作業者の加工時間のばらつきを考慮した スケジューリングシステムの開発*

岩村 幸治^{*1}, 吉岡 卓也^{*2}
谷水 義隆^{*1}, 杉村 延広^{*3}

Development of Scheduling System Considering Statistical Distribution of Machining Time Executed by Human Operators

Koji IWAMURA^{*4}, Takuya YOSHIOKA,
Yoshitaka TANIMIZU and Nobuhiro SUGIMURA

^{*4} Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University,
1-1 Gakuen-cho, Naka-ku, Sakai-shi, Osaka, 599-8531 Japan

In the scheduling problems of the manufacturing systems with human operators, it is not easy to consider variation of machining time which are different from operator to operator. New scheduling method is proposed, in this paper, to consider the statistical distribution of machining time executed by human operators. It is assumed that the machining time executed by human operators are obtained by normal distribution. The proposed scheduling method consists of two steps. In the first step, the sequences of machining operations are determined for the individual machining tools by using utility value based method. In the second step, the candidate human operators are allocated to the individual machining tools taking into consideration of the statistical distribution of the machining time of the individual human operators. The scheduling system is also developed to carry out the proposed scheduling method by using machining time database. Some case studies have been carried out to verify the effectiveness of the proposed method.

Key Words: Scheduling System, Human Operator, Statistical Distribution, Database, Production System, Production Planning, System Simulation

1. 結 言

スケジューリング問題に関する研究では、作業時間を既知の定数とするものが多い^①。しかし、実際の生産現場では、作業時間が正確に決められない場合が多く、特に、作業者が行う加工時間、段取り時間、搬送時間などにおいては作業時間のばらつきが大きいと考えることができる。

作業時間のばらつきを考慮した研究として、不確かな作業時間をファジィ数として取り扱う研究がある。例えば、董ら^②は、作業時間が三角型または台形型ファジィ数であるファジィスケジューリング問題を解決する簡便解法を提案している。一方、作業時間を確率的に取り扱う研究として、江口ら^③は、定期的な最適化とリアルタイムスケジューリングを融合することで、ジョブの処理時間が一様乱数で決定される環境において、有効な動的スケ

ジューリング手法を提案している。また、作業時間のばらつきを正規分布として取り扱うスケジューリングに関する研究が行われている^{④⑤}。

しかし、現実の生産システムへの適用を考えると、生産現場において作業を実行することにより得られる作業時間から、確率分布を用いて作業時間のばらつきを求め、各作業の作業時間のばらつきを考慮して生産スケジュールを作成する一連のシステムが必要になる。

本研究では、作業者が工作機械を用いて加工作業（オペレーション）を実行する加工システムにおいて、加工時間のばらつきを正規分布と仮定した場合に、適切なスケジュールを作成する手法を提案する。また、作業者がオペレーションを実行した場合の加工時間をデータベースに保存し、データベースに保存された作業、工作機械、およびオペレーションの組合せに対する加工時間の実績データに基づいて、加工時間のばらつきを考慮したスケジュールを作成することができるスケジューリングシステムの開発を行う。

* 原稿受付 2009年8月21日。

^{*1} 正員、大阪府立大学大学院工学研究科(〒599-8531 堺市中央区学園町1-1)。

^{*2} (株)野村総合研究所(〒100-0005 東京都千代田区丸の内1-6-5丸の内北口ビル)。

^{*3} 正員、フェロー、大阪府立大学大学院工学研究科。
E-mail: iwamura@me.osakafu-u.ac.jp

2. スケジューリングに関する従来の研究

2・1 作業時間のばらつきを正規分布として取り扱うスケジューリング 作業時間のばらつきを正規分布として取り扱うスケジューリングに関する研究として、以下の研究がある。

今泉ら^③は、ジョブショップスケジューリング問題において、確定的な作業時間に基づいてあらかじめ作成されたスケジュールと、作業時間が正規分布にしたがい変動した場合の比較を行っている。この結果、確定的な作業時間に基づいて良いスケジュールを求めれば、作業時間に変動がある場合も、総処理時間が大きく増加しないことを定量的に示している。また、青山ら^④は作業時間のばらつきを正規分布と仮定し、モンテカルロシミュレーションを行い、総処理時間の確率分布を求めている。これにより、納期を達成できる確率を、正規分布の性質に基づいて総処理時間の平均値と標準偏差を用いて算出している。

森川ら^⑤は、並列機械スケジューリング問題において、ジョブの加工時間が正規分布に従う場合に、総滞留時間の期待値と分散を最小化するスケジューリング手法を提案している。この結果、総滞留時間の期待値と分散の少なくともいずれかが他に劣らない非劣スケジュールを短時間で生成できることを示している。また、木瀬ら^⑥は、スケジューリングに必要なデータの一部分が、確率変数で与えられる確率スケジューリング問題において、ジョブの処理時間については、指数分布より正規分布が実際に即応している場合が多いと述べている。

以上のように、作業時間のばらつきが正規分布に従うと仮定した研究が多くあり、その有用性が示されている。そのため、本研究では、作業者が工作機械を用いてオペレーションを実行する場合の加工時間のばらつきを正規分布に従うと仮定する。

2・2 効用値に基づくリアルタイムスケジューリングの

筆者らはこれまでに、作業時間を定数とするスケジューリング手法として、効用値に基づくリアルタイムスケジューリング手法^⑦を提案している。

効用値に基づく手法は、図1に示すように、ある時刻 t において待機状態にある工作機械およびジョブが、次のオペレーションを実行するための候補工作機械または候補ジョブを求め、オペレーションを実行する場合の効用値を求める。ここで、効用値は、候補工作機械または候補ジョブのオペレーションを実行する場合に、自身の目的関数がどの程度改善されるかを示す指標であり、0から1の値をとる。この手法において工作機械およびジョブは、表1に示す目的関数のいずれか一つを持っている。

Fig. 1 Utility values based scheduling method

Table1 Objective functions of holons

Objective functions		Objective function values
Machine tool	Efficiency	$\Sigma \text{Machining time} / \text{Total time}$
	Machining accuracy	$\Sigma (\text{Machining accuracy of machine tools} - \text{Required machining accuracy of jobs})$
Job	Flow-time	$\Sigma (\text{Machining time} + \text{Waiting time})$
	Machining cost	$\Sigma (\text{Machining cost of machine tools})$

次に、各工作機械およびジョブが求めた候補とその効用値をコーディネータに送り、コーディネータが、効用値の和が最大になるように工作機械とジョブの組合せを決定する。以上の手順を繰り返すことで、各工作機械およびジョブの組合せを順次決定する。本研究では、この手法を用いてスケジュールを作成する。

3. 作業者の加工時間のばらつきを考慮したスケジューリング手法

3・1 スケジューリングの基本的考え方 作業者の加工時間のばらつきを考慮したスケジューリング手法を提案するにあたり、以下の前提条件を設定する。

- (1) 対象とする生産プロセスを加工プロセスとし、組立プロセス、段取りプロセス、搬送プロセスなどは考慮しない。
- (2) 各ジョブの工程設計は終了しており、必要なオペレーションとそのシーケンス、およびオペレーションを実行することができる工作機械の候補はすでに決まっている。また、作業者はすべての工作機械を用いてオペレーションを実行することができる。
- (3) 加工時間のばらつきは、正規分布 $N(\mu_{ijkms}, \sigma_{ijkms}^2)$ に従う。ここで、 μ_{ijkms} および σ_{ijkms} は、作業者 i ($i=1, 2, \dots, d$) が工作機械 j ($j=1, 2, \dots, \phi$) でジョブ k ($k=1, 2, \dots, \kappa$) の m ($m=1, 2, \dots, \omega$) 番目のオペレーションを実行する場合の加工時間の平均値および標準偏差を表す。

以上の前提条件に基づいて、作業者の加工時間のばらつきを考慮したスケジューリング手法を提案する。提案するスケジューリング手法は、以下に示す2段階でスケジュールを決定する。

STEP1 各工作機械において実行するオペレーションとオペレーションの実行順序を決定する。

STEP2 各工作機械に作業者を割り当て、各オペレーションの開始時刻と終了時刻のばらつきを求める。

3・2 工作機械において実行するオペレーションと実行順序の決定 提案するスケジューリング手法において、STEP1では、各工作機械において実行するオペレーションとオペレーションの実行順序を、2.2項に示した効用値に基づく手法⁷⁾を用いて決定する。ただし、ここでは、リアルタイムにスケジュールを作成するのではなく、生産プロセスを開始する以前に、すべての生産プロセスが終了するまでのスケジュールを作成する。また、生産効率の向上を目的として、工作機械は稼働率の最大化、ジョブは滞留時間の最小化の目的関数を持つものとする。

効用値に基づく手法を用いてスケジュールを作成するために、工作機械とジョブの組み合わせでオペレーションを実行する場合の加工時間が必要となる。ただし、STEP1において各工作機械に対する作業者の割り当ては決まっていないため、工作機械を用いてジョブのオペレーションを実行する場合のすべての作業者に対する加工時間の平均値 μ_{ijk} を、以下の式から求める。

$$\mu_{ijk} = (1/i) \sum_{j=1}^i \mu_{ijk} \quad (1)$$

$j=1,2,\dots,p \quad k=1,2,\dots,K \quad m=1,2,\dots,\omega$

(1)式から得られる加工時間の平均値を用いて、効用値に基づく手法を実行しスケジュールを作成する。この結果STEP1では、図2に示すように平均値に基づくスケジュールを得ることができる。

3・3 工作機械への作業者の割り当ての決定 STEP2では、各工作機械でオペレーションを実行する作業者を決定する。ただし、作業者は生産システムにおけるオペレーションの開始時点から、すべてのジョブのオペレーションが終了する時点まで、同じ工作機械に割り当ててものとする。

総処理時間が最小となる作業者の工作機械への割り当てを求めるため、STEP1で求めた平均値に基づくスケジュールにおいて、工作機械に作業者を割り当てた場合の各オペレーションの開始時刻、および終了時刻の平均値と標準偏差を算出することが必要になる。

Fig. 2 Schedule obtained by average machining time

Fig. 3 Precedence constraints among operations

図3に示すTarget Operation-1の開始時刻の平均値および標準偏差を算出する場合を考える。Target Operation-1の開始時刻は、図3に示すように、工作機械におけるオペレーションの処理順序の制約に基づいて先行するPreceding Operation-1、およびジョブの工程順序の制約に基づいて先行するPreceding Operation-2がともに終了した時点であり、二つあるオペレーションの終了時刻のうち、いずれか大きい値から開始することができる。

オペレーションおよびオペレーションの加工時間、開始時刻および終了時刻を以下の記号で表す。

O_{ijk} : 作業者 i が工作機械 j を用いて実行するジョブ k の m 番目のオペレーション。

PT_{ijk} : オペレーション O_{ijk} の加工時間で平均値を μ_{ijk} 、標準偏差を σ_{ijk} で表す。

ST_{ijk} : オペレーション O_{ijk} の開始時刻であり平均値を $\mu_{ST_{ijk}}$ 、標準偏差を $\sigma_{ST_{ijk}}$ で表す。

FT_{ijk} : オペレーション O_{ijk} の終了時刻であり平均値を $\mu_{FT_{ijk}}$ 、標準偏差を $\sigma_{FT_{ijk}}$ で表す。

先行するオペレーション O_{ij**} および O_{**km-1} の終了時刻の最大値の分布、すなわちオペレーション O_{ijk} の開始時刻の分布を、Clarkの近似計算式⁸⁾を用いて正規分布として近似する。Clarkの近似計算式は、2つの正規分布の最大値の分布を、正規分布として近似する計算式であり、PERT⁹⁾において並列作業の終了時刻を求める場合にも利用されている。

この場合、オペレーション O_{ijk} の開始時刻の平均値 $\mu_{ST_{ijk}}$ および標準偏差 $\sigma_{ST_{ijk}}$ は、先行するオペレーション O_{ij**} 、 O_{**km-1} における終了時刻の平均値 $\mu_{FT_{ij**}}$ 、 $\mu_{FT_{**km-1}}$ 、

および標準偏差 σ_{ij**} , σ_{**km-1} から, 以下の式で求めることができる。

$$\mu_{S_{ijk}} = \mu_{f_{**km-1}} \Phi(\alpha) + \mu_{f_{ij**}} \Phi(-\alpha) + a\phi(\alpha) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{S_{ijk}} = & \{(\mu_{f_{**km-1}})^2 + (\sigma_{f_{**km-1}})^2\} \Phi(\alpha) \\ & + \{(\mu_{f_{ij**}})^2 + (\sigma_{f_{ij**}})^2\} \Phi(-\alpha) \\ & + \{\mu_{f_{**km-1}} + \mu_{f_{ij**}}\} a\phi(\alpha) - (\mu_{S_{ijk}})^2 \}^{1/2} \end{aligned} \quad (3)$$

ただし,

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

$$\phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}}$$

$$a = \{(\sigma_{f_{**km-1}})^2 + (\sigma_{f_{ij**}})^2\}^{1/2}$$

$$\alpha = (\mu_{f_{**km-1}} - \mu_{f_{ij**}}) / a$$

Target Operation-1 の終了時刻の平均値と標準偏差については, 正規分布の再生性に基づいて開始時刻および加工時間の平均値と標準偏差から次式で求める。

$$\mu_{f_{ijk}} = \mu_{S_{ijk}} + \mu_{ijk} \quad (4)$$

$$\sigma_{f_{ijk}} = \{(\sigma_{S_{ijk}})^2 + (\sigma_{ijk})^2\}^{1/2} \quad (5)$$

以上のように, Clark の近似計算式を用いたオペレーションの開始時刻の分布の算出, および正規分布の再生性に基づくオペレーションの終了時刻の分布の算出という二つの処理を繰り返すことにより, STEP1 で得られたスケジュールにおけるすべてのオペレーションの開始時刻と終了時刻の分布を求めることができる。

図4にSTEP2を実行することにより得られる加工時間のばらつきを考慮したスケジュールを示す。同図(a)のガントチャートにおいて, 各オペレーションの開始時刻および終了時刻における三角形は, 同図(b)に示すように, 開始時刻および終了時刻の平均値, および平均値と標準偏差の3倍の和の時刻をそれぞれ示している。

各オペレーションの終了時刻の平均値と標準偏差に基づき, 以下のように総処理時間の最大予測値 $MS_{3\sigma}$ を定義する。

$$MS_{3\sigma} = \max_{i=1 \dots l, j=1 \dots p, k=1 \dots x, m=1 \dots \theta} (\mu_{f_{ijk}} + 3\sigma_{f_{ijk}}) \quad (6)$$

すなわち, 正規分布の性質に基づいて, スケジュールを実行した場合にすべてのオペレーションが, 99.73 パー

(a) Gantt chart

(b) Representation for statistical distribution of machining time

Fig. 4 Schedule obtained by statistical distribution of machining time

Fig. 5 Scheduling system using machining time data base

セントの確率で終了する時刻を (6) 式から見積もることができる。

本手法では, 各工作機械に対する作業者の割り当ての組み合わせをすべて求め, そのうち (6) 式の総処理時間の最大予測値が最小となる組み合わせを, 最適な作業者の割り当てとする。また, この作業者の割り当てに基づいて, 各ジョブの終了時刻の最大予測値を求めることができる。

4. 加工時間データベースを用いたスケジューリングシステム

本研究で提案する加工時間のばらつきを考慮したスケジューリング手法を実現するために, 図5に示す加工時間データベースを用いたスケジューリングシステムを提案する。このスケジューリングシステムは, 3 節で述べたスケジューリング手法を実行する計画システム, 作成

されたスケジュールに基づいて、作業者が実際にオペレーションを実行する生産システム、およびPOP (Point of Production) システムを通して、実際の加工時間のデータを得るとともに、統計処理を行って蓄積する加工時間データベースからなる。

図5において、生産システムは、作業者が実際にオペレーションを実行した場合の加工時間を加工時間データベースに保存する。また、計画システムは、工作機械におけるオペレーションの実行順序、および工作機械への作業者の割り当てを決定するために必要な情報を、加工時間データベースから参照する。加工時間データベースに保存する情報をまとめると以下のようになる。

- (a) 実加工時間情報 生産システムから得られる作業員 i が工作機械 j でジョブ k の m 番目のオペレーションを、 $n(=1, 2, \dots, \nu)$ 回目に実行した場合の加工時間 MT_{ijkmn} 。
- (b) 統計情報 計画システムで実行するスケジューリング手法のSTEP2のために、加工時間の平均値および標準偏差を、以下の式から算出する。

$$\mu_{ijkm} = (1/\nu) \sum_{n=1}^{\nu} MT_{ijkmn} \quad (7)$$

$$\sigma_{ijkm} = \{(1/\nu) \sum_{n=1}^{\nu} (MT_{ijkmn} - \mu_{ijkm})^2\}^{1/2} \quad (8)$$

また、計画システムで実行するスケジューリング手法のSTEP1のために、(7)式から得られた μ_{ijkm} を用いて (1)式からすべての作業員に対する加工時間の平均値 μ_{ijk} を算出する。

以上のことから、このシステムは、スケジュールの計画、実行、および実績データの保存というサイクルを繰り返すことにより、加工時間データベースに作業員の加工に関する情報を蓄え、その情報に基づいて適切なスケジュールを作成することができる。

5. ケーススタディ

5.1 システム構成 提案した手法の有効性を検証するためにケーススタディを行う。図5における生産システムでは、作業員が実際に工作機械を用いてオペレーションを実行し、POPシステムにより加工時間を計測する必要がある。ここでは、簡略化のため、生産システムシミュレータを用いて作業員がオペレーションを実行した場合の加工時間を算出する。

シミュレータには、作業員がオペレーションを実行する場合の加工時間のばらつきとして正規分布を入力する。

ここで、作業員が工作機械を用いてジョブのオペレーションを加工する能力を1級、2級、3級の3段階に分け、加工時間のばらつきは作業員の加工能力に応じて異なるものとする。それぞれの加工能力を持つ作業員でオペレーションを実行する場合の加工時間の平均値および標準偏差は、次のような関係を持つと仮定する。

$$x_1 \mu_{(1)ijkm} = x_2 \mu_{(2)ijkm} = \mu_{(3)ijkm} \quad (9)$$

$$\sigma_{(1)ijkm} = y_1 \mu_{(1)ijkm} \quad (10)$$

$$\sigma_{(2)ijkm} = y_2 \mu_{(2)ijkm} \quad (11)$$

$$\sigma_{(3)ijkm} = y_3 \mu_{(3)ijkm} \quad (12)$$

ここで、 $\mu_{(1)ijkm}$ 、 $\mu_{(2)ijkm}$ 、 $\mu_{(3)ijkm}$ 、 $\sigma_{(1)ijkm}$ 、 $\sigma_{(2)ijkm}$ 、 $\sigma_{(3)ijkm}$ はそれぞれ、作業員の能力が1級、2級、3級である場合の加工時間の平均値および標準偏差である。また、 x_1 、 x_2 、 y_1 、 y_2 、 y_3 は、各能力の差を決定するための数値である。

シミュレータは、正規分布に従う正規乱数を用いて、作業員 $i(=1, 2, \dots, i)$ が工作機械 $j(=1, 2, \dots, \phi)$ でジョブ $k(=1, 2, \dots, \kappa)$ のオペレーション $m(=1, 2, \dots, \omega)$ を加工する場合の加工時間 t_{ijkm} を決定する。また、決定した加工時間に基づいて得られる各オペレーションの終了時刻 f_{ijkm} から、以下の式を用いてシミュレーションにおける総処理時間 MS_{sim} を求める。

$$MS_{sim} = \max_{i=1 \dots i, j=1 \dots \phi, k=1 \dots \kappa, m=1 \dots \omega} f_{ijkm} \quad (13)$$

5.2 有効性の検証 開発したスケジューリングシステムを用いて以下の条件でケーススタディを行う。

- (1) 工作機械の台数は2種類の工作機械が各3台、合計6台とする。同じ種類の工作機械は、同一のオペレーションを実行することができる。
- (2) 生産するジョブは20個とし、各ジョブは2種類の工作機械を用いて加工される。
- (3) 作業員の人数は、加工能力1級、2級、3級を持つ作業員がそれぞれ2人、合計6人とする。
- (4) (9)式から(12)式における作業員の能力の差を決定する数値は、それぞれ $x_1=12/10$ 、 $x_2=12/11$ 、 $y_1=0.05$ 、 $y_2=0.1$ 、 $y_3=0.15$ とする。
- (5) 1級の能力を持つ作業員がオペレーションを実行する場合の加工時間 $\mu_{(1)ijkm}$ は、30分から100分の間で適当な値で設定する。

表2に、生産システムシミュレータに入力する正規分布の例として、1級の能力を持つ作業者の加工時間のばらつきを示す。

ここで、4節に示した加工時間データベースにおいて、実加工時間情報におけるデータの数 n が、 $n=1$ 以上で統計情報を算出することができる。そのため、 $n=0$ 、すなわちまだ実行されていないオペレーションについては、加工時間の平均値および標準偏差の初期値を与える必要がある。ここでは、これまでに実行されたことがないオペレーションに対する加工時間の平均値および標準偏差の初期値は、 $\mu_{ijkn}=10$ 、 $\sigma_{ijkn}=1$ とした。

はじめに、同じジョブを繰り返し生産する場合を想定しスケジューリングを行った。繰り返しスケジューリングを行う過程における総処理時間の変化を図6に示す。図の横軸はスケジューリングの繰り返し回数を示す。縦軸は、提案手法を用いてスケジューリングを行った結果から得られる総処理時間の最大予測値 $MS_{3\sigma}$ およびスケジューリング結果に対してシミュレーションを行うことにより得られる総処理時間 MS_{sim} である。

同図の結果から、スケジューリングの繰り返し回数が少ない間は、スケジューリング結果から得られる総処理時間の最大予測値 $MS_{3\sigma}$ が、シミュレーションの実行結果から得られる総処理時間 MS_{sim} と大きく異なっていることがわかる。これは、スケジューリングの繰り返し回数が少ない間は、加工時間データベースに作業者がオペレーションを実行した場合の加工時間の情報が十分でないため、適切なスケジュールの作成および総処理時間の見積もりを行うことができていないことを示している。

一方、同図の結果から200回程度繰り返しスケジューリングを行うことで、シミュレーション結果から得られる総処理時間 MS_{sim} の上限値が、スケジューリング結果から得られる総処理時間の最大予測値 $MS_{3\sigma}$ に一致していることがわかる。このことから、加工時間データベースに十分な情報が蓄えられることにより、適切なスケジューリングを行うことができること、および総処理時間の上限値を適切に見積もることができることがわかる。

ここで、スケジューリング結果から得られる総処理時間の見積もり値 $MS_{3\sigma}$ に、シミュレーション結果から得られる総処理時間 MS_{sim} がどれくらいの頻度で納まっているかを評価するため、以下の遵守率を定義する。

$$CR = \{\text{Number of } (MS_{3\sigma} \geq MS_{sim})_{\alpha}\} / \alpha \quad (14)$$

上式において $\text{Number of } 0_{\alpha}$ は、過去 α 回の期間に対して、0内の式を満たした回数を示す。ここでは、 $\alpha=25$ とした遵守率の結果を図7に示す。同図からも、200回程度、

Table2 Statistical distribution of machining time for human operator who have 1st grade

		Human operator 1 and 2				
		Machine tool 1	Machine tool 2	...	Machine tool 5	Machine tool 6
Job 1	Process 1	$N(50, 3^2)$	$N(30, 2^2)$	...	—	—
	Process 2	—	—	...	$N(60, 3^2)$	$N(40, 2^2)$
Job 2	Process 1	$N(50, 3^2)$	$N(30, 2^2)$	...	—	—
	Process 2	—	—	...	$N(60, 3^2)$	$N(40, 2^2)$
Job 3	Process 1	$N(50, 3^2)$	$N(30, 2^2)$	...	—	—
	Process 2	—	—	...	$N(60, 3^2)$	$N(40, 2^2)$
...	...	...	...	...	...	...
Job 20	Process 1	$N(50, 3^2)$	$N(30, 2^2)$	...	—	—
	Process 2	—	—	...	$N(60, 3^2)$	$N(40, 2^2)$

Fig. 6 Scheduling result

Fig. 7 Compliance rate

同じジョブを繰り返し生産することにより遵守率が上昇し、250回程度から100%近い値が得られていることがわかる。

次に、生産するジョブの数が増える場合について、提案手法の有効性を検証する。生産を繰り返し行う過程で、以下のようなジョブ数の変化を発生させた。

- (a) 生産の開始時点では20個のジョブを生産し、繰り返し回数が250回の時点で、ジョブ数を6個に変更する。
 (b) 生産の開始時点では6個のジョブを生産し、繰り返し回数が250回の時点で、ジョブ数を20個に変更する。

図8に総処理時間の変化を示す。同図(a)から、生産するジョブ数が6個に減少する場合、総処理時間の最大予測値とシミュレーションによる上限値はほぼ一致する。これは、加工時間データベースに十分な情報がすでに入っているためである。

一方、同図(b)から、ジョブ数が20個に増加すると、総処理時間の最大予測値 $MS_{3\sigma}$ と、シミュレーション結果から得られる総処理時間 MS_{sim} が大きく離れていることがわかる。これは新たに投入されたジョブに関する情報が、加工時間データベースに存在しないため、データが十分に集まるまで適切なスケジュールの作成、および総処理時間の見積もりを行うことができていないことを表している。

6. 結 言

本研究では、作業者の加工時間のばらつきを考慮したスケジューリングシステムを開発した。以下に内容をまとめる。

- (1) 作業者の加工時間のばらつきを正規分布と仮定し、工作機械において実行するオペレーションと実行順序の決定、および工作機械への作業者の割り当ての決定の2段階からなるスケジューリング手法を提案した。
- (2) 加工時間データベースを用いたスケジューリングシステムを開発した。このシステムは、提案手法を用いてスケジュールを作成する計画システム、作成したスケジュールを実行する生産システム、および作業者の加工時間に関する情報を保存する加工時間データベースからなる。
- (3) 開発したスケジューリングシステムを用いてケーススタディを行い提案手法の有効性を検証した。この結果、加工時間データベースに作業者の加工時間に関する情報が十分蓄えられることにより、適切なスケジュールを作成すること、および実行時の総処理時間の上限値を適切に見積もることができることを示した。この手法は、各ジョブの納期遅れの上限値を予測する上でも有効であると考えられる。

文 献

- (1) Dong, Y., Nakamura, R., Kitaoka, M. and Ohta, H., An Effective Method for Solving Scheduling Problems with Fuzzy Processing Times, *Journal of Japan Industrial Management Association*, Vol.48, No.1, (1997), pp.17-24.

(a) Case for decreasing number of jobs

(b) Case for increasing number of jobs

Fig. 8 Case for considering interruptions

- (2) Eguchi, T., Oba, F., Kozaki, S. and Murayama, T., Dynamic Scheduling with Processing Time Uncertainty Using the Mixture of Periodic Optimization and Real-time Scheduling, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.72, No.717, (2006), pp.1630-1637.
- (3) Imaizumi, J. and Morito, S., Effectiveness of Definite Schedule Optimization under Processing Time Variability (Experimental Analysis of Job Shop Scheduling), *Journal of Japan Industrial Management Association*, Vol.48, No.1, (1997), pp.1-8.
- (4) Aoyama, K., Tahechi, S. and Nomoto, T., Studies on Scheduling Problem considering Uncertainty in Job Shop Manufacturing, *Proceeding of the society of naval architects of Japan conference* (in Japanese) Vol.2, (2003).
- (5) Morikawa, K., Morizawa, K. and Nagasawa, H., Efficient Heuristic Parallel Machine Scheduling to Minimize the Expected Value and Variance of Total Flow Time, *Journal of Japan Industrial Management Association*, Vol.51, No. 6, (2001), pp.566-573.
- (6) Kise, H. and Shioyama, T., Stochastic Scheduling Problem (in Japanese), *Operations Research as A Management Science Research*, Vol.32, No.11, (1987), pp.750-757.
- (7) Iwamura, K., Tanimizu, Y. and Sugimura, N., A Study on A Real-Time Scheduling of Holonic Manufacturing Systems (1st Report, Decision

Making Processes Based on Effectiveness Values),
*Transactions of the Japan Society of Mechanical
Engineers, Series C*, Vol.69, No.682, (2003),
pp.1733-1738.

- (8) Clark, C. E., *Operations Research*, Vol.9, No.2,
(1965), pp.145-162.
 - (9) Tone, K., *PERT Course -I Basic Edition-* (in
Japanese), (1966), p.114, TOYO KEIZAI INC.
-