

國立臺灣大學工學院機械工程學系

碩士論文

Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis



依極值統計理論預測風場之長期最大風速

Prediction of Long-Term Maximum Wind Speed of a  
Wind Farm Based on Statistical Theory of Extreme  
Values

郭軒瑋

Hsuan-Wei Kuo

指導教授：吳文方博士

Advisor: Wen-Fang Wu, Ph.D.

中華民國 112 年 7 月

July 2023

國立臺灣大學碩士學位論文  
口試委員會審定書

MASTER'S THESIS ACCEPTANCE CERTIFICATE  
NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY



依極值統計理論預測風場之長期最大風速

Prediction of Long-Term Maximum Wind Speed of a Wind Farm Based  
on Statistical Theory of Extreme  
Values

本論文係 郭軒璋 (姓名) R09522529 (學號) 在國立臺灣大學  
機械 (系/所/學位學程) 完成之碩士學位論文，於民國 112 年  
6 月 26 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明。

The undersigned, appointed by the Department / Institute of Mechanical Engineering  
on 26 (date) 6 (month) 2023 (year) have examined a Master's thesis entitled above presented  
by Kuo Hsuan Ubi (name) R09522529 (student ID) candidate and hereby certify  
that it is worthy of acceptance.

口試委員 Oral examination committee:

吳文方

(指導教授 Advisor)

盧南佑

何正有

系主任/所長 Director:

林添祥

## 致謝

碩班不知不覺過了3年，一轉眼就要步入人生的下一個階段了。首先要感謝吳文方教授在這2年路上對我指導和叮嚀。再來感謝子誼、晉瑩學長在我碩一時仔細的教導我實驗室的研究主軸和程式，靜觀和映誠在論文上提供很多建議，另外謝謝學弟宇恩在實驗室這一年時常陪我吃飯和聽我分享求職事情。

最後要重重感謝一路陪我到研究所畢業的家人們。從小就很努力栽培我，也給我很大程度的自由，也感謝爸媽的金援支持，在念書和做研究不用擔心生活的問題，能念到碩班畢業多虧我生在這個家庭。

## 摘要



近年來臺灣離岸風電產業蓬勃發展，但缺乏氣象局觀測到的離岸風速資料，即使有少數風場應政府要求於這幾年開始展開風速觀測，也只要一兩年的資料，無法因應一架風機於二十或二十五年生命週期內結構或機構設計所需考量到的最大風速資訊，只能被動採用國外既有風機設計，令人好奇該等設計是否仍然符合國內風場需求。本研究以苗栗竹南外海離岸風速塔觀測到的兩年風速資料為基礎，考量西門子 SWT-6.0-154 風機設計壽命為 25 年，依 Gumbel 所提出的極值統計理論(Statistical Theory of Extreme Values)預測風機未來 25 年所會遇到的最大風速。其間，為講求保守並克服數值分析上的困難，本研究分別以每日最大逐時風速與每月最大逐時風速作為極值統計理論所需之初始分布。經分析探討，本研究發現以每日最大逐時風速預測未來最大風速較為精準。而因最大風速及其對應重現週期也是風機設計上另一個重要考量因素，本研究也依極值統計理論分析所得每年最大風速預測該風場內不同最大風速的重現期，並將結果與文獻所記載香港、墨西哥、印度等地不同風場之結果進行比較。

關鍵詞：離岸風機、風速分布、最大風速、極值統計理論、重現期

## ABSTRACT



In recent years, Taiwan's offshore wind power industry has been booming, but there is a lack of information on offshore wind speeds observed by the Central Weather Bureau; and even though a few wind farms have started to observe wind speeds in the past few years at the request of the government, there is only one or two years of data available. It is curious whether the turbines imported and designed primarily based on foreign wind data can still endure domestic wind environments. In this study, the two-year wind speed data collected by an offshore wind tower off Zhunan are used as the basis for predicting the maximum wind speed a turbine established in that area may face in its lifecycle of 25 years based on Gumbel's statistical theory of extreme values. To be conservative and to overcome difficulties in the numerical analysis, probability distributions of the daily and the monthly maximum wind speeds (measured hourly) are used, respectively, as the initial distribution required in applying the theory. After the analysis, it is found that using the daily maximum wind speed as the initial distribution is more accurate for predicting the maximum wind speed than the other. Since the maximum wind speed corresponding to a prescribed recurrence period is another important factor in the design of a wind turbine, this study also carries out related analysis, also based on the Gumbel's theory. The result for the studied local wind farm is compared with those reported in literature for wind farms in Hong Kong, Mexico, and India.

Keywords: wind turbine, wind speed distribution, maximum wind speed, statistical theory of extreme values, recurrence period.

# 目錄



摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
目錄.....	III
圖目錄.....	IV
表目錄.....	VI
附錄.....	VII
1. 序論.....	1
2. 研究方法.....	2
2.1.1 Gumbel 分類.....	2
2.1.2 Gumbel 極值統計理論.....	4
2.2 最大概似估計法、動差估計法.....	4
2.3 最大風速重現期.....	5
2.4 離群值.....	6
3. 風場的極值風速與討論 .....	7
3.1 初始分佈.....	10
3.2 逐時風速.....	13
3.3 應用於 Gumbel 理論是否會有 $n^*$ 太大致無法收斂 .....	15
3.4 每日最大逐時和每日最大逐 10 分鐘風速.....	18
3.5 每月最大逐時風速.....	22
3.6 重現期.....	27
4. 結論.....	32
參考文獻.....	34
附錄.....	36
附錄 1 2017 年 5 月至 2019 年 4 月 Box plot & Violin plot .....	36
附錄 2 QQ-Plot.....	40

## 圖目錄



圖 1 逐時風速歷程圖.....	8
圖 2 每日最大風速歷程圖.....	8
圖 3 兩年逐 10 分鐘風速直方圖.....	9
圖 4 兩年逐時風速直方圖.....	9
圖 5 兩年逐時風速 Weibull QQ-Plot .....	11
圖 6 使用 MLE 和 MOM 求每日逐時風速 Gumbel 兩參數 .....	12
圖 7 使用 MLE 和 MOM 求每日逐 10 分鐘風速 Gumbel 兩參數 .....	12
圖 8 觀察每日最大逐時風速和 Gumbel 極值推導的每日最大逐時風速分佈.....	13
圖 9 觀察每日最大逐 10 分鐘風速直方圖和 Gumbel 極值推導的每日最大逐 10 分鐘風速分佈 .....	14
圖 10 Gumbel 推導的每日最大逐時風速和逐 10 分鐘分佈比較.....	15
圖 11 每日極值風速推導未來最大風速.....	15
圖 12 每日極值風速推導每年最大風速.....	16
圖 13 每年極值風速推導未來最大風速.....	17
圖 14 觀測每日最大逐 10 分鐘分佈推導最大風速.....	18
圖 15 觀測每日最大逐時分佈推導未來最大風速.....	20
圖 16 以每天最大風速預測長期最大風速.....	21
圖 17 觀察每月最大逐時風速直方圖和 Gumbel 嵌合曲線.....	23
圖 18 每月最大風速分佈.....	23
圖 19 觀測每月最大逐時分佈推導未來最大風速.....	24
圖 20 兩年觀測最大風速和逐時風速、每日最大逐時風速、每月最大逐時風速推 導未來 1 年的極值風速 .....	26
圖 21 計算 100 年近海案地區重現期風速.....	27
圖 22 印度海洋線和地點: DS1 和 DS5 [12].....	29

圖 23 印度海洋線和地點的風速歷程圖 [12].....29





## 表目錄



表 1 最大概似估計法和動差估計法兩參數比較.....	5
表 2 每日最大逐時和每日最大逐 10 分鐘的均值、模數和 4 分位數比較.....	13
表 3 二階段和三階段 Gumbel 推導未來 25 年最大風速比較.....	18
表 4 墨西哥加勒比海風場和台灣苗栗竹南沿海岸風場極值風速比較.....	19
表 5 每日最大逐時和每日最大逐 10 分鐘未來 1~25 年均值比較 .....	21
表 6 初始風速為每月最大逐時風速推導未來 1~25 年最大風速均值和模數 .....	25
表 7 台灣苗栗竹南沿海岸每日最大風速和每月最大風速重現期比較.....	28
表 8 墨西哥加勒比海風場和台灣苗栗竹南沿海岸風場重現期比較.....	28
表 9 印度風場 DS1,DS5 和台灣苗栗竹南沿海岸風場重現期比較 .....	30
表 10 Annual maximum gust wind speed(m/s) occurring in Hong Kong during 1950- 1994 .....	30
表 11 香港和台灣苗栗竹南沿海岸 1000 重現期的風速 in (m/s)比較 .....	31

## 附錄

附錄 1 2017 年 5 月至 2019 年 4 月 Box plot & Violin plot .....	36
附錄 2 QQ-Plot.....	40





## 1. 序論

近 20 年台灣的環保意識抬頭，陸域風場發電地點不易尋找，加上陸域風電造成噪音，影響居民生活品質，所以風場的選擇由陸域轉至台灣竹南沿海的海域。根據國際電工委員會(International Electrotechnical Commission, IEC)標準，在建立海上風力發電廠之前，至少需要一年的海洋氣象觀測數據，以便準確了解該地點的風能潛力。

台灣離岸風力發電缺乏氣象局觀測的風速資料，即時有少數風場應政府要求於近年開始展開觀測，也只要一兩年的風速資料，無法因應一架風機於二十或二十五年生命週期內結構或機構設計所會遇到最大風速資訊的需求，所以只能採用國外既有風機設計。國外有些風場有十幾至數十年長期觀測到的風速資料，包括特定期間內之極端風速(extreme wind speed)，也就是一般人常稱的最大風速(maximum wind speed)，如 Xiao 等人[1]將香港地區過去 45 年中每一年所測得的極端風速數據以特定機率分布嵌合，國內則缺乏長期風速資料，令人好奇國內風場風速是否真的比國外風場佳。

風機在設計時，無論抗風設計和結構安全都需要考量極端風速。極端風速包含龍捲風、颱風、冬季大風等各種惡劣天氣所產生者。極端風速會讓風力渦輪機零件產生過大負荷，導致零件損壞或失效。風機設計時，常需瞭解風場的極端風速，也需瞭解涵蓋 50 年甚至 100 年重現期的極端風速。當架設風速計長期量測風場風速獲得一定數量風速及極端風速數據時，人們可以用特定機率分布函數來嵌合風速與極端風速資料。以極端風速而言，常用機率分布包含 Gumbel 分布、廣義極值(Generalized extreme value, GEV)分布或廣義帕累托分布(Pareto distribution)等，包括 Palutikof 等人[2]針對這些分布的概述。Abohemda 和 Alshebani [3]曾從利比亞國內 22 個測站經四世紀測得的風速數據以 Gumbel 分布嵌合得知利比亞 50 年重現期的極端風速值為 29.16 m/s。Lee 等人[4]在使用

Gumbel 分布進行極端值分析的結果中，使用每日最大風速和每月最大風速數據來計算重現期，結果顯示每月最大風速重現期數值比每日最大風速重現期大 11%。

為加深瞭解台灣苗栗竹南沿海岸風能潛力，本研究將關注竹南沿海岸的風速極端值，預測 5 年、10 年、25 年、50 年、75 年、100 年、125 年、150 年重現期的極端風速，這可能會影響風力發電機。特別的，本研究欲以 2017 年 5 月至 2019 年 4 月苗栗竹南外海測站觀測到的風速資料，以極值統計理論與重現期觀念分析並預測該風場未來幾年所會遇到的極值風速分布與特定極值風速的重現期，並將結果與香港、印度海洋、墨西哥加勒比海等文獻收集到的風場數據比較。有別於前述文獻直接以包括 Gumbel 分布在內的特定機率分布嵌合數據資料，本研究提出依 Gumbel 早期所提出的極值統計理論，分別以觀測逐時風速、觀測每日最大逐時風速、觀測每月最大逐時風速為初始分布，預測風場未來幾年所會遇到的極值風速。因為風速有不確定性，該極值風速需以機率密度函數呈現。

## 2. 研究方法

### 2.1.1 Gumbel 分類

由於漸近分布的收斂取決於初始分布的形式，Gumbel 於 1958 年將此現象分為三類，Gumbel 分布的第一種分布是一種極值分布，它的機率密度函數具有 exponentially decaying 的特性，即在正無限大的範圍內，密度函數的值會隨著自變量的增加而指數下降。它也被稱為廣義極值分布 (Generalized Extreme Value distribution，也稱作 Fisher-Tippett 分布) 的一種特殊情況。此外 Gumbel 分布的第一種分布還被稱為 log-Weibull 分布和雙指數分布，但有時候雙指數分布也會用來指代拉普拉斯分布。在統計學中，Gumbel 分布經常被用來描述極端事件的發生機率，例如自然災害、金融風險和信用風險等。它的累積分佈函數是一個指數函數的指數函數，它的形式類似於高斯分布在極端值處的尾部，又稱作 Type I 極值分布，亦為本研究所提之極值分布，用以分析樣本中的最大值或最小值分布。

本研究將極值分布的機率密度函數以  $f(x)$ ，累積分布函數  $F(x)$  表示，兩式分別為：

$$f(x) = \delta_n^* e^{-\delta_n^*(x-\gamma_n^*)} \exp\left[-e^{-\delta_n^*(x-\gamma_n^*)}\right], x \geq 0 \quad (1)$$

$$F(x) = \exp\left[-e^{-\delta_n^*(x-\gamma_n^*)}\right], x \geq 0 \quad (2)$$

其中， $\gamma_n^*$  為初始變數  $x$  的特徵值(Characteristic Value)，又稱作位置參數(Location Parameter)，以風速極值而言，其可用來預估可能最大值的中心位置， $\delta_n^*$  為初始變數  $x$  反離散值，又稱作尺度參數(Scale Parameter)。

Gumbel Type II 分佈的機率密度函數和 Gumbel Type I 分佈的機率密度函數在形式上非常相似，只是指數內外取了負號。若初始分布具有多項式衰減尾部，其極值分布會漸近收斂於 Type II，在 Li 等人[5]研究探討了 Gumbel Type II 分佈在降水極值分析中的應用，提出了一種新的基於 Gumbel Type II 分佈的降水極值模型。該模型考慮了降水的時間序列性質和非對稱性，並通過樣本分位數估計方法得到 Gumbel Type II 分佈的參數，進而預測未來一段時間內的降水極值。論文還進行了實際案例驗證，證明了該模型的有效性。

若極值具有上限或下限，則其極值分布收斂型態為 Type III。Huang 等人[6]提出了一種基於 Gumbel Type III 分佈和改進的經驗模態分解 (EEMD) 的風速預測模型。通過樣本分位數估計方法得到 Gumbel Type III 分佈的參數，並結合 EEMD 對風速信號進行分解和去噪，最後利用 ARIMA 模型對風速進行預測。該模型在實際案例中的表現優於其他模型。



## 2.1.2 Gumbel 極值統計理論

Gumbel Type I極值分布，亦為本研究所提之極值分布，用以分析樣本中的最大值分布。本研究將極值分布的機率密度函數以  $f(x)$ ，累積分布函數  $F(x)$  表示，兩式分別為：

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} (\ln n^*)^{1-\frac{1}{\alpha}} e^{-\frac{\alpha}{\beta} (\ln n^*)^{\frac{1}{\alpha}} (x-\beta^{\frac{1}{\alpha}} \sqrt[\alpha]{\ln n^*})} e[-e^{-\frac{\alpha}{\beta} (\ln n^*)^{\frac{1}{\alpha}} (x-\beta^{\frac{1}{\alpha}} \sqrt[\alpha]{\ln n^*})}], x \geq 0 \quad (3)$$

$$F(x) = e[-e^{-\frac{\alpha}{\beta} (\ln n^*)^{\frac{1}{\alpha}} (x-\beta^{\frac{1}{\alpha}} \sqrt[\alpha]{\ln n^*})}], x \geq 0 \quad (4)$$

其中的  $\alpha$ 、 $\beta$  為 Weibull 兩參數，其中  $n^*$  為預測時間初始分布的觀測時間。

## 2.2 最大概似估計法、動差估計法

因風速具有極高不確定性，一般人會將氣象站測到的風速資料以適當機率密度函數嵌合，除了直接嵌合直方圖或機率圖紙的應用外，許多人會藉由較簡單的最大概似(maximum likelihood)或動差估計(method of moments)獲得特定機率密度函數的參數值。Mahdi and Cenac[7]的研究探討考慮 2 種估計法，最大概似法和動差估計法通過 5、10、20、30、50、100 的樣本數來找出兩種不同方法所計算出來的參數為何。其中的表 1 的  $n$  為樣本數、MOM 為動差估計法(method of moments)、ML 為最大概似(maximum likelihood)、 $\alpha_M$  和  $\beta_M$  為動差估計法 2 參數、 $\alpha_L$  和  $\beta_L$  為最大概似法所計算出來的 2 參數。從表 1 在樣本數  $n=5$  計算 ML 動差估計法 2 參數值為  $(\alpha_L, \beta_L) = (0.8267, 0.0837)$ 、MOM 動差估計法 2 參數值為  $(\alpha_M, \beta_M) = (0.7925, 0.1107)$ ， $\alpha_L$  和  $\alpha_M$  相差 0.07、 $\beta_L$  和  $\beta_M$  相差 0.027，當樣本數  $n=100$ ，ML 動差估計 2 參數  $(\alpha_L, \beta_L) = (0.9930, 0.0058)$ 、MOM 動差估計法 2 參數  $(\alpha_M, \beta_M) = (0.9905, 0.0087)$ ， $\alpha_L$  和  $\alpha_M$  相差 0.0025、 $\beta_L$  和  $\beta_M$  相差 0.0029。

從表 1 的結果，了解到樣本數超過 100，兩種方法計算出來的參數誤差很小。

表 1 最大概似估計法和動差估計法兩參數比較

n	ML		MOM	
	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$
5	0.8267	0.0837	0.7925	0.1107
10	0.9167	0.0398	0.8954	0.0576
20	0.9653	0.0171	0.9656	0.0269
30	0.9805	0.0135	0.9727	0.0201
50	0.9835	0.0069	0.9801	0.0116
100	0.9930	0.0058	0.9905	0.0087

### 2.3 最大風速重現期

重現期是一個概念，用來描述某一事件在特定時間內發生的可能性。在工程界，重現期通常指的是極端自然環境的發生頻率，如颶風、暴雨、地震等等。重現期的應用很廣泛，特別是在設計與風險評估中，其中風電產業更是一個重要的應用範疇。

以風電產業為例，風力發電機的风葉片設計需要考量風速的影響，而風速的高低又會影響風葉片的耐久性，因此工程師需要了解風速的重現期以確保風葉片設計的安全性和可靠性。在這種情況下，重現期是一個非常重要的參數，它可以幫助工程師和設計師更好地了解極端環境條件的頻率和強度，並通過適當的設計和測試確保風力機的可靠性。Ullah 等人[8]的研究介紹如何使用重現期來設計風力發電機的葉片，以應對極端氣候環境對風機造成的負面影響。作者使用了風場的風速和風向數據，以及其他相關的氣象和地理信息，來估算極端氣候條件下的風力載荷，並使用重現期來驗證設計的可靠性。同樣地，太陽能板的設計也需要考慮降雪和風暴等極端天氣的重現期，以確保能夠承受極端天氣的影響。此外重現期的概念也可以應用於風電場的評估中。在風電場的開發過程中，開發商需要對風場進



行風險評估，以確定風力機的設置和佈局。在這種情況下，開發商需要考慮極端風力和天氣條件的發生頻率，以確保風力機在整個風場中的分佈和排列符合安全和可靠的要求。

總之重現期在風電產業中具有重要的應用價值，它可以幫助工程師和設計師更好地了解極端環境條件的頻率和強度，以確保風力機的安全性和可靠性。同時，重現期的概念也可以應用於風電場的評估中，以確保風電場的安全和可靠性。以原始風速資料預估重現期風速，以確保風力發電機輪轂的結構安全，重現期的風速是通過分析每年最大逐時風速分布來預測極端風速。

$$T = \frac{1}{1-F(x)} \quad (5)$$

這裡的  $F(x)$  為極值風速的累積分布函數， $T$  為重現期。這裡風速  $x$  對應到 2.1.2 節 Gumbel 理論方程式 4 的  $x$  函數，先假設極值風速  $x$  的值， $1-F(x)$  為風速超過  $x$  的機率，來了解 100 年重現風速。

## 2.4 離群值

在風力發電的研究中，風速是一個非常重要的參數。對於風力發電機的效能評估以及風場設計來說，精確測量風速是必要的。然而，風速數據中常常存在離群值，這些離群值的出現可能會影響風速數據的準確性和可靠性。因此，在風速研究中檢測和處理離群值非常重要。

離群值指的是在一組數據中與其他數據明顯不同的值。在風速數據中，這些離群值可能是由於儀器故障、環境條件或者是真實存在的極端值，進而影響風力發電的效能評估和風場設計。

目前常用的檢測離群值的方法有多種，一種常見的處理方法是利用箱型圖 (box plot) 來檢測和標識離群值。箱型圖是一種直觀的圖形化方法，可以顯示風速資料的中位數、四分位距和極端值，進而判斷是否存在離群值。在進行風速資料分析時，經常會使用箱型圖進行初步的資料檢查和清理。



### 3. 風場的極值風速與討論



本研究採用的原始風速資料為苗栗竹南外海離岸測風塔距海平面高 90 公尺處，於 2017 年 5 月至 2019 年 4 月共計兩年間所測得的逐十分鐘風速。中央氣象局將逐十分鐘風速定義為十分鐘間隔內所測得風速的平均值，故一天會有 144 筆逐十分鐘風速觀測資料。逐時風速定義將連續 6 筆逐十分鐘風速取其平均值可視為逐時風速。將上午 11 點之逐時風速定義為上午 11:10 至 12:00 間逐十分鐘風速的平均值，因此一天有 24 筆逐時風速資料。若我們要求每小時最大逐時風速，其將 11:10 至 12:00 間逐十分鐘風速取最大的那筆資料即可。

圖 1 畫出兩年風速得到歷程圖，將原本每天得 144 筆風速取平均值當作 1 點，總共 710 筆資料可以看到台灣冬季的東北季風風速平均值相對於其他季節更大，但在 2018 年 2 月測風塔出現故障有 15 天收集不到風速資料。圖 2 畫出兩年風速得到歷程圖，將原本每天得 144 筆風速取最大值當作 1 點，總共 710 筆資料。中央氣象局在 2017 年發出 5 次颱風警報，7 月兩次颱風警報分別為(海棠、泥沙)，8 月的天鴿颱風和 9 月的泰利和谷超，在 7 月底有兩天(綠色區域)的最大風速均超過 30 (m/s)，颱風登陸台灣時長通常為 1-2 日，並非是連續型的氣候，連續型氣候指東北季風、聖嬰現象、北極振盪、季內振盪，長時間對當地氣候影響。在風速歷程圖可以看出在竹南沿海岸四季平均風速以秋冬季最大，春季次之，夏季最小，然而台灣冬季也是四季變化最大的一個季節，從風速歷程圖可以推論出東北季風為竹南沿海岸風力貢獻最大，將收集風速應用在風力發電上反應出台灣夏季用電量大，但發電量卻小的問題。

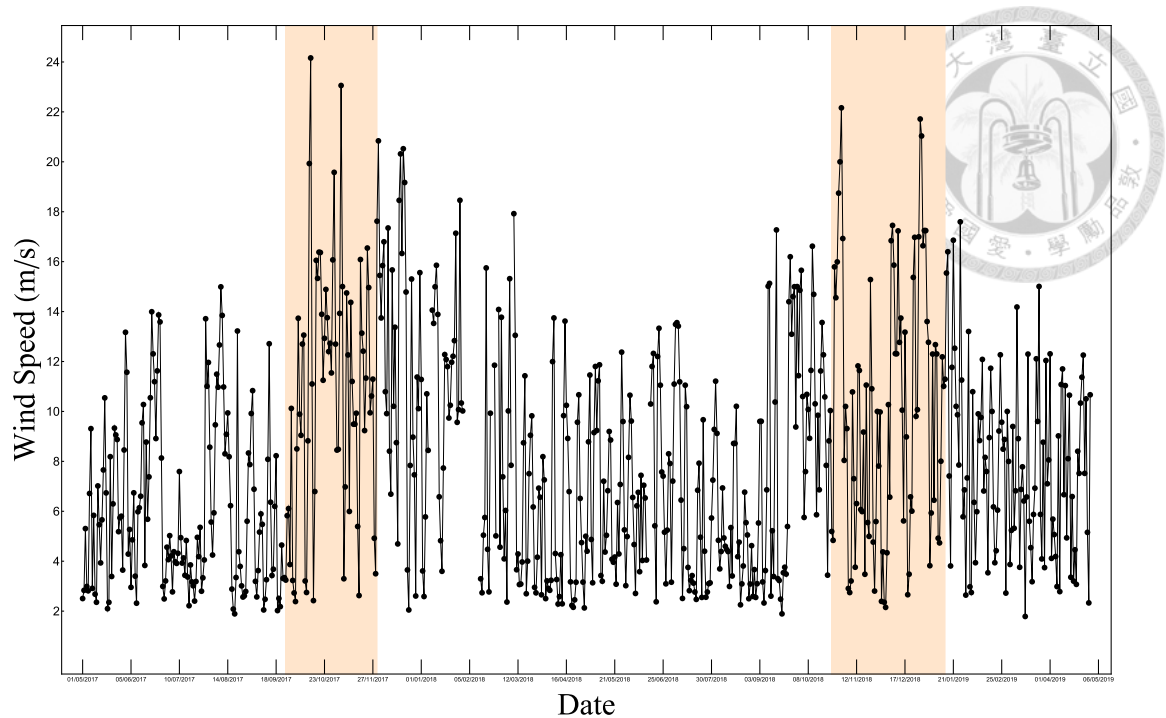


圖 1 逐時風速歷程圖

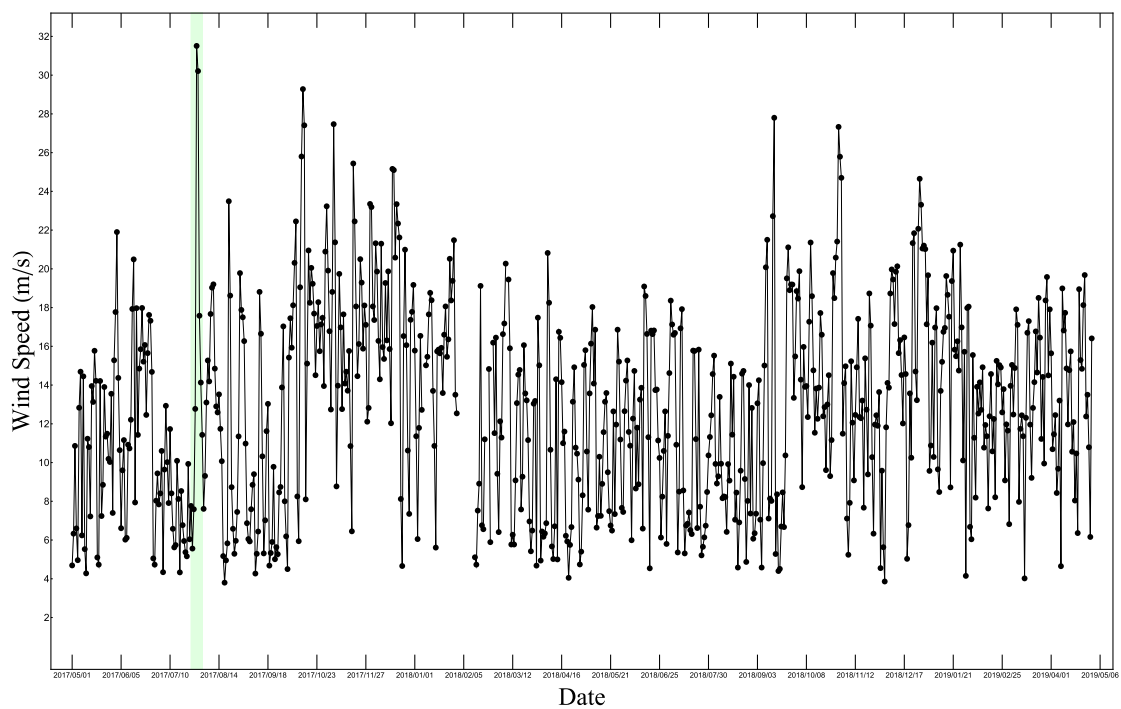


圖 2 每日最大風速歷程圖

在了解風速歷程圖，可以使用直方圖了解整體的風速分布，將竹南沿海岸收集逐 10 分鐘風速 99096 筆的風速畫成圖 3 的直方圖，可以看到是一個右偏的直方圖，逐 10 分鐘風速的均值為  $\mu = 7.98198$  m/s、標準差為  $\sigma = 5.31116$ 。逐時風

速是將一小時收集到的 6 筆逐 10 分鐘風速取平均，計算出逐時風速的均值為  $\mu = 7.98522 \text{ m/s}$ 、標準差  $\sigma = 5.27131$ 。

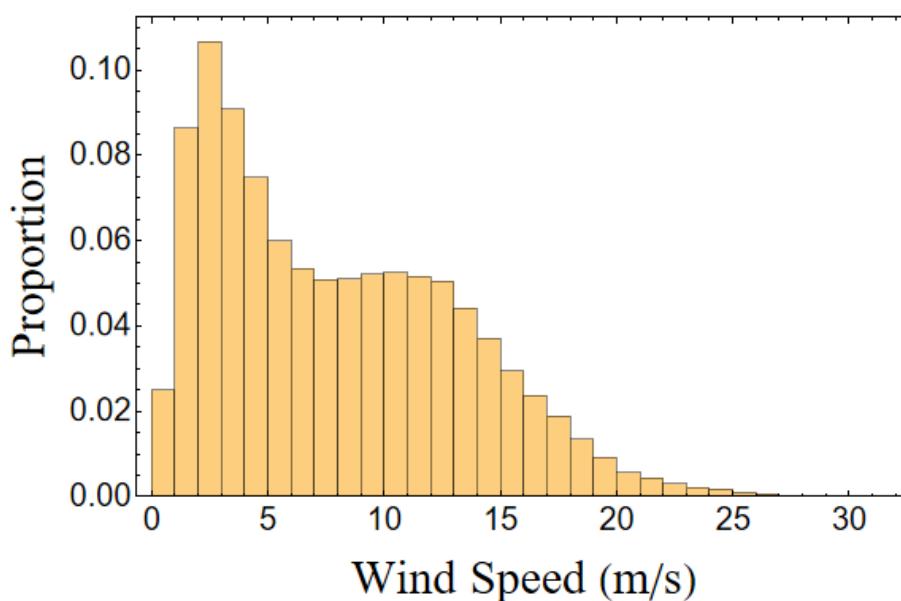
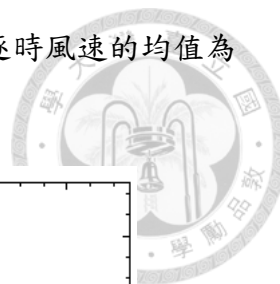


圖 3 兩年逐 10 分鐘風速直方圖

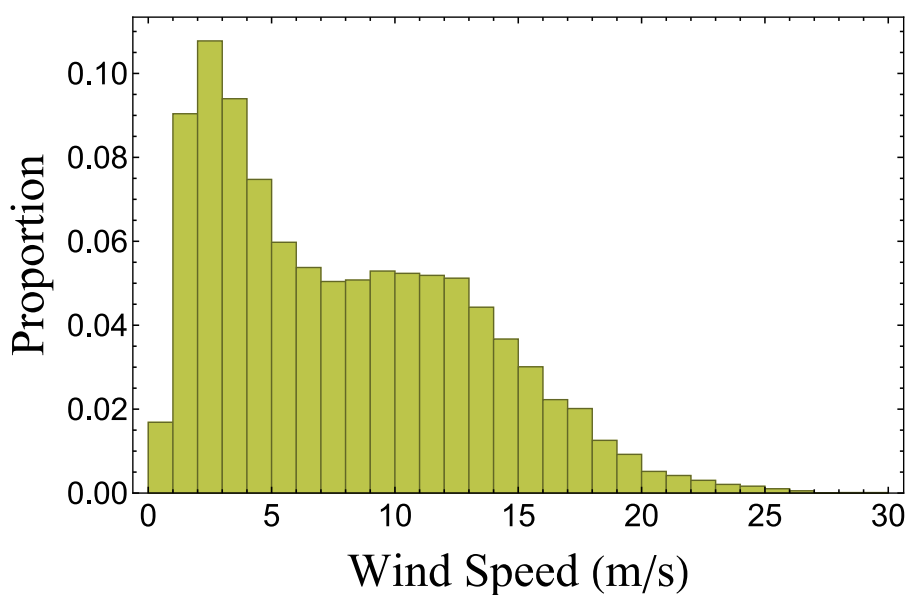


圖 4 兩年逐時風速直方圖

從圖 3 逐 10 分鐘風速值方圖和圖 4 逐時風速直方圖可以看出風速普遍落在 0~10 m/s 之間，整體分布很明顯是右偏可以看到有些風速超過 24.68 m/s，屬於離群值，離群值(Outlier)顧名思義即為某些數據與其它多數的數據有著明顯不同

的分佈情況，然而離群值的發生可能有很多原因，可能該時間有颱風侵襲該地區造成風速的飆升，然而極端值並非每年都有出現，造成每年風速的分布也不盡相同。離群值我們使用 2.4 節提到 box plot & violin plot 進行判斷，從附錄 1 可以看到兩年逐時風速總共有 16483 筆資料，其中的 38 筆為離群值佔總風速資料的 0.23%，離群值計算可以由 2.4 提到  $Q3 + 1.5IQR$ ，其中  $Q3$  為第三四分位數、 $IQR$  為第三四分位數減掉第一四分位數的值，當風速資料大於  $Q3 + 1.5IQR$  被列為離群值。在附錄 1 可以看到 2017 年 7 月的 box plot 多個離群值，7 月有兩個颱風分別為尼莎颱風和海棠颱風，颱風帶來的極端風速，當月的風速均值  $\mu = 4.79$  m/s，第一四分位數 2.63 m/s、第三四分位數 5.69 m/s，當月風速超過 9.38 m/s 有 61 筆資料佔當月風速資料 6.98%。此處的風速分布亦接近韋伯分布而非常態分配，初始分佈如何判斷，可以搭配 Quantile-Quantile plots 在大樣本數下，資料是屬於哪種分布。

### 3.1 初始分佈

Quantile-Quantile plots 是統計學上判斷兩組資料是否來自相同母體的圖形技術，它可以檢驗兩組資料是否有相同的分配。如果兩組資料源於相同分配，則資料點分布將會是 45 度的直線，否則將呈現非線性的分布。因此再使用 Quantile-Quantile plots，可經由分布點形狀進而判斷兩組資料分布在統計上是否一致。Quantile-Quantile plots 概念最早出現在 Kendall[9]，他發現分位數的使用比一些統計量測值(如：標準差、均值、中位數、4 分位數等)更容易表達大樣本中的分布趨勢，也提出對分位數更明確的定義，往後更多學者運用樣本數判斷資料的原始分布。

探討竹南沿海岸風速資料的母體為哪種分佈，稱其為初始分布，我們使用 Quantile-Quantile plots 以視覺化的結果來判斷風速的初始分佈，我們將逐時風速的 16483 個點打在 QQ Plot 上面做 4 種分布(Normal, Weibull, Gamma, Lognormal)，可以看出 Weibull Quantile-Quantile plots 結果最貼合 Quantile-Quantile Line 如圖

5，其餘 Normal, Gamma, Lognormal Quantile-Quantile plots 如附錄 2。

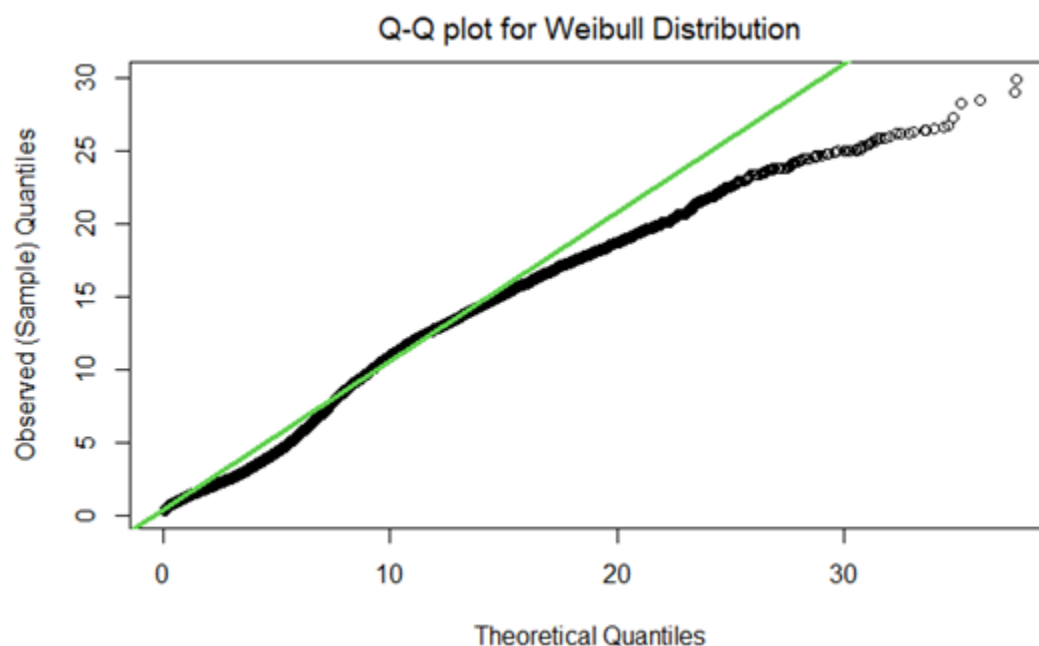


圖 5 兩年逐時風速 Weibull QQ-Plot

使用 Gumbel 理論推導未來最大風速，先將台灣竹南沿海岸收集到兩年逐 10 分鐘風速資料進行整理，每日 144 筆逐 10 分鐘風速取最大一筆當作每日最大逐 10 分鐘風速，逐時風速定義將連續 6 筆逐十分鐘風速取其平均值的值可視為逐時風速，將每日 24 筆逐時風速資料取最大一筆當作每日最大逐時風速。在求解每日最大逐時風速 Gumbel 兩參數 $(\alpha, \beta)$ ，可以使用最大概似估計法、動差估計法來求解兩參數，圖 6 為每日最大逐時風速均值為 $\mu = 11.97$  m/s、標準差為 $\sigma = 5.13$  m/s，使用 Maximum Likelihood method 計算出兩參數 $(\alpha_L, \beta_L) = (14.35, 4.0015)$ 、Method of moments 計算出兩參數 $(\alpha_M, \beta_M) = (14.28, 4.0014)$ 計算出來 $\alpha$  誤差為 0.49%， $\beta$  誤差為 0.02%。圖 7 為每日最大逐 10 分鐘風速 $\mu = 12.82$  m/s、標準差為 $\sigma = 5.22$  m/s，使用 Maximum Likelihood method 計算出兩參數 $(\alpha_L, \beta_L) = (15.17, 4.0734)$ 、Method of moments 計算出兩參數 $(\alpha_M, \beta_M) = (15.12, 4.09005)$ ，計算出來 $\alpha$  誤差為 0.3%， $\beta$  誤差為 0.05%。兩年逐時風速和

逐 10 分鐘資料各有 711 筆資料，從 Mahdi and Cenac [7] 的研究內容當樣本數越大，最大概似估計法和動差估計所計算出來的數值差異越小。表 2 計算每日最大逐時風速或逐 10 分鐘風速的均值、眾數、第一四分位數、第三四分位數。

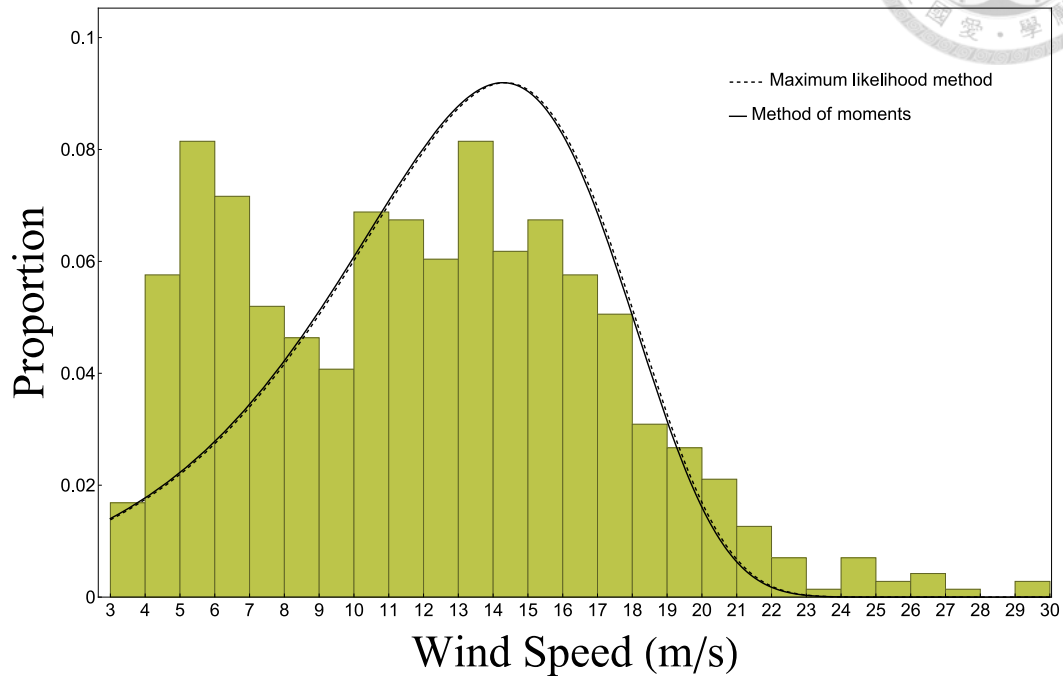


圖 6 使用 MLE 和 MOM 求每日逐時風速 Gumbel 兩參數

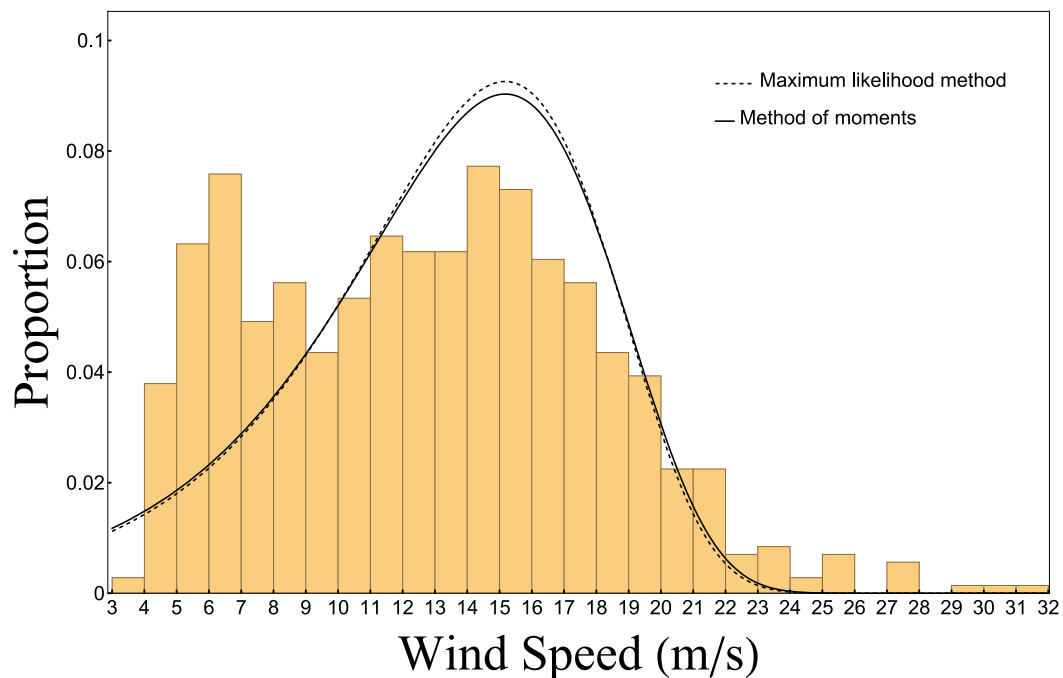


圖 7 使用 MLE 和 MOM 求每日逐 10 分鐘風速 Gumbel 兩參數

表 2 每日最大逐時和每日最大逐 10 分鐘的均值、模數和 4 分位數比較

	Maximum daily hourly wind speed (m/s)	Maximum daily 10-min wind speed (m/s)
Mean	11.97	12.82
Mode	14.31	15.19
First Quartile	7.43	8.25
Third Quartile	15.55	16.60

### 3.2 逐時風速

Gumbel 模型常被用來擬合最大風速和風速壓力，在極值理論中，線性穩定定理導致只有三種類型的極值概率分佈 Rohatgi 等人[10]。這三種類型中的一種通常被稱為 Gumbel 分佈或極值 Type I，此理論通常被用來模擬環境現象的年度最大值。Yip 等人(1995)用這種分佈來模擬加拿大的每年最大風速、Peterka[3]為美國年度最大風速建模。我們先將風速資料修剪，汰除明顯紀錄錯誤者，再進行極值分析的推導。

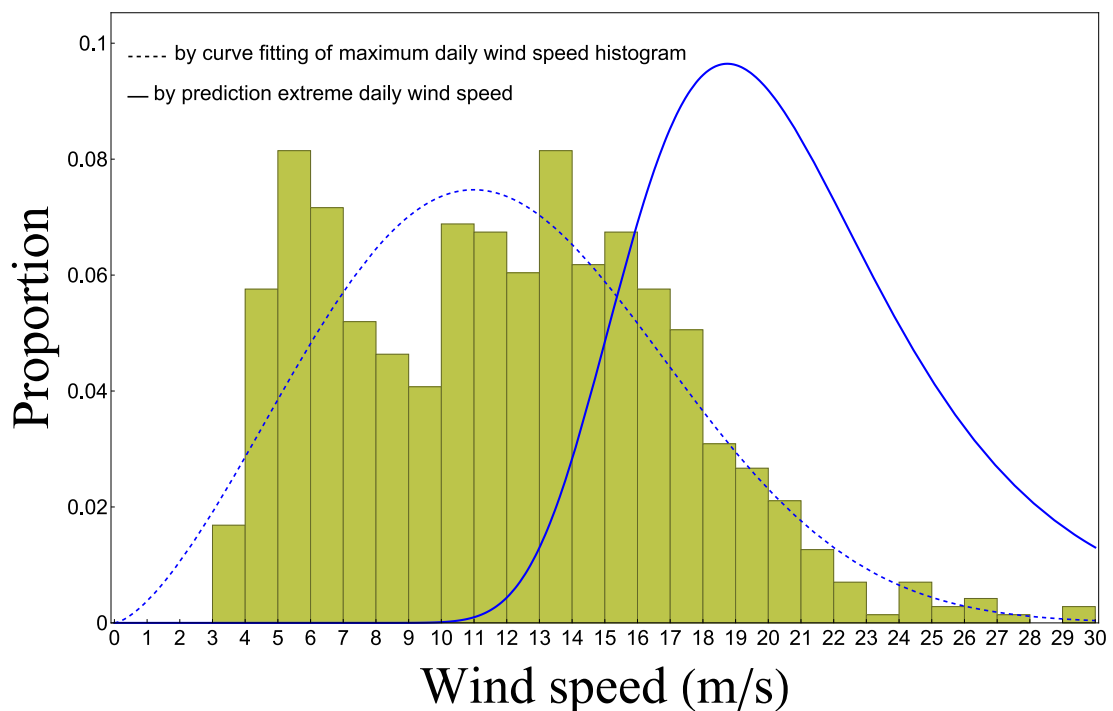


圖 8 觀察每日最大逐時風速和 Gumbel 極值推導的每日最大逐時風速分佈



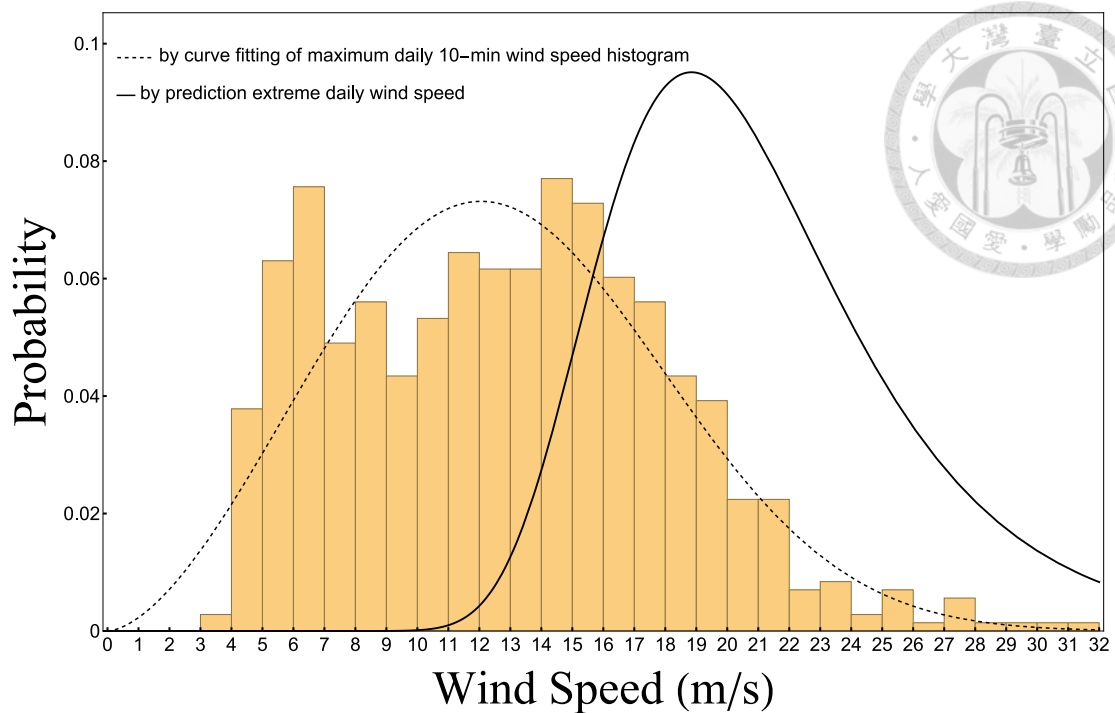


圖 9 觀察每日最大逐 10 分鐘風速直方圖和 Gumbel 極值推導的每日最大逐 10 分鐘風速分佈

圖 8 我們先將風速資料進行切割，將每日最大的一筆逐時風速當作每日最大風速資料，兩年總共 711 筆每日最大逐時風速，每日觀測最大逐時風速均值為  $\mu = 11.97 (m/s)$ ，將每日最大逐時風速假設為 Weibull 分布，並依 2.2 節動差估計法，計算其 Weibull 兩參數分別為  $\alpha = 13.49$ 、 $\beta = 2.49$ ，將兩參數帶入 Weibull 畫出嵌合曲線如圖 8 的藍色虛線。其中藍色實線為使用逐時風速推導每日最大風速，我們可依 2.1.2 節所述 Statistical Theory of Extreme Values，將  $n^* = 24$  帶入式 3，計算每日最大風速為  $20.53 (m/s)$ 。圖 9 以相同的方法將每日最大的一筆逐 10 分鐘風速當作每日最大風速，兩年總共 711 筆每日最大逐 10 分鐘風速，每日觀測最大逐 10 分鐘風速均值為  $\mu = 12.82 (m/s)$ ，將每日最大逐 10 分鐘風速假設為 Weibull 分布，並依 2.2 節動差估計法，計算其 Weibull 兩參數分別為  $\alpha = 14.43$ 、 $\beta = 2.64$ ，將兩參數帶入 Weibull 畫出嵌合曲線如圖 8 的黑色虛線。其中黑色實線為使用逐 10 分鐘風速推導每日最大風速，我們可依 2.1.2 節所述 Statistical Theory of Extreme Values，將  $n^* = 24$  帶入式 3，計算每日最大風速  $\mu = 21.07 (m/s)$



。考量竹南沿海岸收集的風速為 2 年資料，假若今天將樣本數拉長到 20 年的風速觀測資料，所對應的均值會更接近推導的每日最大風速。從 Weibull 推導的每日最大逐時風速和每日最大逐 10 分鐘風速的曲線來看，如圖 10，從結果可以看出兩條曲線完全貼合，所以在推導未來最大風速可以使用不同的初始分佈來做預測。

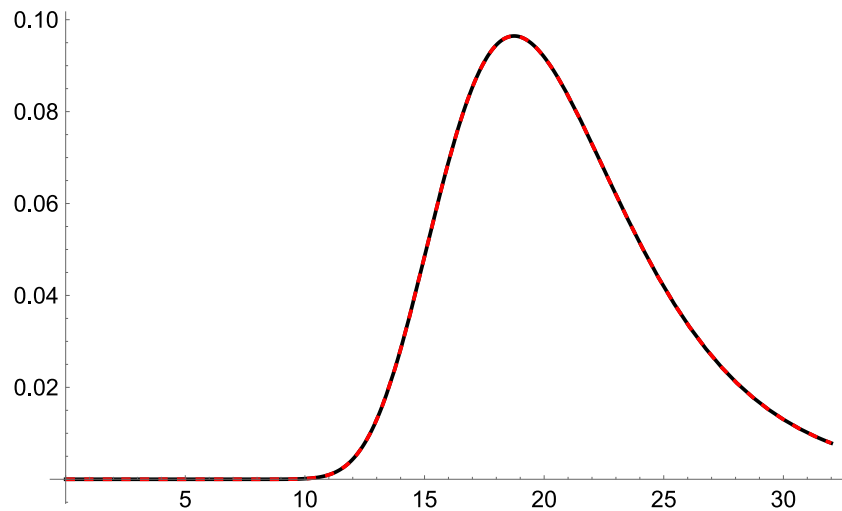


圖 10 Gumbel 推導的每日最大逐時風速和逐 10 分鐘分佈比較

### 3.3 應用於 Gumbel 理論是否會有 $n^*$ 太大致無法收斂

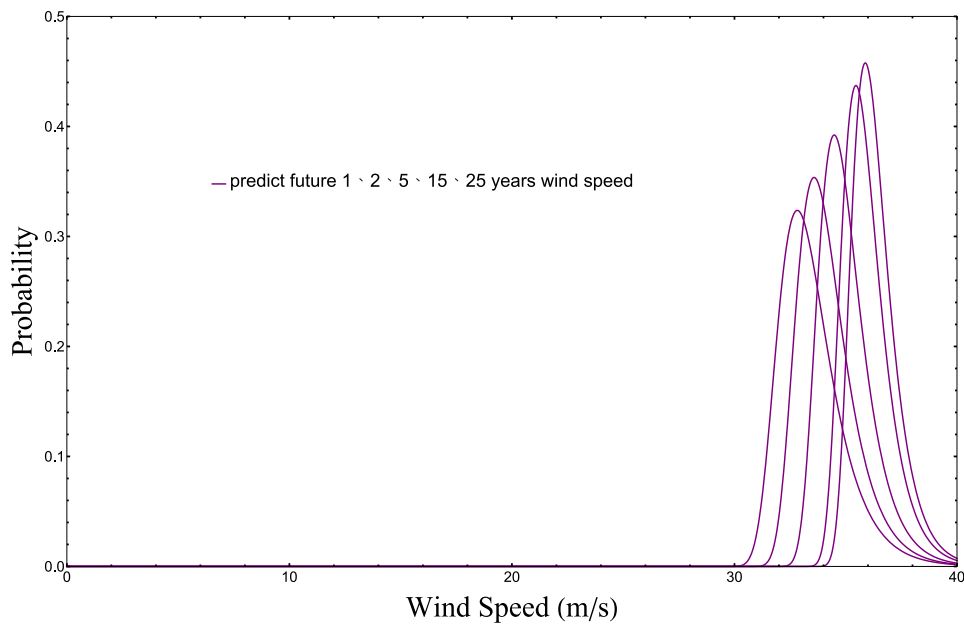


圖 11 每日極值風速推導未來最大風速

Gumbel 理論直接計算未來最大風速遇到數值太大造成系統無法收斂，如逐時風速直接推導未來最大 25 年風速，需要先將逐時風速  $n^* = 24$  變成逐日極值風速，逐日極值風速  $n^* = 365$  變成逐年極值風速，逐年極值風速  $n^* = 25$  變成 25 年最大風速， $n^* = 24 \times 365 \times 25$ ， $n^*$  值等於 219,000，假如改成逐 10 分鐘風速推導最大風速  $n^* = 1,314,000$ 。由於  $n$  值太大這裡提出兩階段的方式推導未來最大風速，第一階段先用逐時風速推導未來每日最大風速如圖 8，得到一個每日最大風速機率密度函數曲線(PDF)，從圖 8 機率密度函數計算均值  $\mu = 20.94$  m/s 和標準差  $\sigma = 4.89$ ，再使用動差估計法(Method of moments)計算每日最大極值兩參數  $\alpha_M = 22.84$ 、 $\beta_M = 4.69$ ，可以依據 2.1.2 節所述 Statistical Theory of Extreme Values，將  $n^* = 365 \times 25$  帶入式 3，推導未來 1、2、5、15、25 年的最大風速如圖 18 紫色曲線。使用二階段 Gumbel 理論推導 25 年平均最大風速為  $36.34$  m/s。

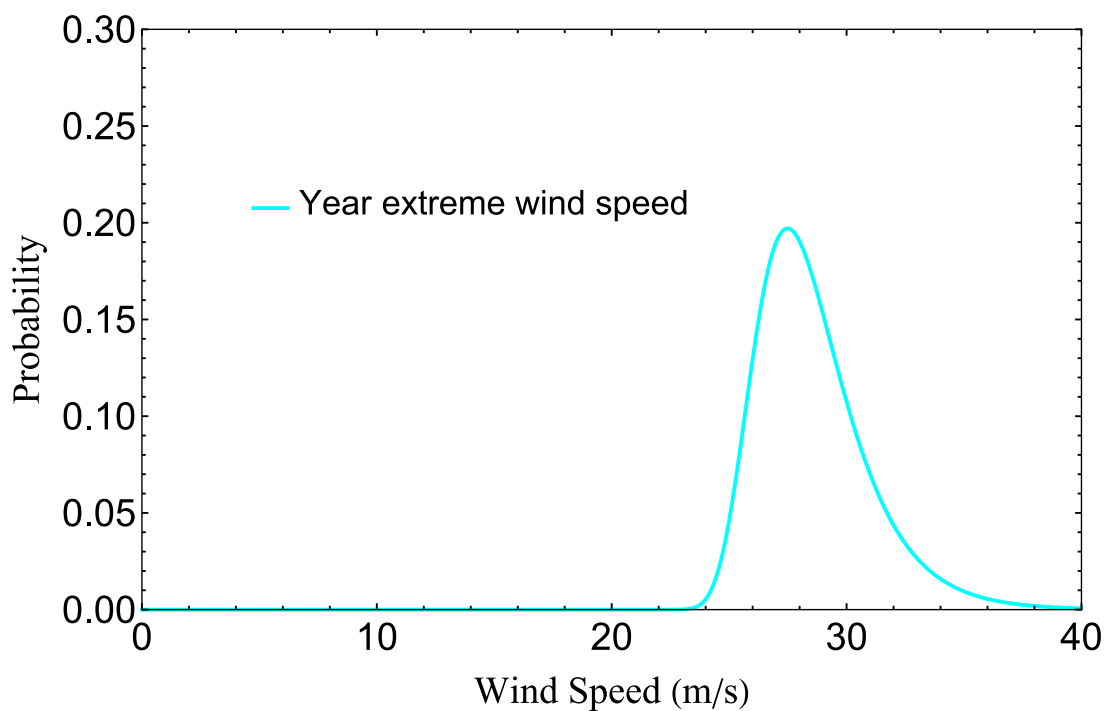


圖 12 每日極值風速推導每年最大風速

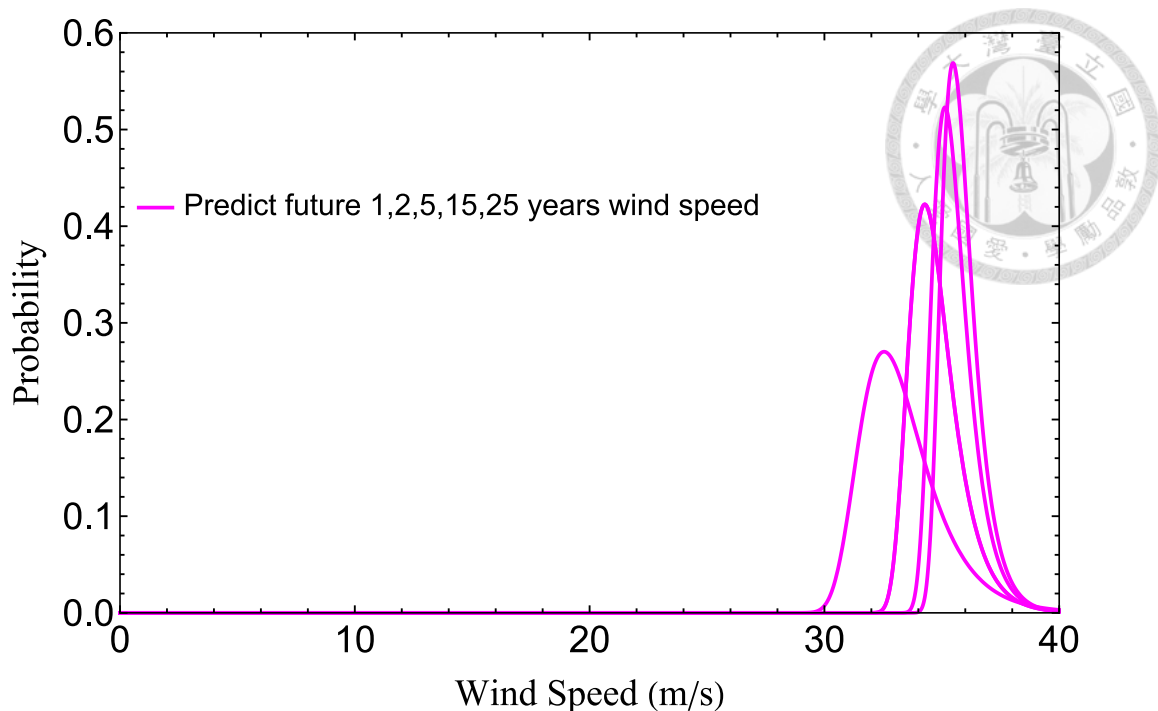


圖 13 每年極值風速推導未來最大風速

這邊提出三階段的方式推導未來最大風速，第一階段先用逐時風速推導未來每日最大風速如圖 8，得到一個每日最大風速機率密度函數曲線(PDF)，從圖 8 機率密度函數計算均值  $\mu = 20.94$  m/s 和標準差  $\sigma = 4.89$ ，再使用動差估計法(Method of moments)計算每日最大極值兩參數  $\alpha_M = 22.84$ 、 $\beta_M = 4.69$ ，可以依據 2.1.2 節所述 Statistical Theory of Extreme Values，將  $n^* = 365$  帶入式 3，得到每年最大風速機率密度函數曲線(PDF)如圖 12，其均值  $\mu$  為 28.56、標準差  $\sigma$  為 2.39，再使用動差估計法(Method of moments)計算每日最大極值兩參數  $\alpha_M = 29.60$ 、 $\beta_M = 14.62$ ，可以依據 2.1.2 節所述 Statistical Theory of Extreme Values，將  $n^* = 25$  帶入式 3，推導未來 25 年的最大風速如圖 13 粉色曲線。使用三階段 Gumbel 理論推導 25 年最大風速平均為 35.85 m/s。在表三整理出使用不同階段推導未來 1、2、5、15、25 年風速，可以從表格得知各階段的風速，雖然初始風速資料是相同，但還是有誤差存在，主要原因為經過多次的動差估計法產生的誤差，未來處理 Gumbel 極值理論遇到  $n^*$  過大，使程式無法收斂，可以使用 2 階段或 3 階段的方法去計算推導的結果。

表 3 二階段和三階段 Gumbel 推導未來 25 年最大風速比較

Years	二階段 Gumbel 推導	三階段 Gumbel 推導	誤差
1	33.48 (m/s)	33.32 (m/s)	0.40%
2	34.17 (m/s)	34.01 (m/s)	1.11%
5	35.02 (m/s)	34.77 (m/s)	0.71%
15	35.94 (m/s)	35.54 (m/s)	0.46%
25	36.31 (m/s)	35.85 (m/s)	1.32%

### 3.4 每日最大逐時和每日最大逐 10 分鐘風速

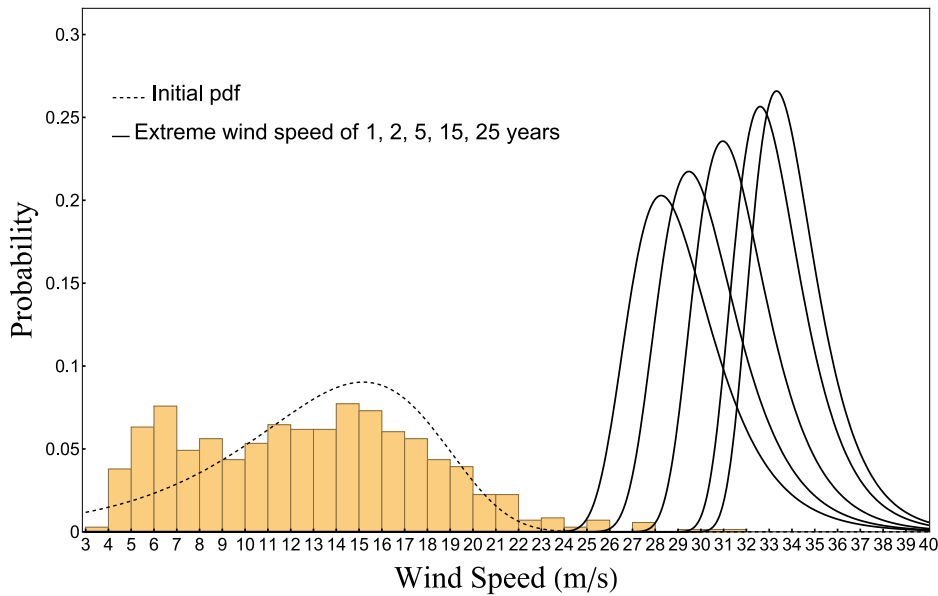


圖 14 觀測每日最大逐 10 分鐘分佈推導最大風速

在圖 14 的黃色直方圖為每日最大逐 10 分鐘風速當作初始分布，預測未來 25 年風速，可以依據 2.1.2 節所述 Statistical Theory of Extreme Values，將  $n^* = 365$  帶入式 3，在圖 14 我們以機率密度曲線來告訴讀者未來 1、2、5、15、25 年最大風速分布，也可以使用最大風速的均值來告訴一般人或工程人員，預測未來第一年最大風速的均值為  $29.30 (m/s)$ ，表示未來 1 年內會遇到的最大風速為  $29.30 (m/s)$ ，其餘 2~25 年最大風速整理出表 3 的 this study，從表 3 可以看出隨著時間增加所測得最大極值風速平均值減緩，標準偏差值則逐漸趨於定值，此現象符合極值理論，標準偏差值係表示此機率分布與其平均值的距離，亦即該機率分布的離散性。在表 4 可以跟 Rohatgi 等人 [10] 論文比較風場，在墨西哥灣到加

勒比海的風速 1~20 年的極值風速比較，以逐 10 分鐘為一筆風速的基底來看未來 1~20 年的極值風速，從表 3 可以看到台灣苗栗竹南沿岸的風場大於墨西哥灣到加勒比海的風場。

表 4 墨西哥加勒比海風場和台灣苗栗竹南沿岸風場極值風速比較

Year	This study (m/s)	West Caribbean Sea Mexico wind speed (m/s)
1	29.3	18.4
2	30.4	20.1
3	31.1	20.6
4	31.5	20.7
5	31.9	21.4
6	32.1	21.5
7	32.3	21.7
8	32.5	22.3
9	32.7	22.7
10	32.8	23.1
11	33.0	23.1
12	33.1	23.6
13	33.2	23.6
14	33.3	23.9
15	33.4	23.9
16	33.5	24.0
17	33.6	24.5
18	33.7	28.0
19	33.7	30.2
20	33.8	34.0
21	33.9	NA
22	33.9	NA
23	34.1	NA
24	34.2	NA
25	34.2	NA

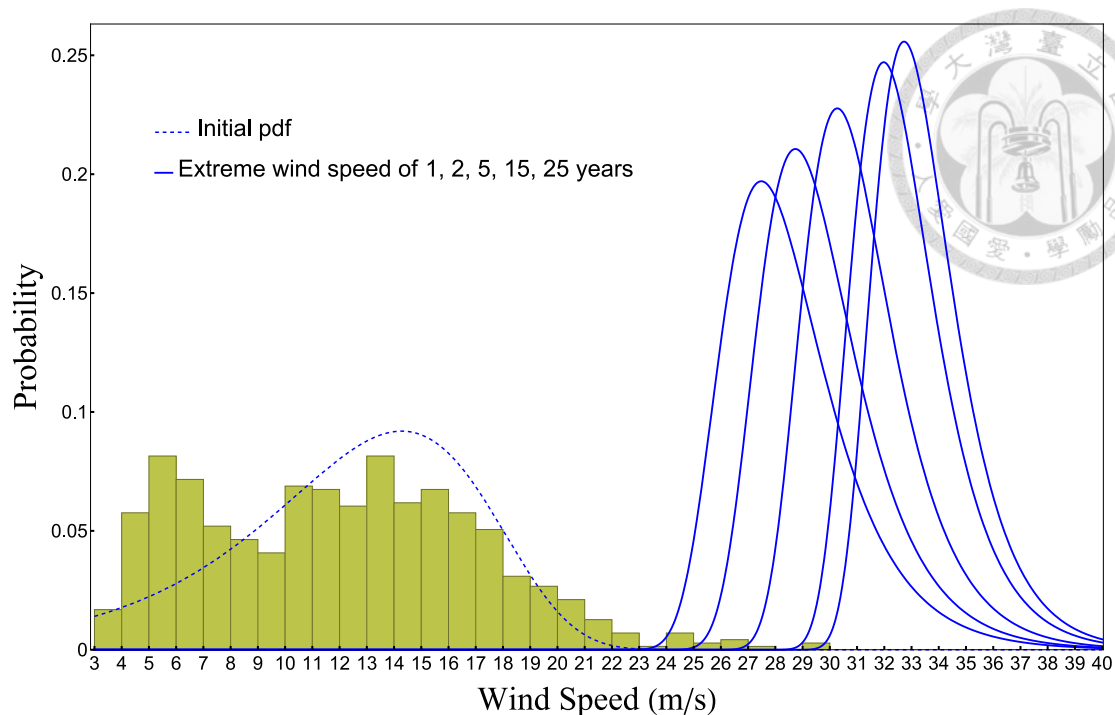


圖 15 觀測每日最大逐時分佈推導未來最大風速

測風塔每天紀錄 24 筆的逐時風速，取最大一筆來當作每日最大的逐時風速，來推導 1~25 年的風速如圖 15，在式 3 的  $n^*$  代入 365 來推導未來第 1 年最大風速為 28.56 (m/s)，從竹南沿海岸觀測的 1 年最大風速為 29.03 (m/s)，誤差為 1.6%。推倒未來第 2 年最大風速為 29.74 (m/s)，竹南沿海岸觀測的 1 年最大風速為 29.89 (m/s)，誤差為 0.5%。可以看到使用 Gumbel 預測未來最大風速跟觀測風速非常接近，西門子歌美颯 SWT-6.0-154 風機在未來 25 年遇到的平均最大風速為 33.55 (m/s)。

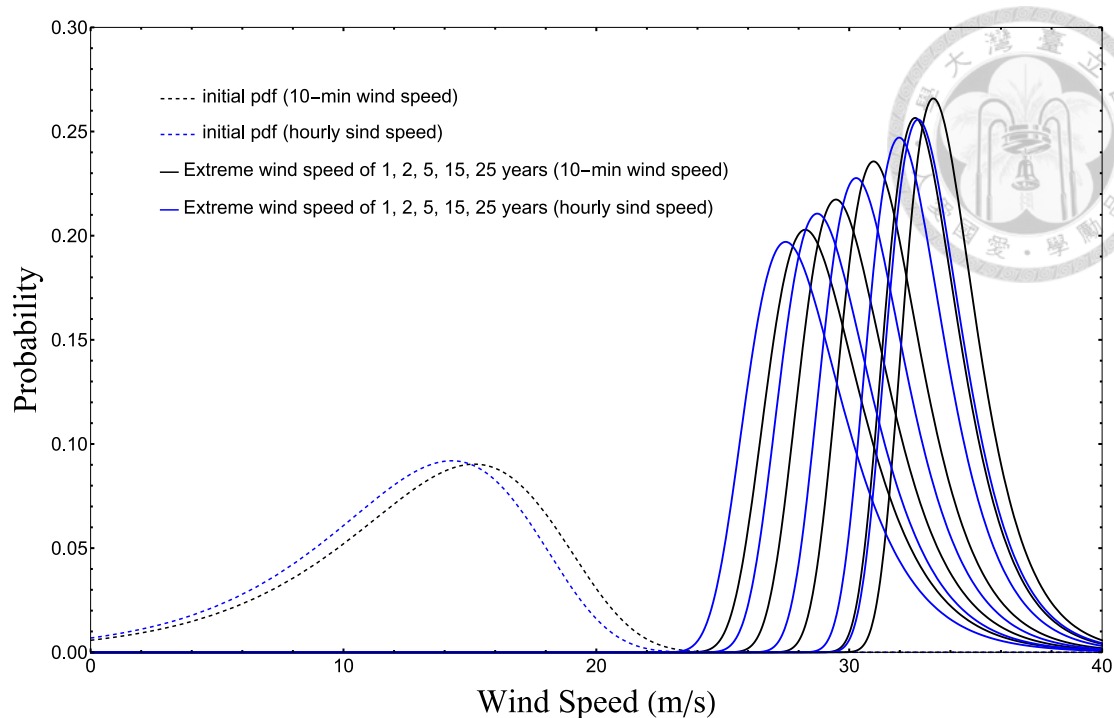


圖 16 以每天最大風速預測長期最大風速

圖 16 藍色虛線為逐時風速，推導未來 1、2、5、15、25 年的最大逐時風速 (藍色實線)，黑色虛線為逐 10 分鐘風速，推導未來 1、2、5、15、25 年的最大逐 10 分鐘風速(黑色實線)，從表 5 風速的均值來看出未來 25 年最大的逐時風速和逐 10 分鐘風速分別為 33.56 (m/s)、34.12 (m/s)，後面的章節可以用重現期來跟 Gumbel 推導的風速進行比較。

表 5 每日最大逐時和每日最大逐 10 分鐘未來 1~25 年均值比較

Predict future n year extreme wind speed	10-min wind speed (m/s)	Hourly wind speed (m/s)
1	29.31	28.56
2	30.45	29.74
3	31.09	30.40
4	31.52	30.86
5	31.86	31.21
6	32.13	31.48
7	32.35	31.72
8	32.55	31.92
9	32.72	32.09
10	32.86	32.25
11	33.01	32.38

12	33.12	32.51
13	33.23	32.63
14	33.33	32.73
15	33.43	32.84
16	33.52	32.93
17	33.60	33.01
18	33.68	33.09
19	33.75	33.17
20	33.82	33.24
21	33.89	33.31
22	33.95	33.37
23	34.01	33.44
24	34.07	33.50
25	34.12	33.55



### 3.5 每月最大逐時風速

在上一個子節，使用每日最大逐時風速推導未來 25 年最大風速，在第 1 年 Gumbel 風速推倒和風速觀測誤差為 1.6%，在第 2 年 Gumbel 風速推倒和風速觀測誤差為 0.5%。接下來的子節以每月最大風速推導未來 25 年最大風速，以每日最大風速和每月最大風速推導未來最大風速的差異。每月觀察風速，將每個月收集的 30 或 31 筆每日最大風速取最大那一筆當該月的最大風速，兩年風速資料總共 24 筆繪畫成直方圖如圖 17，均值  $\mu = 21.03$  (m/s)、標準差  $\sigma = 4.29$  (m/s)，每日最大風速均值為  $\mu = 12.82$  (m/s) 和每月觀測最大風速誤差為 64%，橘線為直方圖嵌合線計算出 Weibull 兩參數，兩參數  $(\alpha_M, \beta_M) = (22.73 \quad 5.67)$ 。



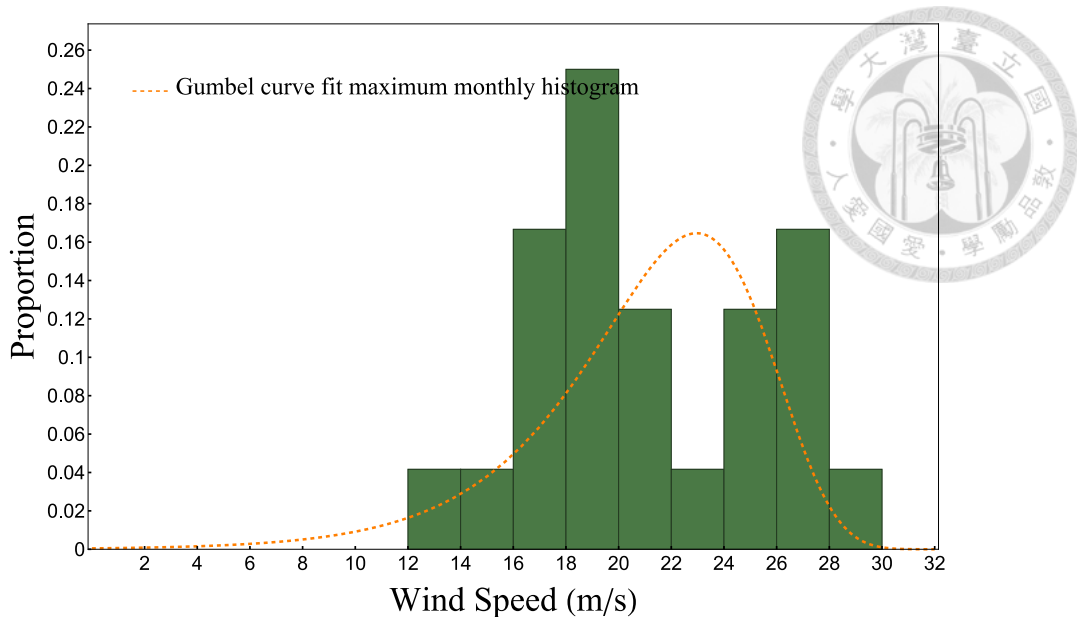


圖 17 觀察每月最大逐時風速直方圖和 Gumbel 嵌合曲線

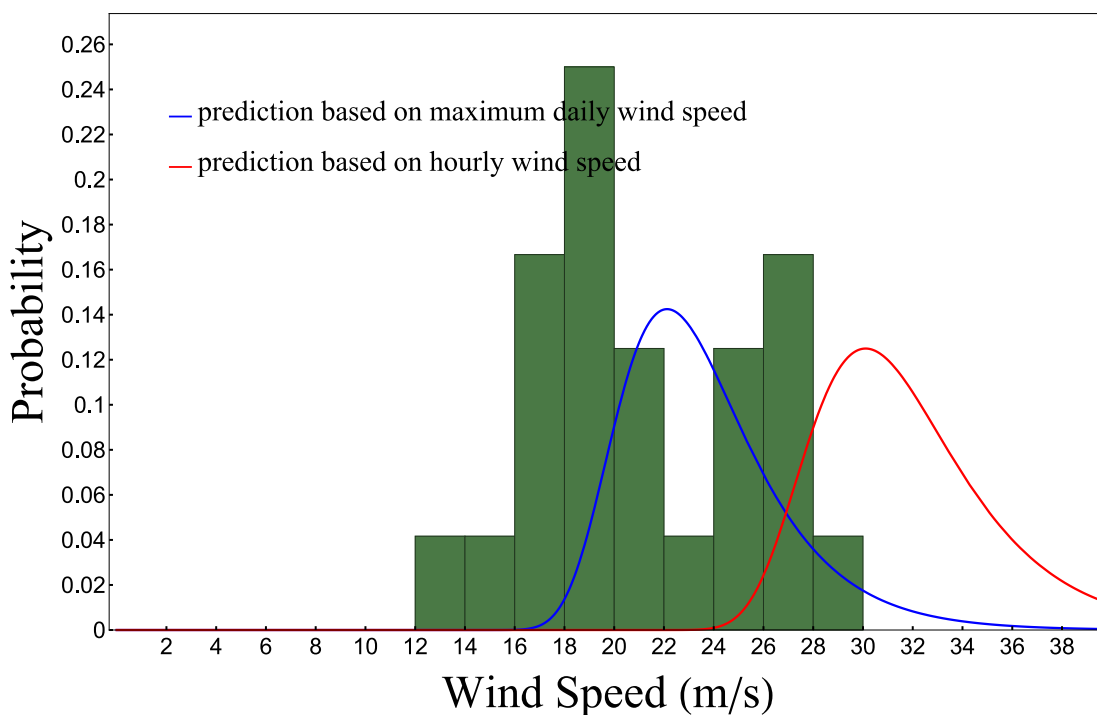


圖 18 每月最大風速分佈

可以看到每日觀測最大風速和每月觀測最大風速差了 64 %，那以每日最大風速來預測每月的最大風速來判斷觀測和預測的風速誤差為多少?藍線為初始分佈每日最大逐時風速(如圖 18)推導每月最大極值風速，在式 3 的  $n^*$  代入 31，每

日最大逐時風速預測每月極值風速均值  $\mu$  為 23.62 (m/s)，實際每月最大觀測逐時風速的均值為 21.03 (m/s)，兩者誤差達 12.3%。紅線為初始分佈逐時風速(如圖 15) 推導每月最大極值風速，在式 3 的  $n^*$  代入 744，以逐時風速預測每月極值風速均值  $\mu$  為 31.81 (m/s)，實際每月最大觀測逐時風速的均值為 21.03 (m/s)，兩者誤差達 51.2%。這裡可以看到以每日最大逐時風速推導未來 25 年最大風速，有一定的準確性。同時我們也可以用每月最大風速來推導未來 25 年最大風速跟每日最大風速圖做比較。

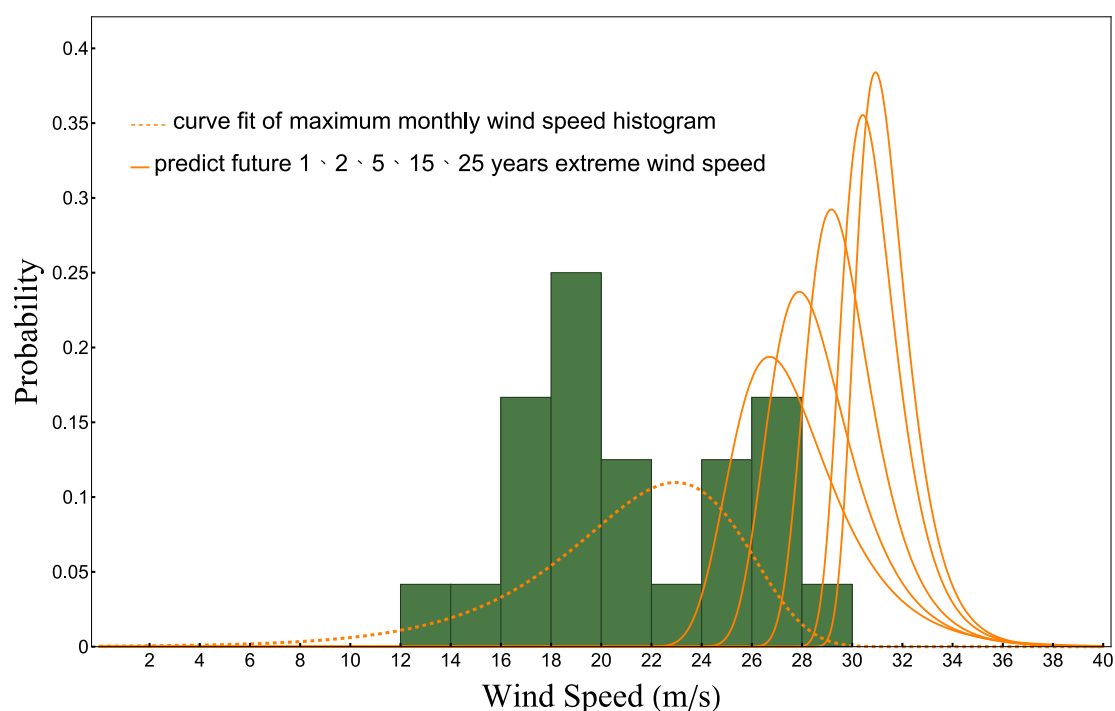


圖 19 觀測每月最大逐時分佈推導未來最大風速

在上一個子節 3.4 了解到每日最大風速預測未來最大風速的結果，以每月最大風速來預測未來 25 年的最大風速跟每日最大風速預測進行比較。圖 19 以每月最大的逐時風速來當初始分佈，推導未來 1~25 年的極值風速，其中值方圖為每月觀測的最大逐時風速結果，橘線為 1、2、5、15、25 年最大風速。將表 5 的初始分佈為每日最大逐時推倒 25 年風速和表 6 的初始分佈為每月最大逐時風速做比較，以每日最大逐時風速預測未來第一年( $n^* = 365$ )的最大風速為 28.56 m/s，以每月最大逐時風速預測未來第一年( $n^* = 30$ )的最大風速為 27.80 m/s，誤差為

2.7%，預測第 25 年最大風速為 6.5%，可以看到以每日最大風速預測未來最大風速結果相對比較更好。

表 6 初始風速為每月最大逐時風速推導未來 1~25 年最大風速均值和模數

Predict future n year extreme wind speed	mean wind speed (m/s)	mode wind speed (m/s)
1	27.80	26.71
2	28.78	27.89
3	29.30	28.49
4	29.64	28.88
5	29.89	29.16
6	30.09	29.39
7	30.26	29.57
8	30.39	29.73
9	30.51	29.86
10	30.62	29.98
11	30.71	30.09
12	30.80	30.18
13	30.88	30.27
14	30.95	30.34
15	31.01	30.42
16	31.07	30.48
17	31.13	30.54
18	31.18	30.60
19	31.23	30.66
20	31.28	30.71
21	31.32	30.75
22	31.36	30.80
23	31.40	30.84
24	31.44	30.88
25	31.48	30.92

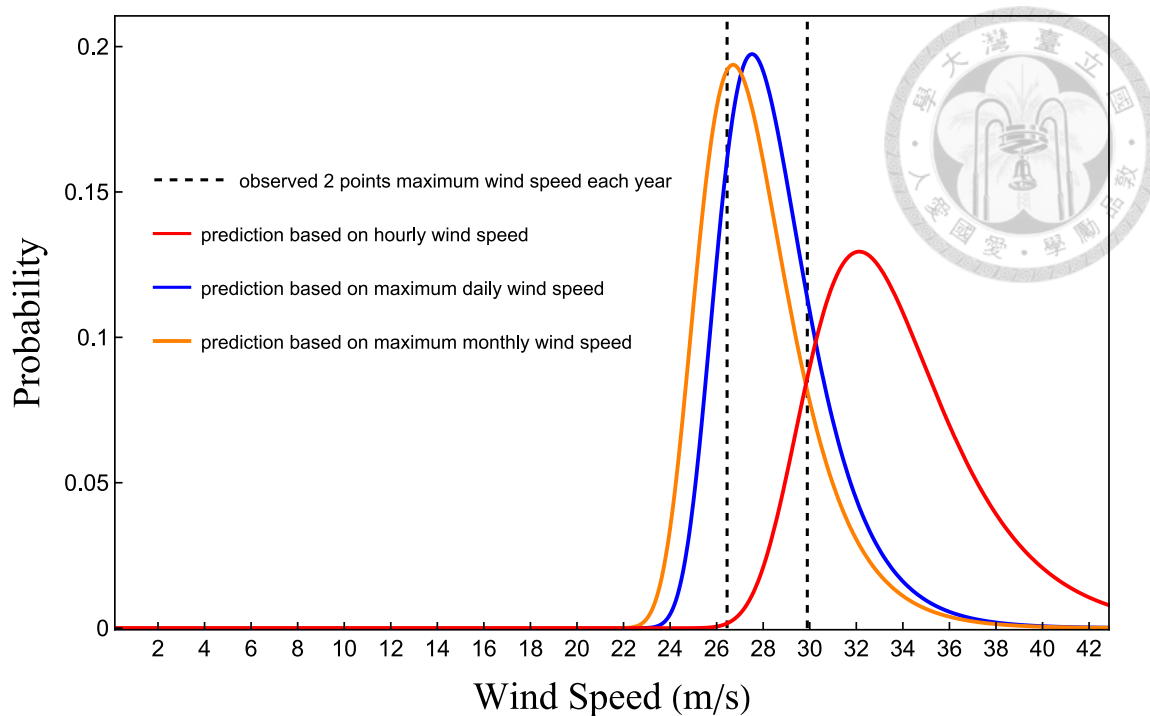


圖 20 兩年觀測最大風速和逐時風速、每日最大逐時風速、每月最大逐時風速推導未來 1 年的極值風速

在圖 18 我們用逐時風速和每日最大逐時風速預測每月的最大風速，可以看到以每日最大風速預測每月最大風速結果是最好。同樣的方式，以初始分布為每日最大風速和每月最大風速推導 1 年的最大風速。圖 20 觀測 2 年最大逐時風速分別為 26.45 (m/s)、29.89 (m/s) 用黑色虛線表示在圖 20，觀測兩年最大逐時風速平均值為 28.17 (m/s)，以初始分佈為每日觀測最大逐時風速推導的 1 年最大風速為 28.59 (m/s)，跟觀測平均風速誤差為 1.4%，初始分佈為每月觀測最大逐時風速推導的 1 年極值風速均直為 27.8 (m/s)，跟觀測平均風速誤差為 2.8%，初始分佈為逐時風速推導 1 年極值風速均直為 33.76 (m/s)，跟觀測平均風速誤差為 18.6%。

上述三種不同初始分布預測最大風速，逐時風速以  $n = 8760$  預測每年最大風速、每日最大風速以  $n^* = 365$  預測每年最大風速、每月最大風速以  $n^* = 12$  預測每年最大風速，可以從圖 20 看出每日最大風速預測 1 年最大風速誤差為最小的 1.4%。

### 3.6 重現期

對於重要結構或基礎設施，設計壽命可以遠超過 50 年，而對於非住宅結構或施工期，設計壽命可以短於 50 年。一些建築規範提供出調整施工期設計風速的係數方法。歐洲規範提供了一個概率係數，用於計算特定的重現期的風速設計，澳大利亞 ABCB 臨時結構標準提供了使用不同的假設的施工設計風速。

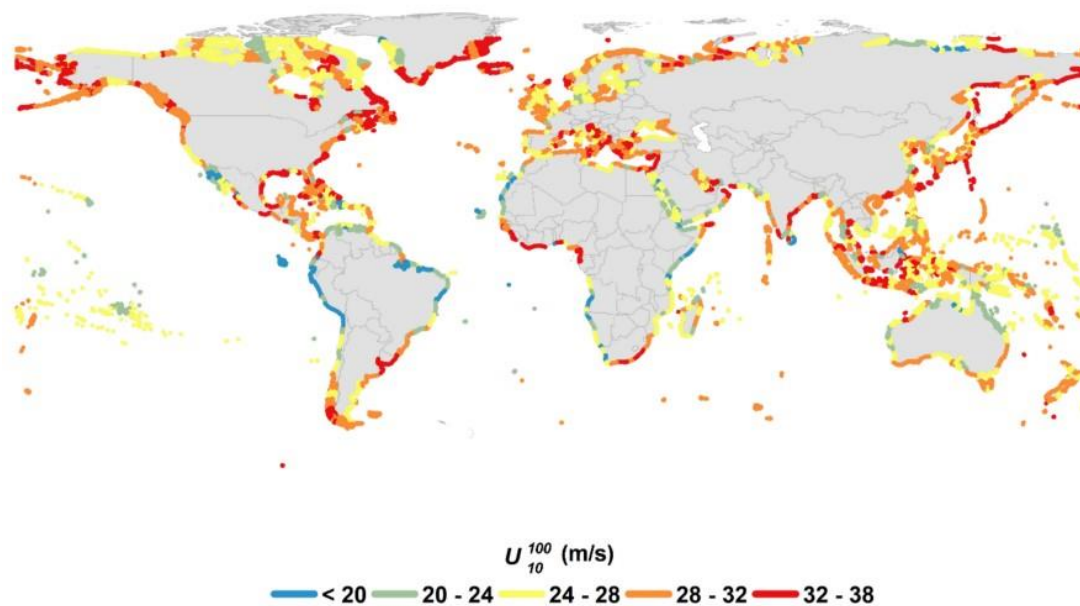


圖 21 計算 100 年近海案地區重現期風速

100 年回歸期的近海岸值，圖 19 顯示在美國東海岸、英格蘭島周圍、墨西哥灣、孟加拉灣和印度洋沿岸地區風速都超過 32 m/s。

在 Lee 等人[4]用 2 種方式紀錄 2005 年至 2007 年風速資料，一種為逐 10 分鐘跟本研究氣象局紀錄風速方法一樣，另外一個為逐 3 秒鐘，每 3 秒鐘為一個單位紀錄該地的風速資料。在 Gumbel 分布進行極端值分析的結果中，使用每日最大風速和每月最大風速數據來計算重現期的數值，在南韓的三陟市以初始分佈逐 10 分鐘計算 50 年的重現期為 37.1 m/s，以每月最大逐 10 分鐘計算 50 年的重現期為 41.3 m/s，在表 7 的台灣竹南沿海岸的重現期預測，可以看到每日最大逐時風速和每月最大逐時風速預測 50 年的重現期分別為 38.42 m/s、44.23 m/s。從 Lee 等人[4]的研究結果和台灣竹南沿海岸的風速顯示以初始分佈為每月最大風速

$n^* = 12$  預測 50 年重現期為 44.23 m/s，初始分佈為每日最大風速  $n^* = 365$  預測 50 年重現期為 39.42 m/s，誤差為 15.1%。雖然預測  $n^*$  下降，但每月最大初始風速的標準差和均值更大，所預測出來的結果顯示每月最大風速預測的結果更大。

表 7 台灣苗栗竹南沿海岸每日最大風速和每月最大風速重現期比較

R, years	Maximum daily Wind speed	Maximum monthly Wind speed
5	34.02	35.54
10	35.31	38.26
25	37.04	41.69
50	39.42	44.23
75	40.19	45.71
100	41.04	46.76
125	41.50	47.57
150	42.11	48.23

表 8 墨西哥加勒比海風場和台灣苗栗竹南沿海岸風場重現期比較

R, years	This Study $V_R$ (m/s)	West Caribbean Sea Mexico $V_R$ (m/s)
10	34.7	28.4
15	35.6	29.6
20	36.3	30.4
25	36.8	31.1
50	38.4	33.1
100	40.0	35.1

在表 8 分析墨西哥加勒比海風場和台灣竹南沿海岸風場極值風速，可以從數據看到未來風場 1~25 年台灣竹南沿海岸的平均風速比較大，表 8 以重現期分析竹南沿海岸風場和加勒比海風場比較。經過重現期的計算 3 式可以得到表 8，其中左邊為本論文研究竹南沿海岸風場，右邊為墨西哥加勒比的風場，可以看到在不同的時間點 10 年、15 年、20 年、25 年、50 年、100 年的重現期，竹南沿海岸的重現期風速平均大加勒比海灣的風速 5~6 m/s，從 Gumbel 理論推導風速和重現期計算都可以發現台灣的竹南沿海岸風場比墨西哥加勒比海風場來的更好。





圖 22 印度海洋線和地點: DS1 和 DS5 [12]

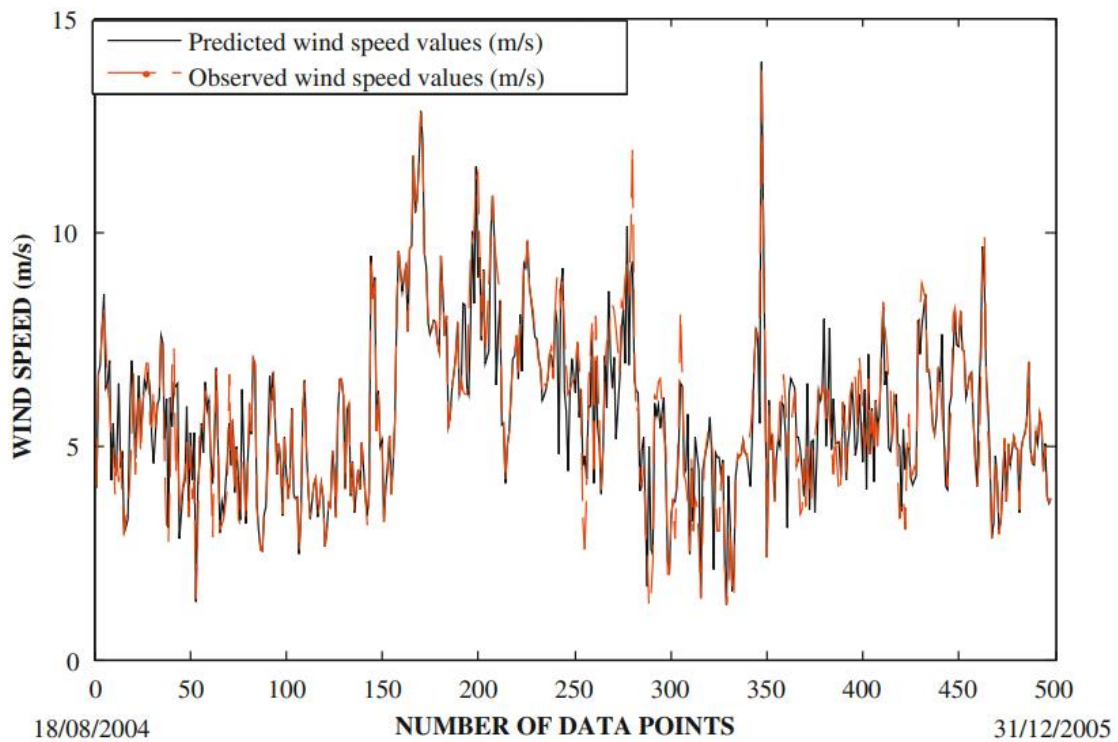


圖 23 印度海洋線和地點的風速歷程圖 [12]

評估氣候變化對印度兩個近海點的重現期比較，根據 1998-2005 年期間波浪浮標觀察的結果，在 Deepthi and Deo[12]的論文中紀錄印度海洋的浮標數據測試，

有兩個測試點 DS1,DS5 如圖 22，在 2004-2005 的風速歷程圖(圖 23)可以看到平均風速在 4.8 m/s，本研究竹南沿海岸的時間歷程圖如圖 1 平均風速為 7.98 m/s，使用 Gumbel 式 3 預測 5、10、25、50、75、100、125、150 年的重現期如表 9，從數值上可以看到台灣的竹南沿海岸的 50 年重現期比印度的 DS1、DS5 風速大 57%和 35%。

表 9 印度風場 DS1,DS5 和台灣苗栗竹南沿海岸風場重現期比較

R, years	This Study $V_R (m/s)$	Indian coastline DS1 $V_R (m/s)$	Indian coastline DS5 $V_R (m/s)$
5	33.02	19.72	22.82
10	34.71	21.11	24.48
25	36.84	22.94	26.68
50	38.42	24.32	28.35
75	39.34	25.13	29.32
100	40.00	25.71	30.01
125	40.50	26.16	30.55
150	40.91	26.52	30.92

表 10 Annual maximum gust wind speed(m/s) occurring in Hong Kong during 1950-1994

Year	1950	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958
Annual maximum wind speed	30.3	39.0	33.9	38.6	44.6	31.4	26.7	51.9	31.9
Year	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967
Annual maximum wind speed	27.2	52.9	45.8	63.6	36.0	64.0	31.4	42.2	41.1
Year	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976
Annual maximum wind speed	37.0	34.4	35.5	62.2	30.3	40.0	36.0	39.4	34.4
Year	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985
Annual maximum wind speed	28.3	39.1	55.0	35.0	28.8	25.7	62.7	32.4	31.9
Year	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
Annual maximum wind speed	37.5	31.5	32.0	35.5	37.5	41.0	37.5	48.6	28.1

另一個 case study 紀錄香港的風速，Xiao 等人[1]紀錄香港 1950-1994 如表 10，45 年期間的每年最大風速。該風場風速是以逐 3 秒鐘為一個點來記錄 45 年



風速，測風塔是位於海平面 70 公尺高，本研究台灣竹南沿海岸風速資料是以逐 10 分鐘為一點，測風塔位於海平面 90 公尺高。雖然初始設定不一樣，但還是可以探討未來 1000 重現期的風速。

表 11 香港和台灣苗栗竹南沿海岸 1000 重現期的風速 in (m/s)比較

Mean Recurrence Interval (year)	Type I Extreme value distribution	Three-parameter Weibull distribution	Two-parameter Weibull distribution	This Study
5	46.32	45.99	47.49	33.02
10	52.30	52.61	51.48	34.71
20	58.04	58.86	54.62	36.33
50	65.48	66.74	58.00	38.42
100	71.05	72.47	60.16	40.00
200	76.60	78.04	62.09	41.56
500	83.92	85.21	64.36	43.63
1000	89.45	90.50	65.91	45.19

表 11 紀錄香港 Wang Lang Island 每年最大的一筆風速當初始分布，45 年平均風速為 38.88 (m/s)以重現期 1000 年來看，表 11 香港使用 Two-parameter Weibull 兩參數理論推導出來的 1000 年重現期風速為 65.91 (m/s)，以台灣兩年觀測個別最大風速為 31.51(m/s)、27.8(m/s)，2 年最大風速平均為 29.655m/s，台灣竹南沿海岸 1000 年重現期計算風速為 45.19(m/s)如表 11 this study。每年最大風速平均可以看到香港 Wang Lang Island 最大風速平均為 38.88、台灣最大風速平均為 29.65，計算 1000 年的重現期可以發現香港 Wang Lang Island 的風速大於台灣竹南沿海岸風速 0.45 倍。

經上述 3 個國家風場比較包含墨西哥加勒比海風場、印度風場 DS1,DS5、香港 Wang Lang Island，本研究發現如欲瞭解未來風場機組所可能遇到的最大風速，以案例風場觀測資料為例，可以兩年逐時風速作為數據資料進行極值風速預測，跟國外的風場進行比較，也可以利用重現期跟 Gumbel 理論推導兩種方式預測未來最大風速。

## 4. 結論

若欲於台灣海峽發展離岸風力發電系統，須先瞭解該風場的風速分佈可能的極值風速，才有益於研發與風險評估。先以風速歷程圖了解竹南沿海岸風速分布以冬季風速為主，夏天風速最小卻用電量最大，則出現電力缺乏問題。

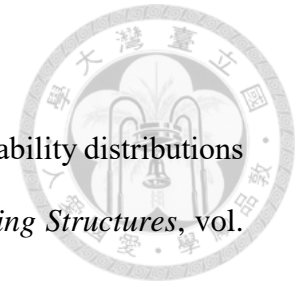
本研究以 3 種不同的初始分佈(逐時風速、每日最大逐時風速、每月最大逐時風速)，預測未來 25 年的最大風速，以每日最大逐時風速預測每月的最大風速和每月觀測最大風速誤差為 12.3 %，以逐時風速預測每月的最大風速和每月觀測最大風速誤差為 51.2%。以每日觀測最大風速預測每年的最大風速和每年觀測最大風速誤差為 1.4 %，以每月觀測最大風速預測每年的最大風速和每年觀測最大風速誤差為 2.8 %，以觀測逐時風速預測每年的最大風速和每年觀測最大風速誤差為 34.7%，其中以每日最大逐時風速預測最為精準。未來在一個新的風場地，當地氣象局收集的風速資料不足，我們可以先以每日最大風速當初始分佈，再使用 Gumbel 預測當地未來最大風速，進行極值分析。推導未來最大風速可能遇到 Gumbel 理論是否會有  $n^*$  太大致無法收斂，本研究提出以兩階段或三階段的方式預測未來最大風速搭配動差估計法，獲得 Weibull 參數、均值、標準差，兩階段 Gumbel 風速推導和每日最大逐時風速推導兩者誤差達 8.28%，但此結果在未來極值風速的預測上，仍可作為參考。

除了使用 Gumbel 理論推導未來最大風速，本研究也使用重現期方法來分析風速數據，並得出了不同風速條件下的重現期。通過對風速數據的分析，我們可以得出在不同重現期下的風速分佈情況，進而對風能系統進行設計和運營提供基礎參考。在建築設計或是風機架設皆需要探討重現期問題，提出重現期 side project 預測未來 5、10、25、50、75、100、125、150 年會遇到的最大風速，其中將竹南沿海岸的重現期跟印度兩個近海點 DS1,DS5 和墨西哥加勒比海進行風場比較，以 50 年的重現期竹南沿海岸風場比印度近海風場風速多出 35%、墨西哥加勒比海為 16%，可見台灣竹南沿海岸風場排名高於印度近海點 DS1,DS5 和

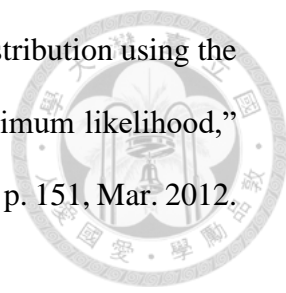
墨西哥加勒比海岸，因此期待未來台灣離岸風電發展技術成熟之時，相信台灣亦能開發我國離岸風場的潛能，進而提升綠電佔比。

未來若將此應用於離岸風力發電機組或結構的老化模擬，或探討長型複合材料風力發電機葉片在極端負載下的結構完整性分析和損傷評估。給予單一方向風速對長型葉片施與均佈力和旋轉慣力的作用，然後將有限元素分析方法應用於葉片的結構完整性評估，以預測在極端負載下可能出現的損傷模式和損傷程度，以預測在極端負載下可能出現的損傷模式和損傷程度。

## 參考文獻



1. Y. Q. Xiao, Q. S. Li, Z. N. Li, Y. W. Chow, and G. Q. Li, “Probability distributions of extreme wind speed and its occurrence interval,” *Engineering Structures*, vol. 28, no. 8, pp. 1173–1181, Jul. 2006.
2. J. P. Palutikof, B. B. Brabson, D. H. Lister, and S. T. Adcock, “A review of methods to calculate extreme wind speeds,” *Meteorological Applications*, vol. 6, no. 2, pp. 119–132, Jun. 1999.
3. M. B. Abohedma and M. M. Alshebani, “Wind load characteristics in Libya,” *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 4, no. 3, pp. 88–91, 2010.
4. B.-H. Lee, D.-J. Ahn, H.-G. Kim, and Y.-C. Ha, “An estimation of the extreme wind speed using the Korea wind map,” *Renewable Energy*, vol. 42, pp. 4–10, Jun. 2012.
5. Z. Li, Z. Li, W. Zhao, and Y. Wang, “Probability modeling of precipitation extremes over two river basins in northwest of China,” *Advances in Meteorology*, vol. 2015, pp. 1–13, Jan. 2015.
6. Y. Huang, S. Liu, and L. Yang, “Wind speed forecasting method using EEMD and the combination forecasting method based on GPR and LSTM,” *Sustainability*, vol. 10, no. 10, p. 3693, Oct. 2018.

- 
7. S. Mahdi and M. Cenac, “Estimating parameters of Gumbel distribution using the methods of moments, probability weighted moments and maximum likelihood,” *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, vol. 12, no. 1–2, p. 151, Mar. 2012.
  8. H. Ullah, B. Ullah, and V. V. Silberschmidt, “Structural integrity analysis and damage assessment of a long composite wind turbine blade under extreme loading,” *Composite Structures*, vol. 246, p. 112426, Aug. 2020.
  9. M. G. Kendall, “Note on the distribution of quantiles for large samples,” *Supplement to the Journal of the Royal Statistical Society*, vol. 7, no. 1, p. 83, 1940.
  10. J. Rohatgi, A. Araújo, and A. R. Primo, “Extreme wind speeds and their prediction for wind turbines,” *Wind Engineering*, vol. 37, no. 6, pp. 595–603, Dec. 2013.
  11. R. Chiodi and F. Ricciardelli, “Three issues concerning the statistics of mean and extreme wind speeds,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 125, pp. 156–167, Feb. 2014.
  12. R. Deepthi and M. C. Deo, “Effect of climate change on design wind at the Indian offshore locations,” *Ocean Engineering*, vol. 37, no. 11–12, pp. 1061–1069, Aug. 2010.

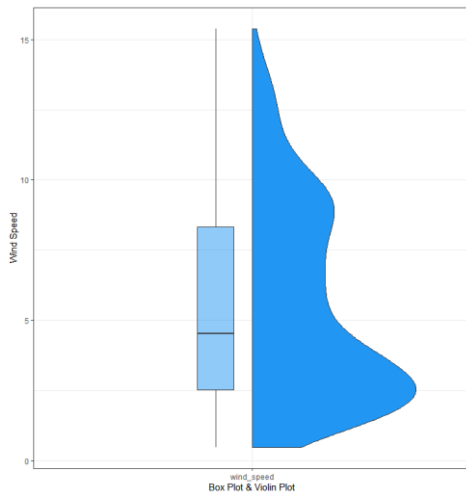
# 附錄



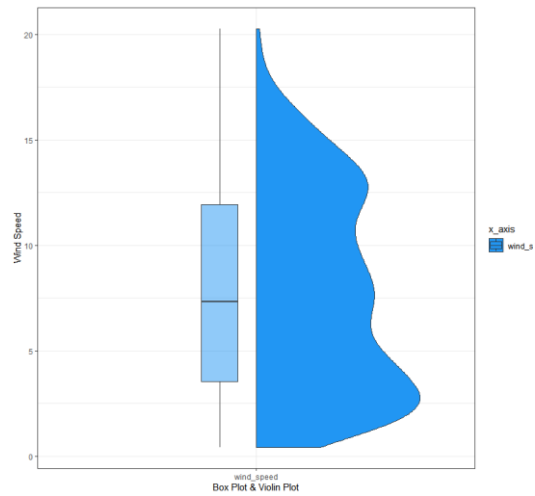
## 附錄 1 2017 年 5 月至 2019 年 4 月 Box plot & Violin plot

找出離群值的方法為：

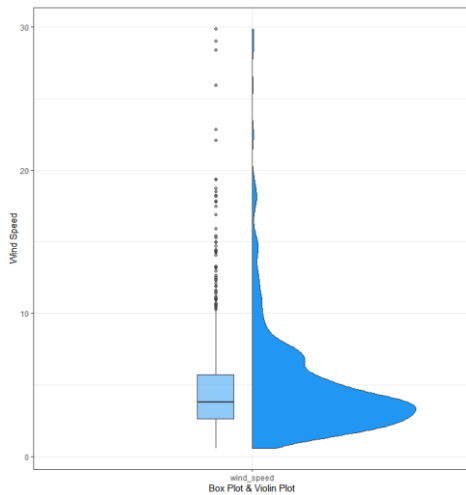
- 1.將資料進行排序後，找出第一四分位數(Q1)、第三四分位數(Q3)。
- 2.計算  $Q3 - Q1$  得出四分位距(IQR)。
- 3.找出數據中大於  $Q3 + 1.5IQR$  或 小於  $Q1 - 1.5IQR$  的數據，即為離群值。



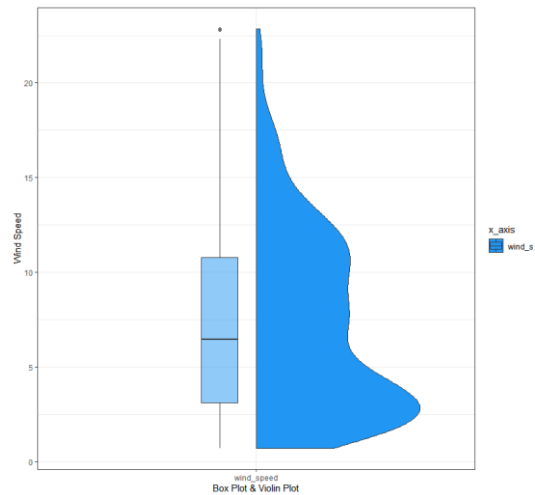
201705 Box plot & Violin plot



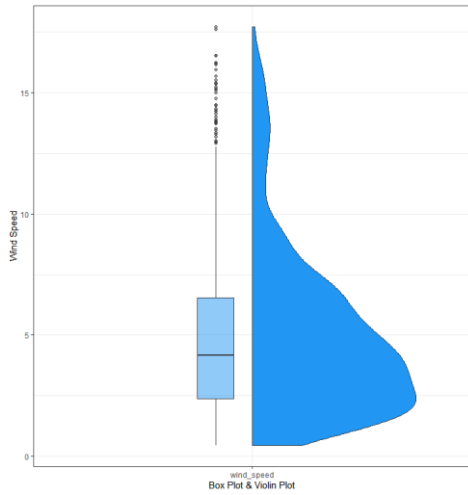
201706 Box plot & Violin plot



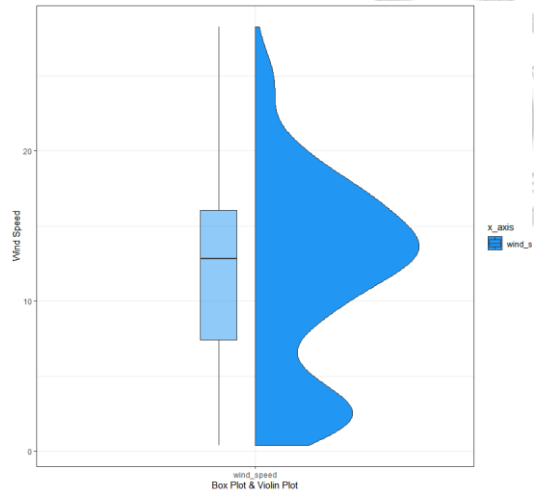
201707 Box plot & Violin plot



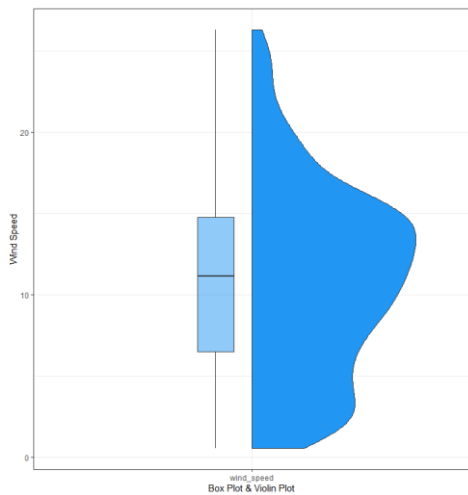
201708 Box plot & Violin plot



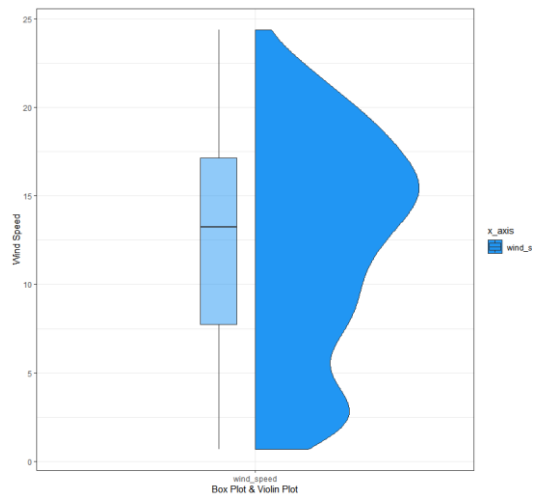
201709 Box plot & Violin plot



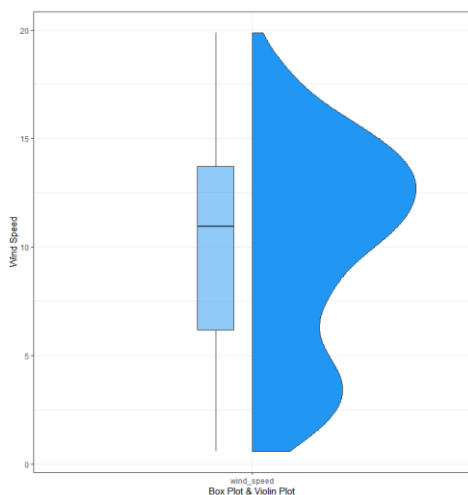
201710 Box plot & Violin plot



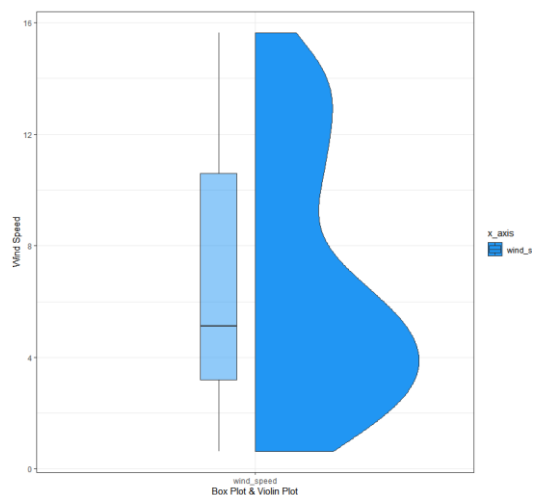
201711 Box plot & Violin plot



201712 Box plot & Violin plot

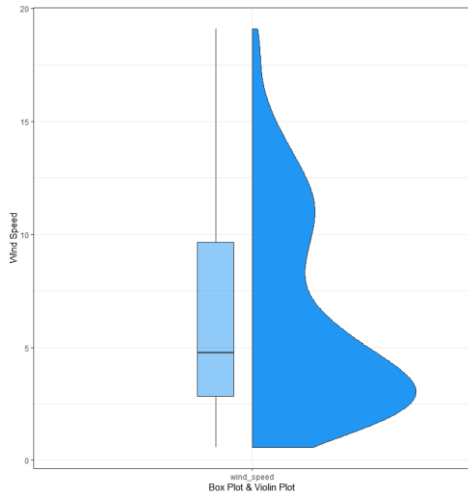


201801 Box plot & Violin plot

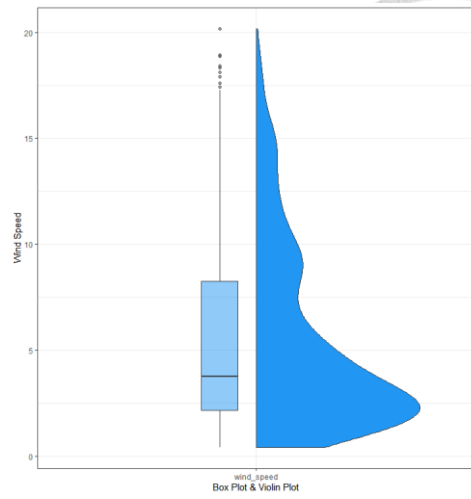


201802 Box plot & Violin plot

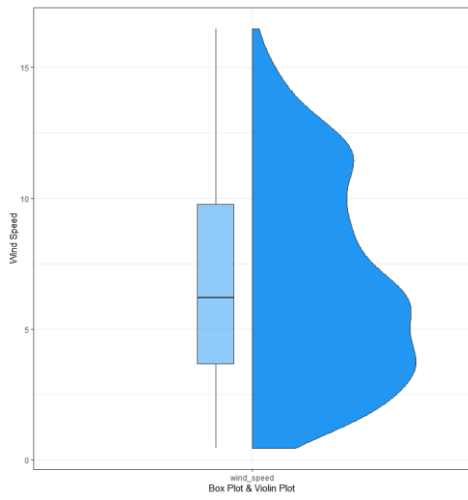




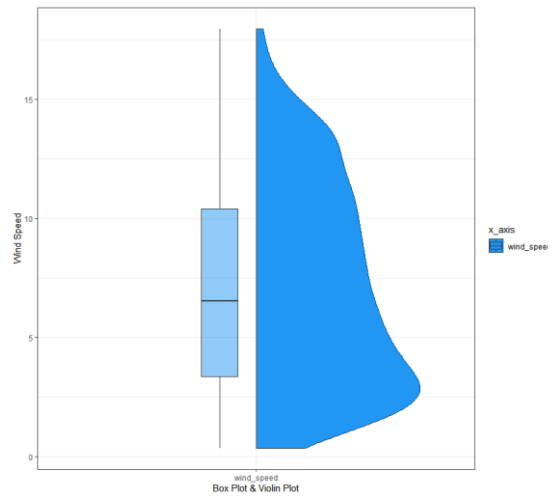
201803 Box plot & Violin plot



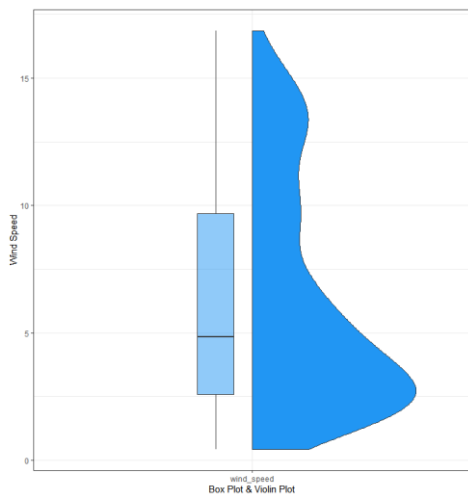
201804 Box plot & Violin plot



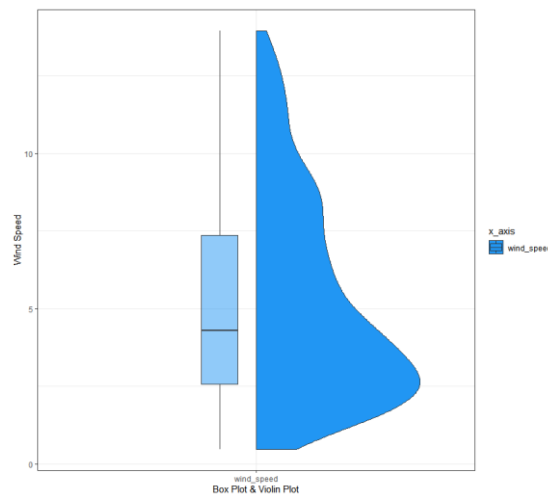
201805 Box plot & Violin plot



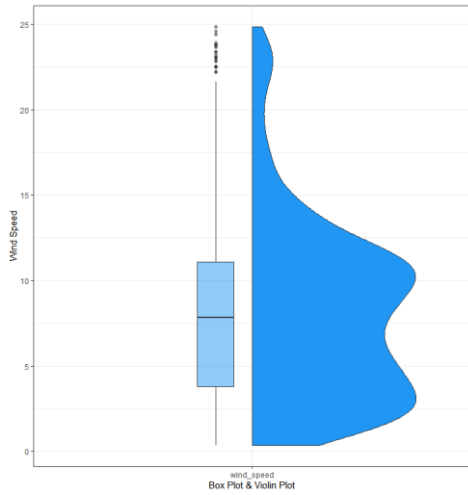
201806 Box plot & Violin plot



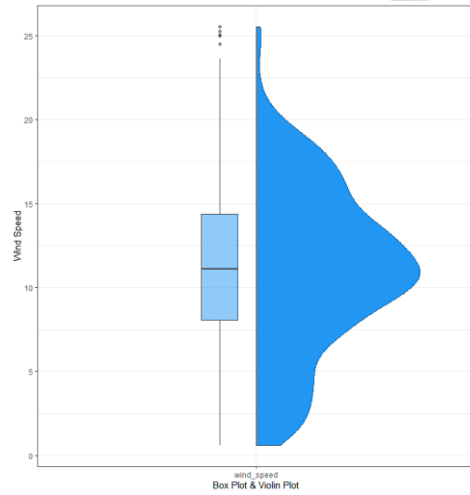
201807 Box plot & Violin plot



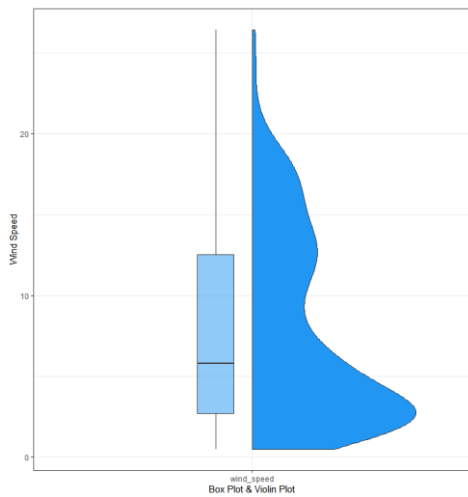
201808 Box plot & Violin plot



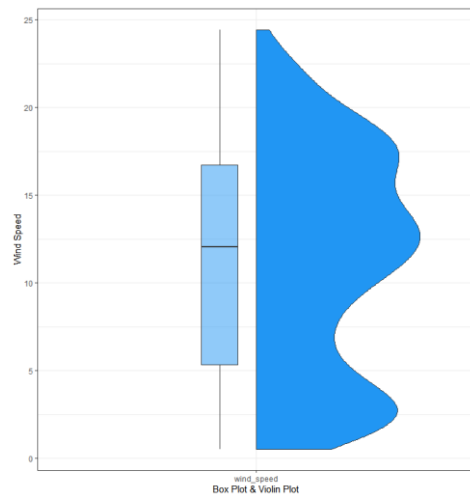
201809 Box plot & Violin plot



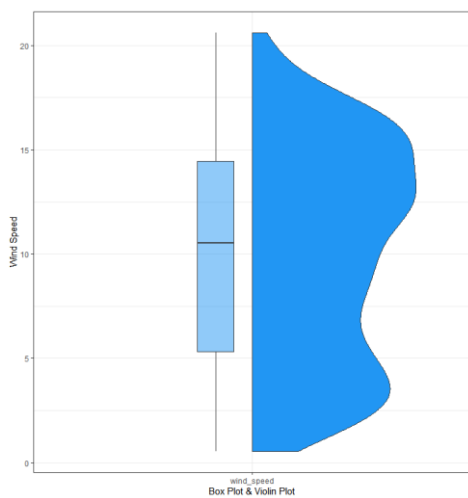
201810 Box plot & Violin plot



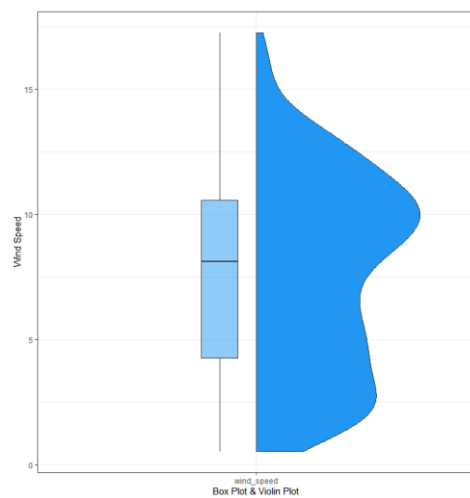
201811 Box plot & Violin plot



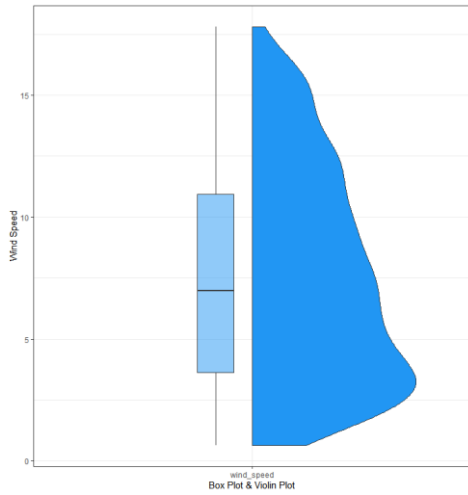
201812 Box plot & Violin plot



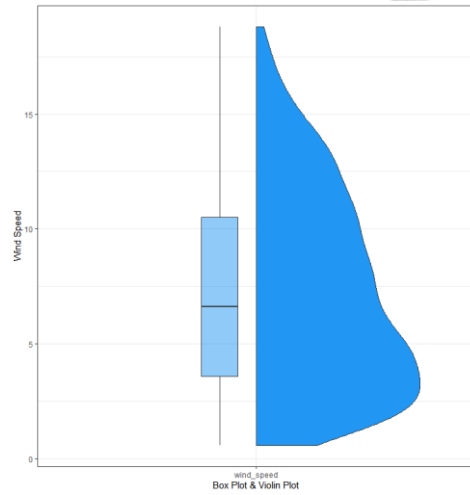
201901 Box plot & Violin plot



201902 Box plot & Violin plot



201903 Box plot & Violin plot



201904 Box plot & Violin plot

## 附錄 2 QQ-Plot

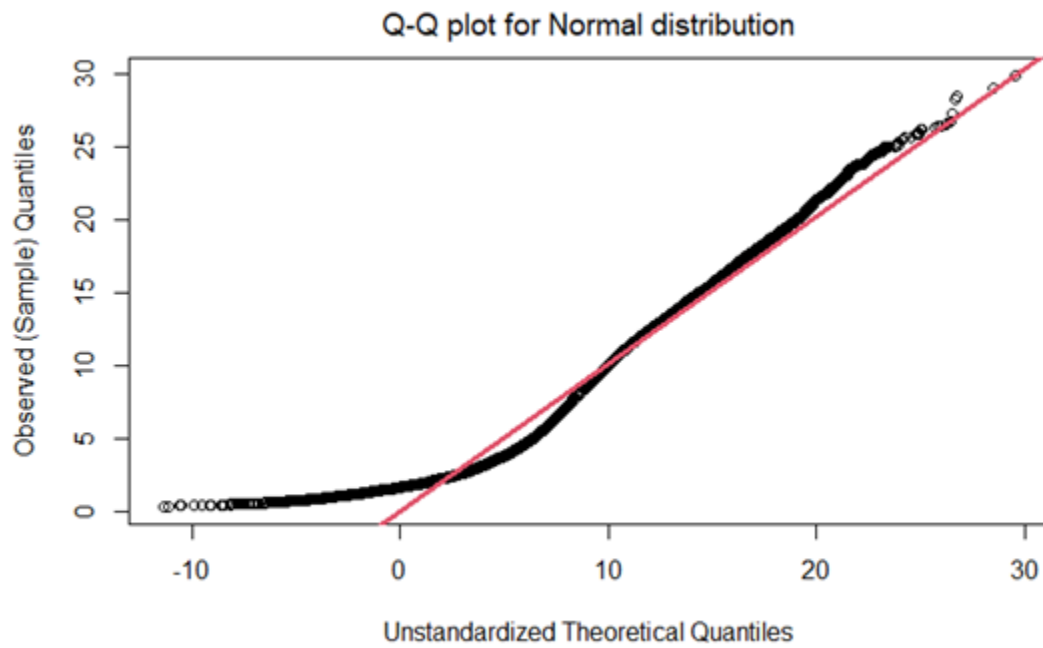


Fig. A.2.1 兩年逐時風速 Normal QQ-Plot

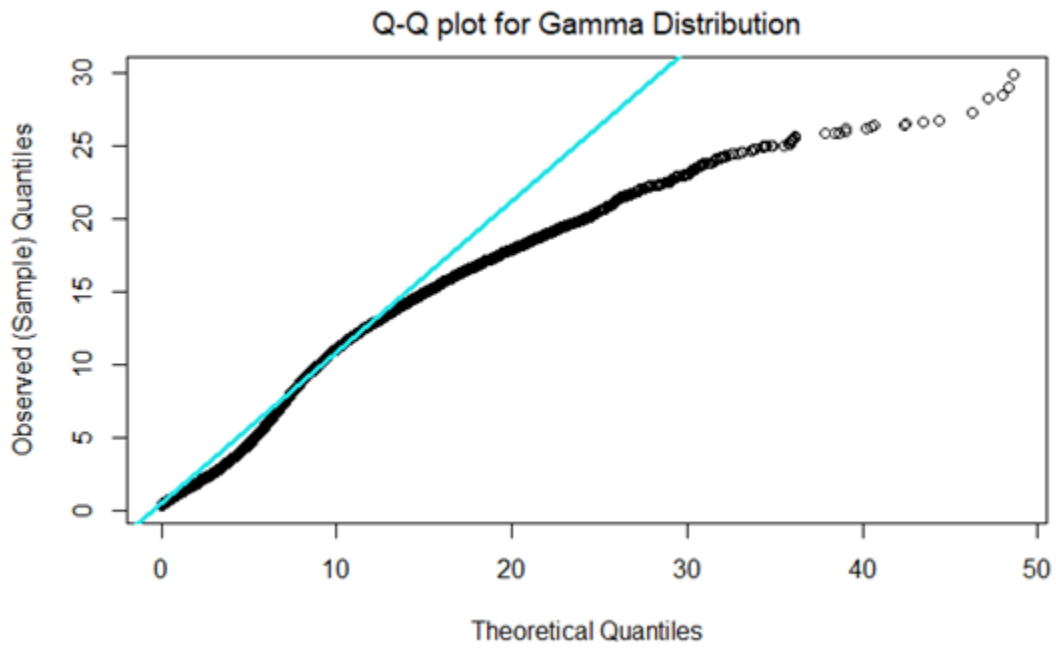


Fig. A.2.2 兩年逐時風速 Gamma QQ-Plot

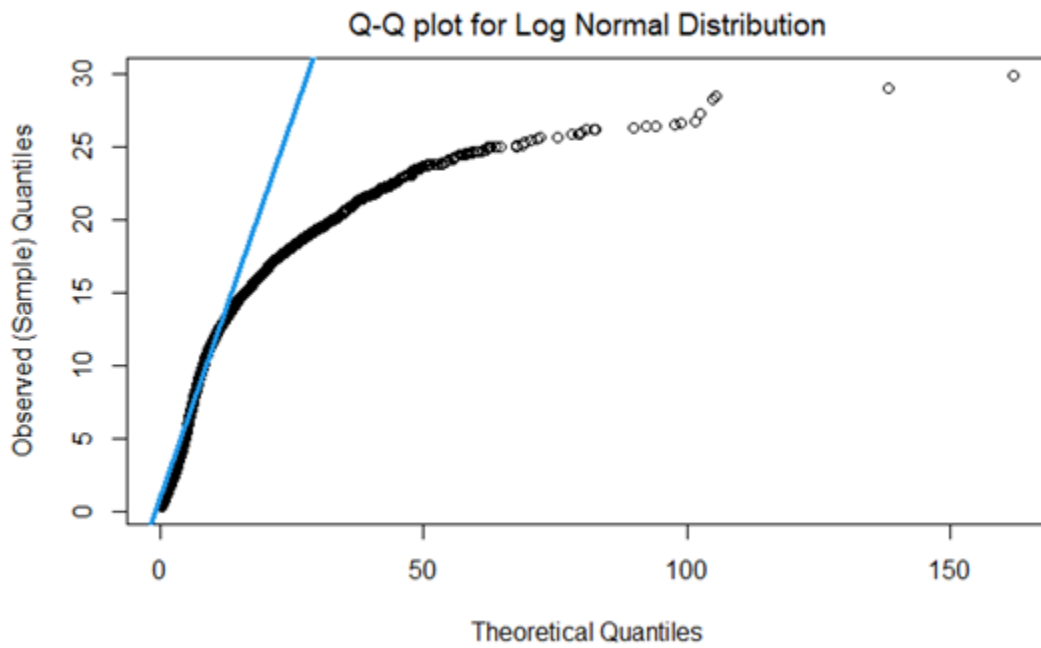


Fig. A.2.3 兩年逐時風速 Lognormal QQ-Plot