

■ 慣性の法則・相対性原理の授業

問題 1

- (1) 自転車に乗って、ほぼ一定の速さで走りながら、地面に引いた白線上を通過する瞬間、ソフトボールを静かに手放す。ボールはどのあたりに落ちるだろうか。

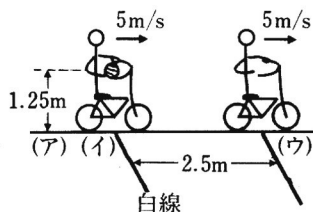
予想 (ア) ボールは白線の後へ落ちる。

(イ) ボールは白線の上に落ちる (自転車の後)。

(ウ) ボールは白線の前、自転車の真下に落ちる。

(エ) その他

〔ヒント〕 自転車が静止している時、ボールを1.25mの高さから落とすと0.5秒で落ちる。そこで自転車が $18\text{km/h} = 5\text{ m/s}$ で走っておれば、0.5s 秒間に自転車は $5\text{m/s} \times 0.5\text{s} = 2.5\text{m}$ 進むことになる。(自転車用速度計をつけて走るとよい)



- (2) 打ち出し装置のついた車がある。止まっているとき、球を真上に打ち上げたら元の位置に落ちるようにしておく。台車がほぼ一定の速さで走っているとき、球を真上に打ち上げたら

予想 (ア) 球は打ち出し口に落ちる。

(イ) 球は打ち出し口の後に落ちる。

(ウ) 球は打ち出し口の前に落ちる。



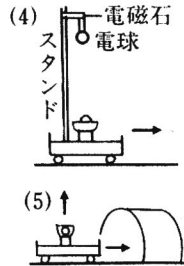
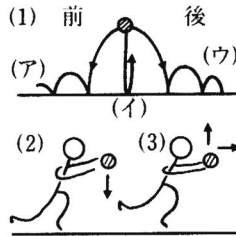
実験をするとき、あわせて次の実験もしてみよう。

- (1) 上の問題で、ボールが地面に落ちるとどのようににはねかえるか。

図(1)

- (2) ほぼ一定の速さで走っている人が、白線上にきた時ボールを落とす。また、ボールを真上に投げるとうなるか。

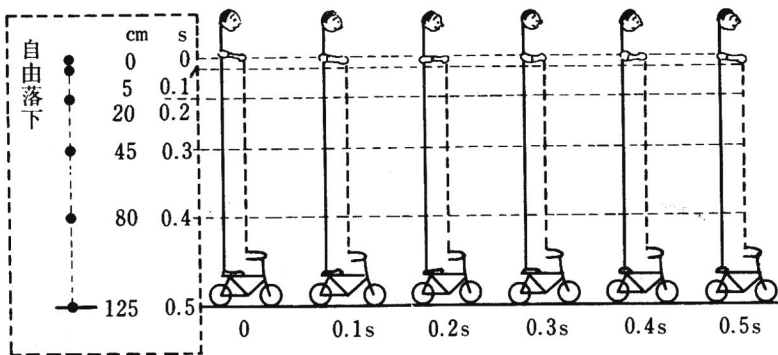
各自、試してみよう。図(2)図(3)



- (3) 図(4)のような装置で、台車の速さがほぼ一定の時、電磁石のスイッチを切って鉄球を落とすと、どうなるか。
- (4) (3)で、球を落とすのと、打ち上げるのを同時にする。2つの球は空中衝突するか。
- (5) 図(5)のように、トンネルの少し手前で球を打ち上げても、球が打ち出し口に入るようにできるか。

問題 2

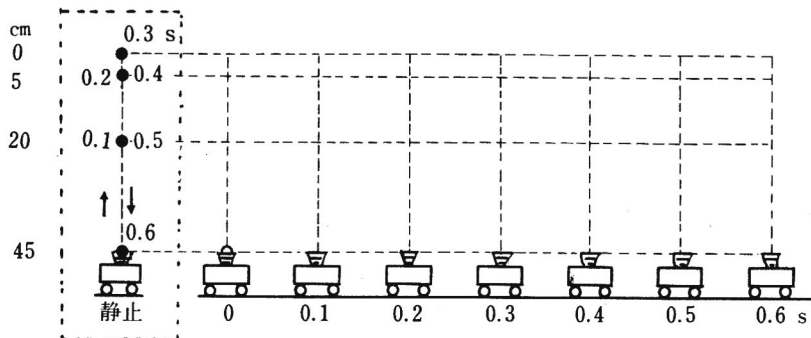
0.1秒ごとのボールの自由落下は左図のようになる。〔問題1〕の自転車の0.1秒ごとの動きが図に書いてある。0.1秒ごとのボールの位置を図に書きいれよ。



0.1s ごとのボールとボールを離した手の位置を赤い直線でむすんでみよう。
自転車で乗っている人から見ると () のときと全く同じ落ち方をする。

問題 3

- (1) 〔問題1〕(2)の台車の動きを0.1秒ごとにかくと、図のようになる。球を打ち上げてから0.6秒後に台車の高さまで落ちてきたとすれば、0.1秒ごとの球の位置はどのようなになるか。図の中に書きいれよ。

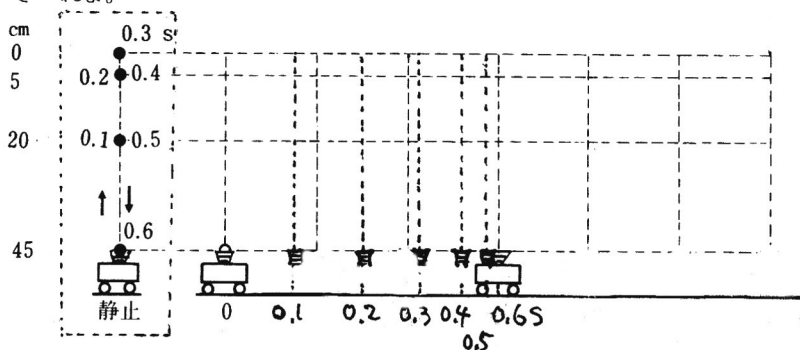


台車が止まっている時、球は上図のように上昇して落ちる。

図を書いたら、ストロボ写真を比較してみよ。

台車に乗っている人から見ると球はどのように落ちるか。0.1, 0.2秒……後の台車と球の位置を赤い直線で結んでみよ。

- (2) 〔問題1〕(2)で、球を打ち上げてすぐ、台車がどんどん減速し、0.6秒後に前の半分の距離だけ進んで止まってしまった。このときの球の位置を図の中にかきいれよ。



0.1, 0.2秒……後の台車と球の位置を、赤い直線で結んでみよ。

台車に乗っている人から見ると、球はどのように落ちていくか。

話1 慣性の法則

「一様に動いている乗り物の中でものを落とすと、ものが下に落ちている間に乗り物の方が前に動いてしまうから、真下よりも後の方へ落ちるだろう」ちょっと考えただけだともう思える。

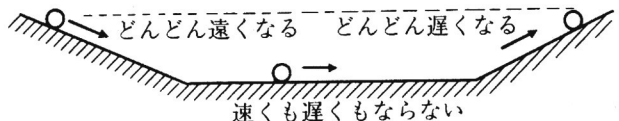
ところが、実際にはそんなことはおこらない。その乗り物がどんなに速くても、一様に動いているかぎり、乗り物が止まっているときと全く同じように、ものは真下に落ちる。これは不思議なことのようには思えるが、事実そうなるだから仕方がない。どうしてこんなことがおきるのか。それは、「ものには一度動いたらいつまでもその速さで動きつづける性質がある」からである。

だから、手からものが離れても今までどおり乗り物と同じ速さで走りながら落ちていくわけである。たとえ乗り物が急に減速したとしても、ものは今までどおり一様な速さで走り続ける。物体のこのような性質を「慣性」とよび、「ものは（力が働かなければ）いつまでも同じ速さで走りつづける」という法則を「慣性の法則」とよんでいる。

一様に動くのがものの本来の性質だという考えは、私たちの日常経験からすると大変理解しづらい。通常、ほとんどの運動が放っておけば止まってしまうからである。だから、古代のアリストテレス以来、ガリレオがでてくるまでの学者たちは、「静止がものの本性であり、力なしに動くということはありません」と考えていた。この考えは現在の私たちでも大変陥りやすい考えである。

これにたいして、古代の原子論者たちは、自然に運動が衰えてしまうようなことは決してない、運動は不滅だと考えていた。自然に止まってしまうようにみえるのは、運動を妨げるものがあるからだ、だから何もない空虚な中ではものの本来の性質で運動を続ける一つまり、すべてのものが等しい速さでまっすぐ動くというのである。この原子論者たちの考えは、今からみれば慣性の法則そのものであった。

ガリレオは落下法則を使って次のように考えた。「斜面を下りる



ときはどんどん速くなる。斜面を上るときはどんどん遅くなる。それなら、上りも下りもしない水平面上では、速くも遅くもならない運動——様な速さの運動をするはずだ」と。

そして「

様な速さの運動は、すでに天体の運動にその証拠があるではないか、それを地上に認めてどうしていけないのか」というのである。慣性の法則はものが静止しているときでもなりたつ。

$$v=c \text{ (一定)} \begin{cases} c \neq 0 & \text{等速度} \\ c = 0 & \text{静止} \end{cases}$$

このような式でかくと、静止は等速度運動のなかに含まれていることがわかる。つまり「止まっているものは速さゼロで走りつづける」, 「止まっているものは止まったままでひとりでに動きだすことはない」のである。

〔質問〕 地球は毎日一回、西から東へ回っているという。それなのに、どうして地球が動いていると感じないのだろう。やっぱり地球は動いていないのだろうか。それとも、動いていてもそれに気づかないわけがあるのだろうか。

話2 ガリレオの相対性原理

一様に動いている乗り物の中でもものを落とすと、まっすぐ下に落ちる。乗り物の中では、どんなものの運動も、止まっている時と全く同じように運動する。どんなに速い乗り物の中でも、それが揺れたりしない限りは止まっている時と全く区別ができない。これは、「等速度運動しているものの上では、静止してる時に比べて、何一つ力学的違いが見つからない。(全く同じ力学の法則が成り立つ)」という法則があるからである。この法則は自然の中で最も根本的な法則で、最初に発見したガリレオの名をとって「ガリレオの相対性原理」とよんでいる。これは、次のようにいうこともできる。

「等速度と静止は力学的には全く同じである。」

私たちには、等速度と静止が力学的に同じだなんて大変考えにくい。静止は止まっていることだし、動いていることとは明らかに違うようにみえる。アリストテレスもそう考えていた。むりやり動かされる運動にたいして、静止だけ

がもの本来の姿だというのである。ガリレオの相対性原理はこのような考えを真っ向から否定する。そもそも、運動は“何に対して”運動しているかを指定しないことには意味をもたない。基準（座標系）を変えれば、運動はまるっきり変わってしまう。これは等速度運動に限らずすべての運動にあてはまる。これを「運動の相対性」とよんでいる。（位置も相対的で「位置の相対性」とよばれる。）

あらゆる運動が相対的な中で、特に、互いに等速度運動の場合は力学的にも相対的であるというのがガリレオの相対性原理である。等速度運動しているものの上では、静止のときと何一つ力学的違いが生じないので、乗り物が止まっていて地面が動いているのか、地面が止まっていて乗り物が動いているのか、全然区別ができない。つまり、静止と等速度は力学的に対等平等で、単なる相対的關係にすぎない、不変なのは力学法則だということのである。

この原理は「等速度運動しているものの上では、自分が動いていると全く感じない」原理だともいえる。もしかりにそれが感じられるような原理に反することになる。私たちが宇宙船地球号に乗っていて、ものすごいスピードで動いていたとしても、そのことをまるで感じないのは、この原理があるためである。相対性原理といえば、このほかに「アインシュタインの相対性理論」があるが、これは、ガリレオの相対性原理をもっと一般的におし広めたもので、「相対的に一樣な速さで運動しているものの上では、力学法則だけでなく、電磁気などあらゆる自然法則が同じになる」といったものである。詳しくは後で学ぶことにしよう。

慣性の法則と相対性原理はどこが違うのだろうか。慣性の法則は、ある系から特定のある物体に着目したときの法則であるのに対して、相対性原理は、力学法則が不変となるような系と系（互いに等速度で、慣性の法則をみたとす系—慣性系）の關係に着目したものである。だから視点の違いだといってもよい。

話3 慣性の法則の応用例

アリストテレス的・経験的にみると、慣性の法則・ガリレオの相対性原理は一見不思議に見えるが、私たちの身のまわりをよく見直してみると、それらが

現われている現象や応用がいっぱいあることに気づく。

(1) 自動車で追突したとき、されたとき



車だけ急に止まるので、中の人間はフロントガラスをやぶってとび出る

シートベルトの着用

車と人のからだが一瞬に前へとび出るので、頭だけとり残され、首の骨がひずむ（ムチウチ症）

安全マクラの装備

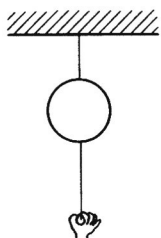
慣性の法則を示すいろいろな例（スポーツやおもちゃなど）をさがしてみよう。

〔練習問題〕 図のように重い物体の上下に同じ糸をつける。

下の糸を急激にひっぱると、

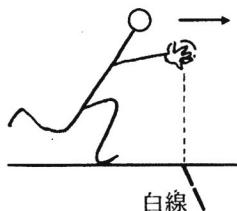
予想 (ア) 上の糸が切れる (イ) 下の糸が切れる

下の糸をゆっくりひっぱるとどうなるか。



問題 4

地面に白線をひき、等速度で走ってきた人が、チリ紙のような軽いものを白線の上から落とす。チリ紙は白線のどちらに落ちるか。



予想 (ア) 白線の前へ落ちる

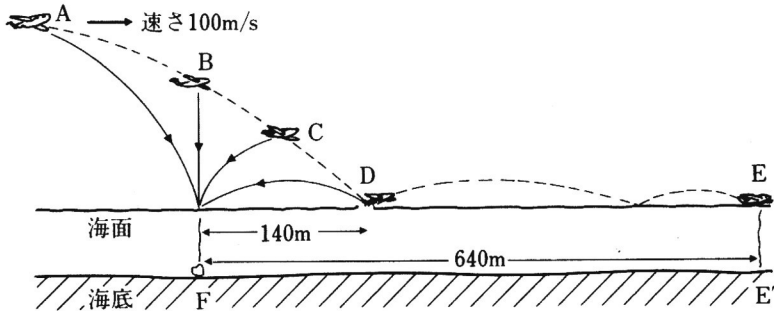
(イ) 白線の後へ落ちる

(ウ) 白線の上に落ちる

走っている人から見ると、チリ紙はどのように落ちていくか。これはどうしてか。予想を立てたら実験してみよう。

〔研究問題〕 1966年2月4日、全日空ボーイング727型機は羽田沖で着陸す

前に墜落、133名全員が死亡した。事故原因は不明とされたが、パイロットの操縦ミスか、機体に欠陥があったかいろいろ論争がされた。現場からは破片E'と機体の着水地点と思われるD点より後方約140mの地点から、第3エンジンのおおいF（大変軽い）が発見された。（図を参照）これだけのことから、第3エンジンのおおいは、A～Dのどの地点で離れたと考えられるか。



A～C点で離れたなら、着水以前にエンジンの事故が生じたことになり、D点で後へはねとばされたなら、着水以前にエンジン事故が生じたと断定できないことになる。

話4 質量（慣性質量）の話

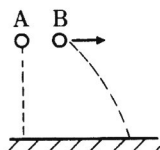
自動車の中から紙切れなどを外へ放りだすと車の後へ飛んでいく。ところがこれを地面から見てみると、落とした地点（白線上）よりは前へ落ちることがわかる。これは、軽いものは空気の妨害をうけやすいからであるが、いくら軽くても、ものには慣性がある、そのままの速さを保とうとするからである。空気の妨害をうけて、重いものと軽いものに運動の差が生じるのは、重いものほど動きにくく止まりにくい性質があるからである。「物体の運動状態をそのまま保ち、運動の変化に逆らうという性質—慣性—の程度は重いものほどよい」。

慣性は、重い軽いに関係なくすべてのものにある性質であり、量的なものは一切含まれていない。慣性の大きさを量的に表わすときは、「慣性質量」とよぶ。この慣性質量は、静力学で習ったときの質量（重さ）と同じものと考えてよいことがわかっている、単に「質量」ともよばれる。そして、g、kgと

いう単位で表わす。

問題 5

二つの同じビー玉 A, B がある。A を自由落下させると同時に、B を同じ高さから水平に打ち出す。どちらが先に床につくか。



予想 (ア) A の方が先につく。

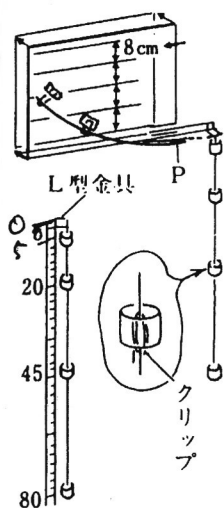
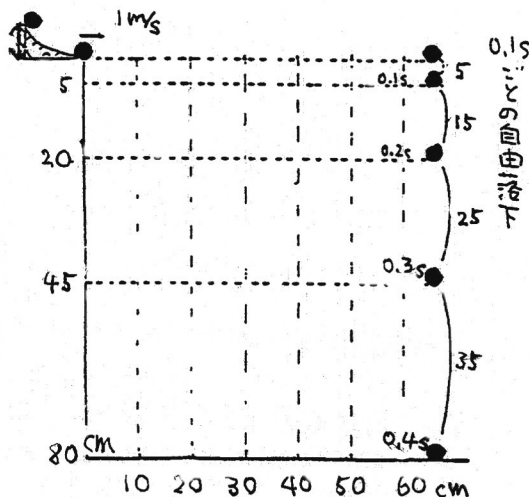
(イ) B の方が先につく。

(ウ) 同時につく。

どうしてそう思うか。討論してからどんな実験をすれば良いか、方法を工夫して実験しよう。

問題 6

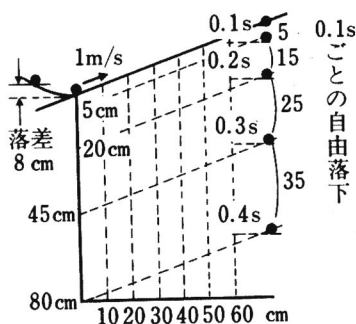
(1) ビー玉を水平方向に 1m/s の速さで飛びださせたらどのような形を描いて飛ぶと思うか。下の図に 0.1s ごとの玉の位置に ● 印をつけよう。



(2) 2倍の高さ (16cm)

から落したときの0.1
s ごとのビー玉の位置
に×印をつけよう。

(3) 落差 8 cm で斜め上
方に 1 m/s で飛ばし
た時はどうなるか。



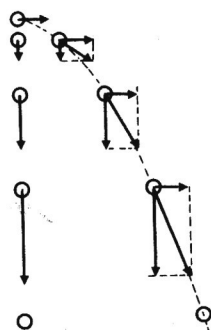
右上図のように「命中式速度計」の先端に糸でキャップをつるす。ものさしを先端 P から 10, 20, 30, 40cm につき出すと 5, 20, 45, 80cm の位置のキャップに次々と命中する。

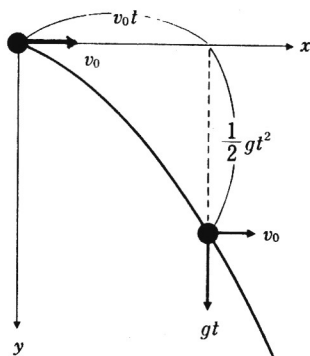
話 5 速度の合成・分解の話

ビー玉が水平に飛び出したとき、水平方向の運動は落下運動の影響をまったくうけず、飛び出したときの速さと方向をそのまま保って運動する（慣性の法則）。一方、落下運動の方も水平方向の運動に全くおかまいなく勝手に自由落下する。このように、1つの運動が他の運動に全く影響をうけないということを《運動の独立性》とよんでいる。ビー玉の実際の運動は、この2つの独立な運動が同時に実現しているわけで、図のように2つの運動をベクトルの的に合成してやればよい。逆にビー玉の運動を水平方向と鉛直方向に分けて考えてもよいことがわかる。このように速度*はベクトルであり、静力学で習った力と同じように合成・分解ができる。

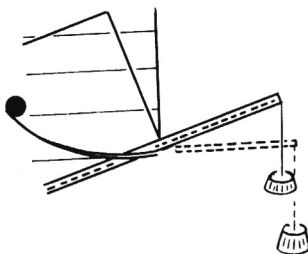
落下法則の最初に「命中式速度計」を習ったが、水平に飛んだ距離で飛び出すときの速さが比べられるのはこのような理由があるためである。さらにこの速度計は、水平だけに限らず、斜め方向に飛び出してもその速さを

比べることができる。図のように、ものさしの先端に空きビンのフタを吊るせば、球がフタまで自由落下する間に、どれだけ斜めに飛んだかで速さがくらべられるわけである。





黑板にはった紙はそのままにして
透明板全体を傾ける



上図右のように、 x, y 軸をとり、水平に速さ v_0 で飛びだしたビー玉の t 秒後の位置と速度 x, y 成分に分けてかくと、次のような式にかけると、

速度； x 方向 $v_x = v_0$ y 方向 $v_y = g t$

位置； $x = v_0 t$ $y = \frac{1}{2} g t^2$ $y = \left(\frac{g}{2 v_0^2}\right) x^2$

(*) 大きさだけのとき“速さ”，大きさと向きもベクトルとして扱うときは，特に“速度”といって区別することが多い。

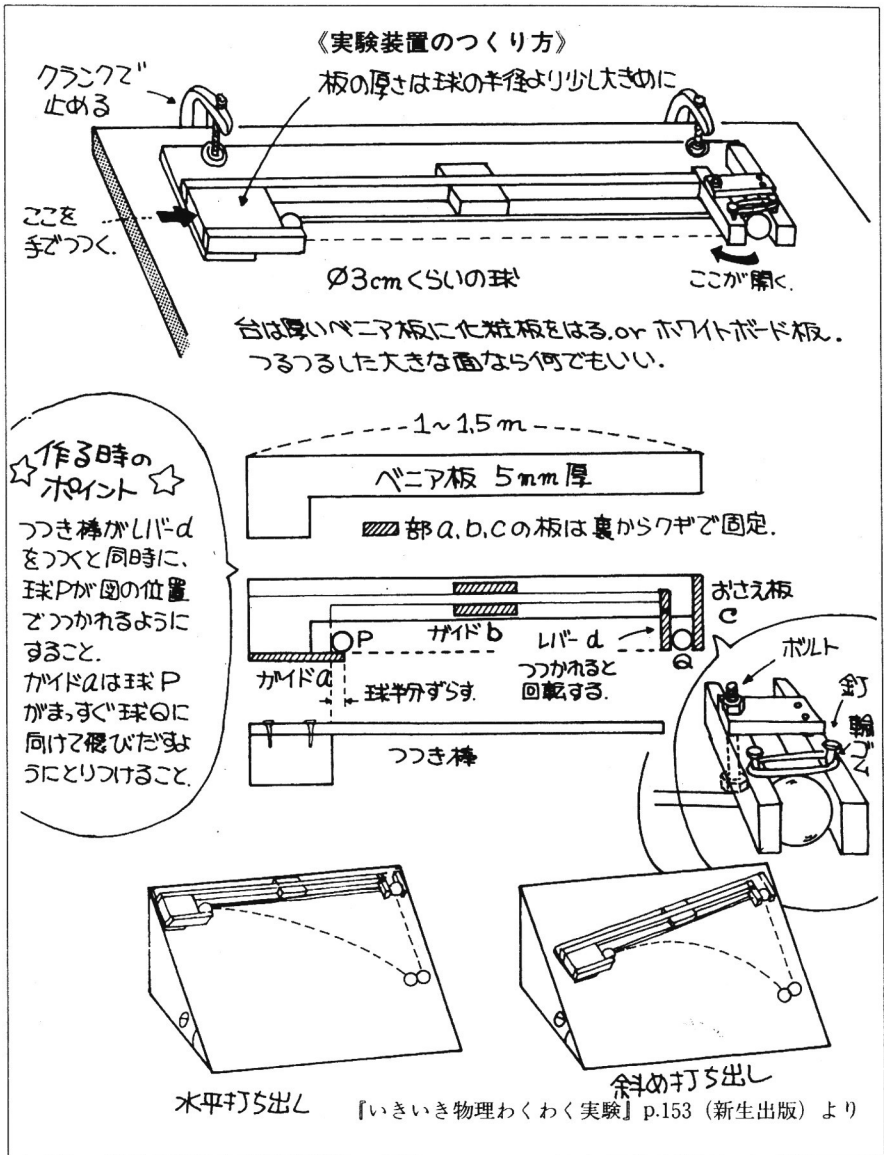
問題7

(モンキーハンティング) 木にサルがぶらさがっている。銃口をまっすぐサルに向けてうった。銃をうつと同時に，サルは手を離れた。はたしてサルに命中するだろうか。ただし，弾丸はサルより十分遠くへ飛ぶものとする。

予想 (ア) 命中しない。 (イ) 必ず命中する。 (ウ) 初速やうつ位置や角度に関係するので命中する場合もあれば，命中しない場合もある。

討論をしてから実験してみよう。

- (1) 最初ある角度でうったら，次に角度を変えて実験してみよう。この場合はどうなるか。
- (2) うちだし速度を変えたらどうなるか。



装置のとりつけかたを変えても、打ち出し速度を変えても、斜面の傾き θ を変えても必ず衝突する。

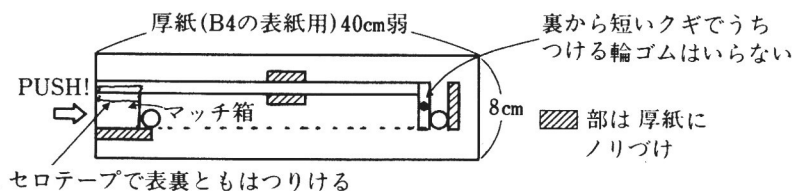
本当は、斜面を使うと、下方への回転が大きく影響するが、2つの球が同じ大きさであれば回転の影響は同じになって、回転は考えなくてもよくなる。

この装置を水平 ($\theta=0$) にして球を打ち出せば、初速度の方向へ慣性運動すること、斜面を傾ければ慣性運動からのズレ (重力の作用) がはっきりと確認できるのがこの装置の特徴といえよう。また、瞬間的運動をスローモーションにできる意義も大きい。重力の成分が板の傾きによって自由自在に変えられる。

〈実験の方法〉

同時発射装置を平らな板にとりつけ、板を鉛直にして実験してみよう。水平打出し、斜め打出しなど、装置の傾きをいろいろ変えたり、打出し速度をいろいろ変えてやってみよう。また板の傾き θ をいろいろ変えて実験してみよう。特に板が水平のとき ($\theta=0$)、打ち出した球がどう転がっていくかに注目し、傾きを大きくしていくとどうなるかを考えよう。

〈グループ実験〉ミニモンキーを作ろう。図のような厚紙は 1cm 角の角材を糊づけし、各人の机を傾けて、実験してみよう。玉はビー玉。もっといい工夫はないか。いろいろ考えてみよう。



距離が短いのでビー玉 ($\phi 1.7\text{cm}$) で十分正確にできる

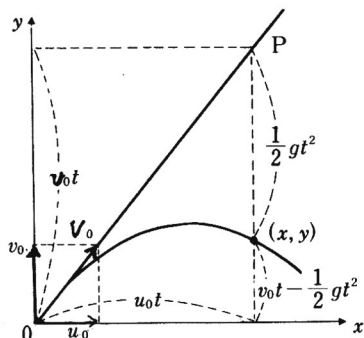
話 6 放物運動 —慣性運動と落下運動の組み合わせ—

地上でものを投げたときの運動—放物運動—は、飛びだすときの位置や初速度 (向きを含む) によってずいぶん形が変わる。でも、モンキーハンティングの実験でわかるように、ものはどんなふうに飛びだしても、大変簡単な法則にしたがって運動していることがわかる。

もし仮に、落下することがなければ、 $O \rightarrow P$ に向かって等速直線運動 (これは慣性の法則にしたがう運動なので慣性運動ともいう) をするはずである。ここで注意してほしいのは、慣性運動の方向は水平方向に限らずどちら向きでもよいことである。しかし、実際は、打ちだした球もサルが落ちる分 (自由落下分) だけは確実に鉛直下向きに自由落下する。球の落ち分はどの時刻をとっ

てみてもサルと同じである。つまり、サルが落ちる分だけ球も落ちるので、どのようにうっても必ずサルに命中してしまうのである。だから、どのような放物運動も、どちら向きでもよい $O \rightarrow P$ 方向の慣性運動に、鉛直下方への自由落下分を考慮するだけでよいのである。

斜面上では、重力加速度 g が小さくなって a になるだけのことである。図のように x, y 軸をとり、 $O \rightarrow P$ 方向の初速度 v_0 の水平成分を u_0 、鉛直成分を v_0 としたときの、 t 秒後の球の位置と速度は x, y 成分に分けてかくと次のような式にかけらる。



$$\text{速度 } x \text{ 方向； } v_x = u_0 \quad \cdots \cdots \textcircled{1}$$

$$y \text{ 方向； } v_y = v_0 - \underline{gt} \quad \cdots \cdots \textcircled{2}$$

$$\text{位置 } x \text{ 方向； } x = u_0 t \quad \cdots \cdots \textcircled{3}$$

$$y \text{ 方向； } y = v_0 t - \underline{\frac{1}{2} g t^2} \quad \cdots \cdots \textcircled{4}$$

——慣性運動， $\sim$ 落下運動

④式から、 t を消去すると

$$y = \left(\frac{v_0}{u_0}\right)x - \left(\frac{g}{2u_0^2}\right)x^2 \quad \cdots \cdots \textcircled{5}$$

数学で $y = -ax^2 + bx$ (a, b 定数) とかく放物線の軌跡が得られる。

斜面上の運動は重力加速度 g を斜面に沿った加速度 a でおきかえてやればよい。真上に v_0 で投げ上げたときは上の式 y 成分のみを考えればよい。

初速度 v_0 で等加速度直線運動 (加速度 a) をするとき

$$v = v_0 + at$$

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$$

$$v^2 - v_0^2 = 2as$$

ここで、一次元の初速のある時の、等加速度運動をあつかう。