

ダイラタンシー現象による振動とその周期

班員 越後 奈津子、長野 佑紀、中山 紘斗、宮本 悠生
担当教員 芳網 健太郎

キーワード：ダイラタンシー現象、振動、周期、単振動

We quantified the characteristic of dilatancy, using a handcart in which we put a fluid of powder and liquid. The handcart pulled with certain power repeated acceleration and deceleration under a constant period.

We focused on the period and made an equation of the period. Also, we defined “the dilatancy calculation”, which shows the force of dilatancy phenomenon.

The period did not change even when the mass of the weight hung by a string became heavier without the mass of all the device changed. However, the period became longer, as the mass of all the device became bigger. Moreover, the higher the temperature of the liquid became, the smaller the period became and the larger the dilatancy calculation became. Meanwhile even when the ratio of the mass of powder to that of liquid became larger, there was no change in the period and the dilatancy calculation.

1 はじめに

粉末粒子と液体の混合物は、ゆっくりとした外力を加えられたときは液体のように振る舞い、急激な外力を加えられたときは固体のように振る舞う。この現象をダイラタンシー現象という。流体力学において、流体とは固体と液体の総称であり、流体の性質を決める最も重要な要素の一つとして粘度が挙げられる。アイザックニュートンの粘性法則では、「流体のずり応力はずり速度に比例する」と説明される。ずり応力 F/A は流体の内部で速度の異なる二部分がずれるときに及ぼし合う面積 A 当たりの力のことで、ずり応力はずり速度 dv/dy に比例する。このときの比例定数が粘度である。ずり速度を x 軸、ずり応力を y 軸とするグラフで示される曲線を流動曲線と呼びその傾きは粘度を表す。ダイラタンシー現象をおこすダイラタント流体は非ニュートン流体の一種で、ずり速度が大きくなるとともに粘度が大きくなるものである。(図1)

(※1) 先行研究を参考に、実験装置を作成して実験を行い(図2)、得られたデータからグラフを作成すると縦軸を速度としたグラフで単

振動とみられる波形が表れた。(図3-1, 図3-2)

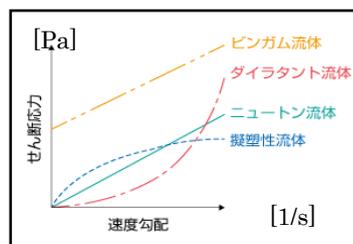


図1 各種流体における速度勾配とせん断応力の関係

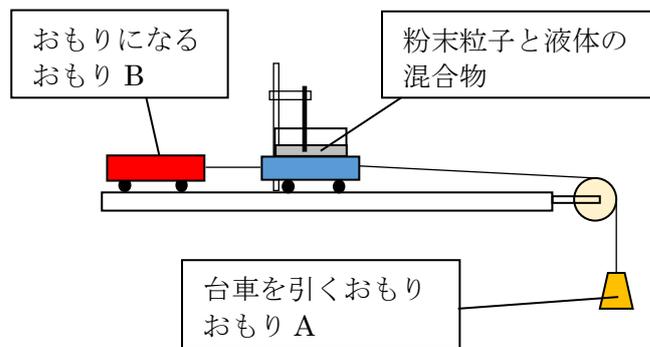


図2 装置の模式図

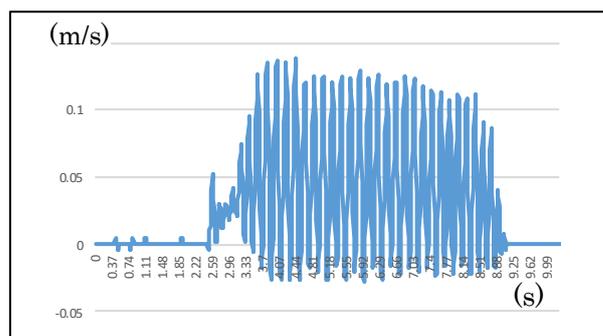


図3-1 データをもとに作成したグラフ

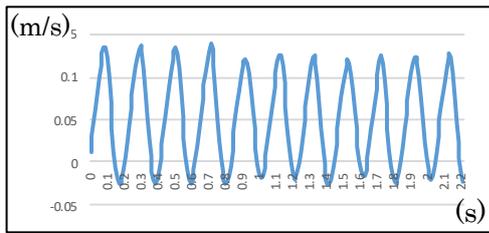


図 3-2 データをもとに作成したグラフ

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{M}{D}}$$

図 3-3 周期の式

図3-1、3-2のグラフから単振動とみなし、周期の式を立てた。(図3-3)おもり、台車、液体を含めた質量をMとし、ダイラタンシー現象の大きさを表すダイラタンシー係数を定義し、Dで表した。本研究では、この現象を定量化するために実験を行った。

2 ダイラタンシー現象の仕組み

通常、粉の粒子は、粒子間の隙間が最も小さくなるように積まれている。粉に力が働くと隙間は大きくなる。粉が水中にあるとき、隙間の体積が大きくなっても水はすぐに移動しないため、不足した水の分、粒子と粒子の間に負の圧力が発生する。この圧力により、粉末の粒子が固まる(図4)。時間がたつと、隙間に水が十分に入り込むため、圧力がなくなり、液体のように振る舞う(図5)。

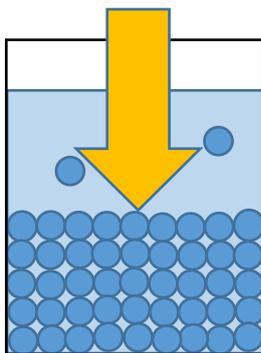


図 4 粒子の模式図

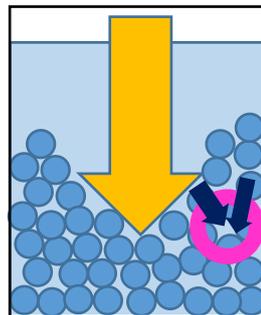


図 5 粒子の模式図
(時間経過後)

3 目的

ダイラタンシー現象の特徴を知るために、観測された単振動の周期が変化する条件を明らかにすることを目的とした。

実験 I では、ダイラタント流体以外の条件を変化させた。

(1)実験 I - 1

台車を引くおもりの質量を変化させる。

(2)実験 I - 2

全体の質量Mを変化させる。

実験 II では、ダイラタンシー現象の強さを表す数値として導入したダイラタンシー係数(D)を、変化させる条件を明らかにすることを目的とした。

(3)実験 II - 1

ダイラタンシー係数の変化する要因を調べるためにダイラタント流体の温度を変化させる。

(4)実験 II - 2A

ダイラタント流体を攪拌してから実験を行うまでの時間を変化させる。

(5)実験 II - 2B

ダイラタント流体の水に対する片栗粉の質量を変化させる。

4 実験装置

粉末粒子と液体の混合物の入った容器に対して、スタンドで固定した棒を差し込む。台車の速度を測定できる力学台車(島津理化 力学台車スマートカート ME-1241)を用いて台車の速度を測定した。糸に「おもり A」を取り付け、台車に「おもり B」を取り付けた。また、台車、容器、流体、おもりの質量を「総質量」とした。以下すべての実験をこの方法で行うものとする。(図1)

(2)実験 I - 1

おもり A の質量を 100 g、150 g、200 g に変化させた。総質量を変化させないために、おもり A の質量を変化させて、2 つのおもりの総質量を 200 g にそろえた。

(3)実験 I - 2

総質量を変化させるために、おもり B を 0 g、250 g、500 g に変化させ、おもり A の質量は 100 g で固定した。

※実験 I については、すべて同一条件のダイラタント流体を使用している。

(4)実験 II - 1

温めた水と片栗粉を混ぜ、自然に冷えていく

過程のなかで台車を走らせる直前の流体の温度を測定し台車を走らせた。

(5)実験Ⅱ-2A

流体をかき混ぜてから台車を0秒、20秒、40秒、60秒、120秒置き、走らせた。

(6)実験Ⅱ-2B

一定量の水に対する、片栗粉の質量を変えて実験した。

※実験Ⅱについては、すべて同一条件の実験装置を使用している。

5 実験結果

実験Ⅰ-1

全体の質量を一定にして、糸につるすおもりAの質量を大きくしても周期は変わらなかった。一方で力学台車の平均速度は、おもりAの質量に比例していたため先行研究と同様の結果を得た。(図6)

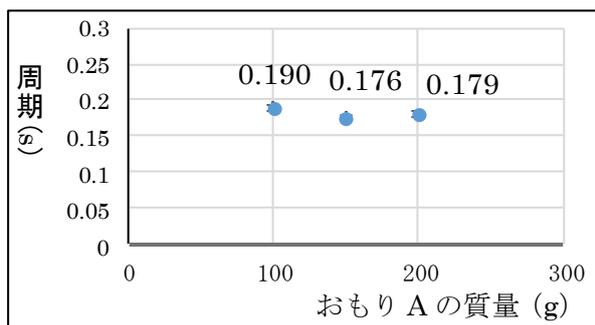


図6 実験Ⅰの周期の結果

実験Ⅰ-2

糸につるすおもりAの質量を一定にして、全体の質量を大きくすると周期は大きくなった。

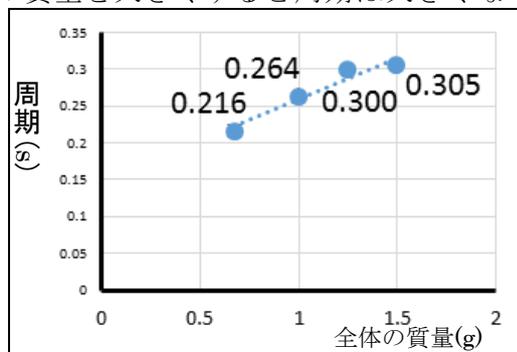


図7 実験Ⅰ-2の結果

実験Ⅱ-1

水温が高くなるほど周期は小さくなり(図8)、ダイラタンシー係数は大きくなった。(図9)

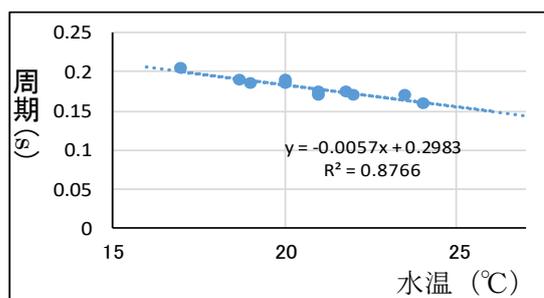


図8 実験Ⅱ-1の結果

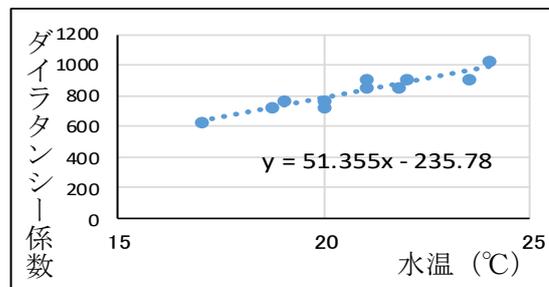


図9 実験Ⅱ-1の結果

実験Ⅱ-2A

沈殿するまでの時間を長くすると、ダイラタンシー係数は大きくなった。(図10)

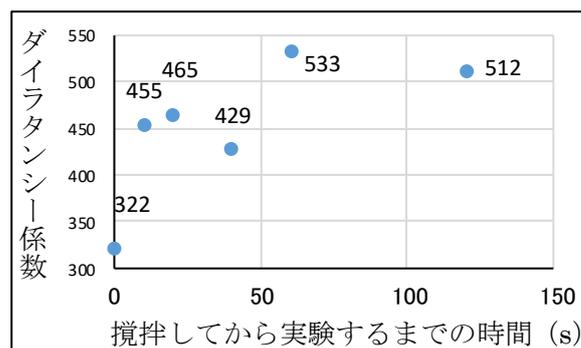


図10 実験Ⅱ-2Aの結果

6 考察

〈実験Ⅰ〉

実験Ⅰ-1、1-2の実験結果から求められたD値で分散分析をしたところ、有意差がなかった。台車を引く力の大きさと全体の質量によってダイラタンシー係数は変化せずダイラタン流体の条件で決まることが分かった。また、Dは計算によって求めることができた。

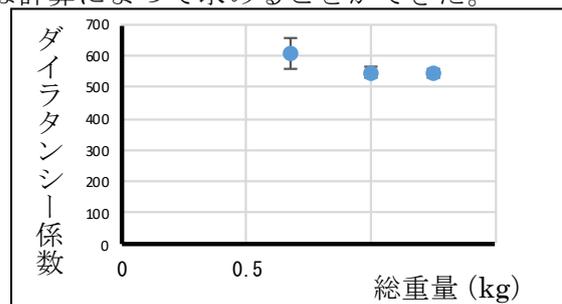


図11 実験Ⅰのダイラタンシー係数の結果

〈実験Ⅱ-1〉

水は水温が上がるほど動粘度が小さくなる
ことが分かっている。実験結果を踏まえると、
Dの値が大きくなるほど水の動粘度は小さく
なっていることが分かった。このことから、動
粘度とDの間には反比例の関係があるのでは
ないかと考え、調べたところ、Dと動粘度の二
乗が反比例していることが分かった。(図12)

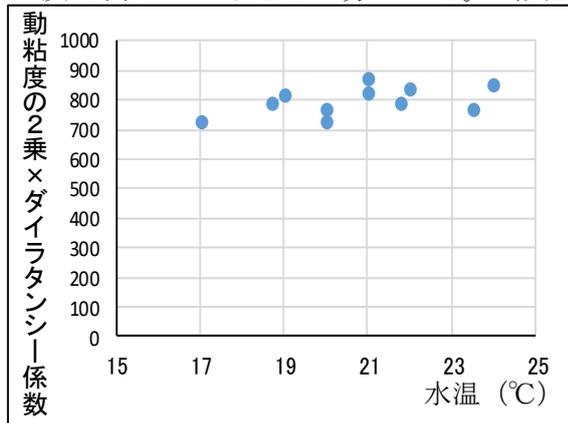


図 12 水温と動粘度の二乗×ダイラタンシー係数の関係を示したグラフ

〈実験Ⅱ-2A〉

ダイラタント流体をかきまぜた後、流体中の
粉は容器の底に堆積する。この振動現象は容器
の底に堆積した片栗粉の粒子によるダイラタ
ンシー現象によるものであると考えられる。

〈実験Ⅱ-2B〉

単振動を起こす抵抗力は、ダイラタント流体の
うち、底で堆積している一部が発生させるため、
必要量以上の片栗粉があってもダイラタンシー係
数は変化しない。その結果、周期が変化しなかつ
たと考えた。

7 結論

運動方程式より

$$Df = \text{抵抗力とすると}$$

$$Ma = mg - Df$$

$$Df = D_1 v_{av} + D_2 X$$

$$Ma = mg - D_1 v_{av} - D_2 X$$

$$Ma = -D_2 X \quad mg = D_1 v_{av}$$

m : おもり A の質量
M : 総質量
X : V_{av} からの速度差
V_{av} : 平均速度

先行研究(※1)より平均速度とおもりAの質量は比例する。
よって平均速度に比例する抵抗力とおもりAの重力の大き
さは等しい。(mg=D₁V_{av}) 今研究のDは、D₂を表す。

図 13

本研究では、ダイラタンシー現象を定量化す
ることを目的とした。台車を一定の力で引いた
とき、台車は周期的に加速と減速を繰り返した。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{D}}$$

この振動の周期 T は、
当てはまった。ここから、ダイラタンシー現象
によって発生する抵抗力 Df には、平均速度に
比例する項 (D₁v_{av}) と、平均速度で移動した場
合の変位と実際の変位との差 (X) に比例する
項 (D₂X) が存在することが分かった。(図 13)

周期は、糸につるされたおもりの質量に関係
なく、全体の質量に影響される。

また、液体の温度によって、ダイラタンシー
現象の強さが変化することが分かった。水の動
粘度は、水温に関係するので、ダイラタンシー
係数が大きくなったのは、水の動粘度に関係す
る。ダイラタンシー係数と動粘度の二乗の積が
一定になったことから、ダイラタンシー係数は
動粘度の二乗に反比例している。ここから、ダ
イラタント流体中に含まれる液体の動粘度が
小さいほど、強いダイラタンシー現象が起こっ
ていると考えられる。

私たちの研究では粘度を示す図 1 と異なる
ダイラタンシー現象の強さを表すグラフが示
された。図 3-3 の式は成り立つことを確かめ、
ダイラタンシー現象の性質がダイラタンシー
係数を使って示されたので、私たちは図 1 とは
異なった見方で、ダイラタンシー現象を定量的
に観測することができた。

8 参考文献

※1

岩井一輝, ダイラタンシー現象における力と
速度の関係, 千葉県立船橋高等学校理数科 3 年課
題研究 2016 年, 107~110, 2016