

単純な物理現象に対する誤った論理の 正当化に関する考察

加藤 徹也*

千葉大学・教育学部

A Consideration of Students' Rationalization of Explanation with Erroneous Understanding of Some Simple Phenomena in Physics

KATO Tetsuya*

Faculty of Education, Chiba University, Japan

昨今重視されている新しい学習スキルを考えると、高校・大学入門レベルの物理教育において、今まで重視されてきた物理モデルの数式的表現についてのスキルに加えて、物理モデル自体の妥当性を検討したり、コミュニケーションの状況に合わせて関数関係を表現したりするスキルも重要になるだろう。このとき、学習者が誤った論理をもっていればそれを正当化していくことが懸念される。本研究では、小学校の理科教育においても話題となるような身近な現象をもとに、更に進んだ物理教育を受けていても経験から離れてしまうと極めて誤答率の高くなる力学分野と電磁気学分野の選択式の設問を作成し、教育学部小学校教員養成課程の理科選修学生からその設問に対する理由の記述を含む回答を得て、それらを分析し考察を行った。

As for the high-school physics and undergraduate introductory physics, the formula for the physics models are treated with great importance. However, a generic trend in education shows that the novel-type learning skills should be included. Especially in physics learning, the skills for verifying of the validity of physics models, and in particular in communication, those for finding representations to show the relations among quantities should be taken into account. A special concern is that students who may try to construct their explanations with erroneous understanding. In this study, two of daily-life phenomena in mechanics and electromagnetism, even for issues appearing in elementary school science, are selected and multiple-choice questions are created. The students' responses are in high error rate if separated from experience for long years, even if they learn physics in higher educations. Answers and comments from university students in the course of pre-service elementary-school teachers are accumulated.

キーワード：物理教育 (physics education) アクティブ・ラーニング (active learning)
概念的葛藤 (conceptual conflict) 小学校理科 (elementary school science)

1. はじめに

次期学習指導要領改訂 (小学校は平成32年度, 中学校は33年度から全面実施予定, 高校は34年度から年次進行による) への論点整理 (「学習指導要領等の改訂に向けた検討状況について」) の中で明示されていることと関係して, 学校教育においても新しい時代に求められる学習・指導方法のあり方として「アクティブ・ラーニング」を取り入れることが重要視されてきている^[1]。

アクティブ・ラーニングとは, 「学生になにかを行わせて, さらにやっていることについて考えさせること」とされている。このとき学生は, 授業を聞くだけではないなにかを行う形で授業にかかわるが, それは, 知識を得るだけでなく, 読み取ったり, 議論したり, 書き表し

たりという活動の中で高次の思考 (分析・総合・評価) を行い, そのためのスキルを身に付け, 自分自身の態度や価値観を明確にしていくことを目指したものと見える。アクティブ・ラーニングに文字通りの「能動的学習」という訳語を当てることがあるが, 一般にはカタカナ表記のまま呼ばれることが多い。

この学習方法が立ち上がったのは1980年代のアメリカの高等教育で, 大学進学率が当該年齢人口の50%を超えるようになったことが発端にある。マーチン・トロウによる高等教育の推移モデルによれば, この状況は, 大学進学に特権的制約のあったエリート型教育の時代から, 制約が緩まったマス型教育を経て, 制約のないユニバーサル・アクセス型の教育に移行した, その結果といえる。エリート型・マス型では構造を持っていた段階的学習方式は崩壊し, 従来型の授業スタイルである「学習者が高い意識をもって講義を聞き, それを受け止めるための努力を自ら行う」というやり方についてはいけない大学生が主流になった。そこで, 学習者の認知能力を多面的に

*連絡先著者：加藤徹也 tkato@faculty.chiba-u.jp

*Corresponding Author :

KATO Tetsuya tkato@faculty.chiba-u.jp

活性化させ、当人にとっての学習活動全体のパフォーマンスを改善させることが評価されるようになった。英米の大学における大学学部レベルの科学教育において、「この時点に至ってアクティブ・ラーニングを行わないことは道義に反する (At this point, it is unethical to teach any other way.)」^[2]ともいわれながら、間違っただり方や失敗例も数多くみられる (2011年にアメリカ77大学の生物教師に対する調査ではほとんどが何らかのアクティブ・ラーニングの方法を使ったと答えたが、正しいやり方はわずかだった)^[2]という指摘もある。現在の日本では、初等中等教育でも21世紀型スキルの獲得が重視されるようになり、そのような教授法への転換のキーワードとして、アクティブ・ラーニングが注目されている。

ここでは物理教育について考えてみたい。そもそも物理学は自然界のなかのできごとを説明する理論を構築し、それに基づいて現象の分析や予測を可能にする学問であり、理論を構成する道具としての数式表現を必要に応じで開発してきた。物理学における自然界の理解は、まず、実際に数式で表現されその特性を分析される「物理モデル」を、現実世界の物理現象のなかの注目すべき性質に合うものとして構成することにある。また、多様な現象にそれぞれ備わっている枝葉末節的な特徴をそぎ落とすことでそれらに共通した物理モデルが現れ、個別の現象が共通の理解枠組みに当てはまることを示すことがそれに続くといえるだろう。そして、科学の中でも特に、物理に特徴的なスキルとして究極的なものだけを選ぶなら、次の2点になるのではないかと筆者は考える。まず、(1) 現実の現象を物理モデルに当てはめるときに重視されたものと省かれたものについての斟酌の妥当性の客観的判断に関するスキル。そして、(2) 得られた物理モデルが内包している物理量のあいだの関数的関係を誰かに納得させるために取るべき表現としての様々なアプローチに対応するスキルである。

ただし、もちろん一般の科学と共通する必須スキルもあり、仮説を立てて対象に合わせ論理的思考をおこなったり、実験を計画・実施してデータを取得し、それが示しうる量的上限・下限の範囲を導出したり表現しコミュニケーションを行ったりすること、あるいは過去のデータやほかの人の報告やその表現の内容を批判的に分析し、適切な量的・質的評価をすることなども、重要なスキルである。これらについては化学・生物・地学分野と足並みをそろえたスタイルを持たせることが効率的だろう。一方、特に初等物理では、眼前において対象となる現象を直接的に観察・測定しながら再現性良く繰り返すことが可能で、その体験の中で批判的思考を行いながら体得していくことができる。この点で、科学の他分野に比べると先のふたつ、端的にいえば (1) **物理モデル当てはめの妥当性**と、(2) **量と量のあいだの関数的関係の表現**について、物理教育が他の科学教育分野にはない重要な特徴を持つといえると考えられるのである。

現実の教育の場面では、残念ながら物理モデルは既定のものを押し付けるだけ、量と量のあいだの関係は数式を変形・処理するだけに留まっているかもしれない。しかしながらどれでも、物理教育を改革していく転機にはこれらふたつを核にすることは避けては通れないものだ

と考える。

これらふたつのうちの後者は、コミュニケーション能力と、その準備としての論理の平易な書き換えに焦点化することができるだろう。ここには数式的・論理的な取り扱いの厳密性あるいは適切性を、受け止める相手に合わせて置き換えるものの、必要に応じて元に戻すことができる扱いとしなければならない。そのことは、物理モデルそのものをどれだけ正確に条件付けて描くかによって実際の扱いが異なり、直観的に共有しうる理解を使って説明を組み立てるために、物理モデルにも曖昧さを残しながら、合意形成を前進させていく必要があることも考えられるだろう。

もうひとつ指摘したこと、つまり、物理モデルあてはめが適切か否かについては、教科書的な扱いの中で不適切なモデルが登場しない以上、形式的な議論は困難であろう。学習者が個人レベルで、あるいは議論の中で構築した試行的物理モデルを言語化してもらう必要があり、いわば論理的に欠陥だらけのモデルでも、妥当性を議論する中で変容し、周到なモデルとして整備されていくことが期待できる。このような議論においては間違いだから却下するのではなく、修正してより適切なものを探るという活動が必要になってくる。

ここでの物理モデルの修正の観点の提示については、概念的葛藤あるいは認知的葛藤と呼ばれる方法^[3]が有効である。これらは学習者の経験に基づく素朴概念が内包している誤りを発見できるような新たな経験をさせることで概念的な衝突を生じさせ、立ち止まって考える活動を促すものとされている。これは、経験に対する主観的で偏った解釈から、科学的客観性が担保され「正しい」とされる解釈への変更を導く手法、という意味合いが強いように筆者には感じられる。

特定の現象を説明する法則を理解するためには、余計な末節を削ぎ落とすことで論理が浮き彫りになり、簡単な数式に表現されることで適用範囲に大きな広がり生まれる。そのような点が重視され、明確な物理モデルの構築と適用に重点が置かれてきた。しかしながら学習者にはそのような議論はモデルに閉じられた、現実性の乏しいものと感じ取られることが問題になっている。これからの物理教育において、特に、現実的な現象に物理モデルを当てはめ、それがどの程度妥当なのかを議論する場ができるのであれば、そこでは必ずしも「正しい」解釈がいつでも優先されるわけではないと考えられるので、モデルの適用範囲理解し、それを拡張するために必要なことに注意しながら、現実的な身の回りの現象のなかにモデルを位置付けていく必要がある。そのような立場で考えれば、物理モデルは段階的に修正され、形成のプロセスを吟味する活動が重要となるだろうし、物理教育としてはそのような活動を活性化させる題材をより多く用意していく必要がある。

本稿で焦点を当てたいのは、その場合に概念修正の妨害となる、学習者の論理の正当化についてである。学習者が誤った概念にとらわれるとき、限られた経験と十分でない論理的思考を元に考えを整理したり、ある現象を別の現象のことばで表現しようとして、対象とは異なる現象が持つ制約にとらわれてしまったりしている。その

ことを如実に表す例として、小・中学生も注目することがあるような、物理の典型的なアクティビティーにおいて教員養成系の大学生が陥る誤りの例を取り上げ、彼らが記述した短い説明の中から彼らの思考を汲み取ることにする。

以下、第2章では物理学の記述言語としての数式の位置付けを確認しながら、近年の物理教育において数式展開とともに重視される概念理解を広い見地から支援するアクティブ・ラーニングの動向について、簡単にまとめる。第3章では力学分野と電磁気学分野において大学生に尋ねた具体的設問とそれに対する彼らの回答を紹介しながら、彼らが何をいわんとしているかを検討する。第4章はそれらの結果を考察し、今後の展望を論じる。

2. 物理教育における数式と概念の学習

2-1. 物理学の記述言語としての数式

科学という営み全般の中でも、物理学では特に数学を手段として利用する。かつて、ガリレオは簡単な算術で物体運動の軌跡が理解できることを示し、ニュートンは時間や位置（あるいはその変化量としての変位）から微積分の関係を定義して速度や加速度の概念を整理し、力学法則の形にまとめ上げた。これらの時代で数学は「科学の奴隷」であったといわれている^[4]。直接には測定されないエネルギー関数やポテンシャル関数を定義することがあるが、それらは現実の量と密接につながっていて、微分により容易に現実の量が得られたり、また、他の量との関係性を示す上で扱いやすさに優れたりするという意味で、数学はあくまで補佐的な道具として扱われたといえるだろう。

その後、特に電磁気現象についてファラデーが考え出した電場や磁場というアイデアは、空間に張り巡らされた電気力線や磁力線というかたちで幾何学のおよび力学的性質という意味付けが与えられたが、数式で表現するのは困難であった。それに数式表現を与えたのはマクスウェルである。ただし、科学者の中にも高度な数式には追従できない人が多く、マクスウェルは主著において数式を意図的に外したといわれている。現在の大学入門レベルの電磁気学ではマクスウェルの整理した一連の連立偏微分方程式を理解できることが一つの基本的水準になっていて、更に専門的課程ではこれを広範囲の諸問題に適用する原理、いわば論理の出発点に置くことが多い。ここにおいて数学は「科学の女王」になったといわれる^[4]。数学のルールに従わなければ、科学的・物理的議論は一切の足がかりが失われてしまうということになる。

マクスウェルはそれまで知られていた電場・磁場と電荷・電流の関係に変位電流という項を加えた拡張を行った。これにより電磁波の存在が予言できるようになり、後にヘルツの実験で実証されたことは有名である。マクスウェルが予言した変位電流は、磁場の変動が原因となり電場が生まれるという電磁誘導（磁電誘導と呼ぶべきという人もいる）についてのファラデーの法則からの類推として、変動電場による磁場生成の可能性を推察したものである。実際のほとんど多くの電磁気現象でその効果は小さく、無視できる。物理学として重要な点は、何

らかの量の一部としては無視できるほど小さい項も、ふたつの量の差、あるいは変化や微分としてはクローズアップされ得るということだろう。

眼前にある量の関係を表すだけならともかく、未知の量を含めた議論が成り立つのは、数式あるいは数式で表された物理モデルが現実の現象から個別の特性を削除し、論理的なつながりだけを式で表したのだからである。普通の感覚では掌握しきれない何か未知の量や現象であっても、論理的な議論の対象として取りこぼさないように考える仕組みとして、数式は欠かせない。この方向でのマクスウェルによる変位電流の発案は極めて有名である。これについて端的に言い表したことを、文献^[5]からここに引用する。

マクスウェルは、場をめぐる論争について結着をつけたが、その際に決定的だったのは、数学が、単なる記述用の、日常の言葉が目に見えたり思い浮かんだりすることを記述するために使われるのと同じような言語ではなく、その言語構造は、隠れた、しばしば想像もつかなかった物理的構造を反映しているらしいという思想（……中略……）を、直観的に取り入れたということだった。

一方、高校物理あるいは大学の物理入門では、数式表現は具体的現象を説明するために導入されるが、それはさらに多くの現象の説明に適用できることを練習し、活用可能性を理解することになる。ただし、その背後には、取り扱われる現象自体が当該の数式表現を適用しやすいように条件付けた範囲に設定されていて、現象としては半ば加工され調理された、物理モデルに対応する人工的なものであるという事情が隠れている。演習問題を解くことは数学を活用するスキルとして、物理学習得には欠かすことのできないものではあるが、それと同時に、取り扱う現象は特定のパターンに特化したものに偏重してしまう。数式記述の必要性は本来、想像もつかないような物理構造を包含させることが可能であるという信念に基づいたものであるはずが、その信念はむしろ、意図的に失われていると言わざるを得ない。

2-2. 大学物理入門におけるアクティブラーニング

高校や大学初年度程度の物理教育では、物理の言語としての数学のレベルをどう設定するかが難しいところである。伝統的な大学理工系における物理教育では、同時に数学の履修が課せられていて、一定レベルの微積分を利用することが、個別の現象を超えて共通する論理構造を理解させる上では必要であろう。たしかに、電磁波の正体を電磁気学抜きに語ることはできないし、その理論には変位電流のような、数式中にアприオリ的に与えられて初めて考察する対象となる効果も存在する。しかしながら数式が意味することを理解するにはそれを使って正しい計算ができるスキルと、その表現に隠れたモデル設定に関する理解が必要で、定期試験でその力量を測定する傾向が強いあまり、正しい概念獲得に問題が生じていることもある。予め解答可能なはずという設定で出された問題は正しく処理できても、簡単な定義の理解が定

着していないという問題が指摘されている。このような問題に対処するために、アメリカでは大学教養レベルの物理教育においてピア・インストラクション法が開発された。理数科目においてアクティブ・ラーニングを取り入れ、成功した典型的な事例として、ピア・インストラクション法は広く紹介されている^[2]。

この方法の特徴は、数式を活用するという到達目標は変えずに、数式の導出や取り扱いの練習を授業時間外に行うものとし、授業時間を主に、概念の説明の短時間講義、クリッカーと呼ばれる学生のレスポンスを即時に集計するシステムを用いてテストを実施する時間、およびそのテストのあいだに、周りの学生が話し合い活動をして正答率を高める時間に割り当てるといったものである。

この方法の開発者であるMazurがこの方法の詳細をPeer Instruction A User's Manualという書籍で説明している^[6]。大学レベルの物理入門教育の研究と実践に関する内容で構成されていて、筆者の担当授業も内容的に大きく重複しているので、クリッカー活用を含めこの方式を試行し始めた。「大学の物理教育」誌2014年のアクティブ・ラーニング特集で新田が指摘するように、クリッカーによるデータ収集能力は極めて有効ながら、この方法にとって適切な配慮をした課題を準備することが極めて大切である^[7]ことを実感したところである。

2-3. アメリカにおける大学物理入門教科書

前述のピア・インストラクションはレディッシュ著「科学をどう教えるか アメリカにおける新しい物理教育の実践」の一部でも紹介されている^[8]。この本にはその他の様々な取り組みが紹介されていて、通常講義に使う教科書としてUnderstanding Physics^[9]というタイトルの書籍を作成し、彼らが物理スイートと呼ぶ一連の学習方法の一角に、そのテキストに基づいた学習を位置付けている。筆者はこのテキストの振動までの力学関係の部分と波・熱・光の部分翻訳し授業に利用している^[10]。

Understanding Physics自体は極めて有名な教科書「物理学の基礎 (Fundamentals of Physics^[11])」(ハリディおよびレズニック著)を物理教育研究者がリライトしたものである。後者は、微積分を利用する(calculus-based course)ものとして、おそらく最も平易に書かれたもので、現在もワーカーという共著者を得て更に版を重ねている。ただし、そのなかの原子・量子の部分はUnderstanding Physicsに含まれておらず、波・熱・光の章についてもUnderstanding Physics 2004年版とFundamentals of Physics 第9版(2011)の内容に特徴的な差異はなかった。

Fundamentals of Physicsは徹底的に概念理解を重視しながら、微積分を活用するテキストとして世界中に翻訳され、日本では培風館から2002年にその年刊行された第6版の一部の翻訳が出版されている^[12]。日本の理工系学部で一般的に使われるテキストと内容を比べると、概念理解のための丁寧な説明が十分なされているものの、扱う内容は限定的である。翻訳者らは、物理を専門としない学生のための教科書として位置付けている。

アメリカの大学入門レベル物理教科書として、この原書が初めて現れる前に有名だったのは、1902年ミリカン

著「力学、分子物理学および熱」や1908年ダフ著「物理学教科書」で、後者は30年間使われ10万部が売られたという。次に1944年のシアーズのテキストが、1947年にゼマンスキーとともに改訂されて「大学物理学」と題され、15年間ほど主流になった。その後、1960年にハリディとレズニックによって出版されたPhysics for Students of Science and EngineeringがFundamentals of Physicsの原型である。後に改題され、10年間だけで100万部の売上を記録し、2013年には第10版が出て、半世紀に渡り今日まで世界中に翻訳がなされ、デファクト・スタンダードの教科書として知られるようになった^[13]。レズニックは全米物理学教師協会から最高栄誉のエルステッド・メダルを受賞していて、そのときの記念講演を紹介するビデオ・クリップには、このような教科書がなかった時代の執筆に関するエピソードが語られている^[14]。

3. 学生による記述の分析

本章では実際の現象を目前で即座に確認できる質問であって、かつ、物理学をある程度学んでいる学生にとっても答えの予測に混乱を招きやすい質問を選んで、学生の回答に見られるモデル当てはめの失敗例について調べたことを紹介する。平成28年6月に教育学部小学校教員養成課程第2学年に所属し理科を中心に学んでいる学生(理科選修)27名を対象にした必修授業の中で取り扱った結果であるが、この受講生全員が中学校・高等学校の理科の免許を副専攻として履修予定である。力学分野と電磁気分野で一つずつ、デモンストレーションが容易に実施できる身近な現象でありながら、正反対の選択肢に対して容易には結論付けることができないような問題を選定し、個人個人で予測させ、その予測についての理由を記述させた。

3-1. 糸巻き牽引

力学的問題として、床に置かれた糸巻きの糸を引いて手繰り寄せようとしたとき、糸が巻き付いたり外れたりするという既視感のある現象を取り上げた。設問についての具体的表現と、それに対する学生の回答を付表1に示す。

糸巻きという形状にはその中心が固定されたときの運動についての感覚が強く印象づけられている。多くの場合、そのような印象は漠然としたものであるはずなのに論理的思考を構成する上での起点として疑うことができなくなる傾向がある。その結果、牽引される方向へ糸巻きが並進運動するはずだという至極当然な予測と、糸巻きの回転が優先的に生じるはずだという誤った直観のあいだで葛藤が生まれ、結果的には後者を選択して間違えることが少なくない。

回答の正誤については、糸巻きという具体的構造を省き、ひとつのシステムとして考えるなら間違えようがない。皮肉に見えるが、その内部の構造についての考察をあきらめた単純な回答(通し番号1)が正解で、類似の現象の説明のための定型的な思考パターンに陥ったもの(番号12~20)や、かなり類似した現象の観察に基づくもの(番号21)は不正解である。不正解の結論を正当化

しようとして仮想的な状況を考案し、論理的な説明を組み立てようとする場合(番号22)もあった。一方、正の回答をしながら、その理由付けにおいて不正確な表現をしているものも多く(番号2~6)、それには理解の不十分さも考えられるものの、内的葛藤状態が解消されていないことが影響していることも十分考えられるだろう。どちらでもないという選択肢は、出題当初は想定していなかったが、多くの学生が申し出た(番号7~11)ために追加したものである。

記入された回答紙を回収した後、実際に現象を演示して見せると、正解を選んだ学生のうちにも「糸が巻き付いていく」という現象に驚くものが少なくないようであり、その現象を目にするだけでは論理の再構築は難しい。そこで、設問では水平に引いた糸を鉛直上向きに引いて見せた。このときは多くの学生が予想したとおりに動くことを確認してから、水平と鉛直の間の特定の角度で糸巻きは回らないまま机の上を引きずられていく様子も見せることにしている。

この課題を困難にしているのは回転の中心の位置が判断しにくいということである。瞬間的な中心は形状から想定されそうな糸巻きの中心ではない。スリップしない場合の机と糸巻きが接触している位置であり、時間の経過とともに瞬間的な回転中心は次々と移動する。そこで、演習実験を行う際には力 F の角度を様々に変え、力の作用線が瞬間的回転中心を通る場合にはトルクとならず糸巻きは回らなくなることを、そのような臨界角度をはさんで、水平に近い角度では巻き付き、鉛直に近い角度では解けることも演示しながら、回転中心が糸巻きの中心ではなくその直下の、机面との接点であることを発見できるよう導くことにしている。

3-2. 手回し発電機とそのモーター動作(1)

手回し発電機の内部には直流モーターとその軸の回転数を変換するギアが入っている。直流モーターは小さな負荷を受けながら高速回転することで効率的に電気エネルギーを力学的エネルギーに変換する素子であり、手回し発電時にはその逆変換が利用される。中学校理科の教科書にも、1台の直流モーターを外部電源で駆動し、その軸に直結したもう1台のモーターの軸を回すことで発電させる例が掲載されている。

なお、モーター軸の回転方向と誘導起電力による出力電圧の正負は一対一対応していて、電流の向きがエネルギー変換の向きと対応することはあまり知られていない。著者は、このような可逆なエネルギー変換が持続可能エネルギーの発生として使われていることに注目し、前著論文においてそれを物理教育に導入することの困難さを議論した^[15]。光発電、風力発電、地熱発電など、すべての持続可能エネルギーは、その動作の仕組みの中に電圧の向きが定まっいて、電流の向きによりエネルギー変換の向きが定まっている。しかし、電流の向きという概念は重要でありながらあまり注目されておらず、理学部や工学部の学生など、物理学を応用するような力のある学生のレベルでも正しい推論ができない例が多くあることも試行的調査研究で判明してきている。

本研究では、関連する議論を授業の中で一通り説明し

た後の学期末に、あとで述べる設問に対して回答させた。対象は小学校教員養成課程の理科選修の学生であり、必修授業ということでもあるので、より高い正答率になることを期待して授業を組み立て、関連する議論を都合3回取り上げた。

はじめに2012年度千葉県・千葉市教員採用試験で出題された問題24をそのままのかたちで考えさせた。この年度は小学校の理科に発光ダイオードやコンデンサーが取り上げられるようになって間もないタイミングであり、現場で相当の混乱が生じているところの出題であると考えられる。小学校教員としては論理的に考えることよりも、体験に基づいて正答が出ることを想定していると考えられる。

各問いには実態図があり、その前に手回し発電機で発光ダイオードを光らせることで正回転の向きとその出力コードに正負の極を定義することが示されている。問いは3つで、それぞれ選択肢が3~6程度用意されているものであった。子供の頃の体験はほとんどすべての学生が有していたが、その後物理を学習して電流や電圧を思考対象にできるようになっている。問題自体の出題の趣旨からしても、また、授業の出発点という意味からも、自らのこれまでの経験を重視して選択肢を選ぶことを期待したものの、正答率ははるかに低かった。

① 2台の発電機を同極同士接続し、一方を正回転させたときの他方の回転向きと速さ(駆動側より速いか遅いか)を問う問題については、速さを間違えるものはおらず、事実上、選択肢は回転の向きについての2つである。24人中過半数の13名が誤答した。

② 1台の発電機に豆電球2つを直列あるいは並列に接続したときのハンドルの手応えと点灯の様子を問う問題については、完全正答は4名にとどまり、直列接続されて負荷抵抗が大きくなる場合を手応えが重いとする誤答者が(明るさについての2つの選択肢の合計として)24人中14名にも達した。

③ 発電機でコンデンサーを充電してからハンドルから手を離し、コンデンサーの放電によるハンドルの回転向きを問う問題について、選択肢は「同じ向き」「逆向き」「同じ向きと逆向きを交互に繰り返す」の3つだけである。正答は「同じ向き」で24名中1名、正反対の誤答「逆向き」を選んだのが19名であった。

第3問のように偏って不正解が多いことは、物理の学習の過程で得た論理的思考法に問題があると言わざるを得ない。小学校のアクティビティーにコンデンサーが登場したのはごく近年だとしても、このことはコンデンサーを二次電池のように充放電するものとしてとらえることができるため、回答の正誤には影響しない。しかし、多くの学生は電流が充電時と放電時に逆転することを知っていて、これが「駆動の元の電圧を反転させた効果になる」と思い込む傾向が強く、それが顕著に出た結果であった。

学生の解答を紙上で回収した後、簡単に解説しながら演習実験を行い、さらに発光ダイオードやコンデンサーについても詳細に解説して自ら手を動かすアクティビティーをさせた。次の週には模型用直流モーターを2つ、軸同士で直結させ、電動と発電の電流・電圧特性を調べ

た。回転子には小さな内部抵抗があって、誘導起電力の大きさと同程度の電圧降下があることを見出し、誘導起電力や外部電源の電圧の向きについても実験により調べるアクティビティーを行った。その後、力学など他分野の議論があったのち、1ヶ月ほど経過したあとで期末試験として、形を変えて出題したのが次の設問である。

3-3. 手回し発電機とそのモーター動作 (2)

付表2に示すように、ここでは接続した2台の手回し発電機に、さらに並列に豆電球を加えた回路を示し、回路は変更しないときの3つの動作を問うことにした。発電機Bのハンドルは一定の速さで回し続けるため、実質的にはこれは外部電源（ただし、内部抵抗があるため、出力電圧一定ではない）のように考えることができる。したがって、ここで問題にしていることは、問1では発電機Aが小さな内部抵抗を持つ受動素子となること、問2と問3ではハンドルを回転させることで生じる発電の効果が、モーター動作のときに生じた回転および電圧の関係とどう結びつくか、ということになる。同類の問題に対し二重に記述させることは、記述の意図を汲み取る上で有効と考え、そのように実施した。

授業の初めの段階で教員採用試験を解かせたときに比べて圧倒的な誤答率はなくなったものの、根強い誤答が見られることがわかった。学生の記述には、物理的思考の表現として不正確なものも多い。中には稚拙な表現や論理的に解釈ができない表現も見られるが、大きく目につくのは、逆起電力がなくなり電気抵抗による電圧降下が残ることを「抵抗が減る」と表現することが多いということである。これは、外部電源が接続された直流モーターの軸に力学的負荷をかけるとき、モーターに流れ込む電流が増大してモーターがうなり出したり巻線が焼き切れて破損するに至ったりするという現象を、モーターの電気抵抗が減少したものと等価だとして置き換えたことを表して、さらに、いくつかの現象がこれにより説明されることを受けて、試験前に友人同士のあいだで理解を確認し合う中で、このような簡略な考えが広まってしまったものと考えられる。

4. 考察と今後の課題

高校や大学入門レベルの物理教育における従来のやり方では、数式を使って表現される代表的な物理モデルの導入があり、学習者はそれ扱うスキルを身につけていく。その多くは、細部についての考察が不要となるように規定された特殊な設定のもとで、たいていの場合は物理モデルがパターン化されていて、一度導入してしまえばくり返し検討されることはほとんどない。そして、対象となる現象に対して正しい物理モデル当てはめをするスキルは、それに続く数式の処理や数値的表現を通して評価される。そして、物理モデル当てはめはほとんど自明な定型的な状況が用意され、評価の重心は数式上の処理に偏っている。

しかし、これからの学修スキルとして、自らの学習過程を確認することが重視される時代には、物理モデル当てはめの妥当性が議論の中心に近づくだろう。実際の身

の回りの現実とはかけ離れた物理モデルがどう実装されるかを吟味する必要が問題になるのである。また、科学の履修でも言語化やコミュニケーションの重視がなされる時代には、量と量とのあいだの関数的関係を表すのに単なる数式以外の表現を工夫してつくる必要が生じる。物理教育がそのように変わっていく状況にあるとすれば、学習者の理解に誤りが生じたとき、学習者は誤りを正当化できるような論理を作り出してしまうことが十分考えられる。

本稿第3章で示したものは、身近な現象でありながら、正しい予想をするにはかなり程度の高い（細かい配慮や仕組みの整理が必要な）問題であった。そこでは教員養成系大学生の回答を示したが、試行的に調べた範囲では、理工学部の学生や高校物理の教員も誤答する割合がたいへん大きかった。理系教育を受け、このような問いにある程度自信をもって回答するであろう人たちが誤答を導く論理には、必ず無理な正当化が入り込んでいるはずである。筆者は、彼らの思考の問題点はこれからの物理教育が出くわすであろう局面を予想させるものだと考えた。

第3章で示した回答者の記述には曖昧な点が多く見られた。思考を整理するスキルが不十分であってこれが誤解を引きずる原因であったり、正しいとは信じきれないことを正しいはずだと自らに言い聞かせ、無理に記述しているためだったり、その理由もさまざまと考えられる。どのような場面でも何らかのプレゼンテーションをする際には、説明できない部分は除外して、主張すべきことを整理し、明確な議論を展開することになるが、教育の場面では学習者が（意図してあるいは無意識に）除外した部分まで考察することを支援したり、必要に応じて考えの修正を求めたりすることは重要である。このとき、物理教育では多くの場合、学習者の限の前で実際に現象を見せることができる。これは、誤った考えの学習者には概念的葛藤を促すことになる。さらに、誤った考えでは説明できない致命的欠陥を提示することもできる。

糸車の牽引の設問では、引くのと逆向きに転がる（誤答）なら糸が切れてしまう。糸の巻取り半径は縁（車輪のように地面に接する部分）の半径より小さく、一定の回転角度に対して巻取り部から糸が外れる（あるいは巻き付く）長さは地面の上での糸巻き移動距離より短くなる。引くのと逆に転がる（誤答）なら糸を引く手は糸巻きに引き寄せられる。糸巻きに動力がなければこれは起こらない。

手回し発電機に関する話題では話が込み入っているが、発電では「磁場に垂直に置かれた導線がそれらに垂直な方向に動くときに起電力が生じる」（フレミングの右手の規則）、モーター動作は「磁場に垂直に流れる電流はそれらに垂直に力を受ける」（左手の規則）という現象が関わっている。これに関して、外部の起電力により強制的に流された電流が力を受け、導線が動くとき電流が増強されるような内部起電力が発生すること（誤解）はありえない、という視点（レンツの法則）はよく知られている。コンデンサーに蓄えた電荷が手回し発電機に戻ってモーター動作させるとき、コンデンサー充電時に対して電流が逆転する（これは正しい）からハンドルが逆回転すると主張する（これは誤解）のであれば、この回転

での発電効果として発生する起電力の向きは、コンデンサーによりモーターへ強制的に流される電流を増強すること（誤解）になり、あり得ない。

ただし、そのような説明の直後には納得できる別の理解が得られても、一月程度の後に行った期末試験で、設問の形を変えたとはいえ、誤答をしてしまう学生が多かった。付表2に示した結果は、実施時にはもっと正答率が高いことを期待していたのである。

いわゆる素朴概念は単純な記憶とは違って、パターン化された思考様式として無意識のうちに復活してしまうのであろう。これを打ち破るには、論理的に組み立てられた思考でも制約範囲を超えれば脆く壊れることを示したり、適用対象を増やすことのできるフレキシブルな思考への転換を考えさせたりする必要がある。これらは自らの理解の程度を理解するというメタ学習的な活動を促すものであり、これからの科学学習において重視されるべきスキルを身に付けさせることにつながるものである。特に、現状の物理教育は「正しい（とされる）思考パターン」の記憶と活用に評価の重点を置いているため、新しい時代の教育の中ではこのような問題がもっとあらわになると考えられる。

もちろん、複雑な論理を背景として精緻な議論を進める際には思考のパターン化は一定の意義がある。多くの現象には類似点があり、それを抽象化したところでの規則には厳密に従いながら、具体的な現象に適用するには付加的な性質の考慮や修正が必要になる。結局のところ、物理モデルの使い方についての理解を深める過程が不足しているのではないだろうか。そこには物理モデルと具体的現象のあいだの対応関係についてのスクラップアンドビルドが含まれ、それを可能とするような科学的活動としてのブレンストレーミングが鍵になるだろう。それらを導入するための手順を示していくこともこれからの重要な課題であると考えている。

参考文献

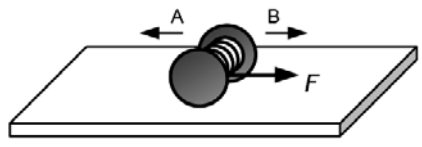
1. 松下佳代（編集）「ディープ・アクティブラーニング」勁草書房（2015）。
2. Mitchell Walldrop, “The Science of Teaching Science”, *Nature*, Vol. 523, 16 July (2015). Available as “Why we are teaching science wrong, and how to make it right” at <http://www.nature.com/news/>

why-we-are-teaching-science-wrong-and-how-to-make-it-right-1.17963, 2016年11月1日閲覧。

3. J. Kwon, Y. Lee, M.E. Beeth, “The Effects of Cognitive Conflict on Students’ Conceptual Change in Physics”, *Reports-Research*, retrieved from ERIC Document Reproduction Service (ED 443 734) (2000).
4. ロビン・アリアンロッド著 松浦俊輔訳「世界を数式で想像できれば—アインシュタインが憧れた人々」青土社（2006）。
5. ナンシー・フォーブス, ベイジル・メイホン著, 米沢富美子訳「物理学を変えた二人の男—ファラデー, マクスウェル, 場の発見」岩波書店（2016）。
6. Eric Mazur, “Peer Instruction A User’s Manual”, Pearson (1996).
7. 新田英雄「ピア・インストラクションとその分析」大学の物理教育第20巻第2号pp.71-74（2014）。
8. エドワード・レディッシュ著 日本物理教育学会監訳「科学をどう教えるか アメリカにおける新しい物理教育の実践」丸善出版（2012）。
9. K. Cummings, P.W. Laws, E.F.Redish and P.J. Cooney, “Understanding Physics”, Wiley (2004).
10. 加藤徹也「力学入門講義における グローバル標準・高可読性テキストの導入と活用」千葉大学教育学部研究紀要第61巻pp.437-446, (2013).
11. D. Halliday, R. Resnick and J. Walker, “Fundamentals of Physics”, 10th ed., Wiley (2010).
12. D. ハリディ, R. レズニック, J. ウォーカー「物理学の基礎」培風館（2002）。
13. Colin Zwiebel, “The Undergraduate Introductory Physics Textbook and the Future”, 2012 AHS Capstone Projects. Paper 22 (2012). Available from http://digitalcommons.olin.edu/ahs_capstone_2012/22 2016年11月1日閲覧。
14. Robert Resnick, video clips of Oersted Lecture “So you want to write a textbook”, <https://www.youtube.com/user/ResnickPhysicist> 2016年11月1日閲覧。
15. 加藤徹也, 西村浩隆「逆動作可能なデバイスを用いた電流の向きについての教員養成の試行」千葉大学教育学部研究紀要第63巻pp.357-367, (2015).

付表1 糸車の牽引に関する設問とその回答

設問：
糸巻きを水平な卓上に置き、図のFのように糸を引いた。糸巻きの動く向きはA、Bどちらか予想しなさい。また、予想が逆になると主張する人に対して、あなたの答えをわかりやすく説明しなさい。

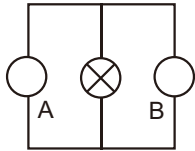


(選択肢：A、B、どちらでもない)

答	説明 (隅つき括弧【 】は筆者コメント)		
B ○	1. 引っ張る方向だから。 【システムの並進運動に関して、単純ながら的を得ている。】	並進	
	2. 糸巻きと糸の間の摩擦力が生じることを考えると、その摩擦力は糸を引く方向と反対向きに生じる。これを糸巻きの中心からのモーメントで考えると糸巻きは図の手前から見て時計回りに回り、Bの方向に転がる。 【指摘した摩擦力は(本人のことばと異なり)机面からかかるものとするれば合理的説明になる。】	並進	
	3. 糸巻きにはたらく力は引く力Tと摩擦力f。摩擦力fは円状に全ての位置ではたらく打ち消し合うから。 【指摘した摩擦力は糸巻きと糸の間のもので、それは運動の向きを決めないで、説明としては1と等価。】	並進	
	4. 引いた瞬間に糸巻きのふちの糸と反作用で回らない。 【ひとつの物体に作用と反作用がかかるという説明は不可。回転を無視して並進運動を考えた点は、1と等価。】	並進	
	5. 糸巻きと床の接触面積は小さく、糸巻きの回転によりAに進もうとするための床の摩擦力より、糸を引っ張る力のほうが大きいため、Bに進む。仮に摩擦力より引く力が小さいと、糸は引けない。 【接触面積は無視すべき。下線部の表現に解釈が必要(回転によりAに進もうとするための⇒スリップ回転を妨げるようにAに向く、糸は引けない⇒力のかかる向きに動き出さない)か。並進運動に関する力の比較は正しい。】	回転	
	6. 糸巻きと糸の間の摩擦力によりBにひっぱられる。 【力の列挙が不十分。糸巻きにかかる摩擦力はAへ向いているはずなのにBに向かうというのは不合理。】	並進	
△ せななこ ひびく	7. ひもが弱く引かれれば、糸巻きと卓上のまさつでBにうごくが、それより強く引けば、慣性によりその場にとどまり、ヒモがなくなると、ヒモと逆に動きだす。 【前半の説明は6と等価。力が強いときの説明はスリップ回転で並進しないことを想定している。】	並進	
	8. どちらでもない。糸の長さは決まっているので、引っ張り始めはBに進む。そののちに、回転が生まれるのでAの方向に進むとかがえられる。 【前半の説明はスリップしながらBに進むことを想定していると考えられる。】	並進	
	9. 引いている最中はほとんど動かず、引き終わるとA方向に行く(引く力にもよる気がする)。 【前半の説明はスリップ回転で並進しないことを想定していると考えられることもでき、7の後半と等価。】	回転?	
	10. じめんに摩擦がなければその場でまわる。 【7、9のスリップ・並進なしと等価。】	回転	
	11. 反作用が動くより巻かれているところにかかる摩擦力の方が強いからだ考える。また、引く力を止めるとA側に動く。 【省かれている文脈として「車の前進は、車輪にトルクがかかることで地面を後方に押し、その反作用としての摩擦力が車を前方に押し返す」という、車輪へのトルクが並進運動をもたらすモデルに関する議論が予想できるものの、表現に混乱があり定かではない。特に、「また」以降の表現が混乱を顕著にしている。】	並進	
A ×	12. 糸を引いたら糸巻きがA方向に行くように回転する。 13. 糸が右向きに引かれると、マサツ力が反対向きに生まれる。マサツ力によって糸巻きが回るから。 14. Bの方向に引っばっているのに糸巻きは図のような【略】回転がかかる。そのため糸巻きはAの方向へ移動する。 15. 糸の引く向きがBに動くように考えられるが、糸巻き自体の回転はAの方向に動くように回っているのだから、Aの方向に動くと考える。 16. 引っ張られる方向つまり反時計回りの力のみが糸巻きすべてに働き、Aに動く。 17. 糸を引くことにより回転が【?トルクが】反時計回りにはたらくのでAのほうへ動く。 18. Bの方向に引いて生じた力は前に進むための回転運動に変換されたか考える。 19. 摩擦でAに行く。 20. 回転するから。 【すべて、車輪へのトルクが並進運動をもたらすモデルにとらわれて回転方向を推定している。】	回転	
	21. 右向きにひっぱると反時計回りに回転の力が加わる。ミシン糸が転がっていく感じ。 【クリティカルな条件設定を適切に分別しない体験が、混乱を増長している。ミシン糸の転がりを観察するとき、糸を引く角度は水平ではなく、斜め上方であったはずである。】	回転	
	22. 動滑車を考えると、図【略】のように片側に天井が糸を引く力(=糸が滑車を上向きに引く力)が常に働いていてつりあっているため、上に動く。しかし、この図で滑車における左側の糸に対応するB方向に動く上側の力がないため、糸が始点から引いた長さと同じだけ(糸巻きからの増えた糸の長さの半分だけ)A方向へ動く。引く方向はBであり、糸巻きは自由に動くことができるためその反作用(?)として引いた分と同じだけA方向に動く。 【面に対して糸巻きが滑らない様子を、動滑車にかかる糸の一端が天井に固定され、それに対して滑らない状況に当てはめている。動滑車は糸のもう一端を上へ引くと上に動く状況は、問題の糸車を引く糸の端をAの方向にした時(引くことによるトルクの向きは問題と同じ)のものに対応する。この問題のすり替えは「糸巻きからの増えた糸」の長さという表現で糸巻きから外れた糸の長さを表すところに通じている。後半の「引く方向はBであり」以降はの巻きにかかる机面からの摩擦力はAに向く。車輪へのトルクが並進運動をもたらすモデルにとらわれて回転方向を推定している。】	回転	

注：説明を組み立てる際に、並進運動と回転運動のうちどちらを先に考えるよう示したかについて、右に示した。

付表2 手回し発電機とそのモーター動作に関する設問とその回答

設問：	<p>ふたつの手回し発電機A、Bの出力端子をつなぎ、さらに並列に、豆電球をつないだ。Aのハンドルを自由にしたままBのハンドルを一定の速さで時計回りに回転させたところ、豆電球が光り、Aのハンドルも時計回りに回転しだした。Bのハンドルをこれと同じように回転させながらAのハンドルを以下のようにすると、Aのハンドルを自由にした時に比べて、豆電球の明るさは変化しないか？ 明るくなるか？ 暗くなるか？ またその理由を説明しなさい。</p> <p>(問1) ハンドルを固定する。 (問2) 時計回りに回転させる。 (問3) 反時計回りに回転させる。</p>
	

答	説 明 (隅つき括弧【 】は筆者コメント)
(問1) ハンドルを固定する。	
暗くなる○	1. Aに流れ込む電流が増えるため。 【モーターの軸を固定すると過電流が流れる現象から推定、ただし、その現象自体には一切言及していない。】
	2. Aのハンドルを固定するとAの発電機に抵抗がかかるため豆電球は暗くなる。 【モーターの軸を固定することを「力学抵抗がかかる」と表現し、過電流が流れる現象から推定している。】
	3. Aを固定したときAの抵抗が小さくなるのでAに電流が多く流れる。よって豆電球は暗くなる。 4. Aの抵抗が減るため流れやすいAの方に多く電流が流れるため。 【モーターの軸を固定すると過電流が流れる現象から推定、ただし、誘導起電力がなくなり電気抵抗による電圧降下が残ることを「電気抵抗が減る」と見かけ上の説明で済ませ、誘導起電力について触れていない。】
	5. 豆電球はつかなくなる。なぜならAに抵抗とみなせる逆電圧が発生しなくなり、実質抵抗なしの導線となるためすべての抵抗がAを通るからである。 【モーターの軸を固定すると過電流が流れる現象から推定し、誘導起電力も正しく理解している。導線は「抵抗のある銅線」と置き換えれば容易に正しい理解に達する。】
消える△	6. Aを固定するとAはモーターではなく導線とみなせるので、抵抗がゼロになり、豆電球に電流は流れなくなる。よって消える。 7. ハンドルを固定するとAはただの銅線と考えられ、豆電球はつかなくなる。 【モーターの軸を固定すると過電流が流れる現象から推定、ただし、誘導起電力がなくなり電気抵抗による電圧降下が残ることを「電気抵抗がゼロになる」と見かけ上の説明で済ませ、誘導起電力について触れていない。】
	8. Aのハンドルを固定すると、Aのハンドルの抵抗値が上がったと考えることができる。このとき、豆電球とAのハンドルは並列回路のため同じ電位がかかるが、Bのハンドルの起電力は変わらないため、豆電球の明るさは変化しない。 【前半は2と等価。後半は発電機Bの内部抵抗(出力電圧は電流の増大とともに下がること)を無視した。】
明るくなる×	9. AのハンドルはBが流す電流を差し止める向きの電流を流すように回っているので、回転を止めることでBの流す電流が豆電球の方に流れるから。 【逆起電力の表現は正しいが、Aの回転を止めたことで電流が増加するのはAである。電球ではない。】
	10. 回路は、発電された電流と逆の方向に電流を流そうとするので、発電をやめると、回路が流そうとした電流を止めようとするものがなくなり、大電流が流れるから。 【Aの回転の原因としてのBからの電流とAでの逆起電力のつながりは、因果関係が不自然に表現されているものの正しい。Aの回転を止めたことで電流が増加するのはAである。電球ではない。】
	11. Aのハンドルの抵抗が大きくなるため、豆電球を流れる電流が増加するから。 【Aの軸に加えた力学抵抗を「電気抵抗が大きくなる」と誤解し、Aへの電流が減るものとした。】
	12. 豆電球とAのハンドルに流れていた電流が豆電球だけに流れるようになるので、豆電球に流れる電流が増えるため。 13. Aのハンドルを固定すると、Aには電流が流れなくなり、豆電球に流れる電流が増加するため、豆電球の光は明るくなる。 14. Aに電流が流れなくなるので、その分の電流が電球に流れ込むから。 【Aの軸に加えた力学抵抗を「電気抵抗が大きくなる」と誤解し、その大きさを無限大とした。説明の細部が省かれ不明だが、直列接続の観察に対する説明を無理やり当てはめたようにも見える。】
	15. 固定することで手回し発電機一つ分の抵抗が減るので明るく光る。 【モーターの軸を固定すると過電流が流れる現象を見かけの「電気抵抗が減る」ものとして解釈し、さらに並列回路を直列回路に置き換えて説明した。】
	16. Aのある回路は切れ、Aによって回されたBが電力の供給源になるから。 【題意の読み取りを間違えており、論理的におかしい表現である。】

(付表2 続き)

<p>(問2) 時計回りに回転させる。</p>	
<p>明るくなる○</p>	<p>1. 明るくなる。なぜならAとBが電源並列になるため、回路内の電圧電流は、手回し発電機ひとつと豆電球を直列につないだものとおなじになり、Aという抵抗があるものより電圧電流が大きくなるため。 2. 電源が並列につながれている状態なので豆電球はハンドルひとつ、豆電球ひとつの状態と同じ明るさである。この明るさは、ハンドルで作った電流がすべて流れるため、始まりよりも明るい。 【ふたつの電源が並列であっても電球にかかる電圧が増大することが、論理性にかける説明ではあるが示されている。】</p>
	<p>3. 2台で回転させることで発電量が増えるため明るくなる。 4. A、Bともに時計回りに回転させると、A、Bの発電機から電流が流れるため豆電球は明るくなる。 5. どちらも電球に向かって電流を流そうとするので明るくなる。 【Aがモーター動作したときの回転と同じ方向に力をかけ、発電させたときの起電力が、モーター動作時の逆起電力と同じ向きになることは示されているが、電源2台の並列接続で出力電圧が増大することには説明が必要であることに気づいていない。】</p>
	<p>6. A、Bを起電装置として考えると、電池の並列回路のようになり、Aを自由にしてBの電流を弱める働きがなくなるので、明るくなる。 【後半の記述は、Aを自由にしたときにあった電圧降下あるいは逆起電力が発電にはなくなるという誤った説明を使って、論理を短絡的に閉じている。】</p>
	<p>7. 同じ方向に流れる電流が増えるから明るくなる。 8. 流れる電流の量が増えるため明るくなる。 9. 回路全体にかかる抵抗の総和が小さくなるため、明るくなる。 【明るくなるというステートメントと論理的に直結することだけを持ち出した、形だけの説明をしている。】</p>
<p>変化しない△</p>	<p>10. 豆電球にかかる電圧は変化しないので豆電球の明るさも変化しない。 11. Aを固定していない時と同じ状態なので、明るさは変化しない。 12. どちらも時計回りに回しても、電位自体は変化しないので明るさは変わらない。 13. 閉回路が2個できるだけなので明るさは変わらない。 【ふたつの電源が並列であっても電球にかかる電圧が増大することに気づいていない。】</p>
<p>暗くなる×</p>	<p>14. Aのハンドルも時計回りに回すと、豆電球にBのハンドルから流れる電流と逆向きのものが流れこんでくると考えられるため、暗くなる。 15. 豆電球に、Bから流れ込む電流とAから流れ込む電流の差の分の電流が豆電球に流れる(キルヒホッフの定理)ため、Aを時計回りに回すとその分差が小さくなるから暗くなる。 16. 手回し発電機から手回し発電機への回路になるため、豆電球は暗くなる。 【発電時の起電力がモーター動作時の逆起電力の逆向きになるという誤った理解に基づいている。】</p>
<p>つかない×</p>	<p>17. A、Bともに電流を流そうとするが、豆電球上では向きが逆になるため豆電球には電流が流れない。 18. つかない。A、Bともに同じ大きさで逆向きの電流が豆電球に流れるから。 【14~16と等価。】</p>
<p>(問3) 反時計回りに回転させる。</p>	
<p>暗くなる・つかない○</p>	<p>1. つかなくなる。なぜなら、AとBが逆方向に同じ電位差を生じさせるため豆電球の両端の電位差もゼロになるからである。 2. AからとBからと逆向きの電流が流れ出るようになり、豆電球に流れる電流が減ってしまうため、暗くなる。 【2つの電源が直列短絡回路を構成し、豆電球はその回路から分岐した2点を結ぶことを説明できている。】</p>
<p>変わらない×</p>	<p>3. 発電機にかかる抵抗が少なくなるため電流が発電機の方へ流れるから暗くなる。 4. 回路に電流が流れづらくなるから暗くなる。 5. 電流は抵抗の小さい方を通るため、豆電球において電流が流れなくなる。よって消える。 【回路の構成について説明不足で、どの部分に流れる電流に言及しているのかが不明。】</p>
<p>明るくなる×</p>	<p>6. 並列のため、変化しない。 【問2の10~13にあたる考察をした。】</p>
<p>明るくなる×</p>	<p>7. 問2とは逆に、豆電球にBのハンドルから流れる電流の向きと同じ向きのものがさらに流れこむため、明るくなる。 8. 明るくなる。A、Bともに同じ向きの電流を流そうとするから。 9. 電力供給源が増えるため明るくなる。 【問2の1~5にあたる考察をした。】</p>