

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)

與田 光伸^{*1}, 江口 透^{*2}, 村山 長^{*3}

Job Shop Scheduling with Capacity Adjustment (An Efficient Search Method Using the Mixture of GA and Priority Rule)

Mitsunobu YODA, Toru EGUCHI^{*2} and Takeshi MURAYAMA

^{*2} Graduate School of Engineering, Hiroshima University
1-4-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima, 739-8527 Japan

In this paper, we propose an efficient scheduling method for a job shop environment in which production capacity is adjustable by adding overtime in each machine of each production shift. The primal objective of scheduling is to meet due-dates of jobs and the secondary one is to minimize overtime. To achieve these two objectives efficiently, the schedule is searched to eliminate tardy jobs at first by allowing large overtime. Then the overtime is minimized. The method using the mixture of genetic algorithm and priority rule is applied for this scheduling. In this method, the characteristics of priority rules are the key for improving performance. In particular, when minimizing overtime after finding schedules without tardiness, it is important to maintain more individuals meeting due dates even after genetic operations are applied. For this purpose, we propose a scheduling method using the priority rules which are modified (CR+SPT) rule and ATC rule. Numerical experiments show the effectiveness of the proposed method.

Key Words : Scheduling, Job Shop, Priority Rule, Genetic Algorithm, Tardiness, Overtime

1. 緒 言

多品種少量生産を行うジョブショップにおけるスケジューリングでは納期遵守を達成することが重要である。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法はこれまでも数多く研究されているが、それらのほとんどは稼働時間帯の制約や能力調整を考慮しておらず、特にジョブが複数のシフトを経て完成するジョブショップにおける能力調整を考慮したスケジューリングについては、シミュレーション法によるスケジューリング法⁽¹⁾⁽²⁾などごくわずかしき提案されていない。しかし、ジョブショップにおいては外注、残業などの能力調整は納期遵守を達成するために現実的に実施されており、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行われる。もちろん残業を行うと経費がかかり労働環境の悪化にもつながるため、できる限り抑制しなければならない。本研究では、稼働時間帯が分断された複数のシフトから成り、ジョブが複数のシフトを経て完成する生産環境を想定し、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う。このような能力調整を考慮したジョブショップスケジューリングでは、ジョブの処理順序のみならず各シフト各機械に追加する残業時間の決定も必要で、さらに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な問題となるため、効率的なスケジュール探索法が求められる。特に実用上は、限られた計算時間でできるだけ良い解を高速に求めることが重要である。

本論文では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筆者らが提案している遺伝的アルゴリ

* 原稿受付 2013 年 5 月 26 日

^{*1} 広島大学大学院工学研究科

^{*2} 正員, 広島大学大学院工学研究院 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

^{*3} 正員, 広島大学大学院歯薬保健学研究院 (〒734-8553 広島県広島市南区霞 1-2-3)

E-mail: eguchi@hiroshima-u.ac.jp



ズム (GA) と優先規則を融合した方法⁽³⁾を適用する. この方法は, GA にスケジューリングに有効な優先規則を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狙ったものである. 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すでに有効な優先規則がいくつか知られており, それらを 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. しかし, 能力調整も可能なスケジューリングを扱う際には, それを考慮したより適切なルールが存在すると考えられる. 本論文では, 第一の目的を納期遵守, 第二の目的を残業時間最小化とするため, まずフル残業を許容して納期遵守を達成したのちに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. より高性能な探索を行うためには, この状況において有効なルールを GA と融合する優先規則として考案する必要がある. 特に, 納期遅れ時間最小化と残業時間最小化はトレードオフの関係にあるため, 残業時間を短縮して行く際に如何に納期遅れを再発させないで効率よく探索できるかが重要なポイントとなる. 本論文ではジョブショップにおいて有効なルールとして知られている ATC ルール⁽⁴⁾と (CR+SPT) ルール⁽⁵⁾をこの目的に合わせて修正したルールを利用することを提案し, 数値実験によってその有効性を示す.

第2章で本研究で取り扱うジョブショップスケジューリングを説明した後, 第3章, 第4章で GA を用いた能力調整を考慮したジョブショップスケジュールの探索法, および GA と優先規則の融合を用いた効率的探索法について説明する. 第5章で数値実験を示し, 第6章で結言を述べる.

2. 能力調整を考慮したジョブショップスケジューリング

2・1 生産環境

本研究では図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, 必要に応じて能力調整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.

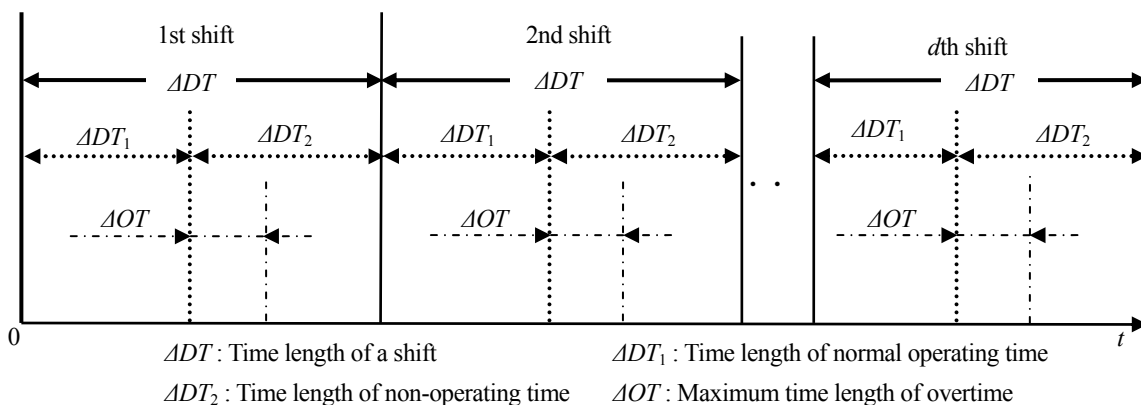


Fig.1 Production environment

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 台の機械により構成されるジョブショップスケジューリングで断続的に到着するジョブを処理する. 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 (i はジョブにつけられた番号) 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 $p_{ij} \leq \Delta DT_i$ 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(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)で表される総残業時間 TOT の最小化とする。

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

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

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り、 N は評価対象ジョブの総数である。 $\max$ 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。

3. GA を用いた残業時間最小化スケジュール探索法

3・1 個体の表現と適応度の評価

本論文では、GA を用いてスケジューリングの最適化を行う。そのため、まず本論文における GA の個体の表現および適応度の評価について説明する。図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する。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⁽⁶⁾による表現法を用いており、後述する優先規則との融合⁽³⁾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⁽⁷⁾。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(3)で与える。

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

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前詰めで割り当てていく遅れなしスケジューリングを行う。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。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(1)で、残業時間に関しては、図3に示すように式(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)によって総残業時間が計算される。

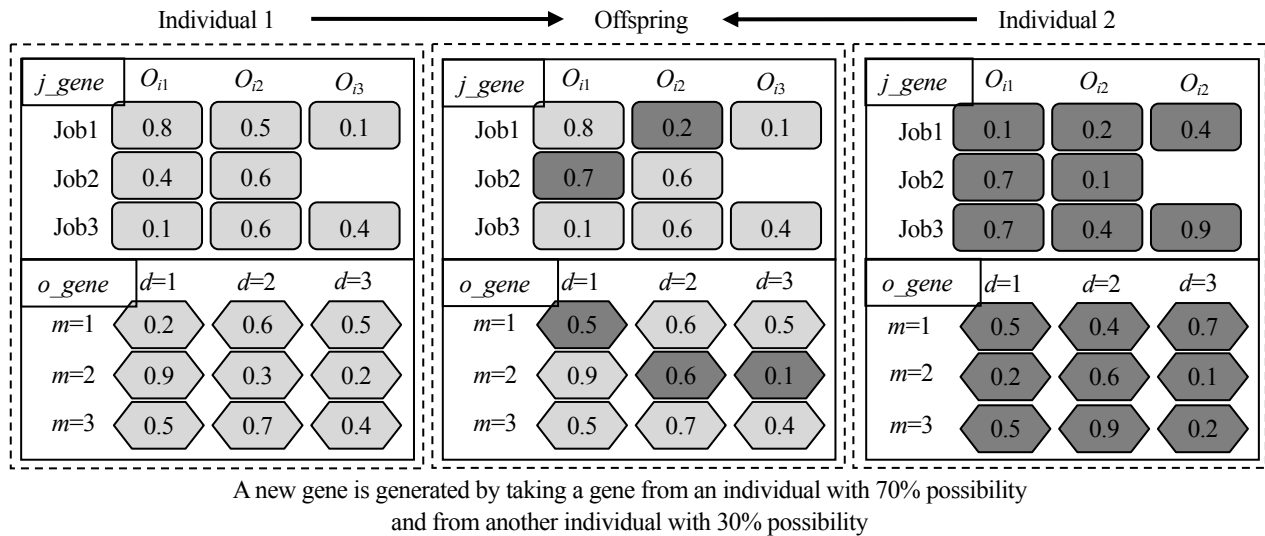


Fig.2 Coding and crossover

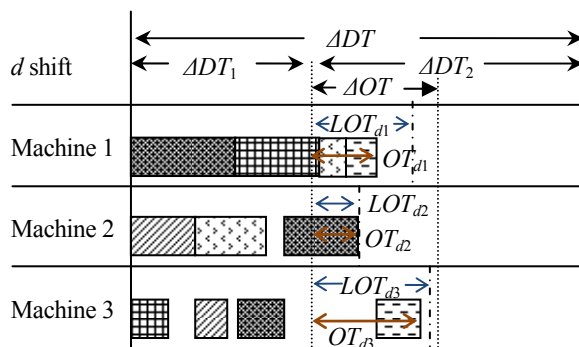
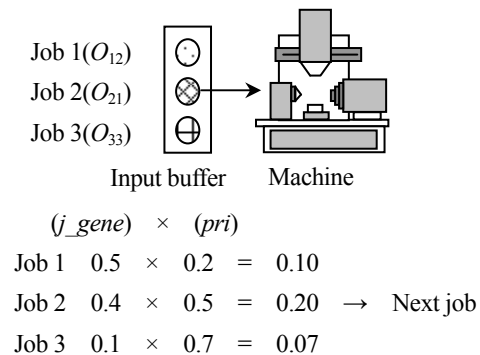
Fig.3 An example of LOT_{di} and OT_{di} in d th shift

Fig. 4 An example of next job selection

3・2 GAによる探索手順と遺伝的操作

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。そのため、 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。

なお本研究のスケジューリングの目的には優先順位があり、第一目的が納期遵守、第二目的が総残業時間の最小化である。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。そのため、適応度の評価としては、 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。

世代交代は、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。交叉は図 2 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、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。この手法は、ランダムキー表現を用いる GA⁽⁶⁾を参考に、予備実験に基づいて定めたものである。

4. GA と優先規則の融合による効率的探索法

4・1 GA と優先規則の融合によるジョブ選択法

本論文では、GA と優先規則を融合した探索法⁽³⁾ をジョブ選択に適用する。これは、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 (4) 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 (図 4)。

$$priority_{ij} = j_gene_{ij} \times pri_{ij} \quad (4)$$

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。

4・2 融合する優先規則

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、この目的を効率よく達成できるルールを選択する必要がある。本論文では式 (5) 式 (6) で表される $(CR^{\beta}+SPT)$ ルールと式 (7) 式 (8) で表される ATC ルール⁽⁴⁾を用いる。

$$pri_{ij} = \frac{1}{p_{ij}} \{ \max[cr_i, 1.0] \}^{-\beta} \quad (5)$$

$$cr_i = \frac{dd_i - t - not_i}{rpt_i} \quad (6)$$

$$pri_{ij} = \frac{1}{p_{ij}} \exp \left\{ - \max \left[\frac{ns_i}{kp}, 0 \right] \right\} \quad (7)$$

$$ns_i = dd_i - t - not_i - rpt_i - \sum_{q=j+1}^{n_i} b \times p_{iq} \quad (8)$$

これらの優先規則では、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

さて、 $(CR^\beta + SPT)$ ルールは、 $(CR + SPT)$ ルール⁽⁵⁾に対してパラメータ β を追加したものである。この $(CR^\beta + SPT)$ ルールの特性は β により変化する。図 5 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(5)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。

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選択されにくく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。本論文ではパラメータ 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、図 6 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、図 6 は $\bar{p} = 10$ での結果である。

このように、 $(CR^\beta + SPT)$ ルールは β を大きく、また、ATC ルールは k を小さく設定することで、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_{dm} 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。

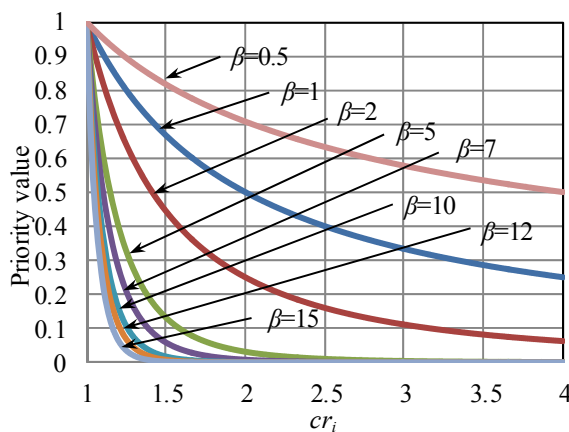


Fig.5 Priority value with β

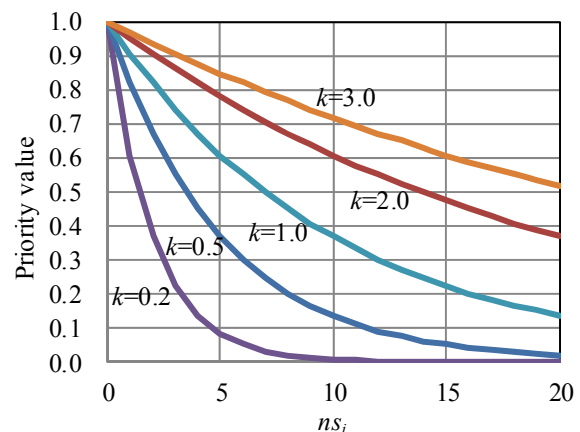


Fig.6 Priority value with k

5. 数値実験

5・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⁽⁸⁾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 (9) のように表すことができる。

$$dd_i = r_i + k_i \times \sum_{j=1}^{n_i} p_{ij} + not_i' \quad (9)$$

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 (終日) に設定した場合：

納期設定 1 と同様にあず式 (9) 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、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 (10)) と SLACK ルール (式 (11)) を利用した場合の実験結果も示す。

$$pri_{ij} = 1 / p_{ij} \quad (10)$$

$$pri_{ij} = \exp\{-(dd_i - t - not_i - rpt_i)\} \quad (11)$$

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 (11) 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。

5・2 実験結果

図 7 から図 10 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。

図 7 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。図 7 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、図 5 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。図 8 は 250 世代目、図 9 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。また図 9 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、図 8、図 9 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。

図 10 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 $^{\beta}$ +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。図 10 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 (図 10) にも関わらず TOT の改善に繋がっていない (図 7)。パラメータ β を大きくしすぎると、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で、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。

図 11 から図 14 に納期設定 2 の問題に対して GA と (CR $^{\beta}$ +SPT)ルールを融合した方法で探索した場合の結果を示す。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 11 は最良個体の TOT の世代における推移を表している。図 11 より納期設定 2 の場合も納期設定 1 の結果 (図 7) 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、図 13 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、図 12 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。図 14 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。

図 15 から図 18 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。図 15 と図 19 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 (これらの結果は図 7、図 11 と同じ結果である)。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⁴⁾である $k=3.0$, $b=2.0$ の結果を掲載する。図 15 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 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。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図 16 (250 世代目) と図 17 (1000 世代目) に示す。図 17 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、図 16 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。図 18 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、 k を小さ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、 $k=0.2$ 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、パラメータ k が (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。

最後に図 19 から図 22 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。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。

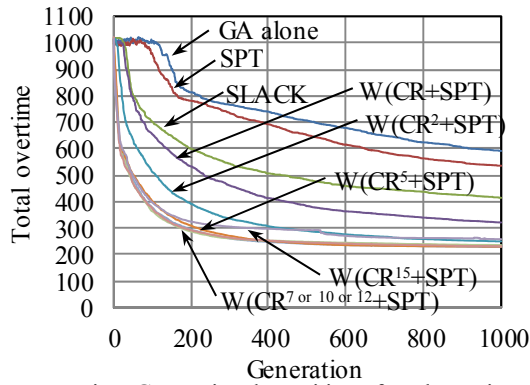


Fig.7 Generational transition of total overtime in "Due date setting 1"

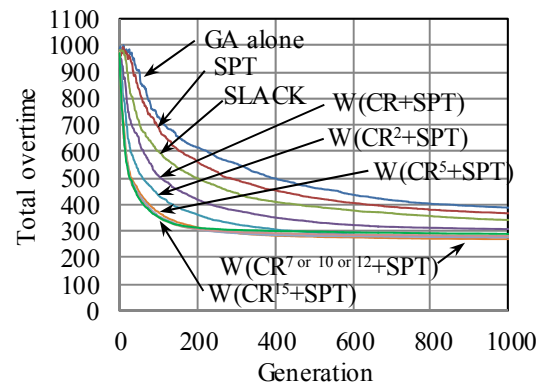


Fig.11 Generational transition of total overtime in "Due date setting 2"

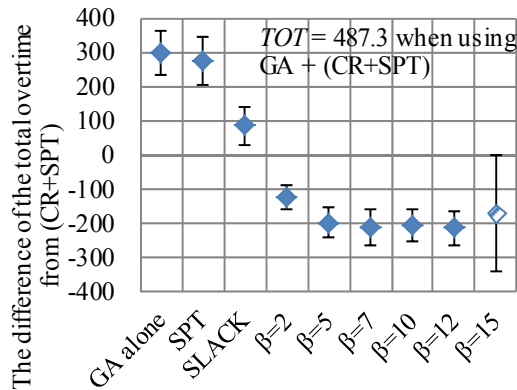


Fig.8 The difference of the total overtime from (CR+SPT) at 250th generation in "Due date setting 1"

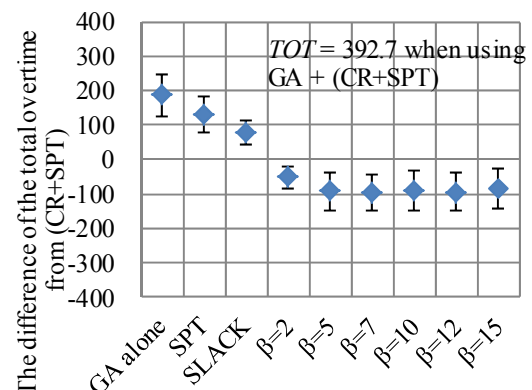


Fig.12 The difference of the total overtime from (CR+SPT) at 250th generation in "Due date setting 2"

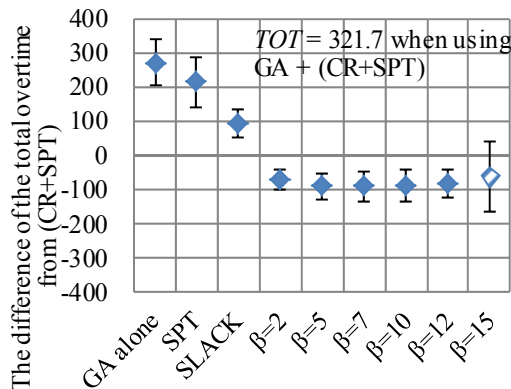


Fig.9 The difference of the total overtime from (CR+SPT) at 1000th generation in "Due date setting 1"

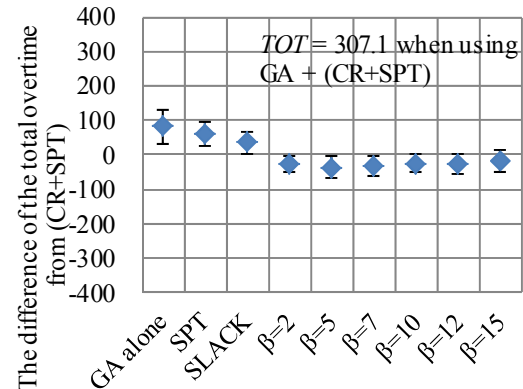


Fig.13 The difference of the total overtime from (CR+SPT) at 1000th generation in "Due date setting 2"

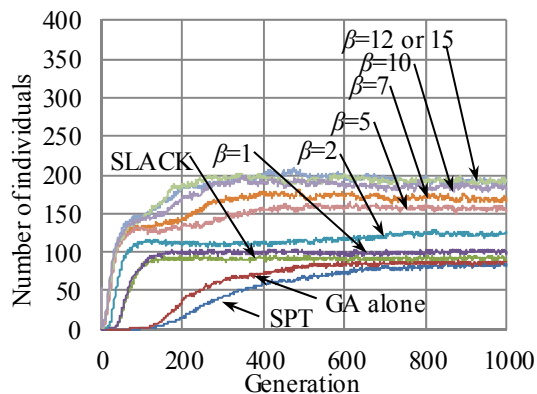


Fig.10 The number of individuals meeting due date in "Due date setting 1"

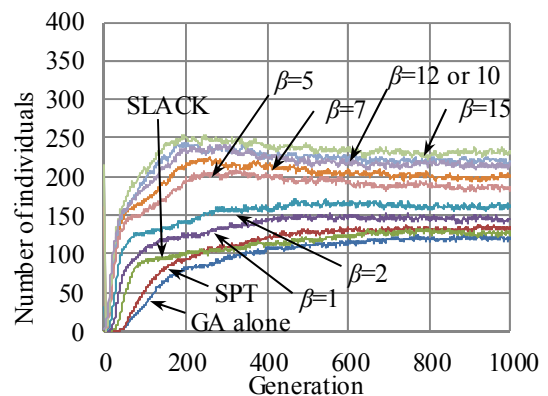


Fig.14 The number of individuals meeting due date in "Due date setting 2"

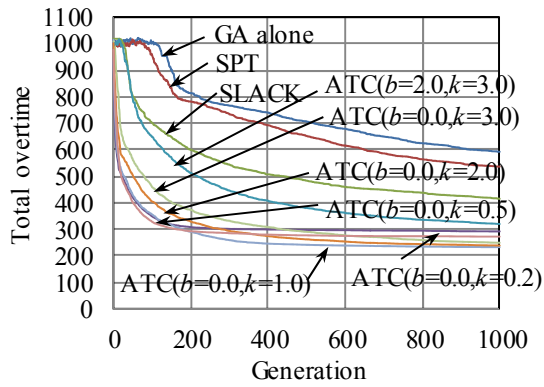


Fig.15 Generational transition of total overtime in "Due date setting 1"

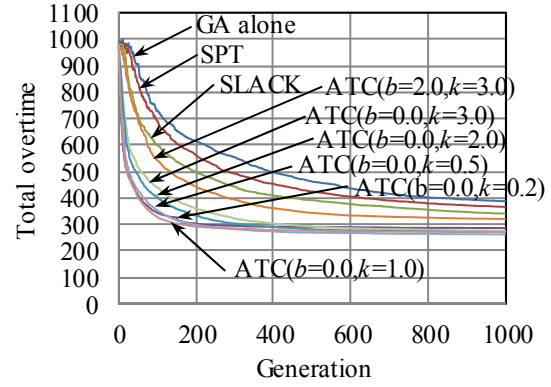


Fig.19 Generational transition of total overtime in "Due date setting 2"

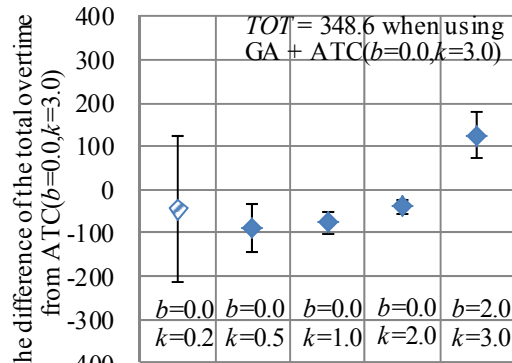


Fig.16 The difference of the total overtime from $ATC(b=0.0, k=3.0)$ at 250th generation in "Due date setting 1"

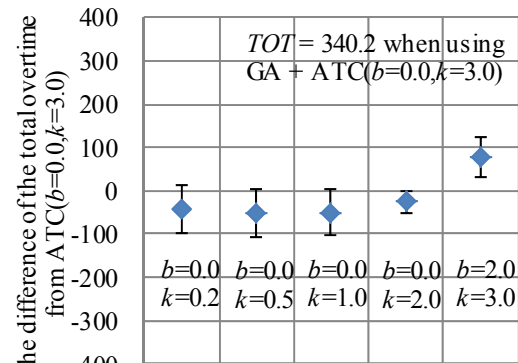


Fig.20 The difference of the total overtime from $ATC(b=0.0, k=3.0)$ at 250th generation in "Due date setting 2"

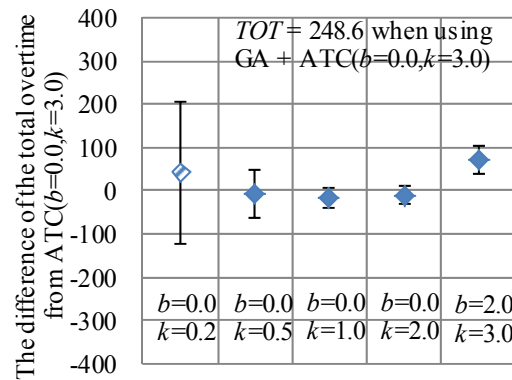


Fig.17 The difference of the total overtime from $ATC(b=0.0, k=3.0)$ at 1000th generation in "Due date setting 1"

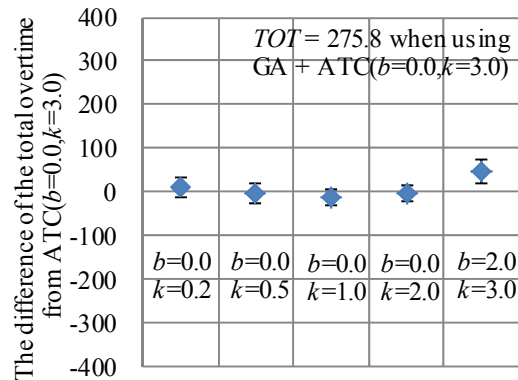


Fig.21 The difference of the total overtime from $ATC(b=0.0, k=3.0)$ at 1000th generation in "Due date setting 2"

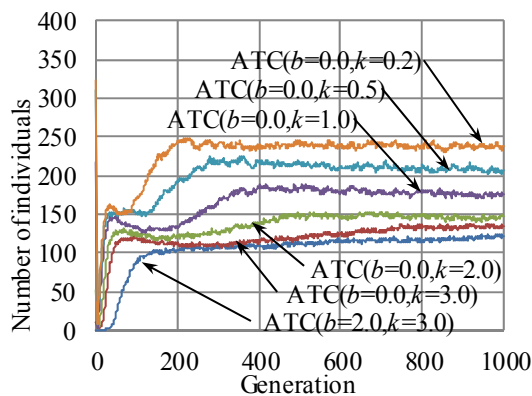


Fig.18 The number of individuals meeting due date in "Due date setting 1"

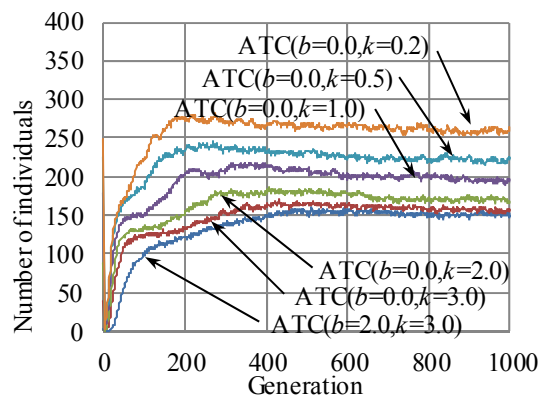


Fig.22 The number of individuals meeting due date in "Due date setting 2"

納期設定が異なる問題に対する性能について考えると、 $(CR^\beta+SPT)$ ルールと ATC ルールのどちらを用いた場合でも、納期設定 2 よりも納期設定 1 の方がパラメータ β もしくはパラメータ k の設定によってより大きな性能差を出している。これより、 $(CR^\beta+SPT)$ ルールもしくは ATC ルールのパラメータ調整は納期がジョブごとに個別に設定された問題に対してより効果的であると考えられる。また、今回の実験では、 $(CR^\beta+SPT)$ ルールと ATC ルールについてはそれぞれパラメータ調整を適切に行うことで同等の性能をもつといえるが、パラメータ調整の容易性の観点からはパラメータが一つである $(CR^\beta+SPT)$ ルールの方が利用しやすい特長があると考えられる。

6. 結 言

本論文では、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。本論文での探索法は、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ものである。この方法で効率的な探索を行うために 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。提案した $(CR^\beta+SPT)$ ルール、および ATC ルールでは、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、提案手法において適切にパラメータを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、本論文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、今後の研究課題である。

文 献

- (1) 荒木雅裕, 冬木正彦, 井上一郎, “納期遅れジョブ削減・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論文誌, Vol.16, No.9(2003), pp.451-460.
- (2) 荒木雅裕, 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の利用の追加調整法”, 日本経営工学論文誌, Vol.51, No.6(2001), pp.603-612.
- (3) 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を融合した動的スケジューリング”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.71, No.703(2005), pp.1047-1053.
- (4) Vepsalainen, A.P.J. and Morton, T.E., “Priority rule for job shops with weighted tardiness costs”, *Management Science*, Vol.33, No.8 (1987), pp.1035-1047.
- (5) 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 (1990), pp.2277-2292.
- (6) Bean, J.C., “Genetic algorithms and random keys for sequencing and optimization”, *ORSA Journal on Computing*, Vol.2, No.2 (1994), pp.154-160.
- (7) 黒田 充, 松村健児, 生産スケジューリング (2002), pp.38-44, 朝倉書店.
- (8) Baker, K.R., “Sequencing rules and due-date assignments in a job shop”, *Management Science*, Vol.30, No.9(1984), pp.1093-1104.