

# 電車で「力学」を体感する

通勤・通学が楽しくなる「動く力学実験室」

名前：山本明利

Romaji：YAMAMOTO Akitoshi

p48-51

## 電車は動く力学実験室

電車（脚注：非電化区間の列車をご利用の方は、「ディーゼル列車」「気動車」などと読み替えてください。）はよく力学の話題に取り上げられます。身近な公共交通機関で誰でも経験があることに加えて、運行規程が厳密なので乗用車やバスに比べて加速・減速が一様で、最高速度も一定していること、直線運動区間が多いこと、何よりも揺れが少ないことなど、力学的な現象の観察に最適の条件を備えているのがその理由です。

すいていれば座席に腰掛けてじっくりと車内の現象や車窓の観察を楽しむことができます。立って吊革につかまっているときは、慣性力による見かけの重力（後述）を身をもって体感することができます。

電車の中は力学の話題に満ちています。ちょっとした知識と力学的な視点を持っていれば、退屈な毎日の通勤・通学電車が楽しい観察の場になる？ かも・・・

## 電車の速度グラフ

電車はどのぐらいの速さで走っているのでしょうか。先頭車両の運転台がのぞける電車なら、運転士の前の速度計を見れば時速何 km で走っているかはすぐにわかります。

自動車のインスツルメントパネルと違って、回転計や走行距離の表示はありませんが、次の



図1 電車の運転台

速度計は列車運行上一番重要な計器なので、運転士の正面に配置されている。

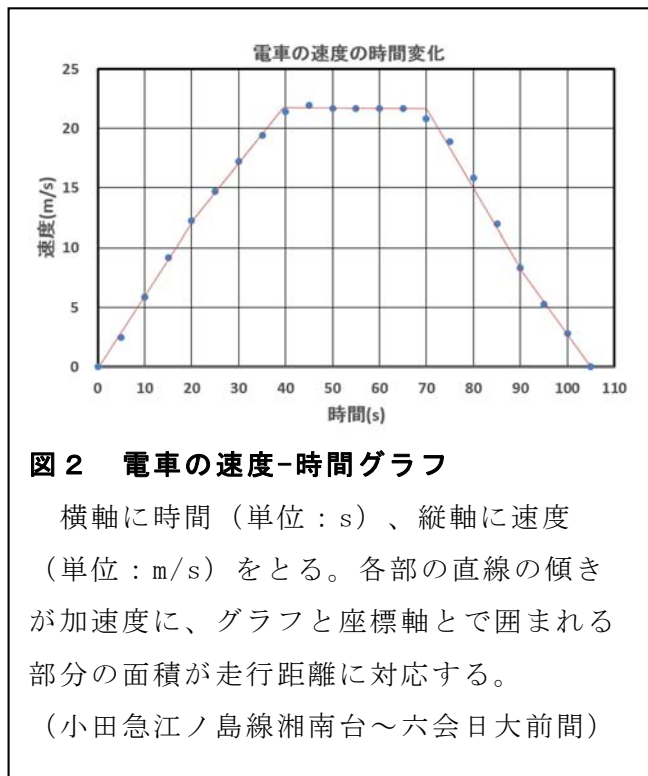
ようにすれば比較的簡単に加速度や走行距離も求めることができます。

最初の例題とするには、できるだけ処理しやすい単純なデータがよいので、身近な路線から次のような条件を満たす区間を探します。

- ・アップダウンのない水平な直線区間
- ・時間にして数分、距離にして数 km 以内の駅間（各駅停車が最適）

測定区間が決まったら、運転台のすぐ後ろに陣取り、発車から次の駅で停車するまで、速度計を中心に大写しにしてスマホやビデオカメラに動画を記録します。あとでゆっくり解析するためです。

動画を再生しながら、発車時刻（運転士が運転台のレバーを操作した時刻）から時間を計測し、決まった時間間隔（5～10 秒程度）ごとに



速度計の読みを記録します。速度は時速表示ですが、あとで秒速に換算しておきます。（脚注：1 km/h=1000 m/(60×60) sなので、時速の数字を3.6で割り算すると秒速の数字になる。）

時間(s)を横軸、速度(m/s)を縦軸にとってグラフを描いてみましょう。図2は筆者の自宅近くを走る小田急江ノ島線での測定例です。かなりきれいな台形のグラフになりました。中学や高校の力学の問題によく登場する台形の速度グラフです。電車は本当にそのような走り方をしていたんですね。

## 速度グラフからわかること

「加速度」とは速度の時間変化率のことですから、速度グラフの適当な区間で、速度変化をそれにかかった時間で割り算すればその区間の加速度が求まります。これは図形的に言えばグラフの傾きをもとめていることとなります。

図2のグラフで、例えば0～20秒の区間を例にとると

$$\text{区間の加速度} = \frac{12.2 \text{ m/s}}{20 \text{ s}} = 0.61 \text{ m/s}^2$$

となります。電車や地下鉄の加速度は普通、0.5～1 m/s<sup>2</sup>程度です。

一定の速さで進む場合は「速さ×時間」が走行距離になりますが、図2のように速さが増える運動でも、「グラフと座標軸で囲まれる部分の面積」を計算するとその区間の走行距離を求めることができます。上と同じ0～20秒の区間を例にとると、グラフの下の三角形の面積は「底辺×高さ÷2」で

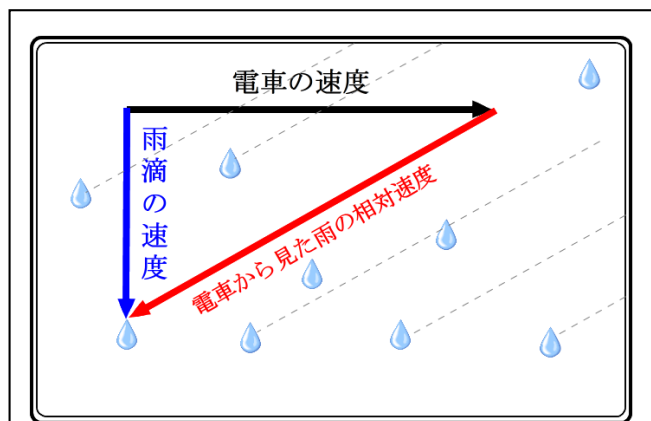
$$\text{区間の走行距離} = \frac{20 \text{ s} \times 12.2 \text{ m/s}}{2} = 122 \text{ m}$$

となります。図2のグラフ全体を台形とみてその下の面積を求めると約1465 mとなり、地図上で計測した駅間距離1480 mとかなり近い値が得られます。図2のグラフをよく見ると20秒と90秒のところでわずかに折れ曲がっていますから、それも考慮して多角形の面積を求めると一致はさらによくなります。詳しくは文献1,2をご覧ください。

## 相対速度の観察

東京駅の近くでは山手線と京浜東北線の電車が隣り合う線路を同じ向きに走ります。両者はほぼ同じ速さで走りますから、たまたま発車のタイミングがそろると、それぞれの列車がぴったり並んで走ることがあります。すると、走行中にもかかわらず相手の列車が止まっているように見え、向こうの乗客を窓越しに至近距離で観察することができます。窓を開けたら言葉が交わさそうなほどです。こちらの列車が先にブレーキをかけると、相手の列車が加速しているような錯覚を覚えます。

このように、運動している観測者が、自分を基準にして他の運動物体を見るときに感じる見かけの速度を「相対速度」と言います。相対速



**図3 車窓に見る雨の相対速度**

電車と雨滴の速度ベクトルの始点をそろえて置き、「電車から雨を見る」ように各矢印の終点同士を結ぶ矢印（赤）を描くと、電車から見た雨滴の相対速度になる。

度は相手の速度から自分の速度をそれぞれ符号付きで引き算して求めます。先ほどの並走する電車の例では向きも含めて両者の速度が等しいので、引き算すると相対速度は0になります。

雨の中を進む電車の窓から降る雨を見ると、実際には風はないのにひどい吹き降りに見えることがあります。これも見かけの運動です。

図3のように雨粒と電車の速度ベクトルを描いて、差のベクトル（赤矢印）を作図すると雨滴の相対速度ベクトルになります。p. 66-67の記事にあるように、雨滴の落下速度（青矢印）は大粒の雨でも 10 m/s (36 km/h) 程度なので、走行中の電車から見るとおよそ図3ぐらいの角度になります。雨の落下速度が小さいほど、ひどい横殴りに見えますが、降りてみたら意外と大したことがなかったという経験はありませんか。

### 加速度運動と慣性力

発車直後の加速時や、次の駅に向けて減速しているときに、電車内の人には体を持って行かれそうな感覚を感じて、足を踏ん張ったり、つり革を引いたりします。しっかりつかまっていな

いとよろけることもあります。

電車の床に不心得者が置き去りにしていった清涼飲料の空き缶が横倒しになっていて、電車が加速したり減速したりするたびに後ろへ、前へと転がっていくのを見たことがありませんか。よく観察すると、電車が動いていても、一定の速度で走行中は転がらないようです。

確かめの実験は図4のように電車の窓枠やテーブルの上に空き缶を置いて行うことができます。電車が加速中は後ろに、減速中は前に転がるのが観察できます。くれぐれも空き缶は放置しないでくださいね。

この現象は、ホームに立って発車を見送っている人が、窓越しに観察したとすると、「窓枠は電車と共に動き出したが、空き缶は慣性でその場にとどまろうとした」と説明するでしょう。よろけた乗客についても「体はその場に残ったが、電車の床が動いたので足もとをすくわれた」と説明します。

でも車内の人には、空き缶に後ろ向きに力が加わったように見え、自分自身も後ろに引かれたような力を感じます。このように加速度運動している観測者が感じる見かけの力を「慣性



**図4 転がる空き缶**

空き缶は、電車が一定の速度で走行中は動かないが、電車が走り出す時は後ろに、ブレーキをかける時は前に転がる。

力」といいます。慣性力は普通の意味での「力」ではなく、力を及ぼす主体、いわゆる「主語」がありません。加速度系での論理を完結させるために、はたらいたと見なす見かけの力です。回転している運動体の中で観測される「遠心力」や「転向力」も慣性力の一種です。

## 見かけの重力

ここで図5のような思考実験をしてみます。停車していた電車が右へ加速度運動し始めると同時に、車内の天井からボールを自由落下させたとしましょう。それぞれの色が時間の経過に対応しています。ホームで電車を見送っている人には、上の図のように電車は電車、ボールはボールでそれぞれ独立に加速度運動しているように見えます。

同じ現象を車内の人が見たらどう見えるでしょうか。車内の人は車両を基準に観察しているので、下の図のようにボールが斜め後ろに落ちていくように見えます。ボールを後ろに動かし

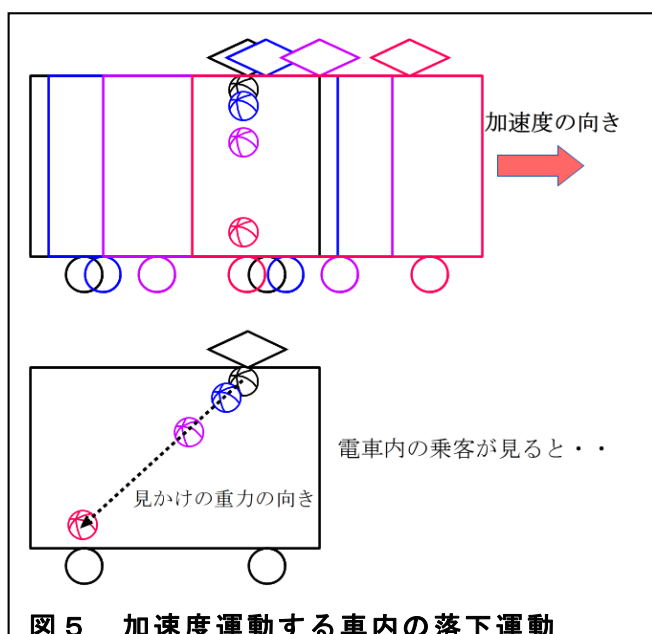


図5 加速度運動する車内の落下運動

自由落下するボールを加速度運動する電車内の人が見ると、重力が斜めにはたらいているように感じられる。水平方向の動きは誇張してある。実際は1/10以下。

ているのが先ほどの「慣性力」です。この慣性力ともともとの重力との合力がボールを斜めに落下させていると考えるのです。この合力のことを「見かけの重力」といいます。

加速中の電車内で注意深く観察すると、つり革やぶら下げた傘が見かけの重力の方向に傾くのが見られます。立っている乗客も、見かけの重力に沿って若干斜めになって足を踏ん張ったり、つり革を引っ張ったりしています。車内の人にとっては「慣性力」は現実の力なのです。

## スマホの加速度計アプリで楽しもう

スマートホンやタブレット端末には重力の方向を検知する加速度センサーが内蔵されていて、どの向きに保持しても画面が上下正しく表示されるようになっています。このセンサーは見かけの重力を感知するので、まさに加速度を測定するのに使えます。実際、この原理でスマホ自身がどのような加速度で運動しているかを表示する多数のアプリが「加速度計」で検索するとヒットします。フリーのものもありますので、お好みのものを選んで乗り物の加速度を実際に測定してみてください。当分、通勤・通学時に退屈しなくてすみますよ。

## 参考文献

- 1) 山本明利(2015)「高校教師が教える物理実験室」工学社
- 2) 山本明利「生徒実験・等加速度運動」  
[http://www2.hamajima.co.jp/~tenjin/hakuyo/library/physics/motion\\_of\\_train.pdf](http://www2.hamajima.co.jp/~tenjin/hakuyo/library/physics/motion_of_train.pdf)

## プロフィール

やまもとあきとし

おかげさまで「新しい高校物理の教科書」(講談社ブルーバックス)はロングセラーとなりました。現在22刷です。