

# 複雑性の科学の原理

—組織変革の総合理論をめざして—

唐 沢 昌 敬

---

## キーワード

複雑性 complexity

相転移 phase transition

拡散 diffusion

反応 reaction

免疫 immunity

オートポイエーシス autopoiesis

触媒 catalyst

自動触媒セット autocatalytic set

## 1. 複雑性の科学の成立

最近、科学の世界で複雑な現象が注目を集めている。注意深く観察していると突然の増幅、突然の分岐、突然の場面の变化、突然のパターンの形成などといった現象をいたるところで見出すことができる。それは、自然科学の分野のみならず、社会科学の分野においても見られる不思議な現象である。

ニュートン力学から解放され、改めて自然現象、社会現象を観察してみると、この世は複雑な振舞いであふれているのである。

複雑な振舞いの代表的な例が、ベルーソフ＝ジャボチンスキー反応と呼ばれる色の振動やパターンの形成である。何種類かの薬品を混ぜ合わせ混合液を作ると、赤から青などといった異なった色の間を規則的に振動すること、また溶液の組み合わせによっては、パターンとカオスが交互に現れることが明らかになった。<sup>(1)</sup>それは、今までの科学、化学反応がつねに平衡へと向かうことを意味する熱力学第2法則に対する重大な挑戦であるといわれている。<sup>(2)</sup>また、レイリー＝ベナール流体力学的不安定性も不思議な現象である。2枚のガラス板の間にシリコーン油を入れて熱すると、最初は熱は伝導によって伝わるが、加熱すると対流が起こり、さらに熱すると蜂の巣構造のパターンが現れる。<sup>(3)</sup>

川の流れが速くなると乱流現象が起こる。川の流れがゆるやかであれば何事も起こらない。川の流れが速くなると岩の後に渦が現れる。そしてさらに川の流れが速くなると、渦が次から次へと分裂していく乱流現象が起こる。これも今までの科学では説明困難な不思議な現象である。<sup>(4)</sup>不思議な現象は生物の世界でも見られる。粘菌は普段は単独で生活しているが、栄養が不足するとある科学的信号を出し、一ヶ所に集まり集団を形成する。そしてあたかも一匹の生物のように振舞う。<sup>(5)</sup>

複雑性の科学が対象とするのは、こうした複雑な振舞い、複雑性である。現在まで多くの学者がこうした現象を次から次へと明らかにしている。物理学、化学の世界のみならず、生命科学の世界でもこうした現象が明らかになっている。しかしながら現象面の研究は進んでいるが、何故こうした現象が起こるのか、分子の再編成、相転移などの現象が起こるのかはまだ十分解明されていない。

多くの学者が、複雑性の特色として因果関係不可視性、予測困難性をあげ、不思議な現象として片づけている。カオス的状况にエネルギーを加えれば秩序が生まれると簡単に処理してしまっている。カオスから秩序にいたる共通

の理論は未解明のままである。グレゴリー・ニコリス＝イリア・プリゴジン、ピーター・ゴヴニー＝ロジャー・ハイフィールドなど一部の学者がその本質に迫っているに過ぎない。

こうした現象をカオス的狀況にエネルギーを加えれば秩序が生まれると簡単に片づけてしまうわけにはいかない。特殊な現象として観察事例を見つけて発表すれば良いという段階はすでに終了した。

複雑な振舞いは、進化、生命の本質、宇宙の誕生などといった 21 世紀の最も重要な課題にかかわる現象である。とくに生命の本質の解明は 21 世紀の最も重要な課題である。生命は複雑性、すなわち細胞分裂、増殖、形体の形成を通して誕生する。そうした過程を通して形成された個体も複雑な振舞いが見られるシステムである。相互調整をするための交信に用いられる情報分子であるサイトカイン<sup>(6)</sup>の調整のもとに免疫系、神経系、内分泌系などが微妙に影響を与え合い、増殖と抑制を繰り返し、生体のバランスを維持している。

<sup>(7)</sup> T細胞から作り出されたインターロイキンはB細胞に働きかけ、その増殖を促進したり抑制したりするだけではなく、それは炎症とか癌とか神経の成長、さらには造血などにも介入している<sup>(8)</sup>というのである。生体内の活動は限られた範囲内の動きではなく、全体との微妙な関係の上で成立しているのである。まさに複雑性が支配している世界である。

このように複雑性は、この世の現象の本質的部分、重大な事実深くかかわっている。この世の出来事は、プロセスは多様であるが、何らかの力が働く一定の秩序に向かっていくという重大な事実である。宇宙の最後はどうなるかはわからないが、それまではすべての存在が荒廃した世界である平衡系へとまっしぐらに進んでいるわけではない。再生、新たな秩序の形成を繰り返しているのである。すなわちこの世の現象に対しては、一定の秩序に向かう力がつねに働いているということである。カオスと秩序という言葉を用いれば、秩序が根源的狀態であり、決定論的カオスはつねにこの秩序に向かっているということである。複雑な振舞いへの対応が迫られている 21 世紀において科学の進歩、人類の進歩は、こうした現象を解明する複雑性の科学を

抜きにしては考えられないのである。

本稿はこうした問題意識のもとで、複雑性の科学の本質にかかわる現時点での理論を整理し、その応用の可能性を探るものである。とくに、組織論への応用の可能性を探るのが本稿の重要なテーマである。

## 2. 複雑性の特色

多くの研究者が複雑性の科学の特色として因果関係不可視性と予測困難性をあげている。突然の場面の入れ代わり、突然の分岐、突然のパターンの形成などといった複雑な振舞いは、考えられないほど多くの要素の相互作用の結果生まれたものである。したがって、複雑な振舞いを、その系の中のいくつかの特定の要素の関係として捉えることは困難である。その中で有力と思われる要素を取り出してモデルを組んでも、その動きをたどることも、結果を予測することもできない。そこには今までの発想での因果関係は存在しないのである。こうした特色を強調すると、複雑性は因果関係を明らかにし、予測をしていく今までの科学にとって手に負えない存在である。今までの科学の立場からすると複雑性は、偶然の出来事、例外の現象として処理されてしまうことになる。事実、複雑な振舞いに関する発見は長い間、学会では例外的現象として取り扱われ、かろうじて学会誌の片隅に記載されるに過ぎなかった。

こうした一般的な考えに反して複雑な振舞いは、偶然の世界の出来事ではない。注意深く観察していると日常生活のいたるところで繰り返されている現象である。生命の誕生、形体の形成から始まって、化学反応におけるパターン形成にいたるまで、幅広い分野で日常的に起こっている現象である。こうした現象は単なる偶然の積み重ねの結果起こるものではない。また一回限りの例外的現象でもない。それは一定の原理、原則のもとに繰り返されている自然現象、社会現象である。その原理、原則がまだ十分解明されていない

だけである。

現段階では複雑な振舞いの多くは説明困難な不思議な現象として取り扱われているが、こうした複雑性の原理やメカニズムがまったく解明されていないわけではない。最近カオス現象の研究が進んでいるが、カオス現象の研究とのかかわりで複雑性の研究が展開している。複雑性は必ずしもカオスのみに関連する現象ではないが、カオスの中で集中的に見出されるので、カオス現象の研究が進むにつれてその原理、メカニズムが少しずつではあるが明らかにされつつある。

グレゴリー・ニコリス＝イリア・プリゴジンやピーター・ゴヴニー＝ロジャー・ハイフィールドなどの努力により、自己組織化や進化にかかわる現象のみならず、自己組織化の原理は何か、それがどのようなメカニズムで起こるのか、そして何が新しい秩序の内容と構造を決めるかについて、いくつかの重要な特色が明らかにされてきている。現在までのところ複雑性に関して、次の5つの特色が明らかにされている。

- ① それは相転移にかかわるものである。
- ② すべてがすべてに影響を与えている。
- ③ 上位の法則が支配している。
- ④ 初期条件に敏感である。
- ⑤ フラクタルな性格を持つ。

①、②、③は複雑な振舞いの原理とメカニズムにかかわるものである。乱雑な状態から必ず秩序が生まれるわけではない。秩序が生まれるためには、その系に相転移を行う能力がなければならない。ピーター・ゴヴニー＝ロジャー・ハイフィールドが拡散と反応という2つの不可逆過程によって自己組織化は行われる<sup>(9)</sup>と述べているように、自己組織化、すなわちその原動力となる相転移は拡散－コミュニケーションと協調運動と反応－触媒作用という過程を通して進んでいく。自己組織化、相転移というと何か神秘的な力によって導かれる現象のように考えられるが、決してそうではない。その相当部分は、一定のプロセスを経て実現されるものである。内なる力によって新し

い秩序に向かう自己組織化、相転移は、拡散と反応というプロセスを原動力にしている。要素がコミュニケーションを取り協調運動をすること、反応によってゆらぎが増幅すること、そして反応を増幅させたメカニズムを通してゆらぎが収束することによって実現する。その系に相転移する能力がなければ、どんなにエネルギーを注入しても何も起こらない。

すべてがすべてに影響を与えているということも、複雑性の存在する系の特色である。いくつかの有力な要素の相互作用から結果が導かれるわけではない。まさに複雑性の語源にかかわる部分であるが、考えられないくらい数多くの要素が相互作用しているのである。そこにおける要素のかかわりはすべてがすべてに影響を与えているだけではなく、その影響力も一様ではない。個々の要素の影響力が異なるだけではなく、同じ要素でも時間的、空間的相違によって、その影響力がまったく異なったものとなる。まさに場の状況の変化に応じて、その影響の仕方は時々刻々変化しているのである。このすべてがすべてに影響を与えているという特色が、複雑な振舞いの理解を困難にしている。

複雑性のもうひとつの特色が上位の法則が支配しているという点である。すべてがすべてに影響を与えているという状況の中で、コミュニケーションと協調運動が進み、促進的触媒機能と抑制的触媒機能が働き、秩序に向かっていく原動力が上位の法則である。多くの学者がその存在に気がついていながら説明に躊躇しているのがこの法則である。何がサイトカインに作動開始の指示を与えているのか、何故、細胞分裂の結果、形体が形成されるのか、何故秩序は一様に渦巻状の形態になるかにかかわる部分である。現在、多くの天才的科学家がその理解に力を注いでいるところである。

④、⑤は複雑な振舞いの運動、形態にかかわるものである。いずれもストレンジ・アトラクターとのかかわりで認識されたものである。ストレンジ・アトラクターとはカオスの進化を記述している<sup>(10)</sup>とされているように、ランダムな動きが時間の経過とともに落ち着く点、もしくは領域<sup>(11)</sup>のことである。それはカオスにおける時間の経過と運動の行方を明らかにしたものであ

る。カオス内では一定の力が働き、ランダムな動きも時の経過とともにストレンジ・アトラクター内に収まっていくということである。ピーター・コヴニー＝ロジャー・ハイフィールドはこのストレンジ・アトラクターの特色として、初期条件に非常に敏感に反応すること、それはフラクタルなものであるという2つの特色をあげている。<sup>(12)</sup> この2つの特色を通して、一見無秩序で乱雑な状態のようにみえるカオスの振舞いの中に秩序があること、そして、その活動が自然にたどる道筋を通して秩序がどのようなものであるかを理解することができるのである。

現在までのところ複雑性についてはこれらの5つの特色が明らかにされている。こうした特色の究明はまだ緒についたばかりであるが、こうした切り口から複雑な振舞いを分析することにより、その本質の理解が進んでいくのである。

本稿では紙面の都合上、すべての特色について考察を加えることができないので、こうした特色のうち相転移にかかわる部分に重点を置いて考察する。相転移の原動力である拡散すなわちコミュニケーションと協調運動はどのようにして起こるのか、反応すなわち触媒機構がどのように作用するかである。とくに触媒機構については、オートポイエーシス・システムの視点からその本質に迫っていく。初期条件に敏感である、フラクタルな性格を持つという点も複雑性の重要な特色であるが、ストレンジ・アトラクターにまつわる複雑性の特色は拙著、創発型組織モデル（慶應義塾大学出版会）で考察しているので本稿では割愛する。

### 3. 相転移を行う能力がある。

複雑性とは、イリア・プリゴジン＝イザベル・スタンジェールが「複雑な振舞いの本質的な特徴のひとつは、異なるいくつかの状態間の転移を行う能力があるという点であった<sup>(13)</sup>」と述べているように、こうしたカオス的狀況

の中に見出される相転移に関連した現象である。相転移とは、物質が分子レベルにおいて再編成されることによって巨視的状态が変化することである。

<sup>(14)</sup> 具体的には、個体から流体へ、非磁性から磁性へ、あるいは伝導体から超伝導へという変化である。<sup>(15)</sup> 複雑な振舞いから秩序が生まれるためには、まず第一にその系に相転移を行う能力がなければならないのである。シュムペーターがイノベーションの源泉として創造的破壊を主張して以来、乱雑な状態さえ作ればイノベーションは進むと考えられているが、必ずしもそうではない。それは必要条件ではあるが十分条件ではない。乱雑な状態にしても、創造的破壊にしても、その系に相転移する能力がなければ、それは単なる混乱を引き起こすだけである。そうした系に力を加え攪拌しても、エネルギーを加えても何も起こらない。

マックス・ウェバーの父の家には、著名な政治家、外交官、大学教授、歴史家などさまざまな分野の人材が出入りしていたが、<sup>(16)</sup> ただ漠然と人が集まっていたわけではなかった。そこには能力、感性の高い人が集まるとともに知の論理、共通の倫理、使命感、共通の関心が存在するという相転移に必要な要件が揃っていたのである。イギリスのコーヒーハウス<sup>(17)</sup> やシリコンバレーのカフェもこうした相転移に必要な要件が揃っており、創発、パターン形成という現象が続出していたのである。

相転移にかかわる現象は数多く指摘されているが、何故こうした現象が起こるのか、分子の再編成、相転移などの現象が起こるのかはまだ十分解明されていない。こうした相転移が何故起こるのかを明らかにするのが複雑性の科学の第1のテーマである。この相転移を行う能力にかかわっているのがコミュニケーションと協調運動、そして触媒の機能に代表されるオートポイエーシス・システムの存在である。その系でコミュニケーションと協調運動が進み、反応を促進する自己触媒と相互触媒、そして反応を抑制する自己触媒と相互触媒が進む時に、新たなパターンが形成される。こうした現象が何故起こるのか、そしてどのようにしてオートポイエーシス・システムが成立するか、その解明が今強く求められているのである。



## 4. 拡散—コミュニケーションと協調運動

相転移の原動力のひとつがコミュニケーションと協調運動である。平衡から遠く離れた系では一斉に協調運動が起こることが物理学、化学、生物学などの学問分野で幅広く指摘されている。イリア・プリゴジン＝イザベル・スタンジェールは「散逸構造はコミュニケーションに対するもっとも単純な物理的機構のひとつを提供している<sup>(18)</sup>」と述べて、散逸構造では分子がいつせいに色を変えるように系全体にコミュニケーションの仕組みと方法が確立していることを指摘している。また、彼等は「散逸構造のもっとも面白い側面は、そのコヒーレンスにある。系はあたかも長距離力があるかのように全体として行動する<sup>(19)</sup>」と述べ、広範囲にわたる協調運動がいつせいに起こることも指摘している。

生物の世界でも、数多くの研究者達が何千という粘菌が信号を出し、より高度に分化したひとつの個体に自己組織化しているという事実や、化学物質の分泌を通してアリが集団を形成しているという事実を通して<sup>(20)</sup>、相転移にコミュニケーションと協調運動が深くかかわっていることを明らかにしている。

相転移が見られる系では、分子は協調していつせいに行動を起こす時間を知っているかのようなのである<sup>(21)</sup>といわれるように、濃度勾配もしくは温度勾配が一定の数値を超えると要素の動きは突然活発になり、近くの要素ばかりでなく、遠方の要素ともコミュニケーションを取り始める。また、要素は仲間の動きに敏感になり、協調運動の可能性を探り始める。それは一見して乱雑に見えるが、その中で要素は見事にコミュニケーションを取って協調運動している。要素は、変わるべき時に向けてつねに準備し、注意を払っており、変わるべき時が来たらいつせいに連絡を取り、新しい秩序に向けて行動を起こすのである。

何故このような動きが起こるかについてはまだ十分解明されているわけではないが、有力な要因のひとつが要素の被刺激性<sup>(22)</sup>である。コミュニケーシ

ョンと協調運動がいつせいに高まるには、要素が何らかの刺激因子に対して反応する性格を持っていること、被刺激性が必要である。刺激因子が系全体に働きかけ、要素が刺激因子に対して敏感に反応する時、コミュニケーションと協調運動がいつせいに始まるのである。刺激因子の発信力が弱かったり、刺激因子がさえぎられたり、要素の被刺激性が低い場合は、コミュニケーションと協調運動が起こる可能性が低いと言える。

一部のベルーソフ＝ジャボチンスキー反応では光に刺激されて協調運動が起こる。<sup>(23)</sup>同様に生体における細胞はサイトカインに対して反応し、生成と抑制を繰り返している。粘菌や微生物は特定の化学物質に対して敏感に反応している。

要素の被刺激性が高ければ、臨界点を超え、ある刺激因子が働くことによって要素がいつせいにコミュニケーションと協調運動を始める。何故臨界点を超えると協調運動が進むかであるが、初期の段階では刺激因子の発信力は弱く、要素は近くの要素とだけコミュニケーションを取り、協調運動は狭い範囲にとどまっていたが、一定規模を超えると、まさに臨界点を超えると刺激因子の発信力は急激に高まり、協調運動が一気に広がると考えられる。臨界点とは何らかの理由で刺激因子が強く働くようになる境界であるといえる。粘菌などの生物の場合、一定の密度を超えるとこの発信力が急激に高まると考えられている。<sup>(24)</sup>

要素の被刺激性とかかわっているのが共通の関心、共通の問題意識である。共通の関心事の実現の可能性が高まった時、もしくは大切なものが脅かされた時にいつせいに協調運動が起こる。粘菌にとって生存は共通の関心事であり、生存の危機に直面すると化学物質に反応し、生存に向けていつせいに協調運動を始めるのである。<sup>(25)</sup>相転移の時間、再編成によって作り出される秩序の内容は、こうした要素の被刺激性が高いか低いか、何に反応するかによって異なった性格のものとなるのである。

人間の世界における刺激因子のひとつは誘因である。誘因には金銭のみならず、地位、能力向上の機会などさまざまなものがある。NGOであればそ

れは社会的使命であり、宗教団体であれば衆生に楽を与え、苦を取り除く慈悲である。要素の被刺激性にかかわるのが欲求、共通の関心、共通の問題意識である。その時充足を求めている欲求、関心、問題意識に対してふさわしい刺激因子、誘因が提供される時、協調運動が起こる。人間の世界ではこれを自発的協働と呼んでいる。そして人々がとくに強く求めている欲求、関心が存在する時、すなわち要素の被刺激性が高まっている時、それにふさわしい誘因が提供されると協調運動は一気に広がる。飢饉や権力者の圧政によって、人々の心が打ちひしがれ、人々が救済を求めている時、神の救いの手をさしのべる宗教は一気に広がっていくのです。

また平衡から遠く離れた系でコミュニケーションと協調運動がいつせいに高まるには、自然な状態が維持されなければならない。光や化学物質などの刺激因子が伝わるにはそれを遮るものがあってはならない。壁や不純物の固まりのような障害物があると、コミュニケーションの範囲は限定される。コミュニケーションと協調運動が起こる部分と、まったく反応しない部分に分かれ、系全体としての協調運動はゆがんだものとなる。相転移が起こるためには、系の中のすべての分子の再編成が必要である。したがって部分の協調、部分の分子の再編成から相転移につながる動きは起こらない。系全体で、コミュニケーションと協調運動を起こすためには、系の中に遮るものがないこと、自然な状態が維持されていることが必要である。

人間の世界では古い制度、古い構造は、自然な流れを妨げる代表的なものである。こうした構造が少しでも残っていると、コミュニケーションは分断され、連帯の動きは制限される。先入観、固定観念で固まった人、無理をする人も、自然な流れを妨げている。こうした障害があると、いかにエネルギーを流入させてもコミュニケーションと協調運動は限られたものとなる。

さらにコミュニケーションと協調運動がいつせいに起こるためには、ひとつひとつの要素が自由な状態に置かれていることも必要である。ひとつひとつの要素が自由な状態に置かれているからこそ、上位の法則、秩序へ向かう力はすべての要素に一様に働く。要素が内部の特定の要素に従属していたり、

外部の要素から強い影響を受けている場合、自然なコミュニケーションと協調運動は妨げられる。とくに上位の法則の働きかけは一様でなくなる。間に何らかの要素が介在することによって直接的働きかけは阻害され、コミュニケーションと連帯の力は一気に弱まるのである。

人間の場合、支配従属関係は、個人の判断を停止させ、個人の人格を抑圧する。自然の流れは、真・善・美の調和した人格を通して感じられる。人格が高まることによって自分自身へのこだわりは薄くなり、先入観、固定観念はなくなり、より大きなもの、全体に目が向くようになる。全体の流れを感じる力も高まる。したがって、人格が抑圧されることは、遠方とのコミュニケーションと連帯を前提にしている秩序の形成にとって致命的なことである。

このように複雑な振舞いの原動力のひとつがコミュニケーションと協調運動である。系の自然な状態が維持され、要素が自由な状態に置かれ、要素の刺激因子に対する被刺激性が高ければ、相転移の動きが促進されるのである。臨界点を超えると何故刺激因子の発信力が高まるかについてはまだ未解明な部分があるが、コミュニケーションと協調運動の前提条件とメカニズムは解明されつつあるといえる。

## 5. 反応-オートポイエーシス・システムとしての触媒機構

相転移のもうひとつの原動力が活発な反応である。同じ種類で同じ量の分子の再編成であれば劇的变化は起こらない。突然のパターンの成長や場面の劇的变化が起こるのは、特定の分子の量が大幅に変化するためである。この分子の量の大幅な変化にかかわっているのが、オートポイエーシス・システムとしての触媒システムである。

コミュニケーションと協調運動が高まることによって反応が始まるが、その反応は触媒機構が存在することによって増幅する。イリア・プリゴジン＝イザベル・スタンジェールはそれについて、「平衡から遠く離れた条件下では

さまざまな自己組織化過程が出現する。化学振動の出現や空間構造などである。このような現象が現れる基本条件是触媒作用の存在である<sup>(26)</sup>」と述べている。分子の一部が触媒として作用することで反応が加速化するわけである。濃度が濃くなることや、強い攪拌が行われることでも反応は活発化するが、一部の分子が触媒になることによって、反応は一段とはやまるのである。

触媒機構が存在しなければ反応はゆるやかに進むが、図1-1のように、Aが触媒として作用することによってBとCの結合は促進される。また自分自身が自己の生成にかかわる自己触媒の機能が作用することによって物質の生成は促進される。こうした自己触媒作用が発展すると、Aが触媒として作用することでBが生まれ、Bが触媒として作用することでCが生まれる……と続いていき、やがて、Zが触媒となることによりAが誕生するといった図1-2のようなループが形成される。現実の触媒作用の多くが円環的ループになっている。このような触媒作用、自動触媒セット<sup>(27)</sup>の場合、時間の経過とともに分子の生成は強化され、A、B、C……Zの分子の量は急速に増大する。自分自身が作り出した産物がいずれ自分自身を作り出す触媒となるのである。まさにまわりまわって自分で自分の構成要素を産出しているのである。こうした触媒の作用により河本が「生成プロセスのネットワークが円環的な連鎖をなしたとき、構成要素は連続的に産出されつづける構成要素として成立する」<sup>(28)</sup>と述べているように、特定の分子は消費されても次から次へと供給され、構成要素として存在し続けるのである。そして消費される分子よりも、供給される分子の量が多ければ、その分子の量は、他の分子の量を圧倒し、系全体の相当部分を占めるようになるのである。流入するエネルギーの量が大きくなると、特定の分子の増殖が一気に進むことになる。みずからが、みずからの産出プロセスにかかわることにより、特定の分子の供給が急激に増加するので、こうした産出プロセスの存在が自己組織化の重要な鍵のひとつとなるのである。もちろん現実の触媒の円環的サイクルはもっと複雑である。ハイパーサイクル<sup>(29)</sup>と呼ばれるように、沢山の分子が円環的サイクルにかかわっている。そして、その円環的サイクルはいく

つかの円環的サイクルと連動している。<sup>(30)</sup> こうした触媒作用によって、分子の数は調整される。そして系の中のある種の分子の量が他の分子を圧倒し、全体の相当部分を占めるようになると分子レベルの再編成が進み。新たな秩序へ向けた相転移の動きが始まるのである。そして、オートポイエーシス・システムを通して作り上げられた分子の種類と量が新たな秩序の内容を決めるのである。

相転移の原動力のひとつとして触媒の作用を考える場合に注意しなければならないのは、エネルギーが大量に流入することによって初めて触媒機構が成立するというわけではないという点である。多くの触媒のメカニズムは、エネルギーの流入によって反応は活発化するが、ある特定のエネルギーが流入すれば、どの組織でもそれに対応して特定の反応が起こるわけではない。歴史のある組織ではエネルギーの流入や外的刺激の有無にかかわらず繰り返される反復的行為の連鎖が存在するのである。流入するエネルギーの内容とその組織の内部に存在する触媒作用のメカニズムの内容は関係がないということである。すなわち、その組織独自のオートポイエーシス・システムとしての触媒のループが存在しているのである。河本英夫が「オートポイエーシス・システムは、構成要素の産出的作動を通じて、システムの反復的作動を行う。システムは自己自身へと回帰するように作動するが、そのことがとりもなおさずシステムの境界を産出することである<sup>(31)</sup>」と述べているように、それはみずからがみずからを作り出し境界を定めていく動きであり、その系独自のものである。生体において自己と非自己の境界を定めているのは免疫系<sup>(32)</sup>というオートポイエーシス・システムである。それは作動によって存在するシステム<sup>(33)</sup>と呼ばれているように、自分自身の構成要素を作り続けている限り存続し、自分自身の構成要素を作り出さなくなれば消滅してしまうことになる。神経系では構成要素はシナプス接合であり、神経系は神経線維のつながりであるシナプス接合の産出関係として存在する。<sup>(34)</sup>これが円環的システムと呼ばれるのはシナプス接合の存在がシナプス接合の産出に関係しているということである。神経系はシナプス接合を作り続けている限り存続し、

シナプス接合を作り出さなくなれば消滅する。同じように免疫系は、T細胞、B細胞などの産出関係である。この産出関係から産出されたT細胞、B細胞などは、みずからを産出した産出プロセスのネットワークを再産出している<sup>(35)</sup> T細胞が存在することによって胸腺でT細胞が産出され、B細胞が存在することによって骨髄でB細胞が産出されるということである。<sup>(36)</sup> 免疫系はT細胞、B細胞などを作り続けている限り存続し、作り出さなくなれば消滅する。神経系、免疫系などの産出関係の消滅は、システムの崩壊すなわち人間の死を意味するものである。

歴史のある組織ではこうしたオートポイエーシス・システムが内部のいたるところで成立しているのである。エネルギーの大量の流入はこうした触媒の作用を作動させたり促進させたりするだけなのである。「システムが自己言及的に作動して自己回帰するさいの『産出関係』とシステムが外的条件に反応する『作用関係』とは明確に区別されている<sup>(37)</sup>」と述べられているように、エネルギーの大量の流入によって起こるのは『作用関係』であり、触媒の作用を作動させたり促進する動きだけであり、自己言及的な回帰によって起こる『産出関係』とはまったく異なったものである。

この産出関係とは反復的作動の繰り返しを通して自分で自分の構成要素を産出したり、自分で自分を変化させたりする<sup>(38)</sup> 一連のメカニズムである。それは、エネルギーの流入や外的刺激の有無にかかわらずもともと存在するメカニズムである。この産出関係が閉鎖的であると呼ばれているのは、外的刺激は産出関係、すなわち、円環的メカニズムの動きを作動させたり、促進させたりするが円環的メカニズムの形成にはほとんど影響を与えないこと、そして円環的メカニズムは自己適応を中心に形成されるという意味である。システムには入力も出力もあるが入力や出力はシステムの在り方を直接決定しないということである。<sup>(39)</sup> したがっていかに、外的刺激の内容を分析しても、そのメカニズムは理解できないのである。この産出関係を基本とするオートポイエーシス・システムの具体例としては細胞システム、<sup>(40)</sup> 免疫システム、神経システム、<sup>(41)</sup> そして自動触媒セットなどがあげられる。ただし、こ

ここでいう閉鎖性とは産出関係の形成が外界に対して完全に閉じているという意味ではない。原則的に外的刺激はシステムの在り方を直接決定することはないが、まったく影響がないわけではない。特定の刺激は複雑なプロセスを経て、これら産出関係の形成に影響を与えている。免疫系では、自己適応がシステム形成の原動力であるが、自己適応ですべて完結するわけではない。外部環境の影響を受けたホルモンの分泌なども免疫系の形成に影響を与えている。<sup>(42)</sup>すなわち外的刺激のほとんどは円環的メカニズムの作動にかかわるが特定の外的刺激は、内部適応の新たな動きに影響を与え、円環的メカニズムの形成にかかわっている。すなわち免疫系は自己適応を繰り返し変容する自己に言及しながら自己組織化していくような動的システムなのである。<sup>(43)</sup>したがってここでいう閉鎖性とは内部適応を中心に自己完結的システムを形成し、つねに自己と照らし合わせながら作動しているシステムという意味である。さて、そもそもこうしたオートポイエーシス・システムがどのようにして成立するのであろうか。システム内の要素が動きの継続の中で自己適応していくことによって成立していくということはわかっているが、それ以上のことは未解明である。

人間の組織では基本的価値の体系、コミュニケーションの連鎖や思考の連鎖をもたらすフィードバック・ループ、経済活動を増殖する自己触媒・相互触媒のループがこのオートポイエーシス・システムにあたる。基本的価値の体系の存在は、基本的価値を受け入れた構成員を次から次へと生み出している。基本的価値は儀式や、刊行物などの媒介物を通して個人に植えつけられていく。また、こうした基本的価値を受け入れた構成員が行動することによって基本的価値は増幅、強化されて基本的価値の体系にフィードバックされ、基本的価値の体系の作動が継続していくのである。そして、こうしたフィードバック・ループが作動していく中で、基本的価値の体系を中心とした組織文化や行動原則を支える制度が作り出されている。こうした基本的価値の体系が強く働く分野では、異なった価値の体系を持った人は排除される。それは免疫系が移植された脳を破壊してしまうように<sup>(44)</sup>ときには、外部から来た



経営者を追い出してしまうこともある。

フィードバック・ループの存在は、発信される情報の意味の連鎖を通して情報や思考の組織における意味内容を明確にしている。フィードバック・ループを通して次から次へと送られてくる情報や思考のつながりを通して、真の意味内容が浮かび上がってくるのである。ひとつの言葉の意味内容は、それ単独では理解できない。その前の言葉、そしてその次に来る言葉によって明確になる。中途採用者が、言葉の意味を取り違えるのは、こうした情報や思考のフィードバック・ループを十分理解していないためである。

さらに、自己触媒・相互触媒の存在は、開発・技術・製造方法・販売方法のコンセプトとアイデアの増殖を促進するとともにバランスの取れた生成を可能にしている。これらの産出関係が組織の個性を作り出し、自己と外部環境との境界を作り出しているのである。

その組織にどのようなオートポイエーシス・システムが存在するかによって組織の構成要素は決定される。他の組織に幅広く存在する要素であってもその組織にその生成にかかわる触媒機構が存在しなければその要素をその組織の中に見出すことはできない。いかに外的条件を変えても事情は同じである。組織の構成要素は、組織の歴史を通して作り上げられたオートポイエーシス・システムに依存しているのである。組織独自のオートポイエーシス・システムの存在は、複雑性の科学の適用に重要な示唆を与える。すなわちエネルギーが大量に流入し、既存の構造が破壊されても、生体における神経系、免疫系にあたるオートポイエーシス・システムは破壊されず、新たな形体形成のゆくえに重要な影響を与えているのである。動物の変態も、このオートポイエーシス・システムの存在によって支配されているのである。<sup>(45)</sup> 外見的構造は変化するが、その構成要素も産出関係も変わらないということである。すなわちこうした、組織独自のオートポイエーシス・システムが存在することによって、無限に存在すると思われる組織の未来は限定されることになる。組織の未来は、組織が生み出す構成要素の組み合わせを基本としたものとなり、自己組織化の動きは、一定の領域内に収束することになるのである。

る。一般の予想に反して、組織の未来に重要な影響を与えているのは、流入してくるエネルギーの内容ではなく、組織の内部に成立した触媒機構を中心としたオートポイエーシス・システムの内容なのである。

図 1 - 1 触媒作用

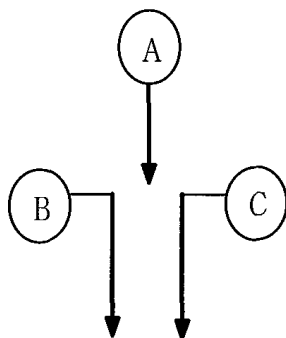
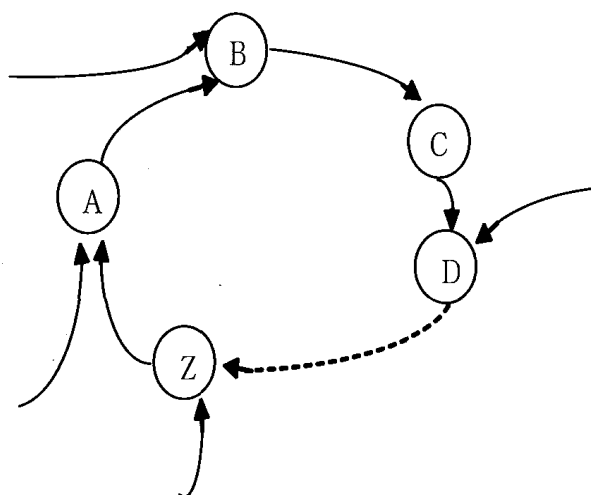


図 1 - 2 自動触媒セット



出典：M. ミッチェル・ワールドロップ『複雑性』

## 6. すべてがすべてに影響を与えている。

複雑性の第2の特色は、すべての要素がすべての要素に影響を与え、相互作用していることである。科学における分析の基本は相互作用の認識であるが、複雑性の存在する系ではそのかわりは考えられないほど複雑である。今までのシステム論では相互作用する要素は特定されていた。システムは相互作用する要素の集合<sup>(46)</sup>と定義されているが、それは限られた要素の相互作用であった。オープンシステム論といっても相互作用する外界の要素は特定されていた。しかしながら現実の産出関係は複雑である。要素は単独で機能しているわけではない。何らかの産出関係のループに参加している。基本

は円環的ループを通した相互作用である。また、その作用の仕方も例示されている自動触媒セットのように単純ではない。ひとつの円環的ループが特定の外部条件に反応し単独で自己完結的に動いているわけではない。何重もの円環的ループが相互に影響を与えながら産出関係が作動しているのである。さまざまな外的条件に対してさまざまな産出関係が反応し、相互に影響を与え合いながら特定の要素を連続的に産出しているのである。それは無数の独立した要素が相互作用している状況よりも複雑である。要素は自動触媒セットの中で触媒として機能しているだけでなく、他のループの構成要素にも影響を与えている。したがって、特定の要素の産出にかかわっている要素を特定することは困難である。思わぬ要素が特定の要素の産出にかかわっているのである。遠く離れた産出関係にかかわる外的要素が若干増加しただけで、まわりまわって特定の産出関係の働きを強め、特定の要素が急激に増加することもある。まさに遠い、小さい変化が大きな結果をもたらすのである。多様で複雑なかかわりが存在するために、何が何に決定的影響を与えるかわからない。これが複雑性の重要な特色である。

ひとつの例が免疫機能である。免疫機能とは免疫系の中で自己完結しているわけではない。抗体の産出にかかわる免疫系内のインターロイキンの作用は、免疫系の中の要素から影響を受けているだけでなく、内分泌系、神経系などからも影響を受けている。ストレスなどにより内分泌系の機能が低下すると、それは免疫系にも影響を与える。NKキラー細胞などの機能が低下し、ガンに対する抑止力が低下する。免疫系は内分泌系、神経系を始めとするさまざまな産出関係から微妙な影響を受けているのである。<sup>(47)</sup> また同様に免疫系は、人体内のさまざまな産出関係にも影響を与えているのである。<sup>(48)</sup>

産出関係の作動において、こうした多様で複雑なかかわりが見出されるだけではない。産出関係の成立段階においても、こうした多様で複雑なかかわりが見出される。産出関係はシステム内の要素の動きの継続の中で自己適応によって成立すると考えられているが、厳密にはこの自己適応も他の産出関係から微妙な影響を受けている。免疫系も、神経系も、原則的にはシステム

内の要素とのかかわりの中で自己適応によって成立していくが、外部の産出関係などからも微妙な影響を受け、若干の調整を行っているのである。このように閉鎖系内の自己完結的システムの成立においても、それ以外のシステムから何らかの影響力が働いているのである。すでに述べた通り、こうしたシステムが閉鎖系と呼ばれているのは、自己と照らし合わせながら、内部適応によって変化を取り込んでいるからである。

こうした多様で、複雑なかかわりを、モデルを組んで分析することは困難である。一部の複雑性が存在するシステムでは有力と思われる要素を抽出し、モデルを組んで、ごく近い将来の可能性のひとつを示すことができるが、時間軸が長くなると、それが起こりうる確率は大幅に低下する。複雑性の存在する系では、有力と思われる要素を抽出し、モデルを組んでも、それは無限にある将来の可能性のひとつを示すに過ぎない。有力と思われる要素に対して、さまざまな要素が影響を与え合っており、その影響の仕方によってさまざまなシナリオが考えられるのである。複雑性の存在する系で、最も本質的なことは、その瞬間有力な要素であると思われても、次の瞬間に、それが有力な要素であるとは限らないことである。これも複雑性が存在する系の分析を困難にしている理由のひとつである。

こうした特色は、要素を特定し、因果関係を明らかにする近代科学の限界にかかわるものである。最近数学方程式で複雑な振舞いの一部を再現する試みがなされているが、それは複雑な振舞いが引き起こす現象に近い状態の再現である。現実の複雑な振舞いは、より神秘的で微妙なかかわりの連続であり、完全に数学方程式によって再現することはできない。

## 7. 上位の法則の存在

もっとも重要であるが、もっとも説明困難なのが上位の法則である。システムの自律性にかかわる部分である。複雑性の意味には無数の要素が相互作用

用していることが含まれているが、単に沢山の要素が相互作用していることだけを意味しているわけではない。複雑な振舞いという言葉で表現されるように、より高いレベルの法則に導かれた活動である。それは部分の総合計を超えたものであり、新たなパターンの形成、突然の場面の变化、そしてストレンジ・アトラクターの存在などといった我々の予測をはるかに超えた振舞いである。その根源にあり、こうした複雑な振舞いを支配しているのが上位の法則である。

現在まで多くの科学者が上位の法則の存在を指摘している。何故特定の状況になるとサイトカインが働き、遺伝子に指令を与え、時間の経過に沿った形体形成が行われるのか、何故カオス内の現象はストレンジ・アトラクター内に収束するのか、何故自己組織化現象によって作られるパターンが共通なのかについて、上位の法則にもとづく生成の力の存在を認めている。こうした生成の力は無機の世界にも働いている。ベルーソフ＝ジャボチンスキー反応についても「(BZ反応には) 突然変異を起こしたり、進化させたりする遺伝システムのようなものはないが、化学的代謝作用、自己組織化構造、リズム活動、ある範囲内での力学的安定性、この範囲を超えた時の不可逆的な分解、自然の寿命といった生きている系としての興味深い特徴を多く持っている」<sup>(49)</sup>といった特色が認識され、生成への力が働いていることが指摘されている。生成の力は有機にも無機にも働いているのである。地球上のあらゆる存在に対して上位の法則にもとづく生成の力、秩序へ向かう力が働いているといえる。

この上位の法則が何であるかが、最終的に残されたもつとも難解な課題である。それは地球の自転、公転さらには宇宙の法則からもたらされた根源的法則である。紀元前よりその存在に気がついた先人達はその説明を試みてきたが、それは存在するが証明できないものとして取り扱われてきた。イリア・プリゴジンも大域的状況<sup>(50)</sup>という表現にとどめ説明はしていない。本稿でもすべての存在が平衡への動きをたどるわけではなく、一定の条件さえ満たされれば生成の力が働くという事実を記述するにとどめる。

## 8. むすび

複雑性の特色のうち本稿では、コミュニケーションと協調運動、オートポイエーシス・システムとしての触媒機構を中心に考察した。相転移はもはや説明不能なブラックボックス内の出来事ではない。オートポイエーシス・システム、触媒機構、生命科学などをよりどころに、その原理とメカニズムの本質に迫ることができるのである。さまざまな切り口からその本質に迫ることによって、複雑性の科学はもはや未知の科学ではなく応用可能な理論になりつつある。複雑性の科学が注目されて久しいが、ようやく抽象論から一歩前へ進む時期を迎えたといえる。

本稿では組織の相転移である組織変革に応用できるように、こうした複雑性の特色を可能な限り社会現象、組織現象とのかかわりで考察した。著者の関心はこうした要素を深めることにより革新的組織を始めとして最先端の組織で日常化している創発、自己組織化がどのようなプロセスで起こるか、その前提条件は何かである。このテーマに取り組んですでに7年経過しているが、これまでさまざまな実践と観察を繰り返してきた。複雑性の分析には社会科学的方法が有効である。複雑な振舞いの多くは有力な要素を抽出してモデルを組んで実験していく方法ではとらえることはできない。今までの自然科学的方法には限界がある。この種の現象の解明には、臨床実験と観察を積み重ね、理解を深めていくことが必要である。数多くの観察事例を通して、その共通点、個性を記述していくことである。著者は現在、こうした実践と観察によって明らかにされた理論を応用し、成長につながる組織変革の実現を試みているところである。現在の状況は、複雑性の理論の実践を通して現象の理解が深まり、ようやく自然現象と社会現象を統合化する理論を確立する糸口が見つかりつつあるといったところである。今後も実践面での事例を増やし、複雑性の科学の理論の体系化に取り組んでいくつもりである。

## 注

- (1) ピーター・コヴニー＝ロジャー・ハイフィールド著，野本陽代訳『時間の矢，生命の矢』草思社，243-246 頁。

(Coveney, Peter, and Roger Highfield, The Arrow of Time, Tawcett Columbine, 1990)

- (2) ピーター・コヴニー＝ロジャー・ハイフィールド著，前掲書，244 頁。

- (3) ピーター・コヴニー＝ロジャー・ハイフィールド著，前掲書，228 頁。

- (4) ジョン・ブリックス＝F. デイビット・ピート著，高安秀樹・高安美佐子訳『鏡の伝説』ダイヤモンド社，平成 3 年，53 頁。

(Briggs, John, and F. David Peat, Turbulent Mirror, Harper & Row, 1989)

- (5) ジョン・ブリックス＝F. デイビット・ピート著，前掲書，186 頁。

- (6) 多田富雄著，『生命の意味論』新潮社，平成 9 年，14 頁。

- (7) 多田富雄著，『免疫の意味論』青土社，平成 5 年，89 頁。

- (8) 多田富雄著，前掲書，80-83 頁。

- (9) ピーター・コヴニー＝ロジャー・ハイフィールド著，前掲書，244 頁。

- (10) ピーター・コヴニー＝ロジャー・ハイフィールド著，前掲書，254 頁。

- (11) ニーナ・ホール編，宮崎忠訳『カオスの素顔』講談社，平成 6 年，75 頁。

- (12) ピーター・コヴニー＝ロジャー・ハイフィールド著，前掲書，251 頁。

- (13) グレゴリー・ニコリス＝イリア・プリゴジン著，我孫子誠也・北原和夫訳『複雑性の探求』みすず書房，平成 5 年，41 頁。

(Nicolis, G., and Ilya Prigogine, Exploring Complexity, Freeman, 1989)

- (14) イアン・スチュアート著，須田不二夫・三村和男訳『カオスの世界像』白揚社，平成 4 年，214-215 頁。

(Stewart, Ian, Mathematics of Chaos, Penguin Books, 1989)

- (15) ジェームス・グリック著，大貫昌子訳『カオス』新潮文庫，平成 3 年，220 頁。

(Gleick, James, Chaos, Penguin Books, 1987)

- (16) マリアン・ウェーバー著，大久保和郎訳『マックス・ウェーバー』みすず書房，

昭和 38 年, 33-34 頁。

(Mariane Weber, Max Weber, Paul Siebeck, 1926)

(17) 今井賢一・金子郁容著『ネットワーク組織論』岩波書店, 昭和 63 年, 10-12 頁。

(18) イリア・プリゴジン＝イザベル・スタンジェール著, 伏見康治・伏見 譲・松枝秀明訳『混沌からの秩序』みすず書房, 昭和 62 年, 210 頁。

(Prigogine, Ilya, and Isabelle Stengers, Order out of Chaos, Bantam Books, 1984)

(19) イリア・プリゴジン＝イザベル・スタンジェール著, 前掲書, 234 頁。

(20) ジョン・ブリックス＝F. デイビッド・ピート著, 前掲書, 186 頁。

(21) ピーター・コヴニー＝ロジャー・ハイフィールド著, 前掲書, 230 頁。

(22) ピーター・コヴニー＝ロジャー・ハイフィールド著, 前掲書, 246 頁。

(23) ピーター・コヴニー＝ロジャー・ハイフィールド著, 前掲書, 246 頁。

(24) イリア・プリゴジン＝イザベル・スタンジェール著, 前掲書, 254 頁。

(25) ジョン・ブリックス＝F. デイビッド・ピート著, 前掲書, 186 頁。

(26) イリア・プリゴジン＝イザベル・スタンジェール著, 前掲書, 215 頁。

(27) M. ミッチェル・ワールドロップ著, 田中光彦・遠山峻征訳『複雑系』新潮社, 平成 8 年, 159 頁。

(Waldrop, M. Mitchell, Complexity, Simon & Schuster, 1992)

(28) 河本英夫著『オートポイエーシス』青土社, 平成 7 年 126 頁。

(29) 河本英夫著, 前掲書, 136 頁。

(30) 河本英夫著, 前掲書, 136 頁。

(31) 河本英夫著, 前掲書, 174 頁。

(32) 多田富雄著, 前掲書, 18 頁。

(33) 河本英夫著, 前掲書, 170 頁。

(34) 河本英夫著, 前掲書, 166 頁。

(35) 河本英夫著, 前掲書, 182 頁。

(36) 多田富雄著, 前掲書, 107 頁。

(37) 河本英夫著, 前掲書, 168 頁。



- (38) 富永健一著、『社会学講義』中公新書，平成7年，113頁。
- (39) 河本英夫著，前掲書，160頁。
- (40) 河本英夫著，前掲書，178頁。
- (41) 河本英夫著，前掲書，8頁。
- (42) 多田富雄著，前掲書，46頁。
- (43) 多田富雄著，前掲書，105頁。
- (44) 多田富雄著，前掲書，18頁。
- (45) 河本英夫著，前掲書，180頁。
- (46) フォン・ベルタランフィ著，長野敬・大田邦昌訳『一般システム理論』みすず書房，昭和48年，35頁。

(Ludwig von Bertalanffy, General System Theory, George Braziller, 1968)

- (47) 多田富雄著，前掲書，89頁。
- (48) 多田富雄著，前掲書，82-83頁。
- (49) ピーター・コヴニー＝ロジャー・ハイフィールド著，前掲書，247頁。
- (50) イリア・プリゴジン＝イザベル・スタンジェール著，前掲書，205頁。

## 参考文献

唐沢昌敬著『カオスの時代のマネジメント』同文館，平成11年。

唐沢昌敬著『創発型組織モデルの構築』慶應義塾大学出版会，平成14年。