

ドミノ倒し

2608 伊藤穂 2528 成瀬裕介 2532 原新芽

要旨

私たちの班では、「真っ直ぐに並べられたドミノが倒れるときどのような速度変化が起きているのか」ということを調べることにした。仮説として私たちは、だんだん加速しながら倒れるのではないかと考えた。振り子を用いた実験装置を利用し、ドミノが5個倒れた区間を1区間とし、倒れるのにかかった時間を10区間分測定した。結果として、区間①から区間③までの区間では一定の加速度運動をしており、それ以降の7個の区間ではおおよそ等速運動をしていることが分かった。このことから、速度が一定になるまでの加速の割合やかかる時間は、振り子がドミノを倒すときの力やドミノ同士の間隔が影響しているのではないかと考えた。今後は、1つ目のドミノを倒す力と加速区間の関係、ドミノの並べ方による速度変化を調べていきたい。

1. 目的

ドミノが倒れる速度に関わる要因の解明

2. 仮説

ドミノの倒れ方には規則性がある。

ドミノの倒れ方にはドミノが倒れるときにドミノに加わる力の大きさに関係していると考え、ドミノが倒れるときにかかる力がどのように働いているのかを調べればドミノが倒れるときの速度変化を説明できる。

3. 使用した器具・装置

- ・ドミノ (株式会社ハナヤマ 日本ドミノ協会公認 ドミノ碑 90個セット)
- ・スタンド
- ・低弾性球+金具+紐 (振り子として使用)
- ・ものさし 1m, 30cm
- ・分度器
- ・BeeSpi
- ・黒い厚紙3枚
- ・タブレット (動画撮影用/計算用)
- ・セロハンテープ

4. 実験方法

【実験1】

等間隔で並べられたドミノの1個目のドミノを一定の力で押した時の速度変化を調べる。

【仮説1】

図1のように、「1つ目のドミノAを倒す時に低弾性球から受ける力」を F_1 、「ドミノAが傾くことにより、2つ目のドミノBにあたる瞬間にBにはたらくドミノAの重力の水平方向成分を F_2 」とする。

2つ目のドミノBを倒すための力は F_3 は、 F_1 と F_2 を合わせたものになり、ドミノが次のドミノを倒すためにはたらく力は、それまでに倒れたドミノにはたらいっていた力の大きさの和になると考えたため、ドミノが倒れるとき、ドミノは徐々に加速しながら倒れると考える。

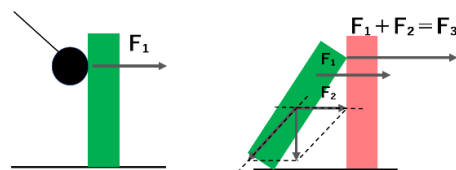


図1 ドミノにはたらく力のモデル

【実験手順1】

- ① 紐の先に低弾性球を取り付け、振り子を作る。振り子を低弾性球の最下点とドミノを並べる机の距離が 3 cm となるようにスタンドに設置する。(図 2)
- ② 振り子の最下点から水平方向に 10 cm の位置に、BeeSpi と 1 個目のドミノを置く。
- ③ ドミノ同士の間隔を 1 cm あけて 50 個並べる。
- ④ 鉛直線と糸のなす角度が 30° の位置から振り子を静かに離す。
- ⑤ 振り子が 1 個目のドミノに衝突する瞬間から、5 個目のドミノが 6 個目のドミノに衝突する瞬間までの区間を「区間①」とし、同様にして 45 個目のドミノが 46 個目のドミノに衝突した瞬間から 50 個目のドミノが 51 個目のドミノに衝突するまでの区間を「区間⑩」とした。(図 3) 1 区間にかかる時間を測定する。1 個目のドミノの端から 6 個目のドミノの端までの距離を、区間①の距離 x_1 として区間①の速度を計算する。
測定は 10 回行う。

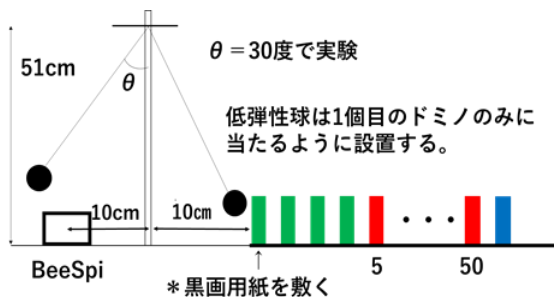


図 2 実験 1 セットアップ

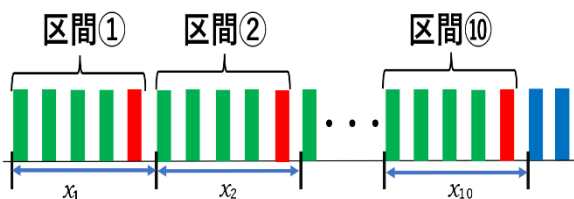


図 3 ドミノの時間計測区間と区間距離 x

【結果 1】

表 1 各区間をドミノが倒れるのにかかった時間

	① (s)	② (s)	③ (s)	④ (s)	⑤ (s)	⑥ (s)	⑦ (s)	⑧ (s)	⑨ (s)	⑩ (s)
1回目	0.12	0.12	0.09	0.10	0.10	0.10	0.10	0.08	0.11	0.09
2回目	0.16	0.12	0.10	0.09	0.09	0.10	0.09	0.09	0.10	0.10
3回目	0.07	0.11	0.10	0.09	0.09	0.09	0.10	0.09	0.09	0.08
4回目	0.18	0.10	0.11	0.10	0.14	0.05	0.09	0.09	0.09	0.09
5回目	0.12	0.12	0.09	0.10	0.08	0.10	0.10	0.07	0.10	0.08
6回目	0.09	0.11	0.10	0.09	0.09	0.09	0.10	0.09	0.09	0.10
7回目	0.11	0.12	0.10	0.08	0.11	0.10	0.08	0.09	0.10	0.09
8回目	0.08	0.12	0.10	0.07	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.10
9回目	0.18	0.11	0.09	0.09	0.10	0.06	0.12	0.10	0.09	0.08
10回目	0.11	0.10	0.09	0.08	0.10	0.08	0.11	0.11	0.07	0.09
平均	0.12	0.11	0.10	0.09	0.10	0.09	0.10	0.09	0.09	0.09

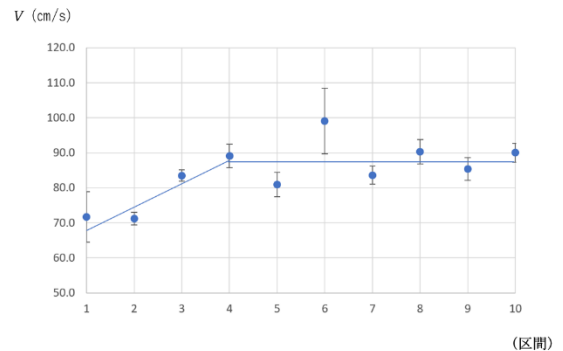


図 4 区間ごとの速度変化のグラフ

区間④までは一定の加速度で加速しており、区間⑤で初めて減速してから加速、減速を繰り返し、だんだん一定の速度に近づいているように見える。

【考察 1】

ドミノが倒れる速度は、区間③までは、加速運動をし、その後段々等速に近づく。

撮影した動画を確認し、各区間の最後のドミノに当たる瞬間に注目する。区間①の最後、つまり 5 個目のドミノが 6 個目のドミノに当たる瞬間に、すでに倒れ始めている 1~4 個目のドミノのうち倒れきっていないドミノの数に注目した。(図 5)

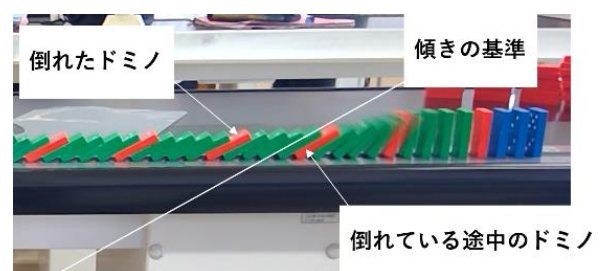


図 5 倒れきらずに残ったドミノの測り方

区間①～区間④までと区間⑤～区間⑩までは、倒れきっていないドミノの数に違いがあるのではないかと考えた。

もし違いがあるとすれば、倒れきっていないドミノの個数とドミノが倒れる速度が関係しているのではないかと考えた。

そこで、倒れきっていないドミノの個数を調べることにした。撮影した動画を使い、「倒れたドミノ」の基準を決め、倒れきっていないドミノの数を数えた。(図5)

「倒れたドミノ」は平行になって静止していると判断したため、倒れた後のドミノの傾きが同じになったドミノを「倒れたドミノ」と判断した。

実験で撮影した動画で、倒れきっていないドミノの個数を数えてみると、図6のような結果が得られた。

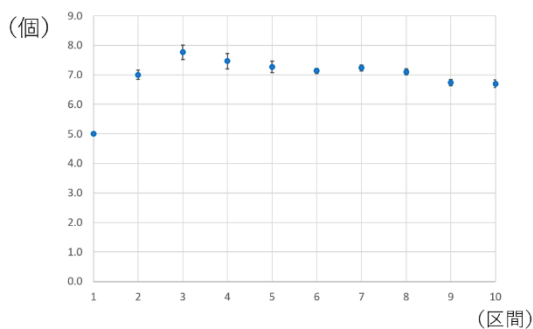


図6 各区間で倒れきらずに残ったドミノの数

区間③までは倒れきっていないドミノの数が増加しているが、区間④以降、倒れきらずに残ったドミノの数がほぼ一定数残ることが分かる。

このことから、図4での加速区間の原因は図6で区間④以降、倒れきらずに残ったドミノの数がほぼ一定数残る事と関係があるのではないかと考える。

また、倒れきらずに残ったドミノの個数と速度の関係は図7のようになる。

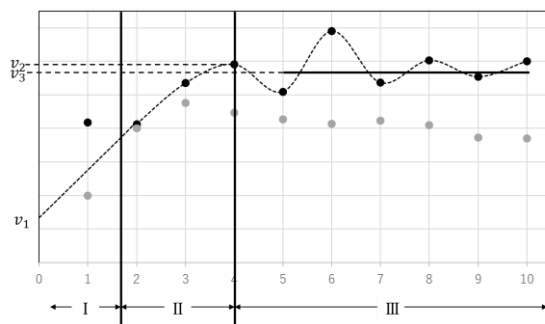


図7 速度●と倒れきらずに残ったドミノの個数○の関係

- I : 1 個目のドミノが倒れている区間
- II : 1 個目のドミノが倒れ切った瞬間から、初めて加速度が0となるまでの区間
- III : 速度がだんだんと等速に近づく区間

区間 I では、 $k+1$ 番目のドミノを倒そうとする力は、次の式で表すことができると考える。(図8)

$$F_{\text{合力}} = \left(F_{\text{振り子}} + \sum_{k=1}^n mg \tan \theta_k \right) - F_{\text{抗力}}$$

[式 a]

n は倒れ始めたドミノの数で、時間の経過とともに n の値は大きくなる。 $F_{\text{抗力}}$ は速度 v に依存する力であると考えられる。

区間 I では、 $F_{\text{抗力}}$ に対して [式 a] の括弧内の値が大きくなるので $F_{\text{合力}}$ が大きくなり、速度 v は図7の区間 I ように増加する。

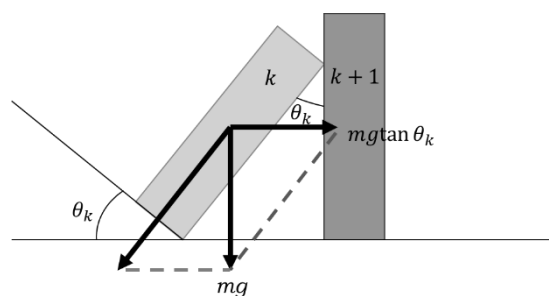


図8 ドミノにはたらく力のモデル

区間Ⅱ以降では、倒れきらずに残ったドミノの数が等しくなる。よって、区間Ⅱでは、 $k+1$ 番目のドミノを倒そうとする力は、次の式で表すことができる。

$$F_{\text{合力}} = (\text{倒れきらずに残ったドミノの重力の水平方向成分の和}) - F_{\text{抵抗力}}$$

[式 b]

[式 b] 中の括弧内の値は変化しないが、ドミノが倒れる速度 v が大きくなるのに伴って $F_{\text{抵抗力}}$ の値が大きくなるので $F_{\text{合力}}$ が小さくなり、加速度が減少していく。それに伴い、速度も減少を始める。

区間Ⅲでは、 v が小さくなることで、 $F_{\text{抵抗力}}$ の値が小さくなり、再び $F_{\text{合力}}$ が大きくなる。よって、加速度が増し、速度が再び増加する。

区間Ⅲでのドミノの速度変化は、[式 b] より $F_{\text{抵抗力}}$ によって引き起こされると考える。

図 7 より、ドミノの速度は v_3 に収束していくが、ドミノを倒す力 $F_{\text{合力}}$ と、速度の関係によりすぐには収束しない。加速と減速を繰り返す、段々と v_3 に近づいていくのではないかと考える。

5. 展望

- ① $F_{\text{抵抗力}}$ がはたらくという考え方が本当に正しいのかを確かめる。
- ② 図 7 の区間Ⅱ、区間Ⅲでの速度変化をより詳しく調べる。
- ③ 考察 [式 a] の $F_{\text{振り子}}$ の値を変化させるために、振り子の振り幅 (θ) の値を変化させ実験を行う。

これら 3 つを調べることでドミノが倒れる速度に関わる要因を調べていきたい。

6. 謝辞

本研究ではご指導していただいた物理科の先生方より、貴重なご指導とご助言を賜りまし

た。感謝申し上げます。

7. 参考文献

岐阜県立恵那高等学校 平成 24 年度 SSH 課題
研究論文
「ドミノ倒しの研究」
市川翔太 内田療 鈴木沙絵
<https://school.gifu-net.ed.jp/ena-hs/ssh/H24ssh/sc3/31211.pdf>

岩手県立一関第一高等学校 令和 2 年度 SSH
課題研究

「ドミノの運動 ～伝播速度の分析～」
白井洸多 並岡大希 千葉太翔 西山直哉 濱田陽音 濱田優音
<https://ic1-h-ssh.sakura.ne.jp/wp/wp-content/uploads/2021/08/2020-07.pdf>