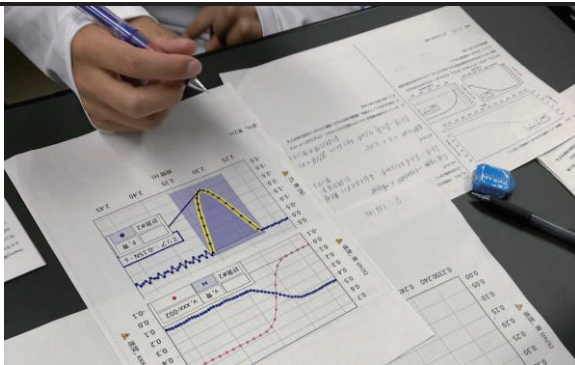


運動と力分野の「探究」過程を重視する実験支援教材の開発



実施担当者 大阪教育大学附属高校池田校舎
教諭 小田 朋宏

1 はじめに

本校は2020年4月に「WWL コンソーシアム構築支援事業」の共同実施校に指定され、日本中のみならず世界各国とつながり、学びの深化を図っている。また、全職員生徒が使用できるWi-fi、オンライン学習環境は整備済みで、2021年度入学生徒からは一人一端末のPCを購入し、個別最適化された学びを提供する。

中教審の教育課程部会理科WGが作成した資料によると、「高等学校段階にて、「**観察・実験**」や「**探究活動**」を充実させることにより、**科学的な探究の過程**を通じて、中学校で身に付けた資質・能力を更に高める、**観察・実験が扱えない場合も、論理的に検討を行うなど探究の過程**を経ることが重要である。」とある。

本研究では、高等学校理科の基礎の分野において、「探究の過程」を重視した実験授業の実践を実現し、主体的・対話的で深い学びに繋がる授業のあり方について検討した。

2 実践事例

2-1 運動量の探究（センサを使用）



運動量の探究実践授業を3時間で行なった。内容としては、ばねの付いた台車Aと台車Bの衝突について、衝突での運動量の総和、エネルギーの総和の関係についてセンサ（位置、速度、力）で調べる。

実験の計画と検証

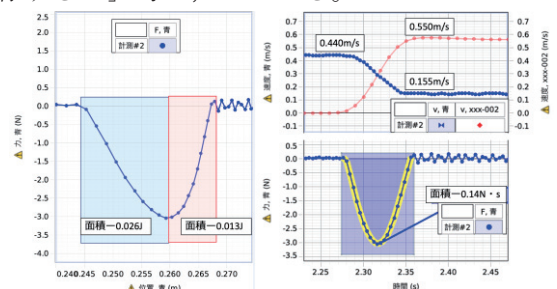
質量が0.50kgのAと0.25kgのBの衝突実験を行う。Aがはじめに動く向きを正、動き出した時刻を $t=0$ とする。Aは0.244m進み衝突をはじめた。

1. グラフより、運動量保存の法則の確認する
2. 1が成り立つ元となる、運動量変化と力積の関係をA,Bそれぞれについて確認する
3. 衝突前後のエネルギーは保存しているか、確認する方法を考え、データを元に分析する
4. 衝突中の各時刻のエネルギーの総和を確認
5. 最接近した際に、外部からの仕事と運動エネルギーの変化の関係を、各台車について確認する
6. 2つの台車が最接近したところで連結されたとすると、どのようなグラフが得られるか。「この場合、運動量は保存するか？運動エネルギーの総和は保存するか」考え、まとめる。

実験データの分析、まとめ

左はAが受ける力 F と位置 x の $F-x$ グラフ、右上は衝突前後の時刻 t とA,Bの速度 v を表す $v-t$ グラフ、右下はAの $F-t$ グラフを示す。

さらに、下図は $v-x$ グラフをそれぞれ示す。



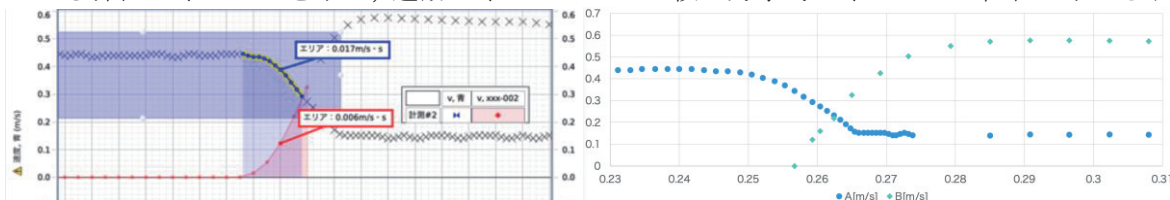
これらのグラフより，課題をそれぞれグループでクリアするようになった。
 グループの討論をまとめると，

1. 運動量について，衝突前 $0.22 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ ，衝突後 $0.21 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ となり，保存されている。
2. 運動量と力積の関係について

A の運動量の変化が $-0.14 \text{ N} \cdot \text{s}$ ，B の運動量の変化は $0.14 \text{ N} \cdot \text{s}$ であり，A についての $F-t$ グラフの面積より確かめられる (B も同じグラフで確認)。

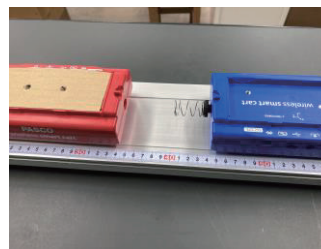
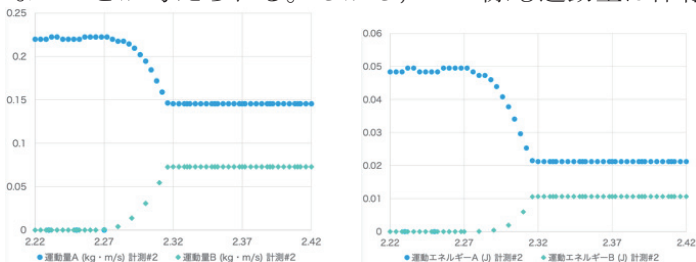
3. は検証方法として，「運動エネルギーの和で比べる」「反発係数が 1 になるか」が考えられる。

4. について，最接近したときの台車の位置の差 ($v-t$ グラフの面積差など) より，ばねに蓄えられている弾性エネルギーを求め，運動エネルギーとの比較で力学的エネルギーの総和が求められる。



5. で，A の運動エネルギーの変化量は -0.272 J であり，A の $F-x$ グラフにて，力の大きさの最大値より左部分が A にばねがした仕事と読み取れる。B もグラフから読み取ることができる。

6. で，最接近した時に連結したとすると，その時点で速度が一定となる。この時の運動量と運動エネルギーのグラフを描くと次のようになる。運動量は連結前後で保存し，運動エネルギーは連結前後で保存されていない。この実験では弾性エネルギーとして取り出せないエネルギーになっているが，実際の衝突でも，弾性エネルギーだけでなく音や熱のエネルギーへと変換が行われ，保存されないことが考えられる。しかし，この際も運動量は保存されている。



2-2 物体にはたらく空気抵抗力の性質とは



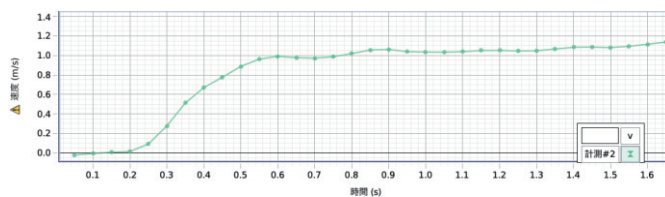
弁当のおかず入れが落下した際の運動はどのようなものだろうか？物体が空気の抵抗を受けながら落下するとき，初めのうちは大きな加速度で落下するが，やがて速度の増加はゆるやかになり，一定の速度（終端速度 v_d ）に近づく。

物体の質量を m ，重力加速度の大きさを g ，空気抵抗による力を f とすると，一定の速度となるときの， $f - mg = 0$ となる。

落下速度 v の空気抵抗 f との間には， v や v^2 に比例するという資料があるので，比例定数を k として， $f = kv$ または $f = kv^2$ のどちらの数式表現が適当か調べる。

速度センサから離れる向きに物体を落下させる。図はその $v-t$ グラフである。

落下速度が大きくなると，空気抵抗の影響が大きくなり，終端速度になることが読み取れる。おかず入れの重ねる枚数を増やした時に空気抵抗 $f(v)$ がどのように決まるのか実験を行う。おかず入れを 2 枚，3 枚と重ねるとき形状がほぼ一致するようにし，また同様の条件で枚数を増やした際の終端速度を測定する。



1枚の落下時の終端速度での空気抵抗力の大きさを f_1 , 2枚の際を f_2 , \dots n 枚の際を f_n とすると,

$$1 \text{ 枚のとき} \dots f_1 - mg = 0$$

$$2 \text{ 枚のとき} \dots f_2 - 2mg = 0$$

$$n \text{ 枚のとき} \dots f_n - nmg = 0$$

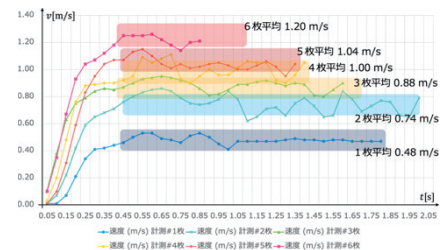
枚数を増やした際の、「枚数(または質量)」と「終端速度の大きさ」の関係を調べ、その関係性についてレポート課題を課した。

実験による検証, 実験データの分析, まとめ

次の図及び表は～6枚までの実験結果である。

枚数(つまり質量)が2倍, 3倍となったとき, 終端速度 v は2倍, 3倍となっていないのに対して, v^2 は2倍, 3倍 \dots となっている。よって, おかず入れの落下時の空気抵抗の力は v^2 に比例する。

枚数	終端速度 v [m/s]	v^2 [(m/s) ²]
1	0.48	0.23
2	0.74	0.55
3	0.88	0.77
4	1.00	1.00
5	1.04	1.08
6	1.20	1.44



3 まとめ

本校1年次の物理基礎履修の生徒に対して, 物理基礎の概念調査を行なった。物理学では「誤概念」や「素朴概念」という学習者が本来持つ概念と物理概念とのギャップを調査するためのテスト問題が, いくつか開発されている。最も普及している一つに, Hestenesらが開発した Force Concept Inventory (FCI, 力学概念指標)がある。

今回の調査では, 東京学芸大グループのものを中心に概念調査を行なった。次の表はその概要である。評価の手法としては, 概念調査の結果を規格化ゲインで処理することにより, 定量的に授業効果を比較できることを示した Hakeの研究に基づくものである。

時期	4月の授業開始前, 3月の考査終了後の2回
対象	本校第1学年 物理基礎選択生徒

授業効果を示すために, 本年度概念調査を対象とした第1学年の年間の授業実施状況を紹介する。本校は2期制である。

前期

速度と変位
 合成速度と相対速度
運動を表すグラフ
 加速度
 等加速度運動
自由落下運動
 鉛直投げ下ろし・鉛直投げ上げ運動
作用・反作用の法則
いろいろな力・弾性力実験
 重力・力のつりあい・慣性の法則について
 運動の法則①

後期

運動の法則②
落下運動と空気抵抗
 最大摩擦力について
 静止摩擦力と動摩擦力
水平投射実験
 水平投射実験の解析
 水平投射の解析
 力の合成と分解
仕事の原理の実験
 仕事と仕事率/保存則と系について
 運動エネルギーと仕事
運動エネルギーと仕事の実験

太字で示したものが, 実験を主体とした授業である。ここで, 規格化ゲインとして, 1998年 Hakeらにより提案された手法を用いた。表では最も右の列がそれを示している。この表は3で紹介した「運動に関する基礎的概念調査」の正答率を表している。授業前の正答率を S_{pre} と授業後の正答率を S_{post} とすると, 規格化ゲイン g は以下で表される。

$$g = \frac{S_{post} - S_{pre}}{1 - S_{pre}}$$

ここで、規格化ゲインが 0.25 を上回っている部分を参照する。Hake によれば、伝統的講義形式における g の平均値として 0.23 とされている。その平均を上回る値として 0.25 を一つのラインとした。

pre		post					
N		N					
118	77	0.653	93	73	0.785	0.3811 ↑	1 質量と落下について
118	74	0.627	93	67	0.72	0.2502 ↑	2 落下の軌道について
118	14	0.119	93	36	0.387	0.3046 ↑	3 投げ上げられた物体の運動について
118	76	0.644	93	57	0.613	-0.088	4 運動のグラフについて
118	67	0.568	93	70	0.753	0.4278 ↑	5 物体間にはたらく力について
118	22	0.186	93	27	0.29	0.1277	6 物体にはたらく運動と力について
118	20	0.169	93	20	0.215	0.0549	7 位置と速度について
118	51	0.432	93	47	0.505	0.1289	8 位置と加速度について
118	22	0.186	93	15	0.161	-0.031	9 慣性について
118	35	0.297	93	17	0.183	-0.162	10 摩擦力について
118	43	0.364	93	38	0.409	0.0695	11 反作用について

さて、ここで対象となる番号 1.2.3.5 を見てみると、授業内にて生徒自身が実験を行っていたものであった。規格化ゲインから考察すると、これらは効果のある授業だったと言える。

Pre は年度当初に行なった調査ではあるが、その調査での正答率が高かった 4 については、正答率の伸びも小さくなった。5 については、実験を通した上で「討論」という形で授業を進めていく方法も有効であったと結論づけられる。

校内で同様に選択式のアンケート及び調査を行なった際、いわゆる「実験などの介入」によりその効果の有無について検証できた。ただし、これらは量的に算出する値であり、質的には検証できない。同時に質的な研究方法も模索していく必要がある。

謝 辞

公益財団法人中谷医工計測技術振興財団の助成により、運動と力分野の「探究」過程を重視する実験支援教材の開発を行うことができた。また、同時にその評価についても検証する方法を模索できた。この手法についても、高大連携事業で学校外へ発信できた。教科の教育実践だけでなく、大きな枠組みとして教育実践研究を今後とも行っていきたい。

また、大阪教育大学附属地区研究発表大会、全附連高等学校部研究大会、全国理科教育大会、理科教育関係学会等で発表を行う。大阪府高等学校理化教育研究会や大阪府高等学校生物研究会において講習会を行う。また、理化教育研究会にて共有することで多くのデータから読み取れる実践研究につなげたい。

参考文献

Richard R. Hake“Interactiv-engagement versus traditional method:A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses”, Am. J. Phys. 66(1998)64.

E.F. レディッシュ(2012)、日本物理教育学会監訳、科学をどう教えるか、丸善出版