

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 物理與天文學科
佳作

051803

描圖紙的捲曲行為變因探討

學校名稱： 國立蘭陽女子高級中學

作者：	指導老師：
高二 楊悅彤	張瑜家

關鍵詞： 描圖紙、捲攤現象

摘要

描圖紙又稱硫酸紙，經硫酸處理後形成部分纖維被轉化成凝膠狀且不可滲透性澱粉樣蛋白的紙張。本研究旨在探討該捲曲、反轉現象的各種可能變因，並推估該紙張捲攤行為的機制。經探討發現環境的溫、濕度影響其現象，且描圖紙接觸的溶液不同也影響運動。描圖紙本身變因有表面材料、大小及重量。不論描圖紙形狀，最後都以同一方向平行捲曲，與描圖紙上的纖維方向有絕對關係。進行不同面積方形描圖紙捲曲實驗，表面積越大的正方形描圖紙在捲攤現象花費較多時間，長形描圖紙捲曲速度則以非捲曲長度為影響因素。描圖紙表面處理的實驗，無論凡士林塗於描圖紙任意面，皆影響其捲攤。描圖紙較厚需更多時間完成現象。根據以上，推測為吸水使描圖紙膨脹導致。

壹、 前言

一、 研究動機：

在 IYPT2024 的網站上，我看見了許多有趣的實驗，其中一個是將描圖紙置於水面上，描圖紙會捲曲再攤開。由於在見到這個實驗之前，日常生活中許多紙張在潮濕或者沾到水的情況下會捲曲的現象，感到好奇所以決定設計實驗探討。推測當描圖紙接觸水面時，它的表面有紋路與描圖紙產生反應。這些材料會張力不均勻分佈，使得描圖紙的形狀發生變化，進而改變其運動模式。於是我們針對這個問題設計了幾個實驗觀測描圖紙在實驗中如何受到水的影響而改變。

二、 文獻回顧：

描圖紙的形狀變化是由水進入多孔纖維素紙的運動引起的，其運動類似雙金屬恆溫器(由兩層膨脹係數不同的金屬經複合加工製成的帶材)。紙張層的差異膨脹導致紙張彎曲，但隨著水進一步擴散到紙張中，膨脹梯度減少，如果紙張還不是封閉的圓柱體，則紙張開始展開，當紙張完全濕潤後，紙張就會攤平。根據 Reyssat and Mahadevan 於 2011 年指出，紙張長度小於一定長度，寬度小於長度，紙張就不會合攏成一個完整的圓柱體。

紙張越薄，捲起的速度越快、捲筒越緊，曲率達到最大值的時間會隨著紙張厚度增加而增加，與擴散動力學一致。毛細現象是水在紙張等多孔結構中的典型傳輸模式，透過毛細管滲水可以產生雙層結構。此機制被稱為 Washburn 定律。雙層的最大曲率與材料的相對膨脹 ε 與其厚度 h 的比率呈線性關係：

$$K_m = 1.5 \frac{\varepsilon}{h}$$

描圖紙非常緻密，孔隙連通性非常低，因此傳統的吸收機制在這裡可能不起作用。

可能是分子擴散，並產生 $\tau \cong h/D$ ， D 是分子擴散係數。紙在純水和界面活性劑中彎曲力學相同，證明水是通過分子擴散而不是毛細管吸收傳輸的。透過假設水含量分佈的擴散前緣平滑，預測紙帶的重新縮放。

透過添加界面活性劑改變了水的表面張力 γ 。雖然分子擴散過程不受 γ 變化的影響，但毛細管吸收率會改變。當表面張力從 72 mN/m 下降到 26 mN/m 時，描圖紙的彎曲動力學保持不變，而根據 Washburn 定律，該過程應該慢 1.5 倍。所以分子擴散是水通過狹窄孔隙的主要機制。

雙金屬片原理是透過兩個不同熱膨脹係數的金屬，在升溫的過程中透過不同的膨脹程度來產生變形並引發讓電路產生通路或段路的機制。描圖紙又稱硫酸紙，經過硫酸處理之後形成部分纖維被轉化成凝膠狀且不可滲透性澱粉樣蛋白的紙張。描圖紙張由於經過加工，中間紙層不容易透水，故可以將紙張看成兩個不同層組成。碰觸水面時，接觸面吸水而形成一個濕層、另一層為乾層，因為濕層膨脹且乾層未膨脹，兩者膨脹情形不同引發扭矩差異。

$$k = \frac{\varepsilon}{h} f(m, n) \quad (1)$$

ε 是由各層的差異膨脹引起的相對膨脹， $m = h_{dry}/h_{wet}$ 、 $m = E_{dry}/E_{wet}$ 是乾濕紙層的厚度和楊氏模量比，

$$f(m, n) = \frac{6(1+m)^2}{3(1+m)^2 + (1+mn)(m^2 + \frac{1}{mn})} \quad (2)$$

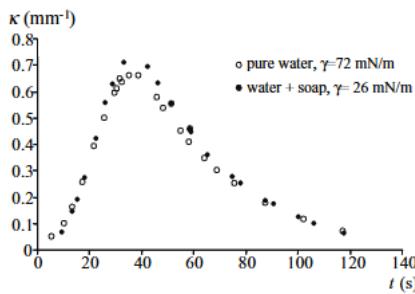
雙層的最大曲率與材料的相對膨脹 ε 與其厚度 h 的比率呈線性關係：

$$K_m = 1.5 \frac{\varepsilon}{h} \quad (3)$$

描圖紙非常緻密，孔隙連通性非常低，因此傳統的吸收機制在這裡可能不起作用。可能是分子擴散。並產生 $\tau \cong h/D$ 是分子擴散係數。

紙在純水和界面活性劑中彎曲力學相同，證明水是通過分子擴散而不是毛細管吸收傳輸的。透過假設水含量分佈的擴散前緣平滑，預測紙帶的重新縮放曲率作為無量綱時間的函數。在長時間內，該模型與實驗數據非常吻合，而短時行為則是由於模量作為水體積分數的函數以及紙張垂直於其平面的膨脹而發生的複雜變化。

透過添加界面活性劑改變了水的表面張力 γ 。雖然分子擴散過程不受 γ 變化的影響，但毛細管吸收率應該會改變。



(圖片來源 Reyssat, E., & Mahadevan, L.)

如圖，一張描圖紙的彎曲動力學保持不變，而根據 Washburn 定律，該過程應該慢 1.5 倍。所以分子擴散是水通過狹窄孔隙的主要機制。

蒸氣濃度沿 z (紙張表面的法線)的一維擴散方程，水含量 $\varphi(z, t)$ 可寫成

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = D \frac{\partial \varphi}{\partial z} \quad (4)$$

其中，水的擴散率為 $D = D(\varnothing(z, t))$ ，在非膨脹介質的情況下，近似值 $D = \text{const}$ ，(4)可以簡化為

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \quad (5)$$

結合邊界條件 $\emptyset(z=0,t) = \emptyset_s$ 和 $\frac{\vartheta_\emptyset}{\vartheta_z(z=h,t)} = 0$ ，乾燥紙張初始條件 $\emptyset(z,t=0) = 0$ 。使用傅立葉變換，可得出

$$\emptyset(z,t) = \left[1 - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{4}{(2m-1)} \times \sin\left(\frac{(2m-1)\pi z}{2h}\right) \exp\left(-\frac{(2m-1)^2\pi^2 D t}{4h^2}\right) \right] (6)$$

根據楊氏模量、含水量和面內相對膨脹計算厚度不均勻的材料帶的捲曲半徑，通過含水量的 z 座標為 $\emptyset(z,t)$ 。

將處於平衡狀態的未變形乾燥地方定義為 Z_n ，曲率為 $K = 1/R$ ，延伸度為

$$\varepsilon_k(z) = K(z - Z_n) (7)$$

含水量 $\varphi(z)$ ，膨脹量為 $\varepsilon(\varphi(z,t))$

帶材截面上位置 z 的局部應力為

$$\sigma(z) = E(\emptyset(z,t))(\varepsilon_k(z) - \varepsilon_\emptyset(\emptyset(z))) (8)$$

在平衡狀態橫向力為 0，

$$F = 0 = \int_0^h E(\emptyset(z,t)) (\varepsilon_k(z) - \varepsilon_\emptyset(\emptyset(z))) dz (9)$$

$$0 = k(I_1 - Z_n I_0) - I_{\emptyset 0} (10)$$

其中， $I_i = \int_0^h E(\emptyset(z,t)) z^i dz$ ， $I_{\emptyset i} = \int_0^h E(\emptyset(z,t)) z^i \times \varepsilon_\emptyset(\emptyset(z)) dz$

截面力矩為 0，

$$M = 0 = \int_0^h E(z) z (\varepsilon_k(z) - \varepsilon_\emptyset(\emptyset(z))) dz (11)$$

$$0 = k(1 - Z_n l) - 1 (12)$$

結合(10)、(12)，曲率表達式為

$$K = \frac{1}{R} = \frac{I_l I_{\emptyset 0} - I_0 I_{\emptyset l}}{I_l^2 - I_0 I_2} (13)$$

三、研究目的：

(一) 探討描圖紙捲曲原因。

(二) 探討影響描圖紙捲曲之變因與其關係。

貳、 研究設備及器材

一、 實驗裝置：

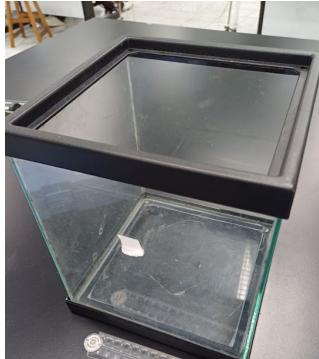
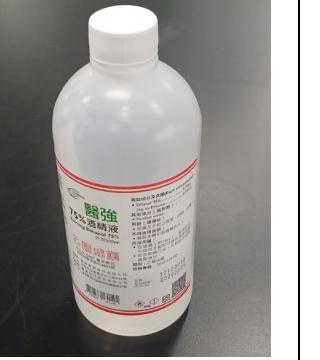
器材名稱	1.描圖紙	2.方形玻璃水缸	3.手機	4.手機顯微鏡	5.筆芯
型號/大小	未知/75 磅/95 磅	邊長 19cm	Galaxy a34	uhandy 行動顯微鏡	pentel HB 0.5
器材功能	進行捲曲實驗 4/24~使用容器	2024 4/24~使用容器	紀錄實驗影像/ 計時	觀察描圖紙紋路	觀察描圖紙紋路

器材名稱	6.凡士林	7.玻璃紙	8.咖啡濾紙	9.塑膠袋	10.牙籤
型號/大小	Vaseline		omax		刷樂
器材功能	描圖紙塗料	其他紙類	其他紙類	其他紙類	描圖紙支架

器材名稱	11.乾燥劑	12.剪刀	13.筆/筆記本	14.筆電	15.溫溼度劑
型號/大小	氯化亞鈷/矽膠	500ml,玻璃製			TANITA
器材功能	除描圖紙濕氣	裁減描圖紙	紀錄數據	整理數據	描圖紙支架

器材名稱	16.酒精	17.大豆沙拉油	18.色素	19.酒精度劑	
型號/大小	75%	台糖		aichose Brix	
器材功能	調整液體成分	調整液體成分	觀測液體移動	觀測酒精濃度	

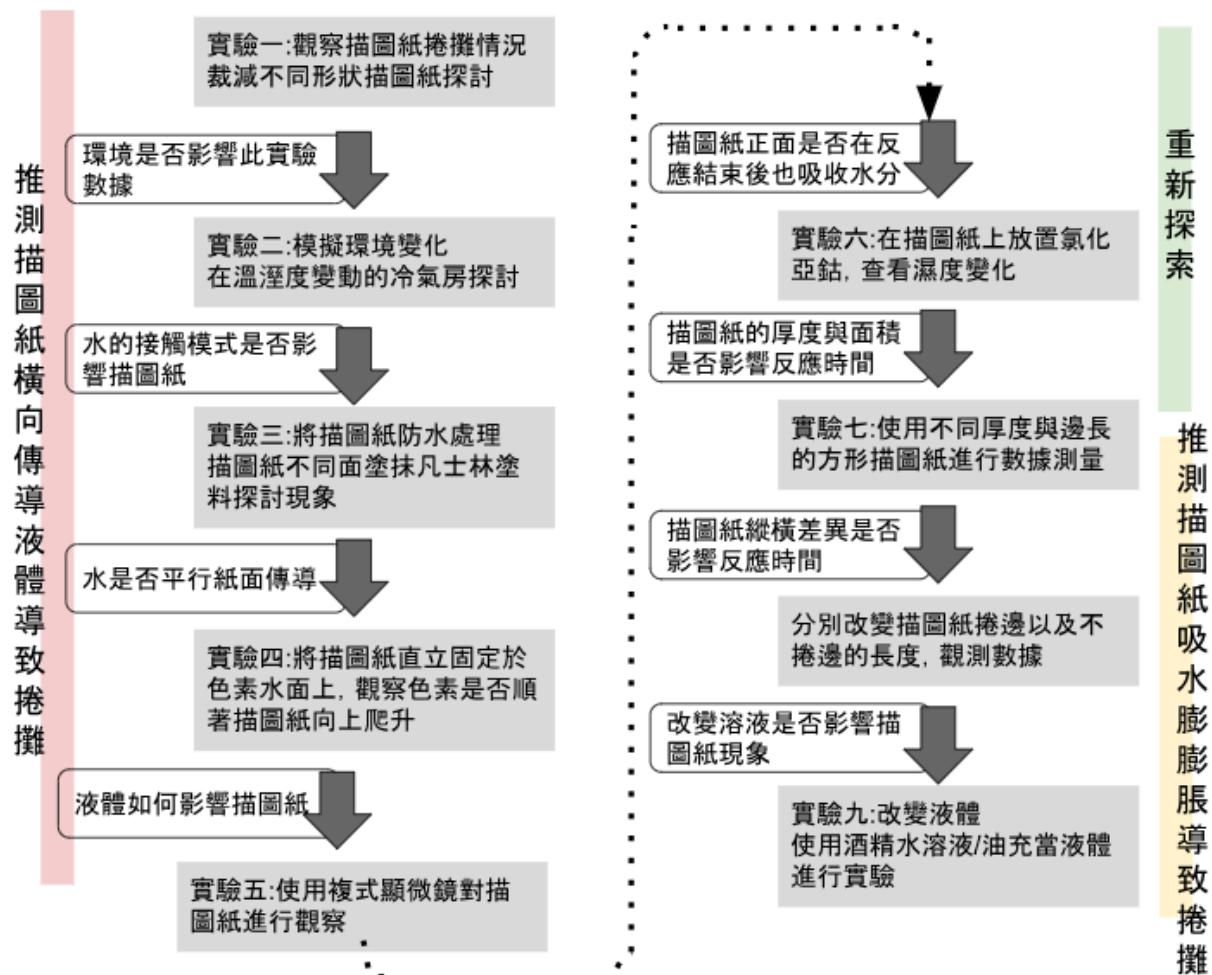
(表格來源為作者自製)

			
1.描圖紙	2.方形玻璃水缸	4.手機顯微鏡	5.筆芯
			
6.凡士林	11.乾燥劑	15.溫溼度劑	16. 75%酒精
			
17.大豆沙拉油	18.色素	19.酒精度劑	

(圖片來源為作者自製)

參、 研究過程與方法

本實驗室先由初步觀察描圖紙在不同的紙張形狀下因為接觸水面而引發的各種形狀改變。經過幾次觀察發現有時候描圖紙會因為不同一天進行的實驗引發不同的反應。於是又再進行了環境因子對捲曲的影響、描圖紙表面處理對接觸水面的影響、水對不同面積以及重量描圖紙的影響、不同酒精濃度以及油對描圖紙的影響等。

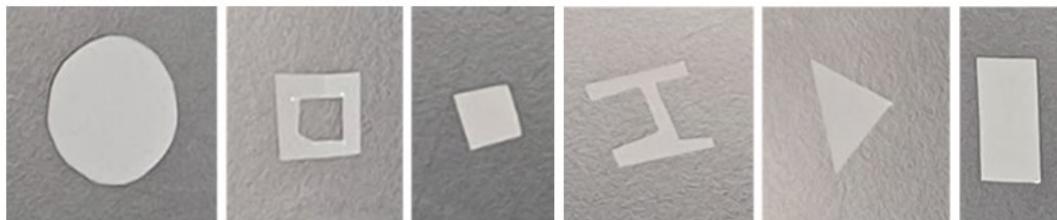


圖一、本研究過程流程圖(圖片來源為作者自製)。

一、實驗一 不同形狀對描圖紙的影響

(一) 實驗說明

想要觀察描圖紙是如何進行捲曲與攤開反應，於是裁減各種形狀的描圖紙進行探討，查看是否有某種特定圖形才造成捲曲(圖二)。



圖二、觀察水對描圖紙影響中所採用的各種描圖紙外觀(圖片來源為作者自製)。

(二) 實驗設計、實驗步驟

將描圖紙裁剪成各式形狀(圖二)，觀測捲曲方向

二、實驗二 不同溫溼度對描圖紙捲曲影響

(一) 實驗說明

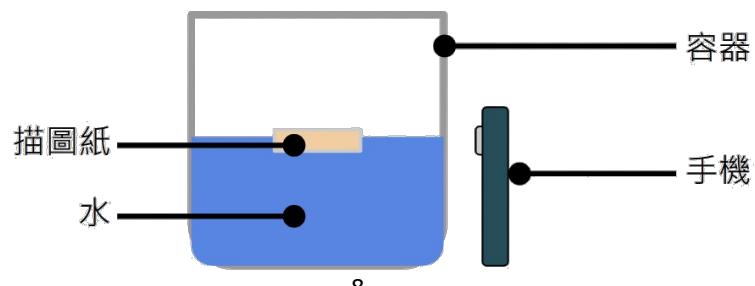
發現相同操控變因的實驗在不同天進行時，數據有明顯的差異，於是推測可能是天候不同而導致，所以決定在夏天於變動的冷氣房中進行實驗，觀察是否因為溫溼度的變動造成描圖紙的實驗數據產生變化。

(二) 實驗設計

透過冷氣浮動溫度與濕度，模擬天氣變動，觀察描圖紙數據是否改變。

(三) 實驗步驟

1. 選定密閉並且擁有冷氣機的地方進行實驗。
2. 將描圖紙的水缸置於與冷氣出風口歪斜的地方，避免水面明顯的被風吹動。



圖三、實驗操作設置情況(圖片來源為作者自製)。

3. 使用 75 磅描圖紙，面積 1*1cm
4. 開啟冷氣
5. 在室內溫溼度尚未平衡時，對描圖紙進行實驗並且記錄數據。

三、實驗三 描圖紙進行表面防水處理對捲曲的影響(描圖紙是否接觸水對捲曲情形的影響-凡士林實驗)

(一) 實驗設計

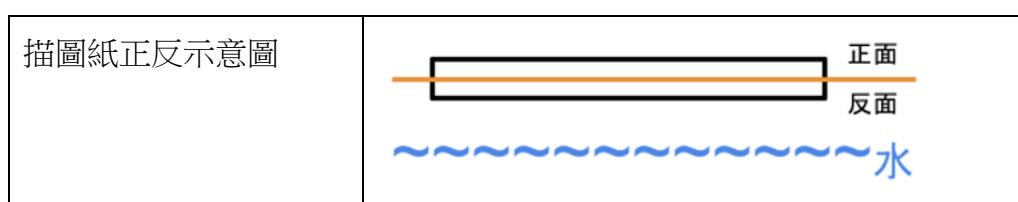
在 IYPT 的題目描述中，描圖紙在實驗中需接觸到水，想驗證描圖紙的捲曲是否會因「與水接觸與否」受到影響。國中生物課有關於保衛細胞的實驗，使用凡士林作為防水塗料，故此次實驗參考該圖料，將描圖紙塗抹凡士林以達到防水目的進行實驗。

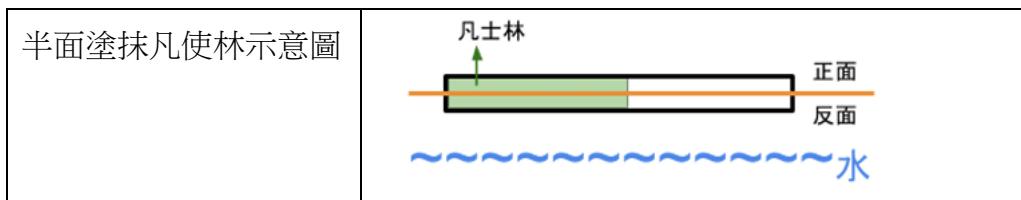
(二) 實驗說明

將描圖紙劃分為正面、反面，並依序在描圖紙的正面、反面以及雙面塗抹凡士林，入水觀察，並留存一張描圖紙雙面皆不塗抹凡士林，進行比對。

(三) 實驗步驟

1. 裁減 3*1cm 的描圖紙 5 張，標示正面與反面。
2. 將一張描圖紙留存備用，其餘夾起懸空。
3. 將三張描圖紙，分別於正面、反面、雙面塗抹凡士林。
4. 將最後一張描圖紙半面塗抹凡士林(圖四)。





圖四、半面塗抹凡士林的操作示意圖(圖片來源為作者自製)。

四、實驗四 描圖紙是否接觸水對捲曲情形的影響-牙籤實驗

(一)、實驗說明

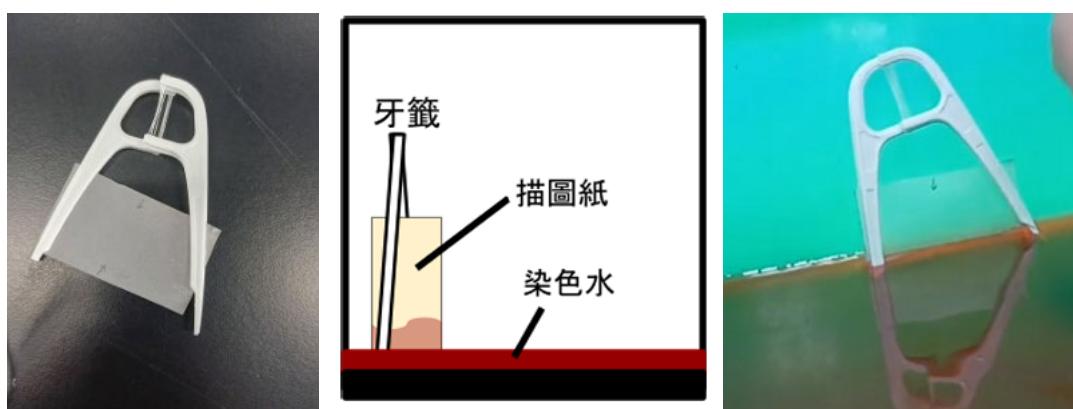
推測描圖紙水平紙面方向傳導可能不好，於是用牙籤棒將描圖紙直立於水面上靜置，觀測是否出現水位上升的傳導情形。

(二)、實驗設計

將描圖紙用牙籤棒架起，豎於染色水面上，靜置 30 分鐘，查看水位是否會逐漸往上移動，像毛細現象一樣。

(三)、實驗步驟

1. 以牙籤製作支架(圖五左)。
2. 於容器裝一層水以後，染色。
3. 將描圖紙固定於牙籤支架，垂直放入水中(圖五中、右)。
4. 靜置 30 分鐘。



圖五、以牙籤作為支架，放入水中觀察變化。圖左為固定牙籤的方式。圖中為實驗示意圖。圖右為實際實驗情況(圖片來源為作者自製)。

五、實驗五 描圖紙吸水之間，纖維變化觀察

(一)、實驗說明

根據實驗四，如果描圖紙材質內部沒有毛細現象，想進一步了解描圖紙上的纖維是否有因為在捲攤的過程中吸水的現象。

(二)、實驗步驟

使用藍色染色水以及純水讓描圖紙吸水。藍色染色水進一步烘乾。用顯微鏡觀察描圖紙上纖維是否有吸水的情況。

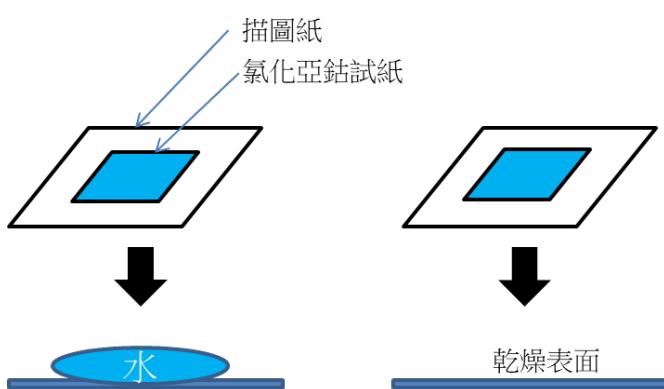
六、實驗六 描圖紙吸水後攤平現象與正面吸水的關係

(一)、實驗說明

經過實驗四及五的觀察，想了解描圖紙的正面在捲攤過程中是否會潮濕，以及發生的時間點。

(二)、實驗設計與步驟

在一平面上放置大水珠，將烘乾後的氯化亞鈷試紙(5 X 5mm)疊在乾燥的描圖紙片(10 X 10mm)上，放在水滴上。同時，在旁邊放上一片一樣的紙片且不沾水。在過程中觀察及拍照。



圖六、描圖紙吸水後攤平，正面吸水關係研究示意圖(圖片來源為作者自製)。

七、實驗七 描圖紙厚度與面積對捲攤情形的影響

(一)、實驗說明

從實驗二的數據推測描圖紙沒有明顯的水平傳導，推測描圖紙的捲曲可能和垂直傳導有關，因此決定使用不同厚度的描圖紙進行實驗。

(二)、實驗設計

使用 75 磅與 95 磅描圖紙，分別裁剪成不同面積大小，投入水中進行數據蒐集。

(三)、實驗步驟

1. 將描圖紙折疊五次，使其擁有十張紙的厚度。
2. 使用螺旋測微器，分別測量描圖紙厚度，再除以 10 (結果如表一)。

表一、75、95 磅描圖紙厚度(表格來源為作者自製)。

75 磅紙	0.0292cm
95 磅紙	0.11cm

3. 將描圖紙裁剪成不同邊長的正方形，測量不同磅數紙的閉合時間。

八、實驗八 描圖紙縱橫是否影響捲曲

(一)、改變捲邊長

1. 實驗說明

在推測描圖紙是吸水膨脹而捲曲的以後，由於描圖紙捲曲的方向一直都相同(如圖，不論何種形狀皆水平往中心捲曲)，為了證明描圖紙的捲曲可能和固定方向的紋路吸水有關，決定使用捲邊相同的描圖紙進行實驗，來看在非捲曲相同長度的情況下，描圖紙的捲曲數據是否維持在差不多的範圍。

2. 實驗設計

改變捲邊長度並且固定非捲曲長度，觀測數據是否維持在差不多的量值。

3. 實驗步驟

- (1) 裁減非捲曲長度 1.5cm，捲邊長度 1~2cm 的描圖紙。
- (2) 投入水中觀測。

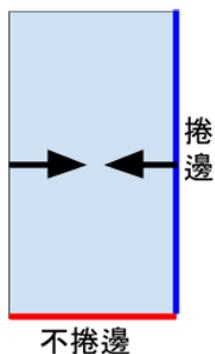
(二)、改變非捲邊長

1. 實驗說明

接著對描圖紙的另一邊長進行改變，按照推測，描圖紙的數據變化應受此邊影響，查看此兩邊對描圖紙影響的差異。

2. 實驗設計

改變非捲邊長度並且固定捲邊長度(圖六)，觀測數據是否有影響。



圖七、改變非捲邊長度示意圖(圖片來源為作者自製)。

3. 實驗步驟

- (1) 裁減捲邊長度 1.5cm，非捲邊長度 1~2 cm 的描圖紙。
- (2) 投入水中觀測。

九、實驗九 不同溶液對描圖紙捲曲的影響

(一)、實驗說明

確認是否只有水能讓描圖紙產生捲曲反應，其餘除了水以外的溶液是否也可以讓描圖紙捲曲。

(二)、實驗設計

將描圖紙投入不親水的油，以及酒精水溶液進行觀測。

(三)、實驗製作

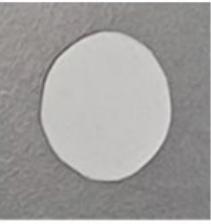
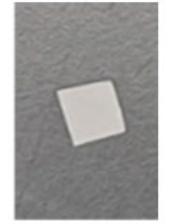
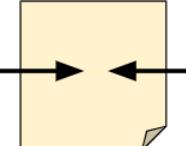
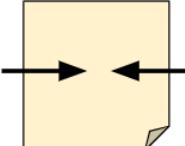
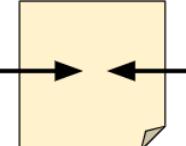
1. 裁剪 1.5*1.5cm 的 75 磅描圖紙。
2. 將大豆沙拉油倒入容器中。

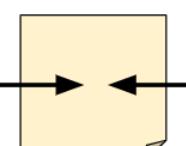
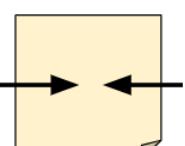
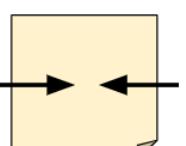
3. 丟入描圖紙進行實驗。
4. 調製 15% 酒精。
5. 蒐集 1.5cm 描圖紙的數據。
6. 丟入描圖紙進行實驗。
7. 將酒精濃度降低 5%。
8. 重複上述 5~7 步驟，直到酒精濃度降為 0%。

肆、 研究結果

一、 實驗一 不同形狀對描圖紙的影響

本實驗中發現不管如何剪裁描圖紙，各種形狀下的描圖紙放入水中捲曲的方向是一致的(圖八)。所以後續的實驗皆以矩形作為探討的形狀。。

描圖紙形 狀			
捲曲方向			

描圖紙形 狀			
捲曲方向			

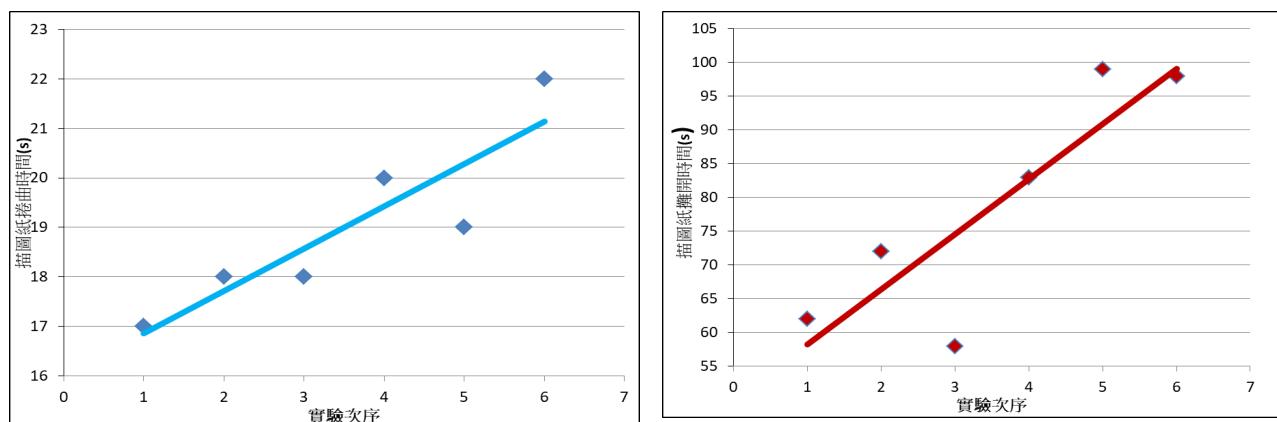
圖八、剪裁成不同形狀的描圖紙放入水中的捲曲方向紀錄(圖片來源為作者自製)。

二、實驗二 不同溫溼度對描圖紙捲曲影響

在一個變動中的環境下，溫度由 32°C 下降至 28°C ，相對溼度也跟著從 44%下降至 39%，同時進行描圖紙捲曲的實驗(表二、圖九)。描圖紙的閉合捲曲時間從 17 秒延長到 22 秒。，攤開的時間也跟著越來越長。

表二、不同溫溼度對描圖紙捲曲影響的捲攤時間記錄表(表格來源為作者自製)。

1*1cm 75 磅	32 度 c 44%	→28 度 c 39%				
實驗次序	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	第六次
閉合時間(s)	17	18	18	20	19	22
攤開時間(s)	62	72	58	83	99	



圖九、不同濕度對描圖紙捲曲的影響。圖左為描圖紙捲曲時間和溫溼度變動關係圖，圖右為描圖紙攤開時間和溫溼度變動關係圖(圖片來源為作者自製)。

三、實驗三 描圖紙進行表面防水處理對捲曲的影響

本實驗分成四種處理，完全沒有塗抹凡士林、正面(面對天花板)、反面(觸水面)、兩面皆塗。實驗記錄如表三，發現半面塗抹凡士林的實驗，只有不塗抹凡士林處有捲曲及攤開的反應。發現塗抹凡士林部分的描圖紙並未出現反應，推測描圖紙橫向傳導液體的能力可能不好。原先推測描圖紙拱起以後 攤開可能是因為水分由拱形的下往上傳遞，但從塗抹半面凡士林的實驗來看，水沒辦法進行橫向傳遞，需要進一步驗證。

表三、表面防水處理的描圖紙在水面上的捲攤反映紀錄表(表格來源為作者自製)。

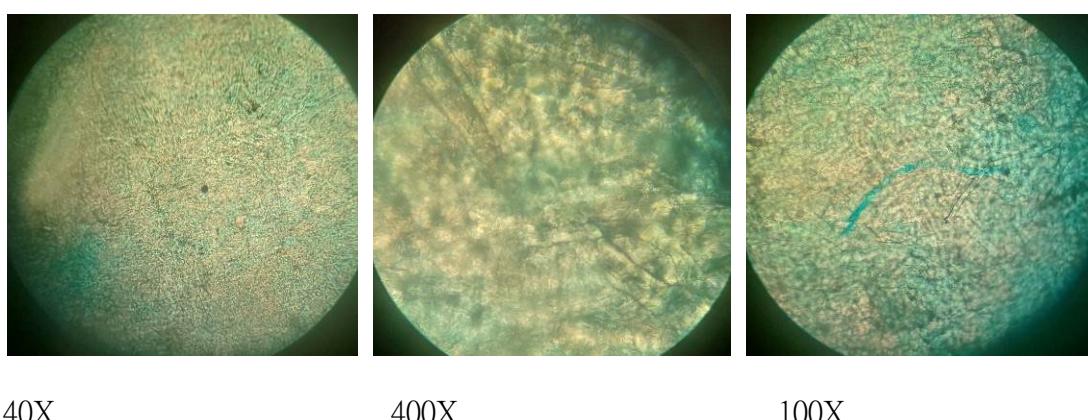
凡士林	無	半面	正面	反面 (觸水面)	雙面
捲曲現象	有	未塗處有	有	無	無
攤開現象	有	未塗處有	無	無	無

四、實驗四 描圖紙是否接觸水對捲曲情形的影響-牙籤實驗

延續實驗三，發現水可能沒辦法從橫向進行傳輸，有兩個原因。一個是因為描圖紙本身就沒辦法橫向運輸水分，另一個原因可能是因為凡士林的塗抹導致水分無法移動。因此在本實驗使用牙線棒固定住描圖紙，透過染色水觀察描圖紙本身是否沒辦法橫向傳遞水分(圖五)。

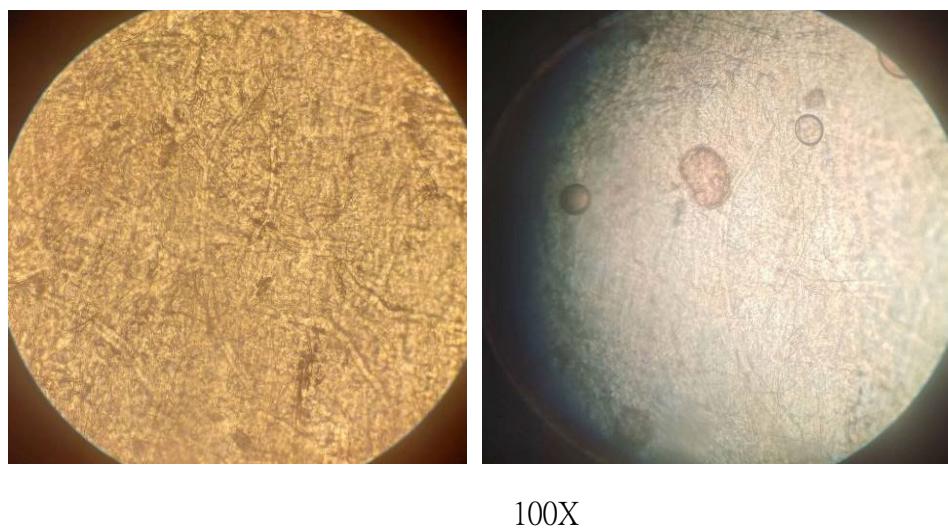
五、實驗五 描圖紙吸水之間，纖維變化觀察

用 95 磅描圖紙吸收藍色的染色水，五分鐘後稍微清洗後用 60°C 烘乾。再用顯微鏡觀察(圖十)。從圖十左圖可以看出來藍色染劑並沒有大量被描圖紙的纖維所吸收，若有被吸收則應該會看到大量的藍色的纖維(圖九左)。放大到 400 倍時，依然看到大量透明且沒有藍色色素的纖維(圖十中)，但是在很偶爾的情況下，還是可以看到像圖十右圖被藍色染劑染色的纖維。



圖十、95 磅描圖紙吸收藍色染色水之後烘乾之顯微鏡照片。圖左為 40 倍放大，圖中為 400 倍放大，圖右為 100 放大圖(圖片來源為作者自製)。

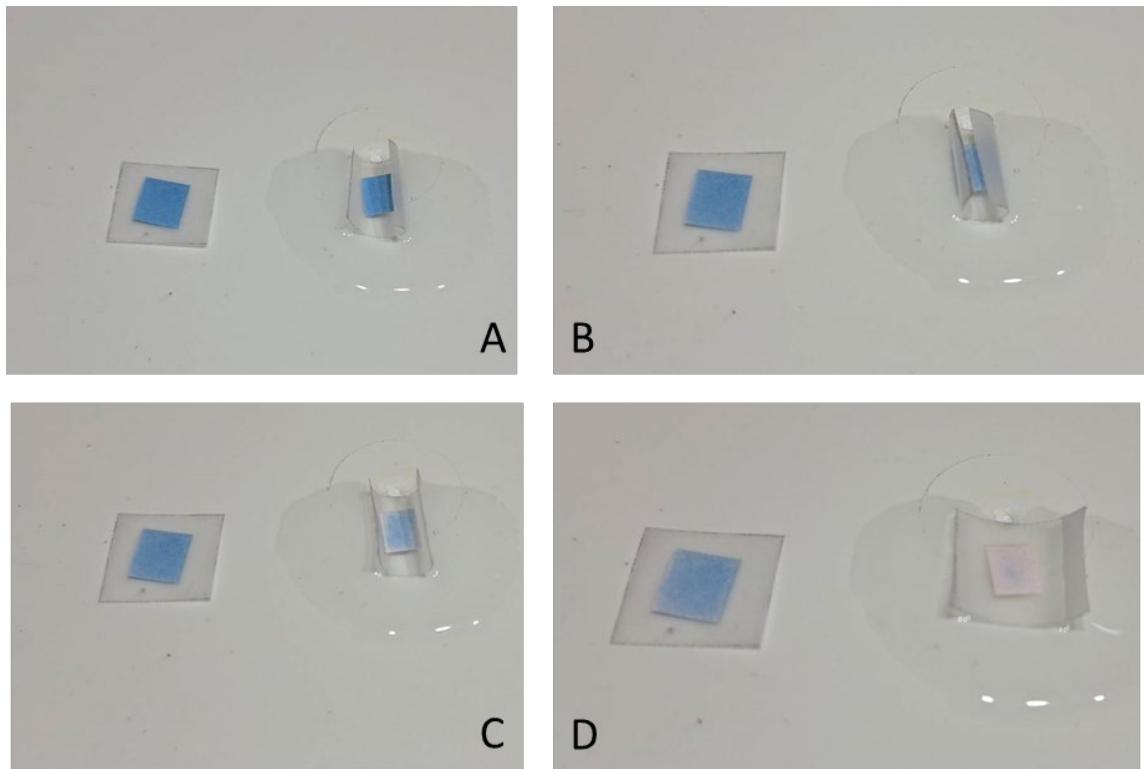
又鎖定特定纖維進行加入純水，觀察在描圖紙吸水期間，是否纖維有出現改變。因此用兩個載玻片將描圖紙輕輕夾住，並且記錄滴入純水前後的纖維差異(圖十一)。圖左為未滴水且放大 100 倍的影像，右圖為滴水五分鐘後在同一位置且放大 100 倍的影像。左右比對下發現加水前以及加水後，描圖紙上的纖維在放大 100 倍下沒有明顯變化。



圖十一、純水滴入描圖紙前後之纖維差異。圖左為滴水之前。圖又為滴水五分鐘後
(圖片來源為作者自製)。

六、 實驗六 描圖紙吸水後攤平現象與正面吸水的關係

用 95 磅描圖紙進行該實驗時，於左方放置一個對照組，做為比對觀察(圖十二)。



圖十二、描圖紙吸水後攤平現象之正面潮濕時間點觀察。按照時間順序是圖 A 至圖 D。圖 A 為閉合期間，一直到完全閉合之前，氯化亞鈷試紙一直是呈現藍色的。圖 B 為開始攤平的起始點後兩秒。圖 C、圖 D 為攤平期間拍攝 (圖片來源為作者自製)。

於圖十二 D 可以看到放置一段時間以後，因為空氣中的濕氣造成氯化亞鈷試紙逐漸變紅。經過實驗發現，描圖紙正面開始潮濕的時間點剛好是描圖紙開始攤平的時間點。符合我們猜想的，可能是因為正面開始吸水以後，扭矩差異開始變小，所以捲曲的程度會開始變小。

七、實驗七 描圖紙厚度與面積對捲攤情形的影響

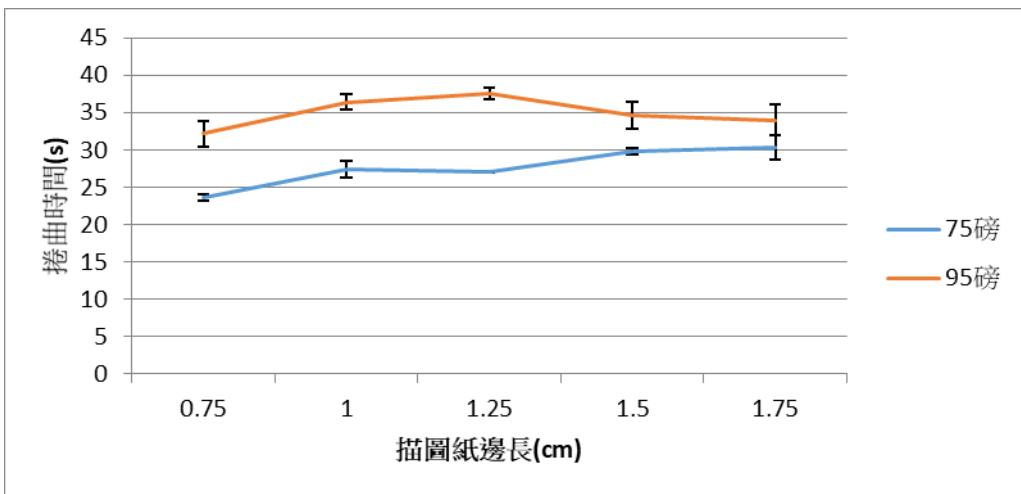
用 75、95 磅描圖紙，進行不同尺寸的剪裁片放入水中觀察捲、攤的時間變化(表四、表五)。因為描圖紙尺寸越大，放在水面上吸水捲起來之後，本實驗從邊長 0.75 公分僅進行到 1.75 公分的實驗。因為 0.5 公分以下的描圖紙放入水中後，有捲曲但無法完全閉合；2 公分以上的實驗放入水中之後，很多比例是捲曲後直接沉入水中，尤其是 75 磅的描圖紙特別嚴重。

表四、各種尺寸 75 磅方形描圖紙在水面上捲攤紀錄(表格來源為作者自製)。

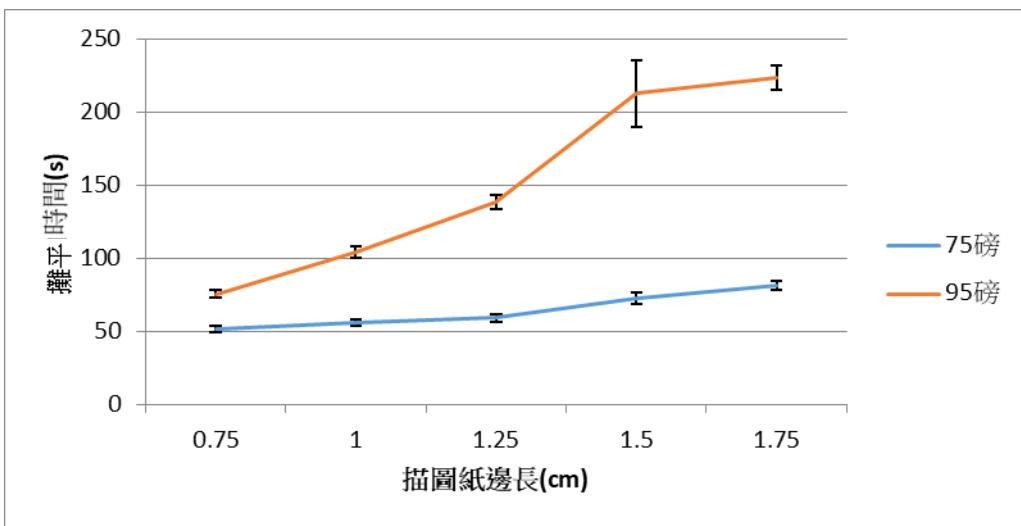
75 磅方形描圖紙									
邊長(cm)	捲曲時間(s)		平均值(s)	標準差(s)	邊長(cm)	攤開時間(s)		平均值(s)	標準差(s)
0.75	第 1 次	23	23.60	0.49	0.75	第 1 次	50	51.60	1.86
	第 2 次	24				第 2 次	51		
	第 3 次	24				第 3 次	52		
	第 4 次	24				第 4 次	55		
	第 5 次	23				第 5 次	50		
1	第 1 次	28	27.40	1.2	1	第 1 次	58	56.20	2.23
	第 2 次	28				第 2 次	58		
	第 3 次	29				第 3 次	52		
	第 4 次	26				第 4 次	57		
	第 5 次	26				第 5 次	56		
1.25	第 1 次	27	27.0	0.0	1.25	第 1 次	63	59.2	2.4
	第 2 次	27				第 2 次	57		
	第 3 次	27				第 3 次	58		
	第 4 次	27				第 4 次	57		
	第 5 次	27				第 5 次	61		
1.5	第 1 次	29	29.80	0.40	1.5	第 1 次	68	72.80	4.07
	第 2 次	30				第 2 次	80		
	第 3 次	30				第 3 次	73		
	第 4 次	30				第 4 次	70		
	第 5 次	30				第 5 次	73		
1.75	第 1 次	33	30.4	1.7	1.75	第 1 次	86	81.2	3.0
	第 2 次	30				第 2 次	79		
	第 3 次	31				第 3 次	80		
	第 4 次	28				第 4 次	78		
	第 5 次	30				第 5 次	83		

表五、各種尺寸 75 磅方形描圖紙在水面上捲攤紀錄(表格來源為作者自製)。

95 磅方形描圖紙									
邊長 (cm)	捲曲時間(s)		平均 值(s)	標準 差(s)	邊長 (cm)	攤開時間(s)		平均 值(s)	標準 差(s)
0.75	第1次	34	32.2	1.8	0.75	第1次	50	75.4	2.6
	第2次	33				第2次	51		
	第3次	33				第3次	52		
	第4次	32				第4次	55		
	第5次	29				第5次	50		
1	第1次	36	36.4	1.1	1	第1次	58	104.4	4.0
	第2次	38				第2次	58		
	第3次	37				第3次	52		
	第4次	35				第4次	57		
	第5次	36				第5次	56		
1.25	第1次	37	37.60	0.80	1.25	第1次	63	138.2	4.8
	第2次	37				第2次	57		
	第3次	39				第3次	58		
	第4次	38				第4次	57		
	第5次	37				第5次	61		
1.5	第1次	36	34.6	1.9	1.5	第1次	68	213	23
	第2次	35				第2次	80		
	第3次	37				第3次	73		
	第4次	33				第4次	70		
	第5次	32				第5次	73		
1.75	第1次	38	34.0	2.1	1.75	第1次	86	223.4	8.7
	第2次	34				第2次	79		
	第3次	33				第3次	80		
	第4次	33				第4次	78		
	第5次	32				第5次	83		



圖十三、75、95 磅描圖紙在水面上捲曲花費時間紀錄(圖片來源為作者自製)。



圖十四、75、95 磅描圖紙在水面上捲曲後攤平所花費時間紀錄

(圖片來源為作者自製)。

整體而言，相等面積下的 75 磅描圖紙在水面上捲曲所花費的時間皆比 95 磅所花費的時間較短(圖十三)；75 磅描圖紙在攤平的時間花費也比 95 磅來得短(圖十四)。

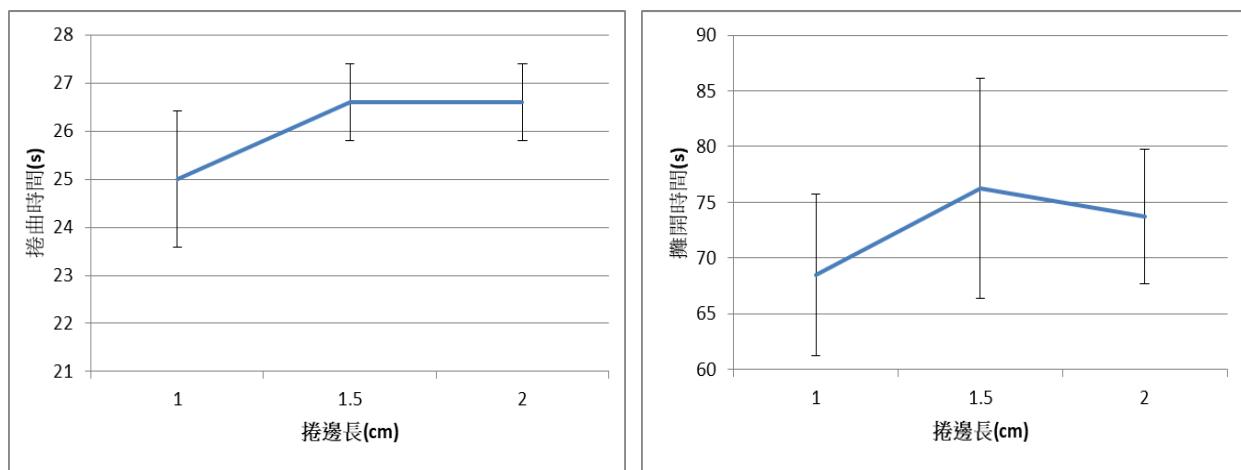
八、實驗八 描圖紙縱橫是否影響捲曲

描圖紙在剪裁的過程會有特定的一個邊會捲起，另一邊則不捲。本實驗分成兩個實驗觀察，第一個是非捲曲維持 1.5 公分，捲邊則分別為 1、1.5、2 公分；第二個實驗室捲邊固定 1.5 公分，非捲曲則分別為 1、1.5、2 公分。

表六、描圖紙縱橫是否影響捲曲之非捲曲維持 1.5 公分的捲曲及攤開時間紀錄

(圖片來源為作者自製)。

75 磅長形描圖紙									
捲邊長 (cm)	捲曲時間(s)		平均值(s)	標準差(s)	捲邊長 (cm)	攤開時間(s)		平均值(s)	標準差(s)
1	第1次	24	25.0	1.5	1	第1次	71	68.5	7.3
	第2次	23				第2次	69		
	第3次	27				第3次	57		
	第4次	25				第4次	77		
	第5次	26							
1.5	第1次	28	26.60	0.80	1.5	第1次	77	76.3	9.9
	第2次	27				第2次	69		
	第3次	26				第3次	67		
	第4次	26				第4次	92		
	第5次	26							
2	第1次	28	26.60	0.80	2	第1次	77	73.8	6.1
	第2次	27				第2次	69		
	第3次	26				第3次	67		
	第4次	26				第4次	82		
	第5次	26							

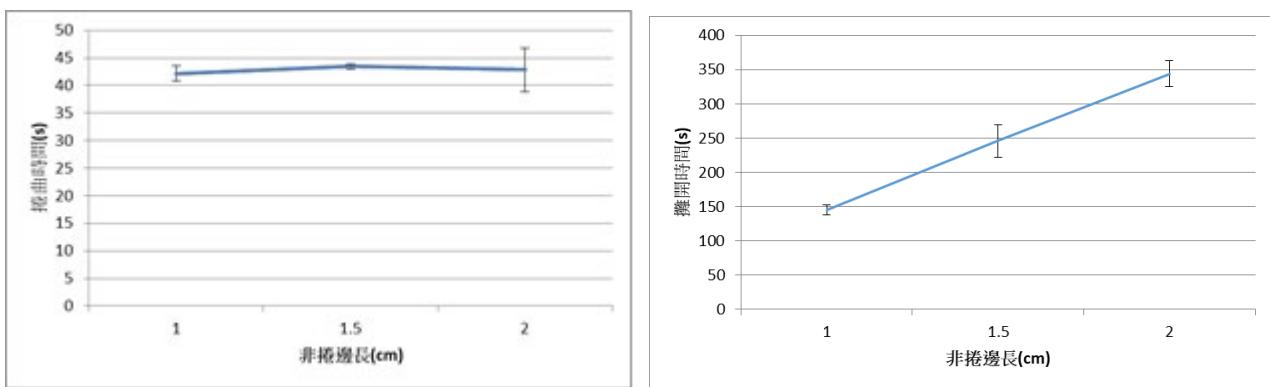


圖十五、非捲曲長度固定為 1.5 公分的測試紀錄。圖左為捲曲時間的紀錄，圖右為攤開時間的紀錄(圖片來源為作品自製)。

由圖十五看，其誤差線明顯重疊，可看見捲邊長度不影響捲曲與攤開時間

表七、描圖紙縱橫是否影響捲曲之捲邊維持 1.5 公分的捲曲及攤開時間紀錄(圖片來源為作者自製)。

95 磅長形描圖紙									
非捲邊長 (cm)	捲曲時間(s)		平均值(s)	標準差(s)	非捲邊長 (cm)	攤開時間(s)		平均值(s)	標準差(s)
1	第 1 次	41.76	42.1	1.4	1	第 1 次	141.65	144.9	7.2
	第 2 次	40.83				第 2 次	136.75		
	第 3 次	40.86				第 3 次	145.44		
	第 4 次	42.69				第 4 次	155.93		
	第 5 次	44.56				第 5 次	153.46		
1.5	第 1 次	42.47	43.41	0.49	1.5	第 1 次	241.53	246	24
	第 2 次	43.91				第 2 次	244.35		
	第 3 次	43.79				第 3 次	246.88		
	第 4 次	43.7				第 4 次	250.51		
	第 5 次	42.9				第 5 次	304.68		
2	第 1 次	49.41	40.5	7.9	2	第 1 次	351.97	344	19
	第 2 次	43.07				第 2 次	351.62		
	第 3 次	26				第 3 次	354.47		
	第 4 次	40.13				第 4 次	318.35		
	第 5 次	43.8				第 5 次	311.82		



圖十六、捲邊長度固定為 1.5 公分的測試紀錄。圖左為捲曲時間的紀錄，圖右為攤開時間的紀錄(圖片來源為作者自製)。

在捲邊固定 1.5 公分的實驗中，從趨勢來看，隨著非捲曲的長度增加，其攤平的時間會增加(圖十六)。

九、實驗九 不同溶液對描圖紙捲曲的影響

(一)、在沙拉油與 95% 酒精中丟入描圖紙，其完全不捲曲(表八)。

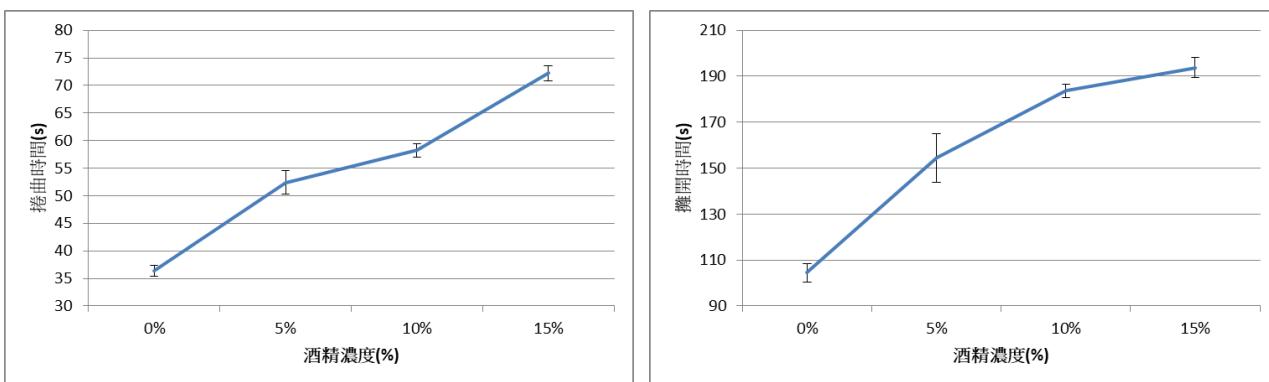
表八、在其他非水溶液類的液體中，對描圖紙捲攤的影響(表格為作者自製)。

液體	捲曲時間	攤開時間
沙拉油	無反應	無反應
95% 酒精	無反應	無反應

(二)、調配不同濃度的酒精，觀察酒精對描圖紙反應的影響。

表九、在不同酒精濃度下，對描圖紙(1 X 1cm)捲攤的影響(表格為作者自製)。

95 磅 邊長 1 公分 方形描圖紙									
酒精濃度 (%)	捲曲時間(s)		平均值 (s)	標準差(s)	酒精濃度 (%)	攤開時間(s)		平均值(s)	標準差(s)
0	第 1 次	36	36.4	1.019803903	0	第 1 次	104	104.4	3.92938
	第 2 次	38				第 2 次	101		
	第 3 次	37				第 3 次	106		
	第 4 次	35				第 4 次	111		
	第 5 次	36				第 5 次	100		
5	第 1 次	51	52.4	2.154065923	5	第 1 次	142	154.4	10.5186
	第 2 次	55				第 2 次	164		
	第 3 次	50				第 3 次	145		
	第 4 次	51				第 4 次	152		
	第 5 次	55				第 5 次	169		
10	第 1 次	57	58.2	1.166190379	10	第 1 次	181	183.6	2.93939
	第 2 次	58				第 2 次	187		
	第 3 次	60				第 3 次	180		
	第 4 次	57				第 4 次	183		
	第 5 次	59				第 5 次	187		
15	第 1 次	74	72.2	1.326649916	15	第 1 次	194	193.8	4.53431
	第 2 次	72				第 2 次	197		
	第 3 次	70				第 3 次	185		
	第 4 次	73				第 4 次	196		



圖十七、不同酒精濃度對 95 磅描圖紙之捲攤的影響。圖左為不同酒精濃度對描圖紙捲曲時間關係圖，圖右為不同酒精濃度對描圖紙攤開時間關係圖(圖片來源為作者自製)。

該實驗採用 95 磅描圖紙，邊長為 1 公分，將乙醇水溶液調整成 0%、5%、10%、15% 的濃度，在實驗中發現隨著酒精濃度的提升，不論是捲曲或攤平時間，時間皆越來越長，而 75 磅描圖紙，因為一放入水溶液中就會沉下去，所以沒有進行該實驗。

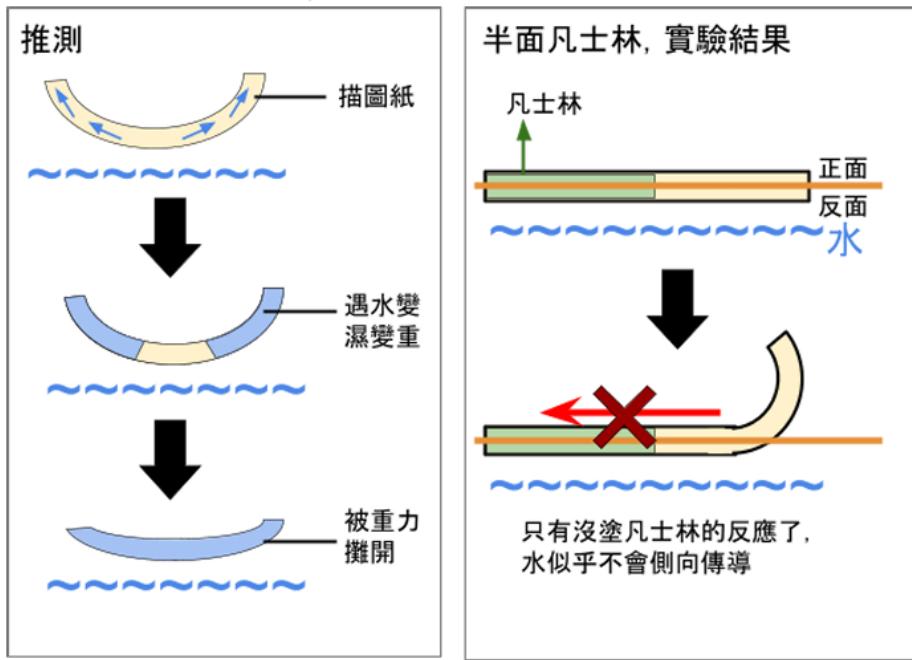
伍、 討論

在實驗一中，將描圖紙裁切成不同形狀在水面上進行觀察，發現不論描圖紙為何種形狀，其捲攤皆維持同一個方向，中間下凹進行(圖七)。所以描圖紙的捲攤現象的方向性是在紙張的製程中就決定了。在初步探索以後，選擇方便裁切的矩形進行後續實驗。

在不同溫溼度環境對描圖紙捲曲影響的實驗中發現，隨著描圖紙所在環境的溫度與濕度下降，其描圖紙捲曲與攤開反應時間皆出現提高的狀況(圖九)。在得出這項實驗結果之後，後續的實驗皆於同一天完成。

這些捲曲的實驗中，都是放在含有水的地方進行觀察，造成描圖紙捲攤的原因皆與水有關。因此本實驗先採用了凡士林塗抹，將描圖紙做防水的表面處理，分別是半面上下皆塗抹、正面(背水面)、反面(觸水面)以及兩面皆塗抹。發現只要將水隔絕開時，該區域就不會發生捲攤的現象(表三)。有關半面塗抹的實驗，一開始以為水會從未塗抹的那一

面傳遞到塗抹凡士林的那邊，結果發現只有一半會出現捲攤。這說明，描圖紙的捲攤是可以因為水的接觸而造成的，只要將水用表面處理隔絕，描圖紙就不會捲動了。而且水也沒有發生毛細現象從材質之中傳遞水到塗抹凡士林的那端(圖十八)。又可能是因為塗抹凡士林導致水沒辦法透過材質內的毛細現象進行傳遞，也就是說描圖紙可能無法水平方向傳導液體，所以在實驗四做了一個沒有塗抹凡士林的實驗。直接將描圖紙固定在牙線棒上，側邊放入染色的水中(圖五中)。經過三十分鐘的觀察發現染色的水不但沒有出現毛細現象往上吸取，而且上半部卻保持乾燥(圖五右)，此現象顯示描圖紙的確未有水平紙面方向的液體傳導，打破了一開始認為液體會藉由水份橫向傳導，而影響描圖紙攤開模式的推測。在實驗五中，使用顯微鏡觀察描圖紙上纖維的吸水情況亦發現，描圖紙上的纖維幾乎不會吸收水分，從圖十一中可以看出在未吸水以及吸水五分鐘後的影像顯示其前後沒有明顯的差異。使用染色水進行描圖紙吸水染色並烘乾，從圖十左、中圖中發現描圖紙的纖維幾乎沒有吸入染劑的現象，唯有偶爾少數幾條纖維出現吸收藍色水的現象(圖十右)。Reyssat and Mahadevan 於 2011 年指出描圖紙的孔隙通透性很低以至於描圖紙因為吸水而產生運動的主要原因不是毛細現象，主要是與分子擴散有關。至於描圖紙的攤平現象，在實驗三中，描圖紙正面經過凡士林塗抹之後，變成描圖紙會捲曲但是不能攤平。又於實驗六發現描圖紙在開始進行攤平運動時，正面放置的氯化亞鈷試紙開始由藍色轉為紅色，同時開始變潮濕。所以描圖紙攤平運動應該是因為正面開始吸水以後開始膨脹，使紙張兩面的應力差一開始減小並出現攤平的現象。



圖十八、表面防水處理的描圖紙上對於半面塗抹凡士林的實驗的假設與發現
(圖片來源為作者自製)。

在實驗一中發現描圖紙本身帶有特定捲曲方向性現象，在實驗八中，探討描圖紙紋路的縱橫是否影響捲曲。分成兩組實驗，一組是固定非捲曲 1.5 公分且捲邊分別為 1、1.5、2 公分的測試(圖十五)；另一組是固定捲邊 1.5 公分且非捲曲分別為 1、1.5、2 公分的測試(圖十六)。由圖十五發現固定非捲邊的實驗中，描圖紙的攤開時間隨著捲邊長度增加，並未出現明顯相關的線條，並且標準差出現重疊，推測捲邊長度並未對描圖紙的捲攤產生影響。在改變非捲邊長度的部分，可以看見雖然於捲曲時間依然並未有明顯影響，在描圖紙攤開的部分，隨著非捲邊長的增加，描圖紙花更多時間完成反應。

在實驗三中，塗抹凡士林的實驗以及用側邊吸水發現雖然描圖紙的捲攤運動不是依靠毛細現象，但是這些實驗皆與水有關。分子擴散的現象也會因為材質的特性而有所差異。於實驗九中，進行了沙拉油、95%酒精以及 5、10、15% 酒精水溶液的實驗(圖十七)。由實驗結果可看出隨著酒精濃度的提升，描圖紙花費更多的時間進行捲曲以及攤開，證明了液體的濃度與種類會對描圖紙的反應造成影響；而且在沙拉油以及 95%高濃度酒精之中是沒有捲攤現象的。表示描圖紙中的分子擴散現象偏向水性環境。

陸、 結論

在這段時間中，爭論於描圖紙的捲攤運動到底有沒有毛細現象，甚至認為主要是因為毛細現象為過程所引發的運動，但是實驗結果一直呈現與水有直接關係，卻不是來自於描圖紙本身的毛細現象。經過多次實驗觀察以及查找，發現原來分子擴散可以引發材質膨脹或結構改變，進而引發捲攤運動。在實驗中，我們得到以下結論：

- 一、 描圖紙的捲曲與攤開所費時間會受到溫度與濕度影響。越乾燥、低溫的環境會讓捲攤動作所花費的時間變長。
- 二、 描圖紙對於油、高濃度酒精沒有捲攤反映。在低濃度酒精中，隨著酒精濃度越高，捲攤所花費時間會越長。
- 三、 如果對描圖紙進行防水處理，捲攤現象會消失，如果塗抹正面，則無法攤平；如果塗抹親水面，則不會捲曲。
- 四、 描圖紙無平行於紙面明顯的液體傳遞，且透過染色以及顯微鏡觀察發現描圖紙的纖維不會出現明顯吸水的現象。
- 五、 隨著描圖紙厚度增加，捲攤所需反應時間整體會更長。而攤平運動會發生在描圖紙正面開始變潮濕的時候，攤平應該是正面吸水膨脹後發生。
- 六、 描圖紙邊長改變時，會影響描圖紙的捲攤時間。
 - (一)、 正方形描圖紙，隨著邊長增加，所需捲攤時間更長。
 - (二)、 長行描圖紙，在捲邊增長時，並無明顯的數據變化。

柒、 展望

- 一、 將描圖紙丟入乾燥劑中，原先想將準備實驗的描圖紙的水氣去除得更徹底，卻發現描圖紙在初次接觸乾燥劑和重新接觸冷空氣時，都會出現拱型彎曲。(推測：描圖紙正面接觸較濕的空氣，導致其向上彎曲，推測潮濕的水氣也會造成描圖紙捲曲，不確定是不是只有水能造成。)



(圖片來源為作者自製)

二、想將來可以將這些發現應用於仿生結構上，例如乾濕環境的調控或是透過水分引發其他機構的驅動等。

捌、 參考文獻資料

- Tracing Paper. (2024, November 21). Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Tracing_paper
Reyssat, E., & Mahadevan, L. (2011). How wet paper curls. *Europhysics Letters*, 93(5), 54001.

【評語】051803

本作品以實驗觀察環境溫度及濕度對硫酸紙捲曲及反轉現象的影響，研究執行上設計系統化實驗變因，如硫酸紙的形狀、硫酸紙的厚度、硫酸紙表面處理、環境溫度、環境濕度、纖維方向、溶液種類（酒精濃度、油等）等，觀測硫酸紙捲曲形態及水滲透量，以紙吸水形態做定性討論。作品之實驗設計嚴謹，並能以物相關理論與實測結果對比分析，具有實驗科學探究方法。

若能進一步以理論模型(如擴散方程與彎曲角度相關數理模型)進行數據擬合與量化分析，將實驗結果得到更精準性理解以及更具說服力的闡釋機制。

作品海報

描圖紙的捲曲行為變大探討

壹、摘要

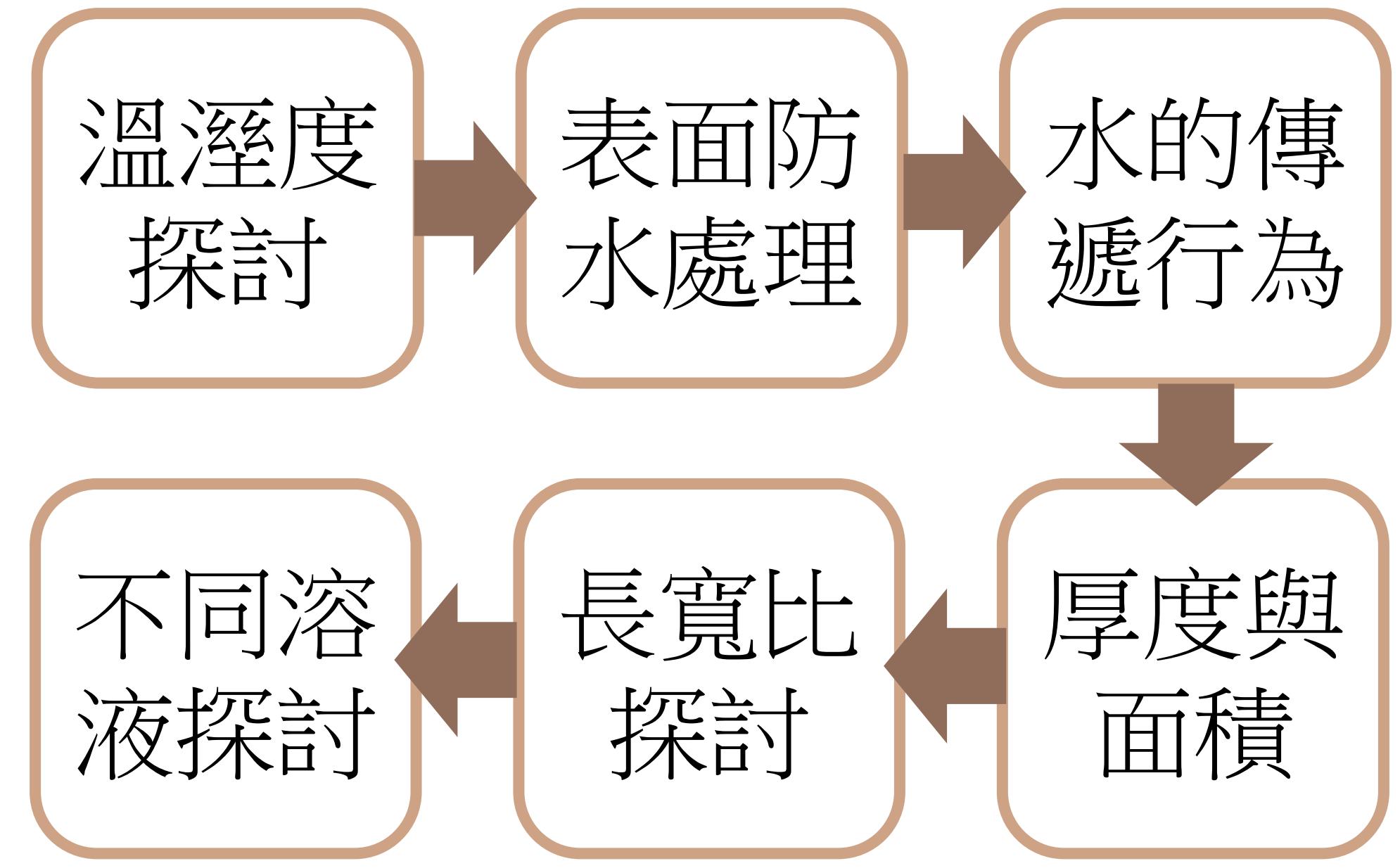
描圖紙又稱硫酸紙，經硫酸處理後形成部分纖維被轉化成凝膠狀且不可滲透性澱粉樣蛋白的紙張。本研究旨在探討該捲曲、反轉現象的各種可能變因，並推估該紙張捲攤行為的機制。經探討發現環境的溫、濕度影響其現象，且描圖紙接觸的溶液不同也影響運動。描圖紙本身變因有表面材料、大小及重量。不論描圖紙形狀，最後都以同一方向平行捲曲，與描圖紙上的纖維方向有絕對關係。進行不同面積方形描圖紙捲曲實驗，表面積越大的正方形描圖紙在捲攤現象花費較多時間，長形描圖紙捲曲速度則以非捲曲長度為影響因素。描圖紙表面處理的實驗，無論凡士林塗於描圖紙任意面，皆影響描圖紙捲攤。描圖紙較厚需更多時間完成現象。根據以上結果，推測為吸水使描圖紙膨脹導致捲攤現象。

貳、研究動機

在網路上看見了有人對描圖紙進行探討，將描圖紙置於水面上，其會捲曲再攤開。由於在見到這個實驗之前，日常生活中許多紙張在潮濕或者沾到水的情況下會捲曲的現象，感到好奇所以決定設計實驗探討。

參、研究目的

- 一、探討描圖紙捲曲原因。
- 二、探討影響描圖紙捲曲之變因與其關係。



肆、文獻回顧

描圖紙的形狀變化是由水進入多孔纖維素紙的運動引起的，其運動類似雙金屬恆溫器(由兩層膨脹係數不同的金屬經複合加工製成的帶材)。

描圖紙張由於經過加工，中間紙層不容易透水，故可以將紙張看成兩個不同層組成。紙張層的差異膨脹導致紙張彎曲，但隨著水進一步擴散到紙張中，膨脹梯度減少，如果紙張還不是封閉的圓柱體，則紙張開始展開，當紙張完全濕潤後，紙張就會攤平。

描圖紙碰觸水面時，接觸面吸水而形成一個濕層、另一層為乾層，因為濕層膨脹且乾層未膨脹，兩者膨脹情形不同引發扭矩差異。

$$k = \frac{\varepsilon}{h} f(m, n)$$

ε 是由各層的差異膨脹引起的相對膨脹， $m = h_{dry}/h_{wet}$ 、 $m = E_{dry}/E_{wet}$ 是乾濕紙層的厚度和楊氏模量比，

$$f(m, n) = \frac{6(1+m)^2}{3(1+m)^2 + (1+mn)(m^2 + \frac{1}{mn})}$$

雙層的最大曲率與材料的相對膨脹 ε 與其厚度 h 的比率呈線性關係：

$$K_m = 1.5 \frac{\varepsilon}{h}$$

描圖紙非常緻密，孔隙連通性非常低，因此傳統的吸收機制在這裡可能不起作用。可能是分子擴散。

並產生 $\tau \approx h/D$ 。(D是分子擴散係數)

透過添加界面活性劑，改變了水的表面張力 γ 。雖然分子擴散過程不受 γ 變化的影響，但毛細管吸收率應該會改變。

蒸氣濃度沿z(紙張表面的法線)的一維擴散方程，水含量 $\varphi(z, t)$ 可寫成

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)$$

其中，水的擴散率為，在非膨脹介質的情況下，近似值 $D = \text{const}$ ，可簡化為

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2}$$

結合邊界條件， $\varphi(z=0, t) = \varphi_s$ ， $\frac{\partial \varphi}{\partial z}(z=h, t) = 0$ ，乾燥紙張初始條件 $\varphi(z, t=0) = 0$ 。

使用傅立葉轉換，可得出

$$\varphi(z, t) = \left[1 - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{4}{(2m-1)} \times \sin\left(\frac{(2m-1)\pi z}{2h}\right) \exp\left(-\frac{(2m-1)^2 \pi^2 D t}{4h^2}\right) \right]$$

根據楊氏模量、含水量和面內相對膨脹計算厚度不均勻的材料帶的捲曲半徑，通過含水量的z座標為 $\varphi(z, t)$ 。

將處於平衡狀態的未變形乾燥地方定義為 Z_n 曲率為 $K = 1/R$ ，延伸度為

$$\varepsilon_k(z) = K(z - Z_n)$$

含水量 $\varphi(z)$ ，膨脹量為 $\varepsilon(\varphi(z, t))$

帶材截面上位置z的局部應力為

$$\sigma(z) = E(\varphi(z, t))(\varepsilon_k(z) - \varepsilon_\varphi(\varphi(z)))$$

在平衡狀態橫向力為0，

$$F = 0 = \int_0^h E(\varphi(z, t)) (\varepsilon_k(z) - \varepsilon_\varphi(\varphi(z))) dz$$

$$0 = k(I_1 - Z_n I_0) - I_{\varphi 0}$$

其中，

$$I_i = \int_0^h E(\varphi(z, t)) z^i dz, I_{\varphi i} = \int_0^h E(\varphi(z, t)) z^i \cdot \varepsilon_\varphi(\varphi(z)) dz$$

截面力矩為0，

$$M = 0 = \int_0^h E(z) z (\varepsilon_k(z) - \varepsilon_\varphi(\varphi(z))) dz$$

$$0 = k(1 - Z_n l) - 1$$

$$\text{曲率表達式為 } K = \frac{1}{R} = \frac{I_l I_{\varphi 0} - I_0 I_{\varphi l}}{I_l^2 - I_0 I_2}$$

伍、研究過程與方法

實驗一 不同形狀對描圖紙的影響：

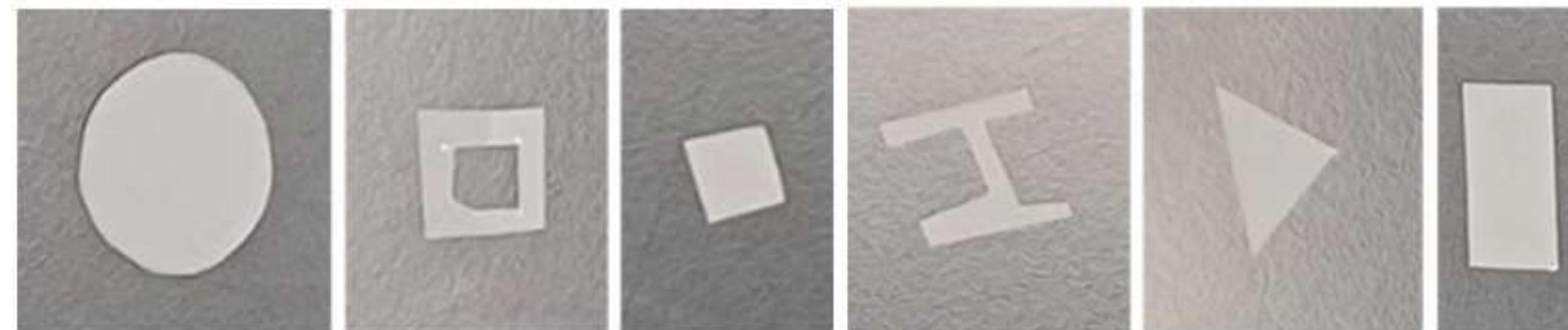
一、實驗說明

觀察描圖紙是如何進行捲曲與攤開反應

裁減各種形狀的描圖紙進行探討，查看是否有某種特定圖形才造成捲曲

二、實驗設計、實驗步驟

將描圖紙裁剪成各式形狀，觀測捲曲方向

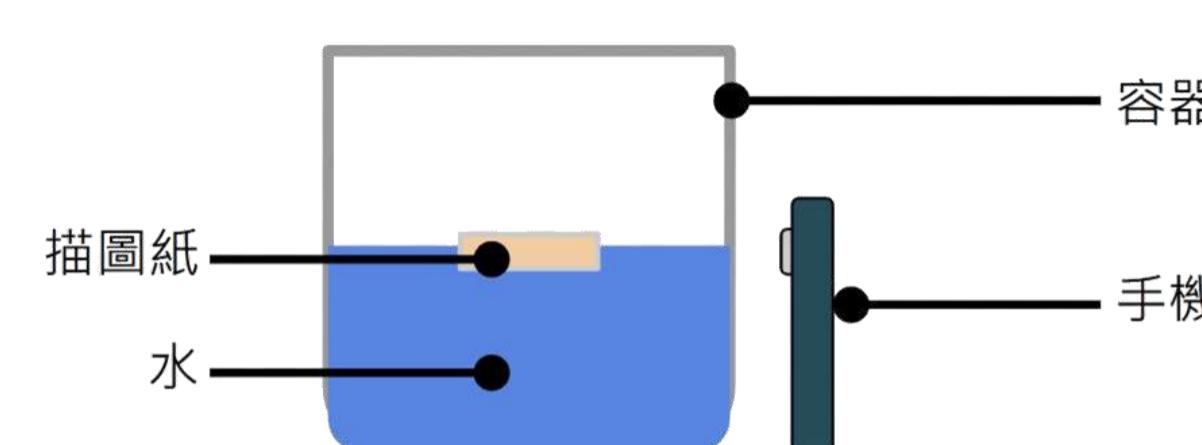


本研究所用之圖片、表格、繪圖若無額外標註皆為作者自製

實驗二 不同溫溼度對描圖紙捲曲影響：

一、實驗說明

觀察溫溼度的變動對描圖紙的實驗數據產生的影響



二、實驗設計

透過冷氣浮動溫度與濕度，模擬天氣變動，觀察描圖紙數據是否改變。

三、實驗步驟

使用75磅描圖紙，面積 $1*1\text{cm}$ ，在室內溫溼度尚未平衡時，對描圖紙進行實驗並且記錄數據。



實驗三 描圖紙表面防水對捲曲的影響：

一、實驗說明

使用凡士林作為防水塗料進行實驗。

二、實驗設計

將描圖紙劃分為正面、反面，並依序在描圖紙的正面、反面以及雙面塗抹凡士林，入水觀察，並留存一張描圖紙雙面皆不塗抹凡士林，進行比對。

三、實驗步驟

- (一)、裁減 $3*1\text{cm}$ 的描圖紙5張，標示正面與反面。
- (二)、將三張描圖紙，分別於正面、反面、雙面塗抹凡士林。
- (三)、將最後一張描圖紙半面塗抹凡士林。



實驗四 牙籤實驗：

一、實驗說明

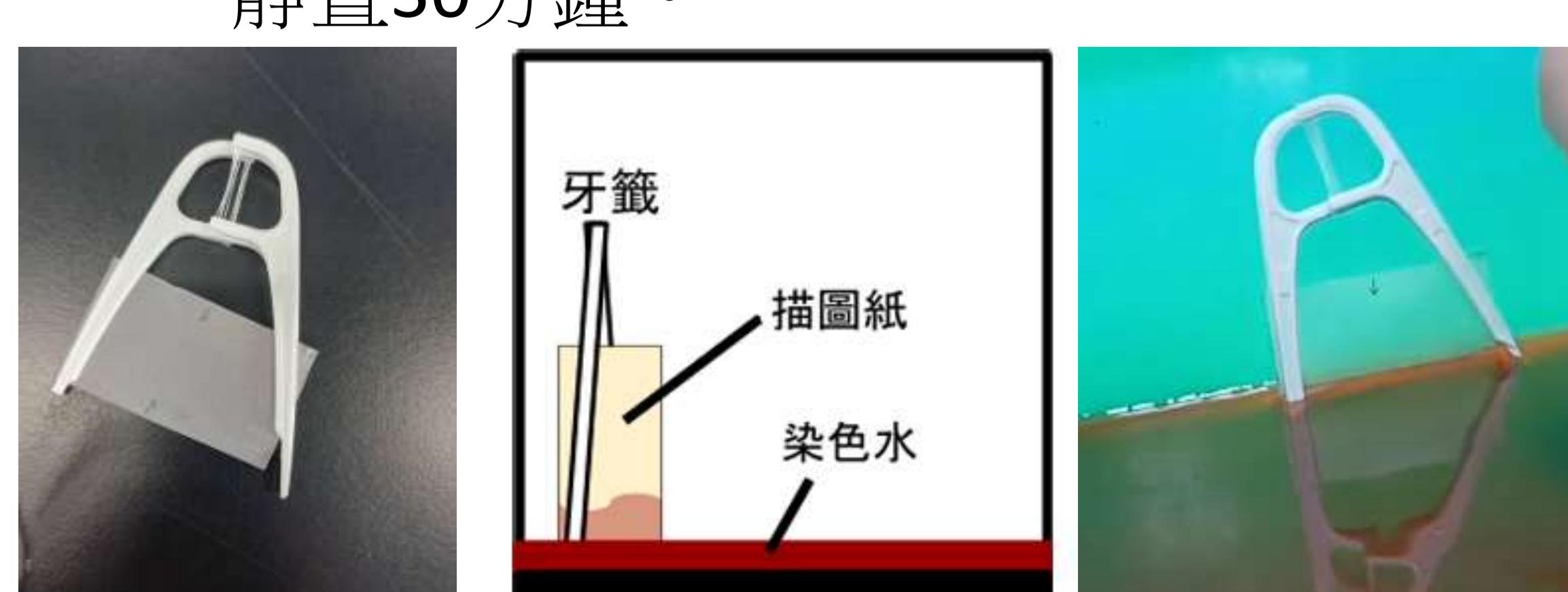
推測描圖紙水平紙面方向傳導可能不好，於是以外牙籤棒將描圖紙直立於水面上靜置，觀測是否出現水位上升的傳導情形。

二、實驗設計

將描圖紙用牙籤棒架起，豎於染色水面上，靜置30分鐘，查看水位是否會逐漸往上移動，像毛細現象一樣。

三、實驗步驟

- (一)、以牙籤製作支架，於容器裝一層水以後染色。
- (二)、將描圖紙固定於牙籤支架，垂直放入水中，靜置30分鐘。



實驗五 描圖紙吸水，纖維的變化：

一、實驗說明

實驗描圖紙上的纖維是否有因為在捲攤的過程中吸水的現象。

二、實驗步驟

使用藍色染色水以及純水讓描圖紙吸水並烘乾。用顯微鏡觀察描圖紙上纖維是否有吸水的情況。

實驗六 描圖紙吸水後攤平現象與正面吸水的關係：

一、實驗說明

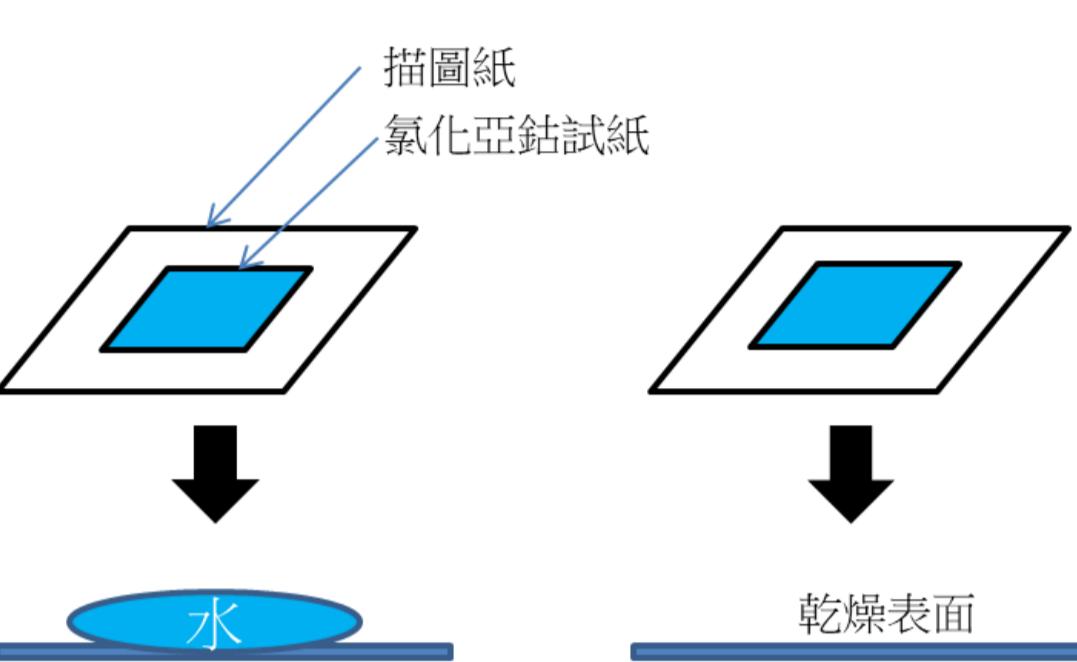
觀察描圖紙的正面在捲攤過程中是否會潮濕，以及發生的時間點。

二、實驗設計、實驗步驟

在一平面上放置大水珠，將烘乾後的氯化亞鈷試紙

($0.5\times0.5\text{cm}$)疊在乾燥的描圖紙片($1\times1\text{cm}$)上，放在水滴上。

同時，在旁邊放上一片一樣的紙片且不沾水。在過程中觀察及拍照。



實驗七 描圖紙厚度與面積對捲攤情形的影響：

一、實驗說明

實驗3~5推測描圖紙無橫向水分傳導

推測其為垂直傳導

不同厚度與面積進行探討

二、實驗設計

使用75磅與95磅描圖紙，分別裁剪成不同面積大小，放入水中。

三、實驗步驟

- (一)、將描圖紙裁切十層疊起，使其擁有十倍厚度。
- (二)、使用螺旋測微器，分別測量描圖紙厚度，再除以10
- (三)、將描圖紙裁剪成不同邊長的正方形，測量不同磅數紙的閉合時間。

75磅紙	0.0292cm
95磅紙	0.1100cm

0.75~
1.75cm

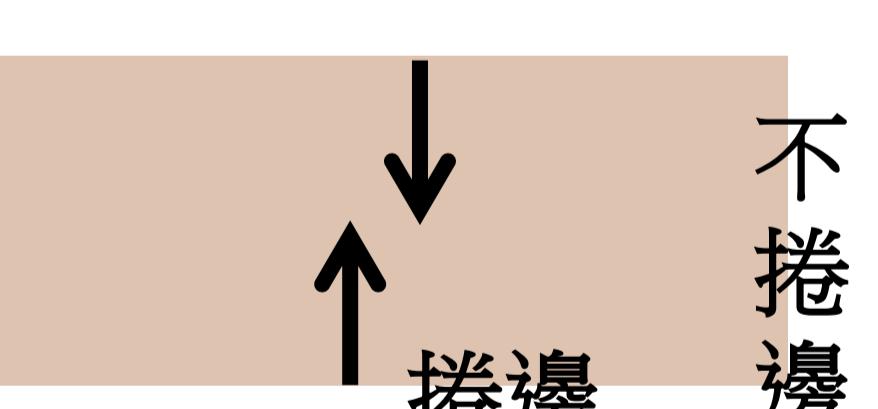
實驗八 描圖紙縱橫是否影響捲曲：

一、實驗說明

證明描圖紙的捲曲可能和固定方向的紋路吸水有關

二、實驗設計

分別改變捲縱邊邊常進行探討



三、實驗步驟

- (一)、裁剪非捲曲長度 1.5cm ，捲邊長度 $1\sim2\text{cm}$ 的描圖紙。
- (二)、裁減捲邊長度 1.5cm ，非捲邊長度 $1\sim2\text{cm}$ 的描圖紙。

實驗九 不同溶液對描圖紙捲曲的影響：

一、實驗說明

實驗除了水以外的溶液是否也可以讓描圖紙捲曲。

二、實驗設計

將描圖紙投入不親水的油，以及酒精水溶液進行觀測。

三、實驗步驟

- (一)、將大豆沙拉油倒入容器中。
- (二)、丟入 $1.5\times1.5\text{cm}$ 的75磅描圖紙進行實驗。
- (三)、調製15%、10%、5%、0%酒精進行實驗。

一、研究結果與討論

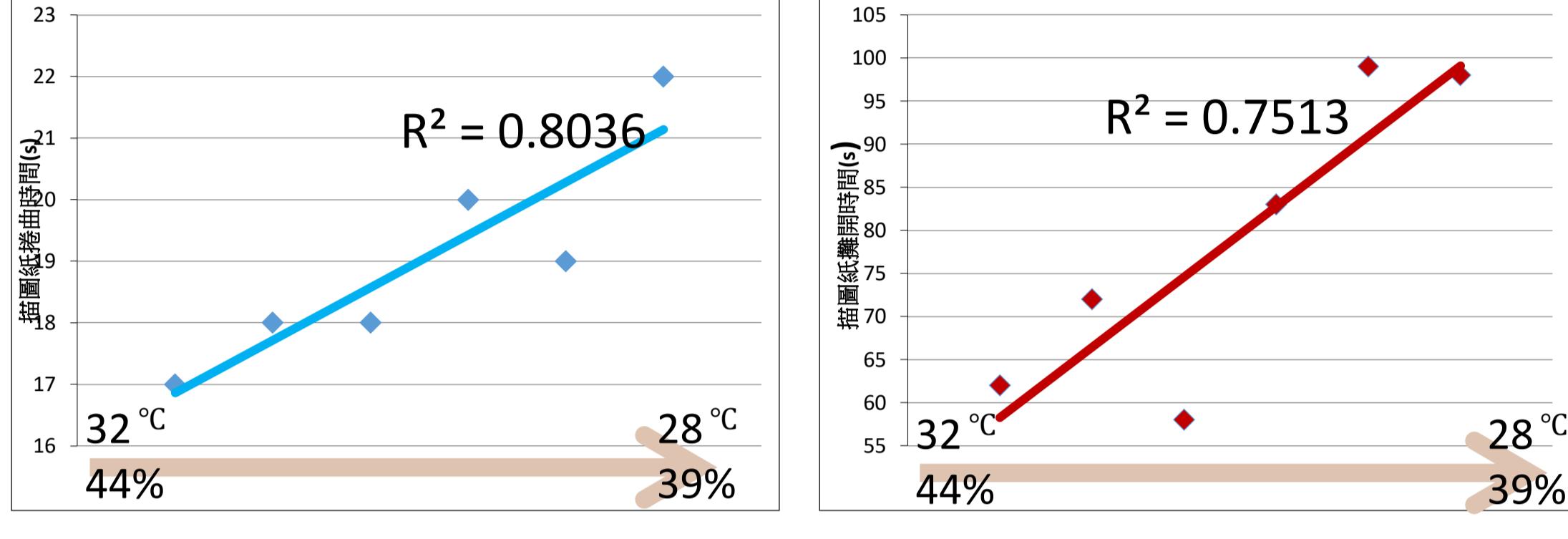
實驗一 不同形狀對描圖紙的影響：

不管如何剪裁描圖紙，各種形狀下的描圖紙放入水中捲曲的方向是一致的。所以後續的實驗皆以矩形作為探討的形狀。

描圖紙形狀						
捲曲方向						

實驗二 不同溫溼度對描圖紙捲曲影響：

在一個變動中的環境下，溫度由32°C下降至28°C，相對溼度也跟著從44%下降至39%，同時進行描圖紙捲曲的實驗。描圖紙的閉合捲曲時間從17秒延長到22秒，攤開的時間也跟著越來越長。

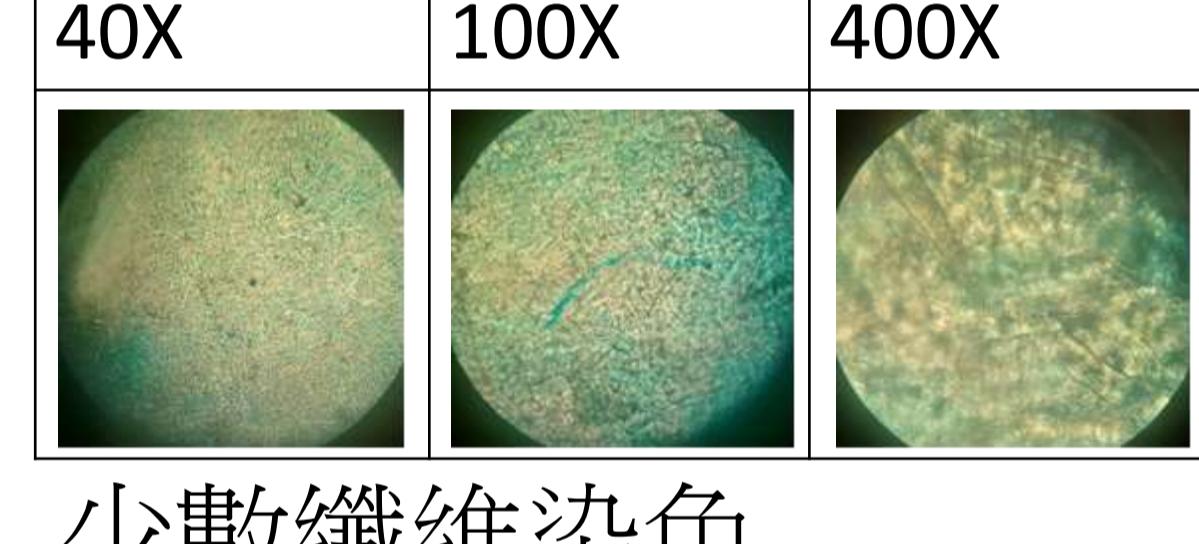


實驗三、實驗四

凡士林	無	半面	正面	反面(觸水面)	雙面
捲曲現象	有	未塗處有	有	無	無
攤開現象	有	未塗處有	無	無	無

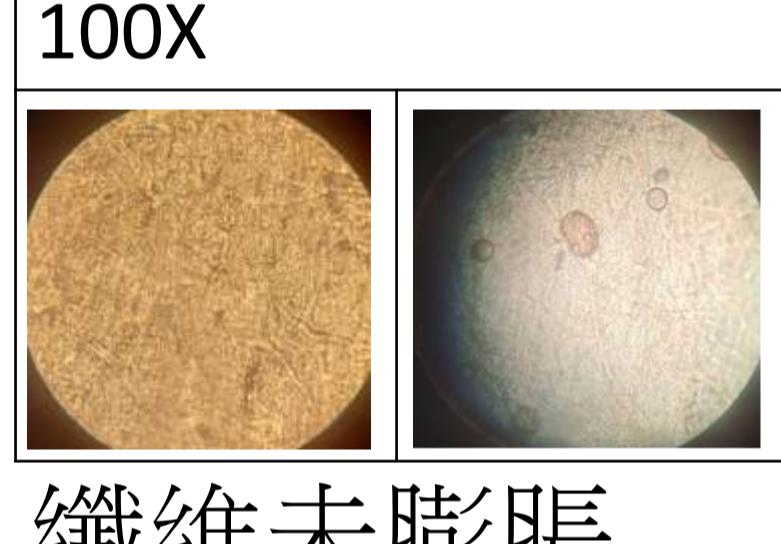
實驗五 描圖紙吸水，纖維的變化：

染色烘乾觀察



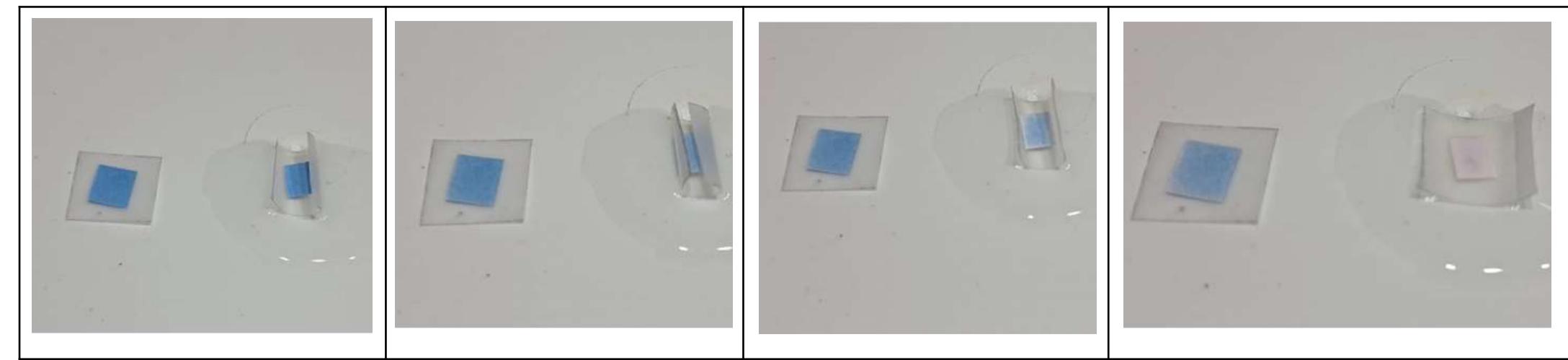
少數纖維染色

浸水前後對比

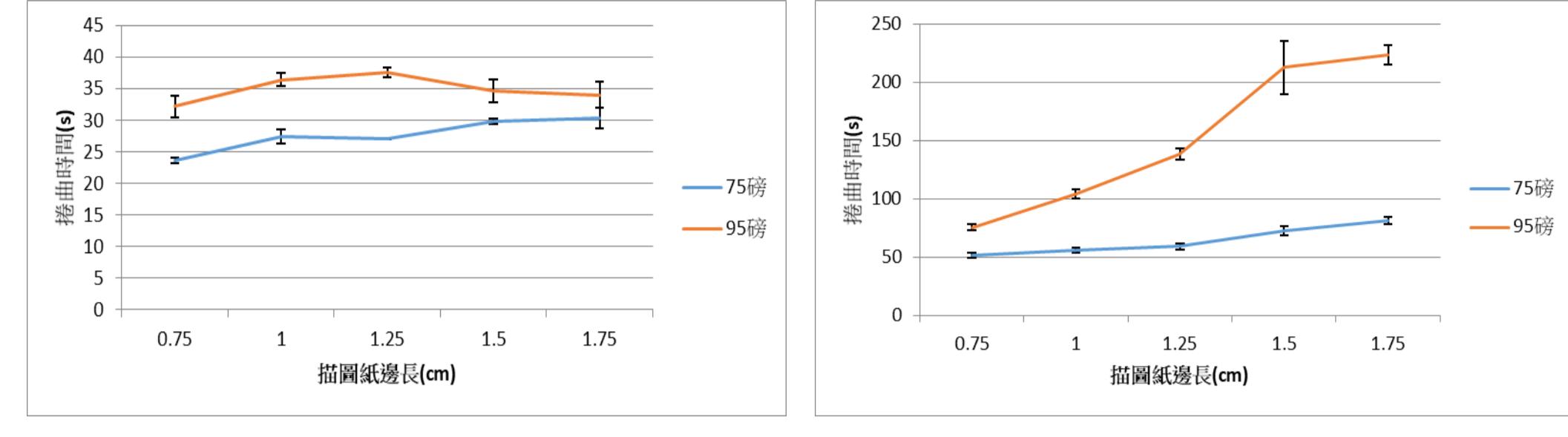


纖維未膨脹

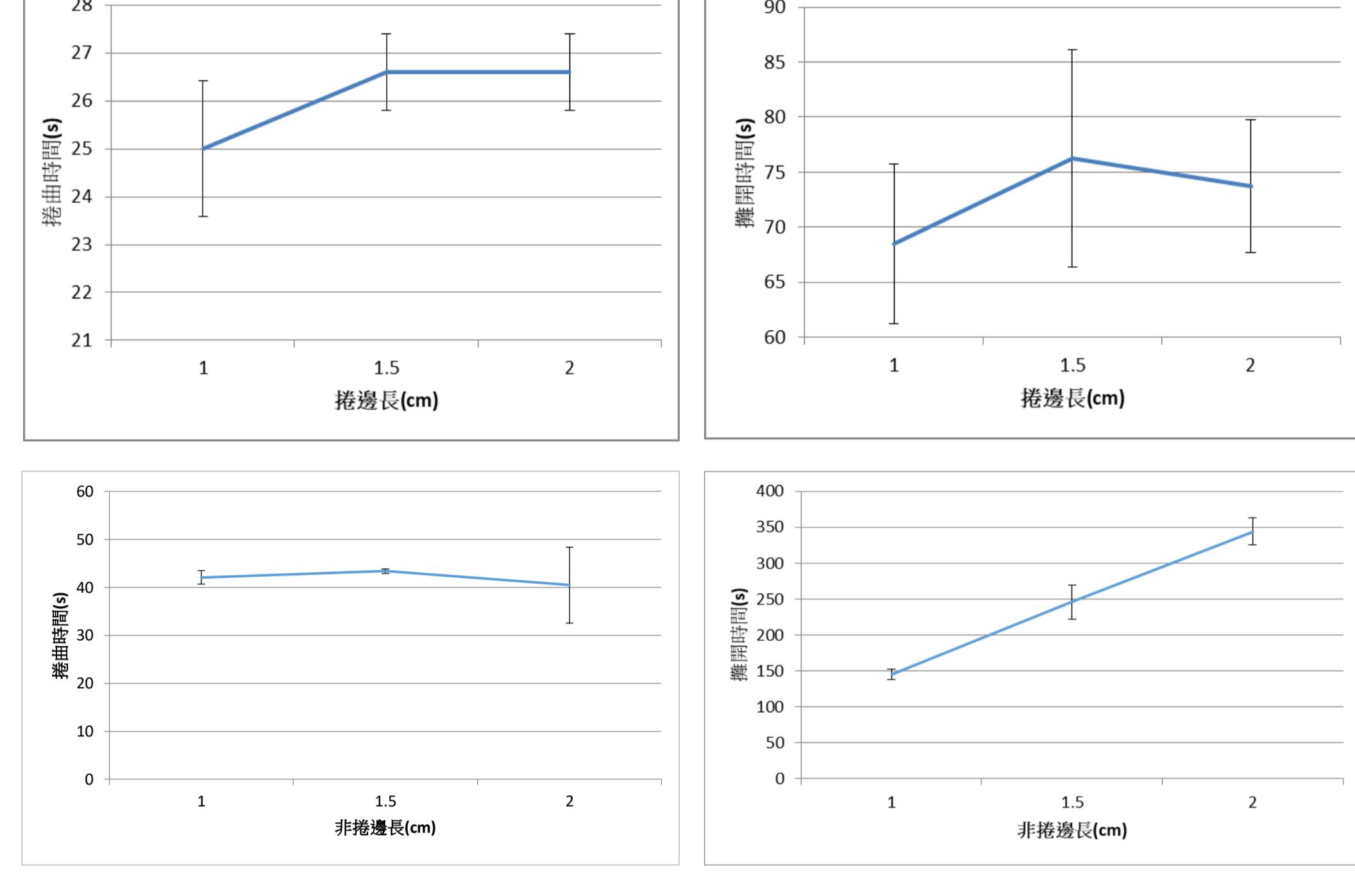
實驗六 描圖紙吸水後攤平現象與正面吸水的關係：



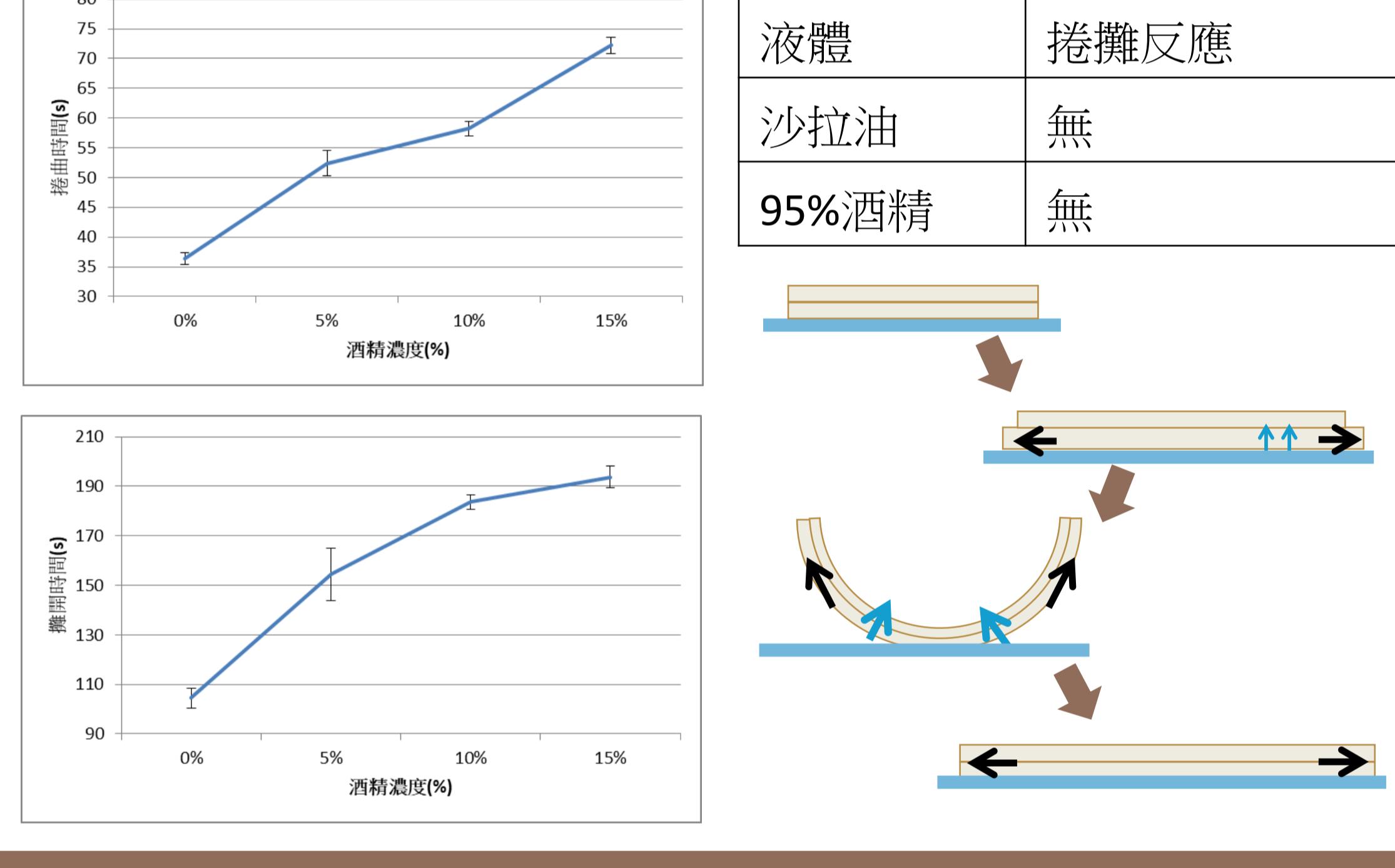
實驗七 描圖紙厚度與面積對捲攤情形的影響：



實驗八 描圖紙縱橫是否影響捲曲：



實驗九 不同溶液對描圖紙捲曲的影響：



八、結論

- 一、描圖紙的捲曲與攤開所費時間會受到溫度與濕度影響。越乾燥、低溫的環境會讓捲攤動作所花費的時間變長。
- 二、如果對描圖紙進行防水處理，捲攤現象會消失，如果塗抹正面，則無法攤平；如果塗抹親水面，則不會捲曲。
- 三、描圖紙無平行於紙面明顯的液體傳遞，且透過染色以及顯微鏡觀察發現描圖紙的纖維不會出現明顯吸水的現象。
- 四、隨著描圖紙厚度增加，捲攤所需反應時間整體會更長。而攤平運動會發生在描圖紙正面開始變潮濕的時候，攤平應該是正面吸水膨脹後發生。
- 五、描圖紙邊長改變時，會影響描圖紙的捲攤時間。
 - (一)、正方形描圖紙，隨著邊長增加，所需捲攤時間更長。
 - (二)、長方形描圖紙，在捲邊增長時，並無明顯的數據變化。
- 六、描圖紙對於油、高濃度酒精沒有捲攤反映。在低濃度酒精中，隨著酒精濃度越高，捲攤所花費時間會越長。

九、未來展望

- 一、希望未來可以嘗試測出描圖紙水平方向毛細現象是否存在以及其強度。

- 二、將描圖紙丟入乾燥劑中，原先想將準備實驗的描圖紙的水氣去除得更徹底，卻發現描圖紙在初次接觸乾燥劑和重新接觸冷空氣時，都會出現拱型彎曲。(推測：描圖紙正面接觸較濕的空氣，導致其向上彎曲，推測潮濕的水氣也會造成描圖紙捲曲，不確定是不是只有水能造成。)



十、參考資料

- Tracing Paper. (2024, November 21). Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Tracing_paper
Reyssat, E., & Mahadevan, L. (2011). How wet paper curls. *Europhysics Letters*, 93(5), 54001.