

複雑系科学と組織研究

シミュレーションによる組織の解明

竹田昌弘

立命館大学 経営学部

603-8577 京都府京都市北区等持院北町 56-1

075-466-3369/mtakeda@ritsumeai.ac.jp

あらまし

組織は、自立性を持った個の集合として複雑系の側面を持つ。環境変化の激しい今日では、還元論的な合理化原理に基づいて構成される階層型組織の限界が露呈してきている。現在求められる組織のデザインを解明するためには、複雑系科学のアプローチを組織研究に取り入れていることが有効であると考えられる。

本稿では、複雑系科学のアプローチによる組織科学研究について概観した上で、魚群の行動をシミュレートする人工生命ソフトウェアによる実験による知見を実際の組織にあてはめて考察する。また、今後、このソフトウェアを拡張していく方向を提示する。

キーワード

経営組織論, 組織学習, 複雑系, 人工生命, シミュレーション

Complexity and Organization Science

Understanding Organizational Behavior through Artificial Life Simulation

Masahiro TAKEDA

Faculty of Business Administration, Ritsumeikan University

56-1, Tojiin-Kita-Machi, Kita-Ku, Kyoto 603-8577, Kyoto, Japan

+8175-466-3369/mtakeda@ritsumeai.ac.jp

Abstract

An Organization is consisted from a group of autonomic individuals. Therefore we can see organizations as complex systems. To understand the new design of the organization that is effective in the turbulent environment, it is useful to introduce the approaches used in complexities.

The overview of the organization science researches using new approach and the discussion regarding findings from the artificial life simulation software are presented. Simple simulation software can explain some aspects of organizational behaviors.

key words

Management Organization, Organizational Learning, Complexity, Artificial Life, Simulation

はじめに

近年、複雑系科学という新しい概念が、自然科学のみならず、社会科学も包括する広い分野で注目を集めている。Gleick の著書 ([Gleick 1987]) が、広範な研究領域に対して複雑系科学の種をまいたが、その後、着実な研究成果をあげてきており、これらは、[Waldrop 1992] や [吉永 1996] で概観することができる。

従来からの科学は、研究対象をより単純な要素に分解することによって、単純化されたモデルの中に記述しようとする要素還元主義的な方法論が主流を占めている。これに対し、自然現象や社会現象の大半は、本質的に複雑なものであり、単純な要素への還元はできないことを認めた上で、その複雑な現象を解明しようというのが、複雑系研究の方法論の立場である。複雑な系を記述する方法は、さまざまあり、複雑系としてひとまとめにしている中には、複数の分野が存在している。

複雑系について、その研究の中心的なセンターとなっている米国のサンタフェ研究所では、次のように定義している ([Arthur 1997])。

「多くの要素があり、その要素が互いに干渉し、何らかのパターンを形成したり、予想外の性質を示す。そして、そのパターンは各要素そのものにフィードバックする。」

多くの自立的な構成員から成り立ち、各々の相互作用によって形作られる組織は、まさに、複雑系そのものといってよいだろう。特に急速な環境変化を常態とした現在、還元論的な合理性を基盤とした階層型組織の限界が露呈し、組織内部の自立性の有効な活用が求められている。本稿では、複雑系研究と組織研究の関連を概観した上で、複雑系研究の一つの分野である人工生命に関する簡単なプログラムによるシミュレーションを通じて、組織研究、特に自己組織性に関する考察を行っていく。

1. 組織研究と複雑系アプローチ

1 組織研究への複雑系アプローチの概要

近代科学では、自然界での現象を摩擦や抵抗のない理想的な環境下での振る舞いとして記述することを中心に体系化されてきた。理想的な環境を仮定すると、自然現象は非常に単純なモデルで整理できる。このモデルによって、科学技術は大きな発展を続けてきた。しかし、真空の空間での現象が精密に説明できたとしても、現実の現象のほとんどは大気中、すなわち空気存在する空間で発生し、観察される。そこでは摩擦や抵抗を完全に無視することはできない。

一方、空気などの気体や、水などの液体の挙動を説明しようとする流体力学の世界では、その法則は単純なモデルでは表現できず、多くのパラメータを必要とする非線型方程式で表現される。このために、現象を記述する方程式を明らかにすることができても、これを数学的に解くことは容易ではない。実際のところ、完全に解くことができる問題は一部の特殊例に限定されてしまう。

社会科学的现象についても、東欧共産主義が雪崩的に急速な崩壊をしたり、ブラックマンデーの株式市場で歴史的な大暴落が起きたりした現象について、事前に何らかの兆しはあったとしても、ほんのわずかはパラメータの変化が、一気に大きな変動を引き起こした例は数限りなくある ([Waldrop 1992])。市場動向の説明や、人口統計学などの研究などで複雑系のフレームワークを利用した研究が始められている。

複雑系研究のうちで、コンピュータ・シミュレーションなどの手段を用いて生命活動を記述することによって、生命活動の本質を解明しようとしているのが人工生命という分野である。同じような研究アプローチをとっている分野には、人工知能や、最近では社会シミュレーションなどがある。

人工知能では、人間の知的能力をコンピュータに移植して経済活動に活用するという実用的研究の側面のほかに、心理学などの分野と連携して、コンピ

ュータ・シミュレーションなどを通じて知能を表現することによって、知能の発現するメカニズムを解明しようとする側面がある。これは、認知科学と呼ばれるものである。このアプローチを適用して、対象を知能の発現から、生命現象に展開させたものが人工生命であるといってもよいだろう。

また、さらに対象を広げると、生命体の集合として社会が形成される。そこで社会現象や社会概念の発現の過程を解明しようとする研究もなされている（〔遠藤 1997〕）。そこでは、社会現象を記述するツールとしてコンピュータ・シミュレーション・モデルを位置づけている。これは、人工生命を延長させた人工社会と呼んでもよいだろう。

生命が発生し、知識が芽生え、個体が増加し社会を構成するようになる。さらに進むと、共通目標を基盤として組織が構成される。生命、知能、社会の現象解明にコンピュータ・モデルが活用されるようになってきた。今後、組織研究にも同様のアプローチでコンピュータ・モデルを活用するのは、自然な延長であろう。実際のところ、システム・ダイナミクスを基盤として、組織現象をシミュレーション・モデルで説明する研究も始まっている〔Senge 1990〕。

人工生命に話を戻すと、これまでの生命研究は、生命を構成するさまざまな要素を細分化し、それぞれを解明した上で統合しようとする要素還元主義のアプローチが中心であった。これは、解剖学に代表される。人工生命では、生命現象が多くの要素の複雑な連携によって構成される複雑系であるという前提から、還元主義のアプローチを捨て、結果として生命現象と認められるような振る舞いをするモデルを作り出すことで生命現象の本質を解明しようとしている。

人工生命の研究のほとんどは、コンピュータを利用したシミュレーションによって進められている。それ以前の生命研究では、有機物質に内包される機能として生命現象を探ろうとしていたのに対して、生命現象の本質をそこにある情報と定義し直したからである。すなわち、遺伝子情報を保存する DNA

に表現されている組み合わせ情報が生命現象にとって本質的に重要だということが前提となっている。そこで、コンピュータのソフトウェアで遺伝子相当の情報を操作することで生命類似の機能や特徴を発現することができれば、そこから生命現象が説明できるというのが、研究のアプローチである。

2 自己組織性

人工生命ソフトウェアの持つ複雑な挙動から生命現象に類似の機能を導出する鍵は自己組織性にある。熱力学の第 2 法則は、エントロピーは増大する方向にあることを主張している。しかし、自然界には複雑な挙動を取る系の中に、自立的な秩序が発現する例は多く知られている（〔Prigogine 1984〕）。エントロピーが高いと思われる系の中に、さらにエネルギーを注入すると、エントロピーは増大していくはずの系の中に秩序が形成されるのは興味深いことである。

人工生命の研究でも、ソフトウェアの仕組の中に、適切なレベルの複雑さを織り込むことで自己組織性を発現できることが分かっている。生命現象を発現させるためには、ソフトウェアは単純すぎず、複雑すぎず、適度な複雑さが要求される。

実際の個体群の挙動をソフトウェアでシミュレートした試みに、鳥の群れの動きのシミュレーションがある。鳥や魚の群れの行動には、統制のようなものが感じられるが、実際に鳥の群れの動きを観察した Reynolds によれば、次のようにまとめられる（〔Levy 1992〕）。

「鳥の群れの行動は……概念的には簡単だが、視覚的にはあまり複雑でランダムに見える。しかし驚くほど同期のとれた行動だ。もっとも不思議なのはたぶん、そこに非常に強い意図的な中央制御があるような印象を受けることだった。しかし、すべての証拠からいえることは、鳥の群れは個々の行動の集合したものに過ぎず、個々の鳥の行動は彼らの局所的な世界の認識をもとにしたものということだった。」

その局所的な世界の認識とそれに基づく行動は、次のように 3 つの簡単な原理で説明できる。

- ・群れをまとめようとする力
- ・群れが同じ速度で動こうとする調整の力
- ・鳥が互いに近寄りすぎたときはなれる力

この原理は、後に述べる魚群の振る舞いのシミュレーションでも基本となっているが、これだけの単純な原理をもとに、適切なパラメータを設定したコンピュータ・シミュレーションは驚くほど現実の鳥や魚の群れの動きを表現している。このためにシミュレートされた動物の挙動は、生物学の研究に応用され始めているほか、映画「ジュラシックパーク」の中で、恐竜の群れの疾走でも応用されている。

鳥の群れのアナロジーは、組織学習過程の説明でも利用されている。de Geus は、組織が有効な学習をするために必要な条件をある鳥の種が種全体で新しい行動を学習するための3条件から示唆している。3つの条件は、次のとおりである ([de Geus 1997])。

- ・その種の個体が移動能力を持つと同時に、移動能力を利用する必要があり、そして、各個体が自分のテリトリーにこもるのではなく、群れを作ったり群れで移動しなければならない。
- ・新しい習慣—新技能—を創り出す能力を備える個体が、その種の中に存在していなければならない。
- ・その種には、遺伝的にではなく、直接的なコミュニケーションを通じて、技能を個体からコミュニティ全体への広める手段が確立されていなければならない。

それぞれの条件を順に、「移動性」、「創造性」、「伝達性」と呼ぶとすれば、個人的な経験から新しい行動パターンを生み出すために要求されるのが創造性である。個人的な行動パターンを他者に伝達するためには、その行動を形式知として記述したり、指導によって教える能力が必要になる。これが、伝達性である。これだけでは、新たな行動パターンを身につけた個人の周囲だけでしか、そのパターンは共有されない。これを広く組織全体に広げるためには、個人が組織内を移動して、新しいパターンをさらに伝播していかなければならない。したがって、これら3条件が整ってはじめて、個の学習とその組織内への浸透が可能になるわけというわけである。

人工生命としての創発する行動は、多くの微細な情報の積み重ねによって発現している。人工生命としての実験が成功したかどうかは、プログラムで意図したものではない性質が何か発現するかどうかにかかわっている。適度な複雑さを持つことによって、当初のプログラムの意図しなかった形で生命現象が発生する過程は、[Hogan 1983]なども参考になる。

3 組織研究における還元論的立場の限界

Barnard, Simon に代表される近代組織論において、組織はさまざまな側面を持つシステムとして捉えられているが、その分析のフレームワークは要素還元主義的なアプローチが中心となっている。複雑な課題の合理的解決手段として階層化された組織構造を説明しているのもその一つの現われであろう。

環境変化の速度があまり大きくなければ、扱わなければならない複雑性もそれほど大きくなり、静的な階層化された組織構造だけで説明できるだろう。組織の問題解決は、階層構造を成す個々の構成員に細分化されて割り当てられた問題の解決の積み重ねで捕らえられてきた。組織構造は、その組織の抱える問題を効率的かつ合理的に解決するための手段の一部になっている。

しかし、最近のように、めまぐるしく変化する環境に対応しなければならない組織の場合には、固定的な組織構造に依存した固定的な応答しかできないのでは不十分である。組織は、個々の構成員の能力を、適宜ダイナミックに再構成して活用し、さらには、個々の能力の総和以上の力を発揮することが求められている。

Simon は、組織の構成員を比喻して、「一つの行動システムとして眺めると、アリの動きはきわめて単純なものである。その行動の啓示的な複雑性は、主としてそれが置かれている環境の複雑性を反映しているものにほかならない ([Simon 1981]).」と述べているが、現実のシロアリの行動について、昆虫学者の E.O.ウィルソンは、次のように述べている。「あるシロアリは、彼らの驚くべき離れ業を、コンピュータ科学者がダイナミック・プログラミン

グと呼ぶ手法でこなしている。動作の各ステップが完了すると、その結果が査定され、次のステップのためにぴったりなプログラムが（たくさんの利用可能なプログラムの中から）選ばれ、起動される。それを行うために、設計図を手にして監視するシロアリは必要ない（[Levy 1992]）。

ここでも、前に述べた鳥の群れのように、個々の個体が認知し、影響を与えることのできる範囲は局所に限定されるものの、全体としては個々の個体に見られる行動の単なる総和以上の行動が発現していると見ることができる。

組織においても、個人を単なる還元論的な個人と捕らえるだけでなく、組織の中の個人としての位置づけと組織全体とを視野に置いた見方が要求される。

4 システミック・アプローチ

個と全体とを視野に置いたアプローチとして、Senge はシステミックという言葉を使っている。また、北矢はホロニックという言葉を用いている。

システミックとは、辞書によれば「組織的な」ということになるが、[Senge 1990] のなかで用いている「木を見て森も見る」という表現が、その特徴をよくあらわしているだろう。森は個々の木から構成されているが、森全体を見るだけでも、個々の木に着目するだけでも、森の本質は見えてこない。組織をとらえる場合にも、一つ一つの要素を個別に見るだけでは、全体は見えてこない。

ホロニックは、ホロンという言葉に端を発するものだが、その特徴は、レーザー光線を利用して平面のフィルム状に立体映像を記録するホログラフィーを見るとわかりやすいだろう。ホログラフィーは、レーザー光源による対象物の干渉縞を平面に記録することによって、適切な参照光源のもとで、立体像を再現することが特徴であるが、もう一つの特徴として、通常の写真フィルムのように、フィルムの各部位が対象物の部分部分に対応するのではなく、フィルムの各部位に、対象物のさまざまな側面が重なり合って記録されることがある。すなわち、通常の写真では、フィルムを半分に切ってしまうと、画像も残りの部分に記録されている半分のみしか再生で

きなくなる。しかし、ホログラフィーでは、フィルムの一部を取り出しても、多少情報が損なわれるものの、全体像を復元することは可能である。

組織においても、各構成員は、組織の情報を単純に断片的に分担して持っているだけではなく、一人の構成員を見ることによって、その組織の雰囲気や大まかに知ることはできるだろうし、複数の構成員を組織から抜き出して、何らかの作業に当たらせれば、その組織の文化的側面が再生されるだろう。また、組織の中から、誰かが抜けたとしても、組織全体がそれまでどおりに機能できるのも、ホログラフィーのイメージに近いだろう。

北矢（[北矢 1985]）は、ホロニック・マネジメントを欧米流のトップダウン型経営でも、日本流のボトムアップ型経営でもない、新しい経営スタイルと位置づけた。「自律と統合を基本原理とする個と全体との有機的調和のマネジメント」というのが彼の定義だが、その目指すところは、「企業のあらゆるレベルで構成員の各々が、自立的に問題解決や事業構造の改革に取り組み、それが全体として望ましい調和のもとに相乗効果を発揮し、企業の戦略ドメインの実現に向けて統合され、収斂していく状況」である。

Senge のアプローチに話を戻すと、彼は、全体を構成するものを、各構成員と位置づけて、部分と全体を同時に把握するのではなく、組織を特徴づけるさまざまな変数の集成として組織を捕らえている。組織は、恒常性を持つものであり、組織変革のために何かの変数を変えようとするれば、ほかの変数の働きによって、その変化は押し戻されるであろう。したがって、一つの変数のみを操作するのではなく、好ましい変革を起こすように、組織に関連するさまざまな変数を総合的に適切に変化させる必要があると主張している。

このためのツールとして、種々の変数の関連をシステム・ダイナミクス的手法を用いて表現し、シミュレーションを通じて、導入しようとしている変革の帰結を実験することを勧めている。いわば、経営者のためのフライト・シミュレータである。

2. 人工生命プログラムによる考察

ここでは、本稿での実験のために移植した人工生命プログラム「メダカの学校」の概要を説明した上で、その実験から得られた知見をまとめる。

1 人工生命プログラム「メダカの学校」

本稿で実験に利用したプログラムは、[大山 1997] に収録されている「メダカの学校」がオリジナルである。オリジナルのプログラムは、C++言語を利用して MS-DOS 上のプログラムとして作成してあったが、より柔軟な環境で実行できるように JAVA 言語（具体的には Microsoft 社の Visual J++）を利用してアプレットとして記述し直した（[Davis 1996]）。その際、単にプログラムの移植をするだけでなく、多様な実験ができるように、プログラム中で固定されていたパラメータを含め、複数のパラメータを html ファイル中のタグの中で、アプレットの外部から操作できるようにした（表 1）。またオリジナル・プログラムにあったグラフ表示機能とパラメータの範囲チェック機能は最初の移植のステップでは単純化のために省略した。

各個体の行動の決定は、前に述べた Reynolds による鳥の群れのシミュレーションでの行動原理を基本にしている。個体の行動を決定する主要なパラメータは、図 1 のとおりである。すなわち、一定範囲内（回避行動領域）に別の個体が近づけば、これとの衝突を回避する方向に移動しようとし、適切な範囲（並行行動領域）に別の個体がいれば、これと並行して移動しようとする。ほかの個体と離れすぎたければ、近づこうとする（接近行動領域）。ただし、離れすぎたり、自分の後方にあたる死角（視野

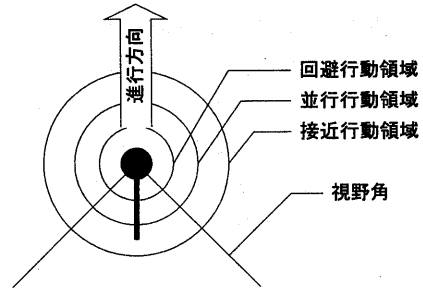


図 1 個体の認知範囲をあらわすパラメータ群

角の範囲外)に相当する部分にいる個体は認識できないために、自分の活動を決定する上でその情報が利用できない。実際の行動の決定には、以上のような方針で決定したものに乱数による揺らぎの要素を加味している。

拡散・分裂は、個体群に脅威が迫った場合に発生する攪乱の活動を人為的にシミュレートするものである。拡散は、個体群の重心を中心に放射状に各個体が散開し、分裂は、個体群の重心を中心に左右に各個体が散開する。それぞれ、画面上の魚の動作範囲内でマウスをクリックすることによって発生させられる。実際の実行画面例を図 2 に示す。

2 シミュレーションから得られた知見

「メダカの学校」プログラムについて個体数 1、すなわち、1 匹だけの場合の挙動を見ていると、いわゆるブラウン運動のようなランダムな動きを示すが個体数を増やし、各個体が他の個体を認知できる範囲を調整していくうちに、徐々に組織的な挙動が見られるようになってくる。各個体の自立的な行動と、他の個体に影響された行動が適切にバランスしたときに、もっとも自然な振る舞いをするようである。

人工生命プログラムは、自然界での群れの挙動を表現することを目的として開発されてきているが、逆に、これを利用して、さまざまな性格の群れをシミュレートし、群れの挙動の特徴を推測することも可能である。

事実、パラメータをさまざまに変更しつつ実行するうちに、いくつかの特徴的な現象を経験した。実際の組織の挙動にあてはめて考えるためには、さら

表 1 パラメータ一覧

パラメータ	意味
MX,MY	魚の行動範囲
N_FISH	個体数
R_AREA	回避行動領域半径
P_AREA	並行行動領域半径
A_AREA	接近行動領域半径
MOD2	行動決定方式
MOD	拡散・分散方式
MAG	拡散・分散の規模
SIGHT	視野角

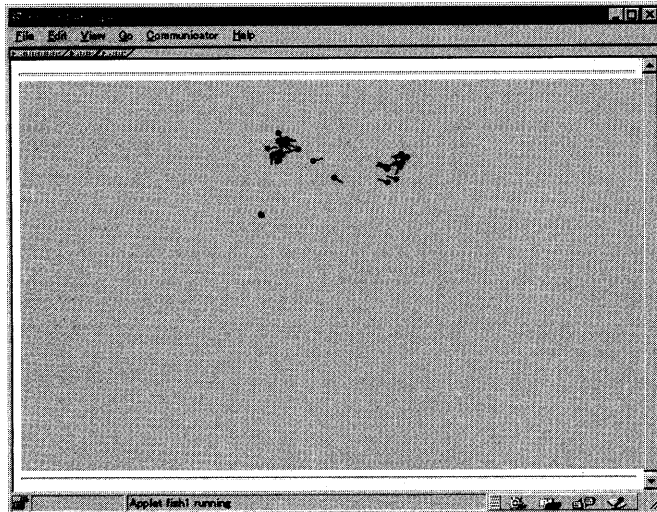


図2 実行例

なる検証の作業が必要となるが、これらの現象から代表的なものをここにあげておこう。

i. 個体の認知能力と自己組織性

まず、第一に各個体の認知能力、すなわち認知できる領域が狭い場合は、近傍にいる個体をうまく発見できず、各個体が組織的に行動できない。接近行動をとるために認知できる範囲を広げたり、視野角を広げることで各個体の認知能力をあげてやることで、組織的な行動をとるようになる。組織的行動のためには、各個体がある一定以上の環境認知能力を持っている必要がある。

現実の組織にあてはめて考えると、ネットワーク組織や分散組織などといって、構成員に自立性を求めた組織構造をとっても、それだけではうまくいかない事例が数多い。たとえば、電子メールなどの利用によって情報流通コストを低減させることで、中間管理層を排除する傾向があるが、各構成員が十分に環境を認知することができず、また、自立的に行動するだけの権限が与えられていなければ、各構成員は常に上位者に報告し指示を受けなければ十分な行動がとれない。結果として、上位者の負荷が急速に増大することで組織が立ち行かなくなるのである。

自律分散型の組織を構成するためには、自律して自由に行動をしながらも、周囲の環境を広範に認知し、適切な行動を選択できるような能力を各構成員

がもつ必要があるだろう。このプログラムによる実験で行動の方向性の決定は、直接的な指示によるのではなく、多数の個体のいる方に向かって行われていることも注意深い。指示・命令による統制というよりは、組織の大勢を率いるリーダーシップに引き寄せられているように見える。しかし、具体的にリーダーシップを取っている個体は存在していない。このような組織の方向転換については、この後で触れる。

ii. 組織の慣性の打破

このプログラムを実行していると、先に述べたように、1匹で泳いでいるときには、ブラウン運動のようなランダムな動きをもって動いている。これが、適切な認知能力を持って、群れとして行動するような個体群になっても、やはり、群れ全体としては、ランダムな動きをしている。しかも、各個体のランダムな動きを平均化するかのようになり、全体の動きは、1匹だけのときの動きに比べて、小さくなるし、群れの進む方向も、一度傾向が定まると、大きな方向転換は起こりにくい。

これは、組織の持つ慣性といってもよいのではないだろうか。一つの方向性を打ち出し、これに向かって行動をとっているうちに、別の方向への転換は困難になっていくわけである。

このプログラムの実行を繰り返す中で、この群れの流れを乱す、つまり、群れの慣性から抜け出した行動が、何度かみられた。すなわち、何らかの状況による群れの分裂である。このとき、2つの群れの大きさが、等しいことはほとんどなく、一方が他方よりもかなり大きな群れになることが多い。群れが分裂すると、小さい群れの方が大きな速度で大きな群れから離れていく。一方で、大きな群れも、小さな群れほどではないが、それまでの群れの動きの方向とは、違った方向に転換がなされる。

これは、すべての個体の重心が、それまでどおりの群れの行動の傾向を維持していると考えれば、当

然のことである。

これを、組織にあてはめて考えると、組織の方向転換のために、それまでのやり方とは違う業務分野、仕事の仕方などを取り入れて別組織を作ることに対応させて考えることができる。具体的には、新規事業の立ち上げなどによって、本体とは別行動をとる部分の構成である。その結果、あらたに設定した組織の部分だけでなく、本体の動きも転換されることがある。ただし、本体とは別行動をとる部分を設定したつもりでも、それが本体を追随しているのでは、転換の効果は得られないだろう。

3 今後の拡張と実験

今回の実験に利用したプログラムは、ランダムな動きの持った群れをシミュレートしただけであるが、上述のように、現実の組織での現象にあてはめて考えることのできるような結果を得た。

今後は、このプログラムに、階層制組織のような情報構造を入れて、現在のネットワーク組織のような動きと比較して見たいと考えている。このためには、すべての個体との関係を検査して行動方針の意思決定をしている部分に、組織と意思決定構造に対応する図 3 のような行列を用意し、各個体の行動方針に影響を与える個体に制約を加えていくことを検討している。

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

図 3 組織構造行列(左から階層構造, 無差別構造)

特に、単に自然にランダムな動きを見るだけでなく、群れ全体としての目的地点への移動など、課題を設定した上で、さまざまなパラメータを調整し、障害物の設置や、攪乱の発生などいくつかの条件のもとで、群れの動きを観察してみたい。本稿での知見は定性的な観察に基づくもののみであるが、今後は個体群の凝集度や移動の速度など、定量的に比較可能な指標を導入し、組織の決定構造や各種パラメータの変更による影響を比較していきたいとも考え

ている。

参考文献

- [Arthur 1997] W. Brien Arthur, 「収入通倍の経済学入門」, 『複雑系の経済学』, ダイヤモンド社, 1997.
- [Briggs 1989] John Briggs and F. David Peat, 『鏡の世界 (Turbulent Mirror, 1989)』, ダイヤモンド社, 1991.
- [Davis 1996] Stephan R. Davis, 『Microsoft Visual J++セルフマスターブック (Learn JAVA Now, 1996)』, Microsoft Press 1996.
- [de Geus 1997] de Geus, A., "The Living Company (「変化に適応し永続するリビング・カンパニーの条件」, DHB, 1997. 9)", *Harvard Business Review*, 1997. 3-4.
- [Gleick 1987] James Gleick, 『カオス (Chaos... Making a New Science, 1987)』, 新潮社, 1991.
- [Hogan 1983] James Patrick Hogan, 『造物主の礎 (Code of the Lifemaker, 1983)』, 東京創元社, 1985.
- [Levy 1992] Steven Levy, 『人工生命 (Artificial Life, 1992)』, 朝日新聞社, 1996.
- [Prigogine 1984] Ilya Prigogine and Isabelle Stengers, 『混沌からの秩序 (Order Out of Chaos, 1984)』, みすず書房, 1987.
- [Senge 1990] Peter M. Senge, 『最強組織の法則 (The Fifth Discipline, 1990)』, 徳間書店, 1995.
- [Simon 1981] Herbert Simon, 『システムの科学 (System of the Artificial, 1981)』, パーソナルメディア, 1987.
- [Waldrop 1992] M. Mitchell Waldrop, 『複雑系 (Complexity: The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos, 1992)』, 新潮社, 1996.
- [遠藤 1997] 遠藤薫, 『世界を作る…社会情報システム学とシミュレーション』, 「第 3 回社会情報システム学シンポジウム講演論文集」, 社会情報システム学研究会, 1997. 1. 30.
- [北矢 1985] 北矢行男, 『ホロニックカンパニー』, TBS プリタニカ, 1985.
- [佐藤 1997] 佐藤修, 「複雑系の企業論」, 『複雑系の経済学』, ダイヤモンド社, 1997.
- [吉永 1996] 吉永良正, 『「複雑系」とはなにか』, 講談社, 1996.
- [大山 1997] 科学シミュレーション研究会 (大山哲雄ほか), 『パソコンで見る複雑系・カオス・量子』, 講談社, 1997.