風力潛能個案研究分析

陳美蘭
工業技術研究院/能源與環境研究所

摘要

一個好的風力發電場址必須具備的首要開發條件就是風能良好且風能穩定，為了提高台灣地區風速資料的空間解析度，作為篩選風力發電開發場址與單一場址風力潛能評估依據之參考，本研究內容將以氣象數值模式預測台灣地區高解析度的風場資料為目標，利用 Weather Research and Forecast Modeling System 進行風場模擬個案研究分析, 探討台灣地區風力潛能分布情形。

I. 前言

目前普遍被使用於風力資源評估的中尺度模式有 KAMM（Karlsruhe Atmospheric Mesoscale Model；Landberg, 2001）、MM5（The Fifth-Generation NCAR / Penn State Mesoscale Model）、WRF（Weather Research and Forecasting Modeling；William, 2005）、MesoMAP（Brazil Mining and Energy Ministry, 2001），主要概念是將現成的全球氣象網格資料針對特定地區利用進行風場模擬，可以提高空間資料的解析度，彌補觀測資料的不足。丹麥 RISØ 國家實驗室所發展 KAMM/WAsP Method（Frank, 2001）是目前應用最廣泛的研究方法，其利用 KAMM 模式模擬受地形影響所反應出來的風場，結合 WAsP 風能評估軟體的分析，以構成大區域範圍之風能特性，且具有一定程度的參考價值。所以當特定場址鄰近地區無任何觀測資料可作為分析或參考依據時，透過中尺度數值模擬結合局部評估風能之方法，可提高資料的空間與時間解析度，以彌補長時間觀測資料之不足，進而有效性及快速性地評估場址風能。

本研究將利用中尺度數值模式 Weather Research and Forecasting Model System （以下簡稱 WRF）作為模擬工具，以台灣地區 2km×2km 解析度的風場資料為目標，模擬真實個案的風場分佈情形，並分析觀測站的風速資料以進行診斷分析。

II. 初始化與模式設計

WRF 數值模式可設定為可壓縮、非靜力歐拉方程（nonhydrostatic Euler equations）的動力積分解，方程式的變數具有動量守恆的特性（Ooyama, 1990）；WRF 模式方程式中已知變數有乾空氣質量（mu）、速度（u、v、w）、位溫（potential temperature）、重力位（geopotential），而非保守變數（例如溫度、氣壓、密度）由已知保守之變數來診斷。WRF 模式的垂直座標是採用追隨地勢的座標（Laprise, 1992），水平及垂直向可使用 2nd order～6th order 的平流選項作為空間離散化之選擇；並且具有多重巢狀網格的功能，對於不同尺度間之交互作用可以有較好的解析及模擬。WRF 模式對於不同的大氣物理過程也提供許多不同的參數化選項，可作為降水的物理過程、地表能量收支、地表邊界層的處理和大氣輻射過程等現象模擬。以下說明本研究所使用的初始條件與側邊界條件，以及模式設計的方法。

第一初始化的部分，首先處理模擬的地圖投影部份，在 WRF 模式中計算網格時，Δx 和 Δy 是固定的，所以隨著緯度的不同，網格大小應隨地球表面的直徑而調整，考量台灣位於中緯度地區，故選用藍伯特保角投影法（Williams, 1980），隨後將地形與地表之特徵建立且內差至模式之網格中，本研究中所使用的網格地形資料主要是以東亞地區為主，包含 USGS 地形地貌資料（30-second）、16 種土壤分類資料、綠色植被資料（0.15 degree）、地表年平均溫度（1 degree）、

反射率（0.15 degree） 以及斜率資料（1 degree），透過此資料的輸入，可以讓模式得以解析地形地貌的差異，接著輸入美國 NCEP Final Analysis 之全球氣象觀測分析資料（水平空間解析度：1°X1°；垂直空間解析度：27 層；時間解析度：6 小時），產生模式中網格的初始場（參見圖 1）。

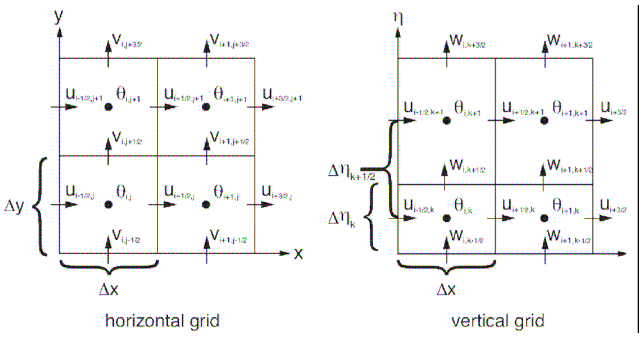

圖 1：網格初始場 Δx、Δy 與 $\Delta\eta$ 的定義

第二模式設計的部分，在水平方向使用三層巢狀網格，內差方式採 Arakawa-C grid staggering，三層巢狀網格設計方式如圖 2 所示，第一層為涵跨東亞地區，網格間距是 18 km，x 方向有 120 個格點，y 方向有 100 個格點；第二層為包含台灣地區及海峽，網格間距是 6 km，x 方向有 151 個格點，y 方向有 166 個格點；第三層為僅有台灣地區及部分離岸，網格間距是 2 km，x 方向有 196 個格點，y 方向有 271 個格點，所以在 2 km 的解析度上，台灣地區及離岸部分可有 53116 個格點。垂直空間解析度：採 η 追隨地勢的座標（Laprise, 1992），由模式頂（η=1.0）至模式底（η=0）共 15 層。

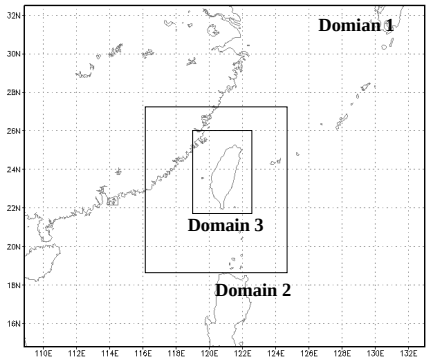

圖 2：三層巢狀網格設計

第三參數設定的部分，時間積分採用積分時間分割法（The time-split RK3 scheme；Skamarock, 2002）、物理過程中微物理採用 Purdue Lin scheme（Lin et al., 1983）、積雲參數選用 Lin et al.scheme、地面層採用 Monin-Obukhov scheme、Land-Surface 採用 Noah land-surface model、邊界層參數化選用 Yonsei University (YSU) PBL、大氣輻射中長波輻射選用 option-rrtm scheme、短波輻射選用 option-Dudhia scheme；邊界條件採用特殊側邊界條件進行真實個案的模擬；多重網巢採用 two-way，可將尺度較小的擾動回饋至粗網格中。模擬作法是進行 2006 年真實個案的模擬，每兩天模擬一次，每次模擬時間為 48 小時，每隔 6 小時更新一次大尺度邊界條件，模式每小時有一筆輸出。

III.診斷分析

蒐集 26 個中央氣象局局屬測站以及 3 座工研院專為評估風力發電場所設置 60 m 高風速塔之 2006 年逐時風速風向觀測資料（10 m），來驗證本模式每小時 10 m 風場（U10、V10）輸出結果。有關模擬準確性可由平均誤差（*ME*）、均方根誤差（*RMSE*）、均方根向量誤差（*RMSVE*）

等指標來量化模擬結果的優劣，各指標定義如下：

$$ME = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(O_i - F_i) \tag{1}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(O_i - F_i)^2} \tag{2}$$

$$RMSVE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(u_i^O - u_i^F)^2 + (v_i^O - v_i^F)^2} \tag{3}$$

其中O代表觀測值；F 代表模擬值。

將觀測值與模擬值針對風向、風速、u 分量與 v 分量依照上述指標進行統計，其結果如

表 1 所示，在風速的部分，平均誤差大約介於-4.35 m/s～0.67 m/s、均方根誤差介於 0.24 m/s～4.5 m/s，除了少數幾個測站誤差值小於 1 m/s 之外，其餘大部分的模擬值顯著比觀測值高。在風向的部分，由於是純量統計平均加上遺失的資料較高，就誤差值而言是遠大於風速的部分，其平均誤差介於-47.56°～142.45°、均方根誤差介於 8.97°～171.20°，但是若從均方根向量誤差來判斷其準確性，0.48 m/s～4.23 m/s 的誤差區間也是相近於風速的誤差。

此外，考量中央氣象局局屬測站多位於市區容易受周遭建築物影響，特別針對嘉義新塭（100011）與高雄興達港（100012）10 m 高的觀測資料進行風花圖與風速機率分佈統計，來說明此兩地區的風能特性並與模擬值進行比較，而宜蘭利澤（100013）因為在本研究期間觀測資料不足，故不作特性分析比對。首先由風花圖來說明風向的特性（參見 圖 3），其中嘉義新塭（100011）最頻風向觀測值為 360°、模擬值為 6°；而高雄興達港（100012）最頻風向觀測值為 33°、模擬值為 346°，且模擬值顯著東風偏少。由圖 4 顯示嘉義新塭（100011）風速觀測值介於 0 m/s～4 m/s 比重大於 50%，風速模擬值分布特性與觀測值相近，風速介於 0 m/s～4 m/s 比重亦大於 50%；高雄興達港（100012）其觀測值與模擬值所表現出來的風能特性亦同，風速介於 0 m/s～4 m/s 的比重大於 50%。由於風力發電機的啟動風速介於 2～4 m/s，所以一個好的風場其風速分佈統計圖大於 4 m/s 的風速占比越大越佳。

表 1：風速風向模擬結果統計分析表

測站代號	風向（°）				風速（m/s）				
	AVE	ME	RMSE	Miss	AVE	ME	RMSE	RMSVE	Miss
466880	92.96	-47.56	58.01	0.06%	2.17	-1.97	2.02	1.72	0.00%
466900	133.99	-1.03	18.90	0.02%	1.95	-2.46	2.71	2.42	0.00%
466910	184.13	51.20	72.11	3.93%	2.96	-2.23	2.41	3.72	0.00%
466920	129.61	-7.88	27.26	0.13%	2.58	-0.29	0.40	0.85	0.00%
466930	110.17	-14.06	18.46	1.44%	2.09	-2.83	2.95	2.67	0.00%
466940	118.03	-8.14	17.94	0.30%	3.02	-0.81	0.86	1.38	0.10%
466950	127.06	11.09	19.05	0.01%	7.47	-0.10	0.68	1.62	0.00%
466990	177.32	78.76	83.24	0.03%	3.16	-1.87	2.30	3.01	0.00%
467060	200.61	63.78	77.69	0.77%	2.73	-3.30	3.41	3.85	0.00%
467080	172.67	46.36	56.27	0.16%	2.00	-0.49	0.70	1.54	0.00%
467300	104.58	0.50	8.97	0.00%	7.90	0.84	1.15	1.64	0.00%
467350	95.88	-0.32	13.84	0.00%	3.95	-3.68	3.84	3.67	0.00%
467410	148.89	-4.11	21.64	0.05%	2.99	0.13	0.48	0.70	0.00%
467440	211.70	-27.40	31.70	0.03%	2.27	-0.16	0.50	0.67	0.00%
467480	165.86	18.42	38.50	0.21%	1.84	-0.81	1.01	0.98	0.08%
467490	189.48	39.47	66.11	0.31%	1.58	-1.50	1.70	1.54	0.00%
467530	185.77	16.40	25.15	2.33%	1.20	-1.30	1.50	1.85	0.00%
467540	148.63	57.45	62.58	0.83%	2.39	-4.35	4.50	4.23	0.00%
467571	108.46	-24.41	27.12	0.25%	1.94	-3.13	3.36	3.01	0.00%
467590	124.34	3.71	13.63	0.23%	3.60	-1.17	1.39	1.52	0.00%
467610	139.01	59.27	62.56	0.10%	3.39	-0.04	0.39	0.81	0.01%
467620	222.30	113.21	145.54	0.05%	7.61	-0.51	1.62	4.41	0.00%
467650	188.59	12.42	16.83	0.34%	1.26	0.16	0.24	0.47	0.00%
467660	209.12	125.21	131.79	0.09%	1.85	-3.54	4.05	3.77	0.00%
467770	253.16	142.45	171.20	0.02%	4.63	-2.05	2.57	3.64	0.00%
467780	120.31	-14.65	19.36	0.78%	4.40	0.67	0.84	1.45	0.75%
100011	137.18	10.39	20.58	1.85%	3.27	0.06	0.55	0.48	1.46%
100012	138.69	-36.39	47.12	2.18%	3.01	0.14	0.30	2.05	2.17%
100013	204.75	70.44	83.72	11.14%	1.97	-3.88	3.98	3.44	10.81%

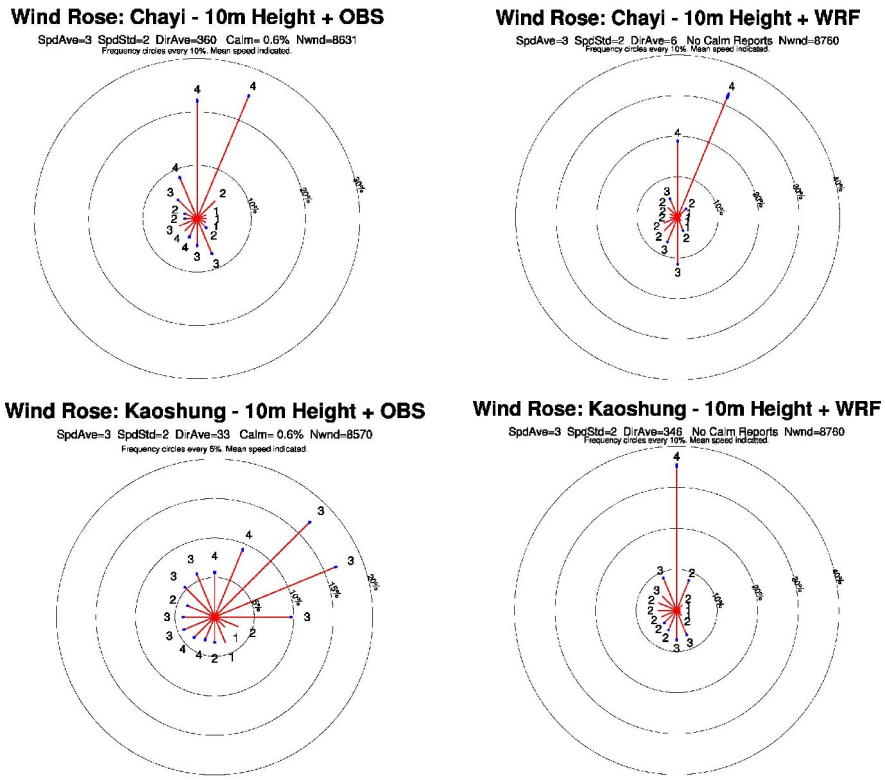

圖 3：嘉義新塭（100011）與高雄興達港（100012）觀測值（OBS）與模擬值（WRF）之風花圖

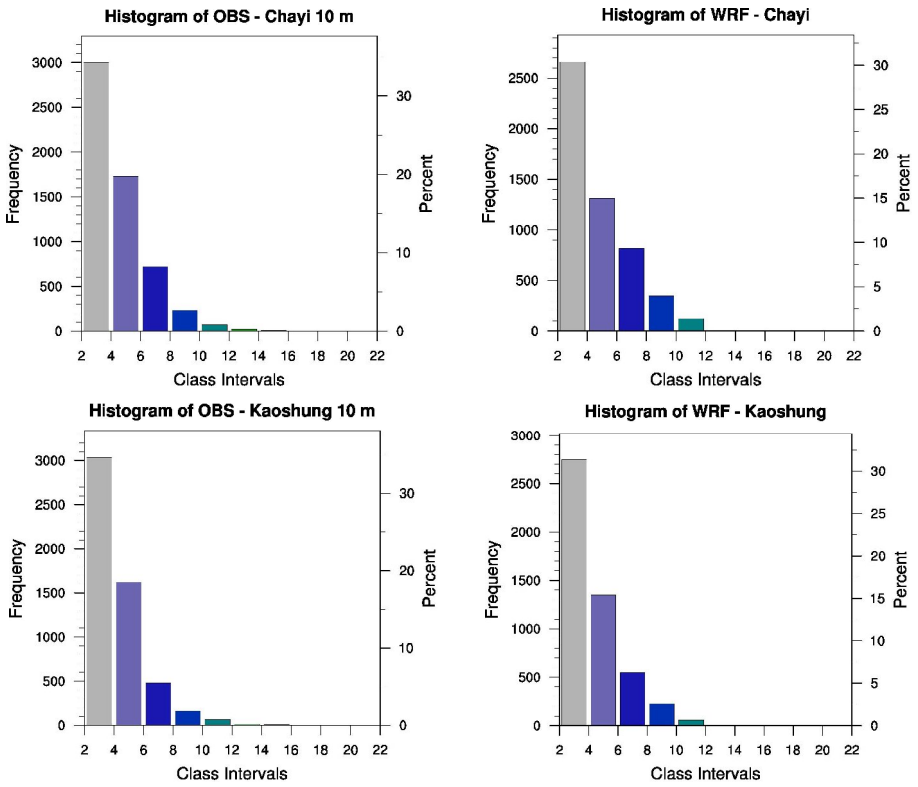

圖 4：嘉義新塭（100011）與高雄興達港（100012）觀測值（OBS）與模擬值（WRF）之風速機率分佈圖

基於上章節模式模擬值與觀測值誤差在一定範圍內，透過本模式 Domain 3 10m 高輸出結果進行年平均風速與風能密度統計，即可瞭解整個台灣地區風能分布情形。圖 5 顯示中央山脈高海拔地區風速約 4 m/s～5 m/s，靠近山區之內陸地區風速最小約 0 m/s～1 m/s，屏東山區平均風速為 6 m/s～7 m/s，台中沿海地區為風速次佳的地區約 5 m/s～6 m/s；由流場分佈顯示台灣地區年平均風向以東北風為主，由於受中央山脈影響，鄰近的風場變化較為複雜。本研究模擬結果就定量而言，單一測站誤差值大約介於 0.48 m/s～4.23 m/s 且是高估的現象；就定性而言，其模擬的分佈狀況跟實際觀測資料大約一致，透過統計分析其結果亦顯示東北季風對於台灣大範圍地區風場的影響甚鉅，且透過模式時間與空間高解析度的模擬分析，可以得到風能特性作為基本選址參考。

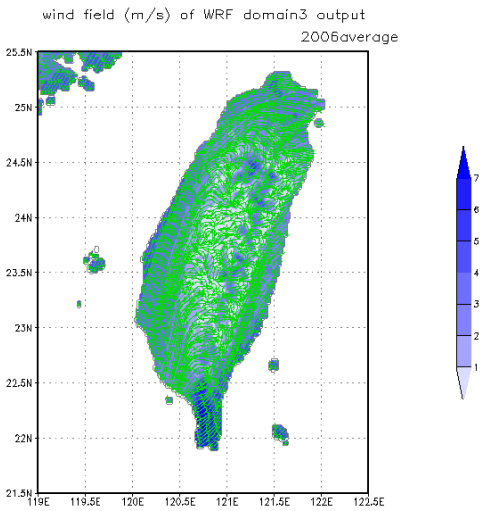

圖 5：WRF Domain 3 10m 2006 年平均風速（m/s）與平均流場分佈圖

IV.結論與討論

風能評估首重風力觀測，設置風速塔進行長期風速觀測，至少需觀測滿一年以上的時間，才能進行年季分析、韋伯機率分佈以及風花圖等，且資料的可用率需達 95%，否則此觀測資料則不具代表性。而本研究雖可以真實模擬大氣近地表面風場變化情形，提供高解析度（2km×2km）的網格資料，對於鄰近地區無觀測資料的開發場址可作為篩選場址的主要依據，但由於可驗證的測站資料太少，此模擬研究未來應與其他觀測資料做結合，以提高模擬之可信度。

由於典型的風能評估是以非常平坦的地形或有些微斜坡的地區為主，近地表風場流動被假設為跟隨地形而變化，但是在複雜地形其風場流動的變化會受陡斜坡度的影響，流場可能會有繞山運動或是越山運動，而目前商業化的風能預測軟體卻無法準確的評估出此現象，導致有風場高估或是低估的可能性。這樣的情況可以透過本模擬方法來解決，但缺點是非常消耗資源與時間，此法亦可配合著重於其他研究重點，例如加強複雜地形所引發的流場或颱風路徑影響等分析，針對有需要之個案進行流場模擬，以彌補目前評估軟體所無法解析的現象。

V. 誌謝

本論文為經濟部能源局委辦「風力發電開發環境建構計畫」（契約編號：97-D0135）研究成果。

VI.參考文獻

[1] Brazil Mining and Energy Ministry. Mapas do Potencial Eólico Anual [cdrom]. In: Atlas Do Potencial Eólico Brasileiro. [Brasilia, Federative Republic of Brazil], e-dea Technologies/ Christianne Steil, 2001.

[2] Frank, H. P., O. Rathmann, N. G. Mortensen, and L. Landberg. The Numericalal Wind Atlas: The KAMM/WasP Method. [Roskilde, Denmark]: Information Service Department, RisØ National Laboratory, June 2001.

[3] Haltiner, G. J., and R. T. Williams, 1980: Numerical prediction and dynamic meteorology. John Wiley & Sons, Inc., 477pp.

[4] Laprise R., 1992: The Euler Equations of motion with hydrostatic pressure as as independentvariable, Mon. Wea. Rev., 120, 197–207.

[5] Lin, Y.-L., R. D. Farley, and H. D. Orville, 1983: Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. J. Climate Appl. Meteor., 22, 1065–1092.

[6] Ooyama K. V., 1990: A thermodynamic foundation for modeling the moist atmosphere, J.Atmos. Sci., 47, 2580–2593.

[7] Wicker, L. J. and W. C. Skamarock, 2002: Time splitting methods for elastic models using forward time schemes, Mon. Wea. Rev., 130, 2088–2097.

[8] WindSCAPE, <http://www.windlabsystems.com/index.htm>

[9] William C. Skamarock, Joseph B. Klemp, Jimy Dudhia, David O. Gill, Dale M. Barker, Wei Wang, Jordan G. Powers, ”A Description of the Advanced Research WRF Version 2”, NCAR/TN–468+STR, NCAR TECHNICAL NOTE, June 2005.