日数は22日である。このようにスケジュール時点でショップ内にあるジョブ数は日毎に出荷され減少するのでグラフから導かれた近似多項式から β_k を決定しこれと式(2)から、SLを導出する。

図3に示すように既に納期を過ぎているジョブは5ジョブあり、表1a)にその詳細を記す。表1a)の納期までの残日数で負の数値はスケジュールリング日に既に遅れている日数を示し、 α_k はジョブ毎の遅れ重みを表す。必要日数は残されたオペレーションに必要な日数を表す。 J_1 を例にとると、 J_1 を他のジョブの納期や段取り負荷を考慮せず最優先で仕掛けることが可能という条件をつけた場合、すでに遅れている日数6日に必要日数1日を加え出荷時の遅れ T_k は7日となる、これに $\alpha_k : 100$ を積算すると遅れ指数は $\alpha_k \times T_k = 700$ となる。他の遅れ4ジョブに関して同様の計算を行い、これらから納期指数TDを算出するとTD値は786となる。これらの5つの遅れジョブ以外のジョブの納期遅れが発生しないという条件を付与し、この値を条件付き到達可能TD値とする。また、図1b)には、従来法の一つであるEDD法(Earliest due date: 納期が早いジョブ順にオペレーションを優先的に進めるルール)でガントチャートを作成し得られた加工完了日により試算したTD値を示している。ここでは、遅れジョブに J_5 が加わり他のジョブの影響を受けた J_{40} の値が5ポイント悪化しTD値は891となっている。2つの試算とも段取り者の負荷の平準化を考慮しておらず実行可能性は保証されないが到達解の一つの目安となり、段取り者負荷の平準化を織り込んだ今回の提案する方法により得られる値がこれらの値に近ければ提案手法が有効であると考えられる。

図4に6名の段取り者の段取り可能な機械台数を示すが、 W_6 が最も多くの機械の段取り技能を保持しており、 W_2 と W_4 は平均を下回っている。稼働時間は1日10.5時間とし、これを30分単位で21区分に分け、段取り時間はすべての機械に対しすべての段取り者とも1区分を要する。

表1 TD試算値

a) 条件付き到達可能TD値					
ジョブ	納期までの残日数	α_k	必要日数	T_k	$\alpha_k T_k$
J_1	-6	100	1	7	700
J_{40}	-3	5	1	4	20
J_{41}	-2	5	3	5	25
J_{42}	-2	5	3	5	25
J_{58}	-11	1	5	16	16
TD					786
b) EDDでのTD値					
ジョブ	納期までの残日数	α_k	加工完了日	T_k	$\alpha_k T_k$
J_1	-6	100	1	7	700
J_5	6	100	7	1	100
J_{40}	-3	5	2	5	25
J_{41}	-2	5	3	5	25
J_{42}	-2	5	3	5	25
J_{58}	-11	1	5	16	16
TD					891

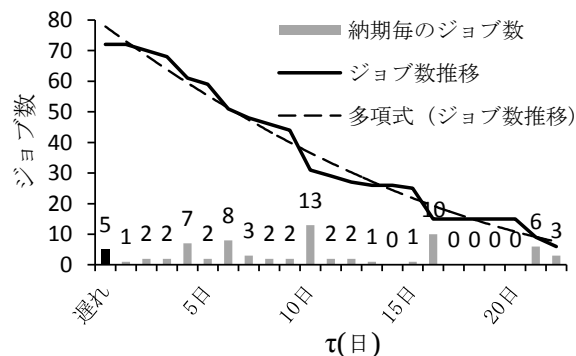


図3 72製品のショップ内ジョブ数の変化

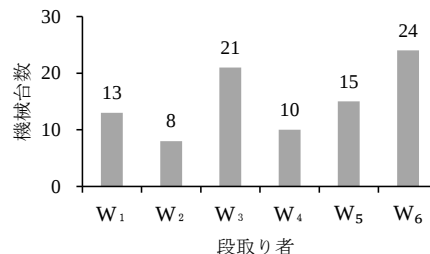


図4 段取り者の段取り対応可能機械台数

4.2 実験条件

表2に実験条件を示す。実験1は4.1で述べた実験データの条件に基づく実験である。以降、この条件を初期条件として他の実験との比較の対象とする。実験2は最も段取り対応能力の高い W_6 が病気や退社等で不在となった場合を想定しており、実験3は実験2の条件に加えオペレーション数の割り当てが最も多い機械 M_{22} に関する段取り技能を、段取り対応可能機械の少ない W_2 と W_4 に訓練する場合である。

実験4は、顧客からの納期短縮要求のリスクとして納期半減(最大22日を11日に短縮)を想定した。これに対し、実験5では受注してからの生産リードタイムの中で最も期間の長い外注加工:5日間を3日間に短縮する対策を施した場合、実験6では上記の M_{22} と同機能の機械 M_{22}^* を導入した場合、実験7では、さらに W_2, W_4 への M_{22}, M_{22}^* の段取り技能を付与する対策を施した場合を考える。

表2 実験条件

実験	リスク条件		対策案		
	段取り者不在	納期短縮	最大外注所要日数短縮	段取り者訓練 W_w に (M_m) 技能	ネック工程機械投資
1	—	—	—	—	—
2	W_6	—	—	—	—
3	W_6	—	—	$W_2, W_4(M_{22})$	—
4	—	半減	—	—	—
5	—	半減	5⇒3	—	—
6	—	半減	5⇒3	—	M_{22}^*
7	—	半減	5⇒3	$W_2, W_4(M_{22})$	M_{22}^*

5. 実験結果

表 2 の条件でそれぞれ 10 回の繰り返し実験を行った結果を表 3 に示す。得られた SL 値と TD 値の関係を SL 値で分類し、TD 値の平均値(Ave)と最小値(Min)を示す。表中の Bold 数字はそれぞれの列における SL と TD 間のパレート解である。さらにパレート解の中で最小の TD 値に網掛けを施している

5.1 初期条件下の下での実験 1 の結果

図 5 に式(1)の TD 値が世代とともに収束している状況を示す。図には EDD 法で得られた TD 値 891 と条件付き到達可能 TD 値 786 を示している。実験による TD 値は世代を重ねると 792 に達し、EDD の結果よりも低い TD 値を示し、条件付き到達可能 TD 値に近づくことが確認できた。

図 6 は横軸を段取り負荷等価値と縦軸を遅れ指数との関係を示し、パレート解、(6, 917), (9, 896), (11, 796)を示す。

図 6 のパレート解の中で最も TD 値が少ない SL=11, TD=796 の場合のガントチャートから得られた段取り者の 7 日間の日毎の負荷の変化を図 7 に示す。数字を付与したグラフは各日付で最大の段取り回数 $L_{\tau_{\max}}$ を示しており、表 4 に示す如くいずれの τ においても $[L_{\tau_{\max}}/\beta_{\tau}] \leq SL=11$ の条件を満たしている。

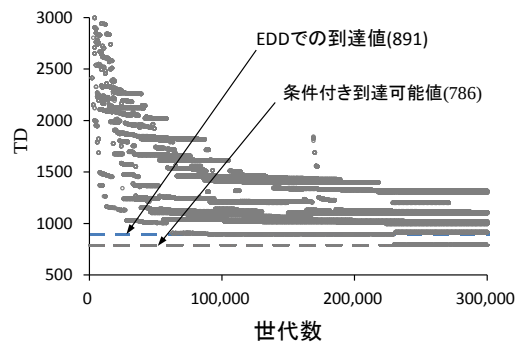


図 5 TD 値の収束状況

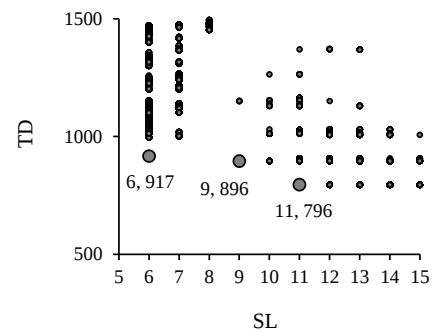


図 6 実験 1 4.1 の条件での実験結果例

表 4 経過日数ごとの最大段取り回数と SL 値との対比

τ (経過日数)	1	2	3	4	5	6	7
$L_{\tau_{\max}}$	11	7	8	5	5	5	2
β_{τ}^*	1	0.94	0.83	0.81	0.75	0.69	0.64
$[L_{\tau_{\max}}/\beta_{\tau}]$	11	8	10	7	7	8	4

* β_{τ} は図 3 の多項式から決定

図 8 は 7 日間の段取り者の合計段取り回数を示しており、段取り回数が多いのは、 $W_6, W_3, W_1, W_5, W_4, W_2$ の順である。この傾向は図 4 に示す段取り者の段取り対応可能機械の順 W_6, W_1, W_5, W_4, W_2 を反映しており、段取り負荷は技能レベルに影響されることを示している。

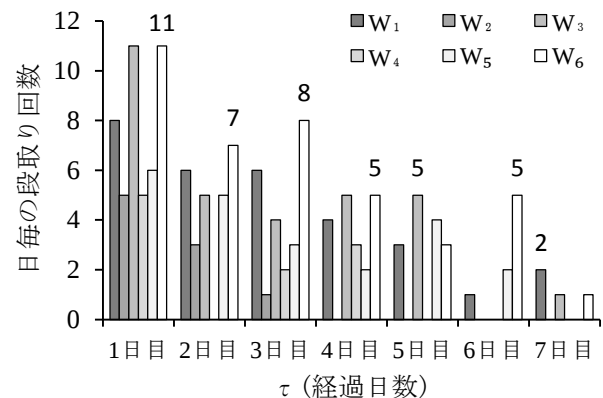


図 7 日毎の各段取り者の段取り回数

表 3 実験結果(繰り返し : 10 回)

SL	TD													
	実験1		実験2		実験3		実験4		実験5		実験6		実験7	
	Ave	Min	Ave	Min	Ave	Min	Ave	Min	Ave	Min	Ave	Min	Ave	Min
5	1757	956	4594	1202	3913	1141	10885	4292	11198	10530	10602	4541	10857	10256
6	889	811	997	911	927	901	4102	2296	2445	1803	4891	1553	2098	1775
7	954	901	885	816	902	817	2235	2081	1577	1315	1461	1245	1526	1370
8	1640	900	902	796	1121	912	2242	1851	1693	1288	1355	1141	1548	1243
9	1059	792	3193	997	2420	896	3378	2322	3346	1923	2667	2083	2982	1642
10	856	792	977	892	910	801	4105	2769	4405	2789	2917	1367	4470	2275
11	826	792	864	796	910	801	2348	1858	1451	1225	2703	1627	1948	1310
12	826	792	864	796	910	801	2037	1840	1394	1225	1468	1319	1391	1204
13	826	792	864	796	910	801	2036	1840	1383	1225	1388	1304	1389	1204

5.2 段取り者離脱の影響とその対策の評価実験結果

実験 2 は最も段取り対応能力の高い W_6 が病気や退社等で不在となった場合であるが、各 SL 値に対し TD の Min 値を実験 1 の () 内数値と比較すると、SL=5 では Min=1202 (956), SL=6 では Min=911 (811) と SL $\leq$ 6 では TD の Min 値が増大している。一方、SL=7 では Min=816 (901), SL=8 では Min=796 (900) と減少し、SL=9, 10 では実験 1 より上昇した値になっているが、SL $\geq$ 11 ではほぼ同じ TD 値に到達している。このことは、 W_6 の離脱で残された段取り者の段取り回数が少ない状態では納期遅れが増大するが、段取り回数を増やせば納期遅れへの影響が低下することを示している。

実験 3 は機械 M_{22} の段取り技能を、段取り対応可能機械の少ない W_2 と W_4 に付与した場合であるが、上記と同様に各 SL 値に対し TD の Min 値を実験 2 の () 内数値と比較すると、SL=5 では Min=1141 (1202), SL=6 では Min=901 (911) と SL $\leq$ 6 では TD 値が低下している。一方、SL=7 では Min=817 (816) とほぼ同じ値、SL=8 では Min=912 (796), SL=9 では Min=896 (997) と上下が入れ替わるが、SL $\geq$ 10 ではほぼ同じ TD 値に到達している。このことは、段取り者 W_2, W_4 への機械 M_{22} の技能付与は段取り回数が 6 回以下の場合には納期遅れ対策としての効果はあるが、段取り回数を 7 回以上に増やせば実験 2 の場合と比較しても納期遅れ対策としての効果はないことを示している。

5.3 納期短縮の影響とその対策の評価の実験結果

実験 4 の納期半減での結果を実験 1 と比較する。実験 1 の数値に対し SL 値が 5 から 13 までの総ての場合について TD 値が増大しており、SL=13 まで上がっても TD 最小値が 1840 の高い値にとどまる。

実験 5 では受注してから生産リードタイムの中で最も期間の長い外注加工:5 日間を 3 日間に短縮する対策を施した場合であるが、実験 4 の () 内数値に対し SL=10 の Min=2789 (2769) を除き、総ての SL 値で TD 値が大きく減少している。

実験 6 では最も多いオペレーションを処理する機械 M_{22} と同機能の機械 M_{22}^* を導入した場合であるが、その効果を実験 5 と比較する。実験 5 では TD の Min の最小値 1225 に達するのは SL=11 であるが、実験 6 では SL=8 で TD の Min の最小値 1141 に達する。このことから実験 5 に比較しより小さい SL 値でより小さい TD 値に達しているといえる。

実験 7 では、さらに段取り者 W_2, W_4 への機械 M_{22}, M_{22}^* に関する段取り技能付与の場合であるが、その効果を実験 6 と比較する。実験 6 の () 内数値に対し SL=5 では Min=10256 (4541), SL=6 では Min=1775 (1533), SL=7 では Min=1370 (1245), SL=8 では Min=1243 (1141) と SL $\leq$ 8 では TD 値が上昇している。一方、SL $\geq$ 9 では SL=10 で Min=2275 (1367) と実験 7 の方が高い TD 値となっているのを除き、そ

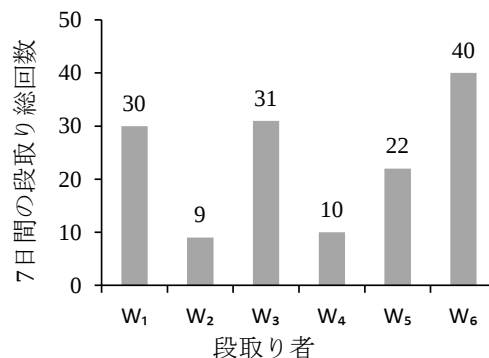


図 8 段取り者毎の段取り回数(7 日間)

のほかの SL 値では実験 7 の方が低い TD 値となっている。即ち、段取り回数が増えると技能追加による納期遅れ対策の効果が現れていることを示している。

6. 考察

6.1 初期条件下の下での実験 1

実験 1 では、納期指数: TD に関しては、図 6 に示すより EDD による到達値より低い値に達し、条件付き到達可能 TD 値に近い値が得られた。段取り当価値: SL に関しては、図 8 により日毎の段取り当価が逓減することが示され、かつ段取り者間の負荷の差も図 9 に示すように能力に添って付与されており、今回提案した方法が意図した解を提供することが確認された。

なお、条件付き到達可能値に近づくには多くの世代数を必要とするが、図 5 に示すように比較的少ない世代数でも近似解を得ることができるので、実用上はリスケジューリングの間隔と到達解の収束度とのトレードオフで世代数と解を選択することとなる。

また、図 6 によると TD 値を減少するには SL 値を増大させる必要がある、即ち、納期遅れを少なくするには段取り回数を増やすことになり、どの導出解を選択するかは管理者の判断となる。

6.2 段取り者の離脱の影響とその対策の評価実験

実験 2, 3 では最も段取り技能を多岐に持っている作業者離脱の影響とその対策の効果を評価した。その結果、SL 値を増せば、遅れ指数 TD を初期条件で得られた値に近づけることが分かる。特に SL $\geq$ 10 の場合の TD の Min 値は実験 1~3 とほぼ 800 前後に到達している。即ち残されたメンバーがより多くの段取り回数に対応できれば、納期への影響は軽微であることを示している。

6.3 納期短縮の影響とその対策の評価の実験

納期短縮の影響とその対策の評価の実験結果から、リスクまたは改善の方向として納期半減の条件を課して実験 4 を行った。実験 4 の結果、段取り当価負荷 SL を増加する TD 値は減少するが SL=13 まで上げて TD 値は 1840 までしか下がらず、納期半減の遅れ指数 TD への影響は非常に

大きく顧客からの納期半減要求が受け入れ可能であるか否かの判断データが得られた。納期半減を受け入れた場合、これを挽回する方策として、受注してからの完成までの期間のうちボトルネックとなっている外注期間を短縮する対策（実験5）、ネック工程の機械と同機能の導入（実験6）、技能訓練等の投資（実験7）の効果を確認したが、ネック工程の機械と同機能の導入、技能訓練の効果は軽微である結果となった。これは、今回の納期半減があまりにも厳しい条件であるため、要員の教育訓練や一部の設備増強では効果が得られなかったからと考えられる。従って、より段階的な納期短縮目標を設定しそれに合わせた対策案を検討することが望まれる。

7. まとめ

7.1 本提案の有効性の確認

本研究では、FJSPにおける納期遅れと段取り負荷の平準化の多目的最適化のためのGAによる生産スケジューリングを提案し、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。導出した解が従来法による方法による解より優れ、条件付き到達可能TD値に極めて近いことが確認でき、その有効性が実証できた。

また、この手法を用いて2つのリスクの影響とその対策案を納期面と段取り者の負荷の2つの面から定量的に評価できることを確認した。これによりリスクや対策案を定量的にランク付けすることが可能となり、客観的な経営判断に結びつけることができる。

7.2 段取り者の負荷平準化

今回は、段取り者の技能格差が大きいため日毎間の段取り負荷の平準化を評価値にしたが、さらに日毎の段取り者間の負荷の平準化を図ることができれば、労働生産性や労働意欲の向上につながると考えられる。そのためには、段取り者間の負荷の平準化を可能とする各段取り者の技能レベルとそれを達成するための訓練コストの最適化も課題と考えられる。

7.3 目的関数の拡張

今回は納期と段取り負荷の平準化を目的関数に定めたが、この手法は工程内在庫コストの最小化などの他の目的関数をさらに追加して織り込むことが可能である。また、ジョブの対象をサービス業務にも拡大可能であるので様々な産業の受注型中小企業の経営判断に寄与できると考えられる。

参考文献

- [1]Meghana Ayyagari, et al., Small and Medium Enterprises across the Globe, Small Business Economics 29, pp.415-434 (2007).
- [2] Simao, Jean Marcelo; Stadzisz, Paulo Cezar; Morel, Gerard, Manufacturing execution systems for customized production, J. Materials Proces. Tech. 179, pp.268-275 (2006).
- [3] Paula van Veen-Dirks, Management control and the production

- environment: A review, Int. J. Prod. Econ. 93-94, PP.263-272(2005).
- [4] Jing xing Wei, Y.-S. Ma, Design of a feature-based order acceptance and scheduling model in an ERP system, Computers in Industry, 65(1), pp.64-78 (2014).
- [5] Abbas Toloie Eshlaghy, et al., Scheduling in flexible job-shop manufacturing system by improved tabu search, African Journal of Business Management 5(12), pp. 4863-4872 (2011).
- [6] Jean-Marie Proth, Scheduling: New trends in industrial environment, Annual Reviews in Control, 31(1), pp.157-166 (2007).
- [7]Sawik, Tadeusz, Selection of a dynamic supply portfolio in make-to-order environment with risks, Com. & Oper. Res., 38(4) pp.782-796 (2011).
- [8]Wang, Chun; Wang, Zhiguo; Ghenniwa, Hamada H.; et al., Due-Date Management Through Iterative Bidding, IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part A-Systems and Humans,41(6), pp.1182-1198 (2011).
- [9]Kaminsky,Philip; Kaya, Onur, Scheduling and due-date quotation in a make-to-order supply chain, Naval Research Logistics, 55(5), pp. 444-458 (2008).
- [10] Thuerer, Matthias; Stevenson, Mark; Silva, Cristovao; et al., The application of workload control in assembly job shops: an assessment by simulation, Int. J. Prod. Res., 50(18), pp.5048-5062 (2012).
- [11]Linet Ozdamar et al. Capacity driven due date settings in make-to-order production system, Int. J. Prod. Econ., 49 (1): pp.29-44, (1997).
- [12]Mesut Kumur, Determining the capacity and its level of utilization in make-to-order manufacturing: A simple deterministic model for single-machine multiple-product case, J. Manuf. Systems, 30(2) pp.63-69 (2011).
- [13]Kacem et al. Pareto-optimality approach for flexible job-shop scheduling problems: hybridization of evolutionary algorithms and fuzzy logic, Math. and Comp. in Simul.,60(3-5) SI, pp.245-276 (2002).
- [14]Shahasaveri et al. A novel hybrid meta-heuristic algorithm for solving multi objective flexible job shop scheduling, J. Manuf. Systems, 32(4) pp.771-780 (2013).
- [15]Shao et al. Hybrid discrete particle swarm optimization for multi-objective flexible job-shop scheduling problem, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 67(9-12), pp.2885-2901 (2013).
- [16] Hong Zhou, Waniman Cheun, Minimizing weighted tardiness of job-shop scheduling using a hybrid genetic algorithm,Euro. J. Oper. Res., vol.194(3), pp.637-649 (2009).
- [17] Veronique Sels, Mario Vanhouck, A hybrid genetic algorithm for the single machine maximum lateness problem with release times and family setups, Euro. J.Oper. Res., 9(10), pp2346-2358 (2012).
- [18]K. Deb, A. Pratap, S. Agarwai, and T. Meyarivan, A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, IEEE Trans. on Evolutionary Computation, 6(2), pp.182-197, (2002).
- [19] 堀井宏祐,國藤進,松澤照, 非同期型島モデル並列GAの評価, 計測自動制御学会論文集 35(vol.11), pp1394-1399 (1999).
- [20]中村善太郎, 流動数分析の仕事の改善での活用, 日本経営工学会誌, 36(2), pp.93-100 (1979).