



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	明治期物理教科書における力の概念の取り扱い
Author(s)	大野, 栄三
Citation	教授学の探究, 15, 21-37
Issue Date	1998-03-05
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/13604
Type	departmental bulletin paper
File Information	15_p21-37.pdf



明治期物理教科書における力の概念の取り扱い

大 野 栄 三
(北海道大学教育学部)

1 はじめに

力学は19世紀に数理科学として完成した古典物理学の特質を学ぶ上で最適の分野である。と同時に、力学は現代物理学への橋梁として重要な役割を果たしている。しかし、物理教育上の重要な位置にある力学が、物理嫌いを生み出す一因となっていることも事実である。落体の運動を表現する数式を学び、運動エネルギーや位置エネルギーの計算方法を覚え、与えられた練習問題に解答できたとしても、生徒は「 $F=ma$ はわかった。けれども、 F は何だ。 m は何だ。 a は何だ。」という深刻な疑問を抱いたままである。

力学の学習が物理公式の利用法を暗記するだけに終わってしまう理由について、これまで様々に議論されてきたが、その根本的原因のひとつは、「 F は何か」という問いかけに対して解答を与えて来なかった教育内容にあるだろう。これまでの力学教育では、力がどのようにふるまうか、そして物体に力が作用した結果何が起きるのかは説明されてきたが、力そのものが何であるのかについては触れられてこなかったのである。現在の高等学校で使用している多くの教科書では、運動を表現するための手法——位置と時間、速度、加速度、そして、それらのベクトル表現等——を学習した後、運動法則 $F=ma$ が導入され、運動の変化を引き起こす原因として力が位置づけられる。その後、力の合成・分解や作用・反作用が説明される。そこでは日常経験として使用している力の概念が援用されており、力の機能、性質は議論されるが、力そのものが何であるのかについての分析的考察は行われない。

平成元年12月発行の高等学校学習指導要領解説⁽¹⁾には、物理IB中の「運動」のねらいが、「自然界における物体の運動について、運動の表し方と運動の法則、保存量としての運動量などを理解させること」であると記されている。その内容は「ア 力と運動」、「イ 運動量」、「ウ 運動に関する探求活動」の3つから構成されており、「ア 力と運動」は、さらに4つの項目「(ア) 力のつり合い」、「(イ) 運動の表し方」、「(ウ) 運動の法則」、「(エ) 落体の運動」にわかれる。「ここでは、運動の法則を中心に扱うが、その前段階として、力の諸性質や運動を数量的に表す方法を理解させる」という内容の取り扱いからわかるように、力そのものが何であるかよりも、その作用としての性質を学ぶことが重視されている。これでは、生徒が抱く本質的な疑問「 F は何か」は未解決のままである。

本論文では、明治期の公教育成立から教科書検定期にかけて出版された物理教科書、主に中等学校用物理教科書を対象にして、力の概念がいかに取り扱われていたかを考察する。本論文で参考にした物理教科書は表1に年代順にまとめられている。明治期の物理教科書を通して、我々は力学教育における教育内容の原初的な構成に接することができる。当時の科学教育の到達点や出版事情の制約から、明治期の物理教科書の記述や図が洗練されていないという印象を我々が受けることは否めない。しかしながら、現在の教科書では、むしろ文章や図という表現が洗練されてきた結果、力学教育の本質的問題が隠蔽されてしまったとも言える。明治期の

表 1. 本論文で引用した明治期物理教科書

年	書名	第 2 節 日常用語の力	第 3 節 素朴実在論	第 4 節 運動の原因	力学から始まる 教育内容構成
明 9	片山 淳吉 『物理階梯』	○			
明 11	小林 六郎 『物理小學』	△	○		
明 13	志賀 泰山 『小學物理問答』	△	○		
明 16	志賀 泰山 『小學物理書』	○			
明 18	林 守清 『小學物理小試』 住田 昇 『啓蒙物理書』 鮫島 晋 『小學物理教授本』	△	○ ○ ○	○ ○	
明 28	木村 駿吉 『新編物理學』	○		○	
明 30	木村 駿吉 『新編中物理學』		△	○	
明 34	本多 光太郎他 『新選物理學』 市川 林太郎 『物理學教科書』		× ×	○ ○	□ □
明 35	神戸 要次郎 『物理教科書』		×	○	□
明 43	本間 義次郎他 『普通教育 物理學教科書』 野田 貞 『物理學教科書』 今村 明垣 『物理學教科書』		× × ×	○ ○ ○	□ □ □

○はその物理教科書が引用された本論文の節、△は本論文では直接言及していないが、その節で述べた内容が教科書に記載されていることを示す。×は分子力にかかわる内容が力学教育の後で記載されている教科書である。教育内容構成が力学から始まっている物理教科書を右列に□で示した。

物理教科書を分析することによって、現在では隠蔽され掘みにくくなってしまった問題をとらえなおし、これからの力学教育の枠組みそのものを再検討することが本論文の目的である。⁹⁾

本論文の構成は以下のとおりである。次節では、まず明治期の物理教科書の中から、日常使用される力という言葉を用いて力学学習が開始されている例を紹介する。それらに見られる素朴な記述から、科学的概念としての力を取り扱うより進んだ段階への移行を第 3 節と第 4 節

で考察する。まず第3節では、明治期の物理教科書で展開されている力の実在論的取り扱いを分析する。つぎに第4節で、運動変化の原因として定義された力——力学理論の範囲内で定義されたようにみえる力——が教科書に登場することを論じる。第5節では、以上の考察をもとにして、明治期物理教科書の到達点と現在の高等学校における力学教育との関係を論じ、従来の力学教育の枠組みに囚われることなく、冒頭に述べた問題解決への道を探りたい。

2 日常用語としての力の援用

「電子—フォノン相互作用がどんなに弱くても、フェルミ面近傍の電子間に実効的な引力があると必ず束縛しあった電子の対を作ることになる」と教師が述べたとしよう。このとき、電子、フォノン、フェルミ面といった言葉を教師が何の説明もなしにいきなり使用したならば、生徒にとって上述の言明の意味を推し量ることはきわめて困難な作業になるだろう。しかし、「物体に力が働かないかぎり、また複数の力が働いていても、それらがつり合っているかぎり、物体の運動状態は変化しない」という類の言明については、生徒は普段使用する「あの人は力持ちだ」とか「愛の力」というような日常用語としての力を利用して、科学的に正しいかどうかは別として、ある意味をもった言明として受け止めることが可能である。

物理教育における力の概念の導入は、日常用語として使用される力という言葉の援用することから開始されると言っても大過ないであろう。人間は科学的世界で生きるよりはるか以前から、日常生活を営み、力という語を使用してきたのである。日常用語を使用して力学指導が行えるということには、少なくとも、訳の分からない言葉が並んでいる状況から始めなくてもよいという利点がある。しかし、その利点は、科学用語としての力を日常用語としての力からはっきりと区別して理解することへの障害にもなる。

現在の高等学校物理教科書では、その構成、記述が洗練されているため、日常用語としての力に過度に頼った議論が展開されることはない。しかし、そのかわり、学習中に用いている科学的概念としての力の中に、どれだけ日常用語としての成分が含まれているかを生徒が自覚しにくいとも言える。一方、明治期の物理教科書では、その構成と記述が素朴であるため、日常用語としての力をそのまま物理教育の中にすべり込ませている有様を窺いやすい。

明治初期の科学啓蒙書やそれに倣って編まれた物理教科書では、ニュートンの運動の第1法則、つまり慣性の法則が、「惰性」や「習慣性」という名称で物質の性質として説明されている。これは、当時の教科書編纂者が慣性の法則を重視していたことの現れと解釈することもできるであろう。慣性の法則が、物理学への導入部分で物性の一項目として詳述されるときに、力という言葉が何の説明、定義もなく登場してくる。そこでは、日常用語としての力を使用して教科書の記述を理解していくことが前提とされているのである。

明治9年の片山淳吉纂輯『改正増補物理階梯』⁽³⁾では、第二課「物性論」の中で「習慣性」として慣性の法則が次のように記述されている。ここで、初めて力という言葉が登場する。

「凡ソ静止スル物体ハ自ラ動クコト能ハズ又運動スル物体ハ自止マルコト能ハズ。是其静止スル物体ハ常ニ外力ニ抵抗シ以テ動カザランヲ欲シ、又運動スル物体ハ直線ニ進行シ以テ其動ノ復息マザランヲ欲スルニ因レリ。之ヲ物ノ習慣性ト曰フ。故ニ各物体ノ動静ハ必ズ他ノ力ニ藉レルニテ自己ノ力ニ由レルニ非ズ。」

『物理階梯』では、総論、第一課「物体論」——ここでは、物質の三態や純度、元素について簡単に述べられている——に続いて、第二課「物性論」が始まる。物質の通有性——すべ

ての物質が共通に有している性質——として5番目に挙げられている「習慣性」の説明以前には、力の定義に関係する項目、記述が見られない。

他にも、明治16年の志賀泰山訳纂の『小學物理書』⁽⁴⁾では、短い総論に続いて、第一篇「物性」の第一章において、「填充性」,「礙竄性」に続いて三番目に「惰性」として慣性の法則を次のように説明している。ここでも、慣性の法則の説明で初めて力という言葉が登場してくる。

「凡天地間ノ萬物ハ外力或ハ抗抵ノ来リテ之ニ働クニ非サレハ其現ニ存有セル静止或ハ運動ノ状態ヲ變スルコトナシ即静止ノ體ハ常ニ静止シ他力ノ之ニ働クニ非サレハ更ニ運動スルコトナク又既ニ運動セル物體ハ常ニ同一方向ニ向ヒ同一速ヲ以テ永久運動シ他力ノ之ニ抗スルニ非サレハ復静止スルコトナシ之ヲ物體ノ惰性或ハ習慣性ト名ク」

明治20年以降の教科書にも、このような日常経験によって培われた力の概念を援用する記述は見られる。たとえば、明治28年刊行の木村駿吉編『増補三訂新編物理學』⁽⁵⁾（初版は明治24年刊行）では、慣性の法則は第六章「動力學の原理」で「惰性の原則」として説明されているが、教科書冒頭の「総論」の中でも、「物理學」という項目の次に、物性としての「惰性」が論じられている。そこにも上述のように、日常経験に支えられた力という言葉が登場している。

慣性の法則に対する上述のような説明では、物体に内在する何か——たとえば、片山淳吉の『物理階梯』では「自己の力」と称されている——が原因で運動が生じるのではなく、物体外部からの力によると述べられている。このような記述は、外力と運動との関係を述べ、物体に内在する原動力を要求するアリストテレス的力学から抜け出すことを教科書読者に要求している点で正しい。しかし、力とは何かに対して本質的説明は与えられておらず、物性としての慣性を理解する課程で日常用語としての力を援用しながら納得していくことが教科書読者に求められている。

子どもが、自分自身の筋肉を使った日常の活動を通して、アリストテレス的力学に見られる力の概念——たとえば、 $F \propto v$ ——を獲得していくことは、ジャン・ピアジェ (Jean Piaget) が発生的認識論の研究で到達した結論である。⁽⁶⁾ 子どもの持つ力の概念とアリストテレス的力学におけるそれとの相同性がどうであれ、まずは近代科学誕生以前から存在する力という語を援用して、ニュートン力学の学習に取り掛かることは可能であろう。しかし問題は、アリストテレス的な内在的力から外在的力の理解へと学習が進んだときに、力に対してどのような説明を与えるのかである。

念のために断っておくが、科学教育における常識の利用を本節で批判しようとしているのではない。常識が科学的知識と対立しているが、常識は科学的知識を学んでいく際のベースキャンプである。そして、力という抽象的概念は、身体を通して受け取る感じとの類比でしか考え始めにくいものであろう。停止していた電車が突然動き出すと、立っている乗客は後方へ転びそうになるという日常経験を利用して慣性の法則を説明する限りにおいては、常識と科学的知識の対立はない。しかし、力とは何かを本質的に説明しようとするとき、我々は日常用語としての力と科学的概念としての力の間にある深淵を越えなければならない。

明治期の物理教科書の変遷を見ていくと、このような日常用語としての力を援用する曖昧な状況から抜け出し、科学的概念としての力を記述しようとする2つの道があったことがわかる。ひとつは、単純、素朴な実在論によって力を理解しようとする所から生まれてくる方法であり、もう一つは、力を機能から把握し、力を運動変化の原因であると規定する現代的方法の原初的な姿である。科学的概念としての力へのこれら2通りの接近方法は、互いに排他的関係にある

のではなく、ひとつの教科書の中で混在している。次節では、まず力の単純な実在論的取り扱いを議論する。

3 力の実在論的取り扱い

明治初期の物理教科書の多くは、冒頭部分を様々な物質の属性を説明する記述に割いている。そこでは、物質の持つ諸性質が「通有性」と「偏有性」の2種類に分類され説明されている。「通有性」とは「万物ノ具有スル」物性を、「偏有性」とは「此物ニ具リテ彼物ニ欠クル」物性を意味している⁽⁷⁾。教科書中のこの部分は、ふつう「物性」と題されており、物質の諸属性と関連したいろいろな力が登場する。

当時の物理教科書の記述では、様々な現象を説明するため、その性質を担うべき力が実体として想定されており、さらに、それら力が現象を引き起こす原因として扱われている。たとえば、二つの鉄片の一端を溶かして接するとくっついて一つになる現象が凝力の存在で説明され、平滑な金属板2枚を重ねて密着すると離れなくなる現象を説明するため粘力または粘着力が登場する。また、毛細管現象は水とガラス管の間で働く毛細管引力によって説明されている。凝力、粘力、毛細管引力、弾力、表面張力、摩擦力といった力が説明とともに列挙され、それらの間の関係は全く議論されない。

明治13年の志賀泰山編纂『小學理學問答』⁽⁸⁾では、「一物體中ノ分子互ニ相索引スル力」として凝力を説明し、「二物相接スルトキハ両面間ニ働ク所ノ引力アリ」として粘力と称している。さらに毛細管現象を引き起こす力を毛細管引力、外力によって変形した弾性体が復元する力を弾力としている。また明治18年 林守清纂著『小學物理小誌』⁽⁹⁾においても、物性を扱っている章で、重力、凝聚力、粘力、弾力が取り上げられている。そこでは日常の現象が紹介され、「同シ性質ノ分子相聚リテ、互ヒニ索引スル力アリ、之ヲ凝聚性、又ハ凝集カト云フ」とか、「性質ノ異ナル物體或ハ基分子ノ互ヒニ相接スル時ニ、一種異様ノ引力アリ、之ヲ粘着性又粘カト云フ」と解説されている。

哲学者ガストン・バシュラール (Gaston Bachelard) は、現象の性質をすべて原子の属性であると考える実在論的原子論について議論している⁽¹⁰⁾。バシュラールは、実在論一般は最も単純な体系であり、いちばん発展性の少ない哲学であると述べている。それは、説明を要する事柄をすべて実体——原子論の場合は原子が実体であるが——に直接関わらせてしまうからである⁽¹¹⁾。たとえば、味、匂い、色を原子の形状のちがいと解釈したり、寒さの原子が存在することで「刺すような寒さ」を説明しようとするのが、単純な実在論的原子論である。このような説明はある程度の説得力を持ってはいるが、現象の質を実体の持つ個別の属性へむやみに還元してしまうため、それ以上問題を追求することを無意味にしかねない。

バシュラールの議論している単純な実在論という観点から、明治初期の物理教科書に登場する種々の力を考えてみよう。上述のように、明治初期の物理教科書では、物質の示す様々な現象に対して、凝力、粘力、毛細管引力、表面張力、弾力という具合に個別の力を対応させている。つまり、ここで述べられている凝力、粘力、毛細管引力、表面張力、弾力は、現象の性質を担う存在としての力なのであり、多様な物性はそれと直接関連する力が異なっているためだと解釈される。このような力の単純な実在論的理解は、「現象を一つの質として存在の本質に無条件に帰属させることによって説明するやりかた」であり、「現象の法則を実体の固有性に還元」してしまう無節操な教育内容を構成してしまうことになりかねない。個々の現象に対応して、あ

る力が想定され、その力には現象の質を説明するための属性が付与されることになる。フリードリッヒ・エンゲルス (Friedrich Engels) は、身体感覚に由来する種々の力——筋肉の力、胃腸の消化力、神経の感受力等——を例に上げ、次のように述べている。⁽¹²⁾

「いいかえれば、自分たちの身体のある機能によって起こされた変化の真の原因をあげる労をはぶくために、われわれは虚構の原因をもってこれに代え、その変化に対応するいわゆる力なるものですりかえる。ついでわれわれはこの便利な方法を外界にたいして転用し、その結果さまざまな現象があるその数だけの力を案出するのである。」

「なぜ毛細管現象が起きるのか」という質問に対して、「毛細管力が作用しているから」と答える教育は、質問者に——実際は、皮相な理解であるにもかかわらず——ある満足感、納得した気持ちを与えると同時に、それ以上の探究を拒むものである。つまり、教える側と学ぶ側の双方にとって「労をはぶく」教育である。現象に対応して個々の力が想定され、力は豊富にはなる。しかし、力についての本質的説明が得られるわけではない。

バシュラールは、現象から得られる感覚的な質をすべて属性として原子へ付与する実在論的原子論の変遷を議論している。ニュートン主義から発した原子論は上述の単純な実在論的原子論とは異なり、原子のもつ属性が豊富化されると同時に、それら属性が序列化、系統化された実在論的原子論であると考えることができる。重力の原因を説明できなかったニュートンの後継者たちは、重力を原子の内的属性として位置づけ、さらに万有引力以外に、凝集力、電気的引力、磁氣的引力、化学的親和力を原子に付与した。そして豊富な実在論的力をこれらの基本的な力に分類、整理したのである。現象はこれら原子の内的属性である基本的な力で説明されることになる。

同様な視点から、明治期の物理教科書の変遷を見ると、現象に対応してその存在が要請された様々な力は、重要かつ基本的な自然界の力として、重力、凝集力、化学親和力、電気的・磁氣的引力などの少数の力に整理されていったことがわかる。マイケル・ファラデー (Michael Faraday) は、1855年に王立研究所での『力と物質』と題したクリスマス講演において、重力、化学親和力、電気と磁気による力が自然現象を理解するための重要な相互作用であるとし、それらの諸性質を魅力的な実験で解説している。⁽¹³⁾ ファラデーが実験によって示す様々な現象は、その背後に何らかの力が存在することを聴衆に深く納得させる。欧米の教科書に倣って編まれることの多い明治初期の物理教科書では、ファラデーのクリスマス講演と同じように、重要な天然力として重力、分子間力、化学親和力、電磁氣力が取り上げられている。イギリスの物理学者バルフォア・スチュワート (Balfour Stewart) の『physics』に基づいて執筆された物理教科書、たとえば小林六郎訳『物理小學』⁽¹⁴⁾ では、第二篇「宇内ニ存セル三大力」として重力、凝聚力、化学親和力を解説している。以上のことは、住田昇著『啓蒙物理書』⁽¹⁵⁾ においても同様である。

明治18年刊行の鮫島晋編『小學物理教授本』⁽¹⁶⁾ では、第4章から第10章にかけて前述したような物性の項目が説明されてはいるが、「重要な力の区分」と題された第12章に自然界の力の序列化の萌芽的記述を見いだすことができる。自然界の重要な力として、「地球上ノ物體ヲ地球ノ引ク力」である重力と、「物體ノ分子ト分子ト互ニ引ク力」である「分子引力」が説明されている。「分子引力」に関しては、「其中左ノ區別アリ」とし、異なる物体の分子同士が接触するときに働く引力である粘着力、同種物体の分子同士を結合する力である凝聚力、異質分子を結合して「化合物」を生成する力である親和力という3つの力に分類されている。力の単純な

実在論では、現象に対応して羅列されていた種々の力が、ここでは「分子引力」として分類、整理されている。

明治 35 年刊行の神戸要次郎編『物理教科書』⁽¹⁷⁾は、第一編「力學」から始まる。第一編「力學」の第三節で、自然界の力として引力が説明され、第二編「物性」の第 1 節「物質」で「分子力」が登場する。この第二編「物性」は、物質の通有性や偏有性を羅列して議論している明治初期の教科書に見られる章建てとは異なっている。第二編「物性」の第一節「物質」は、「不可入性」、「分子及び原子」、「分子力」、「物質の三態」、「物質の不滅」という項目から構成されている。そこでは、「分子力」が「分子交互の間に於ては相索引するの力あれども宇宙引力の如く遠方に及ぼすこと能はず唯極めて接近せる距離に於てのみ其効ある者」と説明され、同種分子の相引く力が凝集力、異種分子が相引く力が粘着力と名付けられている。

同書の第二編、第 2 節から第 4 節では、固体、液体、気体の性質や弾性が物質の凝集力の強弱によって説明されている。さらに第 5 節の「物體分子間の作用」では、毛管現象や拡散などの現象が分子のふるまいとして議論されている。たとえば、毛管現象は、「硝子棒を水中に挿入して之を引き上げれば水は硝子棒を濡せども水銀中に挿入して之を取り出せば毫も水銀の為に濡せざるることなし」という観察が描写された後、「凝集力」と「粘着力」の大小関係を用いて、「硝子分子と水分子の粘着力は水分子の凝集力に優れども硝子分子と水銀分子の粘着力は水銀の凝集力に劣る者なり」という具合に説明されている。そこには毛細管力という実在論的力に頼った説明は見られない。

明治 43 年発行の本間義次郎、大島鎮治著『新訂普通教育物理學教科書』では、分子力が次のように説明されている⁽¹⁸⁾

「化學的現象より推究したる假説によれば物體は分子なる極微分よりなり、其間には多少の間隙ありて各分子は或範圍内を運動しつつあるものとなす。然るに何故に物體は分散崩解せざるか、これ物體間に萬有引力ある如く分子間には分子引力あるを以てなり。……此引力を分子力と稱し同物質間のを凝集力、異物質間のを粘着力と稱す。」

この教科書では、表面張力の起源が液体分子間の凝集力にあると述べられている。液面近くの分子は液体内へ向かう分子力の作用を受けるため、液体表面は常に縮もうとする傾向にあることが図 1 を用いて説明されている。

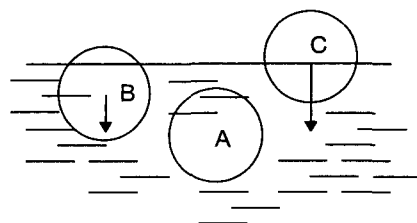


図 1 表面張力の説明図

「液體分子の間に凝集力の存することは滴又は泡を形成するによりて證することを得べし、然れども此作用は甚だ僅少なる距離に於て行はるゝのみ。今分子の位置を心とし、其周圍に分子

力の及ぶ距離を半径とし球を畫くときは此球内の分子は其中心にある分子に作用することを示す、此球が液體内部に存在するときは A は其中心につきて對稱に排列する分子のため少しも影響を受けず、これに反して BC の如く分子を液體の表面或は表面近く想像するときは球の一部のみ作用を呈する分子を含むに過ぎず、故に表面より球の半径以内にある分子は表面に直角に且つ内方に向ふ力を受く、此ため液體の表面は薄き彈性膜を張りたるが如く常に縮まんとする傾きを有す、かく液の表面に沿うて働く力を表面張力と稱す。」

明治中頃に刊行された多くの物理教科書で状況は同じである。つまり、明治初期の教科書に

ある「物性」の章で見られたような、現象に対応して種々の力を羅列していく記述はなくなり、自然界の力は重力と分子間力の2つにまとめられていく傾向が見られる。教科書によっては、重力は地球がその表面の物体を引く力であり、広くあらゆる物体間に生じる引力は萬有引力や宇宙引力として区別されているものもある。また多くの教科書で、分子間力が凝集力と粘着力の2つに区別されている。電磁気力は分子間力とは異なる章で、多くの教科書ではその後半部分で扱われている。分子間力を——量子力学の助けは必要ではあるが——原子・分子の間に働く電磁相互作用の結果として取り扱おうとすることは、当時の分子間力に対する理解からは望めるものではなかったであろう。

現代物理学からみれば、多くの実在論的力を基本的な力へ整理していこうとする傾向、例えば、上述の本間義次郎他著『新訂普通教育物理学教科書』にある分子力による液体物性の説明は、その詳細は別として、微視的な力によって巨視的現象を理解していこうとする分析から総合への試みとして評価できるであろう。しかしながら、当時の物理学の限界から、このような自然界の力の整理が進展しても、それは力の分類が洗練されただけであり、力が何で、どのような機構で生じるのかについて理解が深まったわけではなかった。それは次のような問答に現れているだろう。以下の教師と生徒のやりとりは、結局、いくつかの現象から直観される実在論的力に名称を与えただけに終わっている⁹⁾

「(糸を弱く引っ張っても、その力に抵抗して切れないが、強く引っ張ると切れるという実験を行い、糸や石はそれらを形作っている分子が固く結びあっているために容易に破壊できないという問答を行う。その後で凝聚力が登場する・・・大野) (教) 然り、糸石ノ類ノ容易ニ破壊スベカラザルハ何故ナルヤ。(生) 分子固結セル故ナリ。(教) 分子固結スルモノハ何故ニ容易ニ破壊ス可カラザルヤ。(生) カアルニ因ルナリ。(教) 如何ナルカナルヤ。(生) 分子ヲ固結スルカナリ。(教) 実ニ然り、汝等分子ヲ固結スル所ノカヲ何ト名クルヤ。之ヲ知レルモノアラン。(生) 凝聚力ト名ク。(教) 然り、凝聚力トハ如何ナルカナルヤ。(生) 物体ノ分子ヲ結合スルカナリ。(教) 物体ノ分子ヲ結合スルカヲ何ト云フヤ。(生) 凝聚力ト云フ。……」

ハイトラーとロンドンが水素分子の結合の理論を提出したのが、1927年(昭和2年)であることを考えれば、現在の科学的知見の高みから当時の単純な実在論的記述を批判することはある種の傲慢になるだろう。多数の実在論的な力をいくつかの基本的な力へと分類・整理し、それら基本的な力で現象を説明しようとする方向は、当時の物理学の到達点という限界はあったが、第5節で考察する力の概念の微視的レベルの取り扱いへとつながっていく可能性を示唆している。しかし現実には、明治期の物理教科書はそのような方向ではなく、次節で述べる方向へと進んでいった。

4 運動の変化の原因としての力

明治維新後の科学啓蒙から公教育の成立、そして教科書検定制への転換という流れの中で、物理教科書も、その内容構成、記述が洗練されていった。第2節で述べたような日常経験をあからさまに援用した力の取り扱いは、2つの方向に展開して行った。ひとつは、前節で論じたように、多様で豊富な実在論的力の序列化、系統化である。もうひとつの方向では、力を、その起源や発生機構には触れずに、ただ運動の変化の原因として定義する。この第2の方向から、力学理論の範囲内で力という概念を規定しようとする教科書記述が現れてくるのである。この

方向は、第2節で述べたような運動の第一法則の説明の中へ力という言葉がすべり込ませるのではなく、力を運動の変化の原因として明示的に定義するものであり、力学教育の重心が運動の第二法則へと移動していく傾向を表していると言えるだろう。

明治18年刊行の鮫島晋編『小學物理教授本』⁽²⁰⁾では、「総論」の中で、第十一章として「力の定義」を設けている。鮫島の教授本では、第十章「惰性又習慣性」で物体の性質としての慣性が説明されているが、そこでは車の急停止、急発進のときの乗客の状況等の現象が挙げられ、「物體ハ自己ノ運動ヲ制シ又自ラ運動ヲ起スコト能ハザル性質即チ惰性ヲ具フ」と論証しており、力という言葉は登場しない。このような慣性の説明に続いて、第十一章で「凡ソ物體ノ運動及静止ハ其本性ニ非スト雖之ヲ生ズル原因ナキニ非ズ」と論じた後、定義と明示し、「物體ノ動止ノ状態ヲ變換シ得ル所ノ原因ヲ名ツケテカト謂フ」と述べている。また住田昇著『啓蒙物理書』⁽²¹⁾では、第一章の総論で第一課「物理学」で物理学という学問について解説し、第二課「動」で「物ノ位置ヲ變ズルヲ動ト云フ」と述べた後、第三課「力」で「物體ヲ運動ヨリ静止ニ静止ヨリ運動ニ移ラシムル原因ヲカト云フ」という具合に力を定義している。

つぎに教科書検定制度に転換した後の物理教科書を見てみよう。明治28年の木村駿吉編『増補三訂新編物理學』⁽²²⁾では、第一編「力学」の第一章「力及び其組み合せ」で、力の定義という項目を設けて、「力とは静止せる物体に働きて其運動を生じ又は運動せる物体に働きて其運動を變ずるものなり」としている。同じ著者の手になる『増訂新編中物理學』⁽²³⁾（明治30年 第5版）では、第一章「物質及び其性質」の第一節「緒言」において、物理学という学問の解説、分子説、密度を説明した後、「力」という項目を設けている。そこでは、樹脂製と思われる小球とガラス棒の間の静電気力——教科書本文では原因は不明とされている——による現象を紹介した後、次のように力を定義している。

「此引かんとし或は推さんとする物質の傾向を力と云ふ、物質は何故に互に相引き又何故に相斥くるか、吾人之を知らず、然れども一の結果あれば必ず其原因なかるべからず、而して最も普通なる結果は運動と静止なり、例へば一物體の動くを見るときは、吾人は其原因あるを信じ、之を力に歸す、又運動せる物體が静止するとき、吾人は亦其原因を求め、亦之を力に歸す、故に力は運動を生じ、或は之を變じ、或は之を停むるものなり。」

明治期後半の物理教科書にも目を通しておこう。明治43年発行の野田貞著『新體物理學教科書』では、力が次のように定義されている⁽²⁴⁾

「人が筋肉の作用によりて物體を押し或は引きて、之を運動せしめ或は静止せしむることを得るは、日常経験する所なり。此際、物體に加る作用を力といふ。されば力は物體の速度を變ずるものにして、物體の速度變化即ち加速度は皆之を力に歸す。」

同じく明治43年発行の本間義次郎、大島鎮治著『新訂普通教育物理學教科書』にある力の定義は、「一般に静止せる物體が運動を始め、又は運動體が静止する等は必ず相當の理由ありて起り得るものにして此原因を力と稱す。」である⁽²⁵⁾また、同年発行の今村明恒著『物理學教科書』では、次のような力の定義に続いて、ニュートンの運動の第一法則、つまり慣性の法則が紹介されている⁽²⁶⁾

「吾人の経験に依れば、物體の静止或は運動の状態の變化は必ず相當の理由ありて始めて起り得るものなり、斯くの如き變化を生ぜしむる源因を力と稱し、此経験上の結果をニュートンは次の定律に表はせり。

運動の第一定律 總て物體は力に働かれざる限り其享有せる静止の状態或は等速直線運動

の状態を永遠に保有す。]

力が運動の変化の原因として定義される展開と併せて、まず最初に力学から物理教育を始める現在の物理教科書と同様の内容構成も現れてくる。たとえば、明治34年刊行の本多光太郎、田中三郎合著『新撰物理学』⁽²⁷⁾は、目次の後、第一篇「力学及物性」が設けられている。まず最初に、第一章「運動」で、速さ、速度、加速度、等加速度運動が説明され、次の第二章「力及物質」で「力」という項目がある。そこでは「總て物體の運動の速度に變化あるときは此物體は力の作用を受くと云ひ、速度の變化なきときは力の作用を受けずと云ふ」と述べている。同年刊行の市川林太郎編『改訂物理学教科書』⁽²⁸⁾も同様の構成である。また前節で紹介した明治35年刊行の神戸要次郎編『物理教科書』⁽²⁹⁾も、目次に続き第一編「力学」から始まっている。その第一節「運動」で等速運動、變速運動が説明された後、第二節において、「運動せる物體が其速度若くは方向を變化し、或は静止することあらば必ず其原因なかるべからず又静止する物體が動き始むることあらば是亦其原因ならるべからず斯の如きの原因を名けて力と云ふ」と力が定義されている。

また本節で既に取り上げた、野田貞著『新體物理学教科書』、今村明恒著『物理学教科書』、そして本間義次郎他著『新訂普通教育物理学教科書』も同じような現代的配列になっている。どちらの教科書も、目次の後、總論で「物理学」、「単位」、「密度」等が説明された後、第一篇「力学」から始まる教育内容構成になっている。野田貞著『新體物理学教科書』の第一篇「力学」の内容は、第一章「直線運動」で速度、加速度、等加速度運動を学び、第二章「運動の法則」、第三章「重力、落體、仕事、エネルギー」、第四章「曲線運動」と続く。また今村明恒著『物理学教科書』では、第一篇「力学」は第一章「力の釣合」、第二章「剛體に働く力」、第三章「運動」、第四章「落體」、第五章「仕事、勢力」、第六章「種々の運動」という内容構成である。

力学から始まる教育内容構成になった結果、前節で述べた基本的な力へと分類・整理されていた実在論的な力は、再び分割して記述されることになる。重力は力学教育の中で説明され、分子力にかかわる内容は力学教育の後に配置されることになった(表1の×印を参照のこと)。また、前節で取り上げた本間義次郎他著『新訂普通教育物理学教科書』の分子力による液体物性の説明という例などがあるが、一般に、分子力を積極的に活用して巨視的現象を説明しているという傾向は弱くなっていった。この傾向が現在まで続いていることは、今の物理教科書を見れば一目瞭然であろう。

前節で議論した実在論的な力の存在に科学的説得力を与えようとするならば、力学理論の外部にある物理学的知見を必要とする。現象に対応して登場してくる凝力、粘力、毛細管力といった力は、質点の力学から導出されるものではなく、多数の質点から構成される物体が示す巨視的現象から直観されるのである。古典力学が与えてくれる質点の動力学から固体、液体、気体が示す巨視的現象の物理学的理解に至るには、明治期には教科書編纂者が望んでも手に入らなかった古典力学以外の物理学の領域、たとえば量子力学や物性物理学の成果が必要となる。

これに対して、力を、その起源や発生機構をいっさい問題にせず、ただ運動の変化の原因としてとらえることは、力を力学理論の範囲内で定義しようとする試みである。このような力の定義を理解するためには、力学以外の物理学的知見は必要としない。したがって、力を運動の変化の原因として定義することで、力学教育の内容を力学現象と力学理論に限定することができる。その結果、上で述べたように、まず力学から学習を始め、その後他の領域へ展開していくという、目次だけ見れば現代的と言ってもよい教育内容構成が登場する。

明治30年以降、このような教育内容の配列が登場したということは、明治32年の中学校令改正、明治35年の中学校教授要目制定に続き、中等学校における物理教育が確立していくと同時に、現在の力学教育の枠組みと同様のものがほぼ完成していたと言えなくもない。

力を物体の運動状態を変化させる原因として一応了解した上で、上述のような現代的目次にしたがって力学の学習を進めていくことは可能である。实在論的思惟によって豊かになった力を、あらためて運動の変化を引き起こす原因という抽象的概念に変換してとらえ直すことにより、我々は物体の運動理論の構成へと踏み出すことができる。言い換えれば、なぜ運動の変化という現象が生じたのかという疑問に対して、その変化を引き起こす原因となる力——その中身については気に病む必要はない——が働いたからという説明をとりあえず与えておいて、力の作用した結果何が起きるのかを理解することに専念できる。

そのようにして力の作用に対する理解を深めていくことは、力にある存在感を与えてはくれる。たとえば、教育の必要上、生徒に力を“見せる”ための教材がいくつも考案されてきた。そこで言う「力を“見せる”」の意味は、注目している物体の運動状態の変化を観測し、そのような状態変化を引き起こした原因として、現象の背後に力が存在するのだと主張することであった。しかし、力の起源や発生機構が不明のままでは、そのようにして“見せられ”た力の概念も、力そのものが何であるのかという問いかけに答えてくれるものではない。

エンゲルスは力学理論における力の概念について次のように述べている⁽³⁰⁾

「力学では運動の原因はあたえられたものとされており、考慮されるのはそれらの起源ではなくてそれらの作用だけである。だから運動の原因を力とよぼうと、それは力学そのものにとっては害にはならない。」

確かに、完成された力学の理論体系にとってそれ——運動の原因を力と呼ぶこと——は害にはならないかもしれない。しかし、これから力学を学ぼうとする者が「 F は何か」という疑問を抱いたとたん、それは学習の障害となる。

物理学者のC. F. v. ヴァイツゼカー (C. F. v. Weizsacker) は力学を用いて現象を理解するためには、(1)力学の一般法則、(2)当該の物体相互の間に働く諸力の独特の形態、(3)或る時点において考察された体系の状態という三つの知識が必要であると論じ、その中で物体間に働く相互作用、つまり力について次のように述べている⁽³¹⁾

「或る物体の運動は、しかしその質量やその空間的特徴だけでは定まらず、他の物体とそれとの相互作用によって定められる。これが力学では力という題目で現れてくる。ところが一般力学の教えるところは、実際にいかなる類いの力が存在しなければならないかという点にはない。と言うのは、力はその法則からすれば、何か偶有的なもののように現われるからである。」

つまり、力についての本質的説明は力学の外に存在するのである。これは力学という物理理論の持つ循環論的論理構造の現れであると言える。力学理論の範囲内では、力、慣性質量、質点の加速度という抽象概念は相互に規定しあっているだけであり、それらすべてを一度に経験概念に帰着させることはできないのである⁽³²⁾ 教育上の必要から、力を運動の変化を引き起こす原因として力学理論の枠内で定義することは、けっして無意味なことではない。しかしながら、その定義に限界があることも明らかである。

ヴァイツゼカーが指摘するように、力は力学理論によって本質的説明を完全には与えることのできない偶有的概念である。教育上の必要から、我々は、3次元の概念ネットワークとでも

呼べるであろう物理学の概念体系全体の中から力学を抜き出し、さらにそれを適当なサイズに刻み、ある一定の順序で一次的に配列していく。その配列の中で、力は運動の変化の原因として力学理論の枠内で定義される。確かに、この配列の中には力が如何にふるまうかについての豊かな説明がある。しかし、そこには力が何であるのかという問いに対する解答は含まれていない。それを得るためには、教育内容として抜き出してくる対象を力学以外の領域にまで拡張なくてはならない。つまり、力という概念の取り扱いに関して、従来の力学教育の枠組みから外にでて考え直してみなければならぬのである。

5 力の概念の微視的レベルの取り扱い

科学教育は、まず生徒が現象を経験することから始まると言ってよいだろう。そこでは、自然への人為的操作、つまり実験によって経験が作られもする。このようにして経験される現象を説明するために、實在論的力が教育へ導入される。そのような實在論的力は、現象を直観的に理解することを助けてはくれるだろう。これは明治期も現在も同じである。しかしながら、これはあくまで科学教育の初期段階における必要からなされるわけであり、説明を納得するための基本的観念としての力が登場したにすぎない。

また、粘力、毛細管力といった實在論的力の利用に頼りすぎる教育には、結果であるはずの現象が原因にされてしまうという危険性が潜んでいる。物質がそれ固有の粘弾性を示すという現象に対して、物質を構成する分子間にそのような粘弾性を引き起こす原因となる粘弾力が働いているからという説明を与えたところで、現象のより本質的な部分が明らかになるわけではない。新たに経験する現象に対応して、新しい力を想定していくやり方を続けているだけでは、第3節で述べた節度のない力の實在論になってしまう。また、理論の節度を回復するために、多様な實在論的力の序列化、系統化が行われたところで、力学教育という従来の枠組みに囚われている限りは、豊富な力をいくつかの基本的な力に整理・統合しただけである。本質的な問題を解決するためには、基本的な力を力学以外の物理学的知見にもとづいて理解していくことが必要である。

力を運動の変化の原因であると定義する取り扱い——現在の多くの高校物理教科書はこの取り扱いを採用しているが——は、力学教育の内容を力学理論の範囲内に限定することを可能にはしてくれる。しかし、この取り扱いも力とは何かという問題に本質的解答を与えてはくれない。もしも、運動の変化を引き起こす原因として定義された力を生徒が理解してくれることで物理教育の目標が達成されるのなら、我々に残された課題は明治期の物理教科書において既に展開されていた教育を洗練していくことだけとなるだろう。

「 $F=ma$ 」という関係式を運用して練習問題を解決しながら、この数式にある F とは何かという疑問を生徒が抱いたとしよう。運動の変化を引き起こす原因として力を規定するならば、力 F とは、問題となっている物体へ外から作用し、加速度 a を生み出した原因であると解答することになる。力の概念のまわりで生徒が批判的思考を行わなければ、「 F は何か」というそれ以上の余計な詮索はしないであろう。生徒はその説明を了解した後、練習問題の解法に注意を振り向ける。しかし、彼または彼女が「 F は何か」という疑問にこだわり始めた時、運動変化の原因として力を定義することはそれほど納得がいくものではなくなる。

エンゲルスやヴァイツゼカーが指摘するように力は力学理論にとって偶有的概念である。そのような外在的な力を本質的に説明しようとするならば、当然、力学以外の領域も含んだ教育

内容が要求されるだろう。つまり、物理学の概念体系全体の中で力を理解していかなければならないのである。これは明治期物理教科書に見られる力の実在論的取り扱いへ単純に回帰することを意味しない。押したり引いたりという日常の力以外に、重力、張力、摩擦力等の多くの力が物理教育に登場するが、今日では、現代物理学の成果によって、これら力についての微視的理解が可能となっている。我々は、明治期では不可能であった位置から、当時の実在論的な力の概念の取り扱いが進むべきであった方向を検討することができるはずである。

現代物理学では、自然界の力は4つの基本的相互作用——重力相互作用、電磁氣的相互作用、弱い相互作用、強い相互作用——で説明されるとされている。そのひとつである電磁氣的相互作用は、セルロイドの下敷きをこすって髪の毛を吸い付けることや、磁石を使って鉄釘を引き上げることで容易に経験できる力である。現代物理学は物質を構成する原子が、正電荷を持つ原子核と負電荷を持つ電子からなることを明らかにしている。原子の安定性を議論するためには量子力学の助けが必要であるが、物質が接触することによって生じる力——日常の押したり引いたりする力や摩擦力——は、原子・分子間に働く種々の電氣的相互作用の組み合わせとして理解できる。現在では、第3節で紹介した単純な実在論から生まれる摩擦力、粘力、弾力、毛細管力などの力を微視的レベルの相互作用として説明することが可能なのである⁽³³⁾

力の微視的レベルの説明と言っても、たとえば物質を柔らかいゴムまりのような弾性球の集合体とみなし、押し合い圧合いするゴムまりの変形を分子間相互作用の代用とするのでは、原子に直観的属性を安易に付与する単純な実在論的力のイメージに戻ってしまうことになる。固体といっても、直径 10^{-12}cm 以下の原子核が 10^{-8}cm 程度の間隔で並んでおり、その間を電子が運動しているという空虚な構造をしている。やはり現代物理学が教えるように、原子間の距離が減少するにつれて、引力から斥力へと変化する原子間の相互作用によって現象を理解しようと努めるべきであろう。簡単な力学現象である2物体の衝突を例として考えてみよう(図2)。

等しい質量を持つ2つの球(以下、AとBと呼ぶ。)の衝突現象を考えよう。今、球Aが静止している球Bに速度 V で接近してくる状況を初期状態とする。ある時刻で、球Aは球Bと弾性的に正面衝突したとする。ニュートン力学によれば、衝突後、球Aは静止し、球Bは速度 V で初期状態の球Aと同じ方向に運動する。通常、この種の衝突問題では、運動量保存則とエネルギー

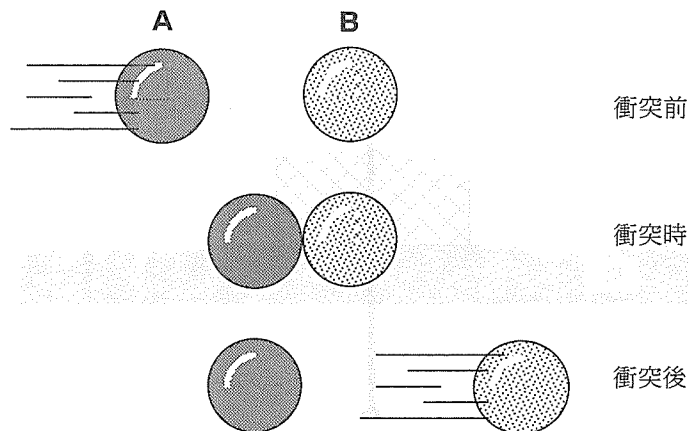


図2 衝突現象

ギ一保存則を使って、衝突前の初期状態と衝突後の終状態の関係のみが考察される。確かに、それで問題——つまり、終状態の2つの球の速度を求めること——は充分解決できるのだが、球Aと球Bの間に働く力について考えをめぐらせ始めると、2つの球が衝突した瞬間についての詳細な議論が必要となる。

球Aが速度 V で球Bと衝突(接触)したとすると、衝突時、球Aの速度は V からゼロへ、球Bの速度はゼロから V へと不連続的に変化しなければならない。運動の第二法則である $F=ma$ の関係からは、衝突時 ($t=0$) に球Aと球Bの間に $F_0\delta(t)$ のような力が働き、その結果として速度が不連続的に変化したと結論されるか、または適当な撃力が働いたとして処理される。

球Aと球Bの間の分子間相互作用という観点から、この簡単な衝突現象を分析し直そう。現代物理学によれば、球Aと球Bの間の距離が大きいときには、2つの球の間に働く分子間相互作用の総和は、無視してもよい。しかし、球Aが球Bに接近すると、2球の間に働く分子間引力は増加していく。しかし、ある距離以下に接近すると、球Aと球Bの近接する表面間に働く分子間相互作用は引力から大きく斥力へと変化し、2球の間には強い反発力が発生する。球Aはある運動量(運動エネルギー)をもって球Bへ接近する。それにともない球Aと球Bの間に働く反発力は急激に増加する。その結果、球Aの速度は V からゼロへと連続的に減少し、球Bの速度はゼロから V へと連続的に増加する⁽³⁴⁾ ミクロな視点から2つの球の衝突現象を観れば、球Aと球Bは衝突(接触)していないとも言えるだろう。

机の上の書物を手で押して動かすときや、バットでボールを打つとき等、およそ接触力(Contact Force) が働く状況では同様の現象が起きている。上述の衝突現象の議論は、18世紀にボスコビチ(Roger Joseph Boscovich)が2物体の衝突について展開した推論と基本的に同じである⁽³⁵⁾ しかし、現在では、物理学の進歩により、2物体が接近した場合に生じる相互作用の詳細がかなり解明されているところが異なる。

もう一つの例として机の上に置かれた物体を考えてみよう。机の上に置かれた物体(例えばブロック)に働いている力を図示する問題は、作用・反作用を学習する時に必ず登場する。この種の問題を生徒に指導する場合、机とブロックが接した図よりも、両者を離して描いた図を使用の方が有効であることが指摘されている⁽³⁶⁾ 机とブロックが接して描かれている図では、机からブロックに作用する力とブロックから机に作用する力を上下方向の二つの矢印として図

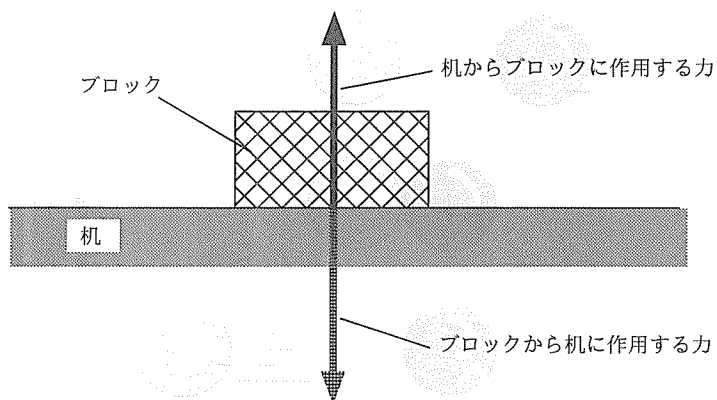


図3 机上のブロック

3のように描く生徒が少なくない。その結果、これら2つの力が異なる物体に働く力であることが曖昧になってしまう。前述の原子間の相互作用という視点からこの問題を考えてみよう。ブロックに働く重力と、机とブロックの間に働く斥力がつりあった位置で、ブロックは静止している。指でブロックを押すと、ブロックはさらに机に近づこうとするが、机とブロック間の斥力が急激に増加するため、ブロックが文字どおり机と接触することはない。ミクロな視点から捉えるならば、机とブロックを離して図示することは決して不自然なことではないと言えるだろう。

以上の例からわかるように、現代物理学における微視的レベルの知見をもとにして、力をとらえ直してみることは今後の教育上の重要な課題である⁽³⁷⁾。このような力の概念の微視的取り扱いは明治初期の物理教科書に見られる实在論的な力、さらには現在と比べて重視されていた物性関係の内容を現代的視点からとらえ直そうとする試みでもある。また、このような微視的レベルの相互作用によって力を理解していく過程の中で、作用・反作用の考え方を自然に導入していくことが可能であると思われる。これは巨視的レベルの力の作用・反作用の考え方、つまり運動の第三法則の学習へとつながるものでもある⁽³⁸⁾⁽³⁹⁾。

6 ま と め

現在の物理教科書に見られる力の概念の取り扱いは、实在論的な取り扱いと運動の変化の原因としての取り扱いという2通りのかたちで、明治期物理教科書の記述の中にほぼ見出すことができる。現在の高等学校物理教科書に見られる力学教育の枠組みは、明治期物理教科書の中にほぼ完成されていたと言えるだろう。極言すれば、以後の力の概念にかかわる教科書記述の変遷は、記述そのものの洗練とさまざまな実験教材の開発であった。明治期物理教科書は、我々が越えなければならないひとつの到達点を示している。そこを越えて我々はどこへ向かうべきなのか。現代物理学の成果を踏まえた力の概念の再考とともに、力の概念の取り扱いを教育内容の中にしっかりと位置付けることが要求されている。本論文で述べた微視的レベルの取り扱いは、明治初期の教科書に見られた实在論的な力の取り扱いを現代物理学の視点からとらえ直そうとする試みである。この微視的レベルの取り扱いは、ミクロとマクロを結ぶ分析・総合の考え方を、現在の物理教育の中でいかに教授すべきかという課題と深く関係している。また、このような従来の力学教育の枠組みに囚われることのない教育内容の検討は、力学、電磁気学等の固定された枠組みから成る現在の物理教育の内容を、新たに総合化し整理することが可能か否かという課題とも関連してくる。

これからの科学教育は、戦前の富国強兵を目的としたものでも、戦後の経済発展を指向したものでもない。我々が必要としているのは、青年期の人間形成を助け、子孫に引き継ぐ価値ある社会を築くための科学教育である。明治期物理教科書は、そのような科学教育を考えていくためのひとつの出発点である。

【参考文献】

- (1) 高等学校学習指導要領解説 理科編・理数編 MESC1-8934, 文部省, 1989, 43~46頁。
- (2) したがって、本論文では、明治期の科学教育史に関わる課題が議論の中心ではない。科学教育史については、板倉聖宣, 永田英治著, 「展望: 日本科学教育史・理科教育史」『科学史研究II』, 29 (1990), 193~200頁, 及び, その参考文献を参照のこと。

- (3) 片山淳吉纂輯、『改正増補物理階梯』(1876, 文部省)

この教科書の原著クッケンボス (Quackenbos) の『Natural Philosophy』の「物性論」はきわめて実用主義的内容であり、片山の教科書にある「物性論」も物理学の工業への応用を重視した展開になっているという指摘がある。中川保雄著, 「19世紀後半の物理学教科書の「物性論」と産業革命期の技術教育内容との関係について」『科学史研究II』, 16 (1977), 161~166頁。本論文では、片山の教科書にある「物性論」をどのように位置付けるかは検討せず、そこでの力の概念の取り扱いのみに着目した。

- (4) 志賀泰山訳纂、『小學物理書』(1883, 原亮三郎)
(5) 木村駿吉編、『増補三訂新編物理学』(1895, 内田老鶴圃)
(6) ジャン・ピアジェ著、『発生的認識論序説, 第II巻 物理学思想』(田辺振太郎, 島雄元訳, 1976 訳刊, 三省堂) 第四章。

子どもの発達にともなう力の概念形成と明治期物理教科書の変遷との間に、何らかの相同性を見いだすことが本論分の目的ではまったくないことを付け加えておく。

- (7) 参考文献(3)
(8) 志賀泰山編纂、『小學物学問答』(1880, 岡島真七)
(9) 林守清纂著, 『小學物理小試』(1985, 中近堂)
(10) ガストン・バシュラール著, 『原子と直観』(豊田彰訳, 1977 訳刊, 国土社)
(11) 本論文では、実在論と実態という言葉を、参考文献(10)で展開されている実在論的原子論にならって使用している。

- (12) フリードリッヒ・エンゲルス著, 『自然の弁証法1』(菅原抑訳, 1953 訳刊, 大月書店) 92頁。

- (13) マイケル・ファラデー著『力と物質』(稲沼瑞穂訳, 1949 訳刊, 岩波文庫)

- (14) 小林六郎訳, 『物理小學』(1878, 清風閣)

- (15) 住田昇著, 『啓蒙物理書』(1885, 博文堂)

- (16) 鮫島晋編, 『小學物理教授本』(1885, 東京府)

- (17) 神戸要次郎編, 『物理教科書』(1902, 興文社)

- (18) 本間義次郎, 大島鎮治著, 『新訂普通教育物理学教科書』(訂正4版, 1910, 宝文館)

- (19) 福岡県師範学校編纂, 『新選物理書』(1882, 連璧社蔵)

- (20) 参考文献(16)

- (21) 参考文献(15)

- (22) 参考文献(5)

- (23) 木村駿吉編, 『増訂新編中物理学』(1897, 内田老鶴圃)

- (24) 野田貞著, 『新體物理学教科書』(1910, 開成館)

- (25) 参考文献(18)

- (26) 今村明恒著, 『物理学教科書』(1910, 大日本図書)

- (27) 本多光太郎, 田中三四郎合著, 『新撰物理学』(1901, 内田老鶴圃)

- (28) 市川林太郎編, 『改訂物理学教科書』(1901, 三省堂)

- (29) 参考文献(17)

- (30) フリードリッヒ・エンゲルス著, 前掲書, 100頁。

- (31) C. F. v. ヴァイツゼカー著, 『自然の統一』(斎藤義一, 河井徳治訳, 1979 訳刊, 法政大学出版局) 141頁。

- (32) 菅野禮司著, 『力とは何か』(1995, 丸善) 41頁。

- (33) 相互作用の引力部分については、邦文の解説としては、L. ブラッグ, J. パナール他著, 『物質の構造をさぐる』(谷川安孝, 中村誠太郎編・監訳, 1972 訳刊, 講談社) 第7章がある。理論についての詳細は、エリ・ランダウ, イエ・リフシッツ著, 『電磁気学2』(井上健男, 安河内昂, 佐々木健訳, 1972 訳刊, 東京図書) 470~477頁を参考。相互作用の斥力部分については、M. P. Tosi, Solid State Physics 16, 1 (1964) を参考。またさらに微視的な視点からの議論は、B. Bhushan, J. N. Israelachvili, and Uzi Landman, "Nanotribology :

- friction, wear and lubrication at the atomic scale”, *Nature*, **374**, pp. 607-616 (1995) を参考のこと。
- (34) このような連続的変化による速度の交換が実現するためには、ニュートンの運動の第二法則と第三法則が要求される。
- (35) マックス・ヤンマー著、『力の概念』(高橋毅, 大槻義彦訳, 1979 訳刊, 講談社) 170~185 頁。
ヤンマーによれば, ボスコビチは物体間の距離が変化するにつれて, 引力と斥力の間を何度も交互に変化するような相互作用を考えていた。
- (36) Arnold B. Arons 著, 『Teaching Introductory Physics』(1997, John Wiley & Sons) 77~78 頁。
- (37) たとえば, 物理学者フレデリック・ライフ (Frederick Reif) が大学初年級用の力学教科書の中で行っている力の微視的説明は, この線に沿った力の概念の取り扱いの端緒として参考になるものであろう。Frederick Reif 著, 『Understanding Basic Mechanics』(1995, John Wiley & Sons) 102~108 頁。
- (38) 運動の第三法則を力学教育の中心に位置づけた教授学研究としては, 寺岡英男著, 『授業書「力学」』(1987, 高村泰雄編著, 『物理教授法の研究』北海道大学図書刊行会) 所収を参考。
- (39) 巨視的な力に対して, 作用・反作用の法則がつねに成立しているわけではないことを注意しておかなければならない。力学関係の書物で述べられていることであるが, 物理教育上の議論としては, 参考文献(36)の 78~80 頁を参考のこと。

謝 辞

本稿の作成にあたって高村泰雄(北海道大学名誉教授), 田中実(北海道教育大学札幌校), 若菜博(北海道教育大学岩見沢校)の各氏に有益な助言をいただいた。また, 本論文で引用した教科書の多くは東書文庫図書室所蔵のものを用いた。この場を借りて謝意を表したい。

本研究は平成 8~9 年度文部省科学研究費基盤研究(C)「教科書における科学教材の研究——日本の公教育成立・形成期に限定して」(研究代表者: 須田勝彦)の研究成果の一部である。