

# 中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

---

國中組 物理科

第一名

030109

尿之有道-小便斗噴濺物理學

學校名稱： 高雄市立陽明國民中學

作者：  國二 林宥君  國一 洪德芮  國一 霍欣妤	指導老師：  謝甫宜
---	------------------

關鍵詞： 流量、紊流、反彈流

## 得獎感言

因為小便斗而邂逅的我們，比起得獎更重要的是……

小便斗是出現在男性廁所中公共場所的一景，無需寬褲解帶給予普羅大眾站立如廁節省時間成本。當時，我便抱著「天降大任於斯人」的想法，和謝乖乖老師一拍即合，又邀請兩位優秀的國一小學妹與曾靜瑩老師來協助，便開啟了前無古人，後應有來者的趣味小便斗尿液噴濺的研究。

進行文獻探討時，經歷了開先河者的共同困難，「缺乏文獻可供參考」或者說是綜合「小便斗」、「模擬器」、「噴濺物理」三大特點的實驗—雖說是難於濫觴，但在第一步便遭受了現實毒打。最後只好憑藉文獻拼湊出基本的研究骨架。其中流體力學的概念便是實驗初期的核心。但好不容易處理後，新的問題來了：該去哪裡進行實驗呢？當然是男生廁所了，抱持著怨念，我一手提模擬尿液，一手握第一代小便模擬器，一步步邁向走廊盡頭男廁間。

經不斷改良的小便模擬器與實驗設計、採用層流和紊流的雷諾數以及蒙地卡羅扇形區等實測數據，進行解釋尿液噴濺現象與範圍，我們得知，善尿者與亂尿者竟造成小便斗高達二十倍的噴濺差距！希望男性同胞能意識到清理男廁者的辛勞。雖然本作品非艱澀高深，卻也下足功夫，研究方法饒富獨創性、研究結果具有實用性！

這件在黯淡無光的男廁進行的「小便斗研究」，實則兵行險著，極可能高不成也低不就，隱沒在科展群傑廳的一個小小網頁，最終泯然於眾人！所幸指導老師、兩位冰雪聰明的小學妹協助實驗蒐集各種物理量、以及家人長期支持下，終能大聲宣布：我們為小便斗平反了！小便斗底下的那攤尿漬，不全然是小便斗設計或那隻「蒼蠅」畫不準所造成，而是來自使用者無法根據小便流速而「測不準」的問題！

在面對第一次評審質詢時發現，評審們似乎都問一些很基礎的問題耶？那可不太妙，因為這可能顯示出評審們對這件作品提不起興趣。當晚我們和指導老師討論許久，最後得出結論：一定要讓他們感受小便斗神奇之處！隔天便由兩位小學妹以女性身分主答引起評審注意，說流體、講方法、談實驗中遭遇的種種瓶頸與研究困境。後來才發現，多為女性的評審們只是尷尬、也並非對小便斗全無關注。總之，把能報告的都報告了，最後這些努力也沒被辜負。


歷經競爭激烈的高雄市賽脫穎而出，立即購得兩組小便斗而不用再繼續蹲廁所、引人側目地觀察小便斗噴濺了。經指導老師謝乖乖與曾瀞瑩老師殫精竭慮地與我們討論研究數據和圖表，組員和每天、每個來男廁照面的同學相互打氣與一些好運氣，串聯了每個實驗結果而彙整成科展作品的架構。每次的實驗失敗，比起心有不甘，更想找出背後的物理機制；在下課的十分鐘忙裡偷閒，那時，我心想：「比天花板更高的究竟是什麼？」

每天都充實地忙碌著，我們所追逐的動漫主角似的青春，在倏忽間滿溢胸膛「盡情燃燒物理魂」；得獎那一刻，胸中塊壘豁然開朗，不為什麼，只為整個二年級的努力終將綻放而怒吼。獲獎固然欣喜，但比得獎更重要的是對於科學研究的態度和信念。

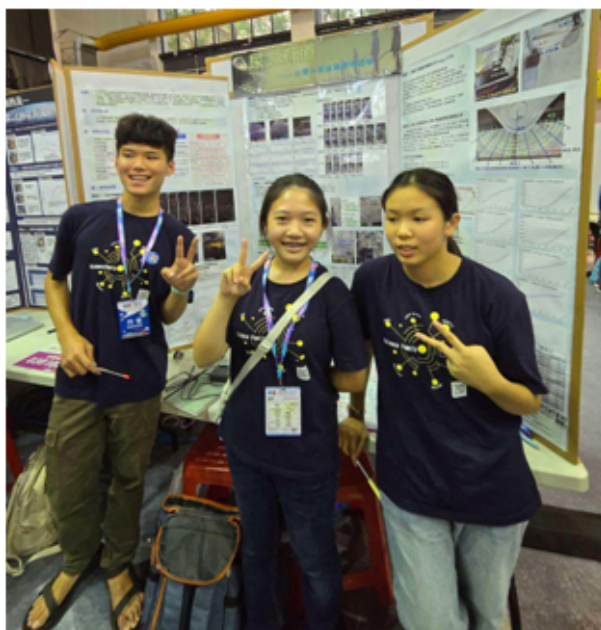
賀！第65屆全國科展物理科榮獲全國第一名、  
聯發科技創造無限可能獎特優獎、康寧創新優等獎



恭喜獲獎同學：217林宥君、126洪德芮、125霍欣妤，感謝謝南宜老師  
辛勤指導，謝謝學校行政團隊與家長團隊的大力支持

 陽明國中全體師生全賀

市賽前在科工館的合照，感謝高雄市政府的獎金讓我逃脫廁所



全國科展殿堂合照，三人中兩位沒看鏡頭，  
或說幸好有人看鏡頭



清大奔園土地公廟焚香祝禱，雖未帶仙草  
蜜，但土地公真的超神！

# 作品名稱：尿之有道—小便斗尿液噴濺物理學

摘要:本研究旨在探討男性使用直立式或懸掛式小便斗時，尿流量、身高、和斗壁距離、入射角等因素，對於尿液噴濺面積和範圍之影響。研究方法包括：以頻閃燈和慢速攝影、tracker 分析與雷諾數，辨識不同流量對層流和紊流之變化量；採用小便模擬器、Vernier 氣壓計和力度計，測得水流和反彈流對斗壁作用力，終以蒙地卡羅法扇形區和 Image J 分析兩組小便斗噴濺面積和範圍。主要研究結果包括:1.以 tracker 分析獲知流量和流速關係，從雷諾數變化量驗證流量小易受紊流噴濺、流量大則易受反彈流噴濺。2.尿緩 $<15\text{ mL/s}$ ，距斗壁 $\leq 20\text{ cm}$ 對準蒼蠅圖像，紊流噴濺最少；3.尿急 $\geq 15\text{ mL/s}$ ，距斗壁 $30\text{ cm}$ 平射，反彈流噴濺最少；4.身高 $\geq 170\text{ cm}$ 、 $25\text{ mL/s}$ ，平射兩種小便斗，噴濺面積與範圍皆最小；5.以 $60^\circ$ 射角和對準排水孔，噴濺面積和範圍最大；6.本研究亦討論和改進尿液噴濺的研究方法。

關鍵字:流量、紊流、反彈流

## 壹、前言

### 一、研究動機

曾訪談某知名百貨清理男廁的資深小姐們得知，噴濺出小便斗外的尿液量「與身高和尿流量無關、而和站位以及小便斗距離有關吧？」她們表示，例假日人潮多，深怕被投訴更需拖地。不知她們是否埋怨:「小便斗就貼著蒼蠅圖像，男人怎瞄不準蒼蠅而噴出小便斗外呢？」

在高鐵站或餐廳上一號時也常見小便斗底下留下一攤尿漬。目測發現，小便斗壁畫在正中央的蒼蠅圖像高度不盡相同。於是懷疑，即使男性瞄準蒼蠅是否尿液仍會噴濺出小便斗之外呢？尿流量、與小便斗距離、身高或尿孔高、尿流入射角、不同類型的小便斗，是否對尿液噴濺量也有影響呢？

於是校內一群科學社團同學，便著手研究如何減少小便斗尿液噴濺量。

### 二、研究目的與研究問題

#### (一)研究目的

根據研究動機，本研究想探討男性使用小便斗時，造成尿液濺出小便斗的主要成因、調整尿流入射角、和小便斗距離等因素，減少噴濺尿液噴濺範圍，除省下許多清潔費，更能體貼清潔人員之麻煩與辛苦。

#### (二)研究問題

- 1.影響尿流噴濺主要因素以及尿流運動模式為何？
- 2.不同流量下，入射角對於液滴噴濺之影響為何？
- 3.不同流量下，水平射角對於液滴噴濺影響為何？
- 4.不同流量下，垂直射角對於液滴噴濺影響為何？
- 5.如何進行實驗設計以 tracker 軟體分析水流流速？
- 6.雷諾數軟體分析流速對於液滴噴濺之影響為何？

- 7.如何設計小便模擬器並測量水流與反彈流對於斗壁之作用力？
- 8.如何設計蒙地卡羅扇形法和 Image J 軟體分析噴濺面積與範圍？
- 9.男性使用直立式和懸掛式小便斗對於噴濺面積與範圍是否有差異？

### (三)文獻回顧

#### 1.尿流相關研究

研究指出，一般健康男性的尿流量約 15~25 mL/s 或以上，尿量約 200~500 c.c./次。男性站著小便時，尿液飛濺距離約 7.5~15 cm，但尿液經碰撞、分裂成尿滴則可飛濺達 91 cm 以上，極可能汙染浴廁內物品。

#### 2.男性使用小便斗相關研究

參考許多尿流的科展題目及文獻時發現，男性最多可噴濺達 7,000 多滴尿滴到馬桶外。日本以 500 名 20~60 歲男性進行調查發現，馬桶旁噴濺尿滴數差異甚大。經彙整其研究結果，如表 1 所示。

表 1. 日本男性在馬桶小號的噴濺尿滴數(文獻探討 9)

排尿位置 \ 人數%	53%	33%	7 %	7 %
瞄準點	馬桶水面中心	馬桶壁頂端	馬桶壁側邊	馬桶前端
噴出馬桶外的尿滴數	372 滴	277 滴	293 滴	7,550 滴
比較結果	次之	最少	次之	最多

彙整自網址: <https://news.qq.com/rain/a/20211224A0BRI600>(文獻探討 9)。



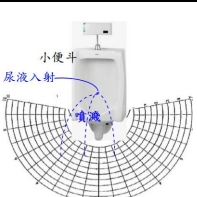
在高速攝影機下，尿流也遵循普拉托-瑞利不穩定性，當尿流在撞擊前分解成液滴掉落而濺水。Wizz(2016)研究發現，以小於 45 度撞擊小便斗器壁，就不會直接撞到小便斗，且尿液流在距尿道末端約 15-18 cm 處分解成小液滴。Bryner(2013)進一步研究發現，男性尿流量隨時間改變。

上述研究說明了「男性使用小便斗上一號時，尿流量逐漸減緩下，收尿前，若慢慢靠近小便斗，可避免被紊流形式的尿滴給滴到」。

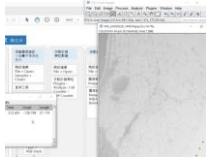
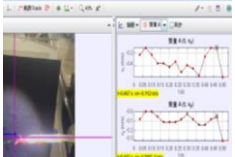







## 貳、研究設備及器材

根據研究問題與實驗需求，我們購買校內直立式與懸掛式兩種小便斗、相關測試儀器以及分析軟體，彙整如表 2 所示。

表 2. 實驗器材與儀器以及實驗用途

	直立式小便斗	懸掛式小便斗	蒙地卡羅法扇形格線
實驗器材名稱與圖示			
WxDxH cm	89 x 34 x 36 cm	77 x 32 x 36 cm	分析尿漬分布
實驗儀器	Image J 軟體	Tracker 軟體	頻閃燈



			
目的	分析尿漬面積	分析流速	頻率 0~26,000 Hz
實驗器材			
	高感光螢光劑 ISO 400	紫外線筆(365 nm)	600 和 750 mL 寶特瓶
測量儀器與用途	Vernier 氣壓計	Vernier 測力計	毛細管(奧氏)黏度計
			
類尿溶液	測量小便模擬器氣壓	測量衝擊力與加速度	測量類尿溶液黏滯性
	螢光劑、食鹽水、葡萄糖、氨水、蛋白粉		

**\*\*本作品之所有照片、圖表、概念圖、繪圖皆由作者本人拍攝及繪製\*\***

## 參、研究過程與方法

### 一、研究流程

根據上述的研究目的與研究問題，本研究流程圖繪製如圖 1 所示：

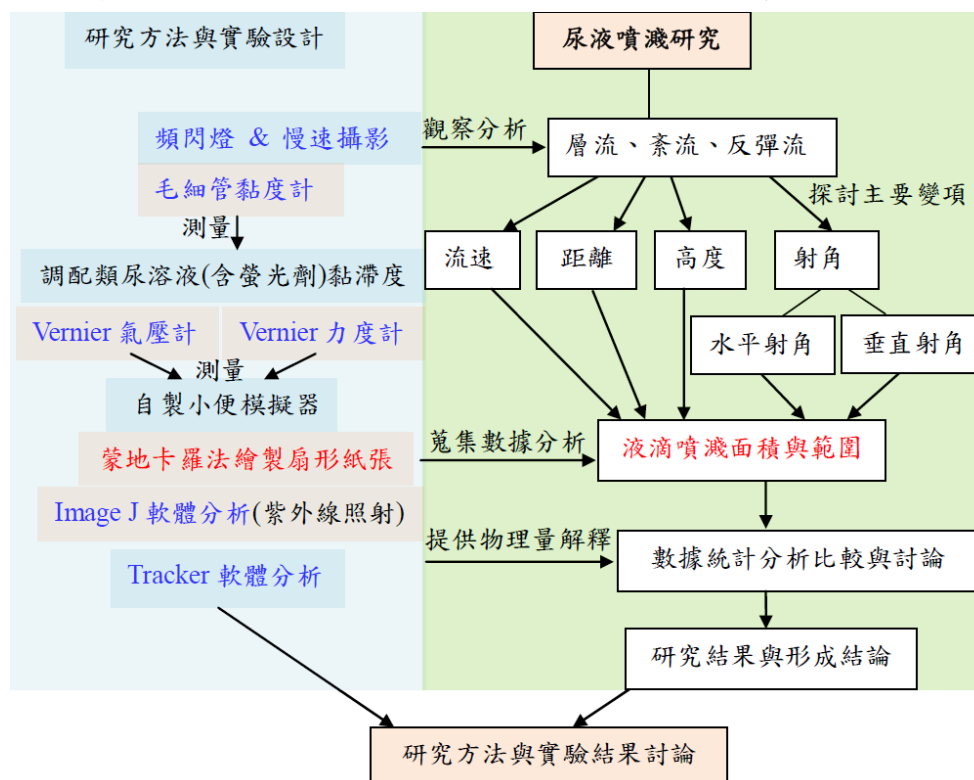


圖 1. 小便斗外尿液噴濺量之研究流程圖

**\*\*本作品之所有照片、圖表、概念圖、繪圖皆由作者本人拍攝及繪製\*\***

## 二、研究方法

根據上述研究流程圖，實驗步驟如下所示。

實驗步驟 1.因男性尿流極快、尿滴甚小，先以頻閃燈與慢速攝影觀察水流噴濺成因與流體的物理模式。

實驗步驟 2.參考相關文獻以適合水量加少量螢光劑並調配出類尿溶液、購買常見直立式和懸掛式兩種小便斗作為測試依據。

實驗步驟 3.依文獻中男性排尿量約 250 mL/次、尿流量約 10~25 mL/s 為基準自製「小便模擬器」。

實驗步驟 4.分別以「Vernier 氣壓計和力度計」，測量小便模擬器內部氣壓與水流衝擊力，判斷不同變因下層流與紊流變化量。

實驗步驟 5.採易吸水宣紙改良和繪製「蒙地卡羅扇形格線」並標示區域，以螢光照射「Image J 軟體」分析液滴噴濺面積與範圍。

實驗步驟 6.調整小便模擬器高度、與小便斗距離、入射角等變因，測試兩組小便斗比較噴濺液滴面積與範圍是否有差異。

## 肆、研究結果

### 實驗一、探討影響尿液噴濺的主要變因與模式

實驗前，多數人可能認為「高度愈高，水流具重力位能愈大，水流撞擊小便斗壁時噴濺面積和範圍也愈大。」

首先，初步先將實驗室水龍頭塑膠管接一截剪下的塑膠滴管，使其出水孔口徑 2 mm，與男性尿道孔平均值相同。但實驗室水流強且集中，需調整流量。此外，除了水流呈透明無色，也不易用觀察細小的水滴噴濺。

因此，我們先拉起窗簾讓實驗室處於全暗環境，再以閃頻可達 26,000 Hz 之頻閃燈(strobe light)調整閃爍頻率觀察水流流動情形發現，約 150 Hz 以上即能觀察到細小之紊流噴濺情形，如圖 2~4 所示。

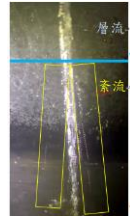


圖 2. 頻閃燈觀察水柱流動      圖 3. 紊流      圖 4. 以頻閃燈照射下觀察紊流

**\*\*本作品之所有照片、圖表、概念圖、繪圖皆由作者本人拍攝及繪製\*\***

根據普拉托-瑞利不穩定性原理，不論流量快慢，即使水柱垂直流下，從水流集中的層流後常發生紊流，在頻閃燈閃爍下清晰觀察到細小水珠自水流旁四散開來。調整流量再以慢動作攝影與截圖彙整觀察結果，如圖 5 所示。



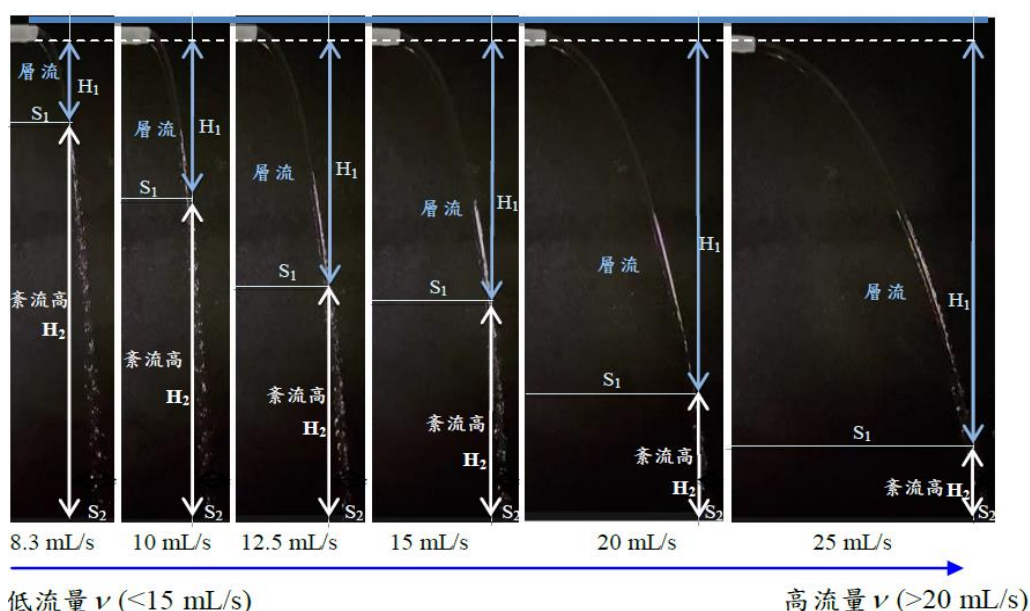


圖 5. 不同流量之水柱的層流與紊流變化

**\*\*本作品之所有照片、圖表、概念圖、繪圖皆由作者本人拍攝及繪製\*\***

根據普拉托-瑞利不穩定性原理，層流形式的水柱流動一段時間後，常會產生斷續的紊流形式造成水滴噴濺，觀察發現如下：

1. 水平噴出的水柱愈強，水柱較為集中的層流愈長、紊流愈短，亦即水流的流量愈強、層流愈長，紊流卻愈短。這也說明了噴出尿液的流量愈快或流量愈大，水柱產生的紊流之噴濺到外面的機率也愈小。
2. 讓實驗室水龍頭水柱穩定地水平噴出，層流與紊流也幾乎維持穩定的長度和比例，不會隨著時間而有變長或變短的差異。
3. 調整水龍頭水柱穩定地向上或向下噴出產生層流與紊流之長度，會與水平射出的水流不同，但是不會隨著時間而變長或變短。
  - (1) 水柱向下噴：層流變長、紊流變短。
  - (2) 水柱向上噴：水柱呈拋物線形式，先上升再下降，層流變長、紊流變短。
  - (3) 不論水柱向下或向下噴，當穩定輸出水量，層流與紊流幾乎維持穩定的長度，層流與紊流之間界線分明。

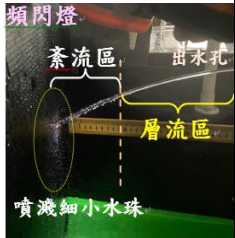
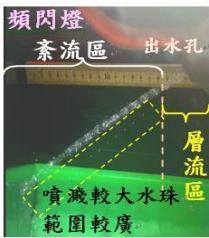

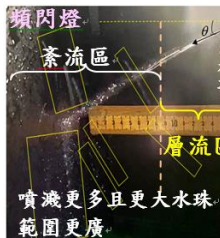
經實際觀察水流受「普拉托-瑞利不穩定性」影響，水流中的水分子因擾動，且表面張力傾向最小化其表面積，不論流量大小，層流形式的尿流後，常伴隨著紊流形式的尿滴噴濺。我們實驗結果為「水流在愈高處落下，水柱撞擊斗壁噴濺面積愈小；而在愈低處流下，水柱撞擊斗壁噴濺面積愈大。」

上述實驗結果與原先研究假設相反，我們好奇難道有其他因素影響噴濺面積嗎？是否來自「水流噴出後，水柱即分散或濺出一些水滴？而非水柱撞擊斗壁才造成反彈呢？」為證實此猜想，我們繼續進行以下實驗加以驗證。

## 實驗二、水流的入射角對於反彈流與噴濺量之初探

從文獻得知，一般健康男性的尿流量介於 15~25 mL/s，初步先以兩種水流量 15 與 25 mL/s 模擬實驗。經慢動作攝影和截圖，彙整如表 3 所示。

表 3. 水流量和入射角對於液滴反彈與噴濺之影響

流量(mL/s)	15 mL/s	15 mL/s	25 mL/s	25 mL/s
距離(cm)	20 cm	20 cm	20 cm	20 cm
垂直射角	$\theta=0$ (平射)	$\theta=30^0$	$\theta=0$ (平射)	$\theta=30^0$
反彈流	局部迸裂型	紊流成串型	局部放射型	煙火四散型
圖示				
反彈距離	29.8 cm	16.0 cm	18.1 cm	45.8 cm
噴濺面積	220.819 cm <sup>2</sup>	280.142 cm <sup>2</sup>	320.481 cm <sup>2</sup>	750.454 cm <sup>2</sup>

**\*\*本作品之所有照片、圖表、概念圖、繪圖皆由作者本人拍攝及繪製\*\***

### 小結：

經實測距離斗壁 20 cm 時，可明顯辨識不同流量與水流入射角，其反彈流噴濺現象來自層流和紊流撞擊斗壁所產生。根據表 3 數據與圖示說明結論如下：

1. 從表 8 得知，水流量之噴濺範圍：25 mL/s > 15 mL/s。顯示水分子在高流量時，具有較大動能，噴濺範圍較廣；而噴濺距離則受水流的入射角所影響。
2. 低流量 15 mL/s 的噴濺範圍隨著垂直射角增加而變大。但噴濺最遠距離卻隨著垂直射角而變小。造成低流量之紊流撞擊斗壁噴濺範圍與噴濺距離不一致的原因，進行推論如下：

(1) 水柱在低流量 15 mL/s 時，水分子動能較小，平射( $0^0$ )的紊流短而具有比垂直射角  $30^0$  產生紊流長較大些的動能。因此，垂直射角  $30^0$  分裂的水滴撞擊小便斗的動能，小於平射( $0^0$ )紊流的水滴撞擊小便斗的動能，所以，平射紊流水滴反彈距離(29.8 cm) > 垂直射角  $30^0$  紊流水滴反彈距離(16.0 cm)。

(2) 水柱在低流量 15 mL/s 時，垂直射角  $30^0$  產生紊流長度 > 平射( $0^0$ )產生紊流長度。因此，垂直射角  $30^0$  所產生分裂的水滴撞擊小便斗之噴濺面積(280.142 cm<sup>2</sup>) > 平射 ( $0^0$ ) 紊流撞擊小便斗之噴濺面積(220.819 cm<sup>2</sup>)。

綜合上述結論，尿緩 ≤ 流量 15 mL/s 時，可對著小便斗排水孔排尿，即增加入射角，雖然噴濺面積較廣些，但不易噴出小便斗之外。

3. 流量 25 mL/s 時，噴濺最遠距離和範圍都會隨垂直射角變大而增加。

我們進行推論如下：

(1) 高流量 25 mL/s 的水柱，水分子動能較大，平射( $0^0$ )與垂直射角  $30^0$  產生紊流長度差異不大。但是，垂直射角  $30^0$  分裂的紊流水滴撞擊斗壁之入射角也大於平射( $0^0$ )。所以，若根據反射定律「入射角=反射角」，垂直射角  $30^0$  紊流水滴反彈距離(45.8 cm) > 平射紊流水滴反彈距離(18.1 cm)。

(2)根據上述推論，高流量 25 mL/s 垂直射角  $30^0$  產生紊流入射角 $>$ 平射( $0^0$ )產生紊流入射角。故垂直射角  $30^0$  因紊流而分裂之水滴撞擊斗壁噴濺面積 ( $750.454\text{ cm}^2$ )，遠大於平射( $0^0$ )紊流之噴濺面積( $320.481\text{ cm}^2$ )。

綜合所述，此意謂著「尿急或尿流量較高時，可將尿孔對著小便斗平射即減少垂直射角，不僅降低噴濺面積，也較不易噴出小便斗之外。」

### 實驗三、流量和水平射角對於水流噴濺的影響

經調整實驗室水龍頭出水量，以最大燒杯承接水之瞬間開始計時，待燒杯承滿 1,000 mL 水量可得知水的流量。實測文獻中，高齡的年長者與一般男性三種尿流量，其水平射角對於層流與紊流之垂直高度和水平距離影響如表 4 所示。

表 4. 不同流量下，水平射角之層流與紊流垂直高度和水平距離

流量 10.0 mL/s	層流(cm)		紊流(cm)		H <sub>1</sub> /H <sub>2</sub>	S <sub>1</sub> /S <sub>2</sub>
與平射夾角	高度 H <sub>1</sub>	距離 S <sub>1</sub>	高度 H <sub>2</sub>	距離 S <sub>2</sub>	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>
0	8.1	10.4	22.9	6.3	0.35	1.65
15	8.7	10.5	21.7	8.8	0.40	1.19
30	7.1	10.6	23.4	7	0.30	1.51
45	6.9	8.4	24.3	8.3	0.28	1.01
60	7.8	6.7	25.1	4.6	0.31	1.46
75	11.9	5.8	25.9	4.8	0.46	1.21
流量 15.0 mL/s	層流(cm)		紊流(cm)		H <sub>1</sub> /H <sub>2</sub>	S <sub>1</sub> /S <sub>2</sub>
與平射夾角	高度 H <sub>1</sub>	距離 S <sub>1</sub>	高度 H <sub>2</sub>	距離 S <sub>2</sub>	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>
0	9.3	13.8	22.5	14.2	0.41	0.97
15	7.3	15	23.3	14.4	0.31	1.04
30	6.2	14.5	24.7	14.6	0.25	0.99
45	5.4	14.6	25.2	13.8	0.21	1.06
60	8.6	11.6	22.9	7.4	0.38	1.57
75	8.4	10.8	23.8	4.4	0.35	2.45
流量 25.0 mL/s	層流(cm)		紊流(cm)		H <sub>1</sub> /H <sub>2</sub>	S <sub>1</sub> /S <sub>2</sub>
與平射夾角	高度 H <sub>1</sub>	距離 S <sub>1</sub>	高度 H <sub>2</sub>	距離 S <sub>2</sub>	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>
0	15.2	13.5	17.2	6.5	0.88	2.08
15	11.2	12.9	21	5.4	0.53	2.39
30	12.6	11.9	17.8	6.4	0.71	1.86
45	10.2	10.1	21.4	7.9	0.48	1.28
60	16	9.8	16.6	7.4	0.96	1.32
75	16.3	7.7	13.4	8.4	1.22	0.92

**\*\*本作品之所有照片、圖表、概念圖、繪圖皆由作者本人拍攝及繪製\*\***

根據上述表 5 數據，繪製不同水流流量所呈現的 R<sub>1</sub> 與 R<sub>2</sub> 值，如圖 6~8 所示。

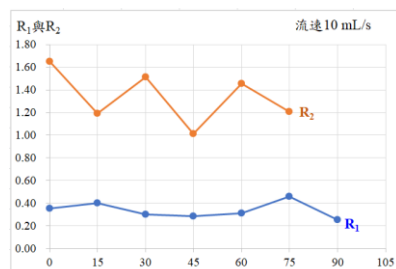


圖 6. 10 mL/s 之 R<sub>1</sub> 與 R<sub>2</sub> 值

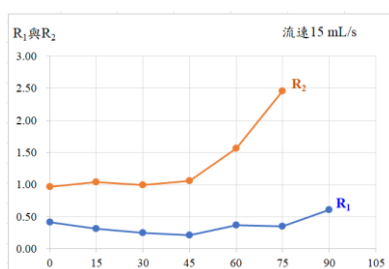


圖 7. 15 mL/s 之 R<sub>1</sub> 與 R<sub>2</sub> 值

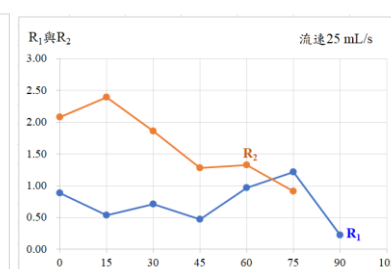


圖 8. 25 mL/s 之 R<sub>1</sub> 與 R<sub>2</sub> 值

**\*\*本作品之所有照片、圖表、概念圖、繪圖皆由作者本人拍攝及繪製\*\***

## 小結：

根據實驗結果，分析層流和紊流  $R_1$  和  $R_2$ ，其中  $R_1$  與  $R_2$  愈大，表示尿液產生的紊流影響愈小。

1.如圖 14，流量較小如 10 mL/s， $R_1$  和  $R_2$  變化甚大；流量>15 mL/s 時， $R_1$  和  $R_2$  變化很小。此外，大流量產生之反彈流遠大於流量小者。推論如下：

(1)尿流量較慢時，尿液幾乎未產生反彈流，紊流影響噴濺較大。

(2)尿流量較快時，紊流較小，撞擊斗壁之反彈流影響噴濺較大。

2.如圖 15，當流量為 15 mL/s， $R_1$  遠比  $R_2$  穩定，即  $R_1$  較不易隨出水孔水平射角改變；但  $R_2$  會隨水平射角增加而變大。此意謂著尿流量約 15 mL/s 時，愈偏離小便斗中心點排尿，反而不易產生噴濺的紊流。

3.如圖 16，大流量如 25 mL/s， $R_1$  也較  $R_2$  穩定。但  $R_2$  隨水平射角增加而變小。即流量約 25 mL/s，愈偏離小便斗中心排尿，愈容易產生紊流而噴濺。

4.如圖 14~16，當流量愈快時：

(1)水平射角<45 度， $R_2$  隨著垂直角度增加而變大，亦即不易產生紊流。

(2)水平射角>45 度， $R_2$  隨著垂直角度增加而變小，反而容易產生紊流。

(3)  $R_1$  隨著流量增加而陡增，極易產生紊流，如圖 16。

綜上所述，我們推論「尿流量愈大或尿急，愈接近平射，愈不易產生紊流噴濺；而尿流量愈小時，愈偏離小便斗壁正中心或水平射角愈大，反而不易產生紊流噴濺。」此有待進一步由接續的實驗來驗證。

## 實驗四、流量和垂直射角對於水流噴濺影響以及是否瞄準蒼蠅

上述實驗三對於水平射角進行水流測試後，接著測試不同流量下出水口

垂直射角對於層流與紊流高度和水平距離之影響，實驗結果如表 5 所示。

表 5.不同流量下，垂直射角之層流與紊流垂直高度和水平距離

流量 10 mL/s	層流(cm)		紊流(cm)		$H_1/H_2$	$S_1/S_2$
與水平夾角	高度 $H_1$	距離 $S_1$	高度 $H_2$	距離 $S_2$	$R_1$	$R_2$
0	<b>8.7(max)</b>	13.2	25.1	7.2	0.35	1.83
15	6	15.76	27.6	5.94	0.22	2.65
30	4.8	13.6	26.9	7.9	0.18	1.72
45	5.8	16.1	26.9	7.9	0.22	2.04
60	6.6	8.6	28.8(max)	5.7	0.23	1.51
75	4.9	9.8	28.3	7.5	0.17	1.31
流量 15 mL/s	層流(cm)		紊流(cm)		$H_1/H_2$	$S_1/S_2$
與水平夾角	高度 $H_1$	距離 $S_1$	高度 $H_2$	距離 $S_2$	$R_1$	$R_2$
0	3.5	17	<b>29.9(max)</b>	15.6	0.12	1.09
15	8.8	16.9	24.3	18.3	0.36	0.92
30	12.8	16.5	27.1	15.3	0.47	1.08
45	10.6	11.9	24.4	13	0.43	0.92
60	8.1	12.7	25.9	12.4	0.31	1.01
75	7.6	0.2	28.4	<b>20.9(max)</b>	0.27	0.01
流量 25 mL/s	層流(cm)		紊流(cm)		$H_1/H_2$	$S_1/S_2$

與水平夾角	高度 $H_1$	距離 $S_1$	高度 $H_2$	距離 $S_2$	$R_1$	$R_2$
0	15.2	13.5	17.2	6.5	0.88	2.08
15	11.2	12.9	21	5.4	0.53	2.39
30	12.6	11.9	17.8	6.4	0.71	1.86
45	10.2	10.1	21.4	7.9	0.48	1.28
60	16	9.8	16.6	7.4	0.96	1.32
75	16.3(max)	7.7	13.4	8.4(max)	1.22	0.92

**\*\*本作品之所有照片、圖表、概念圖、繪圖皆由作者本人拍攝及繪製\*\***

根據以上表 8 數據進行統計分析再繪製圖形，經彙整如圖 9~11 所示。

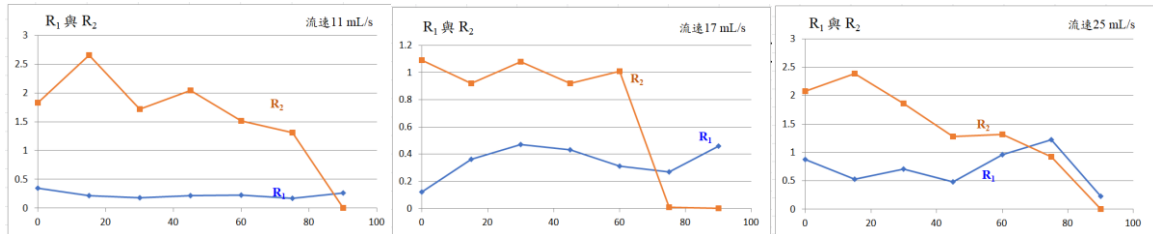


圖 9. 10 mL/s 之  $R_1$  與  $R_2$  值 圖 10. 15 mL/s 之  $R_1$  與  $R_2$  值 圖 11. 25 mL/s 之  $R_1$  與  $R_2$  值

**\*\*本作品之所有照片、圖表、概念圖、繪圖皆由作者本人拍攝及繪製\*\***

從圖 17~19 隨著垂直射角愈來愈大可發現，一般男性使用小便斗時，習慣會瞄準三處分別是「正前方(平射)、蒼蠅、小便斗排水孔」，其對應之垂直射角分別為  $0^0$  (平攝)、 $30^0$  與  $75^0$ 。那麼使用小便斗時，究竟要瞄準哪個位置最不易噴濺？瞄準哪個位置又最容易噴濺呢？因此，彙整數據如表 6，再統計繪製如圖 12 與圖 13。

表 6. 男性使用小便斗常瞄準位置對應不同流量之  $R_1$  與  $R_2$  值

流量 (mL/s)	平射( $0^0$ )		瞄準蒼蠅( $30^0$ )		瞄準排水孔( $75^0$ )	
	$R_1$	$R_2$	$R_1$	$R_2$	$R_1$	$R_2$
10	0.35	1.83	0.18	1.72	0.17	1.31
15	0.12	1.09	0.33	1.01	0.27	0.01
25	0.88	2.08	0.71	1.86	1.22	0.92

**\*\*本作品之所有照片、圖表、概念圖、繪圖皆由作者本人拍攝及繪製\*\***

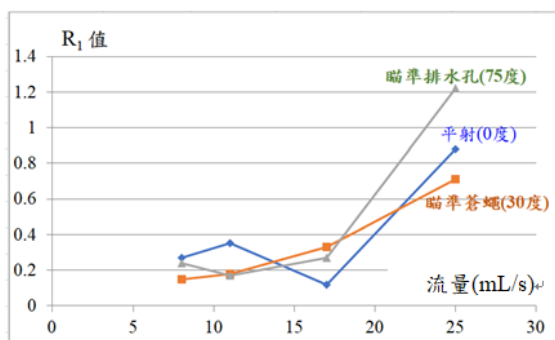


圖 12. 不同流量下瞄準點的  $R_1$  值

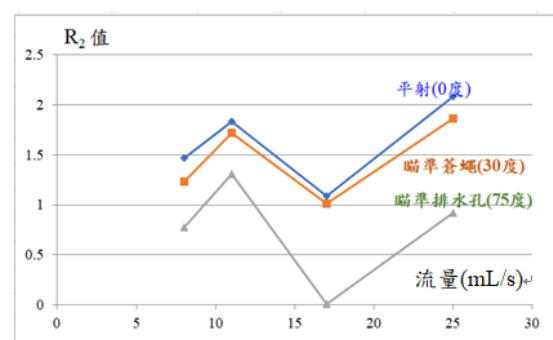


圖 13. 不同流量下瞄準點的  $R_2$  值

**\*\*本作品之所有照片、圖表、概念圖、繪圖皆由作者本人拍攝及繪製\*\***

本實驗是以站在小便斗前 20 cm 處以穩定水流模擬比較，圖中  $R_1$  與  $R_2$  值愈大，表示紊流影響愈小，即愈不易噴濺。因此，我們獲得以下推論：

1. 尿急或流量達 25 mL/s 時：

$R_1$  值：瞄準排水孔( $75^0$ ) > 平射( $0^0$ ) > 瞄準蒼蠅( $30^0$ )



$R_2$  值：平射( $0^0$ )>瞄準蒼蠅( $30^0$ )>瞄準排水孔( $75^0$ )

但是，影響紊流程度： $R_2 > R_1$ 。故尿急時，應選擇平射( $0^0$ )。

2.尿不急或流量約 15 mL/s 時：

$R_1$  值：瞄準蒼蠅( $30^0$ )>瞄準排水孔( $75^0$ )>平射( $0^0$ )

$R_2$  值：平射( $0^0$ )>瞄準蒼蠅( $30^0$ )>瞄準排水孔( $75^0$ )

但是，影響紊流程度： $R_2 > R_1$ 。故尿較緩時，可選擇瞄準蒼蠅( $30^0$ )或平射。

3.尿很少或流量約 10 mL/s 時：

$R_1$  值：平射( $0^0$ )>瞄準排水孔( $75^0$ )>瞄準蒼蠅( $30^0$ )

$R_2$  值：平射( $0^0$ )>瞄準蒼蠅( $30^0$ )>瞄準排水孔( $75^0$ )

但是，影響紊流程度： $R_2 > R_1$ 。故尿流極緩時，仍應選擇平射( $0$ 度)。

若僅以尿柱產生紊流而不考量尿液反彈流時，有些店家或餐廳會貼心地在小便斗排水孔放置如絮狀海綿、碎冰或小石子等阻止反彈流的產生，這時男性使用小便斗就應選擇平射；若瞄準排水孔時，紊流產生噴濺量會達到最大值，極可能被尿液噴濺到褲襠或鞋子。

我們進一步改變出水孔與水平面之夾角(垂直射角)下，測試不同水流流量下，也與上述實驗結果相仿，如圖 14 所示。

從圖 22，我們獲得以下結論：

1.垂直射角愈大，則層流愈長、紊流愈短、反彈流也隨之增加。

2.水流量愈大，則層流愈長、紊流愈短、反彈流也隨之增加。

垂直射角  $\theta$  與流量(mL/s)

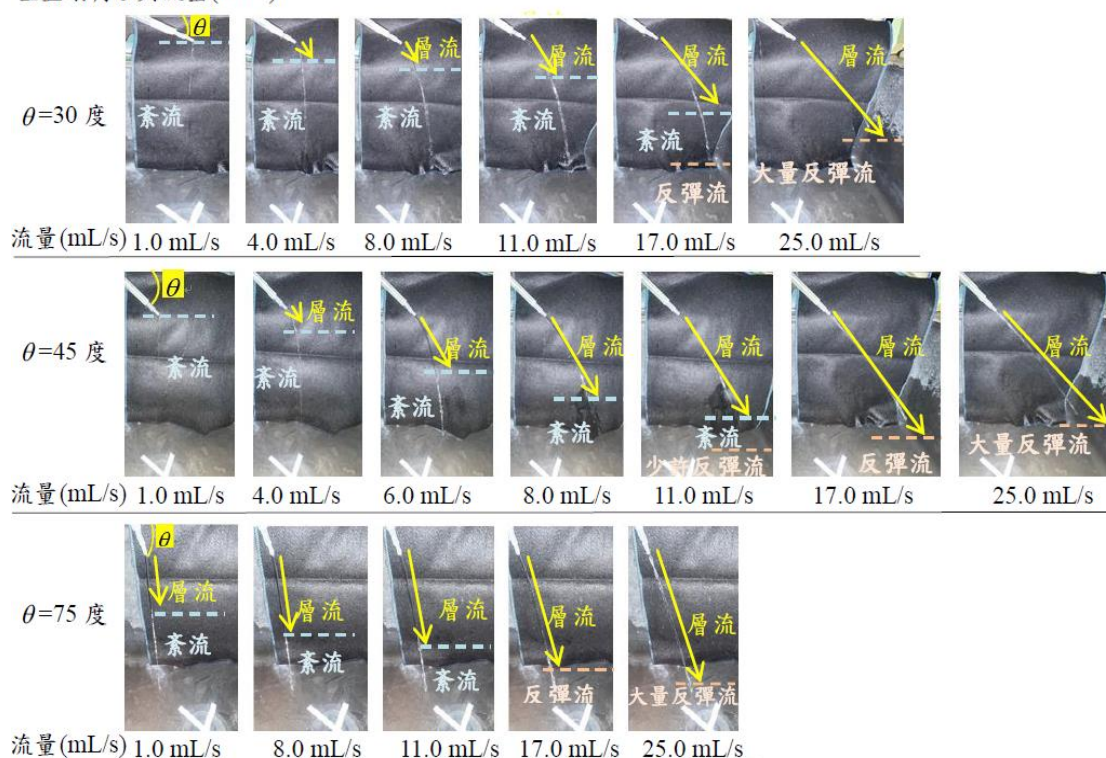


圖 14. 三種垂直射角對於不同流量的水流狀態之影響

**\*\*本作品之所有照片、圖表、概念圖、繪圖皆由作者本人拍攝及繪製\*\***

此外，若便斗底部未放置阻止尿液產生反彈流之物件時，是否也採用平射的尿尿方式呢？於是我們繼續進行以下實驗進行驗證。

## 實驗五、以 tracker 分析不同流速下模擬噴濺之實驗設計

本研究定義的「流量」為每秒噴出水流之體積(mL/s)，而水流的「流速」則是水流每秒移動之距離，即水流的速率(m/s)。若要藉由計算雷諾數來辨識與驗證「目測」究竟為層流或紊流，便需將流量適切地轉換成流速。

但是，紊流噴濺的小水滴不僅細小、運動速率也極快而難以目測之外，人與小便斗壁距離僅約 20 cm，幾乎無法觀察其水流速率或加速度等運動物理量。因此，我們使用細小、富彈性、體積 99%以上為水、密度約  $1.01\sim 1.05\text{ g/cm}^3$ 、介於固液之間的「水晶寶寶」進行實驗驗證。此外，原體積僅  $0.1\text{ cm}^3$  的小水晶寶寶，吸水後約 20 g/100 顆，即每顆小水晶寶寶約 0.2 g 與  $0.2\text{ cm}^3$ 。

經我們多次嘗試失敗的經驗，例如水管噴水口若裝入多於 20 顆水晶寶寶、或水晶寶寶吸水過多而膨脹，都會堵塞水管，且當流量過大也會沖走水晶寶寶等問題，經逐一排除上述問題後，終能以水晶寶寶測量流速。實驗步驟如下。

實驗步驟 1. 事先架設攝影機並調整好平射水流、與器壁距離 20 cm；

實驗步驟 2. 將細小、顏色鮮明的水晶寶寶各 15 顆裝入軟管；

實驗步驟 3. 打開水龍頭瞬間即開始錄影，水晶寶寶跟著水流流出；

實驗步驟 4. 水流與水晶寶寶撞擊模擬斗壁，觀察掉落或反彈；

實驗步驟 5. 以 1,000 mL 燒杯測量該水流流量(mL/s)；

實驗步驟 6. 將步驟 3~4 影片採用 tracker 軟體進行分析。

觀察水晶寶寶與水流一同自噴水孔噴出至落地後影片，以 tracker 軟體進行分析各流量與流速關係，如圖 15~18；影片截圖分析，如圖 19~21 所示。

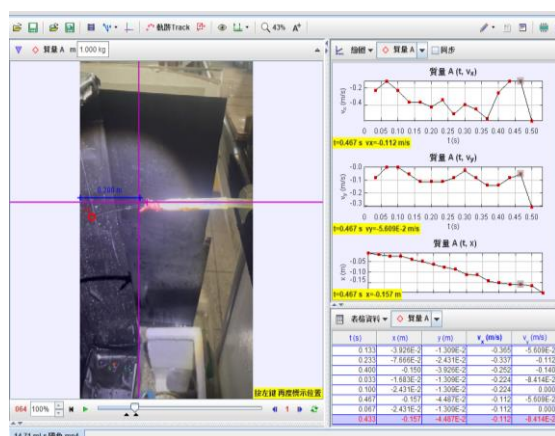


圖 15.選定質點與校正桿 tracker 分析

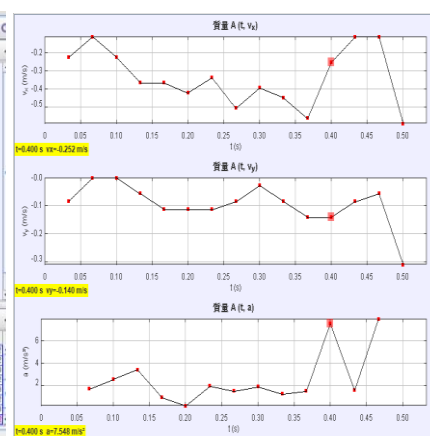


圖 16.流量 14.7mL/s 之流速

**\*\*本作品之所有照片、圖表、概念圖、繪圖皆由作者本人拍攝及繪製\*\***

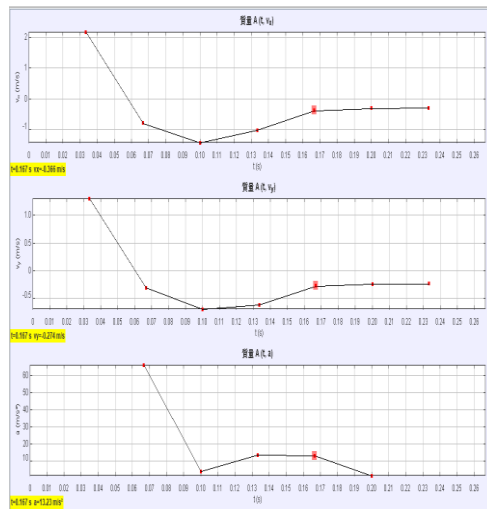


圖 17. 流量 18.9 mL/s 之流速

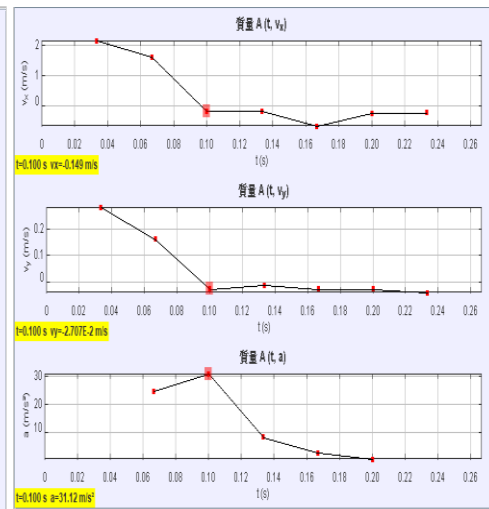
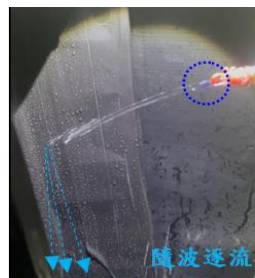


圖 18. 流量 26.1 mL/s 之流速

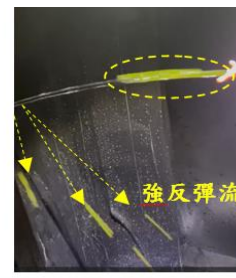
**\*\*本作品之所有照片、圖表、概念圖、繪圖皆由作者本人拍攝及繪製\*\***



橘色、流速 14.7 mL/s



藍色、流速 18.9 mL/s



黃色、流速 26.1 mL/s

圖 19. 低流量情形

圖 20. 中等流量情形

圖 21. 高流量情形

**\*\*本作品之所有照片、圖表、概念圖、繪圖皆由作者本人拍攝及繪製\*\***

根據上述 tracker 軟體分析之圖 16~18 與數據，彙整實驗結果如表 7。

表 7. 不同流量下水晶寶寶運動情形與物理量

流量 $\nu$ (mL/s)	14.7 mL/s	18.9 mL/s	26.1 mL/s
水晶寶寶質量(g)	0.2	0.2	0.2
水平位移(m)	0.2	0.2	0.2
空中停留時間(s)	0.467	0.17	0.10
水平速率最大值 $v_x$ (m/s)	0.11	0.20	0.25
垂直速率最大值 $v_y$ (m/s)	0.10	0.15	0.20
加速度最大值 $a$ (m/s <sup>2</sup> )	7.55	13.23	31.12
可能最大的撞擊力 (N $\times 10^{-3}$ )	1.51	2.646	6.224

**\*\*本作品之所有照片、圖表、概念圖、繪圖皆由作者本人拍攝及繪製\*\***

因此，我們根據 tracker 分析水晶寶寶運動來呈現水流的基本物理量，而彙整表 7 數據，我們可以獲得以下結論：

1. 如圖 16 與圖 19 所示，當低流量 14.7 mL/s 之水晶寶寶跟著水流流動時，因末動能太小以及與水滴之間黏滯作用而「隨波逐流」，不易產生反彈流。
2. 如圖 17 與圖 20 所示，當中等流量 18.9 mL/s 之水晶寶寶跟著水流流動時，也因末動能過小以及與水滴間黏滯作用「隨波逐流」不會產生反彈流。

- 3.如圖 18 與圖 21 所示，當高流量 26.1 mL/s 之水晶寶寶跟著水流流動時，水晶寶寶具有較大的末動能，得以克服水滴之間的黏滯作用而「快速彈跳」，易產生強力的反彈流；也與之前高流量 25.0 mL/s 模擬實驗相似。
- 4.從表 7 數據得知，高流量 26.1 mL/s 水晶寶寶可能最大撞擊力( $N \times 10^{-3}$ )，約中等流量 18.9 mL/s 水晶寶寶 2 倍，且約為低流量 14.7 mL/s 水晶寶寶之 4 倍。此說明了高流量紊流形成的反彈流，遠大於中低流量紊流之反彈流，而中低流量(<流量 20 mL/s)甚至於不會產生反彈流造成噴濺。

小結：

- 1.本實驗採用水晶寶寶進行不同水流之流量、以頻閃燈 532 Hz 照射下發現，水流噴濺主要的影響，包括水流本身的紊流與撞擊器壁產生的反彈流。
- 2.本實驗以 tracker 軟體分析後發現，當流量 $\leq 18.9$  mL/s 時，不易產生反彈流；當流量 $\geq 26.1$  mL/s 時，易產生較大的反彈流。

但是，本實驗採用頻閃燈照射、錄影追蹤水晶寶寶，再採用 tracker 軟體分析水晶寶寶之運動物理量，以「目測」方式判斷層流與紊流，可能因水流對於攝影時的背景光線所造成的反射或折射干擾而影響判讀。因此，我們再以「雷諾數」分析不同流量下的層流和紊流進行驗證。

## 實驗六、以雷諾數分析不同流量下的層流和紊流

黏滯力主要來自分子間相互的吸引力，為黏性液體內部的一種流動阻力，流體動力學稱為動力黏度( $\nu$ )，其定義為剪切黏度  $\mu$  除以液體密度  $\rho$ ， $\nu = \mu / \rho$ 。雷諾數(Re)即流體的慣性力( $\rho v^2 / L$ )與黏性力( $\nu \mu / L^2$ )之比值， $Re = \rho u L / \mu = u L / \nu$ 。

層流:流體黏滯力>慣性力，流速擾動因黏滯力而衰減， $Re < 2,000$ ；

紊流:流體慣性力>黏滯力，易形成不規則的紊亂流動， $Re > 4,000$ 。

過渡流: $4,000 > Re > 2,000$  為介於層流與紊流之間的流體。

根據 Burton-opitz & Robert(1918)對於尿液的研究指出，尿液黏度約為 0.000824 Pa·s，上述實驗二，採用水密度  $\rho = 1 \text{ g/cm}^3 = 1,000 \text{ kg/m}^3$ 、水動力黏度  $\nu = 0.001 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  也很接近尿液黏度；最後以線上雷諾數計算器分析不同流量下，水運動黏力和密度之雷諾數  $Re = (\rho \nu L) / \mu$ ，此公式中，雷諾數 Re(個)、流體密度  $\rho(\text{kg/m}^3)$ 、流速  $\nu(\text{m/s})$ 、出水口直徑  $L(\text{m})$ 、動力黏度  $\mu(\text{Pa} \cdot \text{s})$ 。根據實驗二以 tracker 軟體分析彙整表 11 數據，進行層流、過渡流與紊流 Re 值推算。

當流量 26.1 mL/s 時， $\rho = 1 \text{ g/cm}^3 = 1,000 \text{ kg/m}^3$ 、初始水平流速 0.25 m/s、出水口直徑  $L = 2 \text{ mm} = 0.002 \text{ m}$ 、水的動力黏度  $\nu = 0.001 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ，輸入線上計算雷諾數得知， $Re = 500.00 < 2,000$  屬於層流，如圖 22 所示。

在  $\rho$ 、 $L$ 、 $\nu$  皆不改變的情形下，當水晶寶寶隨著水流落下高度  $h_1 = 0.93 \text{ m}$  時：

$$V_y = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 10 \times 0.093} = 1.36(\text{m/s})，\text{這時末速} \sqrt{1.36^2 + 0.25^2} = 1.38(\text{m/s})$$

計算得知  $4,000 > Re = 2,720 > 2,000$  介於層流與紊流之間的過渡流，如圖 23 所示。



那麼流速各達多少時，「層流轉變成過渡流」以及「過渡流轉變成紊流」呢？

經輸入線上雷諾數計算器數據分析得知，層流至過渡流(Re=2,000)流速 1.0 m/s，而過渡流至紊流(Re=4,000)流速 2.0 m/s，分別如圖 24 與圖 25 所示。

圖 22.初速 Re 值

圖 23.末速 Re 值

圖 24.層流閾值

圖 25.過渡流閾值

**\*\*本作品之所有照片、圖表、概念圖、繪圖皆由作者本人拍攝及繪製\*\***

不同流量下的層流落下高度多少 m 後，會轉變成過渡流或紊流呢？

我們以表 7 數據與流速  $\sqrt{V_0^2 + 2 \cdot 10 \cdot h}$  進一步分析推論如下：

1.層流→過渡流之落下高度 h，當流速達 1 m/s，Re=2,000

$$\text{流量 } 14.7 \text{ mL/s}, \sqrt{0.11^2 + 2 \cdot 10 \cdot h_1} = 1, h_1 = 0.049 \text{ m} = 4.9 \text{ cm}$$

$$\text{流量 } 18.9 \text{ mL/s}, \sqrt{0.20^2 + 2 \cdot 10 \cdot h_2} = 1, h_2 = 0.048 \text{ m} = 4.8 \text{ cm}$$

$$\text{流量 } 26.1 \text{ mL/s}, \sqrt{0.25^2 + 2 \cdot 10 \cdot h_3} = 1, h_3 = 0.0469 \text{ m} = 4.69 \text{ cm}$$

2.過渡流→紊流之高度 H，當流速達 2 m/s，Re=4,000

$$\text{流量 } 14.7 \text{ mL/s}, \sqrt{0.11^2 + 2 \cdot 10 \cdot H_1} = 2, H_1 = 19.93 \text{ cm}$$

$$\text{流量 } 18.9 \text{ mL/s}, \sqrt{0.20^2 + 2 \cdot 10 \cdot H_2} = 2, H_2 = 19.80 \text{ cm}$$

$$\text{流量 } 26.1 \text{ mL/s}, \sqrt{0.25^2 + 2 \cdot 10 \cdot H_3} = 2, H_3 = 19.68 \text{ cm}$$

表 8. 不同流量之層流→過渡流→紊流落下高度的「理論值」

流量 $v$ (mL/s)	14.7 mL/s	18.9 mL/s	26.1 mL/s
水平速率最大值 $v_x$ (m/s)	0.11	0.20	0.25
層流→過渡流之高度 $h$ (cm)	4.9	4.8	4.69
過渡流→紊流之高度 $H$ (cm)	19.93	19.80	19.68

**\*\*本作品之所有照片、圖表、概念圖、繪圖皆由作者本人拍攝及繪製\*\***

從表 8 得知，理論上，水流單位時間內的流量愈大，流速愈快，層流→過渡流→紊流之落下高度應愈短。但是，不論目測或採用 tracker 軟體分析的實測結果，皆顯示相反的結果，即水流在單位時間內的流量愈大，流速愈快，層流→過渡流→紊流之落下高度卻愈長。



經諮詢成功大學工程科學系「流體力學」專家吳毓庭教授得知，當流速較快之水流所受到的空氣阻力>流速較慢之水流所受到的空氣阻力，這也解釋了為何我們觀察與測量不同流速時所發現的現象，包括：

- 1.當流速愈慢，層流愈短而紊流愈長；反之，流速愈快，層流愈長、紊流愈短。
- 2.根據實驗五得知，圖 16 呈現水流流量 14.7 mL/s 較低時，受空氣阻力影響較小，其流速變化量遠大於圖 17、圖 18 的流速變化量。
- 4.實驗五中，圖 17 和圖 18 分別為流量較高的 18.9 mL/s 與 26.1 mL/s，不論其水平或垂直落下速率、與加速度皆遞減，顯示水流運動受較大空氣阻力影響。

進一步比較 Wei Li., Kan Zhou., Raj M.與 Guan-Qui Li(2016)關於「流速與雷諾數關係圖」研究論文，如圖 26 所示。

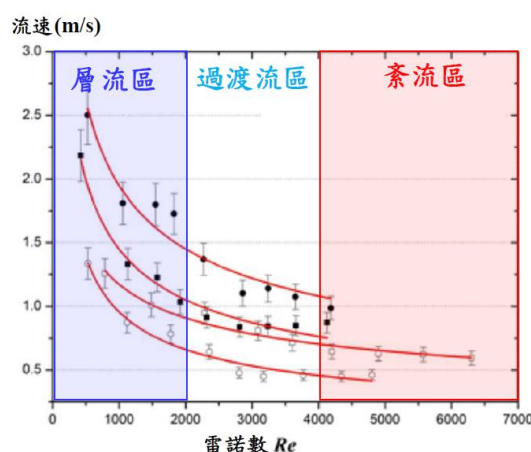


圖 26.流速與雷諾數關係圖

(修改自 Wei Li.等人(2016)研究報告，如文獻探討 9)

- 1.流體為高流速 2.0~2.5 m/s 時，當流速變慢，雷諾數增加較快(斜率大)，流速約降至 1.5 m/s 以下時，層流較快轉變為過渡流，甚至轉成紊流。
- 2.流體為低流速<1.5 m/s 時，當流速變慢，雷諾數增加較慢(斜率小)，流速約降至 1.0 m/s 以下時，層流逐漸轉變為過渡流與紊流。
- 3.流體的流速<1.0 m/s 時，層流較易轉變為過渡流與紊流。

比較本實驗圖 22~25，流速 0.25~2.0 m/s 雷諾數分析結果，頗符合圖 26 推論。實驗六與 Wei Li.等人(2016)之研究結果差異可能來自不同研究情境或樣本所致。我們以生活情境中的例子解釋紊流的發生，說明如下：

- 1.如高流量的瀑布，垂直落下高度較長時，才產生明顯紊流、散開產生小水珠。

因為高流量的水流，其水分子之間的黏滯力較大+所受空氣阻力也較大>水分子本身的慣性力，直到水流中的水分子落下較大的高度後，隨著水分子的慣性力逐漸變大，才會產生紊流。

- 2.如小水流流量低，僅落下較低的高度，即產生明顯紊流、散開產生小水珠。

因為低流量的水分子之間黏滯力較小、與空氣阻力也較小<水分子本身的慣性力，水流中水分子因慣性力>水分子之間的黏滯力和空氣阻力小，本就較易產生紊流，只稍微落下高度增加、流速隨之增加，便更容易脫離水流而形成紊流。

## 實驗七、以氣壓計和力度計測試自製小便模擬器模型之成效

### 一、小便模擬器的製作與改良歷程

第一代小便模擬器/寶特瓶水壓型：如圖 27 所示。

寶特瓶底部鑽 2 mm 孔徑，裝入 250 mL 水量鎖緊瓶蓋，因大氣壓力讓瓶內的水不流出。待轉開瓶蓋噴水時發現，僅依水壓噴水，流量甚低。實際上，小便時膀胱會施力噴出尿液，故捨棄此模型。

第二代小便模擬器/打氣噴射型：如圖 28 所示。

以單向閥結構的雙向打氣筒底部吸水，經前端噴水測試發現，每次出水量不一致、易漏水、施力大小與噴水量難控制。

第三代小便模擬器/針筒壓縮型：

改以 1,500 mL 大針筒裝水噴射，雖解決第一代噴水量無法固定問題，但施力大小與噴水流量仍難以控制。

第四代小便模擬器/氣球壓縮型：如圖 29~30 所示。

以氣球模擬彈性收縮的膀胱，用排水法裝定量 250 mL 水量再插入 2 mm 孔徑吸管噴水。但噴出水前卻常因漏水影響噴濺結果。

第五代小便模擬器/氣球噴瓶型：如圖 31 所示。

改良自第三代小便模擬器，裝水後，氣球底部貼成井字型防水膠帶，中間僅留下一面積 2 mm 開口，以竹籤刺氣球開口處讓水流噴出。但因竹籤刺入開口而未拔出前，已漏水滴在紙上，易造成計算噴濺面積之誤差，氣球也常因裝水彈性疲乏，一刺氣球即爆開。



圖 27.水壓法 圖 28.打氣法 圖 29.排水法 圖 30.吸管噴水法 圖 31.氣球噴水法

**\*\*本作品之所有照片、圖表、概念圖、繪圖皆由作者本人拍攝及繪製\*\***

第六代小便模擬器/氣球噴瓶型：改良自前五代設計與實驗步驟如下：

實驗步驟 1.以打氣筒快速對氣球充氣，氣球膨脹後再以三通閥 1 號封住氣球與寶特瓶之間的孔道使之不漏氣，如圖 32 所示。

實驗步驟 2.經量筒測量出水口以下無法噴出水量 33 mL，再以燒杯裝入能噴出水量 250 mL，總體積 283 mL，如圖 33 所示。

實驗步驟 3.裝入 283 mL 類尿溶液，精準控制在 10 s 噴出固定水量 250 mL，實驗前以三通閥 2 號關閉出水口，如圖 34 所示。

實驗步驟 4.將小便模擬器移至水槽前初步測試，如圖 35 所示。

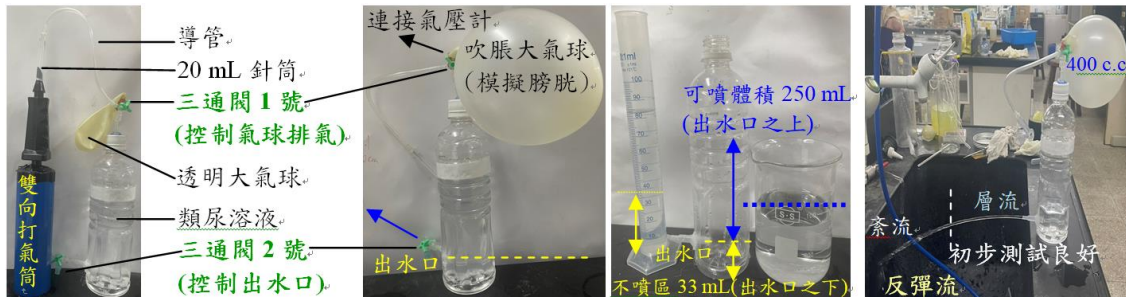


圖 32.第六代小便模擬器 圖 33.氣球打氣 圖 34.排水法測量 圖 35.初步測試

**\*\*本作品之所有照片、圖表、概念圖、繪圖皆由作者本人拍攝及繪製\*\***

第六代小便模擬器經測試發現，此模擬器操作簡單亦不漏水、可穩定控制每次噴出水量固定為 250 mL，並能藉由氣球體積大小控制出水之流量。

## 二、測量第六代小便模擬器的各項物理量

我們想了解第六代小便模擬器的噴水成效，於是進一步測量氣壓、小便斗受水流和反彈流沖擊力等物理量，分別以圖 36~39 並說明如下。

Vernier 氣壓計(kPa)：測量氣球與小便模擬器內部連通後的氣壓變化量。

Vernier 力度計(N)：測量流量與其反彈流沖擊斗壁的最大作用力。

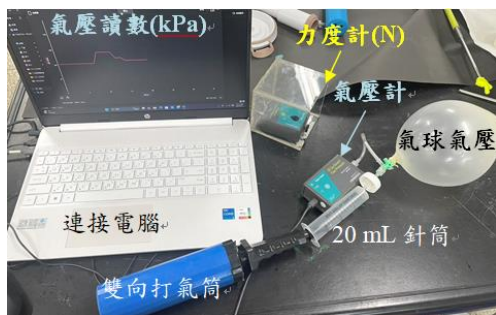


圖 36.充氣與感應器連接電腦

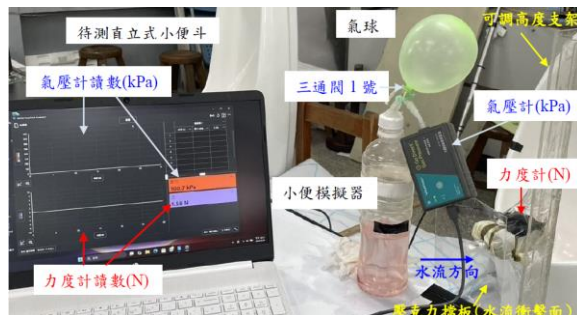


圖 37.氣壓計與力度計同步產生讀數

**\*\*本作品之所有照片、圖表、概念圖、繪圖皆由作者本人拍攝及繪製\*\***

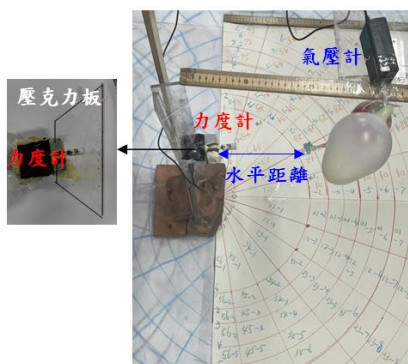


圖 38.實驗設計鳥瞰圖示

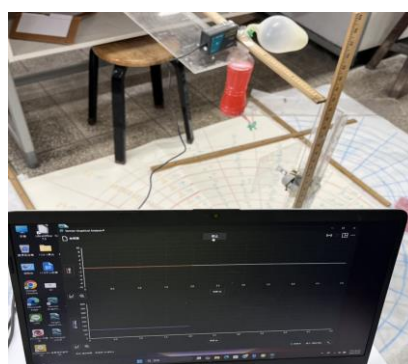


圖 39.測試前安置各項器材

**\*\*本作品之所有照片、圖表、概念圖、繪圖皆由作者本人拍攝及繪製\*\***

此外，我們為了解平射和斜射所產生反彈流作用力之間是否具有差異，進一步採用兩種實驗設計說明如下：



- 1.當水流自出水孔向前平射時，讓水流正面沖擊斗壁，水流反彈後，測量反彈流的最大作用力，如圖 40 所示；
- 2.當水流自出水孔以不同垂直射角 $\theta$ 向下斜射時，水流以拋物線落下再沖擊斗壁，水流經反彈後，測量反彈流的最大作用力，如圖 41 所示。

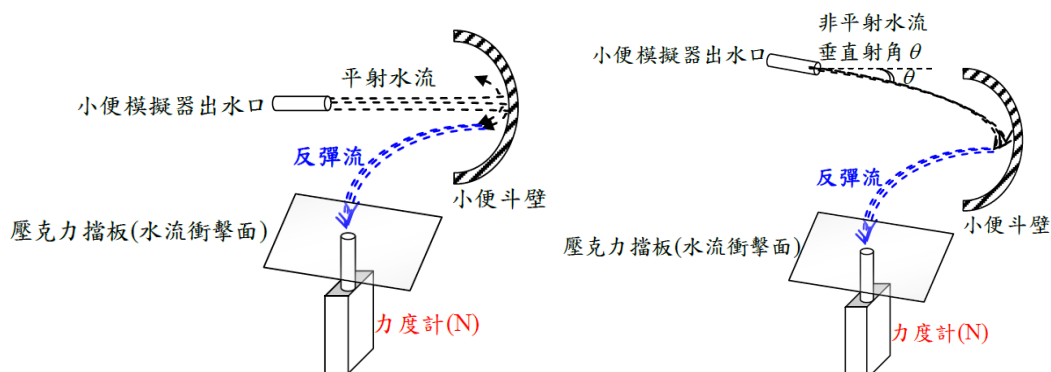


圖 40.平射後反彈流作用力實驗設計 圖 41.斜射後反彈流作用力實驗設計

**\*\*本作品之所有照片、圖表、概念圖、繪圖皆由作者本人拍攝及繪製\*\***

### 三、以小便模擬器初步測試垂直射角對於噴濺量之影響

實驗時，大氣壓 100.4 kPa(千帕)，氣球充氣後經排水法測得體積約 400 mL，同時以 Vernier 氣壓計連接三通閥 1 號，測得穩定氣壓 104.2~104.3 kPa，使用力度計之前讀數 1.56 N，先「歸零」，測量水流作用力，如圖 42~44 所示。



圖 42. 小便模擬器內部 Vernier 之氣壓值與水流力度變化量

**\*\*本作品之所有照片、圖表、概念圖、繪圖皆由作者本人拍攝及繪製\*\***

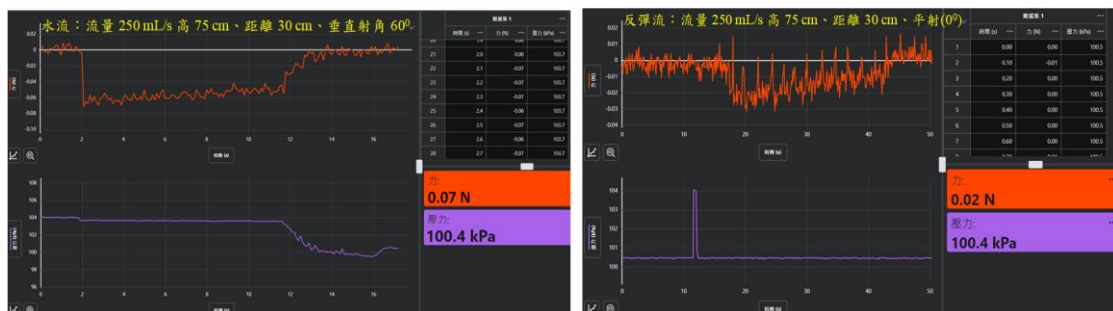


圖 43.垂直射角 60° 水流作用力

圖 44.平射時反彈流作用力

**\*\*本作品之所有照片、圖表、概念圖、繪圖皆由作者本人拍攝及繪製\*\***

從圖 50~52 得知，大氣壓 100.4 kPa 和小便模擬器內氣壓 104.2~104.3 kPa 皆維持頗為穩定的氣壓。當水流固定流量 250 mL/s、相同高度 75 cm 與距離

30 cm 時，垂直射角  $60^0$  的「水流」作用力最大值 0.07 N、平射(垂直射角  $0^0$ ) 的「反彈流」作用力最大為 0.02 N。顯示此 Vernier 氣壓計與力度計分別能精確地測量小便模擬器內部氣壓與微小的作用力變化量。

一般身高 170 cm 男性之尿孔高約 75 cm、尿孔與小便斗壁距離 30 cm 前，採用下列三種方式進行測試：

- 1.尿孔正對著斗壁「正前方」排尿，即垂直射角  $\theta=0^0$ ；
- 2.尿孔正對著斗壁上「蒼蠅」圖像排尿，垂直射角  $\theta=30^0$ ；
- 3.尿孔對準斗壁底下的「排水孔」排尿，垂直射角  $\theta=60^0$ 。

實驗四中，乃以實驗室水流垂直射角  $75^0$  瞄準排水孔。但是，本實驗則是採用自製小便模擬器固定噴管的位置，若對準斗壁底下的排水孔，則垂直射角  $60^0$ 。本實驗七與前實驗四的實驗模擬情境有所不同，故垂直射角有所差異。

經測量小便模擬器水流作用力結果，如表 9、圖 51 和圖 52 所示。

表 9. 測量高度 75 cm 水流垂直射角  $\theta$  之水流和反彈流的作用力

流量(mL/s)	距離(cm)	$\theta$ 值	水流作用力(N)極值	反彈流作用力(N) 極值
250 mL/s	30 cm	$0^0$	0.03 N	0.02 N
250 mL/s	30 cm	$30^0$	0.04 N	0.05 N
250 mL/s	30 cm	$60^0$	0.07 N	0.09 N

**\*\*本作品之所有照片、圖表、概念圖、繪圖皆由作者本人拍攝及繪製\*\***

從表 9 中得知：

- 1.垂直射角愈大，水流與反彈流對於斗壁的作用力皆愈大。
- 2.垂直射角  $\theta=30^0$  或  $60^0$  時，水流作用力愈大，反彈流也愈大。

討論：

- 1.平射時，即  $\theta=0^0$ ，水流垂直沖擊斗壁，理論上都會比斜射所產生的分力還大，即正向力： $\theta=0^0>\theta=30^0>\theta=60^0$ 。但是，實驗結果的作用力比較，卻是  $\theta=60^0>\theta=30^0>\theta=0^0$  呢？
- 2.斜射時，出水孔垂直射角為  $30^0$  或  $60^0$ ，反彈流的作用力分別為 0.05 N、0.09 N，皆大於原水流的作用力 0.04 N、0.07 N。但是， $\theta=0^0$  平射時，為何原水流的作用力 0.03 N>反彈流的作用力 0.02 N 呢？

我們進行推論如下：

當  $\theta=0^0$  時，平射的水流雖然垂直沖擊斗壁的正向力，應比斜射產生的分力大，卻也僅有水平作用力。但是，根據圖 49 的實驗設計，出水孔垂直射角為  $30^0$  或  $60^0$  時，水流因重力影響而產生向下的分力，隨著水流落下高度愈大，因重力產生的向下分力也愈大，反而使水流沖擊斗壁的作用力>平射水流對斗壁的作用力。

根據上述推論即可解釋，因水流受重力影響而產生愈來愈大的向下分力，造成反彈流也隨之愈大。而  $\theta=0^0$  的平射水流沖擊到小便斗壁時，大多數隨著斗壁而流下，僅有少量殘存的反彈流落在力度計的壓克力板上，其反彈流之作用力自然比原水流的作用力還要小。



我們參考與回顧實驗二-表 3、實驗四-表 5 和表 6 得知，本實驗藉由 Vernier 力度計，對於自製小便模擬器產生水流和反彈流作用力之測量，即可解釋在相同流量(200 或 250 mL/s)、與斗壁相同距離( $\geq 20$  cm)、以及相同高度(65~85 cm)下，垂直射角愈大，反彈流也愈強，而平射的水流總是產生最小的反彈流。

如上述實驗數據與推論，也意謂著「男性使用小便斗上一號時，採用平射方式最能避免反彈流的噴濺。」

但是，即使平射比其他垂直射角產生反彈流之力度最小，那麼平射產生反彈流的噴濺面積與範圍也最少嗎？垂直射角愈大，其反彈流之噴濺面積與範圍是否也愈大呢？因此，我們科展團隊繼續進行噴濺面積與範圍相關實驗來驗證。

## 實驗八、蒙地卡羅扇形觀察法和 Image J 軟體分析噴濺面積與範圍

以第六代小便模擬器實測兩組小便斗噴濺面積與範圍，實驗步驟如下：

實驗步驟 1. 根據本研究需求，採用大張易吸水的宣紙繪製「以小便斗為圓心的扇形格線」，自創「蒙地卡羅扇形觀察法」逐一標示格線與液滴可能噴濺位置和範圍，如圖 45、圖 46 所示。

實驗步驟 2. 依尿液黏滯性相關文獻調製不同濃度的葡萄糖、加入少量紅色試劑與螢光劑，配置具有黏滯性的類尿水溶液。

實驗步驟 3. 採用實驗七之第六代自製小便模擬器，以雙向打氣筒對氣球充氣、排水法控制氣球體積 400 mL、瓶內裝水 250 mL、電子天平與 Vernier 力度計分析水流與液滴衝擊力(N)，如圖 47、圖 48 所示。

實驗步驟 4. 分別測試購置的直立式與懸掛式兩組小便斗與蒐集數據；

實驗步驟 5. 以放大率 3,700 倍以上 Image J 軟體分析噴濺面積，如圖 49 所示。



圖 45. 蒙地卡羅扇形觀察法 圖 46. 扇形格線與區域編號 圖 47. 液滴衝擊力初探

**\*\*本作品之所有照片、圖表、概念圖、繪圖皆由作者本人拍攝及繪製\*\***

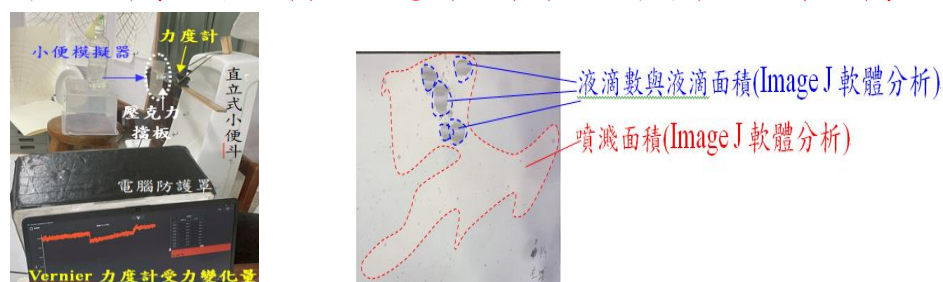


圖 48. 力度計分析水流作用力(N) 圖 49. Image J 分析液滴噴濺

**\*\*本作品之所有照片、圖表、概念圖、繪圖皆由作者本人拍攝及繪製\*\***

如圖 47，採用電子天平無法持續測得水流作用力的變化量，也因水流阻擋而不易觀察，便捨棄此測量作用力的方式，改為力度計測量水流作用力。

### 實驗九、直立式與懸掛式兩種小便斗之噴濺面積與範圍比較

首先，我們調整小便模擬器流量 25 mL/s，固定於離地高度 75 cm 處，對著直立式小便斗內壁之水平距離 20、25、30、35 cm 平射方式噴水，觀察小便斗下方擺設的蒙地卡羅扇形區之噴濺面積與範圍，實驗結果如表 10 所示。

表 10.小便模擬器平射直立式小便斗之噴濺面積與範圍

與斗壁距離 (cm)	噴濺總面積 (cm <sup>2</sup> )	液滴最小面積 (cm <sup>2</sup> )	液滴最大面積 (cm <sup>2</sup> )	蒙地卡羅扇形區最 遠範圍(編號)
<b>20</b>	<b>1,124.01</b>	27	234	<b>12-4</b>
25	1,105.90	8	239	01-3
<b>30</b>	<b>166.67</b>	25	223	<b>01-2</b>
35	735.23	3	253	01-6

**\*\*本作品之所有照片、圖表、概念圖、繪圖皆由作者本人拍攝及繪製\*\***

屬於達 25 mL/s 高流量的小便模擬器，當距離直立式小便斗壁 20 cm 時，因高流量使其反彈流也較強勁，其噴濺面積達 1124.01 cm<sup>2</sup>，遠遠大於距離斗壁 30 cm 和 35 cm 之噴濺面積 166.67、735.23 cm<sup>2</sup>；其液滴也噴濺至「蒙地卡羅扇形區」最遠範圍在編號 12-4 之區域，如圖 50 所示。

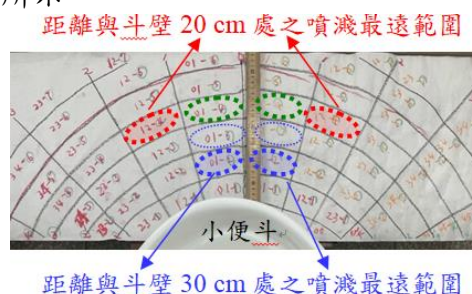


圖 50.蒙地卡羅扇形區噴濺範圍編號

**\*\*本作品之所有照片、圖表、概念圖、繪圖皆由作者本人拍攝及繪製\*\***

從表 10 與圖 58 得知，小便模擬器僅僅往後移動 5 cm、距離小便斗壁 30 cm 處，反彈流噴濺面積驟減至 166.67 cm<sup>2</sup>。這也意味著男性因尿急而使用小便斗時，宜後退一小步站在距離小便斗壁 30 cm 處，尿液受反彈的影響最小、噴濺量也最少。

但是，小便模擬器僅從 30 cm 處往後移動 5 cm 時，卻因紊流產生噴濺面積又遽增達 4 倍之多、噴濺面積則達 735.23 cm<sup>2</sup>。換言之，男性因尿急而使用小便斗時，若再稍微站得遠些，距離小便斗壁 35 cm 處上一號時，又因尿流本身所產生的紊流而增加尿液的噴濺面積了。但是，不同尿孔高度、與小便斗壁距離、垂直射角等因素，對於所購買的兩種公共男性洗手間小便斗之噴濺面積與範圍是否有所差異呢？

為符合男性實際使用這兩類小便斗上一號的情形，經實測本校直立式與懸掛式小便斗後，男性使用直立式小便斗距離地面之尿孔高度約 65~75 cm；而使用懸掛式小便斗距離地面之尿孔高度則約在 75~80 cm。經測試結果彙整數據如表 11 所示。

表 11.以小便模擬器測試兩類型小便斗噴濺面積與範圍

尿孔高度 (cm)	距離斗壁 (cm)	垂直射角 (度)	直立式噴濺情形		懸掛式排水孔高度 ＞尿孔高度	
			面積(cm <sup>2</sup> )	最遠範圍		
65	20	0 <sup>0</sup> (平射)	26.59	11-4		
65	20	30 <sup>0</sup>	632.46	12-5		
<b>65</b>	<b>20</b>	<b>60<sup>0</sup></b>	<b>959.84</b>	<b>12-6</b>		
65	30	0 <sup>0</sup> (平射)	74.37	12-6		
65	30	30 <sup>0</sup>	129.21	23-6		
<b>65</b>	<b>30</b>	<b>60<sup>0</sup></b>	<b>1,589.84</b>	<b>24-6</b>		
75	20	0 <sup>0</sup> (平射)	8.59	12-4		
75	20	30 <sup>0</sup>	78.17	12-5		
<b>75</b>	<b>20</b>	<b>60<sup>0</sup></b>	<b>282.14</b>	<b>12-6</b>		
75	30	0 <sup>0</sup> (平射)	93.02	11-4		
75	30	30 <sup>0</sup>	168.11	12-5		
<b>75</b>	<b>30</b>	<b>60<sup>0</sup></b>	<b>2,392.42</b>	<b>12-6</b>		
80	20	0 <sup>0</sup> (平射)	尿孔高度＞直立式高度			
80	20	30 <sup>0</sup>	尿孔高度＞直立式高度			
<b>80</b>	<b>20</b>	<b>60<sup>0</sup></b>	尿孔高度＞直立式高度			
80	30	0 <sup>0</sup> (平射)	尿孔高度＞直立式高度			
80	30	30 <sup>0</sup>	尿孔高度＞直立式高度			
<b>80</b>	<b>30</b>	<b>60<sup>0</sup></b>	尿孔高度＞直立式高度			

懸掛式噴濺情形	
面積(cm <sup>2</sup> )	最遠範圍
176.10	12-4
277.26	15-6
<b>986.02</b>	<b>32-7</b>
185.22	12-4
520.89	14-7
<b>938.59</b>	<b>34-7</b>

**\*\*本作品之所有照片、圖表、概念圖、繪圖皆由作者本人拍攝及繪製\*\***

根據表 11 數據，與表 10 採用平射直立式小便斗之數據相仿，顯示實驗過程與實驗結果的穩定性。在相同噴水高度(65~80 cm)以及尿孔和斗壁距離(20~30 cm)時。我們分為三個向度進行比較。

#### 一、使用小便斗造成尿液噴濺具有哪些共同特徵

彙整表 11 繪製統計圖分析，如圖 51~58 所示。

- 1.垂直射角愈大，噴濺面積愈大且噴濺範圍也愈廣。
- 2.採用平射方式，噴濺面積與噴濺範圍皆最小。

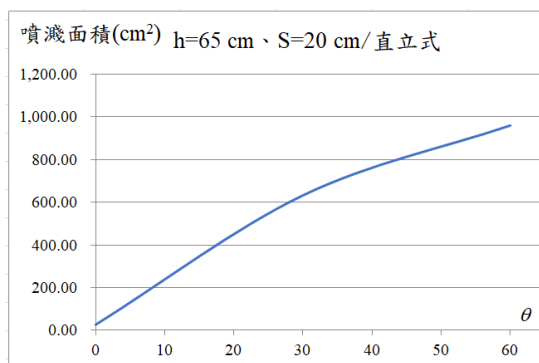


圖 51.直立式 h=60 cm、S=20 cm

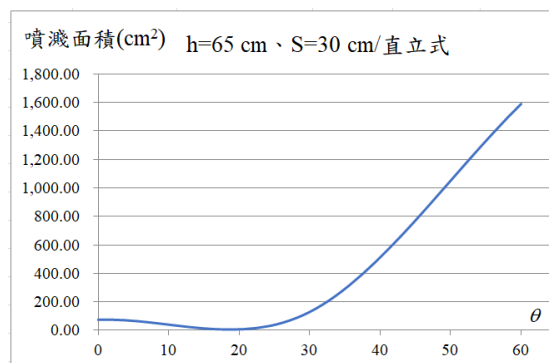


圖 52. 直立式 h=60 cm、S=30 cm

**\*\*本作品之所有照片、圖表、概念圖、繪圖皆由作者本人拍攝及繪製\*\***

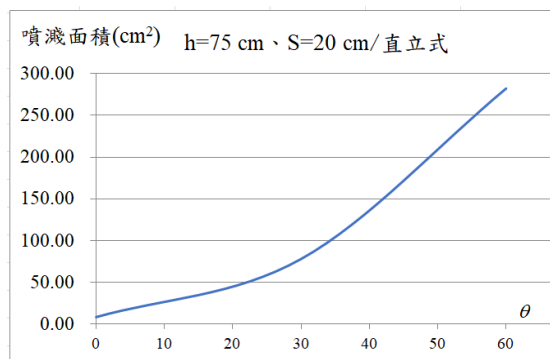


圖 53. 直立式  $h=75\text{ cm}$ 、 $S=20\text{ cm}$

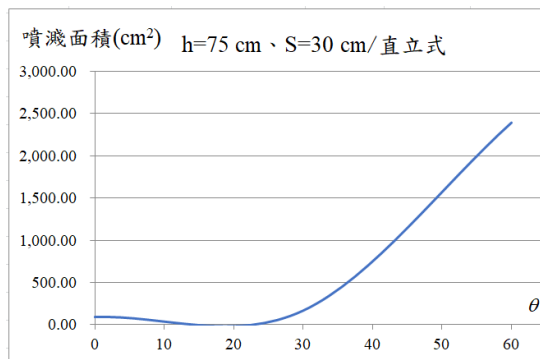


圖 54. 直立式  $h=75\text{ cm}$ 、 $S=30\text{ cm}$

**\*\*本作品之所有照片、圖表、概念圖、繪圖皆由作者本人拍攝及繪製\*\***

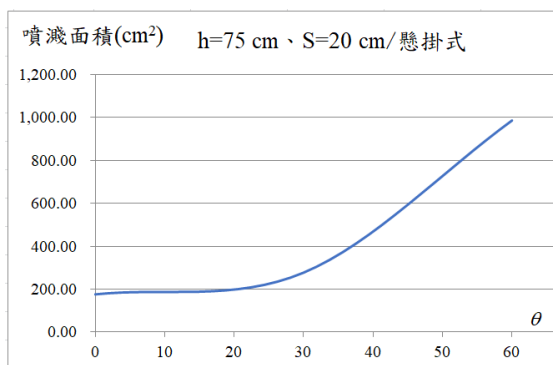


圖 55. 懸掛式  $h=75\text{ cm}$ 、 $S=20\text{ cm}$

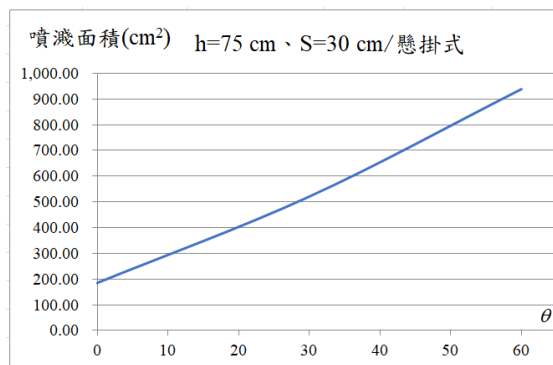


圖 56. 懸掛式  $h=75\text{ cm}$ 、 $S=30\text{ cm}$

**\*\*本作品之所有照片、圖表、概念圖、繪圖皆由作者本人拍攝及繪製\*\***

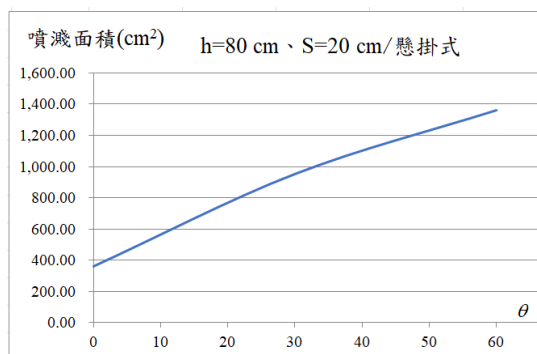


圖 57. 懸掛式  $h=80\text{ cm}$ 、 $S=20\text{ cm}$

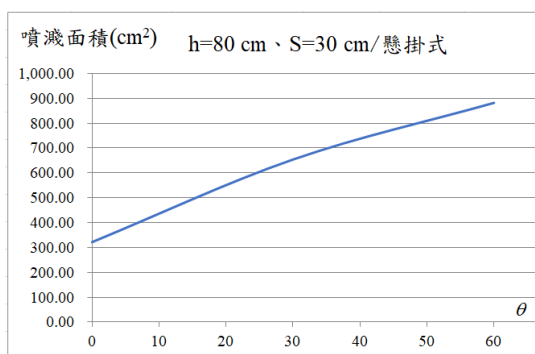


圖 58. 懸掛式  $h=80\text{ cm}$ 、 $S=30\text{ cm}$

**\*\*本作品之所有照片、圖表、概念圖、繪圖皆由作者本人拍攝及繪製\*\***

因此，如圖 51~58 所示，不論使用直立式或懸掛式小便斗，採用平射方式，噴濺面積與噴濺範圍最小；垂直射角愈大，噴濺面積與噴濺範圍皆愈大。

## 二、使用哪一種小便斗尿液噴濺面積和範圍最少

同樣身高 170 cm 的男性使用小便斗上一號時，若有機會選擇小便斗類型，應選擇哪一種小便斗比較不易被尿液噴濺呢？

根據表 11 之數據，再重新彙整如表 12 所示。



表 12.兩類型小便斗噴濺面積與範圍

高度(cm)	距離(cm)	射角(度)	小便斗類型	噴濺面積( $\text{cm}^2$ )
75	20	$0^\circ$	直立式	8.59
			懸掛式	176.10
75	20	$30^\circ$	直立式	78.17
			懸掛式	277.26
75	20	$60^\circ$	直立式	282.14
			懸掛式	986.02
75	30	$0^\circ$	直立式	93.02
			懸掛式	185.22
75	30	$30^\circ$	直立式	168.11
			懸掛式	520.89
<b>75</b>	<b>30</b>	<b><math>60^\circ</math></b>	<b>直立式</b>	<b>2,392.42</b>
			懸掛式	938.59

**\*\*本作品之所有照片、圖表、概念圖、繪圖皆由作者本人拍攝及繪製\*\***

根據表 12 得知，身高 170 cm 的男性使用小便斗上一號時，不論平射或對著蒼蠅(30)尿尿，理應選擇直立式小便斗比較不易噴濺。但是，如果尿孔對著小便斗底下的排尿孔(60)，則噴濺面積瞬間飆升至驚人的  $2,392 \text{ cm}^2$ 。

我們重複多次實驗時觀察發現，上述主要原因來自於直立式小便斗的護斗，比懸掛式小便斗的護斗還要低許多，且直立式小便斗又貼著地面，因此，當男性對著排尿孔上一號時，反彈流與小便本身產生的紊流大量地彈射出小便斗之外。

不過，本實驗採用自製小便模擬器，進行較高流量 25 mL/s 的模擬實驗，誠如實驗四之表 6、圖 12 和圖 13 所示，當尿流 $\leq$ 低於 15 mL/s，例如尿不急或高齡的年長者，則應更靠近小便斗的斗壁，且考量對準斗壁的蒼蠅上一號，反而不易受到尿流產生的紊流所噴濺。

此外，直立式與懸掛式小便斗分別安裝於地面和懸掛於牆壁，直立式小便斗本身的長度遠高於懸掛式小便斗，且兩種小便斗結構亦不同，包括直立式寬度遠較懸掛式大、也較懸掛式厚重，懸掛式前端「護斗」又比直立式高 10 cm，比直立式較能阻攔反彈流濺出小便斗之外。

### 三、站在何處排尿可讓小便斗尿液噴濺最少

從表 11 數據得知，使用不同小便斗以平射方式上一號時，不同身高的男性可採用不同的站位，讓尿液噴濺出小便斗外之噴濺量最小化，結論如下：

- 1.使用直立式小便斗時，身高較矮或尿孔高度 $\leq 65 \text{ cm}$ 者，採用平射且距斗壁 20 cm，尿液噴濺量最少；身高較高或尿孔高度 $>75 \text{ cm}$ 者，採用平射且距斗壁 30 cm，尿液噴濺量最少。



2.使用懸掛式小便斗時，身高較矮或  $80\text{ cm} > \text{尿孔高度} > 75\text{ cm}$ ，採用平射且距斗壁  $20\text{ cm}$ ，噴濺量最少；身高較高或尿孔高度  $> 80\text{ cm}$ ，採用平射且距斗壁  $30\text{ cm}$ ，噴濺量最少。

此外，我們從蒙地卡羅扇形區觀察液滴噴濺範圍中也發現，若排水孔高度  $75\text{ cm}$ (如男性尿孔高度)使用直立式和懸掛式小便斗上一號並採用平射，直立式小便斗的尿液噴濺面積，應遠低於直立式小便斗之尿液噴濺面積，但噴濺範圍卻無顯著差異。

我們推論為「安裝懸掛式小便斗的高度，本就高於貼地的直立式小便斗，故懸掛式造成尿液的反彈流作用力  $>$  直立式反彈流的作用力」致懸掛式噴濺面積  $>$  直立式噴濺面積；但是，兩種小便斗液滴的噴濺範圍則受到兩種小便斗不同的結構所限制。

## 伍、研究結論

### 一、尿液噴濺研究方法上之改良

依本研究改良各項實驗設計和測量的重要程度，依序說明如下。

#### 1.改良尿液噴濺出小便斗之外的數據蒐集與測量方法

從多數文獻得知，過去對於尿液噴濺的研究多以「尿滴數」或「尿滴質量」的多寡作為比較，不僅計算尿滴數或質量的誤差極大，對於將其研究結果運用於減少小便斗外的尿漬也難有實質上的助益。

如實驗八所示，本研究改以「蒙地卡羅扇形區域」標示尿液噴濺範圍，並採用更高解析度的「Image J 軟體」分析噴濺面積，不僅計算尿液噴濺的精準度大幅提升，也對男性使用小便斗上一號時提供有用的參考。

#### 2.改良尿液噴濺之實驗設計與測量方法

以往的研究多僅關注於較高尿流量下，尿柱沖擊小便斗壁所產生的反彈流，缺乏研究較低尿流量下，尿柱本身也會產生可觀的紊流，亦影響尿滴噴濺出小便斗外的影響。

如實驗七所示，本研究自行發展「小便斗模擬器」不僅能藉由 Vernier 氣壓計與力度計，分析比較紊流與反彈流的微小作用力，也藉由控制氣球的脹縮，實際模擬男性小便時因膀胱的施力而改變尿流量之方法。

#### 3 提供尿流噴濺之測量方法與合理解釋

如實驗二和實驗六所示，本研究不僅關注在尿柱沖擊小便斗壁所產生的反彈流，也藉由「雷諾數」的計算提供辨識層流和紊流的物理量。此外，為區分尿流量( $\text{mL/s}$ )與尿流速( $\text{m/s}$ )之間的差異，另採用水晶寶寶配合 tracker 軟體分析得知，流量與流速之間的關係、以及不同流速對於紊流和反彈流的實際影響。

#### 4.提供使用直立式與懸掛式小便斗之參考

如實驗四和實驗九所示，本研究根據上述第 1~3 點的實驗基礎，分析比較直立式與懸掛式兩種小便斗之差異，以液滴噴濺面積和範圍為論據，提供男性

使用此兩種小便斗時，包括身高(尿孔高度)、不同尿流量下的站位(與小便斗的距離)、以及垂直射角(是否瞄準蒼蠅或平射)等參考。

## 二、尿液噴濺之研究結果的新發現

1. 尿液噴濺出小便斗的原因，主要受到尿液本身產生的「紊流」與尿液撞擊小便斗產生的「反彈流」所影響。
2. 使用小便斗造成噴濺出小便斗尿液的主要影響因素依次為：  
尿流量>尿孔和小便斗壁的距離>尿柱的入射角。
  - (1) 尿流平射時，噴濺出小便斗的尿流量與面積最小；水平射角或與垂直射角愈大，噴濺出小便斗之尿流量與面積愈大。換言之，愈瞄準排水孔排尿，噴濺出小便斗的尿液面積和範圍愈大。
  - (2) 尿孔與水平線夾角
    - ① 在小便斗正前方平射排尿，噴濺出小便斗的尿流量與面積最小。
    - ② 水平射角愈大，噴濺出小便斗的噴濺面積和範圍愈大。
    - ③ 垂直射角愈大，噴濺出小便斗的噴濺面積和範圍愈大。
  - (3) 與小便斗的距離，會受到尿流量而影響噴濺出小便斗的尿流量與面積。
3. 當尿流量愈緩慢、流量 $<15\text{ mL/s}$ 時，「尿液產生的紊流，比尿液撞擊小便斗的反彈流對尿液噴濺的影響大。」因此，站立的位置應離小便斗較近些，可減少噴濺出小便斗之尿流量與面積。
4. 當尿急或流量 $\geq 15\text{ mL/s}$ ，尿柱撞擊斗壁之反彈流，比尿柱產生紊流對尿液噴濺影響還大。急尿或用力出尿時，站立位置應與直立式小便斗最佳距離  $30\text{ cm}$ ，可大幅減少噴濺出小便斗外的尿滴面積和範圍。
  - (1) 與斗壁距離 $<30\text{ cm}$ ，尿柱多以層流形式撞擊斗壁反彈，仍因少量紊流與大量反彈流污染鞋褲。
  - (2) 與斗壁距離  $30\text{ cm}$ ，尿柱多以層流形式撞擊斗壁滑落，反彈尿滴最少。
  - (3) 與斗壁距離 $>30\text{ cm}$ ，尿柱在到達斗壁之前，多以紊流形式掉落而滴濺。
5. 根據 tracker 分析水晶寶寶運動分析水流流速，基本驗證了高流量下水分子撞擊力遠大於中低流量；中低流量 $<15\text{ mL/s}$  甚至不會產生反彈流造成噴濺，因多數紊流已無力反彈而沿著內壁流到小便斗底部。
6. 從測試懸掛式小便斗得知，改良直立式小便斗建議如下：
  - (1) 提高小便斗縱深，能有效攔阻尿柱分裂的紊流和反彈流。
  - (2) 加寬小便斗寬度，可阻止大流量紊流噴濺出小便斗之外。
  - (3) 增加小便斗檻高，可更有效攔阻紊流所形成的反彈尿流。

## 陸、研究討論

根據本研究之研究方法與研究結論，進行以下討論：

1. 尿液噴濺出小便斗的原因，主要受到尿液本身產生的紊流、以及尿液撞擊斗壁產生的反彈流所影響。但因紊流與反彈流總是混雜在一起，難以分辨噴濺出小便斗的液滴受到何種因素影響較大。

因此，或可採用高畫質與高速攝影機來捕捉多少紊流直接落入小便斗壁內或小便斗壁外、以及哪些因撞擊小便斗壁產生的反彈流濺入小便斗壁內或壁外，來區分紊流和反彈流對噴濺面積和噴濺範圍的影響程度。

2. 本研究採用紊流與反彈流噴濺出小便斗外的液滴總面積，以 Image J 軟體進行分析之後發現，水柱與平射面夾角愈大，個別噴濺液滴總面積與尿液分布的範圍也具有愈大的趨勢。
3. 根據上述第 2 點，採用 ImageJ 軟體分析計算個別水滴加總面積與噴濺範圍時發現，需將承接液滴噴濺的宣紙所拍攝的照片放到最大值，方可較精準讓 ImageJ 軟體辨識液滴「明暗」程度，方能決定選取面積和範圍。

但是，有些噴濺出小便斗非常細小液滴之面積極小，難以採用 Image J 軟體分析。因此，這些細小的液滴面積總和易造成統計上的誤差。

4. 小便斗種類繁多，但是，因礙於研究時間與器材所限，本研究僅以學校最常見的兩種直立式和懸掛式小便斗，進行實驗數據蒐集與分析解釋，至於其他類型的小便斗則有待未來研究進一步探索。

## 柒、參考文獻資料

1. 吳毓庭(2025)。動手玩流體力學，【動手玩流力-原理】層流與紊流。國立成功大學工程科學系。
2. 男生站着小便會濺到外面？日本實驗證實：每天濺出約 4 萬滴尿。參考網址：<https://news.qq.com/rain/a/20211224A0BRI600>。
3. 尿尿瞄準「馬桶這位置」7 千滴尿狂噴！研究證實：射前端最好。ETtoday 新聞雲，2022 年 02 月 16 日，記者李佳蓉／綜合報導。
4. 加國大學設計「0 噴濺小便斗」找出尿流和便斗的完美臨界角，尿哪都不怕了！<https://www.ettoday.net/daemon/post/63467>。
5. 科普專題：要怎麼尿才不會噴到自己？The Unfortunate Physics of Male Urination。參考網址 <https://a0976737702.pixnet.net/blog/post/314015550>。
6. Bryner J. (2013). The Physics of Peeing, and How to Avoid Splash-Back. <https://www.nbcnews.com/id/wbna53530828>。
7. James Morgan (2013). Physicists probe urination 'splashback' problem. <https://www.bbc.com/news/science-environment-24820279>。
8. R. Burton-opitz & Robert Dinegar(1918). *The viscosity of urine*. Physiological laboratory of Columbia University at College of Physicians and Surgeons, New York. <https://journals.physiology.org/doi/abs/10.1152/ajplegacy.1918.47.2.220>。
9. Wei Li., Kan Zhou., Raj M., Guan-Qui Li(2016). Investigation of CaCO<sub>3</sub> fouling in plate heat exchangers. <https://www.researchgate.net/publication/290497978>。
10. Wizz k. (2016). Preventing Urine Splash And Keeping Restrooms Clean. <https://www.cleanlink.com/news/article/Preventing-Urine-Splash-And-Keeping-Restrooms-Clean--20333>。

## 【評語】 030109

本研究聚焦於男性使用小便斗時尿液撞擊表面產生噴濺的成因，主題貼近日常生活且具實用性，展現出作者將科學應用於實際情境的創意思維。研究中以量化數據進行分析，圖表清晰、討論充分，並能依據科學方法進行實驗設計與驗證，顯示出紮實的探究能力與科學素養。若能在報告中對部分專業術語做適當說明，將有助於提升讀者的理解與報告的可親近度。整體而言，這是一件兼具創新性與實用價值的優秀作品，值得肯定與鼓勵。



作品海報



# 尿之有道

—— 小便斗尿液噴濺物理學



**摘要：** 本研究旨在探索各項因素對於尿液噴濺之影響。應根據尿流量與斗壁的距離、調整角等可有效降低噴濺量。研究方法包括 Image J軟體分析範圍，並以tracker分析所得物理量，使用氣壓計與力度計測量。實驗結果顯示：雷諾數驗證流量小易受紊流噴濺、流量大則易受反彈流噴濺。尿流量<15 mL/s，距斗壁 20 cm對準蒼蠅圖像，紊流噴濺最少；3.15 mL/s，距斗壁30 cm平射，反彈流噴濺最少；身高 170 cm、25 mL/s平射兩種小便斗，噴濺面積與範圍皆最小；以60度射角和對準排水孔，噴濺面積和範圍最大。

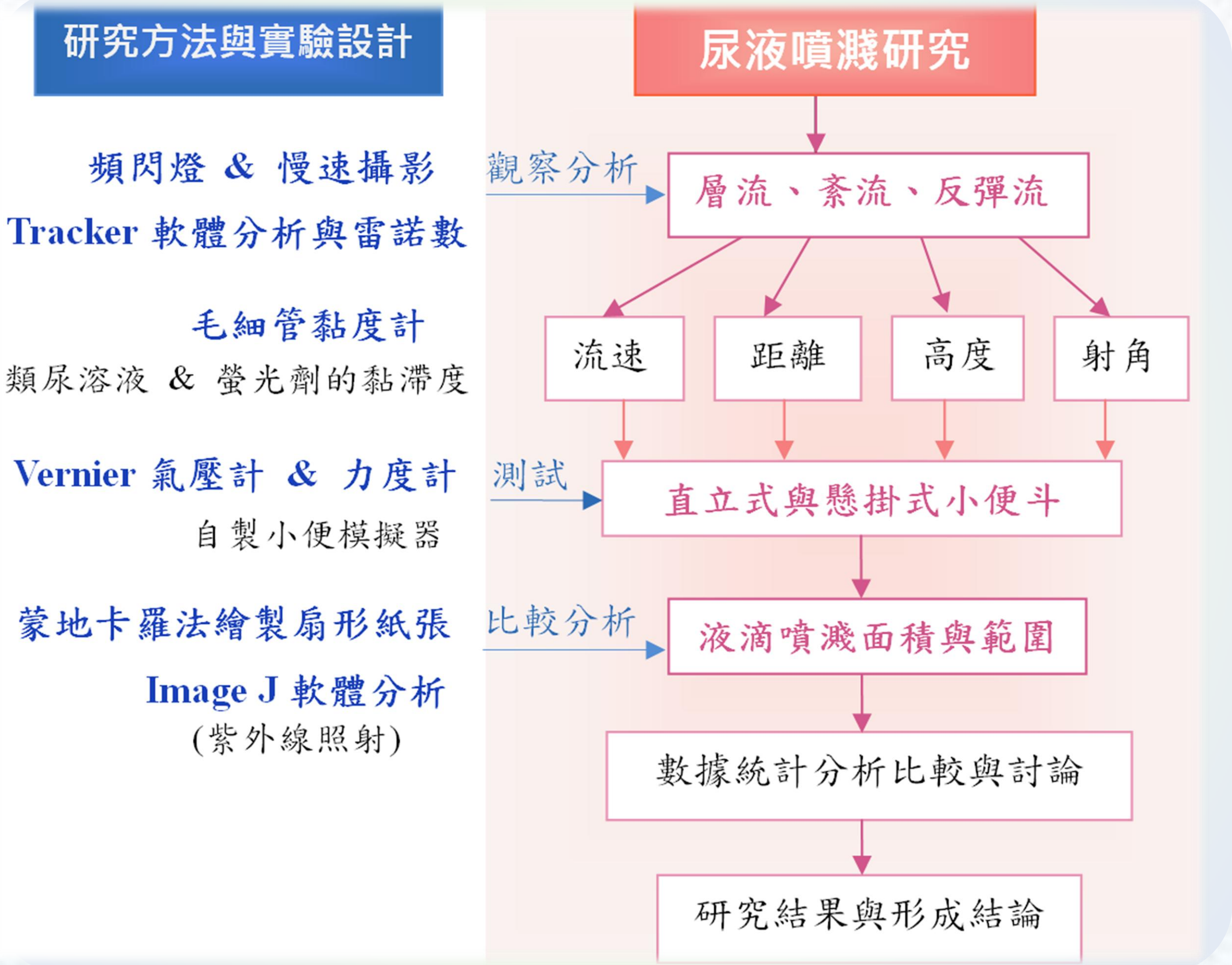
壹、研究動機

公共廁所常見小便斗底下的尿漬，男性即使精準地瞄準小便斗的蒼蠅圖像，尿液是否仍不經意噴出小便斗之外？  
**尿流量**、與小便斗**距離**、**身高**或**尿孔高**、尿流**入射角**、不同**類型**的小便斗，是否對尿液噴濺量也有影響？

貳、研究目的

- 1.影響尿流噴濺主要因素及其運動模式為何？
- 2.不同流量下，**入射角**對於液滴噴濺之影響為何？
- 3.不同流量下，**水平射角**對於液滴噴濺影響為何？
- 4.不同流量下，**垂直射角**對於液滴噴濺影響為何？
- 5.如何進行實驗設計以**Tracker軟體分析**水流流速？
- 6.**雷諾數軟體分析**流速對於液滴噴濺之影響為何？
- 7.如何設計**小便模擬器**並測量水流與反彈流對於斗壁之作用力？
- 8.如何設計**蒙地卡羅扇形法**和**Image J軟體分析**噴濺面積與範圍？
- 9.使用**直立式**和**懸掛式**小便斗對於噴濺面積與範圍是否有差異？

參、研究方法



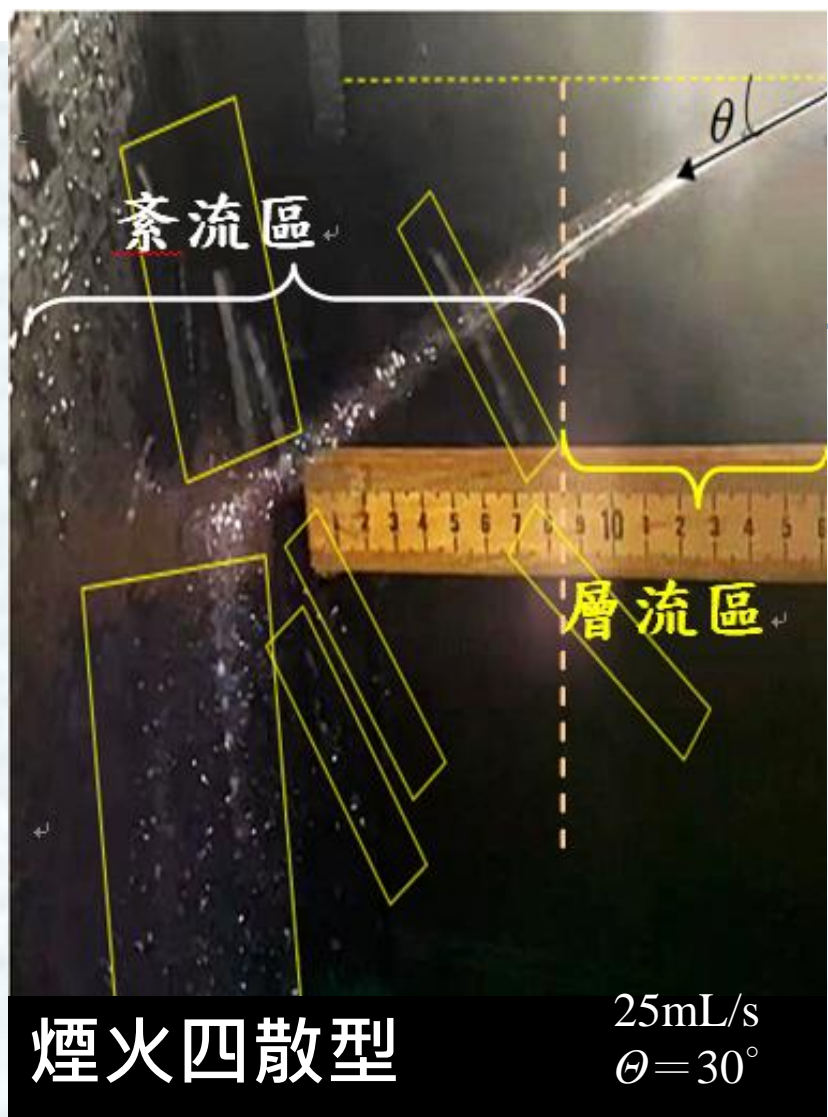
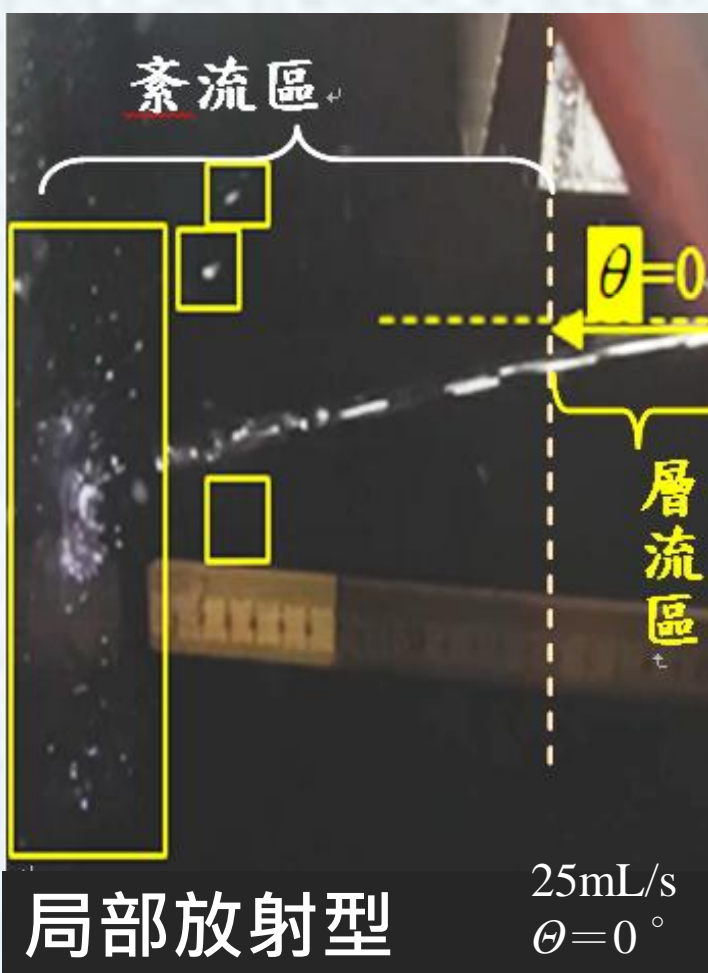
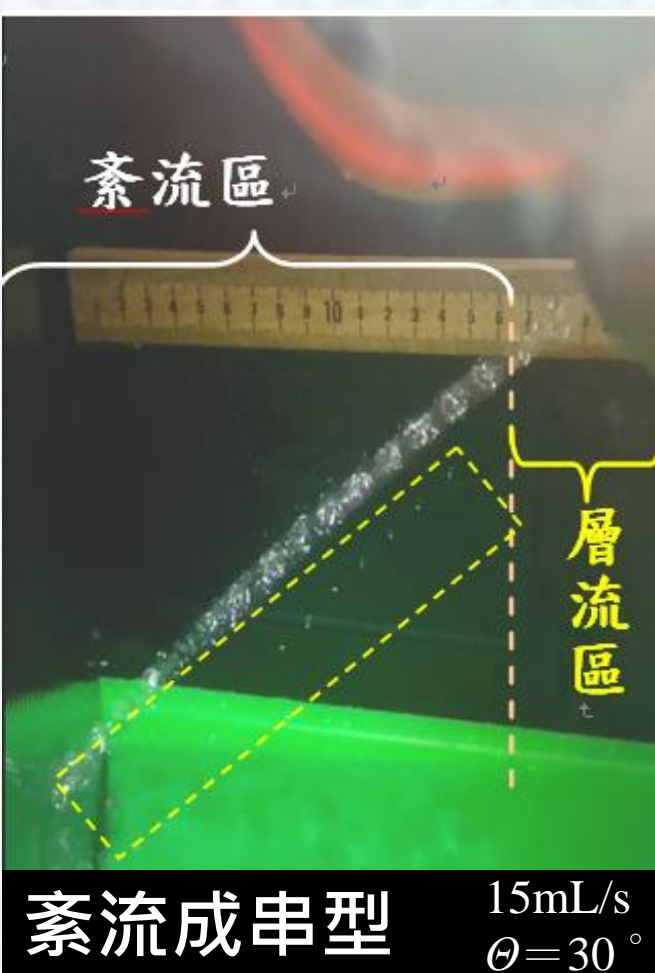
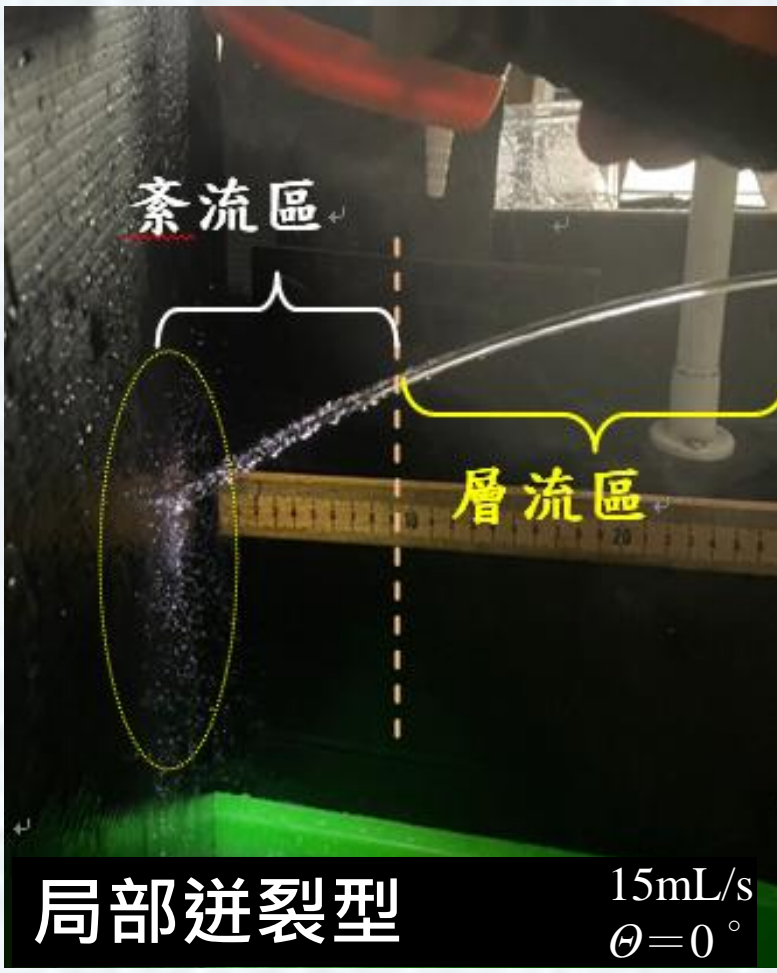
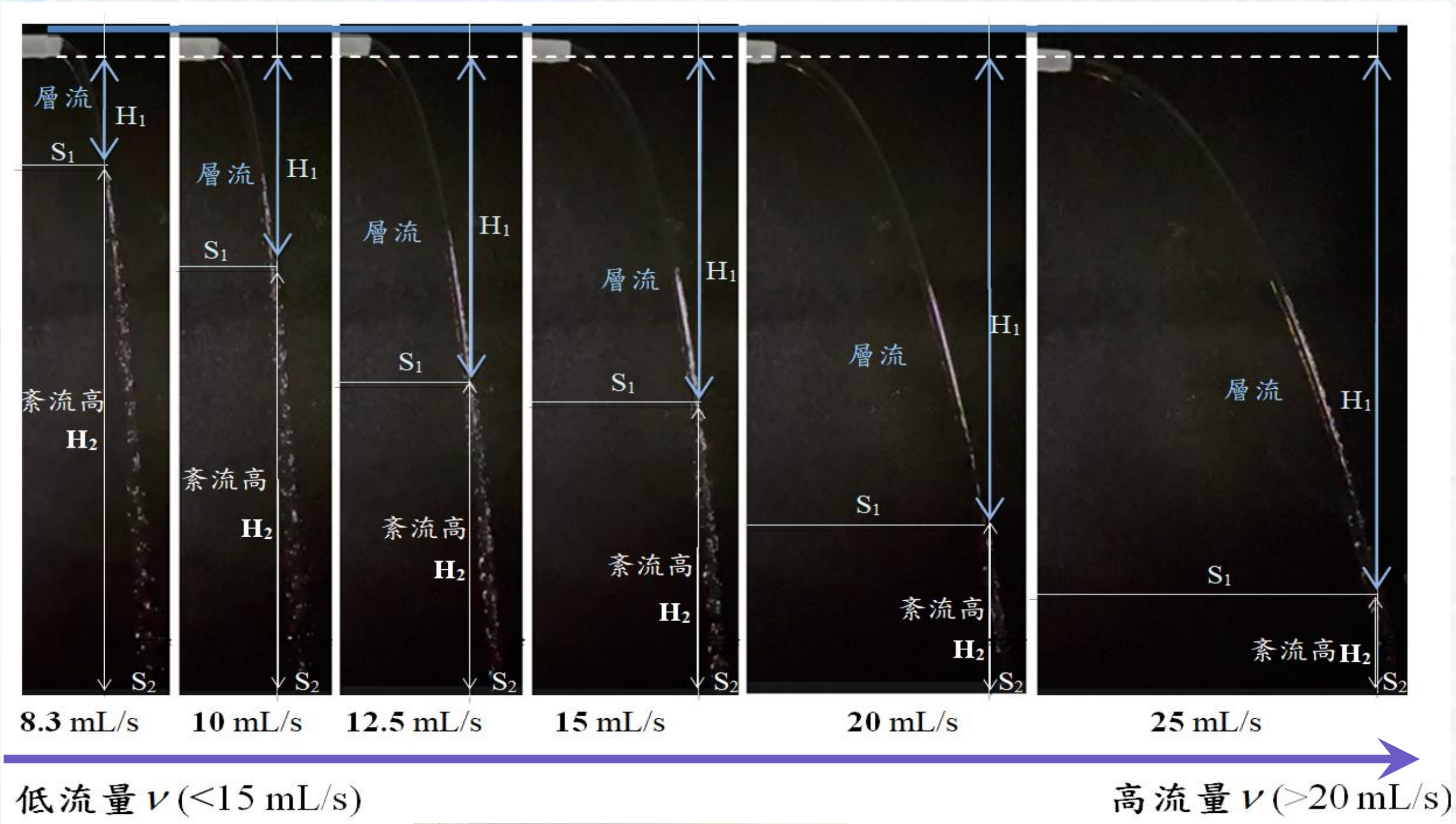
肆、研究結果

實驗一、探討影響尿液噴濺的主要變因與模式

- 尿液噴濺受到**紊流**和**反彈流**影響，以頻閃燈可觀察紊流。
- 1.流量高：層流長，紊流短，噴濺小。
  - 2.層流與紊流不隨著時間改變長度。

實驗二、入射角對於反彈流與噴濺量之初探

- 1.低流量時，噴濺範圍隨射角增加而變大，  
噴濺距離變小。  
**增加垂直射角，較不易濺出便斗外。**
- 2.高流量時，噴濺範圍與距離皆隨射角增加而擴大。  
**應減少平射角度，能有效降低噴濺。**

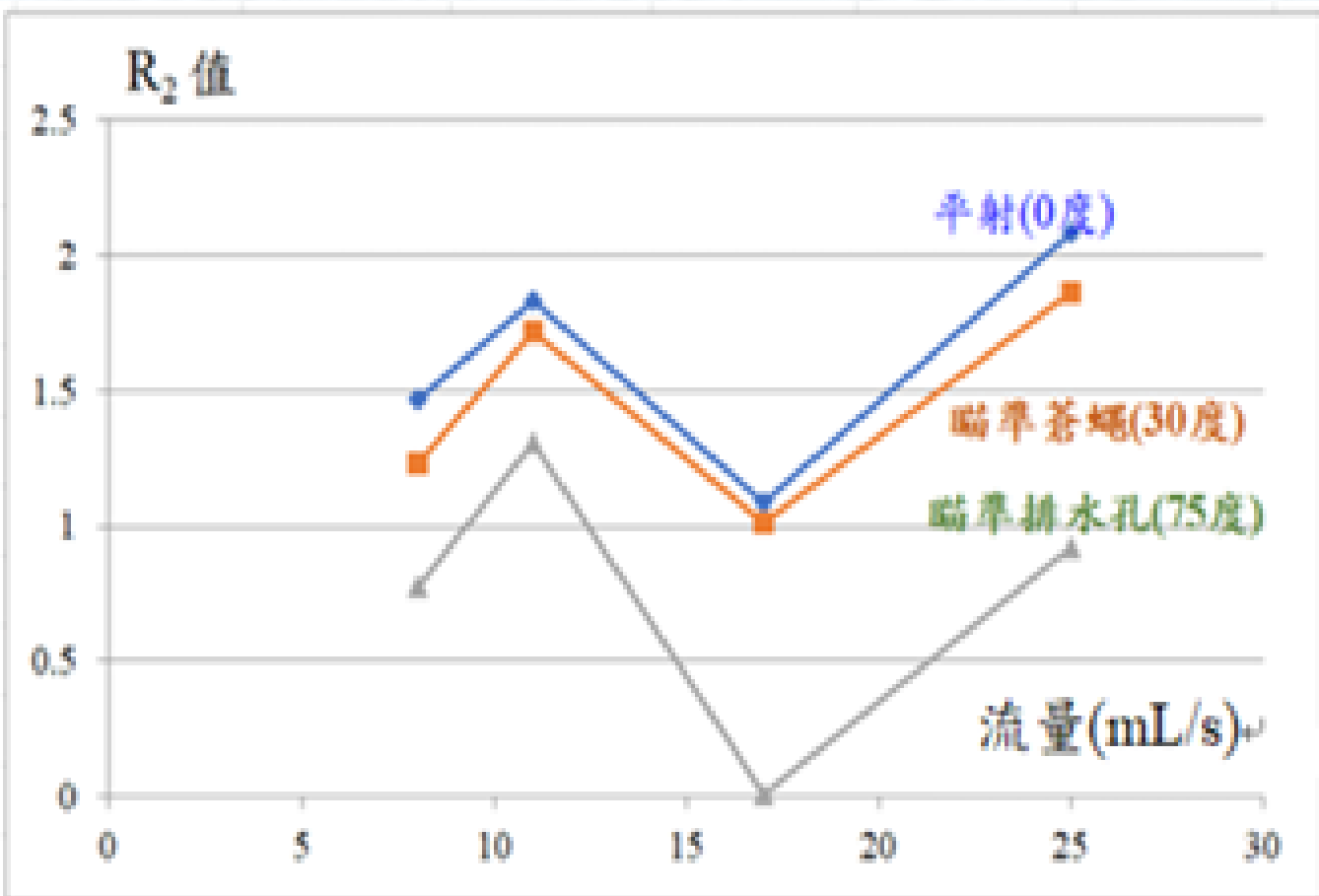
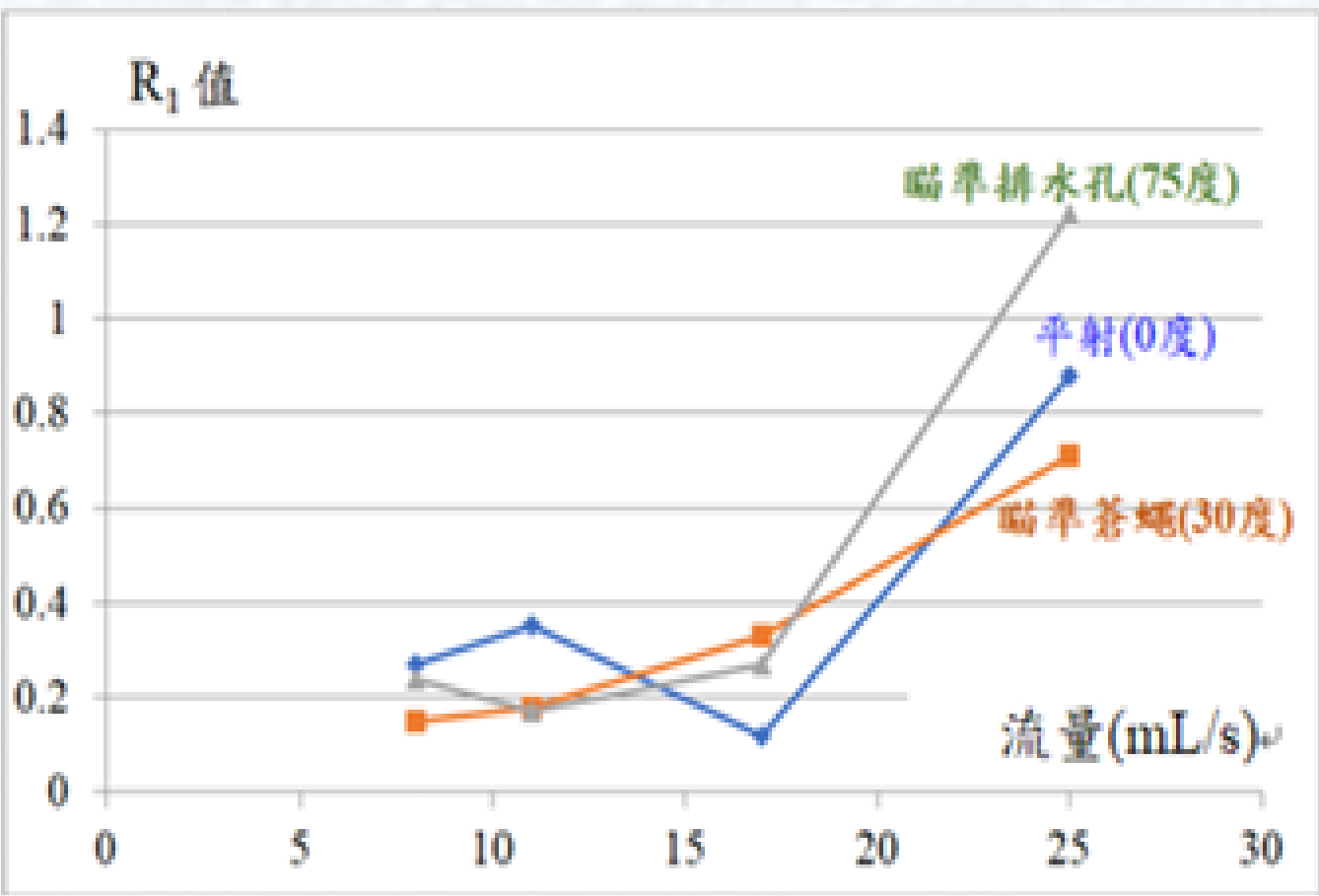
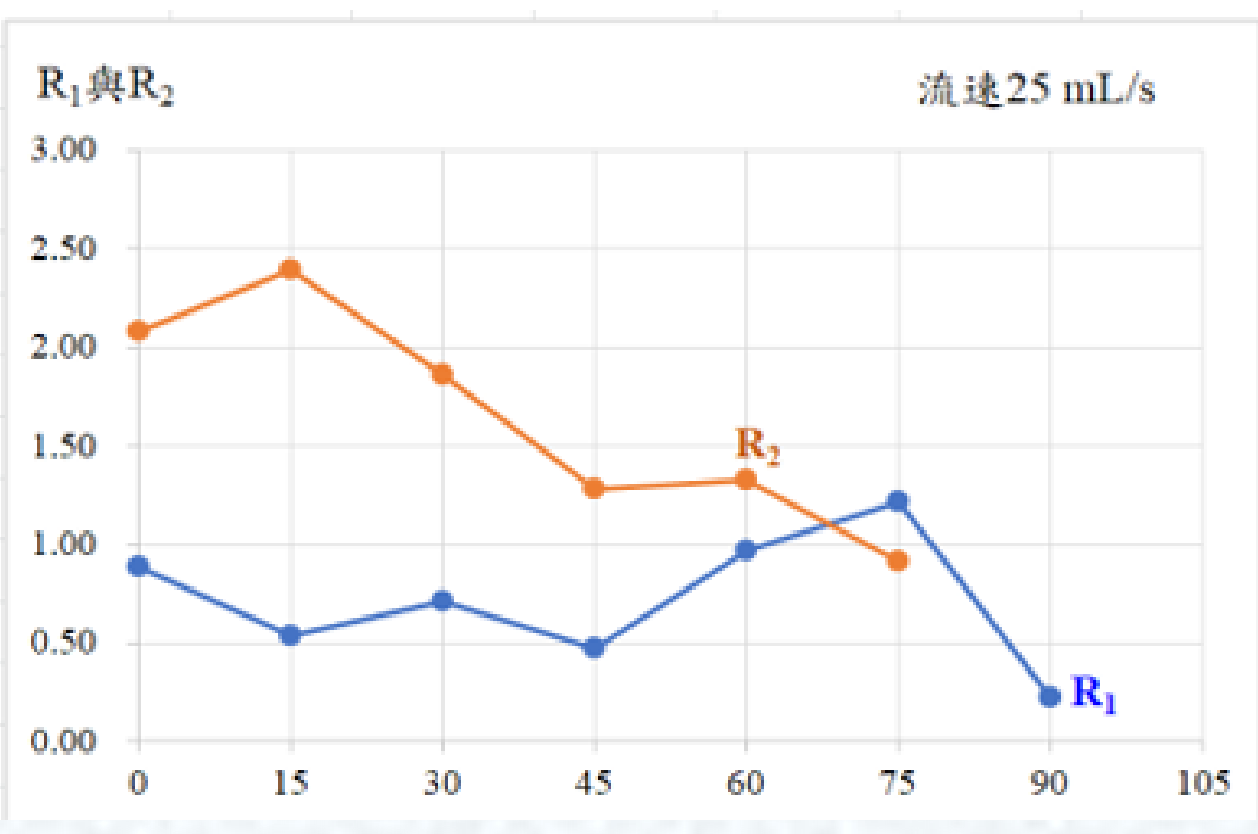
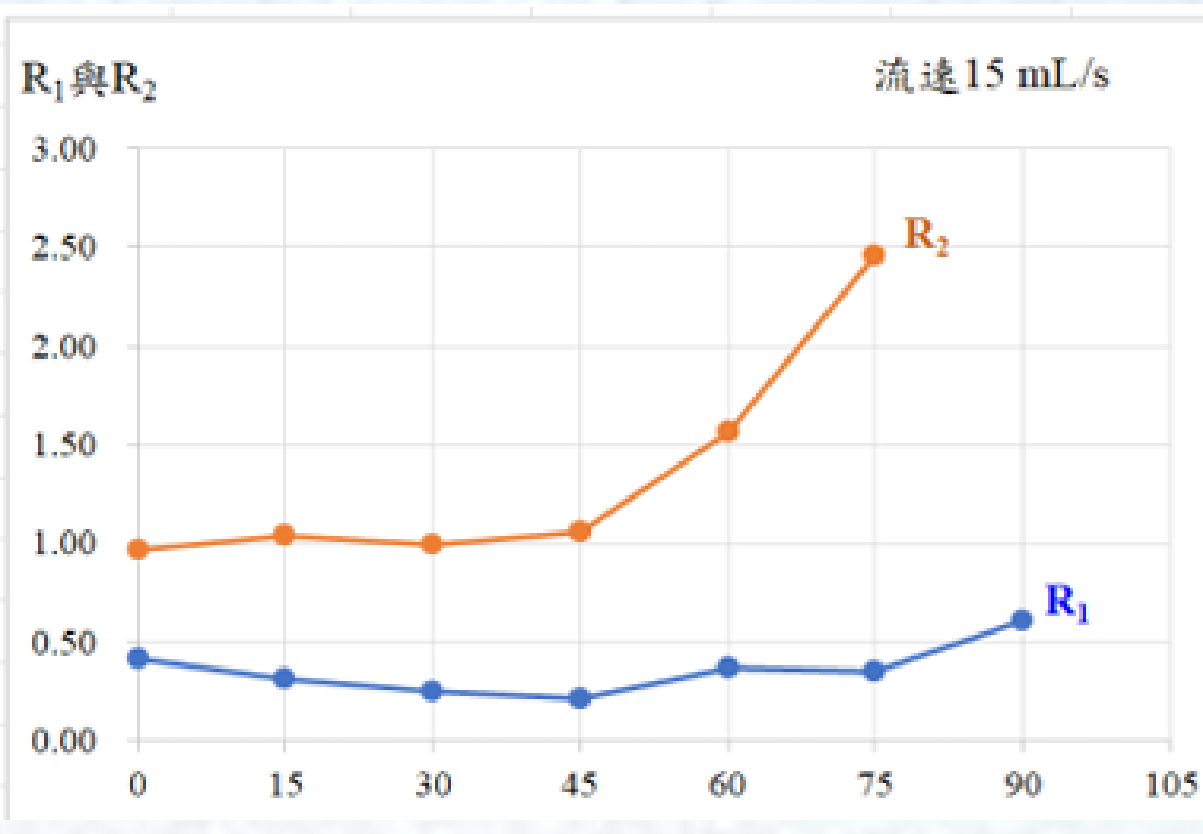
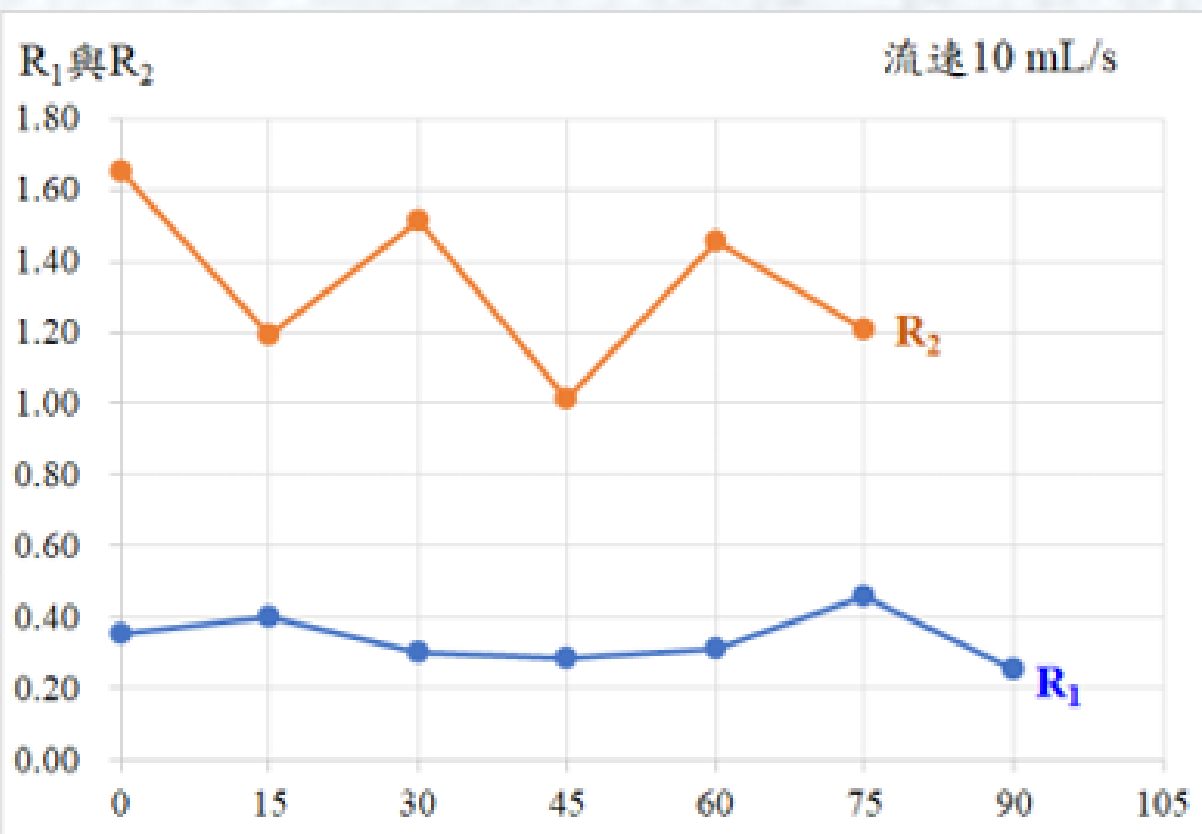


實驗三、水平射角對於水流噴濺的影響

- 1.低流量時，角度愈大，不易產生紊流。
- 2.高流量時，角度愈大，愈容易產生紊流而噴濺。
- 3.流量較高時：  
(1)角度<45度，角度增加，R2變大，不易產生紊流。  
(2)角度>45度，角度增加，R2變小，容易產生紊流。  
(3) R1隨著流量增加而遞減，極易產生紊流。

實驗四、垂直射角對於水流噴濺影響  
以及是否瞄準蒼蠅

- 1.尿急時，應選擇平射(0度)。
- 2.尿較緩時，可選擇瞄準蒼蠅(30度)或平射。
- 3.尿流極緩時，仍應選擇平射(0度)。



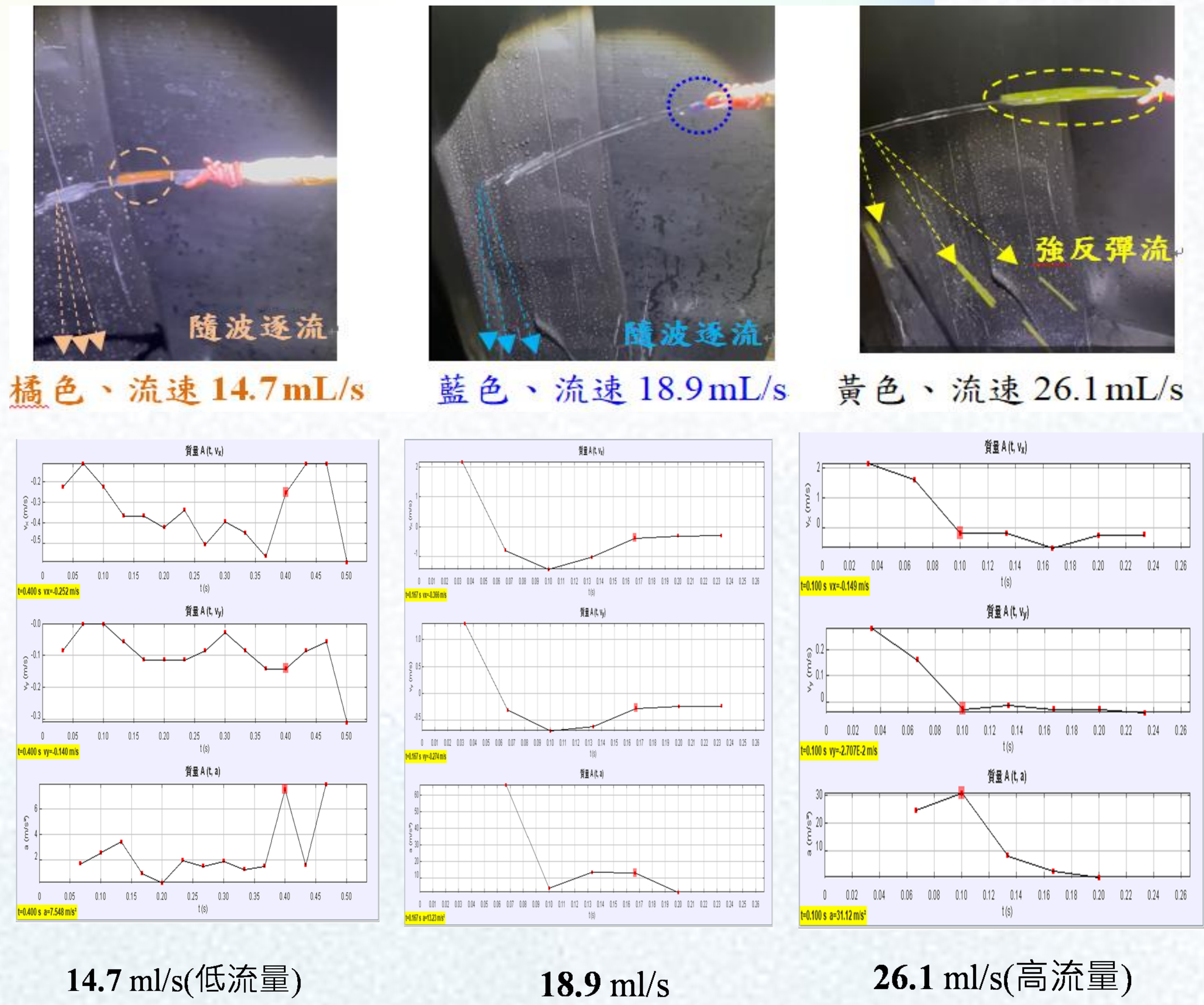
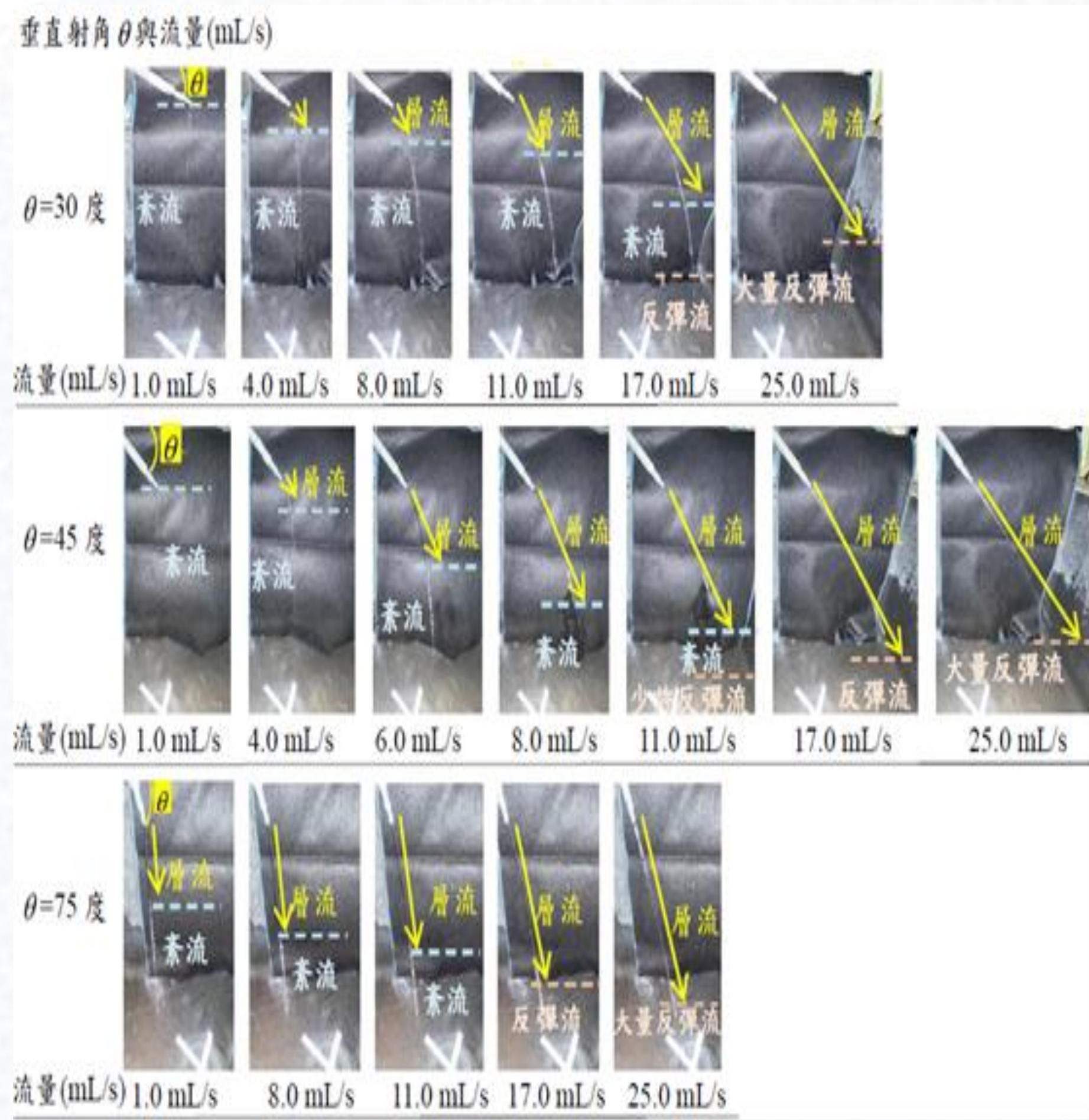
設定層流垂直高度為H<sub>1</sub>，水平長度為S<sub>1</sub>  
紊流垂直高度為H<sub>2</sub>，水平長度為S<sub>2</sub>  
→ H<sub>1</sub>/H<sub>2</sub>=R<sub>1</sub>  
S<sub>1</sub>/S<sub>2</sub>=R<sub>2</sub>  
且R<sub>2</sub>影響 > R<sub>1</sub> (R<sub>2</sub>越小噴濺越多)



實驗五、以tracker分析流速與模擬噴濺實驗設計

流量:每秒水流體積(mL/s)，流速:水流每秒移動距離(m/s)。以雷諾數驗證目測之層流和紊流，觀察吸水後1.03 g/cm³水晶寶寶約0.2 g、0.2 cm³/顆，以便將流量換成流速。

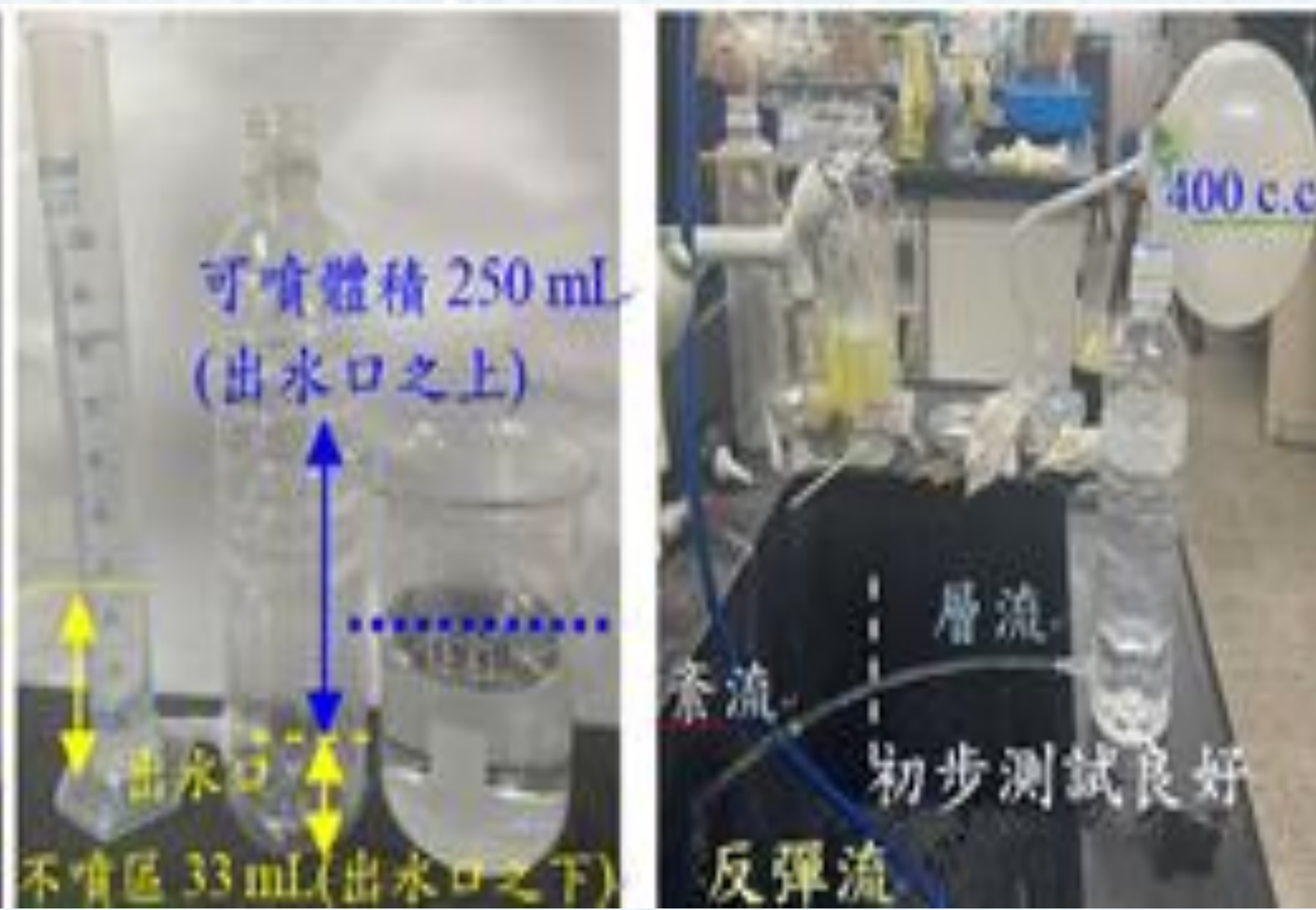
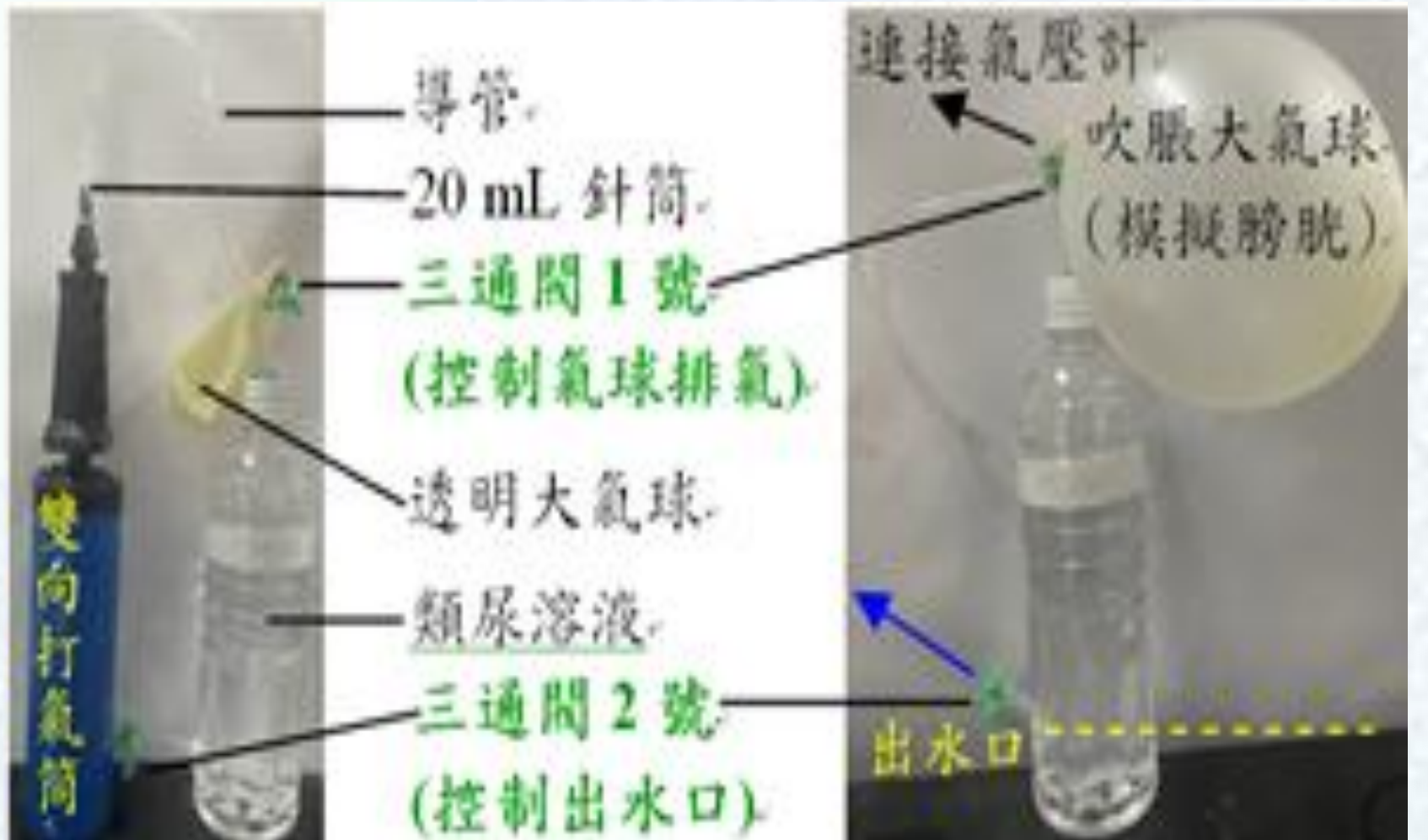
- 1.影響水流噴濺主要因素，紊流與反彈流。  
2.以tracker軟體分析發現，  
(1)流量低，不易產生反彈流；  
(2)流量高，易產生較大反彈流。



實驗六、以雷諾數分析不同流量下的層流和紊流

動力黏度( $\nu$ )，雷諾數(Re)即慣性力( $\rho v^2/L$ )與黏性力( $\nu \mu/L^2$ ) $\mu \nu L^2$ 之比值， $Re = \rho u L / \mu = u L / \nu$ 。  
層流 $Re < 2,000$ ，黏滯力 $>$ 慣性力；紊流 $Re > 4,000$ ，慣性力 $>$ 黏滯力； $4,000 >$ 過渡流 $Re > 2,000$ 。  
尿液黏度約0.000824 Pa·s，上述實驗二，水密度 $\rho = 1 \text{ g/cm}^3 = 1,000 \text{ kg/m}^3$ 水動力黏度 $\nu = 0.001 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ，進行層流、過渡流與紊流之Re值推算。

- 所受空氣阻力比較；流速快 $>$ 流速慢  
1.流速慢，層流短、紊流長；流速快，層流長、紊流短。  
2.流量低，空氣阻力影響小。  
3.中高流量落下速率和加速度遞減，空氣阻力影響大。

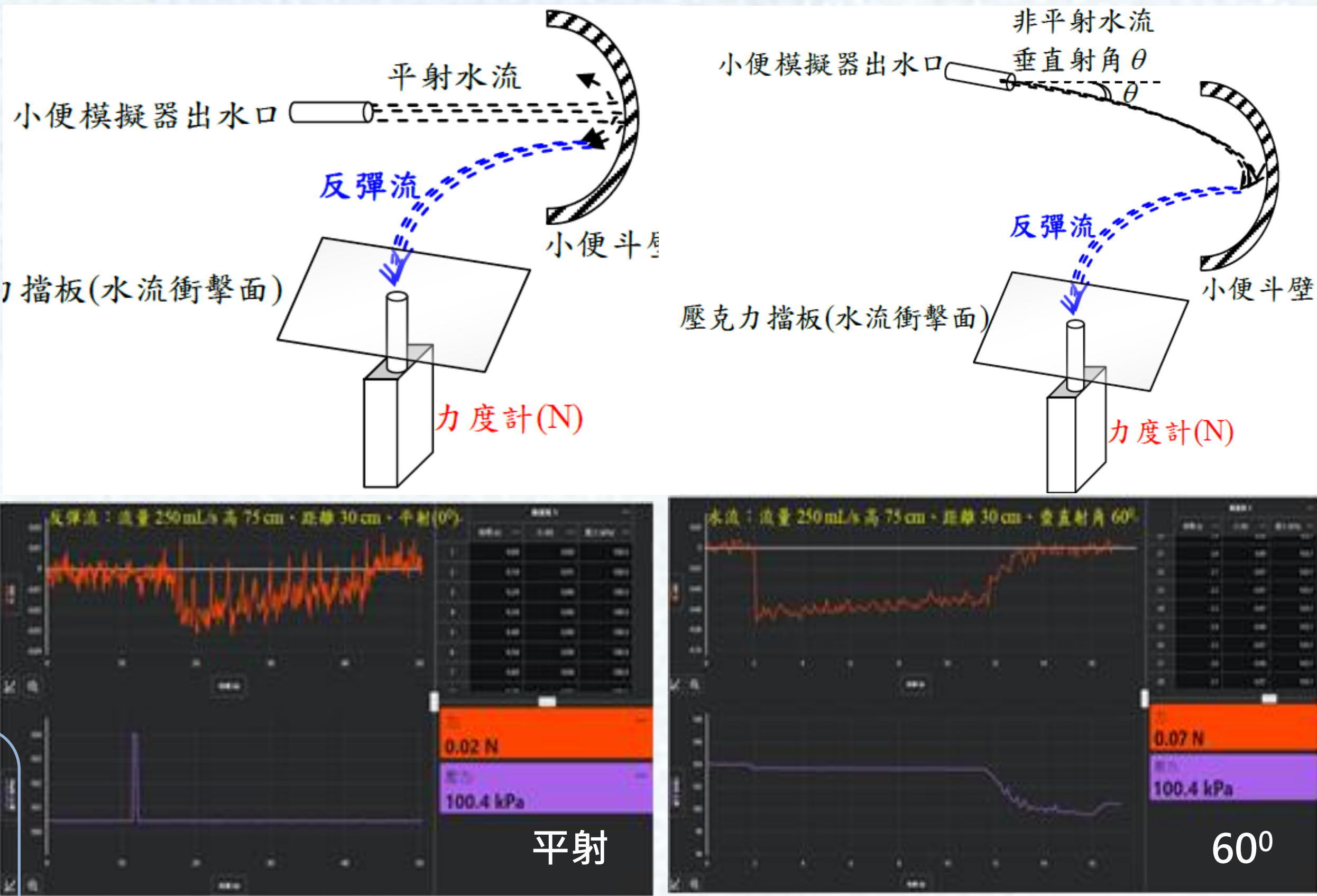
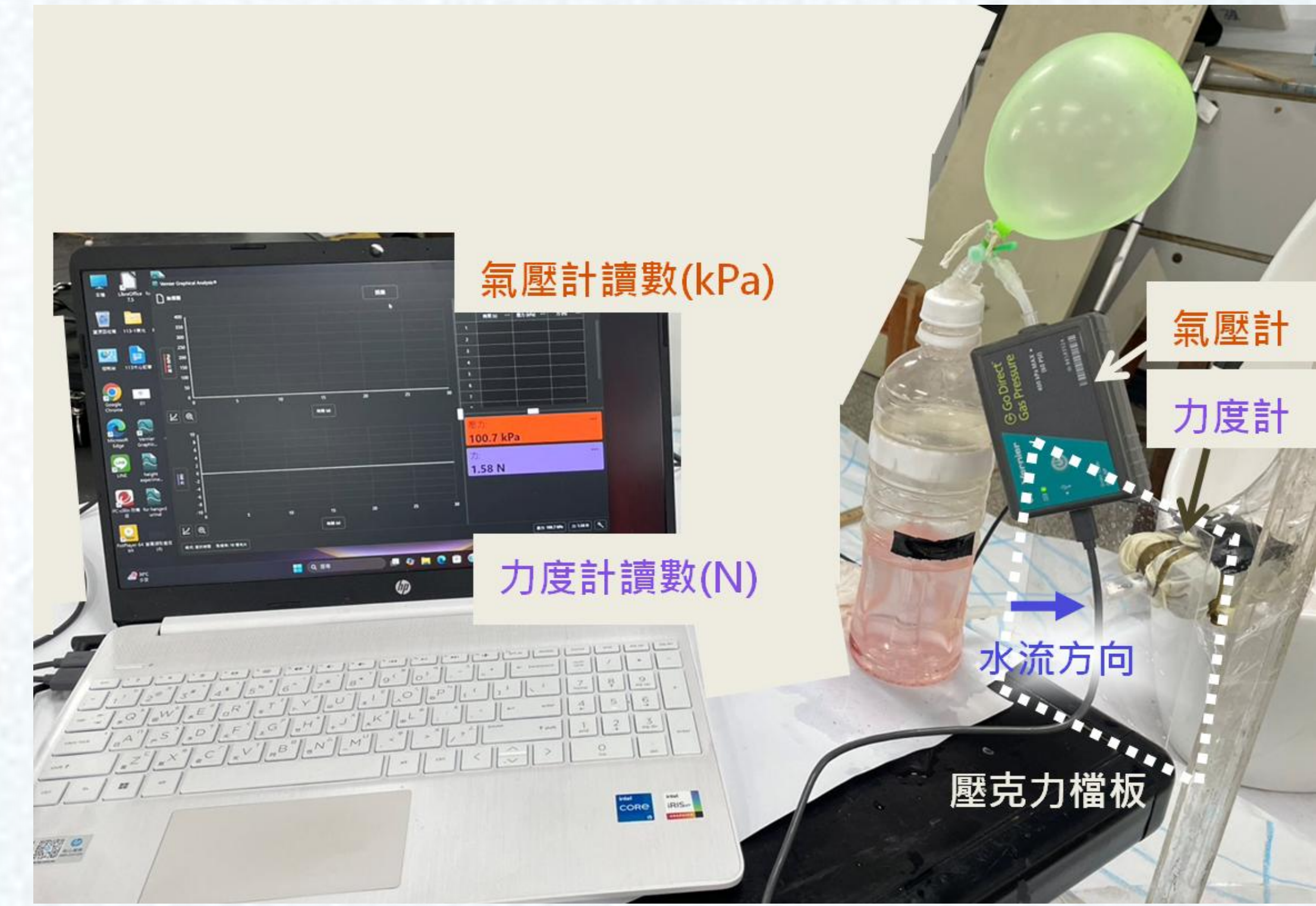


實驗七、以氣壓計和力度計測試自製小便模擬模型

氣壓計(kPa)：測量氣球與小便模擬器內部連通後的氣壓變化量。  
力度計(N)：測量流量與其反彈流衝擊斗壁的最大作用力。

- 1.射角愈大，水流對斗壁作用力愈大。  
2.射角30°或60°，作用力愈大，反彈流也愈大。  
(1)平射時，垂直衝擊斗壁正向力 $>$ 斜射產生分力大。  
(2)射角30°或60°，高度愈大，衝擊作用力 $>$ 平射水流。

流量(mL/s)	距離(cm)	$\theta$ 值	水流作用力(N)極值	反彈流作用力(N) 極值
250 mL/s	30 cm	0°	0.03 N	0.02 N
250 mL/s	30 cm	30°	0.04 N	0.05 N
250 mL/s	30 cm	60°	0.07 N	0.09 N

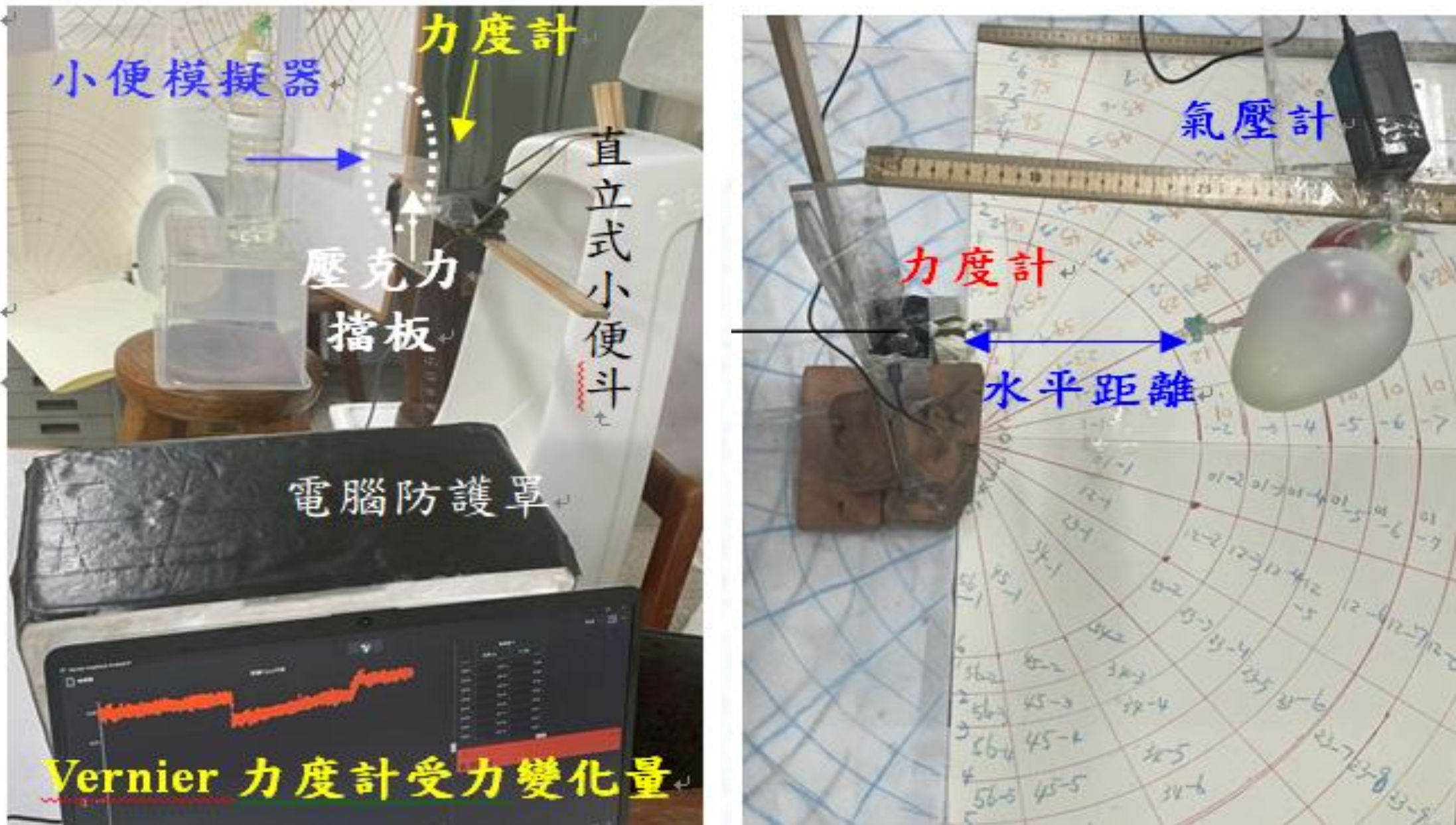


- 第六代小便模擬器/氣球噴瓶型：  
1.精準控制在10 s 噴出固定水量250 mL。  
2.燒杯提供噴出水量250 mL，共裝水總體積283 mL。  
3.三通閥1號封住氣球與寶特瓶間孔道使之不漏氣；2號關閉出水口。



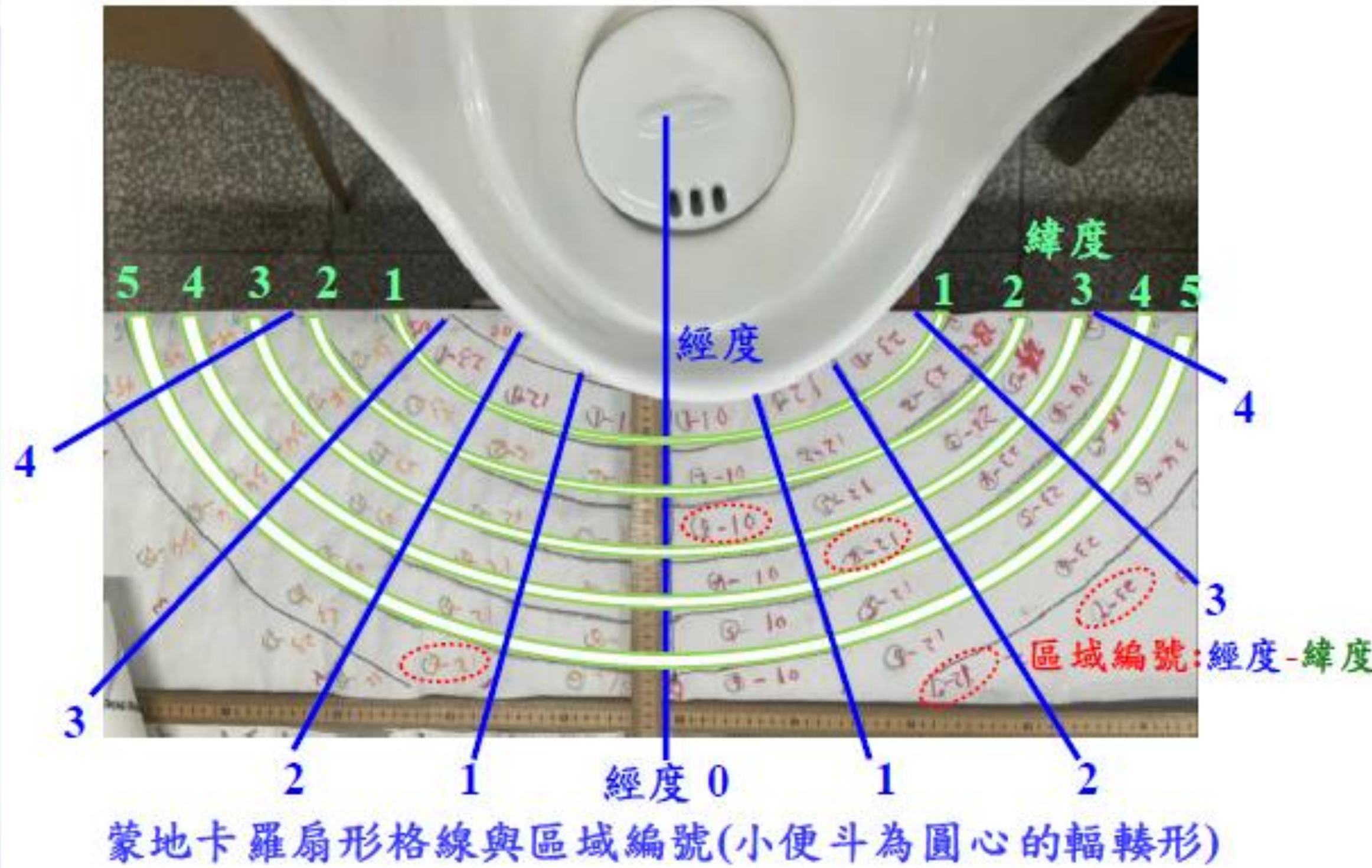
實驗八、蒙地卡羅扇形觀察法和 Image J分析

- 以第六代小便模擬器實測兩組小便斗噴濺面積與範圍：
1. 採用大張易吸水的宣紙繪製「以小便斗為圓心的扇形格線」，自創「蒙地卡羅扇形觀察法」逐一標示格線與液滴可能噴濺位置和範圍。
  - 2.使用實驗七之第六代自製小便模擬器，以雙向打氣筒充氣、排水法控制氣球體積400 mL、瓶內裝水250 mL與Vernier力度計分析水流與液滴沖擊力。
  - 3.分別測試直立式與懸掛式兩組小便斗。
  - 4.以放大率3,700倍以上Image J軟體分析噴濺面積，本研究自創「總噴濺面積」將尿滴之間距離連接，可更為精準測量分析噴濺面積。



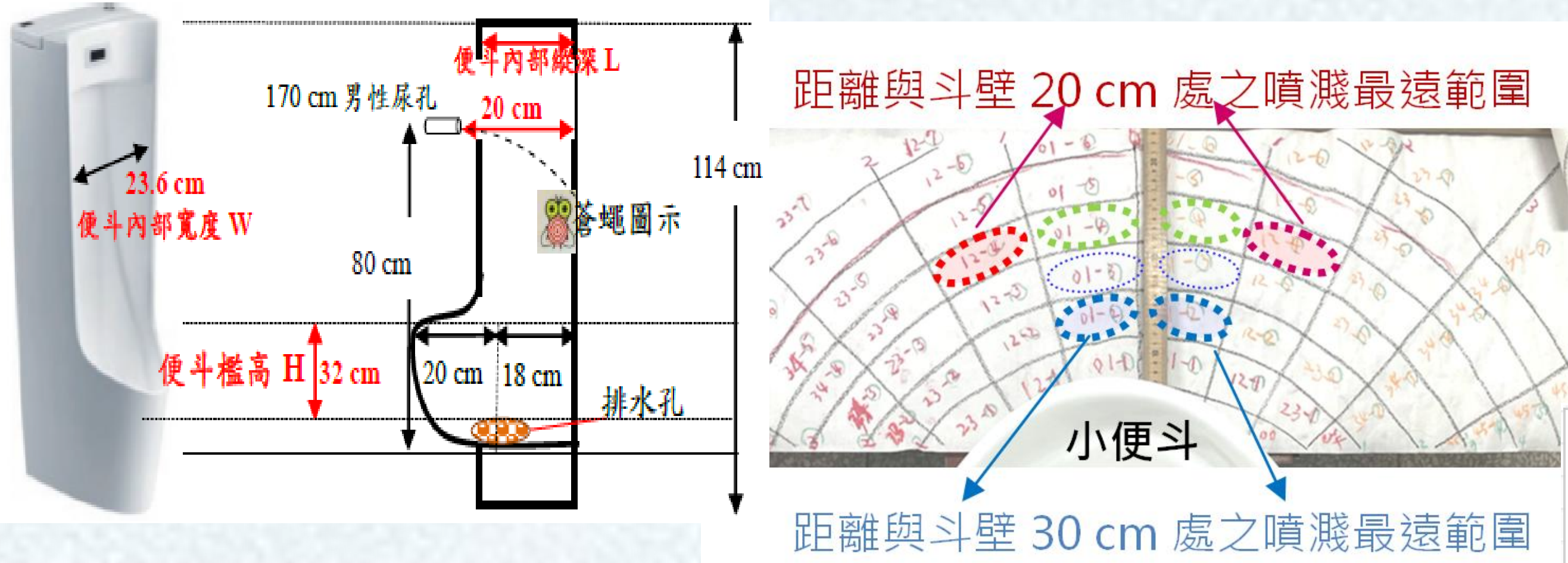
實驗九、直立式與懸掛式小便斗噴濺面積與範圍比較

- 固定流量25 mL/s，分別離地高度65、75、80 cm處，對著直立式小便斗內壁之水平距離20、30 cm加上不同角度方式噴水，觀察小便斗下方擺設的蒙地卡羅扇形區之噴濺面積與範圍
- 直立式小便斗護斗比懸掛式低很多，又貼著地面，反彈流與紊流大量地彈射出小便斗之外。



如何讓小便斗尿液噴濺最少:

- 1.直立式小便斗:  
身高較矮或尿孔高度 65 cm者，採用平射且距斗壁20 cm  
身高較高或尿孔高度>75 cm者，採用平射且距斗壁30 cm。
- 2.懸掛式小便斗:  
身高較矮或80 cm>尿孔高度>75 cm，採用平射且距斗壁20 cm  
身高較高或尿孔高度>80 cm，採用平射且距斗壁30 cm。



伍、研究結論

一、尿液噴濺研究方法上之改良

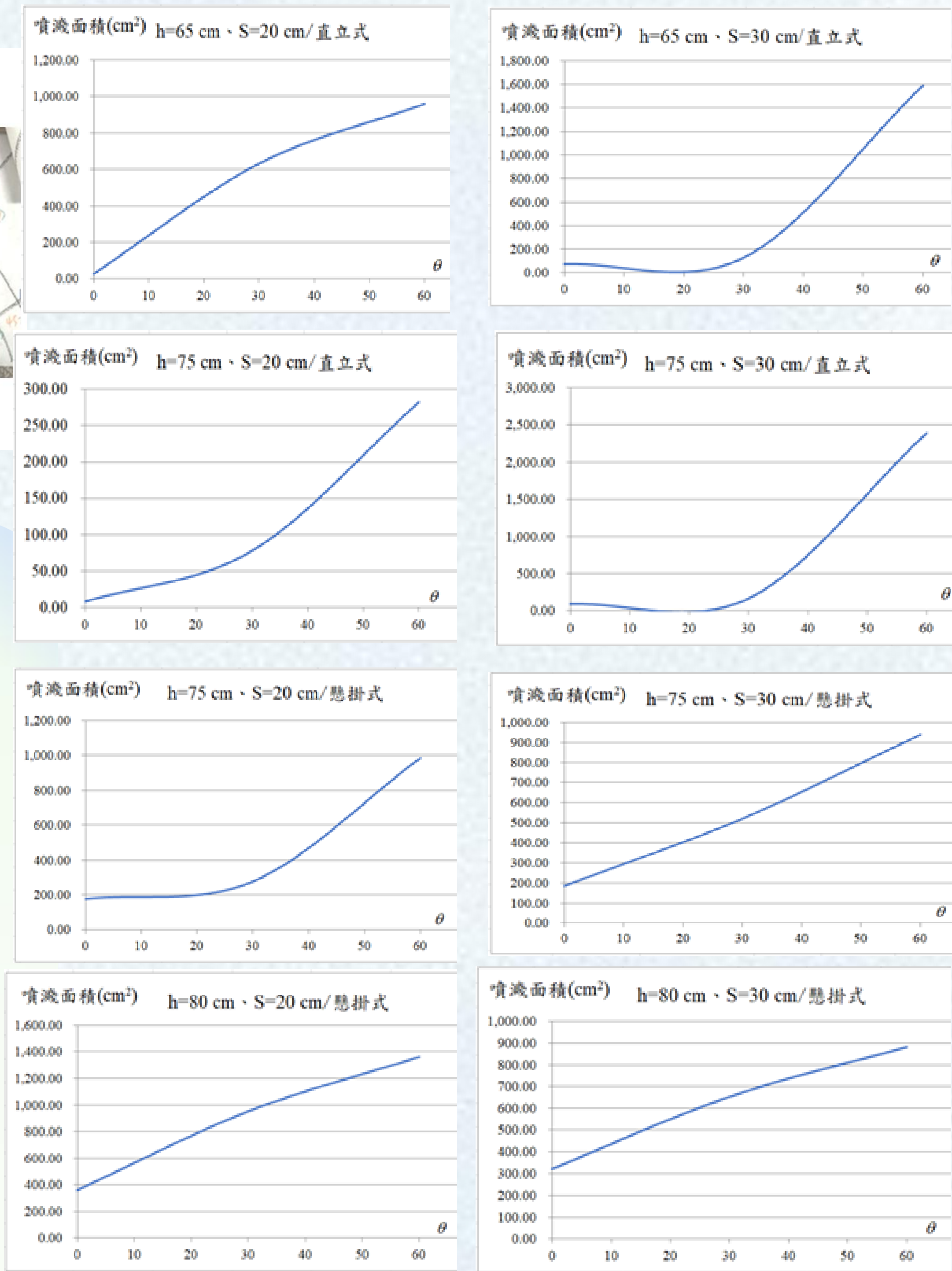
- 1.改良尿液噴濺出小便斗之外的數據蒐集與測量方法  
過去研究以**尿滴數**或**質量**為比較基礎，誤差極大，難有實質助益。  
實驗八，**蒙地卡羅扇形區域**與**Image J**分析噴濺面積和範圍較精準。
- 2.改良尿液噴濺之實驗設計與測量方法  
以往多僅關注於反彈流，缺乏較低流量下可觀紊流的影響。  
實驗七，**小便斗模擬器**以**Vernier力度計**分析作用力，氣球模擬膀胱收縮。
- 3 提供尿流噴濺之測量方法與合理解釋  
實驗五，**雷諾數**分辨層流和紊流；獲知**流量**(mL/s)與**流速**(m/s)關係。
- 4.提供使用直立式與懸掛式小便斗之參考

二、尿液噴濺之研究結果的新發現

- 1.尿液噴濺主要來自紊流與反彈流影響。
- 2.尿液噴濺主要影響程度: **尿流量**>**距離**>**入射角**。  
(1)平射時噴濺最小，而愈瞄準排水孔，噴濺範圍愈大。  
(2)尿孔與水平線夾角：  
①**平射**排尿時，噴濺面積與範圍**最小**。  
②水平**射角**愈**大**，噴濺面積與範圍**愈大**。  
③垂直**射角**愈**大**，噴濺面積與範圍**愈大**。
- 3.尿流量愈緩(流量<15 mL/s)時，紊流影響噴濺大，應站近些。
- 4.當流量>15 mL/s，反彈流影響大。距斗壁 30 cm可大幅減少噴濺。  
(1)與斗壁距離<**30 cm**，尿柱以**層流**反彈，因反彈流易沾染鞋褲。  
(2)與斗壁距離=**30 cm**，尿柱以層流撞擊斗壁滑落，**反彈最少**。  
(3)與斗壁距離>**30 cm**，尿柱在到達前多以**紊流**形式滴濺。
- 5.實驗五，驗證高流量之水分子遠大於中低流量之沖擊力。
- 6.經實測兩種小便斗之噴濺面積與範圍後建議如下：  
(1)**提高縱深**能有效紊流和反彈流。  
(2)**加寬寬度**可阻止大流量紊流噴濺。  
(3)**增加檔高**可更有效攔阻反彈尿流。

陸、研究討論

- 1.噴濺受紊流及反彈流影響，難分辨哪種因素影響較大。  
可採高速攝影機捕捉紊流噴濺以及反彈流區分其影響。
- 2.夾角愈大，總面積分布也具有愈大的趨勢。
- 3.採Image J軟體分析時發現，放到最大值使用Image J 軟體辨識液滴明暗程度。細小液滴難用Image J分析易造成統計誤差。
- 4.小便斗種類繁多，但礙於條件所限，僅測試直立式和懸掛式進行實驗與分析解釋，其他小便斗則有待未來進一步探索。



直立式							
高度(cm)	距離(cm)	射角(度)	噴濺面積(cm²)	最遠範圍			
65	20	0	26.59	23-5			
65	20	30	632.46	12-5			
65	20	60	959.84	12-6			
65	30	0	74.37	12-6			
65	30	30	129.21	23-6			
65	30	60	1,589.84	12-6			
75	20	0	8.59	12-4	懸掛式	噴濺面積(cm²)	最遠範圍
75	20	30	78.17	12-5		176.10	12-4
75	20	60	282.14	12-6		277.26	15-6
75	30	0	93.02	12-6		986.02	32-7
75	30	30	168.11	12-6		185.22	12-4
75	30	60	2,392.42	12-6		520.89	23-7
80	20	0				938.59	34-7
80	20	30				361.18	13-1
80	20	60				953.06	01-7
80	30	0				1,361.64	23-7
80	30	30				321.82	34-5
80	30	60				654.06	01-7
80	30	60				881.80	12-7

柒、參考文獻資料

1. 吳毓庭(2025)。動手玩流體力學，層流與紊流。國立成功大學工程科學系。
- 2.男生站着小便會濺到外面？日本實驗證實：每天濺出約4萬滴尿。
- 3.泌尿瞄準「馬桶這位置」7千滴尿狂噴！研究證實：射前端最好。
4. 加國大學設計0噴濺小便斗找出尿流和便斗的完美臨界角，尿哪都不怕了！
- 5.科普專題：怎尿不會噴到自己？The Unfortunate Physics of Male Urination。