

西南季風下光達近地表大氣邊界層觀測與分析

蔡原祥^{1*} 陳信宏² 陳家漢³ 楊瑞源⁴

^{1*}國立高雄技大學海事學院海事風電工程碩士學位學程 副教授

²國立成功大學水工試驗所 副研究員

³國家實驗研究院國家地震工程研究中心 副研究員

⁴國立成功大學水利及海洋工程學系 教授

摘要

本研究使用 ZephIR300 光達風剖儀，觀測夏季西南季風到達 300 m 高度的大氣邊界層，並分析其風速剖面特性。觀測位址位於台南市成功大學水工試驗所，距離海岸線約 5 km 的海岸區域，風場由海上經過陸地而到達觀測位址，地表為非均質粗糙度分布。使用 10-min 平均風速及風向，系集平均西南風向在不同高程的風速。考慮地表熱效應對風速剖面發展的影響，平均風速剖面區分為白日不穩定及夜晚穩定邊界層。由幂次律(power law)擬合及果顯示，夜晚風速剖面風剪指數值大於日間，隨著風速增加，白日與夜晚的差異逐漸減小，呈現近似大氣中性條件。無論在日、夜時段，隨著風速的增加而風剪係數增大，代表強風下表面動量通量的增加而改變風速剖面特性。

關鍵字: 風速剖面，光達風剖儀，西南季風

1. 前言

大氣邊界層(Atmospheric Boundary Layer)在數百公尺高度內的發展，對於風能、風工程、都市規劃與污染傳輸等多個工程領域皆具有重要意義。就風能工程領域而言，如能夠明瞭到達 200–300 m 高度的風速剖面特性尤為重要，因為將直接影響風能資源評估、風力機載重以及整體風力機設計(Wagner et al., 2009; Irwin 2009)。由於中央山脈佔據約三分之二的陸地，加之高人口密度限制土地使用，風力機與工業設施多集中於沿海地帶。在此區域，陸、海間溫差與地表粗糙度差異導致風速剖面的變化，詳細明瞭此特性可進而評估風力機結構安全與系統發電效能。

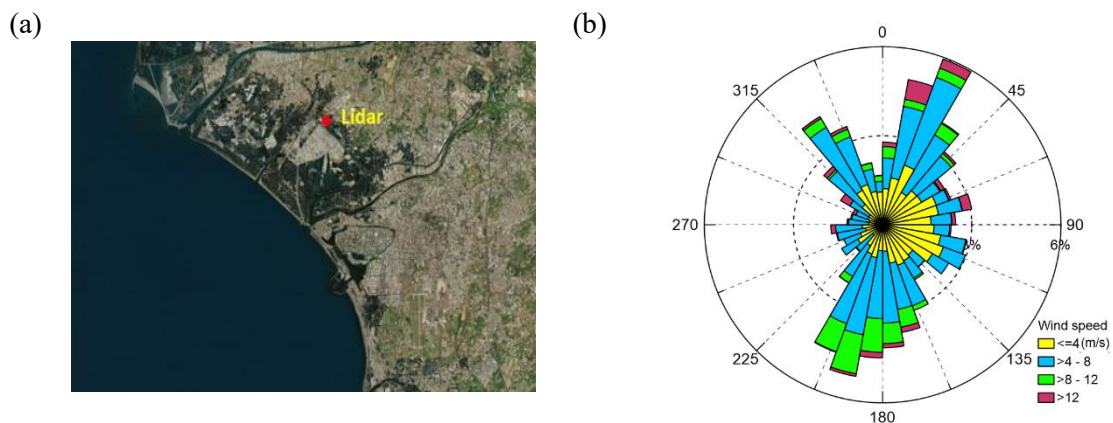
沿岸大氣流場特徵主要源自大尺度天氣系統風場與中尺度海陸風環流的交互作用，形成具區域性特徵的氣象環境。由於海陸表面粗糙度差異顯著（離岸海面約 0.0002 m，而陸地則介於 0.03–0.5 m 之間）。海岸地區氣流如源自海上，當經過海路交界面，會形成所謂內邊界層(internal boundary layer)，當遭遇不同的地表粗糙特性，如人造結構物、建築物與林木，將進一步改變風速剖面特性。傳統風速剖面模型，如對數律與經幂次律，通常應用在平坦地形下，建構於 100 m 高度內的表面層(surface layer)的測風塔觀測結果(Panofsky and Dutton 1984)。國際電工委員會

(IEC)針對風力機設計標準，採用幕次律描述風速剖面(IEC 2005)。

海岸大氣邊界層受海、陸表面差異所影響，呈現明顯的方向性。目前風力機設計多依循 IEC 標準，惟此等標準主要建構於內陸風場的觀測，對於沿岸風場的適用性仍需針對特定地點進行比較及修正。本研究使用光達風剖儀(Lidar wind profiler)系統，量測在夏季西南季風優勢下，位於海岸地區風速剖面高度達 300 m 的發展。探討其風速剖面特性以及幕次律的適用性，並分析季風風速剖面的風剪力指數(wind shear exponent)的變化。觀測期間為凱米(Gaemi)颱風侵台時期，將進一步比較季風與颱風大氣邊界層的差異。

2. 觀測場址描述

光達觀測地點為台南市安南區國立成功大學水工試驗所，場址位於海岸地區，距離西南方向海岸線約 5 公里。圖一說明附近的地理環境，以及所對照的風向玫瑰風速圖。台灣海峽位於西方及西南方，而北方、東方則鄰近市中區，為較高密度之中層建築。西方與南方臨近海岸，主要為農耕地、漁塭與沼澤地，地表平坦。夏季西南季風引發的南風與南南西風由海上吹入陸地，經過台南科技工業園區的較密集的中層建築物群後，到達光達觀測位址，因此風速剖面受較大地表粗糙度所支配。玫瑰風速凸顯是雖然是在夏季西南季風系統，仍有一部分風向為東北風。



圖一(a)國立成功大學水工試驗所內觀測場址與周遭地理條件(來源：中央研究院人文社會科學研究中心 GIS 專題中心)，(b) ZephIR300 於 102 m 所觀測之風向風速玫瑰圖 (蔡原祥 2024)。

3. 光達觀測

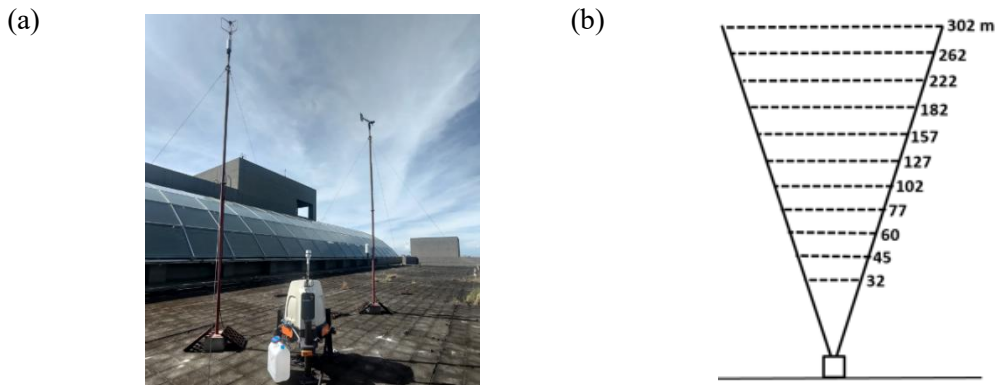
本研究使用 ZephIR300 光達系統進行大氣近地表邊界層觀測，該系統以 VAD 原理進行錐形掃描，雷射光束以偏離天頂 ϕ 傾角發射，在同一高程圓周上量測 50 個不同方位角 θ 的徑向速度 v_r 。徑向速度與三個速度分量 u 、 v 、 w ，以及傾角與方位角之間的關係可表示為：

$$v_r = U \cos(\theta - \theta_d) \sin \phi + w \cos \phi \quad (1)$$

其中， $U = (u^2 + v^2)^{1/2}$ 表示水平風速， θ_d 表示風向。ZephIR300 使用最小平方演算法，根據多個方位角測得的徑向風速，計算出最佳擬合的 U 、 w 與 θ_d (Peña et al. 2009)。VAD 量測原理為透過聚焦於特定垂直高度，進行掃描，並逐層上移聚焦而獲得風速與風向，可涵蓋地面上 10 至 300

m 的高度範圍。

圖四(a)說明光達系統的设置，位於成大水工所。觀測時段為 2024 年 6 月 16 日至 8 月 14 日，並架設傳統式超音波及螺槳式風速計與溫濕度計。量測 11 個高層如圖四(b)所示。平均風速先以 10 分鐘為間隔計算，再使用風向區分為西南向(150° – 210°)，及東北向(30° – 90°)，並於此方向區間內進一步以 2 m s^{-1} 的風速區間分類，而獲得區間平均(bin-averaging)風速剖面，並以風速在 102 m 高度作為參考風速分類。另外，並依照白日(06:00–18:00)與夜間(18:00–06:00)分類，以區分探大氣穩定度對風剖面形狀的影響。



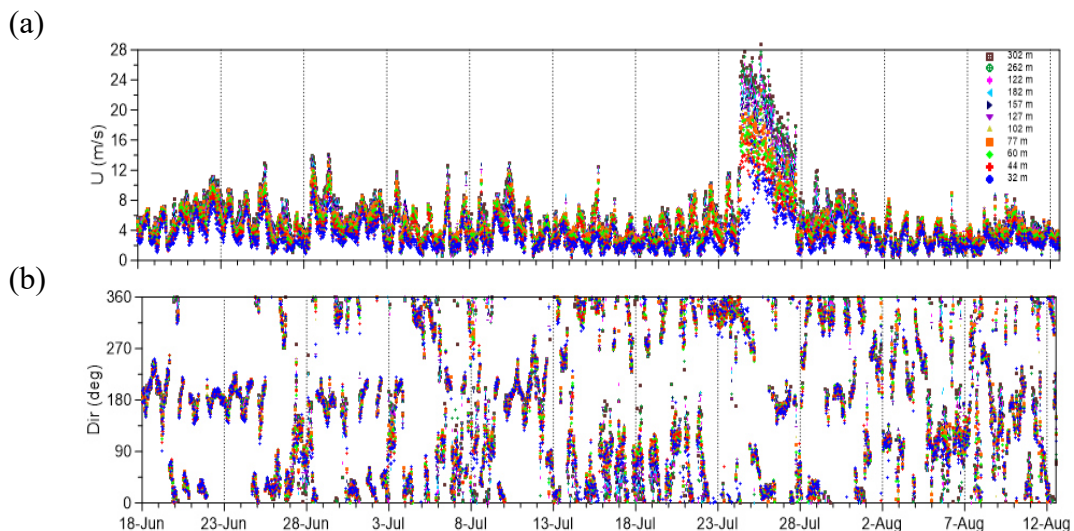
圖二 (a) ZephIR 300 光達系統及超音波、螺槳式風速計的设置，(b)所量測 11 層高度示意圖。

對於風速剖面的於描述，幕次律公式為一簡單且容易明瞭的經驗式，以風剪力指數(wind shear exponent)代表風速剖面的特性，表示如下

$$\frac{U(z)}{U_R} = \left(\frac{z}{z_R} \right)^{\alpha} \quad (2)$$

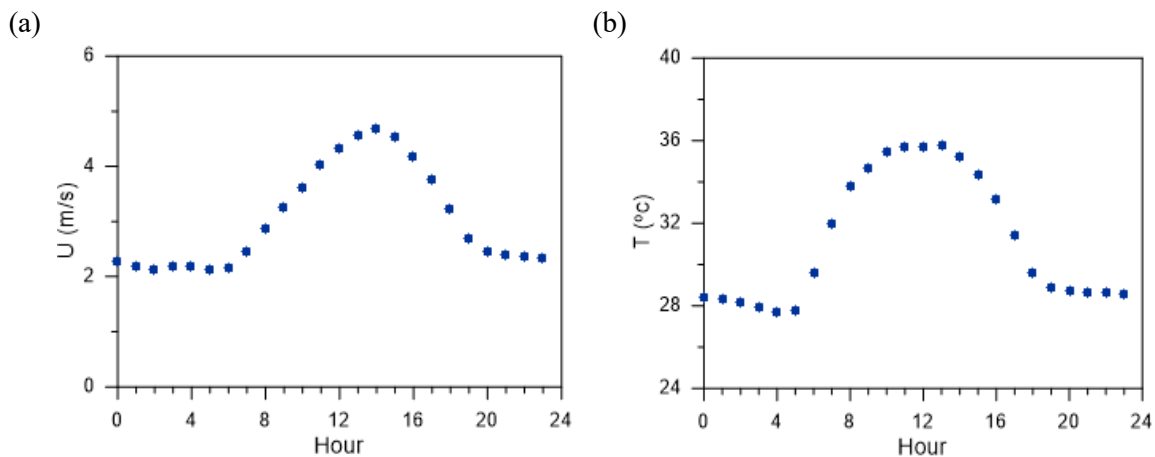
式中 $U(z)$ 為風速隨高度的變化， z 為高度， U_R 為參考高度 $z_R=102 \text{ m}$ 參考風速， α 為風剪力指數。

4. 結果與討論



圖三 ZephIR 300 光達所量測 11 層高度(a)風速與(b)風向隨時間的演變。

在西南季風系統下，11 層風速的時間歷程如圖三所示，呈現出明顯的日週期性變化，每日有一局部風速尖峰，代表海岸區風場由綜觀尺度(synoptic scale)季風與局部海陸風交互作用結果，風速大多維持在 10 m s^{-1} 以下。於 8 月 23 至 28 日為凱米颱風侵台時期，於台灣北部登陸，此期間 10 分鐘平均最大風速達到 28 m s^{-1} 。風向受白天海風與夜間陸風所牽引，規律性的轉換顯示沿海區域風場受白日加熱、夜間冷卻效應所影響。日周期變化特徵可以每小時系集平均呈現，如圖四所示。受熱浮力效應(thermal buoyancy effect)所驅動，風速為 1 日周期變化，最大風速出現在午後約 2 時處，對應於當日最高溫度時期。

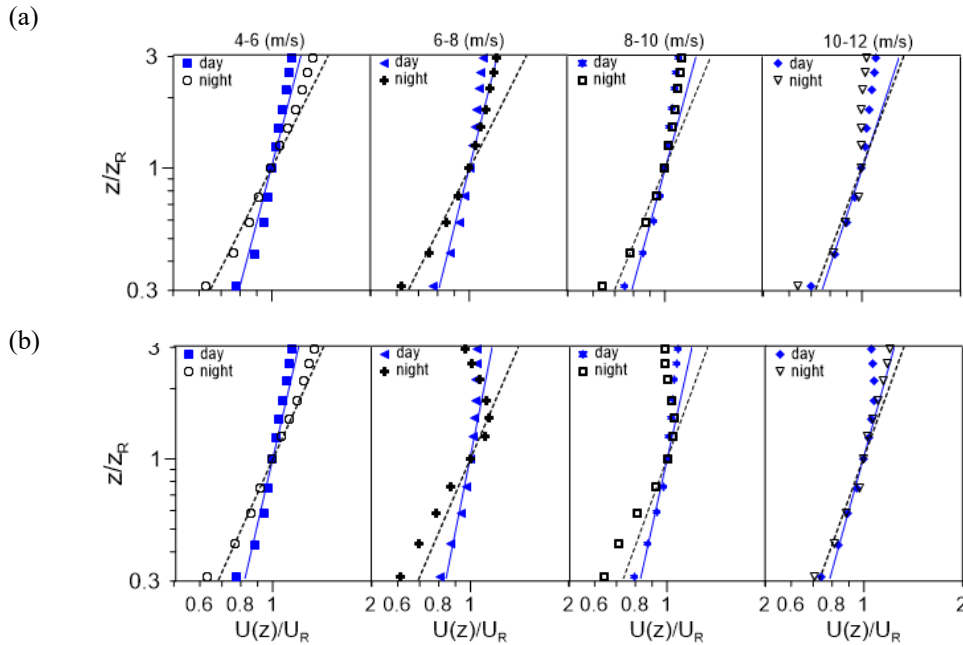


圖四 (a)風速於 30 m 高度與(b)溫度，每日周期性變化。

圖五說明西南以及東北風向，個別 2 m s^{-1} 區間的平均風速剖面，以及所對應擬合之幕次律。整體而言，日夜間呈現不同的風速垂直分布。受地表冷卻效應影響而抑制表面紊流混和效應，夜間的風速剖面有較大的風剪力指數。白天因地表受日照而加熱，強烈的熱對流導致充分的紊流混合，使得風速剖面垂直分布較為均勻。此日夜差異隨著風數的增加而減小，代表剪力紊流的增加而抑制熱對流，形成近中性(near-neutral)邊界層。另外，風剪力指數隨風速增加而下降。西南風速區間顯示，白天平均約為 $\alpha \approx 0.2$ ，而夜間則 $\alpha \approx 0.33$ 。此較大風剪指數顯示風雖然由海上吹送而來，但經過陸上建築物群後，已轉變為陸域型表面邊界層(Choi 2009)。東北風向風經由陸地而來，特別是在 $6-8$ 與 $8-10 \text{ m s}^{-1}$ 風速區間中，夜間風剖面在約 150 m 的高度出現風速反轉的現象。Hsu (1979)指出此類噴流(jet-like)型態風剖面，常在沿海地區夜間被觀測到，主要由夜間陸地冷池所造成顯著的海陸溫差導致，剖面最大風速大約位於 100–600 m，與本觀測結果一致。

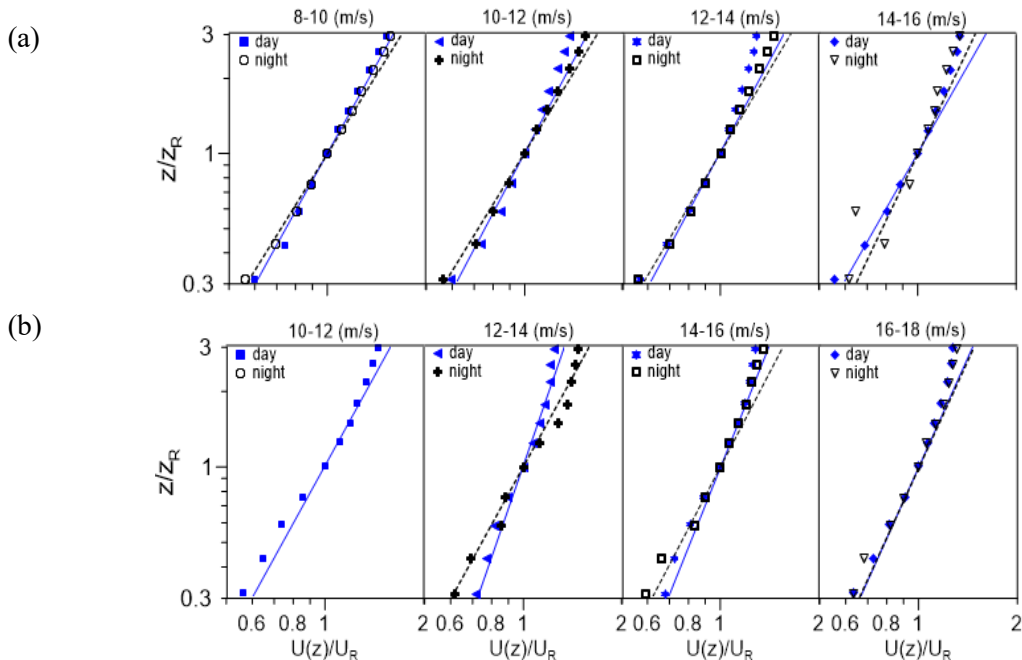
颱風嘉米期間的風速剖面與所擬合的幕次律曲線說明於圖六。在颱風雲層厚且無日照天氣型態下，強風導致強烈的機械紊流混合(mechanical turbulent mixing)作用，使得日夜風剖面差異較小，代表颱風期間多為大氣近中性穩定條件。Tsai et al. (2019) 使用資料浮標分析顯示，風速約大於 6 m s^{-1} 時，可表示為近中性層化(neutral stratification)，與本研究觀測結果一致。與季風風速剖面相較，幕次律較適用於颱風風速剖面，應是強風且低熱效應下，充分的表面層紊流混合，導致動量通量均勻的垂直分布，並延伸至混合層(mixed layer)，並符合對數律風速剖面的描述。東北向的颱風風場特性與西南向情況類似，日夜風速剖面差異較小。然而在 $12-16 \text{ m s}^{-1}$

區間發生類噴流剖面。由於颱風時期熱效應較弱，海陸溫差並不明顯，是否為觀測點大樓本身的尾流效應所造成，仍需更進一步的研究。



圖五 光達觀測之日間(06:00–18:00)與夜間(18:00–06:00)的季風風速剖面，與幕次律擬合曲線。

(a) 南西向 150°–210°，(b) 東北向 30°–90°。圖上方標示為所對應的風速區間平均。



圖六 光達觀測之日間(06:00–18:00)與夜間(18:00–06:00)的颱風季風風速剖面，與幕次律擬合曲線。(a) 南西向 150°–210°，(b) 東北向 30°–90°。圖上方標示為所對應的風速區間平均。

5. 結論

使用 ZephIR300 光達風速剖面觀測至 300 m 高度顯示，在季風條件下，受日照熱效應及夜間冷卻影響，風速呈現明顯日週期變化，同時風速邊界層日夜間存在顯著差異，夜間有較大的風速垂直梯度，亦及風剪力指數大。颱風風場下大致為近中性風速剖面，與季風風速剖面相較，較適用幕次律的擬合。不同於傳統邊界層，季風觀測資料亦存在夜間類噴流剖面，風速約在 150 m 高度反轉。此一現象代表夜間陸風的影響，為大尺度季風與中尺度陸風交互作用所的結果。

6. 參考文獻

- [1] 蔡原祥，“光達西南季風風速剖面觀測及受海陸風影響研究”，家科學及技術委員會補助專題研究計畫報告，2023 年。
- [2] Choi, E. C. C., “Proposal for unified terrain categories exposures and velocity profiles”. In: 7th Asia-Pacific conference on wind engineering, 8–12 Nov 2009, Taipei, Taiwan, 2009
- [3] Hsu, S. A., “Mesoscale nocturnal jetlike winds within the planetary boundary layer over a flat, open coast”, *Boundary-layer Meteorology*, 1979, Vol. 17, pp485–494.
- [4] IEC 61400-1, “Wind turbines–part 1: Design Requirements”, Ed. 3, Geneva, Switzerland, 2005.
- [5] Irwin, J. S., “A theoretical variation of the wind profile power-law exponent as a function of surface roughness and stability”, *Atmospheric Environment*, 1979, Vol. 13, pp191–194.
- [6] Panofsky, H. A., Dutton, J. A. *Atmospheric turbulence: models and methods for engineering applications*, John Wiley & Sons, New York, 1984.
- [7] Peña, A., *Sensing the wind profiles*, Risø National Laboratory. Risø-PhD No. 45(EN), 2009.
- [8] Tsai, Y. S., Miao, J. J., Yu, C. M., Chang, W. T., “Lidar observations of the typhoon boundary layer within the outer rainbands”, *Boundary-Layer Meteorology*, 2019, Vol.171, pp237-255.
- [9] Wagner, R., Antoniou, I., Pedersen, S. M., Courtney, M. S., Jørgensen, H. E., “The influence of the wind speed profile on wind turbine performance measurements”, *Wind Energy*, 2009, Vol.12, pp348-362.

誌謝

本研究由國科會計畫 NSTC 114-2221-E-992-049-MY2 所支持，在此誌謝。