

## 物質・エネルギー・情報について

——「自然」総合科目の理論的および実践的諸問題——

小池和男・林 俊夫・小山 伸・谷山 穰  
西村義春・伊藤 寛・稲積章生・国分 寛  
山崎敏範・西原 浩・岡本研正

## 目 次

- §1 はしがき
- §2 総合科目「エネルギー」とは何であったか
- §3 自然の統一性と物質・エネルギー・情報
- §4 総合科目の構成と概要
- §5 構成上および運営上の諸問題
- §6 あとがき

## §1 は し が き

現代の自然科学のめざましい発展は、自然はたえまない運動と変化の中にあること、また自然はきわめて多様な運動形態をもつが、それらはその物質性において統一した存在であることを自然科学的事実として確立してきた。ある意味ではわれわれは、「全自然は……永遠の生成と消滅、たえまない流れ、やすみない運動と変化のなかにある」というギリシア哲学の創始者たちの見方にふたたび立ちもどったといえることができる。そこにはただ「ギリシア人にとっては天才的直観だったものがわれわれにとっては厳密に科学的・経験的探究の成果であり、それゆえはるかに確定的で明瞭な形をとって現われてきているという本質的な区別がある<sup>1)</sup>」のである。自然科学の発展が今世紀後半において、以前よりもはるかに豊かにかつ深く、具体的に展開する中において明確に基礎づけられた自然の多様性と統一性という事実の理解は、従来の自然科学教育の枠を越えた大学自然科学教育の核の一つとして設定されなければならない。

\*) 本論文の成果を基礎に、58年度から総合科目（科学論 U）の題名は「現代の自然観——物質・エネルギー・情報を軸に」に変更されることになった。

本学一般教育部では、昭和47年以来、自然系総合科目「エネルギー」(生物学 S) が実施されてきた。しかるに昭和55年度から新しい自然系総合科目「瀬戸内の自然と環境」が開設されることになり、「エネルギー」担当者の中の生物系を中心に多くの人が新しい総合科目へ移ることになった。そのために「エネルギー」も、それまでの構成が維持できなくなり、さらには、ほぼ同じ形式で8年間実施されてきたために手直しが期待されるという理由も加わり、再編成を迫られることになった。

最大の困難は、自然系の限られた人数で二つの総合科目を開設することにより、一つの科目の構成部分を担当しうる人数が限られてしまうことであった。すなわち、いままでの「エネルギー」に準じたかたちを維持するには、担当者一人あたりの担当時間をほぼ現状どおりとすれば、担当者の数が不足するし、逆に、一人あたりの担当時間を増やせば、引き受け手がなくなる、といった具合である。最初は「エネルギー」に準じて、新しい自然観の主要な位置を占める「自然界における発展と進化」をテーマとする総合科目の開設が検討されたが、これは担当者の絶対数が不足することから見送られた。

かくして、前行の目的を部分的に達成しつつ、かつ実現可能な総合科目として、「客観的实在の総体」を意味する広義の「物質」を基礎に、これを現代自然科学の発展の段階において、いくつかの領域からとらえていく方向が模索された。それは「物質」を「運動する物質」、「物質の構造とエネルギー」、「物質系と情報」の相対的に独立しつつ、かつ連関において存在する三つの領域から把握することにより、自然の不断の運動と多様性、それをつらぬく統一性を理解することを目的とするものである。それ故、総合科目の題名は「現代の物質観」などとするのが適当ではあるが、担当者間に共通の理解を形成すべく出発点において「物質・エネルギー・情報」(科学論 U) として発足することになった。この題名の設定は、最近の技術的展開を主導することにより広く関心を持たれている分野がまさに、新しく変革された自然の領域に関するものであることを示しつつ、より高次の概念において統一された「総合」を追究することを意識したものである。この問題は、現在においても自然科学者のみならず哲学者をも含めて論争がおこなわれているところの、かなり「知的」水準の高

い内容にもかかわるために、その充実のためには、担当者相互の連携と共同研究が必要になる。本総合科目では、その充実に向けて定期的に担当者の Meeting を持ってきた。本論文は、その際のノートを基礎にまとめられたものである。

## §2 総合科目「エネルギー」とは何であったか

「物質・エネルギー・情報」は、以前の総合科目「エネルギー」の単なる延長上に位置するものではないが、新しい総合科目として発展させていくためには、総合科目「エネルギー」とは何であったのかを明確にすること、およびその積極面を継承することが必要であろう。幸いにも総合科目「エネルギー」に関する諸問題は本誌上ですでに近藤、国分の各氏により論じられているので、ここではその検討からはじめよう。

総合科目開設一年後に近藤論文<sup>2)</sup>があらわれる。この論文では、最初に、「総合科目」の理念上の諸問題を、新制大学における一般教育の理念の定着と発展という課題の中で論じている。総合科目を扱う際の前提として、また歴史的資料として、まず、その論点を要約しておこう。

近藤は、「一般教育改革と総合科目」の章で、つぎの諸点を指摘する。

1. 一般教育は、戦後の民主主義的社会変革のなかで、従来の大学教育に対する深刻な反省をもとにして誕生した新制大学の特質として制度化されてきた。すなわち、戦後の教育改革は、憲法に示された理想の実現を教育の力に待つべきものとして、人格の完成をめざし、国の主権者としての国民を養成することを教育の目的として定めた。この目的に即して、新制大学においては、専門の知識技能を教える専門教育と同時に、社会生活上の諸問題を科学的合理的に判断し批判して社会の改善進歩に貢献しうる人間で、また価値判断力や芸術の鑑賞力をもち豊かな人生を創造しうる人間の養成をめざす一般教育が、特に重要視されていたのである。

2. しかしながら、こうした新制大学の理念はいまだに十分な定着をみないで、一般教育はさまざまな矛盾や欠陥をあらわすことになった。そして一般教

育制度の形骸化が指摘されてきた。

一般教育形骸化の原因は、一般教育の制度そのものにあるのではなく、大学内に残存する因襲的大学観と、そうした問題を解決する物質的基盤を保障することなく、新制大学の理念の定着を阻んできた国の大学政策にある。その施策は、高度経済成長のための生産力をささえる高度な専門知識や技術をもった人材を養成することを第一としてきたといえる。科学的思考力や合理的、批判的精神を養成する一般教育は、生産力をささえるものとなりえないために等閑視され、あるいはむしろ好ましくないものとしてしか考えられなかった。

3. 中教審路線、すなわち一般教育制度を解消して、職業別、目的別に編成された教育課程のなかで「社会の要請に応える人材を効率的に養成する方向で大学を両編成」しようとする方向は、こうした大学政策のあらわれと見ることができる。

こうした方向での一般教育制度の改編は、昭和45年の大学設置基準の改正(46年施行)にも端的にみることができる。改正の要点は以下のとおりである。

- 1) 人文・社会・自然の三分野にわたる36単位以上として、各系列にについての科目数と単位の基準をなくす。
- 2) 36単位のうちの12単位までを、外国語や基礎教育科目、専門教育科目の単位でふり替えられるようにした。

このことによって、広い分野にわたって知識の調和をはかることをめざして、専門分野にかかわりなく一律の基準を設けた一般教育の趣旨が全く否定されることになった。

4. ところで、この改正によって、単一科目の開設だけが認められていた点を改め、いわゆる総合科目の開設を可能にしたが、これは前記の問題と、「抱き合わせ」になっている点に注意しなければならない。

5. 総合科目は、中教審路線による大学の両編成に対抗して、新制大学の理念を豊かにする一つの実践的手段として、一般教育の目的に照らして厳密な検討が加えられなければならない。

それでは総合科目「エネルギー」のねらいは何か。近藤論文は「科目のねら

いと授業内容」の章で再び自然科学系の総合科目の一般論を展開する。そこでは、自然系の総合科目の主題を次の4つに大別する。

- 1) 自然と人間とのかかわりあいを中心とするもの
- 2) 自然科学の発展の現段階での統一的な自然観を中心とするもの
- 3) 科学の方法論や、科学と社会とのかかわりあいを中心とするもの
- 4) 研究分野の境界領域における問題を中心とするもの

これらは「一般的に言えば、前二者は、一、二年次の学生に適当なものであり、後二者は個別科学を学んだ後に扱った方が取り扱いやすい」といわれている。この線に沿って、一年次学生を中心とした総合科目のテーマとして「エネルギー」を設定し、そのねらいを、

「エネルギー概念を正しく統一的に把握させる」

こと、すなわち、「自然現象の連関を統一的に把握するものとしてのエネルギー概念を、自然現象の諸分野にわたって見るとともに、人間とのかかわりあい、生活とのかかわりあいの中で理解させる」ことに置く。このねらいの下に「エネルギーの流れ」を軸に授業が構成される。それは

- I. 宇宙とエネルギー
- II. 物質とエネルギー
- III. 生命とエネルギー
- IV. エネルギーの利用

という構成をとる。ところで、「授業の統一した流れをつくりあげることと、授業内容が多方面にわたることの矛盾は、総合科目の宿命である」。そこで分担講義の弊をのぞくために、授業内容の作成にはそれぞれの分野の教官が参加し、実際の講義では少数の中心分野の教官が担当する方式を提案している。以上が近藤論文の要点である。

近藤論文の3年後には、国分論文<sup>3)</sup>があらわれる。ここでは、「分担形式」をとらざるを得ない理由、およびその積極面が指摘される。「エネルギーというテーマをなるべく広い分野にわたって網羅し、その中から統一的概念を把握させるとすれば、講義形式は、広い学問分野にわたることからも分担形式によらざるを得ない」。実際に分担形式が維持されてきたが、学生のレポートに見

られた積極面として、「ある分野への学問的興味の拡大・深化，専門の研究者の講義から帰結される講義への魅力などはその最たるもの」であり，さらに「内容の変化による新鮮さへの期待」をあげる。この時期の科目の構成は最初の頃とほぼ同一である。科目の構成についても両者の意見は一致しない。

近藤論文はいう。科目の構成は「エネルギーの流れを軸に展開されているが，宇宙の生成発展と太陽エネルギーについて述べ，それが輻射のエネルギーとして地上に至ったところで，生体あるいは生態系についての現象と，人間活動へのエネルギーの利用という二つの分野に展開されるところに問題があり，講義も羅列的に流される危険があるため，生体に直接関係してくる部分に話をしぼるのも一方法ではなかろうか」。これに対し国分論文は「それらの中の一分野に重点を置き，各分野をその補足的なものとして位置づけることには問題がある。エネルギー概念を正しくとらえることに主眼点を置き，生物とエネルギーのみが強調されるべきではない」，「もしそのような形をとるならば，単にエネルギーの一側面についての理解を得るにとどまり，エネルギー概念について統一された理解とは程遠いものとなるであろう」と述べ，それ故「要はエネルギーの形態には種々あり，宇宙という超マクロの世界，原子，分子のミクロの世界，特異な存在を示す生物界，さらにはそれを通じて統一された形，相互関係，本質的に同一なものの存在形態の相違を理解するにはむしろ並列に取扱うべき」であると主張する。

以上，近藤，国分両氏の見解を見てきたがその争点は今日においても，ほとんどすべての総合科目が直面する問題でもあろう。それぞれの主張の積極面は，今後の総合科目に何らかの形で取り入れられていかねばならない。

それでは，総合科目「エネルギー」とは何であったのか。単に「エネルギー概念を理解させる」のならば，これほどの広範な展開は必ずしも必要ではない。重要なのは「統一的に」の意味である。この点に関しては，両氏の意見は，ほぼ一致しているように思われる。すなわち，自然的物質に普遍的な「エネルギー」という側面をとおして，自然の多様性と統一性に対する理解を深めるのが，まさに総合科目「エネルギー」の基本的性格である。

しかしながら，エネルギーという側面は自然的物質の，最も popular な一

側面であり、また、すでに確立し、誰もが一応の知識を持っている概念である。それ故、最初の総合科目として実現するための土壌がすでに形成されており、現実に実施されてきたのだといえる。一方では、それが完全に確立された概念・法則であるが故に、やや深遠さに欠けるといえなくもないのである。

われわれの総合科目は「エネルギー」のもつ積極面、すなわち、自然の中の多様な運動形態の存在とそれらの統一性を把握するという方向を、より一般的に展開するものとして位置づけられる。自然的物質はエネルギーに限定されず物質的・エネルギー的・情動的という3つの側面をもつが、これらは自然の物質的統一性の一つの根拠を与えるものである。「物質」のさらにきわめて一般的な性質は、それは「運動する<sup>4)</sup>」(広義の)という性質であろう。われわれの総合科目は、「物質」のいくつかのきわめて重要な性質を軸に、現代の物質観あるいは自然観に迫ることをそのねらいとするものである。

### §3 自然の統一性と物質・エネルギー・情報

物質・エネルギー・情報は、自然の物質的統一性の実現において、いかなる位置を占めるのか。いうまでもなく、これらの3側面は、自然的物質のきわめて普遍的な側面に関係する。それ故、自然の多様性をつらぬく統一性を実現する一つの基礎はこれらの普遍的側面の存在に求めることができる。このことをより深く全面的に扱うためには、物質概念とその基礎にまで遡らなければならない。

現代の自然科学が描き出す自然の姿は、大局的にはつぎのように表現されるであろう。自然は質的に区別される無数の運動形態の総体である。それらの運動形態は、互いに無関係に存在するのではなく、質的に区別されるとともに相互に密接に関係している。それらの総体としての自然は、相互作用をおよぼし合いながら絶えず運動し、新しい運動形態を生み出しながら歴史的に発展してきたのであり、また発展しつつある。ここでいう運動は狭義の運動すなわち位置変化を含むのみならず、生成と消滅、量の増減、質の生成を含む変化一般をあらわす広義の運動を意味する。この運動の中で、たえず新しい高次の運動形態が生成されていく。

自然の多様性と統一性をより深く理解するためには、まず、物質について明らかにしておくべきであろう。ここでいう物質とは、哲学的概念としての物質、すなわち精神と対立され、意識とは独立に存在する客観的实在の総体としての物質という概念である。それゆえ、社会科学の対象となるようなものでも、それが客観的实在であるかぎり「物質」という概念でとらえなければならず、そこには人間の実践までもが含まれることになる。これに対し自然科学の対象とされる「物質」に限定するとき、われわれはこれを「自然的物質<sup>5),6)</sup>」と呼ぶ。この自然的物質はいかなる規定性を持つであろうか。自然的物質を物質一般から区別する基準は対象そのものの中に「実践」をも含むか否かによる。人間は自然を変革した限りにおいて自然を認識してきたが、自然的物質は実践から独立でありしたがって、自然科学の対象には実践は含まれない。それ故、自然的物質は物質一般の中で実践から独立した存在であると規定される。

哲学的物質＝客観的实在  $\left\{ \begin{array}{l} \text{自然としての客観的实在＝自然的物質} \\ \text{社会としての客観的实在} \end{array} \right.$

自然的物質は物質的・エネルギー的・情動的という3つの側面をもつ<sup>5),6)</sup>。ここで物質的というのはエネルギーの素材的な担い手としての物質 (Stoff) をあらわし、われわれが「物質」という言葉を狭い意味で用いたときに意味するものに対応する。すなわち、「質料」という言葉であらわされる物質の側面である。これに対し「エネルギー」という側面は、物質の運動に関係する。物質は運動しており、運動していない物質はない。古典力学的な意味で静止している物体というものはあるが、その物体をミクロ的構造としてみるならば、運動していないことはありえない。物質と運動とは切り離すことができないものである。したがって、自然的物質は、その一側面として、運動の量的表現としてのエネルギーをもっている。

ところで「物質とエネルギー」という側面とは相対的に独立な「情報」は、やはりその物質的な担い手から切り離されてはありえず、物質の一側面であることはいままでもない。しかし情報は、さまざまな質料の上に、その内容を変えずに伝達されることができる。すなわち質料とは相対的に独立している。情報は自然的物質の運動の秩序性の程度をあらわすものであると解釈される。



本総合科目は、自然的物質の3側面および「物質」の自己運動を基礎に、現代の物質観あるいは自然観に迫ることをねらいとする。それ故、つぎに「物質」概念の成立にいたる歴史的経過を概観し、現在の理論上の問題、あるいは争点を取り上げることにしよう。

### 自然諸力の連関と統一<sup>7)</sup>

近代科学成立の歴史的骨格部分は、ニュートン力学の成立に求めることができるという見解は広く受け入れられている。17世紀末までに成立したニュートン力学は、18世紀を風靡した力学的世界観の基礎となった。力学はさらに、その後の解析力学としての発展およびカントによる哲学的解釈（「純粹理性批判」、1781年）などに見られるように、当時の他の諸科学に比して鮮やかに体系化され、18世紀を通じてその優位性が確立されていく。

18世紀後半から19世紀にかけて、ヨーロッパ各国における産業革命の進展と、世界的規模での産業資本主義の展開に基づく諸技術の発達は、自然の諸領域に対する関心をますます深め、その中でニュートン力学から独立して個別諸科学が成立する。それとともに、しだいに、物理学、化学、生物学、天文学などの諸科学の内的連関が明らかにされていく。以後、19～20世紀の自然科学は、「自然諸力の連関と統一」をしだいに明らかにするとともに、物質の構造の解明という方向に進むことになる。この流れの中で「エネルギーの保存と転化の法則」が発見され、「物質とエネルギー」という見方が確立していく。

ここでいう「諸力」とは、現代の自然科学において厳密にあたえられる「力」とは区別され、自然の諸運動形態に対して、それぞれにややあいまいな概念のまま用いられた歴史的な表現法である。事実、エネルギー不減則に関するヘルムホルツの歴史的論文「力の保存について」（Über die Erhaltung der Kraft, Berlin 1847）においては、動力 (bewegende Kraft)、活力 (lebendige Kraft、運動エネルギー)、Spannkraft (位置エネルギー) などのごとく、「力」ということばの多様な使い方を見ることができる。ヘルムホルツは、エネルギーは力学的エネルギー、熱エネルギー、電気・磁気エネルギーなどの形態をとり相互に転化しうること、またその総量は保存されることを示したが、なかでも興味深

いのは生物体においてもエネルギーが厳密に保存されることを示唆したことであろう。すなわち、もしも生命をもつ有機体が、その食物から得るエネルギーを越えて、それ以上に特殊の生命力によりはたらかせるものとすれば、それらは永久機関ということになるというのである。

自然諸力の連関と統一という思想は、19世紀における自然科学の三大発見、すなわち「エネルギーの保存と転化の法則」の発見、ダーウィンによる「進化論」の成立、シュライデンおよびシュヴァンによる「細胞」発見などにより切り拓かれた新しい自然観の基礎をなすといえる。自然はもはや「力学的世界観」をもってしては扱うことができぬほどの多様性に富んだものであることが明白になり、ここに登場するのがエンゲルスによる「自然の階層性」の見地<sup>1)</sup>である。すなわち、自然はそれぞれの固有の運動形態により特徴づけられる無数の階層からなる。それらの諸階層は、その固有の運動形態により区別されつつも、互いに連続する側面をもつ。個別諸科学が成立する根拠は、客観的な運動形態の存在に求められるのであり、諸科学は、自然の諸運動形態に対応して成立する。

エンゲルスは自然の運動形態の「物質的な担い手」をつぎのように規定する。

- ・地上の物体と天上の運動……力学的運動形態
- ・分子……物理学的運動形態
- ・原子……化学的運動形態
- ・タンパク質……生物学的運動形態

すなわち彼は、18世紀以来の力学的運動形態を基本に据えつつ、「質の生成」の重要性に着目して、これを指導原理として諸科学の区別と連関を明らかにしたのである。これらの運動形態の連続性と非連続性に関するつぎの一節は有名である。「わたくしが物理学を分子の力学，化学を原子の物理学，そしてさらに、生物学をタンパクの化学と名づけるとき、わたくしはこのことで、これらの諸科学のあるものから他のものへの移行を、それゆえこれらの二つの科学の連関・連続とともに、それらの区別・非連続をも表現しようとしている」。かかるエンゲルスの見地は、現代の自然科学を基礎づける際の基盤をなすものである。とくに、この見地は現代の素粒子論の発展において重要な位置を占める

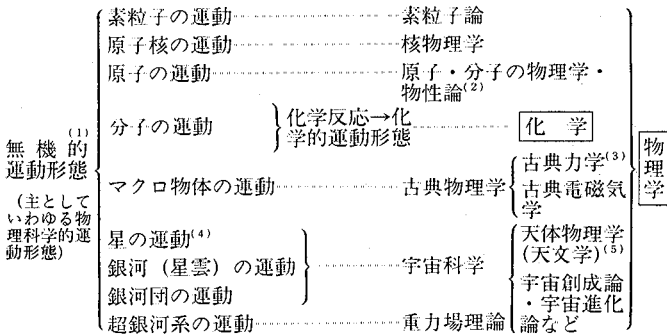
「坂田模型」の提唱の際に、一つの重要な指針となったことは想起されなければならない。

エンゲルスの見地は、まさに現代的な意義をもつものであるが、これを現代的に理解するためには、この見地が提唱された頃の自然科学の発展の歴史的段階を理解することが必要である。19世紀初期には、すでにフロギストン説はラボアジェによる燃焼理論の確立により追放されていたが、彼の元素表においても、熱、光などは元素として残されており、また19世紀初期のカルノーの「火の動力についての省察」の中でも熱素説が採用されていたことは周知のとおりである<sup>8)</sup>。さらに、19世紀後半においては、ボルツマン、マクスウェルらによる「気体の分子運動論」および「統計力学」が建設されていく<sup>9)</sup>。したがって、エンゲルスが物理学を「分子の力学」と呼ぶとき、このような背景を考慮しない限り、これを深く理解することは困難になる。とくに、現代的に表現するならば、生物学を「タンパクと核酸の化学」と呼ぶべきであろう。

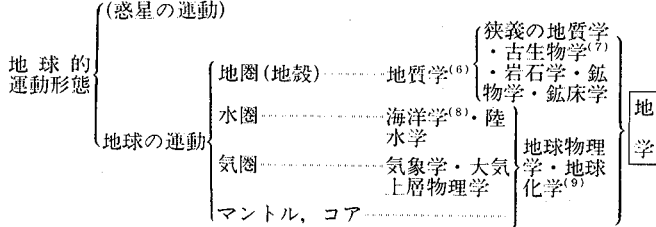
さらに重要なことは、20世紀における量子力学的階層の発見である。これはエンゲルスの時代には未知であった新しい「法則の階層」の発見を意味する。現代の自然科学は、人間が自然を変革しうる範囲の拡大と高度の技術的水準により実践可能領域にもたらされた多くの運動形態がその対象とされ、多種多様に分化している。ここで重要なことは、対象の運動形態のあいだのきわだった質的差異に注目してそれをまず大きく分類することであろう。自然の運動諸形態の中で、きわだった差異が見られるのは、生命を持たない物質の階層と生命を持つ物質の階層の間である。この区別に対応して自然科学は、物理的諸科学 (Physical Sciences) と生物学的諸科学 (Biological Sciences) に大別される。これを詳細に分類するものとして、岩崎・宮原両氏の分類<sup>10)</sup>をあげることができよう。

なお、「自然の諸力の連関と統一」というテーゼに関しては、現代の素粒子論においても、新しい展開が見られることを指摘しておく。

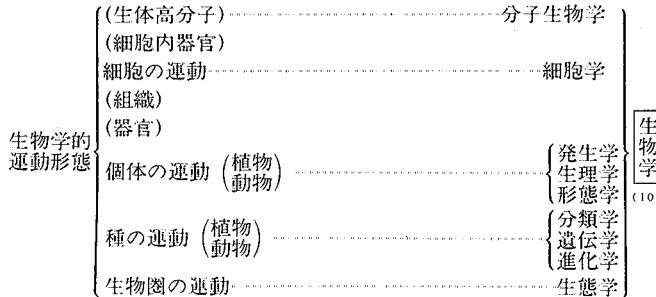
《主系列の運動形態》



《主系列の・枝系列を契機として含む・運動形態》



《枝系列の運動形態》



注 (1) ここで「無機」(unorganisch) というのは、「生命をもたない」という意味である。  
(2) とくに対象の多体であることが物性論の独自の領域をなしている。  
(3) 星をマクロ物体として取り扱う位置天文学(天体力学)・球面天文学などを含む。  
(4) 星の位置運動を意味しない。  
(5) 天文学はここでは主として天体物理学を意味しており、注(3)の意味での天文学とは区別される。  
(6) 狭義の地質学のなかで、構造地質学、層位学などが発展している。これらは地球物理学などと関連してくる。また、物性鉱物学の発展も原子物理学と結びついている。なお、古生物学は、古代の生物の生存様式の発生と発展を研究するものとしては、生物学につらなる。  
(7) 古生物学は伝統的には地質学の一分科であり、その発展にとって不可欠なものであったが、むしろ、生物の歴史的な発展を研究するものとして、生物学にぞくするものと考えられるべきかもしれない。  
(8) 海洋学は海洋生物学的な要素をも含む。  
(9) 今日では、地球化学から、隕石などの研究をつうじて、宇宙化学の認識が深まっている。  
(10) 形態学、発生学、遺伝学等々は当初、特定のレベルにかかわるものであったが、科学の発展は生物現象の広範な諸レベルにかかわるようになっていく。

## エネルギー一元論と原子論

「自然諸力の連関と統一」を明らかにするという流れの中で成立した「エネルギー不滅則」は、自然科学の基礎的な法則として威力を発揮したので、あたかもこの法則だけですべての問題が解決するかのようになっていった。とくに熱機関のはたらきは、作業物質の性質には無関係であることが示されることにより、熱力学はエネルギーの変化のみに関する学問であり、物質の性質に関しては、なんの仮説も前提としないことが強調されるようになる。事実、熱力学は、物質の性質に関する理論的なモデルなしに進展することができ、物質が客観的実在であるという前提を抜きにして進められていった。

このような中で、エネルギー不滅則だけですべての問題が解決されるという見解があらわれる。ウィルヘルム・オストワルトは、自然現象はエネルギーのあらわれにすぎないもので、それが多様な変形を示すだけであるという説を唱え、これは思想的に「エネルギー一元論」派(Energetik)とよばれる流れにつながっていく<sup>11)</sup>。ここでは、自然は観察される現象の一つづきとみなされ、科学はこれらの観察と関連づけられた活動であるとされた。このような見解はさらに、1872年にいたって、エルンスト・マッハによって展開されている。マッハは、「理論的な機械的モデルによって自然現象を説明しようとする科学者の傾向」の例として、ドルトンにはじまる物質の原子論、あるいは、光や電磁気現象の説明のために用いられたエーテルの連続体モデルなどをあげ、激しく攻撃する。その根拠として彼は、熱力学においては自然の機械的モデルはまったく使われていないこと、および、観察される現象は観測される量に直接に関係づけられることを指摘する。彼は、熱力学があらゆる自然科学の原型であり、その方法論は他の科学においても応用されるべきだとするのである。

マッハの立場は、「自然科学は、観察された事実と現象とを母体として、必然的に構成されるべきものであり、それぞれはいくつかの法則や規則によって結び合わされるべきものである」、さらには「自然法則は諸事実を記憶するのに便宜な、また経済的であるように考え出された心理的な工夫である」というところにまで突き進むことになる。これは、客観的実在としての物質の否定で

ある。この頃、ボルツマン、マクスウェルらによって原子論にもとづく統計力学の建設が追求されていたが、マッハの原子論に対する攻撃はもっとも痛烈であった。マッハは、原子が存在するという証拠はどこにもなく、原子は思考の道具にすぎず、決して実在するものではない、というのである。

1899年、ボルツマン<sup>12)</sup>は原子論を擁護すべく反撃に立ちあがる。ボルツマンは「マッハは形而上学と自然科学の学説との間の区別を無視している。彼は科学を観察事実のつらなりによっておきかえることにより科学の諸概念を貧困化させてしまった」と批判する。さらに彼は「原子論は、一つの独立性をもった何物かを生ずる学説、しかもそれ以上にはそれを得ることのできない学説であり、これはさらに発展させるべきものである」と主張する。しかしながら、ボルツマン自身も「決定的な何物か」を見出すことができずにいた。

この「決定的な何か」はブラウン運動の理論と実験によりもたらされることになった。ブラウン運動はすでに1827年に植物学者ブラウンが花粉のかけらの不規則な運動を発見したことにより知られていたが、1905年アインシュタインは分子運動論にもとづいて微小粒子の拡散を厳密に定式化した。1908年のペランの実験は定量的に厳密にアインシュタインの理論を裏づけるものであり、これは原子、分子が実在するという事実を疑いの余地のないものとした。ここにいたり、オストワルトも遂に原子論を受け入れ、自然科学的事実の前に「エネルギーゲティーク」は崩壊することになる。

この事実は、自然科学は恣意的に成立しうるものでなくまさに客観的に実在する運動形態に対応して成立するというエンゲルスの見解を裏づけつつ、かつ、「エネルギー一元論」のような「物質なき運動」の存在を否定するものである。

### 物質の哲学的概念

原子論論争の頃は、従来の科学あるいは自然観の基礎がぐらつき出したときでもあった。とくに19世紀末の5年間は、X線の発見、電子の発見、放射能の発見がつづく激動の時期であり、自然科学の新しい発展を示唆するものであった。このような中で、ポアンカレの「物理学の危機」という見解があらわれる。

彼は1905年に、物理学は新しい段階に入りつつあり、従来の「あらゆる原理

が危機に瀕している」と指摘する<sup>13)</sup>。ポアンカレは、

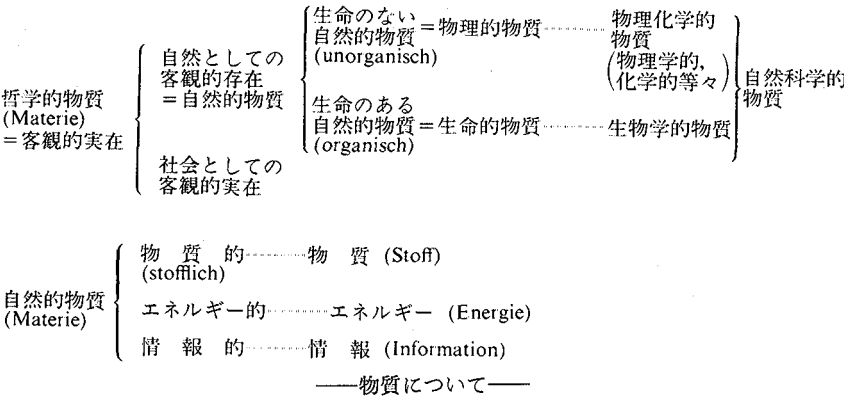
- ① 摩擦によりいったん熱となった運動が回復するブラウン運動……熱力学の第二法則の破綻
- ② 静止エーテルにもとづくローレンツの電気力学……相対性理論の破綻
- ③ 電子の質量はエーテルの慣性により生ずるという電磁質量の理論……質量保存則の破綻
- ④ ラジウムが大きなエネルギーをとどまることなく放出すること……エネルギー保存則の破綻

の証拠であるとした。このような見解の下にポアンカレは、「科学が進歩するにつれ……しっかり確立していた原理までも危機に瀕してくるかに見えるのは」これらは実際に客観的に実在するものではなく、単に「思考力をもった人間に共通のもの」であるからであるとして、約束説 (Conventionalism) を唱える。彼にあっては「科学とは少なくとも一般的には、うまくいくような行動の規則である」とされるのである。一方、物理学界の大御所的存在であった W. トムソンは、古い自然観から一步も踏み出すことができず「ラジウムは原子ではない。なぜならばそこから  $\alpha$  線すなわちヘリウム原子が出てくるからだ」と論じる。このような中においてラザフォードらの原子の変換という客観的事実を客観的事実としてとらえ探究していく方向だけが自然科学の発展において積極的な役割をはたしたといえる。

かかる自然科学の新しい段階は、唯物論哲学 (materialism) の基礎をなす「物質」概念の深刻な検討を要求していた。新しさを装いつつ「危機」を叫び、実は科学を観念論で骨抜きにするマッハやポアンカレの思想が大きな影響力を持つ中で、1909年に「唯物論と経緯批判論」が出版され、彼らの思想を批判するとともに、物質の哲学的概念と、自然科学的物質像の区別が明確にされる。哲学的概念としての「物質」には、自然科学の発展の個々の段階で物質の典型であるとみなされた「不可入性」とか「質量」とかいった特殊な性質はいいい前提とされず、意識の外に客観的に存在するということのみが「物質」の唯一の性質であるとされる。すなわち、「物質」というのは質的に非常にちがうあらゆる形態をもつ多様な実在的外界の全体であり、したがって客観的実在と

しての社会と人間の実践的行動をも包含し意識から独立にかつその外に存立するものである。それ故、物質的世界の全体は、多種多様な運動形態の累層として立ちあらわれるのであり、物質の階層性および無限性として表現される。物質の哲学的概念により科学的認識の内容が物質の構造により制約を受けることが帰結され、また、諸科学を分類し相互の連関を明らかにする原理があたえられる。

ところで、自然科学が対象とする「自然的物質」は、対象自身の中に実践そのものを含まないことにより特徴づけられる。前述のように、自然的物質は、物質的・エネルギー的および情報的という3つの側面をもつ。哲学的物質と自然科学的物質の関係は以下のとおりである<sup>5),6)</sup>。



物質概念と若干の理論的問題

「唯物論と経験批判論」においては意識の外に客観的に存在するということのみが「物質」の唯一の性質であるという記述がみられるが、哲学的物質にもいくつかの属性が前提とされている。それらは、「物質の統一性」「物質とその運動の不可分性、不滅性、無限性」などであり、もちろん「質量」「不可入性」などの特殊な性質は含まぬきわめて一般的な性質に限られている。事実、原子論論争は「物質なき運動」の存在を否定したが、「物質とその運動の不可分性」が意味するところの「運動なき物質」もありえないであろうか。この問いに對



し現代の自然科学はすべての自然科学的成果をもって答えられている。すなわち、現代の自然科学は、自然の自己運動の姿、および自然の歴史的発展の姿を、つぎつぎに明らかにしているのである。

自然科学的法則として確立された「エネルギー不滅則」が意味するものは何か。それは「物質の運動の不滅性」の表現であるといえることができる。かかる意味をもつエネルギー不滅則は、研究の際のイデーの役割を果たしうる。 $\beta$ 崩壊に際しこの保存則が成り立たなくなるように見えた際に、エネルギーを持ち去る新粒子ニュートリノが導入されたのがその代表的な例である。「物質とその運動の無限性」は、物質はその運動諸形態の質的な多様性において汲み尽されえないことを意味し、これは素粒子の下部の階層の発見の際の指導原理となった。

「物質」の第一次性の承認とその存在様式の一般の側面の抽出が、かかる積極的役割をはたしうる根拠は何か。戸坂 潤は自然科学的認識は「予見するために見る」という有効さを持っていなくてはならず、実験はそのためにも必要なのだと説き、この「予見は実証主義のものではなくて実は唯物論の特別な能力に俟たねばならない」と論じる<sup>14)</sup>。この見地の延長上に位置する武谷三男氏の「哲学はいかにして有効さをとり戻しうるか<sup>15)</sup>」という問題提起は、現実の実践の場において絶えず想起されていかなければならない。

このことに関連して、自然的物質の3側面として、物質的・エネルギー的・情報的過程を並列することに議論の余地は無いであろうか。菅野礼二氏はつぎのように論じる<sup>16)</sup>。「物質の普遍的属性である質と量に対比されるものが物質的側面とエネルギー的側面であり、それらとは異なって物質の相互連関の中に普遍的に見出されるものが情報（情報の伝達ではない）ではなからうか。そもそもエントロピーはエネルギーの有効性における質的差異を与える概念であった」。この指摘は示唆的であり、理論の発展の鍵を含んでいるのかもしれない。

#### §4 総合科目の構成とその概要

総合科目の構成の基礎をなすのは、第一章から第三章までに展開された議論であろう。要約するならば、その構成の骨格は、「自然界における発展と進化」

という側面および「物質の構造とエネルギー」, 「物質系と情報」という側面から自然の多様性とそれをつらぬく統一性をとらえ, かつその技術とのつながりを明らかにする, というところにある。その構成は以下のとおりである。

#### I. 自然の運動諸形態と物質・エネルギー・情報

#### II. 運動する物質

1. 自然界における発展と進化, 2. 原子論的自然像と物質の構造, 3. 星の構造と進化, 4. 地球の進化とプレートテクトニクス, 5. 化学進化と生命の起源

#### III. 物質の構造とエネルギー

1. 序論および電磁場とエネルギー, 2. 原子, 分子の構造とエネルギー, 3. 生命現象とエネルギー, 4. 原子核とエネルギー

#### IV. 物質系と情報

1. 自然科学における情報概念の形成, 2. DNA と情報, 3. 半導体と情報科学

#### V. まとめ

総合科目としての統合の一つの基礎は, II, III, IV の内容はいずれも何らかの意味において「物質」に関係していることである。では, 各々の講義がどのような内容を持ち, 全体としての流れの中でどのような位置を占めるのであろうか。以下これを見ていこう。

#### I. 自然の運動諸形態と物質・エネルギー・情報

第三章の議論を基礎に, 自然の運動形態の多様性とその統一性, および自然的物質の三側面について論じる。さらに科目の構成について概説し, 以下の各論を系統的に理解するための方向づけを行なう。

#### II. 運動する物質

1. 自然界における発展と進化

「運動する物質」の序論である。すでに §3 で論じたように「物質」ということは、二義的に用いられている。一つは狭義の物質すなわち質料 (stoff) という意味であり、これに対して広義の物質は「客観的实在」の総体を意味する。「運動する物質」の「物質」はもちろん「客観的实在」の総体という意味である。同様にここでいう運動は、狭義の「位置変化」のみならず、生成と消滅・変化一般をあらわす広義の運動を意味する。「運動する物質」では「客観的实在」の構成部分である自然は絶えず生成と消滅・変化一般のうちにあること、それらが相互に作用を及ぼしあいながら運動し発展しながら高次の運動形態をつくりだしてきた過程を現代の自然科学の成果を基礎に描き出すことを目的とする。なぜならばこれは現代の物質観あるいは自然観を論ずる際にきわめて重要な位置を占めるからである。

歴史的には、ニュートン的な「化石化した自然観に最初の突破口をひらいた」のは、一人の哲学者カントの提起<sup>17)</sup> による「カント・ラプラスの星雲説」であったといわれる<sup>1)</sup>。しかしながら、自然科学の発展にしっかりと基礎づけられたかたちで、自然の発展と進化の姿が明らかにされたのは比較的新しく、19世紀前半における地質学の成立と、ついで提唱されたダーウィンの進化論においてであろう。20世紀にはいると、生命の起源、化学進化、星の進化などがしだいに明らかにされてくるが、宇宙に関してはホイラーの「定常宇宙論」とガモフらの「宇宙の大爆発 (big bang) 理論」が長い間対立していた。ところが1965年にペンジャスとウィルソンにより「3°K 宇宙背景輻射」が発見 (1978 年度ノーベル物理学賞) されるにおよび、定常宇宙論は決定的にしりぞけられ、宇宙は百数十億年前に大爆発を起こしたこと、また宇宙はそれ以後現代に至るまで膨張を続けていることが明らかにされた<sup>18)</sup>。この膨張の中で多様な運動形態がつくり出され、生命が生れ、ついには人間とその社会があらわれる。

Big Bang 後の様子は現代の原子論あるいは素粒子論により、かなり正確に推定できる。3分後には約10億度 K まで温度が下り重水素核が形成される。膨張を続け温度がさらに下ると水素原子が形成され宇宙は「晴れ」あがる。やがて原子星雲が形成され太陽系へと進化し、この過程で約46億年前に原始地球が生れる。U<sup>238</sup> や K<sup>40</sup> などの放射性物質が放出するエネルギーにより地球の内

核温度が上昇し原始大気が形成され、原始星雲の頃から進行してきた化学進化がさらに進行し、有機物質が豊富に蓄積され、やがて原始生命が出現する<sup>19)</sup>。地球は長い地質時代をへて現代に至り、現在もたえず独自の運動を続けている。地球上における原始生命も進化し、やがて高等動物があらわれる。ここでは、以上の歴史的発展の概略を軸に論じ、これを以下の各論の序論とする。

## 2. 原子論的自然像と物質の構造

ギリシアのデモクリトス、あるいはその後にエピクロスによって提唱された原子論でいうアトムとは、自然を構成する究極の粒子として、①不可分な最小単位であること、②不変・不滅であること、③空虚と峻別される実体でありそのために真空（空虚）の存在を認めること、の基本的性格をもつものであるとした。そして物質のいろいろな性質とすべての自然現象は、そのアトムの種々の配列と気まぐれのない運動によって生ずる。即ち万物の変化はアトム自身に備わっている能動性に帰着させるという自然観に立っていた。このようにギリシャ時代のアトムの考えは、実証の科学に裏付けられたものでないにせよ、今日の我々からみて驚嘆に値するほど良くあっていたし、その自然観はその内容に於てたいへん優れたものを持っていた。すなわちギリシャの自然哲学者の言葉はたんなる思いつきでも現実と無関係な思弁でもなく、自然への鋭い観察から自然のなかにある変化と恒常を統一してとらえたに違いないのである。

古代ギリシャに端を発した原子論のその後の発展は、人類の自然の認識の拡大とともに自然の他の諸現象の発見とさまざまな関連をもちつつ展開し、分子から原子へ、原子から原子核へ、原子核から素粒子へと発展してきた。すなわちアトムの問題がより実践的な自然認識の課題として提起された近代の原子論（原子・分子）では、ギリシャ原子論の基本的イメージを大きく越えることはなかったが、現代に入って原子はもはや不可分な最小単位ではなくそれ自体構造をもつことが解明され、更に原子核・素粒子は恒常不変なものではなく互いに転化し得るものであることが明らかにされた。そして巨視的物体に対してはニュートン力学が、原子の世界には量子力学が、素粒子の世界には場の粒子論が、それぞれの階層の固有な法則として成立している。さらに最近四半世紀のこの分野の研究は、素粒子もまたより基本的な要素から構成されていることを

明らかにし、原子論は新たな飛躍を目前にしている。しかしながら素粒子の世界は、かつて原子がそうであったように多様であり、いっそう根元的な単一の究極の物質に帰着されるようには見えないのである。

このように現代の新しい原子論では、自然がいろいろな階層的構造をもつものであり、アトムというのはそのひとつの階層をかたちづくる担い手（実体）であり、そしてそれぞれの階層にはまたそれぞれ固有な法則が貫徹していることを主張している。従って新しい原子論でいうアトムは、ギリシャの原子論でいうような、物質を分割していった限界として認識する不連続的な究極粒子ではなく、それゆえまた、①不可分性、②不変・不滅性、③真空の存在、と言ったアトムの性格概念も、アトムの属する階層の深化に応じて、その変更を余儀なくされてきたのである。そしてまた、それぞれの階層に於ける固有な法則が自然像を豊かにし、その階層の重層的構造が万物の変化と恒常を統一的に説明するという立場がいわゆる現代の原子論である。

このような現代の原子論は、厳密な科学的経験的探究の成果であり、それゆえアトムの階層的概念規定もギリシャの原子論でいう思弁的なそれよりもはるかに確定的で明瞭であるばかりでなく、多様な形をとって現われてきている。そしてこのようなアトムの階層的構造と多様性が、アトム自身の生成・消滅等をも含む広義の運動と不可分に結びついていることは見逃してはならない。

以上の概略を骨子とし、現代の原子論の具体的イメージをとおして、自然の不断の運動と多様性、それをつらぬく統一性を理解することをこの講義の目標とする。

### 3. 星の構造と進化

この講義では、恒星の構造やその進化、また、恒星を構成単位とする宇宙の進化をたどりながら、本講の主題の一つであるエネルギーの保存と転化およびそれを担う多様な運動形態を考察してゆきたい。

われわれは日頃、太陽エネルギーを「気にかける」ことは殆んどない。しかし、生命の直接的な維持に、それが絶対に不可欠であること、また、生命を支えている地球的な環境、例えば、気象や海流の現象、オゾン層、電離層、放射能帯などの作用が、太陽エネルギーに帰因することを誰も否定できない。

太陽系の一惑星に過ぎない地球が、その小さい面積で受止め得るエネルギーは、太陽が放出する全エネルギーの20億分の1に過ぎないし、その貴重なエネルギーを、人類は10万分の1しか活用していないといわれる。最近、太陽エネルギーへの認識が深まりつつある。

このエネルギーの本源である太陽とはいかなる存在であろうか。また、それは宇宙進化の中で、今のどのような過程にあるのだろうか。これらのことは、太陽の内部で起っているエネルギーの非可逆過程を調べることによって明らかにされる。

恒星にはさまざまな種類があって、それは進化のさまざまな過程を進行しつつある数多くの恒星の姿であるという認識は今世紀の初頭に溯ることができる。

1905年、デンマークのヘルツスプルングは赤色星の中に、エネルギー放出量が際立って異なる2種類の量があることを指摘し、それぞれを巨星、矮星と呼んだ。これは、後年、バーデによる恒星の種族の概念（1944）への先駆とも云える卓見であった。

米国のラッセルは、早くも1913年に、恒星の表面状態のパラメーターであるスペクトル型と、恒星の内部構造的パラメーターであるエネルギー放出量を対比して描いた点が、その恒星の物理学的特性をよく表わし、恒星の進化を、その点の図内での移動として捉え得る重要な意味を持つことを提唱している。当時の恒星進化理論は、正しくはなかったが、この図表は、今日でも、ヘルツスプルングーラッセル図（HR 図）と呼ばれ、天体物理学における理論と観測との接点となっている。恒星進化論的に見た HR 図の意義は、この図内の点の疎密が、異なる性質の恒星の頻度分布であるとともに、恒星が進化して図中を移動する生涯のその期間の長短を表わしているといえることである。

白色矮星の理解、パルサーの発見、星間物質の定量分析、中性子星やブラックホールの理論的研究と、この分野での情報は次第に増した。殊に、紫外、赤外エネルギーの殆どを遮蔽する地球大気の外での近年の観測は、それまで、太陽や、他の恒星を大気の下から半透明な大気をすかして、気流に悩まされながら眺めていた人類に、新しい視力を得させ、貴重な情報を加えた。赤外エネルギーしか放出し得ない誕生後間もない低温星、紫外輝線のみを放出する太陽の

上層部、中性子星やブラックホールの近傍から発すると思われる X 線エネルギーなどである。

ハッブルの法則が示す星雲の赤方変位は、宇宙膨張によるものと考えられ、それはビッグバン以来の膨張の結果だと考えられている。膨張のある時点で、物質と輻射エネルギーの相互作用平衡が立ち切れ、その当時の痕跡を示す 3°K 宇宙輻射が、宇宙の「化石」として認識されようとしている。

他方、宇宙を構成している要素を局部的に見ると、宇宙物質は、拡散的、平均化とは逆に、個別化、集中化の現象が見られる。

われわれの銀河系は、回転するディスク状の恒星系で、隣りのアンドロメダ星雲とは200万光年を隔てている。過去にこの範囲の物質がそれぞれに凝集し、収縮によって回転が加速されたのだと考えられている。銀河系の古い量である II 種族星は現在のディスクを大きく包含する球状の古代銀河系（ハロー）に広く分布しており、現在の銀河回転には参加していない。

銀河系の中でも、星間物質は密度の高まり（宇宙雲）から、胞子と呼ばれる暗黒星雲、赤外線星を経て恒星の誕生へと収縮してゆく。

恒星の生涯を通じて、力学的準安定平衡を保ちながら自己重力によって収縮してゆくのが恒星進化の基本的状況だと思われる。収縮によって重力エネルギーから転化された熱エネルギーのある割合は放出されて星の輝きとなり、残りは内部に留保されて温度を維持し、ガス圧によって自己重力を支える。

恒星の中心部の温度、圧力、組成がある種の熱核反応に適合する時にのみ、恒星は熱エネルギーの殆どを核エネルギーから生成し、この期間、収縮を休止する。

宇宙組成の大部分を占める水素の核融合が非常に安定なため、恒星は生涯の大部分に相当する長期間を、この水素燃焼期として過すために、殆どの星はこの状態（主系列星）で見出される。

それにもかかわらず、主系列星としての期間にも限りがある。中心部における燃料元素、水素の消耗である。

核エネルギーからの熱源を失った恒星は、再び基本的な収縮に戻り、それが、次の種類の核反応に適合する状態を生ずるまで続く。このように恒星の進化は、

収縮の過程に、何段階かの核反応を行いつつ、次第に高温、高密度な状態へと進んでいく。

どの段階まで進み得るかは、重力エネルギーがどれだけ引き出せるかによるのであり、それは、持って生れた恒星の質量によって決る。

核反応からエネルギーを引き出せなくなった恒星は、自己重力を電子の縮退圧で支えられて白色矮星となるか、重ければ、この力でも支えられなくて中性子縮退圧の支えで辛うじて中性子星として留るか、もっと重ければ、この力をも押し切って、一点に向って重力収縮を続けるか（ブラックホール）のいずれかの生涯の終焉が待っている。このいずれになるかは、恒星の質量によって決る。

#### 4. 地球の進化とプレート・テクトニクス

われわれの住んでいる地球上では、たえずどこかで地震が発生し、火山活動が生じている。これらの現象は、46億年余前、地球が誕生してから未だに地球が変化しつつある一つの姿に外ならない。

現在の地球は中心部に核、その内側にマントル、表層部にごく薄く地殻を持つ層状の構造をなしているが、地球は初め、原始太陽系星雲の凝縮の結果形成されたと現在は考えられている。この地球の材料物質集積過程の間、または、集積の後に、核とマントルの分離が生じ、原始マントルの形成はなされた。マントル形成に続く数億年の間に、最初地殻が発生し、その後マントルより地殻は、たえず物質の供給を受けて増大し続けて現在に至ったと考えられている。

大陸地殻の起源は、現在まで知られている最古の岩石年令、37億年以前にさかのぼることは明らかであるが、地球の歴史の大部分をしめる先カンブリア時代の地殻の運動については、まだよく解明されていない部分が多くある。しかし、中生代以降の地殻の運動については、プレート・テクトニクス説を適用することによって地質現象を見事に説明することのできる部分が多くある。プレート・テクトニクスによると、2億年程前、単一の大陸であったパンゲア大陸が、いくつかの大陸ブロックに分裂を始め、地球の表層部を移動する。山脈や海溝の形成、地震、火山活動の発生は、地球表層部がプレートとして動き、



その相互作用の結果であると説明する。

鉱物、岩体～地球は、それぞれに固有な一般的物性と、またそれらが生成された時点と時間の経過時の条件によって得られた性質を必然的に持っている。

このことは、現時点における地球の物質の状態のみでなく、過去の地球の状態をも明らかにする鍵となる。

## 5. 化学進化と生命の起源

歴史的過程としての自然の発展と進化の中において決定的に重要な位置を占める質的变化は、地球上における生命の誕生であろう。地球上に最初の原始生命体があらわれたのはおよそ30数億年前のことであると推定されている。この原始生命から現代の生物までの変化は生物の「進化」と呼ばれているが、実は原始生命体の誕生にいたるまでに、簡単な化合物から高次の炭素化合物が形成される長い歴史的過程が前提となっているのである。この過程、すなわち原始地球の大気、水、地表の化合物などの簡単な物質から原始生命ができるまでの過程を「化学進化」という。この章では、生命の起源をめぐる歴史的な諸学説の紹介を織り込みつつ、非生物的自然の進化から生命の起源に至る諸問題について論じる。

### 〔I〕 歴史的に見た生命の起源をめぐる諸学説

初期には神による天地創造説において生物もまた「神が創り給いしもの」であるという見方があらわれ長期にわたり広範な影響力をもつが、ついで、生命永久説（二元論的自然観）があらわれる。これは

#### ① コスモゾア説

生命の胚種が恒星間および遊星間の空間から地球にやってきたという説

#### ② 胚種広布説

20世紀の初頭にアレニウスにより再びとりあげられたもので、生命の胚種は一つの天体から他の天体へ伝播するという説

#### ③ Pryer 説

生命は永久であり無生物も独自の生命をもつという説などの諸説である。これに対し生命は地球上の無生物から、常に自然に発生することを主張する自然発生説があらわれる。この説は微生物の発生を抛り所と

して一定の期間、命脈を保つが、19世紀中頃におけるパストゥールの実験の結果、否定される。生命の起源の問題が本格的に取り上げられるのは20世紀初期の、オパーリンによる生命の起源の学説においてである。

## 〔II〕 オパーリンと生命の起源<sup>19)</sup>

オパーリンによる生命の起源の学説の概略は以下のとおりである。

- ① 簡単な化合物から有機物が形成され、これらの有機物の長い期間にわたる化学進化の結果、生命体に直接に関係する複雑な有機化合物が形成される。
- ② これらの有機物から、コロイド状溶液、さらには外界から区別される境界を持った液滴が形成され、自然選択の結果、液滴内の組織化が進行する。
- ③ その過程で、これらの液滴の中のあるものは、物質代謝の能力を獲得して、動的存在となる。自然選択によりさらに進化が進行し、ついに原始生命が生れる。

それでは、最初の有機物はいかにして形成され、いかに進化したであろうか。有名なミラーの実験以来、多くの実験がなされ、多くのことが解明されて来ている。以下では、その概略を紹介しよう。

## 〔III〕 化学進化の諸問題

### 1. 炭素化合物の特性

諸元素の中でも炭素原子は特に多様な化合物を形成する能力を備えていること。このことが、炭素化合物の進化の上に、すべての生物が存在することになった理由でもあろう。

### 2. 有機物の起源

炭化水素、およびその誘導体は多数、存在する。すなわち、アルコール、アルデヒド、ケトン、アミド、アミン、アミノ酸などである。ところで、生細胞内有機物のすべての変化は、次の三つの原則的反応形式で行なわれる。

- a) 縮合-切断反応
- b) 重合-加水分解反応

## c) 酸化―還元反応

これらの三つの形式の種々の組み合わせにより、複雑な有機化合物が生成されることになる。また、アルコール、アルデヒド、有機酸、アミド、アミン等の水溶液を長い間放置すると、①ブドウ糖、②ペプチド、③ペプトン、などの生細胞内と同様の化合物が生成される。このような化学過程が、原始地球の原始水圏で起ったものと思われる。すなわち、原始地球の上で起った化学過程のほとんどのものは、現代の有機化学実験室で再現できるのである。

## 3. タンパク質の起源

原形質を構成する基礎的物質をなすのはタンパク質と核酸である。タンパク質はアミノ酸のペプチド結合により構成される高分子化合物であり、特有の安定した構造をもっている。生命の起源におけるタンパク質の位置は、以下のようなものであろう。

有機化合物→タンパク質（コロイド）→生物

なお、このことに関して Engels の有名な規定が想起される。

「生命はタンパク体の存在様式の一つである」。

## 4. 原始膠質系の起源

有機物のさらに高度の発展は単に分子内における原子の配列状態に依存するのではなく、分子相互間の相関関係に依存するものである。ここで重要になるのは、コアセルベーションという概念である。

## コアセルベーション

親水コロイド溶液には、凝結のほかにもう一つの分離現象がある。すなわち、コロイド溶液が二つの層（一つはコロイド物質に富む溶動性の層＝コアセルベートであり、もう一つはコロイドを含まない液層＝平衡液）と分離し平衡を保つ現象があり、これをコアセルベーションという。

## a) コアセルベート

連続的流動層ではなく平衡溶液中にミクロ的に小滴として浮動する液滴を意味する。この小滴は表面によって周囲の溶媒から明瞭に区別される。コアセルベートの液滴は相互に融合するが、平衡液とは

混合しない。

- b) コンプレックス・コアセルベートの特徴（ゼラチン，アラビアゴムなど）

- ・周囲の溶液中に分解している諸物質をはっきりと界面に吸着する。
- ・第二次変移を行なう能力を備えている。

ところで地球の原始水圏には、原始タンパク質、リピット、炭水化物、親水コロイドなどの高分子化合物が含まれていた。それ故、コンプレックス、コアセルベートは必ず形成されたであろう。何故ならば、コアセルベートは非常に希薄な溶液でも起こるからである。コアセルベートの形成は、溶媒との間に鋭い区分を生じ、これは外的環境の対立物となり、しだいに物質代謝の能力を獲得するのである。

## 5. 原始生物の誕生

地球の原始水圏において形成されたコアセルベートは、いろいろの有機および無機化合物の混合溶液中に浮遊し、周囲の溶媒から吸着し、その構成を変化させ、徐々に生物の同化過程に対応する能力を獲得していく。ここで分解作用が同化作用を上まわれればコアセルベートは分解される。かくしてコアセルベート間の自然選択の原始的形態があらわれる。この中で最も安定した膠質系のみが生存の継続および進化の可能性を保証される。自然選択の結果は酵素系の出現に導びく。簡単な酵素系ができる、化学過程は速やかに調節され同化物質が分解物質と交代し、新しい構造が老廃した構造に代っていく。

以上の結果、地球表面には組織化された物質の量がしだいに増加したのみならず、さらに重要なことはこのような組織体の「質」がきわめて限られた方向へ変化していったことである。この過程が進行すればする程、原始水圏にある有機物の量はますます減少し「自然淘汰」はますます激しくなる。ここに生物学的因子を持った膠質系が残ることになり、さらに進化を続け、より以上の化学過程を調整する新体系があらわれ、新内部機構が発生し、物質代謝、エネルギー変換が可能となる。かくして高い秩序を有する物質系、すなわち原始生物があらわれる。

### III. 物質の構造とエネルギー

原子論争は「物質なき運動」の存在を否定したが、事実、哲学的には「運動の量的表現」と規定されるエネルギーは、現実の物質の構造と不可分である。「エネルギー不減則」は、エネルギーはその総量を不変に保ちつつ種々の形に転化しうることを表現しているが、そこには必ずエネルギーを担う何かが介在し、それは何らかの構造を持っている。巨視的物体の場合には、それは質点の位置関係であったり相対的な速度であったりする。原子・分子の世界では、エネルギーは原子核とその周辺の量子力学的軌道を占める電子により構成される構造により担われる。

生命現象もまた、いろいろのレベルの構造においてエネルギーが関係している。その最も要素的な過程では、原子・分子の場合と同じ電子によってエネルギーが担われている。しかしながら生命体においては、これらの無数の要素的变化が、互いに無関係に進行しているのではない。それは生物に特有な一定の関係において進行している。このような進行の仕方に生物に特有な質があらわれ「生きている」という物質の存在様式が可能になるのである。

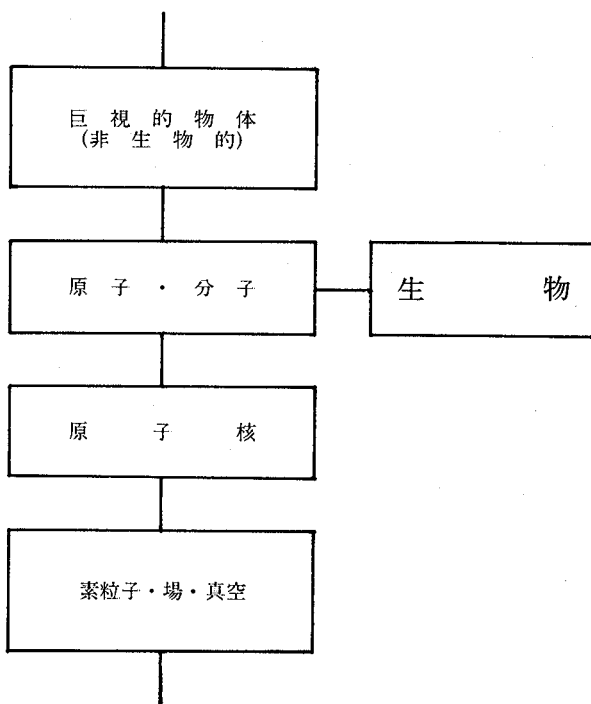
原子核はいくつかの核子（陽子と中性子）の複合系としての構造をもっている。核子は核力により結合して原子核を形成するが、核子一個あたりの結合エネルギーは平均して約 8 MeV であり、これは原子内の電子のエネルギーすなわち化学結合のエネルギーの約 100 万倍にも達する。核の分裂あるいは融合の際にはこの莫大なエネルギーが解放され、このことが、原子核のエネルギーに広く関心が向けられている理由の一つになっている。

さらに、抽象的な場の概念も思考のみにより構成されたものではなく、場が客観的実在であることに基礎を置く。とくに電磁場自身エネルギーと不可分の関係にあり、それ自身がエネルギーを担うという事実は場の物質性を裏づけている。

真空も何らかの構造を持ち、それは、「空虚」あるいは「無」を意味するものではない。実際、場の量子論では「エネルギーの最底状態」として真空が定義されるのである<sup>20)</sup>。

多様な運動形態の総体としての自然も「質料とエネルギー」という関係にお

いてとらえる限りでは整然とその統一性をあらわしており、それ故、エネルギーを軸として自然の多様性と統一性の一側面をとらえることができる。「物質の構造とエネルギー」はかかる意味をもつ章である。その構成は以下のとおりである。



——構造の階層性(概念図)——

### 1. 電磁場とエネルギー

エネルギー概念の把握としては、初歩的には力学的見地から、物質（質点）の運動の最も重要な契機としてとらえ、次第にその概念を micro, あるいは micro な system に適応、拡大する事により、その概念の内容を一層充実させて来た。この、物質の最も基本的な量としてのエネルギーは、全ての自然科学的な相互作用をも貫いて転換され保存される。

アリストテレスの時代から、「色彩」としての光に対する強い関心を持ちな

がらも、この光についての認識が一般化したのは、実に19世紀も終りに近い時代であり、更に20世紀に入って初めてその本質の認識に到らざるを得なかった。人類の最も身近な存在としての光＝電磁場（＝光子）に対する認識を人類はどのような過程で獲得したか。電磁「場」としての場の概念とはどのようなものであり、実在としての場が持つエネルギーとはどのように理解したらよいか。エネルギーとしての電磁場が果している役割を考えながら、慣性閉込めによる発電（レーザー爆縮による核融合）計画等についてふれる。

特に、電磁場の概念及びその電磁場に蓄えられるエネルギーの形態について以下にふれる。

### (I) 電磁場としての「場」の概念

帯電粒子間の力を Coulomb が定量的に測定して以来、この電荷間に作用する力の伝達機構として Newton 力学以来の伝統を持つ遠隔作用として把握することが常識となっていた。しかし、Oersted による電流の磁気作用、Ampère による電流間の研究を通してこの遠隔作用の考え方は危機に直面した。その後登場する Faraday による場の概念の導入によりこれら電気、磁気現象の記述は、Galilei, Newton による力学的自然記述の方法と異なる新しい自然記述の方法に委ねられることになる。つまりエーテルを媒質とする場（空間）の歪みとして、あるいはそのような場と電荷との相互作用として力が記述される。（近接作用）。電波とはこのような場（電場、磁場）の大きさと方向が時間的に変化するものであって、電場の波動と考えられる。（Maxwell の波動方程式）

しかし、時間的に変化する電場、磁場の中での荷電粒子の運動を考えた Lorentz の矛盾点を解消する過程で、特殊相対論の助けにより、電場と磁場とは独立の実在として存在するのではなく電磁場という両者を統一したもの（物質）が実在することが明らかになる。この電磁場を記述するものが Maxwell の波動方程式であり、媒質としてのエーテルに代って真空がその媒質となる。

### (II) 場（電磁場）のエネルギー

静電場のポテンシャルは、静電場中の一点から他の点に電荷が移るときの電場のなす仕事として計られる。この量は電場一般に拡張される。導体の持つ静電エネルギーは、初め帯電していない導体に次々微少電荷を運び込み、導体の

電荷が  $Q$  になるまでに外からする仕事の全量  $W$  として表わされる。Faraday の近接作用の表現では、 $W$  は空間内に生じたエーテルのゆがみのエネルギーとして空間内に蓄えられていると考える。Michelson と Morley の実験(1887)によりエーテルの存在が否定されるに及び、一般的な真空を媒質とする電磁場にもこの考えは拡張される。

## 2. 原子・分子の構造とエネルギー

原子・分子の構造は、それが保有するエネルギーと深いかわり合いをもつ。ここでエネルギーというのは、原子においては、原子核と電子の運動エネルギーとポテンシャルエネルギーの和（全エネルギー）である。ポテンシャルエネルギーの基準を、原子核と電子が無限大に離れているときにおけば、全エネルギーは負の値をとることになる。このエネルギーの計算に際しては量子論を適用すれば、原子のエネルギーは最低の値と零との間で不連続なとびとびの値をとる。これをエネルギー準位と呼んである。つまり、原子においては、エネルギーというものはその多寡というよりも高低としてとらえられる。

原子・分子の構造とエネルギーの間に密接な関連性があるということは、原子・分子に関する種々の変化たとえば吸収・発光スペクトル、化学反応などもエネルギーと深い関係があることを意味する。これらの変化を §3 で言うところの広義の運動と考えれば、これも窮極的にはエネルギー変化の表われであると言える。

エネルギー変化であるところの諸変化に関して根本となる基準は、エネルギーが低いほど物質あるいは状態は安定であるということである（これを基底状態という）。すべての変化はこの基本原理によって示される統一性によって把握される。

原子を構成する原子核と電子の相互作用は、不連続なエネルギー準位を上下に移動（遷移）する電子として表わされる。上述の基本原理に従えば、通常の状態では電子は基底状態に存在する。しかし、原子が外部から何らかの形でエネルギー（熱、光）を受け取ると、電子は高いエネルギー準位（励起状態）に移動する。この状態の電子は再び安定な基底状態に移動するが、このときエネルギーは電磁波（光）の形態によって放出される。これは原子スペクトルと呼



ばれるが、ナトリウムの炎色反応にみられる発光は、この種の放射エネルギーに他ならない。

化学反応（化学結合生成）の問題はエネルギーの問題であると言っても過言ではないであろう。2つの原子から水素分子が形成される過程では、両原子が接近するにつれて「分子」のエネルギーは次第に低下してゆき、ある核間距離のとき最低となり、それ以下では逆にエネルギーは上昇する。エネルギー極小の状態で結合つまり分子が生成されたと解釈される。水素分子のエネルギーは、単独の2個の原子のエネルギーより低く安定になっているのである。

化学結合の数式的ないしそれに基づく図式的記述には、通常原子軌道が使われる。化学結合の一種であるいわゆる「共有結合」は、この記述法によれば、原子軌道の相互作用つまり「重なり合い」で示される。この結合形成においては、重なり合いの度合いの大きいほど強い結合ができるという「最大重なり規準」が適用される。これは、エネルギーの低いほど安定という基本原理の別の表現に他ならない。というのは、原子軌道の最大重なりが達成されたとき、分子のエネルギーは最低となるからである。

複雑な分子においても、エネルギーが重要であることに变りない。ただ、原子数したがって電子数の増加によって、エネルギー単位の計算の複雑さが増大するから、適当な近似法が採用される。1981年度ノーベル化学賞の対象となった福井謙一博士の「フロンティア電子理論」は分子内のエネルギー単位と電子の運動つまり電子密度とに深い関連性をもっているのである。

以上のように考えると、原子・分子の構造と変化の多様性をエネルギーという側面から統一的にとらえることができる。

### 3. 生命現象とエネルギー

地球上に現存する生物は、動物100万種以上、植物約30万種で計130万種以上の多数に及ぶが、それら多数の生物が生命維持のために営む各種の代謝反応にかかわる酵素は、現在知られて居るもので2300前後の数に過ぎない。生物種の多様性に較べ、代謝にかかわる酵素種の少さは極めて対照的である。これは主としてエネルギー代謝に関して、その物質が全生物に共通して炭水化物(糖類)であることに起因する。

生命現象とエネルギーを考えるに当っては、1つは全生物がエネルギー源として利用し得る形の物質生産（エネルギー固定）の面と、他は、生物の生活にかかわるエネルギー生産の面から考えなければならない。即ち前者は、緑色植物（一部細菌を含む）によって営まれる光合成作用であり、後者は広義の呼吸作用である。両者ともそれぞれ研究が広く、深く行なわれ、その機構が明かにされている。したがって、生命現象とエネルギーの表題の下では、光合成作用・呼吸作用とも講義するべきであるが、配分された時間内で両者をおる程度掘り下げて話すことは不可能であるので本講義では、エネルギーの固定—光合成作用—のみを取り上げることにした。

光合成は、葉緑素を持つ植物のみが行なう光エネルギー→化学エネルギーへのエネルギー変換作用であり、地球上に生存する生物は総べてこのエネルギーに依存する。光合成によって固定される量は年間炭素量にして  $2 \times 10^{11}$  トンと推定されているが、これに用いられる太陽エネルギーは、地球全体に到達するエネルギーの0.1%に過ぎない。もちろん、このエネルギー効率は地球上の位置、陸上・水中による相違、植物種とその存在形態の違いによる差のあることは当然であり、また光合成機構の違い（ $C_4$  植物と  $C_3$  植物）による差もある。

太陽エネルギー（光）が植物によって利用されるには、まず、葉緑素に吸収される必要がある。抽出した葉緑素溶液の光吸収スペクトルを測ると、430 nm, 633 nm 附近に極大を持つ曲線が画かれ、青色光と赤色光とがよく吸収され他の波長の光はあまり吸収されない（植物の葉が緑色に見える理由）。このようにして葉緑素に吸収された光エネルギーがどの程度の効率で化学エネルギーとして固定されるかについては、Warburg (1922) によって光量子収率に関する実験から4光量子説が唱えられたが、其後 Emerson 等 (1938以降) によって更に検討が重ねられ8～10光量子が1モルの  $CO_2$  を固定するのに必要であると改められ、それが一般に認められている。Warburg と Emerson 等による光量子収量をめぐる論争は永く続き、その中で Emerson 等は、光を吸収した植物色素間に於けるエネルギーの伝達や、後に葉緑素 a, b がそれぞれ別々に関与する2つの光化学反応系発見の端緒になる Emerson effect の発見等、光合

成研究史上貴重な成果が得られた。Emerson effect は、680 nm 以上の長波長においておこる量子収率の低下が、より短波長の単色光同時照射によって低下せずに維持される二種の単色光の協同による相乗効果である。

Emerson 効果の発見から、更に光合成の機構解明が進展し、光化学系 I (PS-I), 光化学系-II (PS-II) 及び両者を結ぶ中間電子伝達系の構成と、電子伝達に共役しておこる非循環型光リン酸化 (NC-PP) の存在が証明された。即ち、光合成において、葉緑素が吸収した光のエネルギーは、次のような過程を経て還元物質の生成 ( $\text{NADPH} + \text{H}^+$ ) と ATP の生成に用いられるのである。光化学系-II ( $\text{H}_2\text{O}$  分解, 電子受容体 (プラストキノン) の還元)→中間電子伝達系 (NC-PP)→光化学系 I ( $\text{NADPH} + \text{H}^+$  生成と循環型光リン酸化反応 (C-PP))。NC-PP, C-PP は ATP の生成反応である。

光合成作用における炭水化物生成反応については、1938年頃から放射性炭素同位元素をトレーサーとして用いる実験から次第に解明されはじめたが、Ruben, Kamen, Hassid (1939) らは放射性炭素同位元素  $^{14}\text{C}$  (半減期: 20.5分) を含む  $^{14}\text{CO}_2$  を植物に与えて光合成を行なわせ、固定された  $^{14}\text{C}$  の行方を分析する方法で基礎的ないくつかの事実を明かにした (Ruben 反応, Ruben 因子)。さらに1945年頃から放射性炭素同位元素  $^{14}\text{C}$  (半減期5720年) が用いられるようになった。

Calvin, Benson, Gaffron, Fager らによって精細に実験が行なわれて、Benson-Calvin 回路として知られている C 合成の経路が明らかにされている。

#### 4. 原子核とエネルギー

自然界には、そのあらゆる運動形態に何らかの形でエネルギーが介在しているが、本講義では、それが技術化されわれわれの生活といかにかかわるのかという点に重点を置く。

古くは人間社会において、動力源は直接的な力学的エネルギー (人力・馬力・風力など) のみに依存してきたが、その後の自然科学の発展により、熱、光、電磁気などの一見動力源としてのエネルギーとは無縁であると見られていたものまでも、形態こそちがっても、実は力学的エネルギーと同じエネルギーを担うものであることが明らかにされてくる。このことは動力源としてのエネ

ルギーにおいても、熱エネルギーの力学的エネルギーへの転化を実現するところの蒸気機関の発明を取り上げて容易に理解されるように革新的な転機をもたらした。

ところで、アインシュタインの関係式  $E=mc^2$  は質量がエネルギーに転化しうることを示唆しており、それは実際に原子核変換により確かめられている。本講義では、核変換により放出されるエネルギーの利用形式の概要に重点を置いて講義する。すなわち、純自然科学的現象として知られている核分裂によるエネルギー放出を、現実になれわれが利用しうるところまで技術化するには、どのような方法が可能であり、どのような問題があるかについて論じるのである。そこには原子炉の形式、放射線利用の問題が含まれる。

最後に、このようなエネルギー利用の形態をとるかぎりでは避けられない諸問題について論じる。現在の核分裂炉では①核燃料の効率の悪さ ②放射線障害の問題などがあるが、これにどのように対処すべきであろうか。

#### IV. 物質系と情報

##### 1. 自然科学における情報概念の形成

トフラーは、現代は「第三の波」<sup>21)</sup> が押し寄せ、「第二の波」によりもたらされた秩序と激しくぶつかり合う時代であるという。彼によれば、「第一の波」は約1万年前の農業革命にはじまり、それは人類に最初の文明をもたらした技術革新の波であった。これに対し、第二の波の引き金を引いたのは産業革命であり、現在は第二の波の時代にある。ところで、すべての文明は独自の暗号<sup>コード</sup>をもっているが、第二の波すなわち産業主義の暗号となるべきものは何か。それは徹底した分業化である。しかしながら極度に分業化された労働は、人間を機械の部品化、反復作業へと駆りたて、あげくのはてはトータルな一人の人間を必要としないところへと人間を追いやった。これに対し、第三の波は、単純労働からの解放と人間性の回復を可能とする新しい波であるが、この波の引き金は、半導体とLSIであるという。

トフラーの著書に見るように、情報制御技術の発達、産業革命に匹敵するような変化を人間社会に及ぼしつつあるのかもしれない。

しかしながら単純な「技術史観」に陥入ることなくこれらの問題のトータルな把握を可能にするためには、情報のもつ意味を深く全面的に把握することが不可欠であろう。情報は物質の「質料」、「エネルギー」という側面とならんで、第三番目の、しかし重要性において少しも劣らぬ側面である。情報科学が科学として成立したのは、つい最近のことであるが、この科学では情報の量的側面を主としてとり扱うために、数学的に研究され、その担い手たる物質から抽象されてしまい、それが物質の一側面であることから見のがされてしまったといえる。情報科学は「横断科学」的性質をもち、自然科学のみならず社会科学における量的側面とも関係するのであるが、質が捨象され量的側面のみが重視された結果、きわめて一面的な展開と結びつきやすいという弱点が指摘されている。ここでは物質の一側面としての情報という見地を明確にしつつ情報概念の形成過程について論じ、以下の各論の序論とする。

まず、物質の一側面としての情報という観点について論じ、つづいて情報概念の形成過程に焦点をあわせる。そこでは情報とエントロピー、マクスウェルのデモン、ネグントロピーなどについて論じられる。ついで情報を担う高分子化合物 DNA、および DNA とともに分子レベルにおける情報の制御に重要な位置を占める半導体が登場し、これらの重要性が強調される。詳細は以下の各論で紹介される。

## 2. DNA と情報

生物の形質が世代から世代へ伝えられる現象は古くから認められていた。特に Mendel (1865) がエンドウの特定の形質に注目して遺伝の 3 法則を発見して以来、形質の遺伝に関与する因子の解析は遺伝学の最も大きなテーマであった。遺伝子が細胞の核にあることは、細胞分裂時の核の行動をみれば明らかであった。細胞分裂時には核膜が消失し、代って染色体の行動がきわ立つ。しかも染色体は生物種により数、形、大きさが一定であることから、遺伝子は染色体上にあることが推定された。細胞核あるいは染色体を構成する物質が主として核酸とタンパク質であることはすでに 1940 年代に分かっていたが、どちらが遺伝子であるかは全く分かっておらず、現在とは逆にむしろタンパク質であろうと考えられていた。核酸を最初に発見したのは Miescher (1871) である。彼は膿

のついた包帯を集め、膿の主体である白血球の核および後にはサケの精子からリンを含む化合物を抽出しヌクレインと名付けた。このようにして発見された核酸の構造は構成単位から考えると大変単純でたった4種の塩基しか含まれていない。それに比して約20種のアミノ酸残基を含むタンパク質の方がずっと複雑な構造をもち、遺伝子の本体であると考えられても不思議ではなかった。核酸特にDNAが遺伝子であるという証拠を示すきっかけとなったのは、Griffith (1928) によって行われた形質転換の実験である。さらに Avery ら (1943) は莢膜をもつ感染性肺炎菌から純粋な形質転換因子を単離した。この因子はタンパク質、RNA、脂質、莢膜物質などを分解する処理をしてもなお肺炎菌を形質転換する能力をもっていたが、DNAを分解すると活性を失った。Hershey と Chase (1952) は、T2 フェージのDNAを $^{32}\text{P}$ で、タンパク質被膜を $^{35}\text{S}$ で標識して大腸菌に感染させると、 $^{32}\text{P}$ だけ大腸菌の細胞内に注入され $^{35}\text{S}$ は細胞の外に残り、DNAだけが注入されればフェージは大腸菌内で増殖し、親と同じ子フェージが産出されることを示した。これは、DNAがそのフェージの複製・増殖に必要な遺伝情報のすべてを担っていることを示している。これらの形質転換および形質導入の実験結果と、情報量が多く機能的に複雑に分化した高等動物ほど細胞あたりのDNA量が多く、動物では体細胞が生殖細胞の2倍量のDNAを含んでいる事実などから、DNAが遺伝子であることが明らかになった。

次に遺伝子としての機能をもったDNAの構造を考えてみよう。Watson と Crick (1953) は、DNAの立体構造としてWilkins らによって得られたDNAのX線回析の結果やChargaffの規則(DNAではアデニン(A)とチミン(T)、グアニン(G)とシトシン(C)の含量が等しい)から、二重らせん構造を提唱した。それによると右巻らせん構造をした2本のポリヌクレオチドがからみ合い、2本鎖は互いにAとT、GとCの相補的な水素結合および鎖内の各塩基間の疎水結合により安定な構造を保っている。

Meselson と Stahl (1958) は $^{15}\text{NH}_4\text{Cl}$ を唯一の窒素源として培養して得られた大腸菌を、続いて普通の $^{14}\text{NH}_4\text{Cl}$ を窒素源として増殖させ、その時の各世代の大腸菌のDNAの重さを追跡し、DNAの複製機構として半保存型複製

機構を明らかにした。これは Watson と Crick により提唱されていた DNA の相補的な二重らせん構造の正しさを立証した。この半保存型複製では、複製のとき 2 本の DNA 鎖が分かれてそれぞれに対して相補的な DNA の新しい鎖が組み立てられ、結局 1 組の親 DNA から同じ 2 組の子 DNA が得られる。

DNA の遺伝子としての役割は、単に複製だけでは果たされない。DNA の遺伝情報をもとにしてタンパク質（特に機能的には生体触媒として働く酵素）の合成がなされて始めて遺伝子としての機能を果たすことになる。タンパク質の合成は DNA を直接鋳型としては行われない。原則としてセントラルドグマに従って、DNA の情報は必ず DNA から相補的に合成される mRNA に転写され、この mRNA を鋳型としてタンパク質の合成が行われる。3 個のヌクレオチド（あるいは塩基）の並び（トリプレット）をコドンあるいは遺伝暗号というが、64 種のコドンと 20 余種のアミノ酸の対応は、1961 年以降、Nirenberg, Khorana, Ochoa らの精力的な研究によりその全容が明らかにされた。コドンは次のような特徴をもっている。（1）コドンは地球上の全生物に対して共通で普遍的である。（2）コドンは縮退しており、1 つのアミノ酸に対して複数のコドンが対応する例が多い。（3）コドンは重複しないし、隙間もない。タンパク質の生合成はこのようなコドンをもつ mRNA を直接の鋳型として、tRNA（分子量 23,000～30,000）により運搬されたアミノ酸がリボゾーム上で次々と縮重合することにより行われる。

### 3. 半導体と情報科学

物質には金属のように電気をよく通すものと、木やガラスのように電気をほとんど通さないものとがあり、それぞれ、導体、絶縁体とよばれている。一方、ゲルマニウム (Ge) やシリコン (Si) のように導体と絶縁体の中間の電導度をもつ物質もあり、これらは半導体とよばれている。半導体物質は、光の照射や加熱によって電気抵抗値が大きく変化したり、起電力を発生したり、ある場合には整流性（電気をある向きにのみ導く性質）を示すなど数々の興味ある電氣的性質を有することがかなり前から知られていた。しかし、二次大戦前までは、半導体はその導電機構もよくわからないままに、経験的に見出された天然石やセレンなどの整流作用が鉱石検波器（ダイオード）に利用される程度で

あった。

その後、半導体物性の研究と結晶成長が進むにつれて Ge の良好な整流性が注目され始め、1948年、アメリカのベル研究所において増幅作用をもつ3本足の整流器が発明された。この3本足の素子はトランジスタと名付けられた。トランジスタの発明は電気工学、とりわけその1分野である、通信工学分野に衝撃的な影響を与えた。それはトランジスタが、それまで電気通信技術を担っていた真空管と同じ機能（整流、増幅、発振）をもち、しかもはるかに小型で高性能を発揮することがわかったからである。1950年代から60年代にかけては、単結晶 Ge の成長・精製技術やダイオード・トランジスタの製造技術が飛躍的に発展する一方、その需要も増大し、高い信頼度と性能をもったダイオードやトランジスタが大量に生産されるようになり、次第に真空管にとって代っていった。また、その背景としては半導体物理学も急速な進歩を遂げ、半導体の導電機構をはじめ、整流作用やトランジスタ作用が次々と解明されていった。60年代後半からは Ge に代って、より安定性・信頼性が高い Si が半導体材料の主役となった。さらに70年代になると、数ミリ角の Si チップ上に数十から数万個ものダイオードやトランジスタ、さらには抵抗、コンデンサを形成する技術、すなわち集積化技術が開発され、トランジスタ回路は IC（集積回路）化されていった。今日、このような IC は、テレビ、ラジオ、ステレオ、電卓、時計などの家庭電気製品のなかで数多く使用されるようになっている。

トランジスタ技術の台頭と急激な発展は、電気工学の分野にエレクトロニクス（電気工学）とよばれる領域を形成した。エレクトロニクス技術は通信技術に革命をもたらし、従来の通信機器やあらゆる電気機器を小型化・高機能化・高精度化していったが、現代社会に与えた最大の産物は何ととってもコンピューターである。交通輸送機関と通信・放送サービスが極度に発達した今日、われわれの身のまわりにはおびただしい量の情報が氾濫している。このような情報社会においては、コンピューターなしではもはや人間はあり余る情報を処理したり、伝達・蓄積したりすることが不可能にまできている。

本テーマでは、このような半導体技術の進歩と情報科学の発展の相互的なかわりあいを考えてみた。講義においては、まず、半導体という物質がどんな



ものであるか、それが、我々の身のまわりのどんなところでどのように使われているか、さらに、それは半導体のどのような性質を利用したものであるか具体的例を挙げながら説明する。また、ハードウェア的観点からトランジスタやICなどの半導体デバイスによってどのように情報が処理されるのかについてもわかり易く説明する。これまでも講義の内容に対する受講学生の理解と印象を深めるために、VTR を利用したり、いくつかの半導体デバイスの実物を呈示しながら講話を行ってきた。そのため、わずか2回の講義ではあったが、かなり学生の関心を惹くことができたと思われる。

### §5 構成上および運営上の諸問題

前述したように、総合科目「物質・エネルギー・情報」は、総合科目「エネルギー」のなかで不完全ながらも展開されていた自然の多様性とそれをつらぬく普遍性・統一性という観点を全面的に展開することにより、現代の物質観あるいは自然観に迫ることをねらいとしている。もちろん、この問題を深く理解するためには、自然の諸運動形態の認識にいたる過程、あるいはその方法を理解することが必要になる。さらに、かかる自然認識はいつも時の技術的水準に支えられて実現されたという事実、すなわち人間は自然を変革した限りにおいて自然を認識することができたのだという平凡な事実を確認しつつ、現代におけるこれらの諸側面の技術とのつながりを重視した。

ところで、この構成には §1, §2 で論じた問題と同質の問題が存在する。すなわち、多方面にわたる構成部分の中の一つ、たとえば「自然界における発展と進化」に話を限れば、授業内容の全体としての統一と流れははるかに容易に実現されるが、それとともに、これは自然の多様性と統一性の理解の単純化につながることにともなかねないのである。これはまさに国分論文で論じられたのと同一種類の問題である。さらに切実な問題は、このテーマの下で一年間の講義を維持するだけの担当者の絶対数が不足することである。それ故、われわれの構成は、自然の多様性と統一性を広くとらえるという積極面を前面に出し、それが科目の柱をなすのであるが、これはまた現実の諸条件の下における不可避免的な選択でもある。

しかしながら、所与の条件の下で改善可能な二、三の問題も存在する。たとえば、「物質の構造とエネルギー」のまとまりの問題がある。現行では、最も抽象度の高い「電磁場とエネルギー」が最初にきているが、これは諸般の事情からこの項目の担当者がさらに序論をも担当することになった結果である。よりすっきりした構成にするためには、序論を切り離し、抽象度の高い「電磁場とエネルギー」は章の最後の方に持ってくる必要があるであろう。

もうひとつの実施可能な改善策は、それぞれの箇所において専門分野の近い人の中で議論を重ねるなどの工夫により、部分的に第二章で提起された多人数の協力とその上に立つ小人数担当方式を取り入れていく方向であろう。

ところで、一般教育部総合科目運営委員会が実施したアンケート調査<sup>22)</sup>によれば、総合科目「物質・エネルギー・情報」の講義内容を「おおむね理解することができた」と回答した学生の割合は約30%であるという結果が出ている。理解できた学生が30%にすぎないという低率には大きな問題があるが、それはさておき、これらの「理解できた」学生は本総合科目の意義をどのようにとらえているであろうか。幸いなことに、このうち約8割の学生は「通常科目と比較して意義がある」と回答している。この結果は「おおむね理解できた」学生の大部分は、通常科目にない新しい意義を認めているといえる。では、他の学生はどこがどのように現解できないのか。追跡調査の結果、学生はほぼ以下の4グループに分れることがわかった。

- A. すべての講義にわたり「おおむね理解することができた」。
- B<sub>1</sub>. 高等学校で「生物」を履修したので「生物系」の講義は理解することができたが、「物理系」の講義は部分的にしか理解することができなかった。
- B<sub>2</sub>. 同じく「物理系」の講義は理解できたが、「生物系」の講義は部分的にしか理解することができなかった。
- C. すべての講義にわたりほとんど理解することができなかった。

B<sub>1</sub>グループの学生がかなりの割合を占めるという傾向は、最近、自然系通常一般教育科目において数物系の科目を選択する学生が激減している事実と強い

相関があると思われる。 $B_1$ ,  $B_2$  グループに対して A グループの学生は高等学校における履修は在学中に選択した科目だけであるがそれを基礎に全分野を一応はカバーできるだけの学力を打ちあわせているといえる。これに対して C グループの学生は、いちじるしく基礎学力に欠けるか、あるいはきわめて安易に取り組んでいる学生であろう。したがって当面の目標は、 $B_1$ ,  $B_2$  グループの学生をいかに A に近づけるかということにある。 $B_1$ ,  $B_2$  グループの学生の解消策につながるものとして60年度からの共通一次試験において、基礎理科および数 II が必修となる改革案が示されており、その実施が期待される。また、それ以前にも可能な解決策は学生の学力水準を引き上げることであり、これは入試の際に二次募集などを採用することにより部分的には可能になろう。しかしながらこれが抜本的な改善策となりうるか否かは未知数である。

重要なことは、やはり、担当教官の連携を強めて共通の理解を深め絶えず改善につとめていくこと、およびそれを基礎に各教官が「レベルを下げずにできるだけわかりやすい講義をする」という一見したところでは背反する課題を解決すべく努力することであろう。その意味で、これまで随時開いてきた担当教官の meeting をもつこと、および本論文のような形の共同論文をまとめることは、諸問題を改善し科目の全体としての統合度を高めるために意義のあることと思われる。とくに本総合科目の場合、以前の「エネルギー」と比較した場合、学問的に未解決の部分、あるいは共通の意識となっていない部分が多いため、この方向の努力は不可欠のことである。

最後に成績評価の問題に移ろう。本総合科目も最初は「エネルギー」と同じ評価方法、すなわち「レポートと出席」だけによる評価を実施していたが、これでは、総合科目を「単位取得の手段」とする学生の存在を許してしまうことになる。事実、レポートを採点するとき、ほとんど同じ内容のレポートが多数、目につくことがある。極端な言い方をすれば、「授業中に居眠りをしており、レポートは優秀な学生のを写させてもらい提出する」ような学生にすら単位が出るのである。追跡調査の際の「総合科目を受講した感想と改善にむけての希望を卒直に述べよ」という項目に以下のような回答があった。

「私は授業中寝ており友人にノートをとってもらっていましたが、その友人

が左ききのために字がきたないのでできるだけ黒板を使わないでほしかった。また私は目が細いのでプリントなどでも読みにくいところがあり、できるだけ使わないでほしかった。そして内容がむずかしく愚かな私には根底から理解できずに悲しみにくれた授業も多かった」。

適正に評価するためには、レポート、出欠に加えて、試験を実施することが必要であろう。それは、学生が総合的思考を働かせることを部分的にではあっても促すような性格のものが望ましい。本総合科目ではこの線に沿って56年度からは試験を実施している。

## §6 あとがき

第5章で紹介した学生の追跡調査の結果、われわれのねらいをある程度、積極的に受けとめる意見がいくつか見られた。その一例を紹介しよう。

「過去を通じて受けてきた教育の場で、自然科学という大きな視点から個々の分野を見下ろす形での視点を与えられたことがなかった。その意味で私にとってたいへん有意義であった。しかしながら、もっと大きな視点、つまり学問全体における自然科学の位置、社会科学や人文科学とのかかわりあい、といったことにまで講義がおよぶのかと期待していたところが、ある程度までしかおよばなかったのが残念でもあった」。

意見の後半部分、すなわち「学問全体における自然科学の位置、社会科学や人文科学とのかかわりあい」といった問題は、一つには技術を介しての生産との結びつき、もう一つは、哲学、科学思想との相互作用という形をとる。したがって「技術との結びつき」という側面にさらに留意することが必要であろう。これらの問題を全面的に展開するためには、「内的科学史」と「外的科学史」の統一、すなわち、自然科学の発展を自然からと社会からの二重の制約においてとらえることが必要であるが、現在の人員ではそこまで展開することはきわめて困難である。これらの可能性も含めて将来の総合科目の可能性をも検討することが期待されるが、本論文では一応はこの問題を棚上げし、次の機会にまわすことにした。そこでは当然「科学と方法」の可能性もまた検討されるで

あろう<sup>23)</sup>。

## Appendix I

本論文の準備段階の配布メモを紹介しておく。

一般教育研究論文「物質・エネルギー・情報について」の骨子（ねらいと計画）

### 〔目的〕

共同研究のかたちの論文をまとめることにより、テーマに対する共通の理解を深め総合科目の充実をはかること。また、新しい総合科目の可能性を模索すること。

### 〔論文の性格〕

前記の目的を実現するためには、その論文は、

- 1) 自然総合の領域に関する論文
- 2) 科学論の一側面に関する論文
- 3) 総合科目の研究に関する論文

というすべての性格をあわせ持つことになる。

### 〔論文の基礎資料〕

これまでの meeting の際の配布資料、意見などのファイル。

### 〔構成の視点〕

「自然界における発達と進化」という側面、および、「物質の構造」・「物質系と情報」という三つの領域から自然の多様性とそれをつらぬく普遍性あるいは統一性をとらえていく。また、技術とのつながりを重視する。

## Appendix II

本論文は多人数による共著論文の形をとっているがこれは Appendix I で紹介したように内容が多方面にわたること、および総合科目という性格に規定される必然的な結果である。最近では自然科学の分野、とくに多人数の協力を必要とする高エネルギー物理学の分野などでは、われわれの場合よりもはるかに

多人数による共著論文がしばしば目にふれる。以下に、そのような論文の一例を紹介しておこう。

Volume 63B, number 4

PHYSICS LETTERS

16 August 1976

PROPERTIES OF ANOMALOUS  $e\mu$   
EVENTS PRODUCED IN  $e^+e^-$  ANNIHILATION\*

M. L. PERL, G. J. FELDMAN, G. S. ABRAMS, M. S. ALAM, A. M. BOYARSKI,  
M. BREIDENBACH, F. BULOS, W. CHINOWSKY, J. DORFAN,  
C. E. FRIEDBERG, G. GOLDHARBER<sup>1</sup>, G. HANSON, F. B. HEILE,  
J. A. JAPOS, J. A. KADYK, R. R. LARSEN, A. M. LITKE, D. LÜKE<sup>2</sup>,  
B. A. LULU, V. LÜTH, R. J. MADARAS, C. C. MOREHOUSE<sup>3</sup>,  
H. K. NGUYEN<sup>4</sup>, J. M. PATERSON, I. PERUZZI<sup>5</sup>, M. PICCOLO<sup>5</sup>,  
F. M. PIERRE<sup>6</sup>, T. P. PUN, P. RAPIDIS, B. RICHTER,  
B. SADOULET, R. F. SCHWITTERS, W. TANENBAUM,  
G. H. TRILLING, F. VANNUCCI<sup>7</sup>, J. S. WHITAKER  
and J. E. WISS

*Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University, Stanford, California 94305,  
USA and Lawrence Berkeley Laboratory and Department of Physics,  
University of California, Berkeley, California 94720, USA*

Received 15 July 1976

We present the properties of 105 events of the form  $e^+ + e^- \rightarrow e^+ + \mu^* + \text{missing energy}$ , in which no other charged particles or photons are detected. The simplest hypothesis compatible with all the data is that these events come from the production of a pair of heavy leptons, the mass of the lepton being in the range 1.6 to 2.0 GeV/ $c^2$

これは、電子、 $\mu$  粒子につぐ3番目のレプトン（軽粒子）、いわゆる heavy lepton  $\tau$  の発見を告げる歴史的な重みをもつ論文の最初の部分であるが、37名の著者が名前を連ねていることがわかる。このように多人数の協力による成果の発表は、高エネルギー物理学の分野ではあまりめずらしいことではない。

ところで、巨大なプロジェクトの遂行には、反面において個々の担当者の個性が失なわれる傾向がないともいえないであろう。幸いなことに、われわれの総合科目は、まだ十分に個性的でありうるのである。

## 注

- 1) エンゲルス, 自然の弁証法, 序論
- 2) 近藤浩二, 一般教育研究 Vol 4, 73 (1973).
- 3) 国分 寛, 一般教育研究 Vol 9, 70 (1976).
- 4) この性質は, 自然的物質に限らず, 物質一般に成立するというのが定説となっている。
- 5) 岩崎充胤, 宮原将平, 「現代自然科学と唯物弁証法」(大月書店), p. 66.
- 6) 宮原将平, 「現代の自然観」(大月書店)  
岩崎充胤, 科学と思想, No. 34, p. 2.
- 7) この項目などの執筆の際に, 著者の中の1人(小池)は, 一般教育部研究活動補助費による「自然諸力の連関と統一の研究」の成果の一部を参考にした。
- 8) ところでエンゲルス自身はすでに, 熱素説を否定し, 熱の分子運動説をとっていたことがわかる。前掲書1) 所収の『反デューリング論への旧序文』を見よ。
- 9) 朝永振一郎博士の名著「物理学とは何だろうか」(岩波書店)において, 歴史的な背景とその下での論理の展開が鮮かにとらえられている。
- 10) 岩崎充胤, 宮原将平, 「科学的認識の理論」(大月書店), p. 457.
- 11) 前掲書9) および  
マッハ, Die Geschichte und Würzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit (1872).  
マッハ, 「熱学の諸原理」(東海大学出版会)  
メイスン, 「科学の歴史」(岩波書店)
- 12) 前掲書6) および  
E. ブローダ「ボルツマン」(みすず書房)  
とくに訳者追補における恒藤敏彦氏の「気体分子運動論およびボルツマンにおける統計力学の形成について」を参照せよ。
- 13) ボアンカレ, 「科学の価値」(岩波文庫)  
周辺の問題に関しては「科学技術史概論」(オーム社)第8章参照。
- 14) 戸坂 潤全集(勁草書房)第一巻, p. 123.
- 15) 武谷三男著作集(勁草書房)第一巻所収。
- 16) 菅野礼二, 科学と思想 Vol 24 (1977), 178.
- 17) カント, 『天界の一般自然史と理論』(1755) マルクス・エンゲルス全集 第20巻 p. 346 参照。
- 18) S. ワインバーグ, 「宇宙創成は最初の3分間」(ダイヤモンド社) 参照。
- 19) A. I. オパーリン, 「物質・生命・理性」(岩波現代選書) 参照。
- 20) 最近では, 真空自身が相転移を起こすことが知られている。
- 21) A. トフラー, 「第三の波」
- 22) 「総合科目・演習科目・論述作文指導及び読書指導に関する調査報告書」(香川大

学一般教育部，昭和57年3月発行)

- 23) 『『総合科目』関係資料調査報告書』(国立大学一般教育担当部局協議会 昭和56年3月発行)の中(p.86~87)では，総合科目の意味づけにもいくつかの観点があることを指摘している。それらは

- (1) 専門分化に対する「総合」
- (2) 人間形成を目的とする「総合」
- (3) 総合科学を志向する「総合」
- (4) 意味ある体系としての知識・学問の「総合」
- (5) 過程としての知的探究の「総合」

の観点である。とくに(5)の型の意味づけについては「大学においては『学ぶことを学ぶ』という理念のもとに，知的探究の態度・方法を含むその過程が『総合』されて知識の形成・獲得に至ることが学習の意味として重視される。学習のコース又はカリキュラムの語にもともと含まれる学生自体の学習過程に注目しての『総合』である」と説明されている。新しい総合科目の検討の際には，この問題提起は，重要な意味をもつものと思われる。