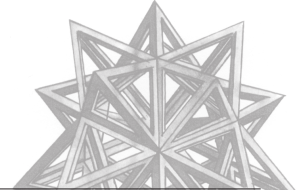


# 滑り台は大人の方が速い!?(前編)



**村田次郎** むらた じろう

立教大学理学部

重いものの方が速く落ちる。これは日常経験からもしっくりくるイメージだ。ところが、これは空気抵抗のせいであって空気がなければ本来、落下速度は重さによらない。このことを示した逸話がガリレオの「ピサの斜塔の実験」だ。この発見を端緒として近代科学は花開き、ニュートンの力学という形で一つの完成をみた。そしてこれに従うと、斜面を滑り落ちる物体の速さは、やはり重さによらないはずなのである。ところが大人になって滑り台を滑ってみると、明らかに子どもより速いように思える。これはおかしいではないか……。この謎を解く鍵は、斜面との摩擦の性質が握っている。前編と後編に分けて、この摩擦についてナナメから眺めてみよう。

## ピサの斜塔の実験

ガリレオ・ガリレイは手作りの望遠鏡で木星を観察し、地球の月と同じように木星の周りを回っているような動きをする木星の衛星を発見した。そこから天文学への興味をもち、地動説を支持する証拠と解釈できる観測事実の数々を示したことで有名だ<sup>1</sup>。それよりずっと以前に落体の運動について考察し、当時主流だった「重いものほど速く落ちる」というアリストテレスの考え<sup>2</sup>に逆らって、「自由落下の一様性(普遍性)」を主張したという<sup>3,4</sup>。これはピサの斜塔の実験の逸話に象徴される、重さによらず重力で落ちる速さ(加速度)はみな同じなのだという「落体の法則」と呼ばれる考え方だ。ガリレオは、動いているものは動き続けるのが自然である、という「慣性の法則」も発見し、ニュートンの力学へと導く決定的な法則の数々を見出した。自由落下の一様性の発見はまさに現代の科学文明の出発点に位置する金字塔である。

## 自由落下の一様性

さて落体の法則(自由落下の一様性)とはどのような考え方だったか、ニュートン力学にもとづいて整

理してみよう。慣性の法則に従って物体は外から力が加わらない限り、等速運動を続ける。そして物体に備わる慣性の大きさを慣性質量と呼ぶ。ここに力が加えられると、等速運動する状態が変化。速度の変化、すなわち加速度が発生する。これを表すのがニュートンの「運動方程式」であり、

$$\text{加速度 } a = \frac{\text{力 } F}{\text{慣性質量 } m}$$

となる。 $ma=F$ として覚えたであろう、あの有名な公式だ。ここから、慣性質量とは力が加わったときの物体の動きにくさを表す量であることがわかる。慣性の大きいものを動かすのは大変、ということである。

次に重力を考える。言葉の通りだが、重いものには強い重力がはたらく。そこで物体に備わった性質のうち、重力の強さは重力質量という量に比例するものと考え。電気力の場合の電荷と同じで、重力への感受性を表すものである。すると、物体にはたらく重力の強さは

$$\text{重力 } F = \text{重力質量 } M \times \text{定数 } g$$

となる。定数  $g$  は重力場の強さと呼ばれ、場所によって定まる量である。例えば地表面では場所を

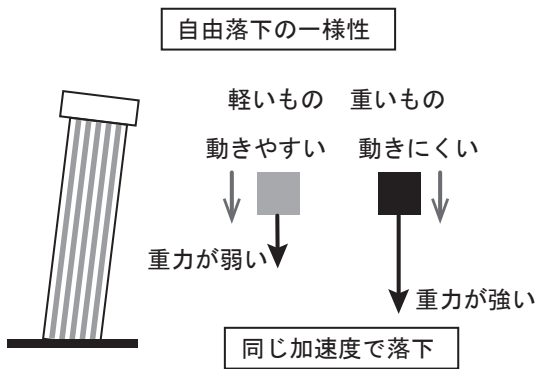


図1—ピサの斜塔の実験と「自由落下の一様性」(文献5より引用)

問わずほぼ一定値(約  $9.8 \text{ m/s}^2$ )をとる。上の二つの式を合わせると、

$$\begin{aligned} \text{重力 } F &= \text{重力質量 } M \times \text{定数 } g \\ &= \text{慣性質量 } m \times \text{加速度 } a \end{aligned}$$

であるから、重力で落下する加速度は

$$\text{加速度 } a = \frac{\text{重力質量 } M}{\text{慣性質量 } m} \times \text{定数 } g$$

となる。自由落下の一様性は加速度が物体によらず一定だということであるから、これは「重力質量と慣性質量の比が、全ての物体で共通である」という重大な主張を意味している。この比が  $M/m = 1$  となるように  $g$  の値を定めれば、図1のとおりすべての物体は加速度  $a = g$  で落下することになる。 $g$  は本来、重力場の強さを表す量だが、上記の理由から重力加速度という特別な名前が付けられている。

しかし考えてみればこの主張は実に不可思議だ。どんな種類の力に対しても動きにくさを示すのが慣性質量であり、重力という特定の種類の力とはなんの関係もないものである。しかし現代に至るまでのすべての実験結果は自由落下の一様性を支持しており、13桁という驚異的な精度でその正しさが確認されている<sup>6</sup>。筆者自身もわずか1cmほどの小さな物体による重力でもこれが成り立つことを実験で示したことがある<sup>7</sup>。この実験は最も小さな物体に対する検証の世界記録となってお

り、自由落下の一様性は個人的にもとりわけ思い入れの強い法則である。

この法則は慣性質量と重力質量は互いに等価であることを意味しており、「等価原理」と呼ばれている。この原理をもとに、例えばエレベーターの中で感じる上下方向の力は重力と似ているが、単に似ているだけでなく全く同じものである、と踏み込んだ考え方をしたのがアインシュタインの一般相対性理論の発想である。だから宇宙ステーションの中で浮かんでいる宇宙飛行士は、重力と遠心力がつり合っていると考えてもよいが、等価原理によって地球の重力が本当に消えたと考えてもよい。

以下では等価原理にもとづき、慣性質量と重力質量を区別せず単に質量と呼ぶことにする。

## 空気中の落下運動

アポロ15号の宇宙飛行士が月面で、ハンマーと羽根を同時に落とす有名な実験があるが、それらは見事に同時に着地した。これは実は宇宙で行ったことではなく、真空中で行ったことが本質である。中学・高校の理科の授業でも、空気を抜いた容器の中で落下実験を行いこの現象を確認する。だからわざわざ月まで行ってやった意味はないのだが、自由落下の一様性を強烈に印象付ける効果は絶大である。

そう、実はピサの斜塔の実験はそのまま行くと空気抵抗があるので同時には落下しない。これは日常感覚通りの結果で、空気抵抗は物体の質量には無関係で、物体の大きさと速さだけで強さが決まるためだ。大きさが同じ羽根とハンマーなら空気抵抗の強さは同じだが、空気抵抗と重力の比は羽根とハンマーで同じにはならない。結果としてハンマーが速く落ちるわけだ。これが常に空気のある世界で生きてきた人間の生活経験にもとづくイメージであり、重いものは速く落ちるという考えは全く正しい。ただし空気抵抗があるならば、という条件付きである。

ガリレオの慧眼は、空気抵抗は余分な効果であ

って自然本来の姿としては落下の速さは重さによらないはず、という性質を見破った点に表れている。物事を切り分けて整理して考える、科学的態度のお手本である。真空の存在を認めなかったアリストテレスにはやや不公平ではあるが、ガリレオはこうして観察事実をもとに日常経験とアリストテレスのバイアスを打ち破ったのである。

## 滑り台上の落下運動

さて本題の滑り台について考えよう。そもそも、なぜ滑り台に着目するのか。ガリレオ自身も実際はピサの斜塔ではなく「斜面の実験」を行って自由落下について考察を深めたと伝わるが、ここでは筆者の日常生活での違和感が発端だ。落体の法則を勉強していた学生時代には想像もつかなかったことではあるが、大人になって子どもと公園で滑り台を滑ってみると、これが怖いくらいに速いのである。なんと試しても、どんな姿勢で試しても、明らかに速い。

自由落下の一様性の信奉者たる筆者としては当然、まずは空気抵抗のせいにしたくはなる。しかし滑り台を滑る速さは遅すぎて、減速するには空気抵抗は弱すぎる。スキーや自転車の場合と違って、空気抵抗は体感でさほど感じない。

となると、減速の主要因は滑り台との接触、つまり摩擦以外にはない。ここで再びニュートンの力学で整理してみる。

質量  $m$  × 加速度  $a$  = 重力 - 摩擦力

今度は、滑り台の下方方向への重力の他に、逆向きに「摩擦力」がはたらく。重力は重力加速度、質量、そして斜面の角度がわかれば正確に計算できる。問題はこの摩擦力だが、これは高校の物理学の教科書によれば

動摩擦力 = 動摩擦係数  $\mu$  × 重さ  $mg$

らしい。動摩擦とは、動いている物体にはたらく摩擦のことだ。質量  $m$  の物体が置かれた面が水平から傾いていれば、重さの部分は少し小さくな

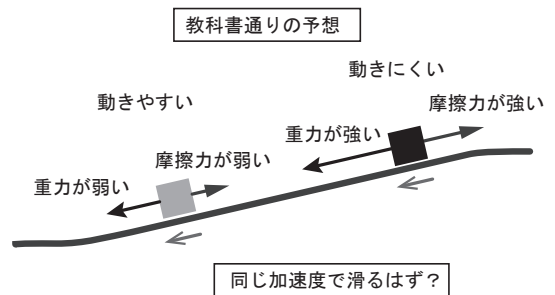


図2—斜面上でも「自由落下の一様性」が成り立つはず？  
(文献5より引用)

る。物体が面をどれだけの強さで押し付けているかに、摩擦力の強さは比例しますよ、というもってもらいたい法則だ。この式は「アモントン-クーロンの法則」の一つとしても知られている。

その比例係数が動摩擦係数  $\mu$  である。これは動いてさえいれば、速度や、物体の質量によらず一定であると教科書に書いてある。上記をまとめると結局、動摩擦力は質量に比例することがわかる。物体が滑り台を垂直に押し付ける力が質量に比例するからだ。

さてこれで運動方程式を考えることができる。傾きを  $\theta$  としてその補正を入れると、

$$\begin{aligned} \text{質量 } m \times \text{加速度 } a \\ = \text{重力 } mg \sin \theta - \text{摩擦力 } \mu mg \cos \theta \end{aligned}$$

となり全ての項が質量  $m$  に比例することから、落下の加速度は

$$\text{加速度 } a = g(\sin \theta - \mu \cos \theta)$$

となる。したがって、重力加速度の値が自由落下の場合の  $(\sin \theta - \mu \cos \theta)$  倍になるだけで、落下加速度は物体の質量によらない。上記で三角関数の部分が傾きの補正であるが、ここでは本質的ではないのでさほど気にしなくてよい。

では「大人の方が滑り台を速く滑る」、つまり「重い人ほど速い」のは、何かの見間違いなのだろうか？(図2)

## 自然法則の格付け

空気中で羽根とハンマーを落とせば、ハンマーの方が速く落ちる。それは観察された事実であって、見間違いではない。そしてこの問題は空気抵抗によって無事に解決する。

一方、滑り台の謎は、見間違いの可能性はある。大人になると同じ速さでも恐怖感が増す、という心理的効果もあるかもしれない。そこで、まずはこれが事実なのかどうかをきちんと検証することにした。この研究には、当時立教大学4年生だった塩田将基君が卒業研究のテーマとして興味を示してくれた。滑り台の研究、こと始めた。

この研究を始めるにあたっては大体の予想は付いていた。測らなければ確証はないが、自分の経験、感覚から言っても、事実であることは恐らく間違いない。間違っているのは公式の方だろう。もっとも怪しいのが摩擦力の扱いだ。とりわけ動摩擦係数が常に一定、という天下り的な法則がポイントだろう。その根拠を授業で教わった記憶はないし、学術的にはアモントン-クーロンの法則が近似的にしか成り立たないことは古くから知られてもいる。

物理学に代表される自然科学には数多くの「法則」がある。しかしこれらは一つとして数学的な定理と同等な意味での「真理」ではない。限りなく真理に近いと思われるものから、はなはだ心もとないものまで玉石混交である。等価原理は、理論的には破れている可能性が検討されてはいるが実験事実としては矛盾が一例もない。法則の格付けとしては最上格だ。

それに対して摩擦の法則は物理学の法則の中でもおそらく最下位に位置づけられる、ほとんど番外のものだろう。摩擦の法則は大学入試問題の定番であり、摩擦のはたらく状況を検討する際、真っ先に適用される有用な法則であることは間違いない。しかし、そもそも動摩擦係数が一定になる理由が授業で説明されることはないし、実測値を見ることもまれだ。

実は筆者の頭の中には、図3があった。これ

動摩擦係数

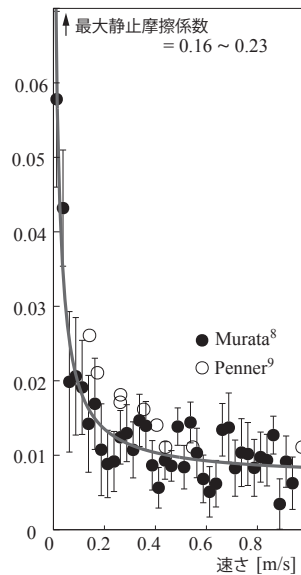


図3—氷の上のカーリング石の動摩擦係数の実測結果(文献8より引用)

は以前に本誌で紹介した<sup>10</sup>、氷の上の石では動きが遅くなると摩擦が強くなることを示した結果で、ちょうど、その論文<sup>8</sup>を仕上げている時期だった。

「そういえば、滑り台の謎があったなあ。あれも動摩擦係数の問題だろう」。そう、高校の教科書はともかく、現実の動摩擦係数はちっとも一定ではないのだ<sup>11</sup>。考えてみればその方が自然ですらあるのだけれど、そもそも入試問題のような「摩擦のはたらく場合の物体の運動」について、研究対象として真剣に考えたことは一度もなかった。高校生ときに習った法則を長らくそのまま信じてさほど疑っていなかったことを大いに反省していた最中だった。

## 滑り台の実測研究

かくして塩田君と筆者は実際の公園の滑り台での研究を開始し、卒業論文の内容<sup>5</sup>は文献<sup>12</sup>に詳しく報告した。そのプレプリント<sup>13</sup>は実に1万件ちかくもダウンロードされて広く読まれ、新聞<sup>14</sup>にも大きく掲載される注目の結果となった。卒業論文がこれほど多くの人たちに読まれたことはこれまでなかったのではないだろうか。

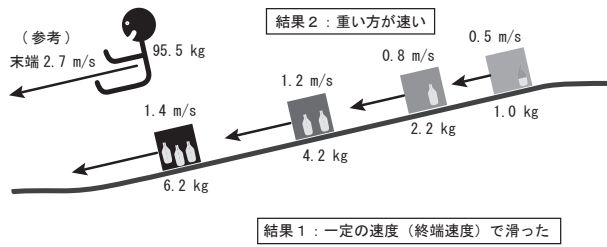


図4—塩田君の卒業研究の結果(文献5より引用)

得られた結果は図4のように、ごくシンプルなものであった。段ボール箱にペットボトルの水を入れて重さを変えつつ、滑る様子を観測する。その結果、

結果1：途中で加速が止まり、一定の速さ(終端速度)で滑る。

結果2：終端速度は、重いものの方が大きい。

ということがわかった。軽い場合のゆっくりさたるや驚くべきもので、「おそ!!」と夜の公園で二人同時に叫んだのはいい思い出である。

これらの結果はいずれも、動摩擦係数が一定ではないことを示している。まず終端速度とは小さな紙切れを落とした場面などに見られるもので、重力と空気抵抗が釣り合った結果、合力が0となり加速が止まって落下する際の、一定の速さのことである。

重力は一定であり、落下し始めた直後は空気抵抗が弱く、加速する。速さが大きくなってきたどこかの時点で空気抵抗が重力の大きさに達して、そこで力が釣り合う。つまり、空気抵抗は速いほど大きくなるのが終端速度の存在する原因だ。

同様に滑り台の「結果1」は、摩擦力が速いほど強いことを意味している。これを摩擦の法則で考えると「動摩擦係数には速度依存性があり、速度の増加関数である」ことになる。

重い人ほど速いという経験則は「結果2」で直接、確認された。つまり終端速度は重いものほど大きいのである。こうしてこの経験則は、見間違いではなかったことが明らかとなった。

ペットボトルの入った段ボール箱にライトを付

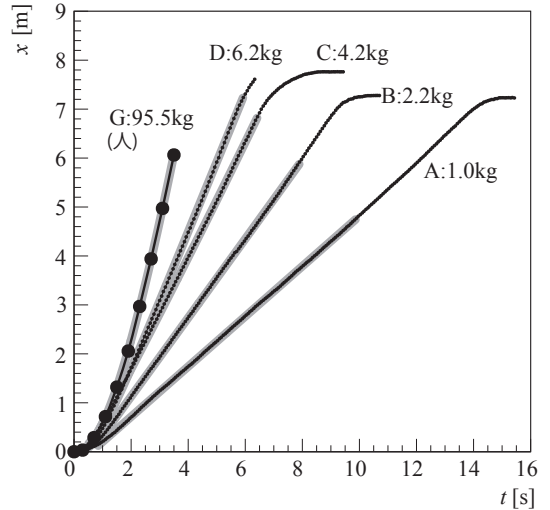


図5—物体の位置の測定結果(文献12より引用)

けて滑らせ、これを動画撮影した後に位置を解析した結果が図5である。動画から物体の位置を求める手法は本連載でも繰り返し紹介している、ビデオ撮影したデータを解析することで極めて高い精度の出る技術である。時刻  $t=0$  で物体が滑り始め、次第に斜面方向の位置  $x$  が大きくなる、つまり滑っている様子がわかる。グラフの傾きは速さを意味しており、滑り始めは加速したもののすぐに傾きが一定、つまり落下速度が一定になっていることがわかる。これが終端速度である。そしてその終端速度は、重いものの方が大きいことがわかった。

## ローラー式滑り台だから?

塩田君の卒業研究では、二つのタイプの滑り台で検証した。浅い角度でも長距離を楽しく滑ることができて現在主流となっているローラー式のも

のと、昔ながらの金属板式のものだ。

図5の結果はローラー式のものだ。滑らせる物体を減速させる要因は、この場合ローラーへのエネルギーの移行であることは明らかである。ローラーにも質量・慣性があるので、これを動かすには物体の質量が大きい方が有利だ。だからローラー式で重い方が速い、という結果はわかりやすい。

親子で前後に並んで滑る場面では親が後ろに位置することが多い。この場合は先に子どもが滑って回転させたローラー上を、後から大人が滑るので回転させ始める労力がない。こうして「後続が速い」現象が起きる。大人でなくとも2番手以降は速いのだ。いずれにせよ摩擦の法則から思い浮かぶものとは似ても似つかない状況ではある。

しかし教科書の動摩擦係数を考える摩擦の法則では、平らな面の上を滑ることを想定している。滑り台の謎の本丸は金属板式滑り台だ。筆者は金属板式しか当初、想定していなかったのだが塩田君がまず試し始めたのが、たまたま公園にあったローラー式だったというわけだ。

しかし、得られた結果は実に面白いものだった。そもそも摩擦とはいかなる考え方なのか、当たり前ではないバイアスに気づくチャンスがローラー式の結果にはある、と筆者は考えを改めはじめた。むしろ、それがこの研究結果を広く伝えようと思った本当の目的であったと言ってよい。

それはさておき既定路線の金属板式の観測もその後に行い、その観測結果は筆者の予想に反して卒業研究の結果としては「教科書通り」という結論にとどまった。金属板式は摩擦が強くて比較的滑りにくいことから、概して傾斜は急であり、長さも短い。物体を滑らせるとかなり高速まで一気に加速して滑り終わってしまう。

ローラー式の場合もはじめは加速してやがて終端速度に達したが、金属板式は同様に終端速度に至る途中にあるのか、それとも終端速度は存在せずにどこまでもそのまま加速を続けるのかわからないままに滑り終えてしまう。10 mを超えるような長い金属板式滑り台があればわかったのか

もしれないが、そんな滑り台は安全面から不安である。

さらに金属板式の場合は、測定の度に加速の様子にばらつきが大きかった。これは滑り台の表面や段ボール箱の底に付着した砂ぼこりなどの状態がよく管理できていなかったせいだと思われた。そうしたことから金属板式に対しては明確な結果が得られないままに卒業研究の時期は終わってしまった。

後編予告 6月号掲載予定の後編では、金属板式に再チャレンジした結果や、摩擦とは結局なんなのか、などを考える。

---

#### 文献

- 1—ガリレオ・ガリレイ：『星界の報告』、伊藤和行訳、講談社学術文庫(2017)
- 2—アリストテレス：『新版 アリストテレス全集第4巻(自然学)、第5巻(天界について 生成と消滅について)』、内山勝利・他編、岩波書店(第4巻：2017、第5巻：2013)
- 3—R. Panchyk：『ガリレオと地動説』、大森充香訳、丸善出版(2009)
- 4—ガリレオ・ガリレイ：『新科学対話(上・下)』、今野武雄・日田節次訳、岩波文庫(1937)
- 5—立教大学プレスリリース「大人の方が速い? 『滑り台』の疑問を学生が謎とき」(2023)
- 6—安東正樹・白水徹也編集幹事/浅田秀樹・他編：『相対論と宇宙の事典』、朝倉書店(2020)
- 7—K. Ninomiya et al.: Classical and Quantum Gravity, **34**, 185005(2017)
- 8—J. Murata: Sci. Rep., **12**, 15047(2022)
- 9—A. R. Penner: Am. J. Phys., **69**, 332(2001)
- 10—村田次郎: 科学, **93**, 194(2023)
- 11—松川宏：『摩擦の物理』、岩波書店(2012)
- 12—村田次郎・塩田将基: 物理教育, **71**, 95(2023)
- 13—<https://doi.org/10.51094/jxiv.236>
- 14—「ローラーすべり台、重い人ほど速い 摩擦の法則と矛盾?」朝日新聞(2023年7月21日朝刊27面)

---

#### 村田次郎 むらた じろう

3次元を超える高次元空間を探索する重力実験や、空間と時間の対称性を検証する加速器実験を主軸に、学生と一緒に身近な物理の検証も楽しんでいる。著書に『「余剰次元」と逆二乗則の破れ』(講談社ブルーバックス)など。