アメリカ物理教育の転回
―「何を教えるか」から「学生は何を学んでいるか」の研究へ―

共通教育部自然科学系物理学教育部門　右近　修治

0. アメリカ物理教育の転回

■科学教育改革　戦後 1950 年代に入ると，アメリカ科学界は科学教育・数学教育の凋落ぶりに危機感を抱き，科学教育改革に乗り出す。実際，1950 年までの 40 年間の学校現場では，「調理」「タイプ」「運転」等の科目が好まれ，「代数学」や「物理学」などの科目は「一般数学」や「一般科学」に吸収されており，1 科目としての扱いさえ受けていなかった(1)。

1956 年，MIT の物理学者 Zacharias (Jerrold Zacharias, 1905－1986)は PSSC (Physical Sciences Study Committee)を立ち上げ，世界中で 100 万人もの学生が学ぶことになる物理の教科書「PSSC 物理」を完成させた。新しい物理コースの目標として Zacharias は次のように述べている「従来アメリカにおける教科書は物理を工業その他の実用面で役立てるという観点で書かれたものが多いが，高等学校教育の目的からいってこれは間違いである。自然界に関する種々の事実の発見とこれを統一する学理とは，人類がその好奇心と必要性とを満足させようとするたゆまない努力によって生まれたものである。…次の時代において，種々の問題を解決し，文化を発展させるという責任を帯びている現在の少年少女には，科学の何たるかを十分に知らしめなければならない。これこそ高等学校において物理を教える最大目標で，実用面に役立たせるというようなことは末の問題である。」(2)
実際に PSSC 物理を紐解くと，物理の基本的概念を理解させることに徹底し，優れた教材と随所で出会う。今では当たり前になっている力学台車による運動の解析も，波動を観察するウェーブマシーン（Shive wave machine）も，波動の干渉を観察する水波投影機（Ripple tank）も PSSC 物理が普及させたものだ。今では，これらの実験器具のない物理教育を想像すること自体，難しい。

その翌年 1957 年 10 月 4 日に，ソビエトが人工衛星スプートニクを打ち上げる。スプートニク・ショック（Sputnik crisis）の始まりである。これを機に PSSC 物理はアメリカ国立科学財団（NSF : National Science Foundation）から 30 万ドルもの資金援助を得，さらに多くの科学者，研究者が科学教育に動員された。その後 NSF の資金援助により，科学カリキュラム改革研究（SCIS : Science Curriculum Improvement Study）がスタートし，CBA 化学（Chemical Bond Approach），BSCS 生物（Biological Sciences Curriculum Study）等，いわゆるアルファベット・カリキュラム（alphabet curricula）が続々と登場する。ハーバードプロジェクト物理（Harvard Project Physics）や Feynman 物理も大きな成果である。戦後まもなくのアメリカの科学教育改革は，豊富な資金援助の下，一流の科学者から学校へのトップダウンにより，達成されたのである。

一方，NSF による豊富な資金援助は，科学教育を専門とする人材の育成にも役立つこととなった。1960 年代になると, Berkeley 大学の Robert Karplus, Fredrick Reif らや, Washington 大学の Arnold Arons が物理教育研究（PER : Physics Education Research）の研究活動を開始する(3)。教育に参集

した科学者達が優れた現代的教材群を次々と世に出す一方，彼らはこれらの教材群を学校の生徒に，いかに教えるかの研究を始めたのだ。

■物理履修率の逓減と増大　図 1 はアメリカの高校物理履修者の割合の経年変化を示している(4)。科学教育の現代化が推進される一方で，実は物理履修率は逓減していたことがわかる。この間，高等学校入学者が増加しているので，多様な生徒が入学してきた影響は当然としても，減少は 80 年代終わりまで続く。しかしその後増加に転じ，2013 年まで増加の一途を辿っている。一方，アメリカで年間 5000 名を維持していた物理学学士数は 1992 年頃から減少に転じ，1999 年には 4000 名を切る事態に至った。しかしその後 2004 年には 5000 名に回復している(5)。この間，物理教育に何が起きたのだろうか。

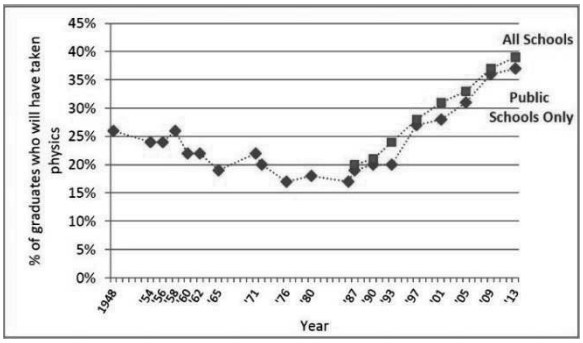

図 1　アメリカ高校物理履修率の推移
1948－2013（文献(4)より）

物理履修率が 1/5 以下にまで落ち込んでしまった 1987 年の時点では，履修者の 80%が 1 年次に「通常物理」コースを選択していた。理系大学を目指す Advanced –Placement(AP)コース，　2 年次に物理を選択する生徒は，わずか 4%に過ぎなかった。しかし 2013 年時点では「通常物理」コースは物理履修者全体の 36%，AP コースおよび 2 年次選択者は 17%に達している(4)。パイ全体の成長により，専門コースも充実していったのである。

履修者回復の原動力となったコンセプトが”Physics for all”であり，物理の概念的理解に重点を置いた物理教育研究(PER)の教育現場への普及にあった。2013 年時点で，物理履修者の 3 割が，文系生徒を対象とした，物理の考え方や概念を重視した，「通常物理」コースとは別の「コンセプト物理」を履修している。ヒューイット（Paul G. Hewitt）の教科書に代表されるような「コンセプト物理」にも簡単な代数式は出てくるが，中心にあるものは，例えば位置，速度，加速度の意味を互いに関連付けて概念的に理解することにある。各種調査によれば，学生はこれらの区別すらつかずに問題を解いていたのだった。「コンセプト物理」履修者の割合が年々増加すると共に，物理選択者の割合も増加し，その結果 AP コース選択者数も増加したのだった(6)。教育現場に，物理の概念的理解の重要性が浸透していったのである。

■学生は何を学んでいるのか　多くの研究者は 70 年代に入り，Lillian C. McDermott が Arons と合流し，ワシントン大学で研究を開始したことが，物理教育研究が新たに転回するきっかけとなったと考えている(3)。McDermott らは，大学の教室で，学生が何をどう学んでいるかの研究に焦点を当て始めたのである。そこで明らかになったことは，伝統的授業を受講している学生の大半は，教室では驚くほど何も学んでいない，ということだった(7)。McDermott らが新に開発したカリキュラム”Physics by Inquiry”は，与えられた質問に対し，学生が自ら考え，問題を解決していく過程を通して物理学の

概念を獲得することを目指す，一連のアクティビティからなる。そのために組み込まれた実験・実習は概念獲得の手段であり，従来からの実験スキル獲得のための計測実験とは本質的に異なる。こうした研究を契機として教育研究のテーマが「学生に何を教えるか」から「教室でいったい学生は何を学んでいるのか」へと徐々に転回していくことになる。

2006 年に東京で ICPE（INTERNATIONAL CONFERENCE ON PHYSICS EDUCATION）物理教育国際会議が開催された。その基調講演で Edward F. Redish は物理教育研究（PER：Physics Education Research）の主題を「学生が何を学習するか，あるいはしないのか，を研究する」こととし，それゆえ物理学の専門家と教育研究者の境界領域にある研究分野であるとした。その意味で PER は DBER（Discipline-Based Education Research）[8]である。一方，教育心理学の分野は昔から確立されており，学生の学びについては十分な研究があるはずである。これに何か付け加えることがあるのだろうか。DBER は物理，化学，工学，等の専門分野の学習に，それぞれ固有の概念的困難が存在すると考える。その困難は同じ物理の中でも運動の法則，各種保存則等，テーマごとに異なる。DBER は学生のそれぞれの学問分野，固有のテーマごとに，より効果的な学習を追及する新しい学問分野であり，これは教育心理学が目指してきたものではない。

科学の出発点が観察と実験にあるように，PER も学習する学生の観察から始まる。そのために学生との詳細な（半構成的）聞き取り調査，概念理解を問う一連の小テスト，教育研究に基づいて作成された FCI（Force Concept Inventory）や FMCE（Force and Motion Conceptual Evaluation）等によるコース開始前テスト・事後テストの比較，チュートリアルワークにおける学生の発言を記録した録画記録，学生自身による学習に対するメタ認知調査等，様々な手立てを用いる。80 年代を通した，こうした多方面からの研究の積み重ねにより，次第に明らかになってきたことは，十分な指導を受けたはずの学生ですら，強い誤概念を保持しているということであった。なぜ，そんなことになってしまうのか。そのメカニズムの解明は，より効果的なカリキュラム開発に直接結びつく。

こうした過程を経て様々なカリキュラムが開発されてきた。Priscilla Laws らによる”Workshop Physics”， McDermott らによる”Tutorials In Introductory Physics”，Eric Mazur による”Peer Instruction”，Sokoloff らによる”ILDs：Interactive Lecture Demonstrations”，等はその代表的な例である。いずれも授業の重心を，教員による説明から学生のアクティビティに持っていくところに特徴があり，現在では Active Learning として括られている。

図 2 は学生がいわゆる伝統的授業を受けた場合と，学生のアクティビティに重点を置いた授業（Tutorials あるいは Workshop Physics）を受けた場合の「教育効果」を表す各授業クラスの平均規格化ゲイン h (=<g>)の度数分布である。N は各コースのクラス数である。h =0 はその授業が何の効果ももたらさなかったことを表す。h が高いほど，授業は効果的である。文献(9)によれば，

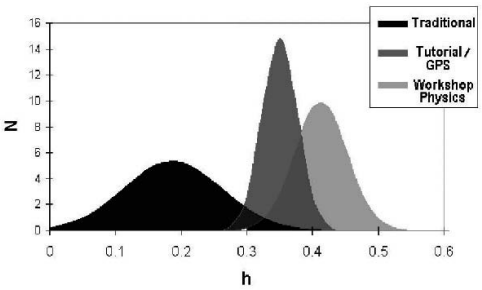

図 2　伝統的授業と Active Learning による授業との教育効果の比較（文献(9)より）

伝統的な授業では$h \cong 0.20$，チュートリアルを取り入れたもので$h \cong 0.34$，ワークショップ物理では$h \cong 0.41$であった。平均規格化ゲイン$\langle g \rangle$については後ほど詳述する。

PER が物理学や工学と同様に固有の学問領域として成り立つためには，教育効果の測定がこのように規格化されていなければならない。一般に，何が教育的かについては，多様な価値観に基づいた多様な尺度があると考えられることが多い。何がよい授業かは教員しだい，生徒の感想しだいであり，究極的には何でもあり（anything goes!）である。しかし PER の尺度は，実際に学生が物理を理解し，それを活用できるようになったのかどうかにあり，これは客観的に測定できる量であると考えられている。それを測定するためのツールが長年研究されており，FCI や FMCE，BEMA はその代表的なものである。

■本論文の目的と構成　本論文はアメリカにおける物理教育研究を歴史的に概括し，日本の物理教育に新たな観点を提供することにある。しかし研究史を概括するだけでも，詳細な年表と論文リストが必要となる。（70 年代以降を概括したものとしては文献(3)がすでに存在する。）一方，こうした概括論文を読んでも，具体的に何をどう議論しているのかがわからなければ教育実践に生かすことが難しい。そこで，本論文では，大きな全体の流れを示しつつ，各時期に影響を与え，現在の教育研究に直接関連があると思われる事項を選んで論考する道を選んだ。PER 以前の「学生に何を教えるのか」が主要なテーマであった時代からは１．物理実験教育の導入を選び，「学生はいかに学んでいるのか」が問われ始めた時代からは２．問題を解く，３．誤概念の発見，４．概念指標を選んだ。最後にまとめとして今後の５．展望について述べる。

米国物理教育関連略年表

1860―　MIT（Massachusetts Institute of Technology）でPickeringにより実験室実習が導入される。
1880―　E.H.HallによるHarvard Descriptive List
1900―　R.A.Millikan, H.G.Galeによる米国初の本格的な物理教科書 ″A First Course in Physics″
1930―　米国物理教師協会AAPT（the American Association of Physics Teachers）が米国物理学会APS（American Physical Society）より独立して設立される
1950―　米国科学財団NSF（National Science Foundation）設立
Sputnikショック
Zacharias（MIT）らによるPSSC（The Physical Sciences Study Committee）物理
SCIS（Science Curriculum Improvement Study）開始
1960―　Washington 大，Arnold Aronsの活躍
Berkeley大，　R. Karplus ,F. Reifの活躍
1970―　McDermott, University of Washingtonに着任，Aronsと合流
Reif, LarkinらによるProblem solving
McDermott, Physics by Inquiry
PER（Physics Education Research）で最初のPhD
1980―
1980 McDermott, Trowbridgeによる「学生の物理理解の現状」の研究
1981 AAPTにPER委員会設置
1981 Clement, MIF誤概念
1982 Heller, Minnesota大でGroup Problem Solving
1986 Laws, Thorntonらによる Workshop Physics
1986 Hestenes, Modeling
1990―
1990 McDermott, Millikanメダル受賞
1991 Mazur,Harvard大でPeer Instructionを開発
1992 HestenesらFCIを発表
1992 Hellers, Problem solving
―PER本格化―
―Maryland大，E.F. Redishの活躍―
1993 diSessa，ｐプリム
1998 Hake, FCIを6000人対象大規模調査により評価
1998 McDermott, Tutorials in Introductory Physics
1998 Redish, Millikanメダル受賞
1999 AJPにPERセクション誕生
2000―
2003 Redish, ″Teaching Physics with the Physics Suite″
2004 Sokoloff,ThorntonらによるInteractive Lecture Demonstrations

1. 物理教育に実験室を―MIT の挑戦

マサチューセッツ工科大学（MIT，Massachusetts Institute of Technology）の青写真ともいえる「ボストン理工科学校設立計画書（A Plan for a Polytechnic School in Boston）」が提出されたのは 1846 年のことである。ボストンに理工科学校を設立する計画は Rogers 兄弟によりその数年前から練られていたものであった(10)。William B.Rogers と Henry D.Rogers は共に専門は地質学で，２人はア

メリカ地質学者協会やこれから派生した全米科学振興協会（AAAS :American Association for the Advancement of Science）の設立に深く関わっている。共にロンドンに留学して化学を学び，地質学者としてのキャリアを開始する。帰国すると２人は母国に「組織的に運営される，実験室実習を基盤とした，厳密で実践的な科学教育」の場を設立することを願い，奔走の日々を送る。先の計画書はそうした中から生まれたものである。しかし議会から公式に認可を受けたのは 1861 年であった。

やがて兄 William は初代物理学教授に就任，さらに 1867 年，ハーバード大学ローレンス科学学校から物理の専任として，Pickering（Edward Charles Pickering, 1846－1919）を迎える。William の志を継ぎ，物理教育の現場に学生実験を必修科目として導入し，MIT で最初の実験室マニュアルや実験物理の教科書を作成したのは Pickering である。彼は MIT に 10 年間留まり，物理教育に実験室を導入するという革新的な仕事を遂行するのである。電磁気学の有名な教科書の共著者としても知られており，物理教育にも多くの足跡を残した Melba Phillips（1907-2004）(5)によれば，MIT こそ科学に実験室実習を持ち込む目的でつくられた大学であった(10)。

Pickering が MIT の学生のために出版した著書「物理の操作 I」（Physical Manipulation I）(11)に記した実験指針は古さを感じさせない。「わが国でも外国でも，物理教育における実験室実習は急速に広まりつつある。その一方，これに対応した，学生の使うことのできる特別な教科書が強く求められている。この教科書はそうした要求に答え，ここ 4 年間の MIT での経験を基にまとめたものである。序章では，研究の一般的な方法と，得られる結果を解析するのに必要な，より一般的な数学の応用について取り扱う。グラフによる方法は，いままで本来受けるべき注目を受けてこなかったように思われる。したがって，ここでは解析的方法との比較で取り上げることにする。さらに新しく発展したものも付け加えてある。学生が測定結果をいかに取り扱うか，そしてそれをどのように処理するのか，といったことを十分に理解することや，物理実験において生じる様々な誤差について熟知することは根本的に重要なことがらである。また，距離や時間，そして重さを測定する様々な方法についても簡潔にまとめてある。これらの測定はすべての物理の研究において，基本となるものだからである。この序章は，学生が実際に実験室に入る前に，実習の基本となる内容を短い講義として受けることを意図して書かれている。しかし，すべての物理実験器具はあらかじめ製作すべきである，という一般的原理に学生が親しむためにも，教員は事前学習にさらに十分な時間を充てるべきだろう。自分たちの手で実験装置を工夫する際には，序章は大きな助けとなろう…」文献(12)に Pickering の実験書の詳細な検討がある。

2. 問題を解く

1975 年，カリフォルニア大学の Reif，Larkin らは，物理入門コースの授業で，学生に一般的学習スキルを獲得させることにより，学力を向上させることができることを示し，その後の物理教育研究の進展に大きな影響を与えた(13)。

物理教員の多くは，現在教えている内容を，学生が単に暗記するのではなく，将来，何か新しい問題解決を迫られたときに，現在獲得した知識や概念を柔軟に利用し，問題解決に至る様々な道筋を検索し，問題を解決する能力を獲得して欲しいと望んでいるだろう。物理コース内での短期的視野にお

いては，運動の法則なり，万有引力の法則を単に覚えたり，これを用いた例題の解法と答えを暗記したりするのではなく，新しい問題と出会ったときに，解法の筋道を見出し，適切に物理法則を適用し，論理的に推論し，解答に至るまでの能力の育成に，そのコース目標があるはずである。

Reif，Larkin らによれば，単に教科書を読んだり，伝統的講義を聴いたりして物理を学習するだけでは，こうした法則理解に大半の学生は失敗するという。これは教科書や講義によって与えられる情報が不足しているからではない。学生は知識として蓄えた情報をうまく活用できないでいるのだ。そこで彼らは，学生がこれらの知識を活用するために必要な一般的学習スキルを，リストとして纏める作業から始めた。公式・法則に対し，リストには(1)物理量の属性：その基本的属性を列挙せよ。それは数値か，ベクトルか，符号は？ 単位は？代表的な値はどのくらいになるのか？(2)関係式の解釈：言葉や数値，式，グラフ等，様々な表現形式を用いてその意味を解釈せよ。(3)適用条件：その公式が成り立つ，あるいは成り立たない物理的条件を認識する，等の項目が並ぶ。確かに教員は，個々の公式なり法則なりを説明するときに，こうしたガイドラインに従って解説しているのだが，その心は学生に届いてはいない。Reif，Larkin らは，こうした理解の仕方を教員がするのではなく，学生が自分でするようにしたのである。

彼らは大学初年度物理コースを受講した学生を対象に，はたして「学習スキル」を教えることができるかどうかを調べた。彼らが用いた指導は次の 4 項目に纏められる。(1)説明：学生に，物理学において「公式・法則」を理解することの重要性と，先のリストが，そのための大切な指針となることを説明する。(2)明確に組織化された実践：学生に物理のテキスト該当部分を熟読させた後，質問する。リスト内容を個々の該当公式に具体的に適用した質問項目を予め作成しておき，質問はこれに基づいてなされる。学生の回答に対して適切な応答をする。(3)テスト：学習後，学生の理解度を調べるテストを実施する。学生がリストの学習スキルを獲得していると判断できるまでテストを繰り返す。(4)系統的研修期間：(2)(3)の学習過程を 4 週間で 10 個の「公式・法則」について繰り返す。

Reif，Larkin らは，このような特別授業を受けた学生（N=75）と通常授業を受けた学生（N=150）の「学習スキル」を比較するため，２つの調査を実施した。一つ目は物理学とはまったく縁のない会計学から題材を採り，「在庫回転率」を定義する「公式」を理解する能力を調べた。特別授業を受けた学生は 70%が満足な結果を得る一方，通常授業では 47%であった。二つ目は，題材として新しく学習する物理学の「公式」（万有引力の法則）を選んだ。結果は特別が 54%，通常が 38%だった。

さらに彼らは，学生が実際にどのようにして物理の問題を解いているのかを調べた。問題を解くために，今，何をしているのか言葉を出すように求め，解いている状況を録画し，解析した。多くの学生は問題を与えられると，すぐに何かの計算を始めるが，その計算が解答に近づくかどうかには，お構いなしである。使えそうな公式があればひたすら代入したり，式の変形を繰り返したりするが，その意味には無頓着である。何か数値が出てくれば，それで満足し，すぐに問題集の答えを見る。問題集と数値が同じであれば，そこで演習は終了する。結果の意味など考えることはない。また一方，学生が与えられた条件と解答に必要な原理を把握していたとしても，問題を解くことができないでいた。これは学生が問題を解くために必要な系統的方略（strategy）を持っていないからだと Reif，Larkin

らは考えた。

そこで彼らは，次のステップを踏む問題解答方略（problem-solving strategy ）に基づく問題演習を実施し，解答方略を実際の問題で実践させる練習を繰り返した。

(1) 問題を理解する：与えられた情報，必要な情報を列挙せよ。

(2) 計画する：問題を解くのに必要な公式あるは法則を選び，それをどう適用すべきか考えよ。

(3) 実行する：あらゆる計算手立てを用いて計画を実行せよ。

(4) 検討する：上の各ステップが適切であったかを検討せよ。また得られた結果が妥当なものなのかどうか，検討せよ。

こうした方略は，問題演習を沢山経験すれば自然と身につくものではない[14]。意識的にその方略を選択するような指導が必要である。いうまでもなく，ここに列挙した方略の各ステップはポリヤによる古典的方略「いかにして問題をとくか」に基づいている[15]。Reif，Larkin らによる研究は「学習スキル」を教えることが可能でありことを示し，学生が問題を解く方略に注目させるきっかけとなった。

ミネソタ大学の Heller らは 1980 年代から 90 年代にかけて「共同グループによる問題解法（CGPS: Cooperative Group Problem Solving）」[16]と呼ばれる教育的アプローチを開発した。これが，物理教育における問題解法研究の重要性，共同学習の重要性を認識させる土台となっている。

ミネソタ大学では 1 年 4 期のうち 2 期分が物理入門コースに当てられ，建築，農業工学等 24 の学科の共通科目となっている。週当たり 50 分講義が 4 回，50 分の単純な反復演習（recitation）が 1 回，そして 2 時間の実験から成る。授業は 1 クラスあたり 120 名，反復演習と実験は 15～20 名である。CGPS は，このコースで学ぶ学生が，定量的あるいは質的，その両面から問題を解くための一般的なスキルを獲得し，新しい問題解決に活用できるための，教育方法として開発された。

Heller らは物理学の概念的理解および Reif，Larkin らによる問題解答方略を，入門コースに積極的に採り入れた。そのために，物体や斜面，滑車などから構成される抽象的な問題ではなく，具体的な状況が目に浮かぶような context-rich な問題を選んだ。

例えばグループ学習用の問題として「飛行機問題」がある[16]。日本の教科書の問題を見慣れていると，問題の状況を具体的に説明しているので，叙述はいたずらに長く感じる。

飛行機問題：ある朝，授業が始まるのを待っている間，あなたは飛行機の安全性に関する新聞の記事を読んでいます。この記事は，最近起きた事故の事例を元に，金属疲労の果たす役割を強調していました。特に飛行機が離着陸する際には大きな力がかかるので，飛行機の骨組み部分が伸び縮みし，長い間には金属疲労が発生します。飛行機の重量を 200,000 ポンド，離陸時の速度を時速 200 マイルで，水平面から 30° 上向きとし…（以下略）

これに Heller らは，問題解答方略を次の 5 つのステップに分けて適用するよう指導する。1.問題を視覚化する：問題状況を理解するために問題を視覚化し，与えられた条件を簡潔に箇条書きする。実際には飛行機が離陸する絵を描き，読み取った条件を言葉で書き入れる。2.物理的に図解する： 座標や速度ベクトル，加速度ベクトル，力のベクトル等の導入，飛行機の軌跡を表すグラフの作成等，また，必要な代数記号，例えば D:抵抗力，L:浮力，v_0:速さ，等を定義して導入し，図解する。3.計画：問題

をどう解いたらよいのか，解法を計画する。何を求めればよいのか，それを求めるためには何が必要なのか。もし，情報が足りないことに気がついたら，2.に戻ってチェックをする。また他に必要な数学の関係式や法則があるだろうか。4.実行：計算により，求める物理量を，すでに与えられている物理量を用いて表す。この段階で学生は多くの計算ミスを犯す。5.チェックと評価：答えが適切なものかチェックする。彼らはこうした各段階でなすべき詳細な項目をリストにし，コースの早い段階から学生に配布して，この流れに従って宿題を解くことを課している。context-rich な問題を選んだのは，学生に問題の意味を考えるようにさせるためである。単に公式に数値を機械的に放り込んで，未知なる代数を求める計算を何回繰り返しても，習熟することはない。学生は 5～6 名のグループとなり，話し合いをしながら課題問題に取り組む。反復演習と実験とは同一のグループで実施する。

コース実施結果は目覚しく，共同学習において，学生達は互いに概念や各解法に向けてのプロセスを共有することができ，個々に学習する場合と比較して，より深く問題を理解し，解法のスキルを上達させることができたと Heller らは報告している。問題を解く（problem-solving）は，物理教育研究の最重要テーマの一つである。2005 年までの重要論文リストは，文献 (17)に整理されている。

3. 誤概念の発見

■MIF 誤概念　Clement(1981)は，学生がいかにして力学の問題を解くかを調査中，学生は力と加速度の関係について，通常のニュートン力学とは異なる「概念のプリミティブ (conceptual primitive)」を持っていると考えるようになった[18]。初学者にとって力学の数量的理解はもちろん難しい。しかしこれに加え，「概念のプリミティブ」は力学の質的，概念的理解を妨げる「誤概念」である。しかも「概念のプリミティブ」は強固であり，伝統的な力学の講義だけでこれを変えることは難しいという。なかでも，「運動は力を含む(Motion Implies a Force)」という先入観は MIF 誤概念と呼ばれている。Clement は工学部初年度学生を対象とし，振り子の運動，コインの投げ上げ運動，ロケットのガス噴射による運動の３つの題材を用いて，彼らの持つ MIF 誤概念を調べている。

コイン問題：図３で，コインを点Ａで投げ上げると，Ｂ，Ｃ，Ｄの各点を通過し，点Ｅに落下してくる。コイン上昇中の点Ｂにおいて，コインにはたらく力を，その大きさと向きに注意してすべて図示せよ。

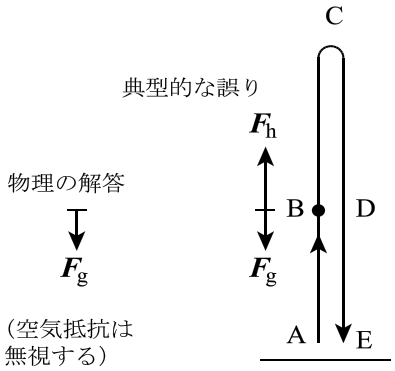

図３　コイン問題（文献(18)より）

この問題に対し，力学コース受講前で 88%（標本数 N=34）が誤答，受講後でも 72%（N=43）が誤答した。典型的な誤答例を図３に示す。誤答した学生の 90%は図３にあるような上向きの力，しかも重力のおおきさよりも大きな力を描き加えていた。聞き取り調査で，この力について問うと「投げた力」，「元々の上向きの力」，「加えられた力」，「私が与えた力」，「速度が上向きに引いているので，合力は上向きになる」等の回答を得た。

ロケット問題：ロケットが，宇宙空間をＡからＢまで

エンジンを切って運行している。近くに天体はなく，ロケットは外部から力を受けていない。ロケットがＢでジェットエンジンを図４の向きに 2 秒間噴射してＣに達した。(a)ロケットのＢからＣまでのおおよその軌道を描け。(b) Ｃに達した後，エンジンを再び切った。その後の軌道を描け。

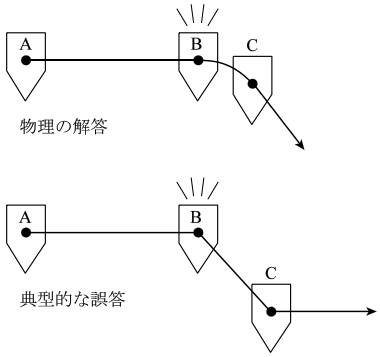

図４　ロケット問題（文献(18)より）

これに対し，力学コース受講前で(a)89%（N=150）(b) 62%（N=150）が誤答，受講後で(a)77%（N=43）(b)28%（N=43）が誤答した。典型的誤答例を図４に示す。力学コース受講前の学生に対し，ＢからＣへの軌道として直線を描くかどうかを見るのは些細なことかも知れない。しかし驚くべきことは，多数の学生が，ロケットがＣに達した後，再び元の水平方向への運動に復帰すると考えていることだ。ＡからＢへの運動を担っていた「力」がここで再び復活する。その後の聞き取り調査で学生は「ＢからＣへは，これまで右向きの運動を起こさせていた力とジェットエンジンによる力により，斜め下向きへ運動する。Ｃを過ぎると右向きの力だけになるので，元の運動に復帰する」と回答している。

McCloskey も MIF 誤概念に相当する誤概念を見出している[19]。学生の８割が物体の運動について「素朴インペタス理論」を抱いているという。それは，物体が運動するにはインペタスを与えねばならない，運動する物体はインペタスを保持しているが，これは徐々に散逸し，やがて運動が止まる，というものだ。いうまでもなく，インペタスとは，科学革命以前の世界で人々が共通に了解していた，「運動する物体が保持する力」の力に相当する言葉である。

Clement は，力学の基本概念は定性的レベルから誤解されている，こうした誤概念は認識の深いレベルに留まっているので，ニュートンの法則理解に深刻な影響を与える，と結論している。

■物体を支える　運動する物体が運動の「力」を保持しているのであれば，静止している物体は「力」を保持していない。Clement に続き，Minstrell は論文「物体の『静止』状態を説明する」[20]で，机の上に静止している物体に関する，高校生の持つ「概念のプリミティブ」を研究した。

中学，高校では力学の初歩として力のつりあいを学習する。机の上の物体が静止しているのは，物体が地球から受ける重力と机から受ける抗力とがつりあっているからだ。物理の教員にとって，あまりにも自明で「わかりやすい」こうした学習教材に対し，生徒が概念的困難を抱いているとは，おそらく想像もつかないだろう。Minstrell によれば，多くの生徒が，無生物である固体が，引いたり押したりして他の物体に力を及ぼすことがどうしてできるのか，わからないでいる。生徒は，机の上の物体が静止しているのは，机が重力による物体の落下を妨げているからだと考える。そもそも教室にいる高校生は，この問題を「力のつりあい」という枠組みの中で考える問題として認識できないでいるので，問題解決の出発点にさえ立っていないのである。もちろん生徒は力のベクトル合成の仕方は学習するだろう。しかしこの学習と，机の上で静止した物体との関連付けはできないままでいる。

高校では力の概念を，(Ⅰ)物体を変形させる，(Ⅱ)運動の状態を変化させる，の２つのはたらきから

導入する。鈴木亨によれば，日本の中学校理科のすべての現行教科書では，これに力のはたらきとして「物体を支える」が追加されている[21]。物理的には明らかに不要な追加である。なぜ「物体を支える」が日本の中学教科書に出現するに至ったのか，その経緯は不明である。しかし少なくとも，これが生徒の実情に寄り添った処置であったことはわかる。しかしその適否は別である。鈴木はこうした処置が，その後の物理学の学習に支障を及ぼす可能性を論じている[21]。

■ｐプリム　物理学固有の概念的理解の研究が進むにつれ，学生の内に存在する，こうした様々な誤概念の目録が次第に明らかとなってきた。物理の学習を阻む誤概念にどう対処したらよいのだろうか。誤概念には何か通底する構造があるのだろうか。もしそれが明らかになれば，対応するための方略（strategy）も立てやすくなるのではないだろうか。diSessa[22]，Minstrell[23]らによる研究は，まさにこれを解明しようとしたものである[24]。

diSessa は，MIT の新入生を対象とした 3 年間の聞き取り調査により，学生の持つ，この世界の仕組みを捉える感覚としての「概念のプリミティブ」をｐプリム（p-prims：phenomenological primitive）として捉えることを提案する。Clement による MIF 誤概念，あるいは McCloskey による素朴インペタス[19]は，素朴ではあるが首尾一貫しており，理論的でさえある。これには，近代科学が出現する以前，長い命脈を保ってきたインペタス理論を思い起こせばよい。それゆえ素朴インペタス等の誤概念は比較的分離しやすく，いくつかに系統立ってまとめることさえできるだろう。学習を妨害するゆえ，これらは否定されなければならないし，正しい物理学の理論に置き換えられなければならない。

しかし diSessa のｐプリムは，細切れで互いに系統性がない，現象論的断片である。論理的側面はないので，より洗練されたものに置き換える必要もないし，系統的な物理理論に置き換わることもない。まず，ｐプリムは「自明」であり，何かが生じたら「そのようになっているから」としか言えないものである。ｐプリムはその名の通り，現象論的（phenomenological）であり，現実世界を表面的に捉えた個々の経験に基づいている。その経験はこれまで生活してきた長い時間を経て獲得したものなので，原始的（primitive）である。状況ごとに場当たり的なｐプリムが指針となるので，一貫性については意識にも上らないし，仮に論理的矛盾があるとしても，違和感を抱かない。

diSessa は論文「物理学の認識論に向けて」[22]で，30 項目にも及ぶｐプリムのリストを与えている。そこに現れる「オームのｐプリム」（Ohm's P-Prim）を例にとる。

オームのｐプリムは「インペタスのような，なにかの働き手が，抵抗や干渉に対して作用し，結果をもたらす」という観念である。これらから「さらに努力すれば，あるいはインペタスが増大すればより多くの結果が得られる」とか「より抵抗が増せば得られる結果は減少する」等の思考の枠組みが発生する。電圧を表す"voltage"は英語，ドイツ語圏では潜在的なインペタス，あるいはなにかの緊張状態を連想させる言葉である。これが抵抗"resistance"に作用し，電流の強さという結果を生じるという構造を，オームの法則は持っているので，こうしたｐプリムは「オームのｐプリム」と呼ばれる。

オームの法則はオームのｐプリムと合致しているので，学生が法則を公式として学習することは容易である。一方，オームの法則の物理的メカニズムは難解であり，学習レベルに応じてその物理学は深まり，量子統計力学の線形応答理論にまでたどり着くことだろう。容易に思えるのは，単にｐプリ

ムと合致しているというだけのことなので，電圧，電流，抵抗に対する物理の概念的理解がなくても，これら３者の係わり方の構造は納得でき，構造を体現している「公式」を用いた計算問題自体に学生が困難を感じることは少ない。しかし一歩進んで，その概念を問うレベルになるととたんに困難が発生する[25]。もちろん努力しても結果が伴わない事例は世の中に無数あるのだから，オームのｐプリムが常に正しいとは限らない。しかし我々はそれに矛盾を感じることなく，いつのまにかこうした構造を納得しているのだ。ｐプリムはそれ自体が正しいとも正しくないとも言えない素朴概念であるがゆえに，何かの学習によって消し去ることはできない。

コイン投げ上げ問題をｐプリムから見ると次のようになる。コインを投げ上げるという行為は，重力とバランスしていた状態（dynamic balancing P-Prim）に手が打ち勝つ（overcoming P-Prim）ことで，その結果，コインに上向きの力（force as mover P-Prim）が宿る。当初この力は重力に打ち勝っているが，次第に減衰し（dying away P-Prim），最高点に達したときに再び重力とバランスする（dynamic balancing P-Prim）。やがて重力が打ち勝ち（overcoming P-Prim）コインは落下してくる。diSessa によれば，MIF 誤概念と考えられてきたものは，このように複数のｐプリムが複合し，都合よく組み立てられたものなので，教師が物理の説明を１回程度しただけで，その誤解が解けるようなものではない。

Minstrell も，diSessa に近い素朴概念理解を展開しており，こうした概念のプリミティブをファセット（facet）と呼んでいる[23]。ｐプリムを「ｘがｙを克服するように作用し，その結果ｚが生じる」という型とすれば，ｘ，ｙ，ｚに具体的内容を入れ込んだ，特定の物理的文脈の中に現れる概念のプリミティブがファセットである。diSessa，Minstrell の研究は，その後の誤概念をいかにして克服するかの問題や，概念転回（conceptual change）の研究に大きな影響を与えている。

■橋渡し方略（bridging strategy）　誤概念克服の古典的方略が Clement により与えられている。それはいわば概念に「橋渡し」（bridging）をする方略[26]で，図５に示す。

図５.1 は Minstrell の机の上で静止する物体（本）である。しかし生徒は Minstrell が解明したように，机のような無生物が，力を他の物体（本）に及ぼすことが理解できない。そこで机の上で静止している本の問題を，本が机から受ける抗力と重力のつりあいの問題として，生徒に認識させることが目標となる。Clement はこれを Target と呼ぶ。一方図５.2 のように，ばねの上に物体を置くと，ばねは変形して縮む。聞き取り調査によれば，物体がこうしてばねを押し縮めると，ばねは物体に反発力を及ぼすことを生徒は容易に認めることができる。Clement はこれを Anchor と呼ぶ。そこで，Anchor から Target へ Bridge 図５.3 を経由することにより，目標に達するのが橋渡し方略である。Bridge は変形しやすい机である。変形した机は弾性力を本に及ぼす。この例では，机の本に対するはたらきを，ばねによるアナロジー（analogy）で説明

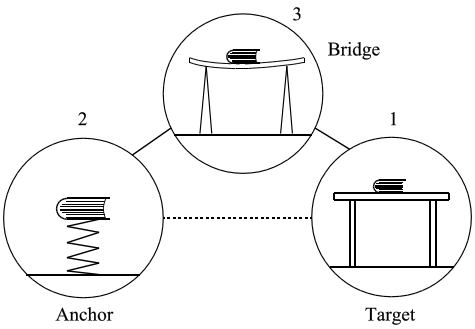

図５　橋渡し（文献(26)より）

していることになる。Clement は物理教育におけるアナロジーの役割を重視する。

4. 概念指標（CI）

学生の科学に対する概念的理解を調べるために，概念指標（CI : concept inventories ）が導入されている。これは多岐選択テスト形式による調査を伴い，その主要な目的は２つある。一つは授業に先立ち，その時点で学生が持つ，概念的困難の度合いを把握するためであり，今ひとつはコース終了後に学生がどれほど困難を克服し，科学の概念的理解を獲得するに至ったのか，その変化を調べるためである。したがって通常，まったく同じテストがコース開始直後とコース終了後の２回実施される。テストの伸び率が大きいほど，その授業は有効であったと評価される。そのクラスのテストの伸び率 $<g>$は平均規格化ゲイン(average normalized gain)と呼ばれ，満点を 100 点とした場合

$$<g>=\frac{\text{事後テストのクラス平均}-\text{事前テストのクラス平均}}{100-\text{事前テストのクラス平均}}$$

で定義される。$<g>$は授業の有効性の指標となる[27]。

概念指標は恣意的に作成されるものではなく，生徒の持つ素朴概念や誤概念に関する調査・研究に基づいたものである。したがって，研究の進展により内容が修正されたり，新に付け加えられたりする。CI の導入は急速に進んでいる。 文献[28]によれば，科学技術の分野で現在 23 種類の CI が実際に使われているという。物理分野で多く使われている CI の一覧を表１に示す。

概念指標（CI）	内容と概念指標項目数	基礎文献
力学概念指標（FCI）	力学，30項目（改定版31項目）	Hestenes et al.(1992) .[29]
力と運動概念評価 (FMCE:The Force and Motion Conceptual Evaluation)	力学，47項目	Thornton,Sokoloff.(1998) .[30]
熱概念評価 （Thermal Concept Evalution）	熱と温度，26項目	Yeo, Zadnick.(2001). [31]
電磁気学簡易評価 (BEMA: Brief Electricity and Magnetism Assessment)	電磁気学の基本概念，30項目	Ding. et al.(2006).[32]
電磁気学概念調査 (CSEM: Conceptual Survey in Electricity and Magnetism)	電磁気学の基本概念，32項目	Maloney. et al.(2001). [33]

表１　物理分野で使われている主な概念指標（CI）（文献(28)から引用，一部加筆）

CI が注目され，現在のような大きな影響力を持つきっかけとなったのが表１最上段にある D.Hestenes， M.Wells， G.Swackhamer らによる FCI(力学概念指標 : Force Concept Inventory) [29] である。FCI は学生が持つ，ニュートン力学と顕著な不整合を示す，力と運動に関する「常識的信念」（commonsense beliefs）を摘出する。Hestenes らによれば，これらの信念に基づいた学生の持つ誤概念を改めることは容易でない。講義を中心とした従来型の授業では，教員の指導力や教材の違い等にほとんど関係なく，有効性指標$<g>$は 0.2 程度の低い値に止まるという[27]。

Hestenes らはニュートン力学の概念指標を，0.運動学，1.第一法則，2.第二法則，3.第三法則，4.合成の原理，5.力の種類の６つに分類し，それぞれに対応して，従来から知られている誤概念を，誤

概念分類表の中に 0.運動学（Kinematics），1.インペタス（Impetus），2.活性力（Active Force），3.作用・反作用のペア（Action/Reaction Pairs），4.影響の連鎖（Concatenation of Influences），5.その他の運動への影響（Other Influences on Motion）と，６つに分類した[29]。誤概念分類表全体は文献(34)にその訳が掲載されているので，ここでは割愛する。概念指標 0.運動学に対応する誤概念分類表の 0.運動学（Kinematics）では，誤概念というよりも位置，速度，加速度の概念的混乱が K1.～K3.として 3 項目指摘されている。（1995 に改定された FCI では K1.～K4.の 4 項目となっている）例えば K1.位置と速度が区別できない，K2.速度と加速度が区別できない，等である。また，概念指標 2.第二法則に対応した誤概念分類表の 2.活性力（Active Force）は AF1.～AF7.の 7 項目が分類されている。例えば AF2.運動は活性力を保持している，AF3.速度は加えられた力に比例する，等である。そしてこれらのすべての項目に基づいて，FCI テスト問題の選択肢が構成されている。

FCI の調査問題は 30 問からなり，学生はそれぞれ 5 つの選択肢から正解 1 つを選ぶ。図 6 は FCI 初版の問 20 である[29]。(E)が正解で(A)～(D)が「誤った選択肢（distractors）」である。ここで大切な点は，誤った選択肢は適当に作られているのではなく，先の誤概念分類表に基づいて設計されているということだ。誤概念分類表の K1.，K2.，…AF2.，AF3.…の項目ごとに，それぞれに対応する調査問題の「誤った選択肢」が作成されている。K1.の項目には 20(B)(C)(D)，K2.には 20(A)の記号を見出すことができる。つまり問 20 の「誤った選択肢」(A)は K2.の誤概念を想定し，「誤った選択肢」(B)(C)(D)は K1.の誤概念を想定して作られている。さらに，これらの項目は一つの調査問題中だけではなく，他の問題中にも複数回出現する。K2.の欄には 20(A)の他に，21(B)(C)とあり，問 21 にある「誤った選択肢」(B)(C)をも構成している。このように何度も別々のコンテクスト内で出現することにより，学生はほんとうにその項目にある誤概念を排除できているのか，調査の精度を上げているのである。こうして全 30 問中にある「誤った選択肢」が，互いに絡み合いながら，誤概念分類表のすべての項目に対応して問題と誤答が設計されているのである。

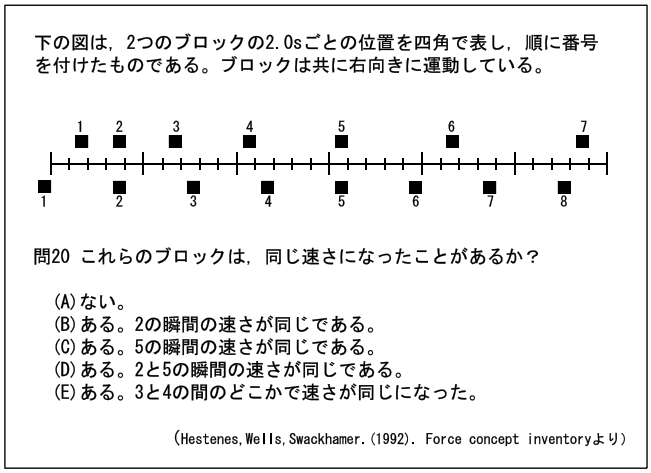

図 6　FCI 問 20（文献(29)より）

さて，先に触れた平均規格化ゲイン<*g*>は 1997 年に Richard R. Hake により導入された[27]。彼は高校，大学の力学入門コースの 62 クラスで FCI の事前・事後調査実施を依頼し，<*g*>を求めた。総調査対象学生数は $N=6542$ 名に上る。報告によれば，いわゆる板書中心の伝統的（traditional(T)）講義形式の授業クラスでは $\langle g \rangle_{\mathrm{T}}=0.23\pm0.04$ （$N=2084$）に留まっていたが，学生になんらかの相互活動を取り入れた（interactive-engagement (IE)）クラスでは $\langle g \rangle_{\mathrm{IE}}=0.48\pm0.14$（$N=4458$）

を達成したという。IE クラスでは，こうして学生の概念的理解の深まりと共に問題を解く力も著しく向上したと報告されている。この研究は FCI の考え方を PER に定着させると共に，物理教育においてアクティブ・ラーニングが注目を浴びるきっかけの一つとなった。

大学入門物理を教える経験豊かな教員が，図 6 のような設問が，ほんとうに大学生の力学概念調査問題として適切なのか，疑問を抱いたとしても不思議ではない。あまりにも簡単すぎる問題に見えるのである。メリーランド大学の Edward F. Redish らは 1999 年，過去 5 年間にわたって物理入門コースの異なる 16 クラス，総計 767 名の学生に対して FCI を実施した結果を報告している[35]。それによると，事前テストで図 6 問 20 の正答(E)を選んだ学生は 50%であった。また 16 クラスのうち，伝統的講義形式の授業クラス受講者は 238 名，なんらかの相互活動を取り入れたクラスの学生は 529 名であったが，前者の事後テスト問 20 の正答率は 47%で，まったく改善が見られなかった。少なくても，伝統的講義形式の授業では学生が抱く，位置，速度，加速度の概念的混乱を取り除くことはできなかったのである。

FCI は「誤った選択肢」を選択しないことによって，その誤概念に陥っていないことを判断する調査であるので，正解(E)を選択したからといって，調査対象者が必ずしもニュートン力学に基づいた概念的理解を獲得しているとは限らない。さらに精度を上げるためには，同一のニュートン力学概念指標に基づく設問を複数のコンテクストで出題しなければならないが，調査問題の解答時間として 30 分程度が想定されている枠組みもあり，当然限界がある。しかし FCI は発表以来，現在に至るまで，その有効性が調査・研究されており，現時点において十分な信頼を得ている。

5. 展望

PER は着実に基盤を固め，1999 年にはアメリカ物理学会（APS）により，新しい学問領域として認可され，AJP（American Journal of Physics）誌に論文掲載頁が確保される。さらに，2005 年には Physical Review 誌に Physical Review Special Topics-Physics Education Research (PRST-PER) が誕生し，研究体制が確立する。以来，続々と若い研究者がこの分野に参入している。現在 PER の研究者の大半が，物理学科に研究室を持っている[3]。

一方 Redish は，2003 年に PER を概括する書籍” *Teaching Physics with the Physics Suite*”[36]を出版，前述の ICPE(Tokyo)2006 の講演では日本の参加者に強い印象を与えた。2012 年に日本物理教育学会監訳によりその邦訳「科学をどう教えるか」[36]が出版され，PER に関する理解も深まりつつある。「アクティブ・ラーニング」の言葉も，2012 年のいわゆる「質的転換」中教審答申以来，随所で多く出会うようになってきている。しかし何か「アクティブ・ラーニング」の形があり，その形を単に真似ればよい，ということではない。日本の物理教育界において科学としての物理教育研究 (PER) が着実に歩み始めるまでには，もう少し間がありそうである。

引用文献

(1) Matthews, Michael R. (1994). *Science Teaching*, Routledge. London.

(2) 山内恭彦他，翻訳監修(1967)，「PSSC 物理　上下 第 2 版」，岩波書店

(3) Cummings, K. (2011). A developmental history of physics education research. Paper presented at the Second Committee Meeting on the Status, Contributions, and Future Directions of Discipline-Based Education Research. Available: http://www7.nationalacademies.org/bose/DBER_Cummings_October_Paper.pdf.

(4) www.aip.org/statistics

(5) Hehn, Jack. and Neuschatz, Michael. (2006). Physics for all? A million and counting! *Physics Today* ,**59**(2)

(6)右近 修治(2006)，「すべての高校生のための物理教育を目指して」，(24pWA 領域 13 シンポジウム) 日本物理学会講演概要集，**61**(2-2), 302

(7) McDermott, Lillian C. (2014). Melba Newell Phillips Medal Lecture 2013: Discipline-Based Education Research—A View From Physics. *American Journal of Physics* ,**82**(8), 729-741

(8) Susan R. Singer, Natalie R. Nielsen, and Heidi A. Schweingruber, Editors.(2012). Discipline-Based Education Research: Understanding and Improving Learning in Undergraduate Science and Engineering, http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=13362

(9) Redish, Edward F. (1998). Millikan Award Lecture:Building a Science of Teaching Physics. *American Journal of Physics* ,**67**(7), 562-573：邦訳，渡辺靖志，笠耐(2000)，ミリカンレクチャー1998：物理教育を科学に，物理教育，**48**(1),37-50

(10) Philips, Melba. (1981).Early history of physics laboratories for students at the college level. *American Journal of Physics*, **49**(6)

(11) Pickering, Edward Charles. (1875). *Physical Manipulation I*. Cambridge,the Riberside Press.

(12) 右近修治(2006)，学生実験誕生，「物理教育通信」（物理教育研究会 APEJ），**124**, 69–76

(13) Reif, Fredrick, and Larkin, J. H., & Brackett, G. C. (1976).Teaching general learning and problem-solving skills. *American Journal of Physics*, **44**,212-217.

(14) Taejin Byun and Gyoungho Lee. (2014). Why students still can't solve physics problems after solving over 2000 problems. *American Journal of Physics*, **82**(9),906-913.

(15) Polya, George. (1945). *How To Solve It*. Princeton University Press,邦訳：柿内 賢信訳（1975），「いかにして問題をとくか」，丸善株式会社

(16) Heller, P., Keith, R., Anderson, S. (1992). Teaching problem solving through cooperative grouping. Part 1: Group versus individual problem solving. *American Journal of Physics*, **60** (7)627-636; Heller, P., Hollabaugh,M. (1992). Teaching problem solving through cooperative grouping. Part 2: Designing problems and structuring groups. *American Journal of Physics*, **60**(7) 637-644.

(17) Hsu,L., Brewe, E., Foster,T.M., Harper, K.A. (2004). Resource Letter RPS-1: Research in problem solving. *American Journal of Physics*,**72**(9),1147-1156.

(18) Clement, John. J. (1981).Students' preconceptions in introductory mechanics. *American Journal of Physics*, **50**(1).66-71.

(19) McCloskey, Michael. (1982). “Naïve theories of motion,”in Dedre Gentner and Albert L.Stevens, Eds.*Mental Models* (Erlbaum, Hillsdale NJ, 1983),299-324.

(20) Minstrell,Jim. (1982). Explaining the “at rest” condition of an object. *The Physics Teacher*,**20**(10)

(21)鈴木亨(2013),中学教科書に見られる抗力概念の問題点，物理教育，**61**(4),190-193

(22) diSessa,A. A. (1993). Toward an Epistemology of Physics,” *Cognition and Instruction*, **10.**105-225.

(23) Minstrell,Jim. (1992). “Facets of students' knowledge and relevant instruction,” In: Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies, Proceedings of an International Workshop, Bremen, Germany, March 4-8, 1991,edited by R. Duit, F. Goldberg, and H. Niedderer (IPN, Kiel Germany, 1992)

(24)新田英雄(2012)，「素朴概念の分類」，物理教育，**60**(1),17-22

(25)右近修治(2009)，「グラフィカルな教科書と物理教育」，数理科学（サイエンス社），1 月号

(26) Clement,John J., “Overcoming Students',Misconceptions in Physics: The Role of Anchoring Intuitions and Analogical Validity”,Proc. of Second Int. Seminar: Misconceptions and Educ. Strategies in Sci. and Math. III, J.Novak (ed.) (Cornell U., Ithaca, NY, 1987); “Not all preconceptions are misconceptions: Finding 'anchoring conceptions for grounding instruction on students' intuitions”, Int. J. Sci. Ed. 11(special issue), 554-565 (1989).

(27) Hake, Richard R. (1998). Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses. *American Journal of Physics* **66**, 64

(28) Libarkin, J. (2008). Concept inventories in higher education science. Paper presented at the National Research Council’s Workshop on Linking Evidence to Promising Practices in STEM Undergraduate Education, Washington, DC. Available: http://www7.nationalacademies.org/ bose/Libarkin_CommissionedPaper.pdf.

(29) Hestenes, David, Malcolm, Wells, and Swackhamer Gregg. (1992). Force concept inventory. *The Physics Teacher*, **30**, 141

(30) Thornton, R., Sokoloff, D. (1998). Assessing student learning of Newton's laws: The Forceand Motion Conceptual Evaluation and the Evaluation of Active Learning Laboratory and Lecture Curricula. *American Journal of Physics*, **66**(4), 338-352

(31) Yeo, S., Zadnik, M. (2001). Introductory thermal concept evaluation. *The Physics Teacher*, **39**, 496-503

(32) Ding, L., Chabay, R., Sherwood, B., & Beichner, R. (2006). Evaluating an electricity and magnetism assessment tool: Brief electricity and magnetism assessment. *Physical Review-ST-PER*, **2**, 010105.

(33) Maloney, D., O'Kuma, T. L., Hieggelke, C. J., Van Heuvelen, A. (2001). Surveying students' conceptual knowledge of electricity and magnetism. *Physics Education Research Supplement to American Journal of Physics*, **69**(7), S12-S23

(34) 新田英雄,塚本浩司(2011).FCI(Force Concept Inventory)とは何か.大学の物理教育 **17** ,16

(35) Redish,Edward F.,Steinberg,Richard N. (1999).Teaching Physics:Figuring Out What Works. *Physics Today*. January

(36) Redish, E.F.(2003). *Teaching Physics with the Physics Suite*. John Wiley & Sons,Inc.　邦訳：日本物理教育学会監訳(2012)，「科学をどう教えるか」，丸善出版