

《論文》

複雑系とSD Complexity and Improvement of SD

末武 透*

Abstract

Complexity or Complex Science has become very popular recently and has effectively used in such areas as physics, economics and political science. SD: (System Dynamics) should also handle the Complexity approach within its model in the future. However, I think the present SD model and SD program languages have several limitations, especially for handling the chaos linkage model and typical phenomenon on Complexity such as emergence and self-organized criticality. In this report, I introduce the brief history of Complexity and the necessary issues to be improved within SD in order to adapt and handle the many phenomenon on Complexity using the SD model.

〈キーワード〉 複雑系、SDの拡張、ビジネスゲーム

*朝日監査法人

1. 複雑系とは何か

複雑系は、米国ではComplexityあるいはComplication、欧州ではComplex Systemと呼称されることが多い。前者は、そのままであれば、「複雑さ」、「複雑性」、「複雑なもの」、「複雑体」という意味で、「複雑性の科学」といったニアンスになる。つまり、複雑性を科学的に解明していくことが主眼アプローチという指向性が込められている。これに対して、後者では、「複雑なシステム」、「複雑な体系」、「複雑な系」といった意味になり、「複雑系の科学」というニアンスになる。これは、複雑なしくみをシステムのアプローチで解明していこうという指向性が込められている。事実、両者の志向に違いがあり、米国での複雑系の研究の中心地であるサンタ・フェ研究所では、前者の定義通り、複雑系で発見された原理や現象を応用し、応用分野を広げる中で、さらに原理や現象を一般化し、応用範囲を広げると共に、新しい原理や現象を見いだそうとしている。これに対し、欧州や日本では、カオス現象のようなシステムを使って、複雑系を一般化し体系化しようという方向性が強いように見受けられる。

複雑とは、「単純」の反意語であるが、単純である、Simpleの反意語には、MultipleとComplexがある。単純な要素が重なり合っているようなものが前者で、ごちゃごちゃスパゲティのように絡み合っているようなもの、あるいは五目飯のように入り交じっているものが後者である。複雑系も、このごちゃごちゃして、込み入ったものを解明しようとしている。

欧州や日本で試みられている、カオスモデルを基本とした研究から、将来的には、複雑系は高次元力学系で数学的に理論化され、体系化される可能性が高い。カオス現象に関しては、高次元力学系でかなり理論的に体系化されていて、複雑系に関しても、その延長上でまとまってしまう可能性があるからである。

複雑系としての米国を中心とした今までの研究では、主に以下の2つの試みがされてきたと言えよう。

(1) 要素還元主義だけでは説明できない事象に対する総体的な説明

(2) システム安定性、平衡性、均衡性神話の否定

(1) 要素還元主義だけでは説明できない事象に対する総体的な説明

今までの科学は、対象を要素に分解し、その振る舞いを分析し、それを再び組み立てることで全体の理解が可能であるとしてきた。この要素還元主義に対して、60年代から70年代にかけて、欧米で対抗分化運動やニュー・エイジ・サイエンスなどが全体主語を提唱した。その後、この運動は現在は下火になったが、こういった全体主義とは、複雑系は違うものであると主張されている。すなわち、全体主義でのケスラーのホロンのような、要素部分に全体のイメージが内包されているという考えは否定している。むしろ、個々の要素の組合せや動きの中から、その延長では全く予想もできないような新しい現象が発生する（創発）という考え方をしている。

(2) システム安定性、平衡性、均衡性神話の否定

今までは、実際の現象をモデル化したシステムは安定的であると信じられてきた。そのシステムが本質的に正しければ、対象を取りまく状況が少々違っていても、あるいは、構成要素の振る舞いが多少違っていても、全体的な結果に本質的な相違はなく、原理的には同じ安定状態を維持する、従って結果は確定的であるとされてきた。この結果確定性ゆえに、ある程度の誤差はあるが、自然現象は予測可能であるとされてきた。

しかし、ローレンツの気象モデルでのカオス現象の発見をきっかけに、システムの安定性神話を覆すカオスやゆらぎといったものが発見され、研究が盛んになった。

複雑系では、システム安定性、平衡性、均衡性神話を否定し、

- ・ 直線的な因果関係では構成されないようなシステム
- ・ 因果関係は明確だが、初期値敏感性のため、現象の将来予測が不可能なシステム
- ・ 無数の可能性の中から、偶然により1つの現実が選択されてしまうような経路依存性(Path Dependence)を持ったシステム
- ・ 単純な規則に支配されてはいるが、進化や変化を遂げていく自己組織的なシステムを研究しようとしている。

2. 複雑系の進展

現在の複雑系は、さまざまな研究の成果を踏まえ、そこから進展してきている。主に4つの発端があり、大きく2つの流れになっているように思われる。

(1)カオスの縁

発端の1つは、1960年代にカウフマン(Stuart Kauffman)が行ったヒト・ゲノムに関するシミュレーション研究で、彼は、ヒトのゲノムに含まれる遺伝子群の相互作用から、どのようにして256種の異なる細胞が出来るのかを研究しようとした。発生では、細胞の分裂と共に細胞の特殊化が起こり、形態的、機能的に異なるいくつものタイプが現れる。これは遺伝子の数の平方にほぼ比例し、人間ではこの異なる細胞タイプが256種類ある。カウフマンは要素数100、要素間結合が2種類しかない単純化したセル・オートマトン・モデルを使い、状態の変化をコンピュータ・シミュレーションした。プール式ネットワークの要素を遺伝子に、状態循環を分化した細胞に見立てることができる。この実験の結果、結合と安定状態(状態循環)に関し、次のような4つの現象が見られることを発見した。

- 1) 結合が1つずつだと何も起こらない
- 2) 結合が4つ以上だと、不安定でカオスになる
- 3) 結合が2つの場合は、少数の安定した状態が出現する
- 4) 安定状態と要素数には規則性があり、安定状態の数は要素数の平方根になる

これとは別個に、1982年のウォルフラム(Stephen Wolfram)の1次元セル・オートマトンの研究で、セル・パターンが4つの規則群に分類できることが発見された。すなわち、

- 1) クラス1：最終的には黒一色、あるいは白一色になってしまう
- 2) クラス2：最初はばらばらな動きをしていても、ある安定したパターンに落ちつく
- 3) クラス3：白黒がいつまでもばらばらに出る、カオス状態
- 4) クラス4：さまざまなパターンがいつまでも不規則に発生する

ラングルトン(Christopher Langton)が、この両者の論文を、信号処理として数学的に分析した。セル・オートマトンのすべての規則表からなる空間のふるまいを規定するような一種のオーダー・パラメータ(秩序媒介変数) λ を持ち込み、規則群の質的相異を0~1の実数区間に写像させ、その質的相異を複雑さ(情報理論における計算量: Computational Complexity)と λ 値の関係で分析した。その結果、上記ウォルフマンの実験は、次のような結果に言い換えられることが解った。

- 1) クラス1は λ が0の近くに集中する
- 2) クラス2では λ は最終的に0の近くに集中する
- 3) クラス3では λ は0.5の近くに集中する
- 4) クラス4では複雑さが最大となり、 λ は0.273の近くに収集する

つまり、パラメータ λ で0.273を境に、変化のない安定状態か、カオスという不安定状態かが分かれ、この λ で0.273を中心としたごく狭い範囲に、カオス状態とも違い、安定状態とも違う、自的にパターンを生み出していけるような、一種の生命的振る舞いをする状態が発見された。カウフマンの2)と3)は、このクラス4を横切っていたわけで、これを、カウフマンの命名で、カオスの縁と呼んでいる。この部分を複雑系は取り扱っている。

カウフマンは、その後、自身のモデルをNKモデルとして発展させて、ブーリアン・ハイパーキューブを使って要素とその他への影響の空間的波及を解明しようとしている。(注1)

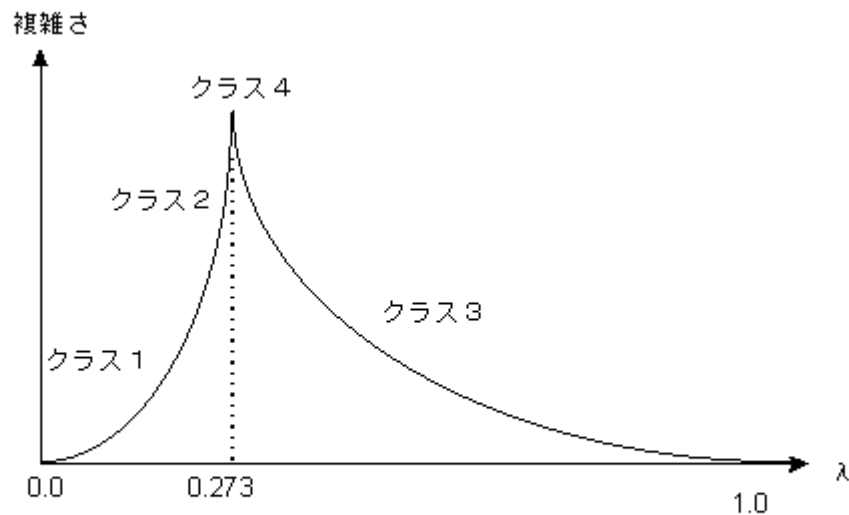


図1: 複雑さと λ の分布

(2) 自己組織化臨界 (Self-Organized Criticality)

観点は違うが、パー・バック(Per Bak)は1986年に、構成要素の変化が破局的な状況になり、連鎖反応を引き起こすような現象を研究し、構成要素と連鎖反応の関係について、同じような結論に達している。すなわち、構成要素変化の破局が連鎖反応を引き起こすのだが、全体はその構造により安定した形状を保つ。この構成要素の破局連鎖反応の大小にはべき乗法則が成立する。このような現象は、自然に多く見られ、例えば、雪崩や山火事、株式市場の変動といったものがこれで説明できるという。このことは、ある意味では、要素が連鎖的に変化し続けることによって全体が安定するというように見えなくもない。そして、要素連鎖変化の回数にはべき乗則が成り立つという、カウフマンの研究の4)が見られる。

(3) 創発 (Emergence)

クレイグ・レイノルズ(Craig W. Reynolds)は、鳥の群をシミュレートするようなプログラムであるBirdoidを作成した。このプログラムでの鳥の行動規則は基本的には以下の3つだけである。

- 1) 近くの鳥が数多くいる方向に向かって飛ぶ
- 2) 近くにいる鳥たちと非行の早さと方向を合わせる
- 3) 近くの鳥や物体に近すぎたら離れる

この簡単な規則でシミュレートしてみた結果、鳥の集団の意志があるように、一定の秩序だった群を形成し、うまくビルに模した障害を避けながら行動させられた。

このことから、下位レベルにある個々の構成要素の局所的相互作用から、上位レベルにある何らかの大域的構造が出現し、この構造によって規定された全体的な特徴が、今度は下方へフィードバックされ、構成要素のふるまいに影響を及ぼすような関係が示せた。この構造を、下からだけで見ていると、機械論的な見方しかできなく、上位レベルの振る舞いや構造に行き着けない。また、上からだけで見ていると、生気論的、あるいは目論見的な見方しかできない。個の自発性が全体の秩序を生み出すという「創発」的に捉えることで統合的に理解できる。この創発性は、複雑系の研究の大きな柱となっている。

(4)カオス

一方、カオス・システムを連結してみたらどうなるかという研究から、カオスの縁に当たる現象の確認や、その自己パターン生成メカニズムが解明されてきた。カオスシステムを複数個連結したシステムの振る舞い（注2）を金子邦彦（物理学）らが1984年から研究し、同じく、何名かの、脳モデル（津田一郎の非平衡神経回路モデル）、池田研介らの光乱流シミュレーション等のカオスを伴うモデルのシミュレーション研究からも、ウォルフラムの4つのクラスの存在やカオスの縁が発見されている。例えば、カオスの特徴を持つ複数の系を、局所的な相互作用を持たせて結合し、さらに、大域的な状況に応じて、すべての構成要素が相互作業を行うようなモデルである大域結合マップ(Globally Coupled Map Lattice :GCM)を使つての研究から、以下の5つのような現象が発見されている。

- 1) 平均と結合度の大小と構成要素の非線形度の強弱によって、相空間における系全体の振る舞いが、ほぼウォルフラムの4つのクラスに分かれる。
- 2) 平均との結合度が十分に大きければ、システムは引き込み現象を起こし、振動の位相がそろったコヒーレント状態になる（これはクラス1に相当）
- 3) 平均との結合度が個々のカオスに比べて十分小さい場合は、システム全体は各要素がバラバラに振動するカオス状態になる（クラス4に相当）
- 4) 平均との結合がお大きくもなく小さくもない場合には、初期状態として、各要素に同じ振動を与えても、やがていくつかの集団（クラスター）に分かれ、振動の位相や振幅が揃った要素のいくつかのグループが出現する。結合度が比較的大きいと少数のクラスターに固定されて、秩序を持った振る舞いを示す。
- 5) しかしながら、結合度が比較的小さいと、クラスターの数とその構成要素が固定されず、常に変わり続けるような部分秩序が発生する（クラス3に相当）

クラス3の振る舞いや発生メカニズムを中心に解明が試みられた結果、さまざまな、複雑系特有の面白い現象が発見されている。例えば、複雑系の特徴である動的安定性に関しては、以下のような2つの点が詳細に判明している。

A) 5)の部分秩序に関し、どの要素が次にどのクラスターにまとまるかといった要素同士の親和性も時間的に移り変わっていき、部分秩序相で生成される秩序は、多数の自由度をもつ弱いカオス的振動が、完全に揃うわけでもなく、しかし、完全にばらばらになるわけでもない状態で、お互いの影響や依存の中から動的な安定が保たれている。

B) 多様性がこの動的秩序を生み出すものであり、大筋ではあたかも基準となる状態を個々の系や

要素が知っていて、そこから逸脱しないような振る舞いをするのが多様性を生みだし、その総和的な状態で安定性を保っている。(これは自己組織臨界と似ている) しかも、ホメオスタシスに代表されるゆらぎ現象では、想定される理想的な清的安定性からのゆらぎに対して、ゆり戻しのためのフィードバック機構が必要と考えられているのに対し、GCMのような複雑系モデルでは、理想状態やフィードバック機構を仮想しなくとも、システム自体で帰結する。

また、このような安定状態を生み出すメカニズムについて、自由度が一種のエネルギー配分のように機能しているように見えるという現象も発見されている。すなわち、クラス4のカオスでは、自由度が固定され、従って相空間の次元が不変に保たれ、システムは閉じているので、相空間の中での軌道が不安定になって伸ばされていくと、どこかで折り畳み現象が起き、相空間事象が変わるということはない。しかし、GCMのような複雑系モデルでは、自由度が変動するシステムとなっていて、不安定性が増大していったら、運動が不規則になると、そこから自由度のジャンプが起きる。そして、このジャンプにより新たに出現した余分な自由度に不安定性が分配され、そこで生じた自由度の弱いカオス状態に上記のB)のようなしくみが働き、多様性を維持した安定性が生成される。

(5) 複雑系の研究の方向性

複雑系は、米国のサンタ・フェ研究所を中心とした、複雑系の応用とコンピューターを使った複雑系記述や解明のためのシミュレーション・システム作り(複雑系記述のためのコンピュータ言語開発も含む)を中心とした研究の方向と、欧州や日本のような、カオスモデルを研究の中心に据えた理論的解明の2つの方向性を持ちながら進展してくものと思われる。(注3)

W. ウィーバーは、複雑系を科学的に位置づけ、「19世紀以降の単純さの科学、19世紀半ば以降の熱力学、量子統計力学などの非有機的な複雑さの科学に対して、最近やっと実現してきた“有機的複雑さの科学”」と、複雑系を新時代の科学のように評価している。しかし、まだ、このように位置付けられるまでには評価が確立していない。

3. 複雑系とSD

従来のSD及びSD用のコンピュータ言語を用いて複雑系を取り扱うには、いくつかの課題を達成しなければならないように思われる。SDにはソリッドなメカニズムをレベルとフローによって明確に記述できるという優れた点があり、この特徴はあくまでも生かしていくべきであると思う。しかし、現状のまま複雑系をSDでも取り扱っていく場合、前の「2. 複雑系の進展」で述べたカオス的モデル記述や巨大モデル記述、創発を注目していくという指向性が必要であると考えられる。従って、こういったものを取り扱えるようにSDを拡張していく必要がある。

(1) 限界性

現状のSDは一種の要素還元主義を抜け出していないように思われる。要素を直接的なフィードバックの関係で結びつけ、この関係を、同じレベルだけでなく、上下のレベルとの結びつきに対しても行っている。いわば、フィードバックの扱い方が、直接的なものを重要視して、間接的なフィードバックを、無視できるものと切り捨てがちだったように思われる。複雑系では、創発に代表されるように、下位レベルでの動きが、下位レベルの単なる延長ではなく、それ自体でも全く別の振る舞いをする上位レベルと、例えば自由度のような一種のエネルギー配分を通じた間接的なフィードバックで結びつき、お互いを規制している。こういった記述はSDが試みてこなかった

ものであり、現状のDYNAMO等の言語でも、記述しにくい。

2番目に、上記のフィードバックにも関することだが、今までのSDのモデルはあくまでもソリッドでありすぎたように思う。複雑系の場合にはソフトなモデルが必要である。例えば、同じレベルの中でも構造が変わっていくだけでなく、下部構造の変化に応じて、上部構造がダイナミックに変わっていきけるようなモデルも必要になってくる。ダイナミックにモデルを変えるために必要な「進化」や「学習」といったメカニズムの確立が必要と思われる。

3番目として、複雑系では、カオス的なシステムを要素にしてモデルを組み立てるといったモデルの組立が必要になってくる。このため、モデルが大規模になり、コンピュータ言語による記述も長文化する傾向にある。現状のSDに使われる言語は、このカオス的なシステム記述及び巨大モデルの記述がやりにくいように思われる。部品やサブルーチンのような形でもいいから、いくつかのカオスのパターンや、SDとして固まっていた標準的な部品として使えるものを、例えばライブラリーとして提供し、活用させていく必要があるのではないかと思う。

4番目に、SDは下部構造が不連続に上部構造を変えるようなしくみに注意を払ってこなかったように思う。今後は、このようなひずみが溜まって上部構造を変えるようなしくみの記述や、全く違った振る舞いが出てくる現象を注意深く取り上げていく必要があるのではないだろうか。今までのSDモデルでのシミュレーションの中でも、創発といった複雑系の現象が現れているのを見逃している可能性が大きい。

(2)意志決定モデル

上記のような限界はあるものの、対象によってはSD的なアプローチでも十分複雑系の事象をモデル化できるのではないかと考えている。私が携わっていた社員教育用ビジネスゲーム(注4)での観察の中で見られた創発らしき現象について説明する。

このゲームは、経営者養成のためのトレーニングに用いられているもので、コンピュータ・システムが、営業、製造、経理、人事を担当し、被経験者が経営者となって、経営計画(営業計画、製造計画、人事計画、財務計画)を策定し、それに基づいて仮想的な企業を経営する。経営結果はコンピュータを通じて仮想的な市場にリンクしている。仮想敵な市場はいくつかの予め設定されたシナリオ(需要変動、供給変動、金利変動等)で変動する。この変動や事故に対応できる経営スキルを習得させるのがトレーニングの目的で、いくつかの企業で、このゲームを使いながら、社員教育を行ってきた。

1)下部構造(オペレーション・レベル)

- ・営業、製造、会計、人事の4部門があり、営業はさらに複数(顧客毎)に分かれる。

営業：経営者は、営業計画に基づき販売価格を設定し、受注用ストックを用意しておく。顧客からランダムに引き合いが発生し、競合相手と比べ、価格が一番低ければ受注できる。価格が高い、または、ストックが不足した場合は受注を逃す。受注できた場合は、売上げ情報が会計に渡される。価格が同じ場合は、営業人数比をファクターに確率的に決まってくる。期の内に複数回の販売取引が行われる。

製造：経営者により与えられた製造計画に基づき製造を行い、ストックする。仕入原価は周期的に変化し、発注数の変動により変動幅が増幅される。変動率が高い場合は、納品がストップされ、製造ができなくなる。納品を停止させる変動率は予めシナリオに基づき決められているが、経営者には知らされていない。製造数、仕入原価、在庫数の情報が会計に自動的に引き渡される。他に、人員数や設備能力、在庫レベルにより製

造上限が定まってくる。設備能力は時間的に定率で低下する。

会計：営業から売上情報を、製造から製造数、仕入原価、在庫数、人事から人員数の情報を受け取り、ストックとフローに関する仮想的な財務諸表を自動作成する。減価消却や販管費等は、すべて定率で決められるが、販管費に関しては、シナリオに基づき変動する。

人事：経営者が策定した営業計画と製造計画、人事計画に基づき営業部門及び製造部門の人員を自動計算する。この計算結果が会計に引き渡される。

2) 中部構造（管理者レベル）

経営者で、ゲーム開始前に、12期分の経営計画（営業計画、製造計画、財務計画、人員計画）を策定してからゲームに入る。これらの計画を基に、下部構造から出力されるさまざまなデータを基に上記の計画を部分修正していく。入手できるデータには以下のようなものがある。

営業：市場全体の製品販売実績及び顧客別発注実績、顧客別自社受注実績、需要予想用ツール。

製造：製造実績、在庫。

会計：財務諸表、銀行借入金レート。

人事：営業各部門別人員数、製造人員数、全社人員数。

これらのデータを基に、以下のような計画修正が可能である。

営業：販売価格、営業各部門別人員数。

製造：生産計画数、生産要員数、設備投資の規模と有無。

会計：資金繰表。

人事：採用数、営業部門や製造部門の廃止の決定（配賦人員数をゼロに設定できる）

経営者同士で、OEM調達、OEM販売の交渉が可能である。

3) 上部構造（業界レベル）

- ・製品販売市場、原材料仕入市場から成る。競合がある。
- ・市場はシナリオに基づき周期的に変動し、市場全体への供給レベルで変動幅が増幅される。
- ・シナリオの中には営業、製造、会計、人事に関係してくる事故も含まれている。

このモデルでのビジネスゲームの実験から、次のような現象を何回か経験している。

1) 勘のいい経営者がいて、うまく短期間に市場リーダーになれる。予測情報を移動平均から別の、最小2乗法等に変えても、変動パターンを変えてもこの勘（予想を増減させる能力）はあまり変わらない。

2) 経営者には、販売市場の変動と原材料購買市場の変動を見ながら営業計画、製造計画をバランスさせていくという能力が要求されるわけだが、この2つの変動を同時に見ながら2つの計画を調整させていける能力のある人は少ない。

3) しかしながら、変動要因が少ない製造計画の調整だけならば、うまく経営していける経営者の数は多くなる。そこで、

4) 業績が悪くなるとOEMで生き延びようという戦略に切り替え、業績の良い企業とうまく戦略的提携を組むことで長期的な関係を維持できる企業が発生する。これは経営技術から経営戦略が生み出されたという意味で、1種の創発ではないかと考えている。

5) しかしながら、自社製造部門を廃止し、OEM購買に切り替え、販売会社として、製造会社と戦

略的提携を組むことで長期的な関係を維持しようとする経営者は少ない。

6) 学習から習得する経験の蓄積に基づく判断能力だけではなく、恵知のようなものがメカニズムとしてあるのではないか。そのメカニズムは自己組織臨界と創発で説明できるのではないかと考えている。(注5)

ゲームの目的は、経営管理とは何かを模擬体験させることにあり、経営戦略までは想定して作られていない。しかし、営業人員数や製造人員数をゼロに設定することや、被経験者同士が勝手に話し合っ、企業同士で製品をOEM売買することを容認したために、4)に見られるような経営戦略が、創発らしき現象として現れてくる。これを表現すると、図2から図3への構造変化となる。従来のSDでは、このようなモデルの構造変化をあまり認めてこなかった。また、上記のような場合、経営戦略の有効性をシミュレーションするようなSDモデルを構築する方向に走って、経営戦略を自発的に選択するようなSDモデル構築は行なわれてこなかった。今後複雑系を扱う上では、こういったモデル構造変化や経営戦略を自発的に選択するようなものが必要になってくると思われる。5)の販売専門戦略の長期安定的な継続の可能性と、6)については現在まだ説明できていない。

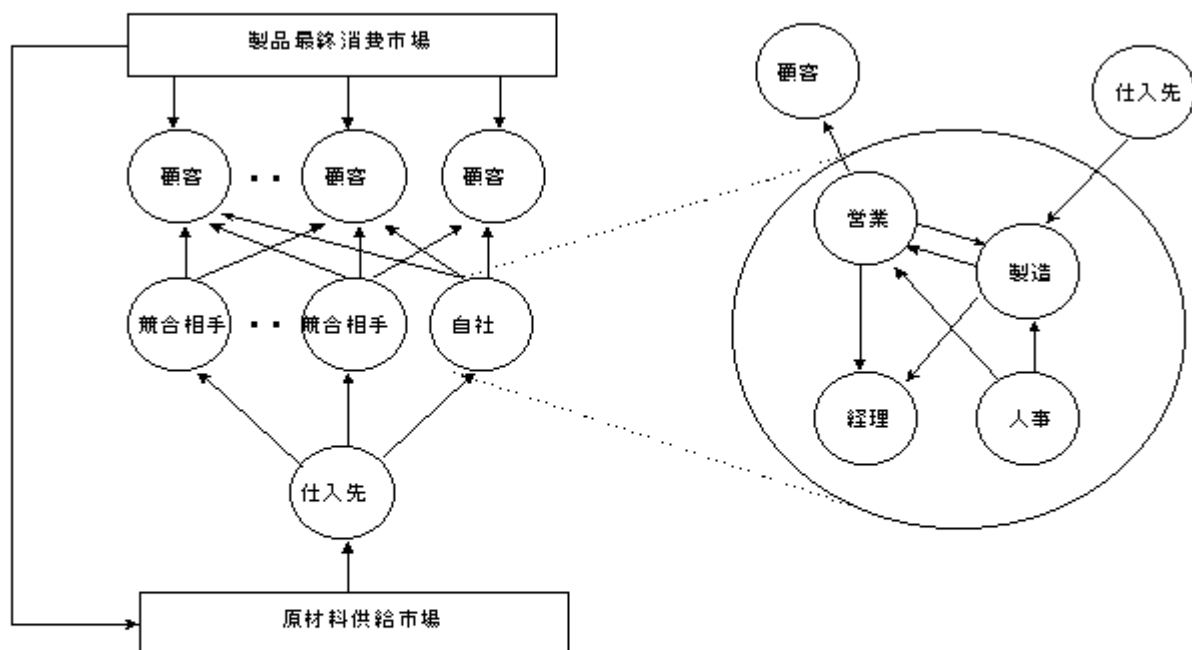


図2：ビジネスモデルでの位置付け（初期状態）

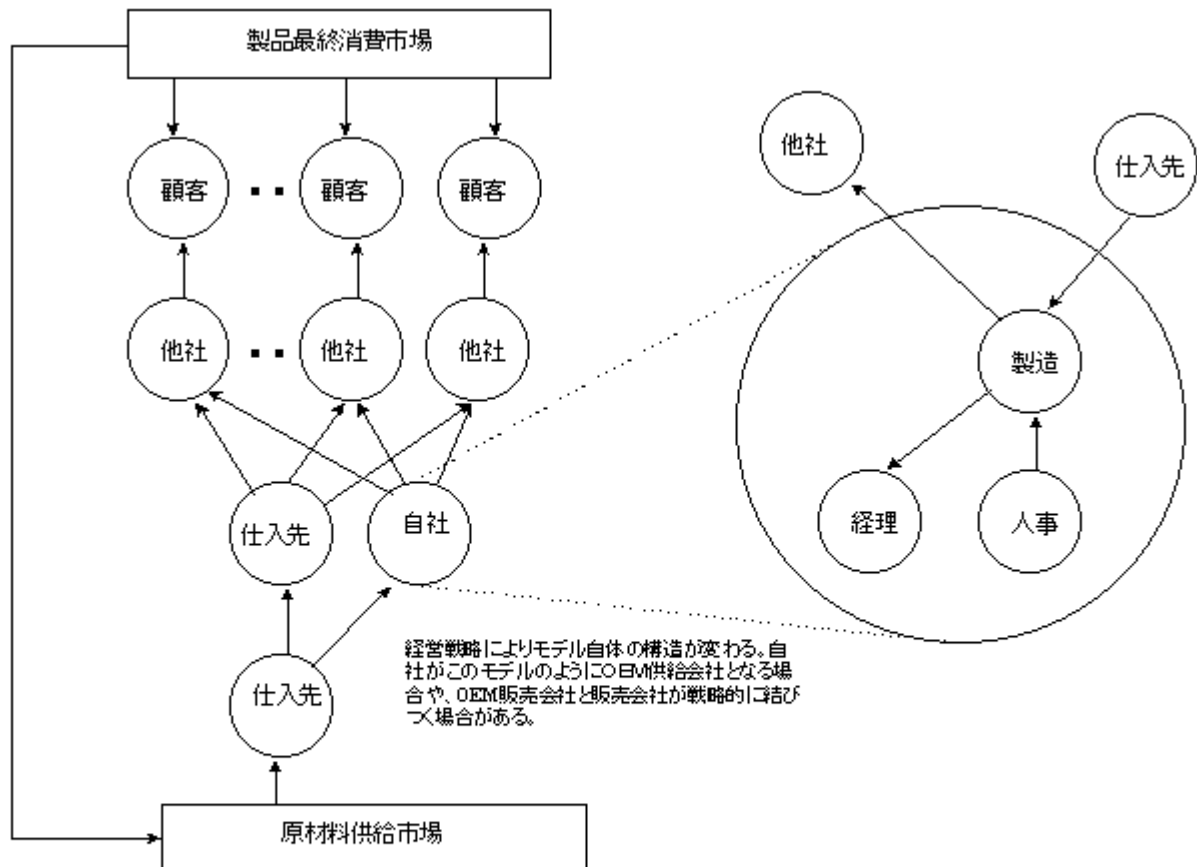


図3：ビジネスモデルでの位置付け（変遷後）

注釈：

(1) Origin of Order - by Stuart Kauffman

NKモデルは、「週刊ダイヤモンド」96.11.2 Page 39-40に概要が示されている。

(2) 「複雑系双書：複雑系のカオスのシナリオ」 金子邦彦他著（朝倉書店）

(3) サンタ・フェ研究所の現在の研究テーマは主に下記6分野である。

- ・ 複雑系の適用（経済学、人間社会等）
- ・ 複雑系の適用分野からの複雑系の特徴の一般化（生態分析、遺伝子、免疫、地球科学等）
- ・ 複雑系の理論化（カウフマンのNKモデル等）
- ・ 複雑系のコンピュータ・サイエンス的研究（セル・オートマトン等）
- ・ 複雑系記述のためのソフト開発（ECHO, SWARM等のソフト開発）
- ・ 人工生命

特に人工生命と複雑系の経済学への応用に関するW. Brian Arthurの収穫逓増の経済学が脚光を浴びている。

(4) TSS Business Game（管理者養成講座用ビジネス・ゲーム支援システム）

なお、このビジネスモデルの構成要素である、営業、製造（在庫管理を含む）、経理、人事等については、それぞれSDモデルが確立している。ここでは詳細をカットした。

また、SDではあまり推奨されていないが確率関数がこのシステムでは多用されている。

(5) これに関連して、私の個人的意見をつけ加えたい。

- ・ 自己組織化限界のような社会安定性の中で、新製品や新技術が収穫逓増性を示し、新製品による旧製品の駆逐や代替が起きている。この動きを市場全体だけで捉えると、ブライアン・アーサーの論文（参考文献11）のように未来予想不可能となる。
- ・ 自己組織化限界により、社会の変動が市場の変動に関連してくる部分が存在する。
- ・ 6)に関する恵知の一部は、この自己組織化限界の大きさとタイミングを予知できる能力と読み換えられるのではないか？
- ・ 自己組織化限界は部分的に予測可能ではないか？

文献案内

(1) John L. Casti, *Complication: Explaining a Paradoxical World Through the Science of Surprise*, Harper Collins, 1994 「複雑系とパラドックス」佐々木光俊訳（白揚社）1996

(2) Roger Lewin, *Complexity: Life at the Edge of Chaos*, Macmillan, 1992 「コンプレキシティへの招待」糸川英夫監修（徳間書店）1993

(5)の底本にもなっていて、興味深く読める。

(3) M. Mitchell Waldrop, *Complexity: The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos*, 1992 「複雑系」田中三彦他訳（新潮社）1996

サンタ・フェ研究所創設のいきさつ等、複雑系の研究の進展が書かれていて面白い。

(4) 科学シミュレーション研究会著「パソコンで見る複雑系・カオス・量子」（講談社ブルーバックスB-1160）1997

(5) 吉永良正著「複雑系とは何か」（講談社現代新書1328）,1996

気軽に読める入門書である。図1はp103より転載した。

(6) 井上政義著「やさしくわかるカオスと複雑系の科学」（日本実業出版社）1996

たしかにカオスについては分かりやすかったが、この本では複雑系は理解できない。

(7) 週刊ダイヤモンド編集部他「複雑系の経済学」（ダイヤモンド社）1997

(8)の焼き直し

(8) 週刊ダイヤモンド96.11.2 “「複雑系」の衝撃” p22-83

週刊ダイヤモンド97.4.19 「複雑系の経済学」 p63-76

(9) 現代思想1996 VOL.24-13

日本の複雑系の研究を知るには注釈(2)と共に、現在最上のもの。

(10) *Complexity*, John Wesley & Son

複雑系に関する専門誌

(11) ブライアン・アーサー、「複雑系の経済学を解きあかす“収穫逓増”の法則」ダイヤモンド・ハーバード・ビジネス 97.1

収穫逓増の経済学は今まであまり研究されてこなかったもので、ブライアン・アーサーがこの論文で述べていることが全面的に正しいとまでは、まだ断言できないのではないかと思う。特に予測不可能という部分は正確ではない。

