

ダイラタント流体の量と衝撃吸収の関係

橋本 心花 細谷 俊輔 河津 柚花 尾上 瑞希

1. 研究目的

外部から力を加えると固体的に振る舞うが、力を加えるのをやめると流体的に振る舞うダイラタント流体には衝撃吸収の働きがあり、この現象(ダイラタンシー現象)にとっても興味を持った。この流体に関する他の研究を調べてみると、ダイラタンシー現象が起こる条件や溶媒と溶質のより衝撃吸収する組み合わせについては研究されていたが、この流体がどのくらい衝撃吸収するのか実際に数値を測っている研究は見当たらなかった。そこでこの現象と衝撃吸収の関係を数値で示したいと思った。また現時点では日常生活で利用されることが少ないため少しでも実用性を高めるためにダイラタント流体の量と衝撃吸収の関係性、特に効果的に衝撃を吸収する必要最小量を見つけることに着目して研究することにした。

2. ダイラタント流体について

図2左のような粉粒体と液体の混合物で作った流体に外部から力を加えると、粒子がずれるように動くため粒子間の隙間が広がる。そこに液体が入り込むことによって強度が増し固体のように振る舞う(図2右)。しかし、力を加えるのをやめると再び粒子が動き粒子間の隙間が広がる。その隙間から液体が外に出ていくことで、もとの流体の状態に戻る。この一連の現象をダイラタンシー現象といい、この現象を示す流体をダイラタント流体という。本研究では水と片栗粉で作った一般的なダイラタント流体を使用した(図1)。



図1 ダイラタント流体

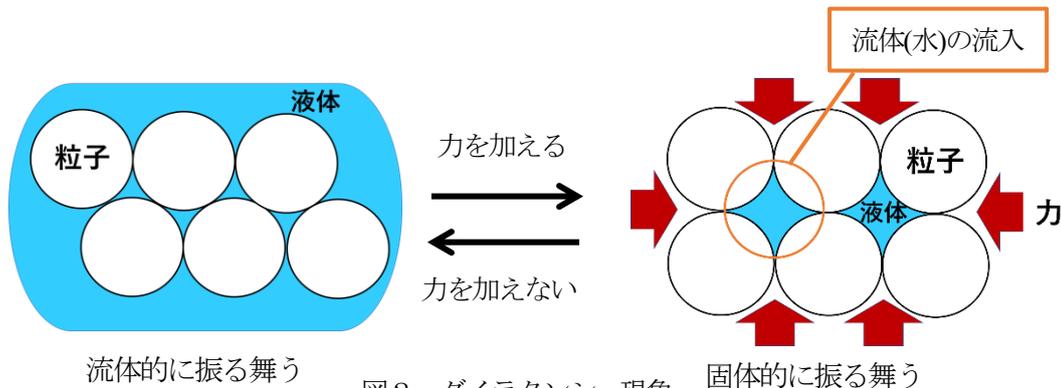


図2 ダイラタンシー現象

3. 先行研究および予備知識

①レイノルズの膨張の原理(dilatancy principle)

粉体媒質の振る舞いに関する原理で、粉粒体媒質を変形すると、粒子間の空隙が増して媒質全体の体積が膨張すること。ダイラタント流体の外力により変形して固化する様子が、この原理の粉体媒質の振る舞いに似ていとされる。なかには、ダイラタント流体が外力を受けると粒子間の液体が外部に出て収縮すると記述されているものもあるが根拠に乏しく、この原理が有力である。(「ダイラタント流体、ダイラタンシー」九州大学)

②圧電素子の圧力感度について

実験で使用する圧電素子の圧力感度(V/N)には個体差がある。(製造会社に確認)

③ダイラタント流体の溶質と溶媒の割合について

ダイラタント流体に関して水と片栗粉の割合を変化させ、より衝撃吸収する割合を計測していた。実験結果としてより衝撃吸収する流体の割合は水：片栗粉=2：3であると示されていた。(「ダイラタンシー流体の強度測定とその応用」熊崎隆斗 森悠太朗)

④ダイラタント流体の固化について

ダイラタンシー現象が起きる条件を探し、定量化している過程で数十分放置した流体が固くなっているのを見つけていた。実験により時間が経過するほど、流体が固くなっていくということが分かっていたが、その要因については考察されていなかった。（「ダイラタンシー現象の定量化」千葉県立舟橋高校理数科3年）

4. 実験器具について

ダイラタント流体(以下「流体」と称する)が衝撃吸収したあとに残った衝撃の大きさを測る方法について考えたが、直接衝撃の値を計測する機械は高価で購入するのは難しいと判断した。そこで、圧電素子とオシロスコープを用いて実験を行うことにした。

・圧電素子

圧電素子は加えられた力を電圧に変換することができる。上部電極に衝撃が加わることで上部電極と下部電極の間で電圧が発生するという仕組みである(図3)。しかし、電圧が生じるのは上部電極に加わる力が変化するときのみで一定の力を加え続けている場合は生じない。本研究では図4のような圧電素子をオシロスコープにつないで使用した。



図3 圧電素子の構造



図4 圧電素子

・オシロスコープ

圧電素子で発生した電圧を図5のオシロスコープで測定した。オシロスコープには様々な用途があるが、私たちの実験では電圧の変化を波形として表示できるように設定した。また、どの実験においても生じた電圧の最大値を記録した。



図5 オシロスコープ

5. 予備実験1

流体の量と衝撃吸収の関係を調べるために私たちが必要な値は衝撃の大きさであるが、オシロスコープが表示するのはあくまでも電圧の値である。したがって、得られた電圧の値を衝撃の値に変換する必要があった。そこで、1Nの力が加わった時に発生する電圧の大きさを示す圧力感度(V/N)を用い、その逆数に電圧の値をかけて衝撃の値を求める次の式を用いることにした。

$$\text{圧力感度の逆数(N/V)} \times \text{電圧の最大値(V)} = \text{衝撃の値(N)}$$

しかし、圧電素子の製造会社に問い合わせたところ、圧力感度は圧電素子によって個体差があるということを確認した。そこで、私たちが今回使用する圧電素子における圧力感度を求めるために予備実験1を行った。

<実験方法>

・準備物

- 物理スタンド
- 圧電素子
- オシロスコープ
- おもり(ひもを含めて20g)

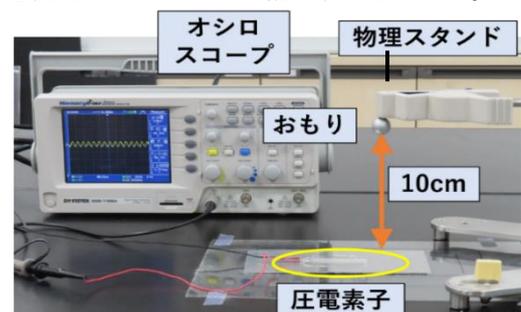


図6 予備実験1の設置図

・実験手順

- ①おもりの最下部から圧電素子までの距離が 10 cm になるように物理スタンドを設置し、ひもをつけたおもりを固定する。
- ②物理スタンドのはさみの隙間からひもを上に通し、図 6 のような状態からひもを離しておもりを圧電素子の真上に落とす。
- ③圧電素子で発生した電圧の最大値をオシロスコープで計測する。
- ④おもりを落とす高さや、物理スタンドの位置は変えずに①～③を 50 回繰り返す。
- ⑤おもりの質量、おもりを落とす高さ、圧電素子に力が加わった時間 Δt (s) を使い計算式によって衝撃の値を計算する。(Δt の算出方法と衝撃の値の計算については後の<計算方法>で述べる。)
- ⑥③で測定された電圧の最大値を⑤で計算した衝撃の値で割り圧力感度の平均を求める。

<計算方法>

・ Δt について

オシロスコープで記録された電圧の波形におけるデータを、Excel を用いて数値を表示する。電圧の値が最大となっている数値付近を選択し、縦軸：電圧の値(V)，横軸：時間(s)を示すグラフを作成する。衝撃が加わり始めた時間はグラフによっては電圧の値が 0 を下回っていないものがあつたため電圧の値が最大となる直前に極小となっている点とした。衝撃が加わり終えた以降は圧電素子の上部電極に加わる力が減衰しているため、必ず電圧が負の値になる。したがって電圧のグラフが 0 と交わっている点とした。その間の時間を「圧電素子に力が加わった時間 Δt 」として定義し横軸から読み取って値を算出した。

・衝撃の値について

$mgh=1/2mv^2$ より

$$v=\sqrt{2gh}(\text{おもりの質量 } m[\text{kg}], \text{ 重力加速度 } g[\text{m/s}^2], \text{ おもりを落とす高さ } h[\text{m}], \text{ おもりの落ちる速さ } [\text{m/s}^2])$$

$F\Delta t=mv$ が成り立つので、

$$F=mv/\Delta t(\text{衝撃の大きさ } F[\text{N}], \text{ 圧電素子に力が加わった時間 } \Delta t[\text{s}])$$

<結果>

おもりの質量 (g)	電圧の最大値 (V)	力が加わった時間 Δt (s)	衝撃の値 (N)	圧力感度の逆数 (N/V)
20.0	8.35	3.28×10^{-4}	91.7	11.4

表 1 予備実験 1 の結果

表 1 の値はすべて 50 回の試行の平均値を示している。これらから以下の式が求められた。

$$11.4(\text{N/V})^{*1} \times \text{電圧の最大値(V)}^{*2} = \text{衝撃の値(N)}^{*3}$$

- ※ 1 予備実験 1 で求めた圧力感度の逆数
- ※ 2 オシロスコープで測定される電圧の値
- ※ 3 本実験で求める値

本実験ではこの式を用いて衝撃の値を求める。

6. 予備実験 2

3. 先行研究および予備実験の④より時間が経過すると流体がかたくなる要因について水が蒸発することで水分が減少しているからではないかと考えた。また、実験を行っている過程で水と片栗粉の割合が同じ流体でも流体全体の量が異なると、流体のかたさに違いがみられた。そこで流体の量の違いによる水の減少量について調べることを目的に予備実験 2 を行った。

<実験方法>

・準備物

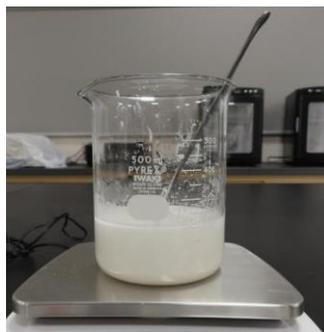
流体(水, 片栗粉), 500m l ビーカー, 電子はかり, ストップウォッチ

・実験手順

- ①水と片栗粉の割合が2 : 3の流体(25g, 250g)をそれぞれ 500m l ビーカーの中に作成する。その際, 電子はかりを用いて計量をする(図7)。(25g では水 10g と片栗粉 15g, 250g では水 100 g と片栗粉 150g)
- ②流体生成時から 10 分間で水がどのくらい減少したか計測し, 水の減少量と減少率を比較する。



25g



250g

図7 実験の様子

<工夫点>

実験結果を出来るだけ正確にするために, 実験開始前に500m l ビーカーと薬さじの2つの質量を測っておき, これらを含む流体の質量を計測した。こうすることで, 流体が付着した薬さじをビーカーから取り出す必要がなくなり, 流体の質量に誤差が生まれることを防いだ。

<結果>

表2は各流体の量における水の減少量と減少率についてまとめたものである。水の減少量は25gで0.14g, 250gで0.19gとほとんど同じだった。しかし, 流体全体の量に対する水の減少率について考えてみると, 25gで1.40%, 250gで0.19%と違いが見られた。

流体の量(g)	25	250
水の減少量(g)	0.14	0.19
水の減少率(%)	1.40	0.19

表2 予備実験2の結果

<考察>

結果から, 水と片栗粉が同じ割合の流体でも流体全体の量が異なると水の減少率が異なり, かたさに差ができると考えられる。このことから作成する流体の量が異なると, 流体生成時から実験開始までの時間を統一しても条件は揃わない。よって, 本実験での流体の使用量(型に入れる量)に関わらず作成する流体の量を一定にする必要がある。本実験では流体生成時の量を25gと設定した。

7. 本実験

<仮説>

型に入れる流体の量が多くなると衝撃吸収の働きは大きくなるため, 対象物にかかる衝撃の大きさが小さくなると考えられる。ただし, 型に入れる流体の量の増加に対して衝撃吸収の働きの増加は一定でなく, 徐々に増加幅が小さくなっていき, 衝撃の大きさは一定の値に近づくと仮定した(図8)。そして, 本実験から衝撃吸収するのに必要な流体の最小量を見つけられるのではないかと私たちは考えた。

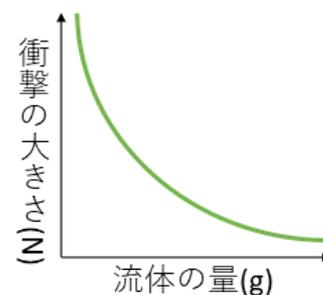


図8 仮説のグラフ化

<工夫点>

圧電素子に水が付着すると絶縁状態が小さくなり、出力が小さくなるため濡れないように圧電素子を袋に入れた(図9)。

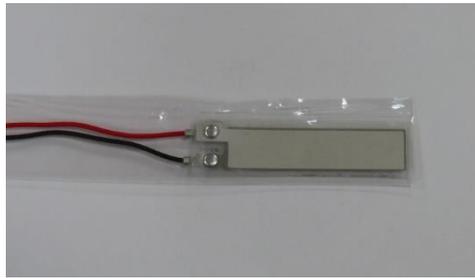
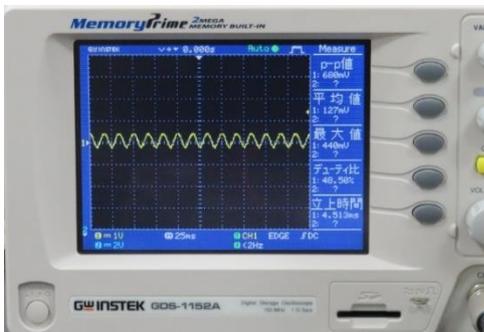


図9 袋にいれた圧電素子

圧電素子をオシロスコープにつなぐと、図10左のようにノイズが大きくなってしまうため、ノイズを消すためにアースにつないだ(図10右)。



アースにつなぐ前



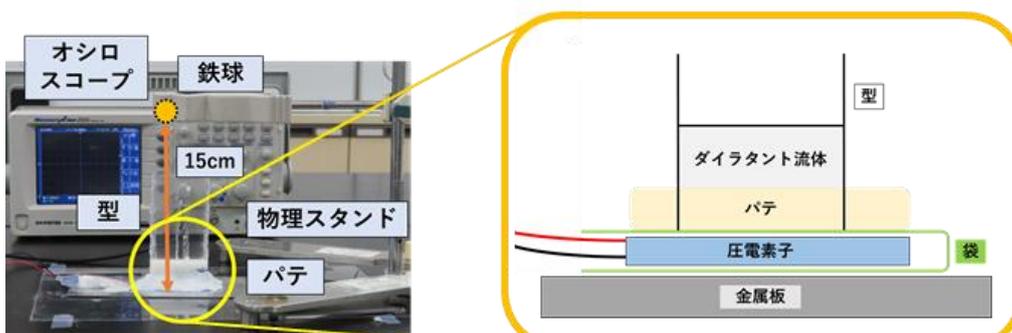
アースにつないだ後

図10 オシロスコープの波形

<実験方法>

・準備物

流体(水、片栗粉)、物理スタンド、金属板、オシロスコープ、鉄球(5.46g)、プラスチックの型(縦×横×高さ=1.6cm×5cm×10cm)、パテ



本実験の設置図

圧電素子付近の断面図

図11 本実験の様子

・実験手順

- ①金属板の上に袋で包んだ圧電素子を置きその上にプラスチックの型を置いて、型から流体が漏れないように周りをパテで固める。
- ②プラスチックの型に流体をいれ、鉄球(5.46g)の最下部から圧電素子までの距離を15cmに固定し、圧電素子の真上に鉄球を落とす。
- ③圧電素子につないだオシロスコープで電圧の値を読みとる。

- ④プラスチックの型に流し込む流体の量を 0 g, 2.5 g, 5.0 g, 7.5 g, 10.0 g, 12.5 g に変えながら各質量で②, ③を 5 回ずつ行う。

<結果>

表 3 は各流体の量における衝撃の値の平均値を示している。流体の量を 7.5g~12.5g に増やすにつれて、衝撃の値が減少する間隔が小さくなっていることが分かる。また、図 12 から流体の量を増やすにつれて衝撃の値が減少し一定の値に近づいていることがわかる。

流体の量 (g)	0	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5
衝撃の値 (N)	28.8	11.5	8.82	4.23	3.78	3.44

表 3 本実験の結果

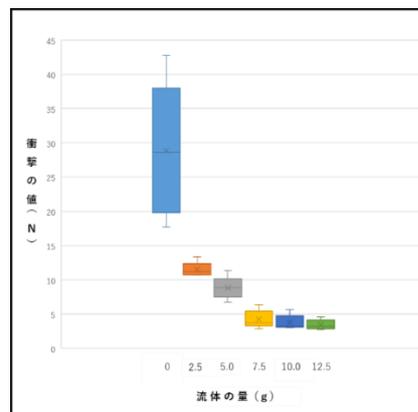


図 12 結果のグラフ

<考察>

結果より仮説と同様に流し込む流体の量が多くなるにつれて衝撃の大きさが一定の値に近づいており、その要因は流体の量に対する衝撃の吸収量が少なくなっているからだと考えられる。したがって今回の実験で設定した 6 種類の流体の量において、流体の量が最も少なくかつ最も衝撃を吸収しているのは 7.5 g であるといえる。しかし、6 種類の流体の量でしか実験が行えていないため、さらに流体の量の設定間隔を小さくすると 5.0g~10.0g の間で 7.5g よりも最適な値が存在する可能性があると考えられる。

8. 結論

本実験では、水：片栗粉=2：3 の割合で作った流体 25g を流体生成時の量に設定し、縦×横×高さ=1.6cm×5cm×10cm のプラスチックの型に流し込む流体の量を 6 種類に変えて実験を行った。その結果、7.5 g の時に使用する流体の量が最も少なくかつ量に対して衝撃の吸収量が最も多くなったことがわかる。よって今回の実験の目的である効果的に衝撃を吸収する量は 7.5g といえる。しかし、本実験の試行回数が少ないためより多くのデータを得てこの結果に信頼性を持たせる必要がある。また使用する型や圧電素子の大きさなどによって効果的に衝撃吸収する量は変わると考えられる。さらに今回の実験では流体生成時に 25g の流体を使用した。予備実験 2 から分かる通り水と片栗粉の割合が同じでも作成する流体の量によっては流体のかたさに違いができるため、本実験において流体生成時の量を変えて型に流し込む量を同じにし、実験結果を比較する。

9. 参考文献

- ・「ダイラタント流体, ダイラタンシー」九州大学
<http://www.stat.phys.kyushuu.ac.jp/~nakanisi/Physics/Dilatancy/index.html> 2011 年 11 月 3 日更新
- ・「ダイラタンシー流体の強度測定とその応用」熊崎隆斗 森悠太郎
[31905.pdf \(gifu-net.ed.jp\)](http://31905.pdf(gifu-net.ed.jp))
- ・松定プレジジョン 技術コラム 「圧電(ピエゾ)素子とは? 圧力をかけるとどうなるの?」
https://www.matsusada.co.jp/column/whats_piezo.htm
- ・「衝撃力の計算」三浦 裕 名古屋市立大学大学院医学研究科分子神経生物学 愛知県山岳連盟所属 社会人山岳会 チーム猫屋敷
<https://square.umin.ac.jp/miura/essay.dir/rope-miura.pdf> 2013 年 11 月 4 日
- ・フリー百科事典「ウィキペディア (Wikipedia)」ダイラタンシー
<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%80%E3%82%A4%E3%83%A9%E3%82%BF%E3%83%B3%E3%82%B7%E3%83%BC> 2023 年 3 月 8 日更新