生産システムの柔軟性とシステム更新による 生産変動への対応*

大場 史憲**・高庄 幸孝***・村山 長**

A Study to Cope with the Demand Variation by Flexibility and Reconstruction of the Manufacturing System*

Fuminori OBA**, Yukitaka KOSYO*** and Takeshi MURAYAMA**

This paper deals with the problem to decide how much flexibility should be given to the manufacturing system, when and how replacement in the facilities should be carried out to cope with the demand variation over the service life of the system. To make these decisions, the evaluation items, such as the cost for equipments, the operating cost, the cost for replacements and revenues, are considered as a cash-flow over the planning horizon. A method based on the optimality principle in dynamic programming is proposed for deciding the optimum reconstruction plan in which the net present worth of the cash-flow is adopted as the criterion for optimality. A numerical example is given to demonstrate the advantage of our method for reconstructing the system compared with the usual method in which the flexibility of the system is only considered to cope with the demand variation.

1. 緒言

最近のフレキシブル生産システム (FMS) では、多種類の部品を加工するための機能の柔軟性 (フレキシビリティ) を備えるべきであることは言うまでもないが、それにも増して生産対象の変動にどのように対処すべきかが重要な課題となっている。すなわち、FMS の設計時点で、対象となる部品群の生産に必要な機能を備えたシステムを設計したとしても、対象部品の種類や各部品の生産量が変化した場合、適切に対応できるかどうかが問題となる。たとえば、新しく対象となった部品の加工に必要な機能が備わっていなかったり、機能的には生産可能であったとしても生産工程が複雑になり極めて生産効率が劣る場合や、設備の容量 (量的な生産能力) が不足する場合には、新しい設備の導入が必要となる。また逆に、設計時点で将来の生産要求を予測し、あらかじめ必要以上の

機能を付加したり、設備容量 (機械台数など) を大きくして、冗長なシステムにすると、生産期間全体にわたる設備稼働率が低下し、部品一個当りのコストが高くなるため経済的にシステムの存続が不可能となる場合が起こりうる。

上記の問題点を解決するために、従来、システムの柔軟性と加工コストの観点から生産システムを評価する方法¹⁾や、システムの柔軟性と設備コストのトレードオフにより適切なシステム構成を決定する方法²⁾、および柔軟性の不足に起因する機会損失を考慮して総生産費用を最小とするシステム構成を決定する方法³⁾などが提案されている。これらの方法は、システムの設計時点で対象部品の種類と生産量について将来の変動の予測が立てられる場合に、経済性を考慮した上でシステムに柔軟性を持たせることにより、その変動に対処しようとするものである。

しかし、システムの柔軟性によってのみ変動に対処することは経済的に得策と言えないばかりでなく、その前提となっているシステムのライフサイクルにわたる長期の生産変動の予測を立てることは極めて困難である。そこで、システムにある程度の柔軟性を持たせるとともに、適切な時期にシステムの設備構成を変更することが考え

* 原稿受付 1995 年 5 月 8 日

** 広島大学 工学部 Faculty of Engineering, Hiroshima University; 1-4-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739, JAPAN

*** 宮崎大学 工学部 Faculty of Engineering, Miyazaki University; 1-1 Gakuen-Kihanadai-Nishi, Miyazaki 889-21, JAPAN

Key Words: production system, FMS, flexibility, reconstruction planning, cash-flow.

られる。この場合、システムに大きな柔軟性を持たせると設備の更新は少なくともすむ代わりに、設備コストの負担から部品一個当りの生産費用が膨大となり、逆に、柔軟性を小さくすると頻繁に設備更新を行わなければならない、そのためにやはり一個当りの生産費用は膨大となる。このトレードオフ問題を解決するために、システムにどのような柔軟性を持たせ、いつの時点でどのような内容の設備更新を行えば良いかを、生産要求の変動に応じて決定する必要がある。しかし、従来このような問題に取り組んでいる研究は見当たらない。

本研究では、生産システムのライフサイクルにわたる設備の導入・更新などに伴う資金の流れ（キャッシュフロー）に着目し、全体的なシステムの経済性を評価する⁴⁾ことにより、適切な柔軟性を持ったシステムの構成と更新時期を決定する問題に対する一つのアプローチを提案する。その基本的な考え方は、ダイナミックプログラミング（DP）における最適性の原理を基礎としてシステム更新時期を決定し、システムの設備構成を、その使用期間中の総生産費用が最小となるように決定することである。これにより、システムが持つべき柔軟性とその更新時期が自動的に決定されることになる。ただし、ここでは生産システムに付与される柔軟性とシステム構成の部分的な改修による生産変動への対応を取り扱い、機械部品の加工システムのような生産システムを対象としている。

2. 一定期間における最適生産システムの決定

ここでは、ある一定期間、システムの設備構成を変更しないで生産する場合に、適切なシステム構成としてその期間における総生産費用が最小となるような構成を求める。ここで求められる生産システムは、後で、適切なシステム更新時期を決定するプロセスにおいて必要な候補システムとなるものである。この問題に対するアプローチはすでに報告しているので³⁾、ここではその概略を述べる。

生産計画に基づき、与えられた一定期間に生産すべき部品の種類 P_i ($i=1, \dots, I$; I は部品の総種類数) とその個数 d_i ($i=1, \dots, I$) が与えられるものとする。各部品 P_i ($i=1, \dots, I$) の生産は、加工工程 q_j ($j=1, \dots, J$; J は工程の総種類数) のいくつかを必要とし、各工程の処理量（加工量）を w_{ij} とする（部品 P_i に工程 q_j が含まれていないとき $w_{ij}=0$ とする）。このとき、生産すべき全部品に対する工程 q_j の総処理量 Q_j は次式で与えられる。

$$Q_j = \sum_{i=1}^I w_{ij} d_i \quad (j=1, 2, \dots, J) \quad (1)$$

工程 q_j は、加工機械 M_k ($k=1, \dots, K$; K は機械の総種類数) の内のいくつかの代替機械で処理可能とし、総処理量 Q_j を各機械 M_k に x_{jk} ずつ負荷配分するものとする（機械 M_k が工程 q_j を処理不可能なとき $x_{jk}=0$ とする）。このとき、次式が成立する。

$$\sum_{k=1}^K x_{jk} = Q_j \quad (j=1, 2, \dots, J) \quad (2)$$

また、機械 M_k での工程 q_j の処理速度を V_{jk} （処理不可能のとき $V_{jk}=0$ とすると、機械 M_k で処理するすべての工程の全処理時間は次式で与えられる。

$$\sum_{j=1}^J \frac{x_{jk}}{V_{jk}} \quad (k=1, 2, \dots, K) \quad (3)$$

(ただし、 $V_{jk} \neq 0$ である。)

したがって、与えられた期間内での機械 M_k の稼動可能時間を A_k とすると、機械 M_k の必要台数 R_k は次式で与えられる。

$$R_k = \sum_{j=1}^J \frac{x_{jk}}{A_k V_{jk}} \quad (k=1, 2, \dots, K) \quad (4)$$

しかし、この R_k の値は整数数ではないので正確には台数ではなく、以下では必要容量と呼ぶことにする。

つぎに、評価規範としてシステムの運転費用と固定費用からなる総生産費用を考える。運転費用は機械の稼動に伴って発生する費用であるから、機械 M_k の単位時間当りの運転費用を C_k^U とすると、システム全体の運転費用 C^R は次のようになる。

$$C^R = \sum_{k=1}^K C_k^U \sum_{j=1}^J \frac{x_{jk}}{V_{jk}} \quad (5)$$

固定費用として、ここでは機械選定に主要な影響を及ぼす設備償却費のみを考慮する。機械 M_k の購入費用を C_k^M 、耐用寿命を L_k とすると、与えられた一定期間 T における機械 M_k 一台当りの償却費 C_k^D は、

$$C_k^D = C_k^M \frac{T}{L_k} \quad (k=1, 2, \dots, K) \quad (6)$$

となり、システムに含まれる全機械の設備償却費 C^F は、機械 M_k の台数をその必要容量 R_k で近似すると次式で与えられる。

$$C^F = \sum_{k=1}^K C_k^D R_k \quad (7)$$

ただし、(6) 式、(7) 式の設備償却費は、定額法に基づくものである。このほかに定率法や生産高比例法が採用される場合もあるが、そのような場合には、これらの式を

対応する算定式に置き換える必要がある。以上により、与えられた期間 T における総生産費用 C^T は次式で与えられる。

$$C^T = C^R + C^F \\ = \sum_{k=1}^K \left(C_k^U + \frac{C_k^D}{A_k} \right) \sum_{j=1}^J \frac{x_{jk}}{V_{jk}} \quad (8)$$

以上のようにして、一定期間で用いられる生産システムの適切な機械構成とその必要容量を求めるために、まず、(2) 式の制約を満たし、(8) 式の総生産費用を最小とするように、次の線形計画問題を解いて、加工工程の適切な機械への負荷配分量 x_{jk} を求める。

$$\text{minimize } C^T(x_{jk}) \quad \text{under constraints eq. (2) (9)}$$

つぎに、上の結果を用いて (4) 式により各機械の必要容量 R_k を求める。

(9) 式の問題は、シンプレックス法により簡単に解けるが、その結果得られる機械の必要容量 R_k は整数ではないので、機械台数を求めるためにはこれを整数化する必要がある。この場合、(9) 式を解いた結果、選択された機械(必要容量 R_k が 0 でない機械)の容量 R_k の小数点以下をすべて切り上げたものを各機械の台数とすると冗長なシステムとなり、総生産費用が大幅に増大する可能性がある。そこで、各機械の必要容量 R_k の小数点以下を切り上げた場合と切り捨てた場合を考えてそれぞれの機械台数を設定し、各場合に対して、(9) 式に次の容量制約を付加した線形計画問題を解くことにより、負荷 (x_{jk}) の再配分を行うことを考える。

$$R_k \leq R_k^* \quad (k=1,2,\dots,K^*) \quad (10)$$

ここに、 R_k は (4) 式で与えられる機械 M_k の必要容量、 R_k^* は設定された機械台数、 K^* はさきに選択された機械の種類数 ($\leq K$) である。また、総生産費用 C^T のうちの設備償却費 C^F ((7) 式) は、設定された機械台数 R_k^* を用いて次のように置き換えられる

$$C^F = \sum_{k=1}^{K^*} C_k^D \cdot R_k^* \quad (7')$$

(10) 式の制約を付加することにより、さきの負荷配分 (x_{jk}) の決定で、必要容量 R_k が R_k^* を超えている機械 (R_k の小数点以下を切り捨てた機械) の負荷量が他の代替機械に再配分されることになる。

上の問題において、機械台数の設定の仕方は、選択された機械の種類数が K^* であるとき、 2^{K^*} 通りの組み合わせが存在する。そのすべての場合について上の問題を解き、総生産費用が最小となるとき機械台数の組み合わせ

が求める最適機械台数を与える。

しかし、 K^* が大きい場合には、機械台数設定の組み合わせの数が膨大になるので、効率的な解法が必要となる。そのために参考文献 3) において、分岐限界法を適用した効率的な解法を提案した。現実には、処理すべき加工工程に対して適切に対応できる代替機械の種類はそれほど多くなく、さらに (9) 式の問題を解いた結果選択される機械の種類数 K^* は全候補機械の一部となるので、それほど大きくならず、提案手法で対応できるものと考えられる。

また、より一般的に、内作費と外作費との兼ね合いからシステム内での生産とともに外作をも考慮すると、上の問題は次のようになる。ただし、外注については、自社のノウハウの保護や協力企業の育成など政策的な要因により左右されることが多いが、以下では、製作コストのみを考慮する。したがって、以下の記述において、政策的に内作とする工程については、その外作量を 0 とし、外作する工程については、その工程のすべてを外作量とするなどの措置が必要となる。

総生産費用 $C^{T'}$ は、(5) 式で与えられる運転費用 C^R と (7') 式の設備償却費 $C^{F'}$ と外作費 C^E の和として次式で与えられる。

$$C^{T'} = C^R + C^{F'} + C^E \quad (8')$$

ここで、外作費 C^E は、工程 q_j の外作量を e_j とし、その単位処理量当りの外作費用を C_j^E とすれば、次式で与えられる。

$$C^E = \sum_{j=1}^J C_j^E \cdot e_j \quad (11)$$

また、各機械への負荷配分に関する制約式 (2) 式は、外作量 e_j を考慮すると、次式のようにになる。

$$e_j + \sum_{k=1}^K x_{jk} = Q_j \quad (j=1,2,\dots,J) \quad (2')$$

したがって、問題は (2)' 式、(8)' 式、(10) 式を用いて次のように記述できる。

$$\text{minimize } C^{T'} \quad \text{under constraints eqs. (2)' and (10)} \quad (12)$$

この問題において、(10) 式の機械台数 R_k^* は、(9) 式の問題を解いて得られる最適機械容量 R_k を用いて、内作費用と外作費用の関係から合理的に設定できる。すなわち、 R_k の小数部分の機械容量に相当する工程処理量を外作した場合の外作費用と、小数部分に対して機械 M_k を一台導入して内作するときの生産費用を比較し、外作費用が小さい時、小数部分を切り捨てた整数を機械 M_k の台数 R_k^*

とし、内作費用が小さいとき、切り上げた整数を R_k^* とする。ただし、このように設定した機械台数は最適であるとは限らないので、最適性を追求するには、前述の場合と同様に分岐限界法の適用が必要となるが、その場合でも、設定した機械台数を可能解として利用することにより、効率よく最適解を得ることができる。

3. キャッシュフローと正味現価

生産システムのライフサイクルは通常数年以上に及ぶので、システムの経済性を評価するためには、その運用期間の各時点で発生する収益や費用を資金の流れ（キャッシュフロー）として把握し、それを一定時点の価値に換算して評価する必要がある。すなわち、資金利率を考慮すると、各資金の発生時点によってシステムの価値は変わるので、ここでは、現在（計画初期時点）の価値（正味現価；NPW(Net Present Worth)）に換算して評価するものとする。

まず、システムの設備更新も含む全運用期間（計画期間） TP を適当な N 個の単位期間に分割し、各単位期間で発生する収益や費用を Fig. 1 のように表す。図において、上向きの矢印で表す R_t^E は、第 t 期末に得られる報収であり、その単位期間における生産量に比例して得られる収益から、その生産に必要なシステムの運転費用を差し引いたものとして与えられる。下向きの矢印で表される初期投資額 C^I は、最初にシステムに導入される全機械設備の購入総額で与えられる。また、 C_t^A は第 t 期始めに設備更新を行う場合にのみ発生するシステム改修費用であり、新設機械の購入費用 C^N 、機械の設置および撤去費用 C^C 、システム改修に伴う機会損失費用 C^L の和から撤去機械の残存価値 V^R を差し引いた額として次式で与えられる。

$$C_t^A = C^N + C^C + C^L - V^R \quad (13)$$

ここで、機会損失費用は、システム改修のためにシステム

が停止し、得ることの出来なかった報収である。また、撤去機械の残存価値は、機械購入費用からそれまでの設備償却費を引いた額で与えられる。上式の各費用項目は、改修の内容に応じて当然存在する場合としない場合がある。

以上のキャッシュフローに対して、単位期間の計算利率 i を考慮すると、システムの正味現価 NPW は次式で与えられる。ここで、計算利率 i として前述の資金利率を用い、全期間にわたって一定とする。ただし、資金利率の予測が可能な場合は、利率の変動を考慮して次式を修正することにより対応することができる。

$$NPW = \sum_{t=1}^N \frac{R_t^E - C_t^A}{(1+i)^t} - C^I \quad (14)$$

以後のシステム改修時期の決定においては、上式で与えられるシステムの正味現価を経済性評価の基準として用いる。

4. システム改修時期の決定

需要の変動に応じて生産システムをいつ改修すべきかは、2. で論じた生産システムが生産変動に対してどの程度の柔軟性を備えているかに依存する。システムの持つ柔軟性と改修時期およびその内容によって、そのシステムの全運用期間（計画期間）におけるキャッシュフローは異なり、システムの正味現価は異なったものとなる。そこで、ここでは、与えられた需要変動に対して、システムの正味現価が最大となるように、システムの機械設備構成およびシステム改修時期を決定する。

解法の説明を明快にするために、Fig. 2 の例を用いて説明する。この例では、計画期間を4年とし、それを横軸にとり、8個の単位期間に分割して考える。一般に、全計画期間にわたってあらかじめ正確な需要予測を立てることが困難な場合も多いので、ここでは、途中で需要予測をやり直す場合でも取り扱えるように、最初の予測で第1期から第4期の需要を予測し、第4期末に第5期から第8期までの需要を予測する場合を考える。

Fig. 2 は、ダイナミックプログラミング (DP) の最適性の原理を適用して、システム改修計画を求める手順を示したものである。図において、印「|」で仕切られた各横線は、それぞれの長さに対応する期間におけるシステム改修計画を示したものであり、第1期始め（左端）の「|」は初期のシステム構成を示し、横線途中の「|」はその時点でシステムを改修することを示し、横線右端の「|」はその時点でシステムの残存価値を残して当該システムの運用を打ち切ることを示す。以下に解法の手順を説明する。

まず、第1期の計画（1番上の横線）で、第1期の需要量を生産するための最小総生産費用を与えるシステムの

Fig. 1 Cash flow over the time horizon

Fig. 2 Dynamic programming approach for determining optimum time points to reconstruct the manufacturing system

構成を求める。つぎに、第1期と第2期の需要量を生産するときのシステム計画(2番目と3番目の横線)を考える。2番目の横線は、第1期の需要に対する最適システムを用いて第1期の生産を行い、第2期始めに第2期の需要に対する最適システムに改修して第2期の生産を行うことを示す。3番目の横線は第1期、第2期を通じて改修しないという条件で総生産費用最小となるシステムを構成し、そのシステムで第1期、第2期を通して生産することを示す。両者を比較してその正味現価の大きい方がその期間の最適計画となる(図の例では○の付いているもの、すなわち、第1期、第2期の需要を改修しないで生産するシステムが最適であったとしている)。同様に、第1期から第3期までのシステム計画(4番目から6番目の横線)を考える。これらは、それぞれ第3期始めに改修を行う場合、第2期始めに改修を行う場合、改修を行わない場合である。ここで最適性の原理が適用できる。すなわち、第3期始めに改修を行う場合(4番目の横線)、それ以前の第1期、第2期のシステム計画は最適でなければならないから、先に求めた第2期までの最適計画(す

なわち、第1期、第2期を改修しないで生産する)が自動的に採用される。図ではその部分を太線で示している。したがってこの場合、第3期の需要に対する総生産費用最小のシステムを求めるだけでよい。同様に、第2期始めに改修する場合(5番目の横線)、第2期、第3期を改修しないで生産する総生産費用最小のシステムを求めればよい。最後に、第1期から第3期を改修しないで生産する総生産費用最小のシステム(6番目の横線)を求め、これら三者の正味現価を比較し、その最大のもの(○印)がこの期間の最適システム計画となる。最適性の原理の適用は、第1期から第4期までのシステム計画(7番目から10番目の横線)においてより顕著である。これらは、この期間での最終の改修時期を第4期始め、第3期始め、第2期始め、第1期始め(途中改修しない)とした場合である。最適性の原理により、これらの最終改修時点以前のシステム計画は最適でなければならないから、それまでに求まっている最適計画が採用される(太線部分)。したがって、ここで求めるべきは、それぞれの最終改修時期からその期間の最終期までを改修しないで生産するときの総生産費用最小のシステムである。そして、各システム計画の正味現価の最大のものが最適計画となる。

以上により、当初の需要予測に基づく第1期から第4期までの最適システム計画(8番目の横線)が求まったので、その計画が実行に移される。そして、第4期末になった(現時点が第4期末に移行した)とき、再び需要予測が行われ、第5期以降のシステム計画(11番目以降の横線)が立てられる。この時、同様の手順が用いられるが、この時点(第5期始め)では、それまで使用中のシステムが存在するので、第5期始めには、改修を行わずに旧システムを継続して使用する場合も候補計画として考慮する必要がある。図において第5期以降の候補計画の中で、第5期始めに「|」の付いていない計画がそれに相当する。たとえば、12番目の計画では8番目の計画(第1期から第4期の最適計画)の第3期と第4期で使用中のシステムをそのまま用いて第5期の生産を行うことを意味する。以下、前と同様に最適性の原理を適用して、第5期から第8期までの最適計画を求めることができる。この例では、22番目の計画が最適となっている。結局、第1期から第4期までの最適計画(8番目)と第5期から8期までの最適計画(22番目)を統合して、図の一番下に示したシステム計画が得られる。すなわち、最初に第1期、第2期の生産を総生産費用最小で行うシステムを構成し、第3期始めに、第3期、第4期の生産を総生産費用最小で行うシステムに改修し、そのまま第5期までの生産を行い、第6期始めに、第6期から第8期までの生産を総生産費用最小で行うシステムに改修する。

以上では、Fig. 2 の例によって、システム改修計画を求める手順を示したが、その説明から明らかなように一般の場合にも適用できる。以下に一般の場合についての手順をまとめる。

まず、当初の需要予測に基づいて、第1期の生産を総生産費用最小で行うシステム構成を求め、その正味現価を NPW_1 とする。つぎに、第1期から第 t 期までの最適計画を求める。ただし、 t は2以上で次の需要予測が行われるまでの期とする。いま、第1期から第 t 期までの間で、最後のシステム改修が行われる時点を第 s 期始めとし、第 s 期から第 t 期までの生産を総生産費用最小で行うシステムを求め、その正味現価を NPW_t^s とする。また、第1期から第 $s-1$ 期までの最適なシステム改修計画で得られる正味現価を NPW_{s-1} とする。ただし、 $s=1$ のとき、 $s-1=0$ となりシステムが存在しないので、 $NPW_0=0$ とおく。このとき、最適性の原理は次のように記述できる。すなわち、「第1期から第 t 期までの改修計画が最適であるためには、その期間の最後の改修がいつ行われようと、それ以前の改修計画は最適でなければならない。」この最適性の原理を適用すると、第1期から第 t 期までの最適なシステム改修計画は、次の正味現価の関係式によって与えられる。

$$NPW_t = \max_{1 \leq s \leq t} \{NPW_t^s + NPW_{s-1}\} \quad (15)$$

この式を用いて、 $t=2$ から順次、次の需要予測が行われるまで（その時期を $t=T_1$ の期末とする）再帰的に最適計画を求める。このようにして、第 T_1 期までの最適改修計画が求まると、それを実行に移す。そして、第 T_1 期末に新しい需要予測が行われると、それに基づいて第 T_1+1 期から後の改修計画が前と同様の手順で求められる。このとき、現在時点が第 T_1+1 期始めになっているので、第 T_1+1 期を第1期として (14) 式が適用され、正味現価は第 T_1+1 期始め（現在時点）の値として評価される。ただし、 NPW_t^1 は、新しい計画の第1期（すなわち第 T_1+1 期）から第 t 期（すなわち第 T_1+t 期）まで用いるシステムの正味現価であるが、第1期 (T_1+1) 始めに旧システムを改修する場合と、改修しないで旧システムをそのまま用いる場合の正味現価を比較し、その大きい方が採用される。

さらに需要予測が繰り返される場合にも、同様の手順を適用することにより最適なシステム改修計画が求められる。

5. 数値計算例

ここでは、Fig. 3 に示すように、4年間の生産計画に対する生産システムの改修計画を考える。ただし、全期間

Table 5 Revenue for each part RE_i [¥/piece]

P_i	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
RE_i [¥/piece]	1,000	10,000	7,500	3,500	15,000

Return in unit period t , R_t^E , is given by

$$R_t^E = \sum_{i=1}^5 RE_i \cdot d_{it} - C_t^R$$

where, d_{it} is the number of part P_i produced in the period t , C_t^R is the running cost in the period t

Fig. 3 Quantity of parts to be produced in each period

の需要が計画当初にわかっているわけではない。まず、4年間を8期に分割し、計画当初に第1期から第4期までの4期分の需要予測を行い、その結果、第1期から第4期までに生産すべき5種類の部品の生産量が与えられる。これに対して生産システムの計画を立て、4期末になった時点で、2回目の需要予測を行い、第5期から第8期までに生産すべき部品の生産量を求めて、これに対して生産システムの計画を立てるものとする。

生産対象となっている5種類の部品 $P_1 \sim P_5$ は、それぞれ Table 1 に示すような加工工程 q_j を含むものとする。Table 1 には各部品 P_i に含まれる各加工工程 q_j の処理量 w_{ij} が示されている。ただし、 $w_{ij}=0$ は部品 P_i に工程 q_i が含まれないことを意味する。Table 2 は、各工程 q_j を処理することができる代替機械の種類 M_k と各機械 M_k で各工程 q_j を処理するときの処理速度 V_{jk} を示し

Table 1 Volume to be removed in each cutting process per part w_{ij} [cm^3/part]if $w_{ij} = 0$, the part P_i does not include the process q_j

cutting process q_j Part P_i	q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	q_6	q_7	q_8	q_9	q_{10}	q_{11}	q_{12}
P_1	0	0	100	0	0	0	330	0	0	0	0	220
P_2	250	0	0	0	0	240	0	0	130	0	0	0
P_3	0	0	110	0	0	210	0	100	0	0	300	0
P_4	0	0	0	200	210	0	0	0	110	0	0	0
P_5	0	200	90	0	0	220	0	190	0	80	0	0

Table 2 Processing speed of each process on each machine tool V_{jk} [cm^3/min]if $V_{jk} = 0$, the process q_j can not be processed on the machine M_k

machine tool M_k cutting process q_j	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9	M_{10}	M_{11}	M_{12}	M_{13}	M_{14}
q_1	15	33	28	41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
q_2	30	26	63	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
q_3	13	47	29	51	0	0	0	0	32	0	0	0	0	27
q_4	11	0	32	28	0	0	0	0	0	25	0	0	31	0
q_5	55	0	42	0	0	28	0	0	0	0	0	35	0	0
q_6	32	28	0	29	0	0	0	42	0	0	0	0	0	0
q_7	54	31	48	37	0	0	0	0	0	0	39	0	0	0
q_8	51	42	21	38	0	0	0	0	43	0	0	0	0	0
q_9	0	68	33	0	0	0	65	0	0	0	0	0	0	0
q_{10}	0	0	0	32	0	0	58	0	65	0	0	0	0	0
q_{11}	0	0	48	0	0	0	0	0	0	0	33	0	27	0
q_{12}	0	0	0	75	0	0	0	0	0	0	66	0	0	55

Table 3 Information on machine tool

	machine tool M_k													
	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9	M_{10}	M_{11}	M_{12}	M_{13}	M_{14}
cost of machine C_k^M [$\times 10^7$ ¥]	4.20	5.11	3.80	4.50	1.25	1.10	1.30	1.15	1.60	1.20	1.54	1.15	1.50	1.30
feasible running time A_k [hour/week]	117	112	121	98	131	139	125	114	123	150	135	123	119	137

Table 4 Outside order cost C_j^E [¥/ cm^3] for each process q_j

q_j	q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	q_6	q_7	q_8	q_9	q_{10}	q_{11}	q_{12}
C_j^E [¥/ cm^3]	1319	466	550	475	319	181	183	158	102	109	182	89

ている。ただし、 $V_{jk}=0$ は、機械 M_k で工程 q_j を処理できないことを示す。この表において、機械 M_1 から M_4 は、マシニングセンタやターニングセンタなどのように多くの工程を処理できる多機能工作機械を想定し、機械 M_5 から M_{14} は汎用工作機械を想定している。Table 3 は工作機械情報を与えるものであり、各機械 M_k の価格 C_k^M 、稼動可能時間 A_k を示している。なお、各機械の運転費用 C_k^U はいずれも 3,640 円/時間、耐用年数 L_k は 4 年、設置工事費用は 90 万円、撤去費用は 50 万円としている。さらに、この例では外作をも考慮し、各工程 q_j の単位処理量当りの外作費用 C_j^F は Table 4 に与えられるものとする。また、各部品 1 個当りの収益は Table 5 に示されるものとする。また、キャッシュフローから現在価値を求めるときの計算利率 i は、単位期間（半年）に対して、 $i=0.03$ とし、全期間にわたって一定とする。

以上のようなデータに基づいて、最適生産システムの改修計画と各システムの設備構成を求めた結果を Fig. 4 に示す。この例では、Fig. 4(a) に見られるように、第 1 期、第 2 期をシステム A で生産し、第 3 期始めにシステム B にシステム構成を変更し、そのシステムで第 3 期、第 4 期の生産を行い、第 5 期始めにシステム C に改修し、第 5 期と第 6 期を生産して、第 7 期始めにシステム D に改修して第 7 期と第 8 期の生産を行えば良いことが分かる。Fig. 4(b) には、これらの各システムの機械設備構成、すなわち選択された機械の種類とそれぞれの台数を示している。第 3 期始めのシステム A からシステム B への改修では、Fig. 3 の生産量の変動に対応して、機械 M_1 と M_3 がそれぞれ 1 台から 2 台へ 1 台ずつ増設され、 M_4

が 3 台から 5 台へ 2 台増設され、 M_5 が 2 台から 3 台へ 1 台増設され、システム A では採用されていなかった機械 M_7 が 1 台新設され、 M_8 が 4 台から 7 台へ 3 台増設され、 M_9 が 3 台から 5 台へ 2 台増設され、 M_{11} と M_{13} がそれぞれ 2 台から 3 台へ 1 台ずつ増設されている。システム B から C、システム C から D への変更も同様に同図から読みとることができる。なお、同図に現れていない機械は、すべてどのシステムでも採用されなかった機械である。この結果から、需要の増減に応じて、比較的安価な汎用機械 (M_5 から M_{13}) の増設、撤去がよく行われ、高価な機械の変更は少ないことがわかる。これは、実際によく行われていることの理論的妥当性を示すものであり非常に興味深い結果である。

上で得られたシステム改修計画に基づいて、システムを運用したときのキャッシュフローを第 1 期当初の値に換算して評価したときの正味現価は 1.39×10^9 円となる。このとき、各単位期間 t における内作費用 C_t^I と外作費用 C_t^F は Table 6 のようである。ここで、内作費用は単位期間 t における運転費用と設備償却費の和で与えられる。各期における内作工程と外作工程の詳細についてはデータ量が多いため表示できないが、外作に出された工程は、 $q_6, q_7, q_8, q_9, q_{11}, q_{12}$ であり、Table 4 から、これらの工程は外作費用の安い、付加価値の低い工程であることがわかる。これは実際の外注政策で経験的によく用いられる方法である。しかし、外作費用の安い工程から外作に出せば良いという単純なものではなく、部品構成と機械設備の能力から決まるもので、実際この例でも、工程 q_{10} は外作費用が安いにもかかわらず内作されている。

なお、従来の研究にみられるように、全期間（第 1 期～第 8 期）にわたってシステムを改修しないという条件のもとで、第 1 期当初に全期間の需要量が既知であるとして、総生産費用最小とするシステムを求めると Table 7 のようなシステム構成となる。このシステムを用いて全期間の生産を行ったときの正味現価は、 1.24×10^9 円となる。すなわち、現在価値で比較して、本手法で求めた最適計画に基づくシステムは、1.5 億円（約 12%）価値が高いことになる。実際には、第 1 期当初に全期間にわたる需要を正確に予測することは困難であるので、Table 7 のようなシステムを得ることは困難であり、その差はさらに大きなものとなる。また、全期間を一つのシステムで生産するとして求めた Table 7 の最適システムは、Fig. 4(b) の各システムの構成と比較すればわかるように、比較的規模の小さいシステムとなっている。なお、このシステムにおける各単位期間での内作費用と外作費用は、Table 8 のようである。このことから、全期間にわたって大きなフレキシビリティを持つシステムを構成することは適切

Fig. 4 Optimum reconstruction plan and the number of machine tools included in each system

Table 6 In-house production cost C_t^I [¥] and outside order cost C_t^E [¥] in each unit period t

t	1	2	3	4	5	6	7	8
C_t^I $\times 10^8$ [¥]	2.437	2.537	4.244	4.383	5.269	5.233	4.801	4.761
C_t^E $\times 10^8$ [¥]	0.224	1.505	0.083	1.284	1.228	0.650	0.814	0.281

Table 7 The number of machine tools included in the optimum system which is operated through entire periods with no reconstruction

Machine	M_1	M_3	M_4	M_5	M_7	M_8	M_9	M_{11}	M_{13}
The number of machine	1	2	5	3	1	7	5	3	3

Table 8 In-house production cost C_t^I [¥] and outside order cost C_t^E [¥] in each unit period t for the system in Table 7

t	1	2	3	4	5	6	7	8
C_t^I $\times 10^8$ [¥]	2.563	3.456	4.063	4.203	4.203	4.203	4.203	4.190
C_t^E $\times 10^8$ [¥]	0	0	0.414	1.655	3.358	2.622	1.894	1.225

でないことがわかる。

つぎに、理想的な場合として、第1期当初に全期間の需要量が既知とした場合に、提案手法を適用して第1期から第8期までの全期間にわたる最適なシステム改修計画を求める。この場合の最適解は、一般には需要予測の見直しを行う場合よりも良い解が得られる。しかし、本計算例に対して理想的な場合の最適解を求めた結果、需要予測を見直したときの解 (Fig. 4) と同じ結果が得られた。これは、理想的な場合の第1期から第8期までの最適解における第1解から第4期までの計画と、第4期末で需要予測を見直した場合の第1期から第4期までの最適計画が一致したためである。

以上の結果より、需要の変動に応じて、外作を考慮して適切なフレキシビリティを備えたシステムを構成し、適切な時期に適切なシステム更新を行うことにより、大きな効果が得られることがわかる。

なお、本数値計算例を解くために用いた計算機は、NECのPC-9801VX (クロック周波数 10MHz, CPU: 80286) であり、使用言語は PROFORTRAN77 である。また、

Fig. 4 の最適解を求めるために要した計算時間は約 24.5 分であった。計算時間は計画期間の長さに大きく依存するが、需要予測の見直しを行う場合は、予測時間の間隔によって計算量が定まり、全体の計画期間が長くなっても、計算量は比例的にしか増加しない。

6. 結言

本論文では、生産変動に対応するために、生産システムにどのようなフレキシビリティを持たせるべきか、また、いつどのようなシステム改修を行うべきかという問題を取り扱った。結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 生産システムの全計画期間にわたる、収益、運転費用、設備費用、システム改修費用などをキャッシュフローとして把握し、その正味現価を評価することによって、適切なシステム構成とシステム改修時期を決定する新しい考え方を示した。
- (2) 適切なシステム改修時期を決定するために、ダイナミックプログラミングにおける最適性の原理を適用した効率的な方法を提案した。

(3) 数値計算例を示し、次のような知見を得た。

- (a) 従来のように、フレキシビリティの付加によってのみ生産変動に対応する方法と比較して、適切なシステム改修を考慮することによって大きな効果が得られることがわかった。
- (b) 生産システムの改修に当って、安価な汎用機械の増設、撤去により対応することが適切である。
- (c) 外作費用を考慮に入れることによって、従来困難とされていた外注政策に対して、製作コストの面から適切な指針を与えることができる。

なお、本論文で提案した、生産変動に応じてシステムの構成を変更していく考え方は、次世代工場システムとして提案されている工場ドームの考え方⁵⁾に通じるものであり、今後ますます重要になるものと思われる。

今後の研究の展開としては、本手法を、生産計画、負荷計画などと統合することにより、総合的な効果を追求すること、生産スケジューリング、ショップフロアコントロールと統合することにより、生産現場での実現可能性を保証することなどが考えられる。

参 考 文 献

- 1) 伊東, 大見, 島: フレキシブル生産システム (FMS) の評価方法 (柔軟性評価ベクトルの概念と二, 三の評価例); 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 52, No. 473, pp. 191-198 (1986)
- 2) 山品, 松本, 光行, 岡村: ミックスフレキシビリティを考えた FMS の構成法; 精密工学会誌, Vol. 53, No. 7, pp. 1080-1085 (1987)
- 3) 大場, 高庄, 加藤, 安田: 最適フレキシブル生産システムの設計とロバストシステムの選択; 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 55, No. 519, pp. 2912-2918 (1989)

- 4) 室津, 大場, 米沢, 藤井: システム工学, 森北出版, pp. 18-24 (1980)
- 5) 和田 監修: CIM/MAP 実践絵とき読本, オーム社, pp. 191-197 (1990)