

# 形状加工から迫るオランダの涙の謎

静岡県立科学技術高等学校  
自然科学部 3年 平井萌乃 松下真歩

## 1. はじめに

ガラス棒をバーナーで熱し、自然に垂れ下がってきた滴を水に落下させて急冷する。このとき割れなかったものがオランダの涙である(図1)。本論文では以降、細くくびれた部分を「尾」、丸くなっている部分を「頭」と呼ぶ。涙の強度はとても高く、実際にハンマーで強く叩いても割れない。しかし、涙から出ている尾のような部分を折ると一瞬で碎ける。先生がオランダの涙の実験を見せてくれたとき、オランダの涙の尾を取ることができるのか、涙を尾からもう一度温めるとどうなるのかなど疑問があふれ、研究することにした。



図1 オランダの涙

研究では、涙の尾を取り除くための形状加工と、加工したことによる強度の違いを調べた。形状加工と衝撃実験までを一昨年の山崎賞に提出した。また、山崎賞の研究をまとめていく中で、さらに以下のような3つの疑問が生じたため、その疑問を解決することを目的として研究を続けた。

- ・尾を削った涙の強度はどうなのか。また、衝撃実験の棒と台座を軟鉄ではなく、鋼鉄にしたらどうなるのか。
- ・涙の尾を折ると、粉々になるのはなぜか。
- ・ペンチで折ったときや衝撃実験で割れた破片は粒状をしていたのに対して、頭を削っている途中で割れた破片は鋭利になっていたのはなぜか。

本論文では、山崎賞の論文を2にまとめ、3以降にその後の研究成果を報告する。

## 2. 昨年度の研究のまとめ

### (1) 形状加工

#### ①再加熱法

無加工のオランダの涙の頭をピンセットで挟み、バーナーの炎の中央部で決めた時間加熱する。形状加工のための加熱を再加熱と呼ぶ。再加熱時間は1s~30sとした。

涙全体を10s以上再加熱すると、ひずみはすべて消えていた。尾のみを加熱した場合、尾のひずみは消えていたが頭部分のひずみは残っていることが確認でき、これらの涙のひずみを見比べてみたが、違いは見られなかった(図2)。



図2 尾を再加熱した涙

#### ②削り法

オランダの涙を指でつまみ、尾の方から粗さ#120の紙やすりで削る。無加工の涙はあらかじめ尾を1.5~2.0cmくらいに折っておく。削った涙のうち11個を頭側からも削った。実験には、無加工の涙1個、再加熱した涙17個を使用した。

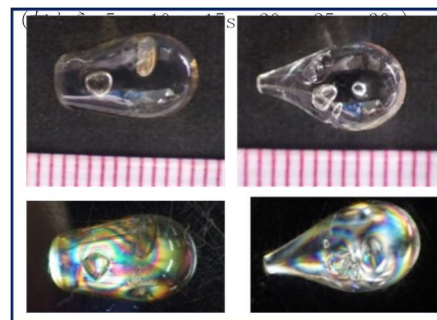


図3 削った涙

結果、無加工の涙はすぐに割れた。再加熱した涙は加熱時間に関わらずすべて削ることができた。中にはひずみのあった部分まで削ることができたものもあった(図3)。頭からは11個中5個削ることができた(図4)。削っている途中で6個割れ、そのときの破片は非常に鋭利な形状をしていた(図5)。

## (2) 衝撃実験

### ① ハンマー殴打法

台の上に涙を置き、涙をビニール袋に入れ、ハンマーで叩く(図6)。頭部のみにハンマーが当たるよう紙粘土で台座を作り、高さ10cm程度から涙の頭めがけてハンマーを振り下ろす。殴打回数の上限を500回とし、同じ力で行うことを意識する。

実験には無加工の涙10個、再加熱した涙(1s~20s)13個、尾を削った涙6個、両側(尾と頭)削った涙4個を使用した。

結果、ハンマーで500回叩いても割れなかったものは、無加工の涙7個、再加熱した涙11個、尾を削った涙4個であった。両側を削った涙はすべて割れた。割れなかった涙の割合を比べてみると、無加工の涙は再加熱した涙より割合が少し低く、尾を削った涙とは同じ程度の割合であった。割れたときの殴打回数は、どの涙も個体差が大きく、無加工の場合は31回~303回となっていた。また、両側を削った涙でも418回まで耐えたものもあった。

### ② 鉄の棒落下法

図7のような装置を作成し、9.58kgの鉄の棒を涙の上面に固定し、台から1cmの高さから落とす。実際には台との間に涙が入るため、高さ2cmから行った。割れなかった場合は高さを1cmずつ上げて鉄の棒を落とし、割れたときの高さを記録する。鉄の棒は落下位置がずれることを防ぐためアクリル管に通し、涙はハンマー殴打法と同様に袋の中にセロハンテープでとめ、台に養生テープで固定する。無加工の涙は40cmの高さから落とし始めた。装置の構造上、安全を考えて55cmまで実験を行った。

実験には無加工の涙2個、涙型のガラス(空中で冷却したもの)2個、ガラス棒(ソーダ石灰ガラス)1本、再加熱した涙(5s、10s、15s、20s)各5個ずつ、(25s、30s)各3個ずつを使用した。

結果、無加工の涙は、40cmから落とししたが2つとも一発で割れてしまったため、40cmに記録をした。涙型のガラスは2つとも7cmで、ガラス棒は3cmで割れた。再加熱した涙の砕けたときの高さはばらつきが大きく、決まった傾向は見られなかった。無加工の涙が割れた40cmの高さを超えたものは、5sが1個、10sが2個、20sが2個、30sが1個の計6個だった。55cmを耐えた涙は2個だけで、どちらも再加熱時間10sのものだった。しかし、涙の尾は欠けていた(図8)。

## (3) 全体考察(形状加工と強度の関係)

オランダの涙は、形状加工をすることでひずみが消えてしまい無加工の涙よりも強度が下がってしまうのではないかと予想していた。しかし、衝撃実験では、無加工の涙は40cmで割れたのに対して、再加熱した涙は、尾が途中で割れたが40cmを超えて割れ残った。このことから、

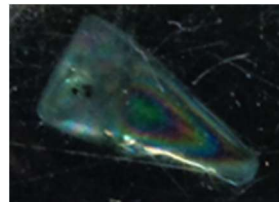


図4 両側を削った涙

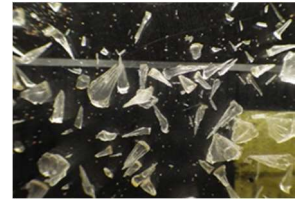


図5 削っている途中で割れた涙の破片

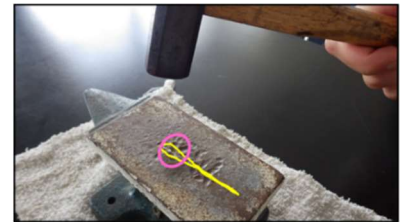


図6 ハンマー殴打法の様子

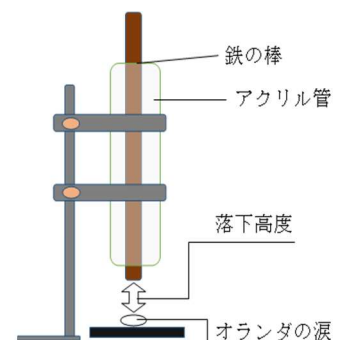


図7 鉄の棒落下法装置 模式図



図8 55cmに耐えた涙

再加熱した涙に限れば、加熱時間によらず無加工の涙よりも強くなっていると結論づけた。

再加熱した涙が無加工の涙よりも強くなっている理由を探るために、55cm で碎けなかった涙に注目してみる。衝撃実験前後のひずみの様子(図9)を比較すると、尾はひずみの境目で割れているように見えた。このことから、再加熱によって尾はひずみの境目で割れるようになると考えられる。尾をひずみの境目で分離できるのであれば、再加熱した涙はペンチで折っても碎けない

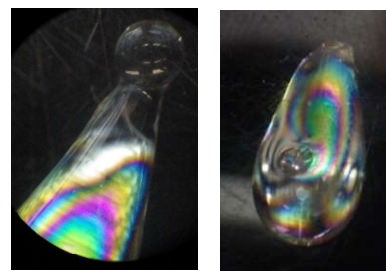


図9 鉄の棒落下法  
前後のひずみ

のではないかと考え、サンプルを用意して試してみたところ、5sと25sの涙は碎けたが、それ以外は全体が碎けることはなかった(図10)。このことから、涙の尾は再加熱して丸くすることで、先細ったひずみの先端が消え、非強化ガラスになった尾は頭部から分離できるようになったと考えられる。また、ひずみの先端が丸くなることで尾に衝撃が伝わってもひずみの境目で衝撃が止まり、全体に衝撃が伝わることはな

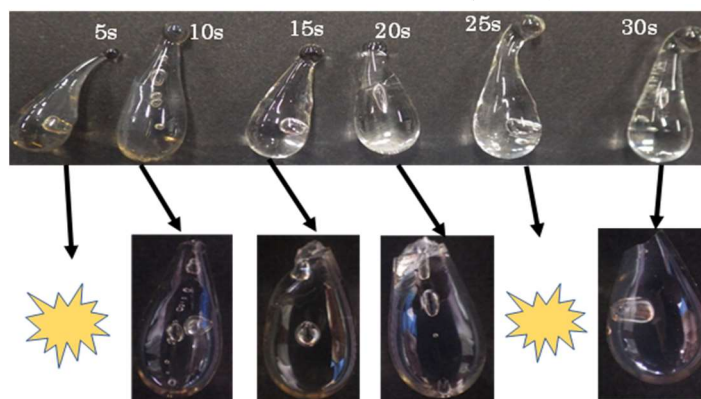


図10 再加熱の後ペンチで折った結果

かったと考えられる。頭のひずみは再加熱の影響を受けないため、その強度は保たれたと考えた。そのため、再加熱は安全に尾を無くすことができ、碎けやすい尾という弱点を取り除いたことで涙の強度を上げることができたという結果を得ることができた。



図11 衝撃実験後の台

### 3. 衝撃実験

#### (1) 目的

これまでの研究で行った鉄の棒落下法のデータでは、不十分であった無加工の涙の正確な強度を調べる。また、鉄の棒落下法では、尾を削った涙は行わなかったため、どの程度の強度があるのかを確認し、形状加工方法による強度の違いも調べたい。

衝撃実験では軟鉄を使用していたため、実験していくうちに台がぼこぼこになった(図11)。また、鉄の棒は直径 2.5 cmと細く、涙の頭に落とすことができるようにゆっくり下ろしてから涙の頭めがけて鉄の棒を落下していたが、位置合わせが難しかった。台に落下したときの衝撃で、鉄の棒が跳ねることがあり尾にあたってしまった可能性も考えられる。そこで、涙の頭部分の正しい強度を調べるために、落とす側の鉄の円盤を大きく、さらに硬くしたいと考えた。

#### (2) 実験方法

装置を図12のように改良し、鉄の棒に焼入れした円盤(直径 13cm)の鋼鉄を両面テープで貼り付けた約 10kg のおもりを、同様に焼き入れした鋼鉄の台の上に設置した涙の上から落とす。鉄の棒落下法と同様の測定方法で行った。装置の構造上、台からの高さは 10 cmから行った。

#### (3) 使用したもの

- ・無加工の涙(気泡あり) …14 個
- ・無加工の涙(気泡なし) …2 個

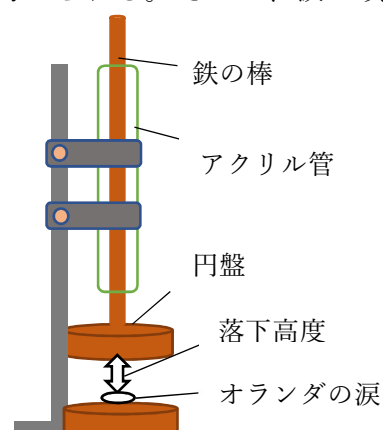


図12 衝撃実験改善装置模式図



- ・再加熱した涙（気泡あり）

10 s …8 個 20 s …3 個 30 s …3 個

- ・尾を削った涙(気泡あり) …6 個

#### (4) 結果

結果を図 13 に示す。図の横軸は、砕けた時の高さ(cm)である。気泡がある涙は赤丸、気泡がない涙は青丸で示している。無加工の涙では、10 cm から 15 cm で割れたものが多く、最高で 32 cm で割れた。

再加熱した涙は、10cm から 15 cm で多く割れていた。再加熱 10s の最

高値は 32cm、20s の最高値は 30cm、30s の最高値は 17cm であった。再加熱 30s は 10cm から 20cm で割れた。再加熱した涙の砕けた高さはばらつきが大きかったが、砕けた高さは無加工の涙と変化がないように見える。尾を削った涙は、砕けた高さの最低は 19 cm で、最大は 38 cm だった。

#### (5) 考察

再加熱のサンプル数は少なかったが、この結果からは無加工の涙と再加熱した涙の強度に大きな違いがないことがわかった。一方で、尾削りをした涙は、再加熱した涙よりも砕けた時の高さは高く、これは完全に尾を取り除いたためではないかと考えられる。落とす側の鉄の円盤を大きく、さらに鋼鉄を使用したことで、涙の頭部分の正しい強度を調べることができたと考えている。これらのことから、再加熱、削りなどの形状加工をすることで涙の強度を保つことができると考えられる。

衝撃実験の棒と台座を鋼鉄に変えて実験を行ったため、軟鉄よりも全体的に砕けた時の高さが低くなっていた。例えば再加熱 10s では、軟鉄の棒の場合は 55 cm から落下しても割れなかったが、鋼鉄の棒では最大で 32 cm で割れたため、砕ける高さが 20 cm 程度低くなっている。

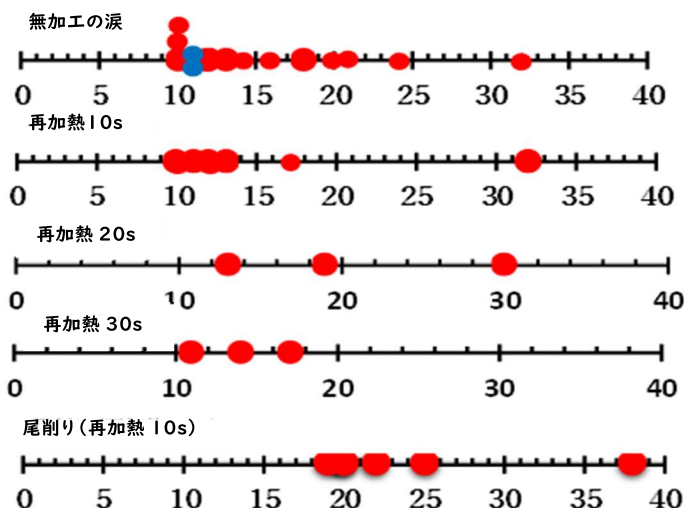


図 13 衝撃実験の結果

## 4. 薄片の作成

### (1) 目的

涙内部のひずみも外側から見たひずみと同じような形状をしているのか確認する。

### (2) 作成方法

10 s 再加熱した涙を一番太くなっている手前まで削る(図 14)。削り面を滑らかにした後、スライドガラスにボンドで貼り付け頭側からも同様に削る(図 15)。鉤物の場合と同じ 0.3mm を目指す。



図 14 再加熱した涙



図 15 頭側から削った涙

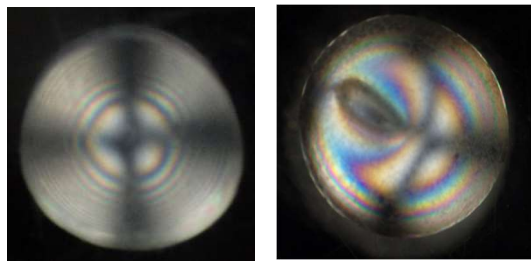


図 16 涙内部のひずみ  
左：気泡なし 右：気泡あり

### (3) 結果

涙は約 3 mm の厚さになったときにすべて割れた。作成途中の涙のひずみを見てみると、気泡がある場合は気泡を中心に(図 16 右)、ない場合は涙の中心部分から同心円状にひずみができていることがわかった(図 16 左)。割れ残った部分は円錐状の形で、放射状に亀裂が入っていた(図 17)。また、内部の気泡を中心に割れたものもあり、気泡があった場所は滑らかな凹となっていた(図 18)。



図 17 割れ残った部分



図 18 割れ残った部分

### (4) 考察

一般的に、涙内部には冷やされたことによる圧縮応力とそれに対抗する引張応力がかかっていると言われている。

①殻状構造：圧縮応力方向の構造はサーモカメラでの写真(図 19)や、ひずみ(図 20)から観察することができる。また、涙内部のひずみが中心から同心円状にできていたことから涙の圧縮応力構造を確認することができた。

②放射状構造：薄片の割れ残った部分が、鋭利な破片が集まったもののように見えることから、これが鋭利な破片の起源なのではないかと考えた。また、放射状の亀裂は偏光板からは見ることができなかった引張応力方向の構造を表しているのではないだろうか。つまり、鋭利な破片は衝撃が応力のかかる中心域に達したときに内側から割れて生じたのではないかと考えられる。

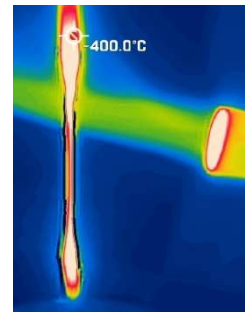


図 19 サーモカメラ写真

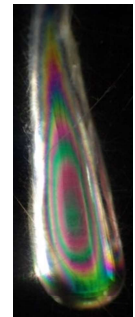


図 20 涙のひずみ

## 5. 電子顕微鏡での破片観察

### (1) 目的

破片の粒子の形状に違いがあっても、細部構造に共通点があるのか確認するために電子顕微鏡で観察する。

### (2) 電子顕微鏡観察試料(図 21)

電子顕微鏡観察試料として、以下の 4 つを使用する。

- A：頭を削っている途中で割れた鋭利な破片
- B：薄片作成中に割れた鋭利な破片
- C：鉄の棒落下法で割れた粒状の破片
- D：ペンチで折って割れた粒状の破片

### (3) 結果

図 22 は、A の左端の破片を 19 倍に拡大した写真、図 23 は、B の右側下から 2 つ目の破片を 200 倍に拡大した写真である。どちらの破片にも細かいスジが多数見られ、このスジと直交するように折れたような断面が観察される。この断面をよく見てみると、同じ方向に割れていることがわかる。図 24 は C の上段右から 3 つ目の破片を 50 倍に拡大した写真、図 25 は D の下段右から 2 つ目の破片を 190 倍に拡大した写真である。どちらの破片にも A、B と同じような放射状のスジが観察された。



図 21 電子顕微鏡観察試料

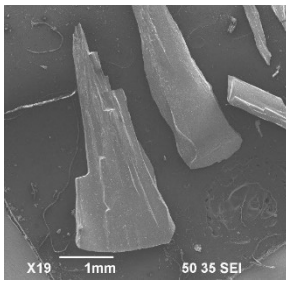


図 22 鋭利な破片の  
電子顕微鏡写真  
倍率×19 (サンプル A)

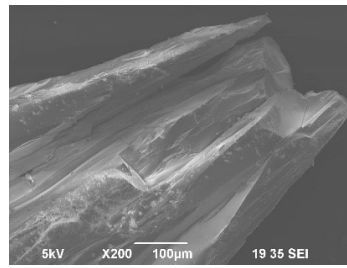


図 23 鋭利な破片の  
電子顕微鏡写真  
倍率×200 (サンプル B)

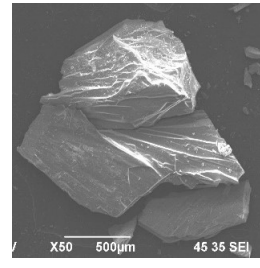


図 24 粒状の破片の  
電子顕微鏡写真  
倍率×50 (サンプル C)

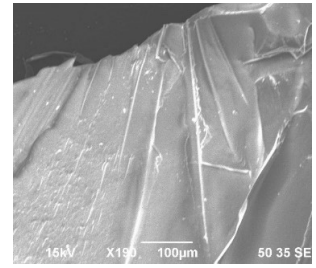


図 25 粒状の破片の  
電子顕微鏡写真  
倍率×190 (サンプル D)

#### (4) 考察

各破片の特徴を図 26 にまとめた。電子顕微鏡の観察より、鋭利な破片には細かいスジが顕著に見られ、それと直交するように折れたような断面が何か所も確認できた。このことから、スジに対して直交する方向の方が割れやすいと考えられる。この方向は圧縮応力の構造からのものだと考えた。また、粒状の破片にも放射状の細かいスジが確認できたことから、引張応力の構造が粒状の破片にも表れていると考えた。これらのことから、粒状や鋭利といった粒子の形状に違いがあっても、涙の細部構造には同じ 2 方向の構造があると考えられる。

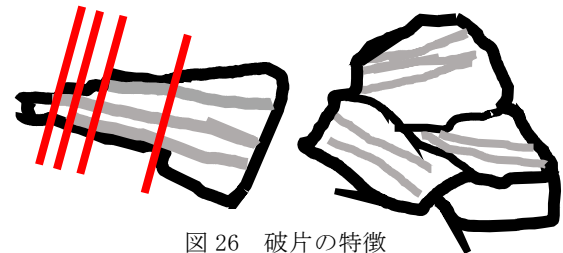


図 26 破片の特徴  
左：鋭利な破片 右：粒状の破片

### 6. 全体考察

#### (1) オランダの涙の内部構造についての考察

ここまでの研究結果より、オランダの涙の内部構造は玉ネギのような殻状構造と中心から広がる放射状構造の 2 方向の構造を持つと考えられる。

①殻状構造：偏光板の十字偏光で見ることができひずみや、サーモカメラでの写真で確認できる涙の形に沿った構造である。薄片の観察からは、断面では同心円状になっていた。

②放射状構造：偏光板などからでは、確認することができない。しかし、薄片の割れ残った部分や電子顕微鏡での写真から、中心から放射状につながる構造を確認することができた。

電子顕微鏡での観察では、粒状の破片には放射状構造を表すスジが見られた。また、鋭利な破片で見ることができたスジと直行する割れ目は、殻状構造の方向と一致していると考えられる。このことから、涙の内部構造は、涙の形成方向である殻状の構造と引張応力方向である放射状の構造の 2 つの構造からなっていると考えられる (図 27)。

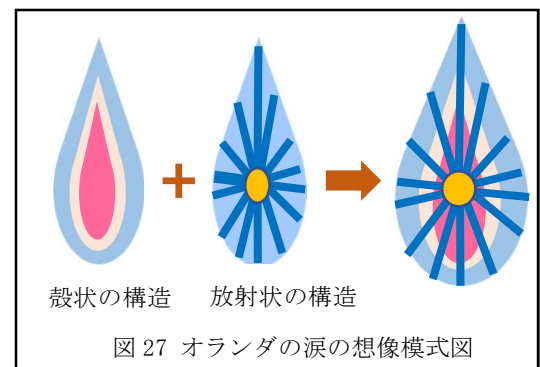


図 27 オランダの涙の想像模式図

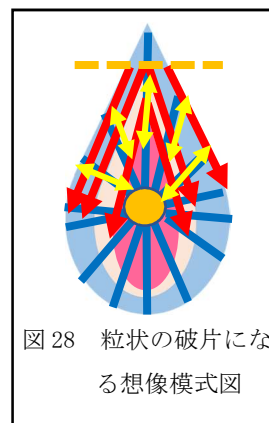


図 28 粒状の破片になる  
想像模式図

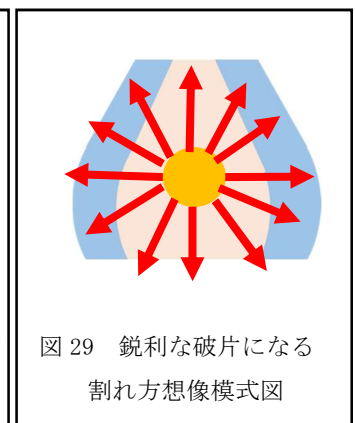


図 29 鋭利な破片になる  
割れ方想像模式図



## (2) 破片の形成過程についての考察

涙の内部構造が 2 つの構造からなっていることから、ペンチで折るとなぜ粉々になるのか考えてみた。殻状の構造のひずみの先細った部分をペンチで折ると、衝撃はまず殻状方向に沿って涙頭部の方向へと伝わっていくとともに、それが放射状方向に枝分かれして伝わっていくことで粒状の破片になるのではないだろうか(図 28)。また、削った衝撃が涙の中心に伝わったときのみ涙は中心から放射線状に広がり、鋭利な破片になると考えた(図 29)。鋭利な破片の同じ方向の割れ目は殻状の構造から、粒状の破片のスジは放射状の構造からのものだと考えた(図 30)。中心付近に気泡がある場合は、気泡に達したときに同様なことが起きていると言える。

## (3) 形状加工をすると涙が強くなる理由についての考察

無加工の涙の尾はペンチで折ると一瞬で割れるが、再加熱や削りといった形状加工をすると、尾を取り除くことができ、さらに無加工の涙よりも衝撃に対して強くなっていることがわかった。

強化ガラスが強いのは、表面にできた傷が引張応力により引っ張り込まれることで破壊が抑えられるからだと言われている。しかしながら、尾のような細く、円錐状をしている場所では、表面に押さえ込むことができず割れると考えられる。尾を再加熱しひずみの先端を丸くすることで、引張応力が表面を引き込みやすくなるのではないだろうか。傷がそこで押し込められて消え、衝撃が伝わりにくくなるのではないだろうか。そのため、再加熱した涙はひずみ部分まで削ることができるようになったと考えた。このことから私たちは、涙を再加熱してひずみの先端を丸くすることで尾を取り除くことは、涙をより破壊しにくくするために重要だと結論付けた。

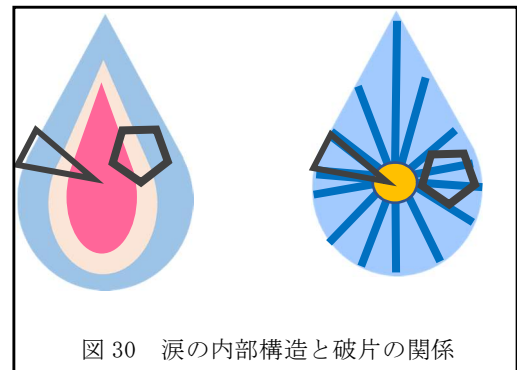


図 30 涙の内部構造と破片の関係

## 7. 今後の課題

尾を折ると砕ける理由として、ひずみを断ち切っているからだと言われているが、ひずみ部分まで涙を削ることもひずみを断ち切っているとは言えないのだろうか。ひずみを断ち切るとはどういうことなのか、という疑問がさらにわいてくる。

本研究では、涙の薄片作りと電子顕微鏡で破片表面の微細構造の観察を行った。その結果、涙内部には涙の形成方向から生じた殻状の構造と引張応力の方向から生じた放射状の構造の 2 方向のひずみができていると考えられた。放射状の構造は、偏光板では見ることができず、削りによってのみ発見することができた。削った涙を偏光板で観察すると、ひずみを断ち切っているとしか見えない状態を示している(図 31)。ペンチの断ち切りと、薄片のように厚さ 3mm 程度まで削っても割れていなかった削りの断ち切りとは何が違うのだろうか。薄片作成途中の涙のひずみを見ると、削っている面に新たなひずみ構造が生じているようにも見える(図 32)。ここから、私たちはひずみを断ち切る速度の違いに答えはあるかもしれないと考えた。削りのように遅い速度で衝撃を加えていくと、原子の並びが再構成される可能性があるかもしれない。今後はこの謎を解明していきたい。



図 31 尾を削った涙のひずみ

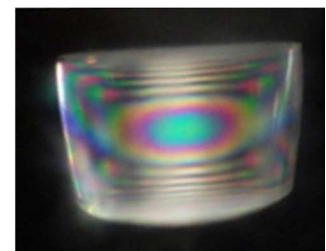


図 32 薄片を作成中の涙のひずみ

## 8. 参考文献

1. GIZMODO 銃弾をも砕くガラス「ルパートの涙」。ようやく仕組みを解明  
<https://www.gizmodo.jp/2017/05/ruperts-drops-why-so-strong.html>
2. 大地直樹 他(2001)「オランダの涙の研究」第45回日本学生科学賞作品集高校化学
3. 平井萌乃・松下真歩(2021)「オランダの涙の形状と強度についての研究」山崎賞
4. 23. ガラスが割れる時—5 強化ガラスの自然破損—AGC Glass Plaza  
[https://www.asahiglassplaza.net/knowledge/rg\\_knowledge/vol23/](https://www.asahiglassplaza.net/knowledge/rg_knowledge/vol23/)