

自然界における力

——その分類と総合——

中川 益夫・高橋 初乃

(まえがき)

自然界に存在する力、並びに力に関連した概念・用語というものは、ずいぶん数多くある。本稿では、まず、これらもろもろの力を分類し、整理してみる。その上で、典型的ないくつかの力に対して、わかり易いイメージを付与ないし補助することによって、力の概念のもつより深い意味の把握に役立てることが出来るのではないかと考えた。

物理学で使われる種々の用語のうち、特に今回は力に関連したものに限って、上述の試みを実施してみようと考えた。具体的には、本学における一般教育等物理の授業経験(教育学部における講義と実験、商業短期大学部における講義)などから、毎回の授業でその都度行っている「わかりやすい解説への工夫・配慮」をここに集約して、一般化し、総合化してみようと思うのである。

その際、自然界の累層構造という観点が大へん示唆に富み、総合化(総合的理解)にとって極めて有益であることが明らかにされる。

物理学におけるバックボーンとでも言うべき力の概念が、後段一般教育の課程で、より深く把握でき、立体的・総合的に身につけることができるならば、力学はもとより物理学全体、ひいては世界観、もののみかた考え方にも役立つのではないかと期待される。

そうは言っても、本小稿は、ささやかな試論の域を出ないので、掘り下げの足りない点、また、首尾一貫しない面も多々あることと思われるので、多くの関心ある方々の、積極的な御批判、御助言をたまわり、これを契機として、いっそう発展・展開させていきたい考えである。

§1. 自然界における種々の力

まずはじめに、自然界にどのような力があるかを主として物理・化学を中心にしてではあるが、一瞥^{いちべつ}してみたいと思う。それには、例えば、岩波『理化学辞典』¹⁾に掲載されている力と力に関連する用語を列举してみるのが網羅的であろう。

番号と英語名は参考までに付したが、あとの整理のために役立つ筈である。

- 1 圧力 pressure
- 2 イオン化エネルギー ionization energy
- 3 イオン結合 ionic bond
- 4 1電子結合 one-electron bond
- 5 引力 attraction, attractive force
- 6 v-A 相互作用 v-A interaction
- 7 s-s 結合 s-s bond
- 8 s-d 相互作用 s-d interaction
- 9 エネルギー energy
- 10 L-S 結合 L-S coupling
- 11 遠隔作用 action at a distance
- 12 遠心力 centrifugal force
- 13 応力 stress
- 14 重さ weight
- 15 音圧 acoustic pressure
- 16 解像力 resolving power
- 17 外力 external force
- 18 化学結合 chemical bond
- 19 化学親和力 chemical affinity
- 20 核力 nuclear force
- 21 慣性力 inertial force

- 22 気圧 atmospheric pressure
- 23 起磁力 magnetomotive force
- 24 起潮力 tide-generating force
- 25 起電力 electromotive force
- 26 逆起電力 back electromotive force
- 27 凝集 aggregation, cohesion
- 28 凝集エネルギー cohesive energy
- 29 鏡像力 image force
- 30 共有結合 covalent bond
- 31 許容応力 allowable stress
- 32 近接作用 action through medium
- 33 金属結合 metallic bond
- 34 偶力 couple of forces
- 35 クーロン力 Coulomb's force
- 36 撃力 impulsive force
- 37 結合エネルギー bond energy
- 38 原子エネルギー atomic energy
- 39 原子核の結合エネルギー nuclear binding energy
- 40 原子力 atomic power
- 41 光圧 light pressure
- 42 交換相互作用 exchange interaction
- 43 交換力 exchange force
- 44 公称応力 nominal stress
- 45 向心力 centripetal force
- 46 抗張力 = 引張り強さ
- 47 合力 resultant force
- 48 コリオリ力 Coriolis force
- 49 作用 action
- 50 3重結合 triple bond

- 51 3 中心結合 three-center bond
- 52 3 電子結合 three-electron bond
- 53 残留応力 residual stress
- 54 残留相互作用 residual interaction
- 55 jj 結合 jj coupling
- 56 仕事率 = パワー
- 57 磁気 magnetism
- 58 重力 gravity
- 59 出力 output, output power
- 60 真応力 actual stress
- 61 浸透圧 osmotic pressure
- 62 水素結合 hydrogen bond
- 63 スピン-軌道相互作用 spin-orbit interaction
- 64 ずれ応力 shearing stress (= 剪断応力)
- 65 静圧 static pressure
- 66 静電結合 electrostatic coupling
- 67 斥力 repulsive force
- 68 接線応力 tangential stress
- 69 総圧 total pressure
- 70 双極子相互作用 dipole-dipole interaction
- 71 束縛力 constraining force
- 72 素粒子の相互作用 interaction of elementary particles
- 73 体積力 volume force, body force
- 74 耐力 proof stress
- 75 短距離力 short-range force
- 76 弾性 (応力) elasticity
- 77 力 force
- 78 中間結合 intermediate coupling
- 79 中心力 central force

- 80 長距離力 long-range force
- 81 超交換相互作用 superexchange interaction
- 82 超重力 supergravity
- 83 張力 tension
- 84 対相関力 pairing force
- 85 強い相互作用 strong interaction
- 86 δ -結合 δ -bond
- 87 電荷移動力 charge transfer force
- 88 電気化学親和力 electrochemical affinity
- 89 電気力 electric force
- 90 電磁気力 electromagnetic force
- 91 電子-格子相互作用 electron-lattice interaction
- 92 電子親和力 electron affinity
- 93 電磁相互作用 electromagnetic interaction
- 94 テンソル力 tensor force
- 95 電池の起電力 electromotive force of cell
- 96 電流の磁気作用 magnetic action of current
- 97 電力 electric power
- 98 動圧 dynamic pressure
- 99 2重結合 double bond
- 100 2重交換相互作用 double exchange interaction
- 101 入力 input
- 102 熱応力 thermal stress
- 103 熱起電力 thermoelectromotive force
- 104 場 field
- 105 パイエルス力 Peierls force
- 106 配置間相互作用 configuration interaction
- 107 破壊応力 breaking stress
- 108 馬力 horse power

- 109 反作用 reaction
- 110 反対称交換相互作用 antisymmetric exchange interaction
- 111 万有引力 universal gravitation
- 112 ひずみ strain, deformation
- 113 引張り強さ tensile strength
- 114 標準重力 normal gravity
- 115 表面圧 surface pressure
- 116 表面張力 surface tension
- 117 ファン・デル・ワールス力 van der Waals force
- 118 風力(階級) wind-force
- 119 フェルミ型相互作用 Fermi-type interaction
- 120 浮力 buoyancy
- 121 分圧 partial pressure
- 122 分散力 dispersion force
- 123 分子間力 intermolecular force
- 124 分力 component of force
- 125 ヘルツの接触圧力 Hertz's contact pressure
- 126 法線応力 normal stress
- 127 保磁力 coercive force
- 128 補力 intensification
- 129 マクスウェルの応力 Maxwell stress
- 130 無効電力 reactive power
- 131 面積力 surface force
- 132 誘導起電力 induced electromotive force
- 133 有能電力 available power
- 134 湯川型相互作用 Yukawa interaction
- 135 陽子親和力 proton affinity
- 136 揚力 lift
- 137 弱い相互作用 weak interaction

- 138 力積 impulse
- 139 力線 line of force
- 140 流動応力 flow stress
- 141 量子重力 quantum gravity
- 142 臨界剪断応力 critical shear stress
- 143 臨界表面張力 critical surface tension
- 144 レノルズ応力 Reynolds stress
- 145 ローレンツ力 Lorentz force

以上、145 項目の用語の中には、力と力に関係する用語が混在していることはお気付きの通りのことと思うが、力に関係する用語の取舍選択には多少のあいまいさが入り込む。この点の吟味は次の節で検討する。尚、力に関係するとはいつても、「力学」「統計力学」「量子力学」など学問に関する用語の列挙は省略した。

同様の列挙を、他の辞典、例えば培風館『物理学辞典』²⁾で行ったとすると、合計で約 180 項目にのぼる。かなり専門的な用語も入ってきている上、言い換え(別称)も丁寧に見出しに挙げられているため、基本的な術語については、両者にそれほど大きくないちがいは見受けられない。

以上の理由から、ひとまず、より標準的な岩波『理化学辞典』の 145 項目にとどめることにして、次にこれらを分類・整理してみようと思う。

§2. 「力」の分類と整理

文科系も含めた広い分野の読者のために、分類に入る前に、まず、力というもの、どのように定義されているかをみてみよう。岩波『広辞苑』³⁾がわかりやすく、かつ総括的である。

- ① 自らの体や他の物を動かし得る、筋肉の働き strength
- ② 気力、精神力、根気、精根 vitality
- ③ はたらき、能力、力量、実力 ability
- ④ ほねおり、労力
- ⑤ たよりとするもの、よりどころ

- ⑥ しるし, ききめ, おかげ, 効能 effect
- ⑦ 権力, 腕力, 暴力 power
- ⑧ (理) 静止している物体に運動を起こし, また, 動いている物体の速度を変え, もしくは運動を止めようとする作用。単位はニュートン。電力・馬力など, エネルギーまたは仕事率 (動力, 工率) の意に用いることもある
force

上記引用のうち, 古典などからの引用が例文として記載されている部分は省略した。また英語名は, 講談社『日本語大辞典』⁴⁾との対応から, 筆者が付け加えたことをことわっておく。

参考までに, 九善『科学大辞典』⁵⁾の記述もここに示しておこう。

「もともとは筋肉の作用に結びついた概念であったが, 物理学では物体の運動状態を変化させる作用をいう。厳密にはニュートンの運動方程式 (力) = (質量) × (加速度) によって定義される。」

上の二つを合わせみたとき, 岩波『広辞苑』は, 歴史的 (経験的), 人文学的 (文学的), 社会学的, 並びに理学的 (物理的) 定義を包括していて, 簡潔かつレベルの高い定義 (解説) を行っていると, 筆者には思われる。

さて, 以上の前置きをした上で, 145 項目を分類してみよう。次の七つに別けられる。

- 力 I. 体積力
- II. 面積力
- III. 結合力ないし親和力
- IV. 相互作用の意味での力
- V. 見かけの力
- VI. 総称的 (抽象的総合的) な力
- VII. パワーないしエネルギーの意味で使われているもの, その他

以下に順次解説を加えてゆこう。

体積力

物体の表面や特定の点にだけ作用するのではなく, 物体を構成している実質

の全体に働く力のことで、重力やクーロン力などがその例である。普通、授業では、重力は物体の重心に働く1つの力のように扱っているが、本来は物体全体に働いている体積力である。物体の微小部分について考えれば、密度などを一定とみなせるので、全体としての力の大きさは体積に比例することになる。面積に比例する圧力など（面積力）とは区別される。

体積力のうち、主要なものは重力と電磁気力で、145項目のうち該当するものを列記すると次のようになる。

〈重力〉 重さ、起潮力（潮汐力）、重力、超重力、万有引力、標準重力、浮力、揚力、量子重力

〈電磁気力〉 鏡像力、クーロン力、電気力、電磁気力、ローレンツ力

電気力に対応して磁気力という用語は存在するのだが、見出し語としては項目にない。また、起電力、逆起電力、電池の起電力、誘導起電力、熱起電力（磁気に関しては、起磁力、他に保磁力など）等は、電流を流す能力、あるいは電荷を動かす力という意味での力である。従って、むしろ電圧（または電圧に相当するもの）を実質的には指している。将来実質または実体に合わせるように用語が整理される場合、このあたりが整理の対象となることが予想される。

面積力

摩擦力、粘性力、弾性応力などが典型例だが、微視的には体積力・面積力の区別はなくて、面を隔てて作用しあう分子間力が短距離型のために面積力としてあらわれるにすぎない点、留意する必要がある。

多数の項目があるので、便宜上、圧力、応力、張力に三大別してみることにする。

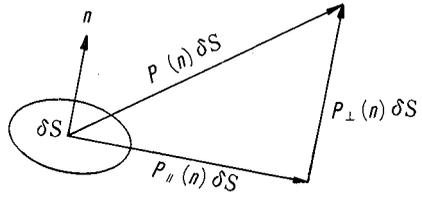
〈圧力〉 圧力、音圧、気圧、光圧、浸透圧、静圧、総圧、動圧、表面圧、分圧

〈応力〉 応力、許容応力、残留応力、真応力、ずれ応力、接線応力、弾性応力、熱応力、破壊応力、法線応力、マクスウェルの応力、流動応力、臨界剪断応力、レノルズ応力

〈張力〉 抗張力、張力、引張り強さ、表面張力、臨界表面張力

応力は、文献2)によると

「物体の表面，または物体内部の任意の面を通して両側の部分が及ぼし合う力を面積力といい，単位面積力を応力（単位は $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ ）と定義する。一般に応力は考える面の向きにも依存し，したがって単位ベクトル \mathbf{n} を法線とする面要素 $\mathbf{n}\delta S$ に働く面積力は，応力を $\mathbf{P}(\mathbf{n})$ と書けば， $\delta\mathbf{F} = \mathbf{P}(\mathbf{n})\delta S$ である。ただし $\delta\mathbf{F}$ は反対側（うら）から \mathbf{n} が向いた側（おもて）に及ぼす力と約束する。これを第一図のように面に垂直な分力と平行な分力に分けると， $\mathbf{P}_\perp(\mathbf{n})$ を法線応力（または垂直応力）， $\mathbf{P}_\parallel(\mathbf{n})$ を接線応力（または，ずり応力，せん断応力）という。法線応力が面を押す場合は圧力（または圧縮応力），逆の場合は張力（または引張り応力）である……」



〔第一図〕 応力

この解説からでも，多数の術語が極めて明快に統一的に理解されるであろう。応力がキーワードであることが一目瞭然である。

結合力と親和力

次に，結合力ないし親和力に移ろう。結合には，英語で二つの使い分けがあり，2つの系 A と B の間に相互作用があるとき，A と B の間に結合（または結合力）があるといい，coupling が使われる。

あと一つは，化学結合とほぼ同じ意味で，分子のなかの特定の一対の原子の化学結合を問題にする場合，bond が使われる。

イオン結合（異極結合），共有結合（原子価結合，等極結合），金属結合，水素結合，およびファン・デル・ワールス（結合）力などは，化学結合の基本形の5つであって，固体の分類に使われる重要なものである。

<coupling> L-S 結合，J-J 結合，静電結合，中間結合

<bond> イオン結合，1電子結合，S-S 結合，化学結合，共有結合，金属結合，3重結合，3電子結合，水素結合， δ -結合，2重結合，ファン・デル・ワールス力

他方，古くから化学反応のときに物質間に働くと考えられてきた特別な力に，化学親和力というのがあり，はじめは反応に伴う発熱量に関係があるのではと

されたが、その後の熱力学の発展により、化学親和力の大きさは、化学反応が可逆的に進行するときを得られる最大仕事、すなわち定温定圧の条件ではギブスの自由エネルギー G の減少量、定温定積の条件ではヘルムホルツ自由エネルギー F の減少量で与えられることがわかった。

〈affinity〉 化学親和力、電気化学親和力、電子親和力、陽子親和力

相互作用

広い意味では2つまたはそれ以上の物体がお互いに力を及ぼし合うことに使われるが、特に分子以下の原子、原子核、素粒子などの粒子間の作用に対して使われることが多い。

〈マクロな相互作用〉 残留相互作用、電磁相互作用、電流の磁気作用

〈ミクロな相互作用〉 v - A 相互作用、 s - d 相互作用、交換相互作用、スピン-軌道相互作用、双極子相互作用、素粒子の相互作用、超交換相互作用、強い相互作用、電子格子相互作用、2重交換相互作用、配置間相互作用、反対称交換相互作用、フェルミ型相互作用、湯川型相互作用、弱い相互作用

〔第一表〕 自然界の基本的相互作用

相 互 作 用	強 さ	力 の 作 用 範 囲
重力 (万有引力) 相互作用	$\approx 10^{-39}$	無限大 ($1/r^2$ 法則)
電磁相互作用	$\approx 10^{-2}$	無限大 ($1/r^2$ 法則)
強い相互作用	1	短い ($\sim 10^{-15}\text{m}$)
弱い相互作用	$\approx 10^{-10}$	短い ($\sim 10^{-15}\text{m}$)

自然界の4つの基本的な相互作用（重力相互作用、電磁相互作用、強い相互作用、弱い相互作用）の統一的理解の試みについては、のち程ふたたび論ずる積もりである（第一表参照）。

見かけの力

遠心力：慣性系に対し一定の角速度で回転する座標系に現れる見かけの力のうち、静止物体にも運動物体にも同じようにはたらく力。回転軸のまわりの角速度を ω 、物体から回転軸に下した垂線の長さを r 、質量を m とすれ

ば、遠心力は垂線の方向で回転軸から遠ざかる向きをもち、大きさは mrv^2 である。

慣性力：慣性系に対して加速度運動する座標系に現れる見かけの力。質量 m に力 F が作用して加速度 a を生ずる場合に、 $-ma$ に相当する力をさし、慣性抵抗ともいう。運動方程式 $F = ma$ は、質点とともに並進運動する座標系では、 $F + (-ma) = 0$ に変わり、質点に作用する力 F と慣性力 $-ma$ とがつりあうとみなされる。

コリオリ力：回転座標系において運動物体にはたらく見かけの力の1つ。慣性系に対する座標系の角速度ベクトル ω が一定ならば、見かけの力は、遠心力とこの力 $2m\mathbf{v} \times \boldsymbol{\omega}$ とである。 m は物体の質量、 \mathbf{v} は回転座標系から見た物体の速度。(以上、3つとも、文献1)による)

ファインマンらは味のある大変ユニークな本を残しているが、そのうちの力学篇⁶⁾で、この見かけの力に関して面白い説明を加えている。以下は文献6)からの引用である。

「見かけの力について非常に大切なことは、それはいつも質量に比例するという点である；重力も質量に比例する。だから、**重力それ自身も見かけの力である**という可能性がある。重力というものは、単に我々が正当な座標系によっていないということから生ずるのだということはありませんか？ 結局のところ、物体が加速度を受けているとみるならば、質量に比例する力がいつも考えられる。例えば、人が地球に対し静止している箱に閉じこめられていると、自分の質量に比例した力によって、その箱の床におしつけられていることを感じる。しかし地球が全然ないとし、しかも箱が静止しているとすれば、その中の人は空中に浮かぶ。一方、地球が全然ないとして、何かをそれを加速度 g でひっぱっていると、箱の中の人は、物理学を考えて、重力と同じように、からだを床にひきつける見かけの力がはたらいていると思う。

アインシュタインの有名な仮説は⁷⁾ 加速度は重力と同じようなものを生じ、加速度による力（見かけの力）は、重力と区別がつかないというのである；一つの力が与えられたとき、どれだけの部分が重力で、どれだけの部分

が見かけの力であるということを知ることは不可能なのである。……」

ぐいぐい読者を引っばっていき迫力を感じさせるが、こういった授業の仕方が、筆者の言う後段一般教育、すなわち review education の具体的な例なのである。

それはさておき、次に抽象的というか、総合的というか、つまりは総称的な力に移ろう。

総称的な力

一部には以前に列記したものと重複するものもあるが、次のようなものである。

圧力、引力、遠心力、応力、外力、核力、偶力、交換力、向心力、合力、斥力、束縛力、体積力、短距離力、力、長距離力、テンソル力、内力、分散力、分力、面積力

他に力と関連した用語では、遠隔作用、抵抗、場、ひずみ、力線（電気力線、磁力線）などがある。

ここに掲げた場が、力と関係するのは、次の理由による。

「空間的に離れた粒子間にはたらく力は遠隔作用によるものではなく、粒子はまずその位置である物理的な場と相互作用して場の変動をひきおこし、その変動が光速度またはそれより遅い速度で伝搬し、相手の粒子の位置に達して相互作用をおこす。このような立場で構成された理論を場の理論という。自然界は物質粒子と場から構成されるとみられるが、場の量子論によれば、物質粒子もまた場とみなされるので、自然界は場の理論として一元化される。」（引用は文献1)による)

場の考えは、次節の自然界における力の統一に関係してくるので相互作用のところで後程再びとりあげることになるだろう。

パワーないしエネルギーの意味での力

力という文字がついているものの、本来の意味の力でないものが、(厳密であるべき)物理学用語の中に入っている。そのため一定の誤解ないし混乱をまねくことにもなり、その点、初学者や門外漢には解りにくい原因にもなっているように思われる。人類の知的発展の歴史、特に物理学だけが孤立単独で発展し

たわけではないという当然の事情の反映でもあるが、いつか、誰かが概念・意味の用語上での整理を行う時(があるとすれば)、真先にその対象となるのが以下の用語であろう。但し、英語では、一応既に区別は出来ているので、日本語が、非学術的用語を多く抱えているとされる代表例でもあると筆者は考えている。

〈パワーの意味〉 解像力, 原子力, 出力, 電力, (無効電力, 有効電力), 馬力。

〈エネルギーの意味〉 イオン化エネルギー, 凝集エネルギー, 結合エネルギー, 原子エネルギー, 原子核の結合エネルギー, 入力。

このうち、入力とは「機械, 装置, 物質など, 1つの系に外から供給されるエネルギーや信号をいう。一般の現象や測定を, 量 A の変化によって他の量 B が変化したものとみなして, A を入力, B を出力 (応答) とよぶことも多い」(文献1)による)ということは広く知れわたっているので問題ない。が, 同じ文献1)の中で, たとえば凝集 aggregation, cohesion の項をみると, 「分子やイオン, 原子などが集合する現象。集合した分子 (イオン, 原子) の間にはたらく力を凝集エネルギー*という」との記述があり, *印のついた凝集エネルギー cohesive energy の項をみると「凝集状態 (液体または固体) にある物質の原子を無限遠までひき離すのに要するエネルギー。凝集によるエネルギーの低下がおこる機構は, 分子間のファン・デル・ワールス力, イオン間のクーロン力, 価電子の共有による引力など, 物質により異なる。凝集エネルギーの大きさは, 機構によりひらきが大きい。たとえば, 固体アルゴン (ファン・デル・ワールス結合) で 7.74 J/mol, ケイ素 (共有結合) では 446 J/mol。」とあるから, 力と一旦は説明して, 結局はエネルギーなのである。

以上で, 冒頭にかかげた 145 項目の「力」を一部に重複はあるものの, 一応 7 種類に分類・整理することが出来た。この分類・整理が, どういう意味をもつか, 言い換えれば, 分類・整理の背後にあるもの = 法則を, 次に探ってみようと思う。

§3. 自然の累層構造と力

自然界における力については、既に種々の成書があり、さまざまな工夫をこらした解説がなされていて、それぞれに特色があり魅力がある。例えば、P. C. W デイビス著『自然界の力』⁹⁾などは、出版後既に 10 年以上たつが、複雑な数式を使わない解説書として、文科系の人達にも読みこなせるユニークな文献であるように思う。

しかし、その書の副題が示す通り、素粒子の世界における力をわかりやすく説明することに力点が置かれているので、冒頭に述べたような本稿の主旨とも異なるところがあり、従って本稿の独自性も既出の文献の存在によって失われていることはないであろう。

事実、筆者の一人は「科学の総合化に関する一試論」I⁹⁾ II¹⁰⁾ III¹¹⁾で一貫して追及してきたことを、具体的生産的な問題に適用してゆくことを約束していた。その中で物理学の中の諸分科の種類を説明するために、物質の存在形態(累層構造)、運動、相互作用、構造に分けて、質的に異なる各累層のレベルに応じたそれぞれの研究が必要であることを概観した。

本稿では、従来の試論を一步推し進めて、まず力学の分野に適用し、自然の累層構造と力との関係について検討してみることにしたい。

まず最初に、主要な結論を第二図に掲げる。縦方向(上下方向)に自然の累層構造を並べ、最下層のクォークから最上層の超銀河宇宙へ 11 の累層(strata, 階層ともいう)に分けた。この分け方は既にほぼ定着しているところである。

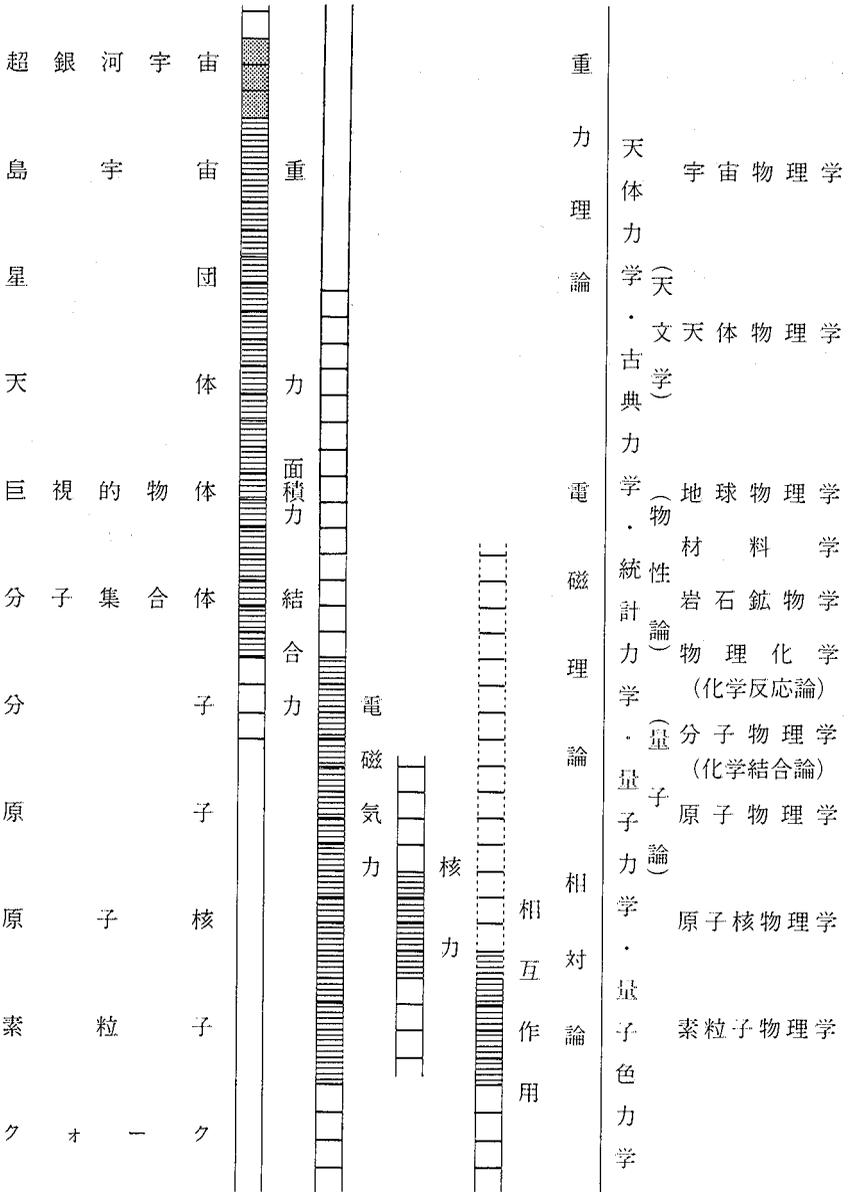
さて、この右側に、自然界における力を配置してみる。縦線でその力の支配する範囲を示してある。上下両端をぼかしてあるのは、累層のレベルが変わるにつれ、他の力の支配下に移行していく仕方が必ずしも截然としない面のあることを表現している。

図から、§2 で分類した体積力(重力と電磁気力)、面積力、結合力、核力並びに相互作用(力)が、複数の累層を貫いて支配している様子が一目で見とれる。すなわち、各々の力の支配する範囲、生物学でいうテリトリーのようなものがあることがわかる。

累層構造

自然界における力

力学物理学



〔第二図〕 自然の累層構造と力

重力は、質量のある物体が存在する限りすべて支配するのだが、質量が小さい下半分の累層では殆ど問題にならない位小さな力でしかない。これは第一表に示されていたこととも一致する。

電磁気力は、重力と同じ逆二乗則に従うが、こちらの方は距離の小さいことが効いてきて、むしろ上半分の累層にとっては主要な力ではない。重力と電磁気力が、自然の累層の上半分と下半分をそれぞれ二分して分担している観がある。

面積力は、主として巨視的物体と分子集合体の累層のあたりで支配的で、面を隔てて作用しあう分子間力（結合力）が短距離力のため面積力として作用することを考慮し、一応重力線上に置いた。

結合力は、分子集合体と分子の累層のレベルで効く。図では重力と電磁気力の両方に関与する力であることも表現している積もりである。

核力は原子核を中心に支配している力である。そして相互作用の方は、電磁気力並びに核力も含めた幅広い力を含んでいるため、用語の上で整理が出来れば、素粒子以下の累層に限定されて使用されるならば、図の上でも、もう少しすっきりしたものになることが期待される。

さて、詳細な点では異論があると思うが、図から、重力、電磁気力、核力、相互作用の4つが自然界の累層を分担的に支配している主要な力であるとの見方が成り立つ。

他方、§2でふれた通り、相互作用という用語は一般総合的な概念としても使われており、これには重力も核力も含まれている。この意味で、現在、自然界には4つの基本的な相互作用（重力相互作用、電磁相互作用、強い相互作用、弱い相互作用）が存在するというのが共通認識である。つまり、宇宙のすべての物理的・化学的諸現象は、すべてこの4種類の相互作用の現れであると理解できるというのである。

そうだとすると、第二図の中の「相互作用」を、適当に核力（強い相互作用）と電磁気力に分散して、残った狭義の相互作用（弱い相互作用）に限定して用いれば、第二図の内容と今日の物理学の到達点とは実質一致していることになる。しかも自然の累層構造との関連において理解できたことになるであろう。

第二図の中で相互作用の上部に点線で表現したのは、この辺の事情を反映させている。

さて、では、この4つの基本的相互作用は、更に整理して、2つに、或いは1つに統一できないのであろうか。現代物理学の最も重要な課題のひとつは、この4つの相互作用を統一して理解することであると言われている。

歴史的には長距離力（遠達力）という共通の性質がある重力と電磁気力とを統一して、幾何学的な理論にしようとする試みがなされてきたが、完成には到っていない。電磁気力と弱い相互作用を組み合わせた方がもっと自然であり、既にワインバーグとサラムらによって統一的に取扱うことが可能となっている（ワインバーグ—サラム模型）。この2つの相互作用をまとめて弱電相互作用といい、弱電相互作用と強い相互作用を統一的に取扱う試みを大統一理論と呼んでいる。これを検証する実験（陽子崩壊など）も進められているようだが、ここまでくると一般教育物理の範囲を越えることになりそうなので、それは別に論ずることにしたい。

ただ、本稿の末尾に『ファインマン物理学』の一節（文献⁶）の中の31～32頁）が極めて含蓄ある内容を含んでいるので、引用させていただき、結びとしたい。

「このように我々の前にはたくさんの粒子があり、それらが素材となって物質が構成されているようである。幸いなことには、それらの間の相互作用がそれぞれみな違うというわけではない。事実、粒子の間の相互作用は4種類に限られている。強い方からいえば、核力、電気力、 β 崩壊相互作用、万有引力である。光子はすべての帯電粒子と関係があって、その間の相互作用の強さには1/137という数字が出てくる。このカップリングの法則はくわしくわかっており、これがすなわち電磁量子力学である。万有引力はすべてのエネルギーと関係するが、そのカップリングは極端に弱く、電気のカップリングよりもずっと弱い。次にいわゆる弱崩壊——ベータ崩壊というのがあるが、それによって中性子が陽子と電子とニュートリノとに比較的ゆっくりと崩壊する。この法則は一部分わかっているだけである。いわゆる強い相互作用、中間子—重粒子相互作用は、このスケールで1という強さであるが、その法

則は全然わかっていない。もっとも、任意の反応においては重粒子の数は変化しないという規則くらいはいくつかわかっている。

今日、我々の物理学はこのようなおそるべき状態におかれているのである。要するにこういうことである。核の外のことについてはすっかりわかっていると思われる；核の中では量子力学が通用する——これまでのところ量子力学の諸原理はうまくいかないことはない。我々の知識は、相対論的時空間という舞台におかれている；ことによると引力はこの時空間に内在するものであるかも知れない。宇宙がどのように始まったのか、我々は知らない。空間や時間についての我々の考えが、非常に小さい距離に対しても正しいかどうか、それを正確にためす実験が行われたということもない。だから我々が知っているのは、そのような距離よりも大きいところでは我々の考えが正しいということだけなのである。つけくわえていうならば、このとき適用される規則は量子力学的原理であって、我々の知る限りでは、それは古くから知られている粒子にも、新しく知られた粒子にもよくあてはまる。原子核の中の力の起原から考えて新しい粒子が出てきたが、困ったことにはそれがたくさんあって、それらの間の相互関係を完全に理解することはできないのである。もっともそれらの間には驚くべき関係がいくつかあることはわかっている。かくて我々は、原子以下の粒子の微小の世界を理解するのにむかって手さぐりしながら徐々に進んでいるようである。しかし、どれだけ行ったらこの仕事が終わりになるのか、それは全くわからない。」

当初は、最近時々話題になっている「第5の力」についても述べる積もりであったが、他の機会にとりあげることにしたい。

文 献

- 1) 久保亮五, 長倉三郎, 井口洋夫, 江沢洋編集, 『理化学辞典』第4版(1987) 岩波書店
- 2) 物理学辞典編集委員会編『物理学辞典』(1984) 培風館
- 3) 新村出編『広辞苑』(1983) 岩波書店
- 4) 梅棹忠夫, 金田一春彦, 阪倉篤義, 日野原康明監修『日本語大辞典』(1989) 講談社
- 5) 国際科学振興財団編『科学大辞典』(1985) 丸善

- 6) ファインマン・レイトン・サンズ著 坪井忠二訳『ファインマン物理学 I, 力学』(1986) 岩波書店。178 頁より抜粋。
- 7) アインシュタインの等価原理を指す。すなわち、慣性質量(作用した力と得られた加速度との比)と重力質量(重さに比例)とが一致するという考えを手掛りとして、アインシュタインは相対性原理, 光速不変の原理に, この等価原理を付け加えて, 彼の一般相対性理論を作り上げていった。
マーチ著 木名瀬亘, 大槻義彦訳『詩人のための物理学』(1985) 講談社などがわかりやすい。
- 8) ディビス著 原康夫, 仲丸信行共訳『自然界の力』——素粒子の世界——(1981) 培風館
- 9) 中川益夫, 香川大学一般教育研究 第 32 号 (1987) 1 頁
- 10) 中川益夫, 同上, 第 33 号 (1988) 143 頁
- 11) 中川益夫 同上, 第 34 号 (1988) 49 頁