

Original

Scheduling for a Mold-die Manufacturing System A Case of Mold-die Requiring Sub-assembly

Toshirou IYAMA,¹ Masahiro MIZUNO,¹ Yoshiya SATO,¹ Junnichi TAMAKI²
and Kenzou YAMAZAKI³

Abstract

Mold-dies are important tools for producing various types of press and injection products. They generally consist of dozens of parts, each of which is machined in various fabrication stages, and are assembled through many sub-assembly stages. So, in order to manufacture them efficiently it is important to complete assembly parts nearly at the same time just before sub-assemblies start. Furthermore, in order to increase orders from customers and capture the customer's confidence it is necessary to manufacture mold-dies in a short time and reduce tardy mold-dies. In this paper, we study a scheduling method for a manufacturing system which manufactures various mold-dies requiring sub-assemblies under dynamic manufacturing conditions. First, we consider three types of dispatching rules which can be applied to the system and may reduce assembly time losses, and present the rule which minimizes the mean of make span using an evaluation scale α ; α is the ratio of a make span to an ideal minimum make span. Next, we propose a new method to estimate the minimum due date coefficient which yields an L_p smaller than a given value; L_p is the ratio of the number of tardy mold-dies to the number of completed mold-dies. Finally, we present the usefulness of the proposed method and effects of due date coefficient and load on mold-die tardiness. The main results are as follows: (1) MMO dispatching rules, which use the mold due date revised according to the tardiness of machining stage, minimize the mean of make span. (2) The proposed method can approximately estimate the minimum due date coefficient which yields an L_p smaller than a given value. (3) MMO dispatching rules minimize L_p and the mean tardiness, and MO and DDATE dispatching rules, which use mold and stage due dates calculated from a given due date, minimize the maximum tardiness.

Key words: scheduling, dispatching rule, mold-die, sub-assembly, make span, due date, tardiness

¹ Iwate University

² Kitami Institute of Technology

³ Takara Tool & Die Co. Ltd.

Received: June 21, 2001

Accepted: December 21, 2001

金型生産システムにおけるスケジューリング サブ組立を持つ金型生産の場合

井山俊郎¹, 水野雅裕¹, 佐藤義也¹
田牧純一², 山崎健三³

本研究では、ダイナミックな環境下でサブ組立を必要とする多種多様な金型を生産するシステムに適用可能なスケジューリング法を考え、金型メイクスパンを最小化するスケジューリング法を明らかにする。また、納期遅れ金型の発生割合を完成金型総個数の一定割合以下とする金型納期係数設定法を提案し、提案された金型納期係数設定法の有効性および金型納期係数や金型投入個数が金型納期遅れに及ぼす影響を明らかにする。本研究で得られた主な結論は以下のとおりである。(1)金型メイクスパンを最小にするディスパッチングルールは、修正金型納期を用いたMMOルールである。(2)金型納期遅れ割合を設定値以下にする金型納期係数設定法を提案した。

キーワード：スケジューリング、ディスパッチングルール、金型、サブ組立、メイクスパン、納期、納期遅れ

1. 緒 言

金型は、プレス製品や射出成型品を生産する上で重要な工具である。金型は、一般に、数十個の要素部品で構成され、各部品は複数の工程で加工された後、数個の部品のサブ組立を繰り返し最終的に金型として完成する。このとき、効率的な金型生産を行うには、サブ組立ごとに、組立に必要なすべての部品を組立開始時刻までに揃える必要がある。また、複数個の異なる金型が日々投入される生産工場では、部品の加工に必要な多種多様な工作機械が多数導入されるので、各工作機械を有効利用し稼働率を高く維持する必要がある。さらに、金型企業間での競争力を高め受注を有利にするため、短納期を目指した生産を考える必要がある。したがって、サブ組立に必要な全部品の加工完了時刻を揃えながら工作機械の稼働率を高く維持し短納期の金型生産を可能にする各工作機械への各金型各部品各作業工程の最適割当、すなわち最適な日程計画の立案を考えなくてはならない。

日程計画の立案に関する研究は、ジョブショップやフローショップの加工システムを対象として、整数計画法、分岐限定法およびGAなどの解析的な手法やディスパッチングルールを用いたシミュレーション手

法などさまざまな手法を用いて数多く行われている〔1〕～〔6〕。しかし、スケジューリング対象ジョブを固定した静的な環境下での研究、工作機械台数や種類が少ない小規模システムを対象とした研究、さらに組立を考慮しないシステムに関する研究が大部分であり、異なる複数個の金型が日々投入されるダイナミックな環境下で、金型生産のようなサブ組立を必要とする実規模のシステムを対象とした研究はほとんど行われていない〔7〕,〔8〕。

本研究では、日々異なる複数個の金型が投入され、スケジューリング対象となるジョブが日々変化するダイナミックな環境下で、多種の工作機械で部品が加工されサブ組立を必要とする金型生産システムを対象とした日程計画法すなわちスケジューリング法に関する基礎研究を行う。はじめに、サブ組立を必要とする金型生産に適用可能なスケジューリング法を考え、金型メイクスパンを最小化し短納期を与えるスケジューリング法を明らかにし、納期遅れ金型の発生割合を完成金型総個数の一定割合以下とする金型納期係数設定法を提案する。さらに、納期を設定した金型を用いてスケジューリングを行い、提案された金型納期係数設定法の有効性および金型納期係数や金型投入個数（作業負荷）が金型納期遅れに及ぼす影響を明らかにする。

2. モ デ ル

2.1 システムの概要

本研究で対象とする金型生産システムは種々の金型を生産するが、各金型を構成する各部品は表1に示

¹ 岩手大学

² 北見工業大学

³ (株)多加良製作所

受付：2001年6月21日，再受付（2回）

受理：2001年12月21日

表1 部品の作業プロセスと使用機械

部品 タイプ	作業プロセス							
	1	2	3	4	5	6	7	8
No.1	B	SG 1						
No.2	B	G						
No.3	SG 2	CH	PG 2	PG 1	LA			
No.4	SG 2	EDM	CH	PG 2	PG 1			
No.5	HQ	SG 2	PG 1	JG	CH	PG 2	LA	
No.6	HQ	SG 2	CH	PG 2	EDM	PG 1	LA	
No.7	JB	B	HQ	SG 2	PG 1	HF	JG	
No.8	JB	B	HQ	SG 2	WE	SG 2	PG 1	JG

す8種類 (No. 1~8) のいずれかの作業プロセスで加工され、その後サブ組立を繰り返し、最終的に金型として完成する。各作業プロセスは実際の金型工場を参考にした。したがって、システムは、金型を構成する全部品の加工に必要な14種類の作業工程 (B, G, SG 1, SG 2, EDM, HQ, JB, JG, CH, PG 1, PG 2, WE, HF, LA) と金型の組立に必要な組立工程で構成される。また、本システムのモデル化にあたり導入した仮定は以下のとおりである。

- ・システムへの新規金型投入時刻は毎朝9時である。
- ・各工作機械の稼働時間は24時間であり、故障しない。
- ・各工作機械は1度に1個のジョブを処理し、途中で加工を中断することはない。
- ・段取り時間は各作業工程の作業時間に含まれる。
- ・各部品の作業プロセスは、その順序が変化しない。
- ・各部品の工程間移動時間は作業時間に比べて小さいので無視する。

なお本システムでは、加工工程の作業が複雑であり、組立工程の作業は組立部品がすべてそろった時点で開始され、組立作業は加工作業に従属する作業と考えている。したがって、本研究では、加工工程での最適なスケジューリング法を考えるため、組立作業がスケジューリング性能に影響を及ぼさないように、すなわち、組立工程で新たな納期遅れが発生しないように考え、組立作業数を無限大とした。

2.2 スケジューリング法

ダイナミックな環境下で稼働するシステムは、未来の投入ジョブに関する加工情報が、スケジューリング開始時点ですべて明らかになっていないため、ディスパッチングルールを用いたスケジューリング法が数多く用いられている〔9〕～〔13〕。また、本研究で対象とする金型は、完成までに数多くのサブ組立を繰り返す必要があり、サブ組立に必要な部品の加工終了時刻を揃えるスケジューリング法を考える必要がある。した

がって、解析的なスケジューリング法は困難と考えられるので、本研究では、ディスパッチングルールを用いたスケジューリング法を用いる。

サブ組立を持つ金型生産に適用可能なディスパッチングルールは、金型単位、部品単位、工程単位のルールが考えられる。そこで、以下のような14種類のディスパッチングルールを用いて、最短の金型メイクスパンを与えるルールを明らかにする。ただし、金型単位の場合、金型を構成する全部品は同一の優先順位を持つので第2優先規則として工程単位のSPT, DDATE, SLACKを用いる。

工程単位

- ・SPT：各部品の工程作業時間の短い順に割り当てる。
- ・DDATE：各部品の工程納期の早い順に割り当てる。
- ・SLACK：各部品の工程余裕時間の短い順に割り当てる。
- ・DDATE 1：各部品の修正工程納期1の早い順に割り当てる。修正工程納期1とは、工程納期遅れを起こした部品のみを対象として、未作業工程の工程納期を遅れた時間だけ逐次遅らせるように修正した工程納期であり、式(1)で与えられる。

$$d'_{i,j,k,v} = d_{i,j,k,v} + \max[0, C_{i,j,k,l} - d_{i,j,k,l}] \quad (1)$$

ただし、 i 日目に投入される金型 j を構成する部品 k の工程 l の工程納期を $d_{i,j,k,l}$ 、作業終了時刻を $C_{i,j,k,l}$ 、未作業工程を l' 、未作業工程の修正工程納期1を $d'_{i,j,k,v}$ とする。また、 $\max[]$ は $[]$ 内の大きいほうの値を意味する。

- ・DDATE 2：各部品の修正工程納期2の早い順に割り当てる。修正工程納期2とは、工程納期遅れを起こした部品を含む金型の全部品を対象として、全部品の未作業工程の工程納期を遅れた時間だけ逐次遅らせるように修正した工程納期であり、式(2)で与えられる。

$$d''_{i,j,k',v} = d_{i,j,k',v} + \max[0, C_{i,j,k,l} - d_{i,j,k,l}] \quad (2)$$

ただし、工程納期遅れを起こした部品を持つ金型において、未作業工程を持つ部品を k' 、未作業工程の修正工程納期を $d''_{i,j,k',l}$ とする。

部品単位

- DDATE # : 各部品の部品加工納期の早い順に割り当てる。ただし、 i 日目に投入される金型 j を構成する部品 k の部品加工納期を $d_{i,j,k}$ 、加工工程数を $S_{i,j,k}$ とすると $d_{i,j,k}$ は式(3)で与えられる。

$$d_{i,j,k} = d_{i,j,k,S_{i,j,k}} \quad (3)$$

- DDATE #1 : DDATE 1 で定められた各部品の修正部品加工納期の早い順に割り当てる。ただし、修正部品加工納期 $d'_{i,j,k}$ は式(4)で与えられる。

$$d'_{i,j,k} = d'_{i,j,k,S_{i,j,k}} \quad (4)$$

- DDATE #2 : DDATE 2 で定められた各部品の修正部品加工納期の早い順に割り当てる。ただし、修正部品加工納期 $d''_{i,j,k}$ は式(5)で与えられる。

$$d''_{i,j,k} = d''_{i,j,k,S_{i,j,k}} \quad (5)$$

金型単位

- MO : 各金型の金型納期の早い順に割り当てる。
- MMO : DDATE 2 で定められた各金型の修正金型納期の早い順に割り当てる。

これらのルールの中で、工程単位の DDATE 2、部品単位の DDATE #2 および金型単位の MO、MMO は、サブ組立に必要な各部品の加工終了時刻を揃える可能性が高いルールと考えられる。

2.3 評価尺度

本研究では、金型完成までのメイクスパン最小化、金型納期係数の設定法および金型納期係数や金型投入個数の金型納期遅れに及ぼす影響を考慮している。

そこで、金型メイクスパンを最小化するディスパッチングルールを明らかにし金型納期係数の設定を行うため、スケジューリング性能を以下の3種類の尺度で評価する。ただし、 i 日目に投入される金型 j のシステム投入時刻を $H_{i,j}$ 、金型完成時刻を $C_{i,j}$ 、理想的な金型完成時刻（機械台数 ∞ の条件下で求めた理想的な最短の金型完成時刻）を $C^*_{i,j}$ とし、シミュレーション期間の完成金型総個数を N_{all} 、シミュレーション期間における日にちの集合を ω_d 、 i 日目の完成金型の集合を ω_i とする。

- T_m : 金型メイクスパンと理想的な金型メイクスパンの比 $\alpha_{i,j}$ の平均値

$$T_m = \sum_{i \in \omega_d} \sum_{j \in \omega_i} \alpha_{i,j} / N_{all} \quad (6)$$

ただし、 $\alpha_{i,j} = (C_{i,j} - H_{i,j}) / (C^*_{i,j} - H_{i,j})$

- T_σ : $\alpha_{i,j}$ の標準偏差

$$T_\sigma = \sqrt{\sum_{i \in \omega_d} \sum_{j \in \omega_i} (\alpha_{i,j} - T_m)^2 / N_{all}} \quad (7)$$

- T_{max} : $\alpha_{i,j}$ の最大値

$$T_{max} = \max_{i \in \omega_d, j \in \omega_i} [\alpha_{i,j}] \quad (8)$$

また、納期を定めた金型のスケジューリングで発生する金型納期遅れに及ぼす金型納期係数や金型投入個数の影響を明らかにするため、スケジューリング性能を以下の3種類の尺度で評価する。ただし、納期遅れ金型総個数を N_L 、 i 日目に投入される金型 j の納期を $d_{i,j}$ とする。

- L_P (%) : 完成金型総個数に対する納期遅れ金型総個数の割合

$$L_P = N_L / N_{all} \cdot 100 \quad (9)$$

- TL_m (分) : 金型納期遅れ時間の平均値

$$TL_m = \sum_{i,j \in \omega} \max[0, (C_{i,j} - d_{i,j})] / N_{all} \quad (10)$$

- TL_{max} (分) : 金型納期遅れ時間の最大値

$$TL_{max} = \max_{i,j \in \omega} \{\max[0, (C_{i,j} - d_{i,j})]\} \quad (11)$$

2.4 シミュレーション条件

解析に用いたシミュレーション条件は、各種モールド金型を量産している実際の金型工場を参考にして、以下のように設定した。

- i 日目の金型投入個数 n_i ($i=1, 2, \dots$) : 平均 N_1 個、区間 $[0, 2 \cdot N_1]$ の一様分布
- 金型 j ($j=1, 2, \dots, n_i$) の部品数 $p_{i,j}$: 平均 N_2 個、区間 $[1, 2 \cdot N_2 \cdot 1]$ の一様分布
- 金型 j の部品 k ($k=1, 2, \dots, p_{i,j}$) の加工工程数 $S_{i,j,k}$ と作業工程 $q_{i,j,k}$: 表1に示す8種類の作業プロセスからランダムに選択
- 金型 j の部品 k の加工工程 l ($l=1, 2, \dots, S_{i,j,k}$) の作業時間 $O_{i,j,k,l}$: 平均 W_0 分の指数分布
- サブ組立の順序と組立部品数 : 金型に含まれる全部品に対し、部品が組み込まれる親部品をランダムに選択
- 各サブ組立での組立時間 : 平均 $(A_P - 1) \cdot W_1$ 分の $(A_P - 1)$ アーラン分布。ただし、 A_P はサブ組立での組立部品数
- 納期 : $H_{i,j} + \kappa \cdot (C^*_{i,j} - H_{i,j})$ で与えられる TWK (Total work content) ルール。ただし、 κ は納期係数

ただし、 $N_2=20$ 個、 $W_0=W_1=100$ 分と固定し、 $N_1=5, 4.5, 4, 3.5$ 個と作業負荷を変化させた。また、各工程の機械台数は、実際の工場の作業負荷率に近くなるように考え、表2のように設定した。ただし、作業負荷率 = (1日あたりの平均金型個数が持つ各工作機械の平均作業量 (単純に山積みした作業量)) / (各工作機械の1日あたりの処理能力) $\times 100$ である。表2には各機械の平均作業負荷率も示す。

表2 機械台数と平均作業負荷率

機械名	台数	作業負荷率 (%)			
		$N_1=5$	$N_1=4.5$	$N_1=4$	$N_1=3.5$
JB	2	86.8	78.12	69.44	60.76
B	4	86.8	78.12	69.44	60.76
HQ	4	86.8	78.12	69.44	60.76
G	1	86.8	78.12	69.44	60.76
SG 1	1	86.8	78.12	69.44	60.76
SG 2	7	86.8	78.12	69.44	60.76
CH	4	86.8	78.12	69.44	60.76
EDM	2	86.8	78.12	69.44	60.76
PG 2	4	86.8	78.12	69.44	60.76
PG 1	6	86.8	78.12	69.44	60.76
WE	1	86.8	78.12	69.44	60.76
HF	1	86.8	78.12	69.44	60.76
LA	3	86.8	78.12	69.44	60.76
JG	3	86.8	78.12	69.44	60.76

シミュレーションは、1日あたりの金型投入個数、各金型の部品数、各部品の作業プロセス、加工工程の作業時間、サブ組立の順序と組立部品数、サブ組立の組立時間を異なる乱数系列10種類で発生させ、各乱数系列に対し500日間行った。ただし、解析には、システムの初期条件の影響が消える後半400日の各評価尺度の平均値を用いた。

3. 最短金型メイクスパンを与えるディスパッチングルール

金型メイクスパンを最小化するスケジューリング法を明らかにするため、各ディスパッチングルールが T_m , T_σ , T_{max} に及ぼす影響を調べ、結果を図1~3に示す。ただし、使用した金型納期、部品納期および工程納期は、機械台数 ∞ 、金型納期係数 $\kappa=1$ すなわち納期余裕時間0の条件下でバックワードスケジューリングを行った場合の各納期である。

図1から、 T_m は N_1 の増加とともに単調に指数関数的に増加すること、また、MMOのグループが最小の値を与え、DDATE2とDDATE2#、MOのグループの順に値が増加し、SPTが最大の値を与えることがわかる。したがって、サブ組立を必要とする金型を生産する場合、金型単位でのスケジュールを考える必要があり、特に、サブ組立てに必要な部品の加工終了時刻をできるだけ揃えるようにスケジュールを組む必要がある。

一方、図2、3から、 T_σ や T_{max} は N_1 の増加とともに単調に指数関数的に増加し、DDATE2とDDATE#2が最小の値を与え、MMOのグループ、MOのグループの順に値が増加することがわかる。したがって、 T_σ や T_{max} は金型単位よりも修正部品加

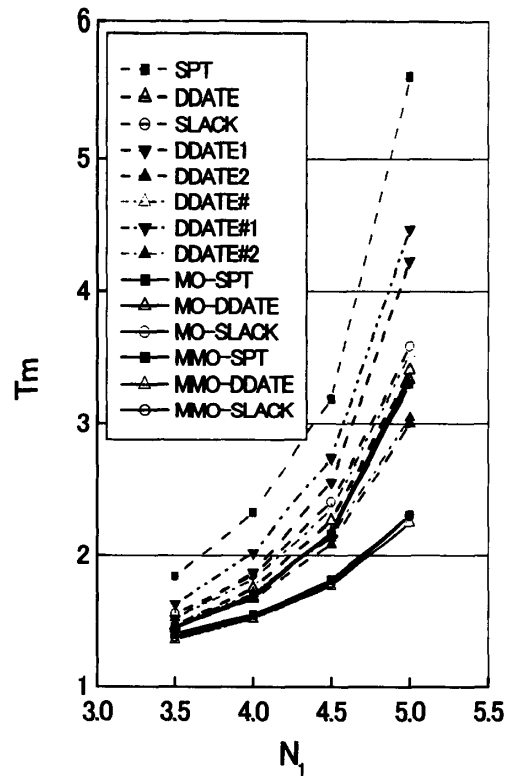


図1 $a_{i,j}$ の平均値

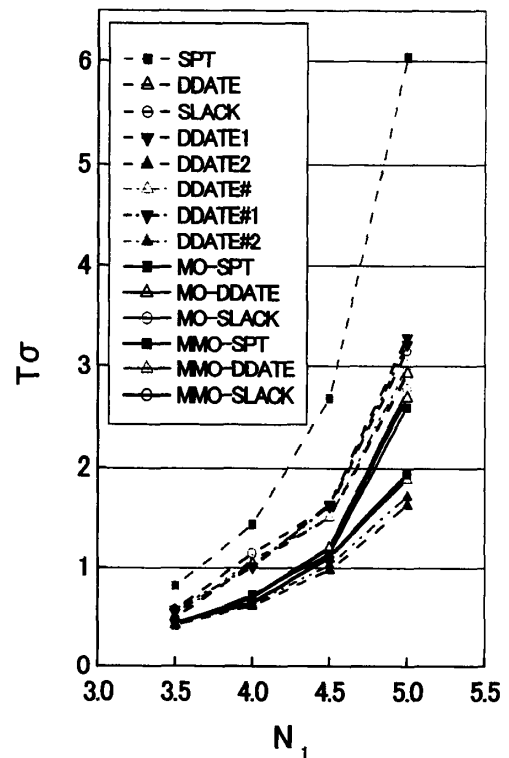


図2 $a_{i,j}$ の標準偏差

工納期や修正工程納期を用いた部品や工程単位のスケジュールの方が小さくなる。

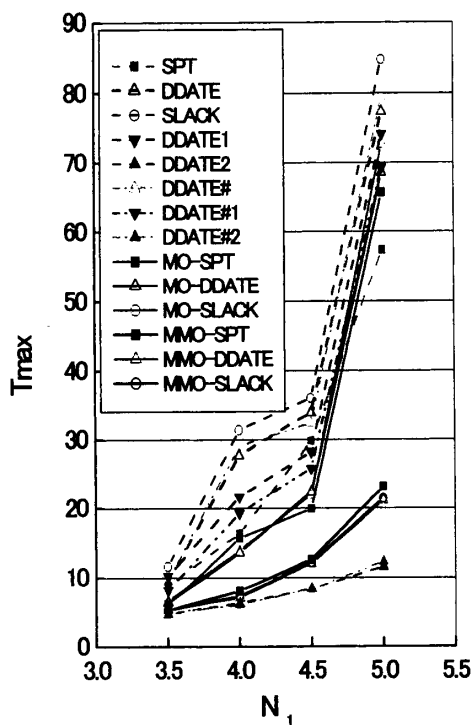


図3 $\alpha_{i,j}$ の最大値

4. 金型納期係数の設定

金型納期を設定する場合、企業戦略の立場から、なるべく納期を短縮すること、また、顧客との信頼関係を築く立場から、納期遅れを極力さけることを考えなくてはならない。しかし、納期の短縮は、一般に納期遅れを発生させる可能性を高くするので、短納期と納期遅れを考慮した適切な金型納期すなわち金型納期係数の設定が必要になる。そこで、設定した値以下の金型納期遅れ割合 L_p を実現可能とする最短納期を与える納期係数設定法を考える。

前節で求めた各金型のメイクスパン比 $\alpha_{i,j}$ は、スケジュール上で各金型を生産するのに必要な生産時間と理想的最短生産時間 ($C_{i,j}^* - H_{i,j}$) の比を与えるので、納期遅れを発生させずに金型を生産可能とする最短納期を決定する納期係数となる。このとき、図1、2に示したように、 $\alpha_{i,j}$ の平均 T_m と標準偏差 T_σ は金型投入個数 N_1 すなわち作業負荷に依存して変化するので作業負荷の関数として納期係数を設定する必要がある。また、一定の作業負荷の下で、あるディスパッチングルールでスケジューリングを行っても、金型毎に $\alpha_{i,j}$ はさまざまな値をとり分布をなす。したがって、 $\alpha_{i,j}$ の分布が近似的に平均 $T_m(N_1)$ 、標準偏差 $T_\sigma(N_1)$ の正規分布になると仮定し、金型納期係数 κ を式(12)で与えると、金型納期遅れ割合 L_p を一定値以下に抑える最小の納期係数 $\kappa(N_1)$ が近似的に推定可

表3 L_p と x の関係

L_p		$N_1=5$	$N_1=4.5$	$N_1=4$	$N_1=3.5$
5	正規分布	5.37	3.59	2.57	2.07
	図5	5.51	3.59	2.54	2.15
10	正規分布	4.67	3.18	2.33	1.91
	図5	4.70	2.93	2.26	1.91
15	正規分布	4.22	2.91	2.18	1.81
	図5	4.10	2.70	2.01	1.78
20	正規分布	3.84	2.69	2.05	1.72
	図5	3.74	2.47	1.89	1.65

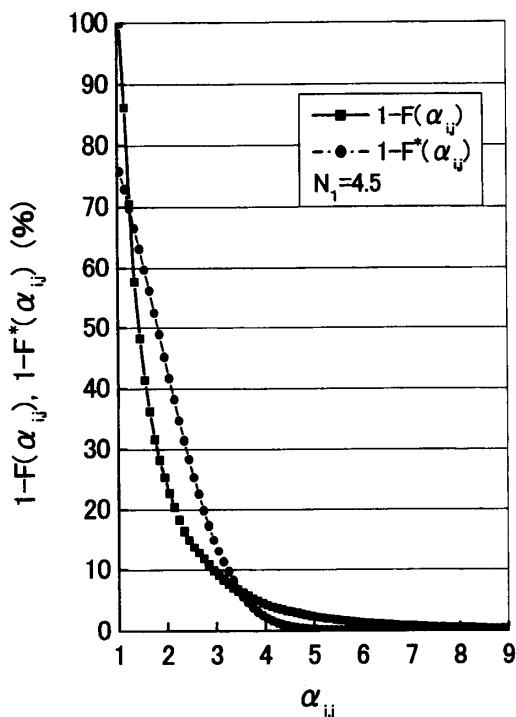


図4 $\alpha_{i,j}$ の分布

能となる。

$$\kappa(N_1) = T_m(N_1) + x \cdot T_\sigma(N_1) \quad (12)$$

例えば、 $L_p=20, 15, 10, 5\%$ 以下とする $\kappa(N_1)$ は、正規分布表から近似的に $x=0.84, 1.04, 1.28, 1.64$ で与えられる。各 N_1 に対し、 $\alpha_{i,j}$ が正規分布をなすと考えた場合の L_p と $\kappa(N_1)$ の関係を式(12)から求め表3 (上段) に示す。ただし、ディスパッチングルールは、最短の金型メイクスパンを与える MMO-DDATE を用いた。また、 $\alpha_{i,j}$ の分布の正規分布への近似性を示すため、 $\alpha_{i,j}$ の累積分布関数 $F(\alpha_{i,j})$ に対する $1-F(\alpha_{i,j})$ と $T_m(N_1)$ 、 $T_\sigma(N_1)$ で表される正規分布の累積分布関数 $F^*(\alpha_{i,j})$ に対する $1-F^*(\alpha_{i,j})$ の比較例を図4に示す。

次に、上述の金型納期係数設定法の妥当性を調べるため、 $N_1=5, 4.5$ に対し $\kappa=2, 3, 4, 5, 6$ 、 $N_1=4$ 、

3.5 に対し $\kappa=1.5, 2, 2.5, 3$ と納期を設定した場合の κ と L_p の関係を図 5 に、 κ を式(12)の係数 x で置き換えた結果を図 6 に示す。また、 $L_p=20, 15, 10, 5\%$ を与える κ を図 5 から推定し、その結果を表 3 (下段) に示す。図 6 から、各 N_1 に対し x と L_p の関係は、ほぼ同一の曲線で表され、また、表 3 から、

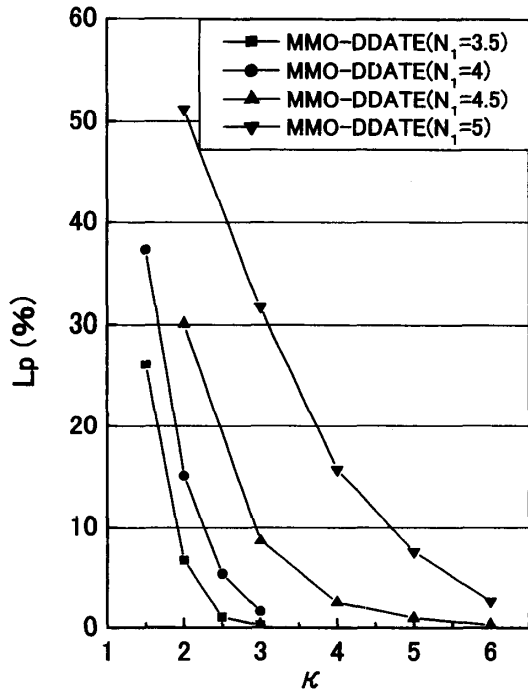


図 5 κ と L_p の関係

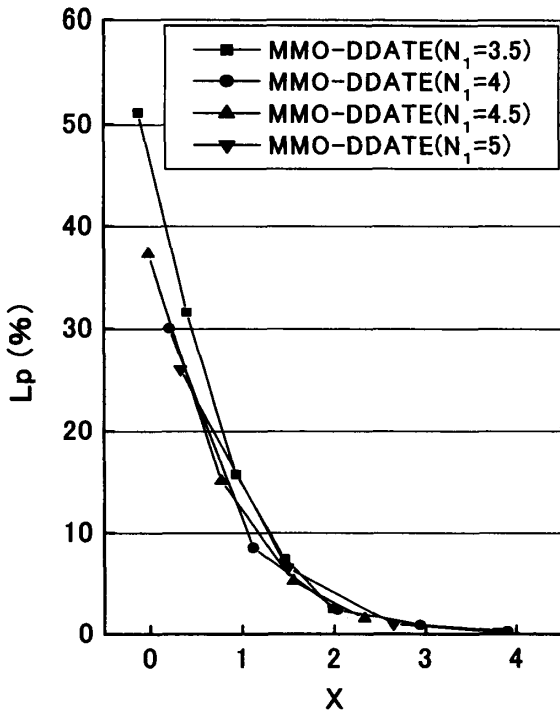


図 6 x と L_p の関係

式(12)で推定した納期係数と図 5 から得られた納期係数はほぼ一致することが示される。この結果、提案された納期係数設定法「 $\kappa=1$ の条件下でMMO-DDATEを用いてスケジューリングを行い、得られた $T_m(N_1)$ と $T_o(N_1)$ および設定した金型納期遅れ割合に対応する x を式(12)に代入して納期係数を推定する」の妥当性が示される。

5. 金型納期遅れの解析

金型投入個数 N_1 、金型納期係数 κ と各ルールが金型納期遅れに及ぼす影響を解析する。ただし、使用したルールは、金型メイクスパンの評価尺度が優れている DDATE, DDATE 2, DDATE # 2, MO-DDATE, MMO-SPT, MMO-DDATE の 6 種類である。

N_1 、 κ と各ルールが金型納期遅れ割合 L_p に及ぼす影響を調べるため、各ルールにおける N_1 、 κ と L_p の関係を図 7 に示す。図 7 から、 N_1 が増加するにつれ、また、 κ が減少するにつれ L_p が指数関数的に増加し、MMO を用いたルールが最小の L_p を与えることがわかる。したがって、最短の金型メイクスパンを与えるルールは、納期係数を設定した場合、最小の L_p を与える。しかし、 N_1 が減少するにつれ、また、 κ が増加するにつれ、ルール間の差は小さくなる。

次に、 N_1 、 κ と各ルールが金型納期遅れ平均時間 TL_m に及ぼす影響を調べるため、各ルールにおける

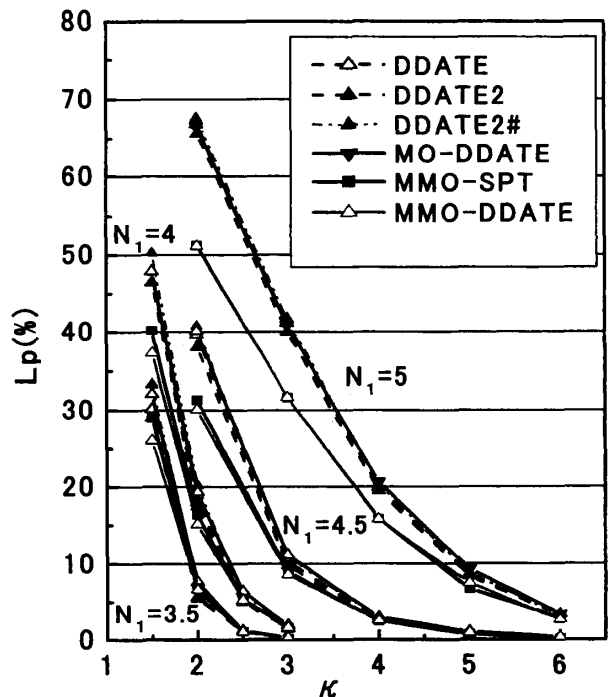


図 7 金型納期遅れ割合

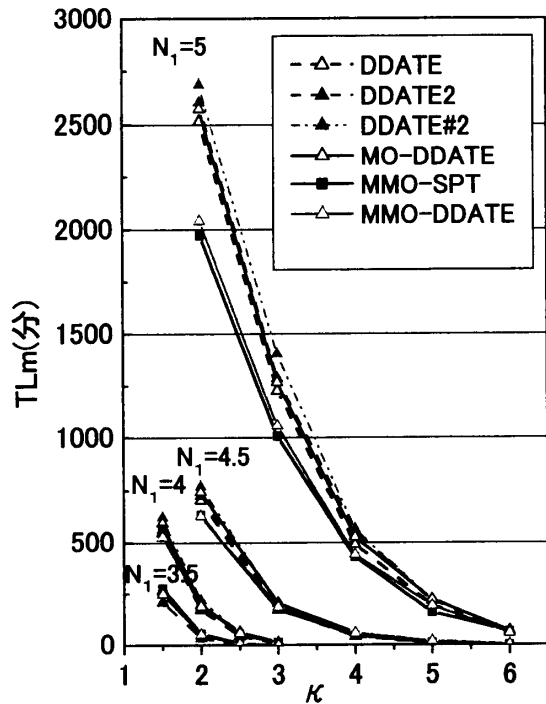


図8 金型納期遅れ平均時間

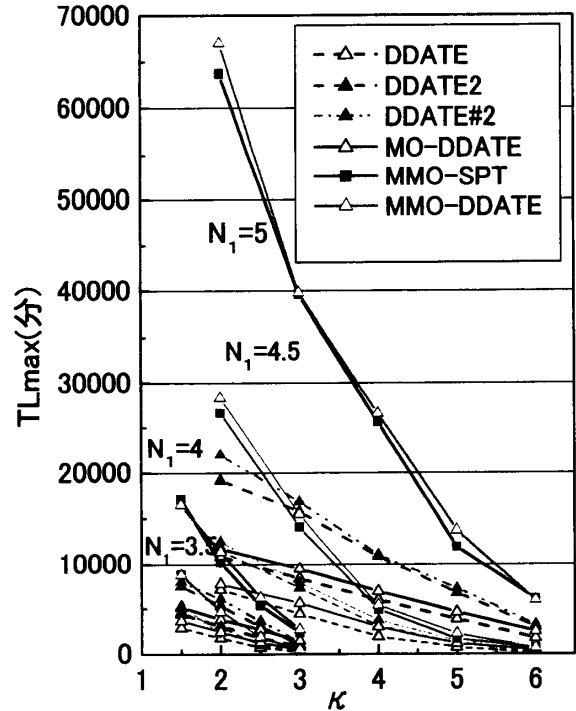


図9 金型納期遅れ最大時間

N_1 , κ と TL_m の関係を図8に示す。図8から、 N_1 が増加するにつれ、また、 κ が減少するにつれ TL_m は指数関数的に増加し、MMOを用いたルールが最小の TL_m を与えることがわかる。しかし、 N_1 が小さくなるにつれ、また、 κ が増加するにつれ、ルール間の差は小さくなる。

さらに、 N_1 , κ と各ルールが金型納期遅れ最大時間 TL_{max} に及ぼす影響を調べるため、各ルールにおける N_1 , κ と TL_{max} の関係を図9に示す。図9から、 N_1 が増加するにつれ、また、 κ が減少するにつれ TL_{max} は増加することがわかる。このとき、 TL_{max} は3種類のグループに分かれ、納期を重視したDDATEとMO-DDATEのグループが最小の TL_{max} を与え、次いでDDATE2とDDATE#2のグループとなり、MMOのグループが最大の TL_{max} を与える。したがって、MMOの様に修正金型納期を用いた場合、納期遅れを起こした部品を持つ金型は、金型納期が修正され優先順位が下がり、結果として、納期遅れが再び発生する可能性が高くなる。そして、その後も納期遅れが繰返し発生する可能性が高いので、特定の金型に納期遅れが集中し TL_{max} が増加すると思われる。一方、DDATEやMOの様に金型が本来持つ工程納期や金型納期を用いた場合、納期の早い工程や金型は、納期遅れが発生しても優先順位は下がらず優先的に処理されるので TL_{max} は極端に大きくなることはない。しかし、この場合、納期の遅い金型の作業

開始時刻を遅らせる可能性が高くなり、図7に示したように、多くの金型に納期遅れを発生させると考えられる。

6. 結 言

本研究では、サブ組立を必要とする金型生産システムに適用可能なスケジューリング法を考え、ダイナミックな環境下で最短の金型メイクスパンを与えるスケジューリング法を明らかにした。また、設定値以下の金型納期遅れ割合を実現可能とする金型納期係数設定法を提案し、その有効性を明らかにした。さらに、金型投入個数（作業負荷）、金型納期係数と各ルールが金型納期遅れに及ぼす影響を明らかにした。本研究で得られた主な結論は以下のとおりである。

- (1) 最短金型メイクスパンを与えるディスパッチングルールは、MMOを用いたルールである。
- (2) 金型納期遅れ割合を設定値以下にする金型納期係数設定法を提案した。
- (3) 金型納期遅れ割合と金型納期遅れ平均時間を最小にするディスパッチングルールは、MMOを用いたルールである。また、金型納期遅れ最大時間を最小にするディスパッチングルールは、DDATEとMOを用いたルールである。

金型生産システムは、一般に、加工工程と組立工程で構成されるが、本研究では、加工工程での加工メイクスパン最小化に焦点を当てた。したがって、組立作

業者数を無限大と仮定し、組立作業の開始時に新たな遅れが発生しない条件を与えた。この組立条件は、組立作業数がある場合、「組立に必要な部品がそろった時点で組立作業が開始でき、組立作業に対する待ち時間が発生しない。」という条件を満たす組立作業数に対応し、このような組立作業数を与えられれば、組立作業数がある場合であっても、組立工程のスケジューリングを考える必要はない。しかし、組立作業数がある場合組立作業に待ちが発生する場合には、組立作業の優先順位を、すなわち、組立工程のスケジューリングを考える必要がある。この場合、本研究では、組立部品がそろった時点で組立作業を開始し、組立作業は加工作業に従属する作業と考えているため、組立工程のスケジュールを考える時刻において、常に、組立部品がそろっていることになり、結果として、最短加工メクスパンを与える加工工程のスケジューリングは組立工程のスケジューリングの影響を受けず、加工工程のスケジューリングは組立工程のスケジューリングと独立に考えることができる。このとき、組立工程のスケジューリングによって組立作業の待ち時間が発生するならば、その待ち時間は、本研究で得られた加工工程スケジューリング結果に対しては、各部品の加工終了時刻から組立作業開始までの余裕時間となる。

なお、本研究では、MMOを用いたルールが最小の金型メクスパンや金型納期遅れ割合を与えたが、一方では、最大の金型納期遅れ時間を発生させている。したがって、このような金型や金型を構成する部品は、納期に間に合わせるため、外注工場の利用が不可欠であり、今後は、外注工場の利用を考慮したスケジューリング法を考える必要がある。

最後に、本研究は平成12年度文部省科学研究費の助成を受けてなされたものであることを付記する。

参考文献

- [1] 黒田 充：生産スケジューリング・シンポジウム'97講演論文集，日本オペレーションズリサーチ学会，pp.1-13 (1994)
- [2] Tzafestas, S. and Triantafyllakis, A. A.: "New Adaptively Weighted Combinatorial Dispatching

- Rule for Complex Scheduling Problem", *Computer Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 7, No. 1, pp. 7-15 (1994)
- [3] Chang, Y., Sueyoshi, T. and Sullivan, R. S.: "Ranking Dispatching Rules by Data Envelopment Analysis in a Job Shop Environment", *IIE Trans.*, Vol. 28, pp. 631-642 (1996)
- [4] Pierreval, H. and Mebarki, N.: "Dynamic Selection of Dispatching Rules for Manufacturing System Scheduling", *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 35, No. 6, pp. 1575-1591 (1997)
- [5] Barman, S.: "Simple Priority Rule Combination: An Approach to Improve both Flow Time and Tardiness", *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 35, No. 10, pp. 2857-2870 (1997)
- [6] Kutanoglu, E. and Sabuncuoglu, I.: "An Analysis of Heuristic in a Dynamic Job Shop with Weighted Tardiness Objectives", *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 37, No. 1, pp. 165-187 (1999)
- [7] 横山雅夫：“組立作業を伴う複合フローショップスケジューリングに関する一研究”，日本経営工学会論文誌，Vol. 49, No. 1, pp. 17-23 (1998)
- [8] Lee, C. Y., Cheng, T. C. E. and Lin, B. M. T.: "Minimizing the Makespan in the 3-machine Assembly-type Flowshop Scheduling Problem", *Manage. Sci.*, Vol. 39, No. 5, pp. 615-625 (1993)
- [9] Haung, P. Y.: "A Comparative of Priority Dispatching Rules in a Hybrid Assembly Job Shop", *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 22, No. 3, pp. 375-387 (1984)
- [10] Fry, T. D., Philipoon, P. R. and Markland, R. E.: "Due Date Assignment in a Multistage Job Shop", *IIE Trans.*, Vol. 21, pp. 153-161 (1990)
- [11] Philipoon, P. R., Russell, R. S. and Fry, T. D.: "A Preliminary Investigation of Multi-attribute Based Sequencing Rules for Assembly Shops", *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 29, No. 3, pp. 739-753 (1991)
- [12] Lockwood, W. L., Mahmoodi, F., Ruben, R. A. and Mosier, C. T.: "Scheduling Unbalanced Cellular Manufacturing Systems with Lot Splitting", *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 38, No. 4, pp. 951-965 (2000)
- [13] Reeja, M. K. and Rajendran, C.: "Dispatching Rules for Scheduling in Assembly Jobshops—Part 1", *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 38, No. 9, pp. 2051-2066 (2000)