

空気中の水の捕集効率を上げるには

静岡県立静岡高等学校

2 年 小泉剛愼

1 動機

私は物心ついた時から、いけばなを習っている。ある日お稽古中に花や葉に水が垂れてしまった。しかしその花はきれいに、飛び跳ねるように水をはじいた。なぜこの花は水をはじいたのだろう。そこから私の「撥水」に関する探究は始まった。小学 6 年生から 4 年間、撥水性を高める構造、良くはじかれる液体について調査してきた。これまでは私の興味関心に注目し研究を進めてきた。しかし研究を進めていくうちにただ研究をするだけではなく社会に還元していくことも大切であるということを知った。その時から徐々に、「何か自分の研究、興味関心を活かして応用研究をしたい」その思いが強くなってきた。そして高校生になり学校の授業で SDGs を学んだ際、水を確保するために多くの子供たちが重たいタンクをもって自分の時間を割いて水を汲みに行っているを知った。撥水性、そして親水性の効果をうまく用いればこの問題に自分なりにアプローチできるかもしれないと思いアイデアを巡らせ、親水撥水パターンニング加工を思いついた。先行研究を調べていくうちに、パターンニング加工を思いついているのは私以外にクリアツメゴミムシダマシという虫がいたが、親水撥水パターンニング構造を調べる余地がまだまだあると判断し、いつかは装置を開発してみたいと思いながら、まずはこの親水撥水パターンニング構造について研究していこうと思うようになった。

2 研究の目的

- ・水蒸気が凝集する際に界面で何が起きているのかを解明する
- ・親水撥水パターンニング加工が捕集効率に与える影響を調べる

3 探求 1 親水撥水の効果がもたらす捕集量への影響

(1) 動機

親水、撥水面はどのように空気中から水分を捕集するのか調査し、それを踏まえて親水、撥水パターンニング加工の評価をするべきであると考えた。

(2) 仮説

捕集量は親水面の方が撥水面よりも多い

理由

親水面では表面の化学的な性質によって水が電氣的に表面張力によって引かれている。そのため水を親水面に滴下すると広がり濡れていく。この効果が空気中の水蒸気にも作用すると考え、空気と親水面との界面において小さな力で水蒸気の凝集を高めていると仮説を立てた。

(3) 方法

同じ粗さの #300 のステンレスメッシュに撥水加工、超親水加工を施したもの、そして何も加工していないものをそれぞれ同じ環境下で 30 分間冷却し、水蒸気を捕集させた。#300 のメッシュとは線の直径が 40 μm のサイズのメッシュである。

メッシュを用いたのは表面積を増やすことができ、また実験効率を高められると考えたためである。その後、これらの試料を取り出して顕微鏡で観察する。

(4) 結果

撥水メッシュ (Fig. 1) の上に球形に転がっているのが、無加工メッシュ (Fig. 2) と親水メッシュ (Fig. 3) ではメッシュの間にはさまれているのが、捕集した水滴である。

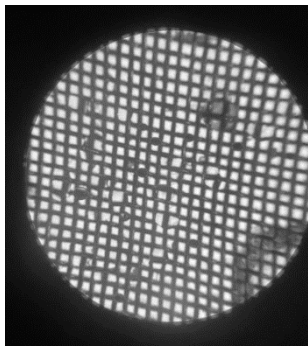


Fig. 1 水を捕集した撥水メッシュの顕微鏡写真

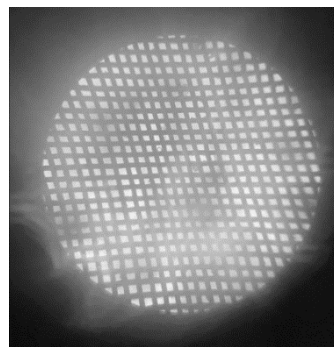


Fig. 2 水を捕集した無加工メッシュの顕微鏡写真

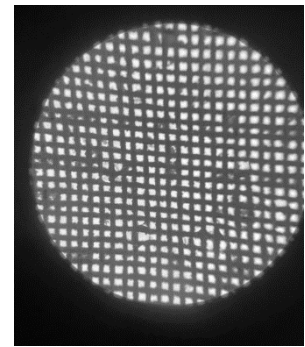


Fig. 3 水を捕集した親水メッシュの顕微鏡写真

(5) 考察

顕微鏡写真から親水メッシュ、撥水メッシュ、無加工メッシュという順に集めたと分かる。捕集後のメッシュを見てもこの結果は明らかであった。これは仮説に反する結果となった。撥水面はまったく捕集しないわけではなく、それどころか無加工である比較的弱い親水性を持つメッシュよりも捕集量が少なくなるという結果になった。

一方でそれぞれの面で異なる性質が見られたことから、少なくとも親水、撥水の効果は微小な力でありながら何らかの作用を及ぼしていることは確実である。ここで私は、親水面が空気中の水蒸気を引き寄せるのではなく、水蒸気がメッシュに衝突しそのキャッチのしやすさに親水、撥水の効果が影響を与えているのではないかという新たなモデルを考えた。また、撥水面が無加工メッシュよりも凝集した理由は、2つの表面積が関係していると考えた。1つは、メッシュが空気中の水を捕集することが出来る面積である。撥水面は水滴が広がりにくく、メッシュが空気と触れる表面積が維持され捕集効率が無加工メッシュに比べ低下しなかった。2つ目は水滴の表面積である。水滴が広がってしまうとその分再蒸発が起こりやすくなってしまう。撥水面では水滴が球形になり再蒸発しづらくなったのだと考えた。

また、親水面は網目に水が入り込むように水を捕集し、撥水面では網目に乗るように水滴が捕集された。

4 探究2 親水撥水パターンニング加工が捕集量に与える効果について

(1) 動機

探究1で親水面では捕集効率が高まっていた。そのため、親水撥水パターンニング構造が捕集効率に良い影響を与えるのか、またそれはなぜなのか疑問に思った。研究の動機で述べたが、この親水撥水パターンニング構造はキリアツメゴミムシダマシという虫の背中に存在している。この虫は砂漠に生息していて、霧が発生するとその霧に羽を向け水滴を捕集するのである。これに注目した先行研究がある。[2]の研究では撥水の効果で滑落を促せることが示されている。[3]の研究では捕集するデバイスに超撥水加工を施したところ親水面のみで凝集が起こり水滴のマイクロアレイが生じていた。これも撥水面の凝集が弱いことを示している。しかし、探究1では撥水面が全く水を集めないわけではなかった。参考文献では撥水面がほとんど水滴を凝集していなかったために親水面のみに水滴が凝集していた。また、撥水面の顕微鏡写真Fig. 1を見ると粒状に水滴が生じている。そこで、ある程度撥水の程度が弱く、かつ滑落しやすいければ、撥水面に生じた小さな水の粒が親水面に引き寄せられることで水滴の成長が起こると考えたのである。どれだけ水滴を集め、かつ親水面を増やし凝集力を上げるかが大切になってくる。パターンニング構造

にこの狙いを込めて独自の研究を展開しようと考えた。

(2) 仮説

親水撥水パターニング加工は超親水のための構造よりも捕集効率が上がる。

理由

親水撥水パターニング構造は捕集量を上げ、かつ滑落しやすい構造であると考えているからだ。撥水面は水滴を押し流す効果を持つ。これは親水面の接触角が撥水面のそれに比べて小さく、撥水面から押し出す方向に力が生じるからである。現在はこの技術が液滴操作に用いられている。^[4] この事例においても同様に撥水面が生成した水滴を親水面に押し流し、親水面での水滴のサイズが大きくなっていく。そして、表面張力では支えきれず水滴が滑落するのである。探究1で顕微鏡を用いて見た時は水滴が小さく、集まって大きな水滴となり滑落していく可能性はとて低く見えた。

(3) 方法

パターニング加工が及ぼす捕集効率への影響を調査するために、偏光シート、撥水、親水加工を施したメッシュとで比較実験を行った。

パターニング加工の作り方としてスタンプ式を採用した。撥水加工を施したものの上に親水性のものを塗布していくのである。いろいろな素材で試した結果、撥水加工を施した偏光シート上にゴム製の凹凸版

(Fig. 4) で親水性の液体をスタンプすることにした。Fig. 5のようにパターニングシートができた。塗布する親水性のものとしては酸化チタンを水で溶いてペースト状にしたものを採用した。Fig. 6のようにパターニングメッシュができた。

こうしてパターニング加工を施したシートを実験装置で捕集させ、その様子をビデオカメラで撮影した。メッシュはカメラで撮影したのち顕微鏡で捕集の様子を確認した。メッシュ内に4地点を設定し、どのメッシュも同じ倍率で写真を撮影し、水滴が生じている部分の面積を比較する。今回は水滴を集めているポイントだけを黄色で着色しカラー成分測定「色とりどり」^[5]でその色が画像内に占める割合計算し、画像内の水滴の個数で割った値を比較するという手法を取った。水滴のサイズを比較するためである。黄色で着色をし、画像のサイズをそろえ解析を行った。

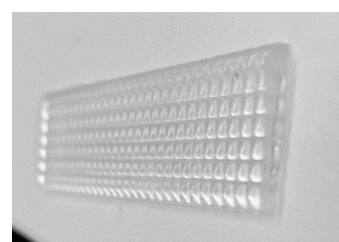


Fig. 4 スタンプ

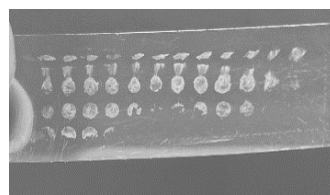


Fig. 5 パターニングシート

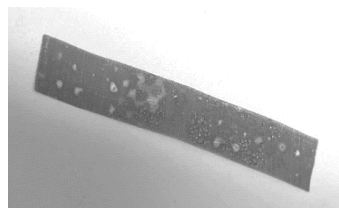


Fig. 6 パターニングメッシュ

(4) 結果

Table. 1 パターニングメッシュ上にある一粒当たりの水滴のサイズ

	パターニング加工メッシュ			撥水加工メッシュ		
	画像中の水滴の割合 (%)	水滴の個数 (個)	1 滴当たりの割合 (%)	画像中の水滴の割合 (%)	水滴の個数 (個)	1 滴当たりの割合 (%)
A	17.7	28	0.63	11.0	11	0.1
B	37.9	29	1.3	13.4	108	0.12
C	30.8	57	0.54	2.70	34	0.08
D	5.07	6.0	0.95	11.7	88	0.13
平均	23.0	30	0.86	7.23	60	0.11

親水加工を施したメッシュでは水滴が広がってしまい上手くマークできず調査できなかった。しかし目視でも水滴にはなっておらず、一様に広がってしまっていたのは明らかであった。

(5) 考察

Table. 1 から、パターンニングシートを用いると撥水面にたまった水が親水面に押し出され（親水面が引き寄せ）、大きな水滴を創り出すことが出来ていると分かった。私の意図通り撥水面から親水面へ水滴が動きサイズを大きくするというパターンニングの効果が確認できた。親水面では水滴にならず滑落しづらいため捕集効率は低いと考える。

また、水滴が親水面の方に引き寄せられることでパターンニングメッシュにおける撥水面の捕集効率は上昇したのではないかと考えられる。撥水加工のみであると水の逃げ場がない。そこに親水面が点在することで水がしっかり撥水面から逃げ、まとまっていくのである。撥水加工メッシュでは小さな水滴が点在していたが、パターンニングメッシュは小さな水滴がほとんど見られない。撥水面の空気と触れる表面積は水滴がない方が増加し、表面積が増えれば水滴の凝集の効率も同様に増加するのは明らかである。つまり、滑落にも、捕集にもいい影響を与えるはずだと分かる。

親水加工を施した面では水滴が広がっていったため、撥水面での評価をする際に水滴をマーキングしその面積を比較するという方法は有効であると考えられる。

加えて、親水加工を施したポイントの捕集スピードが撥水面に比べて速かった。一方で探究2と同様に、撥水面においても時間をかければ親水面と同レベルまで水滴捕集を行えることも分かった。録画した映像やそれを切り取った画像から、撥水面では捕集スピードが遅くなっているのだとわかった。捕集の速度に差が生じているだけであり、探究2の考察で述べたように、水蒸気は親水面に引きつけられ、撥水面では水滴を生じるきっかけを作りづらく凝集効率が低いという仮説は誤っていた。水蒸気のキャッチのしやすさに効果を及ぼしていると考えたほうが自然であると考えた。

また新たに、パターンニング加工が捕集に対して正の効果があつたことを踏まえると撥水面での半自然的なパターンニング構造の生成が撥水面での捕集効率を高める1つの要因になっていると考えた。というのも、撥水面では時間の経過とともに水が表面を覆うようになってくる。水はもちろん親水性のものであるため、撥水面状に水が凝集すると自然にパターンニング構造が形成されるというわけだ。

5 探究3 撥水面が与える捕集量への影響

(1) 動機

探究2でパターンニング構造の有効性を示すデータが集められたが、その結果もあわせて撥水の効果が与える捕集効率への影響を考える必要性を感じた。そこで撥水面ではどのように水を捕集するのか詳しく調査し、自然に生じるパターンニング構造は捕集効率に影響を及ぼすのか検証したいと考えたのである。これまでにない新たな考察をしようこのテーマで実験することを決めた。

(2) 仮説

撥水面では捕集量が大きく増加するタイミングがあると考えた。

理由

探究2の考察で述べたように、撥水面では自動的に親水撥水パターンニング構造が形成されるタイミングがあると考えた。パターンニング構造の効果として水滴が親水面に集められると探究2で述べた。ある程度メッシュ状に水がたまり、親水面という水に、周りの撥水面から小さな水滴が集められるため、水滴が撥水面にたまりづらくなり、凝集効率が上がるのだと考えた。

(3) 方法

探究1、2と同様の撥水加工を、粗さの異なる3種類のメッシュに施し、実験装置を用いて冷却し、20

分間捕集させた。粗さが#100, #300, #500 の3種類のメッシュを用いた。それぞれ線の直径が 100 μm 、40 μm 、25 μm である。メッシュを上から抑える棒は撥水加工を施したメッシュを何度も巻いて作成したものである。それぞれのメッシュを冷却装置に置いて水を捕集させ、その様子を録画した。2分おきにスクリーンショットを行い、カラー成分測定「色とりどり」[5]を用いて水滴を集めている面積から、捕集量の変化を数値化して調べる。精度を上げるため ImageJ[6]というソフトを用いてシャープネスを上げ、モノクロ画像にして水を捕集している白色の部分の面積を計算した。

(4) 結果

Table. 2 撥水メッシュにおける水滴を捕集している面積の推移 (%)

	#100	#300	#500
2 分後	0.6	0.4	0.3
4 分後	0.2	0.1	1.5
6 分後	0.3	0.2	0.8
8 分後	0.6	0.4	0.7
10 分後	0.5	0.2	0.4
12 分後	0.4	0.4	0.8
14 分後	0.4	0.3	0.9
16 分後	15.2	6.0	6.3
18 分後	10.2	4.6	4.7
20 分後	11.4	5.7	5.5

(5) 考察

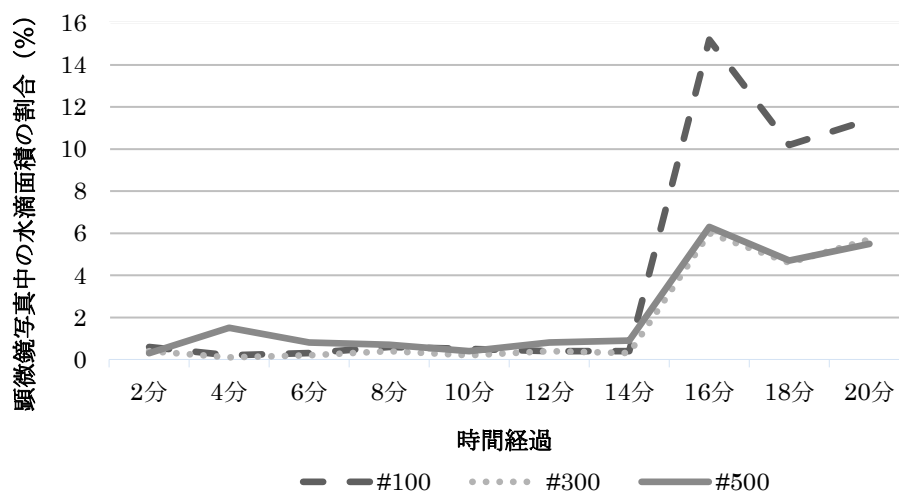


Fig. 7 水滴を捕集している面積の推移 (%)

Table. 2 と Fig. 7 より 16 分を境に捕集量が急激に増加している。仮説は正しかったと考察する。基本的に捕集量は装置上に水の膜が生じることで空気と降れる表面積が減少してしまい、捕集量が低下してしまうという傾向にある。その効果を踏まえると一層捕集量が増加したことになる。急激に上昇したことから撥水面と親水面の面積比にちょうど良いバランスがあることも分かった。

一方で、16 分以降ではあまり捕集量に大きな増加がみられなかった。これは親水面とは言え表面が水に覆われてくると接地面積が減ってしまい捕集効率が低下してしまうことが原因であると考えた。今回親水

撥水パターンニング化が進むということは表面に水が溜まってきていることを意味している。つまりその負の効果が生じたものであると考えた。ここから、撥水加工のみで捕集量を上げるためには撥水の程度が重要になってくる。この実験での16分の状態をキープする必要があるということだ。撥水の程度が強すぎると水がたまらず、ある程度弱いと水が流れず今回のように効果が途中で終わってしまう。親水撥水パターンニング構造を作るのに比べて複雑である。

6 今後の展望

更に他の手法で水滴のサイズを変えられるものはないか調査したい。今はメッシュの粗さが変わったときに捕集量に変化が出るのか詳しく調査したいと考えている。メッシュにおける水滴の存在の仕方が親水面と撥水面で少し異なっていた。親水面では入り込むように、撥水面ではメッシュの上に乗っかっていた。メッシュを工夫すれば生じる水滴のサイズを容易に変更できるかもしれない。そうすれば滑落の効率をあげることが容易になるだろう。

加えて、パターンニング構造におけるもっとも捕集効率の高い撥水面と親水面の面積比効果の程度を考えたい。それぞれ滑落と凝集に関わっている。しかしトレードオフの関係にありちょうどよいバランスがそこにあるのではないかと考えている。

7 感想

今回の研究では数値化が難しく客観的な判断につなげることが非常に難しかった。また、例えばスタンプを使ってパターンニング構造を作ろうという段階に行くまでもたくさんのパターンニングの方法、材料を試し、決定してきたというように、試行錯誤し、時間をかけて進んでいくことができた。この経験はとても貴重であり研究の地道な大変さを所々で痛感した。一方で面白い現象、データが入手できた時というのは心躍る瞬間であり、研究や科学の面白さを実感するときでもある。こうした感情を忘れず研究を楽しみ、様々な現象の調査に根気よくこれからも取り組んでいきたいとこの研究を通して再確認できた。

8 謝辞

研究の指導をしてくださった下村勝先生、支援をしていただいた静岡大学FSS関係者の皆様、ならびに私の研究に関わってくださった全ての人にここで感謝申し上げます。本当にありがとうございました。

9 参考文献

[1]

下吹越 光秀, 光触媒の超親水性-理論と応用, 表面技術, 1999, 50 巻, 3 号, p 247-250, 公開日 2009/10/30, Online ISSN 1884-3409, Print ISSN 0915-1869, <https://doi.org/10.4139/sfj50247>, https://www.jstage.jstgo.jp/article/sfj1989/50/3/50_3_247/_article/-char/ja

[2]

平井 悠司, 下村 政嗣, キリアツメゴミムシダマシから着想を得た大気からの水回収技術, 表面技術, 2017, 68 巻, 3 号, p. 127-131, 公開日 2018/03/01, Online ISSN 1884-3409, Print ISSN 0915-1869, <https://doi.org/10.4139/sfj.68.127>, https://www.jstage.jst.go.jp/article/sfj/68/3/68_127/_article/-char/ja

[3]

井上 泰志, 齋藤 永宏, 高井 治, バイオミメティック超親水・超はっ水性薄膜, 表面技術, 2005, 56 巻, 7 号, p. 379~384, 公開日 2006/01/31, Online ISSN 1884-3409, Print ISSN 0915-1869, <https://doi.org/10.4139/sfj.56.379>,

https://www.jstage.jst.go.jp/article/sfj/56/7/56_7_379/_article/-char/ja

[4]

九州工業大学 安田研究室 研究紹介「微量液体操作デバイス」

<https://www.lifeyutech.ac.jp/~yasuda/jp/research/liquidhandling/index.html>

使用したツール

[5]

カラー成分測定「色とりどり」

<https://ironodata.info/extraction/irotoridori.php>

[6]

ImageJ

<https://imagej.nih.gov/ij/index.html>