

# ピースピによる速度・加速度測定のコウハウ

神奈川県立湘南台高等学校 山本 明利

## ピースピの歴史

玩具メーカー「ハドソン」が速度測定玩具「ピースピ BeeSpi」を発売したのは、1997年1月のことでした。ピースピは、もともと「ビーダマン」という玩具が打ち出すビー玉や、ゼンマイ式小型自動車玩具「チョコQ」の速度測定用として開発され、折からの「ミニ四駆」ブームにも便乗すべく、ミニ四駆用のアタッチメントをセットにして販売されました。



ハドソンの思惑が当たったかどうかはともかくとして、ピースピは発売前から、物理実験教材としての可能性が注目され、YPC（横浜物理サークル）も発売と同時に研究に着手しています。同年1月の例会では、重力加速度の測定や、エネルギー保存則の実験への応用が検討され、2月の例会ではピースピを分解して内部構造を調べると共に、重力加速度の測定に関して、測定誤差の検討がなされています。この時期、YPCで何百という数のピースピを買い占め、例会の席で販売したりもしました。3月の例会では、鎌倉学園の市江さんが、早くも生徒実験にかけた重力加速度測定の成果を報告しています。このころまでには、ピースピの存在は全国に広く知れわたり、以後、学会誌やサークル誌に続々とピースピを使用した実験の報告が載るようになります。（参考文献参照）

ボタン一つの手軽な操作で、小物体の速度が正確に測定でき、手頃なお値段で入手できるピースピは、打点式タイマー以来決め手を欠いていた、力学分野の速度・加速度測定の生徒実験における決定打として、だれもが注目したのです。以後、ピースピは代表的な物理実験教具として公認され、中高の教科書にも掲載されるようになりました。

## ピースピ復活

そんなピースピにも、危機がありました。パッケージに使用されていたアニメキャラクターの著作権切れが元で、ハドソンが製造・販売中止を決めたのです。ピースピが教具としての研究段階を終えて、いよいよこれから現場に普及すると思われた時期のこのニュースに、物理教育関係者は一様に落胆しました。記事の掲載を決めていた教科書会社も対応に頭を抱えました。

ピースピのこの窮地を救ったのは中村理科工業（株）でした。上記の事情で販売できなくなっていた大量の在庫を買い取り、パッケージを交換して問題点をクリアーし、今度は玩具としてではなく、純粋に理科教具として再販売に踏み切ったのです。これで再

び安定供給の道が開け、学校でも教材業者を通じて楽に入手できるようになりました。こうしてピースピは生まれ変わったのです。英語版のマニュアルもついたので、やがて海外にも普及していくかもしれません。

本稿では、ピースピの復活を記念して、これからの本格利用に備え、ピースピを使用した速度・加速度測定のコツについてまとめてみたいと思います。



## 時速表示の問題

ピースピの発売当初から指摘されている問題点は「時速表示」でした。もともと玩具として開発された製品でしたから、子供達にとってより身近な単位が採用されたのはやむを得ないことですが、せめて秒速へのモード切替があったら、ピースピは物理教具として絶賛されていたに違いありません。

今回の再販売でも、この点は以前そのまま改善されていません。パッケージは変わっても、中味は以前のままなので当然です。ピースピの売れ行きが好調で、改良版を開発するという話にならない限り、この点の改善は望めそうにありません。3.6で割る、というデータ処理をたびたび反復することで、生徒は自然に時速・秒速の換算を身につけますから、かえって教育的であるとも言えなくもありませんが・・・

しかし、自分で工作のできる方なら、ピースピを改造して秒速表示に作り替えることはまったくできない相談ではありません。ピースピの速度測定は、約 39mm 離れて配置された 2 対のフォトインタラプタ（赤外線 LED とフォトセンサーで光がさえぎられるのを検知する）で、物体の通過時間の差を測定し、速度に換算していると考えられます。測定回路は変えられませんが、赤外線 LED やセンサーの位置変更はそれほど難しい工作ではありません。要するにフォトインタラプタの間隔を 3.6 倍すなわち 140mm にしてしまえばよいのです。そうすれば表示される数値は 3.6 分の 1 になるでしょう。

時間間隔が長くなることなどから、測定精度はぐんと落ちると予想されますが、それでも秒速表示ピースピは魅力的でしょう。でもそんな苦勞をするぐらいなら、電卓を使って 3.6 で割る方がずっと早いですね。



## 空気抵抗の問題

自由落下や斜面上の運動の速度・加速度測定では、Lアングルや透明パイプにビースピをとりつけ、運動体がビースピに衝突しないようにガイドするのが一般的です。透明パイプとしては、東急ハンズのPC管（外径 40mm × 長さ 1m、¥600）がビースピの内側にぴったりはまるのでおあつらえです。

図1はポピュラーな加速度測定装置の例で、上下のビースピの測定値  $v_1, v_2$  から

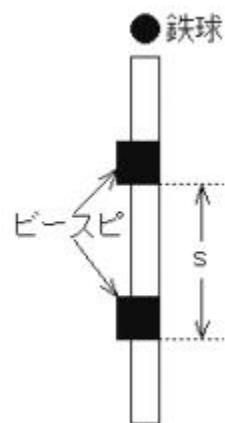
$$a = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2s}$$

として加速度を求めるものです。生徒実験では  $s=0.5\text{m}$  とすると計算しやすくなります。

しかし、管を使う場合には、空気の影響を忘れてはいけません。上記の装置はつい机の上に立てたくなりますが、管の下をふさぐと、圧縮された空気圧でブレーキがかかって、加速度に大きな影響が出ます。

上記の 40mm 径の管を鉛直に立て、28.5mm、95g の鉄球を落下させて比較してみました。すると、管の下をふさがない場合  $9.51\text{m/s}^2$  と得られる加速度の測定値が、四つ折りにした雑巾を机上に置いて、その上に管を立てたときには  $8.66\text{m/s}^2$  となり、9%もの差を生じるのです。

同じ管の中を単一乾電池（33mm 径）を落下させた場合では、管の下をあけておいても  $8.91\text{m/s}^2$ 、管の下を雑巾でふさぐと実に  $5.88\text{m/s}^2$  という結果になってしまいます。管を使う場合、空気の影響はあなどれません。落下する物体に比べ十分に直径が大きい管と、密度の大きい物体を用いるのが賢明です。管ではなく Lアングルを用いれば、空気抵抗の影響は半減します。

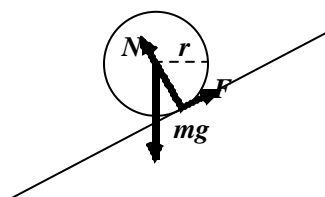


【図1】

## 斜面をころがす場合の加速度

同様の装置で斜面を下る球や模型自動車などの速度や加速度を測定することができます。質点の場合、この加速度は  $g\sin$  となるはずですが、例えば鉄球（28.5mm、95g）を用い、 $\theta = 30^\circ$  で測定した結果は、 $3.35\text{m/s}^2$  となり、 $4.90\text{m/s}^2$  にはほど遠く、芳しくありません。これは、主として球の回転運動のためです。

右図のように転がり摩擦  $F$  を受けながら滑らずに回転する半径  $r$ 、質量  $m$  の球を考えると、その並進運動の運動方程式は下のようになります。



$$ma = mgsin - F$$

一方、球の回転運動の運動方程式は、慣性モーメントを  $I$ 、角加速度を  $\alpha$  として

$$I \alpha = F r$$

となります。さらに、滑りがいい条件のもとでは  $a = r \alpha$  が成り立ちます。

半径  $r$ 、質量  $m$  の球の慣性モーメントが

$$I = \frac{2}{5}mr^2$$

であることを考慮してこれらの方程式を解くと、

$$a = \frac{5}{7}g\sin$$

を得ます。つまり転がり摩擦を考慮すると質点の場合の  $5/7$  の加速度になるわけです。  
 $= 30^\circ$  で、 $g = 9.80\text{m/s}^2$  としたときの理論値は  $a = 3.50\text{m/s}^2$  となります。 $g$  に空気抵抗がある場合の実測値  $9.51\text{m/s}^2$  を用いるなら  $a = 3.39\text{m/s}^2$  となり、測定値とさらによく一致します。

現行の物理教育課程では回転運動の運動方程式は学習しないので、筆者の授業では何もヒントを出さずにまず測定させ、質点の場合の理論値との一致がよくないことに気づかせています。そして、レポートを返却する際に、「実は・・・」と、発展的に種明かしの解説をしています。 $5/7$  については天下りになりますが、生徒たちは自らの測定値が理論通りだったことに安堵し、再び実験への信頼を取り戻すのです。

力学的エネルギー保存則を示す実験でも、斜面をころがす形だと回転運動に分配されるエネルギーは無視できません。力学的エネルギー保存則の実験には、回転運動を考慮しないですむ振り子を用いるか、回転運動の影響が少ない力学台車を使用するのがいいでしょう。

## 系統誤差と統計処理の簡便法

ピースピの測定値には、製品ごとのばらつきが認められます。このことは、ピースピが目ざされはじめたかなり早い時期から指摘されてきました。原因としては、二組のフォトインタラプタの取り付け精度の低さや、クロック周波数のばらつきなどが考えられますが、いずれも推測の域を出ません。いずれにせよ、系統誤差があることは事実です。系統誤差は標準値によって校正するのが正しい手続きで、事前に校正表や校正式を作っておくのが望ましいのですが、高校程度の生徒実験では以下のような簡便法も考えられます。

二つのピースピを用い、図1の方法で加速度測定をする場合を考えましょう。第一のピースピで測定する速度の真値を  $u$ 、第二のそれを  $v$  で表すことにします。それぞれには常に一定の系統誤差が伴い測定値は  $u + \Delta u$ 、 $v + \Delta v$  となるものとします。加速度は

$$2as = v^2 - u^2$$

から求められますが、上式の右辺は誤差を含んで

$$v^2 - u^2 + 2(v\Delta v - u\Delta u) + (\Delta v^2 - \Delta u^2)$$

となります。当然ながら、この測定を何度繰り返して平均しても、系統誤差は取り除くことはできません。特に第2項からの寄与が大きく、 $\Delta v$  と  $\Delta u$  の組み合わせによっては大きな誤差を生じる恐れがあります。

そこで、図1の装置の上下を入れ替えて、互いに逆方向から通過させる2回の測定を組み合わせ平均することを考えます。測定値は

1 回目  $u_1 + u, v_1 + v$

2 回目  $v_2 + v, u_2 + u$

であるものとします。それぞれの 2 乗の差は

$$(v_1^2 - u_1^2) + 2(v_1 v - u_1 u) + (v^2 - u^2)$$

$$(u_2^2 - v_2^2) + 2(u_2 u - v_2 v) + (u^2 - v^2)$$

となりますが、それぞれの第 1 項は真値  $2as$  であり、第 2 項以降の誤差を含む部分は、平均すると

$$(v_1 - v_2) v + (u_2 - u_1) u$$

だけになって、何もしない場合よりは影響を小さくおさえられます。

このように、図 1 の装置では、上下を入れ替えて測定した 1 組のデータを平均する方法が、高校生程度でも可能な簡易誤差処理として実用的です。

## 参考文献

ビースピに関する文献を、出版の時系列で列記します。

山本明利：速度を測れるおもちゃ「ビースピ」, YPC ニュース No.107, 1997/2/5

山本明利：ビースピの実験への応用, YPC ニュース No.108, 1997/3/5

市江寛：ビースピ生徒実験, YPC ニュース No.109, 1997/4/3

猪又英夫：スピード測定器「ビースピ」の紹介, ガリレオ工房通信 No.127, 1997/5/

馬目秀夫：ビースピの授業への活用, 物理教育通信 No.88, 1997/5/21

井上賢："BeeSpi"を使ってみました, 物理教育通信 No.88, 1997/5/21

浮田裕：スピード測定玩具（ビースピ）を用いた仕事と運動エネルギーの実験, 兵庫物理サークルニュース第 29 号, 1997/7/12

浮田裕：ビースピを用いた自由落下の実験, 兵庫物理サークルニュース第 30 号, 1997/7/19

浮田裕：ビースピを用いた力学的エネルギーの実験, 兵庫物理サークルニュース第 30 号, 1997/7/19

馬目秀夫：ビースピの授業への活用 II, 物理教育通信 No.90, 1997/11/18

片桐泉：速度計"ビースピ"重力加速度を正確に求める工夫, 物理教育第 46 巻第 2 号, 1998/4/30

佐藤久志, 細川敏幸, 小野寺彰, 阿部英一：速度計を使った楽しい「物体の運動」, 物理教育研究 No.26, 7-8, 1998

山本明利：ビースピでバッチリ・落下実験, たのしくわかる物理実験事典（東京書籍）, 1998/9/17

山本明利：ビースピで簡単・加速度測定, たのしくわかる物理実験事典（東京書籍）, 1998/9/17

>

( 2002/06/20 )