遺伝的アルゴリズムを用いたリアクティブスケジューリング* (第2報, ジョブの追加に対する生産スケジュールの変更)

阪口 龍彦*¹, 谷水 義隆*², 杉村 延広*²

Genetic Algorithm Based Reactive Scheduling (2nd Report, Modification of Production Schedule for Additional Jobs)

Tatsuhiko SAKAGUCHI*³, Yoshitaka TANIMIZU and Nobuhiro SUGIMURA

*³ Graduate School of Science and Technology, Kobe University,
1-1 Rokkodai, Nada-ku, Kobe-shi, Hyogo, 657-8501 Japan

A systematic scheduling method is required to modify the predetermined production schedules in order to cope with unforeseen changes in manufacturing systems. The objective of the present research is to propose a scheduling method based on GA (Genetic Algorithm) for modifying delayed production schedules due to the additional jobs, reactively. A prototype of reactive scheduling system is developed and applied to scheduling problems. The effectiveness of the proposed method is verified through the numerical experiments of the reactive scheduling problems.

Key Words: Reactive Scheduling, Genetic Algorithm, Additional Jobs, Lower Bound, Variety

1. 緒言

実際の生産活動では, 機械の故障やジョブの追加により, あらかじめ作成した生産スケジュール通りに生産活動を行うことが困難になる場合がある. このような生産システムの状況の変化に対応することができる生産スケジューリング手法の一つとして, リアクティブスケジューリング(Reactive scheduling)⁽¹⁾がある. リアクティブスケジューリングは, あらかじめ作成した生産スケジュールに従って生産活動を行っている途中に, 予測していない変化が発生した場合, 変化が発生した時刻以降の生産スケジュールを変更するスケジューリング手法である.

リアクティブスケジューリングの既存の研究⁽¹⁾⁽²⁾では, ルールを用いて生産スケジュールを変更する手法が提案されている. しかし, どのような生産スケジュールでも適切に変更することができる優れたルールを求めることは容易でない. そこで, 第1報では, 生産活動中の作業に遅延が発生した場合に, 遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm, 以下 GA と呼ぶ)⁽³⁾を用いて初期スケジュールを適切に変更するリアクティブスケジューリング手法を提案し, 計算機実験により, その有効性を検証した. 本研究では, 生産活動中に製品オ

ーダが追加された場合に, 初期スケジュールを迅速に改善することができるようにリアクティブスケジューリング手法を拡張する. 次に, 拡張した手法に基づき, リアクティブスケジューリングシステムのプロトタイプを開発し, 計算機実験を行うことで, 本手法の有効性を検証する.

2. リアクティブスケジューリング

2.1 用語と記号の定義 本論文中使用する用語と記号を以下に整理する.

- ジョブ (Job) : J_i ($i = 1, 2, \dots, m$)
部品や組立品などの生産対象を表す.
- リソース (Resource) : R_j ($j = 1, 2, \dots, n$)
ラインや工作機械などの生産資源を表す.
- オペレーション (Operation) : $O_{i,j}^{k,l}$
フライス加工やドリル加工など, ジョブ J_i にリソース R_j を用いて施す作業を表す. オペレーション $O_{i,j}^{k,l}$ は, ジョブ J_i の工程順序の k 番目のオペレーションであり, リソース R_j において l 番目に実行されることを表す. ただし, k は工程設計によりあらかじめ定められる順序であり, l はスケジューリングの結果から定まる順序である. オペレーション $O_{i,j}^{k,l}$ は, 作業の開始時刻 $st_{i,j}^{k,l}$, 終了時刻 $ft_{i,j}^{k,l}$ および処理時間 $pt_{i,j}^{k,l}$ の情報を持つ.

なお, リソースでは, 同時には一つの作業しか行えないこととし, 一つのジョブは, 全てのリソースで 1

* 原稿受付 2004 年 8 月 25 日.

*¹ 正員, 神戸大学大学院自然科学研究科(☎ 657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1).

*² 正員, 大阪府立大学大学院工学研究科(☎ 599-8531 堺市学園町 1-1).

E-mail: sakaguchi@mech.kobe-u.ac.jp

回ずつ作業を施されるものとする。

スケジューリング問題は、各リソースにおけるオペレーションの適切な実行順序を決定する問題である。本論文では、ジョブショップスケジューリング問題を取り扱う。ジョブショップスケジューリング問題では、ジョブごとにオペレーションを施すリソースの順序が異なる。

2.2 リアクティブスケジューリング手法 第1

報で提案した処理時間の遅延に対するリアクティブスケジューリング手法⁽⁴⁾の概要を以下に示す。

リアクティブスケジューリングでは、生産開始後に生産スケジュールを変更するため、既に開始したオペレーションおよびリアクティブスケジューリング中に開始するオペレーションの実行順序、開始時刻および終了時刻を変更することはできない。そのため、それ以外のオペレーションが、リアクティブスケジューリングの対象になる。

図1の例では、リソース R_1 におけるジョブ J_2 のオペレーション $O_{2,1}^{1,1}$ の遅延により、総処理時間があらかじめ与えられた基準値 C よりも大きくなったため、時刻 T_1 からリアクティブスケジューリングを開始する。1回のリアクティブスケジューリングプロセスに、 dt の計算時間を要すると考えると、 $O_{2,1}^{1,1}$ 、 $O_{3,2}^{1,1}$ 、 $O_{4,2}^{1,2}$ および $O_{3,3}^{2,1}$ の4つのオペレーションは、その実行順序、開始時刻および終了時刻を変更することができない。そのため、残りのオペレーションに対して、リアクティブスケジューリングを行い、リソースにおけるジョブの実行順序、そのオペレーションの開始時刻および終了時刻を変更する。

新たに求めた生産スケジュールの総処理時間が、現時点の総処理時間よりも小さい場合は、新しい生産スケジュールに基づいて、現時点の生産スケジュールを更新する。さらに、新たな生産スケジュールの総処理時間が基準値 C よりも大きい場合は、リアクティブスケジューリングプロセスを繰り返す。

第1報で提案した手法では、GAを用いてリアクティブスケジューリングを行う。まず、現状の生産スケジュールを表す個体を生成するためにコーディングを行う。コーディングでは、既に提案されている平野の手法⁽⁵⁾を用いる。すなわち、図2に例示するように、開始時刻の小さいオペレーションのジョブ名 J_i を先頭から1列に配置して個体を生成する。次に、その順序をランダムに入れ替えて、複数の個体を生成し、初期個体の集合を生成する。生成した初期個体の集合に対して遺伝的操作を行い、次世代の個体の集合を生成する。生成した個体の集合に対して、生産スケジュー

Fig. 1 Reactive scheduling process

Fig. 2 Creation of initial population

ルを作成するためにデコーディングを行う。これにより、個体の先頭に配置されているジョブから順番にリソースへオペレーションを割り当てる。その際、既に実行順序が決まっている他のオペレーションを調べ、最も早い時刻に当該のオペレーションを開始できる時刻を探索し、それを開始時刻とする。この時、当該のオペレーションに先行するオペレーションが終了していること、およびオペレーション間に当該のオペレーションを挿入することができる空き時間があることが必要になる⁽⁵⁾。

本手法では、コーディング、遺伝的操作、デコーディングの一連の操作を1回行う処理を、1回のリアクティブスケジューリングプロセスとする。1回の操作で生産スケジュールが改善された場合、現行の生産スケジュールと入れ替える。これを繰り返しながら、リアクティブスケジューリングプロセス間で個体を継承することにより、生産スケジュールを段階的に改善することができる。

2.3 ジョブの追加に対する処理 ここでは、新しいジョブ J_x が追加された場合に、リアクティブスケ

ジューリングシステムが解くべき問題を述べる。

まず、前節に示すリアクティブスケジューリング手法において、初期個体の生成時に、追加すべきジョブのオペレーションを含む個体を生成し、遺伝的操作を行うことで新しい生産スケジュールを作成する必要がある。その際、適切な生産スケジュールの解を短時間で求めるためには、適切な初期個体を生成することが重要である。

一般に、GA では個体の集合が多様であり、かつ適切な評価基準値を持つことで、適切な解を早期に求めることができると言われている⁽⁶⁾。そのため、本論文では、初期個体の生成時に解空間内において広く分散し、かつ評価基準(総処理時間)の観点から適切な初期個体を生成することを考える。ここでは、準最適な初期スケジュールに、追加すべきジョブを適切に挿入することで、多様かつ適切な初期個体の集合を生成する方法を提案する。すなわち、追加すべきジョブ J_x のオペレーションを $O_{x,j}^{y,*}$ ($j, y=1, 2, \dots, n$) とするとき、リソース R_j において、追加すべきジョブの y 番目のオペレーション $O_{x,j}^{y,*}$ を初期スケジュールの適切な位置(以下、時間区間と呼ぶ)に挿入して、初期個体の集合を生成する手法を提案する。ここで、 $\cdot$ は未決定変数を表す。

3. ジョブの追加に対するリアクティブスケジューリング手法

3.1 適切な初期個体の生成 ここでは、適切な初期個体を生成するために、新しいジョブを追加する時間区間について検討する。

3.1.1 ジョブを挿入する時間区間 新たなジョブのオペレーションを挿入することができる時間区間は、リソースごとに複数個存在する。しかし、各時間区間の大きさが異なるため、オペレーションの追加が総処理時間に与える影響は同じではない。そこで、本研究では、全余裕時間と遊休時間を足した値が大きい時間区間を選択し、新たなジョブのオペレーションを挿入することで、生産スケジュール全体の総処理時間の増加量の小さい初期個体を生成する方法を提案する。図3に示すように、初期スケジュールにおいて、リソース R_j における p 番目のオペレーション $O_{x,j}^{p,*}$ の最早完了時刻を $eft_{x,j}^{p,*}$ 、リソース R_j における $p+1$ 番目のオペレーション $O_{x,j}^{p+1,*}$ の最遅開始時刻を $lst_{x,j}^{p+1,*}$ とすると、全余裕時間と遊休時間を足した時間区間の大きさ $vt_{j,p+1}$ は、式(1)で表すことができる。

$$vt_{j,p+1} = lst_{x,j}^{p+1,*} - eft_{x,j}^{p,*} \quad (1)$$

Fig. 3 Vacant time slot

Fig. 4 Lower bound value of increase in make-span

この時間区間に挿入するオペレーションの処理時間を $pt_{x,j}^{1,*}$ とすると、 $vt_{j,p+1} > pt_{x,j}^{p+1,*}$ の場合、生産スケジュール全体の総処理時間は増大しない。また、 $vt_{j,p+1} < pt_{x,j}^{p+1,*}$ の場合、総処理時間は $pt_{x,j}^{p+1,*} - vt_{j,p+1}$ だけ増大する。これは、追加すべきジョブ J_x の全てのオペレーションを挿入し終わるまで初期スケジュールのジョブの処理順序は変更しないため、処理時間 $pt_{x,j}^{p+1,*}$ のオペレーションを $vt_{j,p+1}$ の位置に挿入すると、このオペレーションがスケジュールにおけるクリティカルパス上に存在することにより明らかである。

3.1.2 総処理時間の下界値 図4に示すように、初期スケジュールの総処理時間を ms として、リソース R_j における z 番目の時間区間に、ジョブ J_x の1番目のオペレーション $O_{x,j}^{1,*}$ を挿入する場合を考える。このとき、 z 番目の時間区間の全余裕時間と遊休時間を足した大きさを vt とすると、総処理時間の下界値は以下のようになる。

$$LB(1) = \max \left[ms + \max [0, pt_{x,j}^{1,*} - vt], ft_{x,j}^{1,*} + \sum_{a=2}^n pt_{x,j}^{a,*} \right] \quad (2)$$

ここで、 $\max [0, pt_{x,j}^{1,*} - vt]$ は新たにオペレーションを追加することによる総処理時間の増加量を表す。また、 $ft_{x,j}^{1,*} + \sum_{a=2}^n pt_{x,j}^{a,*}$ は、追加したオペレーションの終了時刻に残りオペレーション $O_{x,j}^{a,*}$ の処理時間の総和を足した値であり、追加したジョブの処理が最も早く終了する時刻を表す。

$vt_{j,p+1} < pt_{i,j}^{x,y}$ の場合、1 番目のオペレーションの挿入により、このオペレーション以降の初期スケジュールのオペレーションの開始、終了時刻が変わる。そこで、オペレーションの挿入後、総処理時間と時間区間 $vt_{j,p+1}$ の再計算を行う。以下、リソース R_j における z 番目の時間区間に、追加すべきジョブ J_x の y 番目のオペレーション $O_{x,j}^{y,z}$ を追加する場合も、同様に次式で総処理時間の下界値を求めることができる。

$$LB(y) = \max \left[ms' + \max \left[0, pt_{x,j}^{y,z} - vt' \right], ft_{x,j}^{y,z} + \sum_{a=y+1}^y pt_{x,j}^{a,z} \right] \quad (3)$$

ただし、 ms および vt は、 $(y-1)$ 番目までのオペレーションを追加することで初期スケジュールの値とは変化しているため、すべて「 $'$ 」をつけて区別している。

3.2 初期個体の特異性 次に、初期個体の集合を生成する際に、各個体の特異性を評価する指標について検討する。すなわち、あるスケジュールが他のスケジュールに対してどれだけ異なるかを示す指標を考える。

ジョブの数が m 、リソースの数が n のジョブショッブスケジューリング問題において、 S_p 、 S_q という 2 つの生産スケジュールの相違 $dif(S_p, S_q)$ は、Brizuela らの研究⁽⁷⁾によって式(4)のように定義されている。

$$dif(S_p, S_q) = \sum_{a=1}^m \sum_{b=1}^n \partial_{pq}(a, b) \quad (4)$$

$$\partial_{pq}(a, b) = \begin{cases} 0: \text{スケジュール } S_p \text{ における機械 } R_b \text{ のジョブ } J_a \text{ の直後のジョブが、スケジュール } S_q \text{ における機械 } R_b \text{ のジョブ } J_a \text{ の直後のジョブと同じ場合} \\ 1: \text{上記以外} \end{cases}$$

式(4)は、一対の生産スケジュールの差異を定量的に評価する指標である。いま、追加すべきジョブが n 個のオペレーションを持っており、これらのオペレーションを n 個のリソースの適当な時間区間に挿入することで、 γ 個のスケジュール群 $\{S_d\} (d=1, 2, \dots, \gamma)$ を生成したと考える。このとき、 n 個のオペレーションはすべて異なるリソースで実行される。そのため、スケジュール群 $\{S_d\}$ から任意の一対のスケジュール S_p と S_q を取り出し、その相違を式(4)で評価すると、 $dif(S_p, S_q)$ は以下の範囲になる。

$$2 \leq dif(S_p, S_q) \leq 2n \quad (p \neq q) \quad (5)$$

これは、それぞれのリソースの一つずつオペレーションを追加することから明らかである。このとき γ 個のスケジュール群 $\{S_d\}$ における一つのスケジュール S_p の

(a) Initial production schedule

(b) Search tree

Fig. 5 Example of beam search

特異性 $SP(S_p)$ を次式で定義する。

$$SP(S_p) = \sum_{q=1}^{\gamma} \delta_{pq} \quad (p \neq q) \quad (6)$$

$$\delta_{pq} = \begin{cases} 0: \text{if } dif(S_p, S_q) = 2n \\ 1: \text{if } dif(S_p, S_q) < 2n \end{cases}$$

上式は、 S_p との差異が $2n$ 未満のスケジュールの数をスケジュール群 $\{S_d\}$ の中から数え上げるものであり、数値が小さいほどスケジュールの特異性が高いことを表す。そこで、オペレーションを挿入する時間区間を選択する際に、総処理時間の下界値が小さく、かつ特異性の高い時間区間を選択することにより、適切かつ多様な初期個体の集合を生成する。

3.3 リアクティブスケジューリングプロセス ジョブ J_x が追加された場合、以下の手順でリアクティブスケジューリングを行う。

Step1: リアクティブスケジューリングの対象となるオペレーションの選定

現在時刻を T_x 、1 回のリアクティブスケジューリングプロセスに要する計算時間を dt とすると、開始時刻 $st_{i,j}^{k,l}$ が以下の条件を満たすオペレーション $O_{i,j}^{k,l}$ は、リアクティブスケジューリングの対象となる。

$$st_{i,j}^{k,l} \geq (T_x + dt) \quad (7)$$

式(7)を満たすオペレーションが存在しない場合は、リアクティブスケジューリングプロセスを終了する。

Step2 : 初期個体の集合 P_1 の生成

リアクティブスケジューリングプロセスの繰返しにおいて、1 回目すなわち時刻 T_1 でのリアクティブスケジューリングプロセスと、2 回以降すなわち時刻 T_2 以降のリアクティブスケジューリングプロセスでは、初期の個体集合 $P_1(T_x)$ を生成する方法が異なる。

Step2-1 : $T_x = T_1$ の場合

ジョブ J_x の全てのオペレーション $O_{x,j}^{y,*}$ ($j=1,2,\dots,n$) に対して、以下に示す処理を繰り返すことにより、初期個体の集合 $P_1(T_1)$ を生成する。

Step2-1-1 : 新しいオペレーションの挿入

リソース R_j の z 番目の時間区間に、ジョブ J_x の y 番目のオペレーション $O_{x,j}^{y,z}$ を挿入する。図 5(a)に示す例の場合、 $y=1$ の時、挿入するための時間区間の候補が、リソース R_1 において 5 個ある。これを、図 5(b)に示すような探索木のノードで表す。また、 $y>1$ の場合、ジョブ J_x の y 番目のオペレーション $O_{x,j}^{y,z}$ の開始時刻 $st_{x,j}^{y,z}$ と、 $y-1$ 番目のオペレーション $O_{x,j}^{y-1,*}$ の終了時刻 $ft_{x,j}^{y-1,*}$ の間では、オペレーションの工程順序の制約から、次式を満足する必要がある。

$$ft_{x,j}^{y-1,*} \leq st_{x,j}^{y,z} \quad (8)$$

よって、リソース R_j の z 番目の時間区間 $vt_{j,z}$ の終点 f と、ジョブ J_x の $y-1$ 番目のオペレーション $O_{x,j}^{y-1,*}$ の終了時刻 $ft_{x,j}^{y-1,*}$ に次式の関係が成り立つ場合は、その時間区間にはジョブ J_x の y 番目のオペレーション $O_{x,j}^{y,z}$ を挿入することができない。

$$f \leq ft_{x,j}^{y-1,*} \quad (9)$$

よって、図 5(b)に示すように、式(9)を満たさないノードは、以降の探索の候補から削除する。

Step2-1-2 : 総処理時間の下界値と特異性の評価

Step2-1-1 で生成した各ノードに対して、総処理時間の下界値 $LB(y)$ と生産スケジューリングの特異性 $SP(S_p)$ を求める。図 5(b)の各ノードの数値は、下界値 $LB(y)$ と特異性 $SP(S_p)$ の値を表す。次に、各ノードの下界値と特異性の線形和を評価値 EV として次式で定義する。

$$EV = \alpha \cdot NLB(y) + (1-\alpha) \cdot NSP(S_p) \quad (10)$$

$$0 \leq \alpha \leq 1$$

ここで、 $NLB(y)$ および $NSP(S_p)$ は、式(2)、式(3)および式(6)で示した $LB(y)$ 、 $SP(S_p)$ を正規化した値で、次式

により計算する。

$$NLB(y) = \frac{LB(y) - \min LB}{\max LB - \min LB} \quad (11)$$

$$NSP(S_p) = \frac{SP(S_p) - \min SP}{\max SP - \min SP} \quad (12)$$

ここで、 $\max LB$ 、 $\min LB$ 、 $\max SP$ および $\min SP$ は探索木の同じレベルのノードにおける LB および SP の最大値および最小値を示す。

Step2-1-3 : 探索を継続するノードの選択

Step2-1-1 で挿入したオペレーションがジョブの最後のオペレーションである場合は探索を終了し、Step2-1-4 に進んで初期個体を生成する。そうでない場合は、ビーム探索⁽⁸⁾により探索を進める。すなわち、あらかじめ設定したビーム幅 w 個分のノードを、Step2-1-2 で計算した評価値 EV の小さいノードから順に選択する。次に、選択したノードに対し、 y を一つ増加し Step2-1-1 から繰り返す。図 5(a)の初期スケジュールに対して、ジョブ J_x の 3 つのオペレーションを挿入する時間区間の候補を表す探索木を図 5(b)に示す。

Step2-1-4 : 初期個体の生成

探索木の最下位のノードのうち、評価値 EV の小さいノードから順に集団サイズ M 個分のノードを選択し、各レベルのノードを決定する。これらのノードの情報をもとに、ジョブ J_x のオペレーションを各リソースの時間区間に挿入し、 M 個の生産スケジュールを作成する。このスケジュールにおいて、開始時刻の小さいオペレーションからそのジョブ名を 1 列に並べて、初期個体の集合を生成する。

Step2-2 : $T_x \geq T_2$ の場合

時刻 T_2 以降では、第 1 報で提案したように、時刻 T_{x-1} のリアクティブスケジューリングプロセスの Step3 で求めた次世代の個体の集合 $P_2(T_{x-1})$ を利用して、時刻 T_x の初期個体の集合 $P_1(T_x)$ を生成する。

Step3 : 次世代の個体の集合 P_2 の生成

Step2 で生成した初期個体の集合 $P_1(T_x)$ に対して遺伝的操作を行い、次世代の個体の集合 $P_2(T_x)$ の個体を M 個生成する。ここでは、遺伝的操作として、ルーレット選択、2 点交叉、および逆位を用いる。

Step4 : 生産スケジュールの更新

Step3 で生成した個体に対してデコーディングを行い、 M 個の生産スケジュールを作成する。作成した生産スケジュールの総処理時間 ms_r ($r=1,2,\dots,M$) を計算し、

その最小値が現行のスケジュールの総処理時間より小さい場合、最小値を持つ生産スケジュールを現行の生産スケジュールと入れ替える。

Step5: 終了判定

総処理時間が、あらかじめ決められた基準値 C よりも小さい場合は、全ての処理を終了する。そうでない場合は、Step1 から繰り返す。

4. 計算機実験

本研究では、ジョブの追加に対して、第1報で開発したリアクティブスケジューリングシステムのプロトタイプを拡張した。次に、このシステムを用いて計算機実験を行った。実験の対象として、ジョブ数 50、リソース数 10 のジョブショップ型生産システムを用いた。なお、各オペレーションの処理時間は Storer, Wu, Vaccari のジョブショップスケジューリングのためのベンチマーク問題⁽⁹⁾のうち、swv11 という問題を使用した。また、追加するジョブの工程順序はランダムに設定し、処理時間は 1~200(sec)でランダムに決定した。

まず、GA を用いたスケジューリングを行い準最適な初期スケジュールを作成した。GA のパラメータは、予備の実験により、個体数 $M=50$ 、交叉率 0.5、突然変異率 0.1 とした。次に、工程順序および処理時間をランダムに設定したジョブを、生産活動の開始から 66 秒後に追加した。それにともない、スケジュールの総処理時間が増大し、基準値を超えたため、開発したプロトタイプシステムは自動的にリアクティブスケジュー

リングを開始した。重み $\alpha=0.5$ 、ビーム幅 $w=50$ とし、10 例の試行を行った。その結果を図 6 に示す。図の横軸は生産活動を開始した時点からの経過時間を、縦軸は各時点においてリアクティブスケジューリングの結果得られた生産スケジュールの総処理時間を表す。ジョブの追加で増加した総処理時間は、リアクティブスケジューリングの進行にともない徐々に改善したことがわかる。一方、新たなジョブのオペレーションを初期スケジュールの最後尾に追加した後、前報のリアクティブスケジューリング手法を用いてスケジュールを改善した結果を図 6 に示す。本研究で提案した手法は、初期個体を生成するために約 120 秒の計算時間を要したが、従来の手法を用いて生成したスケジュールよりも総処理時間の小さいスケジュールを迅速に得ることができた。

次に、 α を 0~1 の間で変化させ、各重みについて 10 回ずつリアクティブスケジューリングを実行した。その結果を図 7 に示す。図の横軸は重み α を、縦軸はリアクティブスケジューリング終了時の総処理時間の最大値、最小値および平均値を示した。これにより、 $\alpha=0.6$ の場合が最も総処理時間の短い生産スケジュールになることがわかる。すなわち、下界値および特異性の両方を考慮することにより、迅速に適切な生産スケジュールを求めることができる。

さらに、新たなジョブのオペレーションをランダムに挿入することにより初期個体を生成する方法との比較を行った。なお、提案手法の重みは $\alpha=0.6$ とする。実験では、工程順序および処理時間をランダムに設定

Fig. 6 Experimental result of reactive scheduling

Fig. 7 Experimental results for different weight

Table 1 Comparison between two methods

	Make-span [Average] (sec)		
	After input of 1 st job	After input of 2 nd job	End of reactive scheduling
Randomly inserted	3649.6	3744.4	3533.2
Proposed method ($\alpha = 0.6$)	3480.7	3573.2	3478.5

Table 2 Comparison with real-time scheduling

Scheduling method	Make-span (sec.)
FCFS (First Come First Service)	4366
LPT (Largest Processing Time)	5031
SPT (Shortest Processing Time)	4265
Proposed method (Average)	3478.5

した2種類のジョブを連続して投入した。表1は、各ジョブの挿入直後の生産スケジューリングの総処理時間の平均値、およびリアクティブスケジューリング終了時の生産スケジューリングの総処理時間の平均値を示した。これにより、提案手法は、ジョブが連続して投入される場合においても適切なスケジューリングを迅速に求めることができると考える。

さらに、ディスパッチングルールを用いて生産スケジューリングを決定する手法⁽¹⁰⁾⁻⁽¹²⁾との比較を行った。実験結果の比較を表1に示す。GAは、確率的な操作を伴うため、提案した手法は10回の試行の平均値を示す。これにより、簡便なディスパッチングルールを用いた手法より、提案手法の方が、総処理時間の小さい生産スケジューリングを作成することができた。

5. 結 言

本研究では、新しいジョブの追加に対応することができるリアクティブスケジューリング手法を提案した。この手法は、第1報で提案した手法を拡張したもので

ある。その内容をまとめると以下になる。

- (1) 新たなジョブの追加により増加する総処理時間の下界値およびスケジューリングの特異性に基づいて、適切かつ多様な初期個体を生成することで、生産スケジューリングを迅速に改善する手法を提案した。
- (2) 計算機実験により、下界値と特異性を考慮して初期個体を生成することで、適切な生産スケジューリングを求めることができることを検証した。さらに、複数のジョブを連続して投入した場合における本手法の有効性を示した。

文 献

- (1) Smith, S. F., *Intelligent Scheduling Systems*, (1995), 155-192, Kluwer Academic.
- (2) 西岡靖之, 計測と制御, **33**-7(1994), 571-574.
- (3) Holland, J. H., *Adaptation in natural and artificial systems*, (1975), University of Michigan Press.
- (4) 谷水義隆・阪口龍彦・杉村延広, 機論, **69**-685, C (2003), 234-239.
- (5) 平野広美, 応用事例でわかる遺伝的アルゴリズムプログラミング, (1995), パーソナルメディア.
- (6) 西川禎一・玉置久, 計測自動制御学会論文集, **29**-5(1993), 589-595.
- (7) Brizuela, C. A. and Sannomiya, N., GECCO 1999, (1999), 75-82.
- (8) 圓川隆夫・伊藤謙治, 生産マネジメントの手法, (1996), 102-103, 朝倉書店.
- (9) Storer, R. H., Wu, S. D. and Vaccari, R., *Management science*, **38**(1992), 1495-1509.
- (10) Shin, H., Kuroda, M., *Advances in production management systems*, (1996), 399-410, Chapman & Hall.
- (11) Hatono, I., et al, *Advances in production management systems*, (1996), 423-434, Chapman & Hall.
- (12) Sugimura, N., Tanimizu, Y., Ae, S., *Proc. of APMS'99*, (1999), 466-473.