

エレクトロニクス革命について

井 上 周 八

- 一 はじめに
- 二 マイクロエレクトロニクスの歩み
- 三 古代の原子論から科学的原子論へ
- 四 おわりに

一 はじめに

このところ「技術革新(イノベーション)の嵐」が産業社会に吹きまくっている。

いまから三五年ぐらい前に、ナイロン、テレビ、コンピュータ、トランジスタ、ジェット・エンジンなどが現われ、その後、技術革新の時代は終るかにみえたが、ここ数年に、再び技術フィーバーが現われ、例えばLSI、センサー、レーザー、テレコミニケーション、バイオテクノロジーなどが多彩で華麗な展開をみせている。

昭和五〇年代に過去の主役産業が低落した。繊維、砂糖、肥料、造船、合織、映画、アルミニウム、石炭、そしてさらに住

エレクトロニクス革命について

宅、非鉄金属、外食産業、自動車などの分野にもゆきずまりの陰がみえてきた。そして反面、マイクロエレクトロニクスの飛躍的進歩、光技術、生物技術が登場し、光で情報を送り、細胞に新しい情報を付加するなどが実用化にまで進んだ。

牧野昇氏は著書『五大技術革命が日本を変える』(PHP研究所刊、一九八二年)で、衝撃的な変革が進行する「五つの革命」について以下のように述べている。

①情報革命 工業化社会から情報化社会への移行は、つとに指摘されている。コンピュータ、とくにマイクロコンピュータ、さらにコミュニケーション、とりわけテレコミュニケーション・ネットワークの進歩が、おそらくこれからの社会を大きく変えていくだろう。

②メカトロニクス革命 今や機械文明は、新しい段階に入っている。従来の丈夫で長持ちする機械は頭、口、耳、そして五感を備えた機械へと変わってきている。機械と電子が合体した、全く新しい複合商品が、目白押しに並んでくるのである。

③材料革命 過去、材料の進歩が、世の中をさまざまな領域で変えてきた。トランジスタを生んだ半導体、ロケットを誕生させた耐熱鋼、合成繊維を産み出したポリエステル繊維などは、その一例である。最近の材料の進歩は、これまでの構造的な強さから電気的特性あるいは生体適応性といったファンクション（機能）を持つことに重点が置かれており、新しい材料の転換が着実に進行している。

④光革命 電子産業を大きく上回るほどの影響力を持つ光技術（オプト・インダストリー）がレーザー光線を中心としてクロウズアップされている。その応用は、通信、光IC、メモリー、加工、測定、医療、核融合、太陽電池、ディスプレイなど、きわめて多様である。

⑤生物革命 いわゆるバイオ・テクノロジーの出現である。バイオ・フィーバーという言葉が生まれたほど、多方面で話題を呼んだが、その原因の一つは、神の手に委ねられていた生物の創造を人間の手で操作しうる可能性が出てきたからである。社会への影響も大きく、EC委員会では、バイオ・ソサエティという言葉を使っている。（三四～五ページ）

まことに日本は、そして世界は一つの転換期にきている。このことをいわゆるエレクトロニクス革命を例としてみよう。

半導体をめぐる摩擦がこの十年間に、日米の間に発生した。⁽¹⁾日本の半導体産業は米国の技術を導入し、追いつき追い越せと急進してきた。今や「記憶素子」の分野では米国を大きくくり

ドしている。

(1) ハイテク分野の代表である半導体の分野で日本が米国を駆逐する勢いを示し、とくに記憶素子についてみると、初めは米国が圧倒的に有利だったが、六四キロビットあたりから次第におされはじめ、二五六キロビットでは日本の圧倒的な優勢がはっきりし、今後の一メガ以上の競争でも日本リードの傾向は崩れそうにない。こうした事情のもとで、アメリカはついに一九八七年四月十七日、半導体に関する対日報復措置を決定した。すなわちレーガン大統領は、日本が八六年九月に発効した「日米半導体協定」を履行していないとして、コンピュータ、電動工具などに一律一〇〇%、総額三億ドルの報復関税を導入することを発表し、これによって「日米半導体戦争」はついに火を吹いたのである。日本側は事態の早期收拾をはかってきたが、アメリカの対応は予断を許さない情勢であり、自衛隊軍用機の購入問題や、コメの自由化を迫る農業問題などの強圧的方针は緩和の見通しがない。

エレクトロニクス産業発展の開始は、いまから約四〇年ほど以前であったが、この間の電子機器産業、マイクロエレクトロニクス産業の発展は目ざましいものであった。

ラジオやテレビや電気洗濯機は、すべて電気の方で動く。これらを動かすためには、電流をとくべつなやり方で制御しなければならぬ。一九五〇年ごろまでは真空管がこれを行っていた。この真空管がトランジスタの発明によって、トランジスタと交替することによってエレクトロニクス革命は開始されたのである。そしていまや日米間の半導体摩擦が新聞紙上に連日

伝えられるまでになったのである。

半導体の市場占有率は、一九八〇年に米国系企業六〇%、日本系企業二五%、その他一五%だったものが、八六年には米系四五%、日系四二%、その他一三%(米のデータクエスト社発表)にまでなっている。

周知のようにコンピュータは真空管からはじまってトランジスタ、IC (Integrated Circuit 集積回路)、LSI (Large Scale Integration 大規模集積回路)、そして超LSIの時代になった。

トランジスタとは真空管のように電気信号を増幅する機能をもった半導体素子のことである。真空管よりはるかに小さく、増幅作用にすぐれ、ほとんど発熱せず、寿命が長い。このため一時、真空管の代わりに使われたが、そのころIC (集積回路) が開発され、エレクトロニクス製品ではあまり使われなくなつた。

ICはトランジスタやダイオード (半導体を素材にした回路部品のひとつ、電流を決められた方向に流す) コンデンサー、抵抗などの素子を一辺が数ミリほどのチップ (基板) の上に組みこんだ回路である。ダイオードやトランジスタなどの部品を接続しつづけた回路にくらべ、ICはぎざぎざしりつめこむことができ、小さくなると同時に接続部分がなく信頼性が高く、値段も安い。こうしてマイクロエレクトロニクス革命が始まったのである。

マイクロエレクトロニクスはエレクトロニクスの最新の成果

エレクトロニクス革命について

である。マイクロエレクトロニクスとは、これまで何千個もの単体のトランジスタで実現されていた機能を、小さなシリコンのチップに高い信頼性をもたせて組み込むことを可能にした技術のことである。すなわちシリコン集積回路である。周知のように集積回路を用いたマイクロエレクトロニクスはあらゆる形式の電子機器に応用されている。

エレクトロニクス産業の発展は、その生産指数の増進にもみられ、また株式価格にも反映されている。

牧野昇氏は電子機器の伸びについて次のように述べている。「昭和三十七年の電子機器・部品の総生産額は六千六百八十億円、輸出額は一千百六十二億円であったが、昭昭五十五年度は八兆六千八百二十八億円に達し、乗用車産業に比肩する主導産業に成長した。輸出も四兆一千二百億円となり、自動車・鉄鋼とともに輸出御三家の一つになった。まさに、情報化社会への移行を示唆するものであり、とくに注目すべきことは、鉄鋼輸出は横這いとなり、自動車の国際摩擦も激化してくるのに対し、電子機器の輸出は順調な伸びが予想され、一九八〇年代の終りにはプラントとともに、輸出のトップを分け合うことになろう。」(前掲書、四七ページ)

また国際証券調査部長の池辺恭氏は、その近著『エレクトロニクス革命と株価革命』(実業日本社、昭和六十一年四月)で、最近四五年の間に、株価市場では、従来の常識では考えられないような大きな変化が起きている点を指摘したのち、日本の産業

表1 生産指数

	S38~48 10年間		S49~59 10年間		S54~59 5年間				
	順位	10年間 の伸び (倍)	年平均 成長率 (%)	順位	10年間 の伸び (倍)	年平均 成長率 (%)	順位	5年間 の伸び (倍)	年平均 成長率 (%)
鉱工業		3.13	12.1		1.43	3.7		1.22	4.1
製造工業		3.18	12.3		1.44	3.7		1.22	4.1
	①電機	5.23	18.0	①電機	3.33	12.8	①電機	2.23	17.4
	②輸送機	5.00	17.5	②機械	2.01	7.2	②機械	1.61	10.0
	③機械	4.45	16.1	③化学	1.53	4.3	③輸送機	1.24	4.5
	④石油	4.17	15.3	④輸送機	1.30	2.6	④化学	1.17	3.3
	⑤鉄	3.71	14.0	⑤非鉄	1.25	2.3	⑤食品	1.01	0.1
	⑥非鉄	3.46	13.2	⑥食品	1.17	1.6	⑥非鉄	1.00	0.1
	⑦化学	3.42	13.1	⑦土石	1.08	0.8	⑦鉄	1.00	0.0
	⑧土石	2.63	10.2	⑧鉄	1.05	0.5	⑧土石	0.98	△ 0.4
	⑨繊維	2.02	7.3	⑨繊維	1.01	0.1	⑨繊維	0.98	△ 0.5
	⑩食品	1.71	5.5	⑩石油	0.86	△ 1.5	⑩石油	0.84	△ 3.5
	乗用車	10.98	27.1	テレビ 音響等	5.53	18.7	半導体・ 集積回路	5.34	39.8
	テレビ 音響等	5.80	19.2	電子 計算機	3.89	14.5	テレビ 音響等	3.00	24.6
	医療品	2.63	10.2	医療品 乗用車	2.54	9.8	通信・ 電子部品	2.79	22.8
					1.98	7.1	電子 計算機	2.24	17.5
							医療品	1.52	8.7
							乗用車	1.15	2.8

(通産統計より)

構造の変化を生産指数で見ながら、エレクトロニクス革命について述べている。

氏は昭和三八年から四八年、四九年から五九年の各一〇年間、及び、五四年から五九年までの五年間の、生産指数（通産統計）による年平均成長率を、主要業種別に示す表1を掲げ、以下のように解説する。やや長いが引用しよう。

「昭和四八～九年は第一次オイルショックの時期で、日本経済は、それまでの高度成長から、一時はひどい不況におち込み、低成長時代に入った。

表の一番左は、オイルショックまでの一〇年間の高度成長期で、平均一二％以上の高成長を続け、この間に、日本の製造工業の生産は三・二倍になった。

この時期に成長をリードした商品は、前半はカラーテレビ、後半は自動車で、業種としては電機がトップ、輸送機器が二位、しかし、業種間の跛行性はそれほど大きくなく、主要一〇業種の中で、設備投資関連の機械、素材の原油、鉄、非鉄、化学まで、七業種が一三％以上で総平均を上まわっており、少し成長率が劣るのは繊維と食品ぐらいである。トップの電機でも平均を五割上まわっているだけである。

この時代には、景気の良い時には何もかも良くなったわけであり、株価上昇時には、循環的にすべての業種が買われていく充分な理由があった。

表の真ん中の欄は、オイルショック後一〇年間の成長率であ

エレクトロニクス革命について

る。生産の伸びは年平均三・七％と三分の一以下に落ちていく。平均を上まわっているのは三業種だけで、トップの電機が平均の三倍以上の伸びを見せたのに対し、石油はマイナス成長となった。電機、機械が二～三倍になった間に、鉄、繊維はほとんど伸びず、石油は一四％も減少している。業種間の跛行性が強まり、産業構造の変化が進んだことを示している。

このことをもつとも良く示しているのが右の欄である。これは、オイルショック後一〇年間のうちの後半五年間の成長率である。

総平均は四・一％と少し高まり、それを上まわっているのはやはり三業種だけであるが、トップの電機は一七％台で平均の四倍以上、右の欄の高度成長期に近づいている。一方で、非鉄、鉄はゼロ成長で、また、マイナス成長が三業種ふえている。業種間の跛行性は更に大きくなっているわけである。

表の横線から下の部分には、主要の個別品目の平均成長率を示してある。左の欄の乗用車は二七％で、平均の二倍以上の成長であったが、右の欄の半導体・集積回路の約四〇％は、何と平均の一〇倍近い伸びである。それに続くテレビ音響等（VTRが中心）通信・電子部品、電子計算機まで、高成長の目立つ四品目が、すべていわゆるエレクトロニクスであり、電機という業種の成長率を高めている主役である。医薬品、乗用車は、長い好況が続けたが、成長率はやや落ちてきている。

このようにみえてくると、最近の日本経済をリードしてきたの

は、業種別には電機であり、更にその電機（電気機械）の中で、エレクトロニクス（電子機器）が際立った成長をしていることが分かる。まさにエレクトロニクス全盛時代が続いたわけであり、株式市場に株価の革命的变化をひきおこした最初の主役になったのも、こういった、産業と企業の実態を反映したものとええよう。」（二一―四ページ）

エレクトロニクス（電子機器）産業の革命的発展は注目すべき現象であることが、右の叙述からも明らかである。そこで次に、エレクトロニクス革命の歩みをふり返つてみよう。

(2) 日本の通産統計によると、業種別の電気機械の項目の中に、電気機器と電子機器であり、この電子機器がエレクトロニクスである。両者の違いは、電気の流れを力、光、熱などのエネルギー源として利用するものが電気機器であり、電気の流れを、情報の伝達、処理、蓄積などに利用するもの、およびそれに必要な部品などを電子機器という。電気機器には、モーター、電球、電熱器、掃除機、洗濯機、冷蔵庫、その他があり、電子機器には、ラジオ、テレビ、VTR、コンピュータ、OA、FA機器、端末機器、半導体I などがある。

またエアコン、洗濯機、電子レンジなどの家電製品や、時計、カメラ、電子楽器などや、複写機、電子レジスターなどの事務機、工場のNC工作機械や、ロボット、電子制御装置、さらには医療器具、自動車、住宅から玩具にいたるまで、極めて広い分野の製品がエレクトロニクスと結びついている。

以上蛇足ながら電子についての基礎理論にふれておこう。

まず電気とは何であらうか。電気とは電氣的な現象を生じさせる実体をいう。固体の物質中を移動するのは負電気を担う電子である。電気現象には、静電誘導、電磁誘導、電源の熱作用、電磁波の伝播などがある。電気という用語は、日常的には電荷と同義語あるいは電荷と電流の総称として使用されている。

電気には「静」と「動」の二つの状態がある。「静」電気はその場に静止している電気であり、「動」電気は物体のあいだを移動する電気である。

静電気は、二つのものが摩擦したり、接触したりして離れるときに発生し帯電する。静電気は電子が一つの物から他の物に移動することからおこり、電気の本質は電子（エレクトロン）である。電子が出てゆく物体はプラスに帯電し、電子がはいってくる物体はマイナスに帯電する。

摩擦電気や稲妻は電気によっておきるのだが、電子が発見されるまでに長い年月が必要であった。

古代ギリシヤ人は、雷は神が創造するもので、ゼウスが空で石矢を投げているのだと考えた。

一八七四年、イギリスの化学者物・理学者であったクルックスは、自分で改良した真空ポンプを使って真空放電管の実験を行ない、放電管の中の羽根車が陰極から出る陰極線にあたるとグルグル回転することから電子の存在を確かめた。こうして物質の最小単位とみられた原子についての理解はやがて急速に進むことになった。

周知のように、物質の最小単位とされた「原子」(ATOM) という言葉は、古代ギリシヤの「不可分」(ATOMOS) に由来していたが、不可分のはずの原子が電子と原子核に分けられたのが一九

一一年であり、さらに一九三二年に原子核も陽子と中性子から成る複合粒子だということがわかった。すなわち原子をつくっているのは、プラスの電気をもった原子核と、そのまわりのマイナスの電気をもった電子（エレクトロン）である。

電子はエネルギーが集中してできた粒子である。

電子は素粒子の一種で非常に小さく軽い。一個の質量は 9.1095×10^{-31} kgであり、一グラムの $\frac{1}{10^{27}}$ しかない。すなわち、一〇兆個の電子が集まってようやく一兆分の一グラム程度、一の下にゼロを二七個つけた数を集めてやっと一グラム程度なのである。鉄二〇キログラムに含まれている電子を集めても一グラムである。またひとつの電子の大きさを数値で表わすとその半径は 2.818×10^{-14} メートルといわれている。

電子は負の電気をもっているが、その電気量は 1.6022×10^{-19} フロンであり、他のいかなる物質よりもその電気量は小さい。

原子は原子核とこれを中心にして一定の軌道を回っている電子からなりたっている。原子核は陽子と中性子からできており、正の電荷をもっている。原子が普通の状態では中性なのは陽子の正の電荷と電子の負の電荷が相殺されるからである。原子の中で、電子は一定の軌道を描いて回っているが、この軌道は原子によってその数を異にしている。電子のなかで最も外側の軌道を回る電子が価電子であり、これは原子の一番外側にあるために原子核と引き合う力が弱いので、外部から原子に対して熱や電気などのエネルギーが加えられると外へ飛び出し易い。こうして、外からのエネルギーによって原子核との結合を離れ、原子の間を動き回る電子が、自由電子である。一般に電子は負の電荷をもっているので、近くに正の電荷があ

エレクトロニクス革命について

ればそれに引かれて移動する。自由電子は、こうしてどんどん移動するが、この電子の移動が電流であり、電子の流れと電流はその方向が反対である。

電気をおこすには大別して二つの方法がある。電池のように化学的方法と発電機による機械的方法である。トランジスタ・ラジオ用や懐中電灯などの電池もすべて化学反応を利用して電気をおこす。

さてこのように電子の移動を電流といい、正電気の流れる方向を電流の方向という。負電気が流れるときは、その反対方向が電流の方向である。両者は現象的には区別できない。

電流には交流と直流がある。

交流（交番電流または交流電流の略。A. C. = alternating current）とは、ほぼ一定の時間ごとに向きが変わる電流であり、直流（D. C. = direct current）に対応する。

バッテリーから送り出される電気は直流である。しかし発電所でつくられる電気は交流である。交流は電子が一方向だけでなく、導線中を前後に移動する。しかし直流と同じ効果を發揮できる。

交流は変圧器（トランス）で電圧を変えることができるので便利である。柱上トランスは発電所からの三三〇〇ボルトの電圧を一〇〇ボルトに下げて家庭へ送りこむ。

変圧器は鉄の芯に巻かれ二つの絶縁導線のコイルでできている。二つのコイルの間には電氣的接続はないが、一次コイルの電圧が二次コイルに電圧を生じさせる（誘導とよばれる磁気作用）。コイルの巻き数を変えれば必要な電圧を得る。

発電所ではコイルの回転によって電流の大きさが変化する交流を

使う。

電流は原子から原子へ移動する電子の流れであるが、このような自由電子をもっているものを導体とよび、導体に電流を流すためにその両端に取り付ける金属または特殊な導体の部分が電極であり、電流の流入する方が陽極であり、流出する方が陰極である。電池の二つの電極を導体でつなぐと、電子はプラスの電極の方へ移動し、あいた場所にマイナスの電極から電子が移ってくる。

一〇〇V一〇〇Wの電球には一アンペアの電流が流れているが、一アンペアとは毎秒一クーロンの電氣量が流れることであるから、電子の個数にすると $\frac{1}{1.6 \times 10^{-19}}$ 個の電子、すなわち六〇〇億の一億倍の電子 (6×10^{18}) が流れていることになる。

電子の一グラムは、 10^{23} 個の電子に相当し、その電氣量は 1.6×10^{10} クーロンであり、この電氣量は一〇〇V一〇〇Wの電球を一九〇〇日つけることができ、時速二〇〇キロメートルで走る、ひかりの場合、二五〇〇〇Vで一〇〇アンペアの電氣とすると、約二日間走りつづけることができる。

さて前述のようにすべての原子は普通は電氣的に中性であるから、原子核の電荷と電子の電荷は相殺される。すなわち原子核のなかの陽子の数とそのまわりをまわる電子の数は等しいのであるがこの数が原子番号である。

中性原子の電子の個数は原子番号と一致する。

金属の中の自由電子は外部に出ようとしても負の電子の層に反発されて金属の内部に押し返され、また自由電子を失った多くの正の金属原子からは引き戻される。しかし金属の高い温度にすると、外へ飛び出そうとするが、外側に空気がある場合は空気の分子と衝突

して外へ出ることにはできない。真空管の中で金属を熱すれば電子は外へ出ることができる。

真空管の陰極によく使うタングステンから電子が飛び出すには、電子は毎秒一二七〇キロメートルの速さをもたねばならず、このためタングステンを、約二五〇〇度まで加熱すればよい。金属が熱電子であり、熱電子がエレクトロニクスの主役である。

熱電子が外部へ出るためには真空管の中に熱電子を出す陰極ともう一つの電極とを封じこめる。陰極はフィラメントの細い針金でできており、電流を通すと熱せられて熱電子を放出する。陰極から飛び出した電子は、次第に陰極のまわりに雲のようにたまり、それ以上の電子が陰極から出なくする。負の電荷をもつ熱電子が反発力で押し戻されるからである。そこでもう一つの電極に陽極が正、陰極が負になるように電池をつないで電圧を加えると、陰極のまわりの電子は正の電極すなわち陽極に向かって引っぱられ、陰極から再び電子がどんどん放出される、陽極に達した電子は導線を通して正極にたっして中和する。

次に陽極が負が陰極が正になるように電池をつなぐと、陰極から出た熱電子は陽極から引っぱられないで反発され、陰極のまわりは電子ですぐいっぱいになり、熱電子が出なくなり電源はストップする。そこで陰極と陽極の間にプラスとマイナスが交互に変化する交流電圧を加えると、陽極が正のときだけ電流が流れ、陽極が負になったときはストップする。そこで導線の中には一定の方向だけに流れる電流である一種の直流が流れる。このような真空管が整流管であり、交流から直流を得るのに使用される。

次に真空管の陰極と陽極のあいだに格子状の第三の粒極（グリッ

ド)を入れると陰極から陽極に流れる電子の流れを自由に変えることができる。グリッドは網状で、陰極から飛んできた電子がグリッドを通過して陽極にゆけるようにしてある。このグリッドに正(+)の電圧を加えると陰極のまわりの負(-)の電子はグリッドからも引っぱられるので陽極だけのときよりも電子は動き易くなり、電子流は増加する。反対にグリッドに負の電圧を加えると陽子流は制限され、さらにグリッドの負の電圧を大きくすると陽極に達する電子流はゼロとなる。

グリッドは陽極よりも陰極に近いところにあり、陰極から出る電子に対する吸引、反発の影響は陽極よりはるかに大きい。したがってグリッドの電圧を少し変化させても陽極電流は大きく変わる。すなわちこれが真空管の増幅作用である。

電子は負の電気であるから、正負の電圧や磁気的力のはたらく磁場をつくると、引っぱられたり、吸収されたりして電子の進行方向を変える。しかも電子は小さく軽いので、ほんの少しの電圧や磁場を加えると非常に敏速に運動の方向を変える。

モーターを回す力は二つの磁界がぶつかるときに発生する。一つは二つの磁石の間にある磁界、もう一つは電流を流したときにできる導体の周囲の磁界である。モーターでは導体は二つの磁石の間に置かれる。電流が導体の手前から向う側に流れるとき導体は下へ、逆に流れるときは上へ押しつけられる。コイルは回転するコイルが二分の一サイクル回転すると電流は反対方向に流れはじめ、発電所では毎秒五〇サイクルで回転させている。

電動機とは電気エネルギーを機械エネルギーに変換し動力を発生する原動機であり、発電機と一緒にして回転機ということもある。

エレクトロニクス革命について

入力の種類により直流電動機と交流電動機に分けられる。

発電機(ダイナモ)とは機械エネルギーを受けて電気エネルギーに変換し動力を発生させる装置の総称であり、直流発電機と交流発電機がある。

さて話を真空管に戻そう。

電子を真空中にとり出し、電子の真空中での運動を研究し、真空管やブラウン管、そして光電管までつくりあげ、ラジオやテレビがつくられた。気体中にとび出した電子は、気体をイオン化して放電をおこし、ネオンサインや蛍光灯をはじめとする照明を可能にした。

光はどうしてできるのか。原子核のまわりをまわっている電子の数は、それぞれの原子によって異なるが、この電子がまわる軌道を変えるとき光があるのである。

ひとつの電子が、内側に、すなわち原子核の方向に向かって飛び移るとき、電子はエネルギーを失ない、失った分のエネルギーは光子と呼ばれる光の量子となって放出される。

人工衛星はどのような軌道でもまわることができるが、電子はきまった軌道しかまわることができない。電子の各軌道に存在することのできる電子の数はきままっている。すなわち第一の軌道では二個、第二の軌道では八個、第三の軌道では一八個である。一般に入ることのできる電子の数は n^2 で表わせる。 n は n 番目の軌道を表わす。

電子の軌道変換は原子にエネルギーが与えられるとき生ずる。電子が光を出すのはタンクステンの線が電流で熱せられて、原子の中の電子の運動が激しくなって高い軌道に飛びあがると、低い軌道に空席ができ、この空席に電子が落ちるとき出すのである。蛍光物質

が光を出すのも同じである。蛍光物質に光をあてると、蛍光物質のなかのたくさん電子が光を吸収し、エネルギーを得て運動のはげしい状態の高い席に移る。光が途切れると、これら沢山の電子は運動のはげしくないエネルギーの小さい状態の低い空席につきつぎと落下し、このとき発光する。このときの光は、はじめにあてた光より必ず波長が長い。そして沢山の電子が空席に落ちるとき、高い席と低い席との差によって、出る光が紫から赤までと異なる。

ガラス壁にぬった蛍光物質に電子が衝突すると光るのも原理は同じである。

ネオンサインの原理も同様である。ネオンサインはネオンサインをつめた放電管である。紫外線を蛍光物質にあてると光を出す。

さらに電子をゲルマニウムの結晶のように固体のなかにとり出し、その運動をあやつることに成功し、トランジスタ（増幅作用をもつ三端子の半導体素子）を作った。トランジスタは真空管よりさらに小型で、エネルギーもあまり使わずに真空管と同じ働きをする。以上のような技術を総称して、エレクトロニクス、とよぶのであるが、エレクトロニクスの大きな特徴は、電子を利用して小さな信号を大きくしたり、非常に高速で信号を伝えることである。増幅作用は電子装置のもっとも基本的な働きであり、高速信号は、電気計算機では人間なら数年かかる計算を数分間でおこなうことができる。

トランジスタの発明で突破口となってマイクロエレクトロニクスは一九四七年から五八年の間に半導体トランジスタの技術を向上させ半導体産業と呼ばれる新しい産業が生まれた。集積回路つまりチップが応用面で広く普及する最大の理由はその価格がきわめて低い

ことである。

また導体物質の研究も進み、いまや電気伝導は超伝導の時代を迎えつつある。すなわち金属や合金のなかには温度を下げていくと、ある一定の温度以下で急激に電気抵抗がなくなるか、あるいは測定できないほど小さくなってしまふものがある。これらはその低温で磁界をしめ出す性質を示す。これが超電導である。超電導現象は一九一一年に水銀において発見された。やがて超電導は電子と格子振動との相互作用の結果であることも明らかにされた。超伝導状態をこわすには転移点以上に温度を上げるか、限界磁界を越える磁界を加えなければならない。

超電導現象は直流では有効だが、交流では特有の電力損失があるため、超電導状態を維持させるのが難かしい。しかも電力機器はほとんどが交流なので、超電導技術の適用分野を広げるには、交流用の超電導コイルの開発は欠かせず、電力中央研究所が東芝と共同して研究していた。そして最近開発された交流用超電導コイルは直径〇・一一二ミリの銅ニッケル合金の中に、直径一万分の四・六ミリの二オプ・チタン超電導体一万四千五百二十本埋込んだ素線を四十九本重ねたものである。容量は交流（五〇ヘルツ）用としては世界最大の五〇〇キロボルト・アンペアであり、この開発によって超電導を利用する電力機器の開発研究が一段と加速されるとみられる。

二 マイクロエレクトロニクスの歩み

現在、エレクトロニクスはテレビのような生活のなかで使わ

れている民生用機器や、情報の伝達・処理などを行なうコンピュータ・システムや、医療の分野に使われるME（メディカル・エレクトロニクス）や、ロボットなどの産業用機器など、極めて多方面の分野で役立っており、人間生活と社会の構造に多大の影響を与えつつある。

日本のエレクトロニクスを中心とする電子産業は他の産業分野に比べても大きな部分を占めるようになった。電子産業は、材料生産、部品生産、機器生産およびシステム生産などの多くの生産部門の積み重ねのうえに成り立っており、また電子工学界の技術開発の発達に背後から支えられている。

エレクトロニクスを用いたコンピュータの第一号はアメリカのエッカートとモークリーによって作られた「エニアック」で、これはアメリカ陸軍の弾道計算のためにつくられたものであった。

一九四五年にアメリカで世界最初のコンピュータ（エニアック ENIAC: Electronic Numerical Integrator and Calculator）がつくられてから、僅か四〇数年しかたっていないが、この間にコンピュータは素晴しく発展した。現在ではエニアック（これは一〇メートル×一五メートルの部屋を占め、三〇トンの重さをもち一万八千本の真空管からできていた）より遙かに小さくかつ性能のよいコンピュータが、しかも大変安く買うことができる。

コンピュータと自動車の発達をくらべてある人は次のように述べている。

エレクトロニクス革命について

自動車がはじめてつくられたのは一七六九年である。もし自動車がコンピュータと全く同様に発達したら、音の速さの三倍で走り、タンク一ぱいのガソリンで地球を三〇〇周も走ることができ、一台の自動車の値段も一円以下になっているだろう。だが自動車の大きさも、牛の親指ぐらいになってしまおうので、実際には人間が乗ることはできない。

世界最初のアメリカのコンピュータ（エニアック）は、その作成に三年を要した、という。このコンピュータは一〇〇人の人間が一年を要する計算を二週間のできるのである。

イギリスも、第二次大戦のあいだに、敵の暗号をとくために「コロサス」（巨人という意味）のコンピュータをつくった。大きさは広い部屋くらいあり、二〇〇〇個もの真空管をそなえ、沢山のワイヤーやそのほかの部品からできていた。いうまでもなく真空管は電極などをふくむガラスの管で、電気のスイッチの働きをする。この真空管がトランジスタにとってかえられた。

世界最初のトランジスタの発明は一九四八年、アメリカのベル研究所でなされた。それは一センチほどの長さのシリコンの細い円柱であり、その寿命は半永久的である。このため、これを大量に使用するコンピュータの小型化と、故障の減少、性能の高度化に極めて役立ったのである。日本のトランジスタラヂオは、一九五五年にソニーの前身会社によって制作され、戦後の輸出国の先駆者となった。

やがて一つの小さなシリコンの板（チップ）に、いくつものト

ランジスタを集め、ほかの部品も配線もつけて回路機能をもたせる研究が進展し、一九五八年に最初の製品が作られ、六二年に実用化された。これがIC（集積回路）である。

家庭で使われている小さなコンピュータを動かす電子頭脳はシリコンのうすい、たかだか五ミリ角の四角い片で、チップあるいはマイクロチップとよばれている。シリコンはこまかい珪砂を精製してつくる。このシリコンの表面にはいまや一六メガビットDRAMが開発されつつある。このシリコンに組みこまれた回路を通して電気がそれぞれの小さな回路にそってシリコンの片のなかへ、または外へと流れる。こうしてコントロールされた電流によって、チップは計算したり、情報やデータを伝えたりする。

最初はチップに集積される部品（素子）はせいぜい十数個であったが、やがて一〇〇個を超え一〇〇〇個を超えるようになった。ワンチップの素子数が一〇〇〇個以上のICをLSI（大規模集積回路）とよぶ。LSIの出現はエレクトロニクスの利用を急進させた。さらに超LSIがあるが、これは約五ミリ角のチップの上に一〇万個以上の素子が作り込まれたものである。最初の超LSIは六四キロビットの情報を記録できるメモリであった。

半導体メモリーの生産は現在二五六キロビットDRAMが主力である。一九八四年に一年間に一〇億個も作られた超LSI六四KビットDRAMは一九八五年には一個一二〇円〜三〇円の

低価格で売られている。このシリコンチップ一枚に十五万個の部品が集積されており、その記憶容量は、たった一個で、四〇年前の巨大なコンピュータに比べて八倍である。しかし一九八五年には、これが二五六キロビットDRAMに追いこされた。そしてこれもやがて四メガビットDRAMやさらに一六メガビットDRAMに主役をゆずるであろう。

記憶素子の集積度は数ミリ角の素子（チップ）の上にとれだけ多くの電子回路（トランジスタなど）を組み込むかで決まるのであるから、微細加工技術、特に素子の配線幅をどれだけ細くするかポイントになる、二五六キロビットで幅は一・二ミクロン程度である。

集積度が一ランク上昇（四倍化）することに線幅は約三〇%ずつ細くなる。メガビットの素子では最小線幅が一ミクロン以下となる必要がある。

日本では最近通産省が組織した「超LSI技術研究組合」でこの壁を乗り越え、それまで光で回路の図面を描いていたのを、電子ビームによる描画装置を開発した。

ところで半導体メモリ（記憶集積回路）とはデジタル信号の論理「0」を「1」（情報）記憶するデバイスであるが、半導体メモリは使用されているトランジスタによってバイポーラメモリとMOSメモリに大別される。

MOS型素子はシリコン基盤上に酸化膜と金属電極を乗せたサンドイッチ型構造をもっている。双極性トランジスタを組み

込んだバイポーラー型素子よりも動作速度は遅いが、消費電力が小さいうえ、高集積化に適しており、今では記憶素子のほとんどがMOS型である。このMOSメモリは大容量化に有利で、超LSIデバイスの先兵となった。

MOSメモリを機能的に分類すると、①ダイナミックMOSRAM(DRAM)と、②スタティックMOSRAM(SRAM)の二種類となる。

DRAMの発展のプロセスは、半導体メモリの歴史である。その市場への登場は一九七〇年の一K(10³)ビット素子であり、いまや二五六Kビット素子から一メガ(10⁶)ビット素子へさらに一六メガビット素子の発表もなされている。

(3) このように現在のコンピュータの論理回路は、電子式の「スイッチ」で「オンとオフ」の二つの値しかとれず、人間にわかりやすい十進法の計算の「0と1」の二進法に変換しないとコンピュータを動かせない。ところが最近、工業技術院・電子技術総合研究所は、将来の革命的な光コンピュータを実現するかけ橋として必要な「光多値素子」の開発に世界で初めて成功(一九八七年三月十五日「読売新聞」朝刊)した。

現在の電子式コンピュータ(二素子を使用)は、配線の長さや超LSI(大規模集積回路)の接続端子の数の制限などで、超高速化、大容量化が限界にきているとみられている。すなわち現在使われている二進法のLSIは、高密度化して行くに当たって、LSIの内部配線が多くなり、極端な場合、面積の七割九割が内部配線で占められ、肝心のトランジスタを集積できなくなるなど、能力

エレクトロニクス革命について

が限界に進んでいる。そこでこの壁を打破するための研究が進められてきたが、その一つは、電子信号を光信号化する方法である。このためには光信号を取り扱える光素子の開発が急務であったが、最近その開発に成功している。

開発したのは、電総研オプトエレクトロニクス研究室の渡辺正信氏で、氏は昭和六〇年、レーザー光を発光するガリウム・ヒ素の「半導体レーザー」の上部に二本の細い電極をつけ、これらに電流を流した時のレーザー出力の変化をみる実験中に特異な反応を発見した。すなわち、一方の電極の電流を一定にし、他方を増やしていくと、これに応じて初めは①レーザー出力は増えていくが、ある点を過ぎると急に出力が落ちてゆき、極小になるが、②極小の点を過ぎると再び増大する、という二重の「非線形特性」を発見した。このうち①の「非線形特性」を利用して二値素子が作られていることから、氏はこの「二重非線形」で「三値素子」を開発できると考え、三値の計算に必要な基本的な論理回路(和、積、否定)がこの素子の組み合わせで簡単にできることを発見した。さらにこの素子は計算と記憶のほかに光信号を増幅する機能も備えていることも電極を増やすことで、四値以上の素子の開発も可能であること、この素子を使うと、最低の三値でもパソコン程度なら約十倍、大型コンピュータなら百万倍も性能が向上することが予測された。

二進法の限界を打破するための別な方法は高速計算の可能な四進法などの多進法の研究である。そして最近世界初の四進法LSIが東北大と松下電器によって開発された。

東北大の樋口竜雄教授のグループ「多値電流モード」と呼ばれる新しい多進法の論理回路を開発、教授は四進法の計算方式をこれに

応用することで、四進法計算の実現に道を開いた。松下電器は、この新しい論理回路作りに適した高精度の半導体技術を持っていたので、この技術を東北大グループの研究とドッキングさせ、スーパーコンピューターなどの心臓部に使われる「乗算器」の開発を目指し、こうして試作された「乗算器」は三十二けた同士の掛け算を、一億分の四秒も上回る高速であり、「スーパーチップ」と名付けられた。これは将来、人工知能をはじめ、超小型ポケット自動翻訳機や知能ロボット、医療診断システムなど、人間の頭脳をコンピューターに置き換える際の構成要素になると期待されている。

半導体メモリーの開発には、「三年四倍」という経験則がある。記憶容量が四倍増えるのに三年の開発期間が必要だということである。事実四キロビットから一メガビットまでの製品が登場するのに十二、三年が経過した。同時に一ビット当たりの価格は十年間で百分の一程度までに低下する技術革新が行われた。こうした開発競争のなかで、六四キロビット以降は、日本が先行し、アメリカ市場へ輸出攻勢をかけ、日米経済摩擦の象徴にもなっている。

また半導体メーカーにとっては、ついこの間、一メガビットDRAMで量産体制に入ったばかりなのに、早くも次の世代のDRAMへの移行を迫られ、開発、量産の期間が短縮する傾向が強まっている。

最近、さらに四メガDRAMをIBMが開発した。IBM社

は一九八七年二月二五日、ニューヨークの国際固体回路会議で、次世代の半導体メモリーである四メガビットDRAMの開発を発表した。既に四メガビットDRAMは、日本電気、東芝松下電子工業などの日本メーカーおよび米国ではテキサス・インスツルメンツが発表しているが、このうち世界最高のものとみられるのがIBMの四メガビットDRAMであり、これは演算速度が六十五ナノ秒（一ナノ秒は十億分の一秒）とIBMの最高速一メガビットDRAMの八十ナノ秒を上回っている。シリコン・チップの大きさも七十八平方ミリで、IBM一メガビットDRAMより三五%大型化しただけである。

ところが、このIBM社の開発と時を同じくして、日本電信電話（NTT）は、世界で初めて一六メガビットの超大容量DRAMの開発に成功した。一平方センチほどのシリコンチップに、漢字約百万字、新聞にして六十四ページ分の情報を記憶できる記憶容量最大の半導体メモリーである。この結果、人工知脳（AI）などに幅広い応用が期待されるほか、コンピューターの一層の高機能、小型化が促進されよう。

電気が開発した一六メガビットDRAMは、電子ビームなどで〇・七ミクロン（一ミクロンは千分の一ミリ）の幅の微細な電子回路をつくったものであり、タテ八・九ミリ、ヨコ一六・六ミリのチップスの上に約四千万個のトランジスタやコンデンサーなどの回路部品を集積、新聞六十四ページの情報のすべてを〇・四秒たらずで読み出したり、書きこんだりできるものであ

る。半導体メモリーの開発は以上のように驚異的である。

(4) 半導体とは電気伝導率(電気抵抗の逆数)が導体と絶縁体の中間程度の物質の総称である。金属の電気伝導率は温度が上昇すると減少するが、半導体では増加する。電気の伝導とは電子の移動である。

固体の電気抵抗は、 $10^{-9}\Omega \cdot \text{cm}$ 程度の非常に小さな抵抗率の銅や銀のような金属から、 $10^{23}\Omega \cdot \text{cm}$ 以上の極めて大きな抵抗率のパラフィンのような絶縁物に至るまで一〇の二〇乗(一兆のさらに一〇億倍以上)をはるかに超える広範囲に及んでいる。

半導体はその名の通り $10^{-3}\Omega \cdot \text{cm}$ から $10^{16}\Omega \cdot \text{cm}$ の中間の電気抵抗を持つ材料で、数百種類の物質が確認されている。

半導体は熱を加えたり、光をあたえたりして外からエネルギーを加え電子の運動が原子核の拘束からのがれて原子から他の原子に移動することのできる自由電子をつくる。

物質を構成する原子が、陽子と中性子を主体とする原子核と、その周囲をめぐる電子よりなり、その電子のエネルギーは物質によって決まったとびとびの特定のエネルギー値しかとれない(量子化されている)ということの発見は、量子力学の発端となった、

一九一三年のジュームス・フランクとグスターフ・ヘルツの実験は、原子の驚くべき安定性を証明した。原子は、小さな衝突エネルギー、決まった限界のエネルギーよりも弱いもので打たれる限り、変わらないで安定した状態にとどまっており、この限界のエネルギーは各元素について固有の値をもつ。すなわち原子の安定性である。フランクとヘルツによる、電子は粒子であり波動であるという電

エレクトロニクス革命について

子の二重性の発見は、原子構造の謎を解く鍵を提供した。電子は粒子としての性格と同時に、原子核によって一定の領域内に閉じこめられた波としての性質をもっていたのである。電子の波としての性質は電子は原子の中では、はっきり定められた、ある状態しかとることができないという事実を明らかにした。電子が、核の周囲の限られた領域だけに閉じこめられているとき、電子の波動性は、電子に、ある特別の定められた状態だけをとりとせる。それ故、原子はその状態を連続的に変えることはできない。一つの可能な状態から、他の可能な状態へ、突然移らなければならない。電子の波を閉じこめることによって、一定状態の系列の存在が可能になり、定められた振動数の組が与えられるようになる。振動数とエネルギーの間には一定の法則があるので、定められたエネルギーを持った状態の系列が得られる。この系列のなかで最も低い振動数の状態は、エネルギー状態で、原子の安定状態であり、だんだん高い振動数になると、より複雑な状態を示す。原子のなかの電子の波もそのように振動する。

原子の安定性という性質は、最低位のバターンから、次に高いバターンに上がるためには、相当の量のエネルギーが必要であるということから生まれている。原子に与えられる影響がこのエネルギーの量より小さい間は、原子は最低位のバターンにとどまっている。それゆえそのバターンの示す構成は原子の良い安定性を示すのである。また原子の示す同一性は、波のバターンは常に同じで、それが波が閉じこめられた条件によって決められることから来ている。一つのナトリウム原子が他のナトリウム原子と同一であるということは、すべてのナトリウム原子のなかの電子波が、同じ条件、すなわ

ち核の引力と原子内の他の電子の電気的效果とによって、閉じこめられて、いるという条件から生まれるのであり、二個の金の原子の同一性は、同数の電子が、中心の同一の電荷によって閉じこめられ、それ故に同じ波の振動を作ることから来る。このようなどびとびのエネルギー準位も電子軌道を持つ原子が、互いに接近し固体結晶を形成すると、原子核から遠く離れ、原子核の持つ電気的引力に弱い束縛しか受けない電子軌道が重なり合って、その部分の電子は各原子を渡り歩けるようになる。その結果、離散的な「線」であった電子はエネルギー準位（価電子帯）や一定の幅をもった帯（導電帯）になる。

ある結晶の電子は、最終的にはどこかに位置しなければならぬ。これは総電子数との関係で次の二つの場合がある。

(a) 最外周のエネルギー帯（価電子帯）にまだ空帯があつて全電子が詰め込める場合。

(b) 最外周のエネルギー帯（価電子帯）は満席となり、その上の段のエネルギー帯（導電帯）は空席の場合。

(c) 満席になるはずのエネルギー帯の後列の電子が、自分の席を空席にして、もう一つのエネルギー帯の前列に陣とる場合。

(a) が導体、(b) が絶縁体、(c) が半導体である。

つまり、価電子帯に空席があるかないかが導体と半導体の決め手であり、導電体に移行して価電子帯の一部に空席があるのが半導体である。

なおエネルギーギャップ内に電子が位置することができない真性半導体にたいし、半導体中に特定の中純物原子を混入して電子の位置づけを可能にしたのが不純物半導体である。

前述のように半導体は金属の場合とは逆に、温度が上がると自由電子が増加し電気抵抗が小さくなって電気を通し易くなり、低温になると原子間を自由に移動できる電子が減少し、電子はみな原子のなかに拘束されて電気を通さない絶縁体となる。

金属は熱を加える分子や原子の熱による運動が激しくなり、金属の温度が高くなる。

三 古代の原子論かう科学的原子論へ

正しい物質観を確立するということは、物質世界の一般的特徴を正しく理解するということである。

この世界における最も根源的、永遠的、かつ普遍的なものは何であろうか。それはこの世界が物質から成り立っているということであり、すべての物質は対立物の統一であり、絶えず変化・発展しているということである。

世界は物質から成り立っており、かつ物質世界は人類の発生以前から存在している。それ故物質は人間が意識するかしないかに関係なく客観的に存在したのである。物質を無から創造することも、物質を無へ消滅させることもできない。この意味で物質の客観的存在は永遠かつ絶対的であるとみることができさる。

物質はすべて客観的な存在だという点で共通性をもっている。固体、液体、気体、プラズマ、場は、それぞれ異なった物質存在の状態を表わしているが、それらはすべて物質であると

いう点での共通性をもっている。物質はその存在形態と存在構造を変えることは出来ても、それ自体が無へ消滅したり、無から創造されたりすることはない。この世界には永遠に変化し、永遠に運動する物質およびその運動と変化の法則以外には、永遠のものは何もない。

私たち人類が世界の物質による統一と物質世界の客観的存在および物質の運動法則などについての普遍的結論である弁証法的唯物論に到達するためには、哲学を始めとする社会科学ならびに自然科学の長期にたる発展が必要だった。

西洋哲学は紀元前六世紀頃、古代ギリシャの地中海沿岸南部の都市ミレトスから始まったとされているが、古代ギリシャ人は「存在するところのすべてのものを」を自然と呼んで、自然の探究を始めていた。彼らは、自然は生滅するが、それらの根底には不生不滅なるものがあり、これが真に存在するもの、すなわち「真実在」である、と考えた。古代ギリシャ人が考えた真実在は、それ自身が始源であり、原因であって、「生むもの」「結果を生ずるもの」である。しかしこのような考えはやがて素朴な「原子論」に到達する。

生物・無生物を問わず、すべての自然の基礎的な構成要素は、現在知られている限りでは素粒子であり、さらには素粒子の構成子であることが発見された。そして、この素粒子の運動形態は、物理学者によれば、弁証法を余すところなく立証しており、現在知られている限りの素粒子の運動形態を支配してい

エレクトロニクス革命について

るのは弁証法以外の何ものでもないのである。

しかし人類が正しい物質観に到達するまでに長い時間が必要であった。この世界が何らかの基本的要素から構成されているという考えを人類は当初から抱いていた。

古代中国やインドで生まれた、すべての物質は地、水、火、風、空より成るとする「五元素説」や、古代ギリシャでの地、水、火、風の「四元素説」などはそのあらわれである。

また東洋においても陰気と陽気の二つの基本要因と宇宙を支配する自然勢力を金、木、水、火、土の五つの基本要素とみ、これらが配合されて万物を生成しているといういわゆる陰陽五行説が出現している。

ギリシャ哲学の元祖といわれるミレトス市のタレス（おそらく600～550 B・C）は軍事技術者として河川の水路変更工事を指導したり、船の操縦装置や暦の改良もした。また政治家としても活躍したといわれる。彼は自然界の多様な現象を系統だてて、根源的に把握しようとして、「水」説をたてた。土も空気も、生物も、すべて水から分かれてできる。水はどこにでもあるとし、液体だけでなく気体にも固体にもなれる。タレスの住んでいたミレトス市の周辺には、たくさん州が海に注ぎ、デルタ地帯が多く、洪水のあとには肥沃な土がのこり、そのなかに生き物がうごめいていた。彼の「水」説にはこうしたことも関係していたであろう。

同じミレトス市からタレスより少し遅れて生まれたアナクシ

メネス (585~525 B.C.) は「空氣」説をとった。

「水」説も「空氣」説も万物の根源を一元論として把握しようとしたのである。

世界万物の根源を「変化」と「不変」の見地から把握しようとする説もあった。

ヘラクレイトス (535~475 B.C.) は「存在することは変化することだ」と主張し、「火」説をとった。「火」は燃え、変化している。他方、エレア市の理論家であり政治家であった。パルメニデス (540~500 B.C.) は、ひとつのものが「存在する」と同時に「存在しない」ことはできないという論理によって、「変化」はあり得ないという結論に達した。彼は「目や耳や舌などに支配されることなく、理性によって私の論証を判断せよ」と主張している。パルメニデスのゼノン (490~430 B.C.) は「飛んでいる矢は静止している」というパラドックスを提出して運動の概念を否定し、先生の説を裏書きしようとした。

エンペドクレス (495~435 B.C.) は、パルメニデスに反対し「地(土)・水・氣(空)・火」の四元素を考え、これらが混合するとき物が生まれるのであり、いろいろな現象も四元素の混合するときに生まれる、とした。

このように万物の根源の探究は「水」説に始まり、次第に發展して、いっさいの物が地、水、火、風の組合せであるという有名な四元素説が生まれ、やがて紀元前五世紀の後半に至り、哲学者レウキ波斯とデモクリトスは、物質世界は複雑で変化し

ているが、しかしその根底にある真理は永遠であり不変であるという二つの考えの断絶を埋めようとし、自然は無数の小さな粒子からできており、この粒子が自然の始源であり、それ以上分割されえない不変のものであるとして、これを原子 (ATOM) と名付けた。この素朴な原子論は、ギリシャよりも早くから古代インドのジャイナ教徒によっても唱えられていた。

以上のように、古代ギリシャ人は自然とは何かについて思索を加え自然の根源は水であり、火であり、空気であり、地であるとの諸説を立てたが、遂に自然の根源物質は原子と空虚であるという説に到達した。すなわち自然は無数の原子 (不可分なるもの) と、それらの運動の場所たる空虚から成り立っているという思想に到着したのである。レウキ波斯、デモクリトス、エピキュロスらの古代原子論がこれである。

ギリシャの原子論はデモクリトス (460~370 B.C.) によって大成され、エピクロス (341~270 B.C.) にひきつがれた。

古代ギリシャでは原子の存在を実証する事実は知られていなかったから、それは思弁上の一つの憶説にすぎなかったが、一八世紀末から一九世紀にかけて原子の存在は実証された。ある物理学者は、「もしヘラクレイトスの『火』を『エネルギー』という言葉でおきかえるならば、ヘラクレイトスの思想を現代物理学の立場から、ほとんどそのまま再現することができる」と述べている。つまり、エネルギーというものは、すべての素粒子、原子、したがってすべての物体が形づくられる一

番元のものであり、動くものであり、物質や熱や光に転形できるものであり、それゆえ世界におけるすべての運動、変化の原因と呼ばれるものであるが、こうした点がすべてヘラクレイトスが「火」という言葉に託して表現した思想に極めて近かったのである。

このように無限の変化をみせる自然の背後に、それを統一する根源的な何ものかがあるはずだという考えは、古くから人間の心に芽生えていたのである。人間は一方で神話や宗教を生み出したが、他方で神話や宗教の助けを借りずに、物質そのものの中に窮極的な不可分の基本物質を求めようとする唯物論的な考えをもっていたのである。

日本の一流の理論物理学者は、「レウキポス、デモクリトスの原子論は、現代のわれわれの知識から見ても、驚ろくほど当たっている点が多い。しかし、当然のことであるが、当時には原子の存在を実証する事実は知られていなかったから、それは思弁上の一つの臆説にすぎなかった。」(湯川秀樹、片山泰久、福留秀雄著『素粒子』第二版、一九六九年、岩波新書、三ページ)と述べている。

この古代の原子論はやがてローマのルクレティウスに伝わり、ルネッサンスの頃から次第に自然科学者に採用されるようになったが、その代表者が十七世紀のフランスの哲学者ガッセンディやデカルトである。彼らは物質に関する原子論的見解を継承した。デカルトは精神の属性は思惟であり、物質の属性は

延長であるとし、また原子の不可分性を否定し、物質は最後まで可分なるものとみた。

レーニンはこのような説に対し、「何らか不変の分子、(事物の不変の本質)等々の承認は唯物論ではなくして、形而上学的、即ち反弁証法的唯物論である」と批判を加えているが、このレーニンの批判の正しさは、現代物理学によっても確認されている。

古代ギリシャの自然哲学は、ローマ帝国が栄え、そして滅亡した時代に、その進歩を停止した。そして一六世紀までの千数百年の間、アリストテレスの学問体系と教会の権威が支配した。

アリストテレスの権威に最初の打撃を加えたのはガリレオ・ガリレイ(Galileo Galilei)の落下運動の実験であった。アリストテレスは重いものほど速く落ちる、としたが、空気の抵抗さえなければ、重くても軽くても、同じ高さなら同じ時間に落ちることを、周到な実験で証明した。

そのごルネッサンスから産業革命へと、ヨーロッパに新しい物質観が芽ばえた。一七世紀のイギリスの化学者ボイルは「物質を分解していつて最後に得られるもの」が元素である、と考えた。この考えを発展させたのが、フランスのラボアジエ(Lavoisier)であった。彼は化学反応において質量不滅の法則が成立することを明かにした。ラボアジエの到達した元素は化合していない純物質(単体)を意味する。物質の物理的実体を明

らかにする作業はドルトン以後の科学者たちによって行なれた。

ドルトンは一九世紀のはじめ頃、メタン CH_4 とエチレン C_2H_4 の一定量の炭素と結びつく水素の質量が二対一になることに着目し、いろいろな化合物を調べた結果、「ひとつの元素のある一定量と化合する他のいくつかの元素の質量の比は整数比となる」という「倍数比例の法則」にたどりついた。この整数比こそ、元素が一個、二個と数えられる粒子であることを示したのである。

しかし原子の正体を明らかにするまでにはなお一世紀が経過した。

一八九七年にトムソンが電子を発見し、それにつづいてラザフォードがついに原子核をとらえた。この段階でラザフォードは原子核を太陽に、電子を惑星にみたてて、太陽系のような原子像を描いた。これを今日の原子像まで完成させたのは、ニールス・ボーアの業績である。

物体の一片は、それがどこでどんな状態で存在していても、常に元素か、あるいはいくつかの元素からできている。最小単位がいくつかの元素、すなわち分子の結合である物質は化合物とよばれる。

すべての分子は原子の集まりであり、分子はその化合物を作り上げている元素の原子からできている。それらの原子は互いにくっついて、安定した単位、すなわち分子を作り、その分子

を単位とした物質のあらゆる特性をもっている。以前には、「物質を化学的に分析して、もはや二種以上の物質に分解できなくなったとき、物質構成の基本となる物質種を元素とよぶ」と定義されていたが、その後元素についての認識が深まり、放射能の発見、同位体（アイソトープ、同位元素ともいう）の存在、人工元素の創製などによって、この定義は不十分なものとなった。

ところで元素を構成し、それぞれの元素の同一性を保存している最小の粒子が原子であるが、原子はそれぞれきまつた構造を持っており、ある条件の下では変化する。

このように元素の最小単位が原子であり、原子が九二の異なった形で元素を構成し、沢山の種類の物質を作り出していることがわかった。原子番号一から九二のほかに、原子番号一〇五までの超ウラン元素が人工的につくられている。こうして、物質は分子から成り立ち、分子は元素から成り立ち、さらに元素は原子と呼ばれる物質から構成されているという考え方は一九世紀に確立されたのである。

水は水素と酸素の化合物である。水素と酸素の元素の最小単位は水素原子と酸素原子とである。水の最小単位は水分子で、これは二つの水素原子と一つの酸素原子からできていて (H_2O) 、それらの原子は互いにしっかりと結びついていて、電気放電でなくては、こわして分離することができない。

多くのよく知られた物質は実際には元素である。金、銀、

鉄、鉛、アルミニウムなど、すべての純粋な金属は元素である。水素、酸素、窒素など多くの気体もまた元素であるが、光を出している気体や炭酸ガスなどは化合物である。よく知られた液体の大部分は化合物である。

九二個の元素とその原子が発見されたことは、物質の構造を理解する上で最も重要なステップであった。この自然界は外觀、格好、性質、冷暖、生死、その他さまざまな千差万別の変化極まりない、あらゆる姿態の物質から成り立っている。このおびただしい多様な物質があるにもかかわらず、すべての物質はたった九二種の原子からできていて、その各々はよく知られた元素に属している。生物であれ無生物であれ、この九二の元素のどれかに分解できないものはない。この物質的構造の基本的な単純さを明らかにしたのは科学の成果であった。

一つの化合物について、それを構成している元素の原子数の比は、つねに一定である。たとえば、水はどこから採ったものでも、すべて水素原子二、酸素原子一の割合でできている。

やがて、新しい物理学が起こるとともに、物質を構成する原子よりもさらに基本的な粒子、すなわち陽子、中性子、電子という考えが生まれ、実験的にもそのような粒子が発見されるようになって、原子や原子核を構成する素粒子という考えが確立された。

たとえば水素原子は最も簡単な原子であるが、この原子は一個の原子核（陽子）とその周囲をまわる一個の電子から成って

エレクトロニクス革命について

いる。陽子も電子と同じように集中したエネルギーであるが、電子の約一八五〇倍も重い。

原子核を構成するもう一つの重要な粒子がある。それは陽子とほぼ同様の質量をもっているが電荷がないので中性子と呼ばれる。中性子は水素を除いたすべての原子核に含まれている。

自然界にはその数ははるかに少ないがこれと異なった水素が存在する。

この第二種の水素は重水素（デュートロン）と呼ばれ、その原子核は一個の中性子と一個の陽子とからできている。水素ばかりでなくすべての元素の原子核は、陽子の数は等しいが中性子の数を異にするいくつかの種類をもつ。同じ元素について、このように原子核が異なるものを同位元素とよぶ。

原子核の中の中性子の数は、その原子の化学的な性質を変えない。ただ核の重さ（原子量）を変える。

原子量の尺度は国際的なとりきめによって六個の陽子と六個の中性子をもつ炭素の同位元素を基準としている。その原子量は一二でありこの尺度にもとづくと、水素の原子量は一・〇〇七九七である。

原子量の計算を複雑にするのは同位元素の存在である。一般に元素の正確な原子量を計算するためには、そのすべての同位元素の原子量を、それらが天然に存在する混合比で重みをつけた平均をとる。

さて原子核をつくっているのは陽子（プロトン）と中性子（ニ

ニュートロン）であるが、この原子核のまわりに電子がある。自然界のすべての物はこの三種の単位の結合であって、陽子と中性子とは結合して原子核を作り、電子はその原子核の回りの自分のパターンにはまって原子を作っている。多種多様の物質をただこの三つの基本要素に分解することによって、科学は大きな進歩を遂げた。その基本要素が核力と電磁力の影響によっていろいろに結合することにより、宇宙の森羅万象はできあがっている。

原子核は原子全体に比べるとはるかに小さい。原子の直径はおよそ一センチの一億分の一にすぎず、その大部分は空虚な空間である。原子核をゴルフの球の大きさと仮定すると、原子の直径は数百メートルになる。

さて、原子核を構成している二種類の素粒子（核子）と第三の素粒子である電子のほかに、光やその他の電磁波をつくっている第四の素粒子である光子（フォトン）や、さらに電子と核子の中間にある中間子（メソン）、中性微子（ニュートリノ）などが一九三〇年代に実験的にも発見された。

その後一九六四年には、この陽子や中性子の一つひとつが、それぞれクォークと呼ばれる三つの素粒子の組合せからできているという「クォーク理論」が現れた。クォークの種類は三つだけでは説明できず、現在は六種類またはそれ以上あるだろうといわれている。しかもクォークそのものも物質を構成する究極の基本粒子であるとの断定は下されていない。

物質世界を構成する最少単位から目を転じて広大な宇宙そのものに目を向けてみても、それはまた素粒子という物質以外のものでもない。

現在のところ科学者は、このような広大な宇宙のすべての物質的存在は数百種類もの素粒子でできており、それらの素粒子の多くはさらに要素的なものでできている、と考えている。このレベルでの要素的なものには、クォーク、グルーオン（素粒子を構成するクォークなどの何種類かの構成子のあいだの相互作用を媒介する媒介子）レプトン（弱相互作用の粒子で、電子、ミューオン、ニュートリノなど）光子などがある。

こうして物質は「絶対不変」の素粒子から構成されているのではなく、不断に相互に転換するところの何種類かの素粒子から構成されていること、このように素粒子はその本性に基づいて弁証法的な自己運動を行っており、能動性が素粒子の本性であることが、現代科学によって確認されている。

素粒子はこのように極めて活動的な物質であり、それ自身のうちに自己を定立すると同時に否定する矛盾をもっている。古代の原子論の基本的な観点は、変化する表象の背後に絶対的安定性をもつ不可分かつ不連続な不変の原子を根源的なものとして見出すことであったが、現代物理学によって素粒子の性質が明らかにされ、根源的なものこそ最も活動的であり、それ自身のうちに能動性を持ち、絶えず運動していることが明らかにしたのである。

宇宙の生成の科学的研究によれば、宇宙は考えられる限りの過去の一定の状態においても自己運動体であり、そこから原子核や原子ができ、星雲や天体ができ、やがて生命の発生とその進化がみられたが、その根底には素粒子などの物質の自己運動があつたのである。

これらの素粒子は一定の条件——エネルギーと運動量の保存則など——を満たせば発生させることも消滅させることもできる。したがって、どのような巨視的物体でも、また微視的物体でも、必要な条件がくりだされれば、発生も消滅もする。私たちが日常みる例では、光子は電灯をつければ発生し、また写真のフィルムに当たって吸収されれば消滅する。しかし物質的存在が消滅する場合には、他の物質的存在——たとえば光——が発生するのであって、物質全体としては一定の保存則を満たしている。

素粒子の大きさとその寿命はどのくらいであろうか。現段階で科学者の発見した物質を構成している最も基本的な粒子の一つはクォークであり、その大きさは一〇センチメートルのマイナス一六乗(10^{-16} cm)である。またほとんどの素粒子はごく短い平均寿命で自然崩壊する。すなわち 10^{-10} 秒から 10^{-12} 秒くらいの平均寿命であり、例外として中性子の半減期は約一二分(六三六秒)である。

原子核にとっては一秒の一〇億分の一も非常に長い時間である。原子核の中の時間の自然の尺度は、核力の影響の下に核の

エレクトロニクス革命について

軌道を核子が一回まわる時間であり、この時間の長さが核の一年である。それは一秒の一〇億分の一よりずっと短く、 10^{-23} 秒程度である。

クォークは現在の地球上には単独には存在せず、人工的にくりだされる。その生成と発見を可能にしたのが加速器の出現である。これには線型加速器サイクロトロン、シンクロトロンなどがあるが、ボトム・クォークの対になる未発見のトップ・クォークを発見したのは、欧州合同原子核研究機関の、大型粒子加速器(シンクロトロン)である。巨大な電力を用いた電場と磁場で、陽子と反陽子(マイナスの電気をもった陽子)をトンネル内で加速し、それぞれ別の軌道で反対方向にグルグル回すうちに、最終的には光速に近いスピードになり、粒子一個当りの運動エネルギーは二七〇GeV(ギガ電子ボルト、一ギガ電子ボルトは一電子ボルトの十億倍)となる。この超高速の陽子と反陽子をトンネル内のある一点で正面衝突させると、正反対から来た粒子が合体し、その瞬間二倍の五四〇ギガボルトもの巨大なエネルギーの塊が発生し、四〇個前後の新しい別の顔をもった素粒子が発生するが、このなかに最後まで見つからなかったトップ・クォークが一九八四年に発見され、その質量は平均値四〇ギガボルトであると発表された。

世界最大の電子・陽電子衝突型加速器「トリスタン」は茨城県筑波研究学園都市の文部省高エネルギー物理学研究所にある。一周約三キロの、真空にした巨大なリングの中で電子と陽

電子を逆向きに光速近くまで加速し、正面衝突させる。すると電子と陽電子は消滅し、宇宙誕生直後に匹敵する五百億電子ボルトの高エネルギー状態となり、そこからさまざまな素粒子が生まれ、周囲に飛び散る。そのなかからトップクォークなど、未知の素粒子を発見するのが狙いである（「サンケイ新聞」、一九八七年五月十三日朝刊）

四 おわりに

今世紀でなされた科学の進歩のなかで、注目すべきは物質とエネルギーの間に関係があるという発見であるといわれている。すなわち物質とエネルギーの間に絶対的な区別はなく、物質はエネルギーのある特別な一形態とみることができると、たとえば原子爆弾が爆発すると、それを構成していた物質の一部分はエネルギーに転化する。逆に物体のエネルギーが増加すると、その質量が増加する。しかし物質とエネルギーの感覚的区別は存在する。

物質に付随しているエネルギーには二形態がある。一つは運動のエネルギーであり、もう一つはポテンシャル・エネルギーである。

電子の場合、質量の一部分は電荷（ポテンシャル・エネルギー）によって生じ、一部分は運動のエネルギーから生じる。光速の九九パーセントの速度で走っている電子は静止している電子の七倍も重い。このような高速は原子以下の大きさの粒子ではこ

く普通にみられる。

また実用上からエネルギーは六つの形態、すなわち化学エネルギー、熱エネルギー、力学的エネルギー、電気エネルギー、放射エネルギーおよび原子エネルギーに区別される。この六種のエネルギーは、いろいろな方法で相互に変換することができる。

私たちがよく知っている巨大なエネルギーは核反応で放出されるエネルギーである。

核反応で放出されるエネルギーは、アインシュタインの方程式 $E=mc^2$ によってその大きさが示される。すなわちエネルギー（ E ）は質量（ m ）と光の速さ（ C ）の二乗との積によって与えられる。光の速さは極めて大きいから、大きなエネルギーを発生させるのにも、わずかの質量で足りる。

今日の原子力発電所はすべて核分裂炉（中性子がウランの原子核に衝突して分裂する）である。原子は炉の中で核分裂され、そのとき放出された熱が水をふっとうさせて蒸気をつくる。核分裂は危険な放射性廃棄物を出す、これを出さない核融合炉の開発が研究されている。

世界初の原子力発電所は一九五六年、イギリスのコールダー・ホールで開業した。現在では世界中に数百の原子力発電所がある。

最新の原子力発電所では一キログラムのウラニウムが石炭二〇〇〇トンに相当する電気を発生させる。

核融合は例えば海水から得られる重水素と三重水素の原子を結合することである。重水素と三重水素は一億度Cの温度のもとで結合する。

やがて私たちが核エネルギーの平和的利用を実現したとき、その恩恵は巨大なものであろう。そして現在進行中の技術革新による生産力の発展は、利潤追求を目的とする資本制的商品生産社会の枠内に納まることは不可能になることは論をまたないであろう。売るための商品生産ではなく必要のための生産物の生産社会の到来は不可避である。

牧野昇氏は「産業の情報化」として未来社会の理想的モデルについて次のように述べている。

「モントリオール万博（一九六八年）を訪れた時のことが印象に残る。『カナダ館』はテレビやプロジェクトの無人組立て工場。一方から部品が送り込まれ、他方から製品が出てくる。また、『アメリカ館』のなかで未来の工場のモデルがあった。上から鉄やアルミなどをほうり込んでやると、下から自動車が出てくる。未来の工場の理想的モデルだ。この傍のパネルに、こういうことが書いてある。『これこそ産業の情報化だ』。

なぜかというと、物を作るといふ作業に人はもう関係がない。人がやっているのは、『次の製品企画や設計は何か』という仕事、マーケティングの仕事、機械に『フィードバック情報を入れる』仕事などに従事し、まさに情報機態だけになる。これが産業の情報化ということだ。」（前出『五大技術革命が日本を

エレクトロニクス革命について

変える』三九一四〇ページ）

だが産業の情報化そのものも資本主義体制転換の一契機にほかならない。

ただ私たちが注目し、警戒しなければならないのは核力の軍事化の進行である。

アラン・アイザックスは次のように警告している。

「疑いもなく、熱核反応は、われわれの文明の将来の発展の鍵を握っている。この鍵が、万人が自由に使えるエネルギーの巨大な倉庫を開けることになるか、それとも水爆戦争の終末的な破局への道を開くために使われることになるか、それを決定するのは世界人類である。」（『現代科学入門』、講談社、二五四ページ）

世界人類の一員としての私達の当面している問題にたいする責任は極めて重大である。