

現代科学における抽象化

—その目ざすものと人間の考え方—

ウエルナー・ハイゼンベルク

1967年4月26日朝日講堂における仁科記念講演*



自然科学の発展
と抽象化の傾向

自然科学の今日のあり方を昔のそれと比べますと、その発達の上において、いよいよ抽象的になり、現在では多くの分野で全く奇妙な抽象性の性格をもつに到ったことがしばしば確かめられています。そ

* 上智大学副学長柳瀬睦男教授の通訳がつけました。本稿は同教授による完訳であります。なお、この講演記録ならびに故平田教授の講演記録における小見出しは、編集係が適宜つけたものであります。

してそのような奇妙な性格は自然科学がその技術的な応用によって示した偉大な実的な成功によって、やっと少しばかりつながれております。私はここでこの点についてしばしば問題にされる価値の問題に入ろうとは思いません。ですから私はここで昔の自然科学が、自然現象の細かい点についての非常に徹底した記述につとめ、その意味でわれわれが自然に見出すいろいろな関係を生き生きと目にみえるものにしてくれたことの方がもっと

喜ばしいとか、あるいはその反対に、近代の研究の上に立ったいろいろな技術的な可能性の非常な発展が、今日の自然科学の概念が昔のそれに比べてまざっていることを明らかに証明しているのだというふうなことをここで議論するつもりはありません。この価値の問題はここでは完全に避けることに致します。その代り、いろいろの科学が発達する時の抽象化という道筋についてくわしく調べてみようと思います。

この短い歴史的考察の中で可能な限り、私共は諸科学が明らかにその内的な必然性に従って、抽象化のある段階から次のより高い段階に移る時に何が実際起るのか、またこの苦勞の多い道が一体どういうふうな知識を目的としてたどられているのかということをここで調べてみたいと思います。そうすると、いろいろな科学の分野が非常に似た道筋を通じていくことが、この比較によっていっそう明らかにわかってくると思います。生物学者が新陳代謝や生命の伝播を化学的な反応に還元する時、また化学者がこの物質の性質についてのくわしい叙述を、複雑な構造式におきかえる時に、また、物理学者が物理法則を最後には数学的な方程式で表わす時に、常にある

発展がみられます。このような発展の基本的なタイプは恐らく数学の発展において、一番はっきりとみることができます。そしてこのような発展の必然性を調べる必要があります。

私共はまず抽象化とは何
数学を例にとると
であるか、また概念的な

物の考え方の中で、抽象化がどのような役割を演ずるであろうかという問いから始めることができます。それに対する答は恐らく次のようになります。抽象化というのは、ある対象または対象のたくさんの集まりを考える時に、ただ一つの考え方だけからその対象を考察し、そして他の性質については考えないことにする、そういう可能性をいっております。この一つの特徴をとりあげて、それが他の全ての性質に比べて、ある特殊な関係のために特別に重要であるとかんがえることが抽象化の本質を形づくっております。すぐにわかるように、全ての概念構成はこのような抽象化の道筋に基づいております。何故なら概念を構成することは、われわれが相似的なものを認識できることを前提としているからです。しかし完全な同一性は、現象世界では決して起りませんから、この相似性は抽象

化という道筋によってのみ起ります。すなわち他の全ての性質を無視して、ただ一つの性質だけをとりあげることによってであります。たとえば「木」という概念をつくるためには、私達は樺の木とか、あるいは樅の木についてのある共通の性質があること、またそれが抽象化によってとり出され、そしてそれを把握することができるものでなければなりません。

この共通の性質を探し出すことはある状況のもとでは、非常に大切な認識の作用となりうるものであります。人間の歴史の非常に早い時期に、たとえば、三頭の牛と三つのリンゴを比べることによって、そこに「三」という言葉で表わされる共通の性質があることが認められたに違いありません。この数の概念をつくりあげることがすでに、直接与えられた感覚できる世界から合理的につかむことのできる思考の構造の枠への決定的な一歩であります。二つのクルミと二つのクルミを合わせると四つのクルミになるという文章はこの‘クルミ’という言葉で‘バン’、または他のどんな対象におきかえても、いつでも正しい文章であります。これにさらに抽象的な形をとらせ、 $2 + 2$ は 4 であるという命題に一般化

することができました。これは非常に重要な発見でありました。

この数の概念がもっている特別な秩序づける力は恐らく、非常に早い時期にすでに認められており、そしてまた、個々の数は、あるシンボルとして解釈されることも、非常に早くからわかっておりました。今日のわれわれの数学の立場からいえば、各個別的な数は、計算の基本的な操作に比べて、確かにそれほど重要なものではありません。実はこの操作が、自然数の数列を生みだし、またそれが整数論で研究される全ての事実をふくんでいるのです。計算の操作によって、抽象化に明らかに一つの決定的な一歩がふみだされ、それによって数学への入口が開かれ、また同時に数学的な物理学への道が開かれたのであります。

ここで、すでに、私達は数学や他の現代自然科学における抽象化のいろいろの段階においてよく出合う一つの現象を調べることができます。それは恐らく科学における抽象的な考え方の発展にとって、一種の‘根源的な現象’といってもいいようなものであります——ただゲーテは恐らく、この特別な現象に対して、彼の‘ウルフェノメン’、‘根源的な

現象' Urphänomen という表現を使うことは、のぞまなかったでありましょう。この現象は「抽象的構造の展開」とでも定義することができましょう。個別的な事実、あるいは種々の経験から抽象によって最初につくりあげられたいろいろな概念は、それ自身独立の生命を獲得します。これらは最初に考えられたよりも、もっと豊かな、またみよりの多いものだということを示すようになります。そのような概念はそれが後に発展する時に、新しい形態、あるいは新しい概念をつくるやすぎとなる限りにおいて、ある独立した秩序づけの力をあらわします。またそのお互いの間の関係を理解する仲立ちとなり、さらにそれがある程度、現象世界を理解しようとする試みに成功するということを証拠だてるようになります。

たとえば、数えあげるという概念から、またそれに関連した非常に簡単な計算の操作が後に、一部は古い時代に、一部は近代において、複雑な算術および整数論に発展していききました。そしてそれは実はこの数という概念の一番最初から、すでにその中におかれていたものが、ただ明らかにされたというにすぎないのです。さらに数と数から発達した数の

間の関係の理論から、直線を長さをはかることによって比べるという可能性がでてきました。ここから数の理論をすでに概念的にこえている、学問的な幾何学の発展が可能になったのです。このような方法で、数の理論の上に幾何学をつくりあげようと試みて、ピュタゴラス派の人たちは、直線の長さの間の無理数的な比という困難にぶつかり、それから数の種類を拡げることが強いられました。ですから、いわば彼らは無理数を発見することを‘余儀なくされた’といえます。さらにここから、ギリシア人たちは連続性の概念に到達し、また哲学者ゼノンが研究をした、よく知られたゼノンの矛盾に到達したのであります。しかしここでは私共は数学の発達途上におけるこのような困難に立ち入ることをしないで、ただ数という概念の中にたくさんの事柄がたたみこまれていることと、それらをその中からひろげ出すことができるということを指摘しておくにとどめたいと思います。

そこで抽象化の道筋において、結果として次のようなことがいえると思います。その道筋で形づくられた概念は、それ自身の生命を獲得し、またその中から、考えも及ばなかったような多くの事柄、あるいは秩序づける構

成をとり出すことを可能にするということ、またこれらが後に、われわれをとりまいてゐる現象の世界の理解に何らかの意味で価値をもっていることが示されるということであります。

よく知られておりますように、この非常に基本的な現象から、数学の対象

数学的真理は宇宙人にも共通

は一体、何であるかということについての激しい議論が起りました。数学が真の知識にかかわっていることは、ほとんど疑うことができません。しかし何についての知識でしょうか？ 数学において、私共は何らかの意味でわれわれとは独立に存在している実在、つまり客観的に実在するものについて記述しているのでしょうか？ それとも数学は単に人間の思考の一つの能力なののでしょうか？ 数学でわれわれが導き出す法則はただ人間の思考の構造についての命題なののでしょうか？ 私はここでこの困難な問題をとりあげることはしたくありません。しかしただ数学の客観的な性格を強調する一つの注意をしておきたいと思ひます。

火星のような他の惑星に、あるいは他の太陽系においてはなおさら、生命に似た何物か

が存在することは決してあり得ないことではありません。そしてさらに、他の宇宙に住んでいる生物がその抽象的に物を考える能力が非常に発達して、すでに数の概念を構成しているということも、可能性として考えにいれる必要があります。もしそうだとすると、またもしそのような生物が数の概念を数学によってたどっていったとしますと、彼らは数論についてわれわれ人間が到達したと全く同じ命題に到達するでありましょう。算術と数論とは、基本的には、われわれにとってと少しも変わらない形をとるでしょうし、またその結果はわれわれのものと一致するはずです。もし数学が人間の思考において真であるならば、それは人間の思考だけでなく、思考それ自体にとってやはり真であるはずです。いかに多くの思考があつたとしても、数学はその全ての場合に同じでなければなりません。この命題は他の自然科学的な命題と比べることができます。疑いもなく、全く同じ自然法則が他の惑星にも、またさらに遠く離れている他の天体にも、われわれが地上で見出すのと同じように成り立っております。これはただ理論的な前提ではなくて、われわれは望遠鏡によって、星にわれわれと同じ化学元

素があるということを観測できます。またそれらが同じ化学結合をし、そして同じスペクトルの光を出しているということがわかります。しかしながら観測事実に基づいたこの科学的な命題が、数学について前に述べたような命題と、実際、関係があるか、またさらにそれとどういうふうに関係があるのかという点についてはここで調べないことに致します。

歴史の上で、数学は常に繰り返す新しいより広い概念を形づくり、それによって常に抽象化のより高い段階にのぼっていきました。数は無理数からさらに、複素数にまで拡張されました。関数の概念は高等解析、微分・積分学の広い領域への道をひらきました。群の概念はそれが代数にも幾何にも、さらに関数論にも、適用されるということが証明されました。そのことはさらに高い抽象化の段階においては、全数学を秩序づけ、それを把握し、その多くの分野を、ただ一つの観点から理解することができるようになるという考えを示唆するようになりました。集合論は、数学全体のそのような抽象的な基礎として発展していきました。集合論で出合った多くの困難はついに数学から数学的論理学への段階を必要

とさせ、それは 1920 年代において特に、ヒルベルトと、ゲッティングゲンにおける彼の協力者によってなしとげられました。いつでも一つの抽象の段階から、より高い次の段階への抽象化の道筋がとられなければなりません。何故なら、多くの問題は最初におかれた狭い分野では解くことができず、またよく理解することができなかったからです。他のもっと広い分野において他の問題との関係があると、まずその問題についての理解の新しい方法の可能性がわかり、またもっと一般的な概念をつくりあげることが、そこから考えられていきました。たとえば、ユークリッド幾何学において、平行線の公理が証明できないことがわかった時に、非ユークリッド幾何学が発展しました。しかし本当の理解はさらに一般的な問題が考えられた時にはじめてえられたものであります。つまり、ある個々の公理系の中で互いに矛盾が起こらないことが証明できるかどうかという問題です。問いがこのように提出された時に、はじめて問題の核心が把握されました。このような発展の末、数学は現在極端な抽象概念によってのみ、その基礎を論議することができ、われわれの経験にかかるどのようなものとも、関係を完

全に失ってしまったように思われます。次のようなことが、数学者であり、哲学者であるバートランド・ラッセルによっていわれたそうです。「数学はそれが何であるかということが、何も知られていない対象について考え、またそれが真実かあやまりであるか知られていない命題から成り立っている」と。(この命題の第二の部分について、少しコメント致しますと、これはこのような命題は形式的にだけ正しいことが知られるので、それと関係づけることのできる実在する対象について、正しいかどうかは知られていないという意味であります)。しかし、ここで数学の歴史を述べましたのはただ、その発展において抽象化と統一化への必然性がわかるための例として役立てたかったのです。

自然科学の諸分
科では？
—生物学の発展

そこでこれから自然科学においても、同じようなことがあったであろうかという問題がおこってきます。私はその対象からして、生命に最も近いもの、したがって、最も抽象的でない学問、すなわち生物学からはじめてみようと思います。動物学と植物学への分類のような古い区分においては、生物学は大多数われわれ

がこの地上において出あう種々の生命の形態の記述でありました。この学問は、最初にはほとんど無数の種々雑多な生命現象に、ある秩序をもちこみ、また生物の分野において規則性あるいは法則性を探るという目的をもって、これらの形態を比べました。この際に、一体どのような見地からこの種々の生物が比較されるのか、したがってこの比較の根拠になることができるような共通の特性が何であるかというふうな疑問がおこりました。たとえば、植物の変態についてのゲーテの研究はすでにこのような目的に方向づけられておりました。生物学はこの点において、抽象化への第一の段階をふまなければなりませんでした。各個の生物を調べるということをもはやらずに、生長、同化、繁殖、呼吸、循環というふうな生命を特徴づける種々の生物学的な作用が調べられたのであります。これらの作用は非常に異なった種々の生物をよく比較することができるような観点を提供しました。これらは数学的概念のように、予想外に稔りの多いものだということがわかりました。これらは非常に広い生物学の分野を秩序だてる能力をもつまでに、発展していきました。こうして、遺伝の過程の研究からダーウィン

の進化論がおこり、これは初めて、この地上における有機的な生命の豊富な形態を一つの非常に統一された観点から説明することを約束するものでした。

他方において、呼吸と同化作用の研究は生命体の中における化学的な過程の問題に導かれ、これはまた実験室の中でおこる化学的な過程と比較されるようになりました。これによって生物学と化学の間に橋渡しがなされ、同時に一体、生命体の中における化学的な過程と、それから生命をもたない物質の中におけるそれとが同じ自然法則によっておこるものであろうかという疑問がおこってきました。このようにして生物学的作用の問題からさらに一体、このような生物学的な作用が物質的に自然の中に如何にして実現されるであろうかという問題にうつったわけです。このような作用が物質的に行われるという問題とともに、生物学の分野が文字通りこじあけられたのであります。というのは、生物学的過程はそれに対応する物理的・化学的な過程を学問的に分析し、説明した時にはじめて理解できるのだということが明白になってきたからであります。

抽象化の次の段階においては全ての生物学

的な関係というものは、一応度外視され、残された問題はただ生物学的な過程に関連したどのような物理化学的な過程が実際に生命体の中でおこるのかという問題になります。このような線に沿って私共は現在、地上における全ての生命現象を本質的に単一なものとして定義づけ、そして原子物理学の言葉でもっとも簡単にそれらを言い表わすことができるような非常に一般的な関係の知識にまで到達しております。とくに例として、私共はよく知られたメンデルの法則によって支配されている生命体から生命体に連続的に伝えられる遺伝因子をあげることができます。これらの遺伝因子は長い鎖状の分子の二つのくさりの中で四つの特別な分子の小片が非常にさまざまな配置をとっているもので、全く物質的にきめられることが明らかになっています。それはデオキシリボ核酸と呼ばれ、それが細胞核の形成の決定的な役割をしめるものであります。したがってこのような生物学の化学と原子物理学への延長は、この地上における生命体の全てにわたるある基本的な生物学的な現象の統一された解釈を可能にするわけです。しかしたとえば、他の惑星に存在する生命が同じ原子的、あるいは化学的な構造の上

に形造られているかどうかということは現在決めることはできません。とはいえ私共は近い将来にこの問題の答を知るようになるであらうでしょう。

化学の領域では

生物学における場合と似たような発展が化学においてもおこりましたが、私は化学の歴史の中から「抽象化と統一化」という現象を非常によく表わしている原子価の概念の発展というただ一つのエピソードをとりあげてみたいと思います。化学は物質の性質をとり扱うわけですが、どのようにしてある与えられた性質をもった物質が他の性質をもったものに変換することができるか、という問題を研究します。また如何にして物質が化合したり、分離したり、あるいは変化したりするかという問題を調べるわけです。物質の化合物を量的に分析しはじめた時、つまり、いま考えている化合物の中にどれだけの違った化学的な元素があるかということを問いはじめた時にこれらの間に整数の比の関係が見出されました。ところですでに原子的な考え方が種々の元素の化合物を考える時に非常に適当な言い表わし方として用いられておりました。このような場合に、次のようなよく知られた比較から

出発したのです。すなわち、白い砂と赤い砂を混ぜますと、その結果は丁度赤い色がその混合比によって明るい赤か、あるいは暗い赤になるような砂ができあがります。二つの元素からなる化合物はこのように考えられました。ただその場合は砂のつぶの代わりに原子を考えたのであります。ところで化学的な化合物は二つの異なった砂の混合よりも、もっといろいろな異なった性質をもっていたので、化合物とはまず最初違った原子が、原子の群をつくり、これらが分子としてこの化合物の基本的な単位を与えるものだというふうにと考えられました。こうすると異なった化合物における物質の整数比は、一つの分子の中における原子の数によって説明することができました。種々の実験はこのような直観的な解釈を認めさせ、またさらに各原子にいわゆる原子価という数を考えさせました。そしてこれが原子が互いに化合しあう可能性をあらわすことになります。このようにしますと——今われわれがここで考えたい点は——少なくともまず最初は、一体この原子価というものが、原子の、ある方向をもった力を表わしたものか、あるいは幾何学的性質なのか、あるいは、他の別なものなのかということが全く不

明確であったということです。原子そのものが、実際にこういう物質的な構造をもっているのか、あるいはこの化学的な現象を数学的に表わすための便利な補助的な幾何学図形にすぎないのか、ということは長い間決定されないまま残されねばなりませんでした。ここで‘数学的な表現’というのは、シンボルとそれを結びつける規則、したがってたとえば、ここでは原子価とそれから原子価についての規則が、実際おこる現象と **isomorphic** である、つまりたとえば群論の数学的な言葉で、ベクトルの線形変換が三次元の空間における回転と **isomorphic** であると言うのと同じ意味で現象と **isomorphic** であるといいたいわけです。

さて、数学的な言葉をやめて、実際的な問題に戻りますと、これはいま考えている元素の間でどのような化合物が可能であるかということを用意するのに、この原子価の表現を使うことができるということです。しかし一体、この原子価というものが、ちょうどある力が実際にあり、また幾何学的な形が実際にあるといえるかと同じ意味で何か実在するものかといえるかどうかという問題は長い間、答えられないままでした。また、この問

題を決定することは、化学にとって特別なことでもありませんでした。化学反応の複雑な過程に、特に量的な混合比に関心がそそがれ、他の全ての観点が見逃されている間に、つまりこのような抽象化の道筋を通して、種々の化学反応の統一された解釈とまたその部分的な理解を可能にするような概念が得られました。ずっと後になって現代の原子物理学においてはじめて、この原子価という概念の背後にどのような実在があるのかがわかりました。実際、今日でも私共は原子価が本当に一つの力であるのか、電子の軌道なのか、あるいは原子の中の電荷密度の変化であるのか、あるいはこのようなもののある可能性だけなのかについては正しく言いあらわすことができません。しかし今日の物理学にとってこの不確定さは、もはやもの自体に関係しているのではなくて、それらの言葉による表現にだけ関係しております。そしてこのような不完全さをわれわれは根本的には取り除くことができません。

さてこのようにして、原子価の概念から今日の化学における形式的な抽象言語に非常に近づいてきました。そしてこの抽象言語によって、化学者は彼の学問の全ての分野におい

て彼の仕事の内容や結果を理解することができるようになります。

物理学の歴史を
考えてみよう

種々な観測を行なう生物
学者や化学者が集める情
報の流れは、いろいろな

問題提起を通じて、統一された理解を目ざし、さらに抽象的な概念へと導かれていきます。したがって、あたかも原子物理学はその中心的な位置のために、すでに全ての自然現象に関して基本的な構造を与えるほど十分総括的でなければならないようにみえます。このような構造によって全ての現象が関係づけられ、全ての現象が位置づけられるものであるはずです。しかしこのように生物学と化学の共通な基盤のようにみえる物理学の場合においてさえ、このことは自明ではありません。何故なら極めて多くの異なった物理現象があって、それらの内的関係は最初は認めることができないからであります。したがって物理学の発展というものも取り扱う必要がありますし、私共はその最初の出発を少し眺めてみようと思います。

古代ギリシャの科学の初まりの頃、よく知られているようにアリストテレスによって伝えられているところによりますと、人々は

「事物は数である」という理論をもっておりました。現代の立場から、アリストテレスによるこのピタゴラス派の理論を次のように解釈することができます。事物、すなわち現象は数学的な形で互いに関係づけられる限りにおいて、秩序づけ、そして理解することができるといふことであります。ところで、この関係はわれわれの認識能力のただ勝手なやり方で考え出されたものではなくて、何か客観的なものであります。例えば、「数は事物の実体的な本質である」とか、「全ての天は調和であり、数である」というふうなことがいわれております。これによって最初にいわれたことはただ世界の秩序であったでしょう。古代の哲学者にとってこの世界はコスモス（秩序づけられた宇宙）であり、カオス（秩序のない渾沌）ではありませんでした。このように理解することによってえられた世界は、まだそれほど抽象的なものではありません。したがって天文学的な観測結果はたとえば軌道という概念によって解釈されます。星は円の上を動きます。ところで円はその非常に高い対称性のためにとくに完全な図形であります。円運動そのものは自明なものです。しかし惑星の非常に複雑な運動に対しては種々の

軌道運動，すなわち円や周転円による軌道運動がこの観測結果を正しく表わすために組み合わせられなければなりません。しかしその当時に得られる限りの正確さにおいては，これで十分でありました。トレミーの天文学を使って日蝕や月蝕はかなり正確に予言することができました。

ニュートンの物理学から始まる現代は，このような古典的概念に次のような問題をもって立ち向いました。月の地球をめぐる運動が，落下する石の運動と，あるいは投げられた石の運動と，何か共通点をもっているのか。ここに何か共通点があるという発見は——われわれは他の全てのより深い相違を無視して，ただ一つのその共通点にわれわれの注意を集中することができるのですが——自然科学の歴史の中における，もっとも深刻な結果をもたらした事件に属します。この共通な要素は‘力’という概念，ここではとくに重力という概念を形成することによって明らかにされました。それは物体の‘運動の量’の変化をおこすものでした。この力の概念はたとえば重いおもりをもちあげる時のような感覚的な体験から発生しておりますけれども，この概念はすでにニュートンの公理系の

中で，抽象的に，運動量の変化によってこれらの感覚とは関係なく定義されております。質量，速度，運動量などの二，三の簡単な概念によってニュートンは一つの閉じた公理系を形成しましたが，それは物体の他のあらゆる性質を度外視し，全の運動の力学的な過程を取り扱うのに十分なものでした。よく知られているように，この公理系は数学の歴史における数の概念と同じように，それに続く時代を通じて，極めて稔り多いということを示しました。200 年以上にわたって数学者と物理学者はニュートンの出発点から新しい興味のあるいろいろな結論を導き出しました。そのニュートンの出発点というのは，私共が学校で習ったように非常に簡単な，つまり $\text{質量} \times \text{加速度} = \text{力}$ であるという式であります。惑星の運動の理論は，ニュートン自身によって始められ，後の天文学によって発展され，またくわしくなりました。回転するコマの運動が研究され，説明され，流体力学や弾性体の理論が発展しました。また力学と光学との間の類似もに数学的に研究されました。

常に二つの見方が特に強調されねばなりません。第一は，もし人が科学の実用的な方面について問うならば，つまりニュートンの力

学をその天文学的な予言の成就ということにおいて、古代の天文学と比べるならば、少なくとも初期においては、ニュートンの物理学はほとんど古代の天文学と区別ができないほどであります。根本的に惑星の運動は円や周転円の重ね合わせによって任意な精度で表わすことができました。したがってニュートンの物理学の説得力はその実用的な応用性から生じたものではなく、むしろ総合性に基づいている、すなわち多くの違った現象を統一的に説明するということにありました。そしてそれは、ニュートンの出発点から生じる総合の可能性に基づいておりました。

第二に、もしこの基礎から力学、天文学、物理学の新しい分野がそれ以後の数世紀にわたって開かれたとするなら、さらにその後の多くの研究者によって際立った業績が必要であったとするなら、最初そのことがまだわからなかったとしても、ちょうど数の概念がすでに数論全体を含んでいたと全く同じように、その後の結果は、そのニュートンの出発点の中におかれているということです。またもし、他の惑星における理性をもった存在が、彼らの固有な科学的な研究において、ニュートン力学の基礎をその出発点におくとするな

らば、彼らは同じ問題について同じ答を得たでありましょう。この点において、ニュートンの物理学の発展はこの講演の最初に議論した、「抽象概念の発展」の見事な例であります。

19世紀になって初めて、ニュートンの出発点が全ての観察しうる現象に対応する数学的な構成をつくり上げるのに十分なほど豊かではないということがはっきりしてきました。たとえば電気現象は、とくにガルヴァニ、ヴォルタ、ファラデーの種々な発見以来、物理学者の興味の中心となりましたが、力学の概念の体系の中にうまく当てはまりませんでした。ファラデーはそこで弾性体の理論にならって力場という概念を見出し、その変化が物体の運動と無関係に調べられ説明されました。このような出発点からマックスウェルの電磁現象の理論が発展し、それからアインシュタインの相対性理論ができ、最後に彼の一般的な場の理論がでてきたのですが、この場の理論によってアインシュタインは物理学の全ての分野の基礎づけへと発展させることができると希望しておりました。ここではこの発展の詳細に立入ることは致しませんが、ここで私たちの考察に重要なのはただ今世紀の

初めにおいてさえ、このような発展のために物理学は決して統一されたものではなかったという点であります。物体は、その運動は力学によって調べられましたが、その力は全く違った何かによって作用されるものでした。その力は運動をひきおこし、またその固有な自然法則によって、その固有な実在性を力場の場として表わしておりました。種々の異なった力の場が互いに無関係に存在しました。前からよく知られていた電磁氣的な力と重力に、さらに化学的な結合力、また最近の数十年間に、原子核内の力とまた放射性崩壊をひきおこす相互作用がつけ加えられました。

このように非常に違った種々の直観的な叙述また種々の違った力の型があるということの結果として、科学が避けることのできない問題が提出されました。何故なら、われわれは自然は窮極的には統一的に秩序づけられているということを信じております。すなわち、全ての現象は最後にはただ一つの自然法則から発するということであります。したがって物理学の種々の異なった分野の底に横たわっている共通な構造をあばき出すことがかならずできるはずであります。

「可能的な実在」の 概念による統一

現代の原子物理学は、この目的に抽象化の方法と、またより一般的な概念を構成することによってづ付きしました。原子の探究を解釈する時におこった一見矛盾するようにみえる波動と粒子の叙述が、まず理論的解釈の核として‘可能性’の概念、また‘可能的な実在’の概念構成に導きました。これによってニュートン物理学の物体粒子と、それからファラデー—マックスウェルの物理学の力場の間にある矛盾が解かれました。両者とも同じ物理的実在の表われの可能な形態であります。力と物質の間の対比もその意義を失いました。可能的実在の非常に抽象的な概念がまたきわめて稔り多いものだということが示されました。これによって生物学的なまた化学的な現象の原子物理学的な解釈がはじめて可能になりました。しかし種々の異なった型の場の間の関係についての研究は、最近の新しい実験結果からおこってきたものです。一つ一つの力場に対して、前にいったような可能的実在の意味であるきまった型の素粒子が対応しております。光の量子あるいは光子は電磁場に対応しており、電子はある程度化学における結合力に対応し、

中間子は核力に対応しております。最近の素粒子の実験結果によりますと、新しいこのような素粒子は非常に高速度の素粒子の衝突によってつくられ、またもし新しい素粒子をつくるのに十分なエネルギーが得られるならば、どのような型の素粒子をもつことができるようであります。したがって種々の素粒子はいわばすべて同じ実体 (substance) からつくられております。この実体を簡単に、エネルギー、あるいは物質 (matter) といってもよろしいと思いますが、これらの素粒子は互いに他の素粒子に変りうるのであります。これによって力の場もまた互いに変わりうるのです。またその内的な関係は直接実験によって認めることができます。そこで物理学者にとっては、この素粒子の変換をおこさせる自然法則を形式化するという仕事がまだ残っております。これらの法則は実験の中に見出されるべき事実を正確な、したがって、必然的に抽象的な数学の言葉で表わし、叙述しなければなりません。

この仕事をしとげることは現在実験物理学が高度な技術的な方法を使ってわれわれに供給してくれる情報を考えるならば、それほど難しいものではないはずです。この時空に関

係した‘可能的な実在’の概念とならんで作用は光の速度よりも早く伝えられることができないという要請が特別な役割を演ずるように思われます。数学的な構成のためには最後に群論的な構造、対称の要請のすべてが残されていますが、これはかなり簡単な数学的な命題で表わすことができます。このような構造が経験を完全に説明するために十分であるかどうかということは、何度も繰り返してきたような‘発展’の道筋を通してはじめて明らかになります。しかしその細かい点については、ここでの考察には重要ではありません。基本的には物理学の種々の異なった分野の関係についてはすでに最近十年間の実験によって説明されているようであります。私共はこの輪廓の中に自然の統一的な物理的構造が認められると信ずるものであります。

ここで、抽象化の本質の中におかれている自然の理解の到達限界について一言すべきであると思います。もし最初にただ一つの性質をとり出すのに他の多くの重要な細かい点が無視されたと、その一つの性質によって現象を秩序づけることに成功しても、その全体の構成をつくりあげる時に必然的にある制限をおくことになります。それはいわば骸骨の

ようなものであります。それに非常に多くの詳細な点をつけ加えることによってはじめはその現象の本当の表現になりうるものであります。現象とその根本的な構造との間の関係は一般に非常に複雑なので、その詳細にわたって常にあとづけることはできません。物理学においてのみ、現象を直接叙述する概念と、自然法則の形成においてつくられた概念との間の関係が実際に明らかにされましたが、化学においてはこのことはかなり限られた範囲においてのみ成功しましたし、そして生物学はようやく、今僅かの箇所において、如何に生命に関するわれわれの直接的知識に基づく概念が基本的な生物学の構造とどのように合致するかということがわかりはじめてきました。それでも抽象化によって得られた理解はある程度現象を関係づけ、秩序づけることのできる自然な座標系につながります。このようにして得られた宇宙の理解というのは、われわれが根本的にのぞみ、常にそれをえようと努めている知識に対して、ちょうど非常に高く飛ぶ飛行機から見た景色がその中で生活することによって得た描像に対すると同じような関係をもってあります。

限界のなさ を恐れず

ここで最初に考えた問題に戻ってみましょう。もろもろの科学における抽象化への傾向はしたがって、窮極的には人間理性の常に問いかける必然性、また統一的な理解に対する努力という点にかかっております。ゲーテは、彼がみつけ出した *Urphänomen*, つまり「一義的な現象」、あるいは「根源的な現象」に関連して、このことをなげいております。彼はその色彩論の中で次のようにかいています。‘さて、このような根源的な現象が見出されたとしても、まだそれをそのものとして認識しようとしなないというなやみが、また、もしわれわれが直接経験の限界を告白しなくてはならないなら、さらに根源現象をこえて、その彼方に何かを求めるというなやみがのこるでしょう’と。ゲーテはここで、もしわれわれがその問いかけを続けていくなれば、抽象化へのあゆみを避けることができないということをはっきりと感じておりました。ここで‘その彼方に’という言葉で彼が言おうとしていることは、ちょうどこの抽象化の次の高い段階であります。ゲーテはこのことをさけようとします。われわれは経験の限界を認めなければならないし、それを

こえるということをしようとしてはならない、何故ならこの限界の彼方においては、直接経験は不可能であり、そこでは可能的な経験から離れた構成的な考え方の領域がはじまるからです。このような領域はゲーテにとっては常に奇異なものであり、また気味のわるいものでありました。とりわけ、おそらくこの領域には限界がないということが彼を恐れさせたからです。ゲーテと全く違った考え方をする思索家のみが、ここでは明らかなこの限界のない拡がりにはひかれました。‘多くの人々にとって抽象的なものは困難である——私にとってそれは気分のよい日には祭であり、陶醉境である’といったのはニーチェでした。しかし自然について反省をする人間は、その問いかけを続けます。何故なら彼らは世界を統一されたものとして把握したいし、またその一様な構造をつかまえたいと思うからです。彼らはこの目的のために、常により包括的な概念をつくりあげますが、それにとまって、それと直接的な感覚的経験との関係は認めることがいよいよ困難になってきます。しかしこのような関係が存在するということは、抽象化が世界の理解の仲立ちをするための無条件の前提であります。

芸術においても
宗教においても

今日の自然科学の諸分野
におけるこの抽象化の道
筋をこのような広い範囲

にわたって考えた後では、私共はどうしても、人間の思考や、生活の他の分野、たとえば芸術や宗教における分野を一瞥し、そこに同じような道筋がとられたか、あるいは今でもとられているかということをききたいという誘惑にかられます。

たとえば、造形美術の世界の分野において、単純な基本的な形から、ある美術の様式が発展する場合と、ここでわれわれが抽象的な構成の発展と名づけたものとの間には明らかに相似点があります。たとえばローマの建築における半円と正方形のようなある基本的な形が後の時代において、さらに洗練され、より豊かな様式になるという可能性がすでにその基本的な形の中にはじめから定められているという印象をうけます。したがってその様式の発達新しく創造するというよりもむしろ発展するというふうにみえます。非常に重要な共通の性格は、このような基本的な形は発明するのではなくて、ただそれを見つけ出すことができるだけだという点にあります。このように基本的な形は本当の意味での客観性

をもっております。物理学においてはそれは実在を表現するはずでありますし、美術においてはそれは今考えている時代の精神生活を表さなければならないものです。人は適当な環境のもとではそのような役目をはたすことのできる形があるということを、見出すことはできますが、それらを簡単につくり出すことはできません。

これよりもっと判断するのに困難な意見がしばしば述べられております。それは現代美術の抽象性が現代自然科学の抽象性とその内容において何かのつながりをもっているという意見であります。もしこの点についての比較が正当化されるとするなら現代美術はそれ以前の美術では表現することができなかったような、もっと広範ないろいろな関係をみとおせるような関係を表現し、それを可視的にする可能性を獲得したということになります。しかもそれは可感的な経験との直接の関係を断つことによってです。すなわち、現代の美術は古典的な美術よりも世界の統一性をもっとよく再現することができることになります。しかしこのような解釈が正しいかどうか私は決定することができません。現代美術の発展はしばしばこれとは異なったように解

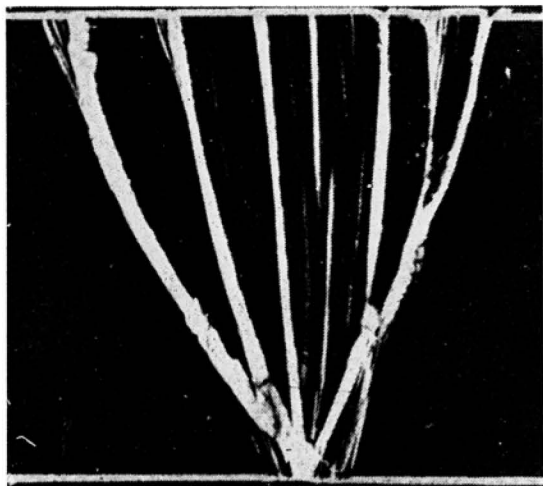
釈されております。たとえば宗教的なきずなのような古い秩序の崩壊がわれわれの時代においては美術における伝統的な形式から解かれることに反映し、そこではただ僅かな抽象的な要素が残っているとします。もしこれが正しい解釈であるなら、現代自然科学の抽象性とは何の関係もありません。何故なら科学の抽象性の場合には実際もっと広範囲にわたる種々の関連性への新しい理解がえられるからです。

おそらくここで歴史の分野からのもう一つの比較を述べるのが許されると思います。抽象化は常に続く問いかけと、また統一化への努力からおこるということが宗教の歴史の中のもっとも著しい出来事の一つの中に認められます。ユダヤの宗教における神という概念は、世界の中における働きが直接に経験できるような、もろもろの異なった自然神の概念と比べると、より高い抽象化の段階を示しております。このような高い段階においてのみ神の働きの唯一性が認められます。マルティン・ブーバーの考えに従いますと、ユダヤの宗教の代表者たちとキリストとの争いは、抽象化の純粋性を保つということをめぐる争いでありました。すなわち、すでに一度え

られた高い段階を主張することをめぐってでありました。これに対してキリストは、抽象化そのものは決して生活から離れるべきではないという要求を強調しなければなりませんでした。すなわち、人間は、この世界の中にわれわれの理解できる神のすがたがもはや存在しない時にも、神の働きをこの世界の中に直接に経験しなければならないとしたのであります。

このことに非常に明らかに表われているような全ての抽象化におけるもっとも重大な困難は、科学の歴史の中においてわれわれがあまりにもよく知っている事実であります。自然科学のいろいろな主張が自然の中に実際観測することができないようなものであるならば、そのような自然科学は価値のないもので

ありましょう。またもし芸術が、人間を動かしたり、あるいは感銘を与えることができないものになるならば、そのような芸術は価値のないものでありましょう。しかし私共はここで現代自然科学の抽象化の発展のみを、よりよく理解しようとするにつとめてきたのですから、この点についてあまり深く立ち入ることは適当ではないと思います。私はそこで次のような命題を述べるにとどめようと思います。人は、自分を取りまく世界の内的な関係を認識し、そこで生活するために、この世界にたえず問いかけをつづけてゆきます。そしてそのような問いかけを通じて、現代自然科学のきわめて広い種々の体系が形づくられてきたのであります。



第 12 図

きょう、仁科先生の記念講演会で「割れ目」の話をするようにというご指名を受けましたことは、わたくしといたしまして、たいへん名誉なことだと思っております。仁科先生の研究室とは違っておりましたけれども、わたくしも仁科先生がご健在のころ理研（理化学研究所）で勉強させていただいた関係で、特に仁科記念講演会で話をする機会を与えられたということのを、非常にうれしく思っております。

割れ目の話

1962 年 12 月 6 日朝日講堂における
定例第 8 回仁科記念講演*

平 田 森 三

人類最初の道具

割れ目、物がこわれるということは、みなさんいたるところで日常ご経験になっていることでありまして、今まで見たこともないというふうなものをお目にかけるわけには、なかなかいかないのでありますけれども、しかしよく考えてみますと、現在の科学技術的な問題、それからいたるところに、物の破壊であるとか、あるいは割れ目に関係した非常に重要な問題があるように思います。それは現在だけではございませんで、ずっと昔にさかのぼりまして、われわれ人間が実際に道具を使い始めた

* 講演者平田森三教授は、本財団発起人の一人であり、その後も財団のためにいろいろ数々のご助力をたまわった恩人ですが、昨年 5 月広島被爆による白血病が再発しておなくなりになりました。この講演記録の掲載にあたって哀惜の情をあらたにするものであります。なおこの記録は、教授の没後、録音を再生した原稿をもとにして、この講演のとき幻灯係をされた石川孝夫氏（現在東大工学部助教授）のお骨折りで、現在の形にまでまとめあげられたものであります。

いちばん最初は、どうもやはり割れ目に関係があるように思うんです。それで、そのいちばん最初は、いわゆる石器時代というのがございます。その石器時代の特に最初の時には、打製石器というのが使われておったわけであります。これは、(第1図)、東大の人類学教室の鈴木教授のところから、貴重な標本の中の一つを、できるだけみなさんに見えるようにと思って、いちばん大きいのを借りてきたのでございますけれども、これはどういふのかと申しますと、要するに、石と石とを打ち合わせて、それだけでもって、非常にエッジの鋭い刃物を作るわけです。これで獣の肉を切ったり、皮をはいたり、いろんな目的に使ったわけですから。これはいちばん最初の人間が使った、おそらく技術の始まりというか、道具だろうと思うんです。

ことしの春(1962年)、東大の鈴木教授その他がイスラエルでネアンデルタール原人の人骨の非常に完全なものを発掘されたということは、新聞にも詳しく報道されておりました、ご承知と思うんですが、あの時にやはり打製石器が三つばかり出ております。それを見させていただきますと、今お見せしたような手のこんでいる非常に鋭い石器ではな



故 平田森三教授

くて、もっと簡単ですけども、しかし適当な方法で砕いた岩のかけらの中の、非常に鋭いエッジを利用するような、そういう石器があるんです。非常に小さいし、非常に貴重なものでありますから、きょう拝借していただくことはできなかったわけですが、本質的に考えますと、そういういちばん最初に人間がやった技術が、物の割れ目の性質を非常にうまく利用したものだということになりま



第 1 図

す。それがどういう種類の割れ目を利用したものかということは、あとでまたご説明いたしてみたいと思います。

スパゲッティ
の折れかたで
実験する

物がこわれるということは、われわれが日常経験することですから、いろんな人が関心をもって、これについての議論をしているわけでありまして、たとえば二千年ぐらい前のギリシャの哲人なんかは、もしここに非常に一様な、均一な物があるならば、それは相当大きい力でひっぱっても切れないであろう。なぜかという、どこも同じなんだから、どこも切れるところがないという、まあそういう議論でして、それでもし切れるときには、全部がもし分子みたいなものでつながっているならば、全部の分子の枝が切れるの

だから、さっと霧のごとく散ってしまうであろうと、そういう議論をしているわけです。それはまさにほんとうであります。ところが、実際には、物はひっぱったり曲げたりいたしますと、必ず割れ目ができてきてこわれる。それはどういうことかという、どんなに一様に作った物であっても、実際に天然にできる物では、完全な意味での均一な物質はないということであります。

どういう不完全さがあるかということは、比較的近年になりましてから、追究されるようになりましたけれども、原理的にはまさに二千年前の人がいったように、もしほんとうに均一な物があるならば、それこそ分子の結びつきの力までは必ずもちこたえるはずです。たとえば、非常に細い針金1本で今もちこたえられる物よりもっと大きい物を、何千倍の重さの物をつり下げることが可能ではありません。

それでは、実際の物をひっぱったときに、どのくらいで切れるか、いわゆる破壊の強度とは何かという問題であります。たとえば、ある物の密度はいくらかというようないろんな物の性質は、どの物を取っても相当のけたまできちっと合うわけであります。つまり水

の摂氏4度における密度は 1.00… というふうに非常に正確にきまっているのであります。ところが、非常に注意をして一様に作った物でありまして、それが切れるときの強さはどのくらいか、毎平方センチ何キログラムの力をかけたならば切れるかというようなことは、一応その物の性質としてある程度はきまっているようにいわれておりますけれども、実は密度だとかがきまっているようには正確にはきまっていない、元来そういった性質のものであります。つまり、あるときある強さでひっぱったら切れた、それならばそれとまったく同じ物をそれよりもう少し大きい力でひっぱったら必ず切れるかという、そうではない。切れないこともある。それで、破壊強度というものは非常にばらつきの多い、一つの標本ともみられます。

ガラスはちょっと危険ですから、ここにはスバゲッティをもってきました。スバゲッティは非常に一様な構造の物質でありまして、かなりの弾性をもっています。だから、こう曲げてやりますと、ばねと同じであります。曲げても放せばもとに戻る。曲げれば折れます。曲げれば、外側がひっぱられて内側が押されますから、曲げて折るのとひっぱって切

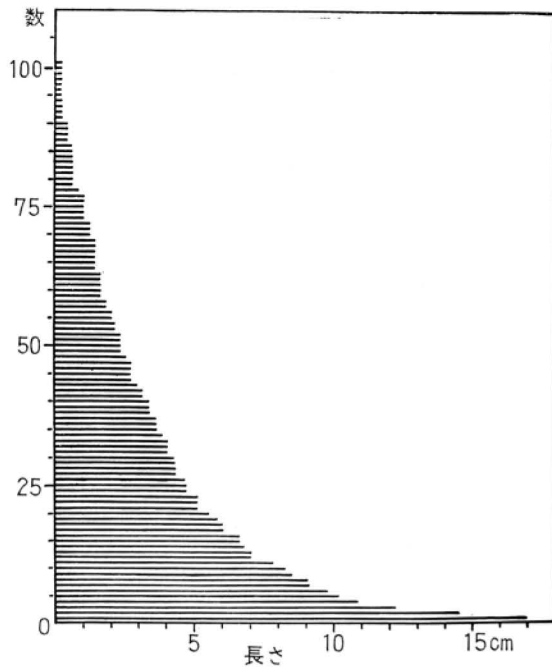
るのとは同じであります。スバゲッティを一様に曲げていったらどうなるか。どれくらい曲げたら折れるか。実際に、いろいろな金属とか、はがねとかがどのくらいじょうぶかということは、原理的には、スバゲッティをどのくらい曲げたら折れるかということと同じであります。たとえば、どこに力をかけるかとか、どういうふうに曲げるかとか、油圧を使って非常に大きい力をかけたらどうかとか、どんなふうに曲がったかということ、非常に正確に測りますけれども、原理的には、スバゲッティを曲げるのと同じことをやっているわけであります。

そこで、スバゲッティをこういうふうに曲げていきますと、ある力のところで、こう切れます。それでは、これと同じスバゲッティをさっきと同じくらいのところまで急に曲げれば、これはもう必ず切れると思うわけです。今は手でやるわけですから、さっきと同じだけというわけにはいきませんが、機械を使えば可能なわけあります。かりにそうやったとしたとき、そうやったその瞬間に必ず切れるかという、実際に詳しく調べてみますというと、その瞬間には切れないんですね。その瞬間に切れることもあるけれど

も、たとえば 1000 分の 1 秒とか、1 万分の 1 秒とかたって、はじめて切れる。それから、場合によると何十分の 1 秒たって切れる。つまり、同じ方向に同じ力をかけましても、実際に“破壊”が起こるまでには時間のむらがあるわけです。どんなに材料を均一にして、どんなに正確に測りましても、そういうむらが必要出てまいります。そのむらは、非常に簡単な特色をもっておりまして、その特色は、簡単なことばでいい表わせます。

それからもう一つ、割れ目に関しまして、たとえばスパゲッティを一樣にこうゆっくりと曲げてまいりますと、どこかで切れるわけですが、一樣に曲げれば、曲げ方が一樣ならば、どこで切れてもいいわけです。どこで切れなければいけないということはないわけですね。ゆっくりやりますと、さっきのように、どこかひとところで切れるということになりますけれども、適当な方法で非常に急激に、ある曲率でぱっと曲げてやりますと、いくつかの点で切れてまいります。割れ目が同時にいくつかできます。その割れ目と割れ目の距離や間隔は、いろんなむらのあるものができるわけです。ですから、両はじをはずして考えますと、短いかけらや長いかけらや、いろ

んなかけらが出るわけですね。こういうことを何十回もやってみますと、長いものができたり、短いものができたりするわけです。それで、それがいったいどういう分布になっているか。つまり、どこにでも同じように割れ目ができる危険性がある、それでどこへできたか。いっぺんできたところとその隣りとの間の距離はどのくらい離れるか。こういうことは、まったくでたらめに分布するわけです。でたらめに分布しているというのは、いったいどういう分布なのか。その長さのばらつきはどういう形になるのか。これは、わたくしどもがガラスでやりましたし、アメリカでもスパゲッティで何千本かやっている人もあるんですが、同じような結果が出ています。その結果はどうかというと、第 2 図のようになります。これは 100 本ぐらいですけれども、その破片を集めまして、1 本、2 本と長い順から積み重ねていきます。そうしますと、長いものが 1 本ある、その次のものがこの長さである、その次はこれであるというふうにして、短いもののほうへいきますと同じものの数が多くなります。短くなるほど同じものの数が多くなってまいります。この図の場合は少しふらふらしていますが、ある曲線



第 2 図

に乗っています。

さっき申しましたように、ある力を急にぱっとかけたとき、その瞬間に割れるものももちろんたくさんあるんですけども、しばらくたってからはじめて割れるものもある。その時間の遅れを第2図で長さを書いてあるのを時間と置き換えて考えれば、やはり同じような曲線に乗ります。こうしたことは、ガラスのように非常にもろいものについていえることで、金属のようなものでは、またあとか

ら申しますように、もっと複雑なんですけれども、とにかく典型的なばらつきの様子を示しております。

統計的ばらつきの
例は宇宙線にも

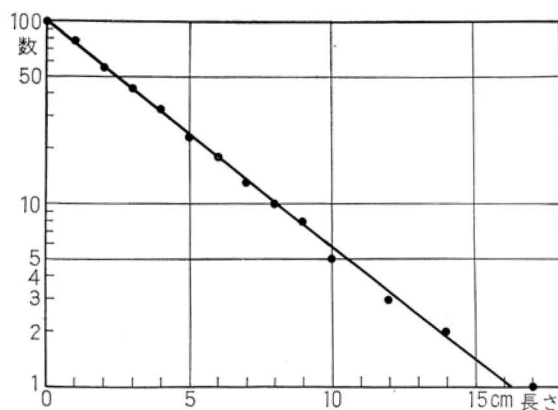
その典型的なばらつきと
いたしましては、宇宙線
が一つの非常にいい例で

ございます。今、宇宙線の音をお聞かせいたします。これは宇宙線のカウンターでございまして、ここにこの講堂の屋根を貫いて、真上から宇宙線がボンボンとくるわけです。それがこのカウンターにはいるたびに、音がしているわけですが、一つやってきたとき、その次がすぐまたきたとしますと、それがあまり早くきたのでは、カウンターの中の電氣的な装置がもとへ返るのに時間がかかりますから、この装置でいいますと、だいたい10万分の1秒以内にきたものは数えることができません。それ以上たてば数えることができます。今はそれをさらに音にしていますから、今度は音にするために、1000分の1秒くらいおいて続けてきたものは一つの音にしかありませんけれども、これを聞いておきますと、とにかくむらがあります。しばらくこないときもあり、ぱらぱらとくるときもあります。これをお聞きになっいて、何か周期が

あるような気がするかたがあるかもしれないんですが、この音を正直に記録して、いっぺんボンといてからその次にボンというまでの時間間隔をたくさん測ってみます。そういう研究は宇宙線の研究が始まってからかなり詳しくやられているわけであります。

たとえば、ここに夜光塗料を塗った時計がありますが、これを近づけますと、もちろん音の数がふえます。このときは宇宙線プラス夜光塗料から出る放射線ということになりますけれども、こうしたものを離しておけば、聞こえるのは宇宙線だけであります。それでは、それがどのくらい聞こえるか。今、わたくしが黒板にゆっくりと、できるだけ様な速さで線を引いていきます。そして、ボンと音がするたびに印をつけることにしますと、こんなふうになります……。

……それで、この長さをですね。この長さを書き写していちばん長いものから順に並べたとしますと、ちょうど第2図と同じようになります。第2図だけでははっきりわかりませんが、本数のほうを対数をとって書き換えてみます。そうすると、第3図のように、非常にきれいな直線になります。それはどういうことかという、いっぺん音がして



第3図

からしばらくしないでいて、それからあとどのくらいたったら音がするであろうかというその確率みたいなものが、一定だということでもあります。いわばどの時間を取りましても、宇宙線がやってくるその確率というのは同じだということでもあります。割れ目の場合にも、ある一定の条件で力をぱっとかけますと、それからどのくらい時間がたったらほんとうに破壊が起こるか、その時間の遅れのばらつきは非常に単純なばらつきの見本といわれる宇宙線の時間的な分布と、非常によく似ているわけであります。

ばらつきを調べる
と何の役に立つか

それでは第3図のようにした場合に、直線の傾斜を決めているものは何

か、どの時間にも同じくらいの確率で破壊が起こるその確率を決定するものは何かと申しますと、それはその物質の分子の結びつきの力で決まる。つまり、その物質にどのくらい力をかけたらどのくらい伸びるかという弾性に関する力、あるいはその中に新しい割れ目ができたときに新しい表面のエネルギーができるわけですが、その表面エネルギーがどのくらいの大きさになるか、そういうことで決まるわけでありす。それではなぜばらつくかという、実際の物体は分子の結びつき、ある程度以上近づくと反発し、ある程度以上離れようとする、と元へ引きもどそうとする分子の力によって、ある形を保って分子が集まっているわけでありす。ところが、分子はけっしてじっとしているのではなくて、そのときの温度で決まる激しさで、盛んに動き回る、振動しているわけでありす。割れ目ができるというのは、何かある決まった場所のまわりに分子が盛んに振動しているその振動が適当な組み合わせになったときに、割れ目ができるのでありす。だから、それはどうしても確率的なものになります。いつできるということではなくて、まったくでたらめである。しかし、でたらめといって

も、ある確率が決まっている。一定の確率が決まっていても、実際に現象が起こるやり方をみると、やはり第2図、第3図のような、でたらめに見えるばらつきがあるのでありす。

それでは、そういうばらつきを調べると何の役に立つのかということになるわけでありす。一つにはそういう物の結びつきの本体を知る手がかりになります。第3図の傾斜が何を意味するかということ进行分析することによって、固体の中の分子を結びつけている力の性質を調べることができます。それから実用上の目的から申しますと、われわれはできるだけじょうぶなものを作って、物がこわれるのを防ぎたいわけでありすけれども、それではどのくらいじょうぶにしたらいいだろうかというときに、もちろん材料の試験をしまして、破壊強度というのを測るわけでありす。けれども、その破壊強度というものは、今いったように、すっきり決まった値ではなくて、とにかくある幅の間でまったくでたらめなばらつきをもっています。そうすると、あることを百万回やってもいっぺんもこわれないかどうか、あるいは一千万回やってもいっぺんもこわれないかどうか、そういう



写真左：講演前，控室におけるハイゼンベルク博士夫妻。

写真上中：歓迎パーティーで歓談するハイゼンベルク博士（右端），朝永理事長，石川理事（左端手前）および菊池正士氏。

写真上右：同じく歓迎パーティーにて，左からハイゼンベルク博士夫人，ハイゼンベルク博士，朝永理事長，菊池正士氏，嵯峨根理事および長岡理事（三井倶楽部にて）。

写真下中：講演中のハイゼンベルク博士と通訳する柳瀬教授。

写真下右：講演に聴き入る聴衆。

ハイゼンベルク博士講演会と歓迎パーティー





どのくらいやってもだいじょうぶかという安心さといえますか、安全率というふうなものを、どうしても考えざるを得ない。実際に物を作るときには、普通の試験をして、それに対してこのくらいみておけばいいだろうというふうに、さらに安全係数というのを掛けております。10倍とか、ものによっては20倍とか、そういう安全係数を掛けて構造物が設計されているわけでありすけれども、そういう安全係数というのは、従来はいわば経験によって、このくらいでやってみたらこわれたから今度はもう少しじょうぶにしようやというふうな過去の経験の積み重ねでできていたのであります。そのような経験によってできた安全係数というものに対して、ほんとうの安全係数がもう少しはっきりとわかる見通しが、今わかっているわけではありませんけれども、そういう方向にわれわれの研究を進めていく可能性があるというのであります。

それではいったいなぜある限度に近づくと割れる確率が生まれてくるのだろうかということは、初めに申しましたように、物がまったく均一ではなくて、どこかに弱いところがあるからである。つまり、ガラスのような場

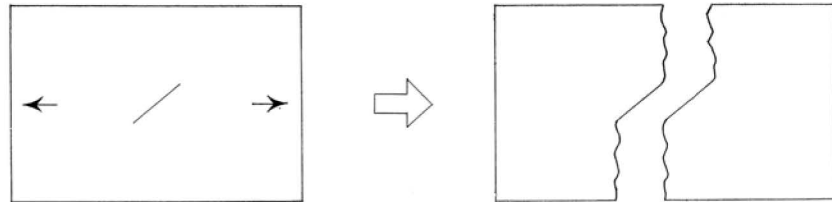
合には、潜在的に非常に小さい割れ目があるのではないかということであります。たとえば、船や橋を作るときに、穴をあけた鉄板をリベットでつなぎ合わせておりますが、そうすると鉄板に穴があいたためにどのくらい弱くなるか、それは昔からかなり詳しく調べられております。その丸い穴を今度はだ円にしてみますと、これも数学的にどのくらいのだ円にしたらどのくらい弱くなるかという勘定ができるわけであります。その限度として、非常に細いすきま、ひび割れがあったらどうなるか。直線的なひび割れの小さいのがあったらどうなるかといいますと、そのためにひび割れのはじめのところに力が集中いたします。それで、ほんとうは比較的小さい力をかけても、ひび割れの先のほうに非常に大きい力が集中いたしますから、そこからひび割れが伸びていく。その伸びていくときに、さっきいったように分子の振動が関係してくる。分子の振動がある組み合わせになったときに伸びる。そのような組み合わせになるのは、けっして決定的にではなく、確率的にしか起こりませんから、ひび割れが伸びるか伸びないかということに、いろんなむらができてくるわけであります。

ひびわれの伸
びかたの法則

それで
は、ひ
び割れ

はどちらの方向に潜在的
にあるのかというと、ど
の方向にも一様に分布し

ていると思うんであります。それをたとえばある方向にひっぱったときに、どちらの方向に伸びるかということを、厳密な意味のモデルではありませんけれども、頭の中にそういう様子を描く助けになるかと思ひまして、こういう実験をやってごらんに入れます。これは普通の紙です。これをただひっぱりますと、なかなかじょうぶで破れませんが、この紙の上にカミソリですきまを作ります。カミソリで斜めに切れ目を入れます。そして両方にひっぱってみるわけです。ほんとうは両端を一樣にくわえて一樣にひっぱらなければいけないんですけども、ここではそういうわけにはいきませんから、手でやっても似たようなことをうまく実験するために、ゆっくりひっぱらないでむしろ衝動的に速くひっぱってみます。はたしてどういうふうに入きますか(第4図)。これをごらんになるとわかりますように、カミソリで切りました切れ目の傾



第 4 図

きをどんなにいたしましても、張力の方向に直角の方向に切れ目が伸びてくる。切れ目が張力に垂直であれば、自然にそのまま垂直に行きますが、斜めであっても張力に垂直に伸びます。

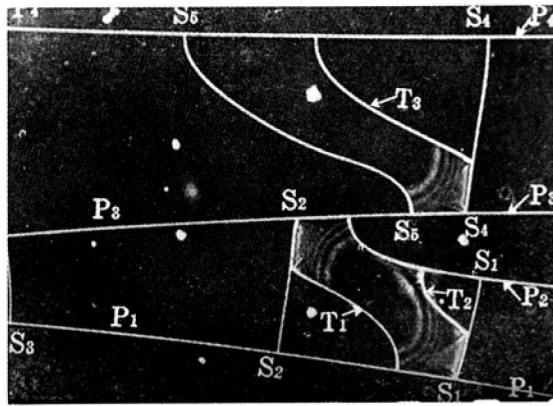
これと同じように、ガラスのように一樣なものの中には 1000 分の 1 ミリとかあるいはもっと小さいすきまがいっぱいあります。それにある方向に力がかかりますと、ひっぱる力の方向と直角の方向に切れ目が伸び始めます。そのとき、一樣にするすると伸びるのかというと、実はさっき申しましたように、ある力をかけてからほんとうに割れ目が出発するまでに、時間のばらつきがあるわけです。それはどういうことかと申しますと、たとえば空気中に水蒸気がたくさんありまして、それをある程度以上温度を下げてまいりますと、水蒸気が固まって水になるわけですが、非常にゆっくり温度を下げてまい

りますと、もうほんとうは水蒸気が固まって水になっていいはずの温度になりまして、まだ水蒸気のままになっております。過飽和の状態になります。そうなったものは、みなさんが飛行機雲なんかでよくごらんになるように、何かきっかけがあってはじめてほんとうの凝結が起こるわけです。割れ目の場合も、いろんな方向にある小さい潜在的な割れ目の先に力が集中いたしまして、伸びようとするわけですが、分子の熱運動的なものから由来するばらつきによって、ある程度過飽和の状態が必ずあるわけです。そこで、それが出発いたしますと、割れ目がある一種の慣性をもって、張力に垂直な方向に飛び出す。力のかかっている場の中へ、ある慣性をもった割れ目が飛び出す、そういうふうな考え方をすることがある程度可能であります。けっきょく、割れ目といたしましては、もともとは何かすでにそういう種があって、そしてその種がどんな方向のものであっても、ある力がかかると、いちばん大きい張力のかかる方向に垂直の方向に、何かある慣性をもったものが飛び出していく。それは、モデル的に申しますと、重力が働いている場に何か慣性をもっているものを打ち出すと、打ち

出したときには打ち出された方向に行きますけれども、やがてだんだん曲がってくるのと同じであります。

物に弾性の力が働きますと、その物の自由なはじめでは、いちばん大きい張力がどっちの方向に働いているかと申しますと、いつもその自由な縁に対して平行に働いています。ですから、もしも割れ目がいっぺん出発いたしましたでだんだん縁に近づいてまいりますと、いつも縁に対して垂直に曲がろうとするような、そういう力がかかっているわけあります。そういうことは、もうすでにいろんなところで日常ごらんになる割れ目にその特色が表われているわけですが、念のためにごらんにいれます。

今、映しますスライドは(第5図)、普通の顕微鏡写真でございしますが、ガラスの表面に電気の火花をばちんとはわせます。はわせますとガラスの表面の数ミクロンのところがだいたい百万分の1秒くらいの非常に短い時間の間、ある程度高温に、半分溶けたような状態になります。そしてまたあとすぐ冷えるわけあります。そうすると、これでは縦の方向に電気火花をはわせたわけですが、縦に細長い部分が急にぱっと熱

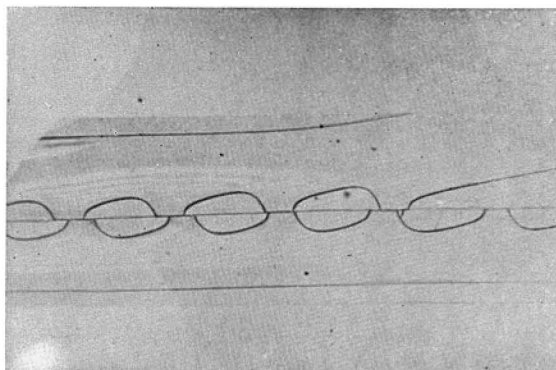


第 5 図

くなって、それからまたすっとさめるんでありますから、全体としては軸の方向にひっぱられる力が働きます。しかし、また同時に、幅が狭くなろうとするような縮む力もあるわけですが、軸の方向にまっすぐにひっぱろうとする力が強いものですから、まず最初にはだいたい平行な方向のほとんど直線的な割れ目が、たくさん出てまいります。これを顕微鏡の下でもう少し拡大して見ておきますと、第5図にありますように、ほぼ水平なもの P_1, P_3, P_4 というような割れ目が見えます。そしてその次に、たとえば T_1, T_2, T_3 というような割れ目ができてまいります。顕微鏡で見えておきますと、水平な割れ目の間に、まず T_1 みたいなものが出まして、それからその次に

T_2 が出たり T_3 が出ます。しかし、これはどこから出るのが順序だということはまったくございません。そこで、たとえば T_1 でごらんになるとわかりますように、この割れ目の最初のきずはどこにあるかという、ガラスの内部よりもやはり自由な縁に存在する確率が多いものですから、 P_1 という下の斜めの線を自由な縁として出発しまして、縁に直角に上のほうへ伸びていき、自由な縁までいくわけですが、そのときはもうけっして直角ではないわけです。かなり角度をもったまま、 S_2-S_2 という自由な縁にすっとはいって消える。だから、こういう割れ目を見ますと、その割れ目がどちらから出発してどちらへ行ったのであろうかということに、ある程度見当がつけます。たとえば、 T_3 はいちばん上の水平な割れ目を自由辺として、そこから出発して、斜めに右下のほうへ伸びてきて、だんだん斜めになっていく。そして、終わっているということでございます。

そこで、これをもっとあらかじめ熱ひずみで一方向にうんとひずみをかけておきまして、そしてさらに電気火花を飛ばしてやりますと、非常に細い平行な割れ目ができます(第6図)。この画面では、画面の幅が5ミリ



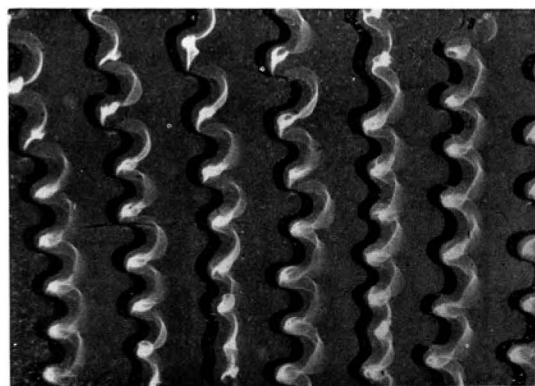
第 6 図

ぐらいであります。水平方向にほぼ平行な細い割れ目がたくさんできます。それをさらに見ておきますと、しばらくたってから、曲がった割れ目がすっとできてきます。これは非常に速いもので瞬間的にできてしまいますが、さらにしばらくたちますと、また別のところにすっとできてきます。こういうものが次々にできてきて、この画面のようになるのであります。これはどういうものかという、この部分は全体として縦の方向にひっぱる力が働いているのであります。それによって水平な割れ目ができますと、その割れ目によってできた帯状のものが、今度は水平方向にも縮もうとします。その力によって、最初の割れ目の上のあるところから垂直に割れ目が出ていきますけれども、それが伸びてい

くと、そこにはまだ縦方向にひっぱる力が働いている。それからどういう形に伸びていくか、簡単な解釈はできませんけれども、とにかくいろいろな条件を満たすような力を受けて、だんだんと曲がって行って、最初の割れ目のほうへもどってきて、少し斜めにはいつて終わります。場合によっては、もとへもどらず、新しい水平な割れ目になることもあります。割れ目ができると、そのへんの力の場が変わりますから、それができたあとでまた別のところにできてくるわけでありす。

ガラスの割れ
目も条件次第
で千差万別

こういうものの例をもう少しお見せします。第7図は大きいガラスの板を一様に炉の中で熱しまして、それをゆっくり水の中

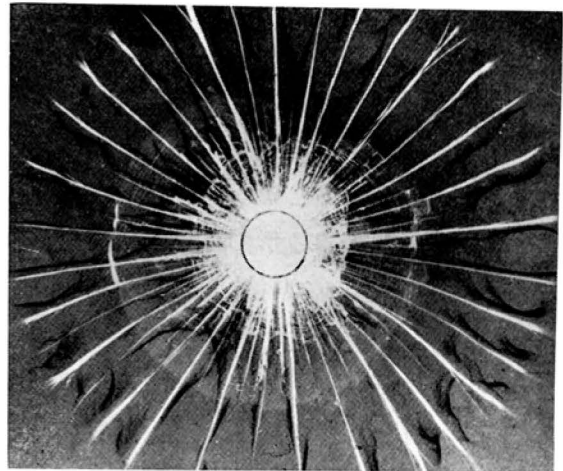


第 7 図

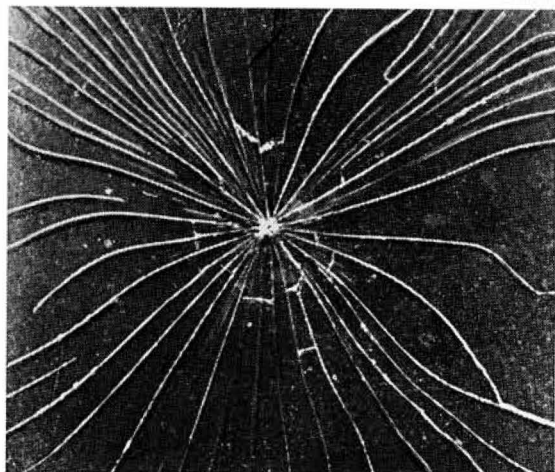
へつけていったものです。そうしますと、水につかっていく部分が、いつも縮まろうとしますから、そこに非常に大きい張力がかかるわけです。それで、縦に割れ目ができてきます。その並び方はどんなふうになってもいいわけですが、実際にはある小さな割れ目がかりにできたといたしましても、あまり近いところに隣りのものがありますと、何というか、吸収されて、一つになってしまいますから、実際の現象としては、かなり等間隔に並んだ割れ目ができます。そのようにして縦に割れ目が並びますと、今度は隣りの割れ目が自由な縁と同じような影響を及ぼしまして、隣りの割れ目に垂直になるように、横方向に曲がっていくわけです。ガラス板をゆっくり水の中へ沈めていきますと、割れ目もゆっくり登ってまいります。それをもう少し拡大して見ますと、伸びだした割れ目が横に曲がって止まり、また縦に伸びだして今度は反対のほうへ曲がる、そういうことをくりかえしているのがわかります。何かしらある質量をもったものが力の場へ投げ出されて、あちこちへ動くという簡単なモデルが、ある程度なりたちます。ただ、それがいったいどのようなスピードで、どういう質量をもったものにあた

るかということは、非常に複雑な問題で、重力の場に物を投げ出したときのように簡単ではありませんが、とにかくそういう関係であることがわかっております。

今まではひと続きのなめらかな割れ目でございましたが、第8図(a)はガラスに鉄の玉をぶつけてできる割れ目であります。このへんのことはあとで申しますが、最初はあらゆる方向に割れ目がスタートするんですけれども、その中で適当なものだけが生き残りまして、この図のように伸びてまいります。この写真は伸びていく途中を瞬間写真にとったもので、実際はさらに伸びていくわけです。ですから、この段階ではほとんど放射状であり



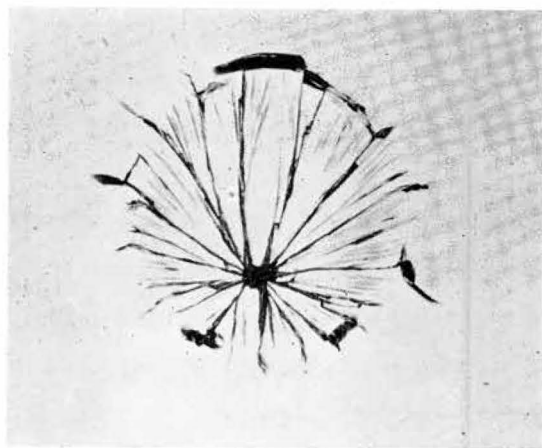
第8図 (a)



第 8 図 (b)

ます。自由な縁というのはずっと遠いところにあります。そこで、この割れ目がもっと伸びてまいりますと、今度は自由な縁に対して垂直になろうとします。第 8 図 (b) がそれです。完全に垂直というわけにはいかないので斜めにはいりますけれども、これは弾性の力の中場で割れ目が運動する、ある慣性をもって運動するというのを頭に置きますと、一応納得できる形で説明できます。

第 9 図は、ガラスの一部分をガスバーナーで半分溶けるくらいまで熱しまして、火を消してさましますと、その部分がひっぱる力になりますので、しばらくするとぱっとこういう割れ目ができるのであります。これを

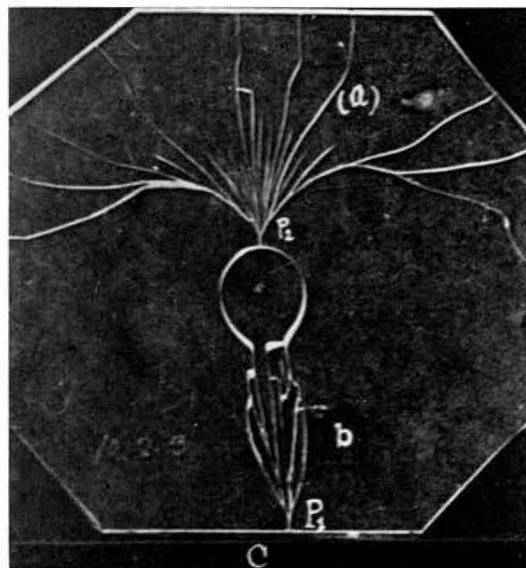


第 9 図

顕微鏡で見ますと、玉をぶつけた場合に割れ目ができる場所とほとんど同じであります。玉をぶつけたときには、ぶつけた側は割れません。反対側が非常に強いひっぱりの場になるので、潜在的にあった小さいクラックをもとにして、割れ目がさっと伸びるのであります。そして、ある程度以上慣性が大きくなりますと、1本ではなくなって、先に次々に枝分かれをしてまいります。それで、第 9 図のようになる。この中心の部分をよく見ますと、最初は 1 本の割れ目で、その先が二つずつに分かれている。それがさらに先で、必ず二つずつに分かれていったたくさんの割れ目になります。その中で適当な条件を満たし

ただのものが生き残るのであります。玉で衝撃したときの裏側の放射状の割れ目の出発点を拡大して見ますと、第9図とまったく同じであります。

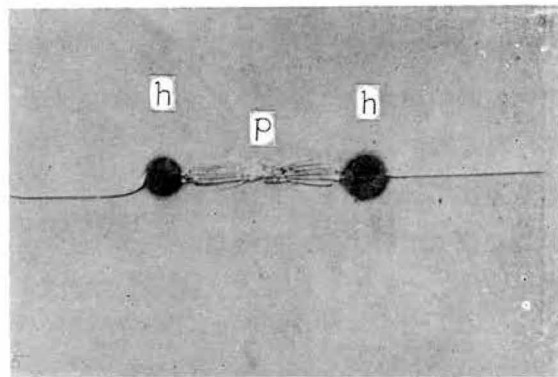
次は第10図であります。第9図は板のまん中を熱して、あとでさましたために、一様にできた力場による割れ目ですが、それでは途中で火を消さないで熱し続けたらどうなるか。そうすると対称的な力を与えているんだから対称的な割れ目ができるかというと、けっしてそうではありません。熱している部分のまわりに張力場ができて、だん



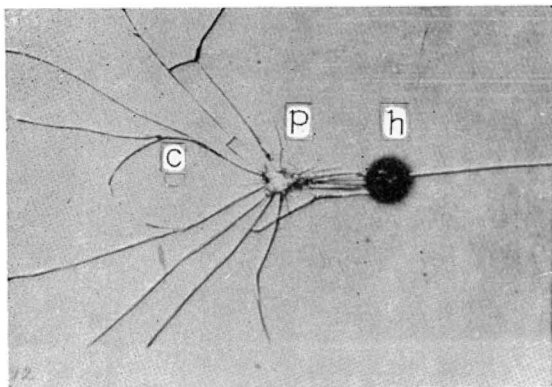
第10図

だん外へ広がっていき、この図では P_1 というところから割れ目が走りだします。そして、まん中の点が熱せられているので、そのまわりの応力場によって、ほんとうならば放射状に分かれていくはずの割れ目が、まん中へ吸い寄せられていきます。そして、その割れ目がまん中の部分をくると取り巻きますと、その上の一点(P_2)から新しく割れ目がスタートし、今度は進行方向と反対の方向が熱せられておりますので、逆に広がろうとする力を受けて、上半分のような形をとります。

今のことをもう少しはっきりさせるために、第11図(a)では、 h と書いてあるところをバーナーで熱しながら、まん中の p と書いてあるところを金づちで軽くたたか、あるいは鉄の玉を落とすかして、割れ目を作り



第11図(a)



第 11 図 (b)

ます。そうしますと、普通ならば放射状に広がっていくはずの割れ目が、熱いほうに吸い寄せられます。これは、いつも張力の場に対して直角になろうとする力が働いているということから説明できるわけです。第 11 図 (b) では、h と書いてあるところを熱し、c と書いてあるところを液体空気で冷やししながら、まん中の p 点をたたいたものです。そうしますと、熱いほうへは割れ目が吸い寄せられますけれども、冷たくしたところではむしろそれを避けて通ります。これも割れ目がいつもおもな張力の場に対して垂直に伸び、しかも慣性をもっているということから説明できそうでございます。

出発点のところだけを注意で見ますと、

機械的な衝撃的な力を受けたときにできる放射状の割れ目の中心の部分と、局部的に急に熱してしました一様な場の中にできる放射状の割れ目の出発点とは、まったく同じであります。

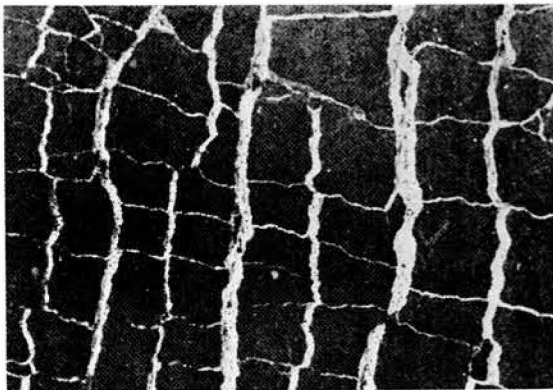
それから、みなさんが日常よく見られるような、ガラスの板を曲げたときにできる割れ目はどうなるかといいますと、そのときは辺から割れ目がスタートし、枝分かれして反対側の辺に向かって伸びていきます(第 12 図, 20 頁左上)。自由な辺に近づいていくときには、辺に垂直になろうとする力が働きますけれども、慣性がありますから直角になりきれず、斜めのまま辺に達するものもあります。厚いガラスほど慣性が大きいのでほとんど直線的な割れ目になり、薄いガラスを割ったときには、柔らかくふわっと曲がって、対辺に直角になってから終わります。

いずれにしても、こういう種類の割れ目では、割れ目自身が交差することが絶対にないというのが、一つの特徴であります。ガラス板をねじって割りますと、いかにも交わっているような割れ目ができますけれども、それはみかけだけのことであります。ねじるということは、表と裏とで方向が直角になるよう

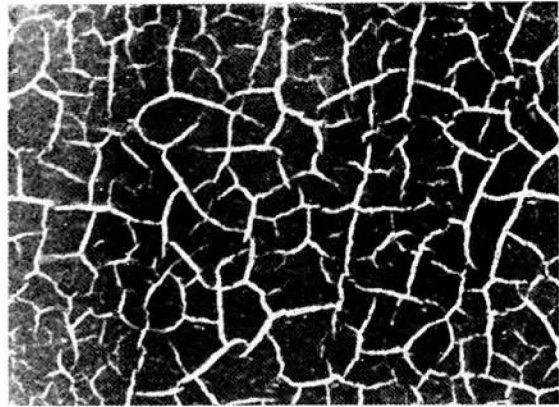
に曲げるということでありますから、表の面にできる割れ目の方向と裏の面にできる割れ目の方向とが直角に交わることになります。それを通して見ますと、いかにも変わった割れ目のように見えますけれども、割れ目自身は絶対に交差してはいないのであります。

粉をかため
たものでは
今までの話はなめらかにひ
と続きのになったものの割
れ目でありますが、今度は

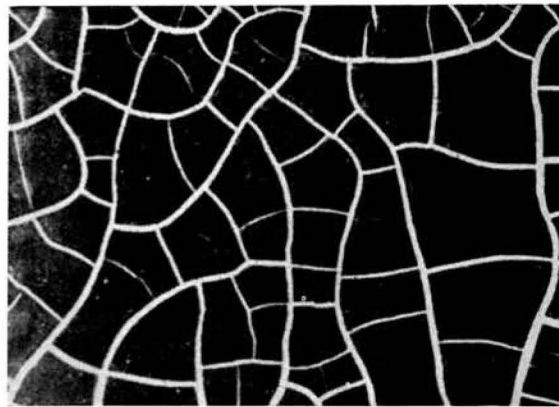
少し組成が乱雑になりまして、粉を固めたようなものの割れ目についてお話いたします。普通の金属は、小さい結晶が一定の方向に非常に小さい粒になって固まり合っているのでありまして、ガラスよりもむしろ粉を固めたものに似ています。ゴム板の上に酸性白土



第 13 図 (a)



第 13 図 (b)

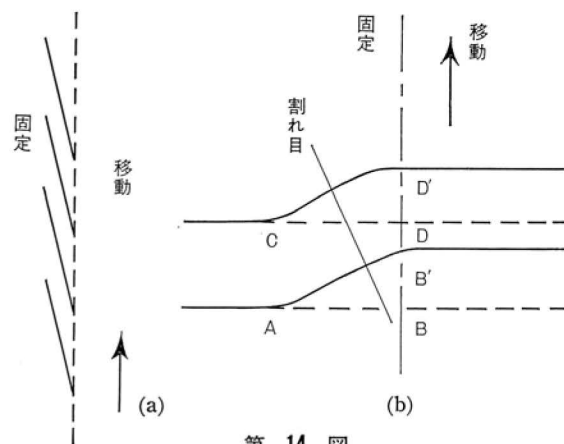


第 13 図 (c)

を水で固めたものを塗り、ゴム板を伸ばしたり縮めたり押しつけたりしますと、伸ばすときと押しつけるときとで割れ目の方向が直角になり、みかけ上交わっている割れ目ができます(第 13 図 (a))。これは、ほんとうは小さ

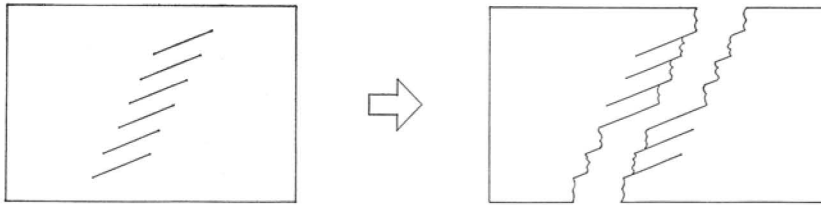
い割れ目がいっぱいあるわけでありす。第13図(b)は普通の粘土の干割れに近いもので、酸性白土にできるだけ粘着剤をいれないで固めてかわかしたものであります。小さい割れ目がまったくでたらめな方向にでき、それがだんだん接近してお互いに仲よくなるんですが、もしこれに寒天みたいなものを少し混ぜまして、粒子の粘着性を増し、力が遠くまで及ぶようにいたしますと、ガラスの場合のように、割れ目がなめらかになってまいります(第13図(c))。実際の実野について、割れ目が交わっているところの角度を測ってみますと、その分布には、 90° と 120° と 180° のところ極大値があることがわかります。粘着力が非常に弱い場合には亀甲型の干割れができて、 120° がいちばん多くなるわけですが、粒子と粒子の間に多少くっつき合う力があって、なめらかにつながる性質とまったく乱雑なものがつながる性質とが混じり合っていると、五角形や六角形が混ざって、 90° 、 120° 、 180° の三つの山ができます。

つぎに、ずれによる割れ目はどうかという、物がずれれば、ずれの境界のところ張力が働きます。その張力は第14図(a)をごらんになればわかりますように、ずれの境の



第14図

面に対して垂直ではなく、いくらか傾くことになります。そこで、割れ目はこの張力の方に直角にでき、第14図(b)のような割れ目が境界線に沿ってできます。そして、これらの割れ目がさらにつながって、ざらざらしたでこぼこの面にはなりますが、みかけ上1個の割れ目になります。つまり、ずれによる割れ目は2段階にできた割れ目であります。この様子を、紙を使ってモデル的にごらんにいれます。前と同じようにカミソリで切れ目を入れておくのでありますが、第14図(b)に見られるような雁行的な割れ目になぞらえて斜めに並んだ切れ目を入れておきます。そして、ゆっくりやらないで、急にぱっとひっぱって破りますと、切れ目がつながって、ず



第 15 図

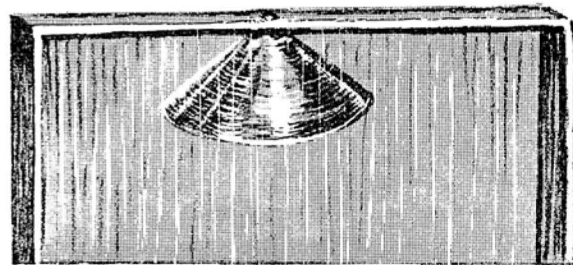
れの方向に平行な割れ目ができます (第 15 図)。

杯状のひびで鋭 い刃物をつくる

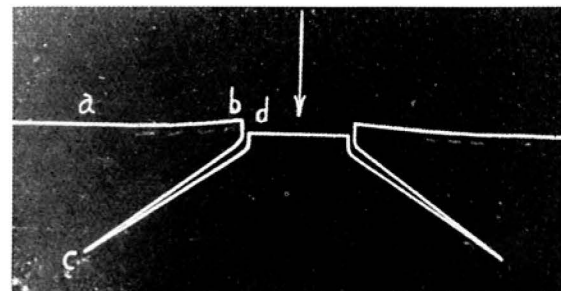
それでは、ずれの力が働いたとき、ガラスではどうなるかといいますと、これもみなさん日常いろいろごらんになっていると思うのですが、その一例をごらんにいれます。第 16 図(a) は、ガラスの上から小さい鉄の玉を落とすか、または強く押しつけるかしたときできる割れ目で、円すい状の割れ目ができます。これをまん中で断ち切った断面図を少し誇張して描くと、第 16 図(b) のようになります。玉を押しつけますと、玉とガラスが弾性的に変形しながら接触し、その接触部分は円形になります。この円周に沿ってひっぱりの力が働き、割れ目ができます。図の b と d の間が、こうしてできた割れ目でありま

す。この割れ目がきれいに作りますためには、玉がバウンドしますと何回も同じところをたたきますので

非常にきたなくなりますから、いっぺんたいてバウンドしたとき、玉をつかまえてしまうような仕掛けをする必要があります。玉とガラスの接触部分の円の直径はだいたい 1 mm くらいで、この円周に沿って枝分かれを



第 16 図 (a)



第 16 図 (b)

するような割れ目ができ、その割れ目をもとにして、斜めにすうっと割れるのであります。

この斜めの割れ目が、初めに申しました石器を作るときの割れ目でございます。実際に原人の作った石器と同じものを複製しようということをやっているドイツ人がおりますが、今申しました斜めの割れ目を利用して作るのであります。石器の材料になるものは、タンバク石であるとかメノウであるとかいうような、ガラス質の非常にきめの細かい石であります。上からたたきますと杯状の割れ目ができまして、それがもとになって割れ目が伸びてまいります。そうやって作ったかけらを使うわけですが、石器の両はじを非常に鋭くとがらすためにはどうするかといいますと、玉を上から落としてたたいたとき、ちょっと考えると外側のほうへ割れるように思うんですが、実際はむしろ中へ斜めにはいっていく、あのきっかけを利用するわけであります。つまり、両側から交互に、適当な方向から適当な力でトントンとたたいてやりますと、杯状の割れ目が表と裏から組み合わさって、非常に鋭い刃をもった石器ができるわけであります。

近ごろ、電子顕微鏡で観察するための資料

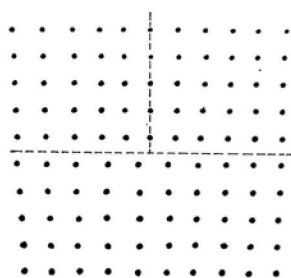
として、ばい菌の切断面とか何とかいうのを見るために、普通はよくいだスチールの刃物で切って切片を作るわけでありませうけれども、ごく薄い切片を作ろうとしますと、はがねの刃では追いつかなくなります。そういう場合には、ガラスの実際の破片そのもののエッジを使うのでありますが、打製石器の知恵を電子顕微鏡の資料を作るのに使っているわけであります。原人が石器を作ったころには、何もないんですから、金づちも使えず、石どうしをぶつけ合って、何回も失敗をくりかえしながら、ずれによって斜めにはいっていく割れ目の特性を利用して、非常に鋭いエッジをもった石器を作ったわけですが、はじのほうからだんだんに刃を仕上げていっても、途中で一度失敗すれば、また初めからやり直さなければなりませんから、おそらく非常に根気のいる仕事であったと思われます。

銅鉄が疲労する
今までは、ガラスのようにきめの細かいもののことばかり申しておりましたが、実用上はむしろ金属やはがねなどの問題がいろいろあるわけがあります。はがねは、ガラスやスバゲッティとは違ひまして、弾性的な変形からいきなり

ぱっとこわれるという性質ではございません。いわゆる塑性変形、つまり力を抜いてももとのまま変形している性質をもっています。そういう塑性の状態を通り越してさらに力をかけていきますと、割れ目ができますが、その割れ目はガラスのように単純に張力に垂直というようななめらかな割れ目ではありません。むしろずれの小さい割れ目が次々につながっているような割れ目であります。それで、実際には、たとえばいっぺんでは割れないけれども同じ力を何回も何回も、百万回とか一千万回とかかけてやりますと、小さい割れ目が次々につながってぴっと割れる。これがいわゆる疲労破壊であります。疲労破壊は、実用上はそれほど問題ではございません。大事な機械ならば、ときどき点検いたしまして、これはもう小さい割れ目がはいつたから少し用心しようではないかというので、対策が立てられるわけであります。いちばん困るのは、ちょうどガラスの割れ目と同じように、いきなりぱっと遠くまで割れ目が伸びてこわれてしまう、いわゆるもろい割れ目、脆性破壊であります。特に、近年になりました溶接が盛んになり、船のように非常に大きいものを溶接で作ることになります

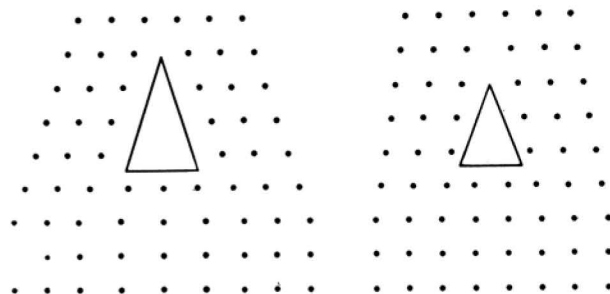
と、脆性破壊が問題になる。リベットでつなぎ合わせた船ならば、割れ目ができてもつなぎ目のところで止まります。けれども溶接した船にもろい割れ目ができると、いっぺんにまっ二つになるからであります。そのもろい割れ方をするのはどういう場合かと申しますと、温度が低いときです。ごく原理的に説明しますと、物が形を保つためにはお互いに分子どうしがひっぱり合っているわけですが、その平衡の位置を中心として、分子は振動しているわけであります。温度が低くなるということは、振動の熱運動が小さくなるわけでありますから、どこかにむらがあったときにそれをすぐ隣りに伝えて力を融通し合う、そういうゆとりがだんだんなくなるのが低温の状態だと思っていいわけであります。つまり低温になるほどむらが多くなるのであります。

金属というのは小さい結晶の粒がいろんな方向に集まったものでありますが、その結晶が完全に規則正しい結晶であるならば、それをこわすのに必要な力は、分子どうしのつながり合いの知識から想像できます。しかし、実際には、そのようにして求めた力のだいたい数百分の1あるいは1000分の1の力で、



第 17 図 (a)

物が塑性変形をしたり、こわれたりいたします。その原因は何かと申しますと、さっき申しましたギリシャの哲人ではございませんが、完全なものがないからでございまして、どんな鉄材にも必ずむらがある。第 17 図(a)では、上へ向う点線に沿って、原子が 1 個ずつよけいにはいっております。そうすると、点線の交わったところに一つの無理のいったところがあるわけでございます。これを転位と申します。物を破壊しようとして力をかけますと、自由な表面にこういうものができまして、ずれの力をかけますと、こういう点は比較的楽にするするっと横へずれていく。それが塑性変形の原因だといわれております。そして、このような転位が集まりますと、第 17 図(b)のように、くさび状のすきまができてまいります。このすきまの両側にある原子は、



第 17 図 (b)

原子どうしの引き合いの力をほとんど無視していいほど離れてしまいますから、すきまの両側は新しい表面であると考えられます。結晶の内部に新しい表面ができたことになります。結晶にひずみをかけますと、内部にひずみのエネルギーがたくわえられますが、新しい表面ができますと、ひずみのエネルギーが表面エネルギーに変わります。そして、そのバランスがくずれると、ひびがはいるわけがあります。こういうひびがだんだんふえて、つながってこわれるのが疲労破壊で、また、長い間同じ力をかけておきますと、だんだんひびが伸びて、ぽっと切れます。

しかし、実用上いちばん問題になるのは、疲労破壊はしてもよろしい。小さい割れ目ならばできてもいいけれども、それが急にさっと伸びたりしないで止まってくればいいの

だということでもあります。それで、その伸びないのにはどうしたらよいのかという問題が、いろいろ研究されています。たとえば、地震が急に起こって、急激にある力が働いて、小さい割れ目ができたとします。そのとき、もしその物体がまだもろくない状態であるならば、その割れ目はすぐ止まってしまいます。もろい状態であると、さっと伸びてしまいます。いったんできた割れ目が伸びるか伸びないか、それは温度によって違ってまいります。ある温度以下であると、割れ目ができればさっと伸びてしまう。それよりも温度が高くなりますと、表面エネルギーがだんだん大きくなりますから、割れ目が伸びることに対しエネルギーの失われる量が大きくなり、割れ目が止まりやすくなります。割れ目が伸びるか伸びないか、その境目の温度を遷移温度といいます、この遷移温度をできるだけ低い温度に保っておくような方法があればよろしい。たとえば、室温が 20 度であるとし、ある板の遷移温度がマイナス 40 度だといたしますと、もし板の中にたまたま割れ目ができたとしても、板の温度が遷移温度よりはるかに高いわけですから、その割れ目はすぐに止まってしまい、ぽっきり折れるというようなこと

はありません。そこで、遷移温度がどのくらいかということをもとにして、溶接をした船が脆性破壊をしないように考えようじゃないかという研究がでてくるわけでもあります。

原子炉の炉 心のばあい

これから原子力発電がだんだん盛んになると思いますが、原子力発電のいちばんもともになります原子炉の炉心は、非常に強い中性子の照射を絶えず受けることになります。はがねに中性子が当たりますと、非常にもろくなります。硬くなってもろくなる。破断試験機で測ったときの破断の強度は高くなりますけれども、もろくなります。もろくなるということは、要するに遷移温度が上がってくるということでもあります。それはどうしてかと申しますと、中性子が当たることによって、はがねの結晶の中に原子の欠けたところができ、それがだんだんつながって、転位のようなものができます。結晶にむらができます。こうなりますと、変形させようとしたときの抵抗は非常に大きくなりますけれども、それと同時に、割れ目が伸びやすくなることになります。遷移温度が上がるわけでもあります。作ったときには安全であるはずの温度であっても、中性子を当てて

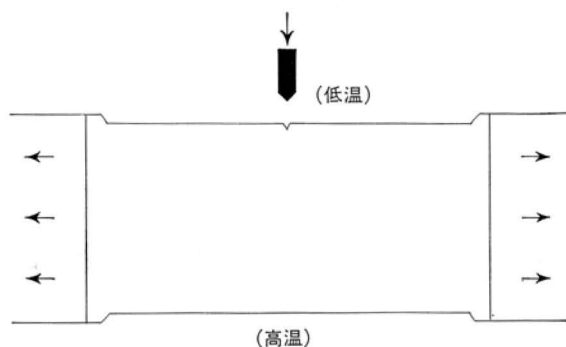
いますと、遷移温度がどんどん上がってきて危険になる。たとえば、遷移温度がじゅうぶんに低いのはがねで炉心を作っておきましても、使っているうちに遷移温度が上がってきて炉心の温度に近づいてきますと、もし何かの拍子に小さい割れ目ができたらその割れ目がさっと伸びて、炉心がこわれてしまうかもしれません。ですから、遷移温度が炉心の使用温度よりもじゅうぶん低い状態にあることを常に確かめながら、原子炉を運転しなければならない。そこで、はがねのもろさを調べる研究が、いろいろ行なわれております。

イギリスでは大きいはがねの板にほんとうに放射線を当てまして、遷移温度がどうなるか調べておりますが、日本にはまだ経済的に実行できるような装置がありませんので、ひずみをかけた状態で熱処理をして、はがねの中に細かい空洞を作って実験しております。もちろん、そうやって作った空洞は、放射線を当てたときにできる空洞と同じではありませんが、もろさを増すという点については、対応がつかます。その試料は、厚さ 20 ミリ、幅 480 ミリ、長さ 950 ミリといったものがありますが、どうやって遷移温度を測るかといいますと、300 トンの油圧ジャッキを4基使

いまして、合計 1,200 トンの力かけられるような装置で、適当な張力をかけます。それから、板の一方を電熱器で熱し、一方をドライアイスとメチルアルコールを混ぜたもので冷やす。こうすると、板に温度こう配ができるわけでありまして。そして、冷たいほうの側のまん中に小さいきずをつけておいて、そこを圧縮窒素で 125 kg-m の打撃エネルギーでたたきますと、そこから割れ目が出発します。初めのうちは温度が低いわけで、しかも両方へひっぱっているんですから、割れ目はどんどん伸びます。ところが、だんだん温度の高いところまで進んでくると、表面エネルギーが温度とともに増大してきますから、割れ目を伸ばすためのエネルギーも多くなりまして、ある温度のところまでくると止まってしまふ。その止まったところの温度は何度か、それが遷移温度です(第 18 図)。

このようにして、ある程度遷移温度の見当をつけますと、今度は全体をほとんど同じ温度にしておいて、トンとたたいてみれば、遷移温度より高ければ割れ目がすぐに止まるが、低ければ伸びるということで、遷移温度が細かく確かめられます。

初めのほうの実験で、途中まで割れ目がで

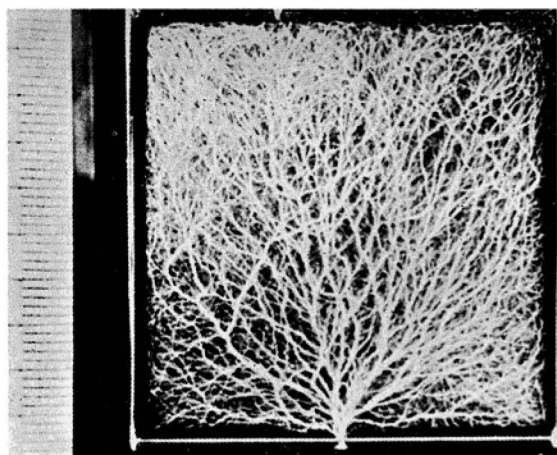


第 18 図

きて止まったとき、それをあとから無理に引き裂いて断面を調べますと、割れ目は深いところのほうが進むことがわかります。そこで、この割れ目の先端の進む速度を測る。はがねはガラスのように透明ではありませんから、板の表面に抵抗線ひずみ計を貼っておきまして、表面のひずみの状態を電氣的に調べて、その変化から推定するのでありますが、この実験によっても遷移温度がわかり、表面エネルギーを出すこともできます。そして、表面エネルギーが出ることがわかれば、今度は、どのくらいの温度ならば割れ目がどのくらいに進むかを予想できます。実験とかなりうまく対応できるわけです。こういうふうにして、かりに小さい割れ目ができてかまわない。それが伸びさえしなければよい。そう

いう意味の安全性を確保するための遷移温度を確認するという方向に、実験が進んでいるわけであります。

放射能に関連しまして、つ
 ホットラボの
 窓のひびわれ
 ぎにプラスチックの板にコ
 バルト 60 のガンマ線を当
 てたときできる割れ目をごらんにいます
 (第 19 図)。プラスチックの板にガンマ線を
 長い間当て続けると、いきなりぱっとこ
 ういうような割れ目ができるのであります。ガ
 ンマ線を当てますと、原子の中の電子がたた
 き出されて、最初は表面近くにあった電子が
 奥深くたたきこまれます。原子核は動きませ
 んから、プラスチックの中でプラスとマイナ
 スの電気が分かれて、プラスの電気は表面に
 ふえ、内部にはマイナスの電気がたまりま
 す。ガンマ線のエネルギーが一定であります
 と、電子のはじかれる距離もだいたい同じく
 らいになりますから、板の表面から測って同
 じ深さのところに、つまり表面と平行な面
 の上に、電荷がたまることになります。プラス
 チックは絶縁体ですから、板の表面にたまる
 プラスの電荷はなんとか逃げていきますけれ
 ども、内部にたまったマイナスの電荷はそう
 簡単には動けません。そこで、ガンマ線を長



第 19 図

い間当て続けると、内部と外部の電位差はどんどん高くなっていき、ついにはいちばん弱いところを通り道として一気に放電するわけでありました。そして、そのときの電流の流れた道筋が、第 19 図に見られるような細かい割れ目になるのであります。この割れ目を真横から見ますと、ごく薄い平面内にあることがわかりますが、これは電荷が板の表面に平行な平面内にたまるからであります。

同じようなことは、いろいろな物質に放射線を照射するホットラボの大きい覗き窓にも起こります(第 20 図)。中の様子を観察するためには窓をつけないければならないわけですが、その窓には放射線を通さなくて、そして



第 20 図

放射線を当てても色のつきにくいようなガラスをはめておくわけでありました。第 20 図の窓ガラスは幅 1 メートル、厚さが 20 センチくらいあります。実際にはこういうガラスをさらに何枚も重ねて使うのであります。このガラスに長い間放射線を当てますと、さっきのプラスチックの板と同じように、ガラスの内部に電荷がたまりまして、それが放電を起こします。それによって放電の道筋に細かい割れ目がいっぱいできます。プラスチックならば細かい割れ目ができるだけですが、ガラスではその割れ目が伸びてまいります。しかも、この場合には、ガラス自身の重さで、かなり大きいずれの力が働きますので、最初の割れ目をもとにして、羽根のように重なった割れ目がゆっくりと、ときには何日もかかっ

て伸びてまいりますので、ガラスを通して窓の中を観察することが非常にむずかしくなるわけでございます。

今後の夢と
見とおし

今までのことを別の面から研究しようと思うのには、割れ目がどんな速さでいろんな形に伸びていくか、たとえば、枝分かれをするときには、途中で速さがどんなふうに変化していきだろうかということを知りたいわけでありまして。ところが、実際には割れ目は非常に速いものですから、それを知るためには、瞬間写真を何枚もとるというのも、手ではありますが、われわれのいちばんの夢といったしましては、うんと速い映画をとりまして、毎秒 2000 m とか 3000 m とかで伸びるような割れ目が伸びるところを、ゆっくりと見たいわけでありまして。実際には、なかなかそういうものはありませんし、まだできておりませんけれども、ある程度のものはございますので、今からお目にかけます。毎秒 5000 コマから 1 万コマぐらいの速さで写したものが多いのですが、このくらいの速さでは、割れ目ができたあとで破片が飛んでいくのは分解できますけれども、割れ目の伸びるところ自身はほとんどわかりません。45 万コマでとっ

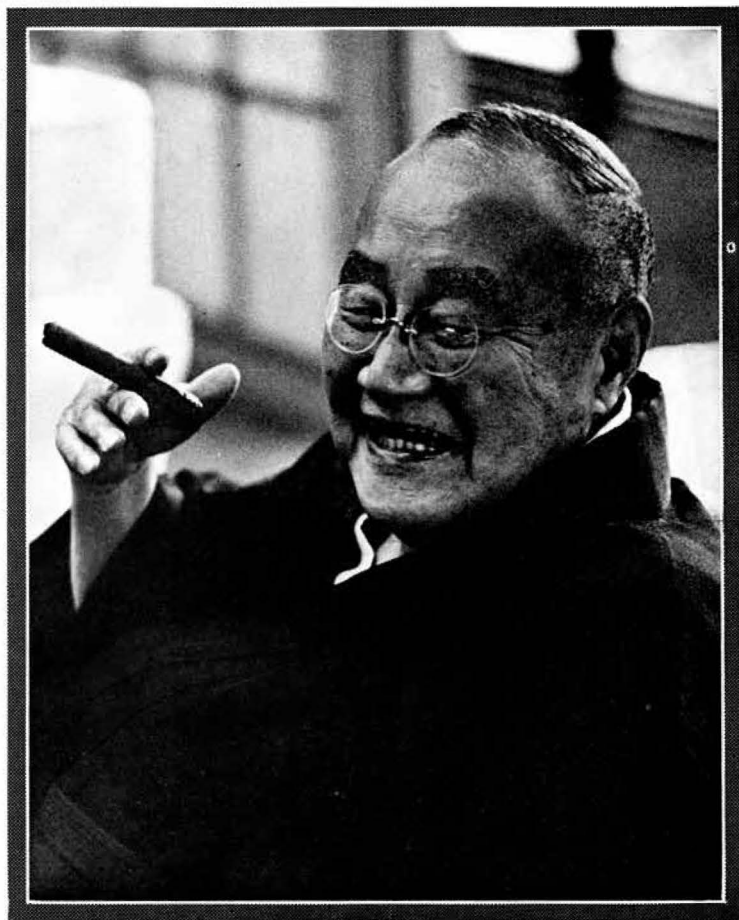
たのは、わずかに割れ目の伸びていくのが見えます。これはたいへん手数のかかる方法で撮影したもので、コマの速さは非常に速いんですが、全体のコマ数は少なくなります。割れ目がさっと伸びていくところは、おそらく 100 万コマ以上でないといけません。旋盤で金属を削っていくところを写したのを見ますと、削るということは割れ目を作っていくことだということがよくわかります。刃物の当たるかなり前から変形が起こり、小さい割れ目ができます。鋳鉄を削るところは、映画で見ますと、ちょうど石を砕いていくところとそっくりであります。

今までお話し下げたことをまとめますと、要するに割れ目が発生するという条件が、本来確率的な性格をもっております。そして、割れ目が成長するのは、ある慣性をもったものが応力の場に打ち出されるのと同じことで、その応力の場というのは、いつもおもな張力に垂直な方向に割れ目の先端を曲げようとするような、そういう力をかけるのであります。そういうモデルで一応解釈できます。

それから、はがねの切断に関してはいろいろ問題があるけれども、最近非常に問題にな

っていることは、かりに割れ目ができたとしても、その割れ目が伸びないで止まるための条件、それは温度で決まるけれどもその温度は何度か。それを実際にいろんな材料について測るのにはどうすればいいかということがあります。将来の理想といたしましては、固体の結びつき、原子と原子の間の結びつきの力がどうかということがもっとほんとうにわ

かれば、いちいち実験をやらなくても、こういう材料ならば、こういう組成にすれば、遷移温度は何度であるということを計算できる可能性はあると思うんですけども、現在はそれを今お話したような方法で実際に測っているということであります。たいへん長くなりました。これで終わりいたします。



本財団の発起人会会長として財団の
設立に御尽力下さった吉田茂元首相
は昭和42年10月20日逝去されました。
謹んで哀悼の意を表します。

昭和41年度事業報告書から

1. 仁科記念賞

本年は下記二件の研究に対して贈呈した。

受賞者 東京大学宇宙航空研究所教授

小田 稔氏

研究題目 「SCO-X-1 の位置決定」

推薦理由

太陽以外の天体のX線は、1962年アメリカにおいてロケット観測によって発見された。その強度は理論的予想を遙かに超え、しかも多くのX線源は可視光や電波で見られる顕著な天体と一致していない。幾つかのX線源は電波の強い星雲であることがわかったが、他のX線源は謎に包まれたままになっていた。小田氏はX線源の位置と大きさを精密に決める多重すだれ式コリメーターを開発し、当時氏の所属していたMITのグループ等でこれを実用化し、NASAのロケットを用いてX線源の観測を行った。その結果、さそり座にある一番強いX線源が星雲的なものではなく、高々惑星系程度の小さい天体であることを見出した。この天体を光学的に同定するため、東京天文台の人々と協力し、岡山天体物理観測所の望遠鏡を用い、対応する光学的対象を見出した。この発見によって、天体X線の観測は天文学としての確固たる地位を占め、天体物理学の発展に大きな貢献をもたらした。この業績は近代天文学の重要な一步を進めたものとして、仁科記念賞にふさわしいものと考えられる。

受賞者 東京大学物性研究所助教授

豊沢 豊氏

研究題目 「固体光物性の動力学的理論」

推薦理由

固体の電気伝導現象、光学的性質などに対して電子および正孔のふるまいが重要な役割を果たしていることはよく知られている。これらの電子および正孔のふるまいを記述する方法として、二つの極端に異なったモデルが考えられている。すなわち局在的な粒子として考えるモデルと、いわゆるバンド理論とである。これらはちょうど光（や自由電子）の粒子性と波動性とにほぼ対応する。

固体による光の吸収（半導体や絶縁体）を測定すると、励起子とよばれる複合粒子があることがわかる。これは電子と正孔とが極めて近い距離にあって互に相互作用を及ぼしながら運動しているものである。

豊沢氏は主としてこの励起子のスペクトルに注目し、これを解明するために従来の局所理論とバンド理論を見事に統合した理論を展開し、在来説明困難とされていた励起子スペクトルの諸点を解明するとともに、固体内の電子現象に対して明快なイメージを与えた。よって仁科記念賞にふさわしいものと考えられる。

2. 仁科記念講演会

1. 朝永理事長のノーベル賞受賞記念講演会を左記のとおり開催した。

日時 昭和41年6月3日(金)午後3時より
(開場2時)4時半まで

場所 朝日講堂

講演 量子電気力学の発展 一個人的回想一

開会前満員となり多数の入場拒絶のやむない有様であった。難解の内容にもかかわらず、きわめて理解し易く述べられ、来聴者の受けた感銘は深かった。

2. 定例記念講演会を左記のとおり開催した。

日 時 昭和 41 年 12 月 6 日(火)午後 2 時半
より 5 時半まで (開場午後 2 時)

場 所 朝日講堂

演 題 「放射線で宇宙を探る」

講 演 名古屋大学教授 早川幸男氏

座 談 東京大学助教授 石本 真氏

東京大学教授 小田 稔氏

東京大学助教授 小尾信弥氏

名古屋大学教授 早川幸男氏

司 会 NHK 解説委員 村野賢哉氏

3. 仁科記念文庫

新しくつぎの図書を購入し、またスウェーデン王立学
士院からノーベル記念講演集1965年版が寄贈された。

1. Collected papers, Vol. 1 of Enrico Fermi

¥ 6,000

2. Harr, D. ter.(ed)—Collected

Papers of L. D. Landau. ¥12,000

3. Bulletin of Atomic Scientists(A)

from Nov. 1966 to Oct. 1967 ¥ 3,600

合計 ¥12,600

4. 仁科記念奨励金

選考委員会において応募件数 30 件について慎重審
査の結果、下記 4 件の研究に対して奨励金を贈った。

本事業の趣旨にそうと考えられる研究テーマが多
く、予定額を超えて 4 件を対象として選んだ。

(1) 「放射線による突然変異誘発機構の研究」

東京大学教養学部助教授 伊藤 隆氏

奨励金 66 万 3 千円

推薦理由

遺伝物質 DNA の二重鎖分子に放射線が作用しその
鎖の中にかかるイオン化または励起状態が DNA の複製
過程に及ぼす影響から突然変異誘発を研究するもの
で、ひいては生体に対する放射線の作用究明に基本的
な寄与がきわめて大きいものと期待される。

以上の理由で本奨励金の対象にふさわしいものと判
断する。

(2) 「半導体中の電気双極子による電子散乱の研究」

大阪大学理学部助教授 大塚エイ三氏

奨励金 59 万 5 千円

推薦理由

申請者たちの研究による完全一様に近い正負イオン
をもつ半導体を用いて電子散乱効果を、サイクロトン
共鳴線の幅から追求するもので、半導体物理の基礎的
研究の面から大いに期待される。この点で本奨励金
の対象にふさわしいものと判断する。

(3) 「偏極 Co-59 核と偏極中性子相互作用」

東京大学物性研究所助教授 小林晨作氏

奨励金 50 万円

推薦理由

原子核の相互作用はスピン依存性が大きく、このス
ピン依存性相互作用の研究は核構造・核反応等の面か
ら原子核研究の重要部分であり、実験的には相互作用
する双方を偏極させて衝突させるのが最良である。申
請者たちはすでに Ho(ホルミウム) ターゲットで成功
したものを Co(コバルト) ターゲットに拡張して意欲
的に重核について実験しようとするものである。

内容・経験及発展性からみて本奨励金に最もふさわ
しいものの一つである。

(4) 「金属錯化合物の同位体交換反応の研究」

東北大学理学部教授 斎藤一夫氏

奨励金 58 万 7 千円

推薦理由

分子内錯塩が有機溶媒中で常に速かな同位体交換を行なっていることを初めて明らかにした申請者が、色の C-14 標識化合物を用いて配位子置換反応の機構を明らかにするもので、独創的な研究結果を大いに期待する。

この意味で本奨励金の対象としてふさわしいものと判断する。

5. 研究者の海外派遣

1. 昭和 42 年度海外派遣研究者の選考を終り、つぎの二氏を決定した。

(1) 東京大学原子核研究所助手 黒田育子氏

海外での研究目標 原子核（中重核）の多体問題的方法およびその構造について 予定留学先 コペンハーゲン理論物理学研究所（デンマーク）

(2) 京都大学理学部助手 牟田泰三氏

海外での研究目標 場の理論における複合粒子の条

件 予定留学先 サセックス大学（イギリス）

2. 前年度の派遣研究者

溝淵明氏は昭和 41 年月渡米し、香村俊武氏は都合で出発を 1 年延期することになった。（42年 5 月渡英）

3. 第 9 回金子洋三郎氏、第 10 回森垣和夫氏がそれぞれ所定の研究を終えて帰国された。

6. 広 報

1. NKZ 7 号および NKZ 7 号の別刷（普及版）を刊行して、朝永理事長のノーベル賞受賞記念講演を掲載、関係各方面に配付した。

2. 「国際放射線防護委員会勧告（1956 年 9 月 17 日採択）」

「病院および医学研究施設における放射性物質の取り扱いと廃棄に関する、専門委員会 V の報告（1964 年）」の翻訳を日本放射性同位元素協会と協力のもとに出版した。

役 員

(昭和 42 年 11 月 15 日 現在)

理 事 長
常 務 理 事
理朝 永 振 一 郎
村 越 司
安 藤 豊 禄
井 上 郎
太 田 蔵
木 川 隆
酒 井 杏 之 助
佐 藤 尚 樹
田 代 治 男
長 岡 信 吾
藤 岡 清 一
吉 川 生 昌
佐 々 木 直 重
水 原 正 夫
芦 西 千 尋
安 井 佐 実
石 佐 寛
岩 山 嘉 登
稲 田 尚 甲
一 万 田 午 郎
植 村 完 二
岡 田 誠 司
茅 池 正 士
菊 村 健 二
木 林 稔
小 形 作 次
駒 峨 根 遼 吉山 崎 文 男
石 川 一 郎
植 村 甲 午 郎
茅 井 誠 司
駒 井 健 一 郎
嵯 峨 根 遼 吉
瀬 藤 象 二
田 中 久 兵 衛
原 安 三 郎
堀 田 庄 三
我 妻 栄 郎
武 見 太 郎
有 山 兼 孝
安 藤 豊 禄
石 川 一 郎
稲 垣 平 太 郎
井 上 五 郎
太 田 清 蔵
川 又 克 一
木 川 田 隆
小 谷 正 雄
駒 井 健 一 郎
酒 井 杏 之 助
佐 藤 尚杉 本 正 雄
瀬 藤 象 二
竹 中 鍊 一
田 代 茂 樹
田 島 英 三
玉 木 英 彦
朝 永 振 一 郎
中 島 慶 次
長 岡 治 男
仁 田 勇 二
浜 田 達 定
春 山 信 吾
藤 岡 愛 一 郎
藤 山 弘 敏
本 崎 友 喜 雄
宮 崎 為 一
矢 崎 文 男
山 崎 秀 樹
湯 川 榮 尋
我 妻 千 甲
鎌 田 島 英 三
田 富 山 小 太 郎
浜 田 達 友 喜 雄
宮 崎 山 寸 み鈴 千 武 田 富 中 永 西 島 原 福 藤 堀 三 村 矢 山 本 吉
木 秋 見 実 中 山 泉 野 村 山 安 田 岡 田 浦 越 野 本 川
万 邦 太 久 小 正 重 蔵 安 千 由 庄 功 一 郎 源 左 衛 門
平 夫 郎 涉 兵 衛 徳 雄 純 六 郎 里 夫 三 功 司 郎 清 一 雄 雄 彦 純 功

運 営 委 員

理 事 長 秘 書

監 事
評 議 員

事務局所在地：東京都文京区駒込二丁目 28 番 45 号

電 話：(942) 1 7 1 8