

生産システムにおける階層性について

奥田 和重

1. 緒 言

生産システムを「生産」と「システム」に分けて考えると、「生産」は基本的には「生産とは生産要素（投入物）を有形・無形の経済財（産出物）に変換し、これによって価値を増殖し、効用を生成する機能である」と定義されている¹⁾。他方、「システム」は「適当な関係によって関係づけられた要素の集合である」と定義される²⁾。したがって、生産システムは生産を実現するための要素が有機的に関係づけられた体系であるといえる。生産の定義から、生産システムは入出力システムであると認識できる¹⁾。すなわち、生産要素を投入してこれを生産財に変換するシステムである。生産要素としては、生産財に変換される材料のような生産対象、生産労働力、生産設備などの生産手段、そして生産情報である。産出物である生産財は、製品のような有形財とサービスのよう無形財がある。この生産財をいつ（時間）、どこで（場所）どのような形のもの（形態）を持つ（所有）かによって効用を生じる。投入物を産出物に変換する変換過程が本論で対象とする生産システムで、これは一般的には多段階の生産工程によって構成されている。本論では、このような生産システムに内在する階層性の問題をシステム理論の立場から明らかにする。

原稿受領日 1985年11月29日

- 1) 人見勝人：生産システム工学（増補版），（1983），共立出版。
- 2) 深尾 毅：システム理論入門，（1972），昭晃堂。

2. 一般システムと階層性

2.1 一般システム

システムは[3]に掲げられているように種々の定義がなされている。これは、①集合性：複数の要素によって構成される、②関連性：要素の間には互いに関連がある、③有目的性：単一ないし複数の目的がある、④合環境性：システムをとりまく環境に適應する、によって規定される¹⁾。これらのことよりシステムを定義すると、次のような四つの定義がなされる¹⁾。

(1) 抽象的定義：①、②よりシステムは互いに関連をもつ複数個の要素の集まりである。

(2) 構造的定義：①～④よりシステムは互いに関連をもつ複数個の要素の集まりで、ある環境のもとで規定の目的を達成する。

(3) 変換的定義：④よりシステムは環境から入力を受け、規定の目的を達成する出力を生成する。

(4) 手続的定義：①～④よりシステムは互いに関連をもつ複数個の要素によって規定の目的をある環境のもとで達成させるための処理の流れ(手続)である。

(1)の抽象的定義のもとで展開されているものが一般システム理論で、本論ではこの定義を中心にして以下の議論を行う。

一般システム理論に基づいて一般システムを定義するために語句を次のように定義する⁴⁾。

属性：システムを記述するためにとられたシステムの構成要素。

システム・オブジェクト：システムに対して集合として表現できる属性。

モデル：システムのある一面をとらえて記述したもので、システムのモデルはシステム・オブジェクトによって記述される。

n 種類のシステム・オブジェクト $V_i, i=1, \dots, n$ によって一般システム S

3) 東洋大学付属計算機センター編：経営システムの理論，(1970)，白桃書房。

4) 高原康彦：システム工学の理論，(1974)，日刊工業新聞。

を次のように定義する。

定義1 一般システム：

$$S \subset V_1 \times \dots \times V_n \quad (1)$$

n 個のシステム・オブジェクトのうち、始めの k 個を入力オブジェクト X 、残りの $n-k$ 個を出力オブジェクト Y に分けることのできる一般システムを入出力システムと呼び、次のように定義する。

定義2 入出力システム：

$$S \subset X \times Y \quad (2)$$

ここで、

$$X = V_1 \times \dots \times V_k$$

$$Y = V_{k+1} \times \dots \times V_n$$

S の変域 $D(S)$ と値域 $R(S)$ を

$$D(S) = \{x | (\exists y)(y \in Y \wedge (x, y) \in S)\} \quad (3)$$

$$R(S) = \{y | (\exists x)(x \in X \wedge (x, y) \in S)\} \quad (4)$$

と定義すれば、入出力システムは

$$S \subseteq D(S) \times R(S) \subseteq X \times Y \quad (5)$$

と書くことができる。

入出力システムに目的 G が与えられるならば、この目的を達成するために意思決定を行うシステムを意思決定システムと呼ぶ(図1)。このシステムにおける操作変数の集合を M 、システムのプロセス方程式を $P: M \times X \rightarrow Y$ 、目的関数を $G: M \times X \times Y \rightarrow \mathbf{R}$ とすると、ある意思決定基準 D のもとに、目的を達成するための意思決定は次のように定義できる⁵⁾。

5) 高原康彦：“一般システム理論からみた大規模システムの定式化” システムと制御，

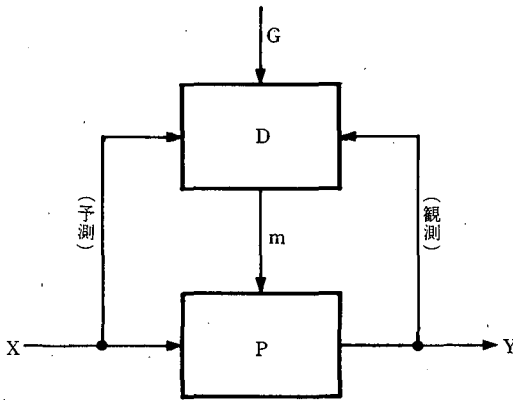


図1 意思決定システム

$$(\forall x)(x \in X \rightarrow D(G(\hat{m}, P(\hat{m}, x)))) \tag{6}$$

ここで、 \hat{m} は解、 $D(G(\cdot, \cdot))$ は目的関数 G が意思決定基準 D を満していることを意味する。もし D が満足化基準であれば、式 (6) は次のようになる。

$$(\forall x)(x \in X \rightarrow G(\hat{m}, P(\hat{m}, x)) \leq T(x)) \tag{6'}$$

ここで、 T は満足度を表わす許容関数 ($T: X \rightarrow \mathbf{R}$) である。

2.2 階層性 (Hierarchy) について

Hierarchy という語は種々の分野で用いられているが、その中心的な考え方はレベルによる記述である⁶⁾。この範疇に入るものとしては、生物の分類、生体、社会や企業の組織などがある。階層構造は、生体のように細胞—組織—器管—有機体という無意識的な場合と、社会のように人—家族—村(町)—都市—国—世界という意識的な場合がある⁶⁾。一方、生物の分類のように階層構造は単に所属の関係を表わす場合と、企業組織のように上位階層と下位階層の間になんらかの相互干渉が存在する場合がある。本論では前者を無機的階層、後者を有機的階層と呼び、これらを区別する。階層システム理論で議論の対象とな

Vol. 17, No. 6, (1973), pp. 339-344.

6) V. Vemuri: Modeling of Complex Systems, (1978), Academic Press.

るのは後者であり、前者はクラスタリングによる層別化の結果である。階層構造における各レベルは、社会の家族や村のように下位階層の集合体である場合と、生体の組織や器管のように下位階層によって構成される一つの個体である場合がある。各レベルが集合体である場合でも企業のように部一課一係が下位階層の集合体であっても、各レベルのリーダーによって代表される場合がある。階層システム理論では、多くの場合このように各レベルのリーダーによって代表される階層構造を対象としている。階層構造の一般的な記述は、垂直的な記述と水平的な記述からなる。垂直的記述では、上位階層はより包括的な記述であり、下位階層はより局所的な記述である。水平的記述は、同位階層における異なる属性による記述である。

階層システム理論で対象となるシステムは、上述の議論より各レベルにリーダーが存在する有機的階層を持つシステムであるといえる。このようなシステムは、一般的には大規模システムや複雑なシステムと呼ばれている。大規模システムや複雑なシステムについては、過去多くの定義がなされている。Haimès は [7] で大規模システムの特徴として次のようなものを掲げている。

- ① 決定変数、外生変数、状態変数の数が多い。
- ② Component (Subsystem) の数が多い。
- ③ 入力/出力関係が複雑でしばしば非線形である。
- ④ リスクと不確実性の存在。
- ⑤ 多階層組織構造
- ⑥ 目的が複数でかつ同一単位で測定することができず、競争しており、しばしば競合している。
- ⑦ 複数の意思決定者が存在する。
- ⑧ システムの目的や制約などが動的に変化する。

多くの研究では、Haimès が特徴の第一に取りあげた「変数の数が多い」ということを大規模システムの定義としている^{8,9,10)}。他方、高原らの一連の論

7) Y. Y. Haimès: Large Scale Systems, (1982), North-Holland.

8) J. Bernussous, A. Titli: Interconnected Dynamic Systems: Stability,

文^{4,5,11)}では、大規模システムを「システムを構成体とするシステム、すなわちシステムのシステム」と定義している。システムを構成する変数の数が多くとも、構造が単純でありシステムを一体として取り扱うことができるならば、そのシステムはあえて大規模複雑なシステムと認識する必要がない⁴⁾。システムが大規模であるかどうかは、本質的には人の価値判断に従う⁶⁾ものであり、階層システムの概念はシステムの規模とは本来独立なものである¹¹⁾といえる。したがって、変数の数だけで定義された大規模システムは、数理計画法における Multi-level optimization techniques の対象であり、階層システム理論ではシステムの規模よりもむしろシステムの複雑性が重要であり、複雑なシステムあるいは大規模複雑なシステムが対象となる。複雑なシステムは、システムのモデル化が困難、あるいはシステムが数学的に複雑⁸⁾、目標が競合状態にある interconnected subsystem を含むシステム¹²⁾、あるいは可能な状態数、状態ベクトルの成分の数が大きいシステムで通常多階層システムとなっている¹³⁾などと定義されている。これらは Haimes が掲げた大規模システムの特徴の中に含まれている。

3. 階層システム

3.1 階層システムの構成原理

複雑なシステムが階層構造に記述あるいはモデル化される理由の一つは、システムをそれぞれ異なった観点から記述し、これを階層的に配置することによ

Decomposition, and Decentralisation, (1982), North-Holland.

- 9) Y. Y. Haimes: Hierarchical Analysis of Water Resource Research, (1977), McGraw-Hill.
- 10) 志水清孝: システム最適化理論, (1976), コロナ社.
- 11) 高原康彦, 中野文平, 高津信三: “多階層システム理論 (1)~(4),” オペレーションズリサーチ, Vol. 18, No. 6, pp. 67-72, No. 7, pp. 57-64, No. 8, pp. 62-68, No. 9, pp. 65-72, (1973).
- 12) M. G. Singh, A. Titli: Systems: Decomposition, Optimization and Control, (1978), Pergamon Press.
- 13) 市橋英世: 組織行動の一般理論: 組織サイバネティクス研究, (1979), 東洋経済新報社.

る¹⁴⁾。このように記述された各レベルの機能は他のレベルの機能とは独立で、各レベル間にはなんらかの相互依存関係が存在する。一方、Findeisen ら¹⁵⁾のように複雑なシステムを情報の分散処理の観点から多階層システムとする必要がある。これは主として計算機の処理能力や情報伝達の信頼性の問題などを解決するためのものである。複雑なシステムの階層的記述は、複雑なシステムをやや複雑なシステムの集まりに置き換え、人間の理解を助けシステムの行動様式を考える際の問題を解決する方法であるといえる。

複雑なシステムを階層的に記述することによって生成される多階層システムは、「システムの横方向の分割により生成される縦配列の部分システムから構成されている¹⁰⁾」、「縦に配列されたいくつかの部分システムから構成されており、より上位の部分システムは行動における優先度あるいは下位の部分システムへの干渉の権利を持っている」、「より上位の部分システムはより下位の部分システムのフィードバックによって修正を受ける」¹⁴⁾、「階層構造における各ブロックは責任、機能、アクティビティを表わし、それはレベルあるいはエシェロンに配置される」、「下位レベルのブロックはシステムのより小さい視点を持つ」⁶⁾などとされている。これらのことより階層システムは、複雑なシステムの水平的な記述と垂直的な記述ならびに相互関係によって表わされ、上位レベルはより包括的な視点を持ち下位レベルはより局所的な視点を持つといえる。

階層システム理論は、制御理論における「意思決定概念」の普及と「多変数制御」の増大、経済学における「社会主義経済体制の効率的運営」および「公共予算の効果的配分」に関する研究、経営学における「分権管理組織論」の発展、数理計画法における「分割原理」の登場などを契機として形成されてきた¹¹⁾。階層システムの基本的な構造は、Mesarovic ら¹⁴⁾によってストレータ、レヤー、

14) M. D. Mesarovic, D. Macko, Y. Takahara: Theory of Hierarchical, Multilevel Systems, (1970), Academic Press; 研野和人監訳: 階層システム論, (1975), 共立出版。

15) W. Findeisen, F. N. Bailey, M. Brdy, K. Malinawsky, A. Wozniak: Control and Coordination in Hierarchical Systems, (1980), John-Wiley.

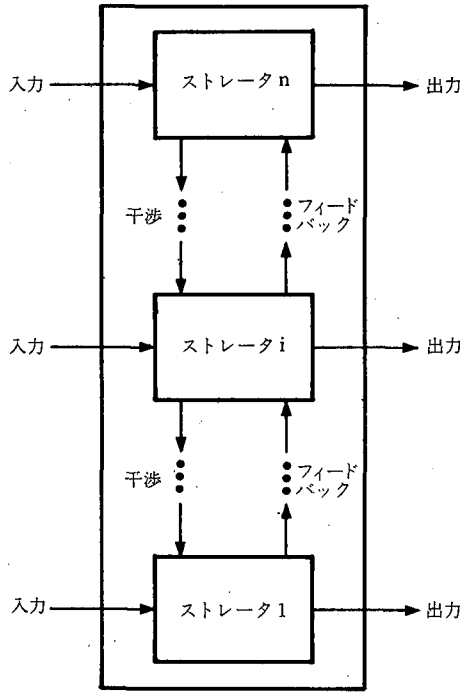


図2 ストレータ

エシェロン の 3 種類が提案されている。

1) ストレータ：複雑なシステムを記述するために、それぞれ異なった観点より同一のシステムを記述し階層的に表わすものである (図2)。

入出力システム $S: X \rightarrow Y$ において入力 X と出力 Y が共に n 個の成分に分割することができるとする。すなわち、

$$X = X_1 \times \dots \times X_n, \quad Y = Y_1 \times \dots \times Y_n$$

とする。このとき各対 (X_i, Y_i) , $i=1, \dots, n$ がそれぞれストレータ S_i に割り当てられる。各ストレータは次のように表わすことができる。

$$\begin{cases} S_n: X_n \times W_n \rightarrow Y_n \\ S_i: X_i \times C_i \times W_i \rightarrow Y_i, \quad i=2, \dots, n-1 \\ S_1: X_1 \times C_1 \rightarrow Y_1 \end{cases} \quad (7)$$

ここで W_i はストレータ $i-1$ からのフィードバックの集合, C_i はストレータ $i+1$ からの干渉の集合である。

ストレータ i の情報関数 $h_i: Y_i \rightarrow W_{i+1}, i=1, \dots, n-1$, および意思決定関数 $c_i: Y_i \rightarrow C_{i-1}, i=2, \dots, n$ が存在するとき, 式 (7) は

$$\begin{cases} y_n = S_n(x_n, h_{n-1}(y_{n-1})) \\ y_i = S_i(x_i, c_{i+1}(y_{i+1}), h_{i-1}(y_{i-1})), i=2, \dots, n-1 \\ y_1 = S_1(x_1, c_2(y_2)) \end{cases} \quad (8)$$

と書くことができ, S_i は S のストレータとなる。

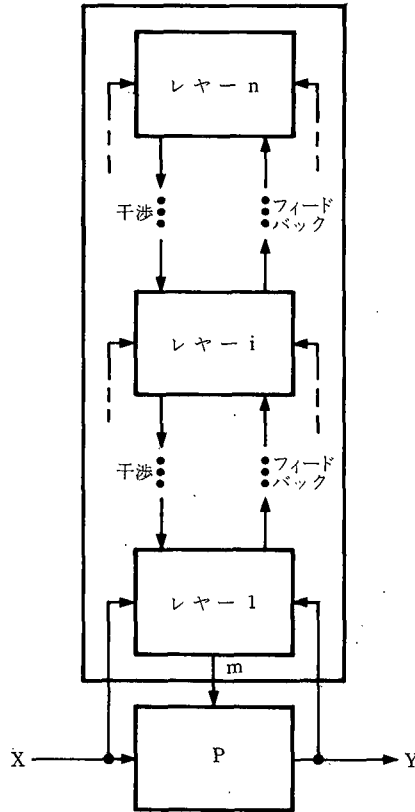


図3 レヤ

2) レヤー：複雑な意思決定問題を部分問題に分割し，意思決定のレベルに従って階層化するもので，2.1項におけるシステムの手続的定義に対応する。これは分割された部分問題を上から下へ順序付けて解いていくことによって，複雑な意思決定問題を縦に順序付けることにより簡単な部分問題の集まりに置き換えることになる(図3)。

入出力システム $S: X \rightarrow Y$ の意思決定問題が n 個のレベルに分割できるならば， i 番目のレヤー S_i はレヤー $i+1$ の干渉 $r_i \in C_i$ とレヤー $i-1$ からのフィードバック $w_i \in W_i$ に基づいてレヤー $i-1$ への干渉の集合 C_{i-1} を規定する。すなわち

$$\begin{cases} S_n: W_n \rightarrow C_{n-1} \\ S_i: C_i \times W_i \rightarrow C_{i-1}, i = 2, \dots, n-1 \\ S_1: C_1 \times W_1 \rightarrow M \end{cases} \quad (9)$$

と書くことができる。ここで W_1 はプロセスからのフィードバックの集合で， M はプロセスの操作変教の集合である。

3) エシェロン：これはシステムを構成する部分組織である意思決定単位の相互関係を組織的に表わすことを目的としている。この階層化には，①システ

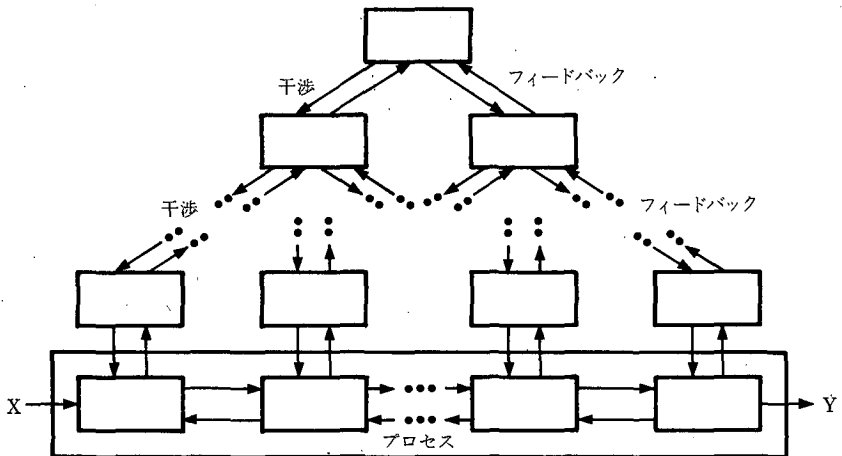


図4 エシェロン

ムには明確に認知できる相互関係を持つ部分システムで構成されている, ②ある部分システムは意思決定単位として定義されている, ③ある意思決定単位は他の意思決定単位によって影響を受ける, という意味において意思決定単位を階層的に配列することが必要である。システムを構成する意思決定単位は, 一般に相容れない目標を持っており, エシェロンは多階層・多目標システムを表わしている (図4)。

入出力システム $S: X \rightarrow Y$ が n 個の部分システム S_i に分割され, l レベルに配置されているものとする。 k レベルに位置する部分システム S_i の添字集合を $I_k, k=1, \dots, l$ とする。部分システム $S_i, i \in I_k$ は, $k+1$ レベルの部分システムからの干渉 $r_i \in C_i \subseteq \{C_{\xi} | \xi \in I_{k+1}\}$ と $k-1$ レベルの部分システムからのフィードバック $w_i \in W_i \subseteq \{W_{i\zeta} | \zeta \in I_{k-1}\}$ に基づいて $k-1$ レベルの部分システムへの干渉の集合 $C_{i\zeta}, \zeta \in I_{k-1}$ を規定する。すなわち,

$$\begin{cases} S_i: W_i \rightarrow C_{i\zeta}, i \in I_l, \zeta \in I_{l-1} \\ S_i: C_i \times W_i \rightarrow C_{i\zeta}, i \in I_k, \zeta \in I_{k-1}, k=2, \dots, l-1 \\ S_i: C_i \times W_i \rightarrow M_i, i \in I_1 \end{cases} \quad (10)$$

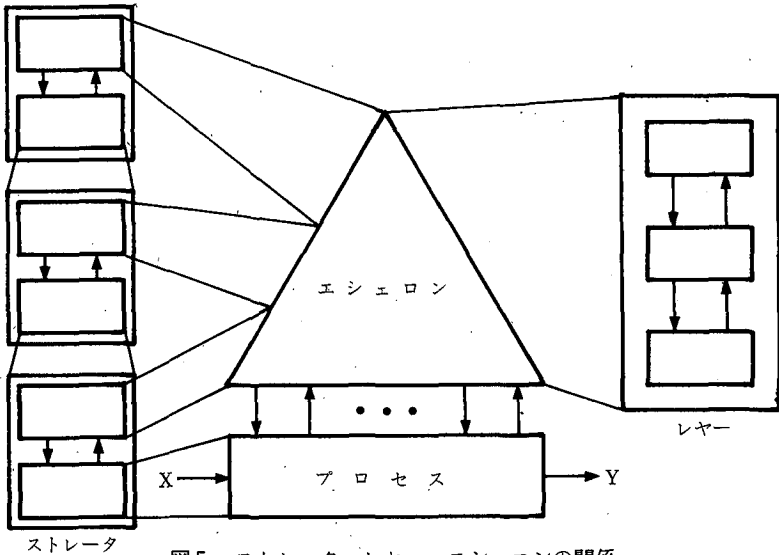


図5 ストレータ, レヤー, エシェロンの関係

である。ここで $i \in I_1$ に対する W_i と M_i は部分プロセス P_i からのフィードバックと P_i の操作変数の集合である。

以上の3種類の概念は、それぞれ独自に存在しているのではなく相互に関係している。たとえば図5では、エシェロン・タイプのシステムを設計する際のストレータとレヤーの関係である。ストレータは、システム全体の階層的な記述を行い、レヤーはシステム全体の仕事の階層化を行う。この結果、エシェロン・タイプのシステムを構成する意思決定単位は、ストレータによるモデルとレヤーによる意思決定問題で定義されることになる。

3.2 階層システムの構成法

複雑なシステムを階層化する方法の一つに分割法がある。分割法には垂直的な分割と水平的な分割がある。垂直的な分割は、時間間隔の長短¹⁵⁾やコントロール・タスク¹²⁾によってシステムを縦に分割しレヤーを作成する。一般に上位レベルと下位レベルの間には、上位レベルから下位レベルの干渉と下位レベルから上位レベルへのフィードバックが存在する。水平的な分割は、システム全体の目的や制約を部分的な目的や制約に分割し、付加的な上位システムを設置する。この場合、下位レベルの部分システム間の相互依存関係は上位レベルにおいて取り扱われることが多い。またシステム全体の最適化は部分システムにおいて行われ、上位レベルは最適化が達成されるように部分システムの統制を行う。システムの目標の分割と階層化に関して井尻¹⁶⁾は「上位目標と下位目標は、目的と手段の因果関係からみれば、下位目標の達成が原因となって上位目標の達成という結果が生まれる」と述べている。一方、Keeney ら¹⁷⁾は「下位レベルの目標は、上位レベルの目標という目的に対する手段として考えることができる。目標を副次目標に細分する場合、それがいかなるレベルにあるにせよ上位レベルが示す全ての側面が副次目標の一つの側面として説明されている必要がある」と述べている。したがって、下位レベルの目標は上位レベルの目標と

16) 井尻雄士：計数管理の基礎，(1970)，岩波書店。

17) R. L. Keeney, H. Raiffa: Decision with Multiple Objectives: Preference and Value Tradeoff, (1979), John-Wiley; 高原康彦監訳：多目標問題解決の理論と実例，(1980)，構造計画研究所。

矛盾してはならず、また下位レベルの目標が達成されると同時に上位レベルの目標が達成されなければならない。

複雑なシステムの階層化に対する別の方法の一つは、いくつかのシステムを集め、それらを階層的に配置することである。これは比較的小規模で単純なシステムを部分システムとする複雑なシステムを階層化する方法で、同位関係にある部分システムを集め、その上位レベルにそれらの部分システムを統制する部分システムを設置し、さらにそれらを統制する部分システムを上位レベルに設置して階層を構成していくものである。

階層システムを構成する部分システムの最適化は必ずしもシステム全体の最適化を達成するものでない。部分システムの最適化をシステム全体の最適化に導くために、上位システムが下位の部分システムを統制（統合）する必要がある。統合には二つの局面があり、その一つは自己組織化の局面で、他方は制御の局面である。自己組織化はシステムの構造を修正することであり、制御は固定された構造のもとで上位システムが下位の部分システムを統合することであり狭義の統合問題と呼ばれている¹⁴⁾。以下では狭義の統合問題を対象とする。

上位システムが統合を行うためには、上位システムの目標がシステム全体の目標と矛盾しないことが必要である。これは目標の調和性と呼ばれている。調和性は、上位システムの目標が達成されたとき、同時にシステム全体の目標が達成されることを要求するが、上位システムの目標に近付くと同時にシステム全体の目標に近付くことを必要としない。これを要求する場合は、強い意味の目標の調和性という⁵⁾。この調和性を考えるには、統合可能性の概念を導入する必要がある。これは統合変数が有効に下位の部分システムに組み込まれているかを調べるもので、システム全体の目標に対する統合可能性と上位システムの目標に対する統合可能性がある。前者はシステム全体の解と部分システムの解が一致するかを調べ、後者は部分システムの解が上位システムの目標を達成しているかを調べることである⁵⁾。

3.3 相互依存、相互干渉

前記の統合問題は、システム内にどのような相互干渉あるいは相互依存が存

在するかによって、どのような統合方法を選択するかということが問題になる。相互干渉にはシステム干渉とプロセス干渉が存在する⁴⁾。システム干渉は、部分システム間に希少資源が存在すると生じる。たとえば希少資源の量 d に対して、各部分システムが $d_i (= g_i(m_i))$ を使用するとすれば、システム干渉は $\sum_i g_i(m_i) \cong d$ のとき生じる。他方、プロセス干渉は部分システム間に入出力関係が存在すると生じ、通常相互依存関係と呼ばれている。プロセス間の干渉 u_i は、相互干渉関数 K_i によって与えられ、

$$K_i: M \times Y \rightarrow U_i \quad (11)$$

で表わされる。

プロセス干渉あるいは相互依存関係の統合原則には、干渉予測による統合原則、干渉推定による統合原則、干渉バランスによる統合原則、および Load-type coordination, Coalition-type coordination^{5, 11, 14)}, Model coordination¹²⁾ などがある。干渉予測による統合は、上位システムが部分システム間の入出力を予測し、部分システムがこの入出力の値が正しいものと仮定して自己の最適化を行う。 u_i の予測値を u_i^p 、これに基づく統合変数の値を r^p とすると、干渉予測による統合原則は、

$$D_0(G_0) \longleftrightarrow (\forall i \leq n)(u_i^p = k_i(\hat{m}(r^p))) \quad (12)$$

である。ここで D_0 と G_0 はそれぞれ上位システム的意思決定基準と目的関数である。この方法は、統合変数が部分システムの目的関数と制約条件の両方に存在するために Mixed coordination とも呼ばれている¹²⁾。干渉推定による統合は、部分システム間の入出力値を一点で予測するのではなく区間によって推定しようとするものである。 $U^p \subset U$ を u_i の推定区間であるとすると、この統合原則は、

$$D_0(G_0) \longleftrightarrow (\forall i \leq n)(k_i(\hat{m}(r^p)) \in U^p)) \quad (13)$$

となる。干渉バランスによる統合は、上位システムが直接部分システム間の相

互依存関係にかかわるのでなく、部分システムの目的関数を制御して統合する方法である。この統合原則は、

$$D_0(G_0) \longleftrightarrow (\forall i \leq n) (\hat{u}_i(r) = k_i(\hat{m}(r))) \quad (14)$$

となる。ここで $\hat{m}(r)$ と $\hat{u}_i(r)$ は $r \in C$ に基づいて部分システムが決定する操作変数と相互干渉である。この方法では、統合変数が部分システムの目的関数の中に存在しているために“Goal coordination”あるいは「価格による統制」とも呼ばれている¹²⁾。統合変数が部分システムの制約条件にのみ存在する場合、これを“Model coordination”あるいは「資源配分による統制」と呼び、Goal coordination の双対問題となる¹²⁾。

システム干渉の統合原則には、Infeasible method による統合原則と Feasible method による統合原則がある^{4, 11)}。Infeasible method による統合原則は「価格による統制」とも呼ばれ、希少性の強い資源により高い内部価格を課して、資源の有効な配分を実現する方法である。一方、Feasible method は「資源配分による統制」とも呼ばれ、部分システムの資源要求に応じた仮の配分からさらに必要性の高い部分システムの方へ資源を再配分する方法である。これらの統合法以外に「目標設定による統制」¹⁸⁾がある。これは上位システムが仮の代替案を設定して、下位の部分システムにその実行可能性を問い、実行可能でなければその理由を報告させ、新たな代替案を探索する方法である。

経営組織論では、相互依存関係を依存度の弱いものから順に集積型 (pooled)、連鎖型 (segment, sequential)、交互型 (reciprocal) に分類している¹⁹⁾。集積型相互依存関係は、下位の部分システムが共通した資源をめぐって競合しているような場合で、部分システム間には間接的にのみ相互依存している。連鎖型相互依存関係は、ある部分システムの行動が他の部分システムの出力に依存している場合で、部分システム間には直接的な依存関係が存在している。交互

18) 中野文平：分権化組織における調整方式に関する研究、(1972)、東京工業大学博士論文。

19) J. D. Thompson: Organizations in Action, (1967), McGraw-Hill.

型相互依存関係は、複数の部分システムが直接的な互恵関係にある場合で、相互依存の強さは比較的大きい。これらのことにより集積型相互依存関係はシステム干渉に一致し、連鎖型・交互型相互依存関係はプロセス干渉に一致するといえる。以上の相互依存関係は、企業内に存在するものであるが、企業をとりまく環境との関連も考慮する必要がある。企業と環境との相互関係について、たとえば Aronofsky ら²⁰⁾は表1のような関係をまとめている。企業をとりまく環境としては、

- ① 製品の市場構造、競争企業の数と規模、消費者の数と規模等
- ② 資材の市場構造、供給者の数と規模、他の購入者の数と規模等
- ③ 財産の源と資本の利用可能性
- ④ 環境規制
- ⑤ 労働協定、雇用条件

などが掲げられている。

経済学では、相互依存関係を外部性あるいは外部効果と呼び、「外部性を受ける側の意思決定とは無関係に、一方的に他の部分システムの意思決定の結果として生じる」¹¹⁾、あるいは「ある経済主体（消費者、企業）の決定変数が他の経済主体の効用関数あるいは生産関数に入り込んでいる状態—経済的に相互依存の状態」²⁰⁾と規定されている。外部性が良い影響を与えるときを「外部経済」、悪い影響を与えるとき「外部不経済」と呼ぶ。外部性には、ある部分シ

表1 企業と環境との関係

to from	内 部	外 部
内 部	販売予測と生産計画のような企業内のつながり	訪問販売のような企業と環境の間のつながり
外 部	徴税のような環境と企業 のつながり	政府と外国政府のような 環境外の二つの部分の 間のつながり

20) 木村憲二：経済外部性と社会費用，(1980)，中央経済社。

システムが他の部分システムにどのように影響を及ぼすかによって技術的外部性と行動的外部性あるいは金銭的外部性が存在する。技術的外部性は、ある部分システムが他の部分システムの制約条件に影響を及ぼす場合で、[20]によれば生産関数にのみ影響を及ぼす場合である。行動的外部性あるいは金銭的外部性は、ある部分システムの意思決定が他の部分システムの目的関数に影響を及ぼす場合で、効用関数に影響を与える。特に行動的外部性は、行動科学の立場から影響を考えているために、多分に心理学的要素を含んでいる。これらのことから、技術的外部性は Model coordination、行動（金銭）的外部性は Goal coordination に類似しているといえる。

4. 生産システムの階層化

4.1 生産システムのストレータ化

1節で明らかにしたように生産システムは入出力システムとしてとらえることができる。生産プロセスは、調達・製造・販売・在庫の各機能が有機的に結びついて活動しており、これらの活動を効率よく実施するための計画・統制の機能が生産プロセスの各機能に有機的に関連している。したがって、生産システムは複雑なシステムであると認識できる。そこで生産システムを二つの異なった観点から記述し、これをストレータで表わす。生産システムの一つの側面は、素材から製品へ変換を行う工程システム、すなわち「物の流れ」に基づいた記述である。他方は素材を製品に変換する生産活動を計画・統制する管理システム、すなわち「情報の流れ」に基づいた記述である¹⁾。この二つの観点から生産システムを記述すると図6のように表わすことができる。管理システムへの入力としては、市場動向や企業環境、受注量・需要予測量、納期などで、これらの情報に基づいて生産量や品質、納入時期などの情報を出力する。他方、工程システムは、生産対象（素材）や生産労働力、生産手段を入力として、これらを加工・変換して生産財（製品、サービス）を出力する。管理システムは、変換過程において生産活動を計画し、計画と生産実績のずれに基づいて統制することによって工程システムを干渉する。工程システムは、生産実績を管理シ

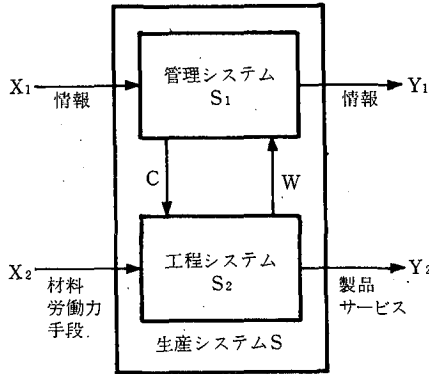


図6 生産システムのストレータ化 (1)

システムにフィードバックする。管理システムを S_1 、入力情報を X_1 、出力情報を Y_1 、工程システムへの干渉を C とする。また工程システムを S_2 、入力を X_2 、出力を Y_2 、管理システムのフィードバックを W とする。このとき、生産システムのストレータ化は次のように書くことができる。

$$\begin{cases} S_1: X_1 \times W \rightarrow Y_1 \\ S_2: X_2 \times C \rightarrow Y_2 \end{cases} \quad (15)$$

管理システムは、「技術情報の流れ」に基づいた生産技術情報システムと、「管理情報の流れ」に基づいた生産管理情報システムに分けることができる。前者は、市場要求に基づいて製品仕様を決定する「製品設計」、製品の生産手段を決定する「工程设计」と「作業設計」、生産設備の空間的配置を決定する「レイアウト計画」、および製品の品質を維持する「品質管理」からなり、生産情報の加工技術的処理を行う。後者は「生産計画」、詳細な計画である「日程計画」、および進度を管理する「生産管理」からなり、生産情報を管理的処理する^{1), 21), 22)}。生産技術情報システムを S_{11} 、生産管理情報システムを S_{12} とすると、生産システムは次のようにストレータ化することができる (図7)。

21) 長谷川幸男編：多品種少量生産システム (第2版), (1984), 日刊工業新聞社。

22) 奥村昌之編：コンピュータ・エイデッド・テクノロジー, (1983), 共立出版。

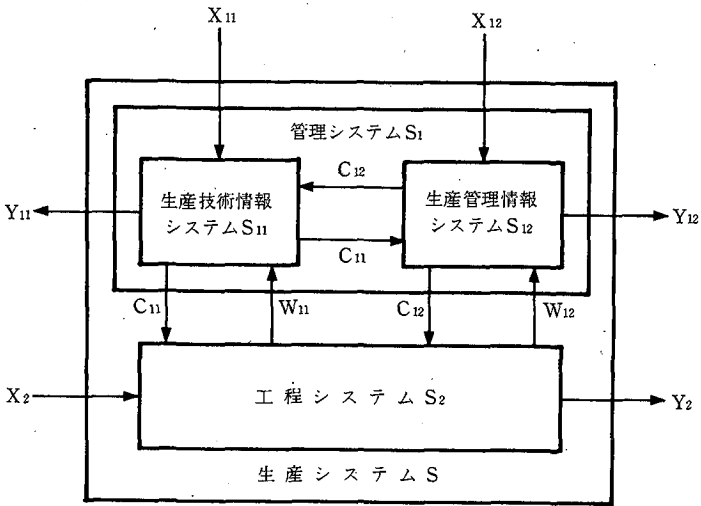


図7 生産システムのストレータ化(2)

$$\begin{cases} S_{11} : X_{11} \times C_{12} \times W_{11} \rightarrow Y_{11} \\ S_{12} : X_{12} \times C_{11} \times W_{12} \rightarrow Y_{12} \\ S_2 : X_2 \times C_{11} \times C_{12} \rightarrow Y_2 \end{cases} \quad (16)$$

4.2 管理システムの意味決定レイヤー

経営組織は、高宮²³⁾によれば「一定の経営目的を遂行するために統合された複数の人間の活動の体系」である。この経営組織を構成するための原理は、①権限による構成、②人間関係による構成、③職能による構成、④意思決定過程による構成であるとされている。①は権限の分割・委譲を伴う組織構成で、②は共通の目的を達成するために行う情報伝達に伴うそれである。③は職能に従って権限と責任が形成され、職能の分化によって組織を構成する。④は作業者の意思決定に影響を及ぼす経営管理者を設定し組織を構成する。経営組織の構成は、③を基礎にして行われ、それと同時に①、②、④を必要条件とする²³⁾。このような職能を中心とした組織の構成原理は、職能の分業理論²⁴⁾に基づいて

23) 高宮 晋：経営組織論，(1978)，ダイヤモンド社。

24) 高田 馨：経営の職能構造：経営分業の原理，(1977)，千倉書房。

いる。それには、経営職能分割は垂直的職能分化と水平的職能分化があるとしている。垂直的職能分化は、職能の「不重要の原理」²⁴⁾に従って管理職能と作業職能に職能を分割する。水平的職能分化は、生産の基幹活動（調達—製造—販売）に従って同位レベルに分割する。前者を「階層的職能分化」、後者を「水平的職能分化」とも呼ぶ²⁵⁾。

このように垂直的に分割された職能は、上位に位置づけられる職能が長期間で大局的な計画を作成し、下位レベルになるに従って短期間でより局所的な計画の作成を行う。[26]における I. C. I. (Imperial Chemical Industries) 社の事例では、計画は次の5つの model からなる。

- Model 1 (On-line computer model): 現時点から1週間先のプラント・オペレーション
- Model 2 (Short-term planning model): 1週間先から6カ月先までのオペレーション
- Model 3 (Medium-term planning model): 6カ月先から3年先までのオペレーション
- Model 4 (Capital planning model): 現時点から2～3年先までの予測
- Model 5 (Cooperative growth model): 現時点から未来への企業成長

Model 1, 2 では計画期間が比較的短期で、計画はプラントのオペレーションに関心がある。一方、Model 4, 5 は計画期間が比較的長期で、計画は企業をとりまく環境に関心がある。また前者では企業の外部環境は固定されているものとし、後者はプラントのオペレーションに関心がない。Model 3 は両者にまたがるものである。

この事例のように、生産計画は外部環境を要因とするマクロ的視点による計画と、企業内部を要因とするミクロ的視点による計画に分けることができる。前者は経営計画と呼ばれるものであり、後者は狭義の生産計画と呼ばれ、全般

25) 泉田健雄：経営組織と職務権限，(1978)，東洋経済新報社。

26) J. S. Aronofky, J. M. Dutton, M. T. Tayyabkhon: Managerial Planning with Linear Programming: in Process Industry Operation, (1981), John-Willey.

的生産計画，日程計画などがある。

(a) 生産管理情報システム

[27]によれば，経営管理の垂直的分割は上位レベルから順に方略的計画レベル，経営管理レベル，作業レベルに分割される。方略的計画レベルは，外部情報に基づく方略的で非定型な全般的な計画を行い，経営管理レベルは，方略的

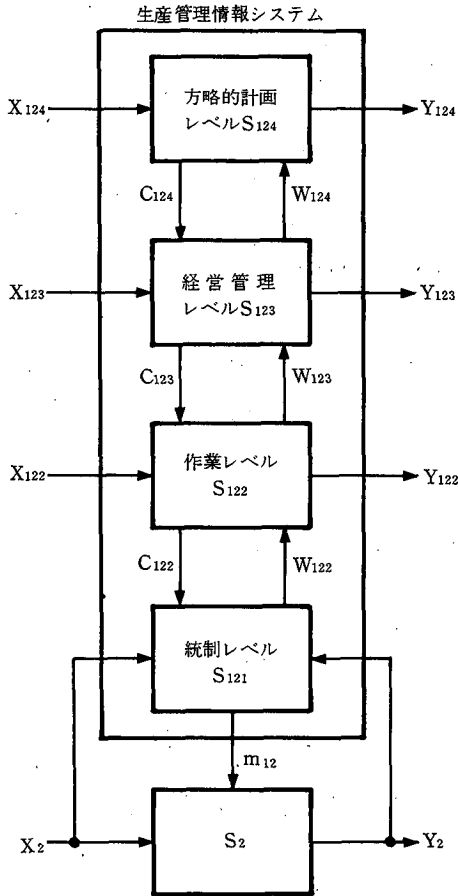


図8 生産管理情報システムの意思決定レイヤー

計画レベルにおける方略的意思決定に基づく管理レベルの定型的な計画と修正を行う。作業レベルは、経営管理レベルにおける方術的意思決定に基づく日常の定型的な実施処理を行う。したがって、方略的計画レベルでは経営計画を、経営管理レベルでは全般的生産計画を、作業レベルでは日程計画を作成する。これらの計画に基づいて生産が実施されるが、計画と実績のずれに基づいて生産工程を統制する生産管理を行う統制レベルがある。これらのことより、生産管理情報システムは図8のような方略的計画レベル—経営管理レベル—作業レベル—統制レベルからなるレイヤーとして表わすことができる。これは、次のようにして表わすことができる。

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{124} : W_{124} \rightarrow C_{124} \\ S_{123} : C_{124} \times W_{123} \rightarrow C_{123} \\ S_{122} : C_{123} \times W_{122} \rightarrow C_{122} \\ S_{121} : X_2 \times Y_2 \times C_{122} \rightarrow M_{12} \end{array} \right. \quad (17)$$

(b) 生産技術情報システム

市場要求から製品を設計してその製造手順を決定する組織は、前述した経営組織の構成原理の内で④の「意思決定過程による構成」を除いたもので構成される。したがって、生産技術情報システムは上位レベルが必ずしもより大きな責任と権限を持つことはないので、経営組織というよりはむしろ「技術組織」と呼ぶ方が妥当である。このような生産技術情報システムにおいて、製品設計では市場要求や生産工程の技術的制約に基づいて製品仕様が決定され、その結果として部品の幾何学的形状や製品構成、使用する生産設備、素材の種類などが出力される。これらの情報を用いて工程設計では、素材から製品へ変換する全般的な生産工程に関する具体的な加工・組立手順を作成する。さらに各工程でなされる具体的な作業に関する詳細な意思決定が作業計画においてなされる¹⁾。作業計画に従って実際に製品が生産されると、これを検査して所定の品質を保つように管理する必要がある。これは品質管理によって行われる。したがって、生産技術情報システムは、製品設計—工程設計—作業設計—品質管理

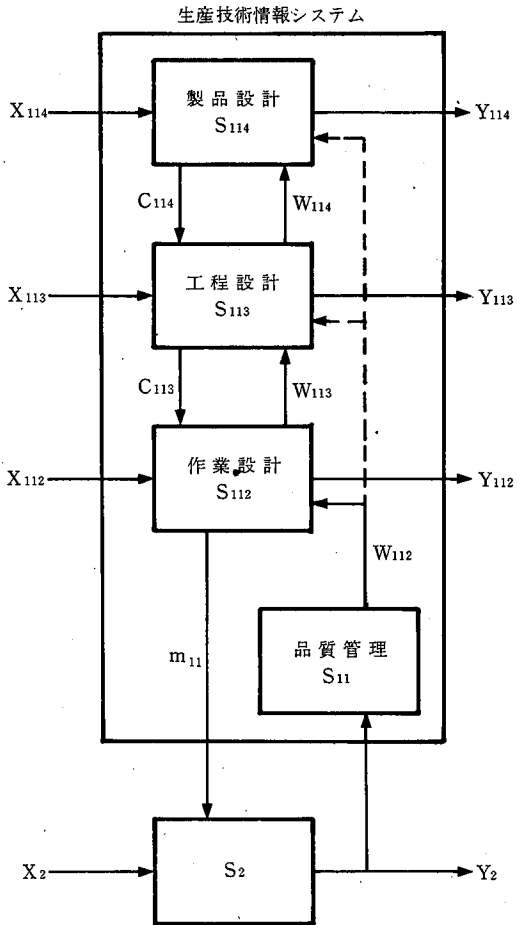


図9 生産技術情報システムの意思決定レイヤー

からなるレイヤーとして表現することができる(図9)。このレイヤーは次のように記述することができる。

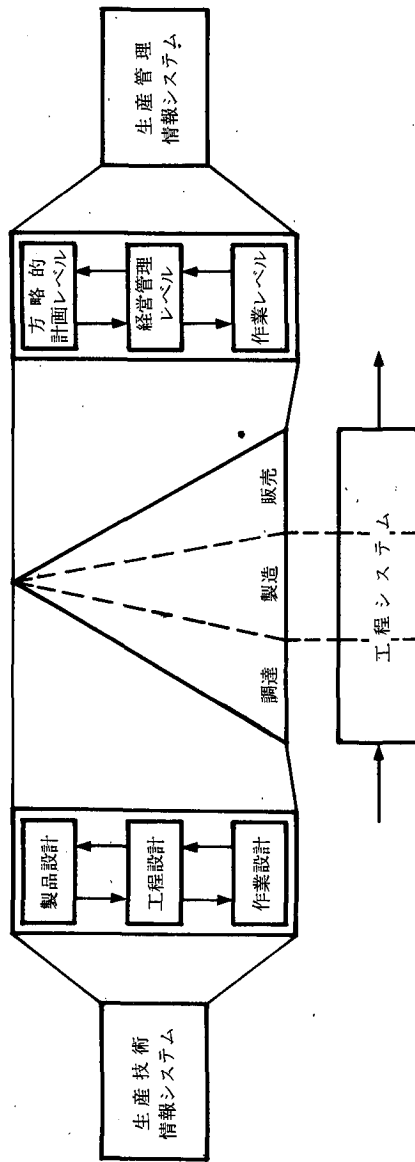


図 10 生産システムの組織化

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{114} : X_{114} \times W_{114} \rightarrow C_{114} \\ S_{113} : X_{113} \times C_{114} \times W_{113} \rightarrow C_{113} \\ S_{112} : X_{112} \times C_{113} \times W_{112} \rightarrow M_{11} \\ S_{111} : Y_2 \times C_{114} \rightarrow W_{112} \end{array} \right. \quad (18)$$

4.3 生産システムの組織化

以上のようにして意思決定レベルの垂直的分割ができると、2.1節で述べたシステムの変換的定義に応じて、生産システムの水平的分割を行う。これは工程システムを物の流れに沿って調達—製造—販売に分割することによってなされる。製造はさらに加工、組立、検査、在庫などの変換・貯蔵の機能からなる多段階工程に分割される。このように工程システムが水平に分割されると、これに対応して管理システムの各レベルが水平的に分割される。ところで管理システムの一方を構成する生産技術情報システムは、物の流れと形態の変化を規定する意思決定システムであった。したがって、工程システムを水平に分割する要因はこの部分システムによって規定される。この水平的分割に従って生産管理情報システムの各レベルが水平に分割される。このようにして生産システムはエシェロン・タイプに階層化される（図10）。

工程システムが n 段階の部分システム（工程）に分割されているとする。 n 段階の工程のそれぞれに対して、統制レベルと作業レベルの部分システムが対応する。 n 段階の工程の内 n_i 個の工程を統合する経営管理レベルの部分システムが n' 個存在し、これを統合する方略的計画レベルの部分システムが1個存在するものとする。式(17)で表わされる生産管理情報システムをこのように水平的に分割し、エシェロン・タイプに階層化すると次のように表わすことができる。

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{124} : W_{124} \rightarrow C_{124} \\ S_{123i} : C_{124} \times W_{123i} \rightarrow C_{123i}, \quad i \in I_3 \\ S_{122j} : C_{123i} \times W_{122j} \rightarrow C_{122j}, \quad j \in I_{2i} \\ S_{121j} : X_{2j} \times Y_{2j} \times C_{122j} \rightarrow M_{12j} \quad j \in I_{1i} \end{array} \right. \quad (19)$$

ここで、 $I_3 = \{1, \dots, n\}$, $I_{2j} = I_{1j} = \{1, \dots, n_j\}$, X_{2j} , Y_{2j} は第 j 部分システムに対する入力と出力である。

方略的計画レベルは、経営管理レベルの各部分システムに目標を設定することによって経営管理レベルを統合するもので、経営管理レベルの部分システム間の相互依存関係を統合するものでない。方略的計画レベルが設定した目標に対して、経営管理レベルの各部分システムは目標を満す満足解集合の中から解を一つ選択しこれを方略的計画レベルにフィードバックする。方略的計画レベルは各部分システムからのフィードバック情報に基づいて新たな目標を設定する。このような干渉とフィードバックを繰り返すことによって、方略的計画レベルと経営管理レベルの各部分システムが合理的であると判断することのできる目標に達することができる。このような目標は Stackelberg 均衡解²⁸⁾と呼ばれている。一方、経営管理レベルの各部分システムは、他の部分システムとの相互関係を満しつつ与えられた目標を達成しようとするものである。これを行うには、部分システム間で情報を交換し、協力して自らの目標を達成する必要がある。このときの解は Nash 均衡解²⁹⁾と呼ばれている。経営管理レベルは、統合の対象としている作業レベルの各部分システムに対して目標を設定し、作業レベルの部分システムはその目標を達成するように意思決定する。この場合も経営管理レベルと作業レベルの間には Stackelberg 均衡解が存在し、作業レベルの部分システム間には Nash 均衡解が存在する。もし経営管理レベルが n_i 個の作業レベルの部分システムに対して唯一の目標を設定するならば、作業レベルの部分システムはチームを構成し、その均衡解はチームの理論²⁹⁾における均衡解となる。このように生産システムにおける統合問題は、生産労働力などの生産資源の配分を除けば 3.2 節で述べた従来の統合法とは異なり、ゲームの理論に基づいた統合法^{30, 31)}となる。

28) 鈴木光男：ゲーム理論入門，(1981)，共立出版。

29) J. Marschak, R. Radner: Economic Theory of Teams, (1972), Yale Univ.

30) T. Basar, G. J. Olsder: "Team-Optimal Closed-Loop Stackelberg Strategies in Hierarchical Control Problem," Automatica, Vol. 16, (1980), pp. 409-414.

生産システムに内存する階層性は、いままでに述べてきた意思決定レベルに基づいた階層性以外に製品構成や GT (Group Technology) に基づいたものがある。これらは部品や製品の所属の関係を表わすもので、無機的な階層である。しかしながら、製品構成や GT の各レベルに生産計画を対応させることによって有機的な階層として取り扱うことができる。このような問題に対しては、MRP³²⁾ や Hax らの一連の研究^{33, 34, 35)}がある。

5. 結 言

本論では、生産システムにおける階層性についてシステム理論の立場から検討した。生産システムをストレータ化することによって、管理システムと工程システムに分割して記述し、管理システムはさらに生産管理情報システムと生産技術情報システムに分割して記述できることを示した。管理システムの2つの部分システムを4レベルの意思決定レヤーで記述できることを示し、工程システムを物の流れに沿って水平的に分割することによって生産システムをエシェロン・タイプに組織化できることを示した。上位レベルと下位レベル間あるいは下位レベル間にはゲーム的状况が存在し、従来の統合法は適用できないことを明らかにした。

-
- 31) H. D. Sherali, A. L. Soyster, F. H. Morphy: "Stackelberg-Nash-Cournot Equilibria: Characterizations and Computations," *Oper. Res.*, Vol. 31, No. 2, (1983), pp. 253-276.
 - 32) J. Orlicky: *Material Requirements Planning*, (1975), McGraw-Hill.
 - 33) G. R. Bitran, A. C. Hax: "On the Design of Hierarchical Production Planning Systems," *Decision Science*, Vol. 8, No. 1, (1977), pp. 28-55.
 - 34) G. R. Bitran, E. A. Hass, A. C. Hax: "Hierarchical Production Planning: A Single Stage Systems," *Oper. Res.*, Vol. 29, No. 4, (1981), pp. 717-743.
 - 35) G. R. Bitran, E. A. Hass, A. C. Hax: "Hierarchical Production Planning: A Two-Stage Systems," *Oper. Res.*, Vol. 30, No. 2, (1982), pp. 232-251.