

# フレキシブル生産システムの能率と経済性

## *Efficiency and Economics of Flexible Manufacturing Systems*

名古屋大学 高桑 宗右エ門

*Nagoya University Soemon TAKAKUWA*

### 1. 緒 言

フレキシブル生産システム(FMS; Flexible Manufacturing System)に代表されるFA/CIM(Factory Automation/Computer-Aided Manufacturing)の導入によって, リードタイム短縮, 品質向上, コスト低減など, その効用が喧伝されている. 産業用ロボットによる工作物の取付・取外しなどの準備作業の実施や, 無人搬送車やコンベヤによる自動的な搬送, NC(Numerical Control; 数値制御)工作機械による高速加工などにより, 生産リードタイムは短縮された. そして, NCプログラムによる加工では, 同種の工作物の加工において, ほぼ均一な仕上がりが期待でき, かつ精密加工も可能となり, 品質向上も達成されていると考えてよい. しかし, 各種の自動生産設備やコンピュータなどの導入に際して, 多額の設備投資を要するために, 如何にコスト低減を達成するかは, 極めて難しい問題である.

生産における自動化の進展による生産システムに対する原価計算の手続きや実態調査に関しては, いくつかの報告がある<sup>1~5)</sup>. 従来の(数値制御付ではない)工作機械を中心とする生産システムでは, (熟練)作業員による直接作業や運搬などの間接作業も大きな役割を果たしてきた. それらに対して, コンピュータ制御による生産システムでは, プログラムによる自動加工に加えて, 産業用ロボット, 無人搬送車, 自動倉庫, コンベヤなどの自動化機器が導入されている. このような加工/作業の進め方の大きな変化によって, 従来の原価計算の手続きが必ずしもそぐわなくなったことなどが指摘できよう.

本研究では, 特に経済性を念頭において, あるランダム・アクセス型フレキシ

ブル生産システムを対象として、能率および経済性に関する解析を行う。そのために、はじめにシミュレーション・モデルを作成し、シミュレーション実験結果を活用した原価計算システムの枠組みを構築する。そして、原価計算の結果をもとに、FMSなどの自動化工場におけるコスト低減の方策について検討する。

さらに、製品選択問題に対して、パラメトリック線形計画法とシミュレーション技法を組み合わせたアプローチを提案する。これにより、従来の数理計画法のみによる静学的な解法では満足いく解が得られなかった問題に対して、真に「実行可能な」最適解を得ることができることを示す。

## 2. フレキシブル生産システム

### 2. 1 ランダム・アクセス型FMS

ここでは、実在するFMSを対象として検討を進めることにする。このFMSは図1に示すように、NC工作機械(NC旋盤、ターニング・センタ、立型・横型マシニング・センタ各1台)と洗浄機1台が配置されている。工作物は無人搬送車(2台設置)によって搬送され、その保管および段取作業は自動倉庫内で行われる。各NC工作機械や洗浄機での段取作業は、産業用ロボットによって遂行される。

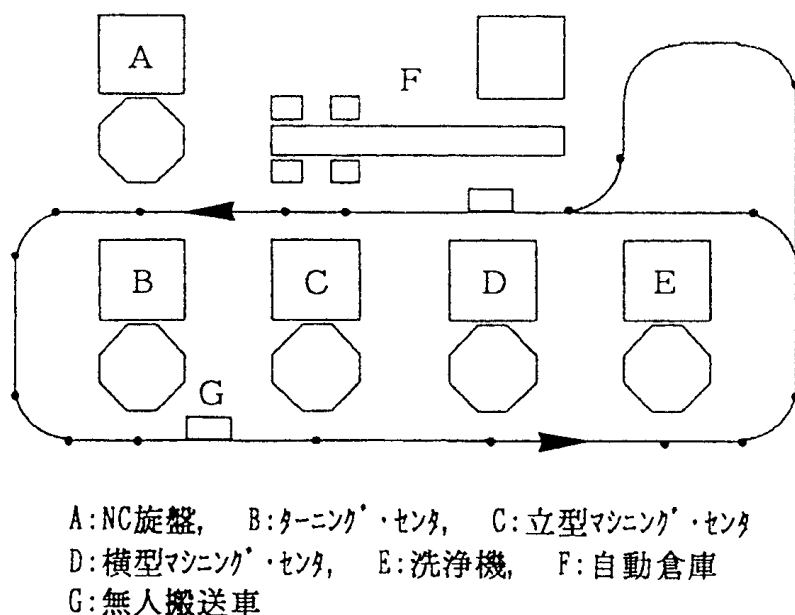


図1. ランダム・アクセス型FMS

る。なお、工作機械で使用する工具の管理もコンピュータによって行われ、ツール・ストッカ(工具保管庫)も併設されている(図1では省略)。このような生産システムにおいては、統括するコンピュータの制御により、多種多様な形状と加工

工程をもつ工作物が、所与の工程順序に従ってランダムに搬送され、所定の加工が行われる<sup>6)</sup>。

## 2. 2 工作物と加工順序

図1に示したFMSによって加工される工作物の一例を図2に示す。この工作物の加工は、(1)NC旋盤、(2)ターニング・センタ、(3)立型マシニング・センタ、(4)横型マシニング・センタ、の順に4工程で行われる。そして、立型および横型マシニング・センタにおける加工の前後には、自動倉庫内で産業用ロボットによる段取作業が実施される。さらに、これらマシニング・センタによる加工

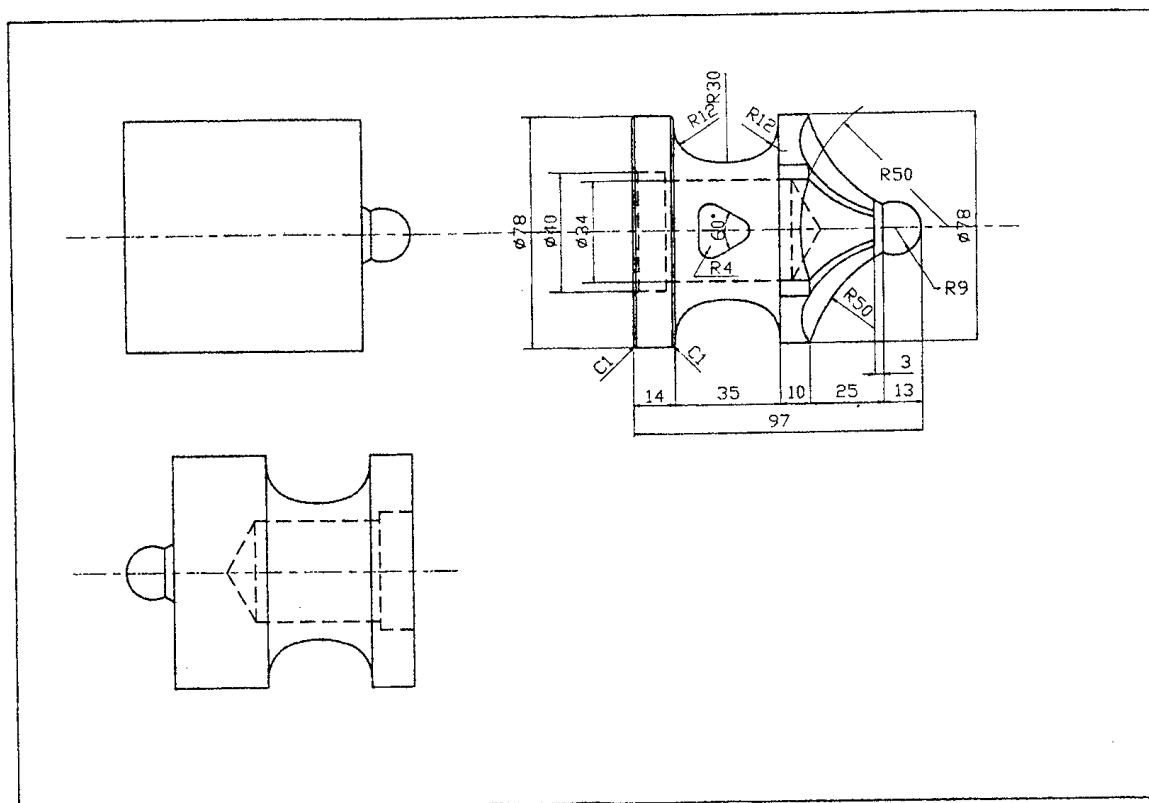


図2. 工作物の例

の直後に、洗浄機による洗浄が行われる。なお、工作物の搬送は、2台の無人搬送車のうち、最寄りの空き(他の工作物を積載していないか、あるいは他の工作物によって搬送要求されていない状態)の搬送車によって行われる。さらに、自動倉庫内の工作物の移動はスタッカクレーンによって行われる。各工作機械および洗浄機における加工・作業時間を、他のいくつかの工作物の場合とともに、表1にまとめて示す。表1より、工作物によって、加工順序が異なり、また使用しない機械もあり、そのうえ加工時間も異なっており、ジョブショップ生産システムの典型的な特徴をみることができる。

表 1. 機械における加工順序と加工時間

部品タイプ	(上段:加工順序、下段:加工/処理時間(秒))				
	NC旋盤	ターニングセンタ	立型マシニングセンタ	横型マシニングセンタ	洗浄機
タイプ 1	1	2	3	5	4・6
	116.4	306	604.7	793.8	180(×2)
タイプ 2		1	2		3
		255.6	510		180
タイプ 3	1				
	386.4				
タイプ 4	1				
	291.6				
タイプ 5		1			
		666.6			
タイプ 6		1			
		605.4			
タイプ 7			1	3	2・4
			791.4	853.2	180(×2)
タイプ 8			1		2
			796.2		180
タイプ 9				1	2
				864	180

### 3. シミュレーション併用の原価計算システム

#### 3. 1 従来の原価計算における原価差異

実際原価計算制度において、原価の一部を予定価格をもって計算した場合における原価と、実際発生額との間に、差額(原価差異)が通常生ずる。これは、複雑な生産システムにおける工作物の生産に係わる所要時間を、近似的ないわば「簡易計算」によって、操業度や加工・作業時間を算定するために、その予測値が実際の生産状況での実績値との間に隔たりが生じることに起因する。特に、生産システムが複雑で、そのうえ工作物の加工順序がたがいに等しくない状況下では、生産実施前に各機械の稼働率を正確に予測することはますます困難になる。

上述の問題点を克服するために、本研究では、シミュレーションによって、加工・作業時間を予測する手続きを提案する。すなわち、時々刻々変化する生産状況について、コンピュータ上で模擬実験を実施し、その結果を用いて、原価を実施することにする<sup>7,8)</sup>。

製品(工作物)およびその生産数量が確定した段階で、実際の生産活動を想定したシミュレーション実験によって、各工程における生産時間などの情報を事前に高い精度で予測することが可能である。次項以降で、原価計算システムに応用する手順について述べる。

#### 3. 2 シミュレーション併用の原価計算システム

原価計算のための情報としては、通常原価計算の場合と同様、種々の項目について収集する必要がある<sup>9)</sup>。すなわち、機械設備、建物の減価償却費、材料費、

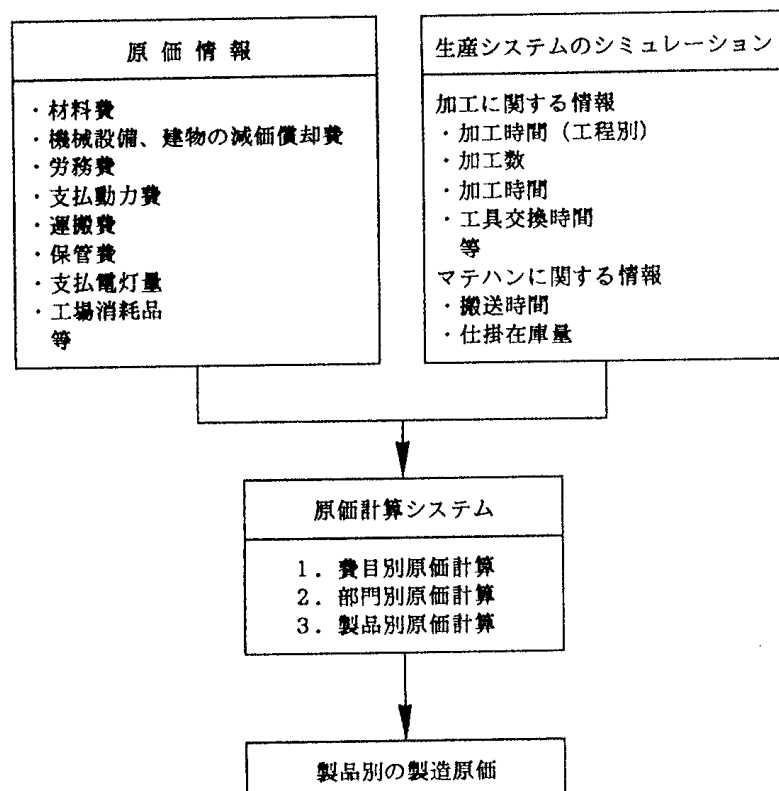
労務費, 支払動力費などである. 正確な原価計算を実施するために, これらの項目に関して正確な値を把握する必要がある. 機械設備などに関する減価償却費

表 2. 減価償却費の計算 (数値例)

	取得価格	耐用年数	残存価格	年間減価償却費	月間減価償却費
NC旋盤	38,600,000	10	3,860,000	3,474,000	289,500
ターニングセンタ	43,600,000	10	4,360,000	3,924,000	327,000
立型マシニングセンタ	40,000,000	10	4,000,000	3,600,000	300,000
横型マシニングセンタ	44,300,000	10	4,430,000	3,987,000	332,250
洗浄機	19,200,000	10	1,920,000	1,728,000	144,000
自動倉庫	86,500,000	10	8,650,000	7,785,000	648,750
無人搬送車	55,250,000	10	5,525,000	4,972,500	414,375
システム価格	110,000,000	10	11,000,000	9,900,000	825,000

の計算のために必要な事項を表 2 にまとめて示す. この表では, NC 旋盤, ターニング・センタ, 立型および横型マシニング・センタ, 洗浄機, 自動倉庫, 無人搬送車システム, そしてコンピュータシステム価格について, その取得価格, 耐用年数, 残存価格を示し, 年当りならびに月当り減価償却費を求めた.

他方, シミュレーションによって, 大別して 2 種類の情報, すなわち加工に関する情報とマテリアル・ハンドリング(略してマテハン)に関する情報を得ること



ができる. 加工に関する情報としては, 工程別の加工時間, 加工数量, 各工作物の総所要時間, 工具交換時間等が得られる. またマテハンに関する情報としては, 無人搬送車による搬送時間や各工程における仕掛在庫量等が得られる.

あらかじめ収集した原価情報に, 生産システムのシミュレーション結果から得られた加工情報やマテハン情報を入力することにより, 従来の費目

図 3. シミュレーション併用の原価計算システム

別原価計算, 部門別原価計算, 製品別原価計算の一連の原価計算を実施して, 個別製品の製造原価を得ることができる. シミュレーション併用の原価計算システムの枠組みを図3に示す. これにより, 生産活動のまえに, 精度の高い製造原価を計算することができる.

#### 4. 無人化工場におけるコスト低減に関する考察

図2に示した工作物を加工する際の製造原価について検討する. いま1日当りの稼動時間を8, 16, 24時間とすると, シミュレーション実験の結果, それぞれ31, 67, 103個の生産が可能であることがわかった. この結果を基に, 3.で示した原価計算システムを用いて, 1個当りの製造原価を求めてみる. この結果をまとめて図4に示す. なお, 製造原価に占める機械設備の減価償却費の割合も併せて示す. この図より, 1日当りの作業時間を増加させることにより, 単位数量当りの製造原価を大幅に低減することが可能であり, また製造原価に占める機械設備の割合も低くすることが可能であることがわかる. このことは, 高額の生産設備を導入する際には, できるだけ稼動することにより, コスト低減を達成できることを意味する.

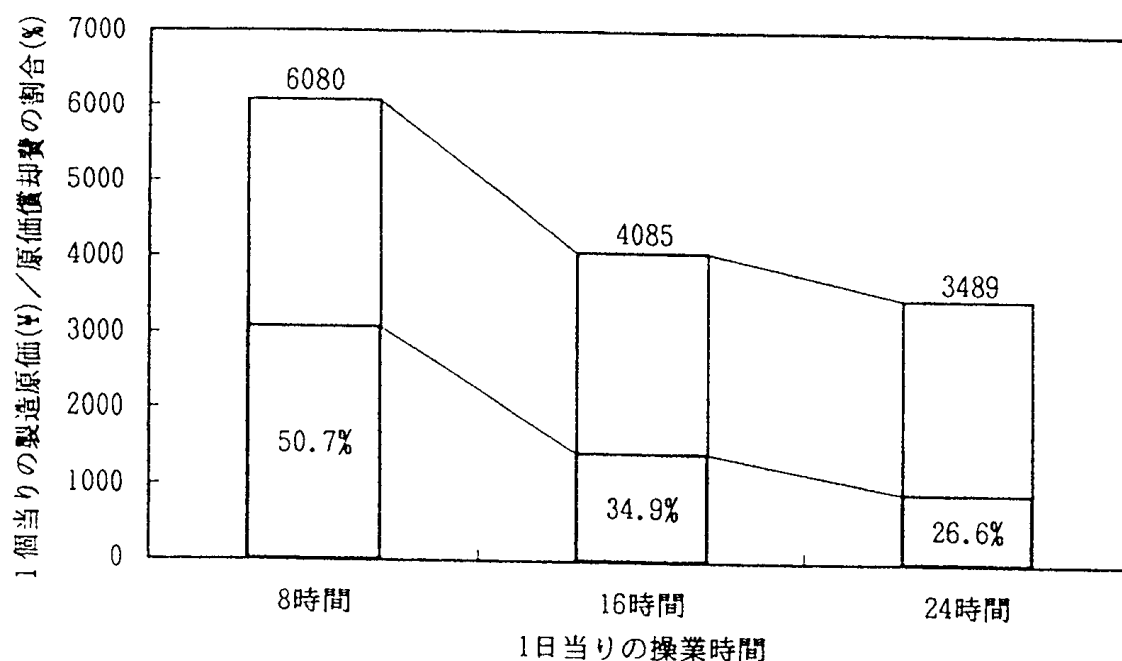


図4. 1個当りの製造原価と設備の減価償却費の割合

次項では、複数の種類の工作物(部品)をこのFMSにおいて加工する場合の製品選択／利益最大化方策について検討する。

## 5. 製品選択問題へのシミュレーション／LPアプローチ

### 5. 1 製品選択問題へのアプローチ

ここでは、複数の種類の部品(工作物)をある一定期間に生産する場合の総利益を最大にする問題について検討する。

従来の線形計画モデルによる方法は、およそその機械負荷を計算するには有効である。しかし、生産活動のダイナミック性が考慮されていないので、ジョブ・ショップにみられるように、多段階工程を経て、しかも工作物によって異なる工程順序で加工が遂行される場合、詳細な日程計画にその結果をそのまま適用するには不適當である。原価計算の項でも述べたように、工作物の加工待ちや搬送／搬送待ち、あるいは機械の遊休状態などにより、所要時間の把握が容易でないためである。

ここでは、制約となる生産可能時間にパラメータを導入したパラメトリック線形計画問題を解きながら、順次シミュレーション実験を実施し、真に「実行可能な」最適解を得る手順を提案する。

### 5. 2 定式化例

はじめに、パラメトリック線形計画法を用いて定式化する。ここで、制約式の右辺(つまり生産可能時間)にパラメータ( $\theta$ )を導入する。各工程において、遊休時間がまったくない場合には、 $\theta = 0$ となるが、ダイナミックな状況下では、上述のように通常、遊休時間が生じる。

表1に示した9部品で構成される部品群について、8時間1シフトで生産する場合、総利益を最大にするパラメトリック線形計画モデルは次のようになる[注]。

目標関数:

$$2,010x_1 + 1,980x_2 + 670x_3 + 670x_4 + 650x_5 + 650x_6 + 1,910x_7 + 860x_8 + 1,580x_9 \quad (\text{最大化})$$

制約条件:

$$116.4x_1 + 386.4x_3 + 291.6x_4 \leq 28,800 - \theta$$

$$306x_1 + 255.6x_2 + 666.6x_5 + 605.4x_6 \leq 28,800 - \theta$$

$$604.7x_1 + 510x_2 + 791.4x_7 + 796.2x_8 \leq 28,800 - \theta$$

$$793.8x_1 + 853.2x_7 + 864x_9 \leq 28,800 - \theta$$

$$360x_1 + 180x_2 + 360x_7 + 180x_8 + 180x_9 \leq 28,800 - \theta$$

$$x_1 - x_2 = 0$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9 \geq 0$$

上の定式化において、目標関数は総利益を表わし、各係数は各部品の単位数量  
当り利益(円)を表わす。制約条件のうち最初の5つの制約式はNC工作機械と  
洗浄機の生産時間に関するものであり、左辺の係数は表1で示した加工時間  
である。そして、6つめの等式は、「2製品を同数生産する」という制約である。

パラメータ $\theta$ の値を0から順次増加させ、上記の線形計画問題を解く。その解  
(つまり、製品種類とその数量)を用いて、そのつどシミュレーション実験を実施  
し、全作業時間が28,800sec.(8時間)を越えなくなったら、実験を打ち切る。

上述の手順を適用した結果、(総利益を最大にする)最適解として、 $x_1=15$ ,  
 $x_2=15$ ,  $x_4=53$ ,  $x_6=14$ ,  $x_9=5$ (個)(つまり、部品1:15個, 部品2:15個, 部品4:53個,  
部品6:14個, 部品9:5個を生産して、その他の部品は生産しない)が得られ、NC  
工作機械の平均稼働率はおおよそ60.2%であり、8時間の生産時間以内での生  
産が可能な解が得られた。 $\theta=0$ の場合の全作業時間はおよそ43,998sec.(12時  
間13分18秒)であり、8時間の生産時間制限を大きく上回ることになる。かくし  
て、ダイナミックな生産状況を考慮したシミュレーション実験を考慮すること  
により、正確に製品選択問題を解くことができることを示した。

## 6. 結言

シミュレーションを活用して、自動生産システム/フレキシブル生産シス  
テムに対する原価計算のためのシステムを構築した。そして、自動生産システ  
ムでは、操業時間を長くすることによって、コスト低減を図ることができること  
を示した。さらに、製品選択問題に対して、パラメトリック線形計画法とシミュ  
レーション技法を組み合わせたアプローチを提案した。これにより、真に「実行可  
能な」最適解を得ることができることを示した。

## 謝辞

本研究で対象としたフレキシブル生産システムに関するデータ収集において、  
雇用促進事業団・高度ポリテクセンターの助力を得た。深甚なる謝意を表す。

注 ここでは、生産する部品タイプや生産数量によらず、各タイプの単位数量  
当り利益は一定であるものとする。



## 参考文献

- 1) Kaplan, R.S., "Must CIM be justified by faith alone?", Harvard Business Review, March-April 1986, pp.87-93, 1986.
- 2) 佐藤康男, 『F A と原価管理』, 中央経済社, 1987.
- 3) 櫻井道晴, 「F A 化はコントロール・システムをどう変えるか」『DIAMONDハーバード・ビジネス』February-March 1986, pp.67-76, 1986.
- 4) 長松秀志, 「生産の自動化と原価計算－日米企業の実態分析－」, 『情報系』, 1, pp.269-281, オフィス・オートメーション学会, 1990.
- 5) 牧戸孝郎, 「F A の進展と原価管理のあり方」, 『企業会計』, Vol.37, No.2, pp36-41, 1985.
- 6) 人見勝人, 『生産システム工学』, (第2版) 共立出版, 1990.
- 7) 高桑宗右エ門, 『C I M 生産システムのシミュレーション－理論と実践－』, コロナ社, 1994.
- 8) 高桑宗右エ門(訳), 『生産システム・シミュレーション』, コロナ社, 1993./ Pegden, C.D. et al., "Introduction to Simulation Using SIMAN," McGraw-Hill, Inc., New York, NY, 1990.
- 9) 青木脩, 『原価計算総論』, 財経詳報社, 1972.