テレフォンブック実験における引張力の指数関数的増大の検証

著者名　菅野颯音

要旨

本研究では、紙を交互に重ねたときに引き離すために必要な力がどのように変化するかを調べることを目的としている。紙を交互に重ねる「テレフォンブック実験」では、紙の枚数が増えるにつれて必要な力が急激に大きくなることが知られている。本研究では、紙の枚数を 30 枚から 50 枚まで変化させ、引き離すために必要な力を測定した。その結果、紙の枚数が増えるにつれて必要な力が指数関数的に増加することが確認された。さらに、得られたデータを対数変換し、logF と枚数 n の関係を調べたところ、両者はほぼ直線関係となった。このことから、必要な力は枚数に対して指数関数的に増加すると考えられる。また、実験結果から必要な力 F と枚数 n の関係は $F \fallingdotseq 0.17e^{0.086n}$ で近似できることが分かった。これらの結果から、交互に重ねた紙を引っ張った時に紙同士が互いに押し付け合うことで法線力が生まれ、自己増幅されることで大きな力が必要になると考えられる。本研究により、紙の枚数と必要な力の関係を実験的に示し、その関係を数式として表すことができた。

キーワード：摩擦力、指数関数的増加、自己増幅

Ⅰ. はじめに

摩擦力は、物理学において身近で基本的な現象の一つである。一般に摩擦力は、垂直抗力に比例すると説明されている。しかし、複数の紙を交互に重ねて引き離す「テレフォンブック実験」では、紙の枚数が増えるにつれて必要な力が急激に大きくなることが知られており、単純な比例関係では説明できない。

この現象は「interleaved phonebook experiment」として研究されており、Frederic Restango(2009)によると紙の枚数が増えると摩擦力が指数関数的に増加することが示された。また、この研究は物理学の学術誌である Physical Review Letters に報告されている。この研究では、紙同士の接触によって生じる張力が次々に増幅されることで、大きな力が必要になると説明されている。

しかし、この指数関数的な増加を実験によって確かめ、数式として表す研究はあまり多くない。特に、紙の枚数と必要な力の関係を測定し、その増え方を近似式として求めることは、摩擦の性質を理解するうえで重要であると考えられる。

そこで本研究では、交互に重ねた紙の枚数を変化させ、引き離すために必要な力を測定した。そして得られたデータを対数変換して解析し、力が指数関数的に増加するかどうかを調べることを目的とした。これにより、紙の枚数と必要な力の関係を実験的に明らかにすることを目指す。

Ⅱ. 手法

本研究は十分な重さに耐えられ、紐をかけられる場所で実験を行う。縦 15cm、横 3cm の白紙の印刷用紙を用意し、条件の枚数を丁寧に合わせてクランプを使って木の板で挟む。この時、実験ごとの誤差を減らすために紙が木の板から 10cm 出るようにする。これを 2 つ作成し、紙を一枚ずつ 10cm 重ねて繋げる。次にナイロン金剛打ロープを使って、図のように柱に結びつける。この時、出来るだけロープ同士が接触するように結ぶことで解ける事故を防ぐ。最後に装置の一番下におもりを入れられる容器をロープに繋げ、容器におもりを入れる。おもりを増やしていき、紙同士が離れた瞬間のおもりの重さを測る。おもりを増やす時、勢いがつかないようゆっくり乗せる。加えて、おもりが落ちる時の危険性を考えて、なるべく地面に近い高さで実験を行う。結果には下の木の板やクランプの質量も含める。



図 1　実験装置

III. 結果

	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目
30 枚	2.4	2.2	2.3	0.6	2.3
35 枚	3.8	2.9	2.9	3.2	4.2
40 枚	4.7	5.3	5.5	5.5	5.0
45 枚	7.5	7.5	7.9	4.9	8.1
50 枚	13.0	12.6	13.3	12.8	12.9

図 2　実験結果

図 2 の結果から外れ値を除いた結果の平均値を図 3 のようにグラフ化した。

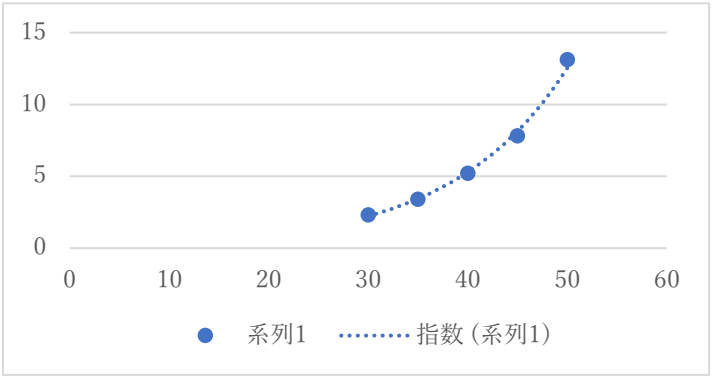


図 3　紙の枚数とおもりの重さグラフ

重ねる紙の枚数を増やすと、引っ張るのに必要なおもりの重さは指数関数的に増加した。

IV. 考察

1)図 3 から 2 点(30 枚と 50 枚)で近似すると、$F \fallingdotseq 0.17e^{0.086n}$(式 1)となる(F はおもりの重さ)。n に 40 を代入すると F=5.3 となり実験結果とかなり近いことが分かる。

2)式 1 の両辺に自然対数をとると、図 4 のようにグラフが直線になる。先行研究では F は $e^{\alpha n}$ と比例することが報告されている。よって今回の研究結果と一致していることが分かる。

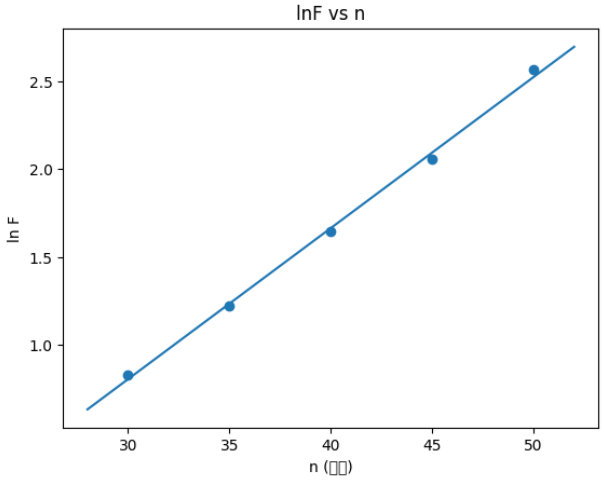


図 4　紙の枚数と logF の関係

3)結果が指数関数的に増加した理由として、枚数が多くなればなるほど紙がわずかに傾き、引く力の一部がページを押し付ける力(法線力)に変換され、摩擦が自己増幅されるためだと思われる。

4)実験結果の誤差の要因として、重なり角度のずれや実験による紙の劣化などが原因だと思われる。

V. 結論

1)本研究では、交互に重ねた紙の枚数を変化させ、引き離すために必要な力を測定した。その結果、紙の枚数が増えるにつれて、引き離すのに必

要な力が指数関数的に増加することが確認された。さらに、得られたデータを対数変換したところ、logF と枚数 n の関係はほぼ直線となり、必要な力が枚数に対して指数関数的に増加することが示された。

2)本研究の実験結果から、必要な力 F と枚数 n の関係は $F \fallingdotseq 0.17e^{0.086}$ に近似されることが分かった。 これらの結果から、紙を交互に重ねた場合には紙同士の摩擦が互いに影響し合い、法線力が増加されることで、必要な力が指数関数的に増加すると考えられる。

以上より、本研究では紙の枚数と必要な力の関係を実験的に明らかにし、その関係を数式として表すことができた。

3)今後の課題としては紙の重なり方、引き離す角度などの条件を変えて実験を行うことで、摩擦の増幅にどのような要因が影響しているのかをより詳しく調べる必要がある。また、より多くの枚数や測定データを用いて解析を行うことで、近似式の精度を高める必要がある。

謝辞

SSH 物理担当の先生方、その中でも特記するは担当の高橋暁先生です。高橋先生は一年間に渡る適切なアドバイスや実験準備の援助により本研究の実験を非常に円滑に行うことが出来ました。また、その他の先生方にも実験道具の貸し出し等で関わる機会が多くありました。SSH の先生方、一年間誠に有難う御座いました。

文　献

Hector Alarcon, Thomas Salez, Christophe Poulard, Jean-Francis Bloch, Elie Raphael, Kari Dalnoki-Veress, and Frederic Restagno, “Self-Amplification of Friction in Interleaved Books,
Physical Review Letters, Vol.116, 015502 (2016).

David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker, Fundamentals of Physics, Wiley(1785)