

落下する紙が滑る条件

What course a piece of paper to slide on the ground

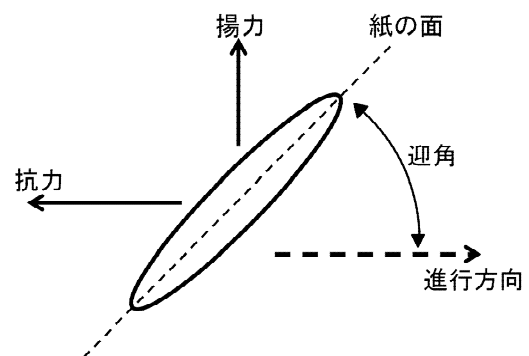
千葉県立船橋高等学校理数科 3 年

秋葉 海弥

はじめに

トランプやわら半紙などの紙状の物は、地面に対して角度をつけて落とすと紙の倒れている方向へ進み着地すると地面を滑っていくことがある。紙が地面を滑る距離や速さは少し驚く大きさである。また、この紙が滑る現象が起こるのはランダムのように感じる。そこでこの現象を明らかにしたいと思い下記の研究を行った。

今回の研究は空気抵抗が大きくかかわっていると考え、空気抵抗の大まかな規則に則って研究を進めた。空気抵抗は多くの場合で揚力と抗力との二つの力で表される。紙（機体）が空気中を進んでいるとき、右図のように揚力は進行方向と平行な面に対して垂直方向にはたらく力で、抗力は進行方向に対して逆方向にはたらく力である。この二つの力の大きさは進行方向と紙の面との間の小さいほうの角（迎角と呼ぶ）に大きく左右される。迎角が 90° 前後のとき、揚力は非常に小さくなり抗力は大きくなる。



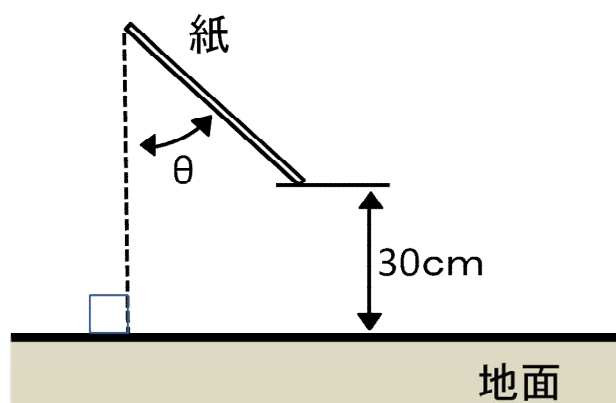
目的

トランプやわら半紙のような紙状の物は、適度な高さから適度な角度をつけて落とすと地面の上を滑る。この現象が起こる条件を調べることがこの研究の目的で、そのために一定の高さから角度をつけて工作用紙を落とす。紙を自由落下させるときの角度を変化させ、着地するときの迎角を調べ、その後紙が滑るかどうかを確認する。

方法

・実験概要

地面に対して角度をつけて、紙を滑らかな地面に向かって自由落下させる。高さは紙の下端から地面までを 30cm とする。角度 θ は紙の面と鉛直方向のなす角である。これを地面に対してつける紙の角度とする。紙が着地するところを動画にして迎角を求める。着地後に紙が 10 cm 以上移動したとき、紙は滑ったと判断する。各角度でそれぞれ一回ずつ計測した。



・実験方法

使用するものは、スタンド、L 字の金属棒（押しても反らない定規状のもので代用可能）、工作用紙（半径 7cm の円形）。スタンドで定規を固定して高さ、角度 θ を調節する。紙を定規の下から指で軽く押し当てる。このとき、当てる面積を大きくすると紙が棒に密着する力が発生するので注意する。今回は面積を 2 cm^2 とした。指を離すと紙が自由落下する。落下して紙が着地する様子を iPhone7 のカメラ・スローモードで撮影する。

・計測方法

動画から静止画を切り出す。切り出す静止画は着地する直前と直後の 2 枚とした。直後の静止画から紙の面の角度 α を求める。直前と直後の静止画を比較して移動方向 β を求める（図 1・2 を参照、 α も β も小さい方の角度とする）。迎角は、図 1 のとき $\alpha + \beta$ となり、図 2 のとき $\beta - \alpha$ となる（三角形の外角の定理からわかる）。ここで図 2 の α を負の値とすると迎角は $\alpha + \beta$ と表せる。これによって迎角が求められる。

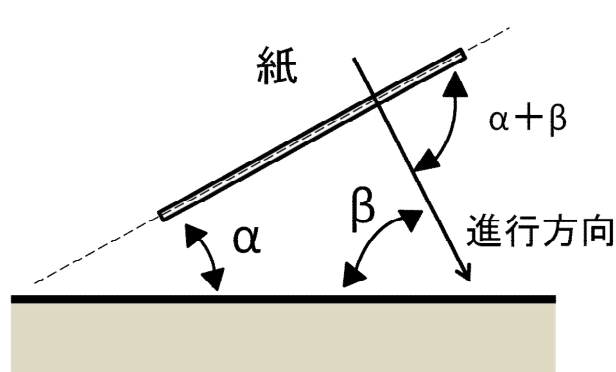


図 1

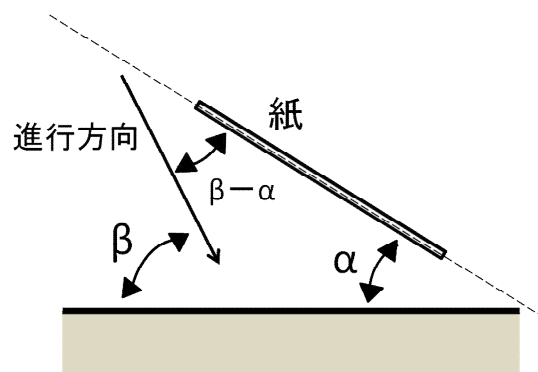


図 2

結果

θ 、 α 、 β は度数法で表している。

θ	α	β	$\alpha + \beta$	滑ったかどうか (○or×)
15	35	80	115	×
20	-2	79	77	○
25	23	61	84	×
30	34	67	101	×
35	29	68	97	×
40	35	69	104	×

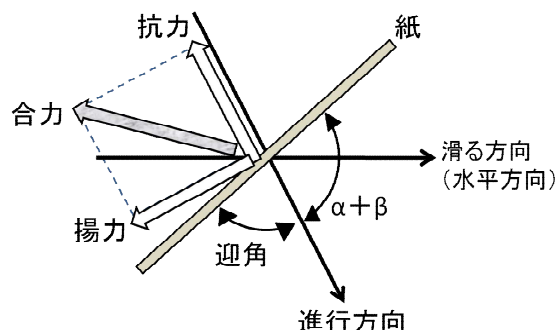
- ・滑ったのは $\theta = 20$ のときだけだった
- ・ α について、 $\theta = 20$ のときだけ 0 に近い
- ・ $\alpha + \beta$ について、 $\theta = 20, 25$ の時以外で 90 より大きい

考察

β の値から考えると紙は滑る前から滑る方向と同じ向きに速度成分を持っている。慣性の法則から、着地前後に紙が減速しない限り紙は地面を滑る。そこで $\alpha + \beta$ の値を 3 つにグループ分けして紙を減速させる力が発生するかどうかを考える。

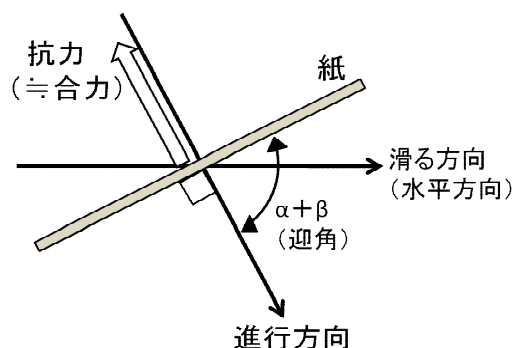
(1) $90^\circ < \alpha + \beta$ のとき

まず迎角は $\alpha + \beta$ ではないほうの角である。このとき揚力と抗力の方向は右図のようになる。揚力と抗力の合力の向きは滑る方向に逆である。よって紙は減速して地面を滑らなかったと考えられる。



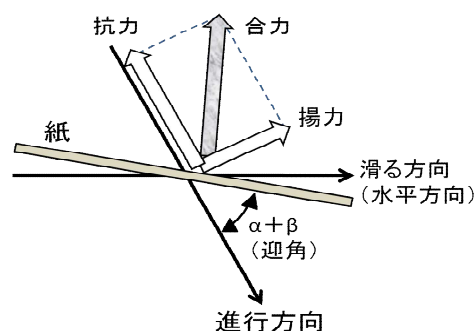
(2) $90^\circ \simeq \alpha + \beta$ のとき

揚力は抗力に対して非常に小さいので、揚力と抗力の合力は抗力とほぼ一致すると考えられる。抗力は進行方向とは逆方向の力だから、滑る方向とも逆方向である。よって紙は減速して紙は滑らなかったと考えられる。



(3) $90^\circ > \alpha + \beta$ のとき

揚力と抗力のそれぞれの水平方向の成分の向きは互いに逆であるから、合力は滑る方向と垂直、または同じ向きの成分を持つことがあり得る。よって紙は減速せず、前述のように慣性の法則で地面を滑ると考えられる。実際に、 $\theta = 20^\circ$ のとき紙は滑っている。



結論

落下する紙が地面を滑る理由は、水平方向において着地前の紙の速度が保存されて着地後も慣性で移動するからである。よって落下する紙が地面を滑る条件は、揚力と抗力の合力が水平方向と垂直以下の角度になって紙を減速させないことである。

今後の課題

今回の実験結果だけでは大雑把な考察しかできなかったため、紙の速度・加速度を計測したり、別の実験で揚力や抗力の大きさを具体的に求めたりして、より細かい考察をできるようにしたい。また、 θ の値を変化させていたが本当に変化させるべきは α や β の値であるから、 α と β の値を直接変化させる実験をすべきだと考える。

反省・感想

課題研究において自分は主に二つのことを反省しなくてはいけない。まず一つは計画を全く立てなかったことだ。課題研究は二年生の間を丸々使えるがそれに甘んじて実験を先送りし続けた結果、上記の研究を始めたのは12月になってしまった。8月頃にはテーマが決まっていたが、研究内容を精査しなかったせいで二ヵ月近くを棒に振ってしまった。また期限を守れずに徹夜を繰り返すことになり、要旨や論文の内容がひどいことになってしまった。二つ目は担当教官とコンタクトを取らずに研究を進めてしまったことだ。教官に説明するのが面倒くさく感じてしまい、一人で研究やポスター作製を行い添削を受けなかったために、研究の進行やポスター発表で多くの困難が発生した。

研究に関して、悪くない題材を選んだと思っているが、適切な実験装置を作るのに苦労した。上記の実験装置も紙に余分な力や運動を与えないことには成功したものの、操作できるパラメータが実験結果に直接関係しないことが問題となった。データの数は一明らかに少ない。スタートが遅かったにしてももっと実験することができた。面倒くささに負けずに頑張れる忍耐力が必要だと強く感じた。