

# 運動の第二法則検証実験の工夫と検討

馬目 秀夫

日本物理教育学会誌 第30巻第2号（1982）に掲載

運動の第二法則の実験としては、ゴムひもで台車を引く方法、振り子を使う方法、台車定加速装置を使う方法などいろいろな方法があるが、今回、比例関係だけでなく、定量的な関係まで証明できる簡単で安定した方法を工夫してみた。これは力学台車にばねばかりを取付け、ばねばかりを落下おもりで引っ張る方法で、ばねばかりの裏にフェライト磁石を付け、台車に取り付けやすくしたこと、ばねばかりに指標を取り付けることによって、運動中のばねばかりの指針の位置を静止状態で読めるようにしたこと等の工夫を加えた。これによって、運動中、台車に加えられる力を容易に読み取ることができ  $F = m a$  の関係を直接検証できるようになった。また、安定した結果を得るための台車の質量と落下おもりの質量の関係についても検討してみた。

## 1 はじめに

運動の第二法則の実験としては、台車をゴムひもで引く方法、長い振り子をゴムひもで引く方法、台車定加速装置を使う方法などいろいろな方法があるが、いずれも多くデータの処理して、運動の法則を引き出す形（帰納的な形）で行われている。しかし、データの処理、分析に時間がかかり、生徒の負担も多く、また、これらの実験では比例関係しか求めることができず、これは実験しなくてもある程度予想されることでもあるので、生徒達にとっては、あまり興味を持てる実験とはいえないようである。

そこで、今回、比例関係だけでなく、定量的な関係まで証明できる簡単で安定した方法を工夫し、運動方程式から運動を予測し、その通り行くかどうかを実験で確かめるという方法を試みた。これは力学台車にばねばかりを取付け、ばねばかりをおもり（落下おもり）で引っ張る方法で、一部の理科 I の教科書にも見られる方法であるが、さらに、ばねばかりに指標を付け、運動中のばねばかりの指針の位置と指標の位置を合わせることで、静止状態で、その位置を読み取れるようにした。また、ばねばかりの裏面にフェライト磁石を取り付けることで、台車にばねばかりを取付けやすくした。これによって直接、台車を引く力を測定できることになり、直接、運動方程式を検証することができるようになった。さらに、台車の質量、張力を予め決めておいて、加速度を予想し、

実験で確かめるという形でも実験することができるようになり、運動方程式の意味をより良く生徒達に理解させることができた。

## 2 教材としての利点

教材としての利点をまとめると、次の通りである。

- 1) 安定した一定の力を加え続けることができる。
- 2) 再現性が容易である。
- 3) 台車を引く力を直接読むことができる。
- 4) 指標をばねばかりの指針に合わせることで、運動中の張力を静止状態で読むことができる。
- 5)  $F = m a$  から求めた加速度（理論値）と  $v - t$  グラフから求めた加速度（実験値）が一致することを知り、 $F = m a$  で、運動を予測できることを指導できる。
- 6) 運動中と静止中では糸の張力が変化することを知り後の学習の動機付けとすることができる。
- 7) 運動中の糸の張力は、台車の質量によって異なることを知り、後の学習の動機付けとすることができる。

## 3 装 置

### 1) ばねばかりと指標

水平にして使えるばねばかりの裏にフェライト磁石を接着剤で貼り、力学台車に取り付けやすくする（ヤガミ理科・マグネボード力学実験器のばねばかりを利用してよい）。台車に取り付ける際には、写真1のように、台車の横腹に、車のナット部分をストッパーとして取り付けたらよい。

また、指標は、図1のようにセルロイド板等を切り、裏にゴム磁石をはって作る。

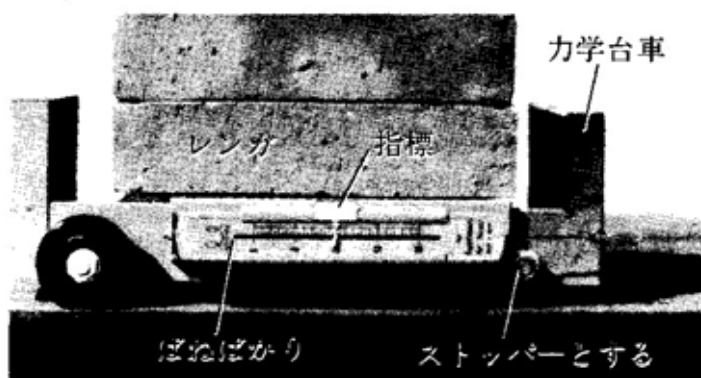


写真 1

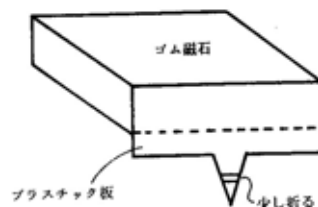


図 1

#### 4 実験方法の概略

1) 台車の質量、落下おもりの質量を決め、図2のようにセットする。

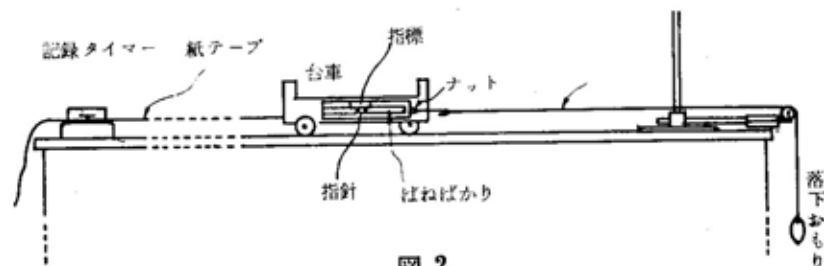


図 2

- 2) 台車をタイマーの方へ引き寄せ、落下おもりの振動を止めてから、静かにはなす。
- 3) 台車が動いている間にばねばかりの指針のおよその位置に見当を付ける。指標をその位置に置き、再びはじめの位置から台車を動かし、指標と指針が一致しているかどうかを見る。一致していなかったら、指標の位置を直し、一致するまで繰り返す、一致したときの目盛を記録する。
- 4) 指標と指針が一致したら、記録タイマーを動かして記録を取る。
- 5) テープに記録された打点を分析する。最初の不明瞭な打点を除き、5打点ごとに印を付け、その間隔を測る。
- 6) これをもとに、速度-時間グラフを書き、一定な力を加え続けていったときの運動の様子を調べ、傾きから加速度を求める（実験値）。
- 7) 台車の質量、糸の張力をもとに  $F = ma$  より加速度を計算し（理論値）、これと実験値を比較する。
- 8)  $F = ma$  が検証できたら、台車の質量、糸の張力を予め決め、加速度を予想し、実験で確かめる。

#### 5 測定値例

1) 一定な力を加え続けるとどのような運動をするか

表 1

時 間	速 度
tick	cm/tick
0.5	1.00
1.5	1.75
2.5	2.40
3.5	3.20
4.5	3.95
5.5	4.75
6.5	5.50
7.5	6.30
8.5	7.10
9.5	7.80
10.5	8.65
11.5	9.40
12.5	10.20

台車の質量  
1.2 kg  
落下おもりの質量  
107 g  
糸の張力  
96 g 重

(ただし 1 tick =  $\frac{1}{10}$  S)

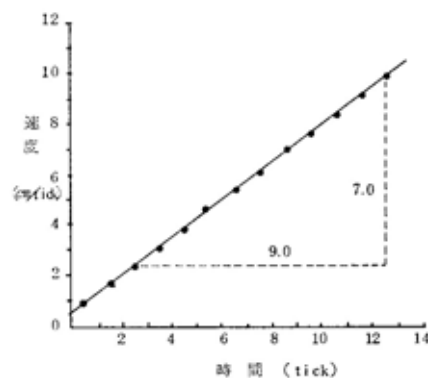


図 3

## 結果——加速度

グラフより

$$a = 7.0/9.0 = 0.78 \text{ [cm/tick}^2] = 78 \text{ [cm/s}^2]$$

$F=ma$  より

$$a = F/m = 96 \times 980/1200 = 78 \text{ [cm/s}^2]$$

## 2) 台車の質量、張力を変えた場合

表 2

落下おもりの質量 [g]		50	100	150	200
糸の張力	[g重]	49	97	145	191
	[N]	0.48	0.95	1.37	1.87
力学台車の質量 [kg]		4.5	4.5	4.5	4.5
加速度[cm/s <sup>2</sup> ]	グラフから	10	19	30	43
	$a=F/m$	11	21	30	42

表 3

落下おもりの質量 [g]		100	101	102	107
糸の張力	[g重]	96	96	96	96
	[N]	0.94	0.94	0.94	0.94
力学台車の質量 [kg]		4.5	3.4	2.3	1.2
加速度[cm/s <sup>2</sup> ]	グラフから	21	28	40	78
	$a=F/m$	21	28	41	78

## 6 実験についての検討

### 1) ばねばかりの指針の安定

台車の質量と落下おもりの質量が不相当だと、ばねばかりの指針が振動して、安定した結果が得られない。

ばねばかりの指針が安定するためには、静止状態と運動状態での張力の差を小さくする必要がある。そのためには、台車の質量M [g] と落下おもりの質

量 $m$  [g] を適当に選ばなければならない。その張力の差を $\Delta T$  [g 重] とすると、次のように表される。

$$\Delta T = \frac{m^2}{M+m} \text{ [g 重]} \left( \begin{array}{l} \text{MSK 単位系では} \\ \Delta T = \frac{m^2}{M+m} g \end{array} \right)$$

具体例を表 4 に示す。実際に実験してみると、この $\Delta T$  が 6 g 重以内なら安定、6 ~ 10 g 重なら多少振動があり、10 g 重以上になると不安定となった（使用したばねばかりは大塚式 200 g 重、5 g 重目盛のものである）。ただし、多少振動がある場合にも台車を急に手放すのではなく、1 ~ 2 cm 手で支え気味にして放すと安定する。

表 4 (単位 g 重)

台車質量 落下おもりの質量	1.2 kg	2.3 kg	3.4 kg	4.5 kg
50 g	2.0 ○	1.1 ○	0.7 ○	0.5 ○
100	7.7 △	4.2 ○	2.9 ○	2.2 ○
150	16.7 ×	9.2 △	6.3 ○	4.8 ○
180	23.6 ×	13.1 ×	9.1 △	6.9 △
200	28.6 ×	16.0 ×	11.1 ×	8.5 △

(○：安定 △：多少振動 ×：不安定)

従って、台車の質量は 3.4 ~ 4.5 kg 程度、落下おもりの質量は、小さいと加速度も小さいことを考えると 100 g 程度が扱いやすい。

## 2) 運動中の糸の張力

静止状態での糸の張力 $T$  [g 重] と運動中の糸の張力 $T'$  [g 重] が異なることに生徒は疑問を持つ。そこで、早速運動方程式を立てて、それを解いて、疑問に答えるとよい。

運動方程式を解くと

と表される。

$$T' = \frac{Mm}{M+m} \text{ [g 重]} \left( \begin{array}{l} \text{MKS 単位系では} \\ T' = \frac{Mm}{M+m} g \end{array} \right)$$

これから計算した値（理論値）と表 2 に見られる値（実測値）とを比較する

と表5のように、かなりの一致が見られる。従って、予め台車の質量、落下おもりの質量から運動中の張力を予測しておいて、実験で確かめてみることもできる。

表 5

力学台車の質量 [kg]	4.5	4.5	4.5	4.5	
落下おもりの質量 [g]	50	100	150	200	
糸の張力 [g重]	理論値	50	98	145	191
	実験値	49	97	145	191

## 7 おわりに

従来、ゴムひもで台車を引く方法で実験してきたが一定な力を加え続けるのに技術を要し、結果の分析にも時間を要した。また、振り子を使う実験は、場所的な問題もあって、生徒実験には向かないように思われた。また、昨年は、台車定加速装置を使って生徒実験を行ってみたが、ばねの伸びと台車を引く力の関係が、生徒達には、今ひとつピンとこなかったようで、満足できる成果はあげられなかった。そこで、ここで述べた方法を試みたところ、意外に簡単で、良い結果が得られ、従来の法則発見的な形（帰納的な形）ばかりでなく、演繹的な形でも実験でき、さらに、運動方程式を使うと運動を予測することも直接指導できることが分かった。従って、この方法は、装置、方法とも簡単で、結果も安定しており、応用範囲も広く、教材として適当ではないかと思われる。

## 参考文献

- 1) 山内恭彦、平田森三、富山小太郎、翻訳監修  
PSSC物理実験指導書（1967）33岩波書店
- 2) 射落均、高校理科研究、大日本図書（1980、3月4月）7、8頁

## 追記

トップページの映像は、「静止中の張力と運動中の張力の違い」を示す部分をピックアップしたものである。

[トップページに戻る](#)