

化学

左上一箇所でホチキス留め

受付番号: SJ1157  
エントリーID: 3130

筑波大学

朝永振一郎記念

## 第19回「科学の芽」賞 応募用紙

受付番号 : SJ1157  
応募部門 : 中学生部門  
応募区分 : 個人応募  
題名 : PETの熔融紡糸法の工夫  
サブタイトル : ー～より良い繊維を目指して～ー  
学校名 : 茨城県 県立並木中等教育学校  
学年 : 2年生  
代表者名 : 田中 祐吉

※ 個人情報保護のため、入力された項目から抜粋して出力しています。

## 1 研究の動機

一部のプラスチックの性質として、熱を加えると徐々に柔らかくなり粘度が下がるというものがある。これを熱可塑性という。側面に穴をあけた缶に熱可塑性のあるプラスチックを入れて、モーターで回転させながら熱することで、柔らかくなったプラスチックを遠心力で穴から出して繊維状にするという、簡単な繊維化の方法を知った。実際に実験したところ、繊維化できたが、衣服や釣り糸、フィルターなどに使える繊維とは異なり、様々な問題点が見られた。そのため、簡単な装置でも理想的な繊維を作ることができるようにするにはどのような装置でどのような実験をすればよいのかに興味を持ち、この研究を始めた。

## 2 研究の背景

熱可塑性を持った樹脂を熱可塑性樹脂といい、PET(ポリエチレンテレフタレート)はこの中に含まれる。そのため、この性質を用いて、ノズルの開いた容器の中に PET を入れて熱し、柔らかくなった PET をノズルから押し出して細長く繊維化する熔融紡糸という方法がある。この方法によって、PET のリサイクルとしてポリエステル製の製造が行われている。熔融紡糸には、圧力をかけてノズルからプラスチックを押し出す方法と、容器を回して遠心力によってノズルからプラスチックを押し出す方法があり、圧力による方法は様々な工場で実用化されているが、遠心力による方法では、連続的かつ繊維径が均一な繊維を作ることにはまだ難しい。

熔融紡糸は、他の紡糸法に比べて、特殊な溶剤を使わないため環境にいいというメリットや、効率よく速く紡糸できるというメリットがある。そのため、速く、かつ質の高い繊維を製造できる熔融紡糸法の開発が求められている。

## 3 研究の目的

熔融紡糸の遠心法によってできるだけ良い PET の繊維を取り出すことを目的とする。だが、今の方法(実験1での方法)では、作られた繊維に問題があるため、理想的な繊維を作るために、以下の要素を追求する。

- ・白い繊維にする。
- ・繊維の太さの均一性を高める。
- ・一本一本が長く、連続した繊維を生成できるようにする。
- ・同量のPET からできるだけ多くの繊維を取り出す。

## 4 仮説

- ・白ではない繊維は、炭化しているために白くなくなっていると考えられるので、炭化を防げばよいと考えた。
- ・缶に開ける穴の大きさや缶の回転数をコントロールすることによって、太さを十分にし、また連続的な繊維を作れるようになって考えた。
- ・缶に開ける穴の数や缶の回転数をコントロールすることによって、同量の PET からできるだけ多くの繊維を取り出すことができると考えた。ただし、この方法には限界があり、穴の数を増やせば際限なく紡糸できるというわけではなく、穴の数があるところまで増えると頭打ちになると考えた。

## 5 実験の方法・結果・考察

### 【実験1】



図1 装置の様子

#### (1) 目的

PET の溶融紡糸の実験の方法を改良し、安全性を確認する。

#### (2) 方法

- ①3g のPET を電子天秤で量る。
- ②PET を切って缶に入れられる大きさ(約1cm四方の四角形)にする。(図2)
- ③PET を缶にいれる。
- ④アルコールランプに点火してモーターを回し始めると同時にストップウォッチで時間を測り始める。
- ⑤回転を始めて5分たったら止める。ただし、5分たつ前に煙が出始めた場合は、缶の中身が燃焼し始めた証拠と言えるので、装置をその時点で止める。

#### (3) 結果

缶を回し始めてから1分50秒で、缶の側面の穴から白い煙が出てきた後、2分10秒で炎が出てきたため止めた。

黄色～茶色の粒がたくさんあった。(図2)

また、網状で強度測定のしにくい繊維があった。(図2)

缶の側面から炎が出たときに缶の外側にススがついたため、黒くなっている。(図3)

ガラス容器の内側で、缶の穴の高さと同じ高さに黄色い粒がたくさんあった。(図4A)また、黄色い粒の内側には、網状の繊維がついて輪状になっていた。(図4B)

アルコールランプの周りには、缶の穴から出てガラス容器にぶつかり容器の下の方に落ちた繊維があった(図4C)。また、ガラス容器から吹きこぼれた繊維(図4D)もあった。

缶の内側全体に黄色から茶色の粉がついていた。缶の底の方に黒くつやのある物体があった(図6)。



図2 繊維の様子



図3 実験直後の装置の様子



図4 実験後のガラス容器(上から)



図5 実験後のガラス容器(横から)



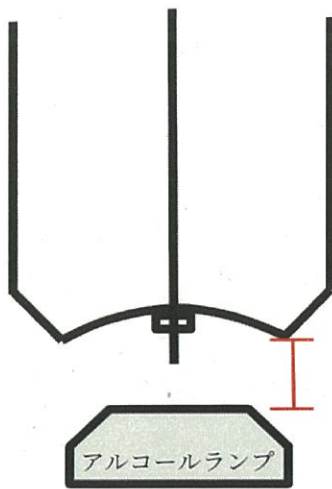
図6 実験後の缶の中身

#### (4) 考察

缶の側面から炎が出た原因として、缶とアルコールランプとの距離が近すぎて温度が高くなり、開始2分10秒で、PET の熱分解でできた気体に引火したことが考えられる。その時、缶はほぼ密閉空間なので不完全燃焼が生じ、缶の底についたプラスチックが炭化し、また穴から出たプラスチックが炭化して黄色い粒や繊維となりガラス容器についたことが考えられる。



【実験2】



(1) 目的

実験1で、缶の側面の穴から炎が出たのは、アルコールランプと缶の距離が短く、PET が分解してできた気体に発火しやすかったからと考えられる。そのため、黄色い繊維や粒などの出ないアルコールランプと缶の距離を見つける。

(2) 方法

アルコールランプと缶の距離を 1cm、2cm、3cm、4cm と変えて、缶の中に 3g のPET を入れ、できた繊維の変化や缶・ガラス容器の様子を調べる。








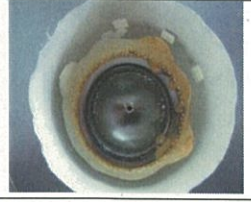
このとき、図の赤い部分の長さを「アルコールランプと缶の距離」とする。

(3) 仮説

アルコールランプとの距離に近いほど黄色い繊維や粒が多くなると考えられる。

図7 アルコールランプと缶の距離の測定方法

(4) 結果

	実験2-1	実験2-2	実験2-3	実験2-4
繊維	 0.75g	 0.91g	 0.60g	 0.75g
缶の中身				
その他	開始2分20秒で白い煙が出始めた。	開始2分で白い煙が出始めた。	開始1分50秒で白い煙が出始めた。	開始後2分10秒で白い煙が出始めた。

(5) 実験2 考察

2-1～2-4の結果の共通点:

- ・白い粉がついた
- ・炭化したプラスチックが缶の内側に残った
- ・缶の底が黒く、ツヤツヤしている
- ・1分以上経過したのち白い煙が出てきた

このことから、缶の底や缶の側面内側に残ったプラスチックには炭素が含まれていると考えられる。缶の内側に残ったプラスチックは炭化しているため黄色く見え、缶の底の方について少量のプラスチックの外側の部分は完全燃焼して炭化しなかったが、内側の部分は酸素が足りず炭化したために、黒くツヤのある物体になったと考えられる。

白い煙が出てきたのは、プラスチックが熱分解したことでできた気体が発生したからだと考えられる。PET が分解するとメタンや二酸化炭素、水などが多く発生すると考えられる。

実験2-3が、融け出した部分が一番少なかった理由は、炎から遠く、アルコールランプの外炎にもあまり触れていなかったため、温度が他と比べて低く、また急な温度上昇を防げたことが考えられる。中に残ったプラスチックの炭化部分が少なく、白い煙が出なかったのも、実験2-3の、缶とアルコールランプの距離が3cmの場合が一番繊維の炭化を防げ、黄色い繊維や粒をなくせると考えられる。

### 【実験3】

#### (1) 目的

缶の側面に開ける穴の数と、同量のプラスチックから得られる繊維の相関を調べる。

#### (2) 方法

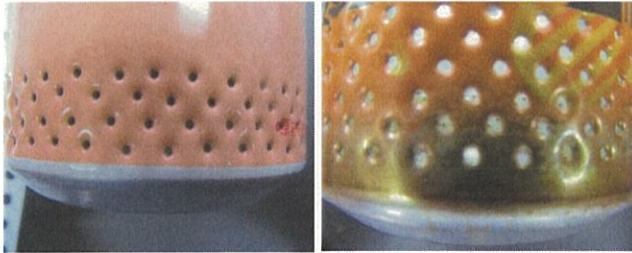


図8 穴160個

図9 穴240個

図8、図9のように、穴どうしの距離は5mmのまま、穴を開ける数を変える。そのため、穴が開いている高さが穴の数に比例するようになっている。

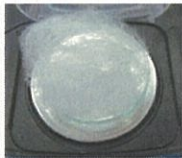
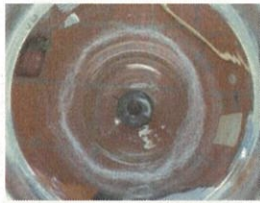
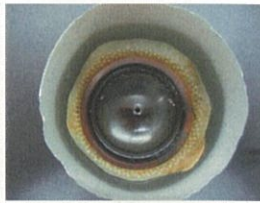
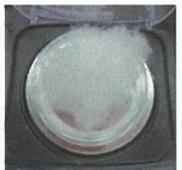


穴を開ける数を4列160個(実験3-1)・6列240個(実験3-2)と増やして、それぞれ炭と缶の距離3cmにそろえて、PETの繊維化をする。

実験後、繊維・ガラス容器・缶の中身を観察し、繊維の質量を量る。

#### (3) 仮説

穴の数に比例して繊維の量は増えると考えられる。実験2-3では、0.6gほどの繊維が取れたため、実験3-1では約1.2g、実験3-2では約1.8g繊維化できるのではないかと予想した。

#### (4) 結果

	繊維の様子	ガラス容器の中身	缶の中身
実験3-1	 1.29g		
実験3-2	 1.25g		

#### 【共通点】

- ・実験3-1でのガラス容器も、実験3-2でのガラス容器も、内側に向かって層状に繊維が重なっていた。
- ・実験3-1でも3-2でも、缶の内側に高さ3~5cmのプラスチック板が残っていた(缶の中身)。

#### 【相違点】

- ・実験3-2での缶の底の色は、実験3-1での缶の底の色よりも薄かった。
- ・実験3-1のプラスチック板は、側面の穴を完全に囲んでいたが、実験3-2のプラスチック板は、一部、プラスチック板からはみ出している穴があった
- ・実験3-1では白い粉が出たが、実験3-2では白い粉が出なかった。

#### (5) 考察

実験3-1は、缶の中身の炭化が進んでいたのに対して、実験3-2は、3-1よりも缶の底が炭化しておらず、白い粉も付着していなかったことから、実験3-2では、高いところまで穴が開いていたために、上の方の穴には遠心力によってプラスチック板が張りつかず、空気穴となって酸素の供給をしたと考えられる。

実験3-1でできた繊維は予想通り1.2gほどだったが、実験3-2でできた繊維は、穴が多いにも関わらず予想よりも少なく1.25gだったことから、空気穴ができたことによってPETの一部が完全燃焼し、穴から固体として出る繊維の量が減少したと考えられる。



## 【実験4】

### (1) 目的

缶に開ける穴の大きさと、繊維の連続性・繊維の太さの均一性の関係を調べる。

### (2) 方法

缶とアルコールランプの距離は 3 cm とし、缶に開ける穴の大きさを 0.5 mm (実験4-1)、1.0 mm (実験4-2)、1.5 mm (実験4-3) と変えて、装置を使った熔融紡糸の実験をする。繊維が出なくなったら止める。その後、それぞれの実験で、ガラス容器に付着した繊維の長さや太さを測定し、その平均をとる。ガラス容器についた繊維の長さを計測するとき、次のような方法を用いる。

- ① ガラス容器に付着した繊維には二種類あり、層状に連なる部分 (A) とガラス容器の中心に向かって斜めに伸びている繊維 (B) がある (図10)。B がこのように傾斜している理由は、缶から繊維が出る時に缶の回転の影響を受けるためである。A の部分は層状に連なっていて一本一本の繊維の長さを測定することが難しいため、B の付け根から先端までの長さをノギスで測る。
- ② ガラス容器に付着したすべての繊維の長さを調べるために、予め 30 度毎に a~l の印をつける。(図11)
- ③ に示す a~l の 12 か所の繊維の長さを計測し、その平均をとる。
- ④ a~l の 12 か所の、層状に連なっている繊維と内側に向かって斜めに伸びている繊維の太さをそれぞれノギスで計測する。a の部分の層状繊維の太さを a-1、a の部分の内側に伸びる繊維を a-2、b の部分の層状繊維の太さを b-1、b の部分の内側に伸びる繊維を b-2 というように、計 24 か所計測する。
- ⑤ それぞれの実験において 24 か所計測した繊維の太さのデータの分布図をもとに太さの均一性を比較する。計測後繊維の質量を量り、缶の中身や繊維を観察する。

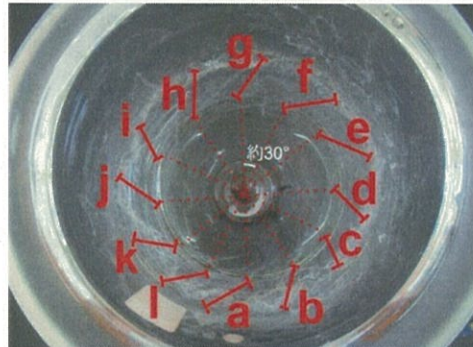
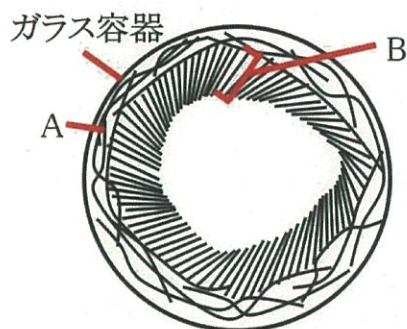


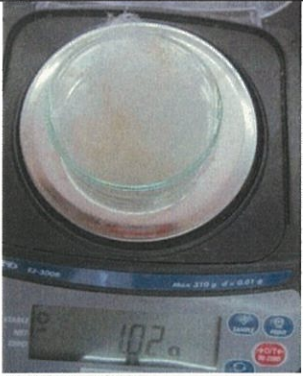
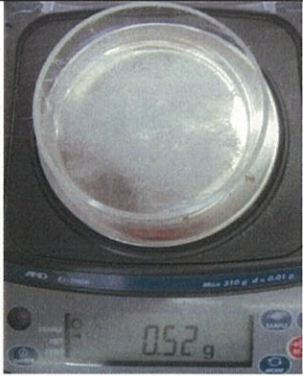
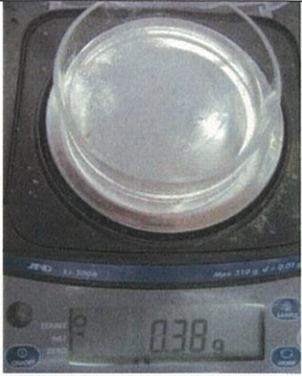
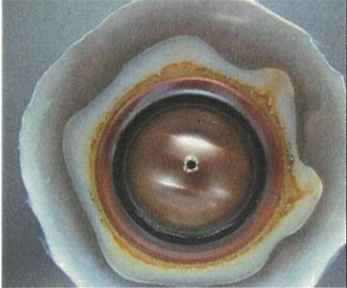


図10 ガラス繊維の内側に付着した繊維 図11 計測する場所 12 か所

### (3) 仮説

穴の大きさが小さい場合、繊維が缶から出たときに、繊維の断面積が小さくなるため、周囲の空気によって冷えやすくなる。そのため、繊維が穴から出たときに穴の大きさが大きい場合よりも早く冷え、繊維が切れにくくなる。また、穴が小さいほど、穴から繊維が出る時に遠心力の影響をより強く受ける。よって、穴の大きさが小さくなるにしたがって繊維の連続性と太さの均一性が高くなると考えた。

一方、穴の大きさが大きいほど一度に穴から出る繊維の量が大きいため、繊維の質量は大きくなると考えられる。

(4) 結果

実験4-1 穴の直径 0.5 mm	実験4-2 穴の直径 1.0 mm	実験4-3 穴の直径 1.5 mm
 <p>繊維 (1.02g) 繊維の一部が茶色である。</p>	 <p>繊維 (0.52g)</p>	 <p>繊維 (0.38g) 繊維の量は一番少なかった。</p>
 <p>缶の中身</p>	 <p>缶の中身</p>	 <p>缶の中身 炭化度が低い。</p>

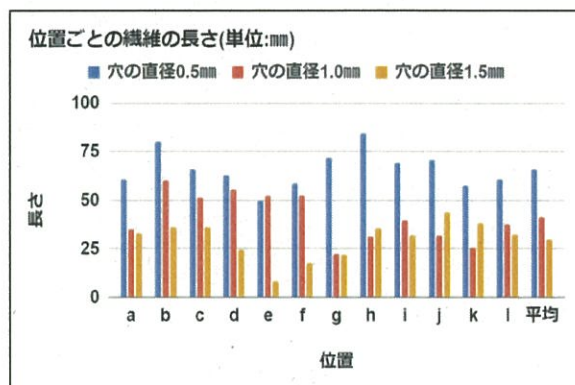


図12 位置ごとの繊維の長さ

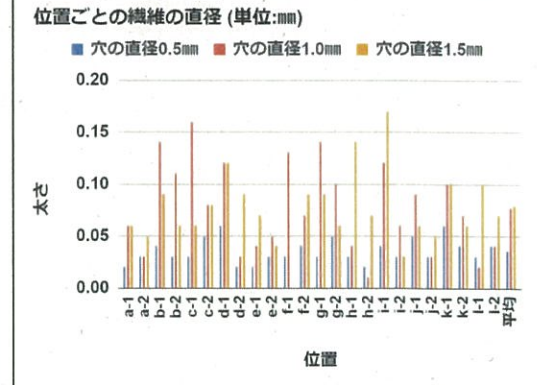


図13 位置ごとの繊維の直径



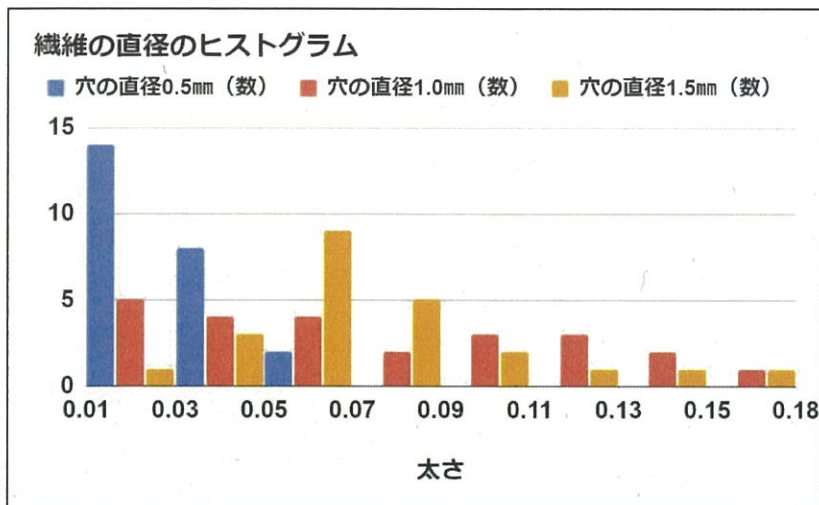


図14 図13のデータのヒストグラム

【共通点】

・どの実験でも、高さ 4 cm～5 cmのプラスチック板が内側に残った(缶の中身)。

【相違点】

- ・繊維の質量は大きい順に穴の直径が 0.5 mm、1.0 mm、1.5 mmの場合。
- ・実験4-1の繊維は、他の実験より黄色い粒が多かった。
- ・実験4-3の缶の中身は、他の実験より炭化していなかった。また、缶の中に残ったプラスチックが少なかった。
- ・繊維の長さの平均は長い方から穴の直径が 0.5 mm、1.0 mm、1.5 mmの場合(図12)。
- ・繊維の直径の平均の大小関係は、穴の直径の大きさの順番と同じ順番だった。
- ・穴の直径が 1.0 mmの場合のみ、太さのばらつきが多かった(図14)。
- ・穴の直径が 0.5 mmの場合は繊維の太さは 0.01 mm～0.03 mmに集中し、穴の直径が 1.5 mmの場合は 0.07 mm～0.09 mmに集中していた(図14)。

(5) 考察

繊維の長さは、穴の直径が短いほど長かったことから、繊維が細いほど、連続性を増すことができると考えられる。また、穴の直径が 0.5 mmのときの繊維の太さの標準偏差は、他の実験の標準偏差に比べて明らかに小さかったため、穴の直径が細く 1 mmより小さい場合は、太さの均一性がある程度保持されると考えられる。

一方、繊維と、の缶の中身の様子より、穴の直径が小さいほど炭化がより激しいと考えられる。これは、穴の直径が小さいほど缶の中への酸素の供給が乏しくなるためと考えられる。

また、穴の直径が小さいほど繊維の質量は多かったことから、穴の直径が大きい場合、遠心力で穴から出るときに、空気と触れる面積が大きいために PET がそこで冷やされ固まるが多かったことが考えられる。



## 【実験5】

### (1) 目的

缶に開ける穴の密度と繊維の質量の関係を調べる。

### (2) 方法

高さで結果が変わらない範囲で穴を増やし実験するために、穴の高さが、これまでの実験で缶の内側に残ったプラスチック板の高さ(3~5 cm)を超えないように穴を増やす。実験1での穴の並び方に穴を加えて、穴の高さが変わらないように穴の数を2倍にする(実験5-1)。実験5-2では、図15・図16の穴の並び方を縦に2つ積み上げる形で穴を開ける(図17)。

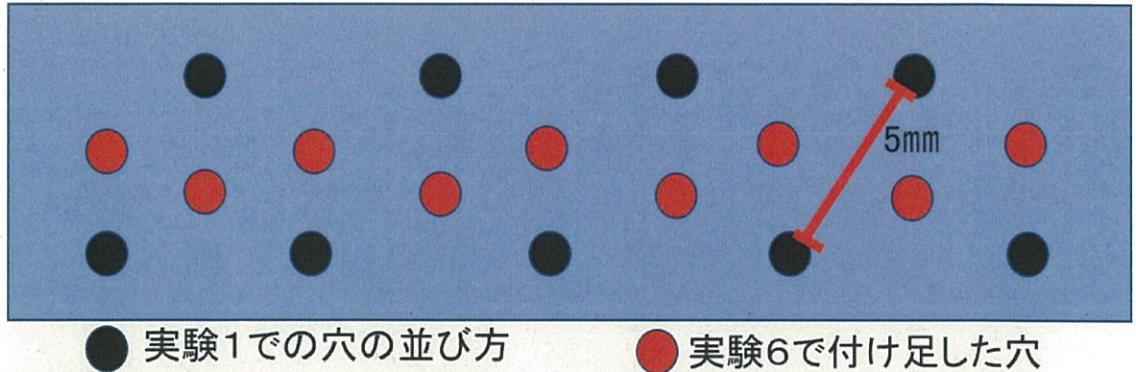


図15 穴の開け方(模式図)

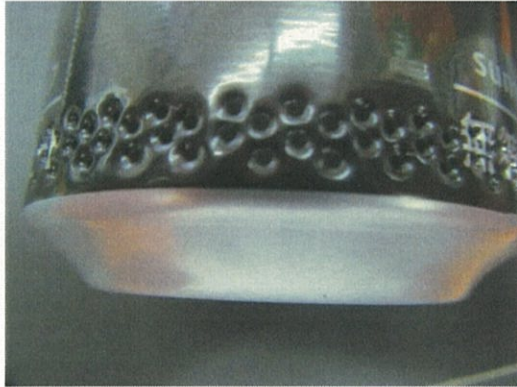


図16 実験5-1(穴 160 個)

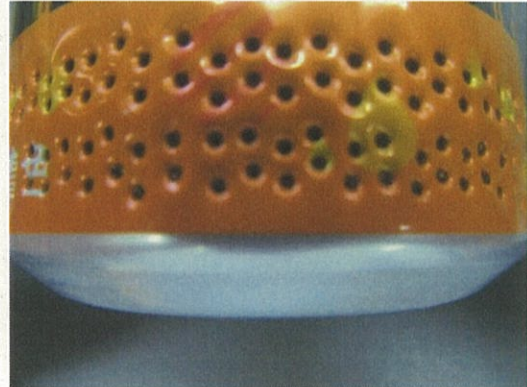



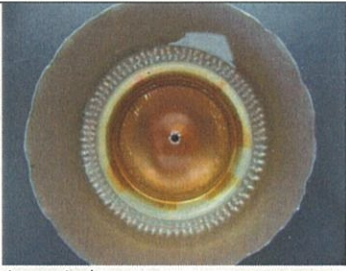


図17 実験5-2(穴 320 個)

### (3) 仮説

穴の数が多くなるほど、繊維の量は多くなると考えた。ただし、穴の数が多いほど缶の中のPETが完全燃焼しやすくなるため、必ずしも穴の数に比例して繊維を取ることができるとは考えなかった。

(4) 結果

実験5-1 穴 160 個	実験5-2 穴 320 個
 <p>繊維 (1.16g)</p>	 <p>繊維 (1.44g)</p>
 <p>缶の中身 ほぼ炭化していなかった。</p>	 <p>缶の中身 実験5-1より炭化していたが、実験2と比べ炭化度は低い。</p>

【共通点】

・実験後の缶の中身は、いずれも、実験2や実験3よりも炭化していなかった。

【相違点】

- ・実験5-1では、開始後約3分40秒で、ガラス容器に付着していた繊維の大部分が缶に巻き取られて大きな塊となった。
- ・実験5-1では、缶の中身はほぼ全く炭化していなかったが、5-2では、缶の底の部分に多少の炭化が見られた。
- ・実験5-2では、繊維が1.44gと、過去最多の量になった。

(5) 考察

実験2-3と5-1、3-1と5-2の比較から、穴の密度を増やすと繊維の量が増加することが分かった。ただし、穴の数と繊維の量が比例するわけではなく、穴が増えていくにつれて内側のプラスチックの炭化度が落ちていくため、完全燃焼するPETが多くなり、比例した場合より量が小さくなる。

また、実験5-1と3-1、5-2と3-2の比較から、プラスチック板が穴の内側をふさぎきれない高さの穴が出現しない範囲であれば、穴を開ける場所が上に高く広がっているほど、繊維の量は多くなることが分かった。



## 6 まとめ

この研究から、PET を遠心力を用いた熔融紡糸によって行う実験をするときに、どのような条件にすればよいのかを把握することができた。それらを次に示す。

- ・実験2から、黄色い繊維をなくして白い繊維にするのに最適な缶とアルコールランプの距離は約 3 cm である。

- ・実験3・5から、穴を増やす場合、繊維の量は多くなるが、缶の内側への酸素供給がより多くされるため、完全燃焼する PET が増え、繊維の量が少なくなることがある。だが、穴の開けている場所の面積を広げるよりも、穴の密度を高くした方が多く繊維が取れることが分かった。

- ・実験4から、缶に開ける穴の直径を短くした場合、繊維の連続性を高めることができる。

これらのことから、この研究において最も総合的によいと思われる実験の条件は、缶とアルコールランプの距離3cm、穴の直径0.5mm、実験前に缶の中に酸素を満たす、穴の開け方は実験5-2と同じ方法で 320 個、という条件だと考えた。

## 7 今後の課題

実際に繊維を製品として活用できるようにするためには、熔融紡糸した後の繊維に力を加えて引っ張り、繊維の中のポリマーの並び方をまっすぐにする必要がある。これを延伸という。今後は、さらに強度の高い繊維を目指すために、延伸という工程も視野に入れる必要がある。

また、今の実験方法では、白く連続性があり一定量のプラスチックから効率よく繊維化できるが、ガラス容器に付着した繊維は絡まっていて、一本の糸として使用することは難しい。太さの均一性も実用化できる段階には至っていない。そのため、これらの要素を解決するために実験条件を工夫し、圧力を利用した熔融紡糸と同等の繊維を遠心力でも製造できるようにしていきたい。

## 8 参考文献

PET の高速熔融紡糸 村瀬泰弘

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/fiber1944/47/10/47\\_10\\_P564/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/fiber1944/47/10/47_10_P564/_pdf)

遠心力を利用したナノファイバーの紡糸に関する研究 野口裕之・長田卓也

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/pscjspe/2013S/0/2013S\\_337/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/pscjspe/2013S/0/2013S_337/_pdf)

新規な遠心紡糸装置 山洞輝和・大谷朝男

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/tanso1949/2006/225/2006\\_225\\_344/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/tanso1949/2006/225/2006_225_344/_pdf)

耐熱性「ポリイミド繊維」の開発 三河繊維技術センター

[https://www.aibsc.jp/nsj/01gijyutsu/150701\\_01/index.shtml](https://www.aibsc.jp/nsj/01gijyutsu/150701_01/index.shtml)

遠心紡糸装置及び遠心紡糸方法 <https://patents.google.com/patent/JP5656297B2/ja>