

科学と科学教育と科学史

工学院大学エクステンションセンター 原 康 夫

はじめに

湯川さんは核力の中間子論という物理学の大発見をしたが、同時に、物理学の独創的な研究は日本でもできることを実証した。物理学は普遍的であるが、物理学者には国境がある。私の若かった頃には素粒子論の研究論文を書くと、湯川さんが創刊した *Progress of Theoretical Physics* 以外の発表の場はなかった。湯川さんに心から感謝している。

物理学の法則は普遍的であるが、「科学としての科学教育」というテーマが意味する、物理学を研究対象としたときに得られる研究結果は普遍的だろうか。物理教育研究でどのような普遍的法則が発見されているのだろうか。これが私の講演の一つのテーマである。

「科学としての科学教育」という研究会のテーマに合わせて「科学と科学教育と科学史」という講演題目を提出したが、実際の講演内容は「物理学と物理教育と物理学史」になった。ポスターセッションで「物理教育と物理学史」を発表したので、講演のその部分の報告はポスターセッションの報告を見ていただきたい。

1. 物理教育との関わり

まず、私の物理教育との関わりを記す。私は東京教育大学-筑波大学、帝京平成大学で物理教育に従事した。1980年頃からは大学物理と高校物理の教科書等を執筆してきた。他大学の教員と協力して物理教育の研究を始めたのは、日本物理学会に1988年に設置された物理教育委員会の委員に選ばれてからであった。1980年代に、アジア諸国と米国から日本物理学会に物理教育での交流が要望された。当時の日本物理学会は物理教育に関わる事業を行うことは定款上不可能だったので、対応策の検討のために物理教育委員会が設置されたのであった。検討の中で、物理教育での国際交流を行うのに必要な、大学物理教育の情報が収集されていないことが認識され、データ収集と物理教育の研究者集団をつくるために1990-1992年度に約30人の物理教師のチームが科学研究費による総合研究「大学における物理の基礎教育」(研究代表者・原康夫)を実施し、日本と外国の基礎物理教育の実態調査、新しいカリキュラムと学生実験の開発、物理の大学入試問題の改善等の総合研究を行った。この総合研究の参加者を主要研究者として1993-95年度には総合研究「大学初年級向け物理教材モジュールの開発と評価」(研究代表者・阿部龍蔵)、1996-1998年度には総合研究「大学物理教材のネットワーク化」(研究代表者・宮脇澤美)が実施された。これらの総合研究の報告は<http://www.nep.chubu.ac.jp>で読むことができる。このような活動の中から、

物理教育における情報交換の場として、日本物理学会から雑誌「大学の物理教育」が1994年に創刊された。

1997年に日本工学会が、国際的に通用するエンジニア教育（JABEE）検討委員会を発足させ、日本物理学会に参加するかどうかの問い合わせがきた。「物理学は工学の基礎教育なので、検討委員会に物理学会は参加すべきだ」と主張した私は検討委員に選ばれた。しかし、「物理教師による物理の授業は効果がない」というのが多数の工学教育関係者の認識だったのは予想外であった。逆に1999年2月の委員会の折に、大橋秀雄委員長から「英国の物理学会（IOP）では職業資格としての chartered engineer を認定しているので、日本物理学会も英国の状況を調査して JABEE に関連学会として参加し、物理学関連分野のエンジニア教育課程の審査・認定に加わるよう検討してほしい」と提案された。私は物理学科の卒業生の過半数は技術者になっているのだから、大橋提案に応じることは物理学会の社会的責任だと受け止め、物理教育委員会に前向きに検討するよう提案し、その結果2001年に日本物理学会は JABEE に正会員として加入した¹⁾。

1991年に大学設置基準が大綱化されたのと期を一にして、国立大学では大学院重点化と教養部の廃止が進んだ。その原動力は教員等積算校費増を期待する教員の希望と教養部の廃止を伴う大学の組織改編を望む文部省の要求であったと記憶している。この際に、基礎科目としての物理学の実施体制は弱体化し、教養部が存続した唯一の国立大学の東京大学ですら文部省との交渉の中で物理の単位数が減少した²⁾。

教養部による基礎物理教育が廃止された一因には、それまでの基礎物理教育への不信感があり、それを払拭させるような新しい教育法を生み出せなかった物理教師の力量不足があったと思う。ある大学では医学部から演習中心の授業という提案が出たが、今考えると尤もなこの提案も当時の物理教師は誰も理解できなかった。

最近の私は、物理の教科書執筆とカルチャースクール講師として、広い意味での物理教育に関わっている。

2. 物理教育では物理学のモデルを教える

物理学は研究者がつくった文化遺産であり、現在も発展し続けている。物理教育では、現在発展中の物理学そのものを教えるのではなく、受講生に適切だと考えられる物理学の体系が作られ、教科書が刊行され、教育が行われている。ここでは物理学の教育用体系を標準モデルとよぶ。「モデル」の意味については、素粒子の標準モデル、飛行機のモデルなどで使われている幅広い意味から推測してほしい。

日本の学習指導要領は標準モデルの1例である。これが日本の中学・高校の科学教育での唯一の標準モデルだという状況は、望ましくないと私は考える。複数の標準モデルが必要な理由として、英国の高校物理の標準モデルの1つである Advancing Physics AS での

光波の伝わり方の単元を挙げたい。前の単元でホイヘンスの原理にしたがう波の伝わり方を学んだ直後なのに、この単元では「光は空間を波として伝わる」と書かずに、「光子は量子的振る舞いをする。その根本的ルールは、すべての経路を試みるである。量子的振る舞いでは、すべての可能な経路からの位相子が結合される」とファインマンの経路積分の考えを説明している。日本の高校教師と生徒の多くがこのような説明を理解できるとは思えない。英国では他の標準モデルもあり、選択の自由度があるので、このような内容が有り得るのだと考える。

物理の標準モデルには限界がある。「高校物理の内容がチャンと分かれば、大学の物理学科卒業レベルだ」と宮島龍興さんが言われたことがあった。高校物理の標準モデルは物理そのものではないので、チャンと理解できないのが当然だという意味である。

3. 物理の標準モデルの標準的構成は歴史的発展順序重視型で、力学の標準モデルの作り方は積上げ型である

標準モデルの作り方については、歴史的発展順序重視型、積上げ型、理解しやすいことを重視する型、専門教育との接続重視型、…がある。

現在、物理教育で使われている標準モデルの構成は、

「物理学は目に見えたり、手で触れたりできる現象の法則探求から始まった。目で見ることのできる石の放物運動、天体の運行、手に感じる熱、目に見える光、耳に聞こえる音、そういう現象が物理学者の興味の対象であった。感覚に縁のうすい電磁気現象でも、摩擦電気をピリッと感じるとか、摩擦電気が物を引きつけるとか、磁石が鉄片を引っ張るとか、目に見えたり、感覚で感じたりする現象に関係して論じられていた。しかし、物理学の研究の進展によって、日常生活で経験する熱現象、電磁気現象、物質の性質などの法則を本当に理解するには、原子の世界という直接は目にも見えず手にも触れられない小さな世界のことを知らなければならないことが明らかになった。その結果、原子の中がどのようなになっているか、そして、そこでどのような法則が支配しているのかがだんだん明らかになってきた。(朝永振一郎)」

という物理学の歴史の順序を重視して、力学、波動、熱学、電磁気学、原子物理学という順序になっている。

物理学の標準的構成で最初に現れる分野である力学の標準モデルは、ニュートンの法則から始まる積上げ型の構成法で作られている。積上げ型とは「ある事柄を理解するとは、それを既知の事柄に関連付けることである」という原則に基づく方式である。

4. 標準モデルの作り方の見直し — 電磁気学の場合

電磁気学と量子力学の学習は難しかったという人は多い。私もそうだった。電磁気学は

なぜ難しいのだろうか。

第1の理由は、基本法則のマクスウェル方程式が最後に登場し、電場と磁場がいつの間にか主役になるので、電磁気学の積上げ型の理解が難しいことである。第2の理由は、磁石中の磁場の向きに2つの見方があることである。電気学からの積上げ型では、磁石中の磁場の向きは $N \rightarrow S$ である（磁場 $\mathbf{H}$ ）。歴史的には、磁力線の発明者のファラデーは、磁力線は閉曲線で、磁石中の磁場の向きは $S \rightarrow N$ だと考えた〔磁場（磁束密度） $\mathbf{B}$ 〕。

科学リテラシーとしての物理教育では、1つのタイプの磁場だけが現れるのが望ましい。この磁場が米国では $\mathbf{B}$ であるように、日本でも $\mathbf{B}$ が妥当だと私は思う。しかし、高校物理での磁気現象への導入では身近な磁石は無視できない。ここは工夫の必要な個所である。

磁場 $\mathbf{B}$ と磁化 $\mathbf{M}$ は独立な物理量なので、電磁気学の専門教育レベルの標準モデルでは $\mathbf{B}$ と $\mathbf{H}$ の両方が必要なことは言うまでもない。

なお、教科書での電場、磁場の説明図には、電場、磁場ではなく、電気力線と磁力線が現れる。電磁気学の直観的理解には電気力線と磁力線は不可欠である。

5. 標準モデルの作り方の見直し — 量子論の場合

量子論は古典論の適用範囲外なので、古典論からの積上げ方式には基本的困難がある。そこで、「自然法則は導くものではなく、発見するものだ。自分が分かりやすいように理解すればよい」という朝永さんの言葉が役に立つ。分かりやすい理解法としてビジュアルな理解がある。例えば、光や電子の二重性は微弱ビームの二重スリット実験の写真を見れば、容易に理解できる。また発見法的説明、つまり、こう仮定すれば、こうなるという説明もわかりやすい。

「はじめから全部わかろうと思うな。量子力学。」という長岡洋介さんの示唆もある。

これとは異なるが、はじめから全部教えない量子力学として、角運動量と摂動論が出てこない朝永さんの「量子力学」（初版）がある。これは、計算問題を解けるようになることを目指さない量子力学教程であり、物質の二重性という古典物理学と矛盾する現象の理論としての量子力学教程である。今回の研究会で丸山瑛一さんが紹介されたヒップファミリークラブの「量子力学の冒険」も同じ目標の面白い試みだと思った。

1990年代に、米国の物理教育は「高校→大学→大学院→物理研究者」という物理学者養成の蒸留過程になっているという反省が聞かれた。日本でも同じ傾向がある。蒸留過程優先に対する反省の視点から、朝永さんが執筆した「量子力学」と朝永さんが編集した「物理学読本」を読み直すことは有意義だと思う。

6. 物理教育には実際的な研究で得られた知識と普遍的法則が必要

物理の標準モデルの作成と活用には、物理教育の実際的な研究で得られた知識と普遍的法

則が必要である。I teach physics. But, I don't teach students. にならないためである。

日本で生まれた物理教育研究の成果として、川勝さん飯田さん et al, 米村さん、瀧川さん et al の開発した演示実験がある。私は授業で空気の質量による慣性を体感できる大きな風船を愛用していた。

7. 物理教育で成り立つ国際的普遍性をもつ法則 — 多くの学生には論理的思考が難しい

「光源に正対している紙面を、光源から2倍の距離に遠ざけると紙面の明るさはどうなるか」というような次元に関する問題がある。ワシントン州立大学の Arons によれば, "A large fraction of engineering-physics students have difficulties." だそうである³⁾。日本の大学生の小さなサンプルを対象にした私の調査でも、かなりの学生が「2分の1になる」と答えた。これは次元という論理的概念の理解が困難だという国際的普遍性の存在を意味する。国際的普遍性は1国での研究結果が他国でも適用可能であることを意味する。

Arons によれば、論理的思考の教育は、異った状況でくり返し行わなければならないとすることである。この事実は、短期的学習効果の定量的測定だけでは不十分で、長期的学習効果の定量的測定が必要なことを意味する。学士力の養成において留意すべき点である。

学生は論理的推論が不得意だということに関して日本で発見された例

西村和雄さんと戸瀬信之さんのグループが1998年に複数の大学で実施した数学の基本的知識を問うテストの25問の中で、すべての大学で正解率をもっとも低かった問題は⁴⁾,

ア. $y \leq 3x - 2$ と $x \geq 0$ を満たす (x, y) の範囲を図示せよ。

イ. 点 A(5, -2)と点 B(3, 6)を結ぶ線分 AB を2対1に内分する点の座標を求めよ。

の2つであった。私が勤務していた大学で行ったテストでもこの2問は正解率が最も低い問題であった。この日本の大学における普遍性は、日本の1大学での調査結果が日本の他大学に利用可能であることを意味する。この普遍性の基礎には、グラフの利用には論理的推論能力を必要とすることがある。

8. Nothing is good for everybody.

普遍性といっても、上で述べたことは、学生の平均に対する普遍性であった。次元が分からない人がいることが理解できない学生もいれば、次元についてくり返し教えないと理解できない学生もいる。私は、教育における最も重要な留意点は Nothing is good for everybody だと考えている。教師は、いくら練習してもほとんど上達しない趣味をもち、人間はあらゆる面で同じ能力をもつという偏見に基づく教育原理を打破する必要があると思う。

私の知人は、高校教師時代に7割の生徒が理解することを目指して授業したそうである。物理教育での格差是正の一つの方法は実験の重視ではなかろうか。この仮説については根

拠があるわけではない。

授業は分かりやすいのが望ましい。しかし、分かりやすい授業にも落とし穴がある。実験結果の理解に概念図は不可欠である。たとえば光電効果の実験の概念図として1個の光電子が負極から正極へ移動している絵があるが、これを見る生徒の中には、負極を出た光電子は必ず正極に到達するので、光電流は正極の電圧に無関係で一定だと思ってしまう者もでてくる⁵⁾。そのとき、教師が光電管を持っていて調べるか、光電管の特性曲線図をもっていてそれを見れば、問題は生じない。そうでない場合には、教師が微分方程式を解いて特性曲線を求める努力をする必要がある。微分方程式が解けなくても、微分方程式に電荷密度が出てくるので、光電管の中には多数の電子が存在することに気づくはずだからである⁶⁾。実験もせず、微積分も使わなければ、科学教育とはよべない。中世の大学でのアリストテレス物理学の講義のようなものだからである。

9. We teach physics が重要

大学に入るまでに英語ができなかった学生に週2~3時間の授業をしても英語ができるようになるわけがないと主張した英語教師がいた。物理を未履修の学生は大学で週何時間の授業をしたら物理ができるようになるのかという実際的研究が必要である。全国の教育学部の理科教育講座(物理学専攻)で、将来の教師を研究対象として、ぜひ研究してほしい。

1950年頃、優れた研究成果を挙げるには、研究体制が重要だという主張が聞かれた。現在は教育体制の議論が必要だと私は考える。具体的には、物理の基礎教育を team teaching 体制にして、TAとしての大学院生の教師教育の場にもなるように工夫してほしいというのが私の提案である。

参考文献

- 1) 原康夫 大学の物理教育 2002-1 (2002) 3
- 2) 市村宗武 大学の物理教育 95-1 (1995) 3
- 3) A.B. Arons "A Guide to Introductory Physics Teaching" (John, Wileys & Sons, 1990)
- 4) 岡部恒治, 戸瀬信之, 西村和雄 『分数ができない大学生』(東洋経済新報社, 1999),
岡部恒治, 戸瀬信之, 西村和雄 『小数ができない大学生』(東洋経済新報社, 2000)
- 5) 立澤尚史, 坂井信之, 野々山信二 大学の物理教育 11 (2005) 70
- 6) 原康夫 大学の物理教育 12 (2006) 59