

# タブーリストを組み入れたハイブリッド GA による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の最適化

森永泰彦<sup>†1</sup> 丸田峻也<sup>†2</sup> 長尾征洋<sup>†1</sup> 佐野充<sup>†3</sup>

本論では、多品種の製品を受注生産している中小企業における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(FJSP)の最適化について述べる。問題の目的には重み付けした納期遅れ、段取り者の負荷の平準化、工程内在庫高を取り上げ、最適化手法としてはタブーサーチに用いるタブーリストを組み入れた遺伝的アルゴリズム(GA)を開発し、受注生産型の中小企業の実生産データを用いて研究を行った。開発した本手法の解と納期のみを優先させる EDD(Earliest due date)法、及び、マルチアイランドを組み入れた GA によって得た解とを比較し、本手法の有効性を確認した。

## Optimization of multi-objective flexible job shop scheduling using hybrid Genetic algorithm with Tabu list

YASUHIKO MORINAGA<sup>†1</sup> SHUNYA MARUTA<sup>†2</sup> MASAHIRO NAGAO<sup>†1</sup>  
MITSURU SANO<sup>†3</sup>

This paper describes the optimization of a multi-objective flexible job-shop scheduling problem (MO-FJSP) in small and medium-sized enterprises (SMEs) where a wide variety of products are manufactured by make-to-order system. Genetic Algorithm using Tabu lists was applied to solve the MO-FJSP incorporating weighted tardiness, setup-worker-load balance, and work-in-process as the objective functions. The obtained solutions by the proposed method are compared with those obtained by conventional earliest due date (EDD), and GA using multi island, and the results confirmed the effectiveness of the proposed method.

### 1. はじめに

ものづくりの中小企業が持続的に発展していくには、下請け体質から脱却しマーケティングを意識した独自性のある多品種少量の受注生産に対応できるフレキシブルな生産システム採用することが選択肢の一つとして考えられる。フレキシブルな生産システムを支えるには、マーケティング受注-生産(-在庫)-納品を一貫して把握する情報システムが必要であるが、中でも、中小企業の限られたリソースを効率的に活用し顧客ニーズに応えるための生産スケジューリングが重要である[1,2,3]。

受注生産の生産スケジューリングで留意すべき点は、顧客納期に応えること [4,5,6]、経営資源の制約の多い中小企業におけるリソースの負荷の平準化を図る[7,8,9]こと、さらに、適切なキャッシュフロー確保のため工程内在庫にも配慮することである。即ち 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生産システムをもつ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。

以上の背景から、この十数年間、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(MO-FJSP)の研究

が行われてきた。Kacem et al. [10]は、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[11,12]が多く見られる。しかし、受注生産で重要となる納期を考慮した論文[13,14]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。工程内在庫に関する研究はフローショップに関しては見られるものの[15]、フレキシブルジョブショップに関する研究は見られない。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]などに固定したパターンを対象として取り上げ提案アルゴリズムの有効性を議論する報告が多く、実際の生産現場での生産システムをモデルとした最適化問題に関する研究は少ない。

本論では、実在する中小企業の受注生産環境下における多目的(重みづけ納期遅れ、段取り者の負荷、工程内在庫)の最適化を扱う。近似最適解を求める解法として、大域的な解の生成に優れている遺伝的アルゴリズム(GA)を基本とするが、GAは局所的探索能力に劣る点も知られている。そこで、この欠点を補うためタブーサーチに用いられるタブーリストを組み込んだハイブリッド GA アルゴリズム TS-HGA 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。

<sup>†1</sup> 名古屋大学 大学院 環境学研究科  
Nagoya University Graduate School of Environment Studies

<sup>†2</sup> 名古屋大学 大学院 情報科学研究科  
Nagoya University Graduate School of Information Science

<sup>†3</sup> 中部大学  
Chubu University

以降の節は次の構成からなる。2 節は受注生産における MO-FJSP の問題の設定をおこなう。3 節では今回の研究で用いた TS-HGA の構成について、4 節では実験条件と設定するパラメータについて述べ、5 節では、多目的に関する実験結果とそれに対する考察を加え、6 節で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 MO-FJSP

### 2.1 問題の構成

MO-FJSP は与えられたジョブ、各ジョブを定められた順序で処理するオペレーション、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。

今回は重みづけ納期遅れ、段取り者の負荷の平準化、工程内在庫を最適化するため、表 1 に示すようにジョブ毎のオペレーションと各機械との組合せのほかに、遅れ重み、ロットサイズ、単価の項目を加え、更に表 2 に示す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、ロットサイズ  $L_k$  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、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。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  $L_k$  との積からなるジョブ毎の加工時間  $P_{kim} (P_{kim}=p_{kim} \times L_k)$  経過後に終了する。機械  $M_m$  において、あるジョブのオペレーションから次のジョブのオペレーションに作業が変更されるとき、前のオペレーションとの種類が異なっていれば、 $w$  人の段取り者  $W_w (W_1, W_2, \dots, W_w)$  のうち対応可能な段取り者の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。

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
- 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
- 1 台の機械は、一度に 1 つのオペレーションのみ処理する
- 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
- ジョブ毎のオペレーション順序はジョブ毎に定められた順序に従う
- 一人の段取り者は同時に複数機の段取りをしない

### 2.2 評価関数

#### (1) 重みづけ納期遅れ

ジョブ  $J_k$  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  $T_k(\max\{0, e_k - d_k\})$

表 1 オペレーションと機械との関係

ジョブ	納期	遅れ重み	ロットサイズ	単価	オペレーション			機械		
					$O_{11}$	$O_{12}$	$O_{13}$	$M_1$	$\dots$	$M_m$
$J_1$	$d_1$	$\alpha_1$	$L_1$	$C_1$	$O_{11}$	$O_{12}$	$O_{13}$	$P_{111}$	$P_{112}$	$P_{11m}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$J_k$	$d_k$	$\alpha_k$	$L_k$	$C_k$	$O_{k1}$	$O_{k2}$	$O_{km}$	$P_{k11}$	$P_{k12}$	$P_{k1m}$
					$O_{ki}$	$P_{ki1}$	$\dots$	$P_{kim}$		

表 2 段取り者と機械との関係

段取り者	機械		
	$M_1$	$M_2$	$M_m$
$W_1$	$\dots$	$S_{k12}$	$\dots$
$W_2$	$S_{k21}$	$\dots$	$S_{k2m}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$W_w$	$\dots$	$S_{kw2}$	$\dots$

とする。従って、各解における重みづけ納期遅れは、ジョブ毎の納期遅れ  $T_k$  に重み  $\alpha_k$  を付加し、全てのジョブの重みづけ遅れの総和を遅れ指数 (TD) として (1) 式での最小化を目的とする。

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

#### (2) 段取り者の負荷平準化

多品種の受注生産の場合、日々、複数のジョブ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、ショップ内のジョブは日々入れ替わる。従って、スケジュール設定時にショップ内に保有されていたジョブは日々減少して、翌日以降、新たなジョブが追加されることになる。従って、スケジュール設定時点で受注している全ジョブをスケジュール対象とし、段取り者負荷の平準化を考慮するにはスケジュール対象のジョブの変化を反映した段取り負荷を考慮する必要がある。[16]

上述のようにスケジュール設定時のジョブ数 ( $k_0$ ) は  $\tau$  日目には  $k_\tau$  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許容回数を  $L_0$  とすると、当該ジョブに対し  $\tau$  日目の段取り許容回数 ( $L_\tau$ ) は  $(k_\tau / k_0) \times L_0$  となる。ここで、 $k_\tau / k_0 = \beta_\tau (\beta_0 = 1)$  とおくと  $L_\tau / \beta_\tau = L_0$  となるが、この  $L_0$  を許容段取り回数  $SL$  と考え、 $SL = L_0$  と設定し  $L_\tau / \beta_\tau \leq SL$  の条件で (2) 式による段取り負荷の最小化を目的とする。

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

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

$L_{\tau\_max}$  は  $\tau = 1, 2, \dots, T$  における段取り回数の最大値である。

#### (3) 工程内在庫

各ジョブの在庫コストは単価 ( $C_i$ )  $\times$  ロットサイズ ( $L_i$ ) となる。スケジュール時点で受注している全てのジョブが、納期を考慮してショップ内に投入され出荷されるまで期間、即ち、ショップ内に存在する期間の在庫コストを積算しこれを工程内在庫高 (WIP) とし、(4) 式による工程内在庫の最小化を目的とする。

$$\min WIP = \sum_{l=t_k}^{T_k} \sum_{i=1}^k C_i L_i \quad \dots\dots\dots (4)$$

但し、 $t_k$ はジョブ  $J_k$ のショップ内へのリリース時期、 $T_k$ はジョブ  $J_k$ の出荷時期である。

### 3. タブーリストを用いる遺伝的アルゴリズム

#### 3.1 段取り者を考慮した遺伝子表現

本提案では、先行研究と異なり段取り者を考慮した遺伝子表現が必要である。以下、ジョブ数を  $2(J_1, J_2)$ 、機械数を  $2(M_1, M_2)$ 、段取り者を  $2(W_1, W_2)$ 、各ジョブは夫々2の4オペレーション( $O_{11}, O_{12}, O_{21}, O_{22}$ )で処理される簡単な例で説明する。ジョブ、機械、段取り者、オペレーションが図1の関係であると仮定すると、オペレーションの組合せは表3のジョブ表現番号表に示す様に6個のジョブ表現番号からなる。即ち  $O_{11}$ は  $M_1$ (段取り者  $W_1$ )でのみ対応可能ゆえ選択肢は1個の表現番号、 $O_{12}$ は  $M_2$ (段取り者  $W_1$  or  $W_2$ )で対応可能ゆえ選択肢は2個、 $O_{21}$ は  $M_2$ (段取り者  $W_1$  or  $W_2$ )で対応可能ゆえ選択肢は2個、 $O_{22}$ は  $M_1$ (段取り者  $W_1$ )と  $M_2$ (段取り者  $W_1$  or  $W_2$ )とで対応可能ゆえ選択肢は3個となる。このジョブ表現番号表から各ジョブのオペレーションを処理する機械を読み取り、GAで取り扱う表5の遺伝子表現が得られる。表4の各遺伝子座にはジョブ表現番号が入り、例えば機械1ではジョブ表現番号①→②の順に処理を行い、機械2ではジョブ表現番号②→④→①→③→⑥の順に処理することを示している。なお、-1の数値は機械によっては有効な遺伝子座が少ないため交叉処理や突然変異処理が円滑に行われぬ場合があり、機械の休止の意味で機械毎に複数個挿入する。

次に、GAで取り扱うための遺伝子表現から評価値を計算するための表現型への変換を行う。機械ごとに先頭の遺伝子から順に読み取り、設定されたオペレーションを行い表5に示すガントチャートに記述していく。ガントチャートは縦軸に機械名が記述され、横軸には各時間における段取り者、又はどのジョブのオペレーションが処理されてい

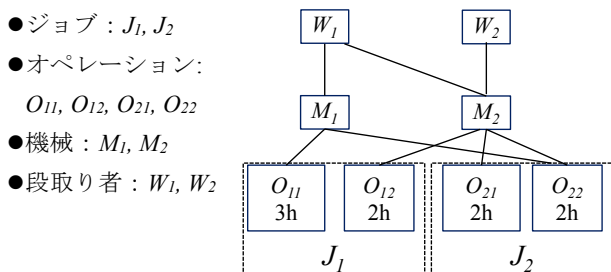


図1 オペレーション、機械、段取り者の関係例

るかを示している。例えば、 $M_1$ の行では、最初の時間枠は-1があるので休止、2枠目はジョブ表現番号①の  $J_1$ のための段取り者  $W_1$ の段取り作業が入りその後、3~5枠目は  $J_1$ が処理される。その後、表4の遺伝子座iiiにジョブ表現番

号②がセットされているが、 $M_2$ で既にジョブ表現番号②が処理されているので  $M_1$ での処理の対象はなくなる。6枠目は表4の遺伝子座ivに-1がセットされているので休止する。このように、ガントチャートよりジョブ毎の開始時間、終了時間、段取り回数が算出され、これを基に  $TD$ 、 $SL$ 、 $WIP$ が導出される。

表3 ジョブ表現番号

ジョブ番号	表現番号	$O_{11}$ or $O_{21}$	$O_{12}$ or $O_{22}$
$J_1$	①	$M_1, W_1, 3h$	$M_2, W_1, 3h$
$J_2$	②	$M_2, W_1, 2h$	$M_1, W_1, 2h$
$J_1$	③	-	$M_2, W_2, 2h$
$J_2$	④	$M_2, W_2, 2h$	$M_2, W_1, 2h$
$J_1$	⑤	-	-
$J_2$	⑥	-	$M_1, W_1, 3h$

表4 遺伝子表現

遺伝子座	i	ii	iii	iv	v	vi	vii	viii
機 $M_1$	-1	①	②	-1				
機 $M_2$	②	④	①	③	⑥	-1	-1	

表5 ガントチャート

時間	1	2	3	4	5	6	7	8	9
機 $M_1$	-1	$W_1$	$J_1$	$J_1$	$J_1$	-1			
機 $M_2$	$W_1$	$J_2$	$J_2$	$W_1$	$J_2$	$J_2$	$W_2$	$J_1$	$J_1$

#### 3.2 タブーリストを用いるGAオペレーション

##### (1) 基本的なGAのフロー

初期個体から複数個の個体をランダムに作成し個体群を生成する。本研究の遺伝子表現の概念を表4で示したが、個体ごとを1次元の配列で示すと図2のようになる。各個体は使用する機械毎に固定長の配列を持ち、この配列は当該機械で処理するジョブ表現番号が処理順で並んでいる。遺伝子表現に基づいてガントチャートを作成し、個体ごとに重み付け納期遅れ、段取り者毎の段取り回数、工程内在庫高を算出し、パレート解を導出する。同一パレート面に含まれる導出解間のユークリッド距離を算出し混雑度と定義し、この値が大きいかほど混雑度が低いとする。この混雑度が低い順(距離が大きい順)にランク付けを行い、更に解の多様性を確保するためルーレット選択を採用し次世代の個体群を作るための親個体を選択する。選択された親個体に対し以下の交叉、突然変異処理を行い、次世代を生成する。

交叉オペレーションは機械毎の交叉と機械内の交叉の2方法で行う。機械毎の交叉は親となるべき二つの個体の同一機械毎での交叉であり、例えば、図4において機械3がランダムに交叉対象として選択されたとすると、個体iの遺伝子座  $K \sim O$ が個体jの遺伝子座  $k \sim o$ と入れ替わる。機械内の交叉は同一機械内での交叉であり、例えば、図4では機械1の中の交叉対象として遺伝子座  $B \sim D$ がランダムに交叉対象として選択されたとすると、 $B \sim D$ と  $b \sim d$ を入れ

替える交叉である。

突然変異の処理は2つの親の同一機械においてランダムに選択した同一遺伝子座間で一定確率のもとで行われる。

**(2) TS-HGA でのタブーリストの導入**

提案手法の交叉処理での基本的な考え方は、上記の2つの交叉のうち機械毎の交叉の際、機械ごとに図2に示す交叉マスクをランダムに設定し交叉マスクに従って機械間の交叉を行う。交叉マスクは設定した条件に従いタブーリストに格納し、タブーリストに書き込まれている交叉処理を一定期間禁止することにより、無駄な交叉を少なくすることができる。

突然変異へのタブーリストへの適用は突然変異を行う遺伝子座を限定することにより無駄な突然変異を少なくすることができる。

**3.3 マルチアイランド GA(MI-GA)のオペレーション**

今回の提案手法の性能を確認するために多様な解を探索可能な多目的MI-GAによる結果と比較する。MI-GAは、前述の基本的なGAの中で、生成した個体群を複数の島に分配し、一定世代の間、島の中で前述のGAオペレーションを行わせる。島内では、島ごとに評価値の混雑度の重みづけを設定しそれに基づいて解が評価されるが、一定世代後に島間の移住オペレーションを行い局所解を避ける。

**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項で実験におけるパラメータの設定を行なう。

**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。

今回対象とする上記の中小企業において、最近の受注状態を反映し、ジョブ当たり1~9オペレーションを持つ109ジョブが受注され、これらを6名の段取り者と10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

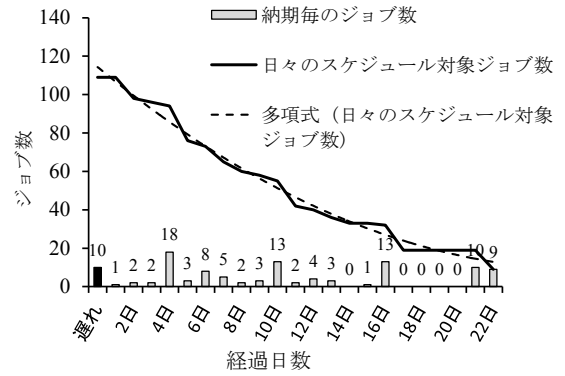


図3 ジョブ数の変化

げる。図3は計画時点における納期までの日数毎のジョブ数の変化を示しており、納期までの最大日数は22日、既に納期を過ぎていたジョブは10ジョブある。また、日毎のスケジュール対象の折れ線グラフに示すように、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 $\beta_x$ を決定しこれと式(2)から、SLを導出する。

表7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より試算した遅れジョブによるTD値を示している。納期までの残日数が負の値を示すジョブは図3に示す既に納期遅れとなっている10ジョブで、更に、 $J_4, J_5, J_{43}$ が遅れジョブに加わっている。 $\alpha_k$ はジョブ毎の遅れ重みを表す。 $J_1$ を例にとると、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日となり、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12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1251となる。この試算は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TS-HGAやMI-GAの到達解の一つの目安となり、段取り者負荷の平準化や工程内在庫の最小化を織り込んだ今回の提案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。

**4.2 実験におけるパラメータの設定**

実験に用いる遺伝的アルゴリズムの各パラメータ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、表8の数値を用いた。

なお、MIGAの混雑度算出時の重みづけは、12島毎に特徴を与えるため、 $k_{TD} + k_{SL} + k_{WIP} = 1$ となるように、それぞれの島ごとに設定し多様な解の導出を促している。

交叉マスク	0	0	1	0	...														
	= 機械1 => 機械2 => 機械3 => ... => 機械m =>																		
個体 i	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	...
個体 j	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	...
...																			
...																			
個体 n																			

図2 個体群の染色体構造

表 6 EDD による TD 値の導出結果

ジョブ	ロットサイズ	納期までの残日数	必要日数	加工完了日	$T_k$	$\alpha_k$	$\alpha_k T_k$
$J_1$	10	-6	1	1	7	100	700
$J_4$	2	6		7	7	100	100
$J_5$	100	6		8	2	100	200
$J_{40}$	100	-3	2	2	5	5	25
$J_{41}$	100	-2	3	3	5	5	25
$J_{42}$	55	-2	3	4	6	5	30
$J_{43}$	1	1		2	1	5	5
$J_{58}$	35	-11	5	5	16	1	16
$J_{93}$	2	-3	3	3	6	5	30
$J_{94}$	2	-3	3	3	6	5	30
$J_{95}$	2	-3	3	3	6	5	30
$J_{95}$	2	-3	3	4	6	5	30
$J_{96}$	100	-3	3	4	6	5	30
TD							1251

表 7 遺伝的アルゴリズムのパラメーター一覧

	TS-HGA	MI-GA
個体数	20	144
島数	-	12
島内個体数	-	12
機械毎交叉率	70%	70%
機械内交叉率	70%	70%
突然変異率	20%	20%
交叉探索禁止形式	交叉マスク	-
交叉 TS の実施間隔	2000 世代	-
交叉 TS 実施時の繰り返し数	500 回	-
突然変異探索禁止形式	遺伝子表現	-
突然変異 TS の間隔	1000 世代	-
突然変異 TS 実施時の繰り返し数	5 回	-
島間移住頻度	-	5000 世代
混雑度算出時の重み	TD	$k_{TD}$
	SL	$k_{SL}$
	WIP	$k_{WIP}$
世代数	400,000	400,000

### 5. 実験結果と考察

図 4 に TS-HGA , MI-GA 及び EDD により得られた解の分布を示す. 受注生産において最も重要な目的は納期遵守であるので, スケジューリングでは TD の最小化が優先されるべきで, この観点から判断すると, TS-HGA は小さい SL, WIP で低い TD 値を導出しているといえる.

同じく, 図 5 には TD=1200 に収束した TS-HGA(TD=1201) と MI-GA(TD=1198)の解の収束状況を示す. 両者の収束値とも表 7 に示した EDD による TD 値 (1251) より優れているが, TS-HGA が MI-GA に対して短時間で TD 収束値に近づいていることが認められる. これは TS-HGA がタブーリストにより冗長な探索を防止している点と両者の個体数の差が影響していると考えられる.

次に, 段取り負荷の平準化について述べる. 図 5 は図 4 の中で最適近傍と見なされる解 (TD=1201, SL=9, WIP=35041710)でのガントチャートから得られた段取り者 ( $W_1 \sim W_6$ )の日毎の段取り回数を示しており, 図 3 のジョブ

数の変化を反映舌段取り回数と見なせる. しかし, ここで改めて 2.3 項で述べたように, ジョブの減少率を反映した数字で平準化されていることを確認しておく必要がある.

図 6 の段取り負荷の日々の最大値  $L_{\tau, max}$  を表 8 の中段の  $\beta_{\tau}$  に基づき変換すると表 8 の最下段の如く段取り回数の最大値が平準化された状態となっていることが確認できる.

次に, 工程内在庫に関し, 図 4 における TS-HGA の WIP (約  $35 \times 10^6$ ) と EDD の WIP (約  $41 \times 10^6$ ) との日毎の在庫高の推移の比較を図 8 に示す. 図 8 は TS-HGA のほうが納期を満足させつつ適切な時期にジョブがジョブショップ内にリリースされ工程内で停滞するジョブ即ち工程内在庫を低下させていること, 更に在庫高最大値も低下させていることを示している. 即ち, 提案手法はより少ない運転資金と在庫スペースでより納期を満足する生産スケジューリングを導出可能であることを示している.

### 6. まとめ

本研究では, FJSP における重みづけ納期遅れ, 段取り負荷, 工程内在庫の最小化を目的にした多目的最適化のためのタブーサーチの考えを織り込んだ TS-HGA による生産ス

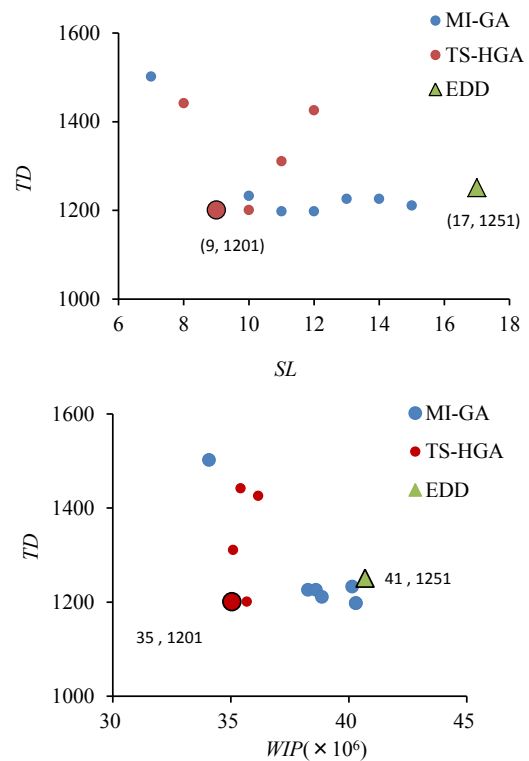


図 4 TS-HGA, MI-GA の近傍界解と EDD の解との比較

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。

TS-HGA の性能評価のため、従来法である EDD によるスケジューリングと広域な解を提供する MIGA との比較実験を行い、TS-HGA 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短時間で MI-GA と同等以上の収束解に達することを確認できた。今後の課題としては、広範囲な実務展開にはより短時間の処理時間が望まれるので、これに向けたアルゴリズムの開発が必要と考えられる。

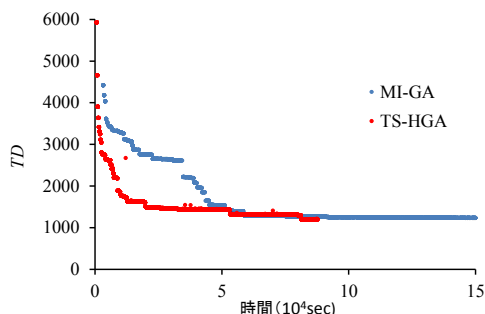


図5 TDの収束状況

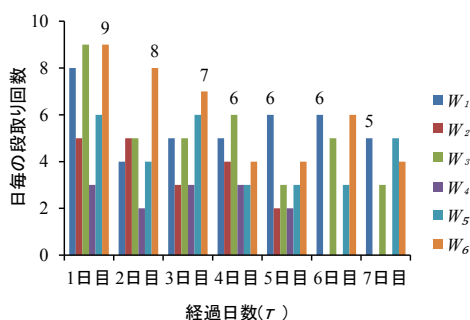


図6 ガントチャートによる段取り回数

表8 換算段取り回数

$\tau$ (経過日数)	1	2	3	4	5	6	7
$L_{\tau\_max}$	9	8	7	6	6	6	5
$\beta_{\tau}$	1	0.93	0.86	0.8	0.74	0.68	0.62
$[L_{\tau\_max}/\beta_{\tau}]$	9	9	9	8	9	9	9

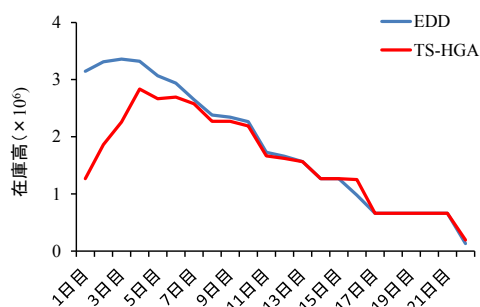


図7 在庫高の経時変化

## 参考文献

- [1] 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).
- [2] 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).
- [3] Jean-Marie Proth, Scheduling: New trends in industrial environment, Annual Reviews in Control, 31(1), pp.157-166 (2007).
- [4] Sawik, Tadeusz, Selection of a dynamic supply portfolio in make-to-order environment with risks, Com. & Oper. Res., 38(4) pp.782-796 (2011).
- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] 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).
- [12] 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).
- [13] Hong Zhou, Wanman Cheun, Minimizing weighted tardiness of job-shop scheduling using a hybrid genetic algorithm, Euro. J. Oper. Res., vol.194(3), pp.637-649 (2009).
- [14] 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).
- [15] Peter B.Luh et al., An effective method to reduce inventory in job shop, IEEE transaction on robotics and automation, vol.16, no.4, August 2000
- [16] Y. Morinaga, M. Nagao, M. Sano, Optimization of Flexible Job-shop Scheduling with Weighted Tardiness and Setup-Worker Load Balance in Make-to-order Manufacturing, Proceedings of the Joint 7th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 15th International Symposium on Advanced Intelligent Systems, 87-94, ISBN: 978-1-4799-5954-9. ((SCIS & ISIS 2014) held on December 3rd-6th, Kitakyushu International Conference Center, Kitakyushu, Japan.)