

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 地球與行星科學科

第一名

051910

攔截 PM2.5—自創 EcoPIV 技術應用於空汙阻
隔研究

學校名稱：復旦學校財團法人桃園市復旦高級中等學
校

作者：	指導老師：
高二 吳允蘋	王貞琇
高二 苗綽芸	

關鍵詞： 粒子影像測速法、流體動力分析、空氣品質

得獎感言

從單純到深刻：科學研究思維的培養與實踐

這次參賽的過程，好像是一場奇幻的旅程。一開始，我們的研究發想，只是單純地關心學校門口的空氣汙染。但是沒想到，最後卻進入到全國科展，並且獲得第一名。這一路走來，我們深刻體會到從簡單到複雜的科學思考過程，也讓我們在科學研究上成長了不少。

在王貞琇老師與林睿學長的鼓勵、引導以及長時間的陪伴下，經過無數次討論，我們逐步突破種種困難，最後竟然成功地自行研發出「EcoPIV系統」，這讓我們能夠實際量測到空氣流場的變化，也讓我們能夠解釋許多物理現象。為了讓數據更具合理性，我們將實驗組數從原本的 40 組擴增到 200 組。為了這 200 組數據，我們沒日沒夜沒假日的進行實驗，甚至在大家放颱風假的時候，我們還跑到學校進行結果分析。外頭是暴風暴雨，而我討論時心情也是波濤洶湧。最終我們獲得桃園市科展第一名。

進入全國賽後，看到來自各地的參賽者，在地球科學領域皆展現出精彩的議題和研究成果，坦白說，我們一度感到惶恐，覺得自己得獎的機會非常渺茫。但正是因為貞琇老師不斷給予我們信心，以及林睿學長的提醒，讓我們瞭解到從無到有、親手完成一個實驗系統的過程，有多麼珍貴。這些鼓勵成為我們堅持下去的動力。經過無數次的實驗調整與簡報練習，我們甚至練到鍾芸可以「邊打瞌睡邊簡報」的地步，最終我們在全國科展中獲得了亮眼的成績。

在此，我們要由衷感謝王貞琇老師和林睿學長，沒有他們的帶領與支持，這項研究無法完成。我們也感謝復旦高中陳建佑校長，校長藉著過去指導科展的經驗，給予我們許多寶貴的建議，以及都市計畫方面的專業知識。此外，感謝許民陽教授，他精準點出我們在海報設計與簡報表達上的弱點，讓我們能夠及時改進、更加完善。我們還要特別感謝導師、師長及同學們，在最後衝刺階段，願意包容

我們頻繁請假練習，並選擇信任我們的付出。最後，最深的感謝獻給我們的家人，尤其是爸爸媽媽、爺爺奶奶，因為他們無條件的支持與鼓勵，我們才能在一次次的挫折中堅持到最後。

能夠獲得本屆高中組地球與行星科學科的桂冠，我們感到非常幸運。我們也期勉學弟妹們也能勇於嘗試。因為努力付出後獲得豐碩成果的感覺，真的很美好。我們更認為，這次全國科展中的12 件作品皆為我們學習的典範，研究的議題及成果都很有趣，未來也期盼有機會在地球科學領域中彼此切磋、持續成長，並一同為地球科學界的未來努力。



為了瞭解紅樹林對空汙的影響，我們到淡水紅樹林去收集樣



做科學研究，雖然很辛苦，但是很快樂！



獲獎返程，親愛的家人迎接的合影

摘要

本研究以風洞實驗探討植被對空汙阻隔的效果與動力機制，並分析為何植被靠近建築物時，攔汙效果最佳？本研究創新提出經濟型粒子影像測速法 (EcoPIV)，透過強光雷射、折射理論及相關係數法，成功以低成本量測風洞中的流速場。結果顯示，當植被緊鄰建物時，由於建築物的阻擋，會使流體反覆在綠樹帶中穿梭，不僅阻礙後續汙染物進入，也使其滯留於植被中。本研究亦分析紅樹林對於空汙阻隔的優勢及限制，發現低矮紅樹林對於下沉型汙染物具極佳阻隔效果，但當汙染物超過負荷門檻時，EcoPIV 顯示，紅樹林邊緣會產生類邊界層，反而使得汙染物更有效率地傳遞至下游處。文末展現數值模擬結果，汙染物濃度與實驗相當一致。本研究成果可作為政府規劃行道樹配置之原則。

壹、前言

一、研究動機

永續發展是最重要的全球議題之一，在聯合國永續發展目標 (SDGs) 中，SDG 3 - Good Health and Well-being 與 SDG 11 - Sustainable Cities and Communities 兩項指標都指出 PM2.5 對人類健康的影響 (United Nations, 2015)。空汙的研究與流體力學相關，大尺度方面，大氣科學探討風場結構、地形與地貌分布，對於汙染物的傳輸與擴散有決定性影響。如強風時可促進汙染物稀釋與外擴，在穩定天氣或大氣層垂直混合較弱時，汙染物容易在地面層積聚。此外，地形與地表綠樹植被也會影響空氣流場結構。

在小尺度方面，綠樹植被對汙染物的「攔截效應」和微環境的改善同樣屬於流體力學中的研究主題。綠樹植被不僅能直接吸附粒狀汙染物，還能間接影響汙染物在街道中的分布 (Janhäll, 2015)。雖然過去研究多集中在綠樹植被對都市空氣品質的總體改善，但對於如何配置與選擇適當的植栽位置，仍未有深入探討。這個未解議題激發了我們濃厚的興趣，促使我們進一步探索不同綠樹植被配置對空氣品質的影響機制 (如圖 1 右所示)。



圖 1 空氣汙染受地形與綠樹植被的影響。(左) 空氣汙染受臺灣地形的影響 (環境部，2024)；(右) 綠樹植被靠近哪一側，對於空氣汙染阻隔效果較好？(作者自行製作)

二、文獻探討

大氣中的懸浮微粒 (PM2.5)、二氧化氮 (NO₂) 和臭氧 (O₃) 會對人體健康造成危害，尤其是在交通繁忙和工業密集的地方特別嚴重 (環境部，2024)。

改善空氣品質並降低汙染物對環境與健康的危害，許多學者提出自然解決方案，包括種植綠樹及濕地紅樹林等方式，來達到空氣汙染物阻隔與吸收的效果 (徐吟絢，2024)。不過，綠樹植被的安排需要仔細設計，避免樹木種得太密，這樣會讓氣流受阻，反而讓汙染物堆積更多。當前關於城市植被對空氣汙染物影響的研究，逐漸從「植栽愈多愈好」的直覺假設，轉向對綠帶配置位置與氣流機制的深入探討。Gromke 等人 (2008) 與 Kim & Lee (2017) 透過專業風洞模擬發現，在都市街道中不當的植樹配置 (如道路中央密植) 可能阻斷通風通道，反而導致汙染物滯留。Morakinyo & Lam (2017) 與 Abhijith et al. (2015) 更在綜述中指出，植被的淨汙效果與配置位置、密度、街道幾何等因素高度相關，並呼籲應進行更多具可控性、可視化的微尺度實驗，以釐清紊流與氣流交互作用的具體機制。然而，這些研究大多仰賴高成本的雷射 PIV (Particle Image Velocimetry)，難以被廣泛應用。

在臺灣的都市中，由於土地有限，綠樹植被通常只能單排種在道路旁。因此，本研究的出發點是想知道『綠樹植被應該種在靠近汙染源一側，還是靠近建築物一側，才能達到最佳的汙染物阻擋效果？』。

在上述文獻當中，以 Kim & Lee (2017) 與本研究最為相關。該文獻亦使用風洞模擬進行研究，也探討植被位置變化，但是該研究以探討大尺度之街道氣流與汙染物擴散為主，並未分析汙染物與植被距離對於空汙阻隔的效果與機制。

因此，在本研究中，我們將研究目標放在植被位置對阻隔效果的定量實驗與數值分析、以探討氣流與 PM2.5 傳輸的動力機制。為了觀察汙染物的傳輸，本研究以可操作、可視化、可複製為核心出發點，發展出低成本 EcoPIV 系統。透過簡易雷射折射與水霧模擬，搭配自製風洞與開源 PIVlab 軟體，探討汙染源與綠帶間的氣流行為。

三、研究章節規劃

本文內容規劃如下：壹、前言，講述研究動機、文獻探討；貳、研究目的；參、研究設備及器材；肆、研究過程 (假說、風洞實驗設置等) 與方法 (自製 EcoPIV 測量技術與概念)；伍、研究結果，風洞實驗結果與汙染濃度變化分析、EcoPIV 測試結果與流場分析；陸、討論；柒、結論與未來展望，包括研究發現與結論、以及未來展望；捌、參考文獻資料。另外，本文所有圖片，除非特別標註，皆是出自作者本人。

貳、研究目的

一、研究初期的探索

為回答空汙阻隔效能的問題，本研究考慮多種分析方法，包括現場量測、實驗室實驗和數值模擬分析，希望可以結合不同方法的優勢，建立更完整的科學依據，據此瞭解綠樹植被種植位置對空氣汙染的影響。然而當我們在校園外進行的實地測量過程中，卻遭遇到了不少挑戰，主要是由於空氣汙染源難以控制，以及車流頻繁度不穩定等問題所致。因此本研究決定採用實驗室實驗作為主要的研究方法。

本研究利用風洞實驗來探討綠樹植被和濕地植被對空氣汙染物阻隔效果的影響。在風洞中使用噴霧器來當作可控汙染源，模擬 PM2.5 懸浮微粒。此外，為研究不同綠化配置對汙染物擴散的影響，我們使用假樹條帶來替代綠樹植被。為監測汙染物濃度，在風洞內設置空氣品質監測儀來記錄 PM2.5 的變化，這代表建築物及人類可能面臨到的汙染值。同時，我們自行研發一款經濟型粒子影像流速分析儀（Economical Particle Image Velocimetry, PIV），簡稱 EcoPIV，用來測量風場內的流速分布和紊流結構。透過 EcoPIV 獲得的流場數據，我們可以進一步分析綠樹植被所造成的屏障以及其設置位置對汙染物傳輸的影響，並提供定量的流體動力學分析，來驗證我們的研究假設。

綜合以上，我們設定以下 3 個研究目的：

- (一)、分析綠樹植被位置對汙染物阻隔的影響。
- (二)、分析綠樹植被濃密程度對於 PM2.5 傳遞的影響。
- (三)、瞭解汙染物傳送及阻隔的空氣動力學機制與原因。

參、研究設備及器材

本研究的設備主要分成兩大項目，詳細內容將於第肆章研究過程與方法中敘述。

第一項目為風洞設備組，主要量測汙染源經過綠樹植被後，抵達建築物時的濃度。這部分的設備包括：(圖 3、圖 4、圖 5，參考 P6~P7)

- 透明壓克力風洞：長 70 cm、高 25 cm、深 5 cm，用於觀察汙染物的飄送。
- 超音波噴霧器：簡稱「噴霧器」，用於產生穩定的水霧粒子作為汙染源。
- 假樹條帶：由塑膠片組合而成，用於仿比綠樹植被。
- PM2.5 空氣品質監測儀：簡稱「空品儀」，用於記錄 PM2.5 隨時間的變化。
- 計時器與照相手機：計時器採 iPad 平版，照相手機為 iPhone14 Pro Max。用於記錄空品儀的數據以及時間影像。

第二項目為自行研發的 EcoPIV 系統，用於量測汙染物在風洞中的流速場，以分析綠樹植被對流場造成影響。所用到的設備包括：(圖 3，參考 P6)

- 強光雷射：Class 3B 0.5Watt (Max)。
- 細玻璃棒：直徑 0.65 cm，長度 25.0 cm。
- 可手動對焦攝影機：Sony ZV-E10L。
- 其他器材與軟體工具：化學器材鐵架、Matlab 2024B 軟體、PIVlab 軟體。

細節將於「肆、一、(二)」中配合實驗設置詳述。

肆、研究過程與方法

一、研究過程

(一) 假說 Hypothesis

研究顯示，PM2.5 濃度的上升主要受空氣流動傳輸 (advection) 影響，因此我們認為，降低空氣汙染物的關鍵在於有效阻隔其傳輸，而綠樹植被種植位置在此過程中會扮演重要角色。

本研究提出兩個初始假設：

1. 綠樹植被的配置方式將對汙染物傳輸會有明顯影響。
2. 受到口罩阻隔空氣汙染物機制的啟發，本研究假設當綠樹植被緊鄰住宅建築物時，能夠提供最佳的空氣汙染阻隔效果。

(二) 風洞實驗

為更清楚地瞭解綠樹植被對汙染物阻擋的影響，我們在實驗中對綠樹的形狀做幾何上的簡化，使之成為均勻長條狀，並縮小風洞的寬度，使汙染物的擴散比較像是發生在一個近二維 (quasi-2D) 的環境裡。另外，為更容易分析與討論，我們把「汙染物的釋放」簡化成「水霧粒子單點噴射」，主要目的是為減少過多的變數，且容易重複實驗。

有關於實驗中汙染物的選擇方面，在我們能力所及的範圍，我們曾嘗試過使用乾冰、線香，甚至自製出倒流煙。這些煙霧更接近 PM2.5 的屬性。但是我們也發現，實驗的重要性之一在於可重複性。然而以上的汙染源難以進行多次精準的重複實驗。因此，我們最後決定採用可以重複實施的水霧粒子噴霧。水霧粒子具有可重複性以及可視性的優點，能夠幫助我們反覆觀察與追蹤流場的運動，以了解其背後的物理意義。但是這也表示，我們在進行 PM2.5 運動的研究時，必須更小心謹慎的解釋所觀察到的現象，並將結論聚焦在流場的運動趨勢。

依據上述條件，我們設計一個風洞（圖 2）來分析這個問題。風洞的左側（亦即上游方向）為開放邊界，我們在這裡放一台超音波式噴霧器（Ultrasonic Humidifier），用來產生極為細小的水霧粒子，模擬空氣中的汙染物。噴霧器的噴口與風洞的左側對齊，這個位置被定義為 $x = 0\text{ cm}$ 。在垂直方向上，噴霧器的噴口距離底面 5 cm ，這個位置我們定義為 $y = 5\text{ cm}$ 。

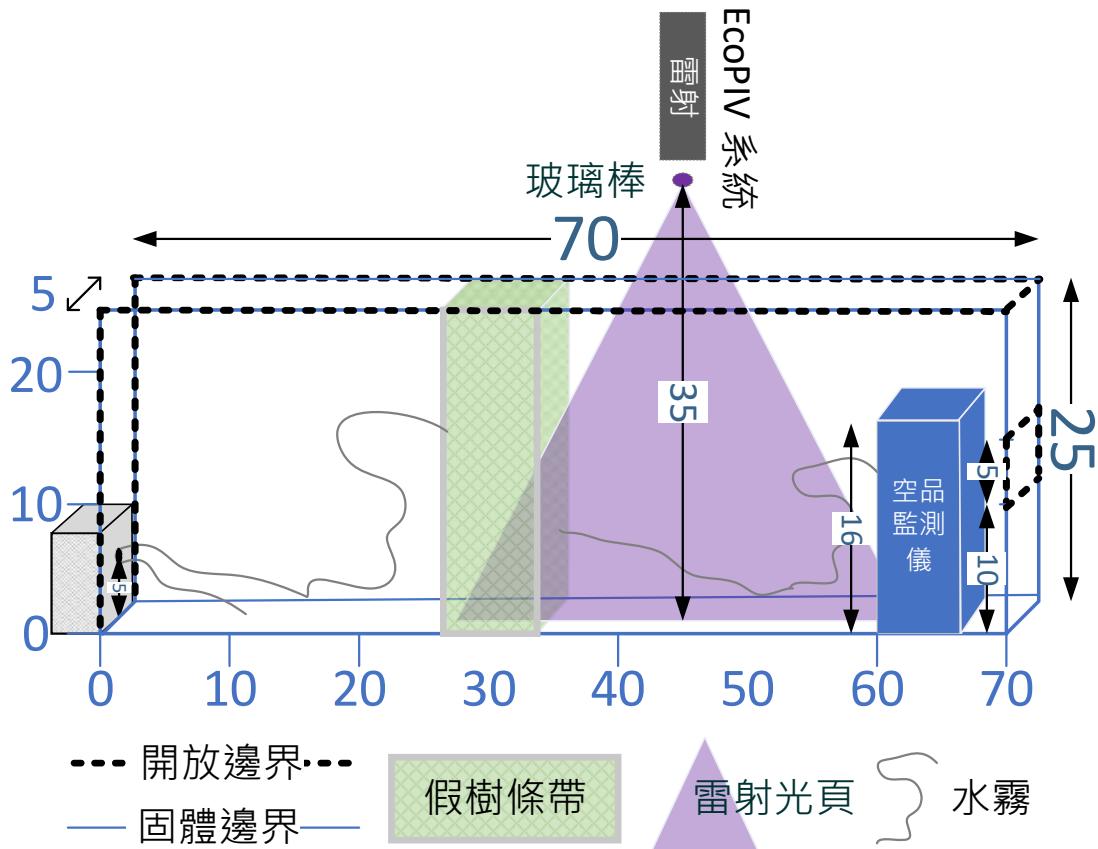


圖 2 風洞實驗設置。上游側為開放邊界，放置超音波式噴霧器。風洞內設置假樹條帶，右側為空品儀。上方為自行研發的 EcoPIV 系統，用於量測流速場。(作者自行製作)

本研究僅考慮下沉型汙染物，因此在風洞實驗的設計中，我們把風洞的上方設計成開放式，讓汙染物可以向上對流擴散，以模擬在真實空氣汙染傳送過程中銜接至外部環境的情況。風洞的右側（也就是下游方向）在 $x = 70\text{ cm}$ 的位置，這一面是封閉的，但我們在距離底部 10 cm 的地方開一個 $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ 的小窗口，這樣可以模擬建築物的窗戶。另外，風洞的底部是完全封閉的，以符合現實中不可穿透地面。

不同綠樹植被擺放方式對汙染物傳播的影響是本研究討論的重點，我們在風洞裡放可以移動位置的假樹條帶，來模擬各種不同的綠樹植被配置情境。另外，在風洞的下游側（靠近出口的地方）放一台 PM2.5 空品儀，儀器的左側（也就是下游方向）位於 $x = 60\text{ cm}$ ，用來記錄 PM2.5 濃度隨時間的變化。

本研究所使用的空品儀為臺灣製造的多功能偵測儀（型號為 MET-AQM+8），可以測量 PM1.0、PM2.5、PM10 等懸浮微粒、甲醛（HCHO）、揮發性有機物（TVOC）、溫度、濕度及空氣品質指數（AQI）。在本研究中，我們主要透過測量 PM2.5 濃度變化來分析汙染物的移動情況。不過，這台儀器在 PM2.5 監測上有個限制，它的偵測範圍是 0~999 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，如果 PM2.5 濃度超過 $999 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，儀器最多只能顯示 $999 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。這部分在解釋數據時要加以注意（圖 3）。

為掌握汙染物的傳播過程，我們使用攝影機拍攝水霧粒子的運動情況。由於水霧粒子的傳播主要受到風速場的影響，因此需要記錄和量化風洞內的流速情況。為此，我們基於傳統的粒子影像測速法（PIV）（柳仲恩，2023），開發一種更便宜的測速方法，叫做經濟型粒子影像測速法（EcoPIV）（圖 4）（圖 5）。目標是降低測速設備的成本，同時提高實驗的可行性。我們將 EcoPIV 設置在風洞的上方，用來測量風洞內的風速場，具體的方法會在後續的章節中詳細說明。



圖 3 實驗器材。左起，空品儀、超音波噴霧器、捲尺、假樹條帶、鐵尺。（作者自行拍攝）



圖 4 實驗過程快照。噴霧器由風洞左側噴入水霧粒子，空品儀顯示 PM2.5 數值，右側放置計時器，記錄 PM2.5 隨時間的變化。（作者自行拍攝）



圖 5 實驗設置。自製壓克力風洞，以噴霧器釋放水霧粒子作為汙染源，上方設置自製的 EcoPIV 量測流速場。(作者自行拍攝與製作)

(三) 控制變因

本研究的主要控制變因如下：

1. 綠樹植被的濃密度

在模擬綠樹植被時，我們使用假樹條帶，而假樹條帶的密度是根據折疊的次數來決定的。對於高密度 (lush) 植被，我們使用 100 cm 長的假樹條帶，將它對折兩次，最後形成 25 cm 長的植被結構；而對於低密度 (sparse) 植被，我們使用 50 cm 長的假樹條帶，對折一次，也形成 25 cm 長的植被結構。

2. 假樹條帶的位置

根據植被與汙染源的距離，我們把假樹條帶分別設置在 $x = 20, 30, 40, 50$ cm。

3. 噴霧器的發送時間長度

發送時間長度代表汙染物釋放的量，根據不同的發送時間（從 5 秒到 40 秒不等）來分析汙染物穿過假樹條帶後，於空品儀所呈現出的 PM2.5 數值。

二、研究方法

研究方法主要分兩大階段。第一階段是透過改變假樹條帶的位置、噴霧器發送時間以及假樹條帶的密度，來分析 PM2.5 污染物抵達建築物的濃度。第二階段是透過 EcoPIV 量測風洞內水霧粒子的速度場，探討水霧粒子飄送的動力機制，藉此完整解釋第一階段所量測的結果。

由於 EcoPIV 是本研究所創新，因此需要對此方法進行深入敘述。

(一) 經濟型粒子影像測速法 EcoPIV

流速場的量測方法，主要可分為接觸式和非接觸式兩大類。接觸式有熱線風速計 (Hot-Wire Anemometer, HWA)，該方法利用加熱的金屬絲 (如鎢絲) 感應冷卻速率來測量流速。有反應快、解析度高，可測量紊流擾動速度的優點，但是易受環境溫度變化影響，且需要校正。另外，還有像是皮托管 (Pitot Tube) 和速度探針 (Velocity Probe) 等 (朱佳仁，2015)。此類的儀器對本研究而言，會干擾實驗結果，因此不適合本研究使用。

非接觸式有雷射都卜勒測速儀 (Laser Doppler Velocimetry, LDV)、超音波都卜勒測速 (Ultrasonic Doppler Velocimetry, UDV)、及粒子影像測速法 (Particle Image Velocimetry, PIV)。其中 LDV 和 UDV 分別利用雷射和聲波的都卜勒效應進行單點流速量測，此方法在高中地球科學課本的海流流況量測也有提到，因為價格高昂，且對於本研究想要進行的速度場量測也不適用 (全華，2024)。

最後，我們將目光放在粒子影像測速法 (PIV)。PIV 原理主要以光學為主，透過在流場中灑上顆粒細粉，以雷射光頁 (LASER Sheet) 激發細粉，再透過高速攝影機來拍攝細粉顆粒的運動，進而分析流速的分布與變化 (柳仲恩，2023)。分析的方法並非針對特定細粉進行追蹤分析，主要是因為細粉太多，難以進行顆粒配對，而且紊流 (Turbulence) 主要以三維運動為主，細粉不一定會持續出現在雷射光頁上所致。因此分析時以前後時間及照片中的影像像素值進行交叉相關法 (Cross-Correlation) 來計算流速，這方法剛好是我們在高一下 (翰林，2022) 統計與機率的單元中所學到的方法。透過前後兩張照片的移動與旋轉，找出最佳的相關係數，進而獲得流場中的流速與方向。

$$r = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2} \cdot \sqrt{\sum(Y_i - \bar{Y})^2}} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

式中： X_i 、 Y_i 為兩組數據的值； \bar{X} 、 \bar{Y} 為兩組數據的平均值； r 為相關係數。

PIV 的優點是非侵入式測量流體速度場，並可獲得瞬時且高解析度的流場資訊，較適合本研究的需求。但是我們查詢相關的設備與價格，發現一套標準 PIV 系統 (雙脈衝雷射 + CCD 相機 + 軟體)，大約需要 150 萬~600 萬元臺幣，遠遠超過我們這個研究 6000 元臺幣的預算。

我們的目標是能夠使用 PIV 法，因此我們在本計畫中發展出便宜且可以達到本研究需求的方法，我們稱為 EcoPIV，即經濟型 PIV 法。

為了降低成本，但是又保有 PIV 的結果，在發展 EcoPIV 之前，我們必須先針對傳統

PIV 法進行瞭解。傳統 PIV 基本測量步驟如下：

1. 粒子追蹤與照明

在流體中添加循跡微粒 (Tracer Particles)，這些粒子必須與流體同速運動且具有良好光學反射性。在這步驟中，因為我們要觀測的是透過超音波式加濕器 (Ultrasonic Humidifier) 所產生細小的水霧粒子。超音波式加濕器的核心是壓電振盪片 (Piezoelectric Oscillator)，將電能轉換為機械振動，頻率通常在 $1.7\text{MHz} \sim 2.4\text{MHz}$ 之間（屬於超音波範圍）(Kim & Lee, 2017)。這種高速振盪會在水中產生高頻壓力波。當壓電片的振盪頻率達到一定程度時，水分子之間的壓力變化劇烈，導致水面上產生微小氣泡。這過程稱為穴蝕作用 (Cavitation Effect)，所產生的水霧粒子一般為 $1 \sim 5$ 微米 (朱佳仁, 2015)。這種水霧粒子可類比描述空氣汙染源的移動與擴散，也可作為 PIV 法中的追蹤粒子。

在照明部分，傳統 PIV 使用雙脈衝雷射（Double-Pulse Laser）照亮粒子，一般選擇 Nd:YAG 雷射（波長 532 nm，綠光）（柳仲恩，2023）。然而雙脈衝雷射因為要在短時間將能量提升到可以達到脈衝效果，而且兩套脈衝雷射還要互相搭配，價格勢必高昂。為此，我們改用強光雷射筆來替代。一支強光雷射筆，售價大約在 1500 元左右，在本研究預算之內。

在傳統 PIV 測量中，為確保循跡微粒在特定平面內被清晰照明，必須使用雷射光頁技術。該技術的核心是將雷射束展開成薄片狀光源，以便在流場中形成 2D 或 3D 的測量平面。為了讓雷射束擴展成雷射光頁，我們想到高一物理所學到的折射定律（翰林，2021）。折射是當光線從一種介質進入另一種介質時，光速發生改變，並且會導致光線改變方向。

其關鍵原理由可 Snell 定律 (Snell's Law) 描述：

式中, n_1 和 n_2 分別為兩種介質的折射率。 θ_1 和 θ_2 是光線在兩介質中的入射角和折射角。

當雷射光進入圓柱體後，有可能發生多次折射、臨界折射、以及全內反射。其中能量以 2 次折射為主，越多次全內反射後的折射，雷射光的能量會削弱。因此本章節的討論以 2 次折射為主。以簡單幾何為例，示範計算過程。如圖 6 所示，本研究的圓柱體先以試管裝水進行測試與演算。水的折射率為 $\frac{4}{3}$ ，當雷射光由右方射入，若入射角 $\theta_0 = 53^\circ$ ，則此雷射光經過兩次折射後的偏向角可如下算出：

首先，在 P 點處的折射，可由 Snell 折射定律計算： $1 * \sin(53^\circ) = \frac{4}{3} * \sin(\theta_1)$ ，可得 $\theta_1 = 37^\circ$ ， $\theta_3 = 16^\circ$ 。由於等腰，可得 $\theta_2 = 37^\circ$ 。在 Q 點由 Snell 折射定律可知： $\frac{4}{3} * \sin(37^\circ) = 1 * \sin(\theta_4)$ ，可得 $\theta_4 = 53^\circ$ ，及 $\theta_5 = 16^\circ$ 。亦即偏向角會等於 $\theta_3 + \theta_5 = 32^\circ$ 。

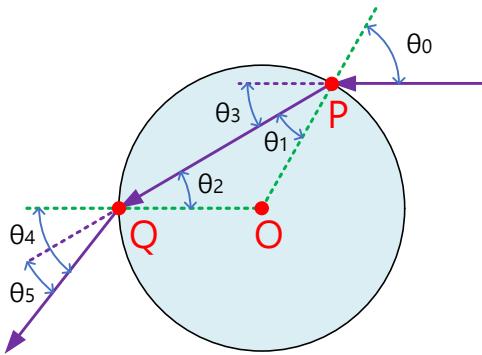


圖 6 雷射光進入圓柱的偏向角計算。入射角 θ_0 。偏向角 $\theta_3 + \theta_5$ 。（作者自行製作）

經測試後發現，玻璃棒折射效果更佳。一般玻璃的折射率通常介於 1.5 到 1.9 之間，具體數值取決於玻璃的成分和種類，常見的普通鈉鈣玻璃（soda-lime glass）的折射率約為 1.52（Wikipedia contributors, 2021）。

根據上述的折射原理及玻璃的折射率可知，當一束雷射光，在空氣中由上往下通過一支實心玻璃圓柱時，雷射光的軌跡大致如圖 7。圖 7 (A) 為光線由圓柱正中心進入，此情境不會發生折射。圖 7 (B) 為光線由中心偏右進入，此時會發生向左的偏折。圖 (C) 為光線由中心更為偏右進入，此時雷射光會更大幅度偏向左方。以圖 7 (B) 為例，雷射光由階段 1 開始經由空氣接觸到玻璃圓柱，階段 2 在玻璃圓柱內發生折射，由於玻璃的折射率較空氣為大，因此折射會偏向法線。階段 3 則是雷射光離開玻璃圓柱，並進入空氣。由於空氣的折射率較玻璃圓柱小，因此雷射光會偏離法線。

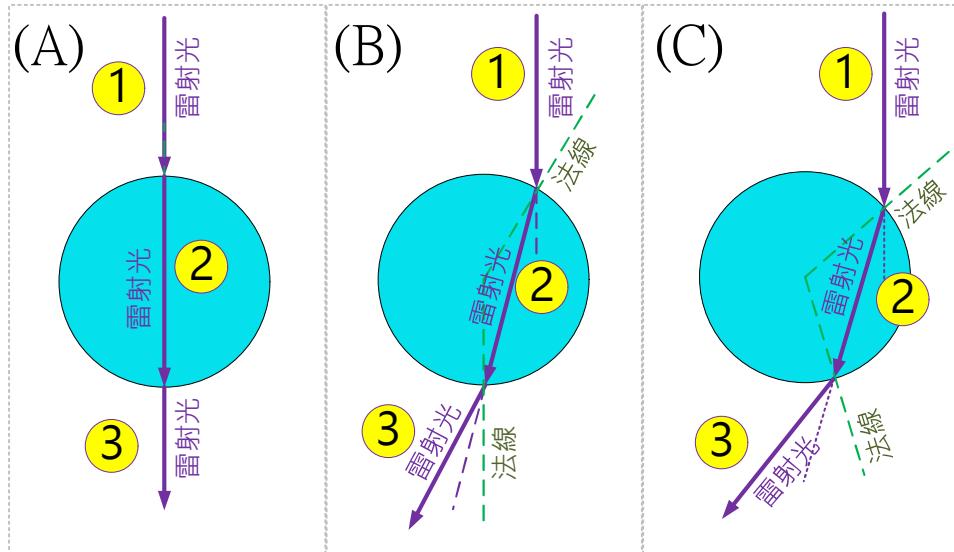


圖 7 雷射光束通過一支實心玻璃圓柱時，雷射光的軌跡。（作者自行製作）

根據這原理，我們想到可以透過圓柱狀透鏡（Cylindrical Lens）將雷射光束展開成光頁。我們嘗試使用不同粗細的圓柱狀透鏡，包括直徑 2.5 cm 的玻璃試管、直徑 0.72 cm 的玻璃棒以及直徑 0.65 cm 的玻璃棒（圖 8）。

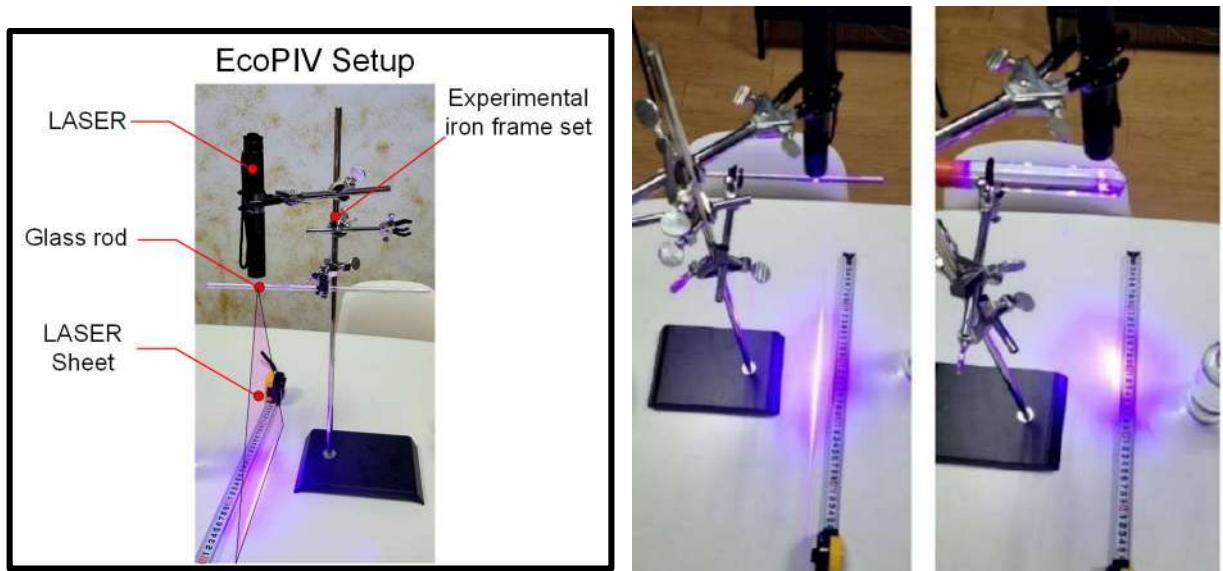


圖 8 自行設計的 EcoPIV 設備與雷射光頁範圍測試。(左) 透過玻璃棒將雷射光折射成雷射光頁。(右) 不同粗細的玻璃棒所產生的雷射光頁展幅不同。(作者自行拍攝製作)

結果顯示，直徑越大的柱狀透鏡所產生的雷射光頁範圍越窄。而 0.65 cm 的玻璃棒能將強光雷射分散成大約 20 cm 寬的雷射光頁，符合本研究的需求。

2. 影像擷取

在傳統 PIV 法中，使用高速相機（CCD 或 CMOS 相機）捕捉粒子影像，通常會拍攝兩張時間間隔極短的圖像，並透過交叉相關法計算速度場（柳仲恩，2023）。在這步驟中，高速攝影機價格昂貴，但考量現在部分簡易型的數位相機也具備高速攝影的能力，加上本研究中的汙染物擴散速度較為緩慢，所以使用具有高解析度攝影的相機取代（圖 9）。

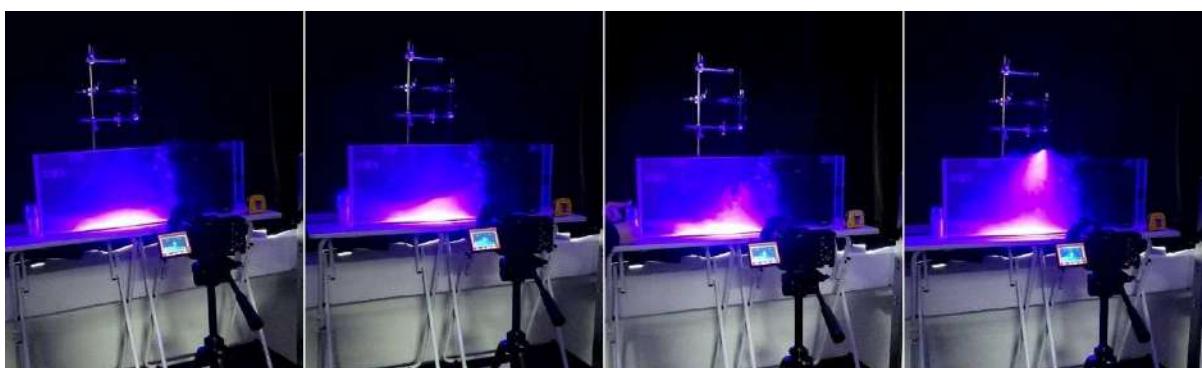


圖 9 自製 EcoPIV 測量量測過程。噴霧器由風洞左下方射出水霧粒子。EcoPIV 則由上方射出雷射光頁。(作者自行拍攝)

(二) 交叉相關法 (Cross-Correlation) 計算流速

PIV 法的模式核心在於使用交叉相關法 (Cross-Correlation Method)，計算粒子在短時間內的位移，進而推算其速度場。影像被分割成小區塊 (Interrogation Windows)，並透過統計方法計算每個區塊內粒子的平均位移，從而獲得速度向量 (柳仲恩，2023)。

經查詢，我們發現 PIV 的分析技術已經相當成熟，甚至在 Matlab 軟體上已經有免費套件，叫做 PIVlab。我們在瞭解其原理後，學習使用即可。

(三) EcoPIV 系統創建流程

經過以上的研究，我們創建 EcoPIV 系統。在系統中，我們透過強光雷射筆作為 EcoPIV 的光源，透過自己的手機，以及跟學長商借的相機，來拍攝汙染物的移動。這樣額外支出的部分只有 1500 元的強光雷射筆。相較於傳統 150 萬～600 萬元臺幣的 PIV 設備，在經費上節約不少。

EcoPIV 系統的整體流程如下 (圖 10)：

1. 透過玻璃棒折射強光雷射，產生約 20 cm 的雷射光頁。
2. 雷射光頁激發一片風洞中的水霧粒子。
3. 透過手動對焦，錄製雷射光頁中水霧粒子運動的 mp4 檔案。
4. 透過 USB 將 mp4 檔案傳輸至筆電。
5. 在 Matlab 中啟動 PIVlab，進行 mp4 影像調整、調校多圖框參數、校正影像尺度，並計算出流速場。

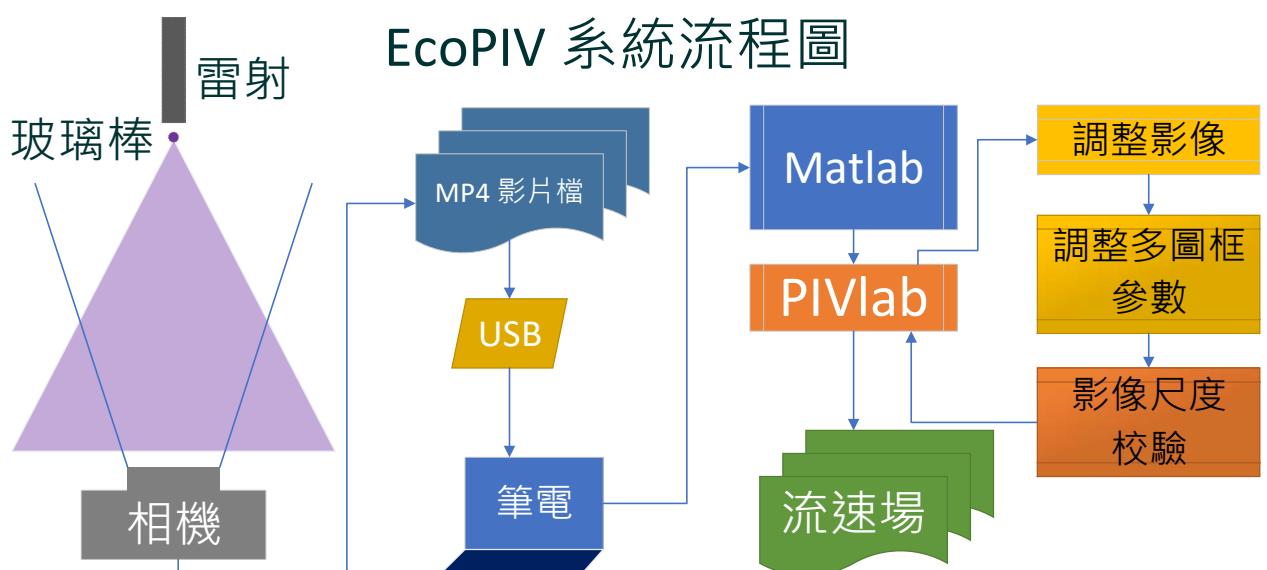


圖 10 EcoPIV 系統流程圖。(作者自行製作)

(四) EcoPIV 參數設置及其與紊流裂解效應的關係

本章節以濃密植被的 EcoPIV 量測結果為示範。圖中黑白色階背景為透過強光雷射以及圓柱狀透鏡產生的雷射光頁所激發的細小水霧粒子。綠色箭頭則是透過 PIVlab 所分析出的速度場。在使用交叉相關法 (Cross-Correlation) 計算流速時，PIVlab 會將影像分割成小區塊 (Interrogation Windows)，以計算每個區塊內粒子的平均位移，得到速度向量，這小區塊的設定是影響結果正確性與穩定性的關鍵。經過我們的嘗試，發現這小區塊的擷取，關鍵在於流場中的紊流漩渦大小。

紊流 (Turbulence) 是一種高度不規則且具有多尺度結構的流體運動。在高雷諾數 (Reynolds number, Re) 條件下，紊流的動能主要由大尺度漩渦獲得，然後通過一系列的非線性相互作用，將能量逐步傳遞到更小尺度的漩渦，最終因黏性作用而消散。這種自上而下的能量傳遞過程稱為紊流裂解 (Turbulent Cascade) (朱佳仁，2015)，在本次的研究也有觀察到紊流裂解的效果。

為此，我們將實驗中的紊流區分為三個大小區段，分別為 200 Pixel (藍框)、100 Pixel (黃框) 及 50 Pixel (綠框) (圖 11)，每個 Pixel 對應到實際尺度大約為 0.118 mm (圖 12)，並將其帶入 PIVlab 的影像分割中，得到的效果非常理想，可以產生穩定且合理的速度場向量。

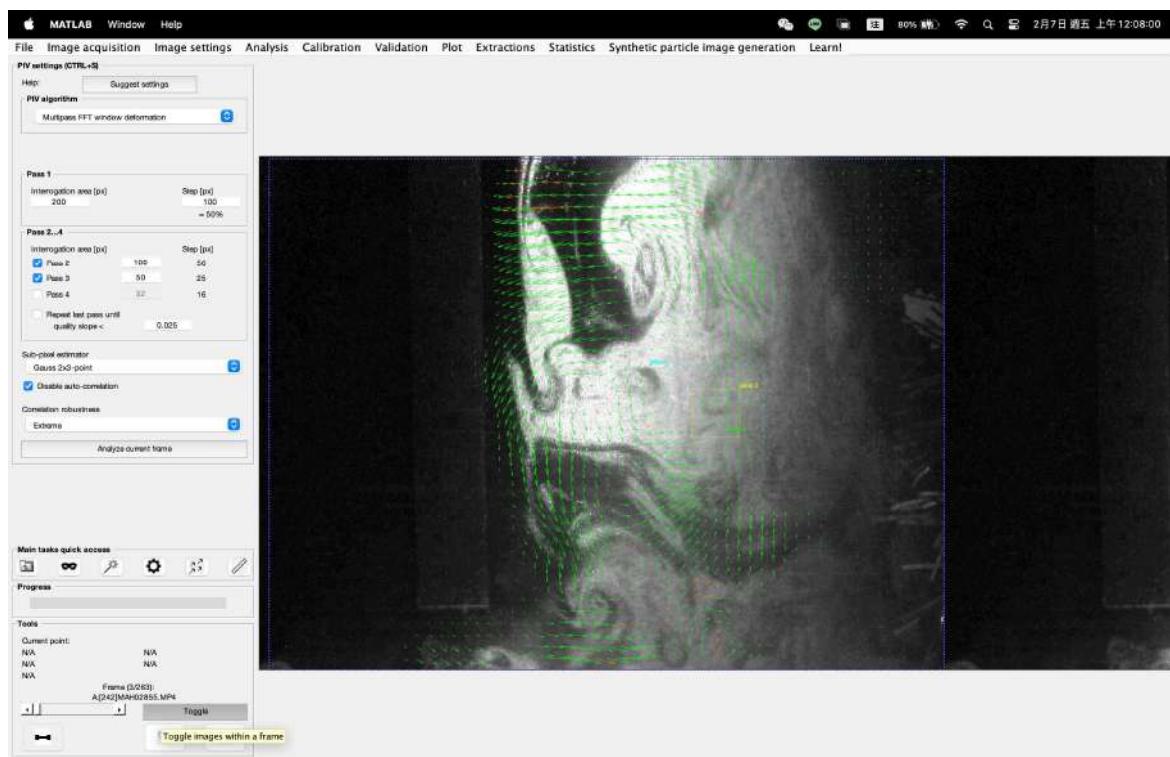


圖 11 PIVlab 的影像多圖框分割參數，以及透過 PIV 法所分析出的流速場向量 (綠色箭頭)。(作者自行製作)

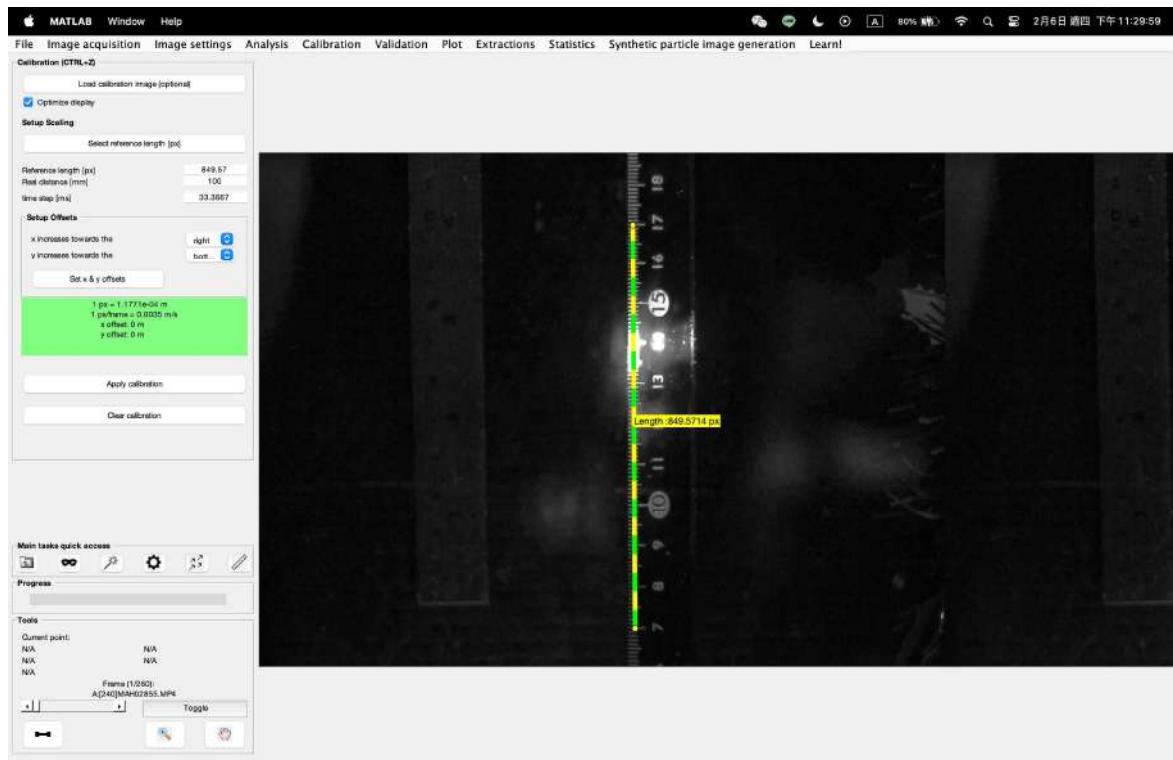


圖 12 PIVlab 的影像 Pixel 與實際尺寸大小的校驗。透過影像中的已知尺度，進行像素對應實際尺度的校驗。(作者自行製作)

伍、研究結果

在風洞實驗中，我們在風洞左側設置噴霧器，並分別於 $x = 20, 30, 40, 50\text{ cm}$ 四個位置設置假樹條帶（圖 13），希望探討不同植被位置對汙染物阻隔效果的影響。這四個位置在實驗代號上分別以 A、B、C、D 表示，汙染源的發送量則透過噴霧器發送時間控制。本研究選擇 5 秒至 40 秒範圍內的不同發送時間進行測試，其實驗代號以兩位數字表示，如 05、10、15、...、40。由於風洞下游所設置的空品儀可記錄的 PM2.5 濃度上限為 $999\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，在某些實驗條件下，假樹條帶無法有效阻隔汙染物，會導致測量數據迅速超出記錄範圍。因此，須適當縮短汙染源的發送時間，以確保獲得有意義的實驗數據。植被密度是影響汙染物遮蔽效果的重要因素之一。本研究設計兩種不同的植被密度，分別為濃密植被（代號 L，代表 Lush）與稀疏植被（代號 S，代表 Sparse）。

情境案例依照上述方法進行編號。例如，當假樹條帶設置於最靠近建築物的位置 ($x = 50\text{ cm}$ ，代號 D)，並使用濃密植被 (L)，汙染物發送時間為 10 秒 (10)，則該實驗案例的編號為 D10L。

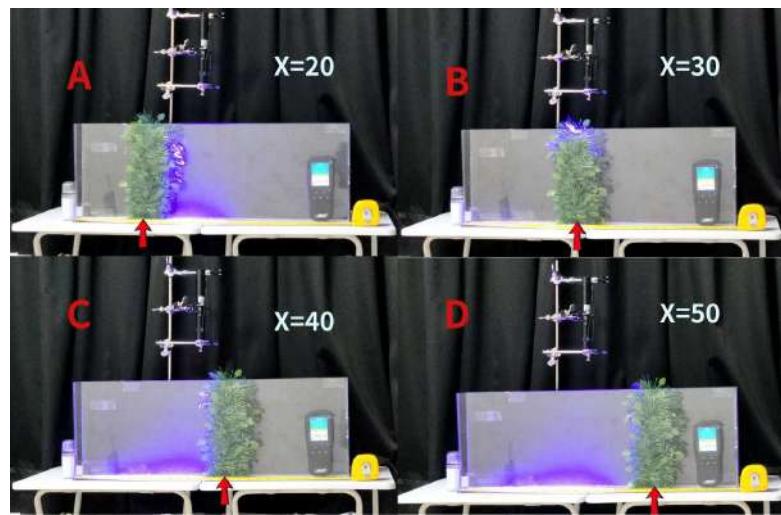


圖 13 假樹條帶與汙染源的距離與代號：A：20 cm, B：30 cm, C：40 cm, D：50 cm。圖中紫色泛光為被雷射光貢激發的水霧粒子。(作者自行拍攝與製作)

一、實驗結果與討論

本研究先進行實驗可重複性測試，之後共進行 40 組數據量測，分別對 A、B、C、D 不同假樹條帶位置、不同濃密植被，以及不同汙染物發送量等變因進行趨勢分析。

(一) 濃密植被，不同汙染物發送時間及不同假樹條帶位置的分析

為在濃密植被條件下，不同汙染物發送時間及不同假樹條帶位置下 PM2.5 時序歷線圖。每組數據均對應相同濃密植被和汙染物發送時間，但植被位置不同。

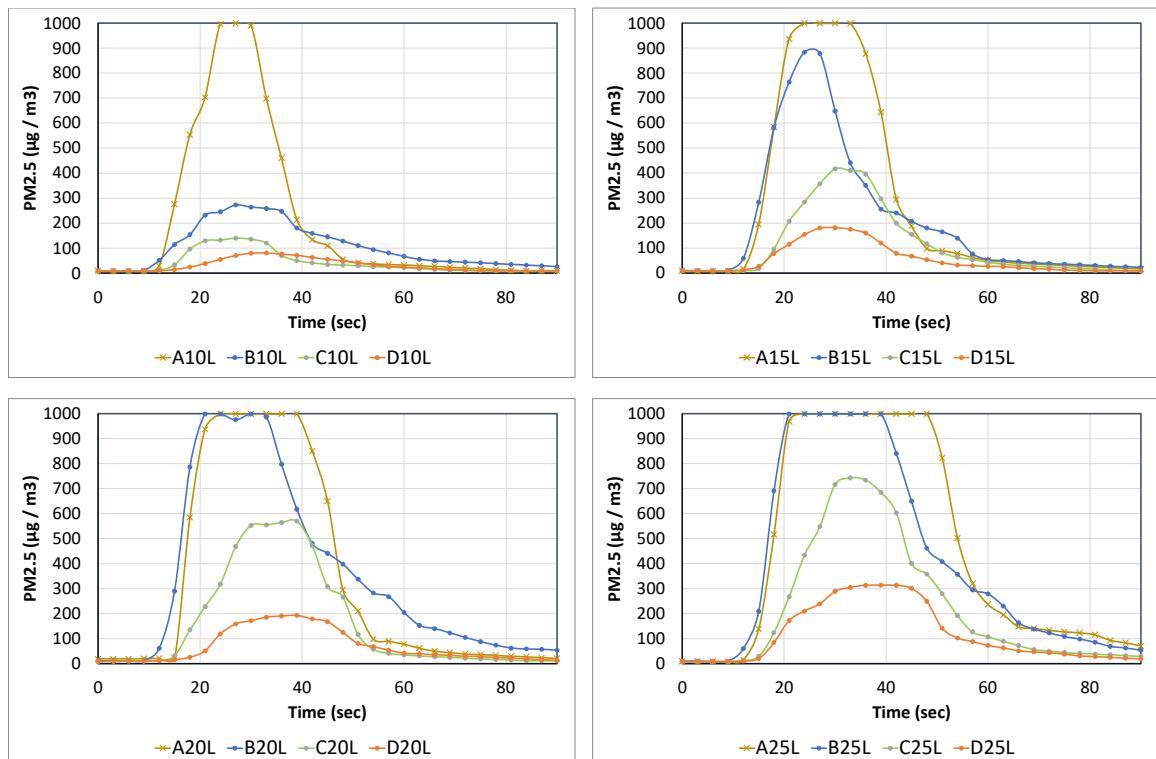


圖 14 PM2.5 的時間歷程。濃密植被，四幅圖代表不同汙染時間，不同顏色條線表示不同位置。橘線代表假樹條帶最靠近建築物，具有最低的 PM2.5 值。(作者自行製作)

根據所獲得的數據，在相同的植被密度下，無論汙染排放時間為 10、15、20、或 25 秒，位置 D 的汙染濃度值均較低。由此顯示，當植被遠離汙染源並且靠近建築物時，綠樹植被在減少汙染濃度方面發揮顯著的作用。

（二）稀疏植被，不同汙染物發送時間及不同假樹條帶位置的分析

圖 15 比較兩組實驗數據，分別為稀疏植被條件下，不同假樹條帶位置，汙染物發送時間為 10 秒及 15 秒的 PM2.5 時序歷線圖。可以發現稀疏的假樹條帶對空氣汙染的阻隔能力有限，導致 PM2.5 濃度迅速上升，並很快超過儀器測量的上限。然而，從汙染物消散的速率來看，當綠樹植被種植於位置 D 時，能夠達到最佳的 PM2.5 濃度降低效果。此外，植被距離建築物越近，其改善空氣品質的效果越顯著。圖 15 亦可以圖 19 作為對照組。

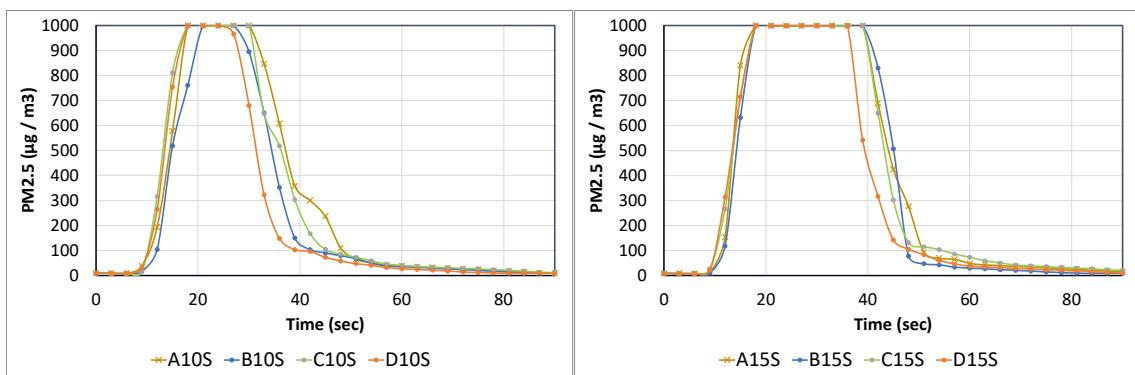


圖 15 PM2.5 的時間歷程。探討稀疏植被條件下的汙染物傳輸情形，此圖包含兩組不同汙染程度的數據，每條線代表不同的位置。(作者自行製作)

（三）濃密與稀疏植被，不同汙染物發送時間及不同假樹條帶位置的分析

由於分析的變因有三組，因此採用矩陣式分析。圖 16 比較於 A、B、C 和 D 位置種植不同密度的綠樹植被對空氣品質改善的影響。其中直列分別表示 A、B、C、D 四個位置的結果，橫行表示不同的發送時間。每張圖上有兩條線，分別表示濃密與稀疏植被的 PM2.5 時序歷線圖。結果顯示，濃密植被在阻隔汙染方面的效果明顯優於稀疏植被，亦即藍線的數值普遍遠小於橘線的數值。假樹條帶位於 D 的位置，其 PM2.5 的數值小於 A、B、C 位置。圖中亦可看出，在濃密植被條件下，PM2.5 的數值高低，大約為 A>B>C>D。這表明，濃密植被配合假樹條帶位於 D 位置，可有效降低 PM2.5 濃度。

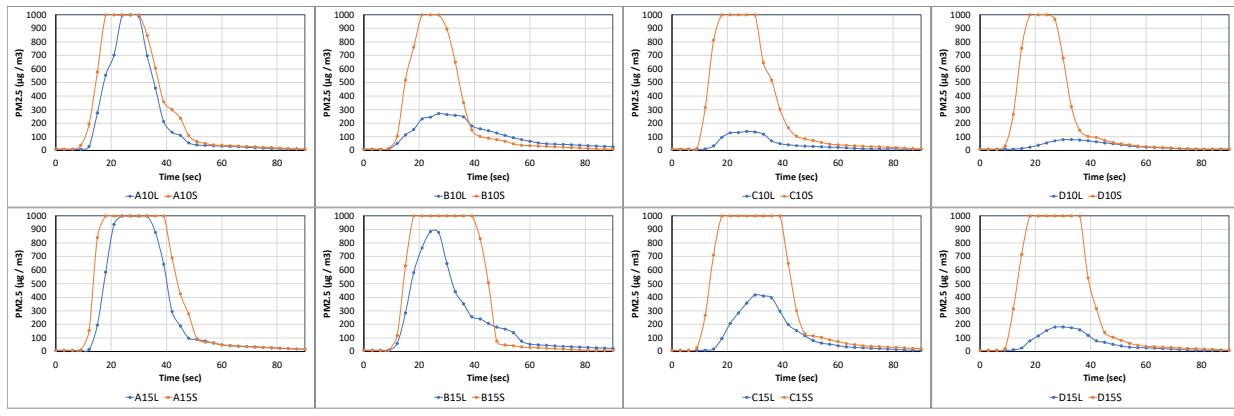


圖 16 PM2.5 的時間歷程比較圖。藍色線條代表濃密植被，橙色線條代表稀疏植被。(作者自行製作)

(四) 濃密植被，不同假樹條帶位置及不同汙染物發送時間的分析

在這個分析當中，假樹條帶設定為濃密植被。我們著重在不同發送時間的 PM2.5 發展情形。在圖 17 中，四張圖分別代表不同的位置。每張圖中有數條色線，代表不同的汙染物發送時間。可以清楚看出，這四張圖中，以 D 位置整體 PM2.5 數據最小，而 A 位置在較短的汙染物發送時間即達到 PM2.5 超過儀器的上限飽和。此外，在 B、C、D 圖中，可看出 PM2.5 的數值大致正比於汙染物發送時間。透過交叉比對，最靠近建築物的 D 位置的假樹條帶對於汙染物阻隔有最好的效果。

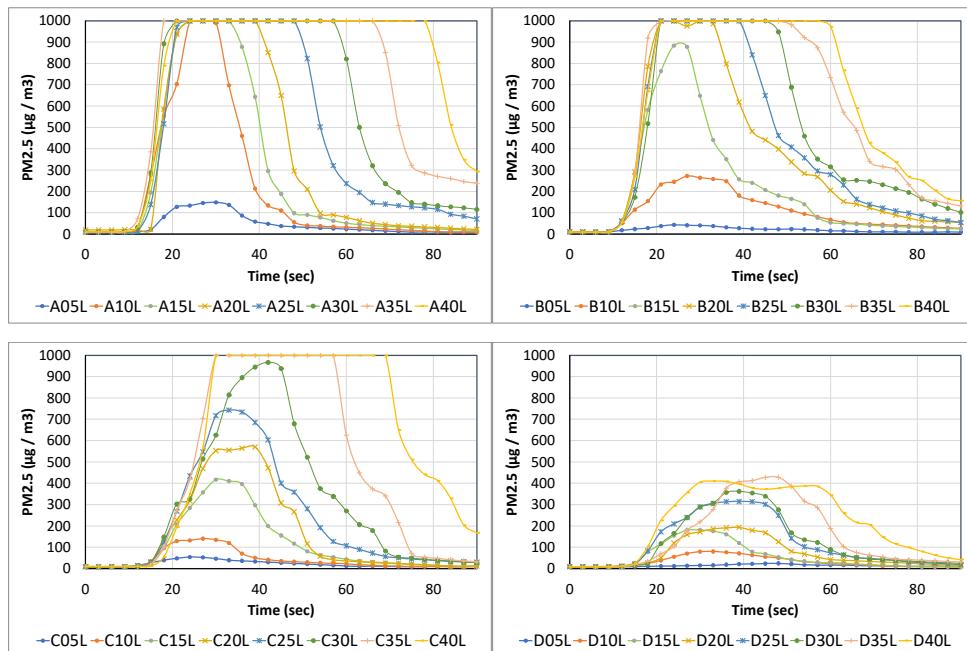


圖 17 濃密植被條件下 PM2.5 的時間歷程比較圖。(作者自行製作)

(五) 稀疏植被，不同假樹條帶位置及不同汙染物發送時間的分析

在這個分析當中，假樹條帶設定為稀疏植被。我們著重在不同發送時間的 PM2.5 發展情形。在圖 18 中，四張圖分別代表不同的位置，每張圖中有數條色線，代表不同的汙

染物發送時間。結果顯示，在稀疏植被條件下，汙染物濃度會更快迅速上升，而上升的程度基本上正比於汙染物發送的時間。然而，位置 D 的汙染物濃度下降速率最快，顯示該位置對汙染物的阻隔效果較佳。

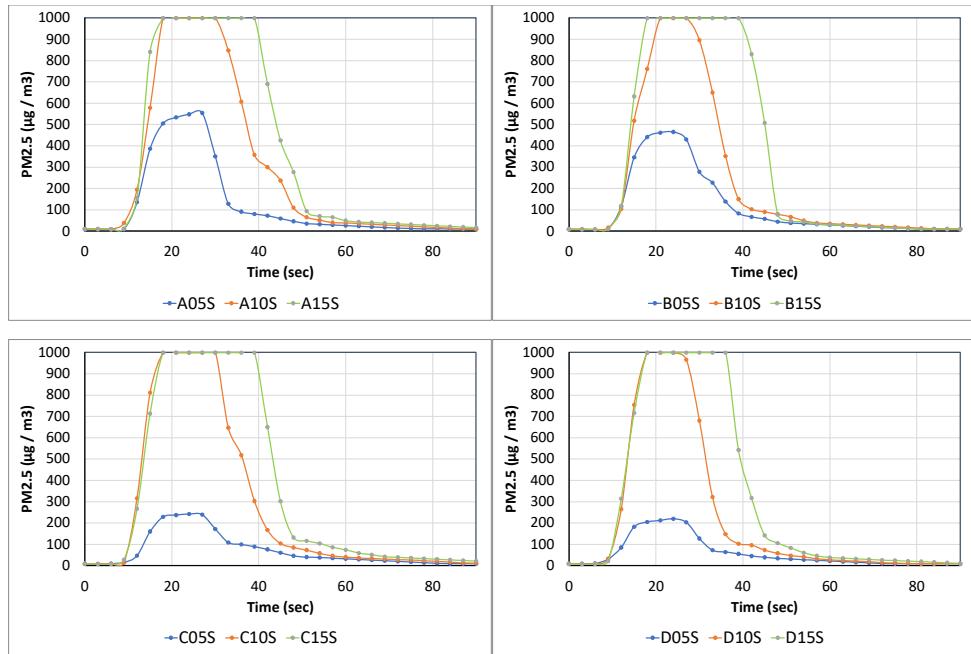


圖 18 PM2.5 的時間歷程。圖中包含四張影像，分別代表稀疏植被下不同位置的假樹條帶對汙染物 PM2.5 濃度的影響。(作者自行製作)

與濃密植被相較，稀疏植被的汙染物穿透性強，種植位置對於汙染物 PM2.5 的影響較小。然而整體而言，仍以 D 位置 PM2.5 數據最小，而 A 位置在較短的汙染物發送時間即超過儀器 PM2.5 的上限。

(六) 無綠樹植被，不同汙染物發送時間的分析

另一個值得探討的案例是無綠樹植被的情形。圖 19 為無假樹條帶的案例。藍色線為汙染物發送 5 秒、橘色線為汙染物發送 10 秒。本圖亦為背景值圖。由此結果可知，若無法種植濃密的綠樹植被，則 PM2.5 數值的上升階段中，汙染物發送 5 秒與 10 秒有近乎一致的結果。而藍線因為汙染物發送時間較早結束，因此其 PM2.5 數值回落亦較早發生。當無任何綠樹植被時，汙染源會迅速導致 PM2.5 濃度超過儀器的測量範圍。

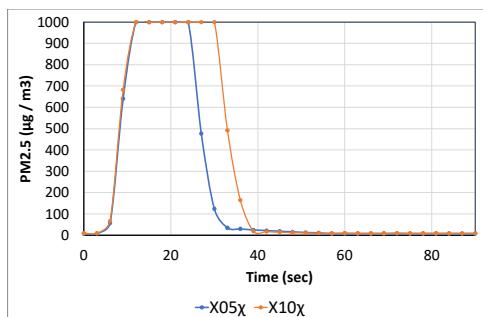


圖 19 無假樹條帶的 PM2.5 時間歷程。藍線發送 5 秒，橘線 10 秒。(作者自行製作)

以上六種不同變因的分析，主要是透過多次重複性實驗數據，每次實驗均進行4-6次，在確認數據正確後所繪製而成。本研究採用多重檢測數據法，包括峰值檢測、峰值到時檢測、以及數據重覆性檢測等。檢測後的數據則取其一進行比對與分析。

綜合而言，為最大化綠樹植被的效能，應考量以下幾點：

1. 對於降低汙染物的PM2.5濃度值而言，濃密植被比稀疏植被明顯有效。
2. 不論濃密植被或稀疏植被，將假樹條帶置於最靠近建築物的位置效果最好。
3. 若汙染物排放量過高，即便是濃密植被，也有其效果極限。

二、動力機制分析

從上述實驗結果可以明顯看見，最靠近建築物的濃密植被，對於汙染物阻隔有最好的效果。濃密植被較稀疏植被效果相當顯而易見，但是為何同樣的假樹條帶，位於D位置遠較位於A位置為佳呢？為了瞭解這一現象，本研究希望透過EcoPIV法，量化流速場，以明確掌握汙染物飄送機制。

(一) 論點

我們的論點是汙染源的輸送主要仰賴對流(Advection)，若綠樹植被下游有無法穿透(impermeable)的建築物時，氣流將被阻隔而往其他方向流動。在本研究的實驗中可以明顯觀察到，氣流受到建築物阻隔後將往上流動，而將綠樹植被放置於此處，將有效阻隔穿透型對流，達到最佳的阻隔空汙之效。

為論證此論點，我們藉助EcoPIV對水霧粒子的移動進行流速場的量測分析。

(二) B20L VS D20L 案例比較與分析(參考圖 17)

在本章節中我們主要探討具有代表性的B20L與D20L案例。B20L為濃密植被的假樹條帶位於 $x = 30$ (位置居中)，水霧粒子噴射20秒。D20L為濃密植被的假樹條帶位於 $x = 50$ (位置緊鄰代表建築物的空品儀)，水霧粒子噴射20秒。在PM2.5的時序量測數據中顯示，相較於B20L，D20L的PM2.5數值明顯較低。

(三) B20L 假樹條帶上游側的EcoPIV速度場分析

圖20為B20L假樹條帶前方(上游側)的水霧粒子影像與EcoPIV的速度場量測結果。時間順序為(a)~(e)，綠色箭頭為速度向量。由圖可見，當水霧粒子由畫面左下方進入後，水霧粒子會向下游側水平方向移動，在撞擊至假樹條帶後，使行進方向往上，並形成一個逆時鐘旋轉的大漩渦。從圖中也可以清楚看到，此大漩渦會繼續裂解成小漩渦，這與先前提到的紊流裂解現象符合。而此不同尺度的大小紊流也是EcoPIV在決定小區塊(Interrogation Windows)大小時的重要依據。

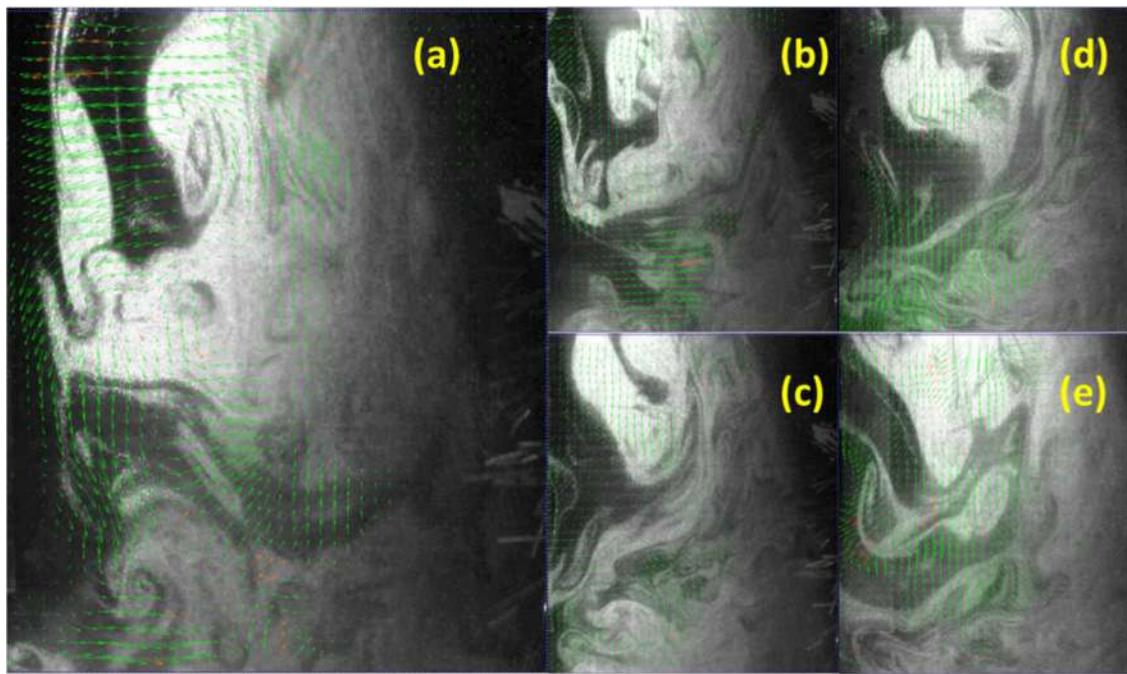


圖 20 B20L 假樹條帶上游側的水霧粒子影像與速度場。時間順序為 (a) ~ (e) , 綠色箭頭為速度向量，黑白灰階背景為水霧粒子影像。（作者自行製作）

從實驗結果可以看出，大尺度的紊流有一致性，然而紊流裂解後的小紊流則充滿凌亂的軌跡。其中大尺度紊流主要負責傳輸，而小尺度紊流則扮演加速混合的效果。對PM2.5的量測數據而言，大尺度的紊流所產生的傳輸（Advection）為主要動力機制。為觀察大尺度的紊流運動，我們透過 PIVlab 的 Summation 對紊流場做積分。圖 21 為積分後的紊流場。由圖可見，主要的流場行為呈現大尺度的逆時針旋轉紊流，此與紊流教科書中所描述的現象一致（朱佳仁，2015）。

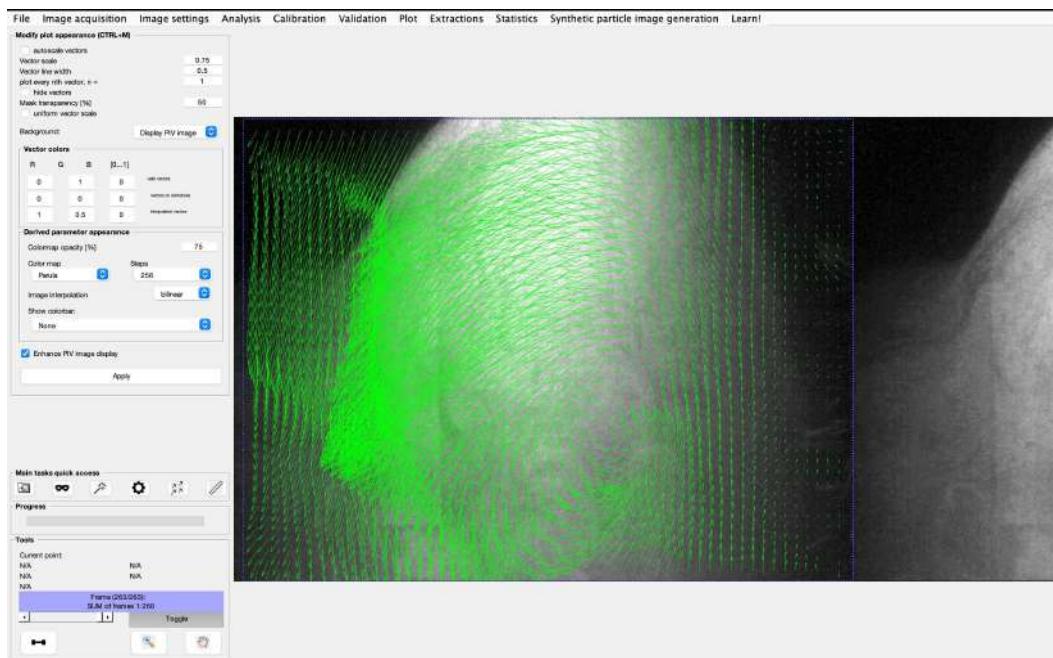


圖 21 B20L 案例，假樹條帶上游側的速度積分場。（作者自行製作）

(四) B20L 假樹條帶下游側的 EcoPIV 速度場分析

接下來我們利用 B20L 假樹條帶下游側的流場進行 EcoPIV 量測。此量測的目的主要是瞭解代表汙染物的水霧粒子，在穿透過假樹條帶後的運動行為與流速場。圖 22 為 EcoPIV 量測結果，時間順序為 (a) ~ (d)。畫面中假樹條帶位於左側，而代表建築物的空品儀則位於右側。由結果可見，代表汙染物的水霧粒子由左側大面積流入，因為水霧粒子密度較周遭空氣大，所以水霧粒子在穿透過假樹條帶後，呈現下沉型前進。在這過程中，除了水霧粒子上方與空氣接觸部分形成小漩渦之外，主體以較為均勻的速度往下游側前進，這與先前上游側的運動行為不同。當水霧粒子撞擊到代表建築物的空品儀之後，部分水霧粒子會往上運行，部分則進入到空品儀之中。這與前述的假樹條帶上游側運動行為明顯不同，進入空品儀的水霧粒子則造成空品儀 PM2.5 數值提升。

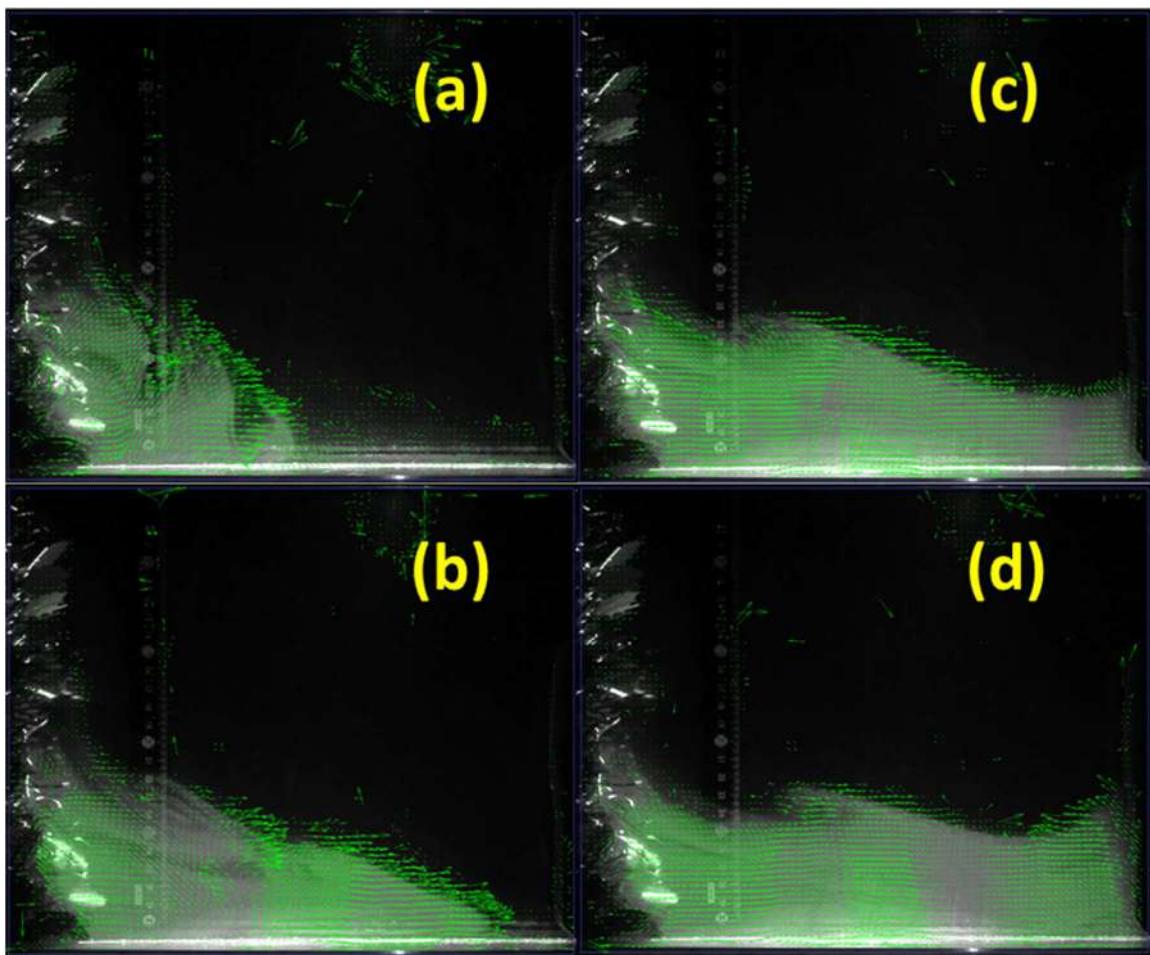


圖 22 B20L 假樹條帶下游側的水霧粒子影像與速度場。時間順序為 (a) ~ (d) ，綠色箭頭為速度向量，黑白灰階背景為水霧粒子影像。（作者自行製作）

從實驗結果可以看出，B20L 假樹條帶下游側的水霧粒子運動較其上游側均一。亦即流速大致往下游側運動，部分小漩渦則出現在水霧粒子與空氣以及水霧粒子與地板之間。

在這部分我們也將其透過 PIVlab 的 Summation 對紊流場做積分。圖 23 為積分後的紊流場。由圖可見，水霧粒子主要以水平方向朝下游移動，並且在撞擊到代表建築物的空品儀之後，朝上及朝左反射，但是漩渦不若先前位於假樹條帶上游側的漩渦大。部分水霧粒子則進入空品儀之中。

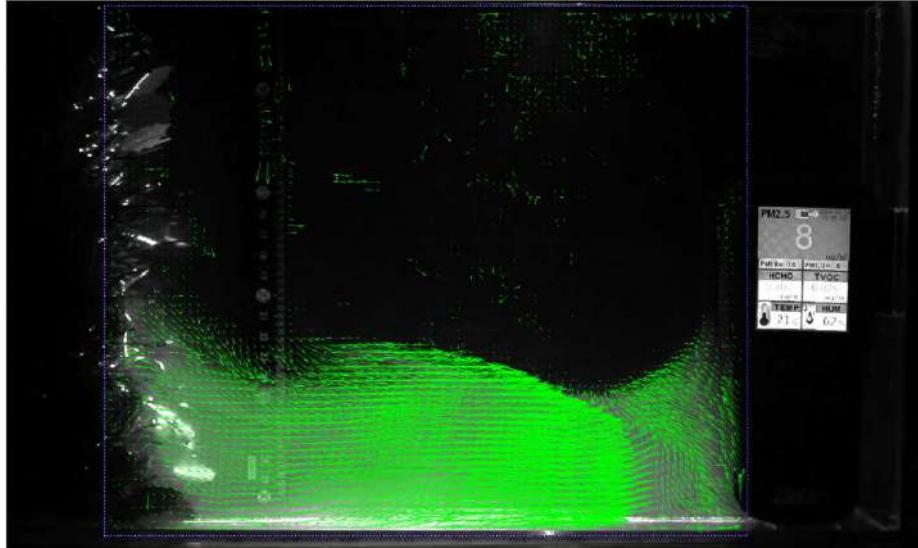


圖 23 B20L 假樹條帶下游側的速度積分場。(作者自行製作)

(五) D20L 假樹條帶下游側的 EcoPIV 速度場分析

在瞭解 B20L 水霧粒子的速度場後，接下來要探討 D20L 的案例。D20L 為濃密植被的假樹條帶為於 $X = 50\text{ cm}$ 位置，並將水霧粒子持續噴射 20 秒。與 B20L 相比，D20L 的假樹條帶緊鄰建築物，除此之外其餘條件皆相同。

與 B20L 比較，D20L 的假樹條帶上游測的水霧粒子運行為近似，皆是以大漩渦裂解成小漩渦為主。但是假樹條帶下游側的速度場則因為緊鄰建築物而與 B20L 有相當大的差異。因此我們將分析的內容著重於假樹條帶下游側的流速場。

圖 24 為 D20L 假樹條帶下游側的水霧粒子影像與速度場。假樹條帶位於畫面左側，而代表建築物的空品儀則位於右側。兩者間的距離大約為 5 cm ，將較於 B20L 的案例，此空間相當狹小。水霧粒子由畫面左方進入後即於此狹小空間內發展成紊流，並反覆與假樹條帶及代表建築物的空品儀碰撞。由於下游側空間已被空品儀佔據，因此水霧粒子只能向上發展，並在向上盤旋的過程中，一方面阻礙後續水霧粒子由假樹條帶進入，也使水霧粒子與碰撞過程中被假樹條帶吸附。

此論點亦可由圖 25 看出。圖 25 為透過 PIVlab 對速度場進行時間積分所得到的結果。水霧粒子在穿透過假樹條帶後，由畫面左下方進入此狹小空間，並在與空品儀碰撞之後向上抬升，並以左右碰撞與反彈方式移動。在碰撞過程中，不僅阻礙後續水霧粒子的進入，也因為與假樹條帶有更多的接觸而有更多的水霧粒子被吸附。

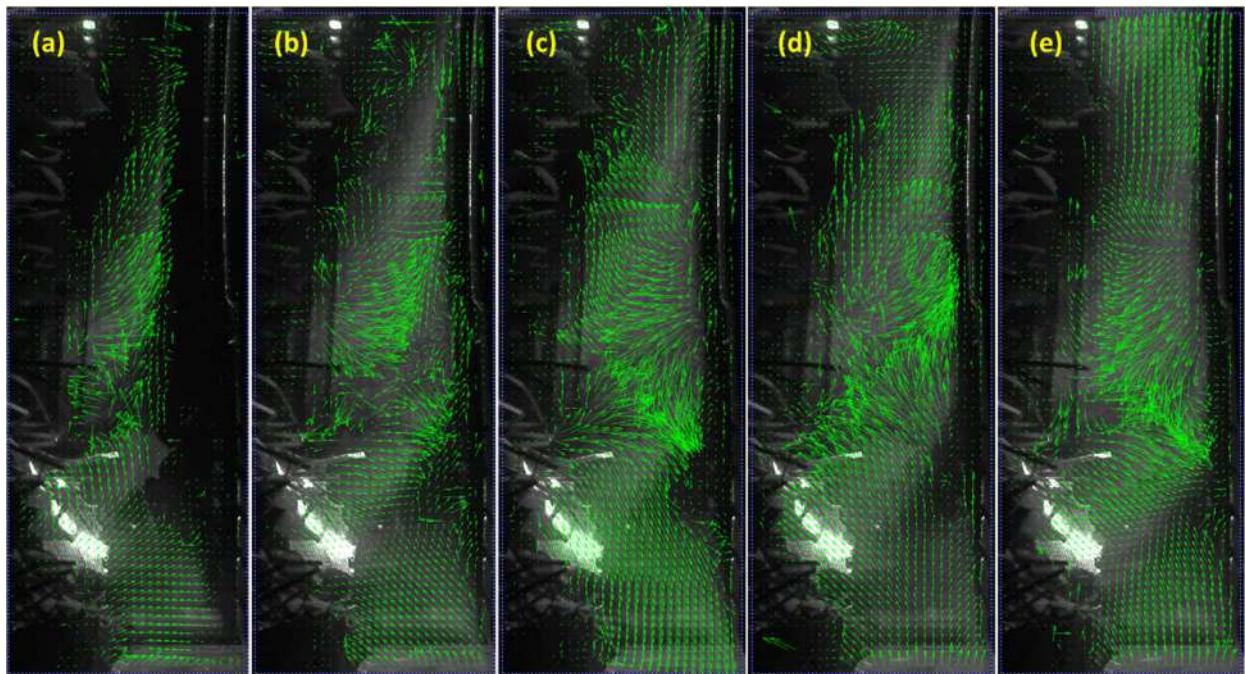


圖 24 D20L 假樹條帶下游側的水霧粒子影像與速度場。時間順序為 (a) ~ (e)，綠色箭頭為速度向量，黑白灰階背景為水霧粒子影像。(作者自行製作)

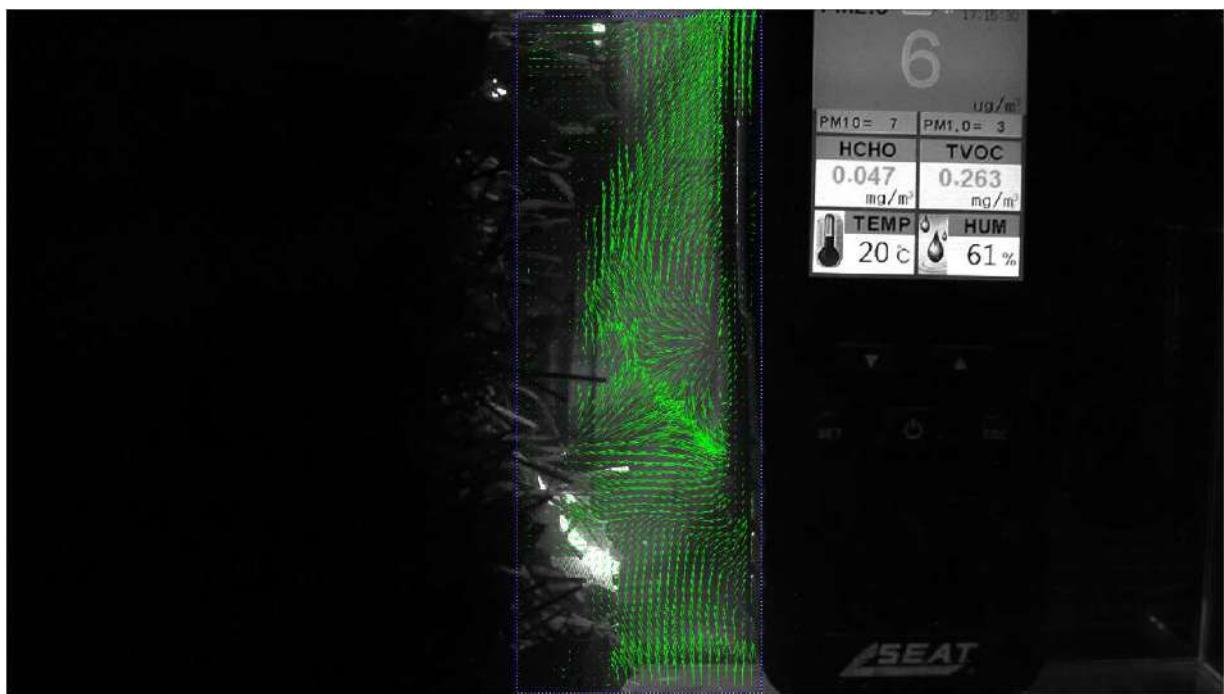


圖 25 D20L 假樹條帶下游側的速度積分場。(作者自行製作)

(六) 討論：B20L 與 D20L 行為的差異

透過 EcoPIV 系統對於 B20L 及 D20L 的流速場進行分析後，發現其在 PM2.5 數值有顯著差異的主要原因，來自於假樹條帶後方是否有建築物。B20L 的後方並未立即銜接建築物，因此由汙染源發送出來的下沉型水霧粒子在撞擊到假樹條帶後，有較大的比例穿透假樹條帶抵達下游側，並進而透過對流傳遞至代表建築物的空品儀。而 D20L 的假樹條

帶後方緊鄰建築物，因此當水霧粒子穿透過假樹條帶後，立即與空品儀碰撞，進而產生向上氣流，此氣流左右彎曲，一方面阻擋後續水霧粒子的進入，另一方面也大幅增加水霧粒子與假樹條帶接觸的機會。這樣的結果也呼應前面圖 17 看到的現象，當假樹條帶最靠近建築物的 D 位置時，對於汙染物阻隔有最好的效果。

透過以上的觀察與論述，我們可以得到下列關鍵因素：

1. 假樹條帶緊鄰建築物，將使水霧粒子穿透過假樹條帶後，立即產生碰撞與路徑彎曲，並阻礙後續水霧粒子進入。在這裡我們認為此狹小區域的壓力會提升，但此部分有待後續數值模擬與分析。

2. 水霧粒子在狹小區域中左右盤旋向上，會大幅度增加水霧粒子與假樹條帶吸附的機會，進而使水霧粒子的 PM2.5 下降。

陸、討論

一、橫置型假樹條帶實驗

以上的綠樹植被皆以垂直栽植為主，並探討下沉型汙染源的運動。

臺灣因為綠樹與濕地遍佈，特別是以低矮灌木型態為主的紅樹林濕地，是否應該會對於下沉型的汙染物也有很好的阻隔作用？

紅樹林是潮間帶重要的藍碳生態系統，對全球碳循環扮演著關鍵角色。其獨特的根系與高生產力，使其不僅能吸收大氣中的二氣化碳，還能將碳長期儲存在地下沉積物中，形成穩定的碳庫 (Donato et al., 2011)。而下沉型汙染物在紅樹林中穿梭，我們預期應該會有很好的空汙阻隔效果。

但是弔詭的是，我們在學校老師的引薦之下，有機會與泰國皇室科研人員進行國際間區域空汙問題的討論，卻得到很不一樣的訊息。經過交流，我們瞭解到新加坡長期受到印尼焚燒農地所引發的跨境汙染所困擾 (Reuters, 2023, October 7)。然而在新加坡與印尼汙染源之間就有大範圍的紅樹林。很明顯地，這大範圍的紅樹林對於空氣汙染阻隔並沒有明顯效果。為何是這樣呢？

為此，我們額外做了一組實驗，在這組實驗中，我們將濃密型假樹條帶橫置於底部。位置由 $x = 20\text{ cm}$ 至 $x = 45\text{ cm}$ 。水霧粒子發送時間為 5、10、15、20、30 秒，我們亦針對 20 秒的情境進行細部 EcoPIV 量測，以利此一系列的討論與分析。這組實驗的代號為 E20L，代表水平橫置，水霧粒子發送 20 秒，且為濃密植被。

我們的論點為水平橫置的假樹條帶，因為水霧粒子必須在假樹條帶中進行較長距離

的飄移，所以對於下沉型的水霧粒子會有很好的阻隔效果。但是結果有點出乎意料，請看實驗結果與分析。

圖 26 為假樹條帶水平橫置的 PM2.5 時序歷線圖。由圖中可以看出 E05L~E30L 的假樹條帶皆很高效率的空汙阻隔效果。然而 E20L 以上，PM2.5 的阻隔效率卻急速下降。

為探討此一特殊現象，我們針對 E20L 進行 EcoPIV 量測。

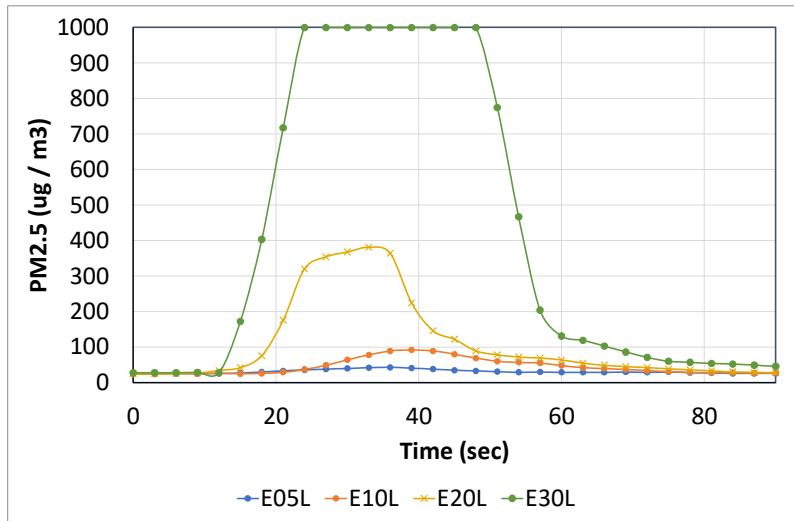


圖 26 假樹條帶水平橫置的 PM2.5 時間歷程。圖中顯示濃密植被條件下 PM2.5 的時序歷線，色彩線條代表不同的水霧粒子發送時間。(作者自行製作)

二、E20L 之 EcoPIV 速度場比較與分析

目前主要癥結點在於為何當水霧粒子噴發時間大於 20 秒之後，PM2.5 的數據即快速上升。圖 27 為 E20L 假樹條帶的水霧粒子影像與速度場。假樹條帶位於畫面底部偏右，而代表建築物的空品儀則為於右側畫面之外。由速度向量的發展可看出，水霧粒子由畫面左下方進入後，與水平橫置的假樹條帶發生接觸，並迅速發展出類似邊界層的氣流，使後續的水霧粒子得以攀爬至假樹條帶頂部，並迅速往下游方移動。也就是說水霧粒子進入到假樹條帶內，其 PM2.5 的數值將會降低許多。然而，當假樹條帶中的水霧粒子達飽和時，水霧粒子由於無法繼續進入假樹條帶，因此會向上爬升，並且在爬升後於假樹條帶邊緣形成類似邊界層的光滑界面。此光滑界面會導引水霧粒子往下游移動。由於光滑界面的緣故，假樹條帶上方的流速因為承受較小的摩擦力，因此可以有效率地往下游移動。

這部分的論述可以從圖 28 的 E20L 看出。透過 PIVlab 對速度場進行時間積分所得到的結果。圖中可見代表汙染物的水霧粒子在撞擊至水平橫置的假樹條帶後，部分水霧粒子往上及往左移動，並且在假樹條帶上方形成類似邊界層的效應，使得假樹條帶上方的流速因為阻力減小而快速移動。

三、假樹條帶的效果與限制分析

綜上所述，水平橫置的假樹條帶對於下沉型的汙染源阻隔有其良好效果。然而若汙染量達到飽和，汙染物將在假樹條帶外緣形成邊界層，使得水霧粒子與假樹條帶間的阻力降低，並加速其上方的氣流流速。這結果可以解釋為何新加坡與印尼之間雖有大面積紅樹林，卻無法有效阻隔空汙的傳遞。

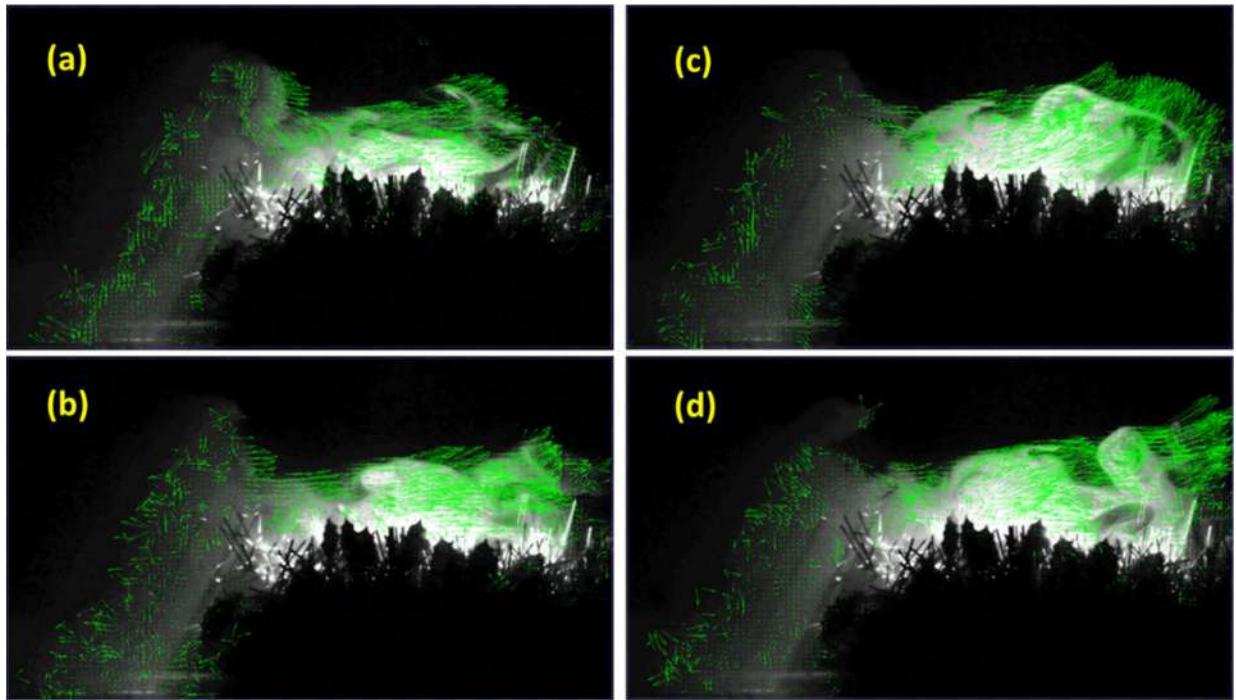


圖 27 E20L 假樹條帶的水霧粒子影像與速度場。時間順序為 (a) ~ (d)，綠色箭頭為速度向量，黑白灰階背景為水霧粒子影像。(作者自行製作)

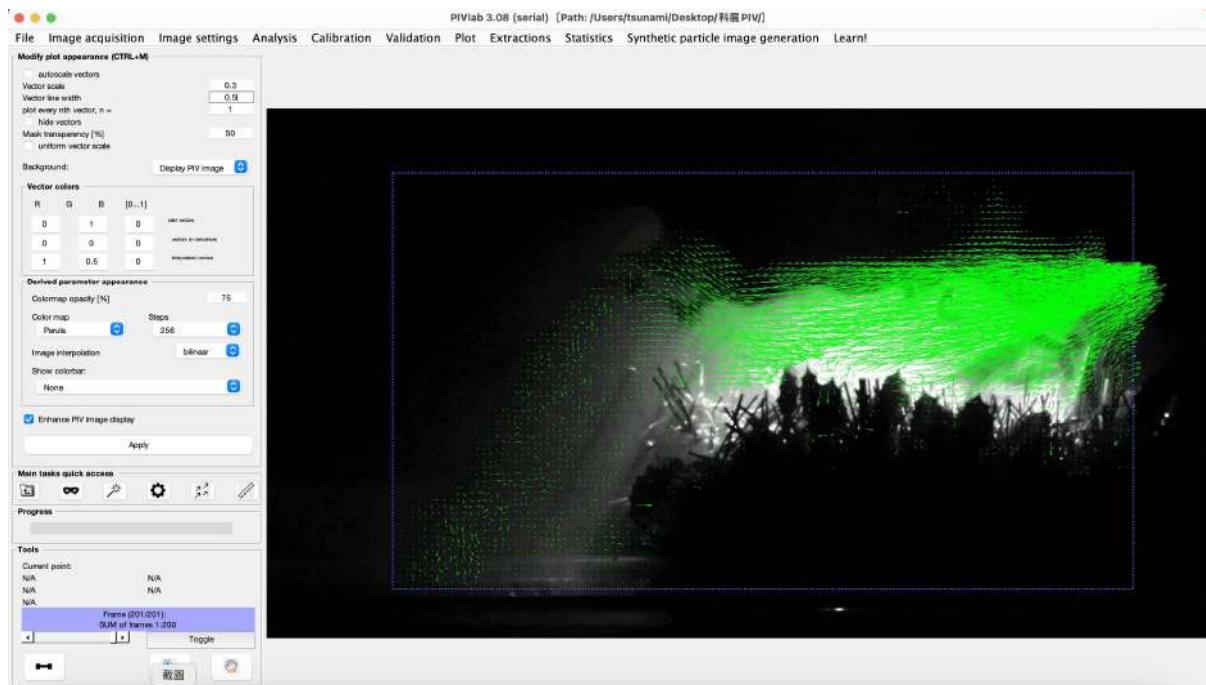


圖 28 E20L 水平橫置型的假樹條帶的速度積分場。(作者自行製作)

四、數值模擬初步結果

在經過一系列的實驗後，我們瞭解到實驗在邊界條件以及量測上有其侷限。相對於實驗室實驗，透過電腦數值模擬（Computational Fluid Dynamics, CFD）可獲得更完整的數據。因此我們在進入全國賽之後，開始著手進行數值模擬。透過高強度的密集學習，我們的數值模式有了初步的結果。

所採用的數值模式名稱為 Truchas，是由 Los Alamos 美國國家實驗室所發展。類似高中物理所學，該模式也是求解 Navier-Stokes 動量方程式與不可壓縮流連續方程式，來預測流速場及壓力場。以及利用流體體積分率 (Volume of Fraction, VOF) 方程式來預測 VOF 場。其中 VOF 表示水霧粒子在每個數值網格中所佔的體積百分比，也就是高中物理和化學所學到的體積百分比濃度，這結果可用於比對實驗所拍攝到的水霧粒子分布。

在紊流模型部分，採用大渦模擬 (LES) 模型。在假樹條帶部分，採用部分網格法 (PCT) 搭配孔隙阻力來達成。數值設置完全仿照實驗設置，計算域長 70 cm、寬 5 cm、高 25 cm，網格解析度為 0.25 cm。在邊界條件方面，上游側依照實驗設置，設定為局部入流。根據 EcoPIV 之量測結果，設定入流流速為 0.25 m/s，天花板側為開放邊界，地板為非滑動邊界。計算在筆記型電腦上完成，CPU 為 12th Gen Intel(R) Core(TM) i7-1260P，2.10 GHz、記憶體為 8GB、個案模擬時間約需 2 小時。

目前初步完成五組模擬，分別為 A20L、B20L、C20L、D20L、E40L。結果繪製採用隨附的 GMV 軟體繪製。結果展現於（圖 29）與（圖 30）。圖 29 為水霧體積分率。圖中明顯可見，A20L~D20L，其汙染物濃度在抵達下游空品儀時有穩定下降的趨勢。且在 D20L 中，汙染物尚未抵達假樹條帶區即已開始擴散，受下游側的空品儀阻擋，使氣流減緩。

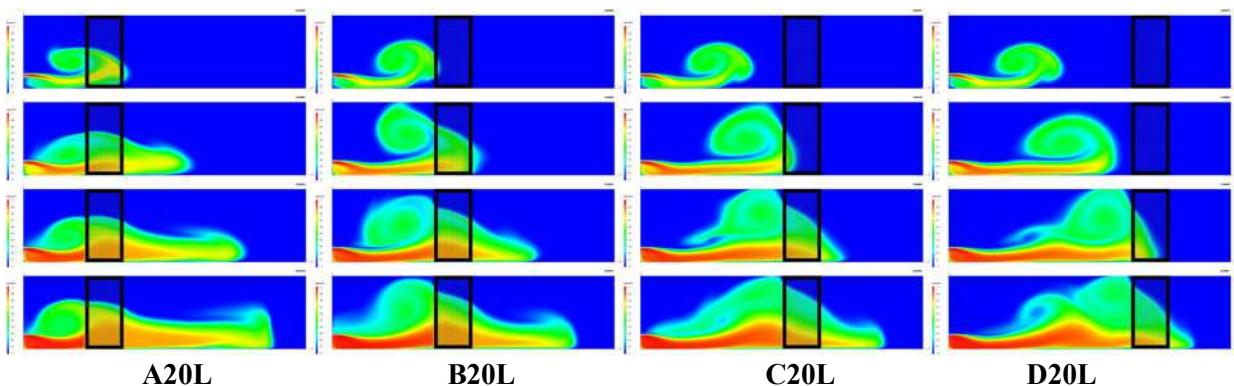


圖 29 數值模擬結果的水霧體積分率 (VOF)，色階為 0.0 ~ 1.0。橫軸與縱軸分別為水平與垂直距離，單位為公分。左行至右行分別為 A20L、B20L、C20L、D20L。上列至下列分別為 $t = 5$ 、 10 、 15 、 20 s。黑框為假樹條帶區域。（作者自行製作）

在圖 30 中可見，E40L 在 30 秒後，假樹條帶內的水霧 VOF 值大幅提升，並迫使後

續的水霧氣流爬升至假樹條帶之上。之後透過所形成的類邊界層，快速向下游傳遞。從第三組水平速度 u 的圖可以看出，在第 20~30 秒的圖中，流速 u 難以再進入假樹條帶區，此時假樹條帶上方的高速 u 接近發展完成，並且於大約第 30~40 秒後穩定存在。

以上模擬結果與 EcoPIV 量測結果相當吻合，包括汙染物阻擋效率的距離趨勢，以及橫置型假樹條帶對空汙阻擋效果為先盛後衰等，也再次支持先前對空汙阻隔的假說與實驗結果。

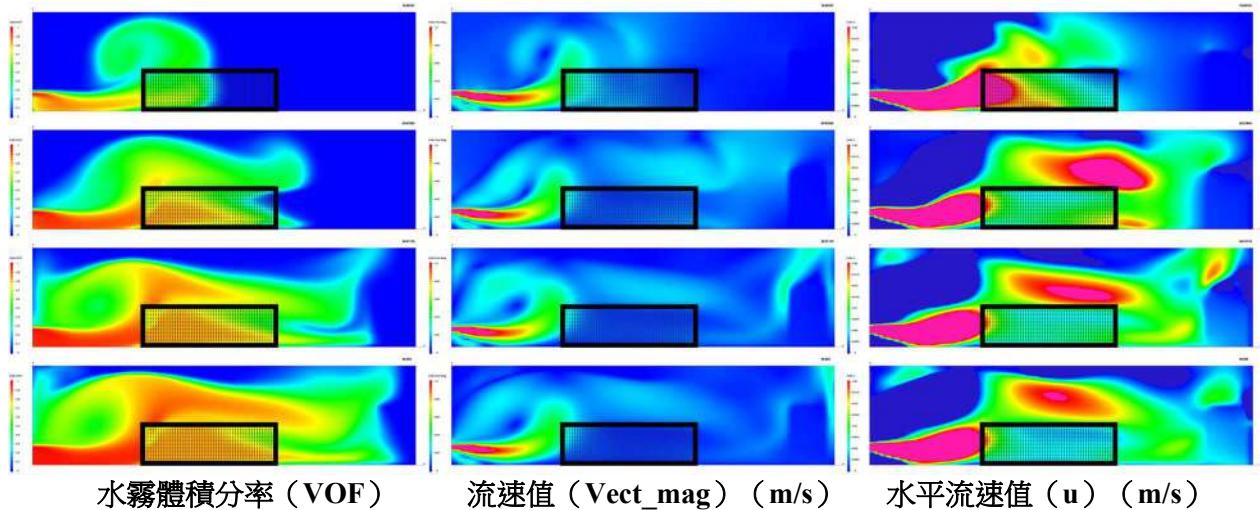


圖 30 E40L 的數值模擬結果。左行至右行分別為 (1) 水霧體積分率 (VOF) ，色階為 0.0 ~ 1.0 、 (2) 流速值場 (Vect_mag) ，色階為 0.0 ~ 0.1 m/s 、及 (3) 水平流速值 (u) ，色階為 0.0 ~ 0.02 m/s 。橫軸與縱軸分別為水平與垂直距離，單位為公分。上列至下列分別為 $t = 10$ 、 20 、 30 、 40 s 。黑框為橫置型假樹條帶區域。（作者自行製作）

柒、結論與未來展望

一、結論

本研究探討綠樹植被種植位置及其疏密程度對於空氣汙染阻隔的效果。我們自製小型風洞，透過可穩定重複噴發的噴霧器做為假想的汙染源，以假樹條帶來代表綠樹植被，並利用空品儀代表建築物以及記錄 PM2.5 的時序資料，反覆確認實驗的可重複性。

研究結果顯示，濃密植被較稀疏植被有更好的空氣汙染阻隔效果。更重要也是本文的重點之一，我們將假樹條帶置於最靠近建築物的位置時，發現其對空氣汙染阻隔效果有明顯提升。

為了瞭解為何假樹條帶應該要種植於靠近建築物，我們設計 EcoPIV 法。該法結合強光雷射與玻璃棒，讓原本單束的雷射光折射成扁平的雷射光頁。此雷射光頁也可以激發水霧粒子形成氣流剖面，再透過可手動對焦的相機，記錄雷射光頁中水霧粒子運動的影片。最後，將影片導入 Matlab 中的 PIVlab，分析水霧粒子的運動行為，進而產生流速場。

相較於 150 萬至 600 萬的 PIV，EcoPIV 成本低廉，且容易操作。而本套價格低廉且實用性高的 EcoPIV 系統，很適合推廣至校園，嘉惠更多對地球科學或流體動力學有興趣的老師和同學。

我們以濃密植被及水霧粒子發射 20 秒的情境為討論對象。當假樹條帶位於中間位置 ($x = 30\text{ cm}$) 時 (B20L)，水霧粒子氣流會在假樹條帶上游側形成一大漩渦。而部分水霧粒子則會穿透過假樹條帶，往下游移動，並造成空品儀 PM2.5 數據提高。相較於 B20L，D20L 因為緊鄰建築物，因此在氣流遭受建築物阻擋的效應下，氣流迅速往上攀升，並蜿蜒而上，這將會產生兩個重要動力機制，其一為假樹條帶中的水霧粒子氣流因為反覆受到下游側水霧粒子撞擊，因此後續的水霧粒子較不容易穿透過假樹條帶。另一方面，水霧粒子氣流不斷與假樹條帶碰撞，使得假樹條帶吸附能力增強，進而減少 PM2.5 的濃度。

之後，我們額外對水平橫置的假樹條帶進行分析。分析結果發現，水平橫置的假樹條帶對於下沉型空汙氣流有很好的阻隔效果。然而其阻隔力是有限的。當水霧粒子在假樹條帶中達到飽和，水霧粒子氣流會向上攀爬越過水平橫置的假樹條帶，並在其交界處形成一層類似邊界層的界面。而後續的水霧粒子氣流，會隨著氣流傳遞至下游。在此汙染量較高的情境下，假樹條帶對於空氣汙染阻隔效應反而偏低。

最後，我們進行初步的數值模擬。模擬結果顯示，假樹條帶越接近汙染源，對於建築物的空汙阻隔效果越差。反之，越靠近建築物，空汙阻隔效果越佳。這與實驗結果相當一致。

最後總結四項對政府的建議：

1. 行道樹盡可能種植於靠近住宅區並盡量遠離汙染源之處。
2. 行道樹盡可能選擇枝葉較為濃密的樹種。
3. 在行道樹下方種植濃密的灌木叢。
4. 在學校部分，可以在近教學區大樓旁多植栽綠樹，增進防制 PM2.5 的效益。

二、未來展望

在本次研究當中，我們發現影響空氣汙染的因素很多，包括距離、樹型、街道、氣流方向、氣流流速等，都會對汙染物的傳遞有所影響。在本研究中，我們固定其他變因，僅針對綠樹植被與汙染物距離進行分析，並且透過 EcoPIV 對於流速場的描述，瞭解為何越接近建築物時空汙阻隔效果越好，也瞭解到紅樹林對於汙染物阻隔所呈現兩極化的結果。但是我們也瞭解，目前結果僅是距離與趨勢方面的縮尺分析，現場實際情況遠較理想實驗複雜。因此我們希望未來能更加深入學習使用數值模式，並且進行實物大小的模擬，並探討其他因子，如樹型、氣流方向與流速方面的深入分析。

捌、參考文獻資料

- 全華. (2024). 選修地球科學 (大氣、海洋、天文). 臺北市: 全華出版事業股份有限公司.
- 朱佳仁. (2015). 環境流體力學 (第二版). 台北市: 科技圖書.
- 徐吟絢. (2024). *樹木吸收都會區空氣汙染物之健康效益評估* (碩士論文). 國立臺北科技大學, 臺灣博碩士論文知識加值系統. 取自 <https://hdl.handle.net/11296/543sh8>
- 柳仲恩. (2023). *粒子影像測速技術開發—窗口偏移法之應用* (碩士論文). 淡江大學。華藝線上圖書館。<https://doi.org/10.6846/tku202300267>
- 翰林. (2021). 高一物理. 臺南市: 翰林出版事業股份有限公司.
- 翰林. (2022). 高級中學數學 A 上冊. 臺南市: 翰林出版事業股份有限公司.
- 環境部. (2024). 112 年空氣品質監測年報. 取自 <https://www.moenv.gov.tw/DisplayFile.aspx?FileID=52034F4FCF901C1C>
- 環境部. (2024). 未來一週空品圖卡. 空氣品質專家 [Online image]. 環境部空氣品質監測網. <https://airtw.moenv.gov.tw/CHT/NewsDetail.aspx?type=空品說明&startDate=2024/01/12&title=113 年 1 月 13 日至 113 年 1 月 18 日空氣品質預報>
- Abhijith, K. V., Kumar, P., Gallagher, J., McNabola, A., Baldauf, R., Pilla, F., Broderick, B., Di Sabatino, S., & Pulvirenti, B. (2017). *Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments – A review*. *Atmospheric Environment*, 162, 71–86. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.05.014>
- Donato, D. C., Kauffman, J. B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M., & Kanninen, M. (2011). *Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics*. *Nature Geoscience*, 4(5), 293–297. <https://doi.org/10.1038/ngeo1123>
- Gromke, C., Buccolieri, R., Di Sabatino, S., & Ruck, B. (2008). *Dispersion study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and numerical investigations—Evaluation of CFD data with experimental data*. *Atmospheric Environment*, 42(36), 8640–8650. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.08.019>
- Janhäll, S. (2015). *Review on urban vegetation and particle air pollution – Deposition and dispersion*. *Atmospheric Environment*, 105, 130–137. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.052>
- Kim, Y. S., & Lee, C. K. (2017). *Development of an ultrasonic humidifier using a piezoelectric transducer*. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31(8), 3973–3979. <https://doi.org/10.1007/s12206-017-0749-9>
- Morakinyo, T. E., & Lam, Y. F. (2016). *Simulation study of dispersion and removal of particulate matter from traffic by road-side vegetation barrier*. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(7), 6681–6693. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5839-y>
- Reuters. (2023, October 7). *Haze hits Singapore as hot spots in Indonesia's Sumatra increase*. Reuters. <https://www.reuters.com/business/environment/haze-hits-singapore-hot-spots-sumatra-increases-2023-10-07/>
- United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*. United Nations. <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- Wikipedia contributors. (2021). *Soda-lime glass*. Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Soda%20lime_glass

【評語】051910

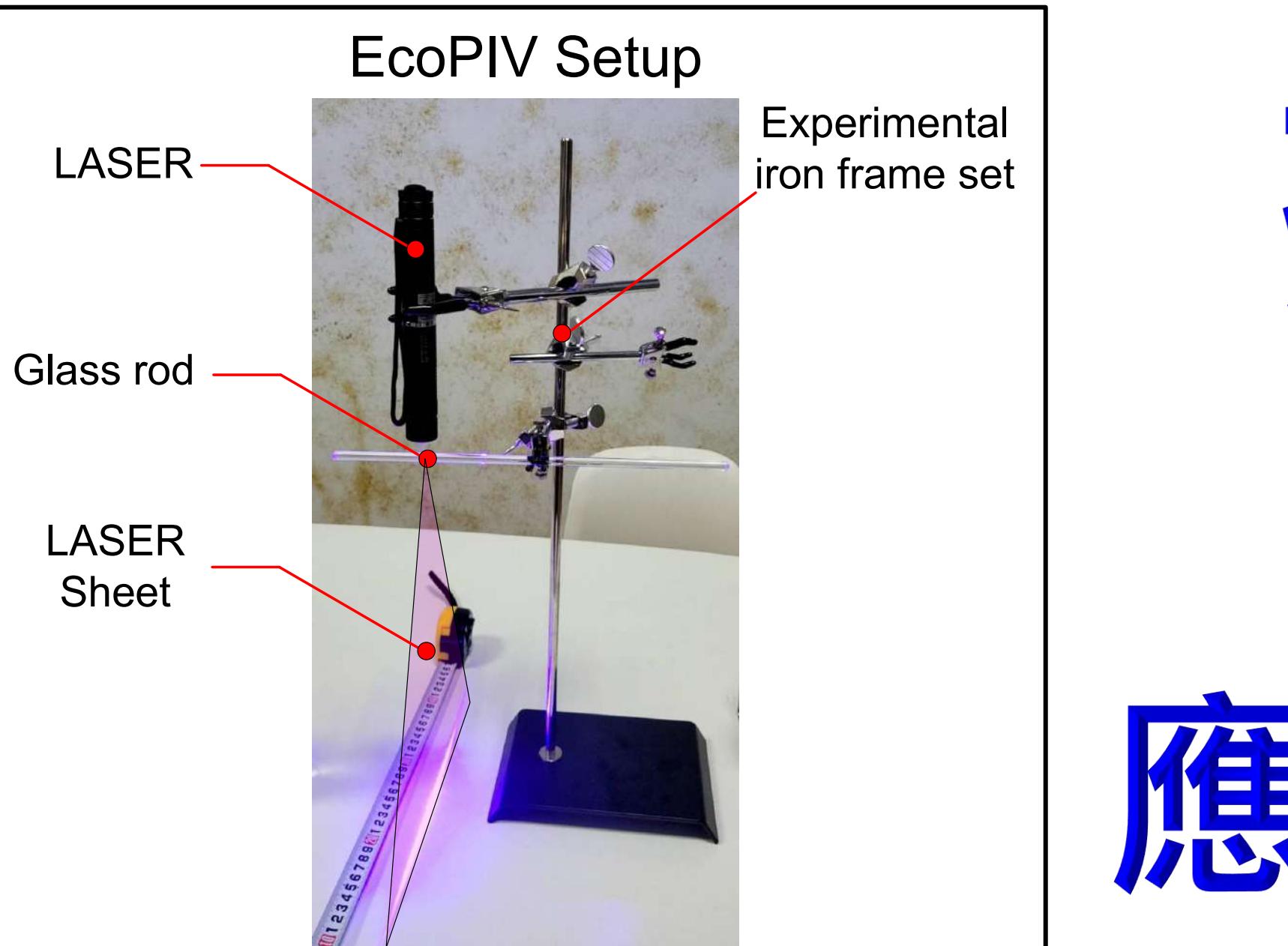
本研究以風洞實驗探討植被對空汙阻隔的效果與動力機制，並分析植被靠近建築物時，攔汙效果最佳之可能因數。本研究創新提出經濟型粒子影像測速法 (EcoPIV)，透過強光雷射、折射理論及相關係數法，成功以低成本量測風洞中的流速場。結果顯示，當植被緊鄰建物時，由於建築物的阻擋，會使流體反覆在綠樹帶中穿梭，不僅阻礙後續汙染物進入，也使其滯留於植被中。該研究亦分析紅樹林對於空汙阻隔的優勢及限制，發現低矮紅樹林對於下沉型汙染物具極佳阻隔效果，但當汙染物超過負荷門檻時，EcoPIV 顯示，紅樹林邊緣會產生類邊界層，反而使得汙染物更有效率地傳遞至下游處。此外，數值模擬結果，汙染物濃度與實驗相當一致。

作者創新提出經濟型粒子影像測速法 (EcoPIV) 進行實驗，值得讚許。值得注意，植被下游有建築物阻擋氣流，而紅樹林則無，兩者差異似乎說明氣流因數應予探討。倘若長期大量空汙接近緊鄰建物之植被，是否有累積空汙之可能，而形成反效果。

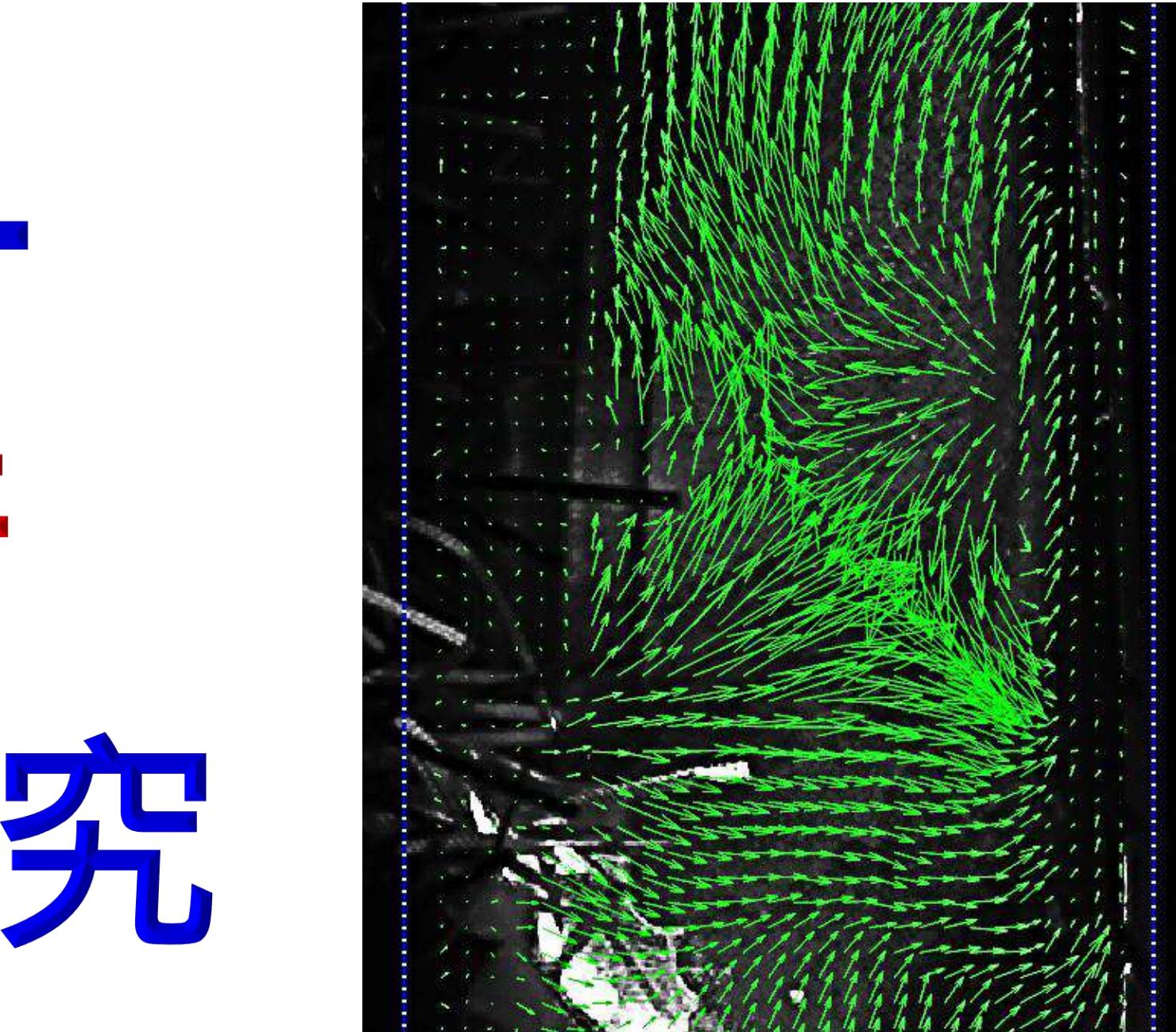
目前分析結果以流線圖與粒子分布視覺化為主，若能進一步量化特定流場參數(如平均流速、紊流強度、渦量分布等)，並加

入統計分析與誤差評估，可使資料更具科學深度與比較價值。建議未來可嘗試提升光源均勻度、改用高頻率手機攝影或工業級攝影模組，進一步優化影像辨識品質。現有模擬障礙物雖具實驗對照性，但建議未來可考慮模擬實際街區建築、都市風場或特定環境條件(如交叉氣流、地形遮蔽)等複合因素，讓研究成果更貼近政策推動或城市規劃中的實際需求。

作品海報



攔截PM2.5- 自創EcoPIV技術 應用於空汙阻隔研究

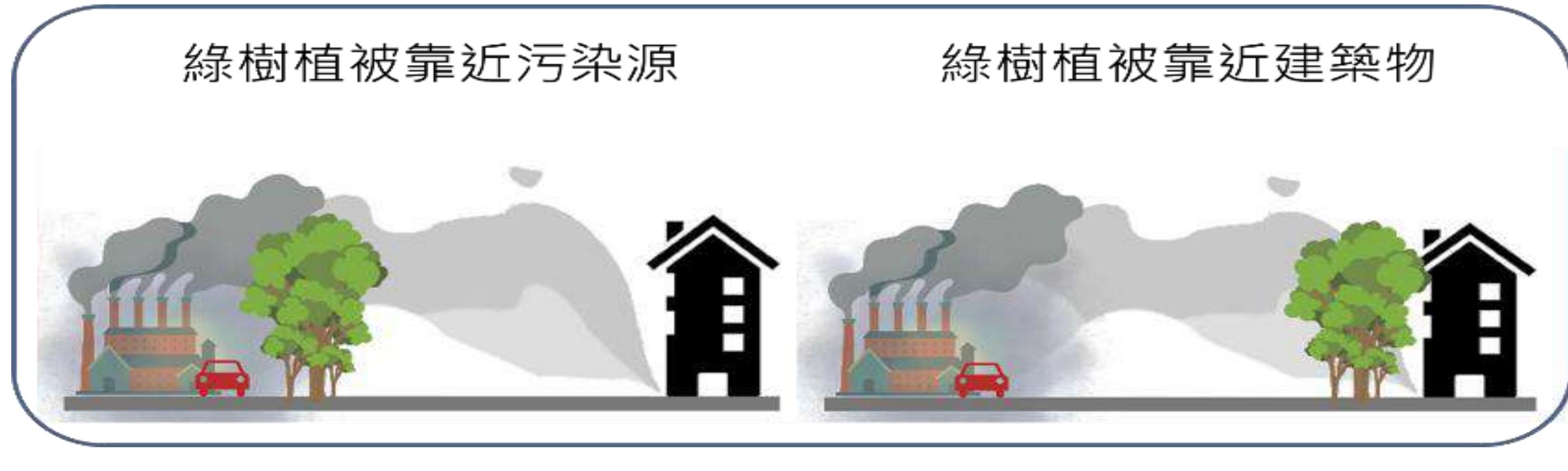
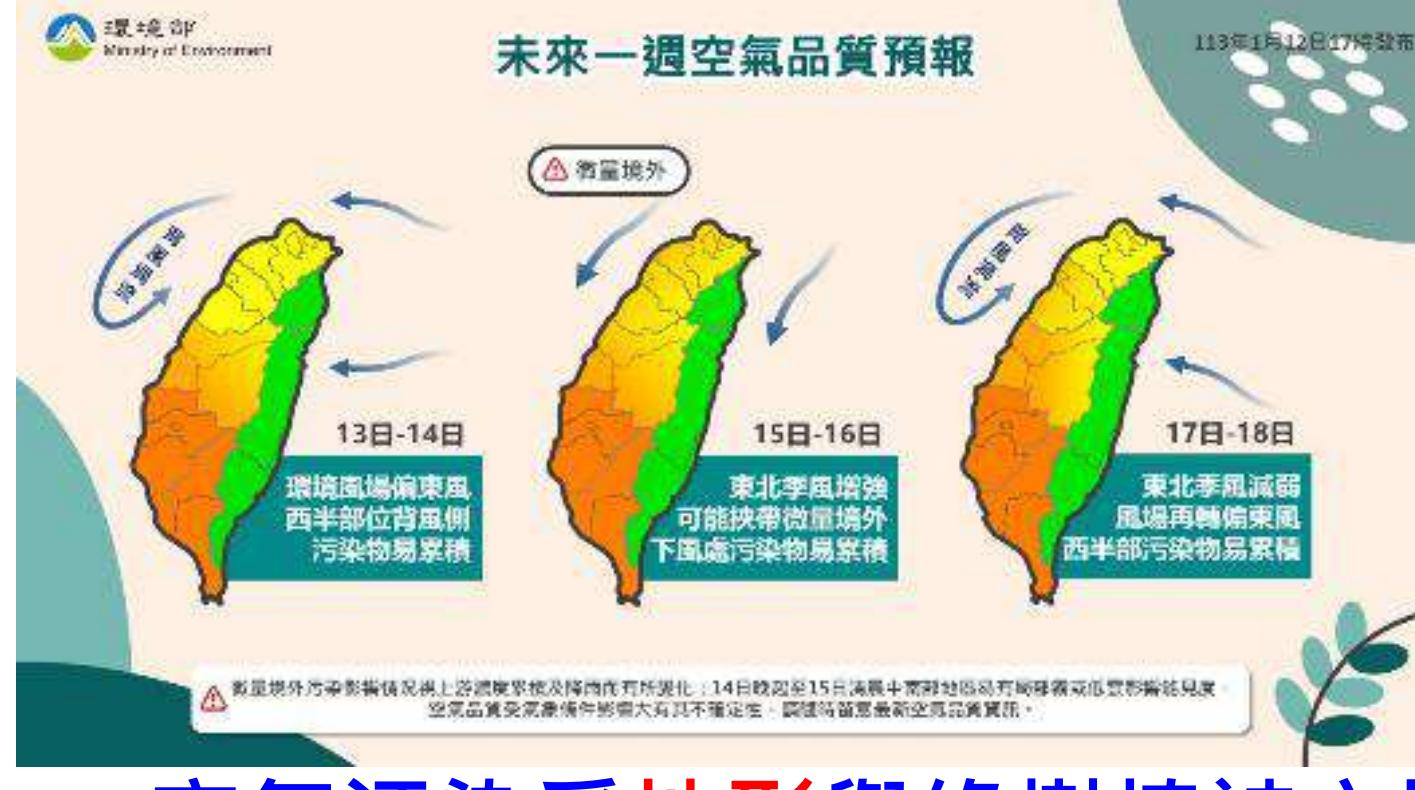


摘要

本研究以風洞實驗探討植被對空汙阻隔的效果與動力機制，並分析為何植被靠近建築物時，攔汙效果最佳？本研究創
新提出經濟型粒子影像測速法 (EcoPIV)，透過強光雷射、折射理論及相關係數法，成功以低成本量測風洞中的流速場。
結果顯示，當植被緊鄰建物時，由於建築物的阻擋，會使流體反覆在綠樹帶中穿梭，不僅阻礙後續汙染物進入，也使其滯
留於植被中。本研究亦分析紅樹林對於空汙阻隔的優勢及限制，發現低矮紅樹林對於下沉型汙染物具極佳阻隔效果，但當
汙染物超過負荷門檻時，EcoPIV顯示，紅樹林邊緣會產生類邊界層，反而使得汙染物更有效率地傳遞至下游處。文末展現
數值模擬結果，汙染物濃度與實驗相當一致。本研究成果可作為政府規劃行道樹配置之原則。

研究動機

永續發展是全球關注的議題，聯合國 SDG 3 (健康福祉) 與 SDG 11 (永續城市) 皆強調 PM2.5 對健康的影響 (United Nations, 2015)。空汙與流體力學密切相關，風速、風向、地形與綠樹植被是決定汙染物傳播的關鍵因素。過去研究多探討植被對都市空汙的影響，但對植被種植『位置』的影響仍缺乏深入研究，這激發我們想要探索綠樹植被配置與空氣品質的關聯。



空氣汙染受地形與綠樹植被之影響。（左）空氣汙染受臺灣地形之影響（環境部，2024）；
(右) 綠樹植被靠近哪一側，對於空氣汙染阻隔效果比較好？（作者自行製作）

文獻回顧

為改善空氣品質，學者提出種植綠樹與濕地紅樹林等自然解決方案，以阻隔與吸收汙染物（徐吟絹，2024）。Gromke 等人 (2008) 與 Kim & Lee (2017) 透過專業風洞模擬發現，在都市街道中不當的植樹配置，可能阻斷通風通道，反而導致汙染物滯留。Morakinyo & Lam (2017) 與 Abhijith et al. (2017) 更指出，植被的淨汙效果與位置、密度、街道幾何等因素相關並呼籲應進行更多具可控性、可視化的微尺度實驗。然而，這些研究仰賴高成本的雷射 PIV (Particle Image Velocimetry)，難以被廣泛應用。

假說 Hypothesis & 研究目標

PM2.5濃度的上升主要受空氣流動傳輸 (advection) 影響，因此降低空氣汙染物的關鍵在於有效阻隔其傳輸，而綠樹植被種植位置在此過程中會扮演重要角色。

受到口罩的啟發，本研究提出兩個初始假設：

1. 綠樹植被的位置將對汙染物阻隔會有明顯影響。
2. 當綠樹植被緊鄰住宅建築物時，有最佳的空汙阻隔效果。

我們設定以下3個研究目標：

1. 分析綠樹植被位置對汙染物阻隔的影響。
2. 分析綠樹植被濃密程度對於PM2.5傳遞的影響。
3. 瞭解汙染物傳遞及阻隔的空氣動力機制與原因。

風洞實驗

為探討綠樹植被對汙染物阻擋的影響，我們在實驗中簡化樹形為均勻長條狀，並縮小風洞寬度，使汙染物擴散趨近二維環境。此外，將「汙染物釋放」簡化為「水霧粒子單點噴射」，以減少變數並提高可重複性。然而，這種方法有其適用範圍，解釋結果時須謹慎考量。基於此條件，我們設計風洞。風洞左側為開放邊界，放置超音波噴霧器產生細小水霧粒子，模擬空氣中的汙染物。噴霧器噴口對齊風洞左側，定義為 $x = 0$ cm；其距離底面 5 cm，定義為 $y = 5$ cm，並作為後續無因次分析的參考長度，以比較不同規模的實驗結果，探討其在現實環境的應用（朱佳仁，2015）。

控制變因

• 假樹條帶的位置

假樹條帶分別設置在 $x = 20, 30, 40, 50$ cm。（如下圖）

• 綠樹植被的濃密程度

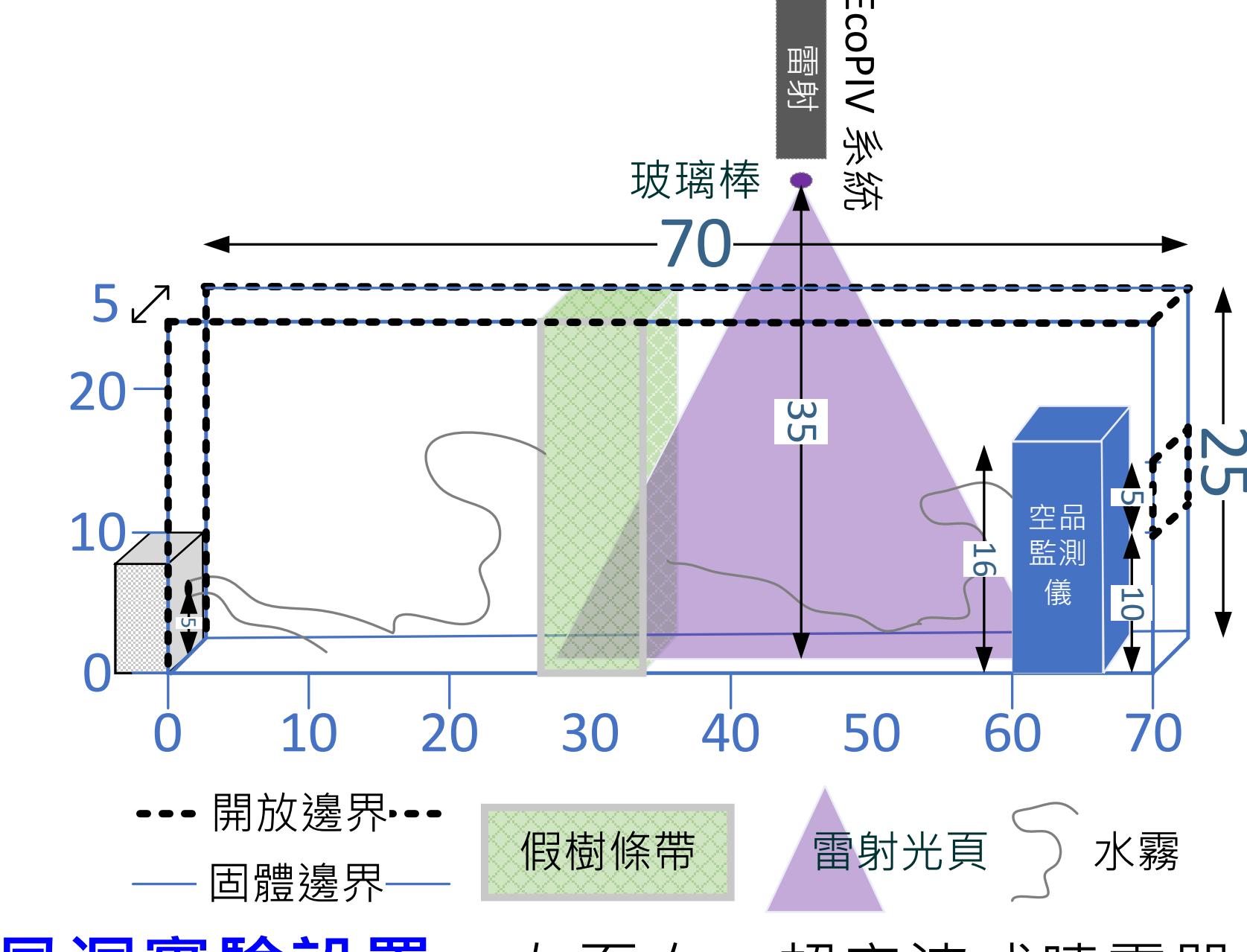
假樹條帶的密度由折疊次數決定：

高密度 (Lush) 使用 100 cm 假樹條帶對折兩次；

低密度 (Sparse) 使用 50 cm 假樹條帶對折一次。

• 噴霧器的發送時間長度

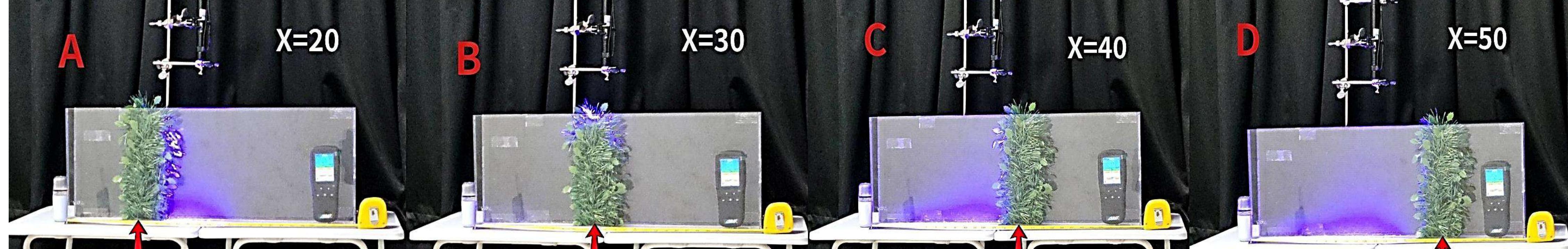
透過不同發送時間分析汙染物穿過植被後的 PM2.5 數值。



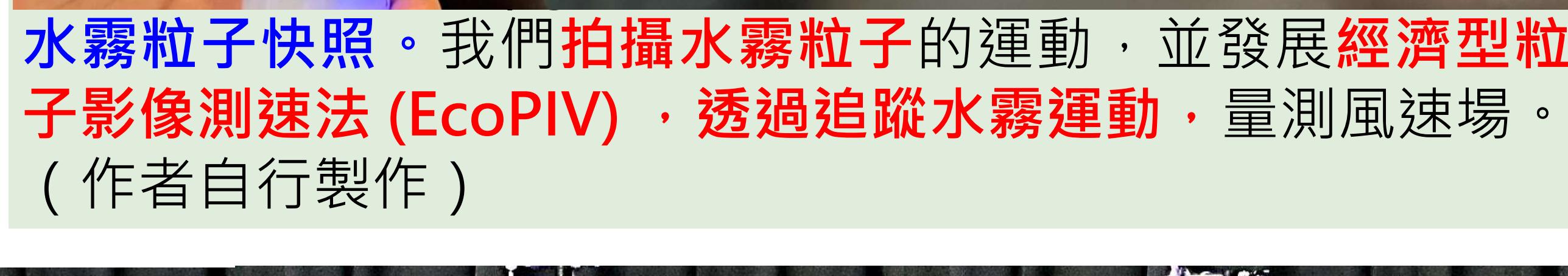
風洞實驗設置。左至右：超音波式噴霧器、假樹條帶、EcoPIV系統、空品儀。（作者自行製作）



實驗過程快照。噴霧器由風洞左側噴入水霧粒子，空品儀顯示PM2.5數值，右側放置計時器，記錄PM2.5隨時間的變化。（作者自行製作）



假樹條帶與汙染源的距離與代號：A : 20 cm, B : 30 cm, C : 40 cm, D : 50 cm。圖中紫色泛光為被雷射光頁激發的水霧粒子。本研究實驗均進行4~6次，並採用「趨同數據法」，擇一為代表數據。（作者自行製作）

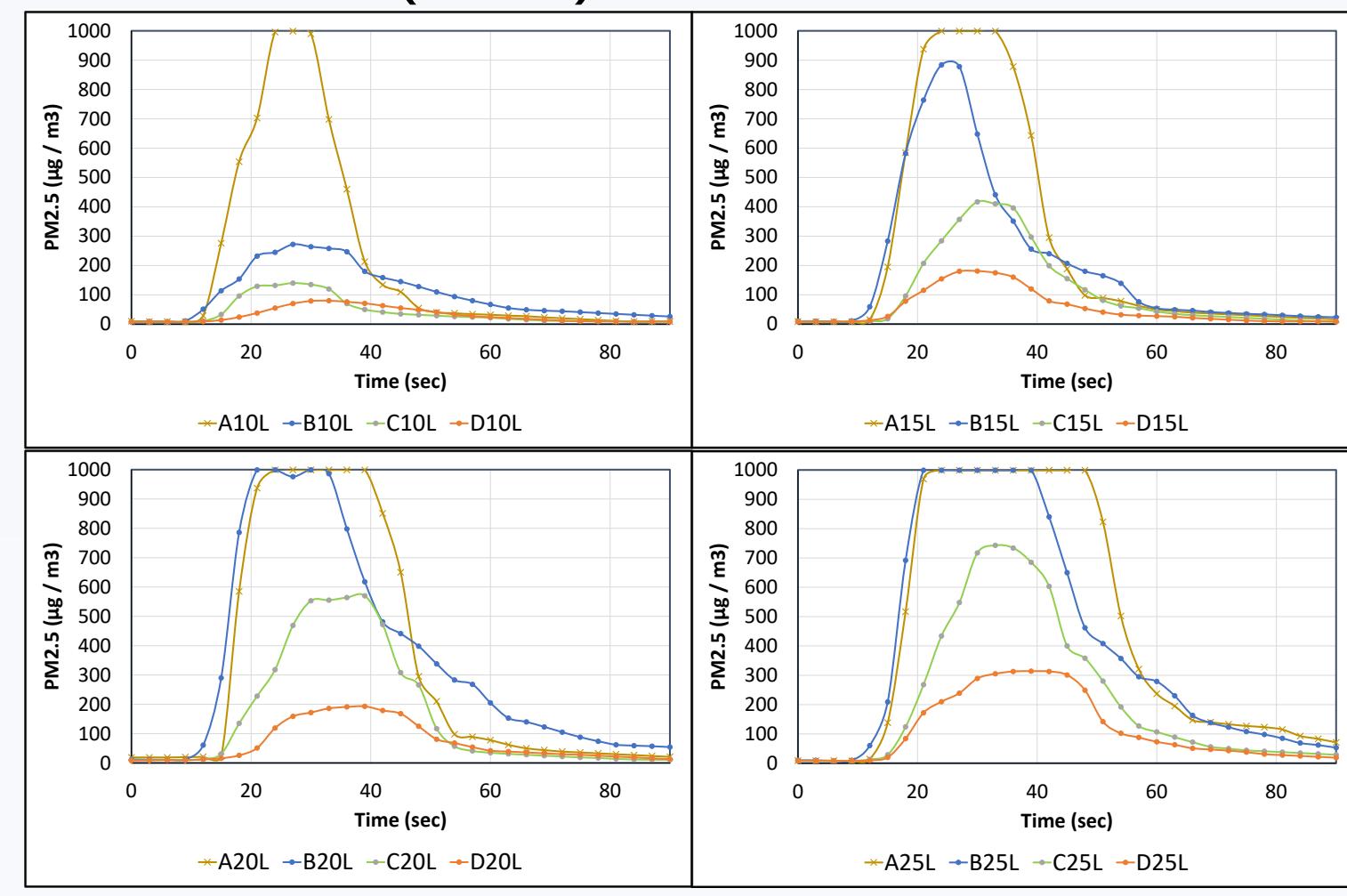


水霧粒子快照。我們拍攝水霧粒子的運動，並發展經濟型粒子影像測速法 (EcoPIV)，透過追蹤水霧運動，量測風速場。（作者自行製作）

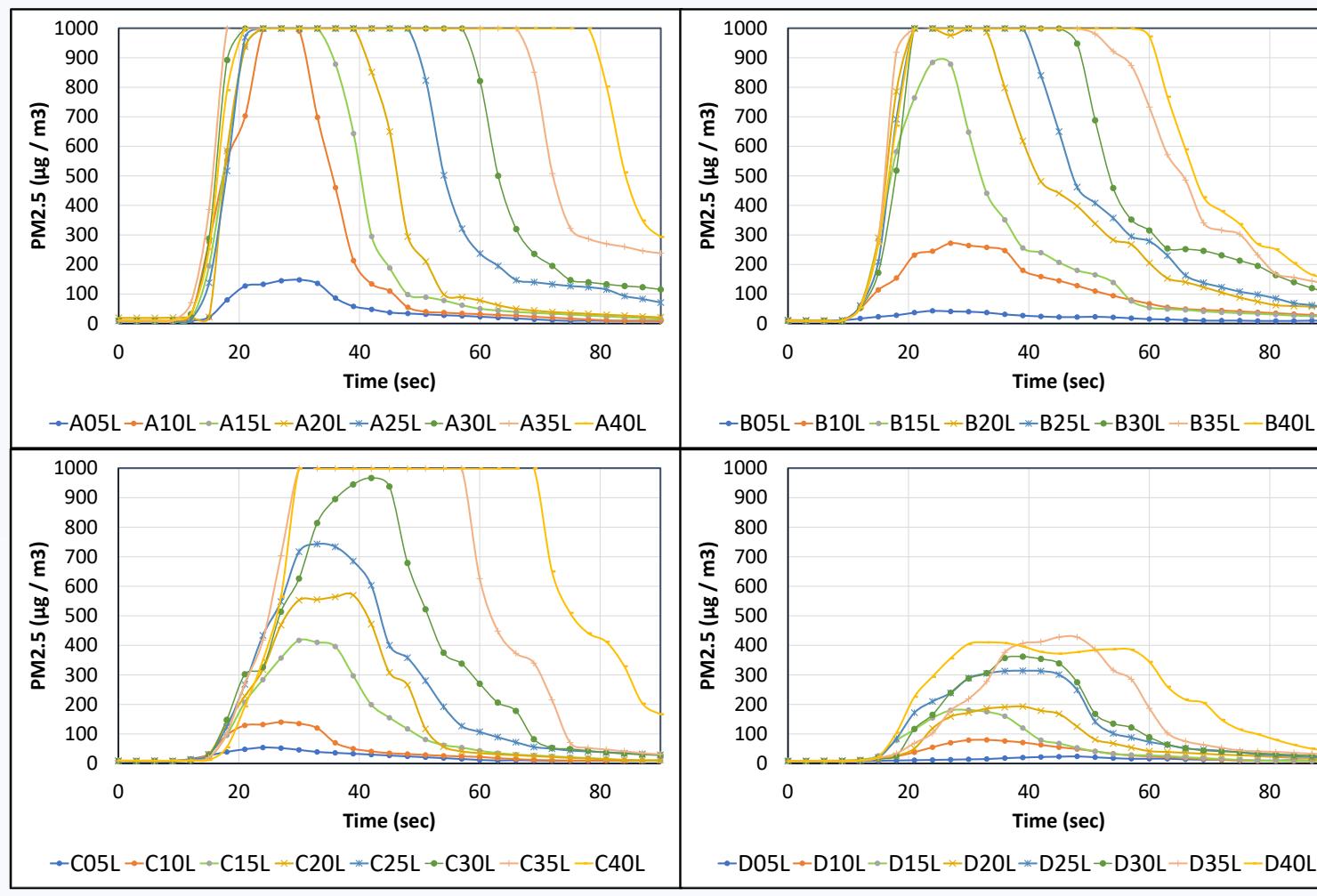
PM2.5 實驗結果與討論

在風洞實驗中，我們在風洞左側設置噴霧器，並於 $x = 20, 30, 40, 50\text{ cm}$ 設置假樹條帶，探討不同植被位置對汙染物阻隔效果的影響。四個位置分別以 A、B、C、D 代號表示，汙染源發送量透過噴霧器發送時間 (5~40秒) 控制，代號為 05、10、15...40。

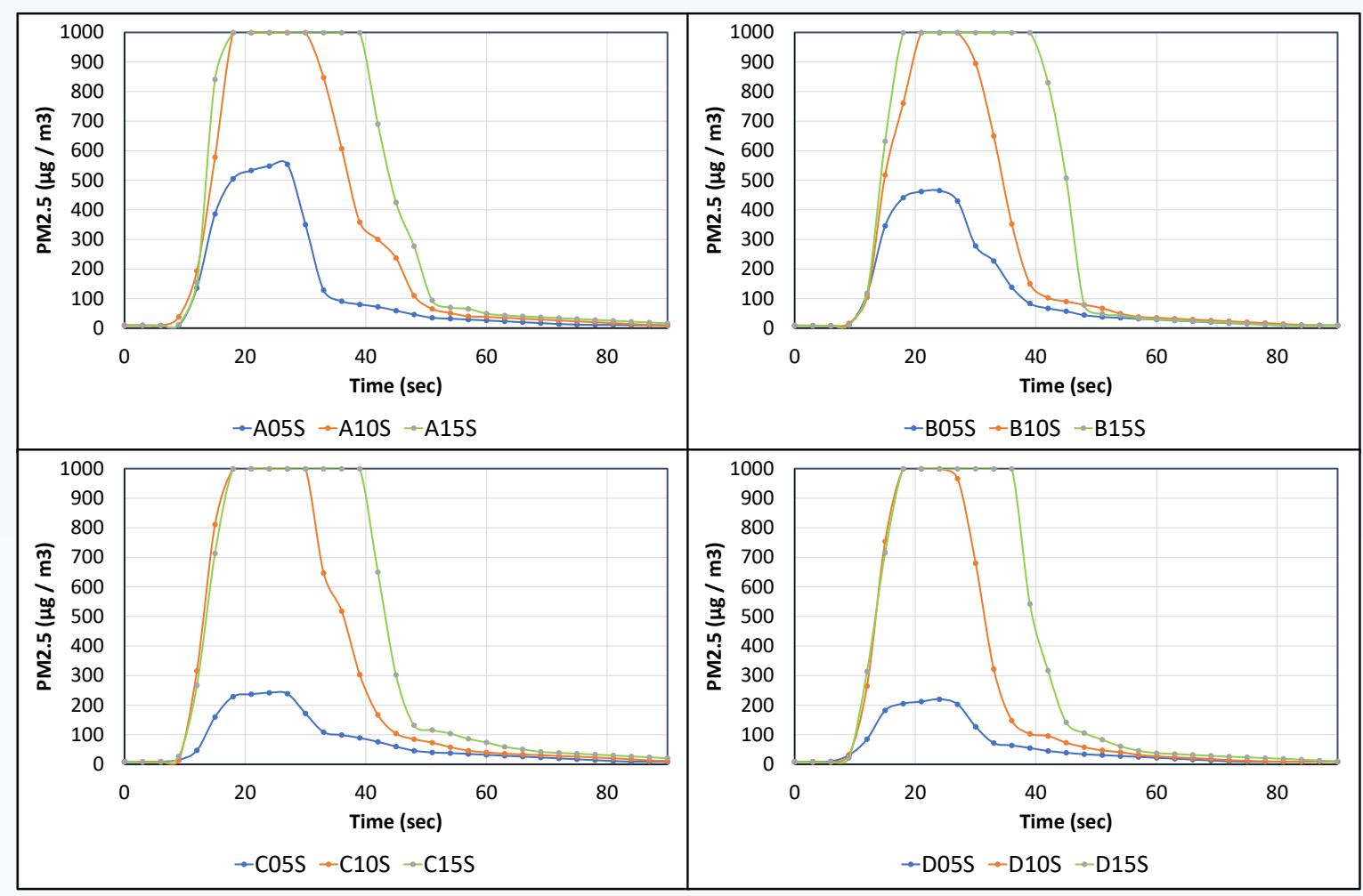
由於空品儀的 PM2.5 濃度上限為 $999\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，若假樹條帶無法有效阻隔汙染物，數據可能超出範圍，因此需適當縮短發送時間。植被密度影響遮蔽效果，實驗依編號標示，如假樹條帶設於 $x = 50\text{ cm}$ (D)，使用濃密植被 (L)，發送時間 10秒 (10)，則編號為 D10L。



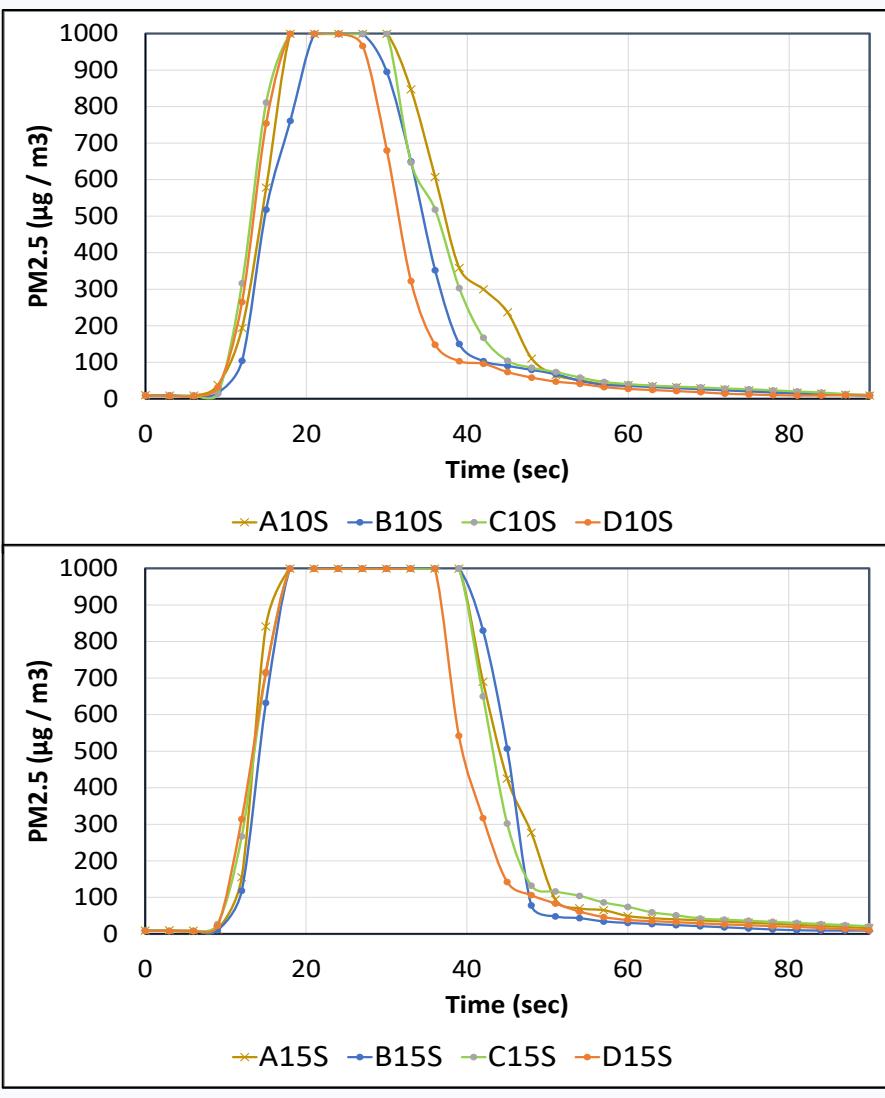
濃密植被，各組不同位置但相同汙染時間之PM2.5時序歷線。小結：越靠近建築物，PM2.5越低。



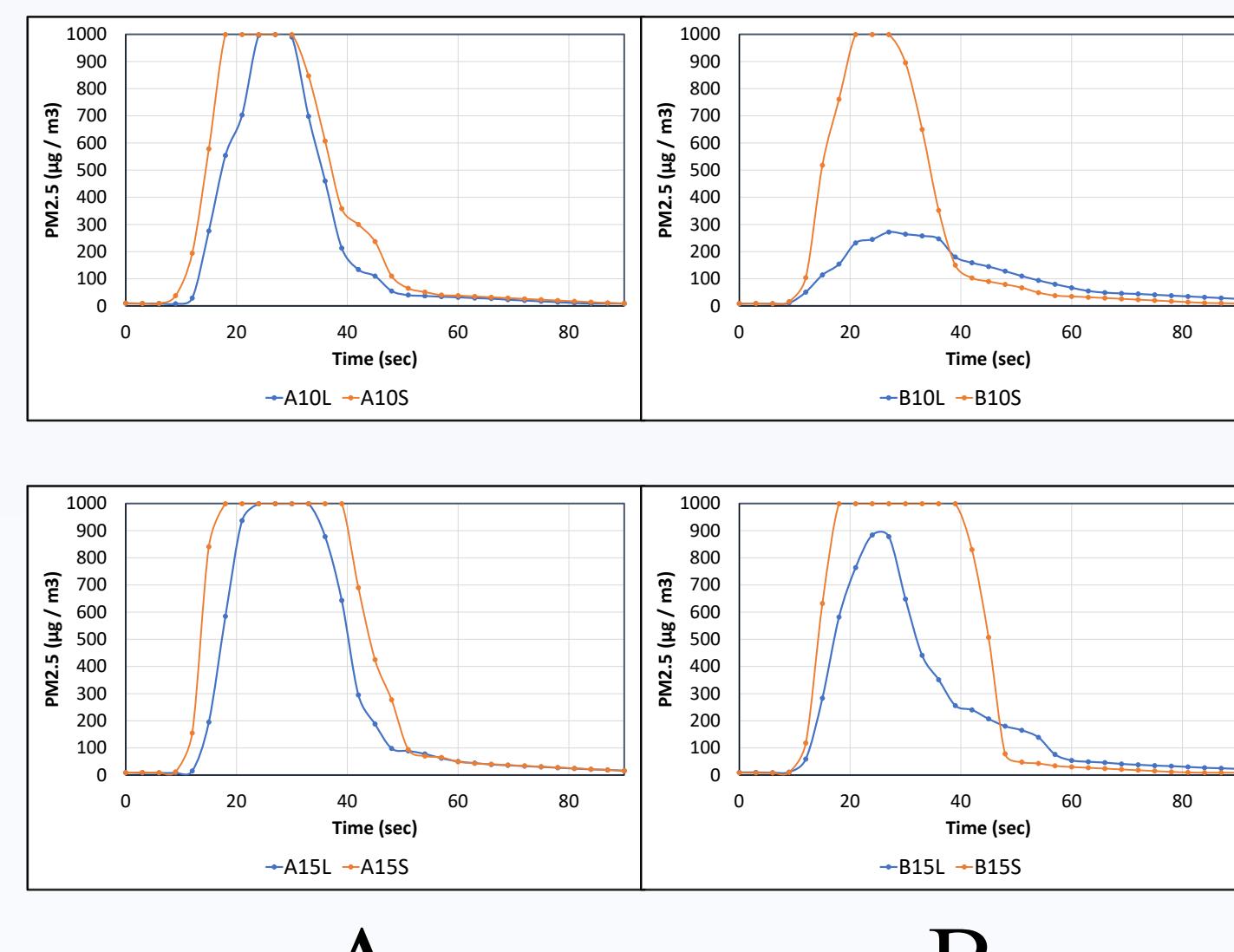
濃密植被，各組相同位置但不同汙染時間之PM2.5時序歷線。小結：越靠近建築物，PM2.5越低。



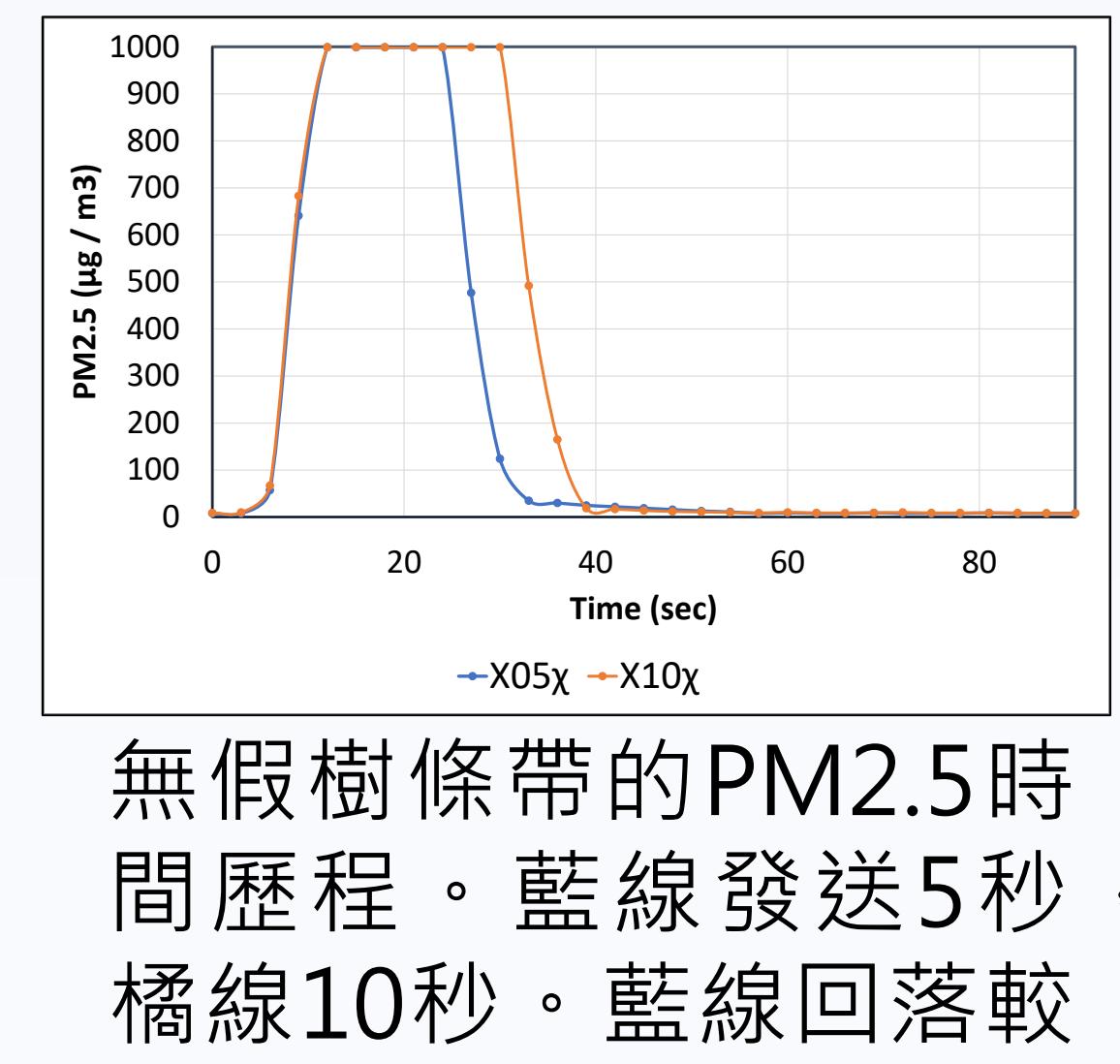
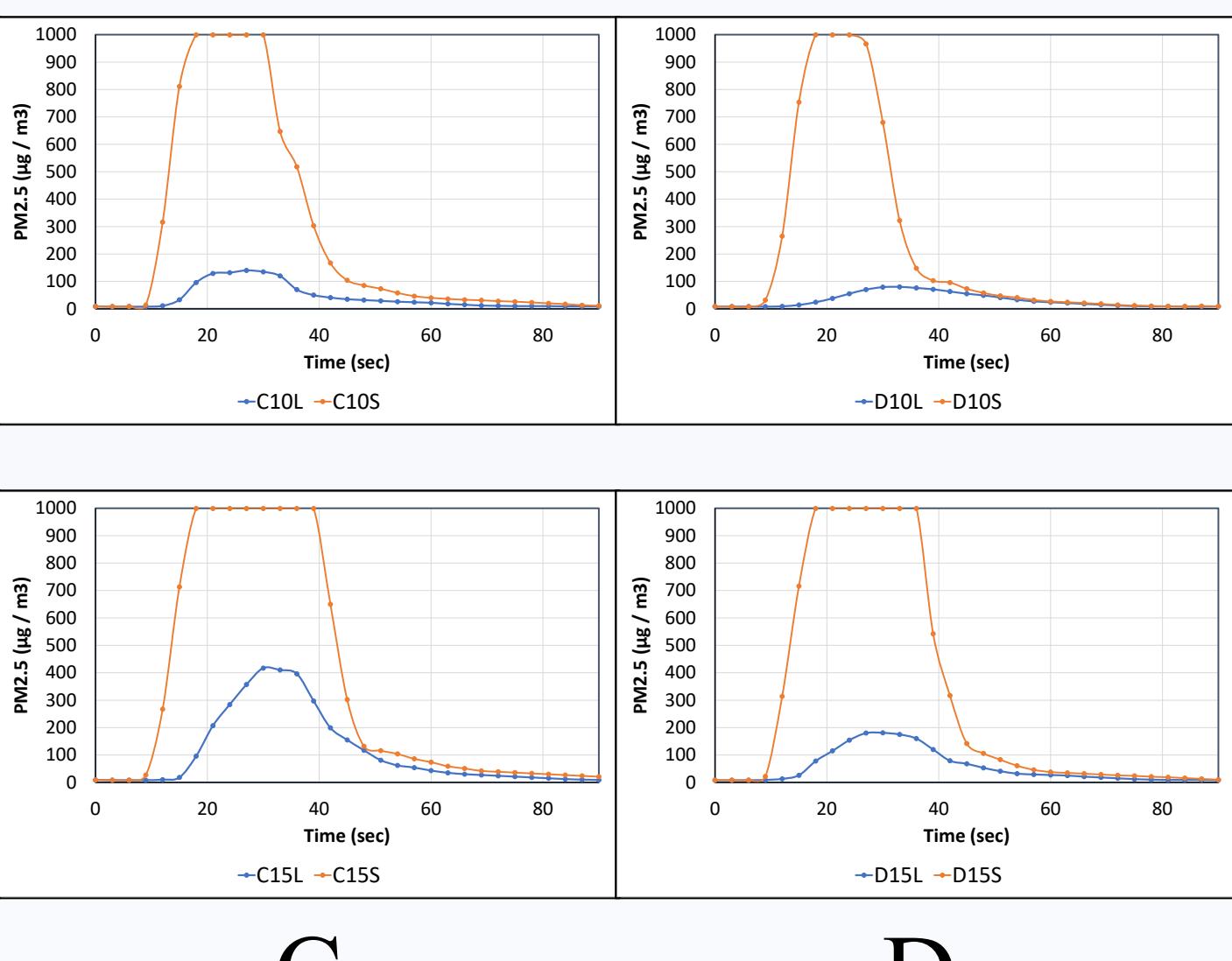
稀疏植被下不同位置的假樹條帶結果。小結：稀疏植被效果較不明顯。但靠近建物PM2.5下降較快。



同前，但稀疏植被。
小結：越靠近建築物，濃度下降越快。



濃密植被與稀疏植被，在不同位置之PM2.5比較。小結：不論植被濃稀，數據皆顯示越靠近建築物，PM2.5濃度值越低。（作者自行製作）



無假樹條帶的PM2.5時間歷程。藍線發送5秒，橘線10秒。藍線回落較快。在0~15秒，兩線幾乎重合，表示噴霧器及實驗可重複性極高。

PM2.5 實驗小結

1. 將假樹條帶置於最靠近建築物的位置，不論是濃密植被或稀疏植被，皆比其他位置效果好。
2. 對於降低汙染物的PM2.5濃度值而言，濃密植被比稀疏植被明顯有效。

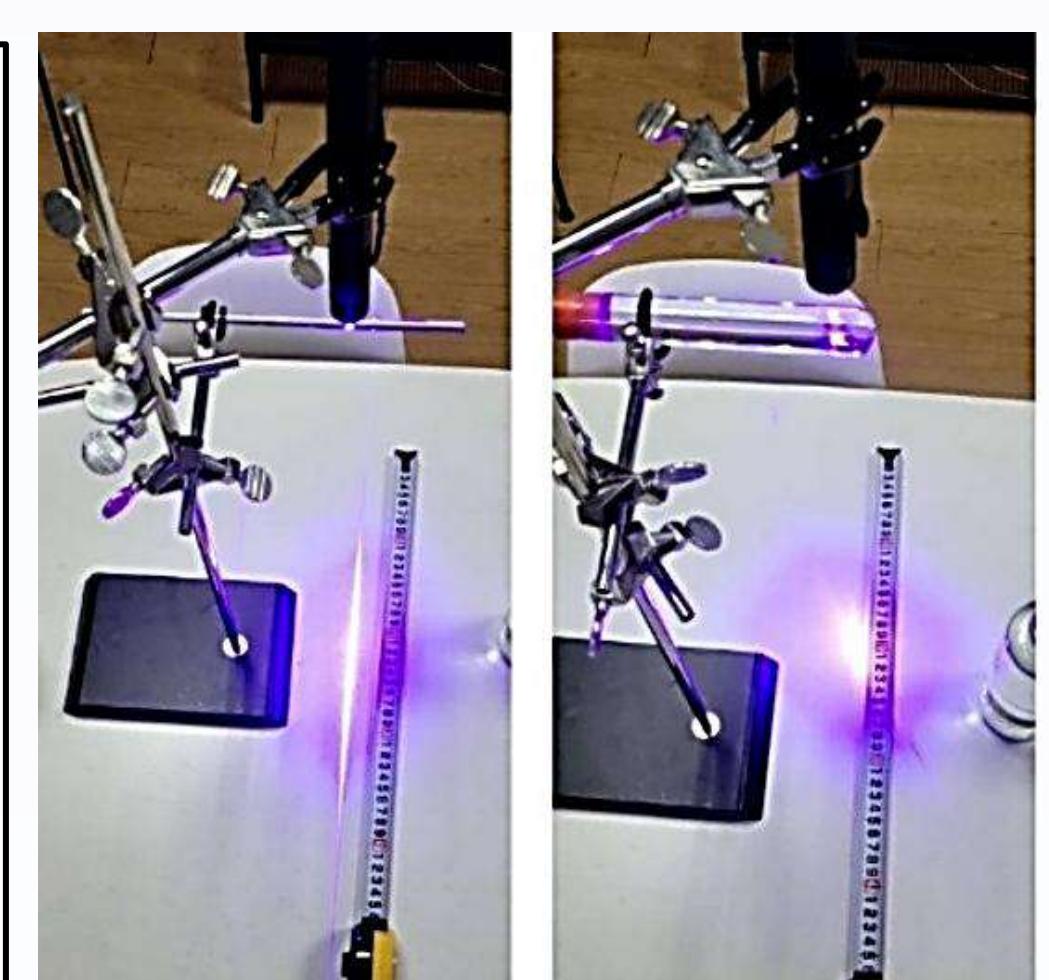
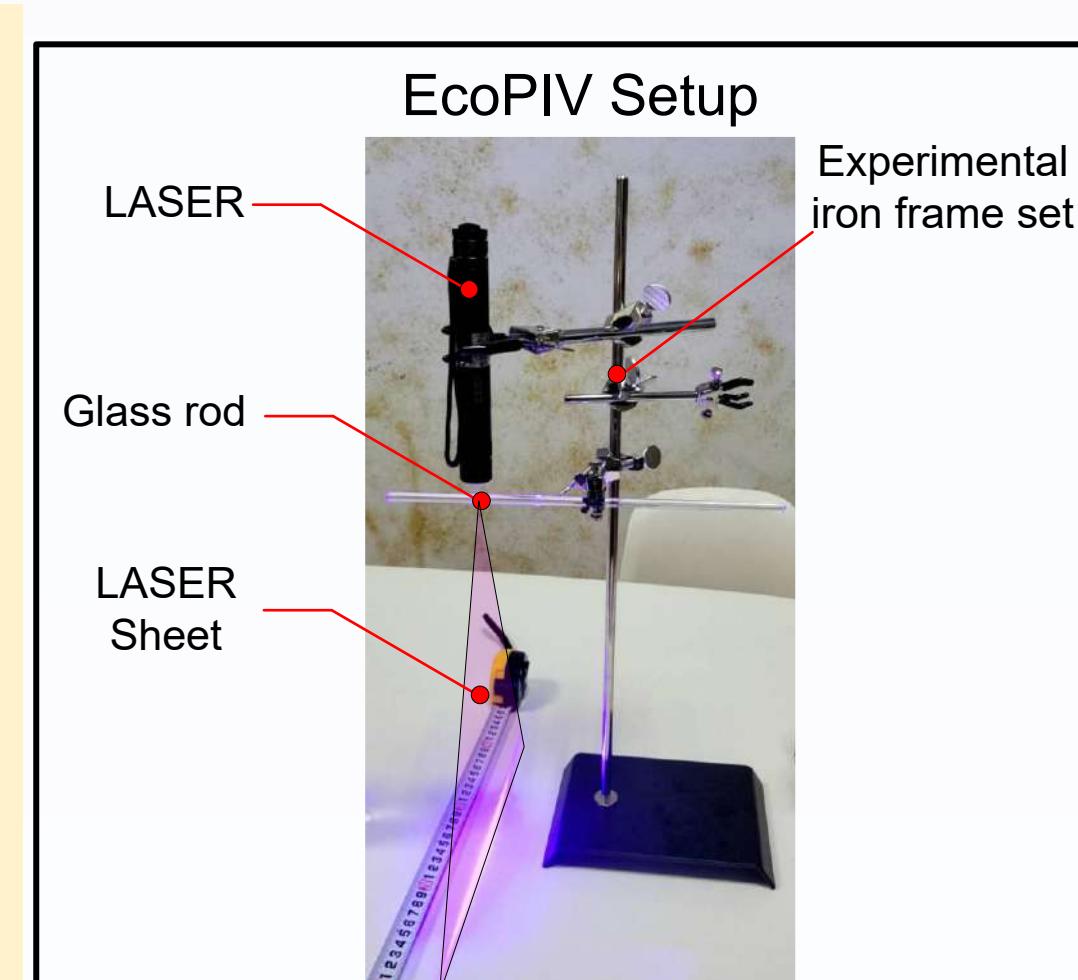
但是為何會是這樣？

EcoPIV 研發動機

我們需要對流場進行量測和分析。

流速場的量測方式為接觸式，如超音波流速計、皮托管等，但會干擾流場，本研究不適用。非接觸式如雷射與超音波都卜勒測速儀，雖精確但價格高，不利大範圍流場分析。粒子影像測速法 (PIV) 則利用雷射光激發細粉並以高速攝影機記錄，再以相關係數法分析連續影像，求得流速與方向，適合本研究應用。但是PIV太昂貴，因此本研究想要以PIV的概念，自己發展經濟型PIV (EcoPIV) 系統。

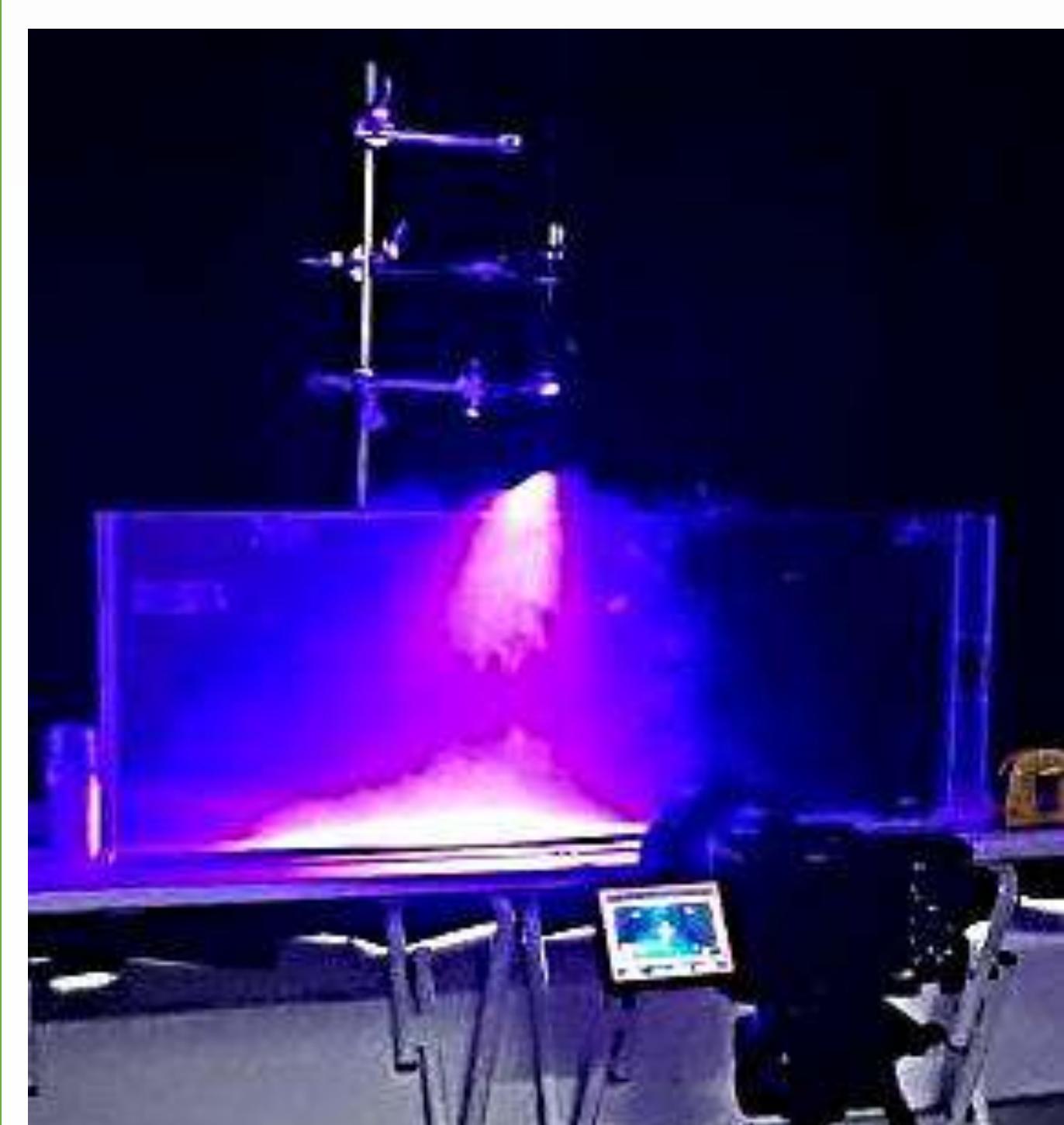
EcoPIV兩大步驟：1. 雷射光頁激發細粉、2. 相關係數法產生流速場。其中，雷射光頁生成所使用的圓柱折射，以及相關係數法等，都是高一物理和數學的學習內容。



EcoPIV設置（左），與雷射光頁範圍測試（右）。不同粗細的透鏡所產生的雷射光頁展幅不同。

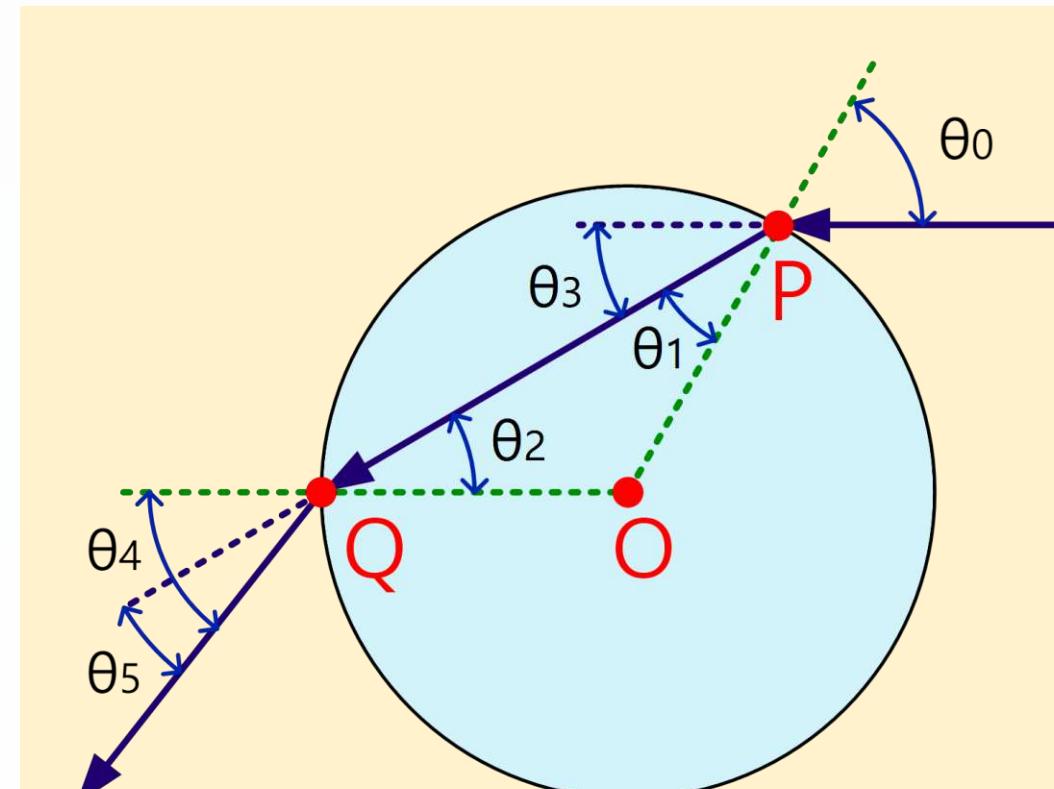
（作者自行製作）

EcoPIV 理論與方法

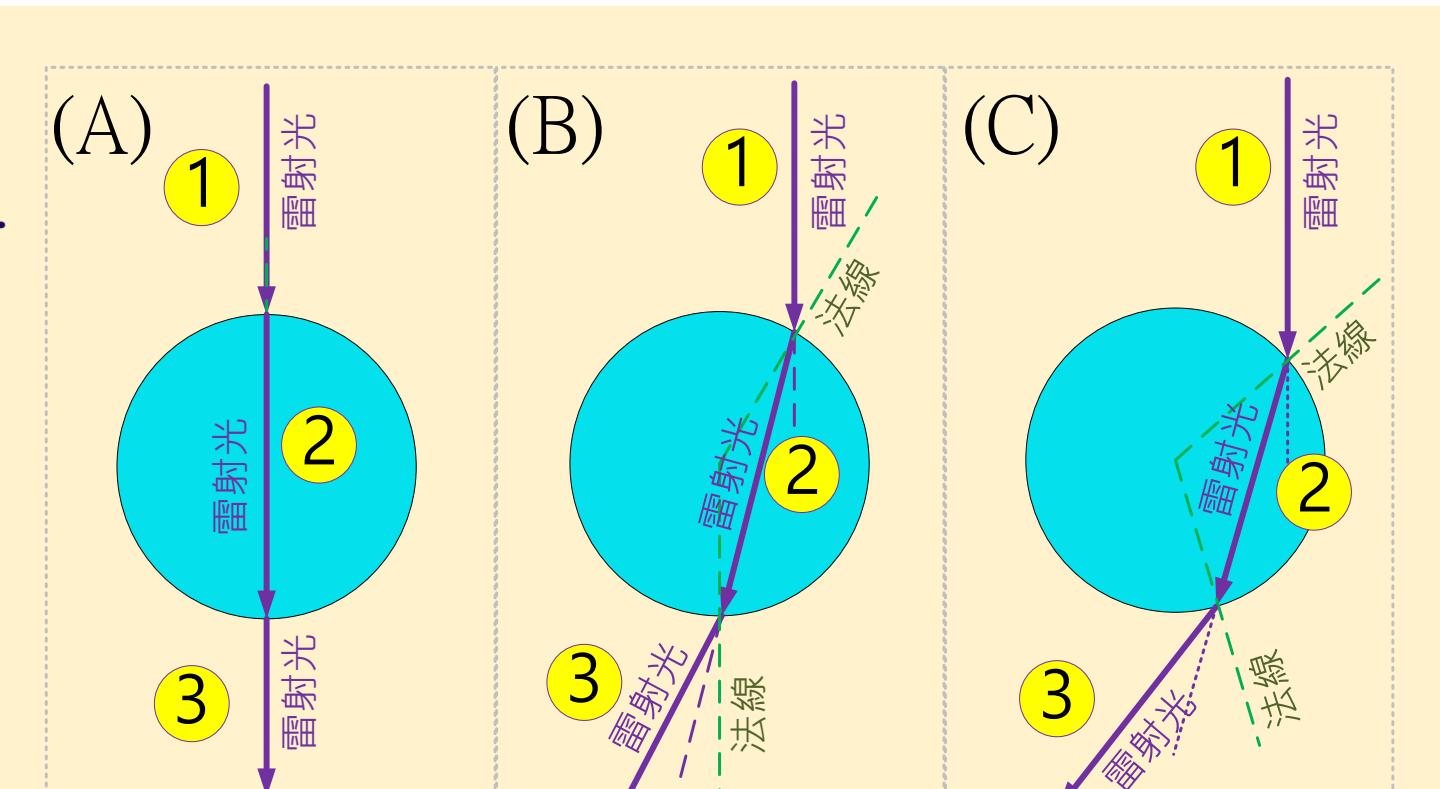


Snell's Law :
 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$
 n_1 和 n_2 為折射率。
 θ_1 和 θ_2 為入射角和折射角。

EcoPIV量測過程
噴霧器射出水霧粒子。
EcoPIV由上方射出雷射光頁。（作者自行製作）



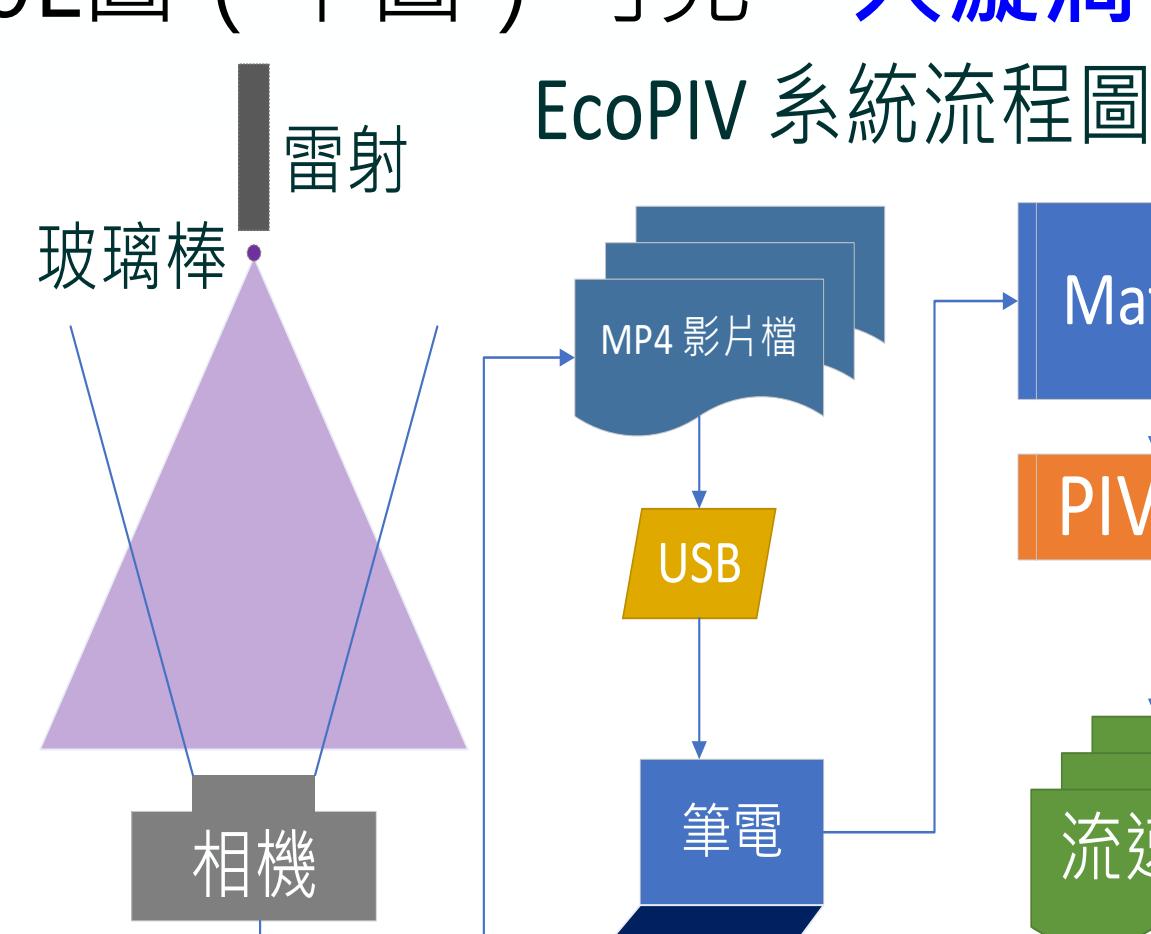
雷射光進入圓柱體後的
偏向角計算。入射角 θ_0 。
偏向角 $\theta_3 + \theta_5$ 。



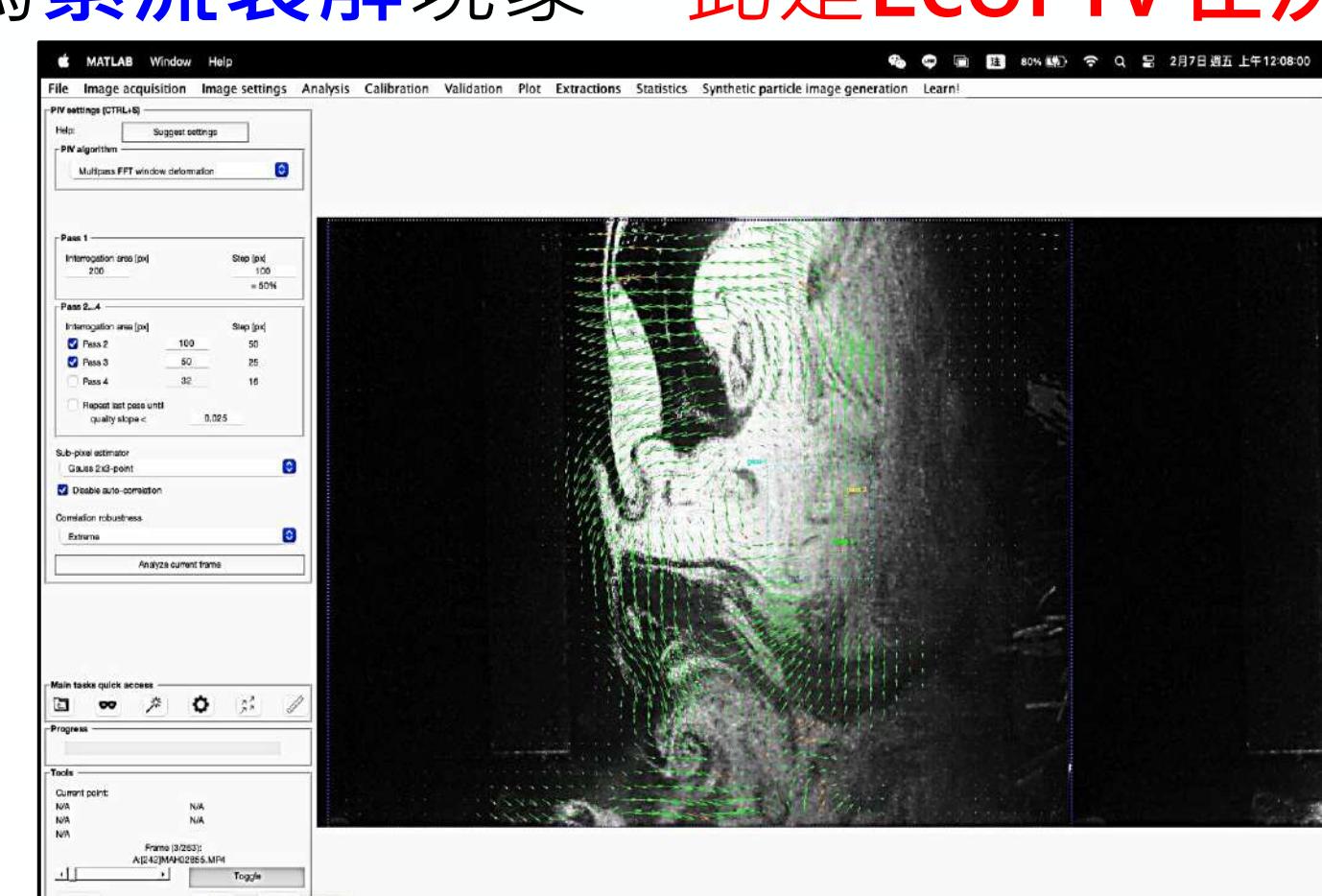
雷射光束通過一支實心玻璃圓柱
時的軌跡。這也代表柱徑越大，
折射範圍越小。（作者自行製作）

EcoPIV 設置與流程

由B20L圖（中圖）可見，大漩洞會裂解成小漩洞，為紊流裂解現象。此是EcoPIV在決定多圖框分割大小設定的重要依據。



（作者自行製作）



EcoPIV流程圖。1. 產生雷射光頁、2. 以手動對焦
相機拍攝水霧運動、3. 透過PIVlab進行流速分析。

PIVlab的影像多圖框分割參數及
流速場向量（綠色箭頭）。（作者自行製作）

（作者自行製作）

假說 Hypothesis :

我們主張汙染源的傳輸主要透過對流。若綠樹下游有建築物，氣流會被阻擋而改變方向。若綠樹設於此處，可有效阻隔穿透型對流，達成降低空汙的效果。

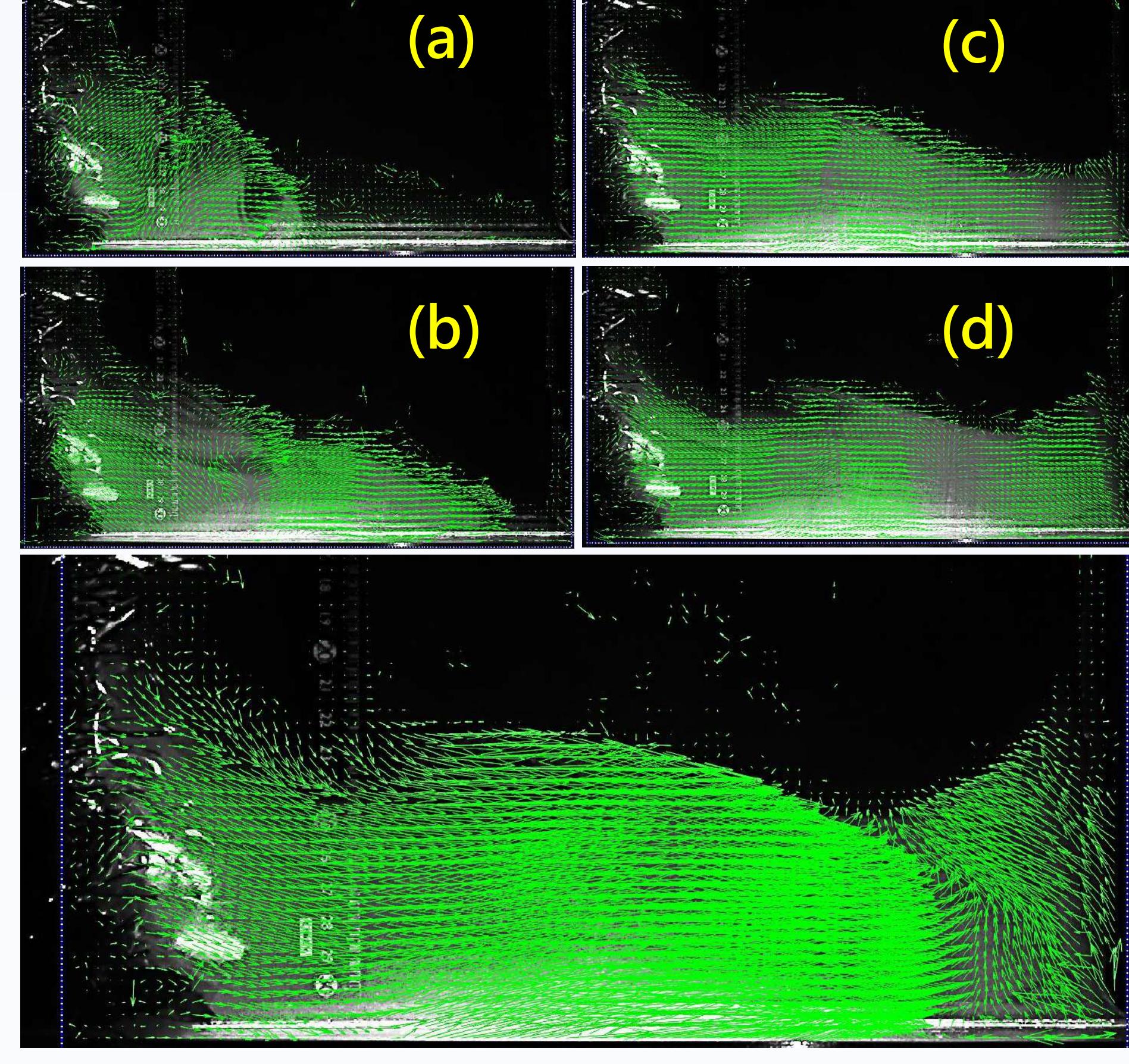
以EcoPIV探討B20L與D20L案例。B20L為位置居中，D20L為緊鄰建築物。兩者皆為濃密植被，水霧粒子噴射20秒。在PM2.5的時序量測數據中顯示，D20L的PM2.5值明顯較低。

假樹條帶上游側的EcoPIV速度場分析：

從EcoPIV實驗結果可以看出，大尺度的紊流較有一致性，然而紊流裂解成小紊流則顯得相當凌亂。其中大尺度紊流以傳輸為主，而小尺度紊流則扮演加速混合的效果。對PM2.5的量測數據而言，大尺度的紊流所產生的傳輸為主要動力機制。為此，我們透過PIVlab的Summation功能對紊流場做積分，可見主要流場行為呈現大尺度的逆時針旋轉紊流，此與紊流教科書中所描述的現象一致。而D20L在上游側有著與B20L類似的機制。

B20L下游側的EcoPIV速度場分析：

由EcoPIV結果，水霧粒子由左側大面積流入，下沉並前進。當水霧粒子撞擊到代表建築物的空品儀後，小部分粒子會往上運行，大部分則進入到空品儀之中，並造成空品儀PM2.5數值提升。



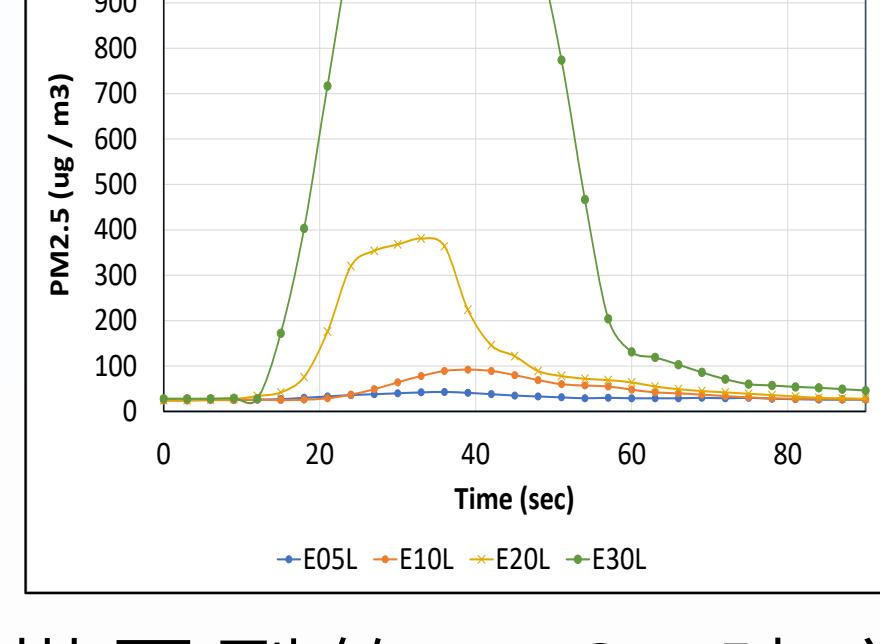
B20L下游側的速度場與積分場。時序為(a)~(d)，綠色箭頭為速度向量。

橫置型假樹條帶實驗：(作者自行製作)

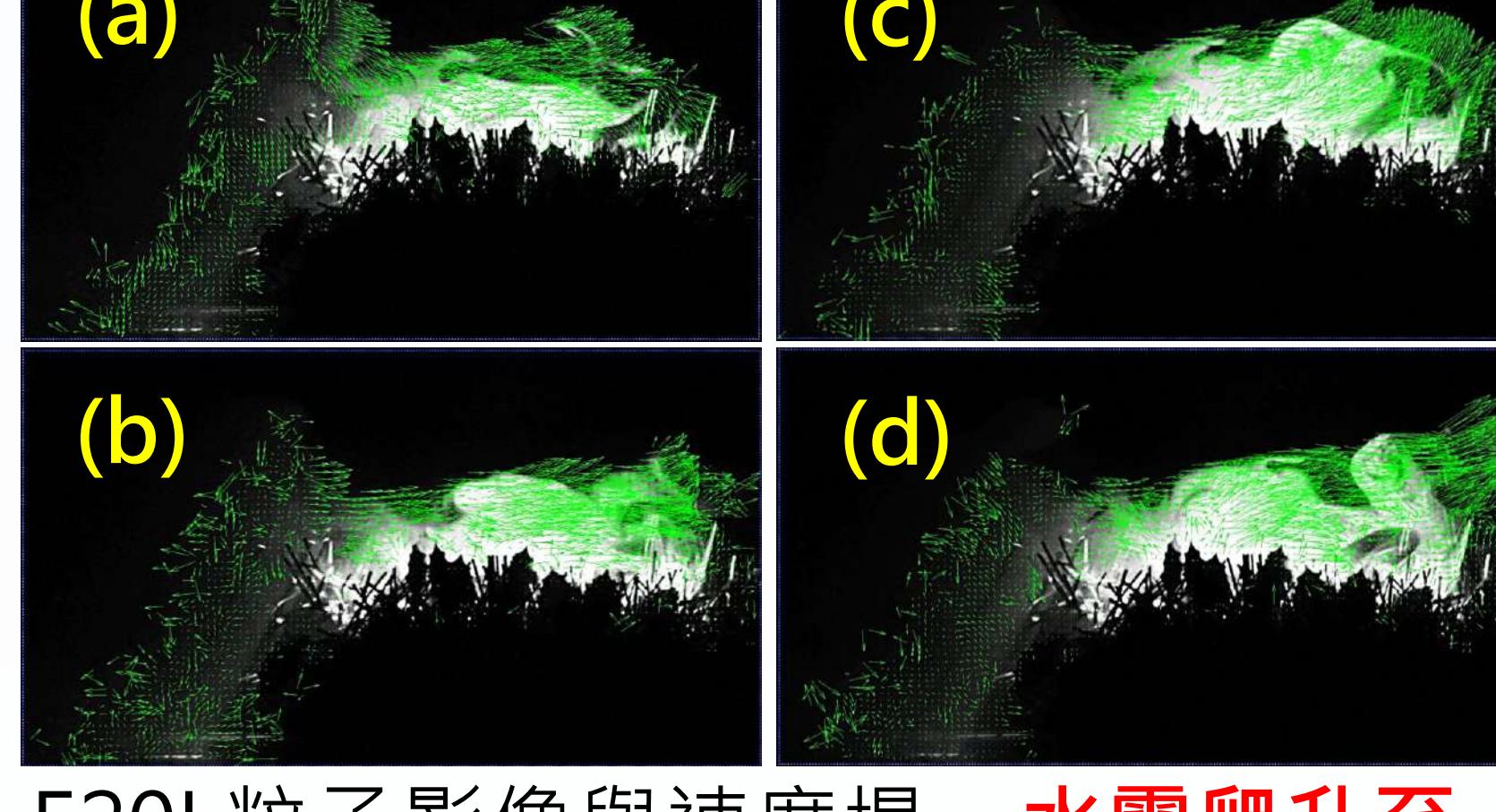
大面積紅樹林濕地，是否對於下沉型的汙染物也有很好的阻隔作用？

因為水霧粒子必須在紅樹林中進行較長距離的傳輸，應該會有很好的空汙阻隔效果。但是結果有點出乎意料。由圖中可見E05L~E20L皆有高效率的阻隔效果。然而E20L以上，阻隔效率卻急速下降。

小結：橫置型假樹條帶對20秒以下的下沉型汙染有良好阻隔效果。但當汙染量超過20秒時，外緣形成類邊界層，反而降低與水霧粒子的阻力，並加速上方水粒子的流動。

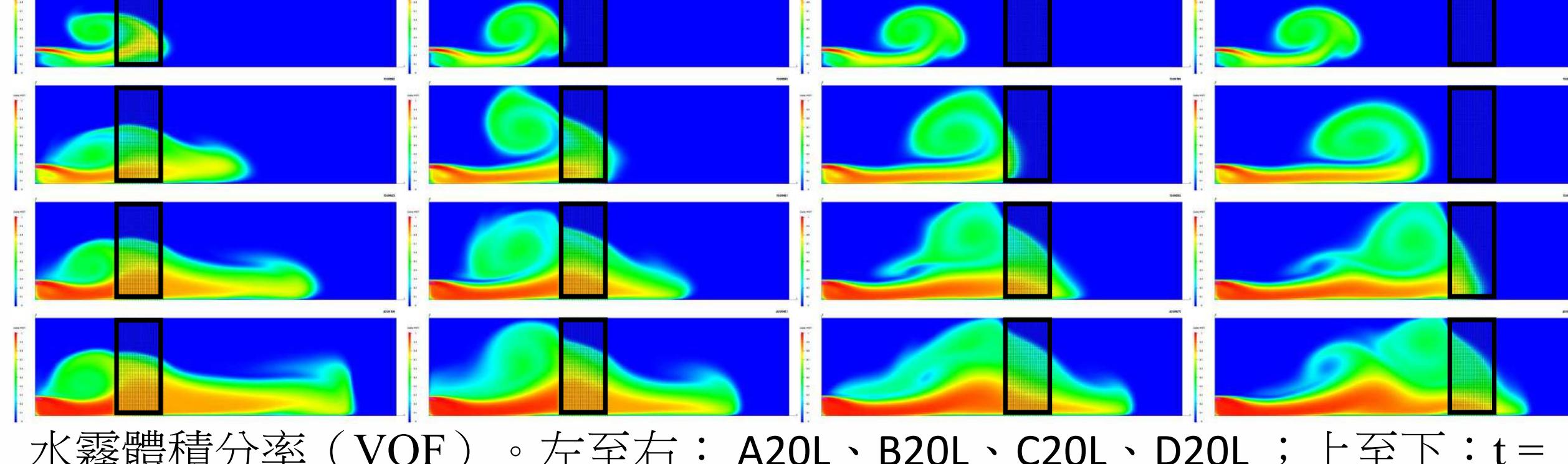


橫置型的PM2.5時序歷線。當水霧噴發時間達到20秒以上，數據急遽上升。



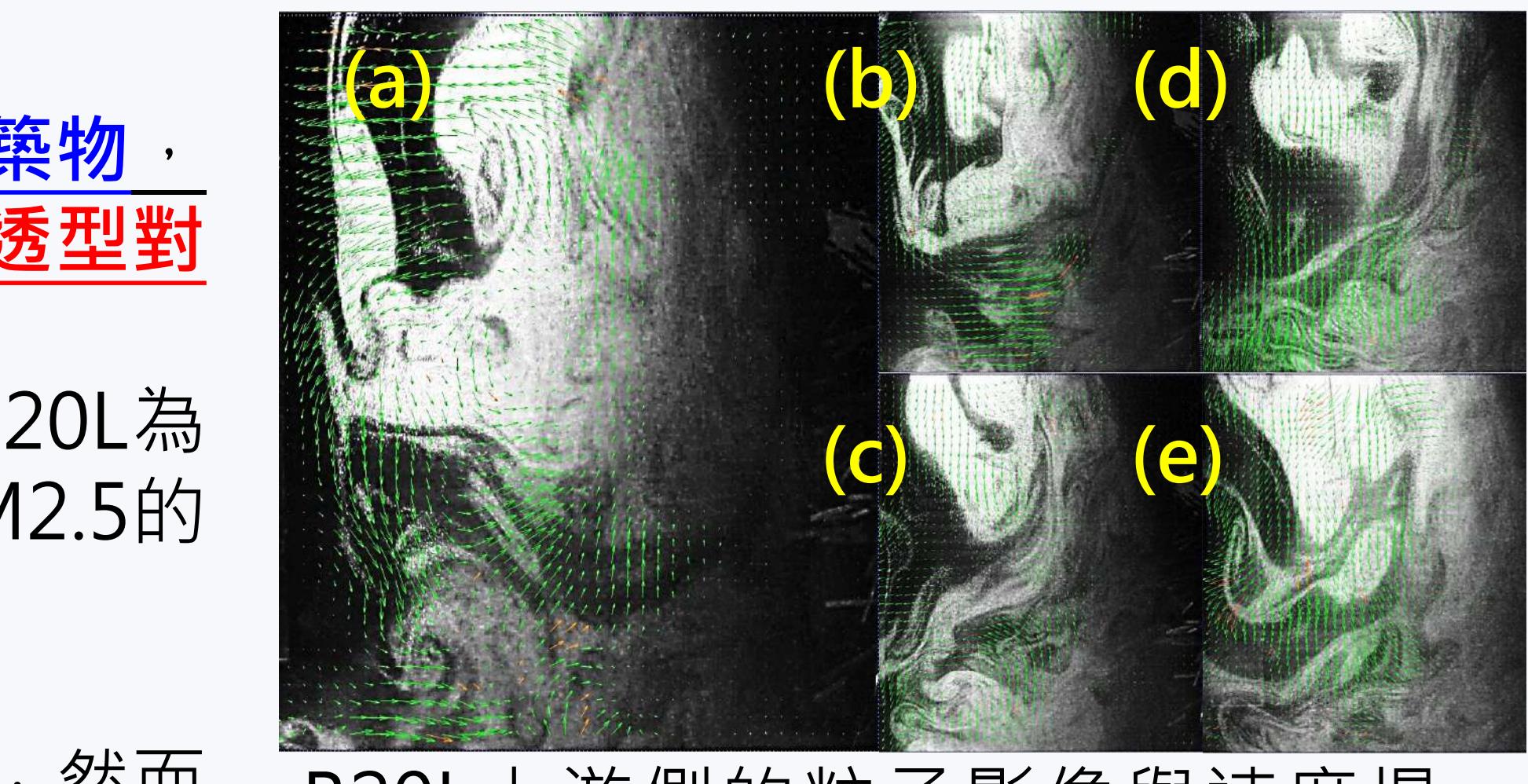
E20L粒子影像與速度場。水霧爬升至假樹條帶頂部後，快速向下游滑動。

數值模擬初步結果：

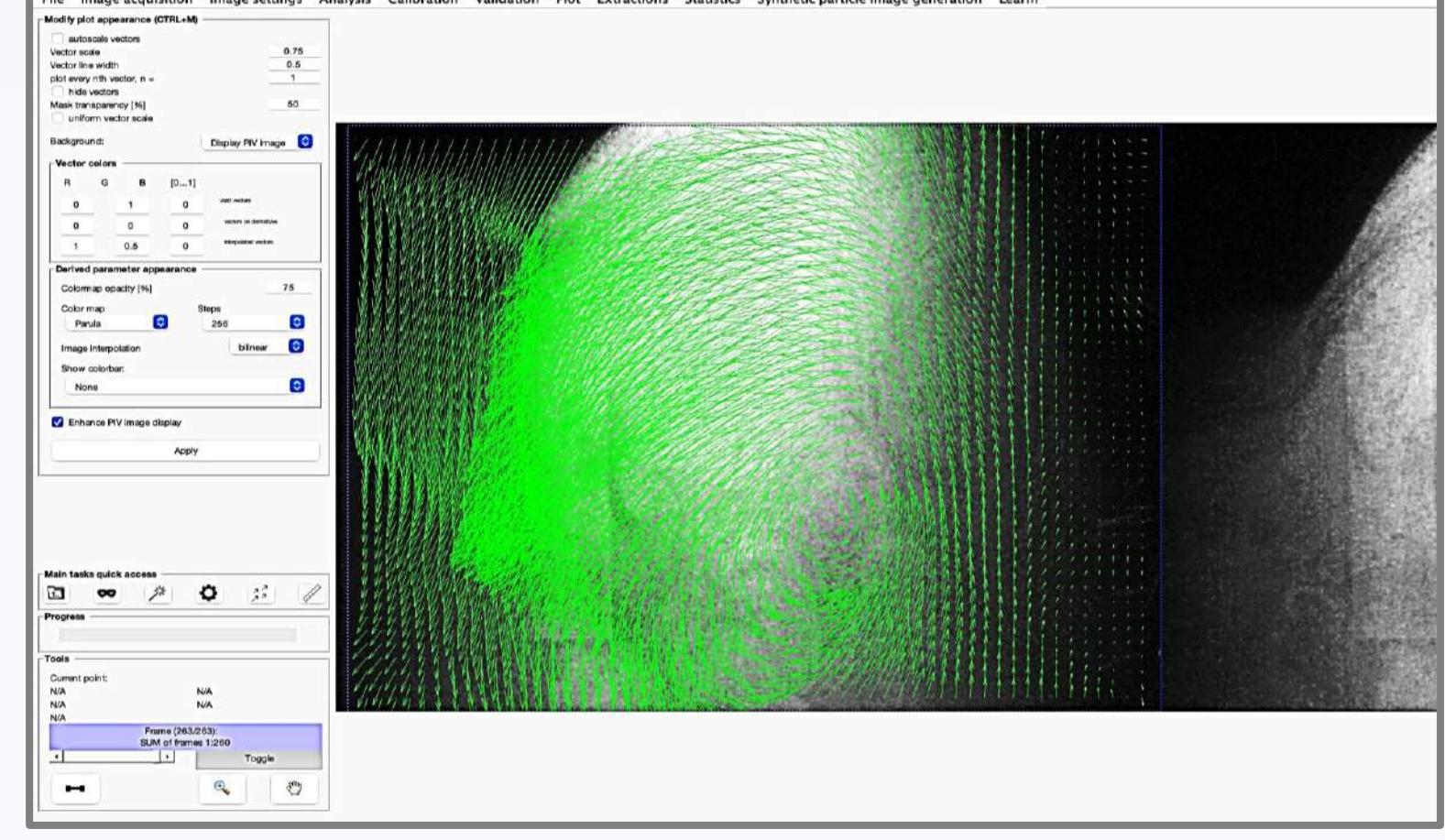


水霧體積分率 (VOF)。左至右：A20L、B20L、C20L、D20L；上至下： $t = 5 \sim 20$ s。汙染物濃度在抵達下游空品儀時有穩定下降的趨勢。且在D20L中，汙染物尚未抵達假樹條帶區即已擴散，受下游側的空品儀阻擋，使氣流減緩。

(作者自行製作)



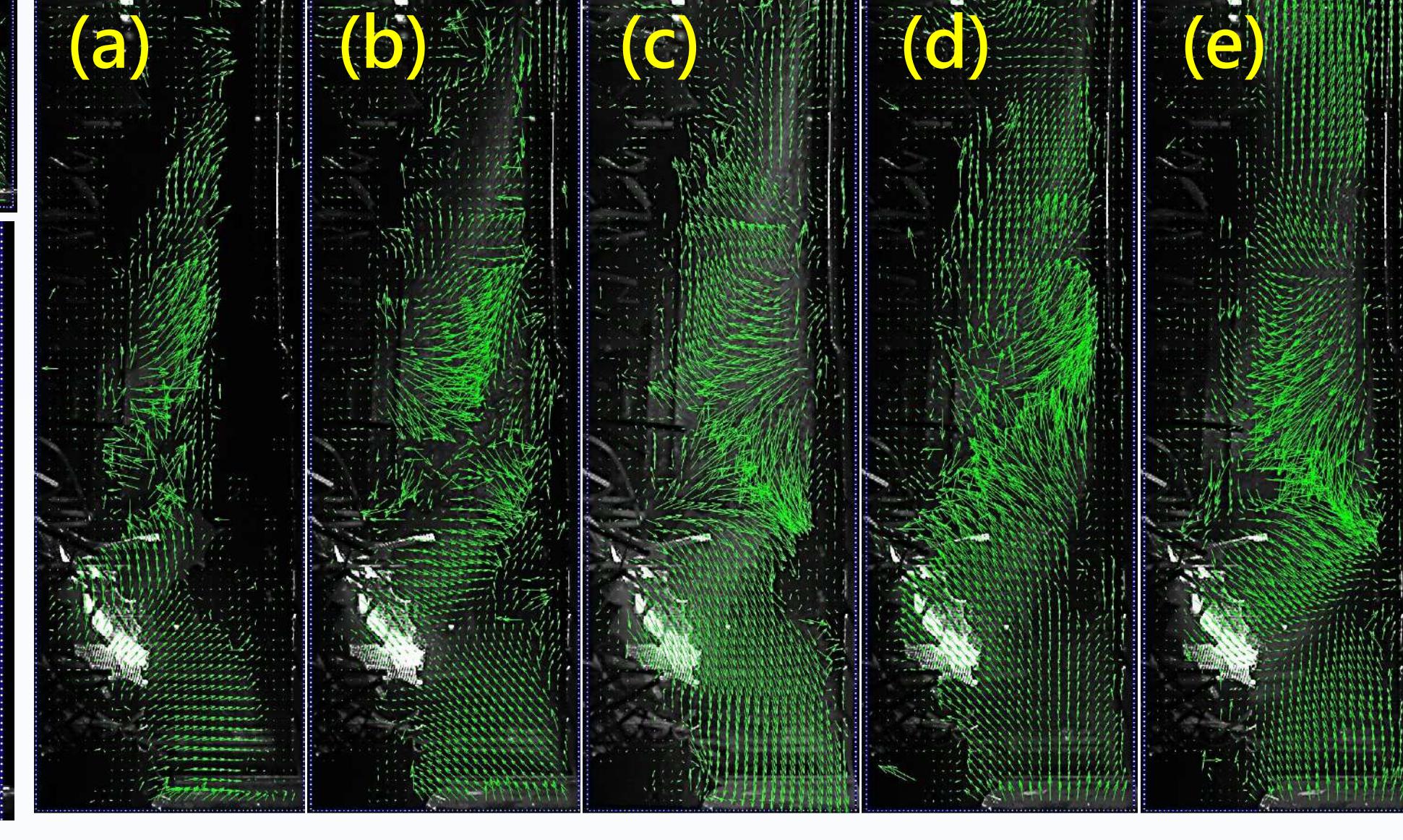
B20L上游側的粒子影像與速度場。可明顯觀察到紊流裂解現象。



B20L假樹條帶上游側的速度積分場。

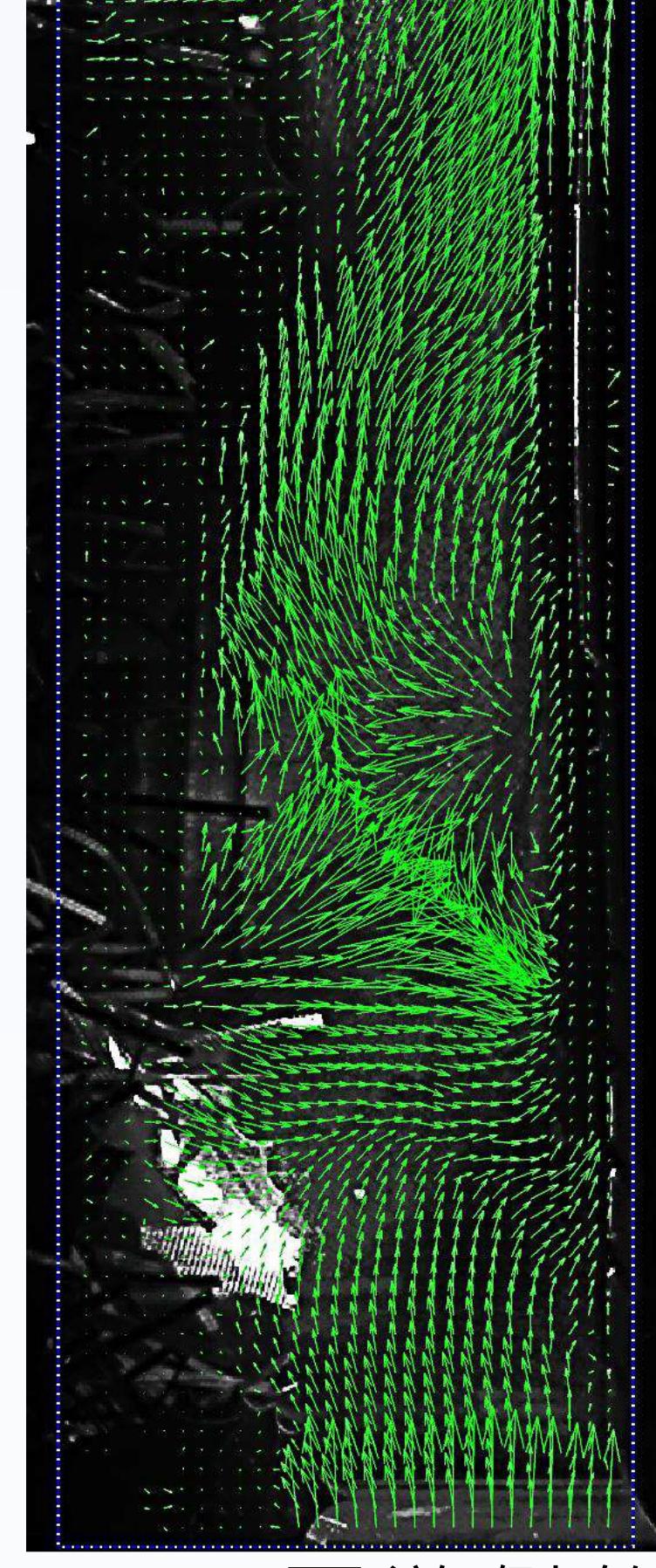
D20L下游側的EcoPIV速度場分析：

水霧粒子由左方進入後即於此狹小空間內發展成紊流，並在向上盤旋的過程中，反覆與假樹條帶及建築物碰撞，使污染物吸附效果更佳。



D20L下游側粒子影像與速度場。時序為(a)~(e)，綠色箭頭為速度向量。

(作者自行製作)



D20L下游側的速度積分場。

(作者自行製作)

結論：當假樹條帶設於建築物前方時，空氣汙染阻隔效果顯著提升。EcoPIV與CFD分析皆顯示，在B20L情境中，下游氣流未被有效阻擋，導致部分粒子穿透至下游空汙較高。反之在D20L情境中，建築物導致氣流上升並使氣流與假樹條帶頻繁碰撞，增強其吸附能力。此外水平放置的假樹條帶雖能阻隔下沉氣流，但在高污染量情況下若達到飽和，會產生邊界層效應，反而降低阻隔效能。本研究成果可作為政府規劃行道樹配置之原則。

討論：影響空氣汙染的因素很多，包括距離、樹型、氣流方向、氣流流速等，都會對汙染物的傳遞有所影響。在本研究中，我們固定其他變因，僅針對綠樹植被與汙染物距離進行分析。希望未來能更加深入學習使用數值模式，除了進行實物大小的模擬之外，也探討距離以外的因素影響。

參考文獻 (簡列)
全華(2024), 朱佳仁 (2015), 徐吟綱 (2024), 柳仲恩 (2023), 翁林 (2021, 2022), 環境部(2024), Abhijit et al. (2017), Donato et al. (2011), Gromke et al. (2008), Janhäll (2015), Kim & Lee (2017), Morakinyo & Lam (2017), Reuters (2023), United Nations(2015), Wikipedia (2021)

結論與未來展望

(作者自行製作)