

明治期の物理教科書における力のベクトル表現

神村 圭佑・興治 文子・小林 昭三

1. はじめに

学習内容に関して、児童・生徒は学校での授業で学習する以前から何らかの概念を有していることが知られている。これらの概念は、理科では特に素朴概念と呼ばれている。素朴概念は、児童・生徒の生活経験から児童・生徒自身の中でその概念が構築されるとされる。それ故に、素朴概念は科学的知識とは異なった内容であったり、相互に一貫性や整合性が欠けているものであったりすることが多くある^[1]。また、素朴概念は生徒の経験に基づいているため、学校での学習を経ても覆されることが難しい。理科学習において、児童・生徒の素朴概念を覆し、科学的概念を習得させることは、非常に重要である。

理科、特に力学についての素朴概念は欧米を中心に多くの研究がなされている。小・中学校で児童・生徒が学習する力学は、一般にニュートン力学といわれるものである。児童・生徒の持つ素朴概念の代表的なものとして、物体にはたらく力とその物体の運動の関係についての法則に関するものがある。例えば1980年にClementは「運動する物体には、その運動と同じ方向の力がはたらき続けている(Motion Implies Force 以下MIFとする)」という素朴概念を多くの児童・生徒が持っていることを明らかにした^[2]。これらの素朴概念の調査から、力と物体の運動の関係の理解は児童・生徒にとって困難であることがわかる。

児童・生徒のニュートン力学の法則などに関する概念を調査する方法として、「Force Concept Inventory(FCI)」^[3]や「Force and Motion Conceptual Evaluation(FMCE)」^[4]などが開発されている。我が国でもMIF的素朴概念を有しているかの調査が、多く実施されている。例えば、平成14(2002)年度高等学校教育課程実施状況調査^[5]の物理IB B2(2) ボールの投げ上げ問題でその傾向が見られる。この問題はボールを投げ上げた時、上昇中、最高点、下降中の各地点でボールにはたらく力の向きを問うものである。投げ上げたボールにはたらく力は重力のみであり、常に下向きにはたらくのが正しい解答となる。出題者の設定した正答率は50~60%であったが、実際の生徒の正答率は22.5%しかなかった。その一方で、MIF的な誤答選択肢の回答率は59.5%にも上った。小中学校や高等学校の児童・生徒に限らず、大学においても、このMIF的素朴概念を保有している学生は多いという調査報告はなされている^[6]。これらの結果から我が国においても、MIF的素朴概念を持つ生徒は数多くおり、これらの児童・生徒の素朴概念を覆し、ニュートン力学の概念理解が可能となるような支援が必要である。

力学の学習の難しさには、児童・生徒がMIF的素朴概念を保有していることに加え、中学校理科では力がベクトルであり、力のベクトルを矢印記号で表現することが難しいという先行研究もある^[7]。

我々は、教科書で説明に用いられる図も、力と運動の理解を難しくしている一因になっていると考えた。力は前述のようにベクトルであり、「はたらく向き」と「大きさ」を矢印の記号で表すことをルールとしている。しかし、矢印は日常生活でも「方向」や「動き」を表す記号として使われているため、教科書の図では、理科で「力」を表す記号としての矢印と、「物体の動き」を表す記号としての矢印が混同している場合があった。例えば、落下する物体にはたらく重力を説明する図として、落下する物体の時間経過を示すをストロボ写真が載っており、各時間ごとの物体にはたらく「重力」が物体の中心から下向きの「青い矢印」を描くことで表わされている。一方、同じ教科書中で、ボールが斜面を転がり上がる様子の写真が載っており、ボールが

斜面を上る方向に「運動の向き」として斜め上向きの「青い矢印」が用いられている。ここでは、ボールに重力がはたらいているが、重力は明記されておらず、斜面方向の重力の分力が「斜面に沿った力」としてボールの中心から斜め下向きの「オレンジ色の矢印」を用いて表現されている。このように「力」と「物体の動く方向」の両方を矢印で表現する記述は、複数の教科書で見られた。教科書では、矢印の色についての配慮もなく、初学者は、教科書の図に表現されている「物体の動く向き」にも「力」がはたらいていると誤解しかねない。教科書の図が、むしろMIF的概念を強める可能性があると考えられる。

本研究では、力と物体の運動の単元において、ベクトルである力が歴史的に教科書でどのように記述されてきたのかについて調査し、理科のルールと日常生活の混同を避け、生徒が理解しやすくなるような表現方法を探る。なお、理科における力の矢印と、日常生活で用いている矢印の混同がどのように起きているかの調査については、神村が修士論文で研究を行っている^[8]。

2. 教科書における力とその記号的表現

2-1. 研究目的

まず、現在の中学校理科において、力について学習すべき内容について述べる。平成20(2008)年に施行された中学校学習指導要領においては、「身近な物理現象」において、力について「力には、大きさ、向き、作用点という要素があり、力を大きさと向きの矢印を用いて表すことができることを理解させる。」という記述がある^[9]。つまり、力の矢印には「大きさ」と「向き」を表すベクトルとしての意味があることが明示されている。また、力のはたらきについても「物体に力がはたらくとその物体が変形したり動き始めたり、運動の様子が変わったりすることを見いだすとともに、力は大きさと向きによって表される」という記述がある。全ての教科書において、学習指導要領にあるように、力を矢印を用いて表現する図を用いている。しかし、前述のように動きの向きの矢印が描かれていたり、斜面上の物体にはたらく重力が斜面の平行成分のみ描かれていたり、その平行成分を重力と明言していなかったり、斜面方向の力と表記するなど不完全な記述の教科書もみられる。

そこで、力が日本の理科教育において歴史的にどのように導入されてきたのか、「力の定義」、「ベクトルとしての力」、「物体の運動と力」の3つの観点について、明治初期の舶来教科書と、その後明治期に日本人によって執筆された教科書では、どのように記述されているのかについて検討を行う。さらに、図を用いて力を矢印を用いてを表記しているかどうか、表記している場合はどのような矢印の表現になっているのか、生徒が混同しやすい図の表現はあるのかについて分析する。なお、本論文ではベクトルとしての力を示す矢印のことを「力の矢印」と表現する。

2-2. 分析に用いた教科書

日本で近代科学教育が始まったのは明治初期であるといわれている。1871(明治4)年に現在の文部科学省の前身である文部省が設立された。翌年1872(明治5)年に「学制」と呼ばれる教育の法令が交付され、全国で学校教育が開始された^[10]。1873(明治6)年には東京開成学校が設立され、この学校は東京大学理学部の“準備段階”をなす“中等教育機関”的なものであったと一般にいわれている。

当時、日本が教育を近代化するにあたり、参考としたのは欧米であった。教科書も欧米で用いられていたものを輸入し、それを用いていた。日本の教科書といわれるものは、しばらくはそれらの舶来教科書を翻訳したものであった。

東京開成学校において、1974(明治7)年にはベクトルが教授されていたといわれている^[11]。それは高等数学の授業においてであった。では、物理学、特に力学においてはいつ頃、どのように教授されはじめたのだろうか。当時、東京開成学校で用いられていた物理の教科書としては、アメリカのQuackenbosの“Natural philosophy”やフランスのGanotの教科書の英訳版である“Elementary Treatise on Physics Experiment”などがあるとされている^[12]。これらの教科書のうち、Swift, Olmsted, Parkerなどの初等向け教科書は、分析対象から外した。表1は本研究では分析に用いた教科書とその発行年である。

また、明治30年頃までの中等教育で用いられた教科書のうち、表2に示した日本人によって執筆された4種を分析の対象とした^[13]。ただし、入手できた教科書は、初版ではない。

表1 分析に用いた舶来の物理教科書

発行年	書籍名	著者
1874	“Nantural Philosophy”	G.P. Quackenbos
1878	“Lessons in Elementary Physics”	B.Stewart
1879	“Elementary Treatise On Physics Experimental And Applied”	A. Ganot
1894	“Elementary Treatise on Natural Philosophy”	J.D.Everett

表2 分析に用いた日本人執筆による物理教科書

発行年	書籍名	著者
1893(明治26)	『新編中学物理学』	木村駿吉
1894(明治27)	『物理学教科書』	菊池熊太郎
1899(明治32)(明治39改版)	『近世物理学教科書』	中村清二
1903(明治36)	『中学物理学教科書』	早川金之助

2-3. 分析した教科書における力の定義とその表現

2-2-1. G.P.Quackenbosの“Natural Philosophy”

用いた教科書は、アメリカのG.P.Quackenbosの“A Natural Philosophy : the Most Recent Discoveries in the Various Branches of Physics and Exhibiting the Application of Scientific Principles in Every-day Life”(1874)であり、REVISED EDITIONとの記述がある。全19章456頁で構成されている^[14]。

Quackenbosの教科書ではChapter 1 Matter and its Formsで力(Force)の定義を次のように行っている。

Whatever acts on a body, to change its form, state, or relation to other bodies, is a Force. Heat, light, electricity, are Forces. It is by the action of Forces on matter that the various phenomena of the universe are produced. (p.7)

この教科書においては、力は形と状態を変えるものであるという説明がなされ、このような説明はこれ以降の明治期の舶来教科書ではなされていない。また、Chapter2 Properties of Matterにおいて

When a stationary body begins to move, or a moving body comes to rest, it is not through any power of its own, but because it is acted on by some external agency, which we call a Force.

とも記している。こちらでは、運動を変化させるという力のはたらしに注目した説明がなされている。

Chapter 1, 2で力の定義をし、その後Chapter 4で運動の三法則を説明している。その中で力の合成の場面がある。その例として川の流れとボートを出している。この例では、図1のように、二方向の力を平行四辺形を用いて合成できることを示している。一方で、力の分解を説明するものは見られなかった。

力の表現に関して、Quackenbosは「矢そのもの」の記号を用いている。また、その用法は「向き」を表すために用いている。教科書でのその他の用例を見る限り、これは「動きの向き」を表すものであると考えられる。例えば図2では、てこを使いものを持ち上げる様子を描いてあるが、腕を動かすことで力を加える際の、「腕の動き」を矢そのものを用いて表している。

この教科書では「矢そのもの」の記号を用いていたが、「動き」を表す記号としてであり、力を意味する矢印は用いられていなかった。また、力がベクトルであるという説明はなされていなかった。力の分解も扱っていなかった。

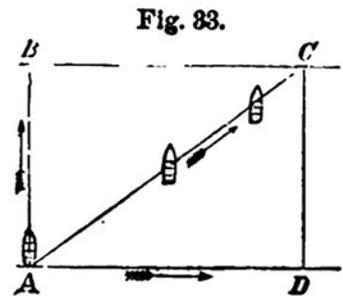


図1 Quackenbosの教科書における力の合成

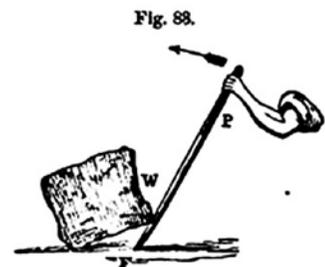


図2 Quackenbosの教科書における動きを示す矢印

2-2-2. B.Stewartの“Lessons in Elementary Physics”

用いた教科書は、イギリスのB.Stewartの“Lessons in Elementary Physics”(1878)である。ただし、参照したのは「New edition」であり、初版より「音」の内容が追加されている。全9章383ページで構成されている^[15]。StewartもQuackenbosと同様に、一番初めのChapter1-1で力の定義を行っており、次のように力を定義している。

In fact that which changes the state of a body is called force, whether that state be one of rest or of motion. (p.5)

このように、運動している、または静止している物体の状態を変化させるものとして力を定義している。Quackenbosの教科書にあった「物体を変形させる」という記述がなくなっていた。一方で、運動の状態を変化させることに関しては、本文中でも太字で書かれていたことから、力のはたらきについて速度を変えるという点に重点を置いていたものと考えられる。

その後、Chapter1-2から運動の三法則に関する内容を扱っている。力の内容はChapter1-4の運動の第二法則の項で扱っている。図3は「24. Forces in Different Directions」における力の合成を説明する図である。この図では、AからBの向きにはたらいている力と、AからDの向きにはたらく力を合成しACの力となることを説明している。その際に、力には向きがあることと、線分の長さによって力の大きさが表されることを説明している。この図では力の表現にあたって、矢印を用いていない。

一方、図4は2力の合成を示した図である。力ABと力ACを合成すると力ADとなる。これがAD'と釣り合うことを示している。ここでは、力の大きさとして「Magnitude」と力の向きとして「Direction」という単語があり、この図では力を矢印によって表している。矢印の表記として、力AD'のように矢じりが端に付いたものと、力AB・力ACのように中間についたものが混在していることがわかる。

このことから、力を矢印で表すにしても、同一教科書内で表記の仕方にもばらつきがあったことがわかる。この時期から力を矢印で表記することはあったものの、「矢印の始点から矢じりまでの長さが力の大きさ」を表すという共通の認識ではなかったと考えられる。

Stewartの教科書を川本清一が日本語訳し、東京大学理学部で用いられていた『士都華氏物理学』（1878(明治11)）では、力の定義が「力の定位とは時一即一秒時間に質量一即一グラムの物質をして速力一足一秒時一メートルの速力を発せしむるの力を謂う…(後略)」となっている。力の合成は図3、図4と同じ図を用いており、力は線分で記し、力の大きさと方向を表すとされていた。川本も図中に矢印が描かれているにも関わらず、本文中に矢印や矢じりを用いて方向を表すとは書いていなかった。

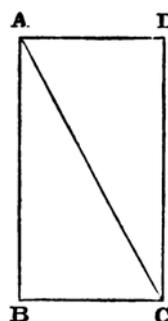


FIG. 7.

図3 Stewartの教科書における力の合成



FIG. 9.

図4 Stewart教科書における3力の釣り合い

2-2-3. Ganotの“Elementary Treatise on Physics Experimental and Applied”

用いた教科書はフランスのGanotの教科書のあり、E.Atkinsonによって英訳された“Elementary Treatise on Experimental and Applied for the Use of College and School”(1879)である。この教科書は全10章から構成されており、力は第1章 On Matter, Force, and Motionで説明されている^[16]。

Ganotの教科書では力を次のように定義している。

When a material point is at rest, it has no innate power of changing its state of rest; when it is in motion it has no innate power of changing its state of uniform motion in a straight line. This property of matter is termed its inertia (19). Any cause which sets a point in motion or which changes the magnitude or direction of its velocity if in motion is a force.

Ganotは、力のはたらきを運動の状態を変化させるものとして捉えている。

この教科書では、力の合成を線分を使って表現している。

If two forces act on a point, and if lines be drawn from that point representing the forces in magnitude and direction, and on these lines as sides a parallelogram be constructed, their resultant will be represented in magnitude and direction by that diagonal which passes through the point.

とあるように、力の大きさ (magnitude) と向き (direction) が線によって表されると述べている。また、線も力の線だけを描くのではなく、力のはたらく直線上に力の大きさを表す長さの点を指定することで、力の大きさを表現している。例えば、図5のように力ABは力のはたらく直線AP上に、力の大きさを表す点Bを置くことで力ABを表している。そして、実線で示された力ABと力ACを合成すると点線で示された力ADとなることを説明している。この図では力を表す際に矢印を用いていない。

図6もまた、複数の力の合成の図である。力ABと力ACを合成することで合力AFとなる。さらに、力AFと力ADを合成して力AGが、力AGと力AEを合成することで合力AHが合成されることを表している。力を表現する際に、矢印を用いて力の向きを表しているが、現在の力の矢印のように力の向きと大きさを同時に表してはいない。

現在の力の矢印記号が含む力の向きと大きさを意味するものとしては表されていなかった。

力の分解に関しては、斜面上の物体の力についての項で説明されていた。また、斜面に関しては、物を持ち上げる際にどれだけ力を軽減できるのかに注目している。この斜面の力では、幾何学的方法を用いて、力を分解しての説明を行っていた。この図7では、力を矢印ではなく、線分を用いて表していた。

Ganotの教科書について、Stewartの教科書同様に矢印を用いた力の表現が見られた。しかし、図によっては、矢印をもちいていない図も見られたために、力の表現は明確に定まっていなかったものと思われる。力を説明する際に、矢印を用いているが、単に方向を意味する記号としての矢印であり、ベクトルとしての力そのものを表す力の矢印を用いている図は見られなかった。

2-2-4. Everettの“Elementary Treatise on Natural Philosophy”

用いた教科書はJ.D. Everettの“Elementary Treatise on Natural Philosophy”(1894)であり、第13版である。全23章で構成されており、力学はChapter2の「First Principles of Dynamics, Statics」から始まる^[17]。

Everettの教科書では、Chapter2-4において力を次のように定義している。
Force may be defined as that which tends to produce motion in a body at rest, or to produce change of motion in a body which is moving. A particle is said to have uniform or unchanged motion when it moves in a straight line with constant velocity; and every deviation of material particles from uniform motion is due to forces acting upon them.

この定義では、運動の第一法則、第二法則とは明言していないものの、これらの法則と関連付けた説明を行っている。ここでも、現在の力の働きと比べて、物体を変形させるという記述がされていない。その後、力に関する説明が続いていく。

力の矢印はChapter2の§14 Three Forces Meeting in a Point. Triangle of Forcesで初めて出てくる。この項では、力の釣り合いについて説明しており、図8のように力の矢印を用いて、説明を行っている。また“the length of

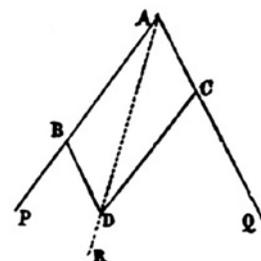


Fig. 8.

図5 Ganotの教科書における二力の合成

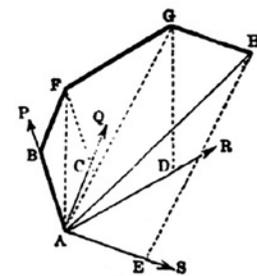


Fig. 11.

図6 Ganotの教科書における複数の力の合成

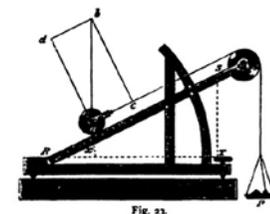


Fig. 23.

図7 Ganotの教科書における力の分解

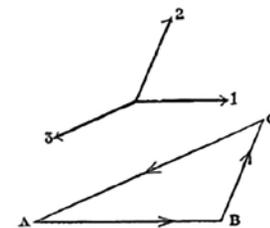


Fig. 1.—Triangle of Forces.

図8 Everettの教科書における力の釣り合いの図

AB represents the magnitude of the force.”との記述があり、力の矢印について、矢線の長さが、力の大きさを表現することが述べられている。“When a line is used to represent a force, it is always necessary to employ an arrow or some other mark of direction”ともあるように、矢印などの記号によって力の向きと大きさを記すことが説明されている。Everettは力を表すときには矢印などの記号を用いることを明言しており、従来の力の大きさを線分のみで表すことから、加えて、力の向きを意識した図的表現が必要であるという主張がみとれる。

力の合成は同Chapterの「16. Parallelogram of Forces」で力の平行四辺形の説明がされている。力ABと力ACの合力ADがABとACの平行四辺形の対角線によって描くことができることを説明している。しかし、この図では力の矢印を用いておらず、単なる線分によって説明されている(図9)。

また、力の分解はChapter4 The Mechanical Powersの§64 Inclined Planeで説明されている。この教科書でも、力の分解については斜面の項において扱っている。図10では、物体にはたらく重力MPを斜面との垂直成分MNと、平行成分MTに分解している。ここでも、MP, MN, MTは力であると明記されているにも関わらず、それぞれの力は線分によって表されている。

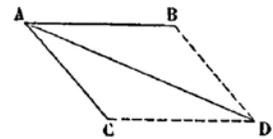


Fig. 2.—Parallelogram of Forces.

図9 Everettの教科書における力の平行四辺形

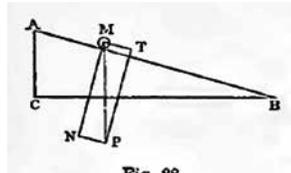


Fig. 23.

図10 Everettの教科書における力の分解

2-2-5. 菊池熊太郎の『物理学教科書』

用いた教科書は、菊池熊太郎の『物理学教科書』(明治27年)であり、何度か改訂を重ねている^[18]。上下巻全6編で構成されており、力学は上巻の第2編に含まれる。

菊池の教科書では、第一編第一章第七節において力を次のように説明している。

力とは物体の運動を誘起し或いはその運動を変じ、或いは停止せしむるものなり。力の本性は全く究極すべからずと雖、各般の現象は必ず力に由来するものにて、力は即ち万象の原因なり。

このように、菊池は力を物体の運動をもたらす、或いは運動を妨げるものであると説明する。また、菊池は力の有無について「現象によって力の存在を認識する」ともいっている。この教科書での力の認識は、力と物体の運動とが深く関わりあっているという視点であることが読み取れる。

また第一編第一章第八節において、力の単位を定義している。

一ぐらむの質量に一秒時間働き、これを一秒メートルの速度を興するものは即ち単位の力なり。

ここで「秒メートル」という単位は速度の単位であり、同章第六節で定義している。つまり、「1グラムの物体に一秒間働き、その物体が1メートル毎秒の速度で運動する力」を力の基本単位であると説明している。また、1グラムの物体に1秒間働き、1cm毎秒の速度を与える力を「1だいん」とも定義している。こちらにおいても、力と運動を関連させた説明がなされている。

第2編第3章第1節「力を図式に表わす法」において力の表現について、力の向きと大きさを、運動と関連付けて、図を用いて説明している。力の合成の説明で、線分の中ほどに矢を付けた矢印を用いた図が見られた(図11)。また合成した力を「合成力」という呼び方をしていた。

力の分解は、第七章第六節 斜面の項で扱っている。斜面上の物体にはたらく重力をWとして、斜面ABCと同じ三角形abcを描いている(図12)。辺ac上に斜面と重力Wの垂直成分Rを、辺cb上と物体から斜面に対して重力Wの平行成分Pを描いている。この図では、重力Wを分解しており、重力W及び分力P(スキャンの際に紙が燃れている可能性がある)、分力R共に力を描くときに端に矢じりを付けているように見える。この力の大きさを比によって求めており、分力

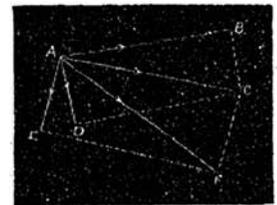


図11 菊池の教科書における力の合成

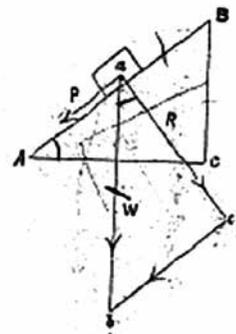


図12 菊池の教科書における力の分解

Pの大きさを辺cb上に描き表している。

ただし、「力を図に表す法」で力の大きさを「球を打った時の移動距離」によって、その大小について説明しており、それを図で表現する際には、その球の移動距離を矢印で表現している。したがって、この教科書では、力と運動を関連付けて説明している点は分かりやすいが、矢印の用法については力と運動が混同する可能性がある。

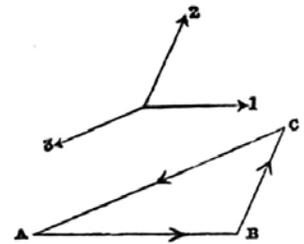
2-2-6. 木村駿吉の『新編物理学書』

用いた教科書は木村駿吉の『新編物理学書』(1895(明治28))である^[19]。木村は、この教科書を作成する際にEverettの“Elementary Treatise on Natural Philosophy”を参考としており、図はEverettのものと同じものが数多く存在している。

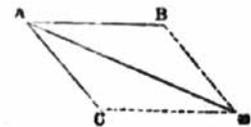
木村の教科書では、第1編第1章力学において力を次のように定義している。

力とは静止せる物体に働きて其運動を生じまたは運動せる物体に働きて其運動を変ずるものなり (p.17)

木村もまた、力とは物体の運動と関係するものであると捉えている事がわかる。また、「○二十 一点にはたらく力を確定する事」において「一個の力を確定するには其の大きさと為働点と働きの道との三者を知るを以て必要且十分なりとなす」と説明している。ここでの為働点とは作用点のことであり、働きの道とは力の方向であると考えられる。「○二十二 力の三角形」では図13に示すように「A点より二力の一に平行する直線ABを引き、其の方向を同一とならしめ(則ち鎌をAよりBに向けて書く)其の長さを以て力の大きさを示すものとなし。」と力の表し方を説明している。木村は力の向きを表す際に、向きを「鎌」で表すと説明しており、図13のように力の表現に矢印を用いている。現在の力の矢印は矢じりを線分の端に付けることが決められているが、ここでは、矢じりが矢印の端に付いたものと中ほどに付いたものの両方を用いている。



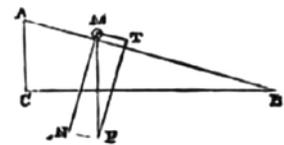
図三第
図13 木村駿吉の教科書における力の表現



図四第
図14 木村駿吉の教科書における力の合成

力の合成については、現在と同様に平行四辺形を用いた解釈を行っている。合成については「二個の力が互に角をなしてはたらくときは、其合力は此二力を表はす所の二線と是と平行せる他の二線より成る平行四辺形の対角線によりて表はさる力なり」としている。図14をみると、力ABと力ACの合力をもとめる議論をしている。図13では力の表現に矢印を用いていたが、図14では、線分のみで力を表している。

分解についても図15のように「ACは互に角をなしてはたらく所の二力より成る平行四辺形の対角線なるが故に、C点よりABに平行に且つABに等しくCDなる線を引き、BC及びADを連ねて平行四辺形を作るときは、力の組合の理に由りADはABと共にAよりCに送るものなり故にADは求むる所の分力なり」という議論をしており、力の平行四辺形を用いての理解を進める様子がみられる。ここでも図14と同様に、力を表す際に線分を用いており、矢印や力の矢印は用いていない。



図五二第
図15 木村駿吉の教科書における力の分解

2-2-7. 中村清二の『近世物理学教科書』

用いた教科書は中村の『近世物理学教科書』(1900(明治33))である。この教科書は全9編で構成されている^[20]。

中村は第1編第1章総論で力を次のように定義している。

物体の運動を変せしむる原因を総て力と称す。(p.6)

また第2編第1章「二七 力の絶対単位」で力の単位としては「だいん」を用いることが述べられている。「運

動の第二法則によりて、力の単位を定む」とあることから、力という概念を運動方程式から説明していることが分かる。

力自体については、52ページから「第三章 力」において説明をしている。「三五 力の組立」「三六 力の分解」「三七 斜面」「三八 力の釣合」と続いていく。

「三五 力の組立」では「力に関して三の要素あり、其方向、着力点及び強さはなり 力は一の直線にて代表せしむることを得」としている。力の要素として、「力の向き」「力の作用点」「力の大きさ」を説明している。これは、現在と力の三要素と同様である。また「其法は着力点より、力の方向に沿うて一の直線を引き、其長さをして力の強さに比例せしむる在り」とも書かれている。力の表現として説明しているのが、力の大きさと向き、作用点の表し方に留まり、「矢印」や「矢じり」のような言葉は用いられておらず、ベクトル記号的な表現をすることは定められていない。しかし、図16では力を矢印を用いた表現をしており、さらに、矢じりは線分の端に描かれていた。

力の分解に関しては「三七 斜面」の項で物体にはたらく力について述べられている。図17を示しながら「地上にある重物を高所に揚ぐるによりて、垂直に引き上ぐるには、其重さに抗するに足る丈の力を用いざるべからず、然るに図のごとく、斜に板を架し、此板面に沿うて引上ぐるときは、小なる力にて足る」としている。

図17では物体を質点として扱っており、その質点から重力の矢印が描かれている。さらにその重力を分力 p と q に分解している。ここでも、用いられている矢印は、矢線の端に矢じりが付いている。中村は力の矢印を用いて力を表現していたといえる。

2-2-8. 早川金之助の『中学物理学教科書』

用いた教科書は早川金之助の『中学物理学教科書』（1903(明治36)）である^[21]。この教科書は全7編で構成されており、第3編力学及び物性「第1章 力」において、力は次のように定義されている。

総ての物体の運動の状態を変化せしむる如き作用を名づけて力といひ、運動を変化せしめらるる物体を力を受けたりといふ(中略)力はまた物体の形状・容積を変化せしむることを得

力は、物体の運動の変化を及ぼすものという捉え方である。また、力のはたらしとして物体の形を変化させる点についても言及している。

同章「七二 一点に働く力の合成と分解」では、力の表し方と、力の合成・分解を説明している。力の特性として、「力は三つの特性を備ふ、大きさ・方向及び其の作用する点はなり」とあり、「力は直線にて図に表さる、即ち其の作用する点より力の方向に直線を引き、其の長さをちょうど力の大きさを表す様になせば可なり。」力の大きさは直線の長さをもって表されることがいわれている。

力の合成に関しては、図18のように「一点に二力同時にはたらくときは、此の二力を表す直線 FF' と二辺とする平行四辺形の対角線 R を作れば R の一方と前の二力と、其の効果を同じくす」との説明がある。点 P にはたらく力 F_1 と力 F_2 を合成すると合力 R となることが説明されており、この力の合成を力の中斜法と呼称している。この図18では、力は矢線の端に矢じりが付いており、力の矢印で表現しているといえる。この項で力の表し方を紹介し、力の矢印を用いて力を表現している。力の大きさは線分の長さ

圖三十第

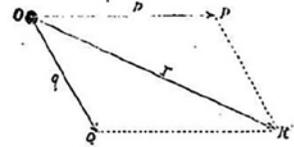


図16 中川の教科書における力の合成の図

圖四十第

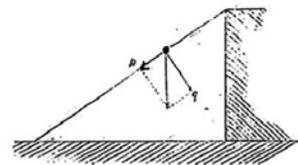


図17 中村清二の教科書における斜面の物体にはたらく重力の分解

圖九十六第

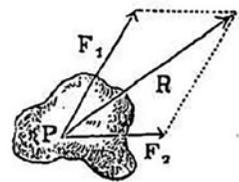


図18 早川の教科書における力の合成

圖九十七第

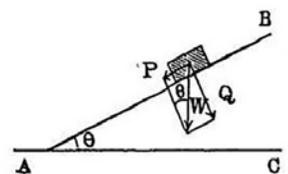


図19 早川の教科書における力の分解

で表すことは記述されていたものの、矢じりで力の向きを表すことには触れておらず、力を力の矢印で描くことは明記されていなかった。

同様の操作を行うことで力の分解ができることも記されている。また、力の分解は第三編第二章 固体静力学-固体の性質の第二節 器械の「斜面」においても扱われている。図19のように物体にはたらく重力Wを斜面の平行成分の力Pと垂直成分の力Qに分解し、これの大きさについての説明がなされている。「 $P=W\sin\theta$ 」のように三角関数を用い、この斜面で、物体を引き上げるの力がどれだけ軽減されるかに注目している。斜面上の物体にはたらく力に関しては、現在と同じ操作を行っているといえる。ここでも、重力Wや分力P、Qを力の矢印で表現しおり、現在の表現と同様に矢線の端に矢じりが付けられたものである。

早川は速度を表す際にもベクトル表現を用いていた。運動に関して、速度が変化する運動について説明がなされており、平行四辺形を使った速度の合成が行われている。ここでは力のように合成が可能であるという説明はなく、このように合成できるとだけ端的に示してある。図20のように速度の変化の説明に矢印表現が用いられている。早川の教科書では速度をベクトルとしてとらえ、力だけでなく速度も矢線ベクトルによって表現していた。

圖 十 二 百 第

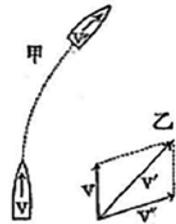


図 20 早川の教科書における速度の表現

2-3. 分析した教科書における運動している物体の運動方向の表現とはたらく力の図的表現

このように、明治初期から中期にかけて用いられていたとされる物理教科書では、力を表現する際に、「向き」「大きさ」「作用点」などのベクトルとして必要な要素が明記されていた。それらを図に書き表す際に矢印を用いる図は、Everett、木村、中村、早川の教科書内に見ることができた。しかし、力を矢印で書き表すといったルールの記述は本文中に見られなかった。Everettの教科書では、矢やそれに代わるもので向きを示すこと、木村の教科書では、鎌という語を使い線分中に向きを示すことが記述されていた。

それでは、力と物体の運動に関する図はどのように描き表されていたのだろうか。今回分析した明治期の教科書では、力のはたらく運動としては、自由落下と放物運動が扱われていた。現在の中学校理科の教科書では、自由落下と斜面を下る物体の運動が扱われている。しかし、明治期の教科書では、斜面とは、力を軽減する道具として扱うことが多いため、力の分解に注目しており、斜面を下るといふ運動は扱われていない。自由落下については、どの教科書でも、アトウッドの実験機の図(図21)を載せており、特に重力や動きを表す矢印の図は見られなかった。

一方、放物運動については多様な表現が見られた。図21から図28は各教科書における放物運動を示した図である。Everettの教科書では水平投射の図、そのほかの教科書では、斜方投射の図を載せている。

放物運動の図22から図29では、物体の軌跡を線で示しており、矢印は用いていなかった。多くの図では、斜めに運動する物体が、重力がはたらかなかつた場合の軌跡と重力がはたらく実際の軌跡を並び示している。これらの図において、物体にはたらく力は図示されていない。

しかし、図28と中村と図29の早川の教科書では、運動の向きの矢印を用いている。特に早川の教科書では軌跡の線に添えられる形で矢印が併記されている。これは現在の教科書中の図にもみられる運動方向を示す表現である。力の向きと運動の向きの混同の要因になり得る図的表現である運動方向の矢印は、この時期の教科書から始まっており、これは現在の教科書にも続いている。よって、明治中期の教科書から物体の運動方向の矢印が用いられ始めたものであると考えられる。

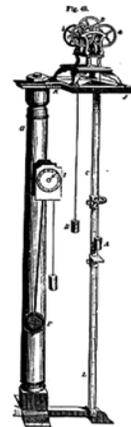


図 21 アトウッドの実験機の図

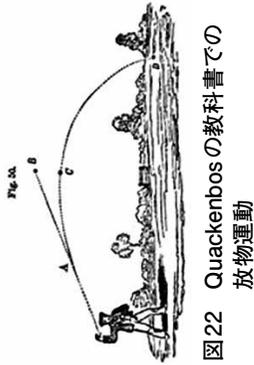


図22 Quackenbosの教科書での放物運動

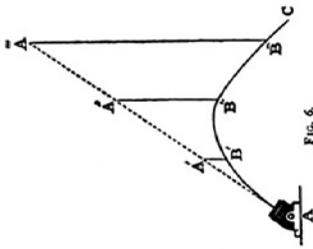


図23 Stewartの教科書での放物運動



図26 菊池熊太郎の教科書での放物運動

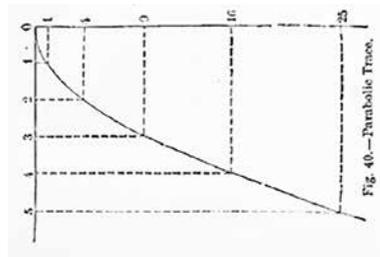


図25 Everettの教科書での放物運動

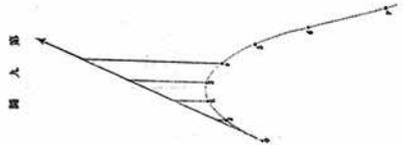


図28 中村清二の教科書での放物運動

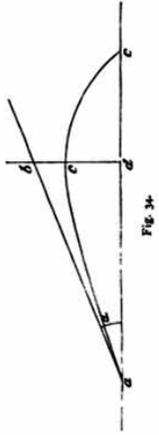


図24 Ganotの教科書での放物運動



図27 木村駿吉の教科書での放物運動

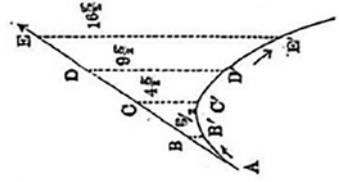


図29 早川金之助の教科書での放物運動

3. まとめ

力と物体の運動の学習において、児童・生徒が保有しているMIF的素朴概念に加え、教科書上の表記がより学習を難しくしている可能性があることから、力と運動が歴史的にどのように教科書で表現されてきたのかについて研究を行った。特に、力はベクトルであることを矢印記号を用いて表現するが、教科書においては動いている物体の動きを示すために矢印を用いて表記している場合もあり、図でどのように表記しているかにも注目した。具体的には、明治期の舶来教科書と日本の教科書における「力の定義」、「ベクトルとしての力」、「物体の運動と力」に注目し、分析を行った。

分析に用いた教科書8冊すべてにおいて、力は運動の状態を変化させるものとして定義されていた。ただし、Quackenbosの教科書のみ、形を変えとも記されていた。

ベクトルとしての力は、明治初期の教科書では、力を表す際には図に大きさを表す線分を用いて表現することが多く、向きが明示されていないものもあった。例えば、Stewartの教科書では、ベクトルを図で表す際に線分のみであったり、矢印を用いていたりして、両者が混同していた。また、矢印も線の中に矢じりがあるものと線の端に矢じりがあるものの混同もあった。Ganotの教科書では、力がはたらく方向を矢印で表していたものの、その線上に力の大きさとなる点を取ることで、力の大きさと向きを表していた。また、Quackenbosの教科書では、力のベクトルを表す際に矢印も用いていたが、力の大きさを表す際に線分の脇に、力の向きを表す矢そのものの記号を用いて表しているなど、矢印を用いても、その表記の方法は現在の「力の大きさを表す線分の端に矢じりを付ける」という表記の方法とは異なるものが多く、表現が定まっていなかったことが分かった。

このような多様なベクトル表記は、1900年の中村による『近世物理学教科書』では見られなくなる。現在と同じような力の矢印表現になり、斜面上の物体にはたらく重力の分解においても、分力の矢印も描かれている。1901年は、J.W.Gibbsが“Vector Analysis”というベクトル解析の教科書を出版した年である^[22]。1900年頃を境に、ベクトルという概念が一般的に広く認識され、ベクトルの表現も共通のものになっていったと考えられる。

一方で、力と物体の運動の混同を引き起こすような図の表現も明治期の教科書から既に見ることができた。本研究で調査対象とした教科書のうち、放物運動において物体の運動方向の矢印も描かれているものがあった。放物運動の図には物体の軌跡が描かれており、多くの教科書では重力がはたらかなかつた場合とはたっていた場合の2種類の軌跡が描かれていたが、早川の教科書においては物体の軌跡の線の脇に、進行方向に矢印が描かれていた。

運動する物体には、その運動と同じ方向の力がはたらき続けているという素朴概念の存在が明らかになったのは、早川の教科書が執筆された約80年後である。物体が運動する様子を図で表現するには、矢印を用いることが分かりやすい。しかし、不用意に矢印を用いることで運動と力の向きが混同される恐れがあり、現在における教科書中の図でも混同を招くような矢印が用いられている。素朴概念が明らかになった現在において、生徒に教授する際には、この力と運動を混同するような矢印を使用しないように意識し、力と運動の単元の生徒の概念理解に繋げたい。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費 2570071,15H02912,15K12373 によるものである。

参考文献および注

- [1] 新田英雄, 「素朴概念の分類」, 物理教育, 60(1), (2012)17-22.
- [2] John Clement, Am. J. Phys., 50(1), (1982) 66-71.
- [3] Hestens, M.Welse & G.Swachkamer, Phys. Teach. 33, (1992) 142-148.
- [4] R.Soronton & D.Socoloff, Am. J.Phys, 66(4), (1998), 228-351.
- [5] 国立教育政策研究所教育課程研究センター, 平成14年度高等学校教育課程実施状況調査, (2002).
- [6] 神村圭佑, 「物体の運動と力の理解を深めるリアルタイムな表現を可能とするICT教材の開発」, 新潟大学教育学部卒業論文, (2015).
- [7] 貫井正納, 物理教育, 26(3), (1978), 214-219.
- [8] 神村圭佑, 新潟大学大学院教育学研究科修士論文, (2017 予定).
- [9] 文部科学省, 「中学校学習指導要領解説 理科編」, (2008).
- [10] 板倉聖宜, 『日本理科教育史(付・年表)』, 仮説社, (1968); 『増補日本理科教育史(付・年表)』, 仮説社, (2009).
- [11] 公田蔵, 「日本の数学教育とベクトル その百二十五年」, 数理解析研究所講究録, 1317巻, (2003) 190-204.
- [12] 中川保雄, 「明治初期の物理教育の形成とアメリカ, イギリスの物理教科書」, 科学史研究II(16), (1977) 38-46.
- [13] 教科書研究センター, 『旧制中等学校 教科内容の変遷』, ぎょうせい, (1984).
- [14] G.P.Quackenbos, "A Natural Philosophy : the Most Recent Discoveries in the Various Branches of Physics and Exhibiting the Application of Scientific Principles in Every-day Life", D.Appleton and Company, (1874).
- [15] B.Stewart, "Lessen in Elementary Physics", D.Appleton and Company, (1878).
- [16] Ganot, A.K.Atkins 訳, "Elementary Treatise on Physics Experimental and Applied", William Wood and CO, (1971).
- [17] J.D. Everett, "Elementary Treatise on Natural Philosophy", D.Appleton and Company, (1894).
- [18] 菊池熊太郎, 『物理学教科書』, 敬業社, (1894(明治27)).
- [19] 木村駿吉, 『新編物理学書』, 内田老鶴圃, (1895(明治28)).
- [20] 中村清二, 『近世中物理学』, 富山房, (1900(明治33)).
- [21] 早川金之助, 『中学物理学教科書』, 金港堂, (1903(明治36)).
- [22] J.W.Gibbs, Edwin Bidwell Wilson, "Vector Analysis", Dover Publications, (1901).