

ドミノ倒し

3504 伊藤穂 3532 原新芽 3622 成瀬裕介

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、徐々に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区間し、倒れるのにかかった時間を20区間分測定した。結果として、区間③までは加速度運動し、それ以降は加速と減速を繰り返しながら、一定の速度に収束することが分かった。実験から、ドミノが倒れるときの速度変化には倒れきっていないドミノの個数やドミノの間隔などが影響しているのではないかと考えた。

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が関係していると考えた。そのドミノが倒れるときにどのような力が働いているのかを調べることで、ドミノが倒れるときの速度変化を説明できると考えた。

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】

ドミノを等間隔で並べ、その1個目のドミノを押し、ドミノが倒れていく速度変化を調

べる。

【仮説1】

図1のように、「ドミノ1が傾くことによりドミノ2に当たる瞬間に、ドミノ2がドミノ1から受ける力」を F_1 とする。「ドミノ2が傾くことによりドミノ3に当たる瞬間に、ドミノ3がドミノ2から受ける力 F_2 」は F_1 とドミノ2がドミノ3を倒す時にはたらく力の合力になると考える。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く力の合力になると考えるため、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。

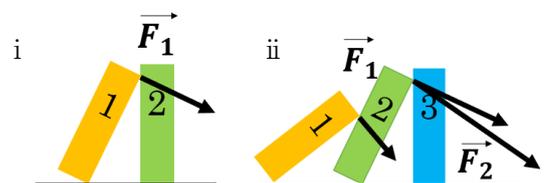


図1 ドミノにはたらく力のモデル

i. ドミノ2がドミノ1から受ける力

ii. ドミノ3がドミノ1,2から受ける力

【実験方法とその手順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3.0cmとなるように振り子を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10cm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 空けて 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 個目のドミノの手前から 6 個目のドミノの手前までの距離 9.0 cm を用いて速度を計算する。測定は 10 回行う。

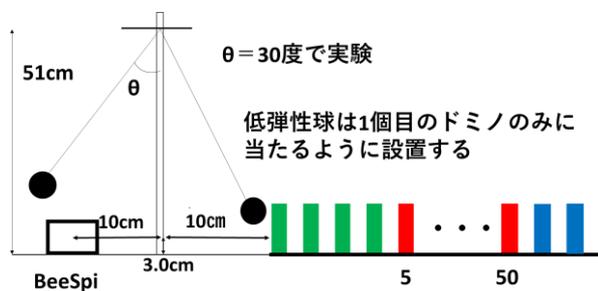


図 2 実験 1 のセットアップ

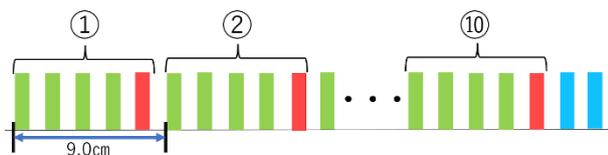


図 3 ドミノの時間計測区間と区間距離

【結果 1】

表 1 各区間を倒れるのにかった時間

	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

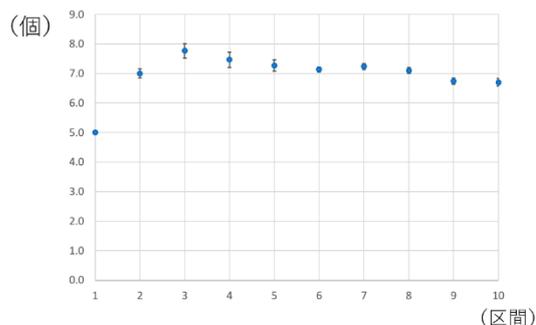


図 4 各区間の速度変化のグラフ

区間③までは一定の加速度で加速しており、区間④で初めて減速してから加速、減速を繰り返す、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】

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を注目した。(図 5)

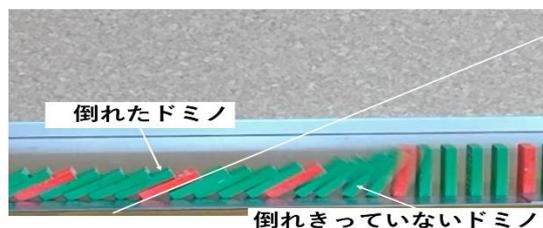


図 5 倒れきっていないドミノの測り方

区間①~区間④までと区間⑤~区間⑩まででは、倒れきっていないドミノの数の違いがあ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。

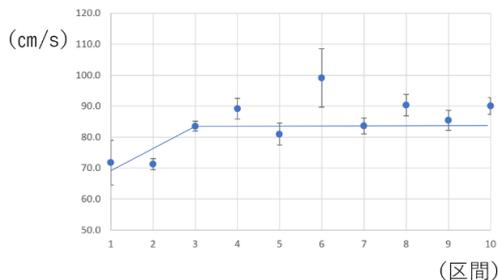


図6 各区間で倒れきっていないドミノの数

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、倒れきっていないドミノの数がほぼ一定になることが分かる。

このことから、図4での加速区間の原因は図6で区間③までの、倒れきっていないドミノの数が増加していることと関係があるのではないかと考える。

また、倒れきっていないドミノの個数とドミノが倒れる速度の関係は図7のようになる。

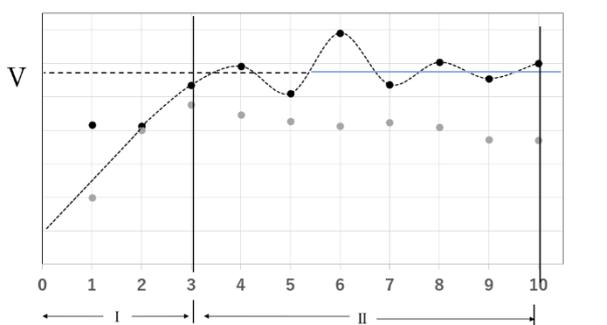


図7 速度●と倒れきっていないドミノの個数●の関係

I : 倒れきっていないドミノの数が増加している区間

(1個目のドミノが運動し続けている区間)

II : 倒れきっていないドミノの個数が一定となる区間

図7より、区間Iでは倒れきっていないドミ

ノの個数が増加していることから、ドミノが倒れる速度が加速していると考えられる。区間IIでは倒れきっていないドミノの個数が一定になるので、ドミノの速度はVに収束していく。ドミノを倒す力 $F_{合力}$ に対し、加速しているときに減速させ、減速しているときに加速させるような速度に依存する抗力がはたらくことにより、加速と減速を繰り返し、徐々にVに近づいていくのではないかと考える。

【実験2】

ドミノを並べる個数を100個にし、【実験1】と同様の実験を行う。50個目以降の速度変化を調べ、【考察1】が成り立つかを確認する。

【仮説2】

加速と減速を繰り返しながら一定の速度に近づく。

【実験方法2】

【実験1】と同様の実験を行う。

* 変更点

- ①ドミノの個数を100個に増やす。
- ②タブレットの台数を1台から3台に増やし、撮影を行う。

【結果2】

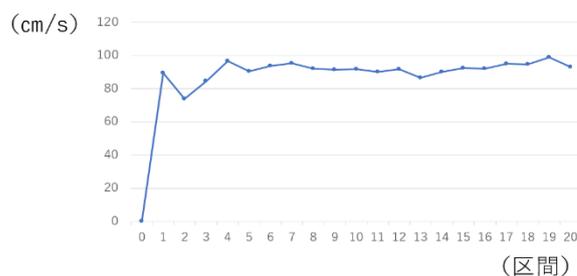


図8 速度変化の平均のグラフ

ドミノが倒れる速度は区間③を境に一定の値に近づく。

【考察2】

収束値を詳しく調べるために対象のドミノの個数を変化させたグラフを作成し、収束値

の定義を決めた。

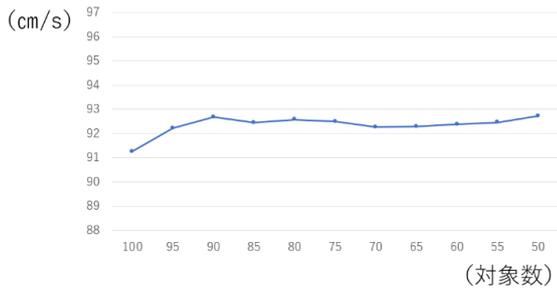


図 9 収束値の変化

このグラフから区間①や区間②を含めたドミノの倒れる平均速度は、変化しているが、区間③から区間⑬まではほぼ一定の平均速度となっている。

実験 2 の速度の収束値は区間③から区間⑳までの平均の速度とする。

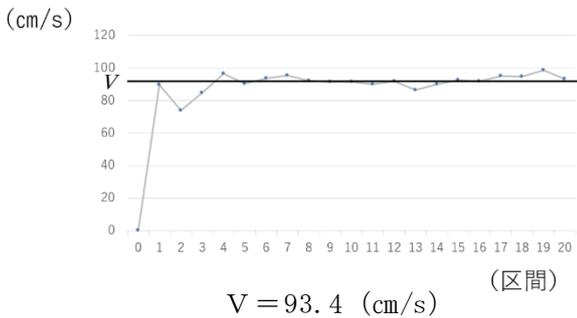


図 10 図 8 に速度の収束値を加えたグラフ

図 10 より、速度は徐々に収束値 V に近づくことが分かる。しかし、仮説 2 で立てた「加速と減速を繰り返す」ということはわからない。

そこで、隣り合う区間での速度の差をとることで加速、減速を繰り返しているかどうかを調べることにした。

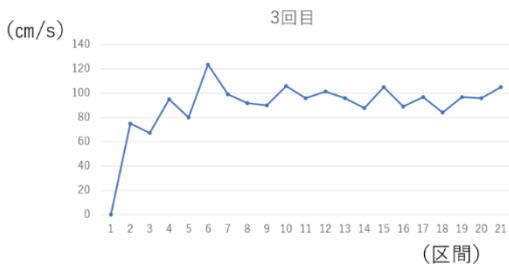


図 11 実験 2 の結果の一例



図 12 図 11 の隣り合う区間での速度の差の変化

図 11、図 12 より、加速と減速を繰り返しながら収束値に近づいていることが分かる。

以上のことから、仮説 2 の「加速と減速を繰り返しながら徐々に一定の速度に近づく」ということがわかった。

また、実験 1 と同様倒れきっていないドミノの個数を調べた結果、図 13 のようになった。

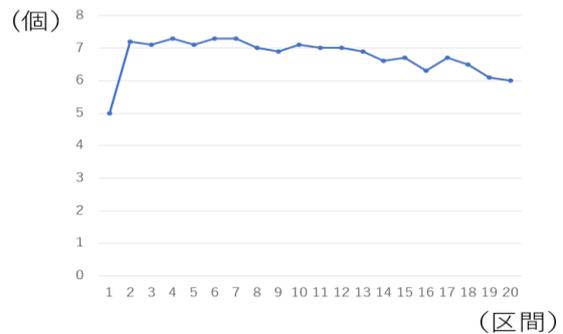


図 13 倒れきっていないドミノの個数の変化

図 13 より、倒れきっていないドミノの個数は区間③以降はほぼ一定の数になることが分かった。しかし、前回に比べ、後半はドミノの個数が少し減少傾向にあることが分かる。その原因として、ドミノ同士の衝突により生じる摩擦力による負の仕事や、エネルギーが音へ変換されたことが考えられる。また、グラフの速度が加速、減速する原因としてドミノが衝突するときの角度の違いなどが考えられる。

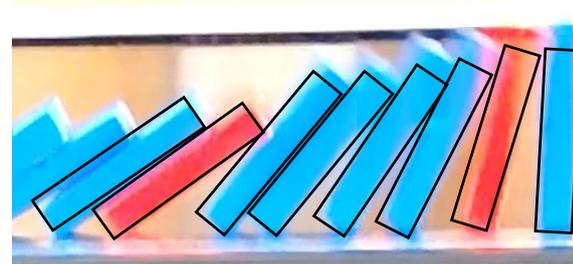
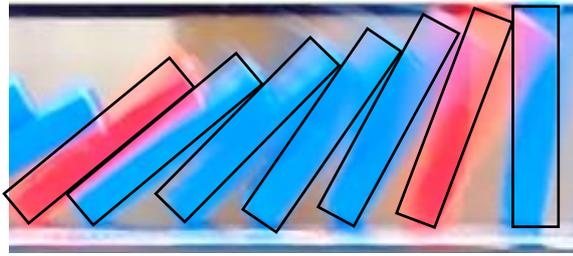


図 14 間隔によるドミノの角度の違い

これはドミノを並べるときに、間隔に多少の誤差が生じることや、すべてのドミノが平行に並べられていないことが挙げられる。

5. 展望

- ①ドミノが加速，減速を繰り返し倒れていく原因を解明する。
- ②一つひとつのドミノに着目した時の速度変化を調べることで，運動量と力積の観点から加速と減速の原因を説明できるようにする。
- ③ドミノの並べ方による倒れる速度の変化を調べる。

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>