

商港風力觀測站風力資料校正因子探討之研究

許義宏¹ 李政達¹ 張祐榕² 李俊穎³ 蔡立宏⁴ 賴志炫⁵

¹交通部運輸研究所運輸技術研究中心 副研究員

²交通部運輸研究所運輸技術研究中心 助理研究員

³交通部運輸研究所運輸技術研究中心 科長

⁴交通部運輸研究所運輸技術研究中心 主任

⁵臺灣港務股份有限公司 副工程師

摘要

風力觀測資料對於船舶停靠、船舶進出、碼頭作業、港區結構物設計與防災預警十分重要，其中風速相關性分析提供區域風場重建、預測和模擬的重要工具。本研究透過質化及量化分析之綜合討論來建立測站修正機制，並分析直接以風速風向資料計算與將風力資料拆解為 U、V 分量後再計算之差異，最後導入機器學習的方法(包括決策樹回歸模型及長短期記憶模型)，透過不同測站的風力觀測數值，進行目標測站的估計推算，以及估計值與實際值量測的結果比較，探討其影響因子。本研究相關研究成果可提供歷史資料推估、區域風場重建、以及風速補遺(頻率增補)之應用參考。

一、前言

港口和航運對全球經濟運作至關重要，促進了全球近 80%以上的貿易活動，而我國為海洋國家，港口更是臺灣對外重要的航運樞紐。然而受到氣候變化和自然災害的威脅，強風等氣象因素造成的事故可能導致整個供應鏈的負面衝擊並造成經濟損失，同時船舶大型化亦導致船舶所受風力增大，使船舶操作及航行更加複雜。

為提供臺灣主要商港臺北港、基隆港、蘇澳港、花蓮港、高雄港、安平港、布袋港、澎湖港、臺中港及馬祖港域船舶停靠、船舶進出、碼頭作業、港區結構物設計與防災預警等所需相關資料，交通部運輸研究所(以下簡稱本所)自民國 75 年起陸續於臺灣各港建置長期性風力觀測系統，目前本所協助臺灣港務股份有限公司及連江縣政府代管風力觀測站計有 32 站，構成我國商港風力觀測網。

然而，依據世界氣象組織之風速測站分級相關規定，我國商港各風力觀測站座落位置時而受到地形、高度、結構物、碼頭船舶、設施(備)及障礙物等影響，僅少數幾座風速站可符合上開分級之第 1~3 級標準，多數測站均為第 4、5 級，其特定方向風力觀測資料恐有失真疑慮，因此需要透過資料修正等方式進行校正。考量過往本所校正方式多採文獻建議之經驗公式，對於港區之適用性仍需進一步討論，因此，本研究透過各港區及中央氣象署鄰近測站之風力觀測資料，

進行數據相關性之實證探討，據以訂定各港區之風力資料校正係數與方法，以提供港務管理單位做為即時資料修正、推估及模擬預測之應用參據。

二、研究方法

2.1 文獻回顧

世界氣象組織（World Meteorological Organization, WMO）自 1950 年出版「儀器和觀測方法指南(WMO-No. 8)」係國際氣象儀器性能標準化和確保觀測品質之重要依據，該指南也是相關會員國推動「WMO 全球綜合觀測系統」的重要指導原則，促進各國推動氣象資料蒐集、報告與交換之一致性與數據共享。在風力觀測部分，WMO-No. 8 在第 1 卷第 5 章對於地面風的測量有詳盡的指引，其中包括定義、氣象要求、測量方法與觀測方法、觀測儀器、數據處理方式、測風儀器安裝位置、數據修正等。該指引提到：「對於現代儀器設備來說，是容易達到所要求的不確定性。風觀測的最大難題是風速計的安裝位置。因為要找到一個對大範圍地域的風速具有代表性的場地是幾乎不可能的，因此，只能對安置誤差進行估計」。WMO 建議風速風向季最佳的安裝地點就是：在此處觀測到的風是對周圍至少幾公里範圍地域的風最具代表性，或者可以很容易地加以修正使之具有代表性。

風速會隨高度而明顯增加，特別是在崎嶇地域，如不平坦的地域、有障礙物，或者有不均一的地表覆蓋，其對於風速和風向都有顯著的影響。因此，WMO 建議測風儀器需安置在開闊地域的 10 米標準高度，其中開闊地域的定義是風速計與任何障礙物之間的距離至少是障礙物高度的 10 倍。而在實際上大多數陸域測風站都受到地形作用或地表覆蓋物(障礙物)的影響，其對於需要開闊平坦的地域要求幾乎難以滿足。

在現場風況校正上，一般需考量的因素包括：氣流失真（通常是由於物體、地形或風速計本身的設計造成的，其可透過風洞試驗去得出修正函數）、地形修正（這項修正是考慮到在測風站周圍的地域高度的作用，可透過該區域平均風速和目標測站觀測到的風速比值建立修正函數）、非標準觀測高度（一般常以對數或指數剖面函數進行修正，如 Davenport, A. G.於 1965 年提出之風速剖面關係式）、粗糙度影響（上游粗糙度影響）。在進行實地風場資料校正，可比較同一地點不同高度的風速風向數據，並利用風速剖面理論對低高度風速進行校正，或者利用區域性的風速經驗公式，再根據地形、地貌等因素對風速數據進行校正。隨著數值模擬及衛星遙感技術發展，亦有利用多個測站的資料，並透過空間插值或機器學習模型，對單一測站的資料進行校正。

直接使用原始風數據，若未考慮地形或結構物影響可能會導致顯著的誤差，因此，對原始風資料集進行標準化有其重要性。進行觀測資料偏差校正，主要是為了消除或減小觀測儀器在製造、使用和環境因素影響下產生的偏差，以提高觀測資料的準確性、一致性和可靠性，並讓觀測資料確保後續分析、預測和研究的可利用性，特別是在氣候變遷領域。暴露校正可用於校

正次優條件下的平均風速測量值，在非理想但合理的位置放置單一風速計通常能夠提供足夠的觀測數據，其經過適當的修正和數據處理後，獲得具有代表性的風向估計值(J. Wieringa, 1996)。而現有的標準化方法主要適用於平坦地形，在複雜地形條件下可能變得不適用，若能利用雷達剖面儀的垂直風剖面，以及風洞試驗模擬數據來校正地形對地表平均風速的影響，可有效提供氣象站做為數據修正因子(Y.C. He 等人, 2014)。

風速相關性分析提供區域風場預測和模擬的重要工具，在風工程領域，相關性分析能幫助理解風速的隨機特性，進而應用於結構設計。在氣候分析領域，透過風速相關性分析，可配適較佳的高斯模型參數，有助於提高模型預測的準確性，其對於空氣品質管理、風速場域建模、風能規劃和海氣互動具有重要意義，特別是風速模式的變化可能為氣候變遷研究提供關鍵背景資訊(Solomon 等人, 2015)。美國 IOOS 計畫辦公室之海洋即時資料品保手冊(QARTOD Manual)等資料品管相關文獻，在風力資料之第 11 項鄰近站相關性檢查(Neighbor Test)品管程序，亦透過鄰近站相關性檢查，以確認即時風力觀測資料的可信程度，其作法係透過二個站點的資料進行比較，當每個站點的標準差在時間段內計算變化率超過 2 倍標準差，則可標記為可疑。

2.2 分析方法

本研究在分析方法上，透過質化及量化分析之綜合討論來建立測站修正機制，其中質化分析包括蒐集測站基本資料及地理空間的相關資訊，藉以釐清其影響因子；而量化分析主要透過不同主風向的紊流強度百分比及鄰近測站的相關性分析，瞭解測站間風速及風向的關聯性，最後再綜整質化與量化分析結果，確認測站之影響因子與討論校正方式，研究流程如圖 1 所示。

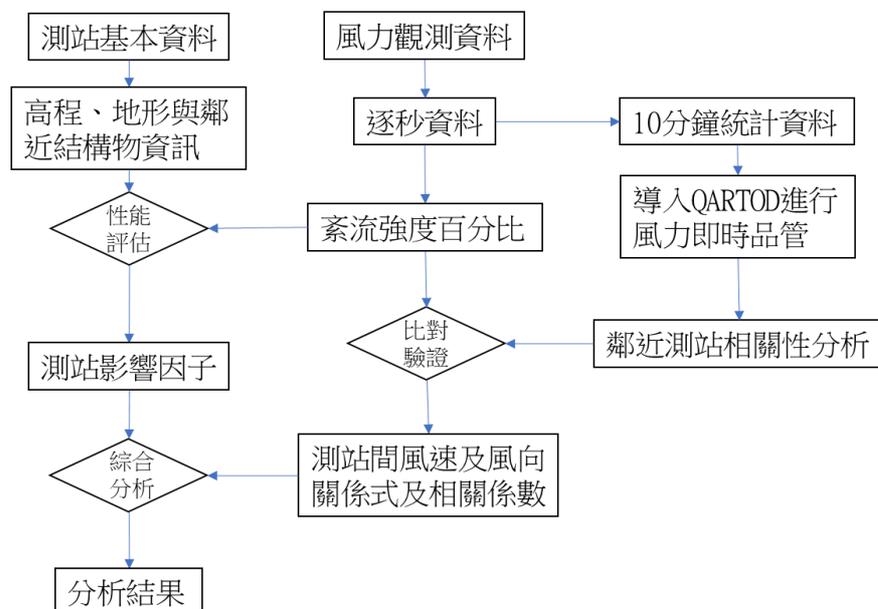


圖 1 研究流程

紊流強度(longitudinal turbulence intensity)定義為某一高度量測之主流向風速擾動速度之均方根值與同一位置量測之主流向平均風速之比值，亦即：

$$TI_u(z) = \frac{\sqrt{u(z)^2}}{U(z)} \quad (1)$$

其中： $TI_u(z)$ ：某一高度紊流強度

$u(z)$ ：某一高度量測之主流向風速擾動速度

$U(z)$ ：同一位置量測之主流向平均風速

紊流強度係代表風場流速擾動大小的強弱(即紊流動能大小)之一種指標。其與地表粗糙度，以及距地面高度及大氣穩定度有關；一般而言，隨大氣不穩定及地表粗糙度之增加而變大，因此，本研究透過風力量測之逐秒資料計算每分鐘紊流強度，以瞭解各測站之基本風況。

相關性分析是指二個或多個變數之間的關係程度。在資料分析中，通常可使用相關係數來衡量變數之間的關聯程度，其常見的相關係數包括皮爾森積動差相關係數(Pearson product-moment correlation coefficient)、斯皮爾曼等級相關係數(Spearman's Rank Correlation Coefficient)、切比雪夫相關係數(Chebyshev correlation coefficient)等。其中，皮爾森積動差相關係數是最為常見的一種，其可用來衡量兩個變數之間的線性關係程度。對於樣本皮爾森相關係數如下：

$$r_{xy} = \frac{\sum x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{(n-1) s_x s_y} = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (2)$$

一般常用於規範中的大氣邊界層風速剖面有 2 個主要定律，一為指數律(power law)，另一則為對數律(logarithmic law)，其中指數剖面之關係式如下：

$$\frac{U(Z)}{U_\delta} = \left(\frac{Z}{\delta} \right)^\alpha \quad (3)$$

其中： $U(Z)$ 為縱向之平均風速；

Z 為地表上之高度；

U_δ 為梯度風速；

δ 為大氣邊界層厚度；

α 為指數

2.3 測站基本資訊

本研究以高雄港鄰近區域風力測站為主要分析目標，包括交通部運輸研究所代管臺灣港務股份有限公司的 6 個測站及交通部中央氣象署設置的 4 個測站，其測站基本資訊如表 1、位置圖如圖 2，資料區間為 2024 年 8 月 1 日至 2025 年 7 月 31 日之完整 1 年風力觀測資料。

表 1 高雄港鄰近區域風力測站基本資訊

| 測站代碼 | 測站別名 | 資料頻率 | 高程 | 設置單位 |
|--------|----------|--|--------|------------|
| KHWD01 | 10 號碼頭 | 10min | 9.63m | 臺灣港務股份有限公司 |
| KHWD04 | 綠燈塔 | 10min | 16.73m | 臺灣港務股份有限公司 |
| KHWD05 | 港警大樓 | 10min | 25.07m | 臺灣港務股份有限公司 |
| KHWD06 | 76-77 碼頭 | 10min | 24.46m | 臺灣港務股份有限公司 |
| KHWD07 | 63-64 碼頭 | 10min </td <td>17.25m</td> <td>臺灣港務股份有限公司</td> | 17.25m | 臺灣港務股份有限公司 |
| KHWD08 | 一港口 VTS | 10min | 15.9m | 臺灣港務股份有限公司 |
| C0V890 | 前鎮氣象站 | 60min | 25m | 交通部中央氣象署 |
| C0V840 | 鳳鼻頭氣象站 | 60min | 35m | 交通部中央氣象署 |
| C0V690 | 鼓山氣象站 | 60min | 30m | 交通部中央氣象署 |
| CAP070 | 高雄燈塔氣象站 | 10min | 34m | 交通部中央氣象署 |

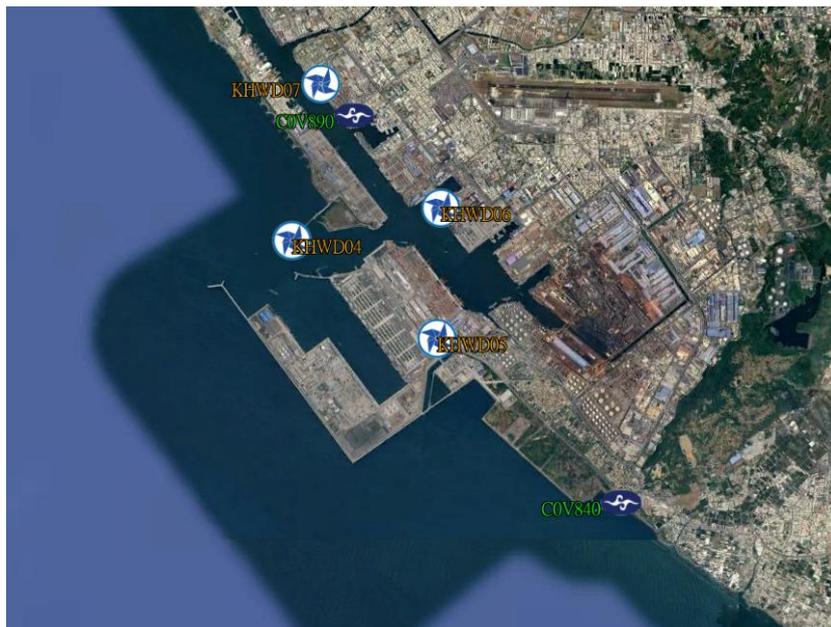
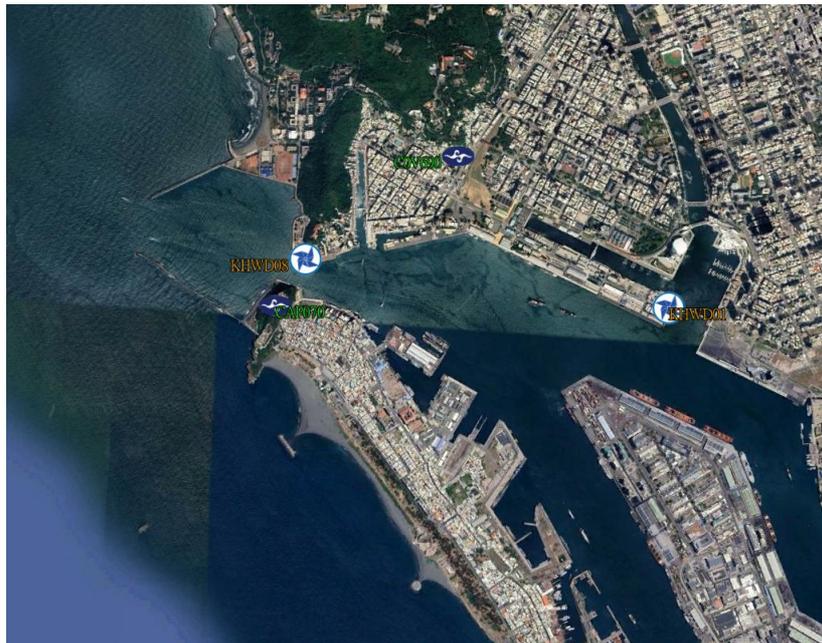


圖 2 高雄港鄰近區域風力測站位置圖(上圖：一港口；下圖：二港口)

在交通部運輸研究所代管臺灣港務股份有限公司的 6 個測站中，KHWD01 設置於 10 號碼頭潮位站平房頂樓，其西側至西南側 46m 處為碼頭廠房(遮蔽度 75°)，另東側碼頭常有船舶停靠；KHWD04 設置於二港口綠燈塔頂端，鄰近區域無較大障礙物影響，可符合 WMO 之 1 級或 2 級測站規範；KHWD05 設置於港警大樓頂樓，其東側 300m 有大林電廠，遮蔽度約 50°；KHWD06 設置於 76-77 號碼頭之貨櫃管理大樓頂樓，西北側至西南側為貨櫃碼頭(距離約 80~100m)，常有大型貨櫃船舶及橋式起重機，遮蔽度達 180°；KHWD07 設置於 63-64 號碼頭之貨櫃管理大樓頂樓，其西側至南側碼頭(距離約 80m)常有大型貨櫃船舶及橋式起重機，遮蔽度達 90°；KHWD08 設置於一港口船舶交通管理中心頂樓，其東北側 200m 及西南側 300m 為山坡地，受地形效應影響。經分析上述測站不同主風向下之紊流強度百分比，如表 2 所示。

表 2 高雄港風力測站紊流強度百分比統計表 (單位：%)

| 測站代碼 | 平均紊流強度(%) | 標準差 | N | NE | E | SE | S | SW | W | NW |
|--------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| KHWD01 | 21.3 | 9.1 | 21.4 | 15.8 | 17.9 | 13.9 | 16.9 | 27.3 | 25.0 | 22.5 |
| KHWD04 | 7.8 | 5.0 | 8.2 | 9.8 | 8.5 | 8.9 | 8.4 | 8.2 | 6.7 | 6.2 |
| KHWD05 | 25.5 | 12.1 | 20.6 | 27.1 | 29.3 | 40.0 | 24.8 | 25.8 | 23.5 | 25.9 |
| KHWD06 | 41.4 | 13.8 | 37.4 | 41.2 | 42.4 | 45.7 | 48.4 | 43.6 | 39.9 | 47.4 |
| KHWD07 | 27.2 | 12.8 | 34.5 | 30.8 | 27.5 | 33.5 | 29.1 | 23.3 | 18.1 | 24.8 |
| KHWD08 | 20.8 | 12.5 | 26.5 | 24.6 | 27.3 | 22.4 | 26.6 | 22.7 | 14.8 | 14.3 |

三、相關性分析

KHWD08 位於高雄港第一港口船舶交通服務中心頂樓，而 KHWD04 風力測站位於高雄港第二港口北堤綠燈塔，分別為第一港口及第二港口船舶進出港重要風力參考指標測站。因此本研究分別以該 2 測站為代表測站，並輔以其他鄰近測站進行相關性分析。

本研究首先導入美國 IOOS 計畫辦公室之海洋即時資料品保手冊 (QARTOD Manual) 在風力即時資料品管之 11 項程序，其程序包括：時間(間隔)檢查 (Timing/Gap Test)、傳輸格式及編碼檢查 (Syntax Test)、座標檢查 (Location Test)、儀器或物理現象極限值檢查 (Gross Range Test)、逐月及季節變化合理性檢查 (Climatology Test)、短時距離群值檢查 (Spike Test)、短時距變化率與標準差之檢查 (Rate of Change Test)、連續資料無變化(或微小)之檢查 (Flat Line Test)、變數間關聯性檢查 (Multi-Variate Test)、長時間資料變化幅度檢查 (Attenuated Signal Test)、鄰近站相關性檢查 (Neighbor Test) 等 11 項。資料依照檢查程序予以逐一標記，其標記內容可分為：通過 (Pass=1)、無法評估 (Not Evaluated=2)、可疑的 (Suspect=3)、錯誤 (Fail=4) 與缺值 (Missing Data=9)，以確保後續分析資料之可用性與正確性。此外，本研究利用時間窗移動迴歸分析，計算每個時間點之前 1 小時及前 4 小時之迴歸方程式，並取其斜率項做為短期風力觀測變化趨勢之相關性比對，其分析結果，如圖 3、圖 4 所示，其藉由各測站風速變化趨勢，可瞭解不同測站間受風場變化之敏感度(單位時間變化量)，以及變化量的相關性，並且確認測站間的觀測資料是否存在時間-空間的延滯性，經分析結果顯示，採用 4 小時時間窗風力變化

趨勢是合適的方法，其不僅可確保具有足夠的觀測數量(約 24 個觀測值)，亦可明顯看出測站風力在短期變化的趨勢。

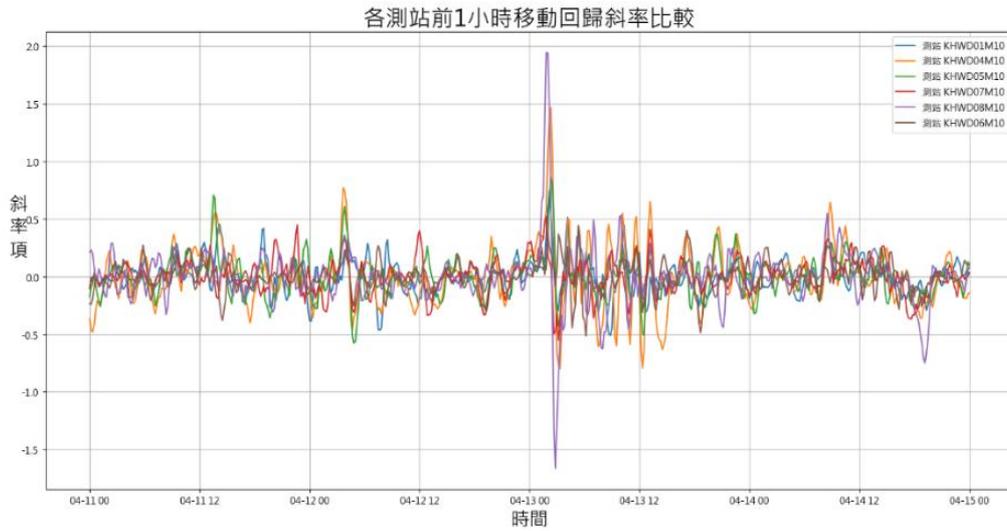


圖 3 高雄港各測站 1 小時時間窗之風力變化趨勢圖

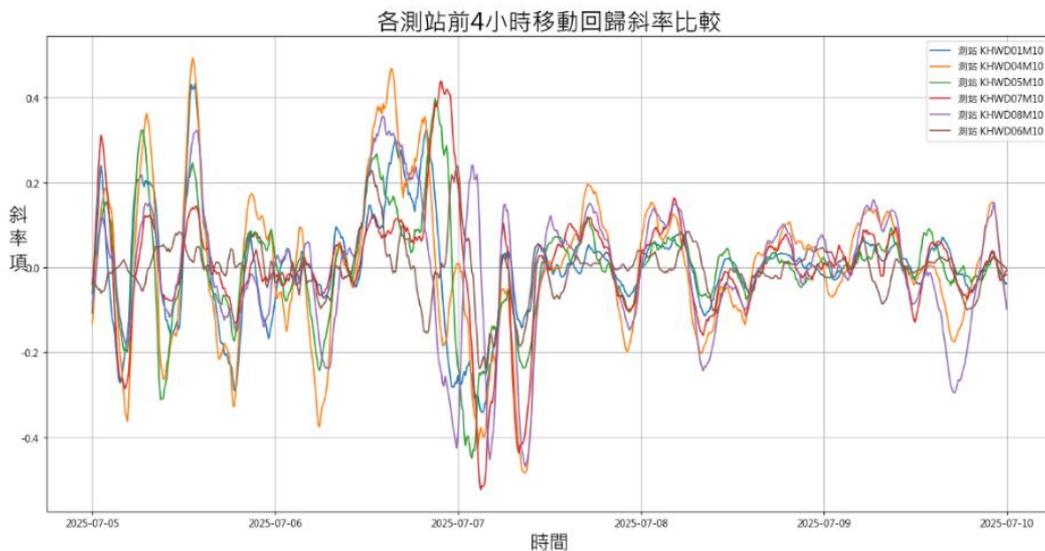


圖 4 高雄港各測站 4 小時時間窗之風力變化趨勢圖

經分析高雄港一港口 KHWD08 及二港口 KHWD04 等 2 個代表測站與其他鄰近測站之相關係數及回歸式如表 3 及表 4 所示，該 2 個代表測站除了與 KHWD06 及 CAP070 相關性較差外，其餘大致可達到中高度相關，另外本研究依據中華民國建築物耐風設計規範所建議之不同地況的邊界層高度與指數剖面函數，換算為同一高程後(其中 KHWD04 及 C0V840 因鄰近海側，其 α 設定為 0.11，其餘測站採用 0.15 進行調整)，再進行風速修正的迴歸分析，期藉由回歸分析可換算不同測站間的風速關係，有助於重建面域風場之參考應用。

表 3 高雄港一港口 KHWD08 風力測站與其他測站相關分析表

| 比對測站 (變數 Y) | 相關係數 | 回歸式 | 回歸式 (無截距) | 風速修正回歸式 (同高程) |
|-------------|------|----------------|-----------|---------------|
| KHWD01 | 0.62 | $Y=0.38X+1.36$ | $Y=0.65X$ | $Y=0.70X$ |
| KHWD04 | 0.82 | $Y=0.93X+1.41$ | $Y=1.21X$ | $Y=1.22X$ |
| KHWD05 | 0.76 | $Y=0.53X+1.30$ | $Y=0.79X$ | $Y=0.74X$ |
| KHWD06 | 0.60 | $Y=0.30X+0.81$ | $Y=0.46X$ | $Y=0.43X$ |
| KHWD07 | 0.77 | $Y=0.49X+0.59$ | $Y=0.60X$ | $Y=0.60X$ |
| CAP070 | 0.53 | $Y=0.28X+0.08$ | $Y=0.30X$ | $Y=0.27X$ |
| C0V690 | 0.71 | $Y=0.42X+1.15$ | $Y=0.55X$ | $Y=0.50X$ |
| C0V840 | 0.72 | $Y=0.53X+0.96$ | $Y=0.63X$ | $Y=0.59X$ |
| C0V890 | 0.74 | $Y=0.49X+1.12$ | $Y=0.60X$ | $Y=0.56X$ |

表 4 高雄港二港口 KHWD04 風力測站與其他測站相關分析表

| 比對測站 (變數 Y) | 相關係數 | 回歸式 | 回歸式 (無截距) | 風速修正回歸式 (同高程) |
|-------------|------|----------------|-----------|---------------|
| KHWD01 | 0.74 | $Y=0.40X+0.82$ | $Y=0.54X$ | $Y=0.57X$ |
| KHWD05 | 0.88 | $Y=0.55X+0.62$ | $Y=0.65X$ | $Y=0.60X$ |
| KHWD06 | 0.69 | $Y=0.30X+0.45$ | $Y=0.38X$ | $Y=0.35X$ |
| KHWD07 | 0.73 | $Y=0.41X+0.40$ | $Y=0.47X$ | $Y=0.46X$ |
| KHWD08 | 0.82 | $Y=0.72X+0.13$ | $Y=0.74X$ | $Y=0.73X$ |
| CAP070 | 0.62 | $Y=0.29X-0.29$ | $Y=0.24X$ | $Y=0.22X$ |
| C0V690 | 0.79 | $Y=0.40X+0.27$ | $Y=0.43X$ | $Y=0.38X$ |
| C0V840 | 0.79 | $Y=0.50X-0.31$ | $Y=0.47X$ | $Y=0.43X$ |
| C0V890 | 0.86 | $Y=0.48X-0.10$ | $Y=0.47X$ | $Y=0.43X$ |

本研究繪製一港口 KHWD08 及二港口 KHWD04 代表站之風速及風向相關性散布圖，如圖 5、圖 6 所示，其中為了避免在靜風及微風下之風向量測之雜訊，本研究在風向相關性分析時，係將蒲福氏風級 4 級以下(即風速小於 5.5m/s)之風向剔除，其風向的相關係數達 0.73，並可看出其風向具有高度一致性。

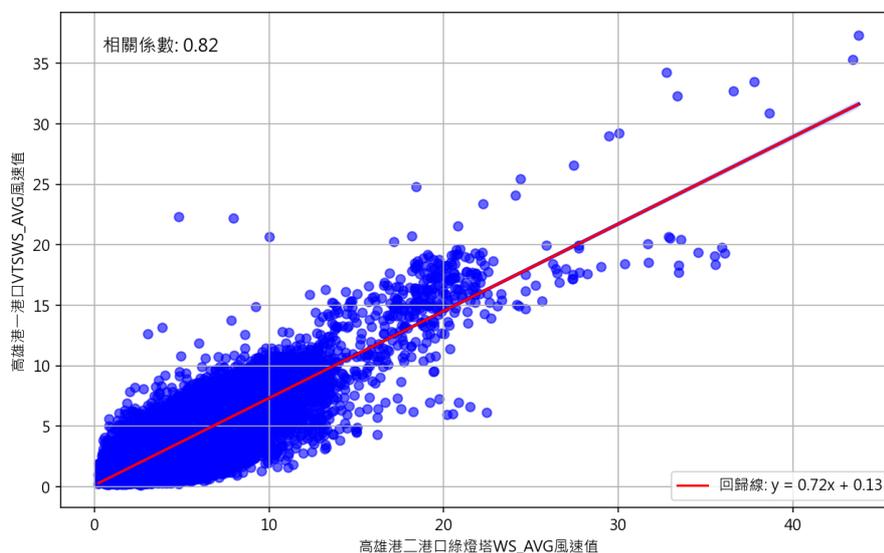


圖 5 高雄港一港口及二港口代表站之風速相關性

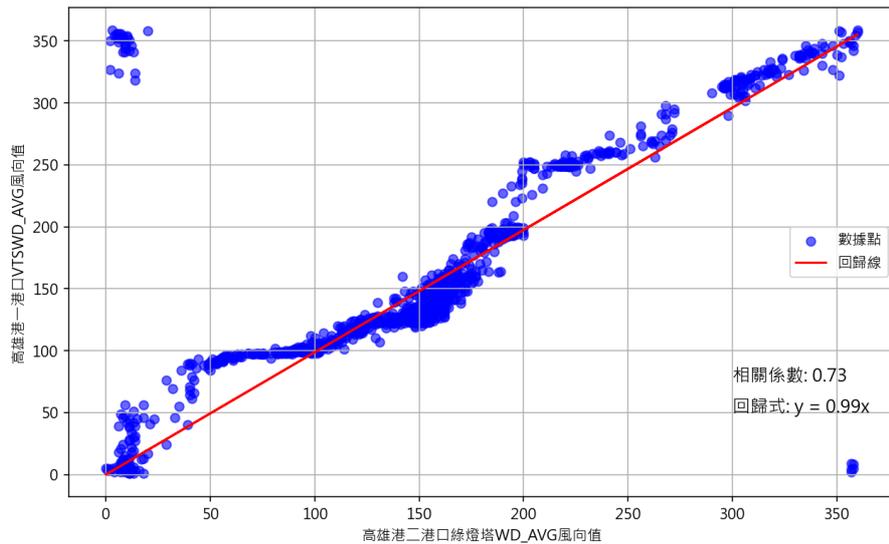


圖 6 高雄港一港口及二港口代表站之風向相關性

另外，經分析二港口 KHWD04 代表站相對一港口 KHWD08 之風速相關性，從不同季節的相關性來看，其春季相關性為 0.79、夏季為 0.84、秋季為 0.87、冬季為 0.73；從不同主風向的相關性來看，其 N 方向為 0.65、NE 方向為 0.61、E 方向為 0.92、SE 方向為 0.92、S 方向為 0.89、SW 方向為 0.83、W 方向為 0.89、NW 方向為 0.85，除了吹正北風及東北風之相關性略低外，其餘方向的風速均有高度相關。二港口 KHWD04 代表站相對其他測站之相關係數，如表 5 及表 6 所示。

表 5 高雄港二港口 KHWD04 風力測站與其他測站在不同季節之風速相關係數表

| 比對測站 | 春季 | 夏季 | 秋季 | 冬季 |
|--------|------|------|------|------|
| KHWD01 | 0.72 | 0.81 | 0.83 | 0.46 |
| KHWD05 | 0.85 | 0.87 | 0.92 | 0.82 |
| KHWD06 | 0.58 | 0.65 | 0.80 | 0.54 |
| KHWD07 | 0.66 | 0.74 | 0.82 | 0.67 |
| KHWD08 | 0.79 | 0.84 | 0.87 | 0.73 |
| CAP070 | 0.44 | 0.68 | 0.74 | 0.37 |
| C0V690 | 0.16 | 0.85 | 0.87 | 0.22 |
| C0V890 | 0.69 | 0.84 | 0.89 | 0.80 |
| C0V840 | 0.58 | 0.68 | 0.82 | 0.76 |

表 6 高雄港二港口 KHWD04 風力測站與其他測站在不同主風向之風速相關係數表

| 比對測站 | N | NE | E | SE | S | SW | W | NW |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| KHWD01 | 0.67 | 0.67 | 0.91 | 0.79 | 0.88 | 0.88 | 0.73 | 0.73 |
| KHWD05 | 0.84 | 0.71 | 0.96 | 0.95 | 0.90 | 0.91 | 0.81 | 0.86 |
| KHWD06 | 0.71 | 0.63 | 0.97 | 0.83 | 0.78 | 0.79 | 0.67 | 0.57 |
| KHWD07 | 0.71 | 0.72 | 0.96 | 0.89 | 0.78 | 0.82 | 0.84 | 0.73 |
| KHWD08 | 0.65 | 0.61 | 0.92 | 0.92 | 0.89 | 0.83 | 0.90 | 0.85 |
| CAP070 | 0.48 | 0.42 | 0.92 | 0.90 | 0.85 | 0.88 | 0.46 | 0.80 |
| C0V690 | 0.34 | 0.50 | 0.96 | 0.86 | 0.84 | 0.92 | 0.88 | 0.71 |
| C0V890 | 0.82 | 0.53 | 0.98 | 0.89 | 0.89 | 0.69 | 0.88 | 0.95 |
| C0V840 | 0.65 | 0.67 | 0.90 | 0.86 | 0.79 | 0.76 | 0.93 | 0.93 |

一般而言，進行風力資料分析時，直接使用風速及風向資料雖然比較直觀，然後風向表示受到圓周效應影響，其在計算表示上，容易有不精確及統計分析的限制，因此，在進行較複雜的風力分析上，將風速及風向轉換為 U(東西向)、V(南北向)分量，可更有效進行數據運算。經分析一港口 KHWD08 及二港口 KHWD04 代表站之 U、V 分量相關性如圖 7 所示(左圖為 U 分量、右圖為 V 分量)。其結果顯示 U 分量相關係數約為 0.9、V 分量相關係數約為 0.85，其具有高度的相關性。

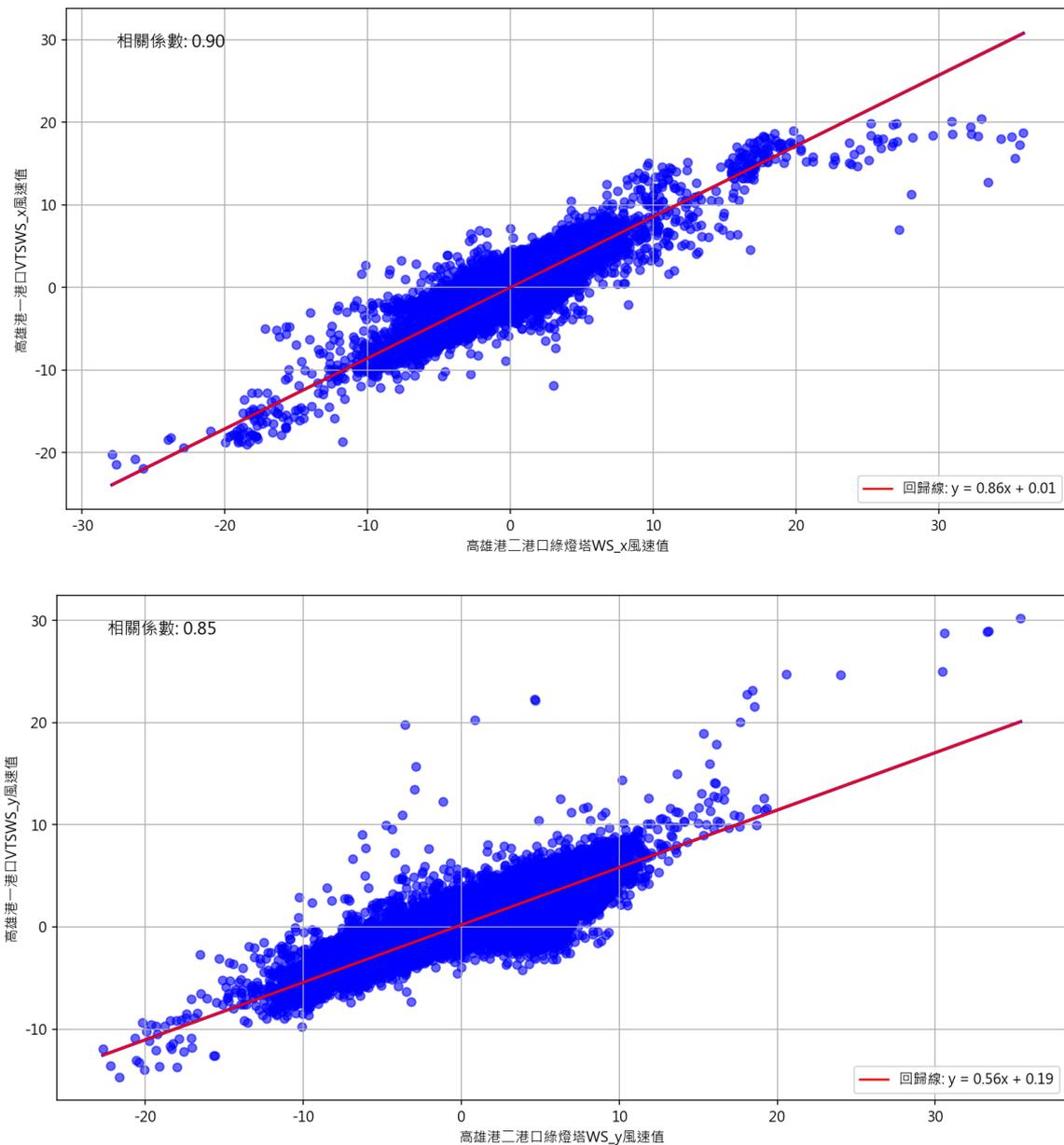


圖 7 高雄港一港口及二港口代表站之風速 U、V 分量相關性

綜合而言，一港口 KHWD08 及二港口 KHWD04 在高風速(超過 20m/s)之相關性有較為偏低的現象，其推測原因可能是高雄港之年平均風速約在 2.8m/s，其主要風速均落在 1.5~5.4m/s 間，

一般風速條件達到 20m/s 的狀況，均為颱風所造成，而颱風期間風速及風向變化較為快速，可能是 2 測站在高風速之相關性較明顯差異的現象。

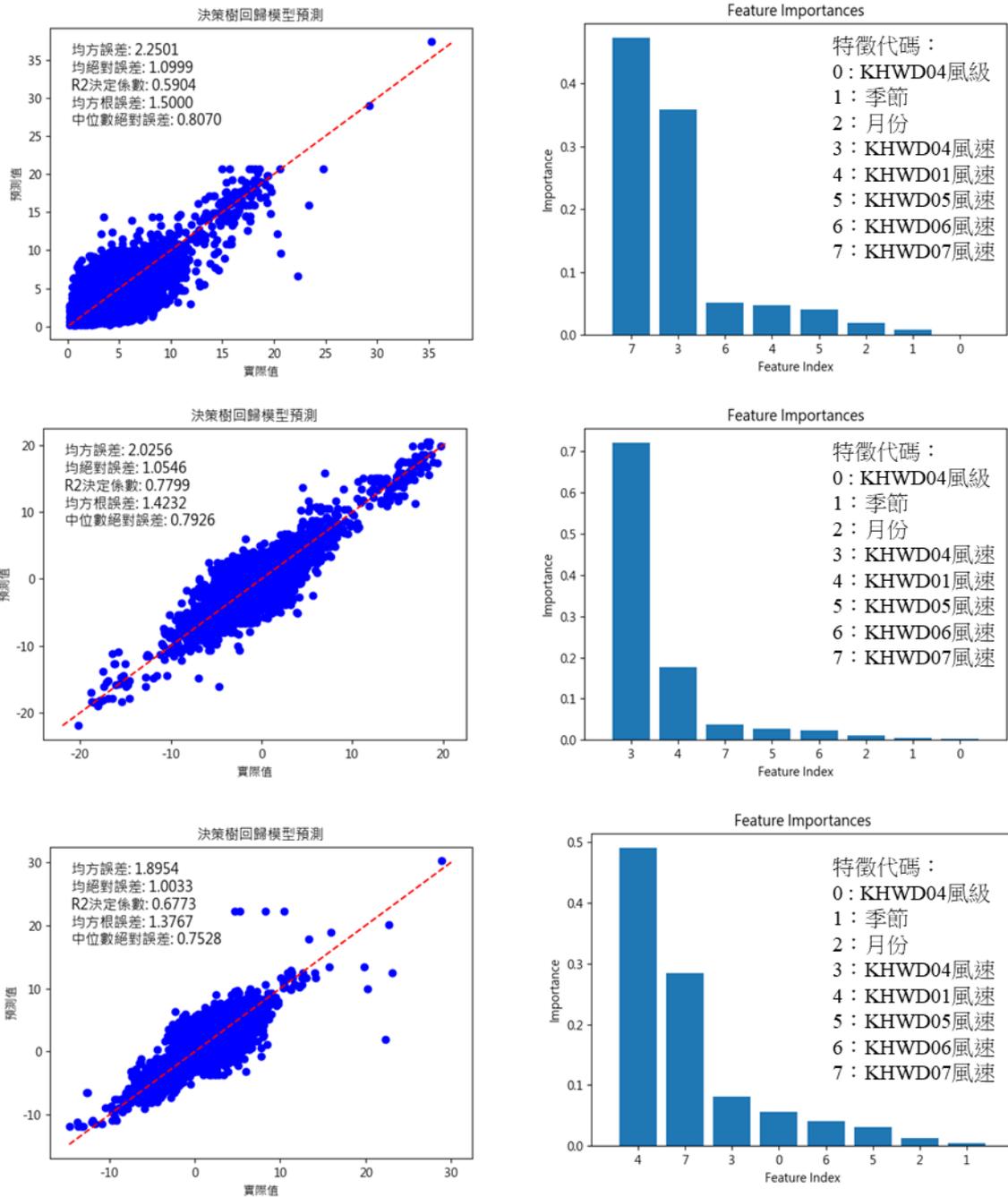
四、風力資料校正機制之探討

當風速觀測資料產生不合理的偏移或相關性降低，可以合理的去懷疑該資料可能受到外在因素的影響或者有疑慮，本研究導入美國 IOOS 計畫辦公室之海洋即時資料品保手冊(QARTOD Manual) 在風力即時資料品管之 11 項程序，其中在短時距離群值檢查 (Spike Test)、短時距變化率與標準差之檢查 (Rate of Change Test) 以及鄰近站相關性檢查 (Neighbor Test) 等 3 項檢查程序可以檢查觀測資料在時間及空間上的關聯性，看出風力觀測資料是否有疑慮，並將有疑慮的數據標記，甚至於移除。

然而氣象觀測資料由於自然或人為因素，常有缺失值的問題。因此，在進行氣候資料統計的時候，一般會將缺失值捨棄不列入計算，但不完整的資料可能導致統計值的偏差，於是發展出利用不同方法 (如空間插值、時間插值或其他觀測資料等) 得到資料估計值，以取代原先的缺失值。陳怡彰等人 (2021) 利用多元回歸模式來估計測站風速資料，然後將觀測值與估計值比較，如果兩者的差異過大(超過上下邊界門檻及大於 99.995 信心區間以外者)，則測站觀測值標記為可疑。黎益肇、陳瑞華等人 (2021) 在以大數據預測季風機率分析研究中，進行類神經預測時，其平均風速可以掌握得很好，而在極值風速預測上略嫌不足，經適當選取地形變化以及正規化後的資料進行訓練，可提升極值風速的預測結果，且對於整體預測風速與風向角的結果依然良好；吳南靖等人(2025) 為解決氣象站缺失的風力數據可能會影響風力評估的準確性，發展了一個基於加權 K 最近鄰 (WKNN) 演算法的插補模型，並將風力資料分解為向量分量，進行數學轉換供機器學習使用。

本研究嘗試利用機器學習的方法(包括決策樹回歸模型及長短期記憶模型)，透過不同測站的風速及風向觀測數值，進行目標測站的估計推算，再藉由估計值與實際值量測的結果比較，探討其影響因子。其中決策樹回歸模型是一種基於決策樹算法的回歸分析方法，用於預測連續型目標變量，其通過將數據分割成不同的區域來建立預測模型，從而對目標變量進行預測。而長短期記憶模型(LSTM)是 RNN(Recurrent Neural Network)中最常使用的模型，主要是要解決時間序列的問題。

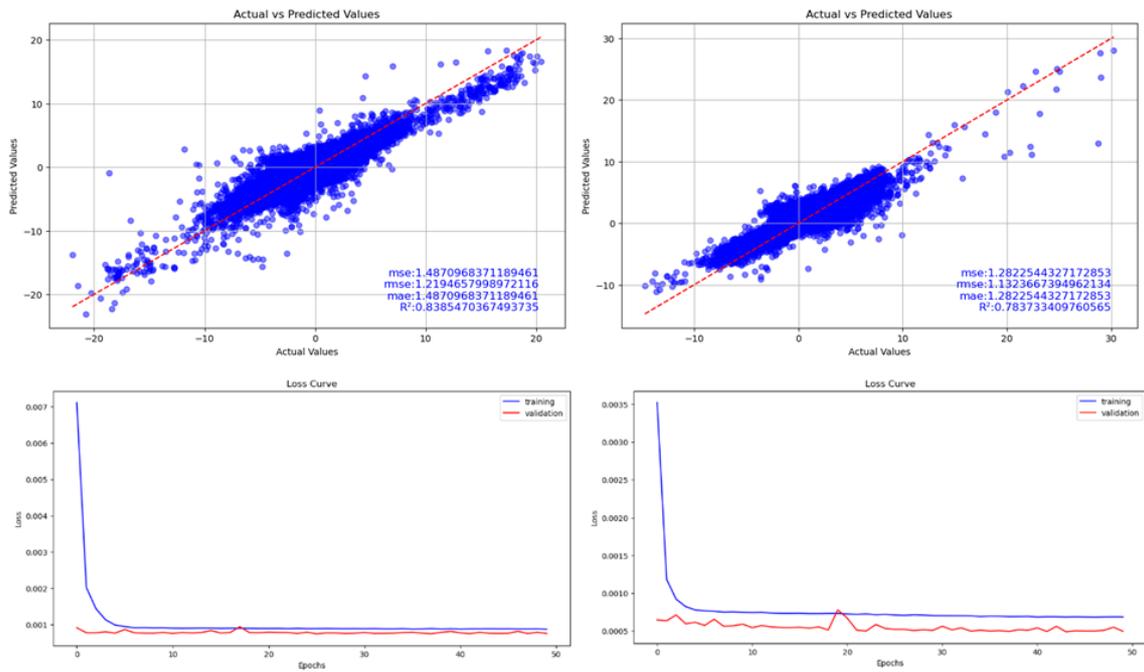
在決策樹回歸模型構建，本研究在預測目標為 KHWD08 的風速及風向資料，特徵則以高雄港其他測站的觀測數據以及觀測時間(月份)，訓練比例則在全年觀測資料中隨機選擇 50%的資料，再利用 50%的資料進行驗證。經分析結果如圖 8 所示，若以風速直接進行估算預測，其 R^2 約為 0.59，若將風速及風向拆解為 U、V 分量分開進行估算預測，則 R^2 可提高至 0.77 及 0.67，對於預測的準確性可有所提升。另外從特徵的重要性指標來看，以 KHWD04、KHWD01、KHWD07 較為重要，其可對應到 KHWD08 與該 3 站亦具有較高的相關性。



備註：上圖：風速決策樹回歸模型預測結果、中圖：風速 U 分量預測結果、下圖風速 V 分量預測結果

圖 8 高雄港一港口風力決策樹回歸模型分析結果圖

其次，本研究亦嘗試透過 LSTM 進行 KHWD08 的風速及風向資料估算預測，特徵則以高雄港其他測站的觀測數據以及觀測時間(月份)，訓練比例則在全年觀測資料中選擇前 80%的資料，再利用後 20%的資料進行驗證，其中訓練週期設定為 50、優化器選用 adam、損失函數以 MSE、並使用 2 層各 50 個神經元，結果如圖 9 所示，其相較於決策樹回歸模型， R^2 可提高至 0.83 及 0.78，均方誤差可降至 1.48，其推估結果更為準確，惟訓練時間耗時較久。



備註：左圖：風速 U 分量預測結果、右圖風速 V 分量預測結果

圖 9 高雄港一港口風力長短期記憶模型分析結果圖

本研究利用 2025/08/01~2025/09/15 的實測數據進行模式驗證，經分析結果如圖 10 所示，其風速估算之均絕對誤差為 0.92、風向估算均絕對誤差為 27.93，除發生 2 次較明顯的跳動差異外，其估算結果與實際量測結果均十分一致，其跳動原因推測係風向不穩定時，其估算值同時在 U 方向及 V 方向產生增幅或降幅，造成合成時產生不正常的風速及風向跳動，為減少該類情形發生，初步可導入數值連續性檢查機制，並於後續進一步進行模式改善。

風速及風向補遺結果

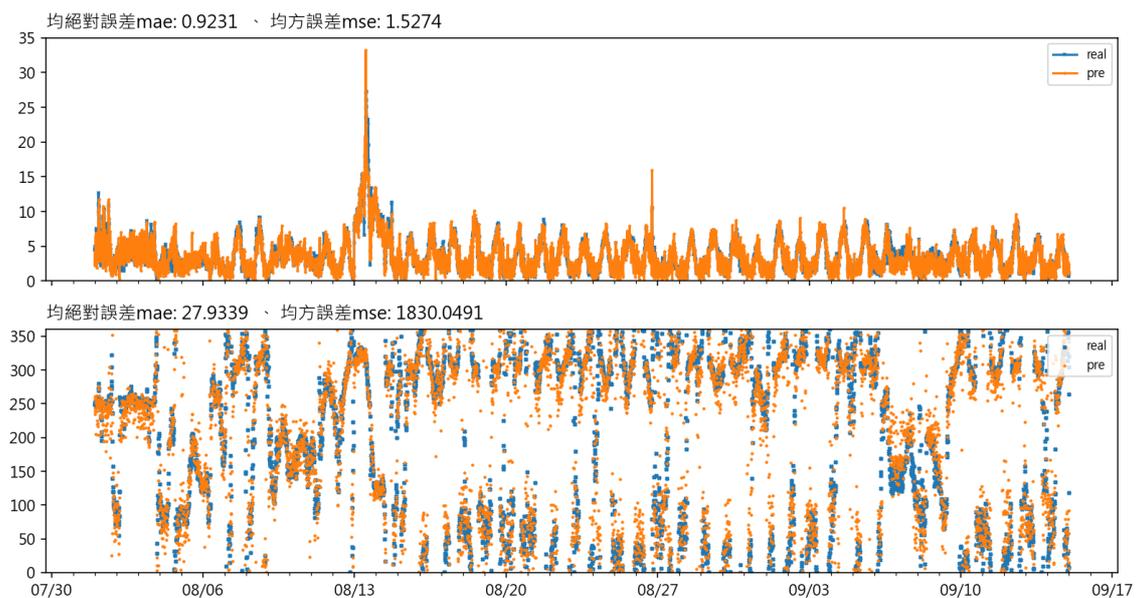


圖 10 決策樹回歸模型實際補遺驗證結果

五、結論與建議

風力觀測資料對於船舶停靠、船舶進出、碼頭作業、港區結構物設計與防災預警十分重要，風速相關性分析提供區域風場重建、預測和模擬的重要工具。本研究透過質化及量化分析之綜合討論來建立測站修正機制，其中在不同方向的紊流強化分析，可協助觀測者瞭解單一測站之觀測性能，如若單一方向或多方向之紊流強度百分比有高於環境風場之平均值時，可合理懷疑該方向可能受到地形或結構物之影響。其次本研究利用時間窗移動迴歸分析，計算各測站每個時間點之前 1 小時及前 4 小時之迴歸方程式，並取其斜率項做為短期風力觀測變化趨勢之相關性比對，可提供觀測者瞭解不同測站之風力變化趨勢是否一致。

在港口營運及工程規劃設計上，其風力觀測數據仍應盡可能選擇符合 WMO 之第 1~3 級標準之測站位址，而各港受到地形或結構物影響，多半難以可找到符合上開條件之位址，因此，透過風力資料修正、補遺及模擬等技術，可有效改善並預測港區風場觀測之效果。而本研究透過各測站之相關性分析，包括直接以風速風向資料計算，以及將風力資料拆解為 U、V 分量後再計算，並比較差異。其結果顯示，將風力資料拆解為 U、V 分量，除可有助於瞭解 2 測站間的相關性外，亦可檢核是否在特定方向觀測數值的不一致現象。最後本研究導入機器學習的方法(包括決策樹回歸模型及長短期記憶模型)，透過不同測站的風速及風向觀測數值，進行目標測站的估計推算，再藉由估計值與實際值量測的結果比較，探討其影響因子，其結果可提供歷史資料推估、區域風場重建、以及風速補遺(頻率增補)之應用參考。

透過風力資料拆解為 U、V 分量雖有助於模型分析與計算，然而在實際應用時，需要再進一步進行向量合成計算，求解風速及風向值，然而本研究 U、V 分量在進行向量合成時偶爾會觀察到出現極端風速(極大或極小)的現象，其原因在於風向不穩定時，其估算值同時在 U 方向及 V 方向產生增幅或降幅，造成合成時產生不正常的風速及風向跳動，建議後續研究可增加 U、V 分量間的相關性探討，以提升預測精準度。另外，本研究以高雄港為分析區域，其地勢平坦、區域風場之相關性較高，建議後續研究可針對地勢較為複雜之港區，例如基隆港、蘇澳港或花蓮港進行分析，進行本研究發展模式之異地驗證。

參考文獻

1. 朱佳仁 (2006)，風工程概論 (初版)，科技圖書股份有限公司。
2. 交通部中央氣象局 (2014)，地面測報作業規範 (第 4 版)。
3. 陳怡彰、林秉煜、黃椿喜、黃于盈、鄭安孺、蔡慧瑩等人 (2021)，風速資料檢覈技術改進之研究，110 年天氣分析與預報研討會，110 年 10 月 27 日。
4. 陳建忠、朱佳仁等人 (2019)，建築物耐風設計規範之基本設計風速修訂研究，內政部建築研究所。
5. 黎益肇、陳瑞華等人 (2021)，以大數據預測季風機率分析研究，內政部建築研究所。

6. Davenport, A. G.(1965).The relationship of wind structure to wind loading. Proceedings of the Symposium on Wind Effects on Buildings and Structures.
7. Integrated Ocean Observing System (2017), Manual for Real-Time Quality Control of Wind Data- A Guide to Quality Control and Quality Assurance for Coastal and Oceanic Wind Observations.
8. Solomon Okechukwu Amadi, Sunday Okon Udo (2015), Analysis of Trends and Variations of Monthly Mean Wind Speed Data in Nigeria, IOSR Journal of Applied Physics (IOSR-JAP), Volume 7, Issue 4 Ver. I (Jul. - Aug. 2015), pp. 31-41.
9. Wieringa, J. (1996), Does representative wind information exist, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 65. - pp. 1 - 12
10. World Meteorological Organization (2021), Guide to Instruments and Methods of Observation (WMO-No. 8), 2021 edition.
11. World Meteorological Organization (2023), Guide to Instruments and Methods of Observation (WMO-No. 8), 2023 edition.
12. World Meteorological Organization (2019), Manual on Codes - International Codes, Volume I.1, Annex II to the WMO Technical Regulations: part A- Alphanumeric Codes (WMO-No. 306), 2019 edition.
13. Y.C. He, P.W. Chan, Q.S. Li (2014), Standardization of raw wind speed data under complex terrain conditions: A data-driven scheme, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 131, August 2014, pp. 12-30.