

システムダイナミックス

Japanese Journal of System Dynamics

No.1 1995.1

[創刊の言葉]

大庭 謙

[システムダイナミックスの発刊に当たって]

島田 俊郎

[論 文]

- SDモデルの分類階層化 岸 光男、奥野 拓真 (1)
システムダイナミックスによる閉鎖生態系のシミュレーション
..... 大谷 雅春、金田 典久、石川 芳男、山極 芳樹 (11)
タクシー業界の需要分析と経営計画シミュレーション 鈴木 信幸 (25)
リサイクルにおける行政・住民の役割 松本 安生 (35)
株価モデル -裁定取引の株価に与える影響- 佐藤 圓 (50)
WORLD-3 による宇宙エネルギー資源開発評価モデル
..... 山極 芳樹、金田 典久、石川 芳男 (60)

[書 評]

- 島田 俊郎 編 「システムダイナミックス入門」 住田 友文 (78)

[講 演]

- 「私の歩いたSDの道」 島田 俊郎 (81)

国際システムダイナミックス学会日本支部

THE JAPANESE CHAPTER OF INTERNATIONAL SYSTEM DYNAMICS SOCIETY

創刊の言葉

編集委員長 大鹿 譲

「システムダイナミックス」(Japanese Journal of System Dynamics) 創刊号をお届けします。SD関係の論文発表機関としては、国際的には「System Dynamics Review」がありますが、日本支部を設立した以上、支部固有のオリジナル・ペーパー発表機関は是非必要があり、それがなければ会員増強も困難だというわけで、1991年7月の第1回理事会で発行の方針が打ち出されました。その後いろいろな事情で発刊が遅れに遅れていきましたが、この度漸くNo.1発行の運びとなりました。大変遅くなりましたがことを深くお詫び申し上げます。編集方針としては、数篇のオリジナル論文（レフェリー付）のほか、1～2篇の依頼原稿、また必要に応じて国際大会の案内や報告等を掲載し、差し当たって年1回発行したいと考えています。投稿規定は本号に載っていますので奮って御投稿下さい。言葉は日本語のほか、あまり突拍子もない言葉以外は何語でも結構です。なお、支部会費はご存じのような金額ですので、ジャーナルは当分有料とさせて頂きます。また、ジャーナルとは別に、リサーチ・レポート・シリーズ、翻訳リーディング・シリーズを随時刊行致します（既に数篇刊行済み）。また会員への連絡機関としてニュース・レターが随時送付されています。

以上のような次第ですので、ジャーナルを大きく育てていくため、今後会員各位の積極的な御支援をお願い致します。

1995年1月

システムダイナミックス (Japanese Journal of System Dynamics) の発刊に当って

国際システムダイナミックス学会
日本支部 支部長 島田俊郎

システムダイナミックスは1956年米国MITのForrester教授により、インダストリアルダイナミックスとして創案された。以来世界中の研究者がMITで教育された後、故国に帰りそれぞれの国でシステムダイナミックスを発展させた。1983年MITを中心として国際システムダイナミックス学会 (The System Dynamics Society) が結成され、1990年には、この学会の日本支部 (The Japanese Chapter of the System Dynamics Society) が発足した。

今回、当日本支部は支部機関誌として「システムダイナミックス」 (Japanese Journal of System Dynamics) を刊行することにした。

経済学、経営学、情報科学関係の学会誌は各種存在するが、それらの中にSD関係の論文を見ることは極めて少なく、よってSD研究者の論文発表のための場を設定することがこの機関誌の責務であると考える。

情報は地域的に全くグローバルとなり、更に瞬時に世界中に伝わる。政治的にも、経済的にも、かつてない激動を繰り返しつつあり、従来、経済、経営問題を扱う主流であったスタティックでハードな理論では歯がたたない状態になっている。この状況は、フィードバックループの扱いに適したダイナミックでかつソフトな手法であるSDの絶好の活躍の場になると信じる。

従来のSDの分野、すなわち、インダストリアルダイナミックス、アーバンダイナミックス、ワールドダイナミックス、ヘルスダイナミックス等の事例研究、カオスなどの理論研究に加えて、全く別の分野のダイナミックスをも、どしどし投稿願い、支部会員およびSDに関心をお持ちの諸賢の本誌に対する今後のご支援を切望する。

《論文》

この論文は複数のレフェリーの審査を受けたものです

SDモデルの分類階層化

Conceptual Clustering for System-Dynamics Models

岸 光男*、奥野 拓真**

Abstract

The authors has prepared a modelling support system for System-Dynamics. Hierarchical conceptual classification is possibly the key to retrieve the information from the knowledge base in the support system. This paper deals with the classification for System-Dynamics models. A practical method is proposed based on conceptual clustering, and a data structure of System-Dynamics submodel is given. Application example is provided to illustrate the applicability of the proposed method.

〈キーワード〉 概念クラスタリング、SDモデル、データ検索

* 大阪府立大学工学部

**富士通関西通信システム(株)

1. はじめに

J. W. Forresterが提唱したシステム・ダイナミックス（以下SD）は現在では固有名詞化しているが、それは動的システム（まさにシステム・ダイナミックス）のモデリングおよびシミュレーションの一手法である。今日、SDは主に手段として用いられ、SD自体を研究の対象としている研究者は少ない。多くの研究者は非線形システム理論に魅力を感じる。しかしながら、SD研究に関連して残された課題はまだまだ多い。たとえばSDモデルの分類整理については、重要性が認識されながらもその体系的方法論はまだ確立されていない。著者の一人は、かつて大書店の専門書売場で店員が『クラスター分析の本はどこに分類したらよいの？』と他の店員にたずねている風景に出会い、いらぬ助言を与えたことがあるが、知識の分類による概念体系の形成は情報検索の意味からも非常に重要となる。ここでは、SDモデルの分類階層化について述べる。

2. SDモデリング支援システム

第1次石油ショック前後の過大な新造船建造と第2次石油ショック以後の海上荷動量の減少は、世界の海運・造船業界に対して深刻な影響をもたらした。図1は著者らが世界タンカー船腹量の動向をSDモデルによってシミュレーション予測してみた結果であり、図2はそれのもとになった因果関係図（因果ネットワーク）である[1]。シミュレーション結果は、近い将来にタンカー・ブームがおこることを予見している。事実、1989年より世界の造船業界は活況を呈し始めており、世界経済が先行き不透明な中にあっても造船業界は安定した需要に支えられている。これは、過剰船腹の減少と既存船腹の代替建造期の到来による。ところで、たとえば1993年の年間造船受注量は何百万トンになるか、受注のピークはいつになるかといった定量的な特性に注目したいのであれば、海事産業研究所でなされているような精密なモデルと詳細な統計が必要となる[2]。著者らのモデルはそれに比して極めて単純ではあるが、このモデルをもとに定性推論[3]を行なった結果は図3のようになり、システム挙動の本質はとらえている。

ところで、図2の因果ネットワークはSD研究史上特筆すべき特徴を備えている。それは、これがSDモデリング・エキスパート・システム（SDモデリング支援システム）[1]によって人間とコンピュータとの対話を通して得られたという点である。

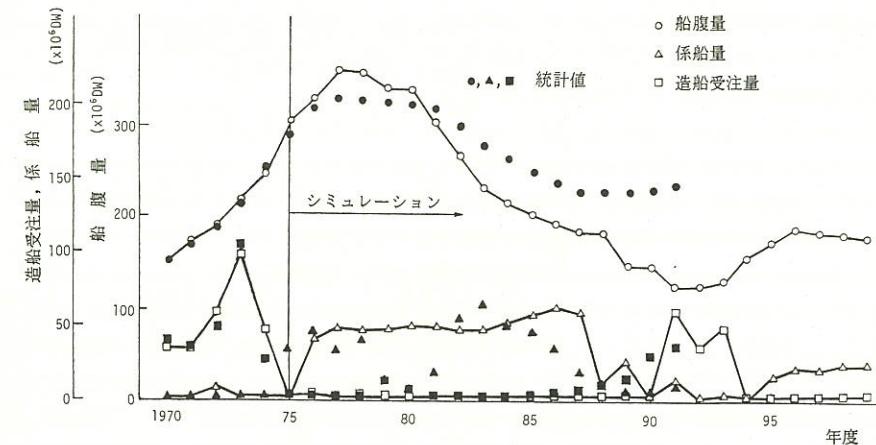


図1 世界タンカー・システムのシミュレーション

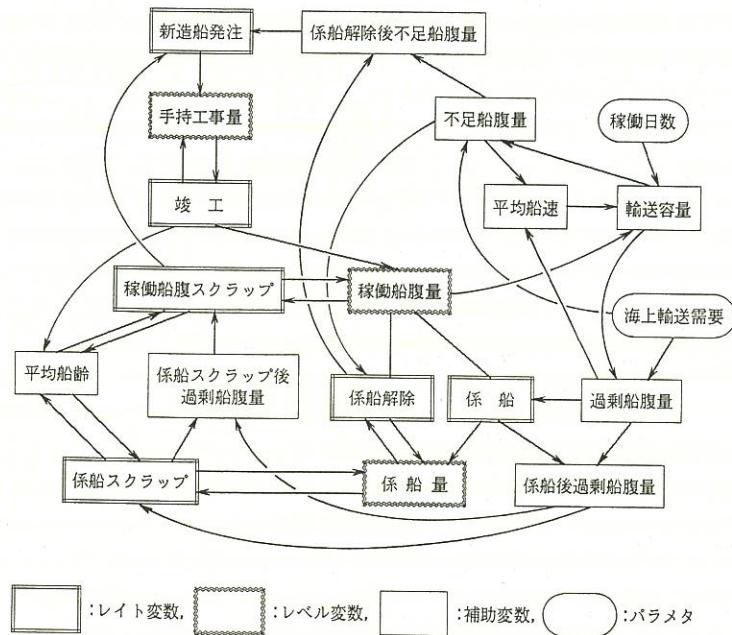


図2 世界タンカー・システムの因果ネットワーク

SDモデリング支援システムは次の条件に従って構築された。

- (1) 提案システムは、ユーザーに対してモデル作成の対象システムに関する知識のみを要求し、基本的にはSDに関する知識を要求しない。
- (2) 初期の状態では、提案システムはSDモデル作成のための規則および手続に関する知識のみを有する。
- (3) 提案システムは、運用するにしたがってSDモデル作成の過程で獲得される種々の対象システムに関する事実を蓄積し、以後の類似モデル作成の際に要求に応じてそれを提示する。

SDモデリング支援システムは図4に示す構造をもつ。通常のエキスパート・システムと異なる点は、作業用メモリを推論エンジン内以外に外部メモリ上にも設けているということである。知識獲得機構は、作業用メモリより因果関係等に関する事実的知識を取り出し、編集整理した後、それを事実的知識ベース内に格納するという機能をもつ。

現在普及している多くの文献データベース・システムでは、比較的少數の属性（著者名、キーワード等）を検索キーとするだけで情報検索の機能を果たすことができている。一方、エキスパート・システム中の知識ベースでは、事実的知識であっても複雑にからみあった多数の属性を検索キーとしなければデータを同定することができない場合がある。そのような場合には、検索キーをどう設定し、それらをいかに組合わせて効率的に情報検索を行なっていくかが重要な課題となる。SDモデリング支援システムの開発での最もむずかしい問題も、知識ベース中に蓄積してあるSDモデルの情報検索の方法である。そこで、著者らは概念クラスタリング手法[4,5]を用いてこの問題に対処することを考えた。すなわち、過去に作成したSDモデルを分類階層化することにより、新しいモデル作成時にその情報を役立たせようというのである。

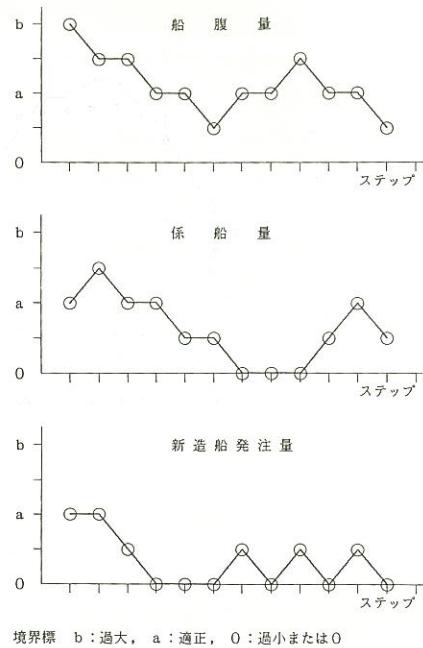


図3 タンカー・システムの定性推論

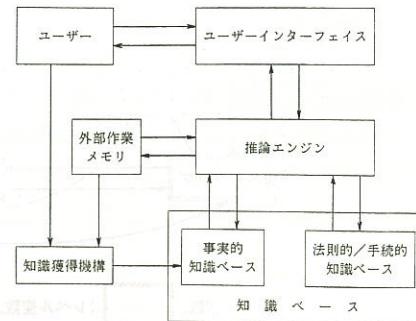


図4 SDモデリング支援システムの構造

法[4,5]を用いてこの問題に対処することを考えた。すなわち、過去に作成したSDモデルを分類階層化することにより、新しいモデル作成時にその情報を役立たせようというのである。

3. 実際的概念クラスタリング手法

知識の体系は、事実的な知識と法則的な知識とからなる。もっとも、知識という概念の定義自体むずかしい。ここではシステム工学的に、知識とは問題解決に役立つ情報と考えることにする[6]。一般に、学問は対象の観測による事実的知識の集積とそれらの分類とから始まる[7]。事実的知識の分類としてはC. Linnéによる植物分類が名高い。多数の事実的知識から類似のものまとめあげていく分類は、知識の抽象化の1つであり、その結果として新しい概念が形成される。人間はそのような分類を從来直観的に行なってきたが、コンピュータの発達に伴い数値解析による分類手法（クラスター分析）が開発され、今日それが多くの分野で用いられている。

知識の分類による概念体系の形成は、情報検索の意味からも非常に重要となる。その典型は図書館分類法である。ところで、通常のクラスター分析では、クラスター（1つの概念）の意味するところは解析者の判断に委ねられる。したがって、多くの属性が複雑にからみあうような分類対象に対しては、クラスター分析により得られるクラスターや各クラスター間の階層構造の意味づけが困難となり、分析結果を概念の情報検索に直接結びつけることができない。また、知識を分類の対象とする場合、非数値的属性が多く含まれることになり、それへの対応も問題となる。

従来のクラスター分析のもつこのような問題点を解決するために、R. S. Michalskiらは概念クラスタリングと呼ばれる手法を提案した[5]。すなわち概念クラスタリングでは、非数値的属性を含む分類対象から数理論理学的演算を通してクラスターとその意味づけ（概念の記述）が同時に形成される。ところで、Michalskiらによる概念クラスタリング手法は、論理演算の処理速度と組合せ爆発とからデータ数の増大に対応することが困難である。J. F. Pugetらは、分類対象の非数値的属性に対してデータ間の類似度を量化する定義を与えることにより古典的なクラスター分析に準じた分析手法を提案した[8]。ただし、その場合クラスターの概念記述はなされない。そこで、著者らはクラスターと階層構造の生成についてはPugetらの手法を用い、生成されたクラスターの概念記述についてはMichalskiらの手法の一部を用いるという実際的概念クラスタリング手法を提案するに至った。

いま、 n 個の属性 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ からなる線形リストのレコードを考える。各属性の型には、i) 値の相違が順序関係を表わす順序変数(Lと略記)、ii) 順序的な意味あいをもたない名義変数(N)、iii) 階層構造を表わす構造変数(S)の3種類を考える。Michalskiらによるシナクス距離[4]の概念に準じて、レコード間あるいはクラスター間の類似性を表わす類似総和なる変量を導入する。たとえば、表1の各レコード間の類似総和を表2のように算出する。ただし、構造変数 X_4 は図5の階層構造をもつものとする。各属性に対する類似度は0から3までの値をとるものとしている。この類似総和を評価尺度に用いることによって、古典的なクラスタリング手法に準じた分類階層化が可能となる。

表1 線形リストのレコード

属性 レコード	X1	X2	X3	X4
e1	0	A	2	b
e2	1	C	0	a
e3	2	A	1	c
e4	1	B	2	b
属性の型	L	N	L	S

L:順序変数, N:名義変数, S:構造変数

一方、生成されたクラスターの概念記述については、各属性ごとにクラスター内のレコードの値の論理和（ \cup ：または）をとった後、それらの論理積（ \cap ：かつ）をとる操作を施せばよい。たとえば、表1のレコードe1, e3, e4からなるクラスターの意味づけ $C(e1, e3, e4)$ は、

$$\begin{aligned} C(e1, e3, e4) &= [X_1 = 0 \cup 1 \cup 2] \cap [X_2 = A \cup B] \\ &\cap [X_3 = 1 \cup 2] \cap [X_4 = b \cup c] \\ &= [X_2 = A \cup B] \cap [X_3 = 1 \cup 2] \cap [X_4 = f] \end{aligned}$$

となる。論理和および論理積をとる操作以外にも、概念記述をより一般化する手続きが組込まれる。

4. SDモデルの分類階層化

SDモデルに限らず、ペトリネット、認知構造分析、定性推論等で用いられる因果ネットワーク（対象システムの因果関係／認知構造図）を抽象化すると図6のように表すことができる。すなわち、因果ネットワークは複数種類のノード（節）およびリンク（弧）より構成される。そのデータ構造としては、隣接行列等による2次元配列を用いた表現が可能である。配列は線形リストの1つであることから、これらの因果ネットワークデータは概念クラスタリングの対象となりうる。

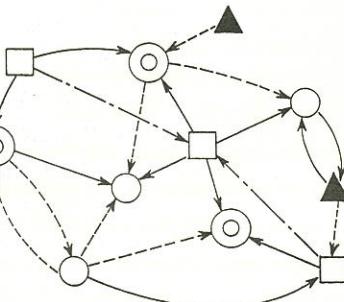


図6 抽象的因果ネットワーク

表2 類似総和の計算例

属性 レコード	X1	X2	X3	X4	類似総和
	0 1 2	A B C	0 1 2	a b c d f	
(e1, e2)	1 1 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0 1 0	3
(e1, e3)	0 0 0	3 0 0	0 1 1	0 0 0 0 1	6
(e1, e4)	1 1 0	0 0 0	0 0 3	0 1 0 1 1	8

SDモデルには、小規模なものから大規模なものまである。SDモデリング支援システムでは、原モデルそのままではなくサブモデルに自動分割して知識ベースに格納している[1]。SDモデルの分類についても、それらサブモデルを分類する方が以後のモデリングに有益な情報を得られる。いま、分類の対象とするSDサブモデルが3個以内のレイト、レベル変数、2個以内の補助変数をもつものとすれば、そのデータ構造は表3のように与えることができる。このデータ構造は、隣接行列を基本にしつつ、各モデルの因果ネットワーク中に自己ループが含まれないものとして対角要素に各変数の属性（レイト変数ならばその動作の意味、レベル変数ならばその実体、等）を入れる。SDモデルでは、レベル変数からレイト変数へのフィードバック・ループが重要な意味をもつ。表3の斜線部にはフィードバックの有無や直接／間接的の度合を順序変数として入力する。

ところで、このままではSDモデル中の各変数へのノード番号の与え方によって同一のモデルが異なったデータとして表現されてしまい、客観性に欠けることになる。そこで、たとえば出力リンク数や入力リンク数の多い順等のように各変数を並びかえる標準化操作が必要となる。その処理が施されたデータが概念クラスタリングの対象となる。

簡単な例として、ここでは図7に示す13個のSDサブモデルを分類階層化した結果を図8に示す。この結果に対して概念記述を求めるアルゴリズムを適用すると、たとえばクラスターCL2は図9に示すような特徴をもつことがわかる。SDモデルのレコード中にはネットワーク形状に関する属性が多く含まれているため、主としてそれに依存した分類階層化となっている。

実際の概念クラスタリング手法では、分類階層化自体は論理演算に基づいていないため、クラスターの階層が上位になるにつれて概念記述における特徴を消失していく、「特記事項なし」というケースも生じる。古典的クラスター分析と同じく実際の概念クラスタリング手法による分類階層化の結果は絶対的なものではなく、分析者にとって最も適当と思われる結果が得られるように類似度の量化方法や類似総和に占める各属性の重みづけを調整する必要がある。

表3 SDサブモデルのデータ構造

	R1	R2	R3	L1	L2	L3	A1	A2
レイト変数	R1	■■■						
	R2		■■■					
	R3			■■■				
レベル変数	L1	■■■	■■■	■■■	■■■			
	L2	■■■	■■■	■■■		■■■		
	L3	■■■	■■■	■■■			■■■	
補助変数	A1							
	A2							

■:順序変数, □:名義変数, ■■:構造変数

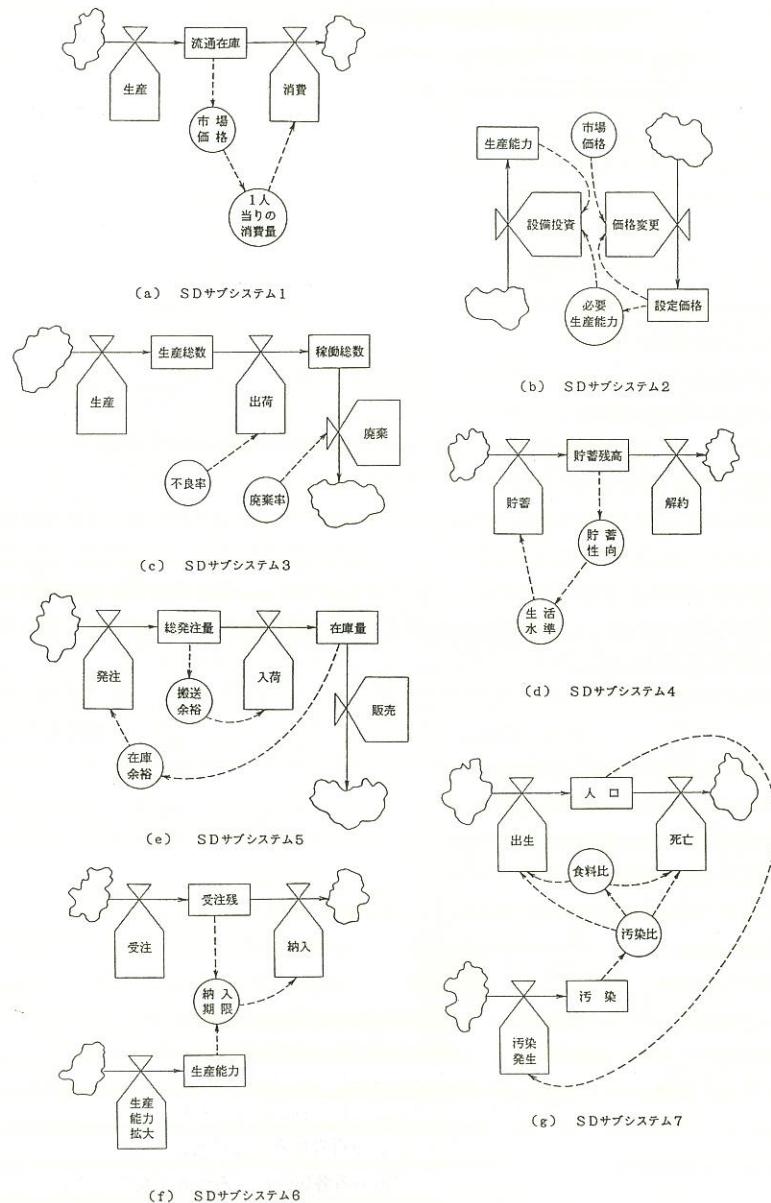


図7.1 SDサブモデル（その1）

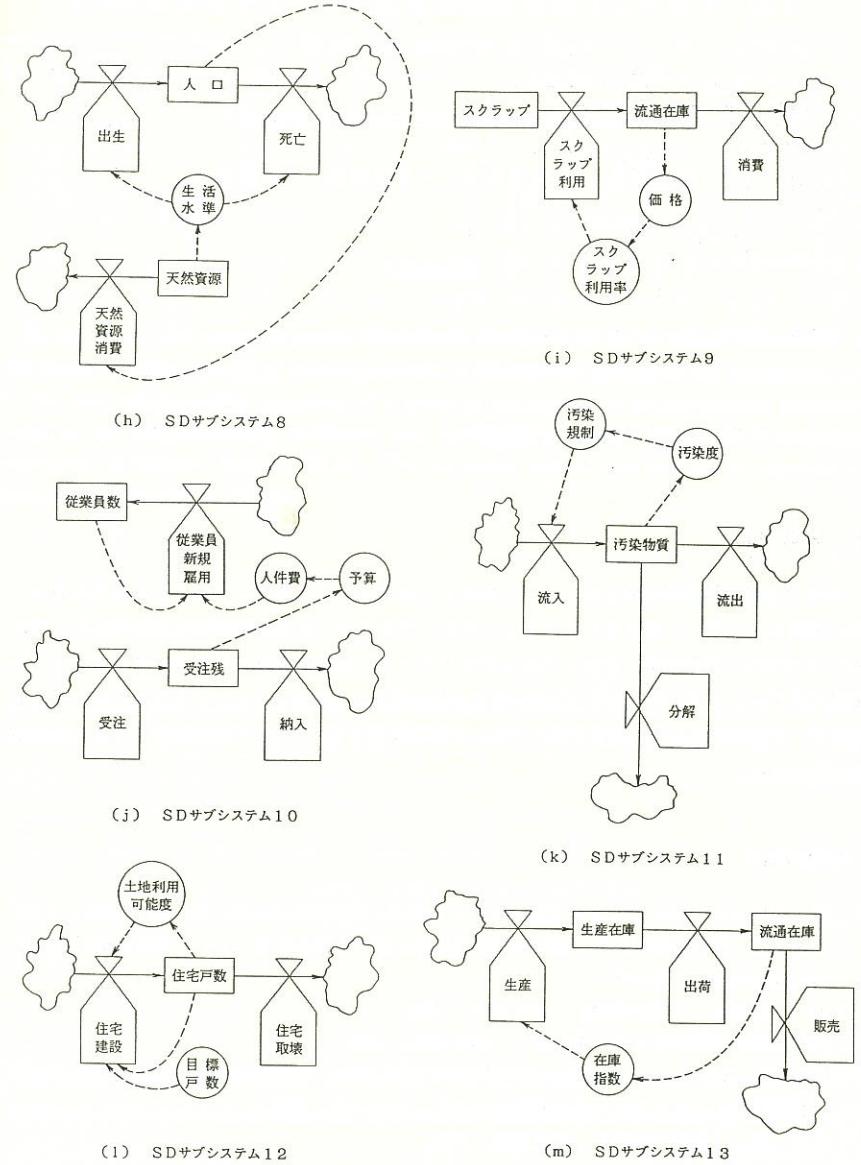


図7.2 SDサブモデル（その2）

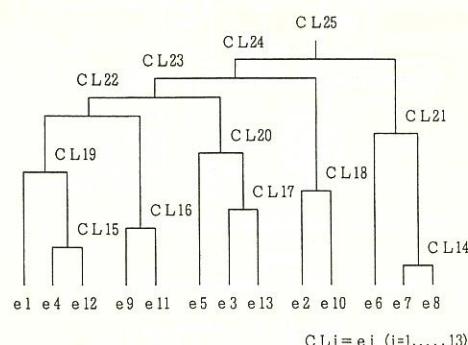
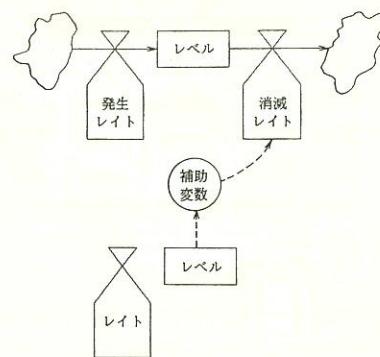


図8 SDサブモデルの分類階層化

図9 概念記述（クラスターCL₂₁）

5. おわりに

SDモデルの分類階層化の方法として、概念クラスタリングに基づく手法とその適用例を示した。因果ネットワークの概念クラスタリングは、アナロジーによる知識の体系化であり、単にSDだけではなく他の動的／静的システムのモデリング、認知構造分析、あるいはオブジェクト指向プログラミング／データベース等の研究分野の発展にも寄与しうる。そのためには、リスト構造データを線形リストに変換することなしに直接概念クラスタリングの対象としうる手法の開発が望まれる。

〈参考文献〉

- [1] 岸 光男ほか：SDモデリング支援システムの開発、関西造船協会誌、No. 208 (1988)、1-10.
- [2] たとえば、海事産業研究所：船舶解体促進効果に関する調査研究（上）、海事産業研究所報、No. 242 (1986)、77-107.
- [3] 渕 一博ほか：『定性推論』、共立出版、1989.
- [4] 圓川隆夫：『多変量のデータ解析』、朝倉書店、1988.
- [5] Michalski, R. S. (eds.)、電総研人工知能研究グループ訳：『発見的学习』、共立出版、1988.
- [6] 大須賀節雄：『データベースと知識ベース』、オーム社、1989.
- [7] 長尾 真：『知識と推論』、岩波書店、1988.
- [8] Puget, J.F., et al. : Hierarchical Conceptual Clustering, in : Sriram, D. (ed.), Application of Artificial Intelligence in Engineering Problems, Springer Verlag, 1986.

《論文》

この論文は複数のレフェリーの審査を受けたものです

システムダイナミクスによる閉鎖生態系（ミクロコズム） のシミュレーション

System Dynamics Simulation of Microcosm

大谷雅春*、金田典久*、石川芳男**、山極芳樹***

Abstract

In this report, the system dynamics simulation is conducted on the so called "microcosm", the closed ecological system of microorganisms, to simulate its generation and succession.

The microcosm which is composed of a group of five species of microorganisms maintains itself by the internal material circulation and the supply of exterior light, like a controlled ecological life support system (CELSS). The simulation method used here can be expanded to analyze the dynamics of CELSS.

<キーワード> シミュレーション、システムダイナミクス、ミクロコズム

* 日大院 ** 日大理工 *** 静大工短大

1. 序論

ミクロコズムに関する我々のシミュレーションは、栗原¹⁾によって報告された実験結果を再現するために行われたものである。そこで最初に、この実験について述べた栗原の説明（要旨）を引用する。

「竹の煮汁を入れた瓶を野外に放置しておくと、5種の微生物（バクテリア、原生動物、クロレラ、らんそう、ワムシ）が発生し、数ヶ月たっても共存する。その仕組みを解明するため、次の様な実験を行った。新鮮な培養液を500ccのフラスコに入れ、綿栓をして滅菌し、その中に野外にさらした瓶の中の生物群集を少量移植し、蛍光灯による12時間の明暗周期の下で摂氏24度に保った（図1）。フラスコの中の水を3日おきに顕微鏡で調べたのが図2の遷移図である。遷移とは時間経過にしたがって、生態系の構造と機能が一方向に変化し、安定した系として極相（遷移の過程の最後に到達する状態）に向かう動的過程である。」

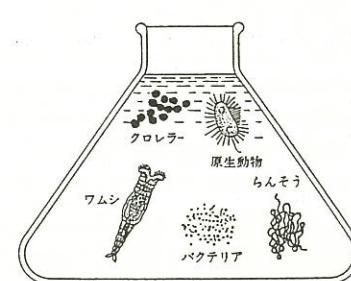


図1 フラスコの中の生物概念図¹⁾

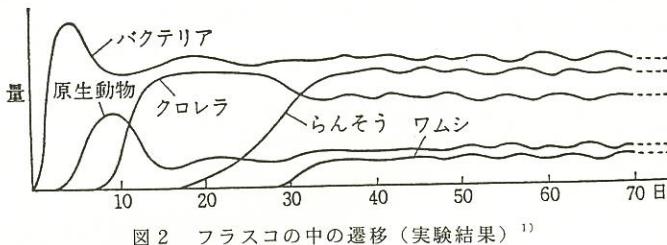


図2 フラスコの中の遷移（実験結果）¹⁾

2. 生物集団の力学^{2, 3, 4)}

2.1 一種問題²⁾

ある与えられた環境の中で生息している一つの生物種に注目し、その個体数の変動を考える。環境は微生物の生育、増殖、代謝などの生理学的性質に影響を与え、環境の諸条件により増殖が促進されたり、阻害されたりする。

(1) 指数関数的増殖

微生物の増殖速度（rate of growth）は、

$$\frac{\Delta C}{\Delta t} = \frac{C(t + \Delta t) - C(t)}{\Delta t}$$

と表される。Cは細胞濃度 [mg/l]、tは時間である。ある時刻tにおける増殖速度は、 $\Delta t \rightarrow 0$ の極限として、 dC/dt で表される。この増殖速度は、外部との移動がないという仮定のもとでは、細胞分裂などによる真の増殖速度（B）と死滅速度（D）との差で表される。すなわち、

$$\frac{dc}{dt} = B - D \quad (2)$$

しかし、増殖速度や死滅速度は一般に細胞濃度に依存するため、Cの関数として $B = bC$ 、 $D = dC$ と表される。したがって、微生物の細胞濃度の増加に関する式(2)は、

$$\frac{dc}{dt} = (b-d)C = \mu C \quad (3)$$

となる。 μ は比増殖速度（specific growth rate）と呼ばれる。

μ が一定値と仮定し、初期値 ($t=0$) 濃度を C_0 とすれば式(3)の解は、

$$C = C_0 \exp(\mu t) \quad (4)$$

で与えられる。

(2) 密度依存的増殖

式(4)から分かるように、 $\mu > 0$ であれば微生物個体群が無限に増殖することになる。これは、増殖の初期段階において個体数が少なく環境条件が良好な場合には $\mu = \text{一定}$ と考えて十分といえる。しかし実際には μ が一定のまま無限に増殖することはありえない。微生物の濃度Cが増加する（個体群が大きくなる）と、栄養塩、光など増殖に必要な資源が相対的に減少する。また、濃度（個体群の密度）の増加そのもの、すなわち1個の微生物が占める空間の減少が μ の低下を招く。 μ を低下させる要因を環境抵抗（environmental resistance）と呼ぶ。

個体群の増加に伴い、環境抵抗により μ が低下することから、 μ はC自身の関数と考えられる。最も単純な場合として $\mu(C)$ を線形（一次式）で近似すると、

$$\mu(C) = \mu - hC \quad (\mu, h > 0) \quad (5)$$

したがって、

$$\frac{dc}{dt} = (\mu - hC)C \quad (6)$$

ここで、hはVerhulst-Pearl係数である。式(6)は、Verhulst-Pearlのロジスティック(logistic)式と呼ばれる。式(6)で、 $\mu - hC = 0$ となる密度を飽和密度kという。式(6)は飽和密度を用いると、

$$\frac{dC}{dt} = \mu \frac{k-C}{k} C \quad (7)$$

と表せる。上式は、密度の増加が種の増殖能力を低下させる要因（環境抵抗）を増大させることを意味し、込み合い効果と見なすことができる。

(3) 増殖の基質依存性^{2, 3)}

微生物の増殖速度に対して多くの数式モデルが提供されているが、それらの中で、最も簡単で多く利用されている式として Monod (モノド) の式がある。それによれば、一つの基質が制限となる場合、その比増殖速度が次のような双曲線関数で表される。

$$\mu = \mu_{\max} \left(\frac{S}{k_s + S} \right) \quad (8)$$

ここで、 S : 制限基質濃度、 μ_{\max} : 基質制限がない場合の比増殖速度の最大値、 k_s : 比増殖速度が最大値の $1/2$ を示すときの基質濃度（飽和定数）である。

k_s はある増殖制限基質の濃度依存性を表す定数と考えられる。増殖制限基質とは、微生物が増殖するに必要な栄養源のことであり、この栄養源の濃度に対して増殖の感度を示すのが飽和定数である。Monodの式を用いることにより、微生物の増殖速度は、

$$\frac{dC}{dt} = \mu C = \mu_{\max} \left(\frac{S}{k_s + S} \right) C \quad (9)$$

で表される。微生物の増殖が密度依存的・基質依存的であるなら、

$$\frac{dC}{dt} = \mu C \frac{k-C}{k} = \mu_{\max} \left(\frac{S}{k_s + S} \right) \left(\frac{k-C}{k} \right) C \quad (10)$$

となる。ただし、この式は単一の基質の消費が増殖を律速する場合のものである。

2.2 二種問題²⁾

生態系の中で、同時に共存していて、互いに密接な関係のもとで生活している二種の生物種について考える。この場合、他の生物群集は環境として考えることになる。

二種問題において見られる相互作用は、捕食-被食および競争の2つが主動的なものとして上げられる。ここでは一般的な生物の数学モデルを、捕食-被食と競争について示す。

(1) 捕食者-被食者関係

二種の生物個体群が共存していて、一方の種が、もう一方の種の餌として捕食されるという関係にある場合を考える。これは大型の生物に見られる捕食者-被食者関係、例えばサメと小型魚類などに見られるものと同様である。このような捕食者-被食者の相互関係を表すモデルは、Lotka-Volterraのモデルが最も基礎的なものとして知られている。捕食による餌(N_1)の増殖率の低下は、捕食者(N_2)の数に比例し、逆に捕食者(N_2)の方の増殖率の増加は、餌(N_1)の量に比例するとすると、個体数の時間的变化は最も簡単な場合次式で表される。

$$\frac{dN_1}{dt} = (a_1 - b_1 N_2) N_1 \quad (11)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = (-a_2 + b_2 N_1) N_2 \quad (12)$$

ここで、 a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 などのパラメーターは、すべて正である。

式(11)において、 a_1 は N_2 が存在しないときの N_1 の比増殖速度を表す。また b_1 は捕食者 N_2 の捕食による N_1 の減少を表し、その速度は N_2 に比例する。式(12)の b_2 は、捕食者 N_2 の比増殖速度が被食者 N_1 の存在量に比例するときの比例定数である。さらに、 $-a_2$ は捕食者 N_2 の死滅速度であり、 N_1 が存在しないとき N_2 は指数関数的に減衰する

(2) 競争

同一の栄養源を利用する異なる種間の競争 (interspecific competition) の一般的な数学モデルを示す。この場合、ある一つの種の増殖は、それと同一の種のみでなく他の種の存在によっても抑制される。二種の場合、

$$\frac{dN_1}{dt} = (a_1 - b_{11} N_1 - b_{12} N_2) N_1 \quad (13)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = (a_2 - b_{21} N_1 - b_{22} N_2) N_2 \quad (14)$$

ここで、 a_1 、 b_{11} は種1（個体数 N_1 ）が単独で増殖するときのロジスティックパラメーターである。また a_2 、 b_{22} は種2（個体数 N_2 ）に対応する。したがって、 b_{12} は種2の存在が種1に与える影響を、 b_{21} はその逆を表す。

2.3 多種問題⁴⁾

古典力学の場合には、多体系を考えると、二体間の相互作用が基礎になり、多体系の相互作用は一般に二体間の相互作用の重ね合わせとして取り扱うことができる。ところが、三種以上の生物集団の力学を考える場合には、単なる二種間の相互作用の重ね合わせという形では表現できない。これは環境との相互作用の多様性によるためである。

具体的で簡単な例として、二種の餌とその両者を栄養として捕食する捕食者の三種問題をVolterra型の方程式で考える。二種の餌の個体数をそれぞれ N_1 、 N_2 、捕食者の個体数を N_3 として、最も簡単なVolterra型の方程式を立てると、

$$\frac{dN_1}{dt} = (a_1 - b_1 N_3) N_1, \quad \frac{dN_2}{dt} = (a_2 - b_2 N_3) N_2 \quad (15)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = (-a_3 + b_1' N_1 + b_2' N_2) N_3$$

となる。ここで、 a_1 、 a_2 は N_3 が存在しないときの N_1 、 N_2 の比増殖速度を表す。 b_1 、 b_2 は N_3 の捕食による N_1 、 N_2 の減少を表す。 $-a_3$ は N_3 の死滅速度であり、 b_1' 、 b_2' は N_3 が N_1 、 N_2 を捕食するときの増加を表す。ここで、本質的な多種間相互作用を考えるために、

捕食の様式について注目してみる。式(15)では、捕食者の1個体が餌の1個体を捕食する率は、2種の餌についてそれぞれ独立に b_1 、 b_2 である。この捕食係数を餌の総量に対するその餌の量の割合に比例するとし、第一種の餌に対する捕食係数を b_1 の代わりに $b_1N_1/(N_1+N_2)$ とおく。このような食い分けは捕食のスイッチング効果と呼ばれる。このとき式(15)は、

$$\begin{aligned}\frac{dN_1}{dt} &= \left(a_1 - \frac{b_1 N_1 N_3}{N_1 + N_2}\right) N_1, \quad \frac{dN_2}{dt} = \left(a_2 - \frac{b_2 N_2 N_3}{N_1 + N_2}\right) N_2 \\ \frac{dN_3}{dt} &= \left(-a_3 + \frac{b_1' N_1^2 + b_2' N_2^2}{N_1 + N_2}\right) N_3\end{aligned}\quad (16)$$

の形で与えられる。式(16)は本質的な三種間相互作用(古典力学に例えるなら三体力学)を取り扱っていることになる。

3. ミクロコズムに働く相互作用¹⁾

生態系のシステムを解析するためには、各要素間(生物どうしや生物と環境との間)に作用する相互作用を分析・統合することが必要である。

ミクロコズムに働く相互作用は、自然のそれに比べて著しく単純化されているが、主動的な相互作用であるためシステムの挙動をおおまかに記述できる。

ミクロコズムのシステムを分解してみると、次の5つの相互作用が働いていることが分かる。それは、捕食・被食・抑制・生産・競争・自己抑制である。各要素間に作用する相互作用をまとめたものが図3である。

各相互作用を簡単に述べると、

- ①捕食・被食：食べる-食べられる。
- ②抑制：排泄物が微生物の増加を抑制すること。
- ③生産：排泄物を生産すること。
- ④競争：微生物間で栄養物を奪い合うこと。
- ⑤自己抑制：密度増加により増加しにくくなること(込み合い効果)。

この図のように、ミクロコズム内では相互作用が複雑に絡み合っており、微生物が他の微生物、もしくは他の微生物の排泄物を食べることにより物質循環が行われ、力学的なバランスが保たれている。よって、ここでの中心的な相互作用は捕食・被食の関係であるといえる。

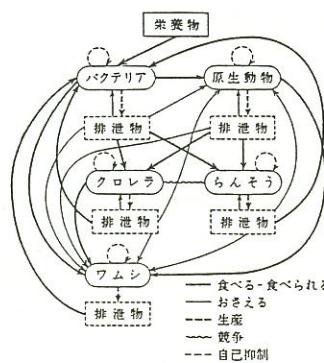


図3 相互作用系の模式図¹⁾

4. 二体間における微分方程式

ここでは、今までの理論をもとに、ミクロコズムについての微分方程式を立てることを考える。そのとき、中心になるのは捕食-被食および競争の相互作用であるが、さらに抑制、生産および自己抑制の効果も考慮する。

4.1 捕食-被食の微分方程式

微生物濃度をC [mg/l]、微生物の栄養物をF [mg/l]、排泄物をM [mg/l]としたとき、これらの量の間の微分方程式は次式となる。

$$\frac{dC}{dt} = \mu_{max} \frac{F}{k_{SF} + F} \frac{k_c - C}{k_c} C - k_1 \cdot M \cdot C \quad (17.1)$$

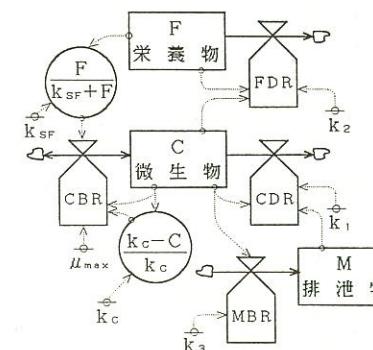
$$= \left(\mu_{max} \frac{F}{k_{SF} + F} \frac{k_c - C}{k_c} - k_1 \cdot M \right) C \quad (17.2)$$

$$\frac{dF}{dt} = -k_2 \cdot C \cdot F \quad (18)$$

$$\frac{dM}{dt} = k_3 \cdot C \quad (19)$$

ここで、 k_c : 飽和密度 [mg/l]、 k_S : 飽和定数 [mg/l] (Fは栄養物を表す)、 μ_{max} : 最大比増殖速度 [1/day]、 k_1, k_2 : 減少係数 [$l/mg day$]、 k_3 : 増加係数 [1/day] である。

この微分方程式上で、捕食-被食の関係は微生物と栄養物の間に見られる。抑制は排泄物による微生物濃度の減少であり、式(17.1)の $k_1 \cdot M \cdot C$ の項で表してある。生産は排泄物の増加であり、式(19)に表してある。自己抑制は密度増加による増殖抑制を示し、式(17.1)の $(k_c - C)/k_c$ の部分がこれに当たる。さらに式(17.2)の()内は、二種全体で見たときの比増殖速度 μ に当たり、排泄物の抑制により比増殖速度が減少する形となっている。捕食-被食のフローダイアグラムを図4に示す。



CBR: 栄養物Fによる増加レイト

$$CBR = \mu_{max} \frac{F}{k_{SF} + F} \frac{k_c - C}{k_c} C$$

CDR: 排泄物の抑制による減少レイト

$$CDR = k_1 \cdot M \cdot C$$

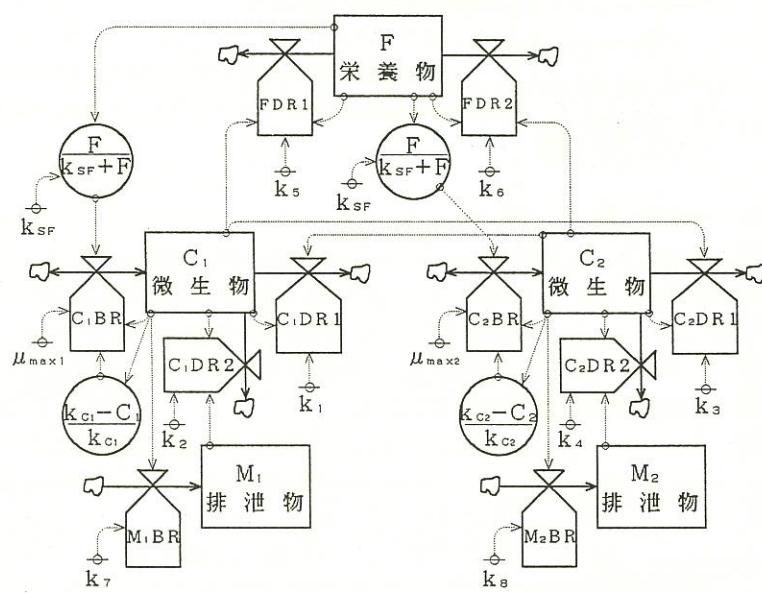
FDR: 微生物の捕食による減少レイト

$$FDR = k_2 \cdot C \cdot F$$

MBR: 微生物の生産による増加レイト

$$MBR = k_3 \cdot C$$

図4 捕食-被食のフローダイアグラム



C_1BR 、 C_2BR ：栄養物 F による増加レイト

C_1DR1 ：微生物 C_2 との競争による減少レイト、 $C_1DR1 = k_1 \cdot C_2 \cdot C_1$

C_2DR1 ：微生物 C_1 との競争による減少レイト、 $C_2DR1 = k_3 \cdot C_1 \cdot C_2$

C_1DR2 、 C_2DR2 ：排泄物の抑制による減少レイト

FDR1、FDR2：微生物の捕食による減少レイト

M_1BR 、 M_2BR ：微生物の生産による増加レイト

図 5 競争のフローダイアグラム

4.2 競争の微分方程式

競争を示す微分方程式は、二種の微生物濃度を C_1 [mg/l]、 C_2 [mg/l] とし、両者の間で同一の栄養物 F [mg/l] を取り合い、同時に排泄物 M_1 [mg/l]、 M_2 [mg/l] を生産するとすると、次式で表される。

$$\frac{dC_1}{dt} = \mu_{max1} \frac{F}{k_{SF} + F} \frac{k_{C_1} - C_1}{k_{C_1}} C_1 - k_1 \cdot C_2 \cdot C_1 - k_2 \cdot M_1 \cdot C_1 \quad (20.1)$$

$$= \left(\mu_{max1} \frac{F}{k_{SF} + F} \frac{k_{C_1} - C_1}{k_{C_1}} - k_1 \cdot C_2 - k_2 \cdot M_1 \right) C_1 \quad (20.2)$$

$$\frac{dC_2}{dt} = \mu_{max2} \frac{F}{k_{SF} + F} \frac{k_{C_2} - C_2}{k_{C_2}} C_2 - k_3 \cdot C_1 \cdot C_2 - k_4 \cdot M_2 \cdot C_2 \quad (21.1)$$

$$= \left(\mu_{max2} \frac{F}{k_{SF} + F} \frac{k_{C_2} - C_2}{k_{C_2}} - k_3 \cdot C_1 - k_4 \cdot M_2 \right) C_2 \quad (21.2)$$

$$\frac{dF}{dt} = -k_5 \cdot C_1 \cdot F - k_6 \cdot C_2 \cdot F \quad (22)$$

$$\frac{dM_1}{dt} = k_7 \cdot C_1, \quad \frac{dM_2}{dt} = k_8 \cdot C_2 \quad (23)$$

ここで、 k_c ：飽和密度 [mg/l] (番号は種 1、2 を表す)、 k_s ：飽和定数 [mg/l] (F は栄養物を表す)、 μ_{max} ：最大比増殖速度 [1/day] (番号は種 1、2 を表す)、 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 、 k_5 、 k_6 ：減少係数 [$l/mg\ day$]、 k_7 、 k_8 ：増加係数 [1/day] である。

式 (20)、(21) に見られるように、二種の微生物の間に起こる競争は、競争相手の存在に M よって増加が抑制される形で表されている。競争による増加の抑制は、式 (20.1) の $k_1 \cdot C_2 \cdot C_1$ の項、および式 (21.1) の $k_3 \cdot C_1 \cdot C_2$ の項で表される。競争のフローダイアグラムを図 5 に示す。

5. ミクロコズム全体のモデル

ミクロコズム全体での微分方程式を考える場合、古典力学の多体問題と同様、二体間の関係（捕食・被食と競争）を重ね合わせることにする。ただし前述したように、生物の多体問題と捉えるための修正（捕食のスイッチング効果の導入）が行われている。相互作用の重ね合わせは、図 3 に示された関係に基づいている。

11 個の要素について微分方程式を立てると次式となる。ただし、B：バクテリア、P：原生動物、C：クロレラ、S：らんそう、R：ワムシ、F：バクテリア栄養物、MB：バクテリア排泄物、MP：原生動物排泄物、MC：クロレラ排泄物、MS：らんそう排泄物、MR：ワムシ排泄物（単位は全て濃度 [mg/l]）である。

$$\begin{aligned} \frac{dB}{dt} = & \left[B_1 \left(\frac{SF \cdot F}{k_{SF} + SF \cdot F} + \frac{SMC \cdot MC}{k_{SMC} + SMC \cdot MC} + \frac{SMS \cdot MS}{k_{SMS} + SMS \cdot MS} \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{SMR \cdot MR}{k_{SMR} + SMR \cdot MR} \right) \frac{k_B - B}{k_B} - B_2 \cdot P - B_3 \cdot R \cdot SB - B_4 \cdot MB \right] B \end{aligned} \quad (24)$$

$$\frac{dP}{dt} = \left[P_1 \frac{B}{k_{SB} + B} - P_2 \cdot MB - P_3 \cdot MP - P_4 \cdot MC - P_5 \cdot MS - P_6 \cdot R \cdot SP \right] P \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \frac{dC}{dt} = & \left[C_1 \left(\frac{SMB \cdot MB}{k_{SMB} + SMB \cdot MB} + \frac{SMP \cdot MP}{k_{SMP} + SMP \cdot MP} \right) \frac{k_c - C}{k_c} \right. \\ & \left. - C_2 \cdot S - C_3 \cdot R \cdot SC - C_4 \cdot MC \right] C \end{aligned} \quad (26)$$

$$\frac{dS}{dt} = \left[S_1 \left(\frac{SMB \cdot MB}{k_{SMB} + SMB \cdot MB} + \frac{SMP \cdot MP}{k_{SMP} + SMP \cdot MP} \right) \frac{k_s - S}{k_s} - S_2 \cdot C - S_3 \cdot MS \right] S \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \frac{dR}{dt} = & \left[R_1 \left(\frac{SB \cdot B}{k_{SB} + SB \cdot B} + \frac{SP \cdot P}{k_{SP} + SP \cdot P} + \frac{SC \cdot C}{k_{SC} + SC \cdot C} \right) \frac{k_r - R}{k_r} \right. \\ & \left. - R_2 \cdot MB - R_3 \cdot MP - R_4 \cdot MC - R_5 \cdot MS \right] R \end{aligned} \quad (28)$$

$$\frac{dF}{dt} = -F_1 \cdot B \cdot SF \cdot F \quad (29)$$

$$\frac{dMB}{dt} = MB_1 \cdot B - (MB_2 \cdot C + MB_3 \cdot S) SMB \cdot MB \quad (30)$$

$$\frac{dMP}{dt} = MP_1 \cdot P - (MP_2 \cdot C + MP_3 \cdot S) SMP \cdot MP \quad (31)$$

$$\frac{dMC}{dt} = MC_1 \cdot C - MC_2 \cdot B \cdot SMC \cdot MC \quad (32)$$

$$\frac{dMS}{dt} = MS_1 \cdot S - MS_2 \cdot B \cdot SMS \cdot MS \quad (33)$$

$$\frac{dMR}{dt} = MR_1 \cdot R - MR_2 \cdot B \cdot SMR \cdot MR \quad (34)$$

ここで、SF、SMC、SMS、SMR、SMB、SMP、SB、SP、SCは、捕食のスイッチング効果を表しており、以下の式で示される。

$$SF = \frac{F}{F + MC + MS + MR} \quad (35)$$

$$SMC = \frac{MC}{F + MC + MS + MR} \quad (36)$$

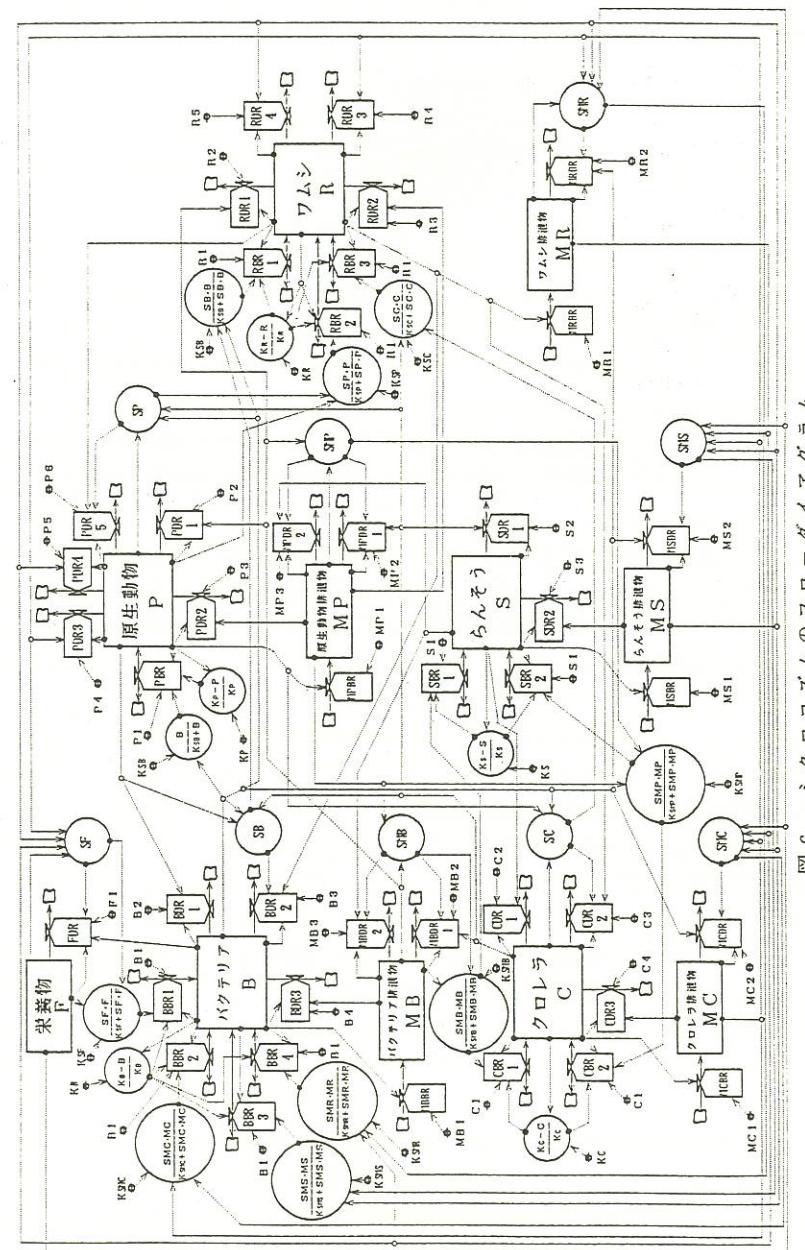


図 6 ミクロコズムのフローダイアグラム

$$SMS = \frac{MS}{F+MC+MS+MR} \quad (37)$$

$$SMR = \frac{MR}{F+MC+MS+MR} \quad (38)$$

$$SMB = \frac{MB}{MB+MP} \quad (39)$$

$$SMP = \frac{MP}{MB+MP} \quad (40)$$

$$SB = \frac{B}{B+P+C} \quad (41)$$

$$SP = \frac{P}{B+P+C} \quad (42)$$

$$SC = \frac{C}{B+P+C} \quad (43)$$

以上の方程式をシステムダイナミクスによるフローダイアグラムで表すと図 6 となる。

6. シミュレーション結果および考察

本研究では、ミクロコズムを均一モデルとして扱っており、生態系の構造分化などは考慮されていない。また、ミクロコズムのように5種の生物集団の間にすら42の相互作用が働いており、これをシミュレートするためのパラメーターは60以上にもなる。これらのパラメーター値は、二体間の相互作用の実験データ¹⁾をもとに、その定性的特性に合うよう決定された。シミュレーション結果を図7 (a) ~ (c) に示す。縦軸は生体量 [mg/l]、横軸は時間 [day] である。各グラフについては、生体量の初期濃度が異なっている。すなわち、(a) ミクロコズムの実験結果(図2)の傾向、特に各生物の発生のタイミングが実験結果に合うよう生体量の初期濃度および比率を調整した場合、(b) 全て同じ濃度とした場合、そして(c) ミクロコズムの実験結果(図2)で極相に達した後の各微生物の濃度比を与えた場合である。

これらの結果より、以下の事を指摘できる。(1)全体的傾向は初期濃度比率にはほとんど依存しない。特に極相に達した後の生体量比率は全く同じである。(2)各生物の発生順序とタイミングは明らかに初期濃度比率の影響を受ける。

当初の予想では、極相の濃度比率を初期条件とした例(c)が最も良く系の遷移過程を再現できると思われたが、初期濃度の調整のみによって実験と計算の結果を合わせるために、(a)のような初期条件を与える必要があった。このことは、5章で述べた数学モデルが系の動的過程をまだ完全には記述し得ていないことを表している。すなわち、発生

のタイミングのずれは、らんそうやワムシといった遷移の後期に現れてくる生物において顕著であり、これは二体間の関係の重ね合わせで記述されているモデルの単純さがその原因であるかもしれない。

〈参考文献〉

- 1) 栗原康：有限の生態学、岩波新書、1975.
- 2) 須藤隆一：微生物生態学 I、共立出版、1986.
- 3) 山根恒夫：生物反応工学、産業図書、1980.
- 4) 大沢文夫：生命の物理、岩波書店、1978.

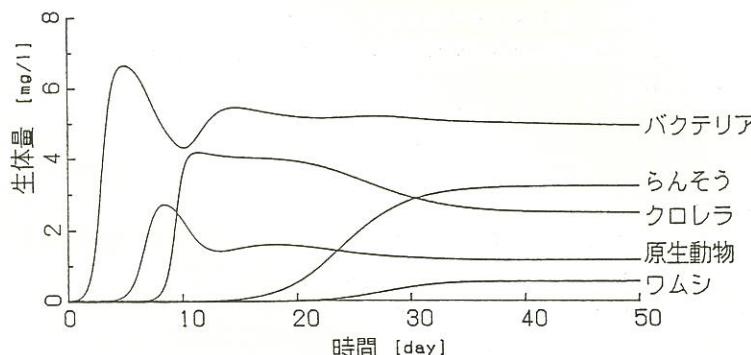


図 7 (a) 初期濃度 : $B = 0.01$ 、 $P = 0.001$ 、 $C = 0.001$
 $S = 0.0001$ 、 $R = 0.00001$ (単位は $[mg/l]$)

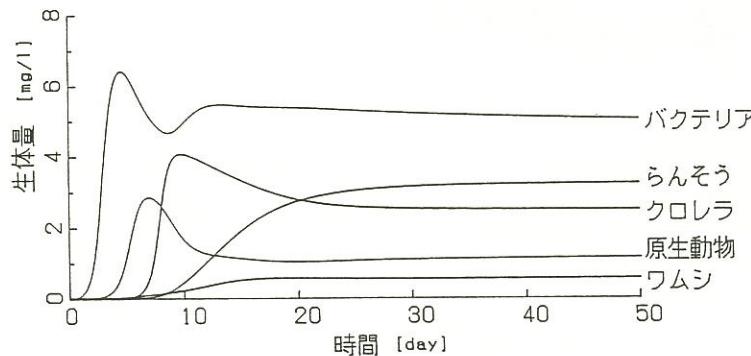


図 7 (b) 初期濃度 : 全て $0.01 [mg/l]$

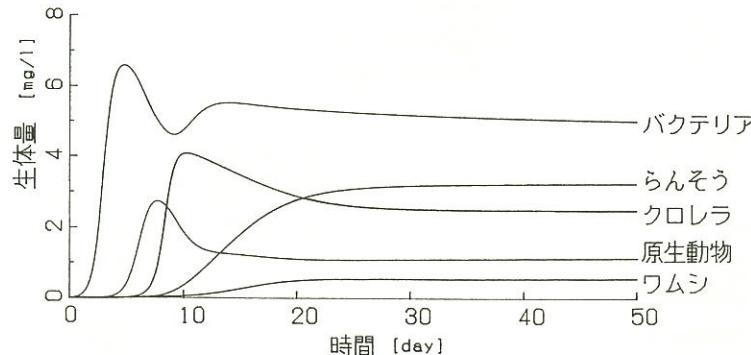


図 7 (c) 初期濃度 : $B = 0.01$ 、 $P = 0.0027$ 、 $C = 0.0067$
 $S = 0.0087$ 、 $R = 0.002$ (単位は $[mg/l]$)

《論文》

この論文は複数のレフェリーの審査を受けたものです

タクシー業界の需要分析と経営計画シミュレーション

Demand analysis of taxi industry and Management planning simulation

鈴木 信幸

Abstract

In researching an effective resources allotment and total management system for taxi industry, we ought to consider a long range and synthetic planning. It will be define a pre-step decision making to think out any substitutable corporate strategies.

That's to say, this paper pay attention to a taxi demand which is attached much importance in management planning process, as referring to some simulations results about taxi max-demand, taxi supply, number of drivers, total of taxi-drive km which include passengers ride and not ride, total of taxi-drive km which passengers ride on actually, and produce some beneficial dynamic intelligences to a lot of management problems in taxi industry that should be made a decision feasibly.

<キーワード> 需要分析、経営計画、意思決定情報

明治大学情報科学センター