

# 枯草菌の芽胞の伸縮について

## － 芽胞シートの性質を探る －

石原田 豪 岩木 悠乃 大塚 俊輔 小濱 晴天 町田 宇弥 村山 元気  
兵庫県立神戸高等学校 総合理学科 2年

### 概要

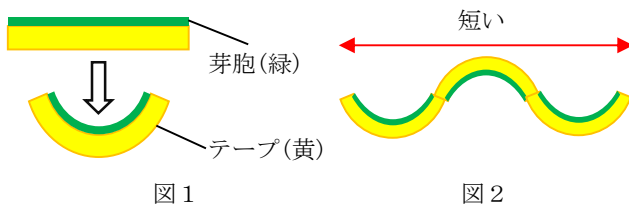
我々は枯草菌の芽胞をシートに塗布することで、湿度を変化させるとシートが伸縮するというを確認することに成功した。さらにそのシートの性質を追求した結果、シートに塗布する芽胞の量と伸縮率の関係を数式化することや、理論を用いて芽胞の量とシートの長さの関係を求めることにも成功した。また、ばね型芽胞シートの形状を変化させることで伸縮方向を制御し、結果グラム単位の張力を得ることに成功した。

## 1. はじめに

### 1.1. 先行研究について

枯草菌の芽胞の伸縮に関する研究は2015年に米コロンビア大学によって初めて発表され、比較的歴史の浅い研究である。そこでは枯草菌の芽胞を塗布して作られたシート(以下芽胞シートと省略する)が、相対湿度(以下単に湿度と呼ぶ)を変化させることで伸縮するということが示されていた。また、芽胞シートを利用した発電方法が提案されていた。

### 1.2. 芽胞シートが伸縮する原理



一枚のシートに芽胞を表だけ塗布(このシートを単独の芽胞シートと呼ぶ)して乾燥させると、図1のように収縮する。これを考えると、図2のように裏表交互に芽胞を塗布(このシートをばね型芽胞シートと呼ぶ)することで、乾燥させると全体の長さが短くなっているということがわかる。

## 2. 研究について

### 2.1. 研究の目的

近年、私達は世界規模でのエネルギー不足に陥っている。その中で我々は枯草菌の芽胞の伸縮を利用して発電ができるという論文を目にした。この発電は菌の特性による力学的エネルギーを電気エネルギーへと変換するという他に類を見ない画期的な方法である。そこで私たちはそこで用いられている芽胞シートの性質について深く調べることにした。

### 2.2. 先行研究と本研究の特徴

先行研究では芽胞シートを用いた「発電」について深く焦点が当てられており、その本質である芽胞シートの伸縮についてはあまり触れられていない。我々の研究は、芽胞シートが持つ性質を追求してみようと試みた研究である。

### 3. 伸縮率とシートの長さの関係について

単独の芽胞シートの伸縮率を曲率で定義した。曲率は曲率半径の逆数で与えられる。曲率を $\alpha$ 、シートの伸びきっているときの長さを $l_0$ とする。

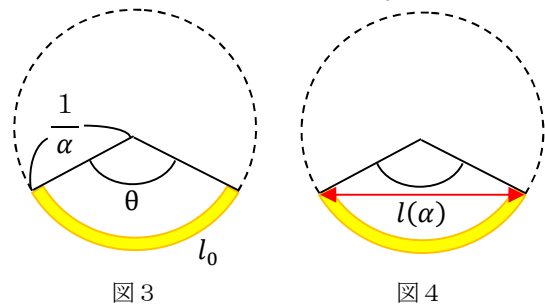


図3の角を $\theta$  ( $0 \leq \theta \leq \pi$ )とすると曲率半径は  $\frac{1}{\alpha}$

なので、 $l_0 = \frac{\theta}{\alpha}$  より  $\theta = \alpha l_0$ 。

図4の長さを  $l(\alpha)$  とすると、

$$l(\alpha) = 2 \frac{1}{\alpha} \sin \frac{\theta}{2} = \frac{2}{\alpha} \sin \frac{\alpha l_0}{2}.$$

分母に $\alpha$ が入っているなので $\alpha \neq 0$ であるが、

$l(0) = \lim_{\alpha \rightarrow +0} l(\alpha)$ と定義すると、

$$l(0) = \lim_{\alpha \rightarrow +0} \frac{2}{\alpha} \sin \frac{\alpha l_0}{2} = l_0$$

のように計算できる。

次に、 $\pi \leq \theta \leq 2\pi$ として考えると

$$l(\alpha) = 2 \frac{1}{\alpha} \sin \frac{\theta}{2} = \frac{2}{\alpha} \sin \left( \pi - \frac{\alpha l_0}{2} \right) = \frac{2}{\alpha} \sin \frac{\alpha l_0}{2}$$

となり、結局  $0 \leq \theta \leq 2\pi$  で

$$l(\alpha) = \frac{2}{\alpha} \sin \frac{\alpha l_0}{2}.$$

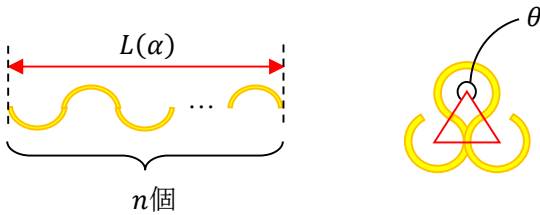


図 4

図 5

図 4 のようにシートを  $n$  個つなぎ全体の長さを  $L(\alpha)$  とすると、

$$L(\alpha) = \frac{2n}{\alpha} \sin \frac{\alpha l_0}{2}.$$

ここで、シートを複数枚つなげると、図 5 以上  $\theta$  を大きくすることができない。このとき赤い三角形は正

三角形なので、 $\theta$  の値は  $\frac{5}{3}\pi$  であり、

$$0 \leq \theta \leq \frac{5}{3}\pi \Leftrightarrow 0 \leq \alpha \leq \frac{5\pi}{3l_0} \text{ より、}$$

$$L(\alpha) = \frac{2n}{\alpha} \sin \frac{\alpha l_0}{2} \quad \left( 0 \leq \alpha \leq \frac{5\pi}{3l_0} \right). \quad (1)$$

これより、芽胞の量  $m \cdot$  湿度  $h$  とシートの長さ  $L$  の関係を求めるにはそれぞれ芽胞の量  $m \cdot$  湿度  $h$  と曲率  $\alpha$  の関係を求めればよい。

## 4. 予備実験

### 4.1. 目的

枯草菌の芽胞が湿度によって収縮する様子を顕微鏡で観察する。また、芽胞をシートに塗布し湿度を変化させると伸縮するかを確認する。

### 4.2. 方法

枯草菌の株を入手し液体培地で培養した。芽胞が液体培地内に十分繁殖してから遠心分離し芽胞を採取した。得られた芽胞を純水で薄めた液(以下芽胞液と略す)をスライドガラスに垂らし、乾燥させ水分を飛ばした。これをプレパラートとし、光学顕微鏡を倍率 5000 倍にして観察した。湿度を変化させるために息を吹きかけた。

芽胞液をシャーレに入れ、中に 12 mm 四方に切ったポリイミドシートを沈めた。シートとシャーレの間に隙間があると両面に芽胞がついてしまうため、隙間ができないように沈める必要がある。シートを沈めたシャーレを 30 度で三日間放置し、水分を蒸発させた。

## 4.3. 結果

以下は顕微鏡で観察した様子である。

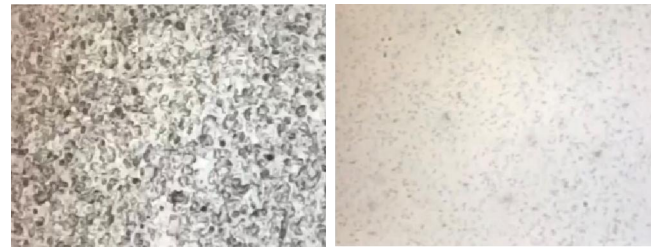


図 6 息を吹きかける前

図 7 息を吹きかけた後

図 6, 図 7 からわかるように湿度を増加させると全体の色が薄くなっていることがわかる。このことはすなわち芽胞が膨張していることを示す。また、シートも同様に湿度を変化させることで伸縮を示した。先行研究ではシートに芽胞を塗布する際に化学糊を混ぜていたが、混ぜずともシートに芽胞を塗布すると十分に伸縮させられることが分かった。

## 4.4. 考察

芽胞の色が薄くなっていることから  $Z$  軸方向にも伸縮していることがわかる。しかし、枯草菌自体が湿度により伸縮したとしてもそれを塗布したシートが伸縮するという事実は自明ではなく、その点については未解明である。シートという平面な作りではこの  $Z$  軸方向の伸縮が影響しているかはまだ明らかになっておらず、仮に  $Z$  軸方向の伸縮がシートの伸縮に作用していない場合、エネルギーをロスしていることが考えられる。

## 5. 本実験 1-1

### 5.1. 目的

塗布する芽胞の量と曲率の関係を調べる。これは (1) 式より芽胞の量とシートの長さの関係の式を出すことができるためである。

### 5.2. 方法

まず芽胞シートを作成した。採取した芽胞を電子天秤で 0.1 g ~ 1.0 g まで 0.1 g 刻みで量り取った。それを滅菌したチューブ 10 本にそれぞれ入れ、全体が 15 ml となるように脱塩水を加えて芽胞液を作成した。次にポリイミドシートを 12 mm 四方の大きさに切ったものを 100 枚用意した。滅菌シャーレを 10 個用意し 10 枚ずつシートを入れ、その上から芽胞液を浸した。三日程度空気中で放置し乾燥したことを確認して、シートをはがした。次に伸縮率の測定を行った。シートを数分空気中(湿度約 45%)でシートを放置し、縮むことを確認した。縮んだシートを 5 mm 方眼のラボノートに置き、上から写真を撮った。写真を印刷して曲率半径を計測した。

### 5.3. 結果

結果は以下のとおりである。ただし0.7gは実験の失敗によりデータをとることができなかった。

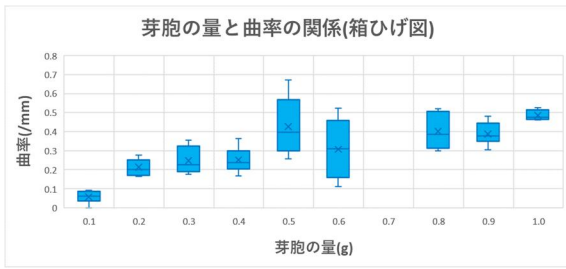


図8 芽胞の量と曲率の関係を箱ひげ図で表したグラフ

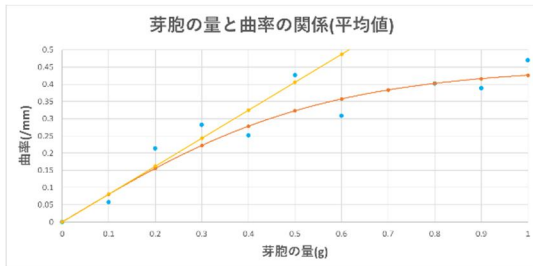


図9 芽胞の量と曲率の平均値をプロットした散布図(青)

図8は芽胞の量に対応する曲率のデータを箱ひげ図にしてあらわしたものである。図9は芽胞の量と、それぞれに対応する曲率の平均値をプロットした散布図(青点)である。黄色の直線は、芽胞の量が0gから0.5gである六つのデータのみを使用して最小二乗法を用いて切片を0にした直線である。直線の式は $y = 0.8123x$ で、 $R^2$ 値は0.9134であった。オレンジのグラフは $y = 0.5 \tanh(2 \cdot 0.8123x)$ である。

### 5.4. 考察

図8から芽胞の量と伸縮率には正の相関があることが分かる。また、黄色の直線から、芽胞の量が0gから0.5gの間では比例関係にあることがわかる。しかし、芽胞の量が0.5gを超えると比例関係が崩れていることがわかる。これは、ある程度シートが縮んだ後は曲げるために必要な力が急激に増加し芽胞の量が増加したとしても曲率が増加しにくくなるためであると考えられる。また、オレンジ色の式すなわち $\tanh x$ の式で近似できる理由を裏付けるための理論はまだ構築できていない。

## 6. 本実験1-2

### 6.1. 目的

塗布する湿度と曲率の関係を調べる。これは(1)式より湿度とシートの長さの関係の式を出すことができるためである。

### 6.2. 方法

本実験1-1で作成した、芽胞を0.3g含む芽胞液で浸して作ったシート二枚を用いて行った。ピンセットでシートをはさみ、真空デシケーター内に固定した。空気中の湿度より湿度を上げる場合は水が入

ったシャーレを入れた。湿度を下げる場合はデシケーター内を真空にした。このようにして湿度を調整し、シートを写真に収めて曲率半径を計測した。計測方法は本実験1-1と同様である。

### 6.3. 結果

機械の都合上、湿度0%~27%、78%~100%の間の測定はできなかった。

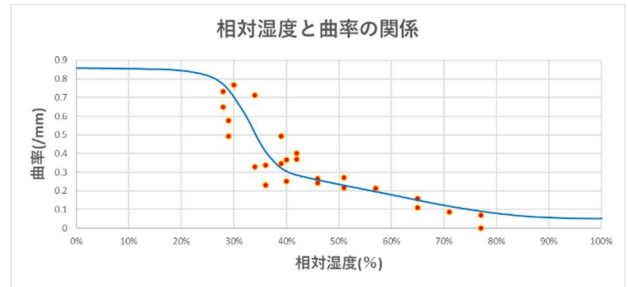


図10 湿度に対応する曲率をプロットしたグラフ

図上の青いグラフは結果から予想した関係である。

### 6.4. 考察

図10より湿度と曲率には負の相関があることがわかる。しかしながらその関係は複雑であり、線形近似は通用しない。それは実験1-1で芽胞の量を増やしても曲率が増加しなくなったことと同じように、湿度を20%以下にしても曲率が変化しないことが見込まれるからである。このことは湿度が80%以上のときも同様である。このことから我々は青いグラフに従うのではないかと考えたが、そのグラフを数式化することはできなかった。曲率が大きく変化している範囲は湿度が30%から40%のときである。これはこのシートが空気中の湿度から10%ほど操作することで大きく伸縮することを示しており、実用化に適していると考えられる。

## 7. 本実験2

### 7.1. 目的

芽胞シートの伸縮方向を制御する。

### 7.2. 方法

まず初めに単独の芽胞シートについて考えた。その場合、シートの形状、またその大きさを変えても伸縮方向は異なっていた。よって、ばね型芽胞シートについて考えることにした。まず、8mm四方の正方形を12個交互に塗布したばね型芽胞シート(i)を作った。

### 7.3. 結果・考察

芽胞の伸縮によって予想していた方向にシートは歪んだ。しかし、先行研究のような蛇腹状に伸縮することはなかった。このことはシートが伸縮にかかるエネルギーが少ないほうに曲がろうとすることから起きる。よって、正方形を縦に並べたような形のばね



型芽胞シートでは正方形の対角線を通るように曲がろうとするのは容易に想像できる。これを踏まえて新たな形状を模索した。

#### 7.4. 方法(改)

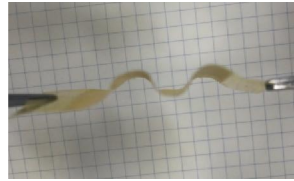
40 mm×10 mm の長方形を交互に 4 個塗布したばね型芽胞シート(ii)を作った。この形状ではシートは長方形の短辺で曲がるのが予想される。また、以前と同様に対角線で曲がったとしても正方形の場合と違い歪みは小さくなると考えられる。

#### 7.5. 結果・考察(改)

シートは予想していた方向に伸縮し、歪みも見られなかった。よって、単独の芽胞シートでは伸縮方向を制御することはできなかったが、ばね型芽胞シートではシートの形状を工夫することで全体としての伸縮方向を制御することができた。



(i)のシート



(ii)のシート

#### 7.6. 追実験

40 mm×10 mm を 8 個交互に塗布したばね型芽胞シートを用いて張力を測る実験を行った。まず、段ボール箱を用いて密閉空間を作った。その中でばねばかりをスタンドに吊り下げ、その先端にシートを取り付けた。この時、シートは三枚並列に束ねたものを一枚のシートとした。次に密閉空間内で電気ポットを用いて水を沸騰させることで湿度を 90% 以上とした。伸び切ったシートの下端をテープで固定し段ボール箱を外し、湿度を室内  
段ボール箱の写真  
同じ湿度約 45% し、シートを収縮させ、ばねばかりの目盛りをよんだ。



#### 7.7. 追実験の結果・考察

張力は平均で 2.3 gw となった。ここで注目してもらいたいことは gw という単位でエネルギーを得ることができたという点である。これは驚くべき事実である。というのも今回の実験でシートに塗布した総量は僅か約 0.171 g だからである。枯草菌の芽胞は

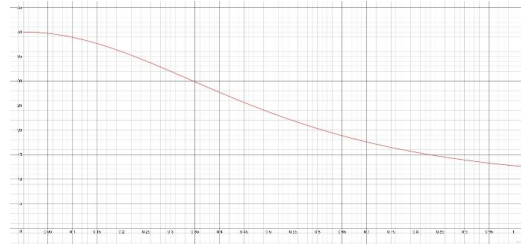
非常に容易に大量に培養することができる。また、シートも非常に安価で今回の実験系のようなものならば大量生産し、実用化も可能であると考えられる。

#### 8. 伸縮率とばね型芽胞シートの長さの関係

芽胞の量  $m$  と伸縮率  $\alpha$  の関係式は、湿度が約 45% のとき  $\alpha = 0.5 \tanh(2 \cdot 0.8123m)$  とあらわすことができる。また、伸縮率とシート全体の長さの関係式は(1)式であらわすことができた。従って芽胞の量とシートの長さの関係式は以下のようになる；

$$L(m) = \frac{4n}{\tanh(2am)} \sin\left(\frac{l_0}{4} \tanh(2am)\right) \quad (a = 0.8123)$$

この式をグラフ化すると以下のようになる。



#### 9. 展望

我々は芽胞の量とシートの長さの関係、また湿度の影響について追究した。だが、湿度を下げることができなかったなど、未だ課題は残る。また、ばね型芽胞シートでどの辺りまでフックの法則が成り立つのか調べてみるのも面白いだろう。今後は芽胞の伸縮性の利用についても考えていきたい。

#### 10. おわりに

我々は、先行研究で枯草菌という常在菌が芽胞を形成することで伸縮し、さらにそれを利用して発電ができるという驚異的な結果に興味を抱き研究を始めた。その結果、芽胞の量とシートの長さの関係式を得ることができた。さらに、シートの形状を変えることでばね型芽胞シートの伸縮方向を安定して制御することに成功するなど、多少なりとも先行研究に次ぎ貢献することができたのではないかと考える。

#### 11. 謝辞

本研究を遂行するにあたって、温かく見守って下さり、また貴重なアドバイスを下さった、中澤先生、繁戸先生、サイエンスアドバイザーの皆さん、本当にありがとうございました。

#### [参考文献・参考URL]

[1] Scaling up nanoscale water-driven energy conversion into evaporation-driven engines and generators, <https://www.nature.com/articles/ncomms8346>

[2] 芽胞(細菌孢子)の微細構造 [https://www.jstage.jst.go.jp/kenbikyoku1950/23/1/23\\_1\\_9/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/kenbikyoku1950/23/1/23_1_9/_pdf)