

# システム・ダイナミックス(SD)の今日的意義

亀山 三郎

## 1. はじめに

われわれは、いま、昨年11月のベルリンの壁の崩壊が象徴するように、歴史的な、社会システム激動のただ中にある。それは戦後ながく世界を二分してきた東西問題の構図からいえば、西側自由主義対社会主義経済の勝敗に1つの結着がついたことを物語っているともしえる。しかしすでに半世紀近く、あるいは、国によってはそれ以上も続いた社会主義体制が、そう簡単に市場経済に移行できるとは思われない。諸々の社会制度をはじめ、技術水準、さらに人々のメンタル・アティチュードにまで、抗しがたいレベル変数が存在するはずだからである。しかし、当面、従来社会主義諸国が、現在の西側先進国が享受しているような高度経済成長をめざすことは間違いあるまい。

だがここに、高度経済成長をめざす路線には、現在、きわめて深刻な問題が立ちだかっている。周知の地球環境問題がそれである。CO<sub>2</sub>による地球の温暖化、フロンガスによるオゾン層の破壊、酸性雨による森林被害等々、人類の高度経済活動がもたらした自然環境の異変をあげればきりが無い。この問題に対しては、一昨年のトロント・サミットでの議論を皮切りに、相つぐ国際会議で経済成長か環境保護かをめぐって活発な議論がくり上げられている。

このことに関連してすぐに思い出されるのは、ローマクラブが1972年に発表した報告書「成長の限界」である。資源の枯渇、汚染の進行、人口の爆発的増加等によって、このままでは人類は遠からず破局に向かうという警鐘の内容が世界の反響を呼んだことは、まだわれわれの記憶に新しい。その後、翌1983年秋の第1次オイル・ショックを契機に先進国の経済成長は低下し、もっぱら関心がそちらに移って、長期的な地球環境問題への関心は遠のいたかの観があった。しかしその間にも環境破壊

が確実に進行したことは各種の統計データが明らかにしており、「成長の限界」が提起した問題は依然深刻であり、抜本的な解決策がとられないまま今日に至っているといつてよい。

昨年7月、「成長の限界」のもととなったシステム・ダイナミックス(以下SD)による世界モデルのシミュレーションを実行した、当時のMITプロジェクト・チームのメンバー、ピータ・ミリング、エリック・K.O. ツァーンの2人をホストに、西独シュトゥットガルトで1989SD学会国際会議が開かれた。この大会では冒頭を飾ったJ.W.フォレストによるSDナショナル・モデルの報告(後述)が注目をひいたが、最近のSD国際会議では、科学方法論としてのSDの研究から、社会システムのマクロ、ミクロ・レベルでのSDモデルの展開、SD教育の問題にいたるまで、幅広い多彩な研究報告が活発に行なわれている。

東西問題、冷戦構造の崩壊は、それを待っていたかのように、世界のいたるところで、民族や宗教の対立抗争を蜂起させている。社会システムの混迷はますます深い。その根本に経済発展の問題があることは否めないであろう。しかも経済発展は、これからはいかなる場合にも、これ以上生態系のバランスを崩さないという絶対的制約のもとでしか解決されえないであろう。

まさに世紀末ともいえる社会システム激動のいまこそ、21世紀に向けて人類の叡知を結集する方法論として、SDは顧みられてよいのではないだろうか。

## 2. 社会システムの行動理解

今日の世界的な社会システムの混迷に対する、有効な科学的解決策はどこに求められるであろうか。実は、すでに25年以上も前に、今日の事態を予想したかのようなフォレストの発言がある[1]。

1964年に発表されたその論文の中で、フォレストは21世紀への人類進歩のフロンティアがどこにあるべきかを示唆している。フォレストによれば、人類発展の各時代は、移りかわるそれぞれの時代のフロンティアの進

かめやま さぶろう 中央大学  
〒192-03 八王子市東中野742-1

1990年10月号

©日本オペレーションズ・リサーチ学会。無断複写・複製・転載を禁ず。

(5) 557

歩によって特徴づけられる。そのフロンティアとは、話し言葉の発達であり、伝統的な社会構造の進化であり、地理上の発見であり、独裁政治から民主政治への転換であった。そして近代のフロンティアは、“科学の秘密”(the secrets of science)の浸透によって特徴づけられる。

だが次の20年間は、社会がその開拓者の熱情を科学に注いだ時代から、社会システムのダイナミックな行動の理解へと、関心の優先度を変える過渡期となるだろうとフォレスターは予想する。なぜなら、戦争や革命や、経済の停滞、インフレ、企業の破産、多数の苦難、政治的不安定、個人の欲求不満などは、すべて、われわれが社会システムの理解に失敗したことを宣告しているからだ。他方でエンジニアリングは、過去30年間に、社会システムのダイナミクスを洞察する、新しい一般的な基礎を提供した。SDがまだインダストリアル・ダイナミクスであったこの時期、フォレスターはそれを企業工学(enterprise engineering)と呼んでいる。今日では社会システム工学(social systems engineering)と読み換えるのが適当であろう。SDはこのような意味での、社会システムのダイナミックな行動特性(動特性)を解明するための、社会システム工学の方法論にはかならない。SDと必ずしも特定するつもりはないが、このような方法論こそ、次のフロンティアへの鍵をにぎるものであろう。

フォレスターのいうように、今日のエンジニア(科学者もといつてよいであろう)は、科学的フロンティアの時代にどっぷりと浸かって生きてきたから、それが次のフロンティアにとって代わるなどと認識することは困難なことかも知れない。しかし新しい時代の夜が明けるとき、古いフロンティアは消滅するのではない。ただ日常の活動に織り込まれて退くにすぎない。われわれは、すでに、フォレスターの予想した20年をとうに過ぎた時代に生きている。しかもなお上述のように、ますます混迷の度を加える社会システムの現状を見れば、フォレスターの予想にまつまでもなく、今世紀の残された10年間に、社会システムの行動理解という人類進歩の新しいフロンティアへの過渡期として、はっきりと位置づけ、認識すべきではなからうか。

新しい時代は、先行する時代に創り出された基礎の上に建設される。フォレスターは、過去30年間に、エンジニアリングが社会システムの動特性を解明するための一般的基礎を提供したと述べるとともに、そこでの際立った貢献として、次の5つをあげている。

1. システム設計の概念
2. フィードバック制御の原理
3. 政策立案と意思決定の明瞭な区分
4. コンピュータと通信の発達
5. 解析解に対するシミュレーションの代替

これらはいずれもSDの基礎的なコンセプトないし手段をなすものだ。なかでもフィードバックの概念は、「SDは社会システムへのフィードバックの概念の適用である」といわれるほどに、方法論としてのSDアプローチにとって本質的なものである[2]。フォレスターは、フィードバック制御は、自律的なクロズド・システムの内部で生ずる、ダイナミックな現象の全範囲にかかわる重要概念であることを強調している。SDでは対象(社会システム)をモデル化するとき、最初にシステムの境界を定義し、システム内に生ずる事象の因果関係をフィードバック・ループ構造として定式化する。フィードバック・ループの基本構造は、システムの状態を示すレベル変数、レベル変数を伝える情報チャンネル、情報の伝えるシステムの現状を目標値と比較してとるべきアクションの大きさを決める意思決定(レート変数)、意思決定の結果としてのアクションの流れ、アクションの流れは再びシステムの状態に影響してその値を変える、という以上の一連のプロセスを結び閉じたループである。社会システムはどんなに単純なものでも、工学的なシステムに較べればはるかに複雑であるから、システム内にこのようなフィードバック・ループは多数存在し、その多重ループ構造の全体がシステムの行動を規定することになる。

システム設計にあたって、政策と意思決定の区分が重要であるのは、政策にしたがって意思決定が行なわれるという関係にあるからである。工学的に言えば政策は伝達関数にあたり、意思決定はその関数形によって処理された瞬間瞬間の値に対応する。単純な社会システムでも伝達関数は非線形をふくみ、しかもそれが相互に作用しあうフィードバック・ループは多数にのぼる。そのようなシステムの行動を予測するには解析解は無理で、ステップ・バイ・ステップのシミュレーションに依るしかない。しかしコンピュータの発達がその膨大な量の計算コストをひき下げ、シミュレーションを経済的に利用可能なものとした。本特集でも紹介されているように、SDシミュレーション・ソフトの最近の発達は、シミュレーションという社会システムの実験を、ますます誰にも利用可能な身近なものにしている。

社会システムの行動理解に、フィードバック・ループ

構造を基本とするSDのアプローチは構造依存といわれる。それは統計的アプローチによる計量経済モデルのデータ依存と対比されるSDモデルの顕著な特色をなす[3]。構造依存の意味をたずねてみよう。

### 3. SDアプローチの特徴

目的を共有する人々の協働という側面を強調すれば、社会システムないし組織は、すべてこれをコントロール・システムと見ることができる。そこには必ず上記のフィードバック・ループが認められる。意思決定は孤立しては行なわれ得ない。フィードバックの連続的な性質から、現在の意思決定は先行する意思決定の決定によって影響され、それはまたみずからの次の決定に影響をおよぼす。ロバーツは、SDは社会システムをこのようにコントロール・システムの立場から見るのが最も有効であるという1つの哲学であり、またそのような見地から導かれる社会システムの政策設計のための方法論にほかならないと述べている[4]。

ところでここに、われわれの行なう意思決定に対してサイモンによって提出された重要な見解がある。“限定された合理性”(bounded rationality)の主張である[5]。サイモンによれば、われわれの行なう意思決定は、主として(1)すべての代替案を知ることはできない、(2)外生的な事象については不確実性がある、(3)結果を計算することができない、という3つの理由によってつねに限定された状況のもとにある。このような意思決定状況は、最適化原理に対する満足化原理としてよく知られている。だが上述のフィードバック・ループの文脈でいえば、意思決定の結果はアクションを生じ、アクションの累積がシステムのレベルを決定するから、その全効果は重大である。換言すれば、十分な合理性のないままに行なわれた意思決定が、しかも確実に社会システムの状態をコミットしてしまうということだ。それが累積されるとき、できあがった社会システムは、まことに人工物(Artificial—サイモン[6])としかいいようのない奇妙な構造物であろう。しかしそれがわれわれの対象とする現実の社会システムであり、しかもその妖怪が地球の生態系を脅かすまでに肥大してしまっているのだ。

このような人工物としての社会システムの行動が示す空間は、完全なランダムネスの支配する世界でもなく、また決定論の支配する世界でもなく、その中間に位置するような、なんとも従来の科学にはなじみにくい空間といわなければならない。その行動の軌跡を再現しようと

すれば、できるだけ忠実に問題行動をひき起こしている因果関係を追って、それをモデルの構造として組み込む以外にないであろう。いいかえれば、システムの行動をひき起こしている内部メカニズムを、モデル構造に再現するしかない。

モデルの作成には、専門家の判断や直感や熟練が重要な役割を演ずる。またモデルの情報源としては、数値データだけでなく、人々のメンタル・データまでをふくむ利用できる情報の全範囲が参照されなければならない。フォレスターはSDがアートであることを否定しない。しかし完成したモデルが実際のシステムの適切な表現であるとき、モデルはそのモデルが表現するシステムについての理論であるという。モデルの構造に具体化された仮説は、システムの行動がいかにして生ずるかについての因果論を表わしており、モデルは現実世界の一部がいかに作用するかについての理論であるとされる[7]。もっともフォレスターは、モデルがそのまま理論となるといっているのではない。モデルが理論となるためには、一般性(generality)と応用可能性(transferability)が獲得されなければならない。たとえば、アーバン・モデルは都市の成長と均衡に関する一般理論として解釈されるべきであり、パラメータやテーブル関数を適当に変えることによって、西ベルリンやカルカッタのような異なった都市にも適用可能でなければならないと主張される。フォレスターはセンジとともに、モデルが理論となるための、モデルの構造、モデルの行動、政策に関する17種類のテストを推奨している[8]。

さて、このようなSDのアプローチに対しては、当然、多くの批判がなされてきた。とくに伝統的な社会科学の分野からは、批判の連打を浴びてきたとフォレスターは述懐している。それらの批判のなかから、SDが特に他のモデリング・アプローチと顕著に対立する若干の論争点を取りあげてみよう[9]。

(1)内生的見地 上述のように、SDは閉じた境界をもつ因果ループをモデル構造の最上位におき、モデルの変数をできるだけ境界内の内生変数としてとらえようとする。これを内生的見地(endogenous viewpoint)と呼ぶ。内生的見地は、社会をフィードバック・システムの見地からとらえようとするSDの立場からは、当然のアプローチといえよう。フォレスターのいうように、計量経済モデルはしばしば外生変数によって支配され、経営者は自分の会社の問題を外に求めたがる。しかし内生的見地はあまりに機械論的であると批判されてきた。これ

に対しフォレストは、システムの問題行動をひき起こすメカニズムを明らかにすることこそモデル作成の目的ではないのかと反論している。唐突かも知れないが、地球の有限性が強く認識されているいま、内生的見地はもっと注目されてよいのではないだろうか。

(2)予測 経済モデルには、モデルの究極のテストはその予測能力にあるとする共通の仮定がある。これに対しSDでは、モデルの予測能力よりも、現実のシステムの行動に対する説明力の方が重視される。システムの行動をひき起こしている実際の因果構造の再現が重要である。因果構造がうまく再現できれば、モデルの構造は現実のなかにその対応物(counterparts)を持つことになる。このことは、モデルのシミュレーション結果を現実に返して、政策改善のための具体的なアクションをとろうとするとき、現実のどこに手を打てばよいかについて、モデルが有効な処方箋を提供しうる能力を持つことを意味している。これに対し計量経済モデルの構造といわれるものは、データの統計的相関から導かれる形式的構造であり、現実に対応物を持つわけではない。データの相関は因果関係を保証するものではなく、モデルは本質的にブラックボックスといわなければならない。

(3)モデルの検証 SDモデルの検証は、これまで最大の論争点であった。SDに対する多くの誤解が生ずるのもこの点である。一般にモデルの検証というとき、人はこれを仮説検証と同義に解して、仮説から推論によって導かれるモデルの論理的妥当性を求める。しかしそのようなモデルのテストは、モデルの含意をその仮定からひき出す過程で、論理的な誤りがなかったかどうかについては教えてくれるが、モデルと現実との関連性については何も教えてくれない。これに対してSDでは、モデルの妥当性はそのモデルの研究目的ないし実践目標と切り離して論ずることはできないと考える。「客観的」と称するモデルの論理的妥当性チェックの手続きも、結局は、その手続きそれ自身は客観的な証明なしに受け入れられるという、ある低いレベルの判断に依存しているのではないかとフォレストは反論し、統計的な信頼水準の利用がモデルの妥当性に客観性をもたらすという幻想を例にあげている。信頼水準の選択の問題は、われわれの実践目標と結びつかねばならない。実践目標についての合意は形式的なアルゴリズムの過程によっては達成されないのだから、モデルの妥当性の問題はすぐれて社会的議論の問題となる。こうしてSDのアプローチでは、モデルの妥当性は「証明」というよりは「合意」形成の問題で

あり、それはモデル関係者の間に信頼性をうちたてることによってしか求められないとされる。モデルの信頼性を確立する全過程に誰もが接近しうることこそ決定的に重要なことだとフォレスト＝センジは述べている。そのような信頼性の確立に、モデルの論理性的なテストは必要ではあっても十分ではない。

## 4. SDモデルの展開

SDモデルは、今日、各方面で展開されているが、ここで特に注目されるMITグループによるナショナル・モデルと企業進化モデルの2つをとりあげる。

### (1) ナショナル・モデル

フォレストは、ナショナル・モデルの発表にあたって、「マイクロ構造に起因するマクロ行動」という副題をつけている[10]。この表現からも、上述のSDアプローチの特徴が強うかがえよう。ナショナル・モデルは、経済における分権化された意思決定を支配する局所的な政策が、どうして観察されるような全体の経済の行動を生み出すのかを解明するために着手された。モデルは内生的に、景気循環、インフレーション、スタグフレーション、経済の長期波動、成長のようなマクロ経済に観察される主要なモードを生み出すことができるという。なかでも関心をよぶのは、モデルによるコンドラチエフ長期波動の立証である。フォレストは、変動する実質利子率を長期波動を説明するいくつかのドライビング・フォースの1つとしてあげている。モデルは、消費財部門、資本・生成部門、家計部門、政府部門、労働部門、金融部門の6部門からなり、200を超えるレベル変数と1,500以上の方程式をふくむ。数学的にいえば、200次の非線形微分方程式が扱われていることを意味する。

経済学にはこれまで2つのわかれた分野—マイクロ経済学とマクロ経済学—があり、両者の連環はほとんどとりあげられていない。マイクロ経済学は全体としての経済行動を説明する適切な基礎を提供せず、マクロ経済理論は国民経済に見られる行動の多くの説明に失敗している。両者を結びつけるSDナショナル・モデルは、フォレストのいうように、経済の研究手法に新たな光を投げかけ、多くの論争を解決し、改善された経済政策に導くことが期待される。

### (2) 企業進化モデル

社会システムの進化は、自律的な社会システムの相互作用の結果であると考えられる。企業をそのような多階層の意思決定レベルからなる自律的なシステムとみて、

戦略的意思決定のレベルに、最近の進化論とAIの分野での新しい発展にもとづくスパイラル・ループの概念を適用したマーティンのモデルは注目される[11]。モデルは、戦略実行のレベルには従来のSDによる連続的なフィードバック・ループを適用し、戦略レベルの不連続なスパイラル・ループとの間に、階層的フィードバック結合を試みている。さらにそのようなループ構造を持つシステムが相互に作用しながら社会システムが進化していく様子を、具体的なケースについて、シミュレーション・ゲームとして展開している。

マーティン・モデルは、システムが構造そのものを変化させながら発展していくという、社会システムの環境適応行動をみごとにモデル化しており、SDモデルの拡張を示すとともに、企業的意思決定モデル(DSS)としてもすぐれたものとなっている。

## 5. おわりに

われわれはこれまで断片的な科学的知識については、すでにその洪水に見舞われているといっても過言ではない。しかし地球の有限性が強く認識され、生態系の危機が叫ばれている今日、これとの共生をはかる社会システムの設計こそ緊急の課題ではないだろうか。これまでの科学の還元主義的傾向をすて、もっと地球規模のマクロスコopで見た[12]、グローバルな資源配分のための処方箋がえがかれねばならない。SDはそのための方法論を提供してくれないであろうか。新たなフロンティアに向けて、社会科学だけでなく、科学の全分野に文字通りのパラダイム革命が強く求められている。

## 参考文献

- [1] Forrester, J. W. : "Common Foundations Underlying Engineering and Management", IEEE Spectrum 1, No.9, September, pp.66-77 (1964)
- [2] Richardson, G. A. : "The Feedback Concept in American Social Science, with Implications for System Dynamics", in Qifan Wang, et al.(ed.), Theory and Application of System Dynamics, New Times Press, Beijing, P.R. China, pp.23-30(1987)
- [3] Meadows, D.H.:"The Unavoidable A Priori", in Jørgen Randers. (ed.), Elements of the System Dynamics Method. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, pp. 30-57 (1980)
- [4] Reberts, E.B. : "The Design of Management Control Systems", in E. B. Roberts, (ed.), Managerial Applications of System Dynamics, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, pp.393-411(1978)
- [5] Simon, H.A. : "Rational Decision Making in Business Organization", THE AMERICAN ECONOMIC REVIEW, Vol.69, No.4, SEPTEMBER, pp.493-513(1979)  
ハーバート・A・サイモン著, 稲葉元吉, 吉原英樹訳: 新版システムの科学, パーソナルメディア, (1987) 315-376
- [6] Simon, H.A. : The Sciences of the Artificial, Second Edition, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts(1981)  
(邦訳) 稲葉, 吉原訳, 前掲書
- [7] Forrester, J. W. : "Future Development of the System Dynamics Paradigm", in Qifan Wang, et al.(eds.), Theory and Application of System Dynamics, New Times Press, Beijing, P.R. China, pp.1-7(1987)
- [8] Forrester, J.W. and Senge, P.M. : "Test for Building Confidence in System Dynamics Models", in A. A. Legasto Jr., J. W. Forrester, J. M. Lyneis, (eds.), SYSTEM DYNAMICS, Studies in the Management Science, Vol.14, North-Holland Publishing Co., Amsterdam, pp.209-228(1980)
- [9] 亀山三郎: AD (Accounting Dynamics) モデルの検証, 商学論叢(中央大学), 第26巻第5・6号(1985) 25-45  
亀山三郎: ADモデルの検証(その二), 商学論叢(中央大学), 第30巻4・5・6号(1989) 19-224
- [10] Forrester, J. W. : The System Dynamics National Model: Macrobehavior from Microstructure", in Milling, P.M. and Zahn, E.O. K., (eds.), Computer-Based Management of Complex Systems, Springer-Verlag, Berlin, pp.3-12(1989)
- [11] Merten, P. P. : "System Simulation, The Simulation of Social System Evolution with Spiral Loops", Behavioral Science, Volume 33, pp.131-157(1988)
- [12] ジョエルド・ロスネー著, 明島高司訳: グローバル思考革命macroscope, 共立出版(1984)