

校内でできる微小重力実験装置の開発とその利用

～国際宇宙ステーション用ピペットの開発を目指して～

兵庫県立加古川東高等学校自然科学部物理班微小重力チーム

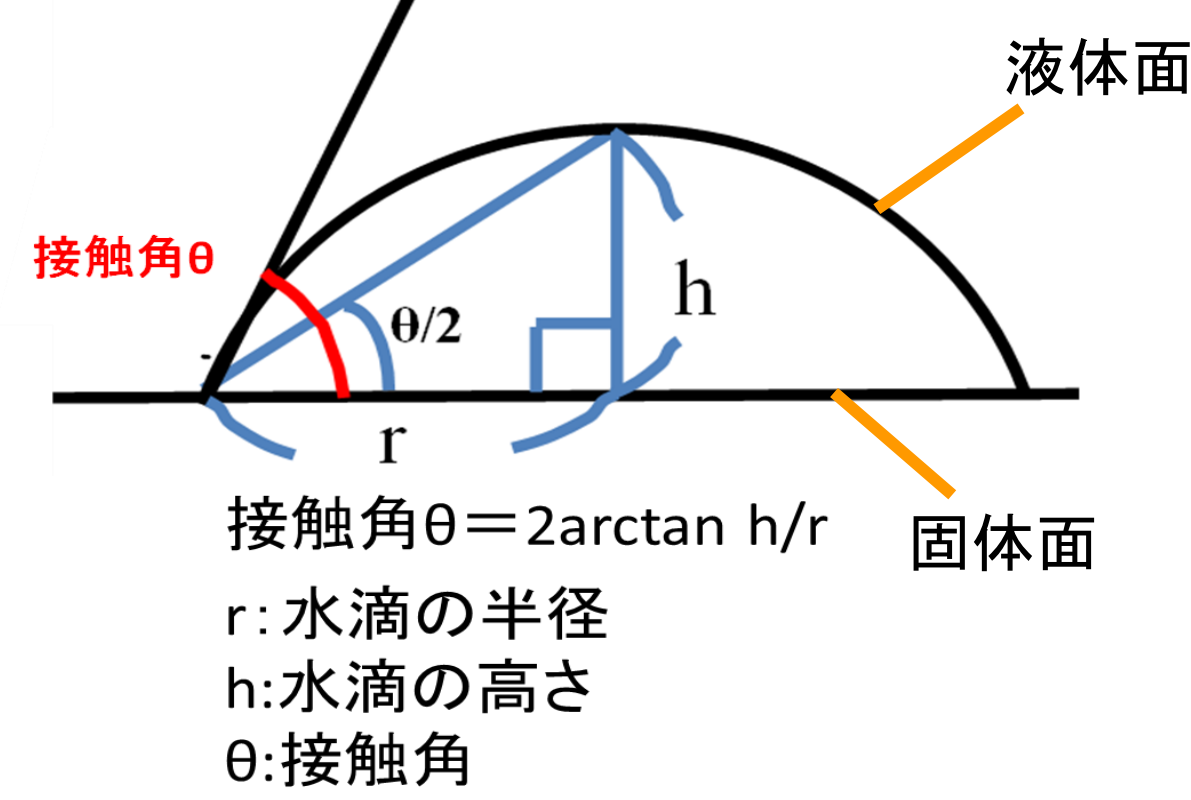
荒谷健太 頃安祐輔 玉田麗 澤田さくら子 高井みく 藤原圭梧

目的

国際宇宙ステーション用ピペットの開発。また、提案しているデザインの有効性検証のための微小重力実験、装置の開発。

キーワード

- 濡れ性(個体面と液体面が引き合う性質)
- 接触角(個体面と液体面が成す角度)
- 毛細管現象(濡れ性と表面張力によって引き起こされる現象)



動機

- 以前の研究で明らかにした濡れ性を実用的なものに応用して商品開発を行おうと考えた。
- 微小重力状態で水をコントロールすることは難しいため、宇宙では地上で用いられる一般的なピペットが使用できない。
→ **濡れ性の違いを利用し、微小重力下で**
使用できる新しいピペットの開発を目指す。

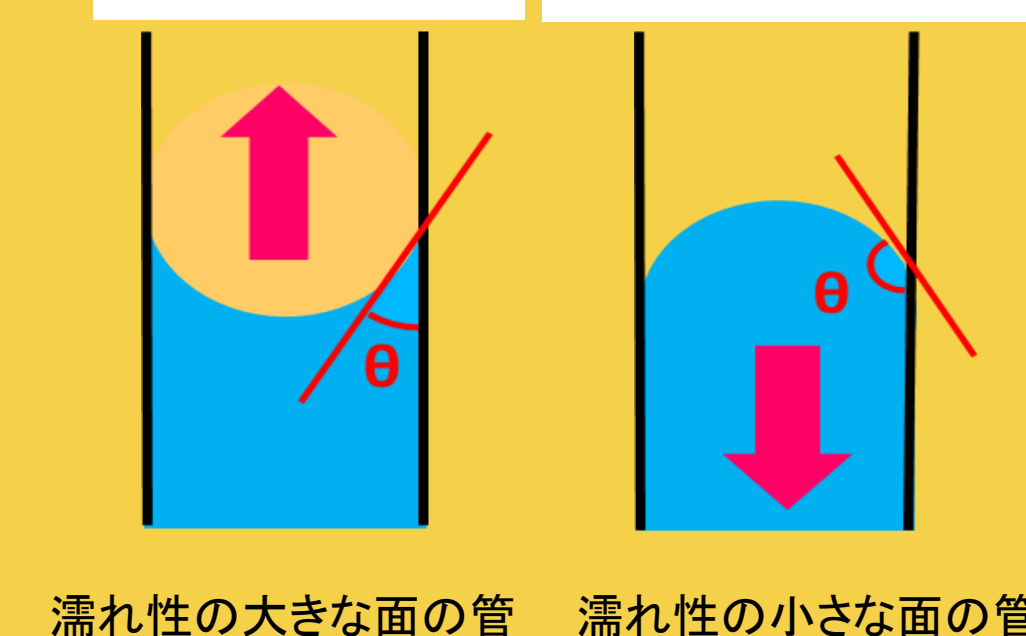
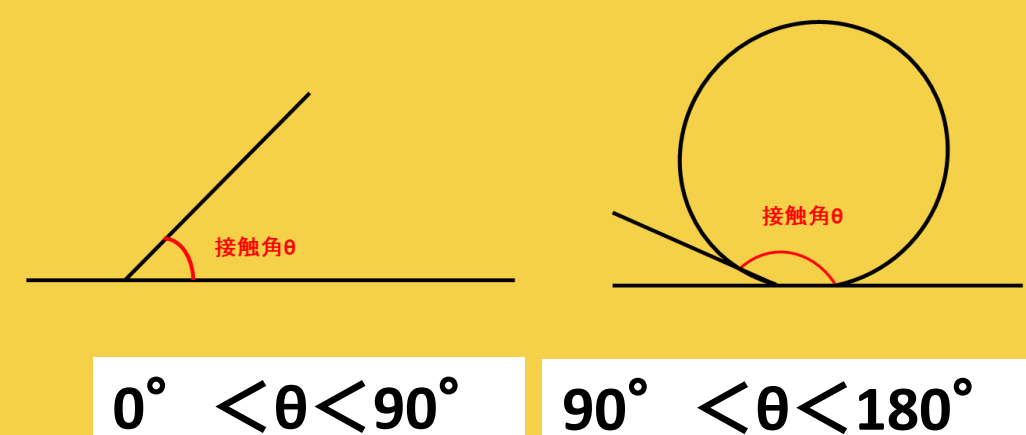
仮説

微小重力下の管内において・・・

濡れ性の大きいもの 濡れ性の小さいもの

<STEP1>

- 濡れ性の**大きな**面では、濡れによる力により水は**上昇**する。
- 濡れ性の**小さな**面では、濡れによる力により水は**下降**する。



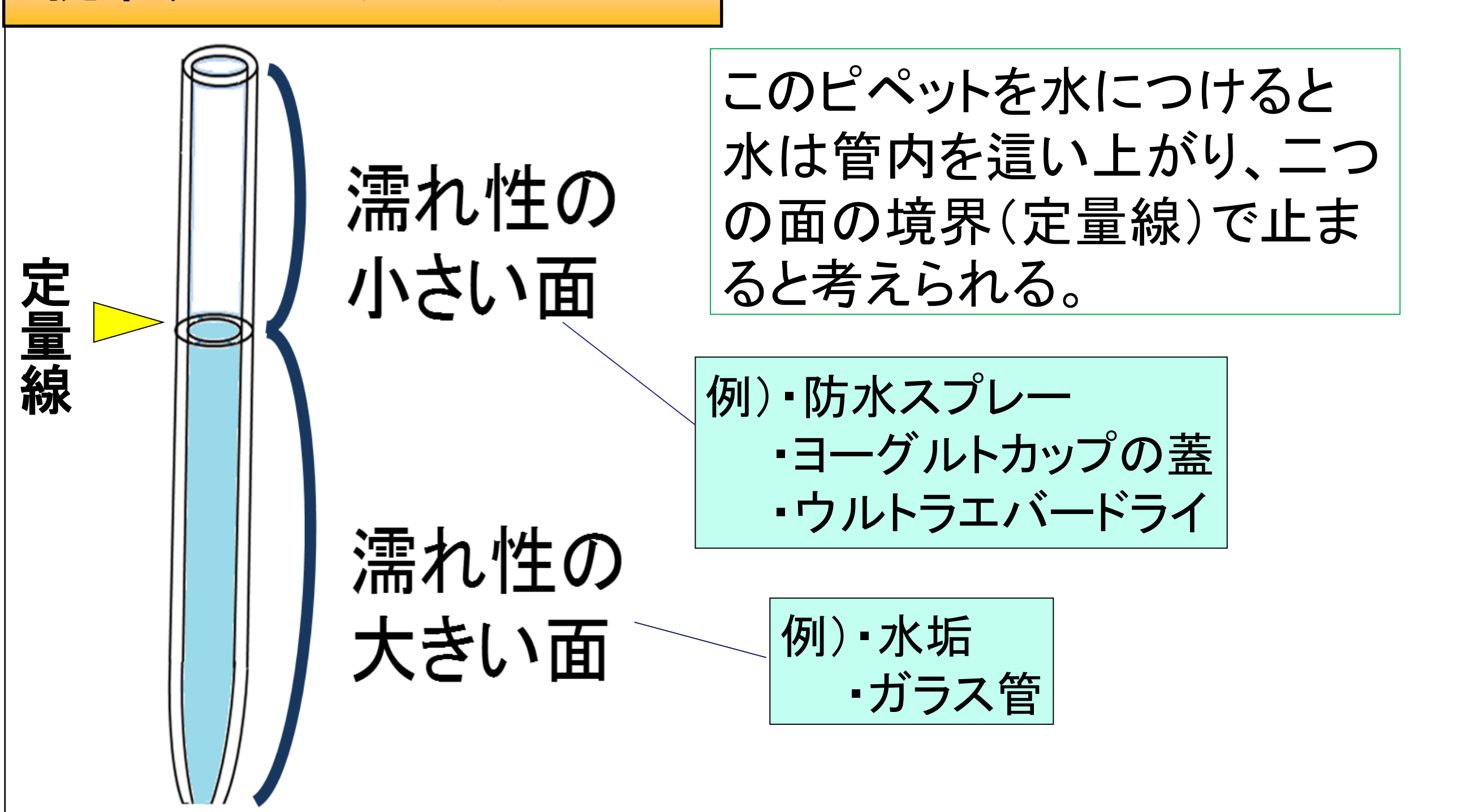
濡れ性の大きな面の管 濡れ性の小さな面の管

<STEP2>

- 濡れ性の異なる面の境界で水は静止する。

濡れ性の大きな面の管 濡れ性の小さな面の管

提案するピペットのデザイン



このピペットを水につけると水は管内を這い上がり、二つの面の境界(定量線)で止まると考えられる。

例)・防水スプレー
・ヨーグルトカップの蓋
・ウルトラエバードライ

例)・水垢
・ガラス管

微小重力実験2

<STEP1> 水は濡れ性の大きい面を這い上がることを確かめる。

<旧型> 方法

ガラス管を入れたペットボトル

内容物・水に太さの違うガラス管2本を挿したボトル
・200gのおもりをのせたばかり

カメラ

結果・考察

はかりの様子 水の様子



落下前

落下中

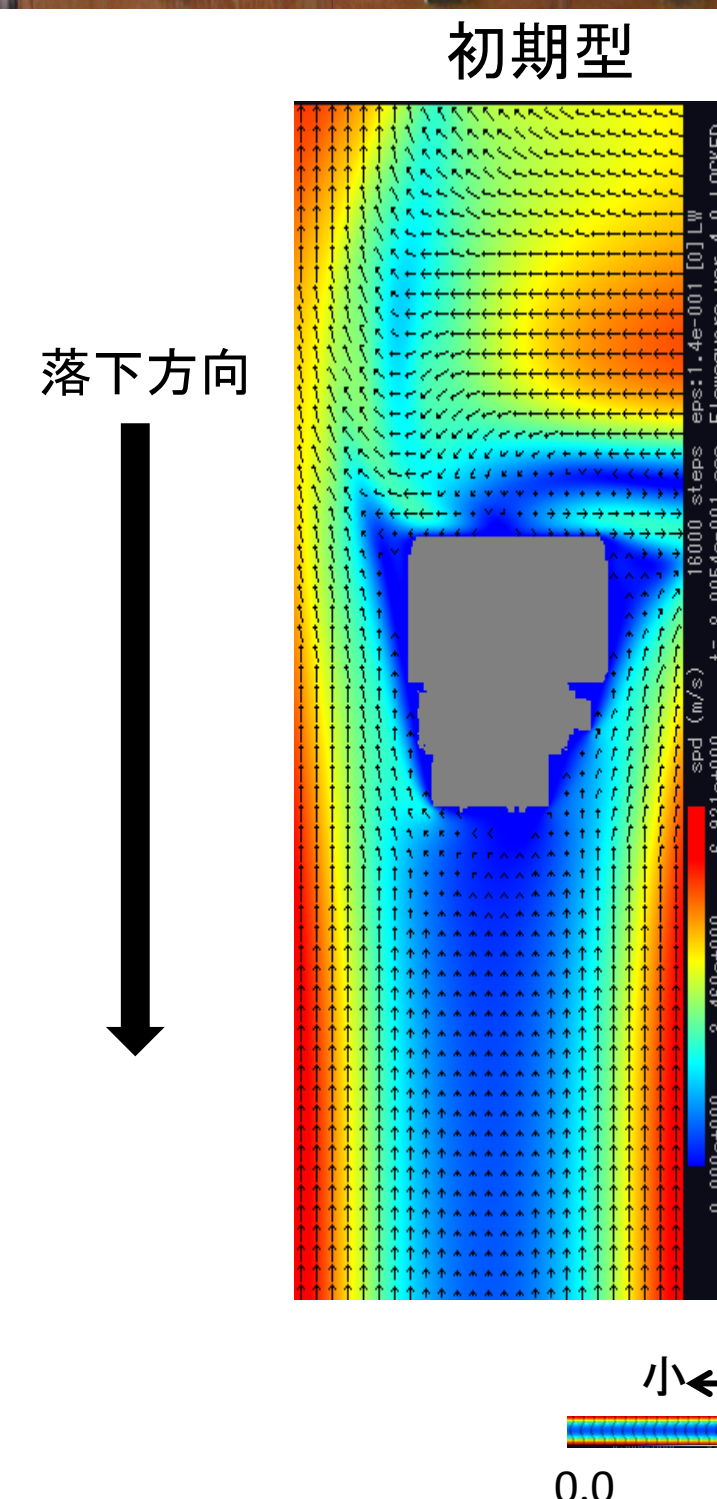
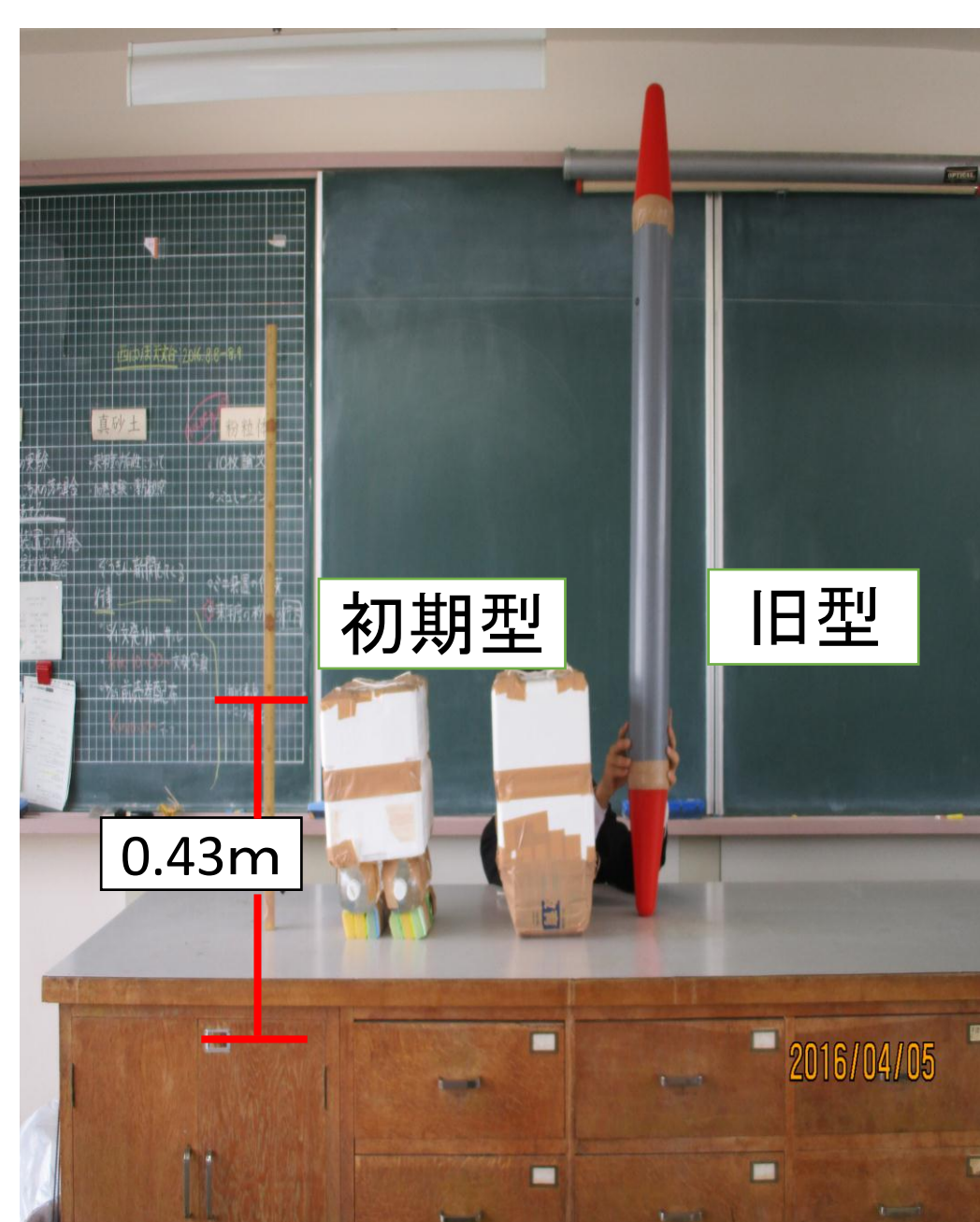
・はかりの値は0を示した。
・細い管では常に水が上昇した。
・太い管では水は上昇したが、途中で止まった。

装置改良

改良目的

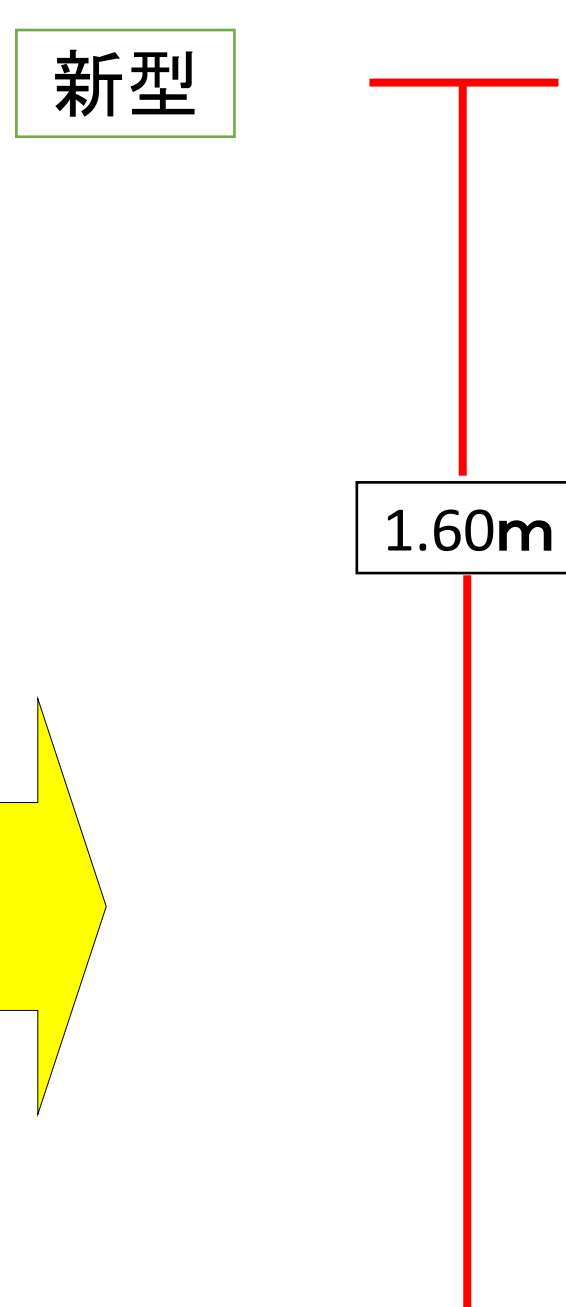
初期型から旧型に改良したことにより、実験の際に用いたガラス管内の水が上昇する様子が見られた。よって、旧型から新型に改良することにより、さらに水が上昇すると考えた。

旧型実験装置



- 発泡スチロール製、箱型
- 装置の外側におもりとして水の入ったペットボトルを取り付けた
- はかりによる微小重力状態の確認

新型実験装置

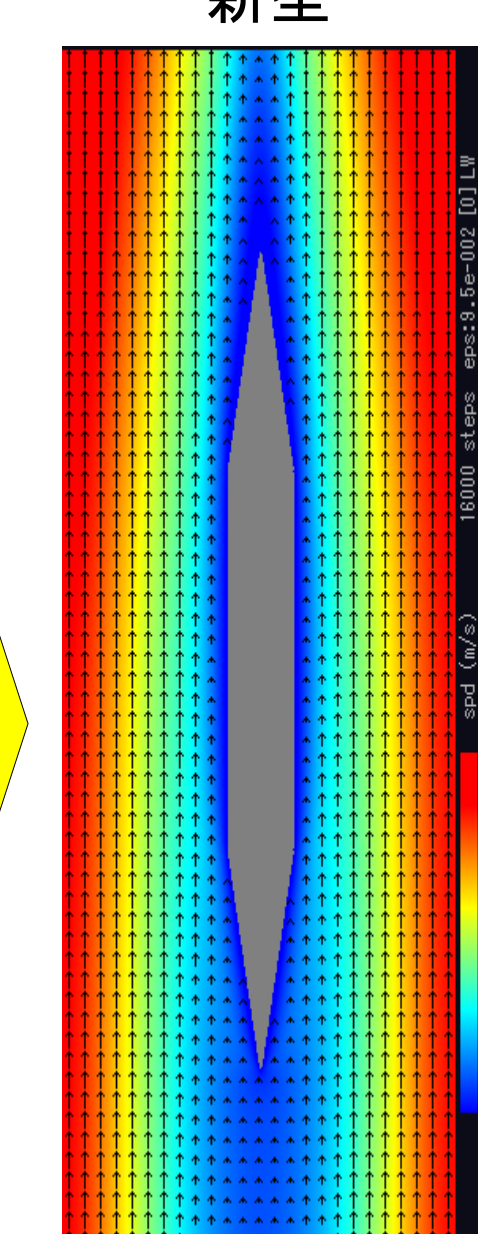


新型

- 塩ビパイプ製、ロケット型
- 装置の内側におもりとして砂袋を入れた
- ipod内蔵の加速度センサー(アプリ名: 加速度・ジャイロスコープ・磁力センサロガー)
- 液面感知センサー
- 摩擦の低減のために、落下時に使用する紐を細くして結び方を変えたなど

ソフト名: Flow square 4.0
初期条件: 粘性係数 → $2 \times 10^{-5} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$
空気の速さ → 10m/s
密度 → 1.2 kg/m^3
縦: 2.4m 横: 1m

<各実験装置周辺の落下中の空気の流れの様子シミュレーション>



新型では、初期型や旧型に比べて空気の流れが安定しているので、空気抵抗が削減されたと言える。

微小重力実験1

・実験日 2016/7/14(木) ・気温 30℃
・平均風速 0.65 m/s ・落とした高さ 12.1m

<新型>

方法



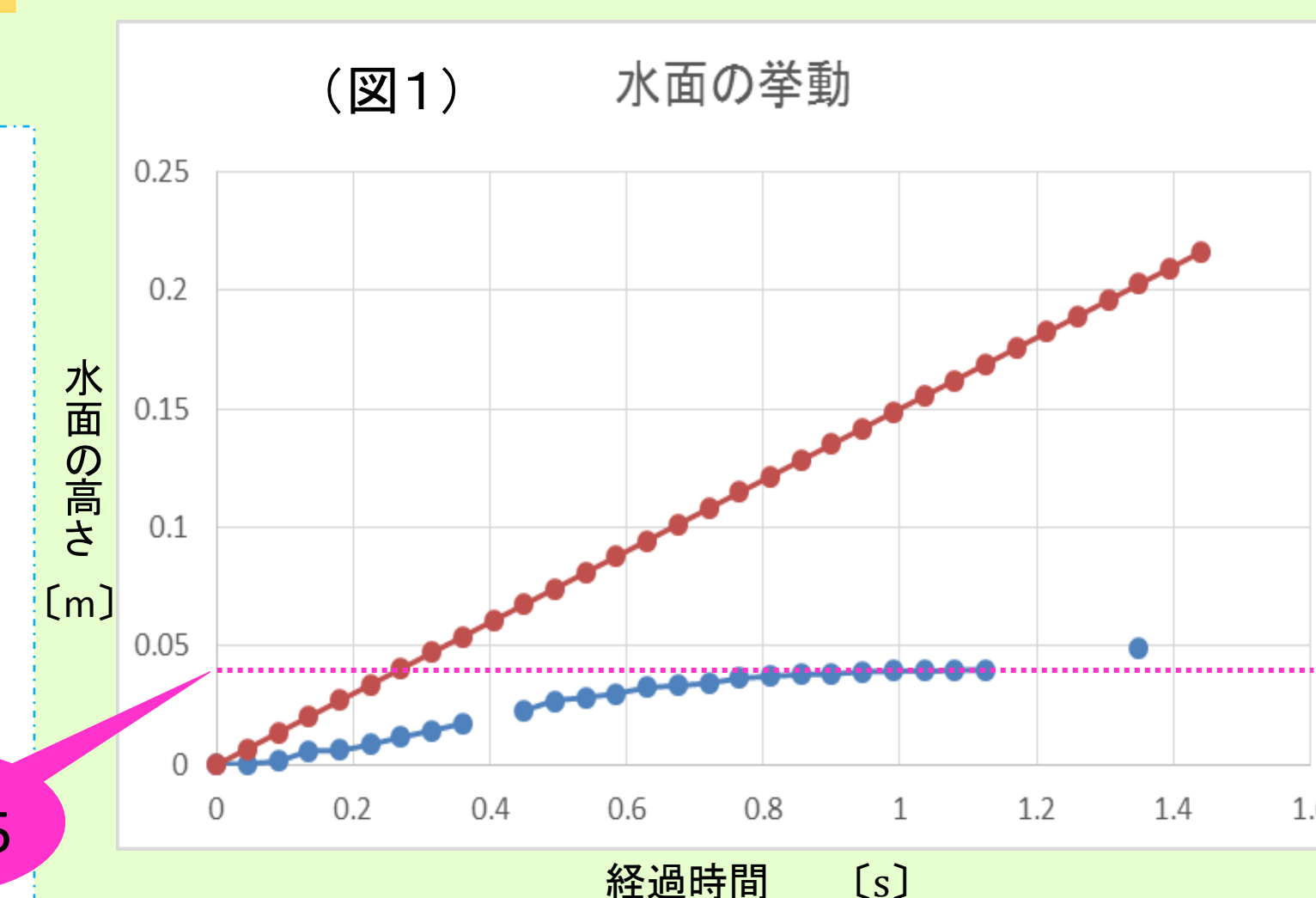
装置内の様子

内容物

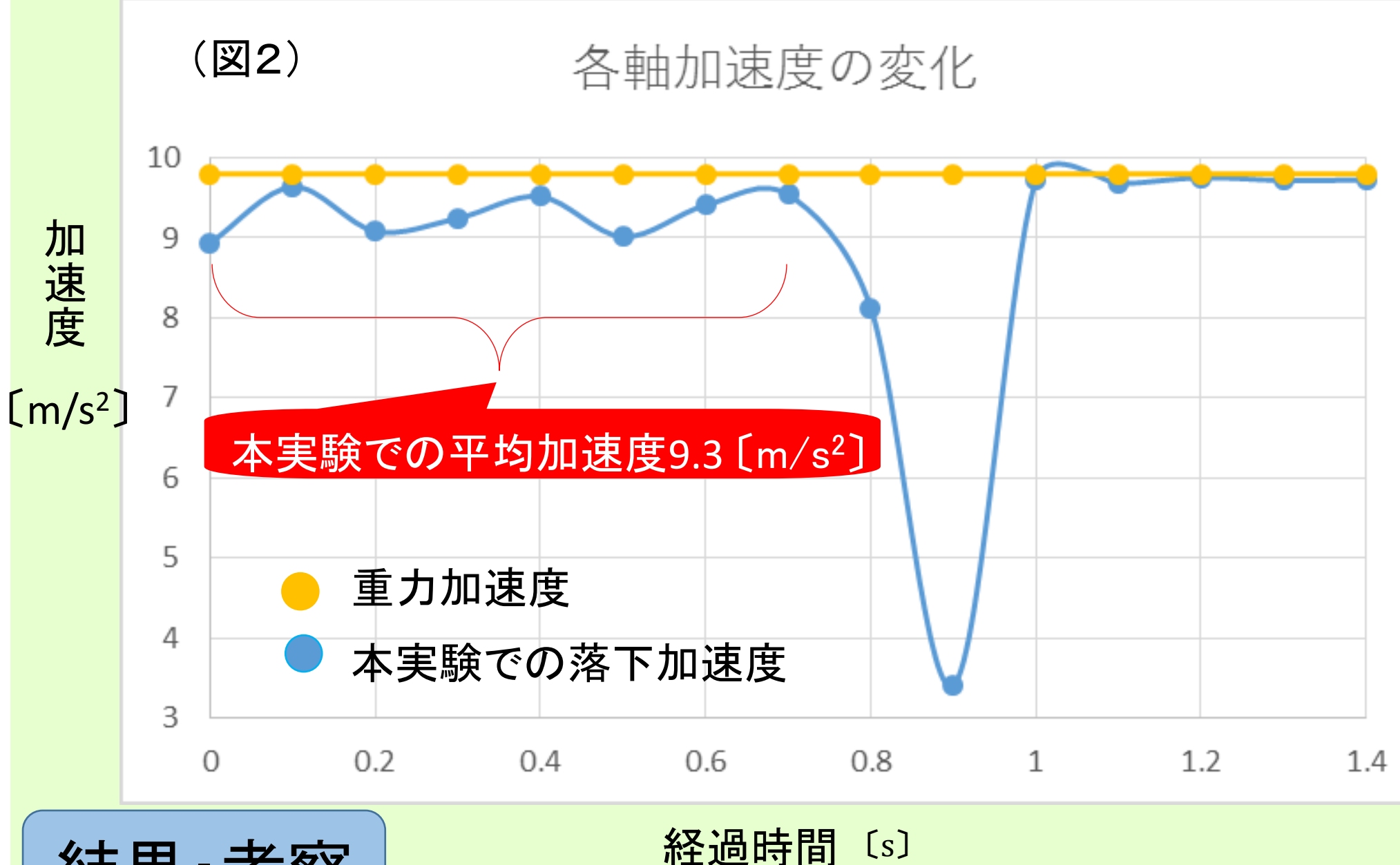
- ピペットをモデルにし、水を入れたガラス管
- 液面感知センサー×2
- 加速度センサーと回路
- 緩衝材の綿
- おもりとしての砂袋
- 仕切り用のプラ板と段ボール板
- カメラ

内部をデジカメで動画を撮影し、中には液面感知センサーなどを入れ、外部から装置が落ちる様子を撮影した。

結果(図1, 2)



●: 微小重力下での水面の挙動(予測理論)
●: 本実験での水面の挙動



結果・考察

図1・2より、本実験で0～0.7秒間の落下加速度の平均は9.3[m/s²]で、水は約0.045m上昇した。図3より、実験装置の落下加速度が十分に重力加速度に近づかなかったため、水は予測した理論値まで上昇しなかったと考えられる。今後は落下加速度が重力加速度に近づくよう、工夫を行う。

今後の課題

- STEP2の理論を証明する実験を行うこと。
- 本チームの3名が、東京理科大学の宇宙教育プログラムに選出されたことより、プログラムの一環であるパラボリックフライト実験(飛行機で約20秒間の微小重力)にて、実際に提案するピペットのデザインが有効かどうかを検証すること。

参考文献

・ドウジェンヌ プロシヤール・ヴィアーレ ケレ 共著 奥村剛 訳. 表面張力の物理学—しずく、あわ、みずたま、さざなみの世界—. 吉岡書店, 2008, 294p.・協和界面科学株式会社. “接触角とは?”. 2016-04-14. http://www.face-kyowa.co.jp/science/theory/what_contact_angle/#id.01・ブリタニカジャパン. Logo Vista電子辞書シリーズブリタニカ国際大百科事典 小項目版. 2014.・Maria Az. “無重力状態で濡れたタオルを絞るとどうなるか”. You Tube. 2013-06-04. <http://youtu.be/XKBlabUZkYg>. (2016-04-06) ・石岡憲明. “第39号”. ISASメールマガジン. 2005-0531. <http://www.isas.jaxa.jp/j/mailmaga/backnumber/2005/back039.shtml>. (参照2015-06-19)
・藤田薫, 小林和男. “宇宙実験用定量ピペット”. astamuse. <http://astamuse.com/ja/published/Jp/NO/1995256121>. (参照2016-04-15)
・宇宙の不思議 うそ、ほんと ～さあ、宇宙へ飛び出そう!～ 2章 宇宙でうごく (1) http://iss.jaxa.jp/iss_faq/go_space/step_2.html#q06

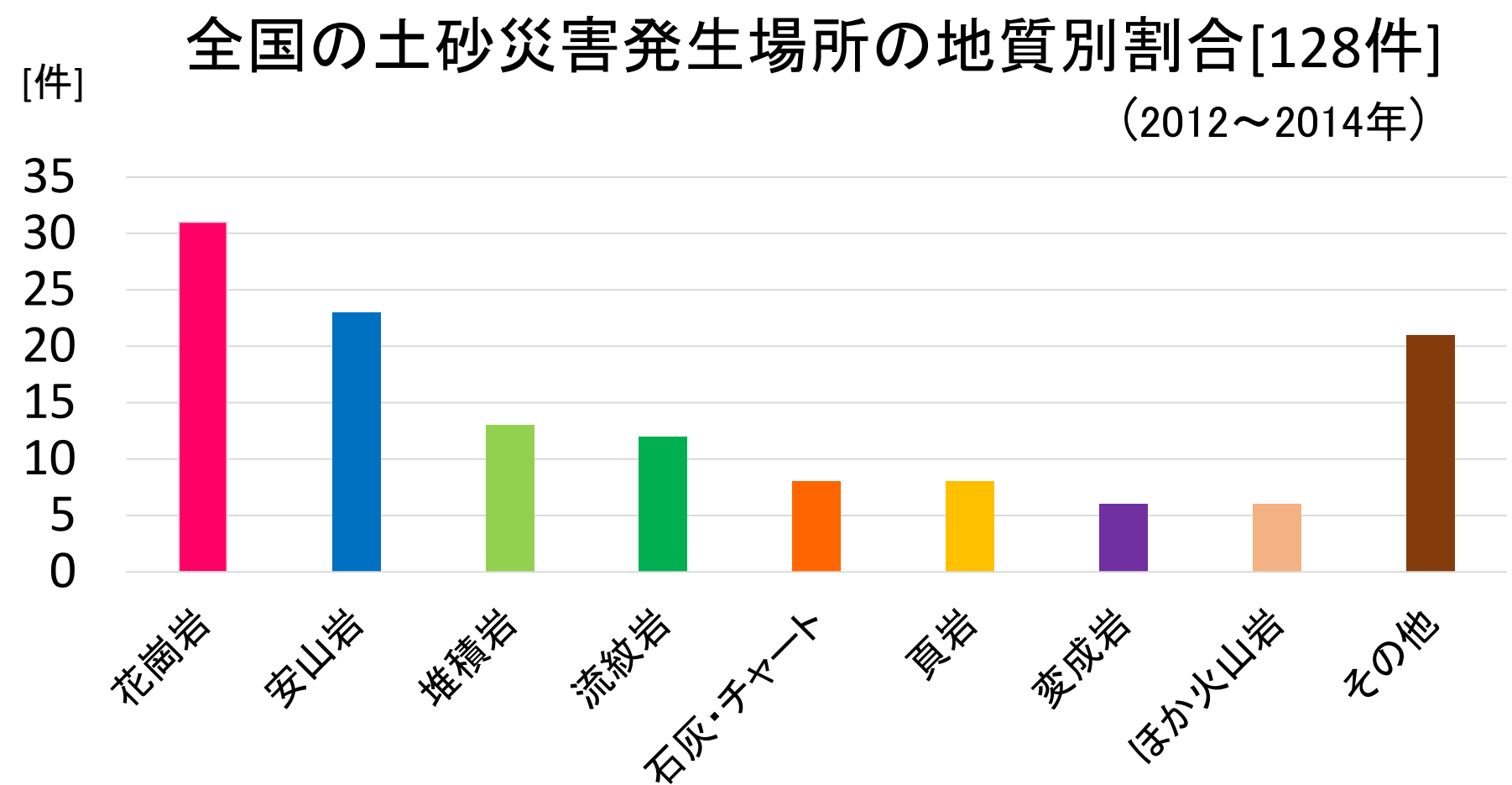
花崗岩の風化度基準の定量化を目指して

兵庫県立加古川東高校 自然科学部地学班(真砂土)
岩本南美 田島晴香 田村笙 東森碧月 中野勝太 中野美玖 尾藤美樹

動機と目的

広島市で発生した土砂災害(2014)は花崗岩が風化してできた、真砂土層が関係しているとされている
同じく花崗岩体である加古川市の大藤山でも土砂災害(2011)が発生した

全国で発生した土砂災害2012-2014年の
発生場所の岩体を調査



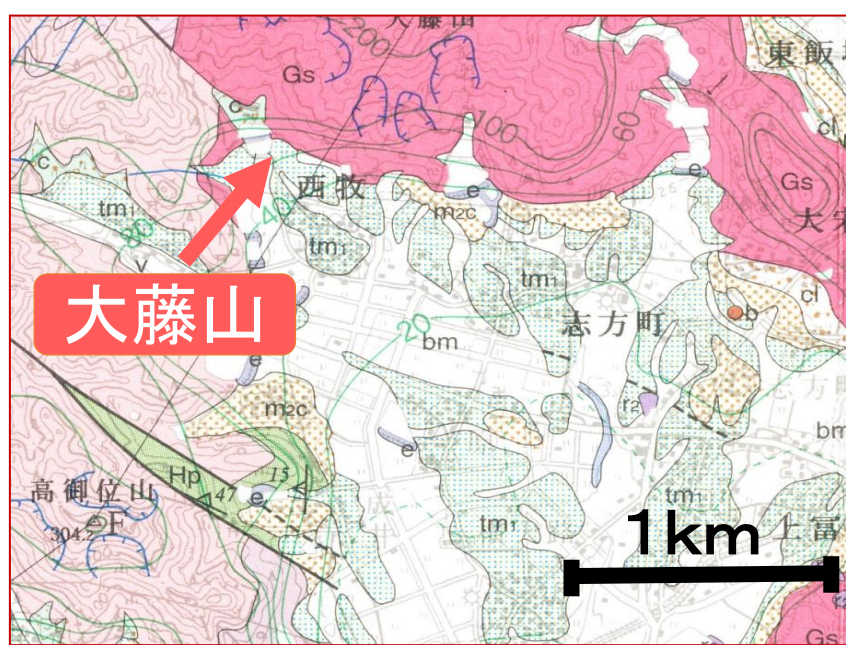
花崗岩の分布面積は全国のおよそ12%だが、
地質別の土砂災害発生件数は花崗岩が一番多い

調査地点

Gs: 黒雲母花崗岩

大藤山

- 兵庫県加古川市志方町
- ・過去60年間に**6回**の土石流
- ・風化した花崗岩が土砂層を形成



現在のハザードマップは
過去に土砂災害が発生した区域、
傾斜度などを基準に作成

花崗岩の地質的特徴のより詳細な調査

地質的特徴を考慮した
新しいハザードマップ作成のための
花崗岩の風化度基準の指標

- ①土砂の透水係数
- ②細粒土砂の割合
- ③河川水のCa硬度
- ④土砂に含まれる風化鉱物の割合

目的 花崗岩の風化度基準を定量化すること

透水係数と粒度

採取場所 兵庫県加古川市大藤山2011年土砂災害発生跡付近



20160611 - 土石流跡



20160611 - 露頭

仮説

昨年度の研究から、土砂災害場所は水を通しやすいと考えた
①土石流跡の方が透水係数が高い
②土石流跡の方が細粒土砂の割合が低い

目的

場所の違いによる①透水係数と、②土砂の粒度を比較する

方法

①透水係数

- 1.計測地点に、試験孔半径 $r=10\text{cm}$ となる円柱形の試験孔を掘り、砂利袋を入れる
- 2.装置に水を満たして砂利袋の上に水平に置き、水が100mL流出することにかかる時間と、試験孔水位 h を計測する
- 3.定常流量 Q を求め、式Aより透水係数を算出する

②粒度

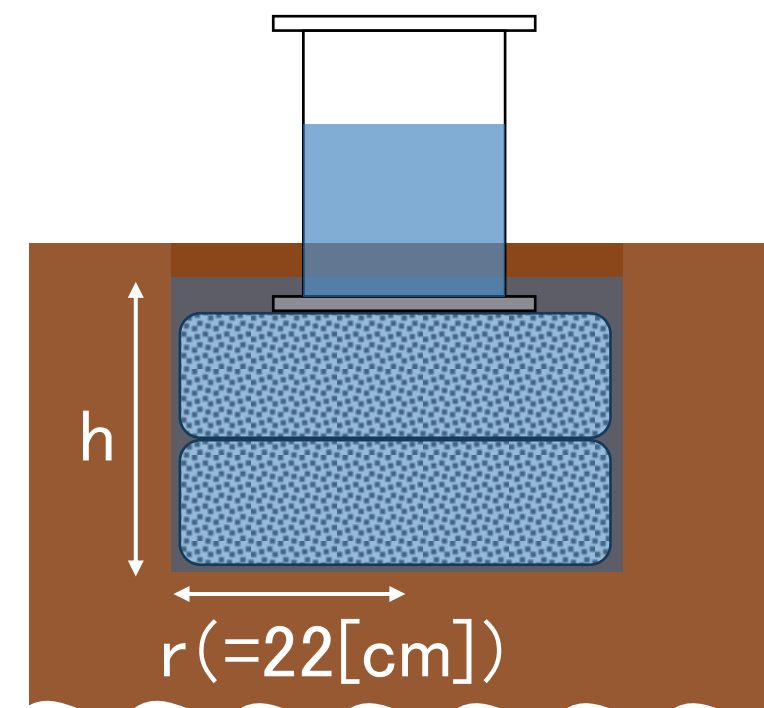
- 1.計測地点の土砂を採取し、乾燥させる
- 2.それぞれ篩を使用し、土砂を粒径ごとに分別する
- 3.粒径ごとに重量比・体積比を求める

<式A>

$$k = \frac{Q}{2\pi h^2} \left[\ln \left\{ \frac{h}{r} + \sqrt{\left(\frac{h}{r}\right)^2 + 1} \right\} - \sqrt{\left(\frac{r}{h}\right)^2 + 1} + \frac{r}{h} \right]$$

k : 透水係数[cm/s] Q : 定常流量[cm³/s]
 r : 試験孔内半径[cm] h : 試験孔内水位[cm]

$r=22\text{[cm]}$ とし、 Q と h を計測によって求めた。



↑実際の試験の様子

結果

①透水係数

土石流跡	露頭上部	露頭下部
$5.18 \times 10^{-5} [\text{m/s}]$	$2.19 \times 10^{-5} [\text{m/s}]$	$1.13 \times 10^{-5} [\text{m/s}]$

②土砂の粒度

粒径別割合	土石流跡		露頭上部	
	[-250μm]	[2mm-]	[-250μm]	[2mm-]
重量比	14.6%	50.2%	9.6%	54.2%
体積比	15.4%	50.2%	10.4%	49.3%

粒径**大** → 土砂間にすき間ができるので、体積比**大**

粒径**大** → 同じ重量の碎屑物なら、体積比**大**

- ①・土石流跡の方が透水係数が高い
→ 土石流跡の方が水の浸透するスピードが速い
・露頭の上部の方が透水係数が高い
→ 露頭上部の風化が進行している
- ②・土石流跡の方が250μm以下の土砂の割合は高かった
→ 土石流跡の風化が比較的進行している
・2mm以上の土砂について土石流の方が体積比**大**かつ重量比**小** → 粒径がより大きい
→ 土石流跡の方が粒径が比較的大きい

土石流跡は風化が進行しているが、
大きな砂礫を含み透水係数が高くなっている
⇒水を通しにくい岩体や粘土層の上に
水がたまりやすくなり土砂災害が発生

キレート滴定

目的 雨水による化学的風化の程度を調べるために、河川水のCa硬度を測定する

方法 ①pH12緩衝液、 $1.0 \times 10^{-3} [\text{mol/L}]$ -EDTA水溶液を精製する
②サンプルを10mlとり、ビーカーに入れ、pH12緩衝液を加え静置する
③ビュレットにEDTA水溶液を入れ、②の混合液にNN指示薬を少量加える
④滴定を行い、溶液が赤、もしくは赤紫から青になったところを終点とする
⑤この作業をそれぞれのサンプルで3回ずつ繰り返し、平均値を算出する

結果

サンプル名	Ca硬度[mol/L]
大藤山河川水	5.55×10^{-4}
雨	0.433×10^{-4}
A	2.86×10^{-4}
B	1.58×10^{-4}

企業が出している値

名	Ca硬度[mol/L]
A	2.88×10^{-4}
B	1.25×10^{-4}

市販されている水AとBについて、実験結果の値と企業の出している値がほぼ同じのため、この実験は有効だといえる。また、雨水と比べて大藤山の河川水のCa硬度が高いことから、大藤山では風化が進行しているといえる。

参考文献

・「六甲山地域の急傾斜地崩壊危険区域の花崗岩斜面の風化変質鉱物と元素溶脱による風化度」田結庄良昭ほか/2003年
・「六甲花崗岩の風化過程における主要幹成分及び希土類元素の溶出とその河川水への影響」寺門靖高/2003年
・「2014年8月20日広島における土砂災害、特に地質要因」高橋祐平/2015年
・「偏光顕微鏡と岩石鉱物」黒田吉益・諏訪兼位/2010年
・「土の透水試験方法」地盤工学会
・「土砂災害発生事例」国土交通省 国土保全局砂防部
・「新版 碎屑物の研究法」公文富士夫・立石雅昭/1998年
・AppleMaps
・地質図navi
・「加古川市総合防災マップ」加古川市/2014年

謝辞

長楽寺ご住職釋康祐さん
加古川市総務部危機管理室の方々
神戸大学名誉教授田結庄良昭先生
研究に関する貴重なご意見・資料をいただきました

まとめ

透水係数と粒度の実験から、土石流跡では透水係数が高く、
粒径も大きくなっていた

キレート滴定の実験から花崗岩体の河川水におけるCa硬度測定は
風化基準を作る指標となりうるということが分かった

透水係数と粒度が風化に与える影響について調査地と試料を増やし、
河川水のCa硬度の測定結果とともに

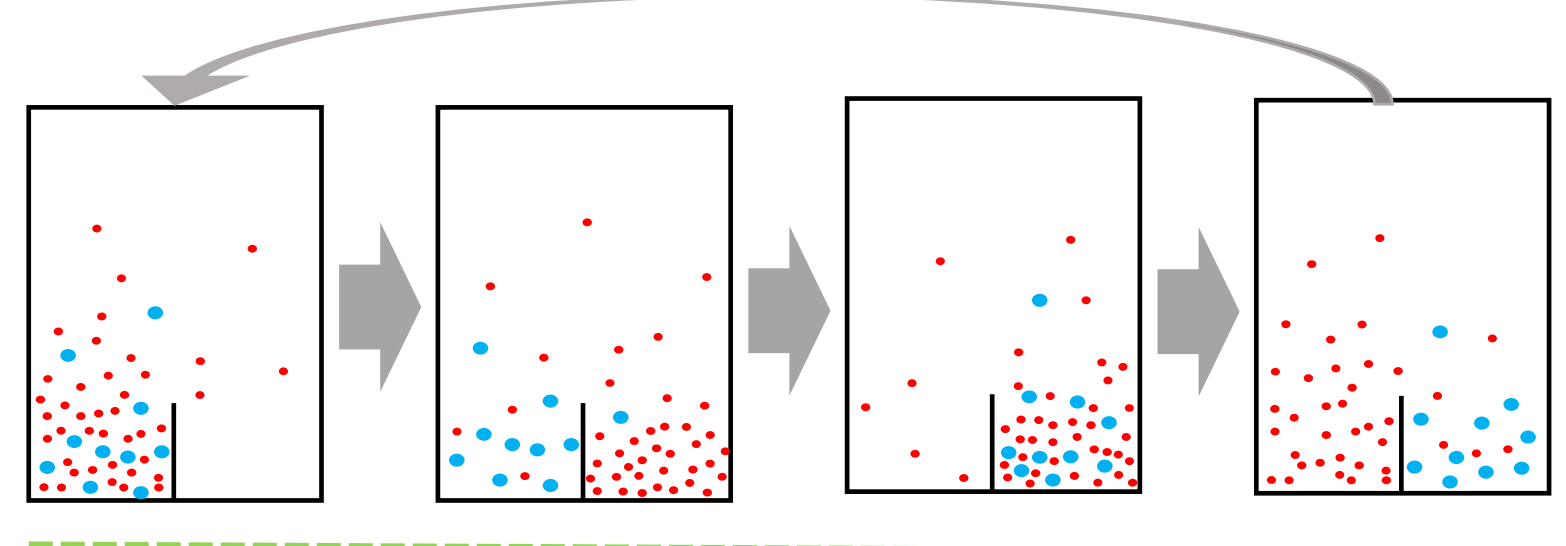
花崗岩の風化度基準の指標作りを進めることができると考えている

今後の課題

- ・土砂に含まれる風化鉱物の割合を薄片を観察することで分析する
- ・大藤山でさらに試料を採取し、より詳細な調査を進める
- ・大藤山と同様に、花崗岩体である六甲山で試料を採取する

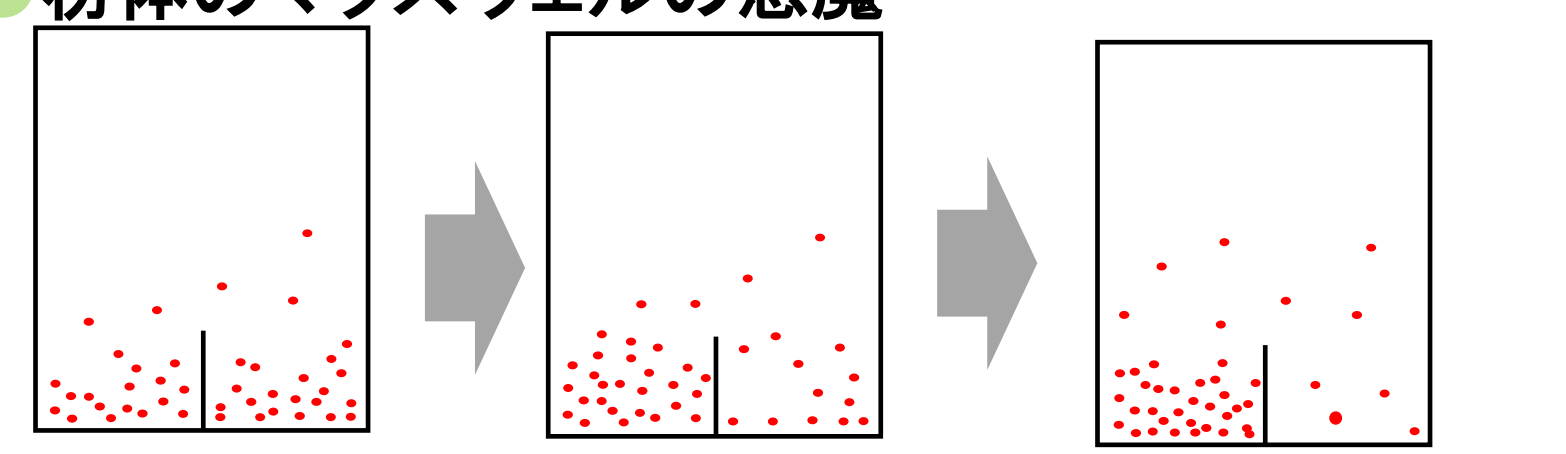
1. 粉粒体の現象

●粉体時計



2部屋に分けた容器の片部屋に
大小の粉粒体をいれて
縦振動を与えると粉粒体が
2部屋を往復する現象

●粉体のマクスウェルの悪魔



2部屋に分けた容器の両部屋に
1種類の粉粒体を1:1の割合で入れ
縦振動を加えると粉粒体が
片方の部屋に集まる現象

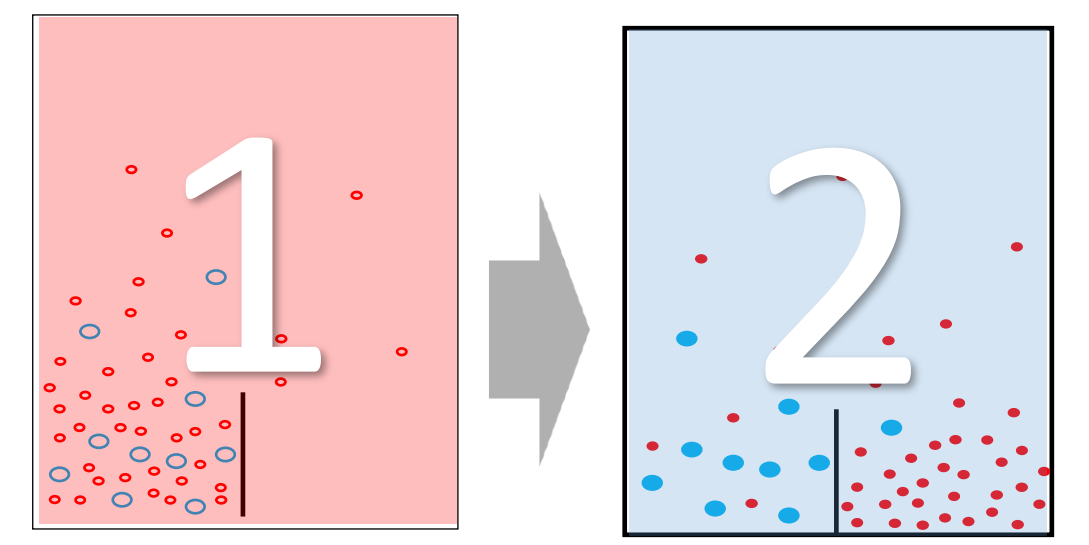
2. 動機

粉体時計の3次元での
実現は非常に困難で
世界でも成功例はない

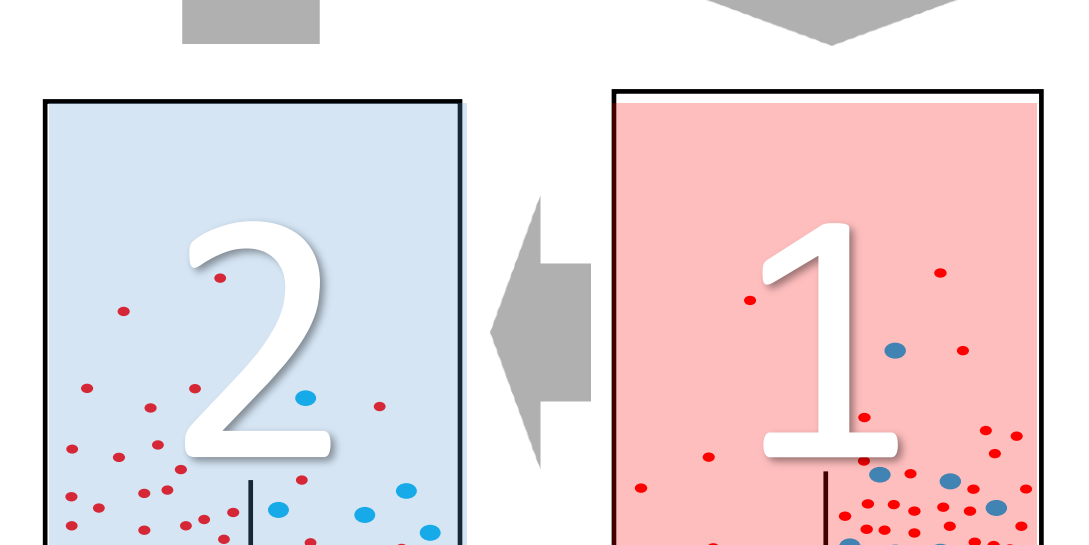
➡

「粉体時計」を実現し
メカニズムを考察する

3. 粉体時計のメカニズムの仮説



STEP 1
現象：小粒のみ片部屋に移動する
仮説：小粒が大粒からエネルギーを得て移動する



STEP 2
現象：大粒が小粒を追いかけるように移動する
大粒が移動し終わるまで、小粒は留まる
仮説：大粒の平均自由行程が大きく
小粒の平均自由行程が小さい

4. 実験① — STEP1 が起こる範囲を特定する —

◆ 実験方法
① 大小2種類の粉粒体を片部屋に入れる
② 縦振動を与え、10秒毎に撮影する
③ 各部屋の粒の個数を調べる

◆ 使用した粉粒体
小粒：ビーズ（直径2.5mm）
大粒：BB弾（直径5.9mm）

個数比（大粒：小粒）
大粒 小粒の総数（個）
450
400
350
300
250
200
150
0
1:21 1:18 1:15 1:12 1:9 1:6 1:3

◆ 自作した実験装置
容器の高さ：25cm
一部屋：8×8cm
仕切り：4cm

結果

STEP1の発生条件は大粒と小粒の総数、割合に依存する
また、大粒と小粒の割合は一定以上

STEP1が起こる大粒と小粒の範囲を絞ることができた

5. 平均自由行程 — STEP2の考察1—

粒子が他の粒子に影響されず
自由に動ける平均距離

$$\lambda = \frac{1}{n\sigma}$$

$$n: \text{数密度}$$
$$\sigma = 4\pi r^2$$

粒が出て行った部屋
部屋内の粒数 減
↓
平均自由行程 大
↓
粒が移動しやすくなる

粒が入ってきた部屋
部屋内の粒数 増
↓
平均自由行程 小
↓
粒が移動しにくくなる

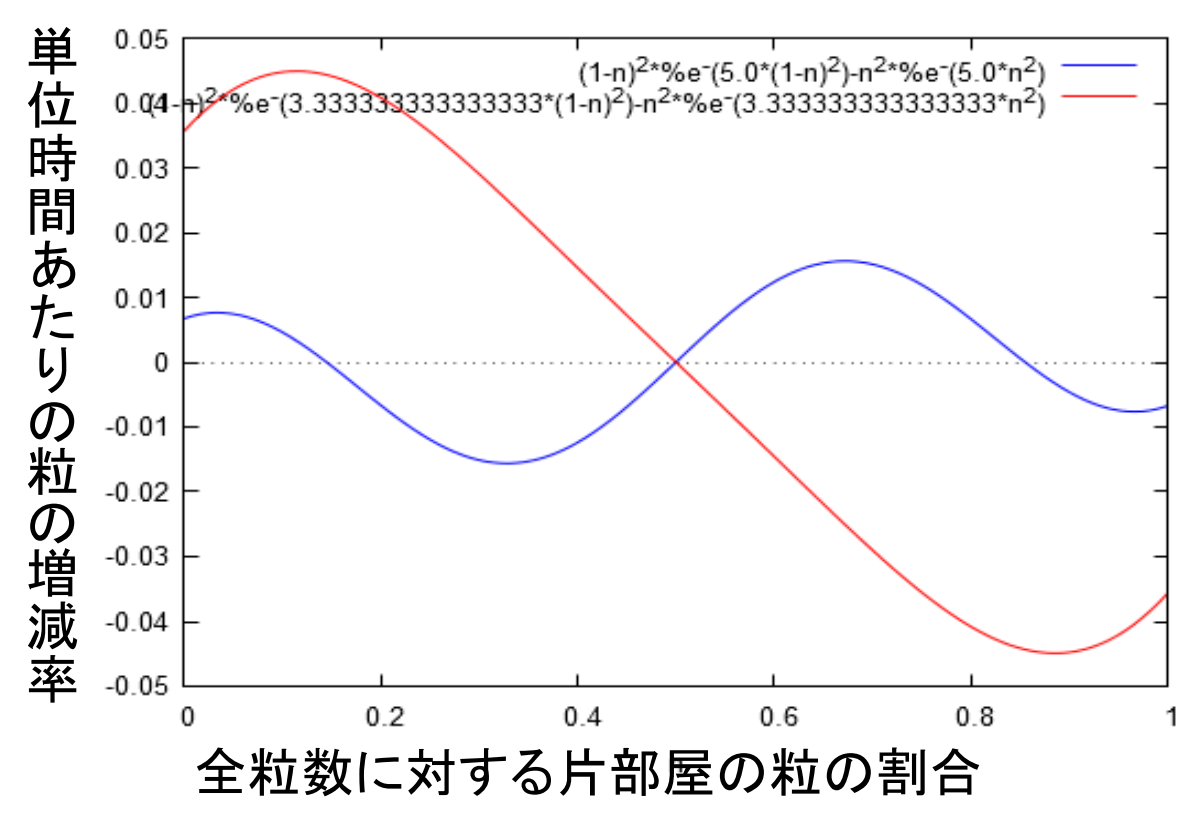
STEP2の起こる条件
大粒の粒数ができるだけ少ない
大粒の粒径ができるだけ小さい

6. 微分方程式を用いた考察 —STEP2の考察2—

STEP2において
別の観点から

大粒では
粉体のマクスウェルの悪魔が発生しない

小粒では
粉体のマクスウェルの悪魔が発生する



粉体のマクスウェルの悪魔が発生する細かい条件が分かると、
STEP2において大粒小粒に必要な細かい条件が分かる

粉体のマクスウェルの悪魔の現象を説明する微分方程式は

$$\frac{dn}{dt} = -n^2 e^{-\frac{n^2}{A}} + (1-n)^2 e^{-\frac{(1-n)^2}{A}}$$

n : 全粒数に対する片部屋の粒の割合（数密度）
 e : 自然対数の底
 A : 非弾性衝突と出力の平衡を表した正の変数

$n=1/2$ での傾きが正→粉体のマクスウェルの悪魔が発生

この微分方程式を n で微分すると

$$\frac{d^2n}{dt^2} = -2 \exp\left(-\frac{n^2}{A}\right)n + \frac{2n^3 \exp\left(-\frac{n^2}{A}\right)}{A} - 2(1-n) \exp\left(-\frac{(1-n)^2}{A}\right) + \frac{2(1-e)^3 \exp\left(-\frac{(1-e)^2}{A}\right)}{A}$$

$n=1/2$ を代入し、これが正となるように計算すると

$0 < A < 0.25$

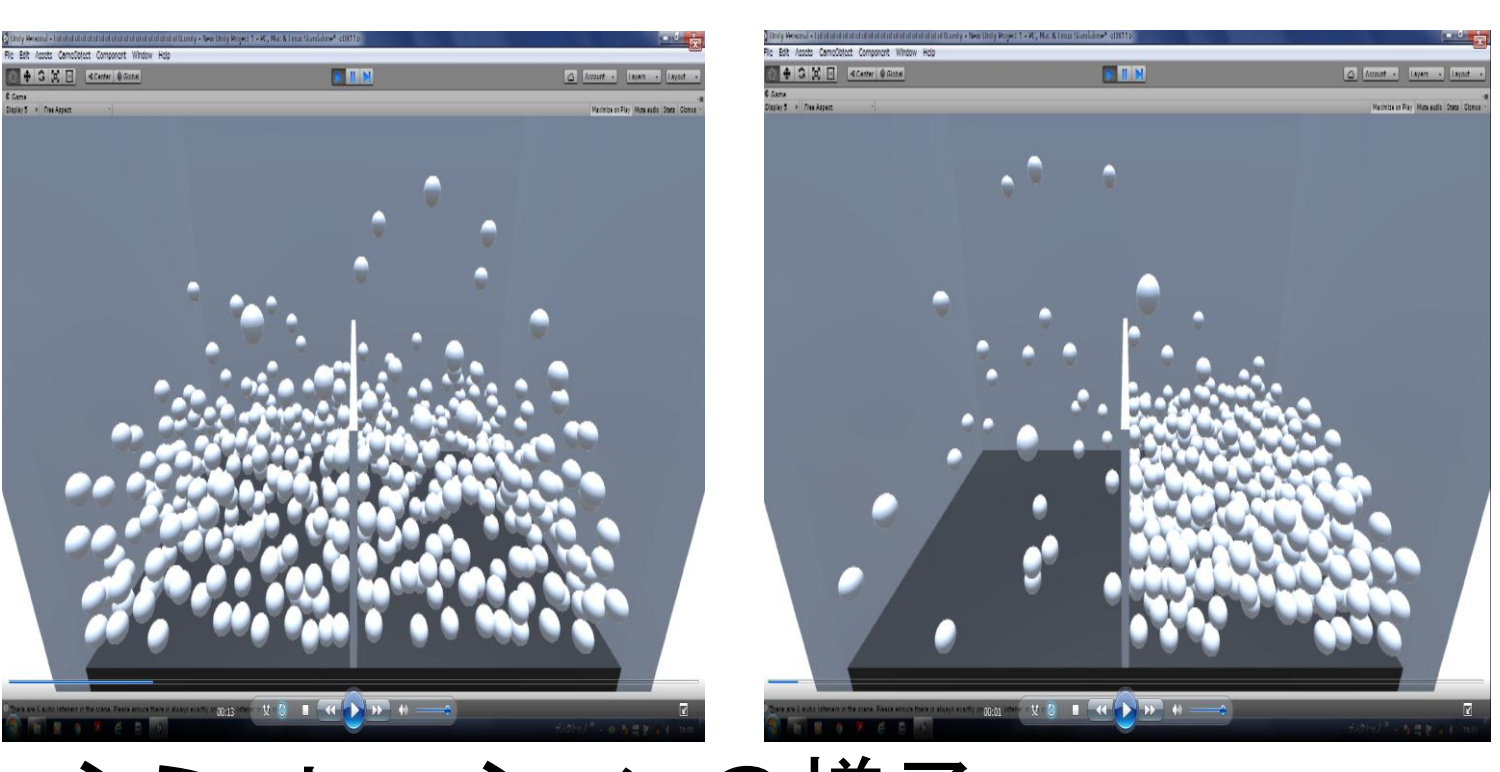
STEP2の起こる条件は

小粒は粉体のマクスウェルの悪魔が起こる⇒ $0 < A < 0.25$

大粒は粉体のマクスウェルの悪魔が起こらない⇒ $0.25 \leq A$

7. 実験② — A の値が上記のようになる大粒小粒の条件を特定する—

実験方法 ① シミュレーションソフト「Unity」を使用し、仮想空間で
粉体のマクスウェルの悪魔を条件を変えて発生させる
② 得られたデータを基にして、 A の値を数式処理ソフト
「Maxima」でグラフ化する



シミュレーションの様子

<実験1>
粒径を固定し粒数を変える
<実験2>
粒数を固定し粒径を変える

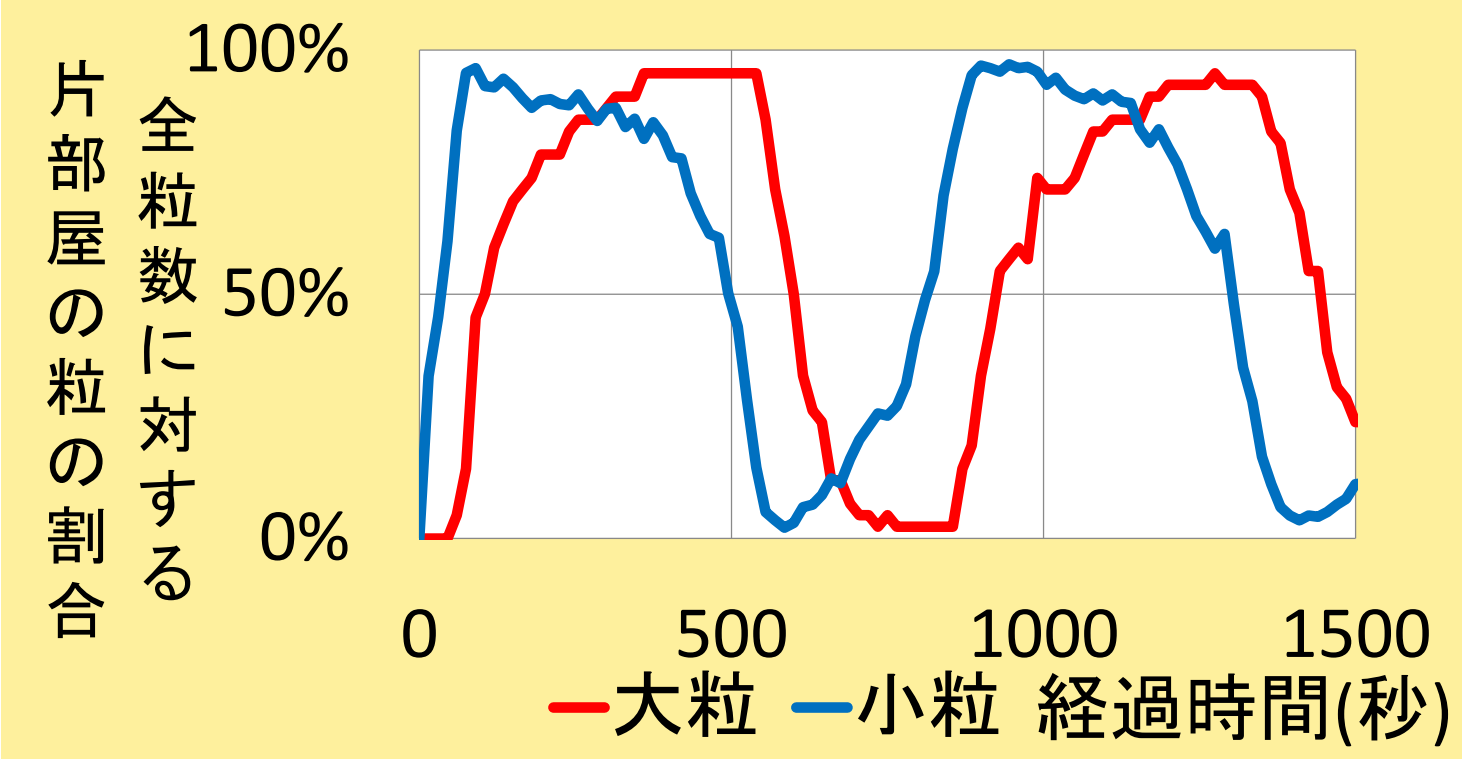
今後、データを増やしていき、 A の
範囲を、具体的な粒数、粒径で表す

世界初 3次元での粉体時計発生

◆実際に発生した例

【小粒】
2.5mmビーズ 405粒

【大粒】
5.9mmBB弾 45粒



粉体時計の実験映像をYouTubeに載せています

今後の課題

・データ数を増やし、STEP2のより詳しい範囲を特定する
・実現した粉体時計から数理的考察、数理的考察から粉体時計の条件を見つける
・粉体の新たな分離方法または非分離(攪拌)方法などへの活用法を提案する
・粉体時計をオリジナルの式で表す

参考文献

・Ko van der Weele, Granular gas dynamics: how Maxwell's demon rules in a non-equilibrium system, Con. Phy. Vol49(2008), pp.157-178
・Takagi Ikuji: 「平均自由行程-Vacuum Technology」エネルギー理工学設計演習・実験2 別冊, 1998
・Jens. Eggers, Sand as Maxwell's Demon, Phy. Rev. Lett. Vol83(1999), pp.5322-5325.
・R. Lambiotte, From particle segregation to the granular clock, Phy. L.A. 343 (2005) 224-230

謝辞

京都大学 情報学研究科 宮崎修次先生 IMV株式会社 衣川俊也様
兵庫教育大学 准教授 猪本修先生 東京大学 元粉体班班長 西口大貴様
かがく教育研究所 理事 森本雄一様