

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 生活與應用科學科(一)

第三名

082814

斷羽重生-自製羽球的再生之旅

學校名稱： 國立臺南大學附設實驗國民小學

作者：	指導老師：
小四 陳析	林士揚
小四 陳婕菱	楊佳蓉
小五 楊上賢	
小六 陳宥愷	

關鍵詞： 環保材料、風洞測試、飛行軌跡

摘要

本研究探討如何利用學校的落葉、端午包粽子的粽葉、破損 L 夾等環保替代材料，延長羽球的使用壽命，進一步設計全國第一款再生羽球，並透過「風洞測試、飛行軌跡測試、耐受性測試」進行科學驗證。研究方法包括專家訪談、環保材料篩選、風洞設計、發射器設計、Tracker 軟體操作、撞擊設計等。根據我們的研究結果顯示：「粽葉」為修補羽球的最佳素材，在飛行穩定性、飛行軌跡、撞擊次數測試上，都能與完整羽球有相抗衡之水準，粽葉應用於生活中作為修補材料，具有潛在優勢。

壹、前言

一、研究動機

這學期體育課時，我們開始接觸羽球這項運動，班上同學熱衷於打羽球的同時，發現天然羽毛的羽球既脆弱又昂貴，會在短時間內磨損或破裂，一旦打壞了，除了再購買，似乎別無他法。每當看到羽球迅速損壞，我們總會感到相當可惜。我們也發現，整顆羽球會隨著羽毛損壞趨於嚴重而導致飛行晃動與偏移，趨向無法掌控，終至讓人不想再使用。

因此，我們決定以常見環保材料替代羽毛的再生羽球。目標是延長壽命、不犧牲飛行品質，減少對天然資源的依賴，並比較其與國際羽球的差異。此舉能降低成本、減少廢棄，更呼應 SDGs 責任消費與生態保護，展現運動器材永續設計的可能。

本研究結合科學驗證，運用國小中高年級自然科所學習的空氣流動、力與運動概念，設計風洞及自製發射器，分析飛行軌跡。透過材料、風洞與飛行分析，確保再生羽球性能可行。

二、研究目的

在臺灣的國小課程中，羽球是相當適合入門與推廣的運動，但羽球一旦開始損壞，便只有淘汰一途。淘汰後的羽球若經過整理，有重生的機會，相信對於資源的再利用與經費的節省，能有相當的貢獻。因此本研究嘗試解決廢棄羽球如何再利用，設計一款運用環保素材替代羽毛的新型羽球！

- 研究目的 1：拜訪專家及借用淘汰羽球，進行斷羽分析
- 研究目的 2：定義出符合好羽球標準規範之量化基準
 - 2-1：對完整羽球與缺損羽球進行風洞測試
 - 2-2：對完整羽球與缺損羽球進行飛行軌跡／高度／距離測試
- 研究目的 3：運用環保素材，替換羽球羽毛損壞處，研發自製羽球
 - 3-1：自製羽球的環保素材選用與測試
 - 3-2：運用自製羽球進行風洞測試
 - 3-3：運用自製羽球進行飛行軌跡／高度／距離測試
 - 3-4：運用自製羽球進行撞擊測試

三、文獻回顧

（一）羽球結構相關資料：

根據世界羽球聯合會（BWF）的規範，羽球的重量容許在 4.74 克到 5.50 克之間，具體取決於所使用的羽毛的種類和底座的材料。羽球的羽毛長度通常為 6.5 到 7.5 公分。Cooke（1996）進行了一項實驗研究，以瞭解羽球的空氣動力學。羽球尾翼的空氣氣流與尾端環形空氣停滯區的氣流有關，因此羽毛或球裙的間隙導致羽球的空氣阻力增加，是創造天然羽球先加速後減速飛行軌跡的主因。

（二）天然與塑膠羽球飛行軌跡研究：

我們使用 Chat GPT、Gemini 作為文獻探索的初步工具，在 AI 的協助下我們找到了：Aekaansh Verma, Ajinkya Desai, Sanjay Mittal（2013）的研究中，羽球上羽毛的阻力會嚴重影響其軌跡，天然羽毛受到的阻力較大，它們的剎車速度也更快，達到先加速、後剎車的飛行軌跡。合成羽球的裙邊是由尼龍或塑膠製成，價格相對天然羽球便宜且耐用，但合成羽球在高速下會發生更大的變形，這種變形減少如天然羽毛的空氣阻力。羽球裙邊的縫隙會導致羽球的空氣阻力增加，無間隙的合成羽球的阻力係數明顯小於天然羽球。旋轉的羽球會受到稍大的阻力，但旋轉的影響微乎其微。依此實驗，我們在設計自製羽球時，需考慮羽球裙邊的縫隙。

（三）過去羽球風洞實驗研究：

第 57 屆中小學科學展中陳品文、邱健紘、宋品孝（2015）、Firoz Alam, Chanuch Nutakom, Harun Chowdhury（2015）的研究，都以滾珠軸承固定羽毛球在風洞

中，探討運動時的受力。他們觀察到空氣可以從羽毛根部的間隙流過，這種「底部引流」（base bleed）以及流過羽毛上方的氣流在球裙末端匯合，並在羽毛後方的阻滯區域產生不穩定的氣流，隨後消散至下游。來自底部引流的氣流噴射會捲吸尾流中的空氣，降低尾流壓力，從而增加阻力。這種現象被認為類似於「噴射泵」（jet pump）的作用。

（四）人工羽球的材料：

根據中華民國專利號 TW201309368A（2013）指出，紙張纖維或不織布為適合替代天然羽毛的材料、而 PET 塑膠的韌性接近天然羽毛球梗，為適合製作人工羽球的素材，因此在發想自製羽球階段，將紙製材料納入考量。

貳、研究設備與器材（表 1）





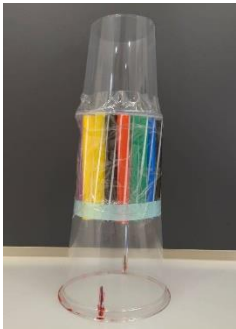





淘汰羽球	實驗用羽球	循環扇	彈力繩發射器	自製風洞機
				
手機	筆記型電腦	腳架	量尺	研究日誌
				

表 1：研究設備與器材（照片由第一作者/家長拍攝）

一、動態影像追蹤分析軟體 Tracker：

我們選擇 Tracker 作為影像分析軟體，並透過實際測量，交互驗證軟體判讀準確性，進一步選用 3 個品牌、5 種全新羽球，進行飛行軌跡實際皮尺測量，與軟體判讀進行比較測試：

	全新羽球 N1	全新羽球 N2	全新羽球 N3	全新羽球 N3	全新羽球 N4
實際皮尺測量	8.22m	8.45m	8.32m	8.32m	8.41m
Tracker 判讀	8.11m	8.40m	8.25m	8.21m	8.40m
誤差%	1.3%	0.6%	0.8%	1.3%	0.1%

表 2：實際量測與 Tracker 量測比較表

如表 2 所示結果可以確認控制鏡頭變形的情況下，Tracker 數據判讀顯示，兩者在飛行距離及軌跡形狀上的誤差值相對有限，整體變異範圍落於可接受範圍內，無顯著差異。

二、風洞設備說明（表 3）：

風洞機設計圖	成品照	說明
<p>第一代風洞機</p> 		<p>第一代風洞機設計採用了簡單的日常材料：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 使用普通電風扇橫放。 ● 進風口：使用紙杯（寬到窄）。 ● 出風口：使用塑膠杯（窄到寬）。 ● 連接部分：使用長的粗吸管。 <p>這個設計的特點和局限性如下：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 進風口較小，導致風力收集較弱。 2. 出風口的塑膠杯直徑較小。 3. 可以讓正常的羽球順利通過測試。 4. 無法仔細觀察羽球的偏移情況。 <p>結論：第一代風洞機雖然能基本運作，但觀察效果不佳，需要改進。</p>
<p>第二代風洞機</p> 		<p>為了改進第一代的缺點，第二代風洞機做了以下調整：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 進風口：改用塑膠桶（寬到窄），以收集更多風量。 ● 出風口：使用較大的塑膠杯（窄到寬）。 ● 連接部分：仍使用長的粗吸管。 ● 後期改進：加上一個長條形寶特瓶。 <p>這個設計的特點和效果如下：</p>

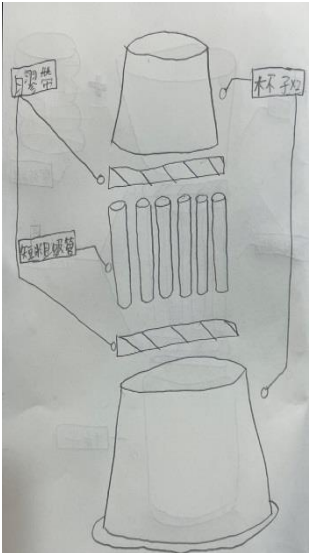

		<ol style="list-style-type: none"> 1. 進風口更大，可收集更多風量。 2. 出風口範圍變大，便於觀察羽球偏移。 3. 初始測試發現風力無法集中，羽球只能貼在吸管處旋轉。 4. 加上長條形寶特瓶後，大部分羽球可以順利升起旋轉。 5. 可以觀察到不同羽球的旋轉和偏移情況。 6. 結果仍有部分羽球無法順利升起。 <p>結論：第二代風洞機改善了觀察效果，但仍需進一步優化。</p>
<p>第三代風洞機</p> 		<p>根據前兩代的經驗和柯宇謙（2011）陳品文、邱健紘、宋品孝（2015），第三代風洞機做了更精細的調整：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 使用循環扇固定風速與位置。 ● 使用兩個寬口的塑膠杯。 ● 進風口：保持寬到窄的設計。 ● 出風口：參考國際羽球測試影片，將杯口改為寬到窄，與進風方向一致。 ● 連接部分：縮短粗吸管長度，以穩定氣流。 <p>這個設計的特點和效果如下：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 進出風口方向一致，可能有助於氣流的穩定性。 2. 縮短吸管長度，可以穩定氣流。 3. 正常羽球和自製羽球都能平穩升起。 4. 可觀察修補過的羽球的穩定性及偏移性。 <p>結論：第三代風洞機達到預期效果，可有效進行羽球偏移測試，是三代中最成功設計。</p>

表 3：歷代風洞機演變（照片由第四作者拍攝）

二、風洞機性能驗證：

我們以 3 顆通過 BWF 世界羽球聯盟認證比賽用球的 Yonex AS50、3 顆符合 BWF 標準的練習級超力綠標羽球，每顆錄影 30 秒、每秒 30 張影格，分析 900 影格的偏移作為檢驗自製風洞可靠性的標準：

羽球的種類	Yonex AS50-1	Yonex AS50-2	Yonex AS50-3	超力綠標
說明	有 BWF 認證用球			按 BWF「標準」製造、沒有認證完整羽球
平均值	0.66	1.71	1.15	2.09
標準差	1.10	1.02	0.51	0.94

表 4：三類羽球風洞偏移量比較表（單位：mm）

如表 4 所示，測試結果顯示我們設計的風洞機具有良好的鑑別力與可靠度，可以區別世界羽球聯盟「認證」比賽用球與僅符合「標準」的練習用球。可見羽球在全新的狀態下，即有性能上的差異，我們的修復目標以符合 BWF「標準」的超力綠標練習用球為標的。

四、自製羽球發射器設備說明：

為了標準化模擬羽球被擊打的力道，我們必須先設計一個發射器，符合標準發球最低力量為 9.07 公斤重。首先我們觀察玩具彈弓的發射動作，與打羽球時的發球動作類似，因此我們計畫以固定彈射力道的模式進行實驗，並同步觀察市售發球機的構造設計。其中我們經過下列改良流程：

（一）發想發射方式與力道測試（圖 1）：

1. **步驟 1**：以行李秤測試玩具彈弓，極限拉力為 4 公斤。玩具彈弓發射力道不足速度不夠，軌跡是拋物線，無法達到標準羽球飛行的「先加速、後煞車」的飛行軌跡。
2. **步驟 2**：市售玩具彈弓力道不足，至五金百貨購買腳踏車行李束帶（彈力繩）。並在店內以行李秤測試，兩條合併的拉力是 14.20 公斤，符合後續實驗標準而購買。
3. **步驟 3**：將 2 條彈力繩綁在推車把手的兩條桿子上，再將羽球拉緊在 2 條彈力繩上，放手讓羽球被射出去就達到類似彈弓的效果。實驗 5 次有 1 次成功，出現「先加速、後煞車」的飛行軌跡；失敗的 4 次，主要是徒手發射，與較難維持所需 45 度發射角。
4. **步驟 4**：在影音平台尋找市售發球機的示範影片，然後嘗試模擬它的機械結構：
 - （1）先將兩個五金百貨的 3 吋推車輪分解，移除萬向接頭只留下滾輪部分。
 - （2）在滾輪橡皮內邊鎖上六個小螺絲，綁上尼龍風箏線，沿著小螺絲繞圈圈；

(3) 將兩個滾輪鎖在木板上，兩個滾輪中間留略小於羽球的軟木塞（國際標準羽球 1 號，球頭直徑 26.21mm）的空間，用壓縮球頭的力量將球發射出去。兩輪間距我們試了兩組數據：一是過去科展做的略少 3% 的空間、以及我們自己猜的少 23%，再將羽球卡在這個空間裡。

(4) 最後用手快速拉滾輪上的尼龍繩，輪子快速轉動，藉由羽球頭被滾輪壓縮的力量，讓羽球像發球機一樣讓球彈飛出去，成果最多只能射 10 公分。

1	2	3	4	5
				
玩具彈弓的拉力測試	極限拉力為 4 公斤重	2 條彈力繩綁於推車的測試	2 條彈力繩拉力總和 14.2 公斤重	模擬市售發球機的測試

圖 1：發射力道測試（照片由第一作者/家長拍攝）

(二)自製羽球發射器與測試：

徒手發射羽球，手的力量和角度很難保持一致，因此我們需要製作一個羽球發射器，控制發射角度和力量，也保持後續實驗的重複性和一致性，同時實驗中隨時可調整設定，且更能理解羽球的飛行特性。

1.設計圖發想（表 5）：

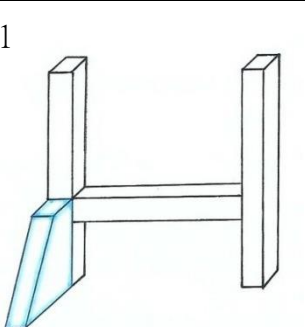
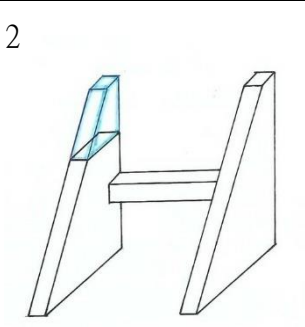
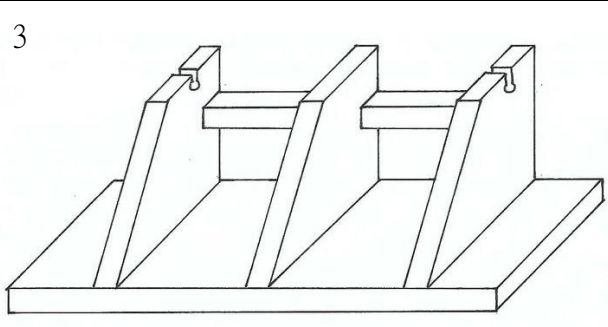
1	2	3
		
以 H 型結構來設計，但是怕在拉彈力繩時它向後倒，所以加三角擋板來加強結構。	後來將三角擋板與 H 型柱合併（後稱側立板），再將頂端變矮。	為了將彈力繩固定住，所以在側立板的頂端挖一個凹槽，在中間加一片中立板，為了將羽球固定擺放位置和發射角度。

表 5：發射器設計演變（圖表由第一作者製作）

2.發射器實作（圖 2）：

2024 年 10 月 30 日，我們將以上實驗結果和設計圖，帶到木工坊與專家討論：

- (1) 加強彈弓 H 型結構，使它不會像在大賣場推車上因拉力而傾倒。
- (2) 使用的腳踏車束線為圓形，不容易固定羽球位子，木工坊正好有扁平的彈力繩，適合固定羽球，1 條拉力也等於 2 條五金百貨腳踏車束線，滿足實驗需求。
- (3) 我們根據牛頓萬有引力相關的物理學知識，知道發射角仰角 45 度，水平發射距離最遠，因此我們使用 45 度作為發射角度。
- (4) 木工專家將原中立板改為 2 片式結構，中間切 45 度斜角，可以減少發射時羽球和中立板的摩擦力，同時讓羽球準備發射時固定在中立板上不會掉下去。
- (5) 另外發射按鍵的設計，我們一開始設計木棒從彈力繩上方抽離，實際觀察這種方式造成扁平彈力繩釋放脫離有時間差，可能干擾射擊，木工專家建議機關由下往上頂，讓彈力繩脫離中立板凹槽，再彈出去打擊羽球，我們採用這個建議。

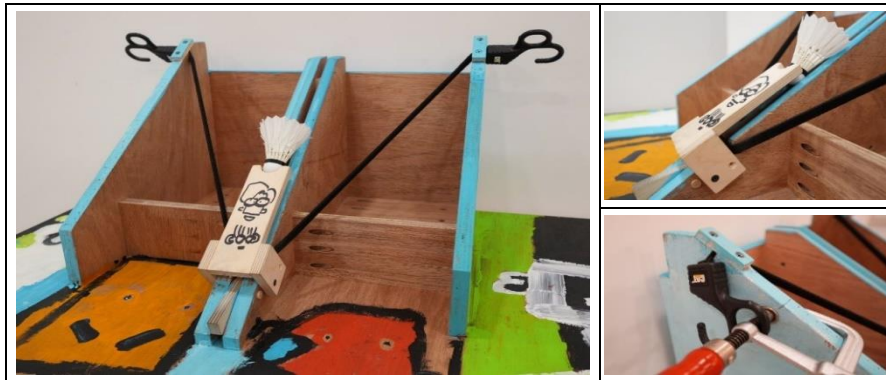


圖 2：自製羽球發射器（照片由第一作者拍攝）

參、研究方法與實驗流程設計

一、研究架構圖（圖 3）：

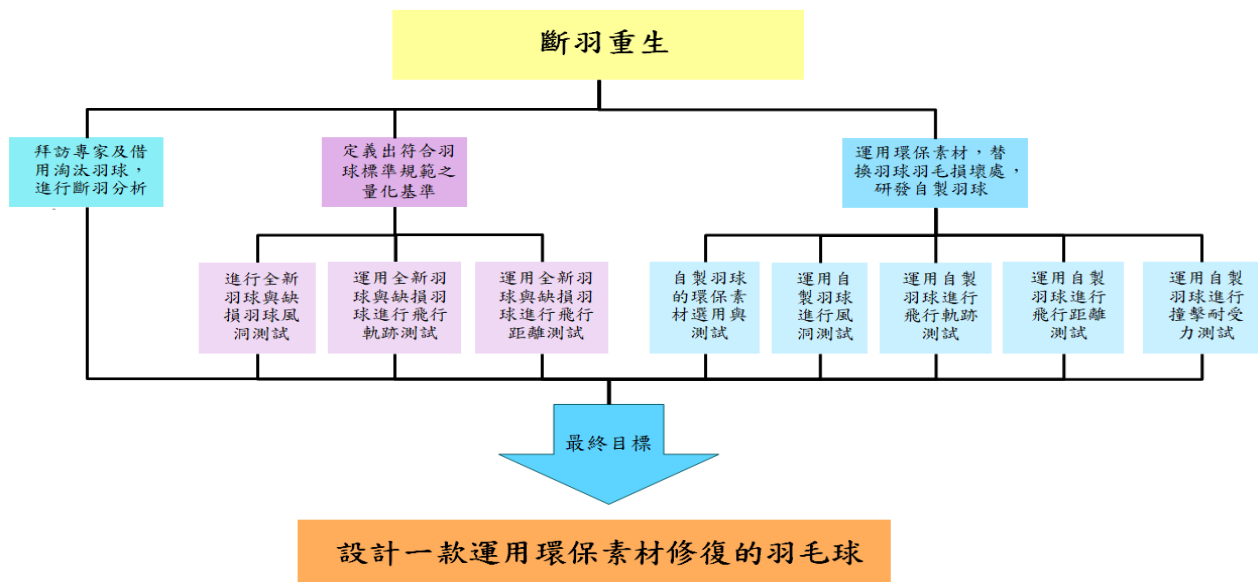


圖 3：斷羽重生研究架構圖（圖片由第二作者製作）

二、實驗流程設計：

【前置作業】確定研究主題：請教羽球教練／拜訪木工專家／確定題目和研究步驟(圖 4)

1. 現場觀察羽球飛行與打擊，同時教練提示羽毛向內折可以飛得更遠，外折將飛得較近。繼續思考如何延續羽球壽命，透過討論提出一項有趣創新的羽球主題相關研究。
2. 由指導老師安排時間前往木工專家的參觀和請教發射器製作方式。
3. 拜訪 tracker 資訊專家，專家表示以影片拍攝及程式運算，推得不同羽球的飛行軌跡。



圖 4：確定研究主題：拜訪請教專家群（照片由家長拍攝）

【實驗 1】收集研究資料：進行淘汰羽球的斷羽分析

1. 指導老師協助團隊將向羽球教練借用之 225 顆淘汰羽球帶回進行研究初探。
2. 針對 225 顆羽球進行羽球斷裂分析，並以正字號做紀錄（圖 6）。人工將淘汰羽球分類，分別為同側斷 1 根羽毛、同側斷 2 根羽毛、異側斷 2 根羽毛、同側斷 3 根羽毛、異側斷 3 根羽毛、同側斷 4 根羽毛以上、異側斷 4 根羽毛以上共七大類（圖 7）。
3. 每顆羽球經全體討論與人工判讀後，分類至不同組別，以正字記號來標記群體數量。

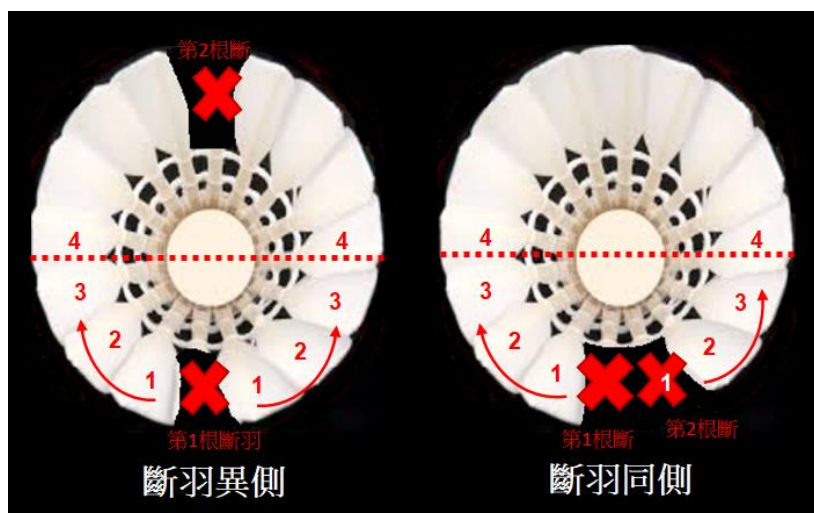


圖 5：同側異側示意圖（圖片由第二作者製作）

4. **同側異側定義（圖 5）：**以球的圓心為對稱軸來劃分，先取 1 根羽毛作為基準點，從基準點往左右兩邊的 4 根的斷裂羽毛以內為同側，若在基準點左右斷裂的第 5 根羽毛及 5 根以上，則定義為異側。



圖 6：斷羽分析判讀現場（照片由家長拍攝）



圖 7：斷羽分析組別（照片由第二作者拍攝）

【實驗 2-1】運用完整羽球與缺損羽球進行風洞測試

1. 將每顆羽球內貼上有黑色圓心的白色圓形貼紙，為了方便 Tracker 軟體追蹤。
2. 將自製風洞機安裝於循環扇上。
3. 根據實驗需求，進行完整羽球和缺損羽球的風洞測試。
4. 啟動循環扇，並將羽球依序放在自製風洞內。
5. 每顆羽球測試 3 次，每次 20 秒，並錄影。
6. 目測羽球的穩定性，20 秒內沒有停止旋轉，視為成功畫○，停止旋轉則是失敗畫×
7. 將風洞測試成功羽球錄好的影片送進 Tracker 分析，得知不同狀況的羽球的偏移量。
8. 風洞測試成功的羽球才能執行第二階的實驗-發射距離實驗。

【實驗 2-2】運用完整羽球與缺損羽球進行飛行軌跡／高度／距離測試（圖 8）

1. 將自製發射器用 2 隻夾具固定安裝在桌面上（高度 74 公分），以防在測試過程中發射時，反作用力造成發射器的移動。
2. 將捲尺用紙膠帶固定在地板，並將根據實驗需求放入不同型態羽球。
3. 每顆羽球測試 3 次，並錄影。
4. 設定起點線，運用捲尺測量不同羽球的直線飛行距離。
5. 重複步驟 4-4，直到所有羽球都測試完畢。
6. 將軌跡實驗錄好的羽球影片送進 Tracker 軟體分析，得知各類羽球的飛行軌跡。



圖 8：羽球飛行軌跡測試（照片由家長拍攝）

【實驗 3-1】自製羽球的環保素材選用與測試

1. 材料選擇

- (1) **天然環保素材**：想到端午節時，那輕薄耐用能折成肉粽的形狀，又能水煮的粽葉，成為了第一個被選中的環保素材。我們另外根據中華民國專利號 TW201309368A（2013），進一步推測製作羽球需要取得纖維較多的紙張或較厚的葉子，當作替換材料；故我們開始實驗這些素材，紙張方面，我們選擇了圖畫紙、瓦楞紙板。還有觀察餐桌上的玉米葉、與深綠色的蔬菜，纖維感較粗，推測深綠色或較厚的植物葉子可能比較強韌，應該會是適合拿來替代羽毛的材料。
2024 年的 9 月 30 日，我們在學校內收集了黑板樹和大王椰子的葉子。週末，組員再去公園收集各類素材，包括蒲葵、羊蹄甲、榕樹、黑板樹、春不老、黃槿、橡膠木、菩提樹、大葉欖仁、阿勃勒、與樟樹的葉子等（圖 9、圖 10、圖 11）。
- (2) **天然環保素材篩選**：因樹葉飽含水分，含水量會使整體重量增加，故我們各種採集到的樹葉以微波方式快速乾燥；為了避免在製成羽毛時出現裂痕，我們使用含角度測量功能的尺，從 90 度直角開始，兩邊內夾逐漸縮小角度，去觀察乾燥樹葉何時出現裂痕，過程中以彎折裂痕的方式，篩選出適合當替代羽毛的植物材料。

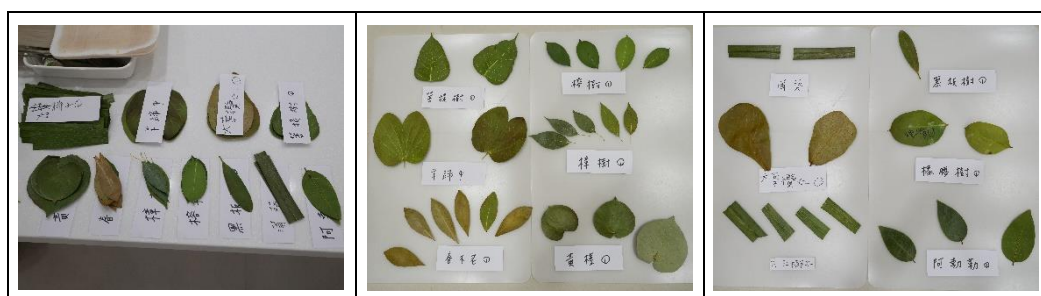


圖 9：自製羽球材料一覽表（照片由第一作者拍攝）

- (3) **回收環保素材**：文具店看到文件夾為 PET 塑膠，猜想破損 L 夾可以回收再利用。

2. 羽球製作

- (1) **天然環保素材**：將中華民國專利號 TW201309368A 的羽球型版圖樣，1:1 放樣在半徑 10.1 公分、16 等份圓紙上，並剪下貼在粽葉與蒲葵葉上，按造羽球型版圖樣剪下粽葉羽毛和蒲葵葉羽毛，再將剪下的粽葉羽毛和蒲葵葉羽毛插入羽球球頭。
- (2) **回收環保素材**：裁切 16 支羽球型版圖樣時，剩下的 5 支部分，發現尺寸正好可以圍成一顆羽球，組員嘗試將剩下的 5 支羽球型版圖樣，用雙面膠固定在羽球球梗上，再剪開上半羽翅部分。簡易確認可以在風洞旋轉後，將羽球型版圖樣紙貼上 L 夾上，做成球裙式塑膠片羽球，並依文獻（二）所提及之注意事項，將球裙縫隙加上彎折。



圖 10：第一輪自製羽球一覽表（照片由第一作者拍攝）

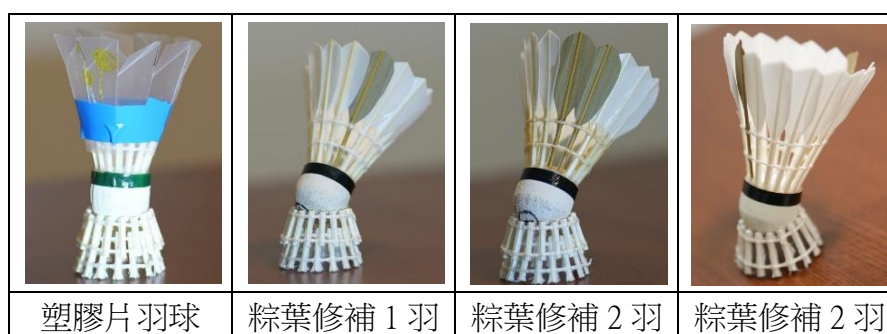


圖 11：第二輪自製羽球一覽表（照片由第一作者拍攝）

【實驗 3-2】運用自製羽球進行風洞測試，實驗步驟同【實驗 2-1】

【實驗 3-3】運用自製羽球進行飛行軌跡／高度／距離測試，實驗步驟同【實驗 2-2】

【實驗 3-4】羽球撞擊測試（圖 12）

1. 將兩顆正常羽球，一顆剪下其中一根正常羽毛，另一顆剪下兩根正常羽毛，並替換成自製的粽葉羽毛。此外，再準備一顆正常羽球和一顆使用塑膠片製作的羽球。
2. 將自製發射器用 2 隻夾具固定安裝在桌面上，固定高度為 74 公分，以防在測試過程中發射時，反作用力造成發射器的移動。
3. 發射器朝牆面發射，固定發射器離牆面 130 公分，每顆羽球測試到葉面斷裂為止，並以正字記號來標記。

4. 以目視檢查羽球的破損狀況。在葉面未斷裂之前，若測試成功則畫一條橫線；若葉面斷裂則停止標記，並記錄至斷裂之前的最後一次成功測試。



圖 12：羽球耐受力撞擊測試（照片由家長拍攝）

肆、研究結果

【研究結果 1】：淘汰羽球的羽毛斷裂情形分析

在與專家教練商借淘汰羽球後，針對 225 顆跨品牌羽球進行羽球斷裂分析，並以正字號做紀錄。如下圖 13 所示：

1. 多數羽球被淘汰的原因有一定的規律及關聯性。
2. 根據圖 13，針對羽球損壞的斷裂情況進行探討，缺損羽球中，斷 3 羽同側至斷 4 羽同側以上的損壞數量顯著下降，而損壞羽毛在異側時，斷裂數量則明顯上升，若將此類羽球進行風洞或飛行軌跡的測試，推測亦會有影響。
3. 淘汰羽球的共同特點為，在球頭與連接球頭的梗沒有絲毫損傷，但羽毛的狀態各有不同程度的損傷。
4. 觀察球頭堅硬的軟木塞，與羽球硬挺的球梗與堅固的縫線，外加外層塗上的膠水，均經過專業且特殊的處理，以我們的技術上難以獨立完成製作完整羽球；羽球為耗損性的運動用品，一旦被打壞只有丟掉，過去並無任何回收再利用的價值。
5. 綜上所述，我們決定蒐集淘汰羽球，並利用其球頭完好的特性，進行斷裂羽毛的替換；而羽毛的材質，則選用環保素材，使淘汰羽球重新嶄露並延續新生命！

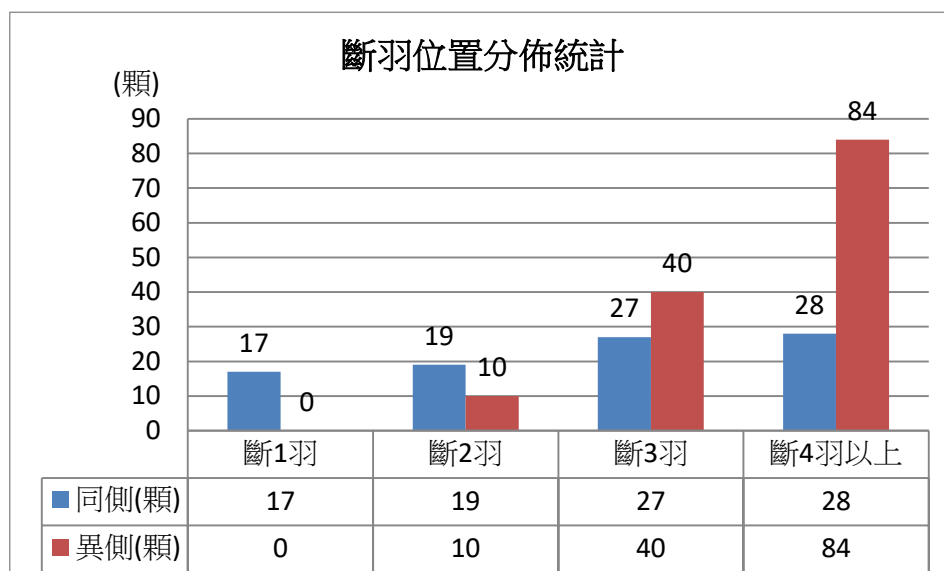


圖 13：羽球斷裂位置顆數表（圖表由第二作者製作）

【研究結果 2-1】：完整羽球與缺損羽球風洞測試（圖 14）

1. 根據【研究結果 1】，淘汰羽球中，當羽球開始斷 1 羽及斷 2 羽時，被淘汰的機率會快速增加，這次科展研究選擇斷裂 1 根羽毛的羽球，及斷裂 2 根的羽球作為修補對象。
2. 為了了解羽球的飛行穩定度，首先在學校的自然教室進行風洞實驗，觀察完整與缺損羽球在風洞中的表現。我們將羽球進行編號，完整的 3 顆羽球、斷 1 羽的 3 顆羽球、斷 2 羽同側的 3 顆羽球、斷 2 羽異側的 3 顆羽球共 12 顆不同型態之羽球，通過風洞測試跟錄影拍攝，觀察完整和缺損羽球的偏移狀況，和獲得完整和缺損羽球的風洞實驗數據，以此作為標準，判讀各種缺損羽球的穩定性。

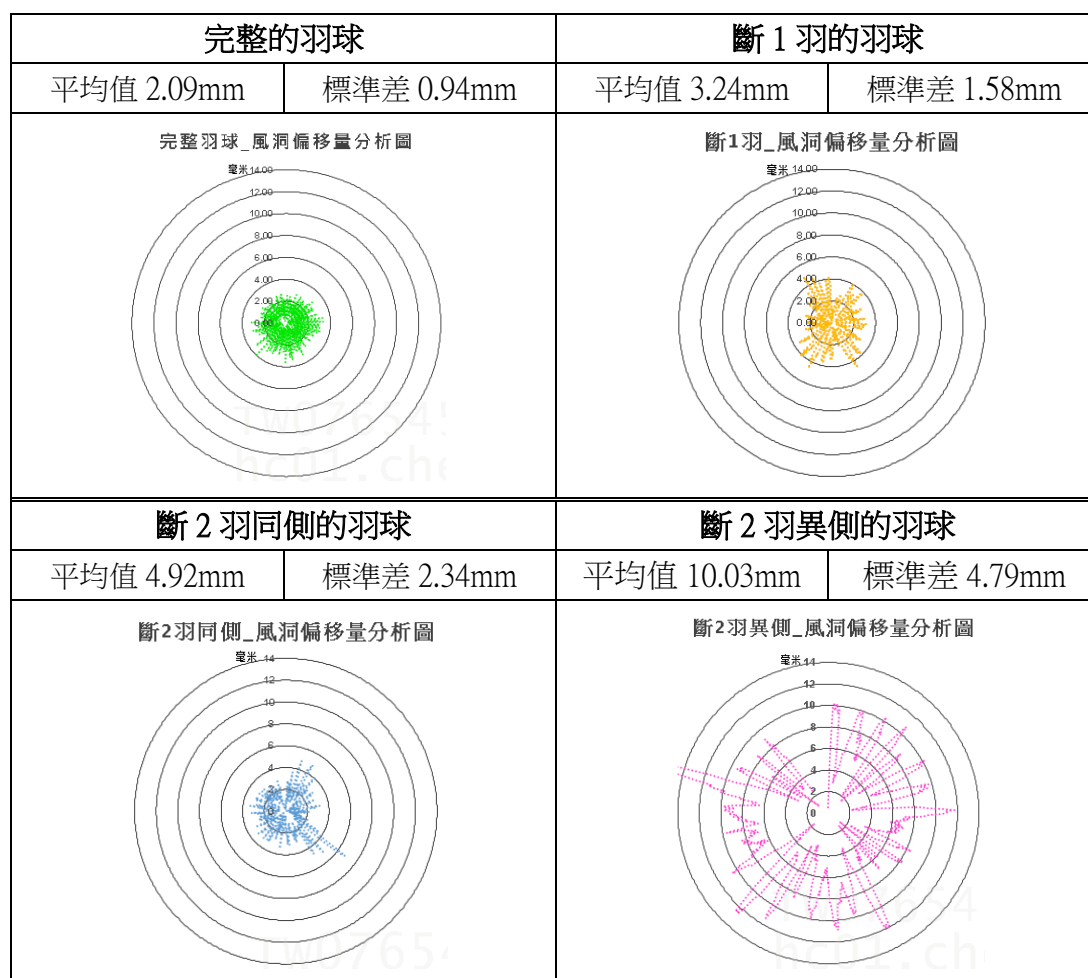


圖 14：完整羽球與缺損羽球的風洞偏移量分析圖（圖片由第三作者製作）

本研究旨在開發一款採用環保替代材料製成的再生羽球，期望其在風洞測試中所展現的旋轉穩定性，能夠接近部分現行市售羽球之水準，以具備實際應用之潛力。為此，我們首先分析了多款「完整羽球」在風洞中的穩定性表現。

我們以完整羽球偏移量的「平均值」（單位：mm）作為衡量羽球在風洞中旋轉穩定性的主要依據。考量再生羽球的實用目標，我們將本研究的「風洞好球帶」定義為平均值 2.09 mm 的區域。

這個標準旨在界定出一款品質優良、適合常規練習，乃至一般比賽使用的羽球應具備的風洞穩定性水平。我們期待透過本研究的修補技術，能使自製的再生羽球，其風洞穩定性能落入此「好球帶」內，展現與高品質市售羽球相近的風洞穩定性。

【研究結果 2-2】：完整羽球與缺損羽球進行飛行軌跡／高度／距離測試

1. 本實驗運用自製發射器，運用固定的彈力發射同廠牌完整羽球共 12 顆，每顆進行三次的飛行，並固定角度 45 度的發射位置，並同步於定點運用手機進行攝影，並將影像輸入 tracker 軟體進行飛行軌跡的判讀（如下圖 15）。

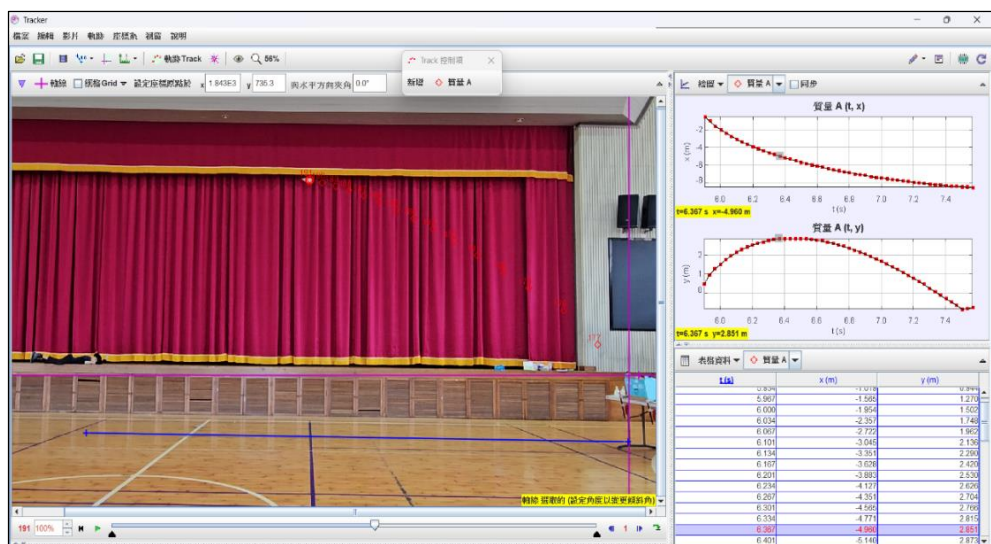


圖 15：飛行軌跡實測現場（圖片由第一作者製作）

- 彙整所有完整羽球軌跡路徑數據繪製如下圖 16，完整羽球飛行時，飛行距離在 7.98 至 8.21 公尺之間，而飛行最高高度落在 3.65 至 4.19 公尺之間，可參考下表 6。

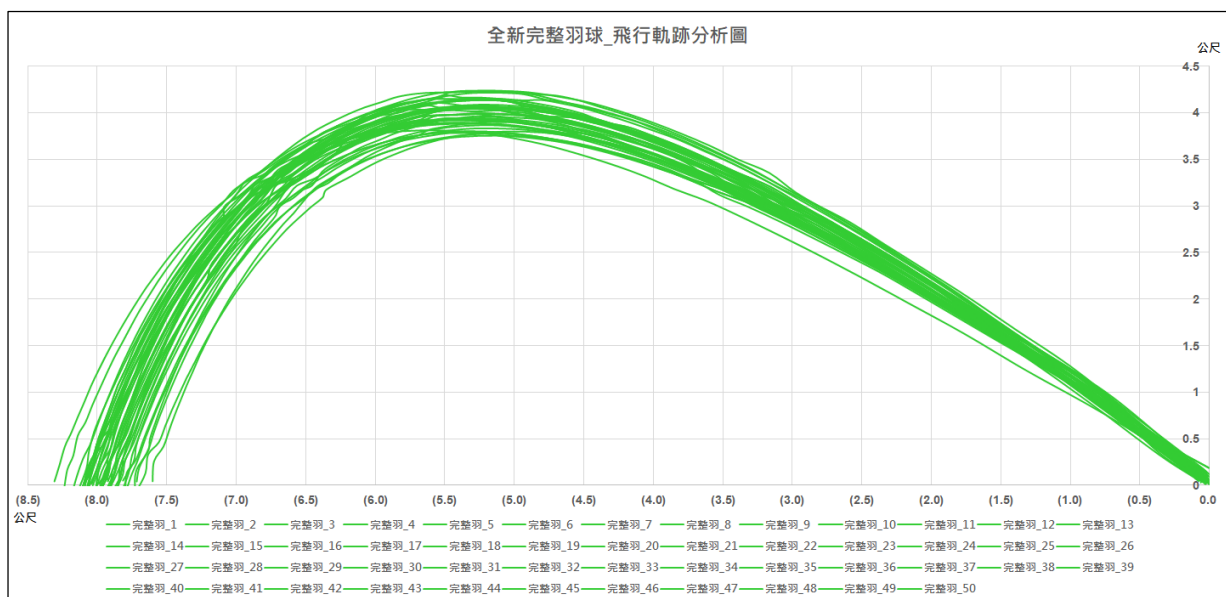


圖 16：完整羽球飛行軌跡實測（圖片由第三作者製作）

羽球種類	飛行距離 平均	距離 平均值	標準差	飛行最高 高度平均	最高高度 平均值	標準差
完整羽球 A1	8.00	8.06	0.07	4.09	3.93	0.16
完整羽球 A2	7.98			4.19		
完整羽球 A3	8.05			3.98		
完整羽球 A4	8.17			3.92		
完整羽球 A5	8.11			3.91		
完整羽球 A6	8.00			3.91		
完整羽球 A7	8.10			3.99		
完整羽球 A8	7.99			3.65		
完整羽球 A9	8.17			3.73		
完整羽球 A10	8.07			3.97		

表 6：完整羽球飛行距離與飛行最高點表（單位：公尺）

3. 進一步要了解缺損羽球的飛行軌跡，進行不同斷裂模式的羽球之飛行測試。檢視淘汰羽球除斷羽處之外，通常其他羽毛也多有細部缺損或岔毛，為減少實驗變因，我們運用同廠牌完整羽球剪除 1 羽和 2 羽方式，進行缺損羽球飛行軌跡測試。以下圖 17 為缺損羽球的飛行軌跡：

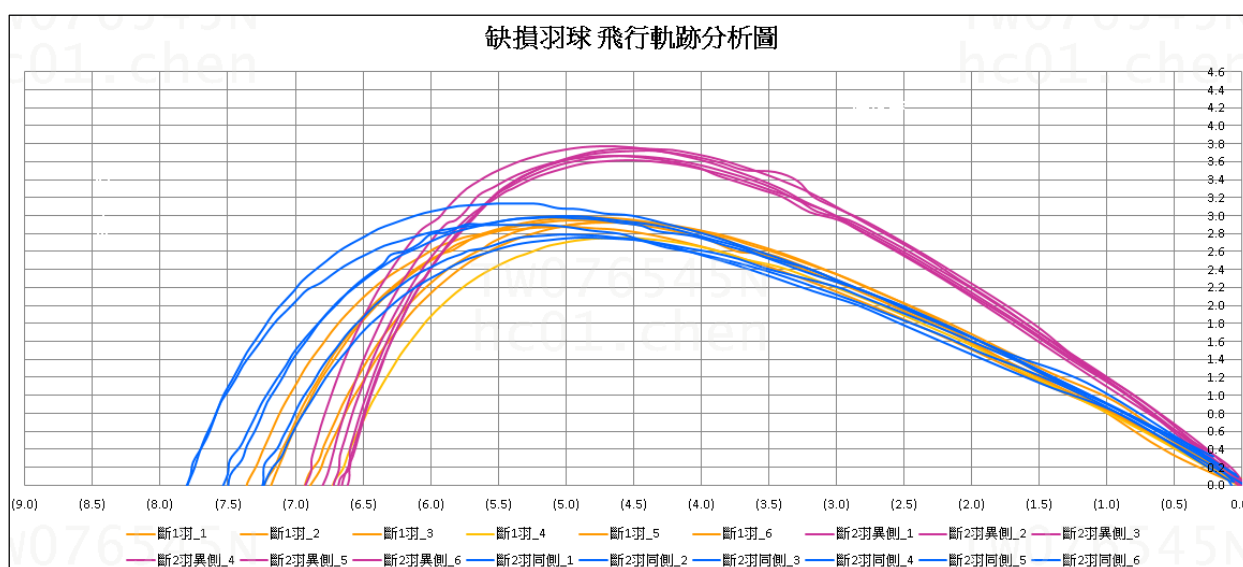


圖 17：缺損羽球飛行軌跡實測（單位：公尺）（圖片由第三作者製作）

4. 缺損羽球的飛行實驗中，斷 1 羽、斷 2 羽同側、斷 2 羽異側的實驗羽球，每種都有 2 顆、每顆進行 3 次彈射飛行，3 種實驗羽球共 18 筆數據。
5. 以橘線的斷 1 羽之缺損羽球為例，其飛行最高點介於 2.75 至 2.97 公尺，飛行距離則介於 6.73 至 7.36 公尺之間；藍線的斷 2 羽同側之缺損羽球，最高點軌跡略高於斷 1 羽羽球，飛行最高點介於 2.76 至 3.14 公尺，飛行距離則介於 7.22 至 7.79 公尺之間；紫線的斷 2 羽異側之缺損羽球，軌跡最高點為三類缺損羽球中表現最佳，飛行最高點介

於 3.61 至 3.78 公尺，但其飛行距離為三者中最短，介於 6.62 至 6.93 公尺之間，斷 2 羽異側的缺損羽球數據中，每顆球的飛行軌跡較集中，呈現一致性。

6. 結果，缺損羽球與完整羽球平均值相較：斷 1 羽之缺損羽球飛行最高點少 26.4%，飛行距離少 12.8%；斷 2 羽同側之缺損羽球，飛行最高點少 25.9%，飛行距離少 7.1%；斷 2 羽異側之缺損羽球，軌跡最高點為三類缺損羽球中表現最佳，少 6.1%，但其飛行距離為三者中最短，少完整羽球 16.7%，但斷 2 羽異側的缺損羽球數據中，每顆球的飛行軌跡較集中，呈現一致性，可參考表 7。

羽球種類 \ 飛行距離	第一次	第二次	第三次	最大值	最小值	總平均	與完整差距	標準差
斷 1 羽 B1	7.36	7.18	7.24	7.36	6.73	7.05	-12.8%	0.245
斷 1 羽 B2	6.73	6.92	6.87					
斷 2 羽同側 B3	7.51	7.24	7.22	7.79	7.22	7.51	-7.1%	0.244
斷 2 羽同側 B4	7.53	7.79	7.76					
斷 2 羽異側 B5	6.65	6.73	6.62	6.93	6.62	6.73	-16.7%	0.114
斷 2 羽異側 B6	6.79	6.68	6.93					

羽球種類 \ 飛行最高高度	第一次	第二次	第三次	最大值	最小值	總平均	與完整差距	標準差
斷 1 羽 B1	2.87	2.97	2.95	2.97	2.75	2.90	-26.4%	0.08
斷 1 羽 B2	2.75	2.92	2.93					
斷 2 羽同側 B3	2.97	2.78	2.76	3.14	2.76	2.92	-25.9%	0.142
斷 2 羽同側 B4	2.98	2.89	3.14					
斷 2 羽異側 B5	3.65	3.61	3.75	3.78	3.61	3.7	-6.1%	0.064
斷 2 羽異側 B6	3.68	3.73	3.78					

表 7：缺損羽球飛行距離與飛行最高點表（單位：公尺）

7. 我們希望創造一款以環保素材重生的自製羽球，並驗證修復結果。因此我們由完整羽球與缺損羽球的軌跡中，發現其飛行距離與飛行軌跡最高點可定義出一組介於辨別好壞之間的數據，也就是飛行最高點介於 3.8 至 4.2 公尺，飛行距離則介於 7.8 至 8.3 公尺之間。依此原則將此數據的區間畫出，將其定義為本研究的「好球帶」，可參考下圖圖 18 所示。

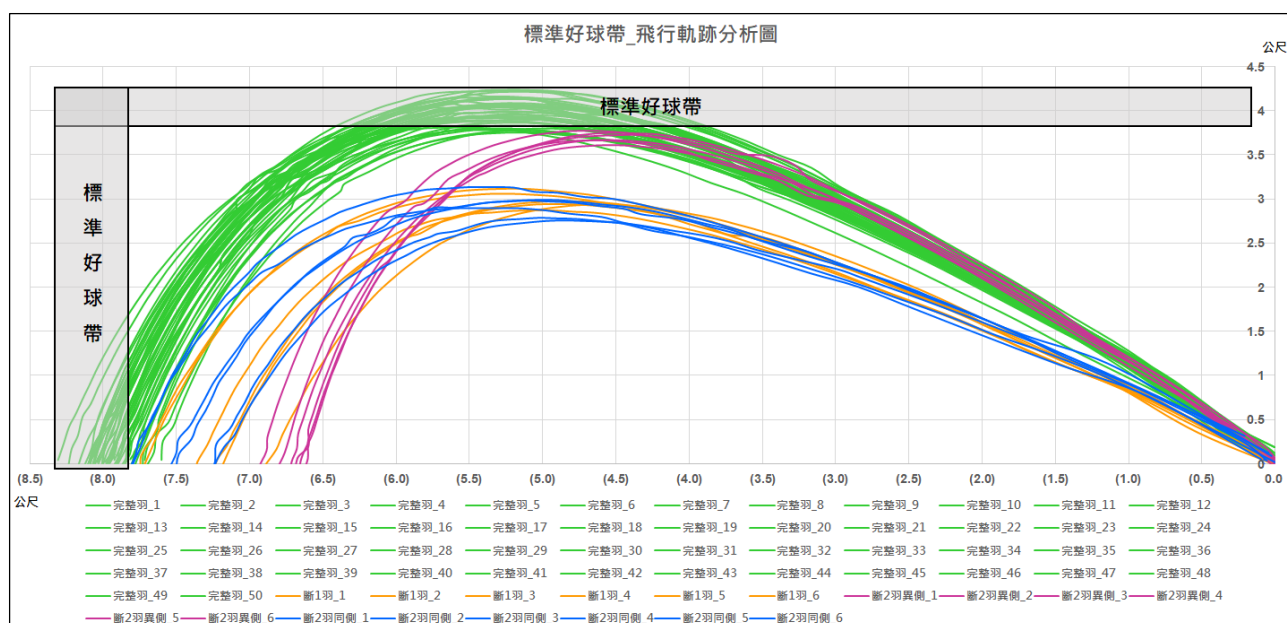


圖 18：標準好球帶飛行軌跡圖（圖片由第三作者製作）

【研究結果 3-1】：自製羽球的環保素材選用與測試

1. 承續【研究結果 1】，我們保留羽球軟木塞球頭與上層支架，再發揮創意尋找再生素材，並運用中華民國專利號 TW201309368A 型版圖樣為羽毛模型參考與製作第一輪自製羽球。
2. 選材我們會選竹粽葉和蒲葵，他們是三個可以彎折到 15 度才有裂痕中的兩個，淘汰羊蹄甲的原因是因為梗太細，不好用。蒲葵跟大王椰子都是棕櫚科，葉子都很寬很長；但蒲葵更寬而且寬度較為一致，也比較有韌性。大葉欖仁看起來纖維很多、莖很粗，可是輕輕用奇異筆寫植物標籤時，馬上被戳破而且發出清脆的聲音，很不理想(表 8)。

彎折出現裂痕角度	1 號樣本	2 號樣本	彎折出現裂痕角度	1 號樣本	2 號樣本
羊蹄甲	<15 度	<15 度	粽葉	<15 度	<15 度
榕樹	45 度	45 度	阿勃勒	30 度	30 度
黑板樹	60 度	45 度	菩提樹	45 度	30 度
春不老	30 度	30 度	大葉欖仁	45 度	45 度
大王椰子	30 度	45 度	蒲葵	15 度	15 度
黃槿	45 度	30 度	樟樹	45 度	75 度
橡膠木	60 度	60 度			

表 8：乾燥樹葉彎折後出現裂痕角度表

3. 組員運用市售粽葉直接進行剪裁，先把廢棄球頭的羽毛用斜口鉗拔除，並用 T 牌黏著劑，以同樣手法（一滴在凹洞裡）行粽葉羽毛的替換。

4. 將第一輪製作的羽球秤重，我們發現若每一片羽毛都換成葉子的話，整顆羽球會超過 BWF 國際羽球標準重量 4.74 公克到 5.50 公克，所以根據前一實驗斷羽分析的結果，如果可以羽球在斷一根羽毛或斷兩根時，即時替換，便可延續其使用壽命；我們決定選定斷一根羽毛與斷兩根羽毛的羽球進行羽毛替換就好。
5. 斷羽分析中發現，若直接拿淘汰羽球進行實驗，我們發現淘汰羽球的其他羽毛都有分岔現象，會增加飛行時的不確定原因，所以最後決定用全新羽球剪除羽毛的方式，進行後續實驗。
6. 自製羽球重量介於 4.74 公克到 5.50 公克，塑膠片羽球雖超出 5.50 公克，但因其材料環保耐用，且容易取得，故我們將其列入備選素材中；蒲葵葉羽球重量 7.5 公克，超重太多，因此在此階段淘汰；故最後我們選取了以下四類自製羽球，進行後續研究，如下表（表 9）：

名稱	塑膠羽球	粽葉修補 1 羽	粽葉修補 2 羽 (同側)	粽葉修補 2 羽 (異側)
重量	5.7g/5.8g/5.9g	5.0g/5.0g/4.9g	4.8g/5.0g/5.5g	4.8g/4.9g/4.7g
備註	以整片球裙加上膠帶黏接在球頭	任選一根羽毛替換成粽葉羽毛	選取相鄰的 2 根羽毛進行替換	選取羽毛對稱面的 2 根羽毛進行替換

表 9：自製羽球相關資訊表

【研究結果 3-2】：運用自製羽球進行風洞測試

1. 承續【研究結果 1】和【研究結果 2-1】，本研究選擇斷 1 根羽毛、斷 2 根的羽球作為修補對象，每種都實作 5 顆。接下來將修補的羽球進行編號，粽葉修補斷 1 羽、粽葉修補斷 2 羽同側、粽葉修補斷 2 羽異側。另外製作塑膠片修補的 3 顆羽球，共 18 顆不同型態之羽球，做風洞實測與影像拍攝，目標為目測自製羽球的偏移狀況，利用各種羽球的風洞實驗數據，了解我們修補的羽球的穩定性。
2. 粽葉修補和塑膠片修補羽球的風洞實驗偏移量結果（圖 19）：

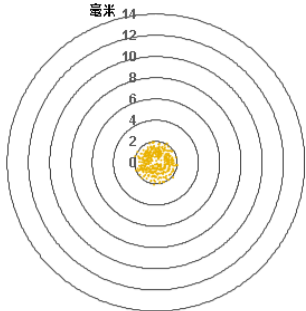
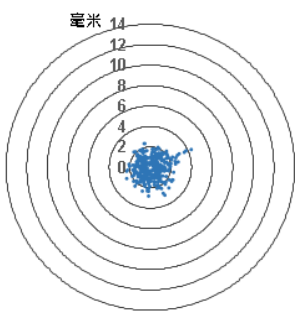
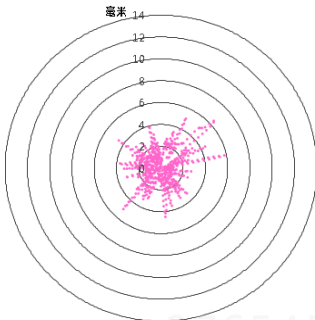
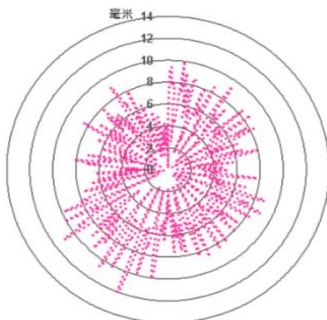
粽葉修補斷 1 羽的羽球		粽葉修補斷 2 羽同側的羽球	
平均值 1.45mm	標準差 0.61mm	平均值 2.49mm	標準差 1.19mm
自製粽葉修1羽_風洞偏移量分析圖 		自製粽葉修2羽同側_風洞偏移量分析圖 	
粽葉修補斷 2 羽異側的羽球		塑膠片修補的羽球	
平均值 4.85mm	標準差 3.07mm	平均值 7.15mm	標準差 3.5mm
自製粽葉修2羽異側_風洞偏移量分析圖 		自製塑膠羽_風洞偏移量分析圖 	

圖 19：粽葉和塑膠片修補的羽球的風洞實驗偏移量（圖片由第二作者製作）

由圖可得知，完整羽球與粽葉修補缺損羽球的風洞實驗偏移量結果，以其平均值為準，穩定性由高至低排列如下：粽葉修補斷 1 羽的羽球＞完整羽球（2.09mm）＞粽葉修補斷 2 羽同側的羽球＞粽葉修補斷 2 羽異側的羽球＞塑膠片修補的羽球。

【研究結果 3-3】：運用自製羽球進行飛行軌跡／高度／距離測試

1. 依【研究結果 2-2】定義出的好球帶，將粽葉修補 1 羽、粽葉修補同側 2 羽的羽球、粽葉修補異側 2 羽及塑膠片修補羽的羽球，經由同一發射器進行飛行軌跡的測試後，其呈現的飛行軌跡與本研究所定義之好球帶對照，如下圖（圖 20）所示：

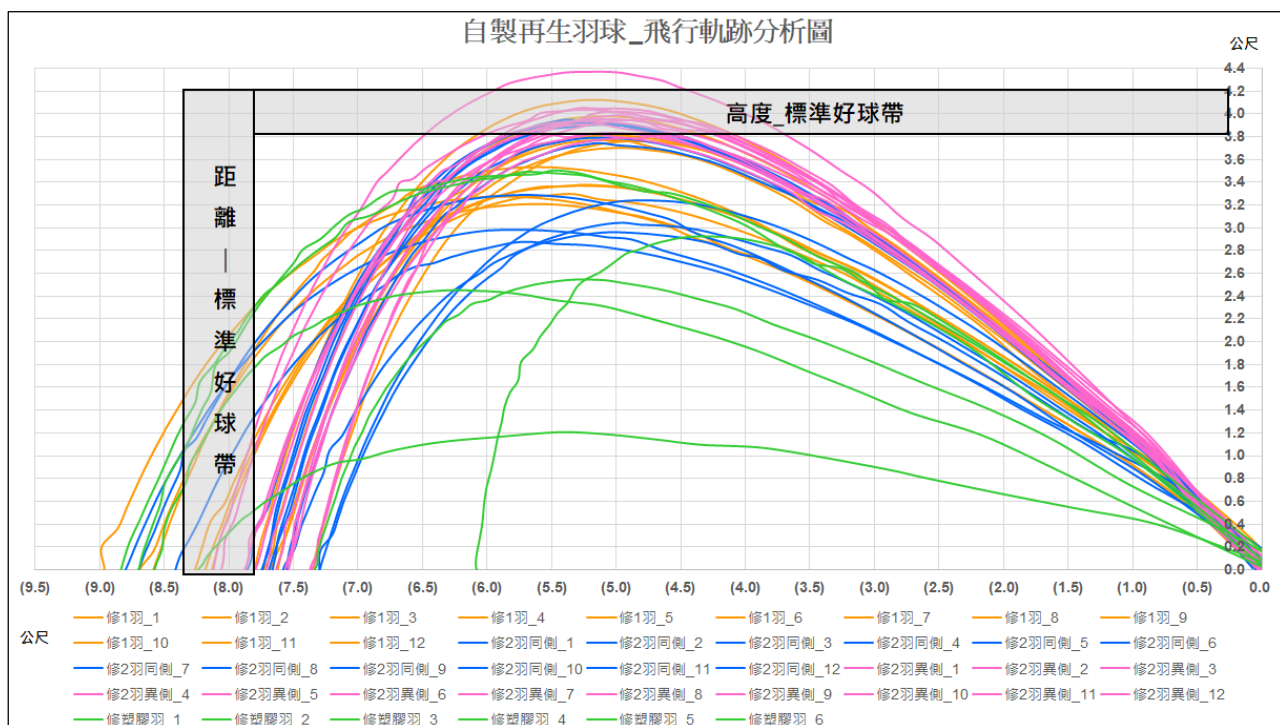


圖 20：自製再生羽球飛行軌跡圖（圖片由第三作者製作）

2. 以飛行軌跡而言，我們希望自製羽球能同時符合「飛行高度」和「飛行距離」之好球帶，兩者兼備才能延續羽球的使用壽命，從上圖（圖 20）可清楚看出，部分自製羽球無法達到飛行高度好球帶。
3. 由圖可得知自製羽球的飛行高度中，修 1 羽、修 2 羽同側、修 2 羽異側羽球均符合好球帶的標準，飛行高度介於 3.8 公尺與 4.2 公尺之間；自製羽球的飛行距離中，此三類自製羽球的飛行距離也有進入好球帶，飛行距離介於 7.8 公尺與 8.3 公尺之間。
4. 經修復的羽球與完整羽球的相比：修 1 羽之羽球，飛行距離增加 0.36%，飛行最高點短 8.61%；修 2 羽同側之羽球，飛行距離只短 1.93%，飛行最高點短 11.97%；修 2 羽異側之羽球，飛行距離少 3.96%，飛行最高點增加 1.52%；塑膠片修補的羽球，飛行距離少 1.49%，飛行最高點減少 32.23%。可參考下表（表 10）。

飛行距離 羽球種類	第一次	第二次	第三次	最大值	最小值	總平均	與完整 羽球性 能差異	標準差
修 1 羽 C1	8.96	8.68	8.13	8.96	7.46	8.11	+0.36%	0.0447
修 1 羽 C2	8.27	8.58	8.18					
修 1 羽 C3	7.77	7.75	7.92					
修 1 羽 C4	7.46	7.85	7.76					
修 2 羽同側 C5	7.98	7.68	7.80	8.81	7.29	7.92	-1.93%	0.489
修 2 羽同側 C6	7.88	7.79	7.88					
修 2 羽同側 C7	7.29	7.30	7.57					
修 2 羽同側 C8	8.42	8.69	8.81					
修 2 羽異側 C9	7.88	8.06	8.12	8.12	7.44	7.76	-3.96%	0.226
修 2 羽異側 C10	7.54	7.86	7.57					
修 2 羽異側 C11	7.75	7.81	7.92					
修 2 羽異側 C12	7.68	7.44	7.45					
塑膠片羽 D1	8.83	6.08	8.69	8.83	6.08	7.96	-1.49%	1.064
塑膠片羽 D2	8.24	7.34	8.57					

飛行最高高度 羽球種類	第一次	第二次	第三次	最大值	最小值	總平均	與完整 羽球性 能差異	標準差
修 1 羽 C1	3.27	3.21	3.30	4.12	3.21	3.60	-8.61%	0.298
修 1 羽 C2	3.37	3.54	3.38					
修 1 羽 C3	3.81	3.77	4.12					
修 1 羽 C4	3.76	3.98	3.70					
修 2 羽同側 C5	3.95	3.74	3.79	3.95	2.87	3.47	-11.97%	0.441
修 2 羽同側 C6	3.92	3.91	3.93					
修 2 羽同側 C7	3.24	3.05	2.96					
修 2 羽同側 C8	2.87	3.28	2.98					
修 2 羽異側 C9	3.83	4.04	4.38	4.38	3.79	4.00	+1.52%	0.211
修 2 羽異側 C10	3.83	3.91	3.94					
修 2 羽異側 C11	4.05	3.99	3.94					
修 2 羽異側 C12	4.02	3.95	3.79					
塑膠片羽 D1	3.49	2.92	3.51	3.51	1.10	2.67	-32.23%	0.891
塑膠片羽 D2	1.10	2.55	2.45					

表 10：自製再生羽球飛行距離與飛行最高點表（單位：公尺）

5. 由圖 20 可比較出，運用粽葉修復之羽球，在飛行距離上多能達到好球帶距離之標準。塑膠片修補之羽球，其飛行最高點介於 1.10 公尺至 3.51 公尺，飛行距離介於 6.08 公尺至 8.83 公尺之間，變異數較大、飛行穩定性不佳，不如粽葉修補的羽球。

【研究結果 3-4】：運用自製羽球進行撞擊測試

1. 本研究的自製羽球，若需要供一般民眾打球使用，便須經過不斷擊打的撞擊測試，為了比較完整羽球與我們自製羽球在耐用性方面的差異，所以我們採用自製的彈力繩發射器，將距離（1.3 公尺）和拉力（14.2 公斤重）固定，面對牆壁進行羽球彈射，藉此模擬羽球在高速擊打過程中所受到力道，並觀察自製羽球在擊打次數是否能和完整羽球相比擬，以此判斷其耐受性。下表（表 11）為完整羽球與自製羽球撞擊測試表：

名稱	塑膠片球	粽葉修補 1 羽	粽葉修補 2 羽（同側）	粽葉修補 2 羽（異側）	完整羽球
斷裂狀況					
撞擊次數	7 次	68 次	191 次	106 次	300 次以上
說明	第 8 次塑膠面斷裂	第 69 次葉面斷裂	第 192 次葉面斷裂	第 107 次葉面斷裂	未斷裂，只出現岔毛

表 11：正常羽球與自製羽球撞擊測試（圖表由第四作者製作）

2. 實驗初始，我們運用完整羽球進行撞擊，經過 300 次以上的彈射，完整羽球的羽毛未有任何損壞之跡象，故我們以 300 下為撞擊測試的基準，以此標準來測試自製羽球是否能通過。最後，我們得到的數據各有不同。
3. 實驗發現，天然羽毛通常會具備更好的耐用性，這使得正常羽球在激烈撞擊測試中，能夠維持較長的使用壽命。而我們粽葉修補 1 羽（同側）和粽葉修補斷 2 羽的粽葉(同側與異側)，是一種相對較脆弱的天然材料，其耐用性和抗衝擊能力，可能無法承受長時間的高頻率使用，所在撞擊測試中較容易破裂。
4. 在實驗過程中觀察到，粽葉修補羽球在經歷多次撞擊後，其損壞情形多數表現為沿著葉脈紋理方向產生線條型裂縫，而呈現出順著纖維直向斷裂的特性。此現象顯示粽葉的天然纖維在撞擊時，容易沿葉脈方向失去結構支撐，進而導致破裂。

伍、討論

【研究討論一】：斷羽分佈分析

異側羽毛斷裂的有顯著增加，根據統計，隨著斷裂羽毛數量的增加，異側羽毛的斷裂數量顯著高於同側羽毛。例如，在「斷 4 羽以上」的情況下，異側羽毛斷裂顆數 84 顆遠高於同側羽毛的 28 顆。這可能表明在羽球受力時，異側羽毛承受的力量或衝擊較大。

而同側羽毛斷裂數量有不同變化，同側羽毛的斷裂數量在斷裂羽數少於 3 羽時，保持在較低的數字，如斷 1 羽為 17 顆，斷 2 羽為 19 顆，但在斷裂羽數達到 4 羽以上時，數量仍有顯著增加為 28 顆。這顯示在強烈的衝擊下，同側羽毛斷裂的機會仍然存在，但相對較異側羽毛來說，斷裂數量較少。

就整體來看，羽球的斷裂情況呈現出異側羽毛較容易斷裂的趨勢，尤其是在斷裂數量達到 3 羽或以上時，異側羽毛的斷裂比例明顯較高。而羽球中的羽毛一旦開始斷裂後，會繼續連續斷裂，由數據可得知，斷 3 羽的羽球被淘汰的機率為斷 2 羽羽球的二倍以上。綜合以上結果，有效替換的關鍵點在斷 2 根羽毛之前，斷 2 根羽毛的羽球又分為同側斷 2 根羽毛，以及異側斷 2 根羽毛的情形，若能在斷 1 根羽毛，或斷 2 根羽毛時，便即時透過不同方式進行修復，相信能延續羽球的使用壽命。

【研究討論二】：風洞實驗結果分析

回顧缺損羽球（如斷 1 羽、斷 2 羽異側）在風洞中穩定性顯著下降（標準差增大），同時其飛行軌跡也表現出距離縮短、高度降低且軌跡變異性增加的情況。以上結果初步支持了風洞穩定性差，則實際飛行性能也較差。

隨著羽球斷羽數量增加，我們發現偏移的平均值與標準差都會增加，這個結果顯示羽毛缺損的確造成穩定性變差。經由比較完整羽球和缺損羽球的風洞數據後，我們定義出本實驗的風洞好球帶，為平均偏移量在 2.09mm 以內的區域。若以完整羽球偏移所定出的好球帶，來和自製羽球相比較的話，棕葉修 1 羽和棕葉修 2 羽同側均有進入風洞好球帶，而棕葉修補 2 羽異側則稍微超出好球帶，塑膠羽球的偏移量最大，其數據則超出好球帶。其結果顯示以棕葉修補羽球，其飛行是具備穩定性的。

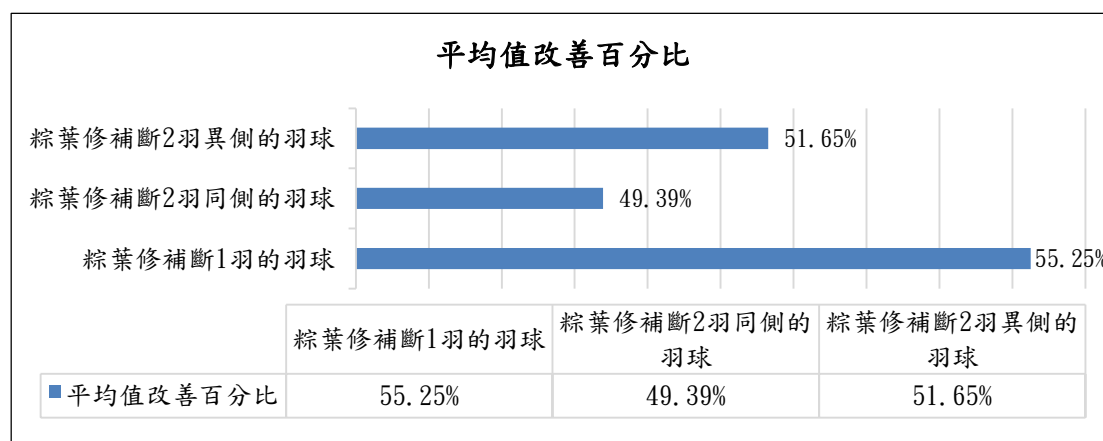


圖 21：經棕葉修補的羽球改善百分比（圖片由第一作者製作）

若是將缺損羽球和自製羽球的偏移量來做比較的話，如上圖 21 顯示經棕葉修補的羽球，其偏移量和平均值，都比未修補時改善約 50%，標準差的改善程度至少也有 35.9%，穩定性大幅提升。

斷 2 羽的羽球，經棕葉修補後的結果，平均值改善百分比相近，但斷異側的標準差改善幅度 35.9%，小於同側的 49.1%，由於完全修補後風阻相當，依 Aekaansh Verma, Ajinkya Desai, Sanjay Mittal（2013）的研究，推論這個差異應該是重量分布造成。棕葉修補 1 羽的羽球的偏移平均值 1.45mm，甚至比完整羽球的平均值 2.09mm 還要小，0.61mm 的標準差也比完整的 0.94mm 還要小，我們推測棕葉修補羽球，在飛行軌跡中比完整羽球更穩定。

在自製羽球中，塑膠羽球則表現最差，風洞的偏移平均值高達 7.13mm，推測可能是手動貼合的方式，使得球裙底部與球頭的間距不同（4.39mm、1.28mm、4.27mm 等），顯示我們自製塑膠片球不是一個平衡的圓錐體，故造成的整體偏移較大。與棕葉相比較起來，整枝棕葉羽毛替換修補，會比整片球裙式修補更穩定，因此若要運用塑膠片自製羽球，我們不建議在羽球斷 1 羽和 2 羽時，就把所有羽毛都剪掉，直接裝上塑膠片球裙。

【研究討論三】：飛行軌跡分析

由上述實驗結果可知，完整羽球與缺損羽球的飛行軌跡最高點與飛行距離，呈現著相當明顯的落差，故我們將兩者之間的數據彙整一起進行比較與分析。這次實驗讓我們發現，羽球的飛行距離會因為羽毛斷裂而變短。當羽球斷掉 1 根羽毛時，它的飛行距離比正常羽球短了大約 13%。如果是斷掉 2 根羽毛，飛行距離的影響會更明顯，尤其是當 2 根羽毛分別位在不同側時，飛行距離會減少最多，大約 17.3%。有趣的是，如果 2 根斷掉的羽毛在同一側，飛行距離竟然比斷 1 根還遠！這可能是因為同側斷裂讓羽球的旋轉比較穩定，不會太過傾斜。從這些結果可以看出，羽球的羽毛如果斷裂，飛行距離就會變短，而且斷越多影響越大，特別是當羽毛斷裂的位置讓羽球失去平衡時，它飛得更短、更不穩定。

而斷 1 羽的羽球使用粽葉修補單根斷裂的羽毛後，實驗後發現飛行距離表現略優於正常羽球，可能因為修補後的羽毛增加了穩定性，使空氣阻力減少。

粽葉修補斷 2 羽同側羽球，相較於未修復的斷 2 羽同側羽球，粽葉修補的羽球提升了飛行距離，顯示修補技術能夠部分彌補羽毛斷裂帶來的影響，有效提升飛行表現。

而以粽葉修補斷 2 羽異側的羽球，相較於未修復的斷 2 羽異側羽球，修補後的 2 羽異側羽球飛行距離明顯提升，顯示修補對於此類破損的羽球，具有顯著的補償效果，並能恢復部分飛行穩定性。

使用塑膠片取代羽毛的塑膠片球，飛行距離變異較大，可能與塑膠片的特性與空氣動力特性不同於羽毛有關，使其表現稍遜一籌，在部分測試中飛行距離較短，在飛行高度也無法達到高度好球帶。

【研究討論四】：自製羽球撞擊測試分析

本研究運用自製發射器撞擊牆壁的實驗方式，測試自製羽球的耐受性。以下圖 22 為撞擊結果圖示：

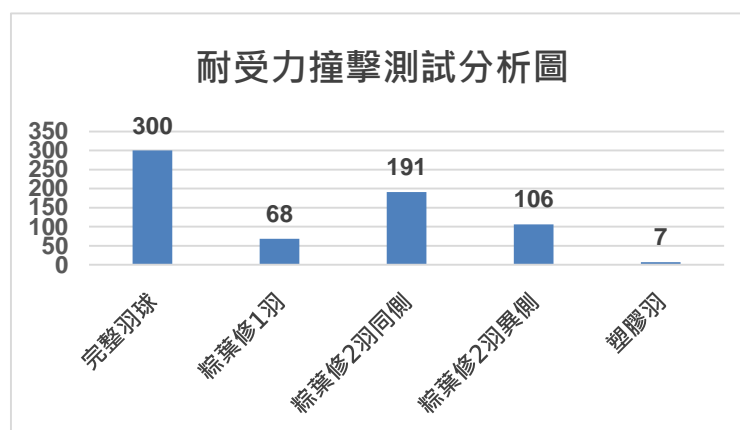


圖 22：各類羽球耐受力撞擊測試分析（圖片由第四作者製作）

經測試完整羽球經過三百次撞擊仍保持完好，我們推測市售羽球多使用鵝毛，這些材料經過專業處理，具備高度彈性、韌性與抗斷裂性，能在反覆受力下維持結構穩定，且市售羽球在製造時會把每根羽毛固定角度，插入的深度一致，以確保飛行穩定與結構均勻。相較之下，我們的自製粽葉羽球葉面產生斷裂，因為粽葉為天然植物纖維，其強度雖足以暫時修補，但相對脆弱。而葉片乾燥後容易變脆，受力時較易沿著葉脈方向撕裂，這與其天然纖維排列方式有關；且自製粽葉羽球由人工修補，固定的方法較為簡單，連接處容易成為受力薄弱點，導致較快損壞。

自製羽球中，由圖可知耐受力成效最不佳的為塑膠羽球，本研究的塑膠羽球使用的塑膠片材質為一般硬塑膠，彈性與抗裂性低，在反覆彎折與撞擊下極易出現裂縫，也無法像天然

羽毛或粽葉那樣產生微幅彎曲來吸收能量，因此在多次衝擊後迅速損壞。黏貼處只圍一圈膠帶的型式，也很容易脫落，所以塑膠片羽球還需要再多研究。

儘管粽葉修補羽球的耐用性不如完整市售羽球，但在受限資源條件下，已能有效延長羽球的可使用次數，最高達 191 次，可證明為即將報廢的羽球，提供了「重生機會」，展現了良好的環保意義與實用潛力。

陸、結論

本研究成功開創羽球再生的新可能，透過精密的科學實驗與創新設計，證明環保修補羽球的可行性。我們以粽葉為核心材料，提出一種完整羽球修補方式，不僅延長羽球壽命，更為環保永續與運動發展提供了嶄新解方。

羽球損壞機制揭密，修補關鍵時機確立：經分析 225 顆淘汰羽球，我們發現大多數羽球的損壞始於羽毛斷裂，而球頭與底座仍保持完好。實驗證實，當斷 1 至 2 羽時即時修補，可顯著維持羽球的飛行穩定性，避免提前報廢，大幅延長使用壽命。

粽葉修補羽球，飛行穩定度媲美完整品：透過風洞測試與飛行軌跡分析，我們發現粽葉修補的羽球在空氣動力學表現優異，其偏移量與完整羽球接近，甚至在部分測試中更勝一籌！粽葉因其天然纖維結構，成功模擬羽球原始的飛行特性，成為理想的修補材料。

撞擊測試驗證粽葉耐用性，挑戰羽球再生極限：在固定拉力的撞擊測試中，粽葉修補的羽球可承受高達 191 次撞擊，成功延長廢棄羽球的壽命；相較之下，塑膠片修補的羽球僅能承受 7 次撞擊即破裂，證明粽葉在環保與實用性上的雙重優勢。

環保創新，翻轉羽球運動的未來：本研究不僅提出羽球再利用的新模式，更突破傳統對羽球損壞即報廢的限制，證明透過適當修補，可讓羽球「斷羽重生」，延續其運動價值！這不僅能減少羽球淘汰率，減輕環境負擔，也能降低羽球運動的經濟門檻，讓更多人受惠。

未來展望：

本研究首創粽葉修補羽球技術，成功驗證其可行性。在再生材質的選用上，本研究採集 15 種週遭常見植物，經彎折測試後得到粽葉與蒲葵可耐彎折小於 15 度角，粽葉羽球能在風洞與飛行軌跡與天然羽球匹敵，但粽葉再生羽球耐久度還是不如天然羽球；未來如果能找到具備高流動、富彈性的膠水，可將其噴灑於粽葉羽毛上提升耐用性。另外，在進行淘汰羽球分析時，發現大部分的羽球都是損壞在羽毛處，綁線下方的羽毛梗大部分完好，若能善用堅固的球頭和綁線下的羽球梗，並開發出快速替換羽毛的修補工具，與對應的操作方法，將可讓羽球修補變得更為便捷與高效，讓羽球修補成為普及的環保運動！

在測試方法上，本研究運用了自製風洞與自製飛行發射器，並運用軟體比較其軌跡，並量測其飛行距離，在器材的使用上雖盡力將變因控制一致，但仍有部分差異性出現，例如發射器雖然可固定發射角度與力道，卻難以完整模擬所有擊打力道與角度。未來實驗將朝呈現真實擊打數據努力，邀請社會大眾進行測試，使粽葉再生羽球不僅是一場科展研究，更是一場對運動與環境的革命！羽球，不該是一次性消耗品，而是能夠重生的運動夥伴！

柒、參考文獻資料

1. Cooke, A.J.(1996) Shuttlecock design and development.*Sports engineering – design and development*(ed. S. J. Haake). Proceedings of the 1st International Conference on the Engineering of Sport. Blackwell Science, Oxford, UK.
2. Aekaansh Verma, Ajinkya Desai, Sanjay Mittal (2013). Aerodynamics of badminton shuttlecocks. Journal of Fluids and Structures Volume 41, Pages 89-98.
3. 中華民國專利號 TW201309368A · 2013, Page 39 第四圖。
4. 柯宇謙（2011）。奮發向上的毛毛蟲。中華民國第 51 屆中小學科學展覽會作品。
5. 陳品文、邱健紘、宋品孝（2015）。斷尾球生 — 探討羽球羽毛對飛行的影響。中華民國第 57 屆中小學科學展覽會作品。
6. 弓與箭(2) 箭為何有羽？簡易風洞實驗（2019）。<https://n.sfs.tw/content/index/11996>
7. Firoz Alam, Chanuch Nutakom, Harun Chowdhury (2015). Effect of Porosity of Badminton Shuttlecock on Aerodynamic Drag

【評語】 082814

利用天然常見的材料粽葉，自製修補羽球斷羽的材料，降低練球的耗材成本，切合生態永續環保的議題。利用粽葉來修補羽毛球，設計風洞來進行風洞實驗，在測試過程中也設計發球機來控制變因，在多次軌跡實驗中歸納修補羽毛球的流程與最佳化，具有實踐性與創造力。團隊態度積極，實驗設計完整。

作品海報



斷羽重生

自製羽球的再生之旅



摘要

本研究探討如何利用學校的落葉、端午包粽子的粽葉、破損L夾等環保替代材料，延長羽球的使用壽命，進一步**設計全國第一款再生羽球**，並透過「**風洞測試、飛行軌跡測試、耐受性測試**」進行科學驗證。研究方法包括專家訪談、環保材料篩選、風洞設計、發射器設計、Tracker軟體操作、撞擊設計等。根據我們的研究結果顯示：「**粽葉**」為修補羽球的**最佳素材**，在飛行穩定性、飛行軌跡、撞擊次數測試上，都能與完整羽球有相抗衡之水準，粽葉應用於生活中作為修補材料，具有潛在優勢。

研究動機

這學期體育課時，我們開始接觸羽球這項運動，班上同學熱衷於打羽球的同時，發現天然羽毛的羽球既脆弱又昂貴，會在短時間內磨損或破裂，一旦打壞了，除了再購買，似乎別無他法。每當看到羽球迅速損壞，我們總會感到相當可惜。我們也發現，整顆羽球會隨著羽毛損壞趨於嚴重而導致飛行晃動與偏移，趨向無法掌控，終至讓人不想再使用。

觀察到**羽球損壞多為羽毛斷裂，球頭常完好**，引發利用廢棄球頭、替換羽毛以達成「斷羽重生」的想法，期望開發便宜耐用的替代方案。我們的**目標是嘗試使用生活中常見的材料來替代羽毛，延長壽命**且不犧牲飛行品質，並減少對天然資源的依賴，此舉能降低成本、減少廢棄，更呼應SDGs責任消費與生態保護，展現運動器材永續設計的可能。另外，我們**運用國小中高年級自然科所學習的空氣流動、力與運動概念，設計風洞及自製發射器，分析飛行軌跡。透過材料、風洞與飛行分析，確保再生羽球性能可行。**

文獻回顧

(一) 羽球結構相關資料：

- Cooke (1996) 進行了一項實驗研究指出，羽球尾翼的空氣氣流與尾端環形空氣停滯區的氣流有關，因此**羽毛或球裙的間隙導致羽球的空氣阻力增加，是創造天然羽球先加速後減速飛行軌跡的主因**。

(二) 天然與塑膠羽球飛行軌跡研究：

- 我們使用**Chat GPT、Gemini**作為文獻探索的初步工具，在AI的協助下我們找到了：Aekaansh Verma, Ajinkya Desai, Sanjay Mittal (2013) 的研究中，**羽球上羽毛的阻力會嚴重影響其軌跡**，天然羽毛受到的阻力較大。它們的剎車速度也更快，達到先加速、後剎車的飛行軌跡。合成羽球的裙邊是由尼龍或塑膠製成，價格相對天然羽球便宜且耐用，但合成羽球在高速下會發生更大的變形，這種變形減少如天然羽毛的空氣阻力。**羽球裙邊的縫隙會導致羽球的空氣阻力增加，無間隙的合成羽球的阻力係數明顯小於天然羽球**。旋轉的羽球會受到稍大的阻力，但旋轉的影響微乎其微。依此實驗，**我們在設計自製羽球，需考慮羽球裙邊的縫隙**。

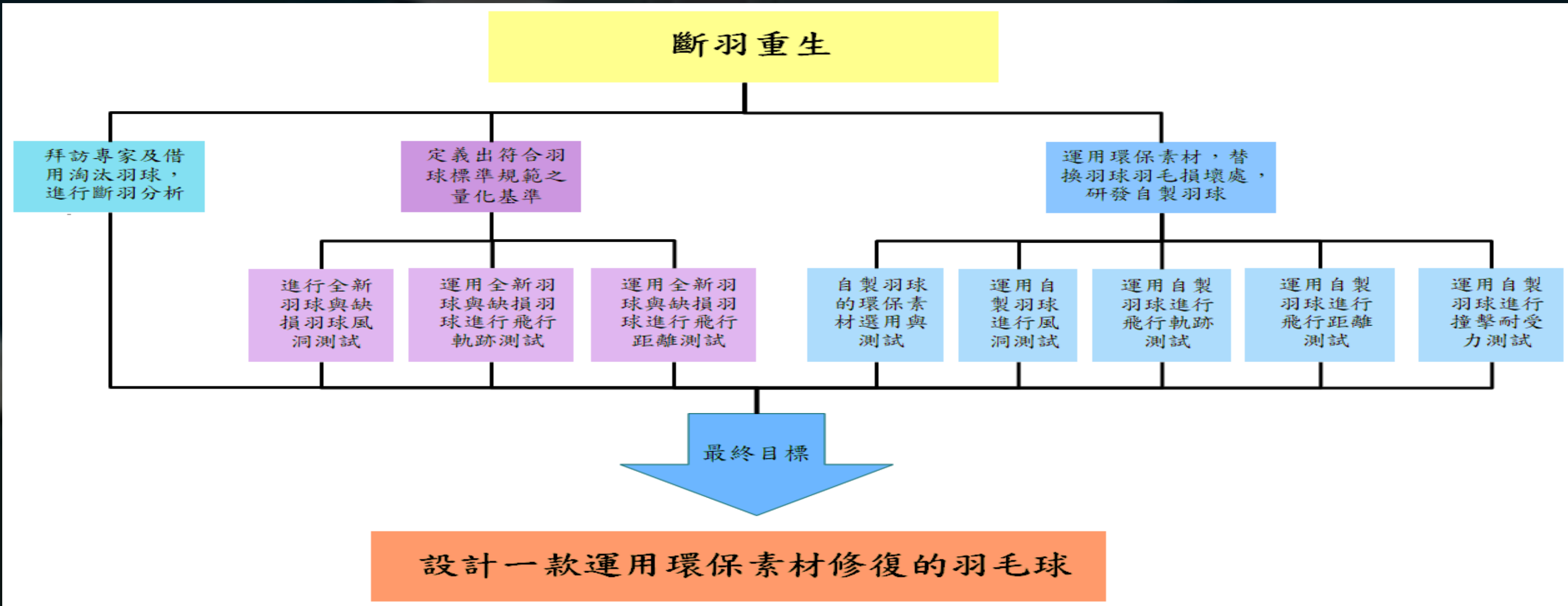
(三) 過去羽球飛行實驗研究：

- 陳品文、邱健紘、宋品孝 (2015) 的研究中，他們觀察到空氣可以從羽毛根部的間隙流過，這種「底部引流」(base bleed) 以及流過羽毛上方的氣流在球裙末端匯合，這種現象被認為類似於「噴射泵」(jet pump) 的作用

(四) 人工羽球的材料：

- 根據中華民國專利號TW201309368A (2013) 指出，**紙張纖維或不織布為適合替代天然羽毛的材料、而PET塑膠的韌性接近天然羽毛梗**，為適合製作人工羽球的素材，因此在發想自製羽球階段，將紙製材料納入考量。

研究脈絡



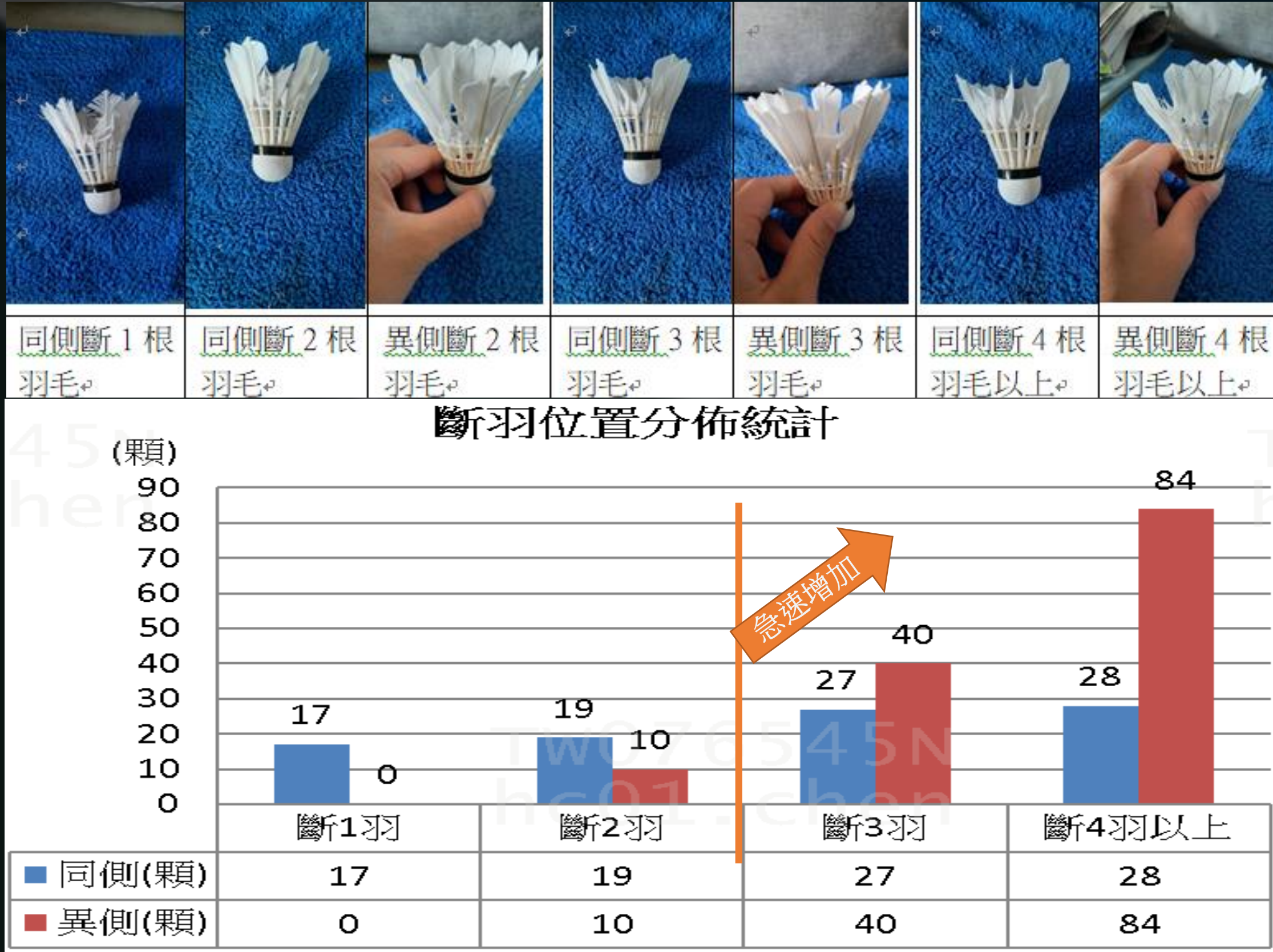
* 以上圖表是由研究作者製作

斷羽分析

* 以下照片是由研究作者拍攝

從斷羽分布數據發現，羽球的斷裂情況呈現出異側羽毛較容易斷裂的趨勢，尤其是在斷裂數量達到3羽或以上時，其數據急速地增加且異側羽毛的斷裂比例也明顯較高，推斷大部分的人在斷3羽以上時則不想再繼續使用了。綜合以上結果，**若能在斷1根羽毛或斷2根羽毛時，能即時透過不同方式進行修復的話，相信能延續羽球的使用壽命。**

綜上所述，我們決定蒐集淘汰羽球，並利用其球頭完好的特性，進行斷裂羽毛的替換；而羽毛的材質，則選用環保素材，使淘汰羽球重新嶄露並延續新生命！

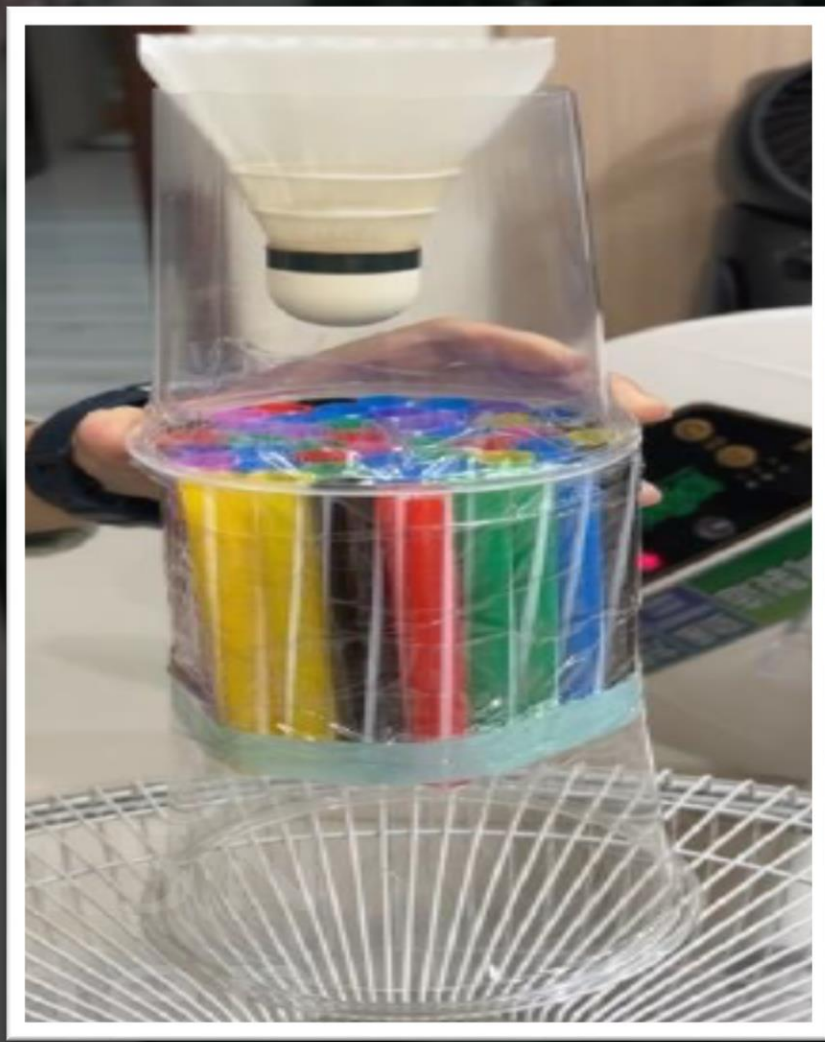


* 以上圖表是由研究作者製作

[好羽球] 如何檢測?

~ 檢 測 方 法 ~

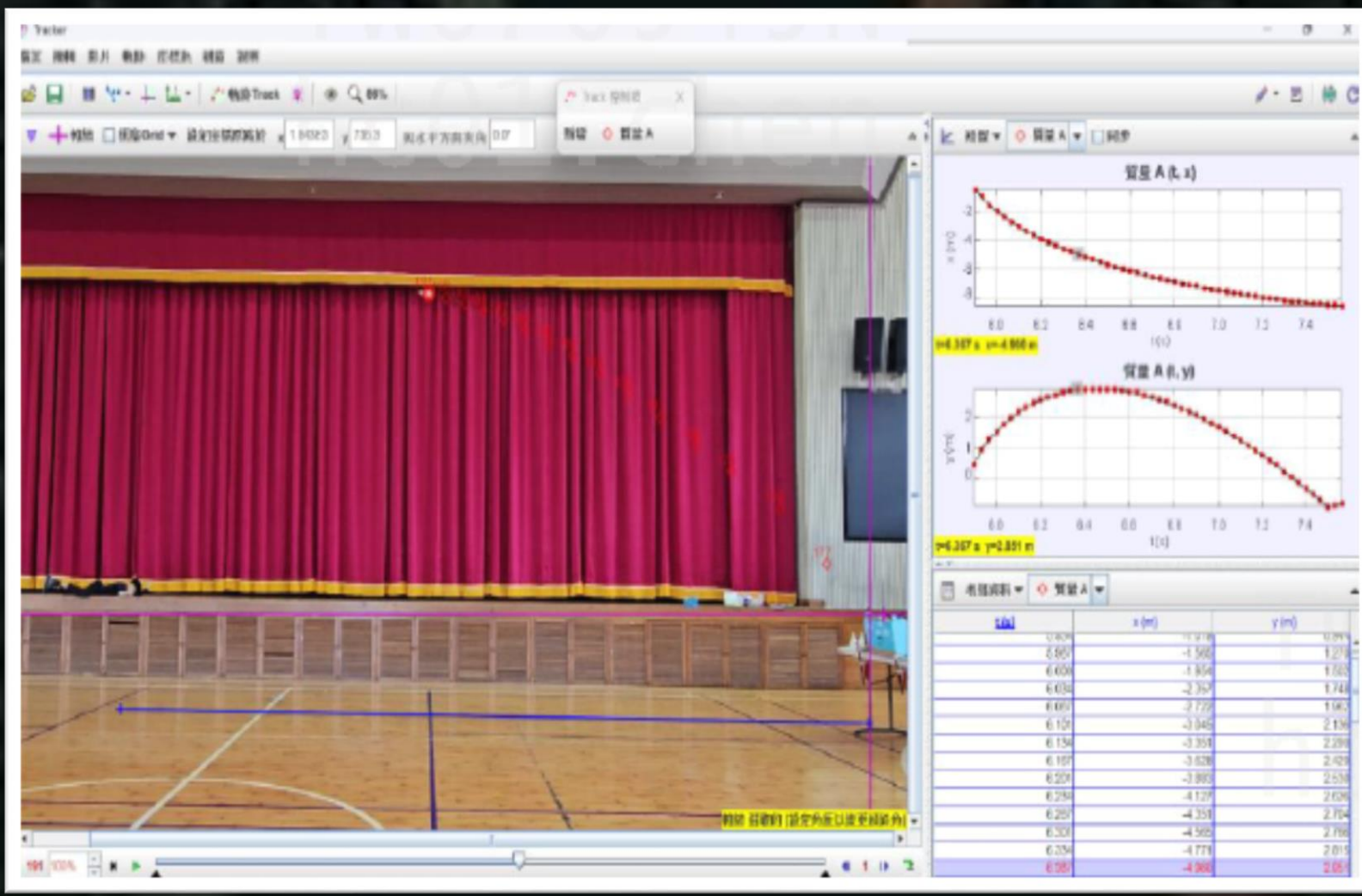
風 洞 分 析



透過風洞檢測分析，是想知道「羽球飛行時的穩定性」，可在實驗中觀察羽球受氣流作用的飛行狀態，以推估羽球在空中飛行是否穩定（有無偏移晃動）。

* 以上照片是由研究作者拍攝

飛 行 軌 跡 分 析



透過自製發射器，在固定的彈力且固定45度角度發射下，並同步於定點運用手機進行攝影，再將影像輸入tracker軟體進行飛行軌跡高度與距離的判讀。

* 以上照片是由研究作者拍攝

撞 擊 分 析



透過自製發射器，在固定的彈力且固定45度角度發射下，朝向牆壁發射撞擊以模擬擊打羽球的狀況，並透過多次撞擊測試來檢測耐用程度。

* 以上照片是由研究作者拍攝

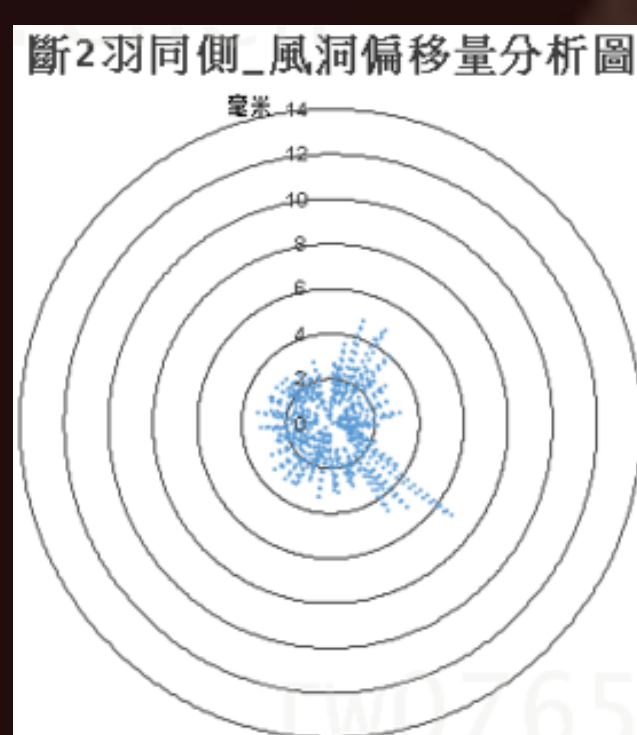
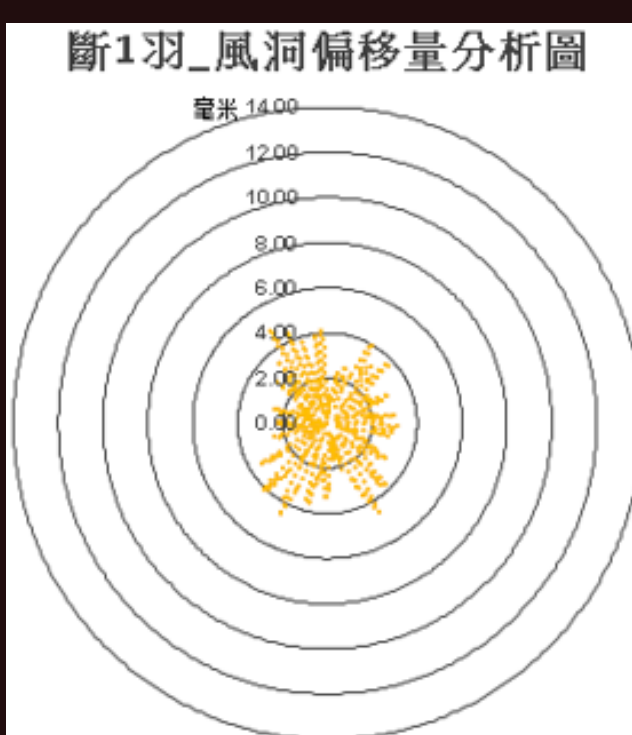
~完整羽球 V.S. 缺損羽球 – 檢測結果~

風 洞 分 析

* 以下圖表是由研究作者製作

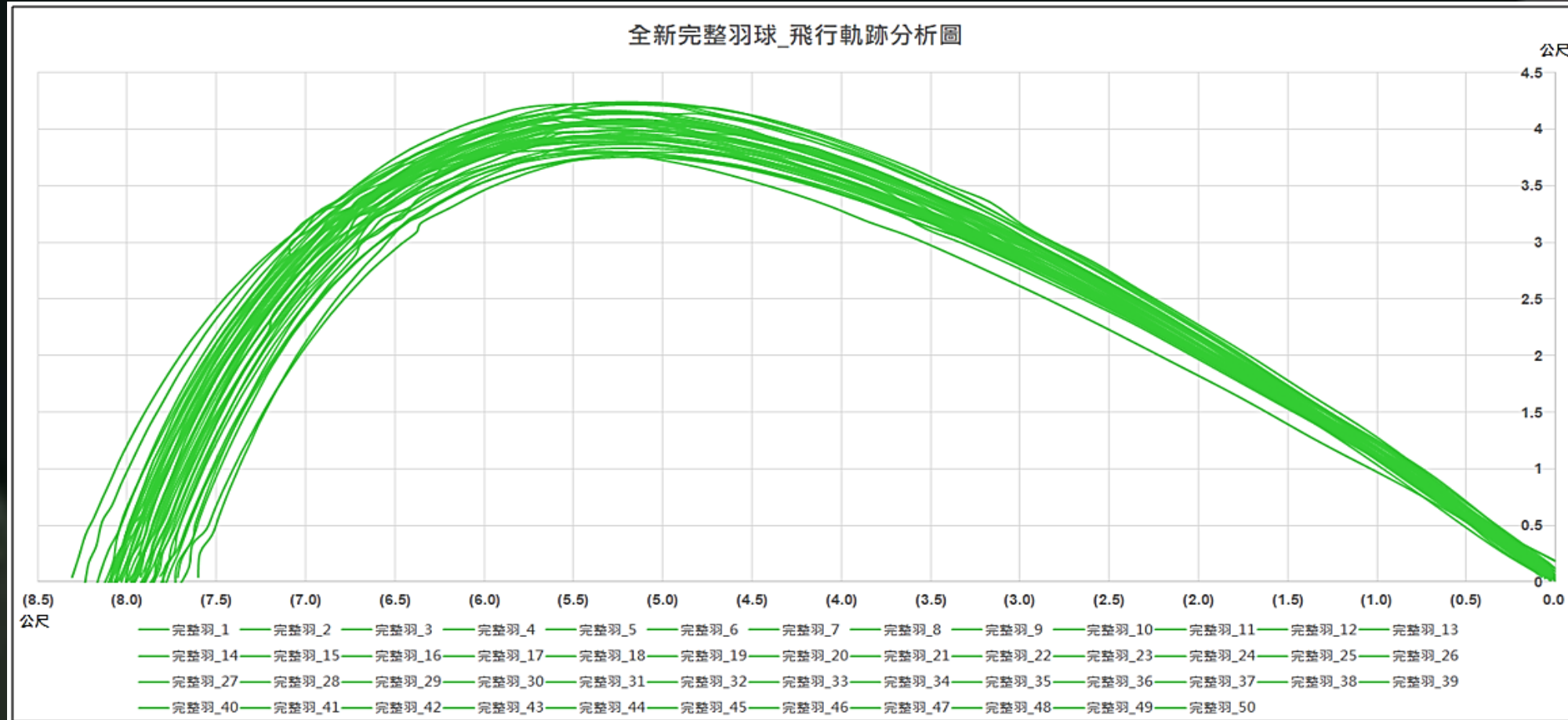


V.S.

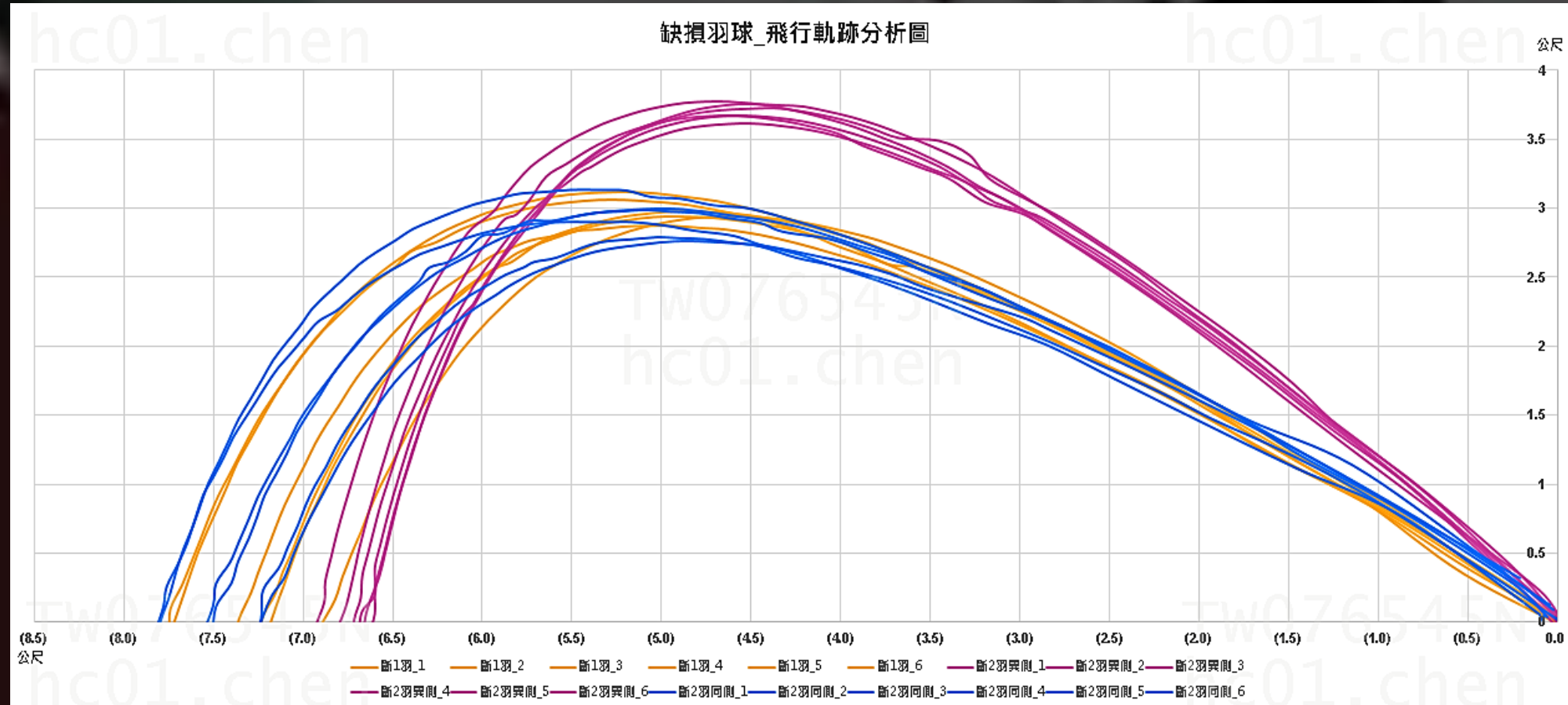


飛 行 軌 跡 分 析

* 以下圖表是由研究作者製作

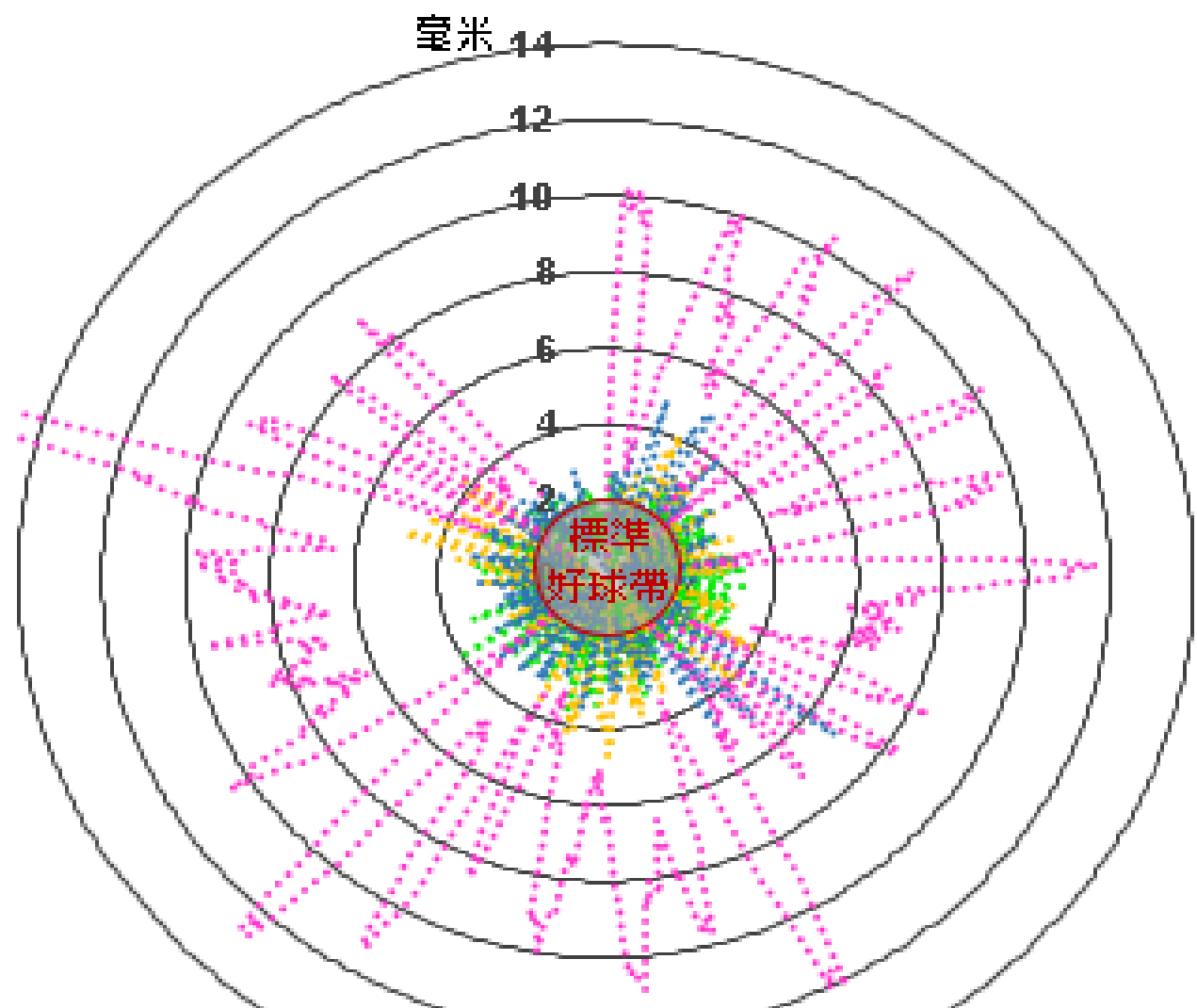


V.S.



互 相 比 對 分 析 結 果

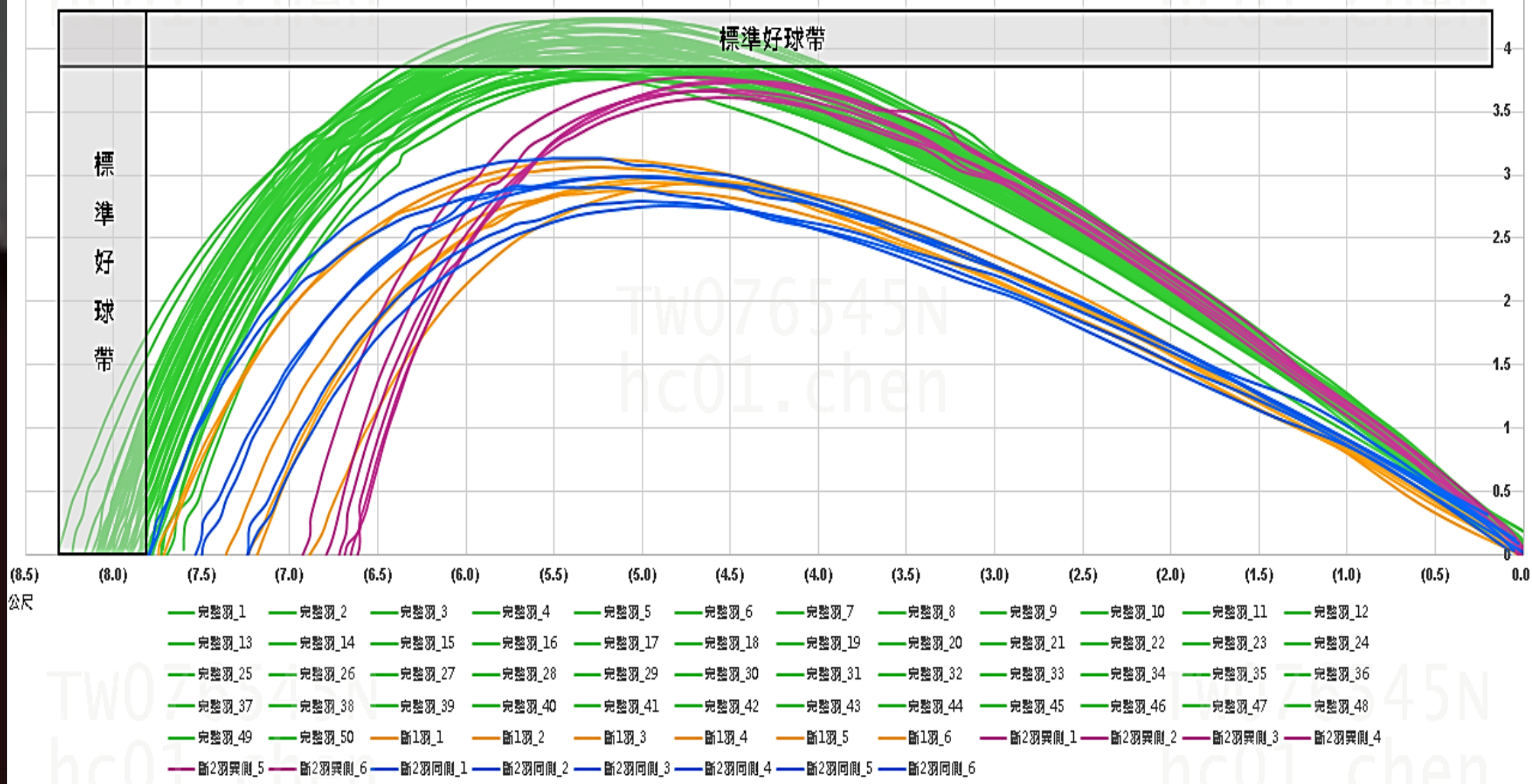
完整羽球 V.S. 缺損羽球 偏移量分析圖



— 完整羽球
— 斷1羽
— 斷2羽同側
— 斷2羽異側

* 以上圖表是由研究作者製作

標準好球帶_飛行軌跡分析圖



* 以上圖表是由研究作者製作

偏移量 $\leq 2.09\text{mm}$

$7.8\text{m} \leq \text{飛行距離} \leq 8.3\text{m}$

$3.8\text{m} \leq \text{飛行高度} \leq 4.2\text{m}$

自製羽球材料篩選

* 以下照片是由研究作者拍攝



第一輪自製羽球一覽表



塑膠片羽球	棕葉修補 1 羽	棕葉修補 2 羽	棕葉修補 2 羽
5.7g/5.8g/5.9g	5.0g/5.0g/4.9g	4.8g/5.0g/5.5g	4.8g/4.9g/4.7g

第二輪自製羽球一覽表

環保材料篩選：

- 第一輪選材：圖畫紙、瓦楞紙等穩定性不佳。玉米葉易受濕度影響變形。
- 第二輪選材：
 - 材料測試：收集15種植物葉片及回收塑膠片(PET)。
 - 彎折測試：乾燥葉片彎折，角度越小越不易裂。**棕葉、蒲葵葉可耐<15度**。
 - 重量測試：需符合BWF標準(4.74-5.50g)。蒲葵葉(7.5g)過重淘汰。塑膠片(5.7-5.9g)略超重但納入測試。
 - 最終選材：**主要使用棕葉進行羽毛替換修補，另製作塑膠片球裙式羽球共同比較。**

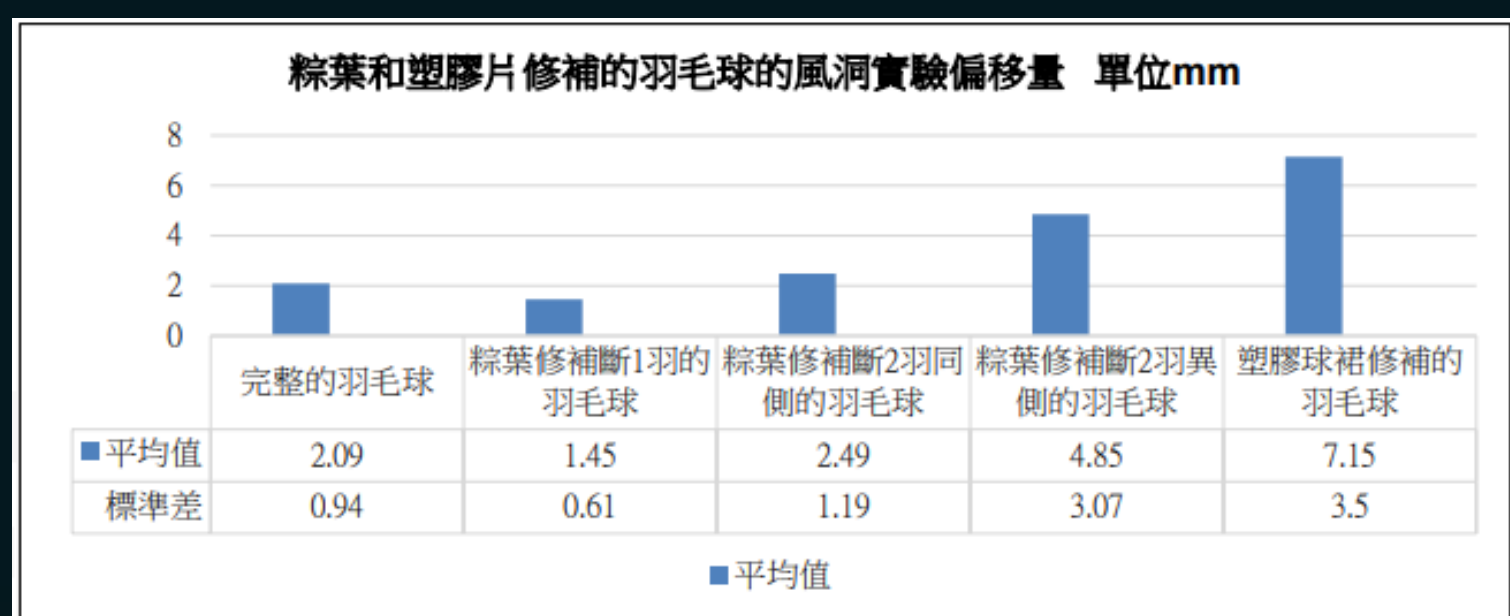
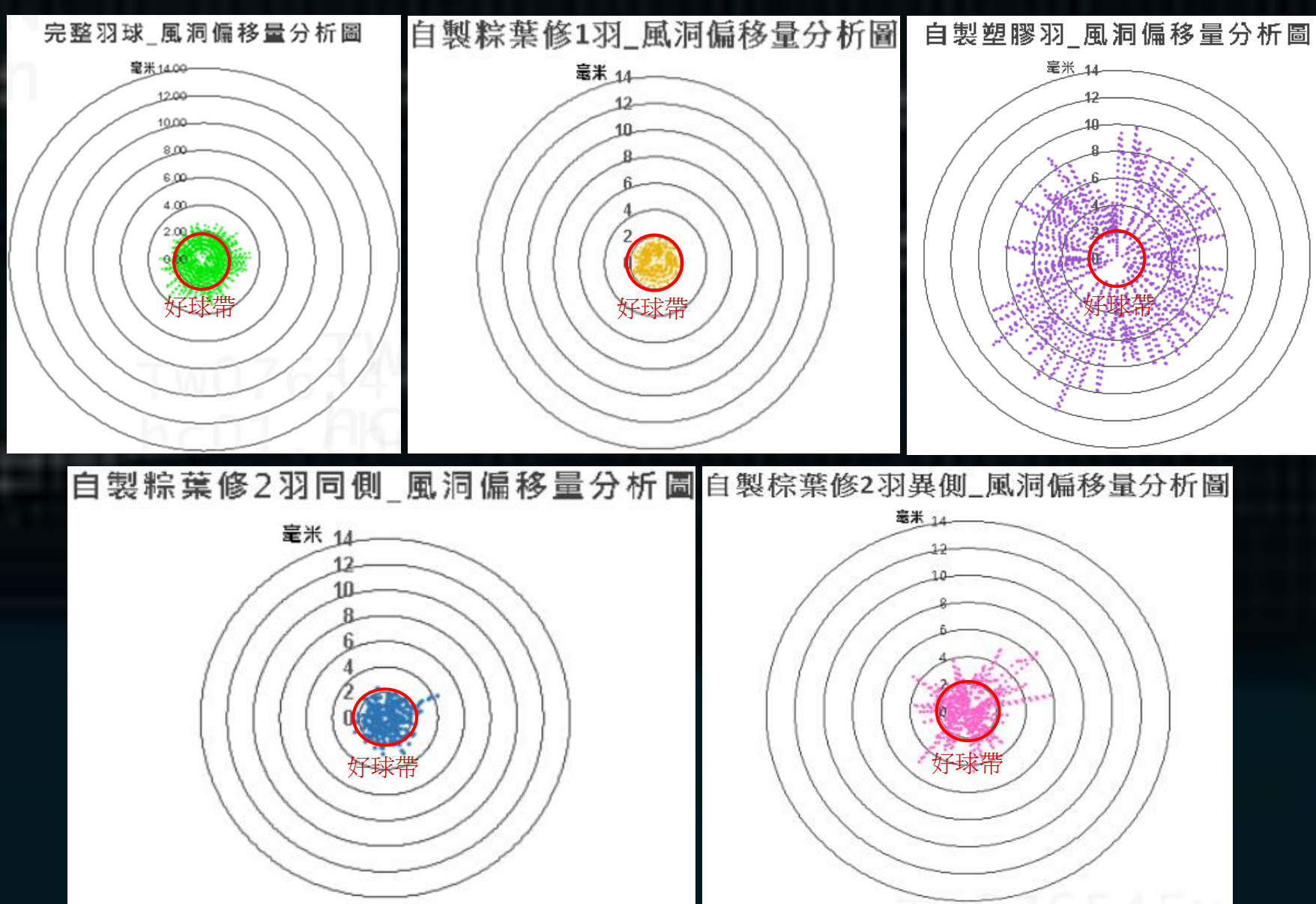
彎折出現裂痕角度	1號樣本	2號樣本	彎折出現裂痕角度	1號樣本	2號樣本
羊蹄甲	<15 度	<15 度	棕葉	<15 度	<15 度
榕樹	45 度	45 度	阿勃勒	30 度	30 度
黑板樹	60 度	45 度	菩提樹	45 度	30 度
春不老	30 度	30 度	大葉欖仁	45 度	45 度
大王椰子	30 度	45 度	蒲葵	15 度	15 度
黃槿	45 度	30 度	樟樹	45 度	75 度
橡膠木	60 度	60 度			

* 以上圖表是由研究作者製作

自製羽球檢測結果

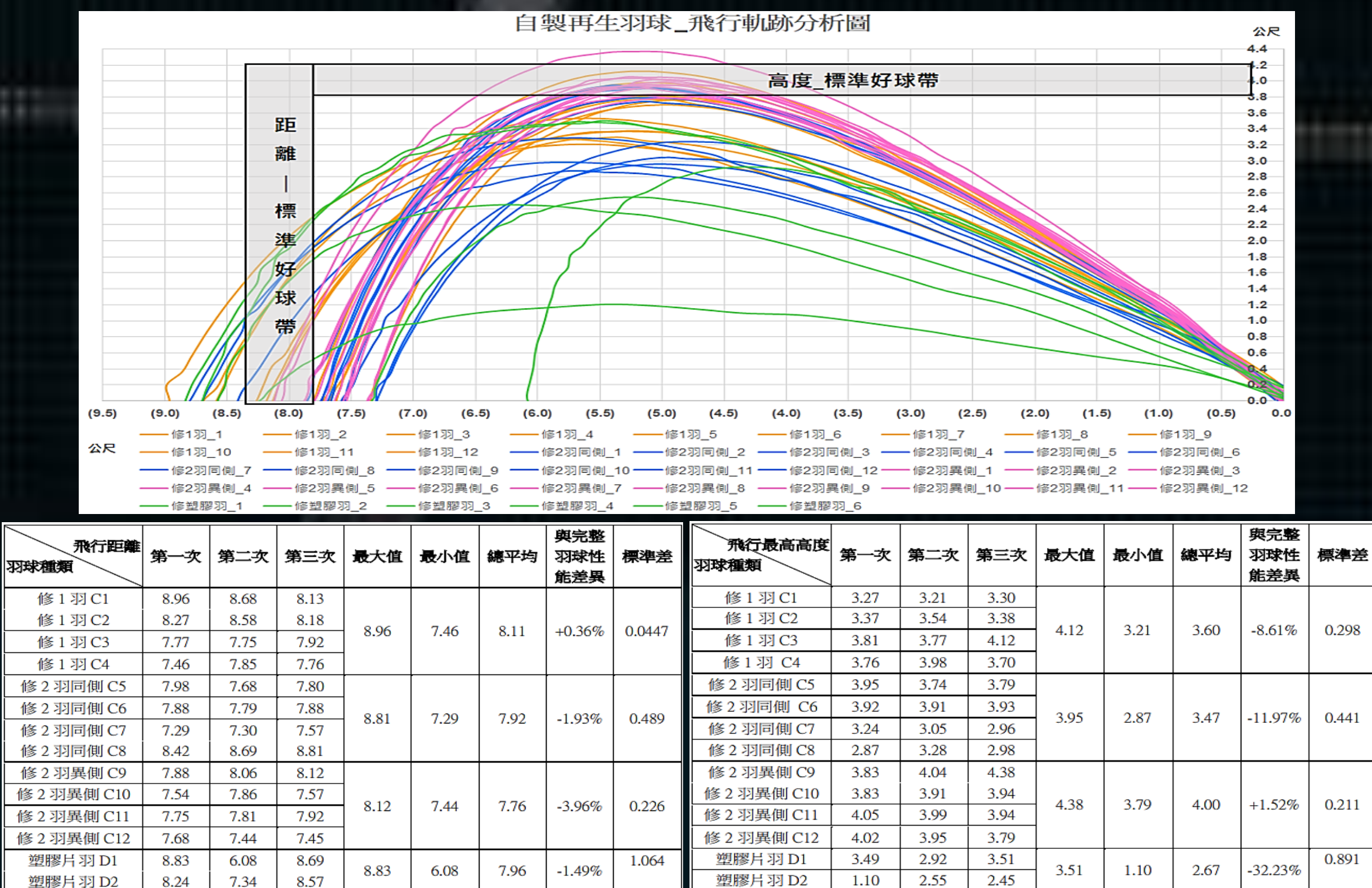
風洞分析

* 以下圖表是由研究作者製作



飛行軌跡分析

* 以下圖表是由研究作者製作



上述檢測結果有符合[好球帶]之自製修復羽球：

- 風洞分析：棕葉修1羽, 棕葉修2羽同側。
- 飛行軌跡分析：棕葉修1羽, 棕葉修2羽同側, 棕葉修2羽異側。

撞擊分析

* 以下圖表是由研究作者製作

完整羽球 V.S. 自製羽球 撞擊分析結果：

發現棕葉或塑膠自製羽球的耐用性皆不如完整市售羽球，但在受限資源條件下，棕葉自製羽球已能有效延長羽球的可使用次數，最高達191次，可證明為即將報廢的羽球，提供了「重生機會」，**證明棕葉在環保與實用性上的雙重優勢。**

名稱	塑膠片球	棕葉修補 1 羽	棕葉修補 2 羽 (同側)	棕葉修補 2 羽 (異側)	完整羽球
斷裂狀況					
撞擊次數	7 次	68 次	191 次	106 次	300 次以上
說明	第 8 次塑膠面斷裂	第 69 次葉面斷裂	第 192 次葉面斷裂	第 107 次葉面斷裂	未斷裂，只出現岔毛

結 論 & 未來展望

研究結論：

- * 修補關鍵時機確立：**當斷1至2羽時即時修補**，可顯著維持羽球的飛行穩定性，避免提前報廢，大幅延長使用壽命。
- * [好球帶]機制確立：透過完整與缺損羽球在風洞/飛行軌跡分析結果中**找出[好球帶]的定義**。
- * 自製羽球選材確立：透過風洞/飛行軌跡/撞擊...等分析後，發現**棕葉為理想的修復材料**。
- * 環保創新價值：**本研究證實「斷羽重生」的可行性，提供羽球再利用模式，減少廢棄物與成本，具環保與經濟效益。**

未來展望：

本研究首創棕葉修補羽球技術，成功驗證其可行性！棕葉羽球能在風洞與飛行軌跡與天然羽球匹敵，但棕葉再生羽球耐久度還是不如天然羽球；**未來如果能找到具備高流動、富彈性的膠水，可將其噴灑於棕葉羽毛上提升耐用性。**

未來實驗將朝上**真實擊打數據**來努力，邀請普羅大眾進行測試，使棕葉再生羽球不僅是一場科展研究，更是一場對運動與環境的革命！羽球，不該是一次性消耗品，而是能夠重生的運動夥伴！

參考資料

- Cooke, A.J. (1996) Shuttlecock design and development. Sports engineering – design and development (ed. S. J. Haake). Proceedings of the 1st International Conference on the Engineering of Sport. Blackwell Science, Oxford, UK.
- Aekaansh Verma, Ajinkya Desai, Sanjay Mittal (2013). Aerodynamics of badminton shuttlecocks. Journal of Fluids and Structures Volume 41, Pages 89-98.
- 中華民國專利號TW201309368A · 2013, Page 39 第四圖。
- Firoz Alam, Chanuch Nutakom, Harun Chowdhury(2015). Effect of Porosity of Badminton Shuttlecock on Aerodynamic Drag
- 柯宇謙 (2011)。奮發向上的毛毛蟲。中華民國第51屆中小學科學展覽會作品。
- 陳品文、邱健紘、宋品孝 (2015)。斷尾球生 - 探討羽球羽毛對飛行的影響。中華民國第57屆中小學科學展覽會作品。
- 弓與箭(2) 箭為何有羽？簡易風洞實驗 (2019)。https://n.sfs.tw/content/index/11996