HOF 01-075

本田財団レポートNo.75

「シナジェティックス：自然と人類における協同と自己組織化について」

シュツッツガルト大学教授　ヘルマン・ハーケン

Dr. Hermann Haken

Dr. Haken, as an initiator of "Synergetics", has theoretically clarified the complicated mechanism of the order formation of systems and transversely applied its results to comprehensive scientific fields including not to only natural science but also engineering、 medicine, and social science, extending great benefits over these and many other research fields.

Personal History

1927	Born in Leipzig, Germany
1946～48	Study of mathematics and physics at the University of Halle
1948～50	Study of mathematics and physics at the University of Erlangen
1951	Ph.D. in mathematics, University of Erlange (group theory)
1959～60	Visiting Associate Professor, Cornell Uninersity
1960	Professor of theoretical physics, University of Stuttgart
1961	Visiting Professor, Research Institute for Fundamental Physics, Yukawa Hall, Kyoto, Japan
1961～62	Consultant to Bell Telephone Labs
1964～69	Consultant to Laboratoire Telecommunications (ITT), Paris
1970～76	Member of the Scientific board of the Max-Planck-Institute for Solid State Physics, Stuttgart
1973～76	Director of the Quantum Optics Division of the German Physical Society Consultant with the German Sciences Foundation
1972～78	Member of the IUPAP Commission of Statistical Physics

In addition, Dr. Haken has received Max Born Prize and Medal from the British Institute of Physics and the German Physical Society, Max Planck Medal from the German Physical Society and so on. He also has been internationally appointed as members of the academy of science for Synergetics in various countries including Eastern Europe.

ハーケン教授の受賞は、氏がシナジェティックスの創始者として、複雑なシステムの秩序形成の仕組みを理論的に解明し、これを自然科学のみならず工学、医学、社会科学などの諸分野に広く学際的に適用して、多くの学問領域に多大な影響を及ぼされたことによるものです。

●略歴

1927	ドイツ、ライプチヒ生まれ
1946～48	ハレ大学で数学と物理学を専攻
1948～50	エアランゲン大学で数学と物理学を専攻
1951	エアランゲン大学で数学博士号を修める（グループ理論）
1959～60	コーネル大学客員準教授
1960	シュツッツガルト大学理論物理学教授
1961	京都、湯川記念館、基礎物理学研究所客員教授
1961～62	ベル電話研究所顧問
1964～69	パリ、遠隔通信研究所（ITT）顧問
1970～76	シュツッツガルト、ソリッドステート物理学のマックス・プランク研究所科学委員会メンバー
1973～76	ドイツ物理学会量子光学部部長 ドイツ科学財団顧問
1972～78	統計物理学IUPAP 委員会メンバー

その他、英国物理学会及びドイツ物理学会MAX BORN賞、ドイツ物理学会MAX PLANCKメダル等を受賞。国際的にも東欧圏も含めた各国でシナジェティックスに関わる学会等の会員として名を連ねる。

1992年11月17日に東京にて行われた本田賞受賞式でのスピーチ

シナジェティックス：
自然と人類における協同と自己組織化について

理事長並びに御列席の皆様、世界的に権威のあります本田賞を受賞できましたことは、私のこのうえない光栄と致すところでございます。また日本を訪れ、日本のたくさんの古くからの友人、ことに久保亮五教授に再会する機会を得ましたことは、このうえない喜びでございます。久保教授とはおよそ40年前にドイツのガルミッシューパルテンキルヘンで開催されました国際半導体会議で知り合った間柄でございます。教授はその折り私に、後に久保フォーミュラとして広く知られることになる、ご自身の新しい研究の結果を話してくださいました。私が初めて日本を訪れましたのは1961年のことで、高名な湯川秀樹教授に招かれ、京都にあります教授の大変有名な研究所で数カ月間を過ごさせていただきました。その時以来、日本の文化と科学技術の急速な進歩に深く感銘し、日本を訪れますことを大変楽しみにしてまいりました。

本日の私の話の主題でありますシナジェティックスの分野は、レーザー理論から生まれました。そこでまず、レーザー理論の特徴について、すこしお話をさせていただきたいと思います。レーザーの構造につきましては、何人かの科学者が提案をしており、特にシャローとタウンズが精力的にこの研究に取り組みました。日本の霜田氏もメーザー及びレーザーの理論に対し、重要な貢献を果たした初期の研究者の一人であります。

ここでレーザー理論に対する私のアプローチの仕方を説明したいと思います。ガスレーザーの場合を考えてみましょう。この場合レーザーはガスの原子が充満したガラスの管から成っています。ガラスの管の両端には鏡が二つ取り付けられています。この鏡は軸方向に頻繁に走る光を反射させ、管の中にある原子と長時間に渡り相互作用させる役割を果たします。複雑な説明は省きますが、この場合、各原子がガスの内部を送られる電流により励起されると言えます。電流が強ければ強いほど、励起される原子の数も増えるのです。ここで、ランプの中で、そしてレーザーの中で何が起こるのか考えてみて下さい。そのために、個々の原子をもうすこし詳しく見てみることにしましょう。御存知の通り、原子は原子核と、その周りを回る１ないし複数の電子からできています。原子の周りにある電子が電流の電子と衝突すると、この電子は励起されエネルギーを帯び、その後このエネルギーは光界に吸収されることがあります。つまり、光線が発生するのです。これは、私たちが水の中に小石を投げると、水が励起し、波が発生するのに似ています。ランプでは、励起した電子が各々、全く個別に波を発生します。これはちょうど、一握りの小石を水の中に投げ入れた状態に相当します。この場合、水

の表面は大きく波立ちます。また光の場合には、微視的にみて無秩序な光が発生します。レーザーの場合には、まったく異なった現象が生じます。つまり、微視的にみて無秩序な光ではなく、大変秩序だった光波が発生するのです。この現象は、原子が大変秩序だった方法で光波を発すると仮定しないかぎり、理解できません。これは言い換えますと、各電子の動きに高い相互関係があるということを意味しています。しかし驚いたことに、原子の中にある電子にこのように秩序だった方法で振る舞うように働きかける力は、レーザーに対して外からは一切働いていないのです。言い換えますと、電子はこの大変秩序だった動きを自ら見いだしているのです。つまり、レーザーの原子は自己組織の現象を示しているのです。

これは、どのような仕組みで起きるのでしょうか。これを理解するためには、励起した電子から光が発生する過程をもう少し詳しく見てみる必要があります。量子力学では、励起した電子は自発的に光を発生することがあることが知られています。こうして発生した光が他の励起した電子と衝突すると、この電子はエネルギーを衝突した光波に奪われることがあるのです。これにより、衝突した光波のエネルギーは高められます。この過程は「誘導発光」と呼ばれています。励起した電子が多数存在する場合には当然、振幅が止まることなく増幅し、電子なだれが発生するのです。

私たちは、発生する光波には異なった種類のものがあることを理解しておかなければなりません。つまり、光波は波長（あるいは周波数）により違ったものになるのです。光波が発生すると、異なった波長に属する電子なだれは、急速に成長することもありますし、減衰することもあります。何故かと申しますと、いずれの場合にも、光波は最終的には鏡を通り抜け逃げ出てしまうからです。異なった光波の間には競争が生まれます。つまり、励起した電子に蓄えられたエネルギーを奪い合うのです。これはある意味でダーウインの理論を想像させます。つまり、環境に最も適合した光波が競争に打ち勝ち、生き残るのです。この競争に勝ち残った光波を秩序パラメータと呼びます。電子がこの勝ち残った光波に供給できるエネルギーは限られているので、光波は永遠に成長することはできず飽和します。ここでシナジェティックスの過程において中心となる、ある素晴らしい過程が起こるのです。一度この光波、すなわち秩序パラメータが確立しますと、この光波のリズムと一致したリズムで電子が動き始めるのです。これをシナジェティックスの専門用語を用いて説明しますと、秩序パラメータがここの電子を隷従すると言えます。一方、電子は光の発生を通じ、秩序パラメータの存在を常に支援します。このように、秩序パラメータの存在は各電子の支援により可能になる一方、各電子の動きは秩序パラメータにより決定されるのです。つまり私たちは循環的な因果関係により起こる現象を扱っているわけです。

では、何故ランプとレーザーでの現象の違いが生じるのでしょうか。この違いは、各電子が励起される速度の違いにより生まれます。励起される速度が遅い場合には、光波は時折発生するに止まり、実際こうした光波は他の励起した電子に

出会うチャンスはないため、誘導発光は起こりません。しかし、充分な数の電子が励起されると、これはレーザー装置を通り送られる充分な高電流により生じるのですが、突然レーザーでみられた行動が発生しうるのです。

これまで申し上げてまいりました現象を、もう少し抽象的な視点から見てみることにしましょう。まず初めに古い状態、すなわちランプの状態を想定します。次に制御パラメータ、すなわちガスを通って送られる電流を変化させます。この制御パラメータが臨界値に達すると不安定性が始まり、新しい状態、すなわちレーザーの状態へと成長するのです。ある系が一つのみならず複数の秩序パラメータを生産し、それらの秩序パラメータがサブシステムを隷従することが広く一般的に見られます。

秩序パラメータそして、それにより隷従されたサブシステムは、どんな特徴を持っているのでしょうか。秩序パラメータを妨害しますと、今の話の場合には光波ですが、それは非常にゆっくりと元の状態に戻ってしまいます。一方、妨害されたサブシステムは、素早く元の状態に戻ります。言い換えますと、秩序パラメータでは変数がゆっくりと変化し、一方サブシステムでは変数が急速に変化するのです。各要素の行動は秩序パラメータにより決定されるので、各要素の行動を理解するためには、秩序パラメータについて理解しさえすればよいのです。つまり知るべき情報の量が著しく縮小されるのです。ランプの中にある原子の各電子の動きを説明するためには、非常に多くの情報が必要とされています。ところが、レーザーの場合には、電子が明らかな様式で行動することがわかっているので、秩序パラメータに関する情報のみを知りさえすればよいことになります。

このレーザーの例からわかるように、操作方法を変えることにより、レーザー光線はより一層、複雑な行動を見せることがあります。対応する秩序パラメータは競争するだけでなく、共存したり協調し合うことがあるのです。例えば、より高い励起の割合を持つレーザーを考えてみますと、かつては秩序だっていた干渉性の光波が不安定になり、超短波の規則的なパルスに取って代わられることがあります。さらに他の条件下では、他の種類の秩序パラメータが発生し、今日「決定的な無秩序」と呼ばれている状態が生じます。この場合には、微視的な無秩序を示すランプの場合とは全く異なり、かなり不規則的な光が発生します。この例は、レーザーのような非線形の開放系の非常に興味深い特徴を示しています。1ないし数個の制御パラメータをわずかに変化させただけで、系が全く違った行動を示すことがあるのです。このような現象は、多くの生態技術系でも発生することが考えられます。

この行動の質的変化を数学的処理に基づいた違った視点から、さらに説明してみたいと思います。ランプからレーザーへの変異の例で見たように、系の行動は競争に打ち勝った光界により決定されます。すなわち、これが秩序パラメータとなるのです。この変異は次のように説明することができます。秩序パラメータの大きさを変数qで表すことにします。これは、丘の多い風景画では、ボールの位

置で示されています。レーザーあるいはランプの中を送られる電流が弱い場合は、この風景画に谷が一つしかない状態に相当します。秩序パラメータはゼロの地点で安定的な静止状態を持ち、電子の自然放出のみが秩序パラメータを回転させることができるため、秩序パラメータは静止点の回りで小さなゆらぎを見せます。これらのゆらぎは、極めて不規則に起こります。私が今話しておりますのは、ランプで見られた微視的な無秩序状態のことです。電流を強くしていきますと、谷底が非常に平坦になっている所が現れます。この場合、ボールは強く回され、臨界的なゆらぎが発生します。谷底が非常に平らなために、ボールは平衡の位置にゆっくり戻る以外にないからです。これは臨界の減速に相当します。最後にレーザーの中を送られる電流をさらに強化すると、風景は一層変形され、谷が二つ現れます。そして非常に興味深い現象が発生します。つまり、この系には、一つは左側の谷底に、そしてもう一方は右側の谷底にと、二つの状態が発生するのです。もちろん、この系は、これら二つの状態のうち、いずれかを選択しなければなりません。一体、どちらを選ぶのでしょうか。結局、初めに起こった小さな微視的なゆらぎ、すなわち単一の電子による光波の自然発生が、この系が巨視的な秩序を形成するためにどちらの状態を選ぶのかを決定するのです。不安定な状態では、微視的な現象が巨視的な現象に成長し、系が取るべきコースを決定することもあります。ゆらぎの影響下にある系の中腹から谷に至る動きの研究は難しく重要な問題でありますが、これは鈴木氏により解決されました。

ここまで、レーザーという、かなり特別な物理系について、お話してまいりました。この例では無秩序から秩序へという素晴らしい異変が起こりました。物理学及び化学の分野では、かなり多くの無秩序から秩序への変異という現象が、かなり以前から知られております。その一例といたしまして、強磁性体では鉄の要素となる各々の磁石が、ある温度を越えますと完全に無秩序状態になり、この系を臨界温度以下に下げると再び秩序が生まれることが知られています。他の例としまして、超伝導現象が挙げられます。この場合には、伝導体をある臨界温度以下に冷却しますと、伝導体内にある電子の不規則な動きが、非常に相互関係の強い動きをするようになるのです。これら２つの例には、私が先程レーザーに関して説明いたしました効果が見て取れます。その現象と申しますのは、臨界的なゆらぎ、臨界的な減速、そして対象の破壊であります。しかし、レーザーと私が今申し上げました２つの系の間には、大きな違いがあります。レーザーは外部からエネルギーを絶えず供給される場合にのみ働きます。実際、充分な量のエネルギーが与えられて初めて、秩序だった状態が生じるのです。一方、強磁性体と超伝導体の場合には、物質が冷却された場合に、熱平衡において秩序だった状態が生じます。これら２つの系は平衡相転位を受ける一方、レーザーは非平衡相転位を受けるのです。御存知の通り、熱平衡における相転位は自然界によく見られる特徴であります。私は非平衡相転位は、稀な現象なのか、それとも一般的なものなのかという疑問を抱きました。この疑問が、私を20年程前にシナジェティックスの

研究へと誘ったのです。

私は当時まだ存在しておらず、いずれ現れるであろうことを期待していた研究分野を特徴付けるためにシナジェティックスという用語を造りました。科学の多くの分野のみならず、技術、エコロジー、そして人文科学の分野でも、私たちは次のような問題に直面します。私たちは、相互に作用しあっている各要素からなる系を扱っているのです。お互いに相互作用を及ぼすことにより、これらの要素は巨視的な規模で全体としての行動を起こすのです。もうすこし正確に申し上げますと、空間的、時間的、あるいは機能的な組織（もしくはパターン）が形成されるのです。多くの場合、総合的な行動は系の要素自身により造り出され、外部からの働きかけにより生じることはありません。言い換えますと、自己組織化が起こるのであります。研究を始めました当時、私が疑問に思いましたことは、サブシステムの性質のいかんにかかわらず、自己組織化の一般的な原理が存在するかどうかということでした。この疑問はかなり奇妙に聞こえたかもしれません。と申しますのは、私はサブシステムとして原子や分子、生物体の細胞、動物社会に生きる動物、あるいは人間社会に生きる人間や人間のグループにまで及ぶ広範囲なものを思い浮かべたからです。しかし、この20年間にこの質問は、私たちが特定の代価を払いさえすれば、大部分の系において肯定的に答えることができることが判明しました。その代価というのは、巨視的な規模で系の質的変化を探ることを指しています。これは、上に挙げた系の最も興味深い特徴の１つであります。すなわち、こうした系においては、新しい性質が生まれることがあるのです。例えば、微視的に混沌としたランプの光に比べ、レーザーにおける極めて秩序だった光波は新しい性質だと言えます。

問題の種類に応じて異なった数学的なアプローチがありますので、それを皆様に口頭で説明したいと思います。多くの場合、特に物理や化学では、これらの分野における基礎的な方程式からまず始めます。これらの分野において、ある系の各要素の行動を扱う場合もあるかと思います。また、制御パラメータを変えられた場合、系の安定性を研究することがあるかもしれません。系が不安定になると、いわゆる秩序パラメータと呼ばれる集団モードが発生し、一般的に、初めの極めて複雑だった方程式が、幾つかの秩序パラメータに削減されることもあります。これらの等式が進化のパターンを決定するのですが、その多くの例を、これから申し上げたいと思います。各要素の行動が詳しくわからない場合には、２番目のアプローチを用います。この場合には、秩序パラメータを考えることから始め、秩序パラメータの方程式を直接定式化することもできます。

まず第１番目のアプローチを説明したいと思います。よく知られております例に、環状の容器に入れられた液体の層を下から熱した場合があります。上部の表面と下部の表面の温度差が臨界値を越えますと、流体が突然秩序だった動きを始め、例えば六角形のパターンが現れます。それぞれの六角形の中央を流体が登り、

上部の表面で温度が下降し、六角形の区分の境まで沈みます。その後、容器の境をも加熱すると新たな螺旋状のパターンが現れることが実験的に発見されました。この変異は、私の研究所で、秩序パラメータの概念に基づき、数値的な計算により明らかに示されています。この絵の上部はまだ加熱されておりませんが、六角形のパターンが見られます。環状の壁を加熱し始めますと、六角形のパターンは縞模様に変わり、これは最終的にはっきりとした螺旋状のパターンに変わります。気象学への応用では地球の大気のモデルを扱いました。その中の最も簡単なモデルでは、太陽が地球の表面を均一に温め、大気の外側の表面はある一定の低温で維持されていると仮定しました。地球の大気圏は磁界の影響を受けています。全くの同位体であるにもかかわらず、全く異なった構造が起こりうるのです。これは静的対流と呼ばれ、大気の一部に熱い部分が現れ、その反対側に冷たい部分が現れます。ある条件下では、これらの部分は地球の周りを回り始めることもありますし、また別の条件下では、大気の対流、すなわち大気の上向き及び下向きの流れが混沌となり、熱い縞模様が消え、熱い部分が現れ、これがひとしきり続いたあと、突然消滅する、といったことが起こることもあります。勿論これらのモデルは、かなり人工的なものですが、すでに地球の大気の幾つかのパターンの現れかたを説明するために用いられています。

より現実的な例に、いわゆる大気の傾圧不安定性があります。ここでは、地球の動きが考慮されています。計算を用い等圧線を決定することができます。これは天気図で見られる等圧線に非常によく似た特有の形をしています。これらの複雑なパターンでさえ、わずかな数、例えば4つ程の秩序パラメータにより決定されているということを述べますことは、皆様の興味をかき立てるのではないかと思います。シナジェティックスの概念は、化学反応における巨視的なパターンの形成や、生物学における形態形成、その他の現象に応用されています。

レーザーはシナジェティックスの原理を定式化するのに役立ちました。次に、このシナジェティックスの原理が別の装置、すなわちパターン認識のためのコンピュータの製作をいかにして可能ならしめたかということについてお話し申し上げたいと思います。現在パターン認識のためのコンピュータは世界的に開発が進んでおり、この分野ではニューロコンピュータなどの新しい概念が論じられ、応用されています。日本はこの分野の研究では長い伝統を有しており、この分野の研究者として甘利教授と福島教授のお名前を申しあげておきたいと思います。

ここでパターン認識を目的としたコンピュータの開発におけるシナジェティックスの応用について述べさせていただきたいと思います。私の概念は次の3点からなっています。

1．まず、パターン認識は連想記憶に基づいているということです。この種の記憶の例として電話帳が挙げられます。電話帳である人の名前を見つければ、その人の電話番号を知ることができます。より一般的に申し上げますと、連想記憶はある1組の不完全なデータを補完する役割を果たすのです。

図1



2．連想記憶は動的な過程を経て実現されると仮定しています。ここではパターンは秩序パラメータにより表現され、潜在的な風景の中を動いています。ここでは異なった最小限の風景が異なったパターンに一致します。

3．私のアプローチの中心となっている考えは、パターン認識はパターンフォーメーションに過ぎないというものです。この考えを説明するために、下から加熱される流体を考えてみて下さい。この場合、まず初めに上向きに流れる縞模様が発生しますが、流体はこの縞模様を補完し、縞模様が１つにまとまった完全なパターンを造ります。初めに発生した縞模様に何か方向付けがあったとすれば、それから成長している完全な縞模様も同様の方向付けを持つことになります。最後に、一方が他方より幾分大きい２つの縞模様がある場合には、競争が起こります。この幾分大きい方の縞模様が競争に勝ち、最終的にはその勝ち残った初めの縞模様に一致する縞模様のパターンが発生します。シナジェティックスの専門用語で説明いたしますと、次のようなことが起こるのです。初めに与えられた模様が、それに一致する秩序パラメータを発生させ、その秩序パラメータがその他全ての潜在的な秩序パラメータと競争します。この秩序パラメータは競争に勝ち残り、模様の成長のパターンを決定します。パターン認識でも同様のことが起こります。つまり系にパターンの幾つかの特定の特徴を与えるのです。これらの特徴は秩序パラメータを造り出し、これとは異なったパターンに属する他の全ての秩序パラメータと競争を開始します。初めの秩序パラメータが、この競争に打ち勝ち、この秩序パラメータに属するその他全ての特徴を発生させるのです。ここでは数学的な説明をする代わりに、この仕組みの各々の段階について説明したいと思います。まず初めに、例えば１組の顔（図１）のような基礎となる原型パターンを決定します。これらのパターンはコンピュータに符号化して入力することもできますし、コンピュータに覚えさせることもできます。次に、谷が記憶された原型パターン（図２）に相当するような丘のある風景で表せるダイナミックスを作成します。不完全もしくは変形したパターンが与えられた場合、それはこの風景画の丘の上部に点で示されます。ダイナミックスはこの点が、それに最も近い谷に引

き込まれるような方法で作成します。図３に認識の過程を示してあります。コンピュータはある顔の一部を与えられると、記憶されている全ての原型パターンの中から、つまり完全な並行処理により、顔全体を再形成することができます。わずかに修正を加えるだけで、コンピュータは景色を認識することもできるのです。例えば、図４の場合、コンピュータはまず前にいる女性を認識し、次に２列目にいる女性を認識します。そして女性と結び付けられているいわゆる「注意パラメータ」がゼロになると、後列にいる女性を認識できるようになるのです。このようにして、ある景色の中の顔を５つまで認識することができました。

ここで他の分野に話題を大きく転換しまして、社会学における現象についてお話ししたいと思います。シナジェティックスは微視的な系と、それから進化する巨視的な系の間の独特の関係を見いだしました。この両者間ではマクロレベルで

図２

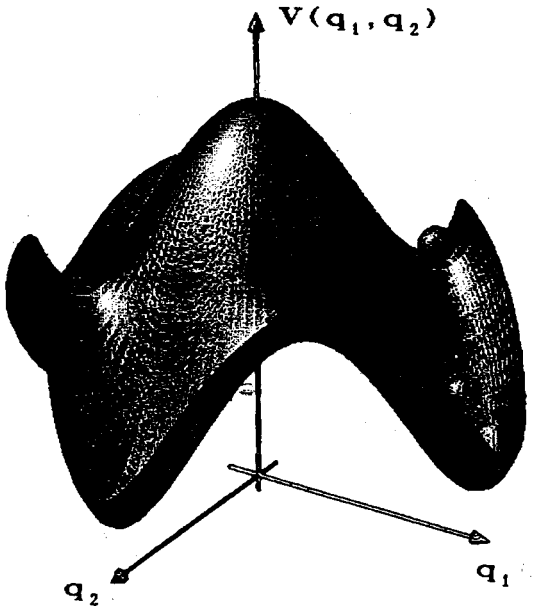


図４



図３



の系の行動は、サブシステムを隷従する秩序パラメータにより決定されます。しかし、こうした概念を社会の系に応用しようとする場合、「隷従」という表現は厳格過ぎて、充分適切でないように思えます。確かに人間社会におきましても、秩序パラメータが個人やサブシステムに影響を及ぼしますが、これはより柔軟な方法で個人の合意に基づいて起こります。こうした理由から、これからの話しで

は、「隷従」という言葉の代わりに「合意化」という言葉を使いたいと思います。しかしこの場合にも、マクロレベルとミクロレベルの関係の重要な特徴は存続します。では秩序パラメータ及びある系の要素についての典型的な例を幾つか考えてみたいと思います。覚えておいでだと思いますが、秩序パラメータは、系の個々の要素の変化に比べ、非常にゆっくりと変化する特徴を持っております。言語というのは明らかに秩序パラメータの一例です。言語はある国のいかなる国民よりも長い期間、存続し続けます。赤ん坊が生まれると、両親が話す言語の支配下に置かれます。赤ん坊はその言語を覚え、その知識をさらに深めていきます。ここでも、循環の因果関係で特徴付けられる秩序パラメータと個々の構成要素との関係を見ることができます。他の例としては、儀式とそれに従う個人との関係が挙げられます。人間社会では、儀式には人間の間の合意の印、あるいはあるグループのアイデンティティの印という意味があります。他に秩序パラメータの例として市民により支えられている国家、あるいは、少なくとも民主主義社会では、市民によって作成された法律があります。また会社の社風や企業のアイデンティティも秩序パラメータの例に当てはまります。会社の社風は、その会社の社員によって作られ、一方社員の行動はその社風により決定されるのです。少なくとも西側諸国では、日本企業の偉大な成功がどの程度まで企業の社風によりもたらされたのかということに関し議論がなされていることは周知のことでございます。他にあまり堅苦しくない例としては、ファッションと、それがいかにして人々が着る服を決定するかということが挙げられます。

より一層厳格な秩序パラメータの例もあります。例えば、科学の理論も秩序パラメータ、もしくはトーマスS.クーンの言葉を借りますと、パラダイムと考えることもできます。クーンの著書「The Nature of Scientific Revolutions（科学革命の性質）」の中にこの言葉が使われています。科学の理論は科学者たちにより受け継がれ、生徒はこれらの理論を教えられるのです。つまり科学者も生徒も、ある意味では、理論や概念により隷従されているのです。その他の秩序パラメータの例としては、経済システムが生産者と消費者の行動を決定し、他方で生産者及び消費者が経済システムを決定しているといった状況があります。サミュエルソンのような著名な経済学者の中には、経済プロセスにおける遅い変数と速い変数をすでに区別している者がいることは、申しあげておく価値があることと思います。しかしこうした経済学者たちは、研究を行っていた当時、こうした概念を形式化するのに必要な数学的な道具を持ち合わせていなかったのです。

これまで挙げてまいりましたいずれの例におきましても、秩序パラメータはかなり固定化されているように思え、会社の社風や経済もしくは政治システムなどの秩序パラメータの変化は、どのようにして起こるのかと考えられるかもしれません。また、秩序パラメータの変化にどういった現象が伴うのでしょうか。シナジェティックスでは、こうした変化を生じさせうるメカニズムを説明しています。

再びレーザーのパラダイムを例にとり、説明したいと思います。自己組織化が起こった場合、もしくは起こりつつある場合には、いずれの場合にも各構成要素の行動を直接決定することはできません。その代わりに、不特定の制御パラメータを変えなければなりません。先程皆様にお見せいたしました丘のある風景画を使いまして、これらの考えを簡単な例を用いまして説明することに致します。ある経済システムから他の経済システムへの移行はどのように起こるのでしょうか。まず初めに風景を変形しなければなりません。つまり既存の系を不安定にする必要があるのです。これは、規制の緩和や、以前とは異なった貨幣の流動を認めることなどにより実現可能です。そして最終的に、新しい最低値で特徴付けられる新しい系へと成長しうるのです。しかしこれに伴い、幾つかの重要な状況が発生することを心に留めておかなければなりません。まず、現在旧ソビエトなどの幾つかの経済システムで見られるような、危機的な経済変動や危機的な経済減速の期間を経なければなりません。さらにその後には、対象の破壊という問題が起こることを覚悟しておかなければならないのです。つまりシナジェティックスの法則によりますと、不安定になった系が自動的に、ある特定の新しい状態に突入していくことを期待してはならないのです。潜在的な新しい安定的な状態が幾つも存在している場合が、おうおうにしてあるのです。その中には最適なものもありますし、最適状態に及ばないものもあります。そしてどんな状態が発生するかは、一握りの人々の行動のような小さな変動により決定されるのです。

複雑な系の性質を丘のある風景におけるボールの動きに例え、視覚化することにより、安定性と適応の間の関係が容易に理解頂けるのではないかと思います。急な斜面を持つ谷が１つしかない場合には、ボールは安定した位置にあります。ボールを軽く押してみても、余り動き回ることはありません。しかし、もっと緩やかな斜面の方が望ましい場合もあります。谷が２つある風景を思い浮かべてください。一方の谷が他方より深いのです。ここで、深い谷の最低値は、あるシステムのより高い効率を持つ状態を意味していると仮定します。もし系がもともとより高い谷の最低値を有していた場合、干渉により飛ばされることが無いかぎり、低い谷の最低値に自然に飛び移ることはできません。この例えは、経済を含めた、たくさんの複雑な系にも当てはめることができます。私たちは干渉により、そしてこうした干渉が成長するかも知れないという可能性を認めたうえで、系が適応するのを許さなければならないのです。私はこの絵は、創造力の真髄を表していると思います。人間は全く新しい考えを得るためには、心を開放させる必要があるのです。安定性と適応の間で系の作用を変化させることが望ましい場合も、多々あります。自然は私たちに、自然が進化を通して、いかに適応を達成しているかを示してくれます。この安定性もしくは硬直性と進化の関係は、エコロジーとテクノロジーの関係においても同様に見ることができると思います。私は、人類は次から次へと生まれるニーズに対応するため、そしてあらゆる困難な問題に適応するのに充分な能力を持つために、テクノロジーを必要としていることに全く疑

いを持っていません。人類はエコロジーとテクノロジーの間のバランス、言い換えますと、安定性と適応の間のバランスを見いださなければならないことは明らかだと申せます。無論このバランスを見つけるための簡単な方法など、あるわけはなく、私たちは努力して、これを見いださなければならないのです。これに関連して、１つの重要な点を指摘いたしたいと思います。ある意味で自然は私たち人間の偉大な教師であり、私たちは自然から多くのことを学んでいます。そのわかりやすい一例に、自然界における再循環があります。例えば、森を見てみますと、木々が成長し、やがて枯れ、そして新しい木々の栄養源となるべく土に返ります。このような場合、物質は全て保存されるのです。木の成長には他に太陽光線から与えられるエネルギーと木の遺伝コードに刻み込まれた遺伝情報が必要です。私たち人類は、新たなエネルギー源の探究と、より多くの情報や知識の獲得に努めなければなりません。スウェーデンのAke Anderssonは、その研究の中で、知識こそが経済において最も重要な秩序パラメータであることを明らかにしています。明らかに、このような傾向は引き続き追跡していかなければなりません。私たちは物質を情報で置き換えなければなりません。またエネルギー源には限りがありますので、エネルギーも情報で置き換える必要があります。当然こうしたことを実現するためには、より一層高度な教育、すなわち適切な教育システムや大学、産業界における訓練等が必要になります。私はかねてより、日本の子供たちの勤勉さや学生の教育水準の高さに感銘を受けており、また、現在の日本の成功の大部分は、日本のあらゆるレベルに見られる、高度に文化的な伝統によりもたらされたのだと考えております。

エネルギー源の利用を最小限にするためには、過程を効率化しなければなりません。再びレーザーを例にとってみますと、わかりやすいと思います。レーザーはコーヒレント作用を受けますと、効率性が著しく高まります。より抽象的な表現でこれを説明致しますと、充分に強い情報交換によりレーザーの電子の秩序がもたらされると言うことができます。しかしながら、レーザーの原子と人間には大きな違いがあります。この違いは人間の複雑さ故に生じるだけでなく、人間には学習し、知識を後々の世代に伝える能力があることによるのです。

シナジェティックスでは、自己組織化の系の状態を間接的に変えることができると考えます。これは微妙な意味合いを持つかもしれません。「制御パラメータ」がわずかに変化しただけでも、系全体に大きな変化が生じることもあるのです。こうした変化は系の改善につながることもありますが、制御パラメータがわずかに誤った方向に変化しただけで、深刻な問題が生じることもありえます。複雑な系というものが、いかにもろいものか、お気付き頂けることと思います。では、このような状況で私たちは何をすればよいのでしょうか。まず何よりも大切なこととして、自然と人間性に対する責任ということに関し、新しい意識や感覚を持つ必要があります。私は、ここ数年の間に、こうした一般的な意識を生み出すことにおいて、大きな進展がなされたと考えています。亡き本田宗一郎氏の賢明な

洞察力に基づき、本田財団はエコロジーとテクノロジーの関係に対する一般市民の態度をいかに改善すればよいかということについて、明快な例を示してくださいました。その一例として、この話題に関連した種々のシンポジウムを開催されております。指導的地位にあります科学者や、経営者、エンジニア、ジャーナリスト、政治家、その他の方々を世界各地から招いての話し合いからは、今後も、地球の保護を究極の目的とした、人々の合意や結束を生み出すことにつながる益々多くの考えが生まれることと信じてやみません。

本田財団レポート

No. 1 「ディスカバリーズ国際シンポジウム　ローマ1977」の報告　昭53.5
電気通信大学教授　合田周平

No. 2 異文化間のコミュニケーションの問題をめぐって　昭53.6
東京大学教授　公文俊平

No. 3 生産の時代から交流の時代へ　昭53.8
東京大学教授　木村尚三郎

No. 4 語り言葉としての日本語　昭53.10
劇団四季主宰　浅利慶太

No. 5 コミュニケーション技術の未来　昭54.3
電気通信科学財団理事長　白根禮吉

No. 6 「ディスカバリーズ国際シンポジウム　パリ1978」の報告　昭54.4
電気通信大学教授　合田周平

No. 7 科学は進歩するのか変化するのか　昭54.4
東京大学助教授　村上陽一郎

No. 8 ヨーロッパから見た日本　昭54.5
NHK解説委員室主幹　山室英男

No. 9 最近の国際政治における問題について　昭54.6
京都大学教授　高坂正堯

No.10 分散型システムについて　昭54.9
東京大学教授　石井威望

No.11 「ディスカバリーズ国際シンポジウム　ストックホルム1979」の報告　昭54.11
電気通信大学教授　合田周平

No.12 公共政策形成の問題点　昭55.1
埼玉大学教授　吉村　融

No.13 医学と工学の対話　昭55.1
東京大学教授　渥美和彦

No.14 心の問題と工学　昭55.2
東京工業大学教授　寺野寿郎

No.15 最近の国際情勢から　昭55.4
NHK解説委員室主幹　山室英男

No.16 コミュニケーション技術とその技術の進歩　昭55.5
MIT大学教授　イシェル デ ソラ プール

No.17 寿命　昭55.5
東京大学教授　吉川俊之

No.18 日本に対する肯定と否定　昭55.7
東京大学教授　辻村　明

No.19 自動車事故回避のノウハウ　昭55.10
成蹊大学教授　江守一郎

No.20 '80年代―国際経済の課題　昭55.11
日本短波放送専務取締役　小島章伸

No.21 技術と文化　昭55.12
IVA事務総長　グナー・ハンベリュース

No.22 明治におけるエコ・テクノロジー　昭56.5
山本書店主　山本七平

No.23 西ドイツから見た日本　昭56.6
電気通信大学教授　西尾幹二

No.24 中国の現状と将来　昭56.9
東京外国語大学教授　中嶋嶺雄

No.25 アメリカ人から見た日本及び日本式ビジネス　昭56.10
オハイオ州立大学教授　ブラッドレイ・リチャードソン

No.26 人々のニーズに効果的に応える技術　昭57.1
GE研究開発センターコンサルタント　ハロルド チェスナット

No.27 ライフサイエンス　昭57.3
㈱三菱化成生命科学研究所人間自然研究部長　中村桂子

No.28 「錬金術　昔と今」　昭57.4
理化学研究所地球化学研究室　島　誠

No.29 「産業用ロボットに対する意見」　昭57.7
東京工業大学教授　森　政弘

No.30 「腕に技能をもった人材育成」　昭57.7
労働省職業訓練局海外技術協力室長　木全ミツ

No.31 「日本の研究開発」　昭57.10
総合研究開発機構(NIRA)理事長　下河辺　淳

No.32 「自由経済下での技術者の役割」　昭57.12
ケンブリッジ大学名誉教授　ジョン F. コールズ

No.33 「日本人と西洋人」　昭58.1
東京大学文学部教授　高階秀爾

No.34 「ディスカバリース国際シンポジウム　コロンバスオハイオ1982」報告　昭58.2
電気通信大学教授　合田周平

No.35 「エネルギーと環境」　昭58.4
横浜国立大学環境科学研究センター教授　田川博章

No.36 「第3世代の建築」　昭58.7
㈱菊竹清訓建築設計事務所主宰　菊竹清訓

No.37 「日本における技術教育の実態と計画」　昭58.8
東京工業大学名誉教授　斎藤進六

No.38 「大規模時代の終り―産業社会の地殻変動」　昭58.8
専修大学経済学部教授　中村秀一郎

No.39 「ディスカバリーズ国際シンポジウム ロンドン1983」の報告　昭58.9
電気通信大学教授　合田周平

No.40 日本人と木の文化　昭58.10
千葉大学名誉教授・千葉工業大学教授　小原二郎

No.41 「人間と自然との新しい対話」　昭59.2
ブラッセル自由大学教授　イリヤ・プリゴジン

No.42 「変化する日本社会」　昭59.3
大阪大学教授　山崎正和

No.43 ベルギー「フランドル行政府産業使節団」講演会　昭59.7

No.44 「新しい情報秩序を求めて」　昭59.7
電気通信大学教授　小菅敏夫

No.45 「アラブの行動原理」　昭59.10
国立民族学博物館教授　片倉ともこ

No.46 「21世紀のエネルギーを考える」　昭60.1
イタリア国立エネルギー研究機関総裁　ウンベルト・コロンボ

No.47 「光のデザイン」　昭60.7
石井デザイン事務所　石井幹子

No.48 「21世紀技術社会の展望」　昭61.1
第43回日経ハイテクセミナー

No.49 「星をつぶす法」　昭61.5
文部省宇宙科学研究所所長　小田　稔

No.50 「ひまわりVA太陽光は人間の生活にどう役立つか」　昭61.5
慶応義塾大学教授　森　敬

No.51 「エコ・テクノロジーの宇宙的観察」　昭62.2
コーネル大学天文学および宇宙科学教授　カール・セーガン

No.52 「人間はどこまで機械か」　昭62.2
東京大学教授　古川俊之

No.53 「中国人とどのようにおつきあいすべきか」　昭62.2
東京外国語大学教授　中嶋嶺雄

No.54 「舞台の奥のヨーロッパと日本」　昭62.5
演出家　寺崎裕則

No.55 「日米関係の現状と展望」　昭62.5
経団連特別顧問　大河原良雄

No.56 「私の半導体研究」　昭63.1
東北大学教授　西澤潤一

No.57 「生物学者の科学的責任」　昭63.4
コレージュ・ド・フランス名誉教授　ジャン・ドーセ

No.58 「最近の宇宙論をめぐって」　昭63.3
上智大学教授　柳瀬睦男

No.59 「科学・技術研究の国際的規模：その展望と考察」　平1.7
ローマ大学教授　パオロ・マリア・ファゼラ

No.60 「温室効果による地球環境の変動と対策」　平1.9
中央大学理工学部教授　安藤淳平

No.61 「組織の進化論」―企業及び軍事組織における進化―　平2.3
一橋大学商学部教授　野中郁次郎

No.62 「ファジー理論の誕生と進化」　平2.9
カリフォルニア大学バークレー校教授　ロトフィ・アスカ・ザデー

No.63 「遷都問題について」　平2.12
通産省工業技術院　国際研究協力課長　八幡和郎

No.64 「クリーンエネルギーとしての水素利用」　平2.12
東海大学工学部　応用物理学科教授　内田裕久

No.65 「地価インデックス債による土地問題の解決」　平3.1
一橋大学経済学部教授　野口悠紀雄

No.66 「"宇宙のひとかけら"としての人間の視座」　平3.4
松下技研㈱主幹研究員　佐治晴夫

No.67 「建築と自然」　平3.5
シュツッツガルト大学軽量建築研究所教授　フライ・オットー

No.68 「先端科学技術と経済成長」　平3.7
東京大学　先端科学技術研究センター教授　竹内　啓

No.69 「自然界におけるゆらぎ, フラクタルおよび秩序」　平3.9
東京大学理学部教授　鈴木増雄

No.70 「エコ・テクノロジーと飢餓の克服」　平4.4
国際マングローブ生態系協会会長　M.S.スワミナタン

No.71 「開放型の情報技術」　平4.5
明治大学教授　西垣　通

No.72 「地球環境問題と日本の役割」　平4.9
三菱化成生命科学研究所室長　米本昌平

No.73 「冷戦後の日米関係」　平4.10
日本経済新聞社国際第一部長　小島　明

No.74 「エネルギー技術の動向」　平5.6
東京大学工学部教授　茅　陽一

No.75 「シナジェティックス：自然と人類における
協同と自己組織化について」　平5.6
シュツッツガルト大学教授　ヘルマンハーケン