



慶應義塾大学ビジネス・スクール

「システム・ダイナミックス」

1. システム・ダイナミックスとは

システム・ダイナミックス（SDと略称する）は1956年、MITのForrester博士により創案された。当時は企業を動的に研究する為に考えられたので、インダストリアル・ダイナミックス（IDと略称）と呼ばれた。その後対象分野は企業経営以外の領域にも広がり、1969年には地域問題を研究する『アーバン・ダイナミックス』、1971年には世界の動向を研究対象とする『ワールド・ダイナミックス』が出版された。さらに、国家レベルの問題を扱うナショナル・ダイナミックス、健康医療問題を扱うヘルス・ダイナミックスなど、対象分野は社会システム全般に及ぶようになったため、これらを総称してシステム・ダイナミックスと呼ぶに至っている。ちなみに、ダイナミックスは、動的とも訳されるように「時間と共に変化する」という意味あいで使われている。

Forrester博士は『インダストリアル・ダイナミックス』の中で、「IDは、経営の為のシステム分析の一つの方法である。それは、時間と共に変わる経営システム部分間の相互作用を取り扱う。」「IDは、企業システムのインフォメーション・フィードバック特性の研究および企業形態の改良と、政策設計の為のモデルの利用法である。」といっている。ここで使われているフィードバックという考え方は、原因はある結果を引き起こすがそれで終了するのではなく、この結果がさらに原因を取り巻く環境に影響を与え原因自体を変化させるという、いわばぐるぐる回る因果関係を表している。

単純な問題では、因果関係を解明するのはさほど難しい作業ではない。直観的に結果をもたらす原因が分析でき、その対応策を練ることも可能であろう。

しかし、企業、都市、世界といった大きな問題を扱おうとすると、直観的に結果をもたらす原因を分析することは難しくなる。一つには、因果関係が多重に絡み合ってくるためである。ある結果をもたらす原因が複数存在し、それらの原因同士もまた複雑に絡み合っているのが、現実の姿である。さらに、この因果関係ループは、時間遅れを伴うという事実も、問題を難しくしている。例えば、営業の人員を増加したからといって、その月の売上にすぐに貢献するとはいえない。そこには、何ヵ月かの時間遅れが発生するだろう。

本教材は慶應義塾大学大学院経営管理研究科柳原一夫教授の指導の下、松田園恵によって作成された。本教材は、システムダイナミックスの入門書として作成されたものである。(1992.4.1.)

Forresterは次のように述べている。「複雑なシステムにおいては困難さの原因が、兆候が現れるよりも時間的にはずっと早いところにあるのかもしれない。あるいは、システムの中で全くかけ離れた部分にあるのかも知れない。事実、原因は前の事象にあるのではなくて、常にシステムの構造やポリシーにあることがわかる。事態を更に悪くしているのは、複雑なシステムは原因を隠しているだけでなく、あてにならないことさえある。複雑なシステムでは、ある兆候について時間的にも空間的にも近いところに原因を捜し求めると、われわれは常にもっともらしい原因をつかまされてしまう。しかし、それは普通原因ではないのである。」

このような複雑な現実システムを分析するために、複雑なシステムに対するアプローチの方法としてSDが生まれてきた。SDでは、人間の抽象化能力とコンピュータの計算能力を基盤として複雑なシステムを分析する。

SDでは、まずどの様な問題を解決するのかを明確にした後、複雑なシステムを観察し、因果関係ループを発見していく。システムの構成要素として、ストックを表すレベル変数とフローを表すレイト変数を使って、それをモデル化する。因果関係は、定量化し、数値や式あるいはグラフデータであらわす。モデルは、システムダイアグラムと呼ばれる図によって表される。ここまで、人間の抽象化能力、センスに大きく依存する。システムダイアグラムは、問題解決者の考え方、価値観を表すといえよう。

次の段階として、システムダイアグラムをコンピュータ・プログラム化し、コンピュータによって計算する。計算は単純だが量が多いため、実際問題として手計算が出来ないからである。これにより時系列に問題の分析が行える。SDがIDと呼ばれていた最初の頃、モデルをコンピュータにかけるために、MITグループによりDYNAMOと呼ばれるシミュレーション言語が開発された。当時は、最新のマシンと特別の言語によって計算されたわけだが、コンピュータ技術の発展にともない、現在ではパソコンと表計算ソフト（もしくは、BASIC言語など）で計算は充分可能である。

以下、具体的なSDの使用法をみていこう。

2. 問題定義からシステムダイアグラムまで

2.1. システム境界の設定

具体的にどの様な問題を解決するのかを明らかにしたら、その問題に関連するシステム領域を定義する。システム領域の外側にある要因は、システムの動きに影響を与せず、内側にある要因だけがシステムの動きに影響を与えるように領域を設定する。具体的作業としては、実際のシステムを観察し、いろいろな要因の中から、実際のシステムの動きを説明するのに必要と考えられる要因を拾い出す。それらの要因の抽象度が一定であることが、ポイントとなる。

解決すべき問題は複雑であるから、要因も拾い出していくと、非常に数が多くなってくる。それらの要因をどのように抽象化するかが、システム構築の醍醐味となる。

1970年、ローマクラブは「人類の危機に関するプロジェクト」の研究をSDの手法を用いて行った。その報告書が、世界的なベストセラーとなった『成長の限界』である。ここでは、この時の研究を例にひきながら、具体的な作業手順をみていこう。

この研究における問題とは、「⁽³⁾世界システムは、新たな圧力に遭遇しつつある。」“世界システム”とは人間、社会システム、技術及び自然環境を意味している。これらのものは成長、変化及び緊張を生み出すように相互に作用し合っている。社会一技術一自然システムの内部から生じてくる偉大な力を経験することは、目新しいことではない。しかし、人類が移住、拡張、経済成長及び技術についての歴史から得られる答えを用いても解決することの出来ない力が増大しているのに気付き始めたのは、ごく最近の事である。

世界システムの緊張は過剰人口、増大する汚染、生活水準の相違によって表されている。しかし、増大する人口、汚染および経済的不平等が原因なのであろうか。それとも兆候なのであろうか。それを直接改善することが出来るものであろうか。あるいは、緊張の原因は、世界システムのどこか他の所に存在するのだろうか。」ということであった。

この様な問題意識の元に、このプロジェクトでは、世界的規模の動的モデルを作成した。⁽⁴⁾「そのモデルは人口、資本投資、地理的空間、天然資源、汚染および食糧生産を相互に関連づけている。これらの主要なセクターと、それらの相互作用から、世界システムにおける変化のダイナミックスが現れてくるらしい。」

すなわち、このモデルでは、人口、資本投資というような大きなくくり方をしていて、人口を地域別や、年代別などのように細かく捉えてはいない。システム領域をこの様に大きく捉えたわけである。

2.2. 因果ループ図の作成

拾い出した要因の因果関係を考えていく。この時、関係の正負にも注意する。正の関係とは、原因が増えると結果も増えるもの、負の関係とは、原因が増えると結果が減るものという。

例えば、人口の因果ループを考えてみよう。人口は、基本的には、出生者数と死亡者数により決まる。出生者数が増えれば人口は増える、すなわち正の関係がある。死亡者数が増えれば人口は減少する、負の関係である。しかし、人口、出生者数、死亡者数の関係は、これで終わりではない。人口が増えれば、出生者数も死亡者数も増加する。正の関係がある。これは図で表した方が分かりやすい。図1に三者の関係を表す。

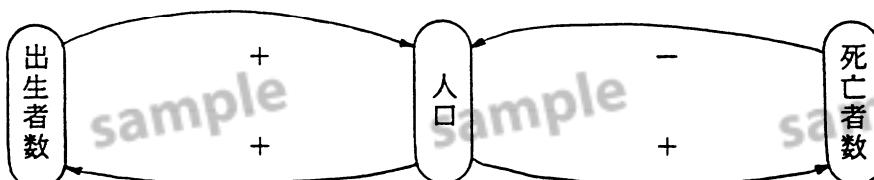


図1 人口セクターにおける基本的因果ループ

では、出生者数、死亡者数は、何に影響されるのであろうか。ここでは、食糧供給量、物質的生活水準、環境汚染度、混雑度により、影響されると考えられた。例えば、混雑度を採ってみよう。人口が増えれば、混雑度が増す。一般的には、混雑は生活環境の悪化をもたらすため、混雑度が増加すれば、出生者数は減り、死亡者数は増える。この因果関係を図1に付け加えたものが、図2である。

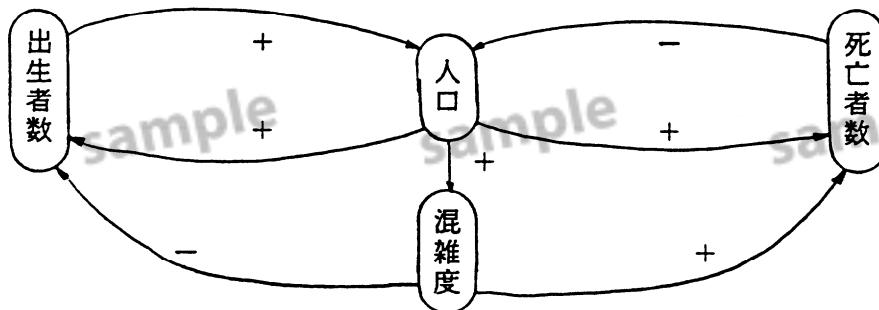


図2 人口セクターに混雑度を加えた因果ループ

さらに、食糧の影響を考えてみよう。人口が増えれば一人当たりの食糧が減少する。一人当たりの食糧を食糧比と呼ぶなら、食糧比が増加すれば、出生者数は増加し、死亡者数は減少する。図3に、この関係を示す。

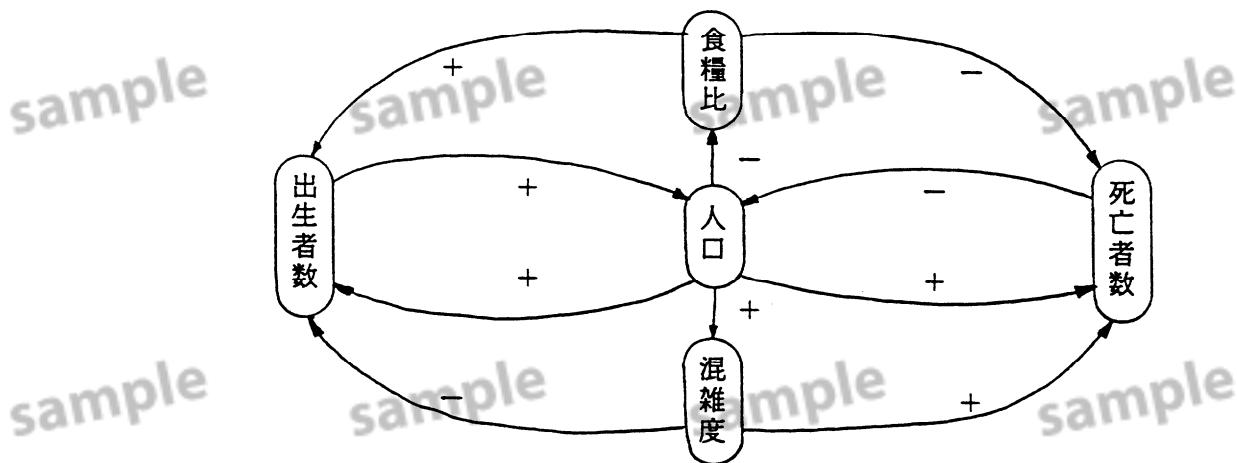


図3 人口セクターに混雑度・食糧比を加えた因果ループ

この様にして、因果ループをふくらましてゆき、システム全体を覆い尽くす因果ループを作成する。

2.3. レベル・レイトの決定

システムは、累積であるレベルと、レベルを変化させる流れであるレイトという二種類の変数を含んでいる。何がレベルであり、何がレイトであるかを判定する。SDでは、図4のようにシステムダイアグラム用に記号が定められている。

フローは、矢印を含む線で表され、流れを明らかにするものである。レベルは、長方形で表され、累積によって作り出される変数であり、ある時点におけるシステム状態を明らかにするものである。レイトは、バルブ記号で表され、レベルに依存し、レベルを作り出すように累積される。補助変数は、円で表され、レイト記述の一部分だが、独立かつ明白に記述される概念としてレイト記号とは分離して記述したものである。ソースとシンクは、不定形な雲形記号で表され、システム領域の外側を表す。ソースはフローの源泉であり、シンクはフローのたまり場である。

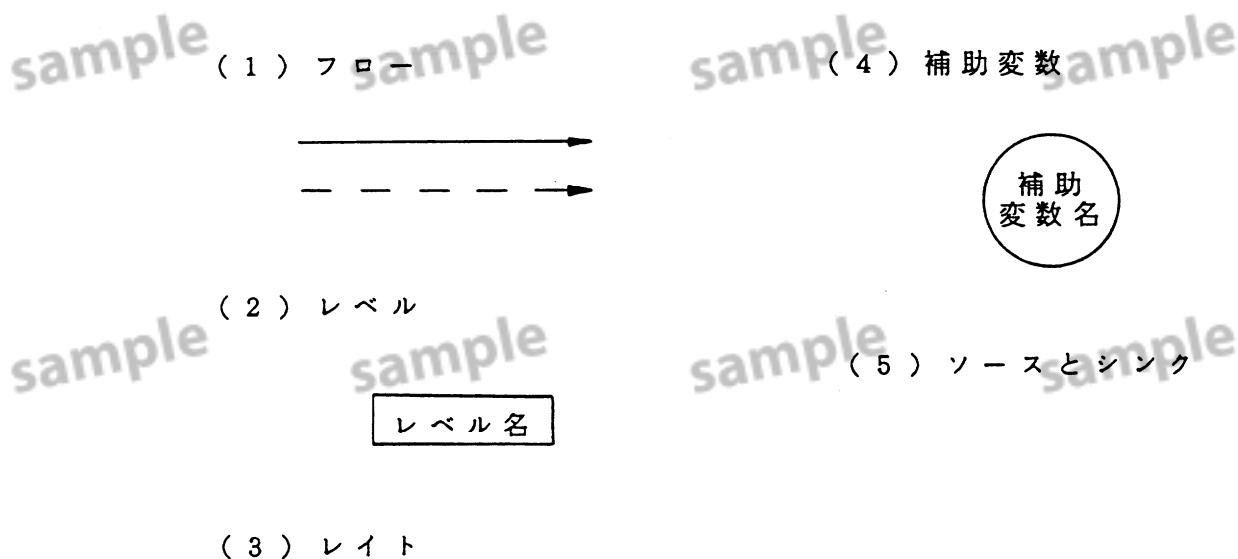


図4 SDで用いられるシステムダイアグラム用記号

図1の因果ループをシステムダイアグラムとして表示してみよう。人口、出生者数、死亡者数のうち、人口が累積であるレベル変数であり、他の二つが人口というレベル変数を作り出すレイト変数であることが解る。年間の出生者数を出生レイト、年間の死亡者数を死亡レイトと名付けると、図1の因果ループは図5のように表される。

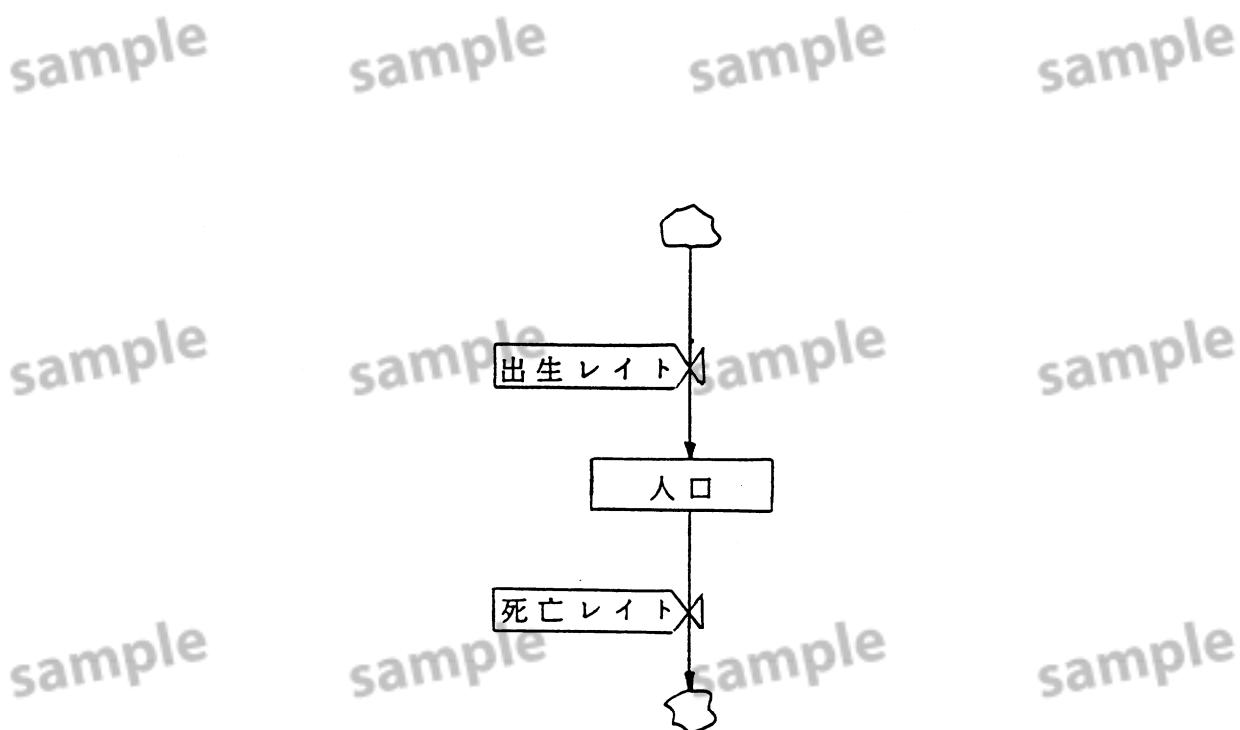


図5 人口セクターにおける基本的システムダイアグラム

混雑度を表すのに、基準の混雑度に対する割合を用いて混雑比と呼ぶなら、混雑比、食糧比などは、補助変数と考えられるので、図3は図6のように表される。

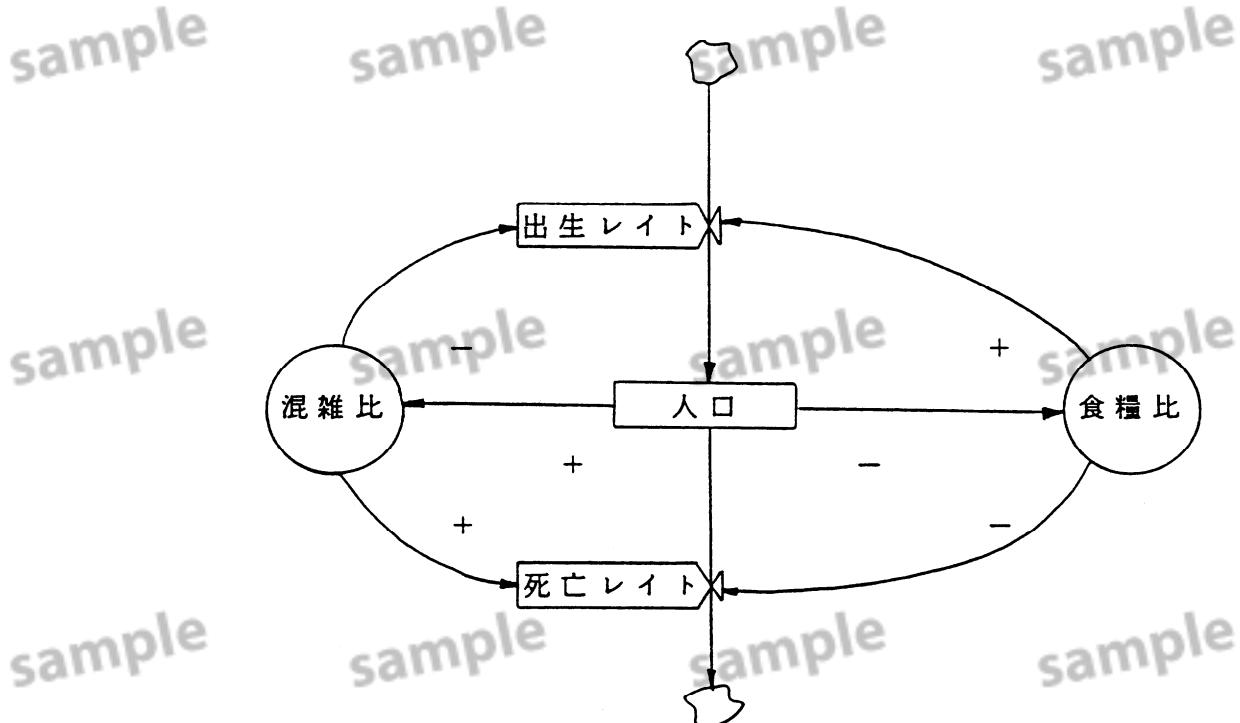


図6 人口セクターにおける混雑・食糧システムダイアグラム

2.4. 因果関係の定量化・数式化

図6のシステムダイアグラムを数式化する。例えば、今年の人口は、昨年の人口に年間の出生者数である出生レイトを加え、年間の死亡者数である死亡レイトを差し引いたものとなる。式で表せば、

$$\text{人口 (今年)} = \text{人口 (昨年)} + \text{出生レイト (昨年～今年)}$$

－死亡レイト（昨年～今年） (式 1)

となる。ここで、出生レイトや死亡レイトはシステムダイアグラムのいろいろの影響を受けて、時間と共に変化していくことに注意を要する。今年の出生レイトと来年の出生レイトは同じではない。厳密にいえば、ひとことに年間の出生者数といつても、各月によりその数は違う。数学的に表すには、微分を使うのが一般的であろう。時間を t 、微小時間を $d t$ という記号を使って表すと、式 1 は次のように表される。

$$\text{人口} (t) = \text{人口} (t - d t) + d t \{ \text{出生レイト} (t - d t, t) - \text{死亡レイト} (t - d t, t) \} \quad (\text{式 } 2)$$

人口というレベルを定式化したものが式 2 である。微小時間 $d t$ は、システムの規模・目的に合わせて、任意に決定すればよい。ちなみに、ローマクラブの研究では 0.2 年としている。

次に、レイトを数式化する。図 6 では、出生レイト、死亡レイトは、人口、混雑比、食糧比の影響を受ける。人口、混雑比、食糧比のうち、人口はリニアに効いてくるだろう。すなわち、人口が 2 倍になれば、出生レイト、死亡レイトも 2 倍になるだろう。しかし、混雑比、食糧比と人口の関係は、リニアではなかろう。混雑比を横軸にとり、出生レイトを縦軸にとった場合、因果関係が負であるから、非線形の右下がりの曲線になる。この曲線を数式化するのは非常に複雑であるため、曲線は曲線のままグラフデータとして扱う。つまり、フローダイアグラム上に、補助変数として混雑比一出生レイト乗数を導入し、混雑比一出生レイト乗数はグラフデータとする。混雑比と死亡レイトの関係を表すのも、同様に混雑比一死亡レイト乗数を導入する。食糧比に関しても、食糧比一出生レイト乗数、食糧比一死亡レイト乗数を導入する。図 6 のシステムダイアグラムは、図 7 のように表される。

図 7 をもとに、出生レイトを数式で表すと、次のようなになる。

$$\text{出生レイト} (t, t + d t) = \text{人口} (t) \times \text{基準出生レイト}$$

\times 混雑比出生レイト乗数 (t) \times 食糧比出生レイト乗数 (t) (式 3) ここで、基準出生レイトというのは、基準時刻における出生レイトを表し、実際の統計データから求められる。死亡レイトも同様である。

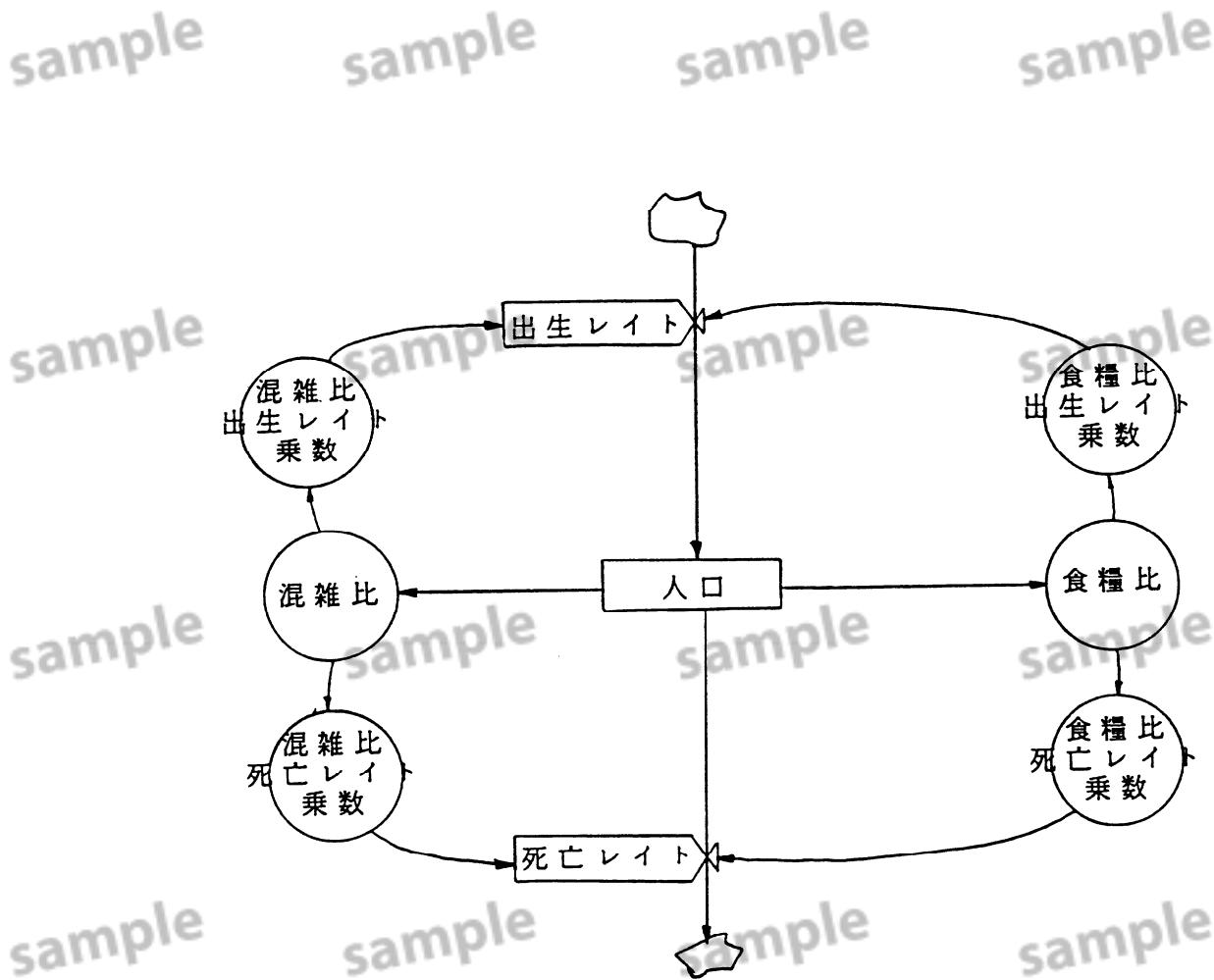


図7 人口セクターにおける混雑・食糧システムダイアグラム

このようにしてシステムダイアグラムを数式化することが出来る。

2.5. コンピュータによる計算

レベル、レイトを数式化し、混雑比出生レイト乗数のような乗数を表すグラフが描けたならば、それをコンピュータを使って計算させればよい。計算はスタート時刻、計算時間間隔だけを決定すれば、あとは繰り返しでコンピュータが計算してくれる。

例えば、図7を計算するのに、スタート時刻、基準時刻を1990年とし、計算時間間隔を1年としてみよう。1991年の人口は、式2に1990年の人口、出生レイト、死亡レイトの数値を統計データから求めて代入すれば計算できる。1992年を計算するには、まず式3を使って1990年のデータを基に1991年の出生レイト、死亡レイトを計算する。1991年の人口は、すでに計算されているので、計算した1991年のレイトを式2にいれて1992年の人口を計算する。以下同様に、1993年、1994年と順番に計算することが可能となる。レイトとレベルを逐次計算することにより、将来の動向を知ることが出来るわけである。100年後の人口を知りたければ各レイト、レベルの計算を100回、200年後の人口を知りたければ200回行えばよい。

これらの計算は、単純な繰り返しであるから、コンピュータの得意分野である。パソコンが大いに力を発揮してくれるだろう。

以上、SDの使用法をローマクラブの研究を例に説明してきたが、ローマクラブの作成した

フローダイアグラムとコンピュータによる計算結果を付録として添付するので、参照されたい。

3. システム・ダイナミックスの信頼性と利用法

S Dは以上のように使用されるが、その評価は意見の分かれるところである。もっとも論議の対象となるのは、その計算結果に対する信頼性である。例えば、「何%の確率でその結果の信頼性はあるのか」というような疑問には、S Dは答えられない。S Dの根本的な目的が、正確な短期予測ではなく、大ざっぱでもポイントを擱んだ長期予測だからである。

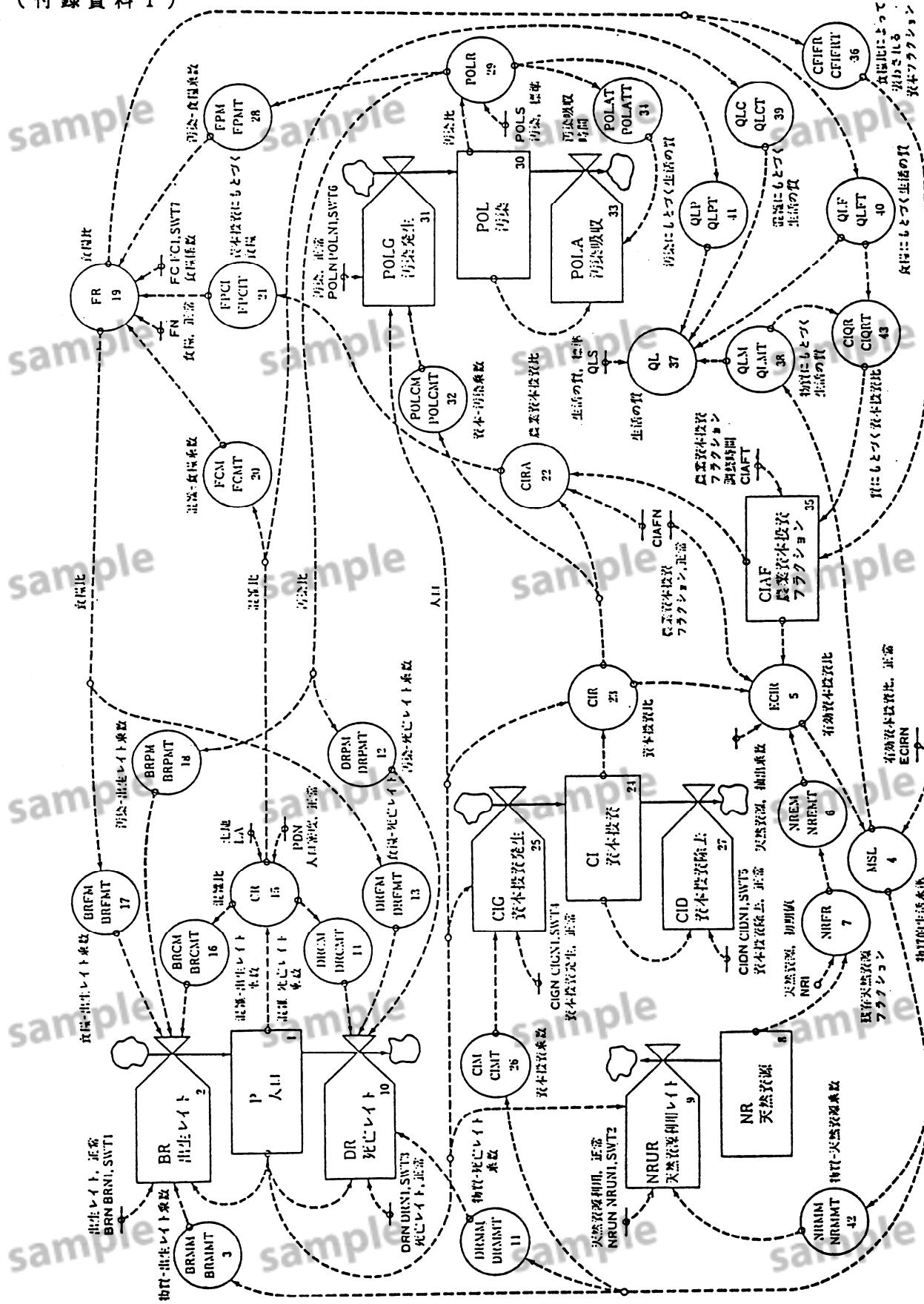
ここで例としてとりあげたワールド・ダイナミックスに対しても、その信頼性についていろいろな疑問・否定意見が寄せられた。反対意見を発表した研究グループの一つであるSussexグループに対し、ワールド・ダイナミックスの作成者たちは次のように反論している。

「⁽⁵⁾Sussexグループは、主として経済学と自然科学の専門家達である。これらの領域は、精密な短期予測をめざしてモデル構成法を発展させてきた。他方、S Dモデルは一般的で全体的であって、短期予測の為でなく、複雑なシステムの長期的な変動特性の探求の為に設計されている。Sussexグループのもっとも基本的な誤りは、ワールドモデルを評価するのに用いられた基準として完全さを選んだ事である。Sussexグループは、S Dは完全な方法ではないというが、それではよりよい方法を示唆しているかといえばそれをしてはいない。」

なるほど彼らのいうとおり、複雑なシステムをモデル化する我々の試みは大変原始的な水準のものではあるが、我々はその原始的な水準を、達することの出来ない完全さに比べるのではなく、現実の社会の政策模型である他のモデルと比べようというのである。」

システムダイアグラムは、作成者の価値観、世界観に大きく依存している。現実の中から抽象化に向けて、何を重大事項として取り上げ、何を外すかということにより、結果も異なってくる。そのモデルが本当に正しいかどうかは、誰にも解らない。しかし、複雑な現実に対応する方法として、自らの価値観に基づいてモデルを構築し、その計算結果を意思決定の道具の一つとして利用していくということは非常に合理的であると考える。特に、コンピュータが誰にでも利用できるような手軽なハード・ツールとなつたいま、S Dというソフト・ツールを多くの人が利用していく環境整備は整ったといえよう。勿論、S Dは万能ではない。その利用分野、利用時期、利用方法は、慎重に検討すべきである。しかし、意思決定における方法論のひとつとして、大きな価値を持っていると考えられよう。

(付録資料 1)

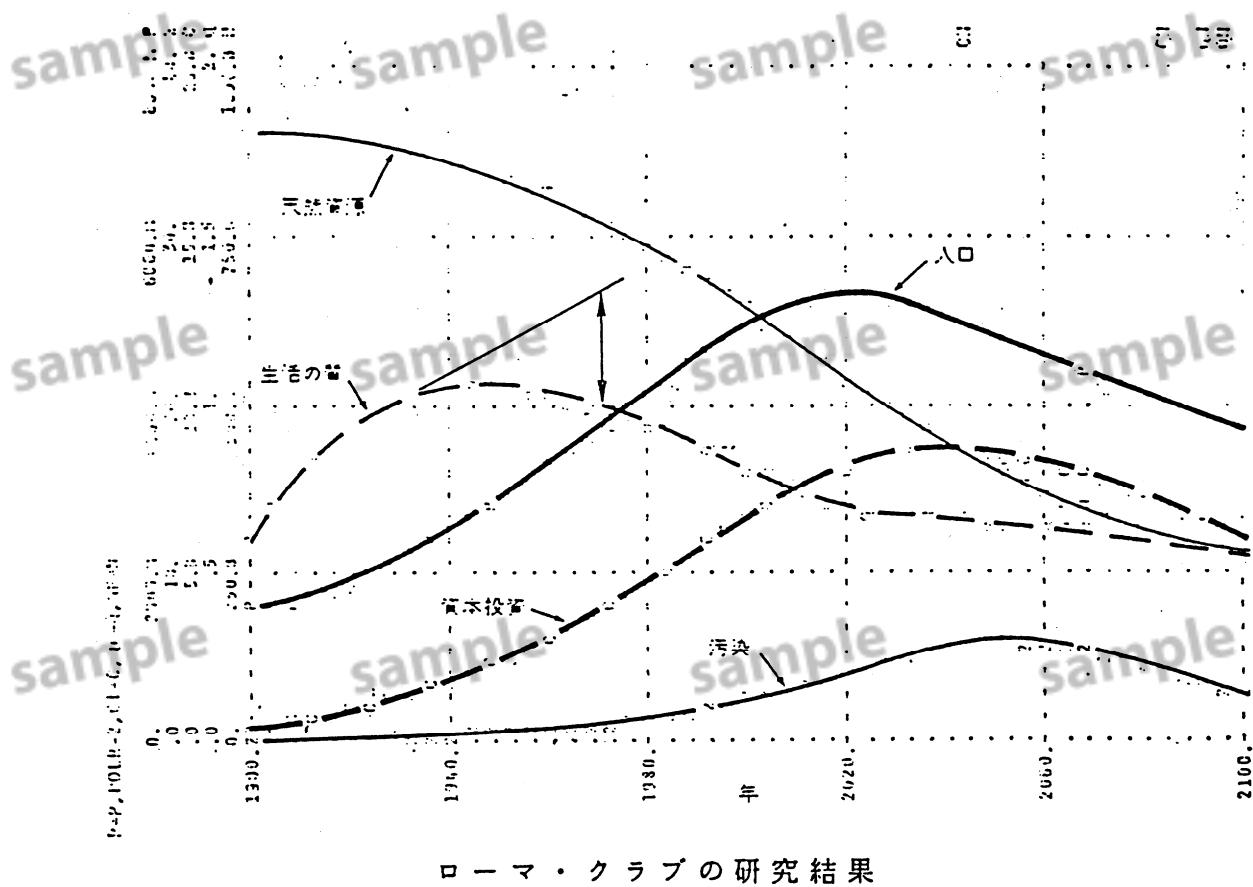


5つのレベル変数——人口、天然資源、資本投資、農業用資本投資、および汚染——が相互に関係している世界モデルの完全なダイヤグラム
出所：ワールド・ダイナミクス・システム・ズ・ジャパン著、小玉陽一訳、日本経営出版会、1972年

システム・ダイヤグラムの項目概要

No	名 称	略 号	決算元	内 容
1	人 口	P	人 / 年	初期値：1900 年 正當な出生レイト：BRN
2	出生レイト	BR	無	物質的生活水準による出生レイト修正
3	物質的出生水準	BRMM	無	物質的生活水準による出生レイト修正
4	物質的資本投資	MSL	無	物質的資本投資による出生レイト修正
5	有効資本投資比	ECIR	有効資本単位／人	一人当たり有効資本投資基準：1970 年の一人当たり有効資本投資
6	天然資源抽出乗数	NREM	無	天然資源抽出乗数による出生水準の改善に直接受ける
7	残在天然資源フランクション	NRFR	無	天然資源の天然資源／天然資源の初期値
8	天然資源	NR	天然資源単位	初期値：1970 年 天然資源単位／人初期値：1970 年で 1 人／年
9	天然資源利用レイト	NRUR	無	正當な死亡レイト：DRN
0	死亡レイト	DR	無	正當な死亡レイト：DRN
1	物質・死亡レイト乗数	DRMM	無	物質的生活水準による死亡レイト修正
2	汚染・死亡レイト乗数	DRPM	無	汚染による死亡レイト修正
3	食糧・死亡レイト乗数	DRFM	無	食糧供給による死亡レイト修正
4	混雑・死亡レイト乗数	DRCM	無	混雑による死亡レイト修正
5	混雑比	CR	無	混雑基準：1970 年の正常な人口密度
6	混雑・出生レイト乗数	BRCM	無	混雑による出生レイト修正
7	食糧・出生レイト乗数	BRFM	無	食糧供給による出生レイト修正
8	汚染・出生レイト乗数	BRPM	無	汚染による出生レイト修正
9	食糧比	FR	無	基準：1970 年の一人当たり平均食糧
10	混雑・食糧乗数	FCM	無	混雑による食糧生産への影響
11	資本投資に基づく食糧	FPCI	食糧単位／人／年	一人当たりの資本投資による食糧生産への影響
12	農業用資本投資比	CIRA	資本投資単位／人	資本投資基準：1970 年を 1
13	資本投資	CIR	資本投資単位／人	資本投資基準：1970 年を 1
14	資本投資	CII	資本投資単位／年	初期値：1900 年
15	資本投資発生	CIG	資本投資単位／年	資本投資と物質的生活水準の関係
16	資本投資乗数	CIM	無	資本投資と物質的生活水準の関係
17	資本投資除去	CID	資本投資単位／年	資本投資除去：CIDN
18	汚染・食糧乗数	FPM	無	汚染による食糧生産への影響
19	汚染比	POLR	無	基準：1970 年の一人当たり汚染単位
20	汚染	POLL	汚染単位／年	初期値：1900 年
21	汚染発生	POLG	汚染単位／年	正當な汚染：POLN
22	資本・汚染乗数	POLCM	無	汚染発生に与える一人当たり資本投資の影響
23	汚染吸収時間	POLA	汚染単位／年	汚染量／汚染吸収時間
24	汚染吸収時間	POLAT	年	汚染吸収時間と汚染比の関係
25	農業用資本投資	CIAF	無	初期値：1900 年
26	食糧乗数で示される資本投資	CFIFR	無	食糧供給量と農業資本フラクションの関係
27	生活の質	QL	適足度	基準：1970 年で 1
28	物質に基づく生活の質	QLM	無	物質に基づく生活の質
29	混雑に基づく生活の質	QLC	無	混雑に基づく生活の質
30	食糧に基づく生活の質	QLF	無	食糧に基づく生活の質
31	汚染に基づく生活の質	CLP	無	汚染に基づく生活の質
32	物質生活水準による天然資源利活用レイトへの影響	NRM	無	物質的生産水準による天然資源利活用レイトへの影響
33	生活の質比	C1QR	無	生活の質比：物質に基づく生活の質／食糧に基づく生活の質

(付録資料3)



(付録資料 4)

引用文献

- (1) 『インダストリー・ダイナミックス』 J.W. Forrester著
- (2) 『システム・ダイナミックス』 小玉陽一著 1973年 共立出版発行
- (3) 『ワールド・ダイナミックス』 J.W. Forrester著 小玉陽一訳
1972年 日本経営出版会発行
- (4) 『ワールド・ダイナミックス』 J.W. Forrester著 小玉陽一訳
1972年 日本経営出版会発行
- (5) 論文「SDの歴史とSDモデルの信頼性」島田俊郎著
『オペレーションズ・リサーチ Vol. 21 No. 3』
1976年3月号 日本オペレーションズ・リサーチ学会発行

不許複製

慶應義塾大学ビジネス・スクール

Contents Works Inc.