

社会システムの構造モデリング

村越 稔 弘

最近、社会システムという言葉がよく聞かれる。その明確な定義は明らかでないが、都市問題、環境問題のような公共の問題に対しシステムズ・アプローチを適用する場合に用いられている。とくにこのようなものを社会システムとよぶ理由は従来のシステムとは異なる複雑性の解決が当面の課題であり、システムズ・アプローチに特殊な側面が必要となるからである。その特殊性が手法面にあらわれたものが構造モデルであるといつてよいであろう。以下では社会システムにおける構造モデルの概説を試みる。

1. 社会システムの特殊性と構造モデル

システムズ・アプローチを分析すると図1のように対象の現実からの問題の発見および状況の認識を含む定式

化の段階とその問題を解決する計画の段階にわかれる。

従来のシステムズ・アプローチで開発された手法はほとんど計画段階のためのものであった。

システムズ・アプローチで構造がかなり知られている対象をあつかっている間はこれで十分であるが対象の構造が十分把握されていない複雑なシステムになると問題は計画段階よりも対象を正確に理解するという定式化の段階が重要となる。とくに社会システムでは、従来の社会科学においてシステム概念が弱いこと、学際的領域が対象であることが多いことからシステムズ・アプローチに必要な構造が過去の蓄積知識から再構成なしに導出が困難であり、社会システムをあつかうには定式化の段階は避けて通れない重要な問題となる。

定式化の段階の目的は混沌とした状況を分析目的に合

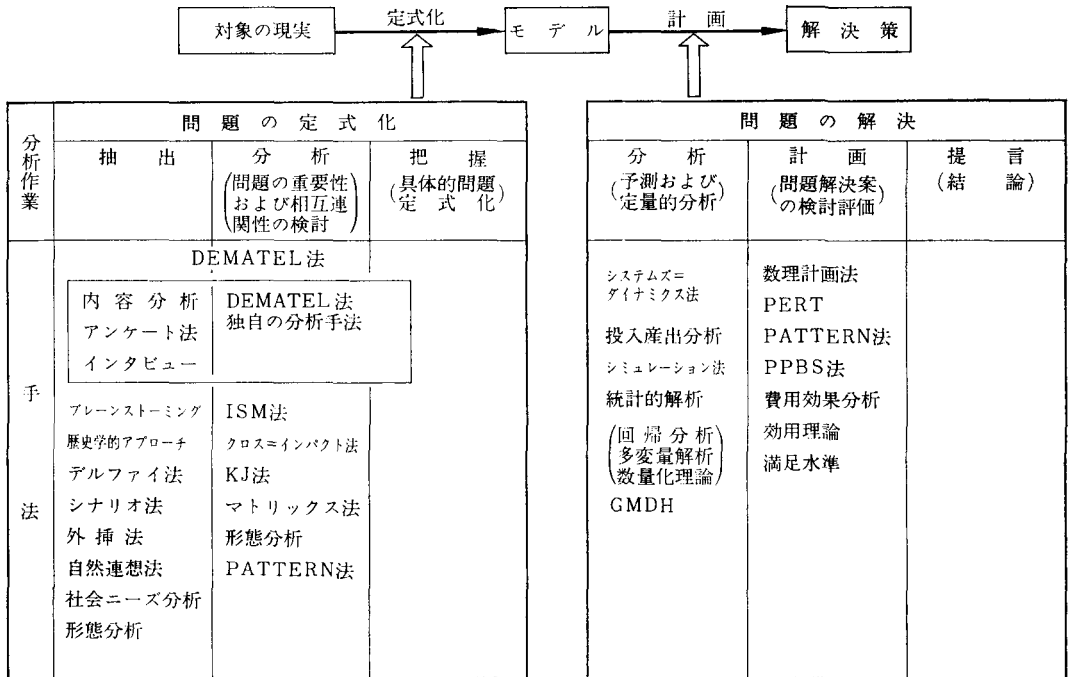


図1 システムズ・アプローチの過程

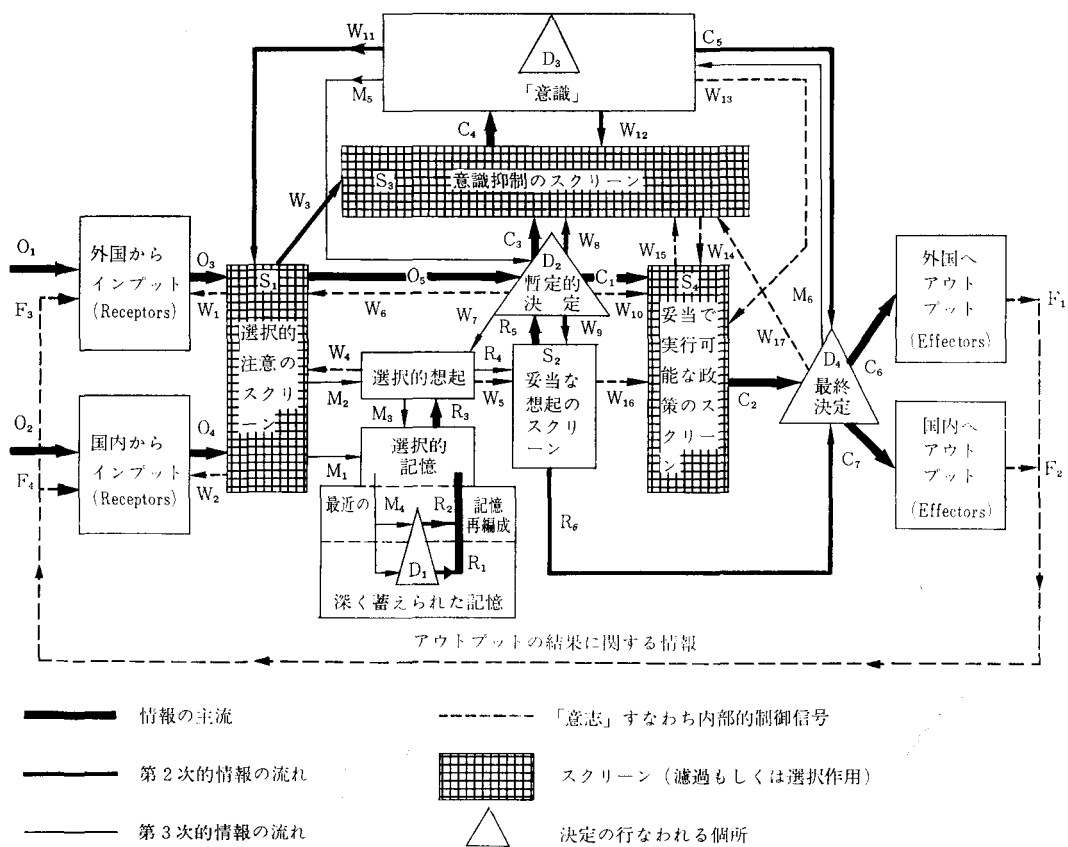


図 2 ドイチ・モデル(K. W. Deutsch, *The Nerves of Government, Models of Political Communication and Control*, London, 1963)

わせて整理することであり、過去の社会科学分野における多くの理論は対象を論理的に説明しているという点で一つの定式化といえよう。それらは概念的にはすぐれたものであるが表現手段として形式化が十分でないため理論間の比較分析、コミュニケーションの困難がある。

構造モデルは要素とそれらの間の関係というシステム概念(構造概念といっても良いが)を用いて対象を形式化し表現することにより複雑な対象の分析を容易にしよとするものである。しかも、基礎概念としてシステム理論にもとづいているため予測、計画を含む問題解決段階へと一貫した論理で展開可能であるという大きなメリットを有している。

図 2 は政治学で有名なドイチ・モデルであるがこれは明らかに国際政策決定を対象とし情報の流れを関係概念とする構造モデルである。

このように最近社会科学分野においてもシステム概念による分析が見られるようになった。たとえば、レヴィ・ストロースの構造主義、チョムスキーの生成文法、パーソンズの構造機能分析等は代表的な構造モデルということができる。

システムズ・アプローチという数量的データとコンピュータ・プログラムによる分析というイメージがあるが、伝統的社会科学の蓄積を生かした型で展開可能であり、上記のごとく大きな成果を生む可能性がある。

現在の社会科学分野では概念においてすぐれている伝統的理論と形式化において勝っている数理的分析が独立した状態で展開されつつある。社会科学分野における構造モデル適用は両者の融合を生み新しい飛躍のきっかけとなる可能性を秘めている。

2. 構造モデル

システムズ・アプローチとは関係を中心として対象を分析する方法であり、システム・モデルはシステム構成要素とそれらの間の関係をもとに次式で表現される。

$$S = \langle A, R \rangle \quad \text{ただし、} A: \text{システム要素} \\ R: \text{関係} \subset A \times A$$

ここで、 A, R の意味づけを変えることによりすべての種類のシステムを記述できる。たとえば、 A をサブシステムの集合とすれば R はサブシステム間の関係を規定し、 S は複数のサブシステムから構成される大規模シ

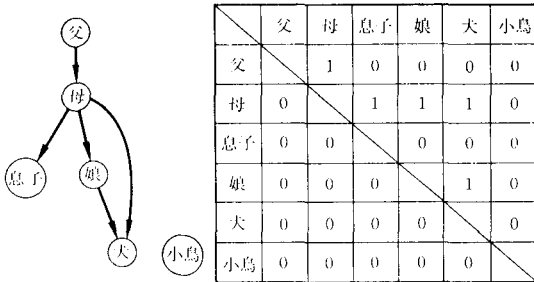


図3 グラフによる構造モデル
(関係：家族における支配服従関係)

システムとなる。また、 A を変数、システム状態とすれば R はそれぞれ変数間の関係、状態構造となる。

構造モデルとは R による A の要素間の結合関係をあつかうものであり、関係 R の観点から見た場合 A の各要素がどのように関係するかを示す。

構造モデルの表現方法はつぎの3種類が考えられる。

- (1) ネットワークによる表現
- (2) 行列による表現
- (3) 代数による表現

前二者はグラフ理論を用いるもので要素を頂点 (vertex), 要素間の関係の有無を辺(edge)に対応させたグラフでシステムを表現する。ネットワーク, 行列はグラフの表現方法であり、関係の方向性を考えた有向グラフの例を図3に示す。

ネットワーク表現は視覚に訴えるため理解が容易であり、行列表現はコンピュータによる処理が容易であるという特徴をもつ。代数による表現はシステム構造と代数構造を対応させ特定の条件をつけた関係を表現する方法であり、群論による交叉いとこ婚の分析[5], オートマトンによる人間行動の分析[6], カテゴリ代数による組織の分析[7]等の適用例が見られる。

グラフによる表現では関係は1つにかぎられるが代数による表現では複数個の関係を同時に表現でき、しかもそれらの関係の間の関係の分析も代数の論理構造を用いることにより可能となる。

図4は交叉いとこ婚の分析例であり結婚における構造を群論を用いて分析している[5]。

構造モデルはグラフ理論の応用として古くから応用され社会心理学におけるソシオグラム[8]等のように確立した分野を築いているものもある。にもかかわらず、最近構造モデルが話題として取り上げられるようになったのは構造モデルの構成, 分析にコンピュータを用いたいくつかの手法が開発, 報告されたためである。そのおもしろいものがバテル記念研究所で開発されたISM法および

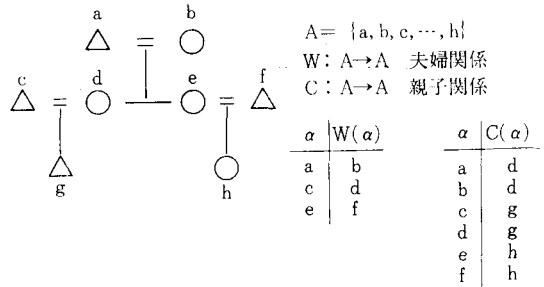


図4 関数による構造モデルの例

DEMATEL法である。

以下では、グラフ理論を用いた構造モデリングとしてISM法, DEMATEL法, オートマトン理論を用いたものとしてオートマトン・モデルについて述べる。

3. ISM法 [9], [10], [11]

ISM法(Interpretive Structural Modelling)はコンピュータと会話形式で構造モデルの構成と分析を行なう方法である。推移律を用いることによりコンピュータが発する質問の数を少なくしている、最終結果であるネットワーク表現では辺の数が最少の表現としている等の特徴がある。

ISM法の過程は大きく2つに分割される。第1過程では質問の回答から到達可能行列(間接的関係を含む結合行列)の作成, 第2過程では到達可能行列による構造の分析および図式化を行なう。

(1) 構造モデルの作成

任意の要素 s_i をきめ s_i と他の全ての要素との関係の有無を質問する。回答は推移律による間接的関係を含んだ関係の有無を要求され、この推移律の条件から他の要素間の関係が推測可能となる。この時点での到達可能行列は図5となり要素の集合 S はつぎのように分割される。これを図式に表現すると図6となる。

$$L(s_i) = \{s_j \in S \mid s_i R s_j\}$$

$$D(s_i) = \{s_k \in S - L(s_i) - s_i \mid s_k R s_i\}$$

$$V(s_i) = \{s_l \in S - L(s_i) - D(s_i) - s_i \mid s_l \bar{R} s_i \text{ and } s_i \bar{R} s_l\}$$

$$F(s_i) = \{s_m \in L(s_i) \mid s_m R s_i\}$$

つぎに関係が不明である $M_{L-F}, L-F, M_{VV}, M_{DD}$ には同じ方法が適用可能である。 $M_{V, L-F}, M_{DV}$ に対しては $M_{V, L-F} = M_{L-F, L-F} + M_{VV} \cdot M_{V, L-F} = M_{V, L-F}$ なる関係が成立していることを利用して質問回数を減少させている。

(2) 構造の分析

到達可能行列として表現されているシステム構造の分析はつぎの2つの分析を行なう。

- (a) サブシステムへの分割

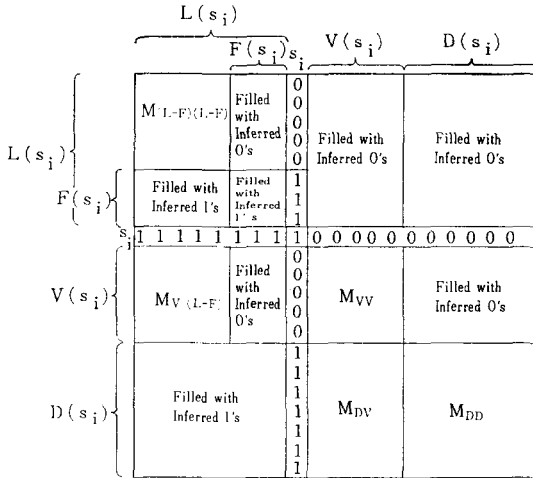


図 5 到達可能行列における要素の分割

(b) サブシステム間の関係の分析

サブシステムへの分割は強連結結合の部分集合を求めるものでありフィードバック・ループで結ばれている s_i と $F(s_i)$ を一つのサブシステムとする。到達可能行列 M を用いて表現するとつぎのようになる。

$$\text{サブシステム } S_i = \{i\} \cup \{j | m_{ij} = m_{ji} = 1, i, j \in A\}$$

ただし、 m_{ij} , m_{ji} は行列 M の (i, j) 要素
 A はシステム要素の集合

サブシステム間の関係の分析は関係の方向により上位のサブシステム、下位のサブシステムを決定しサブシステムの階層構造を明らかにするものである。ここでは階層構造のグラフにおいて辺の数を最少にするという条件を加え図 6 における $D(s_i) \rightarrow \{L(s_i) - F(s_i)\}$ の辺は s_i を経由した関係に含ませることにより図には示さない方法がとられている。これにより間接関係の辺が消えるため

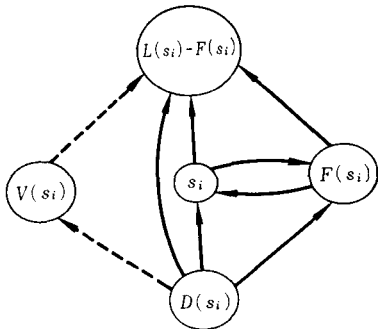


図 6 要素の部分集合間関係
 →: 関係あり(間接関係含む)
 ...→: 関係有無不明

の図が単純化されるメリットがあるが $D(s_i) \rightarrow \{L(s_i) - F(s_i)\}$ に直接関係が含まれている可能性もあり結果の図は直接関係を表現するとはいえない。したがって図の解釈に多少おかしな点が生ずる場合がある。図 7 に ISM 法によるシステム構造図の例を示す。

4. DEMATEL 法 [11], [12]

DEMATEL 法 (DEcision MAKING TESting Laboratory) はバテル記念研究所で行なわれた世界的問題の解決策を探る DEMATEL プロジェクトにおいて「問題構造の把握」の方法として開発されたものである。

構造同定の方法論的側面から見るとつぎのような特徴をもっている。

- (a) 要素間の関連度の定量的分析
- (b) アンケート方式による構造同定
- (c) 複数の構造の集計
- (d) 回答者間の構造の差異の発見

方法としてはデマテル法はアンケート分析であり、その特徴はアンケートにおける質問内容、そのアンケート回答の分析法から生じている。

デマテル法のアンケートでは要素間の直接的影響の強さを質問する(図 8 参照)。この回答を用いて要素間の関係の定量的分析を行なう。また複数の回答者がいるため各回答者の回答を基礎として回答者集団としての構造モデルを構成する必要がある。

(1) 構造モデルの作成

デマテル法では要素間の直接関係の強さが回答により与えられるため回答を整理しネットワークまたは行列で表現することにより各回答者別の構造モデルが得られる。回答者集団としての構造モデルを作成するには各回答者の回答の平均を採用する。これを行なうと強さの小さい関係が多くなり複雑性が増すためカットポイントを

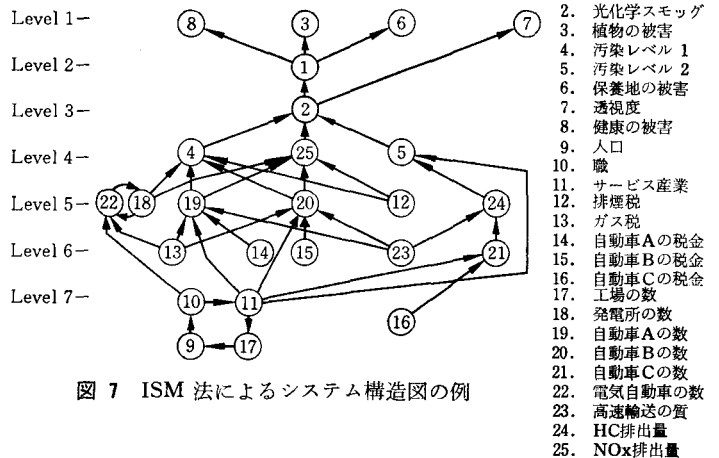


図 7 ISM 法によるシステム構造図の例

問題 16. 教育制度の不応

■この問題が、直接影響を及ぼすと思われる他の問題がありますか。
その影響の大きさは、どのくらいだと思いますか。

問題番号	影響のしかた	影響大
②1	マスプロ教育の弊害としての主体性の欠如	無 1 2 3 4
②2	教育年限の伸長による若年労働者不足	無 1 2 3 4
①6	○	無 1 2 3 4
	問題リスト(25問+追加問題)の中より、つに加えるべき他の問題	1 2 3 4
	○	1 2 3 4
	○	1 2 3 4

図 8 デマテル法アンケート票の例

設定しカットポイント以下の強さの関係を切り捨てて回答者集団の構造モデルとすることも試みられている。

(2) 構造の分析

デマテル法で行なっている分析はつぎの3つである。

- (a) サブシステムへの分割
- (b) サブシステム間の関係の分析
- (c) 要素の影響度の分析

(a), (b)の分析はISM法と同じフィードバック・ループで結合されている要素の部分集合に分割し、それらの間の階層関係を調べるものである。ISM法との違いはここでは直接関係がわかるため、より明確な分析が可能である。この分析においては関係の強さは無視し、有無だけを問題とする。

(c)の分析は対象のシステムにおいて中心となる要素を見出すための分析であり各要素の他の要素への影響の大きさが基礎となる。

分析は関係の強さを要素の値とする行列に下記の変換をほどこして得られた正規化直接影響行列Xが中心となる。

$$X = \lambda X^*, \quad \lambda = 1 / \max_i \sum_j X^*$$

ただし、X*：アンケート回答を行列表現したものの

パスの長さ2の間接影響は行列Xを乗ずることによって得られる。同様にパスの長さnの間接影響はX^nで得られる。したがって間接影響の全体Yは次式で計算される。

$$Y = X^2 + X^3 + \dots = X^2(I - X)^{-1}$$

直接影響行列と間接影響行列を加えることにより総合影響行列Tが計算できる。

$$T = X + Y = X(I - X)^{-1}$$

総合影響行列Tにおいてその要素T_{ij}は要素iが要素jに与える直接および間接影響の大きさを示すものである。ここで行和ΣT_{ij}、列和ΣT_{ij}を考えると前者は要素iが他の要素に与える影響の合計、後者は要素iが他の要素から受ける影響の

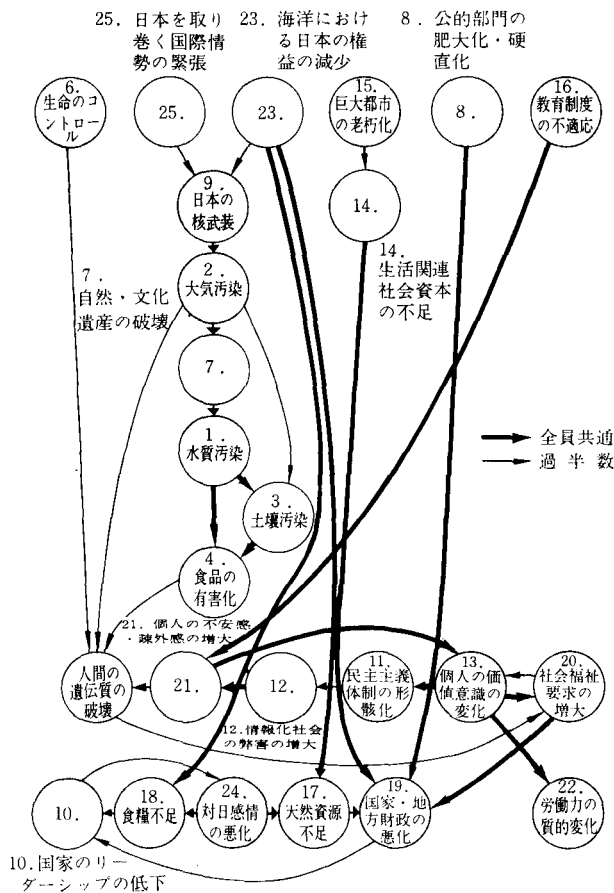


図 9 デマテル法によるシステム構造図の例

合計であり、これらの値からその要素のシステムにおける重要性が分析できる。また総合影響行列 T を分析することによりシステムを特徴づけている支配的関係を説明することが可能となる。

回答者集団としての構造モデルの分析は上述の方法を適用するとともに各回答者の分析結果の比較によって補なうことにより、より効果的な分析とすることができる。回答者間の差異の定量的把握としてはつぎのような尺度も有効である。

$$d_{rs} = \sqrt{\sum_{i,j} (u_{ij}^{(r)} - u_{ij}^{(s)})^2 / N^2}$$

d_{rs} : 回答者 r と回答者 s の相違度
 $u_{ij}^{(r)}$: 回答者 r の正規化直接行列
 N : 正規化直接行列の要素の数

5. オートマトン・モデル [14]

ISM法、DEMATEL法がシステムを静的にとらえているのに対しオートマトン・モデルでは動的システムとしてとらえる。オートマトンはつぎの5項組で表現される状態遷移関数 δ 、出力関数 λ に時間が入るためである。

$$M = (S, I, O, \delta, \lambda)$$

- ただし、 S : 有限状態集合
- I : 有限入力集合
- O : 有限出力集合
- δ : 状態遷移関数 $S \times I \rightarrow S$
- λ : 出力関数 $S \times I \rightarrow O$

オートマトンで考えているシステムは開システムであり入力の変化にしたがうシステムの状態が変化する状況を記述できる。オートマトンの構造モデルはこの状態遷移構造を利用したものである。

オートマトン・モデルは人間行動の分析[6]、都市シ

ステムの分析[19]に用いられた例がある。

(1) 構造モデルの作成

構造モデルの作成は入力と出力の組から状態遷移関数 δ 、出力関数 λ を推測することにより行なわれる。より具体的には、対象の観測結果から対象の状態の変化の構造を分析しようとするものであり、シナリオを書いて構造モデリング・プログラムを用いればそのシステムのモデルができあがるというものである。オートマトンの構造モデリングのアルゴリズムを下に、例を図10に示す。

$(I_1, O_1), (I_2, O_2) \dots, (I_n, O_n)$ の入出力系列が与えられたとする。

- ① $K=1$ とする。
- ② K 個連続して同じ (I, O) 組を入出力系列から探す。あればこの連の最初の入出力組を各 i 番目、 j 番目とし③へ進む。全 (I, O) 組について検討が終われば④へ。
- ③ $I_{i-1} \neq I_{j-1}$ または $O_{i-1} = O_{j-1}$ ならば②へもどる。
 $I_{i-1} = I_{j-1}$ かつ $O_{i-1} \neq O_{j-1}$ ならば $K=K+1$ とし②へもどり最初の入出力系列から再検討する。
- ④ K 個の連の同じ (I, O) 組は同じ状態として入出力系列の最初からたどり状態遷移関数、出力関数を決定する。

(2) 構造の分析

オートマトン・モデルの分析にはオートマタ理論が利用できる。おもなモデル分析項目として、(a) 状態構造分析、(b) サブ・オートマタへの分割、(c) システムの合成、(d) システム状態の制御、がある。

状態構造分析はISM法、DEMATEL法と同様なのであるが状態遷移関では入出力に關係を対応させ複数個の關係とするため分析は多少複雑になる。他の分析項

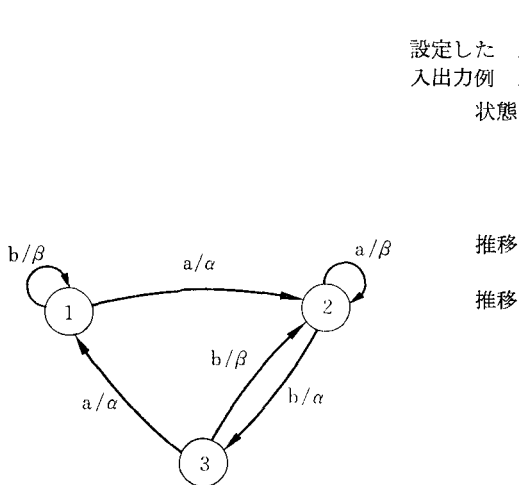


図10 オートマトン・モデルの例

設定した 入力 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16
 入出力例 出力 $\beta \alpha \beta \alpha \alpha \beta \beta \beta \alpha \alpha \alpha \alpha \alpha \beta \beta \alpha$
 状態の組 $(\begin{smallmatrix} b & a \\ \beta & \alpha \end{smallmatrix}), (\begin{smallmatrix} a & a \\ \alpha & \beta \end{smallmatrix}), (\begin{smallmatrix} a & b \\ \beta & \alpha \end{smallmatrix}), (\begin{smallmatrix} b & a \\ \alpha & \alpha \end{smallmatrix}), (\begin{smallmatrix} a & b \\ \alpha & \beta \end{smallmatrix}),$
 $(\begin{smallmatrix} b & b \\ \beta & \beta \end{smallmatrix}), (\begin{smallmatrix} a & b \\ \alpha & \alpha \end{smallmatrix}), (\begin{smallmatrix} a & a \\ \alpha & \alpha \end{smallmatrix}), (\begin{smallmatrix} b & b \\ \alpha & \beta \end{smallmatrix}), (\begin{smallmatrix} b & a \\ \alpha & \beta \end{smallmatrix})$
 推移関係 $(\begin{smallmatrix} b & a \\ \beta & \alpha \end{smallmatrix}) \xrightarrow{b/\beta} (\begin{smallmatrix} a & a \\ \alpha & \beta \end{smallmatrix}) \xrightarrow{a/\alpha} (\begin{smallmatrix} a & b \\ \beta & \alpha \end{smallmatrix})$
 推移関係を表にまとめると、

		入力	
		a	b
状態	1	2	1
	2	2	3
	3	1	2

状態遷移関数 δ

		入力	
		a	b
状態	1	α	β
	2	β	α
	3	α	β

出力関数 λ

目として示したサブ・オートマタへの分割, システムの合成, 状態の制御はシステム理論の概念と一体化しているというオートマトン・モデルの特長であり問題解決のための分析, 計画へと論理的な一貫性を保たせることができる。

6. むすび

「現在の社会システムの問題はデータの不足ではなく情報の構造化にある」とはシステム・ダイナミクスで有名な J. W. フォレストアの言葉である。事実システムダイナミクスのモデル化の過程において用いられている因果関係分析はまさに構造モデルによる分析である。

構造モデルというともむずかしく聞こえるが, この他にもたとえば K J 法は構造モデリングのすぐれた手法であるし要因分析図も特殊な型の構造モデルである等気づかぬうちに一般に広く使われている。

構造モデル分析の手法もここに示した以外にもいくつか考えられている([20]~[24]に掲げておく)。

モデルの分析方法が発展したことにより問題は対象の定式化に集約されつつある。ここに紹介した手法もまだいくつかの問題点を抱えているが, 今後主要な問題となるであろう社会システムにおける合意形成等において構造モデルが目的とする構造の把握・分析, 複数構造間の比較等は不可欠のものとなろう。

参 考 文 献

- [1] 杉野昇, 「社会システムに対するシステムズ・アプローチの必要性和 実際」, オペレーションズ・リサーチ, 22-4, pp. 207-210, 1977.
- [2] 「社会と計測制御特集」, 計測と制御, 16-1, 1977.
- [3] 「社会システムの Structural Modelling」, 計測自動制御学会, 1977.
- [4] 高原康彦, 「大規模システムの理論について」経営科学, 19-5. 6, pp. 167-178, 1975.
- [5] Kemeny, J. G., J. L. Snell, G. L. Thompson, "Introduction to Finite Mathematics," Prentice-Hall, 1966.
- [6] 松田正一, 「システム理論序説」, オーム社, 1971.
- [7] Takatsu, S., "Note on the Application of Categorical Algebra to General Organization Theory," Research Report on Inf. Sci., Dept. of Inf. Sci., Tokyo Institute of Tech., 1974.
- [8] Flamont, C., "Application of Graph Theory to Group Structure" (「グラフ理論と社会構造」紀伊国屋書店, 1974).

[9] 河村和彦, 「複雑な社会問題を取扱う手法: Interpretive Structural Modelling」, 計測と制御, 16-1, pp. 157-161, 1977.

[10] Brill, E. et al., "The Interpretive Structural Modelling Systems: I Users Guide and II Programmers Manual," Battelle Columbus Laboratories, March 1975.

[11] 「Advanced ISM」, 三菱総合研究所自主研究報告書, 1976.

[12] 三菱総合研究所, 「日本の課題—21世紀に向かって取組むべき諸問題」, 総合研究開発機構委託研究, 1975年11月.

[13] 「社会システムに対するシステムズ・アプローチ」, 電子工業振興協会, 昭和52年2月.

[14] 「オートマトンによるシステム分析」, 三菱総合研究所技術メモ, 1975年7月.

[15] Moore, E. F., "Gedanken Experiments on Sequential Machines," Automata Studies, Princeton Univ. Press, pp. 129-153, 1956.

[16] 五百井清右衛門, 「Machine Specification のための実験について」, 早稲田大学生産研究所紀要, 1, 1970年3月.

[17] 五百井清右衛門, 常田 稔, 「Machine Specification」, 早稲田大学生産研究所紀要, 4, 1973年3月.

[18] Gill, A., "Realization of Input-Output Relations by Sequential Machines," J. of ACM, 13-1, pp. 33-42, 1966.

[19] 「都市における公共政策シミュレータの研究」, (財)地方自治情報センター, 1976年.

[20] Mclean, M., P. Shepherd, "The Importance of Model Structure," Futures, Feb. 1976.

[21] Roberts, F. S., "Weighted Digraph Models for Energy Use and Air Pollution in Transportation Systems," RAND Corporation, R-1578-NSF, Dec. 1974.

[22] 「DIGRAPH: Users Manual」, 三菱総合研究所, 1975年.

[23] Reynolds, W. E., "The Analysis of Complex Behavior; A Qualitative Systems Approach," General Systems, XIX, 1974.

[24] Dupperrin, J. C., M. Godet, "SMIC 74-A Method for Constructing and Ranking Scenarios," Futures, Aug. 1974.

(むらこし・としひろ 三菱総合研究所)