

HOF 01-041

本田財団レポートNo.41
「人間と自然との新しい対話」

ブラッセル自由大学教授 イリヤ・プリゴジン

Profile of Lecturer

Professor Ilya Prigogine

- 1917 Born in Moscow, U.S.S.R. (Nationality: Belgian)
- 1941 Ph.D. in Science, Free University of Brussels
- 1951~ Professor, Free University of Brussels
- 1959~ Director of the "Institute Internationaux de Physique et de Chimie", fondés par E. Solvay, Brussels
- 1967~ Regents Professor of Physics and Chemical Engineering, University of Texas, Austin, U.S.A. Director of the Ilya Prigogine's Center for Statistical Mechanics and Thermodynamics of the University of Texas.
- 1981~ Special Advisor to the Commission of the European Committees.

Honour

Doctor Honoris Causa from eleven universities and many Scientific awards and medals including Nobel Prize in Chemistry (1977)

Member:

Fifteen national academies as well as numerous memberships in various learned societies

Recent Monographs:

"Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuations"
en collaboration avec P. Glansdorff.

Wiley & Sons, London, New York, (1971).
"Self-Organization in Non-Equilibrium Systems, From Dissipative Structures to Order through Fluctuations:"

en collaboration avec G. Nicolis J. Wiley and Sons., (1977).

"La Nouvelle Alliance, Les Métamorphoses de la Science,"

en collaboration avec I. Stengers, Galimard, 1981, Paris, France.

"From Being to Becoming, Time and Complexity in the Physical Sciences,"
W.H. Freeman & Co., San Francisco, U.S.A., 1980.

All these monographs have been translated in various languages.

講師略歴

イリヤ・プリゴジン

●学歴および経歴

- 1917 ソビエト連邦モスクワ生まれ
(国籍:ベルギー)
1941 ブラッセル自由大学 理学博士
1951~ブラッセル自由大学教授
1959~E. ソルヴェー設立「国際物理・化学研究所」所長(ブラッセル)
1967~ テキサス大学物理・化学工学教授
及び理事(アメリカ合衆国テキサス州オースティン)
同大学統計力学・熱力学イリヤ・プリゴジンセンター所長

1981~ ヨーロッパ共同体委員会特別顧問

●栄 誉

11の大学から名誉博士号を授与されるとともに、ノーベル化学賞(1977)を始め、科学の分野で数々の賞やメダルを各国から受賞する。

●会 員

15におよぶ国立アカデミー及び数多くの学会に所属する。

●近年発表の論文

『構造・安定性・揺動の熱力学理論』

P. グランスドーフと共著

1971年、ニューヨーク、ロンドン、

ワイリー・アンドサンズ出版

『非平衡システムに於ける自己組織化、散逸構造から揺動による秩序まで』

G. ニコリスと共著

1977年、J. ワイリー・アンドサンズ出版

『新約、科学の変容』

I. スタンガーと共著

1981年フランス、パリ、ガリマール出版

『存在から生成へ。物理科学に於ける時間と複雑性』

1980年米国、サンフランシスコ

W. H. フリーマン・アンド・カンパニー出版

尚上記の論文は各國語に翻訳されている。

このレポートは昭和58年11月17日、ホテル・オークラにおいて行なわれた1984年度本田賞授与式の記念講演の要旨をまとめたものです。

「人間と自然との新しい対話」

1983年11月17日 第4回本田賞授与式に於ける記念講演

I

近年技術が発展し、科学と自然の関係という永遠の問題に新しい側面が加わり、科学と文化を通して人間は自然と如何なる対話を交わしているかが問われるようになりました。

これは全く大胆な問い合わせであって、包括的回答を期待するのは無謀過ぎるであります。然しながら、この問題をとらえる我々の視点というものが、僅か数十年前に比べていまや大きく変わってきているということを強調したいと思います。本日はこの変化をテーマとして話を進めたいと考えております。

ニュートンが「プリンキピア」を王立協会に提出した1686年4月28日は人類の歴史上最も記念すべき日の一つであると言っても言い過ぎではないであります。この日に近代科学が誕生したと言っても差支えありません。つまり、近代科学は、現在300才を迎えたことになります。ニュートンの演繹的推論は革新的視野に立つもので、技術の実際と理論的思弁の歴史的潮流を統合させたものであります。

ギリシャには、特にヘレニズム時代に、優れた科学者が輩出し、今日私達が持っている自然に関する理解もギリシャ哲学に負う所が大きいことは誰しも知っている所でありますし、古代の天文学は数学的創意の記念碑と言えましょう。ニュートン以後この様々な潮流が統合的に把えられるようになり、人間生活に一大変化がもたらされるに至ったことは良く知られています。

ニュートンの体系の規模の並はずれた大きさに注目して頂きたいのです。自然是無限に変化しますが、原則として、すべてニュートンの唱えた運動法則にぴったり納めることができますから、どういう状況であっても当初の諸条件がわかれば、少くとも原則的には100パーセント確実に結果を予測することが可能であります。

ニュートン体系の特徴として、私は次の二点を特に強調したいと思います。つまり、この体系は、自然の決定論的解釈というべきもので、不確定なものは何もありません。これは又、ニュートンの法則では過去と未来の間に区別を設けていませんので、可逆的解釈ということにもなります。然し、この壮大

な知的構想にも問題がなかった訳ではありません。

即ち、古典派が巨大な自動機械と称した宇宙の中で、生命を、人間を、どう位置づけるべきか、という疑問が残るのであります。

20世紀最大の科学者であるアインシュタインも、その学説の中でこの対比に触っています。アインシュタインは、決定論的法則の重要性を一方では認めていますから、一般に行われている量子力学の解釈に異論を持っていたこともよく知られています。アインシュタインは、又一方では人間の行う研究活動の創造性の役割を、同様の確信をもって強調しています。

ではこの二つの立場をどう調和させればよいのでしょうか。人間は、自らの描き出す宇宙の外側にいるのでしょうか。フランスの著名な生物学者ジャック・モローは、生物学の法則は物理学の法則と両立が可能であるが、物理学の法則の中に包含されないと述べて、この対比を明確にしています。

17世紀から受け継いだ古典的な視点に立ちますと、自然是受動的で、人間の創造的衝動に服従するものであるかにみえます。合田教授が述べておられるように、「近代の科学や技術の発展過程で、概ね、自然（事物の自然の秩序）は、活用さるべき財産としてではなく、征服さるべき敵対物とみなされてきた」のも驚くにはあたりません。

ニュートンの総合統一論が提起されて後、300年に亘る科学の歴史は正に劇的なものと言えるでしょう。古典派の学説がほぼ完全なものではないかと考えられた時も度々あって、その時には、決定論の法則と可逆の法則、両者を具えもつ基礎段階が把握できるかにみえたのであります。然し、何時も何か問題が起きました。体系を拡げる必要が生じ、古典学説で言う所の基礎段階は完全な充実をみないまま終ったのであります。

今日、どちらを向いても、発展、多様化、不安定、が目に入ります。科学の概念の基本的再構築が進んでいます。現象が決定論的でありながら確率論的でもある。又、可逆的でありながら不可逆的でもある、多元的世界に我々は住んでいるということを理解してから長い年月が経ちました。無摩擦振り子や地球

を巡る月の軌跡などの決定論的現象も観察し、更に無摩擦振り子も可逆的であるという事実も知っています。然し、これとは別に、拡散とか化学反応等のプロセスは不可逆的であります。天然現象の多様さを、宇宙爆発起源時のプログラムに結びつけるという矛盾を犯したくないならば、確率論的プロセスの存在を認めなければなりません。今世紀初頭以来、変化してきたのは、この四つの現象の相対的重要性に対する私達の評価であるということができます。

人為的事象は決定論的かつ可逆的であると言えるでしょう。自然の事象は無作為と不可逆的因素を内包しています。ここから事象に対する新しい考え方が導きられるのであります。もはや機械的世界觀が唱えるような受動的なものとしてではなく、自發的活動と関連づけて考えられるようになりました。この変化は極めて深なものであります。私は人間と自然との新しい対話について私達が本当に語ることができる段階に至ったのだと考えるのであります。

今世紀初頭の頃ですら、物理学者は古典派の研究手法の伝統を受継いでいて、殆ど例外なく、宇宙の基本法則は決定論的かつ可逆的であるという説を受入れていました。この概念に適合しないプロセスは例外として捉えられ、その複雑な変数をコントロールすることができないものであると考えられていました。今世紀も終り近くなりましたが、自然の基本法則は不可逆的かつ確率論的であって、決定論的かつ可逆的法則は限られた状況下でのみ適用できるものであるという考え方が優勢になっています。

では、このような変化が比較的短い年月の間にどのようにして起ったのか、これは興味深い問題だと思います。この変化は、物理や化学などの全く別の分野、即ち素粒子論、宇宙論、非平衡の系の自己組織化の研究、の分野で達成された成果がもたらしたもので、私達の全く予期していなかったものでした。

50年前、ほとんどの、或いはおそらくすべての素粒子が不安定であるなどと一体誰が信じたでしょうか。宇宙の進化を全体として語るなどをどうか。又、後で詳しくお話しする化学クロックで分るように、分子は平衡状態にあるのではなく、擬人的に言えば、分子同志が相互に交信をしているらしい、などということを誰が考えたでしょうか。

こういう予期せざる発見は、“ハード”の科学と“ソフト”の科学との関係のとらえ方にも多大な影響を与えています。古典派の説では、物理学や化学の

研究対象である単純な系と、生物学や人間科学の研究対象である複雑な系との間には著しい差違があるとされました。しかし、古典派力学の単純なモデル、或いは気体や液体の単純な反応と、生命の進化や人間社会の歴史にみられる複雑なプロセスとの間に大きな対比ほど、大きな対比は他に考えられません。

然し乍ら、今やこのギャップが埋められつつあるのです。この10年の間に、非平衡的状態の中では気体や液体等の単純な物質、或いは単純な化学反応が複雑な動きを示す場合があるということが明らかにされました。この予期せざる複雑性によって時間的相似性や空間的相似性が破壊され、混沌が生じ、多様化のパターンが出現して来るのであります。

II

不可逆性と確率論的性格を内包しつつ複雑性に向う進化という点では、熱力学が重要な役割を果します。ある系に対する説明を、古典派力学と熱力学二つの観点に立って比較検討してみるのも有益かもしれません（図1）

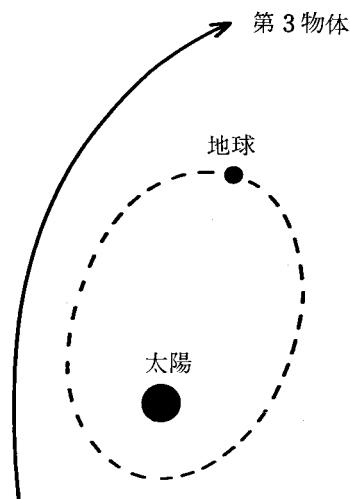


図1：3物体系の力学的説明。

第3物体が出現しても地球軌道の変形が起こるだけである。

古典派力学では、一般に、あるタイプのポテンシャルによって相互作用を及ぼし合っている任意の数の点が考えられていました。太陽と地球が作る系がその典型的な例ですが、勿論他の惑星と星であっても構いません。ただ、一種の摂動として扱われます。（図2）

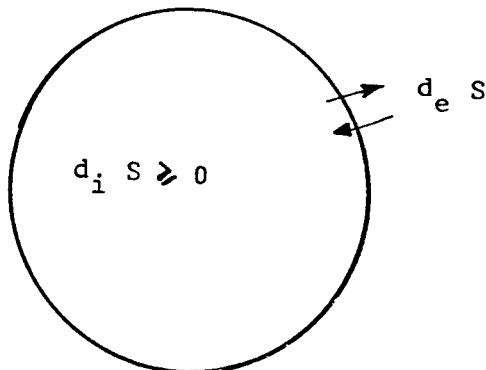


図2：エントロピーの時間的変化は、エントロピー・フロー ($d_e S$) とエントロピー・プロダクション ($d_i S$) に分けられる。 $dS = d_e S + d_i S$

これとは対照的に、熱力学では、図2に示した如く、エントロピーの概念を基礎に置きます。エントロピーには全く独自の傾向があり、その時間的変化は、系が外界と共に変化するエントロピーの流れを示す項 $d_e S$ と、系内部のエントロピー生成を示す項 $d_i S$ とに分けることができます。 $d_i S$ は常にプラス又はゼロですから、不可逆性だけがエントロピーを生ずることができ、それを破壊することはできません。孤立した系ではエントロピーの流れがありませんから、 S が変化するのはエントロピー生成による場合に限られます。エントロピーは系が平衡状態に近付くにつれて単調なペースで最大値に対応して増加します。

熱力学の分野では、長い間、平衡状態にある孤立した系が中心的な研究テーマでしたが、現在は、エントロピーの流れによって周辺と相互作用し合う非平衡状態の系に関心が移りつつあります。両者の基本的な相違を力学的にみてみましょう。熱力学では埋め込まれた系が対象とされ、エントロピーの流れを介した外界との相互作用が基本的な役割を演ずるのですが、このことから、その環境の中に埋め込まれていることによってのみ存続可能な都市や生活体系が直ぐに連想されましょう。

熱力学は当初からその視点を一種の相互作用に置いています。これは“全体論”的観点と言うこともできますが、それだけではありません。図1の例で、地球に近付いて行っている外部の物体があったことを思い出して下さい。この物体は地球の軌道を変化させてしまうかも知れず、また、その変形は永久に残るかもしれません。力学的系では摂動を忘れる事はできないのです。

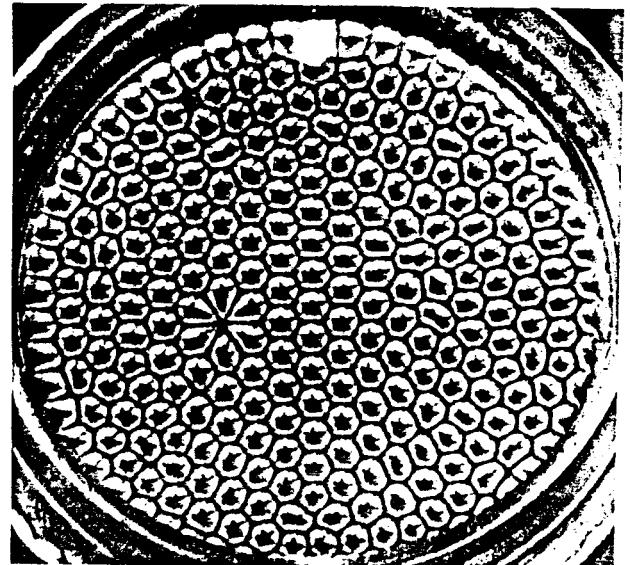


図3：液体の薄層にみるベナールの不安定性

然し、散逸も含めるすると話は変って来ます。振り子が減衰すると、初めの摂動がどうであったかに関係なくある平衡状態に達するからです。このことからも熱力学が如何に私達の生活に近いものかがお解りになるでしょう。私が減衰していない振り子に大きな振動を与えると、その周期は徐々に遅くなってゆき、永久にその状態が続きます。しかし私の心臓は、駆け出すと拍動が増え、休むと平常の状態に戻ります。

熱力学で摂動を忘れる事はあるかもしれませんのが、散逸も含めて熱力学を説明する時にはアトラクターというものがあります。

もしアトラクターがなければこの世界は混沌に陥るでしょう。一般法則はまだ見出されていません。すべての系がそれに問題を提起しているのです。今私達は、ある系を平衡状態から遠く引離すと何が起こるか、全くの総論としては理解することができます。私達がこの系に向けて物質とエネルギーの流れを与えると、平衡に近い状態の系の作用を支配していたアトラクターが不安定になると推定しますと、今度は非平衡状態が秩序の源となり、複雑性のより高い新しいタイプのアトラクターが出現して、この系に顕著な、新しい空間、時間特性を与える、と考えられるのです。

この総論的な話を、今日広く研究されている二つの例を引いて説明してみましょう。初めに取り上げるのは、所謂ベナールの不安定性です。これは静止状態に於ける不安定性を示す驚異的な例で、自発的

自己組織化現象を起こすものです。この不安定性は、水平の液体層の中にできる垂直温度変化によるものです。低い方の面を高い方の面の温度より高い任意の温度に保つと境界の条件ができますから、永続的な熱フラックスが生じ、下から上に向う動きが発生します。温度差が少ない時は、対流が起らなくても伝導で熱が伝わりますが、与えた温度変化率が閾値に達すると、静止状態（流体の“休憩”状態）が不安定になり、対流が起こり、莫大な数の分子の干渉性運動となって熱伝導率が高まります。条件が揃うと、この系の中に複雑な空間的組織化が対流によって実際に生じて來るのであります。

ペナールの現象はもう一つ別の面から見ることができます。ここでは二つの要素“熱フローと重力”的二つの要素が関係してきます。平衡状態では、10mm台の薄い層には重力の力は影響を与えることがほとんどありませんが、これとは対照的に、ペナールの不安定性では、重力によって顕微鏡的構造が現出するのです。物質は、非平衡状態になると、平衡状態にある時に比べて外界の条件の影響を遙かに受け易くなりますので、私は、物質は平衡状態では盲目になり、非平衡状態で視力を回復し始める、と言っています。

このことは化学的振動の例を引いて説明することもできます。ペロウソフ・ザボチンスキイの反応は良く知られている化学クロックですが、ザボチンス

キーの驚くべき研究結果は1960年の終り近くに発表されました。ここでその詳しいメカニズムをお話する余裕はありませんが、総論的な点を若干申し上げておきましょう。理論的には、化学製品の射出成型と廃棄物の処理を適切に行うことによって私達がコントロールできる状態にある一つの化学反応があります。（図4）

二つの中間成分は赤と青の等量の分子で、それぞれ形成されていると考えて下さい。時に、多分赤か青の点が光って色がにじんだように見えることがあると思いますが、これは実際に起っていることではありません。条件が揃えば、容器全体が初めは赤、次に青、そして又赤に変わるのが連続してみられるでしょう。これが化学クロックです。これはある意味で、私達の化学反応に対する直観に反するものです。（図5）

化学反応は、分子の無秩序な動き、無秩序な衝突で起ると言われますが、これに反し、化学クロックの存在は、中間種の動きは無秩序とは程遠く、非常に理路整然としたものであることを示唆しています。ある意味で、分子はその色彩の周期的变化に同時性を持たせるため“伝達”を行うことができなくてはなりません。つまり今お話ししているのは、化学的作用によって生ずる、時間的にも空間的にも新しい超分子スケールなのです。動いている化学反応装置で観察できるのは時間的動き（周期的なものもあれば

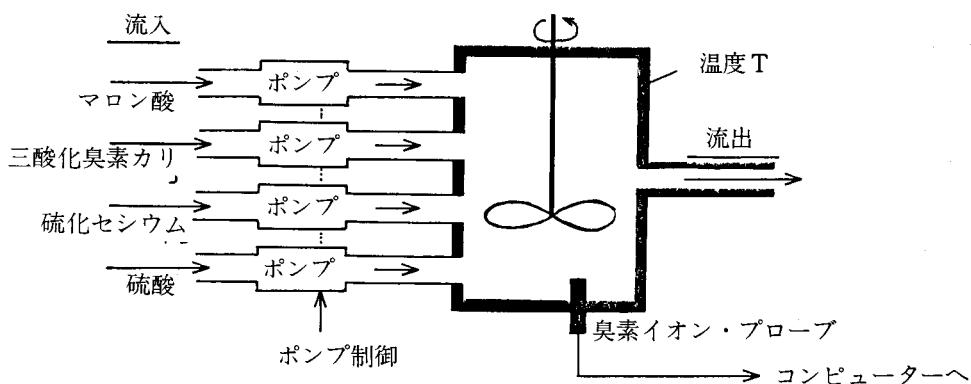


図4：ペロウソフ・ザボチンスキイ反応の振動の研究に用いられた
化学反応装置の図解

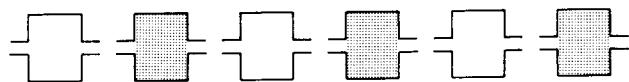


図5：リアクターの連続的状況が反応の周期性を示す。

“無秩序”の場合もある)だけですが、他の場合には空間的構造もみられことがあります。図6は非常に見事なクリンスキーサイラルです。全く、天文学的規模の渦巻き星雲を思わせるものがあります。

分岐ということも大切な概念です。多数の溶相(solution)を呈するある系を一つの分岐図で示せますが、各臨界点で新しいタイプの溶相が生ずることが解ります(図7を参照)。

この他にもう一つ別の要素があります。例えば分岐点Pの近くで、この系では二つの枝に対して選択を行っていますので、確率的要素も考えられることになるのです。

量子力学は顕微鏡的世界に確率論的解釈を持ち込むもので、非常に画期的なものと思われます。私がこれまであらましをお話した新しい動向から推して、この確率的要素は巨視的世界にもあると考えることができます。

III

第II節で概要をお話したいいくつかの概念は、現在では生物学、社会科学、気候学等多くの分野に取り入れられるようになりましたが、その中で今私達の前にある大きな問題の一つは、私達の環境を形成している大規模な均整を理解することでしょう。

二つの例を示したいと思います。初めに取り上げるのは気候の問題であります。私達は、過去気候に大きな変化が生じたことを知っています。2億年から3億年前の頃の気候条件は現在とは大いに違っていて、その当時は、第四期(約200万年前に始った時代です)を除き、事実上大陸氷はなく、海面も現在より約80メートル程高かったです。第四期の目立った特徴は一連の氷河作用がみられることで、平均10万年の周期で起っており、相当量のノイズが加わって来ます。人類の歴史に確かに重大な役割を演じたこの大変動を起させたのは一体何ものなのでしょうか。太陽エネルギーの強度が変動を起させる原因であるということを示す事実は何もありません。

今度は、これ迄とは反対に、その著しい均一性と変動のなさに驚かされる例をお話致しましょう。化学では対掌性分子をよく取り上げます。例えば、殆どのアミノ酸の中心炭素は不均整で、二種の配置を示します。これをR異性体とL異性体としますと、この二つの異性体の間の関係は、左巻きの渦と右巻きの渦に若干似ており、蛋白質のアミノ酸が常にL型の配置を示すことは興味をひかれる点であります。

これとやや似た例が粒子と反粒子ですが、量子論

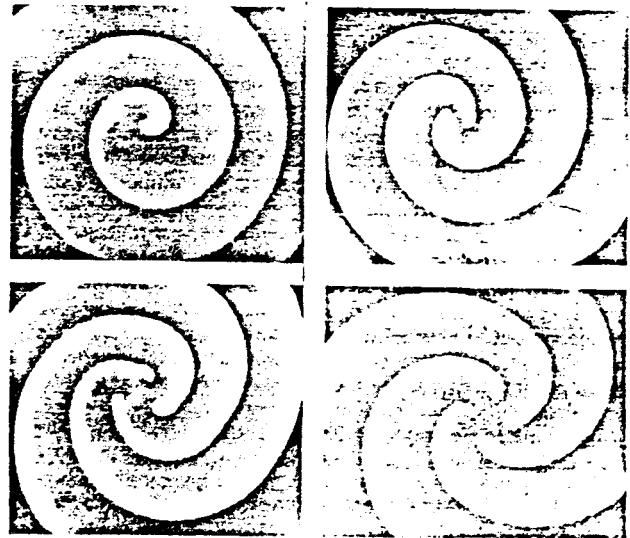


図6：活動的な励起性媒体の渦巻。
1本、2本、3本、4本のもの
(V. I. クリンスキー)

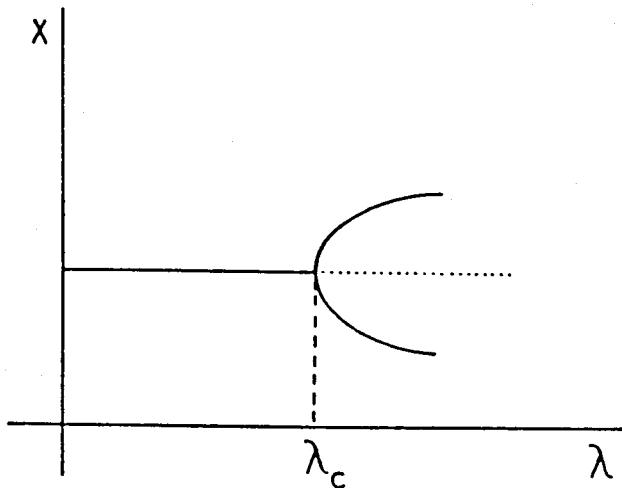


図7：対称的分岐図。Xは λ の函数としてプロットしてある。
 $\lambda < \lambda_c$ の場合、安定した静止状態は1つであるが、
 $\lambda > \lambda_c$ の場合は新しい安定静止状態が2つ現われ、
前の安定状態は不安定になる。

では粒子と反粒子の役割は殆ど同じであるとしています。しかし、この世界は粒子で成り立っており、反粒子はアクセレーターの中で生成されるものです。

この二つの対極的な状態を理解する方法を我々は手にしはじめています。気候は、日光の吸収と放出の両者を考慮した全くの非線形方程式で表わされます。簡単に言いますと、ここから気候の二つのタイプ、即ち寒冷な気候と温暖な気候を導き出せます。この二つの気候には勿論変動がありますが、これらの変動だけでは気候のタイプが変わることの十分な原因とはなりません。

然し、更に地球軌道の偏心率は太陽熱の流入の周期性に僅かに関係するだけですが、二つの研究グループから、その影響は大きく、非常に小さな外部擾動が気候のタイプの移行の蓋然性を高めるという重大な研究結果が発表されています。

こうみて来ますと、氷河作用の周期が10万年ということも理解できると思います。私が強調したいと思いますのは、内部ノイズが瞬間的な外部擾動を増幅し、そのために気候の大変動が起こされる可能性を考えることができます。

次に2番目の問題ですが、非平衡状態にある物質は非常に外部擾動の影響を受け易いということは先にお話し致しました。分岐点附近では特にその傾向が強いのです。

右巻きの分子或いは左巻きの分子の安定性の間にあるごく僅かの差（例えば、活性化エネルギーで約 10^{-15} の差）が“対称”分岐にある確率性を抑制し、この状態のいずれか一つを優先的に選択させる可能性も考えられます。

のことから巾広い分野での応用の道が開かれるのです。新型の高感度スイッチを作り出せるかもしれません。しかし、その代償も払わなければなりません。このスイッチは動きが非常に遅いのです。このため、分岐パラメータを長期間分岐点の近くに置く必要があるのです（この正確な値は運動方程式によって時間単位から分単位までの差があります）。

以上の2例で解る通り、私達に環境の基本的特質を理解する手がかりが与えられたのですが、更に、量的に応用できる他に質的な応用方法もあり、私が概略をご説明した概念から、動物社会或いは人間社会の動きというような長年問題にされているテーマを追求する新しい方法が見出される可能性もあるのです。

蟻の社会を例にとってみましょう。私は、この地球上にいる蟻の数は推定で 10^{15} の桁になるということに非常に興味をそそられました。これは人間一人に対して蟻が数百万匹ということです。蟻の総生物量（バイオマス）は従って、人類の生物量を崩壊させるのに十分であり、蟻が人間より偉大な生態形を形成しているとも言えるのではないかと考えたりします。何故でしょうか。古典的考え方では蟻は、自動機械で同じ動きを何度も繰り返すのだと考えられていました。しかし、これは間違っているようです。蟻は環境に非常に“敏感”ですし、その行動は決定論と確率性とが見事に結びついているからあります。コミュニケーションが不十分な場合、社会のイマジネーションが促進されます。

蟻のコロニーが住んでいる環境はある程度時間的、空間的に予測できます。食糧事情について二つの極端な状況を比較してみましょう。あぶら虫のコロニーは長期的（4～5ヶ月）な食糧源であり、反対に鳥の死骸は予測し難い食糧源です。

あぶら虫を食糧源とする場合、自分達の巣からあぶら虫のグループまで一定の道ができ、このルートからはずれて散らばる蟻の数は非常に少ないので。このような構造はあぶら虫のグループの長期的寿命とコロニー内部の増幅メカニズムの相互作用の結果として生まれるものです。

一匹の蟻が鳥の死骸を見付けた場合、巣に帰ってこれを知らせますが、この場合は安定した構造は作られません。蟻同志のコミュニケーションは非常に不十分なもので、多くの蟻が巣と食糧との間のルートからはぐれ、一帯を行きあたりばったりに歩き回ることになります。

実際、行動とコミュニケーションの面に見られるこのでたらめさは順応的価値を持ち、組織的な食糧源利用と新しい食糧源開拓調査との最大限の調整を示すものです。

また一方、蟻のコロニーの反応として考えられることは、恒常性メカニズムによって外部の変動を弱めることです。この良い例が分業です。最近行われた実験で、一匹の蟻の働く可能性を、“働き者”的と“怠け者”的の蟻の比率も含めた多くの変数の函数でどの程度まで表わせるかを示したものをお簡単に紹介しましょう。

実験では、巣の移動の際それぞれの蟻が卵をどれだけ運ぶか、その数を調べています。対象コロニーは「合成コロニー」で、それぞれの蟻は非常に近い

関係にあります（兄弟姉妹、同じ分業グループのメンバー、同年齢など）。非常に同一性の高い集団であります。それでも定まった分業形態があり、“働き者”と“怠け者”的蟻を区別することができます。ここで“怠け者”的蟻だけを取り出してまた同じ実

験を行った場合、結果として怠け者のうちかなりの部分が働き者に変わります。（図8～11）

このことは、活動それ自体が遺伝的に決定されているのみならず、大きな“社会的”要素がそこにはあるということを示唆しているといえます。これは

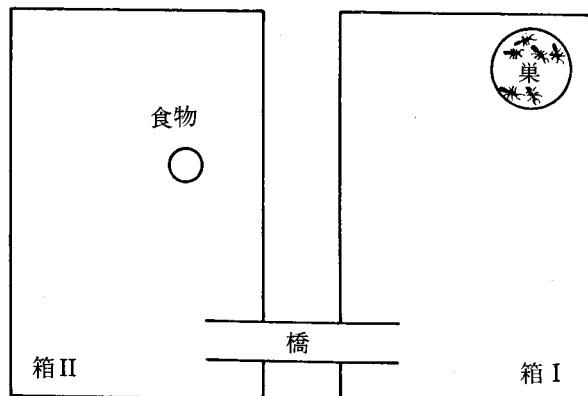


図8：巣移動実験の最初の状態。実験の前は蟻はすべて巣の中に住んでおり、巣全体のメンバー（卵と働き蟻）を箱IIの中に落とした時から実験が始まる。

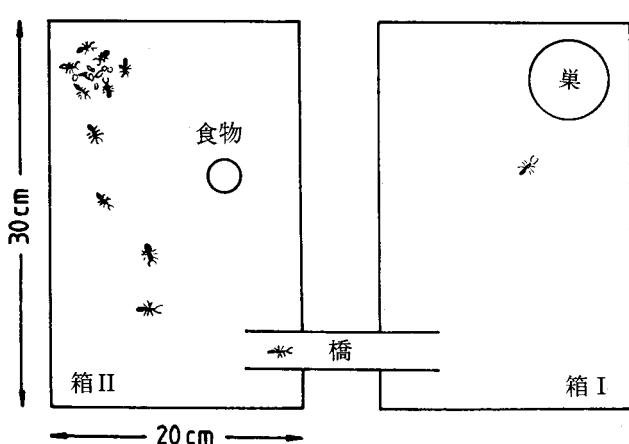


図9：調査段階の後、働き蟻が卵の移動を始める。2つの箱の間の橋を渡る時に卵を運んでいるかどうかチェックする。実験の終わりでは、卵はみな巣に戻される。各蟻の運んだ卵の数を合計する。

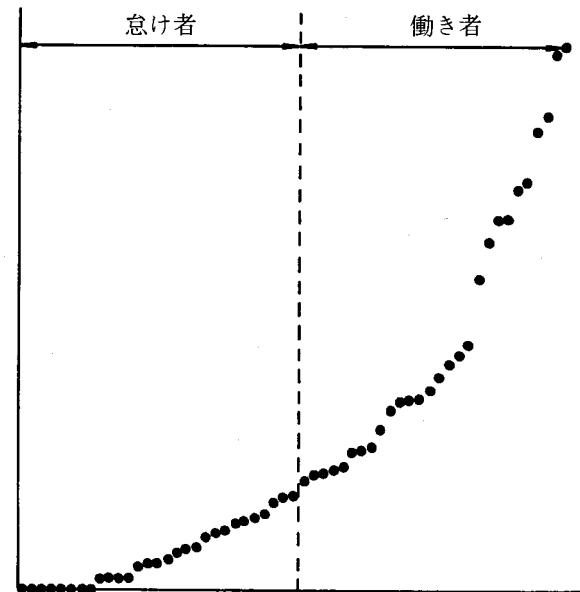


図10：働き蟻の卵運搬状況のランク付け。グラフでは、ごく少数の蟻が非常に働き者であることが分る。構成メンバーは雑多で、右半分の働き蟻（「働き者」）が全運動量の80%を受け持ち、左半分は20%分しか働いていない。

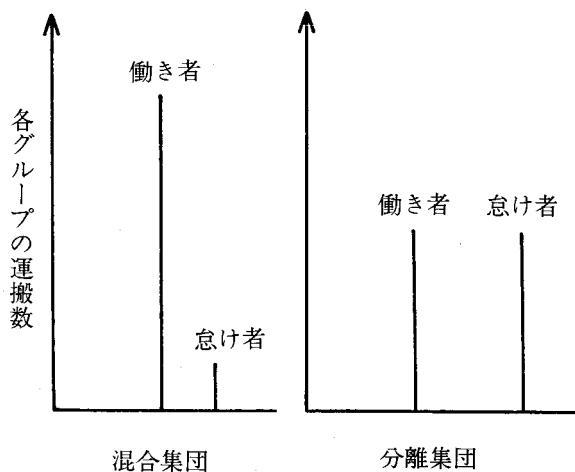


図11：「雑多」（図10の実験）及び「非同質」な蟻集団の活動分布。働き者と怠け者の蟻を分けると、その働き具合はある程度等しくなる。

人類学的にもあてはまるのではないかと思われます。ペロウソフ・ザボチンスキ反応で単純分子の非平衡構造と行動が驚くほどの変化を見せることを先にお話しましたが、構成単位が複雑性を高める時には動物や人間の社会にみられるように、遺伝学的決定によらずに極めて多様な行動形態が見られると考えて良いでしょう。ではこれから非常に興味深い、しかしながら非常に難しい問題に入ることに致しましょう。今までご紹介した概念を人間社会にあてはめてみるのです。

IV

複雑な社会技術システムの創造的自己進化の重要性については、現在広い関心が集まり、認識も高まっています。自己進化とは、社会技術体制の中で生成され得る構造的変化と多様化のプロセスと階級の出現のプロセスです。

既にお話申し上げました通り化学と物理学では人間社会の複雑性の根元にあるもののいくつかが既に明らかにされていますので、この点に注目することは大切なことだと思います。ただ、社会技術システムにも独自の特質があることは言うまでもありません。

ここで中心となる問題は、各々の独自の状況とその役割のルールに対して持っている考え方を反映させつつ、様々な協力メカニズムと競争メカニズムを介して相互作用を及ぼし合うアクターのグループで構成されるシステムの進化、ということです。

様々なアクターのグループはある限定された局所的知識にそって機能し、その行為の結果、システム全体が連続的に不安定になって構造が生まれます。また、システムを継続的に機能させるため、ルールと役割の一部変更が必要になります。

従って、社会技術体制の全体的特質は“マスター・プラン”の忠実な反映とはならず、むしろ单一のアクター或いはアクターのグループが必ずしも計画、意図、或いは希望しない方向にプロセスが進んでしまうことになります。

散逸的構造、特に不安定性と決定論的行動の複雑な相互作用を研究し、それで把握できる概念を使って、私達は都市、或いは数都市を含む地域などの複雑なシステムのコンピューター・モデルを作り出すことができます。このモデルは私がこれ迄お話した形の構造変化を生成させることのできるものです。

(図10~14)

個人の意志決定とイニシアティブが発揮されると、経済的、行動的不安定性が与えられた空間的構造の安定性を絶えず探査することになります。需要と供給の経済的実態がこのイニシアティブのどれを選択するかに作用し、強化するもの、捨てるものとを選び分けます。

成長、或いは衰退は時に純粹に量的である場合があり、その量的特質が不变のまま残り、場合によつては分岐点付近で都市構造を完全に塗り替え、新しい優れた面と新しい問題とを同時に持込むよう全く新しい流れが現われることがあります。

この事からわかるように、P・アレンらの都市成長のコンピューター・シミュレーションは、計画と政策分析に使われる通常の図形モデルとは異なり、空間的構造を作り出し、いつ空間的不安定性が生じ、構造的変化が現われるかの予測も行えるようになっています。この方法を用いれば、現在の段階では意思決定の前にごく短期的、直接的影響しか考えられないのに対し（もし考えられるとしてですが）、ある行為なり政策なりの長期的、全世界的影響を把握することができるのです。アレンのモデルには、土地利用も、また土地利用パターンと一貫性を持つ財、サービス、通勤者、エネルギーを運ぶ流れも盛り込まれますから、実際に起る都市化の様々な連続的段階をたった一つのシミュレーション・モデルを操作するだけで生成することができるのであります。

この節ではシミュレーションのいくつかを取り上げますが、その大部分はベルギーのブラッセルの特色と歴史に若干影響を与えた都市に関して行われたもので、点で表わされた六角形上に表示されます。点と点との間の距離はマトリックス d_{jj} で表わします。マトリックス d_{jj} はブラッセルの輸送システムを一つの参考にした輸送システムについて計算された数値であります。（図12）

図16に示されているように、これらのシミュレーションの当初の状況は格子状になっている中心点に殆どどの職と居住地が集中しているということです。しかし、原材料や第一次産品の供給地に近いということが大きな要素になっているある種の産業は、市街のすぐ外の運河沿いのより地価の安いところに立地しています。この状況はブラッセルの場合、大体1880年頃の状況にあたります。シミュレーションでは、その後の成長期に都市構造がどのように自発的に表われてくるかを示しています。

シミュレーション都市の全体的特性

	第1段階終了時	第2段階終了時	第3段階終了時
総雇用者数	729,600	669,500	674,300
有効居住者数	462,670	411,560	414,200
雇用係数	1.58	1.63	1.63
産業構造	25%	22%	22%
第三次産業構造	75%	78%	78%

これらシミュレーションでは、当初 ($t = 0$ から $t = 10$) 主に都市の外側に生じた工業製品の需要によって成長を見せた都市の場合を示しています。

(図13、14) このプロセスによって、良く知られている都市増殖が始まり、そのために第三次産業が拡大し始め、中には長期的性格を持つものもあり、都市居住者と通勤者の都市雇用が増加しました。この繁栄期 ($t = 10$ から $t = 20$) の後、工業製品の需要は落ちましたが、第三次産業のサービスと財の市場は残り、成長さえ見られました。この様なプロセスは、多くの西ヨーロッパの都市の歴史にはある程度はみられるものです (図14、15)。

重工業は、初め交通の便の最も良い北部で発展し始め、北部が余りに過密になってから中心部の南側に拡がっていきます。重工業製品に対する需要が減りますと、先ずこの南側の部分から工業が立ちのきます。軽工業地帯も初めは重工業地帯の近くにあったのですが、軽工業にはハイ・テクノロジー型産業を志向して進化する特色がありますので、東部方面に移転する工場が増え、最後には一番交通の便の良い高速道路のインターチェンジの周りの一点に集中してしまいます。産業の低迷期にも軽産業の雇用者数はごく僅かながら増え、都市の東部の一点に集中した形を保ちます。第三次産業は、全体的に交通の便が最も良く、有利な地点を占める都市中心部で急速に発展します。

$t = 5$ の点で飽和状態に達し、中心ビジネス地区 (CBD) の機能が周辺の点の第一リングにあふれ出るようになります。然し、この成長はそれまでに出来た地点の真東の点にどんどん集中し、この両地点は第二段階の間もその機能を大きく特殊化させてゆきます。第三次産業も初め僅かに中心部に表われるのですが、十分な市場が形成されれば直ちに都市周辺部に新しい商店街が出現します。然しこの変化は、こういう中心部が 5ヶ所できると安定し、第二段階ではこの 5ヶ所が生存を続け、新しいものは育ちません。その一つの原因是都市居住人口が減り、

一商店街当たりの確実な市場が減少するからです。都市全体に対する基礎サービスの普及には、人口と少い第三次商店街両者の分布状態が影響を与えます。居住者の内ブルーカラーに属する人は、主に運河沿いの三点に集中しますが、北部、中心部、南部もブルーカラー層の居住者の多い地域あります。第一段階が終了する頃には、輸送コストが相対的に安く済むため、ブルーカラー層が住居と仕事場とを遠く離すことができるようになります。

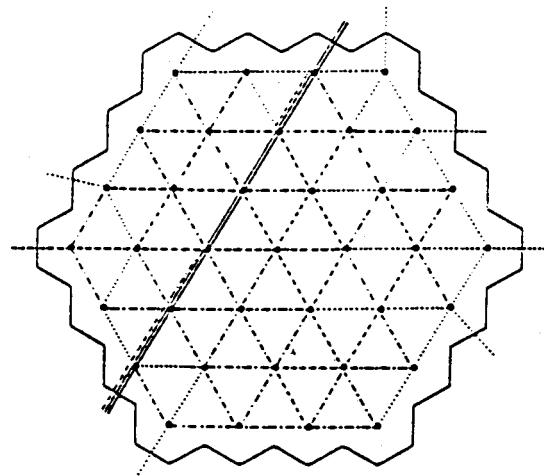
このため、ブルーカラー層が都市全体に拡がって住むようになり、通勤圏は都市の外側にまで拡がるようになります。これと同じ形をとって、第二段階では都市部郊外 37 の地点にホワイトカラーが居住し、通勤者となる傾向が出てきます。我々の社会の都市部でもホワイトカラーは既に外部周辺に居住し、都市全体に分散していますが、ブルーカラーが集中している地点は避けています。

このシミュレーション都市の進化の $t = 20$ の点から出発して、いくつかの異なった条件を与えて未来的の都市を想定するシナリオを試験してみることに致しましょう。図16と先に示した表は、パラメーターを変えずにシミュレーション時間を 10 単位以上動かした時 ($t = 30$) の都市の状態を示したものです。これから $t = 20$ の時の状態との差は極めて少ないという結論が得られます。

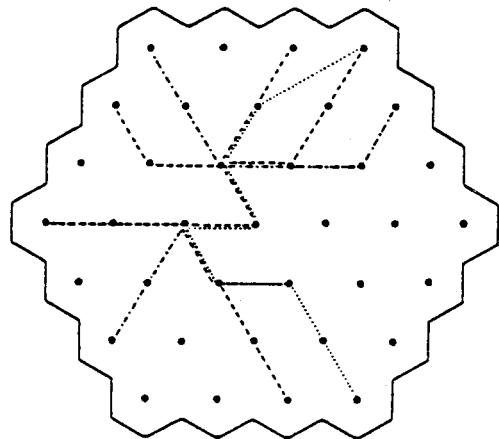
初めのシナリオは、公共輸送機関として都市を南北に縦貫する新しい地下鉄の建設に関するものです。モデルは $t = 20$ から $t = 30$ までで、地下鉄のあるものと構造のセッティングは $t = 30$ で地下鉄のない場合と比較されます。この交通網の改善には雇用数の 2.4 % 増、都市顧在居住者の 4.5% 増という、都市経済に対するメリットがあり、地下鉄のターミナル駅周辺地域を中心にブルーカラーの居住者の都市への舞い戻り (+5.4%) もあります (図17)。都市居住者の増加はサービスの需要増を意味しますし、ひいては第三次産業のサービスの分布変化も小規模ながら観察できるでしょう。基本的な小売サービスにこれが最も明瞭に現われるでしょう。

次のシナリオは、図18にまとめましたが、少ない商店街に投資を行った場合を想定したものです。このシミュレーションは投資規模、空間的位置、正確な投資のタイミングを示していますが、図18でお解りになる様に、 $t = 10$ の時に都市の南東の一地点に 40 単位の投資を行えば商店街として成功が望めます。しかし、それよりあと $t = 20$ の時に全く同じ投資

個人的
交通手段

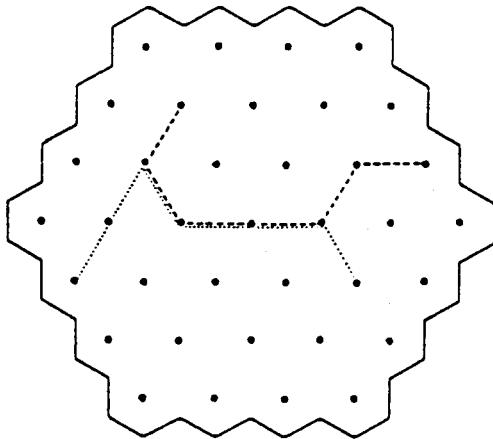
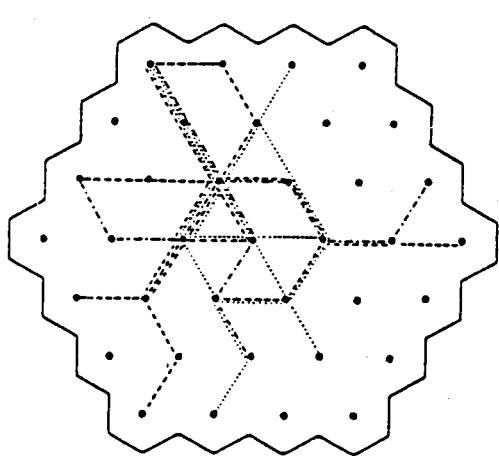


公的
輸送



電車・長距離バス

市バス



地下鉄

市電

図12：輸送ネットワーク

を行ったとしても、人口は既に既存のショッピング・ゾーンに吸収されており、十分な市場がないために失敗に終わります。投資を50単位にすれば、 $t = 20$ の時に着手しても成功します。或いは40単位の投資を $t = 20$ の時に使っても、在来の商店街の北や東の、進出が遅れている地域を選べば、7つ目の周辺中心部が出現することになります。

遠隔通信機器によって CBD 機能の集中化の必要性は大巾に減るありますから、次に CBD の位置に与える遠隔通信機器の影響のシナリオを試してみたいと思います。図19は CBD のサービス $P^{2.2}$ の協力のパラメータの異なる数値に対してこれを明らかにし、極端な例 ($P^{2.2} = 0.0011$) で CBD が完全に崩壊する様を描きました。

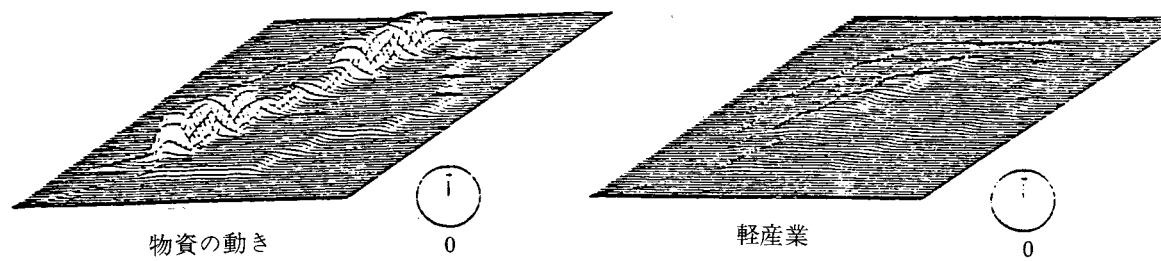
最後に取り上げるシナリオは、空間的構造そのものではなく空間的構造を作り出す一般的メカニズムを強調しましたので、この種モデルの有効性を示すには最も重要なものと言えましょう。アレンのモデルは同じ都市の量的シミュレーション（パラメータは全部同じ、当初の条件とネットワークも同じです）ですが、この都市を南北に走る運河の代りに、丘陵地帯と同じ位置に置いたものです。産業にとって丘陵地帯は交通の便の悪さという好ましからざる条件があります。シミュレーションは $t = 0$ から $t = 10$ まで行われていますが、都市の構造（図20）は、参考構造の $t = 10$ の時のものに比べて完全な様変わりを見せ、丘陵地帯には工場がありませんが、地価が安く、人口密度も最低の都市周辺部には拡がっています。ホワイトカラー層は工場地帯や人口過密の地域に住むのを避けることができますから、こういう人達にとって魅力的な都市の丘陵地帯に住むようになっているのです。居住パターンとしては都市北部が好まれるので、第三次産業も丘陵地域に近い北部に市場を開拓することになります。

すなわち、こうしたコンピューターのモデルは、例えば町といった複雑な構造がどのようにして成長していくのか、を非常に詳しく調べることができます。こうしたコンピューター・モデルの実際上の重要性については、まだ今後詳しく評価していかねばなりません。こうしたモデルに基いて予測を行うには、様々な変数（パラメーター）の値を組み込んでいかねばならず、これには過去の成長過程を調べていくしかありません。過去を理解してこそ初めて将来を予測することができます。このアプローチには、強力な自然主義的要素があります。この要素

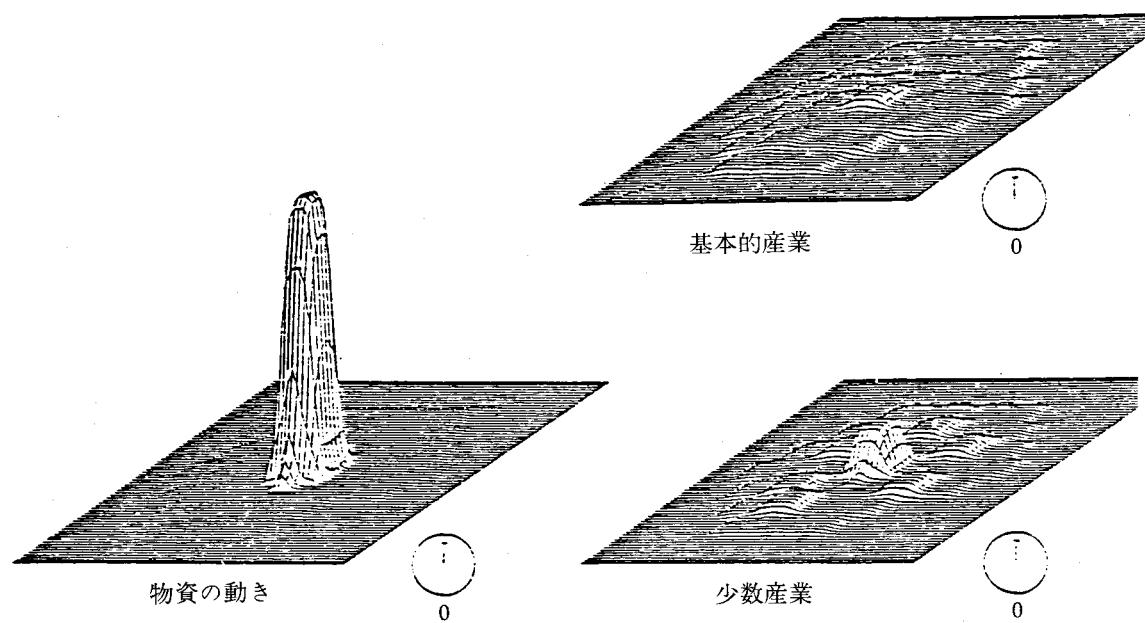
を含むした具体的な研究の実例が現在表われてきています。アメリカにおける地域間展開のシミュレーションもその一例として挙げられます。

それでは人間と自然との対話の、より一般的な側面に話を戻しましょう。

産業



第三次産業



居住者

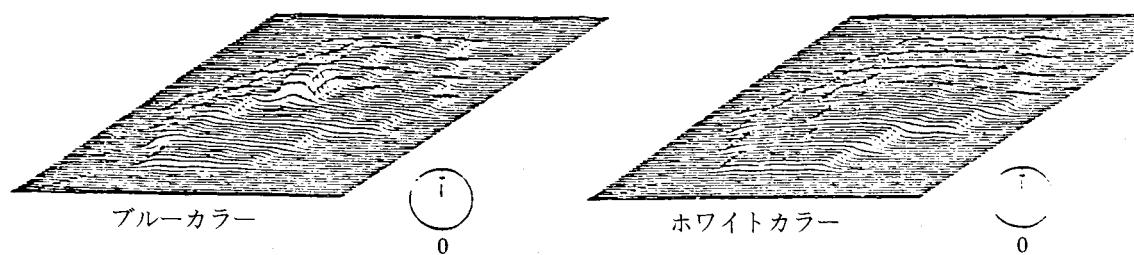
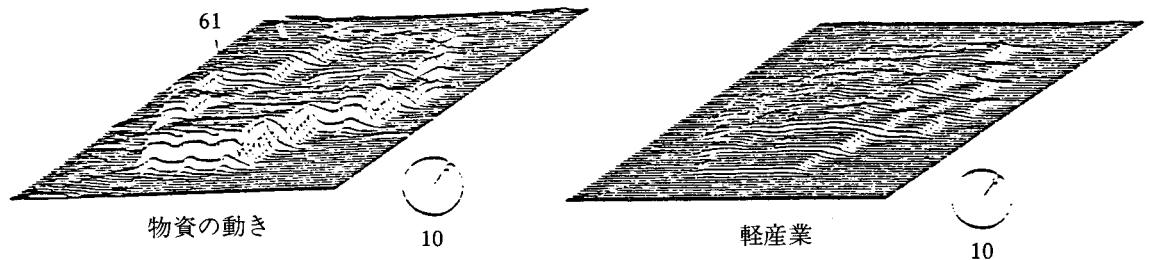
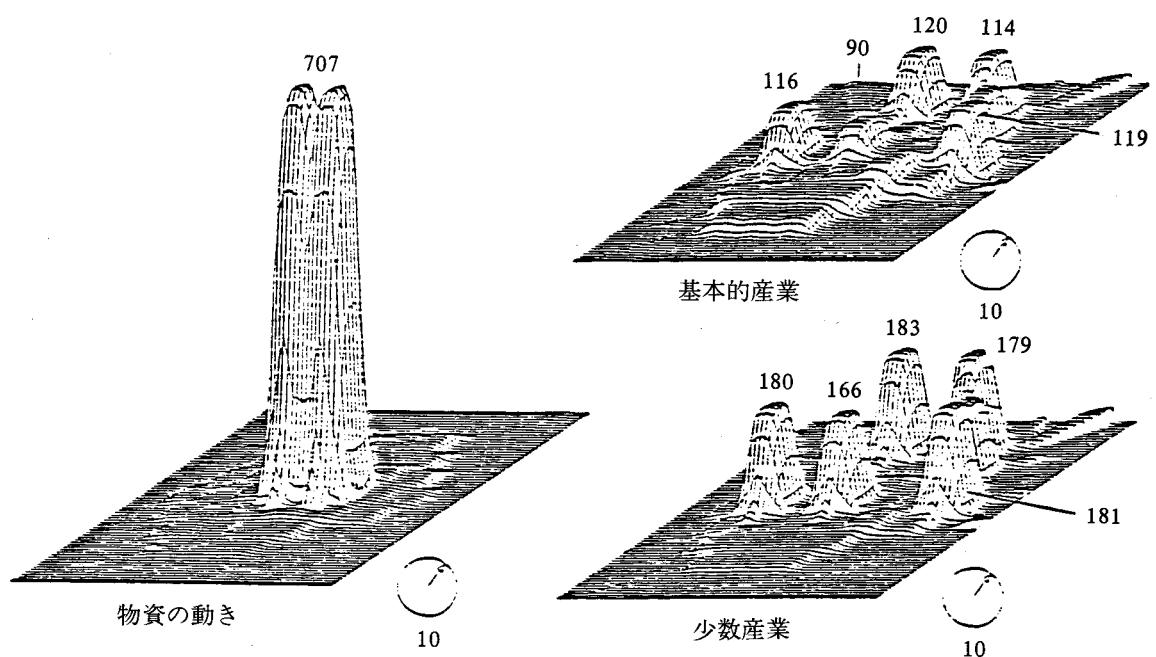


図13：7つの変数の当初分布：シミュレーションの初めの参照構造

産業



第三次産業



居住者

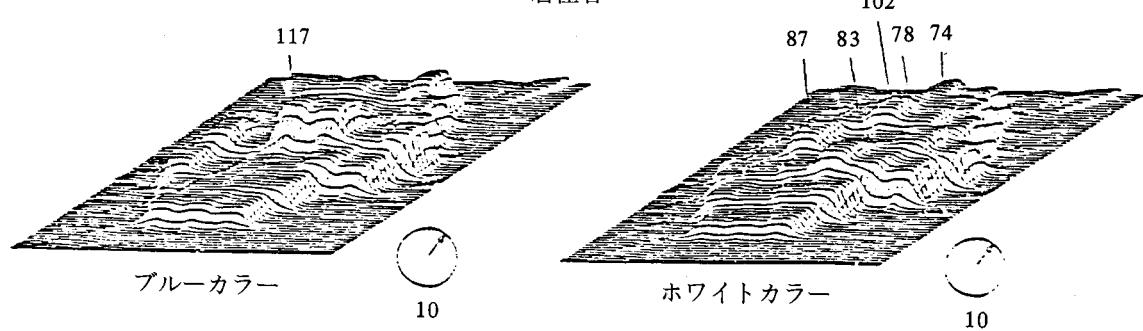


図14: $T = 10$ (第1段階終了時) に於ける参照構造

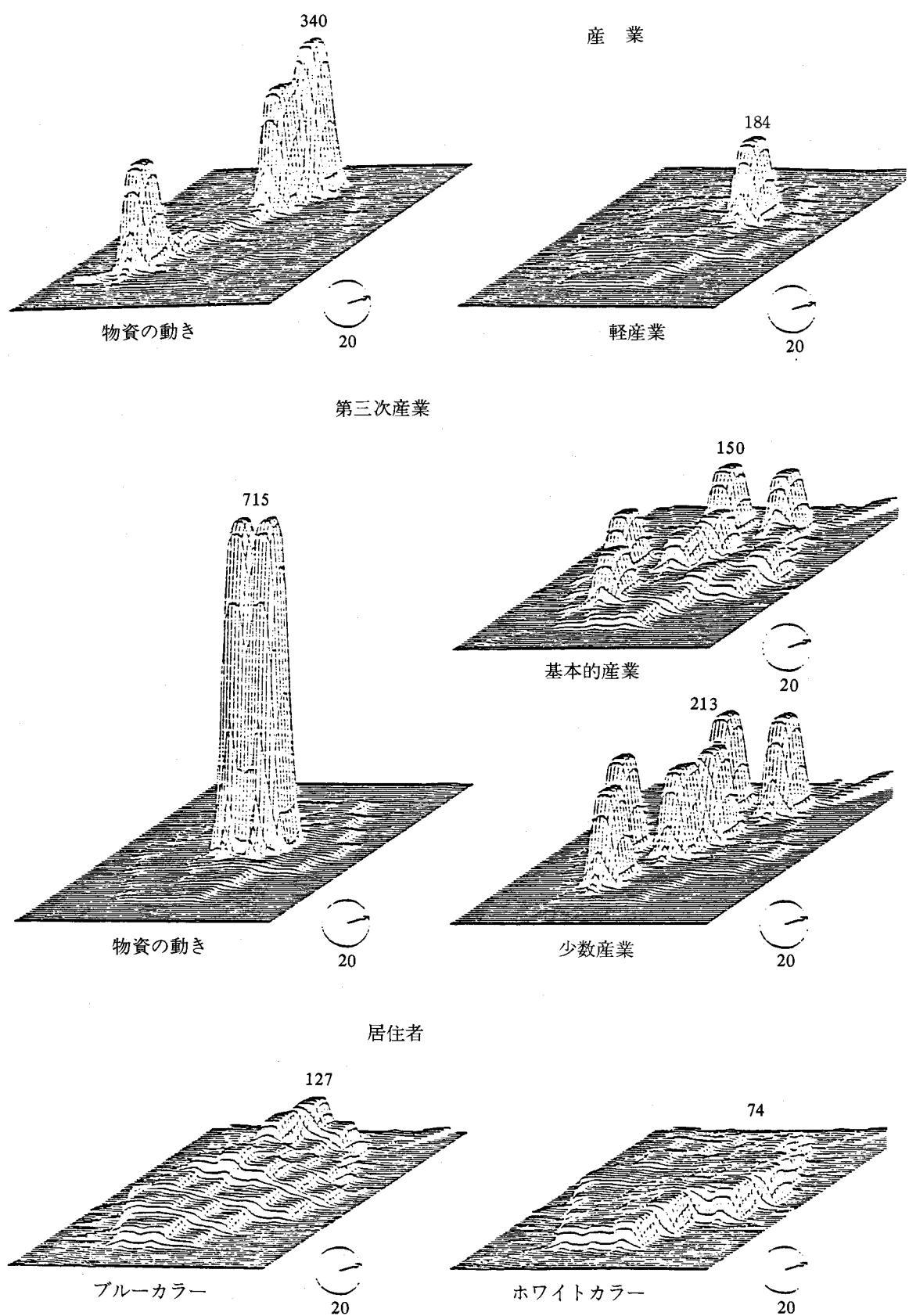


図15：T=20（第2段階終了時）に於ける参照構造

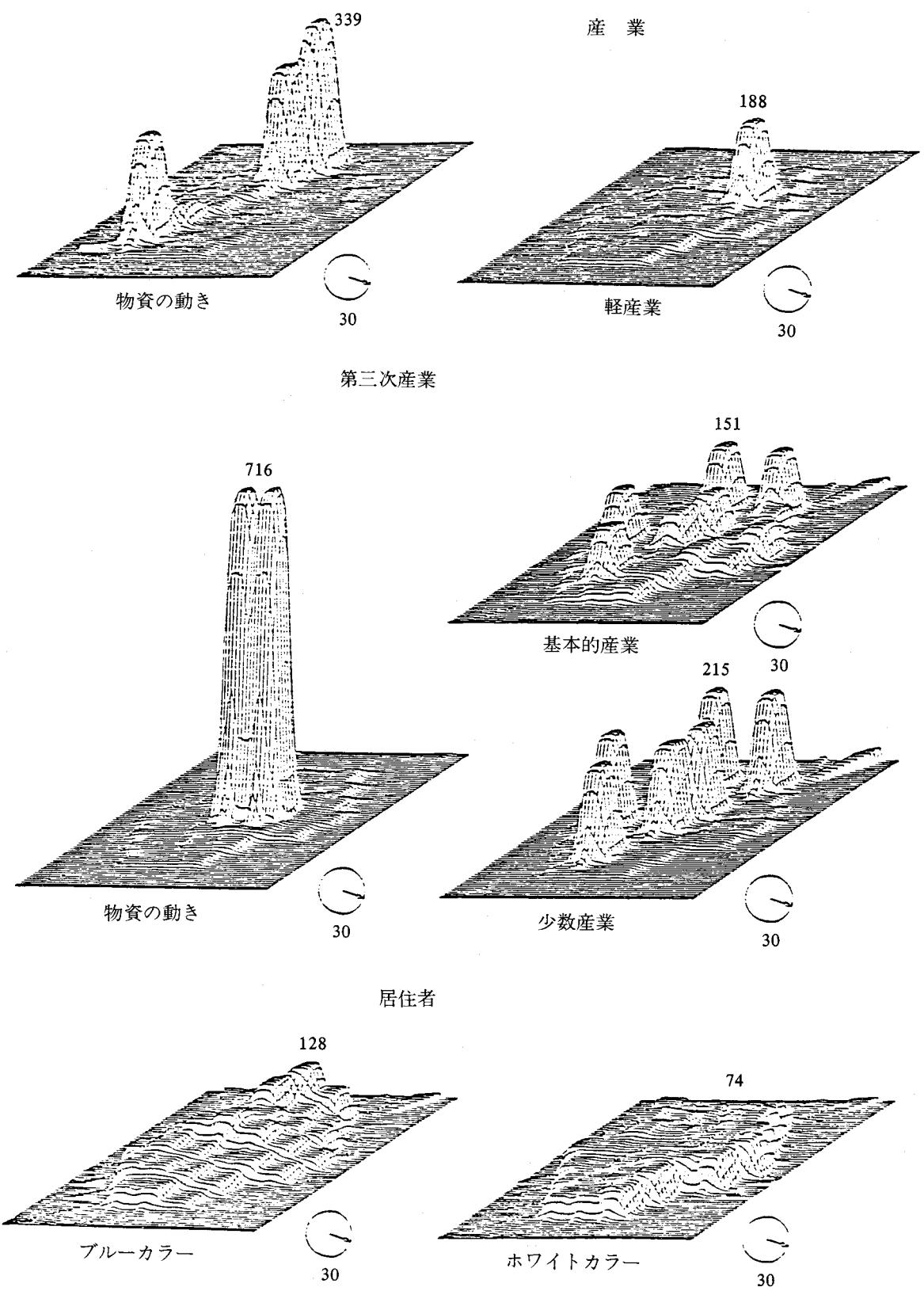


図16：T = 30（第3段階終了時）に於ける参照構造

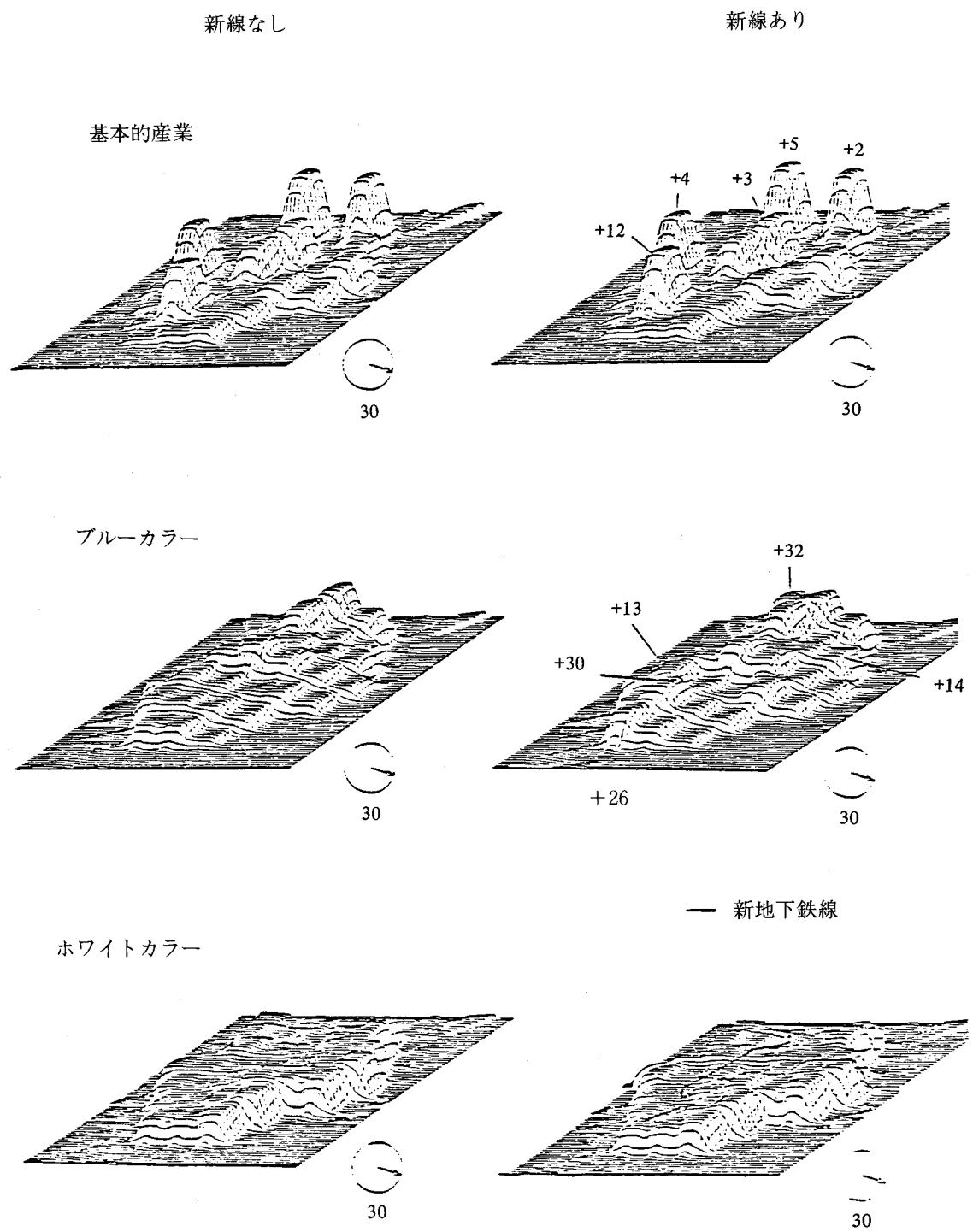


図17：地下鉄線（市街南北縦貫）建設の影響予想

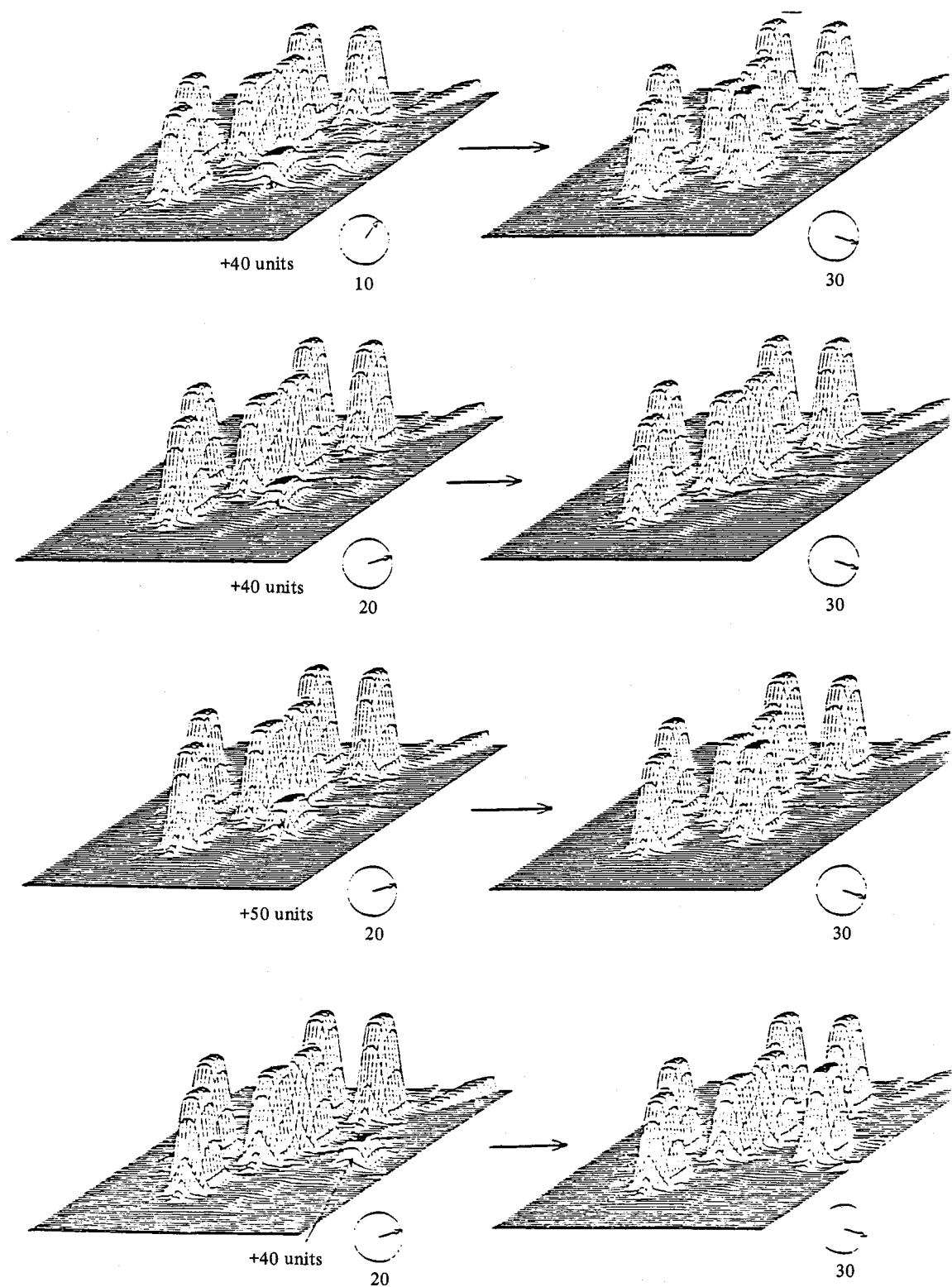


図18：ショッピングセンターの進出。投資の規模、時期、場所。

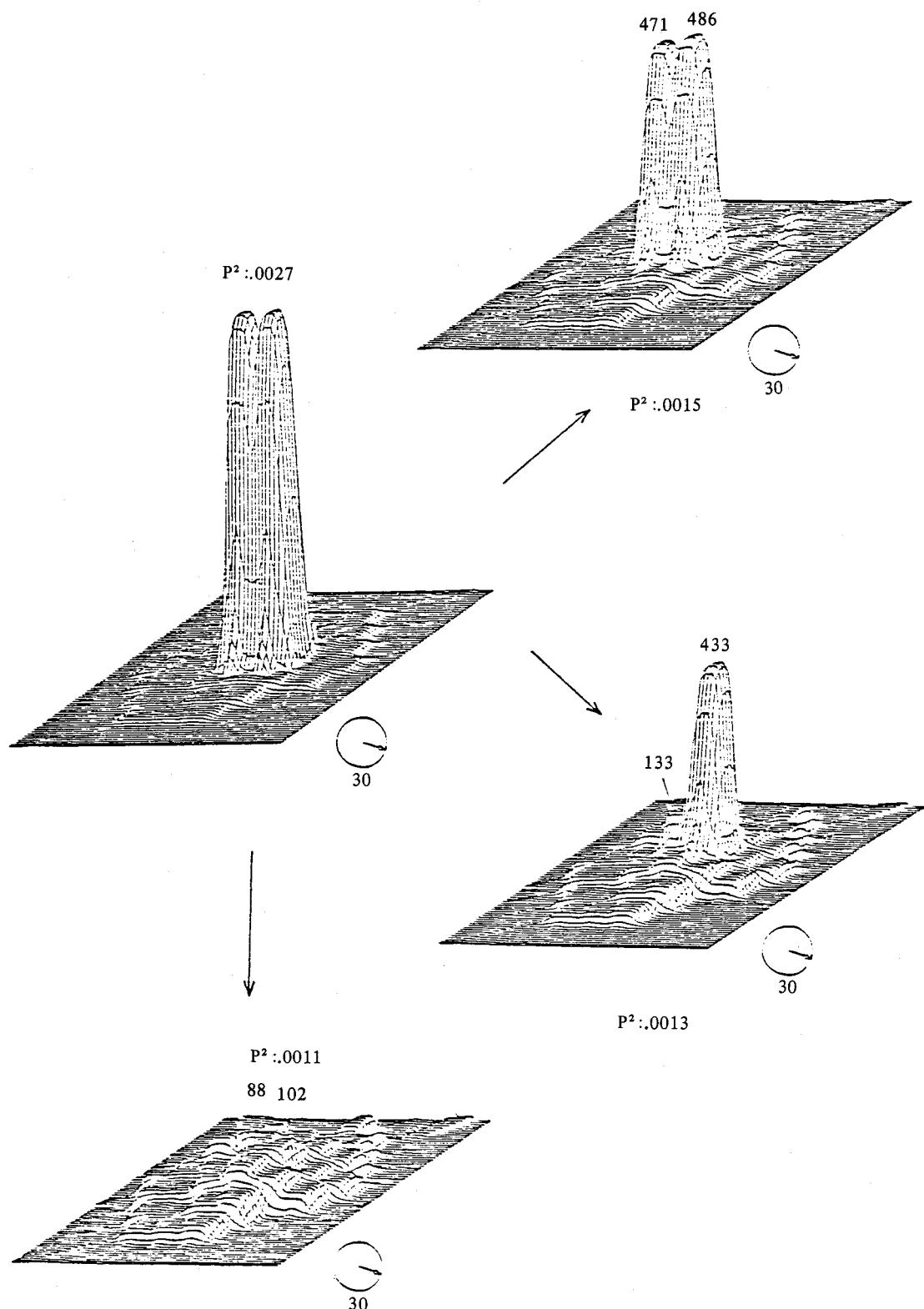
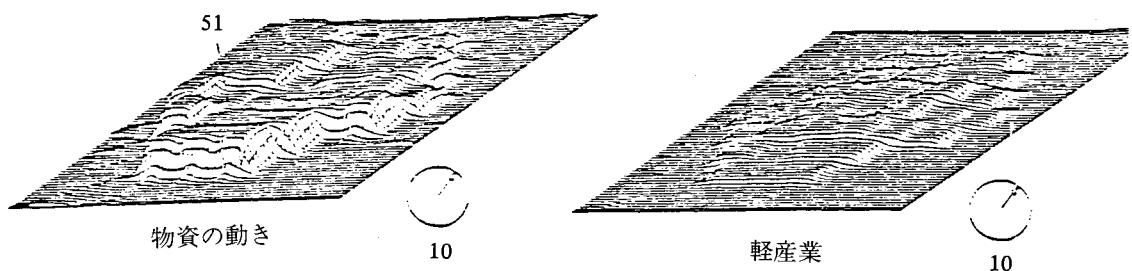
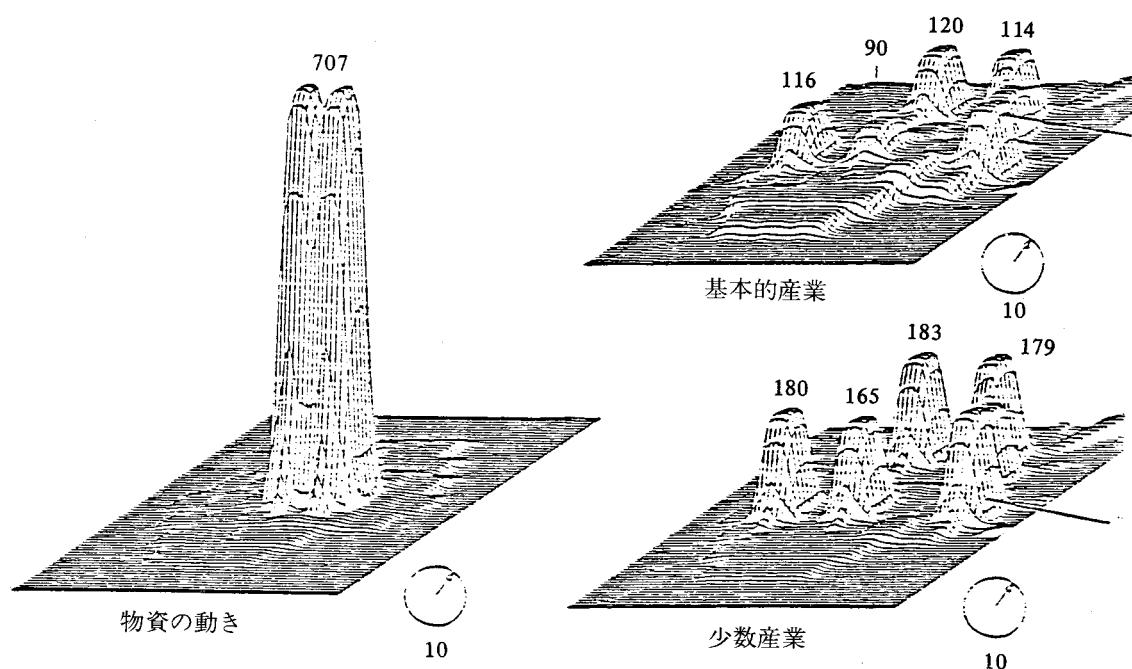


図19：遠隔通信機器の使用拡大（集合の必要性が減る）によるCBDの未来予測。

産業



第三次産業



居住者

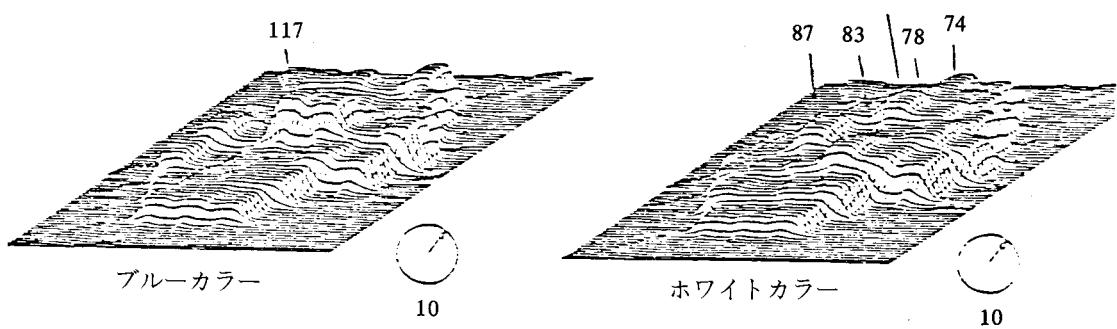


図20：運河の代わりに山があった場合の職及び居住地の分布（T=10）

V

では結論に入ることに致しましょう。古典的な科学は、二元論を基礎にしています。一面では世界を巨大な自動機械とみなし、また他面では人間をその描く自然の外に置いています。明らかに、この考え方方は非常にもろいものでありまして、どうやってこの特典を維持することができるでしょうか。人間は何か神のような存在でしょうか。あるいは人間も単なる機械に過ぎず、自分が機械であるという事実も知らされていない存在なのでしょうか？。このようなもろさは、ある種の不安のもとになります。1984年が近付いています。これはまたオーウェルの描いた世界的に有名なユートピアのタイトルでもあります。ここで我々は、しばしばアインシュタインの言ったように、時間が幻想となる社会の青写真を見るわけです。スローガンはこうです。「過去を制する者は未来を制し、現在を制する者は過去を制する。」制することは、抑圧を通してのみ可能です。本が、新聞が書き換えられ、歴史は意味のない変動へと還元されます。

オーウェルの小説では、大裁判官のオブライエンが犠牲者を拷問しながら、彼の心の外には真実はないのだ、と繰り返して言います。奇妙なことに、力に焦点をあわせたこの物質主義の社会が、最も純粹な哲学的理義の必要条件にぴったり一致しているのです。

同じような不安はまたハクスリーの“Brave New World”にも見られます。ハクスリーの没後20年が過ぎましたがこの小説の力強さはいまも変わりません。未来の社会は虫の社会のパターンをなぞっていくのでしょうか。忘れてはならない点ですが、虫の社会は一般に思われているよりも決定論的性格はずっと弱いのです。動物の行動に関する最近の研究は、いわゆる「個人のアイデンティティの喪失」という悪夢から我々を解放してくれます。

我々の周囲を囲む自然に対する新しい展望は、我々の内部に我々が見ているものと相容れ易い様相を示すようになっています。我々と自然との関係、特に学習や測定の問題は、不安定性や不可逆性といったものをも包含したこの観点からのみ意味あるものとなるのです。明日というものが今日手に入れられるとしたら、学習のプロセスの意味は何なのでしょうか。

今日、近代科学というものの持つメッセージは、以前よりはるかによりユニバーサルな性格を持つも

のになっていると思われます。また他の文化的伝統にとっても受け容れ易いものになっています。いま人間と自然の間に見ることのできる調和は、中国や日本の自然に対するビジョンでもあったことが再発見されています。

本田財団は、生活の中の技術ということでエコ・テクノロジーというものを一貫して強調してきました。これまでお話ししてきました近代科学の動向といったものは、科学と哲学の一体化の方向を示すものであり、伝統的にこの二つを異った文化と見る見方を超えていくものであります。

現世における存在が取り得る最高の形は「ケアリング」(ハイデガーがいうところの Sorge) であります。このケアリングの最も驚くべき例が本田財団の活動である、と申せましょう。この機会に本田宗一郎氏と本田財団の長期的な、また実り多い活動をお祈り致したいと思います。

この草稿作成にあたって御協力を頂いた
Serge Pahaut 氏と Pierre Kinet 氏に
心より感謝申し上げます。

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 電気通信大学教授 合田周平	昭53.5	No.23 西ドイツから見た日本 電気通信大学教授 西尾幹二	昭56.6
No.2 異文化間のコミュニケーションの問題をめぐって 東京大学教授 公文俊平	昭53.6	No.24 中国の現状と将来 東京外国语大学教授 中嶋嶺雄	昭56.9
No.3 生産の時代から交流の時代へ 東京大学教授 木村尚三郎	昭53.8	No.25 アメリカ人から見た日本及び日本式ビジネス オハイオ州立大学教授 ブラッドレイ・リチャードソン	昭56.10
No.4 語り言葉としての日本語 劇団四季主宰 浅利慶太	昭53.10	No.26 人々のニーズに効果的に応える技術 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	昭57.1
No.5 コミュニケーション技術の未来 電気通信科学財団理事長 白根禮吉	昭54.3	No.27 ライフサイエンス ㈱三菱化成生命科学研究所人間自然研究部長 中村桂子	昭57.3
No.6 「ディスカバリーズ国際シンポジウム パリ1978」の報告 電気通信大学教授 合田周平	昭54.4	No.28 「鍊金術 昔と今」 理化学研究所地球化学研究室 島 誠	昭57.4
No.7 科学は進歩するのか変化するのか 東京大学助教授 村上陽一郎	昭54.4	No.29 「産業用ロボットに対する意見」 東京工業大学教授 森 政弘	昭57.7
No.8 ヨーロッパから見た日本 N H K解説委員室主幹 山室英男	昭54.5	No.30 「腕に技能をもった人材育成」 労働省職業訓練局海外技術協力室長 木全ミツ	昭57.7
No.9 最近の国際政治における問題について 京都大学教授 高坂正堯	昭54.6	No.31 「日本の研究開発」 総合研究開発機構(NIRA)理事長 下河辺 淳	昭57.10
No.10 分散型システムについて 東京大学教授 石井威望	昭54.9	No.32 「自由経済下での技術者の役割」 ケンブリッジ大学名誉教授 ジョン F. コールズ	昭57.12
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 電気通信大学教授 合田周平	昭54.11	No.33 「日本人と西洋人」 東京大学文学部教授 高階秀爾	昭58.1
No.12 公共政策形成の問題点 埼玉大学教授 吉村 融	昭55.1	No.34 「ディスカバリーズ国際シンポジウム コロンバスオハイオ1982」報告 電気通信大学教授 合田周平	昭58.2
No.13 医学と工学の対話 東京大学教授 澤美和彦	昭55.1	No.35 「エネルギーと環境」 横浜国立大学環境科学研究センター教授 田川博章	昭58.4
No.14 心の問題と工学 東京工業大学教授 寺野寿郎	昭55.2	No.36 「第3世代の建築」 ㈱菊竹清訓建築設計事務所主宰 菊竹清訓	昭58.7
No.15 最近の国際情勢から N H K解説委員室主幹 山室英男	昭55.4	No.37 「日本における技術教育の実態と計画」 東京工業大学名誉教授 斎藤進六	昭58.8
No.16 コミュニケーション技術とその技術の進歩 M I T教授 イシェル・デ・ソラ・ブルー	昭55.5	No.38 「大規模時代の終り—産業社会の地殻変動」 専修大学経済学部教授 中村秀一郎	昭58.8
No.17 寿命 東京大学教授 古川俊之	昭55.5	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 電気通信大学教授 合田周平	昭58.9
No.18 日本に対する肯定と否定 東京大学教授 江村 明	昭55.7	No.40 日本人と木の文化 千葉大学名誉教授・千葉工業大学教授 小原二郎	昭58.10
No.19 自動車事故回避のノウハウ 成蹊大学教授 江守一郎	昭55.10	No.41 「人間と自然との新しい対話」 プラッセル自由大学教授 イリヤ・プリゴジン	昭59.2
No.20 '80年代—国際経済の課題 日本短波放送専務取締役 小島章伸	昭55.11		
No.21 技術と文化 I V A事務総長 グナー・ハンベリュース	昭55.12		
No.22 明治におけるエコ・テクノロジー 山本書店主 山本七平	昭56.5		