

邊界層風場垂直結構及風機尾流效應的多光達與測風塔觀測研究

鄧詠霖¹ 廖宇慶^{1*} 張少凡¹ 鄭羽廷¹ 林沛練¹ 鄧仁星²

1 國立中央大學大氣科學系

2 交通部中央氣象局

(中華民國 109 年 6 月 12 日收稿；中華民國 109 年 10 月 09 日定稿)

摘要

本研究記錄利用同時設置於風機上下游的三部垂直指向光達及一座測風塔，進行邊界層風場與風機入流與尾流風觀測實驗的結果。實驗的時間與地點為 2018 年 6 月 15 日到 9 月 14 日於臺中港，資料長度為 92 天，代表夏季西南季風時的觀測。

觀測所得的資料，用來擬合出適用於描述臺灣本地的邊界層風場在不同風速與日夜間情形下垂直結構的公式。此外，並量化在強弱風速與日夜間等不同情境下的風機尾流效應。本文同時計算尾流效應在風機後方隨角度及沿下游距離的分佈，前者可做為風電場設置時風機如何交錯排列的參考，後者可用來評估適合在風機下游架設另一台風機的位置，以及計算對周遭風機發電量的影響。本研究的長期風場觀測資料亦可以用來驗證高解析度數值模式的模擬結果。

關鍵字: 風機、邊界層、光達觀測、尾流

* 通訊作者:廖宇慶, 國立中央大學大氣科學系,桃園市中壢區中大路 300 號;
tyliou@atm.ncu.edu.tw

一、前言

能源問題一直都是國家經濟的重要議題，但隨著全球暖化造成的極端天氣頻仍，國際間對於減碳目標日趨一致，因此開發包括風能在內的替代能源，來降低對石化能源的依賴，成為各國政府的當務之急。臺灣位於亞熱帶地區，其風能資源在各個季節有很大的變化，冬季受到強盛東北季風的影響風速比較大，夏季因較強的太陽直射使得垂直對流的發展較為旺盛，導致風速比較小(Chang et al. 2015)，但整體而言臺灣的氣候條件相當適合發展風力發電，尤其是西部海岸區域(賴等人 2012, 呂等人 2017)。根據前人研究，風力發電機的性能除了與風場條件有關之外，受周圍風機以及風機葉片尾流的影響很大(Wu et al. 2011, 2019)，Wu et al. (2020)的研究更指出，尾流速度的大小，又會隨風機葉片的轉速快慢而有所變化。風力發電機會使邊界層內產生更多的亂流，對於風能評估更是一大挑戰。

光達 (LIDAR, Light Detection And Ranging system)是觀測近地面風場常用的儀器，其量測原理是利用都卜勒效應，以雷射光照射空氣中的懸浮粒子，接收器收到回波光後量測頻率的變化，透過這樣的方式計算空氣中懸浮粒子沿平行天線指向方向的運動速度，也

就是徑向風速，再利用 VAD (Velocity Azimuthal Display; Browning and Wexler 1986)技術擬合，求得各高度層的水平風速、風向、風切、亂流等資料。光達可以協助評估風力發電潛能，觀測流場特性甚至是評估發電效益，其資料具有高時空解析度的優點，以垂直指向的方式運作時，沿垂直方向上可以提供極高解析度的觀測，透過不同掃描策略可以得到關於風場的詳細資訊。

利用光達可以對邊界層氣象場的擾動、受海陸風日夜週期變化影響的流場特性進行瞭解。Pena Diaz et al. (2009) 利用光達研究離岸風場，結果顯示光達觀測資料與海上流場中的擾動有很大的相關性，可用於分析近地面的風場特性。Chen et al. (2019) 利用雙都卜勒光達研究海陸風循環與空汙傳輸的關聯，指出海風鋒面的上升及沉降氣流會影響空氣污染物的累積與輸送。Pitter et al. (2013) 則是在不同的地形條件下驗證光達的掃描方式，以期建立光達在各種地貌型態下適用的掃描策略。

風機尾流會影響下游風機發電量，而風機周圍環境的風場量測亦是利用光達。Smith et al. (2014) 指出若在風機上游架設光達，可以監測風場狀況、防止劇烈陣風造成的損壞、降低風機疲勞情形、評估運轉方案、提高風機的使用

用壽命以最佳化風機的效益。Iungo et al. (2013) 透過風洞實驗及光達觀測研究風機葉片轉動造成的流場特性及其穩定性，為風力發電提供參考，由於光達量到的是徑向風分量，因此他們是利用三台掃描式光達進行實驗，其中一台量測環境入流風，另兩台同步觀測尾流，再進行風場合成，以進行高解析度的尾流分析。Rettenmeier et al. (2014) 則將光達架設在風機輪轂上觀測入流風的特徵。Wagner et al. (2009) 利用垂直指向的光達往上進行定點觀測，但隨著掃描式光達的開發，可利用單一光達對風機尾流進行掃描 (Hansen et al., 2016)，了解尾流風速的水平或垂直剖面分布。

隨著風能開發需求，過去在臺灣地區已有進行關於邊界層風場的光達量測。Tsai et al. (2015) 於四個季節各選一周在彰濱工業區進行光達量測，結果顯示垂直的風剖線(profile)和紊流分布在強弱風會有不同表現，風剖線的經驗指數函數在 110 米以下較吻合觀測結果。周 (2015) 在彰化漢寶潮間帶，分別於夏季西南季風和秋冬季東北季風進行一周的風場量測，並與 WRF 模擬比較，經由兩季的觀測紀錄風的垂直剖線隨日夜的變化，並與經驗指數函數比對。除了季節因素，颱風的強風特性也是風能開發時需考慮的

因素，陳 (2017) 分析在颱風移動的不同時期，大氣亂流特性的改變，其結果發現氣壓最低時，近地表大氣亂流強度皆為極大值，但隨高度增加而迅速遞減。Tsai et al. (2019) 量測颱風雨帶的垂直風剖線，比較以不同函數形式擬合垂直風剖線的結果，並指出科氏力的影響。Hsuan et al. (2014) 則首次在臺灣近岸使用浮動式光達量測風場，並與陸上光達驗證。此外，對尾流特性的量測與研究，也有學者利用風洞實驗進行 (Wu et al. 2019)。

針對風機尾流觀測實驗，在國外已有利用光達量測尾流特徵研究，呈現出風速受風機影響在距離與高度上的變化(Iungo et al. 2013)，另外，在處理風機尾流數值模擬上的應用，比對了不同類型的模式對尾流特徵的掌握 (Wu et al. 2011)。

本研究的目標為透過國內的觀測實驗，瞭解臺灣地區邊界層結構以及風機尾流特徵，前者可用來驗證高解析度邊界層數值天氣預報的結果，後者可用來建立風機尾流對下游風機發電量影響的評估技術。觀測實驗是利用設置在風機入流區的 1 部垂直指向光達，以及位於風機尾流區的 2 部垂直指向光達和一台測風塔，同時量測環境入流風和風機尾流隨距離的變化，此種利用多部儀器配置所進行的風電

場邊界層觀測為目前國內相關研究中較為少見。本研究的實驗期間是在夏季西南季風盛行時進行 3 個月的長期觀測，透過風機周圍邊界層風場和尾流效應的資料收集，探討不同大氣條件和日夜變化對於風剖線、亂流強度指數和尾流的影響。

二、光達資料校驗

本節首先討論在實驗進行之前對於光達資料的校驗，本研究使用的光達為 ZephIR 300 型，儀器規格說明參見表 4，其基本量測範圍沿垂直方向從 10 米至 200 米，可依研究需要設定 11 個高度層，每 20~30 秒提供一組風場沿垂直方向分布的剖線，在本研究中光達設定的觀測高度為 11 米、25 米、39 米、48 米、65 米、82 米、100 米、125 米、150 米、175 米、200 米。此

外，還可計算出於某時間間隔之內（如：1 分鐘內）各層風速的亂流強度指數 (Turbulence Intensity, TI)，TI 的定義為：

$$\left(\frac{\sigma_u}{\bar{u}}\right)/C \quad (1)$$

其中 σ_u 為該時間間隔之內平均風速之標準差， \bar{u} 為風速的平均值，C 則是儀器經驗修正值，TI 為一個無因次的物理量，當風速標準差(離散程度)愈大時，則亂流強度愈大，穩定度愈低。IEC (The Wind Turbine Technical Committee of the International Electrotechnical Commission)指出，為了確保光達測量結果之標準性，會將光達長時間放置在校準後的風速計附近來進行校驗，因為要將光達經掃描式測量得到的結果轉換為對應風速計的點測量結果，因此以 C 值進行修正。針對本實驗所用的光達型號，C 值與高度有關：

$$C = \begin{cases} 1.037, & 10 \text{ m} \leq H < 20 \text{ m} \\ 1.071 - 0.0017H, & 20 \text{ m} \leq H < 90 \text{ m} \\ 0.918, & H \leq 90 \text{ m} \end{cases} \quad (2)$$

其中的 H 為高度(m)。

光達資料品質的驗證於 2017 年秋季到 2018 冬季進行，共有 2 台光達，第一台置於桃園中壢中央大學的氣象觀測坪，所收集的資料可與鄰近高度 32 米的氣象塔風力觀測資料比對，資料長度從 2017 年 8 月 16 日到 2018 年 1 月 24 日，共 162 天。第二台光達則

架設在中央氣象局的桃園新屋氣象站，可與該站的地面風場觀測比較，資料長度從 2017 年 8 月 31 日到 2018 年 1 月 24 日，共 146 天。

圖 1 (a)為比對位於中央大學觀測坪的光達與氣象塔在 32 米高度量測的水平風速，圖 1(b)則為比對位於新屋的

光達在最低層(11 米)與氣象站在地面量測的水平風速。結果顯示光達與其它兩種原位(in-situ)儀器觀測的結果有極高的相關性，R 值分別為 0.981 和

0.978，均方根誤差為 0.629 m s^{-1} 和 0.814 m s^{-1} 。整體而言光達以遙測方式量測的風速有很高的精確度，可用來執行後續的觀測實驗。

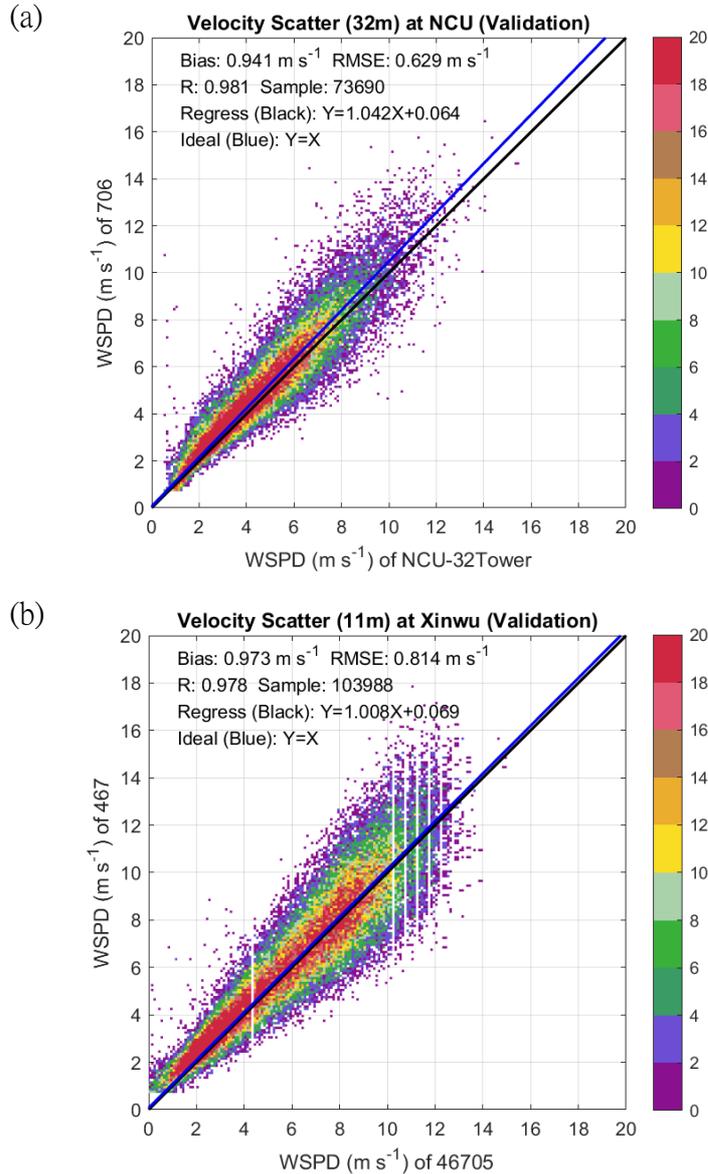


圖 1：(a) 設置於中央大學觀測坪的光達和鄰近氣象塔在 32 米高度量測的水平風速散布圖。(b) 設置於新屋測站的光達在 11 米高度和地面測站量測的水平風速散布圖。各圖中藍色實線為依最小平方法得到的線性回歸線，黑色實線為理想的 1 對 1 對角線，每個資料點的顏色色階代表樣本出現次數。

三、觀測儀器配置

2018 年的西南季風觀測位於臺中港北堤管制區內，圖 2 為儀器設置圖。實驗期間工研院綠能與環境研究所也在該處架設一部測風光達進行量測(編號 739 號，即圖 2 中的 W2)，另外在西北側有一隸屬於經濟部金屬工業研究發展中心，高度為 100 米的測風塔(圖 2 中的 W3)。為充分利用前述兩種儀器的觀測，因此在考慮現場地形地貌的條件與可利用的空間後(當地栽植大批防風林)，第一部光達(編號 706 號，圖 2 中的 W1)架設在大致沿風機和 W2 光達的連線上，這樣的配置使得吾人可以在風機後方三個不同的點針對尾流進行量測。尾流區的 3 個觀測點相對於風機的位置分別為：光達 706 號(W1)是 1.2D (D=70.5 米，為風機葉片直徑)，工研院光達 739 號(W2)是 2.3D，測風塔(W3)為 5.5D。

由於該實驗為量測夏季風場，因此架設另外一部光達(編號 467 號，即圖 2 中的位置 I)來量測入流風，假設風場在上游未受風機場影響前其水平變化可以忽略，則位置 I 的風場可視為風機所在位置入流風場。由於 3 個尾流流量測點大致位於目標風機的西北方，如果氣流沿著風機到 W1 的連線運動，則其風向約為 163° ，故將此視為入流風的主要角度，本文第 4、5、7 節中我們

分析的入流風場是經過篩選的，篩選條件是在位於風機輪轂高度(65 米)，風向為 $163^\circ \pm 5^\circ$ ，且風速介於 3 m s^{-1} 至 25 m s^{-1} 之間的資料，這也是風機葉片啟動運轉的風速範圍。

2018 年夏季臺中港區實驗期間，大部分風速屬於弱風，考慮該地的風機啟動風速為 3 m s^{-1} ，若扣掉小於 3 m s^{-1} 的資料，位於輪轂所在高度 65 米的有效入流風資料總數為 5319 筆(每筆資料的定義為光達 1 分鐘觀測的平均)，在本文後續的章節中若需要對風速資料進行分類時，為了平衡分類後的資料數量，會以 5 m s^{-1} 為門檻值，分為弱風($< 5 \text{ m s}^{-1}$)與強風($\geq 5 \text{ m s}^{-1}$)兩大類，資料筆數分別為 2571 筆與 2748 筆。

四、邊界層風場隨高度的變化

本節利用未受風機影響前的入流風資料來探討邊界層風場隨高度的結構特徵。除了以 5 m s^{-1} 為門檻將風速進行分類外，也將入流風資料分成日間與夜間，在此定義日間為當日的 08 到 20 LST，夜間為 20 LST 到隔日的 08 LST，再比對尾流風速在日夜間的變化。

本研究中使用 Empirical Power Law Relation (Hsu et al. 1994)，將風速值透過測站高度轉換至不同分層高度，這個關係式一旦建立後，吾人可利用近地表的風速觀測來推估包括風機輪轂所

在高度內的各高度層風速值。轉換公式以兩者間的高度關係為基準，可由下式表示：

$$\frac{U_i}{U_{ref}} = \left(\frac{H_i}{H_{ref}} \right)^\alpha \quad (3)$$

U_{ref} 、 U_i 分別為地面觀測的風速參考值及換算至不同分層高度的風速值， H_{ref} 、 H_i 分別為地面觀測點及不同分層的高度，參數 α 與大氣穩定度相關，Hsu et al. (1994)的研究建議 α 值約為 0.14，但會因地區而有所不同，要注意的是，此 Power Law 使用範圍應該限制在邊界層的範圍內。

我們將資料隨機分成 2 群，稱為訓練組(T 群)與驗證組(V 群)，T 群代表用來擬合我們所需要公式的資料，而 V 群則是為驗證擬合後的公式所保留的樣本。Power Law 所使用的參考高度為編號 467 的入流風光達(I)在地面量測(高度為 1 米)，參考風速即為該高度的風速量測。

圖 3 即為擬合後風速垂直變化的曲線，指數的值列在表 1 中，對於指數

而言，日間的指數值較夜間小，代表日間邊界層風速由於混和的機制，在垂直上的變化程度較夜間緩和。在夜間的時候弱風速在垂直方向上的變化又比強風速的變化為大(見圖 3c 和 3d)。

以 Power Law 公式擬合後的曲線以 V 群資料來驗證，圖 3 中分別以三角形與水平線段來呈現 V 群資料在各高度層的風速值與在一個標準差內的風速範圍。由圖中可見擬合曲線與驗證資料兩者吻合的程度很高，代表擬合的公式具有相當好的代表性。圖 3 中同時利用 Hsu et al. (1994)所建議的 α 值來呈現風場垂直結構，由結果發現與本實驗所觀測的資料差異甚大，說明該公式並不適用於本文探討的這個臺灣本土的個案。圖 4 為利用擬合公式計算各層高度風速，並與驗證資料對照後所求出的均方根誤差(Root-Mean-Square Error; RMSE)，發現其數值差異在 1.0~3.0 m s⁻¹左右，而如果使用 Hsu et al. (1994)的公式，則誤差會明顯增加到 5.0 m s⁻¹。

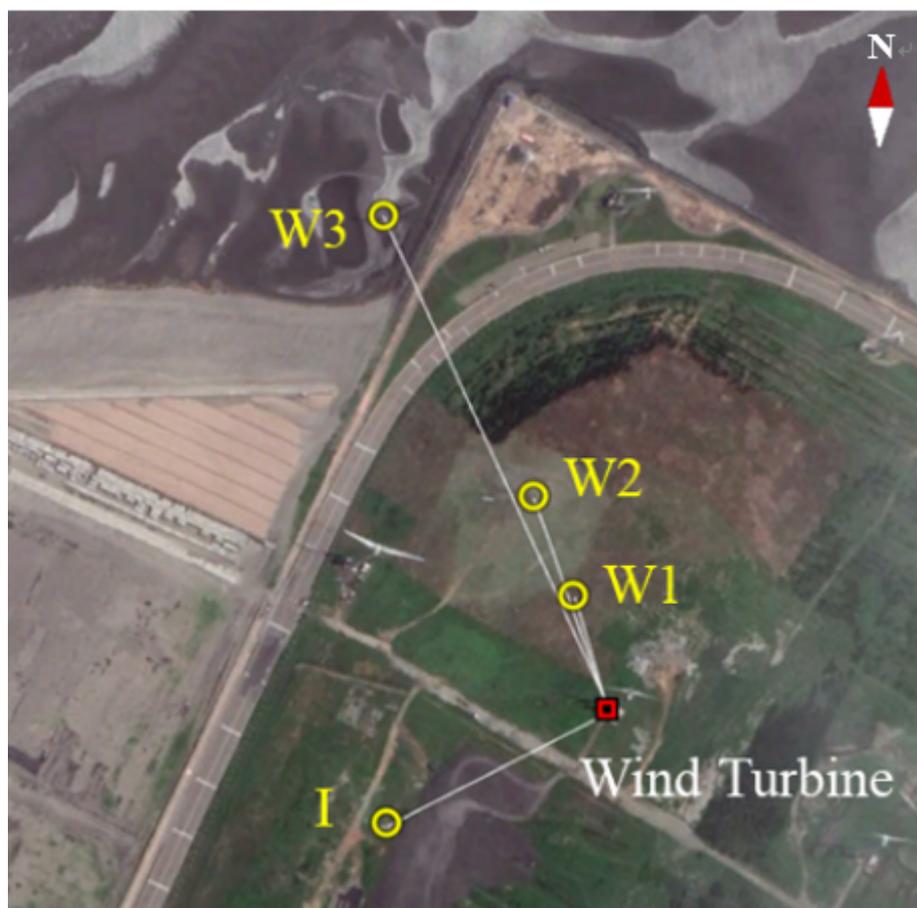


圖 2：2018 年臺中港西南季風觀測實驗時的觀測儀器與目標風機的相對位置。紅點為目標風機，I 點為量測入流風的光達(467 號)，W1 點為量測尾流風的光達(706 號)，W2 點為工研院的光達(739 號)，W3 點為測風塔。

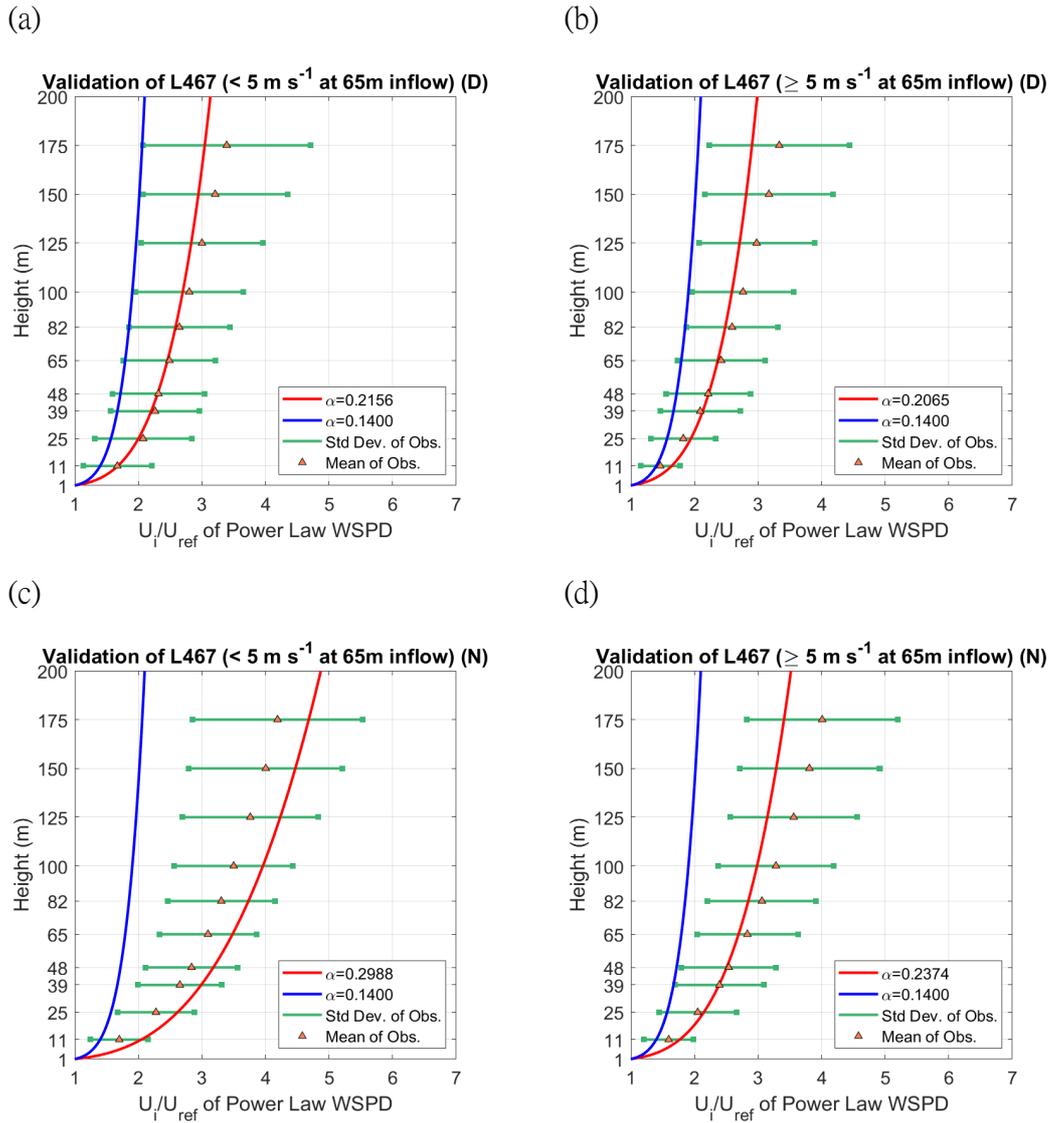


圖 3：風速比(U_i/U_{ref})隨高度變化。橫軸為風速比，縱軸為高度(m)。各圖中的紅線為將使用訓練組 T 群資料擬合之 Power Law 公式，代入驗證組 V 群的最低層資料，所估計的風速隨高度分布。V 群驗證組資料在各高度層的風速平均值以三角形表示，綠色橫線段為一個標準差的風速比值範圍。藍線為使用 Hsu et al. (1994)建議的指數 $\alpha=0.14$ 所得的曲線。(a)和(b)為分別選取弱風速與強風速的日間資料，(c)和(d)為分別選取弱風速與強風速的夜間資料。

表 1：以 Power Law(公式 2)擬合風速垂直分布時的指數 α 值。

	$< 5 \text{ m s}^{-1}$	$\geq 5 \text{ m s}^{-1}$
Day	0.2156	0.2065
Night	0.2988	0.2374

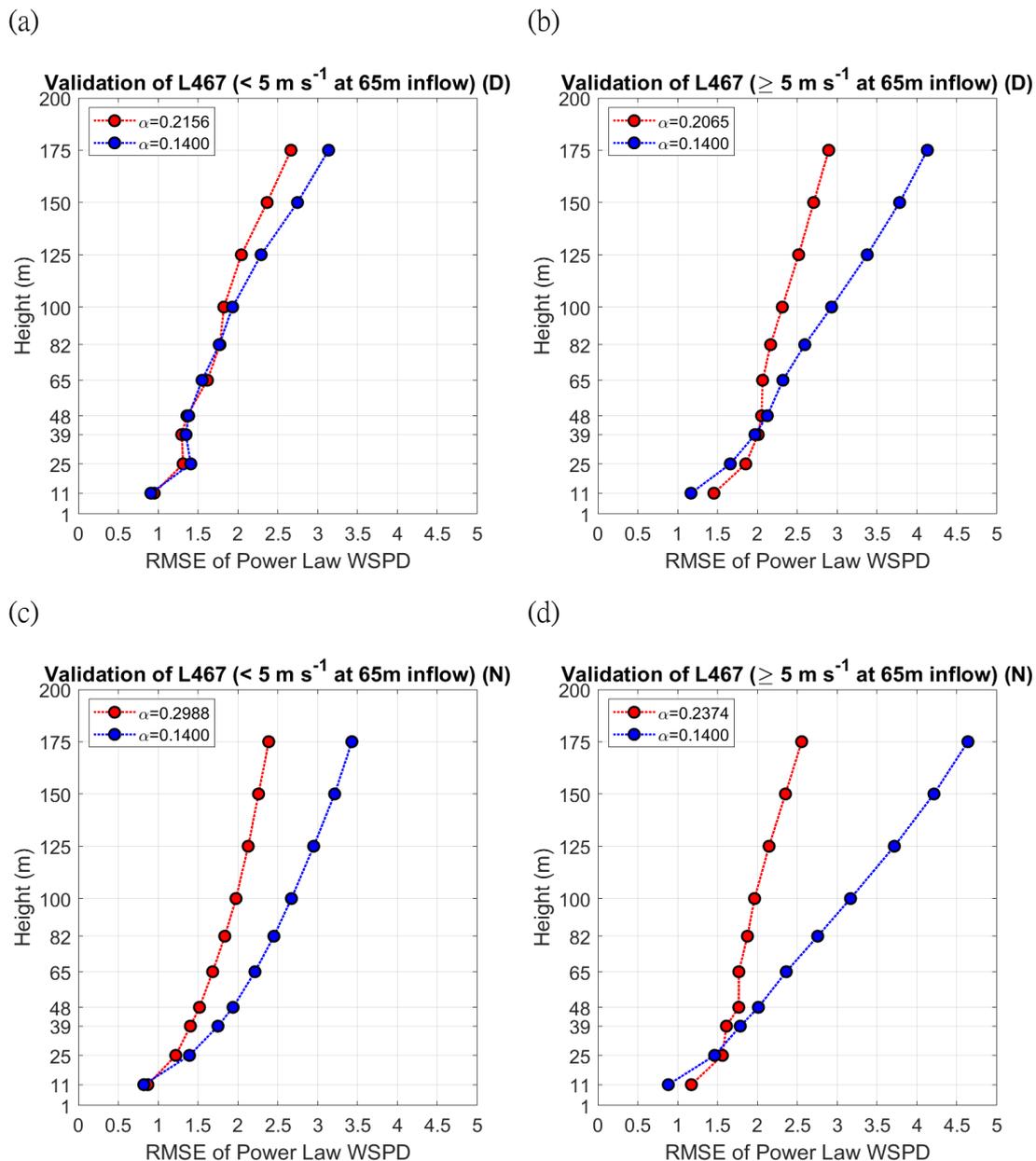


圖 4：橫軸為風速的均方根誤差(RMSE)值，縱軸為高度(m)。各圖中紅點線是將利用訓練組 T 群資料擬合之 Power Law 公式，代入驗證組 V 群的最低層資料，所估計的各高度風速，再與 V 群在該高度層的風速觀測比較後所求出的均方根誤差值。藍點線為使用 Hsu et al. (1994)建議的指數 $\alpha=0.14$ 所計算的誤差。(a)和(b)為分別選取弱風速與強風速的日間資料，(c)和(d)為分別選取弱風速與強風速的夜間資料。

五、風機尾流效應對風速的影響

風機在運轉時會對風機後方下游的風速造成影響，亦即所謂的尾流效應。本節利用觀測資料來探討並量化尾流效應在弱風(小於 5 m s^{-1})、強風(大於 5 m s^{-1})、日間、夜間的變化，風速強弱的分類是以入流風光達在風機輪轂所在高度 65 米的量測為準。吾人將光達與測風塔在邊界層內不同高度量測到的風速進行平均，可得到風速變化的垂直剖面，同時也將尾流點量測的風速平均後除以入流風速的平均，得到各高度層的尾流風速比 ($U_{\text{wake}}/U_{\text{inflow}}$)。

如圖 5 所示，(a)和(b)分別為在弱風和強風、日間和夜間時，平均入流和尾流風速的垂直結構，而(c)和(d)則為尾流風速比值的垂直結構，要注意的是 W2 光達從 40 米高度開始才有資料，而測風塔只有在三個高度層有資料(39 米、65 米、100 米)。

由圖 5 中可以看出在風機葉片運作的高度範圍內(約 30 ~ 100 米，也就是輪轂所在高度 65 米再加減葉片長度 35 米)，且水平距離風機 $2.3D$ 的範圍內，尾流風速減弱的現象非常明顯，幅度可達 50%。而在此高度範圍之外，尾流效應立刻減少甚至消失。在距離風機 $5.5D$ 處(W3 的位置)，尾流風速能夠維持在入流風速的 80% 以上，甚至會出

現稍微超過入流風速的情形(見圖 5c 的黑色虛線)，說明在該處受風機的影響較弱。類似的現象也出現在 30 米以下到地面的風速結構 (30 米是風機葉片旋轉時高度的下限)，圖 5c 和 5d 的綠色線顯示在靠近地面葉片無法觸及的區域，尾流風速和入流風速相當甚至更強，增強的原因可能是因為受到目標風機下方的一個約 10 米高度發電機房的影響(圖未示)，由於離風機較近的光達(W1)有量測 11 米高度的風場，很可能會呈現出風速受建物干擾的情形。入流風的風速在夜間時較在日間時弱，但尾流效應的日夜差異基本上不明顯。

在圖 6 中我們對亂流強度指數 TI 做垂直結構的分析，圖 6 (a)和(b)分別為在弱風和強風的情況下 TI 平均值的垂直結構，包括入流風及位於尾流區三個觀測點的 TI 值。整體上可以看出無論在入流或尾流區，日間的 TI 值都較夜間大，而在風機葉片運作高度範圍內(約 30 ~ 100 米)的 TI 值也較 100 米以上的 TI 值大，表示風機的影響隨高度減少。30 米高度以下的氣流可能因流經粗糙的地表，使得其 TI 值與受風機影響所導致的亂流程度相當。值得注意的是在 W2 ($2.3D$)處，無論是弱風或強風，都出現比在 W1 或 W3 處較大的 TI 量值，由於 W1 和 W3 離風機的

距離分別是 1.2D 與 5.5D，這顯示出亂流強度的極大值並非出現在緊鄰風機的後方，而是在風機下游處一定的區間範圍內，然後到了某個距離後才逐漸消退。

六、風機尾流效應隨入流風角度的分布

由上節得知，受到風機影響的尾流效應與風機葉片旋轉時在垂直方向上所能觸及的範圍有關。本節擬探討的則是尾流效應在風機後方沿水平方向擴展的範圍及隨角度的變化，此結果可作為未來建置風電場時，各風機之間如何交錯排列的參考。

理想的計算情境如圖 7(a)所示，也就是針對某入流風，在風機後方相同距離的弧線但不同角度的位置上量測尾流的風速，但實際的狀況是在風機後方無法同時設置數量如此龐大的測風光達(或測風塔)，因此本實驗的設計如圖 7(b)所示，吾人根據在風機輪轂高度(65 米)的入流風風向和風機與 W1 或 W2 光達連線的夾角($\Delta\theta$)來進行分類，並計算該高度尾流風速(U_{wake})與入流風速(U_{inflow})的比值(U_{wake}/U_{inflow})，將尾流效應量化，當比值愈小於 1.0 時，代表尾流效應愈明顯。

如果把入流風分成平行和垂直於風機和光達連線的兩個分量，就量測尾流效應的觀點而言，吾人希望入流

風的分量越大越好，但是當 $\Delta\theta$ 大於 45° 時，平行於風機-光達連線的入流風分量會開始小於垂直的分量($\Delta\theta=90^\circ$ 時都是垂直分量)，並且根據圖 2 的儀器相對位置，此時 W1 和 W2 光達會開始接受到較多沒有流經風機的風場的影響。因此本實驗針對資料篩選的條件，是以風機和 W1 光達的連線(方位角 163°)為基準，選取與此連線的夾角在 $\pm 45^\circ$ 內的入流風，亦及 $\Delta\theta$ 的最大值計算到以 45° 為上限，如此可濾除入流風分量不足導致不適合用於分析的資料，關於入流風的頻率分布與篩選的範圍如圖 8 所示。

圖 9 為在弱風、強風的情境下，根據 W1 風機、W2 風機的資料所求的 U_{wake}/U_{inflow} 隨角度的散佈圖。本文使用三階多項式擬合(Polynomial curve fitting)，如下列公式：

$$U_{wake}/U_{inflow} = a(\Delta\theta)^3 + b(\Delta\theta)^2 + c(\Delta\theta) + d \quad (4)$$

其中 $\Delta\theta$ 的定義同上(單位 :radian)， U_{wake}/U_{inflow} 為尾流風速和入流風速比值，其值愈小於 1.0 就代表尾流效應愈明顯。擬合後得到的各係數在不同風速與位置的數值如表 2 所示。

如果以 $U_{wake}/U_{inflow} < 1$ 當成尾流效應的指標，則由圖 9(a)及圖 9(b)發現在距離風機較近的 W1 位置(1.2D)，在弱風速($< 5.0 \text{ m s}^{-1}$)的情境下，尾流效

應影響的範圍可以擴散到沿入流風方向的兩側約 37°，在強風速($\geq 5.0 \text{ m s}^{-1}$)的情境下，此範圍可增加到 45°。而圖 9(c)及圖 9(d)則顯示在距離風機較遠的 W2 位置(2.3D)，尾流效應影響的範圍只及於沿入流風方向的兩側約 20°，在

20° 外甚至會出現 $U_{\text{wake}}/U_{\text{inflow}}$ 大於 1 的情形，代表尾流效應已經消失。無論是在 W1 或 W2 位置，弱風或強風，在沿入流風方向的風機正後方($\Delta\theta=0^\circ$)，尾流風速受到風機影響，導致其強度僅為入流風速的 50%。

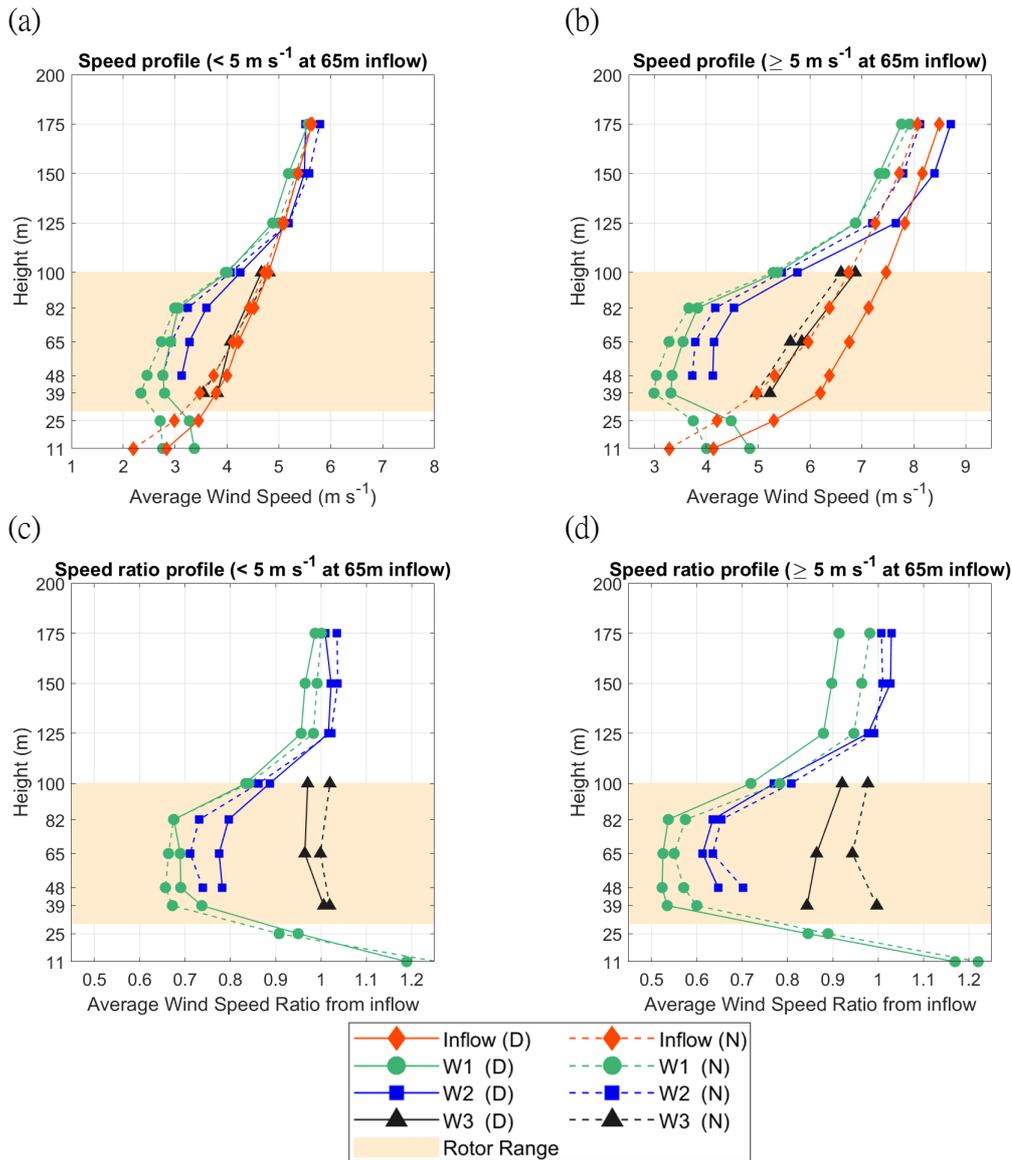


圖 5：(a)和(b)為選取光達量測在風機輪轂高度 65 米的風速，在弱風速與強風速區間的風速平均值垂直剖線，橫軸為風速(m s^{-1})。(c)和(d)為尾流與入流風速比平均值的垂直剖線，橫軸為風速比。紅色線為入流區光達 I 點，綠色和藍色線分別為尾流光達 W1 及 W2，黑色線為測風塔 W3，實線與虛線代表日、夜間資料，淺色區域為風機葉片運轉時可觸及的範圍，縱軸為高度(m)。

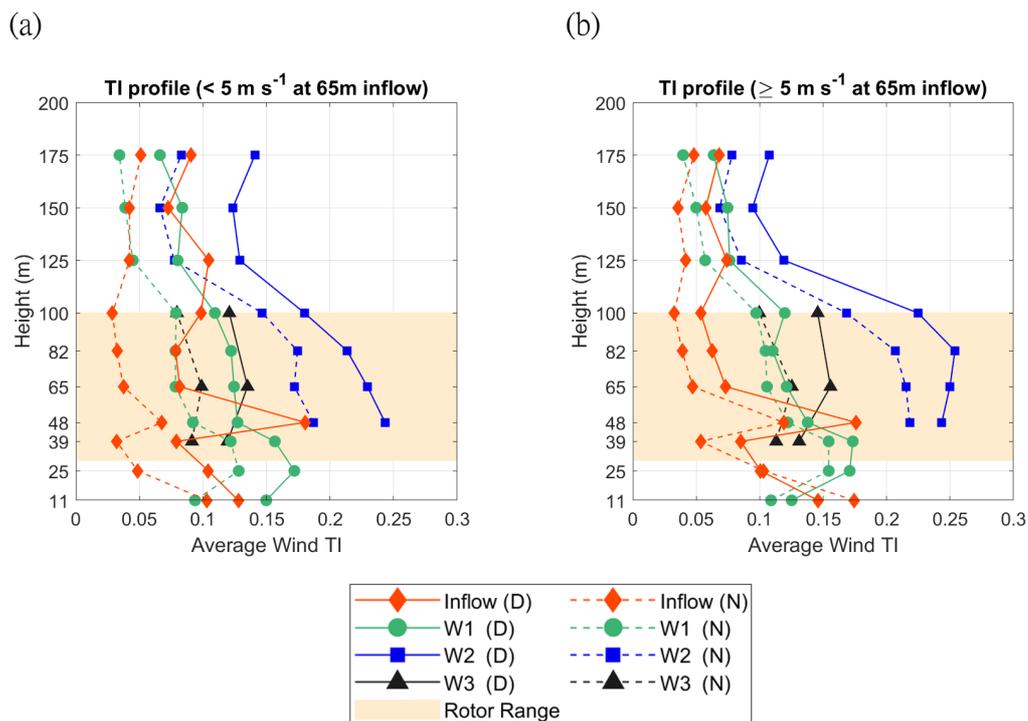


圖 6：同圖 5，但(a)和(b)分別為在弱風速與強風速區間的亂流強度指數(TI)平均值的垂直剖線。

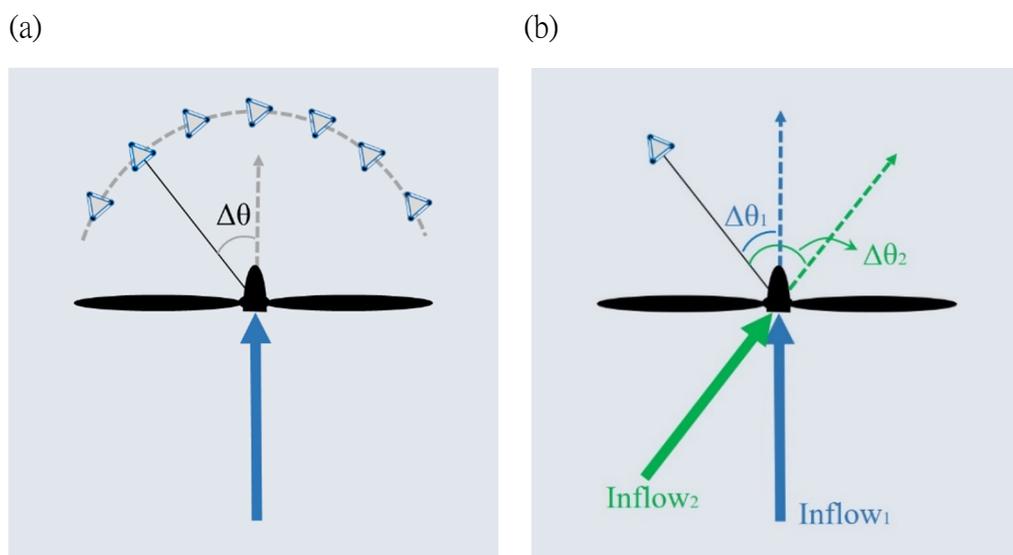


圖 7：風機、光達與入流風風向相對位圖，圖中的三角形為光達，黑色物體為風機扇葉，入流風向以粗箭頭表示，風機後方的虛線為入流風風向的延伸，黑色細實線為光達與風機之連線， $\Delta\theta$ 為入流風向與風機與光達連線之間的角度。(a)為理想的尾流效應隨角度變化實驗設計，在尾流區設置多台光達或測風塔量測，得到等距離上各個角度的尾流效應。(b)為實際的尾流實驗設計，風機後方僅有一台光達量測，計算風機下游沿不同角度(即 $\Delta\theta_1$ 與 $\Delta\theta_2$)的尾流效應。

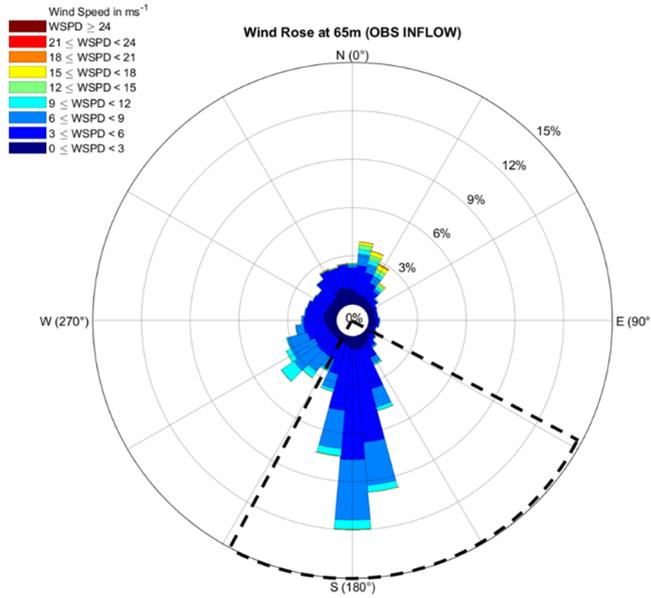


圖 8：光達觀測入流風的 65 m 高度風花圖，輻射線長度代表該風向出現頻率(單位：%)，色階代表風速大小(單位： m s^{-1})。探討尾流效應隨入流風角度的分布，篩選入流風資料的條件是以風機和 W1 光達的連線(方位角 163°)為基準，選取與此連線的夾角在 $\pm 45^\circ$ 內的入流風，虛線扇形處為所選取的有效入流風角度範圍。

表 2：本文中公式 4 擬合後各係數數值，代表尾流效應隨入流風角度的變化。

		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
$< 5 \text{ m s}^{-1}$	W1	-2.262	2.551	0.051	0.514
	W2	0.805	-2.604	2.289	0.478
$\geq 5 \text{ m s}^{-1}$	W1	-1.124	1.426	0.211	0.499
	W2	1.294	-3.093	2.371	0.482

表 3：本文中公式 5、6、7 擬合後各有關參數的數值。

	POLY3				PARK	Weibull	
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>k</i>	<i>k</i>	λ
$< 5 \text{ m s}^{-1}$	-0.018	0.194	-0.551	1.004	0.074	1.85	1.82
$\geq 5 \text{ m s}^{-1}$	-0.018	0.201	-0.560	1.000	0.072	1.87	1.80

表 4：ZephIR 300 Lidar 規格表。

性能	
量測範圍	10 米 ~ 200 米
感測器長度@10 M	±0.07 米
感測器長度@100 M	±7.7 尺
指定量測高度	10 層
取樣頻率	50 赫茲
平均時間	預設 1 秒
掃描圓錐體高度	30 度
風速精度變異	0.1 m s ⁻¹
風速範圍	1 m s ⁻¹ 至 70 m s ⁻¹
資料	
每秒一筆數據輸出	3 MB/天
本機儲存	36 個月
資料傳輸	LAN, MODBUS, WiFi, Global, SIM, Sat Comms.
時間/場址	GPS
操作條件	
溫度範圍	-40 ~ +50°C
耗電量	69 瓦
電源	12 伏特
重量	55 公斤
安全規範	
雷射規範	Class 1
雷達光波長	1560 - 1565 奈米
眼睛安全標準	IEC60825-1
IP 防水等級	IP67
符合認證	CE

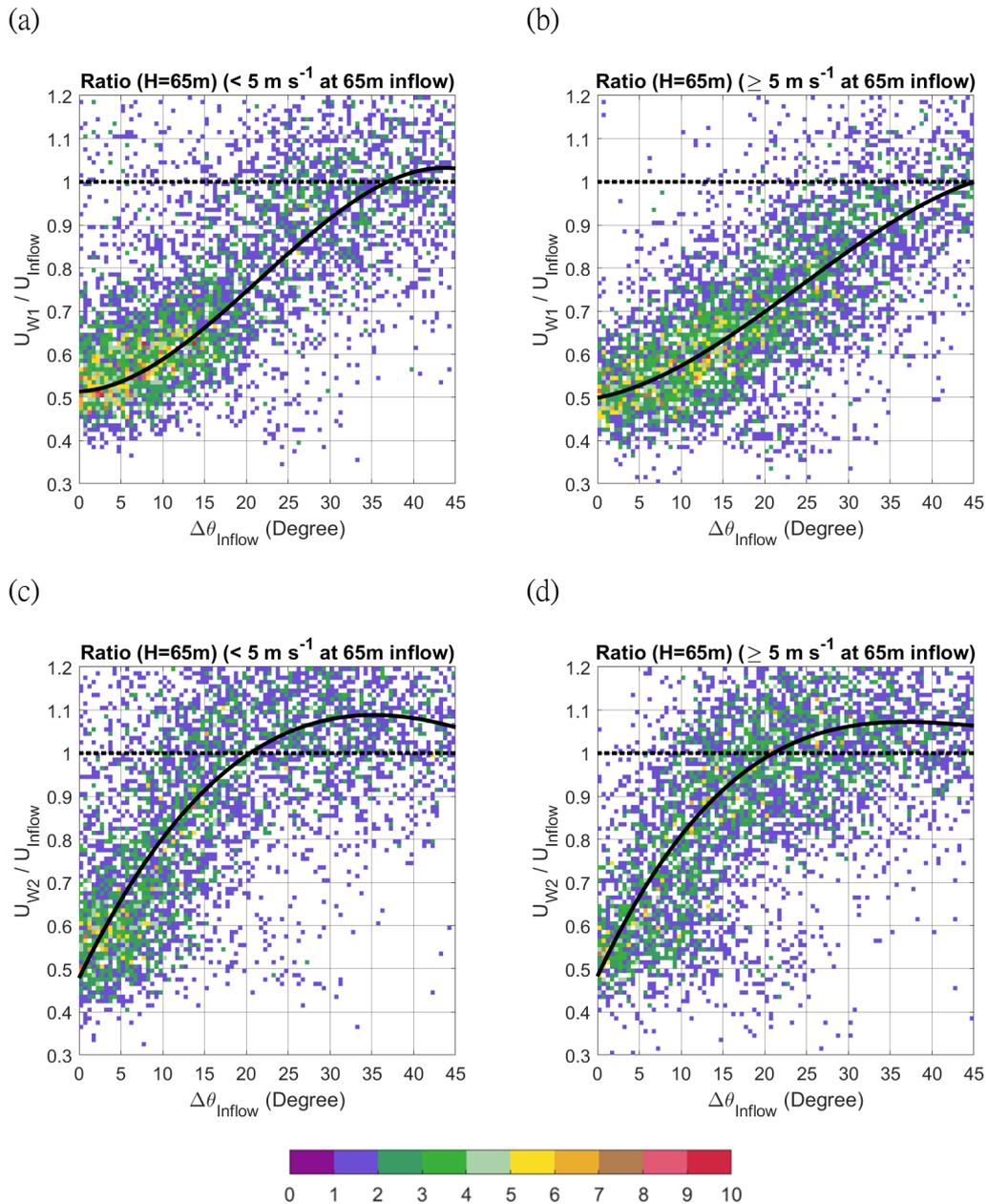


圖 9：風機尾流與入流風速的比值(U_{wake}/U_{inflow})隨入流風角度的分布。(a)和(c)為選取風機輪轂所在高度 65 米的入流風速在弱風時(< 5 m s⁻¹)，分別位於 W1 與 W2 處的結果，(b)和(d)為入流風速在強風 (≥ 5 m s⁻¹)時的結果。橫軸為入流風向與風機與光達連線之間的夾角(即圖 7 中的 $\Delta\theta$)。粗實線為論文中利用公式 4 所擬合的曲線，水平虛線代表風速比值為 1 的邊界。色階為樣本出現數(單位:個數)。

七、風機尾流效應隨距離的分布

由於本實驗在尾流區同時段有 3 個定點的風場量測，因此我們以這組難得的資料來擬合出尾流隨距離變化

的關係式，以便估計在沒有觀測儀器的位置可能出現的風速。與第 4 節相同，吾人將資料隨機分成訓練組(T 群)與驗證組(V 群)，前者用來進行方程式

的擬合，後者則用於結果的驗證。值得注意的是在訓練群的資料中，是利用尾流與入流風速的夾角($\Delta\theta$)在 5° 內的標準來篩選資料，其目的為降低尾流隨角度變化這個因素的影響。

本研究中使用三種方式來擬合尾流風速的曲線，第一種為多項式擬合 (Polynomial curve fitting)，本文使用三階，如下列公式：

$$U_{\text{wake}}/U_{\text{inflow}} = a\left(\frac{x}{D}\right)^3 + b\left(\frac{x}{D}\right)^2 + c\left(\frac{x}{D}\right) + d \quad (5)$$

其中(a, b, c, d)為三階曲線的各项係數， x 為風機後方下游處的水平距離， D 為風機葉片直徑，擬合得到的各係數值如表 3 所示。

第二種方法是參考風能模擬應用軟體(WAsP 及 WindFarmer)中使用的尾流模式，即 PARK model (Jensen 1983)。許多與風能的相關研究是基於 PARK model 進行尾流分析，例如 Beaucage et al. (2012) 將不同的模式來驗證各種程度的尾流，發現其中 PARK model 在風電場的前 3 排風機有較佳的表現，Peña et al. (2013) 也使用 PARK model 進行位於瑞典兩個地點風電場的尾流模擬，並將模擬與觀測資料進行比對，得到有不錯的結果。本文使用的 PARK model 的尾流分布如下列公式所示：

$$U_{\text{wake}}/U_{\text{inflow}} = 1 - \left(1 - \sqrt{1 - C_t}\right) \left(\frac{D}{D+2kx}\right)^2 \quad (6)$$

其中 C_t 為風機推力係數， x 為在風機後方下游處的水平距離， D 為風機葉片直徑， k 為尾流衰減常數(wake decay constant)，與風機的高度以及環境粗糙度對氣流造成影響的有關，可用來描述尾流在風機後方線性延展的程度。PARK model 所產生尾流曲線的特性，會使得風速變化(減少)最劇烈的地方發生在風機的位置上。為了求得 k 值，在此利用試誤法(trial and error)，設定 $0 < k < 1$ ，求出會使得估計值與實際值的尾流風速平均誤差出現最小值的 k 。如圖 10 所示的風速平均誤差隨 k 值的分布，當最小誤差產生時， k 值在弱風和強風時分別等於 0.074 和 0.072， k 值在弱風時稍大(數值如表 3 所示)。

第三種擬合方法為 Weibull 分布 (Weibull 1951)，通常用作描述統計上風速出現頻率的分布情形，例如 Liu and Xu (2010)利用 Weibull 分布關係來描述風能輸出與其他因素的關聯性，包含發電效率、風機轉軸等。Mishra et al. (2011) 也利用 Weibull 分布來取得可能的風速分布，進一步探究風能發電量的估計誤差與蓄能需求的關係，Cicek et al. (2015) 假設風速型態呈現 Weibull 分布，並進而探求該分布中不同的參數設定與模擬風能變化的關係。

本研究中吾人將風速出現的可能性(百分比)轉換為風速降低程度，Weibull 分布的形態以下式代表：

$$U_{\text{wake}}/U_{\text{inflow}} = 1 - \left(\frac{k}{\lambda}\right) \left(\frac{x}{D\lambda}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{D\lambda}\right)^k\right] \quad (7)$$

其中 k 為形狀參數(shape parameter)， λ 為比例參數(scale parameter)， x 為風機後方下游處的水平距離， D 為風機葉片直徑。為了求得 (k, λ) 值，在此仍然利用試誤法，將 (k, λ) 皆設定在 1.0 到 4.0 之間，求出會使得估計值與實際尾流風速值的平均誤差出現最小值時的組合，數值如表 3 所示。

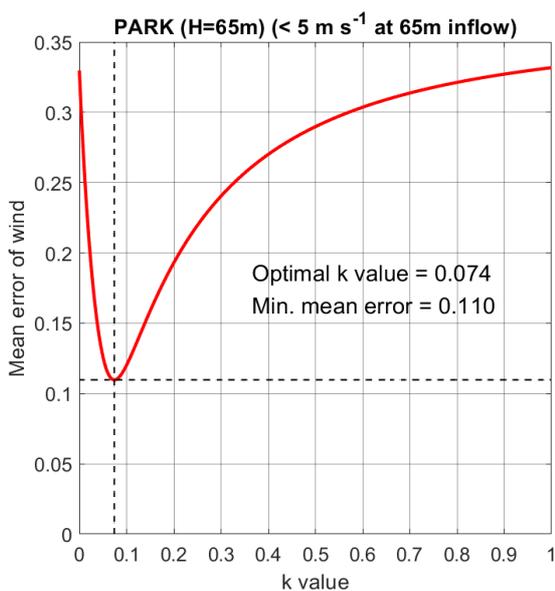
圖 11 顯示的是將三階多項式、PARK model 以及 Weibull 分布透過訓練組(T 群)資料擬合後的尾流分布曲線，以尾流和入流的風速比值來呈現，驗證組(V 群)的平均值以及在一個標準差之內的風速區間也疊加在圖中。圖 12 是在三個觀測點位置擬合出的估計風速與真實觀測風速的均方根誤差(RMSE)。

三階多項式中風速比的最低點會落在尾流距離 1.2D 至 2.3D 之間，再隨著距離增加，在 W3 處可以呈現出尾流效應尚未完全消失的現象(見圖 11 的綠色線)，與驗證組(V 群)觀測較吻合。如前所述，PARK model 中是假設尾流

效應在風機所在位置最為明顯，然後逐漸消退，由公式(6)可見，尾流風速和入流風速的比值會在風機所在的位置(即公式中的 $x=0$)為最小值，然後隨著距離(x)增加逐漸回升恢復到 1.0，在 W1 和 W2 位置 PARK model 擬合之表現稍微優於其它兩種方法，但在 W3(5.5D)位置與驗證組觀測資料相比較會呈現低估的現象(見圖 11 的藍色線)，圖 12 的數值顯示其誤差明顯大於其它兩種方法。至於 Weibull 分布，極小值出現在 W1 處，大致上可以掌握在該點弱風速時的比值，但在 W3 處(5.5D)則趨近 1.0，也就是如果根據 Weibull 方法的預估，尾流效應在該處已消失，但這與真實觀測的情形不同，該點的風速被高估，在強風時此高估現象更為嚴重(見圖 11b 的紅色線)。總的來說，根據圖 11 的曲線分布以及圖 12 的數據，綜合考量各種方法在三個觀測點的誤差，以三階多項式擬合的表現較佳，此方法在 1.2D、2.3D、5.5D 位置的誤差分別為 0.481 m s^{-1} 、 0.293 m s^{-1} 、 0.484 m s^{-1} ，誤差沒有隨距離出現明顯的變化。

本節以三個位於尾流區站點的觀測值擬合的曲線，應該解讀為只限於此研究個案的結果，但可做為日後其它相關研究的參考比對資料。

(a)



(b)

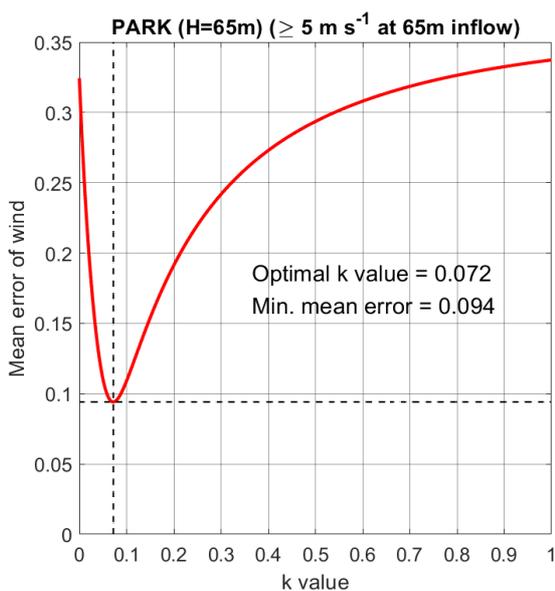
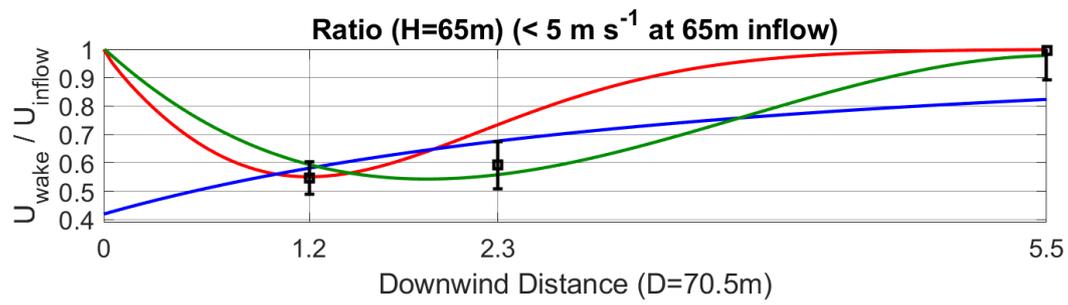


圖 10：PARK 擬合使用的 k 值試誤之風速平均誤差。(a)為選取風機輪轂高度 65 米高度的入流風速在弱風時(< 5 m s⁻¹)的結果。(b)為入流風速在強風 (≥ 5 m s⁻¹)時的結果。橫軸為 k 值，縱軸為風速比值的平均誤差。

(a)



(b)

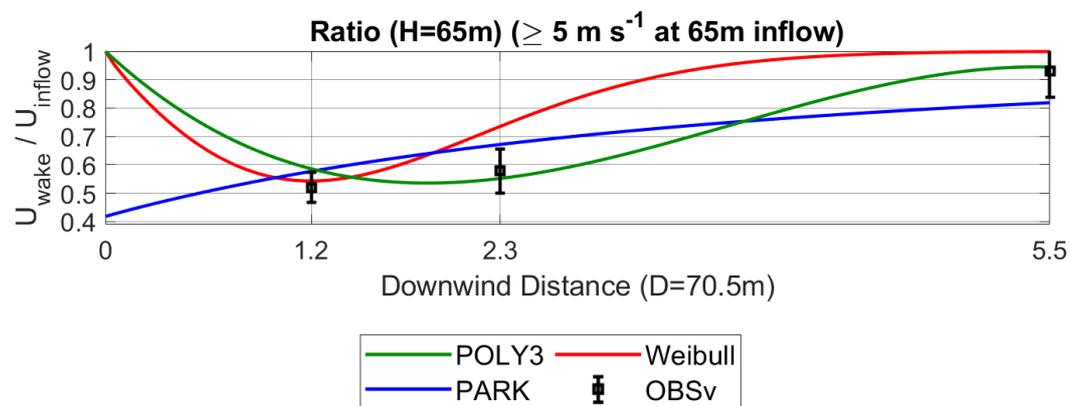


圖 11：訓練群資料經由尾流觀測資料擬合的風機距離與風速比率的關係。綠色、藍色、紅色分別為多項式三階、PARK、Weibull 擬合線。(a)和(b)分別為選取風機輪轂所在高度 65 米的入流風速在弱風時($< 5 \text{ m s}^{-1}$)與強風($\geq 5 \text{ m s}^{-1}$)的結果。橫軸為離風機的距離，單位為風機葉片直徑(D)，縱軸為尾流與入流風速比。圖中黑色誤差線為驗證群資料的平均值與一個標準差區間。

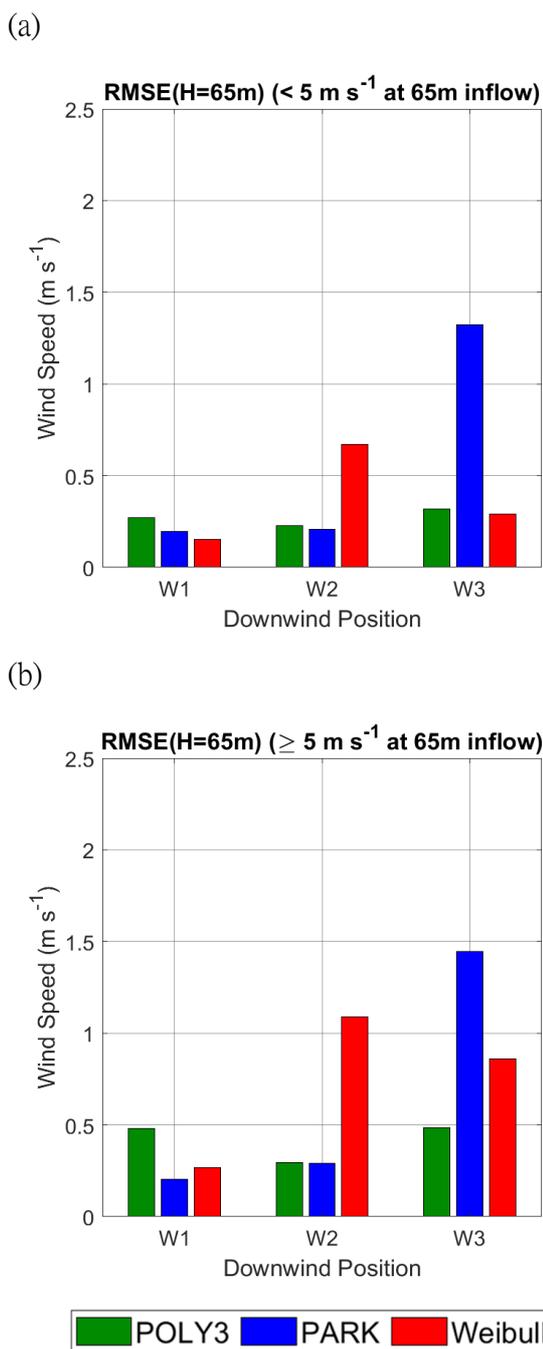


圖 12：經尾流曲線擬合得到的結果與驗證群資料比對的均方根誤差(RMSE)。綠色、藍色、紅色分別為曲線來自三階多項式(POLY3)、PARK、Weibull 擬合。(a)和(b)為選取風機輪轂所在高度 65 米的人流風速在弱風時(< 5 m s⁻¹)與強風(≥ 5 m s⁻¹)的結果。橫軸為距離風機的量測點(W1<W2<W3)，縱軸為風速 RMSE。

八、結論

本研究利用於 2018 年 6 月 15 日到 9 月 14 日長達 92 天在臺中港的光達及測風塔觀測資料，分析邊界層風場與風機入流與尾流風的特性，主要的結論如下：

1. 本研究擬合出適用於描述臺灣本地邊界層風場垂直結構的指數公式，可利用地面觀測推估邊界層內不同高度的風速，尤其是風機輪轂所在高度(65 米)的風速會極具應用上的價值，該指數公式也可提供未來其它相關研究的參考。
2. 尾流效應出現在風機葉片旋轉時可觸及的垂直高度範圍內，但在此範圍外尾流效應會立刻減少甚至消失。尾流效應的影響可達到風機下游 2.3D 的距離，尾流風速較入流風速降低的幅度可達 50%，但亂流指數的相對極大值並非出現在緊鄰風機的後方，而是在下游處一定的距離範圍內。尾流效應的日夜變化不明顯。
3. 在風機下游較近的位置(1.2D)，沿入流風風向兩側 45° 的範圍內仍可量測到尾流效應，而在較遠的位置(2.3D)，尾流效應在 20° 的範圍外基本上已經消失。此資訊可做為風電場設置時風機如何交錯排列的參考。

4. 使用三階多項式擬合公式，可以合理的描述尾流效應所造成的風速在風機後方沿下游距離的分布，可做為日後其它相關研究的參考，此公式產生的均方根誤差值小於 0.5 m s^{-1} ，可用來評估在風機下游架設另一台風機的位置，以及計算對後方風機發電量的影響。

本文的作者群同時在進行邊界層風場與風機參數化的高解析度(水平網格間距為 100 米)數值模式模擬，本研究的長期風場觀測資料未來將會用來驗證數值模擬的結果。

致謝

本研究由交通部中央氣象局計畫 1092030E 資助。感謝工業技術研究院綠能與環境研究所提供光達資料，以及經濟部財團法人金屬工業研究發展中心提供測風塔資料。

參考文獻:

- 呂威賢、胡哲魁、王珮蓉、胡芳瑜，2017：台灣離岸風力發電區塊評選與政策環評，61-76，台電工程月刊825期。
- 周庭光、蔡原祥、苗君易、楊雅兆、李中宏、馮宗緯，2015：彰濱漢寶潮澗帶光達風場量測。2015臺灣風能

- 學術研討會暨NEP-II離岸風力及海洋能源主軸中心成果發表會，臺北市。
- 陳柏中，2017：東北季風與颱風大氣紊流尺度之探討。國立成功大學航空太空工程學系碩士論文，150頁。
- 賴啟銘、張珮綺、P. Winoto、余政達、楊瑞源，2012：台灣西部離岸風能前力分析，803-808，第34屆海洋工程研討會論文集。
- Beaucage, P., Brower, M., Robinson, N., and Alonge, C., 2012: Overview of six commercial and research wake models for large offshore wind farms. *Proceedings of the European Wind Energy Associate (EWEA)*, 18.
- Browning, K. A., and R. Wexler, 1986: The determination of kinematic properties of a wind field using Doppler radar. *J. Appl. Meteor.*, **7**, 105-113.
- Chang, W.-Y., W.-C. Lee, and Y.-C. Liou, 2015: The kinematic and microphysical characteristics and associated precipitation efficiency of subtropical convection during SoWMEX/TiMREX. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 317 – 340
- Chen, G., Iwai, H., Ishii, S., Saito, K., Seko, H., Sha, W., and Iwasaki, T., 2019: Structures of the sea-breeze front in dual-Doppler lidar observation and coupled mesoscale-to-LES modeling. *J. Geophys. Res., Atmos.*, **124**, 2397 – 2413.
- Cicek, N., & Delic, H. 2015. Demand response management for smart grids with wind power. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, **6**, 625-634.
- Hansen, K.S., G.C. Larsen, R Menke, N Vasiljevic, N Angelou, J Feng, W.J. Zhu, A Vignaroli, W Liu W, C Xu and W.Z. Shen, 2016: Wind turbine wake measurement in complex terrain. *J. Phys.: Conf. Ser.*, Vol. **753**, No. 3, p. 032013.
- Hsu, S. A., Meindl, E. A., and Gilhousen, D. B., 1994: Determining the power-law wind-profile exponent under near-neutral stability conditions at sea. *J. Appl. Meteorol.*, **33**, 757-765.
- Hsuan, C. Y., Tasib, Y. S., Kec, J. H., Prahmanac, R. A., Chenc, K. J., and Lina, T. H., 2014: Validation and measurements of floating LiDAR for nearshore wind resource assessment application. *Energy Procedia*, **61**, 1699-1702.
- Iungo, G.V., Wu, Y. T., and Porté-Agel, F., 2013: Field measurements of wind turbine wakes with lidars. *J. Atmos.*

- Oceanic Technol.*, **30**, 274-287.
- Jensen, N.O., 1983: A note on wind generator interaction. Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark.
- Liu, X. and Xu, W., 2010: Economic load dispatch constrained by wind power availability: A here-and-now approach. *IEEE Transactions on sustainable energy*, **1**, 2-9.
- Mishra, S., Mishra, Y., and Vignesh, S., 2011: Security constrained economic dispatch considering wind energy conversion systems. In *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting* (pp. 1-8). IEEE.
- Pena Diaz, A., Hasager, C. B., Gryning, S-E., Courtney, M., Antoniou, I., and Mikkelsen, T., 2009: Offshore wind profiling using light detection and ranging measurements. *Wind Energy*, **12**, 105-124.
- Peña, A., Réthoré, P-E., Hasager, C. B., and Hansen, K. S., 2013: Results of wake simulations at the Horns Rev I and Lillgrund wind farms using the modified Park model. *DTU Wind Energy E*, No. 0026.
- Pitter, M., C. Slinger and M. Harris, 2013: Introduction to continuous-wave Doppler Lidar. Zephir Limited, UK.
- Rettenmeier, A., D. Schlipf, I. Würth, and P. W. Cheng, 2014: Power performance measurements of the NREL CART-2 wind turbine using a Nacelle-based lidar scanner. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, **31**, 2029-2034.
- Smith, M., M. Harris, J. Medley and C. Slinger, 2014: Necessity is the mother of invention: nacelle-mounted Lidar for measurement of turbine performance. *Energy Procedia*, **53**, 13 - 22.
- Tsai, Y.-S., P.-H. Lin, Y.-C. Yang, and J.-L. Chen, 2015. Lidar observation of surface wind profiles in Changhua Coastal Industrial Park, *2015 Conference on Weather Analysis and Forecasting*, Taipei, Taiwan.
- Tsai, Y.-S., J.-J. miao, C.- M. Yu and W.-T. Chang. 2019. Lidar observations of the typhoon boundary layer within the outer rainbands. *Boundary-Layer Meteorol.*, **171**, 237 - 255.
- Wagner, R., Mikkelsen, T., and Courtney, M., 2009: Investigation of turbulence measurements with a continuous wave, conically scanning LiDAR. Danmarks Tekniske Universitet, Risø Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi. Denmark. Forskningscenter Risoe. Risoe-R, No. 1682(EN)

- Weibull, W., 1951: A statistical distribution function of wide applicability. *J. Appl. Mech.*, **18**, 293-297.
- Wu, Y.-T. and F. Porté-Agel, 2011: Large-eddy simulation of wind-turbine wakes: evaluation of turbine parameterizations. *Boundary-Layer Meteorol*, **138**, 345 – 366.
- Wu, Y.-T., Lin, C. Y., and Hsu, C. M., 2020: An experimental investigation of wake characteristics and power generation efficiency of a small wind turbine under different tip speed ratios. *Energies*, **13**(8), [2113]. <https://doi.org/10.3390/en13082113>.
- Wu, Y.-T., C.-Y. Lin, C.-E. Huang and S.-D. Lyu, 2019: Investigation of multiblade wind-turbine wakes in turbulent boundary layer. *J. Energy Eng.*, Vol. **145**, No. 6, p. 04019023.

The observational study of the vertical structure of wind in boundary layer and wind-turbine wake flow effect using multiple lidars and a wind tower

Yung-Lin Teng¹ Yu-Chieng Liou¹ Shao-Fan Chang¹
Yu-Ting Cheng¹ Pay-Liam Lin¹ Jen-Hsin Teng²

1 Department of Atmospheric Sciences, National Central University
2 Central Weather Bureau, Ministry of Transportation and Communication

(manuscript received 12 June 2020 ; in final form 09 October 2020)

Abstract

In this study data observed by three vertical-pointing lidars and one wind tower during a field experiment were used to investigate the wind structure within boundary layer and wake flow effect caused by wind turbine. The experiment lasted for 92 days, from 15 June to 14 September in 2018, which represented the southwesterly monsoon flow.

The observational data are utilized to construct the formulas suitable for describing the local vertical profiles of wind within boundary layer under different wind speeds and in day or night time. In addition, the wind-turbine wake flow effects are investigated through the analysis of wind speed, wind direction, and their root-mean-square errors. The dependence of the wake flow effect on the angular position and downstream distance behind the turbine is examined. This information can be of importance in terms of optimizing the deployment of multiple wind turbines, and estimating the impact on power generation produced by nearby wind turbines. The long-term observational data collected in this research can also be used to validate simulation results from high resolution numerical models.

Key Words: wind turbine, boundary layer, lidar observation, wake flow,

doi: 10.3966/025400022020104801004