

理科や力学の教材として作ったパチンコの玉の滑走台

みや まえ とも かず ほそ かわ た ろう つち や ゆ り まえ はら みつる
宮 前 智 一*・細 川 太 郎*・土 谷 友 利*・前 原 充**
にし おか けん いち ひょう い じゅん こ すす き やす ふみ
西 岡 賢 一**・兵 井 純 子***・鈴 木 康 文***

*小学校教員養成課程理科専攻・**修士課程理科教育専攻・***理科教育講座

(平成16年2月12日 受付)

力学に関する学生実験や子ども達への演示教材としてパチンコの玉を転がす滑走台を製作した。長さ2mのカーテンレールをベニヤ板に打ちつけたものである。玉の速さ ($v_m > 2\text{m/s}$) は、玉がレール上の特定の場所を通過するときに発する電気信号の時間間隔を記録することによって測定した。レールの先端に発射台を取り付け、そこから飛んだ玉の飛距離を測定した。レールの途中にもう一つの玉を置き、玉どうしの衝突についても演示や測定を行った。これらの測定で求めた玉の運動エネルギーを力学的エネルギー保存の法則に照らして比較考察した。また衝突における運動量についても考察した。これらの考察によって、“慎重に測定した結果からは、従来の物理教材で無視されがちな効果が見える”ことが例示できた。この教材は、用い方を選ぶことで、大学生、高校生、中学生、小学生それぞれに力学現象への興味と有意義な理解を与えるものである。

キーワード：力学現象，対象学年の広い理科教材，力学的エネルギー保存の法則，摩擦力，運動量保存則

I 序 論

日常よく目にする現象を，自然科学を学ぼうとする大学生に教えることを目的とし，たとえばボールの簡単な運動を物理学的に表現すれば，「単純な体系の下での対称性の高い剛体の力学」といったものになるであろう。こういった表現が，少し日常的に用いる言葉とは異なり，難しいという印象を与えがちである。しかしそこで教えたいのは，専門性の高い話ではなく，極めて日常的な台の上でボールを転がしたりとばしたりしたときの運動の様子を科学的にとらえましょう程度のことである。ボールを「転がす」とか「とばす」とかいった行為は，小学校に入学する前から誰でも体得しているのが普通である。ボールが転がっているときには摩擦力が働く。これも中学生くらいになれば多くの生徒が予想するだろう。摩擦力という言葉を知ったから分かるのであろうが，少なくとも彼らが習った摩擦力は，転がらずにすべるときのものであり，多くの人は転がっているときの摩擦力についてはほとんど何も習っていない。習った摩擦力という概念を一般化し，実体験に適用して転がっているものにも摩擦力が働くことを予想することができるのである。ボールが転がるときには，いわゆる速さ＝距離／時間で呼ばれる速さ（運動の速度）をもつ。このときボールは，この速さで表される並進運動のエネルギーに加え，回転のエネルギーももっている。これも高校生で理科系の生徒なら多くの者が予想するだろう。現在，理科系の生徒でも物理を履修している人の割合が減少しているが，回転させるだけでエネルギーを与えねばならぬことはたいいていの人なら実感している。ここに挙げた力学の例に限らずあ

らゆる物理学の分野で、こういった日常生活と関わりの深い現象を科学的にとらえることを助けるための教材が必要であろうと認識する。

もちろん学校や大学での授業で用いるための理科教育教材は多く市販されている。しかし、これまでに市販されている教材は、学習指導要領に準拠して設計製作がなされているため、対象とされる学年が決まっている場合が多い。それとは違って、ここで述べたような力学現象を見ることは小学校に入る前のこどもから大人まで学年を問わずくり返される経験である。そのような現象を取り扱う場合は、大学生を対象とする教材の開発をねらうときでも、こども達が見てもおもしろいと思うようなものであった方がよいし、小学生を対象とする教材でも、大学生が見て考えさせられるようなものであった方がよい。結果について十分考察し、装置やその使い方をうまく工夫すればそのことは可能であろう。

今回我々は、主として大学生を対象にし、さらに幅広い学校、学年を対象にできるものとして、湾曲させたカーテンレールの上でパチンコの玉を転がし、弾丸のように発射する滑走台を製作した。このような教材は小・中学生用の演示教材や高校生を対象とした物理教材として既に多く作られている。そういったものを我々が実際に製作し、データを調べることで、学習指導者の視点からその教材のもつ意義をより深く考察することを目的にした。大学生を対象とすることで、演示実験に終始せず、正確に数値化されるデータの測定とそこからの考察を可能にした。また、コンピュータや市販のソフトを使わず、大学生なら機器の原理を理解することで開発も学習指導もできるような教材にした。こどもに演示することも想定し、ダイナミックさを感じるものにした。今回、数値データとして測定したのはパチンコの玉の速度である。滑走台上の2点間を通過する時間を直接測定し、速さ＝距離／時間の関係式で速さ（速度）を求めた。物理学でいう飛行時間法（TOF法）である。回転の角速度は玉とレール面が常に接触しているとして、計算で求めた。このように速度と回転速度を求めることにより、摩擦力測定やエネルギー保存則による考察を行った。さらに玉を飛ばしたときの飛距離や、レールの途中に別の玉をおいたときの衝突のデータも測定し、衝突時のエネルギー保存則や運動量保存則について考察を行った。

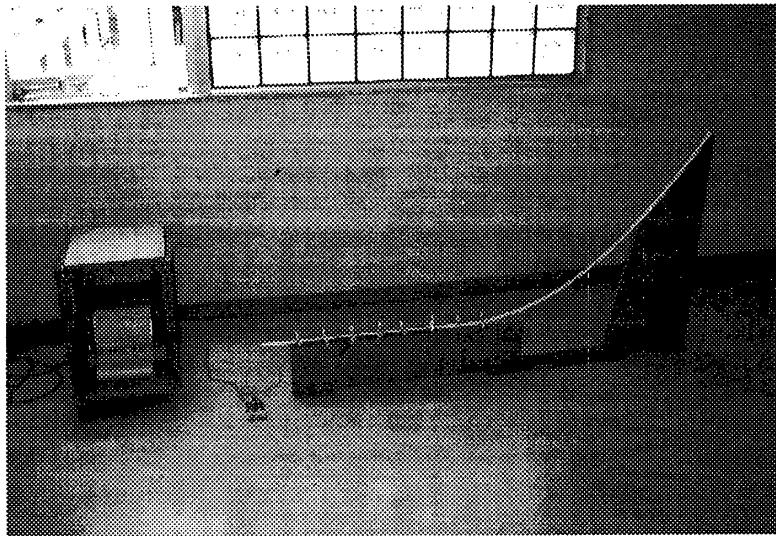
Ⅱ 実 験

1. 滑走台の製作

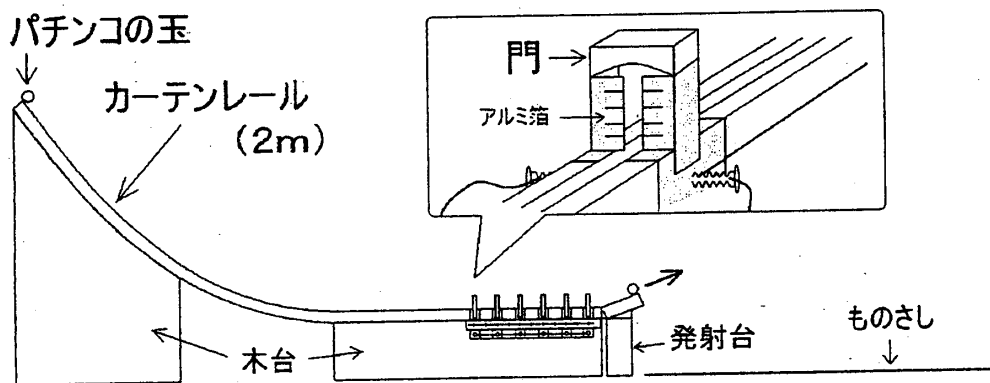
図1に製作した滑走台の概要を示す。(a)は装置本体及び記録計の写真であり、(b)は装置本体の概要図である。(c)は実験データを考察するために作成した直線型の滑走台及び記録計の写真である。(a)を見て分かるように、用意したベニヤ板を、一枚は長方形に、他の一枚も四角形状に切断した。これらを無理のない曲線で結ぶようにプラスチック製の2mのカーテンレールをまげて打ちつけた。(b)に示したように、上部からパチンコの玉をゆっくり転がす。玉はレール上でどんどん加速され、レールの水平部分に達する。玉の速度は、レールの水平部分数カ所に10 cm ごとに設置されたアルミ箔の門を通った時刻を記録することによって測定した。この門の様子を(b)の吹き出しの中に拡大して描いた。レールの両側には乾電池で3 Vの電圧がかけられており、玉が門を通過するとこれが短絡するので、電気信号が生じる。これを抵抗とコンデンサーを直列につないだ微分回路に入力し、出力を記録計にいった。記録計はチャート紙を1秒間に10 cmの速さで正確に送り出すことを確認済みである。チャート紙で信号を読みとることにより2つの

門を通る間の時間を測定した。あえて門を付けたのは、速い玉の動きに対し、電氣的接触を完全に生じさせるためである。門の間の距離を ℓ ，2つの門を通る間の時間を Δt とする

(a)



(b)



(c)

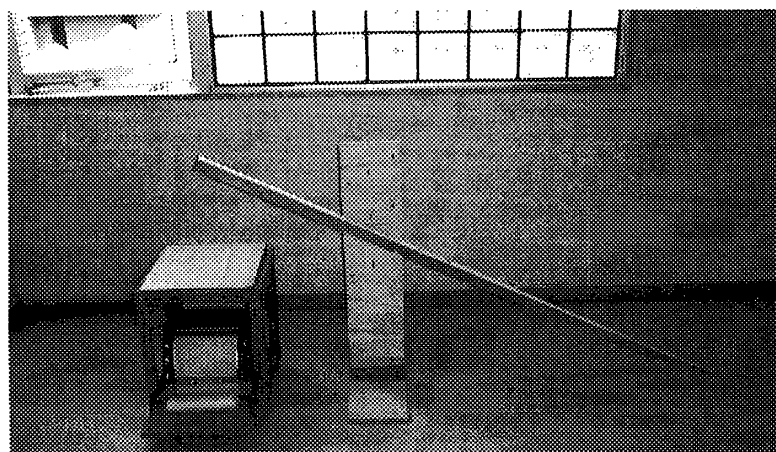


図1 製作した滑走台の写真及び模式図 (a)湾曲型写真 (b)曲線型模式図 (c)直線型写真

と、測定される速度 v_m は飛行時間法により、

$$v_m = \ell / \Delta t \quad (1)$$

となる。レールの水平部分の先端に一定の傾きをもつ 10 cm ほどの長さの発射台を取り付

けることにより、水平部分を通り過ぎた玉を先端から投射することができるようにした。物差しを用いて、投射された玉が、床に落ちるまでの飛距離を測定した。(c)に示した直線型の滑走台は、鉛直な台へ引っかける場所を変えることで直線の傾きを自由に変えることができるものであり、曲線型滑走台での速度データを比較検討するために製作したものである。門は中央付近の2箇所に10 cm 離して設置した。

2. パチンコの玉の速度及び飛距離の測定

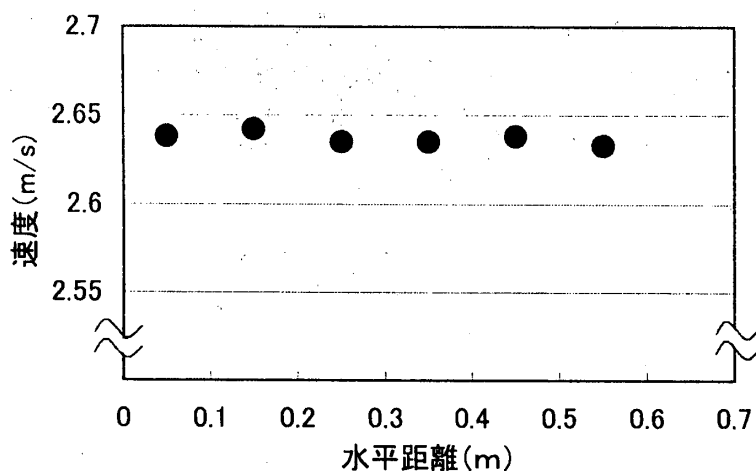


図2 パチンコ玉の速度の水平運動距離依存

湾曲型滑走台の水平部分での速度を測定した結果を水平移動距離に対してプロットしたものを図2に示す。玉は転がし始めるときは、初速度をほぼ0で動かした。横軸の原点は、最初の門の位置にとった。図より玉は水平部分を減速することなく、かなり正確な等速運動をしていることが分かる。即ちカーテンレールとパチンコの玉の間の摩擦

力は無視できるくらいに小さいことが分かる。図3に発射台の傾き角が 30° 以下のとき、傾き角に対する玉の飛距離の測定値を黒丸で示す。このような角度範囲では、傾き角とともに飛距離がわずかに増加することが分かる。

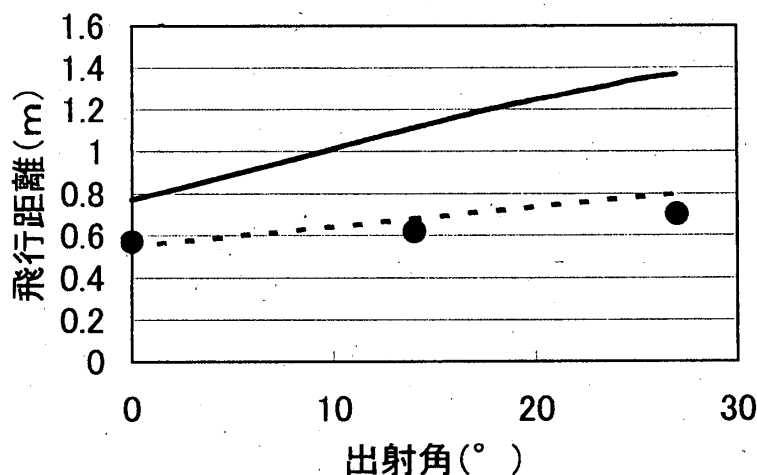


図3 パチンコ玉の飛距離の出射角依存

図4にレールの水平部分の門(M)と門(N)の中央にもう一つ別の同じ玉をおいて、滑走してくる玉と衝突させたとき、記録計に記録された信号から導き出した両方の玉の速度を示す。横軸は最初の門からの水平部分の距離と門の名前(J~P)である。黒丸で示したものが、滑走してくる玉1がそれぞれの門の間を通過するときの速度で、白

丸で示したものが衝突された玉2がそれぞれの門の間を通過する速度を示す。黒三角で示したものは滑走してきた玉1が門(M)を通過してから衝突された玉2が門(N)を通過するまでの時間から求めたふたつの玉の交換が起こる門間での速度である。目でよく見ていると、滑走してきた玉1は衝突が起こったとき、前向きの運動を一旦静止し、くるくる回転しているのが分かる。その後余った回転のエネルギーを解放するかのように前方に進み出すことが分かる。

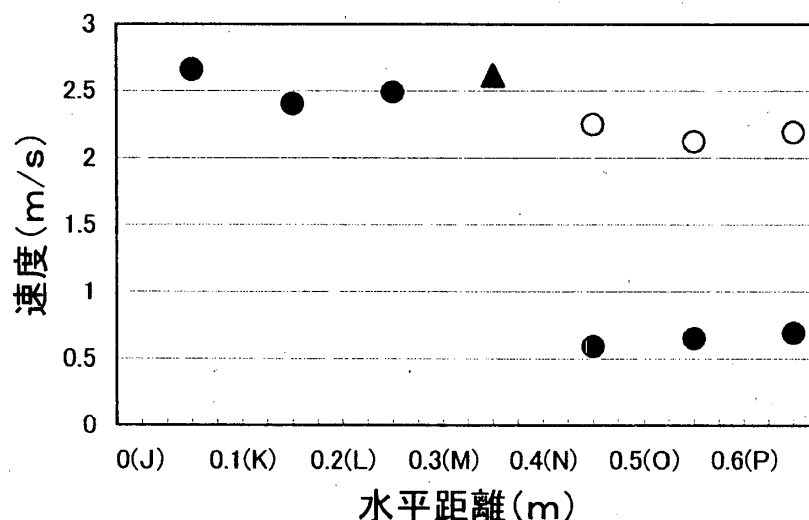


図4 パチンコ玉の衝突前後の速度

Ⅲ 考 察

本装置は自作した実験教材であるため、教材としての活用方法を考察するためには、まず本装置で得られる測定値から何がどのように考察できるかを議論する必要がある。以下に本装置からの測定値に関し、力学的な考察を行った上で、教材としてどのように用いれば有効かの考察を行った。

1. 剛体球の運動の力学教材として

ひとつのパチンコの玉に対するエネルギー保存則を扱う教材として、本装置で得られた結果を考察した。図2に示した速度が、水平な直線部分を滑走している間に減少しないことから、カーテンレールと玉との間に働く摩擦力は無視できるくらい小さいといつてよい。今の場合、玉の運動を目で観察することにより、玉は滑走台の上をほとんどすべることなく、転がっていることが期待できる。玉の形の完全性にもよるが、転がり摩擦はすべりを起こすときの摩擦より格段に減少するので、玉が転がることにも、水平部分での転がり摩擦力が無視できるくらいに小さいことにも、疑問は感じ得ない [1]。

我々はここで摩擦力を無視し、玉の運動を、力学的エネルギー保存の法則に対応させる。まず、玉が滑走台を転がり始めるときの初速度が0であるので、玉の力学的エネルギーは位置エネルギーで与えられる。位置エネルギーの原点を滑走台の水平部分にとり、滑走台の最上部の高さを Δh とすると、初期エネルギーは $mg\Delta h$ となる。ここで m は玉の質量(5.44 g)、 g は重力加速度(9.8 m/s^2)である。玉が水平部分に達したとき、玉はこの位置エネルギーを失っている代わりに、二種類の運動エネルギーをもつ。一つは並進運動のエネルギー $1/2 mv_m^2$ である。ここで v_m は玉の速度の実測値であり、図2に示したものである。残りの一つは回転運動のエネルギーである。回転運動のエネルギーは $1/2 I\omega^2$ で与えられる。ここで I は慣性モーメント、 $\omega[\text{rad/s}]$ は角速度である。球の慣性モーメントは、材質が一樣なら、球の半径 a (5.5 mm)を用いて、 $I = 2/5 ma^2$ で与えられる。本研究では玉が常にレールに接しながら、すべることなく回転すると仮定する。また、玉はレール間の隙間にわずかに埋もれるはずだが、その大きさは無視できて、レールに接しながら回

転する半径は玉の半径に等しいと仮定する。こうすると、 $\omega = v_m/a$ で近似できる。従って回転運動のエネルギーとして $1/2 I \omega^2 = 1/5 m v_m^2$ が得られる。これと並進運動のエネルギー $1/2 m v_m^2$ を加えた全運動エネルギーは $7/10 m v_m^2$ となる。この v_m に図2に示した値を代入することにより求めた値が、水平部分に達したときの全運動エネルギーの測定値であるとした。 $\Delta h = 0.7$ mを用いることで、初期の位置エネルギーのどれだけが、水平部分に達したときに運動エネルギーに変換されているかを調べた。全運動エネルギーを初期エネルギーで割った値を図5に示す。水平部分に達するまでにエネルギーは7割強に減少しており、エネルギー保存の法則が成り立っていないように見える。

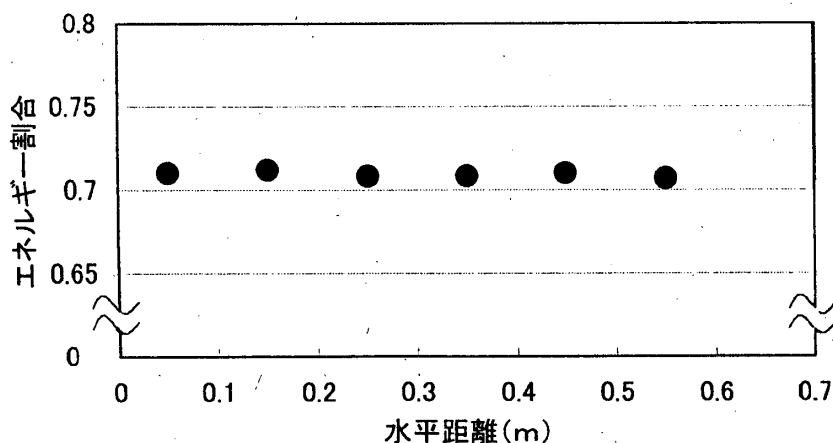


図5 パチンコ玉の運動エネルギー／初期エネルギー

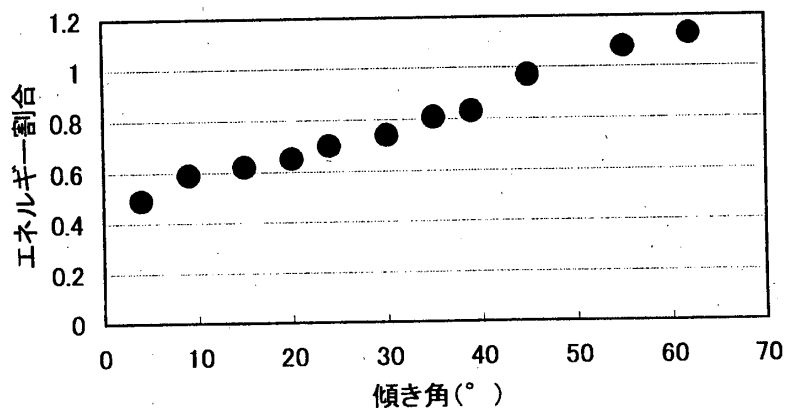


図6 直線型による運動エネルギー／初期エネルギーの傾き角依存

水平方向の等速運動と鉛直方向の等加速度(落下)運動を仮定し、発射台から投射された玉の放物線軌道から飛距離を求めた。その計算値を図3に曲線で示した。滑走台の水平部分が床より20 cm高いことと、発射台が傾きをもつことにより、多少上の方から投射されることを考慮している。実線は初期エネルギーが全て保存された場合に得られるはずの水平部分での速度を用いて計算した値、点線は実測された水平部分での速度 v_m を用いて計算した値である。測定された飛距離は点線に近いので、水平部分から落下点まではエネルギー保存則が成り立っていることがわかる。このことから図5において、エネルギー保存

則を成り立たなくしているのは、レールとの摩擦であり、空気抵抗ではないといえる。

水平な直線部分では、レールとの間の摩擦力が無視できるほど小さいのに、この結果は不思議である。レールのゆがみや門での速度損失も可能な限り小さくしている。パチンコの玉も模様のないものを選んでいく。運動エネルギーを求めたときの2つの仮定についても検討したが、これらは以下に示すように本質的な原因にはなり得ない。まず、すべりが起こって玉がちゃんと回っていないければ、図5に示したエネルギーの割合は過大評価をし

ていることになり、これが1より小さい理由にはならない。次に玉がレール内に多少埋もれていることから回転エネルギーが計算より大きいことを考慮した。回転半径を補正すると回転エネルギーが現在の計算の1.5倍に増加する。しかし全運動エネルギーは約10%増加することにしかならず、図5の縦軸の値がせいぜい0.1上がるにすぎない。

この一見して奇妙な結果を考察するため図1(c)に示した直線型のレールを製作し、エネルギーが保存される割合のレールの傾き角 α に対する依存性を測定した。この測定結果を図6に示す。エネルギー保存則が成り立つならば、傾き角によらずに1になるはずであるが、結果は傾き角とともに増加し、 50° を越えたあたりから1を上回った。値が1以上になるのは、先に示した回転の運動エネルギーに対する仮定による。今回の装置では、回転のエネルギーを $\frac{1}{5}mv_m^2$ と仮定している。即ち、並進速度から仮定のある計算で回転エネルギーを求める仕組みをとっているため、うまく転がらなくなれば求めた回転エネルギーは大きくなる。斜面があまりに急になると、転がり摩擦力が玉を回転させるのに必要な力より小さくなる。このとき玉とレールとの間にすべりを生じながら転がるようになるためである。むしろ奇妙なのは、傾き角が 50° 以下では、角度の減少と共にエネルギーが保存される割合がどんどん減っていくことである。傾き角が小さいほど摩擦力が効くのなら、傾き角が0のときは、図2、3の水平部分で初めにもっていたエネルギーをそのまま保存している結果と、一見して矛盾している。

摩擦力による仕事を考慮した力学的エネルギー保存則を表す式は、直線斜面の場合、

$$mgL\sin\alpha = \left(\mu_0 mgL\cos\alpha - \frac{1}{5}mv_m^2 \right) + \frac{7}{10}mv_m^2 \quad (2)$$

で与えてよいであろう。 L は斜面を転がり落ちた長さであり、 $L\sin\alpha$ が転げ落ちた高さを表す、 $mg\cos\alpha$ は垂直抗力であり、ここでは便宜的にこれに摩擦係数 μ_0 をかけて転がりの

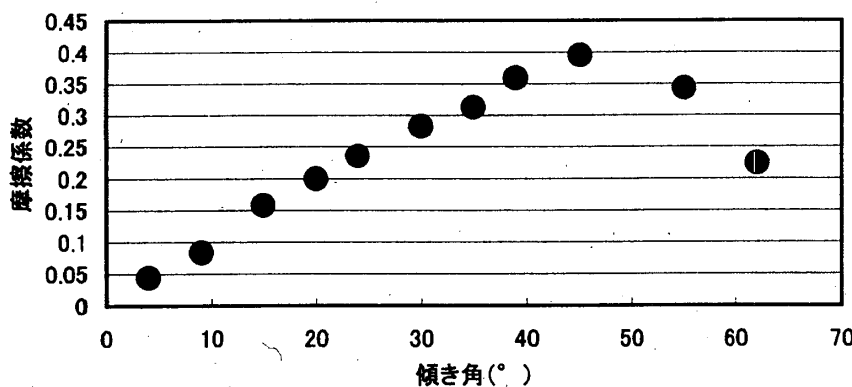


図7 傾き角に対して導出した摩擦係数 μ_0

の摩擦力を表す。摩擦力が場所や速度によらなければ、これに長さ L をかけて摩擦力のする仕事になる。これは摩擦力によるエネルギーの損失を表すことになるが、その一部は玉を回転させるためのエネルギーにもなっている。右辺のカッコ

の中は、摩擦力による仕事から玉の回転のエネルギーを引いたものであり、摩擦力が原因し散逸されてしまうエネルギーを表す。以上より、位置エネルギーが運動エネルギーに変換される割合は、

$$\frac{\frac{7}{10}mv_m^2}{mgL\sin\alpha} = \frac{7}{5} \left(1 - \frac{\mu_0}{\tan\alpha} \right) \quad (3)$$

となる。即ち、 μ_0 が小さくとも α が小さければ、 $\tan\alpha$ が小さくなり、エネルギーの変換

される割合は減ってしまう。この式を

$$\mu_0 = \left(1 - \frac{1}{2} \frac{v_m^2}{gL \sin \alpha} \right) \tan \alpha \quad (4)$$

と変形し、摩擦係数 μ_0 を傾き角 α に対して求めた結果を図7に示す。図7に示した値は、角度が大きくなるにつれ、大きくなる。さらに傾き角が 50° を越えたあたりから再び下がっている。これは少しずつすべりが生じているためであろうと予想される [2]。

曲線型滑走台の湾曲部分で30%ほどのエネルギーを失ったのは、この直線型で考察した結果と同じく、式(3)の $\frac{1}{\tan \alpha}$ の項によることが結論できる。この項のため傾き角が小さいとき、摩擦係数は小さくても、大きなエネルギーを失う。図6より分かるように、湾曲型で失ったエネルギーは、直線型の傾き角 α が $10^\circ \sim 40^\circ$ 程度の値に近いものである。図2で議論したような水平なところをほぼ等速で進んでいる場合、摩擦力が働かぬ様に見えたのは、単に摩擦力が測定にかかるほど大きくなかったためであり、その結果は図7に示した値にもあらわれている。

2. 衝突現象を扱う力学教材として

今回製作した装置が、剛体球の衝突によるエネルギー保存の法則や運動量保存の法則を扱う教材としても有効かを調べるため、図4に示したパチンコの玉の衝突前後の速度を考察した。並進と回転の運動エネルギー $7/10mv_m^2$ は速度の2乗に比例するので、衝突後の二つの玉の速度の2乗の和が衝突前の玉1の速度の2乗に一致していれば、衝突の際エネルギーが保存されることになる。しかしここでもエネルギーは保存されず、衝突でエネルギーを失ったかに見える。またこの衝突を注意深く観測することにより、転がってきた玉1は衝突したとき、一旦静止し、その後余った回転のエネルギーを解放するかのように前方に進み出すことが分かる。このように図4の速度測定には玉の回転が関係しているので、得られた結果は完全弾性衝突が起こっていないためであると簡単にいうことはできない。衝突後、玉とレールの間に摩擦力が全く働かないなら、衝突した玉1はくるくる回転しているだけで、前へ進むようにはならないであろう。これが再び動き出すのは、摩擦力が働いたことなので、玉1のエネルギーが摩擦によって失われているとみなすのが妥当であろう。衝突前の玉1の速度 $v_{m1}^b = 2.5 \text{ m/s}$ の2乗と、衝突後の衝突された玉2の速度 $v_{m2}^a = 2.1 \text{ m/s}$ の2乗との、比をとることにより、 $(v_{m2}^a)^2 / (v_{m1}^b)^2 = 0.71$ をうる。衝突前後でエネルギーが保存されるなら、衝突した玉1は全運動エネルギーの71%を衝突された玉2に与え、その回転エネルギーとして残りのエネルギー(29%)を衝突直後に残していたことになる。玉1は摩擦でこれを失いつつ前に進み出たと予想される。また衝突された玉2は、もらった71%をその並進運動エネルギーと回転エネルギーに分配して前に進んでいった。衝突した玉1が衝突直後に残したと推論される29%という値は、回転運動のエネルギーの全運動エネルギーに対する割合 $\frac{1/5 mv_m^2}{7/10 mv_m^2} = 29\%$ に一致する。

衝突実験の際もう一つ考察すべき重要なことは、運動量保存則が成り立つかどうかである。並進運動に対する運動量は質量に速度をかけたもので与えられるので、衝突後の二つの玉の速度の和が衝突前のものに一致していれば、衝突の際運動量が保存されたことになる。これについても図4を見る限り成り立たないように見える。この結果も完全弾性衝突が起こっていないためであると簡単にいうことはできない。衝突した玉1にはレールとの

摩擦により回転運動を並進運動に変える機構が働く。衝突された玉2はもらったエネルギーをレールとの摩擦で並進運動と回転運動に分けてしまう。このことはレールとの間に運動量のやりとりがあることを意味するので、玉二つだけの衝突系を扱ってこれに運動量保存則を適用することは意味がない。

3. 広く学校・学年に応じた教材として

今回作製した装置は、主として教員養成系大学での物理学実験に用いる教材として使うことを念頭に置いた。教員養成系大学の学生は後に小・中・高等学校の教師になることを希望しているため、製作した教材は教育の現場で、児童・生徒に演示したり生徒実験をしたりすることへの応用も可能であることが望ましい。この点で、ベニヤ板、カーテンレール、パチンコの玉という手に入りやすい材料を使ったことには意味がある。コンピュータを使わず、記録計で記録する教材にしたことには、本質的意味はない。デジタルカメラで連写するとか、ストロボを用いるなどでも同様の結果が得られるはずである。今回はコンピュータソフトやストロボの機能を必要としないものにした代わりに、レール上に門を付けることにより記録計でとるデータの信頼性を向上する工夫をした。

大学生向けには、簡単な力学の知識からこれだけ興味深い現象がとらえられることを伝えることができる。多くの学生は実験結果で得られる事実こそが本当の姿であることを見落とし、理論と合わない分は装置のせいにしがちである。それまで実験に関する教育がおろそかにされ、授業では理論や法則ばかりを真実であると教えられてきたためであろう。しかしどんな理論でもそれを用いるときは必ずと言っていいくらい仮定が入る。今の場合、転がり摩擦による減速を小さいとして無視する理論を使おうとすれば、それを用いるときの仮定が満たされていないのである。一方、力学の擬似体験をねらって作られたシミュレーションでは、系を単純化した方が分かりやすくなる。それゆえ、できれば余計な摩擦力を取り扱いたくないので、摩擦は転がるためにのみ使われるという疑似実験がコンピュータの中で実現されてしまうことが多い [2] [3]。しかし実際に実験してみると、無視される程度の摩擦力が結果的にこんな効き方をすることがわかる。コンピュータの結果と違った現象が現れるのである。ただし、実験で真の姿を見ようとする場合、装置は精度よく作ってあることが大切であり、実験は丁寧に行うことが大切である。

大学生が力学に限らず、電磁気学であれ現代物理学であれ、物理学を少し深く学ぼうとするとき、エネルギー保存の法則は多くの事項の理解に必要とされる概念である。たとえば静電ポテンシャルは荷電粒子にポテンシャルエネルギー（位置エネルギー）を与え、これが粒子の運動エネルギーに変換される。このように力学的エネルギーが変換される様子は、ポテンシャルカーブの図を用いて説明することが多いが、今回のカーテンレールは典型的なポテンシャルカーブの形を模擬している。摩擦力や回転を扱わなければ、様々な基礎的物理現象をモデル化する際に有意義な教材である。

高校生に演示し、実験してもらおうとなれば、摩擦力が効いてしまうことがやはりやっかいであろう。また回転しながら衝突する剛体の力学は、高校生にとって基本的ではなく、理解するには応用力が必要とされる。それでも力学的エネルギー保存の法則に対応付けて実験すれば、位置エネルギー、並進運動エネルギー、回転運動エネルギー、慣性モーメント、運動量保存則などの概念を教えるのに役立つ。実際、玉を斜面で転がす教材は、高等学校でも自作され、実験もされている [4]。この法則の理解と共に、摩擦力が原因し理想的にはゆかぬことくらいまでを教えることができる。中学生には、物体の運動、位置エネ

ルギー，速さ，運動エネルギー，摩擦力，などの概念を教えるときに演示教材として役立つ。小学生に速さやエネルギーの概念付けをするとともに演示するときは，回転型のレールを取り付けることや，飛ばした玉を次の現象の出発に使うことなどを加えればもっと楽しい教材になるであろう。ただしこういった小・中学生向けの演示を目的とした教材は，今回製作したものに似たものが既に色々作られている [5]。従って本装置を児童や生徒への演示用教材としてのみ用いるときの魅力は，そのダイナミックさ以外にはないと判断した。

IV まとめ

本研究では，教員養成系の大学生を主たる対象とした教材の開発を行った。ここで扱ったようなボールの運動は，あまりに身近な現象ゆえ，誰でも子どもの頃から経験しているはずである。摩擦力による考察を強いることがなければ，中・高生にも実験をしてもらったり，してみせたりすることができる。小学生には本装置のダイナミックさとスピード感（玉の速度 2.6 m/s は時速 10 km 位の速度である。）に喜んでもらえそうである。子ども用のおもちゃも対象年齢がある程度決められているが，親が大人の視点から見てもおもしろそうに見えるものもある。ここでは対象学年の如何に関わらず，誰でも学習できるような教材の開発をねらった。一方で，ひとつの教材の議論においてでさえ，そこで明らかになる物理現象を理解してからでなければ，理科教育教材としての良さが見えてこない。そのためには慎重な製作と測定とそれに基づく考察が必要であることの一例を示した。

謝 辞

本研究によって製作した滑走台は本学理科専攻の2，3回生の多くの学生諸君や島津理化器械の増田氏に興味をもってもらえた。本研究をまとめるにあたり，日本物理学会・物理教育分科において計測方法等に関し貴重な意見をいただいた。また本論文の着眼点に関し，理科教育学講座の石川聡子氏には教育科学，教科教育，教材研究の立場からの貴重なご意見をいただいた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- [1] 弥永昌吉 他 監修『科学の事典（第2版補訂版）』岩波書店（1980）。
- [2] たとえば，玉虫文一 他 編集『理化学辞典（第3版補訂版）』岩波書店（1985）。転がり摩擦の要点と図7に対する本文論旨に追記できる説明を参考としてここに記す。転がり摩擦とは物体がある面に対して転がる場合の抵抗をいい，それは本来“力のモーメント”で与えるべきものである。しかし，便宜的に摩擦力を考え，今のように摩擦係数を定義することが多い。摩擦力が生じる主な原因は瞬間的接着であるから，これを引き離すために物体は回転もすれば減速もすることになる。式(3)で，もし $\mu_0 = 0$ なら，位置エネルギーが運動エネルギーに変換される割合が1より大きくなるが，これは摩擦がないため回転しないはずの玉が回

転したとしてしまっているからである。もし回転はちゃんと起こるが、摩擦による減速がなければ、位置エネルギーが並進運動エネルギーに変換される割合は $5/7$ なので、式 (4) のカッコの中は $1 - 5/7 = 2/7$ となり、 $\mu_0 = 2/7 \tan \alpha$ となる。この値は傾き角 α とともに増加する。要するに傾きが急になるほど、落下の加速度が増え、玉は速く回らなければならなくなるから、回転させるのに必要な摩擦力が増加するのである。この $2/7 \tan \alpha$ の値は α が 50° くらいまでは図 7 に示した実測値より小さい。

- [3] 山本将史著, 新田英雄監修『Excelで学ぶ基礎物理学』オーム社 (2003) .
- [4] 山本明利, ビースピによる速度・加速度測定のコツ,
<http://www2.hamajima.co.jp/tenjin/labo/beespi.pdf>
- [5] <http://www.itec.okinawa2.schoolnet.gr.jp/phy/hp/test3.htm>

Rolling Table for Pinball-Balls as a Teaching Material for Dynamics and Science

MIYAMAE Tomokazu, HOSOKAWA Taro, TSUCHIYA Yuri,
MAEHARA Mitsuru, NISHIOKA Ken-ich, HYŌI Junko
and SUSUKI Yasufumi

*Division of Science Education, Osaka-Kyoiku University,
Kashiwara, Osaka 582-8582, Japan*

Rolling table for balls of pinball has been made for student's experiment of dynamics and for demonstration to school children. The table is made from a 2-meter curtain rod and wood plates. The velocity ($v_m > 2\text{m/s}$) of the ball is measured with the time of flight method (TOF) on the table. The ball is ejected from the end of the table and the trajectory length of the emitted ball has been measured. The collision dynamics of the balls has also been demonstrated. In these measurements, the kinetic energy is compared under the principle of conservation of mechanical energy. The momentum transfer in a collision is compared under the law of conservation of momentum. The results show that the phenomena ignored in traditional teaching material can be seen in the carefully measured data. It is concluded that the present teaching material is useful to guide undergraduate, high school and elementary school students, to consider dynamics with suitable choice of use in the teaching.

Key Words: dynamical phenomena, teaching material for science learned in wide ages, principle of conservation of mechanical energy, friction force