

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)

森永 泰彦
(MORINAGA Yasuhiko)

名古屋大学大学院環境学研究科 博士 (環境学)

2016 年

目次

第 1 章 序論	1
1.1 背景	1
1.1.1 中小企業の役割と課題	1
1.1.2 受注生産における生産システムの物的構成	2
1.1.3 受注生産における情報システムとスケジューリングの位置づけ	4
1.2 先行研究	7
1.2.1 スケジューリング問題	7
1.2.2 単一機械問題(single machine sequencing)	8
1.2.3 並列機械問題(parallel machine models)	8
1.2.4 フローショップ・スケジューリング(flow shop scheduling)	9
1.2.5 ジョブショップ・スケジューリング(job shop scheduling)	9
1.2.6 フレキシブル・ジョブショップ ・スケジューリング(flexible job shop scheduling)	10
1.3 本研究の位置づけと狙い	11
1.4 論文の構成	14
第 2 章 受注生産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の定式化	15
2.1 用語の説明	15
2.2 問題の構成	16
2.3 目的関数	18
2.3.1 重みづけ納期遅れの最小化	18
2.3.2 段取負荷の平準化	18
2.3.3 工程内在庫の最小化	21
第 3 章 島モデル遺伝的アルゴリズム	23
3.1 段取者を考慮した遺伝子表現	23
3.2 島モデル遺伝的アルゴリズムの構成	26

3.3 島モデルについて	28
3.3.1 島モデル採用の背景	28
3.3.2 個体の島間の移住	30
3.4 親世代の選択と次世代の生成	31
3.4.1 親世代の選択	31
3.4.2 次世代の生成	33
3.5 まとめ	37
第4章 島モデル遺伝的アルゴリズムの検証	39
4.1 実験データ	39
4.2 EDDにより得られるガントチャート例	42
4.3 GAのパラメータの設定	46
4.4 段取者間の負荷差の最小化	46
4.4.1 スケジュール間隔：1日毎 (T=1) の実験結果	47
4.4.2 スケジュール間隔：2日毎 (T=2) の実験結果	51
4.4.3 スケジュール間隔：3日毎 (T=3) の実験結果	54
4.4.4 段取者間の負荷差の最小化まとめ	58
4.5 日毎の最大段取負荷の最小化	59
4.6 まとめ	65
第5章 経営リスクとその対策法の評価実験	67
5.1 実験条件	67
5.2 実験結果	68
5.2.1 段取者離脱の影響とその対策の実験結果	69
5.2.2 納期短縮の影響とその対策の実験結果	71
5.3 まとめ	75
5.3.1 段取者の離脱の影響とその対策効果の評価	75
5.3.2 納期短縮の影響とその対策効果の評価	75

第 6 章 タブー・リストを用いる遺伝的アルゴリズム	77
6.1 タブー・リストを用いる GA オペレーション	77
6.1.1 タブー・サーチの概要	77
6.1.2 TS-HGA でのタブー・リストの組込み	79
6.2 TS-HGA のパフォーマンスの評価実験	82
6.2.1 実験データ	82
6.2.2 実験におけるパラメータの設定	86
6.3 実験結果と考察	87
6.3.1 TS-HGA, MI-GA と EDD からの導出解の比較	87
6.3.2 TS-HGA と MI-GA の TD 値の収束時間の比較	92
6.3.3 段取負荷の平準化の確認	92
6.3.4 工程内在庫 WIP の比較	94
6.4 まとめ	94
第 7 章 結論	95
7.1 本論文のまとめ	95
7.2 今後の課題と展開	97
謝辞	101
付録 A 初期遺伝子の生成	103
付録 B 機械単位の交叉の効果の確認	109
業績論文	113
参考文献	115

第 1 章 序論

1.1 背景

1.1.1 中小企業の役割と課題

企業は社会システムの重要な担い手の一つであり、その企業の中でも、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 [1] は、地域コミュニティの維持や経済の持続性に対し重要な役割を担っており [2,3]、これらの中小企業の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、今まで日本の経済成長を牽引してきた輸出型基幹組立企業の海外シフトや競争力低下で、これらの組立産業の下請け取引先である国内の中小製造業の受注量が減少している。また、社会の成熟化による需要の多様化や技術革新による商品のライフサイクルの短縮化により、受注品の変化の影響も受けている。これに加えてサプライチェーンの進展により、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おり [4]、受注品の種類が期間毎に変化するとともに生産量が受注の都度変化する「変種変量」化の傾向が強まってきている。このような環境のもと、従来の下請け体質のままでは、中小の製造業が競合企業との競争の中で生き残っていくのは困難な状況となっている [5]。

従来のツリー型取引構造の下での下請け製造業は、取引先からの継続的な注文により繰返し生産を行なうことが多く、見込み生産で工程内在庫や完成品在庫を保有しても、新製品への移行時にはこれらの在庫を納入先に引き取って貰うことができた。しかし、メッシュ型取引構造下では継続的な取引は保証されにくく、しかも短納期要求の傾向が強まってきており、従来の取引構造の下での繰返し生産を背景にした生産ロットサイズを大きくすることによる収益確保が困難になってきている。

このような状況下、今後、中小企業が持続的に発展していくには、上記の下請け体質から脱却し、環境の変化に対応した体質へ進化・成長していかなければならない。そのためにはマーケティングの視点で自社の現在の位置づけを確認しつつ、顧客の要求に迅速、柔軟に対応できる自社独自の成長パターンを確立していく必要がある。奥山 [6] は、その成長パターンとして「下請け・部品加工型」から「試作・多品種少量生産型」、「研究開発支援型」、「自社製品型」への転換を挙げているが、上記の需要の多様化や技術革新による商品のライフサイクルの短縮化の背景を考慮すると、「下請け・部品加工型」の中小企業の次なる進化のステップとしてメッシュ型取引構造下で

の変種変量の生産品の受注生産に対応できる体質へ変革することが選択肢として考えられる。変種変量の生産品やサービスを扱う受注生産では、引合・見積り受注生産計画－工程管理－納品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ルリングは納期、コスト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ルリングの重要性も高まっている。

一方、受注生産では、品質・コストに加え納期遵守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、ムラ・ムリのある勤務形態となることがある。また、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や作業のムラやムリなどにより企業の競争力を低下させる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、効率的で最適な生産スケジュールリングは企業競争力を高め、従業員の厚生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ルリング法の開発を目指す。その対象となる生産システムは物的な構成とこの物的な構成を効率的に運営するための情報システムから構成されており、それぞれについて以下に概要を示す。

1.1.2 受注生産における生産システムの物的構成

受注生産における生産システムの物的構成は図 1.1 に示すように、(a) 単一機械システム、(b) 並列機械システム、(c) フローショップシステム、(d) ジョブショップシステム、(e) フレキシブル・ジョブショップシステムに分類される[7]。

① 単一機械システム

図 1.1 の分類 (a) に示すように、単一の生産設備でシステムが構成される。この場合、生産設備（以降、機械と称する）は大型の装置であることが多い。例えば、熱処理装置、表面処理装置、圧延機装置、大型 5 面加工機などが考えられる。それぞれの受注品（以降、ジョブと称する）は注文に基づいて加工処理されるが、ジョブによってロットサイズや加工処理条件が異なるため仕掛順序によっては段取時間・調整時間が異なる。さらに、それぞれのジョブには納期が設定されているのでそれぞれのジョ

ブの納期を考慮に入れた仕掛順の設定が求められる。

② 並列機械システム

図 1.1 の分類 (b) に示すように、同種の機能を有する複数の機械から構成され、単一機械システムの延長ともいえる。ジョブはこれらの機械のいずれかを用いて処理される。この場合、ジョブをどの機械で処理するか、それぞれの機械でのジョブの生産順序をどのようにすればそれぞれのジョブの納期を満足させるとともに段取時間を少なくするかの運営が求められる。

③ フローショップシステム

図 1.1 の分類 (c) に示すように、特定の製品グループの加工用に構成された生産システムでジョブ間での仕様の差は少なく、全てのジョブの加工処理（以降、作業と称する）が同じ順序で殆ど全ての機械を経由し、それぞれの作業の処理時間も平準化されており、比較的少種の製品を繰返し生産する場合に用いられるシステムである。仕掛順序による工程内在庫や段取頻度を少なくすることが求められる。

④ ジョブショップシステム

図 1.1 の分類 (d) に示すように、各ジョブの作業は特定の機械で処理されるが、經由する機械の順序はジョブによって異なり、全ての機械を経由することもない。変種変量品を汎用機で加工する受注生産に導入される用いられるシステムである。

⑤ フレキシブル・ジョブショップシステム

図 1.1 の分類 (e) に示すように、ジョブショップを更に一般化した形態で、各作業が同じ機能を持った複数の機械を選択可能としたものである。このフレキシブル・ジョブショップを効率的に運営するには、きめ細かな生産スケジュールにより機械やジョブの待機時間を減らすことが必要となる。このフレキシブル・ジョブショップには、システムを構成する全ての機械がすべての作業に対応できるトータル・フレキシブル・ジョブショップ（total flexible job shop : T-FJS）と、構成する機械が一部の作業に対応する部分的なフレキシブル・ジョブショップ（partial flexible job shop : P-FJS）がある[8]。T-FJS の実現にはシステムを構成するすべての機械がほぼ同時期に導入されるなど類似の加工対応の仕様を持つ場合に限られるとともに、関連の付帯設備も含めて同仕様に維持管理するなど、中小企業にとって実現の可能性は低い。従って、現実的なフレキシブル・ジョブショップは P-FJS となることが多い。

「変種変量生産型」への移行には、図 1.1 に示す生産システムのなかで多品種の受注生産に最も対応しやすい柔軟な生産システム、即ちフレキシブル・ジョブショップ

型を採用することが必要となり[9, 10, 11], その中でも現実的な P-FJS で運営されることになる.

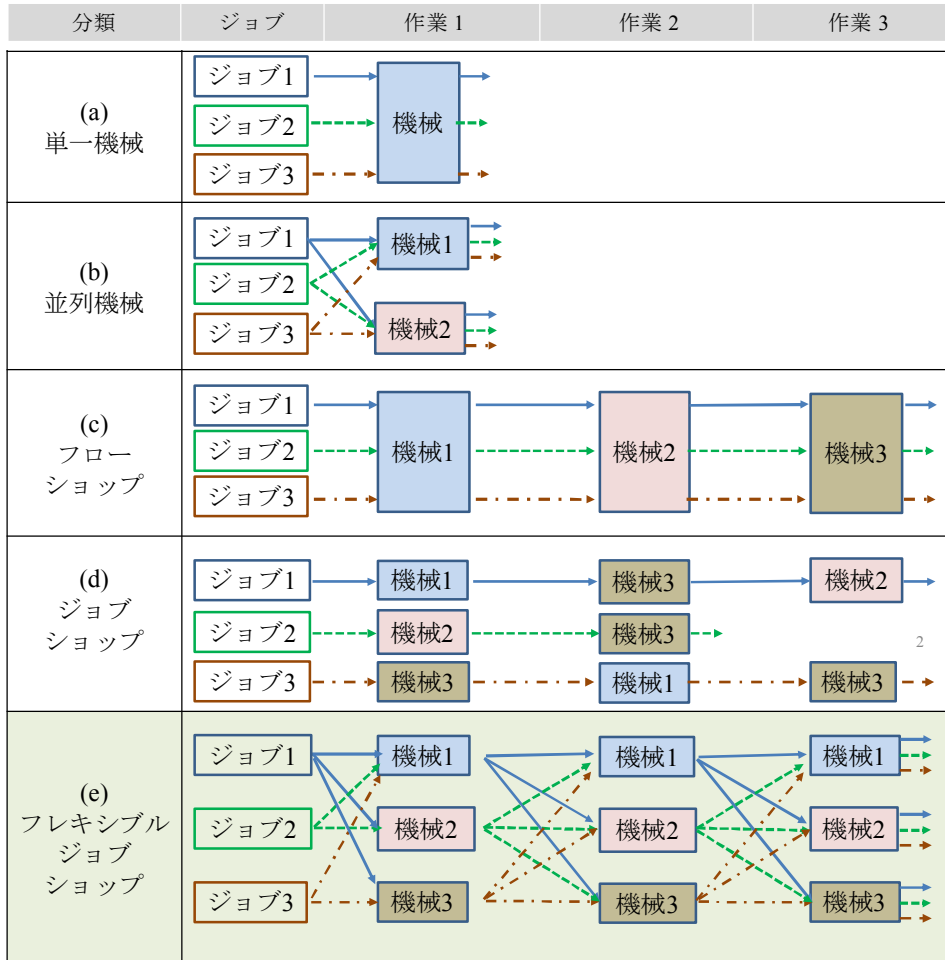


図 1.1 受注生産における生産システムの物的構成の種類

(参考文献[7]を引用, 筆者加筆)

1.1.3 受注生産における情報システムとスケジューリングの位置づけ

フレキシブル・ジョブショップにおける様々な品種やロットサイズ, 納期などのジョブに関する情報の多様性, 人や生産設備などの経営資源の情報の多様性から, フレキシブル・ジョブショップにおける受注生産を効率的に運営するには, これを支える情報システムが必要となる. 中でも中小企業の限られた人や設備などの経営資源を効率的に活用し顧客ニーズに応えるためのフレキシブル・ジョブショップには適切なスケジューリングが要求される[12, 13]. 図 1.2 に受注生産の情報の流れの例を示すが, 図に示す受注生産の情報の流れでは, 引合・見積-受注-生産計画-工程管理-納品

を中心とする生産管理の重要性が高く、生産計画の中でも生産スケジューリングは納期、コストに大きな影響を与える。

手順「①引合」では、顧客からの要求仕様に対し、要求仕様と過去に受注した類似品の受注履歴から効率的な工程（作業の組合せ）を設計し、この工程と見積基準に基づき見積額を算出することとなる。合せて、受注した場合を想定し納品可能日を推定し顧客に提示する。このように、受注生産では受注に先立って精度の高い納期見積りが要求されることが増え、営業ツールとしてもスケジューリングの重要性が高い[14]。

受注が確定した後、改めて、その時点で既にショップ内に投入されているジョブに新たな受注ジョブを加えたスケジュールを定期的に更新する。受注生産では日々、ジョブが出荷され新たにジョブを受注するほか、前日に作成したスケジュール通りに作業が実施されないこともあり、これらの結果を次のスケジュールに反映させることも要求される。

生産スケジュールはガントチャートで提示され、これに基づき進捗管理が行われる。ガントチャートは時刻とともにジョブがどう機械間を移行するかを示す形式と、機械別や作業員別にどの時点でどのジョブを加工するかを示す形式があるが、図 1.3 は機械数が 8、ジョブ数が 8 の機械別ガントチャートの例を示す。図の機械の列には機械 1~8 が並んでおり、機械 1 を例にとると時刻 2 から 5 まではジョブ 6 の 2 番目の作業、時刻 6 から 10 まではジョブ 7 の 2 番目の作業、時刻 11 ではジョブ 8 の 3 番目の作業の 3 番目の作業を行なうことを示している。一方、ジョブに視点を移しジョブ 1 を例にとると、1 番目の作業は機械 5、2 番目の作業は機械 4、3 番目の作業は機械 3 で処理されることを確認できる。

このように、受注生産において生産スケジューリングは生産計画においてはもちろん、引合時における見積において重要な位置を占めており、この適否によって受注可能高、受注品の納期やコスト、従業員の作業密度が左右されるといえる。

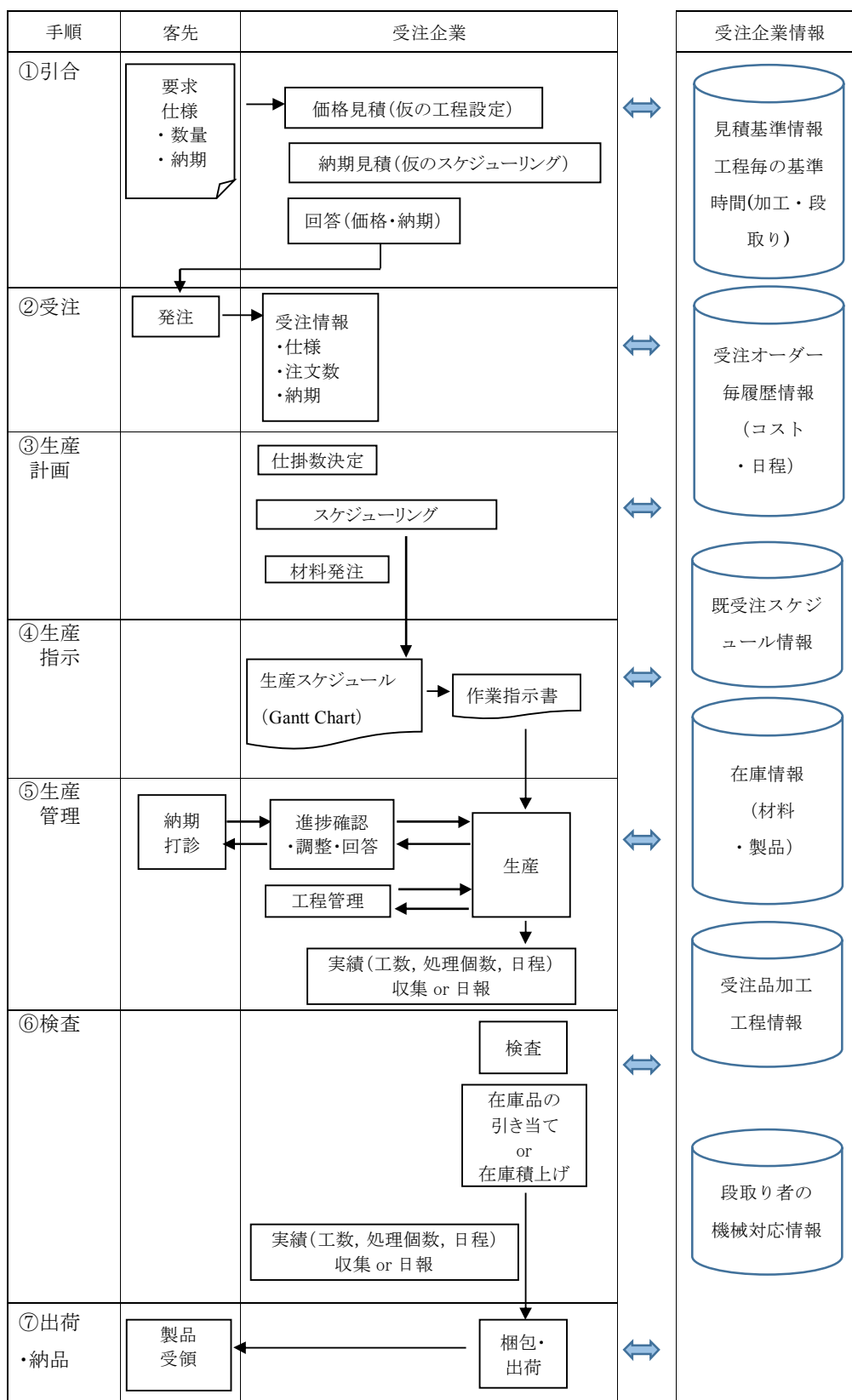


図 1.2 受注生産システムの情報の流れの例

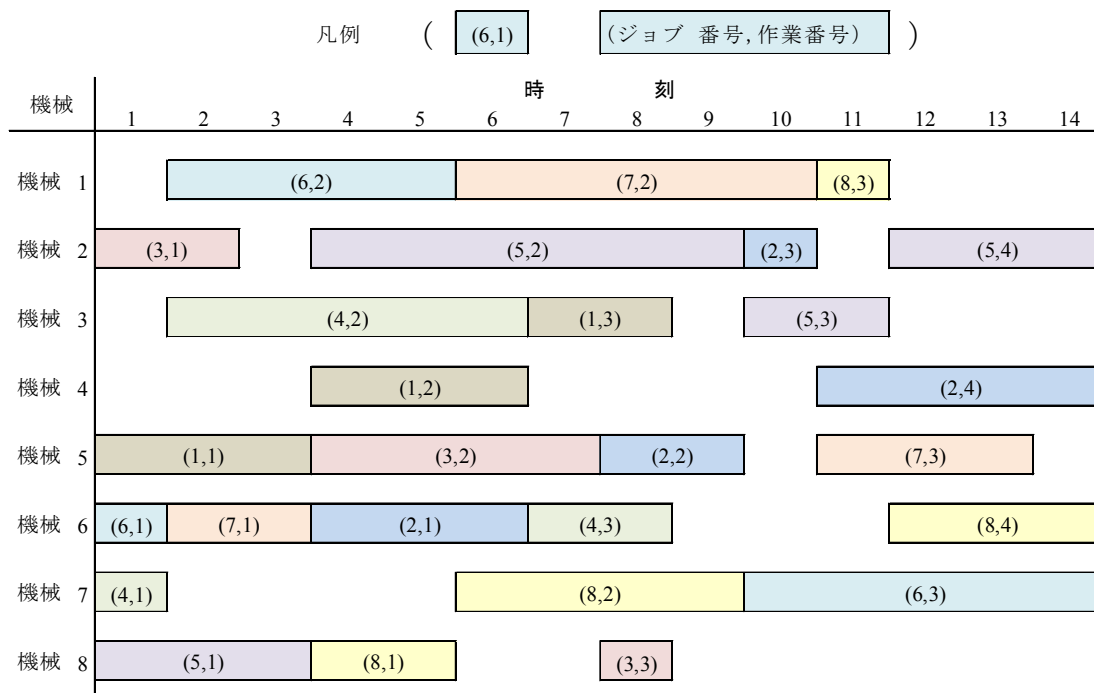


図 1.3 機械別ガントチャートの例

1.2 先行研究

1.2.1 スケジューリング問題

スケジュール問題とは、人や設備などの経営資源の制約の下で複数のジョブを効率良く要求される期限内に終了させるため、それぞれのジョブにおける複数の作業を「いつ」、「どの順序で」、「どの資源に」割り当てるかを決定する組合せ問題[15]である。代表的なスケジューリング問題としては、土木工事などのプロジェクトスケジューリング問題[16]、医療従事者の勤務スケジュールリング問題[17]、ロジスティクスにおける配送スケジュールリング問題[18]、サービス業務スケジュールリング問題[19]、今回取り上げる生産スケジュール問題などがある。

このなかで、生産スケジュール問題は、設備能力や作業者の能力、ジョブ毎の作業順序の制限のもと、与えられた全てのジョブの完了時期（メイクスパン：make-span）、機械の遊休時間、ジョブの待ち時間、総納期遅れなどの最小化を目的としている。生産スケジュール問題の解法として、数理計画法（mathematics programming）やディスパッチング・ルール（dispatching rule）、メタヒューリスティック手法が多く研究され

てきている。数理計画法では、分枝限定法 (branch and bound) やラグランジュ緩和法 (Lagrangian relaxation) 等があり、最適解を求めることができる。しかしながら、規模の増大につれて計算時間は指数的に増加するため、探索範囲の限定や計算時間の上限を設定し近似解法として利用されることが多い。また、ディスパッチング・ルールは優先規則によるジョブの割り当てを行う解法で、一般的に、加工時間の最も小さいジョブを優先させる規則である SPT (shortest processing time)、加工時間の最も大きいジョブを優先させる規則である LPT (longest processing time)、機械の前に到着したジョブの先着順を優先させる規則である FCFS (first come first service)、納期が最も早いジョブを優先させる規則である EDD (earliest due date)、納期までの余裕 (納期までの時間から作業時間を差し引いたスラックタイム) が最小のジョブを優先させる規則である LST (least slack time) がある。生産スケジュール問題の場合、実企業の操業を反映した問題設定をすると、多くの場合が NP 困難 (NP-hard) な問題となってしまう。このような問題に対しては、最適解を保証しないが、最適解に限りなく近い近似解を探索できるメタヒューリスティックによる解法の研究が多くなされてきた[20]。以下、これらの手法が下記の問題に対してどのように取り上げられてきたかを示す [21]。

1.2.2 単一機械問題 (single machine sequencing)

図 1.1 の分類 (a) に示す構成において、1 つの作業からなる n 個のジョブを 1 台の機械で処理するシステムで仕事の最適順序を決定するスケジューリング問題である。ここでは、ジョブ間で完了時間に重みが異なる重み付き完了時間和の最小化スケジュール問題やジョブの仕掛順序により段取時間が異なる場合のメイクスパンの最小化などのケースを問題とする。村松他[22]は、ある期間にわたって期別にジョブ毎の出荷要求があり、品切れや納期遅れが許されない状態で在庫費用を含めた総コストを最小化するスケジュールを作成する問題でラグランジュ緩和法を用いている。

1.2.3 並列機械問題 (parallel machine models)

図 1.1 の分類 (b) に示す構成において、 n 個の単一作業のジョブが m 台の同一機能の機械のいずれか 1 台で処理されるとき、メイクスパンの最小化などを目的として各機械へのジョブの割当てと処理順序の最適化を求める問題である。新井他[23]は同一性能の機械が複数並ぶ 1 工程並列機械問題において、バックオーダー (遅れ) 費用、段取費用、在庫保管費用などを考慮して、複数品種の与えられた需要を最小費用で満たす生産ロットサイズとスケジュールを決定する問題を取り上げ、列生成法[24]を用いる

ことにより精度の良い解を導出することを示している。

1.2.4 フローショップ・スケジューリング (flow shop scheduling)

フローショップは図 1.1 の分類 (c) に示したように直列に m 台の異なる性能の機械が並び、 n 個のジョブを並んだ機械の順に加工するシステムである。 $m=2$ の場合、メイクスパンの最小化を目的とする問題の場合、なるべく早く機械 2 にジョブを送り、機械 2 の空き時間を最小にすればよい。 そのためには、機械 1 では SPT 規則で、機械 2 では LPT 規則で処理すればよく、SPT (1) -LPT (2) 則と呼ばれている。 これは、Johnson (1954) によるもので Johnson ルールとも呼ばれており、この Johnson ルールを満たすスケジューリングは Excel で解を求めることができる[25]。 しかし、 $m>3$ の場合のような、より一般的な問題に対する解析的な結果は得られず、ラグランジュ緩和法や分枝限定法[26]などの最適化手法を用いる必要がある。 岩瀬[27]は各ジョブの納期と段取時間が異なる条件のもと、各ジョブの納期遵守のためにはロット分割を組み込んだスケジューリング問題を解決するため遺伝的アルゴリズムと局所探索法を組み合わせたアルゴリズムを開発し、その有効性を示している。

1.2.5 ジョブショップ・スケジューリング (job shop scheduling)

図 1.1 の分類 (d) に示すようにフローショップと異なりジョブショップの作業の流れは一方方向ではなく、機械は様々なジョブの様々な作業を処理できる。 m 台の機械によって、それぞれ一つの作業をもつ n 個ジョブを処理するには、 $(n!)^m$ 通りの組合せがある。 この数は有限であるからこの中で加工技術的に実行可能な解を選び、その中で与えられた最適な解を見出せばよい。 従って、理論的には有限回の計算で求めることができる問題である。 しかし、このような完全列挙法では膨大な計算時間を必要とし実用的ではない。 例えば、4 台の機械でそれぞれ 4 つの作業を持つ 3 個のジョブを処理するような実用的にかなり小規模な問題に対しても $((4 \times 3)!)^4 = 5.26 \times 10^{34}$ 個の組合せ数になってしまう。 そこで実用上何らかの有効なルールを設定しそれらによって解を導くアプローチが次のように試みられている。

樋口[28]は、ジョブショップ・スケジューリング問題でも、6 機械 6 ジョブ以下であれば、混合整数計画問題として最適解が得られることを報告している。 しかし、このような小規模の問題には厳密解法が適用できるが、ある程度の規模を超える現実的な問題に関してはヒューリスティックス等の近似解法が必要となる。 その代表的な解法として、局所探索法、タブー・サーチ法 (tabu-search : TS)、シミュレーティド・アニー

リング法 (simulated annealing : SA) および遺伝的アルゴリズム (genetic algorithm : GA) がある。飯間他[29]は局所探索法により 50 ジョブ, 20 機械までの事例でメイクスパンの最適値を導出できることを示している。また, 村山他[30]は加工機と複積載 AGV の同時スケジューリング問題で局所探索法によりメイクスパンの最適解を導出できることを示している。

局所探索法は局所最適に陥る可能性が高いため, それを解決するため局所探索法を拡張した TS, SA, GA などのメタ戦略アルゴリズムが用いられる[15]。この中で GA の特徴は複数の解の集合である個体集団を用いた集団的探索戦略にあり, 多様な解を導出する事ができ, 生産スケジューリングでは最も用いられている手法である。一方, GA は局所探索に弱さがあり, GA を組合せ最適化問題に用いる場合, 他の局所探索法と組み合わせて用いることにより効果的な解法となることが多い[31,32]。

1.2.6 フレキシブル・ジョブショップ・スケジューリング (flexible job shop scheduling)

図 1.1 の分類 (e) に示すように, フレキシブル・ジョブショップはジョブショップをより一般化したもので, 変種変量生産品を受注する企業の包括的な形態ともいえる。このような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[33,34,35], 経営資源の制約の多い中小企業における経営資源の負荷の平準化を図ること[36,37,38], 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[39]である。即ち, 変種変量生産品を受注生産で対応するフレキシブル・ジョブショップシステムをもつ企業では複数の目的を考慮した多目的フレキシブル・ジョブショップ・スケジューリングが必要となる。

以上の背景から, この分野の問題に関する研究は, 数十年間, 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 (multi-objective flexible job-shop scheduling problem : MO-FJSP) として研究が行われてきた。十数年前より, 進化的アルゴリズムによる MO-FJSP の研究が行われ始め, Kacem ら[40,41]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, [ジョブ数×機械台数]が [4×5], [8×8], [10×7], [10×10], [10×15]の 5 問題例 (instance) を用いて 3 つの目的 : メイクスパン, 全機械の総負荷, ネック機械の負荷の最小化を研究している。その後, MO-FJSP を解くための GA, 粒子群最適化 (particle swarm optimization : PSO), TS, SA などのヒューリスティックアルゴリズムの研究が行われてきており, 最近の 10 年では複合的な

手法を含めた次のような手法が提案され Kacem の問題例を用いてそれぞれの有効性を比較している。PSO と SA を組み合わせたハイブリッド・アルゴリズム [42], PSO と TS を組み合わせたハイブリッド・アルゴリズム [43], シミュレーションモデル改善のためのアント・コロニー最適化アルゴリズム (ant colony optimization algorithm : ACO) の適用[44], 近傍探索と TS を組合せた手法 (hybrid tabu search algorithm : HTSA)[45], PSO とローカルサーチを組み合わせたアルゴリズム[46], 離散人工蜂コロニー・アルゴリズム (discrete artificial bee colony algorithm : discrete ABC) [47], GA と SA のハイブリッド・アルゴリズム[48], TS と discrete ABC を組み合わせたアルゴリズム[49]などが多く提案されている。

しかし、受注生産で重要となる納期を考慮した論文は一部みられるもののその数は少なく[50, 51], また, FJSP において段取を考慮した研究はある[52, 53]が, 変種変量生産を円滑に運営するための段取負荷に着目した研究は見当たらない。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[54], 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, 殆どの先行研究は, 上記の Kacem や BD data set [55]などの問題例を対象として取り上げ, 提案アルゴリズムの優位性を議論する報告が多く, 実際の生産現場をモデルとした最適化問題に関する研究は作業担当者のスケジューリングをする例[56]などがあるが極めて少ない。

1.3 本研究の位置づけと狙い

本研究では, 受注型中小製造業の経営を支援するための生産スケジューリング手法を提案する。受注生産の生産スケジューリングで留意する点は, 1.2.6 項で述べたように顧客納期に応えること, 経営資源の制約の多い中小企業における経営資源の負荷の平準化を図ること, 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。

具体的には, 実在する名古屋市の中小製造企業 A 社の操業を参考に図 1.2 の受注生産の一般的な情報の流れの中のスケジューリングを支援する機能を提案する。

A 社は 1.1 節の背景で述べたように近年の生産が変種変量化傾向にあり, その結果, 段取の頻度が高まってきているが, 従業員数のなかで段取作業を行えるのは限られた要員であり, 段取作業がタイムリーに実施されない場合, 段取遅れが加工遅れを来とし, その結果, 納期遅れの発生や, 段取後の加工を担当するパート従業員の手待ちにより生産性の低下を来たすことがある。反面, 納期遵守のために段取者に過度な負荷

を与える可能性も孕んでおり、これらの段取者の作業を生産スケジューリングに組み入れ、納期遅の防止やパート従業員の手待ちの防止とともに段取者の負荷の平準化を図ることが重要となる。

また、納期遵守に目を奪われ過ぎると必要以上に早期にショップ内にジョブを投入する、即ち、必要以上に早期に材料を仕入れ加工を始めることも発生しやすい。この結果、原材料の仕入れから納品までの期間が長くなり運転資金の回収が遅れキャッシュフローを悪化させることになる。従って、これを念頭においた適切な仕掛タイミング、即ち、適切な工程内在庫量を考慮に入れたスケジューリングも重要である。

そこで、本研究の課題として次の 3 項を設定する。

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 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、段取負荷の平準化評価のため、先行研究では例のない段取者を組込んだ遺伝子構造を組込む。

- ・納期遅れの最小化
- ・段取負荷の平準化
- ・工程内在庫の最小化

納期遅れの最小化の評価に関しては、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の在庫補充などのジョブの属性により、ジョブにより納期遵守の重要度が異なるため、各ジョブに対し複数の重み付けを織込む。段取負荷の平準化の評価に関しては、段取者間の負荷の差を極力抑え平等な負荷条件にするという考えと、日毎の最大段取負荷の最小化による平準化、即ち、日毎の段取負荷の変動を極力抑制するという考え方があり、どちらの考え方が望ましいかを評価する。工程内在庫の最小化の評価に関しては、変種変量生産であり受注品毎のロットサイズと単価が異なることからこれを考慮に入れた受注品毎のコストを設定することとする。

今回、生産スケジュール問題の解法には、生産スケジューリングに最も適用事例が多い GA を用い、これに多目的最適解を導出するための NSGA II の概念を織込む。また、解の多様性を確保するために、GA の探索母集団を分割する「島モデル」と「島モデルを有効に機能させるための個体の移住」の考え方を組み入れ、島モデル GA (multi-island genetic algorithm : MI-GA) を開発する。

この *MI-GA* の有効性を検証するため、前記の A 社の操業を参考にしたデータを用い、2 目的（納期遅れの最小化、段取負荷の平準化）に関する最適化を行う。

課題 2. *MO-FJSP* の先行研究では稀な、実在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日常の生産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。

導出したスケジューリングは、定常的な経営環境下での最適スケジュールの近似解を提供し、日常の効率的な操業を支援するものである。これに加えて、経営環境が変化した場合の操業への影響を事前に評価することも、経営管理上、重要な事である。例えば、段取者の退社や傷病による離脱、顧客からの過度な納期短縮の要求などの発生である。このような経営リスクが工場の操業にどのように影響を与えるかの計算を行い、事前に対策案を検討することも本提案手法で可能と考えられる。そこで、課題 1 と同じように 2 目的で本手法の意思決定への活用の可能性を検証する。

課題 3. 局所探索に問題のあるといわれる *GA* の改善策を開発しその有効性を確認する。

遺伝的アルゴリズムは多様な解の生成に優れているが、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 *TS* 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 (*tabu-search hybrid genetic algorithm : TS-HGA*) を開発し A 社の生産データを使用した生産スケジュール問題に対して、3 目的（上記 2 目的に加えて工程内在庫を追加）生産スケジュールの最適化を行う。

1.4 論文の構成

以降の章は次の構成からなる。

第 2 章は受注生産における MO-FJSP の問題の構成及び取り上げる 3 つの目的関数について述べる。

第 3 章では今回の研究で用いる島モデル遺伝的アルゴリズムについて述べ、更に本研究で用いる手法 (NSGA II, 島モデル方式) の特徴を述べる。

第 4 章では、「重みづけ納期遅れ」と「段取負荷の平準化」の 2 目的に関する基本機能と本研究の実務展開への可能性の確認を行なう。なお、段取負荷の平準化に関しては、段取者間の負荷の差の最小化という考え方と、日毎の最大負荷の最小化を図るという考え方による 2 つの評価方法が考えられるため、この考え方の比較を行なう。この第 4 章で上記の課題 1 の一部 (2 目的の評価) を確認することになる。

第 5 章では、本手法の成果を用いて予想される経営リスクとその対策案に対し、導出したスケジュールによってリスクの影響や対策案の効果の評価を行い、課題 2 を確認する。

第 6 章では、対象ジョブを増大させるとともに、上記 2 目的に加えて「工程内在庫の最小化」を追加した 3 目的での実験を行なう。また、上記の遺伝的アルゴリズムは広域の解の提供には優れるが、近傍解の収束に時間がかかるといわれることから、近傍解探索に優れるタブー・サーチ機能を組み入れた遺伝的アルゴリズムを開発しその評価を行う。この第 6 章では課題 1 の残りの一部 (3 目的の評価) と課題 3 を確認する。

最後の第 7 章で本研究のまとめと今後の課題を述べる。

第2章 受注生産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の定式化

2.1 用語の説明

本論文では段取負荷の平準化を考慮に入れ、多様な顧客の様々な仕様、ロットサイズの品物を製造する受注生産における MO-FJSP を対象とする。

本論文で使用する記号は以下に示す通りである。

J_k	: ジョブ k
Z_k	: ジョブ k のロットサイズ
u_k	: ジョブ k の単価
d_k	: ジョブ k の納期
r_k	: ジョブ k のショップ内への投入日
e_k	: ジョブ k の出荷日
e_{max}	: 最終ジョブの出荷日
t_k^d	: ジョブ k の納期遅れ日数
α_k	: ジョブ k の納期遅れ重み係数
n_k	: ジョブ k の作業数
O_{kn}	: ジョブ k の n 番目の作業
W_w	: 段取者 w
p_{knm}	: ジョブ k の n 番目の作業の機械 m での 1 個当たりの加工時間
S_{kwm}	: ジョブ k の機械 m での段取者 w の段取時間
x_{kt}	: ジョブ k の t 日における工程内在庫数
T	: 段取負荷の評価期間
Q_t^{max}	: t 日における段取負荷の最大値
Q_t^{min}	: t 日における段取負荷の最小値
γ_t	: t 日における段取負荷の差の重み係数
β_t	: スケジュール日に対する t 日におけるジョブ負荷の減少比率

2.2 問題の構成

本研究では、最適化する目的を「重みづけ納期遅れ」、「段取負荷の平準化」、「工程内在庫」とするため、表 2.1 に示すジョブ毎の作業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 2.2 の各機械と段取り可能な段取者との組み合わせを考慮する。

表 2.1 ジョブ毎の作業と各機械の関係

ジョブ	納期	遅れ重み	ロットサイズ	単価	作業数	作業	機械			
							M_1	M_2	\dots	M_m
J_1	d_1	α_1	Z_1	u_1	n_1	O_{11}	p_{111}	p_{112}	\dots	p_{11m}
						O_{12}	p_{121}	p_{122}	\dots	p_{12m}
						O_{13}	p_{131}	p_{132}	\dots	p_{13m}
J_2	d_2	α_2	Z_2	u_2	n_2	O_{21}	p_{211}	p_{212}	\dots	p_{21m}
						O_{22}	p_{221}	p_{222}	\dots	p_{22m}
\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot
\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot	\cdot
J_k	d_k	α_k	Z_k	u_k	n_k	O_{k1}	p_{k11}	p_{k12}	\dots	p_{k1m}
						O_{k2}	p_{k21}	p_{k22}	\dots	p_{k2m}
						\dots	\dots	\dots	\dots	\dots
						O_{kn}	p_{kn1}	p_{kn2}	\dots	p_{knm}

表 2.2 段取者と機械の関係

段取者	機械			
	M_1	M_2	...	M_m
W_1	S_{k11}	S_{k12}	...	S_{k1m}
W_2	S_{k21}	S_{k22}	...	S_{k2m}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
W_w	S_{kw1}	S_{kw2}	...	S_{kwm}

表 2.1, 表 2.2 の内容を説明すると, 次のようになる.

- 1 表 2.1 において, ジョブ J_k は, 納期 d_k , 納期遅れの重みづけ α_k , ロットサイズ Z_k , 単価 u_k で受注され, 各ジョブの i 番目の作業 O_{ki} は m 台の機械 $M_m (M_1, M_2, \dots, M_m)$ のうちのいずれかで加工され, 作業 O_{ki} ($i=1 \dots n$) のすべてを終了することで加工が終了する.
- 2 各作業 O_{ki} は加工可能な機械 M_m に紐づけられており, それぞれの作業はいずれか 1 台の機械で加工される. 例えば, O_{11} は M_1, M_2, \dots, M_m のいずれか 1 つで加工されるが, M_1 の場合の加工時間は p_{111} , M_2 の場合の加工時間は p_{112} , M_m の場合の加工時間は p_{11m} となる. 作業は中断することなく 1 個当りの加工時間 p_{kim} とロットサイズ Z_k との積からなるジョブ毎の加工時間 P_{kim} ($P_{kim} = p_{kim} \cdot Z_k$) 経過後に終了する. 機械 M_m において, あるジョブの作業から次のジョブの作業に変更されるとき, 前の作業との種類が異なっていれば, 表 2.2 に示す w 人の段取者 $W_w (W_1, W_2, \dots, W_w)$ のうち対応可能ないずれか一人の段取者の段取作業が行われるため, 段取時間 S_{kwm} が加工前に発生する.

なお, 制約条件には次を設定する.

- (条件 1) 各ジョブは与えられた全作業を完了する.
- (条件 2) すべての作業はいずれか 1 つの機械に割当てられる.
- (条件 3) 1 台の機械は, 一度に 1 つの作業のみ処理する.
- (条件 4) ジョブ毎の作業順序はジョブ毎に定められた順序に従う.
- (条件 5) 一人の段取者は同時に複数機の段取をしない.

2.3 目的関数

2.3.1 重みづけ納期遅れの最小化

表 2.3 において、k 番目のジョブ J_k には納期 d_k があり、ジョブ J_k の出荷日 e_k と d_k との差を納期遅れ期間 $t_k^d(\max\{0, e_k - d_k\})$ とする。 α_k はジョブごとの遅れ重み係数である。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^d にジョブごとの遅れ重み係数 α_k を付加し、全てのジョブの重みづけ納期遅れの総和を遅れ指数 TD として(1)式での TD の最小化を目的とする。

$$\min TD = \sum_{k=1}^k \alpha_k t_k^d \dots \dots \dots (1)$$

表 2.3 重みづけ納期遅れ

ジョブ	納期	出荷日	遅れ	遅れ重み係数	重みづけ納期遅れ
J_1	d_1	e_1	$t_{1}^d = \max\{0, e_1 - d_1\}$	α_1	$\alpha_1 \cdot t_{1}^d$
J_2	d_2	e_2	$t_{2}^d = \max\{0, e_2 - d_2\}$	α_2	$\alpha_2 \cdot t_{2}^d$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
J_k	d_k	e_k	$t_{k}^d = \max\{0, e_k - d_k\}$	α_k	$\alpha_k \cdot t_{k}^d$

2.3.2 段取負荷の平準化

段取者の負荷の平準化の考えには、前述のように「段取者間の負荷差の最小化による平準化」という考え方と、「日毎の最大段取負荷の最小化による平準化」という考え方がある。前者の考え方は段取者間負荷の不公平を可能な限り少なくすることを指向しており、後者は段取者間で段取能力に差があった場合、段取者間の負荷の差は許容し、日毎の段取負荷の最大値を最小化し最大負荷の段取者の精神的・肉体的負担を軽減することを指向したものである。

(1) 段取者間の負荷差の最小化

段取者間の負荷差は次式で与えられ、これを最小化することを目的とする。

$$\min \delta_T = \sum_{t=1}^T \gamma_t (Q_t^{\max} - Q_t^{\min}) \dots\dots\dots (2)$$

上記の Q_t^{\max} と Q_t^{\min} は t 日における段取者の段取回数の最大値と最小値、 γ_t は段取回数の差を評価する期間のうち t 日における重み係数である。

(2) 日毎の最大段取負荷の最小化

多品種の受注生産の場合、日毎に複数のジョブがショップ内に投入され納期 d_k を目標に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。即ち、スケジュール設定時点でショップ内に保有されている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、日毎の段取負荷の平準化を考慮するには、スケジュールリング時点でショップ内にあるジョブの日毎の減少を反映した段取負荷を考慮する必要がある。

以下、ジョブの日毎の減少に関し、図 2.1 の流動数曲線[57]で説明する。変種変量の受注生産の場合、各経過日 t 日に n 個のジョブから構成されるジョブ群： G^{1-n}_t がショップ内に投入され、各ジョブが納期 d_k に従って出荷されるので、ショップ内ジョブは日々入れ替わる。図 2.1 は説明の便宜上、全ての t 日に投入されるジョブに関し、日毎に投入されるジョブ数が 5、これらのジョブの納期が 6 日と等しい場合について示している。横軸はスケジュール日からの経過日を示し、縦方向には日毎にジョブ件数を表現する 5 本の横棒が投入から出荷までの 6 間日の長さで描かれている。図 2.1 の中で G^{1-5}_t は t 日目にショップ内に投入される 5 個のジョブの集まりを示しており、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 2.1 ではスケジュールリングの更新間隔は 1 日と仮定しており、1 日目のスケジュールリングの対象はローマ数字 *I* で示すジョブ群 G^{1-5}_{-5} から G^{1-5}_1 となり、2 日目のスケジュールリングの対象は G^{1-5}_{-5} が出荷され G^{1-5}_2 が投入されるのでローマ数字 *II* で示す G^{1-5}_4 から G^{1-5}_2 となる。このように、1 日目にショップ内に保有されている 1 日目のスケジュールリング対象ジョブは日々減少していき、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を実施する必要がある。

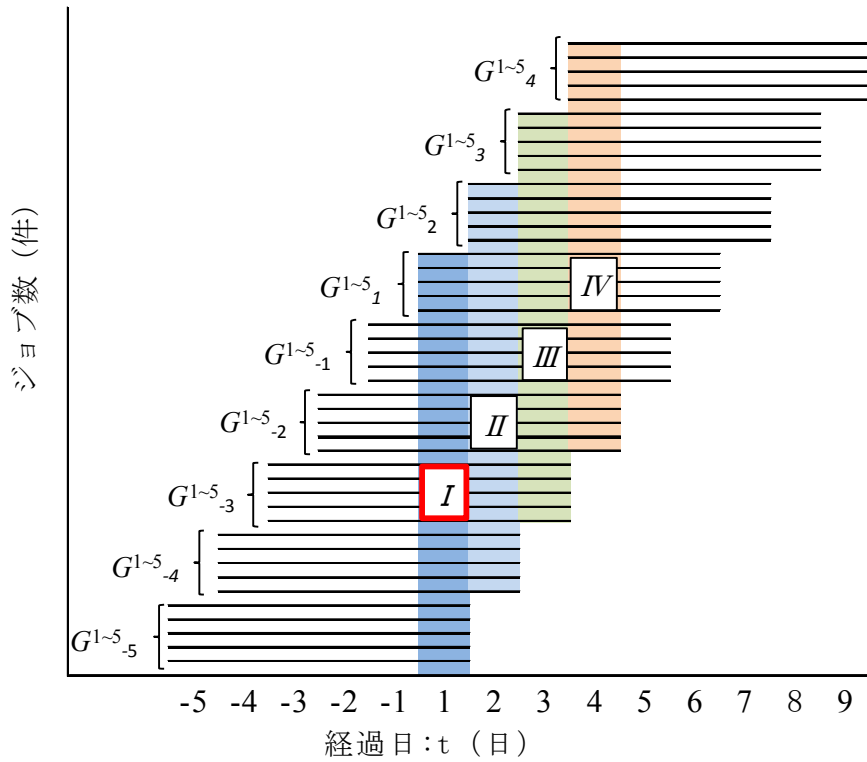


図 2.1 日毎のスケジューズ対象ジョブの変化 (流動数曲線)

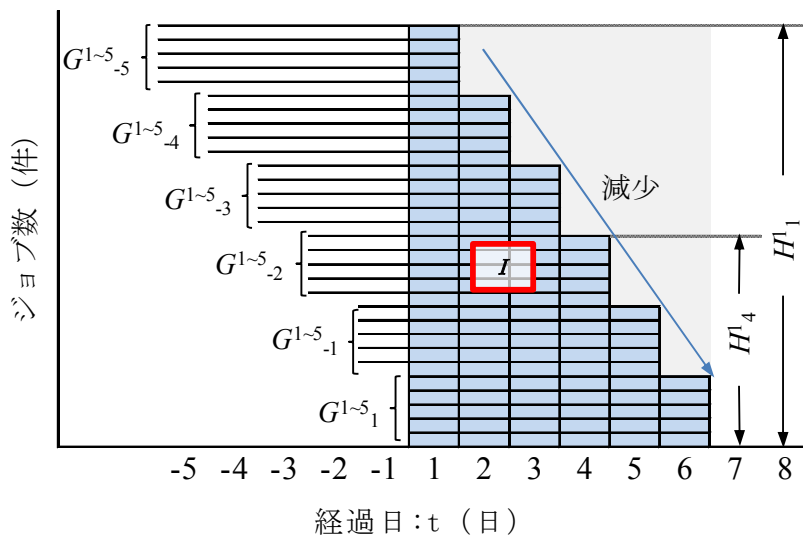


図 2.2 1日目のショップ内ジョブ件数の日毎の変化

図 2.2 は図 2.1 の条件の下で、1 日目にショップ内にあるジョブ群 I の日毎の変化を示す。1 日目の I のジョブ群件数 $H^1_{I_1}$ は t 日目には H^1_t に減少するので、1 日目の段取負荷を $L^1_{I_1}$ とすると、 t 日目の段取負荷 L^1_t は $L^1_t = (H^1_t / H^1_{I_1}) \cdot L^1_{I_1}$ と設定できる。ここで、 $H^1_t / H^1_{I_1} = \beta_t (\beta_1 = 1)$ とおくと $L^1_t / \beta_t = L^1_{I_1}$ となり、 t 日目の段取負荷 L^1_t が $L^1_t \leq \beta_t L^1_{I_1}$ であれば日毎の段取負荷が 1 日目の段取負荷を超えていないと見なすことができる。

上記は、毎日同じ納期の同数のジョブがショップ内に投入されるという仮定に基づくが、日毎の投入ジョブの納期の長短や、ジョブ数の変動があっても、スケジューリング時にショップ内にあるジョブは日々減少していくので、上記の β_t は $\beta_t \leq \beta_1 = 1$ となり、1 日目の段取負荷が最大となる。従って、上記を一般化してスケジューリング時(1 日目)のジョブの負荷に対する各段取者の負荷の最大値を L_t とし、 t 日目の段取負荷を L_t 、更に許容段取回数 $SL = L_1$ と考え、 $L_t / \beta_t \leq SL$ の条件で (3) 式による日毎の最大段取負荷の最小化を目的とする。

$$\min SL = \max\{[L_t^{\max} / \beta_t] | t = 1, 2, \dots, T\} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$L_t^{\max} = \max\{L_{wt} | w = 1, 2, \dots, w\} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ただし、 L_{wt} は $t=1, 2, \dots, T$ における段取者 w の段取回数、 L_t^{\max} は $t=1, 2, \dots, T$ における段取回数の最大値である。

2.3.3 工程内在庫の最小化

表 2.4 は、ジョブ J_1 から J_k の経過日毎のショップ内のそれぞれの工程内在庫 (work-in-process) x_{kt} を示し、横軸の経過日の右端の e_{\max} は最も遅いジョブの出荷日を意味する。ジョブ毎のショップ内への投入個数が受注個数と等しく、工程途中で個数が増減しない (加工不良などで work-in-process が減少しない) とすると、 $x_{kt}=0 (t < r_k, t > e_k)$ 、 $x_{kt}=Z_k (r_k \leq t \leq e_k)$ となる。ただし、 r_k はジョブ J_k のショップ内への投入日、 e_k はジョブ J_k の出荷日である。

図 2.3 は、表 2.4 を図で表現した例で、横方向は経過日を示し、縦方向には、 $J_1 \sim J_k$ までのジョブ内への投入から出荷までをブロックの並びで示している。ジョブ毎にブロックの高さに差があるのはジョブの在庫高、即ち、各ジョブ J_k の単価 u_k と work-in-process x_{kt} の積に差があることを意味している。

経過日 t の全ジョブの在庫コストは $\sum_{i=1}^k u_i x_{it}$ となるので、図 2.3 における経過日 t の青色部の高さで表すことができる。その結果、スケジュール時点で受注している全て

のジョブの期間を通しての在庫コストを図 2.3 における青色部の面積で表すことができ、これを工程内在庫高 WIP とし (5) 式で表し、この工程内在庫高 WIP の最小化を目的とする。

$$\min \quad WIP = \sum_{t=r_k}^{e_k} \sum_{k=1}^k u_k x_{kt} \quad \dots\dots\dots (5)$$

表 2.4 工程内在庫数の変化

ジョブ	単価	経過日					
		1	2	...	t	...	e_{max}
J_1	u_1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1t}	...	$x_{1e_{max}}$
J_2	u_2	x_{21}	x_{22}	...	x_{2t}	...	$x_{2e_{max}}$
...
J_i	u_i	x_{i1}	x_{i2}	...	x_{it}	...	$x_{ie_{max}}$
...
J_k	u_k	x_{k1}	x_{k2}	...	x_{kt}	...	$x_{ke_{max}}$

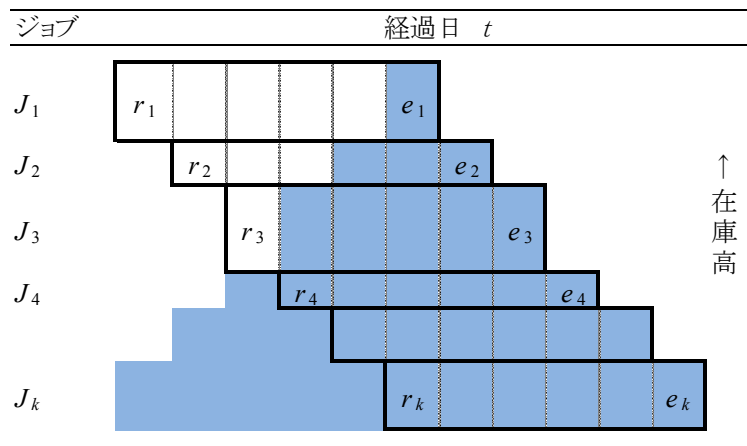


図 2.3 経過日毎の在庫高の推移例

第3章 島モデル遺伝的アルゴリズム

本章では、まず本研究の特徴である段取者を考慮した遺伝子表現について説明し、その後、本研究で用いる解法の一つである島モデル遺伝的アルゴリズム (multi-island genetic algorithm : *MI-GA*) について説明する。

3.1 段取者を考慮した遺伝子表現

本研究では、段取負荷の平準化も考慮するため、図 3.1 に示すように、先行研究で考えられてきた、作業と機械の関係を組込んだ従来の MO-FJSP の枠組に加え、機械毎の対応可能な段取者を組込んだ枠組が必要となる。段取者と機械との組合せを遺伝子表現に追加することにより、スケジューリングは複雑になるが、段取負荷の平準化も反映することができ、ムダ・ムラ・ムリのない実現性の高いスケジュールの導出が可能となる。

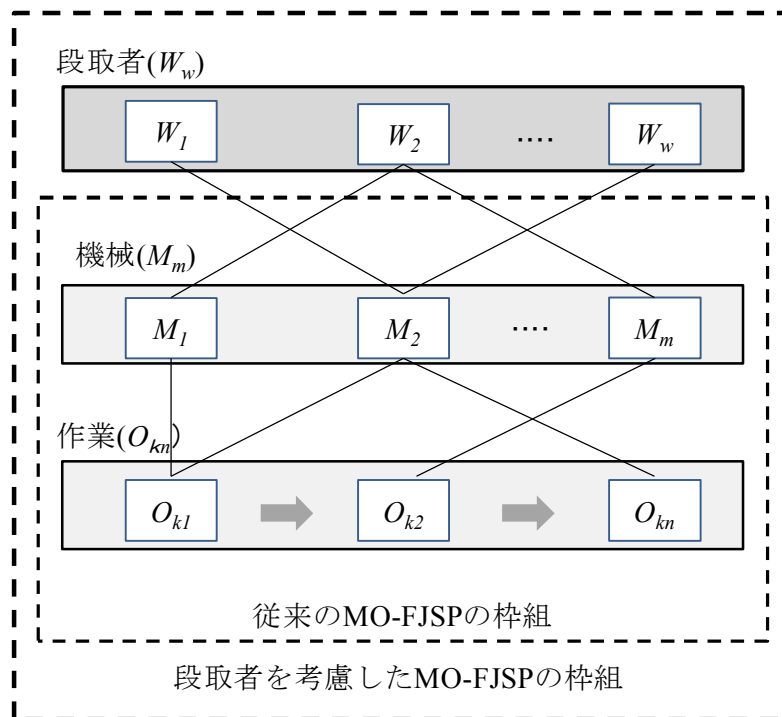


図 3.1 「従来の MO-FJSP」と「段取者を考慮した MO-FJSP」との枠組みの違い

次に、この考え方を織り込んだ簡単な具体例でガントチャート導出までの手順の概要を説明する。図 3.2 ではジョブ数、機械数、段取者数とも 2 で、それぞれ $J_1, J_2, M_1, M_2, W_1, W_2$ とする。2 つのジョブはそれぞれ 2 作業、全体で 4 作業、 $O_{11}, O_{12}, O_{21}, O_{22}$

で構成されている。ジョブ、機械、段取者、作業の関係は図 3.2 に示す様に、作業 O_{11} は1つの選択肢 (M_1 で加工し段取者は W_1)、作業 O_{12} , O_{21} , O_{22} はそれぞれ2つの選択肢 (M_2 で加工し段取者は W_1 または W_2) を持つ。また、各段取時間はすべて1時間とし、4 作業 (O_{11} , O_{12} , O_{21} , O_{22}) の加工時間はそれぞれ 3 時間, 2 時間, 2 時間, 2 時間とする。この図から、表 3.1 に示す様に 8 個のジョブ表現番号 (①~⑧) からなるジョブ表現番号表を構成できる。このジョブ表現番号を各ジョブの作業を処理する機械 M_1 , M_2 で分類すると、GA で取り扱う表 3.2 遺伝子表現表を作成することができる。

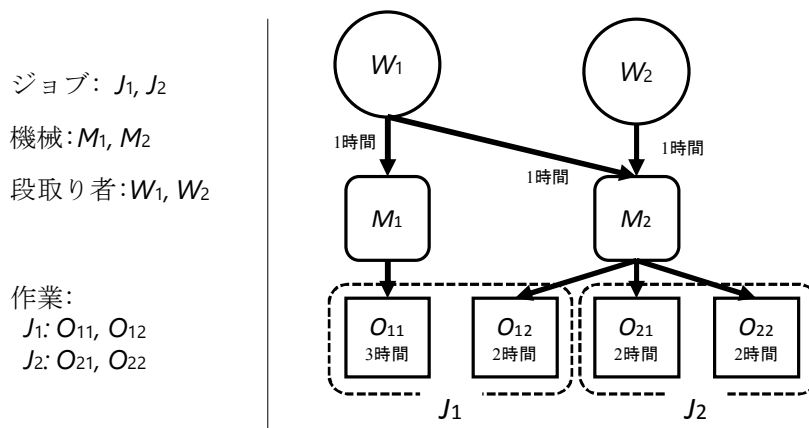


図 3.2 作業、機械、段取者の関係例

表 3.1 ジョブ表現番号表

ジョブ表現番号	対象ジョブ	1番目の作業 (O_{11} or O_{21})	2番目の作業 (O_{12} or O_{22})
①	J_1	$M_1, W_1, 3時間$	$M_2, W_1, 2時間$
②	J_2	$M_2, W_1, 2時間$	$M_2, W_1, 2時間$
③	J_1	...	$M_2, W_2, 2時間$
④	J_2	$M_2, W_1, 2時間$	$M_2, W_2, 2時間$
⑤	J_1
⑥	J_2	$M_2, W_2, 2時間$	$M_2, W_2, 2時間$
⑦	J_1
⑧	J_2	$M_2, W_2, 2時間$	$M_2, W_2, 2時間$

表 3.2 は機械 M_1 , M_2 に関するジョブ表現番号を遺伝子として遺伝子座 (i ~ viii) の順に並べた表で, それぞれの機械で, この表現番号の左端からの配置順に当該ジョブに関する作業が処理される. 例えば機械 M_1 ではジョブ表現番号①のみの作業がなされ, 以降の「0」は作業がないことを示している. M_2 ではジョブ表現番号⑥, ④, ①, ③, ④, ②, ⑧の順に作業が処理される.

表 3.2 遺伝子表現表

機械	遺伝子座							
	i	ii	iii	iv	v	vi	vii	viii
M_1	①	0	0	0	0	0	0	0
M_2	⑥	④	①	③	④	②	⑧	0

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. 表 3.2 の左端の遺伝子から順に, さらに上の機械から順に, 設定されたジョブ表現番号を読み取り, 表 3.3 のガントチャートに表 3.1 の当該ジョブ表現番号の内容を記述していく. ガントチャートでのそれぞれの機械番号の行の時刻枠には, どの段取者が段取を行うか, 又はどのジョブの作業が処理されているかが示されている. なお, 表 3.3 の表 (a) はジョブの番号で表し, 表 (b) は作業の番号で表している.

例えば, 表 3.2 の遺伝子座 i における M_1 の行では, ジョブ表現番号①であるので, 表 3.1 のジョブ表現番号①の J_1 の 1 番目の作業の列の M_1 , W_1 , 3 時間の項から, 表 3.3 の M_1 の 1 時刻枠目には段取者を示す W_1 が入り, 以降, 2~4 時刻枠には J_1 の 1 番目の作業 O_{11} の 3 時間分が設定される. 表 3.2 の遺伝子座 i における M_2 の行では, ジョブ表現番号⑥であるので, 同様に表 3.3 の M_2 の最初の時刻枠はジョブ表現番号⑥の J_2 の最初の作業 O_{21} のための段取者 W_2 の段取作業の 1 時間が入り, その後, 2~3 時刻枠目は J_2 の O_{21} の 2 時間分が設定される. これで J_1 , J_2 とも最初の作業は設定されたことになる. 表 3.3 のガントチャートの時刻枠で最初に空くのは M_2 の 4 時間目の枠であり, 表 3.2 の M_2 行の遺伝子座 ii には④が設定されており, 表 3.1 のジョブ表現番号④から J_2 の 2 番目の作業の列には M_2 , W_2 , 2 時間の項があるので, 表 3.3 の M_2 の 4 時刻枠目には段取者を示す W_2 が入り, 以降, 5, 6 時刻枠には J_2 の 2 番目の作業 O_{22}

の2時間分が設定される。表3.3のガントチャートの時刻枠で次に空くのは M_1 の5時刻目の枠であるが、表3.2の M_1 の遺伝子座ii以降は「0」が入っているので、表3.3の M_1 行の5時刻目以降の枠は空白となり、以降、 M_1 での作業はないことになる。表3.3で次に空くのは M_2 の7時刻目であるが、表3.2の遺伝子座iiiにジョブ表現番号①があり、表3.1のジョブ表現番号①から J_1 の2番目の作業 O_{12} の列で M_2 , W_1 , 2時間の項があり、表3.3の M_2 の7時刻枠目には段取者を示す W_1 が設定され、以降、8, 9時刻枠には J_1 の2番目の作業 O_{12} の2時刻分が設定される。

以上で総てのジョブの作業が設定し終わり、一つの解が導出され第2章で示した目的関数によりこの解が評価されることになる。

このように本研究では、段取者の負荷がスケジュールに組み込まれることになり、上記の目的関数により段取負荷の平準化も評価でき、ムラ・ムダ・ムリのない生産が可能となる。

表3.3 ガントチャートの例

		時刻								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
表(a)	M_1	W_1	J_1	J_1	J_1	0	0	0	0	0
	M_2	W_2	J_2	J_2	W_2	J_2	J_2	W_1	J_1	J_1

		時刻								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
表(b)	M_1	W_1	O_{11}	O_{11}	O_{11}					
	M_2	W_2	O_{21}	O_{21}	W_2	O_{22}	O_{22}	W_1	O_{12}	O_{12}

3.2 島モデル遺伝的アルゴリズムの構成

本研究ではMO-FJSPに関する解法のうち大域での探索に優れ、最も用いられているGAを用いる。本研究では、GAに島モデル [58]の考え方を取り入れており、その基本的な構成を図3.3に示す。

以下、図3.3に沿って各ステップを説明する。

Step1.初期個体群の生成

任意に生成された初期個体から、あらかじめ設定された数だけ任意に個体を生成する。生成した個体の数のことを集団サイズや個体数と呼び、ここで生成した個体

の集団を初期個体群とする。なお、初期個体の生成に関しては、付録 A で詳しく記述する。

Step2.各島への個体の分配

本研究では島モデルによる並列分散型 GA を用いるため、初期個体群をあらかじめ設定された数の島に均等に分配する。

Step3.評価

各島において予め定められた複数の目的関数に基づき、各個体のそれぞれの評価値を計算する。

Step4.親世代選択

本研究では複数の目的の最適近傍解を導出するため NSGA II (non-dominated sort genetic algorithm II) [59]によるパレートランキングとパレート解間の混雑度によるランク付けを行う。さらに、このランク付けに基づき、次世代へ残す個体を選ぶ。手法としては、トーナメント選択やルーレット選択があるが、本研究ではルーレット選択を利用する。

Step5.次世代生成

交叉は Step 4 で選択した個体の中の 2 個体を親とし、これらの遺伝子座を任意に選び、後述する方法でおこなう。

突然変異は、任意に選んだ個体の遺伝子の中で任意に複数の遺伝子座を選び、遺伝子間で遺伝子を入れ替える。

Step6.評価

Step3 と同様に、各個体の評価値を計算する。

Step 7.個体の島間移住

解の局所化を避けるために一定世代毎に島間の移住を行う

Step 8.終了判定

終了判定には、以下の終了条件を採用する。

- ・ 実行すべき最大世代にまで達したとき
- ・ 計算時間が一定時間経過したとき

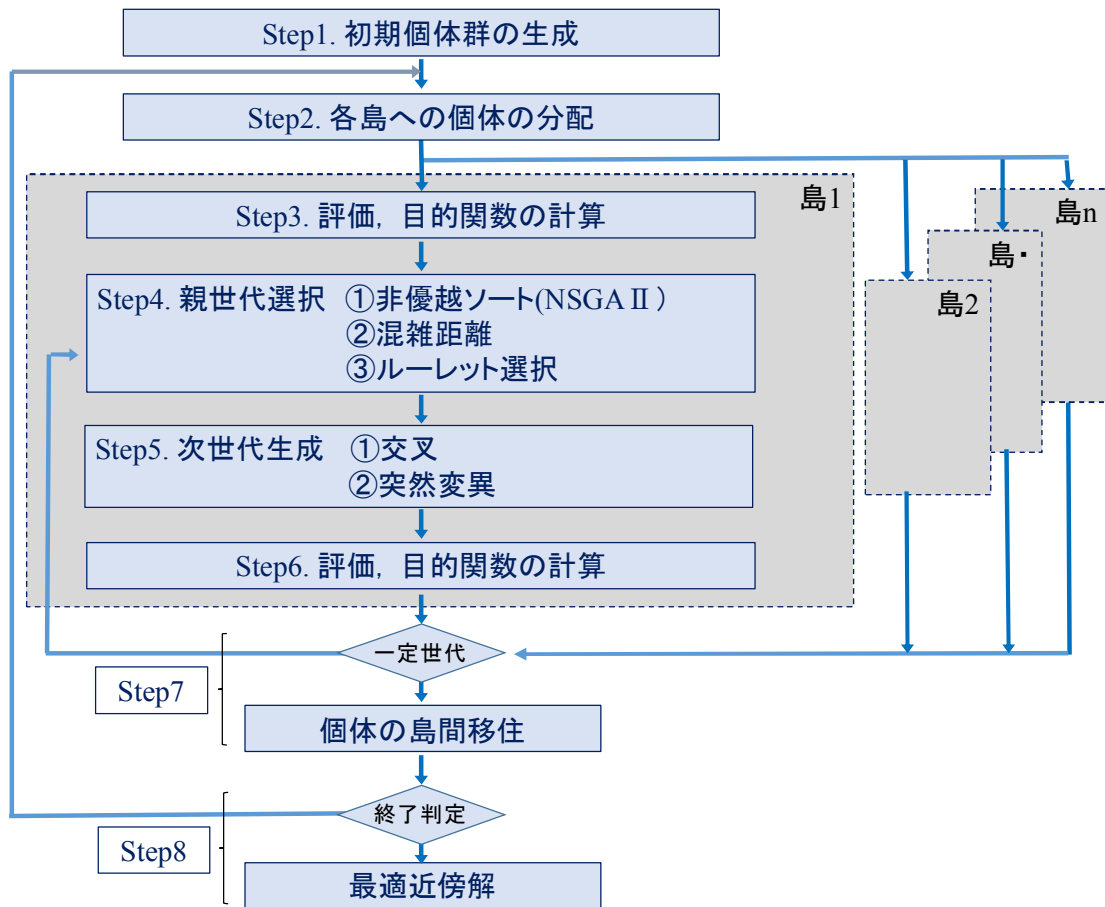


図 3.3 島モデル遺伝的アルゴリズムの構成

次に、本研究の特徴である島モデルについて述べる。

3.3 島モデルについて

3.3.1 島モデル採用の背景

GA では初期個体群から世代交代を経つつ、優良個体（優良解）を引き継いでいくために、ルーレット選択等の確率的な操作で親となるべき優良個体を選別する。しかし、この操作によって、到達可能な全探索域での最適解ではなく、近傍域で優れている局所優良解が多くを占める結果となりがちである。

図 3.4 は高い位置ほど優れた解であるとした例で、探索域の中に A, B, C の局所最適解が存在し青い点群は個体群を示している。この図のように、ある世代で局所解が生まれると、個体群の間での交叉や突然変異の操作がなされても多くの個体が似た解を持

つ結果が生じ局所的な解 A に到達し、全探索域での最適解である C に到達できなくなる。これに対処するには、局所優良解からの脱出が課題となる。新たに初期個体群を作り変え再度操作を加えることも考えられるが、初期個体群は進化した集団と比較すると評価点が低いため、ある程度の評価点に達するには更なる世代交代を経なければならず、処理に時間がかかってしまう。

一方、地球上の多くの動植物に目を向けると、その棲息地は、熱帯、温帯、寒帯などの温度環境や同じ熱帯でも草原や森林などの降雨環境などの違いがある。多くの動植物はこの環境の違いに適した形で進化し、種類や同種内での多様性を確保してきたと思われる。また、同じような自然環境の中でも、ガラパゴス諸島のように離れた島間では個体間で行き交う機会がなく、その結果、遺伝子の交換を行われなため、その領域で固有の進化が起こる。

この環境や進化の過程を GA に織込んだものが島モデルである。図 3.5 で例示すると、全体の個体群を複数の島に分割し、それぞれの島の中でのみ交叉や突然変異を行う。島の中でのみ交叉や突然変異が行われるため、それぞれの島において独自の局所的な優良解に到達することになり、各島で導出された優良解の中に全探索域での最適解が存在する可能性が高くなる。

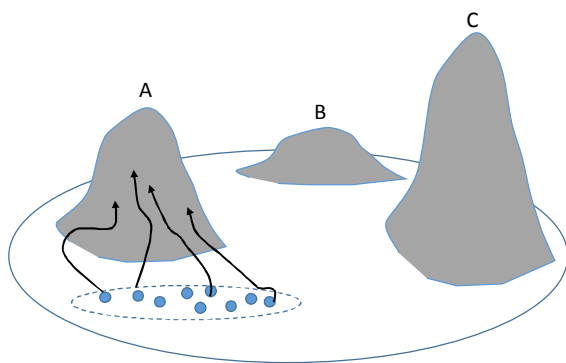


図 3.4 局所優良解への収束

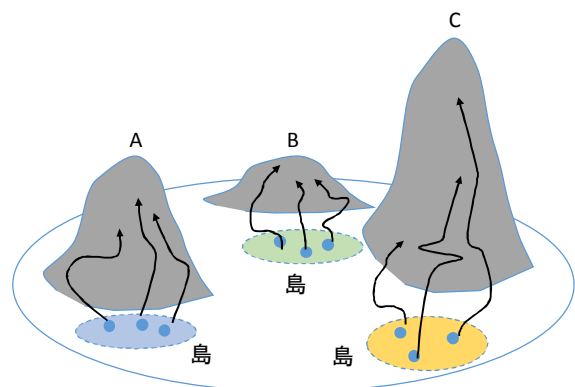


図 3.5 島モデルによる探索

3.3.2 個体の島間の移住

島モデルの各島は分割された少ない個体数で構成されているので、その中での交叉や突然変異では、簡単に局所解へ到達してしまいがちである。そこで、島内の多様性を確保するため、一定世代毎に複数の個体を島間で移住させる操作を採用することが考えられてきた。一方、探索の停滞が発生している局所個体が移住で各島に伝播してしまう場合、全体的な多様性が失われる可能性がある。原ら[60]は多様性を維持するための方法として、パラメータを調整した島を用意して探索効率と多様性を同時に維持する異文化型島モデルの考え方を提案している。

図 3.6 は上記の移住と異文化型島モデルの考えを図示したものである。図 3.6 では島数が3、それぞれの島が異文化を持つことを島の色で示している。島にはそれぞれ4つの個体があり島の文化環境に対応して世代交代を行った結果、島毎の優良個体（図中、島の色に合わせた濃い小円で示す）が生成され、移住対象となる。移住には移住する先を予め決めておく方法と移住の度に移住する先を任意に選択する方法があるが、移住する先を任意に選択する方法が進化の速度が早いという実験結果が多く[61]、本研究では任意に選択する方法を取る。具体的には、図 3.6 に示すように、島毎の複数の優良解を移住対象群として選び、その後、任意の移住先に振り分ける。移住により、それぞれの島で多様な解を導出し、さらに良い局所解が発生する。なお、移住個体は、移住前にいた島において評価が高いことで選択されてきた個体であるため、移住先の島でも続いて選択される可能性が高く、より良い局所解を生み出すことが期待できる。

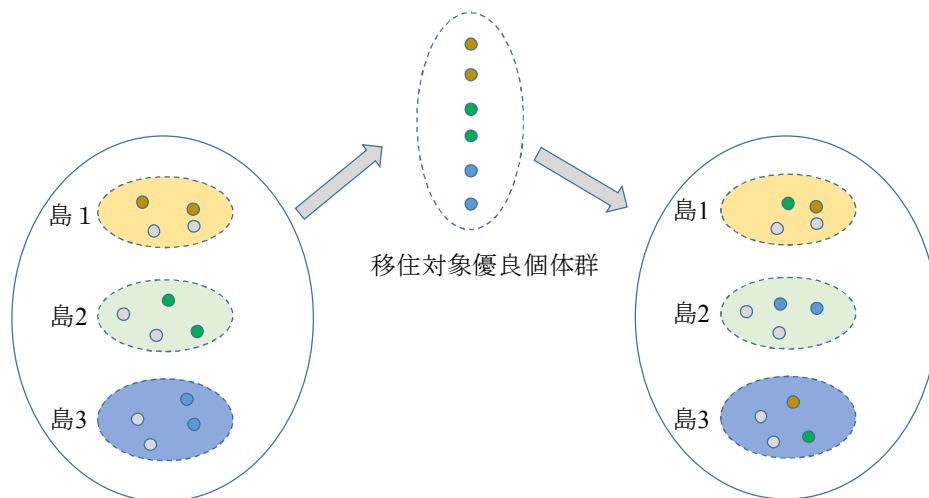


図 3.6 個体の移住操作と島毎の特性づけ

3.4 親世代の選択と次世代の生成

この節では、図 3.3 の中で記した「親世代の選択」、「次世代生成」について、本研究で用いる方法を示す。

3.4.1 親世代の選択

各個体は、先ず、2.1 節に示した「各ジョブは与えられた全作業を完了する」、「一人の段取者は複数機の段取をしない」等の制約の条件を満足しない個体にペナルティを与えられる。次に、目的関数による評価値から NSGA II の非優越ソートによるランク付けと混雑距離を用いてランクを決定し、ルーレット選択により次世代のための親世代の選択を行う。

(1) 非優越ソート (Non-Dominated Sort)

図 3.7 で、2 目的関数 (f_1 , f_2) の場合の例に関し、非優越ソートの手順を説明する。図 3.7 には個体が 15 個あり、 f_1 と f_2 の値が小さいほど優れた個体と仮定する。

Step 1. 「ランク」を r とし、その初期値を $r=1$ とする。

Step 2. 全体の解の中で、その個体より優れた個体がない（個体 a の場合、 A 域に優れた個体がない）非劣個体（●）を選び、これらの個体のランクを $r=1$ とする。

Step 3. 選ばれた非劣個体群を存在する個体群から除き、 $r=r+1$ とする。

Step 4. 選ばれる個体群がなくなるまで、Step 2 と Step 3 を繰り返す。

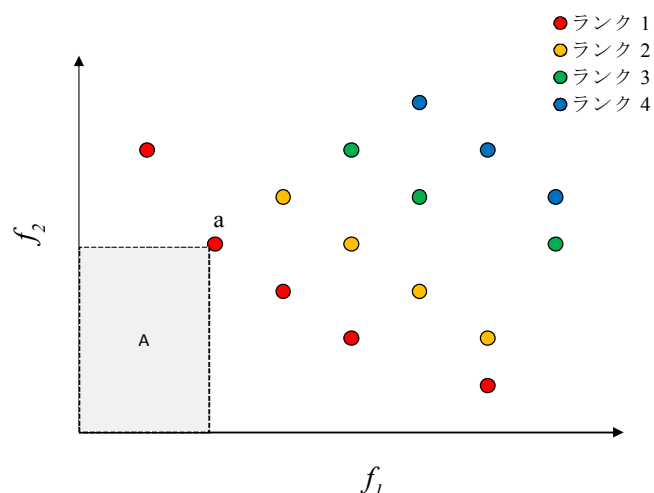


図 3.7 非優越ソートによるランク付け

(2) 混雑距離 (Crowding Distance)

混雑距離は、同一ランクの個体群間のユークリッド距離から算出し、それぞれの個体の他の個体からの乖離の大きさ (混雑距離の大きさ) で解の独自性を評価する方法である。図 3.8 で、2 目的関数 (f_1, f_2) の場合の例に関し手順を示す。なお、図 3.8 では、 f_1, f_2 の両値とも標準化した値を用い、図中の点は同一ランクの個体群を示す。

Step 1. 同一パレート面に含まれる個体数を n 個とし、各個体 i ($i=1, 2, \dots, n$) に対して混雑距離の初期値を設定する。 $dis_i = 0$

Step 2. 目的関数 f_1, f_2 の最小値と最大値の個体 (境界個体) に対して予め設定した最大距離を付与する。

Step 3. 境界個体でない個体 i に対して、同一ランクの個体 j ($j=1, 2, \dots, n, j \neq i$) との距離に基づく (3.1) 式の混雑距離の計算を行う。この結果、混雑距離が大きい程、解の独自性が高く、同一ランクの個体群の中での順位が高くなる。

$$dis_i = \sum_{j=1}^n \sqrt{q(f_1(i) - f_1(j))^2 + (1-q)(f_2(i) - f_2(j))^2} \dots\dots\dots (3.1)$$

ここで、 q は異文化型島モデルにおける特性を示す。例えば、 $q > 0.5$ の場合は f_1 を重視し、 $q < 0.5$ の場合は f_2 を重視する。特性を付けない場合は、 $q=0.5$ とする。

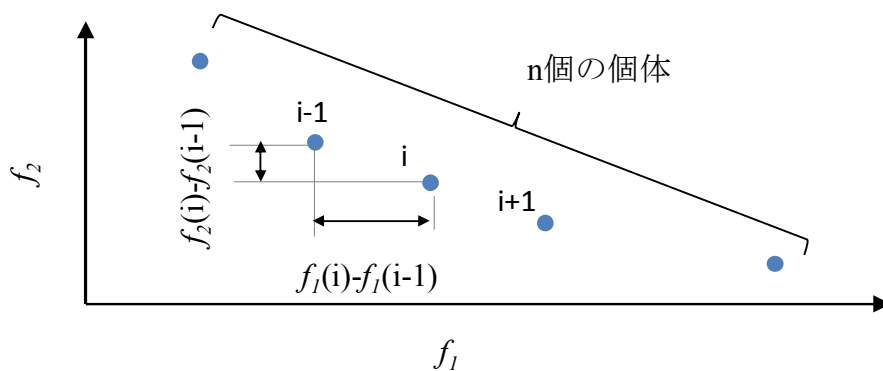


図 3.8 混雑距離の算出

(3) ルーレット選択

ルーレット選択は個体 R 個群の中からある個体 a を選ぶ確率を P_a として、 f_a を個体 a の評価値、 f_b を個体 b ($b=1, 2, \dots, R$) の評価値としたときに、

$$P_a = \frac{f_a}{\sum_{b=1}^R f_b} \dots\dots\dots (3.2)$$

とする選択方式である。

(3.2) 式の f_a, f_b は、通常、目的関数から導出した評価値を用いるが、同程度の評価値を持つ個体が多い場合は優秀な個体の選択確率が低くなる可能性があり、一方、個体間の格差が大きい場合は評価値の高い個体が選ばれる確率が高くなりすぎる可能性もある。従って、何らかの関数で評価値を調整する必要性が生じ、今回は、評価値に対してランク選択の規則に基づく以下のスケーリング（尺度づけ）を行う。即ち、1位の個体には R 点、2位の個体には R-1 点、・・・、R 位には 1 点を与えることとする。例をあげると、5 個の個体の中で最高ランクの個体の評価値を 5、次にランクの高い個体の評価値を 4、最もランクの低い個体の評価値を 1 として、(3.2) 式の f_a, f_b にランク値を入れる。

3.4.2 次世代の生成

(1) 交叉

本研究では、2 種類の交叉方法を用いる。1 つ目は機械単位における遺伝子の二点交叉、二つ目は各機械の内部の一部同士で交叉する部分一致交叉（重複排除）である。

交叉の説明にあたり、交叉対象の遺伝子について述べる。本研究の遺伝子の構成は表 3.2 で簡単な例を示したが、より一般化すると図 3.9 に示すように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 (①, ②, ...) が左端から処理順で並んでいる。

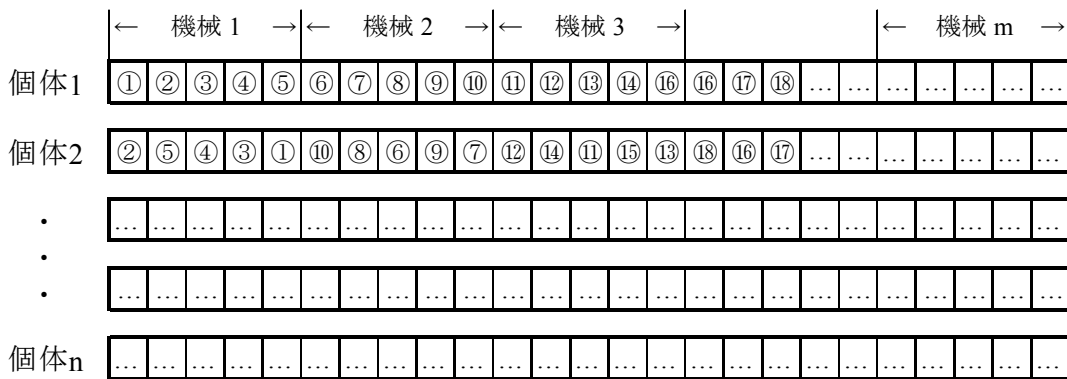


図 3.9 遺伝子の構成

まず、機械単位に交叉する二点交叉を説明する。二点交叉は、交叉点を機械単位で任意に 2 機械を選び、2 機械に挟まれている部分を入れ替える方式である。図 3.10 は m 台の機械のうちの機械 1~機械 7 を示しており、機械 2 と機械 5 が交差点として選択さ

れた場合の例を示す。親1の機械2～機械5が持つ遺伝子（灰色網掛け）を子2の機械2～機械5の遺伝子とし、親2の機械2～機械5の持つ遺伝子（薄緑網掛け）を子1の機械2～機械5の遺伝子とし受け継ぎ交叉する。

この機械単位の交叉による個体の多様性への効果に関しては、付録Bで詳しく記述する。

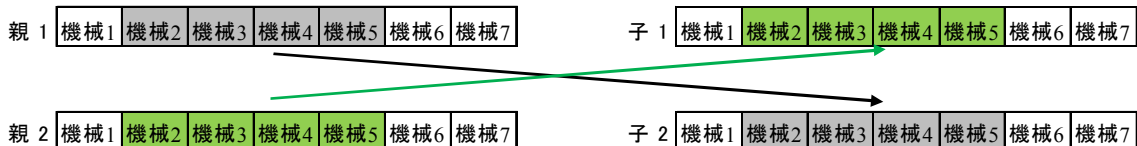


図 3.10 二点交叉

次に、機械内部の遺伝子同士で交叉する部分一致交叉を説明する。部分一致交叉は、親世代の個体群から親となる2個体を選び、同一機械間で任意に決定された二点間の親のジョブ表現番号の順番を示している遺伝子列をそのまま子へ残す方式である。図3.11を例として、ある機械 m において交差点を遺伝子座 iv と vii とを選択した場合の部分一致交叉を説明する。基本的には、親1の交差点 $iv \sim vii$ の遺伝子列（網掛け部）を子2の遺伝子座 $iv \sim vii$ の遺伝子列（網掛け部）の順番とし、親2の交差点 $iv \sim vii$ の遺伝子列の順番を子1の遺伝子座 $iv \sim vii$ の遺伝子列の順番とする交叉である。交叉後に遺伝子の重複を避ける操作が必要となるので、その操作手順を以下に具体的に説明する。

Step 1. 親1の遺伝子を子1へ、親2の遺伝子を子2へコピーする。

Step 2. 親1の遺伝子座 iv の③を子2へ反映させるが、子2の遺伝子座 iv に③があるので、そのままとする。

Step 3. 親1の遺伝子座 v の②を子2へ反映させる。子2の②の重複を避けるため、子2の遺伝子座 i の④と子2の遺伝子座 v の②を入れ替える。

Step 4. 親1の遺伝子座 vi の②を子2へ反映させるが、子2の遺伝子座 vi に②があるので、そのままとする。

Step 5. 親1の遺伝子座 vii の④を子2へ反映させる。子2の④の重複を避けるため、子2の遺伝子座 ii の④と子2の遺伝子座 vi の⑤を入れ替える。これで、子2が完成する。

Step 6. 親2の遺伝子座 iv の③を子1へ反映させるが、子1の遺伝子座 iv に③があるので、そのままとする。

Step 7. 親2の遺伝子座 v の④を子1へ反映させる。子1の④の重複を避けるため、子1の遺伝子座 i の②と子2の遺伝子座 v の④を入れ替える。

Step 8. 親 2 の遺伝子座 vi の②を子 1 へ反映させるが、子 1 の遺伝子座 vi に②があるので、そのままとする。

Step 9. 親 2 の遺伝子座 vii の⑤を子 1 へ反映させる。子 1 の⑤の重複を避けるため、子 1 の遺伝子座 ii の⑤と子 1 の遺伝子座 vii の④を入れ替える。これで、子 1 が完成する。



図 3.11 部分一致交叉

(2) 突然変異

突然変異は、任意に選ばれた機械 M_m に対して行う。突然変異の手法は、交換突然変異の方法を使用する。交換突然変異とは、乱数で選ばれた二つの遺伝子座の遺伝子を入れ替える方式である。図 3.12 では、機械 M_m において遺伝子座 iv (灰色網掛け) と vi (淡赤網掛け) の二つの遺伝子座が選択された場合の例を示す。

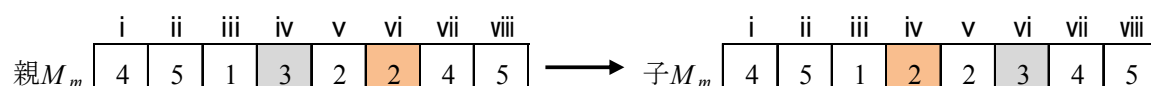


図 3.12 交換突然変異

3.5 まとめ

本章では、先行研究での従来の MO-FJSP の枠組に加え、本研究で新たに追加する機械毎の対応可能な段取者を組込んだ枠組に関して述べ、簡単な具体例でガントチャート導出までの手順を説明した。この新たな枠組みによりスケジューリングは複雑になるが、段取者の負荷の平準化が図れ、導出されるスケジュールにより、ムダ・ムラ・ムリのない生産の実現性が高まることになる。

次に、本研究で採用する島モデルの概要と本研究の次世代生成（交叉・突然変異）の特徴に関して紹介した。特に、交叉については本研究で用いた機械間の交叉（2点交叉）と機械内部での交叉（部分一致交叉）に関して遺伝子の配列例を用いた説明した。

第4章 島モデル遺伝的アルゴリズムの検証

本研究では、段取負荷を目的関数の一つとして取り上げるため、第3章では段取者を考慮した遺伝子表現について述べ、さらにこの遺伝子構造から最適近傍解を導く *MI-GA* の構成を示した。本章では、前述の中小企業 A 社の操業を参考にしたデータを用いて、今回提案の遺伝子表現と *MI-GA* の有効性を確認すると共に、第2章で述べた段取負荷の平準化について、以下の2方法（2.2節 目的関数参照）を比較する。

(1) 段取者間の負荷差の最小化による平準化を目的

$$\min \delta_T = \sum_{t=1}^T \gamma(Q_t^{\max} - Q_t^{\min}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

(2) 日毎の最大段取負荷の最小化による平準化を目的

$$\min SL = \max\{L_t^{\max} / \beta_t \mid t = 1, 2, \dots, T\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$L_t^{\max} = \max\{L_{wt} \mid w = 1, 2, \dots, w\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 L_{wt} は $t=1, 2, \dots, T$ における段取者 w の段取回数、 L_t^{\max} は $t=1, 2, \dots, T$ における段取回数の最大値である。

4.1 実験データ

本章では金属や樹脂などの素形材から縫製機械、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例を扱う。図4.1に加工プロセスの概要を示すが、円板状または円柱状の材料を旋盤加工後、穴明けや歯切り加工を施し、付属品を組み付け、一部のジョブは表面処理（外注）を施し検査・梱包・出荷される。

今回対象とする中小企業 A 社の事例では、ジョブ当たり 1~9 作業を持つ 72 ジョブ

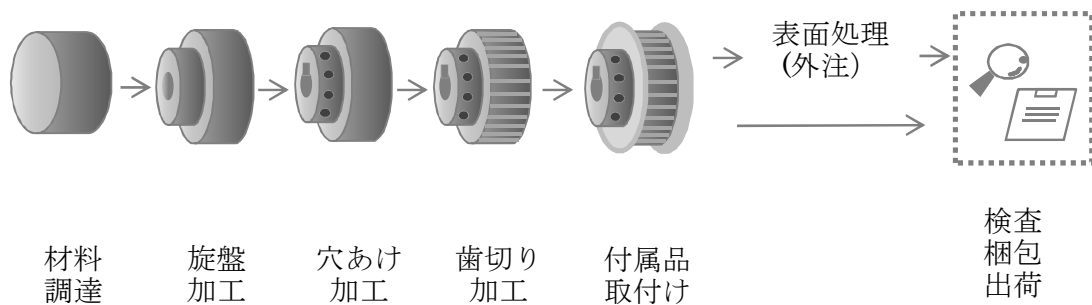


図4.1 加工プロセスの概要

が受注され、これらを6名の段取者 ($W_1 \sim W_6$) と約10名のパートタイマーが32台の機械を使用して生産する場合を取り上げる。

表4.1は6名の段取者がどの機械 ($M_1 \sim M_{32}$) の段取に対応できるかを○印で示したものであるが、段取者の割当てられていない機械は段取者の関与を必要としない機械である。図4.2は表4.1を集計し段取者毎の対応できる機械台数の比較グラフで、 W_6 が最も多くの機械の段取技能を保持しており、 W_2 と W_4 は段取対応機械台数が少なく段取者間での段取対応機械台数に差があることも今回の実験の条件となる。

1日の稼働時間は10.5時間とし、これを21に区分し1区分を30分とする。段取時間はすべての機械に対しどの段取者が行っても1区分の時間と仮定し、作業の終了単位も1区分単位とする。これによりガントチャートの時間単位が1区分となり、ジョブの機械間（工程間）移動のタイミングも区分単位となる。

表 4.1 段取者と段取対象機械対応表

機械	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9	M_{10}	M_{11}	M_{12}	M_{13}	M_{14}	M_{15}	M_{16}	M_{17}	M_{18}	M_{19}	M_{20}	M_{21}	M_{22}	M_{23}	M_{24}	M_{25}	M_{26}	M_{27}	M_{28}	M_{29}	M_{30}	M_{31}	M_{32}
W_1	○	○	○	○	○	○															○	○					○	○				
W_2							○	○										○	○								○	○				
W_3	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○		○	○							○	○			○	○				
W_4			○		○					○	○	○			○	○											○	○				
W_5					○		○	○		○	○	○			○	○	○	○	○	○	○	○	○		○		○	○				
W_6					○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○		○	○				

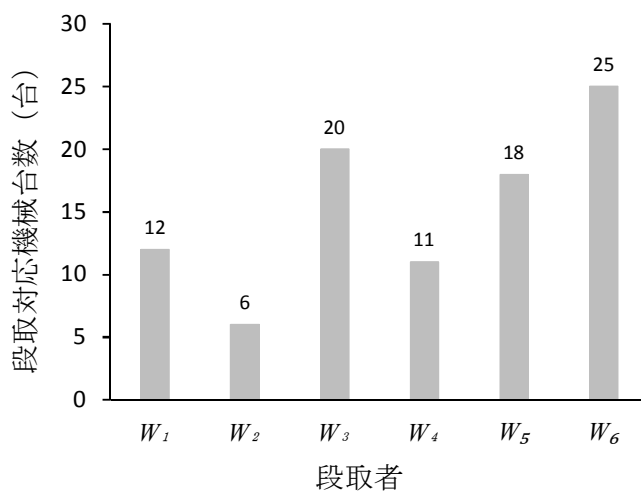


図 4.2 段取者の段取対応機械台数比較

図 4.3 は実働日換算で納期までの残日数毎のジョブの件数を示しており、最大日数は 22 日である。図に示すように既に納期を過ぎているジョブは 5 件あり、表 4.2 に 5 ジョブの内訳を示すが、納期までの残日数で負の数値はスケジューリング日に既に遅れている日数を示す。ジョブ J_1 を例にとると、 J_1 を他のジョブの納期や段取負荷を考慮せず最優先で仕掛け、加工完了することが可能という仮定で、加工完了日を想定すると、すでに遅れている日数 6 日に必要な作業数と処理時間、ロットサイズから算出した必要日数である 1 日を加え出荷時の遅れ t^d_1 は 7 日となる、これにジョブ毎の遅れ重みを示す $\alpha_1=100$ を積算すると換算遅れ日数は $\alpha_1 \cdot t^d_1=700$ (日) となる。他の遅れ 4 ジョブ $J_{40}, J_{41}, J_{42}, J_{58}$ に関して同様の計算を行い、これらから目的関数 TD を算出すると TD 値は 786 となる。この TD 値は 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仮定での仮想値であるので、この値を仮想 TD 値とする。

この仮定は段取者や機械の重複も検証しておらず実行可能性が保証されていないが、実行可能解の仮定の目安となり、段取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。

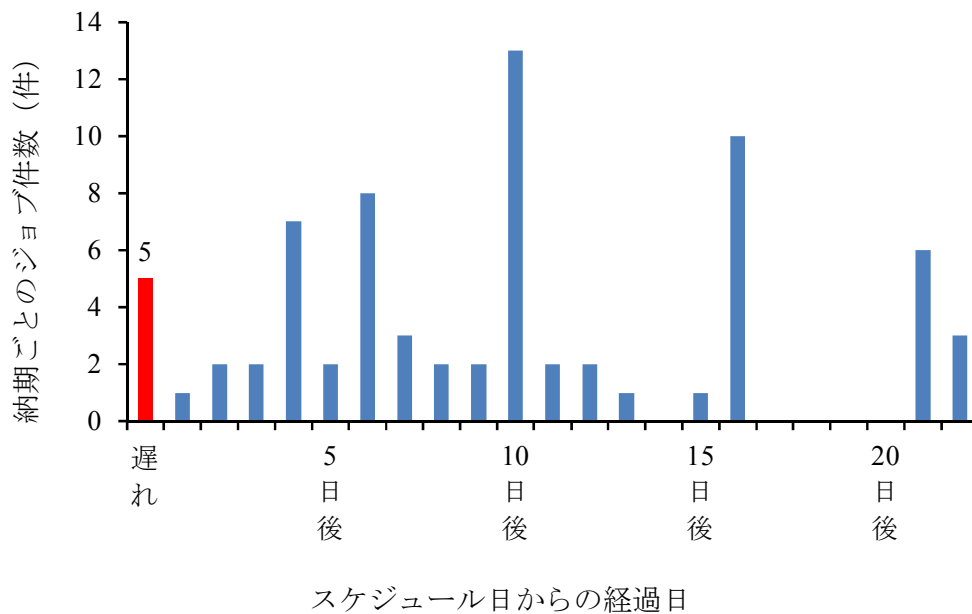


図 4.3 納期までのジョブ件数分布

表 4.2 条件付き到達可能 TD 値

ジョブ	ロット サイズ	残作業数	納期まで の残納期	必要日数	t_k^d	α_k	$\alpha_k \cdot t_k^d$
J_1	10	3	-6	1	7	100	700
J_{40}	100	5	-3	1	4	5	20
J_{41}	100	8	-2	3	5	5	25
J_{42}	55	7	-2	3	5	5	25
J_{58}	35	7	-11	5	16	1	16
TD							786

4.2 EDD により得られるガントチャート例

上記の仮想 TD 値は実行可能性が保証されていないので、実行可能解の例としてディスパッチング・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) による解を導出する。図 4.4 は EDD により得られたガントチャート例の 1 日分 (横軸の 1 時間枠は 30 分単位で、21 枠 : 10.5 時間) を示す。縦軸は全ての機械 32 台と表面処理を担当する外注先の一部を示す。各枠内の $W_1 \sim W_6$ は段取者を、数字はジョブ番号を意味示し、数字の後の「/マーク」はこの時刻で当該ジョブに関する作業が全て終了したことを意味している。ところで、機械 M_{26} と M_{29} には表 4.1 に示したように $W_1 \sim W_6$ の段取者が関与しないにも拘らず、段取者を暗示する P の記号が入っているが、これらの機械はパート従業員でも対応可能な簡易な段取を行なうことから設定されている。なお、これらの段取は複数のパート従業員が対応可能なため同一時刻での P の重複は排除していない。

表 4.3 は EDD によるガントチャートから得られた遅れジョブの加工完了日と TD 値を算出した表である。表 4.3 では、表 4.2 にジョブ J_5 が加わり、更に他のジョブの影響を受けたジョブ J_{40} の値が 5 ポイント悪化し TD 値は 891 となっている。図 4.5 はこのガントチャートから得られた段取者の負荷の分布を示すが、 W_1 の段取回数が 21 と他と比較して大きくなった。これは EDD の解の導出に際し段取者の割り当てにおいて、若い段取者番号を優先したためである。この結果、 W_4 の段取回数 4 との差は 17 となっており、試行した EDD では、段取負荷の平準化は確保できていない結果となっている。

<i>t</i>	経過時刻																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
<i>M</i> ₁																						
<i>M</i> ₂				<i>W</i> ₁	40	40	40	40	40	40	40	40		<i>W</i> ₁	3	3	3	3	3	3	3	
<i>M</i> ₃			<i>W</i> ₁	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62/	<i>W</i> ₁	38	38	
<i>M</i> ₄		<i>W</i> ₁	36	36/																		
<i>M</i> ₅		<i>W</i> ₄	6	6	6	6	6	<i>W</i> ₁	67	67	<i>W</i> ₁	59				<i>W</i> ₁	4	<i>W</i> ₄	51/			
<i>M</i> ₆	<i>W</i> ₅	60	<i>W</i> ₄	65	<i>W</i> ₃	66	66		<i>W</i> ₅	44												
<i>M</i> ₇				<i>W</i> ₂	53	<i>W</i> ₂	53		<i>W</i> ₂	25	25	25	25	25	25	<i>W</i> ₂	25	25	25	25	25	
<i>M</i> ₈		<i>W</i> ₃	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77		<i>W</i> ₂	78	78	78	
<i>M</i> ₉																						
<i>M</i> ₁₀																						
<i>M</i> ₁₁																						
<i>M</i> ₁₂	<i>W</i> ₃	1	1	<i>W</i> ₃	47		<i>W</i> ₃	1	<i>W</i> ₃	2	2	2	<i>W</i> ₃	47	<i>W</i> ₃	48	<i>W</i> ₃	37	37	<i>W</i> ₃	40	
<i>M</i> ₁₃	<i>W</i> ₄	43	<i>W</i> ₅	37	37	<i>W</i> ₃	52	<i>W</i> ₃	54	54	<i>W</i> ₃	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	
<i>M</i> ₁₄																						
<i>M</i> ₁₅																						
<i>M</i> ₁₆																						
<i>M</i> ₁₇		<i>W</i> ₅	4	<i>W</i> ₅	4								<i>W</i> ₅	4	<i>W</i> ₅	4	<i>W</i> ₅	7	7	7	7	
<i>M</i> ₁₈		<i>W</i> ₂	55	55	55		<i>W</i> ₂	39	39	39	39	<i>W</i> ₂	39	39	39	39	<i>W</i> ₂	39	39	39	39	
<i>M</i> ₁₉					<i>W</i> ₅	13	13	13	13	13	<i>W</i> ₅	13	13	13	13	13	<i>W</i> ₅	12/	<i>W</i> ₅	15	<i>W</i> ₅	
<i>M</i> ₂₀				<i>W</i> ₆	35	35	<i>W</i> ₅	35	35													
<i>M</i> ₂₁	<i>W</i> ₁	58	58	58	58	<i>W</i> ₁	42	42	<i>W</i> ₆	43/	<i>W</i> ₆	52/	<i>W</i> ₁	40	40	40	40	40	40	<i>W</i> ₁	37	
<i>M</i> ₂₂	<i>W</i> ₆	41	<i>W</i> ₆	59	59	59	<i>W</i> ₆	44		<i>W</i> ₁	4	<i>W</i> ₁	12	12	<i>W</i> ₁	51	51	<i>W</i> ₁	53		<i>W</i> ₁	
<i>M</i> ₂₃			<i>W</i> ₃	41	41	41	41			<i>W</i> ₃	21	<i>W</i> ₃	22	22		<i>W</i> ₃	23					
<i>M</i> ₂₄					<i>W</i> ₁	1	<i>W</i> ₁	22		<i>W</i> ₅	23										<i>W</i> ₅	53
<i>M</i> ₂₅	57		40		43					53	54											
<i>M</i> ₂₆	<i>P</i>	46	46	<i>P</i>	14	14	<i>P</i>	59					<i>P</i>	21/		<i>P</i>	12	<i>P</i>	22	22/	<i>P</i>	23/
<i>M</i> ₂₇									<i>W</i> ₁	42	42											
<i>M</i> ₂₈																						
<i>M</i> ₂₉	<i>P</i>	45	45/	<i>P</i>	46/	<i>P</i>	47		<i>P</i>	59		<i>P</i>	42	<i>P</i>	59/	<i>P</i>	2	<i>P</i>	44/	<i>P</i>	1	
<i>M</i> ₃₀	<i>W</i> ₂	40	<i>W</i> ₂	43				<i>W</i> ₂	53								<i>W</i> ₁	77	77			
<i>M</i> ₃₁			60/		65/			6	66/		44	67/							4			
<i>M</i> ₃₂																						
外注 ₁						58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
外注 ₂								41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
外注 ₃													42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
外注 ₄																						
外注 ₅																				4	4	4
外注 ₆																						
外注 ₇	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61

機械番号・外注先

図 4.4 EDD によるガントチャート例

この EDD による解は段取者の負荷の平準化を考慮していない点で推奨できないが、少なくとも機械や段取者の重複を許しておらず実行不可能とはいえず、表 4.2 の仮想 TD 値より実現性のある TD の目安となり得る。段取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の値に近ければ提案手法が有効であると考えられる。

表 4.3 EDD により得られた解における遅れジョブと TD 値

ジョブ	ロットサイズ	残作業数	納期までの残納期	必要日数	加工完了日	t_k^d	α_k	$\alpha_k \cdot t_k^d$
J_1	10	3	-6	1	1	7	100	700
J_5	100	7	6	7	7	1	100	100
J_{40}	100	5	-3	1	2	5	5	25
J_{41}	100	8	-2	3	3	5	5	25
J_{42}	55	7	-2	3	3	5	5	25
J_{58}	35	7	-11	5	5	16	1	16
TD								891

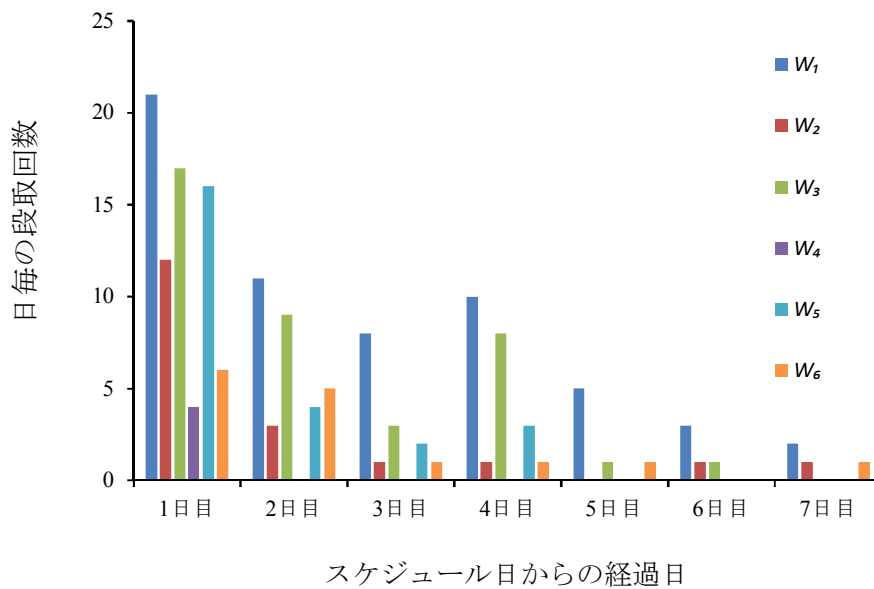


図 4.5 EDD ガントチャートによる段取回数の変化

図 4.6 は EDD による解において対象ジョブが全て処理されるまでの機械毎の段取回数を示している。この図から M_{22} が機械の中で最も段取回数が多く、この機械がネックとなって納期遅れや段取負荷の平準化に影響を与える可能性を念頭においておく必要がある。

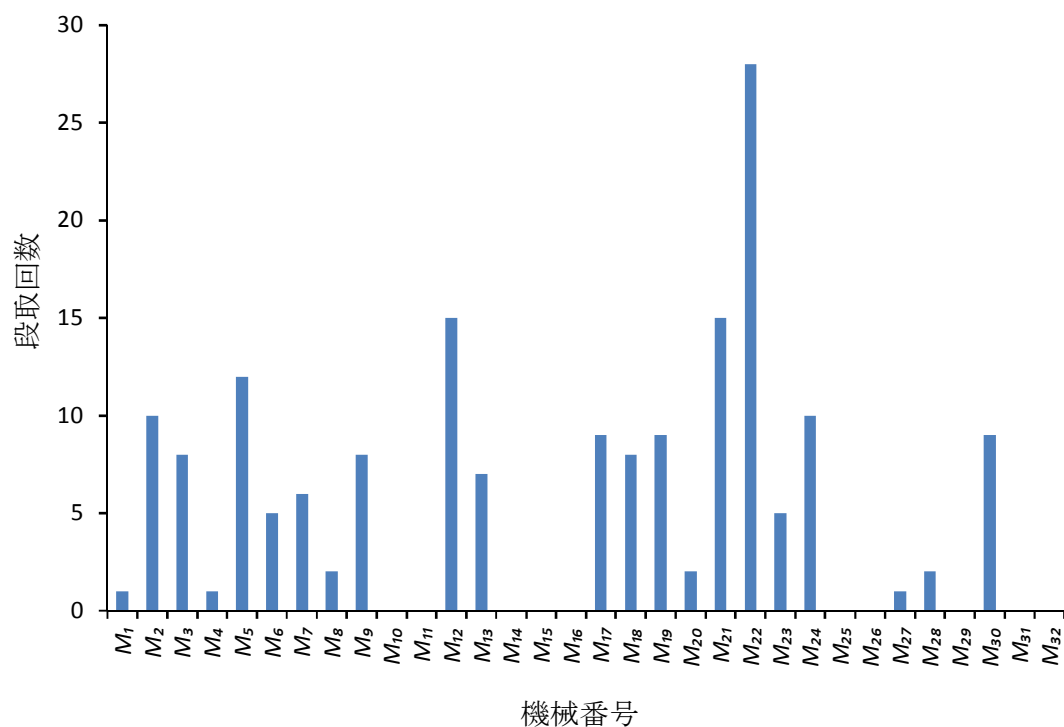


図 4.6 EDD ガントチャートによる機械毎の段取回数比較

4.3 GAのパラメータの設定

今回提案した遺伝子表現とアルゴリズムの有効性の評価を行なうとともに、重みづけ納期遅れ最小化と段取負荷平準化の2目的を最適化する実験を行なう。実験に当たり、前述の中小企業での操業を反映した簡易モデルでの実験で厳密解への到達時間等から、以下のごとくGAのパラメータを設定する。なお、表中に「繰返し計算回数」とあるのはGAでの世代数のことであり、以降は、この意味で「繰返し計算回数」を用いる。

表 4.4 GAパラメータ

パラメータ	MI-GA	
個体数	144	
島数	12	
島内個体数	12	
機械間交叉率	70%	
機械内交叉率	70%	
突然変異率	20%	
島間移住頻度	5000 繰返し計算回数毎	
繰返し計算回数	300,000	
	<i>TD</i>	δ_T or <i>SL</i>
	1 島	0.1
	2 島	0.2
	3 島	0.3
	4 島	0.4
	5 島	0.5
混雑距離の重み係数	6 島	0.6
	7 島	0.7
	8 島	0.8
	9 島	0.9
	10 島	1.0
	11 島	ランキングなし
	12 島	<i>TD</i> のみでランキング

4.4 段取者間の負荷差の最小化

段取者間の負荷差の最小化による平準化を目的にするには、以下の式 (2) を用いる。

$$\min \delta_T = \sum_{t=1}^T \gamma_t (Q_t^{max} - Q_t^{min}) \dots\dots\dots (2)$$

今回は $\gamma_t = 1$ 、即ち、経過日によって負荷差の重みづけは行わないこととし、スケジュール間隔を1日毎 ($T=1$)、2日毎 ($T=2$)、3日毎 ($T=3$) の場合、すなわち、1日間の負荷差の最小化、2日間の負荷差の最小化、3日間の負荷差の最小化の3ケースで実験

をおこなう。

4.4.1 スケジュール間隔:1日毎 ($T=1$) の実験結果

スケジュールを1日毎 ($T=1$) に作成する条件で10回の繰返し実験(実験1~10)を実施した。図4.6は、代表的な例として実験1を選び、例として島1, 島5, 島12の繰返し計算回数5000回ごとの解のTD到達結果を示し、図4.7は同じく δ_T の到達結果を示す。

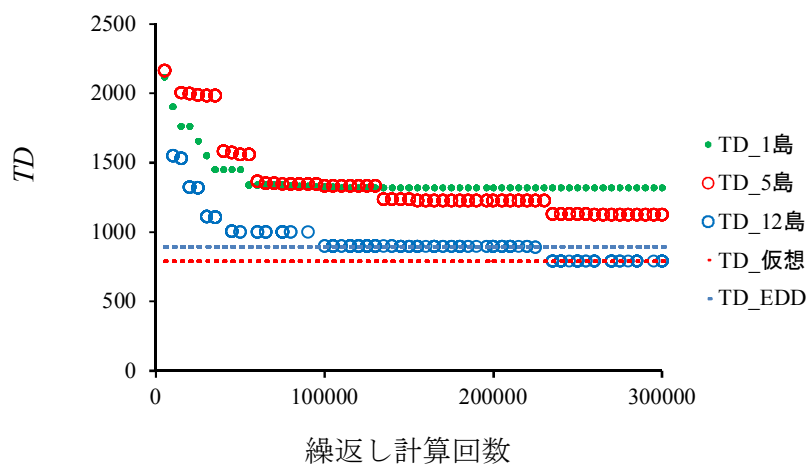


図 4.6 島毎における TD の収束変化(実験 1)

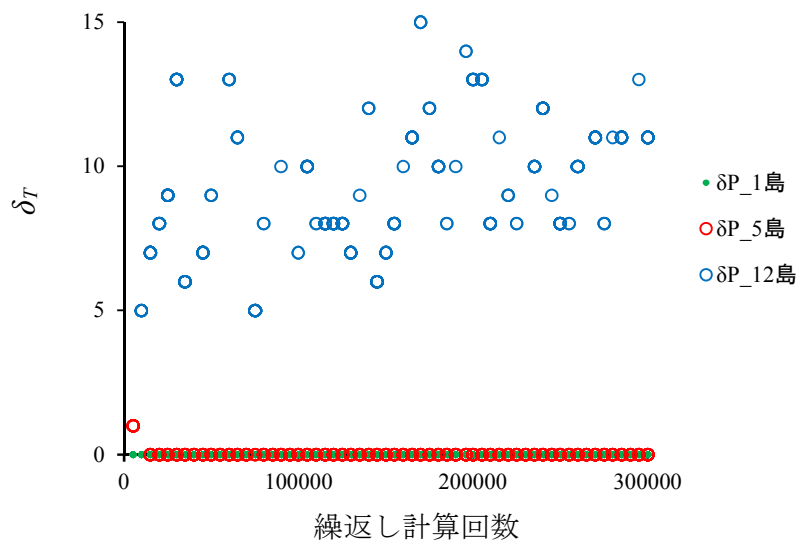


図 4.7 島毎における δ_T の収束変化(実験 1)

図 4.6 では、島 12 の TD 到達値の最小値が、青の破線で示した EDD による TD 値よ

り優れ、かつ、赤い破線で示した仮想 TD 値に限りなく近づいていることが認められる。以上のことから今回提案の $MI-GA$ のアルゴリズムは有効に働いていると考えられる。

図 4.7 では、1 島、5 島は少ない繰り返し計算回数で $\delta_T=0$ に収束しているのに対し、12 島は多くの繰り返し計算回数を経ても収束する傾向は認められない。これは、表 4.4 で設定したように、1 島、5 島は混雑距離の重みに δ_T を組み入れているのに対し、12 島は TD のみのランキングを評価対象として、 δ_T を評価の対象としていないことに起因している。

図 4.8 は導出解の各 δ_T 値と TD 値の関係を示す。この図からは $\delta_T=0$ の解で TD 最小値の減少には限界があるが、 $\delta_T \geq 5$ の解では TD 最小値は徐々に改善し、 $\delta_T \geq 8$ の解では TD 最小値は仮想 TD 値に近づいていることが分かる。これは段取者の技能差を考慮に入れた負荷差をある程度以上許容した解でないと優れた TD 値は得られないとを意味している。

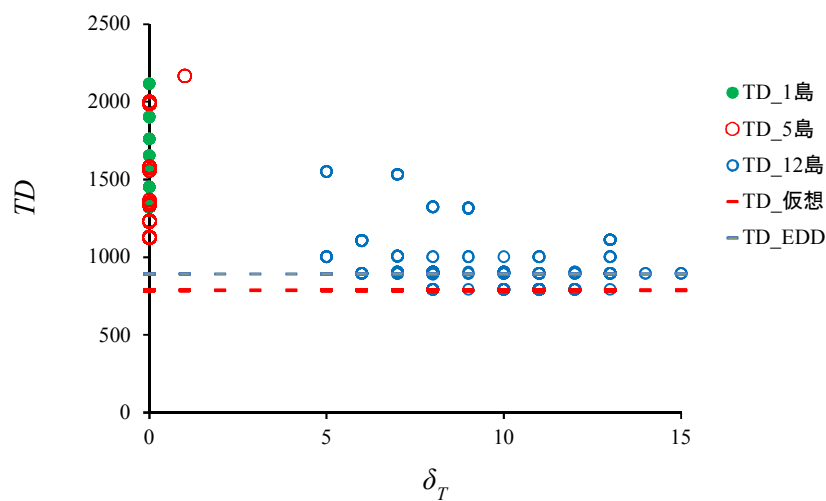


図 4.8 島毎における TD と δ_T の関係(実験 1)

図 4.8 では代表的な例である実験 1 の島 1,5,12 で得られた解の δ_T 値と TD 値との関係を示したが、図 4.9 では、同一条件で 10 回の繰り返し実験結果に関し、それぞれの実験で得られた解の δ_T 値と TD 値と関係で、各 δ_T における最小の TD 値を持つ解の分布を示す。図 4.9 の 10 回の実験の結果からも $\delta_T=0$ の解では TD 値の減少には限界があるが、 $\delta_T \geq 4$ になると TD 値は徐々に改善し、 $\delta_T \geq 8$ になると多くの実験で EDD より優れた解が導出されることを示している。

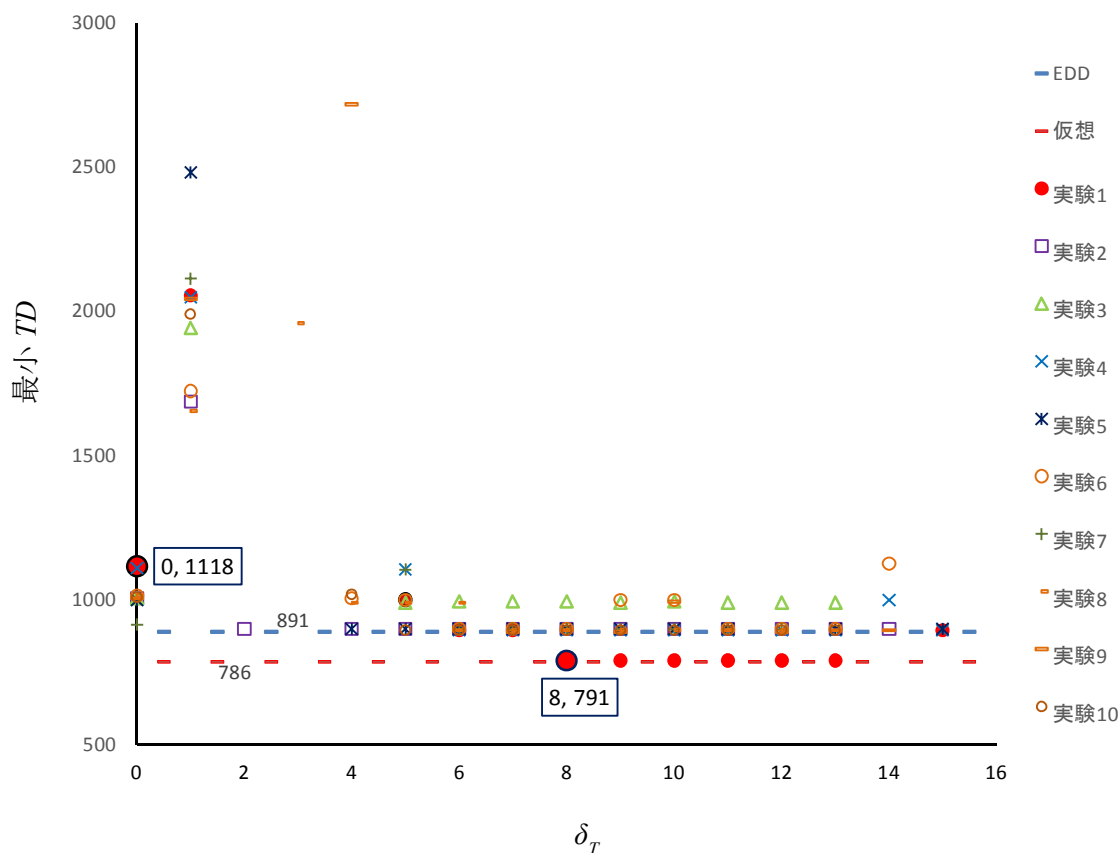


図 4.9 各 δ_T 毎における最小 TD 値をもつ解の分布 ($T=1$, 実験 1~10)

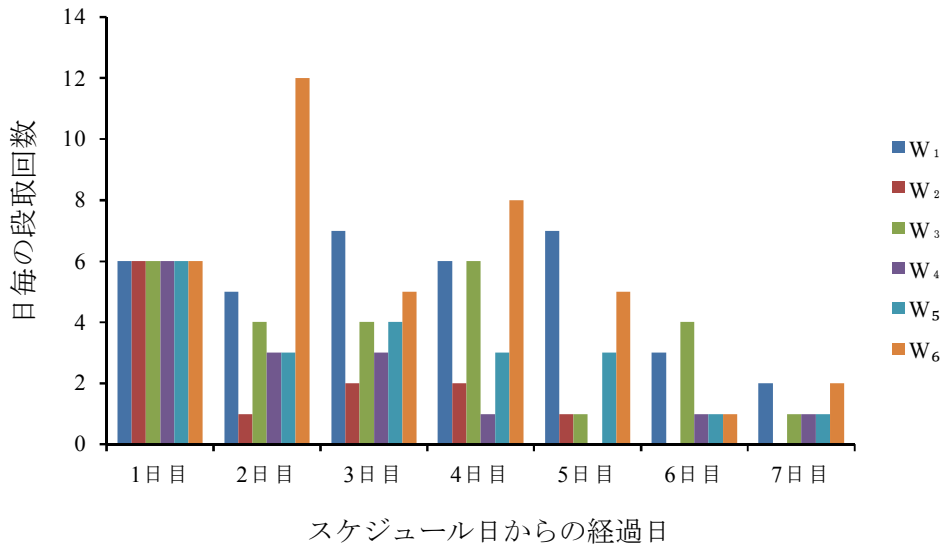
次に、段取者の負荷の差の具体的な状況を確認するため、図 4.9 における実験 1 (●印) のうち 2 つの解 ($\delta_T=0, TD=1118$) と ($\delta_T=8, TD=791$) を選び、段取者間の負荷の分布と負荷の日毎の変化を比較する。

図 4.10 に実験 1 の解 ($\delta_T=0, TD=1118$)、図 4.11 に解 ($\delta_T=8, TD=791$) における 7 日間の各段取者の段取回数の変化を示す。図 4.10 では、1 日目の段取者間の段取回数に差がない ($\delta_T=0$) が、2 日目は最大値が W_6 の 12 回、最小値が W_2 の 1 回と段取回数差は 11 に広がっている。これは 1 日目の $\delta_T=0$ を達成するため段取対象機械台数の少ない W_2 や W_4 が段取回数が段取対象機械台数の多い W_6 の段取回数を制約したため、段取回数の制限を織込まなかった 2 日目にその反動で W_6 の段取回数が増大したと考えられる。

図 4.11 では、1 日目の段取者間の段取回数の差は 8 回 ($\delta_T=8$) で、ほとんど段取者間の負荷差の制限がない条件による結果といえる。その結果、1 日目からの各段取者の段取回数の分布は図 4.2 の段取対応台数を反映しているが、段取者 W_5 と W_6 の 1 日目段取回数が 13 回と比較的大きい結果となり、段取作業が過負荷になる可能性もある。

(a) 日毎の段取回数の変化

	段取者						max	min	max -min	日毎計
	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₅	W ₆				
1日目	6	6	6	6	6	6	6	6	0	36
2日目	5	1	4	3	3	12	12	1	...	28
3日目	7	2	4	3	4	5	7	2	...	25
4日目	6	2	6	1	3	8	8	1	...	26
5日目	7	1	1	0	3	5	7	0	...	17
6日目	3	0	4	1	1	1	4	0	...	10
7日目	2	0	1	1	1	2	2	0	...	7
計	36	12	26	15	21	39	39	12	($\delta_T=$)0	149

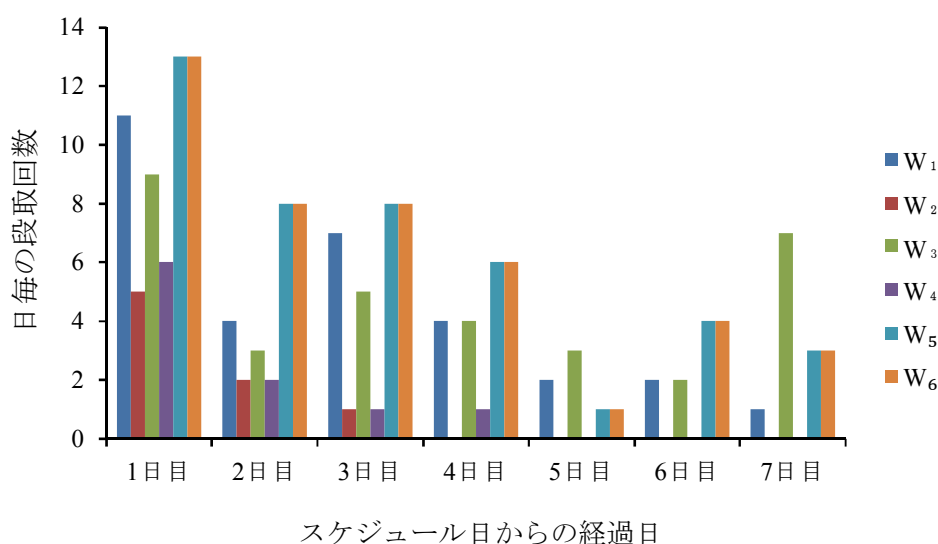


(b) 段取者の日毎の段取回数

図 4.10 解($\delta_T=0, TD=1118$)の各段取者の段取回数($T=1$, 実験 1)

(a) 日毎の段取回数の変化

	段取者						max	min	max -min	日 毎 計
	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₅	W ₆				
1日目	11	5	9	6	13	13	13	5	8	57
2日目	4	2	3	2	8	8	8	2	...	27
3日目	7	1	5	1	8	8	8	1	...	30
4日目	4	0	4	1	6	6	6	0	...	21
5日目	2	0	3	0	1	1	3	0	...	7
6日目	2	0	2	0	4	4	4	0	...	12
7日目	1	0	7	0	3	3	7	0	...	14
計	31	8	33	10	43	43	43	8	($\delta_T=$)8	168



(b) 段取者の日毎の段取回数

図 4.11 解($\delta_T=8$, $TD=791$)の各段取者の段取回数($T=1$, 実験 1)

4.4.2 スケジュール間隔：2 日毎 ($T=2$) の実験結果

スケジュールを 2 日毎 ($T=2$) に作成する条件で 10 回の繰り返し実験 (実験 1~10) を行い、図 4.12 にその結果の一部である、各 δ_T における最小 TD 値を持つ解の分布を示す。図 4.12 と $T=1$ の場合の結果である図 4.9 とを比較すると、 $\delta_T=0$ の解の TD 最小値の分布は大差ないものの、ほとんどの実験で TD 最小値が安定的な値に達するのは、図 4.12 では $\delta_T \geq 12$ の解となり、図 4.9 での $\delta_T \geq 8$ を大きく上回っている。これは、 δ_T を 1 日目と 2 日目との負荷差の合計としたことによるので、たとえば、図 4.11 (a) では、2 日目の段取の max 値は 8、min 値は 2 で、その差は 6 であるので、これに $\delta_T=8$ を加えると 14 となり、図 4.12 での $\delta_T \geq 12$ と同様な結果とみなせる。

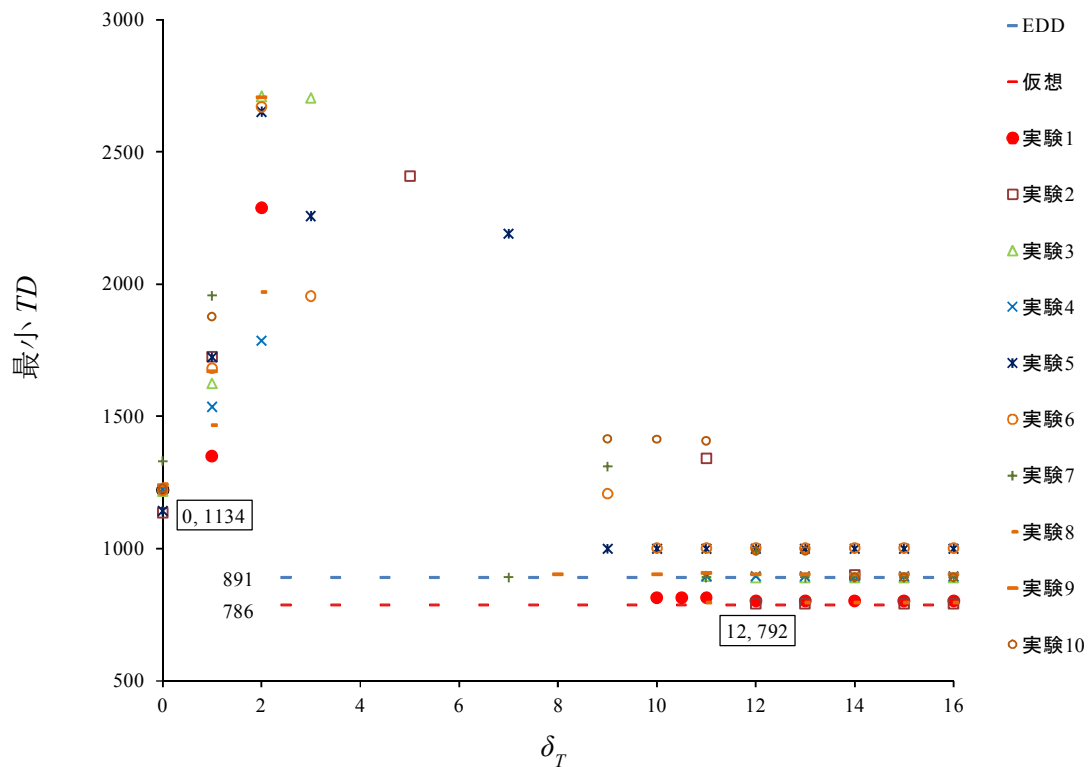


図 4.12 各 δ_T 毎における最小 TD 値をもつ解の分布 ($T=2$, 実験 1~10)

次に、段取者の負荷の差の具体的な状況を確認するため、図 4.12 における実験 2 (□印) の結果の 2 つの解 ($\delta_T=0, TD=1134$) と ($\delta_T=12, TD=792$) を選び、段取者間の負荷の分布と負荷の変化を比較する。

図 4.13 に実験 2 の解 ($\delta_T=0, TD=1134$)、図 4.14 に解 ($\delta_T=12, TD=792$) における 7 日間の各段取者の段取回数の変化を示す。

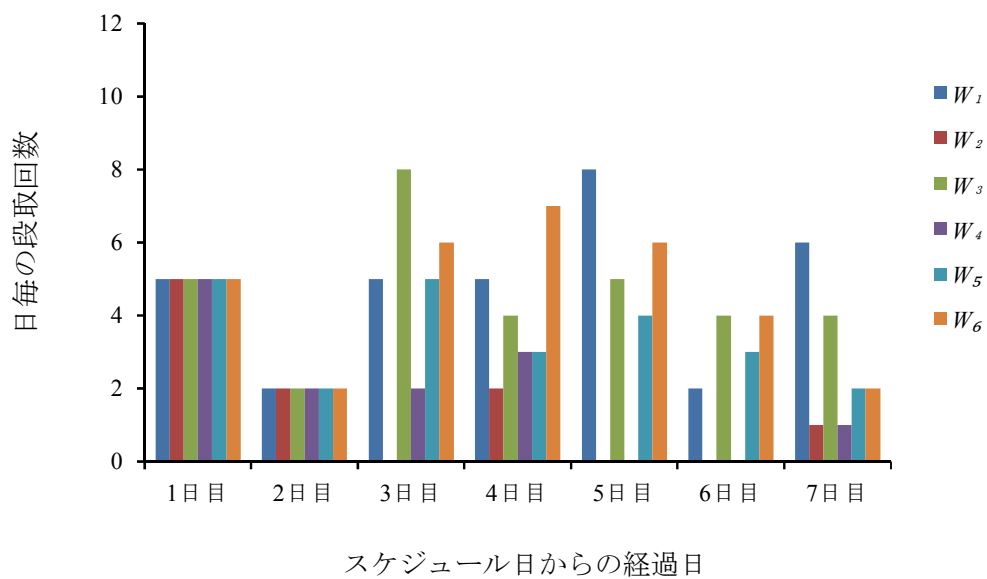
図 4.13 では段取者の段取回数の差のない範囲を 2 日間にした結果、3 日目以降にその影響が出ている。7 日間の全体の段取回数は図 4.10 では 142 回、図 4.13 では 144 回と殆ど差がないものの、1~2 日目の段取回数が大きく制限を受け 3 日目以降に段取回数を挽回して、図 4.9 での解 ($\delta_T=0, TD=1124$) に近づき、図 4.12 での解 ($\delta_T=0, TD=1134$) が得られたことを示している。

図 4.14 では、2 日間の段取者間の段取回数の差は 12 回 ($\delta_T=12$) で、図 4.11 と同じく、ほとんど負荷差の制限がない条件による結果であることを示しており、図 4.14 における到達 TD 最小値 792 と図 4.11 における $\delta_T=8$ での TD 最小値 791 とでほとんど差がない。一方、ほぼ同じ TD 値を得るのに図 4.11 (a) では 7 日間の総段取回数が 168 回、1 日目の

最大段取回数が 13 回となっているのに対し，図 4.14 (a) では 7 日間の総段取回数が 143 回，1 日目の最大段取回数が 10 回と低く，日毎の段取負荷の平準化の観点では，図 4.14 の結果を持つ解が優れていると言える．

(a) 日毎の段取回数の変化

	段取者						max	min	max -min	日 毎 計
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6				
1日目	5	5	5	5	5	5	5	5	0	30
2日目	2	2	2	2	2	2	2	2	0	12
3日目	5	0	8	2	5	6	8	0	...	26
4日目	5	2	4	3	3	7	7	2	...	24
5日目	8	0	5	0	4	6	8	0	...	23
6日目	2	0	4	0	3	4	4	0	...	13
7日目	6	1	4	1	2	2	6	1	...	16
計	33	10	32	13	24	32	33	10	$(\delta_T=0)$	144

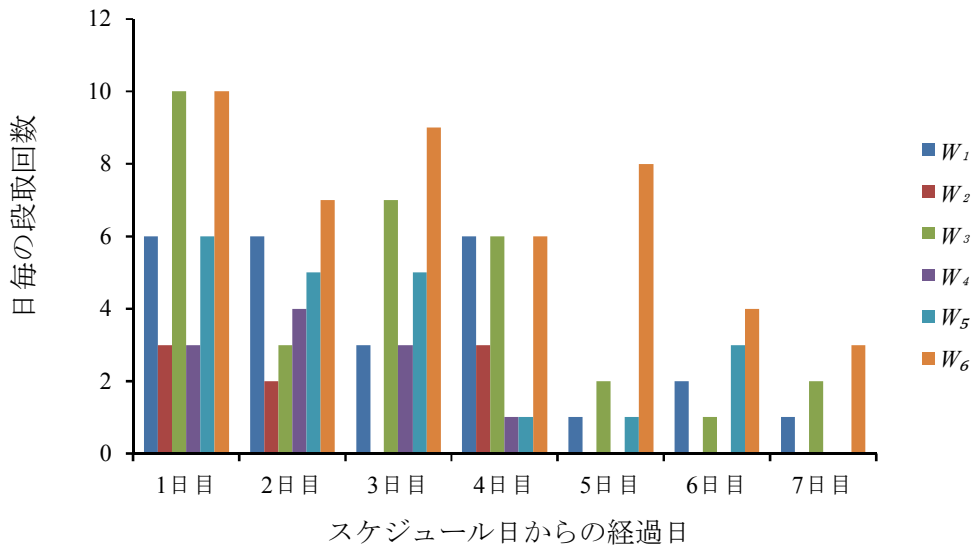


(b) 段取者の日毎の段取回数

図 4.13 解($\delta_p = 0$, $TD=1134$)の各段取者の段取回数($T=2$, 実験 2)

(a) 日毎の段取回数の変化

	段取者						max	min	max -min	日毎計
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6				
1日目	6	3	10	3	6	10	10	3	7	38
2日目	6	2	3	4	5	7	7	2	5	27
3日目	3	0	7	3	5	9	9	0	...	27
4日目	6	3	6	1	1	6	6	1	...	23
5日目	1	0	2	0	1	8	8	0	...	12
6日目	2	0	1	0	3	4	4	0	...	10
7日目	1	0	2	0	0	3	3	0	...	6
計	25	8	31	11	21	47	47	8	$(\delta_T=)12$	143



(b) 段取者の日毎の段取回数

図 4.14 解($\delta_p = 12$, $TD=792$)の各段取者の段取回数($T=2$, 実験 2)

4.4.3 スケジュール間隔:3 日毎 ($T=3$) の実験結果

スケジュールを 3 日毎 ($T=3$) に作成する条件で 10 回の繰返し実験 (実験 1~10) を行い, 図 4.15 にその結果の一部である, 各 δ_T における最小 TD 値を持つ解の分布を示す..

図 4.15 を $T=1$ の場合の結果である図 4.9 や $T=2$ の場合の結果である図 4.12 と比較すると, 図 4.15 では $\delta_T=0$ の場合の TD 最小値のばらつきが大きくなっている. これは後述の図 4.16 で示すように 3 日間の段取回数が制限を受け得るため, ジョブが円滑に処理されない確率が高くなるためと考えられる. また, ほとんどの実験で TD 最小値が安

定的な値に達するのは、図 4.15 では $\delta_T \geq 18$ の解で、図 4.8 での $\delta_T \geq 8$ や図 4.12 での $\delta_T \geq 12$ を大きく上回っているが、これは前述の原因による。

次に、段取者の負荷の差の具体的な状況を確認するため、図 4.15 における実験 1 (●印) の結果の 2 つの解 ($\delta_T=0, TD=1161$) と ($\delta_T=18, TD=796$) を選び、段取者間の負荷の分布と負荷の変化を比較する。

図 4.16 に解 ($\delta_T=0, TD=1134$)、図 4.17 に解 ($\delta_T=12, TD=792$) における 7 日間の各段取者の段取回数の変化を示す。

図 4.16 では段取者の段取回数の差のない範囲を 3 日間にした結果、4 日以降にその影響が出ている。図 4.10 との比較においては、2,3 日目の段取回数が大きく制限を受け 4 日目を以降に段取回数を取戻しているものの 7 日間の総段取回数が低下し、 $T=1$ の実験の TD 値に比し悪化した解が得られたことを示している。

図 4.17 (a) では、3 日間の段取者間の段取回数の差は 18 回で、図 4.11 (a) と同じく、ほとんど負荷差の制限がない条件であるので、到達 TD 最小値も 796 と図 4.9 における解 ($\delta_T=8, TD=791$) や図 4.12 における解 ($\delta_T=12, TD=791$) の TD 値とほとんど差がない結果となっている。一方、ほぼ同じ TD 値を得るのに図 4.11 (a) では日当たり最大段取回数が 13 回、7 日間の総段取回数が 168 回となっているのに対し、図 4.17 (a) では日当たり最大段取回数が 11 回、7 日間の総段取回数が 139 回と低く、図 4.17 の結果を持つ解が段取負荷の平準化という観点ではより優れていると言える。

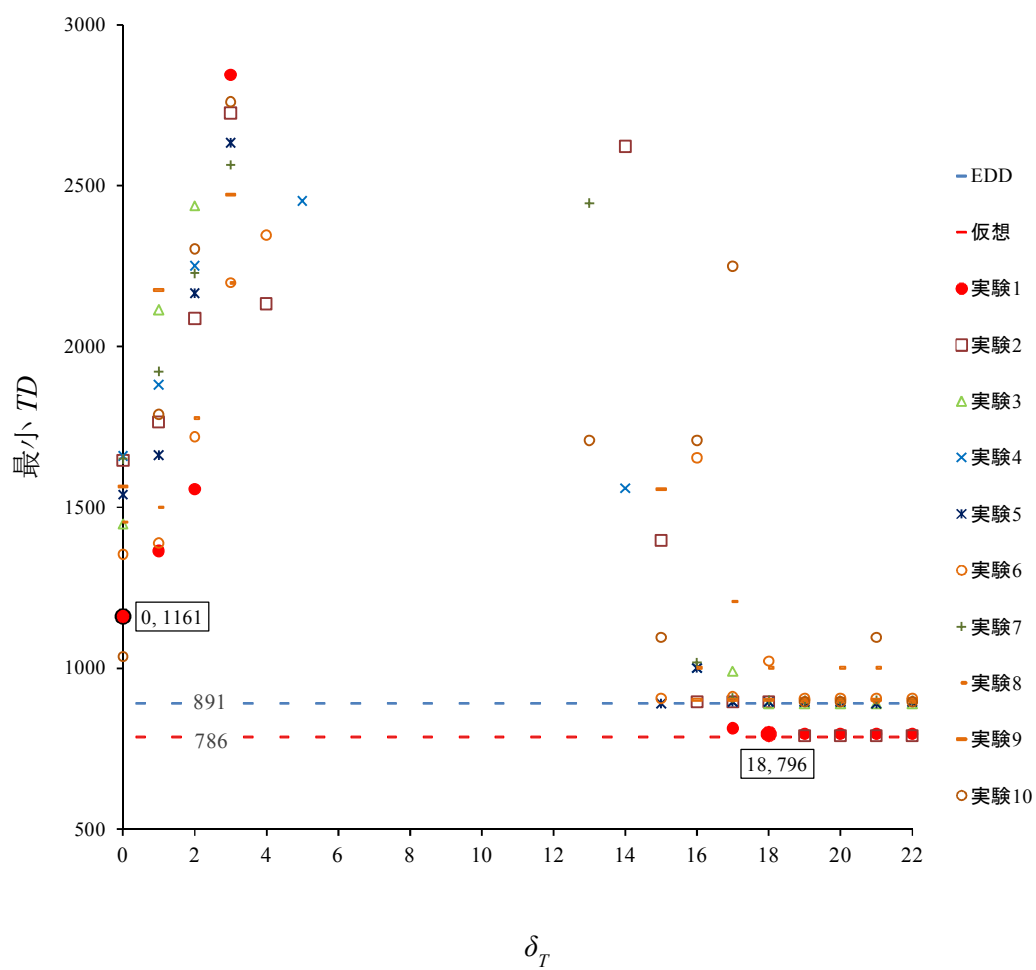
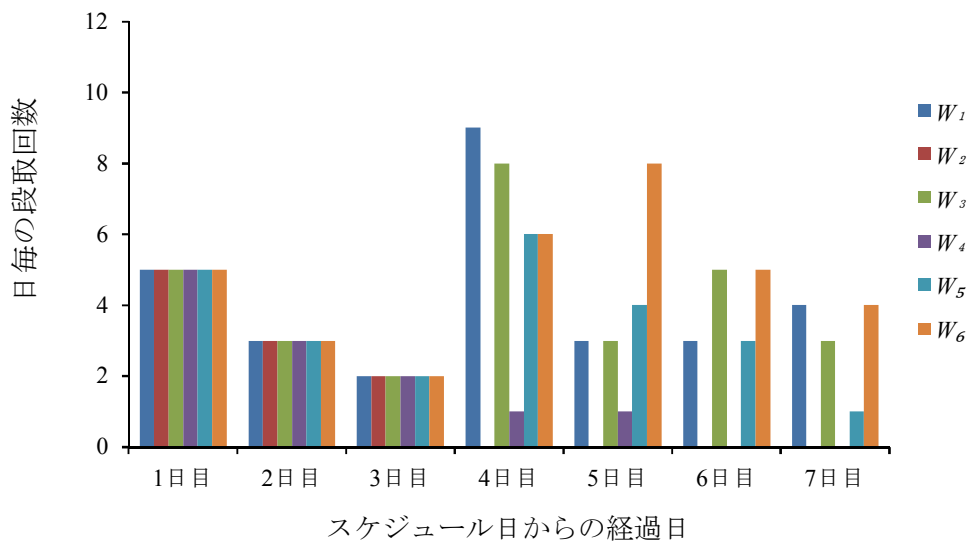


図 4.15 各 δ_T 毎における最小 TD 値をもつ解の分布 ($T=3$, 実験 1~10)

(a) 日毎の段取回数の変化

	段取者						max	min	max -min	日毎計
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6				
1日目	5	5	5	5	5	5	5	5	0	30
2日目	3	3	3	3	3	3	3	3	0	18
3日目	2	2	2	2	2	2	2	2	0	12
4日目	9	0	8	1	6	6	9	0	...	30
5日目	3	0	3	1	4	8	8	0	...	19
6日目	3	0	5	0	3	5	5	0	...	16
7日目	4	0	3	0	1	4	4	0	...	12
計	29	10	29	12	24	33	33	10	($\delta_T=0$)	137

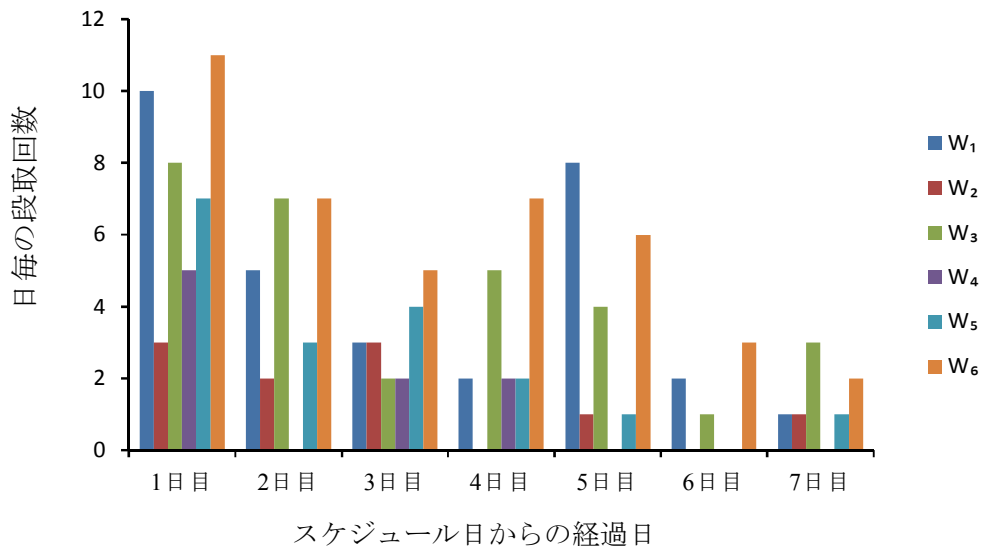


(b) 段取者の日毎の段取回数

図 4.16 解($\delta_T=0$, $TD=1161$)の各段取者の段取回数($T=3$, 実験 1)

(a) 日毎の段取回数の変化

	段取者						max	min	max -min	日毎計
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6				
1日目	10	3	8	5	7	11	11	3	8	44
2日目	5	2	7	0	3	7	7	0	7	24
3日目	3	3	2	2	4	5	5	2	3	19
4日目	2	0	5	2	2	7	7	0	...	18
5日目	8	1	4	0	1	6	8	0	...	20
6日目	2	0	1	0	0	3	3	0	...	6
7日目	1	1	3	0	1	2	3	0	...	8
計	31	10	30	9	18	41	41	9	($\delta_T=$)18	139



(b) 段取者の日毎の段取回数

図 4.17 解($\delta_T=18$, $TD=796$) の各段取者の段取回数($T=3$, 実験 1)

4.4.4 段取者間の負荷差の最小化まとめ

以上の実験から、島モデル遺伝的アルゴリズムを用い、段取者間負荷差の最小化を目的とした手法で、EDDによる TD 値より優れ、仮想 TD 値に近づく最小 TD 値を持つ解が得られることが確認できた。しかし、段取者間の技能差がある環境下では、段取者間の負荷差を0にする($\delta_T=0$)ことを追求すれば、到達する TD 最小値には限界があることになる。一方、 TD 値の最小化を追求し段取者間の負荷差を認めた場合、図 4.11, 14, 17に示すように段取負荷(回数)の最大値が大きくなり、段取対象機械台数が多い段取者に多くの負担を強いることになる。即ち、段取者間の負荷差の最小化による平準

化を目的とした場合、段取者の最大段取負荷を制御できない結果となる．そこで、最大負荷を制御できる次節の方法が必要となる．

4.5 日毎の最大段取負荷の最小化

日毎の最大段取負荷の最小化による平準化を目的とするには、下記の式 (3) を用いる．

$$\min SL = \max\{[L_t^{\max} / \beta_t] | t = 1, 2, \dots, T\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$L_t^{\max} = \max\{L_w | w = 1, 2, \dots, w\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 L_w は $t=1, 2, \dots, T$ における段取者 w の段取回数、 L_t^{\max} は $t=1, 2, \dots, T$ における段取回数の最大値である．

この式を用いるには、式 (3) 中の日毎のジョブの減少率 β_t が必要があるが、これは 2.3.2. (2) 項の「日毎の段取負荷の最大値の平準化」で述べたようにスケジューリング時点の各ジョブの納期によるジョブ数の推移に依存する．そこで、図 4.3 の納期までのジョブ件数の分布にジョブ数の推移を追加した図 4.18 を以下に示す．図中の破線はジョブ数推移から算出した多項式曲線で、この曲線から上記の日毎のジョブの減少率 β_t を算出しその結果を表 4.5 に示す．

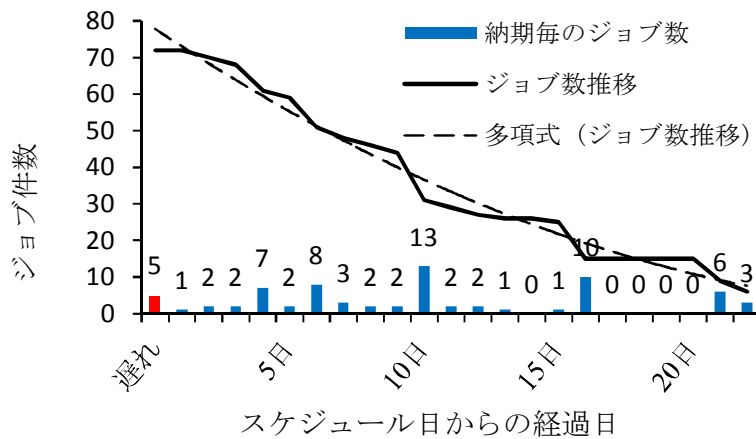


図 4.18 ジョブの数の推移

表 4.5 経過日毎の負荷減少率 : β_t

経過日	1日目	2日目	3日目	4日目	5日目	6日目	7日目
β_t	1.000	0.936	0.837	0.813	0.755	0.698	0.644

4.4節の段取者間の負荷差の最小化による平準化を目的とした実験と同じデータで10回の繰返し実験（実験1~10）を行い、図4.19は、代表的な例として実験1を選び、例として島1、島5、島12の繰返し計算回数5000回ごとと解のTD到達結果を示し、図4.20は同じくSLの結果を示す。図4.19では、図4.6と同じく島12のTD到達値がEDDによるTD値より優れ、かつ、仮想TD値に限りなく近づいていることが認められる。

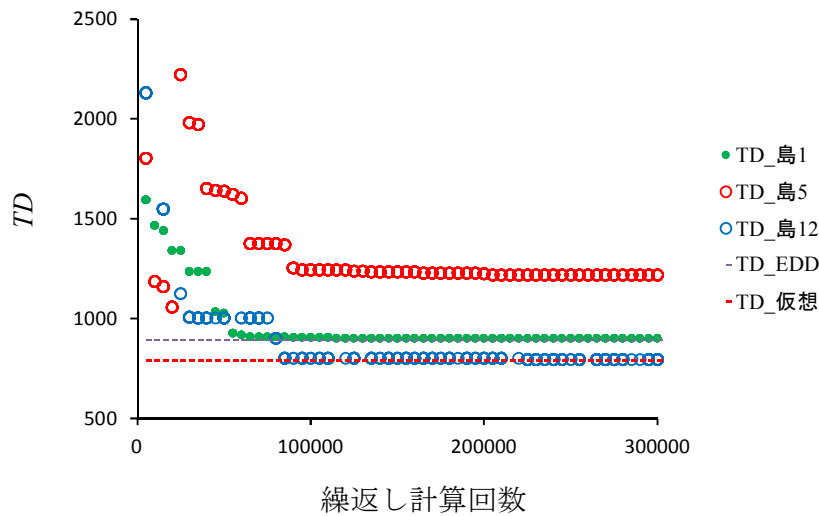


図 4.19 島 1,5,12 における TD の収束変化（実験 1）

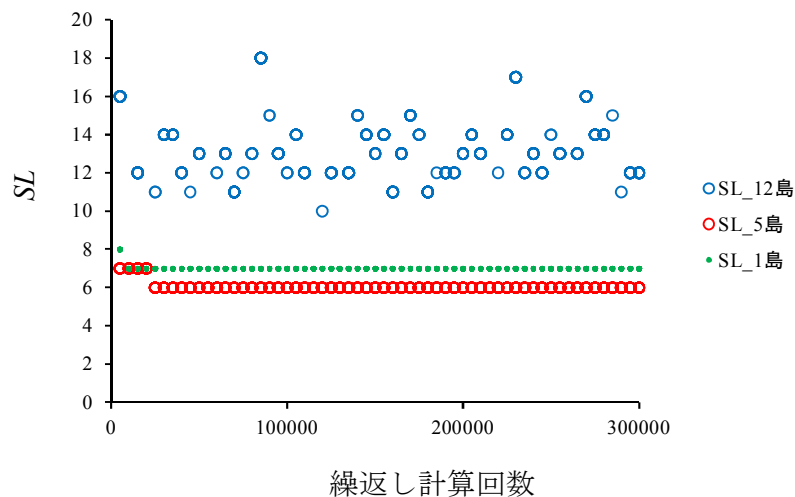


図 4.20 島 1,5,12 における SL の収束変化（実験 1）

図 4.20 では、1 島、5 島は少ない繰返し計算回数から $SL=7$ や 6 に収束しているのに対し、12 島は繰返し計算回数を経ても収束する傾向は認められない。これは、表 4.4 に示すように 1 島、5 島は混雑距離の重みに SL を組み入れているのに対し、12 島は TD のみのランキングを評価対象として、 SL を評価の対象としていないことに起因している。

図 4.21 は各解の SL 値と TD 値の関係を示す。この図からは $SL \leq 8$ の解では TD 値の減少には限界があるが、 $SL \geq 10$ になると TD 値は仮想 TD 値に限りなく近づく。これは段取負荷をある程度以上許容しないと TD 値は向上しないことを示唆している。

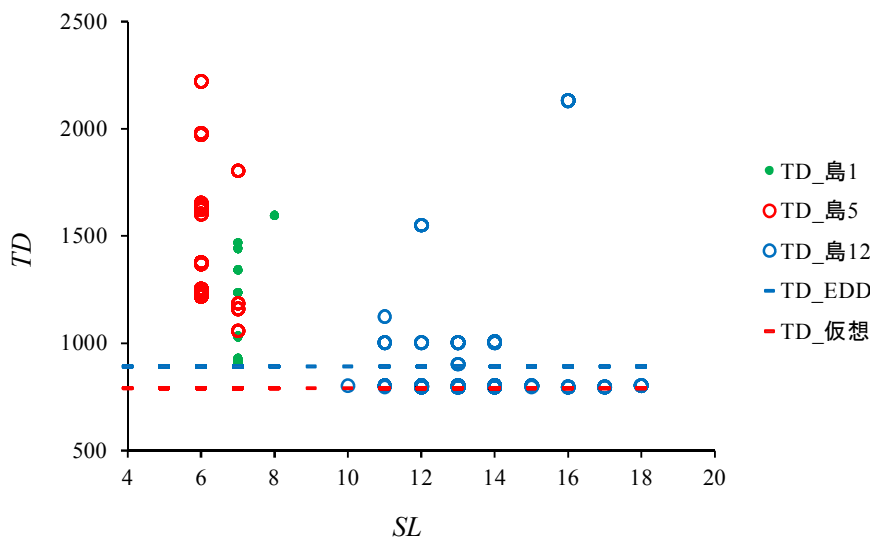


図 4.21 島 1, 5, 12 における SL と TD の関係 (実験 1)

図 4.21 では代表的な例である実験 1 の島 1, 5, 12 で得られた解の SL 値と TD 値との関係を示したが、図 4.22 では、同一条件で 10 回の繰返し実験結果に関し、それぞれの実験で得られた解の SL と TD との関係で、各 SL における最小の TD 値を持つ解を示す。図 4.22 の 10 回の実験結果からも $SL \leq 9$ の解では最小 TD 値の減少には限界があるが、 $SL \geq 10$ の解ではほとんどの実験で EDD より優れた解が導出された。

次に、段取者の負荷の差の具体的な状況を確認するため、図 4.22 における実験 1 (●印) の結果の 2 つの解 ($SL=5, TD=1160$) と ($SL=11, TD=796$) を選び、段取者間の日毎の負荷の分布と変化を図 4.23 と図 4.24 とで比較する。それぞれの図は上から (a) 日毎・段取者毎の段取回数の分布と変化の一覧表、(b) 日毎の段取者別の段取回数ヒストグラム、(c) 日毎のジョブ数減少率を反映した段取者別の日毎段取回数ヒストグラムを示す。

図 4.23 (b) では、最大段取回数は 1 日目のみが 5 回となっているが、(c) 日毎のジ

ジョブ数減少率を反映した段取者別の段取回数では、6日目までの最大段取回数が5回となっており、日毎の段取回数（負荷）の最大値の平準化がなされ、(3)式が効果的に機能していることが分かる。

また、図4.24 (b)でも、最大段取回数は1日目のみが11回となっているが、(c)日毎のジョブ数の減少率を反映した段取者別の段取回数では、5日目の最大段取回数が11回となっており、日毎の段取回数（負荷）の最大値の平準化がなされていることが分かる。

一方、7日間の総段取回数に着目すると、図4.23 (a)では107回、図4.24 (a)では141回と大きな差があり、総段取回数が少ないとTD値が向上（減少）しない結果となっている。

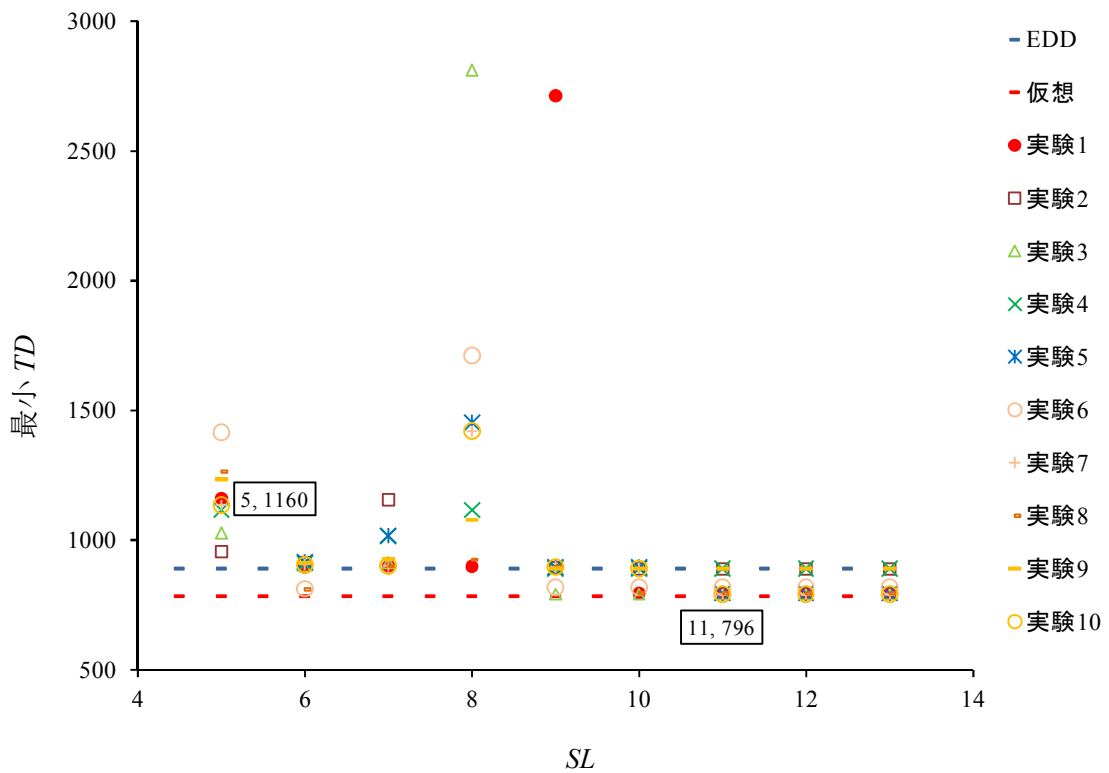
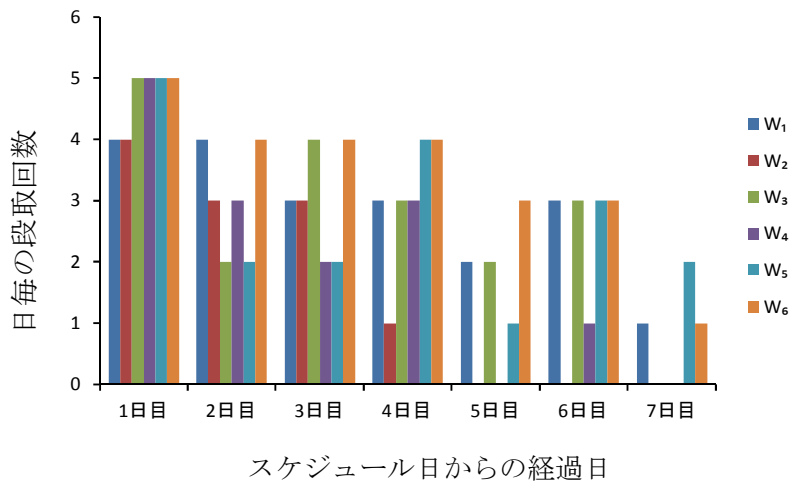


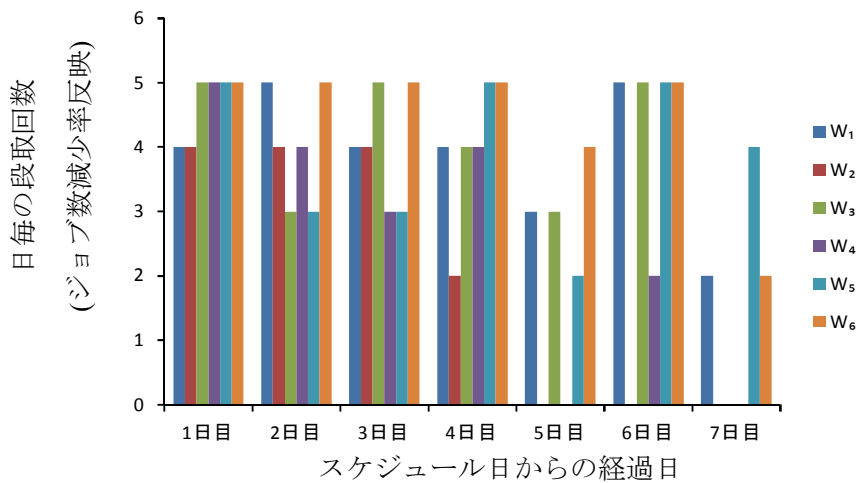
図4.22 SL毎のTD最小値（実験1～10）

(a) 日毎・段取者毎の段取回数の分布と変化の一覧表

	段取者						max	日毎計
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6		
1日目	4	4	5	5	5	5	5	28
2日目	4	3	2	3	2	4	4	18
3日目	3	3	4	2	2	4	4	18
4日目	3	1	3	3	4	4	4	18
5日目	2	0	2	0	1	3	3	8
6日目	3	0	3	1	3	3	3	13
7日目	1	0	0	0	2	1	2	4
計	20	11	19	14	19	24	($SL=$)5	107



(b) 日毎の段取者別の段取回数

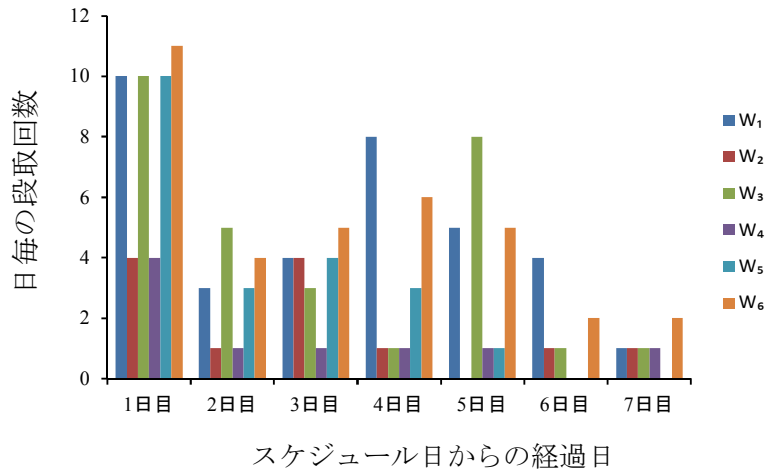


(c) 日毎のジョブ数減少率を反映した段取者別の日毎段取回数

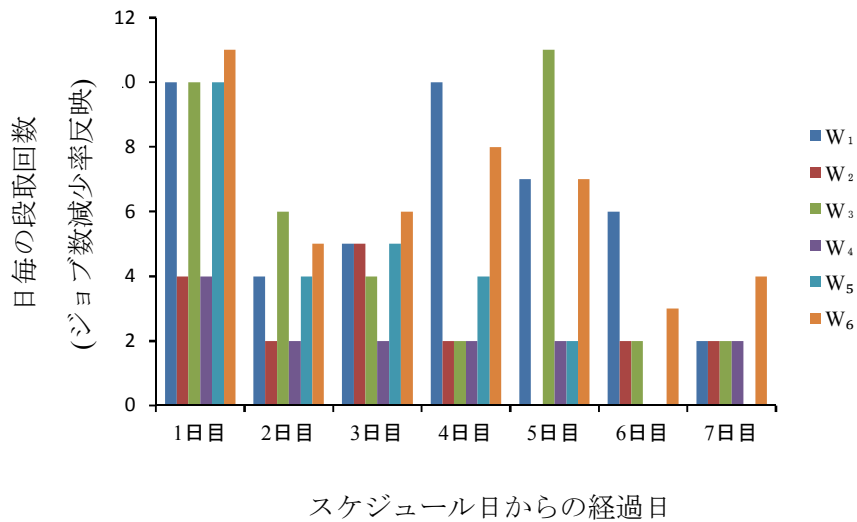
図 4.23 解($SL=5, TD=1160$)の各段取者の段取回数 (実験 1)

(a) 日毎・段取り者毎の段取り回数の分布と変化の一覧表

	段取り者						max	日毎計
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6		
1日目	10	4	10	4	10	11	11	49
2日目	3	1	5	1	3	4	5	17
3日目	4	4	3	1	4	5	5	21
4日目	8	1	1	1	3	6	8	20
5日目	5	0	8	1	1	5	8	20
6日目	4	1	1	0	0	2	4	8
7日目	1	1	1	1	0	2	2	6
計	35	12	29	9	21	35	($SL=$)11	141



(b) 日毎の段取り者別の段取り回数



(c) 日毎のジョブ数減少率を反映した段取り者別の日毎段取り回数

図 4.24 解($SL=11, TD=796$)の各段取り者の段取り回数 (実験 1)

4.6 まとめ

本章では、前述の中小企業 A 社の操業を参考にしたデータを用いて、今回提案した遺伝子表現と島モデル遺伝的アルゴリズムの有効性を確認すると共に、第 2 章で述べた段取負荷の平準化に関し以下の 2 方法 (2.3 節 目的関数に基づく) を比較した。

- (1) 段取者間の負荷差の最小化による平準化を目的
- (2) 日毎の最大段取負荷の最小化による平準化を目的

両方法とも繰返し計算数を増すごとに到達解の TD 値は減少し、EDD による導出解の TD 値より優れ、仮想 TD 値に近づく結果を得た。このことより、 $MI-GA$ のアルゴリズムは実用に供する精度の解を導出すると評価できる。

負荷の平準化に関しては、上記の (1)、(2) の方法のうち、(1) は段取者間に技能差があるため、段取回数の差を最小化すると、段取対象機械台数の少ない段取者の段取回数に合せ、段取対象機械台数の多い段取者の段取回数が低く抑えられることになり、機械が空き、かつ当該機械に仕掛けることができるジョブが待機しているにも拘わらず段取が進まない、即ち納期遅れを来す事になる。一方、負荷差の最小化の制限を外すと、能力の高い段取者の段取負荷が過渡に高くなる解も発生する。これに対し、(2) の方法は、能力の高い段取者の最大負荷を抑えつつ日毎の負荷の最大値の平準化が可能であるので、この方法が従業員の厚生に資すると考えられる。

第5章 経営リスクとその対策法の評価実験

受注生産企業では、従業員の突然の退社や設備停止などの社内要因、急激な負荷増や短納期品の受注の過度な集中などの社外要因による様々な経営リスクが発生する。このようなリスクの影響の程度や、これらのリスクに対する対策案の有効性について、事前に評価することも経営管理上、重要なことである。そこで、現状の操業を反映した条件を基準に、発生することが想定される経営リスクやその対策などの条件を付与した実験を行い、これらのリスクや対策案の効果を、納期遅れや段取負荷を表す SL や TD で定量的に評価することを試みる。

5.1 実験条件

表 5.1 に本章の実験条件を示す。ケース 1 は 4.5 節で説明した現状の操業状態を反映しており、このケース 1 の実験結果を基準として他のケースを比較する。ケース 2 は段取対応機械台数の最も多い W_6 が病気や退社等で不在となった場合のリスクを想定しており、ケース 3 はケース 2 のリスクの対策として段取回数が最も多い機械 M_{22} に関する段取技能を、段取対応機械台数の少ない W_2 と W_4 に付与したと仮定したケースである。

ケース 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。このリスクに対し、ケース 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期間の 5 日間を 3 日間に短縮する対策を講じた場合、ケース 6 では上記の M_{22} と同機能の機械 M_{22}^* を導入した場合、ケース 7 では、さらに W_2 , W_4 への M_{22} , M_{22}^* の段取技能を付与する対策を施した場合を考える。

表 5.1 実験条件

ケース	リスク条件		対策案条件		
	段取者 W_w 不在	納期短縮	最大外注所要日数短縮	段取者訓練 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	$W_2, W_4(M_{22}, M_{22}^*)$	M_{22}^*

5.2 実験結果

表 5.1 の条件でそれぞれ 10 回の繰り返し実験を行い, 表 5.2 に, 得られた SL 値と TD 値の関係を SL 値で分類し TD の最小値を示す. 表 5.2 中の太字はそれぞれのケースにおける SL と TD 間のパレート解であり, その中の最小 (最良) の TD 値に網掛けを施している. また, ケース 1~3 で, 同一の SL 値の下でのほぼ同一の TD 値の解で段取者の負荷の比較を後述しており, これらの解を赤枠で示している.

図 5.1 には各 SL 毎における最小 TD 値をもつ解の分布を示す.

表 5.2 各 SL 毎における最小 TD をもつ解一覧(ケース 1~7)

凡例 各ケース中の最良値
 同一の SL 値の下でのほぼ同一の TD 値の解

SL	TD						
	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4	ケース 5	ケース 6	ケース 7
5	1160	1202	1141	4292	10530	4541	10256
6	897	911	901	2296	1803	1553	1775
7	901	816	817	2081	1315	1245	1370
8	900	796	912	1851	1288	1141	1243
9	2712	997	896	2322	1923	1558	1642
10	796	892	801	2769	2789	1367	2275
11	796	796	801	1858	1225	1627	1105
12	796	796	801	1840	1225	1210	1105
13	796	796	801	1840	1225	1211	1105

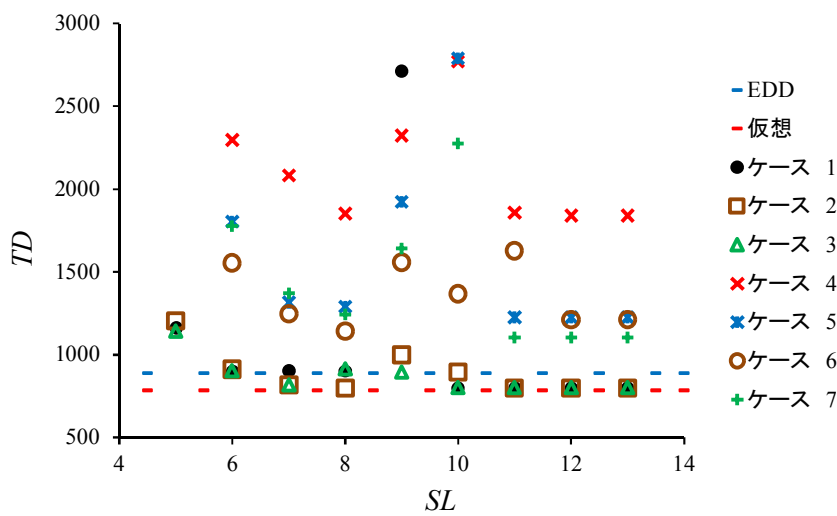


図 5.1 各 SL 毎における最小 TD 値をもつ解の分布(ケース 1~7)

5.2.1 段取者離脱の影響とその対策の実験結果

段取者離脱の影響とその対策に関するケース 2, 3 と基準ケース 1 を表 5.1 と図 5.2 で比較する. 表 5.1 の $SL=5$ ではケース 3 の $TD=1141$ が最小, $SL=6$ ではケース 1 の $TD=897$ が最小など, ケース 1, 2, 3 の各 SL 値での TD 最小値の上下関係は入れ替わっているが, 図 5.2 を見ると, $SL \geq 10$ での TD 値はほとんど差がないことを示している.

そこで, 個々の段取者への影響を確認する. 図 5.3 は表 5.2 の赤枠で示した $SL=11$ のケース 1 での $TD=796$, ケース 2 での $TD=796$, ケース 3 での $TD=801$ の各段取者の 7 日間の段取総回数を示す. ケース 1 では段取対応機械台数の少ない W_2, W_4 の段取回数が 10 回程度と低いことを示している. ケース 2 では W_6 の離脱により, W_6 の段取回数は 0 となり, ケース 1 に比し W_1, W_3, W_5 の段取回数が増加しているが, W_2 と W_4 の段取回数はほとんど変化がない. これは W_6 が担当していた段取作業を W_1, W_3, W_5 が補っているが, W_2, W_4 は補うことができていないことを示している. ケース 3 では, W_2 と W_4 の M_{22} に対する段取技能付加により, ケース 2 に比し W_2 と W_4 の段取回数が増加し, W_1 と W_5 の段取回数が減少している.

図 5.4~図 5.6 には各ケースの 7 日間の段取者の 7 日間の段取負荷の分布を示すが, それぞれ, 段取回数の最大値である 11 回を維持してそれぞれのケースに合わせ段取者が段取負荷を分担する解を導出していることを示している.

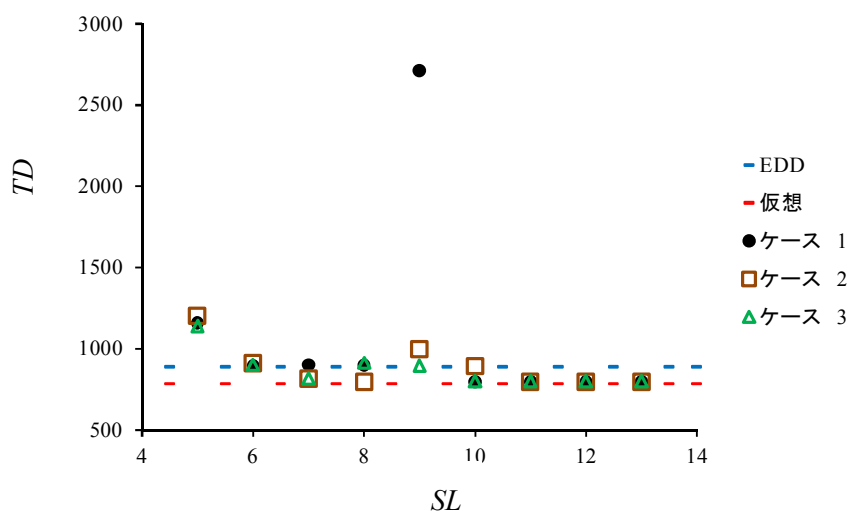


図 5.2 ケース 1,2,3 の各 SL に対する TD 最小値の分布

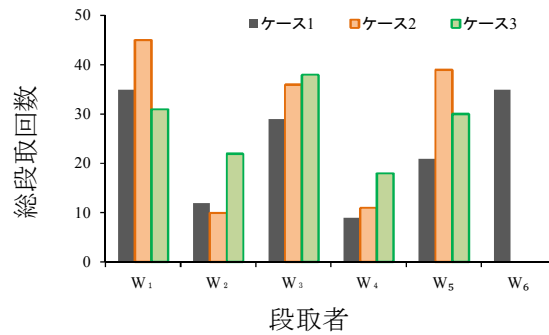


図 5.3 ケース 1,2,3 の各段取者の 7 日間の段取総回数

	段取者						日毎計
	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₅	W ₆	
1日目	10	4	10	4	10	11	49
2日目	3	1	5	1	3	4	17
3日目	4	4	3	1	4	5	21
4日目	8	1	1	1	3	6	20
5日目	5	0	8	1	1	5	20
6日目	4	1	1	0	0	2	8
7日目	1	1	1	1	0	2	6
計	35	12	29	9	21	35	141

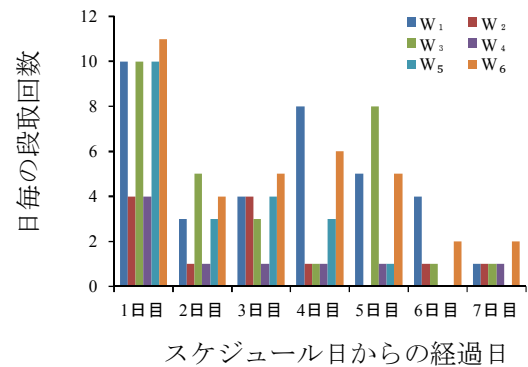


図 5.4 ケース 1 ($SL=11,TD=796$ の例)での各段取者の 7 日間の段取回数

	段取者						日毎計
	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₅	W ₆	
1日目	10	4	10	6	11	*	41
2日目	5	3	5	1	3	*	17
3日目	8	2	8	2	7	*	27
4日目	8	0	6	1	7	*	22
5日目	5	0	3	1	6	*	15
6日目	5	1	1	0	3	*	10
7日目	4	0	3	0	2	*	9
計	45	10	36	11	39	*	141

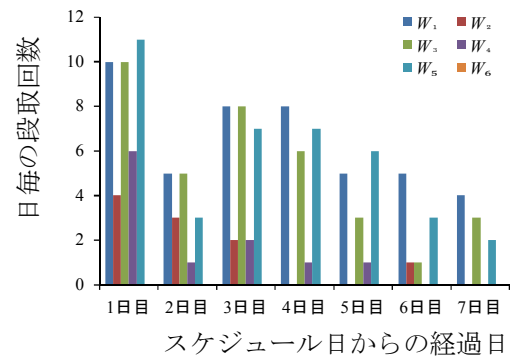


図 5.5 ケース 2 ($SL=11,TD=796$ の例) での各段取者の 7 日間の段取回数

	段取者						日毎計
	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₅	W ₆	
1日目	9	7	9	7	11	*	43
2日目	5	3	8	2	5	*	23
3日目	4	4	4	2	3	*	17
4日目	3	2	6	3	3	*	17
5日目	4	5	6	0	5	*	20
6日目	3	0	0	1	1	*	5
7日目	3	1	5	3	2	*	14
計	31	22	38	18	30	*	139

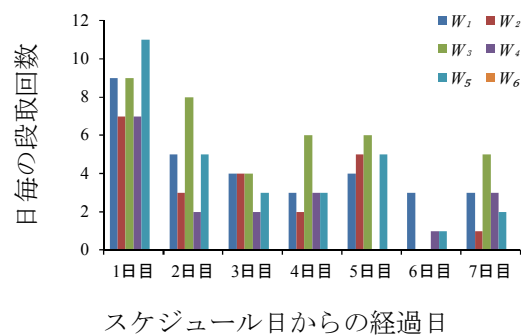


図 5.6 ケース 3 ($SL=11,TD=801$ の例) での各段取者の 7 日間の段取回数

5.2.2 納期短縮の影響とその対策の実験結果

図 5.7 でケース 4 の納期半減での結果をケース 1 と比較する。ケース 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 値が 13 まで上がっても TD 最小値が 1840 の高い値にとどまる。

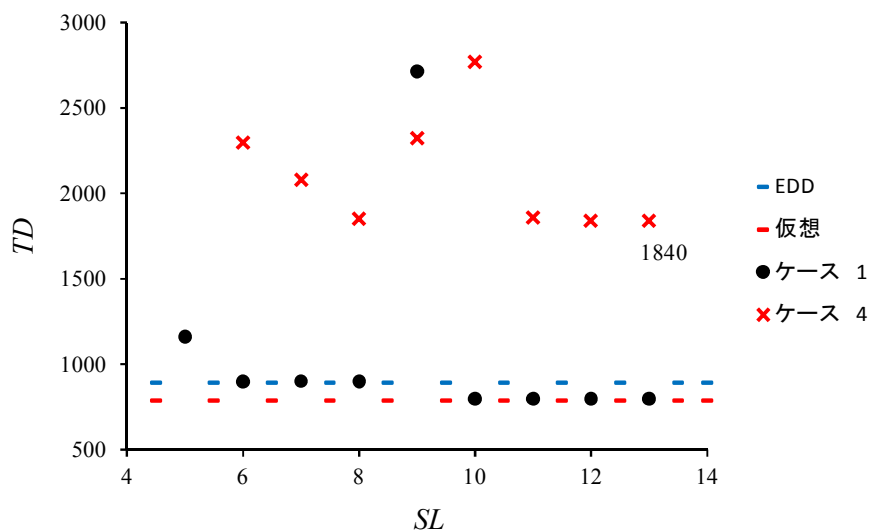


図 5.7 ケース 4 とケース 1 との各 SL に対する TD 比較

表 5.2 と図 5.8 でケース 5 の TD 値の改善効果をケース 4 と比較する。ケース 5 は生産リードタイムの中で最も期間の長い外注加工期間の 5 日間を 3 日間に短縮する対策を施した場合であるが、ケース 4 に対し、 $SL=10$ の解を除き、総ての SL 値でケース 5 の TD 値が大きく減少（改善）している。

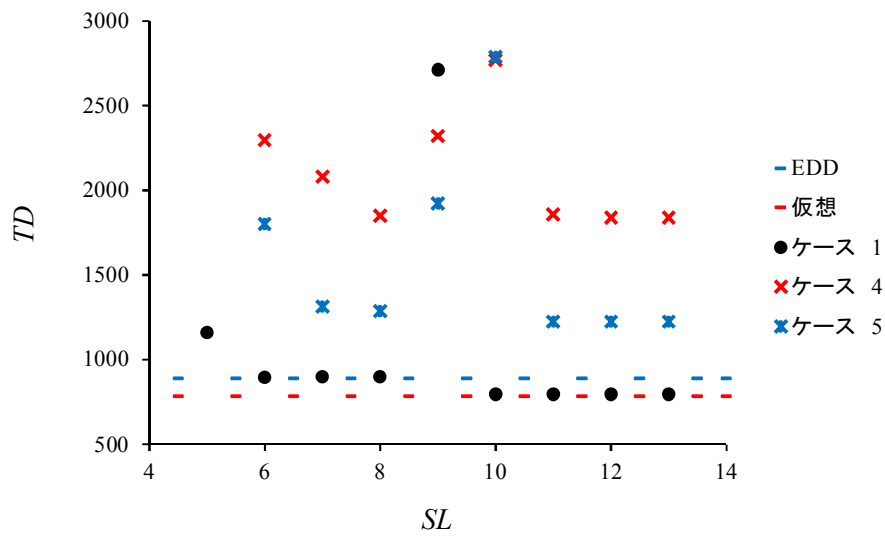


図 5.8 ケース 5 とケース 1,4 の各 SL に対する TD 比較

図 5.9 でケース 6 の TD 値の改善効果をケース 5 と比較する。ケース 6 では段取頻度が最も多い機械 M_{22} と同機能の機械 M_{22}^* を導入した場合であるが、ケース 6 の $SL=11$ でケース 5 より TD 値が劣っているが、殆どの SL 値でケース 5 より同等か、やや優れた TD 値を得ている。

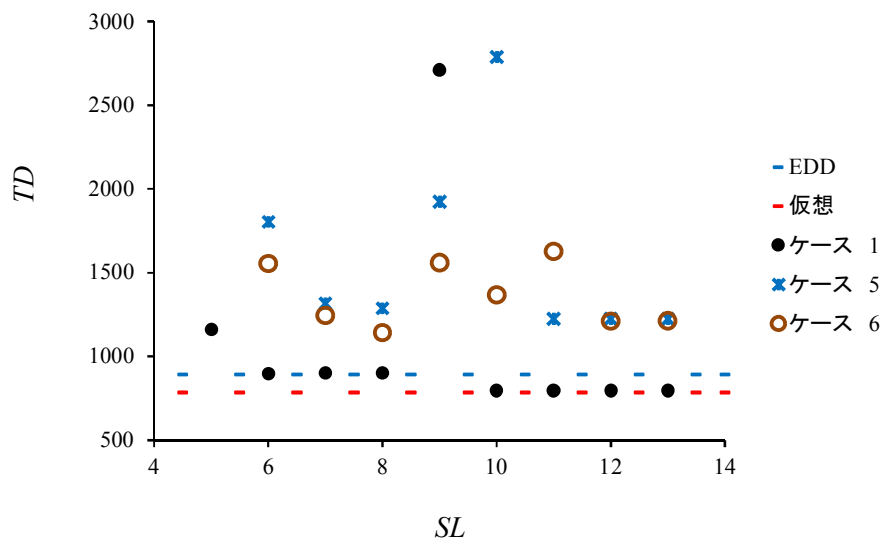


図 5.9 ケース 6 とケース 1,5 の各 SL に対する TD 比較

図 5.10 でケース 7 の TD 値の改善効果をケース 6 と比較する。ケース 7 では、ケース 6 に加え段取者 W_2, W_4 への機械 M_{22}, M_{22}^* に関する段取技能を付加した場合であり、 $SL \leq 10$ ではケース 7 の TD 最小値がケース 6 より劣っているが、 $SL \geq 11$ では最小値が 1105 と、ケース 6 の $SL=8$ での TD 最小値より優れた数値を導出している。即ち、多くの段取回数を許容すること、これは、段取回数が多い 1, 2 日目の段取回数を多く許容することになり、納期を守ることに繋がるといえる。逆に、 $SL \leq 10$ では、この 1, 2 日目の段取回数を制限することになり、機械の導入やそれに伴うい技能追加の効果が現れにくいと考えられる。

図 5.11 ではケース 7 で TD 値が最も低い値に達した解 ($SL=11, TD=1105$) における各機械の段取頻度と段取者の負荷を見る。納期と外注期間の短縮により早い時期に段取回数を消化していく必要があることから、7 日間の段取回数が 170 回と、図 5.4 から図 5.6 までのケース 1, 2, 3 の 7 日間の段取回数が 140 回前後からに比較して大きく増加している。

図 5.12 には機械 M_{22}^* の投資の効果を見るために各機械の段取回数の分布の差を示す。横軸は機械、縦軸は機械毎の段取回数で、図 4.6 の機械 M_{22} の段取負荷が M_{22}^* の追加で半減しており、本提案のアルゴリズムで同機能の 2 台の機械への段取作業の配分が適切に行われていることが分かる。

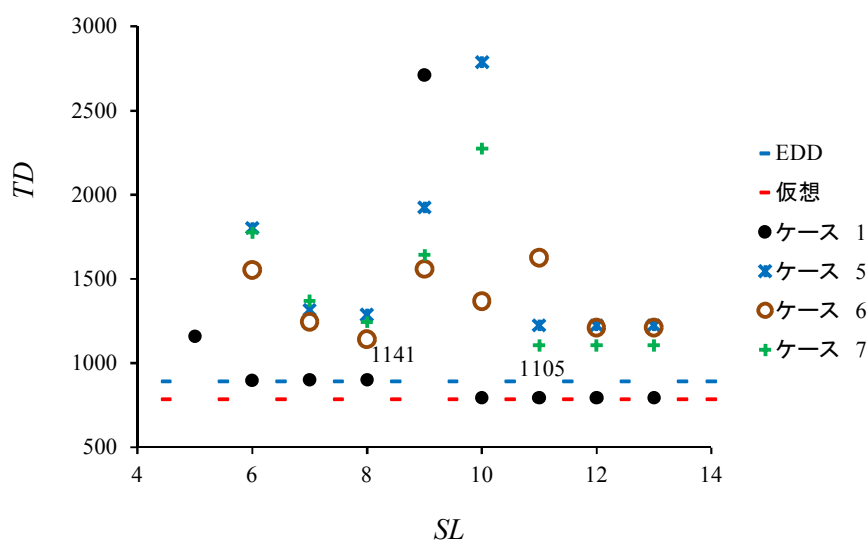


図 5.10 ケース 7 とケース 1,6 の各 SL に対する TD 比較

	段取者						日毎計
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	
1日目	10	5	11	8	7	11	52
2日目	4	7	6	4	6	8	35
3日目	6	3	6	2	6	5	28
4日目	3	4	7	2	3	5	24
5日目	4	2	1	0	3	6	16
6日目	3	0	2	1	2	2	10
7日目	2	1	0	0	0	2	5
計	32	22	33	17	27	39	170

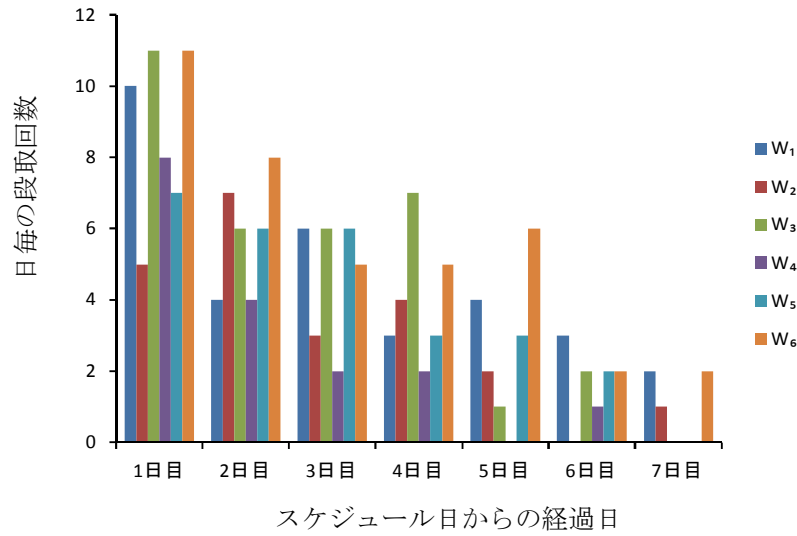


図 5.11 ケース 7 での解(TD=1105,SL=11)の場合の各段取者の段取回数

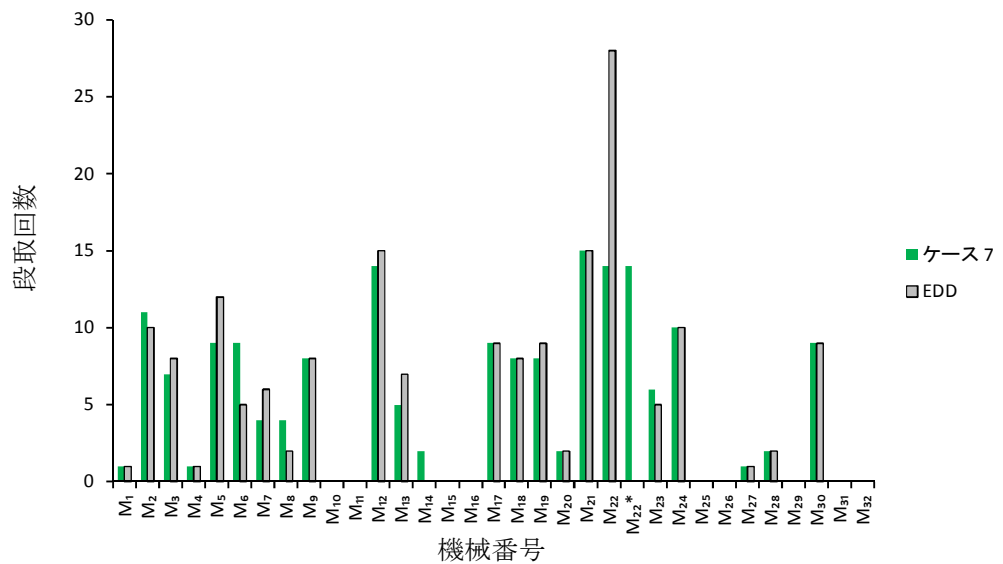


図 5.12 ケース 7 での解(TD=1105,SL=11)の場合の各機械の段取回数

5.3 まとめ

5.3.1 段取者離脱の影響とその対策効果の評価

ケース 2 では段取対応機械台数の最も多い W_6 の離脱の影響、ケース 3 では、その対策の効果を評価した。その結果、図 5.2 に示すごとく、 SL 値と TD 値の関係では、ケース 1, 2, 3 でほとんど差がない、即ち、 W_6 が離脱しても納期遅れへの影響がなく、その対策として W_2 , W_4 に技能を習得させても効果がないという結果となった。しかし、図 5.3 の段取回数の内訳では段取者間に段取回数の差が生じていることを示している。

ケース 2 の結果を考察すると、 W_6 が離脱しても残された段取者 (W_1 , W_3 , W_5) がより多くの段取回数に対応し納期遅れへの影響を減じていることが分かる。別の見方をすれば、残された段取者が W_6 の業務を分担することによって W_6 を他の新規業務につかせることができることも示唆している。

ケース 3 の結果を考察する。図 5.5, 図 5.6 に示すように W_2 , W_4 の段取回数が増加し、 W_1 , W_5 の段取回数が減少している。これは、図 4.6 に示すように機械の中で段取回数の多い M_{22} の段取対応の可能であった W_1 と W_5 の段取を W_2 , W_4 が分担したためと考えられる。このことにより段取者間の段取回数の差の減少に寄与したと見なすことができ、技能差の解消は担当者間の負荷の差の減少に寄与し、労務コストの削減にもつながるといえる。反面、技能差の解消、即ち、技能教育は一時的な投資を伴うことであるので、これらのトレードオフが経営判断となる。

従って、今回の実験を行った A 社のケースでは全体的として段取能力は確保されているといえるので、例えば、段取対応機械台数の最も多いベテラン段取者が離脱しても、あるいは、ベテラン段取者を新規業務につかせても、短期的には現状の技能水準での運用で残された段取者が分担し合い納期を守っていくことが可能である。なお、中長期的には段取技能差を解消し、より機動的な経営を目指すべきと考えられる。また、A 社では中小企業の特性上、人材に余力がないことから技能者の離脱の業務への影響を過度にとらえ、有給休暇を与えにくい、取りにくいという傾向がある。今回の提案手法を用いれば、業務への影響や他の従業員への影響も定量的に把握できるため、的確な経営判断が可能となる。

5.3.2 納期短縮の影響とその対策効果の評価

ケース 4 の結果、 SL を増加させると TD 値は減少するが $SL=13$ まで上げても TD 最小値は 1840 までしか下がらず、納期半減をした場合の TD 値への影響は非常に大きく、

顧客からの納期半減の要求を受け入れると、要求納期に応えることが困難であることを定量的な数値で確認することができた。

ケース5では、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が最も効果的であることも定量的に確認できた。一方、ケース6では、ネック工程の機械と同機能の機械の導入、ケース7で技能訓練等の投資の効果を確認したが、これらの効果は軽微である結果となった。これは、今回の納期半減という仮定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、顧客要求または他社との差別化戦略として納期短縮に取り組む場合、現状の体制を踏まえた目標を設定しそれに合わせた対策案を取っていく必要がある。

以上のことから、本研究の提案は、日常のスケジューリングに寄与するのみならず、経営リスクやその対策の評価にも資することができることが確認できた。

第 6 章 タブー・リストを用いる遺伝的アルゴリズム

第 5 章までで、2 目的（重みづけ納期遅れと段取負荷）の最適化に関し、段取者を考慮した遺伝子表現と島モデルを組み込んだ GA (*MI-GA*) の有効性を確認できた。ところが、GA は大域的な解の生成には優れている一方、局所解への収束に時間がかかる点も知られている。その対応には、良質の解を少ない計算時間で探索することが必要となるが、その基本戦略として現在の解の近傍の探索を繰り返す局所探索 (local search) 法がある。しかし、局所探索法は、局所最適解に陥る可能性が高いことや、いくつかの近傍解を経由してもとの解に戻ってしまうなどの問題がある。これらの問題と解決する手法として様々なメタヒューリスティック手法が考えられてきた[20]。そのメタヒューリスティック手法の一つとして、タブー・サーチ (tabu-search : TS) の考え方が 1970 年頃から Glover によって提案された。

本章では、上記の 2 目的に 2.3.3 項で上げた工程内在庫の最小化を加え、3 目的の最適化を図るにあたり、GA の欠点を補うため TS 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 (tabu-search hybrid genetic algorithm : *TS-HGA*) を開発し、前述の A 社の操業を参考にしたデータを用いた数値実験によりその有効性を確認する。

6.1 タブー・リストを用いる GA オペレーション

6.1.1 タブー・サーチの概要

TS では、現在の解の近傍にある複数の解を探索しその中で最もよい解に移行するときタブー・リストと称する記録表に移行履歴を格納する。次に近傍の解を探索する際、タブー・リストに格納されている移行を一定期間行わないことにより、移行が元戻りせずに最適解を探索する。

図 6.1 に TS の探索過程を示し、簡単に説明する。

Step1. 初期解①を与え、近似最適解とする。タブー・リストは初期化（空に）する。

Step2. 初期解①の近傍（図中破線円内）を複数解探索するとともに、タブー・リストをチェックする。近傍解の中で最もよい近傍解②を選び、タブー・リストに②がなければ、②に移行しタブー・リストに①を格納する。

Step3. ②の近傍にある複数の解を探索する。近傍の中で①が最も良い近傍解であっても①はタブー・リストに格納されているので移行せず、①を除いた近傍解の

中で最もよい③に移行する。タブー・リストに②が書き込まれる。

Step n 終了条件を満たしているか、すべての近傍解がタブー・リストにあれば終了し、そうでなければ上記のステップを繰り返す。もし、タブー・リストに空きがなくなったら最も古い解をタブー・リストから削除し、新しい解をタブー・リストに格納して、上記のステップを繰り返す。

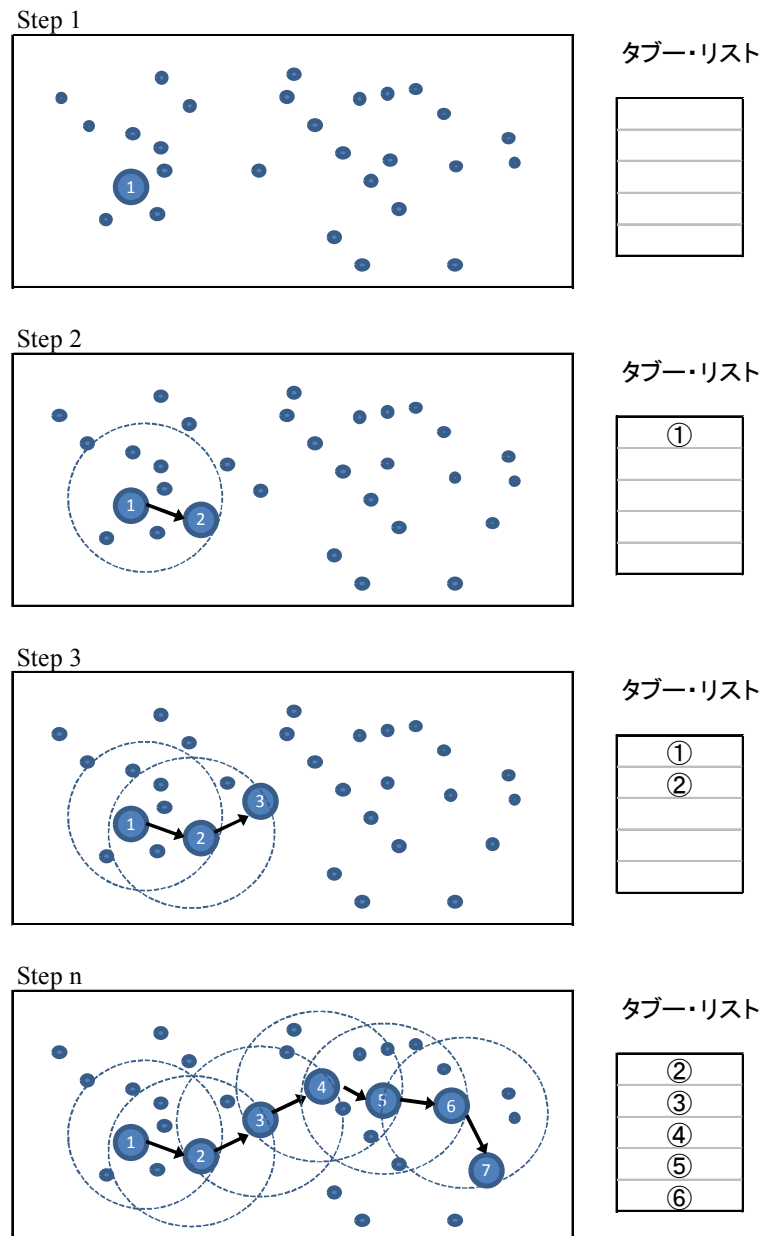


図 6.1 タブー・サーチの探索過程

6.1.2 TS-HGA でのタブー・リストの組み込み

図 6.2 にタブー・リストを組み込んだ TS-HGA の基本的な構成を示す。この中で、図 3.3 に示す島モデル遺伝的アルゴリズムとの違いは、各島への配分、移住の処理がない点と、淡赤色網掛け部の「交叉マスクの評価によるタブー・リストの作成」と「遺伝子型参照テーブルの評価によるタブー・リストの作成」の処理が追加されていることであり、これらに関して以下に説明する。

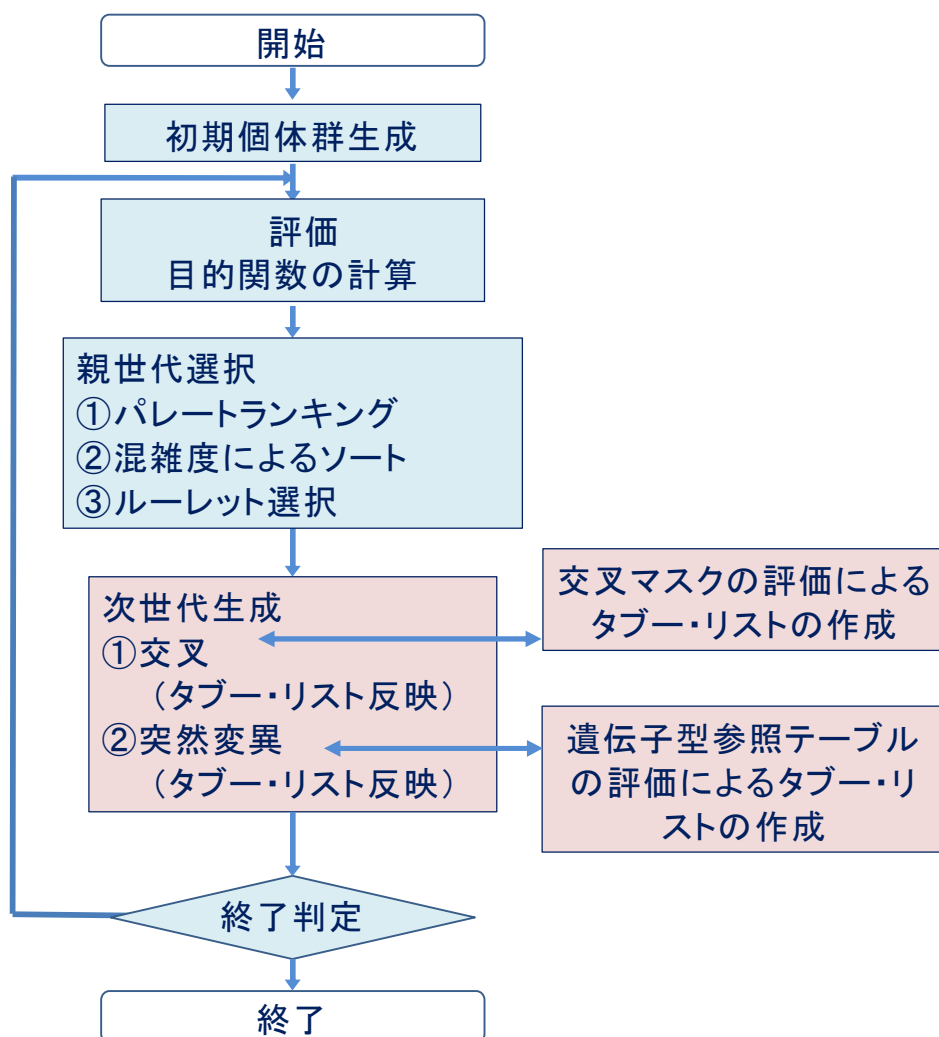


図 6.2 TS-HGA のアルゴリズムの構成

(1) 交叉マスクの評価によるタブー・リストを用いた交叉処理

交叉については 3 章で述べた 2 種類の交叉のうち機械単位の 2 点交叉に関し交叉マスクを用いる。第 3 章で説明した図 3.9 の 2 点交叉では 2 点間の機械の遺伝子は全て

入替える方式であったが、今回は確率的に入替える。具体的には、各機械の遺伝子座群毎に 1 又は 0 の数字をランダムに発生させ、これを 2 進数の交叉マスクとし、1 が立っている遺伝子座群を入れ替えることとする。図 6.3 に交叉マスクを用いた二点交叉の様子を示す。遺伝子座群[2]と[6]との間（網掛け部）が選択され、交叉マスクは遺伝子座群[3]と[5]に 1 が立っているので、遺伝子座群[3], [5]の機械 3, 5 の遺伝子が入れ替わることになる。

次に、交叉マスクにより生成された子個体の評価を行い、子の 2 個体が親個体のうち良い評価値に対し優れた評価値を得られなかった場合、10 進数表現に変化させた交叉マスクをタブー・リストに格納する。例えば、図 6.3 交叉マスクを 10 進数表現にすると、配列が[0010100]であるので、 $0 \times 10^0 + 0 \times 10^1 + 1 \times 10^2 + 0 \times 10^3 + 1 \times 10^4 = 20$ となる。これを 1 世代当たり数回繰り返してタブー・リスト作成を終了する。GA 処理内の交差において、交叉マスクを作成し、もし、作成した交叉マスクと同じ番号の交叉マスクにタブー・リストに格納されていない場合、そのマスクを使用し交叉処理を行う。このようにタブー・リストに格納されている交叉パターンの交叉処理を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。

交叉マスク

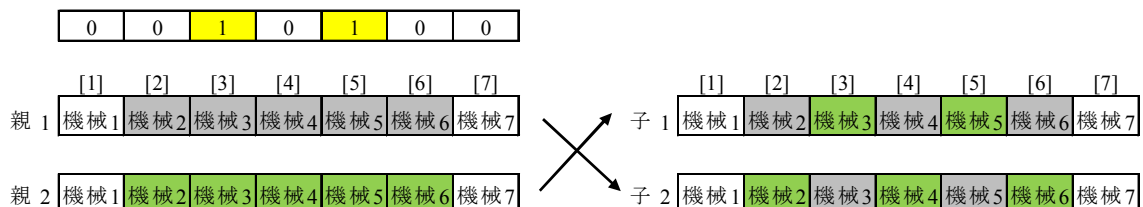


図 6.3 交叉マスクを用いた 2 点交叉

(2) 遺伝子型参照テーブルの評価によるタブー・リストを用いた突然変異処理

TS-HGA における突然変異は、図 6.4 で示すように遺伝子型参照テーブルをタブー・リストとして用いる。その手順を以下に述べる。

- Step1. 突然変異の対象のマシンとマシン内遺伝子座をランダムに設定する。図 6.4 の例では機械は M_1 と M_3 が、マシン内遺伝子座は M_1 内では B と E, M_3 内では K と M が突然変異の対象とされている。
- Step2. 遺伝子表現と同じ形式の参照テーブルを作成しテーブルの中身はすべて「2」を入れて初期化する。
- Step3. 次に通常の GA と同様な突然変異のオペレーションを行なう。図 6.4 の例では

M_1 ではBとEとが入替り、 M_3 ではKとMとが入替る。

Step4. 次に、遺伝子型参照テーブルにおいて、ランダムに選ばれた二つの遺伝子と同じ場所を「1」に入れ替える。

Step5. 入れ替えた個体でガントチャートを作り直し、個体の適応度を比較する。もし、再評価後の個体の適応度が優れている場合は、遺伝子型参照テーブルの「1」に置き換えた遺伝子座を「0」とする。

Step6. 再評価後の個体の適応度が優れていない場合は、遺伝子型参照テーブルの「1」に置き換えた遺伝子座を「2」に戻す。

2回目以降の突然変異では、遺伝子型参照テーブルで「0」の入っている遺伝子座の遺伝子は突然変異対象から除外する。これにより、突然変異を行う遺伝子座を限定され無駄な突然変異を少なくすることができる。

Step 1. 突然変異の対象のマシンとマシン内遺伝子座をランダムに設定

	← M_1 →					← M_2 →					← M_3 →										← M_m →				
個体 i	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	

Step 2. 参照テーブルを2に初期化

個体 i	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Step 3. 突然変異処理

	← M_1 →					← M_2 →					← M_3 →										← M_m →				
個体 i	A	E	C	D	B	F	G	H	I	J	M	L	K	N	O	P	Q	R	

Step 4. 突然変異処理後の参照テーブルの更新

個体 i	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Step 5. 優良解の場合の参照テーブルの更新

個体 i	2	0	2	2	0	2	2	2	2	2	0	2	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Step 6. 劣悪解の場合の参照テーブルの更新

個体 i	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

図 6.4 遺伝子型参照テーブルを用いた突然変異

6.2 TS-HGA のパフォーマンスの評価実験

6.2.1 実験データ

本実験では、2.2 節で上げた以下の重みづけ納期遅れ TD の最小化、段取負荷 SL の最小化、工程内在庫 WIP の最小化の 3 目的を最適化する.

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

$$\min SL = \max\{L_t^{max} / \beta_t | t = 1, 2, \dots, T\} \dots\dots\dots (3)$$

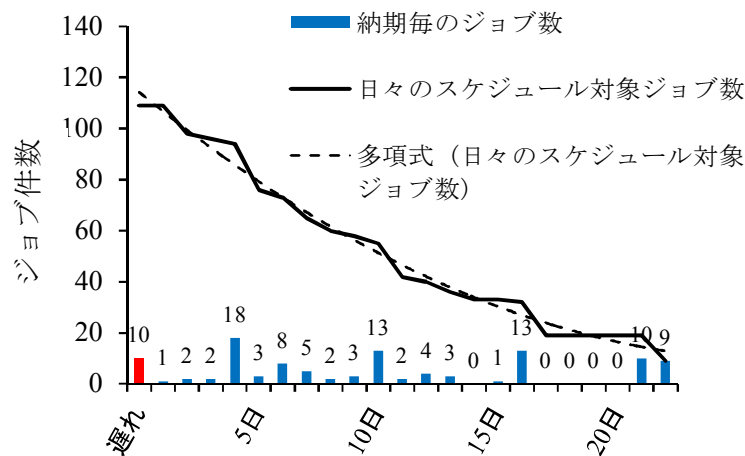
$$L_t^{max} = \max\{L_{wt} | w = 1, 2, \dots, w\} \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 L_{wt} は $t=1, 2, \dots, T$ における段取者 w の段取回数、 L_t^{max} は $t=1, 2, \dots, T$ における段取回数の最大値である.

$$\min WIP = \sum_{t=t_k}^{T_k} \sum_{i=1}^k u_i x_{it} \dots\dots\dots (5)$$

今回は、4, 5 章に比し A 社における日常の受注状態により近くなるように、スケジューリング時点で、ジョブ当たり 1~9 作業を持つ 109 ジョブが受注され、これらを第 4 章の実験と同じく 6 名の段取者と約 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げる. なお、この実験では、段取者の守備範囲を実情に合わせ、4, 5 章から一部変更している. 図 6.5 は計画時点における納期までの日数毎のジョブ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るジョブは 10 ジョブある.

表 6.5 にその内訳を示す. 表の見方は図 4.3 と同じであり、仮想 TD 値は 941 となる.



スケジュール日からの経過日

図 6.5 ジョブ数の変化

表 6.1 条件付き到達可能 TD 値

ジョブ	ロット サイズ	残作業数	納期まで の残納期	必要日数	t_k^d	α_k	$\alpha_k t_k^d$
J_1	10	3	-6	1	7	100	700
J_{40}	100	5	-3	1	4	5	20
J_{41}	100	8	-2	3	5	5	25
J_{42}	55	7	-2	4	6	5	30
J_{58}	35	7	-11	5	16	1	16
J_{93}	2	7	-3	3	6	5	30
J_{94}	2	7	-3	3	6	5	30
J_{95}	2	7	-3	3	6	5	30
J_{96}	2	4	-3	4	6	5	30
J_{97}	100	3	-2	4	6	5	30
TD							941

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図 6.5 のグラフから導かれた近似多項式から表 6.2 に示すように β_t を算出し、これを上記 (3) 式にいれ SL を導く。

表 6.2 経過日毎の負荷減少率： β_t

経過日	1日目	2日目	3日目	4日目	5日目	6日目	7日目
β_t	1.000	0.929	0.861	0.796	0.734	0.675	0.619

表 6.3 は EDD によるガントチャートから得られた遅れジョブの加工完了日と TD 値を算出した表である。表 6.3 では、図 6.1 の 10 ジョブに加え、スケジュールリングの結果、ジョブ J_4 , J_5 , J_{43} が更に遅れジョブに加わっている。更に他のジョブの影響を受けたジョブ J_{40} の値が 5 ポイント悪化し TD 値は 1251 となっている。

EDD によるスケジュールリングは段取者の負荷の平準化を考慮していないが、実行可能な解の一つであり、納期を優先しているので、 $TS-HGA$ や $MI-GA$ の TD 到達値の一つの目安となる。段取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解の TD 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

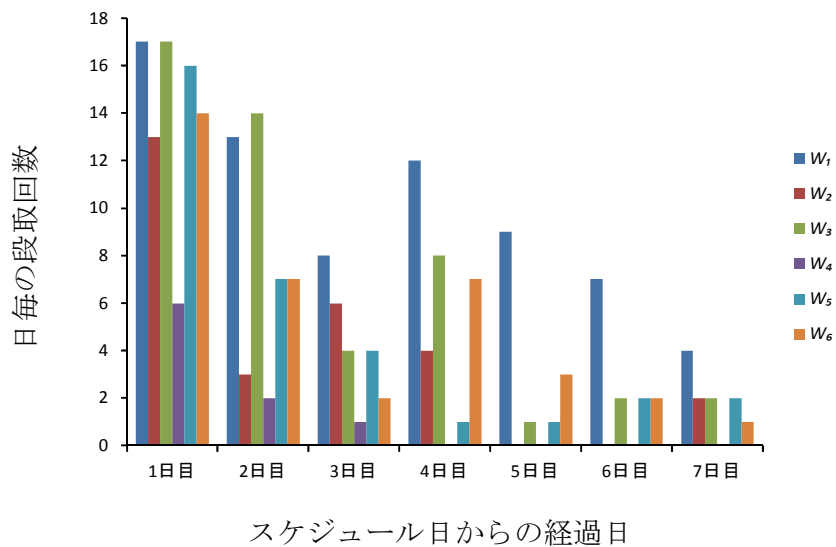


図 6.6 EDD によるガントチャートからの段取負荷

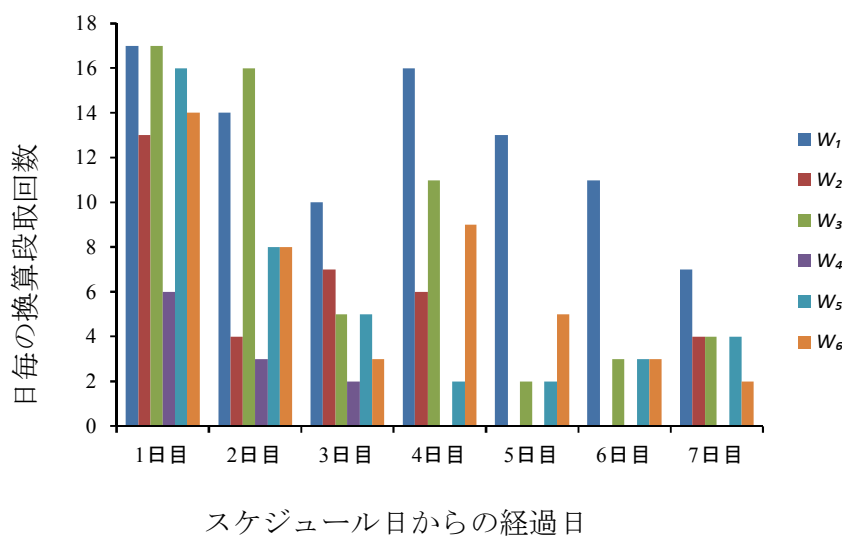


図 6.7 EDD ガントチャートによる換算段取回数($\lfloor Lt_{max}/\beta t \rfloor$)

6.2.2 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パラメータは上記のA社での操作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6.4の数値を用いた。なお、MI-GAの混雑度算出時の重みづけは、できるだけ広範囲の解を導出するため12島毎に特徴を与え、 $k_{TD} + k_{SL} + k_{WIP} = 1$ とし、島ごとに設定し多様な解の導出を促している。TS-HGAは納期遅れの最小化に重点を置くためTDに大きな重みを付与している。

表6.4 遺伝的アルゴリズムのパラメータ

パラメータ	MI-GA			TS-HGA			
個体数	144			20			
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%			
機械毎交叉探索禁止形式	*			交叉マスク			
同 タブー・サーチの実施間隔	*			2000計算回数毎			
同 タブー・サーチ実施時の繰返し数	*			500回			
突然変異探索禁止形式	*			遺伝子表現			
同 TSの間隔	*			1000計算回数毎			
同 タブー・サーチの実施時の繰返し数	*			5回			
島間移住頻度	5000計算回数毎			*			
繰返し計算回数	400,000			400,000			
		k_{TD}	k_{SL}	k_{WIP}	TD	SL	WIP
	1島	0.7	0	0.3	5	1	1
	2島	0.7	0.3	0	*	*	*
	3島	0.3	0.7	0	*	*	*
	4島	0	0.7	0.3	*	*	*
	5島	0	0.3	0.7	*	*	*
	6島	0.3	0	0.7	*	*	*
混雑距離算出時の重み	7島	0.4	0.3	0.3	*	*	*
	8島	0.3	0.4	0.3	*	*	*
	9島	0.3	0.3	0.4	*	*	*
	10島	0	0	1	*	*	*
	11島	0	1	0	*	*	*
	12島	1	0	0	*	*	*

6.3 実験結果と考察

6.3.1 *TS-HGA*, *MI-GA* と EDD からの導出解の比較

この項では、*TS-HGA* 及び *MI-GA* の両方法と EDD からの導出解との比較を行い、それぞれ解の特徴を確認する。

図 6.8 と図 6.9 は、それぞれ *TS-HGA* で得られた解の *SL-TD* 投影面、*WIP-TD* 投影面での世代ごとの分布を示す。図中の黒色点は繰返し計算回数 1000~100000 回 (step)、緑色点は 101000~200000 回 (step)、黄緑色の点は 201000~300000 回 (step)、赤色点は 301000~400000 回 (step) を示す。

図 6.10、図 6.11 は同様にそれぞれ *MI-GA* で得られた解の *SL-TD* 投影面、*WIP-TD* 投影面での世代ごとの分布を示す。

TS-HGA と *MI-GA* を比較すると、解 (点) の数は個体数を反映し *TS-HGA* が *MI-GA* に比して圧倒的に少ない。また、解の分布をみると混雑距離算出時の重みを一組のみ設定した *TS-HGA* は計算回数 (step) が増すにつれ 3 目的の最小化の方向へ向かっているのに対し、*MI-GA* は、12 個の島の多様な島毎の混雑距離算出時の重みの設定により計算回数 (step) が増しても多様な解を導出し続けている。その結果、世代が進んだ赤色点が *SL-TD* 投影面、*WIP-TD* 投影面ともに広域に分布しているが、2 つの投影面から解のクラスターはパレートフロントの曲面を形成していることを示している。

図 6.12 は図 6.8 と図 6.10 の *SL-TD* 投影面の解の最適近傍解と EDD により得られた解を、尺度を拡大して分布を示したものであり、図 6.13 は図 6.9 と図 6.11 の *WIP-TD* 投影面の解の最適近傍解と EDD により得られた解を合わせ拡大して分布を示したものである。受注生産においてスケジューリングの最も重要な目的は納期遵守であるので、*TD* の最小化が最も優先されるべきで、この観点から判断すると、*TS-HGA*, *MI-GA* とも EDD より優れた解を導出している。

EDD が納期最優先でショップ内にジョブを投入しているにも拘らずこのような結果になるのは、次の理由が考えられる。即ち、ショップ内への投入から加工完成までの生産リードタイムに与える要因は当該ジョブのロットサイズや必要作業数にも依存するため、遅い納期のジョブでもロットサイズが大きく、必要作業数が多いジョブは、早い納期の小ロットで必要作業数が少ないジョブより早くショップ内に投入しなければならないということになる。しかし、EDD ではこれらの多岐の要素を考慮することが困難なため納期のみを考慮した。その結果、短納期でロットサイズが小さく作業数 (工程数) が少ないジョブが、生産リードタイムが短いにもかかわらず優先して投入

され、リードタイムが長く、ロットサイズが大きく、作業数（工程数）の多いジョブのショップ内への投入が遅れたことによりこのような結果が発生したと考えられる。また、図 6.12, 図 6.13 から、それぞれの投影面において同程度の TD 値の場合、 $TS-HGA$ は $MI-GA$ より原点に近い解を導出する結果となっている。言い換えると、 $TS-HGA$ は小さい SL , WIP , 即ち少ない最大段取回数, 少ない工程内在庫で操業し $MI-GA$ と同等の TD 値を導出しているといえる。これは同じ繰返し計算回数の条件の下では交叉や突然変異の重複を避けるタブー・リストの効果でと考えられる。

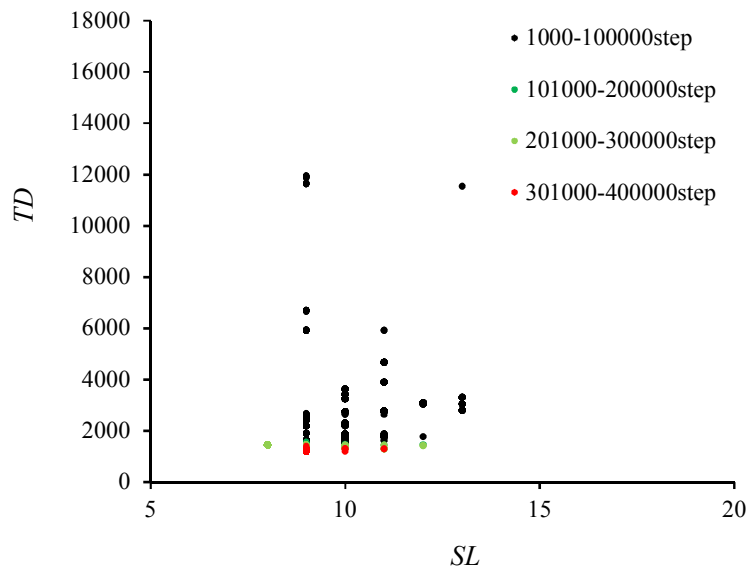


図 6.8 *TS-HGA* 到達解分布(*SL-TD* 投影面)

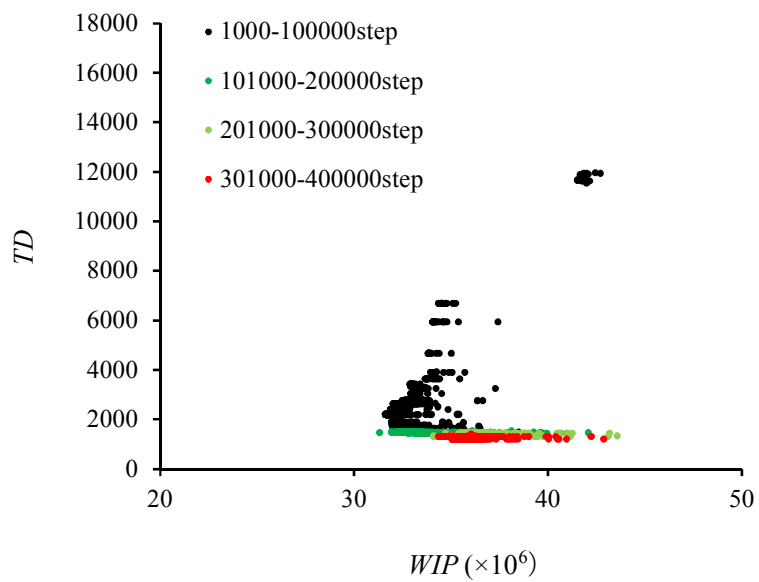
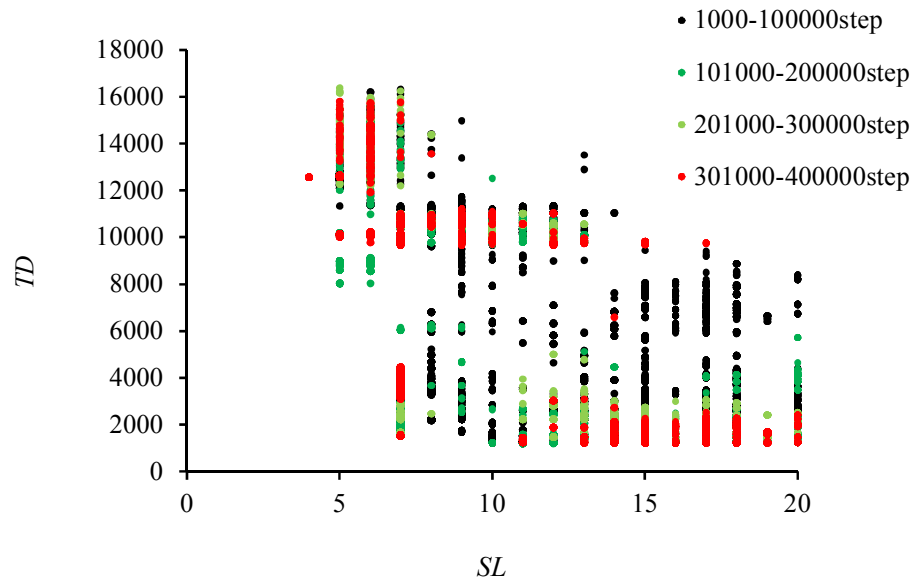
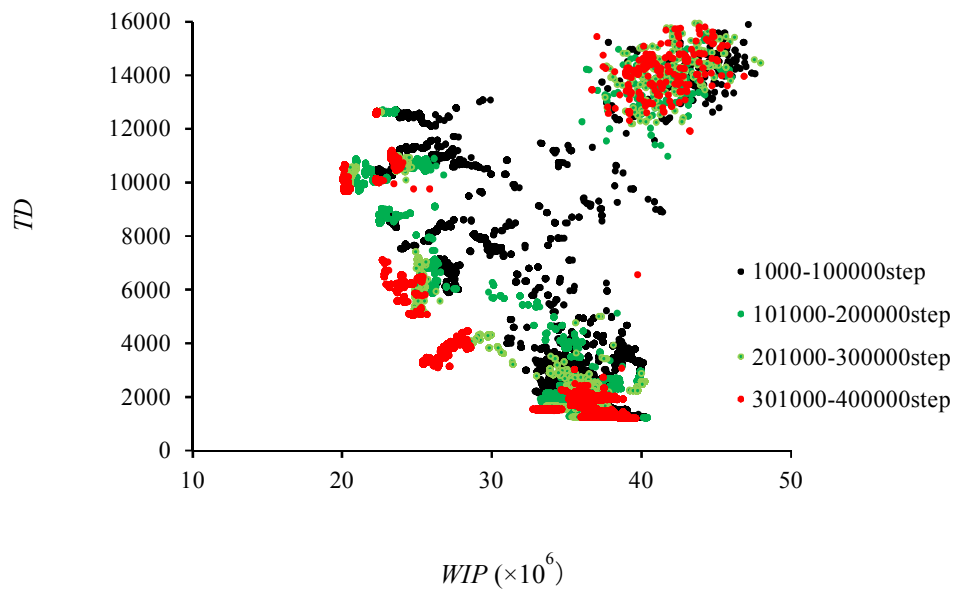


図 6.9 *TS-HGA* 到達解分布(*WIP-TD* 投影面)

図 6.10 *MI-GA* 到達解分布(*SL-TD* 投影面)図 6.11 *MI-GA* 到達解分布(*WIP-TD* 投影面)

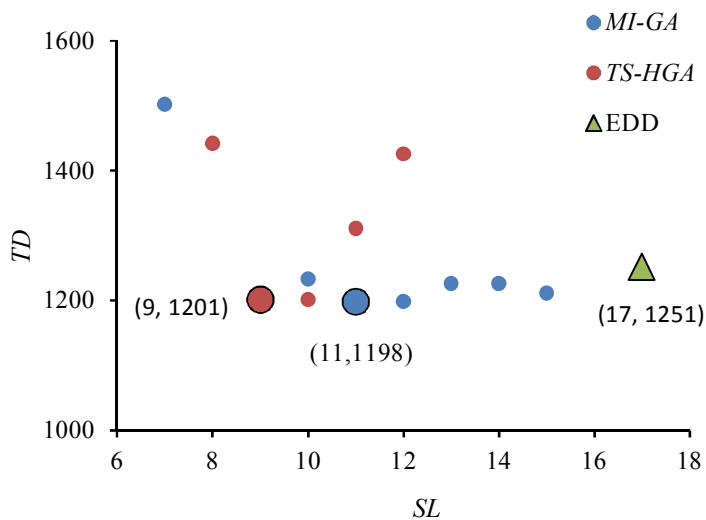


図 6.12 *TS-HGA*, *MI-GA* の近傍解と *EDD* の解との比較(*SL-TD* 投影面)

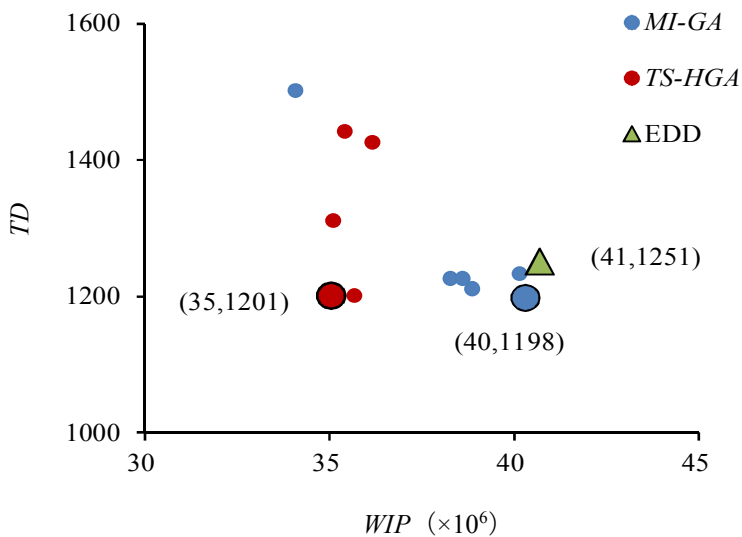


図 6.13 *TS-HGA*, *MI-GA* の近傍解と *EDD* の解との比較(*WIP-TD* 投影面)

6.3.2 TS-HGA と MI-GA の TD 値の収束時間の比較

次に、図 6.12, 図 6.13 における $TD \approx 1200$ の 2 つの解, $TS-HGA$ ($TD=1201$) と $MI-GA$ ($TD=1198$) に関し、図 6.14 に解の収束状況を示す。 $TS-HGA$ が $MI-GA$ に対して短時間で TD が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。

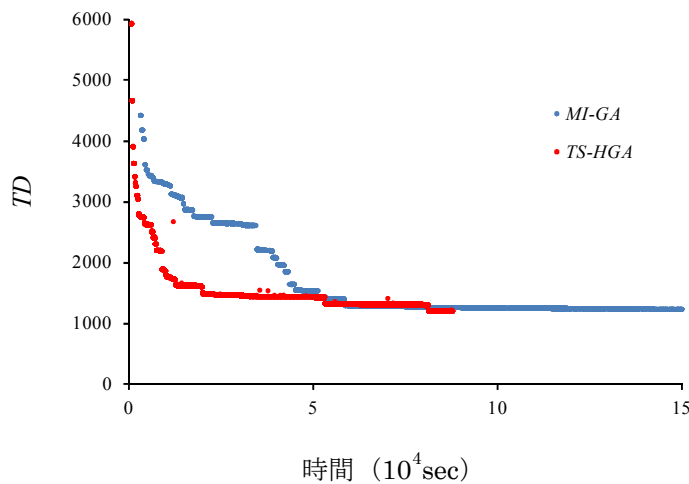


図 6.14 TD の収束状況比較

6.3.3 段取負荷の平準化の確認

次に、 $TS-HGA$ 導出解における段取負荷の平準化について確認する。図 6.15 は図 6.12, 図 6.13 で最適近傍と見なされる解 ($TD=1201$, $SL=9$, $WIP=35 \times 10^6$) でのガントチャートから得られた段取者 ($W_1 \sim W_6$) の日毎の段取回数を示している。これを EDD 導出解から得られた図 6.6 と比較すると、EDD での最大段取回数は 17 回であるのに対し、 $TS-HGA$ から得られた最大段取回数は 9 回となっている。また、図 6.15 では日毎に段取負荷が減少しており、図 6.4 のジョブ数の変化を反映した段取回数と見なせる。しかし、念のため 2.2 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り、図 6.15 の段取負荷の日毎の最大値 L_t^{max} を表 6.5 の中段の β_i に基づき変換すると表 6.5 の最下段の如く段取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。表 6.5 の日毎の段取回数変換値を反映させたグラフを図 6.16 に示すが、EDD による換算値を示した図 6.7 ($SL=13$) に比較して $SL=9$ と段取負荷の平準化が向上していることが分かる。

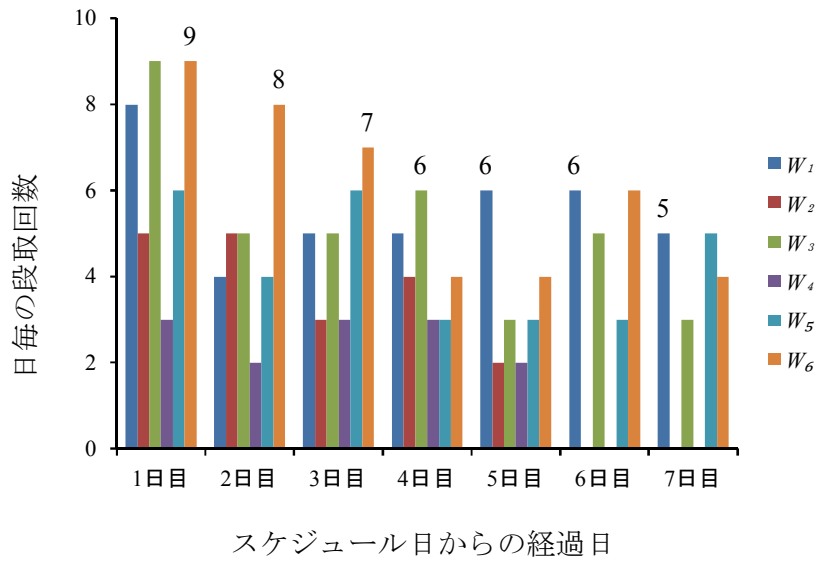


図 6.15 ガントチャートによる段取回数

表 6.5 換算段取回数

t	1	2	3	4	5	6	7
L_t^{max}	9	8	7	6	6	6	5
β_t	1.000	0.929	0.816	0.796	0.734	0.675	0.619
$\lceil L_t^{max} / \beta_t \rceil$	9	9	9	8	9	9	9

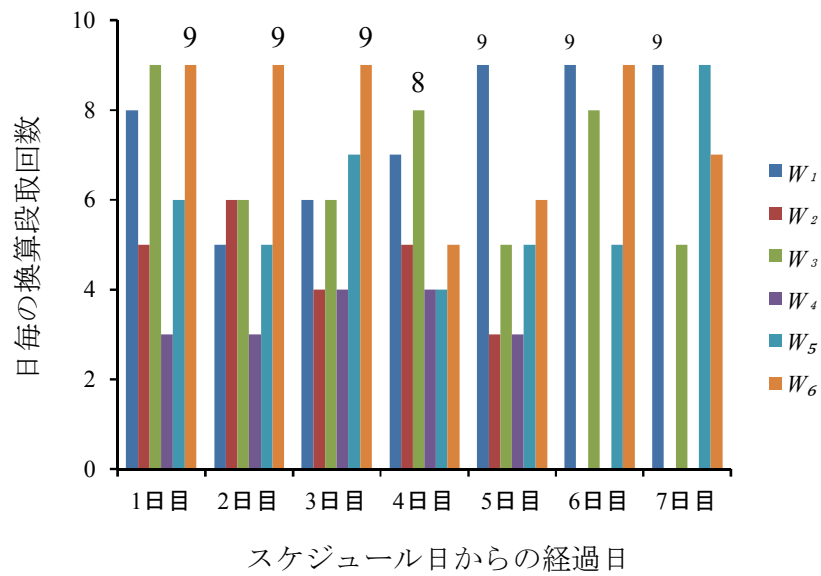
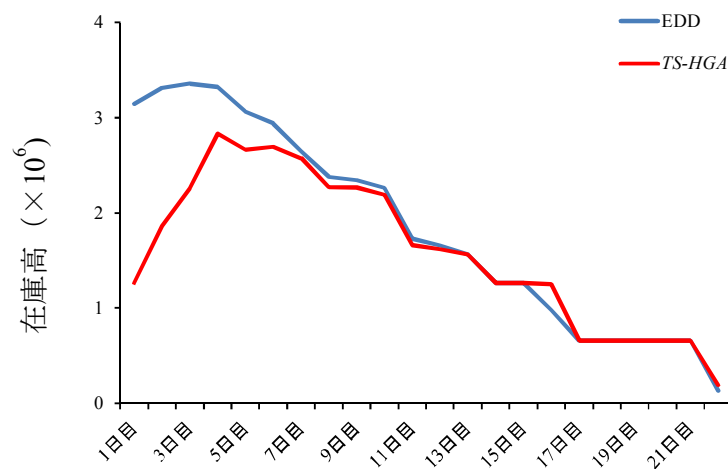


図 6.16 ガントチャートによる換算段取回数($\lceil L_t^{max} / \beta_t \rceil$)

6.3.4 工程内在庫 *WIP* の比較

次に、工程内在庫に関し、図 6.13 における *TS-HGA* の解 ($WIP \approx 35 \times 106$) と EDD の解 ($WIP \approx 41 \times 106$) との日毎の在庫高の推移の比較を図 6.17 に示す。図 6.17 は *TS-HGA* のほうが EDD に比べて遅い時期にジョブがジョブ内に投入されており、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、納期を満足させつつ適切な時期にジョブがジョブ内に投入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、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ルを導出可能であることを示している。



スケジュール日からの経過

図 6.17 在庫高の経時変化

6.4 まとめ

本章では、MO-FJSP における重みづけ納期遅れの最小化、段取負荷の平準化、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操業を反映したデータによる数値実験を行った。

TS-HGA の性能評価のため、ディスパッチング・ルールの一つである EDD によるスケジューリングと広域な解を提供する *MI-GA* 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* と同等の収束解に達することを確認できた。

第7章 結論

7.1 本論文のまとめ

本研究では、受注型中小企業におけるフレキシブル・ジョブショップ・スケジューリング多目的最適化のための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操業を参考にしたデータによる数値実験を行い、その有効性を確認した。なお、研究の取組みに当たり次の課題 1~3 を設定した。

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 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、段取負荷の平準化評価のため、先行研究では例のない段取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参考にしたデータを用いて、上記の開発した手法が日常の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 の改善手法を開発しその有効性を確認する。

課題 1 に対し、島モデル遺伝的アルゴリズム (*MI-GA*) を開発し、実在する企業の操業を反映したデータを用い、納期遅れの最小化と段取負荷の平準化の 2 目的の最適化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実在企業で発生する可能性のある経営リスクを想定し、操業へのリスクの影響度、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できることを確認した。

課題 3 に対しては、局所解への収束が優れる方法の一つである TS 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である *TS-HGA* を開発し、上記 2 目的に加え、工程内在庫の最小化を含めた 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、まとめを述べる。

第1章では、本研究で、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、中小企業の持続性のための課題から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への取組み動機について述べ、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構成、問題を評価する目的関数を示し、この中で段取負荷の平準化に関して2つの考え方を示した。

第3章では、上記の問題の解法として、段取者を考慮した遺伝子表現の考え方を簡単な例を用いて説明し、提案する島モデル遺伝的アルゴリズムを説明した。さらに、島モデルと島モデルを有効に働かせるための移住の考え方についても解説した。また、今回用いた島モデル遺伝的アルゴリズムは多目的であることから、非優越ソート GA (non-dominated sort genetic algorithm) を織込んだ親世代のランク付け・選択方法、次世代生成のための交叉、突然変異の考えに関して述べた。

第4章では、上記で提案した手法の有効性を検証する目的で、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、段取者に技能の差があるなど、現実の企業で発生する可能性のある状態も組み入れた実験条件とした。実験の結果、島モデル 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 より優れた解を導出し、ほぼ最適解に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。段取者間の技能差が大きい場合、段取者間の負荷差の最小化による平準化を目的にすると、段取対応機械台数の少ない段取者に段取対応機械台数の多い段取者が段取回数を合わせることになり、スケジューリング後の早い時期に全体の段取回数を制限することになり、納期遅れが生じることが分かった。反面、段取者間の負荷の差の制限を外すと、納期は早まるものの、段取対応機械台数の多い段取者の負荷が過度に高まることが示された。一方、日毎の最大段取負荷の最小化による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やりやすくなることが確認できた。従

って、今回の実験のケースのように段取者間に技能差が大きい場合に限らず、技能差が少ない場合も後者の日毎の最大段取負荷の最小化による平準化を目的関数として採用すべきと考える。

第5章では、上記の結果を受け、受注型中小製造企業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の数値を用いて、リスクの程度とリスク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段取対応機械台数の多い段取者の離脱は、残された段取者が離脱者の負荷を補うことにより重みづけ納期遅れへの影響が少ないことが分かった。また、段取対応機械台数の多い段取者の離脱の対策として、段取対応機械台数の少ない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ことが分かった。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予想以上に大きく、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が得られ、納期短縮の程度を緩和した対応戦略を取ることが望ましいことが示唆された。このように、本提案が日常のスケジューリングのみならず、経営上のリスクや対策を事前に定量的に評価することができ、客観的な経営判断を支援できることが確認された。

第6章では、局所探索に優れるタブー・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操業を参考にしたデータによる数値実験を行った。

TS-HGA の性能評価のため、従来法であるディスパティング・ルールの一つである *EDD* によるスケジューリングと大域解を提供する *MI-GA* との比較実験を行い、*TS-HGA* では3目的（重みづけ納期遅れの最小化、段取負荷の平準化、工程内在庫の最小化）とも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、短時間で *MI-GA* と同等の *TD* 収束値に達することを確認できた。

7.2 今後の課題と展開

本研究は、受注型中小企業の生産管理情報システムのなかで、その核となる生産スケジューリングを支援する手法を提供することを狙いとして取組み、有効な結果が得られた。しかし、この手法を用いて上記の企業の経営に資するには、次の3つの課題が挙げ

られる。

第1は、開発した手法と既存の生産管理システムとの連携機能の開発の方向である。

生産スケジューリングの研究は、様々なアルゴリズムに関して競うことが多く、実業との乖離が大きいとの指摘も多い。今回の研究を研究段階で終わらせないためには、既存の生産管理システムとの連携が必要となる。今回は実在企業を参考にしたデータを用いて実験を行ったが、そのデータの殆どは既存の生産管理システムで用いるデータと重複する。多くの企業には、様々な生産管理システムが既に運用されており、今回の提案手法をこれらの生産管理システムに組み込むことにより実効性のある生産スケジュールが導出され、ムダ・ムラ・ムリのない生産に資することができ、受注型中小企業の競争力を高めると考えられる。

第2は、計算時間の更なる短縮のためのデータ構造、アルゴリズムの開発などスケジューリングシステムの高度化の方向である。

受注生産の企業にとって競争力の重要な要素として、顧客からの問い合わせに如何に早く回答するかがあげられる。従って、受注生産にとって、スケジューリングは受注後の生産計画のみならず、引合い時点の納期の見積にも活用したい。そのためには顧客からの新たな引合いジョブの情報（スペック、個数、納期）を既に受注しているジョブに追加してスケジュールを立てそのジョブの要求納期を満足するか否かを判断し回答する必要がある。今回の *TS-HGA* での実験で、許容できる時間内で近傍解が導出できたが、差別化を訴求できる高応答性の水準には達していない。上記のように引合い時の納期の回答にまで適用業務を広げるには、更なる短時間で処理できる近傍解の探索アルゴリズムの開発やそれに適したハードウェアの整備が必要となる。

第3は、1.1節で述べた図1.2の中の在庫情報をスケジューリングに活用する開発の方向である。

変種変量受注生産といえども、確率的ではあるが繰返して受注する品物がある。このような繰返し品で極めて少ロットの受注に対し、受注の都度、段取を行なうと段取コストがかかり、市場価格での受注では採算に合わないことがある。この段取コストを削減するには、第1の方法として段取毎のコストを削減する戦略であり、第2の方法として、需要予測による見込み生産で完成品在庫を持ち段取頻度を少なくする戦略が考えられる。図1.1に示したフローショップでは自動車や家電製品などは比較的生産量が多いの

で段取頻度を下げると膨大な在庫が発生するので、しかるべき投資により治工具の整備や設備の改造で段取時間を極小化する第1の方法を取ることが多い。一方、変種変量の受注生産では、第1の方法を指向しつつも段取頻度を減少する第2の方法を重要な戦略として用いられることが多い。しかし、背景でも述べたように受注予測に基づく仕掛けは部品の作りすぎのムダによる産業廃棄物となる恐れがある。欧州では環境問題の解決手段として産業廃棄物削減活動を評価する手法として MFCA (material flow cost analysis) [62]の取組みがなされているが、受注生産の中小企業でもこの MFCA の考え方を反映した在庫の適正化[63]が必要である。受注実績を反映した受注予測に基づく在庫量の適正化を行い、在庫情報をスケジューリングに活かすことが納期遵守、従業員の厚生、キャッシュ・フローの健全化、環境負荷の低減に結びつくと考えられる。

生産管理のスケジューリング分野の外に目を向けると、序論で環境負荷について言及したが、さらに環境問題全般に対象を広げると、社会システムの維持に関わる分野への GA の活用も考えられる。今後、少子高齢化により社会の要求する便益は益々多岐になっていくのに対し、投入可能な資源の制約は厳しくなっており、様々な便益に対する資源の配分の最適化が今まで以上望まれてくると考えられる。これらの問題に関し、今回用いた GA を含めたメタヒューリスティクス手法は、医療・福祉[64]、交通[65]、都市のインフラ維持[66]、中山間地の維持[67]、農業の適正化[68][69]などに広く用いられており、今回、得られた知見をこれら社会システムの維持に資することも検討したい。

謝辞

本研究は、筆者が名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻博士後期課程に在籍中に同専攻の佐野充教授（現 中部大学教授）の下で行った研究結果をまとめたものです。博士課程前期課程に入学以来、本研究の実施の機会を与えて頂くとともに、その遂行にあたって、5年間に亘り懇切丁寧なご指導と多大なるご配慮を賜りました佐野先生には、ここに心から感謝の意を表し深くお礼申し上げます。

同時に、研究過程での中間成果の公表に際し、適切な発表の場の紹介、発表論文に対する注意深いアドバイス、提出に関する適切なお支援を頂きました名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻の長尾征洋講師に対し心から感謝申し上げます。

また、研究の動機付け維持に対し有益なアドバイスを頂くとともに、学位論文の執筆に際し基本的な思想、さらに表現に関して懇切なご指導を頂きました名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻の栗本英和教授に心から感謝申し上げます。

名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻の杉谷健一郎教授には、本研究を社会の厚生に資するためのご示唆を頂きました点、心から感謝申し上げます。

本研究の実験のためのC++によるプログラミングに関しては、当研究室前期課程時代に当研究室の博士前期課程の杉本拓弥氏（現 日立製作所）、丸田峻也氏（現 デンソー）にご助言、ご協力を戴きました。ここに感謝の意を表します。

また、A社の経営者、スタッフの方々には研究推進に当たり様々な生産情報や実験の中で用いたデータのサンプルを提供戴くとともにヒアリングにも答えていただくなど長期間に亘り多くのご協力を頂きました。本論文の実験条件に用いたデータがA社からの提供データを参考にしたことから本研究の構成に欠かせない基本的な材料となりました。ここに心から感謝の意を表し深くお礼申し上げます。

また、筆者より前に退職後に再度大学に入り、シニア学生の学ぶ姿勢について先鞭をつけ、励ましてくれたトヨタ自動車時代の友人に感謝します。

最後に、研究継続の心の支えとなった、筆者が博士課程前期課程入学の年に、生きていれば大学院に入る年であった次男の前向きに努力する生前の姿、研究活動を暖かく見守り心身の健康を支えてくれた妻及び長男家族に深く感謝します。

付録 A 初期個体の設定

3.2 節では，初期個体が存在する前提でGAの構成を説明した．ここでは，初期個体の生成の仕組みを詳述するにあたり，まず，初期個体の基となる表現番号表の構成を説明し，その後，初期個体の生成手順を説明する．

A.1 表現番号表の構成

GA の個体の遺伝子構造は図 A.1 に示すように機械 1 から機械 m までの遺伝子座群の配列あり，個々の機械の遺伝子座群の中にその機械が処理する順序で表現番号が並んでいる．例えば，図 A.1 の個体 1 の機械 1 の左端の枠には表現番号①が記入されているが，それぞれの表現番号の下には 3.1 節でも述べたように対象ジョブ，ジョブを処理する複数の作業，作業に関係する機械，その機械での処理時間，担当する段取者などのデータがある．

具体的な例として，第 6 章の実験で用いた 109 ジョブの表現番号の例を表 A.1 に示す．表の左端の列から，表現番号，ジョブ番号，ロットサイズ，顧客，残納期が記載されており，それより右側の列は作業順に 3 列毎に左から加工機械番号，加工時間(機械番号 32 までは分単位，機械番号 33 以降は外注先を示し数字は日単位で設定している)，段取可能担当者(1000~1008)が並んでいる．因みに，本文中での W_1 は 1000， W_2 は 1001， W_3 は 1002， W_4 は 1004， W_5 は 1004， W_6 は 1005 で設定している．このように，図 A.1 の各枠の表現番号の下に，表 A.1 に示されている 1 行毎のデータが繋がっていることになる．

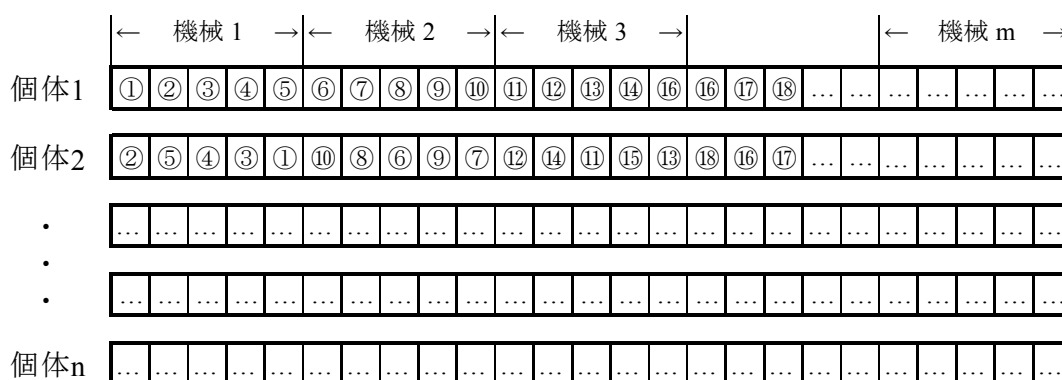


図 A.1 遺伝子の構成 (図 3.9 再掲)

表 A.1 において、表現番号 1 はジョブ番号 1 の一つの選択枝の一つであり、その中で、作業 1 は機械 12 で処理され、その際の加工時間は 6 分、段取者は 1002 (W_3) であることを示す。なお、表現番号 1 の作業 4 以降は全てのセルが 0 となっているが、これはジョブ番号は作業 3 までであることを示している。

FJSP の場合、作業を処理する機械は複数の選択枝があり、本研究では、更にそれぞれの機械に対して段取者の選択枝もあることから、同一機械における複数の段取者の組合せがあり、その組合せごとに表現番号が発生し、それらは表 A.1 の次に続く。表 A.1 の次に続くジョブ 1~109 の表現番号 110~218 の例を表 A-2 の示す。

ジョブ 1 の表 A.1 における表現番号 1 と表 A.2 における表現番号 110 とを比較する。表現番号 1 での作業 1 では、処理機械 12、加工時間 6 分、段取者 1002 に対し、表現番号 110 では処理される機械は機械 12、加工時間 6 分、段取者 1005 と機械と加工時間は同じであるが、段取者が入れ替わっている。作業 2、3 についても同様な差異がみられる。

ジョブ 41 の表 A.1 における表現番号 41 と表 A.2 における表現番号 150 とを比較する。作業 3 では、表現番号 41 では機械 33 に対し、表現番号 150 では処理される機械 34 となっている。機械番号 33 以上は外注先を示しているが、機械番号 32 以外に関しても他の機械の選択枝がある場合は同様の表記となる。

ジョブ 43 の表 A.1 における表現番号 43 と表 A.2 における表現番号 152 とを比較する。表現番号 43 の作業 2 では機械 : 25、加工時間 : 0.17 分、段取者 : 0 となっており、機械 25 では段取者なしで処理が進められることを示している。これに対し、表現番号 152 の作業 2 では 3 つのセルとも 0 に設定されている。これは、ジョブ 43 の第 2 作業は表現番号 41 の第 2 作業以外に選択枝がないことを示している。

今回の事例の存在する中小企業は partial-flexible job shop であるため、MO-FJSP としては、作業と機械の組み合わせが限られた partial-flexible job shop problem となる。1 個体あたりの表現番号の数は、ジョブ数 109、最大作業数 9、機械数 42 (うち 33~42 は外注、1~32 が社内の機械)、段取者 6 であるが、ジョブ数の 10 倍のである 1090 と設定した。

A.2 初期個体の生成手順

初期個体は、上記の表現番号 1~1090 を機械番号でソートして、機械番号毎に表現番号を並べた配列となる。表 A.3 にその例の一部を示している。表 A.3 は、図 A.1 の個体の一部で、図 A.1 では機械が横に並んでいるが、表 A.3 では機械は縦に並んだ形で表現されている。また、表 A.3 は、機械毎の遺伝子座の数は 130 の固定長とし左詰めに表現番号が並ぶ

が、紙面の制約上、配列を折り返して示している。1 個体は機械 1~42 までであるが、これも紙面の都合上、機械 1~8 を示している。従って、1 個体は 130×42 個の遺伝子座から構成されることとなる。

機械毎の遺伝子座中に「-1」が 15 個付与しているが、これは有効な表現番号少ない機械（例えば、機械 1）の場合、交叉や突然変異処理が有効に働かないことを防止するために設定しており、今回の実験では「-1」が選ばれた場合、ガントチャートでは 1 区分（30 分）休止することとしている。なお、遺伝子座中の「0」は加工がないことを示している。

表 A.2 表現番号表 (表現番号: 110~218)

表現 番号	シブ 番号	ロット サイズ	顧客 順番	残納 期	作業 1		作業 2		作業 3		作業 4		作業 5		作業 6		作業 7		作業 8		作業 9		
					機械 加工 時間	段取 者	機械 加工 時間	段取 者	機械 加工 時間	段取 者	機械 加工 時間	段取 者	機械 加工 時間	段取 者	機械 加工 時間	段取 者	機械 加工 時間	段取 者	機械 加工 時間	段取 者	機械 加工 時間	段取 者	機械 加工 時間
110	1	10	E社	0	12	6	1005	24	0.5	1002	12	3	1005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
111	2	50	F社	0	12	1.8	1005	29	0.25	1007	12	1.2	1005	3	4	1002	0	0	0	0	0	0	0
112	3	137	A社	0	2	2.4	1002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
113	4	2	E社	0	17	6	1005	17	3	1005	22	6	1005	17	3	1005	17	3	1005	6	1	1002	0
114	5	100	A社	0	21	1.8	1005	26	1	1007	0	0	0	34	5	0	29	0.25	1007	0	0	0	0
115	6	122	M社	0	5	1	1002	0	0	0	29	0.25	1007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
116	7	100	E社	0	17	3	1005	17	1.8	1005	22	3	1005	5	1	1002	34	5	0	0	0	0	0
117	8	100	M社	0	5	1	1002	0	0	0	29	0.25	1007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
118	9	100	M社	0	26	1	1007	21	1.8	1005	5	1	1002	0	0	0	29	0.25	1007	0	0	0	0
119	10	210	F社	0	12	2	1005	12	1	1005	2	3	1002	5	1	1002	0	0	0	0	0	0	0
120	11	50	F社	0	17	5	1005	17	3	1005	22	3	1005	17	2	1005	2	3	1002	2	3	1002	0
121	12	20	S社	0	22	3	1005	26	1	1007	19	0.5	1005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
122	13	300	S社	0	19	0.5	1005	19	0.5	1005	29	0.25	1007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
123	14	50	S社	0	26	1	1007	29	0.25	1007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
124	15	30	S社	0	19	1	1005	22	3	1005	5	1	1002	34	5	0	0	0	0	0	0	0	0
125	16	15	S社	0	19	1	1005	22	3	1005	5	1	1002	34	5	0	0	0	0	0	0	0	0
126	17	25	S社	0	22	22.5	1005	19	15	1005	19	15	1005	29	0.25	1007	0	0	0	0	0	0	0
127	18	80	S社	0	13	4	1003	12	0.75	1005	30	0.17	1001	21	2.25	1005	0	0	0	0	0	0	0
128	19	50	S社	0	29	0.25	1007	34	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
129	20	50	S社	0	19	1.2	1005	34	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
130	21	30	S社	0	0	0	0	26	1	1007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
131	22	50	S社	0	24	0.17	1002	0	0	0	26	1	1007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
132	23	20	S社	0	24	0.17	1002	0	0	0	26	1	1007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
133	24	300	S社	0	19	0.5	1005	19	0.5	1005	29	0.25	1007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
134	25	100	S社	0	7	1.65	1002	7	2.5	1002	30	0.17	1001	0	0	0	21	0.82	1005	24	0.17	1002	29
135	26	100	S社	0	22	0.9	1005	26	1	1007	29	0.25	1007	24	0.085	1002	0	0	0	0	0	0	0
136	27	300	S社	0	19	0.5	1005	19	0.5	1005	29	0.25	1007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
137	28	100	S社	0	29	0.25	1007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
138	29	216	S社	0	7	3	1002	21	1.2	1005	2	1.8	1002	29	0.25	1007	0	0	0	0	0	0	0
139	30	215	S社	0	7	3	1002	0	0	0	21	0.9	1005	26	1	1007	29	0.25	1007	0	0	0	0
140	31	129	S社	0	21	1.2	1005	24	0.17	1002	26	1	1007	0	0	0	29	0.25	1007	0	0	0	0
141	32	35	S社	0	2	3.6	1002	21	1.2	1005	29	0.25	1007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
142	33	40	S社	0	13	4	1003	12	0.75	1005	30	0.17	1001	21	2.25	1005	0	0	0	0	0	0	0
143	34	40	S社	0	19	1.5	1005	19	1.5	1005	22	4.5	1005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
144	35	40	S社	0	20	1.5	1005	20	1.5	1005	26	1	1007	0	0	0	22	4.5	1005	0	0	0	0
145	36	50	Y社	0	4	1	1002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
146	37	20	Y社	0	13	3	1003	12	3	1005	21	3	1005	24	1.5	1002	0	0	0	0	0	0	0
147	38	20	Y社	0	3	3	1002	24	1.5	1002	29	0.25	1007	12	3	1005	0	0	0	0	0	0	0
148	39	100	Y社	0	18	1.2	1004	18	1.2	1004	18	1.2	1004	22	4.8	1005	18	2.1	1004	18	0.6	1004	0
149	40	100	K社	0	30	0.17	1001	0	0	0	2	2.25	1002	21	1.7	1005	12	2	1005	29	0.25	1007	5
150	41	100	K社	0	22	1.5	1005	0	0	0	34	2	0	1	2.4	1002	0	0	0	0	0	0	0
151	42	55	K社	0	21	1	1005	27	1	1001	29	0.25	1007	34	2	0	0	0	0	0	0	0	0
152	43	1	K社	0	13	2.5	1003	30	0.17	1001	0	0	0	0	21	1	1005	0	0	0	0	0	0
153	44	2	K社	0	22	10	1005	6	1	1002	0	0	0	0	29	0.25	1007	0	0	0	0	0	0
154	45	126	K社	0	29	0.25	1007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
155	46	40	K社	0	26	1	1007	29	0.25	1007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
156	47	10	K社	0	12	1	1005	29	0.25	1007	12	1.5	1005	29	0.25	1007	0	0	0	0	0	0	0
157	48	15	K社	0	12	1	1005	29	0.25	1007	12	1.5	1005	29	0.25	1007	0	0	0	0	0	0	0
158	49	10	K社	0	29	0.25	1007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
159	50	10	K社	0	29	0.25	1007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
160	51	10	K社	0	22	6	1005	5	1	1002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
161	52	1	K社	0	13	5	1003	21	1	1005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
162	53	15	K社	0	7	2	1002	7	2	1002	30	0.17	1001	0	0	0	22	1	1005	24	0.17	1002	0
163	54	15	K社	0	13	3.5	1003	0	0	0	22	3	1005	12	5	1005	29	0.25	1007	0	0	0	0
164	55	45	K社	0	18	1.5	1004	21	1.7	1005	18	5	1004	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
165	56	13	K社	0	22	2.8	1005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
166	57	30	K社	0	0	0	0	22	2	1005	26	1	1007	29	0.25	1007	24	0.085	1002	0	0	0	0
167	58	35	Z	0	21	3.4	1005	34	2	0	34	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
168	59	25	Z	0	22	2.5	1005	26	1	1007	29	0.25	1007	6	1	1002	29	0.25	1007	0	0	0	0
169	60	16	Z	0	6	1	1002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
170	61	445	Z	0	34	2	0	34	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
171	62	150	Z	0	3	3	1002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
172	63	200	Z	0	3	2	1002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
173	64	150	Z	0	3	1	1002	3	3	1002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
174	65	25	Z	0	6	1	1002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
175	66	40	Z	0	6	1	1002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
176	67	70	Z	0	5	1	1002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
177	68	11	Z	0	22	3	1005	9	2.5	1005	9	1.5	1005	29	0.25	1007	0	0	0	0	0	0	0
178	69	20	Z	0	22	3	1005	9	2.5	1005	9	1.5	1005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
179	70	11	Z	0	22	3	1005	9	2.5	1005	9	1.5	1005	3	1.5	1002	6	1	1002	0			

付録 B 機械単位の交叉の効果の確認

本研究の GA の交叉には機械単位での交叉と機械内部での交叉を用いている。機械内部での交叉は、作業の順番を入れ替えることで解の多様性を増大させる効果がある点は理解し易いが、機械間単位の交叉の効果は理解しにくい。そこで、具体的な事例でその確認を行う。

B.1 初期個体の表現番号配列の例

図 A.3 の初期個体の一部例から、さらにその一部である機械 7 と機械 8 を抽出し表 B.1 に示す。表 B.1 中、ジョブ番号 25 に関する表現番号 25, 134, 243, 352, 461, 570 (各数値間の差はジョブ数の 109 である) に着目すると、それぞれの表現番号が機械 7 と機械 8 とも 2 度ずつ出現している。これは、機械 7 と機械 8 が、それぞれジョブ 25 に対し 2 つの作業を受け持っていることを示しており、表 B.1 の中で、より左に配置された黄色のマーカを付与した表現番号は作業 1 に対応し、緑色のマーカを付与した表現番号は作業 2 に対応する。

表 B.1 機械 7 と機械 8 の初期個体の遺伝子配列の例

(凡例 ■: 作業 1 に対応 ■: 作業 2 に対応)

機械 7	25 29 30 53 81 84 85 86 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 134 138 39 162 190 193 194 195 196 197 198 199 200 201 202 203 204 205 206 243 247 248 271 299 302 303 304 305 306 307 308 309 310 311 312 313 314 315 25 53 134 162 243 271 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 0
機械 8	77 78 186 187 295 296 352 356 380 408 411 412 413 414 415 416 417 418 419 420 421 422 423 424 461 465 489 517 520 521 522 523 524 525 526 527 528 529 530 531 532 533 570 574 598 626 629 630 631 632 633 634 635 636 637 638 639 640 641 642 86 195 304 352 380 461 489 570 598 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 0

表 B.2 には、第 6 章での実験条件における作業 1 と作業 2 に関する表現番号ごとの機械と段取者の組合せを示す。

遺伝子個体をガントチャートに展開する場合、遺伝子配列の左端の遺伝子座の表現番号をすべての機械に対し読み込み最初に現れた表現番号がガントチャートにセットされ、その後、次々に右隣の遺伝子座の表現番号を読み込み同様の処理をする。表 B.1 の例では、作業 1 は機械 7 における表現番号 25 が左端の遺伝子座に出てくるので、表 A.1~2 に一部を示した

表現番号表から導かれた表 B.2 (a) 作業 1 により, 作業 1 は機械 7, 段取者 W_2 で処理されることになる. また, 作業 2 でも機械 7 における表現番号 25 が機械 8 の最も左にある表現番号 352 より左の遺伝子座に出てくるので, 同様に, 表 B.2 (b) 作業 2 により, 作業 2 は機械 7, 段取者 W_2 で処理される.

表 B.2 ジョブ 25 の表現番号ごとの機械と段取者の組合せ

(a) 作業 1

表現番号	25	134	243	352	461	570
機械	機械 7	機械 7	機械 7	機械 8	機械 8	機械 8
段取者	W_2	W_3	W_6	W_2	W_3	W_6

(b) 作業 2

表現番号	25	134	243	352	461	570
機械	機械 7	機械 7	機械 7	機械 8	機械 8	機械 8
段取者	W_2	W_3	W_6	W_2	W_3	W_6

B.2 機械単位での2点交叉処理

機械単位での2点交叉処理は、交叉点を任意に2点選び、2点の交叉点に挟まれている機械の遺伝子群を入れ替える方式である。図B.1では、交差点が機械kと機械k+2が選択された場合の例を示す。子1は、親1の機械k~機械k+2以外は親1が持つ遺伝子列を受け継ぎ、機械k~機械k+2は、親2の機械k~機械k+2が持つ遺伝子列を受け継ぐ。同様に、子2は親2の機械k~機械k+2以外は親2が持つ遺伝子を受け継ぎ、機械k~機械k+2は、親1の機械k~機械k+2が持つ遺伝子を受け継ぐ。

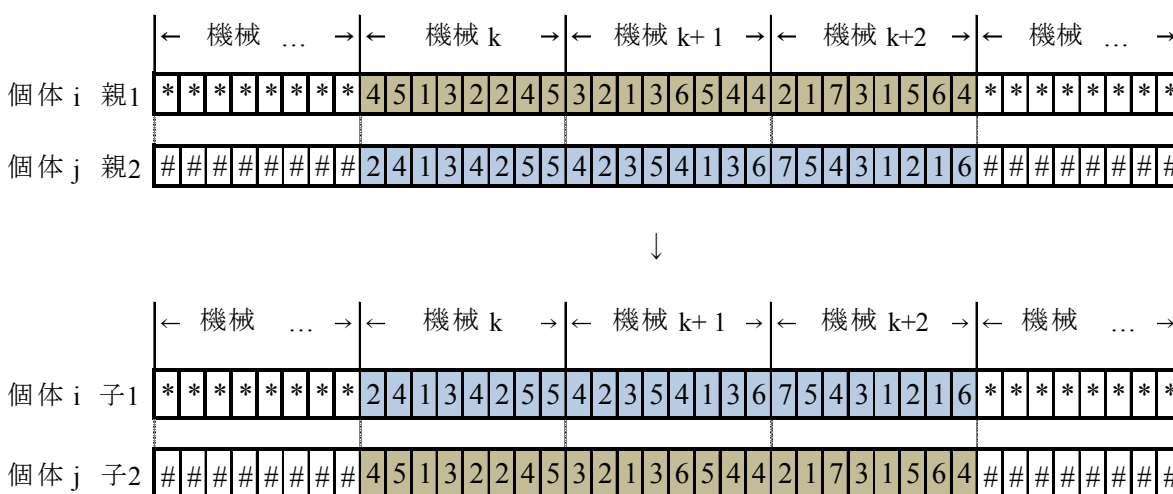


図 B.1 機械単位における遺伝子の2点交叉処理

表B.1で示した機械7と機械8の遺伝子配列が複数世代の機械内交叉を含めて入れ替わった例を表B.3に示す。表B.3の例では、作業1は機械8における表現番号352が機械7の最も左にある表現番号134より最初の左側の遺伝子座に出てくるので、表B.2(a)作業1により、作業1は機械8、段取者 m_2 で処理される。また、作業2でも機械8における表現番号570が機械7の最も左にある表現番号25より左側の遺伝子座に出ており、表B.2(b)作業2により、作業2は機械8、段取者 m_6 で処理される。即ち、表B.1と異なる処理機械と段取者を持つ表現番号がガントチャートに反映されることになり、異なる解を導出することになる。

このように、機械単位の交叉は同一機械内での表現番号の順序は変化しないが、FJSPのように複数の機械で処理可能な作業が存在する場合、上記の例のように処理する機械や段取者の組合せの表現番号が採用され、多様な解を導出する効果がある。

業績論文

1 学術誌等

Masahiro Nagao, Takuya Sugimoto, Yasuhiko Morinaga, Mitsuru Sano, “Diversity oriented multi-objective island based genetic algorithm for flexible job shop scheduling considering setup operator regulation,” *Journal of Human Environmental Studies*, Vol. 13 No.1, pp. 1-12, 2015 June .

Yasuhiko Morinaga, Masahiro Nagao, Mitsuru Sano, “Balancing setup workers’ load of flexible job shop scheduling using hybrid genetic algorithm with tabu search strategy,” *International Journal of Decision Support Systems*, (22nd January 2016 accepted).

2 国際会議

Yasuhiko Morinaga, Masahiro Nagao, Mitsuru 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, Kitakyushu, Japan*. pp. 87-94, 2014 December.

3 その他

森永泰彦, 杉本拓弥, 長尾征洋, 佐野充, 「受注生産における段取り者の負荷を考慮した生産スケジューリング」, スケジューリング・シンポジウム 2013 講演論文集, スケジューリング学会, 南山大学, 名古屋, pp. 217-22, 2013 年 9 月 22 日.

森永泰彦, 長尾征洋, 佐野充, 「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」, 第 98 回 MPS・第 38 回 BIO 合同研究発表会, 情報処理学会, 沖縄科学技術大学院大学, 沖縄, 7 頁, 2014 年 6 月 27 日.

森永泰彦, 丸田峻也, 長尾征洋, 佐野 充, 「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」, 第 103 回 MPS・第 42 回 BIO 合同研究発表会, 情報処理学会, 沖縄科学技術大学院大学, 沖縄, 6 頁, 2015 年 6 月 23 日.

参考文献

- [1] 中小企業庁編, 「付属統計資料」, 中小企業白書(2015年版), pp.566-623, 2015.
- [2] Ayyagari, M., Beck, T. and Demircug-Kunt, A., “Small and Medium Enterprises across the Globe,” *Small Business Economics*, Vol. 29, pp. 415-434, 2007.
- [3] Giovanna,C., Alfredo, D. M. and Lucio,C. “Corporate Social Responsibility: A Survey among SMEs in Bergamo,” *Procedia Social and Behavioral Sciences*, Vol. 62, pp. 325-341, 2012.
- [4] 中小企業庁編, 「変容する企業間取引構造」, 中小企業白書(2007年版), 全体概要, pp.23-26, 2015.
- [5] Jamali, M. A., Voghouei, H. and Mohd Nor, N. G., “Information technology and survival of SMEs: an empirical study on Malaysian manufacturing sector,” *Inf. Technol. Manag.*, Vol. 16, No. 2, pp. 79–95, 2015.
- [6] 奥山 雅之, 「ものづくり中小企業におけるイノベーションと人材育成 : 研究開発支援型企業を中心として(イノベーション,プロフェッショナルリズムと経営教育) 」, 日本マネジメント学会, 日本経営教育学会全国研究大会研究報告集 (55), pp.37-40, 2007.
- [7] 黒田 充, 松村健児, 生産スケジューリング, 朝倉書店, pp.10-13, 2002.
- [8] Li Jun-Qing, Pan Quan-Ke, Xie Sheng-Xian “Hybrid Variable Neighborhood Search Algorithm for Solving Multi-Objective Flexible Job Shop Problems,” *Computer Science and Information Systems*, Vol.7, No. 4, pp. 907-930, 2010.
- [9] Hendry, L.C., “Applying world class manufacturing to make-to-order companies: problems and solutions,” *Int. J. Operation Operations & Production Management*, Vol. 18, No. 11, pp.1086-1101, 1998.
- [10] Veen-Dirks, P., “Management control and the production environment: A review,” *Int. J. Prod. Econ.*, 93–94, pp. 263-272, 2005.
- [11] Simao, J.M., Stadzisz, P.C. and Morel, G., “Manufacturing execution systems for customized production,” *J. Materials Processing Tech.*, Vol. 179, No. 1–3, pp.268-275, 2006.

- [12] Proth, J. M., "Scheduling: New trends in industrial environment," *Annual Reviews in Control*, Vol. 31, No.1, pp.157-166, 2007.
- [13] Wei, J. and Ma, Y.-S., "Design of a feature-based order acceptance and scheduling model in an ERP system," *Computers in Industry*, Vol. 65, pp.64-78, 2014.
- [14] 今泉淳,「サプライチェーンマネジメントにおける生産スケジューリングの役割」, 経営論集 第 62 号, pp.45-55, 2004.
- [15] 柳浦睦憲, 茨木俊秀, 組合せ最適化—メタ戦略を中心にして—, 朝倉書店, pp.1-34, 2001.
- [16] 佐藤忠信, 一井康二,「遺伝的アルゴリズムを用いたライフライン網の最適復旧過程に関する研究」, 土木学会論文集 No. 537/1-35, pp.245-256, 1996.
- [17] 井上武士, 古橋武士他,「バクテリア進化的計算を用いた対話型看護婦勤務表作成支援システムに関する一考察」, 電学論 C, 122 巻 10 号, pp.1803-1811, 2002.
- [18] 山田忠史, 則武通彦, 谷口栄一, 多賀慎,「物流ターミナルの最適配置計画への多目的計画法の適用」, 土木学会論文集, No. 632/IV-45, pp.41-50, 1999.
- [19] 青山功, 佐藤裕幸, 中島克人,「介護サービススケジューリング問題への遺伝的アルゴリズムおよびタブーサーチの適用とその比較」, *Journal of the Operations Research Society of Japan*, Vol.44, No.31,pp.261-280, 2001.
- [20] 久保幹夫, J.P.ペドソン, メタヒューリスティックの数理, 共立出版, pp.17-67, 2009
- [21] 藤本英雄,「生産スケジューリングの動向」, 計測と制御, Vol.33, No.7, pp.533-540, 1994.
- [22] 村松健児,「ロットのサイズと順序との同時最適化: 段取り時間のある多品目単一機械ロットサイズスケジューリング」, 日本経営工学会論文誌 Vol.52 No.5, pp.313-321, 2001.
- [23] 新井裕明, 森戸晋, 今泉 淳,「同一並列機械ロットスケジューリング問題への列生成法の適用」, 日本経営工学会論文誌, Vol. 55, No. 2, pp. 69-76, 2004.
- [24] 宮本裕一郎,「はじめての列生成法」, オペレーション・リサーチ, Vol.57, No.4, pp.198-204, 2012.
- [25] 大野 勝久, Excel による生産管理-需要予測—在庫管理から JIT まで—, 朝倉書店, pp.101-102, 2011.

- [26] 今泉淳, 森戸晋, 「ジョブの分岐と重複生産を許す 2 工程並列機械フローショップ / スケジューリング問題」, 日本経営工学会論文誌, Vol.50, No.5, pp.308-315, 1999.
- [27] 岩瀬弘和, 「フローショップ・スケジューリング問題における発見的探索アルゴリズムの比較」, 東京成徳大学研究紀要 -人文学部・応用心理学部-第 20 号, pp.79-94, 2013.
- [28] 樋野励, 「バッファを考慮にいたしたジョブショップ・スケジューリング(第 3 報, 混合整数計画による最適化)」, 日本機械学会論文集(C 編)74 巻, 742 号, 論文 No.07-0847, pp.1669-1675, 2008.
- [29] 飯間等, 三宮信夫, 「ジョブショップ・スケジューリング問題に対する局所探索法における新しい近傍設定法の提案」, 計測自動制御学会論文集, Vol.39, No.2, pp.185-191, 2003.
- [30] 村山昇, 川田誠一, 「複積載 AGV による搬送を考慮したジョブショップ・スケジューリング」, 電子情報通信学会技術研究報告. CST2005 -4, pp.17-21, 2005.
- [31] 山田武士, 中野良平, 「遺伝的局所探索法によるジョブショップ・スケジューリング問題の解法」, 情報処理学会論文誌, Vol.38 No.6, pp.1126-1138, 1997.
- [32] 輪湖純也, 安藤景子, 三木光範, 廣安知之, 「遺伝的アルゴリズムを用いた適応的温度スケジュールを持つ並列 SA」, 情報処理学会論文誌, Vol.47, No.SIG1(TOM14), Feb. 2006.
- [33] Sawik, Tadeusz, "Selection of a dynamic supply portfolio in make-to-order environment with risks," *Com. & Oper. Res.*, Vol.38, No.4, pp.782-796, 2011.
- [34] Chun Wang, Zhiguo Wang, Ghenniwa, H.H., Weiming Shen, "Due-Date Management Through Iterative Bidding," *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part A-Systems and Humans*, Vol.41, No.6, pp.1182-1198, 2011.
- [35] Kaminsky, Philip, Kaya, Onur, "Scheduling and due-date quotation in a make-to-order supply chain," *Naval Research Logistics*, Vol.55, No.5, pp.444-458, 2008.
- [36] 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.*, Vol. 50, No.18, pp.5048-5062, 2012.
- [37] Linet Ozdamar et al., "Capacity driven due date settings in make-to-order production system," *Int. J. Prod. Econ.*, Vol. 49 , No.1, pp.29-44, 1997.

- [38] 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*, Vol.30, No.2, pp.63-69, 2011.
- [39] Nenes, G., Castagliola, P. Celano, G. and Panagiotidou, S. "The variable sampling interval control chart for finite-horizon processes," *IIE Transactions*, Vol. 46, No.10, pp. 1050-1065, 2014.
- [40] Kacem, I., Hammadi, S. and Borne, P., "Approach by localization and multi-objective evolutionary optimization for flexible job-shop scheduling problems," *IEEE Trans. Syst. Man and Cybernetics – Part C: Application and reviews*, Vol. 32, No. 1, pp. 1-13, 2002.
- [41] Kacem, I., Hammadi, S. and Borne, P., "Pareto-optimality approach for flexible job-shop scheduling problems: hybridization of evolutionary algorithms and fuzzy logic," *Math. and Comp. in Simul.* Vol.60, No.3–5, pp.245-276, 2002.
- [42] Xia, W. and Wu, Z., "An effective hybrid optimization approach for multi-objective flexible job-shop scheduling problem," *Computer & Industrial Engineering*, Vol. 48, No.2, pp. 409-425, 2005.
- [43] Zhang, G., Shao, X., Li, P. and Gao, L., "An effective hybrid particle swarm optimization algorithm for multi-objective flexible job-shop scheduling problem," *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 56, No.4, pp. 1309–1318, 2009.
- [44] Xing, L.N., Chen, Y.W., and Yang, K.W. "Multi-objective flexible job shop schedule: Design and evaluation by simulation modeling," *Applied Soft Computing*, Vol. 9, No.1, pp.362–376, 2009.
- [45] Li, J.Q., Pan, Q.K. and Liang, Y.C., "An effective hybrid tabu search algorithm for multi-objective flexible job shop scheduling problems," *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 59, No.4, pp. 647–662, 2010.
- [46] Moslehi, G. and Mahnam, M., "A Pareto approach to multi-objective flexible job-shop scheduling problem using particle swarm optimization and local search," *Int. J. of Production Economics*, Vol.129, No., pp. 14-22, 2011.
- [47] Li, J.Q., Pan, Q.K. and Gao, K.G., "Pareto-based discrete artificial bee colony algorithm for multi-objective flexible job shop scheduling problems," *Int. J. Adv. Manuf.*, Vol. 55, No. 9, pp.1159–1169, 2011.

- [48] Shahasaveri-Pour, N. and Ghasemishabankareh, B., “A novel hybrid meta-heuristic algorithm for solving multi objective flexible job shop scheduling,” *J. Manuf. Systems*, Vol. 32, No. 4, pp. 771–780, 2013.
- [49] Li, J.Q., Pan, Q.K., Fatih, M. and Tasgetiren, “A discrete artificial bee colony algorithm for the multi-objective flexible job-shop scheduling problem with maintenance activities,” *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 38, No.3, pp.1111-1132, 2014.
- [50] Wu, Z. and Weng, M.X., “Multiagent scheduling method with earliness and tardiness objectives in flexible job shops,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part B: Cybernetics*, Vol. 35, No. 2, pp. 293-301, 2005.
- [51] Turkyilmaz, A. and Bulkan S., “A hybrid algorithm for total tardiness minimisation in flexible job shop: genetic algorithm with parallel VNS execution,” *Int. J. Production Research*, Vol. 53, No. 6, pp. 1832-1848, 2015.
- [52] Defersha, F. M., and Chen, M., “A parallel genetic algorithm for a flexible job-shop scheduling problem with sequence dependent setups,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 49, No.1, pp.263-279, 2010.
- [53] Huang, R. H., Yang, C. L. and Cheng, W. C., “Flexible job shop scheduling with due window—a two-pheromone ant colony approach,” *Int. J. Production Economics*, Vol. 141, No.2, pp. 685-697, 2013.
- [54] Luh, P. B., Zhou, X. and Tomastik, R. N., “An effective method to reduce inventory in job shop,” *IEEE transaction on robotics and automation*, Vol. 16, No. 4, pp. 420-424, 2000.
- [55] Brandimarte, P. “Routing and scheduling in a flexible job shop by tabu search,” *Annals of Operation. Res.*, Vol. 41, No.3, pp. 157-183, 1993.
- [56] Genquan, R., Rui, H., Yingbo, L. et al., “Applying genetic algorithm to optimise personal worklist management in workflow systems,” *Int. J. Production Research*, Vol.51, No.17, pp.5158-5179, 2013.
- [57] 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.
- [58] 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, Vol.35, No.11, pp1394-1399, 1999.
- [59] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwai, and T. Meyarivan, ” A fast and elitist multiobjective genetic

- algorithm: NSGA – II ,” *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, Vol.6, No.2, pp.182-197, 2002.
- [60] 原裕一, 金川明弘, 山内 仁, 高橋浩光, 「異文化型島モデルを組み込んだ GP における効率改善」, 電子情報通信学会技術研究報告. NLP, 非線形問題, 106(344), pp11-16, 2006.
- [61] 廣安知之, 三木光範, 上浦二郎, 「分散遺伝的アルゴリズムにおけるパラメータの検討」, 第 8 回 MPS シンポジウム進化的計算シンポジウム 2001 講演論文集, pp.147-154, 2001.
- [62] 中畷道靖, 國部克彦, マテリアル・フローコスト会計, 日本経済新聞出版社, 2008.
- [63] 日本能率協会コンサルティング/編, 「中小企業向けの簡易的な MFCA 計算の提案 – 在庫管理ベースの MFCA 手法」, 平成 19 年度環境経営・ビジネス促進調査事業, 東北地域におけるマテリアル・フローコスト会計の導入指導の普及と金融支援のあり方に関する調査業務報告書, pp.45-82, 2008.
- [64] 野口 雄史, 吉川 徹, 「年齢別の施設利用頻度変化に着目した施設・住居最適配置の時系列変化分析」, 日本建築学会計画系論文集, Vol. 79, No. 697, pp.737-744, 2014.
- [65] 落合 純一, 宮地 将大, 野田 五十樹, 「複数タイプの車輛が混在するデマンド型交通サービスの利便性評価」, *The 29th Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence*, IF5-OS-09b-6, pp.1-3, 2015.
- [66] 吉田 郁政, 蔵谷 湧介, 大竹 雄, 本城 勇介, 「インフラ構造物の劣化予測のための多目的曲線群の同定法」, 土木学会論文集 A2 (応用力学) Vol.70, No.2, pp.I_33-I_42, 2014.
- [67] 長尾 征洋, 青野 隆仁, 戸川 卓哉, 加藤 博和, 佐野 充, 「QOL 指標と維持費用に基づく撤退・集結市街地の遺伝的アルゴリズムを用いた選定方法」, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 68, No. 5, pp. I_339-I_348, 2012.
- [68] 岡田 泰明, 吉田 智一, 長尾 智晴, 「進化的画像処理を用いた航空写真からの圃場図自動作成手法」, 農業情報研究, Vol. 24, No. 2, pp.56-73, 2015.
- [69] 山田 敬三, 星 遼平, 高木 正則, 佐々木 淳, 「遺伝的アルゴリズムを用いた短角牛の種牛割り当て支援手法の設計」, 情報科学技術フォーラム講演論文 第 4 分冊, pp.575-576, 2015.