

「慣性力実験器」の製作およびそれを用いて の学習効果の測定

川村 康文*
(1995年11月7日受理)

【 要 約 】

本研究では、高等学校物理の学習単元「慣性力」において、学習者の自然認識を高める教材として「慣性力実験器」を製作し、その学習効果を調べた。本学習単元の学習前における学習者の既有概念を調べたところ、次に示す2つのオータナティブ・フレームワークを構成していることがわかった。

- ・オータナティブ・フレームワーク①：「飛行中の物体は進行方向に作用する力を内包する」
- ・オータナティブ・フレームワーク②：「観測者の立場に関係なく、加速度運動をする車内では慣性力が作用する」

学習者がもつこれらのオータナティブ・フレームワークが、妥当な科学概念に変容されることをねらって、学習者を2群にわけ次の条件で学習効果を比較した。実験群では、著者が製作した「慣性力実験器」を用いて学習者の自然認識を高めるような授業を8時間にわたって行った。一方統制群では、教科書に準拠した授業を8時間にわたって行った。結果、実験群の方が統制群より高い学習効果がみられ、またその効果が学習後時間が経過するにつれ減少することなく、長期間にわたって持続することが確認できた。

1. 問題の所在と研究目的

昨今、物理離れについて、多くの調査報告が行われている^{1) 2) 3) 4)}。従来、理科の授業では、科学の体系にそって十分に計画された学習指導を行えば理科学習が成立すると考えられてきた。しかし、理科教育の分野における最近の研究では、従来の科学の体系的な学習や実験によってでは、オータナティブ・フレームワークが改善されずそのまま根強く保持され、学習阻害を起していることが明らかになってきた^{5) 6) 7)}。したがって、従来の科学の体系にそった授業にかかわって、オータナティブ・フレームワークが学習者自身によって科学概念に構成されるような授業が行われる必要がある。

本研究における学習者は、本授業の前に放物運動の学習を行っているにもかかわらず、放物運動の学習後にも「飛行中の物体は進行方向に作用する力を内包する」というオータナティブ・フレームワークを依然保持してい

た。また学習者は、本授業の前に「観測者の立場に関係なく加速度運動をする車内では慣性力が作用する」というオータナティブ・フレームワークも構成していた。そこで、高等学校物理の力学分野においてオータナティブ・フレームワークが改善されるような学習を支援するツールとして「慣性力実験器」を考案し製作した。実験器の製作にあたり、静止座標系や運動座標系を学習者にイメージしやすいように「枠」を取りつけた。また、実験機器の工夫によって学習者に視覚的にも、聴覚的にも、心的にも働きかけることができるように留意した。

2. 慣性力実験器および周辺機器

製作した「慣性力実験器」の本体は、図1に示すような横幅120cm、奥行30cm、高さ90cmの大きな力学台車である。そのプロトタイプは1986年に考案し、それを用いての実験については報告した⁸⁾。本実験器を製作する以前には、次に示すような2つの実験セットを用いての実験を行っていた。

実験1：「水平投射実験」

*京都教育大学附属高校

スタンドを2台用意し、実験台上にそれぞれを約1 m 50cm離して置く。H Oゲージ幅のカーテンレールを2本用意し、1本は机上65cmのところにスタンドを用いて固定する。もう1本は机上5 cmのところにスタンドを用いて固定する。上のレールにはH Oゲージの車輪を取りつけたプラモデルの飛行機をセットし、その真下のレール上に、空き缶を利用して作製した受け皿をセットする。上のレール上の飛行機は、パチンコ玉をH Oゲージの車輪（前輪と後輪がある2軸タイプ）の間にはさんで運べるようにした。したがって飛行機とパチンコ玉の速度は同じになる。上のレールの途中にはパチンコ玉が落下するように穴が空けてある。パチンコ玉は穴の位置まで飛行機により運ばれ、その後は重力により落下する。飛行機の先端には、モータにつながる糸を結びつけ、モータにより飛行機を等速直線運動をさせるようにした。このとき、同じモータで下のレール上の受け皿も走行させたので、飛行機と受け皿とパチンコ玉は同じ速度で等速直線運動をするようになっている。

この実験では、「飛行機から落下させた物体の落下中の速度の水平成分は、飛行機の速度と同じなので、下の受け皿に入る」ということが確かめられる。

この結果から、静止座標系にいる観測者からは、パチンコ玉は水平投射することが確かめられ、飛行機や受け皿とともに運動する観測者からは、パチンコ玉は自由落下するように観測されることが確かめられた。

この実験装置は、毎実験終了ごとに解体し、再度組立直さなければならず、実験準備に多くの時間を要した。

実験2：「斜方投射実験」と「慣性力実験」

市販の力学台車の上に市販の投射物体発射装置を取りつけ、上方投射ができるようにセットした。投射された物体は、この発射装置に取りつけられた受け皿で受けることができるようになっている。力学台車を摩擦の少ない走路板上で慣性走行させることにより等速直線運動をするものとみなす（これと同じ実験システムは市販されている⁹⁾）。力学台車を静止させておいた場合には、上方投射運動を観測することができる。力学台車を等速直線運動をさせた場合、静止座標系にいる観測者には投射された物体が斜方投射するのが観測され、力学台車とともに運動する観測者には上方投射運動をするのが観測される。

さて、この実験システムを改良して、力学台車を滑車をとおしてつるしたおもりに作用する重力を利用して等加速度直線運動をさせた（この方法は、運動の第2法則の実験においてはよく利用される加速方法である）。この場合投射物体は、受け皿で受けることはできず後方に落下する。この結果を「慣性力が作用したために落下物体を受け皿で受けられなかった」と説明すると、学習者

の中には「観測者の立場に関係なく、加速度運動する場合には慣性力が作用するんだな」と学習し、この考え方を長期間にわたって保持する学習者が多くいるという点を著者は従前から問題であると感じていた。

また、この実験システムをさらに次のように改良し実験を行った。力学台車に柱を立て、この柱の上部につり革を取りつけた実験や力学台車の上に水槽や連通管を設置しその状態を観察させたりした（これと同じ実験システムも市販されている¹⁰⁾）が、著者が抱いた問題点の改善はみられなかった。

これら2つの実験システムの問題点は、学習者にとって座標空間がイメージされにくく、そのため静止座標系や運動座標系についての概念を学習者が構成しにくかったことである。そこで静止座標系や運動座標系を視覚的にイメージしやすいものにすることが必要となった。

以上を受けて、慣性力の学習のためには、座標空間をイメージすることができるように「枠」が付いた台車を作る必要があると考えた。この場合、小さな枠ではその中で行われる実験が観察しにくく、学習者にとってかえって煩雑な実験器になるのではと懸念した。また、実験によって学習者に心的な感動を与えるためには、迫力をともなった実験を行う必要があると考え、大きなスケールの実験器を製作することとした。

実験準備の面からは、上述の実験1を、この「慣性力実験器」の中に組み込むことによって、実験1と実験2を同じ実験器を用いて行うことができるという点で効率的に実験準備ができ、準備に要する時間を短縮できた。

3. 慣性力実験器の詳細

本実験器の骨格は、市販のアンクルをボルト止めして作製した。レールも市販のアンクルを利用し、古い教卓にネジで固定した。車輪は溝付きの市販のものを用いた。したがって、実験器の組立は簡単な作業のみで行え、組立の時間も30分程度である。また、実験器本体は頑丈で1度組み立てればそのまま保管しておくことができる。

本実験器の駆動方法は次に示すとおりである。図1に示したように、滑車を2個用意し、1個を教卓の一端に取りつけ、もう1個を教卓に取りつけた滑車の真上の実験室の天井に取りつける。実験器の走行方向の前の端に軽くて細いワイヤー（丈夫なコマ回しの紐でもよい）を取りつける。このワイヤーは、教卓に取りつけた滑車を經由し、さらに天井に取りつけた滑車を経て、落下用のおもりに取り付けられる。このおもりの落下により実験器を駆動させる。

実験器本体の質量は、実験器内に装置を何も設置しない場合には11.9kgである。実験①（詳しくは後述する）

の設定のときには12.2kgである。実験器が一番重くなったときは14.4kgである。また、水槽（水を入れた状態で質量が1.1kg）1つを実験器内に乗せたときの加速度の値については表1に示す。このとき、実験器の総質量は13.3kgであった。なお、加速度の計測は電磁タイマーを用いてそれぞれ5回行い、その平均値を示した。

また実験器は、アングルで作製したレールの上を溝付きの車輪で走行するので、動摩擦力をある程度小さく

表1 慣性力実験器における加速度 (m/s^2) の値及びそのときの $\tan\theta$ と θ° の値

駆動用おもりの質量 (kg)	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均値	$\tan\theta$	θ°
0.20	0.01	0.01	0.00	-0.01	0.01	0.00	0.000	0.00
0.30	0.05	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.005	0.29
0.40	0.10	0.09	0.11	0.11	0.09	0.10	0.010	0.58
0.50	0.16	0.15	0.15	0.14	0.19	0.16	0.016	0.94
1.00	0.39	0.38	0.37	0.38	0.39	0.38	0.039	2.22
2.00	0.91	0.89	0.92	0.72	0.83	0.85	0.087	4.96

(注) $\tan\theta$ 及び θ° の値は、次のようにして導出した値である。加速度 a で運動している座標系内での水面の傾きや振り子の傾きを θ とした場合、 $a = g \tan\theta$ という関係が成り立つ。したがって、 $\tan\theta$ 及び θ° の値は、 $\tan\theta = a/g$ により求めることができる。

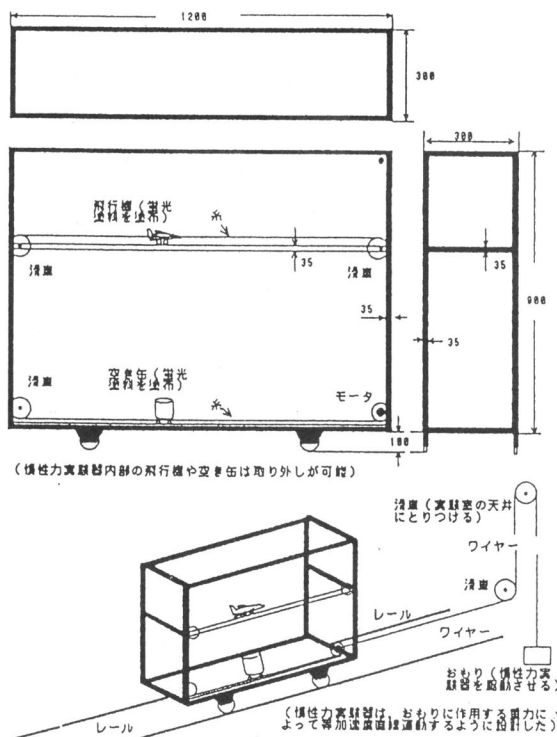


図1. 慣性力実験器の概要

することができた。したがって、表1にみるように駆動用のおもりの質量を0.20kgにすると、ほぼ慣性走行とみなせるような走行が可能となり、等速直線運動をこの方法によってさせることができる。この場合、速度はある程度自由に設定できる。今回の計測では、0.13m/s、0.14m/s、0.14m/s、0.17m/s、0.14m/sであった。

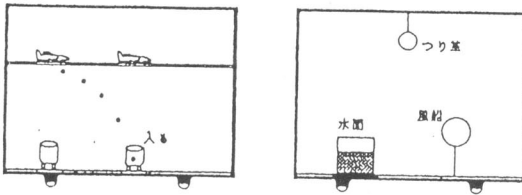
4. 慣性力実験器を用いて行う4つの実験

本実験器を用いて行った4つの実験について説明する。以下の4つの実験では共通に、「等速直線運動をする座標系内部における運動方程式は、静止座標系内部における運動方程式と同じである。しかし、等加速度直線運動をする座標系内部における運動方程式は、慣性力を考慮しなければならないことを理解する」ことが目標である。さらに、後述の実験②③④では「非慣性系では、物体はみかけの重力の向きに落下することを理解する」ことを目標とした。また発展的な目標として、「等価原理」を理解させることができればと期待した。

(1) 実験①「慣性系・非慣性系での、飛行機に運ばれた落下物体の運動を比較する実験」

慣性力実験器内部の上方から約1/3のところと底部に、H Oゲージ幅のレールをカーテンレールを利用して作製し取りつけた。2軸タイプのH Oゲージの車輪を取りつけたプラモデルの飛行機を、上方のレール上に走らせる。底部のレール上には、2軸タイプのH Oゲージの車輪を取りつけた受け皿（空き缶を利用）を走らせる。飛行機は、常に受け皿の真上に位置するようにし、飛行機及び受け皿を1つのモータで引いた。上方のレールは、スタート位置から約70cmの部分は底を雨どい状にして、パチンコ玉が落下せず転がるようにした。したがって、飛行機が最初の70cmを走行する間は、飛行機に取りつけたH Oゲージの前輪軸と後輪軸の間にパチンコ玉がはさまれて運ばれるようになっている。そして、飛行機の走行距離が70cmを超えたところで、上方のレールの底が途切れるので、パチンコ玉は落下し始める。また、飛行機の走行開始および走行停止は、リモートスイッチング・システムとしたので、実験器本体が走行中も、飛行機・受け皿システムの走行をコントロールすることができる。慣性力実験器を教卓に固定した場合、飛行機と受け皿は、慣性力実験器に対しても教卓（静止系）に対しても等速直線運動を行う。慣性力実験器を等速直線運動をさせた場合、慣性力実験器とともに運動する運動座標系は、慣性力実験器を教卓に固定して静止させた場合と同様に慣性系となり、飛行機から落下させた物体はコン！と音を響かせて受け皿の中に入る（写真1）。ところが、慣性力実験器を等加速度直線運動をさせた場合には、慣性力実験器に取りつけられた運動座標系は非慣性

(1) 実験器が等速直線運動をする場合



(2) 実験器が等加速度直線運動をする場合

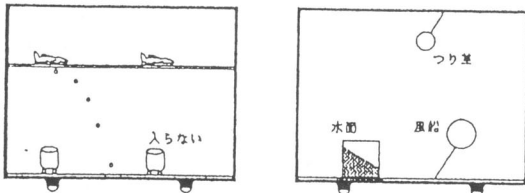


図2 慣性力実験器による実験例の概念図

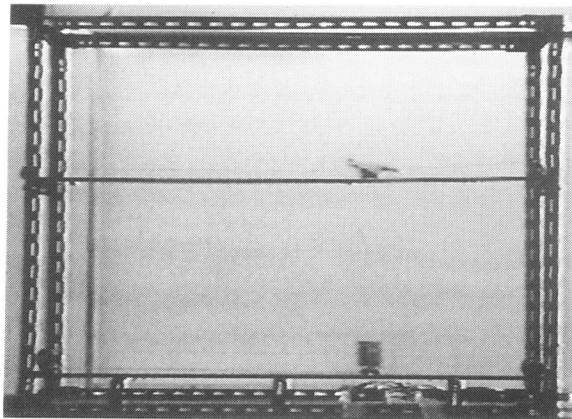


写真1 実験①の様子

系となり、飛行機から落下させた物体は、受け皿より後方に遅れて落下し、受け皿には入らない。

また以下の手順により、この実験をさらに印象的に行った。実験室の電灯を消灯し、蛍光塗料を塗布した飛行機、受け皿、落下物体を、紫外線ランプ¹¹⁾で照らし、暗闇の中にそれらを浮かびあがらせたと、落下物体の軌道をより鮮明に観測することができた。

この実験装置で行う実験は、「枠」を取りつけたことにより静止座標系や運動座標系を視覚的にイメージすることができるので視覚的に効果的であり、コン！という音をとまなう実験であるため聴覚的にも効果的である。さらに、紫外線ランプで照らすことにより実験をより効果的に行うことができる。

(2) 実験②「慣性系・非慣性系での、つり革の傾きを比較する実験」

較する実験」

本実験器内部につり革（市販のおもちゃ）を取りつけた。実験器が等速直線運動をする場合には、つり革は鉛直下向きにまっすぐであるが、等加速度直線運動をする場合には、後方に傾くことが観察できる（写真2）。

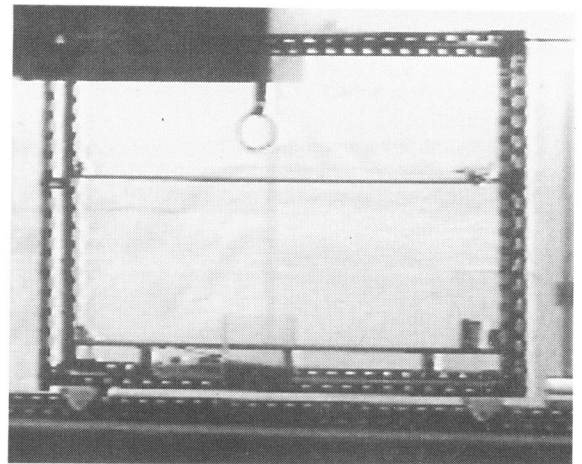


写真2 実験②、③の様子

(3) 実験③「慣性系・非慣性系での、水槽の水面の傾きを比較する実験」

本実験器内部に自作の水槽を置き、等速直線運動をさせた場合の水面の傾きと、等加速度直線運動をさせた場合の水面の傾きを観測させた。水槽は、横幅20cm、奥行6cm、高さ25cmの大きさで、水深が8cmになるようにした。水槽の前面には分度器で、角度目盛りを書き入れた。水面に浮かせた薄い板に垂直に指針を取りつけ、この指針で水面の傾きを読みとれるように設計した。実験器が等速直線運動をする場合には、指針は鉛直下向きにまっすぐであるが、等加速度直線運動をする場合には、指針は後方へ傾くことが観察できる（写真2）。

また、一部の希望者にはこの原理を利用した簡易な加速度計をフロッピーケースの空き箱で作製させ、通学途上の電車の加速度を測定させた。

(4) 実験④「慣性系・非慣性系での、風船の傾きを比較する実験」

本実験器内部に、ヘリウムガスを入れたゴム風船を設置した。非慣性系では、「みかけの重力」という考え方を適用すると、自由落下をする物体はみかけの重力の向きに落下し、煙りのように上昇するものはみかけの重力と逆向きに上昇する。実験④では、このような考え方の後半の部分を学習者に構成させることを目的とした。この実験をより楽しく行うには、次のような手順を踏むと効果的であることが予備実験の結果わかった。実際の授業場面に予備実験で獲得した手法を用いたのでこれを示

す。最初、実験器に風船を取りつけただけの状態で実験を行うと、風圧により、風船は後方に寝るように傾いた。これは、生徒が考えていた傾き方よりも大きすぎるので、生徒の側から「風圧の影響があるのではないか」という指摘がでてきた。そこで、実験器全体をサラップで覆って、風圧の影響が生じないようにして、再実験を行った。等速直線運動の場合には、風船は鉛直上向きにまっすぐであり、等加速度直線運動の場合には前方に傾いた（写真3）。

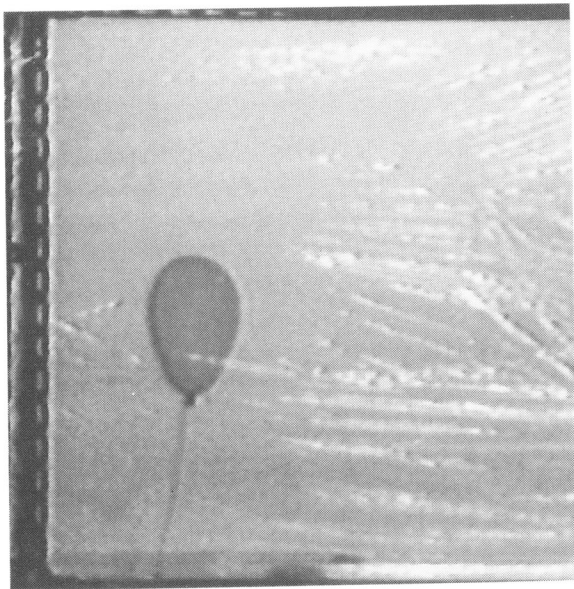


写真3 実験④の様子

以上、4つの実験を計画し実施した。これら4つの実験準備に要する時間は全体で約20分程度である。また製作費用は、本体が約10,000円。実験①～④の周辺機器が約8,000円。合計約18,000円であり、再度授業に利用する場合準備しなければならないものは、ヘリウムガス入り風船、サラップ等のみである。またその後、実験④に関して、ヘリウムガス入りの風船のかわりに「おきあがりこぶし」の利用が可能であることがわかり、ペットボトルを利用して「おきあがりこぶし」を作製した。

5. 方法

学習単位として「慣性力」をとりあげ、学習者がもっているオータナティブ・フレームワークが、「慣性力実験器」を用いた授業によって科学概念へと効果的に変容されるかどうかを調査した。学習単位として「慣性力」をとりあげたのは、従来の科学の体系にそって学習を行う場合、この単元の学習に先立ち、次に示す①～④のよ

うな学習内容の理解および定着が要求されるからである。

- ① 加速度概念が構成されていること
(理由) 加速度概念が構成されていない場合、等加速度直線運動をする座標系のイメージがつかめないから。
- ② 慣性の法則（運動の第1法則）についての理解が十分になされていること。
(理由) 慣性系内部に存在する物体は、等速直線運動（静止も含めて）しているというイメージがつかめないから。
- ③ 「力のつりあい」や「運動方程式」等の基礎的・基本的な物理に関する学習内容の理解がされていること。
(理由) 非慣性系内部の観測者からみる場合、非慣性系内部で生じる現象を、慣性力を考慮して「力のつりあい」を数式で表現できなければならないし、非慣性系外部の慣性系にいる観測者からみれば、非慣性系のもっている加速度を考慮して「運動方程式」がたてられなければならないから。
- ④ 一つの力学現象を、複数の座標系で分析することができるような空間概念が構成されていること。
(理由) ③と同様、例えば、非慣性系内部で生じる現象を、その座標系の内からも外からも分析することができなければならないから。

これらの4点は、それぞれが単独に理解されるのではなく、有機的に連携して理解されている場合に初めて深い理解に至ることになる。今回実施したプレテストの結果では、学習者は「慣性力」について学習する前に、日常生活の中から日常知としていわゆるオータナティブ・フレームワークを構成していて、「加速度運動をすれば、慣性力が作用する」と考え、観測者が加速度運動をする座標系の中にいるのか、そうではないのかの区別があいまいであった。そこで「慣性力実験器」を用いて、学習者に、観測者が加速度運動をする座標系内部にいる場合とその外部の慣性系にいる場合をとを比較し、観察できるようにした。

(1) 授業対象者

京都教育大学附属高校の2年生生物理選択者86名を授業対象者とした。実験群は男子31名、女子12名の合計43名で、統制群も男子31名、女子12名の合計43名であった。

(2) 慣性力実験器を用いての授業（実験群）

実験群の授業の流れ全8時間を箇条書きにして示す。

- ① プレテストを実施した。
- ② 「バスに乗っているとき、バスが急ブレーキをかけたらどうなるか」を問うた。
- ③ 「電車が加速しはじめるとき、つり革はどうなっているか」を問うた。
- ④ 「電車内で観測されるつり革の傾きをどう説明する

のか」を問うた。

- ⑤ みかけの力について確認した。
- ⑥ 図2に示した実験の結果が記入されていない質問紙を用意し、学習者に実験結果を予想させ質問紙に記入させた。その際、学習者同士で自由に討論させ、なぜそう予想したのかを考えさせた。
- ⑦ その後、実験①を行い、予想した結果とあっていたかどうかをチェックさせた。
- ⑧ 実験①のチェックが一段落した段階で実験②を実験①と同様に行った。
- ⑨ その後実験③を行うことで、慣性系・非慣性系・慣性力の学習について何度もフィードバックすることができるよう留意した。
- ⑩ 「実験②でつり革が切れたり、実験④で風船の糸が切れたりした場合、つり輪や風船はどうなるのか」を問うた。
- ⑪ みかけの重力について確認した。
- ⑫ みかけの重力の傾きから、電車やバス等の乗り物の加速度を求めることができることを確認した。
- ⑬ 「エレベータの加速度の求め方」を問うた。
- ⑭ 重力と慣性力は本質的には区別がつかないことを確認した。
- ⑮ ポストテストを実施した。

(3) 統制群での授業

統制群の授業の流れ全8時間を箇条書きにして示す。

- ① プレテストを実施した。
- ② のぞみ号が等速直線運動をしている場合、天井から落下させた物体の落下した位置を、車内にいる観測者からみた場合と、地上にいる観測者からみた場合の両方で求めさせた。
- ③ この場合、両者にとって、運動方程式が同じになることを確認させた。
- ④ 慣性系について確認させた。
- ⑤ のぞみ号が等加速度直線運動をしている場合、天井から落下させた物体の落下した位置を、車内にいる観測者からみた場合と、地上にいる観測者からみた場合の両方で求めさせた。
- ⑥ 車内にいる観測者にとっては、慣性力を考えないと運動方程式がたてられないことを確認させた。
- ⑦ 非慣性系では、慣性力を考慮しなければならないことを確認させた。
- ⑧ 等加速度直線運動をしている電車内のつり革の傾きを求めさせた(演習問題1)。
- ⑨ 等加速度直線運動をしているエレベータの体重計の示す値について考察させた(演習問題2)。
- ⑩ ポストテストを実施した。

(4) 授業効果の測定

授業効果の測定は、オータナティブ・フレームワークが正しい自然認識に寛容しているかどうかを、実験群における学習効果と統制群における学習効果を比較することにより行った。本研究では概念構成がなされたかどうかを測定することが主旨なので、授業前のプレテストと授業後のポストテストの比較のみならず、しばらくの期間においてポストテストによる比較を行った。これにより短期記憶の測定に終わるのではなく、構成された概念が長期にわたって保持されているかどうかを調べた。

調査日時については、実験群に対するプレテストを1994年4月28日に、統制群に対するプレテストを4月30日に行った。プレテストの正解および成績結果は生徒に知らせていない。ポストテストは、授業後にプレテストと同じ内容で行った。実験群では6月13日に、また統制群では同様に6月14日に実施した。ポストテストの正解および成績結果は生徒に知らせていない。また、ポストテストは、プレテストの内容に新たに应用問題を2問加えて行った。科学概念の構成がされているかどうかについての調査であるので夏休みをはさんで、約3か月間おいてからポストテストを実施した。実験群では9月12日に、統制群ではポストテストを9月10日に行った。

(5) 測定テスト問題

測定テスト問題は、次の観点から作成した。問題1では「一定速度で運動してきたボールは、段差がある境界を越えた後、水平投射運動を行うことが理解できているかどうか」を質問した。問題2では、「一定速度で運ばれてきた物体を静かに落下させた場合、物体は水平投射運動を行うことが理解できているかどうか」を質問した。問題3(1)~(4)は、「慣性系・非慣性系のそれぞれにおいて落下運動を観測する場合に、観測者が非慣性系内にいるのか、外にいるのかを認知したうえで、落下の状態について正しく理解しているかどうか」を質問した。詳しくは資料に示した。

6. 結 果

実験群と統制群の群間の差についてはカイ自乗検定を、またそれぞれの群内のテスト間の変化についてはサイン検定を用いて検定を行った。実験群の正答率は、プレテスト43.0%、ポストテスト67.4%、ポストポストテスト71.8%、統制群の正答率はプレテスト38.0%、ポストテスト56.6%、ポストポストテスト62.5%であった。

まず、実験群と統制群の間の比較を行った。プレテストとポストテストは6点満点なので、各群の0~3点を下位集団、4~6点を上位集団とした。ポストポストテストは8点満点なので、各群の0~4点を下位集団、

5～8点を上位集団として、カイ自乗検定を行った。

プレテストにおける両群間の比較では、表2に示すように $\chi^2=0.85$, $p>.30$ となり、両群の間には有意な差があるとはいえなかった。すなわち、実験授業を両群に導入する以前では両群の間に有意な差があったとはいえないことがわかった。

表2. プレテストにおける群間比較

	下位集団	上位集団	合計
実験群	27	16	43
統制群	31	12	43
合計	58	28	86

$df=(2-1)(2-1)=1$, $\chi^2=0.847$, $p>.30$

ポストテストにおける群間比較では、表3に示すように $\chi^2=3.90$, $p<.05$ となり両群間には有意な差が存在した。つまり、実験群において行った教授・学習過程の方が統制群で行った教授・学習過程よりも学習が効果的であったことがわかった。

表3. ポストテストにおける群間比較

	下位集団	上位集団	合計
実験群	13	30	43
統制群	22	21	43
合計	35	51	86

$df=1$ $\chi^2=3.90$ $p<.05$

ポストポストテストにおける群間比較では、表4に示すように、 $\chi^2=4.37$, $p<.05$ となり両群間に有意な差が存在した。すなわち、実験授業の後、長期間の時間をおきかつ応用例題をつけ加えて測定した場合でも、実験群の方が統制群よりも効果的に学習が行われたことがわかった。

表4. ポストポストテストにおける群間比較

	下位集団	上位集団	合計
実験群	9	34	43
統制群	18	25	43
合計	27	59	86

$df=1$ $\chi^2=4.37$ $p<.05$

次にプレテスト、ポストテストおよびポストテストの各テスト間での学習効果について調べてみる。群内の変化の検定には、サイン検定を用いた。検定結果を表5に示す。

全間について概括してみた場合、実験群では、プレテスト・ポストテスト間およびプレテスト・ポストポストテスト間には有意差がみられた。しかし、ポストテスト・ポストポストテスト間には有意差はみられなかった。この傾向は、各問ごとの変化においてもみられた。一方、統制群では、プレテスト・ポストテスト間およびポストテスト・ポストポストテスト間に有意差がみられ、しかもポストテスト・ポストポストテスト間にも有意な差があった。各問ごとの傾向についての、詳しい分析は後述するが、表5にみるように問題によって異なっていた。

表5. 各群の各テスト間での差の分析

	pre-post			pre-postpost			post-postpost			
	+	0	-p	+	0	-p	+	0	-p	
実験群	1	17	24	2**	21	22	0**	7	35	1*
	2	17	25	1**	21	22	0**	6	36	1ns
	3(1)	1	42	0	0	41	2	0	40	3
	3(2)	15	27	1**	17	26	0**	7	33	4ns
	3(3)	10	32	1**	21	20	2**	12	29	2**
統制群	3(4)	11	29	3*	12	28	3*	5	34	4ns
	全間	24	14	5**	32	8	3**	14	22	7ns
	1	6	37	0*	15	28	0**	9	34	0**
	2	6	37	0*	14	29	0**	9	33	1*
統制群	3(1)	1	40	2ns	1	42	0	2	41	0
	3(2)	6	37	0*	10	32	1**	6	34	3ns
	3(3)	30	12	1**	26	17	0**	4	32	7ns
	3(4)	3	39	1ns	9	33	1*	7	35	1*
	全間	29	12	2**	33	9	1**	17	21	5**

* $p<.05$, ** $p<.01$

以上をまとめると、群内比較から両群ともに学習効果があったことがわかり、群間比較から、実験群の方が統制群よりも学習効果が高かったことがわかった。

7. 考 察

まず、学習者がもっているオータナティブ・フレームワークを、プレテストの結果から抽出してみる。

問題1の結果からは、実験群でも統制群でも「ボールはそのまま境界に沿って直落するという考え方」と、「ボールは水平投射軌道を描くとしているがボールに進行方向の力が作用するという考え方」というオータナティブ・フレームワークがみられた。ここで注意しなけ

ればならないのは、後者のように回答した学習者の場合、軌道について答えるときは水平投射軌道としながらも、ボールには進行方向に力が作用しているとしていた。彼らは、ボールに作用する力によってボールが加速されるとは考えていなかった。

問題2の結果から抽出されたオータナティブ・フレームワークは、「物体はそのまま直落するという考え方」と、「物体は水平投射軌道を描くとしているが物体に進行方向の力が作用するという考え方」であった。

問題3(1)では、正答率は実験群でも統制群でも97.7%と高く、ほとんどの学習者が正しい科学概念を獲得していると考えられた。しかし、一部の学習者に「ボールは落下開始点からみて後方へ落下するという考え方」や「逆に前方へ落下するという考え方」というオータナティブ・フレームワークをもっているものがいた。

問題3(2)で学習者にみられたオータナティブ・フレームワークは、「ボールはそのまま落下するという考え方」や「ボールは水平投射軌道を描くとはしているがボールに進行方向の力が作用するという考え方」であった。

問題3(3)で学習者にみられたオータナティブ・フレームワークは、「ボールはそのまま直落するという考え方」や「ボールは落下開始点より後方へ落下するとはしているが、その軌道は放物線や一般の曲線であるという考え方」や逆に「前方へ落下すると考えたり」、「最初は前方へ行くが落下とともにやがては後方へ向きを変えるという考え方」等多様であった。

問題の3(4)で学習者にみられたオータナティブ・フレームワークは、「ボールの軌道を水平投射軌道やそれに近いものを書いてはいるが、水平方向に加速度運動をするという考え方」や「進行方向に作用する力が原因となる加速度とその他に座標系の加速度を合算したものがボールの水平方向の加速度であるという考え方」や「最初は前方へ行くが慣性力が作用するため落下とともにやがては後方へ向きを変えるという考え方」等多様であった。

以上に示したオータナティブ・フレームワークは、実験群においても統制群においてもみられた。また、両群間にはプレテストの成績に関して有意な差はみられなかった。実験群においても、統制群においても、表5に示したように本実験授業の結果学習効果はみられたが、表3、4に示すように実験群の方が、統制群よりも効果的に学習が行われたことがわかる。つまり、授業前に学習者がもっていたオータナティブ・フレームワークは、実験群においてより効果的に、正しい科学概念に置き換わったことがわかった。

では、どうして統制群よりも実験群の方に高い学習効

果がみられたのであろうか。以降、実験群での授業に焦点をしばって考察してみる。

実験①において、飛行機と受け皿がモータによって定速で引かれると、パチンコ玉は飛行機に運ばれるため、飛行機と受け皿とパチンコ玉は同じ速さで等速直線運動をする。慣性力実験器が地面に対して静止している場合、飛行機を電車内の天井、受け皿を電車内の床とみなすことにより、地面に対して等速直線運動をする座標系を想定することができる。車外の観測者には、パチンコ玉が放物線を描いて受け皿の中にコン！という音をとまって入るのが観測され、車内の観測者には、パチンコ玉は天井の投射点から床上の投射点の真下の点に向かって直落するのが観測される。

「慣性系」の学習は、「非慣性系」の学習と常に対比する形で行われる必要がある。慣性力実験器を等速直線運動をさせた場合には、慣性力実験器が静止していたときと同様に、飛行機に運ばれたパチンコ玉は、受け皿の中にコン！と音をたてて入るが、慣性力実験器を等加速度直線運動をさせた場合には、パチンコ玉は受け皿の中には入らず、受け皿より後方に落下する。この実験を通して学習者は、等加速度直線運動をする座標系内から観測した場合にも、等加速度直線運動をする座標系の外（この場合は地上）から観測する場合にも、「パチンコ玉は受け皿に対して遅れる」と観測するが、その説明の仕方が観測する立場によって異なることが学習者自身によって発見される。等加速度直線運動をする座標系内の観測者は、パチンコ玉には座標の加速度の向きと逆向きの慣性力が作用するため、「パチンコ玉は受け皿に対して遅れる」と説明する。これに対して、等加速度直線運動をする座標系の外にいる地上の観測者は、受け皿や飛行機は座標系とともに等加速度直線運動をしたが、パチンコ玉は、落下開始時に与えられた速度を速度の水平成分としてもち続けたため、座標系が加速度運動により先に進んだ分だけ「パチンコ玉は受け皿に対して遅れる」と説明する。これらをふまえて学習者の内部では、既有知識としての「観測者の立場に関係なく加速度運動をする車内では慣性力が作用するという考え方」は変化し、次に示すような考え方が構成される。それは、「①等加速度直線運動をする座標系の外（地上）にいる観測者から観測する場合、座標系がもつ加速度を a 、落下開始からの時間を t とすると、パチンコ玉は $\frac{1}{2}at^2$ だけ遅れる。一方、②等加速度直線運動をする座標系の内にいる観測者から観測すると、①で示された遅れ $\frac{1}{2}at^2$ から考えて、等加速度直線運動をする座標系の内部にある物体は、 $-a$ という加速度をもつことになる。つまり質量 m の物体は、 $-ma$ という力、すなわち慣性力をうける」という考え方である。ここで、学習者内部に構成された概念は

それぞれがネットワーク化され、「速度」、「加速度」、「運動の第1法則（慣性の法則）」、「運動の第2法則」、「慣性系」、「非慣性系」、「慣性力」という概念体系が再体制化され、学習者内部に客観的に妥当な新たな認知構造が構成される。

実験②や実験③は、実験①で学習した内容をフィードバックさせ、より強固なものとすることに役だった。

以上の理由により、実験群での学習が統制群での学習よりもより効果的に行われた。

8. 結論と今後の展望

本研究では、学習単元「慣性力」において次に示す2つのオータナティブ・フレームワークが実験群において統制群よりも効果的に改善された。

- ・オータナティブ・フレームワーク①：「飛行中の物体は進行方向に作用する力を内包する」
- ・オータナティブ・フレームワーク②：「観測者の立場に関係なく、加速度運動をする車内では慣性力が作用する」

しかし今回の授業対象者が、放物運動の学習後にもこのオータナティブ・フレームワーク①を依然保持していたため、「慣性力実験器」を用いた授業が効果的であったといえよう。本来、オータナティブ・フレームワーク①は、学習単元「慣性の法則」において、妥当な科学概念に構成される必要があるため、今後は学習単元「慣性の法則」において、オータナティブ・フレームワーク①が克服されるような教材の製作を行う必要があると考えている。

また、オータナティブ・フレームワーク②に関して、市販実験教材やビデオとの間での学習効果の違いを実験してみる必要がある。著者は、市販の実験教材と同じタイプのものを作製し数年間にわたって利用してきたが、著者が期待する学習効果があったとは必ずしもいえなかったため、本実験器のプロトタイプを1986年に製作して以来現在まで10年にわたって授業に用いながら改良を重ねてきた（本実験器が耐久性に富んでいることの証明といえる）。1993年度の授業において、今回の実験システム（実験①②③④）が完成したので、改めて実験群と統制群にわたっての実験授業を試み、本実験システムの学習効果について調べ、報告した。今後は、市販のビデオとの学習効果の比較を行ってみたいと考えている。

文献及び註

- 1) 広井禎「高校物理履修者の大きな減少」『物理教育』Vol.31, No.4, 1983, pp.240-241
- 2) 唐木宏「高校物理教育の危機」『物理教育』Vol.38, No.3, 1990, pp.163-164
- 3) 中山迅「高等学校理科における物理教育の課題と展望」『理科の教育』1993, 6月号, pp.36-38
- 4) 日本理科教育学会教育課程委員会「理科教育の現状と問題点、今後の改善の方向と方策」『日本理科教育学会研究紀要』Vol.34, No.3, 1994, pp.63-74
- 5) オズボーン・フライバーグ（森本信也ら訳）『子ども達ははかに科学理論を構成するか—理科の学習論—』東洋館出版社, 1988
- 6) 鈴木宏明・鈴木高士・村山功・杉本卓『教科理解の認知心理学』新曜社, 1989
- 7) 武村重和監訳『理科学習の心理学—子どもの見方と考え方をどう変容させるか—』東洋館出版社, 1993
- 8) 川村康文「遠心力再考 物理教育再考—1」京都理化学協会誌, 1987, pp.33-40
- 9) このタイプの実験器は数社から市販されている。（株）中村理科機器から市販されているものは、次の2点が特徴とされている。①打ち上げ装置および自由落下装置は台車が走行途中、自動で作動するようになっている。②台車は慣性走行式なのでスピードは任意に変えられる。
- 10) このタイプの実験器は意外に市販されておらず、著者が調べた限りでは唯一1社（株）島津理科機器のみであった。島津製の実験器も著者の製作した実験器と同様の駆動方法を採用していた。また、円形の水槽を利用して「水面の傾きにより非慣性系における重力の方向」に着目させることで、慣性力は非慣性系で作用する力であることを教えるとしている。最近では、自動車用のアクセサリとしての加速度計が製品化されており、著者も愛用したことがあった。
- 11)（株）マルナス化学工業製のものを3台使用した。波長365nmのもの2台、波長254nmのもの1台の合計3台を用いたが、この実験に紫外線の波長は関係ない。3台用いたのは、明るさを求めたことと、広い範囲で照らすことができるからである。

資料「測定テスト問題」(注。問題4, 5は, ポストポストテストでのみ出題)

この調査は, みなさんの物理分野に関する自然認識について調べるものであって成績等は一切関係ありません。この調査の回答には, みなさんが考えるまますを記述して下さい。

まず, 以下の項目で該当するものの番号を○で囲んで下さい。

1. 学年 1. 1年生 2. 2年生 3. 3年生
 4. 卒業生他
2. 性別 1. 男子 2. 女子
3. 現在学習している理科の科目
 1. 物理 2. 化学 3. 生物 4. 地学 5. 理科 I
4. 既に学習した理科の科目
 1. 物理 2. 化学 3. 生物 4. 地学 5. 理科 I
5. 将来の進学のコース
 1. 理科系
 2. 文科系 3. 芸術・体育系等

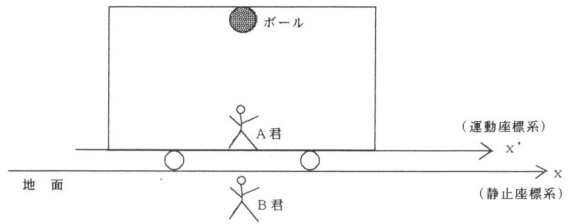
1. 次の図のように, 一定速度 v で運動しているボールがあります。A点を通じた後のボールの運動の軌跡を, 地面に達するまで描いて下さい。このとき, 直線と曲線の区別がつくように描いて下さい。また, このときボールに作用する力を右側のボールの図に矢印を用いて描いて下さい。ただし, 空気抵抗は無視できるものとします。



2. 上空を一定速度 v で飛行している飛行機があります。いま飛行機から地上に救援物資を投下します。救援物資が地面に落下するまでの間の軌跡を描いて下さい。このとき, 直線と曲線の区別がつくように描いて下さい。また, このとき救援物資に作用する力を右側の救援物資に矢印を用いて描いて下さい。ただし, 空気抵抗は無視できるものとします。



3. A君は運動座標系と共に運動する観測者で, B君は静止座標系に固定された観測者です。ただし, 空気抵抗は無視できるものとします。



次の(a), (b)のそれぞれの条件においてボールを静かに落下させました。A君, B君にとってボールはどのように落下するように見えますか, その軌道を直線と曲線の区別がつくように描いて下さい。

- (a) x' 座標が x 座標に対して, 一定速度 v で右向きに運動している場合。
 (b) x' 座標が x 座標に対して, 一定の加速度 a で右向きに速度 v で運動している場合。

(1)(a)のA君の場合



そう考えた理由

(2)(a)のB君の場合



そう考えた理由

(3)(b)のA君の場合



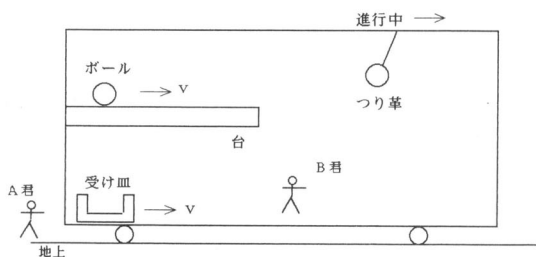
そう考えた理由

(4)(b)のB君の場合



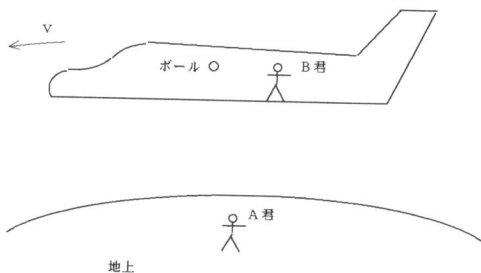
そう考えた理由

4.

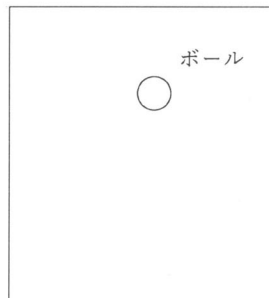


進行中の台車内で、上図のようにボールと受け皿に同じ速度 v を与えました。地上のA君から見る場合、ボールが台車内の床に落下するときのボールの軌道及びそのときの受け皿の位置を上図の中に描いて下さい。ただし最初、ボールは受け皿の真上にあるものとし、ボールに与えた速度 v はかなり大きいものとし、また、空気抵抗及び摩擦は無視できるものとし、

5.



図のようにスペースシャトルが、地球の周りを一定の速度 v で等速円運動をしています。地上にいるA君からみた場合、スペースシャトル内のボールに作用する力を右図のボールに矢印で記入して下さい。



SUMMARY

Development of an "Inertia Experiment Device"

Upper Secondary School Attached to Kyoto University of Education
Yasufumi KAWAMURA

Unpopularity of physics education is a concern nowadays. Traditionally it was thought that students could learn science through masterly teaching which was programed in accord with the system of science. It was also thought that the cause was decrease of experience in science classes, and thus that learning would improve if more experiments were done in science classes.

However, recent studies in the field of science education show that alternative frameworks remain as such after students are taught through traditional teaching and prevent their learning science. I, therefore, develop an "inertia experiment device," which is a large-scale experiment device, 30cm long, 120cm wide and 90cm high. We can easily conduct experiments concerning both the inertial system and the non-inertial system with this device.

The results show that the experimental group learn more than the contoroled group. Also it was ascertained that the former preserve the effect of this trial longer than the latter do.