

中等理科教育で扱う物理学分野の本質

Essence of Physics at Secondary School Science Education

顧 萍 井 嶋 博 石 塚 亙
 Ping Gu Hiroshi IJIMA Wataru ISHIZUKA
 (和歌山大学教育学部) (和歌山大学教育学部) (和歌山大学教育学部)

木曾田 賢 治 富 田 晃 彦
 Kenji KISODA Akihiko TOMITA
 (和歌山大学教育学部) (和歌山大学教育学部)

2016年10月3日受理

Abstract

We introduce some typical features of physics which should be remembered in science education at lower secondary schools. Physics tries to accomplish the unified understanding of the universe. In cooperation with the other branches of science, as well as with engineering, physics education would be improved to make students obtain the perspective on nature.

はじめに

物理学は自然科学の典型であるが、特に基礎的な部分では自然に対するアプローチが他の科学分野とは異なる。描こうとする自然観・宇宙観とそのための方法論にそれが現れる。本稿では筆者らが考える物理学の一つの特徴を示し、筆者らが実践している具体的な教員養成段階での教育と関連させながら、中等理科教育段階でそれを適切に反映させることによる授業内容の改善についての考察を行う。

1. 学習指導要領理科の目標

中学校理科の目標は、学習指導要領で次のように述べられている。「自然の事物・現象に進んでかかわり、目的意識をもって観察、実験などを行い、科学的に探究する能力の基礎と態度を育てるとともに自然の事物・現象についての理解を深め、科学的な見方や考え方を養う」。小学校理科と高等学校理科の目標も同様であり、それぞれ「観察・実験により科学的な見方を養う」「観察・実験により科学的な自然観を育成する」である。学問としての物理学の目標も基本的にこれで

しかし、科学的な見方や考え方とはどのようなものなのか。理論の予想値と実験結果が一致することで理論の正しさが確認されるのだが、よく言われるこのような仮説・実験・検証のサイクルを採ることが、科学的な見方・考え方と同値なわけではない。中学校段階の前後を含め12年間を通じた理科教育の目標は、確立された一つの方法論を得ることではなく、個人それぞ

れによる「自然の事物・現象についての理解」の習得を支援することにある。

次章では教員養成教育の改善に繋ぐことを基調に、理科の中での物理学分野の特徴を採りあげて、重要性が見逃されがちな項目について検討を加える。学習指導要領の中の「科学的に探究する能力の基礎」は手段である。目標は知識の確実な習得ではなく、むしろそれらを覚えて忘れた後に残る「自然観」である。

2. 物理学の目標

物理学の特徴を捉えるには、その周辺から眺めてみるのが分かりやすい。化学は、物理学に比べると対象が極めて複雑であり、新しい物質を創り出すことが目標の一つである。生物学はさらに複雑化と特殊化が進んだ対象を扱う。一方で数学は、少数の公理から全てを導くことを目的とする。物理学はこれらの中間的な性格を持っており、森羅万象を統一的に理解する方向で宇宙を理解しようとする。理科の中での物理学の特徴がここに現れる。

中等教育段階では特に、知識の獲得を比較的重視せざるを得ない面はある。多くの教科書で記憶すべき単語やいわゆる公式が太字で強調され、問題を解く際には数値を代入して計算するための公式を覚えているかが試される。ところが近代以降の物理学が指向するのは逆に公式の数を減らす方向である。

物理学の大きな進展はこのような「統一」によりもたらされた。天上の惑星の運行に関わるヨハネス・ケプラーの観測²⁾から、これが地上の世界の運動と同じ

であるという力学がアイザック・ニュートンにより造られた³⁾。電気と磁気の本質的に同じであるという電磁気学がマイケル・ファラデーの実験⁴⁾からジェームズ・クラーク・マックスウェルの理論⁵⁾により、気体の性質に関するロバート・ボイルの観察⁶⁾と熱学と力学を併せた量子論が、分光の実験からプランクの量子仮説⁷⁾で、電磁気学と力学を併せた特殊相対性理論がマイケルソン＝モーレーの実験⁸⁾からアルベルト・アインシュタインにより完成された⁹⁾。現在の最大のテーマの一つは、量子論と相対性理論を統一する最終理論としての“The Final Theory”の構築である。

これらを可能にしてきたのは、各時代での観察、観測、実験の技術的な進歩に違いない。2016年現在で最高の精度を持つのは時間の計測でその有効桁数は17から18に達する¹⁰⁾。これは、1 mの標高差による時間の進み方の違いが現れるレベルであり、わたしたちの時間に対する常識的な概念を大きく揺るがす。望遠鏡や顕微鏡が分かりやすい例であるが、このような観察・実験の手段を用いて目では見えない世界に踏み込んで宇宙の仕組みを明らかにすることにこそ物理学の目標がある。

3. 中等理科教育における物理学教育

中等教育段階での「理科離れ」は端的には「物理離れ」と言い換えることができる。理科の他科目に比べても敬遠されがちであり、その理由として対象を直接に目で観察できる場合の数が少なくなることが考えられる。筆者らの一人が県立高校に教頭として勤務していた際にも、生徒から、目で見えないから電気分野は難しく感じるという声を聞いた。しかし先に述べたように、一面でこれは物理学の本質に因るのであり、ここを越えて物理学の面白さを生徒に伝えることができる力量を、教師には期待したい。

3-1. 定性的理解から定量的理解へ

物理学は、基本的には測定作業を伴う定量的な学問分野である。小学校理科の「おもしろさ」からここにステップアップする時期が中等教育段階にあたり、「物理離れ」が顕著になる時期に重なる。しかし、物理学の本来の魅力の一つがこの測定という行為に含まれるのであり、現在の測定の精度は先述のように驚異的な水準に達している。このことに触れずに科学の魅力を生徒たちに伝えることはできない。最新の成果を取り上げずにどうするのかとの想いは強いが、幸いにスーパー・サイエンス・ハイスクール(SSH)、サイエンス・パートナーシップ・プロジェクト(SSP)などの文部科学省の「科学技術・理科大好きプラン」¹¹⁾により、科学の先端を生徒たちに提示して興味・関心を高める試みが進められている。これらは実験等による定量的なアプローチを必須としており、教育効果は大きい。

和歌山大学教育学部附属中学校でも、2012年度から大学教員が中学生に授業を行う「知の冒険旅行」の中に物理学の内容を含めて、通常の授業の一步先の姿を提示することに筆者らが取り組んでいる。10講座の中から生徒が選択するが特に人気が高く、より高度な物理学の内容に対する生徒の関心は高いと考えられる。

3-2. 保存則の重要性

物理学では「保存法則」は最も重要な概念である。中学校あるいは高等学校で扱われる物理分野の重要な項目でもある。そこで扱われるのは「エネルギー保存」と「運動量保存」の2つであり、必要なもう一つの「角運動量保存」はこれまでも抜け落ちたままである。しかし玩具のヨーヨーやフィギュアスケートのスピンなど、角運動量は身近な事象にも現れ、必ずしも難解な概念ではない。筆者らが担当した大学の授業では、学生に次のような質問を毎年行っている。

質問：斜面を円盤が転がり落ちるとき、一方の円盤は中央部におもりを貼り付け、他方は周辺部に貼り付ける。速いのはどちらか、あるいは同時か？

これに前者が速いという正解を答える割合は2割～3割である。誤答の多くは「遠心力によって力を受けるので周辺部に貼り付ける方が速い」である。力の作用は部分に囚われて系全体を把握する妨げとなる場合が多いと考えられる。この例題を説明する際に最も簡明な方法は保存則によるものである。すなわち、円盤は回転運動をしているのでこれに運動エネルギーが伴っている。このエネルギーは、貼り付けられたおもりが回転軸から離れているほど大きい。全体が落下する速度に因るエネルギーの一部をこれに振り向けなければならないので、おもりを周辺部に貼り付ける方が全体の速さが小さくなる。

このような種類の誤理解が広く見られることから、現状は私たちの自然観の構築の際に必要な要素の一つを欠いていると懸念される。エネルギーと運動量の保存則は、本質的に時間と空間の一様性の反映であることが知られている¹²⁾。これは時計の0秒と物差しの0 mの地点の選び方が任意であると言い替えられる。これに方向の一様性を加えることは自然であろう。分度器の0度の向きを任意に採れるということである。この要請をすると、角運動量が保存されることが証明される。角運動量と、回転に因るエネルギーは通常は次の形で表現され、これらと運動量、運動エネルギーのそれぞれの表式との類似性は、生徒たちにとっても興味が湧くであろうと考えられる。

$$\text{角運動量} \quad L = I\omega \quad \text{式(1)}$$

$$\text{エネルギー} \quad E = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad \text{式(2)}$$

物理学の保存則は、銀河規模の宇宙から素粒子レベルのミクロの世界までを通じて完璧に成立している。物理学の自体が惑星の運行の観察から始まったことを先に述べたが、ケプラーの法則は角運動量保存則そのものである。角運動量の保存が重要なもう一つの例として、電気分野のローレンツ力による運動がある¹³⁾。フレミングの左手の法則に関わるローレンツ力は、作用反作用の関係が見えにくいために誤理解が生じやすい。教科書では慎重に外部磁場を一定不変なものとして扱うように記述されているが、このような不自然な扱いこそが、現状の物理学の教育内容の不十分さを示している。系を全体として捉えて保存量の発見に導くような形が、われわれはより適切であると考えている。

保存則の重要性と有用性は強調し過ぎることはない。物理学は、対象が持つ少数の特徴を抽出するところから始まる。他の科学分野、たとえば化学では、対象を可能な限り詳細に分析しようとする。この方向性が逆であることに両者の大きな違いがある。対象の気体が水素であるか酸素であるかに依らずに、共通する何かの量を測ろうとするのが物理学である。保存される量がエネルギーであれば、それを持つ物がなんであろうと問題ではなく、この意味で物質の種類に依らぬ「統一的」な理解を深めようとする。気体の場合にはそれは温度に当たる。

また、保存則は一般に広義の運動方程式と数学的に同値である。運動方程式の積分が保存量であり、それは私たちの時間と空間の捉え方と密接に関連する。したがって本質的にニュートン力学の体系は、統一された時空の概念に繋がり、保存則のみで理解することができるのである。このためには空間内での方向を考慮する際に問題となる角運動量の理解が欠かせない。中学校段階でも、少なくとも生徒からの質問に応えられるだけの知見を教師は持つておくことが望まれる。

3-3. 定性的理解による自然観

物理学の研究者の間でも、研究会などの場で屢々出される質問に「その物理的な意味は何か」というものがある。先に述べたように物理学の本質は定量性にあるのだが、その目標が宇宙の仕組みを明らかにすることである以上は、言語による記述が期待される。これまで述べたように、物理学は森羅万象を百科辞書的に記述し尽くすことを目指してはいない。逆に一見無関係に見える事象の間の共通性を発見し、それによって具体的な事物の個別性を越えた普遍性を明らかにしようとする。このために物理学の用語は、たとえば「この物体の速度」というよりも「速度一般」×「質量一般」=「運動量一般」などのように、抽象的な性格が

強まる。

生徒にとってはこのことが目に見えにくいために難解に感じられ、物理が敬遠される原因のひとつとなっていると考えられる。物理の授業で実験を行うことが生徒の関心を高める有効な手段であることは間違いないが、中学・高校の理科教師の研究会等で出される報告からも伺えるように、授業の総時間数から課せられる制約のために、またとりわけ高等学校では大学受験への準備のために、十分な時間を実験に当てられないのが実情である。

そこで、物理学のエッセンスの部分を絞り込むことが重要となる。多数の法則や公式から重要なものを選択することになるが、その際には「保存則」を揃えるのが適切である。それらは「エネルギー」と「運動量」に加えて「角運動量」であるべきなのだが、現在は大学で初めて修得するような教育の組立になっていることが、大きな障害となる。このことは不適切と言わざるを得ず、「一歩先を生徒に提示する」機会として、本稿で述べたSSHやSPPなどを利用した大学との連携が効果的に深められることを期待したい。これに積極的に関わることができるだけの力量を理科教師に備えることを、教員養成段階では努めたい。

3-4. アクティブ・ラーニング

学習者の主体性を活かした授業に関しては2016年時点で検討が進められており、次期指導要領改訂に伴ってより大幅に導入されることになる。教員養成段階でも各教科、各科目で対応が求められることになるが、物理学は座学主体の知識の習得を目標の分野と捉えられがちであるが、本稿で述べたように多くの事柄を記憶することは必要ではなくむしろ逆である。学習者それぞれが自然観を持つことを教師が支援するのが本来である。したがって既にアクティブ・ラーニングを実践していると言うことができ、学習指導要領に「目的意識をもって観察、実験などを行い」と記載されている通りである。この考え方は過去の指導要領改訂の際にも一貫して不変であり、今後も継続されると考えられる。

筆者らが行っている物理学分野の教師教育においても、学習者の主体的な学びを重視する観点からの改善を試みている。授業計画の立案を課し、グループ内での進行係や発表者の役割分担を決めさせて討論形式の授業とし、発表の場は模擬授業として位置づける。指導案作成の指導も併せて行っており、学生は相互にあるいは教員に積極的に質問をする機会を得ることができる。100名以上の受講者の授業においてもこのような形式を取ることは可能であり、これに関しては和歌山大学教育学部附属中学校の福田修武副校長に示唆をいただいた。

さらに、教科・科目間の垣根を越える新しい教育の

あり方が新指導要領で示されることも予想され、それに対応するために筆者らは既にチームとして他分野を引き込んだ形の物理学の授業を構想している。その一つは工学への展開を含んだ、(工学的な意味での)エネルギーの効率的な消費をテーマにするものである。和歌山県立紀北工業高等学校のソーラーカーチームは鈴鹿で開催されたソーラーカー耐久レースで部門優勝の成績を収めており、指導された藪下能男教諭から、ドライバーのアクセルワークがもっとも重要であることを教えていただいた。これは正しく物理学の仕事の単元で扱われる内容であり、物理学が実際の場面で活用される好適な例である。和歌山大学のチームも同じレースに参加して、2016年は部門のクラス優勝を果たした。機械の設計製作をはじめ、一から学生たちが主体的に取り組んだ成果である。

4. おわりに

物理学は座学の面が大きいと思われがちだが、実際には観察・実験に依る主体的な学習の典型である。学習指導要領の「目的意識をもって」の目的は、生徒が自らの自然観を得ることである。物理学の指向するのは自然界の統一的な理解であり、他教科・科目との関連性にも注目することにより、この特徴の認識に繋げるのが効果的である。

《参考文献等》

- (1)中学校学習指導要領, 文部科学省, 東山書房, 2015年
- (2)新天文学, Johannes Kepler, 岸本良彦訳, 工作舎, 2013年
- (3)Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica, Ulan Press, Issac Newton, 2012年
- (4)Experimental Researches in Electricity, Cambridge University Press, Michael Faraday, 2012年
- (5)A Treatise on Electricity and Magnetism, vol. 1 & 2, J. C. Maxwell, Dover Publications, 1954年
- (6)Selected Philosophical Papers of Robert Boyle, Robert Boyle, Hackett, 1991年
- (7)Zur Theorie des Gesetzes der Energierverteilung im Normalspektrum, Verhandlungen der Deutschen physikalischen Gesellschaft 2, p. 237 M. Planck, 1900年
- (8)On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether, A. A. Michelson and E. W. Moley, American Journal of Science, vol. 34, No. 203, p. 333, 1887年
- (9)“Zur Elektrodynamik bewegter Koeper”, A. Einstein, Annalen der Physik 322(10), 891-921, 1905年
- (10)日本標準時をつくる, 熊谷基博, NICT NEWS, No451, pp. 6-7, 2015年
- (11)「科学技術・理科大好きプラン」の目指すものとその効果, 小谷理恵, 理科の教育, 55(1), pp.4-6, 2006年
- (12)場の古典論(ランダウ=リフシッツ理論物理学教程), L.D. Landau and E.M.Lifshitz, 東京図書, 1978年; E. Noether, “Invariante Variationsprobleme”. Nachr. D. König. Gesellsch. D. Wiss. Zu Göttingen, Math-phys. Klasse. 235-257, 1918年
- (13)フレミングの左手の法則に隠されたパラドックス, 顧萍, 木曾田賢治, 石塚互, 和歌山大学教育学部紀要(教育科学)第64集, pp.103-106, 2014年