

HOF 01-069

本田財団レポートNo.69

「自然界におけるゆらぎ、
フラクタルおよび秩序」

東京大学理学部教授 鈴木 増雄

講師略歴

鈴木 増雄 (すずき ますお)

昭和12年3月3日生まれ

東京大学理学部教授。

経歴:	昭和36年3月 東京大学理学部物理学科卒業
	昭和41年3月 東京大学数物系大学院博士課程卒業、理学博士
	昭和44年9月 米国コーネル大学客員研究員
	～昭和45年8月
	昭和45年9月 オランダ、ユトレヒト大学客員教授
	～昭和46年3月
	昭和52年5月～11月 カナダのアルバータ大学及び米国ハーバード大学客員教授
	昭和58年3月～ 東京大学理学部教授
委員:	昭和61年4月 文部省科学官
	～平成2年3月
	昭和63年8月～ 仁科財団評議員
	平成3年4月～ 本田財団評議員
賞:	昭和53年12月 松永賞 受賞
	昭和61年12月 仁科記念賞 受賞
	昭和62年2月 井上学術賞 受賞
	平成1年3月 東レ科学技術賞 受賞

現在の最大の関心事は、ゆらぎや、*フラクタルで特徴付けられる相転移の一般論を構築し、高温超伝導等のエキゾティックな相転移のメカニズムを解明することであり、また、自然現象を混沌から秩序への相転移という視点に立って統一的に見ることにあります。

*フラクタル (fractal): リアス式海岸、木の枝分かれや雲の表面のようにきわめて不規則で半端な形をフラクタルという。そのようなフラクタル図形の次元は整数ではなく半端な値をもつ。1.2次元のリアス式海岸という言い方ができる。一般に、自然界にはフラクタルな構造をしているものが多い。

このレポートは、平成3年5月28日パレス・ホテルにおいて行われた第59回本田財団懇談会の講演の要旨をまとめたものです。

目 次

はじめに.....	4
1. 科学と技術との総合.....	5
2. 無秩序と秩序.....	6
3. マンダラにおける繰り返し構造.....	10
4. フラクタルについて	11
5. 相転移のメカニズム.....	12
6. 相転移と「ゆらぎ」	13
7. 自然界の縞模様.....	18
おわりに.....	19

はじめに

本日は、本田財団の懇談会でお話をする機会を与えられまして、まことに光栄でございます。

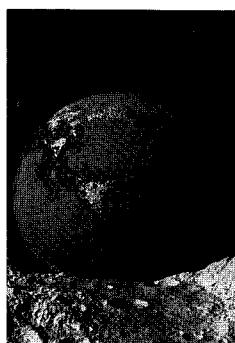
理論物理学といいますと、なにか、難解な取っ付きにくい話と思われ敬遠されがちですけれども、今日は、非常に分かりやすく絵解きでお話したいと思っておりますので、是非、楽しんでいただきたいと思います。懇談会の常連の皆さんに、私の専門の話を聴いていただいたことが今までありませんでしたので、これは非常によい機会だと喜んでおります。先程、仲井さんのご紹介にありましたように、理論物理学では普段大いに使っております数式を、今回は一切使わないでということですので、こちらの伝えたいところと皆さんのが受け取ることが違うかもしれません。しかし、それは、私の話から新しいインスピレーションが皆さんにひらめく手助けになるかもしれませんので、かえってプラスになるのではないかと思います。

明治時代に外国の文明を取り入れるとき翻訳にかなりの誤訳があって、そのためにかえって、日本人がオリジナルなことを大分見付けたということもあるそうですので、情報伝達というものは必ずしも100%こちらの思いどおりのものが伝わらなくてもよいと思います。今日は、絵画などの美術品をひきあいにしてお話をしたいと思っております。それらは、物理の内容をある点では比喩的に表現しているわけですが、皆さんができる受取るかは人によって違うと思います。後のパーティーの席で、皆さんからご感想を聞いて、どの位くらい違っているか知るのが楽しみです。(笑い)



1. 科学と技術との総合

最初に、本田財団のキーワードの一つである「エコ・テクノロジー」に関連して、最初のスライドをお見せしたい。



(スライド1)

これは地球の美しさと月のクレーターとを対比してマンデルブローが描いたものです。エコロジーとテクノロジーとを総合した「エコ・テクノロジー」という概念を、本田財団では非常に強調しておられます。この絵は、その重要性を連想させます。ところで、この絵にある月のクレーターはフランタルな構造をしており、今日の話のテーマとも絡めて、最初の絵として興味があるのではないかと思い、お見せしている次第です。

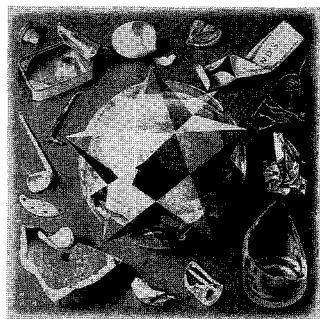
科学と技術との総合ということが最近呼ばれておりますし、また、科学の基礎的な発見がありますと、それが技術の分野に取り入

れられるまでの時間が、ますます短かくなってきております。例えば、最近の例では高温超伝導が発見されるとすぐにマスコミで騒がれ、そして、それを産業界では技術化しようとして、しのぎを削っているようなわけでありまして、すでに、サイエンスとテクノロジーの一体化という時代になっているかと思います。

私の今日の話はサイエンスの中でも、非常に基礎的な分野のお話でありまして、科学の方法論に関連するテーマです。従って、拡張解釈して頂ければ、それは他の分野にも役に立つのではないかと期待しております。

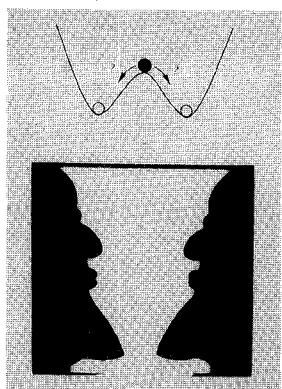
今日ここでお話しするに当って、どういう題材でどんな順序で話をしたらよいかと、いろいろ思案したのですが、私の恩師の統計力学の世界的な権威の久保先生もいらっしゃるし、また、文科系の方も相当いらっしゃるという、非常に幅の広いスペクトルをもった皆さんの前でお話をるので、専門家にも一般の方にも中途半端な内容になるかもしれません、ご了承いただきたい。

2. 無秩序と秩序



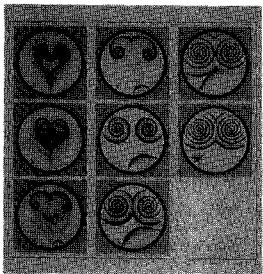
(スライド2)

これは有名なオランダの画家、エッシャーの絵から撮ったものです。「混沌と秩序」という題になっていたかと思います。この絵は、回りが混沌としている状態を表現し、中が非常にきれいな秩序を表しています。私が20数年前オランダ滞在中に、エッシャーの本が出て、そのユニークさにショックを受けた経験がございます。



(スライド3)

この絵をじっと見ていただきますと、今日の話のテーマの一つの側面がご理解いただけるかと思います。これは、ドイツのハーケンの書いたシネジエテックスの本から借用したものです。じっと見ていますと人によっては2人の顔に見えたり、あるいは白い所をじっと見ると、つぼに見えたりというわけで、この絵は非常に不安定な感じを与えます。不安定というのは、一瞬白い方に目がいくか黒い方に目がいくかによって絵から受ける印象がガラッと変わるということです。従って、話を抽象化しますと、皆さんを不安定な位置に置いたことになります。つぼに見えるか、2人の顔に見えるかは、最初のちょっとした視線の違い、いわば「ゆらぎ」で大きく違ってきます。一般に不安定な状態ではそういう「ゆらぎ」が非常に重要な働きをするということの、これは一つの例になっています。

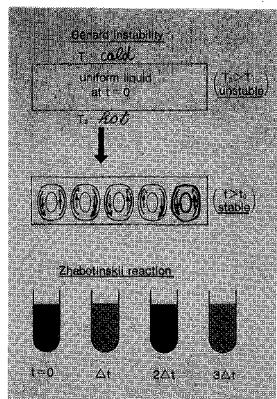


(スライド4)

この図もファンタスティックですが、これは、本田賞を受賞したベルギーのプリゴジンの本「From Being to Becoming」という、野心的な本から借用したもので、化学反応の例です。これは一つ一つがシャーレで、その中で化学反応を起し、最初、非常に混沌とした状態（左上）が、いつの間にか秩序の芽ができる、その芽のところからスパイダルな、きれいな化学反応の波が発生する。

これは非常に重要な化学反応でして、乱れた状態から「ゆらぎ」として発生したものが、やがては秩序に変っていく、そういう典型的な面白い例です。

どのような時間に、秩序がはっきりと現れてくるかという、秩序発生の時間、すなわちオンセット時間がどのような条件によって決まるかということも、理論物理学の重要な研究対象です。



(スライド5)

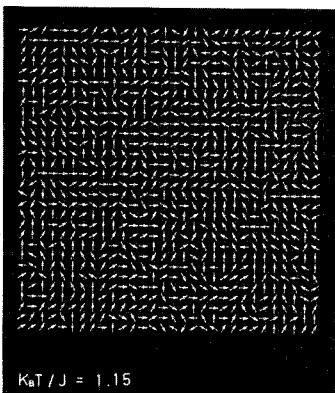
これも、不安定な状態から「ゆらぎ」を経由して秩序ができていく例を模式的に描いたものです。これは、流体のベナール対流というものでして、通常の場合とは逆に上側を冷やしておき、下側を熱くしておきますと、非常に不安定な流体の状態となります。すると、もやもやとした状態が途中の時間の領域で起り、やがて、充分時間が経ちますと、このようなきれいな対流の状態が現れます。

(スライド5の下側の図)

これもやはり化学反応の例ですが、きれいな時間的な秩序ができます。これは時計の役割をするわけです。このように秩序にも、空間的な秩序と時間的な秩序があります。

この図では、一つ一つの矢印が鉄やニッケルの中の小磁石を表していると考えて頂きたい。これは、賭博で有名なモンテカルロという地名に由来するモンテカルロ法という方法で、すなわち、コンピュータの中で、サイコロを振って一つ一つの小磁石がどんな方向を向くかということを、数値実験的に決めたものです。もう少し詳しくその原理を申しますと、この隣同士の矢印は、できるだけ仲良く同じ向きをとろうとするような規則を与えて、全体としてどんな振舞いをするかを調べる。そういう力だけでは、もちろん、全部揃った状態

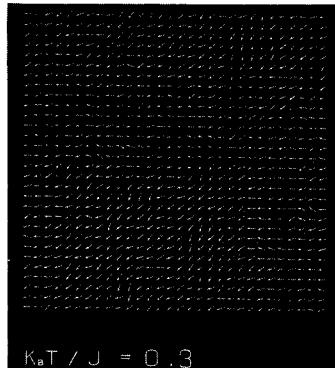
が実現してしまうわけですが、現実には熱的な「ゆらぎ」があり、亂れが起ります。その乱れの効果と、隣り同士お互いに同じ向きをとろうとする協力的な力と



(スライド6)

が実現してしまうわけですが、現実には熱的な「ゆらぎ」があり、乱れが起ります。その乱れの効果と、隣り同士お互いに同じ向きをとろうとする協力的な力と

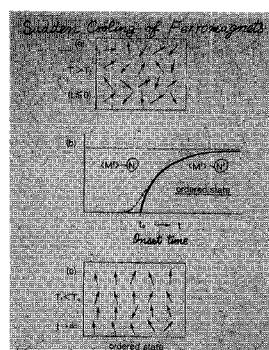
の二つの相反する力のきつこうにより、秩序ができる温度より高い温度にしますとこのような乱れた状態が現れます。従って、矢印の向きを全部足し合わせますとほとんど打ち消しあってしまいます。従って、この状態は永久磁石にならない。鉄やニッケルは高い温度の状態では永久磁石の性質を持たないのです。



(スライド7)

ところが、温度を下げていきましたと、ほとんどが同じある方向を向いてしまいます。これは、小磁石の間に働く力が強いために、熱的な、エントロピーの効果よりも、協力的な力の効果の方が勝ってしまうために、ほとんどがある方向を向いているわけでありまして、こういう状態が普通に使われる強磁性の状態であります。この磁石の性質が、最近のエレクトロニクスでは実にいろんなところで使われております。テープの磁気記録等は、すべてこういう強磁性の性質を使っているわけです。

そこで、高い温度から低い温度に下がっていくときには、乱れた「ゆらぎ」の状態から秩序のある状態にどのように変っていくか、それをミクロに理論的に理解することが、理論物理学、特に私の専門の統計物理学の基本的なテーマの一つであります。

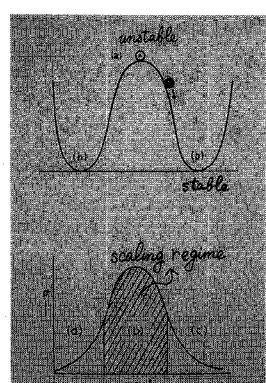


(スライド8)

磁石の例をもう少しまとめてみましょう。これは乱れた状態から秩序のある状態への変化を表しています。真中の図では、横軸に時間をとり縦にその小磁石の向きを平均化して書いてあります。ある時間（オンセット時間）のところまでは平均すると零で、強磁性を示さない。すなわち、常磁性の状態です。オンセット時間のところから、少しづつ磁性を持ち始める。その変化の様子を描くと図のようになります。従って、無秩序状態と秩序状態の境い目のところで相転移を起しているという言い方もできるかと思います。

(スライド9の上側の図)

今迄のものを更に抽象的にまとめてみましょう。これは先程のハーケンの図にあったのと同じものであります。この図は、実は私が1976年に書いたオリジナルな論文の図からコピーしたものです。その後、プリゴジンとかハーケン等が、この図をいろいろな説明に使ってますが、図の曲線は何を示すかということは、皆さんご自由に解釈して下さい。現実の坂道のようなものと理解して頂い



(スライド9)

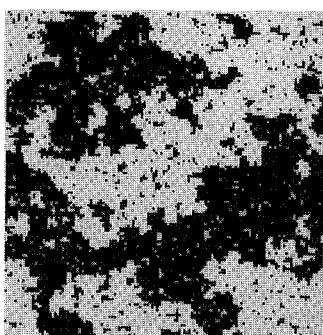
ても結構ですし、エネルギーの図を描いたものと思って下さっても結構です。あるいは、もう少し専門の方ですと、なにか熱力学的な関数としての自由エネルギーをとったものと、ご理解頂ければよいわけですが、いずれにしても、これは非常に面白い問題です。

(スライド9の下側の図)

この図は、縦軸がゆらぎを表し、横軸が時間を表しています。この図に示されているように、不安定な状態から秩序状態に移る際には、非常に大きな「ゆらぎ」が発生することが一般的に示されます。

これは、社会現象その他のものに適用することもできます。例えば、新しい世論の形成のような場合にも、途中で非常に意見が分かれ、その後にきれいな統一された意見が出てきます。

従って、無秩序から秩序への時間的な変化の途中で「ゆらぎ」が大きくなることに対応して、高い温度から低い温度に下げていく途中で相転移が起き、その近傍で非常に大きな「ゆらぎ」が発生します。次に、この相転移近傍の異常なゆらぎを議論しましょう。



(スライド10)

これは、コンピュータ・シミュレーションで作図したものです。これは、丁度無秩序から秩序に相転移する境目のところ（相転移点）での、個々の小磁石の様子をモンテカルロ・シミュレーションで描いたものです。黒の状態が上向き小磁石（スピニン）、白の状態が下向き小磁石と解釈しますと、これは、丁度、無秩序と秩序の境目ですので、このように非常に複雑な、いわゆるフラクタルな形になっています。すなわち、部分と全体とが似たような構造になっております。これを専門用語

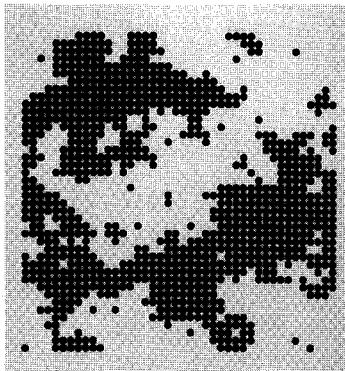
では自己相似性といいます。自己相似性が現われるところではその幾何学的な構造が、普通の一次元や二次元の構造と違い、半端な次元、すなわちフラクタルな次元で記述されます。

このフラクタル次元という概念を使いますと、自然界の現象を横に並べて、普通の言葉で理解することができます。例えば、海岸線でも、リアス式海岸などは、1. 2次元の海岸であるとか、もう少し滑らかな海岸では、1. 1次元であるといった表現ができます、大変便利です。

聞くところによると、ハリウッドの映画を撮る時の背景として複雑な山の形が必要になり、それを描くのにフラクタル次元を指定してコンピュータで劇の内容に合せて、作製したことがあるそうです。そういう利用の仕方もあります。

(スライド11)

一つ前の図を粗視化しますと、このように、前と似たような図形が現れます。先程の図で、1辺が3個のセル、すなわち、 $3 \times 3 = 9$ 個からなるセルを考え、



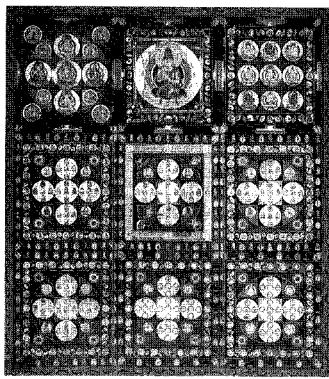
(スライド11)

その各々のセルの中で黒丸が5個以上あつたら多数決で黒とするという規則で、書き直したものが、この新しい図です。この操作を粗視化とか繰込みといいます。こういうことをやりますと、この体系のフラクタルな様子がよく見えてきまして、フラクタル次元というものを、これから推定することができます。

それで、この系の複雑さが理解できるというわけです。それを一般的に定式化したのが、ウイルソンの繰込み理論であります。彼の理論は、この分野で高く評価され、彼はノーベル物理学賞を受賞しています。

あまり物理の話を続けておりますと、居眠りの出る方も現れているようですが、(笑い) 閑話休題ではございませんが、次の話題に移りたいと思います。

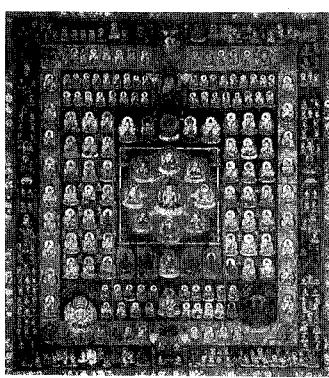
3. マンダラにおける繰り返し構造



(スライド12)

これは、東寺にありますマンダラでございます。マンダラにもピンからキリまでいろいろあります。これは金剛界といわれる働きの世界を表すマンダラです。チベットから始ったマンダラが日本にも入ってきて、これは平安時代に製作されたものです。これを見ていますと東洋人の知恵に感動致します。我々、科学の研究にたずさわっている者から見ますと、その幾何学的な構図が興味をひきます。

画面全体を 3×3 とか、3等分、3等分しまして、それぞれの画面に全体と同じように、また3等分して、似たような図を描き、その3等分した一つ一つの中に、また、ほとんど同じ構図を描いています。少しは変形していますが、発想法としては同じ構造の繰り返しで、入子構造ということが一つのテーマになっています。千年以上も前からこういうアイデアがあるということは非常に驚くべきことです。



(スライド13)

これは東寺の胎蔵界のマンダラで、形の世界を表しています。物理の世界でも、こういう構造は発想の段階で参考になることがあります。私の相転移の理論を説明するときにも、これは役に立ちます。すなわち、無限の宇宙をこの画面の中に、表現しているような気がいたします。

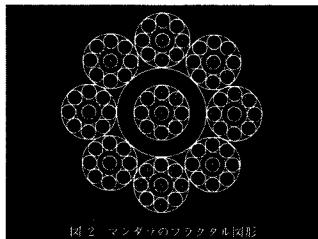


図2 マンダラのフラクタル図形

(スライド14)

これらの二つの絵を見ながら、私がデザインしました数学的なフラクタル図形をご覧に入れます。

この図は、全く数学的に完全な繰り返し構造を表現したものであり、作り方を一つ決める一つの自己相似な絵ができます。すなわち、マンダラと同じように、丸の中に同じ半径の丸を、8個作り、そしてこれを一つの丸でくくり、この操作を

繰り返しますと、マンダラ・フラクタル図ができます。この図形の面積を考えると、2次元よりは小さく、1次元よりは大きくて、幾何学的に計算をしますと、1.76次元というような次元が出てきます。そういう意味で、この図形の複雑さというものが、丁度そのフラクタルな次元で表現できるということになります。

4. フラクタルについて

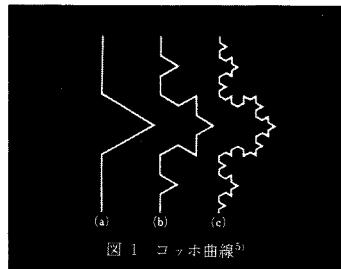


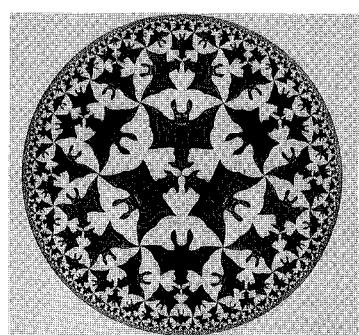
図1 コッホ曲線⁵⁾

(スライド15)

もっとやさしい例が、数学の高木貞二先生の解析概論に出ています。それは、図のように、一本の直線を3等分して、その3等分の中央の線分を折曲げます。この操作を順次繰り返していくと、最後には非常に複雑な曲線が出てきます。その極限の曲線のことをコッホ曲線といいます。数学的にいいますとこれは連続ではあるけれども、至る所微分不可能な曲線です。これは、微分不

可能な曲線の例として、数学では昔から知られていましたが、最近、そういうものをすべて一般化したフラクタルという概念が、マンデルブローによって提唱されました。

この曲線の複雑さの度合いというのを余り詳しくお話ししますと数学的になりますから、ここでは簡単に説明します。このコッホ曲線では3等分すると長さが4倍になりますので、対数を用いてこの系のフラクタル次元は $\log 4 / \log 3 = 1.27$ 次元であるということが出来ます。この概念を応用しますと、先程のリアス式海岸の次元が1.2次元とかいう、そういう表現が可能になるわけです。



(スライド16)

これも先程のエッシャーの絵から撮ったのですが、天使と悪魔が両方入っていて黒い方が悪魔で、もう一方が天使と入子構造になっていますが、外側にいくほど小さくなっています。

これは無限の平面を円の中に等角写像したもので、そういう意味でマンダラなどとも相通じるところがあり、繰り返し構造を円の中に射影したという、構造になっています。



(スライド17)

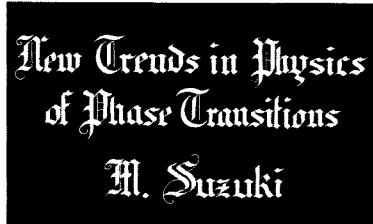
これは、非常にきれいな芸術品のようにも見えますが、実際はコンピュータで作った繰り返し構造の例で、マンデルブローの「フラクタル」という本から借用したものです。

美しく見えるように、適当に色を塗ったものです。これは、科学と芸術の境界みたいなものであります、数学的には複素関数の写像で繰り返し構図を作ったものであります。この構造を理解するためには、例えば、黄色だけ見ていただきますと、

繰り返し入子構造になっていて自己相似な構造がわかります。これは、一つの芸術品ともみなせるようなフラクタルな図形の美しい例です。

5. 相転移のメカニズム

次に、最近の相転移のゆらぎ、フラクタル、および秩序という三題話の理論的な取扱い方を、式を使わずにお話ししたいと思います。



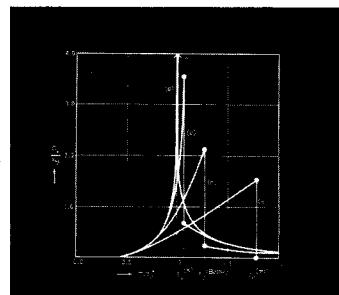
(スライド18)

昨年12月に、仁科先生（この仁科先生は、湯川先生および朝永先生の恩師に当り、日本の量子物理学の生みの親ともいわれる方ですが）の生誕百年を記念して、ここにご出席の久保先生が組織委員長となり、国際的なシンポジウムを開きました。この英語のタイトルはそのときの私の講演のタイトルです。それは相転移の話ですが、その要点を、数枚のスライドでご説明したい。

これは、久保先生の「熱力学統計力学演習」（裳華房）という教科書からコピーしたもので、物質の温度を変化させると熱エネルギーが変りますが、その熱エネルギーの変化の仕方を比熱といいます。この比熱という物理量を縦軸にとって、横軸に温度をとりますと、熱の吸収の仕方の割合が、高い温度では非常に小さく、また、低い温度でも変化が少ないわけですが、ある途中のところで非常に大きくなるところがあります。その温

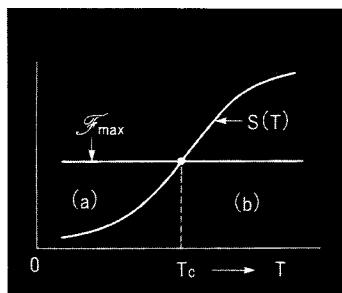
度が相転移の温度に対応します。要するにそれは状態がガラッと変る所でして、比熱が非常に大きな変化を示し、上と下では相が違います。上が無秩序状態、下が秩序状態であります。

例えば、家庭にある料理用のドレッシングを振りますと、全体が一様な状態になります。これも一つの相ですが、やがて落着きますと二つの相に分離して、二相の状態になります。そういう変化は一つの相変化であります。水が凍ったり、



(スライド19)

あるいは磁石が常磁性の状態から、非常に強い強磁性に変ったり、金属で超伝導状態が現われたりしますが、これらはみな相転移という現象です。



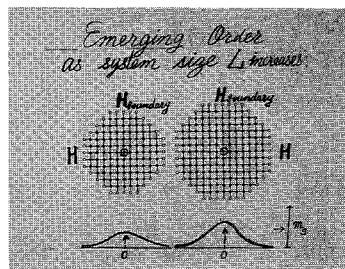
(スライド20)

相転移現象のメカニズムを模式的に示すと図のようになります。横軸が温度を表し、縦軸には二つの違った力が示されています。Sと書いたのがエントロピーです。エントロピーの効果というのは、乱れの強さを表わすもので、温度が上りますとどんどん乱れを大きくしようとする力であり、単調に温度と共に増えていきます。もう一つの力は例えば、小磁石の間に働く協力的な力あります。

これらの二つの力が釣合った所が相転移点です。それよりも高い所は乱れの方が勝ちますから、これは混沌とした状態であります。相転移温度より低い所では協力的な力の方が勝ちますので、秩序状態が現われます。

6. 相転移と「ゆらぎ」

相転移温度がどの辺に現われるかということは応用上は大きな問題であります。例えば、高温超伝導の場合ですと、これまで何十年もの間、ニオブ合金の相転移温度18度Kが最高の相転移温度でしたが、酸化物超伝導でそれが40度Kになったらその発見者はノーベル賞を受賞したことからもわかる通りです。その転移温度は、最近は125度とか130度位まで上っています。どういう温度で相転移が起こるかも重要な問題でありますが、同時にその相転移が起る温度の近傍で、どのような「ゆらぎ」が現われるかということも極めて興味深い問題であります。



(スライド21)

2、3枚、アカデミックな絵をお見せしたいと思います。これも、仁科シンポジウムで使った絵ですが、これはなぜ秩序が現れるかというからくりを簡単に説明したものです。ある小磁石からなるクラスターを考え、その周辺に一定の磁界を当てて、その効果が途中の相互作用を経由して、中心の小磁石にどう影響を与えるかを調べます。中心の小磁石がまわりに付和雷同して境界に与えた

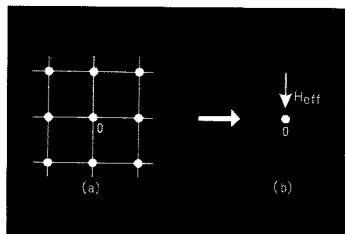
磁界の方を向く期待値を図に示してあります。この期待値すなわち中心の小磁石の強さが、この体系をどんどん大きくしていくにつれて、大きくなっていく場合と、だんだん小さくなる場合があります。これは温度によって変るわけで、低い温度ではまわりの効果がだんだん集積してきまして、中心の小磁石の強さが大きくなっています。これが、秩序発生のからくりでありますと、高い温度になりますとエントロピーというか、乱れの力の「ゆらぎ」の効果の方が大きいので、次に情報が伝わるのが弱くなり、だんだん、中心の小磁石の強さが弱くなってしまいます。

よく、パーティーなどで人を一列に並べまして、前の人と言ったことを後に入る次の人と同じ言葉を伝えるゲームをしますが、20人位いきますと全然反対のことが後に伝わったりします。大体、一次元で伝わっていきますと一人でも途中で間違えるともう修復できませんので、一次元の系というものは乱れやすい系であるということになります。ところが2次元になりますと、途中で一部さほっていたり、反対のことを言っても、別な経路をたどって正しい情報が伝わってくる場合もありますので、このような経路が沢山あるほど、そういう系は秩序ができやすいということになります。

会社の社長も、ある一人の部下だけの情報で判断すると間違い易いけれども、いろんな情報網を通して判断すれば、あまり間違いがないように思われます。社会現象を比喩として用いて、相転移のメカニズムを説明すれば、情報網が非常に沢山あるときには、その系全体が秩序化されやすいということです。現実の鉄やニッケルは3次元ですから、2次元よりさらにそういう意味では情報がより伝わりやすくなっています。要するに、2次元より3次元の方が秩序はでき易いということになります。

そうしますと、数学的には、3次元ではなく4次元の世界ではどうか、5次元の世界ではどうなるかというようなことが、次から次へと問題になってきます。そういう研究も最近盛んに行われております。

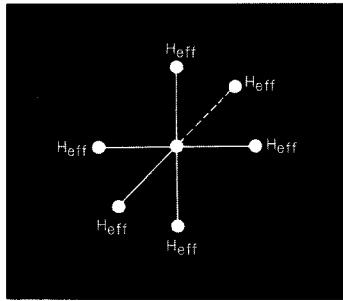
それらを理論的に扱う一つの考え方を説明します。



無限に小磁石があり、その間に力が働いて一つの小磁石が上を向くとその他も上向きの小磁石の状態になり易いとする。このとき鉄やニッケル全体が強磁性の状態になることを理論的に扱おうとしますと、統計力学的な計算をしなければなりませんので、非常に複雑な非線型問題になってきます。それを一番簡単に扱うには、国家を大統領に全部任せてしまうように、一つの小磁石に全部の効果をかぶせてしまうことです。こういう取扱い方をしますと、簡単にこの問題は解けますが、その時に非常に困ったことは、私の講演のタイトルにありますような「ゆらぎ」が全然入らないということです。ですから、たった一個の小磁石では、この小磁石がたまたま上を向くとしますと、磁石全体が上を向いてしまい、決定論的な変化しか起こりませんので、現実とは大分懸離れた近似的な理論になります。

これが1907年のワイスの理論で、相転移の分野で、代表的な近似法として使われているものであります。しかし、いろいろ精密な実験が出るようになってからは、こういう単純な平均場近似と称するものでは間に合わなくなりまして、この近似法は見捨てられるようになってきました。

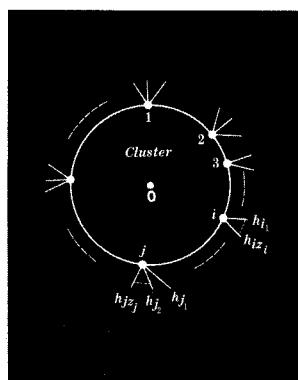
(スライド23)



(スライド23)

それから30年位しまして、ペーテという人が、少し「ゆらぎ」を取り入れようとしたしました。「ゆらぎ」とは平均からのずれを表し、平均からずれた状態が多い程、またそのずれの大きさが大きいほど、「ゆらぎ」は大きくなるわけです。そういう意味で、例えば、図のように一個の小磁石の代りに7個の小磁石を考えますと、7個の小磁石が全部上向く状態、全部下向いた状態とか、3個は上

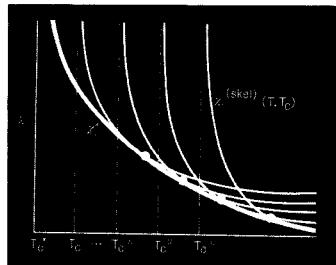
向き、4個は下向くなどのいろいろな状態を全部考慮できます。このように、いろいろ違った状態を適當な重みで足し合わせ、全体の性質を調べるというのが「ゆらぎ」を取り入れた、近似理論ということになります。この7個のクラスター以外の効果を取り込むために、クラスターの境界にある6個の小磁石に平均的な力（磁界）を加える。この平均場の強さは、中心の小磁石と境界の小磁石とが同じ平均値を持つという首尾一貫した条件によって決める。このようにとり扱うクラスターの大きさを少しずつ大きくしていくと、順次大きなゆらぎが取り込まれて近似がよくなります。



(スライド24)

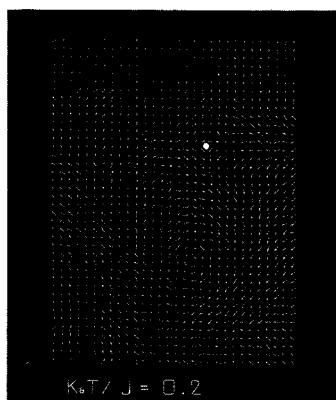
図のような有限のクラスターの理論的な取り扱いは最近のコンピューターの進歩により、容易になりました。実際に、最近は相当複雑な計算でも、解析的、あるいは数値的な計算が可能になってきました。従って、このような取り扱い方が最近非常に流行しております。

しかし、相転移は、無限の小磁石の総ての協力的な力の結果として現れるのであり、その無限の効果を、なんらかの形で理論の中に取込まなければいけないわけです。この無限の効果を、切抜いたクラスターの境界に働く平均的な力によって近似的に表そうとする方法が、上に説明したクラスター平均場近似であります。この近似理論の特徴をもう少し詳しく議論してみましょう。一見、無限を有限で近似しますと、無限分の有限は0でありますので、どうしても、一個の系と本質的に同じ性質しか現われないようと思われます。例えば、外から磁界をかけて、磁石の強さを測定したときの比例定数を磁化率といいますが、縦軸にその磁化率をとり、横軸に温度をとりますと、図のように、それは、相転移点で発散します。これは、その昔、キューリーが実験的に発見し、1907年、ワイスはこれを説明する平均場理論を提唱しました。しかし、ワイスの求めた磁化率は相転移点で単純な振舞いしか示さず、現実のフラクタルな発散とは質的に違っています。要するに、本当の磁化率は、フラクタルな指標をもった発散をするということにして、それを解明し、解析する新しい方法が筆者によって、1986年に提唱され、「コヒーレント異常法」と名づけられた。



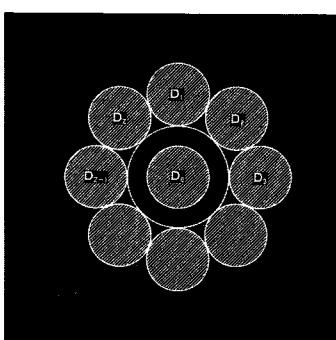
(スライド25)

めたい磁化率のフラクタルな性質を示すということです。これは数学の理論としても面白いものですが、今日は数学的な表現は避けてくださいた言い方をしますと、物の見方として、いろんな社会現象や自然現象を見るときに、その現象一つだけを見たのでは本質が見えてこないが、全体として見ると初めて本質が見えてくる。このような比喩的な理解の仕方もできるかと思います。そういう風に受取って頂ければ、よいかと思います。



(スライド26)

のようなエキゾティックな相転移が話題になりつつあります。例えば、最近の高温超伝導のメカニズムでも、こういう渦対ができているということが大いに関係あるのではないかといわれております。実際のところはまだ解決しておりませんのでどういうことになるか分りませんが、それが理論的に解決できれば、またその分野でノーベル賞が出るだろうと思うのですけれども、それだけに非常に難しい問題です。



(スライド27)

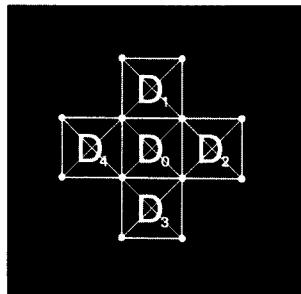
この理論ではクラスター平均場近似を系統的に（コヒーレントに）拡張し、それぞれの近似で求めた相転移点とそこで磁化率の古典的な発散の係数との連動した変化（コヒーレント異常）から真の相転移点とフラクタルな異常性を推定する。いわば一つ一つに接するような包絡線（スライド25）を調べ、その包絡線のもつ異常性が我々の求

これはまた、シミュレーションの図ですが、今までとは大分違ったシミュレーションでありまして、よく見ますと渦の状態になっております。この図では、渦の向きが逆になって2つ対になり、渦対がでています。こういう渦対の発生に伴って現れる相転移は非常に取扱いの難しいものでして、数学的な言葉で言いますと、トポロジカルな相転移といわれます。あるいは、強磁性や超伝導のような普通の相転移とは違った相転移という意味で、エキゾティックな相転移ともいわれます。最近こ

こういうエキゾティックな相転移を解明するための一般的な近似法として、1988年に筆者の提唱した「超有効場理論」を簡単にご紹介したい。エキゾティックな秩序を特徴づける秩序パラメータは一点では表現できず、図のようになにかある領域で定義しなければなりません。例えば、渦の向きを定義するには、（スライド27）の図のように少なくとも3点の小磁石が必要です。これで一つの渦の状態が定義できます。また、掌で右手と左

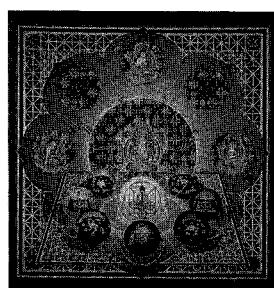
手は平面の中では重なりませんが、3次元空間で回転しますと重なります。これをカイラリティといいますが、このようなトポロジカルな向きを表現するためにも、必ず3点以上必要でして、そういう領域で初めて定義できるような秩序を一般にトポロジカルな秩序といいます。そのような拡張された秩序を表すよう有効場を境界に与え、その影響が相互作用によって、クラスターの中心にそういう秩序がどう誘起されるかを調べ、首尾一貫した条件によって一般化された秩序パラメータを求め、新しいエキゾチックな相転移のメカニズムを解明する方法が最近私の提唱している超有効場理論です。

(スライド27) の図は、先程のマンダラと偶然一致している幾何学的な図ですが、このクラスターの境界のセルにカイラリティのようなトポロジカルな秩序ができたときに、その影響によって、真中の領域 D_0 に秩序ができ易いか、できにくいかということを、具体的な小さなクラスターできちっと調べることによって、最近話題になっているような新しい相転移の様子が研究できます。



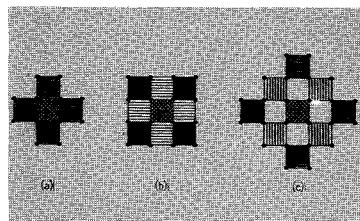
(スライド28)

これは、単純な「ゆらぎ」ではなく、幾何学的に複雑な「ゆらぎ」を系統的に取込むための超有効場クラスターの例です。このように、エキゾチックな相転移に対しても、超有効場理論によって系統的な平均場近似を作り、それに、先程説明した私の「コヒーレント異常法(CAM理論)」を適用しますと、相当難しい問題でも解明できることになります。



(スライド29)

これは、前田常作という人の最近の絵です。目黒の美術館で「マンダラ展」がありまして、早速見に行って買ってきました彼の本から借用したものです。超有効場理論との関連で興味深い絵です。



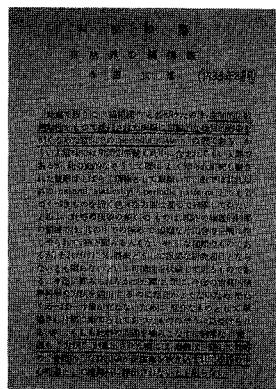
(スライド30)

これは、高温超伝導のメカニズムを解明するために考案した超有効場のクラスターです。その境界に超有効場を与えて、真中の所にどういう新しい秩序が現れるかを計算する図です。これは模式的に書きましたけれど、これを量子統計力学を用いてきちんと解析するには、格子点が12個もありますから、スーパーコンピュータを使って何十時間も計算しなければなりません。

スライド30のように大きなクラスターで「ゆらぎ」をきちんと取入れて量子力学的に解析しようとすると、膨大な計算になります。昔は、ワイス近似のように1個で取扱うのが普通でした。努力してもせいぜい、数個位までのクラスター近似でした。それを統計的に数十個のクラスターまで解析しようと、もし30年も前に提案したら、馬鹿気た話だと一笑にふされたかもしれません。しかし、最近のコンピュータの発達によって、それが現実になりつつあります。ここ4、5年そういう新しい方向に向かいつつあります。CAM理論は、この意味でタイムリーだったのかもしれません。

7. 自然界の縞模様

これで私の講演は終りにしたいのですが、最後に全体のまとめとして寺田寅彦の隨筆のコピーをここに示したいと思います。



(スライド31)

これは、1933年2月号に出ておりますが、日付を見ますと正月の4日であり、多分おとそ氣分で書いたものかとおもいます。それは非常に面白い隨筆です。1933年と言いますと、私の生まれる前ですが、寺田寅彦は、そのような時期に今私がお話ししたような現代的な問題の重要性をすでに指摘しています。ゆらぎから秩序ができる現象が、いろいろと日常生活にも見られるけれども、その中でも特にこの表題にある「自然界の縞模様」というのは、「空間的にある周期性をもった構造」を

指しております。即ち、最近の流行言葉で言うと、パターン形成です。例えば、霜柱の構造とか雲の構造等が日常生活に見られる典型的なものです。このような周期的パターンは熱的な流れがある所で初めてできるものであると彼は主張しています。最近の言葉で言えば“散逸構造”ということです。

そういう開放系の現象を研究することが将来非常に重要になるんではないか、ということをこの隨筆では強調しています。すなわち、「もしも、これらの問題を噛みこなすに適當な歯、即ち、方法が見出された暁には、形勢は一変してこれらの骨董的な諸現象が新生命を吹き込まれて、学界の中心問題として、檜舞台に押出されないとも限らない。」まさしく60年近くも前に、こういう、今、我々が世界中で大騒ぎしているような問題の重要性を指摘しているということは驚きです。

それから随分遅れてプリゴジンも同じようなことの重要性を強調して、「散逸構造」という名前を付け、それが世界中にひろまって、ノーベル賞を受賞したり本田賞を受賞したりしております。こういう大きなアイデアが出たときに、それをどんどん発展させるような流れを日本で創っていけば、世界に先駆けてそういう分野が日本で生れることになったはずであると思うんですが、これはこれだけ

で終わってしまったのは残念であるような気もいたします。

おわりに

最後にまとめますと、このように自然界の中には「ゆらぎ」があり丁度、相転移が起るようなところではフラクタル構造が現れ、そしてやがては秩序ができます。「フラクタル」というのは、丁度「ゆらぎ」が非常に大きくなつた状態でありまして、物事がなにか秩序化されて安定化するまでには、いつでも非常に大きな「ゆらぎ」が現れるという現象は普遍的な現象であります。ですから、会議でも、途中でいろいろな意見が出るほど最終的な収束は却つて早いのではないかと思います。まだまだ、いろいろ新しい現象がこれから発見されて、それを解明する理論が次々と創られていくことでしょう。それらはすぐに技術化されていくでしょう。最終的には科学と技術のホロイズムというか、総合化ということが実現されて、それは我々の人間社会に大いに役立っていくことを期待して、私の話を終りにしたいと思います。

どうもご静聴ありがとうございました。

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.36 「第3世代の建築」 (株)菊竹清訓建築設計事務所主宰 菊竹清訓	昭58.7
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 公文後平	昭53.6	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. 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.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. 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.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. 5	コミュニケーション技術の未来 電気通信科学財团理事長 白根禮吉	昭54.3	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. 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.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・ブリゴジン	昭59.2
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.42 「変化する日本社会」 大阪大学教授 山崎正和	昭59.3
No. 8	ヨーロッパから見た日本 NHK解説委員室主幹 山室英男	昭54.5	No.43 「ベルギー『フランドル行政府産業使節団』講演会」 「新しい情報秩序を求めて」	昭59.7
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	電気通信大学教授 小菅敏夫	昭59.7
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.45 「アラブの行動原理」 国立民族学博物館教授 片倉ともこ	昭59.10
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.46 「21世紀のエネルギーを考える」 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	昭60.1
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.47 「光のデザイン」 石井デザイン事務所 石井幹子	昭60.7
No.13	医学と工学の対話 東京大学教授 濱美和彦	昭55.1	No.48 「21世紀技術社会の展望」 第43回日経ハイテクセミナー	昭61.1
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.49 「星をつぶす法」 文部省宇宙科学研究所所長 小田 稔	昭61.5
No.15	最近の国際情勢から NHK解説委員室主幹 山室英男	昭55.4	No.50 「ひまわりVA太陽光は人間の生活にどう役立つか」 慶應義塾大学教授 森 敬	昭61.5
No.16	コミュニケーション技術とその技術の進歩 MIT大学教授 イシェル デ ソラ プール	昭55.5	No.51 「エコ・テクノロジーの宇宙の観察」 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	昭62.2
No.17	寿命 東京大学教授 古川俊之	昭55.5	No.52 「人間はどこまで機械か」 東京大学教授 古川俊之	昭62.2
No.18	日本に対する肯定と否定 東京大学教授 辻村 明	昭55.7	No.53 「中国人とどのようにおつきあいすべきか」 東京外国语大学教授 中嶋嶺雄	昭62.2
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.54 「舞台の奥のヨーロッパと日本」 演出家 寺崎裕則	昭62.5
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.55 「日米関係の現状と展望」 経団連特別顧問 大河原良雄	昭62.5
No.21	技術と文化 IVA事務総長 グナー・ハンペリュース	昭55.12	No.56 「私の半導体研究」 東北大学教授 西澤潤一	昭63.1
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	No.57 「生物学者の科学的責任」 コレージュ・ド・フランス名誉教授 ジャン・ドーセ	昭63.4
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.58 「最近の宇宙論をめぐって」 上智大学教授 柳瀬睦男	昭63.3
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.59 「科学・技術研究の国際的規模：その展望と考察」 ローマ大学教授 パオロ・マリア・ファゼラ	平1.7
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.60 「温室効果による地球環境の変動と対策」 中央大学理工学部教授 安藤淳平	平1.9
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・チエスナット	昭57.1	No.61 「組織の進化論—企業及び軍事組織における進化—」 一橋大学商学部教授 野中郁次郎	平2.3
No.27	ライフサイエンス 株式会社生命科学研究所人間自然研究部長 中村桂子	昭57.3	No.62 「ファジー理論の誕生と進化」 カリフォルニア大学バークレー校教授 ロトワイ・アスカ・ザマー	平2.9
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.63 「遷都問題について」 通産省工業技術院 国際研究協力課長 八幡和郎	平2.12
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.64 「クリーンエネルギーとしての水素利用」 東海大学工学部 応用物理学科教授 内田裕久	平2.12
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.65 「地価インデックス債による土地問題の解決」 一橋大学経済学部教授 野口悠紀雄	平3.1
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.66 「「宇宙のひとかけら」としての人間の視座」 松下技研株主幹研究員 佐治晴夫	平3.4
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.67 「建築と自然」 シュツツガルト大学軽量建築研究所教授 フライ・オットー	平3.5
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.68 「先端科学技術と経済成長」 東京大学 先端科学技術研究センター教授 竹内 啓	平3.7
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.69 「自然界におけるゆらぎ、フラクタルおよび秩序」 東京大学理学部教授 鈴木増雄	平3.9
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		