

# ドミノの運動

## ～伝播速度の分析～

岩手県立一関第一高等学校理数科3年 物理1班  
白井洸多 並岡大希 千葉太翔 西山直哉 濱田陽音 濱田優音

### 要約

ドミノ倒しはよく知られた遊びだが、その速さ（転倒の伝播速度）がどのように決まるのかにはわかっていない点が多い。私たちは、これまであまり研究されていない加速過程や、曲線上のドミノ倒しについて実験を通して研究を行った。その結果、スタート直後（4～5個目まで）急激に加速することや、一定以上の角度の曲がりでは速度が減少することを見出した。これらの現象は、寄りかかるドミノの個数がスタート直後に急増し、そのため力積が増加することや、曲線上では力が分解されて力積が減少することによって説明できる。

〈キーワード〉 ドミノ倒し 加速過程 曲線上での減速

## Physics of Domino Toppling

### —Analysis of the acceleration and deceleration—

Kota Shirai, Daiki Namioka, Hiroto Tiba, Naoya Nishiyama, Haruto Hamada, and Yuto Hamada

#### ABSTRACT

We are interested in physics of domino toppling. To reveal what determines the propagation speed, we investigate the acceleration at a start and the deceleration on a curve. The results of our experiments show that the propagation speed increases rapidly just after the start and decreases gradually on a curve. We can account for this phenomenon by an increase of the impulse associated with a rapid increase of the leaning dominoes around the propagation front, and by a gradual decrease of the impulse due to the decomposition of the force on a curve.

*Keywords: Domino toppling, acceleration process, deceleration on a curve*

#### 1. はじめに

ドミノは世界中に知られた遊びだが、波の伝搬を可視化するためのモデルや力学の物理教材としても利用されている。私たちはドミノ倒しの伝播速度に興味を持ち、詳しく調べてみることにした。

杉山（2009）では、ドミノの転倒の伝播速度がほぼ一定となることや、ドミノの間隔に応じてその伝播速度が変化することなどが明らかにされている。私たちは、同様の実験を行い結果を検証するとともにより高い精度で実験を行い、また直線ではなく曲線状での伝播速度がどのようになるのか調べる。

#### 2. 直線上におけるドミノ倒しの伝播速度

##### 2-1. 先行研究の検証

杉山（2009）で示されたようにドミノが等速直線運動するか検証実験を行う。

##### 2-1-1. 実験方法

杉山（2009）ではストップウォッチを用いた目測での測定が行われていたが、伝播速度を算出するためのドミノの伝播にかかる時間のデータをより正確にするため、速度を測定するピースピV（株式会社ナリカ製）でFig.1のように設置して測定した。その測定範囲は0～999.9cm/sで測定精度は0.1cm/sである。

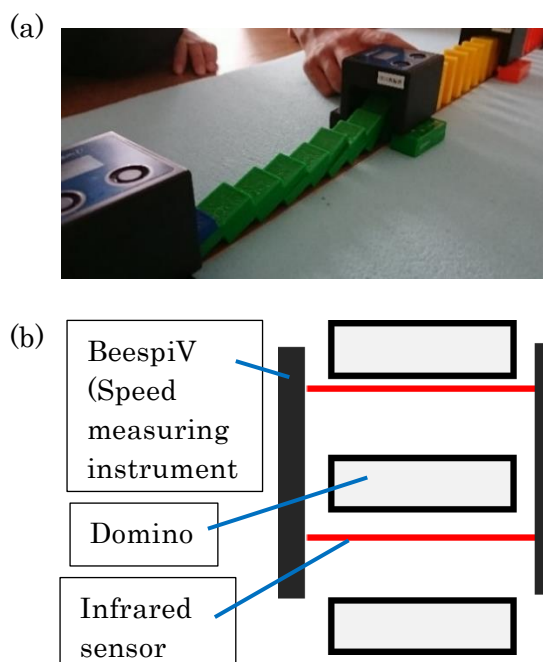


Fig.1 (a) Appearance of the measurement,  
(b) Layout of dominoes and BeespiV

使用したドミノは杉山(2009)と同一規格の厚さ×幅×高さ=0.8cm×2.3cm×4.6cm(体積=8.464≐8.5cm<sup>3</sup>, 質量 m=8.0g)のプラスチック製のものである。実験場所は、教室の床面などではドミノが床面を滑り倒れ方にばらつきが出るため(Fig.2a),木製の角材に紙やすり(240番)を接着したものを土台とした(Fig.2b)。

一つ目のドミノの初速度を一定にするため、自分たちで力学的エネルギー保存則を用いた振り子型スタート装置(Fig.3)を製作し、そこで転倒のきっかけとなる最初のドミノに速度は、重力加速度の大きさを  $g$ , 振り子の糸の長さ  $l$  を 38cm とすると,

$$v = \sqrt{2gl(1 - \cos 5^\circ)} \doteq 17 \text{ [cm/s]}$$

となる。

また、使用するドミノの個数は  $100(+\alpha)$  個とし、1.6cmの間隔で一直線状に並べた。

### 2-1-2. 実験結果

実験は 40 回繰り返し行い、ドミノ 10 個おきの伝播速度を測定した。測定結果を Fig.4 に示す。横軸は測定地点のドミノがスタート地点から何個目かを、縦軸は測定地点での伝搬速度を、エラーバーは標準偏差を表す。

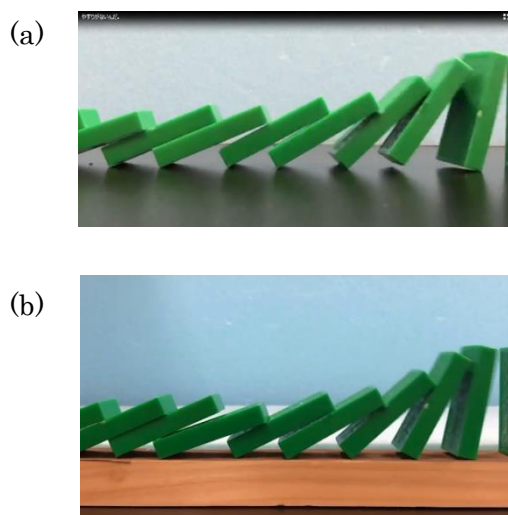


Fig. 2 Dominoes seen from the side  
(a) Experiment on the floor,  
(b) Experiment on the sand paper

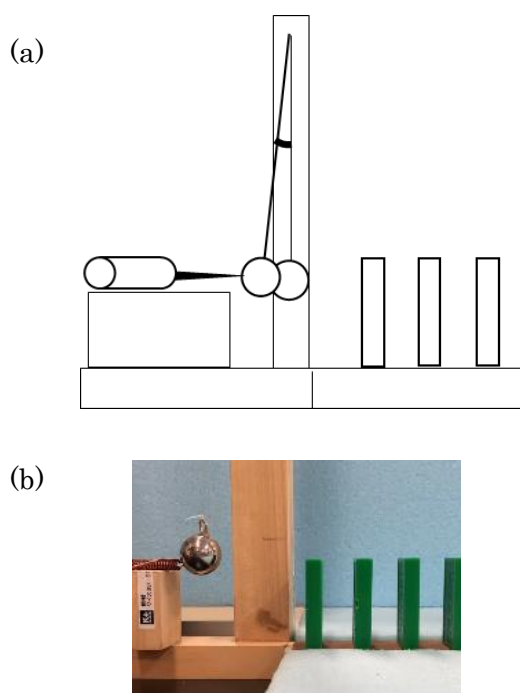


Fig.3 Pendulum-type starter (a) Schematic picture (b) Photograph

グラフより有意な差が見られないことから、ドミノはほぼ等速直線運動した(伝播速度がほぼ一定)と考えられ、杉山(2009)と同一の結果が得られた。

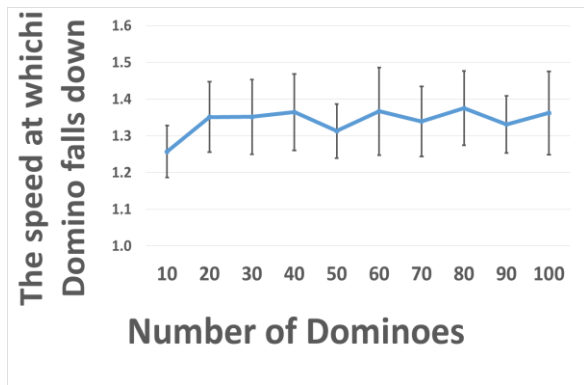


Fig. 4 Variation of propagation speed

## 2-2. スタート時の加速過程

### 2-2-1. スタート直後の速度変化

2-1節より10個目以降の伝播速度は一定と見なせることがわかったが、1~9個目の変化については分かっていない。目視による観測では、スタート直後にドミノの伝播速度は加速しているように見える。そこで、2-1より高精度で伝播速度を測定し、スタート直後の伝播速度の変化について調査する。

### 2-2-2. 実験方法

本実験では、データの測定精度を上げるため、ストップウォッチで測定するとともに、倒れていくドミノをスローカメラで撮影し、その映像から時間の値（最後尾のドミノが転倒を開始してから終了するまでの時間）を読み取ることで計測した。また、測定した速度はドミノ単体の角速度である。

### 2-2-3. 実験結果

40回繰り返して得られた結果をFig. 5に示す。横軸はドミノのスタート地点からの個数を、縦軸はドミノ単体の角速度を、エラーバーは標準偏差を表す。

Fig. 5のグラフより有意な差が見られたことから、ドミノは番号〈1〉~〈14〉の間で加速運動をしていることが分かった。

特に、大きく加速しているのは番号〈1〉~〈4〉の間である。そこで、スタート直後の映像解析から、後ろから寄りかかるドミノの個数がスタート直後に1個から5個程度に急激に増加すること（5個目以降はほぼ一定）がわかった（Fig. 6）。したがって、番号〈1〉~〈5〉での急激な加速は後ろから寄りかかる

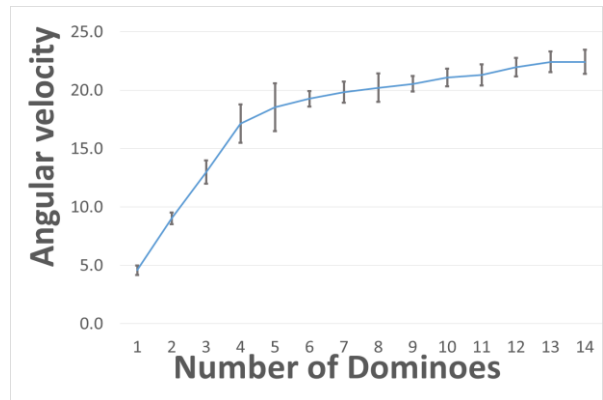


Fig. 5 Variation of angular velocity after the start

ドミノの個数の増加によるものだと考えられる。

また、番号〈6〉~〈14〉でも緩やかに加速をしていることから、等速直線運動がはじまるのは少なくとも番号〈14〉のドミノ以降からではないかと考えられる。

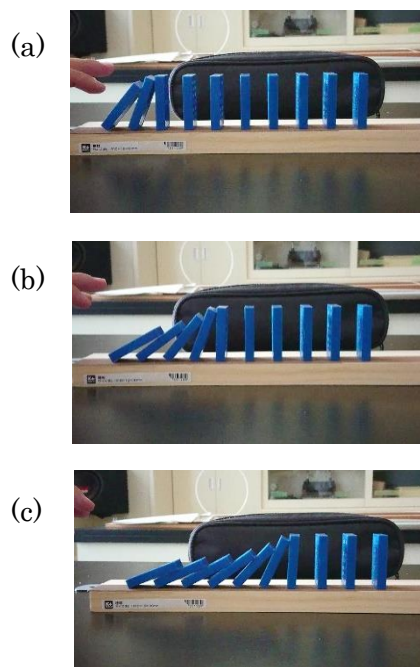


Fig. 6 The start of falling of (a) the 3rd, (b) the 5th, (c) the 7th domino

### 2-2-3 考察

ドミノが加速する際に起きている現象について、次のように考察した。番号〈2〉以降について図のようなモデルを考えると（Fig. 7）、番号〈x〉が転倒する間に番号〈x-1〉が番号

〈x〉に与える力積が、計測した角速度に影響を与えていると考えられる。その力積は、運動量と力積の関係式より

$$mv' - mv = F\Delta t$$

と与えられる。

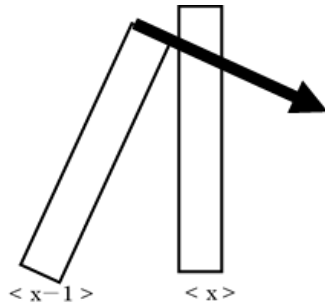


Fig. 7 Model of domino falling

この式にある  $F$  [N] は番号 〈x-1〉が番号 〈x〉に与える力を表しており、 $\Delta t$  [s] は番号 〈x-1〉と番号 〈x〉の接触時間を表している。よって、力積の増加は、接触時間の増加、番号 〈x-1〉から受ける力の増加、または両方によると考えられる。ここで、角速度が増加すると接触時間は短くなることから、スタート直後の力積の増加は番号 〈x-1〉が 〈x〉を押し力が増加したためだと考えられる。

### 2-3 この実験の結論

杉山 (2009) で述べられていた通り、ドミノは等速直線運動をすることが確認された。また、新たにスタートから14個目までは加速することがわかった。さらに、その際、5個目までは急激に加速し、その後、加速度を減少させながら緩やかに加速し、徐々に等速運動に近づいてゆくことが分かった。

この現象は、後ろから倒れかかるドミノの個数による変化で説明でき、後続のドミノから前方のドミノに加わる力積が、伝播速度を決定する大きな要因になっていることがわかった。

## 3. 曲線のドミノ倒し

### 3-1. 3つの仮説

ドミノ倒しの伝播速度がどのように決まるのかをより深く理解するため、私たちはさらに曲線上に並べたドミノでの実験を行う。曲

線の場合と直線上のドミノの結果を比較することで、伝播速度の決定要因についてもより深く理解できるだろう。この実験ではドミノを円周上に並べる。

ここで、私たちは3つの仮説を立てた。

仮説Ⅰ：先行研究(杉山, 2009)でドミノ間の距離(間隔)に応じて速度が変化したとすると、曲線上のドミノ倒しの場合も、ドミノが衝突するまでの距離が等しければ速度も一定(等速運動)となる。

仮説Ⅱ：曲線の場合、衝突の際に力積の方向と速度の方向にずれが生じるため、伝播速度が減少する。

仮説Ⅲ：曲線の場合、接触するのが「点」となるため、力が無駄なく伝わり、加速する。これらの仮説の妥当性を確かめるため、曲がり方をいろいろと変えて実験を行う。

### 3-2. 実験方法

まず、ドミノを曲線に並べる際の条件について述べる。今回の測定ではドミノが等速直線運動となった後であることを初期条件とした。そのため直線状に間隔 1.6cm で 26 個並べ、それに続いて曲線状に並べた (Fig. 8)。



Fig. 8 Photograph of the domino falling on the curve

曲線上への並べ方は、下記の条件 (a), (b) を満たすように並べた (Fig. 9)。

条件：

- (a) 隣接するピース同士において、ピースの辺の延長線のなす角  $\theta$  を一定にすること。
- (b) 番号 〈x〉のドミノの頂点 B が番号 〈x+1〉のドミノの面 A に衝突するまでの距離を、すべて 1.6cm にすること。

条件 (a) については、本実験では  $\theta = 10^\circ$  から  $35^\circ$  まで  $5^\circ$  区切りで (計 6 パターンについて) 実験を行った。また、条件 (b) については、ドミノ間の距離が 1.6cm となる半径  $r$  の導出は以下の手順によって行った。

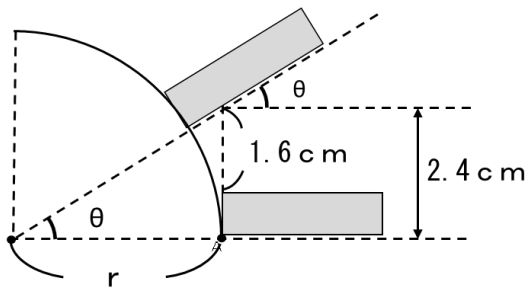


Fig. 9 Schematic picture of the domino falling on the curve

Fig. 9 より、線分 AB は 1.6cm、ドミノの厚さが 0.8cm となるので、線分 AC は 2.4cm となる。円の半径を  $r$  [cm] として、線分 OA と線分 OC のなす角を  $\theta$  とすると、

$$\tan \theta = \frac{AC}{OC} = \frac{2.4}{r}$$

が成り立つので

$$r = \frac{2.4}{\tan \theta}$$

となる。この方法で求めた半径の円に接するようにドミノを並べた。

土台については、ドミノが滑ることがセロハンテープによって改善され、曲線の場合紙やすりの目の方向による引っかかり等の懸念がある事から使用しなかった。

次に、測定方法について説明する。Fig. 10 のように曲線に入る際のドミノの番号を  $\langle 0 \rangle$  とし、番号  $\langle x \rangle$  のドミノが転倒を開始してから、番号  $\langle x+3 \rangle$  が番号  $\langle x+4 \rangle$  に接触するまでの時間を計測して、4 個おきに（つまり、 $x=0, 4, 8$  での）伝播速度を求めた。

4 個での区間の長さ  $L$  は、ドミノの厚さが 0.8cm、ドミノの間隔が 1.6cm だから、

$$\begin{aligned} \text{長さ } L &= (\text{厚さ } D + \text{間隔 } d) \times \text{個数} \\ &= (0.8[\text{cm}] + 1.6[\text{cm}]) \times 4 = 9.6[\text{cm}] \end{aligned}$$

である。測定方法は、2-2 節で示した加速過程の実験のときと同様に、カウントしているストップウォッチと共に倒れていくドミノをスローカメラで撮影して、その映像から時間の値を読み取ることで計測した。

### 3-3. 実験結果

実験結果を Fig. 11 に示す。横軸は計測区間を表し、縦軸はドミノの伝播速度を表している。角度が大きくなるほど、プロットしたデ

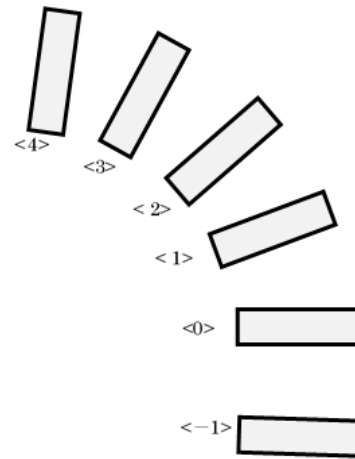


Fig. 10 Domino number

ータの数が少なくなるのは、その個数で円を 1 周してしまうからである。なお、初めの区間 ( $\langle -x \rangle \sim \langle -x+4 \rangle$ ) は直線区間を表している。

### 3-4. 実験結果

実験結果を Fig. 11 に示す。横軸は計測区間を表し、縦軸はドミノの伝播速度を表している。角度が大きくなるほど、プロットしたデータの数が少なくなるのは、その個数で円を 1 周してしまうからである。なお、初めの区間 ( $\langle -x \rangle \sim \langle -x+4 \rangle$ ) は直線区間を表している。

$20^\circ$  より大きい角度の場合のときは伝播速度が有意に変化しており、ドミノが減速していることがわかった。

### 3-5. 考察

ドミノを曲線上に並べた場合、ドミノが次のドミノに衝突するときの角度が  $0$  ではなく、後ろのドミノから受ける力は分解され、進行方向の力の成分が減少する。そのため、転倒中のドミノが受ける力積が減少し、減速してゆくと考えられる。

具体的には、角度  $\theta$  が小さい場合、後ろのドミノから受ける力の進行方向の成分は角度が小さいため元の力の大きさと大きく変わらない (Fig. 12)。そのため、ドミノに与えられる力積にも大きな差が現れず、直線の時に似た結果になると考えられる。

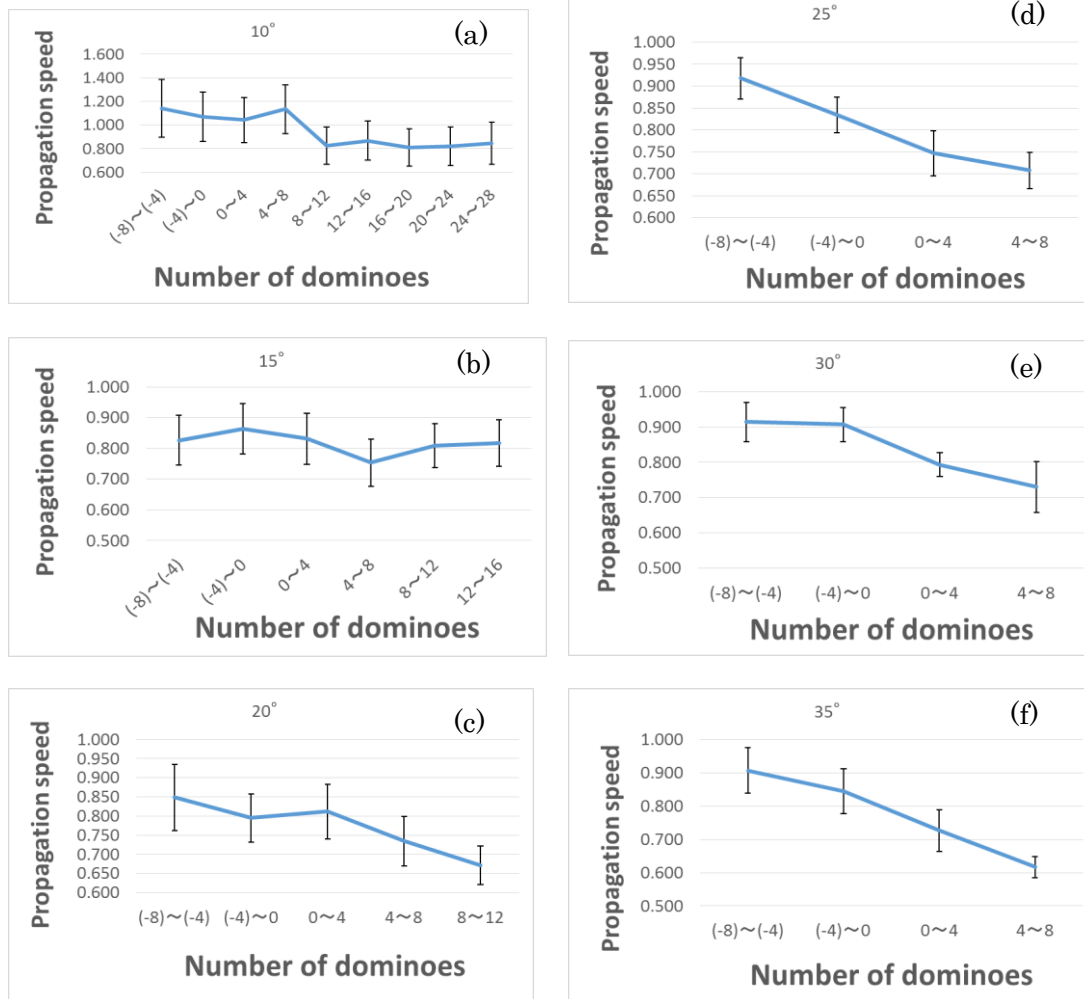


Fig. 11 Propagation speed (a)  $\theta = 10^\circ$  , (b)  $\theta = 15^\circ$  , (c)  $\theta = 20^\circ$  , (d)  $\theta = 25^\circ$  ,

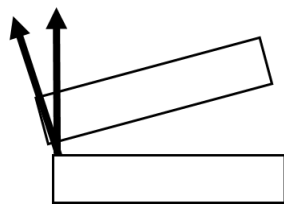


Fig. 12 The case of a small angle

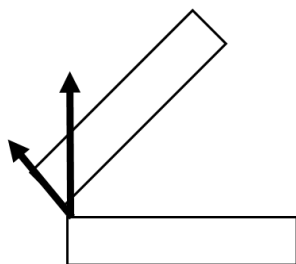


Fig. 13 The case of a large angle

他方、角度  $\theta$  が大きい場合、後ろのドミノから受ける力の進行方向の成分は、元の力の大きさより大きく減少する (Fig. 13)。そのため、転倒中のドミノが受ける力積も減少し、減速すると考えられる。

以上より、曲線上のドミノ倒しの場合も、後ろのドミノから加わる力積の大きさが、伝播速度を決定する要因になっていると考えられる。

### 3-6. この実験の結論

ドミノ倒しの伝播速度について、衝突時の角度が伝播速度に影響を与えていることがわかった。また、このことから仮説 I と仮説 III は棄却され、仮説 II が立証された。

#### 4 まとめ

実験を通してドミノの伝播速度がどのように決まるのかについて研究した。特に、加速過程について調査するとともに、曲線上にドミノを並べた場合の伝播速度について調べた。その結果、ドミノ（の転倒）はスタートから5個目まで急激に加速した後、加速度を減少させながら緩やかに等速直線運動に近づいていくという特徴的な加速過程を持っていることが分かった。また曲線の場合では、一定以上の角度になると減速することが分かった。

#### 謝辞

本研究を進めるに当たり、ご指導いただいた柿木康児先生並びに佐々木隆浩先生に厚く御礼を申し上げます。本当にありがとうございました。

#### 参考文献

杉山了三 (2009) : ドミノで地震波のモデル実験, 岩手の地学教材と実験 2009 年度版, 102-113」