

オランダの涙の形状と強度についての研究

静岡県立科学技術高等学校
自然科学部 2年 平井萌乃 松下真歩

1. 研究動機

先生がオランダの涙の実験を見せてくれた。オランダの涙とは、涙型をしたガラスのことである。涙の強度は非常に高く、ハンマーで強く叩いても割れなかった。しかし、涙から出ている尾のような部分をペンチで折ると、一瞬で涙が砕けてしまった。その不思議な様子に「涙の尾は取ることができるのか」など疑問が溢れ、研究をすることにした。

2. オランダの涙について

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。

オランダの涙の内部には強い応力が閉じ込められていると言われている。その応力形成は次のように説明される。水中に落下した瞬間は、ガラスの滴全体が高温になっている(図2①)。

それが水で冷やされると、まず外側が冷え固まって収縮する(図2②)。僅かな時間差を経て、内部も冷やされて同じように縮もうとするが、先に外側が冷え固まっているために小さくならない(図2③)。

そうすると、涙内部では外殻に固定された状態で縮もうとするために、引張応力が生じる(図2④)。そうして、内部にひずみが形成される。これは強化ガラスの応力構造と同じである。一般的な強化ガラスは、外側に圧縮応力、内側に引張応力がかけられており、図3のようになっている。板厚 $1/6$ は表面層、または圧縮応力層と呼ばれ、非強化ガラスである。

応力によって内部がひずんでいる様子は、偏光板による十字偏光で確認することができる。偏光板には通過することのできる光の振動方向があり、直交させると図4のように色づいて見える。これは、オランダの涙が光弾性を持ったためである。光弾性とは力がかかっている部分で光が複屈折を起こす性質のことである。以降、光弾性によって見られる干渉模様のことを「ひずみ」と呼ぶ。

先行研究を調べてみたところ、オランダの涙の頭には鉄の強度に相当する圧力がかかっていること(チャンドラセカール2016)や、とても硬いこと、衝撃がものすごい速さで伝わることなどがわかった。しかしながら、



図1 オランダの涙

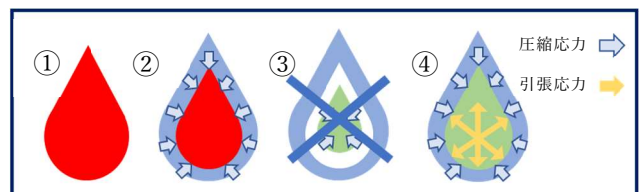


図2 オランダの涙の内部応力構造 模式図

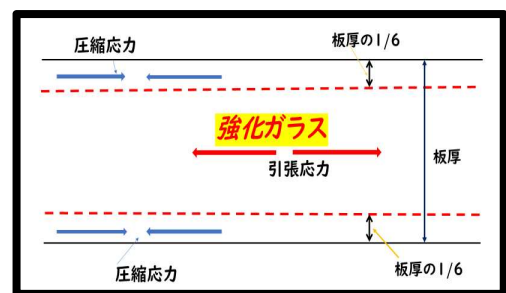


図3 強化ガラスの内部応力構造 模式図

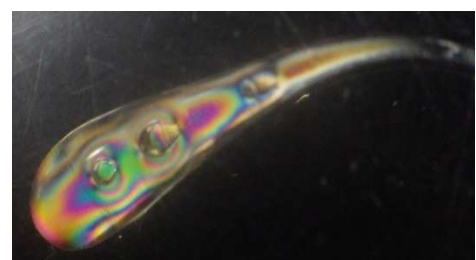


図4 涙のひずみ

ひずみの内部構造やその他の状態に関する論文はほとんど見つけることができなかった。

3. 目的

涙の尾を無くして、壊れにくくすることができるのかを調べる。

涙の尾を再加熱したらどうなるのかを調べる。

涙を加工しても強度は保たれるのかを調べる。

4. 仮説

オランダの涙を作り、袋に入れたときなど、予期せぬときに涙の尾が折れてしまったことがあった。しかし、涙は割れなかった。そこで私たちは、尾には折っても割れないところと、折ればすぐに割れてしまうところの境目があると考えた。

涙の尾を無くすための方法として、再加熱して尾を丸くする方法を思いついた。また、尾は手で折ったり、ハンマーで叩いたりしても割れてしまったため、折らずに削り取っていく方法はどうかと考えた。しかしながら、参考文献よりオランダの涙のひずみは繋がっていると考えられるため、尾を再加熱することで、ひずみはすべて消えてしまうとも考えられる。また、尾を削るという方法に対して、そもそも尾は削ることができるのか、もしできたとしてもひずみが繋がっているのならば、削ることのできるのか、どのような影響が出るのか想像が難しかった。

以上のことをまとめ、以下のように仮説を立てた。

- ・尾には、折っても割れない決まった位置がある。
- ・再加熱すると尾は丸まるが、ひずみはすべて消えてしまう。
- ・尾を削ることはできない。または、できてもひずみ全体に何かしらの影響が出る。

上記3つの仮説にもとづいて形状加工を行い、その様子を確認する。

5. オランダの涙の作り方

(1) 作成方法

ガラス棒は、ソーダ石灰ガラスで6mm径のものを使用した。

- ① スタンドを用いて、図5のようにバーナーが斜めになるよう固定する。
- ② 1000ml ビーカーに水を入れ、バーナーの炎の下に設置する。
- ③ 炎の先端から5cmあたりにガラス棒を入れ、自然に垂れてくるまで待つ。ガラス棒全体に熱がまんべんなくあたるよう時々傾ける。
- ④ 垂れてきた滴を水に落下させ、急冷する。水の中にしばらく放置した後、取り出す。

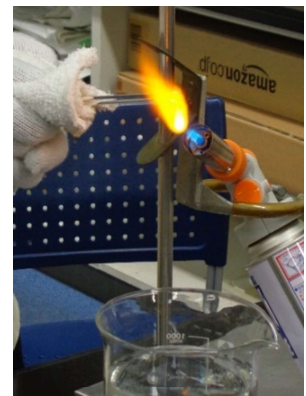


図5 涙作成の様子

(2) オランダの涙の形状

オランダの涙は落下させて作るため涙型になる。しかし、実際にはいびつな形をしていたり、ヒビが入っていたりした涙があった(図6)。そういったものは実験の結果に影響が出ると考えたため取り除き、頭の部分が1cm程度でヒビが無い涙を使用することとした(図7)。

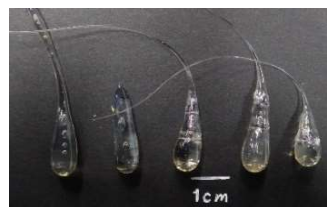


図6 実験に使えない涙

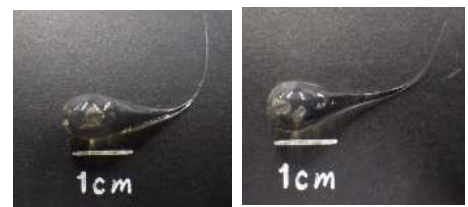


図7 実験に使える涙

また、オランダの涙の中には気泡のような空洞が1つから複数個できる。これは内部が収縮するときに見える真空の泡であると言われている。泡の個数については特に分類はしなかった。

6. 形状加工 1

(1) 目的：オランダの涙の割れる境目が、ひずみと関係があるのか調べる。

(2) 方法：偏光板でひずみを観察し(図8)、目視でひずみの先端から5mm~10mmほど外側の位置にペンで印をつける(図9)。印の位置が合っていることを確認する。印を付けたところをペンチで挟み、袋の中に入れて折る。割れなかった場合は、印を再度付け直して同様の操作を行う。3回ほど繰り返すと先端に非常に近づくため、割れなかった場合はそこで終わりにした。

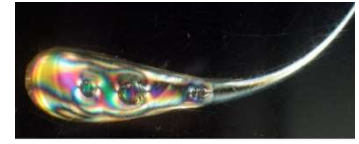


図8 ひずみの観察

(3) 結果：個体差が大きく、先端から5mm以下まで折ることができたものがあったが、1cm、2cm外側であっても割れてしまったものもあった。



図9 印をつけた涙

(4) 考察：作りたてのオランダの涙は、20cm~30cm程度の尾がついていることが普通である。袋に入れる際に尾を10cm程度の長さまで折るが、そのときに割れることはなかった。実験に使用する際には、尾を3cm程度まで折って使用した。ここまでを折っても割れてしまうことはほぼなかった。ひずみが見える部分は、力がかかっているため壊れやすい場所と言われていることから、見えない部分を折ることは安全だと考えていた。しかし実際には、ひずみの見えない部分を折っても割れてしまうことがあった。これは、目視では確認できないごく薄いひずみが尾に入り込んでおり、そこを折ってしまったからではないかと考えられた。結果として、ひずみの観察からだけでは、折っても安全なところを確実に見分けることはできなかった。

7. 形状加工 2

以降、再加熱した涙と区別するため、再加熱していない涙を「無加工」の涙と呼ぶ。

(1) 目的：尾を再加熱によって丸めた場合の影響を調べる。

(2) 方法：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(図10)。加熱した後は涙が熱くなっているため机などにすぐ置かず、軽く振ったり静止したりして自然に冷ます。再加熱時間は1s~30sとした。



図10 再加熱の様子

(3) 結果：涙全体を10s以上加熱すると、ひずみはすべて消えてしまっていた(図11)。尾のみを加熱した場合、5sのものはまだ尾にひずみが入り込んでいる様子が確認できた(図12)。10s~30sの涙の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た。ひずみを見比べても違いは見られなかった。



図11 全体を再加熱した涙



図12 尾を再加熱した涙

(左から5s、10s、15s、20s、25s、30s)

8. 形状加工 3

(1) 目的：オランダの涙を削ることで、どのような影響があるのか確認する。

(2) 方法：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。削るときは割れてしまうと危険なため、削る方の手に軍手をし、袋の中で削る(図13)。

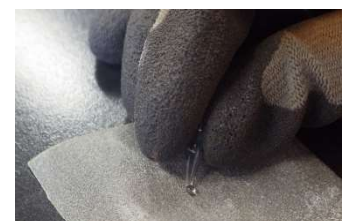


図13 削る様子

〈実験に使用した涙〉

- ・無加工の涙…1 個
- ・再加熱した涙…17 個（再加熱時間：1s、2s、3s、4s、5s、6s、10s、13s、20s）

(3) 結果：無加工の涙は削るとすぐに割れた。削った部分は3mmに満たなかった。再加熱した涙は時間に関わらず、すべて削ることができた(図 14)。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。

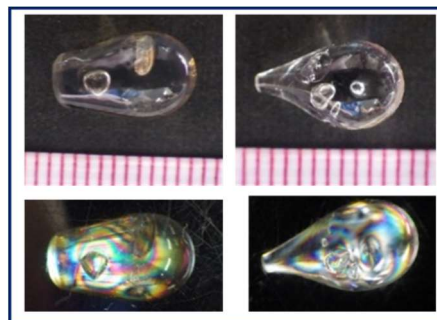


図 14 削った涙

9. 形状加工 4

(1) 目的：形状加工3の結果から、表面の1/6厚の部分ならばどこからでも削れるのではないかと考えた。そこで、頭側からも涙を削りその影響を確認する。

(2) 方法：尾を削った涙を頭から削る。形状加工3と同じ方法で行う。

(3) 結果：11 個中 5 個削ることができたが、ひずみは削る前より薄くなっていた(図 15)。削っている途中で割れた 6 個の破片は、非常に鋭利な形をしていた(図 16)。

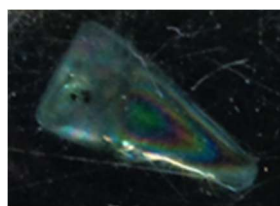


図 15 両側を削った涙

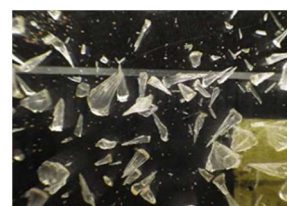


図 16 削っている途中で割れた涙の破片

10. 衝撃実験 1：ハンマー殴打法

(1) 目的：無加工の涙と比べて、形状加工した涙の強度はどうなっているのか確認する。

(2) 方法：台の上にオランダの涙を置き、ハンマーで叩く(図 17)。実際には涙をビニール袋に入れ、無加工の涙には頭部のみにハンマーがあたるように紙粘土で台座を作り、袋の中にセロテープで固定した。高さ10cm程度から涙の頭めがけてハンマーを振り下ろす。殴打回数の上限は500回とし、同じ力で振り下ろすことを意識する。



図 17 ハンマー殴打法の様子

〈実験に使用した涙〉

- ・無加工の涙…10 個
- ・尾を再加熱した涙…13 個（再加熱時間：1s～20s）
- ・尾を削った涙…6 個
- ・両側(尾と頭)を削った涙…4 個

(3) 結果：結果を表1に示す。ハンマーで500回叩いて割れなかったものは、無加工の涙で10個中7個、再加熱した涙で13個中11個、尾を削った涙で6個中4個であった。両側を削った涙はすべて割れた。無加工の涙と形状加工した涙の割れなかった割合を比較してみた。再加熱した涙は無加工のものより少し高い割合になっていた。尾を削った涙は無加工と同じ程度の割合だった。割れた時の回数を見ると、無加工の涙でも31回～303回と個体差が大きく、すべて割れた両側削りでも418回まで耐えたものがあった。

表1 ハンマー殴打法の結果

加熱箇所・方法	サンプル数	割れなかった個数	割れなかった時の割合(%)
無加工	10	7	70
再加熱	13	11	85
尾・削り	6	4	67
両側・削り	4	0	0

(4) 考察：結果より、ハンマーで500回叩いただけでは無加工、再加熱、尾削りの涙の強度にはっきりとした差がでないことがわかった。また、再加熱時間が長くなるほど強度が下がり、すぐに割れると予想していたが、再加熱時間、ひずみの状態、割れやすさの間に関係性は見られなかった。ハンマーで振り下ろすときの力にばらつきが生じてしまい、正しい結果になっていないのではないかと考えられたため、力の量を一定にする工夫の必要性が感じられた。

1 1 . 衝撃実験 2 : 鉄球落下法

(1) 目的 : ハンマーで叩くときの力のばらつきをなくし、衝撃の大きさを定量化する。

(2) 方法 : 図 18 の装置を使い、115 g の鉄球を筒の上からオランダの涙の頭部に向けて落とす。落下の高さは 24cm に固定している。落下回数はハンマーと同じ 500 回とする。

〈実験に使用した涙〉

再加熱した涙…6 個 (再加熱時間 2s、4s、6s、8s)

(3) 結果 : 割れたものは再加熱時間 2s の涙のみで、34 回で割れた。割れなかった割合は 83% で、ハンマー殴打法との違いは見られなかった。

(4) 考察 : ハンマーで叩くときのばらつきをなくす目的で、鉄球落下法を考えた。ハンマーと鉄球の衝撃エネルギーを位置エネルギーとして求めてみたところ、ほとんど差がないことがわかる。そのため、ハンマー殴打法と鉄球落下法の結果は同等に扱えると考えた。

以上のことから、再加熱の結果を修正すると表 2 のようになる。() 内の数は鉄球落下法のみ結果である。ここでも、再加熱した涙と無加工の涙の強度には大きな差が無いことがわかる。

〈計算〉

位置エネルギーの式より $U = m g h$

m : 質量 [kg]

g : 重力加速度 [m/s^2]

h : 高さ [m]

ハンマーの衝撃エネルギー : 0.23 [J]

(+ 少しの運動エネルギー)

鉄球の衝撃エネルギー : 0.27 [J]



図 18 鉄球落下法装置

表 2 ハンマーと鉄球の結果

加熱箇所 方法	サンプル数	割れな かった個 数	割れなかつた 割合(%)	割れた時の殴打回数
無加工	10	7	70	31回、268回、303回
再加熱	19(6)	16(5)	84	(34回)、163回、300回
尾・削り	6	4	67	8回、480回
両側・削り	4	0	0	3回、7回、162回、418回

1 2 . 衝撃実験 3 : 鉄の棒落下法

(1) 目的 : 衝撃実験 1, 2 の実験では、無加工の涙と形状加工した涙の強度にはっきりとした差が出なかった。そのため、さらに強い衝撃実験を行い、強度の違いを明確にする。

(2) 方法 : 図 19 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落下高度は 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す。この操作を繰り返し行い、割れた時の高さを記録する。鉄の棒の落下位置がずれることを防ぐために、棒を鉛直に立てたアクリル管に通し支えている。涙は前の衝撃実験と同様に、ビニール袋の中にセロテープでとめ、台に養生テープで固定する。実験の安全上 55cm を上限に実験を行った。大地 他 (2001) では、無加工の涙は 25kg のおもりで 18.7cm の高さで割れたと書かれていた。この結果を今回の実験に換算すると 50cm 程度で無加工の涙が割れる衝撃となる。そこで、無加工の涙は高さ 40cm から落とし始めた。

〈実験に使用した涙〉

- ・ 無加工の涙…2 個
- ・ 涙型のガラス…2 個
- ・ ガラス棒 (ソーダ石灰ガラス) …1 本
- ・ 再加熱した涙…26 個 (再加熱時間 : 5s、10s、15s、20s、25s、30s)

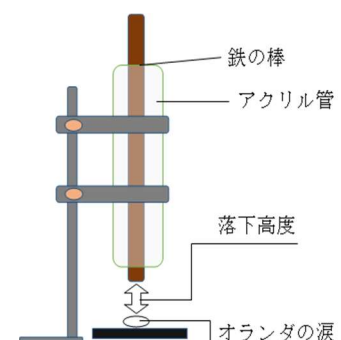


図 19 鉄の棒落下法装置 模式図

(3) 結果：結果を図 20 に示す。図の横軸は涙が砕けたときの高さ (cm) である。無加工の涙に 40cm から鉄の棒を落としたところ、2 つとも一発で割れたため、40cm に 2 つの記録をした。再加熱した涙の結果はばらつきが大きく、決まった傾向は見られなかった。55cm を耐えたものは 2 個だけで、どちらも再加熱時間 10s のものだった。しかし、割れ残ったとは言え、尾が欠けていた状態であった (図 21)。

(4) 考察：再加熱した涙は再加熱時間によって強度に差が出て、無加工の涙よりも強度が下がっているのではないかと予想されたが、砕けたときの高さは数 cm から 40cm を超えたものもあり、時間と強度の間に関係は見られなかった。高さのばらつきにはガラスの不ぞろいさが関係していると考えられる。注目されるのは、再加熱した涙の砕けたときの高さが無加工のものより高くなっているものがいくつかある、ということである。また、55cm を耐えた涙はどちらも内部の泡の数が 1 個であったため、泡の数が少ないほど強度は高いのではないかと考えられた。

1.3. 全体考察

(1) 形状加工と強度の関係：オランダの涙を形状加工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は下がっているのではないかと予想していた。しかし、衝撃実験 3 より無加工の涙は 40cm で砕けたのに対して、再加熱した涙の一部は 40cm を超えても割れなかった。このことから、再加熱した涙は加熱時間によらず、無加工の涙よりも強くなっていると結論づけられる。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 で割れなかった涙に注目してみる。衝撃実験前後の涙とひずみの写真を比較すると、涙は再加熱するとひずみの先は丸くなり、尾はひずみの境目で割れているように見えた (図 22)。このことから、加熱によって尾はひずみの境目で割れるようになったと考えられる。そこで、再加熱した涙の尾ならば、ペンチで折っても砕けないのではないかと考え、5s~30s (5s 間隔) 加熱した涙を用意してためしてみたところ、5s、25s の涙は砕けたが、それ以外は尾が折れただけで全体が砕けることはなかった (図 23)。

これらのことから、尾を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、尾が非強化ガラスになることで、頭部から分離できたと考えられる。しかも、頭のひずみは再加熱の影響を受けないため、強度は保たれたままだった。まとめると、尾のみを再加熱する

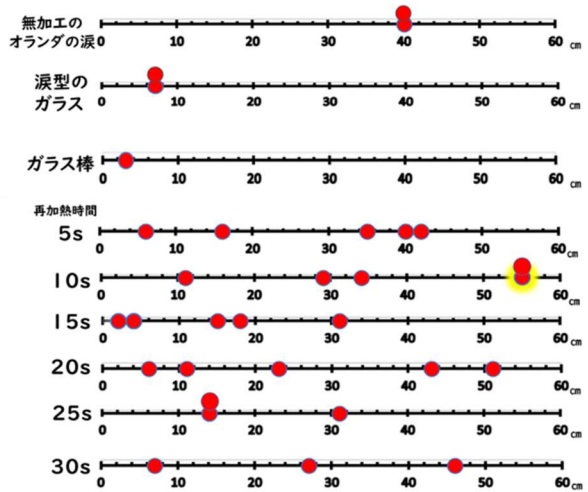


図 20 鉄の棒の結果



図 21 55cm に耐えた涙

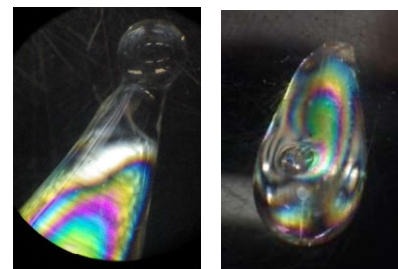


図 22 衝撃実験 3 前後のひずみ (左：前、右：後)

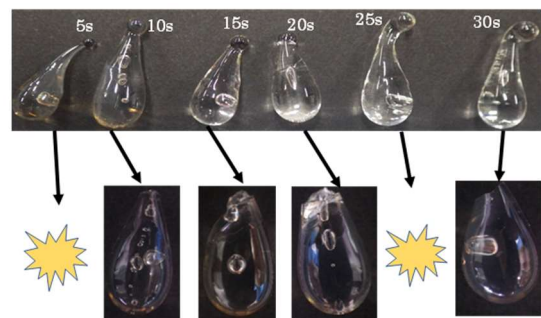


図 23 再加熱の後ペンチで折った結果

ことで加熱部のみが非強化ガラスになるとともに、先端のひずみが丸くなる。こうなると尾に衝撃が加わってもひずみの境目付近で衝撃が止まり、全体に衝撃が伝わることはなかったと理解できる。このことから、尾のみを再加熱することで、砕けやすい尾という弱点を取り除くことができたと言える。

(2) 破片の形状について：図 24 は涙の破片が入ったすべてのシャーレを机に並べた写真である。各涙の破片の写真は、カメラをシャーレの縁にくっつけて撮影したものである。図 25 に無加工の涙をペンチで折って割れた破片の写真、図 26 に衝撃実験 1 で割れた破片の写真を示した。この破片を見てみると、粒子の大きさには多少の違いはあるが、どれもゴロゴロとした粒状であることがわかる。図 27 は衝撃実験 3 で砕けた破片の写真である。見ると、前に示したものと同じく粒状をしているが、さらに細かくなっており粉状に近くなっていることがわかる。図 28 は頭から削っているときに割れた破片の写真である。他の破片とは形が大きく異なり、非常に鋭利で三角形のような形状をしている。

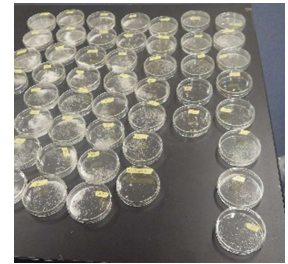


図 24 破片入りシャーレ

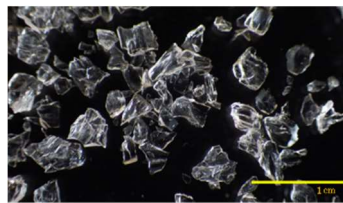


図 25 ペンチで折った破片

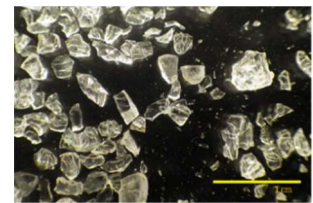


図 26 衝撃実験 1 の破

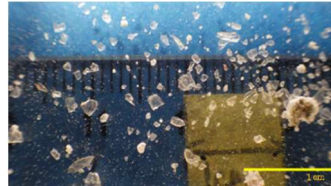


図 27 衝撃実験 3 の破片

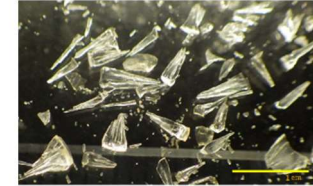


図 28 削って割れた破片

各サンプル 30 粒ずつ長軸と短軸を計測して、グラフを作成し粒子の縦横比を求めた。グラフの傾きは縦横比を表している（1 に近いほど粒状、0 に近いほど細長い）。ペンチで折った破片のグラフを見ると、縦横比は 0.65 であることがわかる（図 29）。縦横比の平均値をまとめると、ハンマーと鉄球の破片は 0.53、鉄の棒は 0.63、削りは 0.36 となった。このことから削って割れた破片は他のものと比べて細長いことがわかる。この破片の角度を分度器で計測すると、測定サンプル 5 個の平均値は 24° 、最小値は 6° であった。この破片の形状が他のものと顕著に違うことから、破片の形状の違いは、内部構造を探る手がかりになるのではないかと考えた。

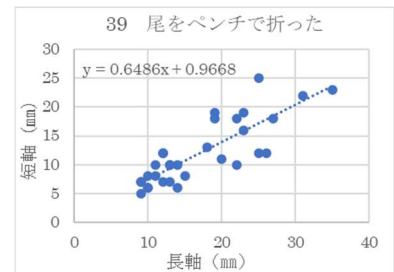


図 29 縦横比グラフ

(3) オランダの涙の内部構造について：無加工の涙は尾の深くまでひずみが入り込んでおり、この部分を折ると一瞬で砕けることから、ひずみは涙全体で繋がっているのではないかと予想していた。しかし、再加熱や削りといった形状加工は可能であるという結果が得られた。形状加工 2 では、尾を加熱することでひずみの境目は丸くなり、尾と頭部で分離することができた（図 30）。形状加工 3 では、ひずみがあった部分にまで、食い込むように削ることができた。さらに、形状加工前後でひずみに変化が見られなかったことから、尾の加工が涙全体に影響を及ぼすものではないと結論づけられる。一般的なガラスには光弾性はなく原子の並びは不規則になっているが（図 31）、光弾性は異方性のあるものに生じることから（図 32）、光弾性のあるオランダの涙の内部は何か結晶のような構造が生じている可能性がある。オランダの涙の内部構造を探る方法は模索中であるが、私たちは、鋭角三角形のように並んだ原子が中心に向かって放射状に規則的に多数存在していると考えている（図 33）。また、1つの破片が層のように重なっていたことから、1セットの原子の構造ごとに割れているわけでは無いともいえる。ペンチや衝撃実験で割れた破片が粒状をしてい

たのは、頭部に衝撃が伝わるスピードが速すぎるがゆえに、原子の並びに逆らって粒状に砕けたのではと考えられる。

1 4. 研究のまとめと今後の課題

涙の強度を保ったまま尾という弱点を解消する方法を見つけるために、涙の形状加工を行ったうえでその強度を衝撃実験で確認した。尾を再加熱すると、尾の部分のひずみは消えたが頭部のひずみに変化は見られなかった。また、再加熱した涙は加熱時間によらずすべて尾から削ることができた。形状加工した涙の強度は、鉄の棒落下より再加熱した涙の強度は無加工の涙と比べて下がっていないばかりか、むしろ無加工の涙より強くなっていることが示された。

衝撃実験で砕けなかった涙を見ると、尾はひずみの境目で割れているように見えた。尾を再加熱することで涙全体に影響を及ぼすことなくひずみを途切れさせ、安全に尾を無くすことができたと考えられる。結果として涙の強度は上がったと考えられる。

一般的なガラスとは異なる性質を持つオランダの涙の内部構造は、光弾性があることから何か結晶のような構造が生じているのではないかと考えている。これを探る手がかりは、削っている途中で割れたときの非常に鋭利な破片にあると考えている。この形状が内部構造を知る手がかりになると考え、今後は、この鋭利な破片を分析して、内部構造との関係に迫っていききたい。

1 5. 参考文献

- ・ 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>
- ・ 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
- ・ 24. 板ガラスの強度と強化ガラス—AGC Glass Plaza
https://www.asahiglassplaza.net/knowledge/rg_knowledge/vol24/
- ・ 見えない性質が見える—偏光計測技術— <https://www.iri>

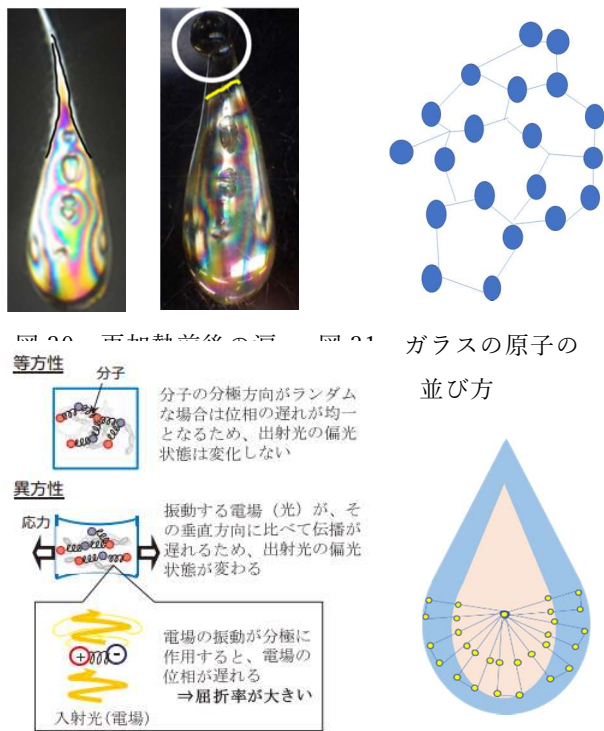


図 32 等方性・異方性について 図 33 内部構造想像図
 (https://www.iri より引用) 模式図