



頌栄女子学院中学校高等学校 北原 祐司*

目的

ニュートンの運動の法則は高校物理の中心となる重要な法則であるが、授業では運動方程式を使った問題演習に時間をかけ、法則自体の発見や検証の実験を省略してしまっているのは筆者だけではないと思う。

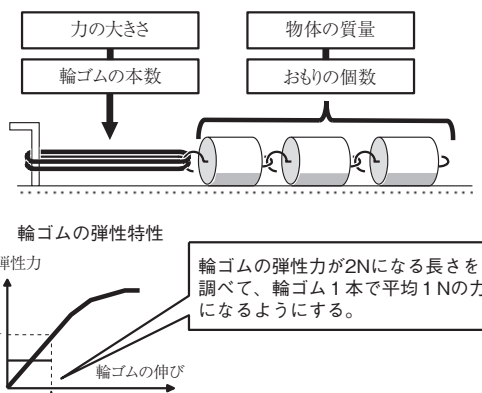
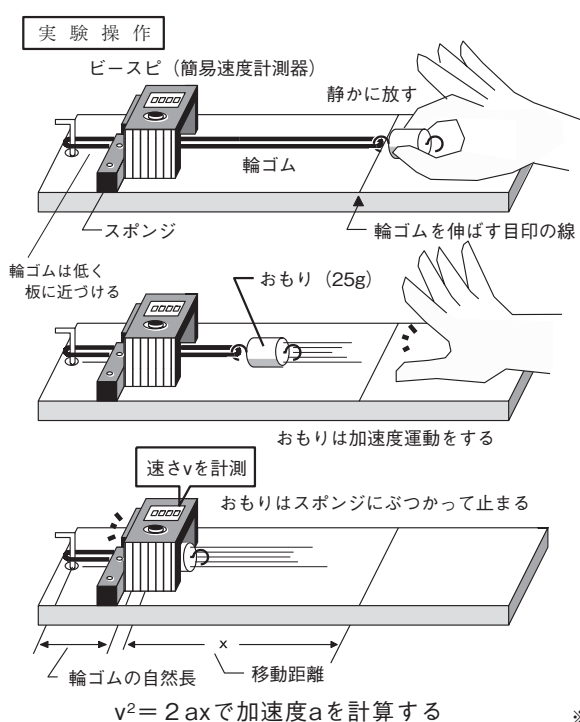
教科書に紹介されている運動の法則の実験は、ずいぶん昔から、力学台車と記録タイマーを用い、パネ秤やゴムを手で引いて力の大きさを加減するものが一般的である。この実験は測定・解析にかなりの時間と手間を要するが、データ数は多くはなく、手で引く不安定さも響いて、なかなか期待通りの結果にはならない。授業時間は足りないし、それなら演習に当てた方が…と考えてしまうのも仕方がない気がする。

1回の授業でもっと簡単に楽しく、かつ期待通りの結果が出る実験が行えないか…と考え思いついたのがこの『 $F = ma$ のパチンコ式実験』である。

概要

実験の基本操作は、玩具のパチンコのように輪ゴムでおもりを飛ばし、その速さを『ビースピ（簡易速度計測器）』で測定することである。その際、実験条件は次のように変える。

まず、力の大きさは輪ゴムを2本、3本…と束にすることにより、2倍、3倍…と変えていく。次に、物体の質量は、おもり自体を物体として、2個、3個…と連結することにより、2倍、3倍…と変えていく。



条件を変えて16個のデータが得られる

〔各2回ずつ、計32回測定…所要時間約20分間〕

質量 力		おもりの個数			
		1個 0.025kg	2個 0.050kg	3個 0.075kg	4個 0.100kg
輪 ゴ ム の 本 数	1本 1N	■	■	■	■
	2本 2N	■	■	■	■
	3本 3N	■	■	■	■
	4本 4N	■	■	■	■

※時間に応じて、輪ゴムの本数・おもりの個数を増やすことができる。

図1 $F = ma$ のパチンコ式実験の概要

* きたはら ゆうじ 頌栄女子学院中学校高等学校 教諭 〒108-0071 東京都港区白金台 2-26-5 ☎(03)3441-2005

加速度は、一定距離加速されたおもりの速さから等速度直線運動の式を使って電卓で計算して求める。

おもりを引く間、輪ゴムの力に変化する。輪ゴムの伸びと弾性力の間には比例関係が確認されるから、力は『平均の力』である。結果、運動も等加速度ではないから、加速度も『平均の加速度』である。事前の説明では、この点については軽く触れるにとどめた。

教材・教具の製作方法

I. 必要な材料→図2のリスト1の通り。

II. 作製手順

1. 平板をのこぎりで長さ40～45cm程度に切る。
2. スポンジをカッターで幅2～3cm程度に切る。
3. 図2のように、板の端から約1cmにフックをねじ込み、そこから6cmの位置に、スポンジを固定する。この位置は、規格#18の輪ゴム（折径（自然長に相当）7cm。メーカーが違っても規格は同じ）を使用する場合のもの。スポンジはおもりの衝突時のクッションと、ビースピを置く位置を決めるガイドの役割をしている。スポンジがなく

ても実験はできるが、おもりがフック（釘）に衝突して、おもりのフックが変形することがある。

III. その他（実験に必要なもの）→図2リスト2の通り。

電卓は1人1台あると暇にする生徒がなく、解析が速く進む。生徒は日常生活で電卓を使う機会が案外なくて、実に楽しそうに計算していた。

IV. 輪ゴスを伸ばす目印となる線の引き方

1. $a \propto F$, $a \propto 1/m$ の関係を定性的に検証（発見）するだけなら目印線は適当（20cm前後）でよい。
2. $F=ma$ の数値の一致まで目指す場合
 - (1) 統一した目印線を予め引いておく場合は、図3のように同じ箱の輪ゴスをニュートンばかりで引いて、弾性力が2Nになる長さの分布を調べ、最も度数分布が多い長さに合わせて目印線を引いた。図3は輪ゴム50本について調べたものだが、10本程度調べればおおよそわかる。
 - (2) 生徒に目印線を引かせる場合は、2Nになる長さがおおよそ等しい輪ゴスを4本選別してから引く。

リスト1 【必要な材料】（すべてホームセンターで入手可）

・平板 SPF 材1×4（19×89×910mm）…227円 ※ 幅が6cm（ビースピの幅）以上、厚さ1cm以上の表面が滑らかな板であれば何でもよい
・保護スポンジ（20×100×100mm）…103円
・フック（真鍮よーおれ20mm 5本入り）…114円 ※ 釘を打ち付けるだけでもよい

リスト2 【実験に必要なもの】

・ビースピ NaRiKa 旧型…1800円 新型…2800円 ※ 旧型はkm/h表示、新型はm/sに切換可
・輪ゴム（規格No18）1箱 共和オーバンド、セメダイン社ゴムバンド等
・おもり25g … 1班4個ずつ
・電卓 … 100円ショップで生徒分揃えた

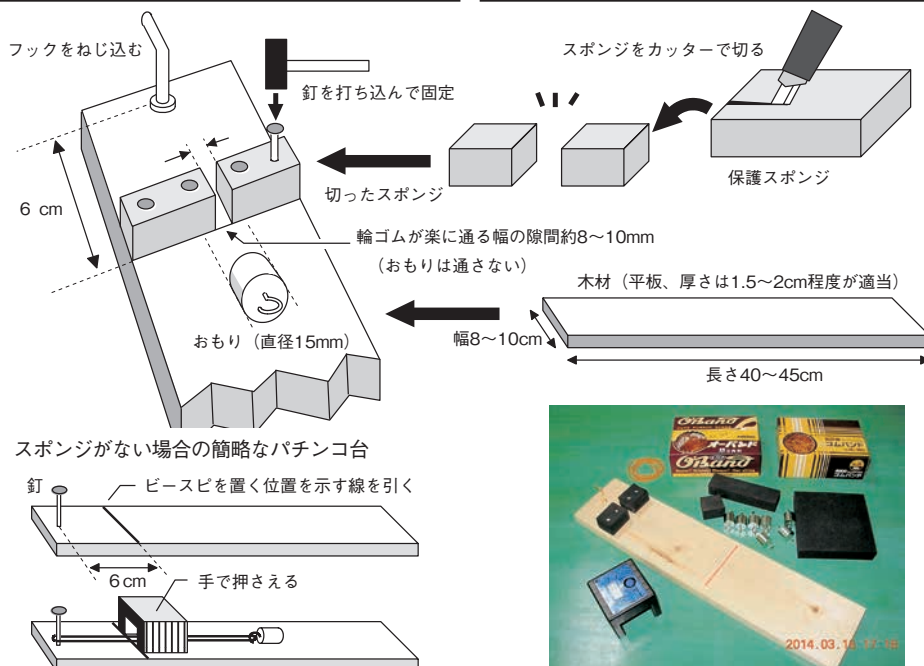


図2 教具（パチンコ台）の製作方法

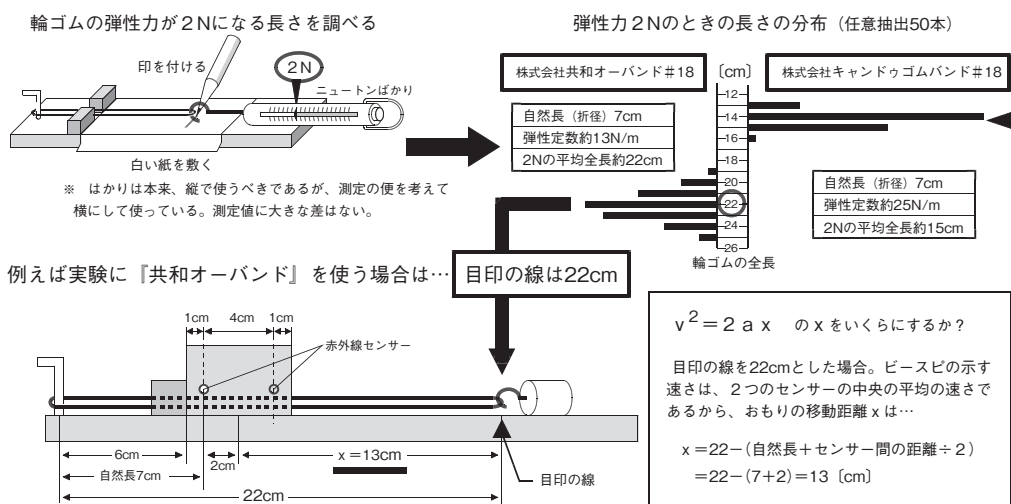


図3 輪ゴムを伸ばす目印となる線の引き方 ～統一した目印線を予め引いておく場合～

学習指導方法（授業展開）

I. 実験の原理と手順の説明（約20分間）

実験前の授業時に行う。実験操作、加速度の求め方、電卓の使い方等を装置を見せながら行った。操作は簡単なので、説明は短時間で済む。

II. 物理室での実験（50分間）

1. 測定

輪ゴム1～4本、おもり1～4個で条件設定は16通り。各2回ずつ、計32回測定する。

2. 解析

- 電卓を使って加速度 a を計算する。
- 検証実験では、 $m \times a$ を計算し、設定した力の大きさ F （1～4N）になっていることを確かめる（ただし、 $m \times a$ の値は小数第1位を四捨五入）。
- 加速度 a と質量 m 、加速度 a と力の大きさ F の関係のグラフを描く。

3. 考察

F 、 m 、 a の関係を確認（発見）。

III. 授業の様子

ビースピは好評、おもりを飛ばす操作も電卓を使った解析も、生徒は楽しそうに行っていた。

実践効果

I. やっぱ、そうなのか…と直観的な理解

おもりの個数が同じなら、これを輪ゴム1本で引くより2本で、2本で引くより3本で引いた方が、加速度は大きくなり、その大きさはおそらく2倍、3倍になるかも…、また、輪ゴムの本数が同じなら、おもり1個より2個を、2個よりも3個を引く方が動かしにくいから、加速度は1/2倍、1/3倍になるかも

と生徒は自然に予想する。この世界に運動の法則が厳然と成り立つ事実は驚嘆すべきことであるが、その内容は日常生活において常識的に理解できるものである。

このパチンコ式実験は、実験を進めながら『なんだ、やっぱりそうなのか…』という直観的な理解をもたらす。輪ゴムの本数を増やせば、計測される速さは予想通り速くなり、おもりの個数を増やせば、速さは予想通り遅くなる。本実験は、一見難しそうな運動の法則を簡単に理解できる実験となっている。

II. おーっ!!…数値の一致に感激

図4の表のように、 $m \times a$ の値は設定した力の大きさ F に等しくなり、 $F = ma$ が検証される。小数第1位四捨五入で有効数字1桁と大雑把な結果ではあるが、実施5クラスの結果を調べて ma と F の一致率は93%で、計算結果の一致に感動している生徒も見られた。

III. 高1全員が行う実験として有効

従来の『力学台車+記録タイマー』の実験では解析の煩雑さに加え時間的にも、生徒の興味・関心が持続しない危険性がある。それに対して、『パチンコ式実験』は操作の楽しさ、結果のわかりやすさ、時間的な面からも、全員必修の物理基礎の実験として大変効果的であると感じた。

その他補遺事項

I. 誤差の原因について

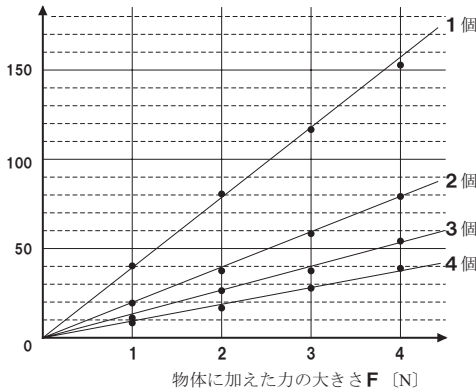
1. 輪ゴムの弾性のバラツキの影響

輪ゴムを選別しないで行う場合、輪ゴムの弾性のバラツキが理論値からのズレを起こす。引いた目印線に対する当たりはずれの影響は、輪ゴムが1本のときが最大で、2本、3本…と束にするとバラツキが相殺さ

輪ゴム：キャンドウ製ゴムバンド#18 目印線（弾性力2 Nのときの全長）＝16.5cm $x=0.08$ [m]

		輪ゴム1本 (F=1 N)				輪ゴム2本 (F=2 N)				輪ゴム3本 (F=3 N)				輪ゴム4本 (F=4 N)			
おもりの個数		1個	2個	3個	4個	1個	2個	3個	4個	1個	2個	3個	4個	1個	2個	3個	4個
質量 [kg] ①		0.025	0.050	0.075	0.100	0.025	0.050	0.075	0.100	0.025	0.050	0.075	0.100	0.025	0.050	0.075	0.100
速さ [km/h]	1回目	9.15	6.40	4.98	4.16	12.98	8.76	7.36	6.11	15.58	11.03	8.81	7.72	17.90	12.48	10.63	9.08
	2回目	8.96	6.32	5.03	4.17	12.86	8.91	7.36	6.29	15.55	10.78	8.71	7.50	17.79	13.05	10.55	8.74
加速度 [m/s ²]	実験値②	39.54	19.51	12.08	8.37	80.31	37.64	26.12	18.53	116.83	57.34	37.00	27.93	153.57	78.58	54.08	38.28
	理論値	(40)	(20)	(13)	(10)	(80)	(40)	(27)	(20)	(120)	(60)	(40)	(30)	(160)	(80)	(53)	(40)
①×② (m×a)		0.99	0.98	0.91	0.84	2.01	1.88	1.96	1.85	2.92	2.87	2.78	2.79	3.84	3.93	4.06	3.83
小数第1位を四捨五入		1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4

加速度 a [m/s²] 力と加速度の関係



加速度 a [m/s²] 質量と加速度の関係

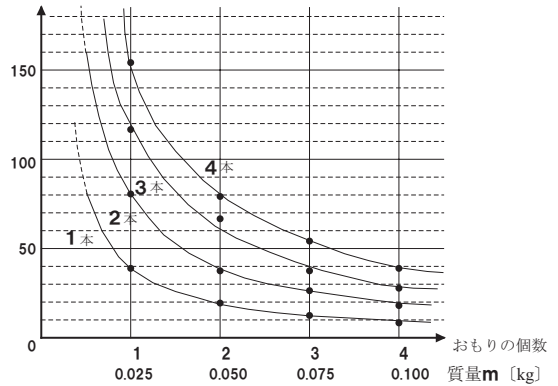


図4 実験結果の例

れ誤差率は最大で10%程度と小さくなる。ただ、誤差率の大きな1本のときでも、グラフを狂わすほどのズレにはならない。

2. 摩擦力の影響

用いた板とおもりとの間の静止摩擦係数は約0.1であった。動摩擦係数を仮にこれと同程度としても加速度に与える影響は $\mu'g$ (0.1×9.8) で、おもりの加速度の大きさ (10~160) に対しては比較的小さいと言える。

II. 計測ミスの主な原因

ビースピの計測値がまれに極端に大きく出ることがあるが、これは輪ゴムの位置が高すぎて、センサーが輪ゴムに反応しているためと考えられる。輪ゴムは台の面に近い低い位置にするよう予め注意しておく。

III. 輪ゴムは何本、おもりは何個まで測定可能か？

輪ゴムは8本を超えると、輪ゴムの束が太くなりすぎて、上記IIに起因する計測ミスが多くなる。引けるおもりの個数は台の長さによって決まる。輪ゴム1本でおもり10個までは確認したが、個数が多くなると理論値からの下方へのずれが大きくなっていった。

IV. ビースピの不通過型使用について

ビースピは大変簡便な装置で、既に様々な活用例が紹介されている。ビースピでの計測＝物体の通過…と

いう思い込みがあったが、本実験でもわかるように、物体が内部の2つのセンサーを横切ればOKで、出口から出てくる必要はない。図5は、この使い方での重力加速度を求める実験で、本実験を思いつききっかけとなったものである。ビースピを机の上に置き、30cmの定規をガイドに、消しゴムを自由落下（センサー中央まで28cm）させる。この使い方ではビースピを空中に固定する必要がないので、普通教室でも簡単に実験できる。2人組で5回ずつ測定し、結果をクラスで平均すると9.8ピッタリになることもしばしばである。

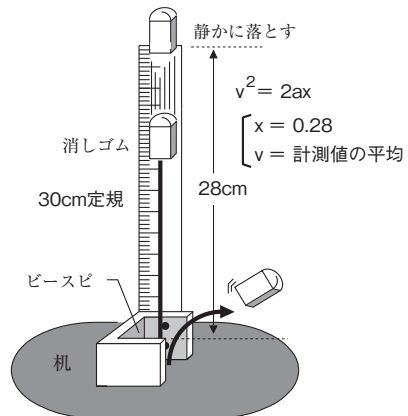


図5 ビースピ（不通過型）実験例