

令和 2 年度

**理 数 科 課 題 研 究 報 告 書**

岡山県立津山高等学校理数科

# 目 次

[ 数学分野 ]	
お絵かきロジックの解の存在判定	.....
与木 溪汰, 黒田 康平	1
[ 物理分野 ]	
シャトルの羽による空気抵抗の影響	.....
大杉 昌徹, 石原 光基, 市場 勇樹, 大橋 虹椰, 大森 永遠, 奥 智, 久保 心暉, 辰巳 陽己, 長畠 透馬	5
斜面上を流れる粘性流体の運動分析	.....
高橋 恵吾, 香山 晟, 難波 幸大, 湯浅 翔庸	9
ステイクスリップ現象における理論周期の導出と検証	.....
荒田 祐希, 仁木 心音, 保田 千代	13
液状化現象における粒子の挙動	.....
神谷 健太, 本同 凌大, 山崎 純汰	17
[ 化学分野 ]	
スペクトルを用いた炎色反応についての研究	.....
塩田 涼介, 松野 晃達, 鷹取 柚花, 日笠 心晶, 春木 英里, 福井 歩純	21
電気分解における電極中の気体の挙動の考察	.....
菅原 壮太, 牧 祐太, 栗栖 冬翔, 河野 春馬, 長尾 修志	25
[ 生物分野 ]	
モジホコリの探索行動に影響する要因 (英語論文)	
Factors that Affect the Exploration Activity of Slime Mold, <i>Physarum</i>	.....
大谷 夕弦, 坂手 萌子, ランボー 海弥	29
ハチミツ中の耐糖性酵母の探索	.....
坂本 晴菜, 杉本 珠花, 杉山 可歩	33
[ 付録 ]	
研究発表ポスター集	.....
	38 ~ 46

# お絵かきロジックの解の存在判定

—お絵かきロジックの定式化による再定義と健全性定理に関する研究—

研究者 与木 溪汰, 黒田 康平

指導者 井上 博, 高木 啓輔

## Abstract

In this paper, we researched the so-called “Oekaki Logic” which is a kind of pencil puzzle. For doing research, we formulated and redefined Oekaki Logic. As a result, we could show some theorems about the input of general Oekaki Logic and an existence judgement of the answer (soundness) corresponding to it.

## 1. 研究の概要

本稿では、ペンシルパズルの一種である「お絵かきロジック」について考察している。本研究を行うにあたって、お絵かきロジックの定式化と再定義を行った。その結果、一般的なお絵かきロジックの入力とそれに対応する解の存在判定（本研究では「健全性」と呼称する）について、いくつかの定理を示すことができた。

## 2. 序論

昨今世界中で親しまれているペンシルパズル、日常的に解かれているそれの中でも雑誌などで特集が組まれるほど人気のパズルがある。お絵かきロジック、別名をイラストロジックやののぐらむ、ピクロスなどとも呼ばれるペンシルパズルの一種である。お絵かきロジックとは、 $M \times N$  のマス目に対して、それぞれの列と行に与えられた数字をヒントに、マス目を塗りつぶすことでイラストを浮かび上がらせるパズルである。

## 3. 語句解説および数学的記法

本研究の中で用いられる語句および記号を定義する。

- 健全性：お絵かきロジックが健全であるかどうか。お絵かきロジックの解が存在し一つであるとき、そのお絵かきロジックは健全である。一般的なお絵かきロジックは健全である。
- 連：数列において、同じ値  $n$  が  $m$  項連續して続くとき、その項を  $n$  の連とし、 $m$  の値を連の長さとする。
- $\mathbb{N}_+$ ：正整数全体の集合(: = {1, 2, 3, ...})。
- $X^m : X$  の元からなる長さ  $m$  の列の集合。列は  $a := (a_1, \dots, a_j, \dots, a_m) = (a_j)_{j=1}^m$  と記す。

- $O_n : n$  列  $n$  行の零行列  $\left( := \begin{pmatrix} 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ 0 & & 0 & & 0 \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix} \right)$ 。

- $\{a\}^{m \times n} : a$  を元とする  $m$  列  $n$  行の行列全体の集合。

#### 4. 研究内容

本研究を行うにあたって、お絵かきロジックを定式化した。お絵かきロジックは、与えられた数字のヒント（キー）に対して、 $M \times N$  のグリッド上の黒マスの位置を特定するパズルである。

ここで、解として出力されるイラストを各要素が 0 (白マス)、1 (黒マス) の  $M \times N$  の行列を

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{j1} & \cdots & a_{M1} \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ a_{1k} & & a_{jk} & & a_{Mk} \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ a_{1N} & \cdots & a_{jN} & \cdots & a_{MN} \end{pmatrix} \in \{0,1\}^{M \times N}$$

と表す。この  $A$  を解と呼称する。

また、与えられる列と行のキーを示した列を

$$C^M = (c_j)_{j=1}^M = (c_1, \dots, c_M)$$

$$R^N = (r_k)_{k=1}^N = \begin{pmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_N \end{pmatrix}$$

と表す。ここで、

$$\begin{aligned} W^{M+N} &= (w_l)_{l=1}^{M+N} = (c_1, \dots, c_M, r_1, \dots, r_N) \\ &= (w_1, \dots, w_{M+N}) \end{aligned}$$

とおくと、

$$C^M = (w_l)_{l=1}^M, \quad R^N = (w_l)_{l=M+1}^{M+N}$$

と表すことができる。さらに、

$$w_l = (\omega_{lp})_{p=1}^{q_l} = (\omega_{l1}, \dots, \omega_{lp}, \dots, \omega_{lq_l})$$

とする。

次に、出力に関する写像について定義する。まず、数列  $a_j, a_{M+k}$  を

$$\begin{aligned} a_j &= (a_{j1}, \dots, a_{jk}, \dots, a_{jM}) \\ a_{M+k} &= (a_{1k}, \dots, a_{jk}, \dots, a_{Nk}) \end{aligned}$$

と定義し、写像  $f$  を

$$f : a \rightarrow w$$

(  $f$  は数列  $a$  を、数列  $a$  の 1 の連の長さを順番に並べた数列に写す写像 )

と定義する。

次に、写像  $\Phi, \Psi$  について、次のように定義する。

$\Phi : R^N \rightarrow \mathfrak{A}^R$  ( $M+1 \leq l \leq M+N$ )  
(  $\Phi$  は数列の列  $R^N$  を、すべての  $l$  について  $w_l$  の逆像  $f^{-1}(w_l)$  を第  $l$  行とした行列  $A^R$  の集合  $\mathfrak{A}^R$  に写す写像 )

$\Psi : C^M \rightarrow \mathfrak{A}^C$  ( $1 \leq l \leq M$ )  
(  $\Psi$  は数列の列  $C^M$  を、すべての  $l$  について  $w_l$  の逆像  $f^{-1}(w_l)$  を第  $l$  列とした行列  $A^C$  の集合  $\mathfrak{A}^C$  に写す写像 )

そして、 $\mathfrak{A}$  を、 $\mathfrak{A}^R$  と  $\mathfrak{A}^C$  の積集合とおき、この  $\mathfrak{A}$  をお絵かきロジックの出力と定義する。このとき、すべての  $A$  は  $\mathfrak{A}$  に属する。

よって、お絵かきロジックを次のように再定義する。

#### 定義

$$\begin{aligned} \text{入力} : W^{M+N} &= (w_l)_{l=1}^{M+N} = \left( (\omega_{lp})_{p=1}^{q_l} \right)_{l=1}^{M+N} \\ &\quad \left( (\omega_{lp})_{p=1}^{q_l} = \{0\}, \quad \omega_{lp} \in \mathbb{N}_+ \right) \\ &\quad M, N \in \mathbb{N}_+ \end{aligned}$$

$$\text{出力} : \mathfrak{A} \ni \forall A, \quad (\mathfrak{A} = \mathfrak{A}^r \cap \mathfrak{A}^c)$$

$$\Phi : R^N \rightarrow \mathfrak{A}^r, \quad \Psi : C^M \rightarrow \mathfrak{A}^c$$

入力とそれに対応する解の存在判定について、いくつかの定理を示す。

#### 定理 1.1

行あるいは列の一つ（語）に注目したときに、次の数式が成り立つならば、キー  $W^{M+N}$  を満たす解が存在しない。また、その逆は成り立たない。

$$N < \sum_{p=1}^{q_l} \omega_{lp} + (|w_l| - 1) \quad (1 \leq l \leq M)$$

または,

$$M < \sum_{p=1}^{q_l} \omega_{lp} + (|w_l| - 1) \quad (1 \leq l \leq N)$$

$$\Rightarrow \mathfrak{A} = \emptyset$$

### 証明

列について ( $1 \leq l \leq M$  のとき), 塗りつぶすマスを  $\alpha$ , 塗りつぶさないマスを  $\beta$  とおくと, お絵かきロジックが解をもつとき,

$$\alpha + \beta = N$$

$$\alpha = \sum_{p=1}^{q_l} \omega_{lp}, \quad \beta \geq |w_l| - 1$$

よって, 次の式が成り立つ。

$$\mathfrak{A} \geq 1$$

$$\Rightarrow N \geq \sum_{p=1}^{q_l} \omega_{lp} + (|w_l| - 1) \quad (1 \leq l \leq M)$$

したがって, 対偶より題意は示された。

### 定理 1. 2

すべての行と列のキーに注目したときに, それぞれの数列の列の総和が等しくなるならば, キー  $W^{M+N}$  を満たす解は存在しない。また, その逆は成り立たない。

$$\sum_{l=1}^M \sum_{p=1}^{q_l} \omega_{lp} \neq \sum_{l=M+1}^{M+N} \sum_{p=1}^{q_l} \omega_{lp} \Rightarrow \mathfrak{A} = \emptyset$$

### 証明

お絵かきロジックが解をもつとき,

$$\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N a_{jk} = \sum_{l=1}^M \sum_{p=1}^{q_l} \omega_{lp} = \sum_{l=M+1}^{M+N} \sum_{p=1}^{q_l} \omega_{lp}$$

よって, 次の式が成り立つ。

$$\mathfrak{A} \geq 1 \Rightarrow \sum_{l=1}^M \sum_{p=1}^{q_l} \omega_{lp} = \sum_{l=M+1}^{M+N} \sum_{p=1}^{q_l} \omega_{lp}$$

したがって, 対偶より題意は示された。

### 定理 1. 3

行と列のキーに注目したときに, 次の条件(I) ~ (III) が成り立つならば, [1] ~ [3] が成り立つ。

条件

$$(I) M = N$$

$$(II) \forall \omega_{lp} = e$$

$$(III) \forall |w_l| = 1$$

[1]  $e = 0$  のとき

$$A = O_M = \begin{pmatrix} 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ 0 & & 0 & & 0 \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix}$$

[2]  $0 < e \leq M$  のとき

$$(1) M \equiv 0 \pmod{e} \Rightarrow |\mathfrak{A}| = \left(\frac{M}{e}\right)!$$

$$(2) M \not\equiv 0 \pmod{e} \Rightarrow \mathfrak{A} = \emptyset$$

[3]  $e > M$  のとき  $\mathfrak{A} = \emptyset$

### 証明

[1]  $e = 0$  のとき

条件より, これを解くと

$$\Phi((0)_{l=M+1}^{M+M}) = (O_M), \quad \Psi((0)_{l=M}^M) = (O_M)$$

よって,

$$A = O_M = \begin{pmatrix} 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ 0 & & 0 & & 0 \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix}$$

[2]  $0 < e \leq M$  のとき

(1) まず,  $W^{\frac{M+M}{e}} = (1)_{l=1}^{\frac{M+M}{e}}$  となるお絵かきロジックの解について考えると, その個数は  $\left(\frac{M}{e}\right)!$  となる。この解を  $B$  としたとき,  $B$  の元  $1$

を  $e \times e$  の行列  $C$   $\left(C = \begin{pmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cdots & 1 \end{pmatrix}\right)$  で,

元  $0$  を  $O_e$  で置き換えた区分行列を  $B'$  とお

く。この区分行列  $B'$  を解に、お絵かきロジックの入力は定理 1.3 [2] (1) を満たす。

また、この入力のとき、解  $A$  の行に注目すると、 $a_j$  の 1 の連の長さは  $e$  である。さらに、 $a_1 = a_2 = \dots = a_e$  があるので、以下

$a_{e+1} = \dots = a_{2e}$ ,  $a_{M-e+1} = \dots = a_M$  となる。列について同様にすると、解  $A$  は  $B'$  と等しくなる。よって、解  $A$  の個数と  $B'$  の個数は等しくなるため、 $|\mathfrak{A}| = \binom{M}{e}!$  が示された。

(2)  $M \not\equiv 0 \pmod{e}$  のとき、 $\mathfrak{A} \neq \emptyset$  すなわち  $\mathfrak{A} \geq 1$  と仮定する。このときの解  $A$  と  $O_M$  をブロックとし、 $A$  を対角成分に、それ以外に  $O_M$  を  $e \times e$  に並べた  $eM \times eM$  の区分行列を考えると、この区分行列を解とするお絵かきロジックの入力は定理 1.3 [2] (1) を満たすため、そのお絵かきロジックの解の個

数は  $W^{\frac{M}{e} + \frac{M}{e}} = (1)_{l=1}^{\frac{M}{e} + \frac{M}{e}}$  を入力とするお絵かきロジックの解の個数と等しくなり、

$M \not\equiv 0 \pmod{e}$  から  $\frac{M}{e}$  は非整数となるた

め矛盾する。よって、題意は示された。

[3]  $e > M$  のとき

$$\sum_{p=1}^{q_l} \omega_{lp} + (|w_l| - 1) = e > M$$

となり、定理 1.1 が成り立つ。よって、 $\mathfrak{A} = \emptyset$  が示された。

## 5. 結論

本研究ではお絵かきロジックを再定義することでいくつかの定理が得られた。今後は、研究当初の目的であったお絵かきロジックの解の個数や複数色のお絵かきロジックに関する研究を行いたい。

## 6. 謝辞

おわりに、本研究を進めるにあたり、貴重なご助言を賜った明治大学総合数理学部先端メディアサイエンス学科専任教授菊池浩明博士に深甚な感謝をささげる次第であります。

## 7. 参考文献

- 1) 八登崇之: NP 完全なペンシルパズルの一覧, 東京大学大学院情報理工学系研究科, 2006/07/03
- 2) 菊池浩明：“イラストロジックパズルを解くアルゴリズム”，情報処理学会研究報告. 人工知能研究会報告, 一般社団法人情報処理学会, PP127-132, 1995/03/07

# シャトルの羽による空気抵抗の影響

研究者 大杉 昌徹, 石原 光基, 市場 勇樹, 大橋 虹椰,

大森 永遠, 奥 智, 久保 心暉, 辰巳 陽己, 長畠 透馬

指導者 仲達 大輔

## Abstract

We researched how shuttlecock feathers affect air resistance. First we threw it at an angle and took a video. We analyzed the video and thought point of launch as origin. We took coordinates per one scene. We made  $v_x - t$ ,  $v_y - t$  graphs based on the data. We compared them with theoretical curves. We threw cork (the part removed feathers) and did the same things. The result showed that actual data was near theoretical data. From the graph of actual data, shuttles were looked as they repeated increasing the speed and decreasing it. From the speed graph of the cork, it was looked as isokinetic motion. Particularly, from  $v_y - t$  graph, actual data was near theoretical data of ball without air resistance.

## 1. 研究の概要

私たちは、シャトルの羽による空気抵抗の影響について研究した。まず、シャトルを斜方投射し、その様子を撮影した。その動画を解析し、打ち出しの点を原点とした。そして、1フレームごとの座標をとった。また、その値をもとに  $v_x - t$ ,  $v_y - t$  グラフを作成した。次に、事前に作成した理論曲線と比較した。さらに、シャトルの羽を取り除いた部分(コルク)を斜方投射した様子を撮影し、以上と同様のことを行った。結果は、 $v_x - t$ ,  $v_y - t$  グラフどちらも理論式に近い値を取った。また、1フレームごとの実測値では、どちらも加速と減速を繰り返しているようなグラフが見られた。コルクの速度グラフは、どちらも等加速度運動をしているような値を取った。特に  $v_y - t$  グラフでは、空位抵抗なしの球体の  $v_y - t$  理論式と同じような値を取った。

## 2. 序論

本研究は、バドミントンのシャトルのその独特な形状からどのような軌道を描き、また羽がない場合と比べてどのくらい空気抵抗が変化するのかを調べた。結果、 $x$  方向の空気抵抗が、羽があるときに大きいことが分かった。

## 3. 目的

シャトルに羽があることによって空気抵抗の受け方や座標、速度などの変化にどのような違いが生じるのかを明らかにし、考察することを目的とした。

## 4. 研究内容

バドミントンのシャトル（ゴーセン GOSEN バドミントン シャトル ネオフェザー クリスタル GFN100H）を用いて、シャトルの軌道を撮影し、動画解析アプリ「うごトル」を用いて  $y - x$  グラフを作成した。また、その値をもとに  $v_x - t$ ,  $v_y - t$  グラフを作成し、出た結果を理論式をもとにした理論曲線と比較した。

### ① 実験 1

羽有の状態のシャトルの軌道を調べた。理論式は、空気抵抗を受けるときのものを用いた。

### <目的>

シャトルの座標や速度の変化の様子などを明らかにする。

### <仮説>

シャトルの軌道は理論式通りに、 $x$  方向に大きく空気抵抗を受け、 $y$  方向には空気抵抗の影響をあまり受けないと考えた。

### <方法>

1. 羽有のシャトルをサーブで打ち出した軌道を撮影した。



図1 実験の撮影の様子

2. 動画解析アプリ「うごトル」を用いて 0.1 秒ごとの座標をとり、 $y - x$  グラフを作成した。
3. また、1 フレームごとの座標もとり、 $y - x$  グラフを作成した。
4. それらを使って、 $v_x - t$ 、 $v_y - t$  グラフを作成し、理論曲線と比較した。

理論式 :

$$v_{x_i} = v_{x_{i-1}} - 0.25 v_{i-1} \cdot v_{x_{i-1}} (t_i - t_{i-1})$$

$$v_{y_i} = v_{y_{i-1}} - (9.8 + 0.25 v_{i-1} \cdot v_{y_{i-1}}) (t_i - t_{i-1})$$



図2 実験に用いたシャトル

### <結果>

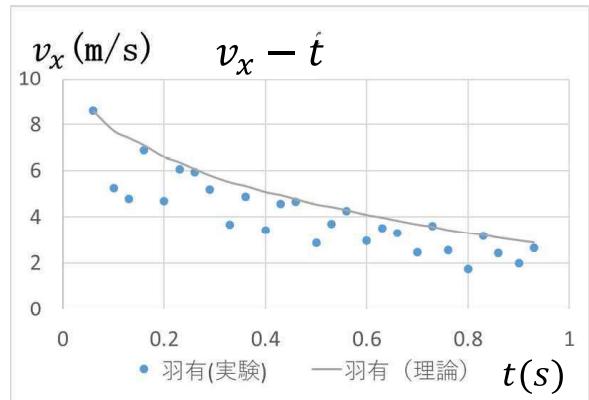


図3 羽有の水平方向の速度成分と時間の関係

$v_x - t$  グラフにおいて、羽有の場合は理論値と近い値を取った。

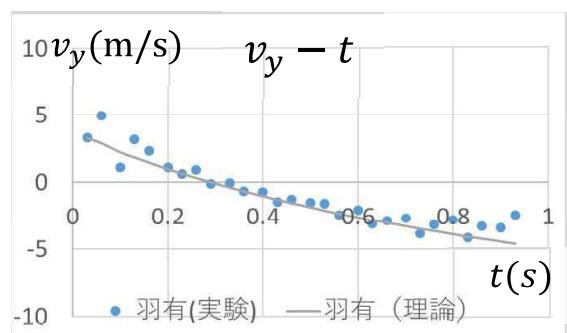


図4 羽有の鉛直方向の速度成分と時間の関係

$v_y - t$  グラフにおいて、羽有の場合は  $v_x - t$  グラフと同様、理論値に近い値を取った。

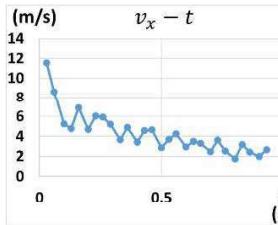


図 5

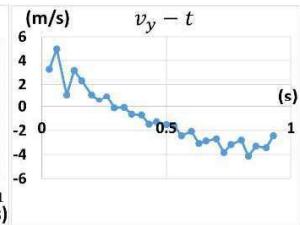


図 6

1 フレームごとの羽有の  $v_x - t$ ,  $v_y - t$  グラフ

どちらのグラフも、加速と減速を繰り返すようなグラフが見られた。コルクのぶれが原因ではないかと考えたが、1 フレームずつの座標を見たときにおこるずれであることが分かった。

#### <考察>

仮説の通り、シャトルは主に  $x$  方向に運動するため、 $x$  方向に大きく空気抵抗を受け、 $y$  方向にはあまり空気抵抗を受けないことがわかった。

ここで、シャトルが通常の球体と比べて空気抵抗を大きく受ける原因が羽にあると考えた。

#### ② 実験 2

羽無の状態のシャトルの軌道を調べた。理論式は、通常の球体が空気抵抗を受けないときのものを用いた。

#### <目的>

シャトルに羽があることによって、通常の球体と比べて空気抵抗の受け方や座標、速度の変化などにどのような違いが生じるのかを明らかにする。

#### <仮説>

通常の球体と同じような放物線状の軌道を描くと考えた。

#### <結果>

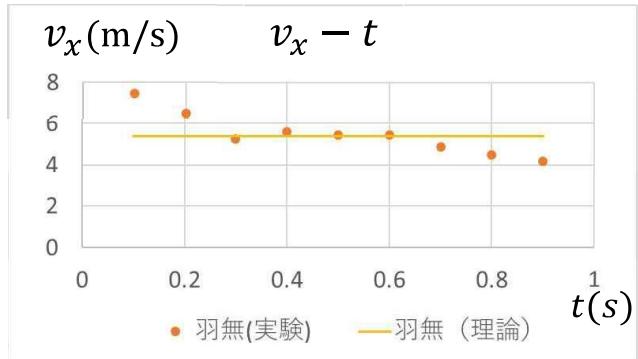


図 7 羽無の水平方向の速度成分と時間の関係

$v_x - t$  グラフにおいて、羽無の場合は等速運動をするかと思ったが、少しずれた値を取った。

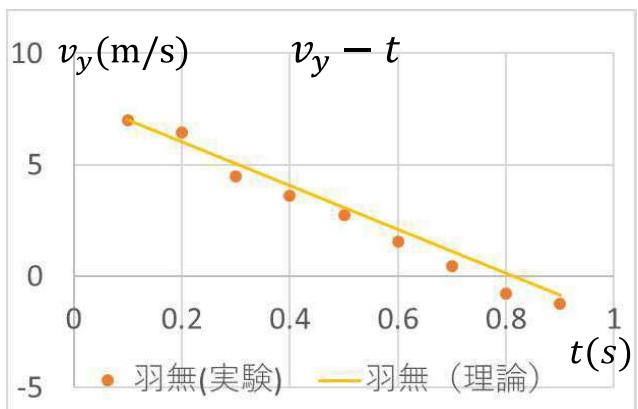


図 8 羽無の鉛直方向の速度成分と時間の関係

$v_y - t$  グラフにおいて、羽無の場合は空気抵抗なしの球体の  $v_y - t$  理論式と同じような値を取った。

#### <考察>

仮説の通り、羽無のシャトルは通常の球体が空気抵抗を受けないときの理論値とほぼ同じような値を取ることがわかった。以上の結果から、シャトルが空気抵抗を受けやすいのは、羽が付いていることが原因であると考えられる。

## 5. 結論

バドミントンのシャトルは主に  $x$  方向に運動するため  $x$  方向に大きく空気抵抗を受け、 $y$  方向にはあまり空気抵抗を受けないことがわかった。羽無のシャトルの場合は、 $x$  方向には空気抵抗を受けるがほぼ等速運動をし、 $y$  方向には空気抵抗の影響をあまり受けなかったため、 $v_x - t$ 、 $v_y - t$  グラフは空気抵抗なしの球体の理論式とほぼ同じような値をとったと考えられる。

また、シャトルの1フレームごとの速度グラフに揺れが見られたのは、はじめは図9のように細かくシャトルの向きが変化して、そのたびに受ける空気抵抗が変化し、シャトルの速度に影響を与えていたのだと考えた。しかし、これは1フレームごとで撮影したときにおこる座標のずれが原因であるとわかった。

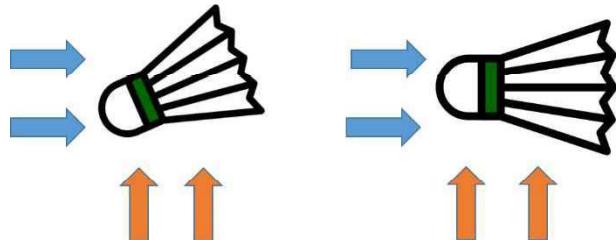


図9 空気抵抗を受けるシャトルのイメージ

これらのことから、シャトルが受ける空気抵抗は主に羽によるもので、羽をなくした部分だけを投射すると、球体とほぼ同じ軌道になることが分かった。

今後の展望として、シャトルの羽が受ける空気抵抗が実際にどれほどの影響をシャトルコックに与えているのかを調べる必要がある。具体的には、羽の構造を調べたり、それによっておこる空気の軌道を調べたりして、シャトルの完璧な軌道の公式を作り導き出せるようにしていきたい。

## 6. 謝辞

今回の課題研究にあたり、津山工業高等専門学校准教授の曾利 仁 先生、加藤 学 先生には、より深い研究内容にするためのご指導、ご助言をいただきました。誠に感謝申し上げます。

## 7. 参考文献

- 長谷川 裕晃、和田 謙治、村上 正秀、大林 茂  
「バドミントンシャトルコックの有する高い  
減速メカニズム」NDL ONLINE ながれ 32  
(2013) 153~162

# 斜面上を流れる粘性流体の運動分析

研究者 高橋 恵吾, 香山 晃, 難波 幸大, 湯浅 皓庸

指導者 仲達 大輔

## Abstract

Viscosity is one of the properties of viscous fluids, and measurement of viscosity in the high viscosity range requires a dedicated and expensive measurement device. Therefore, it is necessary to establish a simple and inexpensive measurement method. We focused on the motion of a viscous fluid on a slope, which is considered to have a large influence on viscosity, and wanted to devise a simple method to measure viscosity by describing the motion using a theoretical model. In this study, we used a water glass as a viscous fluid, and a theoretical model was devised to describe its deformation as geometric deformation. As a result of comparing the values obtained from the theoretical model with the measured values, it was suggested that the theoretical model can describe the motion of water glass in the deceleration interval.

## 1. 研究の概要

粘性流体の性質の一つである粘度は、高粘度帯の測定に専用の高価な測定装置を必要とする。そのため、安価で簡易的な測定方法の確立が求められる。私たちは、粘度が大きく影響を与えると考えられる粘性流体の斜面上の運動に着目し、その運動を理論モデルにより記述することで簡易的に粘度を測定できる手法を考案したいと考えた。そこで本研究では、粘性流体として水ガラスを用い、その変形の様子を幾何的な変形ととらえ記述する理論モデルを考案した。理論モデルから得られた値と実測値を比較した結果、理論モデルは水ガラスの減速区間の運動を記述できる可能性を示唆した。今後は高粘度の粘性流体の粘度測定方法として、今回得られた理論モデルを発展させていきたい。

## 2. 序論

粘性流体の性質の一つである粘度に着目し、粘度が運動に大きく影響していると考えられる斜面上の運動を幾何的な変形という観点から記述する理論モデルを考案する。また粘性流体の運動からその性質を推定する方法を理論モデルと実験値から考案する。

## 3. 実験・解析方法

24, 99, 176 Pa · s の水ガラス 10 g をアクリル板に滴下し、アクリル板を 45° に傾ける。水ガラスが薄く広がりながら斜面下方へと流れる（図 1）。iPad を用いてその様子を撮影し、映像データをコマ送り再生して時間ごとの水ガラス先

端の位置座標を計測する。得られたデータから時間ごとの水ガラス先端の速さを計算する。

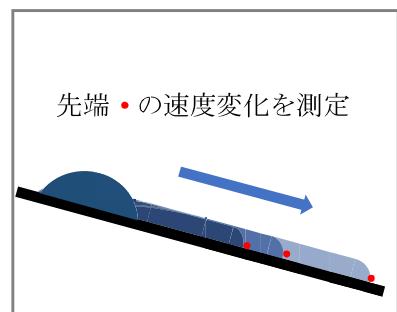


図 1：実験の様子（左）とその模式図（右）

また、実験で確認された水ガラスが斜面下方に流れていく様子を、図形の変形と捉えた理論モデルを考案し、実験値と理論モデルによって求めた理論値との比較を行った。

## 4. 理論モデル

### 4.1. 水ガラス先端の運動と分析

観察の結果、水ガラスが斜面下向きに運動するとともに、水ガラス先端部は以下のようない運動をすることが分かった（図2）。

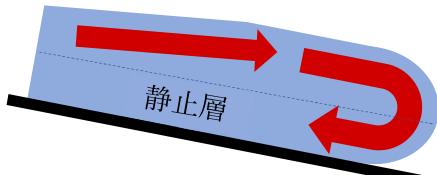


図2：水ガラス先端の様子

1. 斜面上方から水ガラスが先端部に流れ込む
2. 流れ込んだ水ガラスが先端に到達し、その後静止層に流れ込む。静止層とは斜面近傍の層であり、粘性抵抗が大きく斜面に対して運動していない層のことを指す。
3. 水ガラスが静止層に流れ込むとともに斜面下向きに運動する水ガラスの量が少なくなり、水ガラス先端の運動は減速する。なお水ガラスの運動の全体的な傾向として急激な加速の後、緩やかに減速する様子がみられた。

### 4.2. 理論モデル（思考過程）

上記の水ガラスの運動の様子を単純化して記述できる理論モデルを4つ考案した。このセクションでは、4つの理論モデルのうち水ガラスの運動の特徴を最もよく捉えていると考えられる重力線モデルについて、その思考過程を示す。

重力線モデルは、水ガラスが薄く広がりながら斜面下方へと進んでいくことに着目し、その様子を図形の等積変形であるとみなしたモデルである。

参考文献(3)より、斜面上を流れる水ガラスのうち、斜面近傍の層は摩擦力により静止、それより上の層は斜面から遠い層ほど斜面下向きの速さが大きい（図3）。

そのため、水ガラス上部と水ガラス下部では速度差が生じる。その差によって、水ガラス上部は下部を追い越し、（図4）のような運動をする。

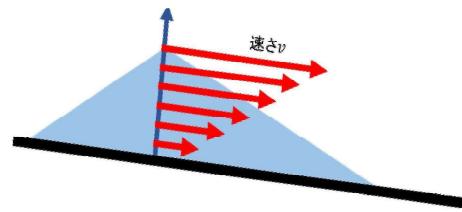


図3：高さに依存した速度勾配

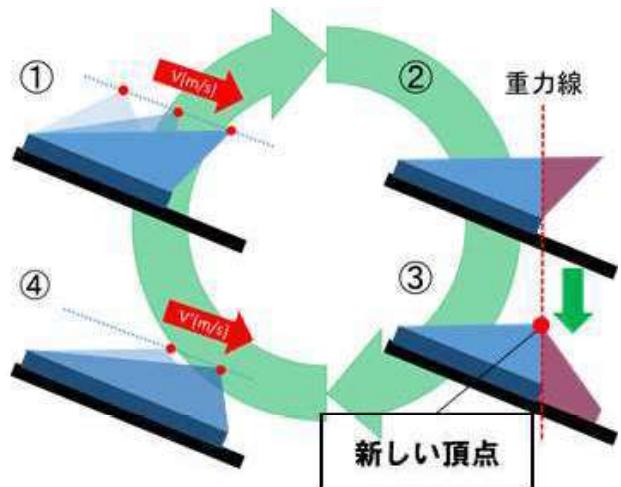


図4：水ガラスの変形①～④の模式図

このモデルは、以下の①～④の変形を連続的に繰り返し、斜面下向きに運動する。

- ① 運動中の水ガラスを三角形と近似し、三角形の頂点（図4の赤い点・）の速度を水ガラス先端の速度とする。三角形の頂点が斜面に対して下向きに平行移動し、三角形は等積変形する。斜面近傍の水ガラスの層は斜面との摩擦により静止している。
- ②～③ 速度差により重力線よりも斜面下向きへ移動した水ガラス（図4の赤い部分）が、斜面下部へ落下（等積変形）する。
- ④ 新しくできた頂点が再び前進する。

この変形が連続的に起こることにより、三角形の頂点の斜面からの高さは連続的に低くなっていく。水ガラスは斜面からの高さに応じた固有の速度勾配を持っており、その速度は斜面に近いほど小さくなるため、このモデルは減速する。実測値の水ガラスには、緩やかに減速する様子が確認できたため、このモデルを採用した。

#### 4.3. 理論モデル（理論式およびその導出）

このセクションでは、理論モデルの理論式およびその導出過程を示す。

重力線モデルを用いて、経過時間  $t$  [s] と、水ガラス先端の速度  $v$  [m/s] の関係式を求めた。

今後用いる文字を、次のように定義する。

- $L$  : 運動前の粘性流体の長さ [m]
- $H$  : 運動前の粘性流体の高さ [m]
- $\mu$  : 粘度 [Pa · s]
- $\rho$  : 粘性流体の密度 [kg/m<sup>3</sup>]
- $g$  : 重力加速度 [m/s<sup>2</sup>]
- $\theta$  : 斜面の角度 [°]
- $h$  : 運動収束後の粘性流体の高さ [m]
- $x$  : 粘性流体の移動距離 [m]
- $t$  : 経過時間 [s]

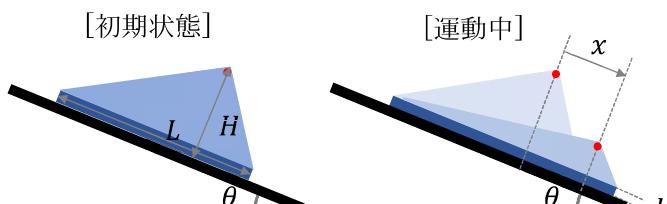


図5：用いた文字

まず、高さ方向の速度勾配について考える。参考文献(3)より、粘性流体は斜面を流れる際、斜面からの高さに依存する速度勾配をもつことがわかっている。この勾配は本来線形ではなく、斜面からの高さを  $y$ 、高さごとの速度を  $v$  とすると、

$$v = \left( -\frac{\rho g \sin \theta}{2\mu} \right) (y - H)^2 + \frac{\rho g \sin \theta H^2}{2\mu}$$

となるが、煩雑すぎるため、下端を  $v = 0$ 、上端

を  $v = \frac{\rho g \sin \theta H^2}{2\mu}$  として、線形な測度勾配を持つと

みなす。よって、速度勾配は、

$$\frac{\rho g \sin \theta H^2}{2\mu} \div H = \frac{\rho g \sin \theta H}{2\mu}$$

となる。ゆえに、 $y = 0$  の面を上層と下層の境界とすると、高さ  $y$  における速度は、

$$\frac{\rho g \sin \theta H}{2\mu} \times y = \frac{\rho g \sin \theta H}{2\mu} y$$

となる。

ここで、前端の運動について考える。前端は、図4のように重力線からはみ出た流体が下に落ち込み、全体の体積を一定に保ったまま変形しながら運動するとする。そしてこの変形が連続的に起こると考える。

そうすると、前端の変形は、微小な時間に重力線からはみ出た流体が落ち込んで重力線と平行に均される変形だと考えることができる。よって、前端の速度は、微小時間  $\Delta t$  間にはみ出た流体が平行四辺形に均された時の、平行四辺形の高さを  $\Delta t$  で割ったものだと考えることができる。

よって、変形前の前端の境界からの高さを  $y$  とすると、その時の  $y$  について、

$$\frac{\rho g \sin \theta H}{2\mu} y \times \Delta t \times \frac{1}{2} \times y = v \times \Delta t \times (y + h)$$

という方程式が成り立つ。 $v$  について解くと、

$$v = \frac{\rho g \sin \theta H y^2}{4\mu(H+h)} \quad \cdots \textcircled{1}$$

となる。また、最初の面積は  $L(H + h)$  より、三角形になった時の底面の長さを  $l$  とおくと、

$$lh + \frac{lH}{2} = L(H + h)$$

$$l = \frac{2L(H + h)}{H + 2h}$$

となる。この時刻を  $t = 0$  とする。ここで、粘性流体が進んだ距離を  $x$  とおくと、三角形の底辺の長さは、

$$\frac{2L(H + h)}{H + 2h} + x$$

となる。最初の三角形の面積は  $L(H + h)$  で等積変形しているため、 $y$  について、

$$\frac{1}{2} \left\{ \frac{2L(H + h)}{H + 2h} + x \right\} y = L(H + h)$$

が成り立ち、これを解くと、

$$y = \frac{2L(H + h)}{\frac{2L(H + h)}{H + 2h} + x} - 2h$$

これを①式に代入すると、

$$v = \frac{\rho g \sin \theta H}{4\mu(H+h)} \times \left( \frac{2L(H+h)}{\frac{2L(H+h)}{H+2h} + x} - 2h \right)^2$$

となる。これは、微分方程式になる。計算過程は煩雑なので省略するが、初期条件を  $t = 0$  の時  $x = 0$  として積分定数を求め、解くと、

$$t = \frac{1}{2ad}x + \frac{1}{2ac\left(x + \frac{c}{d} + b\right)} - \frac{d}{2ac(c + bd)}$$

となる。ただし、

$$a = \frac{\rho g \sin \theta H}{4\mu(H+h)} \quad b = \frac{2L(H+h)}{H+2h}$$

$$c = 2L(H+h) \quad d = -2h$$

とおいた。ここで、 $t = f(x)$  とおき、

$$t = f(x) \Leftrightarrow x = f^{-1}(t) \Leftrightarrow v = \frac{d}{dt}f^{-1}(t)$$

を得る。この式を用いて  $v - t$  理論値を求める。

## 5. 実験結果

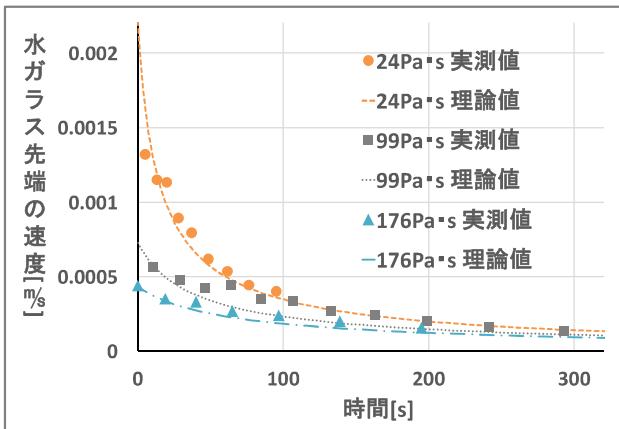


図 6 : 実験結果

実験データから、時刻  $t$  における水ガラス先端の位置の座標  $x$  をプロットした  $x - t$  グラフより、 $v - t$  グラフを得た。また、理論モデルによって得られた  $v - t$  グラフも同じ座標平面上に表示する（図 6）。重力線モデルは減速区間の運動を記述するモデルであるため、各粘度における減速区間の運動の実測値と理論値を比較した。

このグラフから時間の経過によって速度は減少すること、また高粘度の水ガラスほど速度減少

は緩やかであることがわかる。また粘度が 24, 176 Pa · s の水ガラスでは、理論値と実測値が良い相関をみせている。それに対して粘度が 99 Pa · s の水ガラスでは、実測値  $t = 50$ s の付近で加速し、理論値と異なる挙動を示している。

## 6. 考察

重力線モデルの速度減少の傾向が実測値の傾向と合致した理由は、水ガラスの流れが定常であり、上層の水ガラスが下層の水ガラスに潜り込むという動きを図形の変形とみなす処理が適していたからだと考えられる。

また、粘度が 99 Pa · s の水ガラスについて、加速の原因として実験装置やカメラの揺れなどが考えられる。しかし、加速した区間以外では速度減少の傾向が理論値と実測値で一致しているため、重力線モデルは粘性流体の斜面上の運動を記述できると考えた。

## 7. 結論

今回考案した重力線モデルは、斜面上を流れる水ガラスの減速区間の運動を記述できることがわかり、重力線モデルは粘性流体の斜面上の運動を記述できる可能性を示唆した。

今後は、重力線モデルを用いた粘性流体の粘度測定方法を確立することを目的に、他の粘性流体でも実験を行い理論式の普遍性を検証していくたい。そして得られた理論モデルを用いて、高い精度で粘度を測定できる方法を確立していきたい。

## 8. 参考文献

- 須賀一彦「汎用的な解析的壁関数モデル（第二報、滑面～粗面乱流に対応した強制対流温度場のモデル）」日本機械学会論文集（B編）71巻711号（2005-11）
- 藤田勝久『基礎を学ぶ流体力学』（森北出版株式会社、2009年）
- 河原正泰「エコプロセッシング研究室講義移動速度論」  
<http://www.msre.kumamotou.ac.jp/~process/>

# スティックスリップ現象における理論周期の導出と検証

研究者 荒田 祐希, 仁木 心音, 保田 千代

指導者 仲達 大輔, 井上 出

## Abstract

The Stick-Slip Phenomenon causes an unpleasant noise such as a rattling noise when pulling the chair. This is because static friction force and dynamic friction force act alternately on the object. In this study, we tried to analyze the cycle of the phenomenon. At first, we guessed that the natural vibration of the object must be related to the cycle of the phenomenon. However, it remained floating in the air for a longer time than the cycle of natural vibration. Therefore, we set up a model that bounces after touching the ground. As a result of this analysis, the idea that the cycle of this phenomenon is related to the bouncing on the ground could explain the experimental results well.

## 1. 研究の概要

本研究では、不快音の原因であるスティックスリップ現象に注目し、その周期を求めるために理論モデルを立て、実証試験をおこなった。スティックスリップ現象を起こす物体の固有振動が現象の周期に関係すると考えたが、実験結果より、固有振動の周期よりも長い時間宙に浮いている状態が続いたため、地面に接触した後にバウンドするモデルを立てた。解析した結果、地面に接触して弾性衝突したとの考え方は実験結果をうまく説明できていることが分かった。

## 2. 序論

私たちの学校では、授業の始まりと終わりには必ず起立をする。その際、椅子と床が擦れてガタガタと不快音が鳴り響く。その原因が気になって調べたところ、それが「スティックスリップ現象」であることが分かり、車のワイパーの不快音などにも関係していることが分かった。スティックスリップ現象とは静止摩擦力が作用するスティック(固着)状態と、動摩擦力が作用するスリップ(すべり)状態が、接触面に交番的に表れる現象のことである。スティックスリップ現象は静止摩擦力と動摩擦力の性質の違いにより解明が困難であるため、現象の解明への貢献をするとともにさらに発展させ、現象防止を目的とした。

## 3. 研究内容

今回は、スティックスリップ現象の周期を求めるための理論モデルを立て、理論式の導出をするとともに、その実証実験をゴム板で行った。

### 【理論周期 1】

スティックスリップ現象の周期  $T$  を求める理論モデルとして、

- ① 床面に接触している部分は静止しているが、上端は一定の速度  $v_0$  で運動する時間  $T_1$
  - ② 最大摩擦力を迎えた後、固有振動をして  $3/4$  周期後に床に再び接触する時間  $T_2$
- に分けて考えた。これを「固有振動モデル」(図 1)と名付け、 $T$  を次のように定義した。

$$T = T_1 + T_2 \quad (1)$$

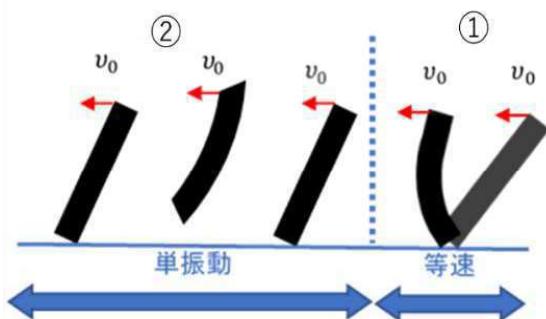


図 1 固有振動モデル

次に、ゴム板の下端が床の上をすべり始めるまでの上端の速さを  $v_0$ 、上端が水平方向に動いた距離を  $x$  とすると、次のような関係式が得られる。

$$T_1 = \frac{x}{v_0} \quad (2)$$

また、ゴム板の下端がすべりはじめる直前の静止摩擦力（最大摩擦力） $F_0$  は、次式で表せる。

$$F_0 = \mu_0 N \quad (3)$$

なお、ゴム板と床の間の静止摩擦係数は、摩擦角を用いた実験により求めた。その結果、 $\mu_0 = 0.819$  が得られた。

ゴム板が床から受ける垂直抗力  $N$  の大きさは、上端の変位  $x$  によって変動する。ここで、すべり始める直前のゴム板にかかる垂直抗力  $N$  の大きさと上端の変位  $x$  の関係を求めるために、次の予備実験を行った。

#### 《予備実験》

図 2 のように、電子天秤の上にゴム板をのせ、 $N$  と  $x$  の関係を求める。この実験から、 $N$  と  $x$  の関係は、図 3 のグラフのようになった。

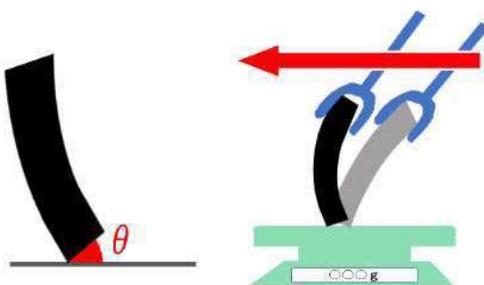


図 2 上端の変位を求める実験

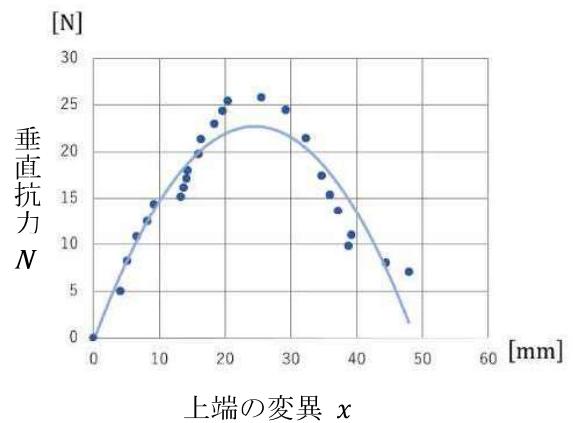


図 3 垂直抗力と上端の変位の関係

ゴム板の下端がすべり始めてから、再び下端が床に接触するまでの時間  $T_2$  は、ゴム板の固有振動の  $3/4$  周期と考え、次のように定義した。

$$T_2 = \frac{3\pi}{2\sqrt{3EI/mL^3}} \quad (4)$$

ここで  $E$  はヤング率、 $I$  は慣性モーメント、 $m$  はゴム板の質量、 $L$  はゴム板の軸  $z$  から下端までの長さである。また  $\alpha$ ,  $\beta$  を図 4 のように定義すると、慣性モーメント  $I$  は、

$$I = \frac{1}{12}m(\alpha_2 + \beta_2) \quad (5)$$

ここで、 $\alpha = 0.01 \text{ m}$ ,  $\beta = 0.15 \text{ m}$ ,  $m = 0.17 \text{ kg}$  より、 $I = 3.8 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  を得た。また、ヤング率には天然ゴムの文献値  $1.5 \sim 5.0 \times 10^5 \text{ Pa}$  を用いた。

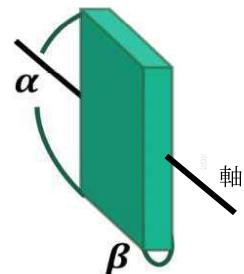


図 4 慣性モーメントの定義

### 【周期の実測値を求める実験】

牽引力が  $F = 1.49 \text{ N}$  のラジコンカーを用いてゴム板を引き、スティックスリップ現象をおこす(図 5)。図 3 から、 $x = 4.8 \times 10^{-2} \text{ m}$  を用いた。



図 5 実験の様子

### 【結果 1】

	理論値(s)	実測値(s)
$T_1$	$0.074 \pm 0.003$	$0.015 \pm 0.009$
$T_2$	$0.0023 \pm 0.0007$	$0.047 \pm 0.005$
$T$	$0.076 \pm 0.003$	$0.062 \pm 0.003$

$T_1$ ,  $T_2$  どちらも誤差の範囲内に一致しなかった。よって、このモデルは現象をうまく表せていないと考えられる。

### 【考察 1】

$T_1$  の部分を等速度運動、 $T_2$  の部分を固有振動の  $3/4$  周期と仮定し立式したが、どちらも値が大幅にずれた。そこで、ゴム板が跳ね上がっていようすを調べるために、実際に跳ね上がるようすを動画で撮影し、より詳しく観察してみた。すると、予測していたよりもゴム板は大きく曲がらないまま跳ね上がっていることがわかった。そのため、最大摩擦力を超えてすべりだしたというよりも、垂直抗力が 0 になって跳ね上がったと考え直すことにした。

そこで、ゴム板をばねに見立てたときの鉛直方向における単振動の  $1/2$  周期が  $T_1$  であると仮定し直すこととした。また  $T_2$  についても、固有振

動の 1 周期とは異なっているのではないかと考え、複数の動画をより詳しく観察した結果、跳ね上がりが斜方投射によるものと判断し、理論周期 2 を新たに考えた。

### 【理論周期 2】

$T_1$  の部分を鉛直方向における単振動の  $1/2$  周期とし、 $T_2$  の部分を斜方投射の滞空時間と考え、これを「バウンドモデル」(図 6) と名付け、定義を試みる。

$$T_1 = \pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad T_2 = \sqrt{\frac{8h}{g}} \quad (6)$$

ここで、 $k$  はゴム板の比例定数、 $m$  はゴム板の質量、 $g$  は重力加速度の大きさ、 $h$  はゴム板の下端の最高点である。そして、スティックスリップ現象の理論周期  $T$  を、次のように定義し直した。

$$T = \pi \sqrt{\frac{m}{k}} + \sqrt{\frac{8h}{g}} \quad (7)$$

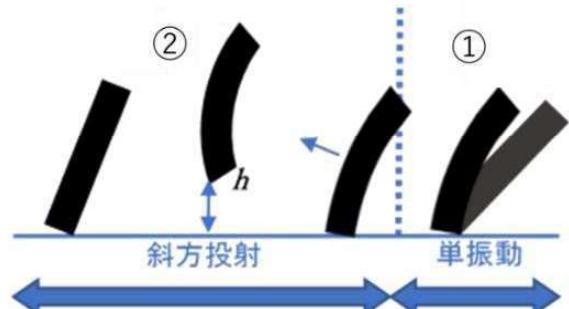


図 6 バウンドモデル

### 【比例定数 $k$ について】

フックの法則より、ゴム板にかかる垂直抗力  $N$  と縮み  $y$  は比例関係にある。よって、次の関係が成り立つ。

$$N = ky \quad (8)$$

また、ここでの縮み  $y$  は、図 7 のように考えることで、次の式のように求めることができる。

$$y = l \cos\theta - l \cos\theta_0 \quad (9)$$

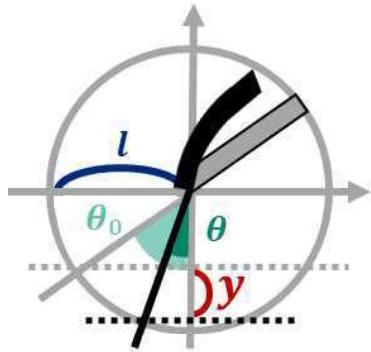


図 7 鉛直方向の縮み  $y$  の導出

## 5. 謝辞

本研究において、ご指導くださいました津山工業高等専門学校 曽利 仁 先生、加藤 学 先生に厚く御礼申し上げます。

## 6. 参考文献

1. 佐野 理『連続体の力学』(朝倉書店, 2000 年)
2. 中野 健『スティックスリップ回避のための設計指針』日本ゴム協会紙 80 卷 4 号 (2007 年)

## 【結果 2】

	理論値(s)	実測値(s)
$T_1$	$0.021 \pm 0.002$	$0.015 \pm 0.009$
$T_2$	$0.071 \pm 0.006$	$0.047 \pm 0.005$
$T$	$0.092 \pm 0.006$	$0.062 \pm 0.003$

$T_1$  は誤差の範囲で一致したが、 $T_2$  は一致しなかつた。

## 【考察 2】

$T_1$  は鉛直方向における単振動の周期に関係すると考えれば、実験結果を上手く説明できる。一方、 $T_2$  は今回の実験装置において、水平方向以外にも力が加わり得るため、その影響で値がずれたものと考えられる。

## 4. 結論

スティックスリップ現象の床に接触中の時間は、 $T_1$  鉛直方向の単振動の周期で考える方がより近い値となることがわかった。しかし、スリップしている時間  $T_2$  については、実験における力の方向を制御し、斜方投射とみなせるかどうかを詳しく調べていく必要がある。また、引き方によってはスリップしている時間が物体の固有振動に影響しているはずであると考えているため、実験条件を変えて考察を深めていきたい。

# 液状化現象における粒子の挙動

研究者 神谷 健太, 本同 凌大, 山崎 純汰

指導者 仲達 大輔

## Abstract

Liquefaction is a phenomenon in which ground becomes liquid due to an earthquake. When we saw the damage caused by liquefaction on the news, we wanted to contribute to the prevention and mitigation of such damage. Although the shape and arrangement of particles in the ground are complex, this study aimed at a simulation of liquefaction with a simple model. As a result of my research, we found that the model of face-centered cubic lattice is the most suitable for the arrangement of particle, and we could show that changes in groundwater level can be simulated well.

## 1. 研究の概要

液状化現象とは、地震により砂地盤が液体状になる現象である。液状化被害をニュースで目の当たりにし、被害の防止・軽減に尽力したいと考えた。地盤中の粒子の形状や配置は複雑であるが、本研究ではこれをシンプルなモデルで設定することで液状化現象を表現することを目指した。実証試験の結果と比較することで、粒子の配列は面心立方格子モデルが最も適しているということが分かり、さらに地下水の変動もうまく表せることが示された。

## 2. 序論

液状化現象は、地盤が繰り返しせん断を受けると地盤中の間隙水圧が上昇し、有効応力がほぼ0になって液体状の挙動を示すことが知られている。理論計算は、先行研究でもおこなわれている[1]。しかし私たちは、地盤中の粒子間の平均距離が地震の振動によって縮むことによって間隙率が下がり、間隙中におさまりきらなくなったり水が地表にあふれ出すというシンプルなモデルで液状化現象が説明できるのではないかと考えた。

## 3. 研究内容

### ① 液状化現象のモデル化

液状化現象とは、乱雑な粒子構造の地盤が振動によって粒子が水に浮遊した状態になり（液状化），

その後再配列するときに粒子は密に詰まる。そのため液状化後に水面の高さは上昇する（図1）。

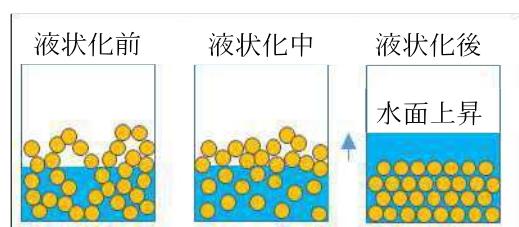


図1 実際の液状化現象

実際の粒子の形状や配列は複雑であるが、私たちはこの粒子を球形で規則正しく配列しているものと仮定し、モデル設定をおこなった。液状化前には粒子間距離が  $\ell$  だったものが、液状化後には  $\ell'$  になると仮定し、粒子が詰まった分地下水の位置  $h'_s$  が高くなるというモデルである。（図2）

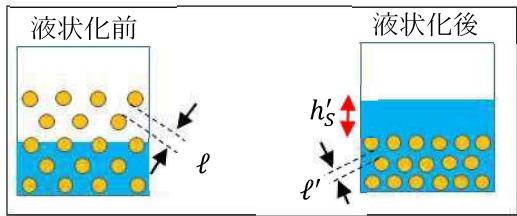


図 2 規則正しく配列したモデル

また、粒子配列は単位格子における配置で 3 パターン用意した。(図 3)

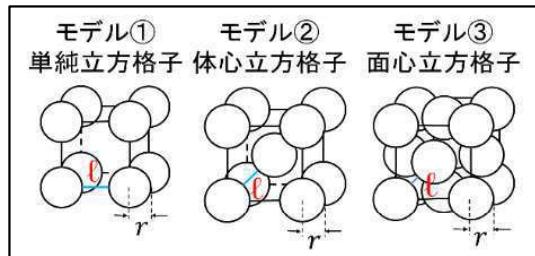


図 3 粒子配列の格子モデル

## ② 理論式

この条件のもと、液状化後の水面の位置  $h's$  を求める理論式を作成した。

$$h'_s = \frac{V_w}{x^2} + \frac{4\pi r^3 M}{3x^2 m} - \frac{(2r + \ell')^3}{(2r + \ell)^3} I$$

ただし、この式に含まれる文字は、次の通りである。

$I$  : 液状化前の砂の高さ

$x^2$  : 実験容器の底面積

$r$  : 粒子半径

$M$  : 粒子全体の質量

$m$  : 粒子 1 つあたりの平均質量

$V_w$  : 水の体積

これらの物理量は、すべて実験によって測定可能なものである。

## ③ 実験

理論式を実証するために、以下の実験を行った。

ふるいを用いて粒径 1.0 mm 以上 2.0 mm 未満の砂 200g 用意する。その砂と水 80ml を容器に入れて、自作の実験装置(図

4) を用いて振動させ、実験前と実験後で砂と水の高さを測る。そして、実験に用いた値を上記の理論式に代入し、液状化後の水面の位置の理論値と実験値の比較を行う。



図 4 振動装置

## ④ 結果と考察 I

液状化後の水面の位置の理論値と実験値は、次のようにになった。

理論値  $h's = -17.1 \text{ mm}$

実験値  $h's = 11.4 \pm 0.6 \text{ mm}$

実験後は、水面の位置が地表より上の位置にあるはずなのに理論値が負の値を示していることから、私たちが考えた理論式であれば液状化後も水面が地表面より低い位置にあることを示している(図 5)。つまり、この理論モデルでは実験の結果を上手く説明できない。

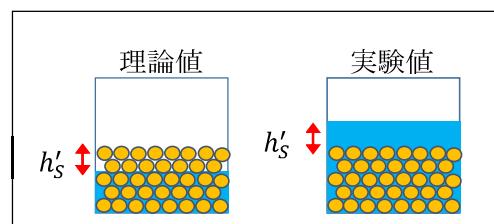


図 5 液状化後の水面の位置

のことから、液状化現象を再現できたということはできない。このようになった原因を次のように考えた。粒子は振動を受けると互いにぶつかり、角が削れていく。そのため、粒子の平均質量は実験を繰り返すごとに変化していくので測定できない。よって、理論式に平均質量を用いるべきではないと考えられる。

そこで、粒子が削れても正確に測定できる粒子の充填率を、質量の代わりに活用することにした。充填率は、メスシリンダーに粒子と水を入れ、使用する粒子の体積を求ることで導出できる(図6)。

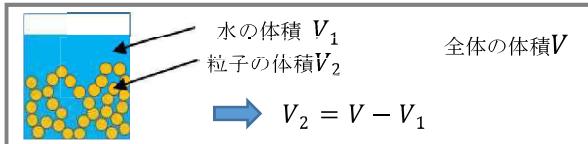


図6 充填率を求めるために粒子の体積 $V_2$ を測定する実験

## ⑤ 理論式再考

粒子の平均質量 $m$ の代わりに、液状化後の粒子が全体積に占める充填率 $z'$ を用いて、理論式を導出し直した。

### ・液状化後の粒子間距離 $\ell'$

モデル①の単位格子に含まれる粒子の数は1つである(図7)。よって、単位格子に含まれる粒子の体積について、次の式が成り立つ。

$$\text{モデル① } z'(2r + \ell')^3 = \frac{4}{3}\pi r^3$$

この式を展開すると、液状化後の粒子間距離 $\ell'$ に関する理論式を導出できる。モデル②・モデル③についても同様の手順で導出可能となる。

$$\text{モデル① } \ell' = \sqrt[3]{\frac{4\pi r^3}{3z'}} - 2r$$

$$\text{モデル② } \ell' = \sqrt[3]{\frac{\pi r^3}{\sqrt{3}z'}} - 2r$$

$$\text{モデル③ } \ell' = \sqrt[3]{\frac{4\sqrt{2}\pi r^3}{3z'}} - 2r$$

### ・液状化後の水面の位置 $h'_s$

液状化前後で、図8における□に囲まれた領域の粒子の数と、■に囲まれた領域の粒子の数が、それぞれ等しいものとする。また、液状化の前後において、水の体積は変わらないものとする。

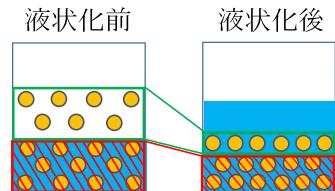


図8 液状化による粒子の動き

これらのことから、粒子の数に関する方程式と、水の体積に関する方程式を立式することができる。それらの式を組み合わせることで、次の式が求められる。

$$h'_s = \frac{V_w}{x^2} - \frac{(2r + \ell')^3}{(2r + \ell)^3} (1 - z') I$$

## ⑥ 結果と考察Ⅱ

液状化後の粒子間の距離については、モデルごとに次のようになった。

$$\text{モデル①: } \ell' = -0.065 \text{ mm}$$

$$\text{モデル②: } \ell' = -0.41 \text{ mm}$$

$$\text{モデル③: } \ell' = +0.17 \text{ mm}$$

モデル①・モデル②では負の値をとり、これは粒子同士が重なってしまうことを意味する。よって、これらのモデルでは実験結果をうまく説明できていないことになる。そのため、正の値をとり、液状化後も砂粒子は互いに粒子間距離を保てているモデル③の面心立方格子が最も適しているといえる(図9)。

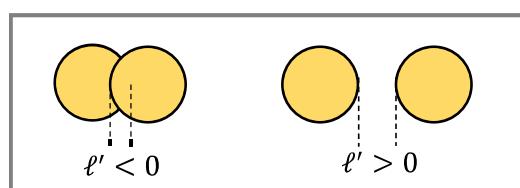


図9 粒子間距離 $\ell'$ の正負

また、液状化後の水面の位置の理論値と実験値は、次のようになった。

理論値  $h's = 10.8 \text{ mm}$

実験値  $h's = 11.4 \pm 0.6 \text{ mm}$

実験後の水面の高さ  $h'_s$  が、理論値と実験値とで誤差の範囲内で一致しており、私たちの作成した理論式が正しいといえる。

#### 4. 結論

実際の粒子の形状・配列は複雑であるが、シンプルなモデルで液状化現象を再現可能であることが示された。つまり、粒子が球体で面心立方格子の配列であると考え、振動後に水面の位置がどれだけ上昇するかを計算して求めることで、液状化現象による被害の規模を予測できるということである。

今後は、過去に液状化が起こった地域についての地盤データを用い、このモデルで再現できるかを検証したい。その際には、地下水表面より浅い地盤の間隙中の水の割合や、粒子サイズの割合などの現実に即したパラメータも加えて、より一般性をもたせた理論式の構築を目指す。

#### 5. 参考文献

1. 湧岡良介「不飽和層への浸透現象を考慮した液状化解析」土木学会論文集 No. 694/III-57, 153-163, 2001. 12
2. 竹下祐二, 河野伊一朗「不飽和浸透特性の推定方法とその適用について」土質工学会 中国支部論文報告集 「地盤と建設」, Vol. 36, No. 3, pp. 95-113, 1993

# スペクトルを用いた炎色反応についての研究

研究者 塩田 涼介, 松野 晃達, 鷹取 柚花,  
日笠 心晶, 春木 英里, 福井 歩純  
指導者 新納 健司, 井上 直樹, 南 洋明, 甲本 龍平

## Abstract

Two kinds of metal salt aqueous solutions were mixed, and the spectrum was analyzed when the flame reaction happened. In this experiment, the spectrum was measured using an electron spectroscope (Go spectro). As a result, we were able to discover two sets of mixed solutions whose wavelengths change stepwise. The common feature of the combinations was that the ratio of ionic values was 1: 2. Therefore, we thought that the time until the start of reaction and the time to maximize the light intensity would be different for the monovalent and divalent valences. As a result, LiCl of LiCl + CuCl<sub>2</sub> took less time to start the reaction than CuCl<sub>2</sub>, but no difference was observed in the case of CaCl + SrCl<sub>2</sub>.

## 1. 研究の概要

2種類の金属塩水溶液を混ぜ、炎色反応を起こしたときのスペクトルの解析を行った。今回の実験では、電子分光器（Go spectro）を用いてスペクトルを観測した。その結果、波長が段階的に変化する混合溶液の組み合わせを2組発見することができた。その組み合わせの共通点は、価数の比が1:2であった。そこで、価数が1価と2価では、それぞれ反応開始までの時間や光の強度が最大になるまでの時間が違うのではないかと考えた。結果的に、LiCl+CuCl<sub>2</sub>のLiClは、反応開始までの時間がCuCl<sub>2</sub>に比べて速かったが、CaCl+SrCl<sub>2</sub>の場合は違いが見られなかった。

## 2. 序論

授業で炎色反応を学んだときに、教科書に記載されていた1種類の金属塩溶液ではなく、2種類の金属塩溶液の混合溶液ではどのように見えるかに興味をもった。本校の過去の課題研究に、2種類の金属塩溶液の混合溶液で炎色反応を目視で判別し、段階的に炎の色の変化を観測できたという報告があった。しかし、その報告は目視によるものであったため、炎色反応のスペクトルを電子分光器で正確に測定すれば、より詳細に色の変化の挙動を観測することができ、その結果の解析を行うことで段階的に炎の色が変化するメカニズムの解明につながるのではないかと考えた。

## 3. 研究内容

本研究では、金属塩水溶液を染み込ませたカーボンフェルトをガスバーナーに入れ、炎色反応を起こした。その際に発生した炎色反応のスペクトルを、電子分光器（Go Spectro）を使用して測定した。実験では、LiCl, NaCl, KCl, CaCl<sub>2</sub>, LiCl, NaCl, KCl, CaCl<sub>2</sub>, SrCl<sub>2</sub>, BaCl<sub>2</sub>の金属塩をそれぞれ0.1mol/Lで調製して使用した。また、これらの水溶液を溶質の物質量比1:1で混合して混合溶液を調製し、カーボンフェルトにしみこませてガスバーナーに入れ、炎色反応のスペクトルを測定した。図1は実際の炎色反応の実験装置である。



図1 本研究で使用した実験装置

### 【予備実験 I】

ブランク反応として、カーボンフェルトのみで実験を行った。また、水の影響がどのくらいあるのか調べるために、カーボンフェルトに染み込ませる水の量を変えて実験をした。

#### 【予備実験 I の結果（表 1）】

カーボンフェルトに水を少量加え、スペクトルを観測したときに 590 nm の波長が検出された。この波長は、カーボンフェルトが高温に熱せられたときに発生するものだと考えられる。そのため、以降の実験では 590 nm の波長は炎色反応によるものではなく、カーボンフェルトを熱したときに発生するものであると考えて考察を行う。

### 【予備実験 II】

混合溶液で炎色反応を行ったときに、どの金属塩水溶液のスペクトルが検出されているのかを調べる実験を行った。1 種類の金属塩水溶液を染み込ませたカーボンフェルトを、ガスバーナーの外炎の下部に入れ炎色反応を行い、電子分光器を用いてスペクトルを測定した。

#### 【予備実験 II の結果（表 2）】

KCl の炎色反応のスペクトルは、観測することができなかった。これは、KCl の炎色反応の光の強度が弱すぎたためであると考えられる。また、NaCl の炎色反応のスペクトルは、カーボンフェルトを熱したときのものと同じ 590nm であったが、光の強度が 46 と非常に強かつたために見分けることができた。

表1 予備実験 I の結果

実験内容	波長 (nm)	強度
カーボンフェルト + 多量の水		—
カーボンフェルト + 少量の水	546 ⇒ 517 ⇒ 590	3
カーボンフェルトのみ	517	3

表2 予備実験 II の結果

溶液	波長(nm)	強度
LiCl	666	10
NaCl	590	46
CsCl	455	7
KCl	—	—
BaCl <sub>2</sub>	549 493	6
CuCl <sub>2</sub>	545	4
CaCl <sub>2</sub>	622 549	3
SrCl <sub>2</sub>	606	19

### 【実験 I】

1 種類の金属塩水溶液を染み込ませたカーボンフェルトを、ガスバーナーの外炎の上部に入れて電子分光器でスペクトルを観測し、炎色反応の炎による変化を調べた（表 3）。

### 【実験 II】

2 種類の金属塩水溶液を、溶質の物質量比 1:1 で混合して混合溶液を調製し、カーボンフェルトに染み込ませた。そのカーボンフェルトをガスバーナーの下部に入れ、炎色反応のスペクトルを電子分光器で観測した（表 4）。

表3 実験Iの結果

溶液	波長(nm)	強度
LiCl	667	19
NaCl	590	45
CsCl	459	5
KCl	—	—
BaCl <sub>2</sub>	459 493 550	5
CuCl <sub>2</sub>	542	9
CaCl <sub>2</sub>	622 549	4
SrCl <sub>2</sub>	609	13

表4 実験IIの結果

組み合わせ	波長(nm)
LiCl +CuCl <sub>2</sub>	688 ⇒533~542 ⇒688
LiCl +CaCl <sub>2</sub>	673 ⇒623
NaCl +CuCl <sub>2</sub>	591 ⇒545~550
CsCl +SrCl <sub>2</sub>	⇒606 457
CsCl +CuCl <sub>2</sub>	530~542 ⇒455

#### 4. 結果

炎色反応の色の変化が目視で確認できる組合せは、CsCl+SrCl<sub>2</sub>、CuCl<sub>2</sub>+LiCl の 2 組あった。また、CsCl+SrCl<sub>2</sub> の場合は 1 度、CuCl<sub>2</sub>+LiCl の場合は 2 度、それぞれ色が変化していた。

また、NaCl との混合溶液は、NaCl でない方のスペクトルを観測することができなかった。これは、NaCl の光の強度が非常に強く、他方の溶質の光の最大の強度を超えてしまったからだと考えられる。

この実験より、次のことが分かった。

- 色が変化した共通点として、値数の比が 1 : 2 である。
- 炎色反応を混合溶液で行うと、1 度は変化する混合溶液には CsCl+SrCl<sub>2</sub>、2 度変化する混合溶液には CuCl<sub>2</sub>+LiCl があった。

#### 5. 考察

炎の色が 1 度のみ変化する混合溶液と、2 度変化する混合溶液があった。

1 度のみ変化する混合溶液は、CsCl+SrCl<sub>2</sub> であった(図2)。目視では、炎の色は SrCl の炎色反応の色である紅色から、CsCl の炎色反応の色である青紫色に変化した。この組み合わせは、反応開始までの時間がほとんど変わらないため、色の変化の要因はスペクトルの強度が最大になるまでの時間が違うためだと考えられる。

2 度変化する混合溶液は、CuCl<sub>2</sub>+LiCl であった(図3)。炎の色は LiCl の炎色反応の色である赤色から、CuCl<sub>2</sub> の炎色反応の色である青緑色に変化し、再び赤色に戻った。2 度変化する要因は、反応開始までの時間だけでなく、光の強度が最大になるまでの時間も違うからだと考えられる。また、色の変化が目視で確認できなかった組み合わせは、光の強度が最大になるまでの時間の差が非常に小さかったため、色の変化を確認することができなかつたと考えられる。

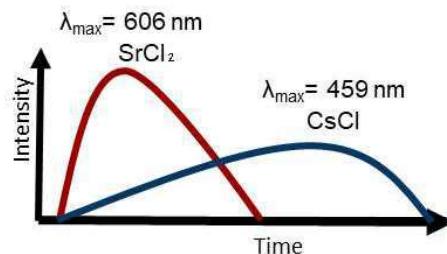


図2 1度のみ変化する混合溶液

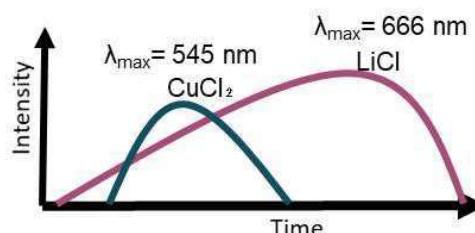


図3 2度変化する混合溶液

#### 6. 今後の展望

濃度を変えて実験を試みたが、観測できなかった KCl のスペクトルを観測したい。さらに、炎の温度を測って高温と低温のときではどのような違いが出るのかを調べたい。

また、結果より色が変化するのは、価数の比が 1 : 2 の混合溶液だけだったので、価数の関連性も調べていきたい。

## 7. 参考文献

- (1) 化學便覽 日本化學会編 p.662
- (2) 教科書「改訂版 化學」(教研出版) p.117
- (3) 化學の新研究 (三省堂出版) 卜部吉庸 p.460

# 電気分解における電極中の気体の挙動の考察

研究者 菅原 壮太, 牧 祐太, 栗栖 冬翔, 河野 春馬, 長尾 修志  
指導者 井上 直樹

## Abstract

In last year's research, we observed the phenomenon of gas absorption on the surface of carbon electrodes in electrolysis. We also obtained data showing that the amount of hydrogen adsorbed increased by about 53 times when it electrolyzes using electrodes that had been oxidized by chemical treatment. When the electrode was chemically treated, we also measured what percentage of the oxygen generated was converted to carbon dioxide.

## 1. 研究の概要

昨年の課題研究での電気分解にて、炭素電極表面に気体が吸着される現象を観察した。また、化学処理をして酸化させた電極を用いて電気分解を行うと、水素の吸着量が約53倍になるというデータも得た。そこで、電極を化学処理するときに、発生した酸素の何パーセントが二酸化炭素に変化したかを測定した。

## 2. 研究の目的

本研究では、炭素電極への気体吸着のメカニズムを解明することを目的とする。また、本研究の電極加工により、気体の吸着が効率化された炭素電極を、燃料電池の水素を貯蔵するタンクとして用いることはできないかと考えている。現在、水素を貯蔵するものとして水素吸蔵合金があげられるが、炭素は安価であり、環境への負荷が少なく、そして軽量であるため代替するメリットは十分にあると考える。このように、本研究は次世代のエネルギー開発に繋がると考えている。

## 3. 吸着量の測定方法

後に述べる実験で吸着量[mol]を計測しており、その測定方法示しておく。

白金電極を用いた電気分解では、電源装置のスイッチをオンにし、電流を流し始めた瞬間に気体の発生が見られる。しかし、炭素電極を用いた場合、電流を流し始ても、すぐに気体（水素、酸素ともに）の発生は見られず、数秒間遅れて発生が見られる。私たちは、この電流を流しているのに気体の発生が見られない時間は、炭素電極に気体が吸着されていると考え、以下の方法で吸着量を測定した。

- ① 電気分解を行い、電流を流し始めてから気体の発生が見られるまでの時間[s]とそのときの電流[A]の値を記録しておく。
- ② ①の値とファラデー定数を用いて、吸着されている間に流れた電子の物質量を計算する。
- ③  $H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$ ,  $2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$ などの電極で起こる反応の化学反応式の係数比から吸着された気体の物質量を算出する。

## 4. 化学処理した電極とは

研究の概要で、化学処理を行い酸化した電極を用いると水素の吸着量が約53倍に増加すると述べた。化学処理した電極とは、炭素電極を一度陽極に用いて、そのとき発生する酸素で表面を酸化させ、表面積を増やした電極のことである（図1）。  
※ 酸素は電極表面の炭素を酸化し、二酸化炭素になる。石灰水を炭素電極で電気分解すると、溶液が白濁する。つまり、 $Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 \downarrow + H_2O$ の反応が起こる。このことから上記のことは確かめられる。



図1

## 5. 実験① 電極の表面積と体積

実験①では、炭素電極の表面積、体積を変更し、そのときの吸着量がどう変化するのか調べた。

### <目的>

吸着量の変化をもとに、気体が炭素電極表面に吸着されているのか、それとも炭素電極の中の方に吸収されているのかを調べたい。また、吸着量を増やすためにはどのように電極の形を加工すべきなのかを調べたい。

### <実験方法>

#### ・表面積を変更する電極

炭素電極をのこぎりで削り、図2のように表面積を変更する。

#### ・体積を変更する電極

炭素電極の中心にドリルで円柱状の穴を開け、図3のように体積を変更する。

※ 円柱状に開けた穴の内部に電解液は入っていないため、表面積を変えることなく体積を変えられている。



図2



図3

このように加工した電極を、一度化学処理(9Vで電気分解)し、先ほどどの方法で吸着量を測定する(6Vで電気分解)。また化学処理の程度を変更し(化学処理するのに使用する電気量[C]を変える)、吸着量を測定する。

### <結果 体積が小さい電極>

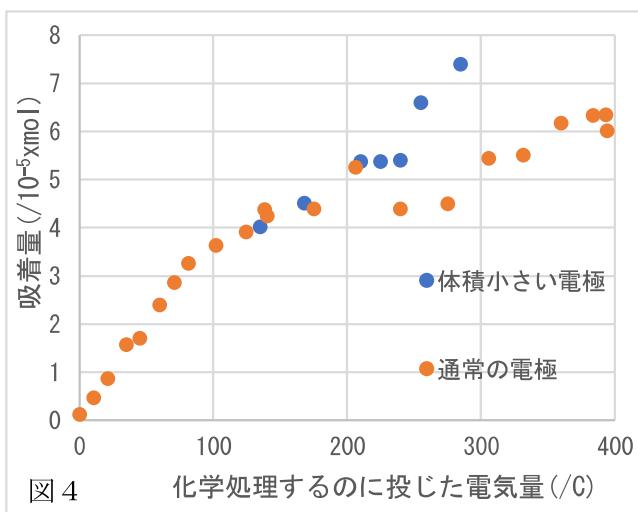
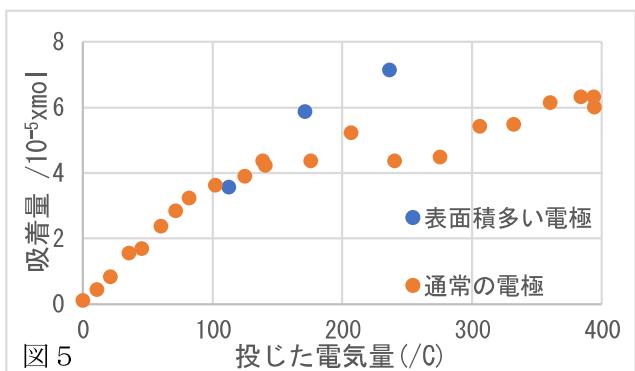


図4 化学処理するのに投じた電気量 /C

### <結果 表面積が大きい電極>



ここにおける通常の電極とは、実験②から得たデータ(水素)である。体積を小さくした電極、表面積を大きくした電極とともに水素の吸着量が増えている。

### <考察>

実験②のデータと比較したいため、実験②の考察とまとめて行う。

## 6. 実験② 電極の化学処理と吸着量

実験②では、炭素電極の化学処理の程度を変えて、そのときの吸着量を調べる実験である。

### <目的>

電極の化学処理と吸着量にはどのような関係があるのかを明らかにする。

### <実験方法>

実験方法としては、まず化学処理(9Vで行う)する時間[s]を調節することで投じた電気量[C]を変え、化学処理の程度を変更した電極を用意する。それを陰極に用いて、先ほど述べた方法で吸着量を測定する(6Vで電気分解する)。酸素の吸着量も水素と同様に測定する。

### <結果 水素と酸素の吸着量>

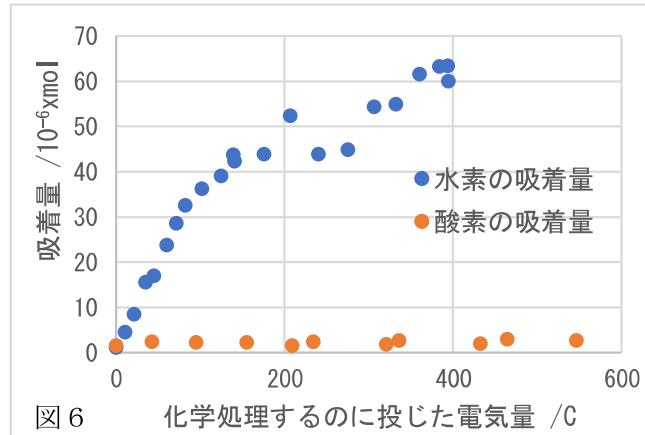


図6 化学処理するのに投じた電気量 /C

水素の吸着量は、最初急激に増加しているが、途中から吸着量の増加率が低下している。酸素の吸着量は、ほぼ変化しない。

#### <考察>

実験①と実験②の考察を、まとめて行う。まず、電気分解中に発生した気体は、炭素電極表面の細孔に吸着されていると考えられる。それに基づき考察したい。

#### ・実験① 表面積

これは、単純に表面積を増やすことで吸着可能な細孔の数が増えたからだと考えられる。

#### ・実験① 体積

これは、体積の減らし方に原因があり、円柱状に開けた穴の中に気体が入ってしまったためだと考えられる。

#### ・実験②

化学処理にかける電気量を増やせば、水素の吸着量は増えるが、酸素の吸着量は増えなかった。その理由について考察する。まず、水素の吸着量が増えたのは化学処理することによって表面積が増え、吸着量が増えたと考えられる。これは、実験①の表面積を大きくする実験と一致する。ただ、その考え方を酸素についても適用すると、表面積が増えているのに吸着量が変化しないというように矛盾が生じてしまい、この現象を十分に説明することは出来ない。そこで、化学処理する段階で生じた堆積物が電極表面の細孔に蓋のようなものを形成し（その様子を図7と図8に示す）、発生する気体が蓋の中に溜まり、吸着量を増やしていくと考えてみる。この考え方を酸素の吸着量の考察に適用すると、酸素が炭素を酸化して二酸化炭素になるという反応が蓋の中に溜まった酸素によって起こされ、炭素で出来た蓋が溜まった酸素によって破壊されてしまい、蓋が蓋としての機能をなさなくなってしまうことで吸着量が変化しなかったと説明できる。また、それを水素の吸着量の考察にも適用してみる。水素は酸素とは違つて、蓋の炭素と反応することはできず、蓋で塞がれた細孔に吸着されてしまうため、蓋が蓋としての機能をなすことが可能である。さらに、蓋の量は化学処理をすればするほど多くなるから、蓋の中に貯められた水素が蓋を吹き飛ばし、外に出るため

にたくさんの水素が必要だと考えれば、化学処理をすればするほど吸着量が増えたのを説明することが可能である。このように、蓋が形成されるという仮説は、実験結果を説明することが可能である。



図7

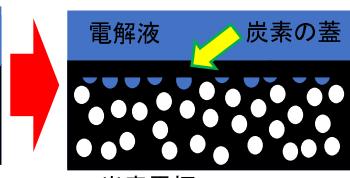


図8

## 7. 実験③ 化学処理における二酸化炭素の定量

化学処理のときに発生した酸素が電極の炭素を酸化して二酸化炭素になると述べたが、実際、発生した酸素のうち、どの程度が化学処理に使われて二酸化炭素になったかわからない。実験③ではその割合を定量的に調べた。

#### <目的>

その割合を調べることで、化学処理すると吸着量が増える原因についてのヒントを得たい。

#### <実験方法>

今回の定量は、3つの方法で行った。

#### <実験③-1>

・方法 水酸化ナトリウム水溶液を電気分解（15V, 10分間）し、生成した炭酸ナトリウムを定量する。①式の反応で炭酸ナトリウムが生成し、その溶液を塩酸で滴定する。そのときの化学反応式を、②、③式に示す。生成した炭酸ナトリウムと発生した二酸化炭素は①式より、物質量が等しいため、二酸化炭素の物質量を求めることができる。また、水酸化ナトリウム水溶液を電気分解するときに陽極で発生した酸素の物質量を求める。そして、先ほどの二酸化炭素の物質量を発生した酸素の物質量で割ることで、化学処理に使われた酸素の割合を求めることができる。

※ 今回の滴定では、空気中の二酸化炭素の影響を補正するため、電気分解する時間と同じだけ放置した水酸化ナトリウム溶液も滴定し、結果を補正する。（ブランクテスト）



・実験の条件

NaOH aq  $9.27 \times 10^{-3}$  mol/L, HCl aq  $9.55 \times 10^{-3}$  mol/L

<結果>21.2%になった

<実験③-2>

・方法 石灰水 ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$  飽和溶液) を電気分解すると、そのときに発生する二酸化炭素と水酸化カルシウムが反応し、炭酸カルシウムが生成する(④式)。すると、石灰水中のカルシウムイオン濃度は低下する。今回は、そのカルシウムイオンが減った量をキレート滴定で調べている。④式より、カルシウムイオンが減った物質量と発生した二酸化炭素の物質量は等しいため、二酸化炭素の物質量を測定できる。また、電気分解中に発生した酸素の物質量を求めておき、実験③-1 と同様に化学処理に使われた酸素の割合を求めた。

※ 今回の滴定でもブランクテストを行っている。



・実験の条件 EDTA aq  $5.0 \times 10^{-3}$  mol/L

<結果>54.3%になった。

<実験③-3>

・方法 実験③-2 と同様に、石灰水を電気分解し、炭酸カルシウムを生成させる。炭酸カルシウムは難溶性塩であるから沈殿する。そのため、水溶液中のイオンの濃度 ( $\text{Ca}^{2+}$ ) が低下する。そして、電気分解中の横軸が時間で縦軸が電流のグラフ(図9)を作成する。また、これとは別に横軸が濃度 ( $\text{Ca}^{2+}$ ) で縦軸が電流のグラフ(図10)を作成する。この2つのグラフを用いて、横軸が時間で縦軸が濃度 ( $\text{Ca}^{2+}$ ) のグラフを作成する。それを用いて、発生した二酸化炭素の物質量を求める。また、発生した酸素の物質量も求めておき、化学処理に使われた酸素の割合を求める。

※ 今回の実験でも、ブランクテストを実施している。(電気分解する時間と同じだけ放置した石灰水を作り、それに電流を流した時の電流の値を求めておく。)

※ 電極付近だけイオンの濃度が下がることを防ぐため、スターラーを回しながら電気分解を行っている。

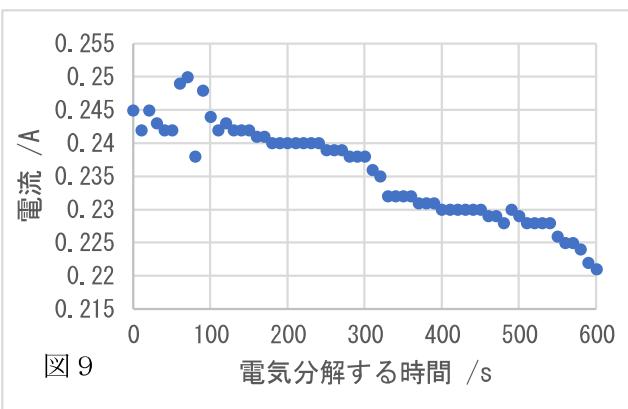


図9

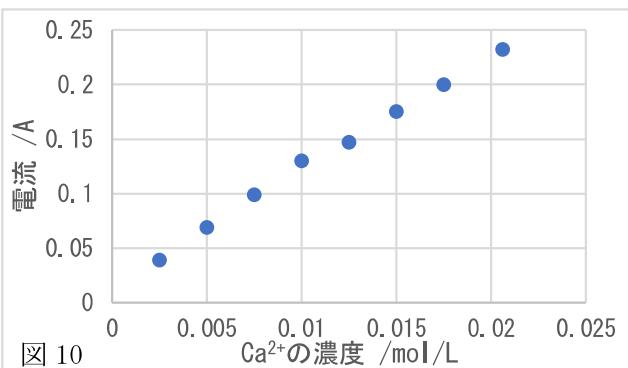


図10

<結果>1回目 39.4% 2回目 37.3%

※ ブランクテスト 0.240 A

<考察> 実験③-2 で求められた化学処理するのに使われた酸素の割合が大きくなっているのは、滴定をしたときに、そのときに用いた精製水の中のカルシウムイオンも滴定してしまったからだと考えられる。このことも加味して考えると、化学処理するのに使われた酸素の割合は 20%から 40% ぐらいだと考えられる。

## 8. 結論と今後の展望

結論として、水素の吸着量を増やすためには、電極の表面積を大きくすることと、電極表面を化学処理させて蓋を形成させることの2つが考えられる。

今後は、吸着のメカニズムのさらなる解明のため、他の気体(ハロゲン)の吸着について調べ、実験①、実験③のデータを増やし、図6の投じた電気量と吸着量の関係をさらに解明したい。

また電極表面を電子顕微鏡で観察し、気体吸着の様子を調べ、自分たちの仮説である蓋の形成について検証したい。

# Factors that Affect the Exploration Activity of Slime Mold, *Physarum*

Yuzuru Otani Moeko Sakate Miya Rambo  
Supervisors Takashi Yamamoto Syohei Kojima

## Abstract

Slime Mold *Physarum* is known to take the shortest path in 2D mazes according to a previous research (2006). However, one study (2018) made it clear that *Physarum* in 3D mazes takes several paths including the shortest path. Our research aims to find out the reason why *Physarum* cannot solve 3D mazes in the shortest path. To find the reason for this, we searched for factors that may affect the exploration activity of *Physarum* and focused on the gravity effect. Two kinds of experiments using hemispheres and inclinations were done. As a result, the tendency that *Physarum* prefers to go against gravity was seen and it became obvious that gravity affects the exploration activity of *Physarum*. Therefore, we concluded that *Physarum* cannot solve 3D mazes in the shortest path because *Physarum* chooses going upwards more than taking the shortest path, saving the energy to move.

## 1. 研究の概要

粘菌（モジホコリ）は、二次元の迷路では餌と餌を最短経路で結ぶが、三次元迷路では最短経路を含む複数の経路を残すことが先行研究(2018)で明らかとなっている。本研究では、粘菌が三次元迷路を解けない理由を探ることを目的としている。研究に際して、粘菌の探索行動に影響する要因を探究し、重力の影響に着目した。粘菌の探索行動に及ぼす重力の影響を解明するために、傾斜や半球を用いた2つの実験を行った。実験の結果、粘菌は傾斜のある位置の餌に向かう傾向が見られた。つまり、粘菌は三次元迷路では、水平方向の移動より負の重力方向に探索行動をするため、複数の経路が残ることが示唆される。

## 2. Introduction

*Physarum* is known to take the shortest path in 2D mazes (Fig. 1) and this special feature of *Physarum* is used as a bio-computer and actually helps to theorize urban structure.

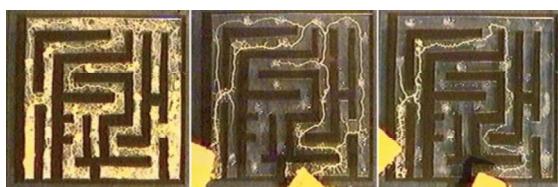


Fig. 1 How *Physarum* solve a 2D maze

On the other hand, *Physarum* in 3D mazes takes several paths including the shortest one. If *Physarum* can solve 3D mazes in the shortest path, this feature can be applied to avoid crowded places in three-dimensional buildings

like shopping malls. Therefore, the purpose of our experiment is to find out the reason why *Physarum* cannot solve 3D mazes in the shortest path and apply *Physarum* to our daily life.

Our hypothesis was set up for these reasons:

- *Physarum* has negative photo-taxis. Also in the natural environment, there is more light at higher places than lower places.
  - It seems obvious that going upwards takes more energy than going horizontally.
- Therefore, we expect that *Physarum* cannot solve 3D mazes in the shortest path because it prefers to move horizontally.

From the hypothesis, we focused on the effect of gravity on the exploration activity of *Physarum* and two kinds of experiments were done.

### 3. Method and Results

2% agar medium and oatmeal were used in all experiments and when *Physarum* was cultured.

#### <Experiment 1>

This experiment was about *Physarum*'s activity on hemispheric agar. The purpose was to verify whether gravity affects *Physarum*'s activity or not.

*Physarum* and oatmeal spots were put on hemispheric agar as the photo shows (Fig.2). All of the lengths between *Physarum* and oatmeal were the same, no matter which path they took, because it was a hemispheric agar. Therefore, in this experiment, only gravity affected their movement.

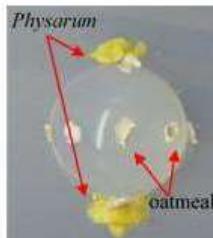


Fig.2 Photo of Experiment 1

Four kinds of hemispheric agars, each of which had a different length of radius, were used in the experiment. The radii were 0.9cm, 1.2cm, 1.6cm, and 2.1cm. We expected that *Physarum* would go horizontally which means they would not go up the hemispheric agar regardless of the radius.

We took pictures to record their movement with a camera which enabled us to do a fixed-point observation.

#### <Result from Experiment 1>

The number of experiments using each agar was as follows. 0.9cm was used 3 times, 1.2cm was 33 times, 1.6cm was 6 times, and 2.1cm was 3 times, as shown in Fig. 3. Out of four different hemispheres, the experiments using 1.2cm radius agar were done the most. Therefore, the result of the experiments with agar which has 1.2 radius should be more reliable than others.

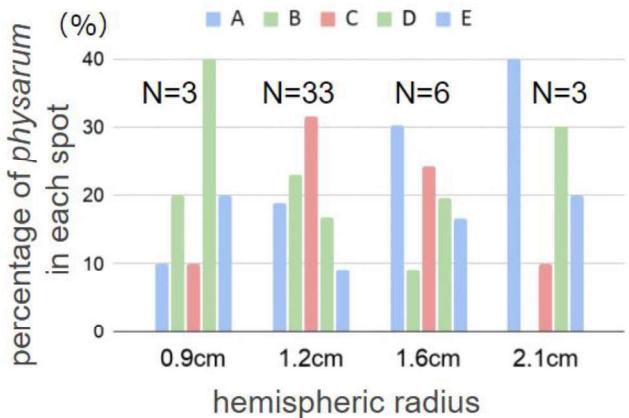


Fig. 3 Result from Experiment 1

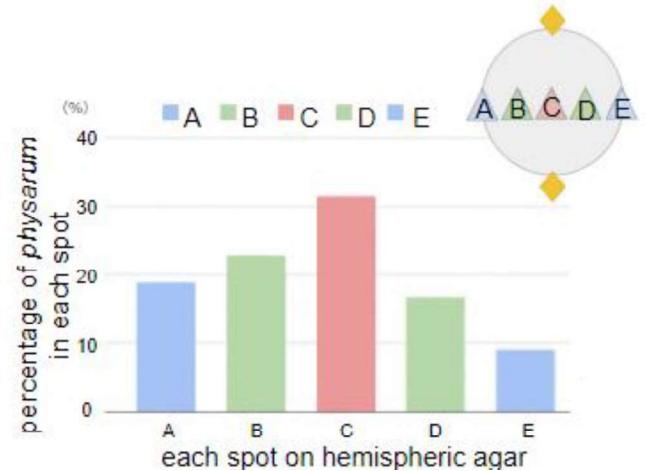


Fig. 4 Result from 1.2cm radius agar

As Fig. 4 shows, more than 70% of *Physarum* went towards the oatmeal of B, C, and D which were located in higher places. On the other hand, only about 30% of *Physarum* went towards the oatmeal of A and E which are located on the same height as the height *Physarum* was first put. This result is perfectly opposite from our hypothesis in which we expected that *Physarum* prefers to go horizontally.

In this experiment, the tendency of going upwards the agar was seen, but we weren't sure which inclination *Physarum* would prefer. Therefore, we had the Experiment 2 about various angle inclinations.

#### <Experiment 2>

This experiment is about *Physarum*'s activity on inclinations. The purpose of this experiment was to find which inclination *Physarum* would prefer.

All sides of *Physarum* were surrounded with 0°, 22.5°, 45°, and 90° inclination agars and the length of all the agar was 3cm as the figure below shows (Fig.5). The lengths between *Physarum* and oatmeal spots on each agar, which was the nearest from *Physarum*, was the same.

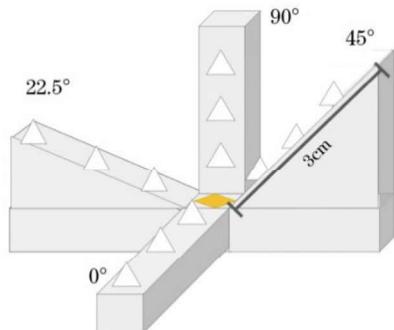


Fig. 5 Figure of Experimental Device

#### <Results from Experiment 2>

The experiment was performed 6 times.

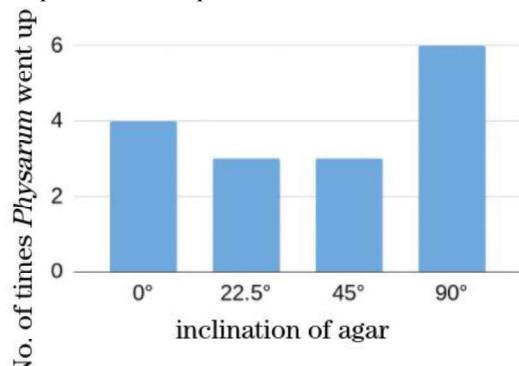


Fig.6 Result from Experiment 2

The numbers of *Physarum* which went to 0° agar, 22.5° agar, and 45° agar were almost the same and all *Physarum* went up to 90° agar (Fig. 6). Although this experiment was performed only 6 times and there may be an error, it can be said that this result shows that *Physarum* has a tendency of going to higher degree inclinations. Therefore, this tendency is thought to affect the exploration activity of *Physarum*.

#### 4. Discussion

In our hypothesis, we expected *Physarum* could not solve 3D mazes in the shortest path because *Physarum* preferred to move horizontally. However, against our

hypothesis, the tendency of moving upwards of *Physarum* was seen in the experiments. There are two possible reasons why *Physarum* went upwards in the experiments.

One possible reason is because we could not reconstruct the natural environment in the experiments (Fig. 7). Although it is obvious that *Physarum* has tendency of going towards moisture, the 2% agar medium on which *Physarum* was cultured might have been too moist for *Physarum* compared to the natural environment.

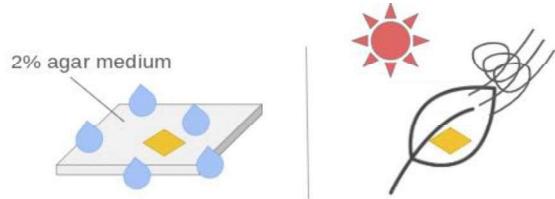


Fig. 7 Difference of moisture between experiments and the natural environment

The other possible reason is that *Physarum* had a tendency of going against gravity originally. There are two possible benefits for *Physarum* to go upwards in the natural environment.

First, it is to leave their descendants in a wider range of locations. Moreover, *Physarum* form sporangium when they are exposed to sunlight or dryness, which they need to do in order to leave descendants.

The other reason is for habitat segregation (Fig. 8). In the natural environment, *Physarum* eats mushrooms, fungi, dead leaves, and so on. But there are many creatures that eat those things so their food and habitat are limited. Therefore, to separate their habitat from other creatures, *Physarum* seems to go against gravity.



Fig. 8 benefits of going upwards

## 5. Conclusion

From these two experiments, we concluded that *Physarum* cannot solve 3D mazes in the shortest path because *Physarum* has the tendency of going upwards rather than moving horizontally. Moreover, when *Physarum* was cultured, *Physarum* sometimes formed sporangium which is one part of *Physarum*'s life cycle. It was usually when *Physarum* was exposed to light and dryness. Therefore, mainly three factors: light, moisture, and gravity, affect *Physarum*'s exploration activity. But, of course, these factors are closely related to each other in the natural environment. In such conditions, we expect that *Physarum* changes their needs depending on their biological life cycle (Fig. 9).

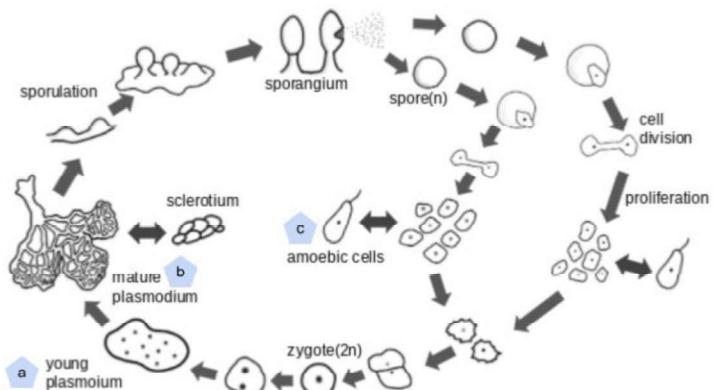


Fig. 9 *Physarum* biological life cycle

For example, young plasmodium ( $2n$ ) needs moisture for moving around and predation (Fig. 9-a). On the other hand, when they are in the stage of mature plasmodium (Fig. 9-b), they give priority to searching light or going against gravity over moisture in order to form sporophytes ( $2n$ ). Once spores germinate, and become amoebic cells, they inhabit where there is much moisture to conjugate with gamete (Fig. 9-c). This is how we thought *Physarum*'s needs change depending on their biological life cycle.

## 6. References

- ・小林千絃(2018). 「粘菌は三次元の迷路が解けるのか」. 第 59 回日本植物生理学会年会 高校生生物研究発表会プログラム要旨集, 19.
- ・中垣俊之(2010). 「粘菌 その驚くべき知性」. PHP サイエンスワールド新書.
- ・中垣俊之(2014). 「粘菌 偉大なる単細胞が人類を救う」. 文春新書.
- ・兵庫県立神戸高等学校 佐々木, 小河, 沖本, 田中, 村川(2019). 「重力が粘菌の行動に及ぼす影響」.
- ・手老篤史, 小林亮, 中垣俊之(2006). 「真正粘菌変形体による最適ネットワーク」. 数理解析研究所講究録, 1499 卷, 159-166.
- ・国立大学附置研究所・センターハイオニア(2016). 未踏の領野に挑む、知の開拓者たち vol.25. [http://shochou-kaigi.org/interview/interview\\_25/](http://shochou-kaigi.org/interview/interview_25/).

2021 年 2 月 1 日.

# ハチミツ中の耐糖性酵母の探索

研究者 坂本 晴菜, 杉本 珠花, 杉山 可歩  
指導者 小西 明雄

## Abstract

Among the yeasts in nature, there are sugar-tolerant yeasts that can survive in the harsh environment of high sugar concentration. We thought that if we could incubate a large amount of sugar-tolerant yeast and put it back to sleep in a high-sugar syrup, we could make a substitute for dry yeast. Dry yeast is running out of stock as more people stay home as a countermeasure against the new coronavirus and bake bread. We examined experimental methods for searching and isolating sugar-tolerant yeast in honey produced in Kagamino. We also examined experimental methods to confirm the sugar-tolerant alcohol fermentation ability. We could not isolate sugar-tolerant yeast. However, we could develop a method that can confirm the sugar-tolerant alcohol fermentation ability with a small amount of yeast.

## 1. 研究の概要

酵母の中には、高い糖濃度という過酷な環境下でも生きることができる耐糖性酵母がいる。耐糖性酵母を大量培養し、高糖濃度のシロップ中で再休眠させることができれば、新型コロナ禍ごもり需要によって品薄となったドライイーストの代替品をつくることができると思った。私たちは、身近にある鏡野町産のハチミツに着目し、ハチミツ中の耐糖性酵母を得るために実験を検討した。また、耐糖性アルコール発酵能力を確かめる実験方法についても検討した。今年度の実験では耐糖性酵母を得ることはできなかったが、耐糖性アルコール発酵能力を少ない酵母量で確認できる方法を開発できた。

## 2. 序論

私たちは、天然酵母に興味をもっている。ここでいう酵母とは、糖分をアルコールと炭酸ガス( $\text{CO}_2$ )に分解する単細胞生物のこと、植物や樹液、野菜、果実などに付着して自然界に広く存在している。私たちは、低温という過酷な環境下でも死なない白神山地の白神こだま酵母<sup>(※1)</sup>のように、極端な性質をもつ酵母を岡山県北で採取したいと思い、鏡野町にある山田養蜂場みつばち農園のハチミツに注目した。ハチミツは水分が少ない高張液であり、浸透圧という水を引き込む力が非常に高い。そのため、ハチミツ中の微生物は水分を奪われ死んでしまう。しかし、ハチミツ中に酵母は存在している。実際に、ハチミツ中の酵母を使って、古代から蜂蜜酒が作られている。<sup>(※2)</sup>ハチミツなどの高い浸透圧下で生存できる酵母は耐糖性酵母と呼ばれ、糖アルコールやトレハロースなどを多量に生成する。これらによって細胞内の浸透圧を高め、細胞内からの水分の漏出を抑え、細胞の立体構造を安定化させた上で、休眠することで生き残ることが先行研究で明らかになっている。<sup>(※3※4)</sup>私たちは、この耐糖性酵母を休眠から起こして大量培養し、高い糖濃度のシロップ中で再び休眠させることで、新型コロナ禍ごもり需要によって品薄となったドライイーストの代替品をつくりたいと考えた。

研究の全体計画は、次の通りである。

- ① 鏡野町産の非加熱の百花蜜入手。百花蜜とは、ミツバチが地域内の多種類の花蜜を集めて乾

燥濃縮したハチミツのことである。花蜜を集めると点では地域内の多種類の酵母が含まれているが、ハチミツが乾燥濃縮され高い糖濃度になる過程で、耐糖性酵母のみが休眠して生き残っていると考えられる。

- ② ハチミツを水で薄め、ハチミツ中にいる酵母を休眠から起こして培養する。
- ③ 培養したものが耐糖性酵母かどうかを実験で確かめる。
- ④ 耐糖性酵母を大量培養し、高い糖濃度のシロップによる休眠化の実現を試みる。

## 3. 研究内容

### I. ハチミツ中の耐糖性酵母を培養する実験

全体計画①において、鏡野町にある山田養蜂場みつばち農園を訪問して巣蜜を提供していただき、そこからハチミツを採取した。入手したハチミツ中の耐糖性酵母を、全体計画②にあるように培養した。培養に適した条件を明らかにするために、以下の3つの方法で酵母の培養を行った。

実験材料：培地の組成はYPD培地(精製水、酵母エキス1%、大豆ペプトン2%、グルコース、クロラムフェニコール $100\mu\text{g/mL}$ )を基本とし、<sup>(※5※6)</sup>グルコースをスクロースに変更し、糖濃度を変えて検討した。

実験方法①：耐糖性酵母のみがハチミツ中に存在すると仮定し、ハチミツを液体培地に直接入れ、

振とう培養によって大量培養することを試みた。振とう培養では、静置培養と比べて培地中の酸素が増えるため、速く多くの酵母を増殖させることができる。容器は三角フラスコを用い、培地中の酸素をより増やすために、栓には通気性のあるキッチンペーパーを輪ゴムで止めて用いた。液体培地の糖濃度は5%, 10%, 25%に調製した。

実験結果①: 液体培地が白く濁り、顕微鏡で観察をしたところ、単細胞の酵母のような微生物が確認できた。しかし、発酵能力を確かめるための実験を行ったところ、アルコール発酵は確認できなかった。つまり、この実験方法で培養されたものは、アルコール発酵を行わない酵母のような微生物だと考えた。アルコール発酵は酸素が不足した状態でエネルギーを得ることができる代謝であるが、酸素が十分にある環境にあるならば、呼吸を行った方が大量のエネルギーを得ることができ、生存に有利となる。このため、ハチミツ中に耐糖性酵母以外の呼吸を行う微生物が生存していて、振とう培養によって選択的に増殖したのではないかと考えた。また、糖濃度が高いほど液体培地が白く濁っていることから、糖濃度が低い方が微生物の増殖速度が速くなる傾向が確認できた。



図1 結果①の様子。  
左から糖濃度5%,  
10%, 25%の液体培地。

実験方法②: ハチミツ中にアルコール発酵を行わない微生物が生き残っていることがわかったので、寒天培地を用いて、アルコール発酵を行う酵母を分離することを試みた。1/1000, 1/10000, 1/100000, 1/1000000, 1/10000000に薄めたハチミツをグルコース濃度2%の寒天培地に塗布し、シングルコロニーを単離した。得られたコロニーをマイクロピペットを用いてシングルコロニーピックアップを行い、シングルコロニーをチップ先端に乗せた状態でチップごと液体培地に落下させた。複数の試験管を用いて、振とう培養ではなく静置培養することで、アルコール発酵を行う酵母を増殖させた。

実験結果②: 1/1000, 1/10000, 1/100000, 1/1000000に薄めたハチミツを塗布した4種類の寒天培地からコロニーをそれぞれ12個ずつ選び、48本の液体培地で静置培養した。その結果、ほとんどの液体培地で発泡の様子を確認できず、発酵能力が見られなかった。発泡の様子が確認できたものもあったが、その発泡もすぐに止まってしまった。

い、確実にアルコール発酵を確認できたものは0本だった。

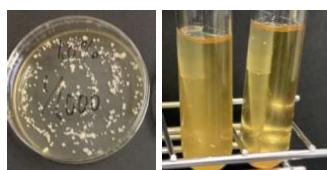


図2 結果②の様子。左側の写真は、寒天培地によって得たコロニーの様子で、右側の写真は、シングルコロニーピックアップを行い、液体培地で静置培養している様子。

実験方法③: ハチミツ中から耐糖性酵母を選別するため、ハチミツを液体培地に直接入れ、糖濃度50%に調製し、静置培養した。

実験結果③: 図1と異なり、液体培地が白く濁らず、糖濃度が高いとハチミツ中の微生物の増殖速度が遅くなる傾向が確認できた。(図3)

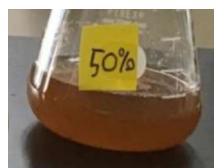


図3 結果③の様子。液体培地の白い濁りが見られず、アルコール発酵に伴う発泡の様子も確認できなかった。

以上の3つの実験結果より、過酷な環境下と言える糖濃度80%のハチミツ中でも存在する微生物は多様で、アルコール発酵を行わない微生物もハチミツ中で生き残っていることと、今回入手したハチミツ内に耐糖性酵母がいたとしても、高い糖濃度中では増殖速度が遅いことが課題としてあがつた。

以上の結果と課題を踏まえ、酵母の培養の改善方法として、次の方法が効率的と考察した。(図4)

- ハチミツを薄めたものを液体培地で静置培養し、アルコール発酵を行う酵母を増殖させる。
- 試験管の底部に溜まった酵母を寒天培地に塗布し、コロニーを単離する。
- 得られたコロニーを再び液体培地で静置培養してシングルコロニーを増殖させ、アルコール発酵を行うコロニーかどうかを確かめる。



図4 酵母の培養の改善方法の様子。iは、直接ハチミツを薄めて静置培養したもの。試験管上部の発泡している様子から、試験管内でアルコール発酵を行う酵母が増殖していると考えられる。iiは、iで増殖させた酵母を寒天培地でさらに増殖させ、コロニーを単離している様子。iiiは、シングルコロニーピックアップを行い、複数の試験管で再び静置培養している様子。

## II. 耐糖性の有無を確かめる実験

私たちが考察した酵母の培養の改善方法には、高い糖濃度で耐糖性酵母を選別する過程が含まれていないため、耐糖性の有無の確認実験を別に行う必要がある。そこで、以下の2つの実験を試した。

### 実験1 キューネ発酵管を用いた耐糖性アルコール発酵能力の確認実験

#### 実験方法:

- ① 60%スクロース溶液を精製水と混ぜ、糖濃度を調製する。
- ② 重量%で10%に調製した酵母溶液10mLと①で調製したスクロース溶液10mLを混ぜあわせ、糖濃度6%, 30%に調製してキューネ発酵管に入れる。
- ③ キューネ発酵管の球部の出入り口に綿栓をして40°Cのお湯につけ、発酵管の上部に気体が発生してから1分ごとに溜まった気体の発生量を計測し、10mL溜まった時点で計測をやめる。



図5 実験1の様子。左側の写真が混合液を入れ、40°Cのお湯についている状態のキューネ発酵管の様子で、右側の写真が発生した気体の発生量を1分ごとに測定している様子。

#### 実験結果:

気体の発生量(mL)

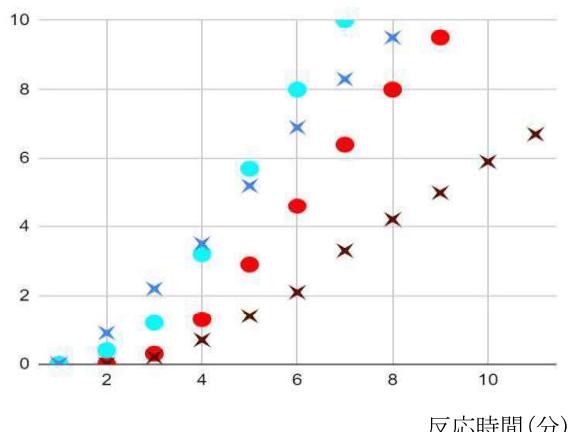


図6 キューネ発酵管での気体の発生量を示したグラフ。横軸が反応時間(分)、縦軸が気体の発生量(mL)。凡例は以下の通り。

- : 糖濃度 6%, 耐糖性あり
- ✖: 糖濃度 30%, 耐糖性あり
- : 糖濃度 6%, 耐糖性なし
- ✖: 糖濃度 30%, 耐糖性なし

この時点では、ハチミツから分離し培養中の酵母は十分な量まで増殖していなかったため、実験に使用できなかった。そのため、市販されている酵母を使用して実験方法を検証することにした。高い糖濃度でもアルコール発酵ができるとされるルサッフル社の金サフを耐糖性のある酵母として使用し、耐糖性のない酵母である同社の赤サフを対照実験用として使用した。<sup>(※7)</sup>

結果は、図6のグラフのようになった。耐糖性のある酵母では、糖濃度6%のときも30%のときも気体の発生速度に大きな差はなかった。一方で、耐糖性のない酵母では、糖濃度6%のときよりも糖濃度30%の方が気体の発生速度が減少した。

この実験によって耐糖性の差を確認できた。しかし、培養して得た酵母は水分を含み乾燥重量が分からぬ。そのため、重量%による調製が難しい。また増殖が遅く得られる酵母量が少ないので、この実験方法では必要な酵母量が多すぎることが課題としてあがつた。この2つの課題を解決するための実験として、次の実験2を行った。

### 実験2 プレパラートを用いた耐糖性アルコール発酵能力の確認実験

#### 実験方法:

- ① 市販の耐糖性のない酵母と耐糖性のある酵母をそれぞれ重量%で10%に調製した後、精製水で10000倍希釈し、1mLあたりの酵母数を血球計算盤を使用して測定した。
- ② 測定結果に基づき再希釈し、酵母数  $2.5 \times 10^6 / \mu\text{L}$  に揃えた酵母溶液  $20 \mu\text{L}$  とスクロース溶液  $20 \mu\text{L}$  を混ぜ、最終的な糖濃度6%, 30%に調製した。
- ③ そのうち  $10 \mu\text{L}$  をスライドガラスに乗せ、カバーガラスをかけ、プレパラートにした。
- ④ 顕微鏡でプレパラート内に気泡がないことを確認した後、約40°Cのお湯で15分温めた。その際1分ごとに写真を撮影し、プレパラート内の変化を観察した。

#### 実験結果:

結果は、図7のようになら。耐糖性のある酵母では、糖濃度が6%のときも30%のときも、気体が発生した様子が確認できた。一方で、耐糖性のない酵母では、糖濃度が6%のときは気体の発生が確認できたが、糖濃度30%のときはできなかった。つまり、実験1と同様の結果を示しているため、プレパラートを用いた実験でも、アルコール発酵による発泡と、酵母の耐糖性アルコール発酵能力の有無を確認できたと考えられる。

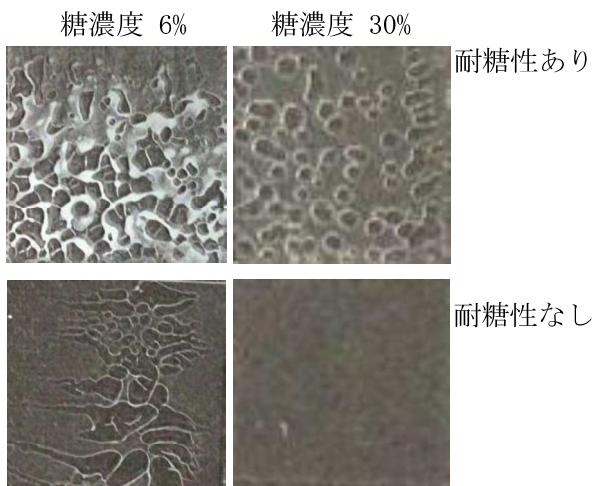


図 7 プレパラートを用いた実験の結果。左上の写真は糖濃度 6%で耐糖性のある酵母での結果、右上の写真は糖濃度 30%で耐糖性のある酵母での結果、左下の写真は糖濃度 6%で耐糖性のない酵母での結果、右下の写真は糖濃度 30%で耐糖性のない酵母での結果。一部の写真で確認できる白い靄のようなものは、アルコール発酵によって発泡している様子。

	必要な酵母数
キューネ発酵管(実験 1)	$1.4 \times 10^{11}$ 個
プレパラート(実験 2)	$5.0 \times 10^7$ 個

表 1 実験 1 と実験 2 で必要な酵母数を血球計算盤で測定して比較した。

また、表 1 のように、キューネ発酵管を用いたときとプレパラートを用いたときに必要な酵母数を比較した結果、プレパラート実験はキューネ発酵管を用いた実験の 1/2800 の酵母数でアルコール発酵による発泡と耐糖性アルコール発酵能力の有無を確認できることがわかった。

#### 4. 結論

実際にハチミツから耐糖性酵母を見つけることはまだできていないが、本研究によって改良した培養方法と判定方法を用いて、耐糖性酵母を単離したいと考えている。また、「耐糖性」という言葉の定義の見直しも必要である。本研究では、「耐糖性」を「高い糖濃度でもアルコール発酵できる能力」と定義し、これを判定するための実験方法を改良したが、「高い糖濃度にさらされた場合に、素早く休眠して耐える能力」と定義する方が、天然

酵母入りパン発酵用シロップを作る上では重要なになってくると考える。なぜなら、パン生地にシロップを混ぜる際に糖濃度は薄まるので、高い糖濃度でアルコール発酵を行う能力が必要とは限らないからである。糖濃度が高くなればすぐに休眠し、糖濃度が低くなれば休眠から起きてアルコール発酵を行う能力さえあれば、発酵用シロップは実現できていると考えている。

ドライイーストは、一度開封すると休眠から起きた酵母が湿気を吸って栄養不足に陥るため、発酵能力が弱まる。しかし、私達が考えている耐糖性の天然酵母入りパン発酵用シロップであれば、シロップ内を高張圧の状態に保ち、酵母の発酵能力を弱めることなく、常温かつ個包装しない状態で好きなときに使える発酵ダネとして用いることができる。今後、ハチミツから耐糖性酵母を得ることができたら、高い糖濃度のシロップ中で休眠させてパン作りの際のドライイーストの代替品の開発を行いたい。

#### 5. 謝辞

美作大学の桑守正範教授と栗脇淳一教授から、研究の進め方や有益な助言など貴重なご指導を賜りました。また、山田養蜂場みづばち農園からは巣蜜を提供していただきました。本研究に協力して下さった皆さまには、心から感謝申し上げます。ありがとうございました。

#### 6. 参考文献

- ※1) 白神こだま酵母について(白神山地)
  - | 株式会社サラ秋田白神  
<http://www.sala1.jp/shirakami/shirakami.html>
- ※2) ミード(蜂蜜酒) 穂積忠彦/富士醸酵工  
日本釀造協会雑誌. 59巻 10号 p. 890-892 (1964)
- ※3) 耐糖性酵母の特性解明と食品の変敗防止.  
徳岡 敬子:  
化学と生物 Vol. 30, No. 9, 589-596, (1992)
- ※4) カラカラの細胞が生き返る。トレハロースの  
ストレス保護効果とは  
<https://www.food.hayashibara.co.jp/library/8/>
- ※5) 微生物増殖学の現在・未来.  
福井作蔵・秦野琢之 地人書館(2008)
- ※6) 自然界から分離した酵母の培養・保持方法に関する研究.  
瀬見井 純: あいち産業科学技術総合センター  
食品工業技術センター(2016)
- ※7) ルサッフル | 日仏商事株式会社  
<https://www.nichifutsu.co.jp/products/foods/brand/lesaffre/>

本年度も課題研究を進めるにあたり、多くの外部指導者の方々にご指導・ご助言をいただきました。ご多忙のところ、快くご指導をいただき、充実した研究を行うことができました。  
教員・生徒一同より厚く感謝を申し上げます。

研究指導 津山工業高等専門学校 曽利 仁 准教授  
津山工業高等専門学校 加藤 学 准教授

美作大学短期大学部 桑守 正範 教授  
美作大学短期大学部 栗脇 淳一 教授

外国語指導 本校 GSO 江原 Martina 様

指導助言 大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻 赤松 史光 教授  
高知県立大学文化学部文化学科 大村 誠 教授  
広島大学病院国際リンパ浮腫治療センター 光嶋 熱 センター長  
真庭市立北房中学校 校長 小林 守 先生  
京都大学大学院人間・環境学研究科 杉山 雅人 教授  
岡山大学異分野基礎科学研究所 鈴木 孝義 教授  
岡山大学大学院環境生命科学研究科環境科学専攻 永禮 英明 准教授  
福山大学生命工学部生物工学科 秦野 琢之 教授

# お絵かきロジックの解の存在判定

—お絵かきロジックの定式化による再定義と健全性定理に関する研究—

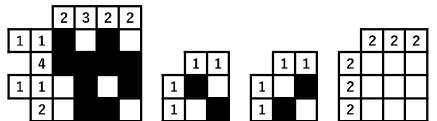
岡山県立津山高等学校 理数科 2年 与木渓汰, 黒田康平

## 研究の概要

本稿では、ペンシルパズルの一種である「お絵かきロジック」について考察している。本研究を行うにあたってお絵かきロジックの定式化と再定義を行った。その結果、一般的なお絵かきロジックの入力とそれに対応する解の存在判定(健全性)についていくつかの定理を示すことができた。

## 序論

お絵かきロジックはペンシルパズルの一種であり、 $M \times N$  のマス目をそれぞれの列や行に与えられている、連続して塗りつぶすマス目の数を示している数字の列をもとにして塗りつぶすことでイラストを浮かび上がらせるパズルである。



## 定義

本研究を行うにあたってお絵かきロジックを定式化した。お絵かきロジックは与えられた数字のヒント(キー)に対して  $M \times N$  のグリッド上の黒マスの位置を特定するパズルである。

ここで、解として出力されるイラストを各要素が0(白マス)、1(黒マス)の  $M \times N$  の行列を

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{j1} & \cdots & a_{M1} \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ a_{1k} & & a_{jk} & & a_{Mk} \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ a_{1N} & \cdots & a_{jN} & \cdots & a_{MN} \end{pmatrix} \in \{0,1\}^{M \times N}$$

と表し、 $A$ を解と呼び、 $A$ を元とする集合を

$$\mathfrak{A} \ni A$$

とする。また、与えられる列と行のキーを示した列を

$$C^M = (c_j)_{j=1}^M = (c_1, \dots, c_M)$$

$$R^N = (r_k)_{k=1}^N = \begin{pmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_N \end{pmatrix}$$

と、表す。ここで、

$$W^{M+N} = (w_l)_{l=1}^{M+N} = (c_1, \dots, c_M, r_1, \dots, r_N) \\ = (w_1, \dots, w_{M+N})$$

とおくと、

$$C^M = (w_l)_{l=1}^M, \quad R^N = (w_l)_{l=M+1}^{M+N}$$

と、表すことができる。

また、 $w_l$ の元を次のように定義する。

$$w_l = (\omega_{lp})_{p=1}^{q_l} = (\omega_{l1}, \dots, \omega_{lp}, \dots, \omega_{lq_l})$$

よって、お絵かきロジックは以下のように定義される。

## 定義

入力:  $W^{M+N} = (w_l)_{l=1}^{M+N}$  ( $w_l \subset \{0\} \cup \mathbb{N}_+$ ) ;  $M, N \in \mathbb{N}_+$

出力:  $\mathfrak{A} \ni A$ , ( $A = A^r \cap A^c$ ) ;

$$\Phi : R^N \rightarrow A^r, \quad \Psi : C^M \rightarrow A^c$$

## 結果

入力とそれに対応する解の存在判定について、いくつかの定理を示した。

### 定理 1.1

$$N < \sum_{p=1}^{q_l} \omega_{lp} + (|w_l| - 1); (1 \leq l \leq M) \text{ または } \\ M < \sum_{p=1}^{q_l} \omega_{lp} + (|w_l| - 1); (1 \leq l \leq N) \Rightarrow \mathfrak{A} = \emptyset$$

### 定理 1.2

$$\sum_{l=1}^M \sum_{p=1}^{q_l} \omega_{lp} \neq \sum_{l=M+1}^{M+N} \sum_{p=1}^{q_l} \omega_{lp} \Rightarrow \mathfrak{A} = \emptyset$$

### 定理 1.3

$M = N$  かつ  $\omega_{lp} = e$  ( $e \in \mathbb{N}_+$ ) のとき、以下が成り立つ。

$$[1] e = 0 \text{ のとき } A = 0_M = \begin{pmatrix} 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ 0 & & 0 & & 0 \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix}$$

[2]  $0 < e < M$  のとき

$$M \not\equiv 0 \pmod{e} \Rightarrow \mathfrak{A} = \emptyset, \quad M \equiv 0 \pmod{e} \Rightarrow |\mathfrak{A}| \geq \left(\frac{M}{e}\right)!$$

$$[3] e = M \text{ のとき } A = \begin{pmatrix} 1 & \cdots & 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ 1 & & 1 & & 1 \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ 1 & \cdots & 1 & \cdots & 1 \end{pmatrix}$$

## 参考文献

- 八登崇之: NP完全なペンシルパズルの一覧, 東京大学大学院情報理工学系研究科, 2006/07/03
- 菊池浩明: “イラストロジックパズルを解くアルゴリズム”, 情報処理学会研究報告. 人工知能研究会報告, 一般社団法人情報処理学会, PP127-132, 1995/03/07

# シャトルの羽による空気抵抗の影響の調査

岡山県立津山高等学校 理数科2年 大杉 昌徹, 石原 光基, 市場 勇樹, 大橋 虹椰,  
大森 永遠, 奥 智, 久保 心暉, 辰巳 陽己, 長畠 透馬 指導者 仲達 大輔

## 目的

シャトルに羽があることによって空気抵抗の受け方や変位、速度などの変化にどのような違いが生じるのかを明らかにし、考察する。

## 実験方法

- ・ シャトルを斜方投射、撮影した。
- ・ その動画を解析し、座標を求めた。
- ・ 座標をもとに  $v_x - t$ ,  $v_y - t$  グラフを作成した。
- ・ そのグラフを理論曲線と比較した。

### 理論式 :

$$v_{x_i} = v_{x_{i-1}} - 0.25 v_{i-1} \cdot v_{x_{i-1}} (t_i - t_{i-1})$$
$$v_{y_i} = v_{y_{i-1}} - (9.8 + 0.25 v_{i-1} \cdot v_{y_{i-1}}) (t_i - t_{i-1})$$

文字説明 :  $v$  … シャトルの速さ

$x_i$ ,  $y_i$  …  $i$ 番目における座標

$t_i$  …  $i$ 番目における時間



## 考察

- ・ コルクは、 $y$  方向には空気抵抗の影響をあまり受けず、 $v_y - t$  グラフは空気抵抗なしの球体の  $v_y - t$  理論式と同じような値を取ったと考えた。
- ・ シャトルの速度グラフに揺れが見られたのは、シャトルの向きの変化などによる空気抵抗の影響だと考えた。

## 参考文献

バドミントンシャトルコックの有する高い減速メカニズム

<https://www.nagare.or.jp/download/noauth.html?d=32-2gencho.pdf&dir=106>

## 実験結果

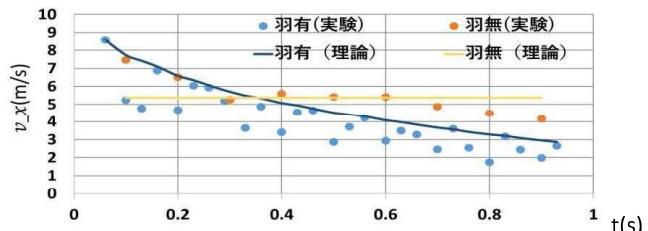


図1：水平方向の速度成分と時間の関係

- ・ 羽無では理論値との差があるとわかった

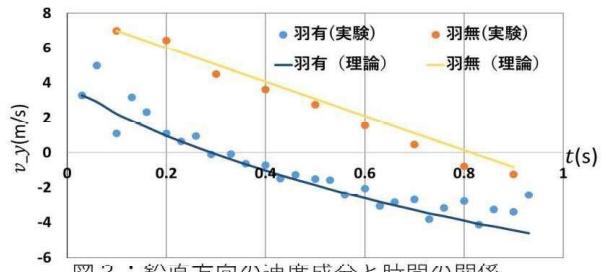


図2：鉛直方向の速度成分と時間の関係

- ・ 羽有、羽無ともに理論値に近い値を取るとわかった。

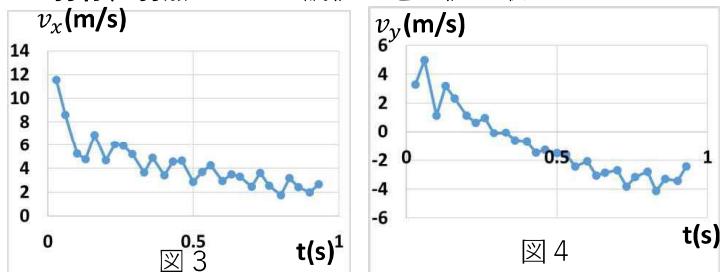
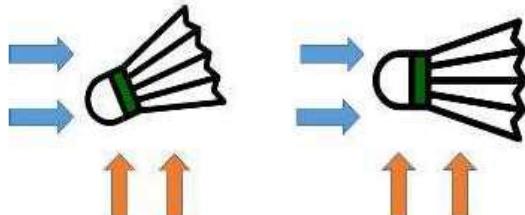


図3, 4 : 1フレームごとの  $v_x - t$ ,  $v_y - t$  グラフ

- ・ どちらも加速、減速を繰り返していることがわかった。
- ・ コルクのブレが原因ではないかと考えた。



# 斜面上を流れる粘性流体の運動分析

岡山県立津山高等学校 理数科2年 高橋 恵吾, 香山 晟, 難波 幸大, 湯浅 皓庸 指導者 仲達 大輔

## 研究目的

粘性流体が斜面上を流れる運動を解析し、**独自の理論モデル**を考案する。  
理論モデルを用いて粘性流体の物性と運動の関係を考察する。

## 実験・解析方法

24,99,176Pa·sの水ガラス(粘性流体)を  
アクリル板に滴下  
45°に傾け水ガラスを流す

先端・の速度変化を測定

流れる水ガラスを上から撮影  
コマ送りで水ガラス先端の位置を測定

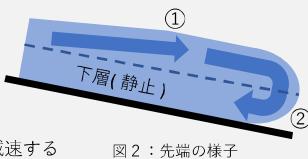
図1：実験の模式図

## 理論モデルの考案

観察の結果、水ガラス先端では以下のような流れが見られた。

### [水ガラスの先端の流れ]

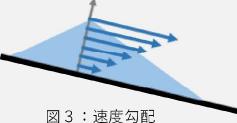
- ① 斜面上方から水ガラスが流入
- ② 先端に到達し、下層に流れ込む
- ③ 下層(静止層)に流れ込んだことで  
上層の水ガラスの量が減り、流れは減速する



流れの様子を分析する

### [先行研究]

斜面上を流れる水ガラスのうち斜面近傍の層は摩擦力により静止。それより上は斜面から遠いほど速さが大きい。



▶ 水ガラス上部と水ガラス下部では速度差が生じる。その差によって  
水ガラス上部は下部を追い越す運動をする。

### 図形の変形と考える

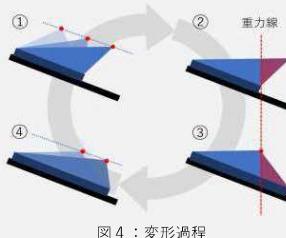
- ① 水ガラス側面の形を三角形とみる

三角形の頂点(図の赤い点・)は  
重力によって斜面下方へと平行移動する

斜面と接する層は摩擦により静止

- ② 重力線よりも斜面下方に飛び出した  
水ガラスが等積変形する(図の赤領域)

- ③ 斜面により近い頂点が新たにできる  
④ 再び頂点が前進する



①～④の変形が連続的に起きるとともに、三角形の頂点の斜面からの高さは連続的に低くなっていく。よって、斜面に垂直な方向の速度勾配(先行研究)に則って、このモデルは減速する。

## 考察・今後の展望

### [考察]

- ・重力線モデルの速度減少の傾向が実測値の傾向と合致した理由は、水ガラスの流れが定常であり、上層の水ガラスが下層の水ガラスに潜り込むという動きを図形の変形とみなす処理が適していたからだと考えられる。
- ・粘度が99 Pa·s の水ガラスについて、加速の原因として実験装置やカメラの揺れなどが考えられる。しかし、加速した区間以外では速度減少の傾向が理論値と実測値で一致しているため、重力線モデルは粘性流体の斜面上の運動を記述できると考えた。

### [今後の展望]

今後は重力線モデルを用いた粘性流体の粘度測定方法を確立することを目的に、他の粘性流体でも実験を行い理論式の普遍性を検証したい。  
そして得られた理論モデルを用いて、高い精度で粘度を測定できる方法を確立していきたい。

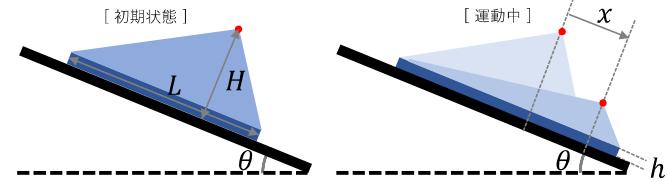
## 参考文献

須賀一彦『汎用的な解析的壁関数モデル(第二報 滑面→粗面乱流に対応した強制対流温度場のモデル)』日本機械学会論文集(B編) 71巻711号(2005-11)  
藤田勝久『基礎を学ぶ流体力学』(森北出版株式会社、2009年)  
河原正泰「エコプロセッシング研究室講義運動速度論」<http://www.msre.kumamoto-u.ac.jp/~process/>

## 理論式の導出

理論モデルを用いて経過時間  $t$  [s] と、水ガラス先端の速度  $v$  [m/s] の関係式を求めた。用いる文字は以下のように定義する。

$L$ : 運動前の粘性流体の高さ [m]	$\theta$ : 斜面の角度 [°]
$H$ : 運動前の粘性流体の高さ [m]	$h$ : 運動収束後の粘性流体の高さ [m]
$\mu$ : 粘度 [Pa·s]	$x$ : 粘性流体の移動距離 [m]
$\rho$ : 粘性流体の密度 [kg/m³]	$t$ : 経過時間 [s]
$g$ : 重力加速度 [m/s²]	

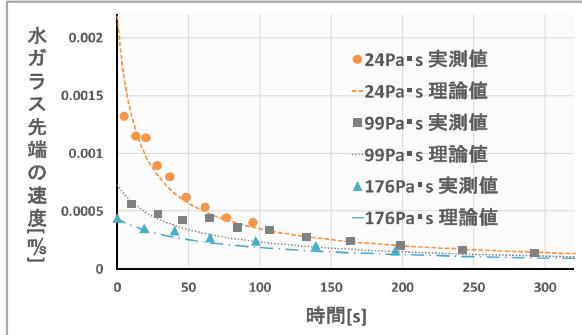


〔導出過程〕

1. 初期状態の斜面からの高さを  $H$  斜面に平行な方向の長さを  $L$  として、三角形の面積を求める。
2. 流体は等積変形をするとし、初期状態から  $x$  進んだ状態の高さを求める。
3. 流体の先端の速さは、先端の高さを変数とする式から求められる。よって、②で求めた高さをその式に代入する。
4. 進んだ距離  $x$  と先端の速さ  $v$  の関係式ができる。これは微分方程式となる。
5. 微分方程式を解き、初期条件「 $t = 0$  のとき、 $x = 0$ 」から積分定数を定める。

$$\begin{aligned} \text{[理論式]} \quad t &= \frac{1}{2ad}x + \frac{1}{2ac(x+\frac{c}{d}+b)} - \frac{d}{2ac(c+bd)} \\ (a &= \frac{\rho g \sin \theta H}{4\mu(H+h)}, b = \frac{2L(H+h)}{H+2h}, c = 2L(H+h), d = -2h) \\ \Leftrightarrow x &= f^{-1}(t) \Leftrightarrow v = \frac{d}{dt}f^{-1}(t) \end{aligned}$$

## 結果



- ・時間の経過によって速度は減少。
- ・高粘度の水ガラスほど速度変化は緩やかである。
- ・理論値は24, 176 Pa·sの水ガラスでは実測値とほぼ一致している。

# スティックスリップ現象における理論周期の導出と検証

岡山県立津山高等学校 理数科2年 荒田祐希, 仁木心音, 保田千代 指導者 仲達大輔, 井上出

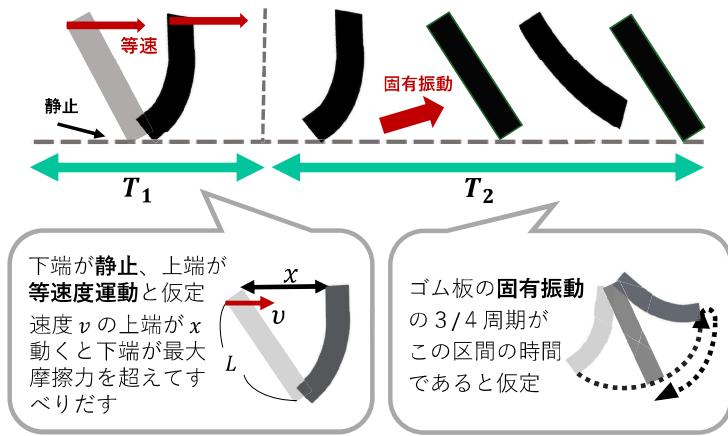
## 1. 研究目的

スティックスリップ現象とは、静止摩擦力が作用するスティック(固着)状態と、動摩擦力が作用するスリップ(すべり)状態が、接触面に交番的に表れる現象のことである。この現象は私たちの生活の中で支障になることがある一方で、静止摩擦力と動摩擦力の性質の違いにより解明が困難である。そこで本研究は、「周期  $T_{SS}$ 」に焦点を当て、現象の解明への貢献を目的とする。

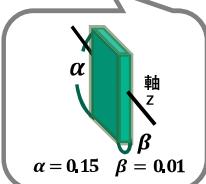
## 2. 理論モデル

スティックスリップ現象により生じる不快音は物体により異なることが判明した。物体の固有振動数により音の高さが決定されるからだ。もしもスリップ時の時間が固有振動の周期に依存していれば面白いと考え、以下のモデルを作成した。

### 《固有振動モデル》



$$T_{SS} = T_1 + T_2 = \frac{x}{v} + \frac{3\pi}{2\sqrt{3EI/mL^3}}$$



## 3. 実験・結果

[実験]  
ラジコンカーを使ってゴム板を平均速度  $\bar{v} = 65 \pm 3 \text{ cm/s}$  で引き、スティックスリップ現象を発生させ周期を測定する。



	理論値(s)	実測値(s)
$T_1$	$0.074 \pm 0.003$	$0.015 \pm 0.009$
$T_2$	$0.0023 \pm 0.0007$	$0.047 \pm 0.005$
$T_{SS}$	$0.076 \pm 0.003$	$0.062 \pm 0.003$

誤差の範囲内で一致しなかった。よって《固有振動モデル》は現象をうまく表せていないといえる。

## 6. 参考文献

- 佐野理『連続体の力学』（朝倉書店、2000年）
- 中野健「スティックスリップ回避のための設計指針」日本ゴム協会紙 80巻（2007）4号

### 現象の具体例

- 椅子の不快音
- 車のワイパーの不快音

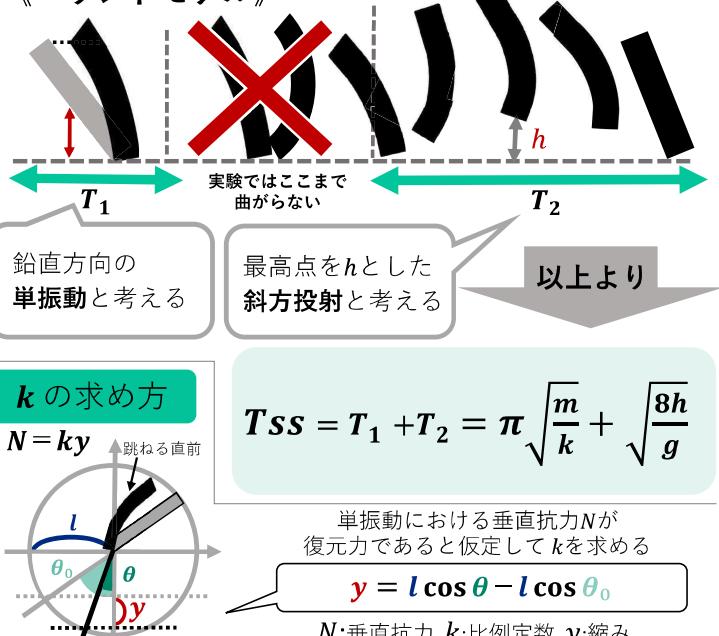
## 4. 考察

### 《固有振動モデル》の誤差の原因考察

動画解析したところゴム板が飛び上がっているように見える  
⇒  $T_1$  は垂直抗力  $N$  が 0 になるまでの時間ではないか?  
⇒  $T_2$  は斜方投射して着地するまでの時間ではないか?

これらを考慮して新たなモデルを立てた

### 《バウンドモデル》



	理論値(s)	実測値(s)
$T_1$	$0.021 \pm 0.002$	$0.015 \pm 0.009$
$T_2$	$0.071 \pm 0.006$	$0.047 \pm 0.005$
$T_{SS}$	$0.092 \pm 0.006$	$0.062 \pm 0.003$

$T_1$  → 一致 垂直抗力が 0 になって飛び上がっている!  
 $T_2$  → 不一致 実験で鉛直方向の力が制御できていなかったか

## 5. 結論と今後の展望

- 地面に接触している時間は、鉛直方向の物体の単振動の周期の  $1/2$  と考えると実験結果をうまく説明できる。
- 上下方向の力を制御し  $T_2$  を斜方投射とみなすことができるか検証する必要がある。
- 物体の引き方によっては物体の固有振動がからんでくる可能性  
→ 実験条件を変えて研究をすすめたい。

# 液状化現象における粒子の挙動

岡山県立津山高等学校 神谷健太, 本同凌大, 山崎純汰 指導者 仲達大輔

## 1 研究の概要

液状化現象とは地震により砂地盤が液体状になる現象である。支持基盤を失った地盤中の物体は重力と浮力を受け、浮いたり沈んだりする。液状化被害をニュースで目に当たりにし被害の防止・軽減に尽力したいと考えた。地盤中の粒子の形状や配置は複雑であるが、本研究ではこれをシンプルなモデルで設定することで液状化現象を表現することを目指した。実証試験の結果と比較することで粒子の配列は面心立方格子モデルが最も適しているということが分かり、さらに地下水の変動もうまく表せることが示された。

## 2 液状化現象のモデル化

実際の液状化現象の特徴を捉えることで理論モデルを作成する。

まず実際の液状化現象は、地盤に振動が与えられることにより次の①～③の流れで進行する。

- ① 振動付与の前、地盤の粒子配列は複雑である。(液状化前)
- ② 振動により粒子が水に浮遊した状態になる。(液状化中)
- ③ 粒子が沈降し再配列する際粒子は密に詰まる。(液状化後)  
最終的に間隙率が低下することにより水面の位置が上昇する。

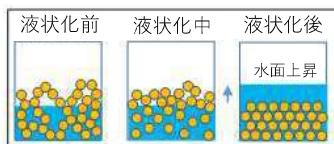


図1 実際の液状化現象

シンプルなモデルを考案。  
① 粒子を球形で、規則正しく配列していると仮定する。

- ② 液状化前後で粒子間距離が $e$ から $e'$ に縮まる。
- ③ 粒子が詰まった分地下水の位置 $h'_s$ が高くなる。

粒子の規則正しい配列は図3のように単位格子あたりの配置を考えてモデル①～③の3種類を用意した。

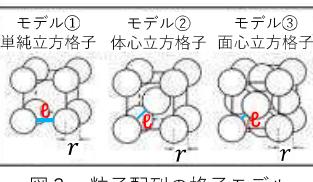
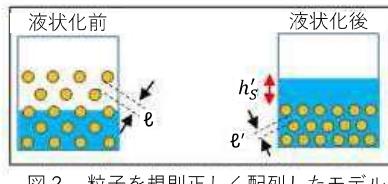


図3 粒子配列の格子モデル

以上の理論モデルから液状化後の粒子間距離 $e'$ と地下水の位置 $h'_s$ の理論式を導出する。そして実証試験の結果と比較することでこのモデルの妥当性を検証する。

## 3 理論式

自作の理論モデルを元にして液状化後の水面の位置 $h'_s$ を求める理論式を導出した。

$$h'_s = \frac{V_w}{x^2} + \frac{4\pi r^3 M}{3x^2 m} - \frac{(2r+\ell')^3}{(2r+\ell')^3} I$$

$I$ : 液状化前の砂の高さ       $x^2$ : 実験容器の底面積       $r$ : 粒子半径  
 $M$ : 粒子全体の質量       $m$ : 粒子1つあたりの平均質量       $V_w$ : 水の体積

## 4 実験

液状化後に水面が地表面よりも上に出て $h'_s$ が測定できるように砂と水の体積を調整しておく。

- ① ふるいを用いて粒径1.0 mm以上2.0 mm未満の砂200 gを用意する。
- ② ①の砂と水80 mLを容器に入れて自作の振動装置で振動させて液状化を起こす。
- ③ 液状化の前後で理論値計算に必要となる各パラメータを計測する。

砂の平均質量 $m$ はランダム30粒の平均をとった。



図4 振動装置

## 9 参考文献

1. 清岡良介「不飽和層への浸透現象を考慮した液状化解析」土木学会論文集No.694/III-57, 153-163, 2001.12
2. 竹下祐二, 河野伊一郎「不飽和浸透特性の推定方法とその適用について」土質工学会中国支部論「地盤と建設」, Vol.36, No.3, pp.95-113, 1993

## 5 結果と考察 I

液状化後の水面の位置の理論値と実験値を以下に示す。

理論値  $h'_s = -17.1$  mm, 実験値  $h'_s = 11.4 \pm 0.6$  mm  
理論値と実験値がかけ離れているため、液状化現象を再現できたとはいえない。この原因を次のように考えた。

実験を繰り返すごとに削れた細かい粒子が目立つようになってきた。つまり粒子の平均質量は測定できないのではないか。

そこで、正確に測定できる粒子の充填率を質量の代わりに活用することにした。充填率はメスリンダーに粒子と水を入れ、使用する粒子の体積を求めて導出できる。

## 6 理論式再考

粒子の平均質量 $m$ の代わりに、液状化後の粒子が全体積に占める充填率 $z'$ を用いて理論式を導出し直した。

### ・液状化後の粒子間距離 $e'$

$$\text{モデル① } e' = \sqrt[3]{\frac{4\pi r^3}{3z'}} - 2r$$

$$\text{モデル② } e' = \sqrt[3]{\frac{\pi r^3}{\sqrt{3}z'}} - 2r$$

$$\text{モデル③ } e' = \sqrt[3]{\frac{4\sqrt{2}\pi r^3}{3z'}} - 2r$$

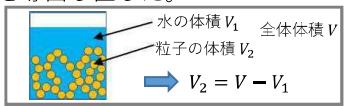


図5 充填率を求めるために粒子の体積 $V_2$ を測定する実験

$$\cdot \text{液状化後の水面の位置 } h'_s$$

$$h'_s = \frac{V_w}{x^2} - \frac{(2r+\ell')^3}{(2r+\ell')^3} (1-z')I$$

## 7 結果と考察 II

液状化後の粒子間の距離についてはモデルごとに次のような解析結果が得られた。

モデル①:  $e' = -0.07$  mm

モデル②:  $e' = -0.41$  mm

モデル③:  $e' = +0.17$  mm

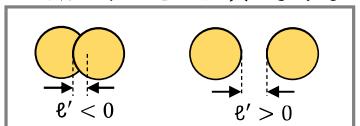


図6 粒子間距離 $e'$ の正負

①・②では $e' < 0$  → 粒子同士が重なる → 矛盾!

③では $e' > 0$  → 粒子間距離存在 → OK!

つまりモデル③の面心立方格子の粒子配列が実験結果を尤もよく説明できる。

次に液状化後の水面の位置の理論値と実験値を以下に示す。

理論値  $h'_s = 10.8$  mm, 実験値  $h'_s = 11.4 \pm 0.6$  mm

誤差の範囲内で一致 → 液状化現象後の状態が再現できた!

## 8 結論と今後の展望

自作の理論モデルで液状化現象が再現できることが示された。今後は過去に液状化が起こった地域の地盤データを用いて現象が再現できるか検証したい。その際には、地下水より浅い地盤の間隙中の水の割合や、粒子サイズの割合など現実に即したパラメータも加えてより一般性をもたせた理論式構築を目指す。

# スペクトルを用いた炎色反応についての研究

岡山県立津山高等学校

研究者  
指導者

塩田 涼介  
新納 健司  
松野 晃達  
井上 直樹  
鷹取 柚花  
南 洋明  
春木 英里  
甲本 龍平  
日笠 心晶  
福井 歩純

## 1 目的

2種類の金属塩水溶液を混ぜ合わせた水溶液（混合溶液）で炎色反応を起こした時、発光スペクトルがどのように変化するのか、電子分光器を用いて解明する。

## 2 内容

混合溶液の炎色反応によって得られる、炎のスペクトルを測定した。

- ①使用した水溶液(すべて濃度は0.10 mol/L)  
NaCl・LiCl・KCl・CsCl・  
CaCl<sub>2</sub>・CuCl<sub>2</sub>・BaCl<sub>2</sub>・SrCl<sub>2</sub>
- ②ガスバーナーは毎回同じものを使用。
- ③使用した電子分光器はGo Spectro(Goyalab)。

## 3 予備実験①－内容

- ①試料を蒸発皿の中でカーボンフェルトに染みこませた。
- ②ガスバーナーの外炎の上部にカーボンフェルトを入れ、炎色反応を起こした。
- ③電子分光器を用いてスペクトルを測定した。

## 4 予備実験②－プランク反応

電子分光器を用いて、以下のものをガスバーナーの外炎に入れた時の炎のスペクトルを測定した。

- (A)カーボンフェルト+多量の水
- (B)カーボンフェルト+少量の水
- (C)カーボンフェルトのみ



表1 予備実験①の結果

溶液	波長(nm)	強度
LiCl	666	10
NaCl	590	46
CsCl	455	7
KCl	—	—
BaCl <sub>2</sub>	549 493	6
CuCl <sub>2</sub>	545	4
CaCl <sub>2</sub>	622 549	3
SrCl <sub>2</sub>	606	19

表2 予備実験②の結果

実験内容	波長(nm)	強度
カーボンフェルト+多量の水	—	—
カーボンフェルト+少量の水	546 ⇒517 ⇒590	3
カーボンフェルトのみ	517	3

## 5 実験①－手順

- ①1種類の金属塩水溶液をカーボンフェルトに染みこませた。
- ②ガスバーナーの外炎の下部にカーボンフェルトを入れ、炎色反応を起こした。
- ③電子分光器を使用してスペクトルを観測した。

## 6 実験②－手順

- ①二種類の金属塩水溶液を1:1で混ぜた（混合溶液）。
- ②混合溶液をカーボンフェルトに染みこませた。
- ③ガスバーナーの外炎の下部にカーボンフェルトを入れ、炎色反応を起こした。
- ④電子分光器を用いてスペクトルを測定した。

表3 実験①の結果

表4 実験②の結果

溶液	波長(nm)	強度	組み合わせ	波長(nm)
LiCl	667	19	LiCl +CuCl <sub>2</sub>	688 ⇒533~542
NaCl	590	45		
CsCl	459	5		
KCl	—	—		
BaCl <sub>2</sub>	459 493 550	5		
CuCl <sub>2</sub>	542	9	CsCl +SrCl <sub>2</sub>	606 ⇒457
CaCl <sub>2</sub>	622 549	4		
SrCl <sub>2</sub>	609	13	CsCl +CuCl <sub>2</sub>	530~542 ⇒455

## 7 考察・まとめ

炎の色が2度変化する混合液と1度しか変化しないものがあった。

1度のみ変化するものはCsCl+SrCl<sub>2</sub>（図1）。炎の色は赤(Sr)→青紫(Cs)に変化した。この組み合わせは反応開始までの時間がほとんど同じであるため、変化した要因はスペクトルの強度が最大になるまでの時間のみだと考えられる。

2度変化するものはCuCl<sub>2</sub>+LiCl（図2）。炎の色は赤(Li)→青緑(Cu)→赤(Li)と変化した。変化した要因は、反応開始までの時間とスペクトルの強度が最大になるまでの時間だと考えられる。

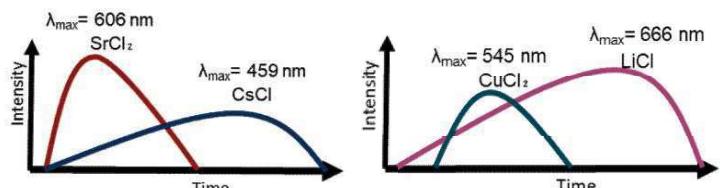


図1 1度のみ変化する混合液

図2 2度変化する混合液

## 8 参考文献

教科書「改訂版 化学」（数研出版）p.117  
化學便覽 日本化學會編  
化学の新研究 (三省堂)版 ト部吉庸 p.460

# 電気分解における電極中の気体の挙動の考察

岡山県立津山高等学校 理数科2年 菅原 壮太、牧 祐太、栗栖 冬翔、長尾 修志、河野 春馬 指導者 井上 直樹

## 研究の概要と目的

昨年の課題研究で電気分解において、炭素電極表面に気体が吸着される現象を観察した。また化学処理した電極を用いて電気分解を行うと、水素の吸着量が53倍になるというデータも得た。本研究では、炭素電極への気体吸着のメカニズムを解明することを目的とする。また本研究の電極加工により気体の吸着量を増加させることで燃料電池の効率化などの次世代のエネルギー開発に繋がると考えている。

## 化学処理した電極とは

化学処理した電極とは一度炭素電極を電気分解時に陽極に用いることで、そのとき発生した酸素により炭素電極表面の炭素を酸化させ、表面積を増やした電極のことである。

右：化学処理した電極

左：新品の電極

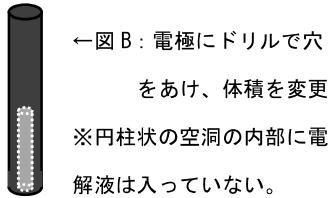
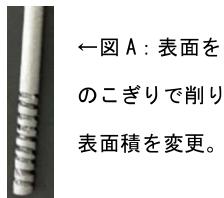


## 実験① 電極の体積と表面積

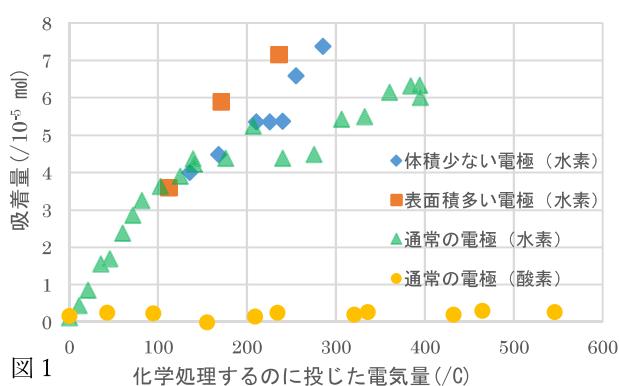
図A、図Bのように電極を加工し、体積、表面積を変えた。その後一度電極を化学処理し吸着量を測定した。

<結果>下(図1)に示す。

どちらの電極も通常の電極より吸着量が増加した。



## 実験結果



## 実験② 電極の化学処理と吸着量

水素の吸着量(物質量)を測定するときは陰極に、酸素の吸着量(物質量)を測定するときは陽極に化学処理した電極を用いた。投じた電気量を変え、化学処理の程度を変更した。

※吸着量は電流を流し始めてから気体の発生が確認できるまでの時間と、その時の電流の値で算出した。

<結果>水素、酸素の吸着量と電気量(電極を化学処理させるのに用いた)の関係を左下(図2)に示す。水素(▲)は途中まで吸着量が急激に増えるがその後吸着量の増加率が低下する。それに対し酸素(●)の吸着量は変化しない。

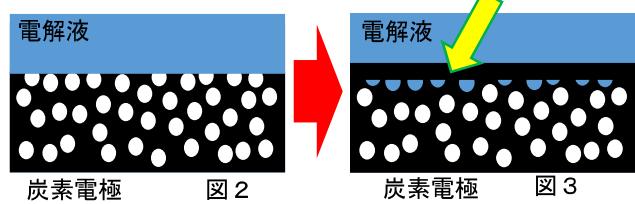
## 考察

気体は炭素電極表面の細孔に吸着されている。

<実験②(表面積)>吸着可能な細孔数が増加。

<実験②(体積)>空洞の中に水素が溜まった。

<実験①>化学処理によって表面積が増加したことによる細孔数の増加と炭素電極表面の細孔に炭素の蓋(化学処理した時の堆積物によって形成される)(その様子を図2と図3に示す)ができる、その中に水素が吸着されたことにより吸着量が増加したと考えられる。蓋の大きさは化学処理させるほど、大きくなると考えられるので、化学処理させればせるほど水素の吸着量が増えたのを説明することができる。また単に表面積が増えたと考えるだけでは酸素の吸着量が変化しなかったのを説明できないのに対し、蓋は酸素によって酸化され破壊するために吸着量が変化しなかったと説明することができる。



## 結論と今後の展望

結論として水素の吸着量を増やすには、電極の表面積を大きくすることと、電極表面を化学処理させることによって形成される蓋という二つが考えられる。

今後は、吸着のメカニズムのさらなる解明のために他の気体(ハロゲン)の吸着について調べ、実験①のデータを増やし、図1の投じた電気量と吸着量の関係をさらに解明したい。

# The Factors that Affect the Exploration Activity of Slime Mold *Physarum*

Tsuyama High School Otani Y. Sakate M. Rambo M.

Supervisors : Yamamoto T. Kojima S.

## I. Introduction

From previous research(2018), *Physarum* is known to take the shortest path in 2D mazes. On the other hand, *Physarum* in 3D mazes takes several paths including the shortest path. We wondered why *Physarum* couldn't solve 3D mazes in the shortest path. To find out the reason, we searched for factors that affect *Physarum*'s activity.

## II. Purpose

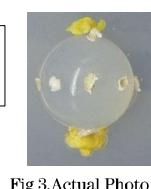
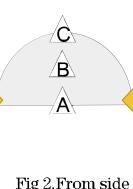
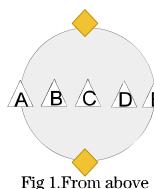
The purpose is to find the reason why *Physarum* couldn't solve 3D mazes in the shortest path by searching for factors that affect *Physarum*'s activity.

## III. Method & Result

2 kinds of experiments were done.

### [Expt.1] *Physarum*'s activity on hemispheric agar

PURPOSE: To determine if gravity affect *Physarum*'s activity.



*Physarum* and oatmeals were put on hemispheric agar as the figures and the photo above show.

The length between *Physarum* and oatmeal is the same, no matter which path they take, because it is a hemispheric agar. Therefore only gravity affected *Physarum*'s activity.

### [Results from Experiment.1]

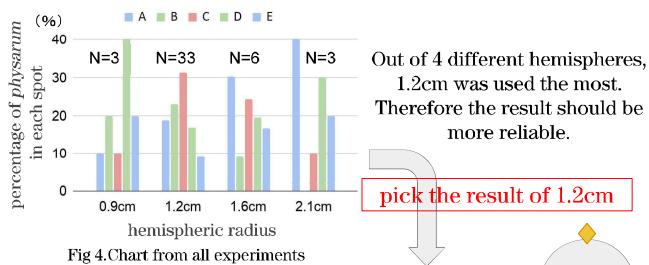


Fig 4. Chart from all experiments

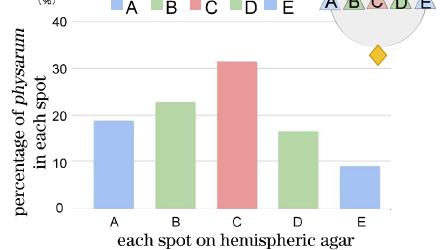
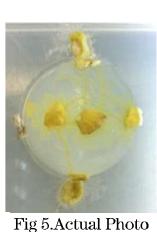


Fig 5. Actual Photo

70% of *Physarum* went towards the top.

The tendency for *Physarum* to go upwards was seen.

### [Expt.2] *Physarum*'s activity on inclinations.

PURPOSE: To find which inclination *Physarum* prefer.

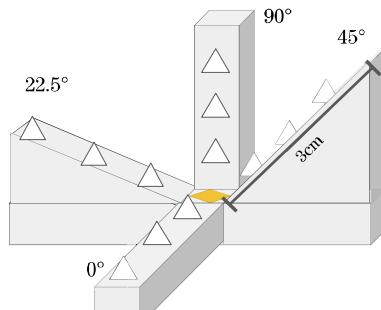


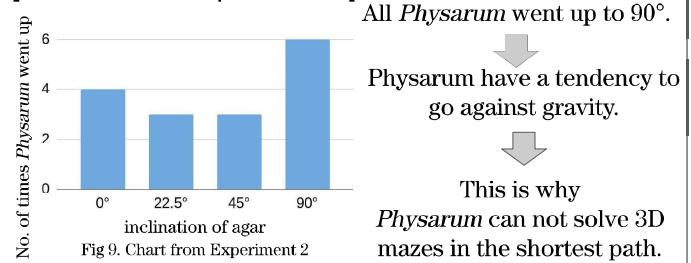
Fig 7. Experimental Device



Fig 8. Actual Photo

*Physarum* was surrounded by 0°, 22.5°, 45°, and 90° inclinations agar as the figures above show.

### [Results from Experiment 2]



## IV. Discussion

There are 2 possible reasons why *Physarum* went against gravity in this research.

### Possible Reason 1

We could not reconstruct the natural environment in our experiments.

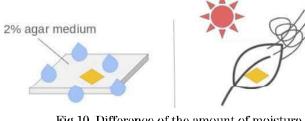


Fig 10. Difference of the amount of moisture

### Possible Reason 2

*Physarum* has benefits of going against gravity originally like:

- leaving their descendants in wider range of locations.
- dividing their habitats from other creatures.

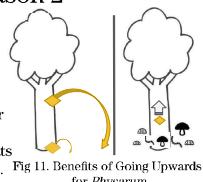


Fig 11. Benefits of Going Upwards for *Physarum*

## V. Conclusion

As a result from two experiments, *Physarum* can not solve 3D mazes in the shortest path because of the tendency of going against gravity.

We expect that moisture, light, and gravity affect *Physarum*'s activity and *Physarum* chooses the most necessary factor of three depending on their needs.

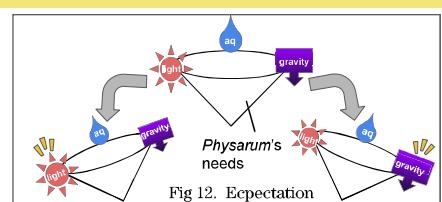


Fig 12. Expectation

## VI. References

- 小林千紘, 粘菌は三次元の迷路が解けるのか, 第59回日本植物生理学会年会 高校生生物研究発表会 プログラム 要旨集, 19,(2018)
- 中垣俊之, 粘菌 その驚くべき知性, PHPサイエンスワールド新書,(2010)
- 中垣俊之, 粘菌 偉大なる単細胞が人類を救う, 文春新書,(2014)

# ハチミツ中の耐糖性酵母の探索

岡山県立津山高等学校 理数科2年6組 坂本 晴菜 杉本 珠花 杉山 可歩 指導者 小西 明雄

## 研究動機・目的

天然酵母に興味があり、岡山県北特産と言える特殊な性質を持つ酵母を発見したと考え、山田養蜂場みつばち農園(鏡野)のハチミツに注目した。ハチミツは糖濃度が高いため、その中には特殊な耐糖性を持つ酵母がいるのではないかと考えた。またこの耐糖性酵母を利用し、新型コロナ禍で需要によって品薄になったドライーストの代替品となるシロップ漬け休眠酵母の開発もしてみたいと思い、本研究を行った。

ドライーストは、一度開封すると休眠から目覚めで劣化していく。



耐糖性酵母を高い糖濃度のシロップ中で休眠させ個包装せずに常温保存可能な発酵ダネとして活用

## 研究背景、全体計画

ハチミツは水分が少ない高張液で、ハチミツ中の菌から水分を奪取することで防腐を防いでいる。しかし、その過酷な環境下でも休眠状態になることで生き伸びることができる耐糖性酵母がいる。



## 全体計画

- ① 非加熱の百花蜜入手  
→ ミツバチが地域内の多種類の花蜜から多種類の酵母を集め。ハチミツが乾燥濃縮されても耐糖性酵母は生き残る。
- ② ハチミツを薄め、休眠状態の酵母を起こして培養する。
- ③ 培養したものが耐糖性酵母かどうか実験で確認する。
- ④ 高い糖濃度のシロップによる耐糖性酵母の休眠化の実現。

## 酵母の培養の問題点と改善(全体計画①、②)

培地の組成はYPD培地(精製水、酵母エキス1%、大豆ペプトン2%、グルコース、クロラムフェニコール 100 µg/mL)を基本とし、グルコースをスクロースに変更し、糖濃度を変えて検討した。

方法①: 耐糖性酵母しかハチミツ中にいないと考え、ハチミツを薄めて液体培地に入れ、培地中のO<sub>2</sub>を増やす振とう培養を行った。

結果①: 増殖速度は速いが、アルコール発酵を行わない酵母のような生物が増殖した。



方法②: アルコール発酵を行わない生物がハチミツ中に生き残っていることがわかったので薄めたハチミツを寒天培地に塗り、コロニーを分離してから液体培地で再培養した。

結果②: 多くのコロニーが得られるが、アルコール発酵能力を持つ酵母を得られる確率は高くなかった。



方法③: 耐糖性酵母を選別するために、ハチミツをスクロース50%液体培地に入れて、静置培養した。

結果③: 増殖速度が遅すぎる上に、アルコール発酵が確認しづらかった。



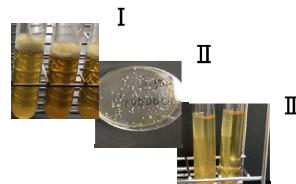
**アルコール発酵を行わない生物もハチミツ中で生き残っていること、アルコール発酵を行う酵母が高い糖濃度中ではなかなか増殖しないことが課題。**

## 改善方法

I ハチミツを薄めた液体培地で静置培養  
→アルコール発酵を行なう酵母を増やす。

II 寒天培地でコロニーを単離する。

III 得られたコロニーを再び静置培養  
→シングルコロニーを増殖し、アルコール発酵を行なうコロニーを確認する。



## 酵母の耐糖性を確認する実験(全体計画③)

改善方法には高い糖濃度で耐糖性酵母を選別する過程が含まれていないため、耐糖性があるかどうかの確認実験を別に行なう必要がある。そこで、以下の実験を試した。

### 実験① キューネ発酵管による耐糖性アルコール発酵能力の確認

→多くの酵母が必要で、

ハチミツから分離中の酵母の増殖が間に合わなかった。

### 実験② プレパラートによる耐糖性アルコール発酵能力の確認

→少ない酵母量でもアルコール発酵の確認ができるようにした。

## 実験① キューネ発酵管による耐糖性アルコール発酵能力の確認

### 方法

- ① 60%スクロース溶液を精製水と混ぜ、糖濃度を調整した。
- ② 重量%で10%に調整した酵母液 10 mLとスクロース溶液 10 mLを混ぜあわせ、キューネ発酵管に入れた。
- ③ 縫栓をして、40°Cのお湯につけ、発酵管の上部に気泡が発生してから、1分ごとに溜まった気体の体積を計測し、気泡が10 mL溜まった時点で計測をやめた。

※まずは、市販の耐糖性がある酵母、ない酵母で実験した。

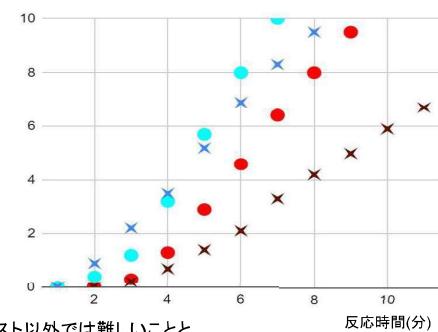


気体の発生量(mL)

### 結果

○耐糖性のある酵母では、糖濃度6%(●)も30%(×)も気体の発生速度は変化しなかった。

○耐糖性のない酵母では、糖濃度6%(●)のときよりも糖濃度30%(×)の方が気体の発生速度が減少した。



耐糖性の差を確認できたが、重量%による調整がドライースト以外では難しいこと、実験に必要な酵母量が多すぎるのが課題。

## 実験② プレパラートによる耐糖性アルコール発酵能力の確認

### 方法

- ① 酵母数  $2.5 \times 10^6 / \mu\text{L}$  に揃えた酵母溶液 20 µLとスクロース溶液 20 µLを混ぜ、最終的な糖濃度を 6%、30% にした。
- ② そのうち 10 µL をスライドガラスに乗せ、カバーガラスをかけ、プレパラートにした。
- ③ 顕微鏡でプレパラート内に気泡がないことを確認した後、約 40°C のお湯で 15 分温めた。その後、1 分ごとに写真を撮影し、変化を観察した。

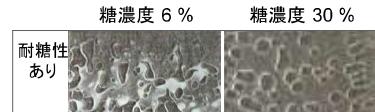


酵母とスクロース入  
フレパラート

### 結果

15 分後

○耐糖性のある酵母では、糖濃度が6%のときも30%のときも、気体が発生した様子が確認できた。



○耐糖性のない酵母では、糖濃度が6%のときは、気体の発生が確認できたが、糖濃度30%のときはできなかった。



→プレパラート実験はキューネ発酵管の 1/2800 の酵母数で発酵による泡と耐糖性の有無を確認できた。

## 今後の展望

○ハチミツから耐糖性酵母を見つけることはまだできていないが、改善した培養方法と判定方法を用いて単離してみたい。



○「耐糖性」の定義の見直しも必要

- (1) 高い糖濃度でも発酵できる能力
- (2) 高い糖濃度にさらされた場合に、素早く休眠して耐える能力

今日は(1)を想定して研究を行ったが、天然酵母入りパン発酵用シロップは、(2)があれば実現可能と考えられる。

## 参考文献

“微生物増殖学の現在・未来”

福井 作蔵・秦野 琢之  
地人書館

耐糖性酵母の特性解明と食品の変敗防止

化学と生物 Vol.30, No.9, 589-596, 1992

自然界から分離した酵母の培養・保持方法に関する研究

瀬見井 純

あいち産業科学技術総合センター・食品工業技術センター 平成28年1月15日発行

ミツバチ、ハチミツなどのイラスト

いらすとや

<https://www.irasutoya.com/>