

ドミノの転倒とエネルギーの関係

徳島県立城南高等学校応用数理科 3 年

江本結 高橋悠愛 根來和芳

目次

1. 研究の概要

実験①

2. 動機・目的

3. 仮説

4. 準備物

5. 方法

6. 結果

7. 考察

実験②

8. 動機・目的

9. 準備物

10. 方法

11. 結果

12. 考察

実験③

13. 動機・目的

14. 仮説

15. 準備物

16. 方法

17. 結果

18. 考察①

19. 考察②

20. 今後の展望

1. 研究の概要

本研究は、ドミノの転倒とエネルギーの関係について突き詰めている。ドミノの転倒とエネルギーの関係を研究するまでに、まず私たちはある実験を経た。先行研究により摩擦力が速さに影響することを知り、私たちはドミノを置く台の摩擦係数の違いによるドミノの転倒速度の変化について調べてみることにした。「ドミノを置く台の材質によって転倒速度が変わり、摩擦が大きいほど転倒速度は大きくなる」という仮説を立て、異なる材質上でドミノを倒して実験を行った。

しかし、仮説とは異なり、ドミノの転倒速度は遅くなった。

このことから、ドミノを置く台の摩擦が大きくなれば負の仕事が働いて転倒速度が遅くなったのではないかと考えられる。摩擦の大きさを変えることに限界があるため違う方法で負の仕事をする事で、いつかドミノが止まるのではないかと考えた。これが本研究の主なテーマである。その方法を考えた結果、ドミノを置く台を階段状にすることで重力による負の仕事を利用し、転倒を継続できるかどうかを調べた。

結果は、階段を最後まで上り続け、転倒し続けた。それは上昇に必要な位置エネルギーはドミノを積み上げる際に台に乗せた人が仕事を与えており、ドミノ単体の上昇とは無関係なのではないかと考察できる。ドミノの転倒の際に開放する位置エネルギーは、静止しているドミノの重心の位置から転倒して並んでいる次のドミノに当たった瞬間の重心の位置までの下がった分のみであり、転倒速度が遅くなったのはドミノの衝突位置が平面上の時よりも下がったため倒れにくくなり遅くなったと考えられる。そして転倒させる際に多くの運動エネルギーを消費したと考えた。

今後は、牌の質量 (m)、牌の高さ (h)、傾斜角度 (θ)、床の摩擦係数 (μ)、などの変数を考え、数式化し、伝達速度を導出、さらに衝突反発係数 (e) を求める実験などをしたい。

・実験①

2. 動機・目的

私たちは先行研究「ドミノの転倒速度に関する研究」を見つけた。先行研究は、ドミノ牌同士の摩擦係数と転倒速度の関係を実験によって明らかにするとともに、ドミノの転倒速度が収束する要因を調べている。それを見て、私たちは身近にあるドミノを置く台の材質の違いによってドミノの転倒速度はどのように変化するかを調べたいと思った。

3. 仮説

ドミノを置く台の摩擦係数が大きいほど、ドミノが倒れるときに滑りが起きず、転倒速度は大きくなる。

4. 準備物

- ・ $1.4 \times 2.0 \times 6.5$ (cm) のドミノ 30 個
- ・ 手作りの実験装置 I

→ (作り方) ①実験機の支柱と大きい分度器の 0 度を合わせて取り付ける。

②分度器の 80 度の位置 (鉛直角度 10 度) に合わせてものさしを取り付ける。

- ・ おもり 10g
- ・ ドミノを並べる台 (木の板、理科室の机、紙やすり)
- ・ ものさし

5. 方法

[1] 各素材の静止摩擦係数を調べる

ビニールテープの上にばねばかりを置き、実験環境が等しい条件下で実験を行った。

利用した素材は ①木の板 ②ユニセラン板 ③紙やすりの 3 種類である。

また、おもりにフックを取り付けることで、ばねばかりでおもりを引けるようにした。

1. おもりをばねばかりで引く
2. おもりが動き出す直前のばねばかりの力を読み取る。
3. ばねばかりの力と最大摩擦力のつりあい式を用いて、静止摩擦係数 μ を読み取る。



図 1 : 摩擦係数を求める様子

数式はこのようになる。「 $F = \mu mg$ 」

求めた最大摩擦係数は次のようになった。

- ①木の板 0.395
- ②ユニセラン板 0.420
- ③紙やすり 0.880

[2] 各素材の上でドミノを 30 個転倒させてその位置、速度、加速度を測る

1. 振り子実験機、分度器、ものさしで実験装置を作った。
2. おもり 10 g を糸を使ってドミノの上部の高さと合わせてつけた。
3. 実験台と高さを合わせるために箱 (6.7cm) の中に紙を入れた上に 6mm の木の板 1 枚を重ねた。
4. ドミノ同士の幅を 2cm にして 30 個並べた。
5. 目線を実験装置と水平に合わせ、おもりを 10 度傾けてドミノの上部に垂直に当たるようにしておもりを離し、ドミノを倒した。(振り子の傾きと長さを合わせたのはドミノに等しい運動エネルギーを与えるため。)
6. ユニセラン板、木の板の上、木の板の上の紙やすりの上でそれぞれ実験を 2 回ずつする。
7. スマホのスローカメラで実験の様子を撮影し、あとから見返してデータをとる。

おもりから手を離し、ドミノにおもりが当たった瞬間を 0 秒とした。



図 2 : 手作りの実験装置

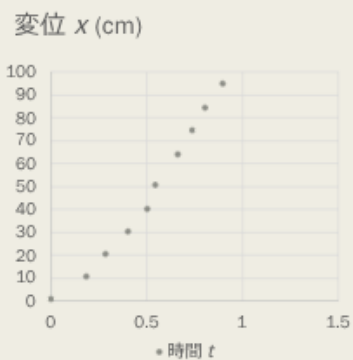


図 3 : $1.4 \times 2.0 \times 6.5$ (cm)のドミノ

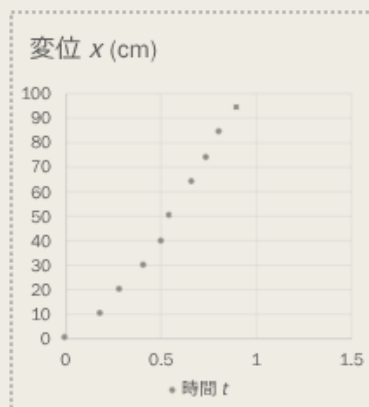
6. 結果

結果(x-tグラフ)(1回目)

・ユニセラン版



・木の板



・紙やすり

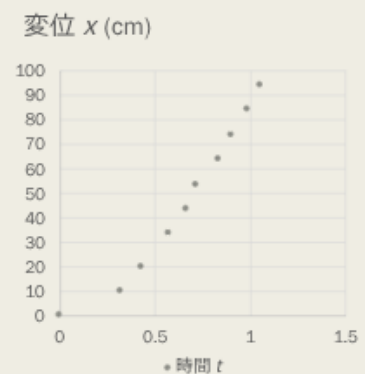
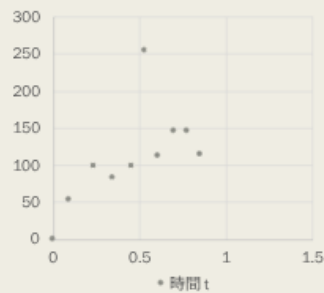


図 4 : 摩擦係数が異なる 3 種類の床でドミノを倒したときの、時間 t (秒) と変異 x (cm)

結果(v-tグラフ)(1回目)

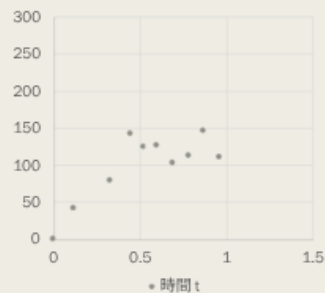
・ユニセラン板

平均の速度 v (cm/s)



・木の板

平均の速度 v (cm/s)



・紙やすり

平均の速度 v (cm/s)

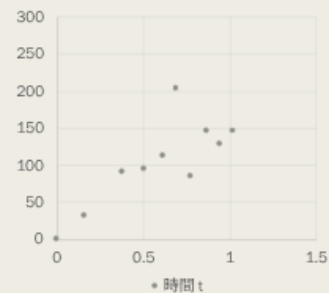
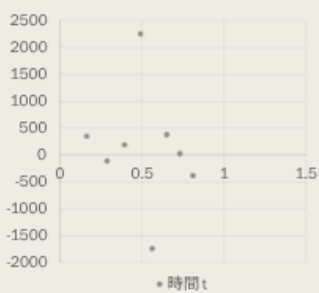


図5：摩擦係数が異なる3種類の床でドミノを倒したときの、時間 t (秒) と速度 v (cm/s)

結果(a-tグラフ)(1回目)

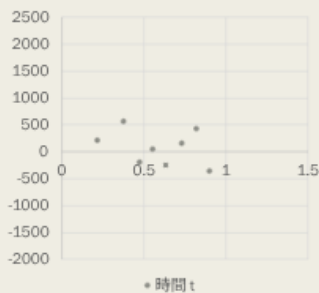
・ユニセラン板

平均の加速度 a (cm/s²)



・木の板

平均の加速度 a (cm/s²)



・紙やすり

平均の加速度 a (cm/s²)

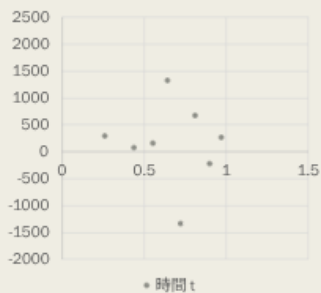


図6：摩擦係数が異なる3種類の床でドミノを倒したときの、時間 t (秒) と加速度 a (cm/秒²)

v - t グラフと a - t グラフで点が大きくぶれている瞬間がある。

7. 考察

グラフを見る限りでは、摩擦が大きいほど加速度が小さいように思われる。 $x-t$ グラフは理想的なデータに近いものが得られたが、中盤辺りでデータが大きくぶれる瞬間があり、それによって $v-t$ や $a-t$ グラフに大きなぶれが生じてしまっている。性質であることも予想したが、ドミノ牌のねじれ等が原因と考えられる。（動画でも途中だけ倒れ方がおかしかった。） 速度や加速度のグラフをより正確に得るためには、均一な形状であるドミノを利用する必要がある。1回目も2回目も同様の結果が得られた。

・実験②

8. 動機・目的

実験①の結果のグラフに大きく振れる瞬間があり、その原因はドミノのねじれによるものだと考えたため、ねじれないプラスチック製のドミノを用いて実験を行う。

9. 準備物

- ・ $2.3 \times 4.6 \times 8.0$ (cm) のドミノ 30 個
- ・ 手作りの実験装置 I
- ・ おもり 10g
- ・ ドミノを並べる台（木の板、理科室の机、紙やすり）
- ・ ものさし



図 7 : $2.3 \times 4.6 \times 8.0$ (cm) のドミノ

10. 方法

実験①と同様。

11. 結果

ユニセラン板

木の板

紙やすり

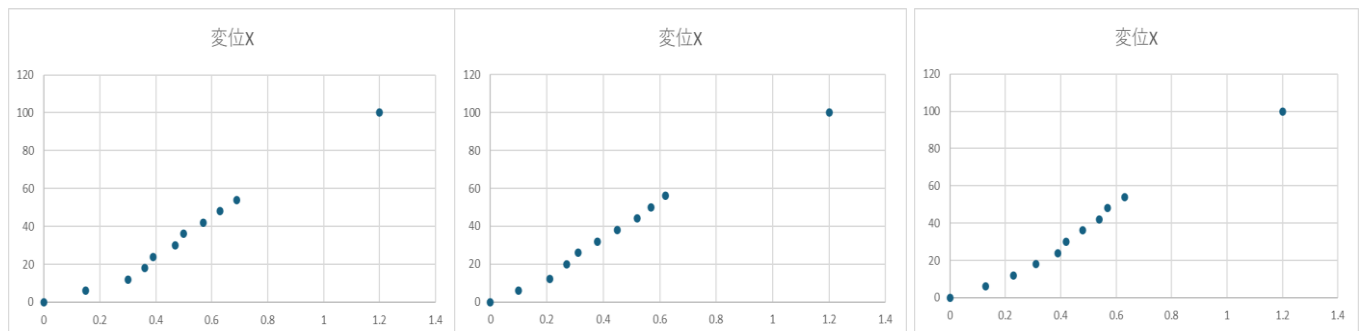


図 8 : 摩擦係数が異なる 3 種類の床でドミノを倒したときの、時間 t (秒) と変位 x (cm)

ユニセラン板

木の板

紙やすり

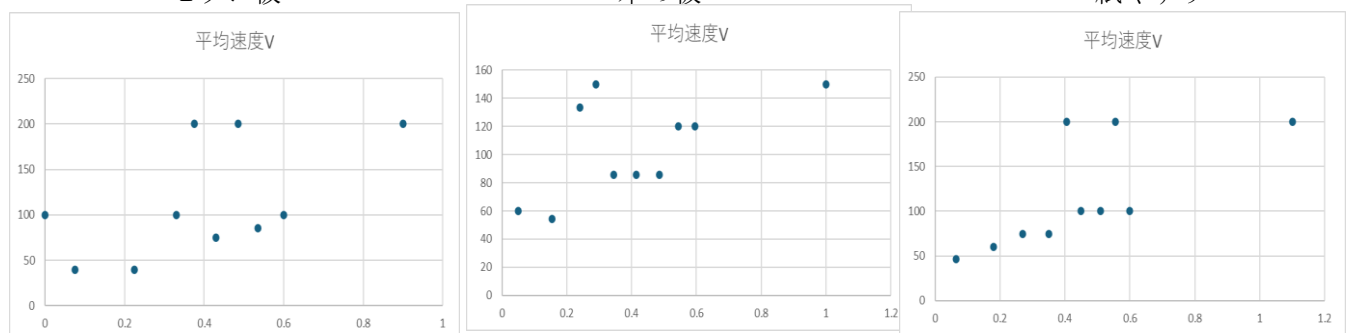


図 9 : 摩擦係数が異なる 3 種類の床でドミノを倒したときの、時間 t (秒) と速度 v (cm/秒)

ユニセラン板

木の板

紙やすり

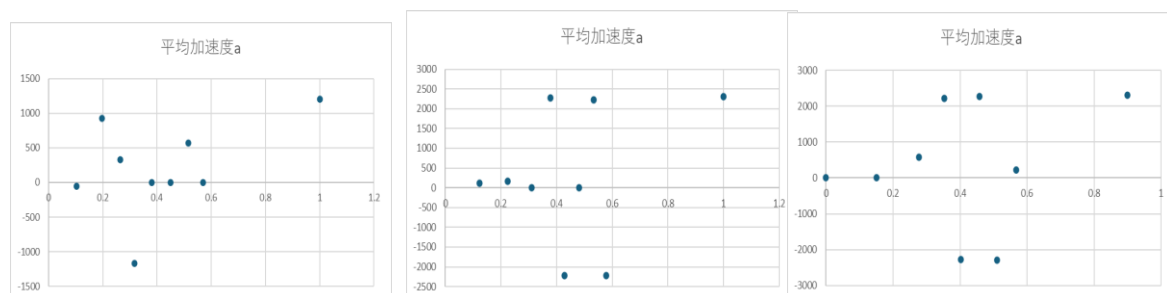


図 10：摩擦係数が異なる 3 種類の床でドミノを倒したときの、時間 t (秒) と加速度 a (cm/秒²)

縦軸の単位は $x-t$ グラフや $v-t$ グラフを見ると、0.5 秒あたりまで加速し、それ以降は終端速度に近いような運動をしていることがわかった。ただし、加速度については、時間が経過しても 0 に近付くようなグラフに見えず、測定誤差があるように見受けられた。また、実験によっては明らかに規則性から大きく外れたデータが得られた。 $x-t$ グラフの中盤辺りで傾きにブレが生じており、これによって $v-t$ グラフや $a-t$ グラフで大きく外れたデータが得られている。これは、一度ではなく何度実験をしても同様に見られた。紙やすりでも同様に、規則性から大きく外れたデータが見受けられた。だから、データが大きく外れた原因はドミノのねじれではなく、スマホのスローモーションカメラであると考えた。スマホのスローモーションカメラは 1 秒間に撮影できる写真の枚数が少なく、正確に時間を読み取ることができなかったからである。そのため、次の実験からは実験の撮影にハイスピードカメラを用いることにした。また、紙やすりでは、ユニセラン板や木の板に比べると、 $x-t$ グラフの傾きが小さいため、速度が遅く緩やかに加速していると考えられる。

12. 考察

仮説とは異なり、摩擦が大きいほど転倒速度が遅くなった。摩擦などの負の仕事を受けると、ドミノのエネルギーは失われるから、このままドミノを倒し続けるといつかドミノは止まるのではないかと考えられる。そこで私達は次の実験③を行うことにした。

・実験③

13. 動機・目的

実験②でこのままドミノを倒し続けるといつかドミノは止まるのではないかと私たちは考え、それを研究するために、階段上でドミノを倒す実験を行うことにした。階段上で実験したのは、平面上でドミノを倒して実験するのはエネルギーが少しずつしか失われずドミノが転倒をやめて止まるまでにかかなり長い距離が必要になると考えたからだ。摩擦だけでは負の仕事が小さいけれど、階段上で実験することで重力による負の仕事を加えることができる。階段上で実験したら効率的に短い距離でデータを得ることができる。

14. 仮説

ドミノが階段を登っていくと、重力が負の仕事をするため減速していく。

力学的エネルギー保存則 $\left[\frac{1}{2}mv^2 = mgh\right]$ より、最高到達点が存在するのでいつか止まるのではないかと考えた。

15. 準備物

・手作りの実験装置Ⅱ

→（作り方）①木材に 3D プリンターで作成した三角柱を貼り付ける。

②木材を壁に立てかける。

（水平器を用いて、ドミノを置く面が水平になるように角度を探した。）

③木材を置く場所に印をつける。

（毎回同じ角度で実験できるようにするため。）

④実験①、②で使った実験装置Ⅰを設置する。

・木の板

・ドミノ×47

・3D プリンター

・ハイスピードカメラ

16. 方法

1. ドミノ同士の水平間隔を 3.5cm にして階段（3D プリンターで作成）に 47 個並べる。
2. 前回と同様に振り子を 1 個目のドミノに当てる。
3. ハイスピードカメラ(480fps) で動画撮影する。

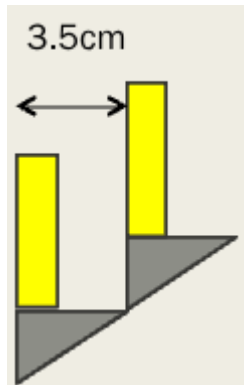


図 1 1 : ドミノの置き方



図 1 2 : 水平器を用いて階段が水平

か調べた。



図 1 3 : 実験の様子

手作りの装置は木の板に底面 3.5cm×2.5cm、高さ 3cm の三角柱を 45 個作り、斜辺面を木の板に貼り付けていく。角度は $\tan \theta = 2/3.5 = 0.57$ とする。）

17. 結果

1 回目

2 回目

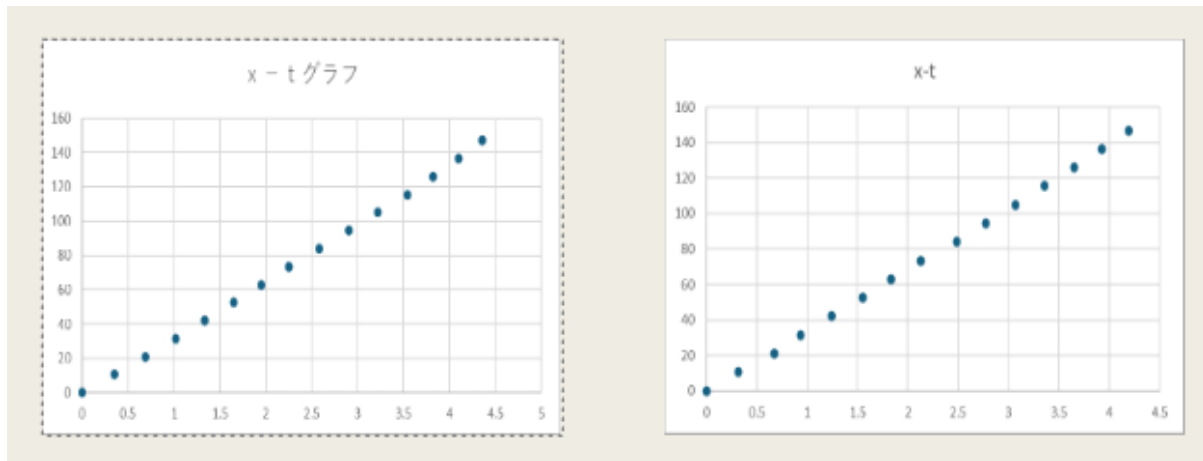


図 1 4 : ドミノに階段を上らせた時の、時間 t (秒) と変異 x (cm)

1 回目

2 回目

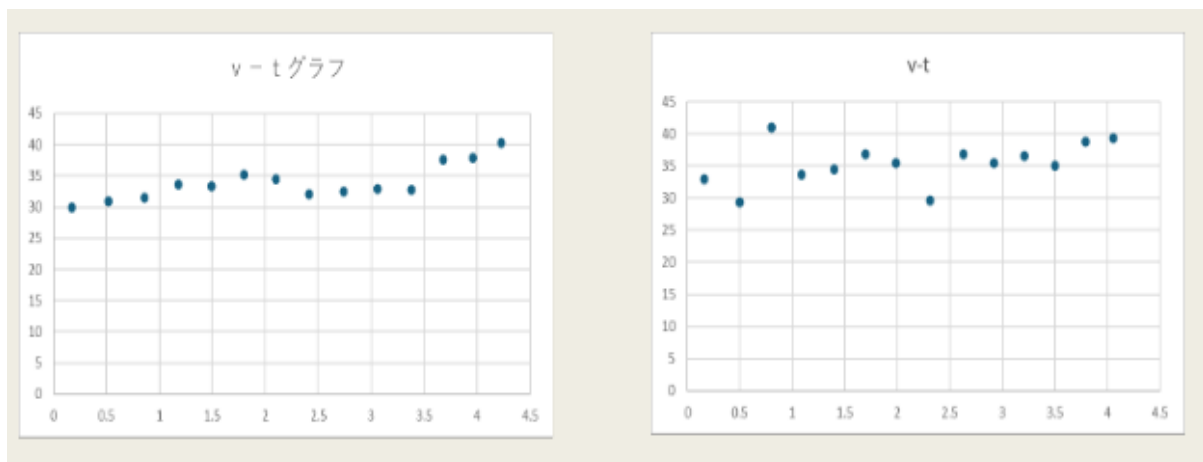


図 1 5 : ドミノに階段を上らせた時の、時間 t (秒) と速度 v (cm/秒)

1 回目

2 回目

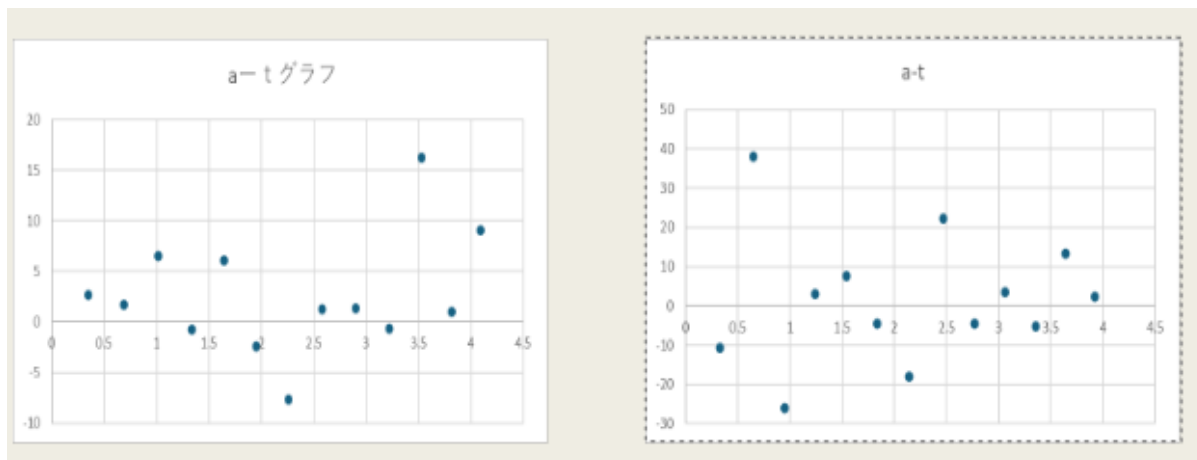


図 1 6 : ドミノに階段を上らせた時の、時間 t (秒) と加速度 a (cm/秒²)

$x-t$ グラフを見ると、どちらも等速直線運動に近い結果になった。

$v-t$ グラフを見ると、多少のばらつきはあるものの、減速傾向は見られなかった。

$a-t$ グラフを見ると、 $v-t$ グラフと同様にばらつきがあるが、0 近辺で変動している。

18. 考察①

仮説で立てた力学的エネルギー保存則「 $mgh = \frac{1}{2}mv^2$ 」とは異なり転倒し続けた。ドミノの上昇に必要な位置エネルギーは積み上げる際に乗せた人が仕事を与えており、ドミノの転倒とは関係ないのではないかと考えた。ドミノが転倒する際に開放する位置エネルギーは静止しているドミノの重心の位置からドミノが倒れ、次のドミノに当たった瞬間の重心の位置の下がった分のみで、力学的エネルギー保存則で成立し、この速さで次のドミノに衝突することは変わらない。この原理は水平面上におけるドミノの転倒と等しく、階段を登るドミノにおいても減速することなく等速で登り続けることができる。

19. 考察②

平面上では 10cm/s 以上、階段上 35cm/s 程度になっており、平面上の実験に比べて階段上の実験の方が終端速度が遅くなっている。これは、階段を登る場合、手前のドミノが次のドミノに衝突する位

置が低くなるため、回転運動に転じにくいのではないかと考えられる。このことにより、消費できる位置エネルギーが小さくなってしまい、転倒に利用できる運動エネルギーが少なくなったのではないかと考えた。

20. 今後の展望

今回の実験③では階段上でもドミノは倒れ続けるという結果が得られたが、階段の長さをより長くしたり、傾斜角度をより急にしたりして実験をしても、今回と同様の結果が得られるかどうかを確かめることをしたい。

また、ドミノの大きさを変えても同様の結果が得られるかどうかを確かめたい。

21. 参考文献

佐藤樹，梁生和 秋田県立秋田高等学校理数科，ドミノの転倒速度に関する研究，2022，第46回全国高等学校総合文化祭東京大会，自然科学部門