



## 第3回 物理教育研究(PER)の衝撃と 物理教育の未来



香川大学名誉教授  
笠 潤平

### 1. はじめに一本稿の趣旨

本稿では、筆者が日本における「物理教育研究」の検討と受容の過程に立ち会い学んだ経験をもとに、物理教育に携わる我々に「物理教育研究」の検討がなぜ有益であるかを述べ、その検討への案内を行う。

### 2. 「概念調査問題」

#### 1. 物理教育を職業とするならば

物理教育を職業としている我々はプロフェッショナルとして、物理教育の動向をある程度把握し、生徒によい教え方があれば取り入れるべきである。そして、世界的にみて現在、物理の教え方に画期的といえる影響を及ぼしているのが、アメリカを中心に発展してきた「物理教育研究」である。

それは第一に、我々の通常の物理の授業は多くの場合驚くほど効果がないという事実を明らかにしてきた。また同時に、はるかに効果的な授業方法を、説得力ある興味深い研究的な知見と証拠の豊富な蓄積とともに提供してきた。だから、我々が「物理教育研究」の内容と成果を検討することは重要なことである。

#### 2. 授業で概念調査問題を

「物理教育研究」の価値を実感する一つのよい方法は、その中で用いられている概念調査問題によって自分の授業の効果を検証することである。

すると、自分の教えた生徒の、物理の基本的概念に関する理解が、我々の予想や期待をはるかに超えて低いという事実を知ることになるかもしれない。だが、それは通常のことなのである。

#### 3. 教師による説明が中心の授業は効果がない

実際、説明的な講義と板書をベースにしながら、エピソード等から概念を口頭で導入し、図解や数式を用いて

物理的な内容を説明し、例題を示し、章末問題を課するような伝統的な授業をしているのでは、いかに演示実験を交えようが、とっておきの例えを入れようが、生徒実験を並行させようが、一般に授業効果は低いのである。

たとえば、ハーバード大学の人気講師であったマズールもその人気にも拘らず自分の講義が概念的理解に役立っていなかったことに驚愕したことを告白している（その結果、後に彼は「ピア・インストラクション」という授業方法を考案することになる。その経緯を述べた彼の有名な講演「転向した講師の告白」はいまもYouTubeで見ることができる）。また、現在生徒の能動的な参加型の授業方式として全米の高校の科学教育現場でもっとも人気がある「モデリング・インストラクション」の開発者の一人、高校のベテラン教師であったウェルズも、自分の授業を受けたクラスの力学概念調査問題の結果の低さに驚いて、新しい授業法の研究に参加したといわれている。

私自身も似た経験をしている。「物理教育研究」が日本で本格的に検討され始めたのは2006年に東京で開かれた物理教育国際会議（ICPE2006 Tokyo）の頃だったが、その当時私は、後述する「力と運動の概念調査問題（FMCE）」（注参照）を訳し、自分のクラスに用い、当時交流のあった各地の先生方にも用いてもらった。その結果、はじめて力学の授業を受けたクラスの結果では、たとえば、鉛直投げ上げで、授業後にニュートン力学的な理解に到達している生徒の割合は、（ある先生の授業を除いて）軒並み数%~30%程度だったのである（判定方法は後述）。私はこのとき受けた衝撃と反省の感覚を今も覚えているが、それは自分の授業の現実を知り、「物理教育研究」に対して真剣な関心を持つ大きな動機づけとなったという点ではよかった。

#### 4. 基本概念の理解の欠如

ここでいう概念的な理解とは何も難しいことではない。「運動する物体には運動の向きに力がはたらいている」、「投げ上げられた物体が頂点で折り返すときはたらく力はゼロである」、「トラックと乗用車が正面衝突したときにトラックが乗用車に及ぼす力の方が大きい」などといった回答を選ぶ生徒が、授業後も非常に多いのである。このようなとき、我々は概念的な理解ができていないと考えるのである。

#### 5. 「物理教育研究」に基づく概念調査問題

説明をもとにして、「物理教育研究」に基づく概念調査問題は、一方で物理学の深い理解と他方で学習者のインタビュー等に基づいて設問と選択肢が作成され、よくできているものが多い。

一例を示せば、ソコロフらの開発したFMCE（力と運動の概念調査問題）は、学習者がニュートン力学的な理解に達しているかどうかの判定という目的にきわめて忠実である。

たとえば、物体（コイン）の投げ上げについては、コインの上昇時・頂点・下降時にコインにはたらいている力について尋ね、しばらく置いて、各場合の加速度の理解も問う。選択肢には、力や加速度の向きだけでなく、大きさが一定か、だんだん小さくなるか、大きくなるか、ゼロかなどが（インタビュー調査結果をもとに）含まれている。これらの設問の回答分布はクラス生徒の考えの傾向をかなり詳しく明らかにする（図1）。

だが、さらに、ニュートン力学的な理解に到達しているかどうかは、上昇時・頂点・下降時の3つの場合とも首尾一貫して力や加速度が鉛直下向きに一定と回答しているかどうかで（3問の完全回答で）判定するとよいとされる（下降中の物体にはたらく力の正答率は、どのクラスでも他の2問より少し高いが、それは自由落下では重力のみがはたらいているという学習者の記憶の単純な再生でも正答に到るため、他の2問を間違えていたら、ニュートン力学的な理解をしているとはいえない）。

一般に、概念調査問題は、さまざまな検討を受けて一定の信頼性を得ているものが多い。さらに、同一の問題が同一の方法で広く用いられているので、自分の授業と他の物理授業と比較してどの程度効果的なのか知ることができる。

コイン投げ上げ K高校3年(神奈川県立)

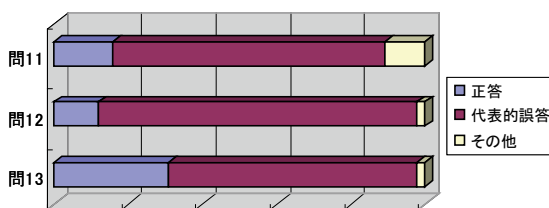


図1 このクラスでは、上昇中（問11）では「上向きの力がだんだん小さくなる」、頂点（問12）では「力ゼロ」、下降中（問13）では「下向きの力がだんだん大きくなる」が代表的誤答で、それらに討論の焦点を合わせれば劇的に理解が進む可能性がある。

### 3. 「物理教育研究」に基づく授業の基本的特徴 :ILDs

#### 1. 学習者の能動的参加

「物理教育研究」に基づく授業の特徴は、学習者の能動的な参加による、自分の持つ考えの変革の機会の連続的な保障である。「物理教育研究」の第一の成果は、通常の講義型授業はそれを欠いてしまうので効果がないということの発見である。

#### 2. 概念的な理解に焦点を当てた教材

焦点を当てられるのは高校・大学の伝統的な授業の通念とは異なり、概念的な理解、あるいは、当該分野の物理学の概念的な原理的なモデルの構築である。

#### 3. ILDs

この2点を、日本の高校の授業環境に比較的適合しやすい「インタラクティブ・レクチャー・デモンストレーション」(ILDs: 開発者はFMCEと同じくソコロフ)のニュートン力学の教材を例にみてみよう。この教材では、モーションセンサーや力センサーから得たデータをパソコンに取り込み、時間に対する位置、速度、加速度、力のグラフを運動解析ソフトによって得て表示するシステムを用いる（ちなみに、これらは現在どの実験教材会社からも提供されているが、その開発は物理教育研究者たちによって行われた）。

#### 4. 授業の目標と進行

授業の目標は、一直線上の物体の運動について、等速度運動と等加速度運動といった基本的な運動にともなう運動学の諸概念およびニュートンの3法則の概念的理解を確立することである。

そのために、主にレール上に置かれた力学台車に与える初速度や加速度、はたらく力などの条件を明示した事例が一つずつ提示される。そして、その都度、台車の運動の位置・速度・加速度・はたらく力などにつ

いて、各自の予想を時間に対するグラフの形で回答することが求められ、グループ内での比較と討論、演示実験による即時の検証、クラスでの事後討論による予想と結果の振り返りが行われ、次の問いに移る。

その中にはたとえば、座標軸の負向きに初速度を与えられた台車が、取り付けられたファンによって減速し、座標軸正向きに運動しはじめる場合（さあ、学習者はどんな速度-時間グラフ、加速度-時間グラフになるか、丁寧に予想しなければならない！）が含まれる（図2）。この課題は負向きの速度が減速するとき、加速度はどちら向きかということをあためて原理的に考えることを学習者に求め、ただちに実験結果をフィードバックする。

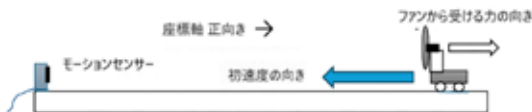


図2 ILDs 運動学2 演示実験6

また、この課題に、原点に向かって斜面を登る向き（座標軸の負向き）に初速度を与えられた台車の運動の速度-時間と加速度-時間グラフを考える課題が続く。これは鉛直投げ上げにおける誤概念「最高点では速度ゼロなので加速度ゼロ」を克服するための最適な橋渡しとなっている（図3）。（素晴らしい！）

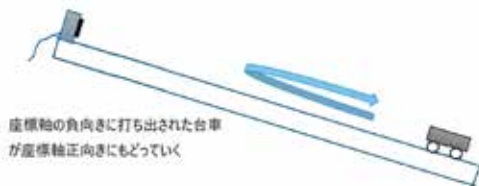


図3 ILDs 運動学2 演示実験7

さらに、この運動は、後にニュートンの運動の法則の学習の際に、装いを変えてもう一度取り上げられる。今度は、滑車ごしにおもりにつながれた糸で座標軸の正向きに引かれる台車が座標軸の負向きに初速度を与えられる。ここで台車を糸で引くのは力センサーで台車が受ける力を測定し、速度の傾きや加速度と並べて観察し関係を納得させるためである（図4）。



図4 ILDs ニュートンの第1・第2法則 演示実験6

そして、最終的に、「受ける力の向きと物体に生じる加速度の向き（速度グラフの傾きの正負）は必ず一致する」という単純かつ本質的な理解（原理的なモデル）を学習者が構築することが目指されている。実際、どんな運動でも、はたらく力の向きの正負によって速度-時間グラフの傾きの正負（加速度の正負）がまずわかるというのは学習者にとって満足のいく強力な原理の発見である。このようなものをニュートンの第2法則の（生きた）概念的理解（の一部）と見なせるだろう。

## 5. ILDs の授業効果

ニュートン力学の概念的理解に関するこのILDs 授業の効果はよく知られている。ソコロフによれば、先述のコイン投げ上げ問題の3設問の完全正答率は、1989-90年度のオレゴン大学での調査では授業前で10%程度、伝統的な授業後では20%程度にしか上がらなかったのに対して、ILDs 授業後には90%程度に上昇している（ちなみに、谷口和成先生の京都教育大学でのILDsに基づく力学授業のゲインもわが国の大学の授業の調査データとしては突出して高い）。

## 4. マクダーモットらの研究と教材

続いて、紙数に限りがあるが、筆者が楽しく検討した魅力的な教材の一部をもう一つだけ紹介する。

### 1. ワシントン大学物理教育グループ

今のアメリカの「物理教育研究」の始まりはマクダーモットに率いられたワシントン大学の物理教育研究グループの70年代以来の一連の研究にある。このグループの活動は、その研究スタイルや物理教育の研究を専門とする博士の育成などの点でも、アメリカの「物理教育研究」の特徴を形づくる源となった。だが、それだけでなく、マクダーモットらが各分野の調査で明らかにした知見や思慮深い洞察、（これらは数多くの研究論文・講演記録および動画で学ぶことができる）そして良く練られた教材自体が尽きせぬ魅力を備えている。

## 2. 『探究による物理』と『入門物理におけるチュートリアル』

マクダーモットらによる教材『探究による物理』(Physics by Inquiry) および『入門物理におけるチュートリアル』(Tutorials in Introductory Physics) は、いずれも小人数のグループに分かれ、ワークシートの指示に従って、課題の実験の結果予想にまず個人で答え、ついでグループで討論するなどしてから、自分たちのペースで実験をして結果を確かめて進んでいく(実験は、もっぱら小さな光源と遮蔽板や豆電球と電池と導線という簡単な装置を用いて手元で行う)。

### 3. 学習者の能動的参加と概念的理解

この授業の眼目が、学習者の能動的参加による、対象となる物理過程についての生きてはたらく概念的理解(あるいは原理的なモデル)の構築であることはILDsと変わらない(というか、おそらくソコロフらはマクダーモットの仕事に学んでいる)。

そして、マクダーモットの教材の素晴らしさは、単純だが、公式の暗記で安易に答えられず原理的な概念的理解が問われる課題を次々に課すところにある。

### 4. 曲線軌道上の運動の加速度

たとえば、曲線の軌道上を進む物体の運動の運動学を導入する際に、マクダーモットは等速円運動ではなく、楕円のような軌道上を運動する物体の速度・加速度を、2つの時刻における変位ベクトルの差や速度ベクトルの差に立ち戻らせ、次第にその2つの時刻の間隔を小さくしていくことから原理的に考えさせる。課題には等速の場合も速さも向きも変わる場合も含まれる。

筆者はこの課題を昨年香川県の公立高校生にグループで取り組んでもらいその様子を注意深く観察した。彼らは非常に楽しみながら、自分たちで、速さがだんだん増していきながら楕円上の軌道を運動する物体の各瞬間の速度や加速度なども明らかにしていった。

そして、考察の帰結の一つとして、曲線軌道上を物体が等速で運動しているときの加速度は、軌道の接線と垂直な方向で内向きになるという理解を得る。これは、等速円運動の加速度は中心向きであると講義で説明されて次に進むこと(我々の授業では普通そうである)と比べて、運動の理解の深さと学習体験の深さという点で大きな差がある。

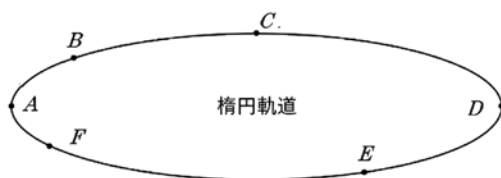


図5 『入門物理におけるチュートリアル』で用いられる事前テストの一部

自動車が楕円軌道上を等速で進むとき、図の各点で自動車の加速度はどちら向きだろうか? 生徒たちはBやE、Fでも楕円の中心向きに描きがちである。物理的考察ではなく等速円運動の公式の記憶に頼って答えているのである。

## 5. 物理教育研究へのアクセスの案内

「物理教育研究」に関心をもたれて情報を集めてみようと考えられたら、アメリカ物理教員協会が運営しているウェブサイト PhysPort にアクセスされるか、エドワード・レディッシュの著作『科学をどう教えるか』を読まれることをお勧めしたい。

### 1. アメリカ物理教員協会 (AAPT) の PhysPort

これは、「物理教育研究」を踏まえた授業をこれから行うことを検討している教員、現在実践している教員などにとって、有効性が実証済みの教材の簡潔な紹介や入手方法、関連論文へのリンクなどがわかりやすく豊富に準備されている大変充実したサイトである。英語が苦手な方でも今ならブラウザの翻訳機能を使って、どのページの内容も意味がつかめるので、ぜひ一度見られることを強くお勧めする。

このサイトに行くと、各分野の教材紹介、各種の評価テストの紹介、ワークショップ紹介、専門家のお勧めなどのいくつかのタブがあるが、たとえば教材紹介のタブを開くと各分野および講義形式、チュートリアル形式、ワークショップ形式などの授業環境にあわせて実に50を超す教材が紹介されている。

また、「専門家のお勧め」という記事のタブでは、「物理学における研究ベースの教育法が機能している理由は何ですか?」「物理の授業で公平性 (equity) についてどう話せばいいですか?」「クリッカーやピア・インストラクションに使える良い質問はどこで見つかりますか?」などといった、入門的でタイムリーなテーマの解説が数多く読める。その中には、「新しい授業法に懐疑的な同僚に向けた議論」という記事もある。

### 2. レディッシュ『科学をどう教えるか』

もう一つのお勧めは、元東京農工大学の覧具博義先

生のイニシアチブの下で、物理教育学会監訳として丸善出版から出版されたエドワード・レディッシュによる『科学をどう教えるか』(2012)である。この本は本当に何度も読み返すに値する。

この本の第1の特徴は、「物理教育研究」の重要な諸側面の手際の良い丁寧な総覧となっている点である。第4章は宿題と試験、第5章は授業評価の調査問題、第6章から第8章は代表的な授業方法、とくに第7章では講義型の双方向的授業、第8章はチュートリアル形式(演習の時間を利用した授業)やワークショップ形式(学生実験をベースにした授業)の紹介である。

第2の特徴は、著者レディッシュによる、この新しい、学習者の能動的参加による概念的理解の構築という教育方法の総括的な理解と基礎づけの意欲的な試みである。これは第2章・第3章で与えられているが、類書はあまりなく、今のところ「物理教育研究」の諸知見はどうまとめられるのか、その基礎にはどんな原理があるといえるのかを考えるうえでの最良の対話相手の一つである(マクダーモットは、「物理教育研究」の諸知見を基礎づけるより深い認知的原理が明らかでなくても、自分たちの実証的研究で十分効果的な教材を開発し物理教育を改善できると考えていた)。

第3の特徴は、自分はその問題をどのように受け取ったか、授業をするなかでどのような経験をしたかなどについて語る著者レディッシュの姿勢である。彼はそれらを積極的に語ることで、紹介する教材や調査問題に見られるさまざまな洞察や工夫や微妙な注意点を丁寧に説明し評価し、さらに同僚の物理教員・物理研究者にとっての「物理教育研究」に対する敷居を下げようとしている。

たとえば、先述のマクダーモットの楕円軌道上を運動する物体の速度・加速度の考察を、等速円運動の考察よりも重視し先行させる扱いについて、レディッシュは、「等速円運動の方が単純でわかりやすいからそちらを先行させた方がよい」と疑問を呈する同僚サグレドを登場させながら、マクダーモットのアプローチがいかに優れているかを丁寧に述べている。またILDsの紹介をする際にも、自分がその教材をどのように使用したかを失敗談と成功例を含めて丁寧に述べている。

### 3. 『物理教育の理論と実践』

また、物理教育学会監修としてオーム社から最近出版された『物理教育の理論と実践』(2025)でも、わ

が国の執筆者によって「物理教育研究」の諸側面やそれに学んだ研究が詳しく紹介されている。たとえば、同書第1章では、本連載第1回の執筆者である新田英雄先生による「物理教育研究」の全体像の解説がより詳しく書かれている。また、たとえば、先述のILDsの力学の授業についても、京都教育大学の谷口和成先生(3章)と元同志社高校の山崎敏昭先生(5章)が詳細に説明している。本連載第2回の執筆者である勝田仁之先生の論考も非常に面白い。さらに右近修治先生(東京学芸大学)の論考は力作で学ぶところが多い。また、「物理教育研究」と同様に学習者の能動的参加を重視し、ある意味ではアメリカの諸研究に先行していた洞察に基づく仮説実験授業や玉田方式(到達目標学習課題方式)も物理教員向けに紹介されている。

### 4. 物理教育学会へのコンタクト

現在、物理教育学会は、「物理教育研究」を検討したいという物理教師とのコンタクトに積極的である。ぜひ、コンタクトを具体的にされることをお勧めする。

### 6. おわりに

いつのまにか歳月は経って、筆者は昨年3月に大学を定年退職となったが、物理教育に関わった年月はとても楽しかった。若い時は他への関心もあって腰を落ち着けていなかったけれども、ある頃からどうせ物理教育に関わるなら世界中のよいカリキュラムや授業方法や教材を理解したいと考えた。それからは本当に楽しかった。そして、多くの素晴らしい方に会うことができたし、やることがたくさんあった。いま、振り返って、若い皆さんに願うのは、物理教育学会や近くの物理教師の集まりを手掛かりに、視野を広くもって物理教育の発展に関わってほしいということである。一人では視野はなかなか広くならない。物理教育のコミュニティの一員として日本の物理教育全体の発展に寄与するという意識を持つと、いろんな人と一緒に仕事ができ、物理教師としてのやりがいは何倍にも増すのだと思う。

注) Force and Motion Concept Evaluation, <https://www.physport.org/assessments/assessment.cfm?A=FMCE> ※石本美智先生による日本語版がこの translation タブから入手できる。使用方法をよくお読みください。