

生物物理学より見た自然法則とその限界

杉 田 元 宜

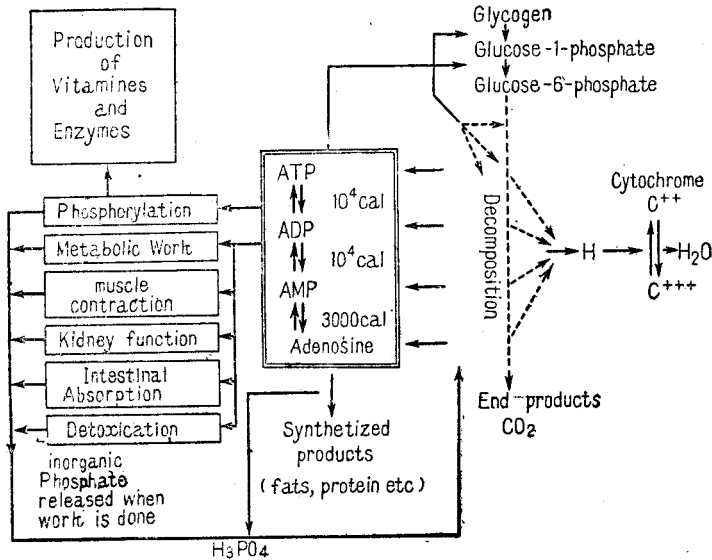
序 論

生物體にあらわれる現象も分解して考えると一見物理的、化學的な變化の組合せにすぎないようにも見える。また人間社會を見ると人類は、その生命を保つのに必要なものをつくり出す・動力源・でもあり、作業機・でもあり、結局自然物の一つである人類が、自然力を『利用』しながら、『生命』という自然現象を實現して行くわけである。では生命現象のあらわれない世界の法則と生物界の法則と、また人間以外の生物界と人間社會の法則とで、どこがどうちがつて、またお互いにどういう關連をもっているのであろうか。

例えば『利用』という考え方は、本來の物理学や化學にはないのである。また意識活動を問題にすると、物理学自身はその活動の産物なのである。このようなことをつきつめるとき、物理学によつて解決つくものではない。しかも物理学の方面からの検討はやはり必要になるのである。『無生物界の法則とちがうものがある』というなら、まずその無生物界の法則とはどんなものか、また『自然法則とはちがう』という時、自然法則とはどんなものか、つきつめてからそのちがいを口にしなければならぬ。たまたま生物物理学の領域に踏み込もうとしているので、その立

生物物理学より見た自然法則とその限界

エネルギー代謝の略表



一橋論叢 第二十五卷 第二號

ATP: Adenosine triphosphate
 ADP: Adenosine diphosphate
 AMP: Adenosine monophosphate

V. R. Potter, Biological Energy Transformations and Cancer
 Problems (Advances in Enzymology 4, 201—256, 1944) 参照

場からこの問題にふれてみよう。最近サイバネティックスの問題が、熱力学と結びついて話題にのぼって来たが、これについてはふれる暇がなかつたので、別の機会にゆずることにした。

第一編 生物として見た人類

一、生体内の消耗と再生産 我々のか
 らだは化学的エネルギーや物質を不斷に
 消耗し、たえまなく補っている。この過
 程を示す略表を参考のためにあげておこ
 う。ここでグリコーゲンは葡萄糖の重合
 物で、米の飯の變化したものと考えてよ
 い。A・T・Pは大きい化学的エネルギ
 ーをもつた磷酸エステルで、カロリー源
 である葡萄糖が分解して、そのエネルギ

1を出すためには、先ずこのA・T・Pの融資をうける必要がある。これによつて分解が進むと、今度は所謂カロリーとしてエネルギーが出てくるが、これを『熱』として無統制に四散させないで、これによつてA・T・Pを再生して行くのである。再生産されたA・T・Pは葡萄糖の分解だけでなく、腸における吸収、筋肉のはたらき、蛋白質や酵素、ビタミン、脂肪などの合成にもつかわれる。生体内でも豫算のわりふりが行われているのである。こゝで注意することは、腸に於ける吸収にもA・T・P等を要すること、どんな栄養物をたべても、それは體力の消耗の下に消化され、吸収され、分解されてはじめてエネルギーが出てくるのである。

このようなからくりが、化學的に自動的に行われることを説明するために、生體について基本的な三種の反應(i)體力の消耗(ii)消耗を補い再生産を行う合成等の反應(iii)栄養物の補給と分解を考え、且この三者の組合せを考えてみよう。この(ii)の再生産は(iii)の補給の上に行われる。即ち外界からとつた蛋白質をアミノ酸に分解吸収し、これらを資材に他方葡萄糖などの分解で得られるエネルギーで合成を行い、消耗され行く物質や體組織を再生産し、エネルギーを補っているのである。この(ii)と(iii)の反應を圓滑に遂行するために(i)の消耗が行われ、その消耗を補うために(ii)の合成過程が入ってくる。これが人生で、食うために生きるのか、生きるために食うのか、この過程に聞いて見るのがよからう。

カロリーの高い物質からエネルギーをとり出すのに、なぜ迎いのエネルギーを消耗する必要があるのだろうか。

それは山火事が一度おこると容易に消えないが、平素は山に平和な森があるのと同様で、反應状態に入らしめるのに迎いのエネルギーがいるからである。これを活性化エネルギーといっている。反應がおこると、それくらいエネルギーは反應によつて容易に得られるとしても、おこり出すまでは、反應状態に入る通路に隘路が頑張つていて、これ

を突破するのに活性化エネルギーがいる。また反應がつづくためには、反應で得られたエネルギーの一部をたえず活性化エネルギーとして隘路のりこえに利用して行くので、このうけわたしが不幸にして圓滑を缺くと山火事は自然に鎮火せざるを得なくなる。

生體內では高温でしかおこり得ないような大きい反應速度が、常温でおこっているといつて學者は不思議がる。葡萄糖にしても、これが分解してエネルギーを出すまでには、その構造の切替が必要である。普通の化學變化のように、『熱』としてこの活性化エネルギーをあたえようとすると、高温を要するわけであるが、生體ではエネルギー素量の巧妙なうけわたしが行われているのである。これを圓滑に行うために、酵素や核酸、ヌクレオチドなどはたらい回しているであろう。またそのために(i)(ii)(iii)のような『組合せ反應』も必要になるのである。

このような巧妙なうけわたしが行われるには、相應した組織が必要である。所で微妙な組織體は後にのべるように、大きいf.e. (free energy) 或は小さいエントロピーをもつていて、その組織は熱力學的にみても不斷に崩壊して行く運命のものである。そのとき大きいf.e.は消耗され、この過程はさきの(i)の中に含めて考えられる。ではどうしてそういう不安定な組織が存在するのか。という単純に存在しているのではなく、不斷に(ii)の過程でつくり出されているのである。こうして過程的に存在している組織のもとでA・T・Pなどから活性化エネルギーをうけ渡され、それによつて構造切替えなどの隘路をのりこえて、(iii)の榮養物から(ii)の再生産を行い、こうしてつくりあげられた組織や化合物は(一部は再生産のため)崩壊消耗されつゝあるわけで、こういう『綱渡り』が我々の生活であるとする、生

死常ならざるも致し方がない。

このからくりの熱力学は次節にゆずることにして一應の結論をのべると、化学反応には一般にこれをおこす『力の場』のようなものと、それに對する『抵抗』とが考えられる。Jougnet や de Londer はこれと反應速度との間に『オームの法則』に似た關係を導いている。大きい f.e. をもつた系は不安定で、そのストレスを解消しようとして大きい化学的な『力の場』がはたらくわけであるが、この抵抗が大きいとストレスは大きくても威力は發揮されず一見安定である。これが『準安定』や『假平衡』である。

この抵抗は一部は『構造の切り替え』からおこり、これを克服する活性化エネルギーの『得易さ』が抵抗の大きさをきめる。他方エネルギーを巧明にうけ渡したり、またエネルギーは別としても反應を進める上に、それに適つた態勢、分子配置をとらなければならない。抵抗の一部はこの態勢をとる確率が小さいことによつておこる。熱運動を行つてゐるものが、その運動のために微妙な配置や都合のよい構造をとることは、『統計的には』相當窮屈である。しかし圓滑に進むにはでたらめな配置ではだめで、このような窮屈な状態を通過しないと反應が進まない所に隘路抵抗がある。この分子の配置状態、相互關係をあらはす量がエントロピー（前記註12参照）で、この窮屈さの大きい状態はこの量が小さく、制限の少く任意性の大きい状態ほどこれが大きいのである。今この隘路を『峠みち』にたとえてみると、これをのりこえるのに活性化エネルギーがいるし、この量が大きいみちをえらび、且これを誤らないためにも苦勞がいる。『みち』のとり方は各分子の相互關係からきまり、でたらめなみちをとつてはだめで、この制限のきびしさが活性化エントロピーにあたつてゐる（p. 109 参照）。生體ではこの値の大きい微妙な組織が(ii)の過程でつくり出され、反應の進むみちをつくり、このみちをとつてまた(i)(ii)の『組合せ反應』が進行しているのであろう。

生物物理学より見た自然法則とその限界

1 基礎科學第19號又は物性論研究第30號小論參照。

2 反應しあうものが一所にまとまつて存在する確率をますために、酵素や蛋白質その他が必要になるにちがいない。この確率とその組織のエントロピーとが關係しあつてゐる。工場にしても適當な道具や資材がまとまつて、且手順よく配置されて能率がある。この相互配置の微妙さが活性化エントロピーに反映され、形をかえると活性化_{f.e.}となる ($\Delta E = \Delta E + T\Delta S$)。

3 Jougnet, Ann. de physique 5, (1926) 5, これをさきの (i) (ii) (iii) の組合せ反應に應用するのが筆者の試みである (註21參照)。

4 de Donder, l'Affinité (1931).

5 氣體運動論的には、反應しあう分子の衝突の回數、即ち二つの分子の共存 (クラスターになつていてもよい) の確率によつて反應速度がきまる。

6 反應が進むためには活性化エントロピーの小さい (エントロピーは大きい状態) 方が都合がよいのであるが、この値の大きい微妙な構造 (エントロピーは小さい状態) のものが峠をのりこえるエネルギーその他の條件で有利となり、結局これが速度決定的なみち (Gate determining process) となるのである。なお活性化エントロピーは $p \cdot 103$ の ΔS^* (絶對値) にあたり、活性化された状態はこれだけエントロピーは小さくなつてゐる。

二、生物體と熱力學 一、でのべた制限や、みちの撰擇はどうしておこなうか。という分子運動の偶然性により、目的活動や意圖などはない。分子的混沌 (molecular chaos) で知られている分子運動が混沌に反した構造配置をとる所に興味があり、氣紛れな運動がこういう配置構造をとるための制限のきびさが活性化エントロピーになるのである。そのきびしい制限のある状態はどうして入り込むかは『奇が奇を生む』原則によるのであるが、その話はあとにして、こういう微妙なものは分子的混沌の原理によつて崩れ行く運命のものである。崩れるときエントロピーは ΔS だけまし、且つそのとき熱運動で崩れるのでまはりから『熱』を吸収する。(この吸収する熱 ΔQ と、エントロピーのまし

だか ΔS との間 $\Delta Q = T\Delta S$ という関係がある。故て T は絶対温度。この崩壊によるエネルギーの變化を ΔE とするとき、熱力學では $\Delta E - T\Delta S = \Delta F$ という形ではされる量の F を $f.e.$ といっている。このような崩壊では ΔE よりも ΔS の方が重要性が大きく、 ΔS が大きいと ΔF は負となり、 $f.e.$ は減少することになる。即ち微妙な形をもつたものは、その小さいエントロピーのために大きい $f.e.$ をもつていて、これは熱運動でゆり崩されるとき小さくなる性質をもっている。エネルギーは消耗されることはないが $f.e.$ は消耗される性質がある。それで先に化學的エネルギーを $f.e.$ と呼んで單純なエネルギーとは區別したのである。

$f.e.$ を考えると活性化のエネルギーとエントロピーとを綜合して『活性化 $f.e.$ として扱う』ことができる。前者を ΔE^* とし、後者の絶対値を ΔS^* とすると、活性化 $f.e.$ は $\Delta F^* = \Delta E^* + T\Delta S^*$ であらわされる。活性化エントロピーは負の量であるから、 ΔS^* は正號で加え各せてある。

全體として大きい $f.e.$ をもつていて、熱力學的にストレスをもつた状態は、隘路を克服して $f.e.$ の小さい平衡状態に向つて進んで行こうとする。克服する速度の大小は問わないが、いつかは克服しなければやまない自然の傾向が『熱力學の第二法則』である。いつかは克服するというだけでは、やいかおそいかはこの法則ではいつていない。この時期は微妙な構造のものがあらわれる程はやくなるが、『自然の傾向はこの時期をはやめる方向に動いている』ようで、これも大事な法則で、私はたわむれに第四法則などといっている。あとでのべる『奇が奇を生む原則』もそれと關係するのである。生物は化學的な $f.e.$ を『利用』して生命を保っている。利用ということは無生物界にはあり得ないように見える。しかし山火事のようなものになると、燃燒熱で生木を熱してもえ易くし、火勢を補給しつゝそのやりくりの

上に形態を保ち、やりくりがうまくつかなくなると、鎮火せざるを得ない。現象が一種の自律性をおびてくると、利用という感じが出て来そうである。山火事は森を利用して存在を保ち、森は山火事を利用して、化学的なストレスを解消して落着く所におちつくようとしている。熱力學的に見ると生物も『化学的にストレスのある所でおこる解消過程』で、個體をとつてみてもそうであるが、全生物界をまとめて『一つの過程』と見ると比較は一そう都合よくなる。或は個體の一生だけを見るより、地球上における生命の起源以後の歴史を通じて、地球上の化学的ストレスを解消しつつある山火事なみの現象と見ると、熱力學的な比較は更に完全になる。個體の生活や運命は、關連しあつた全體の一部、歴史の緩和振動(p. 117)の一ピリオドとして考えられる(註9 参照)。

生命の起原についてはオバーリンの説をとるなり、炭坑の自然發火の類推をとつておこう。それ以後の長い歴史の間に、エネルギーのうけ渡しややりくりは高度に發達した。山火事のようなものは子々孫々につたはらないから、その一代で鎮火し、自律性も低いが、生物では巧妙なやりくりにふさはしい、活性化エントロピーの高い微妙な分子配置のものになつてゐる。所で微妙なものは自ら崩れ行く運命であると共に、微妙な構造のものを再生産して行くことを、『奇が奇を生む原則』としてのべたが、立ち入つた考察は次の三で行うことにする。この崩壊と再生産は個體の一生の事業であると共に、その増殖過程でもある。故に熱力學的には個體の一生だけでなく、子々孫々につたわる過程を通じて、地上の世界の化学的なf.e.の(第四法則的な)消耗過程と見てゐるのである(註8 参照)。

それで、今日ではどんな簡単なものでも、既に生物である以上、その中で行われている反應過程や分子構造や配置のエントロピーに、生物進化の悠久な歴史が反映されてゐるはずで、こゝが生命なきものと、生けるものとの隔然た

るちがいである。逆にみるとそういう活性化エントロピーが、今日の生物のあらわれる迄の何十億年という年月をきめる因子ともなっている。そして今日ではそのエントロピーに應じた巧妙なやりくりで、さきにのべた(i)(ii)(iii)の組合せ反應が行われ、この組合せで生體外では獨立には行われないような(熱力學的には一見逆行するようにも見える)(ii)の反應が行われ、崩れ行くものを再生産して、生命という綱渡り現象を保ち、發展させて行くのであろう。

7 小著、過渡的現象の熱力學又は熱力學及び分子統計論と生物學(新しい生物學)、又は生物科學第二卷第一號小論參照。

8 生物科學第二卷第一號小論參照。

9 生物界は熱力學的に見ると全體相關連していて、どんな簡單なものでも今日高等生物のあらはれている世界で、その一部として適應しないものは生存しないであらう。このためさきに全生物界の動きをまとめて一貫した熱力學的な過程とみたのである。(印刷中の學内英文年報參照)

10 無生物界にもヒステリシスとかアフターエフェクトなどないでもないが、過去の歴史のしみこんでいる場合は少く、多くの場合現狀だけを見て殆んど完全に割り切れる。これに對して生物では、歴史が(ii)のような逆行をもたらししている。

三、活性化エントロピーについて 雪の結晶は、これを顯微鏡でしらべている間にも形は



華の雪

崩れ、ケバの尖端から分子は蒸發して、枝のつけ根の方に沈着して行くのである。分子の熱運動で、微妙な形は崩れて行くのである。所でこの微妙な形が、氷點下の過飽和水蒸氣の『過飽和』という無理(ストレス)を急速に解消させ、(ケバだつていようと)一應氷の形態にもつて行く機能をもっている。このようにエントロピーの小さい窮屈な形のは、事

情によつてはエントロピーの小さい狀態を更につくり出すはたらきをもっているのである。

生物物理學より見た自然法則とその限界

その事情というのは、こゝでは過飽和というストレスである。そういう無理が過渡的にも存在している理由は、解消するみちをさがして、手間とつて停滯しているからで、分子運動で偶然可能なみちに行きあたる確率が小さいからである。この確率（またはそれに應ずるエントロピー）が氷の核ができる迄の時間をきめるはずである。所で核ができると（例えばストレスのある板に割目ができたようなもので）、全體の無理がこゝにかゝつて、更に奇妙な形のものに發展するのである。局部とはいえ、奇妙な、エントロピーの小さい形のもは無理な存在であるが、全體のストレスを速やかに解消するため、局部に小さいながら無理が集積する形になる。核に衝突してくる水蒸氣の分子は面にそつてケバの尖端に運ばれて、こゝに沈着する。一應こゝにとりつくのは、この方が全體の過飽和解消速度が促進されるからである。しかしこゝは安定な場所ではない。不斷の熱運動はみのつた柿の枝をゆすぶるように、沈着した分子を再蒸發させ、安定な地位におちつかせようとするが、それよりも過飽和蒸氣から結晶片めがけて殺到して尖端に一應すがりつく分子の方が数が多いので、珍奇な形は珍奇を極めた形に發達する。これが私のいう『奇が奇を生む原則』である。これはこの種の現象に共通な姿で、全體がf.e.の大きい無理な状態にあるとき、局部に統計的に窮屈な形のものあらわれると、これが『發達の場』を誘起し、『場は發達をひきおこし』簡單な分子がこの相互誘導（相互誘導）によつて複雑奇妙な結晶形に自然に發達して行くのである（註7参照）。

榮養價のあるものは多くくさり易い。ということとは安定でないこと、f.e.の大きい化學的なストレスをもっていること、生物に利用されないでいるのは無理であることを示している。こゝに生物というエントロピーの小さい組織體をあたえたと、そのストレスを利用して自己を再生産しはじめる。その過程は山火事などと比較にならない複雑なもの

であるが、本質的な點は無生物界にもその片鱗がうかがわれるのである。このようにして生物が發展成長増殖すると、エントロピーの小さいものがふえる。この過程は外國の學者には珍しいと見えて、¹² negative entropy とつて話題にしているが、その正體はざつとこんなものである（註8参照）。これが一見不思議に見えるのは、『形あるものは崩る』というエントロピーの法則、即ち全體について行わるべき熱力學の第二法則を部分についても行われるかのよう¹¹に機械的にあてはめているからで、惡くいうと阿呆の一つ覺えになる。

エントロピーは前にものべた複雑な系内の相互關係、分子等の相互配置の形相に關する量である。熱運動を外からゆすぶつていゝように考えると、生起確率の少い無理な形態はゆり崩されて、（エネルギーは同じとして）これ以上崩れようのない形態におちつこうとする。これが平衡狀態で、全體的に見るとそういう傾向に動くというのが第二法則であるが、部分局部を見ると話は當然違つてくるのである（註7参照）。

エネルギーは不滅であるが、f.e.は消耗されるといつたが、それは利用できない形になるからである。熱力學的な系では、『エネルギー的な無理』と『形相の無理』とがからみあつていて、形相の無理が解消すると、エネルギーはあつてもそれはそのまゝでは變化をおこすことができなくなる。これが平衡狀態で、f.e.はこのとき極小になる（但し等溫變化）。『生物は生物自身も含めた環境全體のf.e.減少過程にあらわれる特殊な現象である』といつたが、f.e.極小の平衡狀態ではもう生命は保てない。幸にして世界は日光による植物の同化作用で、一方では平衡狀態に向う過程は他方では不斷に破られ、f.e.を逆に大きくしようとしているので、これを利用して生命は當分は地球上に繁榮つづけられるわけである。しかしその利用によつて、f.e.は他方では不斷に利用できない形に消耗されて行くのである。このためにさ

きに化學的エネルギーのことを f.e. といつて、エネルギー自身と區別したのである。熱力學的にストレスのある状態は火薬にしても、山火事のおこる森にしても、木造家屋にしても、過飽和蒸氣にしても、榮養物にしても、活力のあるものはみな大きい f.e. をもっているわけである。物理學や化學ではこの『f.e. が等溫變化では減少する』という（全系に對する）第二法則の順調な適用が普通見られるが、生物ではその『逆行』のように見える局部現象が支配的に見られるので、『第二法則の公式の一つ覺え』で固まると、物理學者はその領域外でとまどいはじめるのである（註7、12 參照）。

11 一橋論叢24年3月、自然現象と合目的性、參照。

12 E. Schrödinger, What is Life (1948), L. Brillouin, 生命、熱力學とサイバネティクス（譯）科學第20卷第5號、近頃はこれに negentropy などという略稱も出てくる。

四 Information と Negative entropy 培養基は大きい f.e. 即ち養分をもっているが滅菌しておくとき安定である。これに菌種をあたえるのは化學的には入れ知恵でもしたような現象で、培養基中の物質はある特殊な物質や配列をつくることを知らないのが、菌種をあたえられたことによつて、ある形態をとりはじめるとそれが他の部分に入れ知恵して同様の形態をとらせるといつたような具合に繁殖はじめる。それで外國の學者は negative entropy が information（入れ知恵）によつてつくり出されたといっている。そんなことをいうと連鎖反應でも、過飽和蒸氣の凝結でも一種の入れ知恵と考えられ、逆に見ると入れ知恵というのは、エントロピーの小さい状態がエントロピーの小さいものを相互誘導（p. 106 參照）でつくり出す、例の「奇が奇を生む現象」の一種といえないでもない。

今こゝに微妙な形の分子集合體があるとする。これを假にバラ／＼にして各分子や原子に勝手な熱運動をさせなが

ら、自然に再びこの形にまとまるのをまつていると、途方もなく長い時間がかかるにちがいない。そういう形態のエントロピーは小さく、形の崩れた状態とのエントロピーの差が『活性化エントロピー』にあたるわけである(註6参照)。或は形の無理のないありふれた集合状態を標準にとると、微妙な形の状態は負の大きいエントロピーをもつことになる。これが negative entropy の正體で、こういう形のものが熱運動で偶然にまとまるまでの時間は、ざつと見てこの活性化エントロピーの指數函數に逆比例する。この時間が長いということは、その自然的な發生確率が小さく、そういう集合の生ずる反應速度が小さいということである。

しかし『奇が奇をつくり出す過程』を考えると、既に(程度は低くても)下地となる奇形が存在するので、何もない熱力學的にありふれた形態の中から熱運動で偶然奇を極めたものがとび出す確率より餘程¹⁴大きいものになる。雪の華などもこういう過程でできあがるので、この過程を私は相互誘導(相互誘導¹⁵)とよんでいるのである。これは一見入れ智慧のように見える。所で發生確率からいうと非常に小さいものができてしまえば、微妙な觸媒作用をもつていて、發展確率は大きいとすると、これにより『奇は發展する』もので、同時に今日のような生物にまでいたるのに随分長い時間かゝつたであろうことを考えるのである。今日の生物の複雑さの中に、無生物との隔然たる相違の中に、活性化エントロピーの指數函數である長い時間が反映されている。またこの隔然さが絶對的のものではなく、且定量的にその時間又はエントロピーできまると考えられるのである。

『奇が奇を生み、奇を極めて行く』綱渡りは不安定なようであるが、全體としては平衡状態と無理解消の過程にあるので、一度このみに踏みこんだものは逆戻りは許されない。こうして普通の考え方と逆行したきわどいみちを

行く過程が進むので、物理學の一つ覚えでは丸で手がつかなくなる(註12、13参照)。なお全世界では不平衡の解消の反面日光による植物の同化作用で逆行も行はれ、死の平衡状態は幸に實現されそうにない。

大きく達観すると、生物の成長、増殖、遺傳、崩壊など、所謂負エントロピーが自己増殖的に負エントロピーをつくり出し、長い眼でみるとその性質を保ちながらもエントロピーのもとと小さい微妙なものと動いていることを想像しないわけに行かない。しかしそれがどういう形で現實化されるかは、熱力學や分子統計論ではいえないことで、生物學の精密で且實證的な研究にまつより他はないのである。

13 N. Wiener, *Cybernetics* (1947). 又は L. Brillouin 論文(註12参照)。

14 分子統計論的にはいろいろの過程が一應考えられる。偶然とび出す過程もその中に含めてよいが、速度論的には、速度決定的な過程(rate determining process)が實現されるとしてよい。Becker und Döring, *Ann. d. Phys.* 24 (1935) 719
そして相互誘導で奇が奇をつくり出す過程がこれにあたるのである。

15 單細胞の受精卵から親ゆずりの形に發展するのもこういう過程かも知れない。

16 基礎科學18、19、小論、『生物物理學の進むみちについて』、参照、全位相空間からみると、きはめて局限された範圍にあたるが、このみちにふみこんでいる系は相當の速度で動いているのである。これが(ii)の反應である。

五、動力源として見た人類 人體は化學的f.e.を利用した動力源であるが、熱機關と同様に見るのは熱力學的に正しくない。更に生物としてみたこの動力源は、その動力を自己の生命の保全に使用する特色をもっている。さきに述べた(ii)の再生産も化學的な仕事で、その他に餌を求めて動く仕事もこの動力でなされる。動力を保つための動力で、その動力が保たれる限り動力を出さないわけに行かない。考えてみると人の一生たゞ死なないために働いて、力つきて

死んで行くもののである。

しかし熱力學的に見ると、生物界とその環境をも含めた地上全體の f.e. は、生物の活動で減少過程をとるのが自然法則で、その熱力學的な『不可逆過程』⁷を促進するために生物があらはれ、發達し、動力を發生し、その動力で成長、増殖など擴張再生産をしているわけで、何が何やら分らないがそれが自然の動きである。しかし人類の場合は人為的な動きがまざつて來て、單純な自然的な動きが修正されるもののように見える。

人間活動の特色の一つは、自分の肉體以外の自然物を消費物資をうるのに動員利用していることであろう。單なる消費生活の面では、さるでも木の實を利用してゐる。所で親ゆずりの道具しか使はないものには、道具の選擇の自由がないが、人類には適當な道具を選擇する（つくり出すことも含めて）自由と苦勞がある。だから知慧も發達するわけさというかも知れないが、親ゆずりの道具では勝手がきかないかわりに苦勞もいらぬ。苦勞しがいいもない。所が缺と何とかは使いようで切れる。自然物を動員する以上技術が必要になる。『法則性の意識的適用』か無意識的適用かは知らないが、多少とも相手を知り、人為的に法則に従つて動かなければならなくなる。これが第一におこる問題で、動物は何をしても自然でほろびるのも自然であろうが、人間は進化しただけ却つてさる知慧を出して不自然なことをしでかす危険をもつてゐる。或は人間は人為的に、巧妙にたちまはつて、やつと動物なみに自然に即し、人としてのつとめを全うしていることになるらしい。即ち第二におこる問題は、人間はこの自由のために、一步誤ると（他の動物や自然物とちがつて）やりそこなう危険な關頭⁸に追いこまれたということである。一つの進歩は幸福と共に不幸を二律背反的に伴つてくる。火を使い出すと消えたら困るし、自然力に對する人間の支配力がますます、新しい經濟

状態をひきおこし、その状態では今まで苦にならなかつた自然的條件が苦になりはじめる。犬を飼いはじめると、狂犬が苦になり、狂犬病の注射が発明されると、今度はその生産が間にあわないのが苦になる。この二つの問題がからみあつて、自然界にいけば人爲的に動き、必然的に不幸をもつくり出しつゝある特異な存在があらわれたので、(こういうのを人爲的というべきなのであろう、第二編参照)物理学から見ると人間は自らつくり出す不幸と闘いながら、『生命を保つだけに追はれている』存在である。文化などといつても、それがないと間接に、眞綿でくびをしめられるような結果となる。人間は文化を高め労働時間を節約して、文化をつくり出し、またゆとりがないと文化もつけないが、進歩は不幸を、また知慧はさる知慧を伴うことを考えると、人間は生きるということとせい一ぱいのである。それをさる原子科学者のさる知慧の結晶でおびやかされつゝある。

物理的にみると、人間や人間社會は生命保持の工場で、自然物はこゝで有用な形に加工されて行く。同じ葡萄糖の重合物でもセルロースの形になると、食物として價值がなく澱粉になると價值が出てくる。このような變形は物理や化學の法則に反して行われるのではないが、熱力學的にみると、全體のf.e.減少過程の中で發達し、その中に入りこんでいる人間という負エントロピーの存在のために、その動き方の一寸したちがいで、人間も含めた全自然界の動き、様相はかはつてくるのである。簡単な力學的運動には可能なみち(位相空間内の)はいくともありもある。山火事でも同様で、また分子の動きで、自然發火の確率を生じ、可能なみち(位相空間内の)はいくともありもある。山火事でも同様で、まして人間を含めた世界では、可能なみちの中で熱力學的に抵抗のなるべく少いみちがとられ、それが奇が奇を生む原理、又は第四法則として、發展を促したとみることはできまいか(註7、8参照)。即ち、あるみちに從つて動くと、こ

の生命保持工場は同じ動力で多くの物質が有用な形にはなる。有用とは動力保持（生命の再生産）の條件になつたもので、このような（位相空間内の）みちにそつて動く工場は榮え、自然の過程は自からそういう方向に動く。そのみちの岐れ目で（火薬庫の）活性化分子のように動くのが人間の意識活動ではあるまいか。意志の自由ということもあるが、不心得なものが不自然なことをすると自滅になるから、科學的には問題にならない。

今おちている棒をひらうとすると、手頃のものに行きあたる公算は小さい。また任意の棒を手に行きあたる状態を考えると、手頃の棒を手にした状態は其中でエントロピーの小さい状態といえる。そのかはりこれを使うと大きい機能が發揮される。更に棒を適當な長さに加工するとすると、それに人間の f.e. が動員される。すると後でこの棒が人間の f.e. を吸収して有用な仕事をする。故にこの長さや形の制限の中に過去に消費された f.e. がこもっている。故にこの制限は、熱力學的よりもつとこみいつた形で、f.e. をもっているといえる。f.e. というのは夫自身がエネルギーをもたなくても、その形態に加えられた制限により、他のもの（こゝでは人間も含める）との相關々係で、エネルギーを吸収して活動力を發揮する能力である。¹⁸つまり人間も含めた全地上界を熱力學的に見ると、棒の形が制限されていて、その空間的位置が適當な時機に人類の手中にあり、且それを使う人間が偶然的なでたら目な方法ではなく、法則になつた（技術的な）行動をするという状態は、エントロピーの小さい状態で、この状態で自然の熱力學的な過程は促進され有用なものをつくり出し、自己を保ち増殖し、空氣中の酸素をそれだけ澤山消費し、全世界の f.e. 消耗速度をはやめようとする。今もし、有用か否かはこの見地から判斷するべきで、『奇が奇をつくる原則』から技術の向上と生産力の發展がもたらされるとすると、萬事は物理的である。しかしこれだけで解決つくものでないことは、生物學によら

ずして生命の謎がほんとにとけるものではないのと同様である。

それはそれとして、はじめにのべた新陳代謝の表が、社會における現象と似ているのも無理がないわけはこれでもわかる。人間も自然の動きを自己再生産に有利な¹⁹みにちびく觸媒のようなものであるが、自然力の動員に道具その他を使い、且人間相互の協力關係が社會という形に進歩したために、生命を再生産（生命というのは、自己を保つために自己を消耗させる所に特色がある）する過程が他の動物より複雑化しているのにすぎない。どのように複雑化しているかは、社會科學や經濟學の問題となろう。しかし生物としての根本的な様相、生命保持の特色²⁰には變化はないはずである。

私はまた逆に生体内の代謝反應の速度の相關關係をしらべるために、經濟學の知識が是非とも必要になると考えている。からだ一つがもとでというが、我々の體組織で消耗と再生産とのバランスが調和を失すると健康が保てるはずがない。またこのバランスを數式化すると、經濟學に於けると同様の數式となるとしても不思議はない。これから、化學的物理的にははかり得ない（はかるうとすると生命をそこなうから）生體のエントロピーや²¹f.e.や化學ポテンシャルなどを、生體における代謝反應の速度の相關々係から推測できる式が導かれるのである。

17 考古學から分るように、太古の人類は人體を動力源として石をとばし、槍をなげ、力學的に驚くべき技術を發揮している。それには又驚くべき熟練を要し、やかまし屋は技倆又は技能などというであろうが。

18 名刺一枚でも社會におけるエネルギーのうけわたしを圓滑にすると、Wiener のロヂックスによると information による negative entropy をもつたものである。

19 エネルギー的には農民の労働がお米をつくり出すのではなく、日光のエネルギーがつくり出す。しかし、熱力學的にみると、

人間のf.e.が活性化f.e.となり、日光を有利な形にかえていることになる。

20 野生の動物ではf.e.の支出が直接個體保持の動力となるが、人類では、これが等價關係で他人のf.e.支出による産物と交換され、まはりまはつて個體保持につかはれる。そしてこの方が進歩で、生物學的にみても環境も含めた全世界のf.e.の消耗過程は、註7でものべたように第四法則的に促進されるのであろう。

21 基礎科學19、小論又は物性論研究30の小論、新陳代謝反應を解析する試案參照。又は本學英文年報（印刷中）

第二編 意識的な活動と自然法則

六、自然と不自然 人類は下手に動くと不自然になるといつたが、不自然なことをして失敗するから不自然をさとり、無意識的にも法則に従い、人爲的に自然に動くようになるのであろう。ラヂオビーコンに従つて動いているようなもので、それから外れるから計器がはたらき、ジグザグながら外れずに行ける。こゝに單なる自然物を扱う自然科學には見られなかつた特色があらわれる。他の動物は勝手なまねをする自由も苦勞もないが、人類はさる智慧が發達したために、苦勞がつきまとい、またそのために靈長とも稱し、特別な『科學』の對象ともなるのであろう。

人は精神の活動を重視して、物質と全く切りはなして、時には絶對矛盾的などと形容する人もあるが、私は精神と物質の對立よりも、生命あるものとの對立の方が遙かに深刻なもののように思はれる。生命が地球上にあらはれてからの年月は數十億年である。人類が動物から分離してからの年月は一〇〇萬年そこそこであらう。この年月は現在の複雑な段階に達するまでに要した年月であり、反應速度論的にはこの年月と複雑さのエントロピーと關係

生物物理學より見た自然法則とその限界

する。このエントロピーまたは年月が假に對立の深酷さを物語るものとする、一方は他の數千倍になる。生命といふのはそれほど微妙な不可思議な存在である。

はじめの話題に戻つて、精神活動の自由とか主體性とかを考えるために、腰をおちつけて物理現象のあるものを反省してみよう。今香水のふたとつたとする。においの分子が擴散する模様を考えると、空氣の分子に衝突し右往左往し、ブラウン運動を行いながら、長い眼でみると室内一面に擴がつて行く。別にひろげる力^{c.p.}の場はないのに統計的にひろがつて行く。故に私は『擴散の場』という一種の假想的な力^{c.p.}の場を考え、ランデューバンの式と組合せ、更に結晶『成長の場』などと綜合して『化學ポテンシヤル^{c.p.}の場』とよんでいる。化學反應のおこる所、擴散のおこる所、代謝反應のおこる所、生體の内といわず外といわず、熱力學的にものが動き、變化する所に現實の場^{c.p.}の如く私は考えている（位相空間の場であつてもよい）。所が短かい時間²³をとつてみると分子運動は全く偶然であり、右往左往全く自由である（microscopic reversibility もこれと關係してゐる）。マルコフの鎖のように、過去の衝突や經歷は完全に忘れ、その刹那々々で動いている。この短い時間を緩和時間のように見ると、これより短かい觀察に對しては運動は自由で、これより長い觀察に對しては必然性がポツカリとあらはれる。緩和時間より短い觀察と、長い眼でみるとときで、話が單純にはつながらない。こゝから、可逆的な力學から飄箏から胸が出るように不可逆的な熱力學が出てくる。徹底した經驗論者や實證的な生物學者が、現實の觀察から、c.p.の場のようなものは認められないといはれると一言もない。しかし觀察時間の短いときと長いときとで簡單につながるものなら、分子統計論の長年の苦心はいらなかつたわけである。

統計的なゆらぎによる現象にはブラウン運動の他に、亂流とか、脈動とか、緩和振動とか不規則性と規則性の組合さつたいろいろの現象がある。そして熱力學的な無理の解消過程も時間の指數函數に逆比例する緩和現象や『緩和時間數個の組合せ』といった單調なものではなく、社會に於けると同様すつたもんだの波瀾をきはめることがある。これは、熱力學的なストレス、或は『*c.p.*の場』に對して、抵抗が變化速度に應じて變化するからで、土砂を含んだ水の流れなどにも脈動がみられる。

これを見てみると、自然力の角つきあいという感じがする。一方では奇が奇を生みながら、隘路抵抗を減らすむきに組織體を發展させるかと思うと、同じく分子運動論的な過程は、盲目的にこれを崩して混沌えと誘ひこもうとする。雪の華の成長ですらこういう波瀾の結果で、自然界の本性はいろいろの傾向が偶然的にはりあつて、できては崩れ、わきかえりながら、長い眼で見ると何らかの場にひきずられ、方向づけられて動いているので、生體もその例外ではない。自然法則というと、一筋の線路で、『自然に』というと、それにそつて一歩も外れられないというような感じをもつてゐる人が案外に多いのではあるまいか。分子統計的な世界は短見者的な觀察をすると一歩先は見えない。²⁵機械的に辿ろうとすると鎖は分子的混沌の中に姿をけすのである。しかも他方には長い眼でみると必然性が出てくる。物理學者はどちらかというと短見者的な觀察を本職とするから、社會科學者は長い眼で世の中を見て頂きたい。

22 人間でもでたらめと勝手とはちがう。習慣、本能、經歷などにしばられて動きながらも、人間はある程度の主體性で自己運動もするという意味である。

23 局所平衡の考えられる程度の時間、それより長いと状態は變化し、ちがつた局所平衡が考えられる。

生物物理學より見た自然法則とその限界

24 Van der Pol のとなえたもの、例えば Harteg, Mechanical Oscillations 参照。

25 動物は長い眼で見ると自然に順應するが人間はこのときさる知慧を出す危険がある。

七 技術について

例えば棒をテコとして使うとき、その大きい力は自然が出してくれる。即ち支點の所で反作用として力を出して加勢してくれるのである。動滑車にしても同様で、こちらの扱い方さえ法則に適つていると、自然は助力してくれる。しかし偶然、扉の蝶番の所に指をはさまれるとテコの原理でつぶされてしまう。テコの原理もはじめは偶然に、やがて意識的とまで行かなくても、人爲的に使われはじめたのであろう。そのうちテコとか擢とかという特殊性が蒸發し立ち去つて、共通性が骨組のように浮びあがり、知らず知らず抽象化が行われる。こういうことを論ずる資格は物理學者にはないようであるが、科學的認識を自ら進め、また他人の腦裏に培養しようと努めている關係上、多少の發言權はあるかも知れない。この骨組をやがて意識的に求めはじめると、無意的な蒸發は意識的な捨象となり、抽象力という思考活動がはじまる。實はあとで八でこの過程に少々熱力學的な托宣を加えたいのである。

人類を含めて生物は、自然の法則を辿つてゐる。たゞ當面の自由にまかされた人類は、人爲的に生きて行くみちをえらぶので、人爲的に法則を辿り、また辿りそこない出したので、判斷ということが、生物活動の必然的結果としても、あらはれないわけに行かない。そこで自然物の一つとして自然の中で動きながら、何かそれに異をたて、ゴテつきながら順應する妙な動物があらわれたらしい。そして自分のみちをよりわけて行く技術があらわれる。

試験の問題を出すときも時間を考えてむつかしさをきめる。智慧が出るのには時間が必要である。技術の進歩をみても、その進歩で生じた時間のゆとりを知慧の振出にむけて、いるように見える。そして技術が進むと、時間もますますし、

他方には智慧も高級になるから、簡単な工夫ぐらいでは間に合わない。そこで組織化された物理学も必要になり、数学や哲学もあらわれる。工作機械が『機械のための機械』なら、『知識のための知識』があつてもよいわけで、工作機械が消費物資を生産しないといつてヒューマニズムに反すると批難する人はいない。人間は文化を高め価値を創造する自由があるようであるが長い眼でみると、それも生活のためにつくり出しているので、結局眞綿で首をしめられているようなものではあるまいか。

こう考えると、技術は過去の f.e. の支出、即ち労働時間の蓄積されたもので、それが體力とか鍛練とか内臓や筋肉系統ではなく（からだ一つも資本になるが）、知識とか熟練とか主として神経系統に貯金されたものである。技術には年・期ともとがかけてあり、また藝は身を助けるもとでもなる。清洲の城を修理した秀吉のうでは悪くいえば労働強化のさる智慧で、本来技術というのは、自然力を使いこなすための神経系統や精神的な訓練にかけられたものとや年期で、それが主として生産活動の無形の資本となつているものである。

八 自然法則と思考の法則 二〇の扉ではよく整理された質問が大切で、でたらめにやつていては、二〇やそこらではあたらない。でたらめと整理された程度の差がエントロピーであらわされたとすると、あたる迄の回数の平均値は、このエントロピーの指數函數か何かになつていてもよさそうである。

この様式は實は、自然認識の姿をあらわしている。考えを整理して自然にぶつかり、諾否を聞いてはねりなおす (feed back させる) のが實驗的方式である。この方式は偵察活動とも似ている。威力偵察となると相當の作戦になるが、それにしても兵力は少く、可成自由に下級指揮官の自由裁量にまかされる。決戦になると下級者の自由は少く、

兵力は量的には多いが、質的には極めて制限された配置をとる。つまり偵察は（電氣の言葉でいうとフィールド・バックされて）negative entropy をもたらし、それによつて兵力の配置が制限される。シュリーフェンに比べてモルトケは十分な negentropy が展開できなかったことになる。知行合一というが、知を偵察活動とすると行が總攻撃にあたるのかも知れない。我々の生活も、學問も自然や環境に對する挑戦でただ運用する兵力の差のようにも考えられる。故に知というものはとびこんでくるのではなく、負エントロピーをつくり出す威力偵察のようなものである。生命の特色はその自律性にある。さきにのべた(i)(ii)(iii)の組合せ反應で生命を再生産しながら自律的に動きながら、それに外界が影響し反映してくるのである。現在の條件だけで動くのではなく、何十億年という歴史がそのエントロピーに反映され、この過去が自律性となつて生命の動きを支配する。精神の活動もその延長と見られる。知的活動はエントロピーの方でいうと制限のきびしい行動であり、この negentropy が更に negentropy を誘導して自律的（主體的）のびて行くのであるが、そのとき不斷に外界にはたきかけ、その諸否によつて更に微妙なものに自己を再編成している²⁶ので、西洋の學者のいうように、入れ智慧が負のエントロピーをもたらずのではなく、威力偵察がこれをつくり出しているのである。

問題はこの再編成にある。例えば音聲や音感を味うのは具體的な波動によるが、これを調和解析すると、スペクトルに分解される。音質の改善に具體的な複雑な波形ととりくむより、成分を一つかえると、それが全體に複雑な變化を組織的にあたえる。數學的には函數空間での一種の坐標變換になるが、質問や知識の整理はやはり一種の坐標變換で、これをうまくやると、知能検査の○や×とか、二十の扉の諾否だけで、複雑な information が得られるのであ

る。問題はこの再編成にある。

我々の経験は利害にからまれ、立場に制約され、複雑な姿をしている。物理学ではこれを利害や立場によらない自然系列ともいふべきものに坐標變換をしようとしている。無意識の中にも、遠い近い、長い短いという感情が洗い流されて距離とか空間という骨組が浮び上る。更に進むと意識的にこの骨組とか坐標軸を浮びあがらせ、利害系列より自然系列へと變換を行つて、再編成しているようである。

このような再編成の分析など私にはできないが、基礎科學18に大江精三氏が『末綱博士の數理哲學の指し示すもの』として述べていられるものがはからずも一門外漢の眼にとまつた。その中に『自然の中に育つて來た人間理性の考えた數學的法則が自然の感覺的事實にすぐあてはまるのに何の不思議もない』という言葉がある。理性の發達も心許ない太古に言葉があらわれ、具體的な經驗が自然に抽象化され概念が構成されて行つたこと、人類が無意識にも人為的に法則に従つて動き、自然の關連を辿つてゐる中に、たび重る中に、利害や經驗の末梢的なものが洗い流され、科學的認識に再編されて行つたことが想い出されるのである。私は西田哲學も末綱博士の學說も不案内で、何が行爲的直観かよく分らないが、結局威力偵察や總攻撃をくりかえす間に、これをフィード・バックさせて敵狀に對する知識をつくりあげるのであらう。判斷を誤れば破れ、誤らなければそれが敵の實情である。

我々の脳味噌は自律的な點でも工場に似ている。工場は製品をうり出し反應をみては世の中の實情にあわせようとしている。故につくり出される製品に實情が反映される。脳味噌は物質ではないが負のエントロピーをつくり出している。そして製品がこの工場の經濟を保つように、頭は生命を保つためにはたらいっている。『工場のための工場』な

生物物理学より見た自然法則とその限界

ではないが、夫自身の歴史と自律性がある。この工場の執務規律を論理とすると、實情にあわせて規律を適用し、或は融通つけて適用するのが理性であろう。人間も自然物の一つかも知れないが、百萬年の歴史は新田氏と足利氏のよりに四つ足や自然物に對して精神活動を特色あるものにしてしまつたに違いない。人間も自然法則の中で動いているが、その知識をつくり出して行く過程と法則とは單純な自然物の動きやその法則とはものがちがつてしまつたのである。例えば量より質えの飛躍といつて、自然界ではそれ／＼の領域で、特有の法則に従つて自からそ／＼なつて行くので、一般に『量は質にかわるべし』という物理法則はない。所がこれに應じて物理學者の脳味噌が動いて行くとき、量や質の規定にしばられてつつかえることがあるから、また打通してやる法則も必要になる。自然自身にはそんなおせつかいはいらぬ。今迄物理學者は工場の規律や従業員を顧みず酷使して知識の生産にあせつていたが、工場の健全な發展がないとやはり眞の進歩はない。平たくいつても知識と見識は車の兩輪である、見識、つまりは人間をつくる學問、負エントロピーの現實の發展をはかる學問²⁸が益々大切になる。『自然を追求する學問』と『追求する人や、脳味噌の動きを追かけて研究する學問』との關係が興味深いのは自然科學だけに限つたことではない、すべての學問の反省すべき大切なことであろう。

26 精神活動以外の生物活動も、進化もやはりこの形式をとつているのである。また最近問題の feed back system が生物と關連があつても不思議はない註13 参照。

27 再編したものを再び利害關係に加えながら自然系列に feed back させる。なお硬度、もろさなど實用上大切な量であるが、利害系列のもので、物理的正體がいまいで、自然系列の量としては資格が十分でない。

28 数理哲學や山田教授の記號論理學、Wiener の Cybernetics もこの方向の有力な動きになるう。この動きと切りはなされ
て、辯證法などふりまはしても、それは他愛のないねごとにはすぎない。

結論 『心』に關する問題はこれで解決したか？ 今日の理論物理學は一方ではこういう問題を立ち入るべき限界
外であると規定しながら、他方にはこれにもふれなければおさまらなくなっている。その昔心理學を精神物理學とよ
んだ伯父のことを子供の囁聞かされたが、何かこの方面に大きい發展がおこる前夜のような氣がするのである。心は
どこまでも心である。しかし、そうだからといって心の動きを自然法則と全く切りはなして、桃源の境にいつまでも
たてこもつていられるものではないようである。