



砂時計における粉粒体の流れ方 : アーチ構造形成の影響

重里, 真宏

(Citation)

課題研究優秀論文集, 2022:106-120

(Issue Date)

2023-01

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/0100477740>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100477740>



砂時計における粉粒体の流れ方 —アーチ構造形成の影響—

神戸大学附属中等教育学校 9 回生
6 年 4 組 16 番
重里 真宏
(指導教員 若杉 誠)

砂時計における粉粒体の流れ方 —アーチ構造形成の影響— 神戸大学附属中等教育学校 9 回生 6 年 4 組 16 番 重里 真宏 (指導教員 若杉 誠)

要旨

本研究は、砂時計において粉粒体の流れ方（流速、内部の運動、圧力、流れきる時間等）についての全貌を明らかにし、砂時計の全体の動き方についての関係式を求めるという大きい問いを前提として行ったものである。小さい問いとして、側壁にかかる圧力と構造・流れ方の関係はどうなっているかというものを設定し、これについて研究を行うことで砂時計におけるアーチ構造についての性質を明らかにすることを目的とする。また、砂時計のモデルは満員電車などから人が出てくる際のシミュレートなどに使われている。そのため、本研究では高速道路の合流部分で、円滑に合流ができるような本線と合流する側の角度を求めている。

粉粒体の動きは相互作用などの影響で複雑であり、全体的な解明にはまだ至っていないため、中高の物理では題材としない。その中でも砂時計という限定したものに着目することで、簡略化された粉粒体の動きの特性について見るができる。

本研究は主に 2 つの実験から構成されている。なお、本研究では粉粒体の変形・吸水性、各物質における摩擦について無視するという前提条件のもと研究を行った。

1 つ目は、数値を計測せずに流れ方や粉粒体の挙動を見て特徴を分析する実験である。立体ホッパー（砂時計を大きくしたもの）と平面ホッパー（砂粒 1 つ分の幅のホッパー）の両方を観察することで、三次元的な流れ方と二次元的な流れ方の両方についての特徴を見ることができた。また、目詰まりが起こった際などの特徴的な特色を持つ場合を考えることにより、ホッパーにおけるアーチ構造についての分析も行った。

2 つ目は、スポンジを平面ホッパーの側面に設置し、粉粒体を流し入れることで、その沈みから砂時計の側壁にかかる圧力の変動を計測するものである。側壁への圧力と流速の関係を求めることで、砂時計のアーチの形成と崩壊の周期について明らかにすることを目的にしたものである。この実験から砂時計内部でのアーチ構造の有無や、そのアーチの大きさ、崩壊の条件などを知ることができる。ただ、本研究において実験は失敗したため代用実験として、静止時のアーチ構造の側壁への圧力と崩壊のしやすさについての追加実験を行い、主にホッパー内の圧力についての分析を行った。本実験で行ったスポンジによるホッパーの圧力の計測は、スポンジにフックの法則を仮定して、沈み込みからかかっている力を求めたものであり、Google Scholar にて類似の参考文献を探しても見当たらず、独自性の高いものであるといえるだろう。そのため、沈み込みによる構造変化などには注意する必要があるが、参考文献で見られた実験と比べて、より手軽で安価であるといえる。

これらの実験と新たな実験を用いて高速道路の合流地点での渋滞を削減するための提案を行った。

1 つ目の実験からは主に砂時計の挙動について、2 つ目の実験からは主に圧力について、円滑な合流の提案のための追加実験からは取り残される粉粒体についての特徴がみられた。また、それらには参考文献にみられないものも含まれていたため、今後の粉粒体研究に役立つものとなっているだろう。

目次	
第 1 章 序論	1
第 1 節 砂時計の構造	1
第 2 節 ホッパーの特性	1
第 3 節 本研究の位置づけ	1
第 4 節 本論文の構成	2
第 2 章 ホッパー内部の挙動	3
第 1 節 実験の概要	3
第 2 節 目的	3
第 3 節 方法	3
第 4 節 結果	3
第 1 項 立体ホッパー	3
第 2 項 平面ホッパー	3
第 5 節 考察	4
第 3 章 ホッパー内のアーチ構造の側壁にかかる荷重に関する調査	7
第 1 節 実験の概要	7
第 2 節 実験の目的	7
第 3 節 実験方法	7
第 4 節 結果	7
第 4 節 考察	10
第 4 章 人流と平面ホッパー	17
第 1 節 人流と砂時計	17
第 2 節 人流を円滑にする方法の提案	17
第 5 章 結論	20
第 1 節 まとめ	20
第 2 節 今後の展望	20
謝辞	21
付録 A スポンジにかかる荷重とスポンジの沈み込みの関係性（本文第 3 章）	22
付録 B 本文第 4 章で行った実験の失敗パターン	23
参考文献	26

第 1 章 序論

第 1 節 砂時計の構造

砂時計とは時間を測るために昔から用いられていたもので、現代においても時間測定やインテリアとして用いられている。その砂時計はホッパーといわれる漏斗型の部分が二つ組み合わさって構成されており、中央がくびれた構造を取っている。その容器の中に粉粒体が入っており、上側から下側へ粉粒体が落ちることで時間を測るものである。砂時計には主に知られている特性として、粉粒体の落ちる速さは残りの粉粒体の量に関わらず一定であるというものがある。水時計で考えると、ホッパー内の水が多いほど水はより勢いよく流れ出すが、粉粒体と水は同じ流体という分類ではあるが砂時計ではそれが起こらない。

第 2 節 ホッパーの特性

ホッパーの特性として主に 7 つが挙げられる。

- (一) ホッパーの側壁にかかる圧力はホッパー内の粉粒体の量によらない。
- (二) ホッパーに粉粒体を貯めておいてホッパーの出口（砂時計の括れているところ）を開けると、出口の横壁に大きな圧力がかかる。
- (三) 粉粒体がホッパーから流れ出ている時の壁にかかる圧力、および粉粒体流れ出る速度は周期的に変動する。
- (四) 粉粒体流れ出る速さは、出口の直径の二・五乗から三・〇乗に比例する。
- (五) 粉粒体流れ出る速さの時間平均値はホッパー内に残っている粉粒体の量に無関係である。
- (六) 出口にパイプをつけると粉粒体流れ出る速さが増大することがある。
- (七) 出口の直径が粉粒体の直径の六倍より小さい時は粉粒体は流れ出ない（目詰まりを起こす）。

（参考文献[1]より引用）

砂時計の中で粉粒体はアーチ構造の形成・崩壊という周期的な運動をしており、それらは初期条件（粉粒体の直径と出口の直径の比、摩擦係数、側面の角度など）によりある程度決定される。このことによって砂時計は安定して同じ時間を刻むことができています。

第 3 節 本研究の位置づけ

本研究は砂時計内で形成されるアーチ構造とそれの与える影響について明らかにすることを目的としている。現在、砂の動き方について詳細な解明がされていない。そのため、砂を用いた装置の 1 つとして砂時計を取り上げ、砂時計の大きい性質であるアーチ構造について研究することで、砂時計のみならず粉粒体の動きの解明に対して一部の助けとなることを目的とする。

また、砂時計の性質は出口の人の動きのシミュレーションなどにも用いられているため、高速道路の合流地点についての提案についてもサブテーマとして本研究の内容を用いて考察することを目的とする。

ただ、今回得た結果で「平面ホッパーの流れ方に大きく分けて 2 つの流れ方がみられ、それらは主に斜面の角度によって決定される」「斜面の角度がない時、立体ホッパーは互い違いに流れる」「ホッパーの流れ方において側面付近に取り残される粉粒体は斜面の角度と指数関数的な関係がある可能性がある」「ホッパーにおいて側壁にかかる圧力はスポンジを用い、スポンジにフックの法則を仮定することで沈み込みから推定することができ

る」これらのことについては類似の事柄を述べている文献を Google Scholar を用いて調べたが、見つけることができなかった。そのため、これらのことについては誤りの可能性も含め、注意する必要があるが、流体物理学や粉粒体研究に対する新たな特徴・実験手法の提案をするものとなっているといえるだろう。

第 4 節 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。第 2 章では立体ホッパーと平面ホッパーについての参考文献で得た性質の確認と、性質が成り立たなかった原因について実験・考察をしている。第 3 章では平面ホッパーに限定して、アーチ構造における側壁にかかる圧力と崩壊のしやすさの関係について実験・考察している。第 4 章では砂時計と流出の統制についてどのようにすればスムーズになるかという問いについて実験を行い、考察・提案しており、第 5 章では本研究のまとめと今後の展望を述べている。

第 2 章 ホッパー内部の挙動

第 1 節 実験の概要

この実験は二種類のホッパーを用いて行った。ペットボトルの飲み口をホッパーの出口として用いたもの（以後、立体ホッパー）と、砂粒が 1 つずつしか通らないよう奥行きを調整したもの（以後、平面ホッパー）の 2 つである。これらを用いてホッパー内部の粉体の動きを観察し、各粉体の互いに及ぼす影響や流れ方の条件等を調べた。

第 2 節 目的

この実験は、ホッパー内部の力の相互作用やアーチ構造の砂時計全体の動きに及ぼす影響、粉体の流れ方の条件について調べることを目的として行った。

第 3 節 方法

立体ホッパーと平面ホッパーにおいて、それぞれ粒をつめてから出口を開放し、粉粒体の流れを横からと上からそれぞれ撮影し、分析を行った。実験はそれぞれの撮影において 5 回ずつ行った。なお、目詰まりが起こった場合は回数としてカウントしなかった。

第 4 節 結果

第 1 項 立体ホッパー

立体ホッパーについてみられた特徴的な挙動は主に 2 つである。

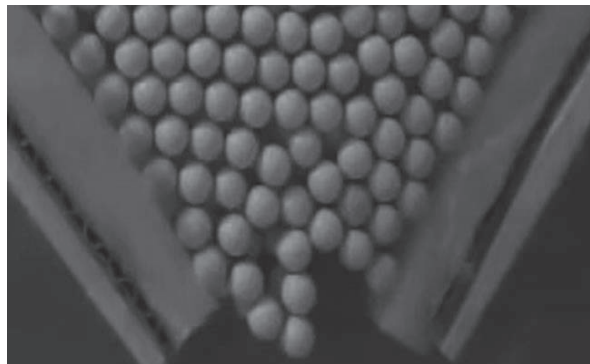
1 つ目は、上から見た際にホッパーの円において、中心部分から先に流れ出し側壁付近（円周付近）の粉粒体は中心部分の粉粒体に取り残されるというものである。

2 つ目は、砂時計一体としてみると動いていても、細部を見ると止まっている部分と動いている部分がみられたということだ。これはつまり、砂時計内の粉粒体は静と動が周期的に入れ替わることで流れ出ているということであり、参考文献にあるアーチ構造の形成と崩壊の連続で砂時計が時を刻んでいるというの検証ができたと考えられる。

第 2 項 平面ホッパー

平面ホッパーにおいてみられた特徴的な挙動は、立体ホッパーと同様の、中心部分にのみ凹みができるというもの・静と動の周期的な運動が起きていることである。また、平面ホッパーでは立体ホッパーとは違い、粉粒体の動きが見えない部分がないためアーチ構造に着目してみると確かにアーチ構造のような形をなしているような部分が確認できた。ただ、参考文献では平面ホッパーにおける流れは左右の粉粒体の流れが交互に入れ替わりながら起こるという性質が紹介されていたが本研究ではその性質がみられずに新たな結果として、立体ホッパーと同様の左右の流れの周期に顕著な違いがない流れ方がみられた。

また 2 回目詰まりが起こり、下の写真のように粒が横 1 列にきれいに並んでいる部分がみられた。



写真：実験の様子

そのため追加実験として、ホッパー内のどこかの粒が横一列に並んだ状態から出口を開放しその後の目詰まりの有無を調べるものと、ホッパーの出口をふさいだ後に振動を与えることで砂粒をかきまぜ、その後装置を立て粒が横一列になる部分があるかを確かめる実験を10回行った。その結果、穴を水平方向の栓で閉じた際には栓に接する粉粒体は10回中8回一直線上にあるような形となった。ただ、その後一直線になったものを流してもすべての実験において目詰まりは起こらずに、すべての場合において流れでてしまった。

第5節 考察

立体ホッパーの結果からわかることとして、次の二つが挙げられる。

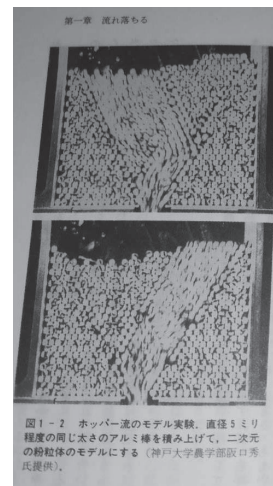
①ホッパーの中心部のみ早く流れ落ちている

②砂時計はアーチ構造の形成・崩壊の連続性によって決まった時間で流れ落ちている

①について、②のアーチ構造の形成・崩壊の性質から側壁にかかる力がアーチ構造の形成のために大きくなることによって、中心部のみ相対的に流れが速くなって（側壁付近では粉粒体の速度が遅くなって）へこみができているのではないかと考えた。この原理と平面ホッパーの観察から考えられることとして、砂粒が流れている状態からアーチ構造の形成につれて徐々に速度が落ちていき静止した後、アーチの上で起こっている粉粒体の流れの影響でアーチにひずみができて崩壊しており、粉粒体の流れの影響は中心部分付近で受けているということがある。これについては第3章で実験・考察を行った。

平面ホッパーの結果からわかることとして立体ホッパーと同様のこと、参考文献と相違点がみられるということと、目詰まりの起こる場合には何らかの特徴がみられる可能性があるということがある。

参考文献の違いについて、参考文献では斜面の傾きがない装置で実験を行っていたが本研究では斜面に傾きを付けて実験を行った。そのため斜面の傾き（ $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ）に対して、 $\theta \rightarrow 90^\circ$ の際には自明に粉粒体同士の衝突はあるが粉粒体一粒ずつはほとんど自由落下運動を行い、 $\theta \rightarrow 0^\circ$ の際には穴の真上部分の粉粒体は自由落下を行おうとして、粒が円形（球体）のために、穴が開いていない底面の上にある粉粒体は静止をすることができずに周りの粉粒体の影響によって側壁方向へ押し出される力が与えられる。そのため、粉粒体が流れ出てから十分な時間がたつと底面付近の球は細密構造を取ると考えられる。これは参考文献[1]の写真においてもわかることである。



（写真:参考文献[1]より平面ホッパーにおける粉粒体の流出モデルの実験の様子）

底面から離れた部分では、左右の粉粒体の力のバランスの差により左右どちらかが流れ出し、下部分には崩れがみられるもののアーチ構造の形成の影響により上部分では流速が遅くなり、そのために左右の力のバランスが変化し逆方向からの流れが生じるということの繰り返しで左右交互の流れが発生しているのだと考えられる。この考察からすれば、本研究において行った実験では斜面の傾きによる斜面の上部分にある粉粒体の流れ出ようとする力の強さと穴の大きさの関係において左からの力と右からの力が釣り合っかつ目詰まりが起こらない程度の穴の大きさであったため左右に同時に流れが発生したのだと考えられる。 θ が小さくなればなるほど側壁部分の流れでようとする力が小さくなる。そのため、粉粒体の粒径・粉粒体同士の摩擦係数・粉粒体と側面との摩擦係数を固定すると、穴の大きさと斜面が地面となす角の関係によって流れる速度だけでなく流れだす動き方もあるところから変化すると考えられる。

また、立体ホッパーにおいて $\theta=0^\circ$ の流れ方の観察を行い、この左右の互い違いの流れ方はわずかであるが観察することができた。ただ、立体であるため内部構造の把握ができなかったために、実測値での観測などはすることができなかった。左右の互い違いの流れ方がわずかであったことについては、立体ホッパーは平面ホッパーとは違い底面部分には左右360度に逃げ場があるため、ある程度の左右の周期はあるものの逃げ場のために左右の差が小さくなっているということが考えられる。

参考文献[2]によると、砂時計には θ が大きくなるにつれて落下するための時間が短くなるということが分かった。斜面と一物体の運動を考えると、斜面に平行方向の加速度 a は斜面と水平面のなす角を θ' として、重力加速度を g とすると $a = g \sin \theta'$ と表すことができる。また、参考文献[3]より、斜面の傾きが大きくなるとアーチ構造ができやすくなるということがわかる。そのため、粉粒体の流速や流れ方とホッパーの条件についてより深い関係を調べるため追加実験として平面ホッパーにおける穴の直径と斜面の角度の関係による流速・流れ方の違いについての実験を行うことができればアーチ形成のための流速の遅延の大きさを導き出すことができる。また、 θ 、穴と粒径の比を固定し、粉粒体を様々なものを用いて同様のホッパーで流す実験を行うことができれば粉粒体1粒ずつの重さや大きさの違いによる流れ方や流速等の違いについて方程式として表すことができる。これらは今後行う必要がある。

粉粒体の目詰まりの起こる要因として一直線との関係は不明である。ただ、目詰まりができる原因としてはアーチ構造が要因であると考察できる。参考文献においては $\theta = 0^\circ$ での目詰まりにおいてアーチ構造が形成されていた。今回の実験において粉粒体が目詰まりした要因は外的要因（接着剤もしくは粉粒体が2重になり止まったこと）にあると考えられるが、その上では確かにアーチ構造のようなものが形成されていた（結果に添付した写真より）。粉粒体を流し始めてから一定時間たった場合の $\theta = 0^\circ$ の平面ホッパーでは底面に接している部分では安定した構造を取っていると考えられる。これは、先ほど述べたように底面部では流れによって外壁に押し出される動きが起こると考えられるのでその力でも安定するような構造を取ることが予測されるためである。底面部がその安定した構造を取っている状態で穴の上の最も低い部分でアーチ構造が形成されると、アーチ構造は崩壊しづらくなる。これは、アーチ構造の崩壊する要因として考えられるのは上や横からの圧力によって形が崩れる場合と土台となる下にあるものがずれてしまう場合であり、下にあるものがずれるという要因は底面部の安定した構造によって取り除かれ、横や上からの圧力による崩壊については上からの圧力が左右均等にかかり頂点付近にある粉粒体落ちることがない程度小さいアーチを形成すればアーチ構造が崩れることがなくなる。また、目詰まりの発生は穴の大きさと粉粒体の粒径の比に依存すると考えられる。穴の大きさをより大きくしていくと目詰まりの可能性が減少していくことは自明である。これは、より小さいアーチ構造のほうが形成されやすく安定するということによる。 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ の場合を考えると安定している斜面が $\theta = 0^\circ$ の時のアーチ構造の下層部の代わりの役割を果たすことでアーチ構造が形成されると考えられる。斜面と粉粒体の摩擦が大きい場合や粉粒体同士の摩擦が大きい場合にはアーチ構造の形成がされやすくなるため目詰まりの可能性は高くなる。

また、底面にかかる重さを M とし重力加速度を g とすると、斜面と垂直方向にかかる力の大きさ (F) は

$$F = Mg \cos \theta$$

である。そのため、 θ が大きくなるにつれて F が小さくなっていくのでアーチ構造の安定性はだんだんかけていってしまう。そのため、 θ が大きくなるにつれて目詰まりができにくくなり、 $\theta = 90^\circ$ になるとアーチ構造の形成がなく目詰まりが起こることはなくなると思える。

第3章 ホッパー内のアーチ構造の側壁にかかる荷重に関する調査

第1節 実験の概要

本実験は、穴の開いていない平面ホッパーを作成し、粉粒体（代用としてペットボトル）を用いて恣意的に構造をつくり上げ、側壁にかかる圧力をスポンジの沈み込みから推測することで、主にアーチ構造についてどのように力をかけあっているのかについて考察した。本研究の実験手法としてスポンジにフックの法則を仮定して、その沈み込みから側壁にかかる力を求めるというものを採用した。これについて参考文献を探したが類似の実験の記載がなく、独自性の高いものといえる。そのため、沈み込みによる構造変化などの懸念点はあるが、ほかのホッパーにおける圧力測定の実験より手軽で安価な実験手法といえるだろう。

第2節 実験の目的

本実験の目的は平面ホッパーにおける側壁にかかる圧力について構造との関係を調査し、流れ方や目詰まりと構造との関係を明らかにするためにに行ったものである。

第3節 実験方法

実験は、平面ホッパー（ $\theta = 30^\circ$ ）を作成し側壁にスポンジを敷き粉粒体の代用として同じ種類のペットボトルを流し、その様子を動画で撮影しスポンジの凹みの深さと粉粒体の流れの速さについて計測し、スポンジの深さからかかっている圧力の大きさを導き出すという方法で行った。しかし結果として、スポンジをへこませる一つ一つの重さと十分な記録の取れる粉粒体の量を兼ね備えているものがなかった。そのため、穴の大きさをなくし粉粒体の代用としてペットボトルを使用し、アーチ構造を取った時の側壁にかかる圧力とその崩壊のしやすさについて実験・分析を行った。平面ホッパーについては二次元面で見ればよいので、立体構造を取るペットボトルでも実験を行うことができる。スポンジの深さとそれに対応する圧力についてはフォーステスターによって関係を出してそれと実験結果を照らし合わせて側壁にかかる圧力を出した。平面ホッパーにおいては奥について1層であれば断面を見ればよいのでペットボトルが1本ずつ流れる程度の斜面を作成し実験を行った。なお、フォーステスターで得たスポンジの沈み込みと圧力の関係については付録に追記している。

第4節 結果

実験によって得られたデータは以下の通りである。また、1度目実験して明らかに外れた値が出たため再計測しなおした。一度目の実験については付録に追記している。

なお、表中の左・右は写真における左側壁・右側壁をそれぞれ指しており、“ n ”(n:自然数)は下から n 番目に側壁に面しているペットボトルを指している。

写真 1



写真 1	右_1
沈み込み*1 (mm)	12.3
荷重*2 (N)	17.2

*1 沈み込み…スポンジ表面と裏面の実測値（沈み込み）の平均

*2 荷重…実測値から予測されるスポンジにかかる荷重（5.0 mm≦沈み込み≦17.5 mmの時は付録に記載されている近似直線により推定。その範囲外の時はフォーステスターでの実測値の沈み込みが一番近いものを採用）

写真 1	左_1
沈み込み (mm)	14.2
荷重 (N)	18.7

写真 2



写真 2	右_1	右_2
沈み込み (mm)	12.4	16.1
荷重 (N)	17.3	20.1

写真 2	左_1	左_2
沈み込み (mm)	17.2	15.1
荷重 (N)	21.0	19.4

写真 3



写真 3	右_1	右_2	右_3
沈み込み (mm)	24.8	18.3	13.9
荷重 (N)	110	23.0	18.5

写真 3	左_1	左_2	左_3
沈み込み (mm)	21.5	17.2	14.8
荷重 (N)	38.3	21.0	19.1

写真 4



写真 4	右_1	右_2	右_3
沈み込み (mm)	20.1	18.9	8.00
荷重 (N)	29.3	24.6	13.9

写真 4	左_1	左_2
沈み込み (mm)	18.3	13.2
荷重 (N)	23.0	17.9

写真 5



写真 5	右_1	右_2	右_3
沈み込み (mm)	18.3	17.4	13.0
荷重 (N)	23.0	21.1	17.8

写真 5	左_1	左_2
沈み込み (mm)	16.3	13.7
荷重 (N)	20.3	18.3

写真 6



写真 6	右_1	右_2
沈み込み (mm)	19.2	16.8
荷重 (N)	25.5	20.7

写真 6	左_1	左_2
沈み込み (mm)	19.8	14.2
荷重 (N)	27.9	18.7

第 4 節 考察

ペットボトルの重さを電子天秤で計測すると 575g であった。地球上では約 100g の物体に働く重力の大きさが 1N であるため、ペットボトルがかかる荷重は 5.80N であるということがわかる。それぞれの部分にかかる荷重をペットボトルの本数に換算すると以下の通りになる。ただ、ペットボトルがスポンジに沈み込む際に、力は最も沈み込んでいる点の 1 点のみにかかるわけではないので、沈み込みの大きさの比で側壁への荷重を推定しなおした。

写真 1	右_1
沈み込み (mm)	12.3
荷重 (N)	17.2
ペットボトル換算*3 (本)	2.97
荷重の比*4	1
推定ペットボトル数*5 (本)	1.44

*3 ペットボトル換算…計測した荷重/5.80 (ペットボトルの荷重)

*4 荷重の比…一番端にあるペットボトルのかけている荷重 (実測値) を 1 としたときのその他のペットボトルのかける荷重の比

*5 推定ペットボトル数…荷重の比を左右の計測値で合算して求め、実験に使用したペットボトル数をその比によって換算することで、スポンジに荷重をかける実際のペットボトル数を推定した値)

写真 1	左_1
沈み込み (mm)	14.2
荷重 (N)	18.7
ペットボトル換算 (本)	3.22
荷重の比	1
推定ペットボトル数 (本)	1.56

写真 1 については基本的な三本の組み合わせの構造である。推定ペットボトルが 1.44 本と 1.56 本で、少しの偏りはあるもののある程度均一な比で力が分散されているということが分かった。また、恣意的に力の分散を偏らせようとしたとしても、二倍の差が生まれることは斜面に接する二本のペットボトルがお互いに接触をしない限りないため (ペットボトルは三本であり二本のみで安定して縦に重なることがないため) 安定性のためには力の分散が必要であり左右の対称性が保たれていることが重要である。これは力のモーメントのつり合いからもわかるように、構造物が崩壊する際にはある方向に崩れ始めると他からの外力がない限りもとに戻ることはないためである。

写真 2	右_1	右_2
沈み込み (mm)	12.4	16.1
荷重 (N)	17.3	20.1
ペットボトル換算 (本)	2.98	3.47
荷重の比	0.86	1
推定ペットボトル数 (本)	1.56	1.81

写真 2	左_1	左_2
沈み込み (mm)	17.2	15.1
荷重 (N)	21.0	19.4
ペットボトル換算 (本)	3.62	3.34
荷重の比	1.08	1
推定ペットボトル数 (本)	1.89	1.74

写真 2 において、みられた特徴的なものは右_1 が右_2 よりも大きい荷重がかかっていたということである。基本的には下に行けば行くほど荷重はよりかかるようになる。しか

し、この構造では下の写真のように（見づらいかもしれないが）右_1とその上のペットボトルとの間にかすかな隙間がみられた。そのため、これは右_1の真上にアーチ構造が形成され、それのために荷重が低くなったとわかる。

写真 7



このことからわかることとして、自明ではあるがアーチ構造はその部分単体で安定するため、それ以下の部分は全く関係のないものとなるということがわかる。また、写真上に力を書き込み、アーチ構造の予測をすると次のようになった。（スポンジへの力等は省略し、ペットボトル同士のかけあう重力による力のみを矢印を用いて表した。⇒は一方向の重力による力。力の大きさは無視）

写真 8



写真 8 の力の関係からわかるように、アーチ構造を中心的にしている粒子は、一本の線で結ぶことはできないこともあり、土台部分が分岐することがあるということがわかる。写真 2 のスポンジにかかるペットボトルは左から 1.74:1.89:1.56:1.81 となっており、右側は空間が開いているため 0.25 本分の差しかないのは自明であり、左側の差も 0.15 であるのはそのペットボトルの真上に同じ数のペットボトルがあるだけでなくアーチ構造として右側からの力がかかっているため水色の矢印の大きさは普通のホッパーよりも横成分が大きくなっていると考えられる。

また、体感ではあるが、アーチ構造は構成粒子が多くなるほど安定性に欠けているということが分かった。これは粉粒体が円形（球形）であり、接触するときには一点のみであるため立体構造を取る際に少しでもずれが起こってしまうと、さらにずれが大きくなるような性質を持つ。そのため、アーチ構造のような立体構造は、少しでもずれてしまうと安

定性が落ちてしまい、構成粒子が多くなるとそれに伴ってずれの発生する可能性のある部分が多くなる。そのため、構成粒子が多くなるにつれてアーチ構造の安定性が落ちてしまうと考えられる。

右_1 を静かに抜き取るとアーチ構造として自立している構造を取った。ただ、貧弱であり空のペットボトル（約 75g）を静かに乗せると崩壊した。そのため、アーチ構造の安定性にはその構造をなしている構成粒子だけでなくその周辺の粒子もかかわってくることがわかる。また、写真 3 でも述べるが、斜面に接する粒子同士でも力が分散しているということの証明にもなると考えられる。

写真 2 における右_1 を抜き取った構造

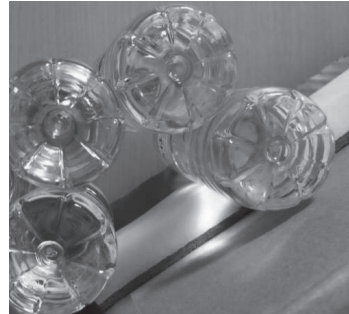


写真 3	右_1	右_2	右_3
沈み込み (mm)	24.8	18.3	13.9
荷重 (N)	110	23.0	18.5
ペットボトル換算 (本)	19.0	3.97	3.18
荷重の比	5.96	1.25	1
推定ペットボトル数 (本)	5.26	1.10	0.88

写真 3	左_1	左_2	左_3
沈み込み (mm)	21.5	17.2	14.8
荷重 (N)	38.3	21.0	19.1
ペットボトル換算 (本)	6.61	3.62	3.30
荷重の比	2.00	1.10	1
推定ペットボトル数 (本)	1.83	1.00	0.92

写真 3 においての一番の特徴は、左_3・右_3 の推定ペットボトルが 1.00 よりも小さくなっているということである。ここから、斜面に接するペットボトルは上だけでなく斜面から見て横からも荷重がかかるということがわかる。ただ、スポンジの沈み込みと荷重の実験（付録）からもわかるように、沈み込みが 20 mm よりもおおきくなると単位沈み込みあたりの荷重の増え幅が大きくなっていく。そのため、数ミリのずれであっても推定ペットボトル数に大きい影響を与えてしまう。なので、このデータは本実験で利用したスポンジ以外の、より大きい沈み込みでも荷重をより正確に測れるようなもので再計測する必要がある。

写真 4	右_1	右_2	右_3
沈み込み (mm)	20.1	18.9	8.0
荷重 (N)	29.3	24.6	13.9
ペットボトル換算 (本)	5.04	4.23	2.40
荷重の比	2.10	1.76	1

推定ペットボトル数（本）	2.15	1.81	1.02
--------------	------	------	------

写真 4	左_1	左_2
沈み込み（mm）	18.3	13.2
荷重（N）	23.0	17.9
ペットボトル換算（本）	3.97	3.09
荷重の比	1.29	1
推定ペットボトル数（本）	1.70	1.32

写真 4 では右側には 3 本のペットボトルが側壁に接しているのに対して、左側には 2 本のみのペットボトルが側壁に接している構造を取っている。また、右_2 と右_3 は接触しておらず、右_2 には上のペットボトルの荷重のみがかかっている。また、右_1 の上部分に空間が開いており、ここでもアーチ構造が形成されている。ただ、右_1 での推定ペットボトル数は 2.15 本であり、右_2 や右_3 と比べて多かった。また、右_2 と右_3 の推定ペットボトルの数の合計は 2.83 本であり、右側にあるペットボトルは 4 本である。そのため、右_1 にかかる荷重は右からのものに加えて左（中心部分）からのものが大きく影響しているとわかる。また、右_2 が左に押し出されている分、右_1 がその荷重を支えているため、穴の開いたホッパーでこの構造をとったとしてもすぐに右_1 が崩壊し流れ出てしまうことが想定される。

写真 5	右_1	右_2	右_3
沈み込み（mm）	18.3	17.4	13.0
荷重（N）	23.0	21.1	17.8
ペットボトル換算（本）	3.97	3.65	3.06
荷重の比	1.30	1.19	1
推定ペットボトル数（本）	2.06	1.89	1.59

写真 5	左_1	左_2
沈み込み（mm）	16.3	13.7
荷重（N）	20.3	18.3
ペットボトル換算（本）	3.50	3.15
荷重の比	1.11	1
推定ペットボトル数（本）	1.82	1.64

写真 5 は平べったく、すべてのペットボトルが 2 段以下の構造を取っている。また、ホッパー本体は斜面の交点から鉛直上向きを境界面とし、左右に線対称であるのに対し、写真 5 の構造は右側に偏った構造をとっている。写真 4 では右_3 よりも端にペットボトルがないが写真 5 では右_3 よりも端にペットボトルが重なっている。そのため、真ん中から 3 つ目というあまり荷重のかからない位置であっても比較的大きい荷重が測定された。写真 4 ではアーチ構造により右側に押し出す力が発生している。その証拠に、右_2 と右_3 は接触していない。それなのに写真 4 の右_3 の推定ペットボトルが 1.02 本でしかなかったのは、右に押し出す力と重力はほとんど垂直に交わっており、スポンジに鉛直な方向には、かかる力を N とすると重力は $N \cos 30^\circ = 0.9NN$ であると予想される。それに対し、右に押す力は、 $N \sin 30^\circ = 0.5N$ であると予想される。そのため、地面に対し鉛直方向の力のほうが斜面にかかる力は大きくなると考えられる。ただ、正弦と余弦の大小関係は 45° で入れ替わるため、 45° よりも斜面の傾きが大きくなると横向きの力のほうが斜面にかかる圧力が大きいと考えられる。参考文献[3]から、斜面が急になると目詰まりが起こりやすくなるとわかる。アーチ構造は線対称な力のつり合いが必要であり、横同士の粒子と支えあわなければならない。そのため、今回の考察より 45° を境に目詰まりの起こる確率が急激に変化すると考えられる。また、アーチ構造も 45° よりも急なほうができやすくなると考え

られるが、参考文献[2]より斜面が急になるに従って流速は早くなっているということがわかる。ここから、アーチ構造の形成崩壊による流れの遅延は小さいことがわかる。そのため、アーチ構造の形成についてのより深い実験や観察を行うことでアーチ構造の微小な影響のなぞについてより探求を深めたいと思う。

写真 6	右_1	右_1
沈み込み（mm）	19.2	16.8
荷重（N）	25.5	20.7
ペットボトル換算（本）	4.40	3.57
荷重の比	1.23	1
推定ペットボトル数（本）	2.20	1.78

写真 6	左_1	左_2
沈み込み（mm）	19.8	14.2
荷重（N）	27.9	18.7
ペットボトル換算（本）	4.80	3.22
荷重の比	1.49	1
推定ペットボトル数（本）	2.40	1.61

写真 6 についてはアーチ構造が 2 つ重なったような構造を取っている。この構造は写真から見てもわかるように、左右で対称性がある。そのため、下のアーチ構造の側壁に接触しているペットボトルのスポンジにかかる荷重の比は左:右=2.40 : 2.20=12 : 11 である。また、下から二段目のペットボトルのかける荷重は左:右=1.61 : 1.78 $\approx$ 8 : 9 である。そのため、この構造は左右でほぼ均等に力が分散されており、安定な構造であるということが分かった。この構造では上からペットボトルを落としたとしても崩れず、今回実験した 6 つの構造のうち最も安定したものであった。

全体からわかることとして、アーチ構造の安定性には左右の対称性や上からのある程度の圧力が必要であることが分かった。また、ある圧力を境に構造が破壊することが分かった。ただ、砂時計においてはより強い圧力をかけるために上に粉粒体を増やしたとしても目詰まりが解消される可能性はかなり低いと考えられる。理由は 2 つあり、1 つ目は粉粒体を増加させるとアーチ構造の連鎖的な構造（写真 6 のよう）になる確率が高まるため、崩壊し流れ出す確率が低くなり、流れ出たとしてもいづれ目詰まりが起こることが予想されるためということである。

2 つ目は今回の実験において感覚的な話にはなるが、アーチ構造の崩壊の理由として、上からの圧力によって側壁に接するペットボトルが斜面に沿って上昇することによる崩壊、斜面に接するペットボトルが滑ることによる崩壊、横からの圧力による崩壊の 3 パターンがみられたということである。3 パターン目に挙げた横からの圧力による崩壊は粉粒体を上から増やしたとしても解消されることはないと考えられる。1 パターン目と 2 パターン目に挙げたものは言い換えると、真上付近からの圧力と側壁付近からの圧力の関係が崩れてしまうと崩壊するということである。

ホッパーにおいて粉粒体を追加したとすると、その荷重は側壁に吸収されたり、力の分散が連鎖的に起こったりすることが考えられる。そのため、そのアーチをなしている部分に力が届くころにはその影響は微小なものになっており、その粉粒体を入れる前の真上付近・側壁付近にかかる荷重に比べると無意味なものになってしまう。この、無意味化することは一瞬で起きるので結局粉粒体をどれだけ増やしていったとしてもその無意味化の繰り返しでしかなくなってしまふ。

また、砂時計では粉粒体はとても細かくなっており、穴から粉粒体の頂点までには数千かそれ以上の粒分の距離があるだろう。そのため、無限に粉粒体が積み重なっていると考えると、粉粒体を増やしたとしてもその力は分散し、壁（砂時計の囲いの部分）に吸収さ

れてしまいアーチに届く荷重は0であると考えられる。そのため、粉粒体をどれだけ追加したとしてもアーチ部分には少しの力も伝わらない。

三次元のホッパーにおいて、このアーチ構造はドーム型の構造を取ると考えられる。今回の平面ホッパーの実験では粉粒体とみなしたものに長さがあり、奥に崩れることを考えなくてもよかったが、立体ホッパーでは奥に崩れることもあり、今回の実験に比べて接触している物体との接地面が小さい（実験では二次元に注目したので円柱を粉粒体とみたため）。三次元座標で考えると任意の直行する三つの軸で切り取った際に、今回の実験で分かった対称性と一定の圧力が必要であると考ええる。そのため、安定性についての条件がより厳しくなり二次元ホッパーよりも目詰まりの可能性は低くなるのではないかと考えられる。

本来予定していた側壁にかかる圧力と流速の変化についての実験について、粉粒体が何層にも積み重なったホッパーでは、粉粒体が独立することがない（スライムのようにくっついて動く）と考ええると、上からの圧力は分散され下層部に伝わるのでスポンジにかかる圧力はあまり変化しないのではないかと考えられる。また、もしも離れることがあってもアーチ構造をなすなどして側壁に荷重をかけたとしてもその構造は層が薄い（主には粉粒体が一本の線で結べる）可能性が高く、そうであればスポンジの弾性力などの小さい力であっても崩壊してしまうことが考えられる。そのため、本来予定していた実験は一瞬の圧力を測定することのできる装置があれば実施することができると考えられるが、スポンジ等の簡単な実験装置では確かな結果が得られる可能性は低いと考えられる。

第4章 人流と平面ホッパー

第1節 人流と砂時計

第1章第3節で述べたように砂時計のシミュレーションにも応用されている。砂時計における粉粒体1粒1粒を人間や車両に置き換えて出口から人が出るときの人流や交通渋滞が起こった際の車両についての予測を行うという手法である。この手法に基づいて今回の研究と組み合わせた提案を行う。

第2節 人流を円滑にする方法の提案

今回の研究では高速道路の合流における角度について考察を進める。高速道路の合流地点は本線が速い速度で流れているところに分岐の遅い車両が入っていく状況である。この状況は砂時計において、側壁付近の遅い粉粒体が穴の上の部分の速い流れに対して取り残されている状況に酷似している。そのため、この状況は穴の大きさが同じという仮定の上で、側壁部分の取りこぼしができるだけ少なくなる θ についての考察と言い換えることができる。

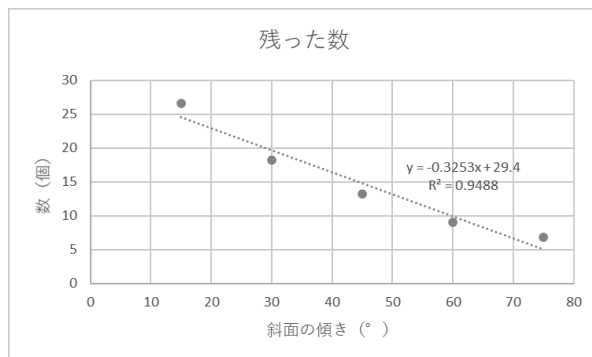
参考文献[2]より、 θ によって砂時計の斜面の傾きによって粉粒体の流れきるまでの速さは変わらないということがわかる。そのため、アーチ構造の形成などの影響による中心部(穴の真上部分)の凹みが一番小さい場合の斜面の傾きを求めることで高速道路の合流を円滑にできる合流の入りの角度がわかる。そのため、実験として穴の大きさが等しい平面ホッパーを作成し同じ量の粉粒体を用いて斜面の傾きのみを変化させ、中心部の粉粒体が流れきったところで穴を閉じ、残った粉粒体の個数を計測した。これによって、中心部と斜面付近の粉粒体の速さの差を見ることができるとこの差によってより良い合流の角度を提案する。

実験結果は以下の通りになった。

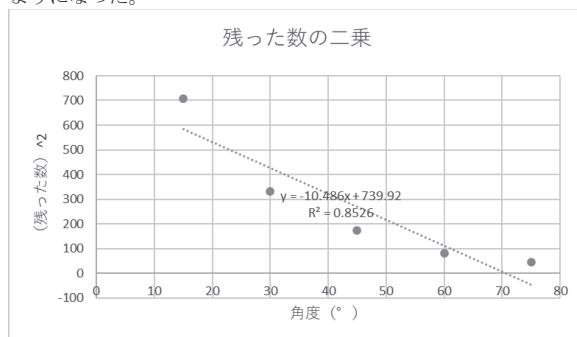
残数\角度	15°	30°	45°	60°	75°
一回目 (個)	32	21	13	9	6
二回目 (個)	31	15	15	8	7
三回目 (個)	21	17	12	8	7
四回目 (個)	26	17	12	9	8
五回目 (個)	23	21	14	11	6
平均 (個)	26.6	18.2	13.2	9	6.8

0° と 90° について実験をおこなわなかった理由は、0° においては斜面の傾きがなく粉粒体を流しだすと穴に向かって流れ出すわけではなく穴とは逆方向に流れ出してしまい、側面の設定によって数値が変わってしまうためである。また、90° においては自由落下運動をすることは自明であるため今回は実験する必要がないと判断した。

今回の実験データを散布図にすると次の通りになった、

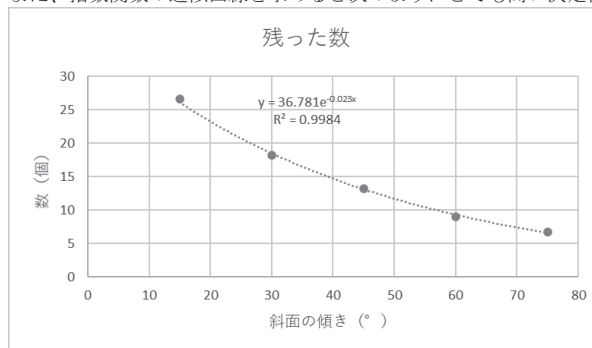


相関係数は-0.97 と大きい相関がみられた。次に残った数を二乗し、散布図にすると次のようになった。



相関係数は-0.92 と大きい相関がみられたものの、元データよりは相関が小さかった。そのため、残った数は二次関数よりも一次関数により近い相関関係であるということが分かった。

また、指数関数の近似曲線を求めると次のようにとても高い決定係数が得られた。



この3つのグラフから斜面に取り残される粒子の数は指数関数的に斜面の傾きが大きくなっていくにつれて少なくなっていくということが分かった。ただ、今回はデータが少な

く指数関数か一次関数であるかの判断ができなかった。また、ほかの参考文献において類似の研究がみられなかった。今回の目的は斜面の傾きと取り残される粒子のある程度の関係性のみであるため、今回の実験では斜面の角度が0° に近づくにつれて斜面部分に取り残される粉粒体の数は多くなっていくという特性のみが得られたとする。そのため、今回高速道路の合流部分での本流と合流する側の道路のなす角はできるだけ0° に近いほうがスムーズな流れになるという結論に至った。もしもこの実験をより精密に多くのデータを取った際に指数関数的なデータが得られたとすると合流地点の二つの道路のなす角はある程度の許容範囲をもって小さくすればよいが一次関数的なデータであるとできるだけ小さくする必要がある。そのため、更なる実験が必要である。

また、高速道路では合流する側の車両は比較的遅い速度でいるのに対し本線走る車両は、時速100kmを超えても速いスピードで流れている。そのため、この状況を砂時計で再現するには、穴の真上部分を比較的重い粉粒体を用いることで、より確かなデータを取ることができるだろう。高速道路の合流は砂時計のように規則正しい速度によるものではないため譲り合いや急な加速などについては物理分野以外からの視点も必要である。今回の研究で実験を行った砂時計の粉粒体は円形をしているため、長方形の車両とは全く異なるものである。そのため、合流地点では長方形のほうが円形（≒正方形）よりも分岐と本線の境界に接する時間が長いと、より遅延が発生するだろう。そのため、本研究での提案は再度検討する必要がある。

第5章 結論

第1節 まとめ

本研究で得られたことは以下の通りである。

- (1)砂時計はアーチ構造の形成・崩壊の繰り返しで流れている
- (2)砂時計は穴の真上部分が早くに流れだす
- (3)平面ホッパーには大きく二つの流れ方がみられ、主に斜面の角度によって決定される
- (4)斜面の角度がない（水平面）時、平面ホッパー・立体ホッパー共に互い違いに流れる
- (5)アーチ構造の安定性には左右の対称性や上からのある程度の圧力が必要である
- (6)ホッパーの流れにおいて側壁付近に取り残される粉粒体は斜面の角度と指数関数的な関係がある可能性がある
- (7)高速道路の合流ではできるだけ本流と合流する側のなす角がより小さいとより遅延（渋滞）が少なくなる

この中で(3)・(4)の立体ホッパーについて・(6)・第3章の実験手法については、類似の結果を得たり手法を用いたりしている論文を見つけることができなかった。そのため、これらのものは誤りである可能性がある反面、流体物理学に対する新たな特徴・実験手法の提案をすることができたといえるであろう。

第2節 今後の展望

まとめの(6)にて述べた残数と斜面の角度の関係は更なる実験が必要であり、確かめることができると世界全体での粉粒体の研究がより進歩するだろう。また、大きい問いは砂時計の方程式についてだったがそれについてより実験・考察が必要なこととしては、やはり今回実験し失敗した側壁にかかる圧力と粉粒体の速度の関係についての実験である。この実験の代用実験を行うことでアーチ構造についての様々な疑問が解消されるだろう。また、考察の中で原理があいまいである部分が多々あるため、その部分について更なる実験が必要である。

また、第2章で行えなかった、平面ホッパーにおける穴の直径と斜面の角度の関係による流速・流れ方の違いについての実験、 θ ・穴と粒径の比を固定し、粉粒体を様々なものを用いて同様のホッパーで流す実験を実施する必要がある。

本研究では摩擦や粉粒体のそれぞれの粒の個性を無視しているためそれらのことを含めるとアーチ構造の安定性や流速なども変化すると考えられる。そのため、今回の研究で得られた結果はほとんどの要素を除いた最も簡略化・理想化のされた砂時計にのみ適用することができるため現実での砂時計とはずれが生じることが予想される。これを現実の砂時計に適用するためには、それぞれの条件について対照実験実験を行い比較することである程度の精度で条件を求めることが必要であろう。

本研究は平面ホッパーのみの関係を調べたため三次元に拡張し、本来の砂時計（立体ホッパー）についての考察も行う必要がある。

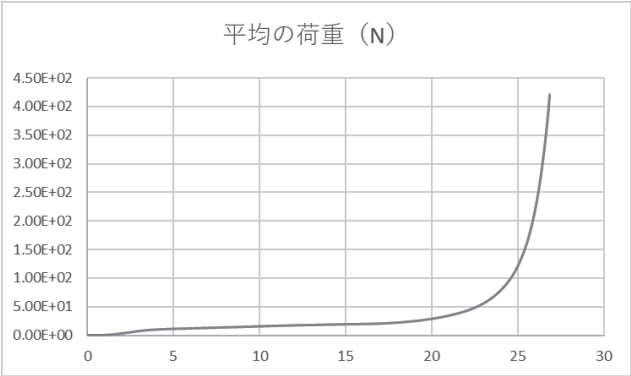
謝辞

今回の研究において指導していただいた若杉先生、竹村先生、また講座内の生徒の方々には、温かいご指導ご鞭撻を賜りました。心より感謝申し上げます。

付録 A スポンジにかかる荷重とスポンジの沈み込みの関係性（本文第 3 章）

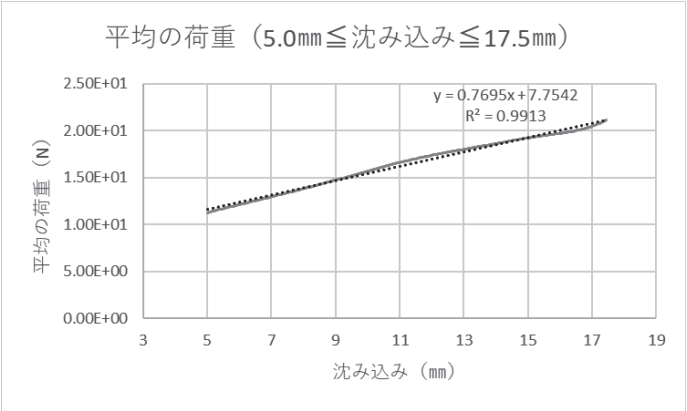
スポンジの沈み込みと圧力変化についてフォーステスターを用いて実験し取得した。結果は以下の通りとなった。

沈み込みと荷重の関係 [横軸:沈み込み (mm) 縦軸:スポンジにかかる荷重 (N)]



このグラフから沈み込みが 2.5 mm程度から 17.5 mm程度にかけて平均の荷重は一次直線に近似しているように見られる。そのため、5.0 mmから 17.5 mmにおいてのデータのみでグラフを作成し、近似直線と R 二乗値を求めると次のようになった。

平均の荷重 (5.0 mm ≤ 沈み込み ≤ 17.5 mm) 青線:実測値 黒点線:近似直線



このグラフから、平均の荷重は沈み込みが 5.0 mmから 17.5 mmの範囲内では

$$(\text{荷重}) = 0.7695 (\text{沈み込み}) + 7.7542$$

という直線に近似しているといえる。R 二乗値も 0.9913 と高いため、本論文では 5 mmから 17.5 mmの範囲内での荷重はこの近似直線により推定した。

付録 B 本文第 4 章で行った実験の失敗パターン

写真 A



写真 A	左_1	右_1
沈み込み (mm)	16.8	16.0
荷重 (N)	20.7	20.1
ペットボトル換算 (本)	3.57	3.46
荷重の比	1.03	1
推定ペットボトル数 (本)	1.52	1.48

写真 B



写真 B	左_1	右_1
沈み込み (mm)	19.6	17.2
荷重 (N)	27.2	21.0
ペットボトル換算 (本)	4.69	3.62
荷重の比	1.30	1
推定ペットボトル数 (本)	2.26	1.74

写真 C



写真 C-1	左_1	左_2	左_3
沈み込み (mm)	23.8	18.1	13.9
荷重 (N)	73.0	22.5	18.5
ペットボトル換算 (本)	12.59	3.88	3.18
荷重の比	3.96	1.22	1
推定ペットボトル数 (本)	6.83	2.11	1.72

写真 C-2	右_1	右_2	右_3
沈み込み (mm)	22.5	10.5	2.0
荷重 (N)	48.5	15.8	3.42
ペットボトル換算 (本)	8.37	2.73	0.59
荷重の比	14.2	4.63	1
推定ペットボトル数 (本)	4.53	1.48	0.32

写真 D



写真 D-1	左_1	左_2	左_3	左_4
沈み込み (mm)	25.4	20.9	19.0	2.40
荷重 (N)	149	34.0	25.0	5.10
ペットボトル換算 (本)	25.8	5.86	4.31	0.88
荷重の比	29.3	6.67	4.91	1
推定ペットボトル数 (本)	7.99	1.82	1.34	0.27

写真 D-2	右_1	右_2	右_3	右_4
沈み込み (mm)	23.1	9.10	3.60	2.30
荷重 (N)	57.7	14.8	9.29	4.68
ペットボトル換算 (本)	9.95	2.54	1.60	0.81
荷重の比	12.3	3.15	1.99	1
推定ペットボトル数 (本)	3.06	0.78	0.49	0.25

写真 E



写真 E-1	左_1	左_2	左_3	左_4
沈み込み (mm)	21.5	17.6	12.1	2.80
荷重 (N)	38.3	21.5	17.1	6.76
ペットボトル換算 (本)	6.61	3.70	2.94	1.17
荷重の比	5.67	3.17	2.53	1
推定ペットボトル数 (本)	4.03	2.26	1.79	0.71

写真 E-2	右_1	右_2	右_3	右_4
沈み込み (mm)	22.3	10.5	3.70	2.90
荷重 (N)	46.1	15.8	9.51	7.15
ペットボトル換算 (本)	7.94	2.73	1.64	1.23
荷重の比	6.44	2.21	1.33	1
推定ペットボトル数 (本)	4.82	1.66	0.99	0.75

この実験により、本来には推定ペットボトル数は 1 以上になることが望ましく、もしもとなりのペットボトルに荷重が分散していたとしてもばらつきが激しい結果が得られた。また、ペットボトル換算と推定ペットボトル数の差が大きいものがほとんどであった。これは、スポンジの沈み込みから推定されるスポンジにかかる荷重が大きく出すぎているものや小さく出すぎているものが多くあった。ここから、誤差範囲が大きく信用のできないデータであると判断して今回の実験は外れデータであるとした。このデータが出た原因としてはスポンジの表面の沈み込みのみ測定したため、ペットボトルに傾きがある場合に飛び値が大きく出てしまったと考えられる。そのため、第三章での実験では表面の沈み込みと裏面の沈み込みの平均値を採用することでこの誤差を少なくするよう試みた。

参考文献

- [1]田口義弘『砂時計の七不思議』,中公新書 (1995)
- [2]磯部浩誠、水野志保、岡田佳子『セルオートマトンを用いた砂時計 CG シミュレーションに関する研究』、pdfファイル (2022 年 1 月 29 日閲覧)
- [3]『粉粒体を扱うなら知っておきたい「流動性」ってなに?』<https://www.nitto-kinzoku.jp/archives/technic/powder-flowability/> (2022 年 1 月 29 日閲覧)