

物理教育の科学的研究とそれに基づく教育改革の実践 —米国での動向—

覧具博義（もと東京農工大学）

物理教育を物理の研究領域の一つに位置づけて科学的なアプローチにそってより効果的な教育のあり方を探る「物理教育研究」が世界的に盛んになりつつある。以下では、米国での最近の動向とそれに基づく物理教育改革の実践例をご紹介します。

はじめに

科学技術の急速な発展は、社会と地球環境に大きな影響をもたらしており、これに対応するための科学技術人材の育成のためだけでなく、広く一般市民が科学的リテラシーを身につけるための科学教育の重要性が増大している。第二次世界大戦後、科学教育の変革の努力は、国際交流の中で行われてきた¹。板倉聖宣による仮説実験授業などの優れた教育方式は海外からも注目され、また、米・英の中等教育の優れた教科書などが日本での研究を刺激してきた。1980年代からは認知心理学を考慮した科学教育の研究や教育成果の調査・検討が行われるようになり、科学教育研究は飛躍的に発展しつつある²。

以下では、米国での物理教育研究とこれに基づく米国での物理教育改革の動向を、特に大学の入門物理教育に焦点を当てて紹介する。以下の解説は、主として、この分野の主導的研究者の一人 F.R.Redish の著書³をよりどころにしている。

物理教育研究 Physics Education Research (PER) の狙いは科学的アプローチに基づいて物理教育の目指すべき方向や効果的な教育方法を探求することにある。それは、科学研究の手法に従って (A) 対象である学習者やその学習行動を観察して、理解の困難や誤概念形成などを把握し、(B) 学習プロセスのモデル化を行い、これに基づいて (C) 教育手法、カリキュラム、教材を開発し、(D) これ

らを実施してその効果を検証し、さらに、それを踏まえて、上記の A~D を繰り返すというサイクル的なプロセスをたどりながらシステムティックで継続的な発展・向上を目指すものである。

今なぜ物理教育研究か

前世紀以来の高度科学技術社会の進展と地球規模の課題の出現は、広く一般市民が科学的素養、物理の素養を持つことを必要としている。Science literacy for all や Physics for all が、すなわち、文系と理系とを問わず広範囲な人々への科学教育や物理教育が、求められている。科学技術の高度化がもたらした世界規模の温暖化や有限な化石エネルギーに変わる代替エネルギーの選択などの人類の課題についての選択は最終的には一般市民に委ねられている。また、高度科学技術社会における経済・社会活動に携わるには、科学リテラシーが不可欠である。科学教育・物理教育が対象とすべき人々の数が増大し、そのスペクトルも広がっている。従来は、知識や公式の丸暗記やその機械的な利用にとどまっていたよしとした人々にも、物理の、科学の、基本的な概念の理解を実現することが強く望まれるようになってきている。

一方、近年、認知心理学や脳神経科学、教育学などの発展によって思考や学習プロセスの科学的理解も大きく進展している。これらの成果を基盤に、学生・生徒の個々人が能動的に学習に取り組み概念理解を獲得する

ことを可能にする学習方式が開発されつつある。さらに、急速な発達している IT 機器やソフトウェアの効果的な利用が教育の高度化・効率化を可能性にしている。

従来型物理教育の問題点

従来型の物理教育は、伝統的に講義が主体であった。講義は教員の主導で進められ、学習者達は受動的に情報を受け入れる一方向的なものであるのが通常である。物理教育研究者達の調査によって、このような一方向的な講義や講演で情報が聴衆に伝わる割合は極めて小さく、多くの場合講演内容の 10% 程度にとどまることがわかってきた。

問題演習を行うことで知識を身につけさせることは従来から行われている。しかし、これも、記憶した公式のどれに当てはめれば答えが導かれるかという問題と解法との間のパターン・マッチングの練習にとどまり、十分な概念理解に至らないことが多い。例えばハーバード大学の Mazur⁴はキルヒホッフの法則を適用して連立方程式を導きこれを解かなければならない数式的にはやや複雑な電気回路の問題で 70% 以上の正答率を示した同じ学生達が、乾電池に 3 個の電球を直列した単純な回路の一部を短絡させたときにそれぞれの電球の明るさが増大するか減少するかという、回路についての基本的な理解があれば、簡単に答えられるはずの問題については 40% しか正答できず、しかもその問題がより難しいと感じたことを知り驚いたことを報告⁴している。

物理教育研究が提唱する教育

認知心理学によれば、学習者が新しい概念を理解し獲得するためには、学習者は提示された情報を自らがすでに獲得し理解している知識の体系と照らしあわせ、整合を取り、自らの知識体系の中に取り入れるという知

的作業を行わなければならない。その場合、すでに持っていた知識体系に誤り(誤概念)がある場合にはそれを修正変更した上で取り入れることが必要になる。従来は、この知的作業は、授業や実験、演習などの実行場面の外側で学習者が自ら主体的に行っていると暗に前提されていたと言えよう。その結果、それができる少数の「物理好き」と物理を暗記科目ととらえる多数派を産み出し、後者の多くが「物理嫌い」になったことが推定される。

物理教育研究が提唱する新しい物理教育の方式は、物理概念の理解・獲得のための知的作業を、学習者が自ら実行することを授業の中で誘発し支援する、すなわち、学習者が授業に能動的に参加し(active-engagement)、教員と学習者との間に双方向的な知的作業の交流が成立する相互作用型の(interactive)、学習者主体の能動的な学習(active-learning)方式である。

多様な能動的学習方式

相互作用的な能動的な学習を成立させやすいのは比較的少人数の学習者で構成する小クラス方式である。しかし、学生数や教員数、さらに利用可能な教室その他の条件を考慮すると、数十名から時に数百名の学生で構成される大クラスでの講義主体の授業が避けられない状況も現実にはしばしば現れる。そこで、様々な工夫を取り入れることによって、大クラスの授業でも能動的学習を実現することが提唱されている。

米国では、演習(recitation あるいは tutorial)と呼ばれる問題解法主体の授業方式も、講義を補完する形で行われてきた。しかし、従来は、あらかじめ宿題として渡されていた問題の解答を指名された学生あるいは教員が板書し、それを学生達がノートにコ

ピーするというような情報の一方向的な伝達になることが多かった。物理教育研究者は、2-3名の学生がグループの中で相互に議論しながら必要に応じて教員が誘導しながら、問題に取り組む方式が、能動的な学習方式として有効であることを見だし、このような新しいタイプの演習を(大文字で始まる)チュートリアル(Tutorial)方式と呼んでいる。

Redishらは、現実的で効果的な教育方式を、環境条件に応じて様々な能動的な学習方式の「組み合わせ」により実現することを提唱しており、この組み合わせを“Physics Suite”と名付けている³。彼らは、物理教育研究に基づいて(PER-based)提案され実践されている授業方式を以下のように分類している。

1. 講義主体のカリキュラム

(1-1)伝統的な講義と PER-based チュートリアルの組み合わせ

(1-2)Peer Instruction⁴ (学習者相互の教え合い)

(1-3)相互作用型演示実験講義 など
(Interactive Lecture Demonstration: ILD)

2. チュートリアル主体のカリキュラム

3. 実験主体のカリキュラム

Real Time Physics など

4. ワークショップ型のカリキュラム

(講義・実験・チュートリアルの融合)

以下では、これらのカリキュラムのうち筆者らが実際に現地を訪問して見学する機会を得た三つの授業形式について紹介する。

講義中心の PER-base 授業方式の実施例

メリーランド大学 (Univ. of Maryland) は、学部 2,600、大学院 10,000、あわせて 36,000 の学生を有する大規模州立大学である。(数字はいずれも 2007 年秋学期)物理専攻学生は学部と大学院あわせて 455 で総数

の 1.3%であるが、物理学科の教員数は 84 で全学教員数の 2.2%を占める。物理学科教員数が相対的に大きい一因は、(米国の多くの大学でそうであるように)これらの物理学科教員が他学科・他学部を含めて全学の物理教育を担当しているところにあると考えられる。

この大学の物理学科では、入門物理を、(1)物理専攻学生向け、(2)化学専攻学生向け、(3)エンジニアリング志向学生向け、(4)バイオ志向学生向け、の四つのメニューで開講している。(1~3)では、微積分を用いるが、(4)は微積分を用いない代数学ベースの力学で物理概念理解に重点を置くコースである。

新田英雄教授(東京学芸大)と筆者が 2007 年秋に Redish 教授を訪問した⁵折には、同教授はこの代数学ベースのコース(Physics121)を担当していた。受講者数は約 180 名で、週 3 回各 1 時間の講義を中心にカリキュラムが組まれていた。講義に連動して週 1 回 20 名程度ずつの小クラスに分かれてのチュートリアル(1 時間)と学生実験(2 時間)が付随するが、これらは、小クラスごとに 1 名のティーチング・アシスタント (TA)によって指導されていた。これらの全体が物理教育研究の知見をもとに計画されており、学期の進行中も週 1 回教授と TA 全員による打ち合わせが行われコース全体の進行が調整されている。

全体のシラバス、チュートリアル用問題シート、学生実験テーマ・教材なども綿密に準備されている。その準備には長年かけたことがうかがえる。その際には、他の物理教育研究者の開発したカリキュラムを相互利用してカリキュラム開発の効率化を図っている部分もある。

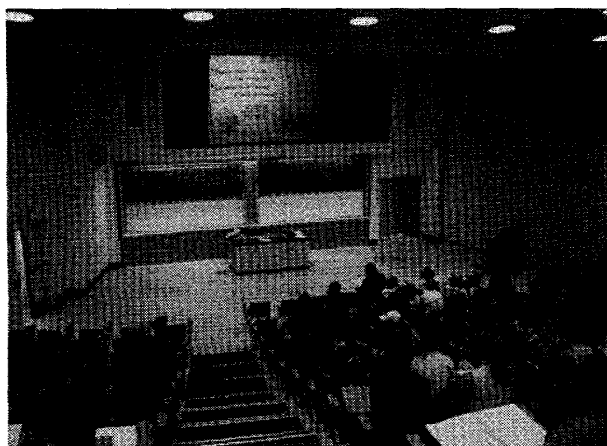


Fig. 1 メリーランド大物理学科の階段教室

講義はFig. 1の写真にある200名収容の伝統的な階段教室で行われていた。前面の黒板の上に設置されたプロジェクター用のスクリーンは、大教室での多数の学生を相手にした演示実験講義を相互作用型にしてactive-learningを実現するうえで効果的に用いられていた。

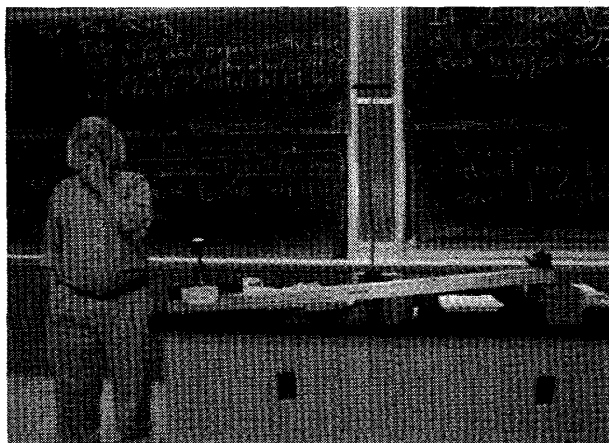


Fig. 2 演示実験の結果を予測させているRedish教授

見学した授業では、二次元運動がテーマで、演示実験はFig. 2の演壇上に設置された装置を用いた実験で、斜面を滑り落ちる台車の上から斜面に垂直に投出されたボールが再び落下してくるときに台車がこれを捕まえられるかどうかを考えさせる実験である。実験を始める前に教授は学生達に結果を予測

させスクリーンに投影された選択肢 (Fig. 3) から回答を選ばせる。学生達は各自が持っている電卓類似の携帯無線端末(クリッカー)のボタンを押して正しいと考える選択肢を選ぶ。

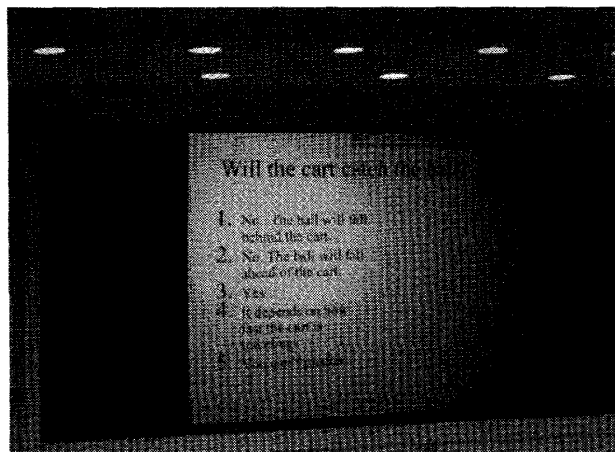


Fig. 3 演示実験結果の予測のための選択肢

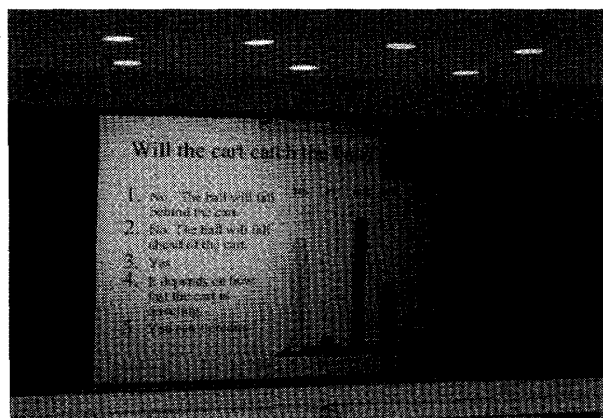


Fig. 4 学生達の予測の集計結果

その結果は教員のパソコンのUSB端末に装着された受信機を通じて直ちに集計され、スクリーンに投影される。(Fig. 4) この場合の正解は3 (YES) であるが、1 (ボールは台車より後ろに落下する) などの誤答もかなり多い。ここで教授は前後左右の学生達の間でなぜどれが正解と考えるか数分間議論させた上で、教授とクラス全体での議論が行われる。その上で実験を行い、ボールが台車にキ

ヤッチされることを確認した上で、直交する二つの方向の運動の独立性について議論を深めていた。

上のような過程の中で学生達は自らの頭の中で「なぜか」を考え、仲間達と議論することでそれを修正し確実なものにし、納得するという能動的な学習が行われることが見て取れた。ここでクリッカーは、議論をスピーディに進めていく上で非常に重宝な小道具であるが、学生の回答が他の学生に知られない、従って誤答しても恥をかく恐れがないことも学生の能動的な応答を引き出す上で極めて重要と Redish は考えている。また、スクリーンに投影される選択肢も、物理教育研究による調査を通じて浮かび上がってきた学生が陥りがちなつまづき、理解の不足や誤解をあぶり出すような誤答を組み合わせることで理解を確実なものにするように選ばれている。

少人数教育に向けたワークショップ方式

ワークショップ方式は少人数教育を標榜する Dickinson College で Priscilla Laws 教授によって開発された⁶。これは当初は微積分学ベースの入門物理(力学)に向けて開発された授業形式で、講義と実験を融合し完全に置き換えたものである。1回2時間のワークショップを週2回のペースで実施する。1クラスは20名程度で学生4~5名が1グループを構成する。実験を行い、そのデータをコンピュータ、データ入出力機器等を用いて可視化し、分析し、数値モデル化するなどの作業と議論を通じて物理概念の理解と解析手法の獲得に導く。

このワークショップ授業では冒頭の短時間、10分間前後をつかって、教員はその日の学習の目的・方法について簡潔に説明する。その後学生達は、グループごとに教室内ある

いは外に出て実験を行う。

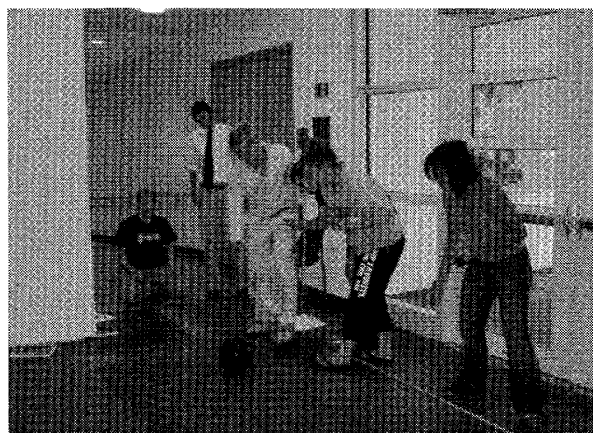


Fig.5 Dickinson College のワークショップ物理での実験風景

筆者らが見学に訪れた日の入門力学コースではここでも二次元運動を扱っていた。この日の実験は、教室を出て廊下で行っていた。Fig.5の画面奥の学生がボーリングのボールを静かに一直線に転がすと、白ズボンの男子学生が、チェアガールの使う質量の小さなバトンでボールを垂直方向にできるだけ同じ強さで、できるだけ一定の頻度で繰り返し叩く。隣の女子学生がストップウォッチを見ながら時刻の合図を送ると一番手前の女子学生がそのときのボールの位置にお手玉を落とす。こうして垂直方向に撃力を繰り返し与えたときのボールの軌跡を記録していた。実験の道具立ては極めてシンプルだが、それには現実の日常の世界で物理法則が働いていることを感じ取らせる意図がある。また、水平面上の二次元運動を扱うのは、遠隔力であるために初学者にとっては理解が容易でない重力の影響を、この段階では排除する意図がある。

実験が終わると学生達は教室に戻ってデータを解析と検討を行う。(Fig.6) ここでは、4人のグループあたり2台のパソコンが配置され、高度のデータ入出力機器やデータ

解析ソフトも用意されており、学生達はデータを解析し物理法則の理解に向けて議論する。Fig. 6 の画面手前左の女性は TA でテーブルを回りながら、学生達の質問に答え、また学生達の議論を理解に向けて誘導している。

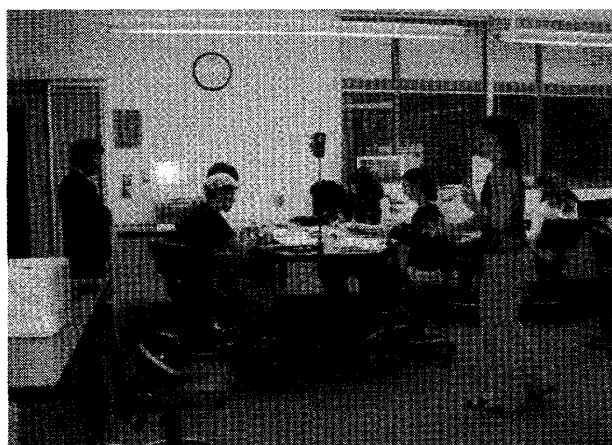


Fig. 6 ワークショップ授業でのデータ解析と検討

教育効果の測定

Laws が開発したワークショップ方式が物理概念を学習させる上で極めて効果的であることは、以下のような手法で客観的な裏付けが得られている。

物理教育研究者達は、学習者の物理概念把握の程度を調査するための標準テスト問題集を開発している。中でも最も広く使われているのは David Hestenes ら⁷によって開発されたニュートン力学の理解度を測定する力学概念問題集 (Force Concept Inventory : FCI) である。Hake⁸は、多数の大学および高校の入門物理のクラスで行われた学期始めおよび学期末の FCI テスト正答率のクラス平均を検討し、以下に定義された規格化向上率 g (gain) が教育効果の指標となることを見いだした。

$$g = (P_{\text{post}} - P_{\text{pre}}) / (1 - P_{\text{pre}})$$

ただし、 P_{pre} と P_{post} は、それぞれ、学期

始めと学期末に行われた同一の標準テスト試験での正答率のクラス平均である。

この指標 g を用いて伝統的な物理授業と比較すると、ワークショップ方式による概念理解の向上は従来型の教授方式に比べて 2 倍程度も大きいことが見出されている。

ワークショップ方式の大クラスへの展開

ワークショップ方式の有効性は広く認められたが、この方式は 20 名程度の少人数クラスに向けて開発されたもので、大規模大学で導入するのは難しい。そこで、この方式を 50 名程度の、さらには 100 名程度の大クラスにスケールアップして適用する研究⁹が行われた。このいきさつは文献 9 に詳述されている。

その一例は MIT で 2000 年から実施されている TEAL (Technology-Enabled Active Learning) と名付けられた 100-120 名規模のワークショップ方式である。そこでは、学生 3 名を 1 組にして 3 組 9 名の学生が一つの机を囲んで、講義と実験と問題演習を融合させてワークショップ方式授業を行っている。1 クラスあたり 100-120 名の学生を、1 名の教員と院生の TA 1 名それに Learning Assistant (LA) と呼ばれる学部上級生のアシスタント 2 名が加わって指導を行っている。

MIT の学部入学者は年度あたり約 1000 名で、全員に対して力学と電磁気学各一学期が必修になっている。これらをすべて物理学科の教員が担当している。力学は約 600 名、電磁気学は 650-700 名が TEAL 形式の授業で受講する。他に、従来方式の科目も併設されている。

TEAL 関係者によれば、この方式の導入について物理学科教員達からの抵抗は少なかった。その一方、学生からの反発は当初は大きかったという。その理由は、それまでにな

れていた授業形式と異なることや、TEAL 形式では、授業に出席することが必須でサボれないというものだった。4 年経過して、教員側・学生側の双方がこの方式に慣れてから、苦情は少なくなったという。

コロラド大学での物理教育改革と教員養成

物理教育研究に基づく教育改革の動きは米国の多くの大学に広がっている。州立大学のコロラド大学(Univ. of Colorado)でも、1993 年からクリッカーを導入したり、講義に付随する演習にワシントン大学のグループが開発した新しいチュートリアル方式¹⁰を導入するなどして段階的に改革を進めた。後者では1クラス28名の学生に、院生のTA1名と学部上級生のLA(Learning Assistant)1名をつける。

このLAを経験する学部生の中には、教育に情熱を感じて将来キャリアとして関心を持つ学生も出てくるという。その中で本人が希望し適性が認められる学生には、教育学部の単位も履修させ在学中に近隣高校と提携した教育実習経験を積ませることによって学部卒業時点で高校教員の資格も取得させる教員育成プログラム¹¹が開始されている。これは、全米科学財団(NSF)が助成して進めている米国の科学および数学分野の教育人材増強を目指すSTEM(Science Technology Engineering and Mathematics)プログラムの一環である。

相互作用型シミュレーション・ソフト: PhET

コロラド大学の物理教育研究グループでは、2001年のノーベル物理学賞の受賞者ワイマン(Carl E. Wieman、現在はUniv. of British Columbiaと兼務)を中心に、能動的な物理学習を支援する教材としてPhETと名付けたシミュレーション・ソフトを開発しインターネット上で公開¹²している。無償

でダウンロードできるこれらのシミュレーション・ソフトは、講義や宿題での利用、さらには学生実験の代替ないし補強を目的に開発されている。物理教育研究から生まれたこの教材については例えば文献¹³にワイマン自身が詳しく興味深い紹介を行っている。

このシミュレーション・ソフトの特徴には、物理教育研究をベースにテーマや仕様が設定されており、開発段階で学生に試用させその反応を開発にフィードバックしていること、物理世界の本質的な要素を抽出し本質的でない要素は意図的に捨象して単純化していること、また、見えないもの(分子など)の人為的な可視化や多面的な表示によって学習者の理解を支援していることなどがある。すでに、科学や数学、バイオを含むテーマで85のソフトが公開されている。大学初年級を主な対象として開発されているが、高校での物理教育でも顕著な効果あり、東部コロラドの高校の75%がすでに使用しているという。

拡大するPER研究グループ

物理教育研究の広がりには研究者の情報拠点となっているwebのホームページ¹⁴PER-Centralに見ることができる。オーストラリア、英、仏、韓、スウェーデンなど米国外にも活動が広がっている。米国大学では、物理教育研究の領域でテニユア付きポストに就任した研究者はすでに60名を超え、PhDを目指す学生も増大しているという。

また米国物理学会(APS)は、全米物理教員協会(AAPT)と共同してフリーアクセスのe-Journal “Physical Review Special Topics – Physics Education Research¹⁵”を創刊した。これは、他の物理分野の研究者にも高く評価される質の高い査読付き研究論文発表の場になっている。

おわりに

「物理教育研究」はある新しい教育手法ないし新しいカリキュラムではなく、物理教育を科学的にアプローチして、これをシステムティックに継続的に改善していく努力と考えられる。その核となるものは、多様な教育手法や教材を組み合わせ、教師と学習者の相互作用型の学習環境を形成し、能動的な学習を実現することにある。すでに日本を含む多数の国と地域の大学や高校、さらに中学小学校でもその研究や実践が試みられている。また、化学やバイオさらに数学などとの科目間連携も始まっている。

謝辞

本稿で紹介した物理教育研究の調査は物理教育研究会 (APEJ) に設置されている Physics Suite 研究会の湯口秀敏 (大宮高校)、岸澤真一 (越谷北高校)、右近修治 (湘南高校)、石井登志夫 (北本高校)、新田英雄 (学芸大)、笠潤平 (香川大) ほかの関係諸氏と共同で進めているものである。また米国での現地訪問の受け入れ先の F. R. Redish (U. of Maryland), P. Laws (Dickinson College), R. Morse (St. Albans school), E. Hudson (MIT), S. Pollock および W. Adams (U. of Colorado) の各氏に感謝する。

¹ 笠耐, 「物理教育の国際交流 50 年」物理教育 50-6, 421-428.

² 笠耐, 「中等科学教育の国際的な動向」, まぐね (掲載予定) 2009.

³ E. F. Redish, "Teaching Physics with the Physics Suite" Wiley, 2003. その全文が <http://www2.physics.umd.edu/~redish/Book/> に公開されている。

⁴ E. Mazur, "Peer Instruction: A User's Manual" Prentice Hall, 1997.

⁵ 新田英雄、覧具博義、「レディッシュ教授の

基礎物理講義」物理教育 56-2, 132-137, 2008

⁶ P. W. Laws, "Millikan Lecture 1996: Promoting active learning based on physics education research in introductory physics courses", American Journal of Physics, **65**, pp. 14-21, January 1997.

Priscilla W. Laws, "Workshop Physics Activity Guide" Wiley, 2004.

⁷ David Hestenes, Malcolm Wells, and Gregg Swackhamer, "Force Concept Inventory", Physics Teacher, **30**, 141-158, March 1992.

(http://quark.physics.uwo.ca/~harwood/phys1/mechanics/resources/fci_tpt.pdf)

⁸ Richard R. Hake, "Socratic pedagogy in the introductory physics laboratory", Physics Teacher, **30**, pp. 546-552, December 1992.

⁹ Robert J. Beichner et al, "The Student-Centered Activities for Large Enrollment Undergraduate Programs (SCALE-UP) Project"

¹⁰ L. C. McDermott, Peter S. Shaffer, and the Physics Education Group, "Tutorials in Introductory Physics at the University of Washington" Prentice Hall, 2002.

¹¹ <http://stem.colorado.edu/>

¹² <http://phet.colorado.edu/index.php>

¹³ C Wieman "Why not try a scientific approach to science education?" - Change: The Magazine of Higher Learning, **39**, pp. 9 - 15, September-October 2007

¹⁴ PER-Central

<http://www.compadre.org/PER/>

¹⁵ <http://prst-per.aps.org/>