

おん

こ

ち

しん

on

固

散

浸

～固体の上で繰り広げられる液体のドラマ～

川崎市立川崎高校 3年

青木尊 坂本千枝 真田碧 刀禰真  
平田みづ来 棕田瑞希 村松里桜

## 研究動機

ミルククラウン(液体を液体に落とす)現象のうち、**飛び散り**の様子が気になった。  
そこで、より身近で頻繁に起きる**液体を固体(紙面)に落とす**現象について  
「飛び散り」を観察する。

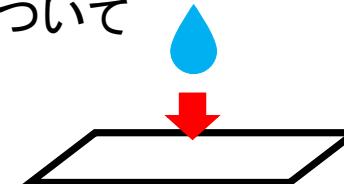


図1 液体を紙面に落としている様子

## 研究目的

本研究では、飛び散りの跡のことを**落下痕**と定義し、次の2つのことを探明する。

1. 滴下する条件(1滴の質量や衝突速度)を変えると、落下痕にどのような変化  
(面積・トゲの有無や数・飛びの有無や数)が見られるのか。
2. 滴下された水滴はどのような変遷をたどって落下痕となるのか。

## 研究構造

図2 飛び散りの跡(落下痕)



研究1 1滴の質量と人為誤差

研究2 衝突物の条件と衝突した速度

研究3 液体はどこまで突き進むのか

研究4

落下痕の規則性

〈条件〉

- ・滴下する質量
- ・落下高度

研究5

落下痕の規則性

〈条件〉

- ・滴下する質量
- ・衝突速度

研究6

飛びの規則性

研究7

落下痕のでき方

トゲ

飛び

総合的  
考察

## 研究概要・目次

- ・表紙
- ・研究動機、研究目的、研究構造

0  
1

研究NO.	研究テーマ	調査目的	研究結果	P.												
研究0	研究を始めるにあたって			2												
研究1	1滴の質量と人為誤差	① 1滴の質量の計測 ② 滴下装置による人為誤差の減少 ③ 滴下装置を用いた1滴の質量の計測	滴下装置によって人為誤差は減少する	6 11 16												
研究2	衝突物の条件と落下速度	衝突速度と滴下条件の関係の明瞭化	速度増加の鍵は質量と時間 調査高度において終端速度には達しない	21												
研究3	落下する液体の貫入深度	落下痕の形状や浸透の規則性の明瞭化	インクの浸透は紙の断面に対してカブ型	27												
研究4	落下痕の規則性	落下痕の規則性の有無を解明 ○: 1次関数的に増加 △: 1次関数的増加と因果関係なしの共存 ×: 因果関係が見られない	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>面積</th> <th>トゲの数</th> <th>トゲの長さ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1滴の質量</td> <td>○</td> <td>×</td> <td>記録なし</td> </tr> <tr> <td>高さ</td> <td>○</td> <td>○</td> <td>△</td> </tr> </tbody> </table>		面積	トゲの数	トゲの長さ	1滴の質量	○	×	記録なし	高さ	○	○	△	36
	面積	トゲの数	トゲの長さ													
1滴の質量	○	×	記録なし													
高さ	○	○	△													
研究5	落下痕の規則性	落下痕の特徴の規則性の有無を解明 ○: 増加量が減少し、増加に限界がない △: 増加量が減少し、増加に限界がある ×: 変化なし	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>面積</th> <th>トゲの数</th> <th>トゲの長さ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1滴の質量</td> <td>△</td> <td>△</td> <td>×</td> </tr> <tr> <td>衝突速度</td> <td>○</td> <td>×</td> <td>×</td> </tr> </tbody> </table>		面積	トゲの数	トゲの長さ	1滴の質量	△	△	×	衝突速度	○	×	×	52
	面積	トゲの数	トゲの長さ													
1滴の質量	△	△	×													
衝突速度	○	×	×													
研究6	飛びの規則性	落下条件と飛びの範囲の関係性の解明 ○: 1次関数的に増加 ◎: 1次関数的増加から指數関数的減少	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>飛びの数</th> <th>飛びの飛距離</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1滴の質量</td> <td>○</td> <td>◎</td> </tr> <tr> <td>衝突速度</td> <td>○</td> <td>◎</td> </tr> </tbody> </table>		飛びの数	飛びの飛距離	1滴の質量	○	◎	衝突速度	○	◎	64			
	飛びの数	飛びの飛距離														
1滴の質量	○	◎														
衝突速度	○	◎														
研究7	落下痕のでき方	トゲや飛びのでき方の解明	ミルククラウンがのびーて、離れーてできる	71												
最終考察	総合的考察	衝突速度と「トゲの数」「飛びの数」の関係 落下中の水滴の形状変化 衝突速度と浸透深度の関係 衝突速度と飛びの放出角度の関係	「トゲの増加」から「飛びの増加」へ 水滴は「カブ型」→「楕円形」→「雲型」と変化 落下痕の浸透深度はだんだん浅くなる 横から見た飛びの角度は45°に近づく	77												



2023年度  
2024年度

## 研究動機

ミルククラウンを見たときに、物質や高さなどの条件を変えると、その形状がどうなるのか疑問に思った。ここから、物質が物質上に落下したときにどうなるのかということを研究することにした。

## 研究目的

物質を落としたときにどうなるか、またそれが条件によってどう変わるのかを明らかにする。

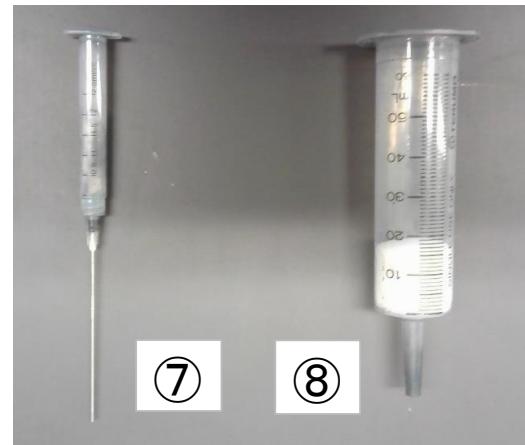
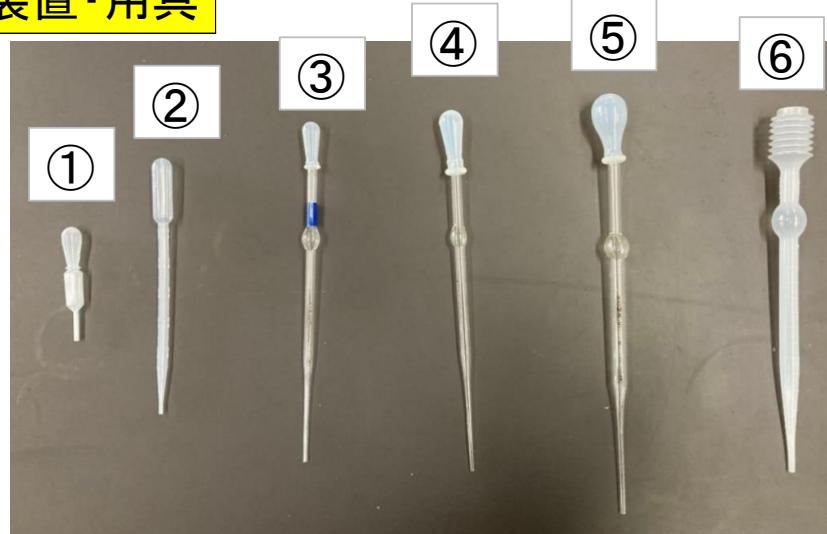
## 研究構造

衝突物と被衝突物を液体と固体でそれぞれ変える。

	衝突物	被衝突物	どうなると考えられるか	
ステージ1	液体	固体	衝突物→跳ねる	← 今回の研究
ステージ2	液体	液体	衝突物、被衝突物→跳ねる	
ステージ3	固体	固体	衝突物→弾む 被衝突物→凹む	
ステージ4	固体	液体	衝突物→沈む 被衝突物→跳ねる	

・ステージ1からしていく。今回の研究では、ステージ1を研究した。

## 装置・用具



スポット名	内径
①ポリ2mlスポット	1.3mm
②ポリ5mlスポット	2.1mm
③ガラス1mlスポット	1.6mm
④ガラス2mlスポット	1.9mm
⑤ガラス5mlスポット	3.2mm
⑥ポリ10mlスポット	4.3mm
⑦注射器小(C小)	0.7mm
⑧注射器大(C大)	4.4mm

⑨メスシリンダー

⑩電子天秤

0—②—3

## 装置・用具



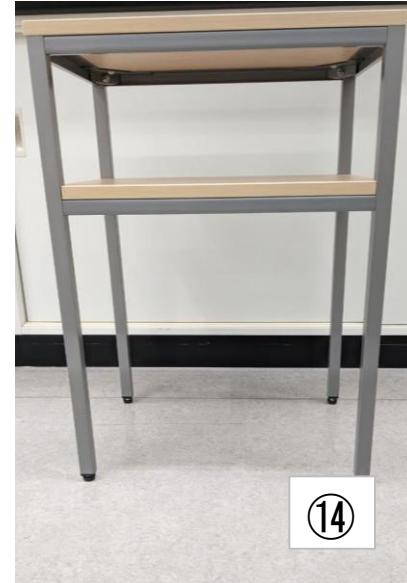
⑪



⑫



⑬



⑭



⑮



⑯



⑰

- ⑪滴下装置(割りばし、ゴム、ひも)  
⑫カウンター ⑯メジャー(5.5m)  
⑬机(1) ⑰ストロボ(+紙)  
⑭机(2)

0—③—4

## 装置・用具



- ⑯ 半紙  
⑯ 厚紙  
⑯ 画用紙  
⑯ コピー用紙  
⑯ 再生紙  
⑯ カメラ  
⑯ インク水(1:9) 滴下試料  
⑯ インク水(2:3) //

0—④—5

## 研究1-1

## スポットによる滴下質量の誤差

青木・大西・小澤・坂本  
佐々木・真田・刀禰  
平田・村松・棕田

スポット(口径)による器具誤差や人による人為誤差がある!?

### 研究動機

今後、水滴を落とす実験をするにあたって、1滴の質量の精度が重要だと考えたため、試験することにした。

### 研究目的

1. 使用スポットの容量(口径)ごとの1滴の質量を求める。
2. スポットと1滴の質量の関係性を明らかにする。

### 研究仮説

1. 1滴の質量を測ることは難しいので、100滴分を100で割ることで1滴の質量がより正確に求まる。また、1回では正しい数値として採用することができないため、複数人の平均を求める。
2. スポットは口径、容量などが違うため、口径が大きく、容量が多いスポットほど1滴の質量が大きくなる。
3. スポットは口径や容量、材質などが違うため、同じ条件(滴下する水量)で実験をすると、人為的な誤差が出やすいスポットと出にくいスポットがでる。

**実験目的**

1. 水滴の1滴の質量をより正確に求める。
2. スポイトごとの違いを見つけ、実験に対する適性を確認する。

**実験条件**

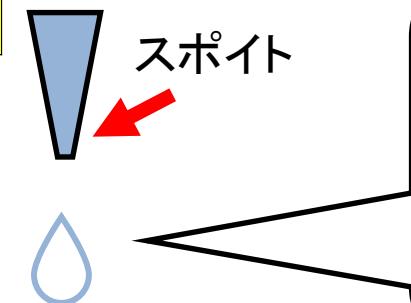
固定条件: 滴下数(100滴)、滴下物(水道水)

可変条件: スポイトの種類

(ポリ2ml、ガラス1ml、ガラス2ml、ガラス5ml、ポリ10ml)

**装置・用具**

- ・ポリスポイト(2ml、10ml)
- ・ガラススポイト(1ml、2ml、5ml)
- ・ビーカー
- ・ガムテープ
- ・メスシリンダー
- ・電子天秤
- ・カウンター

**実験操作**

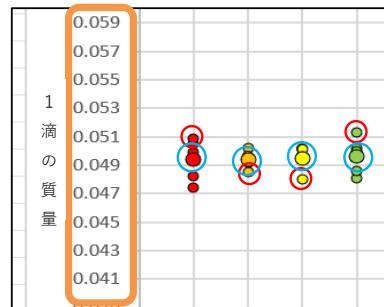
1. 水滴をメスシリンダーに100滴入れる。  
(カウンターで数える。)
2. 1の状態の質量からメスシリンダーの質量を引く。
3. それを100で割り、1滴の質量を出す。
4. 1~3を1人5回行い、平均を出す。

**〈補足-精度について〉**

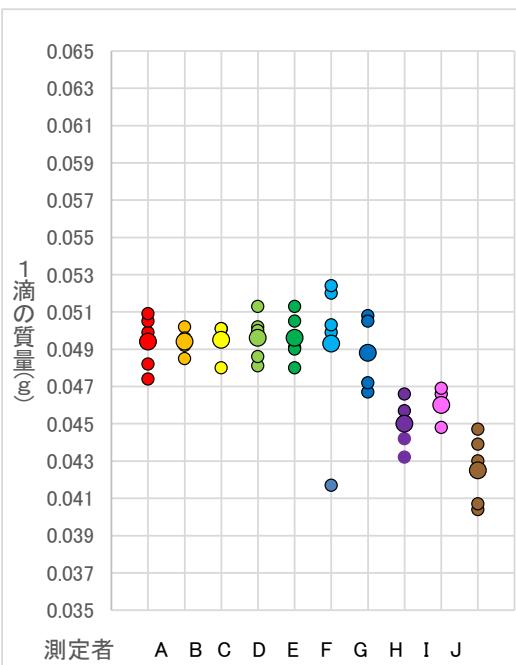
・2のとき、電子天秤を使っている。このとき、小数第3位までを有効数字として扱った。求めた値を100で割り、小数第5位を四捨五入したため、結果では小数第4位までとなっている。

図1 実験モデル図

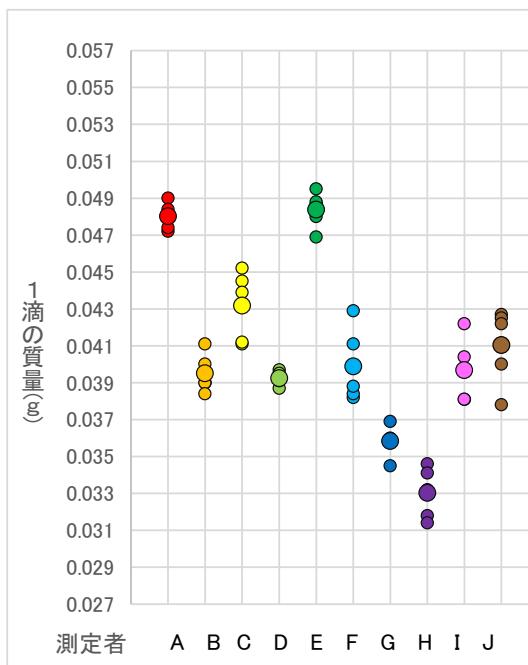
## 実験結果



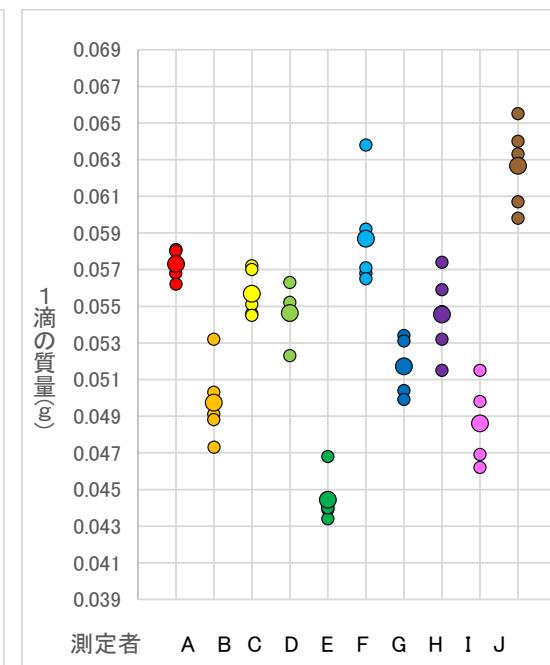
- 小円: 1回の実験で求めた質量
- 大円: 5回行って求めた質量の平均
- 目盛り間隔の幅0.002g、最小値から最大値まで0.030g
- ※グラフ4: データが目盛りの最大値より上にある。



グラフ1  
ポリ2mLスポットの人為誤差

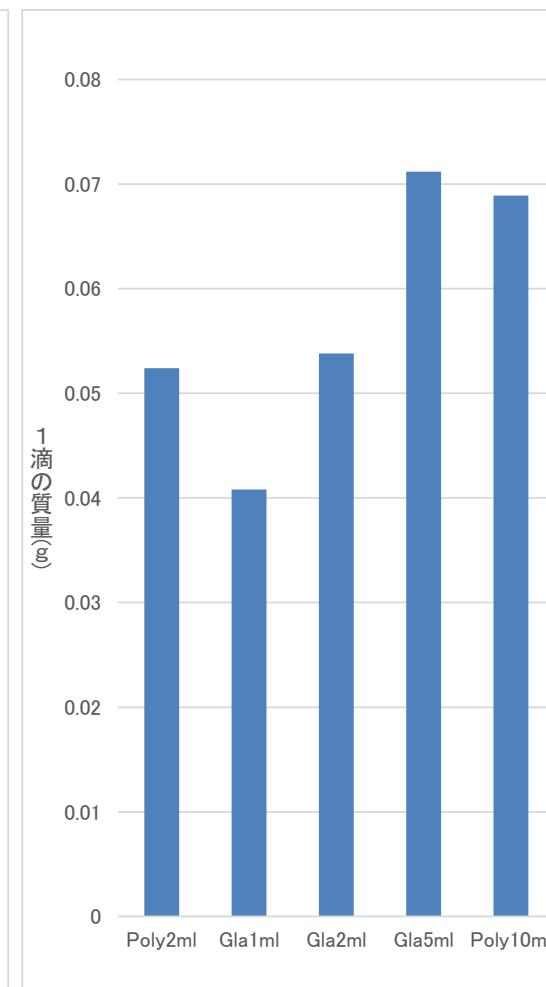
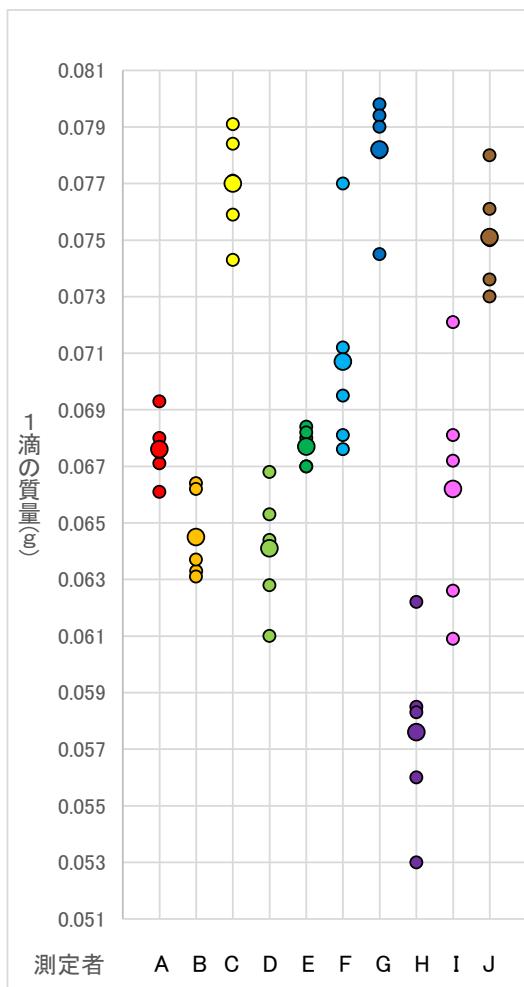
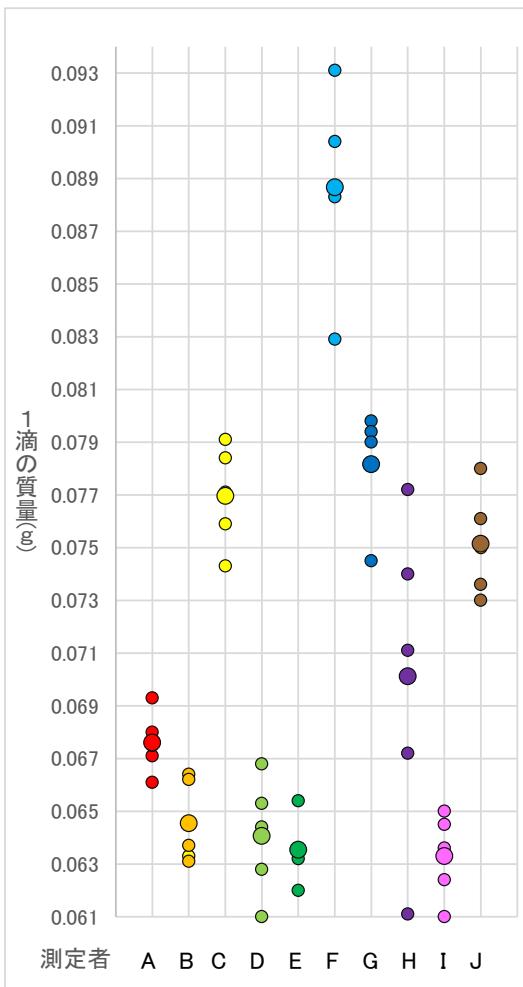


グラフ2  
ガラス1mLスポットの人為誤差



グラフ3  
ガラス2mLスポットの人為誤差

## 実験結果



1—④—9

## 実験結果

1. ポリ2mlスポットでは、人為誤差が少なかった。  
これに対して、他のスポットでは、人為誤差が大きく出ていた。
2. ガラススポット(1ml、2ml、5ml)の3つでは  
仮説通りに容量(口径)に応じて質量が増加した。
3. ポリスポット(2ml、10ml)の2つでは  
仮説通りに容量(口径)に応じて質量が増加した。

## 考察

1. 人為誤差が生じたのは、人それぞれの押す強さが違うため。
2. 1滴の質量は、ガラスとガラス、ポリとポリなど、同じ材質同士の  
中で口径が大きく容量が多いものほど多くなる。

## 結論

1. 手押しによる実験は、人為誤差が大きく、採用できない。
2. 口径が大きく、容量が多いスポットほど、1滴の質量が多い。
3. スポットの材質によって、1滴の質量に差が生じる。

## 課題

人為誤差がある中で、そのデータを使ってもいいのか？

これらのこと踏まえて、人為誤差がより少なくなるように、  
滴下装置を作って、実験を再試行することにした。

## 研究1-2

# 滴下装置による人為誤差の減少

青木・大西・小澤・坂本  
佐々木・真田・刀禰  
服部・平田・村松・椋田

滴下装置は人の手よりも、より正確である!?

### 研究動機

1-1では人の手で実験を行い、数値に差が出てしまった。その人為誤差を少なくするために、滴下装置を用いて実験することにした。

### 研究目的

1. 滴下装置を用いた場合、人の手で行ったときよりも、人為誤差が少なくなるのか明らかにする。
2. 1-1と同じように、スポットの容量や口径と1滴の質量の関係性を明らかにする。

### 研究仮説

滴下装置は、人の手で押すときよりも人の影響を受けにくいため、  
滴下装置を使うと、人同士の数値の差が少なくなる。

※具体的には、データの最小値と最大値の範囲を比べたり、グラフを客観的に見たときに、横に密集しているかを見たりする。

### 実験目的

1. 滴下装置を用いて、1滴の質量を正確に求める。
2. 滴下装置を用いたときのスポットごとの違いを調べる。

## 実験条件

固定条件:滴下数(100滴)、滴下物(水道水)

可変条件:スポットの種類

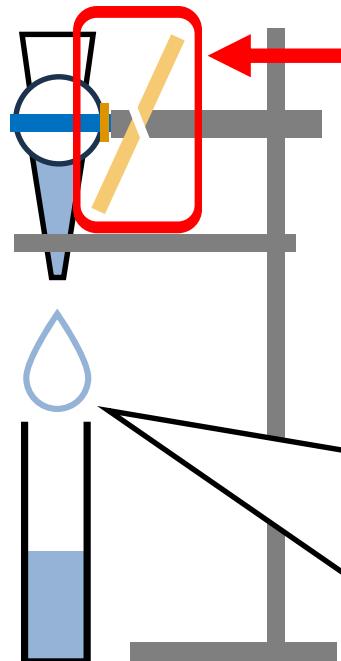
(ポリ2ml、ポリ5ml、ガラス1ml、ガラス2ml、ガラス5ml)

※滴下装置では、ポリ10mlが使えないため、ポリ5mlを使うこととする。

## 装置・用具

- ・ポリスポット(2ml、5ml)
- ・ガラススポット(1ml、2ml、5ml)
- ・ビーカー
- ・ガムテープ
- ・メスシリンダー
- ・電子天秤
- ・カウンター
- ・滴下装置

## 実験操作

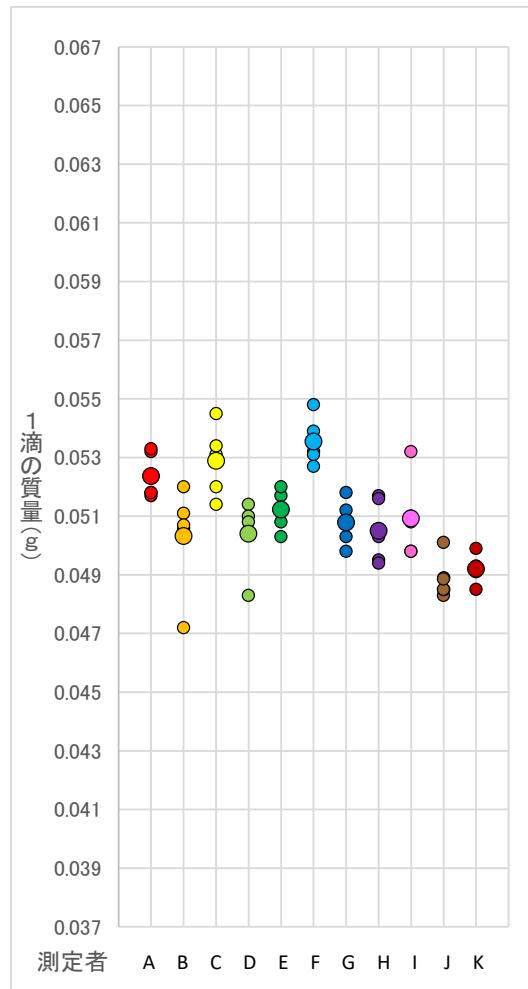


- ・割りばしをひもでとめ、その割りばしを回すことで  
スポットが押され、水が出る仕組み。
- ・ゴムは、スポットを強く挟むためにつけた。

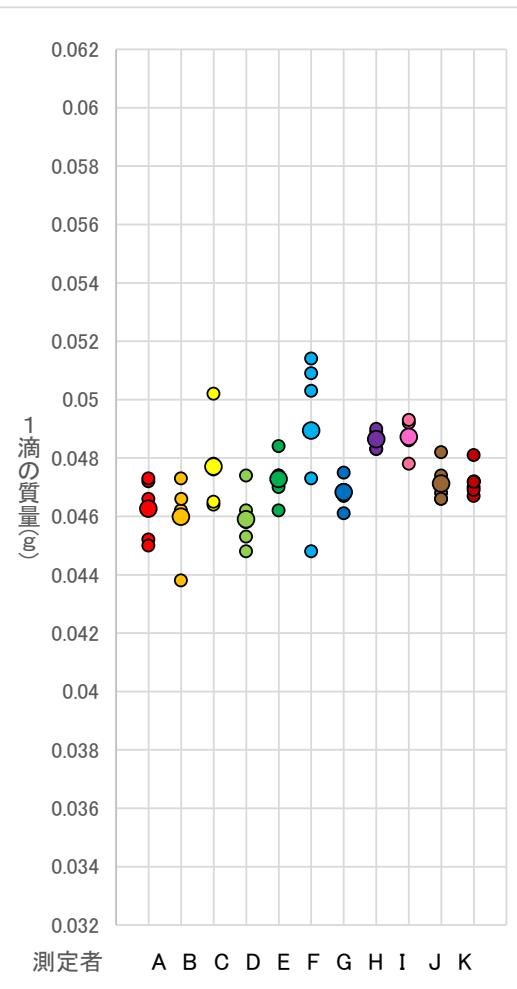
1. 水滴をメスシリンダーに100滴入れる。  
(カウンターで数える。)  
※1-1では、手押しで行っていたものを、1-2では  
滴下装置を用いて行う。
2. 1の状態の質量からメスシリンダーの質量を引く。
3. それを100で割り、1滴の質量を出す。
4. 1～3を1人5回行い、平均を出す。

図1 実験モデル図(滴下装置)

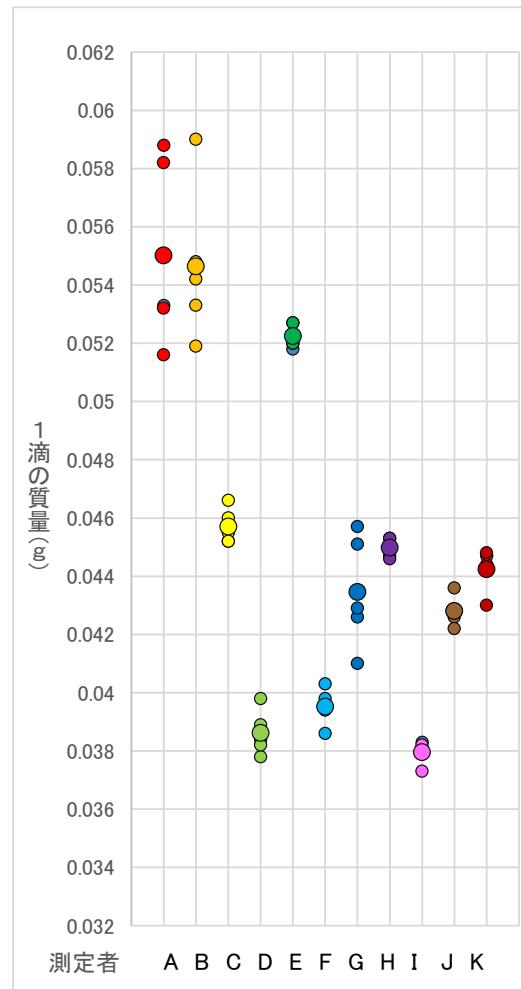
## 実験結果



グラフ1  
ポリ2mlスポットの人為誤差



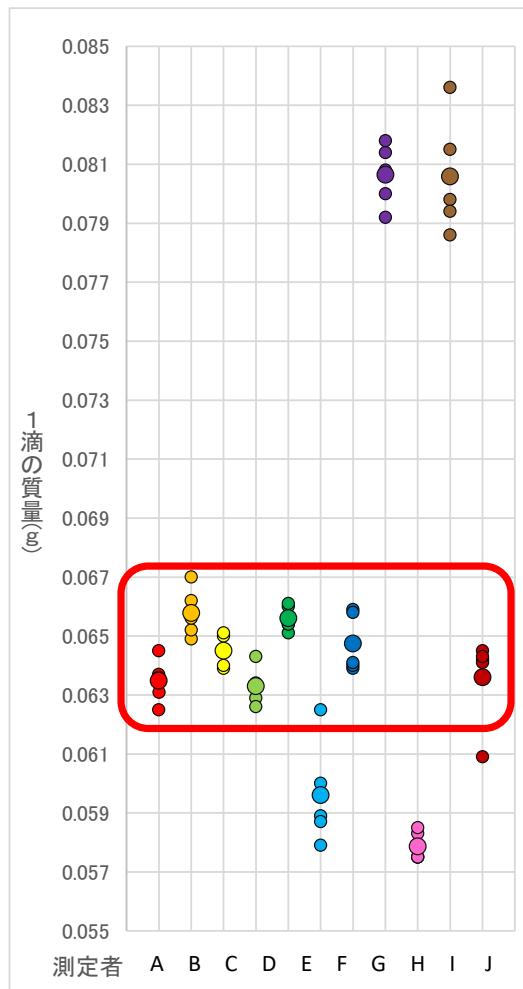
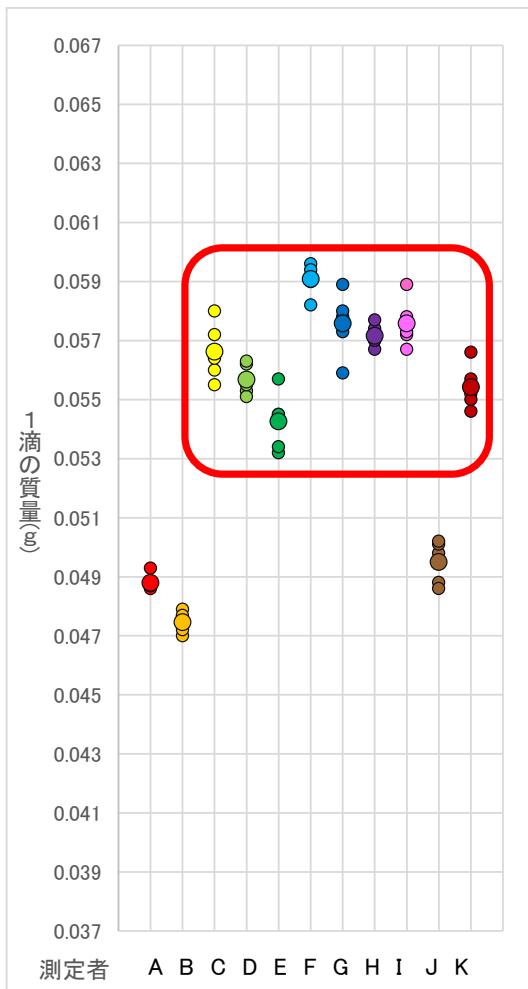
グラフ2  
ポリ5mlスポットの人為誤差



グラフ3  
ガラス1mlスポットの人為誤差

1—⑧—13

## 実験結果



1. ポリスポットでは、2ml、5mlともに人為誤差が少なくなっている。
2. ガラススポットでは、手押しでは少なかった□のように、データが横一直線上に集まるところが増えている。
3. 少しの誤差はあるが、個人内での誤差や、人為誤差は手押しよりも少なくなっている。

## 考察

1. 手押しのときと、滴下装置を用いたときの格差を比べてみると、

格差が小さい方	測定最大値－測定最小値＝格差		
	手押し(1-1)	滴下装置(1-2)	
ポリ2mlスポット	0.0404-0.0524 格差0.0120	0.0472-0.0548 格差0.0076	滴下装置優
ポリ5mlスポット	データなし	0.0438-0.0514 格差0.0076	
ガラス1mlスポット	0.0314-0.0495 格差0.0181	0.0373-0.0590 格差0.0217	手押し優
ガラス2mlスポット	0.0434-0.0655 格差0.0221	0.0470-0.0596 格差0.0126	滴下装置優
ガラス5mlスポット	0.0610-0.0931 格差0.0321	0.0575-0.0836 格差0.0261	滴下装置優

この中で、ガラス1mlスポット以外、滴下装置を用いたときのほうが格差が少ないため、滴下装置のほうがより正確といえる。

- 滴下装置を用いたときのグラフのほうが、横一直線上にデータが多いことからも、滴下装置を用いたときのほうが正確といえる。
- 割りばしを回す力の個人差があるため、人為誤差は滴下装置を用いていても出てしまうと考えられる。

## 結論

手押しそりもスタンドを用いたときのほうが格差がない。  
⇒質量のデータは、滴下装置を用いたときのデータを使う。

研究1-3	スポットによる1滴の質量の違い	青木・大西・小澤・坂本 佐々木・真田・刀禰・服部 平田・椋田・村松
-------	-----------------	---

スポットによって1滴の質量が違う!?

教訓: 1滴の質量はスポットの容量とは関係ない

**研究動機** 今後、水滴を落とす実験をするにあたって、1滴の質量が重要であると考えたため、1滴の質量を求めるにした。

**研究目的** 口径の異なるポリ2mlスポット、ポリ5mlスポット、ガラス1mlスポット、ガラス2mlスポット、ガラス5mlスポットの1滴の質量を求める。

**研究仮説** それぞれのスポットは口径が違うため、  
口径が大きいと1滴の質量も多くなる。

**実験目的** 1滴の質量をより正確に(少なくとも0.001gレベルで)求める。

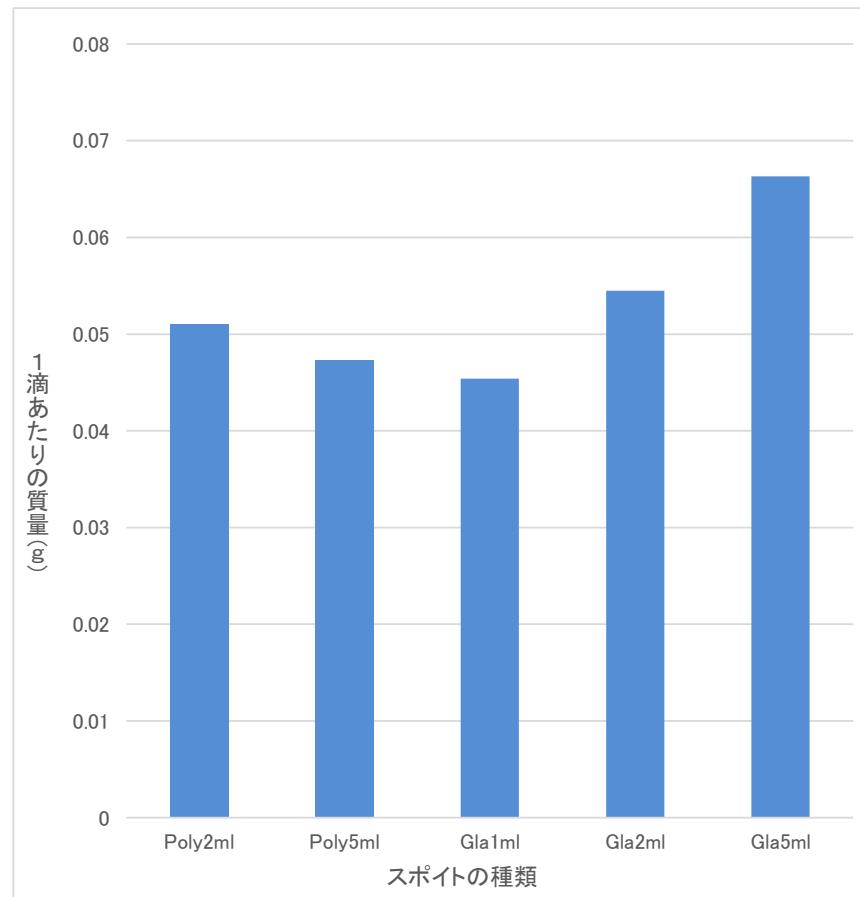
**実験条件** 装置・用具 **実験操作** 研究1-2と同様。

## 実験結果

表1.グラフ1-滴下装置でのスポットごとの1滴の質量の平均

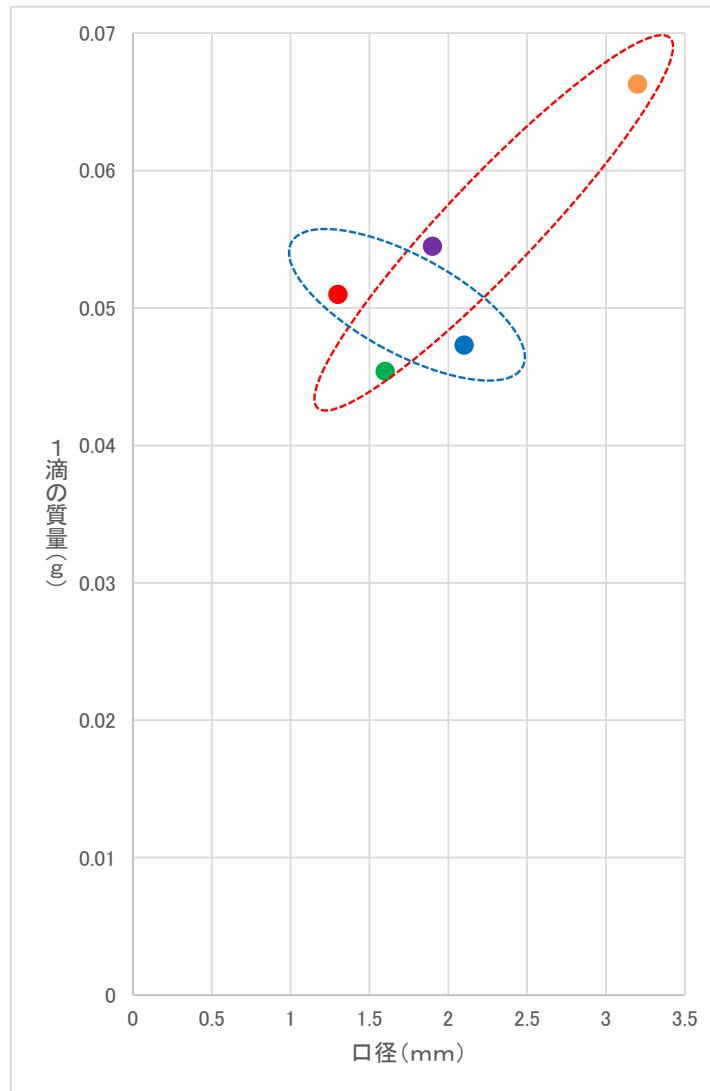
表1

測定者	測定器具				
	Poly2ml	Poly5ml	Gla1ml	Gla2ml	Gla5ml
A	0.0524	0.0463	0.0550	0.0488	0.0635
B	0.0503	0.0460	0.0546	0.0475	0.0658
C	0.0529	0.0477	0.0457	0.0566	0.0645
D	0.0504	0.0459	0.0386	0.0557	0.0633
E	0.0512	0.0473	0.0522	0.0543	0.0656
F	0.0535	0.0489	0.0395	0.0591	0.0596
G	0.0508	0.0468	0.0435	0.0576	0.0647
H	0.0505	0.0486	0.0450	0.0572	0.0806
I	0.0509	0.0487	0.0380	0.0576	0.0579
J	0.0489	0.0471	0.0428	0.0495	0.0806
K	0.0492	0.0472	0.0442	0.0554	0.0636
平均	0.0510	0.0473	0.0454	0.0545	0.0663



## 実験結果

### グラフ2-スポットごとの口径と1滴の質量

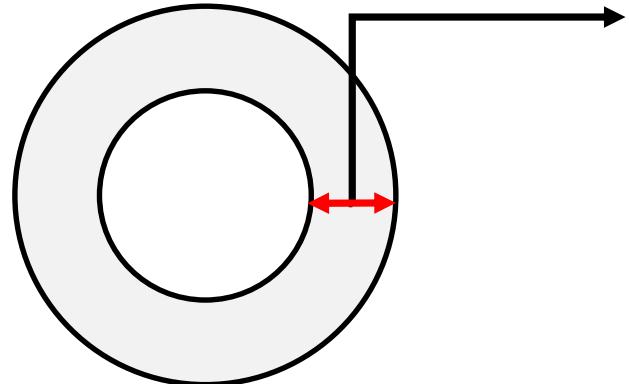


口径(mm)	1滴の質量(g)
ポリ2mlスポット	1.3
ポリ5mlスポット	2.1
ガラス1mlスポット	1.6
ガラス2mlスポット	1.9
ガラス5mlスポット	3.2

- 1 グラフ1、2より、ガラススポットは、口径が大きくなるごとに1滴の質量が増加している。
- 2 グラフ1、2より、ポリスポットでは、口径は質量に関係性がない。
- 3 グラフ1、2より、ガラススポットは、測定器具としてポリスポットより優秀である。

## 考察

表2-スポットごとの口の縁の厚み



	口の太さ(mm)
ポリ2mlスポット	0.9
ポリ5mlスポット	0.5
ガラス1mlスポット	0.2
ガラス2mlスポット	0.3
ガラス5mlスポット	0.5

- 1 ガラススポットは、仮説通り口径が大きくなると1滴の質量も増えた。
- 2 表2より、ポリ5mlスポットよりもポリ2mlスポットのほうがスポットの口の  
縁の厚みが大きいことがわかる。  
そのため実験結果2は、ポリ2mlスポットには口の縁にポリ5mlスポットよりも  
水滴が長い時間留まり、ポリ2mlスポットのほうが1滴の質量が多くなったと  
考えられる。
- 3 ポリスポットは、口径や縁の厚みを踏まえて、測定器として優秀ではない。

## 結論

- ガラススポットは口径、スポットの口の縁の厚みのいずれかが大きくなると1滴の質量が多くなる。
- ポリスポットはスポットの口の縁の厚みが厚いほど1滴の質量が多くなる。
- 1滴の質量はスポットの容量とは無関係であることが判明したため、この研究以降、スポットの器具の名称を以下のように表記する。

旧スポット名	新スポット名
ポリ2mlスポット	0.051g水滴
ポリ5mlスポット	0.047g水滴
ガラス1mlスポット	0.045g水滴
ガラス2mlスポット	0.054g水滴
ガラス5mlスポット	0.066g水滴

今後、この器具を使用するかどうか検討が必要。

## 課題

- 人による1滴の質量の平均から1滴の平均を出しているため、離れた数値に引っ張られている。(不適切測定値の除去が必要)
- ガラススポットは口径、スポットの口の縁のどちらの条件で1滴の質量が変化しているのかわからない。

研究2

## 衝突物の条件と落下速度の関係

刀禰・大西・小澤

速度増加の鍵は質量と時間!? 終端速度は高度の壁に阻まれる…

研究動機

水滴が落ちて跳ねるとき、水滴がどのように落ちて速度変化していくのか疑問に思ったため、研究しようと考えた。

研究目的

1. 1滴の質量と速度変化の関係を明らかにする。
2. 落下時間と速度変化の関係を明らかにする。

研究仮説

※前提条件: 水滴には鉛直下向きに重力がはたらき、鉛直上向きに空気抵抗がはたらく。

1. 実験条件が自由落下に類似するため、**落下速度は経過時間に伴って増加する**。
2. 実験条件が自由落下に類似するため、**落下速度は質量の増加に伴って増加する**。
3. ある地点で水滴にはたらく重力と空気抵抗の大きさが等しくなり、**落下速度が一定**になる。その速度を終端速度とする。

### 実験目的

1. 水滴の落下時間による落下速度の変化を調べる。
2. 1滴の質量による落下速度の変化を調べる。
3. 水滴の終端速度を求める。

### 実験条件

固定条件: 高度2.0m・衝突物(水道水1滴)

可変条件: 水滴の質量(0.045g・0.047g・0.051g・0.054g・0.066g)の5種類

### 装置・用具

- ・ポリ2mlスポット(0.051g) ・ガラス1mlスポット(0.045g) ・三脚 ・巻尺
- ・ガラス2mlスポット(0.054g) ・ガラス5mlスポット(0.066g) ・カメラ
- ・ポリ5mlスポット(0.047g) ・滴下装置 ・ストロボ ・机(1) ・机(2)

### 実験操作

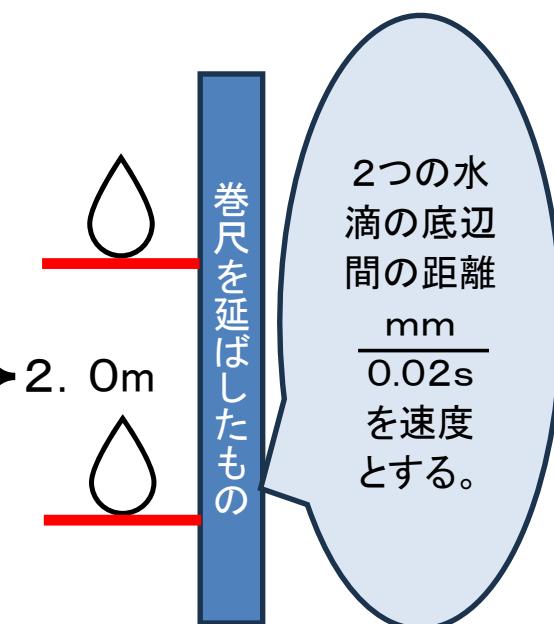
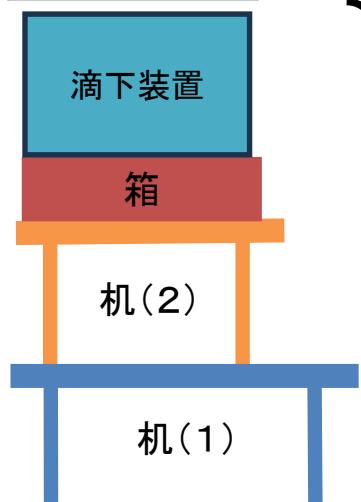
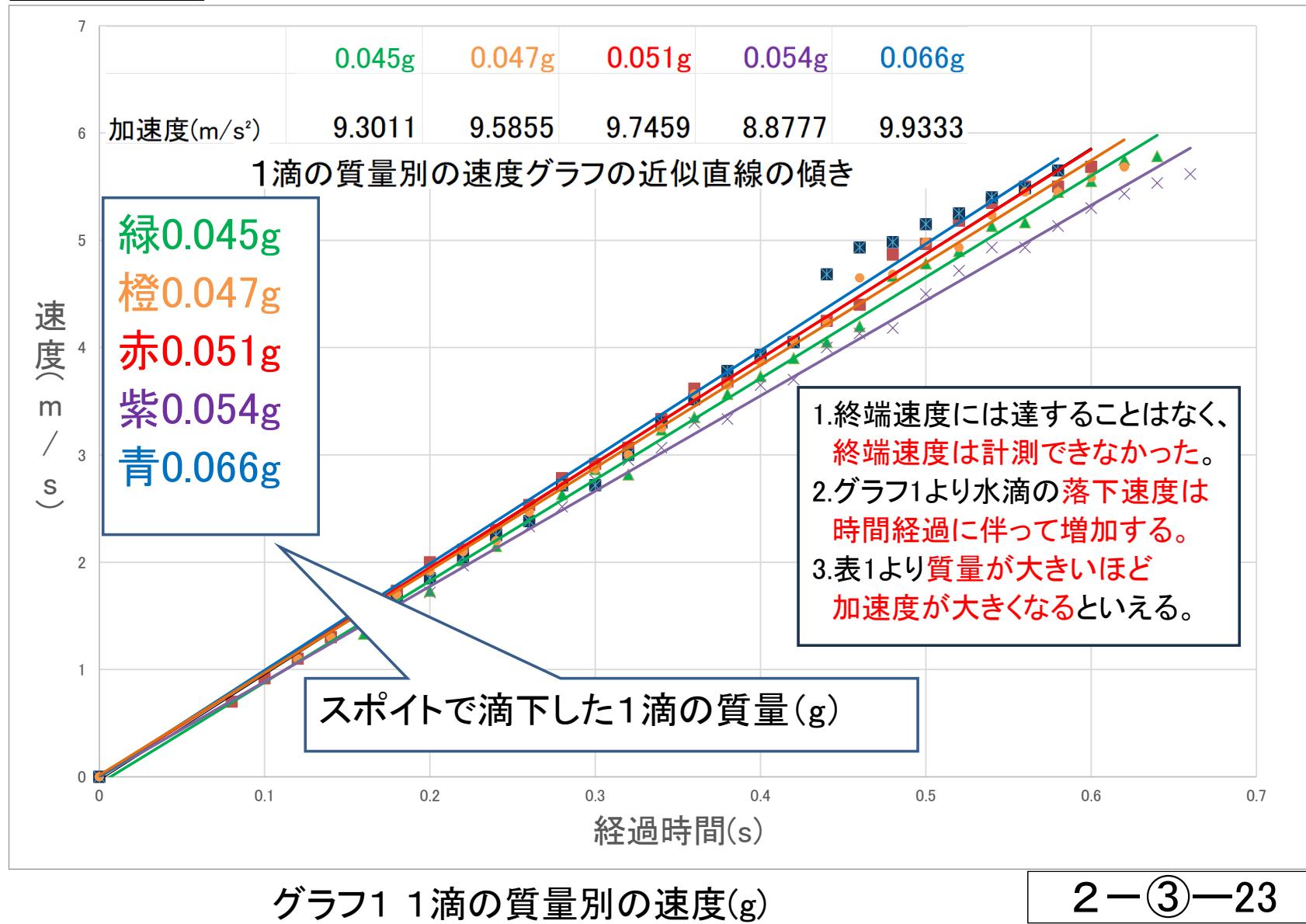


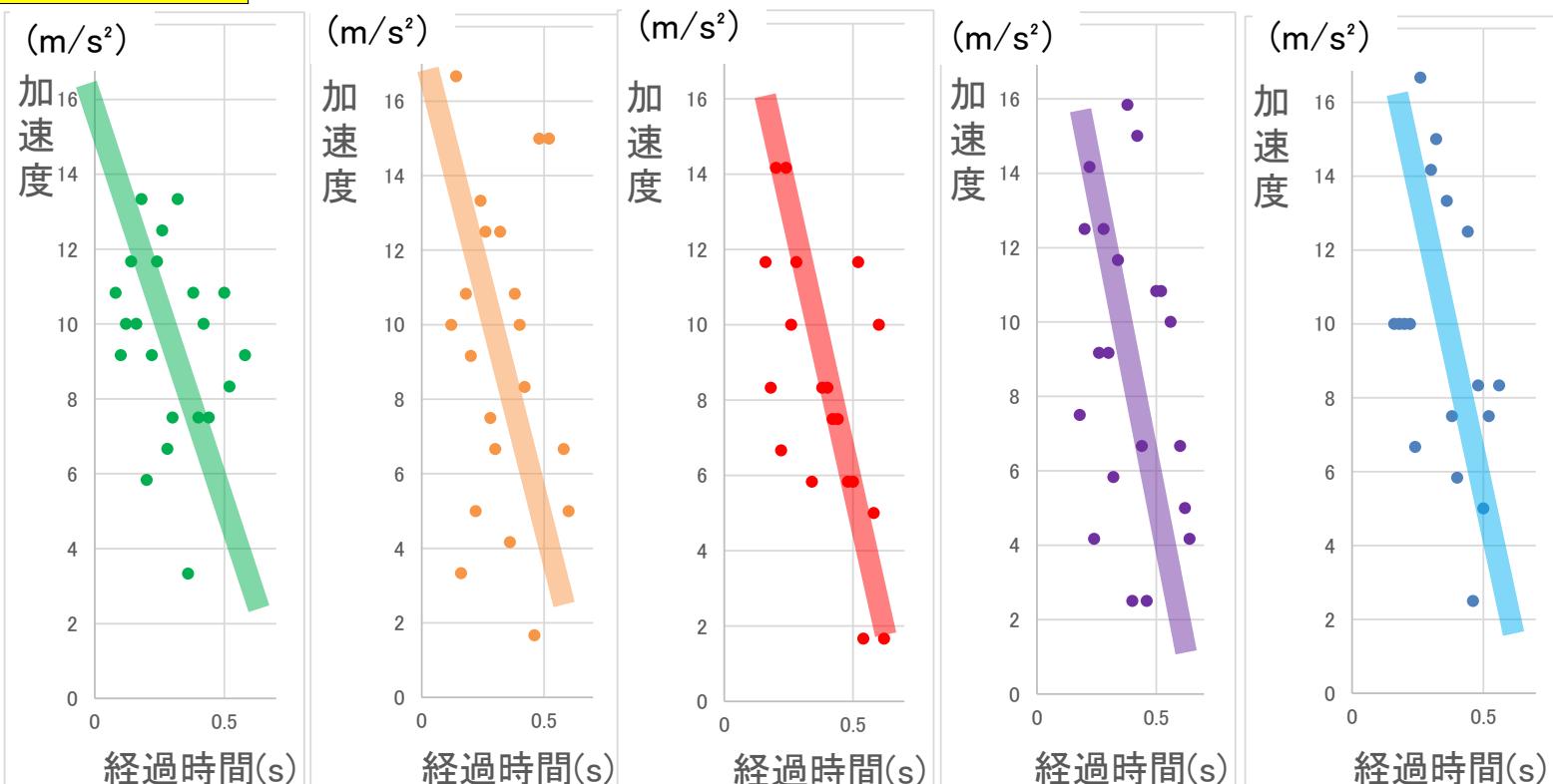
図1 実験装置モデル図 図2 速度測定 説明図

- ①高度2.0mから滴下装置を用いて水滴を垂らし、ストロボを使用して光を1秒間に50回当てる。
- ②光を当てながら水滴が落下している様子を0.5mごとに撮影する。
- ③写真の中の水滴1粒ずつの間の距離を測り、速度を計算する。

## 実験結果



## 実験結果



緑0.045g

橙0.047g

赤0.051g

紫0.054g

青0.066g

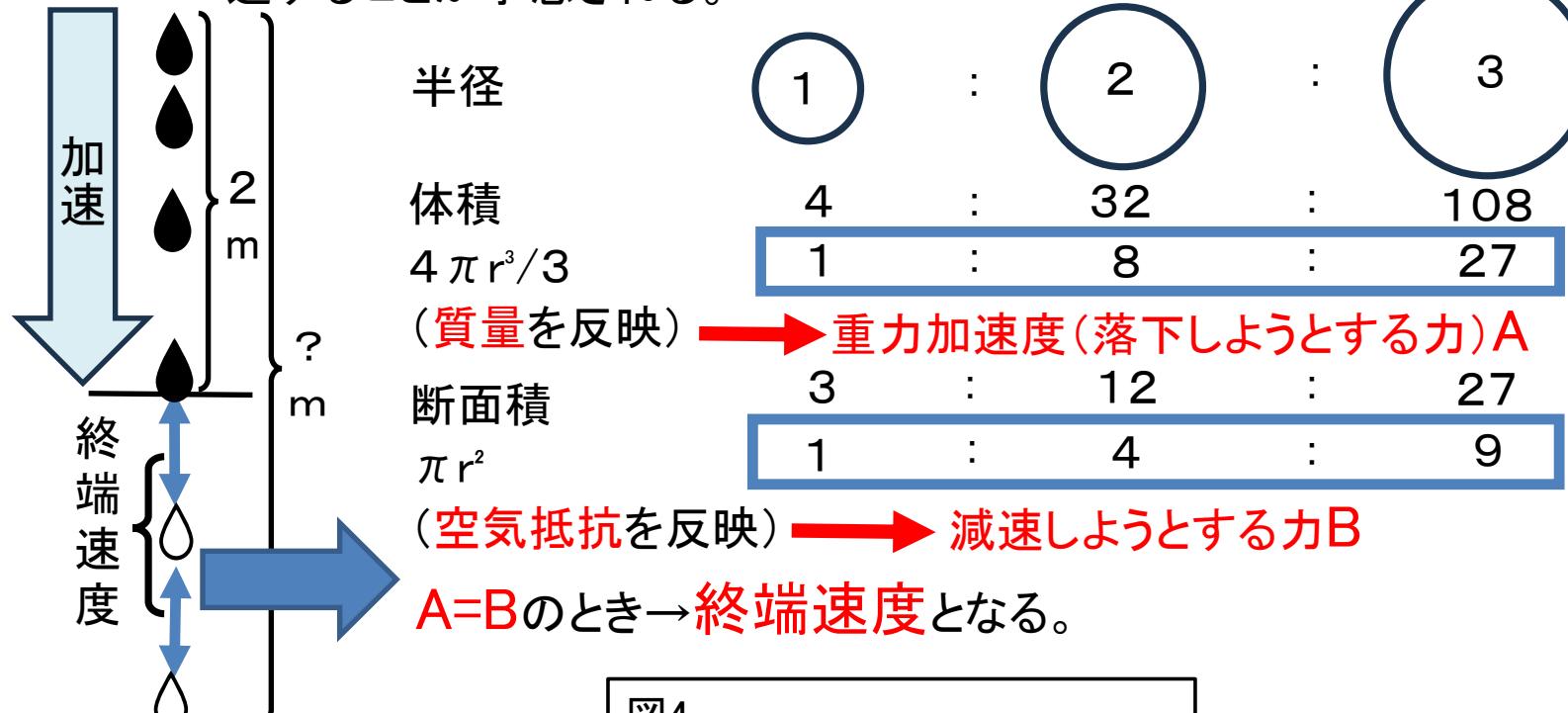
スポットで滴下した水滴の質量(g)

4. グラフ2より加速度が  
時間経過に伴って  
減少するといえる。

グラフ2 水滴の質量別の加速度

考察

1. 今回の実験では計測できなかったが、図3より、空気抵抗が速度とともに増加し、ある時点で加速度と等しくなって、加速しなくなり、**終端速度**を計測することができると考えられる。
2. 落下速度が時間経過に伴って増加しているのは水滴が落下していく、且つ空気抵抗より重力加速度が大きいからだと考えられる。
3. 図4より、小さい水滴のほうが大きい水滴よりも早く終端速度に達することが予想される。



## 結論

- 1.水滴の落下速度は経過時間に伴って増加する。  
(どんどん加速)
- 2.加速度は経過時間に伴って減少している。
- 3.水滴の質量増加に伴って加速度が増加していると  
予想できる。(大きい水滴→重い水滴)はスピードアップ
- 4.ある地点で落下速度が一定になることはなく、  
落下高度2mでは終端速度に達しない。

## 課題

- 1.水滴の落下速度の加速度を(時間、高度、質量)に対する数式化  
①(落下時間と加速度との関係)、②(落下高度と加速度との関係)、  
③(1滴の質量と加速度との関係)
- 2.加速度を調べるには実験の精度が低いため、  
精度の高い実験方法(ストロボの当て方)を考える。
- 3.終端速度の計測をするために落下高度を高くする必要がある。
- 4.空気抵抗が水滴の断面積と比例すると仮定したとき、  
その比例定数が何かを調べる。
- 5.より小さい水滴での実験の実施

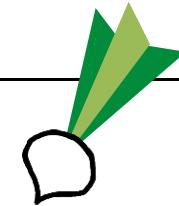
### 研究3

### 液体はどこまで突き進むのか！？

青木  
椋田

速度を変化させて固体への液体浸透を見る

インクの浸透は力ブ型であった！！



#### 研究動機

落下痕の変化が浸透の深度に関連性があるのではないか

と考えられたため研究することにした。

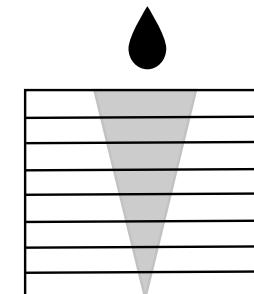
#### 研究目的

インク水の落下速度の変化による、落下痕の大きさと形状や  
浸透の変化(浸透の深度や形状)の関連性を明らかにする。

#### 研究仮説

- 1枚の紙が、落下したインク水の一部を吸収することで  
それを越えてより下層へ進むインク量は減少していく。  
→半紙を2等分した時の側面図形が逆三角形型になる。

図1 インク水が紙に浸透するモデル図



2. インク水の落下速度が速いほど紙に落下した時の衝撃が大きくなり、  
上層部で吸収できるインク水量が減る。  
→落下高度が高いほど衝突速度が上がり、より浸透する。

**実験目的**

インク水を落とす高度を変化させ、衝突した液体の固体に対する  
浸透の仕方の規則性を研究する。

**実験条件**

固定条件: 滴下数(15滴)、滴下試料(インク水[濃度10%])、  
半紙を重ねる枚数(30枚)

可変条件: 落下高度(0.00m、0.50m、1.00m、1.50m、2.00m)

半紙の結果・考察の表示方法は以下の通りにする。

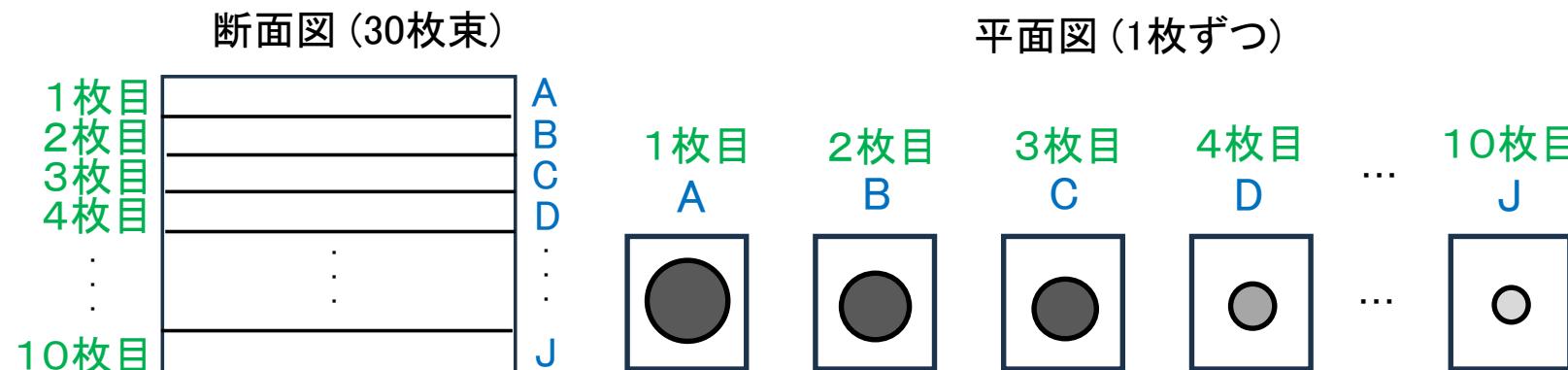


図2 半紙の表示方法

**装置・用具**

滴下装置、インク水(濃度10%)、ビーカー、ものさし(1m)、  
ガラス5mlスポット(1滴の質量:0.066g)、半紙

実験操作

1. 滴下装置にガラス5mlスポット(1滴の質量:0.066g)を設置する。
2. ガラス5mlスポット(1滴の質量:0.066g)の先端と落下地点の距離を調べ、落下高度に合わせる。
3. ガラス5mlスポット(1滴の質量:0.066g)にインク水を吸わせ、半紙に15滴を鉛直下向きに垂らす。
4. 15滴垂らした半紙の1枚ずつ落下痕の形を観察する。

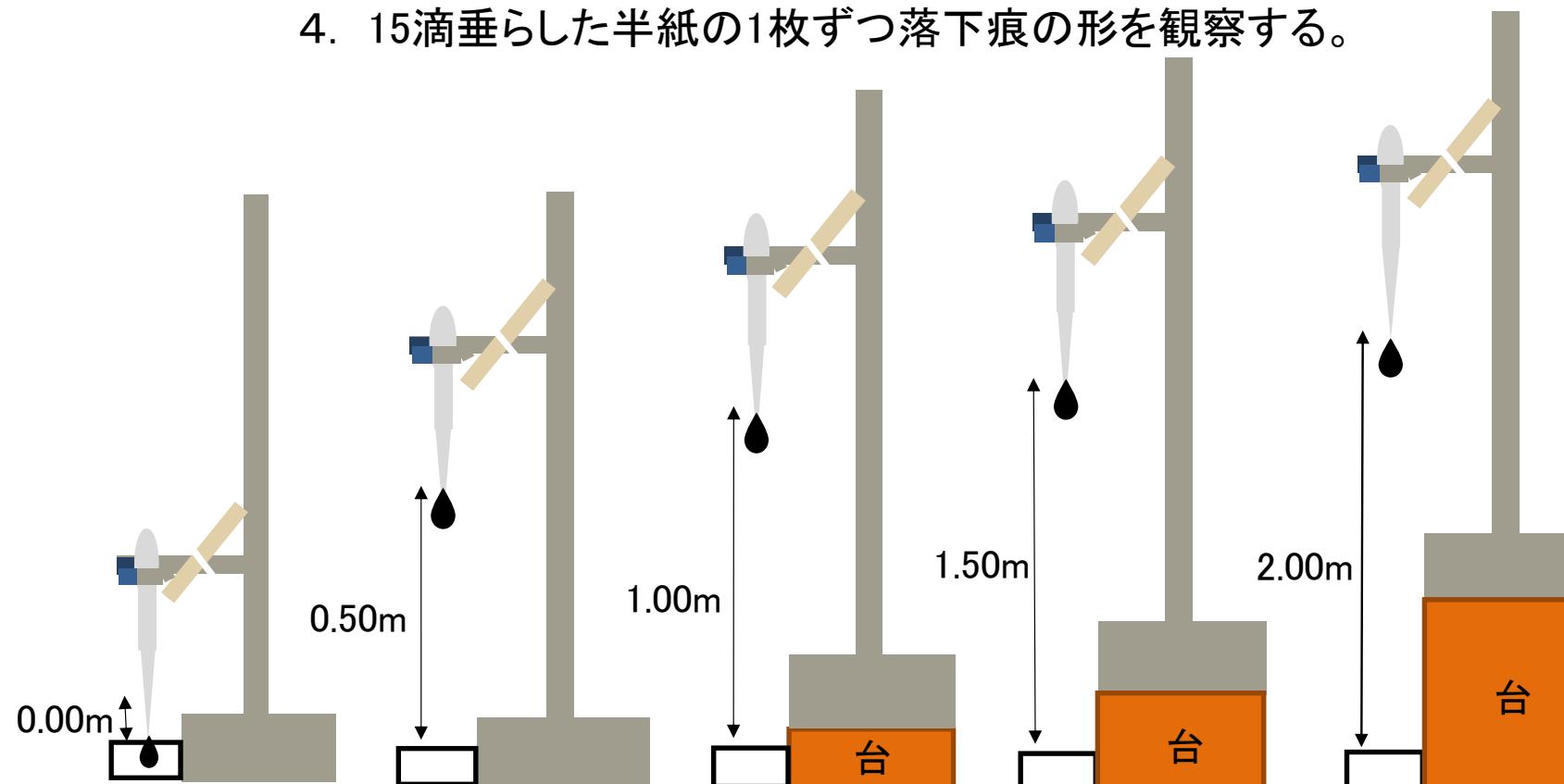
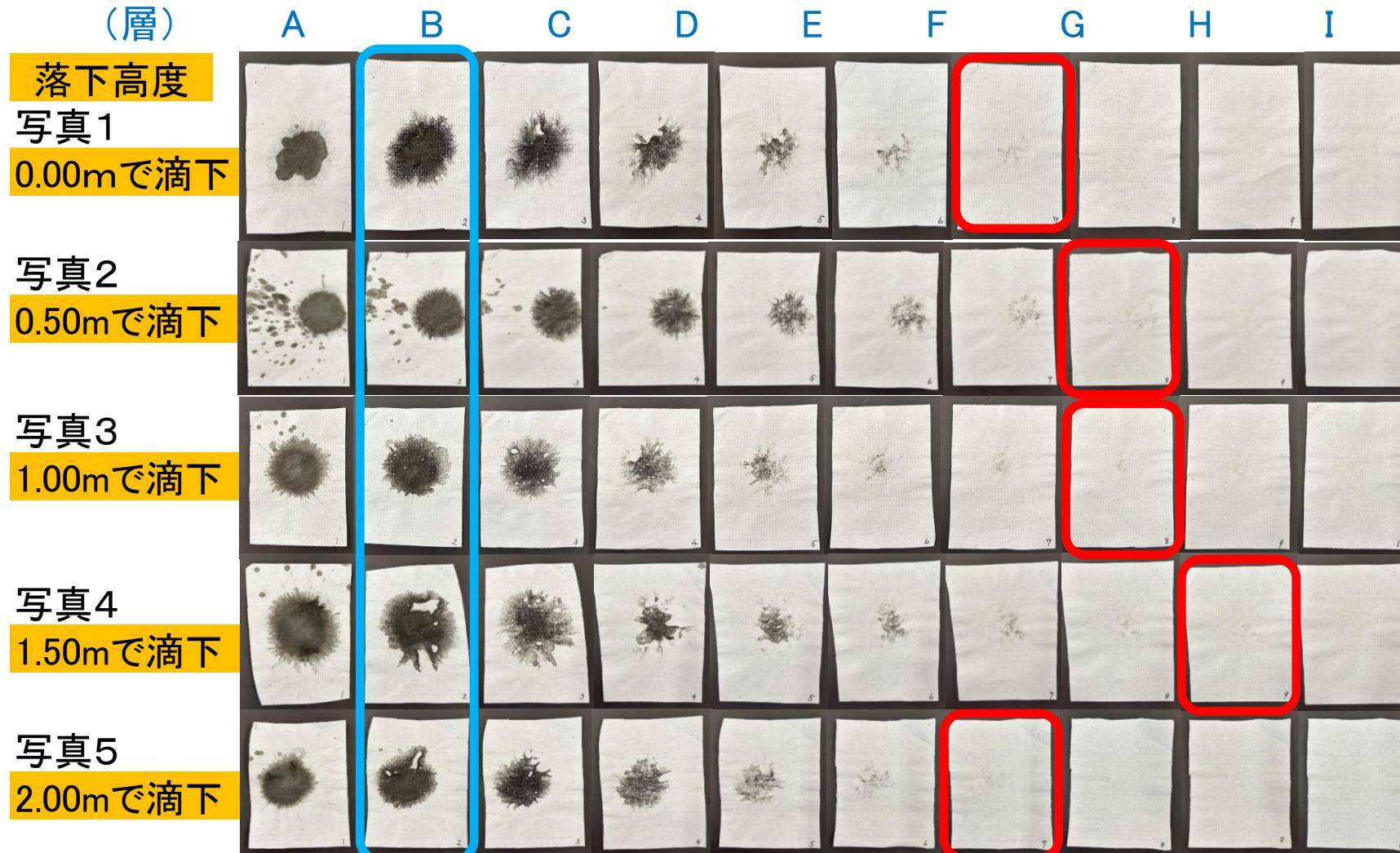


図3 インク水の落下高度を変化させた時のモデル図

## 実験結果

### 高度を変え、インク水を滴下・浸透させた10層の半紙



1. インク最終確認層は0.00mで G、0.50m・1.00mで H、1.50mで I、2.00mで G。
2. インク最濃層は2層目で、どの高度でも変わらない。

## 実験結果

### 表の落下痕く裏の落下痕 という現象

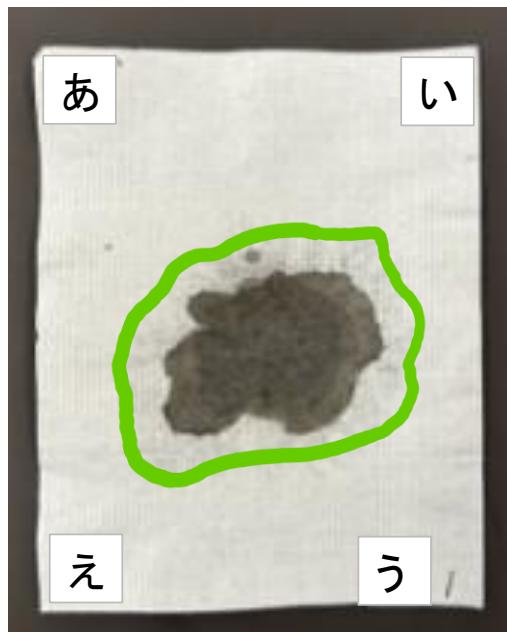


写真6

落下高度0.00mで滴下した  
A(1層目)の半紙

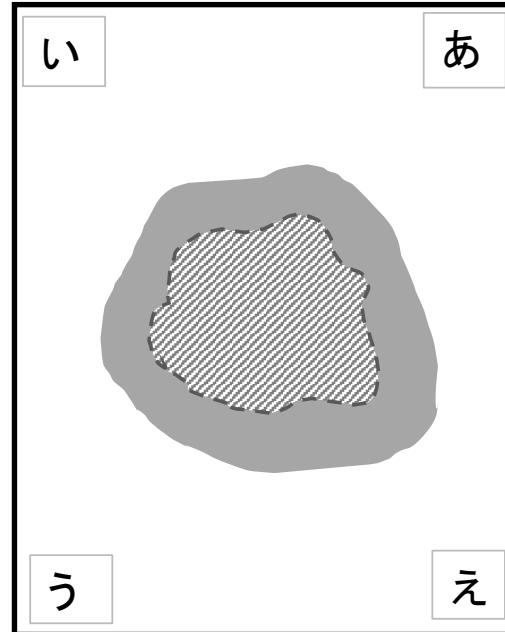


図4

写真6を裏から見たモデル図  
(灰色部分は裏の落下痕)  
(斜線部分は表にのみある落下痕)

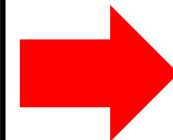


写真7

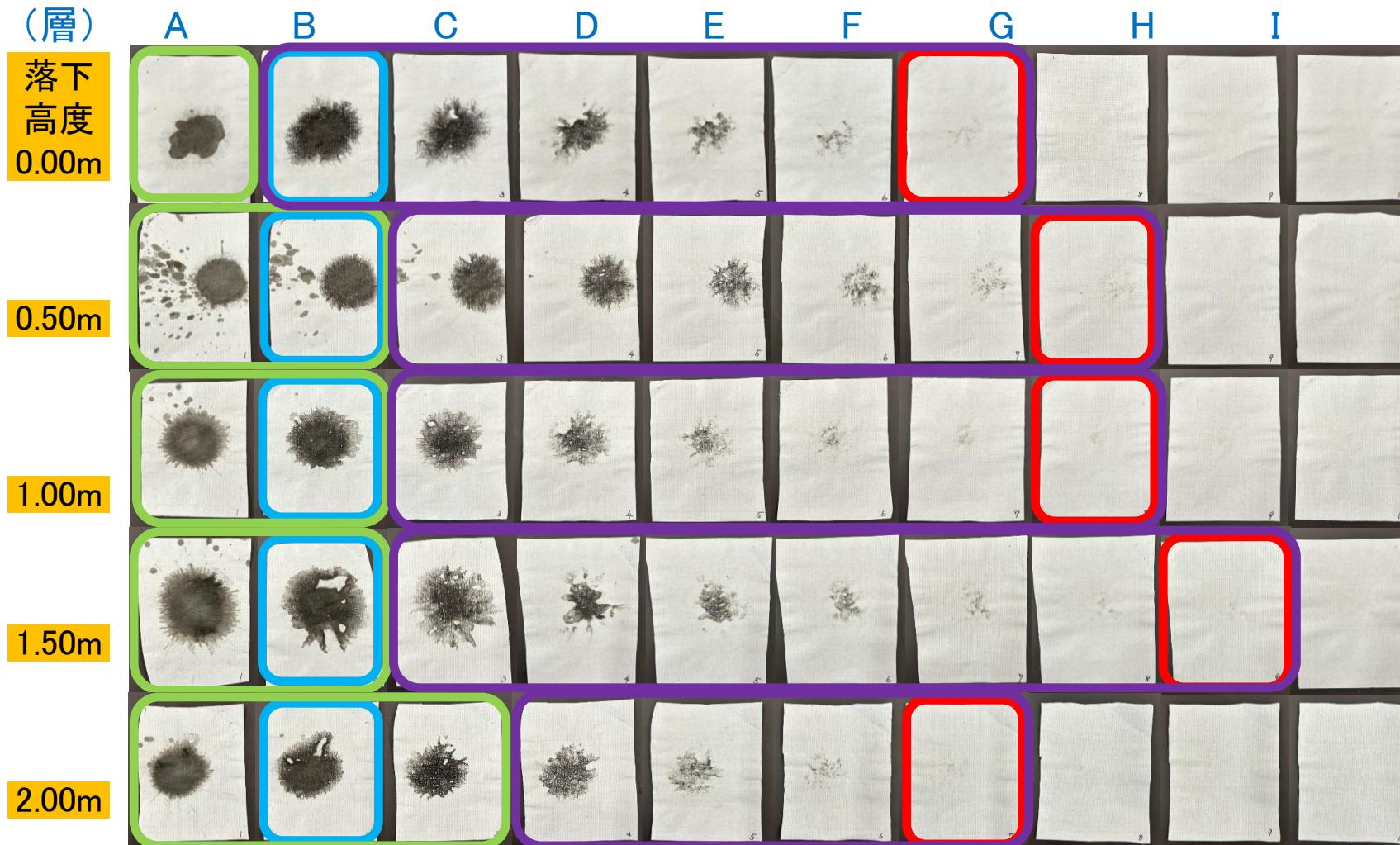
落下高度0.00mで滴下した  
B(2層目)の半紙

表の落下痕に比べて、裏の落下痕が1回りから2回りほど大きくなる層があった。  
その裏の落下痕がそのままの大きさで次の層に染みていくことが分かった。

他の落下高度(0.50, 1.00, 1.50, 2.00m)でも同様の傾向がみられ、1～3層目までの範囲  
で確認された。落下高度が高くなるとより深くの層までみられる。

実験結果(まとめ)

落下高度を変え、インク水を滴下・浸透させた10層の半紙



表より裏の落下痕が大きくなる

インク最終確認層

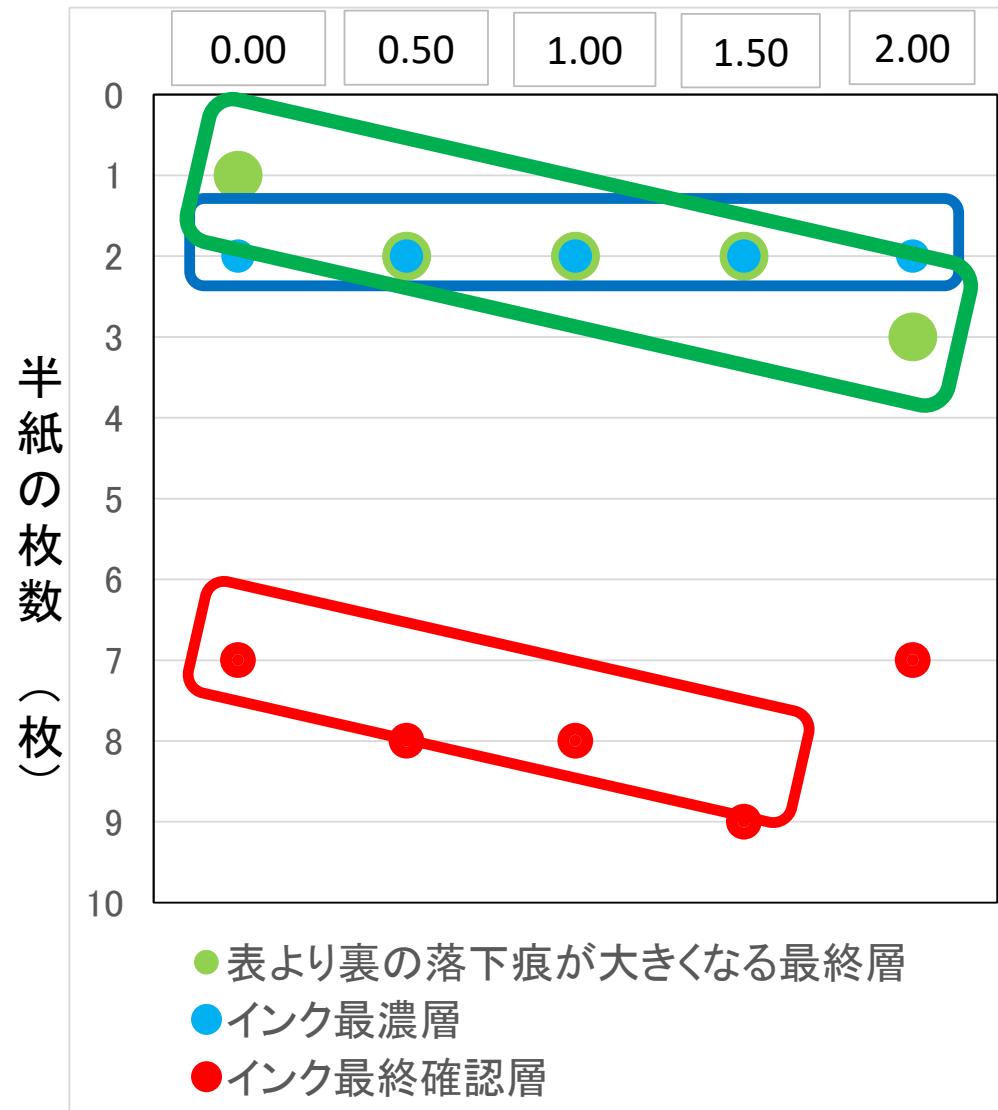
インク最濃層

表より裏の落下痕が小さくなる

3-⑥-32

## 実験結果(まとめ)

落下高度 (m)



グラフ1 半紙の枚数と浸透の関係

1. インク最濃層と落下高度は関係しない。

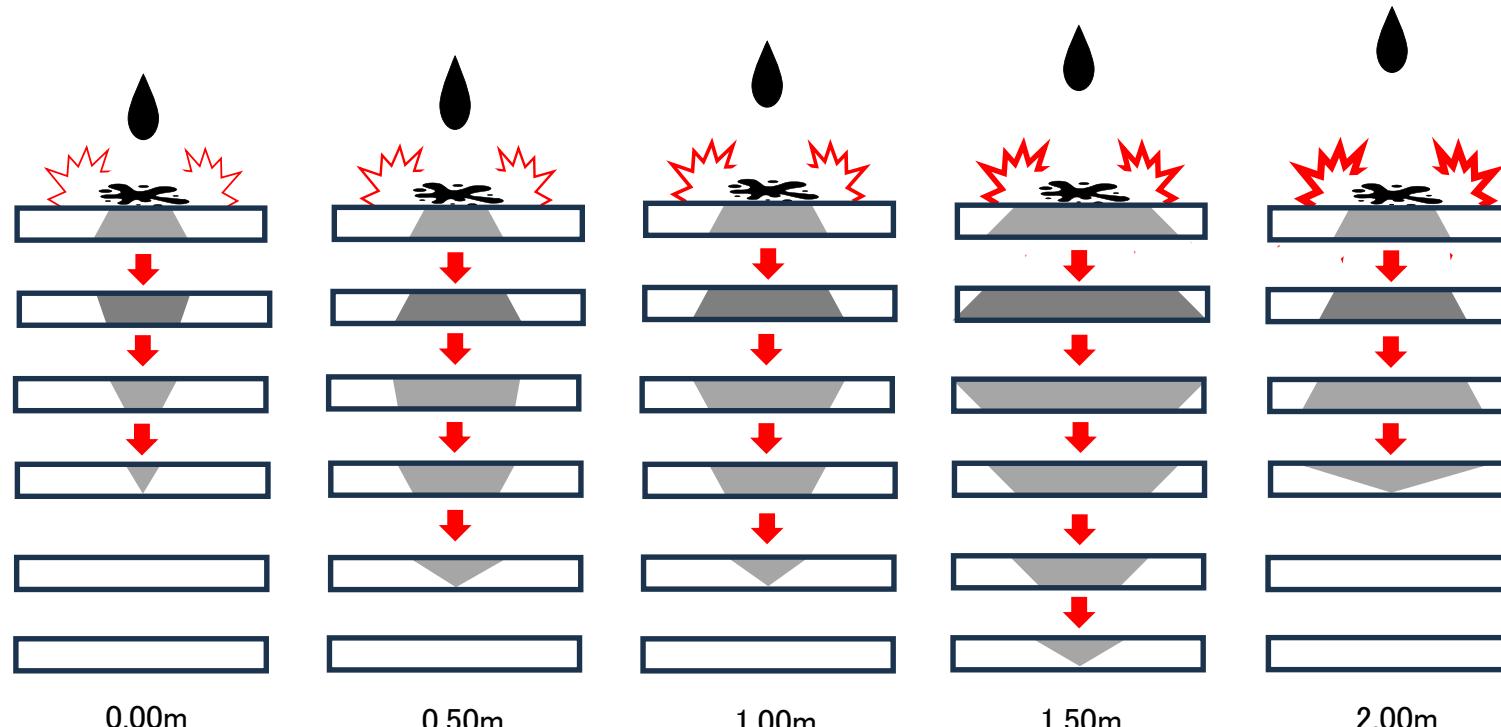
全ての落下高度において2層目が最濃層となる。つまり2層目が最も多くのインクを吸収する。

2. 表より裏の落下痕が大きくなる最終層は、落下高度が高くなるにつれて深くなっていることがわかる。

3. 0.00mから1.50mの範囲についてインクは落下高度が高くなると半紙のより下層へと浸透している。ただ2.00mになると、0.00mと同じ深度にしか浸透しなかった。

## 考察

図5 落下高度の違いによる半紙への浸透のモデル図



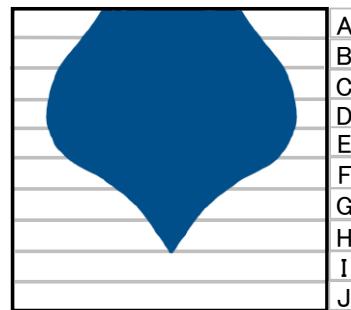
1. インクの落下による衝撃で、1層目の半紙では全てのインクを吸収できない。
2. 1層の半紙の中で、上層部で吸収できなかったインクが下層部で染みることにより、表よりも裏の落下痕が大きくなる。
3. 2の最終層は、落下高度の上昇によりインクの衝撃が増大するため、深くなる。
4. 水がどこまで浸透したのかを可視化するためにインクを用いているが、(インク粒子>水の粒子)であるため、実際の水の浸透深度を反映していない可能性がある。

## 考察

図6  
半紙に浸透する  
インクの断面図  
モデル図

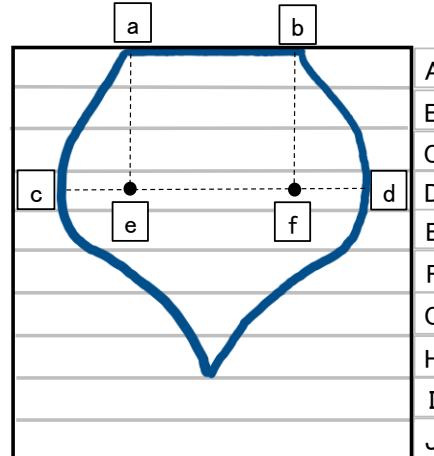
## 結論

インク水(濃度10%)において



上層部では末広がりの形でインクが広がり、  
下部に進むにつれて角度が小さくなる。

下層部では急激にインクの浸透が少なくなり、  
最終的に浸透しなくなっていく。  
つまり「カブ型」で浸透する。



1. ab の長さは速度が速くなることで長くなる。
2. gの深度は速度が速くなることで深くなる。
3. ae、bfの長さは速度が速くなることで長くなる。

※ただし1、2の関係は一定の落下高度(0.00m~1.50m)まで  
確認できるが、それをこえると不明確になる。

図7 半紙に浸透するインクの断面図モデル図2  
(c, dはふくらみの最大面)

## 課題

1. 指標となる物質をインクよりも水の粒子に近い粒子を用い、浸透深度を調べる。
2. 半紙の裏にインクを落とした時の浸透の具合を今回の結果と比べる。
3. 用いるスポット(1滴の質量の変化)による浸透の関係を調べる。
4. 用いる被衝突体(紙の材質)による浸透の関係を調べる。
5. 落下させる水滴の量、継続期間を変えて調べる。

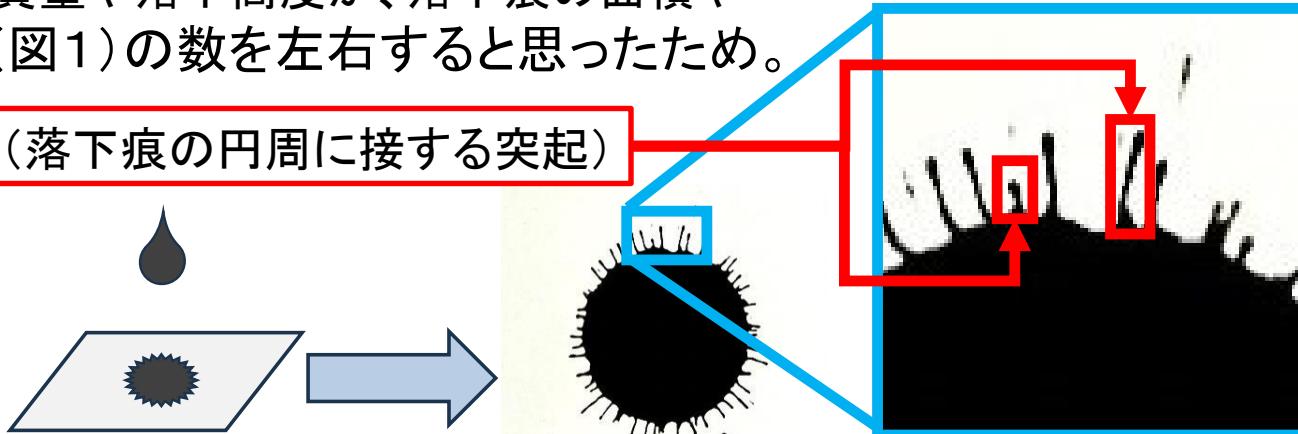
水滴を紙に落下させたときに生じるシミの形や大きさの規則性を探る

シミの外縁に生じるトゲの数は水滴の衝突速度が決める

**研究動機** 雨の質量や落下高度が、落下痕の面積やトゲ(図1)の数を左右すると思ったため。

トゲ(落下痕の円周に接する突起)

図1 トゲ



**研究目的** 1. 落下高度の変化と1滴の質量の変化による、落下痕の特徴の規則性の有無を解明する。

**研究仮説** 1. 1滴の質量が大きいほど体積も大きくなるため、落下痕の面積も大きくなる。

2. 落下高度が高いほど衝突速度が速いため、トゲが長くなる。

**実験目的** 落下高度と1滴の質量(スポットの種類)の変化に伴う  
落下痕の面積やトゲの長さ・数を解明する。

**実験条件** 固定条件

- ・厚紙、画用紙、コピー用紙、再生紙の中で、最もトゲや輪郭が明瞭だった再生紙を記録用紙とする。
- ・記録するための液体はインク濃度10%のインク水とする。

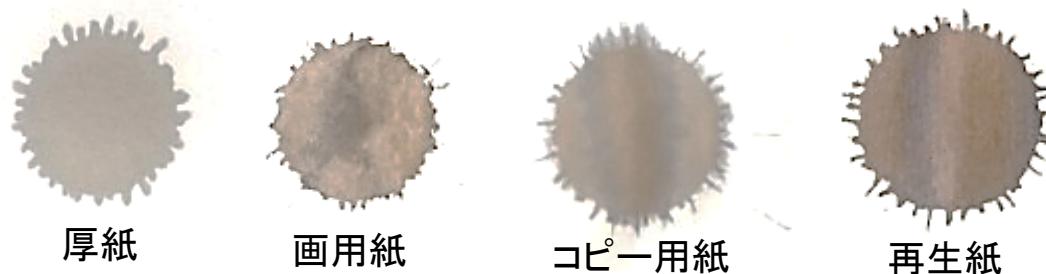


図2 厚紙、画用紙、コピー用紙、再生紙の落下痕

可変条件

- ・落下高度(0.50m、1.00m、1.50m、2.00m)
- ・1滴の質量(0.045g・0.047g・0.051g・0.054g・0.066g)の5種類

装置・用具

- ・滴下装置 ・スポット ・インク水 ・ビーカー
- ・面積解析ソフト(ImageJ) ・再生紙 ・1m定規
- ・双眼実体顕微鏡 ・マイクロメーター ・シャーレ

## 実験操作

1. 滴下装置にスポットを設置する。
2. スポットの先端と落下場所の距離を任意の高度に合わせる。  
(0.50m, 1.00m, 1.50m, 2.00m)
3. スポットにインク水を溜める。
4. 落下場所に記録用紙(再生紙)を置く。
5. 記録用紙1枚につき1滴滴下する。
6. 5滴 滴下する。(記録用紙5枚を取得)
7. 記録用紙を撮影し、面積分析ソフトで面積を求める。  
(面積の単位はmm<sup>2</sup>)
8. 落下痕1滴当たり5人でトゲの本数を数え、平均を求める。
9. 双眼実体顕微鏡でマイクロメーターを用い、ガラススポット2mLで滴下した水滴のすべてのトゲの長さを計測する。

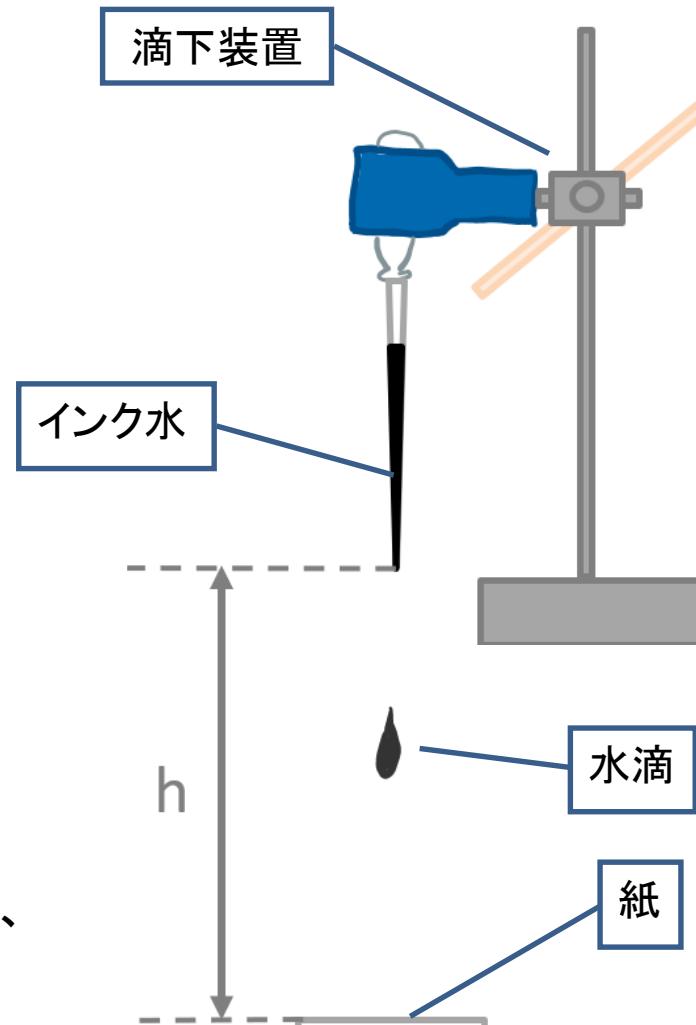


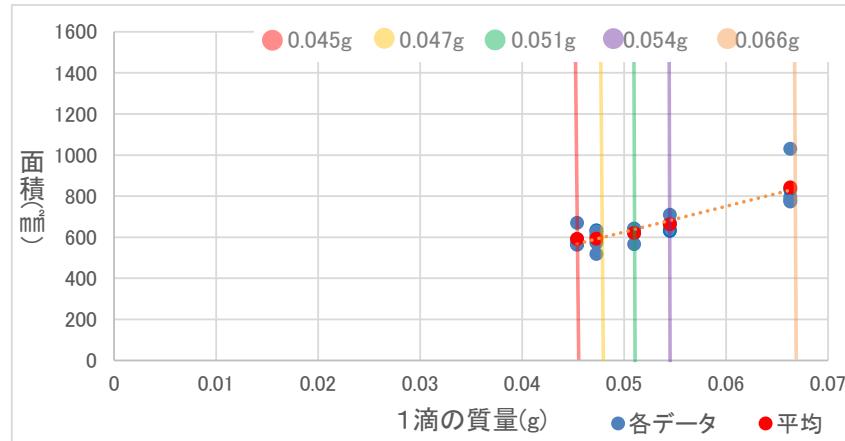
図3 実験操作の様子

## 実験結果

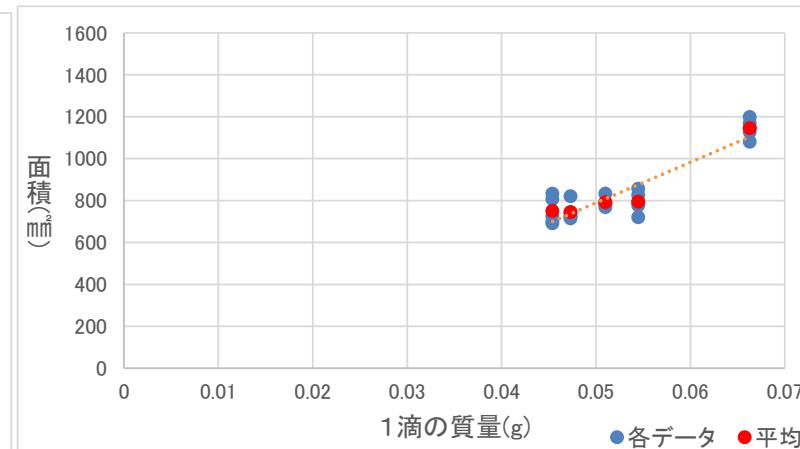
### [1滴の質量と落下痕の面積の関係]

以下グラフ内では落下痕の面積を面積と表記する。

※スポットの種類は数値化できないため、研究1で求めたスポットごとの1滴の質量を数値として使用



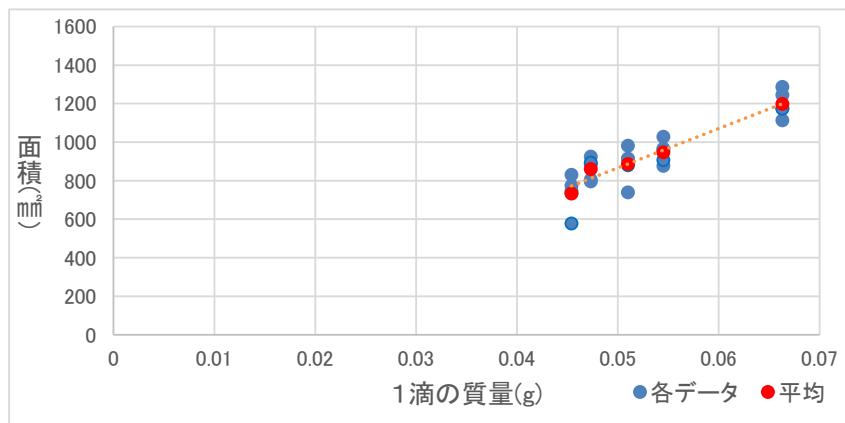
グラフ1-1 1滴の質量と面積の関係(落下高度0.5m)



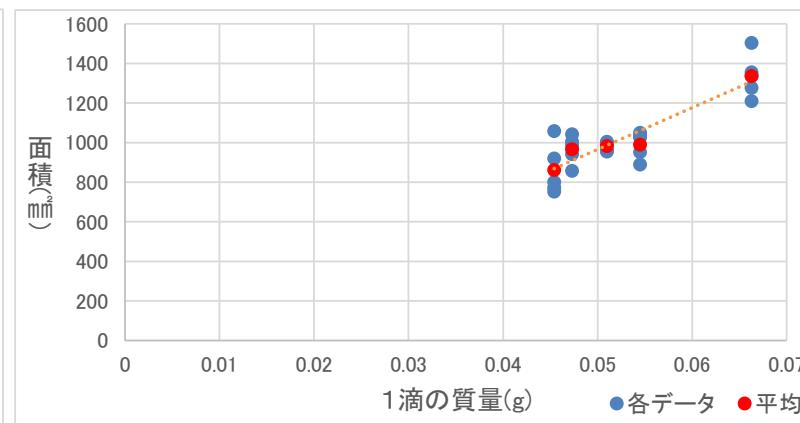
グラフ1-2 1滴の質量と面積の関係(落下高度1.0m)

1滴の質量と面積は1次関数的に増える。

1滴の質量と面積は1次関数的に増える。



グラフ1-3 1滴の質量と面積の関係(落下高度1.5m)

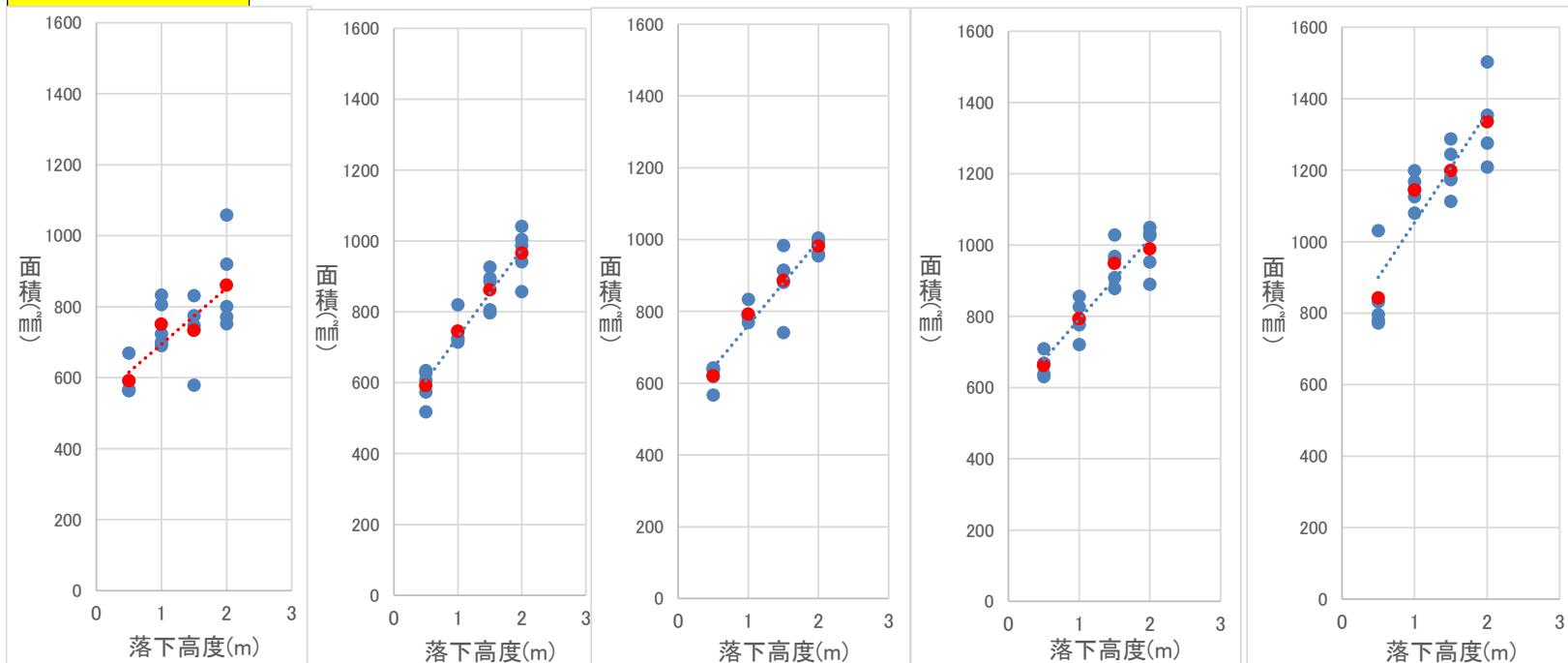


グラフ1-4 1滴の質量と面積の関係(落下高度2.0m)

1滴の質量と面積は1次関数的に増える。

1滴の質量と面積は1次関数的に増える。

## 実験結果 [落下高度と落下痕の面積の関係]



グラフ1-5  
落下高度と面積の  
関係(0.045g水滴)

グラフ1-6  
落下高度と面積の  
関係(0.047g水滴)

グラフ1-7  
落下高度と面積の  
関係(0.051g水滴)

グラフ1-8  
落下高度と面積の  
関係(0.054g水滴)

グラフ1-9  
落下高度と面積の  
関係(0.066g水滴)

グラフ1-5 落下高度が高くなると面積も**1次関数的に**増える。

グラフ1-6 落下高度が高くなると面積も**1次関数的に**増える。

グラフ1-7 落下高度が高くなると面積も**1次関数的に**増える。

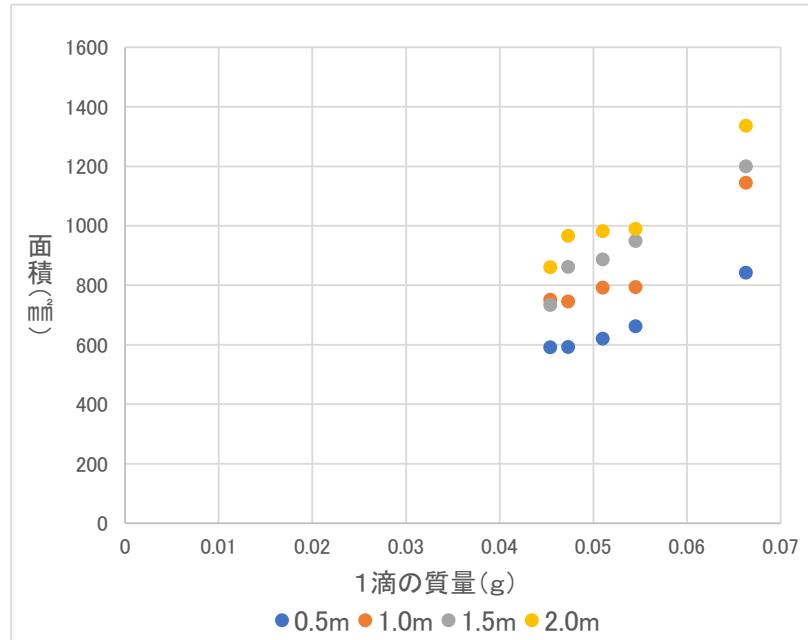
グラフ1-8 落下高度が高くなると面積も**1次関数的に**増える。

グラフ1-9 落下高度が高くなると面積も**1次関数的に**増える。

1滴の質量に  
関わらず共通  
( $y=ax+b$ )

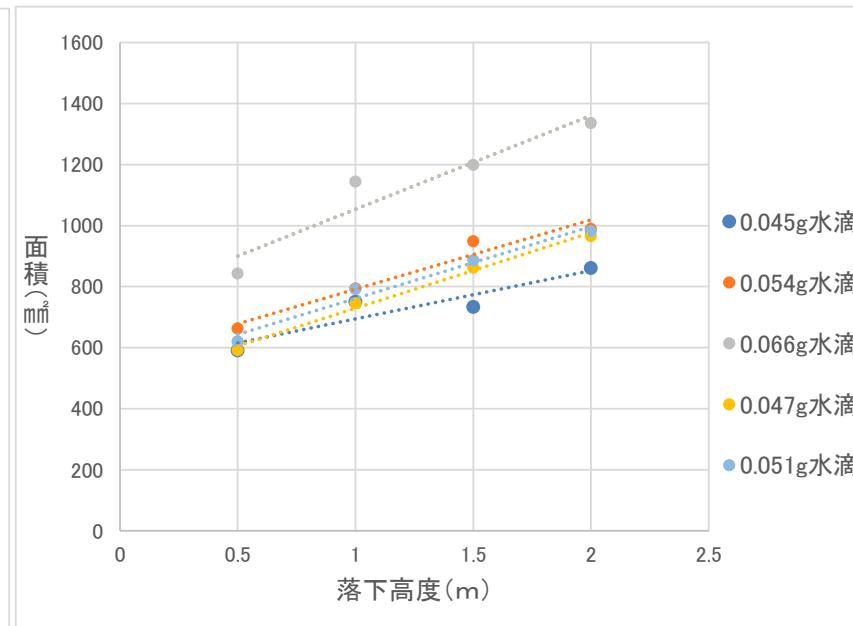
## 実験結果

### [1滴の質量と落下痕の面積の関係のまとめ]



グラフ1-10・1滴の質量と面積の関係(まとめ)

落下高度に関わらず、1滴の質量が多くなると、落下痕の面積は**1次関数的**  
( $y=ax+b$ )に増える。  
(ただし、 $x=0$  の時  $y=0$ )



グラフ1-11・落下高度と面積の関係(まとめ)

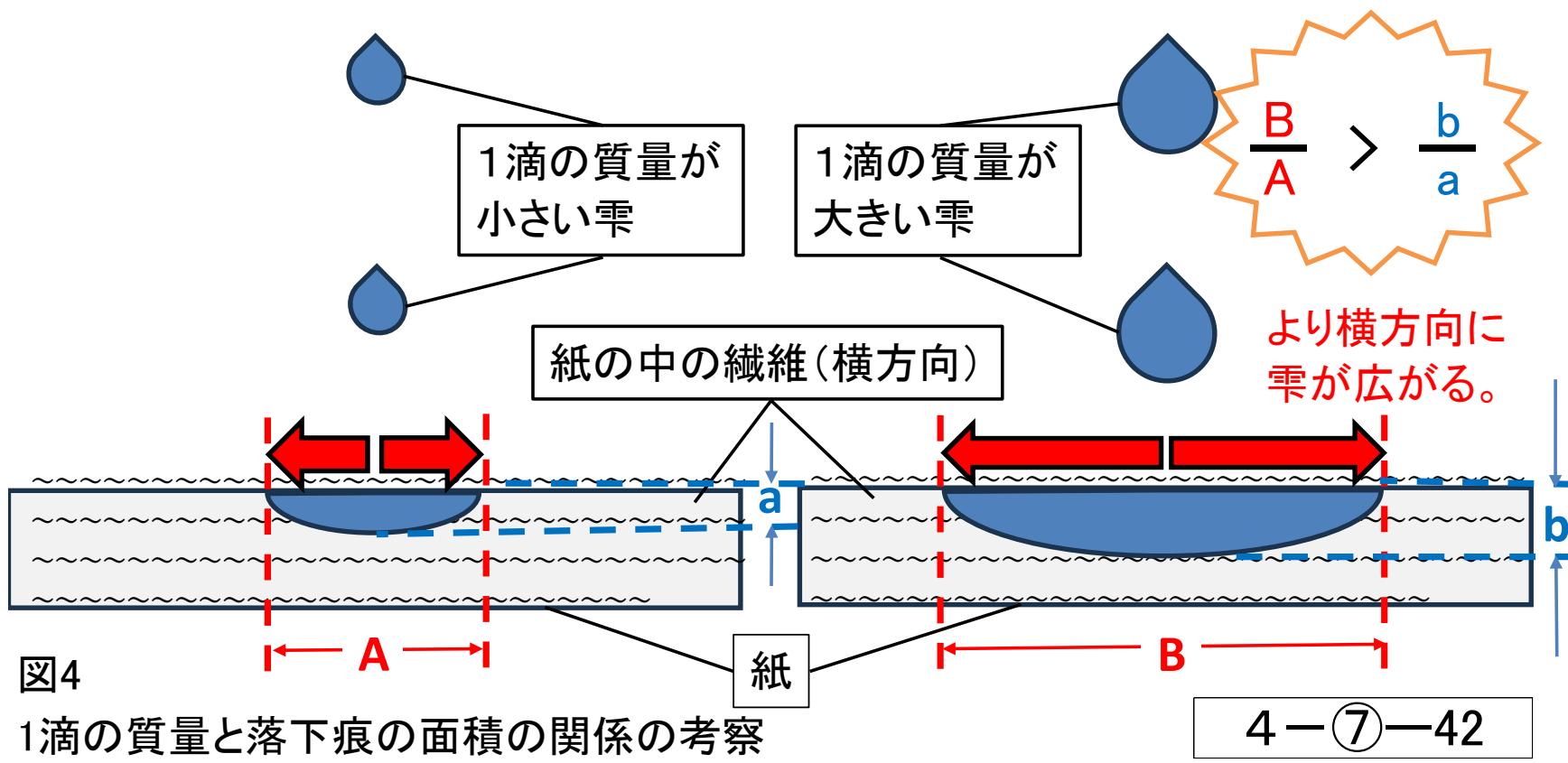
1滴の質量に関わらず、落下高度が高くなると、落下痕の面積は**1次関数的**  
( $y=ax+b$ )に増える。  
1滴の質量が大きいほうがやや面積の増え方は大きい。

## 考察

### [1] 1滴の質量と落下痕の面積の関係

1滴の質量が増加すると落下痕の面積も増加した。

紙の纖維に沿って水は染みこみ、紙の纖維は水平方向に伸びているもののほうが多いため、水は鉛直下向きよりも水平方向に染みこみやすく、滴下した水滴は水平方向に染みている指標である面積に関係しているのではないか。

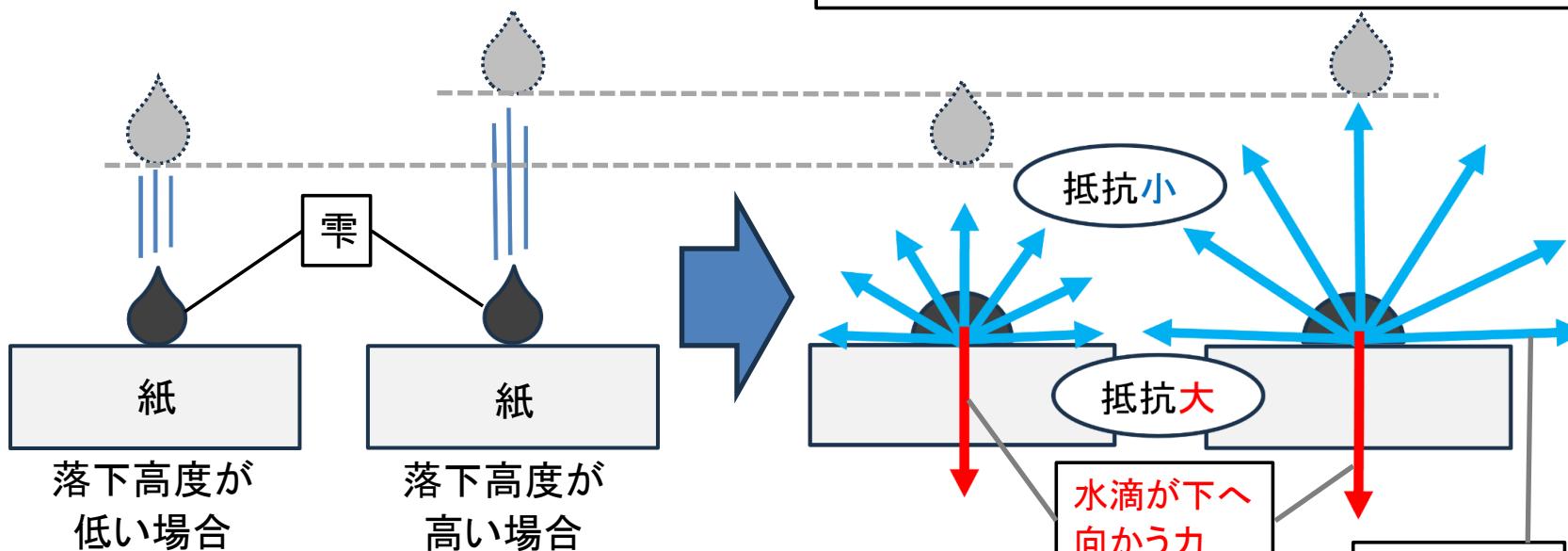


## 考察

### [2] 落下高度と落下痕の面積の関係

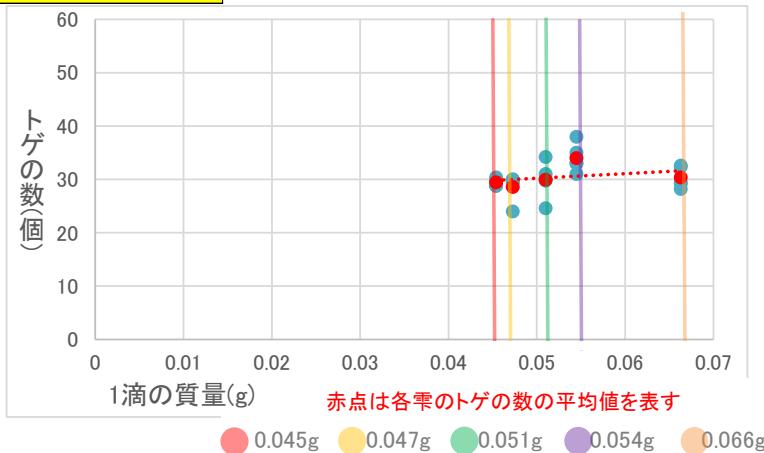
① 落下高度が高いと、水滴が紙に衝突する瞬間の速さが速くなる（研究2の結果より）。

② 下へ向かう力と共に、跳ね返る力もより強くなると考えられる。この時水平面より下へは紙があるが、上は空中であり、下向きに比べ抵抗が少ない。



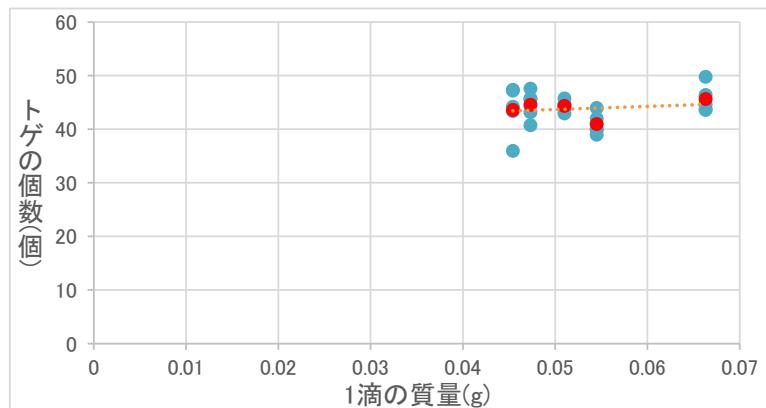
③ 結果的に、落下の勢いで下へ向かう液体よりも、水平面より上へ向かう液体のほうが多くなり、水滴がより薄く広がり、面積が大きくなると考えた。

## 実験結果 [1滴の質量とトゲの数の関係]



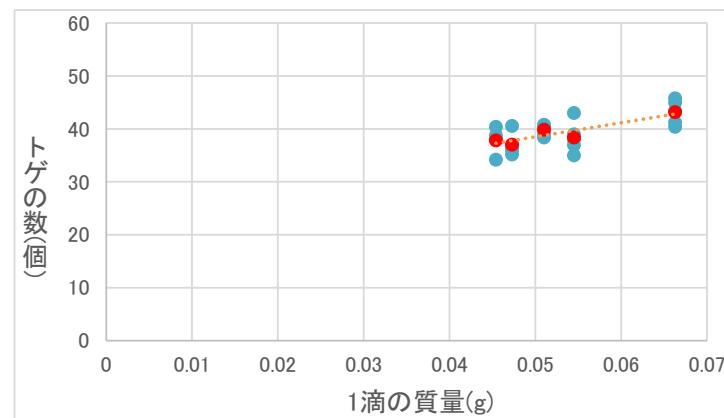
グラフ2-1 落下高度0.5mでの1滴の質量とトゲの数の関係

質量の変化によるトゲの数の変化はない。



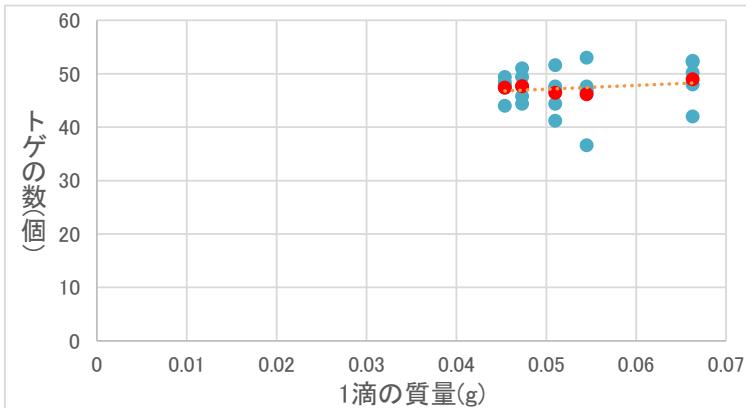
グラフ2-2 落下高度1.0mでの1滴の質量とトゲの数の関係

質量の変化によるトゲの数の変化はない。



グラフ2-3 落下高度1.5mでの1滴の質量とトゲの数の関係

質量が増えるほどややトゲの数も増える。

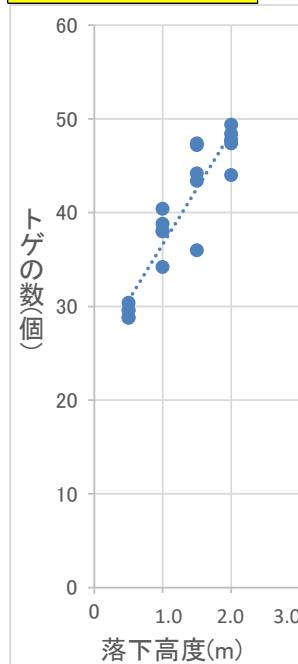


グラフ2-4 落下高度2.0mでの1滴の質量とトゲの数の関係

質量の変化によるトゲの数の変化はない。

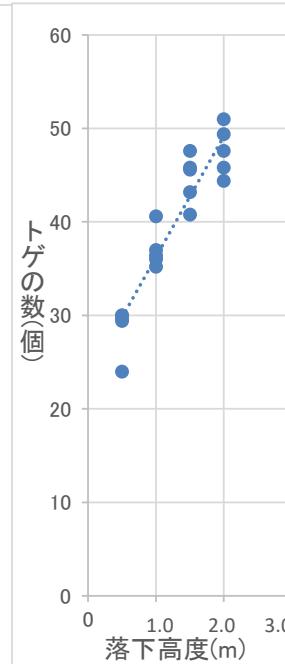
## 実験結果

### [落下高度とトゲの数の関係]



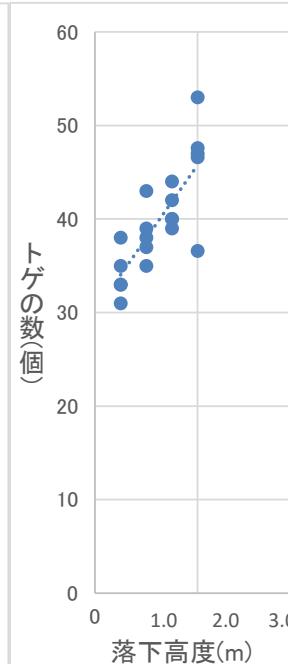
グラフ2-5

落下高度とトゲの数の  
関係(0.045g水滴)



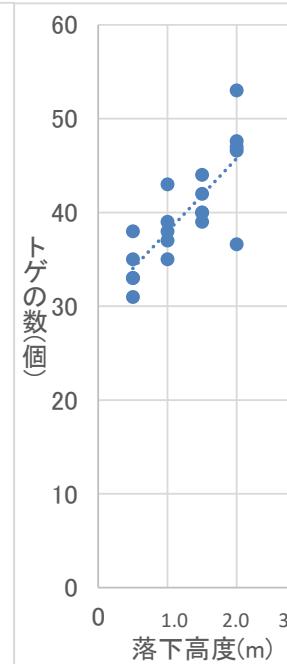
グラフ2-6

落下高度とトゲの数の  
関係(0.047g水滴)



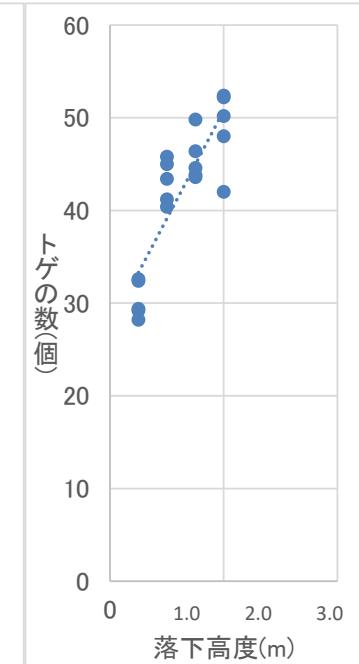
グラフ2-7

落下高度とトゲの数の  
関係(0.051g水滴)



グラフ2-8

落下高度とトゲの数の  
関係(0.054g水滴)



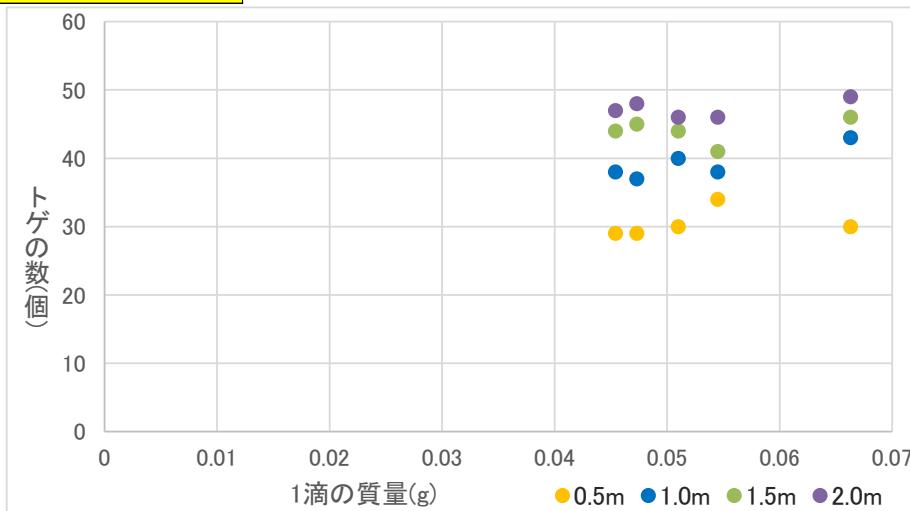
グラフ2-9

落下高度とトゲの数の  
関係(0.066g水滴)

- グラフ2-5 落下高度が高くなるとトゲの数も1次関数的に増える。  
 グラフ2-6 落下高度が高くなるとトゲの数も1次関数的に増える。  
 グラフ2-7 落下高度が高くなるとトゲの数も1次関数的に増える。  
 グラフ2-8 落下高度が高くなるとトゲの数も1次関数的に増える。  
 グラフ2-9 落下高度が高くなるとトゲの数も1次関数的に増える。

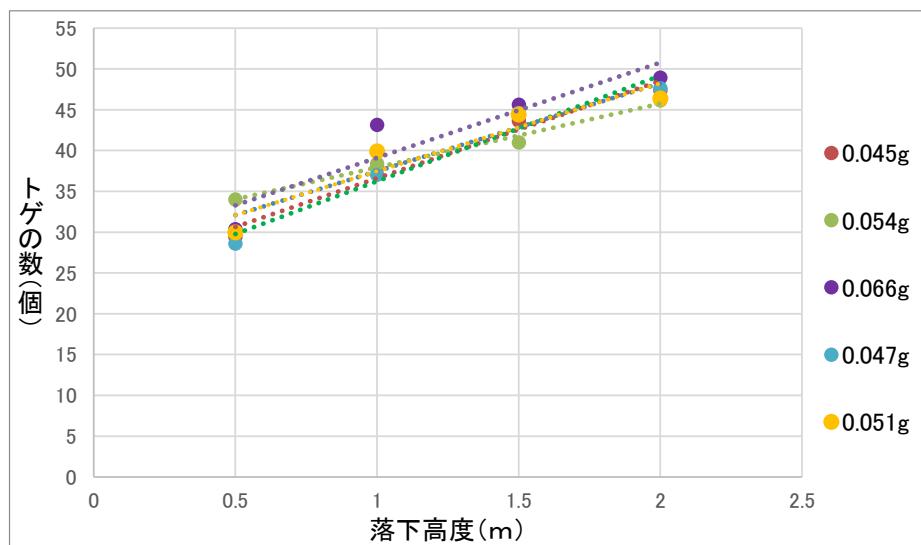
1滴の質量に  
関わらず共通  
( $y=ax+b$ )

## 実験結果 [トゲの数の関係のまとめ]



グラフ2-10 1滴の質量とトゲの数の関係(まとめ)

1滴の質量の変化によるトゲの数の変化は、  
落下高度1.0mのときのみ  
1次関数的に増えている。  
他の落下高度ではトゲの数は変わらず、  
相関関係は見られない。

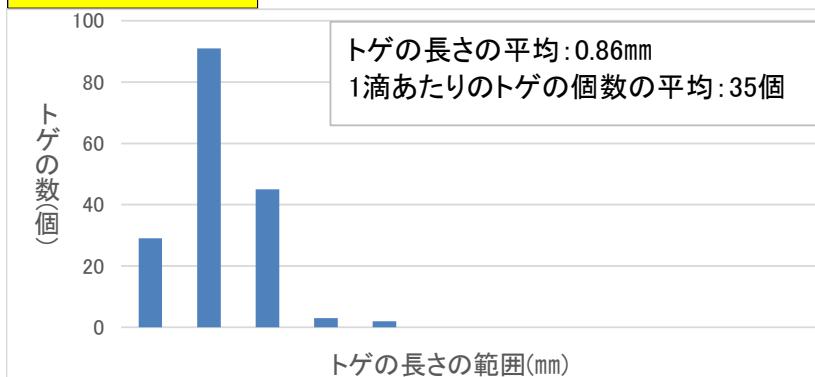


グラフ2-11 落下高度とトゲの数の関係(まとめ)

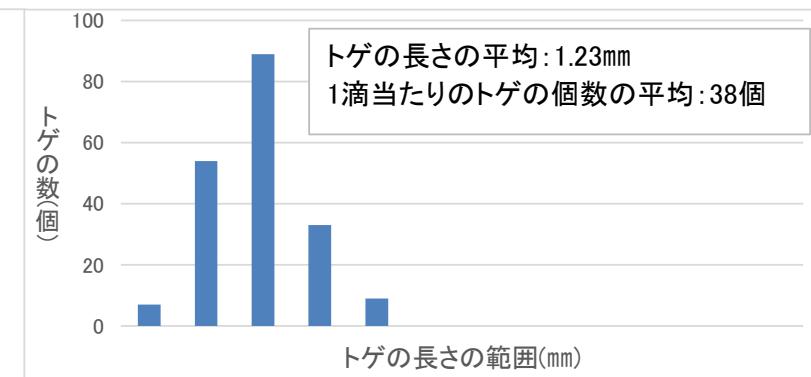
落下高度が高いほど、  
トゲの数は1次関数的に増える。  
1滴の質量ごとの傾き(増え方)はほぼ同じ。

## 実験結果

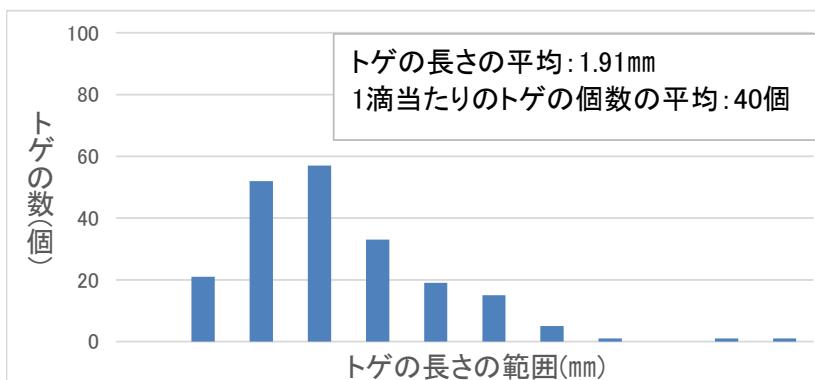
### [落下高度とトゲの長さ(5個の合計)の関係(ガラス2mlスポットのみ)]



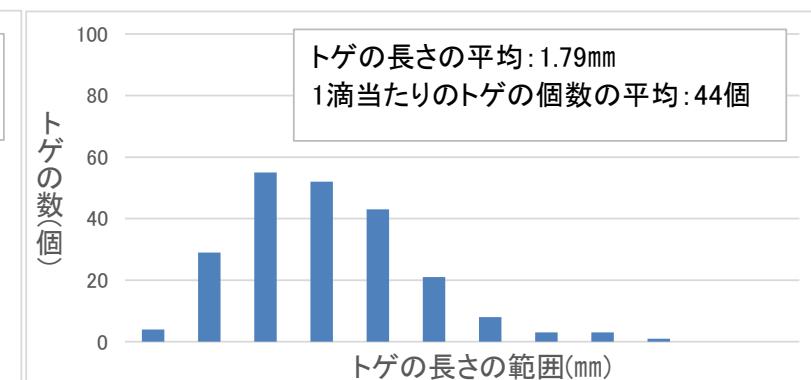
グラフ2-12 高度0.5mでのトゲの長さとトゲの数  
0.50mmから0.99mmを中心いてトゲが存在し、  
トゲの長さにかなり偏りがある。



グラフ2-13 高度1.0mでのトゲの長さとトゲの数  
高度0.5mと比べると長さの範囲がやや広い。  
1.00mmから1.49mmを中心いてトゲがある。



グラフ2-14 高度1.5mでのトゲの長さとトゲの数の関係  
高度1.0mと比べると長さの範囲がかなり広い。  
1.00mmから1.99mmを中心いてトゲがある。

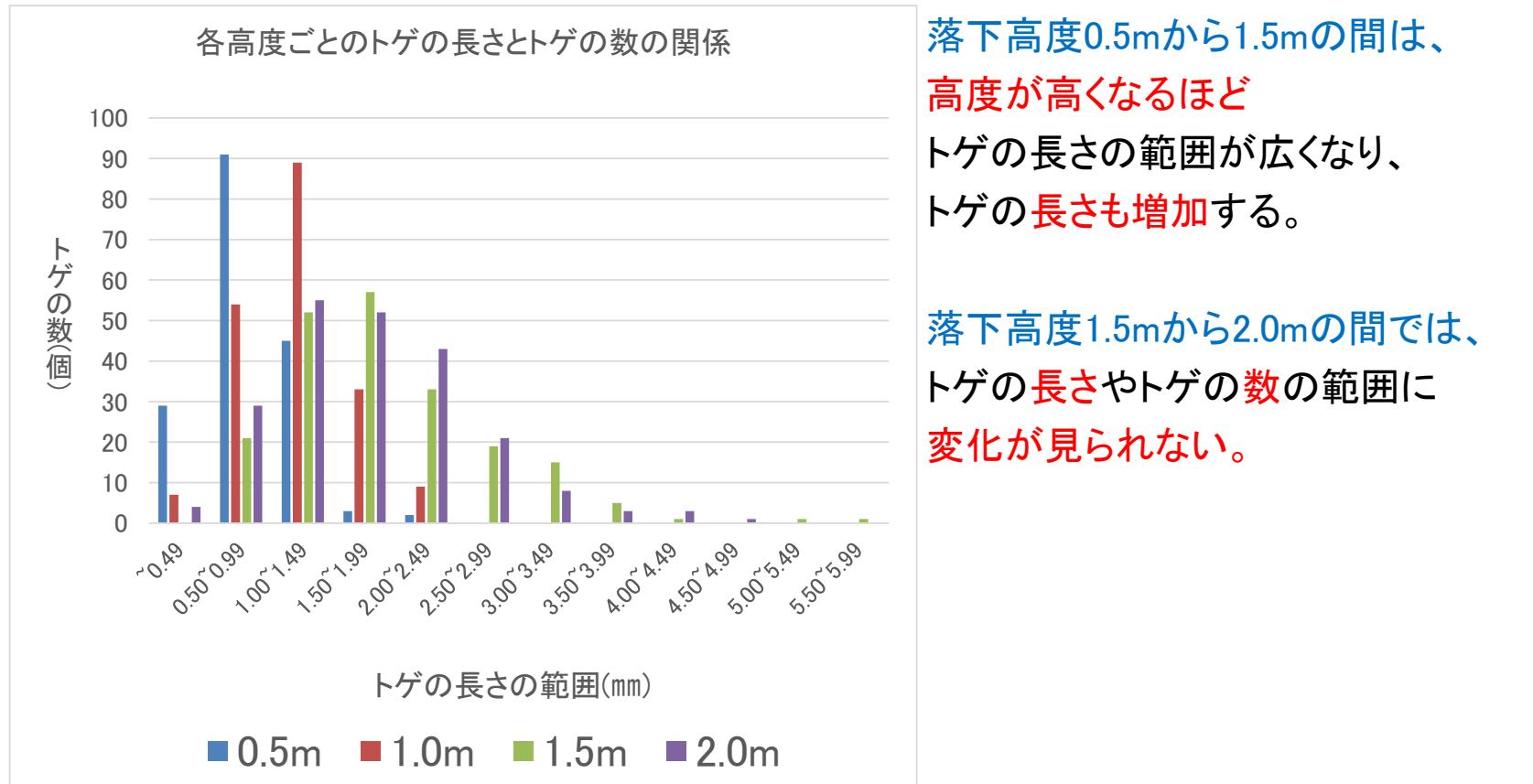


グラフ2-15 高度2.0mでのトゲの長さとトゲの数の関係  
高度1.5mと比べると違いはあまりない。  
1.00mmから2.49mmを中心いてトゲがある。

※グラフの横軸は右のとおり

0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50
0.49	0.99	1.49	1.99	2.49	2.99	3.49	3.99	4.49	4.99	5.49

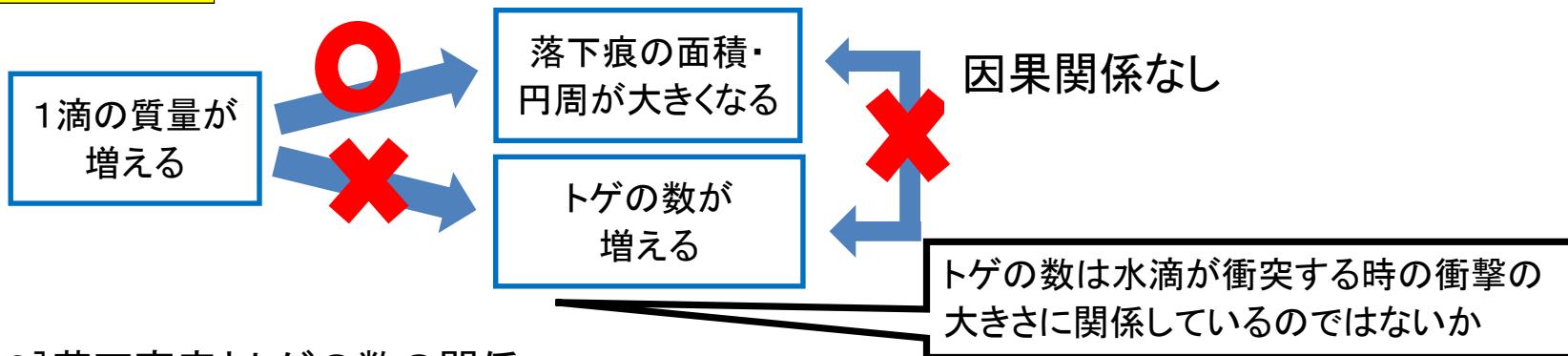
## 実験結果 [落下高度ごとのトゲの長さとトゲの数のまとめ]



グラフ2-16・各高度ごとのトゲの長さとトゲの数の関係(まとめ)

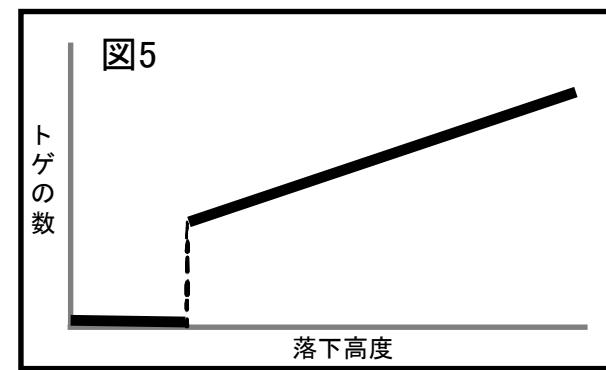
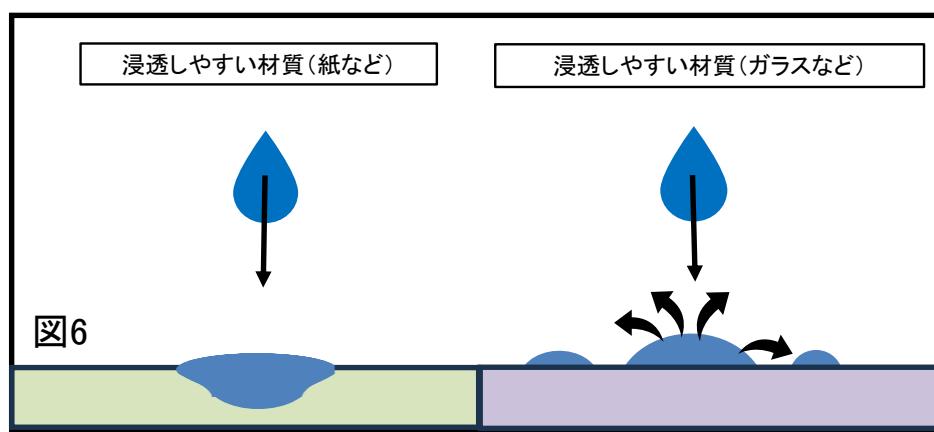
## 考察

### [1] 1滴の質量とトゲの数の関係



### [2] 落下高度とトゲの数の関係

落下高度が高くなるにつれ、トゲの数は**1次関数的に増える**。これは落下高度が高くなるにつれ、速度が速くなり、水滴が紙に衝突する時の衝撃も大きくなるからだ。水の表面張力よりも衝突時の衝撃で水の粒が離れる力のほうが大きくなり、トゲができるのではないか。また、落下高度0m付近のときは表面張力がはたらき、落下してもトゲができないため、図5のグラフになるだろう。



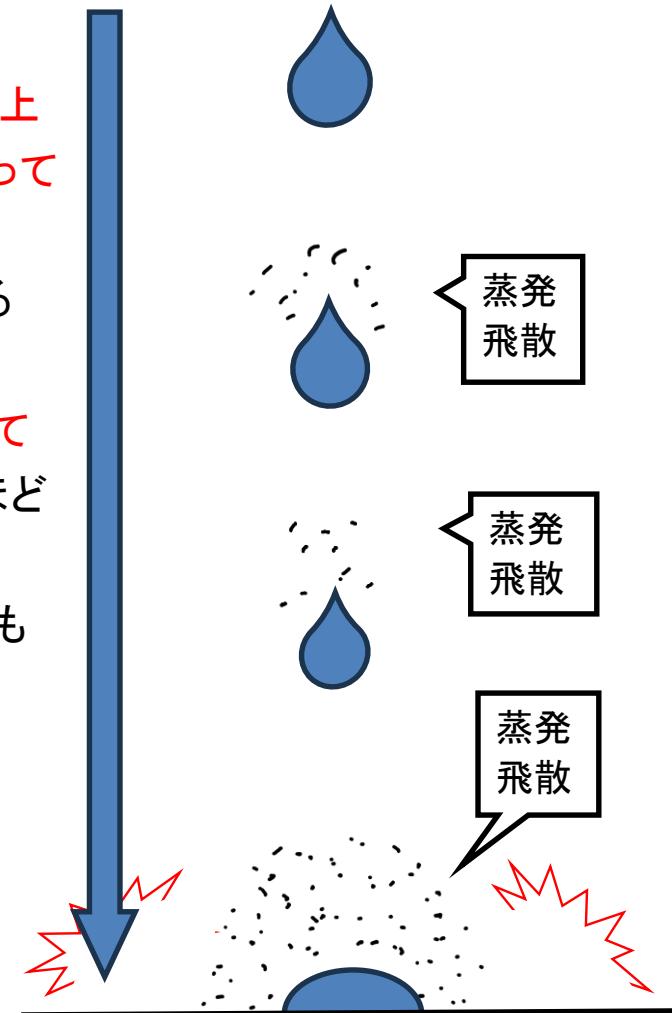
## 考察

### [3]トゲの長さと落下高度の関係

落下高度1.5mと2.0mの結果が類似していることから、落下高度1.5m以上はトゲの長さがこれ以上長くならない、またトゲの長さの変化が小さくなってしまうと考えられる。

落下高度2.0mのほうが滴下されてから衝突するまでの距離が長いため、その間に、微細化した水の粒が蒸発・飛散し、1滴の質量自体が減ってしまったのではないか。また落下高度が高いほど衝突時の速度が速いため、衝突時により多くの微細な水の粒が蒸発・飛散してしまった可能性もある。(図7)

図7



## 結論

1. 落下高度が高くなるにつれ、落下痕面積は大きくなる。
2. 落下高度が高くなるにつれ、落下痕のトゲの数は増える。
3. 落下高度1.5mまでは落下高度が高くなるにつれ、トゲの長さも長くなり、  
落下高度1.5m～2.0mの間はあまりトゲの長さの変化がない。
4. 霽の1滴の大きさが大きくなるにつれ、落下痕の面積は大きくなる。
5. 霽の1滴の大きさが大きくなっても落下痕のトゲの数は変わらない。

	面積	トゲの数	トゲの長さ
1滴の質量	○	×	—
高さ	○	○	△

○:1次関数的に増える

△:1次関数的に増えるところもあれば、  
因果関係がみられないところもある

×:因果関係がみられない

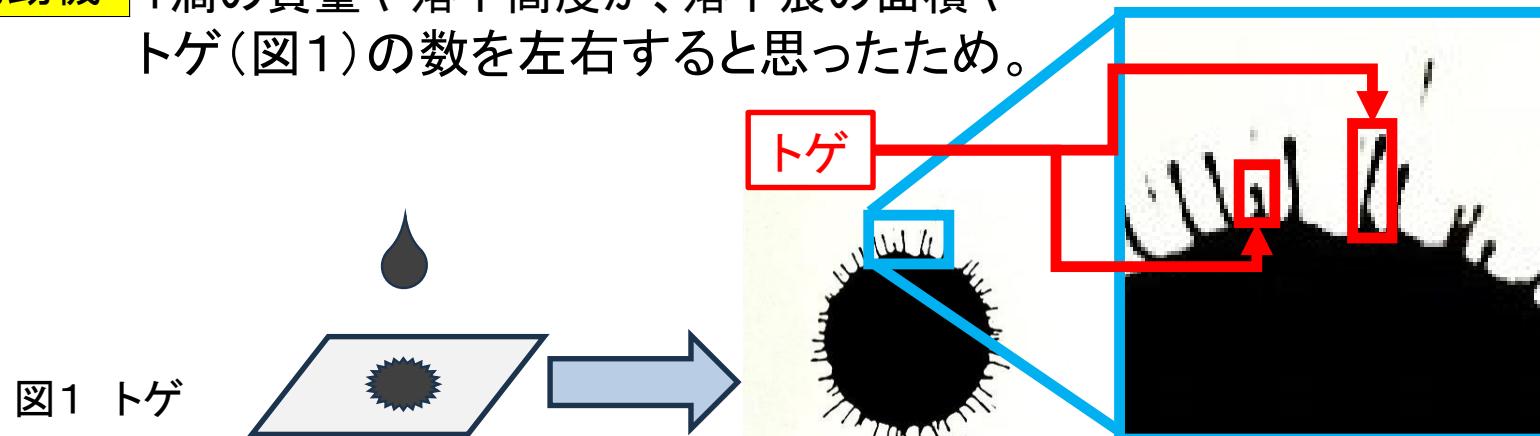
## 課題

1. データ数を増やす。
2. トゲの長さについて、ほかのスポットを使用した落下痕も調べる。
3. 落下痕におけるトゲとトゲの間隔はどうなっているのかを調べる。
4. 落ちる瞬間の水滴の形はどうなっているのかを調べる。

水滴を紙に落下させたときに生じるシミの形や大きさの規則性を探る

シミの外縁に生じるトゲの数は水滴の衝突速度が決める

研究動機 1滴の質量や落下高度が、落下痕の面積やトゲ(図1)の数を左右すると思ったため。



研究目的

落下高度の変化と1滴の質量の変化による、落下痕の特徴の規則性の有無を解明する。

研究仮説

- 1滴の質量が大きいほど体積も大きくなるため、落下痕の面積も大きくなる。
- 落下高度が高いほど衝突速度が速いため、トゲが長くなる。

## 実験条件

### 固定条件

- ・厚紙、画用紙、コピー用紙、再生紙の中で、最もトゲや輪郭が明瞭だった再生紙を記録用紙とする。
- ・記録するための液体はインク濃度40%のインク水とする。



厚紙 画用紙



コピー用紙 再生紙

図2 厚紙、画用紙、コピー用紙、再生紙上の落下痕

### 可変条件

- ・衝突速度: 2.0m/s~(0.5m/s刻み)~7.5m/s

(衝突速度を基準として研究を行う。)

各衝突速度に対応する落下高度は表1の通り。)

- ・滴下器具の種類: ポリ5mLスポット、ガラス5mLスポット、

注射器小、注射器大(1滴の質量の幅を広げるため、

2種類の注射器を追加した。また、人為誤差の大きい

スポット4種類を排除した。各器具の1滴の質量は表2の通り。)

衝突速度(m/s)	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
落下高度(m)	0.20	0.32	0.46	0.63	0.82	1.03
	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
	1.28	1.54	1.84	2.16	2.50	2.87

表1 各落下速度に対応する落下高度

器具の種類	1滴の質量(g)
ポリ 5mL スポット	0.0347
ガラス 5mL スポット	0.0399
注射器大	0.0615
注射器小	0.0174

表2 各器具の  
1滴の質量

## 装置・用具

- ・各種スポット
- ・各種注射器
- ・画像処理ソフト
- ・再生紙
- ・双眼実体顕微鏡
- ・滴下装置
- ・ミクロメーター
- ・メジャー
- ・40%インク水

## 実験操作

1. 滴下装置にスポット、もしくはスタンドにスポンジを詰めた注射器を設置する。
2. 器具の先端から、着地地点までの距離を実験条件の高度に合わせる。
3. スポットにインク水を溜める。または注射器内部のスポンジにインク水を染み込ませる。
4. 器具の真下に記録用紙(再生紙)を置く。
5. 記録用紙1枚につき1滴滴下する。
6. **1条件当たり15滴滴下する。(記録用紙15枚を取得)**
7. 記録用紙を撮影し、画像処理ソフトで落下痕の**重心と面積を求める。(単位はmm<sup>2</sup>)**
8. 求めた面積から**半径を算出し、重心から円を描く。**
9. その円から飛び出た部分をトゲとしてトゲの数を数える。
10. 双眼実体顕微鏡とミクロメーターを用いて、1つの落下痕の中で**最も長いトゲの長さを測定する。**

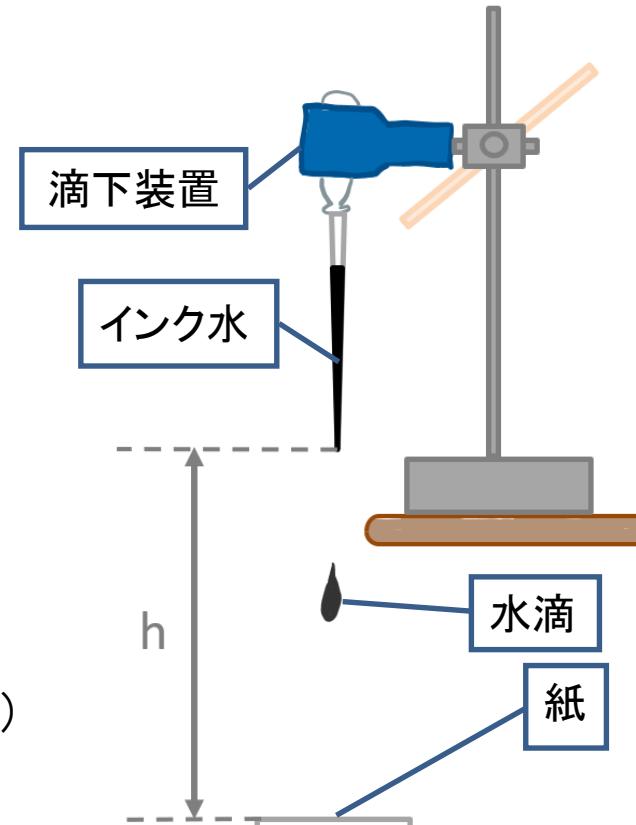
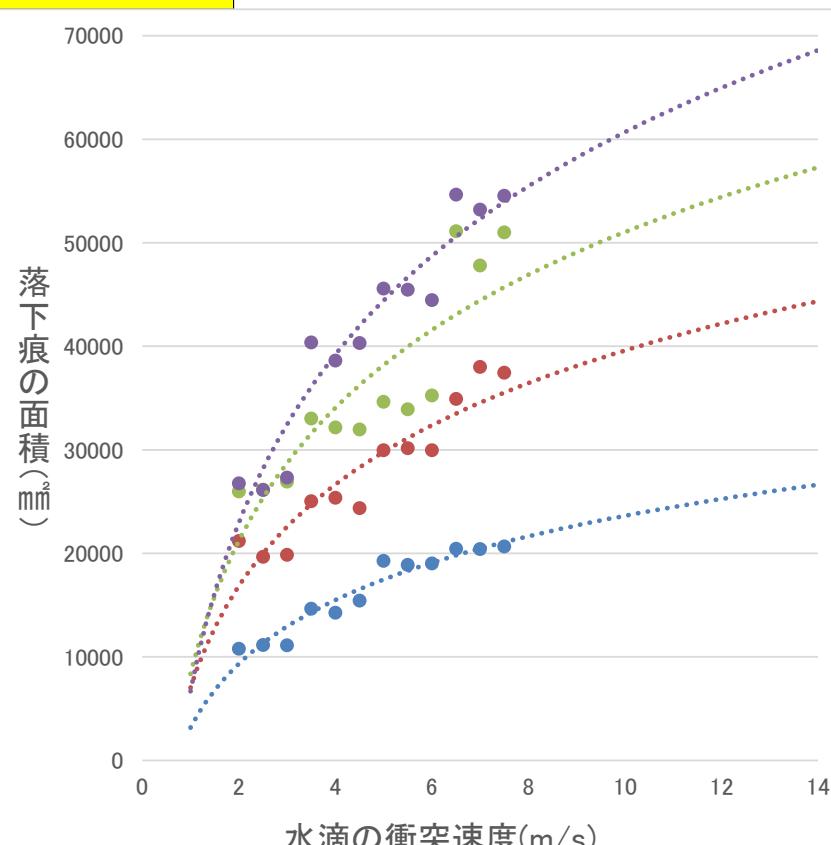


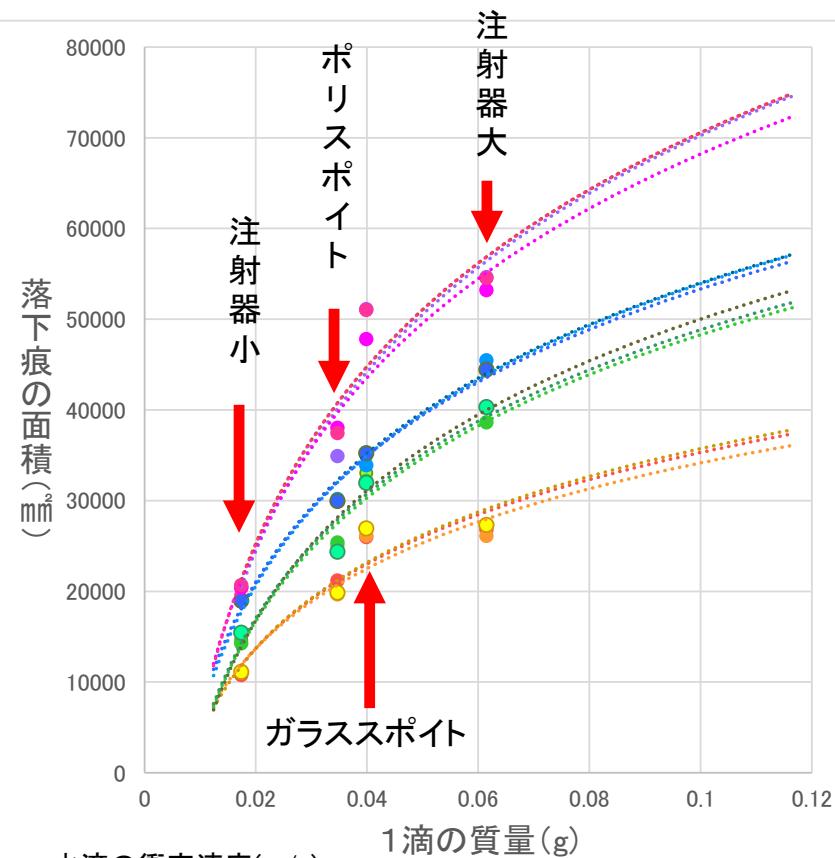
図3 実験操作の様子

## 実験結果 [落下痕の面積について]



グラフ1 水滴の衝突速度と落下痕の面積の関係

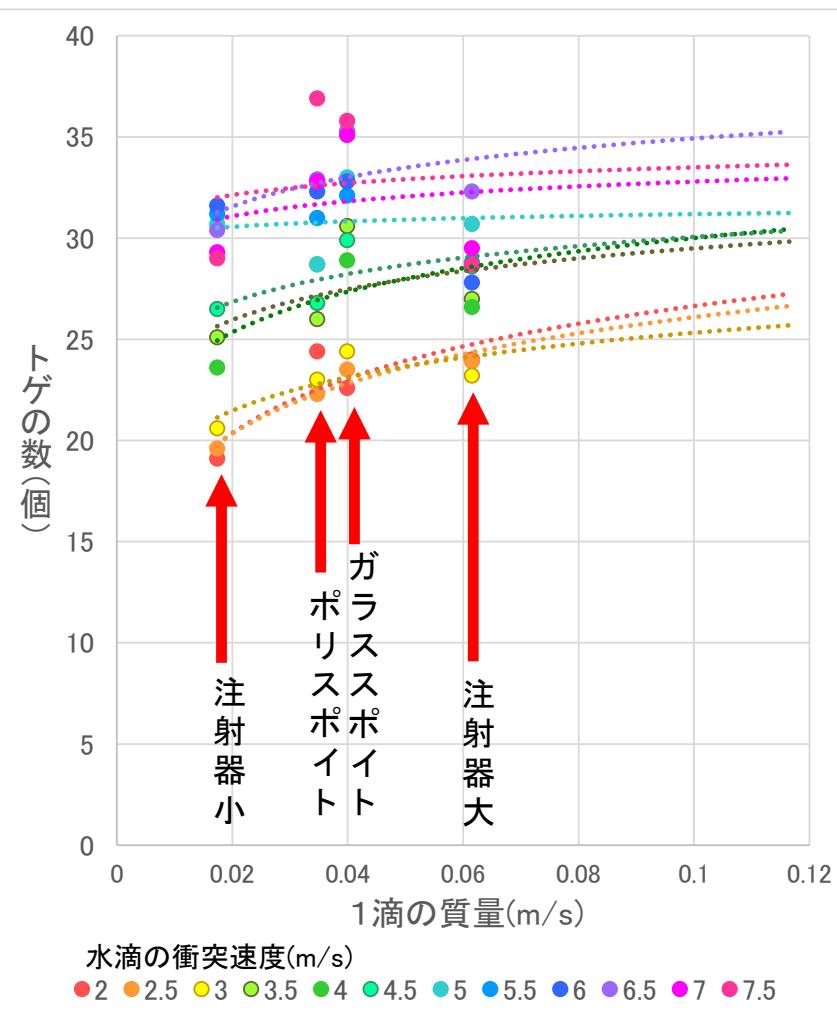
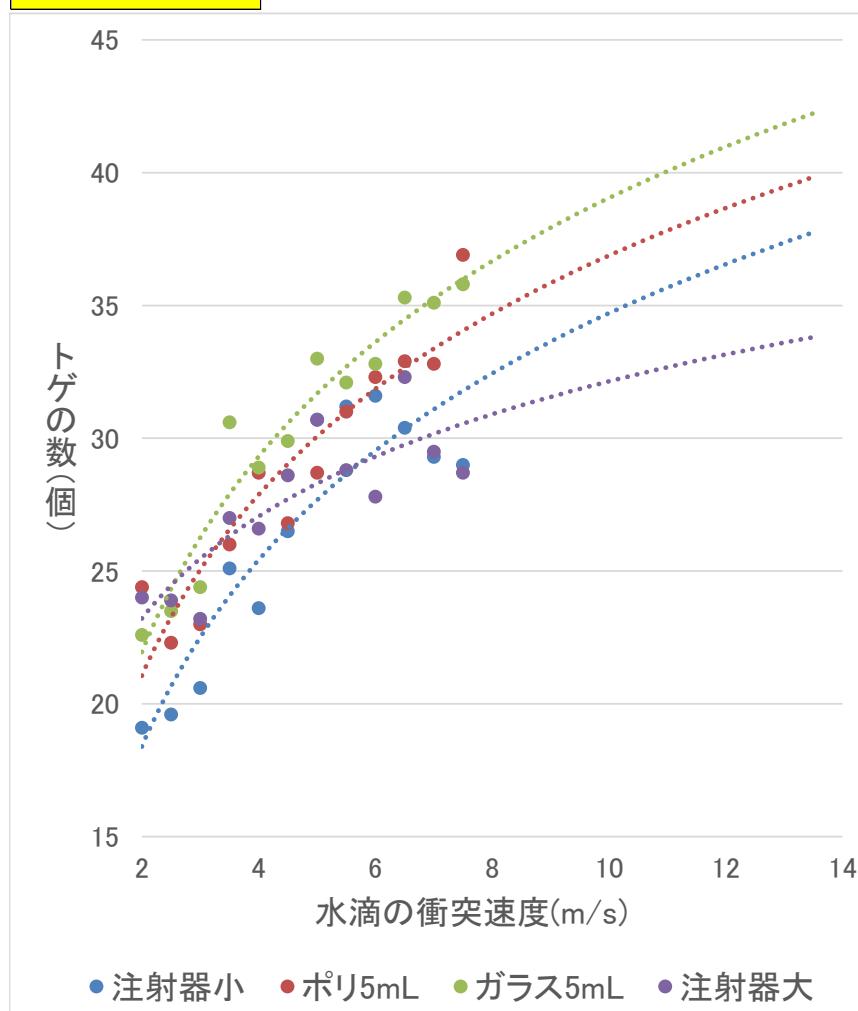
- ・水滴の落下速度が増加→落下痕の面積が増加
- ・1滴の質量が増加→落下痕の面積の増加が著しい。



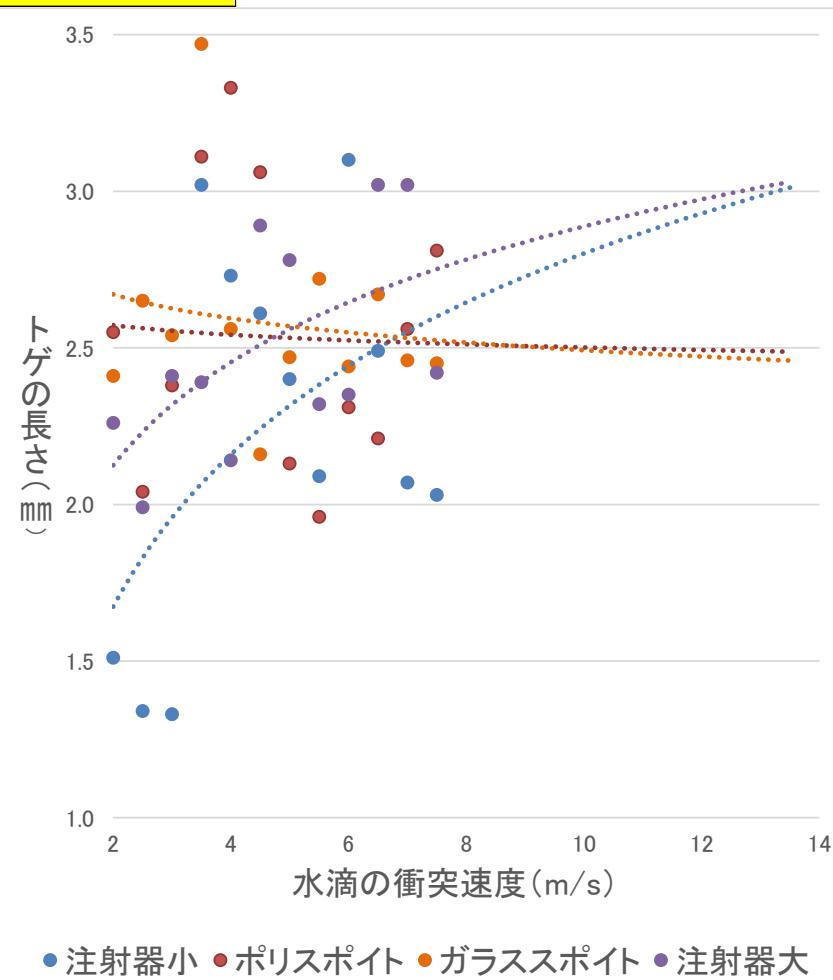
グラフ2 1滴の質量と落下痕の面積の関係

- ・1滴の質量が増加→落下痕の面積が増加
- ・水滴の衝突速度が増加→落下痕の面積の増加が著しい。

## 実験結果 [落下痕のトゲの数について]

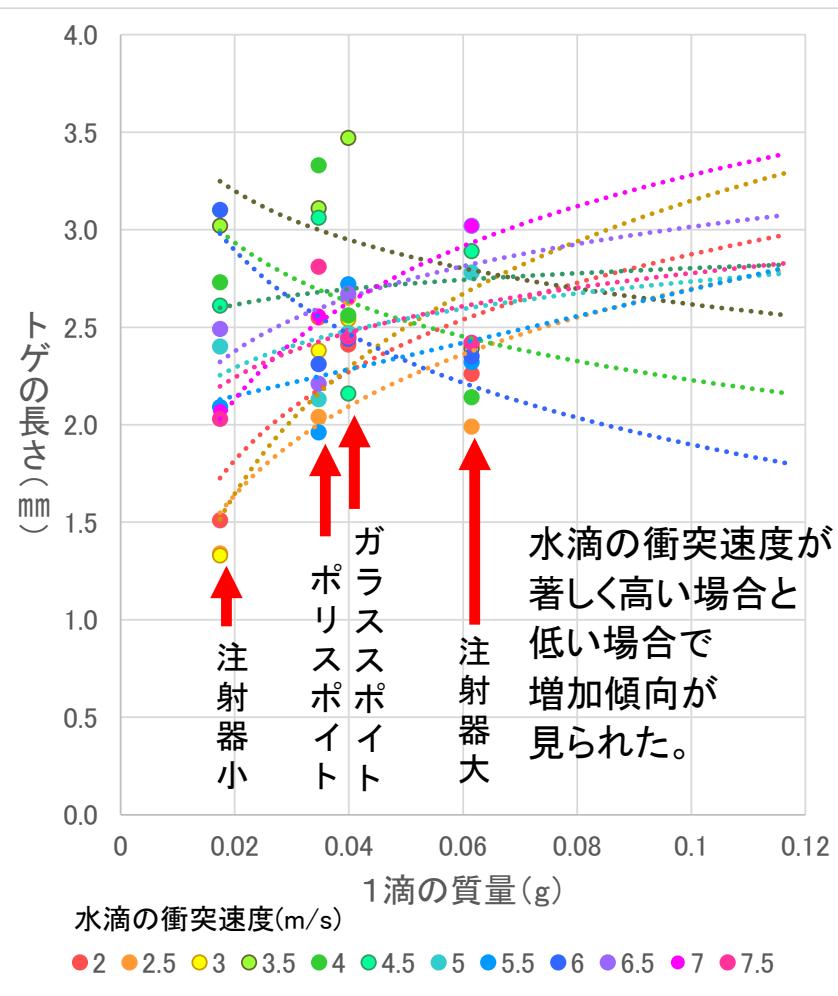


## 実験結果 [落下痕のトゲの長さについて]



グラフ5 水滴の衝突速度と落下痕のトゲの長さの関係

注射器小と注射器大において、  
水滴の衝突速度が増加→トゲの長さが増加



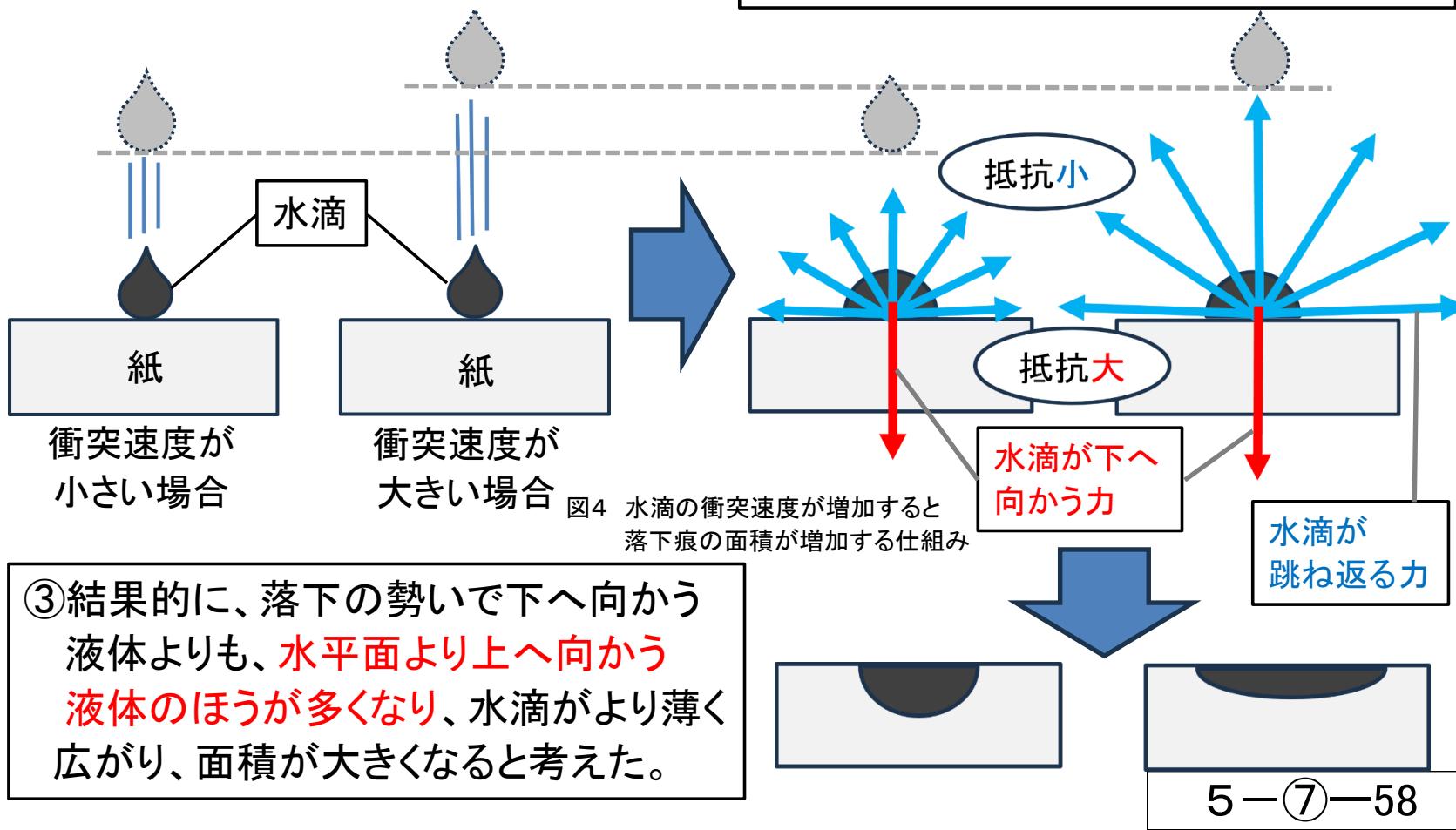
1滴の質量が増加→多くの衝突速度で  
トゲの長さが増加

## 考察

### [1] 水滴の衝突速度と落下痕の面積の関係

① 落下高度が高いと、水滴が紙に衝突する瞬間の速さが速くなる。

② 下へ向かう力と共に、跳ね返る力もより強くなると考えられる。この時水平面より下へは紙があるが、上は空中であり、下向きに比べ抵抗が少ない。



## 考察

### [2] 1滴の質量と落下痕の面積の関係

1滴の質量が増加すると落下痕の面積も増加した。

紙の纖維に沿って水は染みこみ、紙の纖維は水平方向に伸びているもののほうが多いため、水は鉛直下向きよりも水平方向に染みこみやすく、滴下した水滴は水平方向に染みている指標である面積に関係しているのではないか。

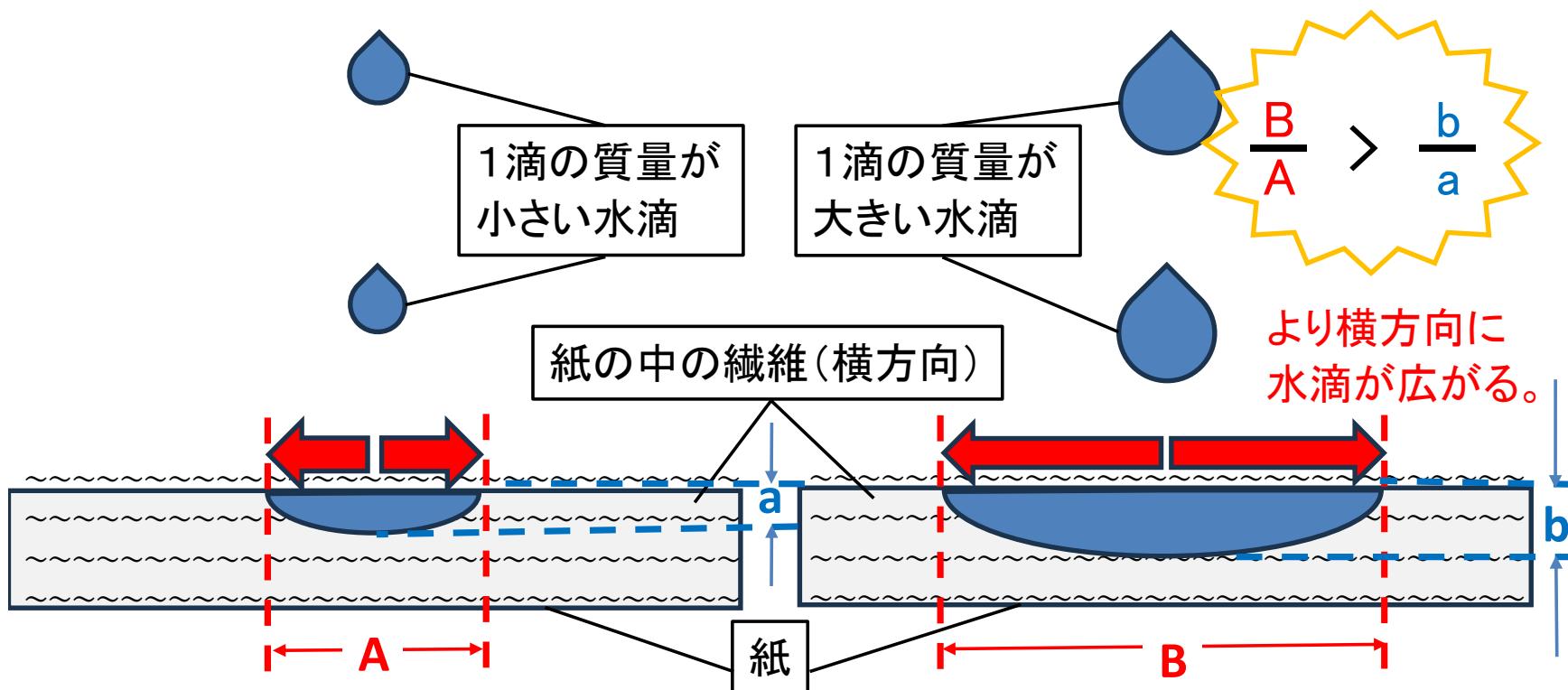


図5 1滴の質量と落下痕の面積の関係の考察

考察

[3]水滴の衝突速度と落下痕のトゲの数の関係①

衝突速度



落下痕の面積



落下痕の周の長さ



落下痕のトゲの数



①水滴の衝突速度が増加する。

②本実験の結果より、水滴の衝突速度が増加すると落下痕の面積が増加する。

③落下痕の面積が増加すると、周の長さも増加する。

④トゲの数も周の長さに比例して増加する。

考察

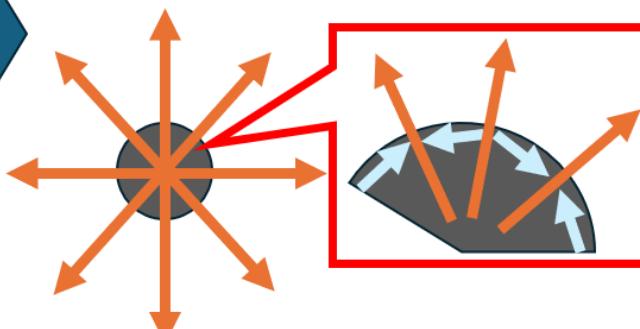
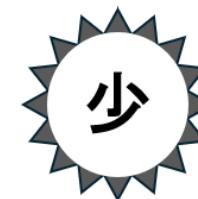
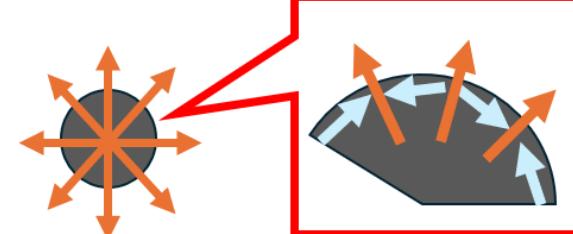
[3] 1滴の質量と落下痕のトゲの数の関係

衝突速度

落下衝撃

水が外側に  
向かう力

トゲの数



①水滴の  
衝突速度が  
増加する。

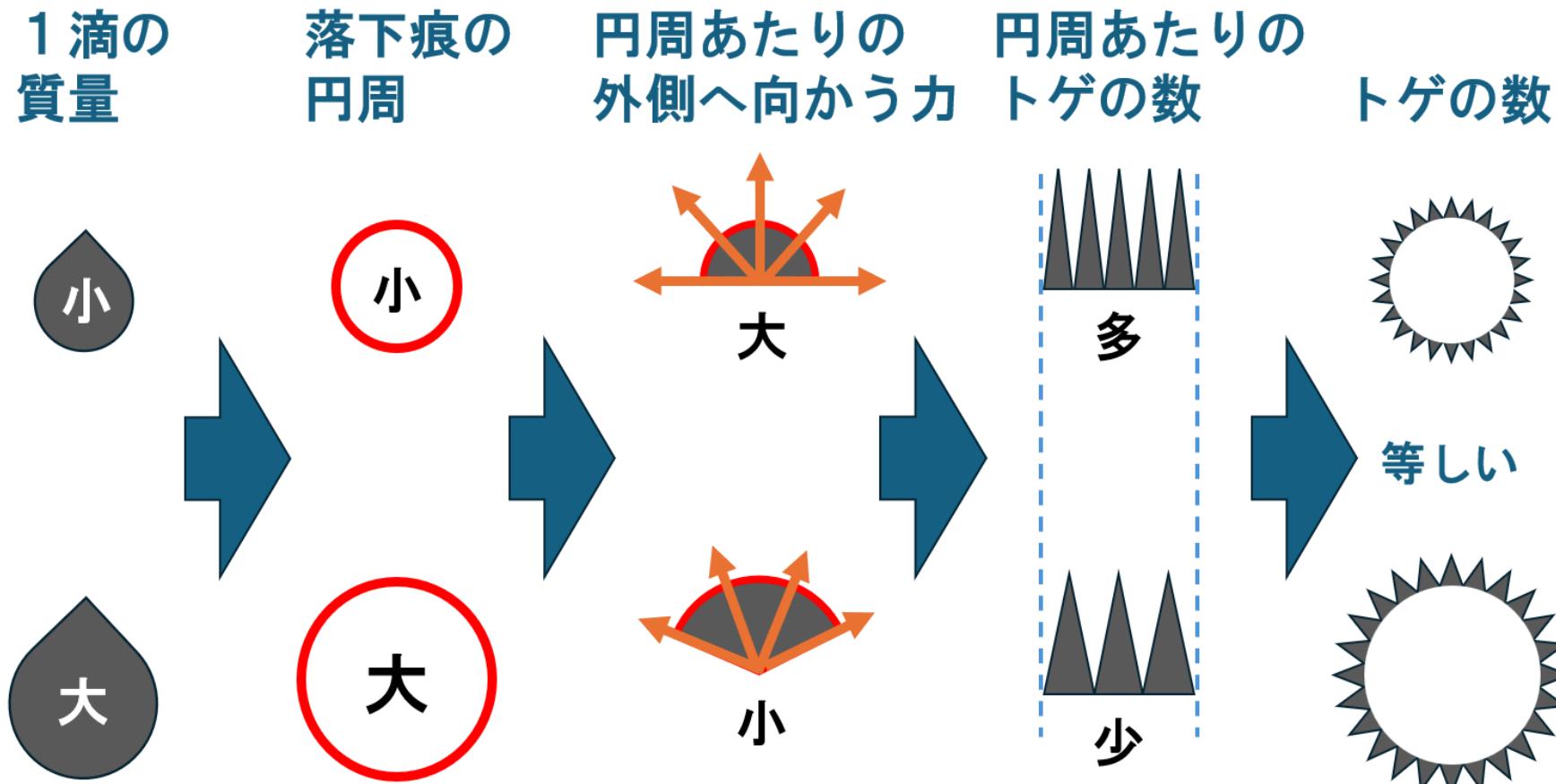
②水滴が紙に  
衝突するときの  
衝撃も増加する。

③水の表面張力よりも、  
衝突時の衝撃で水の粒が  
飛散する力の方が  
大きくなる。

④衝突速度が  
大きいほど  
トゲの数が  
増加する。

## 考察

## [4] 1滴の質量とトゲの数の関係



①1滴の質量が増加する。

②落下痕の円周が増加する。

③水滴が外側へ向かう力は等しいため、円周あたりの外側へ向かう力は減少する。

④円周あたりのトゲの数は減少する。

⑤落下痕のトゲの数は変化しない。

## 考察

[5]水滴の衝突速度とトゲの長さの関係 [6]1滴の質量と落下痕のトゲの長さの関係

①無限にトゲの長さが増加するとは考えられないため、

トゲの長さには限界があると考えられる。(図5)

そのため、水滴の衝突速度・1滴の質量とトゲの長さの関係のグラフは、図7のようになると考えられる。

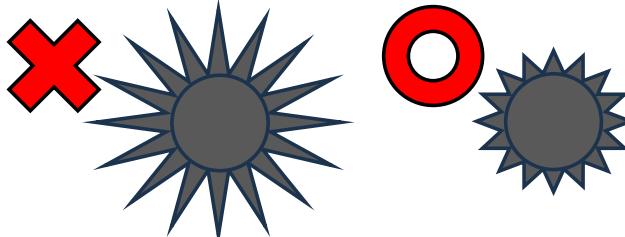


図5 ありえない落下痕とあり得る落下痕

②長さの限界を超えたトゲは、速度が大きいために

トゲから離脱し、「飛び」(図8)になったと考えられる。

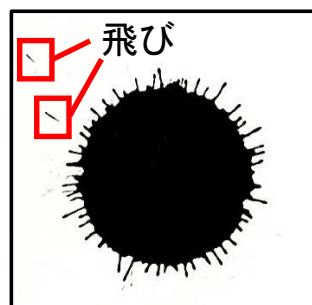


図8 飛び

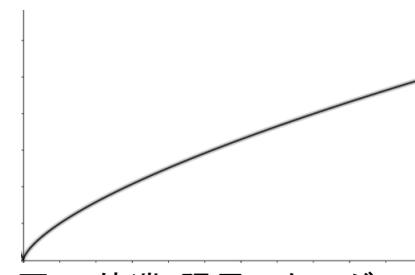


図6 停滞・限界のないグラフ

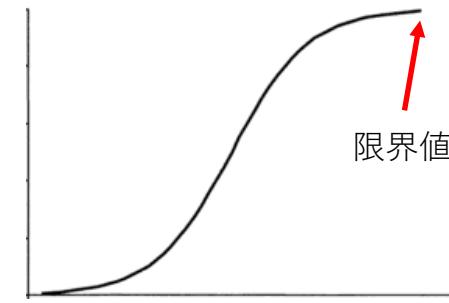


図7 停滞・限界のあるグラフ

## 結論

横軸	縦軸	落下痕の面積	落下痕のトゲの数	落下痕のトゲの長さ
水滴の衝突速度	図7(限界あり)	図7(限界あり)	図7(限界あり)	図7(限界あり)
1滴の質量	図6(限界なし)	図7(限界あり)	図7(限界あり)	図7(限界あり)

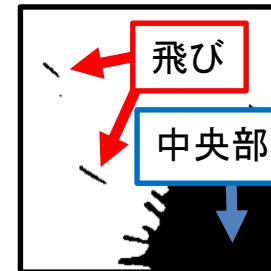
表3 落下痕の規則性①

	落下痕の面積	落下痕のトゲの数	落下痕のトゲの長さ	
衝突速度増加	増加	増加	変化なし	表4 落下痕の規則性②
1滴の質量増加	増加	変化なし	変化なし	5-12-63

跳ねて離れた「飛び」はどこへ行く？その規則性は？

飛びの規則性には、**衝突速度**と**1滴の質量**の両方が影響していた！

**研究動機** 落下痕を見たときに、**中央部**から離れた部分があり、その部分（以下**飛び**）についても調べたいと考えた。  
**飛びの定義**：0.1mm以上で、**中央部**から離れているもの。



**研究目的**

1. 衝突速度・1滴の質量と飛びの範囲の関係を調べる。
2. 衝突速度と飛びの数の関係を調べる。
3. 1滴の質量と飛びの数の関係を調べる。

**研究方法**

1. 到達距離ごとの飛びの数を数えて、**飛びの範囲**のグラフを作る。
2. すべての到達距離での飛びの数を合算して、  
**衝突速度が増加したときの飛びの数**についてグラフにする。
3. **1滴の質量が増加したときの飛びの数**についてグラフにする。

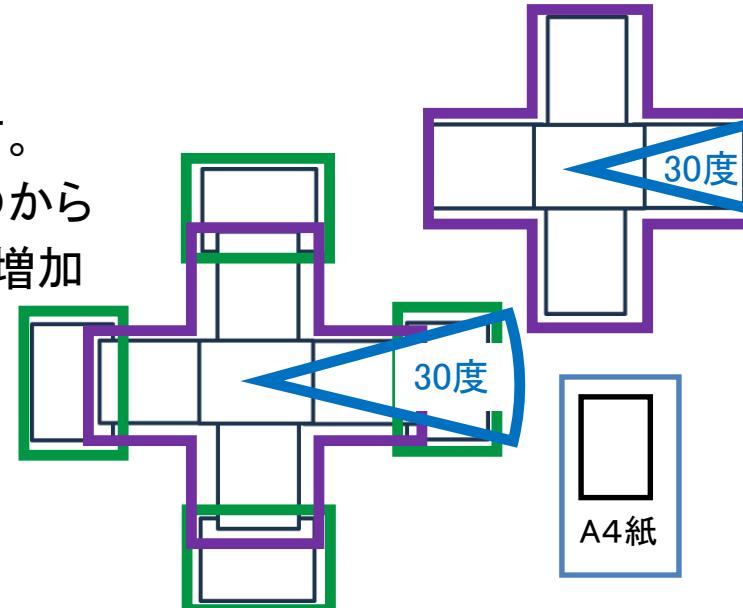
**研究条件** 速度・スポット・滴下試料は研究5（トゲの規則性）と同様。

## 研究仮説

1. 衝突速度が増加すると、衝突して跳ね返す力が大きくなるため、飛距離が増加する(グラフの範囲が広がる)。  
また、1滴の質量が増加すると、飛びに使われる質量も増加するため、飛びの数が増加する(グラフがより高くなる)。
2. 1と同様に、衝突速度が増加すると、衝突したときの跳ね返す力が大きくなるため、飛びの数は増加する。
3. 1と同様に、1滴の質量が増加すれば飛びの数は増加する。

## 実験方法

- ・滴下方法は、研究5と同様。
- ・A4の紙をつないだものに落とす。  
速度が小さい(高さが低い)ものから落としていき、飛びの飛距離が増加すれば、紙を追加する。
- ・落下痕の中心から、四方向の、30度の間にある飛びの数をかぞえて記録する。



## 装置・器具

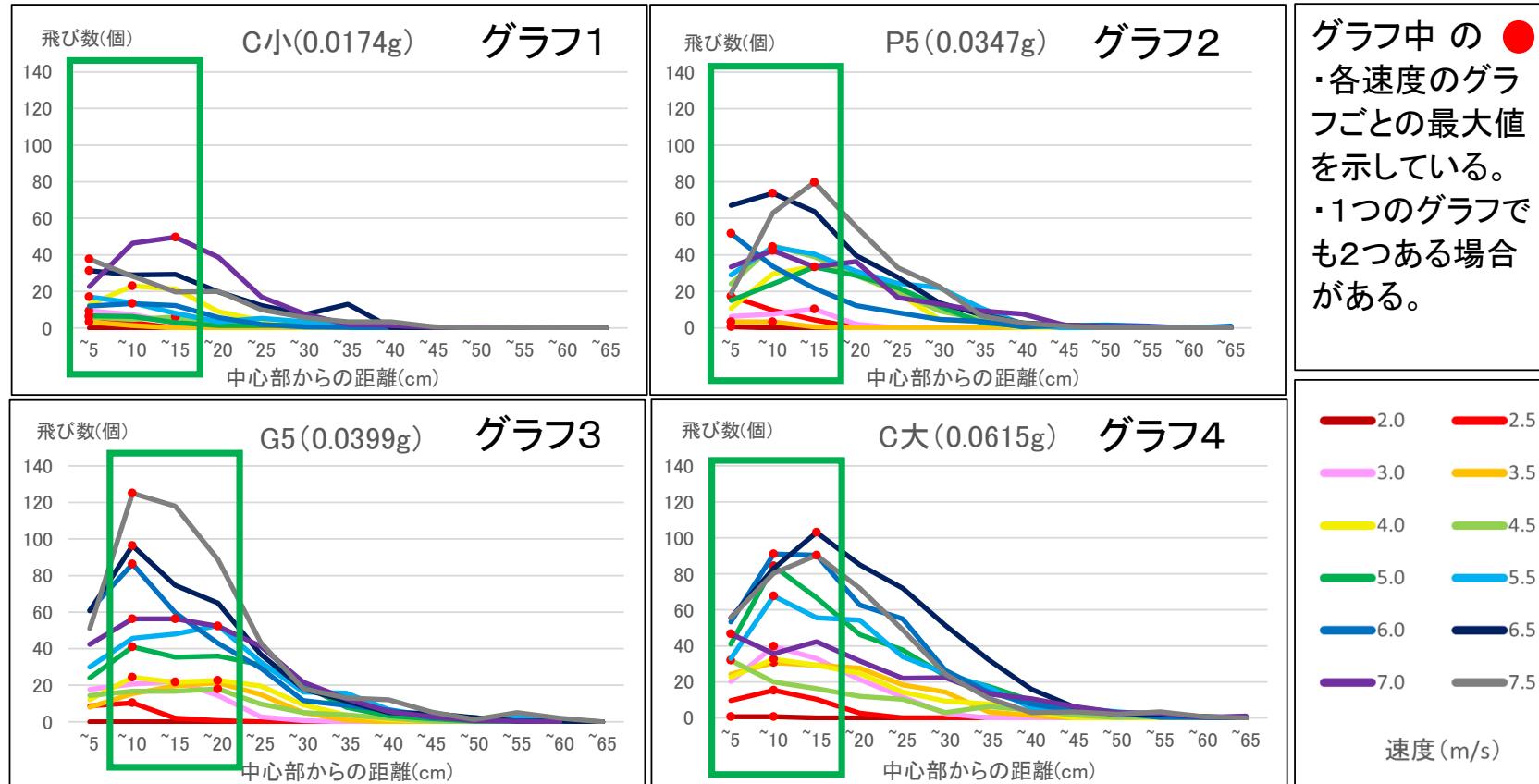
研究5と同様。

## 試薬・試料

滴下試料、被衝突物(紙)は研究5と同様。しかし紙は、飛びの記録のために、つなぎ合わせたものを使っている。

## 実験結果

### 1. 衝突速度・水滴の質量と飛びの範囲の関係



グラフ1～4: 中心からの距離ごとの飛びの数

- ・グラフは山なりが多いが、衝突速度や1滴の質量により、その形は異なっている。
- ・衝突速度が速いものほど、中心部からの距離が遠いところに飛びが生じている。
- ・各グラフの最大値(頂点)が0～20cmの間に収まっている。

## 実験結果

	0	~10	~20	~30	~40	~50	~60	~70	~80	~90	~110	(個)		
半径	~5	~10	~15	~20	~25	~30	~35	~40	~45	~50	~55	~60	~65	(cm)
2.0	<b>0.667</b>	<b>0.667</b>												
2.5	9.667	<b>15.333</b>	10.333	2.667										
3.0	20.333	<b>39.667</b>	33.000	21.333	11.667	2.333								
3.5	24.333	<b>30.667</b>	29.333	27.667	18.333	14.333	3.333	1.333						
4.0	22.667	<b>32.667</b>	29.333	24.667	14.333	9.333	7.667	3.667						
4.5	<b>32.000</b>	20.000	16.333	12.000	10.333	3.000	6.333	4.333	1.667	0.333	0.667			
5.0	41.000	<b>84.333</b>	66.667	46.333	37.667	23.333	17.667	9.667	6.000	2.667	1.333	0.667		
5.5	33.000	<b>67.667</b>	55.667	54.333	34.000	24.667	17.000	5.667	5.667	3.333	1.667	0.333		
6.0	53.333	<b>91.000</b>	90.333	62.667	55.000	26.333	14.333	7.667	4.000	2.667	0.333	0.333		
6.5	55.667	83.000	<b>103.000</b>	85.000	72.000	51.333	32.333	16.000	6.000	1.667	2.000	0.667		
7.0	<b>46.667</b>	35.667	42.333	31.667	22.000	22.333	13.333	10.667	6.333	3.000	2.667	0.333	1.000	
7.5	55.667	80.333	<b>90.333</b>	72.000	49.000	24.333	11.000	3.000	3.333	2.000	3.333	0.667		<b>最大値</b>

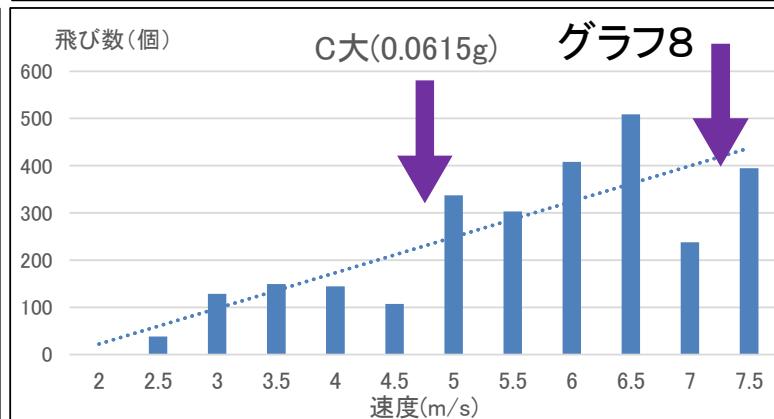
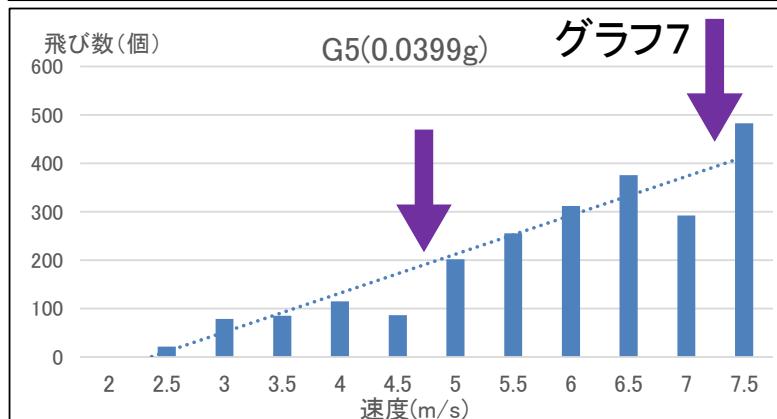
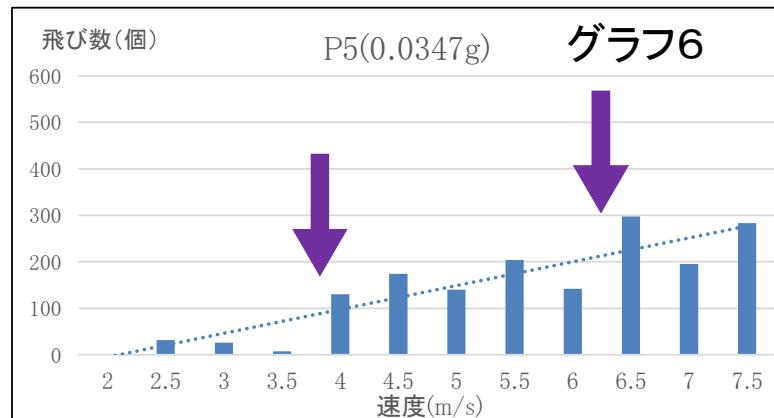
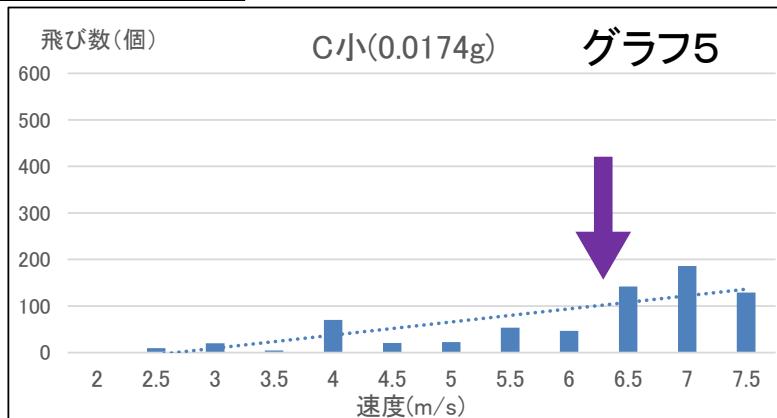
表1:速度ごとの飛びの数の平均(C大) ※空白のところの値は0

- ・衝突速度が増えると、飛びの飛距離がのびる、つまり飛びの範囲が広がる  
ということが、グラフと比べてより明確にわかる。
- ・他のスポット(C小,P5,G5)の表からも同じことがいえた。

## 実験結果

### 2. 衝突速度と飛びの数の関係

青色点線:近似直線



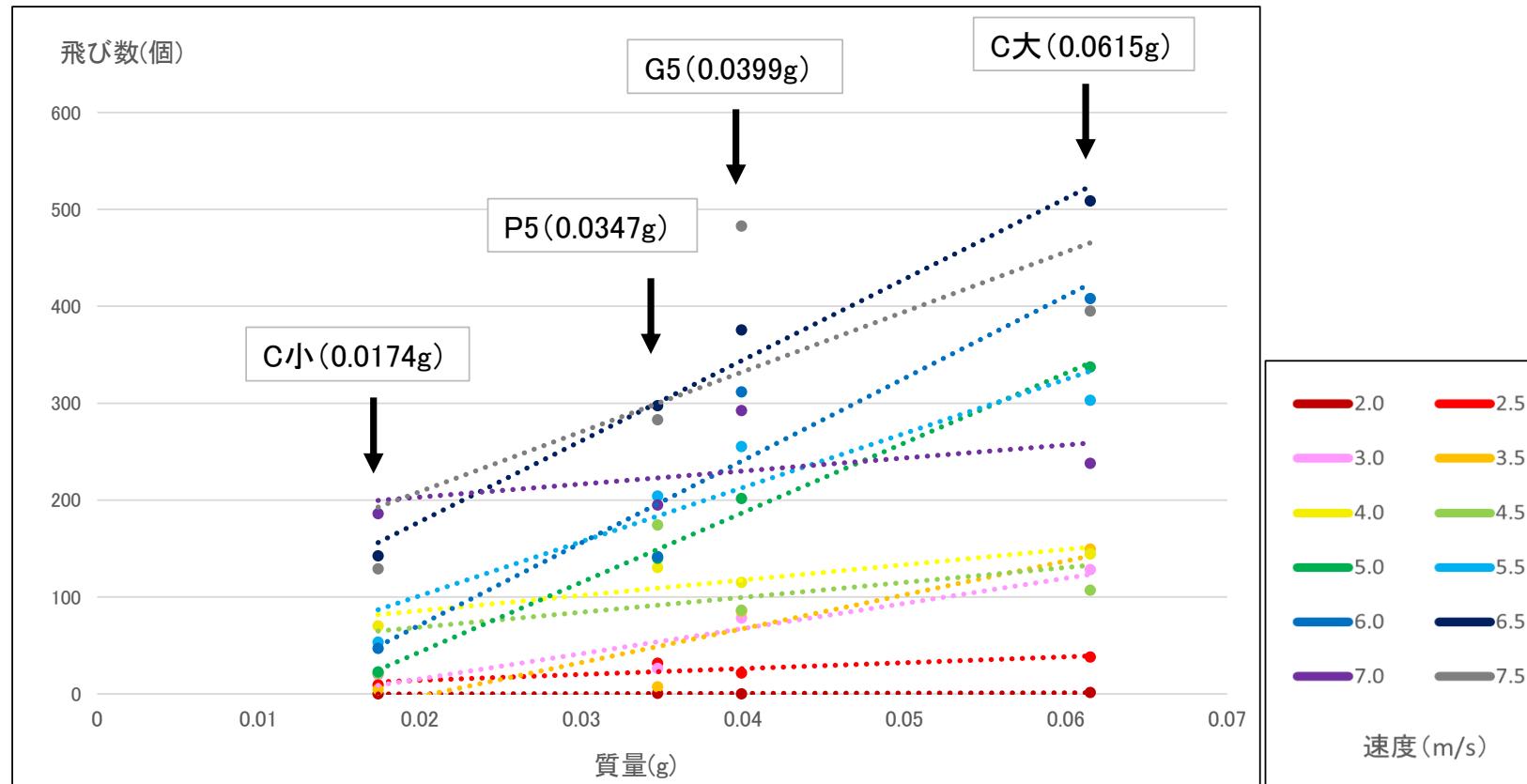
グラフ5～8:1滴の質量ごとの、衝突速度の増加による飛びの数の変化

- ・どの条件でも、衝突速度が速くなるほど飛びの数は増加している。
- ・G5以外のグラフでは、最大が7.5m/sではなく、6.5m/sや7.0m/sになっている。
- ・どの質量のグラフでも、急激に増えている箇所 ↓ がある。

## 実験結果

### 3. 1滴の質量と飛びの数の関係

各色点線:近似直線

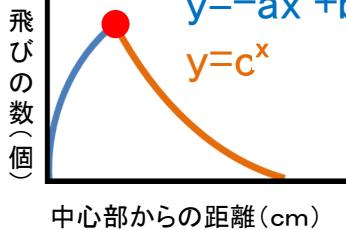
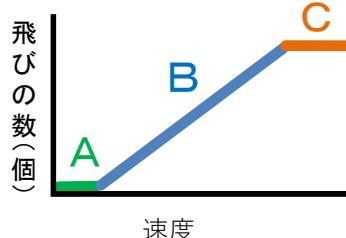


グラフ9:1滴の質量の増加による飛びの数の関係

- ・1滴の質量が増加すると、飛びの数は増加する。
- ・1滴の質量が増えると、速度ごとの飛びの数の差が広がっている。

→ 未広がり

## 考察

1. 
 $y = -ax^2 + b$   $y = c^x$ 
 - 中心部に近いところでは飛び方の違う複数の飛びがあり、そのため飛びの数が増えて青線のようになり、以降は飛びの種類や遠くに到達する飛びが減り、橙線のようになるのではないか。  
 - また、これらのことにより最高値が左側によるのではないか。
2. 
 $y=0$   $y=ax+b$   $y=c$ 
 A: 2.0m/sでは、落下の衝撃  $\leq$  表面張力だったため、飛びがほとんどできなかつたのではないか。  
 B: 落下の衝撃と表面張力の差だけ飛びが飛ぶ速度が速くなり、速度が速くなると飛びが増えたのではないか。  
 C: 飛びにも限界値があるため、7.5m/s以外が最大となつたのではないか。また、いずれは横ばいになるのではないか。
3. 
 - 水滴の落下時、上部が下部を押して飛びができる。1滴の質量が増えると上部下部とも増えるため、飛びが増えたのではないか。  
 - 速度による増加と1滴の質量による増加の二つの要因によって、グラフが未広がりの形になったのではないか。

## 結論

1. 衝突速度や1滴の質量が増えると飛びの数や飛距離は増加する。
2. 衝突速度が増えると飛びの数は増加する。
3. 1滴の質量が増えると飛びの数は増加する。

滴下された水滴は、どのような変遷をたどって落下痕となるのか

ミルククラウンが**のびーて、離れーて**できる

**動機** トゲや飛びのでき方を調べることで、滴下された雲にどのように1滴の質量や衝突速度による力がはたらくのかを調べるため。

**目的** トゲや飛びがどのようにしてできるかを解明する。

**研究方法** 水滴の落下時の様子を見て、衝突後の液体の挙動を観察する。

### 研究条件

**固定条件**

- ・再生紙を被衝突物とし記録用紙とする。
- ・衝突物(液体)は水道水の密度に近い密度  $0.99\text{g/cm}^3$  のインク水を使う。
- ・落下痕のでき方を撮影するカメラの撮影角度を一定にする。
- ・滴下・撮影は、校舎4階(標高14m)の実験室で行う。

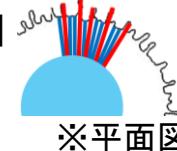
**可変条件**

- ・衝突速度(2.0m/s から 7.5m/s まで 0.5m/s ずつ12種類の速度)
- ・スポットの種類(ポリスポット、ガラススポット、注射器大・小)

## 仮説一【トゲのでき方】

図1・2・3・4 トゲのでき方の仮説 イメージ図

1. 選ばれしトゲ理論：短いトゲの連続の中に特異に長いトゲが発生する。



2. 水はみんなで集まりたがる理論：衝突した時に飛び散った水の粒が表面張力で集まってトゲになる。



3. のびる理論：水滴が落ちた時にフチができ、そのフチが落ちてトゲになる。



4. かがみもち理論：水滴内にできた水の層が上から押されて潰されて横に広がりトゲができる。



## 仮説二【飛びのでき方】

図5・6 飛びのでき方の仮説 イメージ図

1. 滴下瞬間分裂理論：水滴が衝突した瞬間に、水滴から分裂してできた無数の粒が離れて落ち、飛びとなる。



2. 飛びはトゲの兄弟姉妹理論：トゲができる過程でトゲの先端から離れた水の粒が落ち、飛びとなる。



**実験方法** ハイスピードカメラを用いて動画を撮影し、スロー再生で動きを観察する。

写真1 ハイスピードカメラ



## 装置・機材・器具

- ・滴下装置
- ・スポット
- ・巻き尺
- ・滴下位置固定器
- ・バドミントン審判台(落下高度を高くするため)
- ・照明装置
- ・ハイスピードカメラ(株式会社フォトロン様から指導・貸与されたもの)

## 試薬・試料

- ・衝突物：インク水
- ・被衝突物：再生紙

## 実験手順

1. 滴下装置に滴下器具を設置する。
2. 滴下器具の先端と落下場所の距離を  
衝突速度から算出された落下高度( $h$ )に合わせる。
3. 滴下器具にインク水を溜める。
4. 落下地点に記録用紙(再生紙)を置く。
5. ハイスピードカメラを落下地点から  
**水平距離1m**離れたところに設置する。
6. 記録用紙1枚につき1滴滴下する。  
その様子をハイスピードカメラで撮影する。
7. 3滴 滴下する。  
(ある1つの条件につき記録用紙と  
動画を3種類ずつ取得)
8. 各高度における撮影した記録用紙・動画を  
分析し、**トゲ**や**飛び**のでき方を分析する。

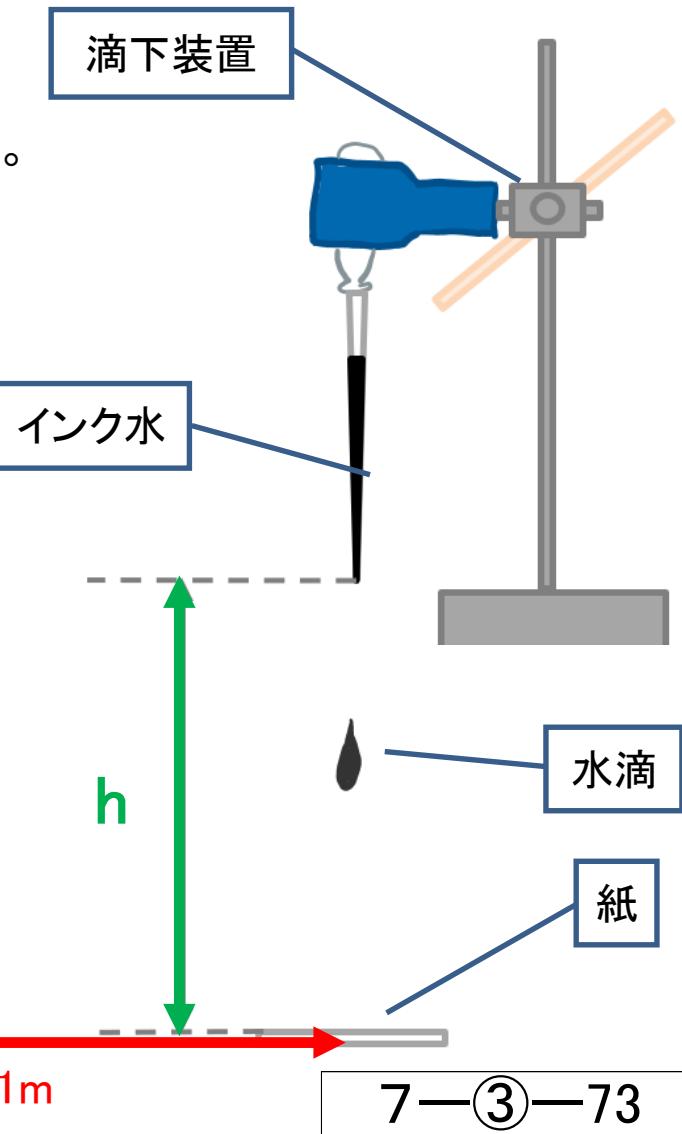
ハイスピードカメラ



1m

7—③—73

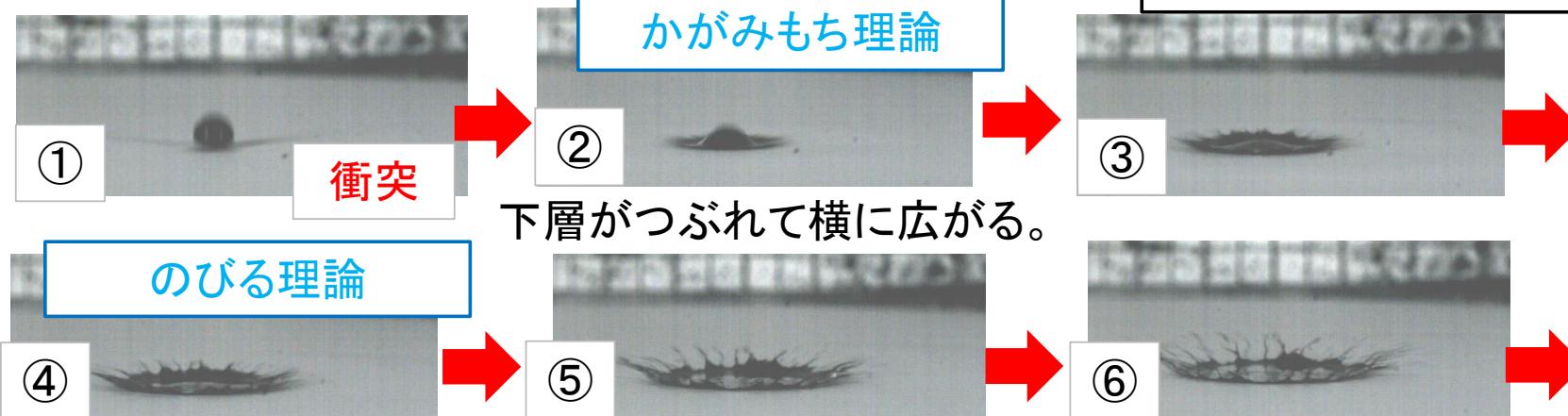
図7 滴下状態の撮影の仕方



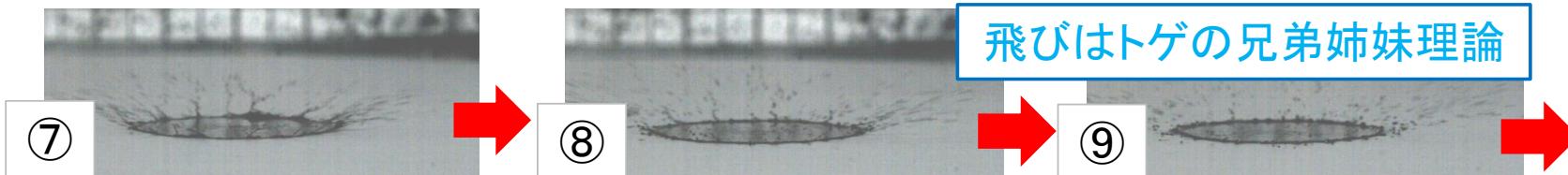
## 実験結果

トゲには「かがみもち理論」「のびる理論」、  
飛びには「トゲの兄弟姉妹理論」がはたらく。

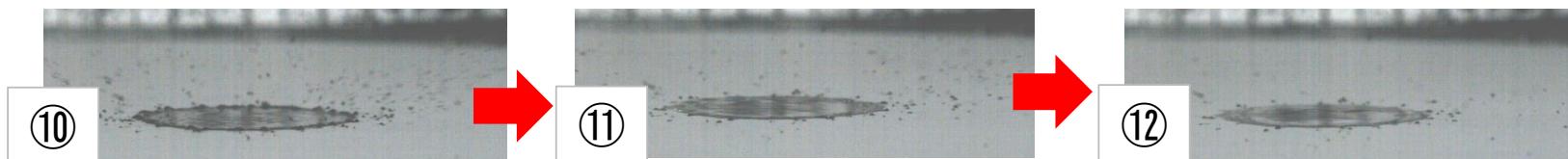
## 写真2 動画を切り取ったもの



中央の球部がさらに下方に押し込まれ、フチ(ミルククラウン)ができる。



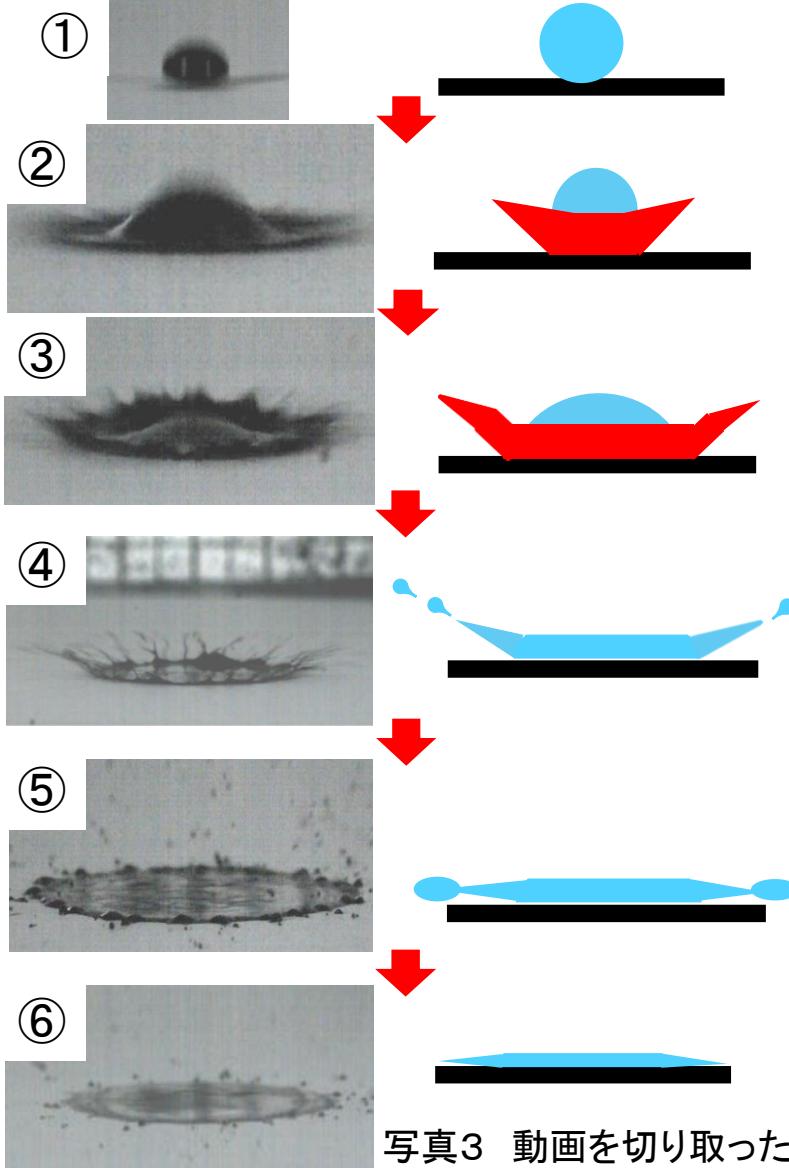
先端で耐えられなくなった液体はフチの先端から離れて空中に舞い、表面張力で集まり飛びとなる。残りの部分が落ちてトゲになり、先端の方に液体がたまる。



先端にたまつた液体の余りが中央部に戻され落下痕となる。

## 考察

## 落下痕のでき方



- ① 水滴が滴下され、衝突する。
- ② **下層部**が上方向に跳ね返ろうとするが  
後から来る上層部につぶされ、  
斜め上方向にとぶ。 **(かがみもち理論)**
- ③ ミルククラウンのようにフチができ、中央が  
沈み込んでその形のまま横にのびる。  
**(のびる理論)**
- ④ 表面張力で耐えられない先端部分が  
フチから離れ、それらが空中で  
ぶつかり合うことで表面張力がはたらき  
飛びとなる。 **(飛びはトゲの兄弟姉妹理論)**
- ⑤ 残ったフチは表面張力により再度集結し、  
フチの部分に液体がたまる。  
その過程で紙面へと落ちて**トゲ**となる。
- ⑥ 先端にたまつた液体の余りは、液量を  
平均化(厚さ)をしようと**中央部に戻**される。

写真3 動画を切り取ったもの / 図8 落下痕 断面図

## 結論

1. トゲは、かがみもち理論とのびる理論の複合によってできる。

飛びは、トゲができる過程で表面張力に耐えられずフチから離れたもので、飛びはトゲの兄弟姉妹理論によって水の粒となる。

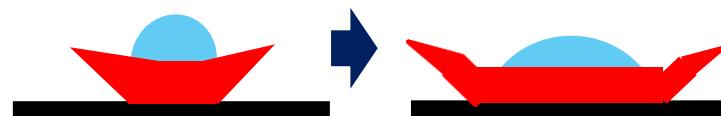


図9 主なトゲのでき方



図10 主な飛びのでき方

2. 1つの水滴の中で3層に分かれているかのように個別に動き、

1層目と2層目の相互作用からトゲが生じる。

さらに3層目の落下によって平準化される。

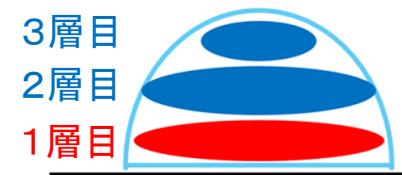


図11 水滴の層化 イメージ図

3. 1滴の質量や衝突速度は上からの圧力としてはたらき、

斜め上方向に液体を飛散させ、

トゲと飛びを作る要因となっている。

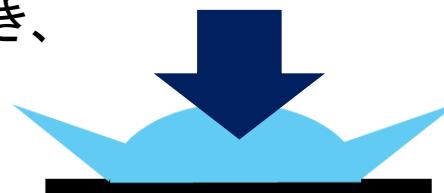


図12 上からの圧力 イメージ図

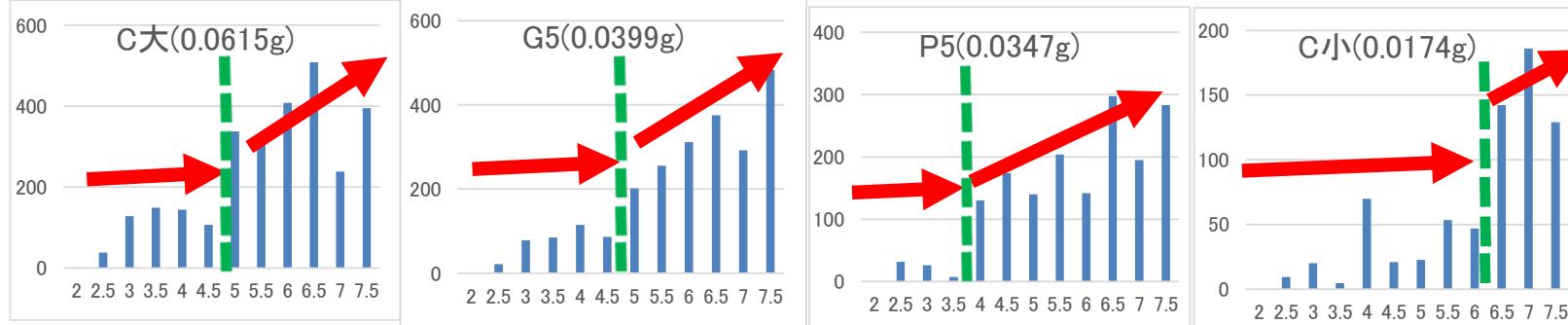
## 展望

トゲの成立条件と不成立条件の境界数値(衝突速度)を探す。

また、トゲや飛びが不成立の場合の落下痕のでき方を詳しく分析する。

## 総合的考察

### 観点1 落下痕の規則性(トゲと飛びの規則性) 特異点(-----)の存在

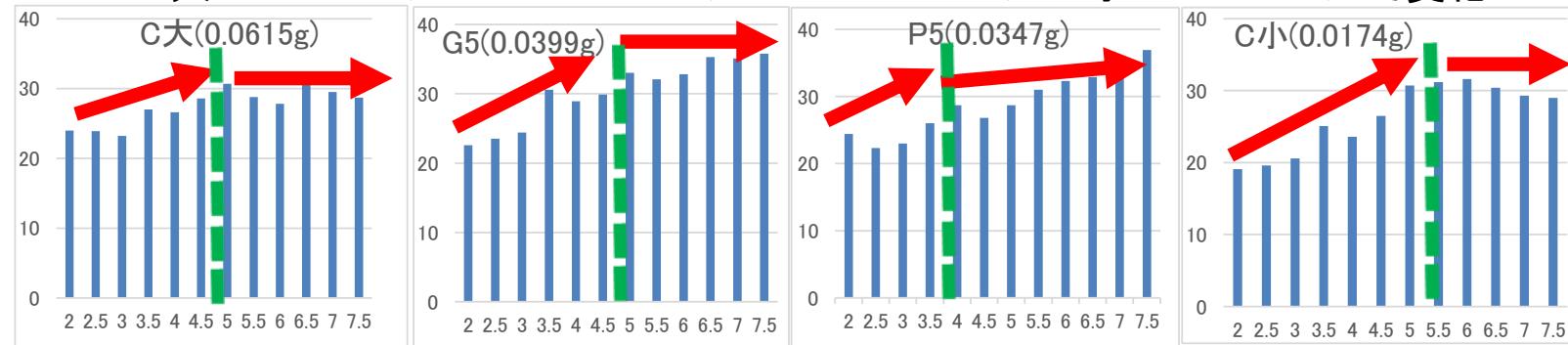


グラフ1・各スポットごとの衝突速度と飛びの数の関係

横軸:速度(m/s) 縦軸:飛びの数(個)

合計の飛びの数はどのスポットでも途中で急激に増加していることが分かる。

C大:4.5～5.0m/s G5:4.5～5.0m/s P5:3.5～4.0m/s C小:6.0～6.5m/sで変化



グラフ2・各スポットごとの衝突速度とトゲの数の関係

横軸:速度(m/s) 縦軸:トゲの数(個)

トゲの数の増え方(グラフの傾き)に着目すると、途中で傾きが小さくなるところがある。

C大:4.5～5.0m/s G5:4.5～5.0m/s P5:3.5～4.0m/s C小:5.0～5.5m/sで変化

## 総合的考察

トゲが停滞し始める衝突速度



飛びが急激に増加する衝突速度



トゲ増加 → 飛び増加 と推移していく。

これは研究3「落下痕のでき方」で解明できた通り、"飛び"は"トゲ"の兄弟であると考えられる。トゲが限界まで増加し、衝突の衝撃でトゲとして耐えきれなくなると飛びが発生するためだと考えられる。トゲが停滞し始めるまでの衝突速度まで飛びが0でないのはその飛びがトゲの延長として現れたものではなく、紙との衝突の衝撃で落下痕から直接派生したものが飛びとして現れているからだと推測される。

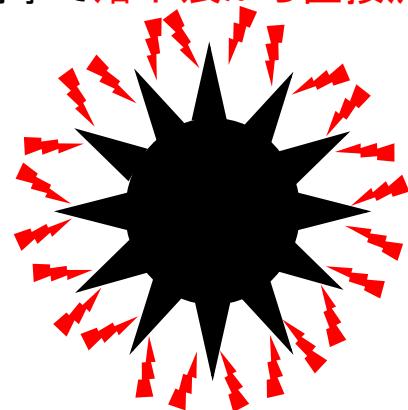


図1 トゲの数の限界、  
トゲとして耐えている

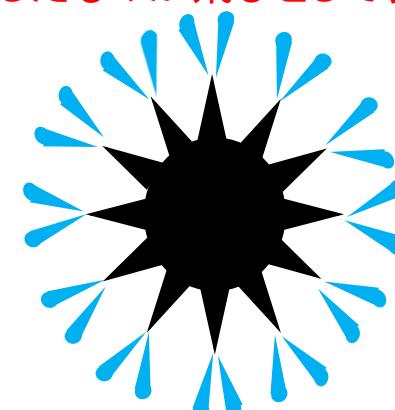


図2 トゲが耐えきれなくなり  
トゲの先から飛びとして放出

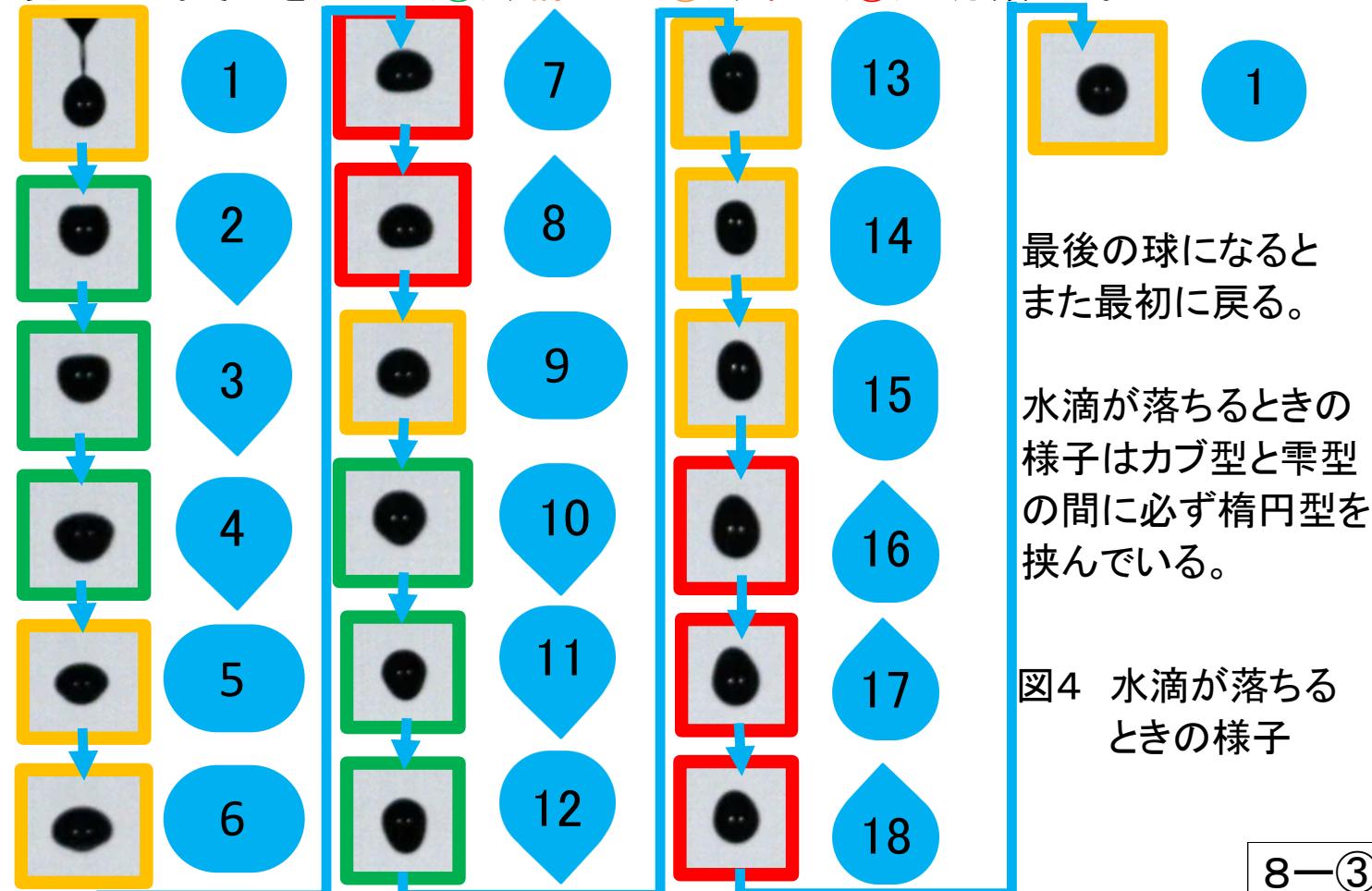


図3 トゲの先からではなく  
紙との衝突の衝撃で派生し  
た飛び

## 総合的考察

### 観点2 水滴が落ちるときの形と落下痕について

水滴の落下の様子をハイスピードカメラで撮影すると、水滴の形は**周期的な変化**が見られた。それを**カブ型(①)**、**楕円型(②)**、**霁型(③)**に分類した。



## 総合的考察

結果より水滴は、「楕円型」⇒「カブ型」⇒「横楕円型」⇒「霁型」⇒「横楕円型」⇒「カブ型」⇒「縦楕円型」⇒「霁型」⇒「球(楕円型)」と周期的に変化することが分かった。またその変化の大きさは落下時間に伴い、小さくなっていく。

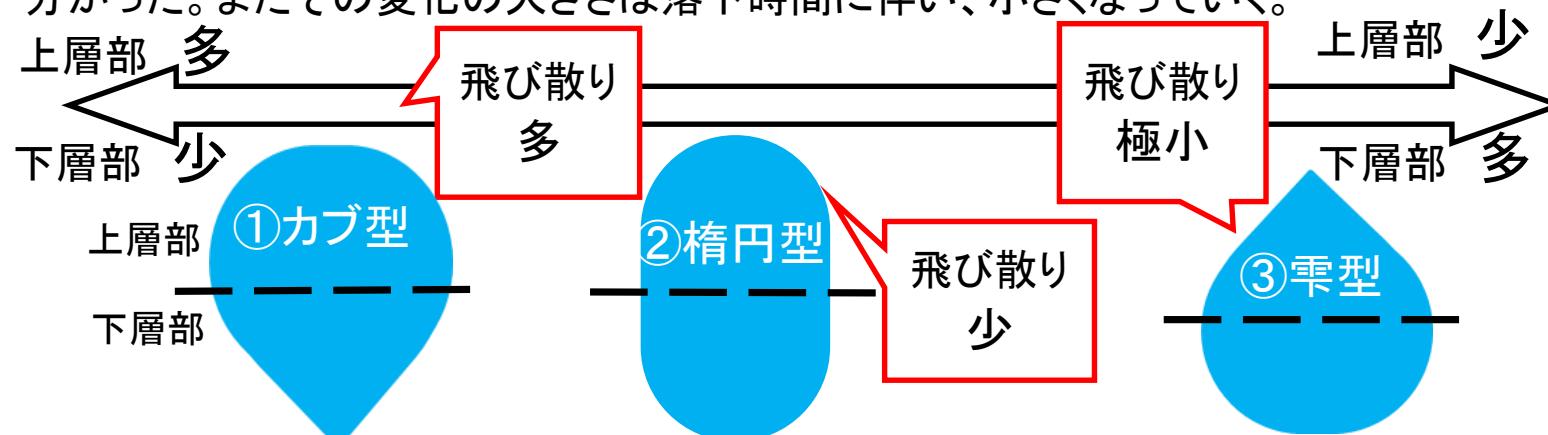


図5 水滴が落ちるときの形と飛び散りの量

下層部の役割: 落下”痕”の形成(液体が固体に衝突する条件)

上層部の役割: 飛び散り(トゲ・飛び)の形成(液体が固体・液体に衝突する条件)

①「下層部で形成される落下痕」 < 「上層部が広がる量」

固体からの垂直抗力を受ける → 飛び散りは多い

②「下層部で形成される落下痕」 = 「上層部が広がる量」

下層部と紙との接地面積も小さい(飛び込みと同じ原理) → 飛び散りは少ない

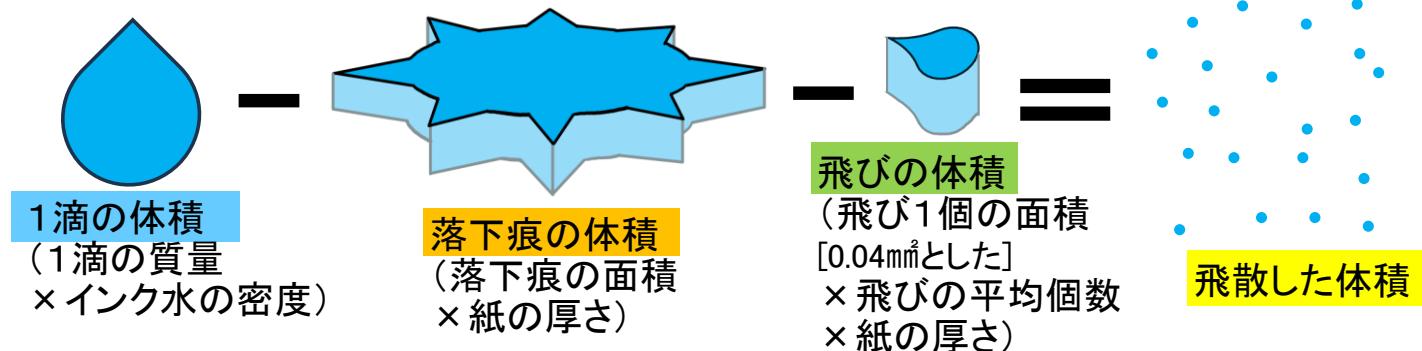
③「下層部で形成される落下痕」 > 「上層部で広がる量」

液体(すでにいる下層部)からの垂直抗力を受ける → 飛び散りは少ない

## 総合的考察

### 観点3・落下痕・飛び・飛散の割合

まず仮説として、「1滴の質量から求めた 1滴の体積 から、 落下痕(トゲを含む)の体積 飛びの体積 を引いた値が、 飛散した体積 になる」と考えた。



※今回、浸透深度は紙の厚さである、また飛びの大きさは一様であると仮定した。

以下は各スポットの、落下痕・飛び・飛散の割合である。

C小 (0.0174g)	1滴の体積	痕の体積	飛び体積	飛散量	痕の割合	飛びの割合	飛散の割合	C大 (0.0615g)	1滴の体積	痕の体積	飛び体積	飛散量	痕の割合	飛びの割合	飛散の割合
2	17.41393	9.453179	0	7.960752	0.543	0	0.457	2	61.54924	23.45709	0.0000467	38.0921	0.381	0.000000758	0.619
2.5	17.41393	9.758114	0.000327	7.65549	0.56	0.0000188	0.44	2.5	61.54924	22.88568	0.0013315	38.66223	0.372	0.0000216	0.628
3	17.41393	9.735251	0.000701	7.67798	0.559	0.0000402	0.441	3	61.54924	23.94029	0.0044968	37.60445	0.389	0.0000731	0.611
3.5	17.41393	12.84146	0.000164	4.572308	0.737	0.00000942	0.263	3.5	61.54924	35.37717	0.0052326	26.16683	0.575	0.000085	0.425
4	17.41393	12.49929	0.002453	4.912185	0.718	0.000141	0.282	4	61.54924	33.84006	0.0050574	27.70413	0.55	0.0000822	0.45
4.5	17.41393	13.52737	0.000736	3.885828	0.777	0.0000423	0.223	4.5	61.54924	35.31182	0.0037493	26.23367	0.574	0.0000609	0.426
5	17.41393	16.89804	0.000794	0.515097	0.97	0.0000456	0.0296	5	61.54924	39.93745	0.0118202	21.59997	0.649	0.000192	0.351
5.5	17.41393	16.53397	0.001869	0.878088	0.949	0.000107	0.0504	5.5	61.54924	39.83636	0.0106171	21.70226	0.647	0.000172	0.353
6	17.41393	16.65732	0.001647	0.754969	0.957	0.0000946	0.04334	6	61.54924	38.946	0.0142963	22.58895	0.633	0.000232	0.367
6.5	17.41393	17.9156	0.004987	-0.50666	1.03	0.000286	-0.0291	6.5	61.54924	47.87577	0.0178237	13.65565	0.778	0.00029	0.222
7	17.41393	17.88354	0.006517	-0.47613	1.03	0.000374	-0.0273	7	61.54924	46.60355	0.0083395	14.93735	0.757	0.000135	0.243
7.5	17.41393	18.11148	0.00452	-0.70206	1.04	0.00026	-0.0403	7.5	61.54924	47.78011	0.0138408	13.75529	0.776	0.000225	0.223

表1 C小とC大の落下痕・飛び・飛散の割合

## 総合的考察

表2 G5とP5の落下痕・飛び・飛散の割合

G5 (0.0399g)		1滴の体積	痕の体積	飛び体積	飛散量	痕の割合	飛びの割合	飛散の割合		P5 (0.0347g)	
2	39.93195	22.7576	0	17.17434	0.570			0.43		2	34.72778
2.5	39.93195	22.91502	0.000759	17.01617	0.574	0.000019	0.426		3	34.72778	
3	39.93195	23.59392	0.002745	16.33528	0.591	0.0000687	0.409		3.5	34.72778	
3.5	39.93195	28.94024	0.00299	10.98872	0.725	0.0000749	0.275		3.5	34.72778	
4	39.93195	28.1846	0.00403	11.74332	0.706	0.000101	0.294		4	34.72778	
4.5	39.93195	28.01054	0.003025	11.91838	0.701	0.0000758	0.298		4.5	34.72778	
5	39.93195	30.35559	0.007066	9.569289	0.76	0.000177	0.24		5	34.72778	
5.5	39.93195	29.70472	0.008947	10.21828	0.743	0.000224	0.256		5.5	34.72778	
6	39.93195	30.87655	0.010921	9.044478	0.773	0.000273485	0.226		6	34.72778	
6.5	39.93195	44.79041	0.013163	-4.87162	1.12	0.00033	-0.122		6.5	34.72778	
7	39.93195	41.88962	0.010243	-1.96792	1.05	0.000257	-0.0493		7	34.72778	
7.5	39.93195	44.69212	0.016913	-4.77709	1.12	0.000424	-0.12		7.5	34.72778	

【1滴の体積】 < 【落下痕の体積】 + 【飛びの体積】となり、飛散量が**負の値**をとった衝突速度の項目があった(  )。また、飛散量は衝突速度が速くなるほど減少している。衝突の衝撃が大きいほど、トゲ・飛びにならず飛散してしまったものが多いと推察され、**最初の仮説は否定された**。負の値となる原因として考えられるのは、落下痕・飛びの厚さを紙の厚さとみなし、一定であるとしたことである。つまり、**落下痕(・飛び)の浸透深度は衝突速度が速くなるにつれて、浅くなる**と推察される。また、浸透のメカニズムについて、今回は「円柱」で浸透していくと仮定したが、昨年の研究でも解明した通り「カブ型浸透」であることが考えられる。



## 総合的考察

### 観点4 トゲの飛び散り角度

衝突速度 (m/s)	C大(0.0615g)	G5(0.0615g)	P5(0.0615g)	C小(0.0174g)
2.0				
2.5				
3.0				
3.5				
4.0				
4.5				
5.0				
5.5				
6.0				
6.5				
7.0				
7.5				

写真1 各スポット、衝突速度のトゲの角度

各スポット、速度においてできる飛び散りのトゲの角度について観察した。

衝突速度が小さいとトゲは  
**水平方向**に伸び、地面を  
滑っているように見えた。

衝突速度が大きくなると  
地面とトゲがなす角  $\theta$  は  
**大きくな**った。

増加の割合は1滴の質量が  
増えるほど **速く**なる。

また、衝突速度  $7.0\text{m/s}$  以降を  
みると  $6.5\text{m/s}$  よりも  $\theta$  は小さくな  
っていった。

これはトゲの質量が大きくなり、  
**重力に耐えられなくな**って  
いるからではないか。

## 総合的考察

また、写真をみると飛びの放出角の

ほとんどは

$$\theta \leq 45^\circ$$

であることがわかる。これは、トゲが中心の痕から放射される、斜方放射であると考へると、トゲおよび飛びが最も遠くに飛ぶのは理論的には  $\theta = 45^\circ$  のときである。

また、衝突速度が速くなると飛びの距離の範囲が広くなるのは  $\theta$  が大きくなることでより飛びが遠くに飛ぶことができるようになるからだと推察される。図7より衝突の際に一番遠くまで飛ぶのは  $\theta_2$  であるが、 $\theta_2$  と  $\theta_3$  の飛びは相互衝突するものも多いのに対し、 $\theta_1$  の飛びは他のものとの衝突が少ないため一番元の量を保っていると考えられる。

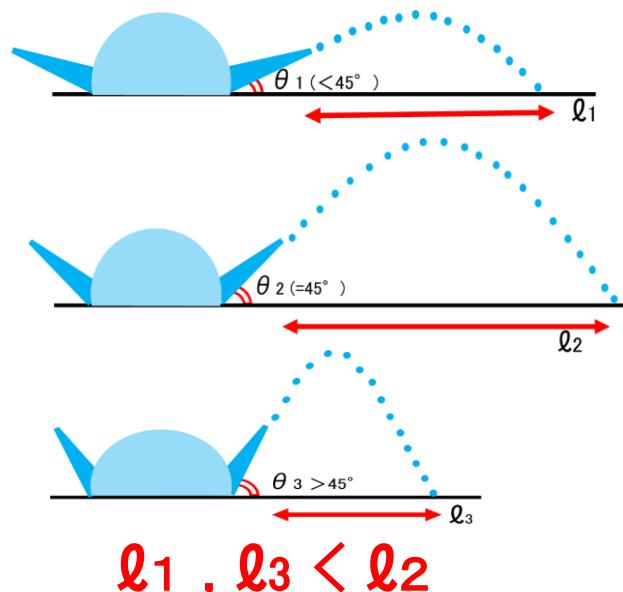
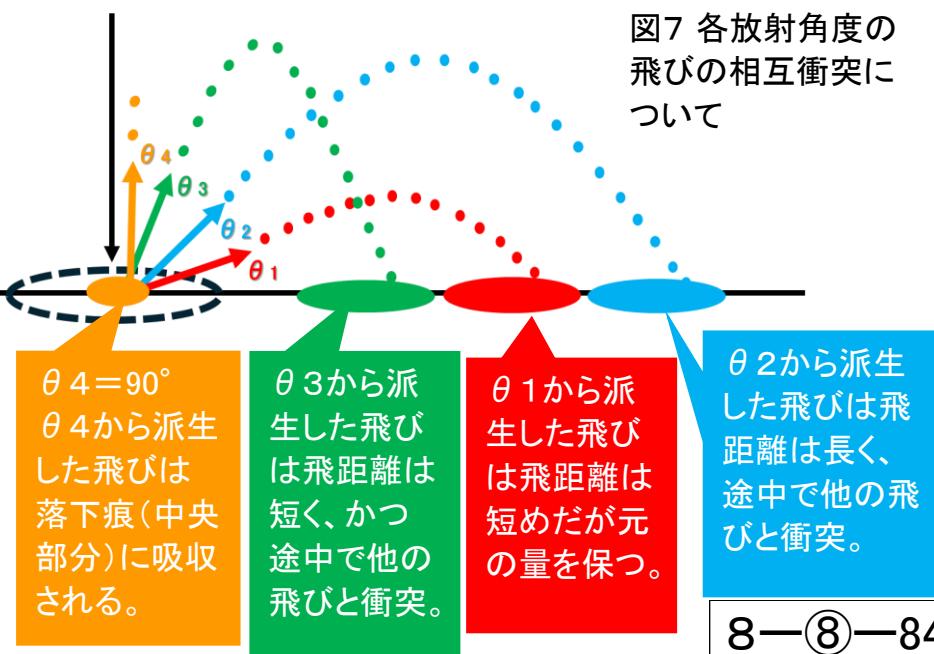


図6 飛びの放射角度別飛距離の違い



## 課題・展望

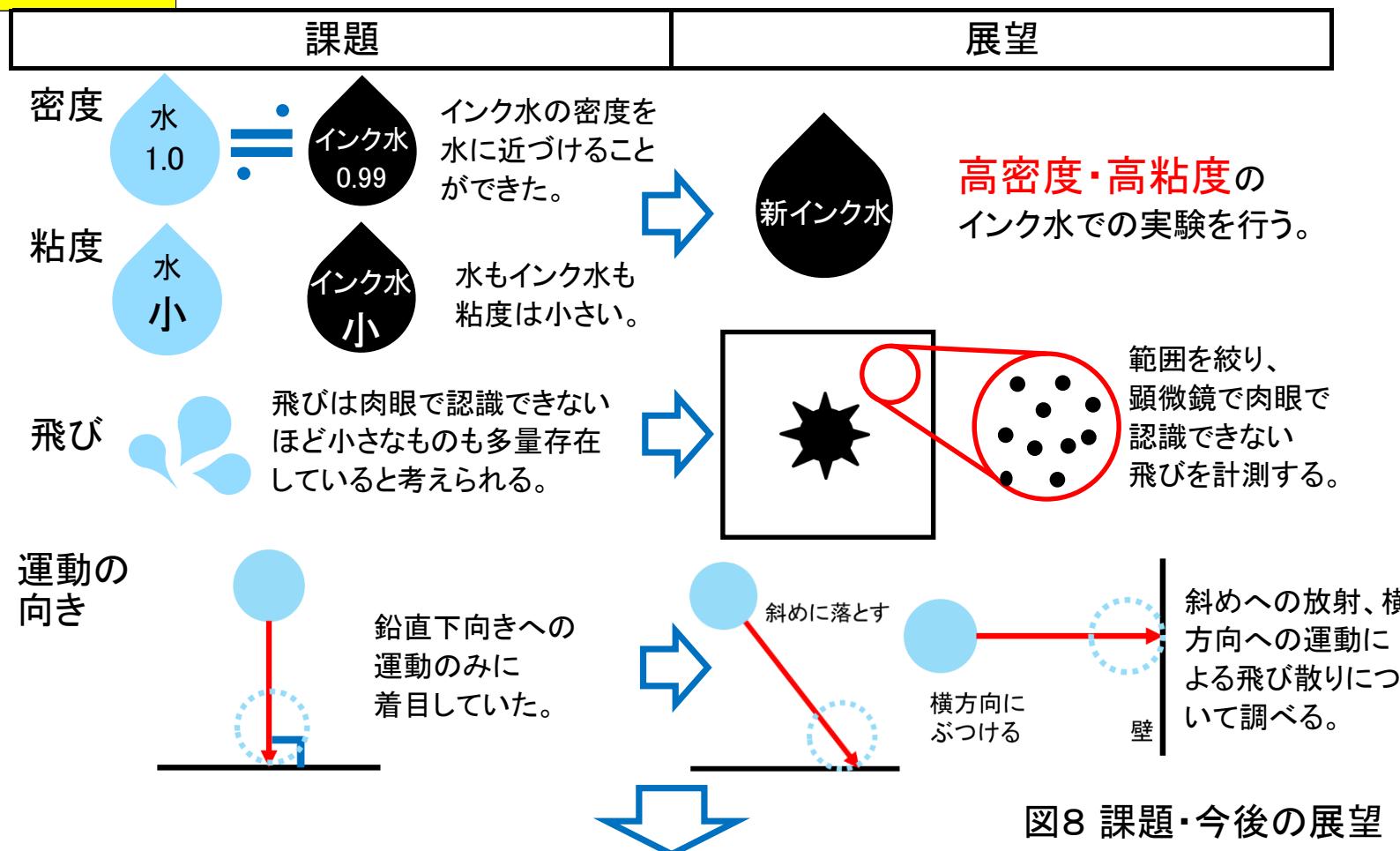


図8 課題・今後の展望

本研究は最終的にトイレ清掃・シンクの掃除・犯罪捜査への応用が可能。

謝辞

ハイスピードカメラを貸与していただいたPhotron様ありがとうございました。