

# 生徒の科学的概念形成を支援する Tablet 端末を利用した ILDs 型物理授業の試み

伊藤 慧

satoshi.ito.toho@gmail.com

桐朋中学・高等学校

Key Words : 物理, Tablet, iPad, アプリケーション, ILDs

## 1. 緒言

物理教育研究 (Physics Education Research; PER) の成果<sup>1)</sup>によると、伝統的な講義形式の物理授業では生徒は授業者の望むほど主体的な学習に至っていないことが判明している。その結果、生徒の素朴概念 (naive concept)<sup>2)</sup>を授業内で修正し、正しい科学的概念に導くことは困難であるといわれる。素朴概念とは幼少期からの生活経験などによって形成、強化される科学的概念に反する認識である。代表的なものとしては、「運動する物体は力を内包する」認識である Motion Implies a Force (MIF) がある。

そこで 1990 年代以降、アメリカの大学では PER を通じて認知科学に基づく Active Learning が多数開発・実践されてきた。例えば、Interactive Lecture Demonstrations (ILDs)<sup>3)</sup>や Peer Instruction (PI) などが挙げられる。それらの多くは授業に議論活動を取り入れて、生徒同士の相互作用を利用することで主体的な学びに導こうとする意図がある。特に今日、PI は複数の一流大学で物理学の講座に限らず実践されており、日本にまでその潮流は到来している。

## 2. Active Learning

### 2-1 ILDs の概要

ILDs とは、予想や議論による生徒同士の相互作用を利用した演習授業のことである。D. Sokoloff や R. Thornton らが開発した。授業の流れは以下の通りである。

まず、生徒は教員による演習を観察する。次に、その現象のグラフをワークシートに描き込んでから生徒同士で議論を行う。そこで、友人の考えのうち納得したものや気になったものを記入しておく。最後に、教員がセンサーなどを用いて測定したグラフを投影しながら解説を行う。

### 2-2 PI の概要

PI は Harvard 大学の E. Mazur が開発した。授業形態は以下の通りである。

まず、生徒は定性的で概念的な問題を各自で考えて、選択肢をクリックと呼ばれる ICT 機器で回答する。教員は回答の集計結果をグラフ化したものをスクリーンに投影して、次に生徒同士の議論を促す。議論後に再び生徒はクリックで回答し、集計結果のグラフが投影される。最後に教員が解説を行う。

## 3. 問題の所在

### 3-1 実践の対象生徒

本校は中高一貫の私立男子校である。筆者は、高校 2 年生の文系進路選択者 (選択授業の 2 クラス計 70 名; 以下、対象生徒) を対象に、2015 年度 1 学期の週 3 コマを力学分野の ILDs および PI 形式の授業に充てた。生徒は 2014 年度に「物理基礎」を履修しているため、一通りの内容理解は終えている。従って、基本的な用語や法則などの講義は割愛することが出来た。

### 3-2 生徒の実態

筆者の感覚として、理系・文系に関わらず生徒が MIF をはじめとする素朴概念を保持していると感じる機会が多い。生徒の実態を把握し、ILDs や PI の提示問題の選定材料および授業の効果測定のために PER の成果である力学概念調査テストを学年当初に実施した。本調査では Force Concept Inventory (FCI) や Force and Motion Conceptual Evaluation (FMCE) と呼ばれるアメリカの大学における膨大な調査から妥当性の担保されたもの (FCI は日本の研究チームが作成した和訳版を、FMCE は筆者が和訳した) を使用した。両者共に問題流出を防ぐために設問の一般公開はされておらず、Newton 力学に関する設問が大半を占める。

### 3-3 FCI によるプレテストの結果

FCI は Newton 力学概念をはじめ、加速度や遠心力などに関する全 30 題の各問に対して 5 つの選択肢が与えられている。対象生徒のうち受験者 68 名の平均正答率は 45.3% であった。特に、自由落下する物体の速度変化に関する問 3 の正答率は 72.1% であり、鉛直投げ上げされた物体にはたらく力に関する問 13 の正答率は 19.1% であった。

### 3-4 FMCE によるプレテストの結果

FMCE は Newton 力学概念に加えて、運動する物体にはたらく力や物体の速度・加速度の時間変化のグラフを選択させる全 43 題から構成される。対象生徒 70 名の平均正答率は 30.0% であった。特に、コイントスされたコインに各状態においてはたらく力に関する問 11-13 の正答率は、問 11 (真上に運動しているコイン) : 8.6%, 問 12 (最高点にあるコイン) : 8.6%, 問 13 (真下に運動しているコイン) : 17.1% であった。

また、コイントスされたコインの各状態における加速度に関する問 27-29 の正答率は、問 27 (真上に運動しているコイン) : 21.4%, 問 28 (最高点にあるコイン) : 10.0%, 問 29 (真下に運動している

コイン) : 24.3%であった。

### 3-5 国内外における先行研究

表 1-3 は、高校生や大学生を対象とした国内外における FCI・FMCE 先行調査の結果である。日本と海外では学習指導要領が異なるため一概に比較できないものの、これらと比較して対象生徒の正答率が極端に低いとは限らない。むしろ設問によっては、

理系の大学生に正答率で上回っている。

しかしながら、鉛直投げ上げ運動に関して対象生徒の MIF を保持する割合は大きく、速度と加速度の概念分化が未熟な可能性は高いと考えられる。やはり、従来の講義形式の授業スタイルでは、生徒の強固な素朴概念を十分に修正できているとは言い難い結果となった。

表 1 国内外における FCI プレテストの調査結果<sup>4)5)6)</sup>

学校名	学部・学科	調査人数	全体正答率(%)	問3の正答率	問13の正答率
松本歯科大	歯学部生(1年)	37	35.5	67.6	21.6
アリゾナ高 他7校(アメリカ)	—	1500人以上	29.3	—	—
ハーバード大 他2校(アメリカ)	—	500人以上	42.7	—	—
マドリード工科大の附属校 (スペイン)	森林工学学校	33	32	79	15
	経営工学学校	110	53	70	37

表 2 国内における FMCE プレテストの調査結果<sup>7)</sup>

学校名	学部・学科	調査人数	全体正答率(%)
高知工科大	物質環境システム工学科	50(2003年度)	32.4
		86(2004年度)	17.7

表 3 海外における FMCE プレテストの調査結果<sup>8)</sup>

学校名	学部・学科	調査人数	全体正答率(%)
アタテュルク大学(トルコ)	物理学科	68	43.5
各問の正答率(%)	問11	問12	問13
	41.2	35.4	45.7
	問27	問28	問29
	57.3	38.5	41.2

## 4. ILDs 導入授業

### 4-1 実践内容

筆者は ILDs を落体運動について 4 コマ、ニュートンの運動の第 2 法則 (以下、第 2 法則) について 5 コマ実施した。それ以外の授業時間の大半は PI 実施に充てた。本稿では ILDs に焦点を当てて実践報告を行う。

### 4-2 iPad と iPhone の利用

文科省による ICT 活用型授業の推奨の影響もあり、iPad を活用した様々な科目の授業実践が近年報告されている。それらの多くは生徒の主体性や相互作用を引き出し、学習意欲や定着度の向上を確認している。しかしその反面、生徒全員もしくはグループごとに 1 台ずつ iPad を行き渡らせる必要があるため、経済的な壁は分厚く、費用対効果が未知数であることも相まって現場教員は二の足を踏むことになりやすい。そこで、筆者は教員用 1 台の Tablet 端末 (iPad および iPhone) を有効利用して、ILDs を実施することとした。活用したアプリケーションは「Motion Analyzer (iPad)」および「Accelerator (iPhone)」である。

### 4-3 落体運動

生徒に、落体運動 (自由落下、鉛直投げ下げ、鉛直投げ上げ、水平投射) について物体の  $y-t$ 、 $v-t$ 、

$a-t$  グラフを予想したものをワークシートに記入・議論をさせた。グラフと共に、落体運動の公式(1)、(2)を記入させた。

$$y = v_0 t \pm \frac{1}{2} g t^2 \quad \dots (1)$$

$$v = v_0 \pm g t \quad \dots (2)$$

次に、落体運動の様子を iPad で動画撮影し、アプリ上で打点をしてからグラフ化したものをスクリーンに投影した。図 1-3 はそれぞれ物体を鉛直投げ上げた場合の打点の様子と  $y-t$ 、 $v-t$  グラフである。加速度については  $v-t$  グラフの傾きで説明することで、最後に解説を行った。

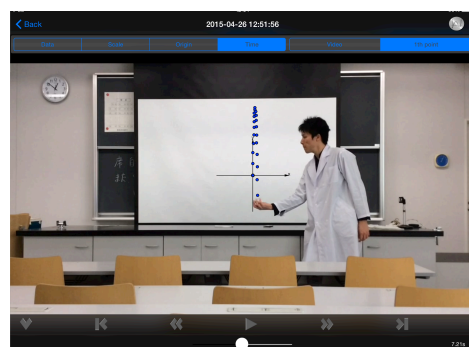
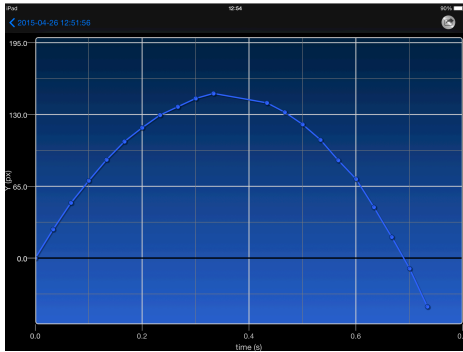
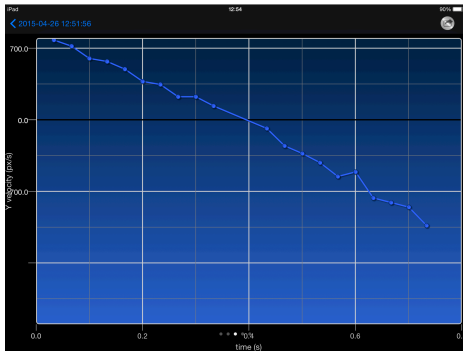


図 1 「Motion Analyzer」による打点

図2 「Motion Analyzer」による  $y-t$  グラフ図3 「Motion Analyzer」による  $v-t$  グラフ

#### 4-4 ニュートンの運動の第2法則

生徒に、第2法則に関する問(計7題)について物体の  $x-t$ ,  $v-t$ ,  $a-t$  グラフを予想したものをワークシートに記入・議論をさせた。ばねばかりで力学台車(以下、台車)を一定の力で引いた場合や台車・おもり・定滑車を用いて物体の質量や外力の大きさを変化させた場合について問うた。

これらについて、運動の様子を iPad に加えて、力学台車に固定しておいた iPhone のアプリによって測定した結果をスクリーンに投影した。図4は、台車とおもりをつなぐ糸を定滑車に通し、定滑車の位置とは反対向きに台車に初速度を与えて台車をUターン運動させた場合の  $x-t$ ,  $v-t$ ,  $a-t$  グラフである。本アプリは  $a-t$  グラフも示せる上に、3つのグラフを重ねて投影できるため3者の関係性を解説しやすい。

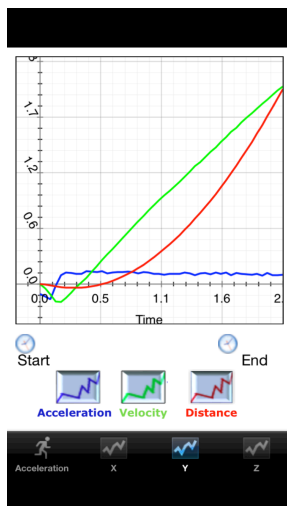


図4 「Accelerator」による測定結果

## 5. 生徒の誤答分析

### 5-1 落体運動

落体運動に関する ILDs において、特に生徒の誤答が目立った自由落下と鉛直投げ上げに着目して誤答傾向の考察を行う。但し、Sokoloff も指摘しているように、予想シートは成績評価に用いないので最初の予想をそのまま提出するように指示したにも関わらず、一部の生徒は記載を正解に修正した形跡が見受けられた。

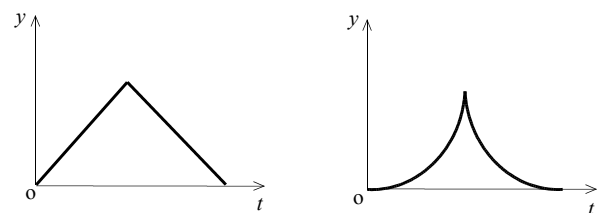
#### 5-1-1 自由落下

公式(1), (2)を正しく記入できた生徒は多かった。しかし、 $y-t$  グラフを比例直線とした者の割合は22.9%,  $v-t$  グラフを曲線(主に放物線)とした者は24.3%,  $a-t$  グラフを比例直線とした者は15.7%存在した。この結果から、公式はとりあえず覚えているものの「座標(落下距離)  $y$  は時間経過と共に加速度的に増していく」ことや「落下速度  $v$  は一定の割合で増す」ことへの理解が不十分な生徒が一定割合いるといえる。また、生徒は数学の授業で  $x$  を引数とする関数をグラフ化することも容易なレベルに達していても、引数が  $x$  以外の例えば式(1), (2)のような  $t$  になった途端につまずくケースは多々ある。本設問では、落体運動そのものに関する理解不足に加えて、数式とグラフの対応における1つのハードルが顕在化したのだろう。

また、 $y-t$  グラフと  $v-t$  グラフは正しく描けていても  $a-t$  グラフを誤って比例直線にした者も目立った。速度と加速度の概念を混合する生徒は多く、「 $v-t$  グラフの傾きが加速度  $a$  と等しく、 $v-t$  グラフが直線ならば  $a$  の値は一定値である」という説明を筆者が繰り返し行っても、生徒が真の理解に達するのに時間のかかる傾向は強い。

#### 5-1-2 鉛直投げ上げ運動

図5のような折れ線若しくは曲線の  $y-t$  グラフを描く生徒は合計14.3%いた。

図5 鉛直投げ上げ運動の  $y-t$  グラフの誤答例

鉛直投げ上げの公式(3)を「数学I」で扱う放物線の式(4)と対応させて考えれば、上に凸の放物線と容易に気付くことは出来るが、教員側の感覚よりも生徒にとっては難易度が高いのかもしれない。

$$y = v_0 t - \frac{1}{2} g t^2 \quad \dots (3)$$

$$y = a x^2 + b x + c \quad (a < 0) \quad \dots (4)$$

$v-t$  グラフについて、図6のようなグラフを描いた者は上に凸・下に凸の放物線ともに15.7%いた。図5(左)と同様の形状の折れ線グラフとした者は20.0%であった。これらの誤答の多い要因としては複数が考えられる。第一に、ベクトル量についての理解不足である。誤答の様子から、速度は負の値を

取らないと思いついでいる者の割合は多いと思われる。第二に、MIF の影響である。 $a-t$  グラフについて、一定値以外のグラフ(曲線, 比例直線, 折れ線)を描いた者は 24.3%いた。よって、物体の運動方向には力がはたらいており、加速度の大きさや向きは時間変化すると考える者は一定割合存在する。第三に、第 2 法則の理解不足の影響も大きいと推測する。

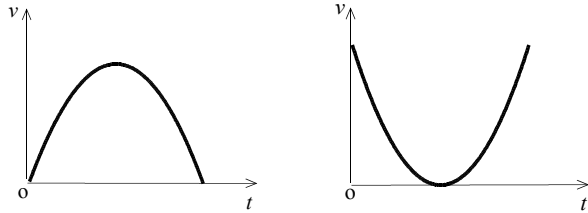


図 6 鉛直投げ上げ運動の  $v-t$  グラフの誤答例

## 5-2 ニュートンの運動の第 2 法則

ばねはかり若しくは定滑車とおもりを用いて台車に一定の力を加えて、等加速度運動をさせた。ここでは 3 題に着目して考察を行う。

### 5-2-1 ばねはかりで引かれる台車

ばねはかりを用いて、台車を一定の力で引いた。 $a-t$  グラフの正答率は 91.4%であった。第 2 法則に関する理解状況は良好といえる。

### 5-2-2 U ターン運動する台車

定滑車の位置とは反対向きに台車に初速度を与えて台車を U ターン運動させた。 $v-t$  グラフを図 7(左)のような放物線を描いた者は 10.0%, 図 7(右)のような折れ線を描いた者は 18.6%いた。

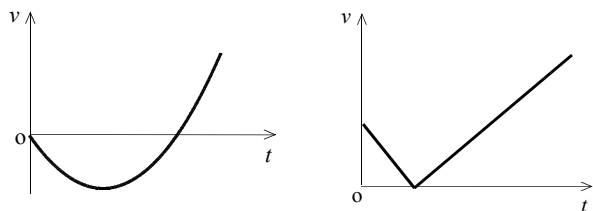


図 7 U ターン運動の  $v-t$  グラフの誤答例

一方で、 $a-t$  グラフを図 8 のような非連続とした者は 14.3%いた。これらから、台車が右向きに運動している状態と左向きに運動している状態では、速度同様に加速度やはたらく力の向きも変化すると考える生徒の存在が浮かび上がる。

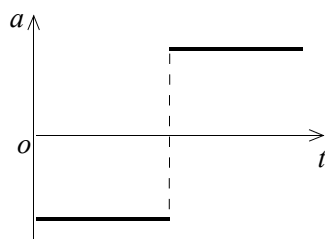


図 8 U ターン運動の  $a-t$  グラフの誤答例

授業最後の解説では、図示した上で運動方程式を立て、摩擦力を考慮しても台車の加速度は一定であることを示したところ、生徒は納得した様子であった。

## 5-2-3 両側から引かれる台車

台車の左右両側に定滑車を設置し、糸を介して左側におもりを 2 つ、右側におもり 1 つをつり下げた。生徒にはグラフを描かせると共に左側からおもり 1 つで台車を引いた場合と比較して  $v-t$  グラフの形状はどうか考察させた。運動方程式を立てて考えるようにヒントを与えたものの、回答欄に記述した 31.4%の全員が「左側からおもり 1 つで引いた場合と同じグラフになる」と回答した。そのほぼ全員が「左のおもり 2 つ - 右のおもり 1 つ」より、正味左側からおもり 1 つで引いた場合と同じ状況である」と書いた。良い意味で生徒の直感を裏切る題材になったのではないかと思う。

## 6. 総括

生徒は ILDs において、認知的葛藤に苦しみつつも活発に意見を交わして友人の説得を試みていた。時には、友人の論理的な説明を受け、「ああそうか。勘違いしてた!」という声も頻りに聞かれた。生徒に予想や議論をさせる意義として、主体的に物理現象を深く考察する機会を与えると同時に、意見主張をする際にメタ認知が促進されているものと思われる。

一方で、ある生徒が「物理の問題を解く時は、自分の直感に頼らないで式を立てて考えた方が良いのかもしれない」と話していたことが印象的であった。ILDs を通して、生徒は自身の保持する素朴概念の存在を認識した期待がある。しかし、生徒に直感を軽視させるのではなく、Active Learning を通してより洗練された物理学的直感に昇華させたい。そして、生徒の物理現象に対する定量的・定性的両面からの考察力を育成することが理想である。

発表時点では、FCI および FMCE のポストテストは未実施であるため、本実践の定量的な効果分析は報告できない。以上を今後の課題としたい。

## 引用文献および註

- 1) E. Redish: *Teaching Physics with the Physics Suite*, Wiley, 2003.
- 2) K. Fisher: A Misconception in Biology: Amino Acid and Translation, *Journal of Research in Science Teaching*, Vol.22, No.1, pp.53-62, 1985.
- 3) D. Sokoloff and R. Thornton: *Interactive Lecture Demonstrations*, Wiley, 2004.
- 4) 田中忠芳: 大学初年次数物系教養科目における授業改善とその評価に関する基礎的研究, 松本歯科大学紀要, Vol.39, pp.23-57, 2011.
- 5) D. Hestenes: Force Concept Inventory, *The Physics Teacher*, Vol.30, pp.141-158, 1992. 「全体正答率」は調査対象校の加重平均である。
- 6) Teresa Martin-Blas: Enhancing Force Concept Inventory diagnostics to identify dominant misconception in first-year engineering physics, *European Journal of Engineering Education*, Vol.35, No.6, pp.597-606, 2010.
- 7) 石本美智: 物理授業改善のための学習効果測定試験, 高知工科大学紀要, Vol.2, No.1, pp.218-222, 2005.
- 8) R. Dilber: Teaching of Newton's Laws: Force and Motion: The Effectiveness Of Demonstrations, *Essays in Education*(online), Special Edition.