

行政院及所屬各機關出國報告

(出國類別：開會/實習)

離岸風力發電之風力特性及 風場分析研究

服務機關：台灣電力公司

出國人職稱：機械工程師

姓名：陳景林

出國地區：丹麥

出國日期：102年6月14日至6月27日

報告日期：102年8月20日

出國報告審核表

出國報告名稱：離岸風力發電之風力特性及風場分析研究		
出國人姓名(2人以上,以1人為代表)	職稱	服務單位
陳景林	機械資深研究專員	台電綜合研究所
出國類別	<input type="checkbox"/> 考察 <input type="checkbox"/> 進修 <input type="checkbox"/> 研究 <input checked="" type="checkbox"/> 實習 <input checked="" type="checkbox"/> 其他 ICOWES2013 國際會議 (例如國際會議、國際比賽、業務接洽)	
出國期間：102年6月14日至102年6月27日	報告繳交日期：102年8月20日	
出國人員 自我審核	計畫主辦 機關審核	審核項目
<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	1.依限繳交出國報告 2.格式完整(本文必須具備「目地」、「過程」、「心得及建議事項」) 3.無抄襲相關資料 4.內容充實完備. 5..建議具參考價值 6..送本機關參考或研辦 7..送上級機關參考 8..退回補正,原因: <input type="checkbox"/> (1) 不符原核定出國計畫 <input type="checkbox"/> (2) 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容 <input type="checkbox"/> (3) 內容空洞簡略或未涵蓋規定要項 <input type="checkbox"/> (4) 抄襲相關資料之全部或部分內容 <input type="checkbox"/> (5) 引用相關資料未註明資料來源 <input type="checkbox"/> (6) 電子檔案未依格式辦理 <input type="checkbox"/> (7) 未於資訊網登錄提要資料及傳送出國報告電子檔 9..本報告除上傳至出國報告資訊網外,將採行之公開發表: <input type="checkbox"/> (1) 辦理本機關出國報告座談會(說明會),與同仁進行知識分享。 <input type="checkbox"/> (2) 於本機關業務會報提出報告 <input type="checkbox"/> (3) .其他 10.其他處理意見及方式:

報告人： 
 單位主管： 
 主管處主管： 
 總經理： 

副總經理：

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：離岸風力發電之風力特性及風場分析研究

頁數 27 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

陳景林/台灣電力公司/綜合研究所/機械工程師/ (02) 26815424#2210

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：102 年 6 月 14 日至 6 月 27 日

出國地區：丹麥

報告日期：102 年 8 月 20 日

分類號/目

關鍵詞：離岸風力、尾流、複雜地形、Lidar

內容摘要：(二百至三百字)

能源局已啟動「陽光屋頂百萬座」及「千架海陸風力機」兩項計畫，希望能夠提前達成再生能源比重由 8% 提升至 16% 之目標，故風力發電已成為再生能源之重點發展項目。由於離岸風機投資大、風險高、維修不易且本公司均無經驗，故亟需前往先進國家研習此一技術。本次 ICOWES2013 (International Conference on Aerodynamics of Offshore Wind Energy Systems and Wakes) 會議在哥本哈根舉行，每 2 年舉行一次，出席人員約百餘人。本次離岸風力發電國際會議主要主題如下：Offshore wind condition、Rotor aerodynamics、Wake aerodynamics、Wind farm optimization、Aero-hydrodynamics of offshore wind turbines。

此外，本報告並介紹利用 Lidar、測風塔及人造衛星進行北海地區離岸風場之風況量測、利用 CFD actuator disk (ADM-NR 及 ADM-R) 模式進行離岸風場的尾流效應分析及利用 CFD 進行在複雜地形的風能預測。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://report.nat.gov.tw/reportwork>)

目 錄

出國報告書審核表

出國報告書提要

目 錄	.....	I
圖 目 錄	.....	II
表 目 錄	.....	III
第 壹 章 前 言	.....	1
1-1、出 國 緣 由	.....	1
1-2、出 國 目 的	.....	2
1-3、出 國 行 程	.....	3
第 貳 章 離 岸 風 場 之 風 況 探 討	.....	8
第 參 章 離 岸 風 機 之 尾 流 效 應 分 析	.....	14
第 肆 章 複 雜 地 形 之 風 能 預 測	.....	21
第 伍 章 心 得 及 建 議 事 項	.....	27

圖 目 錄

圖 1-1 DTU Main campus 及 Riso campus 位置圖	4
圖 1-2 DTU Lyngby 校區國際會議中心	4
圖 1-3 ICOWES2013 國際會議現場	5
圖 1-4 DNV 辦公大樓	5
圖 1-5 DTU Riso 校區	6
圖 1-6 DTU Riso 校區的試驗風場	6
圖 1-7 DTU Riso 校區 Lidar 應用於風能預測試驗	7
圖 2-1 各種風場量測儀器在空間及時間尺度之適用範圍	8
圖 2-2 北海地區離岸及近岸 Lidar 的裝設位置	9
圖 2-3 北海 Siri Lidar 95m 處測試平台的 α 玫瑰圖及 α 分佈圖	11
圖 2-4 Envisat ASAR 所觀測的海平面風向圖(2011.11.22)	12
圖 2-5 人造衛星數據所得出的風場圖	12
圖 2-6 結合數值分析、人造衛星及量測數據所得出的速度分佈圖	13
圖 3-1 離岸風機的尾流效應	14
圖 3-2 利用 blade element 方法計算風機葉片的升力及阻力	17
圖 3-3 Horns Rev 離岸風場風機佈置	18
圖 3-4 不同風向的量測值與分析值比較圖	19
圖 3-5 不同入流風向的風場速度分佈圖(hub 高度)	19
圖 3-6 不同入流風向的風場亂流強度分佈圖(hub 高度)	20
圖 4-1 二維 Autocad 的 isohypse 地形等高線圖	21
圖 4-2 Arcgis 軟體所製作的地形圖	22

圖 4-3 Gambit 所建立之網格分佈圖及其分析結果的風速分佈圖	23
圖 4-4 風能密度分佈圖	24
圖 4-5 局部的風速分佈圖	24
圖 4-6 CFD 與 WAsP 在 20 個點的風能密度分佈圖	26

表 目 錄

表 4-1 CFD 及 WAsP 在 20 個點的風能比較

25

一、前言

1-1、 出國緣由

鑒於日本福島之核能事故，世界各工業國家紛紛延緩核能發電，如德國、丹麥、瑞士及義大利，並提高再生能源比重。我國為因應此一趨勢，亦制定新能源政策，訂定 2030 年前再生能源比重由 8% 提升至 16%。能源局已啟動「陽光屋頂百萬座」及「千架海陸風力機」兩項計畫，希望能夠提前達成目標。由於目前所使用的風機規範 IEC61400-1 及 IEC61400-3 皆為北歐規範，並未考慮颱風及亂流對於風機之影響。台灣每年夏季均為颱風季節，易造成風機倒塌及風機葉片疲勞破壞等事故，已嚴重影響風力機組的使用率及本公司的形象。

離岸風機投資大、風險高、維修不易且台海地區幾乎每年均有颱風侵襲，故對於離岸風場選址技術及離岸風機之風力特性掌握、尾流效應影響及風機優化佈局等，攸關爾後風機之發電效率、運轉安全及維護成本，已成為建置離岸風機極需探討的迫切課題，惟此方面本公司均無經驗，故亟需派員前往先進國家研習此一技術。為了解各國在離岸風機之發展現況與趨勢及與國際學者進行相互交流，參加 6 月 17~19 日參加丹麥科技大學舉辦之「2013 International Conference on Aerodynamics of Offshore Wind Energy Systems and Wakes」離岸風機國際研討會，該會議係由中國科學院、美國 NREL 及丹麥 DTU 輪流主辦，每 2 年舉辦一次。另外亦參訪 DNV 及丹麥科技大學 Riso 校區，研討離岸風機之風場分析。

1-2、 出國目的

1. **目的：**研習離岸風場選址技術及離岸風機之風力特性、尾流效應影響及風機優化佈局等風力發電技術。
2. **緣起：**鑒於日本福島之核能事故，世界各工業國家紛紛延緩核能發電，如德國、丹麥、瑞士及義大利，並提高再生能源比重。我國為因應此一趨勢，亦制定新能源政策，訂定 2030 年前再生能源比重由 8% 提升至 16%。能源局已啟動「陽光屋頂百萬座」及「千架海陸風力機」兩項計畫，希望能夠提前達成目標。由於目前所使用的風機規範 IEC61400-1 及 IEC61400-3 皆為北歐規範，並未考慮颱風及亂流對於風機之影響。台灣每年夏季均為颱風季節，易造成風機倒塌及風機葉片疲勞破壞等事故，已嚴重影響風力機組的使用率及本公司的形象。惟此方面本公司均無經驗，故亟需派員前往先進國家研習此一技術。
3. **實施要領：**(1)利用中央氣象局資料及測風塔數據，進行 50 年重現期之極限風速及亂流強度分析、(2)依據風場分析的風切、亂流強度及上吹角等數據，篩選適合的風機設置地點、(3)依據 50 年重現期的極限風速及亂流強度，篩選適合的風機機型，如亂流強度超出 IEC61400 之級別，尚需進行疲勞荷重分析、(4)分別從風機之安全係數、運轉策略及設置液壓阻尼器等方面著手，研提颱風及亂流之因應對策。
4. **要求成果：**(1)建立離岸風機風力特性之分析技術、(2)

建立離岸風場尾流效應之評估技術、(3)建立離岸風機對於颱風及亂流之因應對策。

1-3、出國行程

本次出國開會及研習期間為102.6.14~102.6.27，共計14天。民國102年6月14日搭乘新加坡航空班機，經新加坡轉機，於6月15日抵達哥本哈根國際機場，當日轉搭DTB國鐵抵達哥本哈根，翌日起向大會報到；6月17~19日參加ICOWES2013會議；6月20~25日分別參訪DNV及DTU Riso校區；6月26日搭乘新加坡航空班機，經新加坡轉機，於6月27日返回台北。此次開會地點在DTU Lyngby校區國際會議中心舉行，由哥本哈根車站搭乘S-train火車抵達Lyngby，再轉搭巴士即可抵達DTU國際會議中心會館。圖1-1為DTU Main campus及Riso campus位置圖；圖1-2為DTU Lyngby校區國際會議中心；圖1-3所示為ICOWES2013國際會議現場；圖1-4為DNV辦公大樓；圖1-5為DTU Riso校區；圖1-6為DTU Riso校區的試驗風場，為準確量測入流風速故每部風機前面設置1台測風塔；圖1-7為DTU Riso校區將Lidar應用於風能預測之試驗，圖中紅色圈所示處即為Lidar所裝設之位置。

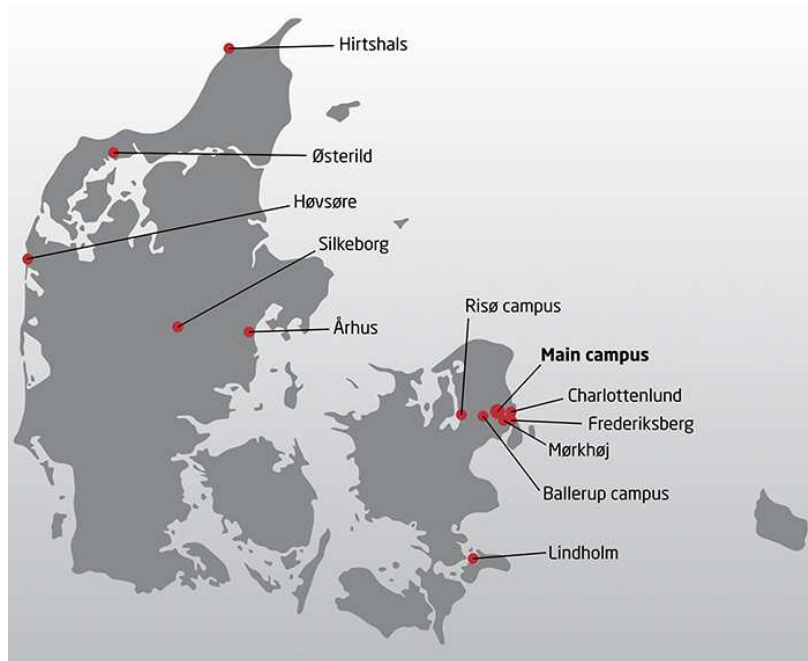


圖1-1 DTU Main campus及Riso campus位置圖



圖1-2 DTU Lyngby校區國際會議中心



圖1-3 ICOWES2013 國際會議現場



圖1-4 DNV辦公大樓



圖1-5 DTU Riso校區



圖1-6 DTU Riso校區試驗風場



圖1-7 DTU Riso校區Lidar應用於風能預測試驗

詳細行程如下：

6/14~15 台北→新加坡→哥本哈根

6/16~19 ICOWES2013 國際會議

6/20~25 DNV

DTU Riso Campus

6/26~27 哥本哈根→新加坡→台北

二、離岸風場之風況探討

北海地區風況量測

EU FP7 計畫NORSEWinD (Northern Sea Wind Index Database)係從2008年~2012年，計畫的目標如下：(1)分析Lidar所量測的風切(wind shear)係數。目前外界已有許多研究計畫利用WRF (Weather Research and Forecasting model)、CFD (Computational Fluid Dynamic)及風洞量測技術來產生風況圖、(2)利用Lidar、測風塔及人造衛星分析所觀測的垂直風切係數。圖2-1為各種風場量測儀器，如Lidar、測風塔、探空氣球、遙控飛機及人造衛星等，在空間及時間尺度之適用範圍。


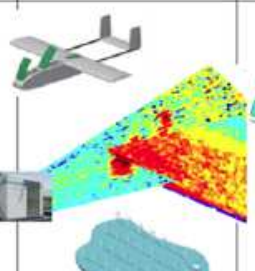
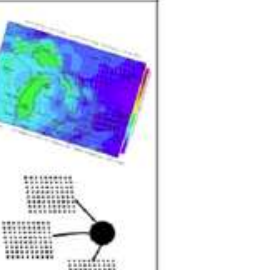
Space-scales	Wind turbine 100's m	Regional/ wind farm 10's km	Mesoscale 100's km
			
Time-scales	Seconds-minutes	Minutes-hours	Hours-days

圖2-1 各種風場量測儀器在空間及時間尺度之適用範圍

測試場址

研究範圍包括Baltic海南部、北海及Irish海。如圖2-2所示係北海在離

岸及近岸Lidar的裝設位置，本研究的Lidar係裝設在現有的平台上。離岸的Lidar裝設點分別命名為Babbage (BAG) –英國；Beatric (BEA)–英國；Fino-3 (FN3) –德國；Horns Rev-2 (HR2) –丹麥；Jacky(JAC)–英國；ORP –比利時；Schooner (SCO) –英國；Siri(SIR) –丹麥及Taqa (PI5)–比利時。在沿海岸的裝設點係Latvia (LAT)及Utsria (UTS) –挪威。大部份的Lidar已先在DTU Hovsore的測風塔進行短時間的測試。大多數(或幾乎所有)的Lidar均通過測試標準，即對於4~16 m/sec的風速範圍(主要係比較60、80、100及116 m高的風速)，其線性回歸的斜率在0.98~1.01間及線性相關係數(R^2)>0.98。Lidar設備安裝完成後，又對少數Lidar進行測試，結果顯示情況良好，足以進行後續半年甚至2年以上之量測試驗。

另一項工作係進行工作平台對於風場扭曲(distorsion)之影響評估，結果顯示工作平台2.4倍高處，此風場扭曲之影響即不明顯，故在100 m高處所獲得的觀測值，適合用來進行風切分析。



圖2-2 北海地區離岸及近岸Lidar的裝設位置

Lidar量測結果

風速的垂直分佈曲線與風的穩定性、表面粗糙度及邊界層高度有關。Lidar的數據分析可得出最感興趣的不同季節、24小時及12風向的風切係數 α 值，故可得出所謂的 α 玫瑰圖(alpha rose)，類似於風花圖(wind rose)。圖2-3所示為北海Siri Lidar 95m 處測試平台的 α 玫瑰圖及 α 分佈圖，Siri數據的量測時間為2010.2.2~2011.5.2；量測高度為距離海平面高85及105 m處。由圖中可知，在每個風向的 α 值均不同，其範圍為-0.8~1.0，負值係表示高處的風速較低處的風速低。大多數的風切係數 α 值稍大於0，一般風機最常使用的風切係數0.2亦在 α 平均值的附近。Lidar量測數據的最主要優點是可得到評估大型離岸風場風資源所需的垂直向風速分佈。

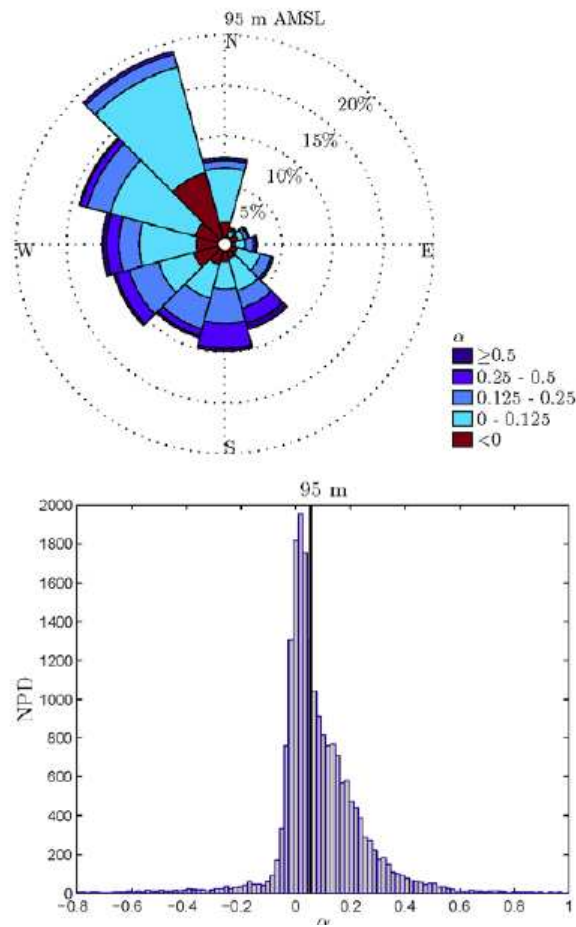


圖2-3 北海Siri Lidar 95m 處測試平台的 α 玫瑰圖及 α 分佈圖

人造衛星量測結果

圖2-4為Envisat ASAR人造衛星在2011.11.22所觀測的海平面風向圖，圖2-5為由人造衛星數據所mapping得出的風場圖。圖2-6為結合數值分析、人造衛星及量測數據所得出的離岸風場速度分佈曲線。

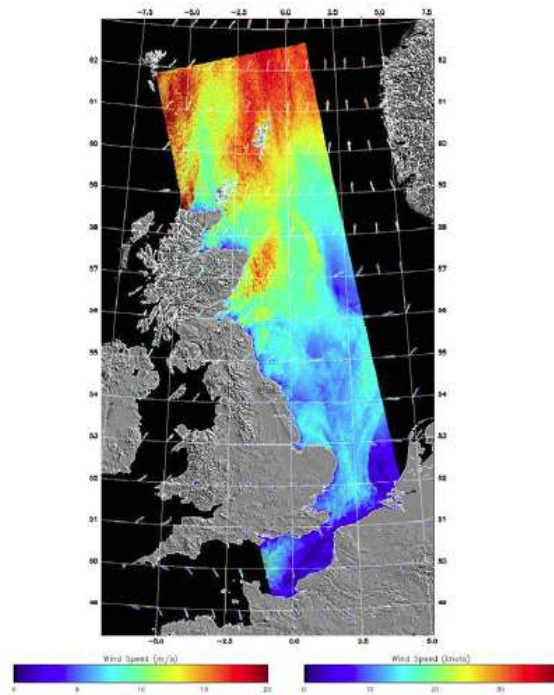


圖2-4 Envisat ASAR所觀測的海平面風向圖(2011.11.22)

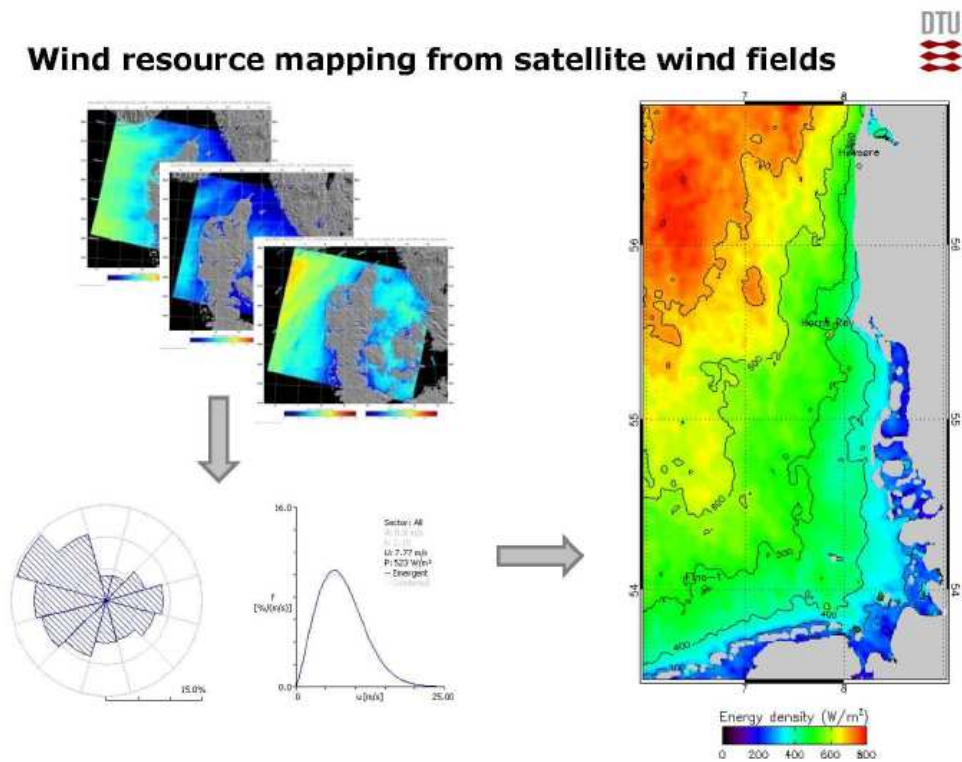


圖2-5 人造衛星數據所得出的風場圖

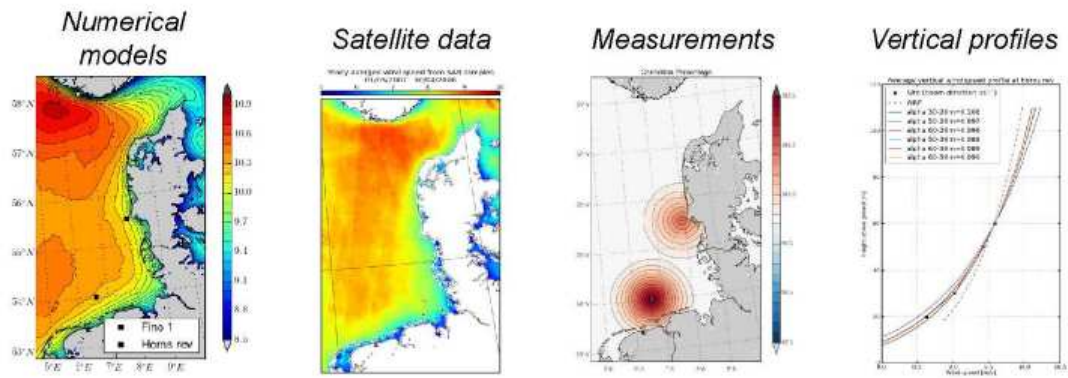


圖2-6 結合數值分析、人造衛星及量測數據所得出的速度分佈

三、離岸風機之尾流效應分析

當許多風機設置在一有限的風場內，由於風機的尾流效應(wake effect)不可避免的將造成風機的發電量降低，發電量的降低多寡與入流的風況條件、大氣的穩定性、海平面特性、風向及風機的排列方式有關。在大型的離岸風場(如 Horns Rev, Lillgrund, Middelgrunden, and Nysted)，尾流效應所造成的平均發電量損失約 10%~23%。如圖 3-1 所示為離岸風機的尾流影響範圍，由於海平面地勢平坦，尾流效應之影響範圍非常深遠，故離岸風機可說是在 wake 中運轉。



圖 3-1 離岸風機的尾流效應

故利用數值分析方法準確的預測尾流所造成的能量損失及降低上游的尾流對下游風機之影響，係離岸風機選址(wind turbine siting)的必要工作。目前已有許多計算尾流效應的模式，例如較簡單且直接的解析解尾流模式或較複雜的數值分析尾流模式。某些解析解的尾流模式，如 Park

模式，已被許多工業界軟體使用，如 WAsP、WindPro 及 WinFarmer。至於數值分析尾流模式一般係使用 1D momentum theory 或 blade-element theory 進行穩態或暫態的模擬分析，暫態的尾流分析在時間上及空間上可得到更詳細的亂流訊息，惟此需要更強大的電腦運算能力及更精確的亂流模式。Horns Rev 離岸風場係使用解析解尾流模式及數值分析尾流模式進行風場規劃設計，所預測結果在 wind sector $< 10^\circ$ 時與量測數據並不吻合。尤其在入流風向與風機平行時，所預測的發電量竟低估 55%，由此可知在風場設計的分析工具，其亂流模式及風機的參數化(parameterization)仍然需要精進。

在以往的研究中，亂流模式係使用 Reynolds-averaged Navier Stokes (RANS) 或 large-eddy simulation (LES) models，而風機的參數化則使用 actuator disk-/line-based models。直到最近，許多的研究證明利用 LES 模式結合 Lagrangian scale-dependent dynamic model 可得到較佳的亂流結果。本研究係使用 LES 模式及 Lagrangian scale-dependent dynamic model 模擬 the sub-grid-scale (SGS) stress，至於風機參數化則使用兩種 actuator-disk type models，亦即傳統的 actuator-disk model (ADM-NR) 及 the actuator-disk model with rotation (ADM-R)。

Large Eddy Simulation

控制方程式如下：

質量守恆：

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0$$

動量守恆：

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \tilde{u}_j \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{p}^*}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}^d}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{f_i}{\rho} + \mathcal{F}_i,$$

Actuator-disk model without rotation (ADM-NR)

此模式亦即傳統的 Rankine-Froude actuator-disk 模式，係一個非常普遍的風機數值模式，已內建在 CFD 程式或商用軟體(如 WindSim)中。ADM-NR 模式僅考慮一均勻的軸向負載作用在圓盤上，忽略尾流的旋轉效應，其軸向力公式如下：

$$F_x^{ADM-NR} = \frac{\rho}{2} \langle \tilde{u}_0 \rangle^2 C_T \cdot A_e = \frac{\rho}{2} \frac{\langle V_x \rangle^2}{(1-a)^2} C_T \cdot A_e,$$

Actuator-disk model with rotation (ADM-R)

如圖 3-2 所示，利用 blade element 方法計算風機葉片的升力及阻力，其各種作用力的關係式如下：

Lift force: L	$= 0.5 \rho V_{rel}^2 c \Delta r C_L$
Drag force: D	$= 0.5 \rho V_{rel}^2 c \Delta r C_D$
Relative wind velocity: V_{rel}	$= \sqrt{V_x^2 + (\Omega r + V_\theta)^2}$
Angle of relative wind: ϕ	$= \tan^{-1} [V_x / (\Omega r - V_\theta)] = \theta_p + \gamma + \alpha$
Normal force: F_x	$= L \cos \phi + D \sin \phi$
Tangential force: F_θ	$= L \sin \phi - D \cos \phi$

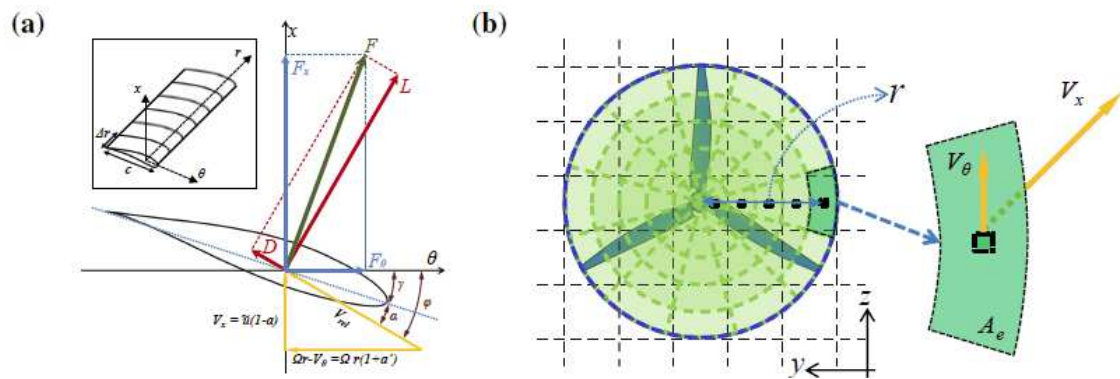


圖 3-2 利用 blade element 方法計算風機葉片的升力及阻力

對於大型風場的模擬，最有效率的方法係使用旋轉的 actuator-disk 概念來計算葉片上的分佈力。模式中有關發電量、軸力矩及相關力，公式如下：

Power output: P_O	$= P_R \cdot \eta$
Rotor power: P_R	$= Q \cdot \Omega$
Total (shaft) torque: Q	$= \sum r \cdot F_{\theta}^{ADM-R}$
Normal force : F_x^{ADM-R}	$= \frac{\rho V_{rel}^2}{2} \frac{Bc}{2\pi r} (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) \cdot A_e$
Tangential force : F_{θ}^{ADM-R}	$= \frac{\rho V_{rel}^2}{2} \frac{Bc}{2\pi r} (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) \cdot A_e$

Horns Rev 離岸風場及風機特性

Horns Rev 離岸風場係位在北海，距離丹麥最西部海岸 15 公里，由 80 部 Vestas V-80 2MW 風機組成，風場範圍為 20Km²，風機 hub 高度 70 m(海平面高)，葉片直徑 80 m，間距至少 7D 以上。風場規劃成菱形狀(10 row × 8 column)，由北旋轉 7 度，如圖 3-3 所示。

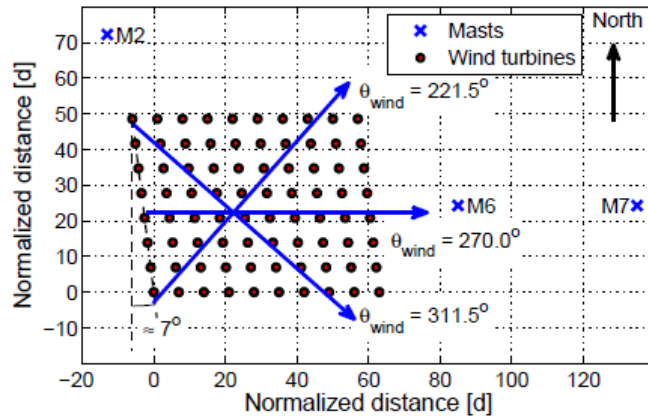


圖 3-3 Horns Rev 離岸風場風機佈置

分析結果

分別使用 ADM-R 及 ADM-NR 模式進行模擬，入流風向為 265° ~ 275° ，發電量的預測值與量測值的最大差異係在第 2 排風機上，ADM-NR 及 ADM-R 模式的誤差分別為 17%及 6%，分析結果如圖 3-4 所示。在本研究中亦使用 2 種風場的分析軟體，WindSim 及 WAsP 進行比較。在 WindSim 模擬時使用 ADM-NR 模式及穩態的標準 k- ϵ 模式；在 WAsP 模擬時係使用線性的尾流模式，入流風速則使用 Weibull 分佈，圖 3-5 為不同入流風向的風場速度分佈；圖 3-6 為不同入流風向的風場亂流強度分佈圖。

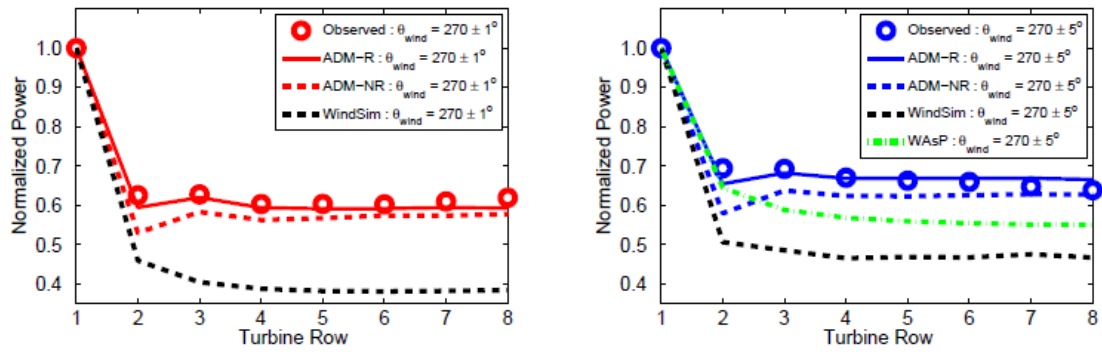


圖 3-4 不同風向的量測值與分析值比較圖

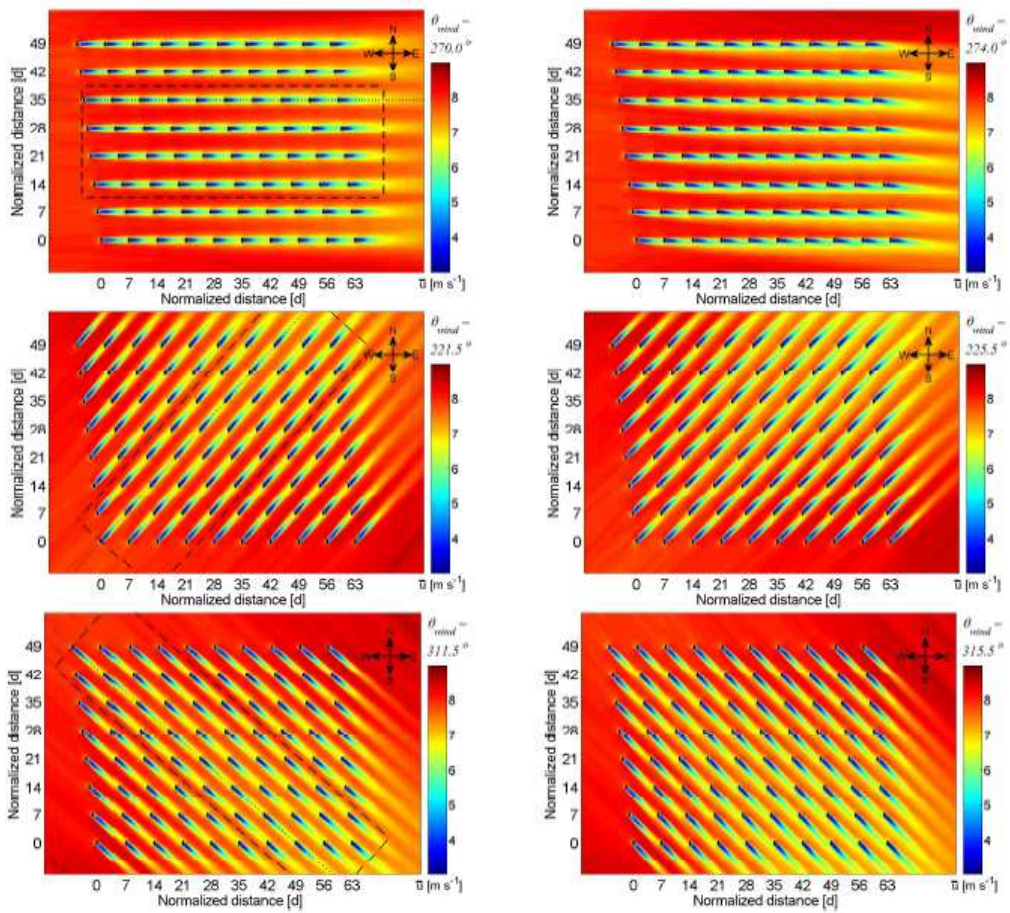


圖 3-5 不同入流風向的風場速度分佈圖(hub 高度)

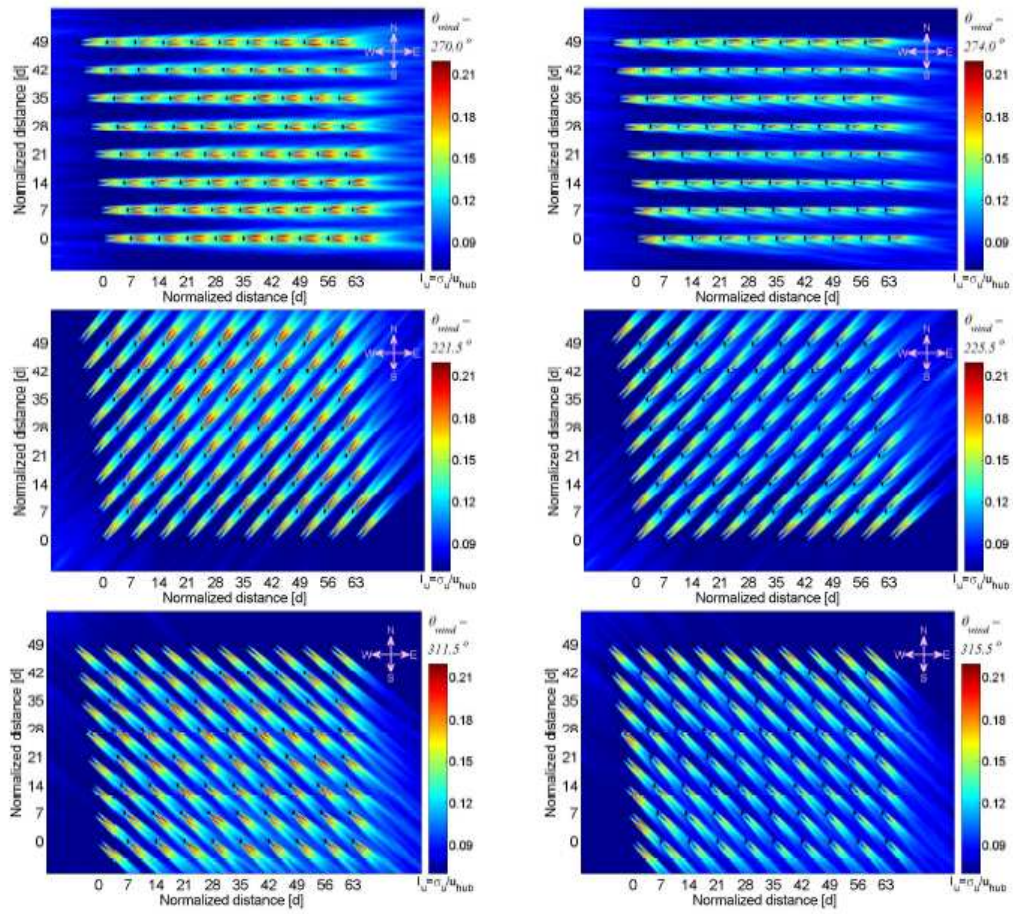


圖 3-6 不同入流風向的風場亂流強度分佈圖(hub 高度)

四、複雜地形之風能預測

WAsP 係使用線性模式，對於平坦地形的風能預測可得到較佳的結果，然而對於較複雜的地形則產生較大的誤差。本研究係使用 Fluent 進行複雜地形的風能預測，前處理軟體使用 Gambit 及 ARGIS，後處理軟體則使用 TECPLOT。風場的複雜地理圖形一般係使用 Autocad 的 isohypse 等高線描繪，而利用 CFD 進行風場分析則需要將複雜的地理圖形數位化，以便轉換成物理模型。Argis 係一套功能強大的地理圖資軟體，可處理複雜的地理圖形、圖形數位化等，為業界最被廣泛使用的軟體。本研究係利用 Argis 程式將 Autocad 的等高線檔，如圖 4-1 所示，轉換成 dem 的座標檔。圖 4-2 為 Arcgis 軟體所製作的地形圖。

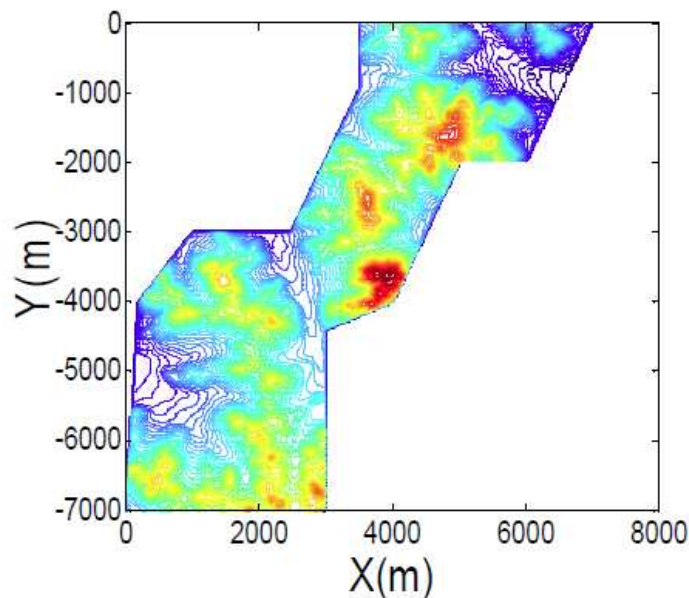


圖 4-1 二維 Autocad 的 isohypse 地形等高線圖

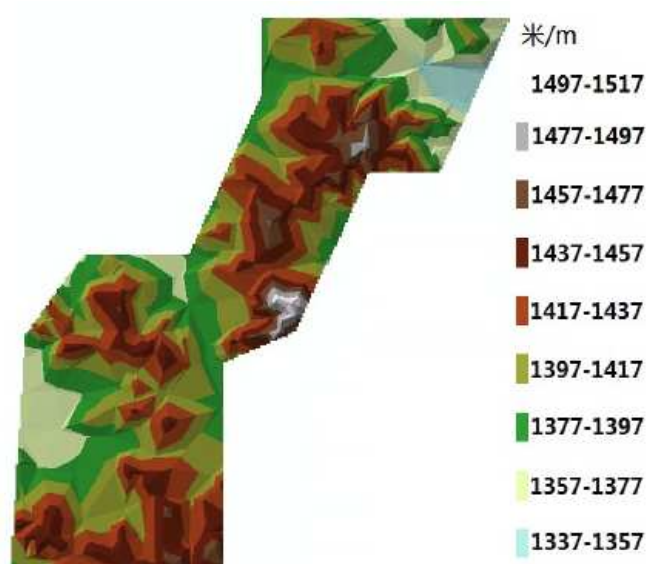


圖 4-2 Arcgis 軟體所製作的地形圖

依據數位化後之複雜地理圖形，再利用 Gambit 軟體進行幾何模型的建檔。地理圖形之範圍為 7,000 m × 7,000 m × 500 m 高，高度 500 m 被分為 0~50 m、50~200 m 及 200~500 m 三個區間，其網格尺寸分別為 5 m、10 m 及 30 m。利用 Fluent 進行 12 入流方向的風場分析。

Navier-Stokes 方程式如下：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{u}) = 0$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \text{div}(\rho u \bar{u}) = \text{div}(\mu \text{grad } u) - \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \text{div}(\rho v \bar{u}) = \text{div}(\mu \text{grad } v) - \frac{\partial p}{\partial y}$$

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} + \text{div}(\rho w \bar{u}) = \text{div}(\mu \text{grad } w) - \frac{\partial p}{\partial z}$$

k-ε 紊流模式如下：

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \text{div}(\rho k \bar{u}) = \text{div}(\Gamma_k \text{grad } k) + G - \rho \varepsilon$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon \bar{u}) = \text{div}(\Gamma_\varepsilon \text{grad } \varepsilon) + \frac{C_{1\varepsilon}}{k} G - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

分析結果

圖 4-3 為利用 Gambit 所建立之網格分佈圖及其分析結果的風速分佈圖。圖 4-4 所示為風能密度的分佈圖。圖 4-5 為局部的風速分佈圖，由圖中可知，背風面的風速較迎風面小，顯示在背風面的風能損失。

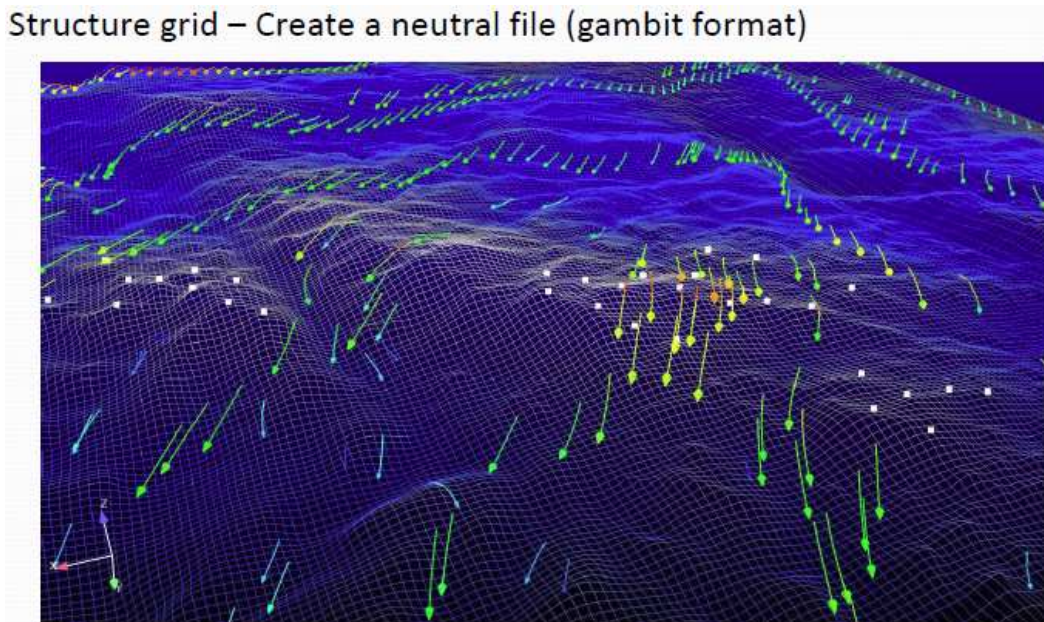


圖 4-3 Gambit 所建立之網格分佈圖及其分析結果的風速分佈圖

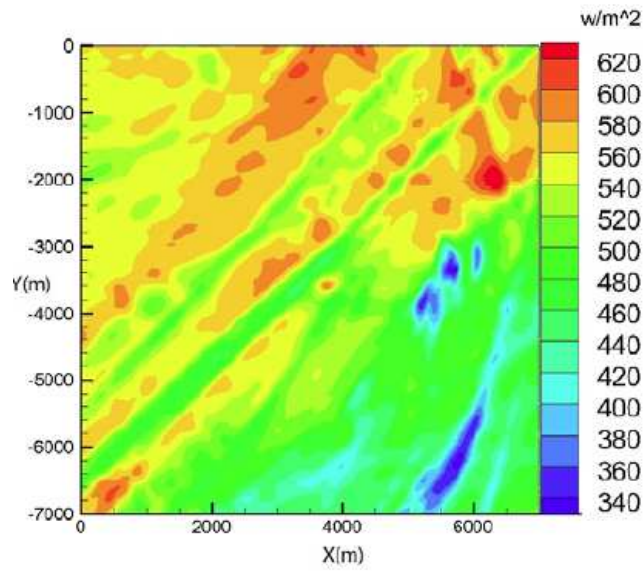


圖 4-4 風能密度分佈圖

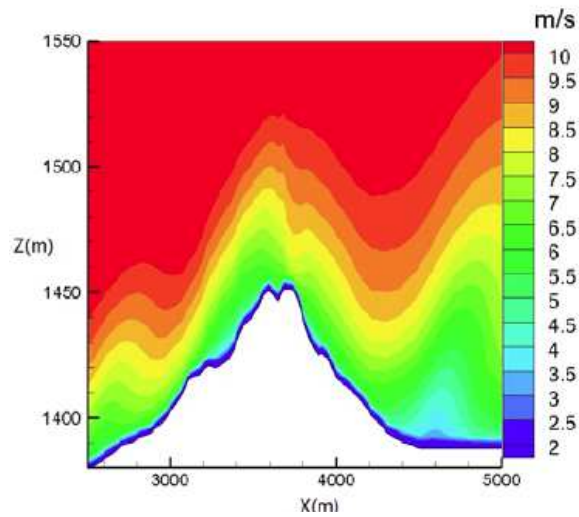


圖 4-5 局部的風速分佈圖

與 WAsP 分析結果比較

表 4-1 為 CFD 及 WAsP 在 20 個點的風能比較，由表中可知，點 6~20 CFD 的分析結果約為 100~200 w/m^2 ，較 WAsP 的分析結果小。

表 4-1 CFD 及 WAsP 在 20 個點的風能比較

Points	X/m	Ym/	Z/m	CFD/ (w/m ²)	WAsP/ (w/m ²)	Difference/ (w/m ²)
1	150.8621	-6849.14	1428.775	352.0798	378.3076	26.2278
2	452.5862	-6547.41	1487.5	568.931	432.9725	-135.9585
3	754.3103	-6245.69	1459.047	394.0908	412.5912	18.5004
4	1056.034	-5943.97	1415.502	214.5136	354.0609	139.5473
5	1357.759	-5642.24	1428.367	319.9514	377.6848	57.7334
6	1659.483	-5340.52	1419.449	215.2356	362.272	147.0364
7	1961.207	-5038.79	1447.859	270.9516	402.0661	131.1145
8	2262.931	-4737.07	1434.054	195.2646	385.8512	190.5866
9	2564.655	-4435.34	1438.466	246.8089	391.5182	144.7093
10	2866.379	-4133.62	1419.913	149.0633	363.1724	214.1091
11	3168.103	-3831.9	1435.779	163.1859	388.1296	224.9437
12	3469.828	-3530.17	1480.485	271.2416	428.591	157.3494
13	3771.552	-3228.45	1455.358	220.3219	409.3249	189.003
14	4073.276	-2926.72	1452.328	235.1058	406.4986	171.3928
15	4375	-2625	1441.018	205.4146	394.5711	189.1565
16	4676.724	-2323.28	1459.547	265.2732	413.0201	147.7469
17	4978.448	-2021.55	1482.582	293.8114	429.9375	136.1261
18	5280.172	-1719.83	1477.5	316.9961	426.6165	109.6204
19	5581.897	-1418.1	1433.579	194.8793	385.2088	190.3295
20	5883.621	-1116.38	1415.281	254.5544	353.5692	99.0148

圖 4-6 為 CFD 與 WAsP 在 20 個點的風能密度分佈圖，由圖中可知，大多數 WAsP 的分析結果均較 CFD 的分析結果高，此結果與工程上的認知一致。亦即在複雜地形 WAsP 的分析結果較風場的量測值高，此係因為 WAsP 係使用風速與高度相關的 Lissaman 模式，而忽略地形所造成的流體分離效應；反之，CFD 數值模擬考慮地形效應所造成的流體分離現象，故分析結果與實際的風能分佈較一致。

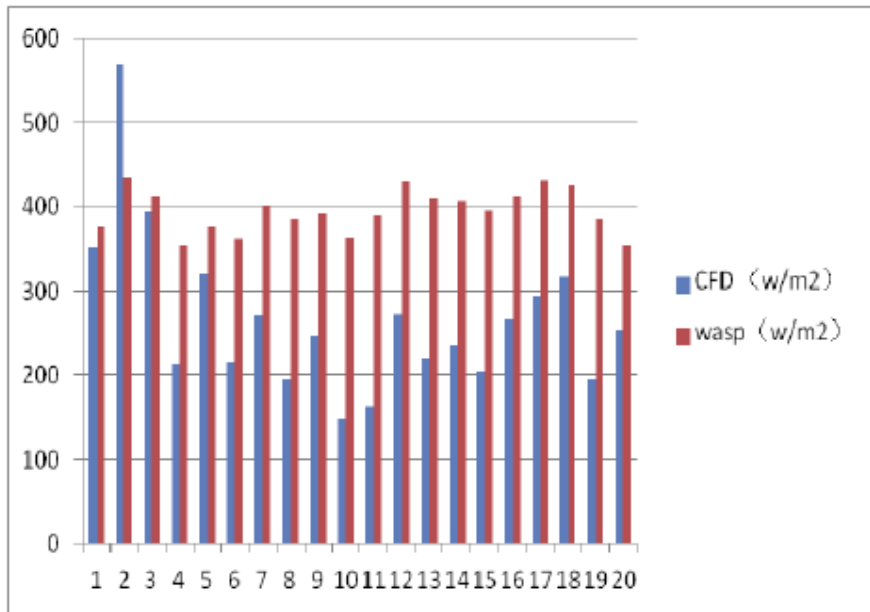


圖 4-6 CFD 與 WAsP 在 20 個點的風能密度分佈圖

五、心得及建議事項

- 1、Lidar 由於其攜帶方便，常用於短期的風場量測；測風塔則用於長期性的定點風場量測；人造衛星則應用於大範圍的風場量測。國外的大範圍離岸風場量測已有結合數值分析、測風塔及人造衛星技術之應用案例，惟本所對此方面甚為陌生，未來如有業務上之需要，可參考國外此方面之先進技術。
- 2、離岸風場因地勢平坦其尾流效應的影響範圍極廣，故離岸風機可說是在 wake 中運轉。由於離岸風機陣列的尾流效應彼此相互影響，風場非常複雜，目前分析離岸風場尾流效應的模式很多，惟精確度仍尚待改進，先進國家正投入許多研究人力進行研發。目前仍以 LES 模式結合 Lagrangian scale-dependent dynamic model 可得到較佳的尾流結果。
- 3、WAsP 風能分析軟體僅適用於平坦地形，對於複雜地形的風場分析則需使用 CFD 數值模擬。
- 4、此次參加 ICOWES2013 國際會議，可藉此機會擴大國際視野並與歐洲、美國、日本及大陸等專家進行技術交流，達到與國際接軌之目的。