

能力調整を考慮した
ジョブショップスケジューリング
に関する研究

(A Study on Job Shop Scheduling with Capacity Adjustment)

学位取得年月日

2015年3月

與田 光伸

学位論文概要

題目：能力調整を考慮したジョブショップスケジューリングに関する研究

A Study on Job Shop Scheduling with Capacity Adjustment

氏名 與田 光伸

近年、顧客の要求の多様化に加えて納期遵守の要求が非常に強く、納期遵守を達成するための方策として残業による能力調整が実施されている。残業は生産環境の変動に柔軟に対応できる一方、経費の増大や労働環境の悪化を引き起こすため、できる限り抑制することが求められる。これまで納期遵守を目的としたスケジューリングの研究は数多くあるが、残業による能力調整を考慮した研究は少なく、さらに、納期遵守を前提とし残業時間を最小化することを目的とした研究はほとんど見られない。

そこで本研究では、顧客の多様な要求に対応可能であるジョブショップ型の生産システムにおいて、納期遵守と残業時間最小化を目的としたスケジューリング問題を扱い、これに対する効率的なスケジュール探索手法を提案する。このスケジューリング問題では、ジョブの処理順序に加えて各機械でどれだけ残業を行うかを決定する必要がある。ほとんどのジョブショップスケジューリング問題におけるジョブの処理順序の決定は、その組合せ数の莫大さから NP 困難なクラスに分類され、さらに残業時間の追加を行う場合、納期遵守と残業時間最小化のトレードオフ関係によってより複雑となる。本スケジューリング問題では、十分に大きな残業時間を許可した状態で納期遵守を達成し、これを維持しながら残業時間最小化を行うが、残業時間を最小化する過程でこのトレードオフ関係により生じる納期遅れの再発を如何に防止できるかが重要なポイントである。本研究では、スケジュール探索に遺伝的アルゴリズム (GA) を適用し、さらに、ジョブの処理順序と残業時間の決定の双方に対して納期遅れジョブの再発を強力に防止できる問題固有の知識である優先規則を組み込むことで、高性能なスケジューリングを実現できることを示す。本論文は6章から構成され、その要点は以下の通りである。

第1章では、まず本研究の目的を述べる。さらに、さまざまなジョブショップスケジューリング法を踏まえた本研究におけるスケジューリング法の位置づけの説明、および残業を考慮した従来の研究の紹介を行い、本研究の意義を明確にする。

第2章では、本スケジューリング問題の定式化と GA を用いた基本的なスケジュール探索手順について述べる。

第3章では、GA と問題固有の知識である優先規則の融合による探索手法において、ジョブの処理順序の決定に着目し、探索の際の納期遅れジョブの再発を強力に防止できるジョブ選択のための優先規則を提案する。提案する優先規則は、ジョブの納期への切迫度によってジョブ選択優先度が高くなるが、そのときの優先度の上昇率を調整できる機能を持ち、これによって高性能なスケジューリングを行うことができる。さらに、納期までの処理待ち機会数を考慮しより正確に納期までの切迫度を評価することで納期遅れの再発を防止する機能を向上させた優先規則を提案し、数値実験によりその有効性を検証する。

第4章では、残業時間の決定に対しても第3章でジョブの処理順序の決定方法に適用した優先規則を適用することで、ジョブの納期への切迫度から判断される残業の必要性に応じて残業時間の決定を行う方法を提案する。これにより、ジョブの処理順序決定と残業時間決定の双方に対して納期遅れジョブの再発を強力に防止できる優先規則の機能が反映され、両者の整合性がとれた探索が可能となることで、より高性能なスケジュールが得られることを数値実験により示す。

第5章では、これまで提案してきたスケジュール探索手法の最適性の評価を実施する。この最適性の評価はラグランジュ緩和法により探索された下界値と比較することで行われる。規模や時間分解能の異なる問題を用いた数値実験により、最適性を評価した結果を示す。

第6章で、各章で得られた結論を総括する。

目次

第1章 緒論	1
1.1 本研究の目的	1
1.2 スケジューリング法の分類と提案手法の位置づけ	3
1.3 能力調整を扱った関連文献	8
1.4 本論文の構成	12
第2章 納期遵守と残業時間最小化を目的としたスケジューリング問題と 遺伝的アルゴリズムの適用	13
2.1 緒言	13
2.2 ジョブショップスケジューリング問題	13
2.2.1 生産環境	13
2.2.2 問題の定式化	14
2.3 スケジュールの基本的作成手順	15
2.4 遺伝的アルゴリズムを用いた探索法	16
2.4.1 個体の表現と適応度の評価	16
2.4.2 遺伝的アルゴリズムによる探索手順	18
2.5 結言	21
第3章 遺伝的アルゴリズムと優先規則と融合によるジョブの処理順序決定	22
3.1 緒言	22
3.2 遺伝的アルゴリズムと優先規則の融合による効率的探索法	23
3.3 納期までの切迫度に着目した優先規則の適用	23
3.3.1 ATC ルールの適用	24
3.3.2 $(CR^\beta+SPT)$ ルールの提案	25
3.3.3 $((SL/RPN)^\beta+SPT)$ ルールの提案	26
3.3.4 納期までの切迫度に着目した優先規則を適用する狙い	27
3.4 数値実験	28
3.4.1 実験条件	28

3.4.2	実験結果	29
3.4.2.1	各優先規則での性能評価	29
3.4.2.1.(a)	納期設定 1 の問題に対する ATC ルールでの評価	29
3.4.2.1.(b)	納期設定 2 の問題に対する ATC ルールでの評価	32
3.4.2.1.(c)	納期設定 1 の問題に対する $(CR^\beta+SPT)$ ルールでの評価	34
3.4.2.1.(d)	納期設定 2 の問題に対する $(CR^\beta+SPT)$ ルールでの評価	37
3.4.2.1.(e)	納期設定 1 の問題に対する $((SL/RPN)^\beta+SPT)$ ルールでの評価	39
3.4.2.1.(f)	納期設定 2 の問題に対する $((SL/RPN)^\beta+SPT)$ ルールでの評価	41
3.4.2.2	優先規則間の性能差評価	43
3.4.2.2.(a)	納期設定 1 の問題に対する性能差評価	43
3.4.2.2.(b)	納期設定 2 の問題に対する性能差評価	45
3.5	結 言	48
第 4 章	遺伝的アルゴリズムと優先規則を融合した残業導入決定	50
4.1	緒言	50
4.2	優先規則を用いた残業決定法	50
4.3	数値実験	53
4.3.1	実験条件	53
4.3.2	実験結果	53
4.3.2.1	$\beta=1$ における実験結果	53
4.3.2.2	β を調整したときの実験結果	56
4.4	結 言	59
第 5 章	ラグランジュ緩和法を用いた最適性の評価	60
5.1	緒 言	60
5.2	ラグランジュ緩和法を用いた総残業時間の評価	61
5.3	ラグランジュ緩和法を用いたスケジュール探索	62
5.3.1	問題の定式化	62
5.3.2	動的計画法によるラグランジュ緩和問題の最適化	64
5.3.3	実行可能スケジュールの導出	66

5.3.4	劣勾配法によるラグランジュ乗数の更新	67
5.3.5	ラグランジュ緩和法による探索手順	67
5.4	数値実験	70
5.4.1	実験条件	70
5.4.2	実験結果	71
5.4.2.1	小規模（粗）での評価結果	72
5.4.2.2	小規模（細）での評価結果	75
5.4.2.3	中規模（粗）での評価結果	77
5.4.2.4	中規模（細）での評価結果	79
5.4.2.5	大規模（粗）での評価結果	81
5.4.2.6	大規模（細）での評価結果	83
5.5	結 言	85
 第 6 章 結 論		 86
 謝辞		 89
参考文献		90
関連研究発表論文一覧		97

第 1 章

諸 論

1.1 本研究の目的

近年、顧客の要求の多様化に加え、納期遵守、すなわち顧客が必要とするものを必要な時期までに提供することがますます重要となっている。この納期遵守の達成は受注生産企業においては非常に重要な制約であり、仮に納期遵守を達成できない場合、短期的には顧客の消失をもたらす、長期的には企業としての信頼性と評判の悪化をもたらす (Mathur et al., 2013)。このため、納期遵守を達成するための方策として外注や残業による生産の能力調整が現実的に実施されている。なかでも残業は生産環境の変動に柔軟に対応できるため頻繁に実施されている。当然ながら、残業を行うほど経費の増大と労働環境の悪化を引き起こすため、できるだけ抑制することが安定かつ持続的な企業経営を行う上で重要となる。しかしながら、残業による能力調整はその高い柔軟性のため、場当たりの、もしくは経験則による実施がなされることが多く、納期遵守を達成するために必要な残業時間の決定が行われているとは言い難い。また、これまで納期遵守を目的とした研究は数多くあるが、残業による能力調整を考慮した研究は少なく、さらに、納期遵守を前提とし残業時間を最小化することを目的とした研究はほとんど見られない。そこで本研究では、残業による能力調整を考慮したスケジューリング問題を対象とし、できるだけ小さな残業時間で納期遵守を達成できるスケジューリング手法を提案する。

本研究で対象とする生産システムは、ジョブショップ型生産システムとする。これは多品種少量生産／変種変量生産を行うため典型的な生産形態であり、多様な顧客の要求に対応できる生産システムである。このジョブショップ型生産システムでのショップフロアにおけるジョブ（部品、半製品、製品をジョブと呼ぶ）の流れは複雑であり、ショップフロアを構成する機械の台数の増加、同時に処理されるジョブの増加、ジョブが完成するに至る工程数の増加等、生産規模が拡大するほどますます複雑なものとなる。なお、ジョブショップスケジューリング問題の基本的な制約は下記のように記述される。

- ・ M 台の機械で構成されるショップにおいて N 個のジョブが処理される。
- ・ 各ジョブの完成には一般に複数の工程処理が必要で、それら工程の処理順序や処理

機械，処理時間は予め与えられている．ただし，これらはジョブ毎に異なりうる．

- ・二つ以上のジョブを同時に一つの機械で処理することはできない．
- ・一つのジョブは同時に二つ以上の機械で処理することができない．
- ・一度処理開始されたジョブの工程はその処理が終了するまで中断することはできない．

これらの条件のもと，全てのジョブの工程の処理開始時刻を定め，予め設定された目的関数を最適化することがスケジューリングの目的となる．このジョブジョブスケジューリング問題は，さまざまな研究者や実務者によって従来から膨大な論文が発表されてきた（Ramasesh et al., 1990）（Blazewicz et al., 1996）（Vaessens et al., 1996）が，目的関数に能力調整を考慮したものは非常に少ない．

このジョブジョブスケジューリング問題は，その組み合わせの複雑さから，スケジューリング問題の中でも最も難しい問題の一つとされる．本研究で考慮する納期を基準としたスケジューリングにおいては，機械台数が1台の場合においてですら NP 困難であることが示されていて（Du and Leung, 1990），本研究で扱うジョブジョブスケジューリング問題もこのクラスに属する．このジョブジョブスケジューリングの目的関数として納期遵守と残業時間最小化を考える場合，NP 困難であることに加えて，納期遵守と残業時間最小化のトレードオフ関係によりさらに複雑な問題となり，これを解くことは非常に困難であることが想定される．IT 環境の整備により確度の高い生産情報をリアルタイムに扱うことが可能になりつつある中，スケジューリング問題の大規模化は避けられず，スケジュールの組み合わせの爆発的な増大に対して限られた計算時間の中で二つの目的を考慮したできるだけ良い解，つまり，できるだけ短い残業時間で納期遵守を達成できる解を高速に求めることは非常に重要である．

本研究では，現実規模のスケジューリング問題に適用可能な方法として，遺伝的アルゴリズム（GA）（Goldberg, 1989）を適用する．しかし，汎用的な GA のアルゴリズムは個別の問題に対して性能が良いとは言えない．一般に問題固有の知識を探索過程に組み込むことで性能を向上させることができる．実用規模の問題への適用を想定する本研究では，有効な知識を組み込むことによる効果は大きいと予想され，その知識の開発が重要となる．これに関して，ジョブジョブスケジューリングにおいてはさまざまな優先規則が開発されていて，これらを GA に組み込むことで探索性能の大幅な向上が期待できる．本研究では，ジョブの処理順序と残業時間の決定に対して，問題固有の知識である優先規則を GA によるスケジュール探索に組み込むことで，高性能なスケジューリングを実現する方法を提案する．

1.2 スケジューリング手法の分類と提案手法の位置づけ

ジョブショップスケジューリング問題を解くための解法はさまざまなものが提案されてきた。代表的なスケジューリング手法は、厳密解法、メタヒューリスティック解法、優先規則を用いたシミュレーション法に分類される。本スケジューリング問題へのスケジューリング手法を提案する前に、これら代表的なスケジューリング法を紹介し、本スケジューリング問題への適用の可能性、本研究におけるスケジューリング法の位置づけについて述べる。

まず厳密に最適解を求める方法として、数理計画法の代表例の一つである分枝限定法について述べる。分枝限定法は「1つのスケジューリング問題を複数の子問題、それぞれの子問題、さらにそれらの子問題などから構成されたトリー（分枝構造のグラフ）によって表し、目的値に関する下界値（例えば、納期遅れの総和を取り上げる場合、いかなる実行可能スケジュールの納期遅れの総和もそれより小さくなりえないことを示す値）を親問題に最も近い子問題から算定しては、下界値が最小の子問題を分割してさらに子問題を作り、最適スケジュールを探索する手順である」（黒田ら、1989）と説明される。分枝限定法のジョブショップスケジューリング問題への適用で代表的なものに Fisher and Thompson（1963）によって提唱されたベンチマーク問題のひとつである 10 機械 10 ジョブの総生産時間最小化を目的とするスケジューリング問題への適用が挙げられる。このベンチマーク問題は 20 年以上も未解決であったが、Calier and Pinson（1989）が分枝限定法を用いて最適解を求めた。その後も分枝限定法の手法改良（Baker et al., 1994）（Caseau and Ladurth., 1995）（Perregaard and Clausen., 1995）により、短い時間での最適解の生成が行われるようになっている。また、分枝限定法は 1 機械での最大納期ずれコストの最小化問題への適用（Hoogeveen, 1996）（Tavakkoli-Moghaddam et al., 2006）、1 機械での納期ずれ時間の総和の最小化問題への適用（Ronconi and Kawamura, 2010）、各ジョブが 2 台以上の機械で順次処理されるときを想定した場合への適用（Brucker et al., 1997）（Gueret et al., 2000）なども行われてきた。

分枝限定法の改良が進められたことにより、スケジュール問題の規模もしくはタイプによってはこれにより厳密解を求める方が後述するさまざまな方法よりも効率的である場合もある（柳浦ら、2006）。しかし、NP 困難に属する大規模な問題の最適解を求める場合、やはり多大な計算コストが必要となり実用的とはいえない。分枝限定法では最適解を求めるまではいかなくとも、探索を途中で意図的に終了させることで、それまでの最良解や下界値を利用することも考えられるが、これでも計算コストの増大の問題が解

決されているとは言い難い。下界値を得ることに焦点を当てると、後述するラグランジュ緩和法のほうが計算コストを低減でき手軽に利用できる（柳浦ら，2006）。これら現状を考慮すると本スケジューリング問題に対して分枝限定法を用いることは困難であると考えられる。

また近年，スケジュール問題を整数計画問題として定式化し，汎用ソルバーを用いて解くことも行われている。汎用ソルバーの改良により 10 万以上に変数および制約式をもつ整数計画問題に対しても実用上の支障がない範囲で最適解を生成できるようになってきている。しかし，10 万変数，10 万制約式で簡単に解ける整数計画問題がある一方，1000 変数未満の小さな問題でも解けない問題もあり，変数の個数や制約式の本数だけでは計算時間を安易に判断できず，問題に依存してしまう（宮代，2012）難点がある。ジョブショップスケジューリング問題への適用については，樋野（2008）により混合整数計画法をバッファを考慮した総生産時間と重み付き待ち時間の和の最小化問題へ適用した事例があげられる。分枝限定法の紹介の際に取り上げた Fisher and Thompson のベンチマーク問題にバッファを考慮した上で汎用ソルバーを用いて解いたところ，6 機械 6 ジョブのスケジューリング問題では 1 秒かからずに最適解を導き出すことができた反面，10 機械 10 ジョブのスケジューリング問題に対しては 24 時間以上の計算時間でも最適解が得られないことが報告されている。現状では，本研究で想定する実用規模のジョブショップスケジューリング問題を汎用ソルバーを用いて解くことは困難な状況にある。

これまで厳密解法である数理計画法に関して紹介してきたが，次に，ある程度の規模までの問題に対して近似解を得ることができるとされるラグランジュ緩和法について述べる。ラグランジュ緩和法では数理計画問題の制約条件の一部を緩和し，目的関数に取り込むことでラグランジュ緩和問題を作成する。このラグランジュ緩和問題をジョブや機械等といった単位に分解し，その子問題を個別に解くことにより大規模な組み合わせ問題を解く方法である。この制約問題の一部を緩和し得られた解は実現不可能な解であるが元の目的関数の下界値を与える。さらに，この下界値を元に何らかのヒューリスティックな方法で実現可能解を求めると，それが上界値となり，下界値と上界値の差である双対ギャップにより解の最適性の保証を可能にしている。

ラグランジュ緩和法の生産スケジューリング問題への適用例は多数報告されている。それらについては今泉（2001）のサーベイ論文および今泉ら（2003）の研究論文の一部に詳しくまとめられている。生産スケジューリング問題に対するラグランジュ緩和法の適用については Luh et al.（1990）の研究報告により始まる。この研究報告では，同一の機械が並列に配置された問題に対してジョブの総納期遅れ時間を最小化することを目的

としている。ショップに配置される機械数以上のジョブを同時に加工できないという機械能力の制約を緩和し、問題をジョブ毎に分解することでスケジューリング問題を解いている。ジョブショップスケジューリング問題への適用に注目すると、Hoitomt et al. (1993) と Luh et al. (1993) により初めて適用された。機械能力の制約に加えてジョブの工程間の先行関係、つまり、次の工程の処理はそのより前の工程の処理が終了されなければ実施できないという制約を緩和し、重み付け総納期遅れ時間を最小化することを目的としている。これらの報告では、数値実験による有効性の確認の際に実際の生産ショップを想定し、前者は 3 週間以上の生産期間において機械台数約 30 台、ジョブ数約 130 個の問題を対象にし、後者は約 8 ヶ月の生産期間において機械台数 44 台、ジョブ数 112 個の大規模の問題を対象に実施している。その後、Chen et al. (1998) によりジョブの工程間の先行関係は緩和せずに機械能力の制約のみ緩和する手法を報告している。この報告では総納期遅れコストを最小化することを目的とし、最大で機械台数 16 台、ジョブ数 82 個の問題を解いている。その他、Luh et al. (1998) がジョブ群依存の段取りや有限バッファ等を考慮した場合を、Sural et al. (2009) がロットサイズと段取り時間を考慮した場合の論文を報告している。

ラグランジュ緩和法は、比較的大規模のスケジューリング問題への適用が実用上可能であるとともに、その最適性を評価できる特徴がある。このことから本研究では下記で述べる本研究の提案手法の最適性評価に用いる。また、ラグランジュ緩和法によって求められたスケジューリングとの性能比較も行う。本研究では納期遵守および残業による能力調整も考慮するため、Chen et al. (1998) の機械能力の制約のみ緩和する手法に対して納期遵守および残業による能力調整を適用したラグランジュ緩和手法を用いる。

これまで数理計画法とラグランジュ緩和法について述べてきたが、次にメタヒューリスティクス手法について述べる。メタヒューリスティクスの代表的なものとして GA、タブー・リサーチ、シミュレーテッド・アニーリングなどがあげられる。数理計画法が網羅的な解の探索するのに対して、これらメタヒューリスティクスは非網羅的あるいは確率的な探索を行うため、実用上可能な計算時間の中で良好な解を求めることができる。一方、数学的な枠組みがないため探索された解の最適性の保証がなされない欠点がある(黒田, 2002)。また、メタヒューリスティクス自体は、ある枠組みを基本とする汎用的アルゴリズムであり、スケジューリング問題に限らずさまざまな最適化問題に柔軟に適用できるという利点がある。逆にいえば、個々のスケジューリング問題に対して特化して効率よく解を求める機能がメタヒューリスティクスに内在しているわけではない。

本研究ではメタヒューリスティクスの中で GA (Goldberg, 1989) を採用する。GA は

生物の進化過程を模倣した確率的多点探索アルゴリズムである。GA では、解を個体（染色体）で表現する（コーディング）。個体は一般には文字列や複数の数値で表現される。これら個々のデータを遺伝子と呼ぶ。複数用意された個体の遺伝子に対して、交叉・突然変異などの遺伝的操作を模倣した処理を行うことで新たな個体が生成される。これら個体は解への変換（デコーディング）することによってその性能（適応度）が評価される。交差・突然変異を繰り返しながら世代交代を模倣した探索を行うことで適応度の高い、すなわち評価値の高い解を求めていくことになる。GA において効率的に高性能な解を求めるためには、コーディング、デコーディング、適用度の評価、遺伝子操作の設計が重要となる。

本研究ではメタヒューリスティクスである GA を用いて本スケジューリング問題を解くが、GA を用いる理由としては第一に、上記で述べたようにメタヒューリスティクスがさまざまな問題に適用できる柔軟性があり、納期遵守と残業による能力調整を考慮する問題へも容易に適用可能であるからである。第二に大規模なスケジューリング問題に対しても実用上可能な計算時間の中で十分良好とされる解を求めることができると期待されるためである。

ジョブショップスケジューリング問題への GA の適用についてはこれまで数多く報告されている。これについては Aytug et al. (2002) によってサーベイされており、ジョブショップスケジューリングに適用された事例に限定すると以下の報告が挙げられる。総生産時最小化問題に対して Lee and Dagli (1997), Al-Hakim (2001), Runarsson and Jonsson (1999) が報告し、総納期遅れ時間最小化問題に対しては Norman and Bean (1999), Lee et al. (1997) が報告されている。また、総生産時間および納期遅れ時間最小化問題に対して Kumar and Srinivasan (1996), 納期ずれ時間最小化問題に対して Zhiming and Chunwei (2000) が報告されている。

本研究では、江口ら (2005) が提案している GA と優先規則を融合したスケジューリング探索手法を用いる。この方法の特徴は、GA という汎用的メタヒューリスティクスによる探索にスケジューリング固有の知識である優先規則を組み込むことで、対象とするスケジューリング問題に対する高性能な探索を実現できることである。前述したように、一般にメタヒューリスティクスは対象とする問題固有の特徴を反映した探索をする機能はない。そのためそれ自体では必ずしも探索性能は良くない。これに対象とする問題に有効な知識を組み込めば大きな性能向上が期待できる。なお、本方法における GA のコーディング法としては、Bean (1994) のランダムキーコーディング手法が採用される。ランダムキーとは、ジョブの処理順序を決める実数で表現される遺伝子であり、ここに

優先規則によるジョブ選択優先度を組み込むことが容易にできるからである。

ここで用いる優先規則とは、一般にショップ情報やジョブ情報を用いて単純に定式化されたもので、これを用いたシミュレーションでは、各機械で発生している待ちジョブを優先規則を用いて評価し、最も高い評価値を持つジョブを次に処理するジョブとして選択する。これを繰り返すことでスケジュールを作成することができる。これまでの優先規則の研究について紹介すると、優先規則の開発はスケジューリングの研究と同時期に始まり (Cnoway et al. , 1967) (Day and Hottenstein, 1970) , 古典的な優先規則として、先入先出規則 (FIFO) , 最小処理時間規則 (SPT) , 納期までの時間が最も短いジョブを選ぶ規則 (SLACK) 等がある。Panwalker and Iskander (1977) は当時報告されていた 100 個以上のルールを紹介している。Chang et al. (1996) は、ジョブショップスケジューリング問題に対して有効な優先規則のランク付けを実施している。本研究で扱う納期を基準とするスケジューリングに対しては、ATC ルール (Vepsalainen and Morton, 1987) や (CR+SPT) ルール (Anderson and Nyirenda, 1990) などの高性能なルールが提案されている。GA と優先規則を融合によるスケジュール探索手法では、GA と融合する優先規則に対象とするスケジューリング問題の特徴、目的に適したものを選択・開発することが非常に重要となる。ATC ルールや (CR+SPT) ルールは、本研究で利用する優先規則の基本となるものであり、これらを改良することでより有効な優先規則を開発する。

以上、さまざまなスケジューリング手法を紹介しつつ、提案するスケジューリング法に言及した。本研究では、残業による能力調整を考慮したジョブショップスケジューリング問題を扱うが、具体的には、できる限り小さな残業時間で納期遵守を達成することを目的とする。GA はこの目的にも柔軟に適用でき、現実規模の問題にも適用できると期待される。さらに本研究では、GA に優先規則を組み込むことで高性能なスケジューリングを実現することを狙う。そのために、本研究で扱う問題に適した優先規則を開発することが重要となる。提案手法では、できる限り小さな残業時間で納期遵守を達成するため、十分大きな残業時間を与えた状況下で納期遵守を達成後、納期遵守を維持したまま残業時間の最小化を行うというスケジュール探索手法を用いる。その際、納期遅れ時間最小化と残業時間最小化のトレードオフ関係により、残業時間の最小化を行うほど納期遵守を維持することが困難となる。このことから、残業時間を最小化する過程で納期遵守を如何に維持できるかが本スケジューリング問題の重要なポイントとなる。そこで、ジョブの処理順序と残業時間の決定の双方に、納期遵守に強力にアプローチし納期遅れジョブの再発を強力に防止できる機能を持つ優先規則を組み込んで実施することで、残業時間最小化の過程でも納期遵守を強力に維持させる。この優先規則は、納期を評価

基準としたジョブショップスケジューリングに対してすでに報告されている優先規則を用いる他，この優先規則を改良，さらには新たな優先規則を提案する．このように，本研究で扱う能力調整を考慮したスケジューリング問題に対して有効な優先規則を開発し，それを GA に組み込むことで高性能なスケジューリングを狙う方法は他にはなく，より実用的な規模の問題に対しても適用が期待できる方法である．

1.3 能力調整を扱った関連文献

これまでジョブショップスケジューリング問題への代表的なアルゴリズムの紹介と本研究の目的について述べた．次に，残業による能力調整を取り扱った文献を紹介する．

Ornek and Cengiz (2006) は生産計画において投入時刻決定問題に対して残業を導入し，納期遅れコスト，在庫コスト，残業コストの和による評価を行っている．残業は通常の生産時間長さに対する一定の割合の上限を設定し，生産計画においてある期間で処理すべきジョブを処理するに不足している時間だけ実施される．数値実験はこの割合と生産計画の各期間での需要量を変動させたときの条件で実施している．この結果から，残業コストはこの割合の大小には依存せず，また，需要量の変動が大きいほど残業コストが悪化する傾向にあると述べている．

Zobolas et al. (2008) は受注生産を想定し，生産計画において処理すべきジョブのショップへの投入時期を決定することで，負荷（製品の処理時間）の各期間への配分問題を解いている．この問題を従来の生産計画ツール（MPS，MRP，CRP）やそれらを改良した方法で解いている．ショップで各期間で処理できる生産能力は予め決定されており，この生産能力を超過する量を残業で処理できると仮定している．ジョブのショップへの投入時期を GA を用いて最適化することで，各期間への負荷配分の結果，納期遅れによって発生するコスト，完成が早すぎた場合に発生するコスト（在庫コストを想定している），残業で発生するコストの総和で評価を実施している．

以上は生産計画段階での適用例であるが，本研究で対象とするスケジューリング問題への適用例については，下記が挙げられる．

Holloway and Nelson (1974) は残業による能力調整を考慮したジョブスケジューリング問題に対して，マルチパスヒューリスティックスケジューリング手法（HSP）を用いた方法を提案している．これは単純な優先規則を用いた方法である．このとき，残業時間の決定は，全てのジョブが納期遵守を達成するために必要な追加時間を残業時間として与

えている。数値実験から納期遅れ時間と残業時間のトレードオフ関係を明らかにしている。

Goodwin, Jr et al. (1978) はジョブの処理順序の決定に対して EDD, FIFO, SPT, ランダム選択等の優先規則を用いて残業による能力調整を考慮したジョブスケジューリング問題を解いている。このスケジューリングでは予め幾つかの条件の残業時間が固定して与えられ、この中でショップの稼働率が異なる場合を想定し、残業時間と利益率（単位残業時間あたりの納期遅れ時間の改善量）のトレードオフによって評価を行っている。数値実験の結果、ショップの稼働率が高いほど高い利益率を確保できる結果となり、また、選択した優先規則によって利益率に差が生まれる結果にもなっている。一方で、残業を用いたジョブショップスケジューリングの評価は稼働率のみならず、残業に掛かるコストとそれによって得られる効果の度合等の経営指標に依存することを強調している。

Adshead and Price (1989) は見込み生産を行うショップに対して、残業時間の決定に対して PWC ルールと TWC ルールの 2 つの残業決定ルールをそれぞれ使い、ジョブの在庫切れコスト、ジョブ在庫コスト、残業時間コストを評価値とするスケジューリング問題を解いている。一般的に残業はジョブが正規の労働時間内で処理しきれず納期に間に合わない判断された場合に、その場しのぎの対応手段として実施される場合が多い。そのため、PWC ルールは機械処理を待つジョブ群の中で納期遅れになったジョブ、もしくは、在庫切れが発生しその除去を是正する必要があるジョブのその機械への負荷量に着目し、また、TWC ルールは処理を待つすべてのジョブの総負荷量に着目し残業を導入する手法である。数値実験の結果、残業時間を抑制すると残業時間コスト、在庫コストが小さくなる半面、在庫切れコストが大きくなる特徴を確認している。

Matta et al. (2001) はマルチマシン FMS モデルのスケジューリング問題を解いている。この論文では、納期遵守のために機械の処理能力の増強、残業、外注による生産能力の追加を述べており、これらの中でも外注に着目している。スケジュール問題を解くにあたり目的値を機械使用料、工具使用料、外注に必要な加工料、外注に必要な輸送料の総和で算出される発生費用を最小化することとしている。スケジューリング自体、納期遵守を達成するための手法を提案しているわけではなく、あくまでも得られたスケジューリング結果で納期遅れとなったジョブの個数と種類に応じて外注に必要な加工料、外注に必要な輸送料が発生するとしている。この論文では混合整数計画問題として解いた場合とラグランジュ緩和を用いた探索手法を提案している。数値実験は最大ジョブ数 200 個の最大工程数 15 工程の大規模問題を想定し、ショップ内負荷量および工具の占有率が変化する場合でそれぞれ評価を実施している。結果として、ラグランジュ緩和法によっ

て探索された結果から下界値と上界値の差を示し、大規模問題でも実行可能解を得られることを確認している一方、問題規模の拡大により差も拡大することを述べている。

Yang et al. (2004) は 1 機械想定したジョブショップスケジューリング問題を対象に、納期遅れコストと機械の使用コストの和で定義された評価値を最小化することを目的としている。ここで機械使用コストについて、通常の稼働時間より残業時間のコストの方が大きく設定されている。ジョブの処理順序の決定に対して疑似多項式時間アルゴリズムを使用し、さらに、混合整数計画問題を用いて求められた下界値と比較することで、現実的な計算時間の中で発見的手法で得られた解の評価を行っている。数値実験によると、ジョブの納期遅れコストの設定範囲が小さくばらつきが少ない場合、下界値とのギャップを小さく追い込むことができるが、大きい場合、ギャップが埋まらない結果となっている。

荒川ら (2001) はジョブショップスケジューリング問題を対象に、優先規則によるシミュレーション法を用いた残業時間の調整手法を提案している。提案手法ではパラメータ空間探索改善法の枠組みを用いている。具体的には、機械の稼働状況を考慮しパラメータにより系統的に各機械に残業時間を割付、余剰の残業時間を削除することにより実施される。数値実験では現実のジョブショップの生産データを用いられており、提案手法により実際に運用されたスケジューリング結果と比較し短い残業時間で納期遅れを改善できることを示している。

さらに、荒川ら (2003) は、パラメータ空間探索改善法の枠組みを各機械への残業時間の割付のみに適用するだけでなくジョブの処理順序に対しても適用し、同時制御による納期遅れジョブ数の削減・解消を目的とするスケジューリング法を提案している。ジョブの処理順序の決定の最適化は、ジョブの納期ずれ時間と待ち時間の総計に着目しジョブの処理優先度をパラメータより操作することで実施している。また、残業時間の割付に対しては、パラメータにより機械の稼働率に応じて決定している。残業時間の決定数値実験では現実の生産データを用いて実施しており、残業時間の割付とジョブの処理順序決定が個別になされる場合と比較し、短い残業時間で納期遅れジョブ数を低減できることを確認している。

Mathur and Suer (2013) は、米国の衣類メーカーの 1 週間 (2 交替) のスケジュールのモデルを元に、複数のセルで構成されるショップで工程数 1 (実際は工程数 8 でフローショップにより処理している) のジョブを処理するスケジューリングを対象にしている。彼らは納期を満足した際に”得られる利益”は残業により”失われる利益”より大きいと明確にした上で、納期を満足しジョブを完成させたときに”得られる利益”を残業の実施よ

り”失われる利益”より大きく設定している．その上で，“得られる利益”から”失われる利益”を差し引き，これを最大化することを目的としている．この問題設定のもとジョブのセルへの割り当ておよびセル毎の処理順序の決定に加えて各曜日で残業を行うかどうかの判断を GA（遺伝子操作を独自に改良している）と数理モデルを用いて解いている．なお，ジョブの処理は曜日を跨いでよいものとし，残業については実施する／しないの判断のみで，実施する時間長の決定は行っていない．GA で問題を解く場合，ジョブ毎に処理するセル番号を表現した遺伝子およびどの曜日のどのシフトで残業を行うかを決定する遺伝子をコーディングしている．数値実験では問題規模の違いに着目するため，ジョブ数が最大 90 個までの計 8 パターンおよびセル数の異なる複数の問題を対象としている．数値実験の結果，ジョブ数が少なく問題規模が小さい場合，GA は数理モデルと同等の性能を出せるが，規模が大きくなるにつれて数理モデルが優位になることを示している．数理モデルの場合，問題規模が大きくなるにつれて解が見つからないが，限られた時間での探索結果でも GA より優れた性能を出せることを示している．

以上，残業を考慮した生産計画問題およびスケジューリング問題に関する研究を紹介した．これらの中で本研究で対象とするスケジューリング問題と比較すると，納期遵守かつ残業時間最小化という問題設定がほとんどなく，また，ジョブの処理順序決定と残業時間の決定の双方に対して同時に探索手法を適用している研究がほとんど見られない．Mathur and Suer（2013）は GA を用いてジョブの処理順序決定と残業時間の決定を実施しているが，ジョブショップスケジューリングを対象とはしていない．荒川ら（2003）は，ジョブショップを対象としており，ジョブの処理順序決定と残業時間の決定の双方を考慮しているが，優先規則を用いたシミュレーション法によるものである．これに対し本研究では，納期遵守しつつ残業時間を最小化するジョブショップスケジューリング問題に対して，ジョブ処理順序と残業時間の決定の双方に GA と優先規則を適用することで高性能なスケジューリングを実現する方法を提案する．

1.4 本論文の構成

本論文は6章から構成されている。本章以降の構成を以下に示す。

第2章で、本論文で想定する生産環境および問題の定式化を行う。その後、本スケジューリング問題へのGAの適用方法および遺伝子操作について示し、GAを用いたスケジュール探索の具体的な手順について説明する。

第3章では、ジョブの処理順序の決定に対して、固有知識である優先規則を第2章で述べたGAに組み込む手法について述べる。初めに、GAと優先規則の融合手法を用いたジョブの処理順序の決定方法について述べた後、GAと融合する優先規則を提案する。数値実験ではジョブの納期設定の異なる問題を用いてこのスケジューリング手法の有効性を調べる。

第4章ではスケジューリングへの残業の導入に際し、優先規則を組み込む手法について述べる。これによりジョブの処理順序決定と残業導入の双方に有効な固有知識を組み込んだGAによる探索を実現する。数値実験ではより現実的な大規模スケジュールを想定した問題を用いて性能の評価を行う。

第5章では、第3章と第4章で提案したスケジュール探索手法で得られる解の最適性評価を実施する。この最適性評価はラグランジュ緩和法を用いて下界値を求め、その下界値と比較することで評価を実施する。また、ラグランジュ緩和法から得られる上界値と比較することでGAと優先規則の融合を用いたスケジュール探索手法とラグランジュ緩和法の性能比較も行う。

第6章は、本論文の結論であり、各章で得られた主要結果をまとめる。

第 2 章

納期遵守と残業時間最小化を目的としたスケジューリング問題と 遺伝的アルゴリズムの適用

2.1 緒 言

本章では、まず、本研究で想定する生産環境について説明した後、ジョブショップスケジューリング問題の定式化、および、スケジューリングの基本的な探索手順について述べる。本研究におけるスケジューリングの目的は、第一に納期遵守であり、それを達成しつつ、できる限り残業時間を短くすることである。この目的を達成するためには、ジョブの処理順序のみならず各シフトの各機械に追加する残業時間の決定が必要である。本論文ではこの決定に遺伝的アルゴリズム (GA) を利用するが、本章では GA を単独で用いた場合のジョブの処理順序の決定方法と各シフト各機械に追加する残業の導入方法について説明する。

2.2 ジョブショップスケジューリング問題

2.2.1 生産環境

本研究では Fig. 2-1 のように複数のシフトからなる生産環境を想定する。各シフトは正規の稼働時間帯、必要に応じて能力の追加を行うことができる残業時間帯、非稼働時間帯から構成される。1シフトの時間長さを ΔDT 、正規の稼働時間帯の時間長さを ΔDT_1 、非稼働時間帯、つまり正規の稼働時間帯の終了時刻から次シフトの稼働時間帯の開始時刻までの時間長さを ΔDT_2 とする。また、残業時間帯の最大時間長さを ΔOT とし、これら時間長さは本論文では全シフト、全機械に対して一定値とする。

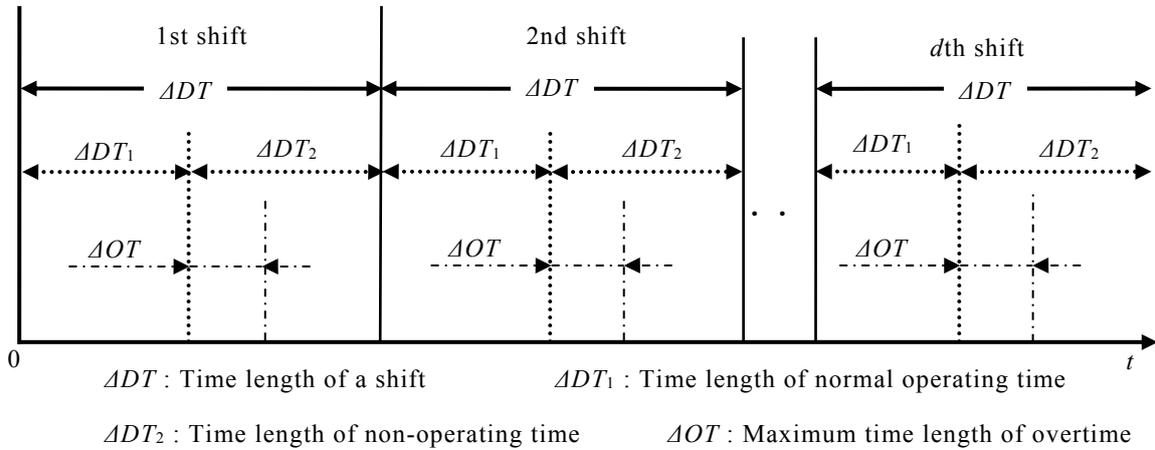


Fig. 2-1 Production environment

2.2.2 問題の定式化

本研究で対象とするジョブショップスケジューリング問題は次のように記述される。 M 台の機械（機械番号 $m = 1, 2, \dots, M$ ）により構成されるジョブショップで断続的に到着するジョブ J_i （ジョブ番号 $i = 1, 2, \dots, N$ ）を処理する。ジョブの到着時刻を r_i とし、ジョブの到着は正規の稼働時間帯のみとする。各ジョブ J_i は n_i 個の工程 $\{O_{ij}(j=1, 2, \dots, n_i)\}$ を持ち、工程番号 j の増加順に処理される。各工程 O_{ij} の処理時間を p_{ij} で表す。この処理時間や工程順序はジョブ毎に異なっているが、ショップに投入する前にあらかじめ決められていて既知とする。一つの機械は同時に一つの工程作業しか処理できず、一つの工程作業は同時に一つの機械でしか処理されない。いったん処理開始された工程作業は途中で中断されない。ジョブの処理、搬送は正規の稼働時間帯および残業時間帯のみで行われる。あるシフトで加工処理を開始された工程は必ずそのシフト内で、つまり、残業時間を追加しない場合はそのシフトの正規の稼働時間帯内で、残業時間を追加する場合はそのシフトの残業時間帯内で処理完了されるものとする。（そのような工程しかそのシフトでは選択されない。また本論文では各工程の処理時間は $p_{ij} \leq \Delta DT_1$ とする。）なお、段取時間、ジョブの搬送時間は考慮しない。

本研究でのスケジューリング目的は、第一に納期遵守であり、式 (2-1) で表される全ジョブの総納期遅れ時間 TT をゼロにすることである。さらに第二の目的を式 (2-2) で表される総残業時間 TOT の最小化とする。すなわち、本研究におけるスケジューリングの目的には優先順位があり、式 (2-1) が式 (2-2) に対して優先される。

$$TT = \sum_{i=1}^N \max[C_i - dd_i, 0] \quad (2-1)$$

$$TOT = \sum_{d=1}^D \sum_{m=1}^M OT_{dm} \quad (2-2)$$

ここで、 C_i , dd_i は、それぞれジョブ J_i の処理完了時刻と納期である。max は括弧内の数値の大きい方を採用することを意味する。 OT_{dm} は、機械 m における d シフト目の残業時間帯の開始時刻（正規稼働時間帯の終了時刻）から d シフト目の残業時間帯で最後に処理された工程の処理終了時刻までの時間長さである。 D は N 個のジョブの処理を完了させるために必要なシフト数である。

2.3 スケジュールの基本的作成手順

一般に、最適なスケジュールは、アクティブスケジュールの中に存在することが知られている（今野・鈴木，1982）。アクティブスケジュールとは、それぞれの機械における工程の処理順序を変えることを含めて、いずれの工程もそれ以上早く開始することができないスケジュールである。すなわち、最適なスケジュールは、待ちジョブが存在している状況でも敢えて遊休状態を続け、後から到着したジョブを次に処理することを許すスケジュールである場合がある。これに対し、機械が遊休状態となったとき、待ちジョブが存在する場合には、その中のいずれかのジョブの処理を直ちに開始するスケジュールを遅れなしスケジュールと呼ぶ。最適スケジュールは遅れなしスケジュールであるとは限らないが、多くの場合、遅れなしスケジュールの中の最適解はアクティブスケジュールの中の最適解に非常に近い性能を持つことが実験的に確認されている（Hutchison and Chang, 1990）。よって、本研究では遅れなしスケジュールのみを対象とする。

本研究では、この遅れなしスケジュールの作成にスケジューリングシミュレーション（黒田・松村，2002）を利用する。すなわち、ジョブを投入時刻にショップに投入し、処理可能な時間帯において、各機械での加工処理や次の機械への搬送を行う。機械が遊休状態になったときに複数の待ちジョブが存在する場合は、各ジョブに与えられた優先度を用いて次に処理するジョブを選択する。各機械が遊休になる度にこの処理を繰り返すことでスケジュールが作成される。この時、各ジョブに与える優先度によってスケジュールの性能が決まる。また、本研究では残業によって処理可能な時間帯を延長可能であり、それを定める必要もある。本研究では、これらジョブ選択優先度や残業導入を優先規則やGAによって与える。次節ではGAによってこれらを探索する方法を述べる。

2.4 遺伝的アルゴリズムを用いた探索法

本研究では、スケジューリングの最適化に GA を適用する。GA は生物の進化を模擬した確率的探索法の一つであり、複数のスケジュールに対応する個体を作成し、それに遺伝的操作を加えることで、より性能の高いスケジュールを探索して行く。高性能な探索を行うためには、コーディング/デコーディング/適応度の評価/遺伝子操作を適切に行う必要がある。本節では、これらについて説明する。

2.4.1 個体の表現と適応度の評価

まず GA の個体の表現および適応度の評価について説明する。Fig. 2-2 にシフト数 3、機械台数 3、ジョブ数 3 の場合のコーディングの例を示している。最適化の対象となるジョブ J_i の各工程 O_{ij} にそれぞれ一つのジョブ選択用遺伝子 j_gene_{ij} を、各シフト d の各機械 m にそれぞれ一つの残業用遺伝子 o_gene_{dm} を与える。この j_gene_{ij} と o_gene_{dm} は 0 から 1 の間の実数値で表現される。これらの遺伝子をまとめて一つの染色体とし、これを一つの個体と考える。ジョブ選択用遺伝子 j_gene_{ij} に関しては、ランダムキー (Bean, 1994) による表現法を用いており、後述する優先規則との融合 (Eguchi et al., 2005) に適したコーディング法である。

この個体の適応度は、遺伝子 j_gene_{ij} および o_gene_{dm} を用いたスケジューリングシミュレーションによる評価値によって計算される。ここでいうシミュレーションとは、優先規則や各ジョブに与えられた優先度を用いて機械などの生産要素の前に生じている加工対象の待ち行列の中から一つを選出して加工を行うという手続きを繰り返してスケジュールを作成する方法をいう。そのシミュレーションの d シフト目の機械 m において許容される残業時間の上限値 LOT_{dm} を式 (2-3) で与える。

$$LOT_{dm} = \lfloor \Delta OT \times o_gene_{dm} \rfloor \quad (2-3)$$

この上限値 LOT_{dm} の時間内で処理完了することができるジョブの工程作業のみを割り当てていく。すなわち、初期時刻から投入可能なジョブをショップに投入し、遊休状態になった機械において処理を待つジョブ群のうち、そのシフトの残業時間の上限値 LOT_{dm} 以前に処理完了するジョブについて、 j_gene_{ij} をジョブ選択のための優先度とみなしてジョブ選択を行っていく (Fig. 2-3)。これを N 個のジョブのすべての工程作業の処理が完了するまで繰り返すことで各工程作業の開始時刻を決めて行くとスケジュールが定まる。そのスケジュールの TT , TOT の値に基づいて個体の適応度を決定する。総納期遅れ時間に関しては式(2-1)で、残業時間に関しては、Fig. 2-4 に示すように式(2-3)の上限値内で

実際に処理終了した最終時刻から OT_{dm} が決まり，式(2-2)によって総残業時間が計算される。

o_gene_{dm}	$d=1$	$d=2$	$d=3$	j_gene_{ij}	O_{i1}	O_{i2}	O_{i3}
$m=1$	0.2	0.6	0.5	Job1	0.8	0.5	0.1
$m=2$	0.9	0.3	0.2	Job2	0.4	0.6	
$m=3$	0.5	0.7	0.4	Job3	0.1	0.6	0.3

Fig. 2-2 An example of individual

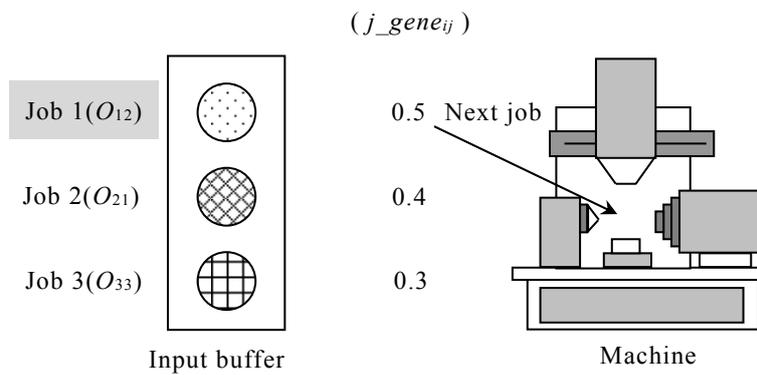


Fig. 2-3 An example of next job selection

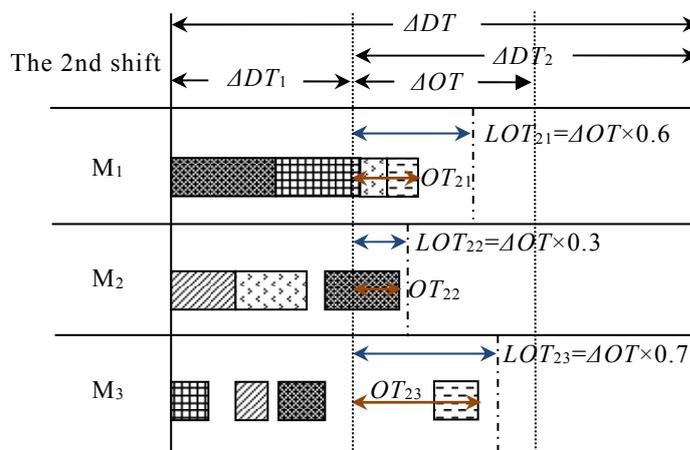


Fig. 2-4 An example of LOT_{2i} and OT_{2i} in the 2nd shift

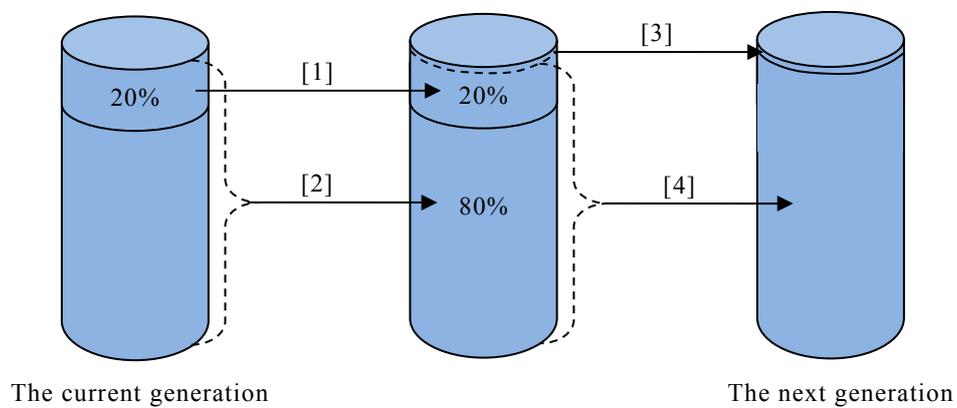
2.4.2 遺伝的アルゴリズムによる探索手順

次に GA による探索手順について説明する。本研究では、納期遵守が第一の目的であるため、探索のスタート時点では、全シフト、全機械の残業時間帯の時間をすべて使用（フル残業）することを許可する。こうすることで、納期遅れが解消し易い環境下でジョブの処理順序の最適化探索を行い、納期遅れジョブの解消、つまり、 $TT=0$ の達成を目的とした探索をまず実施する。そのため、 $TT=0$ となるまで全個体のすべての o_gene_{dm} を 1.0 に設定し、 o_gene_{dm} に対する遺伝的操作を行わない。この環境下で j_gene_{ij} にのみ遺伝的操作を行い、スケジュール探索を実施することで納期遵守の達成を目指す。

その後、納期遵守 ($TT=0$) を達成した個体が一つでも見つかったならば、第二の目的である総残業時間 TOT の最小化探索を開始する。この TOT 最小化開始のタイミングで最良個体を除くすべての残業用遺伝子 o_gene_{dm} を 0~1 の実数値でランダムに与え、その後 o_gene_{dm} にも遺伝的操作を施していくことで、各シフト、各機械に許容される残業時間とジョブの処理順序の探索を同時に行っていく。

適応度の評価は、 TT が小さいほど、また、 TT が同じならば TOT が小さいほど適応度が高いとする辞書式配列法を用いる。これは TT と TOT に優先順位があるため、これら二つの目的に関するパレート最適解を探索することが本スケジューリングの目的ではないことを注記しておく。

世代交代は、Fig. 2-5 に示すように現世代の個体のうち適応度が上位 20%の個体を次世代にコピーし、残り 80%は現世代から選択、交叉させ新たに作成することで行う。交叉は Fig. 2-6 に示すように、選択された二つの個体の遺伝子座の遺伝子に対して、一方の個体から 70%、もう一方から 30%の確率で遺伝子を引き継ぐ。具体的には、遺伝子座ごとにある範囲の乱数を発生させ、その値が上側 70%であれば一方の個体から、その値が下側 30%であればもう一方の個体から遺伝子を引き継ぐという方法である。それぞれの遺伝子座に対して突然変異は、Fig. 2-5 に示すように 0.5%の確率で遺伝子の値をランダムに変化させる。ただし、最良個体には突然変異操作を行わない。これにより、世代交代を進めるに従って各世代における最良個体の性能が悪化することはない。これら遺伝子操作の設定値は、ランダムキー表現を用いる GA (Bean, 1994) を参考に、予備実験に基づいて定めたものである。



[1]: The best 20% of individuals are copied.

[2]: The remaining 80% of individuals are generated by applying crossover operation.

[3]: The best individual is copied.

[4]: Mutation is applied.

Fig. 2-5 The genetic operation

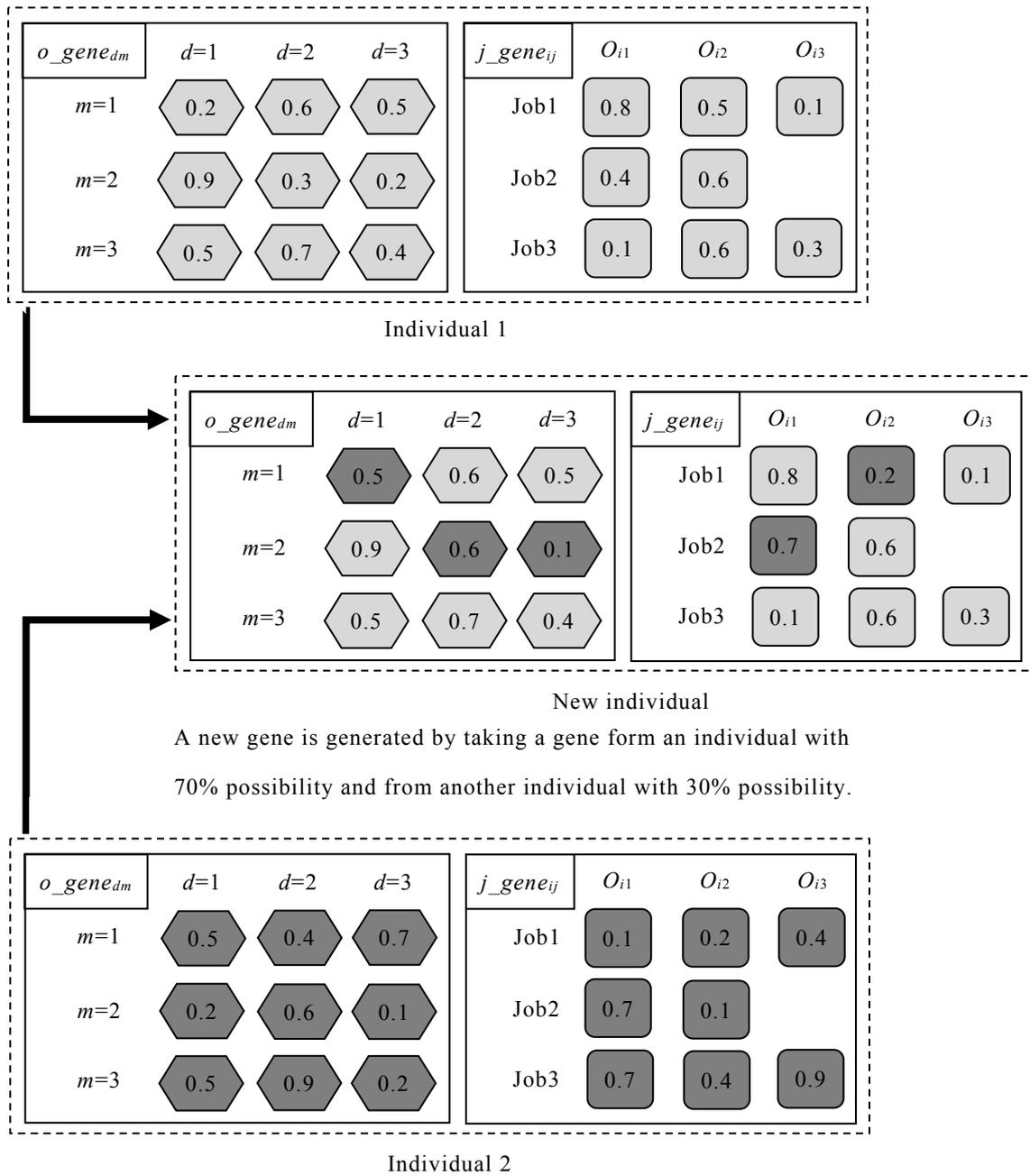


Fig. 2-6 Crossover

2.5 結 言

本章では、残業による能力調整を考慮したジョブショップスケジューリング問題の定式化とそれに対する基本的なスケジュール作成手順および GA を用いた探索手法について述べた。ここで述べた GA は問題の固有知識を利用しない汎用的手法として位置づけられる。これに対し本論文では、第 3 章および第 4 章において、ジョブの処理順序と各シフト各機械に追加する残業時間の決定の双方に固有知識（優先規則）を GA に組み込むことで高性能なスケジュール探索を実現することを検討する。本章で述べた GA の性能評価は、これら提案手法と合わせて第 3 章および第 4 章で示される。

第3章

遺伝的アルゴリズムと優先規則の融合によるジョブの処理順序決定

3.1 緒言

本研究では、納期遵守を第一の目的とし、できる限り残業時間を短くすることを第二の目的としたジョブショップスケジューリング問題を扱っている。この問題を解くためには、ジョブの処理順序と各シフト各機械に追加する残業時間の決定が必要であり、これら双方に対して効率的な決定手法が求められる。

そこで本章ではまず、ジョブの処理順序の決定手法について述べる。本研究では、このジョブの処理順序の決定手法に GA と優先規則を融合した方法（江口，他，2005）を採用する。この方法は、対象とするスケジューリング問題に有効な固有知識、すなわち優先規則を GA に組み合わせることでより効率的なスケジュールの探索を可能とするものである。例えば、納期を評価基準としたジョブショップスケジューリングに対しては ATC (Apparent Tardiness Cost) ルール (Vepsalainen and Morton, 1987) や (CR+SPT) (Critical Ratio + Shortest Processing Time) ルール (Anderson and Nyirenda, 1990) などの優れた優先規則がいくつか知られており、これらを GA と組み合わせることで GA 単独で探索するよりも高性能なスケジューリングを行うことができることが確認されている（江口，他，2005）。

GA と優先規則を融合した探索法を用いる際に、本研究の二つの目的である納期遵守と残業時間最小化にはトレードオフの関係があることを考慮する必要がある。本研究のスケジューリングの目的は第一に納期遵守、第二に残業時間最小化であるため、まずフル残業を許容して納期遵守を達成したのち、各シフトの各機械に追加される残業時間の最小化を行う手順を採用している。このとき、納期遅れ時間最小化と残業時間最小化のトレードオフ関係によって、残業時間を短縮して行く際に納期遅れが再発し易くなるが、これを如何に再発させないで探索できるかという点が効率的な探索を実現する上で重要となる。そこで本研究ではこの観点に着目し、納期遅れの再発を強力に防止できる機能を持つ優先規則を GA と融合する方法を提案する。

第2節で優先規則と GA の融合を用いた効率的探索法を説明し、第3節で本研究の目的に適したルールを提案する。第4節で数値実験を示し、第5節で結言を述べる。

3.2 遺伝的アルゴリズムと優先規則の融合による効率的探索法

GA と優先規則を融合した探索法は，性能の良い優先規則を GA の探索に組み込むことで高速に良い解を探索することを狙ったもので，実験的にその有効性が確認されている方法である．具体的には，ジョブ選択を行う際のジョブ選択優先度を $priority_{ij}$ とするとき，これをジョブ選択用遺伝子 j_gene_{ij} のみで決定するのではなく，式 (3-1) に示すように，ある優先規則を適用した時の優先度 pri_{ij} と j_gene_{ij} の積で計算する (Fig. 3-1) ．

$$priority_{ij} = j_gene_{ij} \times pri_{ij} \quad (3-1)$$

ただし， $pri_{ij} > 0$ とする．この優先度を用いることで，ジョブ選択に関しては優先規則の知識が融合された GA による探索が行われることになる．なお，この探索法では，全ジョブの全工程のジョブ選択用遺伝子 j_gene_{ij} を同じ実数値で与えた個体を初期集団に 1 つだけ入れておく．これにより，この探索法の性能は，用いる優先規則単独での性能以上であることが保障されている．

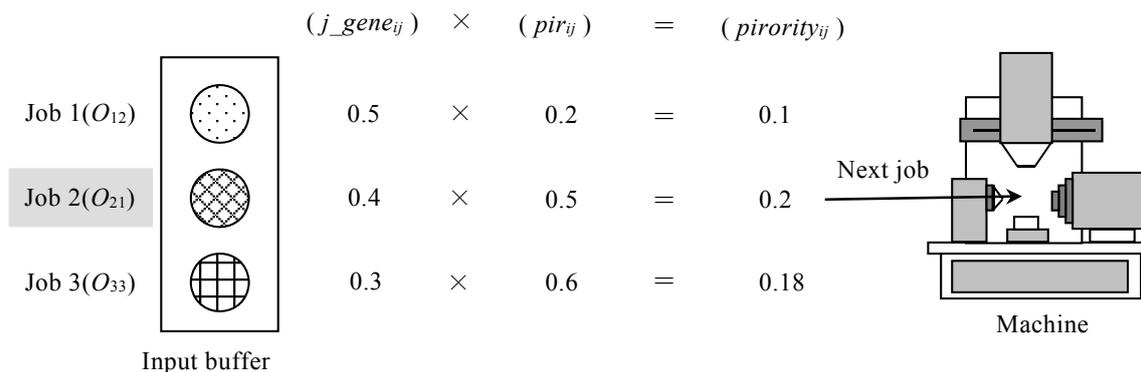


Fig. 3-1 An example of next job selection using genetic algorithm incorporating priority rule

3.3 納期までの切迫度に着目した優先規則の適用

本研究のスケジューリングの目的は，総納期遅れ時間 $TT=0$ を達成しつつ総残業時間 TOT を最小化することである．GA のジョブ選択遺伝子と優先規則の融合による探索法において利用される優先規則としては，この目的に有効な固有知識を持つものを選択する必要がある．本研究ではまず，納期を評価基準としたジョブショップスケジューリングに対して有効であると既に報告されている ATC ルール (Vepsalainen and Morton, 1987) と (CR+SPT) ルール (Anderson and Nyirenda, 1990) を用いる．ここで ATC ルールでは既に実装されているパラ

メータを有効活用することで目的を効率よく達成することを目指す。また、(CR+SPT)ルールには、本スケジューリング問題に適するよう新たな機能（パラメータ）を追加したルールを提案し、これを用いることで目的を効率よく達成することを目指す。

3.3.1 ATC ルールの適用

ATC ルールは式 (3-2) , 式 (3-3) で表される。

$$pri_{ij} = \frac{1}{p_{ij}} \exp \left\{ - \max \left[\frac{ns_i}{k\bar{p}}, 0 \right] \right\} \quad (3-2)$$

$$ns_i = dd_i - t - not_i - rpt_i - \sum_{q=j+1}^{n_i} b \times p_{iq} \quad (3-3)$$

ATC ルールでは遊休状態の機械の待ちジョブの工程群の中から pri_{ij} の値が最も大きいジョブの工程を次に処理する。ただし、式中の記号の意味はそれぞれ以下のとおりである。

t : 個体の適応度を計算する際のスケジューリングシミュレーションにおいてそのジョブ選択が行われる時刻

rpt_i : ジョブ J_i の残り工程に対する処理時間の総和

not_i : 時刻 t からジョブ J_i の納期 dd_i までに存在する非稼働時間帯の時間長さ ΔDT_2 の総和

ns_i : ジョブ J_i の納期 dd_i までの予想待ち時間も考慮した正味の余裕時間の予測値

\bar{p} : 機械での処理を待つジョブ群のその機械での平均処理時間

b : ジョブの待ち時間を予測するためのパラメータ

k : 予測される納期までの正味の余裕時間 ns_i を評価するパラメータ

ATC ルールの特性は、パラメータ b, k により変化する。 b について、この値が大きいほど待ち時間が長いと予測する。一般に、ジョブ選択時に競合するジョブが多いほど待たされる可能性が多くなり待ち時間が長くなる。このことから、 b はいわばショップ内の負荷状況を反映させるパラメータである。本研究ではパラメータ k に注目する。 k が小さくなるほど予測される納期までの正味の余裕時間 ns_i を拡大して評価するため、Fig. 3-2 で示されるように、 k が小さいほど納期余裕 ns_i に対する優先度 pri_{ij} のカーブがきつくなり、納期に差し迫るほど pri_{ij} の上昇率の度合いを大きくすることができる。なお、Fig. 3-2 は $\bar{p} = 10$ での結果である。

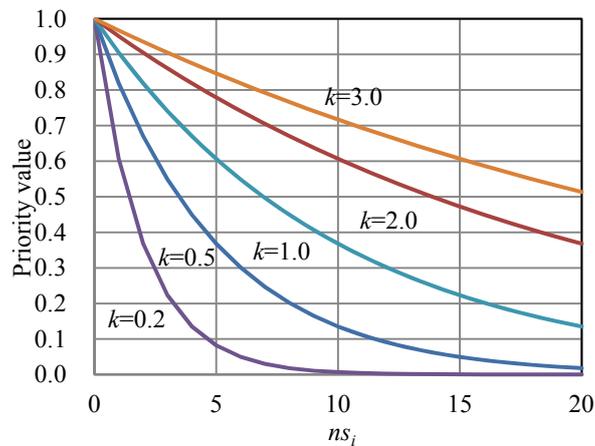


Fig. 3-2 Priority value with k

3.3.2 (CR^β+SPT)ルールの提案

本研究では(CR+SPT)ルールに対してパラメータ β を追加し，式 (3-4) ，式 (3-5) で表される(CR^β+SPT)ルールを提案する．

$$pri_{ij} = \frac{1}{p_{ij}} \{ \max[cr_i, 1] \}^{-\beta} \quad (3-4)$$

$$cr_i = \frac{dd_i - t - not_i}{rpt_i} \quad (3-5)$$

この(CR^β+SPT)ルールも ATC ルール同様，遊休状態の機械の待ちジョブの工程群の中から pri_{ij} の値が最も大きいジョブの工程を次に処理する．

さて，この(CR^β+SPT)ルールの特性は β により変化する． Fig. 3-3 に納期までの切迫度を意味するクリティカル値 cr_i を横軸に，式 (3-4) の優先度 pri_{ij} を縦軸に表した図を示す． β が大きくなるほどクリティカル値 cr_i に対する優先度 pri_{ij} のカーブの上昇が急峻になる．このように β の値を調整することで，納期への切迫度に応じた優先度の上昇率を変化させることができる．

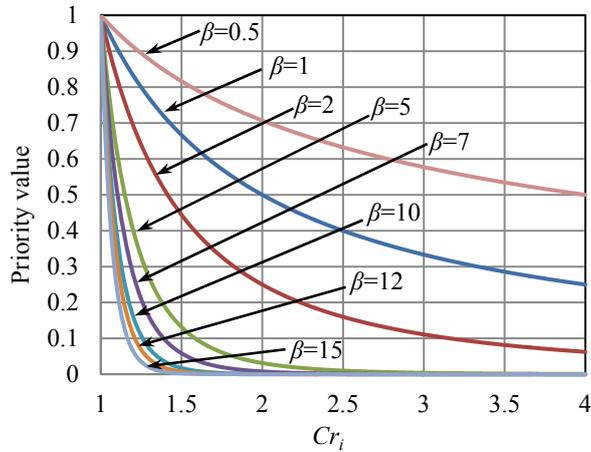


Fig. 3-3 Priority value with β

3.3.3 ((SL/RPN) $^\beta$ +SPT)ルールの提案

ジョブ選択で納期遵守を達成する為に最も重要なことは、ジョブの納期までの余裕時間を適切に評価し、納期遅れに陥る危険性を適切に評価することである。(CR $^\beta$ +SPT)ルールの場合、式(3-5)で表される残り総処理時間あたりの余裕時間で評価している。しかしながら、ジョブの残り処理工程数が多いほど、機械で処理を待たされる機会が多く処理待ち時間が高くなる可能性がある。これにより納期遅れが再発する可能性があるため、これに対して強い防止機能を持つ優先規則が必要であると考えられる。

そこで本論文で、(CR $^\beta$ +SPT)ルールをさらに改良した((SL/RPN) $^\beta$ +SPT)ルールを提案する。この((SL/RPN) $^\beta$ +SPT)ルールは式(3-6)式(3-7)で表される。

$$pri_{ij} = \frac{1}{p_{ij}} (\max[cr'_i, 0] + 1)^{-\beta} \quad (3-6)$$

$$cr'_i = \frac{dd_i - t - rpt_i - not_i}{rpn_i} \quad (3-7)$$

rpn_i : ジョブ J_i の残り処理工程数

式(3-7)はすでに提案されている(S/ORN)ルール(Conway, 1965)と同じである。パラメータ β は(CR $^\beta$ +SPT)ルール同様、 β が大きくなるほどクリティカル値 cr'_i に対する優先度 pri_{ij} のカーブの上昇が急峻になり、納期への切迫度に応じた優先度の上昇率を変化させることができる。Fig. 3-4に納期までの切迫度を意味するクリティカル値 cr'_i を横軸に、式(3-6)の優先度 pri_{ij} を縦軸に表した図を示す。

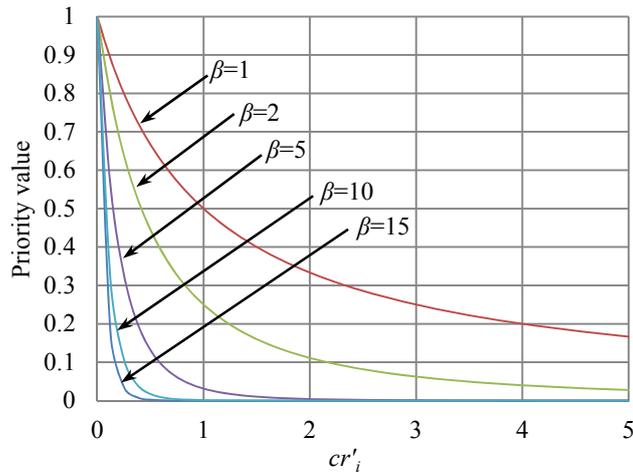


Fig. 3-4 Priority value with β

3.3.4 納期までの切迫度に着目した優先規則を適用する狙い

ATC ルールは k を小さく、 $(CR^\beta + SPT)$ ルールと $((SL/RPN)^\beta + SPT)$ ルールは β を大きく設定することで、納期に近づくにつれて優先度 pri_{ij} を急上昇させることができる。この特性が本研究の目的である納期遵守を達成しつつなおかつ残業時間を最小化する探索において有効となる。なぜなら、本研究においては納期遵守が達成される個体が見つかった後に残業用遺伝子 o_gene_{am} に遺伝的操作を施し残業時間最小化探索を開始するが、その際に効率的探索を行うためのポイントは、納期遵守が達成されている個体に納期遅れジョブが発生してしまうことをできるだけ防止することにあると考えられるからである。納期遅れ時間が同じ個体の中では残業時間が短い個体が上位にランキングされることで世代交代の個体選択時に残業時間の短縮圧力がかかるが、一方で遺伝的操作によってせっかく納期遵守が達成されている個体に納期遅れジョブが再発してしまう状況が生じ、それによってその個体のランキングは下がり、効率的な探索が阻害される。GA と優先規則を融合した探索法では、優先規則が納期遅れの再発を防止する役割を果たすことができる。すなわち、納期への切迫度に応じてより優先度を高くする特性を持たせることで、残業時間の短縮圧力がかかる状況でも納期遵守も維持した個体を作成でき、性能の高い解を効率よく探索できると考えられる。

3.4 数値実験

3.4.1 実験条件

提案法の有効性を確認するために数値実験を行った。5 シフトを想定し、 $\Delta DT=300$ 、 $\Delta DT_1=100$ 、 $\Delta DT_2=200$ 、 $\Delta OT=50$ とした。機械台数 $M=8$ 、ジョブ数 $N=70$ とし、1 ジョブあたりの工程数は $U[1, 8]$ 、各工程の処理時間 p_{ij} は $U[1, 20]$ で与えた。ただし、 $U[a, b]$ は a から b の間の一様乱数で決定されることを意味する。各工程作業を処理する機械は、連続した工程が同一機械で処理されないという条件でランダムに設定した。納期設定は次に示す 2 通りの条件で行った。

(納期設定 1) 納期を正規の稼働時間帯において任意の時刻に設定した場合：

ジョブの総処理時間を基準とする TWK 法 (Baker, 1984) に基づいて定める。具体的には、ジョブ J_i の納期 dd_i は、投入時刻 r_i 以後の正規稼働時間帯 ΔDT_1 内 (複数の ΔDT_1 に亘る場合もある) にそのジョブの総処理時間のある定数倍の時間を確保した時刻とする。結果として納期 dd_i は式 (3-8) のように表すことができる。

$$dd_i = r_i + k_i \times \sum_{j=1}^{n_i} p_{ij} + not_i' \quad (3-8)$$

ここで、 k_i は納期のきつさを表す係数、 not_i' は投入時刻 r_i から納期 dd_i までに存在する非稼働時間帯の時間長さ ΔDT_2 の総和である。

(納期設定 2) 納期を各シフトの残業時間帯の終了時刻に設定した場合：

納期設定 1 と同様にまず式 (3-8) を用いて納期を暫定的に決定する。そして、その暫定納期をその納期があるシフトの残業時間帯の最後の時刻に移す。

なお、すべてのジョブが想定した 5 シフトに収まらない問題も生成され得るので、納期設定 1, 2 とともに、残業を行わない条件で (CR+SPT) ルールのみを用いてスケジューリングし、6 シフト目に入ったジョブの工程を削除した。削除された工程があるジョブについては、納期設定 1 においては 5 シフト目の稼働時間帯の最後の時刻、納期設定 2 においては 5 シフト目の残業時間帯の最後の時刻を納期 dd_i に設定した。納期のきつさ k_i については、納期設定 1 は $U[3.0, 4.0]$ で、納期設定 2 は 2.5 で与えた。

ジョブの投入については、納期設定 1, 2 とともに初期投入数を 30 個とし、その後、正規の

稼働時間帯に納期設定 1 では平均投入間隔 5 の指数分布で、納期設定 2 では平均投入間隔 10 の指数分布でジョブに投入する。

以上の条件でそれぞれの納期設定について問題を 30 問ランダムに作成した。GA の個体数は 400 個体（初期集団に、1 個体の全ジョブ、全工程のジョブ選択用遺伝子 j_gene_{ij} を 0.5 に設定した個体を一つ入れておく）、世代交代数は 1000 世代として数値実験を行った。本論文では、比較対象として SPT ルール（式 (3-9)）と SLACK ルール（式 (3-10)）を利用した場合の実験結果も示す。

$$pri_{ij} = 1 / p_{ij} \quad (3-9)$$

$$pri_{ij} = \exp\{- (dd_i - t - not_i - rpt_i)\} \quad (3-10)$$

いずれも pri_{ij} の値が大きいジョブの工程を次に選択し処理する。式 (3-10) の \exp 関数は提案手法を用いる際に優先度が常に正になるように導入したものである。

3.4.2 実験結果

3.4.2.1 各優先規則での性能評価

性能評価の結果を下記の順に述べる。

- ・納期設定 1 の問題に対する ATC ルールでの評価
- ・納期設定 2 の問題に対する ATC ルールでの評価
- ・納期設定 1 の問題に対する $(CR^\beta + SPT)$ ルールでの評価
- ・納期設定 2 の問題に対する $(CR^\beta + SPT)$ ルールでの評価
- ・納期設定 1 の問題に対する $((SL/RPN)^\beta + SPT)$ ルールでの評価
- ・納期設定 2 の問題に対する $((SL/RPN)^\beta + SPT)$ ルールでの評価

3.4.2.1.(a) 納期設定 1 の問題に対する ATC ルールでの評価

Fig. 3-5 から Fig. 3-8 に納期設定 1 の問題に対して、ATC ルールを GA と融合するルールとして使用した場合の結果を示す。Fig. 3-5 には、GA のみの場合や SPT、SLACK ルールと融合した場合の結果も示している。

ATC ルールのパラメータ k , b について、 k が 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, b が 0.0, 1.0, 2.0 の場合の組み合わせの計 15 通りの数値実験を行った。ここではその結果 1000 世代の探索で最も良い解を探索できた $b=0.0$ のときの探索結果と、ジョブショップにおける推奨値 (Vepsalainen and Morton, 1987) である $k=3.0$, $b=2.0$ の結果を掲載する。Fig. 3-5 は最良個体の TOT の世代における推移を 30 問の平均値で表している。なお、 $k=0.2$ 以外の条件では最終

的には全ての問題に対して納期遵守 ($TT=0$) が達成されている。この結果より、GA のジョブ選択用遺伝子のみを用いて探索するよりも優先規則と融合して探索する手法の方が、より短い世代交代で納期を遵守した上でより少ない残業時間のスケジュールを求めることができていることがわかる。さらに、パラメータ k を適切に設定し納期余裕の減少に伴い優先度をより急峻に上昇させていくことでより短い世代交代で TOT の値を小さくできることがわかる。なお、 $k=0.2$ においては納期遅れを解消できない問題が 30 問中 1 問あった。これらの結果は、Fig. 3-2 からわかるように、 k を小さくしすぎると納期にかなり切迫しないと優先度が上昇せず逆に納期遅れを生じてしまったと考えられる。よって、 k には適度な大きさがあるといえる。

パラメータ k を変化させたときの性能を確認するため、30 問の問題について $ATC(b=0.0, k=3.0)$ ルールを使用した場合の TOT の値を基準として、それからの差の平均値 (ひし形) と標準偏差 (縦線、幅が 2σ) を調べた結果を Fig. 3-6 (250 世代目) と Fig. 3-7 (1000 世代目) に示す。平均値は、マイナスの値であるほど $ATC(b=0.0, k=3.0)$ ルールと比較して高性能である。Fig. 3-7 の結果から十分な探索時間を与えると (1000 世代目) 大きな性能差はないが、Fig. 3-6 から短時間の探索を想定した場合は高い探索性能を確認できる。なお、Fig. 3-6、Fig. 3-7 の TOT の差の平均値を示すマークに斜線パターンがあるが、これはその条件での探索の結果、納期遅れを解消できなかった問題があったことを示している。

Fig. 3-8 には総個体数 400 個の内、納期遵守 ($TT=0$) を達成している個体数の世代における推移を示している。ATC ルールを用いるにあたり、パラメータ k を調整することで残業時間を短縮して行くにつれて発生しやすくなる納期遅れを強力に防止できることを期待した。Fig. 3-8 をみるとパラメータ k を小さくすることで納期遅れを達成できている個体数が増加している。なお、パラメータ $k=0.2$ のときは納期遵守を達成できた個体が多い (Fig. 3-8) にも関わらず TOT の改善に繋がっていない (Fig. 3-5)。パラメータ k を小さくしすぎると、ジョブが納期に切迫しすぎて手遅れになるまで優先度を向上させないため、むしろ納期遅れ解消の性能が低下してしまう。そのためこの条件では、比較的大きな残業時間が与えられた環境で納期遵守を達成できた個体が増えているにすぎず、 TOT の改善に繋がらないと考えられる。

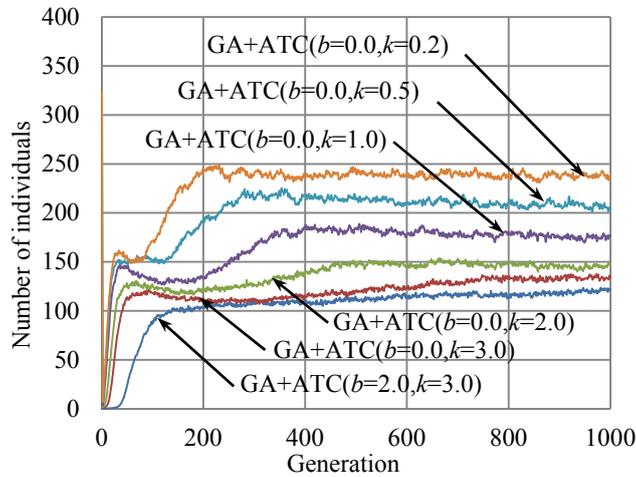


Fig. 3-8 The number of individuals meeting due date in “Due date setting 1”

3.4.2.1.(b) 納期設定2の問題に対するATCルールでの評価

Fig. 3-9 から Fig. 3-12 に納期設定2の問題についてGAとATCルールを融合した方法で探索した場合の結果を示す。ATCルールのパラメータ k 、 b は納期設定1を解いたときと同様に、 k が0.2、0.5、1.0、2.0、3.0、 b が0.0、1.0、2.0の場合の組み合わせの計15通りに設定した。Fig. 3-9は最良個体のTOTの世代における推移を表している。Fig. 3-9より納期設定2の場合も納期設定1の結果(Fig. 3-5)と同様にGAのジョブ選択遺伝子のみを用いて探索するよりも優先規則と融合し、かつ、パラメータ k を適切に設定することでTOTの値をより短い世代交代でより小さくすることができており、効率的な探索が行われていることがわかる。また、ATC($b=0.0, k=3.0$)ルールを使用した場合との差を確認するため、30問の問題について、TOTの差の平均値と標準偏差を調べた結果をFig. 3-10(250世代目)とFig. 3-11(1000世代目)に示す。これら結果より納期設定1の問題に対する結果と比べて性能差が小さくなっているが、納期設定1と納期設定2の場合で同様な傾向が確認できる。Fig. 3-12に納期遵守を達成している個体数の世代交代に伴う変化を示すが、これについても納期設定1の場合と同様の傾向が確認できる。

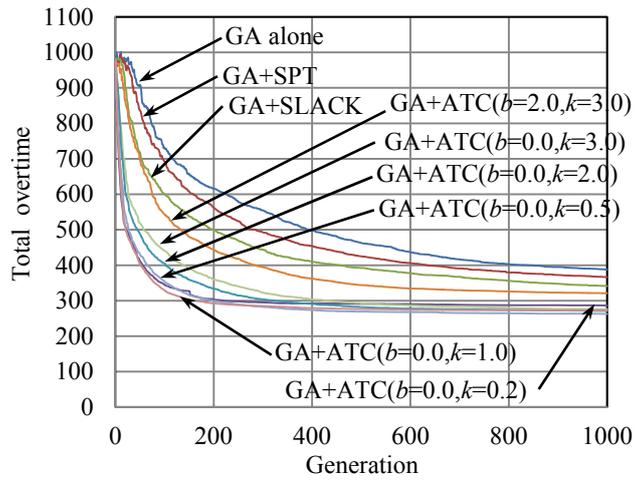


Fig. 3-9 Generational transition of total overtime in “Due date setting 2”

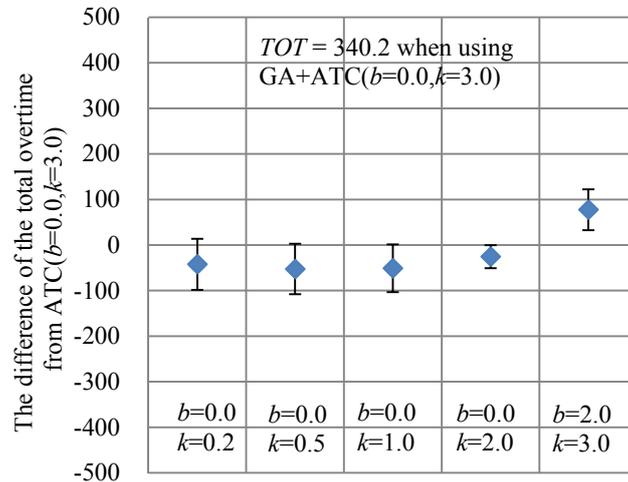


Fig. 3-10 The difference of the total overtime from ATC($b=0.0, k=3.0$) at 250th generation in “Due date setting 2”

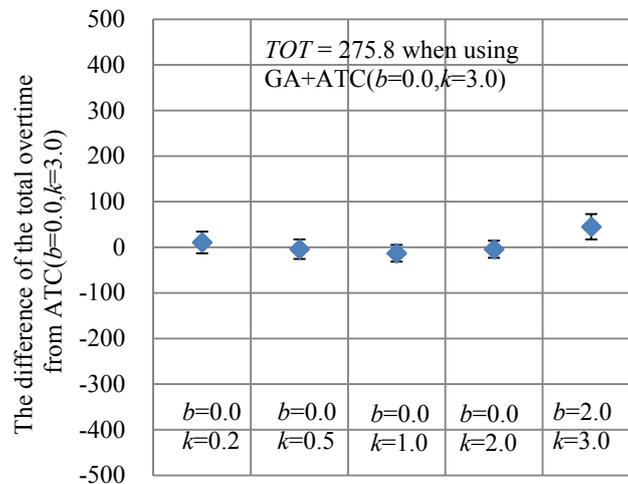


Fig. 3-11 The difference of the total overtime from ATC($b=0.0, k=3.0$) at 1000th generation in “Due date setting 2”

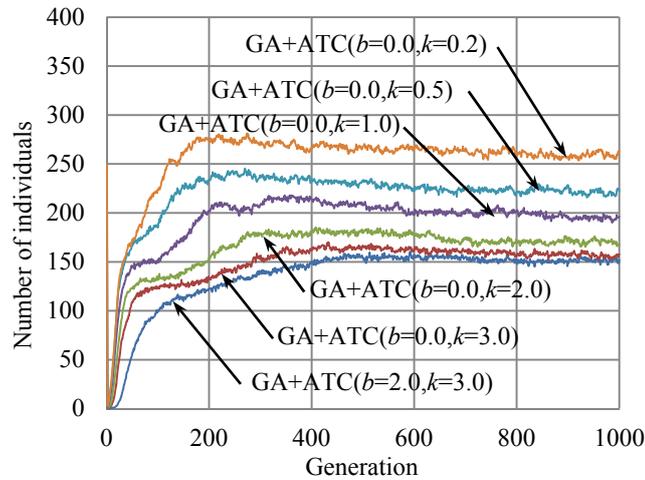


Fig. 3-12 The number of individuals meeting due date in “Due date setting 2”

3. 4. 2. 1. (c) 納期設定 1 の問題に対する(CR^β+SPT)ルールでの評価

Fig. 3-13 から Fig. 3-16 に納期設定 1 の問題に対し GA と(CR^β+SPT)ルールを融合した方法で探索した場合の結果を示す。パラメータ β は 1, 2, 5, 7, 10, 12, 15 に設定した。図中には GA のみを用いた場合や融合するルールに SPT と SLACK を用いた場合も合わせて記載している（これらの結果は Fig. 3-5 と同じ結果である）。

Fig. 3-13 は最良個体の総残業時間 TOT の世代交代における推移を 30 問の平均値で表している。なお、 $\beta=15$ 以外の条件では最終的には全ての問題に対して納期遵守 ($TT=0$) が達成されている。Fig. 3-13 より ATC ルールを融合したときと同様、GA のジョブ選択用遺伝子のみを用いて探索するよりも優先規則と融合して探索する手法の方が、より短い世代交代で納期を遵守した上でより少ない残業時間のスケジュールを求めていることがわかる。さらに、パラメータ β について見ると、納期余裕の減少に伴い優先度をより大きく上昇させていくことで TOT の値をより短い世代交代でより小さくすることができており、効率的な探索が行われていることがわかる。ただし、 $\beta=15$ の場合は納期遵守を達成できない問題が 30 問中 1 問あった。これは、Fig. 3-3 からわかるように、 β を大きくしすぎると納期にかなり切迫しないと優先度が上昇せず逆に納期遅れを生じてしまったと考えられる。よって、 β には適度な大きさがあるといえる。

パラメータ β を変化させたときの性能を確認するため、30 問の各問題について、(CR+SPT)ルール ($\beta=1$) を用いた場合の TOT の値を基準として、それからの差の平均値と標準偏差 (σ) を各ルールを用いた場合について調べた。Fig. 3-14 は 250 世代目、Fig. 3-15 には 1000 世代目での TOT の差の平均値（ひし形）と標準偏差（縦線、幅が 2σ ）を示している。平均

値は、マイナスの値であるほど (CR+SPT) ルール ($\beta=1$) と比較して高性能である。これらの結果から、250 世代目においては $\beta=5\sim 12$ 程度で著しく高い探索性能をもつことを確認できる。また Fig. 3-15 から、十分な探索時間を確保できる場合でも、その性能差は低下するものの依然として高い探索性能を確認できる。なお、Fig. 3-14, Fig. 3-15 の TOT の差の平均値を示すマークに斜線パターンがあるが、これは ATC ルールでの性能評価時と同様、その条件での探索の結果、納期遅れを解消できなかった問題があったことを示している。

Fig. 3-16 には総個体数 400 個の内、納期遵守を達成している個体数の世代における推移を示している。(CR ^{β} +SPT) ルールの特徴は、 β を調整することで残業時間を短縮して行くにつれて発生しやすくなる納期遅れを強力に防止する機能をもつことである。Fig. 3-16 を見ると、パラメータ β を大きく設定することにより納期遵守を達成できている個体数が増加している。なお、パラメータ $\beta=15$ のときは納期遵守を達成できた個体が多いにもかかわらず TOT の改善に繋がっていない (Fig. 3-13)。パラメータ β を大きくしすぎると、ATC ルールのパラメータ k と同様、ジョブが納期に切迫しすぎて手遅れになるまで優先度を向上させないため、むしろ納期遅れ解消の性能が低下してしまう。

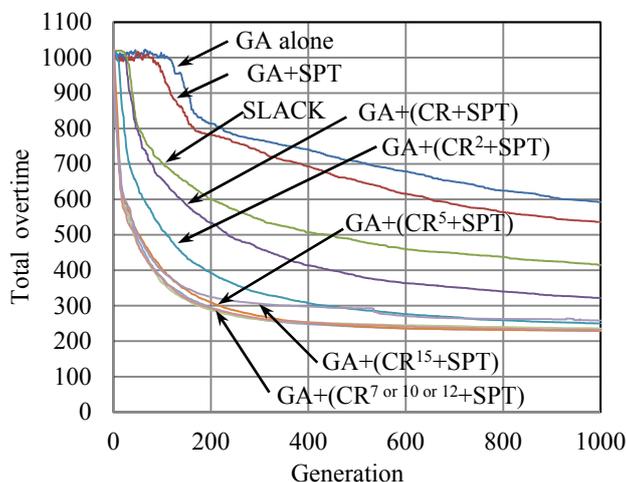


Fig. 3-13 Generational transition of total overtime in “Due date setting 1”

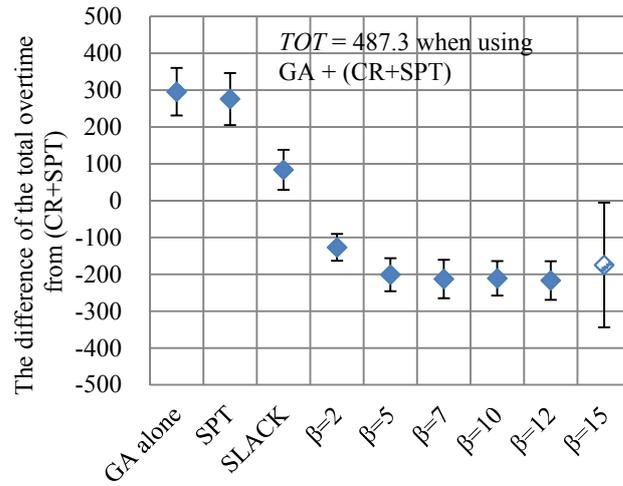


Fig. 3-14 The difference of the total overtime from (CR+SPT) at 250th generation in “Due date setting 1”

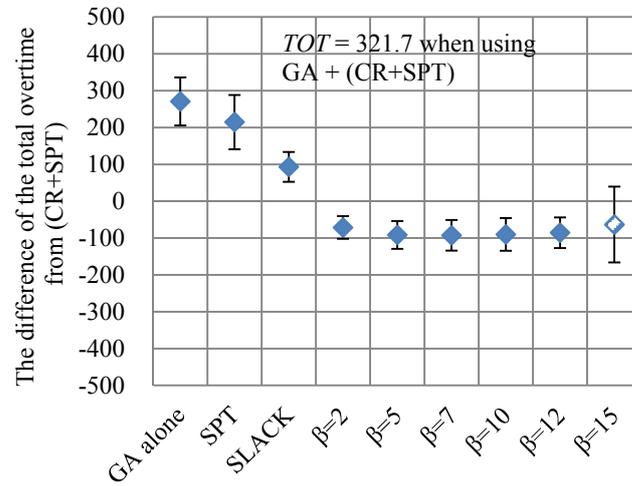


Fig. 3-15 The difference of the total overtime from (CR+SPT) at 1000th generation in “Due date setting 1”

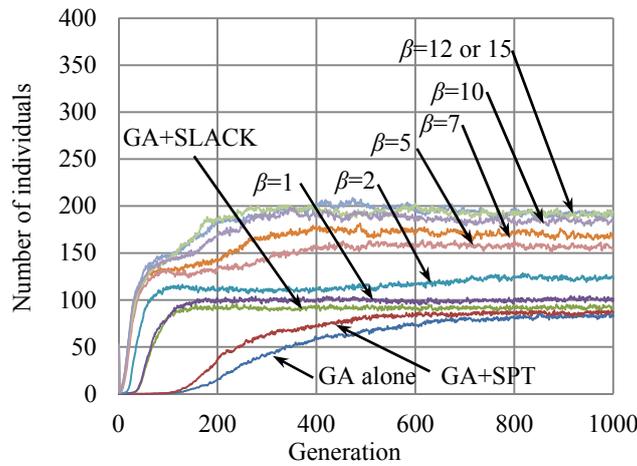


Fig. 3-16 The number of individuals meeting due date in “Due date setting 1”

3.4.2.1.(d) 納期設定2の問題に対する(CR^β+SPT)ルールでの評価

Fig. 3-17 から Fig. 3-20 に納期設定2の問題に対して GA と(CR^β+SPT)ルールを融合した方法で探索した場合の結果を示す. パラメータ β は納期設定1を解いたときと同様に 1, 2, 5, 7, 10, 12, 15 にそれぞれ設定した. 図中には GA のみを用いた場合や融合するルールに SPT と SLACK を用いた場合も合わせて記載している (これらの結果は Fig. 3-9 と同じ結果である). Fig. 3-17 は最良個体の *TOT* の世代における推移を表している. Fig. 3-17 より納期設定2の場合も納期設定1の結果 (Fig. 3-13) と同様に GA のジョブ選択遺伝子のみを用いて探索するよりも優先規則と融合し, かつ, パラメータ β を適切に設定することで *TOT* の値をより短い世代交代でより小さくすることができており, 効率的な探索が行われていることがわかる. (CR+SPT)ルール ($\beta=1$) からパラメータ β を変化させたときの改善効果について, Fig. 3-19 から十分な探索時間を確保できる場合 (1000 世代目), その探索性能の差は著しく大きいというわけではないが, Fig. 3-18 より短い探索時間 (250 世代目) においてその探索性能の高さを確認できる. Fig. 3-20 に納期遵守を達成している個体数の世代交代に伴う変化を示す. 納期設定1の場合と同様の傾向が確認できる.

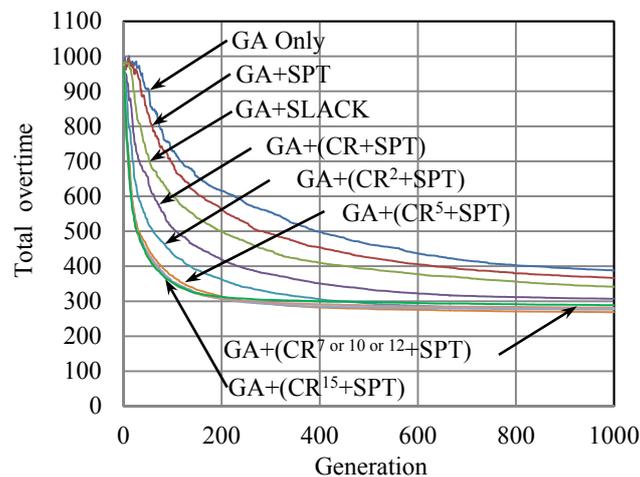


Fig. 3-17 Generational transition of total overtime in “Due date setting 2”

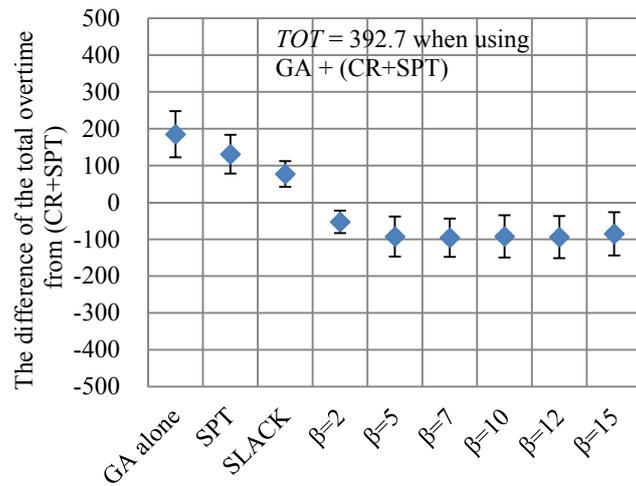


Fig. 3-18 The difference of the total overtime from (CR+SPT) at 250th generation in “Due date setting 2”

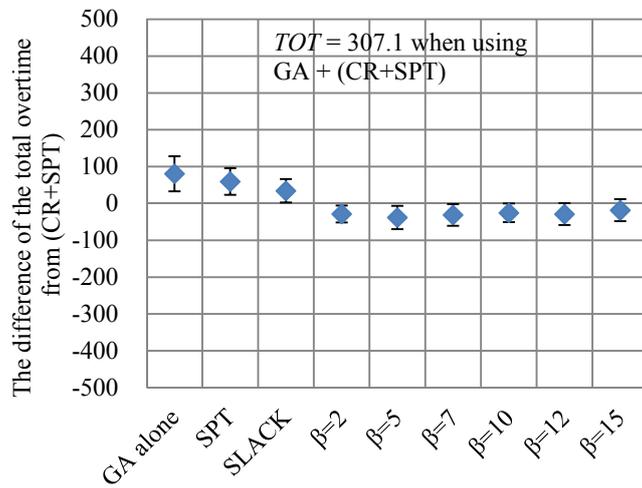


Fig. 3-19 The difference of the total overtime from (CR+SPT) at 1000th generation in “Due date setting 2”

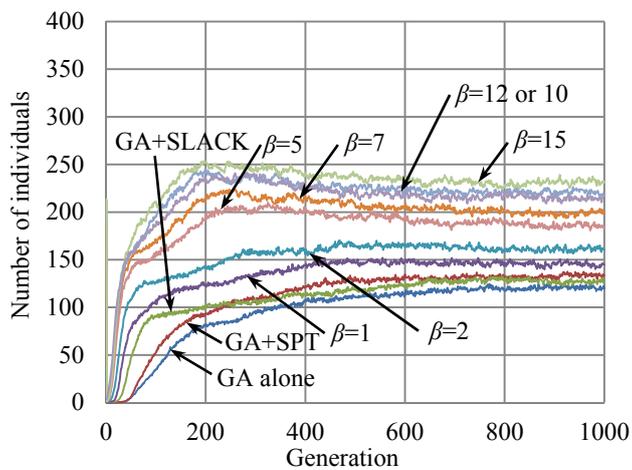


Fig. 3-20 The number of individuals meeting due date in “Due date setting 2”

3.4.2.1.(e) 納期設定1の問題に対する $((SL/RPN)^\beta+SPT)$ ルールでの評価

Fig. 3-21 から Fig. 3-24 に納期設定1の問題に対して、 $((SL/RPN)^\beta+SPT)$ ルールをGAと融合するルールとして使用した場合の結果を示す。図中には、GA のみの場合や SPT, SLACK ルールと融合した場合の結果も示している（これらの結果は Fig. 3-5, Fig. 3-13 と同じ結果である）。 $((SL/RPN)^\beta+SPT)$ ルールのパラメータ β は、 $(CR^\beta+SPT)$ ルールと同様 1, 2, 5, 7, 10, 12, 15 に設定した。Fig. 3-21 は最良個体の TOT の世代における推移を 30 問の平均値で表している。この結果より $(CR^\beta+SPT)$ ルールと同様、パラメータ β を適切に設定し納期余裕の減少に伴い優先度をより急峻に上昇させていくことでより短い世代交代で TOT の値を小さくできることがわかる。また、 $(SL/RPN+SPT)$ ルール ($\beta=1$) を使用した場合との差を確認するため、30 問の問題について、TOT の差の平均値と標準偏差を調べた結果を Fig. 3-22 (250 世代目) と Fig. 3-23 (1000 世代目) に示す。Fig. 3-23 の結果から十分な探索時間を与えると (1000 世代目) 大きな性能差はないが、Fig. 3-22 から短時間の探索を想定した場合は高い探索性能を確認できる。Fig. 3-24 には総個体数 400 個の内、納期遵守 ($TT=0$) を達成している個体数の世代における推移を示しており、 β を大きくすることで納期遅れジョブの発生を抑える効果があることがわかる。なお、 $\beta=10, 12, 15$ においては納期遅れを解消できない問題が 30 問中 1 問あった。これらの結果は、 $(CR^\beta+SPT)$ ルールのパラメータ β と同様の効果をもつことから説明できると考えられる。ただし、 $(CR^\beta+SPT)$ ルールより納期遅れを解消できない β の範囲が拡大している。これは同じ β の値に対して $((SL/RPN)^\beta+SPT)$ ルールの Cr_i が $(CR^\beta+SPT)$ ルールの Cr_i より大きな値をとり易いため、 β がより敏感に作用してしまうためだと考えられる。

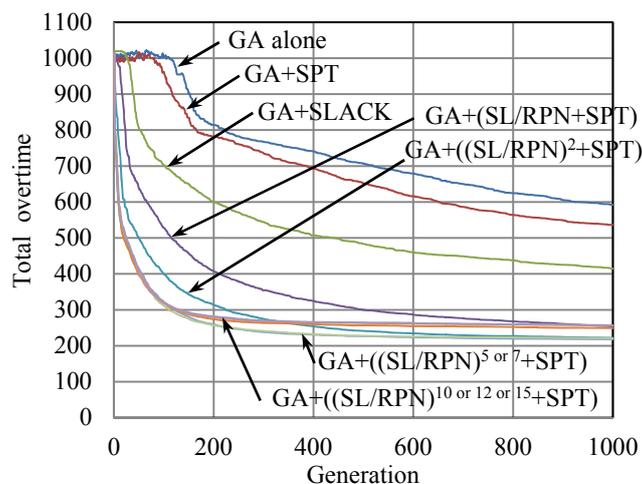


Fig. 3-21 Generational transition of total overtime in “Due date setting 1”

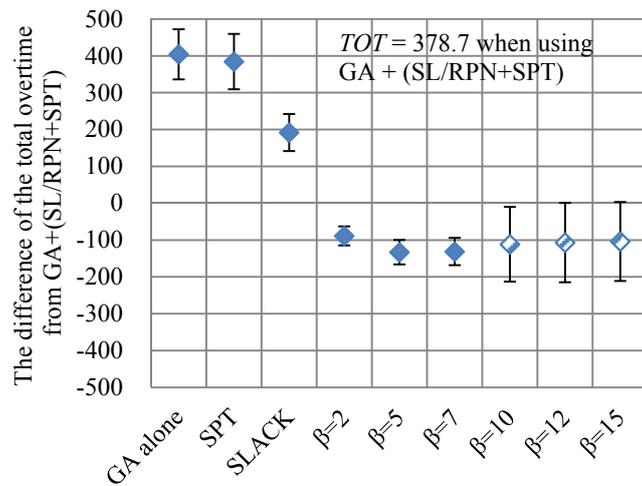


Fig. 3-22 The difference of the total overtime from GA+(SL/RPN+SPT) at 250th generation in “Due date setting 1”

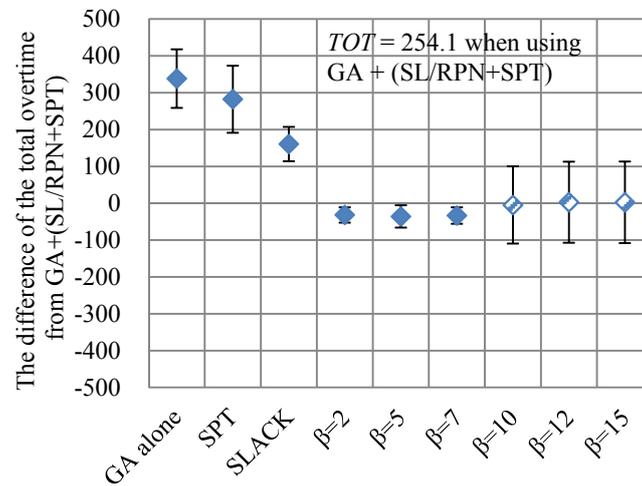


Fig. 3-23 The difference of the total overtime from GA+(SL/RPN+SPT) at 1000th generation in “Due date setting 1”

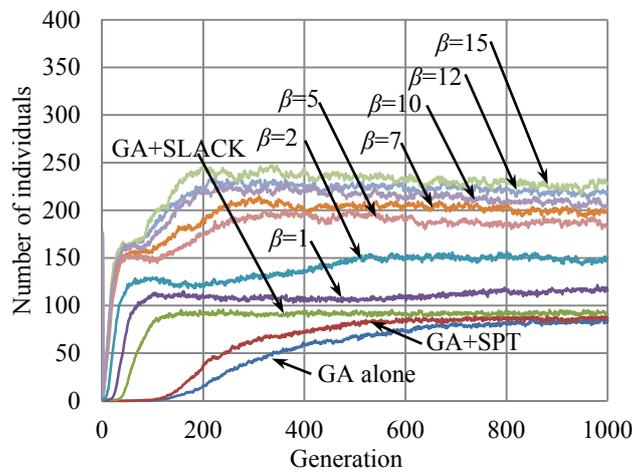


Fig. 3-24 The number of individuals meeting due date in “Due date setting 1”

3.4.2.1.(f) 納期設定2の問題に対する $((SL/RPN)^\beta+SPT)$ ルールでの評価

Fig. 3-25 から Fig. 3-28 に納期設定2の問題について GA と $((SL/RPN)^\beta+SPT)$ ルールを融合した方法で探索した場合の結果を示す。図中には GA のみを用いた場合や融合するルールに SPT と SLACK を用いた場合も合わせて記載している（これらの結果は Fig. 3-9, Fig.3-17 と同じ結果である）。納期設定1の問題に対する結果と比べて性能差が小さくなっているが、 $(CR^\beta+SPT)$ ルールでの場合と同じように、納期設定1 と納期設定2 の場合で似たような傾向が確認できる。

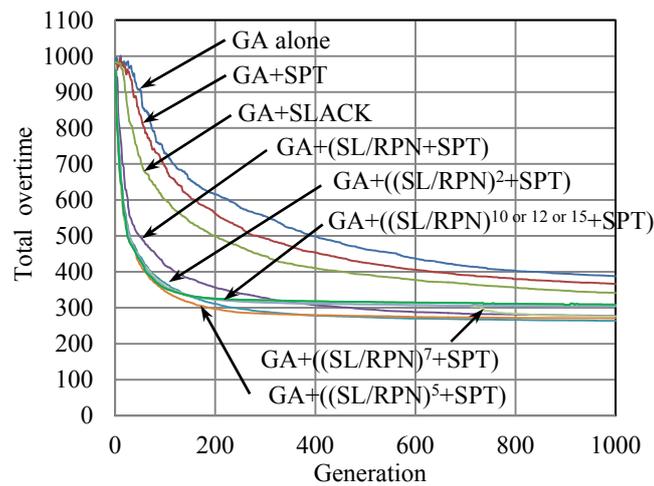


Fig. 3-25 Generational transition of total overtime in “Due date setting 2”

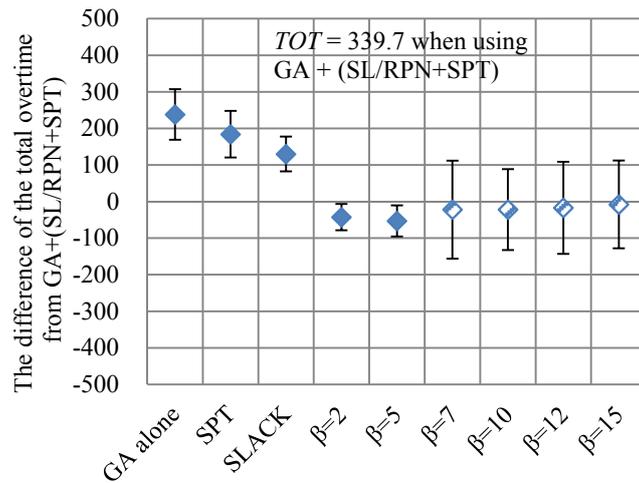


Fig. 3-26 The difference of the total overtime from GA+(SL/RPN+SPT) at 250th generation in “Due date setting 2”

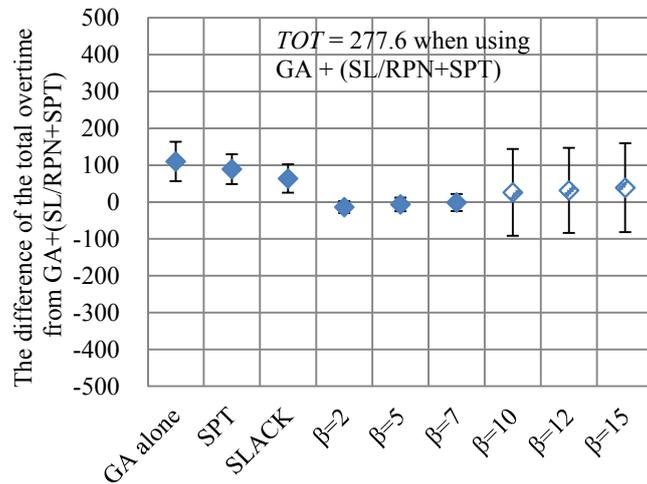


Fig. 3-27 The difference of the total overtime from GA+(SL/RPN+SPT) at 1000th generation in “Due date setting 2”

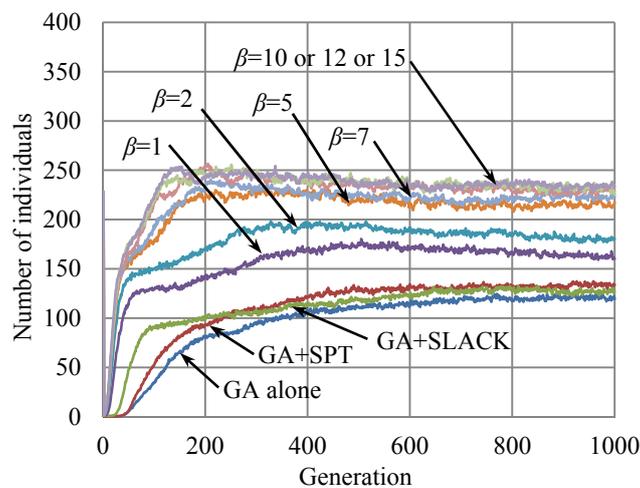


Fig. 3-28 The number of individuals meeting due date in “Due date setting 2”

3.4.2.2 優先規則間の性能差評価

3.4.2.2.(a) 納期設定1の問題に対する性能差評価

Fig. 3-29 から Fig. 3-32 に納期設定1の問題に対し GA と(CR+SPT)ルール ($\beta=1$) , ((SL/RPN)+SPT)ルール ($\beta=1$) , 各優先規則での評価で最も良い性能を持つ ATC($k=1.0, b=0.0$)ルール, (CR⁷+SPT)ルール ($\beta=7$) , ((SL/RPN)⁵+SPT)ルール ($\beta=5$) を融合した方法での結果を比較する. なお, ATC($k=1.0, b=0.0$)ルール(Fig. 3-5), (CR⁷+SPT)ルール ($\beta=7$) (Fig.3-13), ((SL/RPN)⁵+SPT)ルール ($\beta=5$) (Fig. 3-21)は, 各優先規則でそれぞれパラメータ β, k, b を調整したときの 1000 世代目の *TOT* の値が最も小さい場合である.

Fig. 3-29 は最良個体の総残業時間 *TOT* の世代交代における推移を 30 問の平均値で表している. Fig. 3-29 より((SL/RPN)+SPT)ルール ($\beta=1$) は(CR+SPT)ルール ($\beta=1$) より効率的に探索できていることが確認できる. また, 各優先規則でパラメータ β, k, b を調整した場合, 全世代で((SL/RPN) ^{β} +SPT)ルールの探索性能が優れていることが確認できる.

次に 30 問の各問題について, (CR+SPT)ルール ($\beta=1$) を用いた場合の *TOT* の値を基準として, それからの改善率(%)の平均値と標準偏差 (σ) を調べた結果を示す. Fig. 3-30 は 250 世代目, Fig. 3-31 には 1000 世代目での改善率の平均値 (ひし形) と標準偏差 (縦線, 幅が 2σ) を示している. 改善率は, プラスの値であるほど(CR+SPT)ルール ($\beta=1$) と比較して高性能である. これらの結果から, (SL/RPN)+SPT)ルールは(CR+SPT)ルールに対して著しく高い探索性能をもつことを確認できる. また, ((SL/RPN)⁵+SPT)ルール ($\beta=5$) は, (CR⁷+SPT)ルール ($\beta=7$) , ATC($k=1.0, b=0.0$)ルールに対して著しい探索性能を持つことはないが, 比較的探索性能が良いことが確認できる (統計的検定により, ((SL/RPN)⁵+SPT)ルール ($\beta=5$) は, (CR⁷+SPT)ルール ($\beta=7$), ATC($k=1.0, b=0.0$)ルールに対して有意水準 1%で差が認められる.).

Fig. 3-32 には総個体数 400 個の内, 納期遵守を達成している個体数の世代における推移を示している. ((SL/RPN) ^{β} +SPT)ルールの特徴は, 納期までの余裕時間を残り処理工程数をもとに評価し, 処理待ち機会を考慮することで納期遅れの再発を防止することである. Fig. 3-32 を見ると, ((SL/RPN)⁵+SPT)ルール ($\beta=5$) で最も納期遵守を達成できている個体数が増加している. これにより, ((SL/RPN) ^{β} +SPT)ルールは納期設定1の問題に対して納期遅れの再発を強く防止する機能をもったルールであることが確認できる.

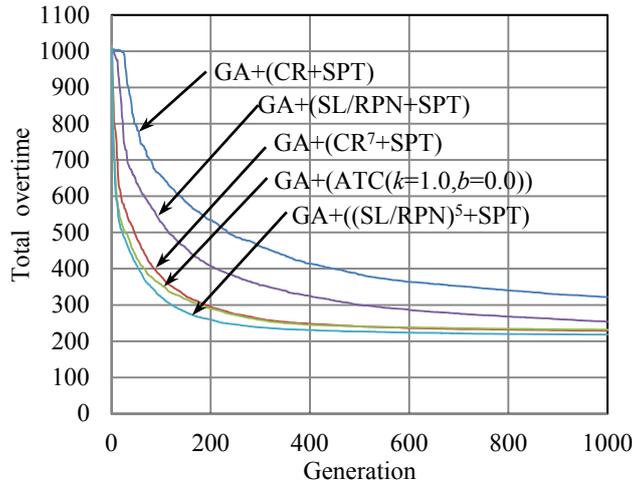


Fig. 3-29 Generational transition of total overtime in “Due date setting 1”

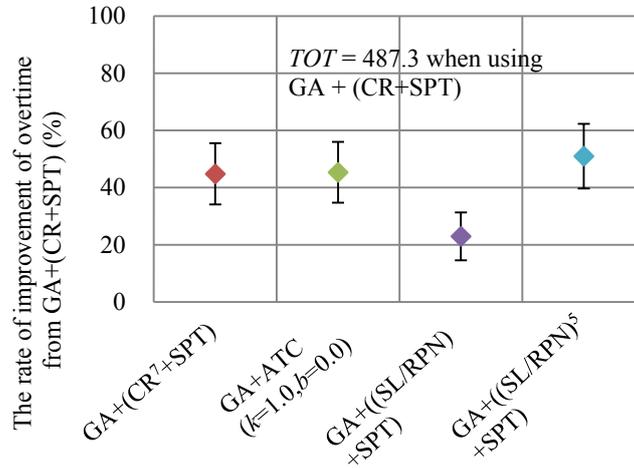


Fig. 3-30 The rate of improvement of total overtime from GA+(CR+SPT) rule at the 250th generation in “Due date setting 1”

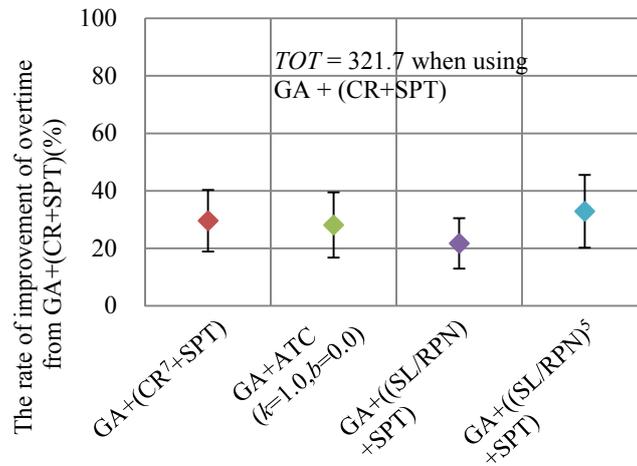


Fig. 3-31 The rate of improvement of total overtime from GA+(CR+SPT) rule at the 1000th generation in “Due date setting 1”

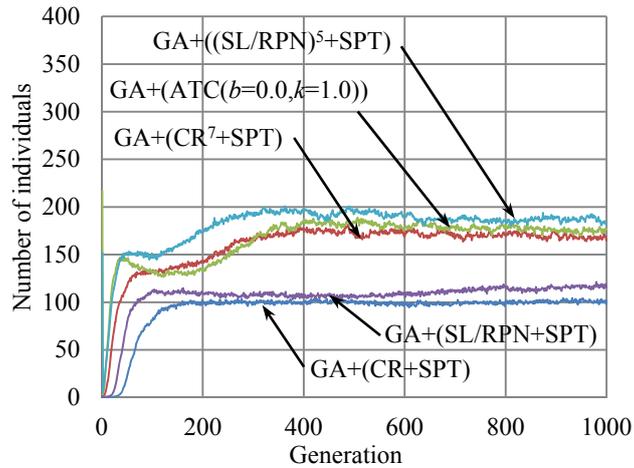


Fig. 3-32 The number of individuals meeting due date in “Due date setting 1”

3.4.2.2.(b) 納期設定2の問題に対する性能差評価

Fig. 3-33 から Fig. 3-36 に納期設定 2 の問題に対し GA と(CR+SPT)ルール ($\beta=1$) , ((SL/RPN)+SPT)ルール ($\beta=1$) , 各優先規則での評価で最も良い性能を持つ ATC($k=1.0, b=0.0$)ルール, (CR⁵+SPT)ルール ($\beta=5$) , ((SL/RPN)²+SPT)ルール ($\beta=2$) を融合した方法での結果を比較する. なお, ATC($k=1.0, b=0.0$)ルール(Fig. 3-9), (CR⁵+SPT)ルール(Fig. 3-17), ((SL/RPN)²+SPT)ルール(Fig. 3-25) は, 各優先規則でそれぞれパラメータ β, k, b を調整したときの 1000 世代目の *TOT* の値が最も小さい場合である.

Fig. 3-33 は最良個体の総残業時間 *TOT* の世代交代における推移を 30 問の平均値で表している. Fig. 3-33 より納期設定 1 の問題と同様, ((SL/RPN)+SPT)ルール ($\beta=1$) は(CR+SPT)ルール ($\beta=1$) より効率的に探索できていることが確認できる. 一方, 各優先規則でパラメータ β, k, b を調整した場合, ATC($k=1.0, b=0.0$)ルール, (CR⁵+SPT)ルール, ((SL/RPN)²+SPT)ルールの探索性能は見られず同等の性能をもつことが確認できる.

次に 30 問の各問題について, (CR+SPT)ルール ($\beta=1$) を用いた場合の *TOT* の値を基準として, それからの改善率(%)の平均値と標準偏差 (σ) を調べた結果を示す. Fig. 3-34 は 250 世代目, Fig. 3-35 には 1000 世代目での改善率の平均値 (ひし形) と標準偏差 (縦線, 幅が 2σ) を示している. これらの結果から, 納期設定 1 の問題と同様, ((SL/RPN)+SPT)ルールは (CR+SPT)ルールに対して著しく高い探索性能をもつ一方, 各優先規則でパラメータ β, k, b を調整した場合, (CR⁵+SPT)ルール, ATC($k=1.0, b=0.0$)ルール, ((SL/RPN)²+SPT)ルール間の探索性能差は見られず同等の性能をもつことが確認できる (統計的検定により, ((SL/RPN)²+SPT)ルール, (CR⁵+SPT)ルール, ATC($k=1.0, b=0.0$)ルール間に有意差なし) .

Fig. 3-36 には総個体数 400 個の内、納期遵守を達成している個体数の世代における推移を示している。これより、納期設定 2 の問題でパラメータ β , k , b を調整した場合、ATC ルール, $(CR^\beta+SPT)$ ルール, $((SL/RPN)^\beta+SPT)$ ルールの順で納期遅れの再発防止の機能を持つと考えられる。

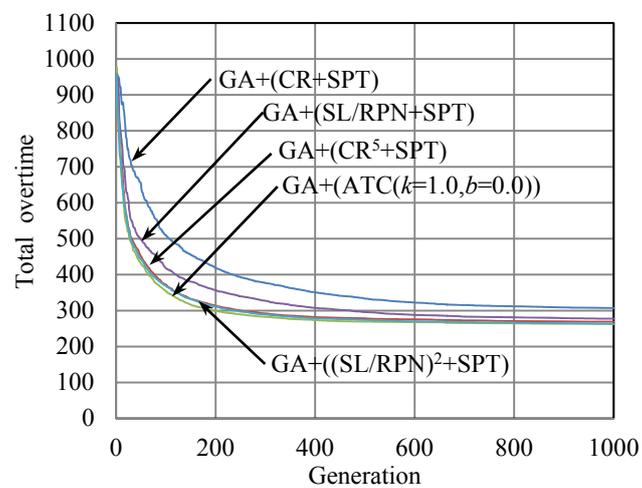


Fig. 3-33 Generational transition of total overtime in “Due date setting 2”

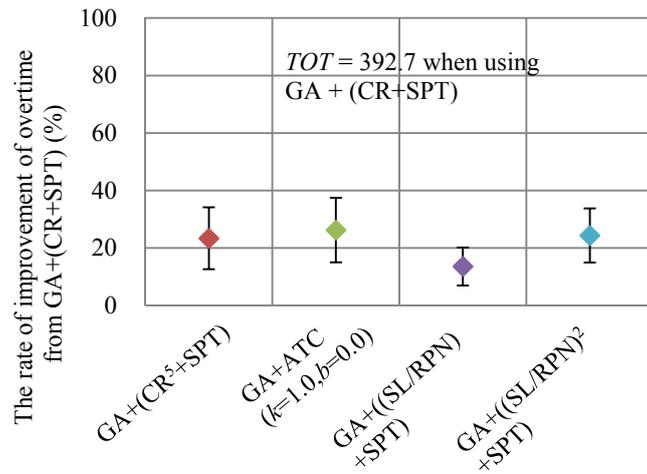


Fig. 3-34 The rate of improvement of total overtime from GA+(CR+SPT) rule at the 250th generation in “Due date setting 2”

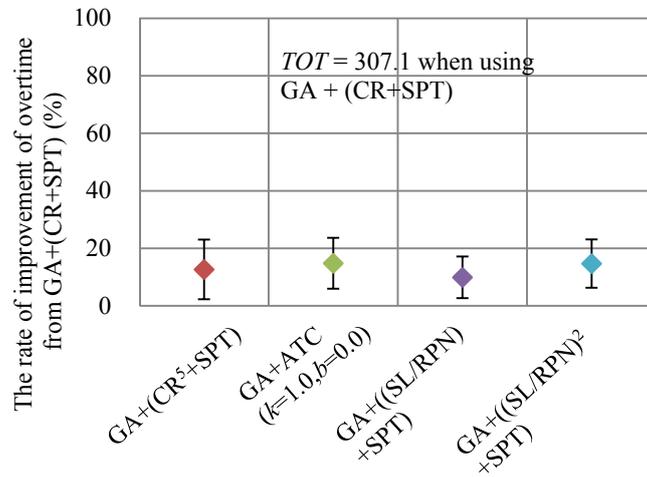


Fig. 3-35 The rate of improvement of total overtime from GA+(CR+SPT) rule at the 1000th generation in “Due date setting 2”

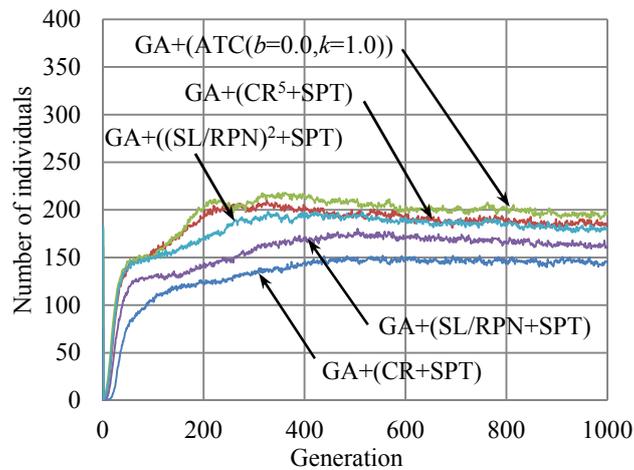


Fig. 3-36 The number of individuals meeting due date in “Due date setting 2”

これら実験結果より $(CR^\beta+SPT)$ ルールおよび $((SL/RPN)^\beta+SPT)$ ルールは ATC ルールに対してほぼ同等の探索性能を持つといえる。しかしながら実用性を考慮するとき、ATC ルールが 2つのパラメータ k, b の調整が必要であることに対して、 $(CR^\beta+SPT)$ ルールおよび $((SL/RPN)^\beta+SPT)$ ルールはパラメータ β のみの調整で使用可能である。このことから $(CR^\beta+SPT)$ ルールおよび $((SL/RPN)^\beta+SPT)$ ルールはパラメータ調整の容易性という利点を持つと考えられる。

$(CR^\beta+SPT)$ ルールと $((SL/RPN)^\beta+SPT)$ ルール間の性能差評価については、ジョブの納期設定によりその性能差にばらつきがみられ、納期設定 1 のようにジョブの納期が任意に設定されている場合は $((SL/RPN)^\beta+SPT)$ ルールが、納期設定 2 のように残業時間帯の終了時刻に納期が設定されている場合には対しては $(CR^\beta+SPT)$ ルールが比較的高い有効性をもつと考えられる。

3.5 結 言

本章では、残業による能力調整を考慮したジョブショップスケジューリング問題を対象とし、納期を遵守しつつ残業時間を最小化するための効率的探索法を提案した。本研究での探索法は、まずフル残業を許容して納期遅れを解消した後に、残業時間最小化の探索を行う。この方法で効率的な探索を行うため、ジョブの処理順序の決定に対して GA と優先規則を融合したジョブ選択法を用いるが、その際、融合する優先規則として残業時間最小を目的とした遺伝的操作に伴う納期遅れの再発を強く防止する機能をもったルールを用いることが有効である。本研究では、納期を評価基準としたジョブショップスケジューリングに対して有効とされる ATC ルールを有効利用するとともに、 $(CR+SPT)$ ルールに納期遅れの再発を強く防止する機能を追加した $(CR^\beta+SPT)$ ルールを提案した。また、納期までの余裕時間を残り処理工程数をもとに評価し、処理待ち機会を考慮することで納期遅れの再発を防止する機能を更に持たせた $((SL/RPN)^\beta+SPT)$ ルールを提案した。これら優先規則は納期までの余裕時間に対する優先度の変化率を調整することができ、これによりジョブが納期に差し迫るほど優先度の上昇率を大きくし、納期遅れの再発を防止する機能を持たせることができる。数値実験の結果、提案手法において優先規則のパラメータを適切に調整することによって、より短い探索時間で納期を遵守しつつ残業時間を短縮できることが確認された。

現実的には本論文では考慮しなかったさまざまな要素も取り入れたより詳細な生産モデルを用いたスケジューリングシミュレーションを繰り返しながら探索する必要があるため、

限られた計算時間で効率よく良い解を求めることができる提案法は実用上高い有効性をもつと考えられる。

なお，本章ではジョブ選択に対してジョブ選択用遺伝子と有効な優先規則を融合することで性能の向上を図った．残業用遺伝子についても有効な知識を取り入れることで更なる性能の改善が可能と考えられ，第4章で述べる．

第4章

遺伝的アルゴリズムと優先規則を融合した残業導入決定

4.1 緒言

残業による能力調整を考慮したジョブショップスケジューリング問題ではジョブの処理順序の決定と残業時間の決定を同時に行う必要がある。ジョブの処理順序に対しては、第3章で述べたジョブ選択用遺伝子 j_gene_{ij} と優先規則の融合手法が提案され、その有効性については第3章で述べた。一方、残業時間の決定については、シフト d_{th} 、機械 m に対する遺伝子 o_gene_{dm} から決定される上限値 LOT_{dm} の時間内で処理完了することができるジョブの工程作業のみを割り当てていく方法を第2章4節1項で述べた。この方法では、遺伝子 o_gene_{dm} のみを用いて残業時間が決定されていた。しかし、ジョブの残業時間での処理の必要性和納期までの切迫度には関連があると考えられ、これを陽に考慮することでより効率的な残業時間の探索が実現できると考えられる。そこで本章では、残業時間の決定に対してもジョブの切迫度の情報を持つ優先規則を組み込むことで、より効率的な残業の決定を行う方法について提案する。なお、ジョブ選択に関しては、第3章で述べた方法を用いるが、利用する優先規則は、 $(CR^\beta+SPT)$ ルールと $((SL/RPN)^\beta+SPT)$ ルールの2つとする。以下、第2節で優先規則を用いた残業時間の決定法について述べ、第3節で数値実験を示し、第4節で結言を述べる。

4.2 優先規則を用いた残業決定法

本章で提案する残業時間の決定法は以下のとおりである。シフト d_{th} で機械 m でのジョブ選択においてジョブ J_i の処理終了時刻が正規の稼働時間外である場合、残業時間帯の最大時間長さ ΔOT 内で処理が終了し、かつ、式(4-1)もしくは式(4-2)を満足する場合のみ次に処理されるジョブの候補に加える (Fig. 4-1)。なお、ジョブ J_i の処理終了時刻が正規の稼働時間内である場合は式(4-1)もしくは式(4-2)での判定は行わず無条件に次に処理されるジョブの候補に加える。

$$\frac{1}{\max[cr_i, 1]} \geq o_gene_{dm}^{th} \quad (4-1)$$

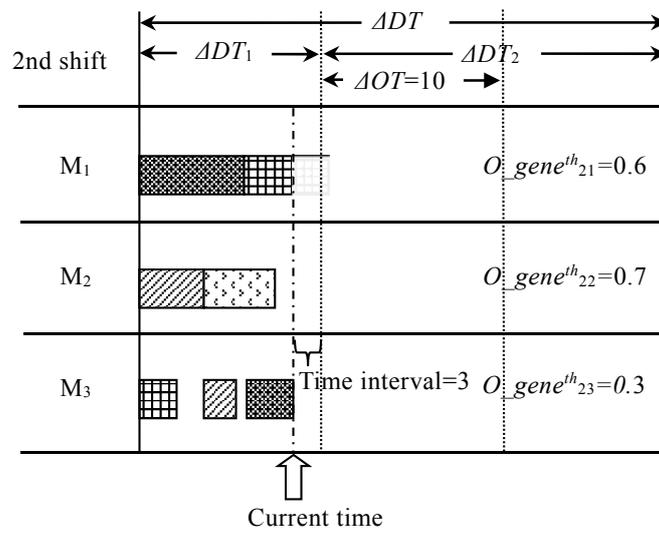
$$\frac{1}{\max[cr_i', 0] + 1} \geq o_gene_{dm}^{th} \quad (4-2)$$

式 (4-1), 式 (4-2) の左辺は 0 から 1 の値を取る. 式 (4-1) はジョブ選択遺伝子に(CR^β+SPT)ルールを融合する場合に用いられ, cr_i は式 (3-5) より求められる. 式 (4-2) はジョブ選択遺伝子に((SL/RPN)^β+SPT)ルールを融合する場合に用いられ, cr_i' は式 (3-7) により求められる. 式 (4-1), 式 (4-2) はそれぞれクリティカル値 cr_i , cr_i' が小さい程, 満足されやすい. つまり, ジョブ J_i の納期までの切迫度が高く納期遅れになる危険性が高いジョブほど残業による処理が許可され易くなる.

式 (4-1), 式 (4-2) を用いて残業時間を決定する場合, $o_gene_{dm}^{th}$ が閾値としての役割を果たすが, 最適な $o_gene_{dm}^{th}$ の値は事前に分からない. そこで, $o_gene_{dm}^{th}$ を GA の残業決定用の遺伝子としてコーディングし, 探索する. この遺伝子 $o_gene_{dm}^{th}$ は第 2 章 4 節 2 項で述べた方法と同様に, 各シフト, 各機械に設定され, 遺伝子操作が施される. ただし, すべてのジョブの納期を満たす個体が見つかるまでは, すべての $o_gene_{dm}^{th}$ の値は 0 に設定される. これにより, 第一の目的である納期遵守が達成されるまでは, すべてのジョブを残業時間帯で処理することが許される (残業時間帯の最大時間長さ ΔOT 内で処理が終了する場合に限る).

第 2 章での残業時間の決定では, 残業時間での処理の必要性和ジョブの納期までの切迫度の関係性は考慮されておらず, GA 単独で実施されている. また第 3 章では, ジョブの処理順序決定にのみ優先規則が利用されていた. 本章での提案手法により, ジョブの処理順序の決定と残業時間の決定の両方をジョブのクリティカル値 cr_i , cr_i' をもとに決定することができる. これによりジョブの処理順序決定と残業時間決定の整合性が取れ, より効率的なスケジュール探索が実施されることが期待できる.

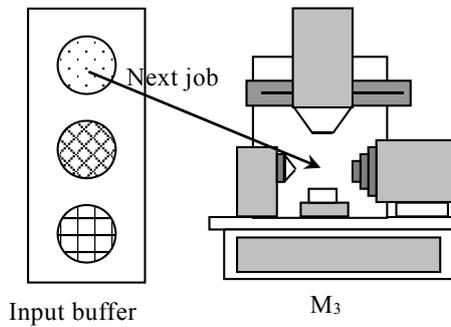
$o_gene^{th}_{dm}$	$d=1$	$d=2$	$d=3$	j_gene_{ij}	O_{i1}	O_{i2}	O_{i3}
$m=1$	0.2	0.6	0.5	Job1	0.8	0.5	0.1
$m=2$	0.9	0.7	0.2	Job2	0.4	0.6	
$m=3$	0.5	0.3	0.4	Job3	0.1	0.6	0.3



Job 1(O_{12}) ; $p_{12}=11, 1/cr_i=0.8$

Job 2(O_{21}) ; $p_{21}=2, 1/cr_i=0.4$

Job 3(O_{43}) ; $p_{43}=8, 1/cr_i=0.05$



Job 1 ; The operation is finished in ΔOT , $1/cr_i > O_gene^{th}_{21}$, $priority_{12}=0.3 \rightarrow$ selected

Job 2 ; The operation is finished in ΔDT_1 , $priority_{21}=0.15$

Job 3 ; The operation is finished in ΔOT , $1/cr_i < O_gene^{th}_{23}$, \rightarrow eliminated.

Fig. 4-1 An example of job selection using the new overtime decision method

4.3 実験結果

4.3.1 実験条件

提案手法の有効性を確認するために数値実験を行った。本章の数値実験では大規模のスケジューリング問題を想定し 10 シフトのスケジューリング期間を設定した。 $\Delta DT=300$, $\Delta DT_1=100$, $\Delta DT_2=200$, $\Delta OT=50$ とした。機械台数 $M=16$, ジョブ数 $N=150$ とし, 1 ジョブあたりの工程数は $U[1, 16]$, 各工程の処理時間 p_{ij} は $U[1, 25]$ で与えた。各工程作業を処理する機械は, 連続した工程が同一機械で処理されないという条件でランダムに設定した。納期設定は, 20% の確率で正規の稼働時間帯における任意の時刻に設定され, 残り 80% の確率で各シフトの残業時間帯の終了時刻に設定する。これは現実的には多くのジョブの納期は, 各シフトの残業時間帯の終了時刻に設定されるが, 中には特急ジョブなど任意の時間が納期とされる場合もあることを想定している。具体的には, 納期のきつさ k_i を $U[2.5, 3.5]$ で定める TWK 法によって納期を与え, そのうちの 80% をランダムに選択し, そのシフト内の残業時間帯の終了時刻に移した。なお, すべてのジョブが想定した 10 シフトに収まらない問題も生成され得るので, 全シフト, 全機械で残業を 25 だけ行う条件で (CR+SPT) ルール ($\beta=1$) のみを用いてスケジューリングし, 11 シフト目に入ったジョブの工程を削除した。削除された工程があるジョブについては, 10 シフト目の残業時間帯の最後の時刻を納期 dd_i に設定した。ジョブの投入については, 初期投入ジョブ数を 32 個とし, その後, 正規の稼働時間帯に平均投入間隔 7 の指数分布でジョブに投入する。

以上の条件でそれぞれの納期設定について問題を 30 問ランダムに作成した。GA の個体数は 400 個体 (初期集団に, 1 個体の全ジョブ, 全工程のジョブ選択用遺伝子 j_gene_{ij} を 0.5 に設定した個体を 1 つ入れておく), 世代交代数は 1000 世代として数値実験を行った。比較対象として SPT ルール (式 (3-9)) と SLACK ルール (式 (3-10)) を利用した場合の実験結果も示す。

4.3.2 実験結果

4.3.2.1 $\beta=1$ における実験結果

Fig. 4-2 から Fig. 4-4 にパラメータ $\beta=1$ に設定したときのスケジューリング結果を示す。Fig. 4-2 は最良個体の総残業時間 TOT の世代交代における推移を 30 問の平均値で表している。なお, すべての条件で全ての問題に対して納期遵守 ($TT=0$) が達成されている。シンボルマーク “*” が付いているものは本章 2 節で提案した残業決定法を用いた場合の結果であ

る。シンボルマーク “*” が付いていないものは第 2 章 4 節 1 項で述べた残業決定法を用いたときの結果である。Fig. 4-2 から(SL/RPN+SPT)ルール ($\beta=1$) を GA と融合した場合、他ルールより非常に高い探索性能をもつことが確認できる。さらに本章で提案した残業時間の決定法を用いることで更に探索性能を向上させることができている。

Fig. 4-3 には 1000 世代目での改善率の平均値（ひし形）と標準偏差（縦線，幅が 2σ ）を示している。改善率は、プラスの値であるほど (CR+SPT) ルール ($\beta=1$) と比較して高性能である。この結果から (SL/RPN+SPT) ルール ($\beta=1$) および本章で提案した残業決定法を用いることで高い探索性能を持つことを確認できる（統計的検定により，(SL/RPN+SPT) ルール ($\beta=1$) および本章で提案した残業決定法を用いることで，他条件に対して有意水準 1%で差が認められた）。

Fig. 4-4 には総個体数 400 個の内，納期遵守を達成している個体数の世代における推移を示している。本章で提案した残業決定法を用いることで納期遵守を達成できている個体数が増加している。これにより，残業時間の決定をジョブの納期までの切迫度と関連付けることで，残業時間短縮の圧力がかかる探索状況でも納期遅れの再発をより強く防止することが確認できる。

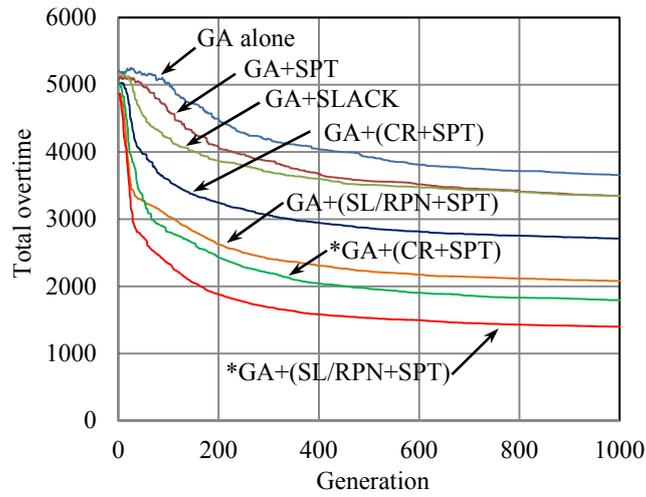


Fig. 4-2 Generational transition of total overtime when $\beta=1$

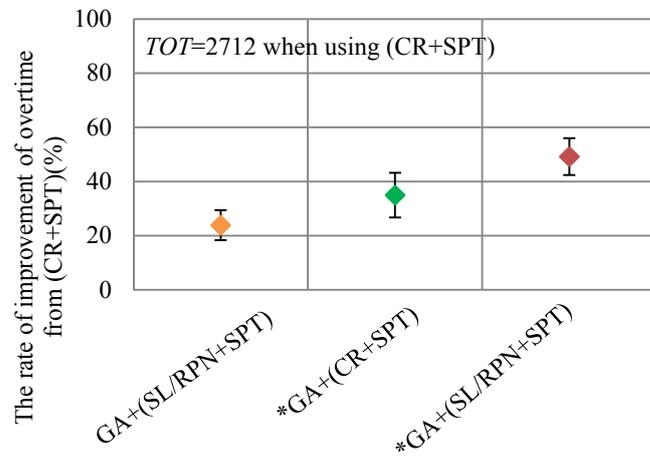


Fig. 4-3 The rate of improvement of total overtime from GA+(CR+SPT) rule at the 1000th generation

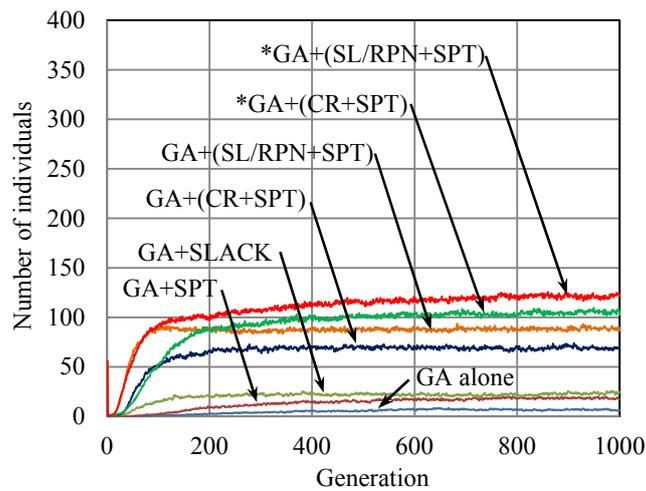


Fig. 4-4 The number of individuals meeting all due dates when $\beta=1$

4.3.2.2 β を調整したときの実験結果

($CR^\beta+SPT$)ルールおよび($(SL/RPN)^\beta+SPT$)ルールにおいてパラメータ β を 1 から 45 まで任意に設定した場合の実験結果を示す。Fig. 4-5 に 1000 世代目における各条件での総残業時間 TOT を示す。本章で提案した残業決定法を用いた場合の結果にはシンボルマーク “*” を付けている。Fig. 4-5 よりパラメータ β を調整することによってすべての条件で探索性能を向上させることができる。ただし、パラメータ β を過大に設定するとすべての条件で納期遵守を達成できない。なお、すべての問題に対して納期遵守を達成できない条件に対してグラフに斜線マークを付けている。これは第 3 章の数値実験で述べたと同様、ジョブの優先度が納期に非常に切迫するまで上がらないためであると考えられる。パラメータ β が 25 以下のとき($(SL/RPN)^\beta+SPT$)ルールはすべての問題で納期遵守を達成でき、パラメータ β が 40 以下のとき($CR^\beta+SPT$)ルールはすべての問題で納期遵守を達成できた。 $(SL/RPN)^\beta+SPT$ ルールが($CR^\beta+SPT$)ルールより納期遵守を達成できるパラメータ β の範囲が狭い理由は第 3 章の数値実験で述べたと同様、($(SL/RPN)^\beta+SPT$)ルールの cr_i が($CR^\beta+SPT$)ルールの cr_i より大きな値をとり易いため、 β がより敏感に作用してしまうためだと考えられる。Fig. 4-5 の結果からパラメータ β の調整で本章で提案した残業決定法の有効性は変わらず、同パラメータ β で比較したとき 2 章で述べた残業決定法より常に高い探索性能を維持していることが確認できる。同時に ($(SL/RPN)^\beta+SPT$) ルールの有効性も確認できる。

Fig. 4-6 から Fig. 4-8 に各条件で最も高い性能を持つパラメータ β に設定したときの性能比較を示す。Fig. 4-6 に最良個体の総残業時間 TOT の世代交代における推移を 30 問の平均値で表している。Fig. 4-7 には 1000 世代目での改善率の平均値（ひし形）と標準偏差（縦線、幅が 2σ ）を示している。改善率はプラスの値であるほど($CR^{35}+SPT$)ルール ($\beta=35$) と比較して高性能である。この結果からパラメータ β を調整した場合でも本章で提案した残業決定法の有効性を確認することができる。同時に($(SL/RPN)^\beta+SPT$)ルールの有効性も確認できる（統計的検定により、($SL/RPN+SPT$)⁵ルール ($\beta=5$) および本章で提案した残業決定法を用いることで、他条件に対して有意水準 1% で差が認められた）。

Fig. 4-8 には総個体数 400 個の内、納期遵守を達成している個体数の世代における推移を示している。Fig. 4-8 より本章で提案した残業決定法は第 2 章で述べた残業決定法より多くの納期遵守を達成できた個体を生成していることが確認できる。また、Fig. 4-4 の $\beta=1$ の場合と比較するとパラメータ β を調整することでより多くの納期遵守を達成できた個体を生成し、($(SL/RPN)^\beta+SPT$)ルールを用いることでそれは更に顕著になることが確認できる。

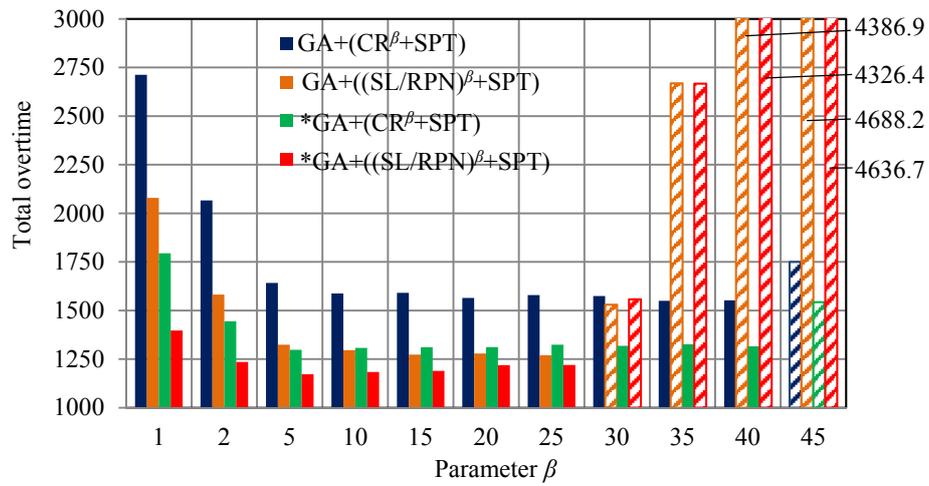


Fig. 4-5 Total overtime at the 1000th generation

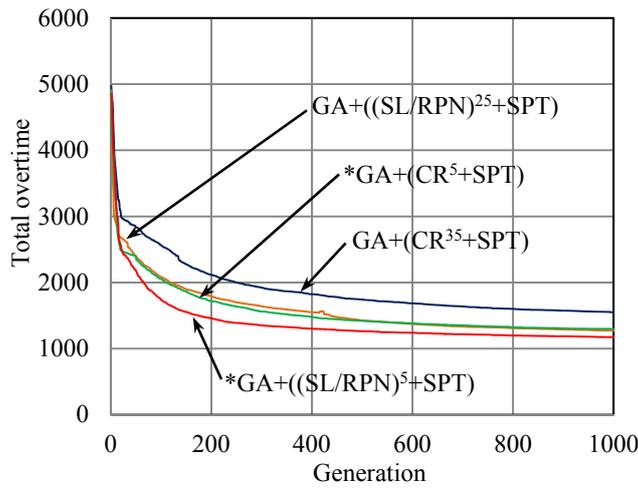


Fig. 4-6 Generational transition of total overtime when using the best value of β for each method

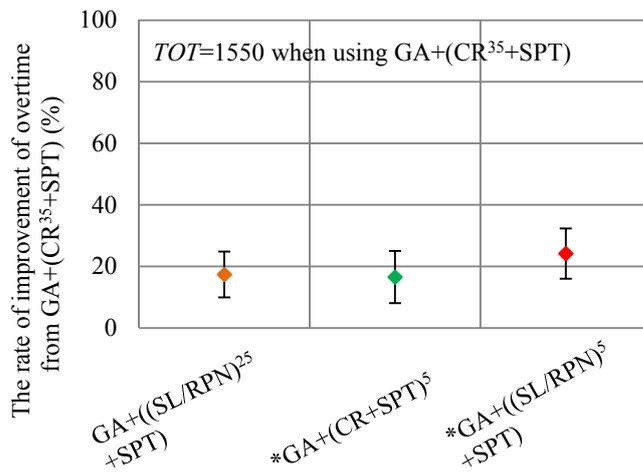


Fig. 4-7 The rate of improvement of total overtime from $GA+(CR^{35}+SPT)$ rule at the 1000th generation

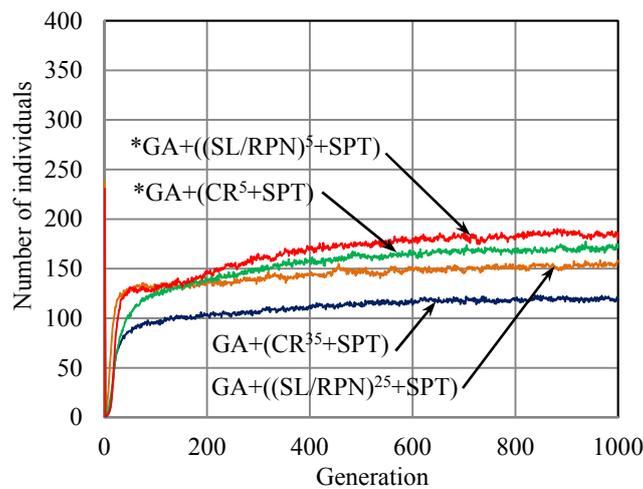


Fig. 4-8 The number of individuals meeting all due dates when using the best value of β for each method

4.4 結 言

本章では残業時間の決定に対して優先規則の知識を用いる方法を提案した。この提案手法では、第3章で提案した優先規則である $(CR^\beta+SPT)$ ルールおよび $((SL/RPN)^\beta+SPT)$ ルールのクリティカル値 cr_i , cr_i' を用いることでジョブの残業時間での処理の必要性和納期までの切迫度を関連付けしている。これにより、ジョブの処理順序決定および残業時間の決定の双方にジョブの納期までの切迫度、つまり、クリティカル値 cr_i , cr_i' を基本とする共通の優先規則が導入されている。数値実験によりこの提案手法の有効性を確認した。

第 5 章

ラグランジュ緩和法を用いた最適性の評価

5.1 緒言

第 2 章～第 4 章において残業による能力調整を考慮したジョブショップスケジューリング法を述べた。ジョブの処理順序の決定に優先規則と GA を融合した方法を用いて、融合する優先規則に納期までの切迫度に対する性質を変化させるパラメータ β を追加し、これを調整することで高速に良解を得ることができることを確認した。残業時間の決定に対してもジョブの処理順序の決定と同様、ジョブの納期までの切迫度に着目し、この知識を持つ優先規則を用いることで、高い探索性能を実現できることを確認した。

本章では、提案したスケジュール探索法の最適性評価を行う。本研究で扱っている問題はその規模が大きくなるにつれて最適解を得ることは困難であるため、最適性の評価はラグランジュ緩和法によって得られる下界値と比較することで行われる。ラグランジュ緩和法では、その制約条件の一部を緩和し目的関数に組み込む。これによりジョブごとに分解された子問題を得て、それらを個別に最適に解くことで下界値を算出できる。ラグランジュ緩和法を最適性の評価に用いたのは、より規模が大きいスケジューリング問題に対して他の数理計画法と比べて短い計算時間で下界値を探索できるためである。また、ラグランジュ緩和法の下界値に対応するスケジュールは一般的には実行不可能であるが、これを実行可能化することで上界値を求め、提案するスケジュール探索手法との比較も行う。

ただし、本評価を行うにあたり総残業時間の目的関数を変更する。第 2 章～第 4 章で用いた総残業時間 TOT に変えて、残業時間帯に終了した個々のジョブすべてに対応した総残業時間 TOT' で評価を実施する。これは、総残業時間 TOT が各機械における残業時間帯内のジョブの終了時刻の最遅時間に対応しており、これをラグランジュ緩和法では扱いにくいためである。

第 2 節で総残業時間に関する目的関数の変更について説明した後、第 3 節でラグランジュ緩和法を用いたスケジュール探索について説明する。第 4 節で数値実験を示し、第 5 章で結論を述べる。

5.2 ラグランジュ緩和法を用いた総残業時間の評価

本研究では Chen et al. (1998) が提案しているラグランジュ緩和法を本スケジューリング問題に適用する。この方法では、一つの機械では同時に一つジョブしか処理できないという制約を緩和することで問題をジョブごとの最適化問題に分解する。これにより最適化するべき問題は1ジョブ問題となり、動的計画法を用いてこれを解くことにより、元問題のスケジュールを求めて行くことになる。よって、この方法によって解かれる問題の評価関数は、ジョブごとに定められるものの総和で表される関数が扱いやすい。例えば、ジョブの納期遅れ時間の総和 TT (式 (2-1)) などである。これに対し、ジョブの中での最大値や最小値で与えられる評価関数に対しては、ジョブごとの問題への分解が難しいため、扱いにくいといえる。例えば、最大納期遅れ時間などである。Chen et al. (1998) の方法はこのような関数に対しても適用可能であるものの、その探索効率は良くない。本研究で扱っている総残業時間の総和 TOT (式 (2-2)) も、あるシフトのある機械での残業時間は、残業時間帯で終了したジョブのうちの最遅時刻によって決まるため、扱いにくい評価関数に属し、問題規模が大きくなるにつれてその適用は困難となる。

そこで本章では、スケジュールの最適性をラグランジュ緩和法によって評価するため、総残業時間の評価を敢えてラグランジュ緩和法での解法に適した評価に変更する。具体的には式 (5-1) で表される総残業時間 TOT' を最小化することを目的とする。

$$TOT' = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} OT_{ij}' \quad (5-1)$$

OT_{ij}' は工程 o_{ij} が残業時間帯で終了した場合において、その残業時間帯の開始時刻からその工程 o_{ij} が完了した時刻 c_{ij} までの時間である。なお、工程 o_{ij} がジョブ J_i の最終工程 n_i である場合には完了時刻 c_{in_i} は C_i と等しい。ある機械で異なる二つの工程作業が同じ残業時間帯で処理された場合、総残業時間 TOT (式 (2-2)) による評価では、最後に処理された工程の終了時刻までの時間がその機械における残業時間として評価されるが、総残業時間 TOT' (式 (5-1)) の評価では、それぞれの工程に対して残業時間が計算され、その総和が評価される。

Fig. 5-1 に具体例を示している。残業時間帯において、それぞれ機械 $m=1$ で3個、機械 $m=2$ で1個、機械 $m=3$ で2個のジョブが処理終了している。 TT (式 (2-2)) による評価では、3本の黒い矢印の長さの総和を残業時間として評価するのに対し、 TOT' (式 (5-1)) の場合には、灰色の矢印も加えた合計6本の時間を総残業時間とする。

この総残業時間 TOT' と TOT では最適化されて得られるスケジュールは当然ながら異なる。よって第3章、第4章で得られた結果および探索性能をここで用いるラグランジュ緩和法に

よる探索解との比較によって評価することは厳密にはできない。しかしながら、提案している GA を用いる方法において評価関数を TOT から TOT' に変更して探索することは極めて容易であり、また、 TOT を小さくすることは TOT' も小さくすることに繋がる場合が多いと考えられるため、提案手法は式 (5-1) で表される総残業時間の最小化にも有効性が高いと考えられる。よって本章では、式 (5-1) で総残業時間を評価した場合において、提案したスケジュール探索法の最適性を評価する。

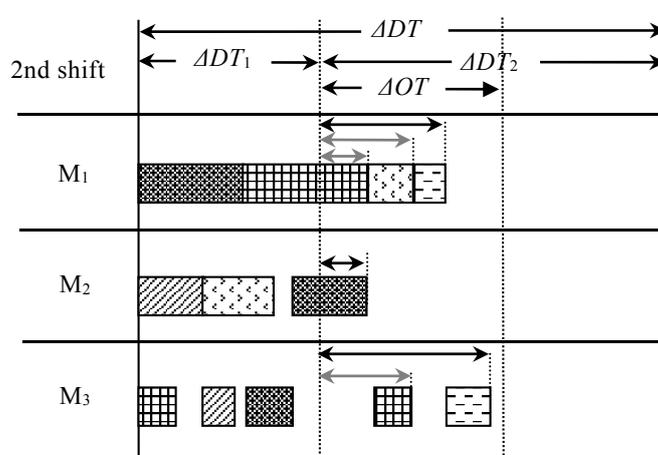


Fig. 5-1 An example of OT_{ij}'

5.3 ラグランジュ緩和法を用いたスケジュール探索法

5.3.1 問題の定式化

本章でのスケジュールリングの目的は、納期を遵守し、かつ、総残業時間 TOT' を最小化することである。ラグランジュ緩和法によってこの問題を解くため、目的関数を式 (5-2) のように設定する。

$$J = W_d \times \sum_{i=1}^N \max[0, C_i - dd_i] + W_o \times \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} OT_{ij}' \quad (5-2)$$

ここで、 W_d は納期遅れに対する重み係数であり、 W_o は残業時間に対する重み係数である。これら重み係数については、本研究の第一の目的である納期遵守を達成するため W_o を W_d より非常に大きな値に設定する。

本スケジュールリング問題の制約のうち、「一つの機械は同時に一つの工程作業しか処理で

きない」という制約を式 (5-3) , 式 (5-4) で表現する.

$$\sum_{o_{ij} \in O_m} \{1(\tau - c_{ij} + p_{ij}) - 1(\tau - c_{ij})\} \leq 1 \quad (5-3)$$

ただし,

$$1(\tau) = \begin{cases} 1, & \text{if } \tau \geq 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5-4)$$

O_m は機械 m で処理される工程の集合, τ ($0 \leq \tau \leq H$, H はスケジュールの時間長さ) はタイムスロットの番号である. ここでタイムスロットとは時間幅のことであり, 1 タイムスロットはスケジュールの最小時間間隔である. すなわち, 時間の分解能を意味する. 式 (5-3) で表現される「一つの機械は同時に一つの工程作業しか処理できない」という条件に該当する制約を, ラグランジュ乗数 λ_{tm} (≥ 0) を導入し式 (5-2) をラグランジュ緩和すると, ラグランジュ緩和問題は式 (5-5) のように表される.

$$\text{Minimize}_{c_{ij}} \left\{ J + \sum_{m=1}^M \sum_{\tau=0}^H \lambda_{tm} \times \left[\sum_{o_{ij} \in O_m} \{1(\tau - c_{ij} + p_{ij}) - 1(\tau - c_{ij})\} - 1 \right] \right\} \quad (5-5)$$

このときラグランジュ乗数 λ_{tm} の数は M (機械台数) $\times H$ (タイムスロット) 数と等しい. ジョブ J_i の工程数を n_i として式 (5-5) を変形すると式 (5-6) となる.

$$\text{Minimize}_{c_{ij}} \left\{ \sum_{i=1}^N \left[W_d \times \max[0, C_i - dd_i] + W_o \times \sum_{j=1}^{n_i} OT'_{ij} + \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{\tau=c_{ij}-p_{ij}}^{c_{ij}-1} \lambda_{tm} \right] - \sum_{m=1}^M \sum_{\tau=0}^H \lambda_{tm} \right\} \quad (5-6)$$

この問題の決定変数は c_{ij} であって, λ_{tm} は固定して最適化を行う. この式の最後の項は定数 λ_{tm} の総和となっているので最適化には無関係である. 式 (5-6) はジョブごとの最適化に分解でき, 式 (5-7) の最適化を行えばよい.

$$\text{Minimize}_{c_{ij}} \left\{ W_d \times \max[0, C_i - dd_i] + W_o \times \sum_{j=1}^{n_i} OT'_{ij} + \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{\tau=c_{ij}-p_{ij}}^{c_{ij}-1} \lambda_{tm} \right\} \quad (5-7)$$

式 (5-7) はジョブごとに各工程の最適な処理完了時刻を決定するスケジューリング問題 (小問題) となっている. この小問題は動的計画法を用いて最適化できる. その結果, 全ジョブの全工程の処理完了時刻 c_{ij} が求められる. それを用いて式 (5-8) のラグランジュ双対問題解くことで下界値を得る.

$$\text{Maximize}_{\lambda} \quad L = \text{Min}_{c_{ij}} \left\{ J + \sum_{m=1}^M \sum_{\tau=0}^H \lambda_{\tau m} \times \left[\sum_{o_{ij} \in o_m} \{1(\tau - c_{ij} + p_{ij}) - 1(\tau - c_{ij})\} - 1 \right] \right\} \quad (5-8)$$

または変形して,

$$\text{Maximize}_{\lambda} \quad L = \sum_{i=1}^N \text{Min}_{c_{ij}} \left[W_d \times \max[0, C_i - dd_i] + W_o \times \sum_{j=1}^{n_i} OT'_{ij} + \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{\tau=c_{ij}-p_{ij}}^{c_{ij}-1} \lambda_{\tau m} \right] - \sum_{m=1}^M \sum_{\tau=0}^H \lambda_{\tau m} \quad (5-9)$$

この問題は最大化問題の中に最小化問題が入れ子になっているため最適解を解析的に求めることは困難である．そこで本研究では劣勾配法を適用することで $\lambda_{\tau m}$ に関する最大化を行う．なお、本方法においては非稼働時間帯には処理が行われないという制約を満たすため、非稼働時間帯のラグランジュ乗数 $\lambda_{\tau m}$ は無限（非常に大きな値）として固定した．

5.3.2 動的計画法によるラグランジュ緩和問題の最適化

式 (5-7) は動的計画法によって解かれる (Chen et al., 1998) . 動的計画法はベルマンの最適性原理に基づく再帰的最適化法である．本研究で用いた動的計画法を以下に説明する．

はじめに各工程 o_{ij} が機械 m でちょうど時刻 t に終了した場合にかかるコスト π_{im}^j を式 (5-10) で定義する．これは、各タイムスロット τ 、機械 m におけるラグランジュ乗数（機械の使用料と解釈される） $\lambda_{\tau m}$ と各工程の処理時間 p_{ij} から計算できる．つまり、各工程を処理するのに必要なコストである．ただし、残業時間帯で処理を行う場合は別途、残業コストがかかる．また、最終工程の場合、納期を超えたタイムスロットには納期遅れコストもかかるとする．

$$\pi_{im}^j = \begin{cases} +\infty & \text{if } \tau < r_i + p_{ij} \\ W_o \times OT'_{ij} + \sum_{\theta=\tau-p_{ij}+1}^{\tau} \lambda_{\theta m} & \text{if } \tau \geq r_i + p_{ij} \\ W_d \times \max[0, t - dd_i] + W_o \times OT'_{ij} + \sum_{\theta=\tau-p_{ij}+1}^{\tau} \lambda_{\theta m} & \text{if } j = n_i \quad \text{and} \quad \tau \geq r_i + p_{ij} \end{cases} \quad (5-10)$$

1行目の式は、投入時刻より前に処理を開始できないため、これを満たさない場合はコストを無限大として定義している。2行目の式は、最終工程でない場合には、処理時間の時間帯におけるラグランジュ乗数（機械の使用料） λ_{tm} と残業時間帯で処理された場合は残業コストの和が総コストであることを意味する。3行目の式は最終工程の場合で、さらに納期遅れに関するコストが加わる。なお、 λ_{tm} の添え字 τ はタイムスロットであり、 π_{tm}^j の添え字 t は時刻である。

上記のコスト π_{tm}^j を用いると、式(5-7)は式(5-11)のように表される。

$$\text{Minimize} \sum_{j=1}^{n_i} \pi_{c_{ij}m}^j \quad (5-11)$$

制約条件

$$c_{i1} = r_i + p_{ij} \quad (5-12)$$

$$c_{i(j-1)} \leq c_{ij} - p_{ij} \quad 2 \leq j \leq n_i \quad (5-13)$$

式(5-11)、式(5-12)、式(5-13)によりジョブごとに分解された小問題を

- ・ジョブの投入時刻 r_i より前で処理開始できない
- ・前工程が処理完了する前に次工程処理を開始できない。

の制約のもと、各工程をどの時刻で処理完了させることでジョブを処理完了するまで必要なコストを最小化できるかという問題で表現できる。この小問題を以下の動的計画法を用いて解く。

動的計画法を適用するに当たり、問題 $JP_k(x)$ を次のように定義する。

$JP_k(x)$: k 番目の工程 o_{ik} 以前のすべての工程が時刻 x 以前 ($c_{ik} \leq x$) に終了するときの最小コストを求める問題(その時の各工程の終了時刻も求める)

この小問題の最適値(コストの最小値)を $f_k(x)$, その時の各工程 ($j \leq k$) 処理完了時刻を c_{ij}^* とする。 x が小さすぎるときこの問題の解が存在しないことも有り得る。例えば $x=0$ では解は存在しないので $f_k(0) = +\infty$ とする。

もし、 $c_{ij}^* < x$ ならば $f_k(x) = f_k(x-1)$ が成り立つ。つまり、工程 k を時刻 x よりも早い時刻に小さなコストで処理終了できるならば、今の時刻 x 以前に処理終了させる場合の最小コスト $f_k(x)$ は $f_k(x-1)$ と等しい。

もし、 $c_{ij}^* = x$ ならば $c_{i(k-1)}^* \leq c_{ij}^* - p_{ij} = x - p_{ik}$ となり、よって、 $f_k(x) = \pi_{xm}^k + f_{k-1}(x - p_{ik})$

が成り立つ。つまり、工程 k を時刻 x に終了させるときに最小コストとなるならば、工程 k までの全工程の最小コストは、工程 k をちょうど時刻 x に処理終了するためのコスト π_{xm}^k と、 $k-1$ 番目以前の工程すべてを $(x - p_{ik})$ 以前に処理終了する場合の最小コスト $f_{k-1}(x - p_{ik})$ との和となる。よって、最小コストは次の式 (5-14) のように再帰的に計算できる。

$$f_k(x) = \min\{f_k(x-1), \pi_{xm}^k + k_{k-1}(x - p_{ik})\} \quad (5-14)$$

以上より、時刻 0 から時刻を増やしながらコストを計算し、それが時刻 $x-1$ でのコストよりも小さくならないならば、 $x-1$ 以前に終了させるときに最適で、 x 以前に終了させる場合の最小コスト $f_k(x)$ は $f_k(x-1)$ となる。もし、小さくなったならば、 x で終了させる場合が最適となり、 $\pi_{xm}^k + f_{k-1}(x - p_{ik})$ が最小コストとなる。第 1 工程について時刻 H までこれを計算したら、その結果を用いて第 2 工程以降も計算する。最適値(コストの最小値)は最終工程 n_i の時刻 H におけるコストの値 $f_{n_i}(H)$ となる。これから逆にさかのぼって最適解(各工程の最適な処理完了時刻 c_{ij}^*) が分かる。

5.3.3 実行可能スケジュールの導出

5章3節2項で述べた方法で求められるコスト最小のスケジュールは「一つの機械は同時に一つの工程作業しか処理できない」という制約を緩和して得られたものであるため、一般的には実行不可能なスケジュールとなっている。これを何らかの方法で実現可能なスケジュールへ変換し、このコスト最小のスケジュールに近い実行可能なスケジュールを得ることができれば、それは性能が良いスケジュールになる可能性があると考えられる。このスケジュールに対する評価値の最良のものが上界値となる。

本研究では、次のようにして実行可能解を求める。ジョブの各工程 o_{ij} の処理開始時刻を下界値に対応したスケジュールにおいて処理されたシフトのはじめとする。なお、その時刻が投入時刻 r_i よりも早い場合には、投入時刻 r_i に従い投入され、それ以降に処理可能となる。下界値に対応したスケジュールにおける各ジョブ各工程の処理終了時刻 c_{ij} を求め式 (5-15) によりジョブの優先度 $priority_{ij}$ を求めスケジューリングする。すなわち、下界値に対応するスケジュールにおける各工程の処理終了時刻が早いものほど優先される。これにより、「一つの機械は同時に一つの工程作業しか処理できない」という制約を違反しているスケジュールから実行可能化されたスケジュールが生成され、上界値が得られる。なお、各ジョブ工程の処理開始時刻を基準として優先度を計算する方法も試みたが、処理終了時刻を基準とした

方が性能が良かったため、この方法を採用した。

$$priority_{ij} = \frac{H - c_{ij}}{H} \quad (5-15)$$

5.3.4 劣勾配法によるラグランジュ乗数の更新

本研究では、劣勾配法（Chen et al., 1998）を適用することで式（5-9）の λ_{tm} に関する最大化を行う。ラグランジュ乗数 $\lambda_{tm}^0 = 0$ から開始し、式（5-16）に従って現在のラグランジュ乗数 λ_{tm}^h から新たなラグランジュ乗数 λ_{tm}^{h+1} を生成する手続きを繰り返す。なお、 h はラグランジュ乗数 λ_{tm} の更新回数である。

$$\lambda_{tm}^{h+1} = \max \left\{ 0, \lambda_{tm}^h + \alpha \frac{UB^* - LB^{(h)}}{\sum_{\tau=0}^H \sum_{m=1}^M g_{tm}^{\tau, 2}} g_{tm}^h \right\} \quad (5-16)$$

ここで、 UB^* は更新回数 h 回目までに求められている最良な総残業時間 TOT' の上界値、 $LB^{(h)}$ は更新回数 h 回目までに求められている最良な総残業時間 TOT' の下界値、 $\alpha (0 \leq \alpha \leq 2)$ は劣勾配法の各反復におけるステップサイズを決めるパラメータ、 g_{tm}^h は機械 m のタイムスロット τ における制約違反量、つまり機械不足台数であり式（5-17）で表される。

$$g_{tm}^h = \sum_{o_{ij} \in O_m} \{1(\tau - c_{ij} + p_{ij}) - 1(\tau - c_{ij})\} - 1 \quad (5-17)$$

5.3.5 ラグランジュ緩和法による探索手順

探索手順を以下に示す。Fig. 5-2 にフローチャートを示す。

Step1 : ラグランジュ乗数 λ_{tm}^0 の初期化

すべてタイムスロット τ 、すべての機械 m におけるラグランジュ乗数 λ_{tm}^0 をゼロに設定する。ただし、非稼働時間帯のラグランジュ乗数 λ_{tm} については、無限（非常に大きな値）に固定しておく。

Step2 : 動的計画法による最適化（下界値の算出）

工程 o_{ij} が時刻 t に機械 m で処理完了した場合にかかるコスト π_{tm} を求める。これは5章3節2項で述べた式（5-10）によって計算できる。繰り返し回数 $h=0$ のときは

与えられたラグランジュ乗数の初期値（すべての $\lambda_{tm}^0=0$ ）をもとに各工程の作業コストを計算する． $h>0$ のときは $(h-1)$ 回目の更新によって得られたラグランジュ乗数 λ_{tm}^{h-1} を用いてコスト π_{tm} を求める．

ジョブごとに小問題化に分解されたものに対してコスト π_{tm} が最小となるように動的計画法により解き，各工程の処理完了時刻 c_{ij} を決定する．すべてのジョブに対してこれを繰り返すことであるラグランジュ乗数 λ_{tm} でのスケジュールが作成され下界値が得られる．

Step3：実行可能化（上界値の算出）

Step2 で得られたスケジュールは一般的には実行不可能なスケジュールとなっている．そのため，5章3節3項で述べた方法で実行可能なスケジュールへ変換する．

Step4：劣勾配法によるラグランジュ乗数 λ_{tm} の更新

各タイムスロット τ ，各機械 m におけるラグランジュ乗数 λ_{tm} を5章3節4項で述べた劣勾配法を用いて更新する．

Step5：終了判定

終了判定を行い，あらかじめ設定しておいた条件を満足した場合，探索を終了する．下記の本数値実験では事前実験で得られた適切な更新回数を設定し一定の更新回数に達した場合，探索を終了させる．

本章の目的は第2章～第4章で提案したGAと優先規則の融合によるスケジューリング手法の最適性の評価を行うことである．そこで，ラグランジュ緩和法によるスケジューリング手法で得られた下界値と比較することでこれを行う．つまり，Step2の動的計画法で得られる下界値との比較によりGAと優先規則の融合によるスケジューリング探手法で得られたスケジュールの最適性評価を行う．また，Step3の実行可能化によって得られた上界値と比較することで，ラグランジュ緩和法によるスケジューリング手法との性能比較も行う．

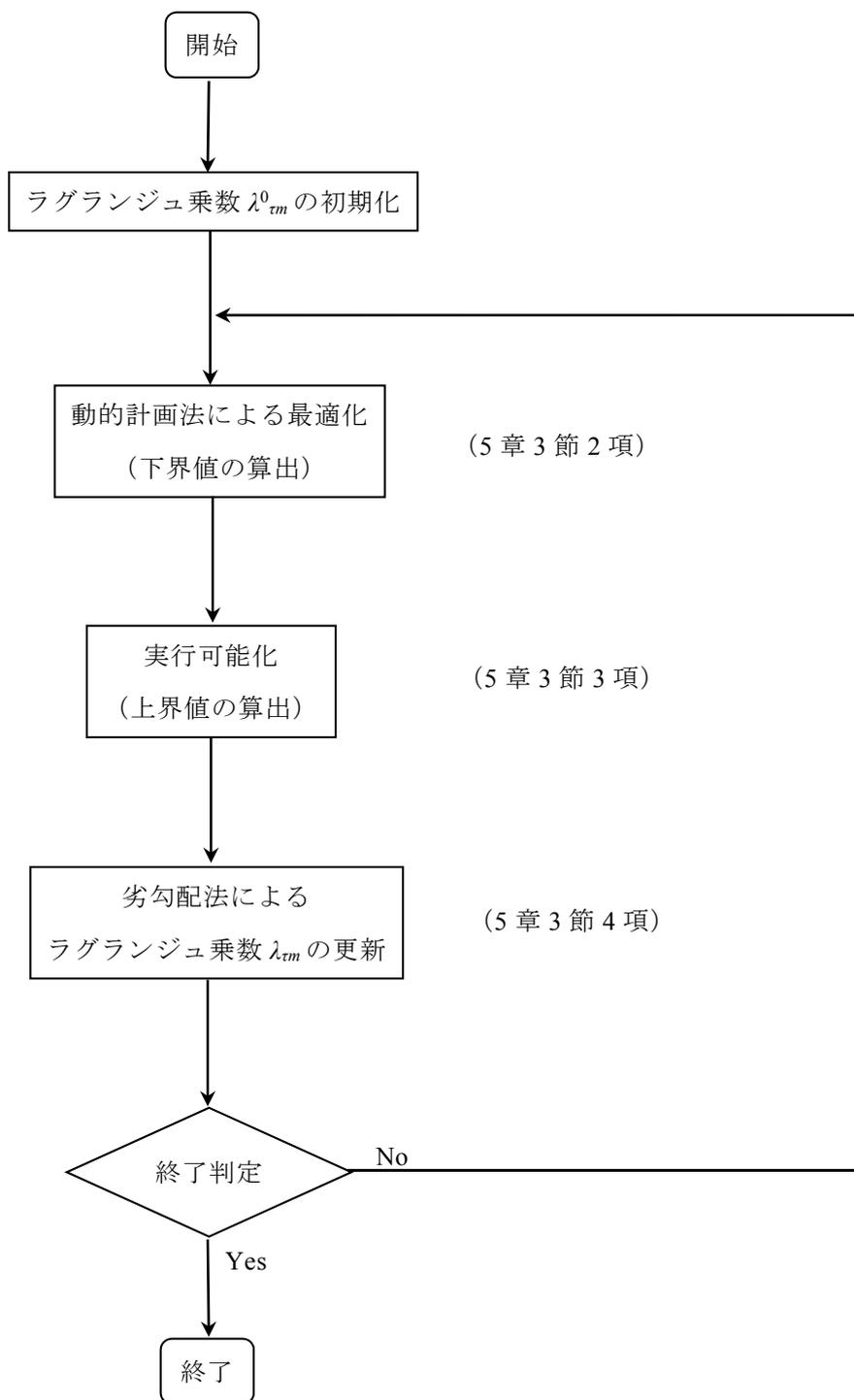


Fig. 5-2 Scheduling search using Lagrangian relaxation method

5.4 数値実験

5.4.1 実験条件

本研究の提案手法とラグランジュ緩和法によるスケジューリング手法の性能比較を行うために数値実験を行う。問題の規模が異なる3通りの問題を用いる (Table 5-1)。

Table 5-1 Experimental Conditions (Scale of problem)

問題規模	(小規模)	(中規模)	(大規模)
シフト数: D	3シフト	5シフト	10シフト
機械台数: M	4台	8台	16台
ジョブ数: N	36個	80個	150個
ジョブの工程数: n_i	U[1,4]	U[1,8]	U[1,16]
納期係数: k_i	U[2.5,3.5]	U[2.5,3.5]	U[3.0,4.0]

さらに、時間の分解能が異なる2つの条件を用意した (Table 5-2)。この時間の分解能はタイムスロット τ の細かさを意味し、時間の分解能を小さくすることでより高分解能なスケジューリング作成が可能となるが、設定する必要なラグランジュ乗数 λ_{tm} は多くなるため高性能な下界値および上界値を求めることはより困難になると考えられる。

Table 5-2 Experimental Conditions (Scale of time resolution)

時間分解能	(粗い問題)	(細かい問題)
1シフトの時間長さ: ΔDT	30	300
正規の稼働時間帯の長さ: ΔDT_1	10	100
残業時間帯の時間長さ: ΔOT	5	50
非稼働時間帯の時間長さ: ΔDT_2	15	150
ジョブの1工程あたりの処理時間: p_{ij}	U[1,3]	U[1,30]

ジョブの投入については初期投入数を $3 \times M$ 個、その後、粗い問題では正規の稼働時間帯に平均投入間隔 5 の指数分布で、細かい問題では平均投入間隔 10 の指数分布でジョブに投入する。納期の設定についてすべてのジョブが各シフトの残業時間帯の終了時刻に設定

される。なお、すべてのジョブが想定したシフト内に収まらない場合もあるため、粗い問題は全シフト、全機械で2だけ残業を許可し、また、細かい問題は20だけ残業を許可し(CR+SPT)ルールのみを用いてスケジューリングし、想定されたシフトを超えたジョブの工程を削除した。このとき、削除された工程のあるジョブの納期は想定した最後のシフトの残業時間帯の終了時刻に設定した。以上の条件でそれぞれ30問の問題を作成した。

以下、各問題の記載方法については Table 5-3 に従う。

Table 5-3 Experimental Conditions

	(粗い問題)	(細かい問題)
(小規模問題)	小規模 (粗)	小規模 (細)
(中規模問題)	中規模 (粗)	中規模 (細)
(大規模問題)	大規模 (粗)	大規模 (細)

GA を適用する際には、総残業時間に関する評価は TOT' (式 (5-1)) によって行う。これは個体の適応度を評価する際に、第2章4節で説明した手順において、 TOT (式 (2-2)) の代わりに TOT' (式 (5-1)) を用いるだけで実現できる。個体数は400個(初期集団に、1個体の全ジョブ、全工程のジョブ選択用遺伝子 j_gene_{ij} を0.5に設定した個体を1つ入れておく)、世代交代数は小規模(粗)で500世代、小規模(細)で1000世代、中規模および大規模で2000世代に設定した。

ラグランジュ緩和法による探索について目的関数(式(5-2))の重み W_d は十分大きい整数を設定し、 W_o は1と設定した。Step5の終了判定は繰り返し回数10000回とした。また、Step4のラグランジュ乗数 λ_{tm} の更新について、式(5-15)におけるパラメータ α は初期値を2とし300回連続して下界値が更新されない場合 $\alpha \leftarrow \alpha/2$ とする方法(Reeves・横山, 1997)を採用した。

5.4.2 実験結果

実験結果を下記の順に示す。

- ・小規模(粗)での評価結果
- ・小規模(細)での評価結果
- ・中規模(粗)での評価結果
- ・中規模(細)での評価結果
- ・大規模(粗)での評価結果

・大規模（細）での評価結果

5.4.2.1 小規模（粗）での評価結果

Table 5-4 および Fig. 5-3 に小規模（粗）の問題に対して GA 単独，GA と $(CR^\beta+SPT)$ ルール および $((SL/RPN)^\beta+SPT)$ ルールを融合した場合，ラグランジュ緩和法を用いて探索された上界値および下界値を示す．パラメータ β は 0.5, 1, 2, 3, 4, 5 に設定した．

Table 5-4 に各条件での各問題（全 30 問）での総残業時間 TOT' を示す．Ave. は 30 問の TOT' の平均値を意味し， $GAP(\%)$ は下界値からのギャップであり，（各条件での Ave. - 下界値） / 下界値 $\times 100$ で計算される．なお，括弧付けの値が記載されている条件では納期遵守が達成されず，括弧の中に記入している値だけ総納期遅れ時間 TT が発生したことを意味する．この場合，Ave. および $GAP(\%)$ には括弧をつけて参考値とする．Table 5-4 より GA と $(CR^\beta+SPT)$ ルール および $((SL/RPN)^\beta+SPT)$ ルールを融合しパラメータ β を調整することで，下界値に非常に近い解を探索することができている．また，ラグランジュ緩和法によって実行可能解（上界値）を探索した場合，問題番号 10 で納期遵守を達成できなかった．優先規則を融合しない GA 単独と比べても，GA と $(CR^\beta+SPT)$ ルール および $((SL/RPN)^\beta+SPT)$ ルールを融合した手法の有効性が確認できる．なお，パラメータ β の値は 0.5 と小さな値で最も良い解を探索できている．問題の規模が小さく，かつ時間の分解能が粗い場合，問題自体がそれほど難しくなく，あえて優先規則による納期までの切迫度を強調し過ぎないほうが良い解が得られたと考えられる．

Fig. 5-3 に GA 単独，GA と $(CR^{0.5}+SPT)$ ルール および $((SL/RPN)^{0.5}+SPT)$ ルールを融合した場合，ラグランジュ緩和法を用いて探索された下界値の探索推移を示す．なお，ラグランジュ緩和法による上界値については納期遵守を達成できていない問題があり評価比較ができないため省略する．Fig. 5-3 より，GA と $(CR^{0.5}+SPT)$ ルール および $((SL/RPN)^{0.5}+SPT)$ ルールを融合した手法での解はすばやく最終的な下界値に近づき，最終的に GAP が極めて小さく最適解に非常に近い解を得ていることが分かる． $(CR^{0.5}+SPT)$ ルールと $((SL/RPN)^{0.5}+SPT)$ ルール間の性能差はなく同等であるといえる．これは第 3 章 4 節 2 項で納期設定 2 の問題を用いた時の結果（Fig. 3-33）と類似している．

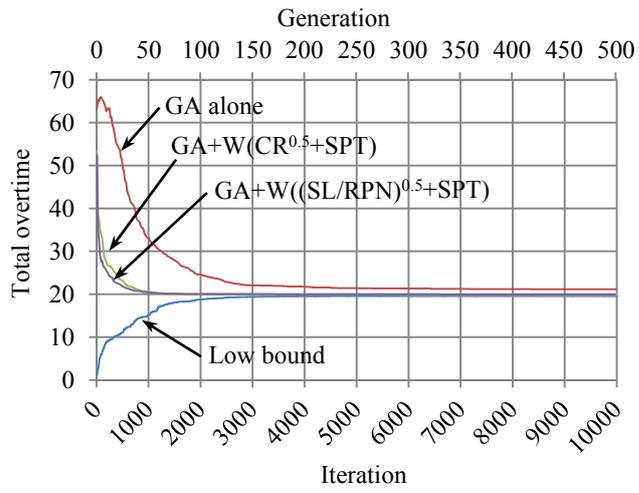


Fig. 5-3 Total overtime in “Small and rough problem”

5.4.2.2 小規模（細）での評価結果

次に Table 5-5 および Fig. 5-4 に小規模（細）の問題に対して GA 単独，GA と(CR^β+SPT)ルールおよび((SL/RPN)^β+SPT)ルールを融合した場合，ラグランジュ緩和法を用いて探索された上界値および下界値を示す．パラメータ β は 0.5, 1, 2, 3, 4, 5 に設定した．

Table 5-5 に各条件での各問題（全 30 問）での総残業時間 *TOT'*を示す．Table 5-4 同様，Ave.および GAP(%)を示す．なお，すべての条件ですべての問題に対して納期遵守を達成できた．Table 5-5 より時間の分解能が小さくなったため小規模（粗）より GAP(%)が大きくなっているが，GA と(CR^β+SPT)ルールおよび((SL/RPN)^β+SPT)ルールを融合しパラメータ β を調整することで，下界値に対して 10%以下の高い探索性能が得られることが確認できる．また，ラグランジュ緩和法によって実行可能解，および GA 単独の方法よりも GAP を小さくすることができており GA と(CR^β+SPT)ルールおよび((SL/RPN)^β+SPT)ルールを融合した手法の有効性を確認できる．なお，パラメータ β については，小規模（粗）より時間の分解能が細くなったことで解空間が広がり，この結果，小規模（粗）よりもパラメータ β を大きく設定し優先規則の機能を強めることで良解が得られたと考えられる．

Fig. 5-4 に GA 単独，GA と (CR+SPT) ルール ($\beta=1$) および ((SL/RPN)+SPT) ルール ($\beta=1$) を融合した場合，ラグランジュ緩和法を用いて探索された下界値および上界値の探索推移を示す．これより，GA 単独による方法や，ラグランジュ緩和法 (Upper bound) よりも，GA と (CR+SPT) ルールおよび ((SL/RPN)+SPT) ルールを融合した手法の方がより早く下界値に近づき，最終的な GAP も小さくできている．(CR+SPT)ルールと((SL/RPN)+SPT)ルール間の性能差は同等であるといえる．

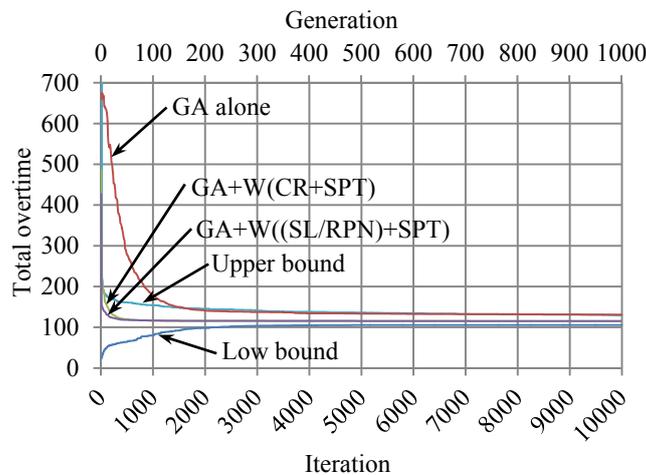


Fig. 5-4 Total overtime in “Small and detail problem”

Table 5-5 Total overtime in “small and detail problem”

Ptb No.	Lower bound	Upper bound	GA+(CR ^l +SPT)					GA+(SL/RPN) ^l +SPT					GA alone	
			1	2	3	4	5	0.5	1	2	3	4		5
			129	129	129	129	129	129	129	129	129	131		131
0	115	141	129	129	129	129	129	129	129	129	131	131	131	130
1	124	177	129	129	132	139	131	127	128	130	138	138	138	130
2	28	48	37	37	37	37	56	37	37	37	37	37	37	80
3	90	117	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	92
4	100	134	101	101	101	101	101	101	103	102	101	101	101	132
5	106	106	106	106	106	106	106	106	106	106	107	113	111	110
6	140	156	148	150	143	150	175	150	148	150	150	150	154	156
7	165	168	179	174	180	180	180	181	173	179	174	179	186	188
8	168	198	221	216	233	233	235	220	222	222	236	236	236	255
9	111	145	139	138	138	141	138	139	138	140	141	141	141	154
10	92	104	95	92	95	95	94	96	94	94	106	125	125	111
11	116	191	119	120	119	122	122	122	122	122	122	135	133	128
12	69	75	76	76	80	80	75	76	76	76	76	76	76	128
13	94	111	95	95	95	95	95	95	95	95	95	98	98	109
14	39	53	39	41	41	41	45	39	39	41	42	42	44	39
15	177	189	177	183	183	177	193	186	177	180	185	190	193	208
16	53	97	63	66	72	73	73	67	65	72	70	70	70	88
17	171	188	178	191	191	194	203	191	191	191	191	196	196	203
18	108	129	112	111	115	115	113	111	111	115	115	116	119	116
19	103	131	110	109	113	124	125	113	113	111	112	115	117	115
20	37	62	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	45
21	56	74	71	71	71	77	71	70	71	70	71	71	74	71
22	35	85	45	45	52	58	67	45	45	45	45	52	53	69
23	111	148	112	111	111	111	111	112	112	112	116	124	130	114
24	105	138	174	149	151	180	180	149	149	149	149	152	152	151
25	105	115	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	167
26	107	122	113	109	109	128	128	116	116	116	116	116	134	149
27	103	121	112	112	116	116	116	112	112	112	116	116	116	142
28	186	193	186	186	186	186	186	186	186	186	186	186	186	186
29	165	171	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165
Ave.	106.0	129.6	115.8	115.0	115.6	117.2	122.1	115.8	115.5	116.3	117.9	120.7	122.0	131.0
GAP(%)		22.3	9.2	8.5	9.1	10.6	13.9	9.2	9.0	9.7	11.2	13.9	15.1	23.6

5.4.2.3 中規模（粗）での評価結果

次に Table 5-6 および Fig. 5-5 に中規模（粗）の問題に対して GA 単独, GA と(CR^β+SPT)ルールおよび((SL/RPN)^β+SPT)ルールを融合した場合, ラグランジュ緩和法を用いて探索された上界値および下界値を示す. パラメータ β は 0.5, 1, 2, 3, 4, 5 に設定した.

Table 5-6 に各条件での各問題（全 30 問）での総残業時間 TOT' , Ave. および GAP(%) を示す. なお, Table 5-4 同様, 結果欄の括弧付けの値が記載されている条件では納期遵守が達成されず, 括弧内に示した値だけ総納期遅れ時間 TT が発生したことを意味する. この場合, Ave. および GAP(%) には括弧をつけて参考値とする. Table 5-6 より小規模（粗）問題同様, GA と(CR^β+SPT)ルールおよび((SL/RPN)^β+SPT)ルールを融合しパラメータ β を調整することで, 下界値に非常に近い解を探索することができている. また, ラグランジュ緩和法によって実行可能解（上界値）を探索した場合, 納期遵守を達成できなかった問題が多数確認できる. ことから, GA と(CR^β+SPT)ルールおよび((SL/RPN)^β+SPT)ルールを融合した手法の有効性を確認できる. パラメータ β については, 小規模（粗）より問題規模が拡大したことにより解空間が広がり, この結果, 小規模（粗）よりもパラメータ β を大きく設定し優先規則の特長を活かすことで良解が得られたと考えられる.

Fig. 5-5 に GA 単独, GA と(CR+SPT)ルールおよび((SL/RPN)²+SPT)ルールを融合した場合, ラグランジュ緩和法を用いて探索された下界値の探索推移を示す. なお, 上界値については納期遵守を達成できていない問題があったため省略する. Fig. 5-5 より中規模（粗）問題でも GA と(CR+SPT)ルールおよび((SL/RPN)²+SPT)ルールを融合した手法の有効性が確認できる. (CR+SPT)ルールと((SL/RPN)²+SPT)ルールを比較すると, ((SL/RPN)²+SPT)ルールの方がより早く下界値に近づいていることがわかる.

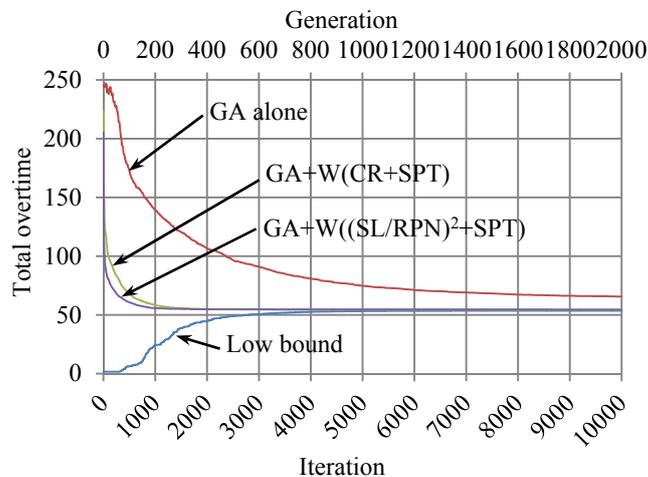


Fig. 5-5 Total overtime in “middle and rough problem”

Table 5-6 Total overtime in “middle and rough problem”

Prb No.	Lower bound	Upper bound	GA+(CR ^β +SPT)					GA+(SL/RPN) ^β +SPT					GA alone		
			0.5	1	2	3	4	5	0.5	1	2	3		4	5
0	56	150	57	56	57	57	57	57	57	57	57	56	57	58	68
1	55	142(17)	55	55	55	55	55	55	55	55	55	56	56	56	61
2	56	146(16)	58	56	56	56	57	57	56	56	56	56	57	58	63
3	50	152(17)	50	50	50	50	50	50	50	51	51	50	51	51	58
4	48	128	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	50	60
5	46	154(24)	46	46	46	46	47	47	46	46	46	46	46	46	57
6	50	123	50	50	50	51	52	52	51	52	52	53	53	54	55
7	63	171(16)	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	67
8	55	157(18)	56	57	56	55	57	57	57	57	56	56	57	56	60
9	54	147(17)	57	57	56	58	58	59	56	58	56	58	56	57	76
10	39	121	39	39	39	41	41	41	40	40	40	39	45	46	42
11	48	135(17)	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	50	52
12	56	161(52)	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	59
13	71	177(20)	73	72	72	72	73	73	73	73	72	72	76	75	80
14	64	149	66	68	65	65	67	67	68	68	66	65	66	68	81
15	39	118	39	39	39	40	40	40	39	39	39	39	39	39	41
16	57	149	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	58	66
17	39	111	41	40	42	41	42	42	41	43	44	42	44	43	57
18	52	114(17)	53	52	53	54	54	54	52	53	54	53	55	56	60
19	55	110	59	60	58	60	60	59	61	60	59	59	59	59	87
20	33	89	34	33	34	34	34	34	34	35	33	34	35	36	36
21	64	183(32)	67	64	65	64	67	67	66	67	65	66	67	65	86
22	62	171(16)	66	64	63	63	63	63	66	64	64	68	66	65	81
23	53	147(16)	54	54	54	54	55	55	56	54	54	54	54	54	69
24	42	155	43	43	46	46	46	46	44	46	45	45	45	44	51
25	62	156(17)	68	65	66	66	67	67	66	68	68	68	67	68	96
26	68	150(17)	68	68	68	68	68	68	68	68	68	72	69	70	96
27	39	99	40	40	40	40	40	40	41	41	41	41	41	41	41
28	70	169(35)	70	70	71	72	71	71	72	71	71	71	72	71	89
29	60	138(18)	62	60	61	62	63	63	62	63	65	62	65	62	73
Ave.	53.5	(142.4)	54.8	54.3	54.5	54.7	55.2	55.4	55.0	55.3	54.9	55.1	55.7	55.8	65.6
GAP(%)		(166)	2.4	1.5	1.9	2.2	3.2	3.6	2.8	3.4	2.6	3.0	4.1	4.3	22.6

5.4.2.4 中規模（細）での評価結果

次に Table 5-7 および Fig. 5-6 に中規模（細）の問題に対して GA 単独，GA と(CR^β+SPT)ルールおよび((SL/RPN)^β+SPT)ルールを融合した場合，ラグランジュ緩和法を用いて探索された上界値および下界値を示す．パラメータ β は 0.5, 1, 2, 3, 4, 5 に設定した．

Table 5-7 に各条件での各問題（全 30 問）での総残業時間 *TOT'*，Ave.および GAP(%)を示す．なお，Table 5-4 同様，結果欄の括弧付けの値が記載されている条件では納期遵守が達成されず，括弧内に示した値だけ総納期遅れ時間 *TT* が発生したことを意味する．この場合，Ave.および GAP(%)には括弧をつけて参考値とする．Table 5-7 より GA と(CR^β+SPT)ルールおよび((SL/RPN)^β+SPT)ルールを融合しパラメータ β を調整することで，下界値に対して約 15%まで GAP を短縮できている．また，ラグランジュ緩和法によって実行可能解（上界値）を探索した場合，問題 8 で納期遵守を達成できず，かつ，納期遵守を達成できた問題でも GA と(CR^β+SPT)ルールおよび((SL/RPN)^β+SPT)ルールを融合した場合と比較して総残業時間が大きいことが確認できる．このことから，ラグランジュ緩和法を用いた手法と比較して GA と(CR^β+SPT)ルールおよび((SL/RPN)^β+SPT)ルールを融合した手法の有効性を確認できる．

Fig. 5-6 に GA 単独，GA と(CR²+SPT)ルールおよび((SL/RPN)+SPT)ルールを融合した場合，ラグランジュ緩和法を用いて探索された下界値の探索推移を示す．なお，上界値については納期遵守を達成できていない問題があったため省略する．GA 単独より(CR²+SPT)ルールおよび((SL/RPN)+SPT)ルールと融合することで高速に解を改善できている．(CR²+SPT)ルールと((SL/RPN)+SPT)ルール間の性能差は見られず探索性能は同等であるといえる．

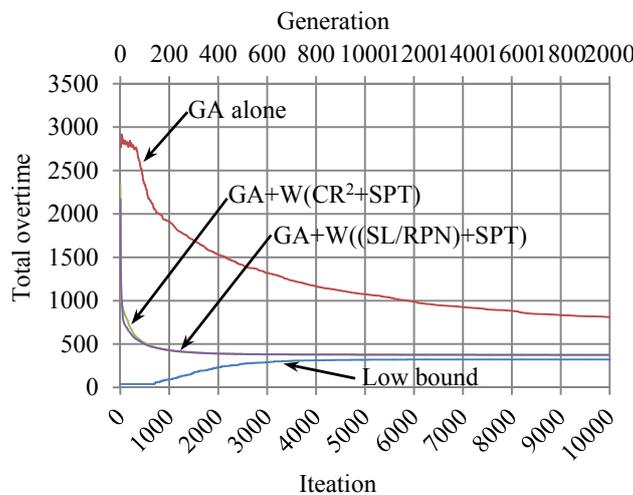


Fig. 5-6 Total overtime in “middle and detail problem”

Table 5-7 Total overtime in “middle and detail problem”

Ptb No.	Lower bound	Upper bound	GA+(CR ^β +SPT)										GA+(SL/RPN) ^β +SPT)										GA alone
			0.5	1	2	3	4	5	0.5	1	2	3	4	5	0.5	1	2	3	4	5			
0	275	804	344	334	307	316	320	339	329	312	330	332	335	361	648								
1	366	1311	399	379	382	383	392	402	384	375	393	398	422	412	822								
2	280	997	411	392	385	388	386	387	382	385	409	412	430	430	835								
3	394	995	488	428	431	422	418	428	434	449	440	472	449	502	1181								
4	435	1251	490	488	490	486	482	485	487	479	489	509	508	543	1217								
5	161	871	220	222	191	207	212	214	215	209	214	215	226	221	615								
6	192	763	261	238	252	255	256	243	249	238	237	251	259	270	446								
7	335	1219	419	401	392	413	395	404	412	401	412	419	426	425	866								
8	434	1518(162)	450	439	442	442	443	450	448	446	441	457	465	486	613								
9	297	934	422	389	389	385	389	408	381	392	368	374	397	394	725								
10	223	1038	297	280	264	280	277	280	271	274	270	278	284	289	498								
11	335	1167	358	346	342	345	345	342	356	358	360	358	375	396	600								
12	427	1148	522	505	463	510	506	529	496	474	507	522	519	552	854								
13	176	920	208	205	210	228	231	216	236	217	209	214	219	223	549								
14	351	1212	390	380	378	378	383	412	393	398	389	406	399	455	851								
15	354	1144	398	393	437	401	414	428	402	396	437	423	428	411	1002								
16	363	1165	459	421	426	429	426	442	426	426	415	446	479	471	846								
17	321	1069	433	387	367	361	373	359	376	388	387	378	375	375	916								
18	308	1099	341	363	360	360	369	351	363	324	352	372	348	373	523								
19	240	835	309	298	333	325	320	333	288	288	318	313	321	324	504								
20	329	1063	394	383	391	391	383	404	402	412	393	409	408	410	1321								
21	323	1243	474	435	421	414	425	429	430	420	420	423	430	469	812								
22	276	645	327	330	325	317	320	330	310	313	326	331	334	347	474								
23	456	1345	489	471	466	467	470	464	471	474	485	477	490	495	1163								
24	306	1120	358	358	353	350	364	360	356	353	353	336	349	381	1434								
25	318	1204	347	335	335	339	338	367	352	343	331	380	372	388	638								
26	420	1319	508	498	482	492	480	484	470	465	469	472	480	496	993								
27	390	1056	484	467	460	469	476	506	456	464	452	472	492	490	760								
28	236	869	313	304	285	306	302	308	318	284	316	289	296	316	601								
29	383	1123	477	460	461	477	508	501	476	490	484	488	525	496	1047								
Ave.	323.5	(1081.6)	393.0	377.6	374.0	377.9	380.1	386.8	379.0	374.9	380.2	387.5	394.7	406.7	811.8								
GAP(%)			21.5	16.7	15.6	16.8	17.5	19.6	17.2	15.9	17.5	19.8	22.0	25.7	150.9								

5.4.2.5 大規模（粗）での評価結果

次に Table 5-8 および Fig. 5-7 に大規模（粗）の問題に対して GA 単独，GA と $(CR^\beta+SPT)$ ルールおよび $((SL/RPN)^\beta+SPT)$ ルールを融合した場合，ラグランジュ緩和法を用いて探索された上界値および下界値を示す．パラメータ β は 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10 に設定した．

Table 5-8 に各条件での各問題（全 30 問）での総残業時間 TOT' ，Ave. および GAP(%) を示す．なお，Table 5-4 同様，結果欄の括弧付けの値が記載されている条件では納期遵守が達成されず，括弧内の値だけ総納期遅れ時間 TT が発生したことを意味する．この場合，Ave. および GAP(%) には括弧をつけて参考値とする．Table 5-8 より GA と $(CR^\beta+SPT)$ ルールおよび $((SL/RPN)^\beta+SPT)$ ルールを融合しパラメータ β を調整することで，下界値に対して約 11% まで GAP を短縮できている．また，ラグランジュ緩和法によって実行可能解（上界値）を探索した場合，すべての問題で納期遵守を達成できなかったことから，ラグランジュ緩和法を用いた手法と比較して GA と $(CR^\beta+SPT)$ ルールおよび $((SL/RPN)^\beta+SPT)$ ルールを融合した手法の有効性を確認できる．パラメータ β については，問題規模が拡大したことにより， β を大きく設定し優先規則の特長を活かすことで良解が得らると考えられる．

Fig. 5-7 に GA 単独，GA と $(CR^{10}+SPT)$ ルールおよび $((SL/RPN)^5+SPT)$ ルールを融合した場合，ラグランジュ緩和法を用いて探索された下界値の探索推移を示す．なお，上界値については納期遵守を達成できていないため省略する．GA 単独より $(CR^{10}+SPT)$ ルールおよび $((SL/RPN)^5+SPT)$ ルールと融合することで高速に解を改善できている． $(CR^{10}+SPT)$ ルールと $((SL/RPN)^5+SPT)$ ルール間の性能差は見られず探索性能は同等であるといえる．

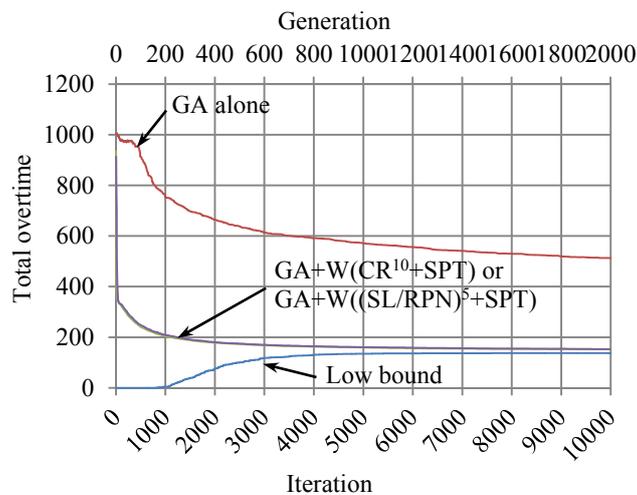


Fig. 5-7 Total overtime in “large and rough problem”

Table 5-8 Total overtime in “large and rough problem”

Ptb No.	Lower bound	Upper bound	GA+(CR ^β -SPT)										GA+(SL/RPN ^β +SPT)										GA alone
			1	2	3	4	5	7	10	1	2	3	4	5	7	10							
0	139	714(143)	199	169	160	155	161	155	155	155	155	182	168	155	158	159	159	161	155	532			
1	143	622(88)	197	171	164	158	163	163	162	162	156	188	166	163	156	154	154	159	168	488			
2	124	955(226)	182	154	142	142	142	142	145	144	144	157	144	140	145	141	141	143	142	480			
3	126	665(232)	210	166	163	147	154	154	152	150	150	191	167	158	154	155	155	151	157	512			
4	123	632(254)	164	143	138	130	127	127	128	131	131	156	144	134	132	132	132	136	135	485			
5	141	667(185)	202	174	164	161	155	155	155	157	157	191	168	161	160	158	165	165	170	488			
6	107	594(151)	150	125	119	121	120	120	115	121	121	136	122	116	117	116	119	119	128	464			
7	127	646(287)	190	153	149	143	140	140	136	136	136	174	142	138	135	132	134	134	137	495			
8	158	570(59)	216	189	178	176	170	170	169	163	163	201	178	170	175	167	169	169	171	544			
9	120	648(140)	167	149	143	138	143	143	141	132	132	166	144	141	134	136	135	135	136	474			
10	137	617(314)	199	159	158	150	152	152	153	153	153	184	160	156	153	152	149	152	152	509			
11	131	697(279)	196	154	149	145	142	142	141	142	142	167	146	141	141	141	136	140	140	554			
12	153	703(296)	234	194	185	184	180	180	169	171	171	212	194	186	179	180	177	177	172	502			
13	155	704(338)	226	185	173	171	172	172	165	168	168	207	179	175	172	171	171	171	173	544			
14	130	718(275)	191	161	150	144	140	140	142	143	143	187	155	144	147	141	144	146	146	537			
15	140	669(283)	207	180	167	160	159	159	161	152	152	197	166	161	157	152	154	155	155	527			
16	149	747(347)	221	181	171	168	165	165	167	162	162	207	170	161	163	164	163	163	167	533			
17	146	644(212)	230	183	171	171	163	163	163	157	157	212	171	170	161	165	163	164	164	556			
18	125	1019(231)	173	151	140	140	137	137	142	140	140	167	145	139	143	151	150	152	152	494			
19	113	654(266)	156	134	127	122	118	118	117	121	121	146	126	123	118	117	117	117	119	496			
20	156	711(282)	222	191	176	173	175	175	173	176	176	210	182	177	170	176	173	175	175	511			
21	137	669(192)	203	167	166	162	154	154	150	155	155	183	161	161	160	155	150	161	161	505			
22	142	634(200)	189	170	155	157	156	156	157	169	169	176	165	161	157	160	165	165	168	453			
23	149	721(343)	232	193	176	176	180	180	177	175	175	224	183	177	173	169	171	171	171	569			
24	123	658(181)	166	145	141	136	136	136	133	135	135	161	138	136	137	135	134	134	134	484			
25	162	690(241)	239	205	191	184	185	185	184	177	177	223	202	187	188	191	181	182	182	548			
26	146	667(234)	218	184	172	171	173	173	170	171	171	206	177	174	168	163	166	166	171	510			
27	156	753(333)	259	209	191	183	178	178	177	181	181	238	190	180	176	177	174	174	179	598			
28	152	684(333)	225	178	171	175	166	166	164	166	166	206	179	175	169	169	169	174	172	510			
29	104	585(150)	126	108	108	108	111	111	106	111	111	119	110	108	109	108	113	118	118	467			
Ave.	137.1	(688.6)	199.6	167.5	158.6	155.0	153.9	153.9	152.3	152.3	152.3	185.8	161.4	155.6	153.6	152.9	153.2	155.7	155.7	512.3			
GAP(%)		(402.1)	45.6	22.2	15.7	13.1	12.3	12.3	11.1	11.1	11.1	35.5	17.7	13.5	12.0	11.5	11.7	11.7	13.6	273.7			

5.4.2.6 大規模（細）での評価結果

最後に Table 5-9 および Fig. 5-8 に大規模（細）の問題に対して GA 単独, GA と(CR^β+SPT)ルールおよび((SL/RPN)^β+SPT)ルールを融合した場合, ラグランジュ緩和法を用いて探索された上界値および下界値を示す. パラメータ β は 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10 に設定した.

Table 5-9 に各条件での各問題（全 30 問）での総残業時間 *TOT'*, Ave. および GAP(%) を示す. なお, Table 5-4 同様, 結果欄の括弧付けの値が記載されている条件では納期遵守が達成されず, 括弧内に示した値だけ総納期遅れ時間 *TT* が発生したことを意味する. この場合, Ave. および GAP(%) には括弧をつけて参考値とする. Table 5-9 より GA と(CR^β+SPT)ルールおよび((SL/RPN)^β+SPT)ルールを融合しパラメータ β を調整することで, 下界値に対して約 61%まで GAP を短縮できているが, 他問題での GAP と比較すると大きな値となっている. 問題規模が大きく時間の分解能が細かい場合, GA の遺伝子数の増大による探索範囲の拡大, また, ラグランジュ緩和法はラグランジュ乗数 λ_m の増大により探索性能が低下し GAP が悪化したと考えられる. ラグランジュ緩和法によって実行可能解（上界値）を探索した場合, すべての問題で納期遵守を達成できなかったことから, ラグランジュ緩和法を用いた手法と比較して GA と(CR^β+SPT)ルールおよび((SL/RPN)^β+SPT)ルールを融合した手法の有効性を確認できる.

Fig. 5-8 に GA 単独, GA と(CR¹⁰+SPT)ルールおよび((SL/RPN)³+SPT)ルールを融合した場合, ラグランジュ緩和法を用いて探索された下界値の探索推移を示す. なお, 上界値については納期遵守を達成できていないため省略する. GA 単独より(CR¹⁰+SPT)ルールおよび((SL/RPN)³+SPT)ルールと融合することで高速に解を改善できている. (CR¹⁰+SPT)ルールと((SL/RPN)³+SPT)ルール間の性能差について(CR¹⁰+SPT)ルールが最終的な GAP で約 7%優れた結果となった.

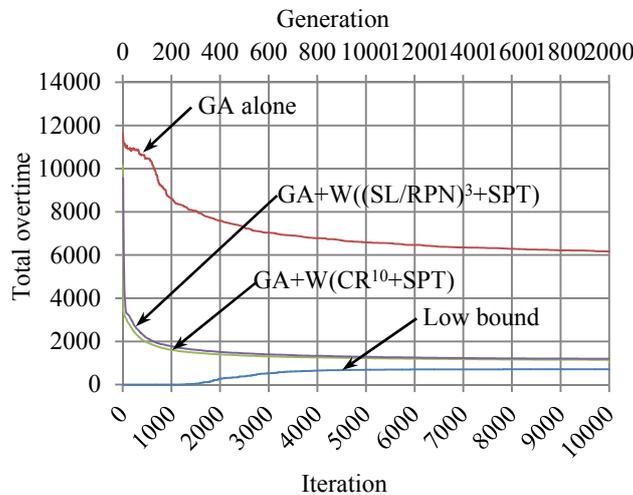


Fig. 5-8 total overtime in “large and detail problem”

Table 5-9 Total overtime in “large and detail problem”

Pth No.	Lower bound	Upper bound	GA+(CR ^h +SPT)										GA+(SL/RPN) ^h +SPT										GA alone
			1	2	3	4	5	7	10	1	2	3	4	5	7	10							
0	746	6114(1504)	1551	1231	1145	1113	1060	1067	1048	1250	1175	1130	1166	1171	1192	1237	5721						
1	508	6039(1014)	1294	1040	1002	930	996	952	980	1039	944	1030	1036	974	1115	1125	5204						
2	573	6012(1115)	1248	1000	885	883	857	880	834	957	857	865	839	860	847	894	5494						
3	796	6836(2442)	1890	1522	1371	1307	1318	1286	1273	1494	1348	1313	1310	1269	1227	1303	6350						
4	741	6198(1976)	1938	1610	1418	1387	1360	1342	1379	1644	1465	1464	1478	1454	1562	1431	7035						
5	954	6684(1901)	2112	1660	1547	1563	1507	1443	1487	1784	1690	1637	1654	1644	1702	1704	6849						
6	838	6002(1708)	1320	1167	1086	1080	1066	1056	1029	1183	1115	1109	1065	1081	1136	1174	5965						
7	455	5894(793)	937	810	736	710	680	686	648	763	713	666	675	707	760	797	5042						
8	835	6994(1519)	1866	1466	1418	1355	1371	1393	1348	1644	1400	1420	1493	1471	1479	1480	6039						
9	765	5914(1617)	1688	1405	1273	1221	1191	1207	1249	1453	1367	1375	1320	1219	1292	1368	6060						
10	918	6772(2217)	2228	1579	1445	1434	1406	1397	1380	1725	1474	1494	1470	1496	1420	1464	6752						
11	405	6320(1206)	1395	1051	1004	940	896	958	898	1011	889	887	861	885	844	972	6231						
12	558	6602(1499)	1582	1281	1163	1178	1168	1099	1084	1205	1144	1027	1166	1174	1204	1203	6640						
13	493	5698(561)	1339	1024	963	864	886	922	902	992	907	906	907	894	896	925	5800						
14	679	6631(1113)	1562	1270	1165	1117	1115	1131	1148	1278	1108	1110	1162	1175	1114	1132	6466						
15	905	6999(1921)	2188	1779	1595	1541	1506	1529	1508	1742	1649	1695	1600	1575	1670	1711	6935						
16	688	5713(354)	1416	1152	1061	1023	1007	1062	1017	1132	1109	1047	1066	1064	1082	1199	5500						
17	609	5719(1191)	1287	1074	1011	999	1049	986	1011	1000	1027	1048	1031	1051	1044	1119	5362						
18	744	6244(716)	2148	1528	1323	1251	1290	1229	1198	1496	1411	1325	1260	1291	1270	1283	6526						
19	992	7704(2262)	1965	1560	1446	1411	1428	1468	1392	1617	1447	1433	1495	1482	1480	1521	6526						
20	505	5999(1219)	1240	972	942	861	886	865	911	994	896	854	860	865	931	941	5834						
21	753	6394(2105)	1733	1387	1247	1185	1165	1194	1142	1406	1244	1258	1267	1271	1262	1289	6172						
22	652	6391(395)	1395	1157	1066	1096	1049	1011	1149	1123	1112	1120	1132	1158	1167	1217	5525						
23	815	5680(1848)	1895	1500	1303	1284	1289	1305	1333	1405	1315	1290	1291	1299	1309	1326	6740						
24	620	5847(1662)	1629	1237	1143	1095	1047	1022	1057	1239	1096	1057	1050	1023	999	1049	6061						
25	962	6830(2023)	1966	1540	1452	1390	1439	1379	1282	1620	1472	1485	1491	1538	1466	1454	6717						
26	861	6539(1335)	1768	1388	1349	1310	1254	1306	1256	1458	1344	1338	1424	1291	1383	1345	6155						
27	476	5628(1129)	1481	1179	1046	997	1018	1068	1082	1155	999	1058	1064	1059	1129	1162	5721						
28	695	5885(1333)	1899	1461	1287	1215	1238	1225	1255	1477	1264	1217	1244	1223	1247	1288	6725						
29	756	6610(538)	1688	1305	1230	1169	1164	1144	1147	1343	1210	1194	1190	1185	1207	1292	6822						
Ave.	709.9	(6296.4)	1654.9	1311.2	1204.1	1163.6	1156.9	1153.7	1147.6	1321.0	1206.4	1195.1	1202.2	1195.0	1214.5	1246.8	6165.6						
GAP(%)		(786.4)	133.1	84.7	69.6	63.9	63.0	62.5	61.7	86.1	69.9	68.3	69.3	68.3	71.1	75.6	768.5						

5.5 結 言

本章で第2章～第4章で提案したGAと優先規則の融合によるスケジューリング手法の最適性の評価をラグランジュ緩和法から探索される下界値を用いて実施した。この評価は、第3章、第4章で示した総残業時間 TOT とは異なる評価式 TOT' を用いた結果である。

数値実験の結果、提案したGAと優先規則の融合によるスケジューリング手法の性能は、対象とする問題の規模および時間分解能によって異なり、より大規模、より高時間分解能な問題になるほどラグランジュ緩和法で求めた下界値とのギャップが広がる傾向をもつが、小規模な問題や時間分解能が粗い問題においては、ギャップが15%程度以下の高性能な解を得ることができることを確認した。なお、提案手法における $(CR^{\beta}+SPT)$ ルールおよび $((SL/RPN)^{\beta}+SPT)$ ルールのパラメータ β に関しては、より規模が大きく、またより時間分解能が高いほど、大き目に設定することで高性能なスケジューリングを実現できることが分かった。これは、より大規模、高分解能な問題ほど困難な問題で探索が難しく、優先規則のもつ知識を有効に利用する効果が現れやすいためと考えられる。

また、ラグランジュ緩和法は、下界値に対応するスケジュールを修正することで実行可能な解（上界値）を得ることもでき、有力なスケジューリング法の一つとして知られている。しかし、数値実験の結果、ラグランジュ緩和法で上界値を生成すると、第一目的である納期遵守を達成できない場合が多く、これは問題規模が大きく時間分解能が高いほど顕著になることが確認された。これに対し、提案したGAと優先規則の融合によるスケジューリング手法で生成される解はすべての条件の問題で納期遵守を達成することができ、なおかつ、より小さな残業時間で納期遵守を達成できた。ラグランジュ緩和法は問題を効率的に最適化可能な子問題に分解できるような定式化が重要である。今回、評価関数を TOT から TOT' に変更した理由もそこにある。これに対し、GAを利用する提案手法では適応度の評価式を変更することによって、さまざまな目的関数に柔軟に対応できる。このような点も含めて、ラグランジュ緩和法との比較においても、提案手法の本ジョブショップスケジューリング問題への有効性を確認できたといえる。

第6章

結 論

多品種少量生産を行うジョブショップでは納期遵守を達成することが重要であるが、近年より短いリードタイムが要求される中で、納期遵守は困難な課題となっている。納期遵守を達成するために残業による能力調整が頻繁に行われているが、残業は経費および労働環境の悪化をもたらすため、できる限り少ない時間で実施されることが望ましい。

そこで本研究では、残業による能力調整を考慮したジョブショップスケジューリング問題において、納期遵守と残業時間最小化を目的とするスケジュール探索手法を提案した。現実の大規模なスケジュール問題を対象とする場合、厳密に最適なスケジュールを生成することは非常に困難となる。本論文ではメタヒューリスティクスの一つである GA を適用したが、その際、問題固有の知識を有効活用することで大規模なスケジューリング問題に対しても効率的に性能の良いスケジュールを生成することを狙った。意思決定項目は、ジョブの処理順序の決定と残業時間の決定であり、この両者に納期までの切迫度を基準とした優先規則を利用した。以下に各章で得られた結果を要約する。

第1章では、本研究の目的を述べた後、さまざまなスケジューリング法が存在する中で提案するスケジューリング法の位置づけの説明、および、能力調整を考慮したスケジューリング問題の先行研究の紹介を行い、本研究の意義を明確にした。

第2章では、本研究で想定する生産環境について説明した後、ジョブショップスケジューリング問題の定式化、および、スケジューリングの基本的な手順について述べた。また、GA を用いたジョブの処理順序の決定方法と各シフト各機械に追加する残業の導入方法について基本的な枠組みを説明した。本スケジューリングにおける目的関数は、トレードオフ関係にある納期遵守と総残業時間最小化であるが、納期遵守が第一目的であり、総残業時間の最小化は第二目的である。そこで本手法では、納期遵守の達成に至る過程においては、十分に大きな残業時間（フル残業）を許可してスケジュールを探索し、その後残業時間最小化に移る探索手法を採用している。

第3章では、ジョブ処理順序の決定に対し GA と優先規則を融合したスケジューリング

法を適用した。前述の通り、本研究での探索法は、まずフル残業を許容して納期遅れを解消した後に残業時間最小化の探索を行う方法である。この方法で効率的な探索を行うためには、納期遅れを解消した後の残業時間最小化を進める際に、GAの遺伝的操作に伴う納期遅れの再発を強く防止することがポイントである。本研究では、そのための優先規則を検討し、数値実験によりこの有効性を検討した。具体的には、ジョブが納期に切迫するほど優先度の上昇率を大きくし、納期遅れの再発を防止する機能(パラメータ k)をもつ ATC ルールを有効利用し、また、(CR+SPT)ルールに同様の機能(パラメータ β)を追加した $(CR^\beta+SPT)$ ルールを提案した。さらに、納期までの余裕時間を残り処理工程数をもとに評価し、処理待ち機会を考慮することで納期遅れの再発を防止する機能を更に持たせた $((SL/RPN)^\beta+SPT)$ ルールを提案した。

数値実験では納期設定が正規の稼働時間帯に任意に設定される場合と残業時間帯の終了時刻に設定される場合との2パターンの問題を用いた。数値実験の結果、両方の納期設定の問題に対し、提案手法において優先規則のパラメータを適切に調整し、納期遅れの再発を強く防止することによって、より短い探索時間で納期を遵守しつつ残業時間を短縮できることが確認された。 $((SL/RPN)^\beta+SPT)$ ルールの探索性能は納期設定により異なるが、納期が正規の稼働時間帯に任意に設定される問題に対して比較的高い探索性能を持つことを確認した。

第4章では、残業時間の決定に対して、優先規則を利用する方法を提案した。具体的には、第3章での残業時間がGAの遺伝子操作でのみ決定していたのに対し、第4章では第3章で提案した $(CR^\beta+SPT)$ ルールおよび $((SL/RPN)^\beta+SPT)$ ルールのクリティカル値に着目することで、ジョブの納期への切迫度から残業の必要性に応じて残業導入の決定を行う方法を提案した。この方法により、ジョブの処理順序の決定と残業時間の決定という2つの意思決定に対して同一の知識に基づく整合性の取れた効果的なスケジューリングが可能となる。

数値実験では、大規模で、かつ、納期設定が正規の稼働時間帯に任意に設定されるジョブと残業時間帯の終了時刻に設定されるジョブが混合したスケジューリング問題を用いた。数値実験の結果、ジョブの処理順序と残業時間をジョブの納期への切迫度に基づく優先規則を利用して決定することで高い探索性能を実現できることを確認した。

第5章では第3章、第4章で提案したジョブショップスケジューリング探索手法の最適性の評価をラグランジュ緩和法によって得られる下界値と比較することで実施した。

ショップのシフト数、機械台数やジョブ数、工程数の大小により規模が異なる3パターン（小規模、中規模、大規模）の条件とスケジュールの時間の分解能が異なる場合の2パターン（粗い、細かい）の条件で計6パターンの条件でのスケジューリング問題を用いて実施した。その結果、問題規模が大きく、時間分解能が細かい場合には下界値との差であるギャップは大きくなったが、問題規模が小、中の場合、もしくは大規模問題でも時間に分解能が粗い場合には、提案した探索手法の高い探索性能が確認できた。またより規模が大きく、時間分解能が細かいほど、優先規則のパラメータ β をより大きく設定し、納期までの切迫度を強調する効果があることが確認された。これらの結果は、本来の総残業時間とは異なる評価式を用いて得られたものであるが、最適性に関する一定の評価はできたと考えられる。

また、ラグランジュ緩和法により得られる上界値と比較することで、ラグランジュ緩和法によるスケジューリング法に対する提案手法の優位性が確認された。

以上、本研究では、納期遵守と残業時間最小化目的としたジョブショップスケジューリング問題に対し、GA と優先規則を融合した効率的なスケジュール法を提案し、その有効性を確認した。今後の課題としては、第5章で取り上げたような問題規模が大きく時間の分解能が細かい問題に対する更なる探索性能の向上・確認が挙げられる。また、自動加工機械を利用する場合には、加工開始後は夜間に無人で作業を行うことができるため、そのような作業を夜間に優先して割り付けることで、残業時間を効果的に削減できると考えられる。このような人手作業が必要な工程と自動工程が混在するスケジューリング問題において、納期遵守と残業時間最小化のための効率的な方法の開発が求められる。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり，適切な御指導と懇切なるご鞭撻のみならず，研究と仕事の両立の中で研究環境等の多大な支援を頂いた広島大学大学院工学研究科 江口透准教授に深甚なる感謝の意を表します。

また，学部4年次以来，適切な御指導と温かい励ましの御言葉を賜った広島大学医歯薬保健学研究院 村山長教授に深謝いたします。

本論文の作成に際し，有益な御助言を頂きました広島大学大学院工学研究科 佐伯正美教授，永村和照教授，池田隆教授に心からお礼申し上げます。

最後に，本研究に協力してくれた広島大学大学院工学研究科機械システム工学専攻生産システム B 研究室の学生の皆様，とりわけ，平成 26 年度修了生の山本悠介君に感謝いたします。

参考文献

- [1] Adshear, N. S. and Price, D. H. R., Overtime Decision Rule Experiments with a Model of a Real Shop, *European Journal of Operational Research*, Vol. 39, pp. 274-283 (1989).
- [2] Al-Hakim, L. An Analogue Genetic Algorithm for Solving Job Shop Scheduling Problem, *International Journal of Production Economics*, Vol. 39, pp.1537-1548 (2001).
- [3] Anderson, E. J. and Nyirenda, J. C., Two New Rules to Minimize Tardiness in a Job Shop, *International Journal of Production Research*, Vol.28, No. 12, pp. 2277-2292 (1990).
- [4] Aytug, H., Khouji, M. and Vergara, F. E., Use of Genetic Algorithms to Solve Production and Operations Management Problem: a review, *International Journal of Production Research*, Vol. 41, No. 17, pp. 3955-4009 (2003).
- [5] Baker, K. R., Sequencing rules and due-date assignments in a job shop, *Management Science*, Vole. 30, No .9, pp. 1093-1104 (1984).
- [6] Bean, J. C., Genetic Algorithms and Random Keys for Sequencing and Optimization, *ORSA Journal on Computing*, Vol. 6, No. 2, pp. 154–160 (1994).
- [7] Blazewicz, J., Bomschke, W. and Pesch, E., The Job Shop Scheduling Problem: Conventional and New Solution Techniques, *European Journal of Operational Research*, Vol. 93, No. 1, pp. 1-33 (1996).
- [8] Brucker, P., Jurisch, B. and Sievers, B., A Branch and Bound Algorithm for the Job-shop Scheduling Problem, *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 49, pp. 107-127 (1994).
- [9] Brucker, P., Hurink, J., Wostmann, B., A Branch & bound Algorithm for the Open Shop Problem, *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 76 pp. 43-59 (1997).

- [10] Carlier, J. and Pinson, E., An Algorithm for Solving the Job Shop Problem, *Management Science*, Vol. 35, No. 2, pp. 164-176 (1989).
- [11] Caseau, Y. and Laburthe, F., Disjunctive Scheduling with Task Intervals, *Working Paper*, Ecole Normal Suerieure (1995).
- [12] Chang, Y., Sueyoshi, T., and Sullivan, R. S., Ranking Dispatching Rules by Data Envelopment Analysis in a Job Shop Environment, *IIE Tarnsactions*, Vol. 20, pp. 631-642 (1996).
- [13] Chen, H., Chu, C. and Proth, J. M., Animprovement of the Lagrangean Relaxation Approach for Job Shop Scheduling: A Dynamic Programming Method, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 14, No. 5, pp. 786-795 (1998).
- [14] Conway, R. W., Maxwell, W. L., and Miller, L. W., *Theory of Scheduling*, Addison-Wesley Publishing Company Inc. (1967).
- [15] Conway, R. W., Priority Dispatching and Job Lateness in a Job Shop, *The Journal of Industrial Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 228-237 (1965).
- [16] Day, J. E., and Hottenstein, M. P., Review of Sequencing Research, *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol. 17, pp. 11-39 (1970).
- [17] Du, J. and Leung, J. Y.-T., Minimizing Total Tardiness on One Machine is NP-hard, *Mathematics of Operations Research*, Vol. 15, No. 3, pp. 483-495 (1990).
- [18] Fisher, H., and Thompson, G. L., Probabilistic Learning Combinations of Local Job-shop Scheduling Rules, in Muth, J. F. and Thompson, G. L.(eds.), *Industrial Scheduling*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, pp. 225-251 (1963).
- [19] Goldberg, D.E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison Wesley Longman Inc. (1989).

- [20] Goodwin, Jr, J. C., Elvers, D., Goodwin, J. S., Overtime Usage in a Job Shop Environment, *OMEGA International Journal of Management Science*, Vol. 6, No. 6, pp. 493-500 (1978).
- [21] Gueret, C., Jussien, N. and Prins, C., Using Intelligent Backtracking to Improve Branch-and-bound Method: An Application to Open-shop Problem, *European Journal of Operational Research*, Vol. 127, pp. 344-354 (2000).
- [22] Hoitomt, D. J., Luh, P. B. and Pattipati, K. R., A Practical Approach to Job-shop Scheduling Problems, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 9, No. 1, pp. 1-13 (1993).
- [23] Holloway, C. A. and Nelson, R. T., Job Shop Scheduling with Due Dates and Overtime Capability, *Management Science*, Vol. 21, No. 1, pp. 68-78 (1974) .
- [24] Hoogeveen, J. A., Van De Velde, S. L., A Branch-and-bound Algorithm for Single-machine Earliness-tardiness Scheduling with Idle Time, *INFORMS Journal on Computing*, Vol. 8, No. 4, pp. 402-412 (1996).
- [25] Hutchison, J., and Chang, Y.-C., Optimal Nondelay Job Shop Schedules, *International Journal of Production Research*, Vol. 28, No. 2, pp. 245-257 (1990).
- [26] Imaizumi, J., Arai, T. and Morito, S., Machine-Based Lagrangian Decomposition for Job Shop Scheduling Problem, *Japan Industrial Management Association*, Vol. 54, pp. 124-132 (2003).
- [27] Kumar, N. S. H. and Srinivasan, G., A Genetic Algorithm for Job Shop Scheduling – A Case Study, *Computers in Industry*, Vol. 31, pp. 155-160 (1996).
- [28] Lee, C.-Y., Piramuthu, S. and Tsai, Y.-K., Job Shop Scheduling with a Genetic Algorithm and Machine Learning, *International Journal of Production Research*, Vol. 35, pp. 1171-1191 (1997).

- [29] Lee, H. C. and Dagli, C. H., A Parallel Genetic Neuro Scheduler for Job-shop Scheduling Problem, *International Journal of Production Economics*, Vol. 51, pp. 115-122 (1997).
- [30] Luh, P. B., Gou, L., Zhang, T., Nagahora, T., Tsuji, M., Yoneda, K., Hasegawa, T., Kyoya, Y. and Kono, T., Job Shop Scheduling with Group-dependent Setups, Finite Buffers, and Long Time Horizon, *Annals of Operations Research*, Vol. 76, pp. 233-259 (1998).
- [31] Luh, P. B. and Hoptomt, D. J., Scheduling of Manufacturing Systems using the Lagrangian Relaxation Technique. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 38, No.7, pp. 1066-1079 (1993).
- [32] Luh, P. B. and Hoptomt, D. J., Max, E. and Pattipati, K. R., Schedule Generation and Reconfiguration for Parallel Machines. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 6, No.6, pp. 687-696 (1990).
- [33] Mathur, K. and Suer, G. A., Math Modelling and GA Approach to Simultaneously Make Overtime Decisions, Load Cells and Sequence Products, *Computers & Industrial Engineering* Vol. 66, pp. 614-624 (2013).
- [34] Matta, R. D., Hsu, V. N. and Feng, C.-X. (Jack), Short-term Capacity Adjustment with Offline Production for a Flexible Manufacturing System under Abnormal Disturbances, *Annals of Operations Research*, Vol. 107, pp. 82-100 (2001).
- [35] Norman, B. A. and Bean, J. C., Random Keys Genetic Algorithm for Complex Scheduling Problem. *Naval Research Logistics*, Vol. 46, pp. 199-211 (1999).
- [36] Ornek, A. M. and Cengiz, O., Capacitated Lot Sizing with Alternative Routings and Overtime Decision, *International Journal of Production Research*, Vol. 44, No. 24, pp. 5363-5389 (2006).
- [37] Panwalker, S. S. and Iskander, W., A Survey of Scheduling Rule, *Operation Research*, Vol. 25, No. 1, pp. 45-61 (1977)

- [38] Perregaard, M., and Clausen, J., Parallel Branch-and-bound Methods for the Job Shop Scheduling Problem, *Working Paper*, University of Copenhagen (1995).
- [39] Ramasesh, R., Dynamic Job Shop Scheduling: A Survey of Simulation Search, *OMEGA International Journal of Management Science*, Vol. 18, No. 1, pp. 43-57.
- [40] Reeves, C. R.編, 横山 隆一他役 : モダンヒューリスティクス-組み合わせ最適化の先端手法- 日刊工業新聞 pp. 249-283 (1997).
- [41] Ronconi, D. P. and Kawamura, M. S., The Single Machine Earliness and Tardiness Scheduling Problem: Lower Bounds and a Branch-and-bound Algorithm, *Computational & Applied Mathematics*, Vol. 29, N. 2, pp. 107-124 (2010).
- [42] Runarsson, T. P. and Jonsson, M. T., Genetic Production Systems for Intelligent Problem Solving, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 10, pp. 181-186 (1999).
- [43] Sural, H., Denizel, M. and Wassenhove, L. N. V., Lagrangean Relaxation Based Heuristics for Lot Sizing with Setup Times, *European Journal of Operational Research*, Vol. 194, pp. 51-62 (2009).
- [44] Tavakkoli-Moghaddam, R., Moslehi, G., Vasei, M. and Azaron, A., A Branch-and-bound Algorithm for a Single Machine Sequencing to Minimize the Sum of Maximum Earliness and Tardiness with Idle Insert, *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 174, pp. 388-408 (2006).
- [45] Vaessens, R. J. M., Aarts, E. H. L. and Lenstra, L. K., Job Shop Scheduling by Local Search, 117 *INFORMS Journal on Computing*, Vol. 8, No. 3, pp.302-317 (1996).
- [46] Vepsalainen, A. P. J. and Morton, T. E., Priority Rule for Job Shops with Weighted Tardiness Cost, *Management Science*, Vol. 33, No. 8, pp. 1035-1047 (1987).
- [47] Yang, B., Ceunes, J. and O'Brien, W. J., A Heuristic Approach for Minimizing Weighted

Tardiness and Overtime Cost in Single Resource Scheduling, *Computer & Operations Research* Vol. 31, pp. 1273-1301 (2004).

[48] Zhiming, S. and Chunwei, A., Genetic Algorithm Approach to Job Shop Scheduling and its use in Real-time Cases. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 13, pp. 422-429 (2000).

[49] Zobolas, G. I., Tarantilis, C. D. and Ioannou, G., Extending Capacity Planning by Positive Lead Times and Optional Overtime, Earliness and Tardiness for Effective Master Production Scheduling, *International Journal of Production Research*, Vol. 46, No. 12, pp. 3359-3386 (2008).

[50] 荒川 雅裕, 冬木 正彦, 井上 一郎, 納期遅れジョブの削減・解消を目的とする能力追加を考慮したシミュレーションベース生産スケジューリング法, システム制御情報学会論文誌, Vol. 16, No. 9, pp. 451-460 (2003) .

[51] 荒川 雅裕, 冬木 正彦, 中西 弘樹, 井上 一郎, ジョブショップ生産スケジューリングにおけるシミュレーション法利用の能力調整法, 日本経営工学会論文誌, Vol. 51, No. 6, pp. 603-612 (2001) .

[52] 今泉 淳, ラグランジュ分解・調整法による生産スケジューリング: 近年の研究の流れと将来の展望に関する考察, 経営論集 第54号 (2001) .

[53] 江口 透, 大場史憲, 小崎慎太郎, 遺伝的アルゴリズムと優先規則の融合による動的スケジューリング, Vol. 71, No. 703, pp.1047-1053 (2005) .

[54] 黒田 充, 田部 勉, 圓川隆夫, 中根甚一郎, 生産管理 (経営工学ライブラリー7), (1989), 朝倉書店.

[55] 黒田 充, 松村健児, 生産スケジューリング, 朝倉書店, pp. 20 (2002) .

[56] 今野, 鈴木, 整数計画法と組合せ最適化, 日科技連出版社 (1982)

[57] 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, pp. 1669-1675(2008).

[58] 宮代 隆平, 整数計画ソルバー入門, オペレーションズ・リサーチ 2012年4月号, pp. 183-189 (2012) .

[59] 柳浦睦憲, 野々部宏司, 分枝限定法ーさらなる計算効率の希求ー, システム／制御／情報／, Vol. 50, No. 9, pp. 350-356 (2006) .

関連研究発表論文一覧

学術論文

[1] 與田 光伸, 江口 透, 村山 長, 能力調整を考慮したジョブショップスケジューリング (GA と優先規則の融合による効率的探索法), 日本機械学会論文集 C 編, 79 巻 807 号, pp. 4424-4434 (2013).

[2] Yoda, M., Eguchi, T. and Murayama, T., Job Shop Scheduling for Meeting Due Dates and Minimizing Overtime Using Genetic Algorithm Incorporation New Priority Rules, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vol. 8, No. 5, Paper No. 14-00076, (2014).

国際会議講演論文

[3] Eguchi, T., Yoda, M. and Yamamoto, Y. and Murayama, T., Job Shop Scheduling with Capacity Adjustment –An Efficient Search Method using the Mixture of GA and Priority Rule and its Performance Evaluation using Lagrangian Relaxation Method–, *Proceedings of the 7th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century*, pp. 571-575 (2013).

国内学会講演論文

[4] 與田光伸, 江口透, 村山長, 能力調整を考慮した納期遵守スケジューリング—GA と優先規則の融合による効率的探索法—, 第 55 回自動制御連行講演会, pp.182-186 (2012).

[5] 江口 透, 山本悠介, 與田光伸, 村山 長, 能力調整を考慮した納期遵守スケジューリング—GA と優先規則の融合による効率的探索法とラグランジュ緩和法による性能評価—, 生産システム部門研究発表講演会 2013 講演論文集, pp.31-32 (2013).

[6] 與田光伸, 江口透, 村山長, 能力調整を考慮した納期遵守スケジューリング-GA との融合手法における効果的な優先規則一, 第 57 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, CD-ROM, (2013).

[7] 山本 悠介, 與田 光伸, 江口 透, 村山 長, 能力調整を考慮した納期遵守スケジューリング-GA と優先規則の融合による効率的探索法とラグランジュ緩和法による性能評価 (第 2 報) 一, 日本機械学会 2013 年度年次大会 DVD 論文集, S142015 (2013).

[8] 與田 光伸, 江口 透, 村山 長, GA と優先規則の融合による能力調整を考慮したジョブショップスケジューリング-ジョブのクリティカル値に基づく残業決定法一, 生産システム部門研究発表講演会 2014 講演論文集, pp.49-50 (2014).