電線加工工程におけるスケジューリング問題の 遺伝アルゴリズムによる解法*

飯間 等**・三井 修***・三宮 信夫**・榊原 隆太****

Genetic Algorithm Approach to a Scheduling Problem in an Electric Wire Processing Process*

Hitoshi IIMA**, Osamu MITSUI***, Nobuo SANNOMIYA** and Ryuta SAKAKIBARA****

This paper deals with a scheduling problem in a real electric wire production process. The process is of a flow-shop with two processes. In each process plural equipments are arranged in parallel. The scheduling problem is large-scale and has complicated constraints. A genetic algorithm (GA) is applied to the problem. If GA is designed so as to search all solutions in the fundamental space, it is inefficient because the number of such solutions is enormous. On the other hand some dispatching rules can be applied to scheduling problems if they are effective. However it is not easy to find an effective rule for complicated production processes. In this paper, GA is designed in such a way that appropriate dispatching rules are combined with the conventional GA operator. Consequently, a part of decision variables are determined by appropriate rules and the others are determined by the operation of GA. The effectiveness of the proposed method is confirmed by computational results.

1. はじめに

生産工程における最適スケジューリングは、理論的にもまた応用上からも重要で興味深い問題なので、これまで多くの研究が発表されている¹⁾。しかし、ジョブショップ工程などの基本的なスケジューリング問題の多くはNP困難のために一般に最適解を得ることは難しく、まして大規模で複雑な制約を有する実在の問題においてはある程度良い実行可能解を得ることさえも難しい。

現在、ジョブショップスケジューリング問題などのベンチマーク問題に対する有効な解法の検討が行われ、その成果が徐々に現れつつある。ベンチマーク問題は種々

の手法による計算結果が蓄積されており、他の手法との比較が容易に行える。したがって、解法の基本的な性能を考察するという点では、このような研究は重要である。しかし、ベンチマーク問題で良い解が得られたとしても、実際に存在する問題で良い解が得られなければ実用的には役に立たない。実在の問題では多くの複雑な制約が存在するので、それらに対応できる柔軟性を解法は具備していなければならない。解法の柔軟性は多様な問題に解法を適用することから生まれるので、実在の問題に対するスケジューリング手法を検討することも重要な研究課題であるといえる。そのような事例研究は個別の問題として軽視されがちであるが、スケジューリング問題の多様性を考慮すると、個々の解法のアイデアの蓄積も必要不可欠である。

本論文では実在する電線の加工工程におけるスケジューリング問題に対して有効な解法を提案する。本工程は2工程のフローショップとなっており、各工程ごとに設備が複数個並列に配置されている。第1工程は通常の並列機械工程であるが、第2工程では処理時間が他の設備で処理される製品との組合せによって変化し、事前に個々の製品の処理時間を確定することが困難である。また、ス

* 原稿受付 1997年8月28日

** 京都工芸繊維大学 工学部 Faculty of Engineering and Design, Kyoto Institute of Technology; Goshokaidocho, Matsugasaki, Sakyo ward, Kyoto city, Kyoto 606-8585, JAPAN

*** 京都工芸繊維大学 大学院 工学科学研究科 Student of Graduate school, Faculty of Engineering and Design, Kyoto Institute of Technology; ditto

**** 古河電気工業(株) The Furukawa Electric Co., Ltd.; Marunouchi, Chiyoda ward, Tokyo 100-8322, JAPAN

Key Words: scheduling, genetic algorithm, flow-shop, parallel machines.

Fig. 1 Production process

スケジュールは一日ごとに作成するが、前日に第1工程の処理が完了しているが第2工程未処理の製品が存在し、これらのスケジュールも新たにこの工程に導入された製品のスケジュールと同時に定める必要がある。このような加工工程において、各製品の納期遅れの総和を最小にするように各製品の処理設備と各設備上における処理順序を求めることが問題である。

この問題に対して、最適化問題の近似解法として注目されている遺伝アルゴリズム (GA)^{2),3)}の適用を試みる。しかし、本問題の基本空間における解の総数はばく大であり、これをそのまま探索空間とするようにGAを構成するのは非効率であると思われる。一方、スケジューリング問題の解法としてディスパッチングルールがよく用いられるが、本加工工程は性質の異なる2工程が結合しており、全体のシステムに有効に働くルールを見つけることは容易ではない。しかし、部分的に有効なルールは存在するので、その能力をGAに取り入れることにより探索空間を縮小してGAの計算効率を高めることができれば、GAの構成法としては現実的であると思われる。本問題では各製品の処理設備と第2工程における処理順序の決定にディスパッチングルールを適用し、この手続きを含めて第1工程の製品の処理順序を定める手続きをGAにより構成する。

本論文では電線加工工程のスケジューリング問題に対するGAの構成法を提案し、実操業データに基づいてその計算結果を示す。また他手法との計算結果の比較を行い、提案する手法の有効性を確認する。

2. 問題の記述

I 本の電線 $A_i (i=1,2,\dots,I)$ がいくつかの工程を経て生産される。本論文では、その中のネックとなる2工程 (Fig. 1 参照) における生産スケジュールを立案する。各工程は以下のように構成されている。

第1工程では B 台の機械 $M_b (b=1,2,\dots,B)$ が並列に配置されている。前工程から送られてきた電線はいずれかの機械で処理が行われ、第1工程と第2工程の間にあるバッファに送られる。本工程では銅線にポリエチレンなどの絶縁材を被覆し、着色する。そのために、つぎに処理する電線の絶縁材の色が異なる場合、機械の清掃のために段取り時間が必要となる。

一方、第2工程では1台の照射機が存在し、照射機中に N 本のライン $R_n (n=1,2,\dots,N)$ [†] が並列に配置されている。バッファから送られてきた電線はいずれかのラインで処理が行われ、後工程に送られる。本工程では電線に必要な量だけ電子線を照射して耐熱性を強化する。各ラインにはターンシープと呼ばれる器具が取り付けられてあり、これに電線を巻き付けて、何回かターンさせながら電子線を当てる。ターンシープにはいくつかの種類があり、それぞれターンさせる回数異なる。ターン数が多い場合、何回もターンして電子線が多く当たるので、必要とされる照射量を得るための時間が少なくてすむ。電子線はすべてのラインに対して同一の電子流で照射される。各電線には最大電子流が定まっており、この値よりも大きい電子流で電子線を当てることはできない。しかし、電子流を小さくすると、必要とされる照射量を得るまで時間がかかることになる。そこで、各時刻ごとに各ラインで処理されている電線の中で、最大電子流の最も小さい電線の最大電子流をその時刻の電子流とする。したがって、あるラインで新たな電線の処理が開始された場合や、あるラインで電線の処理が終了した場合には、電子流が変わる可能性がある。なお前述したように、第

[†]「ライン」は通常のスケジューリング問題における「機械」と考えてよいが、便宜上このように呼んで第1工程と第2工程の設備名を区別することにする。

2 工程の処理時間はターン数および各時刻の電子流に依存する。また、第 1, 2 両工程ともに、各設備ごとに処理可能な電線の太さの範囲が定められており、範囲外の太さをもつ電線を処理することはできない。

スケジュールは毎朝作成するが、前日に第 1 工程の処理が完了して第 2 工程未処理の電線、すなわちバッファで止まっている電線 $A_j (j = I - J + 1, I - J + 2, \dots, I)$ が J 個ある。

このような加工工程において、各電線の納期遅れの総和を最小にするための各工程の各電線の処理設備と各設備上における電線の処理順序を求めることが問題である。なお、電線の移動に要する時間は 0 とし、バッファの容量は無限大であるとする。

本問題では以下のパラメータが与えられている。

L_i : 電線 A_i の長さ

$C(i)$: 第 1 工程で電線 A_i に被覆する絶縁材の色

H_i : 第 1 工程における電線 A_i の処理時間

W_i : 第 2 工程における電線 A_i の照射量

G_i : 第 2 工程における電線 A_i の最大電子流

D_i : 電線 A_i の納期

$V_{C(i1)C(i2)}$: 第 1 工程において色が $C(i1)$ である電線の後に色が $C(i2)$ である電線を処理する際の段取り時間

T_n : ライン R_n にあるターンシーブのターン数

$(i, i1, i2 = 1, 2, \dots, I; n = 1, 2, \dots, N)$

機械 M_b で p 番目に処理する電線番号 $\alpha_b^p (p = 1, 2, \dots, P_b)$ およびライン R_n で q 番目に処理する電線番号 $\beta_n^q (q = 1, 2, \dots, Q_n)$ が与えられた場合に、目的関数である納期遅れの総和 z を求める方法を以下に述べる。ここに、 P_b は機械 M_b で処理される電線数、および Q_n はライン R_n で処理される電線数である。

まず、第 1 工程に関して、各電線 A_i の処理終了時刻 $e_1(i)$ を次式で求める。

$$e_1(\alpha_b^1) = H_{\alpha_b^1} \quad (1)$$

$$e_1(\alpha_b^p) = e_1(\alpha_b^{p-1}) + H_{\alpha_b^p} + V_{C(\alpha_b^{p-1})C(\alpha_b^p)} \quad (2)$$

$(b = 1, 2, \dots, B; p = 2, 3, \dots, P_b)$

なお、第 1 工程処理済みの電線 A_j の処理終了時刻 $e_1(j)$ は $e_1(j) = 0$ とする。

つぎに、第 2 工程に関して、以下の手続きにより各電線 A_i の処理終了時刻 $e_2(i)$ を求める。なお、第 2 工程における各電線の処理順序は 4.2 で述べるように定められているものとする。

ステップ 1 各ライン R_n で最初に処理される製品 $A_{\beta_n^1}$

の中で、第 1 工程で最も早く処理が終了する製品のライン番号 n^* を次式で求める。

$$n^* = \arg \min_n e_1(\beta_n^1) \quad (3)$$

ステップ 2 ライン R_n で処理される電線がそのラインで何番目に処理されるかを表す変数を q_n とすると、各 n に対して q_n を次式で与える。

$$q_n = \begin{cases} 1 & (n = n^* \text{ のとき}) \\ 0 & (n \neq n^* \text{ のとき}) \end{cases} \quad (4)$$

$(n = 1, 2, \dots, N)$

ステップ 3 ライン R_n で電線が処理中であるとき 1, 処理中でないとき 0 を表す変数を δ_n とすると、各 n に対して δ_n を次式で与える。

$$\delta_n = \begin{cases} 1 & (n = n^* \text{ のとき}) \\ 0 & (n \neq n^* \text{ のとき}) \end{cases} \quad (5)$$

$(n = 1, 2, \dots, N)$

ステップ 4 各電線 A_i の処理進行度合 (100%であれば処理終了を表す) を $y_i[\%]$ とするとき、すべての i に対して $y_i = 0$ とする。

ステップ 5 時刻を $t = e_1(\beta_{n^*}^1)$ とする。ここまですが初期設定である。

ステップ 6 時刻 t で新たに処理可能な電線は処理を開始する。すなわち、各 n に対して $\delta_n = 0$ かつ $q_n < Q_n$ かつ $t \geq e_1(\beta_n^{q_n+1})$ ならば、 $\delta_n = 1$, $q_n = q_n + 1$ とする。

ステップ 7 すべての n に対して $\delta_n = 0$ ならば、 $t = t + 1$ としてステップ 6 へ戻る。

ステップ 8 時刻 t における電子流 x を次式で求める。

$$x = \min_n G_{\beta_n^{q_n}} \quad (6)$$

ただし、 $\delta_n = 0$ ならば $G_{\beta_n^{q_n}} = \infty$ とする。

ステップ 9 各ライン R_n に対して、 $\delta_n = 1$ ならば各ラインの電線の処理進行度合を次式で更新する。

$$y_{\beta_n^{q_n}} = y_{\beta_n^{q_n}} + \frac{T_n x}{2W_{\beta_n^{q_n}} L_{\beta_n^{q_n}}} \times 100 \quad (7)$$

$(n = 1, 2, \dots, N)$

ステップ 10 各ライン R_n に対して、電線の処理進行度合が $y_{\beta_n^{q_n}} \geq 100$ であれば処理が終了し、処理終了時刻を次式で定める。

$$e_2(\beta_n^{q_n}) = t \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (8)$$

また、この場合 $\delta_n = 0$ とする。

ステップ 11 すべての電線 A_i に対して $e_2(i)$ が求められたならば計算終了。そうでなければ、

$t=t+1$ としてステップ 6 へ戻る.

以上より, z を次式で求める.

$$\min z = \sum_{i=1}^I \max (e_2(i) - d_i, 0) \quad (9)$$

3. 問題の特徴と解法の方針

本論文で扱う加工工程は基本的には2工程のフローショップで, 各工程ごとに並列機械が配置されているとみることができる. また, 第2工程では各電線の処理時間が他のラインで処理される電線との組合せによって変化すること, さらにそのために事前に処理時間が確定できないという特徴がある.

スケジューリング問題などの最適化問題を解く手法として, 近年 GA が提案された. GA はうまく構成すれば最適解を得ることができ, 筆者らも小~中規模のジョブショップのベンチマーク問題に GA を用い, 最適解を得ることができた^{4),5)}. また, GA は問題の特徴がわからなくてもとりあえず使用することができる. しかし, 現実には存在するような大規模で制約の多い問題に対して, 何の工夫もない GA を適用しても有効な解は得られない. 本問題は各工程ごとの各電線の処理設備と処理順序を求めなければならないが, その総組合せ数はばく大であり, この中から最適スケジュールを GA で求めることは得策ではないと思われる.

一方, スケジューリング手法として, 「処理時間の短い順に処理する (SPT)」などの問題の特徴を利用したディスパッチングルールを用いることが考えられる. ディスパッチングルールは必ずしも最適解が得られるわけではないが, 瞬時に良好な解を得る可能性がある. 本問題では,

- (a) 処理開始時刻が最も早くなる設備で処理する
- (b) 納期順に処理する
- (c) 処理時間の短い順に処理する
- (d) 第1工程において, 段取り時間が小さくなるように処理順序を定める
- (e) 第2工程において, 第1工程から到着した順に処理する
- (f) 第2工程において, 最大電子流がほぼ同一の電線を同時期に処理する

のようなルールを用いれば, 総処理時間や納期遅れ和が小さくなると思われるが, 前述したように第2工程の処理時間が確定できないので, (c) のような処理時間を利用するルールは全体のシステムには使えない. また, 第1工程と第2工程は異なる特徴を有しており, 全体的な視野でルールを作成することは困難である (たとえば, 第1工程のみを考えれば (d) が良いかもしれないが, 第2工程も考慮すると (d) が良いとは考えにくい). ただし,

部分的には有効なルール (例えば (a) または (e)) が存在する.

以上より, 実際の問題に対しては, すべての決定変数を GA で探索せずに, 有効なルールが存在する部分はそのルールに任せて, 残りの有効なルールが考えられないような部分を GA で探索すべきであると思われる. このことは, 明らかにむだな探索をランダムに行う非効率性を避けるとともに, GA にとって不向きである局所探索をルールに委ねることを意図している.

そこで, 本問題に対する解法としては, 第1工程の各電線の処理順序を GA で探索し, 両工程における処理設備の選択と第2工程の各電線の処理順序は, それぞれデコーディングの際に (a) と (e) により定めることにする. このようなルールを導入した理由はつぎのように説明される. すなわち, 本問題の目的が納期遅れの総和を最小にすることであるので, 局所的な立場からはそれぞれの工程でできるだけ早く処理する方がよいと考えられる. もちろん一般的には, 一部の工程で一部の電線の処理を遅らせることが全体を考えて最適である可能性もあるが, それを通常の GA の演算子のみで探索することは計算時間の点で有効でないと考える.

4. 遺伝アルゴリズムの構成法

本問題に対する GA の構成法を述べる.

4.1 全体の手順

- ステップ 1 PS 個の個体をランダムに生成して, 初期個体群を設定する. 世代を $\tau=1$ とする.
- ステップ 2 各個体の適応度を計算して, 適応度に依存して淘汰を行う.
- ステップ 3 各個体をランダムに2個ずつ組み合わせて, 確率 PC で交叉を行い, 新しい個体 (子) を2個ずつ生成する. 子はその生成に関与した古い個体 (親) と置き換わる.
- ステップ 4 各個体の遺伝子座ごとに, 確率 PM で突然変異を行う. 得られた子を親と置き換える.
- ステップ 5 $\tau=GE$ ならば, それまでに得られている適応度が最大の個体を問題の準最適解として計算を終える. 否ならば, $\tau=\tau+1$ としてステップ 2 へ戻る.

4.2 個体表現法

個体は電線番号 $i (i=1, 2, \dots, I)$ を総電線数分一列に並べたもの, すなわち $i_1 i_2 \dots i_I$ とする. デコーディングは左の遺伝子から順に第1工程のスケジュールを定めていくこととする. その際, 処理開始時刻が最も早くなる機械とその時間区間にスケジュールを定めることにする. また, 第1工程処理済みの電線 $A_j (j=I-J+1, I-J+2, \dots, I)$

は第1工程の処理時間を0として、仮のスケジュールを定めておく。もちろん、この場合 A_j とその前後に処理する電線の間の段取り時間は0である。

第2工程のスケジュールは第1工程の処理が終了した順に定めていく。この場合も処理開始時刻が最も早くなるラインとその時間区間にスケジュールを定めることとする。ただし、第2工程の処理開始時刻は第1工程の処理終了時刻以降に定める。

なお、電線の太さにより処理できない設備が存在するので、そのような設備は選択しないようにする。

デコーディングの一例を、Table 1 で与えられる問題で示す。同表 (b) は行の要素から列の要素への段取り時間を表す。 A_5 は第1工程処理済みであるとする。また、電線の太さなどの条件により、 A_1 の第1工程は機械 M_1 でのみ、 A_5 の第2工程はライン R_1 でのみ処理可能であるとする。このとき、個体 (34152) に対応するスケジュールは Fig. 2 のようになる。同図において、長方形内の数字は電線の番号である。デコーディングの際、第1工程ではまず A_3 のスケジュールを定める。つぎの A_4 は M_2 の方が M_1 より処理開始時刻が早いので、 M_2

で処理する。つぎの A_1 は M_1 でのみ処理可能であり、このとき段取り時間が5であるので、図のとおりスケジュールが定められる。つぎの A_5 は第1工程処理済みなので、仮の処理終了時刻を M_2 上の A_4 の後、すなわち時刻7と定める。最後に A_2 のスケジュールを定める。つぎに第2工程のスケジュールを $A_4A_5A_3A_2A_1$ の順に定めていく。まず、 A_4 を定める。 A_4 は1時点で $20 \times 50 / (2 \times 40 \times 60) \times 100 \approx 21\%$ の処理が進むので、処理時間は5となる。つぎの A_5 は R_1 でのみ処理可能であるので、 A_4 の後にスケジュールを定め、つぎの A_3 は R_2 で処理される。つぎの A_2 も R_2 で処理される。 A_2 の最大電子流は100であるが、時刻20までは最大電子流50の A_5 が同時に処理されているので、時刻20までの電子流は50となる。この後時刻21からの電子流は100となる。最後に A_1 のスケジュールを定める。

ところで、 A_5 のような第1工程処理済みの電線の第2工程におけるスケジュールは、常に第1工程未処理の電線の前に位置づけるようにすることも考えられる。しかし、第1工程処理済みの電線の納期が第1工程未処理の電線の納期よりも遅い場合が存在するので、必ずしも早く処理すればよいわけではない。そこで、本デコーディングでは仮の第1工程の処理終了時刻を0よりも大きくすることにして、GAにより適切な第2工程の処理時間区間を求めるようにしている。

4.3 淘汰規則

適応度比例戦略を用いるが、確率的には行わずに確定的に実行する。まず、適応度は次式のように定める⁶⁾。ここで、 F_s は各世代における個体 $IN_s (s=1, 2, \dots, PS)$ の適応度である。また、 z_s は個体 IN_s の目的関数値である。

$$F_s = U \min_{1 \leq \ell \leq PS} z_\ell + \max_{1 \leq \ell \leq PS} z_\ell - z_s \quad (10)$$

$$(s=1, 2, \dots, PS)$$

(10) 式の右辺第1項および第2項は、 F_s の値が常に正となるように導入された定数である。また、第1項で $U (> 0)$ は淘汰圧を調節するパラメータで、その値が大きくなるほど悪い個体も生き残るようになる。

つぎに、このようにして得られた適応度 F_s を用いて、個体 IN_s の淘汰後における個数の期待値 E_s は次式のようになる。

$$E_s = \frac{F_s}{\bar{F}} \quad (s=1, 2, \dots, PS) \quad (11)$$

ここに、 $\bar{F}$ は適応度 F_s の平均値である。すなわち、

$$\bar{F} = \frac{1}{PS} \sum_{s=1}^{PS} F_s \quad (12)$$

Table 1 Illustrative example of the process ($I=5, J=1, B=2, N=2, T_1=20, T_2=10$)

(a) Product data

i	H_i	$C(i)$	L_i	W_i	G_i
1	6	White	100	50	100
2	5	Red	50	50	100
3	8	Black	60	30	50
4	7	Black	60	40	50
5	6	Red	80	50	50

(b) Set-up cost

	Black	Red	White
Black	0	4	5
Red	3	0	3
White	1	2	0

Fig. 2 Example of decoding individual (34152)

本アルゴリズムでは、(11)式で得られる E_s を整数化した値 ε_s を用いて各個体の個数を増減し、淘汰を行う。 E_s の整数化はつぎのように行う。まず、各個体を E_s の小数部の大きい順に並べる。つぎに、その順番の初めから E_s の小数部の合計数（言い換えれば、 PS から E_s の整数部の合計を引いた数）だけ E_s の小数第1位を切り上げ、残りは切り捨てを行い、それを ε_s とする。以上のように求めた ε_s に対して次式が成立し、個体数は一定となる。

$$\sum_{s=1}^{PS} \varepsilon_s = PS \quad (13)$$

4.4 交叉、突然変異規則

交叉は cycle crossover を用いる²⁾。また、突然変異はある遺伝子座で行う場合には、ランダムに他の遺伝子座を選択し、これらの遺伝子座間で遺伝子を交換する。

4.5 パラメータの値

アルゴリズムに含まれるパラメータは、予備計算を行って以下のように定めた。

個体数 $PS=500$ ，世代数 $GE=1000$ ，淘汰圧 $U=0.005$ ，交叉確率 $PC=1$ ，突然変異確率 $PM=0.005$ 。

5. 計算例

電線総数 $I=153$ （このうち、第1工程処理済みの電線は $A_{119} \sim A_{153}$ ），絶縁材の色10種，機械数 $B=4$ ，ライン数 $N=4$ の実際的な規模の事例に本アルゴリズムを適用する。まず、提案した手法の計算結果を示し、つぎに他の解法との比較を行うことにより提案した手法の有効性を考察する。

5.1 遺伝アルゴリズムによる計算結果

Fig. 3 は、本アルゴリズムで得られた準最適目的関数値の10世代おきの変化を示す。これより、多くの納期遅

Fig. 3 Convergence process

れが生じていた初期解からほぼ納期遅れのない解が得られていることがわかる。また、Fig. 4 は得られた解のガントチャートを示す。ここで、第1工程において各機械上に存在する空き時間は段取り時間である。納期遅れが生じているのは、番号59（納期遅れ21）と番号126（同2）の二つの電線のみである。Fig. 4 より、各設備はほぼ休みなく稼働していることがわかる。また、計算機 NWS-5000X（CPU: R4400SC, 200MHz）を使用した計算時間は2704.48秒であった。

5.2 他の解法との比較

提案した手法（以後、手法Aと呼ぶ）はGAとルールを併用している。その有効性を確認するために、第1工程と第2工程の両方の処理順序をGAで決定する手法B、および第1工程と第2工程の両方の処理順序をルールで求める手法Cと比較する。

手法Bおよび手法Cを以下に説明する。まず手法Bでは、第2工程の処理順序を決定する新たな遺伝子列を設ける。第1工程と同様に電線番号を総電線数分1列に並べ、そのデコーディングは左の遺伝子から順に第2工程のスケジュールを定めていくこととする。その際、第1工程の処理終了時刻以降で、処理開始時刻が最も早くなるラインとその時間区間にスケジュールを定めることにする。各遺伝演算子は4.と同じものを用い、GAのパラメータの値も同一とする。

つぎに手法Cでは、第1工程の処理順序を納期順に与え、第2工程の処理順序は第1工程の処理が終了した順に与えて一つのスケジュールを作成する。

これらの手法の計算結果をTable 2に示す。これより手法Aが他の手法に比べて良い解が得られていることがわかる。手法BにおけるGAの遺伝子型の総数すなわち探索空間の大きさは $153! \times 153! = 4 \times 10^{538}$ であり、手法AにおけるGAの遺伝子型の総数 $153! = 2 \times 10^{269}$ よりもはるかに大きい。また手法Bにおいて、第1工程を示す遺伝子列では後の方にあり、第2工程を示す遺伝子列では前の方にある遺伝子の存在は、それ以外の遺伝子に対応する電線がバッファ内でかなり待たされてそれだけ機械が休んでしまう結果を生じ、直感的にも良いスケジュールが得られるとは考えにくい。手法Bではこのよ

Table 2 Comparison among three methods

Method	Objective value
A	23
B	47995
C	16630

Fig. 4 Gantt chart for a suboptimal solution

うに機械を長時間休ませてしまうスケジュールに対応する個体が多数含まれており、これらの個体が淘汰されるには十分多くの世代が必要で、むだな探索が多いと考えられる。一方、手法 A の (e) のルールは総処理時間を小さくする可能性が高いと考えられる。以上の理由により、手法 B では悪い結果が得られたと思われる。手法 C の納期順に処理するというルールは 1 機械問題などでは有効なルールであるが、本問題のような異なるタイプの工程が結合したフローショップ型では良い結果は得られなかった。

6. おわりに

実在する電線加工工程のスケジューリング問題に対する GA の構成法を述べ、その計算結果を示すとともに他手法との計算結果の比較を行い、提案する手法の有効性を確認した。

本問題の解の総数はばく大であるために、第 1 工程の電線の処理順序のみを GA により求め、その他のスケジュールはデコーディングする際にディスパッチングルールにより定めた。計算結果より提案した手法で良好な解が得られることがわかった。このように実際の問題に対しては、基本空間におけるすべての解を GA で探索せずに、有効なルールが存在する部分はそのルールに任せて、有効なルールが存在しないような部分を GA で探索すべきであると思われる。

本論文で取り上げたのは、一連の工程中のネックとなる 2 工程である。他の工程を付加した問題を解く必要があるが、この点は今後の検討課題としたい。

最後に、本研究は文部省科学研究費補助金基盤研究 C09650442 および IMS 国際共同研究プログラムの援助のもとで行われたもので、ここにその援助に謝意を表す。

参考文献

- 1) 木瀬：生産スケジューリングの現状と動向；システム/制御/情報，Vol. 41, No. 3, pp. 92-99 (1997)
- 2) D. E. Goldberg: *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley

(1989)

- 3) 玉置，喜多，岩本，三宮：遺伝アルゴリズム I~IV；システム/制御/情報，Vol. 39, No. 6/8/10/12 (1995)
- 4) G. Shi, H. Iima and N. Sannomiya: A new encoding scheme for solving job shop problems by genetic algorithm; *Proc. of the 35th IEEE Conference on Decision and Control* (1996)
- 5) G. Shi, H. Iima and N. Sannomiya: Comparison of two genetic algorithms in solving tough job shop scheduling problems; 電気学会論文誌 C, Vol. 117-C, No. 7, pp. 856-864 (1997)
- 6) 飯間，三宮：遺伝アルゴリズムを用いた変形フローショップ問題の解法；システム制御情報学会論文誌，Vol. 6, No. 10, pp. 437-445 (1993)