

システム評価技術を用いた金型生産システムの効率化活動

株式会社 ボッシュオートモティブシステム 生産技術部 田中 孝一郎
神垣 敏光

1. 緒言

自動車部品製造業では、市場経済の成熟化により、ニーズの多様化、短納期要求、コスト競争など経営環境が大変厳しくなっている。これらに対応するために、当社の生産システムは、市場優位性のある製品を市場にタイムリーに提供できる生産体制が必要となっており、ますます高度化・複雑化してきている。そのため、迅速、かつ柔軟な要求に対応するために、生産システム導入・改善前における適切な事前評価と導入後のフォローアップの実施がますます重要になっている。

この課題を解決するために、生産システムの設計・改善活動に、シミュレーション技術を主としたシステム評価技術を適用することが、必要不可欠になってきた。^{1) 2)}

本稿では、金型生産システムの効率化活動に、シミュレーション評価技術を適用した事例を報告する。

2. 生産システムにおける評価対象の分類

生産システムにおける評価対象について、分類した内容を表1に示す³⁾。

表1 生産システムにおける評価対象の分類

評価対象	主な評価指標	主な構成パラメーター
生産設備	生産能力 生産リードタイム(納期)	工程数、サーバー数、 工程サイクルタイム、ラインフロー、 バッファ数、パレット数、 段取り、保全、トラブル、不良、等
在庫管理 (部品・中間 ・完成品)	サービスレベル 在庫数 (平均、最小、最大)	在庫方式(バラ、ロット)、許容在庫数、 入出庫方法(随時、定時、定量)、 発注方法(随時、定時、定量)、 調達期間、等
システム 運用条件	生産能力 生産リードタイム 納期遵守 在庫量	生産比率、生産負荷、 投入ロットサイズ、スケジューリング、 作業着手日、納期、 ラインメンテナンス人員数、作業標準、 稼働時間(設備、作業員)、 物流方式(搬送機器、頻度、量)、等

複数機械で構成する生産設備問題、生産設備の前後に存在する在庫管理問題および生産システムを効率的、かつバランス良く稼働させるための運用問題の3つに大きく分類できる。それぞれの問題に対して、設定された評価指標の目標値を達成できるように、構成さ

れるパラメータ値を決定する。例えば、生産設備問題であれば、生産能力、リードタイムが評価指標である。これらの目標値を達成するために、工程サイクルタイムやバッファ数などのシステムパラメーターと、段替や保全などの運用パラメーターを決定する。

3. システム評価技術の役割と活動組織

システム評価技術は、表2に示すように、生産システムの企画～稼働運転までの各ステージの目的を達成するために適用している。

表2 システム評価技術の役割と活動組織

業務手順	シミュレーションの適用目的	部署				評価のポイント
		生産	設備計画	設備製作	システム評価	
1.現状運用条件調査	①生産システム構成及び 運用条件の設計	○	○		●	実績/計画、 パラメータ分析
2.基本仕様作成・評価	②生産システムを構成する 各設備作業条件の設定		●		○	生産設備能力、 コスト評価
3.詳細仕様作成・評価	③生産システム管理方式 の設計・評価 ④投資経済性評価データの 提供		●	○	○	生産システム 全体の評価
4.設備製作				●		
5.設備立ち上げ(初期)	①問題の早期把握 ②優先順位の設定	○	○	●	○	計画時との条件 ・能力差異
6.システム運用(定常)	①現状システムの問題点 抽出と改善案策定	●			○	固定要因・変動 要因の把握
7.ネックポイント調査	(②定期的な診断)	○	○		●	ネック分析、 改善点指摘

●:主務 ○:担当

システム評価技術を適用した場合のメリットを以下に示す⁴⁾。

- (1)対象システムの現象分析に生産を止めることなく、問題点を抽出できる。
- (2)製作・導入時に留意しなければならない要因の基準レベルおよび優先順位が、計画段階で定量的に把握できる。これにより、限られた製作・導入工数の適正な振り分けを行うことができる。
- (3)シミュレータなどのモデルを開発する過程で、問題点に対する洞察力が増し、真の課題が発見できたり、生産システム設計の狙いがより明確になることが多い。
- (4)利用するデータが正確であれば、かなり精度の高

い分析結果が得られるため、計画時に必要となる製造データをしっかり整備する組織風土が生まれる。

また、生産システムを構築・改善するためには、生産性を検討する組織が必要となる。その役割分担と各ステージでの評価のポイントを表 2 に示した。各業務ステージでそれぞれの評価担当部署のどこが担当で、どこが主務なのかを明確にしなければならない。このような関係が明確になっていないと、うまく評価が行えても生産現場に反映できなかつたり、また運用が難しい提案を実行してしまう可能性がある。各担当部署間のコミュニケーションが、うまくとれるかどうか活動の正否を握っている。

4. システム評価技術による評価手順

当社では、システム評価ツールを各種開発しており、生産システム評価の対象や目的に応じて、使い分けている³⁾。

ここでは、各種の生産システム分析・評価に、多く利用しているシミュレーションツールを用いた評価手順を図 1 に示す⁴⁾。

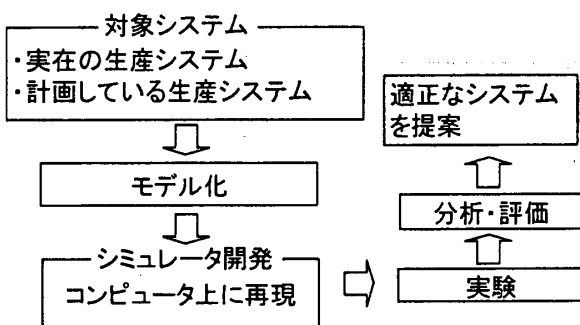


図 1 シミュレーションの評価手順

まず、対象システムの目的と内容を明確にした後、モデル化を行う。ここでは、シミュレータ開発が必要となるシミュレーション以外の方法で、解決がどうかを検討する。シミュレーションを行う場合、このモデルに従ってシミュレータを開発し、検証を行う。その後、パラメータを設定してシミュレーション実験を実施する。実験終了後、実験結果を分析・評価し、何回かこの手順をくり返すことにより、適正なシステム案を提案できる。

最近では、生産システム評価業務に対して、より迅速な対応が求められている。これに加えて、評価の対象となる生産システムは、より大規模かつ複雑になっているため、効率的でかつ効果的な生産システムの評

価方法が必要となってきた。これを解決する方法の一つとして、品質工学をシステム評価技術と併用している⁵⁾。品質工学とは、田口玄一博士によって提唱されている技術開発におけるツール(考え方)のひとつで、技術開発の先行性、汎用性、再現性の確保を目的としている^{6) 7)}。

品質工学の概要を図 2 に示す。品質工学では、パラメータを設計者が自ら決められる「制御因子」と、結果には影響があるが自分では制御できない「誤差因子」に分けている。

また、バラツキを表す尺度として「SN比」と平均値を表す尺度「感度」を用い、バラツキと平均値の最適化ができる。SN比とは、出力特性値のバラツキ具合を表すもので、数値が大きいものほどバラツキが小さいことを示す。感度とは、出力特性値の大きさ(平均値)を表すもので、数値が大きいほど平均値が大きいことを示す。

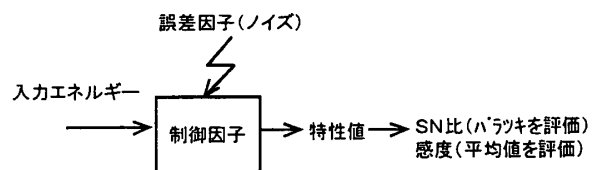


図 2 品質工学の概要

従来のシミュレーションの分析手法では、適正なパラメータ設計を行うために、設計するパラメータと水準の全組み合わせを作成し、実験を実施していた。しかし、従来のシミュレーションによる 1 因子実験には、以下の問題があった。

- (1) 生産システムの単位時間当たりの生産数バラツキ(以下生産数バラツキ)の低減を検討するための評価方法が確立されていない。
- (2) パラメータ数が多くなると、実験回数が膨大になり、実験工数が大になる。

上記の問題点を解決する手法である、シミュレーションと品質工学を用いる評価手法を図 3 に示す。本手法により、従来と比較して、少ない実験回数で適正なパラメータ設計が可能となった。これは、品質工学で実験計画を行うことによって、全てのパラメータの組み合わせを効率的に考慮できるためである。また、品質工学を適用することで生産数バラツキの低減をはかるための評価が可能となった。これによって、安定的に生産が行える生産システムを設計することができる。

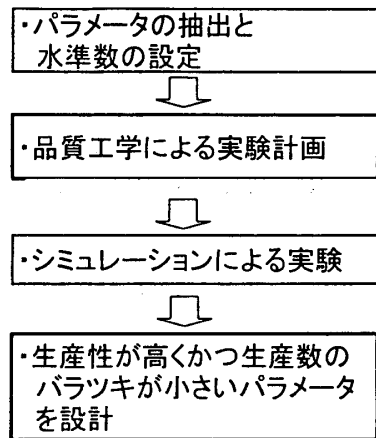


図 3 シミュレーションと品質工学を用いた評価手法

5. 適用事例

当社の金型生産システムの効率化活動は、現在までに継続的に行われている、その中でシステム評価技術を適用した活動は、大きく2ステップに分けられる。

第1ステップでは、既存生産資源の有効活用を目的とした活動を行った。ここでは、シミュレーションを用いることにより生産性が向上した。本報告では、第1ステップでの活動を、適用事例1として報告する。

第2ステップでは、既存生産資源の有効活用を実施した後に、更なる生産能力の向上を目的とした活動を行った。ここでは、シミュレーションと品質工学を用いることにより、資源の投入方法の検討を実施した。本報告では、第2ステップでの活動を、適用事例2として報告する。

5.1 適用事例1

ここでは、シミュレーションを主とした、システム評価技術を金型生産システムの効率化活動に適用して、生産性を向上した事例について報告する⁸⁾。

5.1.1 背景と目的

当社の金型生産システムは、ジョブショップ型の生産現場であり、運用条件が複雑なため、生産能力、納期遵守率の向上を勘と経験だけで、対策を行うことは非常に難しい。このような生産システムに対して、既存の現有生産資源を有効に活用することで、生産性を20%程度向上したいとの要望があり、シミュレーション評価技術を本効率化活動に適用した。

5.1.2 金型生産システムの概要

対象となる金型生産システムの概要を図4に示す。

金型部品は1型あたり数十部品から構成され、各部品がマシニングセンター工程（以下M/C工程）から加工工程を数工程通過し、組立工程を経て出荷される。ただし、全ての部品が各加工工程を通過するわけではなく、部品ごとに加工時間、段替え時間が異なる。これに加え、工程の逆行が存在するジョブショップ型の生産システムである。

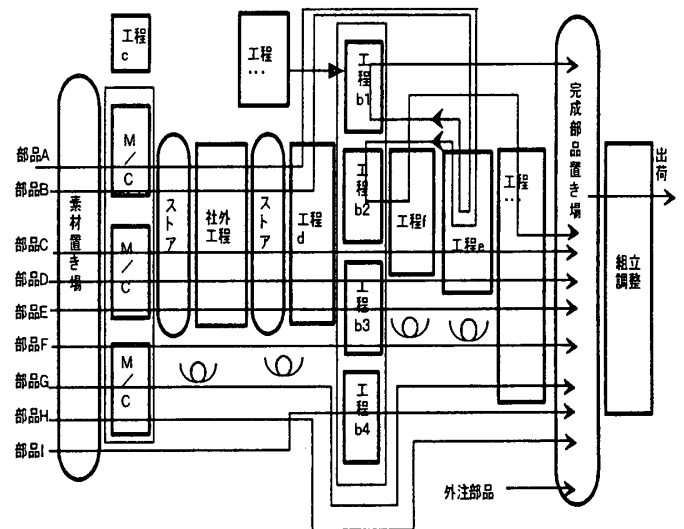


図 4 金型生産システムの概要

技能員は段替え作業、次工程への部品搬送を行うが、技能員によって技能のスキルが異なり、作業可能な工程と不可能な工程がある。さらに勤務シフトは、前半シフトと後半シフトの2交替制などの条件がある。

このような生産システムにおいて、適正な技能員数および技能員の運用ルール、また適正なスケジュールを勘や経験のみで計画するのは、現実的に不可能である。

5.1.3 具体的な検討課題

既存の生産資源をより有効に活用して、目標となる生産性を達成するための検討課題を以下に設定した。

- (1)生産能力の向上には、適正な技能員数、適正な技能員の運用ルールを設定する。
- (2)納期遵守率の向上には、納期遵守率を向上させるための適正なディスパッチングルールを設定する。上記に示した検討項目をバランス良く設定することが必要となる。

5.1.4 シミュレーション実験装置

設定した課題を検討するために必要となる、シミュレータの入出力情報を図5に示す。シミュレータは、生産システム専用シミュレーション・ツール（FACTOR/AIM）を使用して開発した。本モデルは、金型部品モデル、物流モデル、設備モデル、技能員モデルなどから構成されている。このシミュレータに加工時間、段替え時間などを入力することによって、生産数、リードタイム、納期遵守率などが出力される。

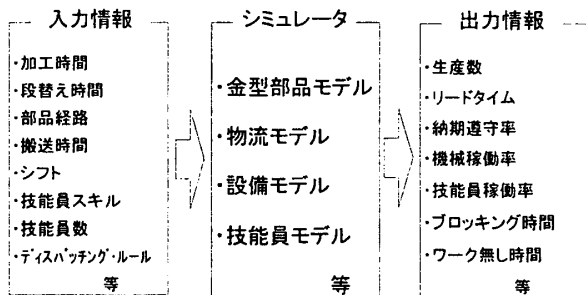


図5 シミュレータの入出力情報

5.1.5 実験方法

実験手順としては、まず生産能力を高めるための検討を行った後、納期遵守率の向上について検討を行った。

(1) 実験1：生産能力向上案の評価

シミュレータに技能員数、技能員運用ルール、技能員スキルを変化させた代替案を入力し、そのときに出力される生産数を評価指標にして、効果的な生産能力向上案の検討を実施した。

(2) 実験2：納期遵守率向上案の評価

シミュレータにディスパッチング・ルールを変化させたものを入力し、そのとき出力される納期遵守率を評価指標にすることによって、納期が守れるスケジュールの検討を実施した。

ディスパッチング・ルールとは、資源での処理（加工、段替え）を待っている部品の中から、次にどの部品をその資源で処理するかを決めるルールのことである。またそのルール数は100以上あるといわれているが、大きく次のように分類することができる⁹⁾。

- (a)加工時間を考慮したルール
- (b)納期を考慮したルール
- (c)加工時間および納期のいずれも考えないルール
- (d)いくつかのルールを組み合わせたルール

数多く存在するディスパッチング・ルール全てにつ

いて、検討を行うのは非常に難しい。また、全ての生産システムに適用できる万能なディスパッチング・ルールは、いまだ提案されていない⁹⁾。そのため、本実験では納期を考慮したルールを中心に、ディスパッチング・ルールをいくつか設定した。これをシミュレータに入力することによって、納期遵守率が高いスケジュールの検討を行った。また、ディスパッチング・ルールを変更する方法は、以下に示す2つがある。

- (1)全資源に同一のディスパッチング・ルールを割り当てる Single Dispatching Rule(SDR)アプローチ
- (2)資源ごとに別々のルールを割り当てる

Mix Dispatching Rule(MDR) アプローチ

本実験では、前者のSDRアプローチで、表3に示す5つのルールを用いて評価を行った。

表3 ディスパッチング・ルール

ルールの名称	概要
FIFO	各工程の仕掛かり置き場に到着した順に部品を選択
EDD	納期に最も近い部品を選択
LSS	納期までの残り時間が最小な部品を選択
LDS	(納期までの残り時間-残り処理時間)が最小な部品を選択
LPT	残り加工時間が最小な部品を選択

5.1.6 実験結果

生産能力および納期遵守率の向上について検討した結果を以下に述べる。

(1) 生産能力向上に関する実験結果

技能員数および運用ルールと生産数の関係を図6に示す。縦軸に現状を100としたときの生産数を示し、横軸は技能員数を示している。

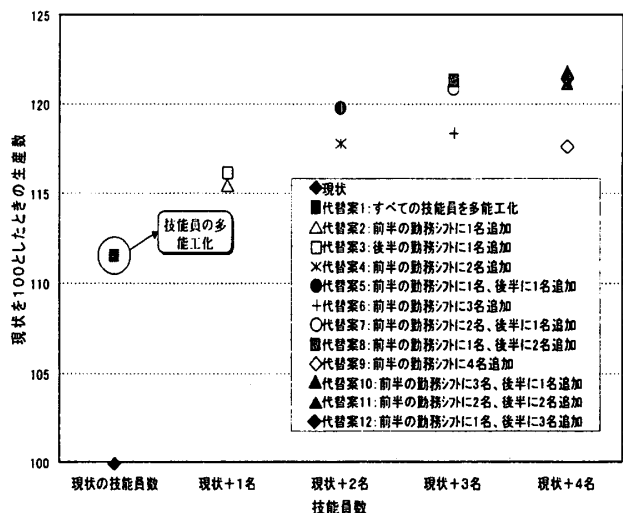


図6 技能員数および運用ルールと生産数との関係

各代替案とも、技能員数を増やすと生産数は増加する傾向にあることが分かる。しかし、運用ルール（前半と後半の各シフトへの技能員の分配方法）によっては、技能員を増やしてもあまり効果的でない代替案があることも分かった。また、現状の技能員数であっても、各技能員が全ての工程で作業可能な状態である多能工になることによって、約 12% の生産能力が向上することが分かった。これは図 7 に示すように、技能員を多能工化することで、技能員と各機械の平均稼働率が、向上したためである。

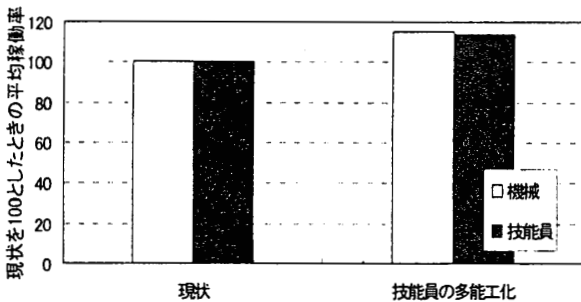


図 7 技能員と各設備の平均稼働率

これより、技能員を新たに投入することなく技能員の多能工化を促進することが、現有資源の有効利用を考えると効果的であることが分かった。

(2) 納期遵守率向上に関する実験結果

ディスパッチング・ルールと納期遵守率の関係を図 8 に示す。縦軸に納期遵守率を示し、横軸は、

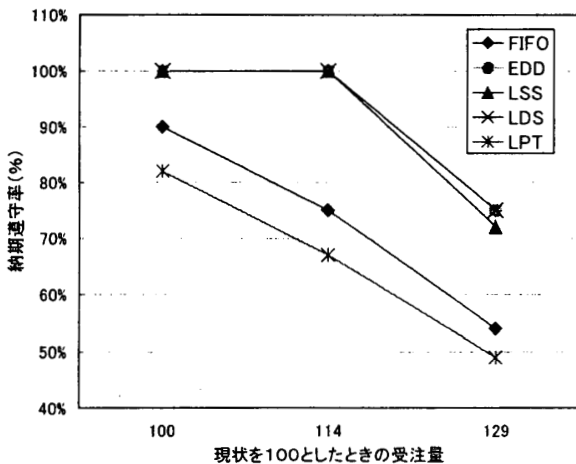


図 8 ディスパッチング・ルールと納期遵守率の関係

現状を 100 としたときの受注量を示している。この図より、受注量が増加すると、納期が大きく守れないディスパッチング・ルールが、出現してくることが分かる。

これより、納期遵守率の高いディスパッチング・ルールは、EDD、LSS、LDS であることが分かった。また、これらのディスパッチング・ルールを採用すると、現状から受注量が 14% 増えても、納期が守れるスケジュールが、計画できることが分かった。

5.1.7 生産性効率化案の設定

以上、他にも様々な検討を行った結果をもとに、現有資源の有効活用の観点から、表 4 に示す効率化案を抽出し、実施した。

表 4 効率化案の抽出

効率化項目	現状	実施案
多能工化の促進*	多能工化率: 43%	多能工化率: 60%
納期遵守率の高いディスパッチング・ルールの採用	勤と経験	EDDまたはLSS

*多能工化率とは全工程の中で技能員が作業可能な工程数の割合を示す指標であり、①式で表す。

$$\text{多能工化率} = \text{作業可能工程数} \div (\text{技能員数} \times \text{工程数}) \text{①}$$

5.1.8 実際の生産システムでの効果

金型生産システムにおいて、上記の効率化案を実施したところ、以下に示す効果を得た。

(1) 技能員および機械の稼働率が向上し、生産能力が約 18% 向上した。

(2) また、実際に運用している日程計画システムに、納期遵守率の高いディスパッチング・ルールを採用し、スケジューリングを実施したところ、納期遵守率が約 14% 向上した。

(3) その他の効果としては、事前に生産数などの目標値が、明確になることによる技能員のモチベーション向上があげられる。

5.2 適用事例 2

適用事例 1 では、現有の生産資源の有効利用を目的として、シミュレーションを用いた検討を行い、実際の現場に適用した結果、生産性が約 18% 向上した。

そこで、適用事例 2 では、更なる生産能力の向上を検討した活動について報告する⁵⁾。

5.2.1 目的

金型生産システムの更なる生産能力の向上を検討することが目的である。このために、効率的かつ効果的な資源（技能員や設備）の投入方法の検討を行う必要がある。そこで、シミュレーションと品質工学による評価手法によって、生産数バラツキを減らし、かつ生産数を増大させる資源の投入方法の評価を行った。

5.2.2 実験計画

制御因子と水準を表5に示す。ここで、工程fの設備能力は十分であることを事前に把握していたため、制御因子から除いた。これらの制御因子と水準を直交表 L_{12} に割り付けた。すなわち、(制御因子の効果をみるための実験12回) × (バラツキを評価するための誤差12回) = 144回の実験を行った。仮に1因子実験で行った場合、 $2^{12} = 4096$ 回の実験が必要となるため、大幅な実験の効率化になる。

表5 制御因子と水準

制御因子	水準1	水準2
A: M/C工程人員	現状の 技能員数 と 設備数	現状+1人
B: 工程b人員		現状+1人
C: 工程c人員		現状+1人
D: 工程d人員		現状+1人
E: 工程e人員		現状+1人
F: 工程f人員		現状+1人
G: M/C工程設備		現状+1台
H: 工程b設備		現状+1台
I: 工程c設備		現状+1台
J: 工程d設備		現状+1台
K: 工程e設備		現状+1台

各実験 No.毎に誤差12個のデータからSN比 η と感度Sを以下の②~⑧式より計算する。

実験 No.1のデータを $y_1, y_2, y_3, \dots, y_{12}$ とすると

$$S_T = y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + \dots + y_{12}^2 \quad \text{②}$$

$$S_m = 12 \times \left\{ (y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_{12}) \div 12 \right\}^2 \quad \text{③}$$

$$S_e = S_T - S_m \quad \text{④}$$

$$\sigma^2 = V_e = \frac{1}{11} (S_T - S_m) \quad \text{⑤}$$

$$m^2 = \frac{1}{12} (S_m - V_e) \quad \text{⑥}$$

$$\eta = 10 \log (m^2 \div \sigma^2) = 10 \log \frac{\frac{1}{12} (S_m - V_e)}{V_e} \quad \text{⑦}$$

$$S = 10 \log (m^2) = 10 \log \frac{1}{12} (S_m - V_e) \quad \text{⑧}$$

SN比 η は、毎月の金型生産数のバラツキ具合を示している。感度Sは、毎月の金型生産数の平均値を示している。評価をする特性値は1ヶ月の金型生産数を用いた。また誤差因子として12ヶ月間のデータを用いた。

本実験では、SN比 η が大きく（毎月の生産数バラツキが小さく）、かつ感度Sが大きい（生産数が多い）条件を求めることになる。

5.2.3 実験結果

実験結果である各実験No.毎のSN比 η と感度を表6に示す（SN比 η 、感度Sの単位はdbと示す。これは音や振動の大きさを表すdBと区別するため、品質工学で用いるSN比 η 、感度Sの単位をdbと小文字で表すことが慣例となっている）。

表6 実験結果

実験 No	データ (1年間の各月の生産数)						全変動 S_T	平均値 の変動 S_m	誤差 分散 S_e	分散 V_e	SN比 η (db)	感度 S (db)
	1月	2月	...	11月	12月							
1	898.00	833.14	64.86	4.99	10.74	17.72	
2	976.00	972.00	4.00	0.36	23.48	19.08	
3	930.00	897.23	32.77	2.73	14.01	18.38	
4	932.00	897.23	34.77	2.90	13.76	18.38	
5	934.00	897.23	36.77	3.06	13.51	18.37	
6	958.00	897.23	60.77	5.06	11.32	18.37	
7	980.00	972.00	8.00	0.73	20.46	19.08	
8	962.00	897.23	64.77	5.40	11.04	18.36	
9	934.00	897.23	36.77	3.06	13.51	18.37	
10	912.00	897.23	14.77	1.23	17.48	18.38	
11	968.00	897.23	70.77	5.90	10.65	18.36	
12	974.00	972.00	2.00	0.18	26.49	19.08	

この結果から、各制御因子の水準別のSN比 η と感度Sの要因効果図を、図9、図10に示す。

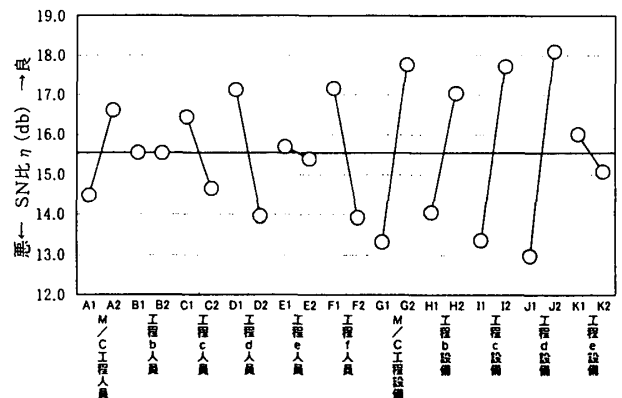


図9 SN比 η の要因効果図

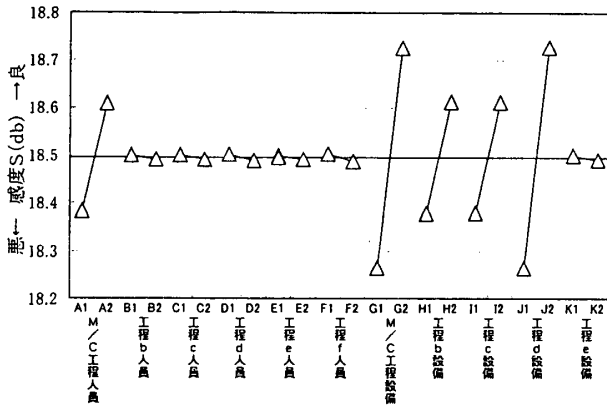


図 10 感度Sの要因効果図

図9のSN比 η の要因効果図より以下の結果を得た。

- ・工程e以外は、設備を1台増やすことにより毎月の生産数バラツキが減少する。
また、工程eの設備は増やしても生産数バラツキには寄与しない。
- ・生産数バラツキに最も影響の大きいものは、工程dの設備である。
- ・M/C工程人員に技能員を1人投入することにより、生産数バラツキは減少する。
- ・M/C工程以外の工程に技能員を投入しても、効果は無いかむしろ生産数バラツキが大きくなる。

図10の感度の要因効果図より以下の結果を得た。

- ・生産数の増加に効果が大きいのは、M/C工程設備と工程d設備である。
- ・生産数増加のために技能員を投入するならば、M/C工程である。
- ・M/C工程以外の工程に技能員を投入しても、生産数は増加しない。

5.2.4 妥当性の検証

実験の再現性を確認するために、表7に示す確認実験の条件を設定して、実験を行った。SN比 η ・感度Sともに推定した値とほぼ一致することが、表8、表9に示す確認実験の結果により分かった。これによって、最適条件が現場でも再現することが予想できる。

表 7 確認実験の条件

	最適条件	現状条件
MC工程人員	現状+1人	現状
工程b人員	現状	現状
工程c人員	現状	現状
工程d人員	現状	現状
工程e人員	現状	現状
工程f人員	現状	現状
MC工程設備	現状+1台	現状
工程b設備	現状+1台	現状
工程c設備	現状+1台	現状
工程d設備	現状+1台	現状
工程e設備	現状	現状

表 8 SN比 η の確認実験結果

	推定 (db)	確認実験 (db)
最適	27.20	26.49
現状	10.73	10.74
利得	16.47	15.75
効果		バラツキ 84%減

表 9 感度Sの確認実験結果

	推定 (db)	確認実験 (db)
最適	19.30	19.08
現状	17.72	17.72
利得	1.58	1.36
効果		生産能力 17%UP

以上のように、品質工学とシミュレーションを用いた本手法により、生産数バラツキが約85%減少し、生産数が約17%増加する条件を求めることができた。

6. 結言

本報告では、ジョブショップ型である金型生産システムに、シミュレーションを適用した。本手法を用い

ることで、生産能力を向上させるための適正な技能員数や技能員の運用ルール、納期遵守率を向上させるための適正なスケジューリングルールの把握が可能となった。また、実際の金型生産システムに適用したところ、生産性の向上が確認できた。

更に、シミュレーションと品質工学を用いる手法を適用した。本手法を用いることで、複雑な挙動を示す生産システムでも、従来の約1/30の実験回数で、生産数バラツキ減少、生産数の増大に関する有益な情報が得られることが分かった。また、適正な資源の投入方法が分かった。

以上によって、ジョブショップ型生産システムにおいて、システム評価技術が有効であることが分かった。

参考文献

- 1) 梅田茂樹, 森戸 晋: 離散系シミュレーションを取り巻く実態と展望, オペレーションズ・リサーチ, Vol.38, No.11 pp.5-9(1993)
- 2) 「日経デジタルエンジニアリング」, 日経 BP 社, No.3(1998)
- 3) 布施雅彦, 神垣敏光, 茂木 久: 生産システム評価技術を用いた生産性向上活動事例, 日本能率協会'98IE 全国大会講演予稿集, C2-6-1-C2-6-8(1998)
- 4) 神垣敏光: 自動加工ライン設計におけるシミュレーション評価技術の適用, 日本設備管理学会誌, Vol.5, No.4 pp.34-43(1994)
- 5) 田中孝一郎, 鷺谷武明, 神垣敏光: シミュレーションと品質工学を適用した金型生産システムの生産性評価, ゼクセルテックレビュー, No.15 pp54-60(1998)
- 6) 田口玄一: “開発設計段階の品質工学”, 品質工学講座第1巻, 日本規格協会(1988)
- 7) 田口玄一: “品質工学の定義とタグチメソッド” 品質工学, Vol.1, No.2, pp.2-7(1992)
- 8) 田中孝一郎, 神垣敏光: ジョブショップ型生産システムにおけるシミュレーション評価技術の適用, 日本機械学会関東支部ブロック合同講演会-'97 桐生 講演論文集, pp182-183(1997)
- 9) 田中克己, 石井信明: 「スケジューリングとシミュレーション」, 計測自動制御学会, 初版(1995)