

PSSC物理における実験の意義と、実験が原理理

解の思考過程に及ぼす効果について

加 藤 十 八

この研究は、昭和40年度文部省科学研究費補助金（奨励研究）を受けたもので、その第1年度における中間発表である。

1. はじめに

1960年以後PSSC物理に関心を持っていた。1962年以來種々の文献を参照して、PSSC物理の成立過程とその意義、並びに西ヨーロッパ、ソ連（特にポリテフニズム）等の物理教育の動向を調査した。特にPSSC物理が、物理教育だけでなく、教育革新の動向に大きな影響をもつものであることを確認した。

（1963年名大附高紀要第9集に記載）

1963年、64年度両2年間に亘って、物理Aの教材として、実際にPSSC物理を教授指導し、PSSC物理の教材内容の構造を分析し、また生徒の受けとめ方についても調査分析した。（1964年名大附高紀要第10集に記載）

1965年度においては、物理A選択者に対して、半年間日本の教科書を用い指導し、10月からPSSC物理の教科書を用いた。この目的は特に実験指導の目的・方法等の差異、効果を吟味しようとした。

2. 研究目的

従来の日本における高等学校の物理実験は、とかく精度を重んじ、厳密な方法・処理・計算に頼りすぎる傾向にあったように思われる。しかも、基礎的・技術的・形式的なものが多く、ややもすると、興味を欠きまた、原理の理解とは無関係なものであった。

PSSC物理においては、原子物理学を支配する基礎的な原理を理解させるための目的に主眼を置いて、新しいアイデアを十分含んで、なるべく視覚的・直観的に理解させるようにしている。この方法が結果において、科学的思考を深め、発見的な態度を養い、原理を理解させるのに効果が挙げられるかどうか、生徒の思考過程の段階を分析・調査していきたい。

併せて、従来の実験指導との間の長所・短所についても考察したい。

3. PSSC物理における実験の特徴

おもな特徴を挙げれば次のようである。

(1) 装置が手軽で、安価である。

簡単な装置であるが、どれも素晴らしいアイデアに富んだもので基礎的な器具は、いろいろな実験に使われるように関連性をもたせている。

(2) 原理を理解させるための直接的な方法がとられる。

このことは大へん重要なことである。直接的、原理的な方法をとるがために、結果として実験の精度が落ちても、原理・現象がよく理解されることにその目標をおいているのではないだろうか。

たとえば、PSSCにおいては重力の加速度 g を測定するのに、記録タイマーを用いて g を測定するが、しかし決してよい値は得られない。しかし落下の法則、 g の意味はよく理解できる。ふつう g の測定は、単振子を用いることに定まっている。ボルダの振子・望遠鏡・ストップウォッチとかなり高価な器具を用い、しかも実験過程は単純で、高度の注意力を要し、過大な時間と労力を必要とする。しかもあとの計算・誤差の算出となるとまた非常な労力を要する。

結果は確かによい値が得られ、生徒も、この点ではかなりの満足感と、充実感を得るようである（生徒の実験後の反省より）この g の測定に代表される形が日本における物理実験の典型であるように思われる。

しかし、これだけの器具と、労力を費し、 g の意味を果してよく理解するに役立つかどうかは甚だ疑わしい。PSSCの記録タイマーによる落下の実験の方が、直接的・原理的に g を測定することができるので、 g の理解には必ず役立っているものと思われる。

この g の測定における2つの立場が、高校の実験の在り方を考える最も大切なことではないだろうか。

PSSCにおける水波による光の波動を理解させる実験などは最も直接的・原理的な実験である。

(4) 高度な実験には、紙上実験が十分使われる。

高価な器具、大きな設備、高い精度を必要とする

実験は、教科書でその装置、実験方法、実験値を詳細に説明している。原理の理解を容易ならしめる大きな効果があるものと思われる。

たとえば、原子物理関係におけるカイガー、マースデンの散乱の実験、光電効果の実験、電子の波動性、フランクとヘルツの実験（原子のエネルギー準位）などがある。

(5) 映画を用いて、実験と法則の関連を深める。

PSSC物理を最も効果あらしめるには、教科書実験器具・映画・各種テストを総合的に使用することが要請されている。

4. g の測定における事例

9月に落体の運動を学習するに当たって、PSSCにおける記録タイマーを用いて、 g の測定を行った。

実験方法の概略は次の通りである。

(1) タイマーの周期の測定

タイマーを振動させ、手動ストロボをゆっくり回転し始め、槌が一端で静止してみえるようになるまで回転を速やめる。静止してみえたときの10回転に要する時間を t とすれば

$$T = \frac{1}{12} \times \frac{t}{10} \text{ (秒)}$$

で測定される。(ストロボには12個の切り口がある) t は5回測定させ、その平均を用いた。

(2) テープの記録

紙テープに重りをつけ、タイマーの間隙を通し*

* 重りを落下する。重りを変えて、テープを数種得る。

(3) g の算出

I図のようなテープを得、これを図のように、

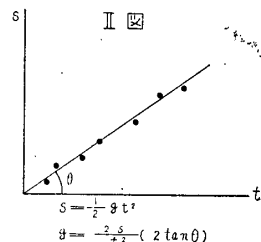
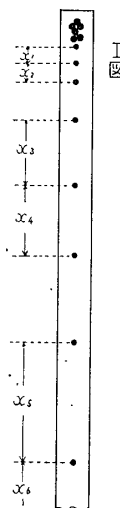
$x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_i, \dots$ の長さを測定すれば、

i 番目の速度は、 $V_i = \frac{x_i}{T}$ で算出し、重力の加

速度 $g = \frac{V_i - V_{i-1}}{T}$ で算出する。

次のような表で g の値を求めた。

	x_i (cm)	$v = \frac{x_i}{T}$ (%ac)	$g = \frac{v_i - v_{i-1}}{T}$ (%ac)
x_1			
x_2			
x_3			
x_4			
x_5			
x_6			
x_7			
x_8			



(4) 考察

この結果、生徒の得た値は次の表のようである。約100人の生徒が1回～数回行なった実験値の集計177回の測定値を示す。

g (cm/sec ²)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600
測定回数	3	3	2	9	26	28	29	22	14	19	10	4	4	2	1	1

$$M = 804.3 \text{ cm/sec}^2$$

$$S. D. = 267 \text{ cm/sec}^2$$

100~1700cm/sec² の大きさに分散し(標準偏差267cm/sec²) 平均は804.3cm/sec²であるから、980cm/sec²とはほど遠い。テープがタイマーの間隙をする抜けるため、まさつがあり、 g の値が小さくなるのは理解できるが分散の大きい点では、 g の測定としての精度は全く信頼できない。

したがって、この実験に関しては、原理を理解させるための実験としての価値だけを認める。

(5) グラフより g を求める方法

(3)の算出のほかに、II図のように落下距離 s と、時間 t との関係性を $s - t^2$ のグラフにし、その直線の勾配より、 g を算出させてみた。生徒のレポートから、正しくグラフが画け、しかも、正しい方法で g が算出されていた生徒は、非常に少数で(14人)であった。こ

の結果を次の表に示す。

	A	B	C	D
人数 (99人)	14	17	68	10

注 A: 正しく結果を算出したもの

B: グラフは正しく画かれたが、それから g の算出を誤ったもの

C: グラフだけを画いて、その後わからないとしたもの

D: グラフも書けなかったもの

この表からみられるように、完全に g が算出できたものはごく少数であるのはどういふわけか。

PSSC物理における実験の意義と、実験が原理理解の思考過程に及ぼす効果について

(3)のように速度を算出し、その速度の変化量が加速度であるというように、直接的に加速度を算出する場合には全員の生徒が間違いなくできたのに、 $s-t^2$ のグラフを作り、これから g を算出させると、多数が誤りを生ずる。これは、数学的に、 $s-t^2$ のグラフの概念がしっかりしておらず、(高校2年であるから十分解っているはずであるが)また、たとへグラフが、画けても、このグラフと、 g の関係が、概念的・模型的に判断できないのではないだろうか。

勿論、グラフによる算出の方法を丁寧に説明し、方法の細部に亘って指導すれば、できないはずはないわけであるが、この時は、 $s-t^2$ のグラフを画けば、直線となるはずであるから、この直線の勾配より、 $g = \frac{2S}{t^2}$ または $2\tan\theta$ で求められるという説明にとどめて行なわしたものである。

(3)の方法の V_i は実は、 x_i の間の平均の速度であるので(生徒にはこのことを説明しておいた)

原理的には、グラフを用いた方が、よい g の値が得るものと予想される。したがって、僅かの精度を上げるために、グラフを用いて、 g を算出する方法がよいのかどうかは甚だ疑問である。加速度概念は、高校物理において、最大の学習困難点の1つ(名大附属紀要8集)であるから、単に、グラフで求めさせたり、振子だけで求めさせておくのでは、生徒に真に理解させることにはならないであろう。

このように、グラフによる結果がよくないことを反省して、実験2週間後に、次のような問を提出してみた。

- 問1. なぜ $s-t^2$ のグラフを作るのか。
 問2. $s-t^2$ のグラフから g を求める方法を説明せよ。
 問3. g を求めよ。(テープに点を示し、求める g は 1000cm/sec^2 が正解として算出し得るようにしておいた。)

全部できたもの3点、2つのもの2点、1つのものは1点、全然できなかったもの0点とし、前の実験レポートのA、B、C、Dとの相関表を作ってみると

レポート \ テスト	A	B	C	D	
3	5	3	3	0	17
2	3	5	11	1	20
1	2	7	6	1	16
0	4	2	32	8	46
	14	17	58	10	99

$r=0.38$

となり、相関係数0.38で、やや相関ありと判断できる。レポートでAを得ているものが、テストの得点で、0、1しかできなかったのはおかしい。友人に聞いて書いたか写したかどちらかであろう。とにかく、このあたりを除けばかなり高い相関を示しそうである。このことから、実験と実験の後始末のよいもの(レポートの評価のよいもの)は、よく実験及びその理解ができてきているということが当然ながら判っきりいえる。

原理・現象の理解に困難を伴う個所は、実験をし、しかもその実験は、原理・理解を直接、確かめることができ、また思考過程そのままの順序方法が行なわれることが望ましい。

(6) 単振子を用いての g の測定

この方法は、従来必ず行われていた方法で、 g そのものの定義から考えれば、間接的であって、むしろ、 g を正確に測定するための方法である。

この方法は、周期の測定と、糸の長さの測定が問題である。ボルダの振子と、望遠鏡・物指・ノギス・水準器を用いて測定した。

○周期の測定

下の表のように各200回ごとの時刻を記入し、10回の平均をとった。

(1) 周期の測定

I	T_0					T_{200}					$T' = \frac{(T'_{200} - T'_0)/200}$					
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
0						200										
10						210										
20						220										
30						230										
40						240										
50						250										
60						260										
70						270										
80						280										
90						290										

○ワイヤーの長さ l の測定

- 実験の始め ——— cm
 実験のあと ——— cm
 球の半径 ——— cm

$g = \frac{4\pi^2(l+r)}{T^2}$ より求める。

この実験における誤差を概算してみると、

$l \approx 1\text{m}$ とすれば、 $T \approx 2$ 秒、 $g \approx 980\text{cm/sec}^2$ であるから、

$\left| \frac{\Delta g}{g} \right| \leq \left| \frac{\Delta(l+r)}{l+r} \right| + \left| \frac{2\Delta T'}{T'} \right|$ より

$|\Delta(l+r)| \leq 0.1\text{cm}$ 、 $|\Delta T'| \leq 0.01$ 秒とすれば十分だから

$\frac{|\Delta g|}{980} \leq \frac{0.1}{100} + \frac{2 \times 0.01}{2}$

$$|\Delta g| \leq 9.8 \text{ cm/sec}^2$$

この実験においては、特別な間違いでも起こさなければ、 $990 \sim 970 \text{ cm/sec}^2$ くらいの実験は容易に得ることができそうである。

生徒の実験値（9 個班）を示すと次の通りである。

1046.3 984.5 982.7 982.4 980.7 980.3
980.2 979.0 979.4

この値からもみられる通り、殆どが誤差範囲内に入っている実験値を得ることができる。前のタイマーを用いる実験とは比較にならない。

5. 運動量保存則を中心とした実験の一つの試み

PSSC物理における、力学台車を用いて、運動量の保存を確認をする実験も、従来にない素晴らしいアイデアで、しかも実験方法は、原理を確認するのに直接的に扱っているところなどは非常に価値があるものと思われる。

運動量自体の概念をどうとらえるか。 mv とはどんなはたらきをもつものか。甚だ抽象的で、説明によい方法がない。あるいは、運動量そのものの概念化自体が無理ではないか。また、概念化する必要もないのかも知れない。このことは、過去十数年の間、高校物理を教えていて痛切に感ずるところであった。したがって運動量を概念化させるという行き方より、運動量を考えなければならない必然性というものをもと、生徒に認識させることが大切であると思われる。

運動量を mv と定義して、運動量保存則を誘導するのは、この意味から、必然性はない。衝突現象から運動量保存則を誘導し、ここから、 mv を1つの量として考えると便利であり、しかも考え方が単純化できる。だから運動量なる量を定義するという行き方が必要ではないだろうか。この立場ならば、何も運動量を概念化する必要はないわけである。

併せて、運動量の保存則は、極めて、基礎的で一般的であることをまた、力学的エネルギーの保存則が、極めて、特殊であることを認識させることが必要である。

このような考えから直接的な実験方法によるほか運動量を考えなければならない現象をいくつかとり扱って、運動量なる量に慣れさせることが大切であると信ずる。

この立場に立って、運動量保存則を中心として、力学的エネルギーの保存、反発係数、落体の運動などを総合的に考えることができる実験例を次に示す。

2 球の衝突による運動量の保存

1. 目 的

2 球を衝突させ、運動量の保存を確かめ、併せて、2 球間の反発係数、力学的エネルギー

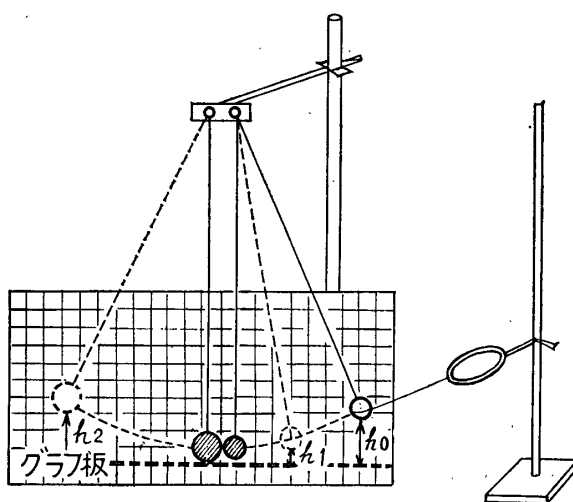
の損失を求める。

2. 使用器具

鋼球 2 (40mm, 30mm) 鋼線 2 mm スタンド 2 グラフ板 木綿糸

3. 実験方法

- (1) 大球・小球の M, m を上皿天秤で測定する。
- (2) 鋼球を、約 1 m の鋼線にとりつける。
- (3) 支持ターミナルをスタンドにとりつけ、鋼球をつるす。このとき、2 球の重心が同一水平面上になるよう調節する。



- (4) グラフ板を鋼球のうしろに、縦線が鉛直になるように設置する。(鋼線とグラフの縦線を平行にする)
- (5) 2 球の最下点をグラフ板上に印をする。(視差のないように球と目を同一水平面にする。以下同じ)
- (6) 小球を適当な高さ h_0 まで上げ、糸で輪をつくり、スタンドにとりつける。このとき、2 本の鋼線と糸が同一鉛直面内にあるようスタンドを調節する。
- (7) 小球の下端 (h_0 の点) をグラフ板上に印をする。
- (8) マッチの炎で焼き切り、2 球を直衝突させる。(斜衝突にならないよう注意)
- (9) 2 球の衝突の後、上がった最高の高さ h_1, h_2 の点を印する。
- (10) h_0 を一定にして、上と同じように数回実験を行い、 h_1, h_2 の平均値を求める。

4. 実験値及び結果

大球の質量 $M =$	g
小球の質量 $m =$	g

回	1	2	3	4	5	平均
h_1 cm						
h_2 cm						

$h_0 =$ cm
衝突直前の小球の速度 $V_0 = \sqrt{2gh_0} =$ cm/sec

衝突直後の小球の速度 $V_1 = \sqrt{2gh_1} =$ cm/sec

衝突直後の大球の速度 $V_2 = \sqrt{2gh_2} =$ cm/sec
〔 $g = 980\text{m/sec}^2$ 〕

衝突前の運動量 $mV_0 =$ gcm/sec

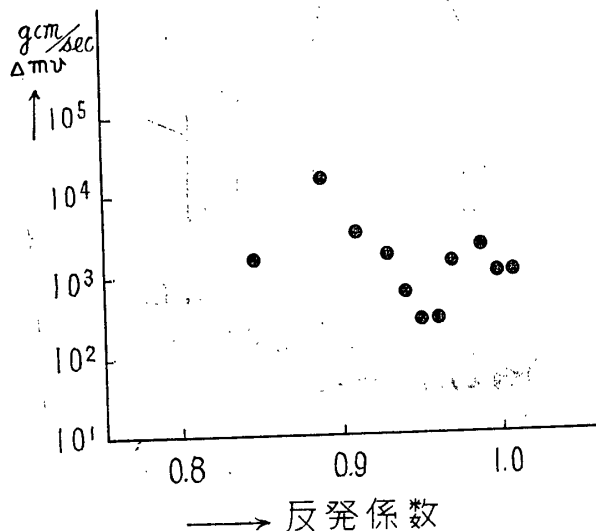
衝突後の運動量 $MV_2 - mV_1 =$ gcm/sec

2球間の反発係数 $e = \frac{V_1 + V_2}{V_0} =$

力学的エネルギーの損失

$\frac{1}{2} mV_0^2 - \left(\frac{1}{2} mV_1^2 + \frac{1}{2} MV_2^2 \right) =$ erg

5. 考察・反省



この実験結果について11組の実験値を示したのが図である。縦軸には衝突の前後における運動量の差の絶対値 $|\Delta mv|$ 、横軸は反発係数を表わす。衝突前の運動量はともに $10000 \sim 15000 \text{gcm/sec}$ を示しているので、 $|\Delta mv|$ の最も少ないものでも誤差 $1/100$ 程度であ

る。多いものは100%近い誤差を示している。

大体、反発係数0.95~0.96当りのものが最もよい値であると判断される。(反発係数の少ないものは斜衝突をさせていると思われる) この結果、この実験も精度の面では必ずしもよくないが、力学を総合的に考えさず実験にはかなりの効果があるものと信ず。

今後もこの種の実験を大いに開発する必要があるものと思われる。

この実験におけるある生徒の感想を次に掲げる。「前回の g の測定 (注: 振子による方法) よりも計算などが今回の実験の方がやりやすい。ということは前回の実験よりその内容をよく理解しているからだろ

う。反発係数はたしか $\frac{V_1 - V_2}{V_0 - 0}$ と思ったのに、よく考えてみると $\frac{V_2 - (-V_1)}{V_0 - 0}$ であることがわかった。…

……さて大切な所が (運動量の保存) $4 \times 10^2 \text{gcm/sec}$ (注: 最もよい値を出しているが) なる差が出たのはどうしてだろうか。はっきりわからないが小球の質量が天びんのおもりの関係で正確にはかれない所から来た誤差であると思われる。以上のように、実験後の反省を原理の理解の面と関連させて反省しているところは注目される。(誤差についての反省は問題はあるが)

6. おわりに

大きな研究題目を掲げて、はじめてみたものなかなかまとまりがつかなかった。従来の高校物理における実験の盲点が、力学であることに間違いはない。この力学を手はじめに考えてみたが、ごく一部しか考察できなかった。PSSCにおける一連の水波の実験も行なってみたが、数値的にまとめにくいので、今回は報告を省略する。

生徒の原理理解の過程と、実験との関連がまだ完全には究明できないので、この点を更に深く研究していきたいと思っている。

最後に、御指導、御助言をいただいた名大教授広岡亮藏、名大助教授山形安二愛知県科学センター村瀬重夫各先生に感謝致します。