

■第15回高校生シンポジウム 「プラズマ科学と先端技術」実施報告

東海大学理学部物理学科
利根川 昭 (本学会監事)

プラズマ・核融合学会では、高校生の理科離れへの対策の一助と考え、平成15年度より SSH・SPP 高校などと連携して「高校生シンポジウム」を立ち上げ、全国の大学・研究機関等を巡って開催してきました。これは、「高校生のための高校生による高校生のシンポジウム」とし、高校生自身が研究・発表し質疑応答する。まさに研究者の学会と同様の形式のシンポジウム実施することにより、高校生自らが科学にふれあいながら、自分たちの言葉で他人との議論を通じたコミュニケーションを図ることの楽しさや面白さを体感させることができます。そのことにより、次代を担う科学技術系の人材育成につなげることができると考えています。

平成29年度の第15回高校生シンポジウムは、8月29日(火)に東海大学湘南キャンパス Techno Cube (19号館) 3階、19-311教室で開催されました。主な内容は、特別講演、生徒による口頭発表、表彰式等が行われ、同階フロアにおいては、ポスター発表も行われました。

今回のテーマは「プラズマ科学と先端技術」で、プラズマ科学の紹介と、その科学を支える先端技術(材料分析技術や真空技術)に触れることにより、基礎研究とそれらを支える幅広い先端技術を体感させ、総合科学としてのプラズマ・核融合について理解することを目的としています。具体的には、プラズマ科学を支える重要な先端技術である「材料分析技術と真空技術」をテーマの中心に位置づけ、東海大学のプラズマ関連施設や高度物性分析センターの見学を通じて、核融合発電のような総合科学の発展には基礎研究はもちろんであるが、その基礎研究を支える周辺の先端技術も重要であることを体験してもらいました。

また、今年度は、前回(第14回)と同様2部制をとり、第1部は高校生の研究発表会、第2部は、筑波大学の坂本瑞樹教授による「プラズマ科学と先端技術」—核融合プラズマと材料開発—についての特別講演を実施しました。その後、本学のプラズマ関連施設と高度物性分析センターの見学会を実施しました。

参加校は、立命館高等学校、岡山県立玉野高校、東海大学付属高輪台高等学校、静岡北高等学校、茨城県立水戸第

一高等学校で、高校生18名、教師4名、大学・事務局関係者は、吉田善章学会会長、坂本教授(筑波大)、東海大学関係者18名で、合計36名の参加でした。

審査委員会(委員長・吉田善章会長)による審査の結果、最優秀口頭発表賞には、東海大学付属高輪台高等学校の「ジャイロ効果とブーメラン」が、最優秀ポスター発表賞には立命館高等学校の「カーブにおけるドミノの倒れる速さ」が選ばれました。審査委員長による講評では、「素晴らしい発表ばかりで選定には苦労しました。今後の更なる研究の発展を期待します。」との感想と激励が述べられました。

以下に受賞内容と受賞者一覧を記載します。

○口頭発表

最優秀賞「ジャイロ効果とブーメラン」

田代勇太郎(東海大学付属高輪台高等学校)

優秀賞「多価の酸⇌1価の塩基の中和滴定曲線とそれらの学術用語についての考察」

西野光太郎(茨城県立水戸第一高等学校)

優秀賞「品質工学を応用した優良株と関連のある指標の抽出」

山内新太(茨城県立水戸第一高等学校)

○ポスター発表

最優秀賞「カーブにおけるドミノの倒れる速さ」

小野美紅, 藤井菜緒(立命館高等学校)

優秀賞「土砂崩れにおける岩盤の影響」

中西緋葉里, 松本拓己, 森下雄一郎
(静岡北高等学校)

優秀賞「指パッチンのメカニズム」

佐藤茂, 高橋大樹

(東海大学付属高輪台高等学校)

参加した高校生には、今回のシンポジウムを通して、スケールの大きい総合科学である核融合研究と、原子・分子現象を扱う材料研究との関連性を理解することにより、科学技術に対するスケージングの大切さを認識していただくと感じています。そして、大学の研究者、大学院生との交流、最先端研究施設の見学等を通じて、将来の自分を想像し、研究や科学に対する興味や関心をより一層高めていただくことを期待しています。

最後に、このシンポジウム開催に当たり協力していただきました全ての方々に感謝します。



■最優秀口頭発表賞

「ジャイロ効果とブーメラン」

東海大学附属高輪台高等学校 3年 田代勇太郎

【ブーメランとは】ブーメランは、古来より狩猟をするため、また儀式をするための道具として世界各地に存在していた。今日では、世界中に広まっている玩具として、またスポーツとして知られている。ブーメランは、投げ出されると回転しながら旋回して戻ってくる。

【動機】もともと回転する物体についての研究をしていた。その中で面白い動きをするものはないかと調べていき、コマなどいろいろな研究対象候補の中からブーメランの運動に興味を持ち、研究することにした。

【目的】ブーメランの飛行原理について学習した上で、その中で生じた「どのようなブーメランが戻ってきやすいのか？」という疑問を解決するためにブーメランの形を変え、ブーメラン運動がどのように変化するかを調べた。

【ブーメランが飛ぶ仕組み】トルク(T)：質点や剛体が円運動をしているときにかかる力Fと円運動の中心との距離にあたる動径ベクトルrを外積した力のモーメントのことである。ベクトル積なので向きが存在し、右ねじの法則のようになるので(図1)のイメージ画像では上向きにはたらく。

・ジャイロ効果：回転している物体が回転軸を保とうとするはたらき。

・ジャイロモーメント：回転する物体のトルク①に対して直交する外部から新しく回転のトルク②が加わったとき、回転する物体のトルクと外部から新しく加わった回転のトルクに直交する軸上にモーメント③がはたらく(図2)。これをジャイロモーメントと呼ぶ。また、このモーメントの回転をジャイロ回転と呼ぶ。ジャイロモーメントと直交する二つのトルクのどちらか、または両方が大きくなるとジャイロモーメントも大きくなる。

これをブーメランに当てはめて考える。投げ出された瞬間にあえられる回転が(図2)の①の回転とする。ブーメラン自体は投げ出されているので前から風を受けていることになり、①の回転により(図3)のように風に向かっていく羽の揚力は大きく、風から遠ざかっていく羽の揚力は小さくなる。この二つの揚力の差により②の回転の力が生まれる。この二つのモーメントによりジャイロモーメントが生まれ、手元に帰ってくるという運動をする(図4)。

【仮説】「どのようなブーメランが戻ってきやすいのか？」という疑問に対し、③の回転(ジャイロモーメントの回転)が大きくなると戻ってきやすくなるのではないかと考えた。③の回転を大きくするには②の回転(羽から生まれる揚力の差による回転)を大きくし、ブーメランの羽の枚数が多くなれば②の回転の力が大きくなるのではないかと考え、次の実験をした。

【実験】・目的：羽の枚数の変化により、②の回転の力の大きさがどのように変わるかを確かめる。

・使用したもの：ブーメラン(4枚)、風洞機、モータ
 ・実験方法：3から6枚の羽をもつブーメランを風洞機の中に入れてモータで回転させ、ブーメランに風を送りブーメランを投げた状況を再現した。揚力の差の大きさをブーメランの傾き具合によって判断した。

- ・実験手順：
1. 厚紙でモータを入れるための箱を作った。
 2. 箱の側面にモータの導線を通し、滑車に取り付けるための穴を開けた。
 3. モータを箱の中に入れ、箱と接着剤で接着した。

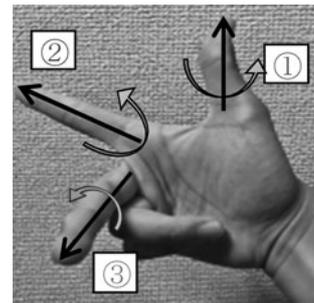


図2 ジャイロモーメント。

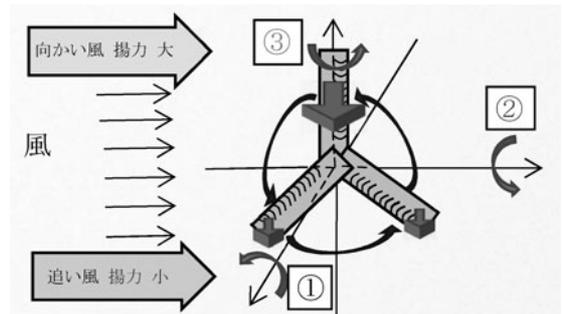


図3 羽の揚力の差による回転。

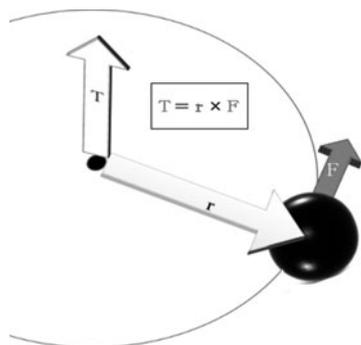


図1 トルクのイメージ。

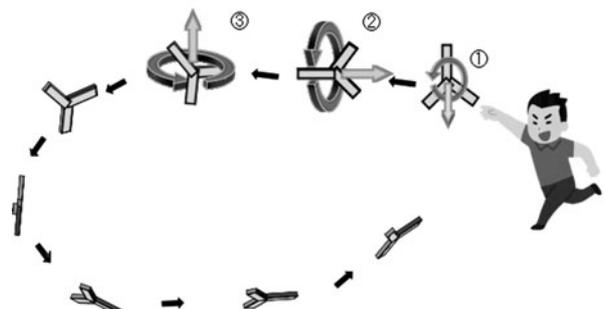


図4 三つの回転により帰ってくるブーメラン。

4. 銅線で箱を滑車に固定して、図7のような装置を作った。
5. 装置を風洞機の測定部の上部に取り付けた。
6. モータにブーメランを取り付けた。
7. スイッチを入れ回っているブーメランに風を送り込み、ブーメランの傾いた角度を一種類につき30回測った。

※1：モータは1.5Vの乾電池を2個直列につないで回転させた。

※2：揚力の差によって生まれる(図2)②の回転の力を測るために滑車に取り付けた分度器の目盛り(図7)を読むことで、ブーメランの傾いた角度を測った。

・実験風景：向かって左から空気を取り込み、モータで回っているブーメランに当たり、空気が右へ抜けていく。(図8)傾いた角度は写真を撮り、記録する。(図9)

【結果】羽の枚数が多いブーメランの方が少ないブーメ

ランより傾いた角度が大きくなっていった。また、3から6枚の間では、ブーメランの傾きの角度のグラフは右肩上がりであり、ほぼ一直線になった。

【考察】羽の枚数が多くなるにつれ、羽の揚力の差による回転②の力が大きくなった。

ほぼ一直線になっていることから羽の枚数(x)と羽の揚力の差による回転②の力により生まれた角度(y)が、枚数が7枚、8枚、…と増えた場合でも、下の式のような比例関係になっているのではないかと考えた。

$$y = 0.60(x-2) + 1.22 \quad (x \geq 3, x \text{ は自然数})$$

羽の枚数が多くなるにつれて羽の揚力の差による回転②の力が大きくなるので、ジャイロモーメントによる回転③の力も大きくなり、羽の枚数が少ないブーメランより多いブーメランの方が早く手元に戻ってくるのではないかと予



図5 風洞機 ※風速 3.1 m/s.

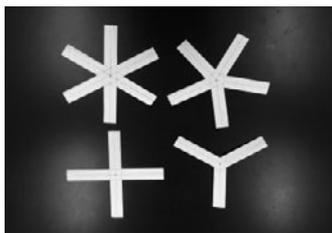


図6 ブーメラン ※厚紙から作り3~6枚の羽を持ち、直径を24cmに統一した。

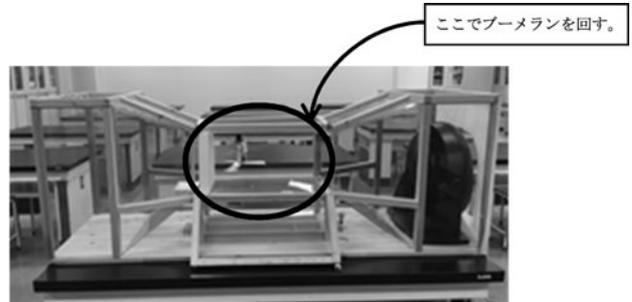


図8 実験装置の全体像。

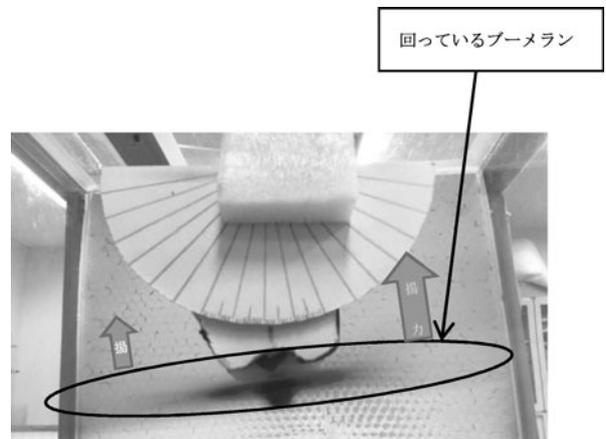


図9 実験中の様子。

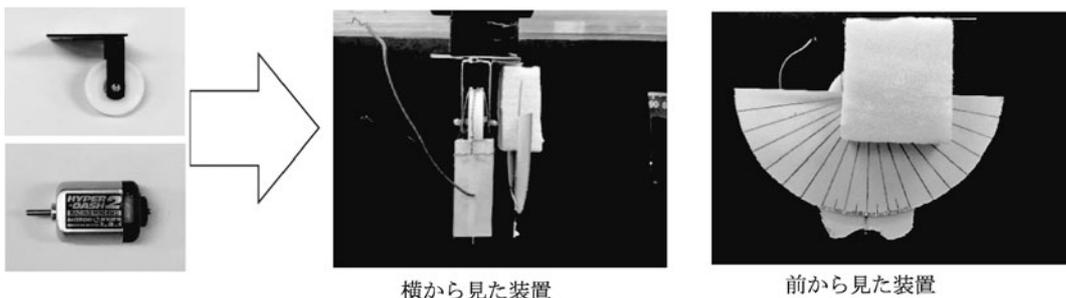


図7 ブーメランの傾いた角度を測るための装置。

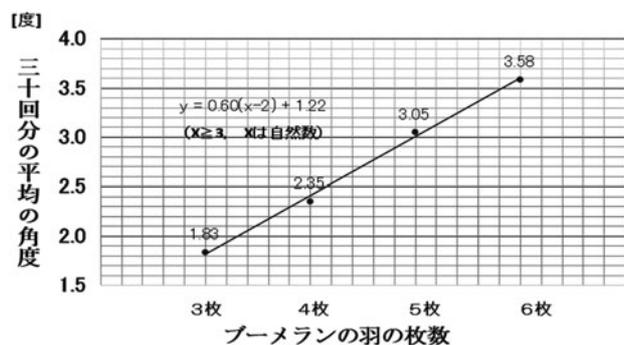


図10 ブーメランの羽の枚数と傾いた角度.

想できる.

【今後の展開】 ブーメランを実際に飛ばし、考察での予想が正しいかどうか確かめたい. さらに羽の枚数を増やしたブーメランを作製し、実験したい. また、羽の枚数以外にも質量や羽の長さなどの条件を変えて実験したい.

参考文献

- Raymond A. Serway 訳：松村博之：科学者と技術者のための物理学 Ia 力学・波動（学術図書出版社，1997）.
- 久保田浪之介：トコトンやさしい 流体力学の本（日刊工業新聞社，2007）.

■最優秀ポスター発表賞
「カーブにおけるドミノの速さ」

立命館高等学校 3年
小野美紅・藤井菜緒

1. 研究目的

ドミノ倒しとは、長方形のタイルを並べ、その列の先頭のタイルを倒すことにより、次々とタイルが倒れていく連鎖で、最後のタイルまで倒す遊びである。最後まで倒しきるといことは難しく、そのための工夫をしたり、たくさんのタイルを使用し、ひとつのドミノによるアートを作り出したりして楽しむ人もある。ドミノを並べることによって達成感を得られることもドミノ倒しにおける魅力である。遊び方が比較的シンプルであるため、誰でも楽しむことができる。

最後まで途切れることなく倒しきらないといけませんが、連鎖が途切れがちであるのは、カーブである。ドミノを平行に並べることが困難で、直線の場合のように力を伝達していくことが難しいからであると考えた。また、カーブではスピードが遅くなるように見える。そこで、カーブにおける速さに着目して研究を行う。

岐阜県恵那高校の高校生が行ったドミノの直線における並べ方の条件と速さの関係の研究では、縦4.6 cm、横2.3 cm、厚さ0.8 cmのドミノを使用し、2 cm 間隔で直線に並べられたドミノ列では、26個から30個目の間で加速度運動から等速直線運動に変わるということがわかっている。また、ドミノとドミノの間隔を変えることによってドミノが倒れきる時間が変化するということがわかっており、1.6 cm 間隔で並べたときが一番早くなるということがわかっている。そのとき、倒れるドミノと地面の間の角の大きさ(図1)は70°である。

そこでカーブにおいてもドミノとドミノの間隔がドミノの倒れる速さに影響すると考え、間隔に着目して実験を行った。それに加え、カーブの急さ、カーブの形においても速度が左右されるのかを調べた。また、ドミノから次のドミノにあたる瞬間に移動する力の大きさも調べた。この研究では、これらの要素から、ドミノ列のカーブを一番速く倒すことのできる条件を導きだし、ドミノの倒れる規制、原理を導きだした。

2. 研究方法

器具・道具

- ・ドミノ (縦4.6 cm、横2.3 cm、厚さ0.8 cm)

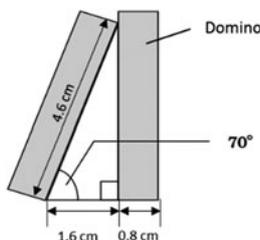


図1 倒れるドミノと地面の間の角の大きさ。

- ・ストップウォッチ
- ・模造紙 (曲線のコースを印刷したもの)
- ・スマートフォン

実験1

まず、直線におけるドミノの倒れる速さがドミノ同士の間隔で変わるのかについて実験を行った。ドミノ同士の間隔(図2)を1.5 cm、2.0 cm、2.4 cm、3.0 cmの4パターンとし、直線に並べた。それぞれ12回ずつ測定し、一番速かった記録と一番遅かった記録を除いた10回分の記録を平均し比較した。また、ドミノ列の始まりから終わりまでの距離を揃える条件とし、120 cmとした。

実験2

次にドミノのカーブにおいて、カーブの急さによって倒れるスピードが変わるのかについての実験を行った。半円を3個含むコース(図3)を用意し、半円の直径の値を変えて、カーブの急さを変化させた。直径は16 cm、18 cm、20 cm、22 cm、24 cmの5パターンとし、実験1と同じように、それぞれのコースで12回測定し、一番速い記録と一番遅い記録を除いた10回の記録を平均し比較した。ドミノ同士の間隔を2.0 cmに統一し、ドミノの個数を揃える条件とした。このとき、ドミノ同士の間隔はドミノの

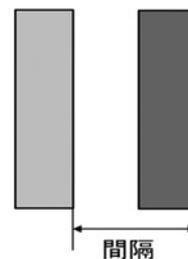


図2 ドミノ同士の間隔。



図3 半円を3個含むコース。

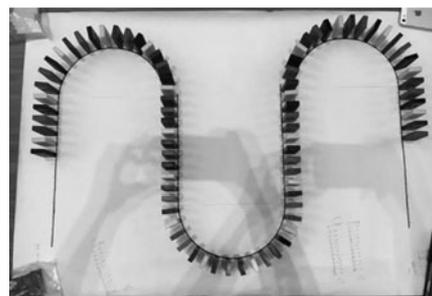


図4 コースに並べられたドミノ。

※本論文は、読売新聞社主催日本学生科学賞に応募し、京都府「読売新聞社賞」を受賞しました。

コース側の端つまり描いた線上で測った (図4)。

実験3

実験2で使用したコースを用いて、それぞれのコースでドミノの間隔を変え、カーブにおいてドミノ同士の間隔がスピードと関係するのかを調べた。ドミノ同士の間隔は2.0 cm, 2.4 cm, 3.0 cmとした(図5)。測定方法は実験2に同じ。揃える条件はコースの長さとした。

実験4

実験4では、曲線の形によってスピードはどれくらい変わるのかを調べた。半円(図6)、放物線(図7)、クロソイド曲線(図8)の3種類を用い、それぞれ12回計測し、コースの全長と時間から秒速を出して比較した。

実験5

クロソイド曲線において、ドミノを倒す向きと速さの関係を調べた。実験4で使用したコース(図8)を使用し、内側から倒す場合と外側から倒す場合をそれぞれ12回測定し、一番速い記録と一番遅い記録を除いた10回の記録を平均し比較した。

実験6

直線において、ドミノの当たる幅と速さの関係を調べた。当たる幅を2.3 cm(図9)、1.2 cm(図10)、0.8 cm(図11)とし、それぞれ12回測定し、一番速い記録と一番遅い記録を除いた10回の記録を平均し比較した。

3. 研究結果

実験1

直線において、図12, 表1, 2からわかるように、ドミノを2.0 cm 間隔で並べた場合が一番速く倒れた。その次に速かったのが1.5 cm の場合で、2.0 cm のときと比べて0.02 秒の差があった。

実験2

図13, 表3, 4より、カーブに用いた半円の直径が大きい場合ほど倒れきるのにかかる時間は短く、直径16 cm と24 cm では0.26 秒の差があった。

実験3

どのカーブの急さにおいても2.0 cm 間隔でドミノを並べた場合が一番速かった。ただし、直径20 cm のときだけ2.0 cm より2.4 cm のほうが0.01 秒速かった(図14~18, 表5~14)。

実験4

図19と表15, 16より、半円の秒速は79.77 cm/sで、放物線が77.12 cm/s, クロソイド曲線が77.44 cm/sであり、半円が一番速い。

実験5

図20, 表17, 18より、内側から倒すほうが0.03秒だけ速かった。

実験6

図21, 表19, 20より、ドミノ全体が当たっている場合は1.28秒で倒れきったが、1.2 cm, 0.8 cm の場合はそれぞれ1.31秒, 1.82秒という結果で、ドミノの当たる幅が小さくなると倒れる速さも遅くなった。

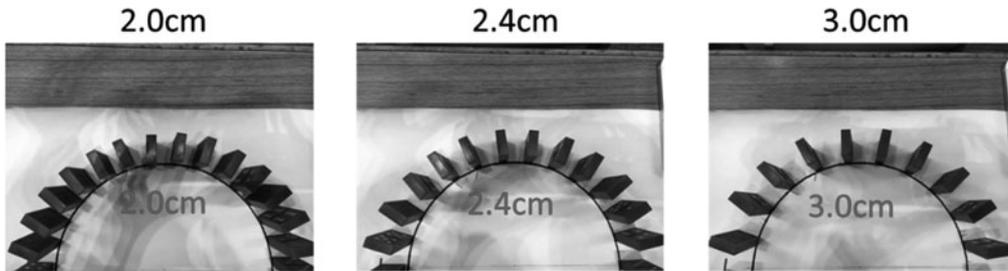


図5 実験3において変えたドミノの間隔。

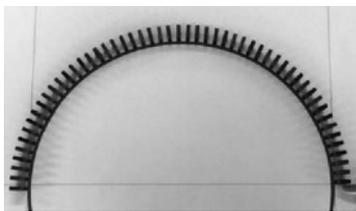


図6 半円。



図7 放物線。

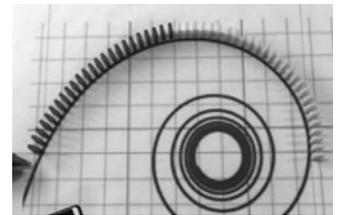


図8 クロソイド曲線。



図9 当たる面積が2.3 cm。

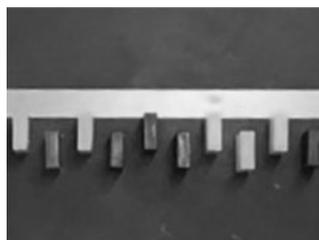


図10 当たる面積が1.2 cm。



図11 当たる面積が0.8 cm。

表1 直線における間隔と速さの関係。

間隔 (cm) 回数	1.5	2.0	2.4	3.0
1	1.35	1.28	1.45	1.71
2	Max(1.43)	Max(1.35)	1.41	1.88
3	1.30	1.33	Min(1.25)	1.68
4	1.30	1.26	1.38	1.56
5	1.21	1.23	1.28	Min(1.51)
6	1.30	1.26	1.46	1.90
7	1.30	1.28	1.40	1.63
8	1.31	1.25	1.35	Max(1.95)
9	1.28	Min(1.23)	1.43	1.68
10	Min(1.18)	1.31	Max(1.50)	1.58
11	1.20	1.31	1.43	1.73
12	1.43	1.24	1.36	1.52
平均	1.30[s]	1.28[s]	1.40[s]	1.69[s]

表2 実験1における有意差。

1.5 vs 2.0	2.0 vs 2.4	2.4 vs 3.0
0.738353	0.061771	0.853472

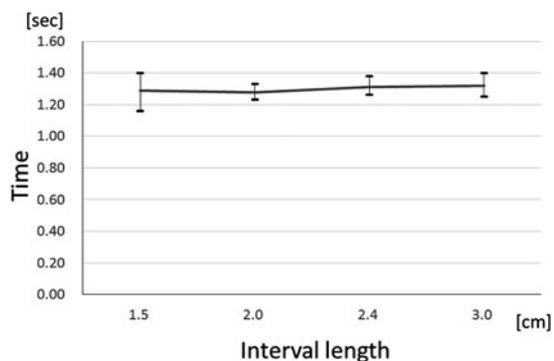


図12 直線における間隔と速さの関係。

表3 カーブの急さと速さの関係。

直径 (cm) 回数	16	18	20	22	24
1	1.99	1.88	1.78	Max(2.05)	Min(1.56)
2	2.16	1.83	1.71	1.70	Max(1.85)
3	Max(2.41)	1.86	1.80	1.75	1.61
4	2.03	1.81	1.85	Min(1.63)	1.60
5	1.86	1.82	Max(2.10)	1.76	1.75
6	1.91	1.81	2.00	1.75	1.80
7	2.06	1.83	1.70	1.85	1.79
8	2.00	1.86	Min(1.68)	1.78	1.58
9	1.85	1.88	1.87	1.73	1.73
10	Min(1.78)	Min(1.78)	1.78	1.83	1.70
11	1.83	1.83	1.73	1.80	1.76
12	1.91	Max(1.91)	1.85	1.80	1.71
平均	1.96[s]	1.84[s]	1.81[s]	1.78[s]	1.70[s]

表4 実験2における有意差。

16 vs 18	18 vs 20	20 vs 22	22 vs 24
0.006326	0.277489	0.335814	0.027141

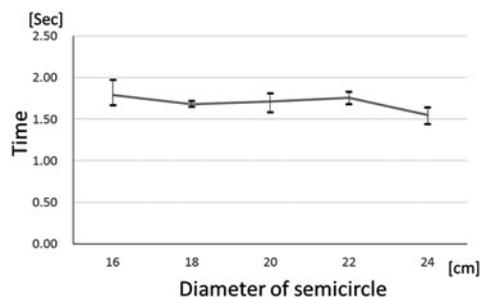


図13 カーブの急さと速さの関係。

表5 直径16 cmのカーブにおけるドミノ同士の間隔と速さの関係。

直径16cm			
間隔 (cm) 回数	2	2.4	3
1	1.82	1.95	Min(1.80)
2	1.97	1.95	1.96
3	Max(2.20)	1.91	Max(2.13)
4	1.85	1.79	1.96
5	1.70	1.88	2.08
6	1.74	1.81	2.03
7	1.88	1.96	1.98
8	1.83	1.85	1.82
9	1.68	1.80	1.96
10	Min(1.62)	Max(2.02)	1.93
11	1.67	Min(1.71)	1.83
12	1.74	1.83	1.91
平均	1.79[s]	1.87[s]	1.95[s]

表6 直径16 cmのカーブにおける有意差。

2.0 vs 2.4	2.4 vs 3.0
0.036974	0.040064

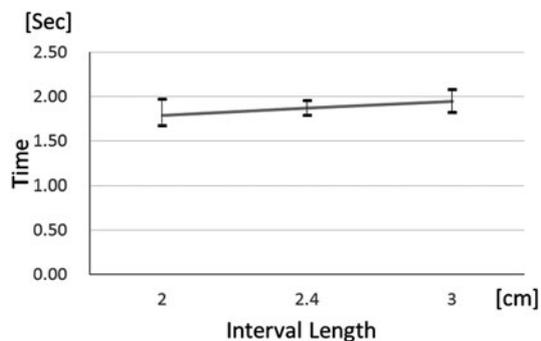


図14 直径16 cmのカーブにおけるドミノ同士の間隔と速さの関係。

表7 直径 18 cm のカーブにおけるドミノ同士の間隔と速さの関係。

直径18cm			
間隔(cm) 回数	2	2.4	3
1	1.72	1.70	1.92
2	1.67	1.65	1.87
3	1.70	1.81	Max(1.98)
4	1.65	1.68	1.78
5	1.66	1.71	1.90
6	1.65	1.82	1.95
7	1.67	1.71	1.85
8	1.70	1.78	Min(1.71)
9	1.72	Max(1.88)	1.95
10	Min(1.62)	1.75	1.80
11	1.67	Min(1.63)	1.83
12	Max(1.74)	1.68	1.93
平均	1.68[s]	1.73[s]	1.88[s]

表8 直径 18 cm のカーブにおける有意差。

2.0 vs 2.4	2.4 vs 3.0
0.034064	3.48×10^{-5}

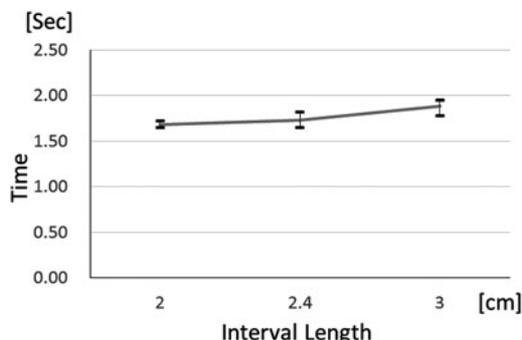


図15 直径 18 cm のカーブにおけるドミノ同士の間隔と速さの関係。

表9 直径 20 cm のカーブにおけるドミノ同士の間隔と速さの関係。

直径 20 cm			
間隔 (cm) 回数	2	2.4	3
1	1.76	1.78	2.01
2	1.69	Min(1.75)	Min(1.91)
3	1.78	1.78	2.08
4	1.83	1.76	Max(2.12)
5	Max(2.07)	1.78	1.98
6	1.98	1.83	1.95
7	1.68	1.76	2.08
8	Min(1.66)	1.76	2.06
9	1.85	Max(1.86)	2.08
10	1.76	1.76	2.05
11	1.71	1.81	2.03
12	1.83	1.75	2.00
平均	1.79[s]	1.78[s]	2.03[s]

表10 直径 20 cm のカーブにおける有意差。

2.0 vs 2.4	2.4 vs 3.0
0.073966	8.56×10^{-12}

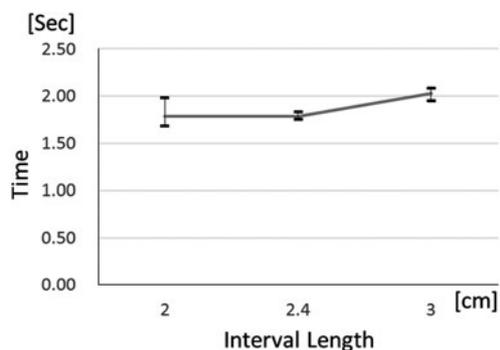


図16 直径 20 cm のカーブにおけるドミノ同士の間隔と速さの関係。

表11 直径 22 cm のカーブにおけるドミノ同士の間隔と速さの関係。

直径22cm			
間隔 (cm) 回数	2	2.4	3
1	Max(2.02)	1.73	2.06
2	1.68	1.90	2.00
3	1.73	Max(1.92)	2.10
4	Min(1.61)	1.78	1.96
5	1.74	1.80	1.93
6	1.73	1.88	Min(1.88)
7	1.83	1.83	2.00
8	1.76	Min(1.70)	2.00
9	1.71	1.80	1.95
10	1.81	1.89	Max(2.10)
11	1.78	1.88	1.88
12	1.78	1.86	1.95
平均	1.76[s]	1.84[s]	1.98[s]

表12 直径 22 cm のカーブにおける有意差。

2.0 vs 2.4	2.4 vs 3.0
0.002851	3.16×10^{-5}

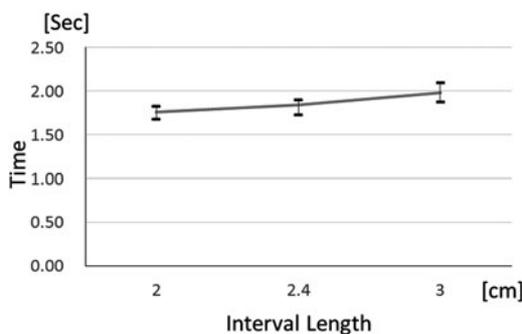


図17 直径 22 cm のカーブにおけるドミノ同士の間隔と速さの関係。

表13 直径 24 cm のカーブにおけるドミノ同士の間隔と速さの関係。

直径 24 cm			
間隔 (cm)	2	2.4	3
回数			
1	Min(1.42)	1.80	1.91
2	Max(1.69)	Min(1.70)	2.00
3	1.47	1.80	Min(1.88)
4	1.46	1.75	1.96
5	1.60	1.90	2.05
6	1.64	1.91	1.88
7	1.63	Max(1.92)	2.05
8	1.44	1.81	1.98
9	1.58	1.91	2.02
10	1.55	1.76	2.01
11	1.61	1.71	1.98
12	1.56	1.85	Max(2.10)
平均	1.55[s]	1.82[s]	1.98[s]

表14 直径 24 cm のカーブにおける有意差。

2.0 vs 2.4	2.4 vs 3.0
1.51×10^{-7}	2.29×10^{-5}

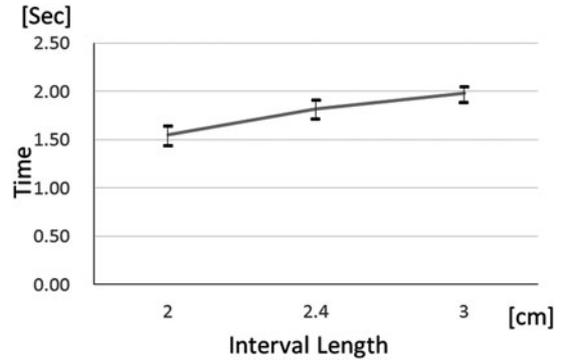


図18 直径 24 cm のカーブにおけるドミノ同士の間隔と速さの関係。

表15 曲線の形と速度の関係。

曲線の形	半円	放物線	クロソイド
回数			
1	Max(88.89)	Max(79.10)	82.64
2	77.61	Min(73.61)	Max(83.33)
3	81.89	79.10	74.07
4	79.39	77.94	78.74
5	81.25	76.26	80.00
6	82.54	77.37	75.19
7	77.04	76.81	74.63
8	Min(74.82)	75.71	78.13
9	83.87	79.10	76.92
10	79.39	79.10	74.07
11	79.39	75.18	80.00
12	75.36	74.65	Max(72.99)
平均	79.77	77.12	77.44

表16 実験 4 における有意差。

半円 vs 放物線差	放物線 vs クロソイド	クロソイド vs 半円
0.017139599	0.771732766	0.079210707

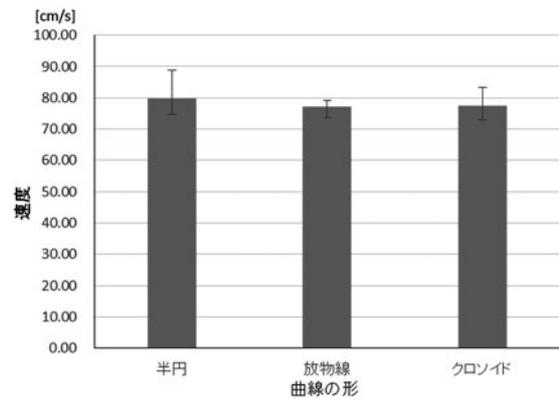


図19 曲線の形と速度の関係。

表17 クロソイド曲線における倒す向きと速さの関係。

回数	外側	内側
1	1.20	1.15
2	1.20	1.11
3	1.21	1.10
4	Max(1.27)	1.20
5	1.14	Max(1.22)
6	Min(1.08)	1.22
7	1.18	1.12
8	1.20	1.12
9	1.13	1.12
10	1.14	1.19
11	1.15	1.10
12	1.16	Min(1.05)
平均	1.17	1.14

表18 実験 5 における有意差。

外側 vs 内側
0.11977141

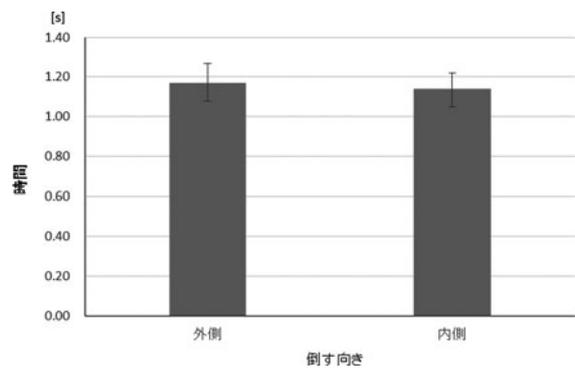


図20 クロソイド曲線における倒す向きと速さの関係。

表19 直線におけるドミノが当たる幅と速さの関係.

当たる幅(cm)	2.3	1.2	0.8
回数			
1	1.28	Max(1.72)	Min(1.72)
2	1.37	1.33	1.86
3	1.32	1.32	1.79
4	Min(1.23)	1.32	1.96
5	1.25	1.36	1.80
6	1.30	1.23	1.60
7	1.28	1.32	1.76
8	1.25	1.32	1.92
9	1.26	Min(1.26)	1.83
10	Max(1.35)	1.33	Max(1.92)
11	1.23	1.29	1.83
12	1.25	1.26	1.72
平均	1.28[s]	1.31[s]	1.82[s]

4. 考察

ドミノの倒れる速さはドミノが次のドミノに当たるときにできる地面とドミノの間の角(図1)に関係していると考え、実験1と2のそれぞれの場合における角度を求めた。計算には図22の計算式を用いた。

その結果(表21)、ドミノ同士の間隔が同じとき、直線の場合とカーブの場合で角度が変わらないことがわかった。

そこで、ドミノの倒れる速さには、角度ではなく、次のドミノに伝達する力の大きさが関係していると考えた。2つのドミノを使い、間隔を変えて伝達する力の大きさを調べた。実験1直線においてドミノ同士の間隔が2.0 cmのときが速いという結果が出ていたが、伝達する力の大きさはほかの間隔の場合と比べて0.032 Nと小さかった(表22, 23)。

また、カーブの急さにおいても調べた。表24における角度というのは、1つ目のドミノに対する2つ目のドミノの角度(図23)である。表25より、10°で0.037 N、20°で0.051 N、30°で0.050 Nという結果となり、10°で並べた場合が伝達する力が小さいということがわかった。

それぞれの場合におけるドミノに伝達する力の大きさがわかったので、伝達する力の大きさとドミノの当たる位置の地面からの高さ(表26)からモーメントを計算した(表27)。一番速く倒れた2.0 cm間隔の場合のモーメントが一番小さく、一番倒れる速が遅かった3.0 cm間隔の場合

表20 実験6における有意差.

2.3 vs 1.2	1.2 vs 0.8
0.049982	1.43689E-10

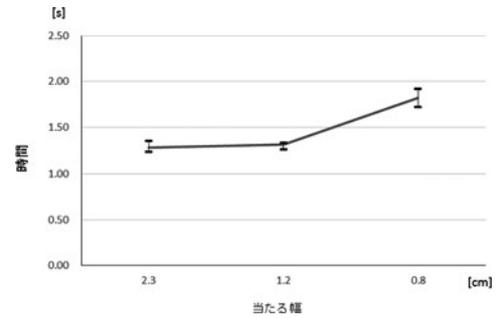


図21 直線におけるドミノが当たる幅と速さの関係.

のモーメントが一番大きかった。また、角度をつけた場合でもモーメントを求めてみると、高さはそれぞれ同じであったため、伝達する力が一番小さかった10°の場合のモーメントが一番小さくなった。これは、実験2のカーブの急さが小さいほうが速く倒れるという結果と一致する。

これらのことから、ドミノ列はドミノに伝達する力のモーメントが小さくなるほど速く倒れる。

5. 今後の展望

今回の研究では、伝達する力を考える際に2つのドミノだけを使用した。ドミノを並べる間隔によって1つのドミノが倒れるときに関係しているドミノの数が変わってくる。つまりは、間隔が狭いほど多くのドミノが1つのドミノの倒れる瞬間に力を加えているし、間隔が広いほど関係するドミノの数は少なくなる。今後の実験として、そのドミノの個数が倒れる速さにどのように関係してくるのかを調べる。また、ハイスピードカメラを使用し、ドミノが次のドミノに当たる瞬間を調べることによって、より詳しくドミノの倒れ方と速さの関係性を調べる。

参考文献

岐阜県立恵那高校「ドミノ倒しの研究」
<http://school.gifu-net.ed.jp/ena-hs/ssh/H24ssh/sc3/31211.pdf>

表21 Angle of curve and straight line.

	Diameter of semicircle					Straight line
	16 cm	18 cm	20 cm	22 cm	24 cm	
2.0 cm	74.49	74.57	74.63	74.68	74.71	74.88
2.4 cm	68.90	69.06	69.18	69.26	69.32	69.65
3.0 cm	59.72	60.10	60.36	60.55	60.70	61.43

表22 直線におけるドミノに伝達する力の大きさと間隔の関係。

Interval Times	1.5 cm	2.0 cm	2.4 cm	3.0 cm
1	0.049	0.034	0.055	0.102
2	0.046	0.030	0.046	0.078
3	0.035	0.030	0.035	0.102
4	0.078	0.032	0.032	0.106
5	0.079	0.034	0.039	0.067
6	0.035	0.023	0.044	0.097
7	0.030	0.028	0.053	0.108
8	0.032	0.025	0.042	0.058
9	0.030	0.051	0.037	0.101
10	0.046	0.025	0.049	0.086
11	0.026	0.058	0.035	0.039
12	0.023	0.032	0.058	0.106
Max	0.790	0.058	0.058	0.108
Min	0.023	0.023	0.032	0.039
Ave	0.041 [N]	0.032 [N]	0.048 [N]	0.090 [N]

表24 ドミノに伝達する力の大きさと角度の関係。

Angle Times	0°	10°	20°	30°
1	0.034	0.037	0.063	0.035
2	0.030	0.039	0.048	0.053
3	0.030	0.041	0.049	0.055
4	0.032	0.018	0.046	0.052
5	0.034	0.030	0.046	0.062
6	0.023	0.037	0.060	0.035
7	0.028	0.037	0.046	0.060
8	0.025	0.039	0.053	0.055
9	0.051	0.037	0.042	0.062
10	0.025	0.037	0.053	0.046
11	0.058	0.039	0.041	0.037
12	0.032	0.037	0.062	0.048
Max	0.058	0.041	0.063	0.062
Min	0.023	0.018	0.041	0.035
Ave	0.032 [N]	0.037 [N]	0.051 [N]	0.050 [N]

表23 力と間隔における有意差。

1.5 vs 2.0	2.0 vs 2.4	2.4 vs 3.0
0.133144677	0.002606497	4.11E-06

(a)
$$d = \sqrt{\left(\frac{r^2 - \left(r \sin \frac{a}{r}\right) \times 0.4}{r \cos \frac{a}{r}} - r \cos \frac{a}{r}\right)^2 + \left(0.4 - r \sin \frac{a}{r}\right)^2} - 0.4$$

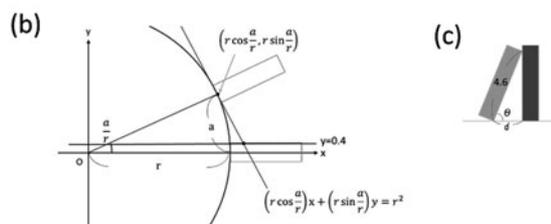


図22 角度の求め方。

(a) Formula
(b) and (c) schematic diagram

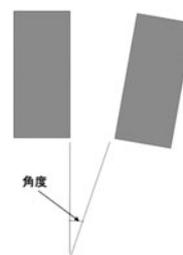


図23 表24における角度。

表25 力と角度における有意差。

0 vs 10	10 vs 20	20 vs 30
0.078169	5.10072E-05	0.955001796

表26 ドミノの当たる位置の地面からの高さ。

間隔 [cm]	1.5	2.0	2.4	3.0
高さ [cm]	4.55	4.44	4.31	4.14

表27 モーメント。

間隔 [cm]	1.5	2.0	2.4	3.0
M [N·cm]	0.19	0.14	0.21	0.36