東京都市大学共通教育部紀要　抜刷　2019 Vol.12

A Lesson Study with Interactive Lecture Demonstrations

相互型演示実験授業（ILDs）による授業研究

右近 修治

Journal of Liberal Arts and Sciences at Tokyo City University Vol.12, 2019

相互型演示実験授業（ILDs）による授業研究

自然科学系 物理教育部門　右近 修治

１．アメリカ物理教育の転回

アメリカの高校物理履修者数は1980年代終わりまで減少の一途を辿ったが，90年代に入ると増加に転じ，現在に至っている。また1992年以来減少していた物理学学士数も2004年には回復を果たしている。アメリカの物理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：Physics Education Research）の教育現場への普及にあったことはよく知られている(1)。

PERの源流は20世紀後半，カリフォルニア大学，バークレーのR.Karplus，ワシントン大学のA.B.Aronsにまで遡ることができる(2)(3)。Karplusは，量子電磁力学（QED）を研究する理論物理学者であったが，娘の通う小学校の科学教育に関心を抱き，1960年代に児童が科学を学習する過程を解明する研究に転じる。ピアジェの発達心理学の成果を初めて科学教育に取り入れ，科学カリキュラム改良研究（SCIS :Science Curriculum Improvement Study）を立ち上げた。現在でも使われているK-6（初等教育）科学教育カリキュラムはその成果である(4)。一方，Aronsは初等教育教員を目指す教師教育の現場に探究学習(inquiry based physics courses)を導入した。1970年代に入り，Lillian C. McDermottがワシントン大学に着任してAronsと合流すると，学生の物理に対する学習過程・思考過程に焦点を当てた調査研究プログラムが加速する。初等・中等教育教員養成のための物理カリキュラム開発研究が進み，その成果は「探究による物理(Physics by Inquiry)(5)」として結実した。学生の科学に対する思考過程の研究は，学生に何を教えるかという指導者からの目線ではなく，いったい学生は教室で何

をしているのかという，学習者への着目点の転回であり，物理教育の「コペルニクス的転回」ともいえるものであった。これはその後の PER の方向を決定づけた (6)。

1980 年代に，I. A. Halloun ，D. Hestenes らは学生が持つ誤概念の研究に基づき，力学概念調査（FCI :Force Concept Inventory）の最も初期の版を発表する (7)。いうまでもなく FCI は，現在では学生の概念的理解を調査する世界標準の診断テストとなっている (8)。調査に基づいた物理教育研究の進展に FCI が果たした役割は重大である。1990 年代に入り，先述したように高校物理履修者数が増加に転じると，大学物理科における物理教育研究PERが市民権を持ち始める。大学入門物理教育の教科書や教材，カリキュラム開発は PER の研究成果に基づいたものでなければならないことが，広く認識されるようになってきたのである。

この時点で多くの研究者に共有されていた PER には 2 つの大きなテーマがあった。その一つは McDermott の研究に代表されるような，学生の概念的理解を向上させるための研究，二つ目は，学生はいかにして問題を解くのかという F.Reif, J. H.Larkin らによる研究を嚆矢とした，問題解法技術（problem solving　skills）の研究である (9)(1)。相互型演示実験授業（ILDs；Interactive Lecture Demonstrations）はこうした状況の中からその姿を現したのである。

2．リアルタイム物理

1990 年代には，学生に物理の概念的理解をもたらす様々な取り組みの研究が模索されていた。伝統的な講義形式による授業では，学生が物理学の学習に対して抱く，概念的困難の克服には不十分であることが理解されてきたのである (10)。McDermott のチュートリアル学習（Tutorials in Introductory Physics）(5)(6) を初めとして，Eric.Mazur のピア・インストラクション（Peer Instruction）(11)，D.R.Sokoloff, R.K.Thornton, P. Laws によるリアルタイム物理（RealTime Physics）(12) 等はその代表的な例である。リアルタイム物理は，本論のテーマである相互型演示実験授業（ILDs）の直接の先祖である。

物理教育の現場に学生実験が登場するのは19世紀後半である(1)。Herbert Spencerに代表されるような(13)，学校教育に自然科学教育を導入しようとする運動が結実してから，それほど時を経ずして教室への学生実験導入が実現している。自然科学教育における実験の意義はいまさら言うまでもない。自然科学の方法が実験・観察による実証に基づくものである以上，実験のない科学教育は，科学とは何であるのかを学生に伝えそこなっていると考えざるを得ない。

学生実験を行う目的として，通常次の点が想定されるだろう。それは，学習した事実の検証，実験誤差（統計や誤差解析）の理解，実験操作や装置を扱うためのスキルの養成，実験データ処理に関するスキルの養成，科学的研究姿勢・態度の育成，概念形成等々である。しかし多くの場合は，実験書の手順通りに実験を遂行し，データを収集して処理し，報告書を書式に従ってレポート用紙に纏めるという，いわゆる料理本形式の「レシピ実験」となってしまっている。レポート提出後に口頭試問を設定していたとしても，通常の学生実験において，必ずしも期待する目的が達せられていないと感じる教員は多いのではないだろうか。

Sokoloff, Thornton, Lawsらは初等物理教育における学生実験の見直しを検討し，共同して「リアルタイム物理」のカリキュラムを開発した(12)。リアルタイム物理の画期的な特徴は，実験の目的を学生の物理概念形成の一点に絞ったことにある。通常重視されている，誤差解析や実験データ処理等につては，物理入門コースのテーマから外したのである。データ収集，解析，表示は学生の代わりにコンピュータがその役割を担う。実験スキルとして学生に要求するものは，コンピュータを操作して実験を行うスキルとなった(14)。入門物理で学生が取り組むべきものとして優先されるものは，得られた実験データを検討し，その意味を考えることであって，適切な実験データを得るにはどのような統計処理や誤差解析をしたらよいか，ではない。

リアルタイム物理は力学，熱と熱力学，電気回路等のモジュールからなる。各モジュールは，例えば力学ではLab1：運動への導入，Lab2：変化する運動，Lab3：力と運動…等の「単元」によって構成される。各単元はいくつかの「探究（Investigation）」と「宿題(Homework)」からなる。さらに「探究」はいくつかの実験課題（Activity）と発展課題（Extention）から成る。各

実験課題には学生に思考を促すための発問が用意されている。全体として，McDermott の「誘導される探究（guided inquiry）」(6)(15) に沿った構成となっている。

学生実験は 2 名～4 名から成る各実験グループに対し，データ処理用コンピュータと，実験課題に対応して超音波距離センサ，力センサ，圧力センサ，温度センサ，電流・電圧センサ等が用意される。力学 Lab1，Lab2，Lab3 等では超音波距離センサが活躍する。超音波距離センサは運動する物体（人，力学台車等）に向けて超音波を発し，物体に反射して戻ってくるまでの時間を計測して物体までの距離を計測するもので，現在では容易に入手できる。データはコンピュータで処理され，ただちに位置―時間グラフ，速度―時間グラフ，加速度―時間グラフ等として表示される。データをグラフ表示するために必要な操作は簡単であり，全実験を通じて共通である。学生は「探究」のワークシートを配付され，実験課題の指示に従った実験を行い，コンピュータ画面に表示されたグラフ等をワークシートに記録する。ワークシートには実験結果に対する質問，コメント，そして必要な場合，実験を行う前に結果を予想する覧が設けてある。指導教員は 30 名程度の学生に対して 1 名が割り当てられているが，直接物理を教えることはない。あくまでもファシリテーターとしての役割に徹する。

Thornton, Sokoloff らによれば，リアルタイム物理は学生の概念的理解を著しく促進させた(16)。彼らはFCI と同等の力学概念テスト「力と運動の概念評価（FMCE: Force and Motion Conceptual Evaluation）」を開発し，リアルタイム物理受講前，受講後のゲイン (1) を評価したのである。FMCE は FCI 同様の多肢選択式問題 43 問から成る評価問題である。問題全文は文献 (16) の Appendix で公開されている。伝統的講義形式の授業では FMCE のゲインは 0.2 程度であったが，リアルタイム物理受講者のゲインは 0.8 以上であった。これは驚くべき効果であったと言える (10)。

3．相互型演示実験授業（ILDs）

高いゲインを得るとはいえ，実験室で 4 名程度の小グループで実験課題と順次取り組み，入門物理学全分野をカバーするのはやはり荷が重い。また，

1回の実験室での授業の定員はせいぜい30名程度であり，1クラス100名を超すような入門物理クラスでの対応は困難であろう。通常の講義ベースの中に，こうした取り組みを導入することは可能であろうか。そこで工夫されたものが相互型演示実験授業（ILDs）である(17)。

ILDsの授業を行うためには，講義用大教室にプロジェクタ，演示用実験セット一式，教室用コンピュータ1台用意すればよい。通常であれば，教員以外にTA配置の必要はない。実験セットはリアルタイム物理の1グループが使用したものと変わらない。実験結果はプロジェクタにより，スクリーンに表示され，クラス全員で共有される。ILDsは「力学」「単振動と波」「熱と熱力学」「電磁気」「光と光学」の5分野から構成され，各分野は2（「単振動と波」）～11（「力学」）の単元に分かれている。各単元は5～8の実験課題により構成されている。1単元あたり50～60分の授業時間が割り当てられており，学生には1単元あたり2頁程度のワークシートが2部配布される。1部は予想シートで，これは授業中に回収される。学生には取り組み状況は評価するが，予想の結果は評価に関係ないと事前に説明する。もう1部は記録シートで，学生が授業で学習したすべてをここに記録し，持ち帰ることができる。予想シートと記録シートはまったく同じ内容をプリントしたものである。

ILDsの授業は次の8つのステップで進行する。

1．どのような実験かを説明する。実際に実験を行って見せてもよいが，実験結果は表示しない。
2．どのような結果になるか予想させ，予想シートに記入させる。
3．周囲の学生で小さなグループ（2～4名）を作らせ，自分たちの予想について話し合わせる。
4．クラス全体から，予想を引き出す。
5．最終的な自分の予想を予想シートに記入させる。
6．測定結果が見えるように設定し，実験を実行する。
7．どのような結果になったのか学生に問い，その結果について議論させる。この段階で学生は記録シートにわかった結果について記入させる。
8．うわべは異なるが，これと類似の物理現象について話し合わせるか，

解説する（つまり同じ物理の概念を用いて理解できる，異なる物理現象について）。

ILDs も仮説実験授業 (18)，到達目標学習課題方式 (19) などと同様，生徒や学生を意識的主体的に課題と向き合わせ，学習活動に巻き込む工夫の一つである。実験課題を提示し，それがどのような結果になるかを予想させ，ワークシートに記入させる。そのあとでグループごとに話し合わせる。教室での授業を想定しているので，各グループは隣や前後に着席している学生など 2〜4 名で構成される。グループを代表して発言を求め，教室全体で意見や考え方を共有した後で演示実験を行う。グループを代表して発言を求めるのは，その予想が実験結果と整合的であってもなくても，負担が個人にかからないようにするための配慮である。通常学生は（もちろん一般社会人も）後から間違っていたと指摘されるかもしれない事柄について，発言することに抵抗感を抱く。しかし自由な発言を保証しない限り，こうした授業は成り立たないので，学生の自尊心に対しては十分な配慮が必要である。学生の発言に対して，趣旨のわかりにくい点については，より明確にするように求めることは当然であるが，その場で発言内容を評価するような態度やコメントを発してはならない。仮に教員がきわめて適切と思えるような発言であっても，安易に褒めたりせず，発言整理に徹しなければならない。

実験結果が得られても，教員がすぐにその解説をすることはない。実験から何がわかったのかについて学生に発言を促し，それでも補うべき点が残ってしまったときには教員が補足する。何が得られたのか，何がわかったのかについて，学生に自分の言葉でまとめさせ，ひとつの実験課題が終了する。

ワークシートは単元ごとにまとまっており，上述のように複数の実験課題から構成されている。実験課題ごとに 1 〜 8 の手順を繰り返し，ワークシートが完成した時点で，学生がそのテーマに関する概念を獲得できるよう，各実験課題は設計され，配置されている。ILDs の実験課題はすべて，学生に物理の概念を獲得させるために設計されている。

ILDs の特徴の一つは，演示実験の設定が，学生が物理学の学習に際して抱く困難に関する長年にわたる調査研究に基づいてなされていることである。そうした困難は誤概念，素朴概念，代替概念と呼ばれているものに由来しているものが多い (8)。誤概念の研究史は長く，詳細は文献 (1)(8)(10) に

掲載されている引用文献を参照してほしい。力学を例に取り，誤概念をあえて簡潔に表現すれば「日常生活においては力学世界のモデルとして適度に機能はするが，ニュートン力学とは異なる概念であり，ニュートン力学の学習に干渉し，妨害する概念である」力学の誤概念を克服しない限りニュートン力学の概念的理解は得られない。

「運動する物体には，常に運動する向きに力が働いている」という MIF（Motion Implies a Force）誤概念は 20 世紀後半には知られていたが，物理教育史はこれとの格闘の歴史ともいえるほど強力な思い込みである。また，物理学を学んだ学生でも「位置と速度の違いがわからない」という，一見信じられないような誤概念も存在する。半期の力学入門コースを履修し終えた大学工学部学生の 3 割が，同じ向きに走る 2 物体の速度が等しくなるのは，両者の位置が一致するときと解答しているのである (8)。

教員が授業中にこうした誤概念を指摘したり，正しい考え方を教えたりしただけでは，ほとんど教育効果はない (10)。ILDs は学生に自らが持つ誤概念と向き合わせ，観察・実験の事実に基づいてこれを克服し，物理概念を獲得させる方略の一つであり，少なくとも大学入門物理教育においては，これによって概念獲得に大きな改善が得られることが実証されている (10)。ILDs を導入している私の担当する「物理学概論」クラスについても，コース前，コース終了後における力学概念調査（FCI）結果から，導入していないクラスと比較して，学生の概念的理解に大幅な改善が見られることが明らかになっている (20)。

４．相互型演示実験授業（ILDs）の授業記録とその分析

本学「物理学概論」は工学部・知識工学部教職課程必修科目であり，2016 年度に新設された。後期 2 単位（13 回）の科目で，16 年度は 1 年生 13 名，17 年度には 1，2 年生 31 名が受講している。物理学全体の基礎的理解を目指した科目であるが，学生が将来教職に就いたとき，授業体験を活かせるようにと一部 ILDs を導入している。導入しているものは次の 6 単元である。

① KIN1 Kinematics 1—Human Motion（人の運動）

② KIN2 Kinematics 2—Motion of Carts（台車の運動）

③ N1&2 Newton's 1st & 2nd Laws（ニュートンの法則１＆２）

④ N3 Newton's 3rd Law（ニュートンの第３法則）

⑤ VECT Vectors（ベクトル）

⑥ PROJ Projectile Motion（放物運動）

②KIN2（台車の運動）単元を例に取れば，この単元は８つの実験課題より構成されている。この単元の目標は等速度運動や等加速度運動をする力学台車の位置－時間グラフ，速度―時間グラフ，加速度－時間グラフを概念的に理解することである。② KIN2 ワークシートの８つの実験課題を演示１～８として本論文末 Appendix A に掲載する。また，KIN2 演示実験６についての17年度「物理学概論」授業の記録をAppendix Bに掲載する。また，Appendix C に，演示実験６終了後に学生が記録したワークシートからの抜粋を掲載する。

KIN2 演示６は図１に示すように，x 軸正の向きに一定の力を受けている力学台車が，初速度負の向きに発車し，その後の運動の速度―時間グラフ，加速度―時間グラフを問うものである。負の向きに進む台車は原点に近づき，やがてUターンして正の向きへと転じる。Appendix B には，ILDs 事前予測（第４ステップ）における学生の発言が記録されている。以下順次，発言記録内容を検討する。

初めにある，教員と学生 MK との対話から，演示実験の前提条件が，学生にしっかりと伝わっていないことがわかる。学生 MK は予想として，黒板にグラフ (1)（Appendix B 図３）を描く。このグラフを見た教員は，台車が初速度を得た後の，手を離した後からの台車の運動を記録する，という前提条件が学生に伝わっていないと感じて「この問題は，力を加えて押し出した後を聞いています」と補足している。これ受けた学生 MK は，グラフ (1) の正に加速している範囲を取り除いた，グラフ (2) へと修正する（この段階でも速度の符号に関して間違っているが）。

Appendix B はその一部であるが，６回の ILDs の授業の記録全体を検討すると，こうした演示実験の前提条件の伝わりにくさは，決して例外的なものではないことがわかる。KIN2 実験課題においては，座標の定義と台車の初速度の向きを前提条件としなければグラフの描きようもない。教員はこの点を事前に強く意識し，特に定義する座標の向き，台車の初速度の向きについ

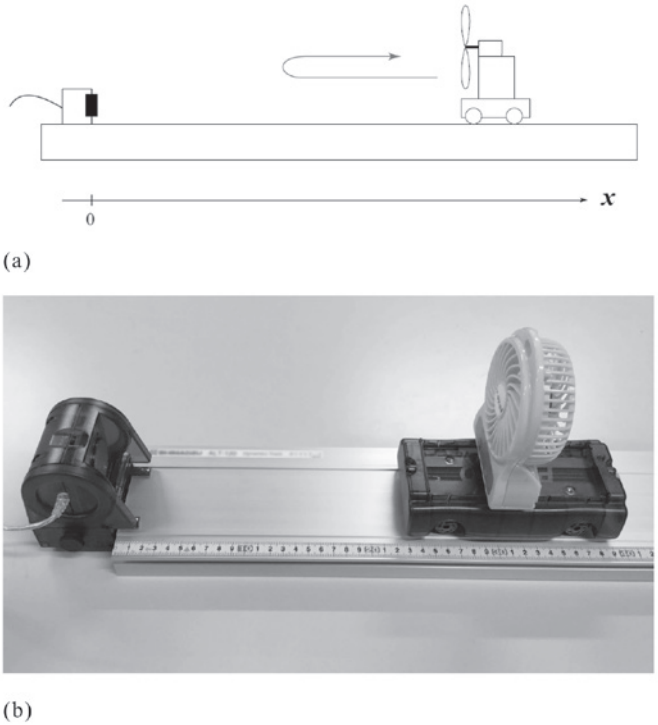

図 1 (a) 演示実験 6 台車は扇風機により x 軸正の向きに一定の力を受けている。台車の初速度は負である。(b) ガイドトラック上に扇風機付き台車，ガイドトラック左端には超音波距離センサが取り付けてある。

て，うるさいほど丁寧に説明したつもりであった。しかし記録からわかるように，こうした前提条件がなかなか理解されず，この場面にあるように，教員は議論の途中で何度も説明し直さなければならなくなっている。目の前で演示実験を観察した学生の目や頭は，手で押している最中の台車の速度変化や加速度から離れることができないのである。

さらに実践記録 Appendix B，C には学生が抱く典型的な誤概念が記録されている。それは台車の速度が 0 となり，ちょうどUターンする箇所で加速度が 0 となるという思い込みである。

興味深いことに，この思い込みは実際に演示実験が表示された後でも変わらない。Appendix B は演示実験前の，予想に関する発言の記録であるが，Appendix C は，実験結果（図 2）が表示された後，ワークシートにわかった

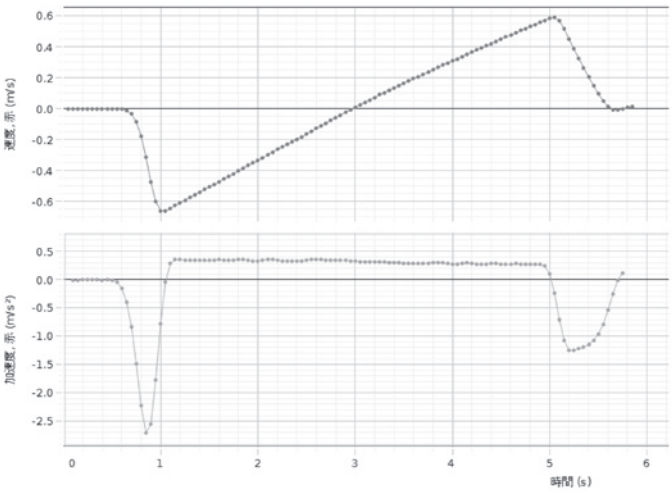

図 2 演示実験 6 で表示された速度－時間グラフ（上），加速度－時間グラフ（下）

事柄として学生が記録したものである。学生は超音波距離センサによる台車の位置の測定原理の説明を簡単に受けている。その際，センサが 1 秒間あたりに実行する測定の回数（sampling rate）についての理解がなされている。例えばサンプリングレートが 20Hz であれば，1 秒間に 20 打点のグラフが得られるというように。Appendix B によると，演示実験前に学生 KG は台車が U ターンする際に加速度が 0 になると予想している。ところが Appendix C によれば，図 2 の実験結果が表示された後でも，学生 KG は「a-t グラフは加速度を生み出している装置が止まっていないためか一定のままであった。しかし 1/20 秒の間に加速度 0 になっている可能性もあると考えられる」と記録するのである。ちなみにこの実験のサンプリングレートは 20Hz であることを事前に断っている。また，実験前に U ターンする際の加速度は 0 になると，特に発言していなかった学生 MR も，実験結果表示後に「（台車が）一瞬止まるから v=0，a=0 に近づくと思う」と記録する。特にこうした発言や記録を残していない学生でも，実験結果を見せても，台車が U ターンする際の加速度は 0 と思い込んでいる可能性は十分にある。一方 Appendix C は，実験結果が表示された後，学生 YT，TK，KY のように，実験結果を受け入れた学生も存在することを示している。

教員の視点からすれば，Appendix B の事前予想で，学生 TA の発言「ボール投げで考えた場合，こちら側（左向きを指して）が正に…レールを 90 度上向きにして…そういう風に考えて，ボール投げで考えた場合，重力加速度というのは 0 になったりしないから…投げ上げ運動で，最高点で速度が 0 になったとき，重力 0 になっているかというと，一定のままなので」は説得力のある発言であったと思われる。水平方向正の加速度，負の初速度の台車の運動と，ボール投げ上げ運動とを，等加速度運動として統一的に捉える視点を提示されることは，授業参加者に大きなヒントとなったはずである。Appendix C で「加速度は 0 にならず一定。速度 0 になったときでも加速度 0 にならない→重力加速度の例はよい例えだと思った」と記録する学生 YT は明らかに学生 TA の事前発言から影響を受けている。これはクラス内議論や意見交換の重要性を示す典型的な例といえる。しかしその一方，先に引用した学生 KG や MR はその影響を受けた形跡がない。

しばしば，こうした生徒や学生の発言を主体とした授業は能動的学習，アクティブ・ラーニングとして括られることが多い (15)。そうした授業の実践記録の中で，生徒から学生 TA のような発言を引き出したことで，その目的が達せられたように満足してしまう報告が散見される。しかしこれは当を得たものではない。教員の視点から，明らかな説得力を持つような発言があっても，すべての学生がそれを適切なものとして受け入れることはない。PER によれば，それは個々の学生が事前に持つ誤概念等の認知的バイアスに依存するのである (10)。

本 Appendix には収録していないが，KIN2 演示 3（Appendix A）ILDs 事前予測（第 4 ステップ）において，次のような学生の発言が記録されている。

教員：予想とご意見，誰でも結構です。

KG：課題に速度が一定の割合で増しながら，とあるので，*v-t* グラフは一定の割合で増加しているグラフが描けます。*a-t* グラフは，一定の割合で加速しているということなので，時間がたっても変わらない一定値となります。

TS：空気抵抗を考慮した場合，*v-t* グラフは直線になるじゃないですか。

教員：えっ，何が直線？

TS：*v-t* グラフがいつかは直線になる…。

教員：どういう直線？

TS：空気抵抗は速度に比例するじゃないですか。だから，空気抵抗と推進力がつりあった場合，速度が一定になるじゃないですか。ただ，ならないにしても，たぶん，右上がりの直線ではなくて，ちょっと下の，こういう感じの（しだいに傾きが減少していくカーブを右手で描きながら）グラフになるのかも知れない。

教員：この測る範囲の長さで，どうなるでしょうか。

TS：この範囲でならないとしても，長い範囲では違ってくるだろうと思います。

教員：じゃあ，やってみましょう。

演示３は，正の向きに正の一定加速度を受けて運動する台車の運動を問題としたものである。演示６同様，一定の加速度は台車に搭載した扇風機によって生じる。教員にとってはKIN2演示１～８までの学習課題は明確であるが，演示１から順に課題と取り組む学生にとっては必ずしもそうではない。学生TSの発言は空気抵抗の効果を考慮したものであるが，これは演示３の学習課題が意図したものではない。教員はこの後「この測る範囲の長さで，どうなるでしょうか」と応じ，台車が終端速度に達するまでには時間がかかることに軽く触れるだけで，それ以上のやり取りを避けている。この段階でこの議論に多くの時間を当てても益がないと判断したのだ。また，学生TSの発言を検討すると，空気抵抗を受ける台車の運動を正しく理解しているようでもあり，また「空気抵抗は速度に比例する…」などと誤解している部分もある（台車の運動では空気抵抗は速度に比例しない）。教員の立場からは，わかってしまった誤解は正したいとは思うが，ここはその場面ではない。学生に自由な発言を求めることは大切であるが，適切にコントロールしない限りILDsの授業は進行しない。

ILDsのように学生に自由な発言を求め，発言を基に進行する授業においては次の問題点が観察されている。

①実験課題の前提条件が容易に伝わらない

②教員の意図からそれていく学生の着眼点

③必ずしも共有されない適切な発言

④実験結果が信じられない

①は先述のとおり，事前にその重要性を意識して丁寧に行ったつもりであったが，教員にとって当然と思えるこの時点での学生の既習状況にはかなりの個人差があることを意識しなければならない。

②は，教員が自明と思うことは必ずしも学生にとっての自明ではないばかりでなく，実験の何を，どこを観察したらよいか，教員がリードしなければならないことを示唆している。そうした意味で ILDs を遂行する教員は単なるファシリテーターではない。

KIN2 演示 6 の学習課題に対する実験結果が図 2 である。課題はこのグラフを表示することで，すべて解決するだろうか。実験結果を見れば明らかなのだろうか。これは少なくとも，単純に「はい」とは言えないのではないか。

対象としている学生は，これから物理の基礎概念を獲得しようとしている人たちである。図 2 は文字通り台車の運動を記録した生データである。扇風機を回して台車が正の向きに一定の力を受けている状態で，台車に手を当て，負の方向に押し出し，返ってきたところを再び手で押し止める，そのすべてが記録されている。演示 6 の課題に答えるためには，図 2 のグラフのどこを見ればよいのか，理解できなければならない。しかしこれは彼らにとって決して簡単なことではない。学生の自由な発言を放置すれば議論はあらぬ方向に発散していくし，実際にそうであった。一方的に教え込むのではなく，教員がグラフの見方を適切にガイドしていかなければならない。これは容易にできることではない。

仮に手を離した直後から手で止めるまでの間のグラフを見るべきことが教室で共有されたとしよう。しかしさらにグラフをよく見れば，台車の帰りの加速度は行きの加速度よりも僅かばかり小さくなっている。速度－時間グラフもこれを反映して折り返し点の 3 秒付近で，少し折れ曲がって見える。摩擦力を受けた結果であるが，記録テープの解析からでは，まず得られない実験結果である。コンピュータ計測の精度は高いので，ここで必要とする以上の情報をもたらしてしまうのである。

しかし運動の向きと逆向きの摩擦力を受けると速度や加速度のグラフがどうしてこうなるのか，この段階で議論しても学生は混乱するだけだ。対象

とする学生はまだこうした議論ができるだけの段階に達してはいないのである。演示6の学習到達目標は，台車が正の向きに一定の力を受け続けるときの加速度は，常に正の向きに一定であり，速度－時間グラフは負の初速度から始まる右肩上がり，傾き一定の直線となることを概念的に理解し，胸に落とし込むことなのである。例え学生がこのような加速度の小さな変化に気がついて発言したとしても，教員は議論を上手くコントロールしなければならないだろう。

③④については個々の学生が事前に持つ誤概念，素朴概念が大きく影響していると思われる。こうした思い込みは単に実験を見せれば解消されるものでないことはすでに多く指摘され，その研究も蓄積されている(10)。ILDsは，学生が自ら持つ誤概念を，実験事実と対決させ，認知的葛藤を生じさせる方略の一つでもある。

5．演示実験授業の有効性

演示実験の重要性はいうまでもない。講義一辺倒よりも，要所要所に演示実験を導入した授業の方が魅力的であろうことは論を俟たない。しかし演示実験の導入が直ちに高い教育効果，高いゲインを発生させるという証拠はない。C.H. Crouch，E. Mazurらは，演示実験をただ導入しただけのクラスは，まったくやらなかったクラスと比較して，その差は小さかったと報告している(21)。著者の一人であるE. Mazurは，ピア・インストラクションの開発者でもある。

Crouch，Mazurらは講義形式の通常授業を次の4つのグループに分けて演示実験授業の効果を調べた。(1)演示実験なしで教員が説明する，(2)演示実験観察後，教員が説明する，(3)演示実験を行う前に，学生に予想させ，演示実験観察後に教員が説明する，(4)演示実験を行う前に，学生に予想させ，演示実験観察後に議論させ，教員が説明する。

評価は授業で教材としも用いた評価問題を利用している（EPAPS Document No. E-AJPIAS-72-007406）(22)。問題の答だけを解答する「答」，その説明をする「説明」について別々に評価した。Rをグループごとのコース終了後の「答」あるいは「説明」の正答率とする。グループ(1)の

「答」あるいは「説明」の正答率を R(1) (N=297) とすると，グループ (2)～(4) の有効性の評価は「答」「説明」それぞれについて，グループ (1) からの増加量の相対値

DR= (R − R(1))／R(1)

として表すことができる。報告によれば「答」について DR は，

(2)0.15(N=220,p=0.03)，(3)0.26(N=179,p<0.001)，(4)0.34(N=158,p<0.0001)

「説明」に対しては

(2)0.09(N=220,p=0.64)，(3)0.36(N=179,p=0.04)，(4)0.45(N=158,p=0.02)

の結果を得た。演示実験を単に実施しただけのグループ (2) は，何もしなかったグループ (1) に対して，「答」「説明」それぞれで DR=0.1 前後の結果である。苦労して教室に演示実験を持ち込んでも，この程度の効果では導入に少し躊躇するかもしれない。しかし (2) と (3)(4) の間には大きな差が生じていることがわかる。演示実験に「予想」を導入するだけで正答率が大きく上昇していることが確認できる。さらに「説明」問題については特にその差が大きくなっている。

ILDs のように実験結果を予想して議論し，その結果を検討するという流れは科学的概念形成を深める上できわめて有効であることがわかる。

既述したように，本学で実施した ILDs については FCI 個人ゲインの測定より，その有効性が実証されている (20)。しかし，議論に要した時間と有効性との関係については，現時点ではそれほど明らかになっていない。時間をかけるほど丁寧な授業にはなるだろうが，全体のカリキュラムを考える限り，無制限というわけにはいかない。ILDs の時間設定は 1 単元あたり 50～60 分であるが，本報告の「物理学概論」の授業では，概ねその 1.5 倍から 2 倍の時間を費やしてしまっている。議論を導入するにしても，どこかに適切な時間配分が存在するはずである。そうした時間配分に従って，学生の議論を適切にコントロールしなければならない。

また，議論するのは予想段階と実験結果が得られた後の，どちらで行うのがより適切なのだろうか，この点も必ずしも明確ではない。Crouch，Mazur らによるものでは，グループ (4) の議論は演示実験観察後によるものである。しかし，日本の伝統的なアクティブ・ラーニングである仮説実験授業や到達目標学習課題方式の授業では，予想段階における生徒の議論に重点が置かれ

ている (18)(19)。

昨年（2018 年）8 月 14 日，本学（東京都市大学）に ILDs 開発者の一人であるオレゴン大学 D.R.Sokoloff 教授（以下敬称略）をお招きし，ILDs 研究会を開催した。高校，大学の関係者 24 名ほどの参加をいただき，盛況であった。教授には 2 時間半にわたって ILDs の模擬授業を電気回路，光学，熱学分野で実施していただき，その後で十分な議論を尽くすことができた。その詳細は文献 (23) に掲載されている。

研究会での Sokoloff の発言によれば，ILDs では 50 分〜60 分で 1 単元の制約があるため，議論に割く時間は限られたものになるということであった。とにかく予想するという時間を設けることにより，自分が持つ誤概念と向き合わせることを強調していた。したがって，上の Crouch，Mazur らのグループ分けから言えば ILDs は (3) に近い。一方，著者が「物理学概論」で実施した ILDs は (4) に近いと言える。しかし著者は長年日本で実践されてきた仮説実験授業などの取り組みの影響を受けているので，(4) にある「教員からの説明」は最小限なものに止めており，また議論は予想段階のものを重視する傾向にあった。カリキュラムとしては ILDs オリジナルなものを採用してはいるが，その実践内容の差異には無視できないものがあると感じた。こうした差異に関する評価は今後の課題である。

本研究は，JSPS 科研費 18K02964 の助成を受けて行われています。

Appendix A

KIN2 Kinematics 2—Motion of Carts（台車の運動）演示１～８

演示１：台車が原点（超音波距離センサのある位置）から一定の速度で遠ざかる時，台車の速度—時間グラフはどうなるか。左の座標を用いて描け。また，このときの距離（位置）—時間グラフも描け（ワークシートには記入用グラフ枠が印刷してある，以下も同様）。
演示２：台車が原点（超音波距離センサのある位置）に向かって一定の速度で近づく時，台車の速度—時間グラフはどうなるか。右の座標を用いて描け。また，このときの距離（位置）—時間グラフも描け。
演示３：台車が原点（超音波距離センサのある位置）から速度を一定の割合で増しながら遠ざかる時，台車の速度—時間グラフ，加速度—時間グラフはどうなるか。右の座標を用いて描け。
演示４：台車が原点（超音波距離センサのある位置）から速度を一定の割合で減少させながら遠ざかる時，台車の速度—時間グラフ，加速度—時間グラフはどうなるか。右の座標を用いて描け。
演示５：台車に原点（超音波距離センサのある位置）から遠ざかる向きに一定の力がはたらいている。台車が速さを一定の割合で減少させながら原点に向かって運動する時，台車の速度—時間グラフ，加速度—時間グラフはどうなるか。右の座標を用いて描け（グラフは，台車をスタートさせ，手を離した後の状態から描け）。
演示６：台車に原点（超音波距離センサのある位置）から遠ざかる向きに一定の力がはたらいている。台車を原点の向きに向かって一瞬，力を加えて押し出した後の，台車の速度—時間グラフ，加速度—時間グラフはどうなるか。台車は原点に向かってしだいに速度を落とし，一瞬止まり，その後速度を増しながら原点から遠ざかる。右の座標を用いて描け。
演示７：台車を斜面の上方にある原点（超音波距離センサのある位置）に向かって押し出した後の，台車の速度—時間グラフ，加速度—時間グラフはどうなるか。台車は原点に向かってしだいに速度を落とし，一瞬止まり，その後速度を増しながら原点から遠ざかる。右の座標を用いて描け。
演示８：超音波距離センサを床上に，上向きに置く。このとき床が原点で，上向きが座標の正の向きとなる。そこからボールを真上に向かって投げると，しだいに速度が減少し，最高点に達して一瞬静止し，その後速さを増しながら落下してくる。ボールを投げて手を離した後から，床に衝突する直前までの速度—時間グラフ，加速度—時間グラフはどうなるか。右の座標を用いて描け。

Appendix B

② KIN2 演示６の発言記録

教員：じゃあ，どなたか予想のグラフを…（MK 黒板に出てきて描く (1)）
教員：そのこころは？（教員，再度実験の条件，推進力は正の向き，台車を押し出す向きは負の向きであることを確認する）
教員：この問題は，力を加えて押し出した後を聞いています…。
ＭＫ：あ，後か。じゃあ，撤回します（描いた黒板を消し，新たにグラフ (2) を描く）。
教員：（改めてセンサの位置，原点，正の向き，風の向き，台車を負の向きに押し出すこと，聞いているのは押し出した後の台車の v-t グラフ，a-t グラフであることを黒板に図を描いて説明）
教員：修正してもいいし，意見でもいいよ。
（KY，黒板に出て来て，グラフ (3) を描く）
教員：そのこころは？（黒板の前に立つ KY に向かって）
ＫＹ：扇風機の風が左向きに吹くので，加速度は右向きで正，速度は右肩上がりになる。まず台車が負の向きに行くってことは，最初は速度がマイナス，その後正の向きに進むことになる。で，右肩上がりになって…
教員：他にいかがでしょうか。
ＴＡ：この実験は演示５と演示３を組み合わせた実験なので…
教員：ああ，なるほど。演示５と演示３を組み合わせたものであると。はい。
ＫＧ：その…終わるところがつりあっている，速度が…
教員：あっ，えー，ここだね（v-t グラフが t 軸を切るところを示す）。
ＫＧ：（そこで）加速度がどうなるのか，っていうのが…やっぱりそのまま一定なのか，止まるのか…
教員：なるほど…ここで（v-t グラフが t 軸を切るところを示す）加速度がどうなっているのかというのがポイントだということ。予想では？
ＫＧ：0 になる。

ＭＴ：速度が０になっても加速度はあるんじゃないか。
ＴＡ：ボール投げで考えた場合，こちら側（左向きを指して）が正に…レールを90度上向きにして…そういう風に考えて，ボール投げで考えた場合，重力加速度というのは０になったりしないから…投げ上げ運動で，最高点で速度が0になったとき，重力0になっているかというと，一定のままなので。
教員：ああ，なるほど。後…ああ，もういないですか。（KG 君を指して）どうですか？
ＫＧ：とは思うんですけど，後は実験で…
教員：じゃあ，やってみましょう。
（演示６実施，図の *v-t* グラフ，*a-t* グラフが表示される）

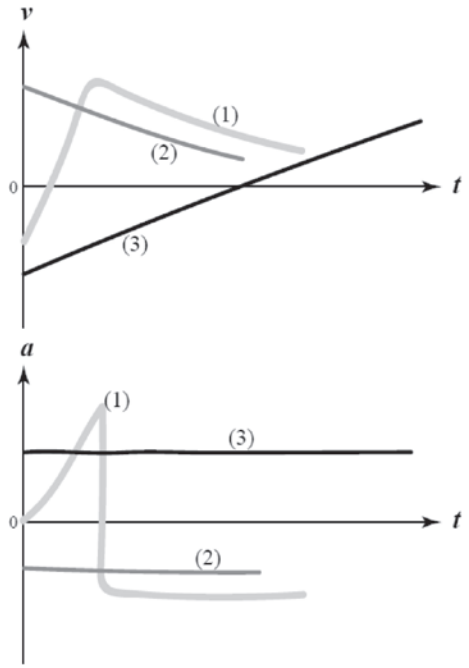

図３演示実験６の予想で学生の描いた速度－時間グラフ（上），加速度－時間グラフ（下）

Appendix C

②KIN2 演示６ワークシートに学生が記録したものからの抜粋

KG：*v-t* グラフは予想通りであった／*a-t* グラフは加速度を生み出している装置が止まっていないためか一定のままであった／しかし 1/20 秒の間に加速度０になっている可能性もあると考えられる／
OR：*v-t* グラフは演示５と真逆になると思ったが，実際は，直線になったので発見でした／また，加速度は一定となった／
YT：加速度は０にならず一定／速度０になったときでも加速度０にならない→重力加速度の例はよい例えだと思った／
TK：複雑な形になるのかなと思ったけど，至ってシンプルな形となった／速度が０になることから加速度も０になるとかと思ったがならなかった／
KT：予想とだいぶ違っていた／演示５と６がまだ理解できていない／演示５と６は加速度が常に一定であった／
MR：原点に向かって速度を落とすので加速度としては正の値を持つ／その後も速度を増しながら近づくので加速度は正のままである／より細かい時間間隔で見られれば加速度のグラフはどうなっているの

か見られるだろうか？→一瞬止まるから v=0，a=0 に近づくと思う／
OG：*v-t* グラフはＶ字になるのではないかと予想したが，実際は負から正への直線になった／加速度は正で予想通り一定であった／
KY：速度０の点では加速度０にならない／ここで０をとると，その後物体は動きを止めてしまう／
TA：演示３，５の組み合わせ実験であると思う／加速度は原点から遠ざかる向きで一定なので，ボール投げ上げ運動と同じである／

引用文献

(1) 右近修治（2015），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―，東京都市大共通教育部紀要 ,Vol.8, pp.65-80
(2) Cummings, K. (2011). A Developmental History of Physics Education Research,Available:http://sites.nationalacademies.org/cs/groups/dbassesite/documents/webpage/dbasse_072580.pdf
(3) Meltzer, D.E. , Otero ,V.K. (2015), A brief history of physics education in the United States, *American Journal of Physics 83(5)*, pp.447-458
(4) Fuller,R.G.(2003), "Don't Tell Me, I'll Find Out": Robert Karplus—A Science Education Pioneer, *Journal of Science Education and Technology*, Vol. 12, No. 4, pp. 359–369
(5) McDermott, Lillian C., Physics Education Group (1996), *Physics by Inquiry Volume 1,2*, John Wiley & Sons
(6) McDermott, Lillian C. (2014). Melba Newell Phillips Medal Lecture 2013: Discipline-Based Education Research—A View From Physics. *American Journal of Physics ,82(8)*, pp.729-741
(7) Halloun, I.A.,Hestenes, D. (1985), The initial knowledge state of college physics students, *Am. J. Phys. 53(11)*, pp.1043–1055.
(8) 右近修治（2016），誤概念診断ツールとしてのＦＣＩ，東京都市大共通教育部紀要 ,Vol.9, pp.67-78
(9) Reif, Fredrick, and Larkin, J. H., & Brackett, G. C. (1976).Teaching general learning and problem-solving skills. *American Journal of Physics, 44*,pp.212-217.
(10) 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
(11) E. Mazur(1997),*Peer Instruction: A User's Manual*, prentice Hall
(12) D.R.Sokoloff, R.K.Thornton, P. Laws (1995)，*RealTime Physics* ,Vernier Software，Portland OR
(13) H.Spencer, *Essays on Education and Kindred Subjects*, Everyman's Library (1911), 論文初出は 1854 年～1859 年頃
(14) K. Thornton, D.R. Sokoloff (1990), Learning motion concepts using real-time microcomputer-based laboratory tools, *American Journal of Physics 58(9)*, pp.858-867
(15) 右近修治 (2016)，物理教育とアクティブ・ラーニング,『理科教室』，Vol.59,No.9,pp.67-72
(16) K. Thornton, D.R. Sokoloff (1997), Assessing student learning of Newton's laws: The Force and Motion Conceptual Evaluation and the Evaluation of Active Learning Laboratory and Lecture Curricula, *American Journal of Physics 66(4)*, pp.338-346
(17) Sokoloff, Thornton, "INTERACTIVE LECTURE DEMONSTRATIONS", John Wiley & Sons, 初版 (2006)；なお同書は以下のサイトから無料でダウンロードできる。https://pages.uoregon.edu/sokoloff/ILDbook0116.pdf
(18) 板倉聖宣 (1974), 仮説実験授業―授業書ばねと力によるその具体化 , 仮説社
(19) 玉田泰太郎 (2008),「理科の授業づくり入門」編集委員会，理科の授業づくり入門―玉田泰太郎の研究・実践の成果に学ぶ，日本標準
(20) 右近修治，長田剛，中村正人他６名 (2018)，25aK510-4 理工系大学初年度物理演示実験講義（ILDs）の授業研究，日本物理学会第 73 回年次大会
(21) C.H. Croucha, A.P. Fagen, J.P.Callanc,E. Mazur(2004),
Classroom demonstrations: Learning tools or entertainment?, *American Journal of Physics 72(6)*, pp.835-838
(22) http://ftp.aip.org/epaps/am_j_phys/E-AJPIAS-72-007406/Appendix.pdf
(23) 右近修治 (2019)，都市大ソコロフ先生研究会報告，物理教育通信，No.175 掲載予定，pp.17-40