

システム・ダイナミクス(上)

—「成長の限界」以後の進展—

島田 俊郎

SDは1956年、MITのJay W. Forresterによりはじめはインダストリアル・ダイナミクス(ID)として創案された。Forresterは1967年、同じ手法によって地域問題を扱い、1969年Urban Dynamics(UD)を出版した。本書のモデルを以後ForresterのUDモデルと呼ぶことにする。さらに1970年、世界モデルの構成に着手その成果を1971年World Dynamics(WD)として出版した。

同じ頃、ローマクラブの委託を受け、Forresterグループは「人類の危機に関するプロジェクト」の研究を、Dennis L. Meadowsを主査として行ない、ローマクラブへの報告“The Limits to Growth”(邦訳“成長の限界”)が出版された。本書は現在もなお版を重ねよく読まれており、食糧危機、エネルギー危機等を読者に考えさせるとともに、SDの紹介の役目も果している。

1973年、Forresterを中心とするMITのSDグループは、アメリカの国家モデルNational Dynamics(ND)の開発を始め、現在なお研究中である。別にEdward B. RobertsはSDを健康医療問題に適用、これをHealth Dynamics(HD)とよぶ。これらを総称してSystem Dynamics(SD)とよぶことはよく知られている通りである。

1973年、OR学会の研究部会の1つとしてSD部会が明治大学に事務局をおいて発足、1977年まで活動したが文献収集は今も続けられている。

1. MITのSDカリキュラム

筆者が滞在した1966年～1967年に開講されたSDコースは、

Industrial Dynamics I (Swanson)
 " II (E.B. Roberts)
 Special Studies in Management (Forrester)

の3コースだけであった。

現在は大変多くなって、次のようになっている。

core subject

1. Principles of Dynamic Systems I
2. " II

ID関係コース

1. Industrial Dynamics
2. Applications and Implementation of Industrial Dynamics

HD関係コース

Dynamics of Health Service Systems

Research Seminars

1. Economic Dynamics
2. Policy Analysis, A Systems Perspective

他学科との共通コース

Dynamics of Physical and Social Systems

このようにコースが多く、内容も多方面に渡るようになってきているが、これらは、UD、ND、HD等の研究発展に呼応している。他学科との共通コース担当のForrester、HD担当のRobertsは依然変わっていないようだが、それ以外は、core subjectsのコースも含めてMITの終身専任者ではないようで、数年で入れ代っている。これらのコースのかつての担当者の何人もが米国をはじめ世界中の大学、研究機関に散って、SDの普及に力をかしている。

Nancy Robertsは、今までMITの学部および大学院で教えられていたSDの分析統合手法を小学5、6年生に教えることを可能にするカリキュラムを考案した[50]。SDの解析手法を、フロー・ダイアグラム、方程式作成、シミュレーションの3階梯とすれば、そのカリキュラムはフロー・ダイアグラム階梯に相当する。すなわち、原因結果構造を示すフィードバック・ダイアグラムの作成およびその読解を教えるカリキュラムの開発である。さらに、開発されたこの問題構造化(分析統合)の接近法は、この方面の数年の経験をもつ教師によるものと同様に効率的に、まったく経験のない教師によっても

しまだ としろう 明治大学 商学部

教えられうることを示している。

最近、Nancy Roberts 指導のもと、MIT の SD グループ内に、中学校向けのカリキュラム研究チームが構成され、そのためのパッケージがテストされている。

以上のことは、SD が分析手法として大変やさしいものであることを示すと同時に、現在のばらばらに事物を記憶させるという初等教育体制に対して、システムを関連のある原因結果の構造として捉えさせることの重要性および児童のそれに対して示す興味を指摘するものとして、わが国でも注目すべきことであると思われる。

2. Industrial Dynamics

後の文献表で明らかな通り、ID に関する文献は少ない。これは ID が実用されていないのではなく、発表されにくい故と思われる。

Roberts 編の Readings [11] は1978年の出版であるが、新しい論文が少ないためか、Roberts 関係者以外の論文はかなり前のものである。だが、ID に関しては見逃し得ない本であろう。

ページ数の関係で ID に関する説明を省く。

3. Urban Dynamics

“Urban Dynamics” 出版の後しばらくして、MIT の SD グループにより Urban Dynamics の事例研究として Lowell が選ばれ、1971年研究が始められた。Lowell が選ばれたのは次のような理由からであった。1. Lowell の当事者に UD 適用の熱意があった。2. Lowell 市発祥以来 150年で UD をテストするのに十分な年限を持つ。3. Lowell は UD がとりあげている成熟した都市としての問題をかかえている。

Lowell 研究は、Forrester の UD モデルをもととして Lowell の150年に及ぶ実績値に Forrester モデル計算値を比較してパラメータの値を改善することから始められた[37]。改善されたパラメータによるシミュレーション結果を、成長期1826~1910、成熟期1910~1930、平衡期1930~のそれぞれについて、実績値と比較し、その適合、不適合およびその理由を検討した。

さらに Lowell モデルには、住宅セクターの改良、税金、産業用地地価等の導入などが行なわれた。

以上についての説明は、Readings in Urban Dynamics Vol. 1[6]に詳しい。

さて、Lowell モデルを含め、UD モデルで問題となるのは都市とその郊外地との関係である。Lowell 研究の SD グループは、1974年の早い時期に郊外を含む都市モデルの構成に着手した[38]。市とその郊外を含むシステムをメトロポリタン・システムとよんでいる。市セク

ターと郊外セクターを2つの UD モデルとして構成、両者を結ぶ interface セクターを付加した。その結果、Forrester の UD モデルの約3倍の400方程式を含むことになった。有効なモデルを作る鍵は、モデルをして必要なだけの複雑さに止めることにある。そこで、市郊外モデルでは Forrester の UD モデルの9レベルを、都市セクター、郊外セクターそれぞれ6レベルに組み直した。

interface セクターは、メトロポリタン・システムの1つのセクターが、他のセクターより魅力的であれば、より多くの人口と産業を受け入れるという考えで設計されていて、次の4部分からなっている。

1. 高給者の就業機会による転入
メトロポリタン・モデルでは、人口を上級所得者と下級所得者の2階層に分ける。
2. 高給者の居住条件によるセクター移動
3. 輸送能力による通勤の難易
4. メトロポリタン・エリア内の産業配置

メトロポリタン・モデルの方程式数は約300である。[38]メトロポリタン・モデルのシミュレーション結果を、Lowell の実際に比較して、Lowell の1970年の状態がモデルの時点150に対比されるべきであるとしている。

このメトロポリタン・モデルを使い、3種の政策シミュレーションが行なわれ、その結果の検討および Forrester の UD モデルとの対比が行なわれている。

Lowell メトロポリタン・モデルに関しては、Readings in Urban Dynamics Vol.2 [12] に詳説されている。

Murphy は市/郊外に地方を含めたモデルを研究した[33]。このモデルは次の4部からなる。1. 市モデル。Forrester の UD モデルに酷似。2. 郊外モデル。市モデルに類似。3. 通勤人口に関する6セクター。4. 地方セクター。国は、同規模の、郊外を持つ100の市からなると仮定し、1850~2150年の期間でシミュレート、地方からの人口移動が無視し得ない影響を持つことを示している。

UD モデルは米国以外でも、西独、フランス、イタリア等で研究されている。

Furxhi 等[24]は Forrester の UD モデルを基礎としてトリノ・モデルを構成した。トリノおよびトリノ近郊23自治体を含むモデルである。人口（人口、5年間の転入数、居室数の3レベル）、産業（産業資本、従業員数の2レベル）、土地（占有土地の1レベル）、公害（固型廃棄物蓄積量の1レベル）の4セクター、7レベルのモデルである。使用データには1901~1971年のトリノ統計表を利用、これに近年の各種統計表を加えて用いているという。

現在、世界で地域モデルが最も多く作られているのは

日本であろうと思われる。UDの原典であるForresterのUDモデルも、これから発展したLowellモデルも、ForresterのUDモデルの計算値と比較するという目的もあって、前述の通り少ないレベルで長期の傾向を説明させようと試みているが、日本で開発されたモデルは、国状の違いからか、原典とはかなり違った研究姿勢を見せている。

UDの日本における研究としては、1973年兵庫県が開発した兵庫モデルと、1974年OR学会が受託して、同学会に設けられた「公共政策研究委員会」が研究開発した埼玉モデルが先行した。前者にはCSMP、後者にはCSMPに対応するユニバックのCSSLが用いられた。両モデルは学会の報文集[9]および本誌のSD特集に詳説されている。兵庫モデルが県の主導で開発されたのに対して、埼玉モデルが研究モデルであるため、現在県は実用には供していないという違いはあるものの、両モデルはその後の地域モデルに多かれ少なかれ影響を及ぼしている。

以下いくつかの地域モデルにふれることにする。

大阪府モデル [37]

1. 目的
このままいけば大阪はどうなるかという予測。
2. 部門別
人口、環境、産業、資源、交通の5セクター。
3. 人口階層
5才階級を主とし、別に新生児、1～4才児、85才以上をそれぞれ1階層として扱っている。
4. 地域
大阪府を1地域として扱う。地域外との関連では魅力の比較など、地域外との関係を仮定して処理している。
5. 計算開始時
1970年
パラメータ推定用に1960～1970年あるいは1965～1971年データを利用。
6. 計算期間
50年
7. 兵庫モデルを参考にしている。
8. 使用言語
CSMPⅢ

宮城県モデル [29][30]

1. 目的
自然環境、土地、水等の資源的制約が、人口と産業の成長にどう抑制的に働くかを明らかにしながら、均衡のとれた県土と県民生活の将来像を予測し、新長期総合計画および国土利用計画策定を支援すること。
2. 部門分割
人口、産業、土地、環境、公共、生活の6セクター

3. 人口セクター
男女別5才階級別階層。
4. 域内連関型モデル
人口の流出入関係を除き、他のすべての要素について県域の内部のみで完結していると仮定してモデルを構築。
5. 計算開始時
1975年
6. 計算期間
50年
7. 兵庫モデルを参考にしている。
8. 使用言語
CSMPⅢ

神奈川モデル [26]

対象地域を県域にとり、域内2分割による分析を行なうシンボリック・モデルと、神奈川県および県との関係が強いと考えられる東京通勤圏(40km圏)を含め、その全体を11地域(県内7ブロック、県外4ブロック)に分割した基本モデルと2種類のモデルがある。

モデル名	シンボリック・モデル	基本モデル
モデルの目的	現状推移の把握	政策実験
対象地域	県域	県域および東京通勤圏(40km圏)
地域分割	2分割(横浜・川崎、その他の地域)	11分割(県内:横浜、川崎、横須賀・三浦、湘南、県西、県央、県北、県外:東京区部、東京都下、埼玉、千葉(茨城の一部を含む))
セクター分割	7セクター 人口・住宅、産業、土地、交通、公害、公共サービス、財政	同左
人口	5才階級別19階層	同左
計算開始時	1975年	1975年 各係数算出のもととなる基準値(ノーマル値)は、おおむね計算開始時のものを用いる。
計算期間	25年	10～15年
使用言語	FORTRAN	同左

千葉県モデル [22][35]

1. 目的
県の主要指標の将来推計を行なうこと。
2. 部門別
人口・住宅、産業、労働市場、土地利用、交通、公共施設、財政、環境の8セクター。
人口・住宅セクター

1. 出生率・死亡率：出生率については、合計特殊出生率1.95、死亡率については男女の平均寿命が78才でそれぞれ安定するように設定。
2. 転入・転出人口の年齢構成：1974～76年度実施の人口移動実態調査の結果に基づいた転入・転出別各才構成比を基礎とし、これに高年齢化にともなう変化を加味して設定。

産業セクター

GNP成長率：1976～1979年度については実績値、1980～1985年度年平均4.8%、1986年度以降4%と仮定

他の6セクターについては、現状推移を仮定。

3. 地域別

近郊内（富津市、君津市、市原市、千葉市、八街町富里村、成田市以西）近郊外（左以東）

4. 人口

1才別階層人口で、75才以上1階層。

5. 計算開始時 1975年

6. 計算期間 25年、50年（試験的使用）

7. 使用言語 FORTRAN

シミュレーション実行から結果を端末に表示するまで2～3分。

以上のモデルとかなり内容の違うモデルが室井[32]によって研究されている。本モデルは、ForresterのUDモデルの考え方を基本として展開されており、大阪市をシミュレーション事例としている。もちろんForresterのUDモデルを日本に適用するために、人口、住宅、産業等の区分を変更するなど相違はあるが、初期値を1920年におき、以後50年間の大阪市の長期動向に適合するようにパラメタ等を選定するなどMIT、SDグループの研究姿勢に沿っている。

県、市の企画モデルは、行政のための資料を作成する必要があるため、複雑なモデルになりがちであり、初期値の設定も現在に近い時点になりがちである。しかしながら、NDにおいて後述する通り、投資循環は10～20年の周期を持つ故、数十年後の数値を計算するためには、パラメタ推定のための期間を投資循環の何周期かの長さにすることが望まれる。同時にモデルそのものも簡略化されるのが好ましい。

その意味では、神奈川県のように2種類のモデルを作るというのも一法であろう。

文 献

報文集[10]の文献表に出された本および論文をのせる

のを原則とする。ただしページ数の関係から、proceedings中の論文およびworking paperの相当数、日本OR学会の論文発表を省略した。また報文集[10]には手違いからB～D間の論文が抜けたので補充した。

本

- [1] Hamilton, H. R., S. E. Goldstone, J. W. Milliman, A.L. Pugh III, E.B. Roberts, and A. Zellner. *System Simulation for Regional Analysis: An Application to River Basin Planning*. Cambridge, MA: MIT Press, 1963.
- [2] Krallmann, Hermann. *Heuristische Optimierung von Simulationsmodellen*. Birkhauser Verlag, Basel und Stuttgart, 1976.
- [3] Levin, Gilbert, Edward B. Roberts, Gary B. Hirsch, Deborah S. Kligler, Nancy Roberts and Jack F. Wilder. *The Dynamics of Human Service Delivery*. Cambridge, MA: Ballinger, 1976.
- [4] Levin, Gilbert, Gary B. Hirsch, and Edward B. Roberts. *The Persistent Poppy: A Computer Aided Search for Heroin Policy*. Cambridge, MA: Ballinger Publishing Company, 1975.
- [5] Lukaszewicz, Ryzard. *Dynamica Systemow Zarzadzania*. Warsaw: Panstwowe Wydawnictwo Naukowe, 1976.
- [6] Mass, Nathaniel J., ed. *Readings in Urban Dynamics: Volume 1*. Cambridge, MA: MIT Press, Inc., 1974.
- [7] Meadows, Dennis L., de. *Alternatives to Growth-I: A Search for Sustainable Futures*. Cambridge, MA: Ballinger Publishing Co., 1977.
- [8] Naill, Roger. *Managing the Energy Transition*. Cambridge, MA: Ballinger Publishing Co., 1977.
- [9] 日本オペレーションズ・リサーチ学会, “都市公共政策のシステム分析に関する調査研究”, 報文集T-75-1, 1975.
- [10] 日本オペレーションズ・リサーチ学会, “システムダイナミクス—方法論と適用例—”, 報文集T-77-1, 1977.
- [11] Roberts, Edward B., ed. *Managerial Applications of System Dynamics*. Cambridge: MIT Press, 1978.
- [12] Schroeder, Walter W., III, Robert E. Swe-

ney, and Louis E. Alfeld, eds. *Readings in Urban Dynamics: Volume 2*. Cambridge, MA: MIT Press, Inc., 1975.

論文

ID 関係

- [13] 芦刈勝治, 公企業経営のシステム分析——東京都営バス事業のケーススタディー, オペレーションズ・リサーチ, vol.24, no.12, pp.735~741, 1979.
- [14] Burns, J.F., and Sivazlian, B.D. "Dynamic Analysis of Multi-Eschelon Supply Systems." *Journal of Computers and Industrial Engineering*, vol. 2, pp. 181-193, 1978.
- [15] Carlson, Bruce R. "An Industrialist Views Industrial Dynamics." *Industrial Management Review*, vol. VI, no. 1, pp.15-20, Fall, 1964.
- [16] Carpenter, F. S., D. G. Hill, and C. V. Swanson. "Anatomy of a Success with a Planning Model." Copies are available from Carl V. Swanson at Technology Management, Inc., 1 Broadway, Cambridge, MA 02139.
- [17] Coyle, R. Geoff. "On Scope and Purpose of Industrial Dynamics." *International Journal of System Science*, vol.4, no.3, pp.397-406, 1973.
- [18] Roberts, Edward B. "Systems Analysis of Apparel Company Problems." *DYNAMICA*, vol.3, Part 3 (Summer 1977), pp.105-131.
- [19] Schwarz, Ingo A. "A Generic System Dynamics Model Applied to U. S. Coal Mines." *Modeling and Simulation*, vol. 9, Instrument Society of America, Pittsburgh, 1978.

UD 関係

- [20] Ammentorp, William, Paul Gunderson, and Jon Morris. "A Dynamics Simulation Model of the Articulation Between a Regional Occupational Training System and an Occupational Work Force." *Regional Science Perspectives*, vol. 6, pp.28-39, 1976.
- [21] Britting, Kenneth R. "Societal Values in Urban Dynamics," in *Proceedings of Summer Computer Simulation Conferences*, Simulation Councils, Inc., P.O. Box 2228, La Jolla, CA 92037, Houston, 1974.
- [22] 千葉県企画部企画課, 千葉県の21世紀への展望——システムダイナミックス千葉県モデルの試算結果, 1980.

- [23] Ford, Andrew. "Simulating the Effects of Boomtown Policies: A Summary Report." *Simulation as an Aid to Making Decisions on Energy*, proceedings of the Simulation Council, March, 1979.
- [24] FURXHI, M.G., A. TARTAGRIA, and A. TERZI, TORINO: A DYNAMIC MODEL OF AN URBAN AREA, PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM AND COURSE, SIMULATION '75, pp.627~630, ZURICH, JUNE 23-26, 1975.
- [25] 城 信雄, 実用的都市人口推定モデルの開発とその評価, オペレーションズ・リサーチ, vol.21, no.4, pp.201~212, 1976.
- [26] 神奈川県企画部計画室, 神奈川システムダイナミックスモデル構造概要, 1979.
- [27] 柏井澄夫, 山田和豊, 大河内勝司, 名古屋市計画局, 計画部都市計画課, 名古屋土地利用動態モデル, オペレーションズ・リサーチ, vol.23, no.12, pp.773~779, 1978.
- [28] 真庭 功, アーバン・ダイナミックス——都市エネルギーの需要と供給システム——, 1974.
- [29] 松崎功保 (IBM), 豊原昭一 (宮城県) 他, 社会・経済環境変化へのシステム・モデルからの挑戦——宮城県長期計画総合モデルの開発と運用, 1978.
- [30] 宮城県企画部企画調整課, 宮城モデルの概要, 1977.
- [31] 森地善夫, 岡田定一, 自治体における将来動向予測—滋賀システムダイナミックス—, 日本電気技報, No.120, pp.15~20, 1977.
- [32] 室井 明, ダイナミックモデルによる都市の分析と評価, オペレーションズ・リサーチ, vol.21, no.11, pp.640~648, 1976.
- [33] Murphy, John H., "Metropolitan Dynamics—A Model of Urban, Suburban, and Rural Interactions, System Dynamics Group, 1972.
- [34] NELSON, CARL W. AND HAROLD M. KRISBERGH, A SEARCH PROCEDURE FOR POLICY ORIENTED SIMULATIONS: APPLICATIONS TO URBAN DYNAMICS, *MANAGEMENT SCIENCE*, vol.20, no.8, pp.1164~1174, 1974.
- [35] 日本長期信用銀行, 千葉県システムダイナミックスモデル開発調査報告書, pp.1~84, 1978.
- [36] 大阪府企画部企画室, 大阪の超長期展望に関する調査研究 (報告書) 大阪ダイナミックモデル, 1976.

- [37] Schroeder, Walter W., III., and John E. Strongman. "Adapting Urban Dynamics to Lowell", in *Readings in Urban Dynamics: Volume 1*, edited by Nathaniel J. Mass, Chapter 16, pp. 197-223. Cambridge, MA: MIT Press, Inc., 1974.
- [38] Schroeder, Walter W. III. "Urban Dynamics and the Suburbs." in *Readings in Urban Dynamics: Volume 2*, edited by Walter W. Schroeder III, Robert E. Sweeney, and Louis E. Alfeld, chapter 12, pp. 219-301. Cambridge, Mass.: Wright-Allen Press, Inc., 1975.
- [39] Schwartz, Ingo A. "The Development of a System Dynamics Model for Regional Analysis." *Modeling and Simulation*, vol. 7, no. 2, pp. 830-834, Instrument Society of America, Pittsburgh, 1976.
- [40] SEXTON, DONALD E., EVALUATING URBAN GROWTH POLICIES WITH A SYSTEMS SIMULATION, *MANAGEMENT SCIENCE*, vol.25, no.1, pp.43~53, 1979.
- [41] Stark, K.P., L.C. Wadhwa, Y-M Demoulin, W. L. W. Grichting, P. J. Crossman and B. A. Harper. "Regional System Simulation Study." Report to the Department of Environment, Housing and Community Development, Canberra 1977.
- [42] 辻 正重, 東京首都圏における人口動態の研究, 日本経営工学会, 昭和51年度秋季予稿集, 1976.
- [43] 辻 正重, 東京首都圏における水利用に関する研究, 日本経営工学会, 昭和52年度春季予稿集, 1977.
- [44] Wadhwa, L.C. and K.P. Stark. "Simulation of Regional Growth with Alternative Migration Models." *Eighth Annual Pittsburgh Modelling and Simulation Conference*, April, 1977.
- [45] Wadhwa, L.C. "Regional System Dynamics Models for North Queensland." Presented at the *Fifth Pacific Regional Science Conference*, Vancouver, August, 1977.
- [46] Wadhwa, L.C. and K. P. Stark. "Inter-Regional System Dynamics: Impact of Regional Growth Policies on Adjoining Regions." Presented at the *Second Regional Science Association Conference*, Australia and New Zealand Section, December, 1977.
- [47] Wadhwa, L.C. "Urban, Regional and Inter-Regional System Dynamics Models with Applications to North Queensland." *Policy Analysis and Information Systems*, vol. 1, no. 2, January, 1978.
- [48] 安田八十五, 小林 登, 都市における公共政策サポートシステムの開発——西宮市のケースを中心に, *オペレーションズ・リサーチ*, vol.22, no.9, pp.536~543, 1977.
- 一 般
- [49] Roberts, Nancy. "Parental Influence in the Elementary Classroom: A Computer Simulation." *Educational Technology*, vol. 15, no. 10, October, 1975, pp.37~42.
- [50] Roberts, Nancy. "Teaching Dynamic Feedback Systems Thinking: An Elementary View." *Management Science*, vol.24, no. 8, pp. 836-843, April, 1978.

●報文集 販売中●

No.	著 者	販 売 価 格		
		会 員	非会員	
R-72-1	コーポレート・プランニング訪米視察団報告書 ——戦略計画のORをめざして——	松田 武彦 他	1,200	1,800
T-74-2	OR手法による都市問題解析型シミュレーション・モデルに関する調査研究	伊藤 滋 他	2,500	3,500
T-74-3	将来住宅の予測に関する研究 ——20年後の理想像——	西野 吉次 他	1,200	1,800
T-75-1	都市公共政策のシステム分析に関する調査研究報告書	伊藤 滋 他	2,200	3,300
T-76-1	オペレーションズ・リサーチのためのデータとプログラムに関する研究	森口 繁一 他	4,000	5,000
T-77-1	システム・ダイナミックス ——方法論と適用例——	島田 俊郎 他	2,500	3,500
R-79-1	ORの実践とその有効活用——視察団報告書	島田 俊郎 他	1,200	1,800