

MOTC-IOT-104-H2EB001f

# 104 年臺北港風與波浪關連性之 統計特性研究



交通部運輸研究所

中華民國 104 年 12 月

MOTC-IOT-104-H2EB001f

# 104 年臺北港風與波浪關連性之 統計特性研究

著者：衛紀淮、張憲國、劉勁成、陳蔚瑋、何良勝

交通部運輸研究所

中華民國 104 年 12 月

104 年臺北港風與波浪關連性之統計特性研究

ISBN 號碼  
及條碼

GPN :

交通部運輸研究所

## 交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：104 年臺北港風與波浪關連性之統計特性研究			
國際標準書號（或叢刊號）	政府出版品統一編號	運輸研究所出版品編號	計畫編號 MOTC-IOT-104-H2EB-001f
本所主辦單位：港研中心 主管：邱永芳 計畫主持人：何良勝 研究人員：衛紀淮 聯絡電話：04-26587105 傳真號碼：04-26560661		合作研究單位：國立交通大學 計畫主持人：張憲國 研究人員：劉勁成、陳蔚璋 地址：新竹市大學路 1001 號 聯絡電話：03-5712121#54987	
		研究期間 自 104 年 3 月  至 104 年 12 月	
關鍵詞：資料分類、湧浪、成熟波、回歸分析、適應性類神經模式			
摘要： 本研究使用港研中心在臺北港外海觀測樁量測的 2010 及 2012 年的波浪及風速資料，以回歸分析及適應性類神經模式建立二者關係。由分析結果顯示 2012 年的資料比 2010 年較散亂，但其統計分布相差不多，因此可由 2010 年資料的回歸結果直接應用來推算 2012 年的風速波浪。 本研究利用 PM 波譜為成熟波譜的示性波高及尖峰週期與風速關係，將臺北港觀測樁上的風速及波浪合適地分類成湧浪、成熟波及成長波三種。本研究的波浪分類方式可以合適地分類出相似統計特性的波浪及風速資料，回歸更好的波浪與風速的關係。證實其 PM 波譜的公式的 19.5m 的風速轉為 10m 的風速的風速冪次方的指數 1/7 是合宜的。以 2010 年資料的模式檢驗指標為例， $R^2$ 從不分類的 0.6286 增加至 0.7285，RMSE 也從不分類的 0.4151m 降至 0.3549m。 以風向方位角區分海風、陸風、西南風及東北風等四組，經三種分區風向方位角測試後，以 Steyn and Faulkner (1986) 提出的向岸風應發生在日出後兩小時至日落後兩小時間，且應至少持續兩小時的結論原則，即為 $0^\circ$ 、 $70^\circ$ 、 $205^\circ$ 、 $275^\circ$ ，為最合適。回歸 2010 年風向分區的資料，獲得全年波高與實測值的模式檢驗指標較佳於不考慮分區的結果，但回歸風向分區樣本的模擬能力稍差於模擬波浪分類的樣本。回歸波浪分類及風向分區成 12 組資料的檢驗指標，證實同時波浪分類及風向分區的波高與風速回歸明顯優於只考慮風向分區或波浪分類的結果。 以風速分量為輸入參數的適應性類神經模式 ANFIS(u,v) 比回歸模式及單純輸入風速的適應性類神經模式 ANFIS-U 更適合建立波高與風速的關係。增加合適的外圍風速的多點模式比只以觀測樁的單點模式適合建立波高與風速的關係。			
出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
104 年 12 月	116		凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
機密等級： <input type="checkbox"/> 限閱 <input type="checkbox"/> 機密 <input type="checkbox"/> 極機密 <input type="checkbox"/> 絕對機密 （解密【限】條件： <input type="checkbox"/> 年 月 日解密， <input type="checkbox"/> 公布後解密， <input type="checkbox"/> 附件抽存後解密， <input type="checkbox"/> 工作完成或會議終了時解密， <input type="checkbox"/> 另行檢討後辦理解密） <input checked="" type="checkbox"/> 普通			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

**PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS**  
**INSTITUTE OF TRANSPORTATION**  
**MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS**

TITLE: 2015 Statistical correlation between winds and waves at Taipei Harbor			
ISBN(OR ISSN)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER	IOT SERIAL NUMBER	PROJECT NUMBER MOTC-IOT-104-H2EB 001f
DIVISION: Center of Harbor & Marine Technology DIVISION CHIEF: Chiu Yung-Fang PRINCIPAL INVESTIGATOR: Ho Liang-Sheng PROJECT STAFF: Wei, Chi-Huai PHONE: (04)26587105 FAX: (04)26560661			PROJECT PERIOD FROM 03/2015 TO 12/2015
RESEARCH AGENCY: National Chiao Tung University PRINCIPAL INVESTIGATOR: Chang Hsien-Kuo PROJECT STAFF: Liou Jin-Cheng, Chen Wei-Wei ADDRESS: 1001 Ta Hsueh Road, Hsinchu, Taiwan 300, ROC PHONE: 886-3-571-2121#54987			
KEY WORDS: Classification of waves ; Swells; Fully developed seas; Regression analysis; Adaptive neuro-fuzzy inference system			
ABSTRACT: <p>Wind and wave data of year 2010 and 2012 at the offshore observation pole of the Taipei harbour measured by the Center of Harbor &amp; Marine Technology were used to established their relationship by regression analysis and adaptive neuro-fuzzy inference system. The resulting coefficients of quadratic equation for the data of 2010 can be applied to calculate wave heights through input of wind speeds for 2012.</p> <p>The criterion of plotting swells and wind seas for the spectrum of Pierson &amp; Moskowitz (1964) were modified by wind speeds at 10 m high instead of those at 19.5 m high based on the 1/7 power law for wind distribution. Three kinds of waves, that are swells, fully developed seas and developing wind waves, hold consistent statistics so that better relationship are obtained by <math>R^2=0.7285</math> and <math>RMSE=0.3549</math> m than those of original whole data with <math>R^2=0.6286</math> and <math>RMSE=0.4151</math> m. Based on the study of Steyn and Faulkner (1986) indicating that the changing time of sea/land occurs two hours of sunrise and after sunset wind directions are separated into four zones by azimuths of <math>0^\circ</math>, <math>70^\circ</math>, <math>205^\circ</math> and <math>275^\circ</math>. Regression analysis on wind speeds and wave heights for each zone and combination of all calculated wave heights gives a better simulation by <math>R^2=0.6667</math> and <math>RMSE=0.3932</math> m. Each data set by three classified wave groups associated with four separated zones of wind directions has good statistics to offer good prediction by regression analysis.</p> <p>Adaptive neuro-fuzzy inference system was applied to simulate wave heights by different input of wind speed or of two components of wind velocity, which are named by ANFIS-U and ANFIS-(u,v). The wave simulation by ANFIS-U is slightly better than by the regression analysis. However, ANFIS-(u,v) significantly promote the model simulation by embedding outer NW wind velocity away 25km from observation pole.</p>			
DATE OF PUBLICATION December 2014	NUMBER OF PAGES 116	PRICE	CLASSIFICATION <input type="checkbox"/> SECRET <input type="checkbox"/> CONFIDENTIAL <input checked="" type="checkbox"/> UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

# 目錄

中文摘要表 .....	I
英文摘要表 .....	II
目錄 .....	III
圖目錄 .....	VI
表目錄 .....	IX
第一章 前言 .....	1-1
1.1 研究動機與目的 .....	1-1
1.2 文獻回顧 .....	1-2
1.2.1 海陸風的研究 .....	1-2
1.2.2 風浪及湧浪的推算公式 .....	1-2
1.2.3 適應性類神經網路 .....	1-8
1.3 研究方法與步驟 .....	1-9
1.3.1 風浪與湧浪的分類 .....	1-9
1.3.2 海風、陸風及季節風浪浪的分類 .....	1-11
1.3.3 單點與多點的風速推算波高及週期的模式 .....	1-13
1.4 研究內容與工作項目 .....	1-14
第二章 資料與研究背景 .....	2-1
2.1 資料來源及格式 .....	2-1
2.2 基本統計分析 .....	2-3
2.3 第一年(2013)的研究結果 .....	2-7
2.3.1 風速的最適分布 .....	2-7
2.3.2 風速的方向性分布 .....	2-7
2.3.3 風速與波浪延時相關性 .....	2-10
2.3.4 風速與波浪之簡易經驗公式 .....	2-11

2.4 第二年(2014)的研究結果 .....	2-12
2.4.1 陸風與海風的風速特性 .....	2-13
2.4.2 向岸風與離岸風的時間分布 .....	2-15
2.4.3 不同風速之持續性及其與波浪特性之關係 .....	2-16
2.4.4 以不同風速特性建立推算波高及週期的經驗公式 ...	2-17
第三章 風浪與湧浪的分類 .....	3-1
3.1 PM 波譜的劃分指標 .....	3-1
3.2 波浪統計資料的分類 .....	3-2
3.3 波浪分類的迴歸分析 .....	3-7
3.4 風速邊界層分布的冪次方對迴歸分析的影響 .....	3-11
第四章 海風、陸風及季節風的波浪分類 .....	4-1
4.1 全年波高與風速的迴歸 .....	4-1
4.2 風向分區 2010 年波高與風速的迴歸分析 .....	4-3
4.3 風向分區 2012 年波高與風速的迴歸分析 .....	4-11
4.4 風向與波向的差異分析 .....	4-16
第五章 適應性類神經模式與多點推算波浪的模式 .....	5-1
5.1 波浪分類及風向分區的波高與風速的迴歸分析 .....	5-1
5.2 以單點風速推算波浪的適應性類神經模式 .....	5-12
5.3 以多點風速推算波浪的適應性類神經模式 .....	5-18
第六章 結論與建議 .....	6-1
6.1 結論 .....	6-1
6.2 建議 .....	6-2
參考文獻 .....	7-1
附錄 A 最適多項式回歸及模式評估指標 .....	8-1
附錄 B 模糊類神經網路的介紹 .....	9-1
附錄 C 本研究的績效指標 .....	10-1

附錄 D 期中報告審查意見處理情形表 .....	11-1
附錄 E 期末報告審查意見處理情形表 .....	12-1
附錄 F 期中簡報 .....	13-1
附錄 G 期末簡報 .....	14-1

## 圖目錄

圖 1.2-1 美國東北海域的 12 個不同地點 18 年的波浪及風速的散佈圖 (引自 Andreama and Wang, 2007).....	1-4
圖 1.3-1 湧浪生成之示意圖(引自 the Open University, 1999).....	1-9
圖 1.3-2 數值模式所計算 Haikui 颱風的風速等值圖及風向圖.....	1-10
圖 1.3-3 數值模式所計算 Haikui 颱風的波高等值圖.....	1-10
圖 1.3-4 臺北港的海風及陸風的風向方位角定義.....	1-11
圖 1.3-5 各組風向的時間分布(藍色:海風;紅色:陸風;綠色:西南風;黑色:東北風).....	1-12
圖 1.3-6 外海波能傳遞至臺北港觀測樁的波能示意圖.....	1-14
圖 2.1-1 臺北港觀測樁的測站位置圖.....	2-1
圖 2.2-1 臺北港每月的月平均風速.....	2-5
圖 2.2-2 臺北港每月的月平均示性波高.....	2-6
圖 2.2-3 臺北港每月的月平均示性波浪的週期.....	2-6
圖 2.3-1 臺北港 2010 年全年的風速與風向聯合分布圖.....	2-9
圖 2.3-2 臺北港 2010 年全年的風速與風向聯合分布等值圖.....	2-9
圖 2.3-3 示性波高與風速延時相關性.....	2-11
圖 2.4-1 比較 5 種混合函數套配觀測樁風速的機率密度.....	2-15
圖 2.4-2 海陸風轉向的時序圖.....	2-16
圖 3.2-1 界定波高與週期 9 種狀況的 2010 年資料數量及其分類.....	3-4
圖 3.2-2 波高與風速的分布圖及其二次式迴歸曲線(2010 年).....	3-5
圖 3.2-3 波高與風速的分布圖及其二次式迴歸曲線(2012 年).....	3-6
圖 3.2-4 三類波浪的波高與風速的關係圖(2010 年).....	3-6
圖 3.2-5 三類波浪的波高與風速的關係圖(2012 年).....	3-7
圖 3.3-1 合併 2010 年三類波浪的計算波高及實測值的散布圖.....	3-9
圖 3.3-2 合併 2012 年三類波浪的計算波高及實測值的散布圖.....	3-11
圖 4.1-1 以 2010 年資料迴歸式推估 2010 年波高與實測值之散布圖.....	4-2
圖 4.1-2 以 2012 年資料迴歸式推估 2012 年波高與實測值之散布圖.....	4-2
圖 4.1-3 以 2010 年資料迴歸式推估 2012 年波高與實測值之散布圖.....	4-3

圖 4.2-1 2010 年海風的風向與其風向持續時間的分布 .....	4-4
圖 4.2-2 第一種分區 2010 年的實測及推算的波高與風速之關係 .....	4-5
圖 4.2-3 第二種分區 2010 年的實測及推算的波高與風速之關係 .....	4-6
圖 4.2-4 第三種分區 2010 年的實測及推算的波高與風速之關係 .....	4-6
圖 4.2-5 合併第一種分區 2010 年的推估波高與實測值之散布圖 .....	4-7
圖 4.2-6 合併第二種分區 2010 年的推估波高與實測值之散布圖 .....	4-7
圖 4.2-7 合併第三種分區 2010 年的推估波高與實測值之散布圖 .....	4-8
圖 4.3-1 第一種分區 2012 年的實測及推算的波高與風速之關係 .....	4-11
圖 4.3-2 第二種分區 2012 年的實測及推算的波高與風速之關係 .....	4-12
圖 4.3-3 第三種分區 2012 年的實測及推算的波高與風速之關係 .....	4-12
圖 4.3-4 合併第一種分區 2012 年的推估波高與實測值之散布圖 .....	4-13
圖 4.3-5 合併第二種分區 2012 年的推估波高與實測值之散布圖 .....	4-13
圖 4.3-6 合併第三種分區 2012 年的推估波高與實測值之散布圖 .....	4-14
圖 4.4-1 2010 年風向與波向的夾角時序圖 .....	4-17
圖 4.4-2 2010 年風向與波向的夾角連續直方圖 .....	4-18
圖 4.4-3 2012 年風向與波向的夾角時序圖 .....	4-18
圖 4.4-4 2012 年風向與波向的夾角連續直方圖 .....	4-19
圖 5.1-1 以風向分區 2010 年的湧浪與風速之關係 .....	5-4
圖 5.1-2 以風向分區 2010 年的成熟風浪與風速之關係 .....	5-4
圖 5.1-3 以風向分區 2010 年的成長風浪與風速之關係 .....	5-5
圖 5.1-4 合併 2010 年分區及分類的推算波高與實測值的散布圖 .....	5-5
圖 5.1-5 風向分區 2012 年的風速與湧浪之關係 .....	5-8
圖 5.1-6 風向分區 2012 年的風速與成熟風浪之關係 .....	5-9
圖 5.1-7 風向分區 2012 年的風速與成長風浪之關係 .....	5-9
圖 5.1-8 合併 2012 年分區及分類的推算波高與實測值的散布圖 .....	5-10
圖 5.2-1 模式計算波高與實測值的 $R^2$ 與學習次數的關係 .....	5-13
圖 5.2-2 模式計算波高與實測值的 RMSE 與學習次數的關係 .....	5-14
圖 A-1 箱型圖架構檢查離群值的示意圖 .....	8-3
圖 A-2 2010 年的波高與風速的散布圖及二次式迴歸曲線 .....	8-4
圖 A-3 2010 年的波高與風速的散布圖及四次式迴歸曲線 .....	8-4

圖 A-4 以不同多項式推估 2010 年波高與實測值之 $R^2$ 及 RMSE.....	8-5
圖 B-1 模糊邏輯推論示意圖(摘自 ANFIS, 1993).....	9-2
圖 B-2 適應性網路架構模糊推論系統架構示意圖(摘自 ANFIS, 1993)	9-2

## 表目錄

表 2.2-1 臺北港 2010 及 2012 年各月風力特性及蒐集率.....	2-4
表 2.2-2 臺北港 2010 及 2012 年各月波浪 $H_s$ 及 $T_p$ 月平均值及蒐集率	2-4
表 2.3-1 臺北港風速與風向聯合分布主峰的風速與風向值.....	2-10
表 2.3-2 以不同多項式模式迴歸臺北港 2010 年資料的各項係數、決定 係數及誤差變異數.....	2-12
表 2.4-1 以 5 種機率函數套配風速樣本機率的 4 種檢定指標 .....	2-14
表 2.4-2 臺北港 5 至 9 月發生海陸風的每月天數.....	2-16
表 2.4-3 臺北港觀測樁分三季節的風速三個主峰值.....	2-17
表 2.4-4 波高的樣本個數及二次多項式迴歸所得的係數及檢定指標	2-17
表 2.4-5 週期的樣本個數及線性迴歸所得的係數及檢定指標 .....	2-18
表 3.3-1 2010 年波浪的三類正常樣本數、迴歸係數及檢定指標 .....	3-8
表 3.3-2 2012 年波浪的三類正常樣本數、迴歸係數及檢定指標 .....	3-10
表 3.4-1 不同風速分布冪次方迴歸 2010 年所得的 $R^2$ 及 RMSE.....	3-12
表 3.4-2 不同風速分布冪次方迴歸 2012 年所得的 $R^2$ 及 RMSE.....	3-12
表 4.1-1 以二次多項式迴歸推算不同年份波高的評估指標.....	4-1
表 4.2-1 三種風向分區的 4 個方位角度.....	4-5
表 4.2-2 第一種分區 2010 年的樣本個數、迴歸係數及檢定指標 .....	4-9
表 4.2-3 第二種分區 2010 年的樣本個數、迴歸係數及檢定指標 .....	4-9
表 4.2-4 第三種分區 2010 年的樣本個數、迴歸係數及檢定指標 ....	4-10
表 4.2-5 三種風向分區 2010 年資料的檢定值標.....	4-10
表 4.3-1 第一種區分 2012 年的樣本個數、迴歸係數及檢定指標 ....	4-14
表 4.3-2 第二種區分 2012 年的樣本個數、迴歸係數及檢定指標 ....	4-15
表 4.3-3 第三種區分 2012 年的樣本個數、迴歸係數及檢定指標 ....	4-15
表 4.3-4 三種風向分區 2012 年資料的檢定值標的統計.....	4-16
表 5.1-1 2010 年資料的風向分區及波浪分類個數及二次迴歸的係數	5-2
表 5.1-2 迴歸 2010 年波浪分類及風向分區資料的檢定指標 .....	5-3
表 5.1-3 分區及分類 2012 年波浪的個數及二次式迴歸的係數 .....	5-7
表 5.1-4 分類及風向分區 2012 年資料的迴歸檢定指標.....	5-11

表 5.1-5 比較風向分區或波浪分類的迴歸檢定指標.....	5-12
表 5.2-1 各模式推算 2010 年分類波浪學習組的檢定指標.....	5-15
表 5.2-2 各模式推算 2010 年分類波浪驗證組的檢定指標.....	5-15
表 5.2-3 各模式推算 2010 年分類波浪全部資料的檢定指標 .....	5-16
表 5.2-4 各模式推算 2012 年風向分區學習組的檢定指標.....	5-17
表 5.2-5 各模式推算 2012 年風向分區驗證組的檢定指標.....	5-17
表 5.2-6 各模式推算 2012 年風向分區全部資料的檢定指標 .....	5-18
表 5.3-1 外圍各方位的風速與波高的相關係數及其二次迴歸的 $R^2$ .	5-19
表 5.3-2 增加 W 風速的多點模式推算 2010 年分類波浪的檢定指標	5-20
表 5.3-3 增加 NW 風速的多點模式推算 2010 年分類波浪的檢定指標	5-21
表 5.3-4 增加 W 風速的多點模式推算 2010 年風向分區的檢定指標	5-21
表 5.3-5 增加 NW 風速的多點模式推算 2010 年風向分區的檢定指標	5-22
表 5.3-6 不同模式推算 2010 年全部正常資料樣本的檢定指標 .....	5-22
表 A-1 以不同多項式迴歸 2010 年資料所得的係數及 F 值 .....	8-3

# 第一章 前言

本章主要說明本計畫的研究動機目的，回顧往昔研究波浪與風速關係的方法及其結果，並介紹本研究方法、步驟與本計畫的工作項目。

## 1.1 研究動機與目的

台灣位處於歐亞大陸與太平洋之交會地帶，受季節風之變化影響甚大。每當大陸氣團南下時，海上風力快速增強，強烈陣風可達 10 級以上，其風力不亞於颱風災害性天候氣象。東北季風帶來的強風巨浪對漁民海上作業、港灣工程施工上甚為不便。若能精準的預測波浪，便能保障漁民及施工人員之安全，並降低海上作業之風險。因此，風速與波浪特性的了解，可作為港灣工程施工及港灣船隻作業之參考。

若以方程式建構的數值模式或經驗公式推算波浪產生可能誤差，其原因部分來自於給定的風速與實際值有差異，因為波浪模式所用的風速為海面上 10m 之風速。此海面 10m 風速值在台灣上少有實測資料，而改引用陸上或高空衛星的觀測值來取代。交通部運輸研究所港灣技術研究中心已在臺北港外海設置一個觀測樁，在觀測樁水下-5m 及-10m 處各安裝潮波流儀並無線電傳輸至岸邊，同時在觀測樁之海面上 10m 處有自記式之風速儀測量風速。

本計畫的前期研究結果已分類不同季節或月份的風速與方向，探討臺北港在不同季節與氣候特性下的風速及方向特性，並採用各風向的風速持續性而建立兩個波浪推算模式。本計畫根據前期研究的基礎，進一步研究海風、陸風及季節風浪浪的分類指標，以類神經及迴歸分析方法建立單點及多點的波浪與週期的推算模式。因為湧浪特性為由外圍波浪傳遞而來，因此與局部的風速關係比較弱，所以在往昔風速與波浪迴歸結果都顯示出中等關係的結果。若數據中同時含有湧浪及風浪兩種類型，其統計特性不同，若分離湧浪及風浪，分別建立其波浪與風速的關係，應可提高臺北港風速推算其波浪的能力。本研究結

果在未來可用於即時推算預測臺北港波浪。

## 1.2 文獻回顧

本節根據研究項目回顧相關文獻，整理海陸風的研究，風浪及湧浪的推算公式及適應性類神經網路的研究，分三小節敘述如下：

### 1.2.1 海陸風的研究

海陸的環流系統(circulation system)屬於常見的中尺度的氣象現象(mesoscale meteorological phenomenon)。Kelvin(1869)提出凱文環流定理(Kelvin's circulation theorem)。Haurwitz(1947)首先以動力過程證明科氏效應會受緯度影響，使海陸風環流產生偏轉。Pierson(1950)，Defant (1951)等人也用線性模式對海陸風進行研究。Steyn and Faulkner (1986)提出向岸風應發生在日出後兩小時至日落後兩小時間，且至少持續兩小時。

當風在海面吹襲時，因為風能傳入海水而使波浪成長，一般研究風浪形成分為兩類，一為受風域限制(fetch-limited)；另一為受延時限制(duration-limited)。受風域限制波浪成長過程常以波浪的作用能量守衡方程式(action density conservation equation)來描述，學者探討其中外力的重要來源(source function)的項目及表示式，如 Miles (1957)、Phillips (1985)、Komen et al. (1984, 1994)、Janssen et al. (1994); Janssen (2004)、Pierson and Garcia (2008)、Tian et al. (2010)。在此類的研究常使用摩擦速度(friction velocity)表示的波浪成長特性。在受延時限制的波浪成長乃自從風吹襲靜止水面起，探討波浪的成長情況。如 Young (1999) 有系統地回顧受風域限制及受延時限制的波浪成長的研究。

### 1.2.2 風浪及湧浪的推算公式

早期用觀察陸上樹枝的搖曳或海面波浪的現象描述來推估波高大小，如 Beaufort 所提出之蒲福風級表。此蒲福風級表為簡易的推算波浪方法，目前只應用在漁業或航海上，但在工程或氣象預報上，

其精度還是稍嫌不足，而逐漸不被採用。

當風速及波浪觀測數據逐漸增加後，用迴歸方法建立波高與風速的關係，如 Wilson (1955, 1983) 提出推算深海風浪的公式，即

$$\frac{gH}{U^2} = \alpha \tanh \left[ k_1 \left( \frac{gF}{U^2} \right)^{1/2} \right] \quad (1.2-1)$$

$$\frac{gT}{2\pi U} = \beta \tanh \left[ k_2 \left( \frac{gF}{U^2} \right)^{1/3} \right] \quad (2.1-2)$$

式中  $H$  為示性波波高， $T$  為示性波週期， $F$  為吹風距離， $U$  為 10m 高的海面風速， $g$  為重力加速度， $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $k_1$  及  $k_2$  為常數值，分別等於 0.26、1.40、0.01 及 0.0436。

Carter (1982) 根據 Hasselmann et al. (1973) 在北大西洋的波浪觀測資料及迴歸公式，提出風域限制(fetch-limit)或延時限制(duration-limit)兩種條件下的示性波高與風速的簡易公式分別為

$$H_s = 0.0163F^{1/2}U \quad (1.2-3)$$

與

$$H_s = 0.0146D^{5/7}U^{9/7} \quad (1.2-4)$$

其中  $D$  為吹風延時，單位為 hour， $F$  的單位為 km，而相對應條件的波浪週期為(此內容可見 Tucker, 1991)

$$T_s = 0.439F^{0.3}U^{4/7} \quad (1.2-5)$$

與

$$T_s = 0.419F^{0.7}U^{-0.4} \quad (1.2-6)$$

根據 Kinsman (1965) 和 Tucker and Pitt (2001) 等學者之研究，在完

全發展(fully developed)的平衡(equilibrium)海域，示性波高與 10 米風速有平方成正比的關係，其為：

$$H_s = 0.0246U^2 \quad (1.2-7)$$

其中波高單位為 m，而風速單位為 m/sec。

Andreas and Wang (2007)使用美國東北近岸海域的 12 個不同地點 18 年逐時的浮標(data buoy)波高及風速資料繪制二者關係如圖 1.2-1。

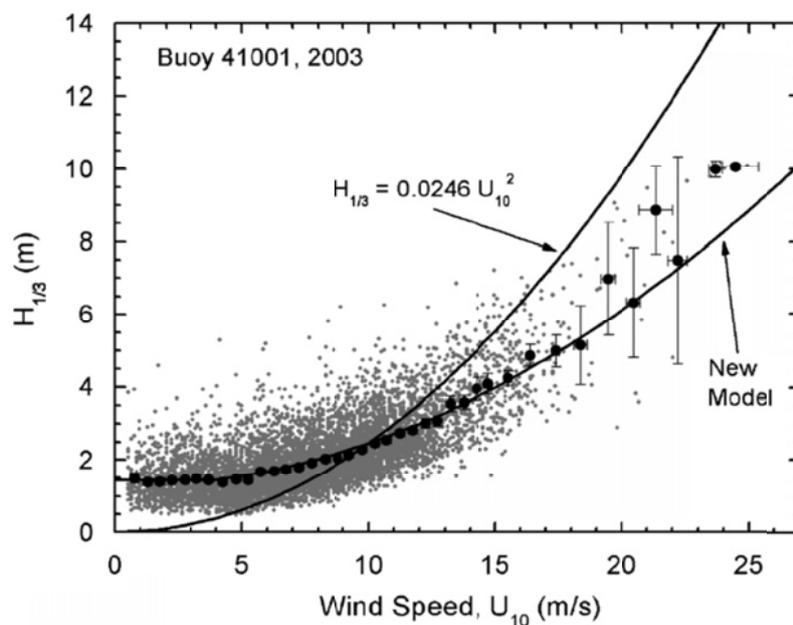


圖 1.2-1 美國東北海域的 12 個不同地點 18 年的波浪及風速的散佈圖 (引自 Andreas and Wang, 2007)

由圖 1.2-1 明顯可知在低風速時(約小於 4m/sec)，以式(1.2-7)似乎低估波高，而在大風速(約大於 18m/sec)時，以式(1.2-7)似乎高估波高。Andreas and Wang (2007)探討二者差異主要來自測量風速的高度是 5m 高的風速，而公式使用的風速是處於 10m 高的。Andreas and Wang (2007)利用海面風速的分布為對數函數(logarithmic function)修正 5m 風速為 10m 風速，另以風速 4m/sec 為界限分別迴歸得到常數及二次多項式為

$$H_s = c(D) \quad (1.2-8)$$

及

$$H_s = a(D)U^2 + b(D) \quad (1.2-9)$$

其中  $a(D)$ 、 $b(D)$  及  $c(D)$  的係數為水深  $D$  的函數。Andreas and Wang (2007) 分別為

$$a(D) = 0.0134 \tanh\left(\frac{\ln(D/9)}{1.3}\right) \quad (1.2-10)$$

$$c(D) = 1.36 \tanh\left(\frac{\ln(D/6)}{1.9}\right) \quad (1.2-11)$$

$$b(D) = c(D) - 16a(D) \quad (1.2-12)$$

Altunkaynak and Ozger (2004) 利用卡門濾波(Kalman filtering)及類神經網路(perceptron)建立波高與風速之推估式

$$\begin{bmatrix} U \\ H_s \end{bmatrix}_t = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ H_s \end{bmatrix}_{t-1} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}_{t-1} \quad (2.2-13)$$

其中係數  $a_{11}$ 、 $a_{12}$ 、 $a_{13}$  及  $a_{14}$  為類神經網路所得的權重(weight)， $b_1$  及  $b_2$  為類神經網路所得的閾值(bias)，此可視為測量誤差。

有關湧浪與風浪的劃分的研究如下，Pierson and Moskowitz (1964) 修改 Phillips 波譜形式，而提出在北太平洋具無限吹送距離下的標準型風浪 PM 波譜。PM 波譜適用於外海的成熟風浪，且波譜形狀大小與吹送距離無關，僅與風速有關，且由波浪分散關係及波譜的積分獲得尖峰週期， $T_p$ ，與示性波高， $H_s$ ，分別示如式(1.2-14)及式(1.2-15)：

$$T_p = 0.729 U_{19.5} \quad (1.2-14)$$

$$H_s = 0.0213 U_{19.5}^2 \quad (1.2-15)$$

其中  $U_{19.5}$  為海面上 19.5m 的風速，此尖峰週期常被選為劃分湧浪及風

浪的標準之一。

Wang and Hwang (2001) 由實測的波浪波譜定義出平均波浪尖銳度函數(wave steepness function)， $A(f_*)$ ，來判斷湧浪及風浪。此波浪尖銳度函數定義如下：

$$A(f_*) = \frac{8\pi \left[ \int_{f_*}^{f_d} f^2 S(f) df \right]}{g \left[ \int_{f_*}^{f_d} S(f) df \right]^{1/2}} \quad (1.2-16)$$

其中  $S(f)$  為波浪波譜、 $f_*$  為波譜的下限頻率、 $f_d$  為波譜的上限頻率。

Wang and Hwang (2001) 提出尖銳度函數與 PM 波譜的分離頻率之關係如式(1-4)

$$f_s = 4.112 f_m^{1.746} \quad (1.2-17)$$

其中  $f_m$  為尖銳度函數的尖峰頻率(peak frequency)， $f_s$  為劃分湧浪頻率。

Komen (1984) 提出劃分二維方向波譜的風浪和湧浪方法，乃以波浪傳遞速度之因子在方向波譜界定之，其定義如下

$$1.3 \frac{U_{10}}{c} \cos(\theta - \psi) > 1 \quad |\theta - \psi| < \frac{\pi}{2} \quad (1.2-18)$$

其中  $c$  為波譜的主頻波浪的相位速度(celerity)、 $\theta$  為波向、 $\psi$  為風向。

Portilla et al. (2009) 發現 JONSWAP 的發展中的波譜(developing spectrum)，較完全發展波譜(fully developed spectrum)有波峰較陡的能量但不穩定現象，因此以完全發展的 PM 波譜為能量界線，作為分離頻率之指標。其定義為尖峰頻率的波譜能量與相對應尖峰頻率的 PM 波譜能量相比，如下表示：

$$\lambda = \frac{S(f_p)}{S_{PM}(f_p)} \quad (1.2-19)$$

當  $\lambda > 1$  表示有發展中波譜能量不穩定的現象，因此即識為風浪；反之， $\lambda < 1$ ，則為湧浪。

Li et al. (2012) 比較 PM、W-H、J-P 及 Komen (1984) 的二維譜分離法四種劃分湧浪指標的優劣，研究結果顯示 J-P 法整體上高估了風浪成份、W-H 波譜在低風速時有高估風浪的現象。整體而言，Komen (1984) 的二維譜分離法是最可靠來劃分湧浪的分法。

梁與李 (1978) 使用台灣海峽的風速及波浪資料建立澎湖及鹿港兩站的波高關係及推估兩站的波浪週期與風域的關係如下所示

$$\frac{T_s}{2\pi U} = a \left( \frac{gF}{U^2} \right)^b \quad (1.2-20)$$

其中  $a$  及  $b$  為係數，兩站的值分別為(0.0395, 0.3156)及(0.0317, 0.3264)。

梁及李(1978)探討台灣海峽冬季季風波浪的特性。高與梁(1980)使用彭佳嶼風速與基隆港東堤測量的波高，以相關係數由無延遲(同時時間)的 0.6 左右，逐漸隨延遲增加而增大，到延遲為 9 小時處的相關係數約為 0.75，然延遲再增長而相關性卻降低，直到延遲 50 小時處相關係數趨近於 0。因此，高與梁(1980)遂以迴歸方法得到

$$H_s = 0.1102U_9^{0.9211} \quad (1.2-21)$$

或

$$H_s = 0.1528U_9 - 0.3761 \quad (1.2-22)$$

其中  $U_9$  為前 9 小時延時的風速。

至於颱風湧浪方面，梁(1982)提出估算颱風湧浪預報公式

$$H_s = CH_R \sqrt{\frac{R_7}{DD}} \quad (1.2-23)$$

其中  $H_s$  為未考慮颱風中心移動的湧浪浪高，單位米， $H_R$  為 Bretschneider 模式求出中心最大風速半徑處之波高， $R_7$  為七級風半徑，

單位哩(nautical mile)， $DD$  為颱風中心到測站的距離，單位呎， $C$  為 0.087 或 0.106。梁、林 (1995)推算 1994 年 6 場侵臺颱風在花蓮港的波高。

梁(1989)及 Liang (1990)考慮颱風接近或遠離測站之堆積或消散效，式(1.2-23)應須乘以係數  $C_x$ 。林及梁(1999)考慮颱風湧浪逆風的情況下，式(1.2-23)再乘以逆風減衰修正係數。Liang (2003)考慮颱風移動產生 Doppler 效應對湧浪週期及波高影響。梁(2010)以颱風實測資料，及一些統計方法修正往昔公式的係數，並將公式的 7 級暴風半徑改為最大暴風半徑。Doong et al. (2007)以 W-H 波譜法比較不同颱風路徑對湧浪之影響。Liang (2012)提出異常波浪潛能指標(freak wave potential index)於原湧浪推算模式來推算異常波浪。

本研究前期研究(2014)，迴歸分析臺北港 2010 年全年數據，剔除該部分離群資料的 95%信賴區間，所得二次多項式為式(1.2-24)，觀測資料與迴歸公式的計算值的決定係數為 0.6763。

$$H_s(t) = 0.0121U(t)^2 - 0.037U(t) + 0.6328 \quad (1.2-24)$$

### 1.2.3 適應性類神經網路

近年來電算科技的發達，類神經網路系統開始廣泛應用於海岸工程方面上。除了以經驗公式來推算波高外，尚有學者利用類神經網路進行預測波浪，如 Deo and Naidu(1999)以即時實測波浪資料作為類神經網路之輸入值，建立倒傳遞類神經路架構來推算短期波浪。Deo et al. (2001)則建構以風速及示性波高與週期之類神經網路，來預測風浪。Bhattacharya et al. (2003) 利用實測波浪資料、風向、延時作為類神經之輸入，追算遺失之波浪資料。Makarynskyy (2004)為修正短期波浪之預測，分析不同延時之測試對預測風浪正確性之關係，並建立輸入值為 48 小時與輸出值為 24 小時之波高及週期之類神經學習網路，以此進行較長時間且可獲得較正確之波浪預測。Kalra et al. (2005)則以衛星量測之外海波浪特性及風場資料，進行近岸類神經網路風浪之推算。蔡(2005)應用類神經模糊系統推算季節風波浪。蔡(2006)以適

應性類神經網路(ANFIS)建立實測風速大小對應波浪之架構，進行台灣東部海域之季節風波浪推算。Chang and Chien (2006a、2006b)針對不同風場參數分析其對波浪特性之關係，建立多個轉換函數之類神經網路模式，以進行颱風浪浪之推算。

本研究以適應性類神經網路來建立臺北港的波浪與風速的關係。本推算模式的架構是以模糊推論系統為網路模式基礎，並結合神經網路自我組織之特性。由於模糊類神經網路模式除具有一般類神經網路的性質與優點外，又由於使用模糊推算的運行機制，使得處理單元的計算變成較簡便，且可加快計算的速度，增加系統容錯的能力。本研究用模糊理論及類神經網路具有學習演算較快及非線性最佳化等優點，達到學習效率快的即時波浪預測。

### 1.3 研究方法與步驟

#### 1.3.1 風浪與湧浪的分類

湧浪定義為在風域前端的波浪，脫離風域範圍而往外側及前方傳遞的波浪，往外側地角度於為  $30-45^{\circ}$ ，湧浪生成示意圖如圖 1.3-1。此波浪一般比風浪的週期長，湧浪的前期波高逐漸增加至達到穩定成熟。若是在臺北港有湧浪到達的情況，必須是在臺北港遠處有個強風的風場，臺北港在湧浪可傳達的範圍內，且湧浪的能量強度大於局部風浪，才可以從資料辨識出湧浪。

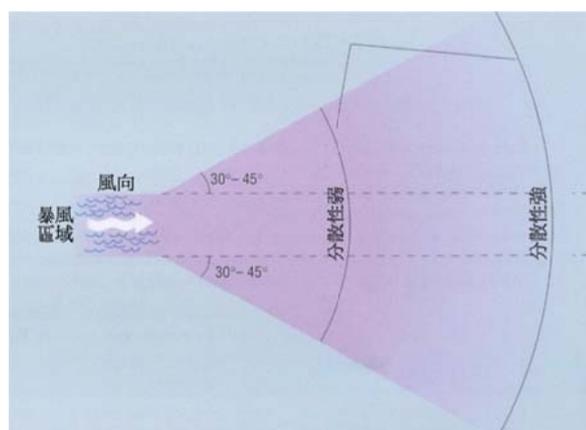


圖 1.3-1 湧浪生成之示意圖(引自 the Open University, 1999)

本研究根據此定義及湧浪特性，配合港研中心的另一個計畫「臺北港區風場數值預報系統之建置」所得的風場，如圖 1.3-2 如 102 年 8 月 6 日 2 時 Haikui 颱風的風速等值圖及風向圖可知，在臺北港東北方遠處有個強烈的風場，此風場可以產生湧浪而達到臺北港。若以波浪數值模式計算此時對應的波高，其等值圖示如圖 1.3-3。由圖 1.3-3 顯示當此風場造成在臺北港的波浪在 0.5m 以下。當湧浪傳出風域而到達臺北港時，應可以觀測到明顯的湧浪。

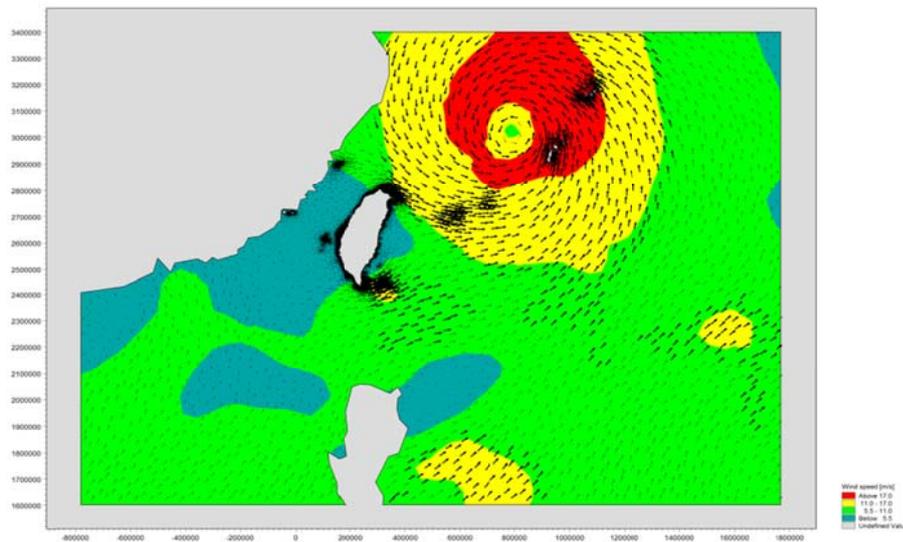


圖 1.3-2 數值模式所計算 Haikui 颱風的風速等值圖及風向圖

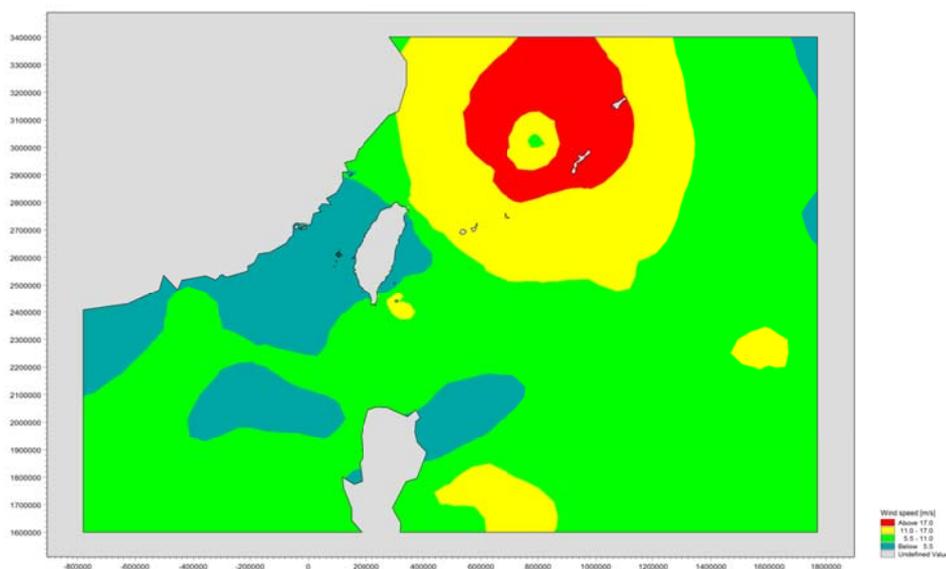


圖 1.3-3 數值模式所計算 Haikui 颱風的波高等值圖

在本計畫的首要工作項目為分離出臺北港湧浪於波浪觀測數據，即先定義出湧浪的分類指。此項目的研究的步驟為

- (1) 利用計算風場，找出臺北港遠處是否有強風的風域，此風速與臺北港局部風速有明顯差異。
- (2) 計算強風風域的主方向及前端與臺北港的距離，計算湧浪到達時間。
- (3) 判斷示性波浪的週期是否明顯高於當月的平均週期，且波高有逐漸增加的趨勢。

利用梁(1982)的研究，將分離出的湧浪進行迴歸分析。

### 1.3.2 海風、陸風及季節風浪浪的分類

前期研究決定臺北港的海岸線在  $47.5^\circ$  及  $227.5^\circ$  的方位，示如圖 1.3-4。若定義沿岸風向乃在海岸線的方位左右  $\pm 22.5^\circ$ ，海風(sea breeze)方向的定義為風速的方位角在  $250^\circ \sim 25^\circ$  之間，而陸風(land breeze)的定義為風速方位角在  $70^\circ \sim 205^\circ$  之間。



圖 1.3-4 臺北港的海風及陸風的風向方位角定義

依此各分區範圍將風向分類，再把相對應的波高及週期進行多項

式迴歸分析。然而，從前期研究發現在此區分範圍的風向，示如圖 1.3-5，在夏天(時間軸為 200-270 日)有東北風的風向(黑色符號)及冬天(時間軸為 0-60 及 330-360 日)有西南風及陸風。

因此，主要探討此問的本工作項目及步驟如下：

- (1) 考慮幾組區分風向的不同範圍的四個界限，讓季節風有合理的風向持續時間，如在夏天的風向在東北風少；而在冬天的風向多在東北風卻幾乎無西南風等原則。
- (2) 利用同組的波浪及風速的迴歸分析的檢驗指標，來決定合適的風向區分界限。
- (3) 臺北港 2012 年的風向及波向數據較為完整，本計畫除了分析 2010 年的數據，再增加分析 2012 年資料，並比較兩年在間上及機率上風向及波向的差異，以探討風向及波向的差異特性。

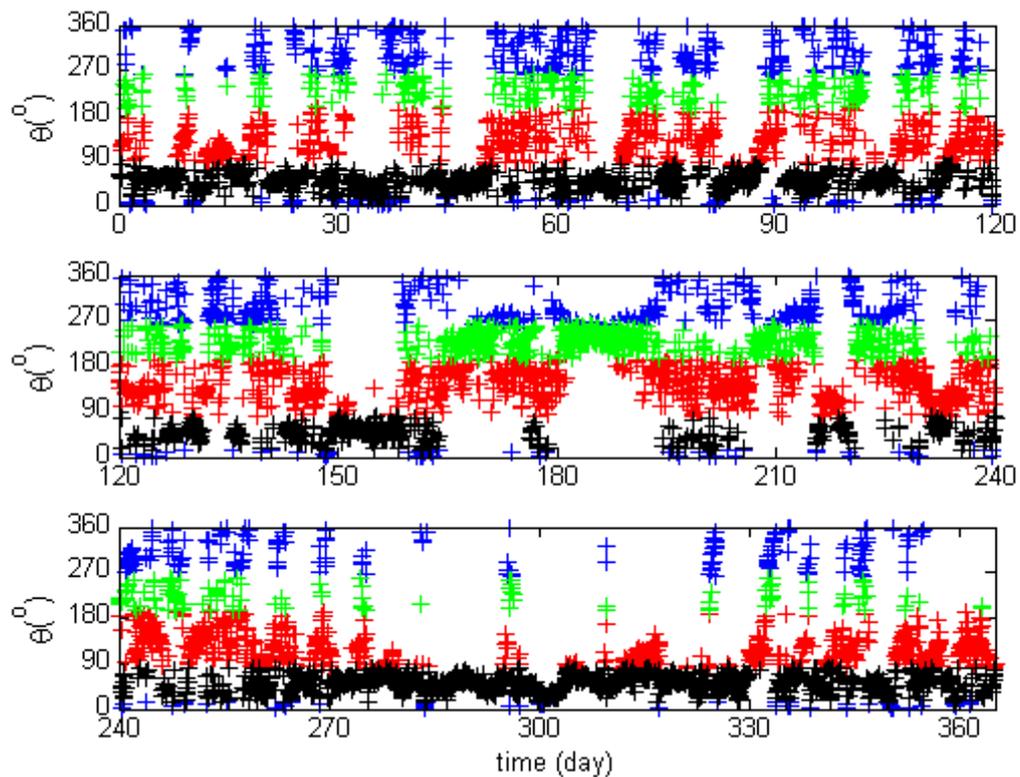


圖 1.3-5 各組風向的時間分布(藍色:海風;紅色:陸風;綠色:西南風;黑色:東北風)

### 1.3.3 單點與多點的風速推算波高及週期的模式

在上述的風向及波浪適合分組後，本研究建立單點不同風速統計特性與波浪的波高及週期的模式。使用的模式有兩種，一為多項式迴歸(polynomial regression)，另一種為適應性類神經模式。

依照前期的研究可知，若僅考慮 2010 年的觀測資料，示性波高與風速的經驗公式以二次式是較合適的，其  $R^2=0.6531$ 。因此，本工作項目為在上述合適的分組資料後，進行迴歸分析，而建立各種條件下觀測樁的單點風速與波浪的波高及週期的關係。

適應性類神經模式(Adaptive neuro-fuzzy inference system, ANFIS)是以模糊推論系統基礎並結合神經網路自我組織之特性的網路模式。由於模糊類神經網路模式除具有一般類神經網路的性質與優點外，又由於使用模糊推算的運行機制，所以處理單元的計算簡便，且計算速度快，系統容錯的能力大。

單點風速推算波高及週期的適應性類神經模式的研究步驟如下：

- (1) 整理臺北港觀測樁的逐時風速  $U_{10}(x_{TP}, t)$  及風向  $\varphi$ ，及逐時波浪的波高。
- (2) 選擇模糊邏輯推論建立各種風向分組的無延時的適應性類神經模式，並比較適應性類神經模式與迴歸模式的推算結果。

局部實測的波中若有湧浪傳遞來的成分，則實測波浪特性與當點局部關係較弱，但與外圍的風速有關，因此需進行多點風速推算波高及週期的模式。

此外海波能傳遞至臺北港觀測樁的波能示意圖如圖 1.3-6 所示。其中 25km 及 50km 的圓圈代表週期 8-10s 的波浪傳遞 1 hr 及 2hr 的距離，分別標示為  $x_1$  及  $x_2$ 。多點的風速推算波高及週期的模式，仿單點的風速推算波高及週期的模式，以多項式迴歸及適應性類神經進行之。

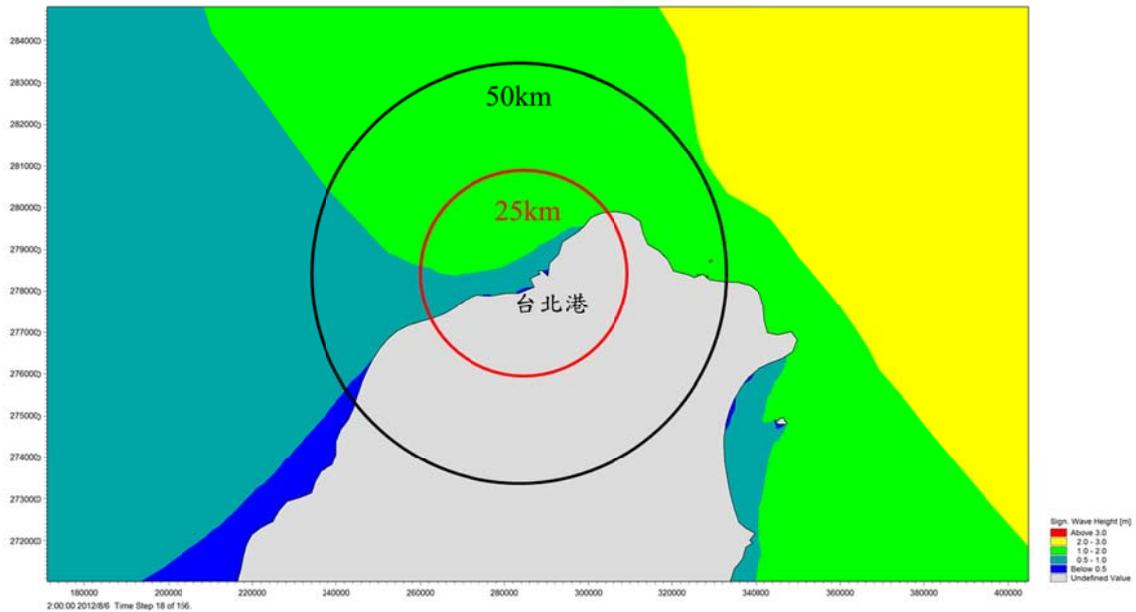


圖 1.3-6 外海波能傳遞至臺北港觀測樁的波能示意圖

## 1.4 研究內容與工作項目

由上述的研究目的及方法步驟的說明，本研究的主要工作項目有

- (1) 建立風浪與湧浪的分類指標。
- (2) 建立海風、陸風及季節風浪浪的分類指標。
- (3) 建立單點不同風速統計特性與波浪的波高及週期的迴歸分析。
- (4) 建立多點不同風速統計特性與波浪的波高及週期的迴歸分析。
- (5) 建立單點不同風速統計特性與波浪的波高及週期的類神經模式。
- (6) 建立多點不同風速統計特性與波浪的波高及週期的類神經模式。

## 第二章 資料與研究背景

今年計畫為三年期計畫的第三年，在本章先介紹前期的 2010 年資料外，今年增加 2012 年的風速及波浪資料的數據的來源及各項背景資料的基本統計特性；另外說明本計畫前兩年計畫的內容。

### 2.1 資料來源及格式

交通部運輸研究所港研中心於 1996 年在淡水河口南岸水深-15m 處打設海上觀測樁，其位置為  $25^{\circ}10'44''\text{N}$ ， $121^{\circ}22'41''\text{E}$ 。後因波浪長期作用，導致觀測樁嚴重傾斜，無法正確量測海象資料，因此 2004 年 12 月更換新觀測樁，新的位置為  $25^{\circ}10'54''\text{N}$ ， $121^{\circ}22'32''\text{E}$ ，新的觀測樁標誌在圖 2.1-1 的外海處。



圖 2.1-1 臺北港觀測樁的測站位置圖

另外港研中心自 2009 年下半年起，除原有外海觀測樁風觀測外，在臺北港區北防波堤延伸南堤堤頭增設堤頭測站，以瞭解岸邊風特性，以提供近岸風是否對港口外之漂沙活動造成影響的參考。其位置為  $25^{\circ}9'23''\text{N}$ ， $121^{\circ}22'18''\text{E}$ 。

堤頭站所用的風速計與外海相同，觀測數據以 GPRS 方式回傳至港研中心，以便即時監控。另外，中央氣象局在淡水站設置風速觀測站，此稱為陸上測站，位置為  $25^{\circ}9'50''N$ ， $121^{\circ}26'54''E$ 。三個測站位置如圖 2.1-1 所示。

在觀測樁的樁頂平臺上安裝 Young Brand 風速儀來觀測風向及風速。在觀測樁的水下安裝 Seapac 2160 Directional Wave, Tide & Current Meter 潮波流儀來觀測波浪、潮位與海流，兩部儀器分別安置於深度 -5m 及 -10m 處。觀測儀器 Seapac 2160 為壓力式潮波流儀，該儀器以壓力偵測器(Pressure Sensor)及流速儀偵測所在位置之壓力及水分子運動速度並加以記錄。此壓力將包括大氣壓力、流體動壓及靜水壓。波浪現場監測的取樣設定為每小時由整點向後連續取 2048 組壓力資料(約 17 分鐘)，取樣頻率為 2Hz，當取得潮波流儀的原始資料(raw data)後，再經資料處理程式轉成壓力之時間序列(time series)。

自 1999 年 7 月底開始，改採用 Inter Ocean S-4 ADW 進行觀測作業，該項儀器可同時觀測潮位、海流、波浪及波向。Inter Ocean S-4 ADW 為壓力式潮波流儀，設定取樣頻率為 2Hz，整點起取樣 17 分鐘，所得之數據經由 14bit 之 A/D 轉成 1cm 以內之精度的觀測數據。當基地站接收每次觀測數據後，再利用波浪處理軟體將壓力訊號配合同步之水粒子運動記錄，計算出代表當時波浪特性的波高及方向，即  $H_s$ 、 $H_{ave}$ 、 $T_s$ 、 $T_p$ 、 $T_c$ 、 $T_z$ 、波向等統計結果，並進行 FFT 分析。

於 2008 年採用挪威 AWAC (Acoustic Wave And Current) 方向性潮波流儀進行觀測，該儀器具備可測得逐時波浪、分層流向流速、水位值之功能。AWAC 系統有兩個分離波高量測模式：

1. 在平靜波浪時，由傳統式壓力感應器的資料會因佈放儀器的深度而受很大的影響；此時，表面高度必須用一個聲波式的高度感應器來量測波高。波高量測方式及取樣範圍為(1)資料量測模式：壓力及沿每一個波束選取一個流速層；(2)量測流層距離：0.5、1.0、2.0m 可選擇性；(3)最大資料輸出頻率：2Hz(以內含)；(4)儀器內

取樣頻率：4~6Hz；(5)取樣期間之取樣數：512、1024 或 2048 次可選擇性。波向的決定乃依海面下 3m 以上的平均流向。

2. 對紛紜的海況時，自動被調整該層深度為平均水位，也就是  $H_{max}/2$ ，來決定波向。此資料可當為平均波向及波向分布。

風之觀測採用 Young Brand 風速計，此風速計之觀測範圍為 0-60 m/sec，最大陣風則可測達 80 m/sec。安裝高度約在海平面上 12 m，風速及風向之取樣方法為每小時的 50 分起至 60 分連續各取 10 分鐘，取樣頻率為 1Hz。風速及風向的算術平均當為該小時風速及風向，例如 10 時 50 分至 60 分所測資料的算術平均，當為 11 時之平均風速 (m/sec)及風向(度)。最大值為該月之最大風速及其相對風向。

## 2.2 基本統計分析

本計畫的實測波浪及風速資料由交通部運輸研究所港灣技術研究中心(以下簡稱港研中心)所提供的 2010 年及 2012 年的資料。此兩年的風力和波浪資料的蒐集率及基本統計特性如表 2.2-1 及表 2.2-2 所示。

由表 2.2-1 及表 2.2-2 中可知，兩年的風力資料均無缺漏，但波浪有缺漏資料，蒐集率在 84.0%至 99.9%間。2010 年各月的平均風速介於 4.9 至 9.5m/sec 之間，最大值出現在 9 月，風速可達到 25.1m/sec，其風向為 ESE。2012 年各月的平均風速介於 5.0 至 8.8 m/sec 之間，最大值出現在 8 月，風速可達到 22.7m/sec，其風向為 NE。表 2.2-1 中兩年的月平均風速繪製成圖 2.2-1。由此圖易看出兩年的月平均風速趨勢相似，5-9 月的月平均風速相對比其他月份低。

由表 2.2-2 可知 2010 年的各月平均示性波高介於 0.57 至 1.85m 之間，平均週期在 4.9 至 7.6 sec，在 10 月有最大的月平均示性波高，其值為 1.85m，相對的平均週期為 7.5 sec。若查其逐時的示性波高最大可達 5.47m，其週期為 10.9sec，波向為 N。

表 2.2-1 臺北港 2010 及 2012 年各月風力特性及蒐集率

月份	2010 年			2012 年		
	蒐集率	平均風速(m/s)	最大風速(m/s)/風向(°)	蒐集率	平均風速(m/s)	最大風速(m/s)/風向(°)
1	100%	7.7	15.4/NE	100%	8.8	15.7/ NE
2	100%	6.5	17.7/NE	100%	7.4	17.0/ NE
3	100%	6.5	17.2/NE	100%	7.6	17.5/ NE
4	100%	6.7	18.0/NE	100%	5.4	18.4/ NE
5	100%	4.9	13.5/WSW	100%	6.3	17.6/WSW
6	100%	5.3	15.1/WSW	100%	5.0	18.3/WSW
7	100%	6.0	16.2/WSW	100%	6.7	17.5/ NE
8	100%	5.4	15.5/SSW	100%	5.6	22.7/ NE
9	100%	6.0	24.1/ESE	100%	8.1	19.5/ NE
10	100%	9.5	19.3/NE	100%	7.2	14.6/ NE
11	100%	8.4	16.2/NE	100%	8.7	14.7/ NE
12	100%	6.8	21.1/NNE	100%	8.7	16.3/ NE

表 2.2-2 臺北港 2010 及 2012 年各月波浪  $H_s$  及  $T_p$  月平均值及蒐集率

月份	2010 年			2012 年		
	蒐集率	Hs(m)	Tp(s)	蒐集率	Hs(m)	Tp(s)
1	94.0%	1.31	7.3	84.0%	1.83	7.8
2	99.0%	1.27	7.6	99.9%	1.62	7.7
3	98.5%	1.17	7.1	96.0%	1.22	7.0
4	97.4%	1.17	7.0	99.6%	0.80	5.8
5	97.2%	0.74	6.0	96.2%	0.95	6.2
6	98.6%	0.82	5.8	92.4%	0.77	5.8
7	98.3%	0.76	5.7	90.1%	0.80	6.5
8	94.6%	0.57	4.9	90.1%	0.91	6.7
9	93.1%	0.8	6.7	99.7%	1.45	7.4
10	96.0%	1.85	7.5	98.8%	1.07	6.2
11	84.1%	1.46	7.1	99.7%	1.59	7.6
12	96.9%	1.31	7.2	92.2%	1.59	7.6

2012 年的各月平均示性波高介於 0.77 至 1.83m 之間，平均週期在 5.8 至 7.8 sec，有最大的月平均示性波高在 1 月，其值為 1.83m，相對的平均週期為 7.8 sec。若查其逐時的示性波高最大可達 4.9 m，其週期為 9.1sec，波向為 N。

平均示性波高及週期分別繪圖如圖 2.2-2 及圖 2.2-3。由圖 2.2-2 及圖 2.2-3 顯示在各月的月平均示性波高及週期有明顯的季節性，以  $H_s$  而言 1 至 4 月與 11 及 12 月的特性較為接近，其值約為 2m；5 至 9 月則較為接近，其值約為 1m。2012 年的月平均示性波高及週期大多比 2010 年高，有些月份波高差可達 0.5m，週期的差值可達 0.5 sec。其可能原因是資料闕漏的比例較高所致。若參見表 2.1-1，雖然 2010 年資料蒐集率達 95.4%，但 11 月份的資料蒐集率僅達 83.1%，為該年最低，且 2012 年 1 月蒐集率僅達 84.0%也是該年最低，卻有最高的月平均示性波高，因此資料蒐集率可能造成某月份的趨勢不一致。

由於兩年的風速資料的良率為 100%，而波高資料約為 90-99%，因此波高遺失的資料先以前期研究所得的經驗公式先由實測風速來推算波高補足。

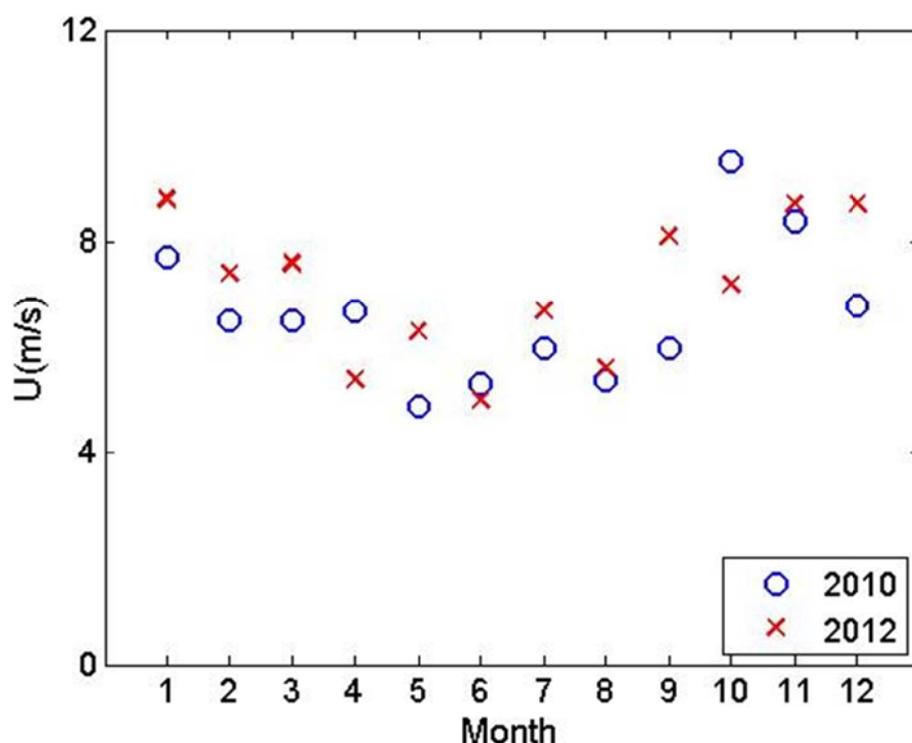


圖 2.2-1 臺北港每月的月平均風速

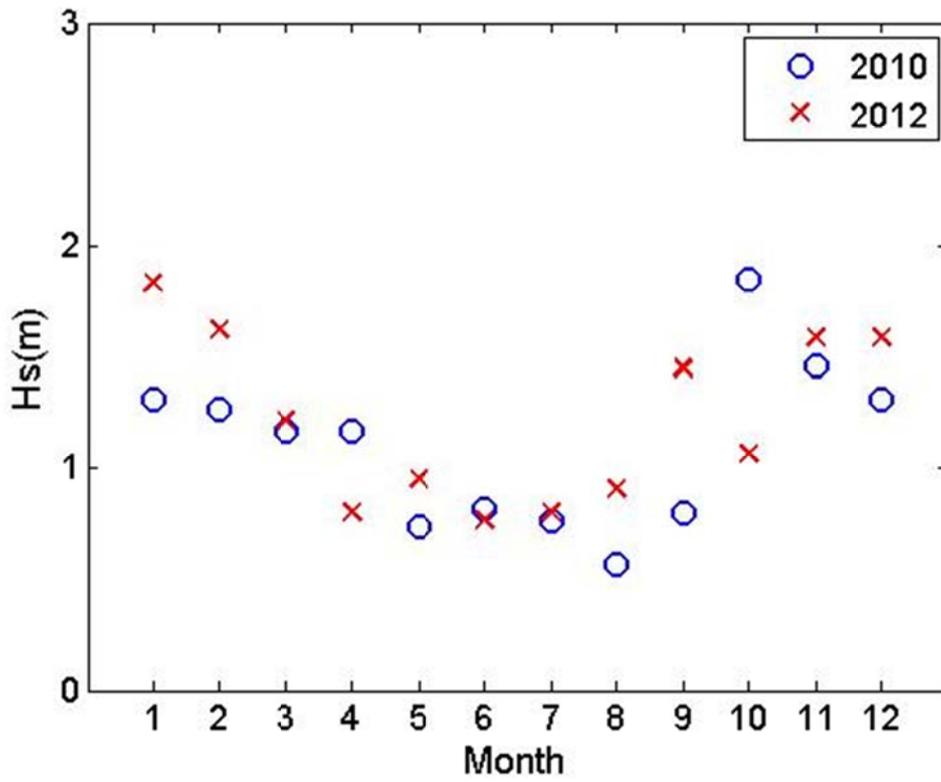


圖 2.2-2 臺北港每月的月平均示性波高

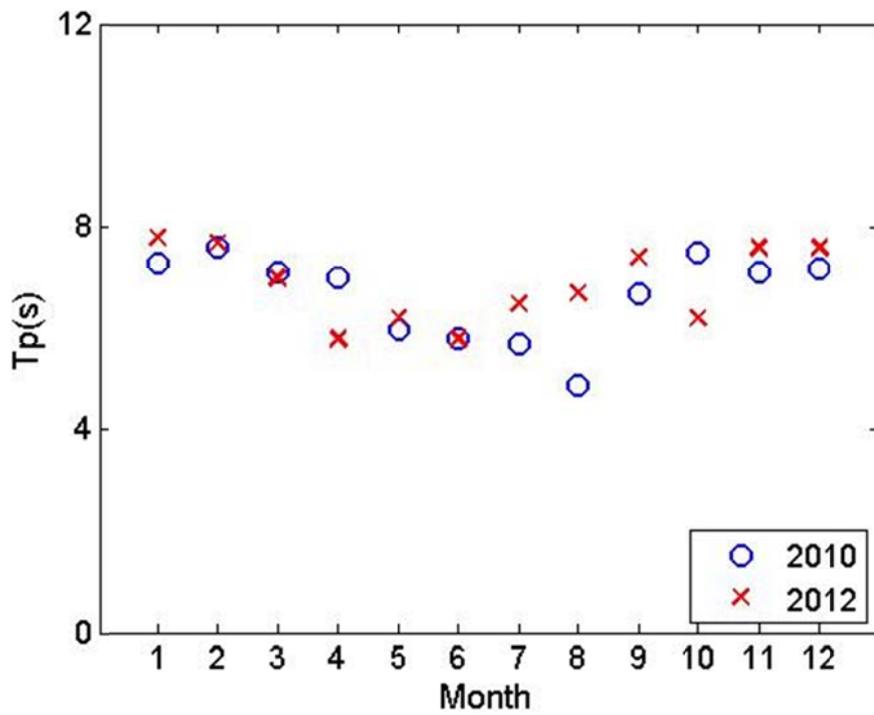


圖 2.2-3 臺北港每月的月平均示性波浪的週期

## 2.3 第一年(2013)的研究結果

本計畫的第一年研究的工作項目為(1)探討短時風速與季節性風速之方向性分布特性；(2) 建立短時風速與季節性風速之最適分布；(3)探討風速與波浪延時相關性；(4)建立風速與波浪之簡易經驗公式。以下簡述各項工作的結果：

### 2.3.1 風速的最適分布

依據 2010 年臺北港的實測資料，將其分成月及季，配套 11 個分布函數，各月份風速的最適分布皆為兩模態 Weibull 分布(BIW)，最高的  $R^2$  為 11 月的 0.994。兩模態 Weibull 分布的機率密度函數及機率函數分別為

$$f(U; \beta_1, \alpha_1, \beta_2, \alpha_2, \omega) = \omega \frac{\beta_1 U^{\beta_1 - 1}}{\alpha_1^{\beta_1}} \exp \left[ - \left( \frac{U}{\alpha_1} \right)^{\beta_1} \right] + (1 - \omega) \frac{\beta_2 U^{\beta_2 - 1}}{\alpha_2^{\beta_2}} \exp \left[ - \left( \frac{U}{\alpha_2} \right)^{\beta_2} \right] \quad (2.3-1)$$

$$F(U; \beta_1, \alpha_1, \beta_2, \alpha_2, \omega) = \omega \left( 1 - \exp \left[ - \left( \frac{U}{\alpha_1} \right)^{\beta_1} \right] \right) + (1 - \omega) \left( 1 - \exp \left[ - \left( \frac{U}{\alpha_2} \right)^{\beta_2} \right] \right) \quad (2.3-2)$$

另外兩模態 Weibull 分布(BIW)之參數進行 kmean 的群集分析，依此將各月份分類成 4 個季節，各季節之定義為：春季—2 月至 4 月，夏季—5 月至 7 月，秋季—8 月至 9 月，冬季—10 月至次年 1 月。

### 2.3.2 風速的方向性分布

以不同方法呈現風速的方向性分布，如(1)直方圖(histogram)；(2)分散直方圖(scatter and histogram plot)；(3) 大、中及小風速及全部資

料的風向 Ksdensity 分布；(4) 高斯混合分布(Gauss mixing distribution) 來配套風速及風向雙變數的三個高斯聯合分布(three-component mixture of bivariate Gaussian distribution)來瞭解風速及風方的聯合分布的特性。

雙變數的高斯分布為例，其定義如下

$$f(U, \theta) = \frac{1}{2\pi\sigma_U\sigma_\theta\sqrt{1-\rho^2}} \times \exp\left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\left(\frac{(U-\mu_U)^2}{\sigma_U^2} + \frac{(\theta-\mu_\theta)^2}{\sigma_\theta^2} - \frac{2\rho(U-\mu_U)(\theta-\mu_\theta)}{\sigma_U\sigma_\theta}\right)\right] \quad (2.3-3)$$

其中  $(\mu_U, \mu_\theta)$  及  $(\sigma_U, \sigma_\theta)$  分別為一個高斯分布下風速及風向的平均值(mean)與標準差(standard deviation)， $\rho$  為風速及風向的相關係數(correlation coefficient)。

以雙變數的三個高斯聯合分布配套臺北港 2010 年全年及四季的風速及風向資料所得聯合分布的三維圖及其等值圖(contour)分別如圖 2.3-1 及圖 2.3-2 所示，所得三個高斯分布峰值的風速及風向  $(U_p, \theta_p)$  畫於圖 2.3-2 中“+”符號，前三大的峰值及峰值與第一峰值的比值列在表 2.3-1。

由圖 2.3-1 及圖 2.3-2 可知聯合分布的主要成份在風速的標準差大於風向的標準差，此顯示臺北港全年風向集中於東北向，但風速變化大；由表 2.3-1 可知其高斯分布的  $U_p$  為 10.34m/s，而  $\theta_p$  在  $49^\circ$ 。第二個高斯分布則顯示在低風速，風向分布很廣，此高斯分布的峰值比第一的峰值明顯小， $U_p$  為 2.77m/s；而  $\theta_p$  為  $172^\circ$ 。若比較此  $\theta_p$  與風向分布所得兩個主風向  $52^\circ$  及  $119^\circ$  可知，因第一主峰明顯，風向集中因而風速影響風向的分布小。二種方法所得角度雖然接近，但是，第二主峰的高斯分布，因風向分布廣且受低風速影響而有所差異。第二峰值的峰值比為 0.106。若以表 2.3-1 低風速的主風向為  $164^\circ$ ，就可理解圖 2.3-1 的二個高斯分布的主風向可相對於全年及低速風的主風向。

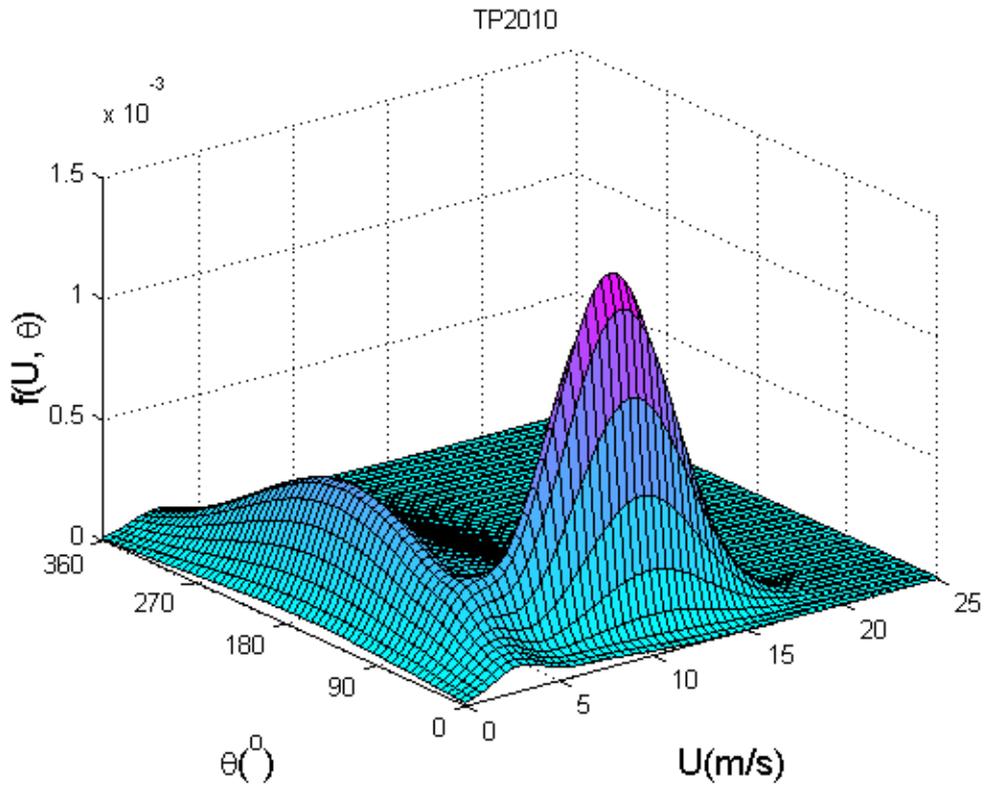


圖 2.3-1 臺北港 2010 年全年的風速與風向聯合分布圖

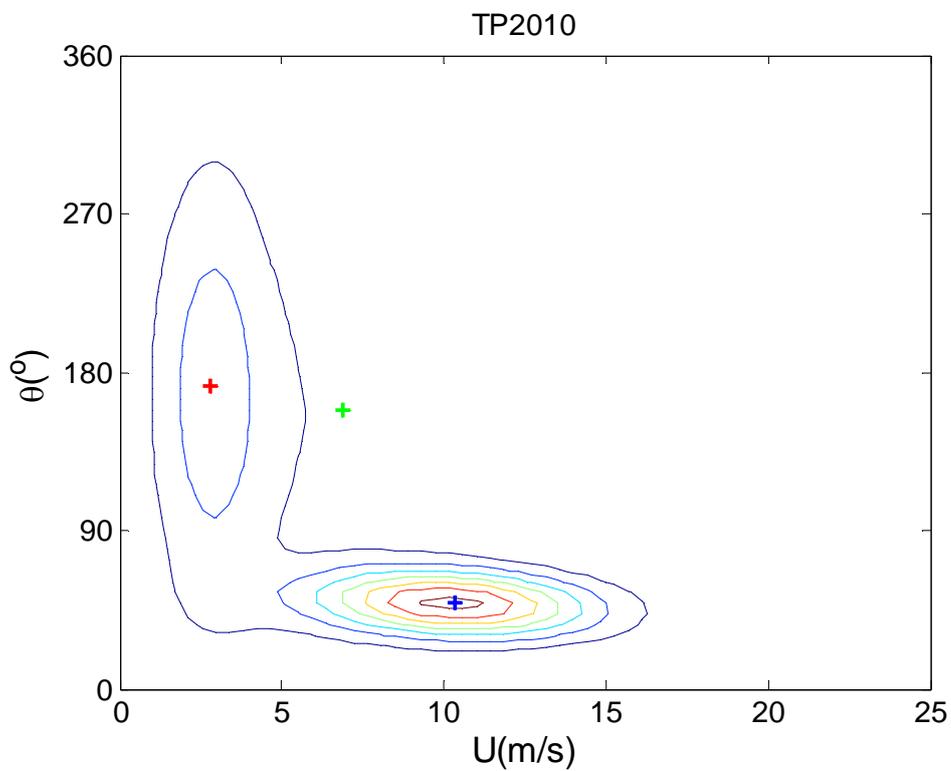


圖 2.3-2 臺北港 2010 年全年的風速與風向聯合分布等值圖

表 2.3-1 臺北港風速與風向聯合分布主峰的風速與風向值

資料長度	第 1 主峰		第 2 主峰			第 3 主峰		
	$U_p$ (m/s)	$\theta_p$ (°)	$U_p$ (m/s)	$\theta_p$ (°)	$f_p^2 / f_p^1$	$U_p$ (m/s)	$\theta_p$ (°)	$f_p^3 / f_p^1$
全年	10.34	49	2.77	172	0.106	6.87	159	0.021
春季	11.03	46	6.03	61	0.034	3.17	215	0.014
夏季	2.96	183	7.68	60	0.617	9.13	247	0.266
秋季	2.92	166	6.07	295	0.786	7.79	74	0.289
冬季	11.35	49	5.74	78	0.128	3.15	233	0.051
1 月	11.81	52	6.13	74	0.030	3.33	233	0.014
2 月	12.34	50	8.00	31	0.059	3.19	193	0.004
3 月	11.45	46	6.03	68	0.053	2.94	212	0.032
4 月	12.62	48	6.10	69	0.020	3.54	218	0.007
5 月	7.65	47	2.35	206	0.043	6.01	164	0.008
6 月	7.47	43	2.66	155	0.802	7.10	160	0.198
7 月	9.72	243	2.79	175	0.382	5.19	170	0.068
8 月	2.70	183	6.47	284	0.153	6.44	81	0.153
9 月	4.60	310	3.02	144	0.541	8.92	69	0.179
10 月	10.66	47	10.35	52	0.798	3.60	145	0.052
11 月	10.82	53	6.38	82	0.090	3.64	269	0.038
12 月	11.77	47	5.21	86	0.086	3.10	244	0.045

### 2.3.3 風速與波浪延時相關性

使用相關係數(R, correlation coefficient)及平均相互資訊(AMI, Average Mutual Information)兩種指標來判斷風速與延時的相關程度。依 Abebe and Price (2004)的研究顯示，平均相互資訊較相關係數更能展現延時相關程度的特性。AMI 的表示式為

$$AMI(A, B) = \sum_{i,j}^N P_{A,B}(a_i, b_j) * \log_2 \left[ \frac{P_{A,B}(a_i, b_j)}{P_A(a_i)P_B(b_j)} \right] \quad (2.3-4)$$

其中  $a_i$  和  $b_j$  為兩個隨機變數， $P_{A,B}(a_i, b_j)$  為兩個變數一起出現的機率， $P_A(a_i)$  及  $P_B(b_j)$  為單一變數出現的機率。

示性波高與風速延時相關性如圖 2.3-3 所示，圖中實線為相關係數 R，虛線為平均相互資訊 AMI，由圖中可知，示性波高與風速的相關性在延時 1 小時最大，其相關係數 R 為 0.7432，平均相互資訊 AMI 為 0.1473，之後則隨著延時的增加，相關性逐漸降低。如往昔研究，圖 2.3-3 亦可看出，平均相互資訊 AMI，較相關係數更能看出延時的相關程度。

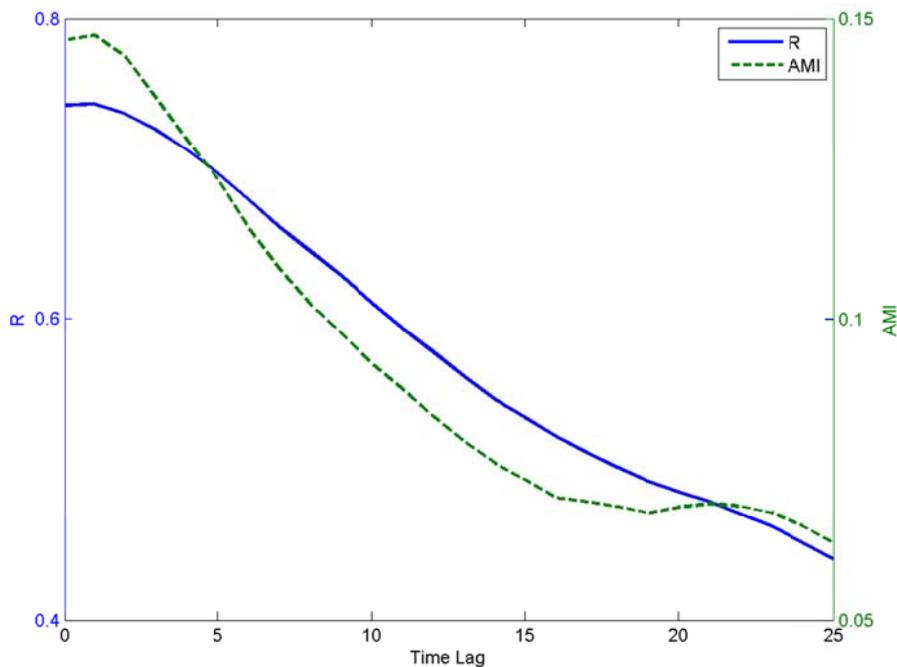


圖 2.3-3 示性波高與風速延時相關性

### 2.3.4 風速與波浪之簡易經驗公式

本文先使用統計學上的箱型圖(Box Plot)理論的離群值偵測法，佐以當地的海象資料，來篩分出異常的資料而獲得合理的資料。接著，以多項式迴歸(polynomial regression)配合虛無假設(null hypothesis)的

F 檢定，決定合適的多項式階數。

若以線性、二次及三次多項式模式分別估算臺北港 2010 年無離群值資料的各項係數、決定係數( $R^2$ )及誤差變異數( $MSE$ )式如表 2.3-2。由表 2.3-2 的  $R^2$  及  $MSE$  比較可知，全部資料以二次多項式模式及無離群值資料以線性模式均與其他模式的估算結果差異大，此說明以無離群值的數據比較集中於分布，且可用二次及三次多項式來表示。無離群值資料以二次多項式模式所得的  $R^2=0.6531$  明顯高於以線性模式所得的  $R^2=0.5959$ ，而以線性模式所得的  $MSE =0.1738$  明顯低於以二次多項式模式所得的  $MSE =0.1492$ ，此結果都顯示增加二階量  $a_2$  於原線性模式明顯助於推估能力。增加三次項後的檢驗指標  $R^2=0.6540$  只比二次式些微的增加 0.0009， $MSE =0.1488$  也比二次式些微的減少 0.0004。從上述 F 檢定、 $R^2$  及  $MSE$  檢定可以發現雖然三次多項式模式的推估能力優於二次多項式模式，然而增加的效果相當有限，而使用三次多項式在計算上比二次多項式繁雜，因此，本文選擇二次多項式為臺北港風速與波高間迴歸的模式。

表 2.3-2 以不同多項式模式迴歸臺北港 2010 年資料的各項係數、決定係數及誤差變異數

模式	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$R^2$	$MSE$
二次式*	0.5372	0.0069	0.0085	-	0.5903	0.2237
線性	0.2037	0.1294	-	-	0.5959	0.1738
二次式	0.5881	-0.0199	0.0102	-	0.6531	0.1492
三次式	0.5234	0.0205	0.0041	0.002	0.6540	0.1488

註:第一列註明\*的結果係以全部資料納入二次多項式迴歸

## 2.4 第二年(2014)的研究結果

本計畫的第二年研究的實工作項目為(1)陸風與海風的風速特性；(2) 向岸風與離岸風的時間分布；(3)不同風速之持續性及其與波浪特性之關係；(4)以不同風速特性建立推算波浪的經驗公式。各項工作的結果簡述如下：

## 2.4.1 陸風與海風的風速特性

本計畫根據 Morgan et al. (2011)所建議適合風速的 Weibull 分布及 Chang (2011)建議的 4 種混合分布，共 5 種不同的機率密度函數， $f(x)$ ，及累積機率函數， $F(x)$ ，來探討臺北港觀測樁、堤頭測站及陸上測站的風速分布。5 種分布函數分別為二參數 Weibull 分布、兩模態 Weibull 分布、兩模態常態分布(NN)、混合裁截 Normal-Weibull 分布(NW)、混合裁截 Gamma-Weibull 分布。

套配臺北港觀測樁 2010 年全年風速的機率密度示如圖 2.4-1。從圖 2.4-1 的觀測樁風速機率密度顯示，在風速約 3.5m/s 及 12m/s 處有兩個峰值，風速分布範圍寬，因此用單峰函數(如 Weibull 分布)來套配這種機率分布並不適合。另外圖 2.4-1 中顯示出 4 種混合的機率分布的套配結果，在 3.5m/s 峰值附近 NW 及 NN 兩種混合函數都有高估的現象，而在兩個峰值之間的機率套配，這兩種函數都與實際的樣本機率有明顯的差異；若以 WW 及 GW 兩種混合函數與樣本的機率密度比較可以發現，此兩種函數的配套吻合程度高於 NW 及 NN 兩種混合函數。以 4 種檢驗指標表示套配於其他樣本機率的吻合程度，如表 2.4-1。

從表 2.4-1 套配觀測樁的風速資料的檢定指標發現，以單峰的 Weibull 分布所得的  $R^2$  明顯低於其他 4 種混合分布函數，而其他三個檢定指標 K-S、RMSE 及  $\chi^2$  都明顯高於其他 4 種混合分布函數，此結果顯示以單峰函數來描述觀測樁的風速並不適合。若比較 4 種混合分布函數的檢定指標發現，NN 及 NW 混合函數的檢定指標相近且高於 WW 及 GG 兩種混合函數的檢定指標。以套配檢定指標  $R^2$  來看，GW 在 4 個函數中是最高的，而在 K-S 及 RMSE 檢定指標卻是最低的，但  $\chi^2$  值雖次低，只稍高於 Weibull 分布。由此檢定結果及圖 2.4-1 的套配結果顯示，以 GW 混合函數是最適合來描述觀測樁的風速分布。混合 Gamma-Weibull 分布的 GW 函數形式為

$$f(U; \alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2, \omega) = \omega \frac{U^{\alpha_1-1}}{\beta_1^{\alpha_1} \Gamma(\alpha_1)} \exp\left[-\frac{U}{\beta_1}\right] + (1-\omega) \frac{\beta_2 U^{\beta_2-1}}{\alpha_2^{\beta_2}} \exp\left[-\left(\frac{U}{\alpha_2}\right)^{\beta_2}\right] \quad (2.4-1)$$

$$F(U; \alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2, \omega) = \omega \left( \frac{1}{\Gamma(\alpha_1)} \int_0^U \left(\frac{t}{\beta_1}\right)^{\alpha_1-1} \exp\left[-\frac{t}{\beta_1}\right] d\left(\frac{t}{\beta_1}\right) \right) + (1-\omega) \left( 1 - \exp\left[-\left(\frac{U}{\alpha_2}\right)^{\beta_2}\right] \right) \quad (2.4-2)$$

表 2.4-1 以 5 種機率函數套配風速樣本機率的 4 種檢定指標

觀測名稱	指標	W	WW	GW	NW	NN
觀測樁	R2	0.9024	0.9864	0.9969	0.9538	0.9560
	K-S	0.0242	0.0144	0.0110	0.0209	0.0227
	RMSE	0.0118	0.0043	0.0022	0.0082	0.0080
	$\chi^2$	0.2631	0.0309	0.0330	0.1111	0.1018
堤頭測站	R2	0.9737	0.9962	0.9949	0.9855	0.9618
	K-S	0.0172	0.0086	0.0110	0.0141	0.0218
	RMSE	0.0071	0.0026	0.0030	0.0052	0.0082
	$\chi^2$	0.1027	0.0206	0.0157	0.0553	0.1188
陸上測站	R2	0.9860	0.9962	0.9885	0.9932	0.9602
	K-S	0.0450	0.0298	0.0780	0.0355	0.0647
	RMSE	0.0162	0.0083	0.0134	0.0117	0.0242
	$\chi^2$	0.1186	0.0325	0.0820	0.0906	0.7397

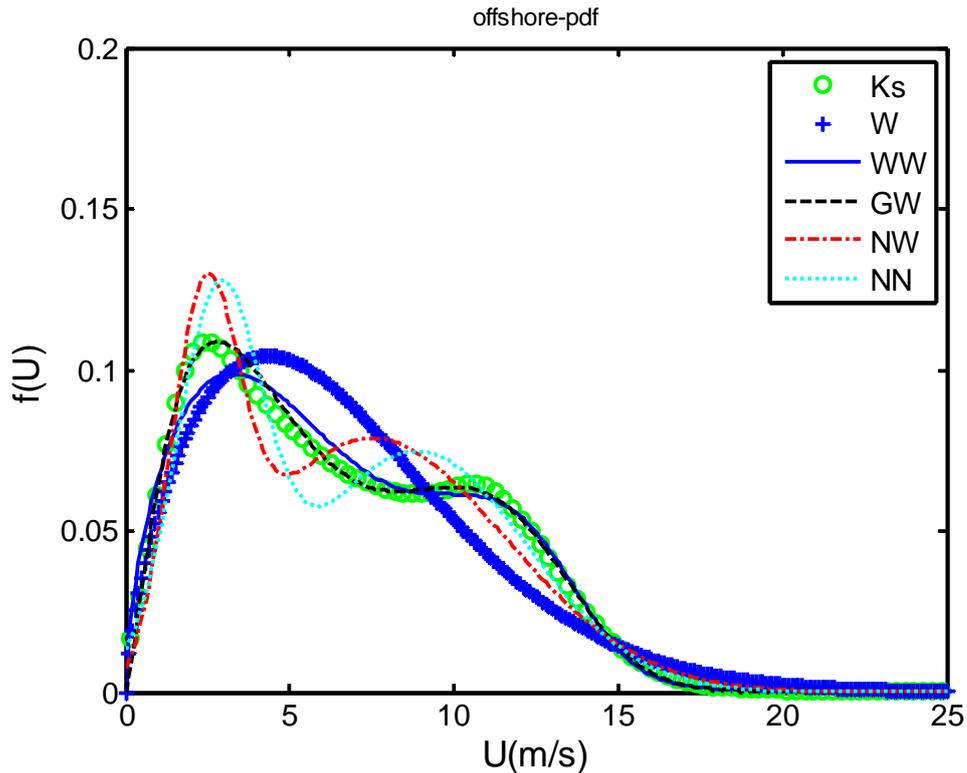


圖 2.4-1 比較 5 種混合函數套配觀測樁風速的機率密度

### 2.4.2 向岸風與離岸風的時間分布

本計畫先定義向岸風與離岸風的方位角，將實測風向依此定義來決定其發生的時間即日數。統計每日有海陸風轉向的每月天數示如表 2.4-2 的第二行，再分析無轉向三種情況的天數如表 2.4-2 最後 3 行。從表 2.4-2 可知海陸風向轉變的天數僅 8-13 天，在 7 月有最多天數海陸風向轉；有季風特性而無海陸風轉向的天數約在 12 至 17 天，在 5 及 6 月以西南季風居多，而 9 月以東北季風居多。

在 5 至 9 月找出的海陸風的轉向時間的時序列繪製成圖 2.4-2。由圖 2.4-2 可知在早上陸風轉海風的時間與下午海風轉陸風的時間有變動。早上陸風轉海風的平均時間為 8.55 時，而下午海風轉陸風的平均時間為 17.44 時，前者標準差為 0.96 小時而後者標準差為 1.63 小時。

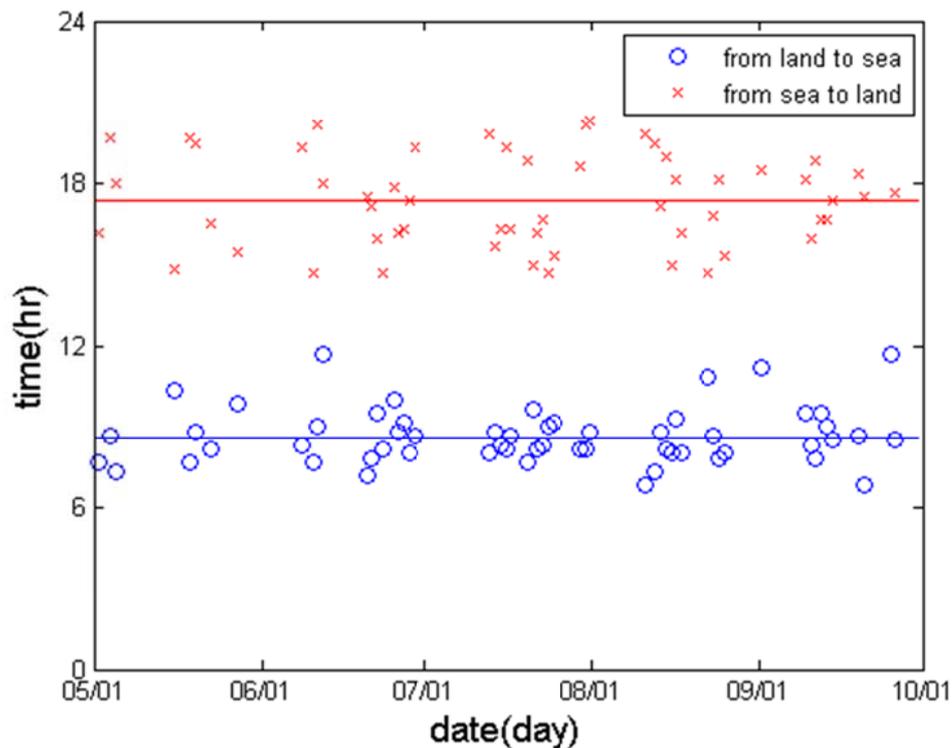


圖 2.4-2 海陸風轉向的時序圖

表 2.4-2 臺北港 5 至 9 月發生海陸風的每月天數

月份	轉向	季風	降雨	其他
5	8	17	2	4
6	13	16	1	0
7	13	15	1	2
8	12	12	3	4
9	11	14	3	2

### 2.4.3 不同風速之持續性及其與波浪特性之關係

若考慮主峰的風速及風向來分季節的月份，分成三季是比較適合的，即 5-7 月的夏季西南季風，與 8 及 9 月的秋季季風，冬春季 7 個月(10 月至隔年的 4 月)的東北季節風。此 3 個季節的風速及風向聯合分布及三個主峰的風速及風向則示如表 2.4-3。

表 2.4-3 臺北港觀測樁分三季節的風速三個主峰值

資料 長度	第 1 主峰		第 2 主峰		第 3 主峰	
	$U_p$ (m/s)	$\theta_p(^{\circ})$	$U_p$ (m/s)	$\theta_p(^{\circ})$	$U_p$ (m/s)	$\theta_p(^{\circ})$
5-7 月	2.96	183	7.68	60	9.13	247
8-9 月	2.97	166	6.12	296	7.85	74
10-4 月	11.59	48	5.83	72	4.16	222

#### 2.4.4 以不同風速特性建立推算波高及週期的經驗公式

以風向分類方法將臺北港風速資料分成海風、陸風、西南風及東北風等 4 組。再以二次多項式模式估算臺北港 2010 的波高正常資料(去除離群值的樣本)的各項係數、決定係數及誤差變異數示如表 2.4-4；而週期分析結果如表 2.4-5 所示。

表 2.4-4 波高的樣本個數及二次多項式迴歸所得的係數及檢定指標

樣本	個數		二次多項式的係數			檢定指標	
	正常	離群	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$R^2$	MSE
全年*	-	-	0.5372	0.0069	0.0085	0.5903	0.2237
全年	8414	346	0.5881	-0.0199	0.0102	0.6531	0.1492
海風	1665	97	0.7607	-0.1033	0.0169	0.6219	0.1169
陸風	2754	83	0.3982	0.0783	-0.0021	0.1019	0.1909
西南風	805	15	0.4598	0.0420	0.0036	0.5924	0.0641
東北風	3284	57	0.6776	-0.0229	0.0107	0.6400	0.2024
分區全年	8518	242	-	-	-	0.7082	0.1399

註:第一列有\*的結果係以全部資料納入二次多項式迴歸

由分組迴歸公式的計算全年波高的與實測值的  $R^2=0.7082$  及  $MSE =0.1399$ ，較佳於不考慮分組的全年樣本的結果( $R^2=0.6531$  及

MSE =0.1492)。此證實以相似統計特性的分組樣本所得迴歸公式，可以獲得更精準的計算波高的公式。由風速計算全年波浪週期與實測值的  $R^2=0.1810$  及  $MSE =2.3718$ ，顯示波浪週期與風速是低相關的。

**表 2.4-5 週期的樣本個數及線性迴歸所得的係數及檢定指標**

樣本	個數		線性迴歸的係數		檢定指標	
	正常	離群	$a_0$	$a_1$	$R^2$	MSE
全年	8203	9	5.7556	0.1252	0.0792	2.9534
海風	1760	2	6.0218	0.0427	0.0062	3.3790
陸風	2824	13	6.0669	0.0857	0.0254	2.4401
西南風	815	5	5.9817	-0.0520	0.0144	2.0301
東北風	3270	71	5.2842	0.1982	0.1928	2.0783
分區全年	8660	100	-	-	0.1810	2.3718

### 第三章 風浪與湧浪的分類

本章節在 PM 波譜劃分風浪與湧浪的基礎下，以邊界層理論轉換其劃分標準成以海面上 10m 風速的形式，而提出適合臺北港風速的風浪與湧浪的資料劃分。

#### 3.1 PM 波譜的劃分指標

往昔在波譜劃分湧浪及風浪之方法，都在實測水位轉成波譜後，依照湧浪的風浪特性提出適當的劃分頻率位置，往昔研究已敘述在第一章文獻回顧。然而，本研究所得的數據為實測水位轉為個別波的統計結果，如示性波高(significant wave height)及波譜尖峰週期(peak frequency)，因而需要提出新的劃分波浪的指標。本研究欲修改 PM 波譜的劃分方式，其分法簡述如下：

PM 波譜為 Pierson and Moskowitz (1964)修正 Phillips 波譜所提出在北太平洋具無限吹送距離下的標準型風浪波譜，即 PM 波譜適用於外海的成熟風浪，且波譜形狀大小與吹送距離無關，僅與風速有關，示如式(3.1-1)：

$$S(f) = 0.0081(2\pi)^{-4} g^2 f^5 \exp\left[-0.24\left(\frac{g}{2\pi U_{19.5} f}\right)^4\right] \quad (3.1-1)$$

分散關係式說明波浪的週期、波長、波高及水深之關係，如式(3.1-2)

$$\omega^2 = gk \tanh kh \quad (3.1-2)$$

其中  $g$  為重力加速度、 $k=2\pi/L$  為波數、 $h$  為水深  $L$  為波長。式(3.1-2)由波速  $C=L/T$ 、週波率  $\omega=2\pi/T=Ck$  及波數可得式(3.1-3)。

$$f = \frac{g}{2\pi C} \quad (3.1-3)$$

當波譜達完全發展的波齡，由現場風速與波速的轉換經驗式可得

PM 波譜的劃分風浪及湧浪的尖峰週期，如式(3.1-4)所示：

$$T_p = 0.729U_{19.5} \quad (3.1-4)$$

基於波高為 Rayleigh 分布的假設，示性波高與波譜面積的關係為式(3.1-5)：

$$H_s = 4.004\sqrt{m_0} \quad (3.1-5)$$

其中  $m_0$  為波譜的零階矩(zero moment)，即為式(3.1-6)，且示性波高與海面上 19.5m 的風速關係示式(3.1-7)：

$$m_n = \int_0^\infty f^n S(f)df \quad (3.1-6)$$

$$H_s = 0.0213U_{19.5}^2 \quad (3.1-7)$$

### 3.2 波浪統計資料的分類

在海洋研究常以海面上 10 公尺的風速( $U_{10}$ )來表示風速特性，且本文使用的臺北港風速資料約為海面上 10 公尺的風速，為配合  $U_{10}$  風速，因此需將式(3.1-1)的  $U_{19.5}$  轉換成  $U_{10}$ 。

海面波動的粗糙度(roughness)對風速產生摩擦而形成邊界層(boundary layer)，風速的分布隨高度增加而減少，而常以邊界層的冪次定律(power law)來表示之。在海洋的風速分布常以 1/7 冪次表示不同高度與風速的關係，示如式(3.2-1)

$$\frac{U}{U_h} = \left(\frac{z}{h}\right)^{1/7} \quad (3.2-1)$$

其中  $U$  為  $z$  高度的風速， $U_h$  為  $h$  高度的風速。

以高度 10 m 及 19.5 m 帶入式(3.2-1)可得  $U_{10}=U_{19.5}/1.1$ ，再代入此關係於式(3.1-4)及式(3.1-7)，可得 PM 波譜成熟波的波高與週期以  $U_{10}$

表示的公式，分別為：

$$T_{PM} = 0.802U_{10} \quad (3.2-2)$$

$$H_{PM} = 0.0258U_{10}^2 \quad (3.2-3)$$

式(3.2-2)及式(3.2-3)表示波浪成熟的波高及週期與風速的關係。當局部點的海面 10 m 風速已知時，即帶入  $U_{10}$  於式(3.2-2)及式(3.2-3)獲得相對應的成熟波高及週期。若實測波高及週期大於計算值顯示，當地實測值有多餘的波浪能量高於  $U_{10}$  產生的成熟波的波高與週期，而此時測量的波浪由外圍波浪的湧浪所傳遞而來。

考慮 PM 波譜的劃分風浪及湧浪的公式有統計上的偏差。由風速代入式(3.2-2)所推算週期值，在 $\pm 10\%$ 範圍內，及代入式(3.2-3)的波高值的 $\pm 15\%$ 範圍內，設定為成熟風浪，亦即由此風速造成的成熟波的波高及週期會在  $H_{PM} \pm 15\%$  及  $T_{PM} \pm 10\%$  之內。

湧浪情況多為外圍波浪傳來的較長週期，因此若實測週期大於成熟波的  $T_{PM} + 10\%$ ，且實測波高亦須大於  $H_{PM} - 15\%$  以上，則定義為湧浪，標示為  $H_s^s$ 。成長波浪為波高未達成熟波高的條件，即為小波高及短週期的狀況，小於  $H_{PM} - 15\%$  及  $T_{PM} - 10\%$  條件，此成長波浪標示為  $H_s^w$ 。其他情況多為實測波高大於  $H_{PM} - 15\%$ ，且大於  $T_{PM} - 10\%$  的條件，此成熟波浪標示為  $H_s^f$ 。本研究以 2010 年的正常數據以上述分類原則，在  $T_{PM} \pm 10\%$  及  $H_{PM} \pm 15\%$  的分界值分類出 9 種狀況，其分類範圍及波浪個數示如圖 3.2-1。

由圖 3.2-1 可知在 9 個分區範圍較多的 2 個為左下角的  $H_s^w$ ，有 2396 個波浪，右上角的  $H_s^s$ ，有 3744 個波浪。至於中間的成熟波範圍  $H_s^f$ ，僅有 188 個波浪，其他兩個小波情況的個數為 836 個及 759 個及長週期中波高的  $H_s^s$  有 533 個，其他兩個波浪數相當少，只有 33 個及 31 個。分類 2010 年的湧浪個數為 4277，成熟波浪的個數為 221，而成長波浪的個數為 4022。2012 年的 9 個分區情況相似於 2010 年，

僅有些微的數量差異。

$H_S^W$ 759	$H_S^S$ 533	$H_S^S$ 3744
$H_S^W$ 836	$H_S^f$ 188	$H_S^f$ 336
$H_S^W$ 2396	$H_S^W$ 31	$H_S^f$ 0

圖 3.2-1 界定波高與週期 9 種狀況的 2010 年資料數量及其分類

分析 2010 年及 2012 年的數據正常值及離群值分別如圖 3.2-2 及圖 3.2-3 所示，圖中方形為數據為離群的樣本，”x”為正常值，”\*”號為二次迴歸的曲線。2010 年及 2012 年的正常數據分別為 8520 及 8568，占全年數據 97.26%及 97.80%。由圖 3.2-2 及圖 3.2-3 顯示以二次式迴歸正常數據是合理的。

以上述分類方法劃分 2010 年及 2012 年的正常資料成湧浪、成熟週期風浪及成長風浪三類，其波高與風速之關係圖分別示如圖 3.2-4 及圖 3.2-5 的上圖、中間圖及下圖。圖 3.2-4 之上圖可知分類出湧浪的最大風速約達 11 m/s，若以式(3.2-3)計算此風速下的波高只為 3.12m，但實測的波高幾乎達到 3m，實測波高雖然稍低於此風速所造成的成熟波高，因為其週期大於成熟波的週期，說明此種波浪為湧浪長週期，而且已含有高能量，除局部風產生能量以外，亦包括外圍波浪所傳入的能量。因此，本研究所歸類之湧浪確保與往昔以指標波譜來劃分湧浪能量高於風浪能量之結果相同。在第五章將探討湧浪與局部風速及外圍風場的關係。

圖 3.2-3 及圖 3.2-4 中間圖的成熟風浪顯示樣本數量較其他兩種少，風速約在 3-12 m/s。成熟風浪的波高隨風速增加，接近於線性增加，樣本集中分布在此迴歸曲線上。以式(3.2-3)計算 10 m/s 風速下的成熟波高為 2.58m，實測的波高為 2.33m，與此值相近。2012 年的成熟波浪的分布相似於 2010 年的狀況。

至於圖 3.2-3 及圖 3.2-4 下圖的成長風浪情況，顯示出資料分布較成熟波浪散亂，波高隨風速增加而呈現二次式的增加，風速約在 3-22 m/s 間。若以式(3.2-3)計算 5 及 20 m/s 風速下的成熟波高為 0.65m 及 10.3 m，此實測的成長風浪僅約 0.4m 及 4.5 m，此顯示在此局部風速下成長風浪尚未達到成熟波浪，還可再成長。2012 年的成長波浪的分布比 2010 年散亂，此說明 2012 年的數據較 2010 年統計特性不一致。迴歸 2010 年及 2012 年正常資料的結果則在下節詳細敘述。

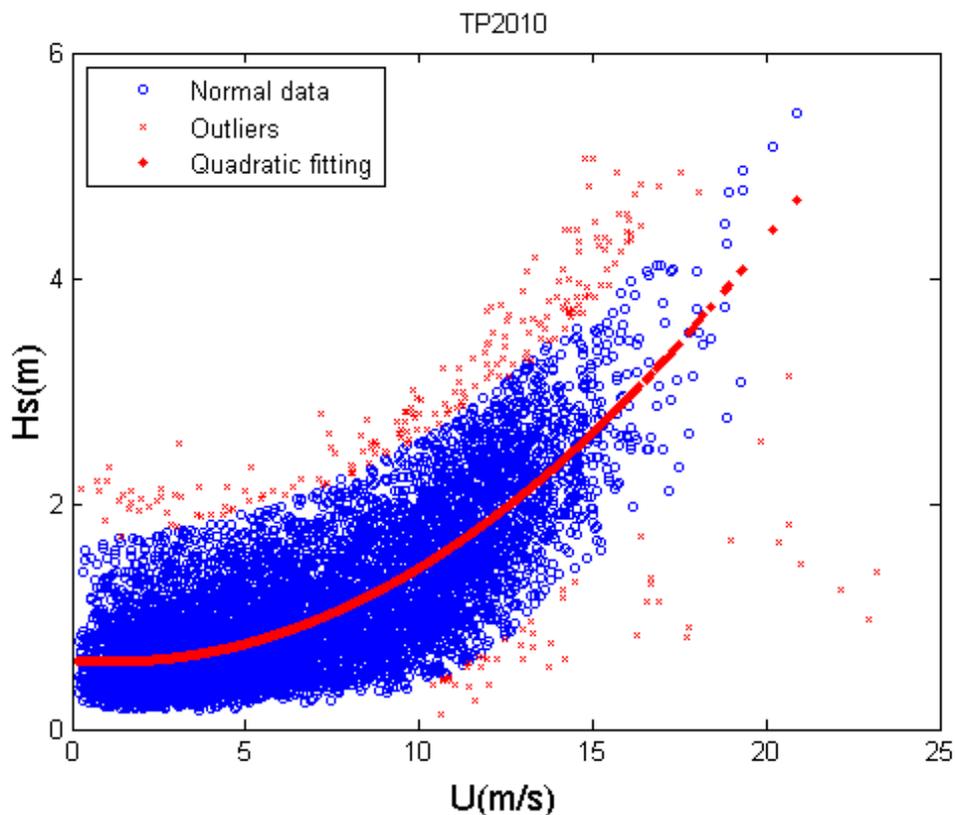


圖 3.2-2 波高與風速的分布圖及其二次式迴歸曲線(2010 年)

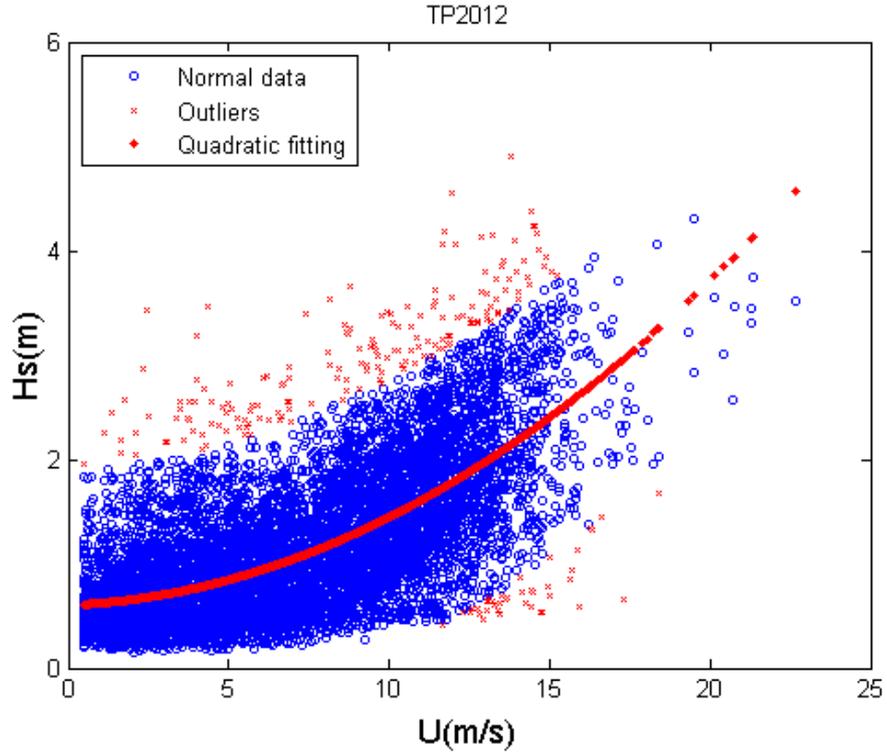


圖 3.2-3 波高與風速的分布圖及其二次式迴歸曲線(2012 年)

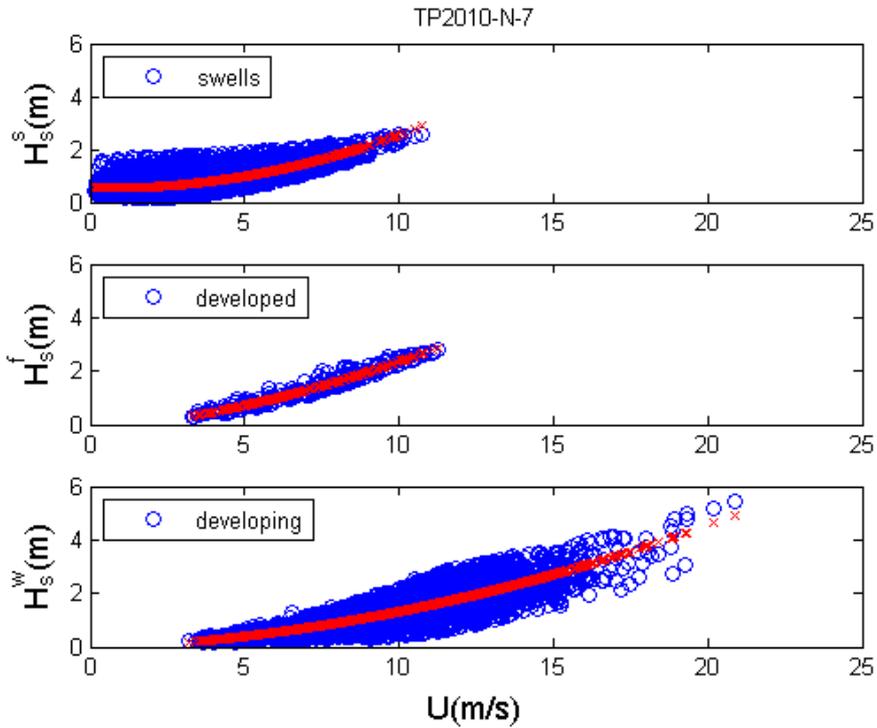


圖 3.2-4 三類波浪的波高與風速的關係圖(2010 年)

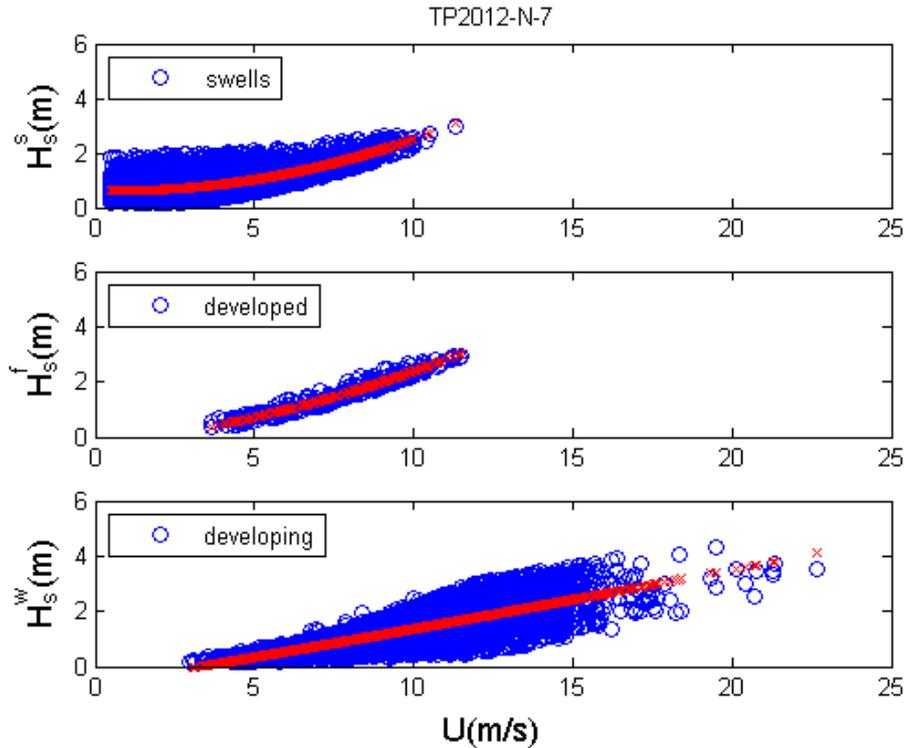


圖 3.2-5 三類波浪的波高與風速的關係圖(2012 年)

### 3.3 波浪分類的迴歸分析

表 3.3-1 及表 3.3-2 為迴歸 2010 年及 2012 年資料的結果。以表內各類波浪資料中所獲得的二次多項式的迴歸係數，代入風速於二次多項式，可獲得各類的計算波高，合併各類計算波高後再與相對應的實測值比較，其散布圖分別示如圖 3.3-1 及圖 3.3-2，其中橫軸及縱軸的說明  $H_m$  及  $H_c$  分別代表實測示性波高及以經驗公式的計算值。

由表 3.3-1 的第 1 列及第 2 列的檢定指標可知，若未考慮樣本離群值的迴歸分析檢定指標比刪除樣本的離群值的結果差。此結果符合一般統計分析的理論，且已於前期報告證實。湧浪的個數為 4277，是三類中最多的；但其迴歸結果的  $R^2=0.5123$ ，在三類中最低的，此說明湧浪的波高與局部風速的相關性低於其他兩類。其  $RMSE=0.3057m$  低於成長波浪的  $RMSE$ ，此乃湧浪樣本值多低於成長波浪，以  $RMSE$  計算式可知低測量值的  $RMSE$  就會比高測量值的  $RMSE$  低。但若以  $RMSE$  除以該類平均波高而得的相對  $RMSE$  (簡稱為  $RRMSE$ )，湧浪的  $RRMSE$  為 0.3866，就高於成長波浪的

RRMSE=0.3061。

成熟波浪的個數僅 221 個，其  $R^2=0.9473$  在三類中最高的， $RMSE=0.1451m$  為三者最低，因為成熟波浪的分類條件較其他兩類嚴苛，所以樣本的統計特性高。

成長波浪的個數從表 3.3-1 迴歸係數來看，成熟波浪的  $a_2$  係數為成長波浪的  $a_2$  係數的 1.54 倍，而成熟波浪的  $a_1$  係數為成長波浪的  $a_1$  係數的 2.42 倍，此顯示風速影響成熟波浪波高較大於成長波浪。成熟波浪的  $a_1$  係數為  $a_2$  係數的 8.18 倍，而成長波浪的  $a_1$  係數為  $a_2$  係數的 5.21 倍，此顯示風速線性項影響成熟波浪比成長波浪大為 4022。成長波浪的檢定指標  $R^2=0.7223$  及  $RMSE=0.4077m$ 。

從圖 3.3-1 的實測值與合併計算值散布圖，及通過原點 45 度的二者線性迴歸直線來看，實測值與計算值均勻地分布在 45 度斜線的帶狀上，且從表 3.3-1 的  $R^2=0.7285$  高於全年的正常樣本的  $R^2=0.6286$ ，此顯示出以波浪分類後迴歸式比全部資料的迴歸結果更適合地表示風速與波高的關係。

**表 3.3-1 2010 年波浪的三類正常樣本數、迴歸係數及檢定指標**

樣本	樣本個數	二次多項式的係數			檢定指標	
		$a_0$	$a_1$	$a_2$	$R^2$	RMSE
全年*	8760	0.5732	-0.0031	0.0093	0.5847	0.4829
全年	8520	0.6103	-0.0230	0.0105	0.6286	0.4151
湧浪	4277	0.5397	-0.0227	0.0223	0.5123	0.3057
成熟波浪	221	-0.2139	0.1154	0.0141	0.9472	0.1151
成長波浪	4022	-0.0712	0.0477	0.0092	0.7223	0.4077
合併分類	8520	-	-	-	0.7285	0.3549

註:第一列有\*的結果係以全部資料納入二次多項式迴歸

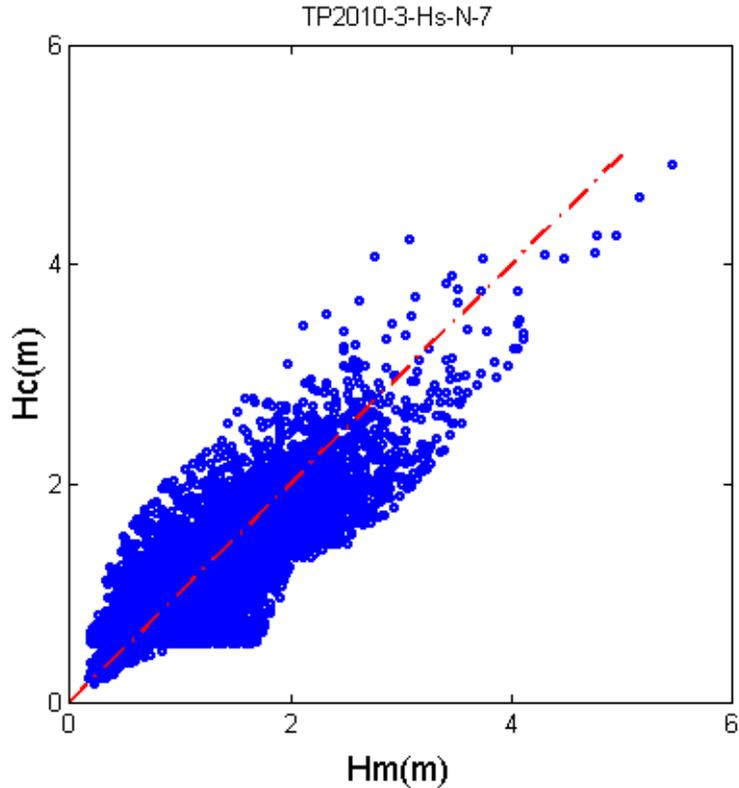


圖 3.3-1 合併 2010 年三類波浪的計算波高及實測值的散布圖

至於 2012 年的分析結果，由表 3.3-2 第 1 列及第 2 列的檢定指標可說明，刪除離群值在迴歸分析是有必要的，此如同前述 2010 年的狀況。湧浪的個數為 3988，稍少於成長波浪是三類中次最多的。其迴歸的  $R^2=0.4873$  在三類中最低的，湧浪的  $RMSE=0.3516\text{ m}$ ， $RRMSE$  為  $0.3987$ 。前者低於成長波浪的  $RMSE=0.4726$ ，後者高於成長波浪的  $RRMSE=0.3449$ 。成熟波浪的個數為 246，其檢定指標  $R^2=0.9463$ ，在三類中最高的，而其  $RMSE=0.1505\text{ m}$  為三類中最低的，顯示成熟波浪有極佳的二次式迴歸。成長波浪的個數為 4334，其檢定指標  $R^2=0.5941$  在三類中次高的。

三類波浪經迴歸分析所得二次多項式後，再代入風速計算出各類的波高值，合併所有計算值與對應實測值，獲得二者全年的  $R^2$  及  $RMSE$ 。圖 3.3-2 為合併各類計算波高與實測值的散布圖，圖中的直線為通過原點 45 度的線性迴歸的曲線。從圖 3.3-2 可知，實測值與計算值均勻地分布在 45 度的斜線的帶狀上，而從表 3.3-2 可知  $R^2=0.6325$  高於全年的正常樣本的  $R^2=0.5193$ 。比較圖 3.3-1 及圖 3.3-2 可看出，

2012 年的實測值與計算值的散布程度比 2010 年寬廣。若再比較表 3.3-1 及表 3.3-2 的各類波浪相對的檢定指標可知，2012 年的波浪的檢定指標較 2010 年的波浪差，尤其成長波浪的結果，此均顯示 2012 年的波浪的統計特性較 2010 年的波浪差。

若比較表 3.3-1 及表 3.3-2 的迴歸係數，兩年的成長波浪係數有明顯的差異外，其他的湧浪及成熟波浪的係數是相近的。因此若以 2010 年的迴歸公式來推算 2012 年時，在成長波浪部分就會有比湧浪及成熟波浪有較大的誤差。

從上述討論可證實本研究分類湧浪及風浪的方法是可行的，而湧浪與局部單點風速有關外，尚與外圍風速有關，因此，只用單點的局部風速來迴歸湧浪的特性是不足的，而必須再與外圍的風場特性建立關係，此改善推算方法將在第 5 章敘述。

**表 3.3-2 2012 年波浪的三類正常樣本數、迴歸係數及檢定指標**

樣本	樣本個數	二次多項式的係數			檢定指標	
		a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	R <sup>2</sup>	RMSE
全年*	8784	0.5917	0.0256	0.0064	0.4656	0.5337
全年	8568	0.6023	0.0132	0.0071	0.5193	0.4737
湧浪	3988	0.6230	-0.0272	0.0216	0.4873	0.3516
成熟波浪	246	-0.2414	0.1182	0.0144	0.9463	0.1505
成長波浪	4334	-0.6510	0.1945	0.0007	0.5941	0.4726
合併分類	8568	-	-	-	0.6325	0.4137

註:第一列有\*的結果係以全部資料納入二次多項式迴歸

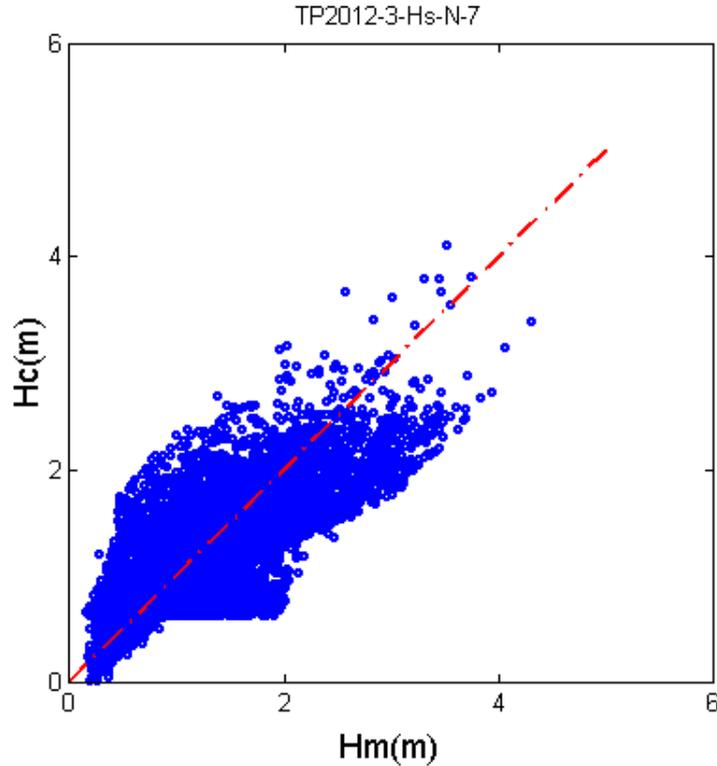


圖 3.3-2 合併 2012 年三類波浪的計算波高及實測值的散布圖

### 3.4 風速邊界層分布的幕次方對迴歸分析的影響

上節的迴歸分析結果乃根據常用的風速 1/7 幕次方的邊界層分布理論轉換 19.5m 高的風速與 10m 高的實測風速，即式(3.2-1)。然而，風速邊界層分布的幕次方可能跟風速及地區有所差異，在本節以不同的幕次方來轉換 PM 波譜原定義 19.5 m 風速成 10 m 風速，比較迴歸結果的差異。

如式(3.2-1)公式本研究再以 1/5 及 1/6 的幕次方，來計算成熟波的波高及週期分別為  $0.0278U_{10}^2$ 、 $0.0266U_{10}^2$  及  $0.833U_{10}$ 、 $0.814U_{10}$ 。不同風速分布的幕次方來迴歸 2010 年及 2012 年所得的評估指標  $R^2$  及 RMSE，分別示如表 3.4-1 及表 3.4-2。從此二表可知風速在邊界層的分布幕次方轉換 PM 波譜的公式成 10m 高的風速，對判斷波浪分類影響不大，因此迴歸波浪分類的結果差異小。若以模式評估指標來看，1/7 幕次方的風速分布的結果在三者是最佳的。因此，爾後分析則根據 1/7 幕次方的風速分布來轉換 PM 波譜的公式。

**表 3.4-1 不同風速分布冪次方迴歸 2010 年所得的  $R^2$  及 RMSE**

樣本/ 冪次方	1/5		1/6		1/7	
	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE
湧浪	0.4946	0.3030	0.5064	0.3044	0.5123	0.3057
成熟波浪	0.9468	0.1359	0.9464	0.1438	0.9472	0.1151
成長波浪	0.7101	0.4147	0.7176	0.4107	0.7223	0.4077
合併分類	0.7201	0.3603	0.7251	0.3571	0.7285	0.3549

**表 3.4-2 不同風速分布冪次方迴歸 2012 年所得的  $R^2$  及 RMSE**

樣本	1/5		1/6		1/7	
	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE
湧浪	0.4528	0.3503	0.4781	0.3509	0.4873	0.3516
成熟波浪	0.9419	0.1523	0.9471	0.1467	0.9463	0.1505
成長波浪	0.5839	0.4770	0.5911	0.4740	0.5941	0.4726
合併分類	0.6224	0.4193	0.6292	0.4155	0.6325	0.4137

## 第四章 海風、陸風及季節風的波浪分類

在前期以海岸線的風向分區的研究基礎下，本章考慮不同風向分區對迴歸分析的影響，並分析 2010 及 2012 年的二次多項式迴歸波高與風速的關係。

### 4.1 全年波高與風速的迴歸

本計畫的前期研究所使用的多項式迴歸分析的理論及模式評估可詳見前期報告或簡述於附錄中。今年利用二次多項式迴歸分析增加 2012 年的數據分析。表 4.1-1 為以二次多項式迴歸不同年份的波高的評估指標，圖 4.1-1 及圖 4.1-2 分別為以 2010 及 2012 年的二次多項式迴歸所計算的波高與實測值的散布圖。

比較圖 4.1-1 及圖 4.1-2 與表 4.1-1 的第二列的 2010 年評估指標及第三列的 2012 年評估指標顯示，2012 年的風速與波高的關係較 2010 年者散亂。以 2010 年的二次多項式迴歸計算 2012 年的波高，如圖 4.1-3 及表 4.1-1 最後一列顯示出評估指標為  $R^2=0.5145$  及  $RMSE=0.4813$ 。此評估指標相似於第二列的評估指標，此說明以 2010 年的二次式迴歸公式推估 2012 年的波高，與 2012 年的二次式迴歸公式推估 2012 年的波高相近。此說明以 2010 年的二次式迴歸公式來描述 2012 年的波高還是可行的，且如前述 2012 年的波浪較 2010 年散亂，波浪統計的偏差較大。

表 4.1-1 以二次多項式迴歸推算不同年份波高的評估指標

樣本年份	推估年份	$R^2$	RMSE
2010	2010	0.6286	0.4151
2012	2012	0.5172	0.4741
2010	2012	0.5145	0.4813

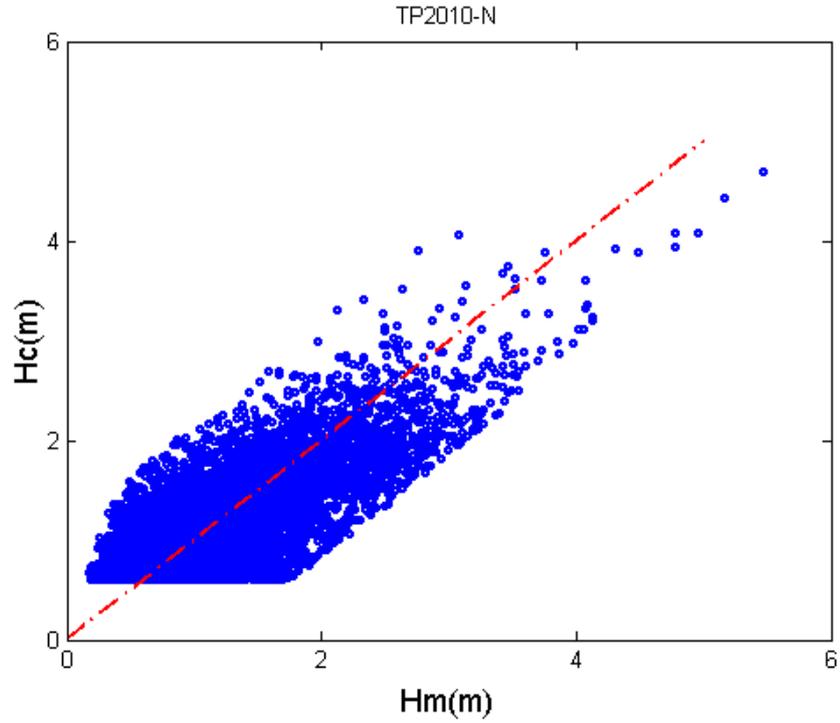


圖 4.1-1 以 2010 年資料迴歸式推估 2010 年波高與實測值之散布圖

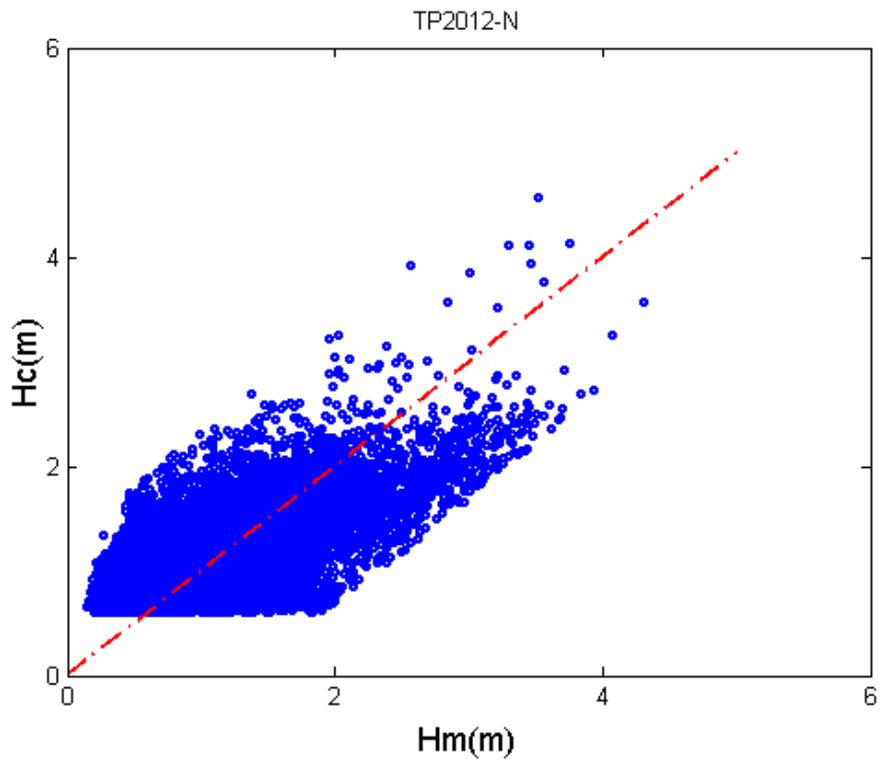


圖 4.1-2 以 2012 年資料迴歸式推估 2012 年波高與實測值之散布圖

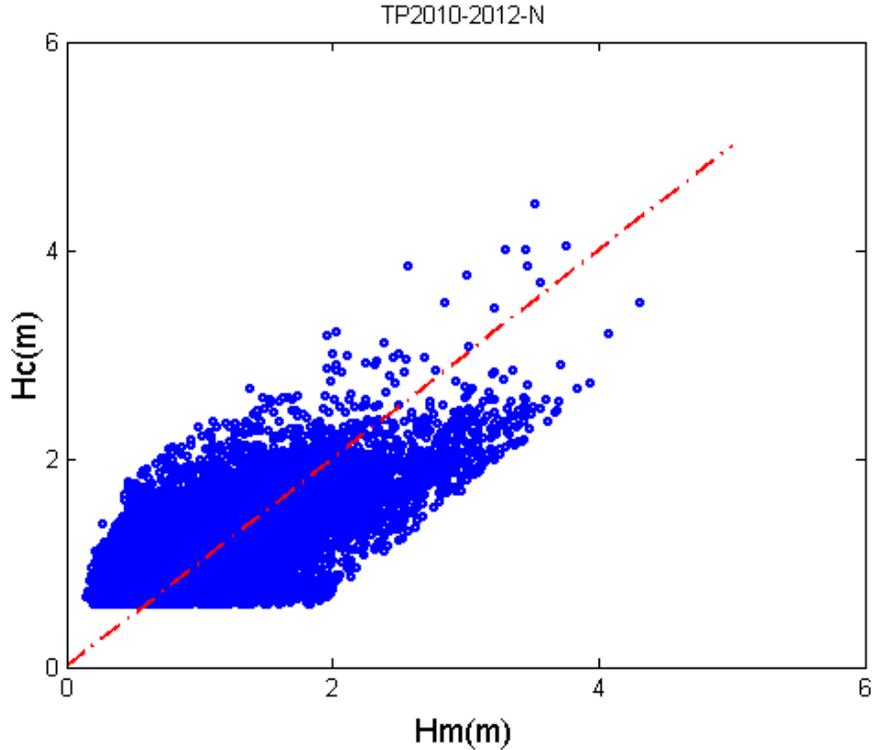


圖 4.1-3 以 2010 年資料迴歸式推估 2012 年波高與實測值之散布圖

## 4.2 風向分區 2010 年波高與風速的迴歸分析

本前期的研究發現將全年數據以風向分區成的 4 個範圍，可獲得統計特性較為接近的海風、陸風、西南季風及東北季風等 4 種波浪。若再各區波高與其相對應風速迴歸則可得較好的迴歸結果。本節考慮幾種不同區分風向範圍的 4 個界限，探討不同區分風向範圍是否影響迴歸結果。本研究測試三種不同區分風向範圍如下：

第 1 種風向分區：乃依海岸線方位之分組。海風為  $250^{\circ}$  至  $25^{\circ}$ 、陸風為  $70^{\circ}$  至  $205^{\circ}$ 、西南風為  $205^{\circ}$  至  $250^{\circ}$  及東北風為  $25^{\circ}$  至  $70^{\circ}$ ，此分區方式已於前期研究說明並進行迴歸分析。

第 2 種風向分區：依 Steyn and Faulkner (1986) 提出的向岸風應發生在日出後兩小時至日落後兩小時間，且應至少持續兩小時的結論。本分區期望讓季節風有合理的風向持續時間，故以此理論判斷若海風在持續超過 15 小時的情況，為不合理之海風，如圖 4.2-1 橫坐標為風向角度，縱座標為風向持續時間，藍色鏈線即為 15 小時上限，由圖

4.2-1 可知在  $0^{\circ}$  至  $25^{\circ}$  及  $250^{\circ}$  至  $270^{\circ}$  間，為風向持續時間有超過 15 小時的範圍，因此將海風範圍改為  $270^{\circ}$  至  $0^{\circ}$ 、陸風為  $70^{\circ}$  至  $205^{\circ}$ 、西南風為  $205^{\circ}$  至  $270^{\circ}$  及東北風為  $0^{\circ}$  至  $70^{\circ}$ 。

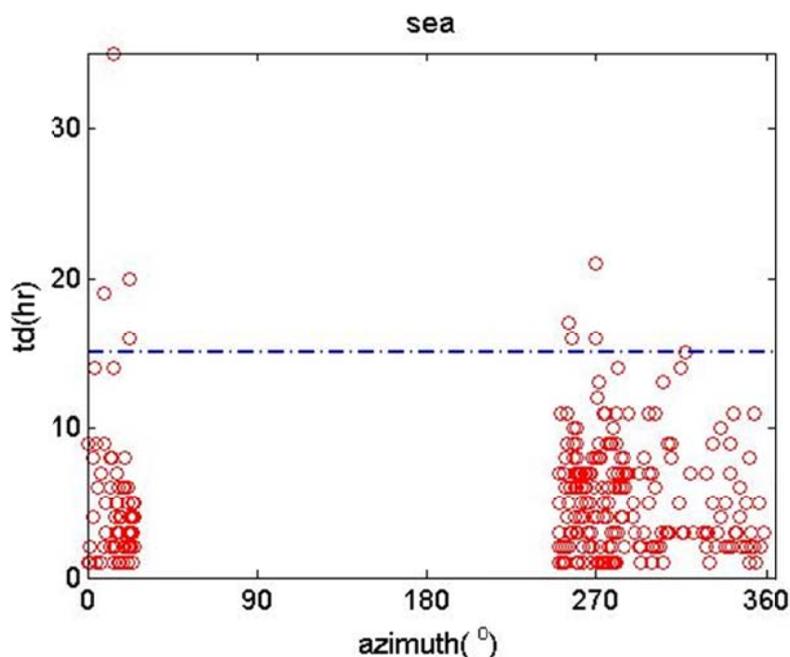


圖 4.2-1 2010 年海風的風向與其風向持續時間的分布

第 3 種風向分區：以在夏季的風向在東北風少，而冬季的風向多在東北向，幾乎無西南風等特性。將夏季時發生東北風的數量除以發生西南風的數量，及冬季時發生西南風的數量除以發生東北風的數量，在尋找此兩個值在不同角度時的最小值。其中夏季與冬季之分類為參考張(2014) 臺北港風與波浪關連性之統計特性研究的結論，考慮風速及風向並以群集分析分類，其結果夏季為 5-7 月，8-9 月為秋季，而 10 至隔年 4 月為冬春季。在此方法所決定畫分風向角度為  $10^{\circ}$ 、 $65^{\circ}$ 、 $225^{\circ}$ 、 $285^{\circ}$ 。

此三種風向分區的 4 個方位角度整理成表 4.2-1。3 種風向分區 2010 年資料的推算及實測波高與風速的關係圖，分別示如圖 4.2-2 及圖 4.2-4，而其合併分區的推估波高與實測值之散布圖，分別示如圖 4.2-5 及圖 4.2-7。

比較圖 4.2-2 及圖 4.2-4 可知，3 種風向分區在各區稍有差異，東北風區的波高波浪最多，且明顯隨風速增加而增加而呈二次多項式的

趨勢。第一種風向分區的海風區的波浪有如同東北風區的特性，但在第二種及第三種風向分區卻呈現較線性的趨勢，此原因可能因為畫分角度的第一種海風區包括 20 度內的方位角，此風速在臺北港尚屬於東北風帶上，風速也較強，所以大風速的海風區應改分區在東北風區。

至於陸風區的波浪與風速都呈現寬帶的線性變化，如同前述陸風與近岸波浪方向相反，此現象會造成波浪特性與風速關係弱的結果。西南風區的波浪與風速也約呈二次式變化，但其風速不如東北風區的風速，約只達 15 m/s。

表 4.2-1 三種風向分區的 4 個方位角度

風向的區分角度	第一種	第二種	第三種
海風	250° -25°	270° -0°	285° -10°
陸風	70° -205°	70° -205°	65° -225°
西南風	205° -250°	205° -270°	225° -285°
東北風	25° -70°	0° -70°	10° -65°

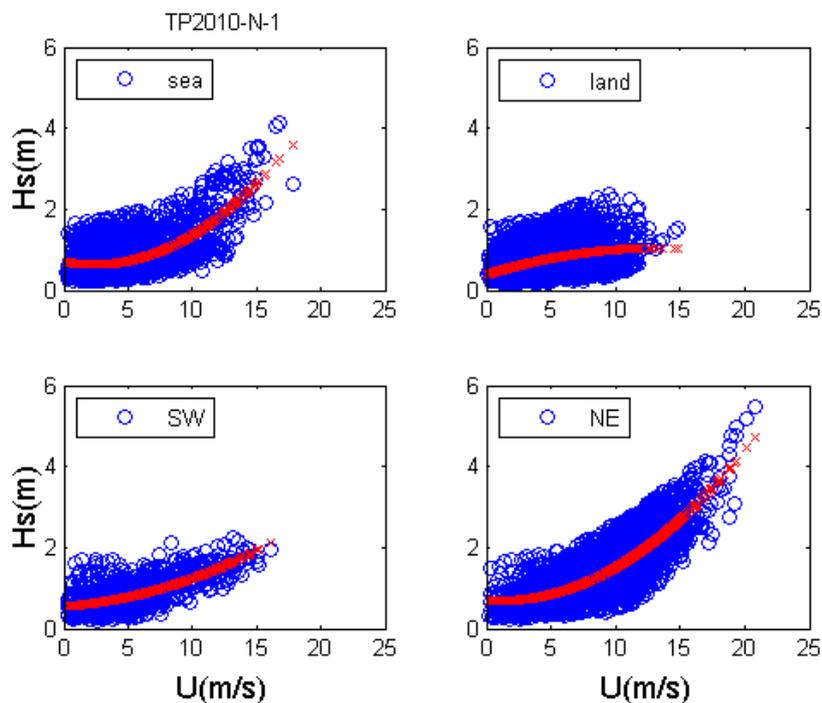


圖 4.2-2 第一種分區 2010 年的實測及推算的波高與風速之關係

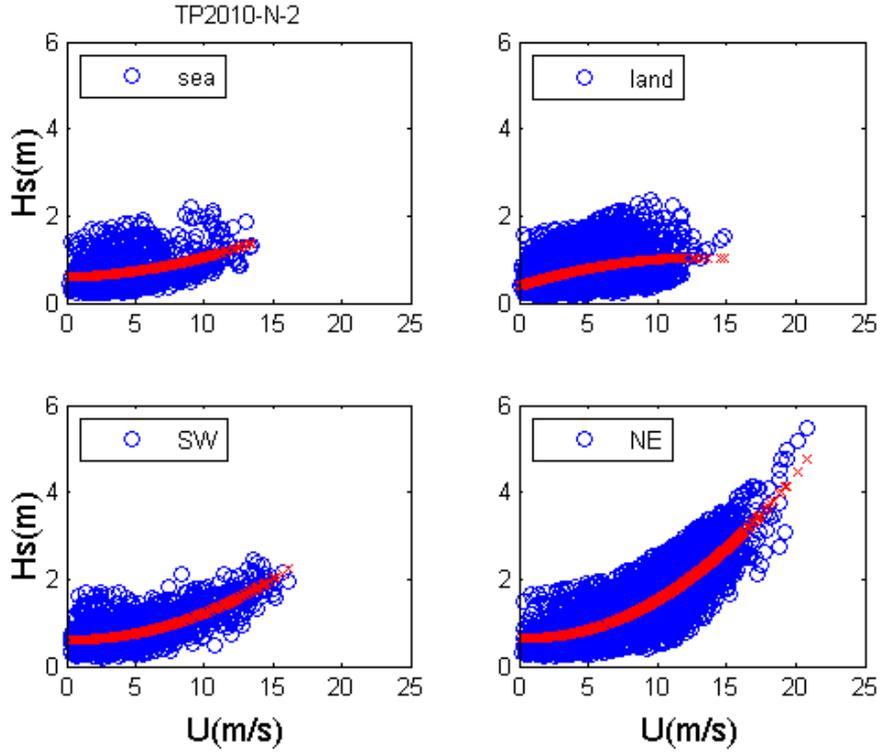


圖 4.2-3 第二種分區 2010 年的實測及推算的波高與風速之關係

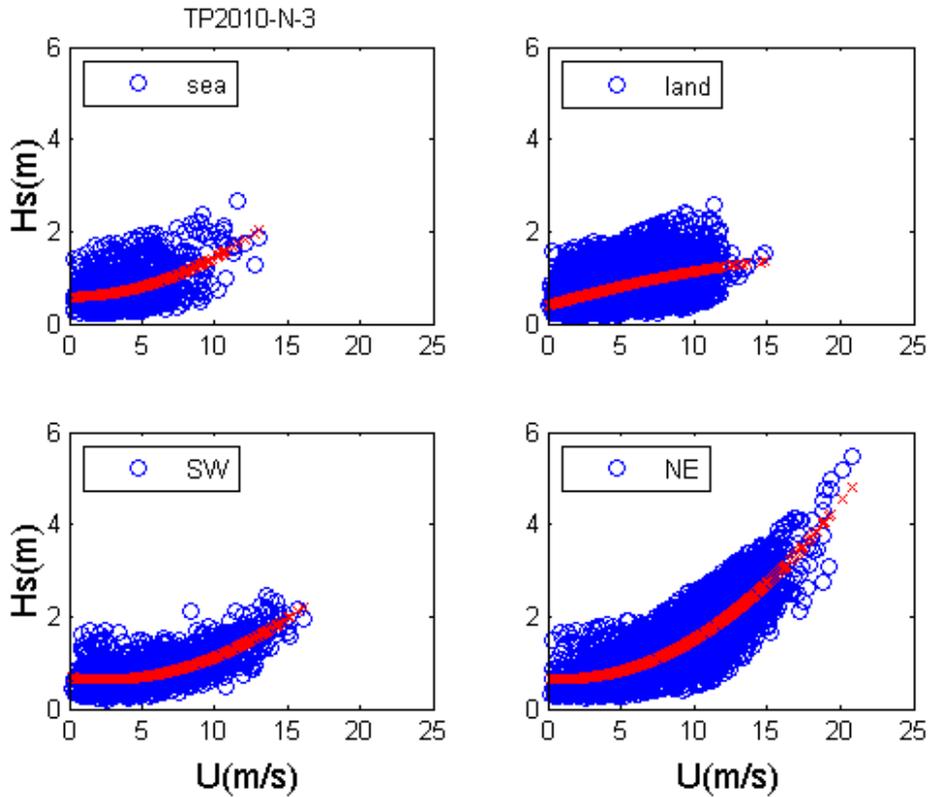


圖 4.2-4 第三種分區 2010 年的實測及推算的波高與風速之關係

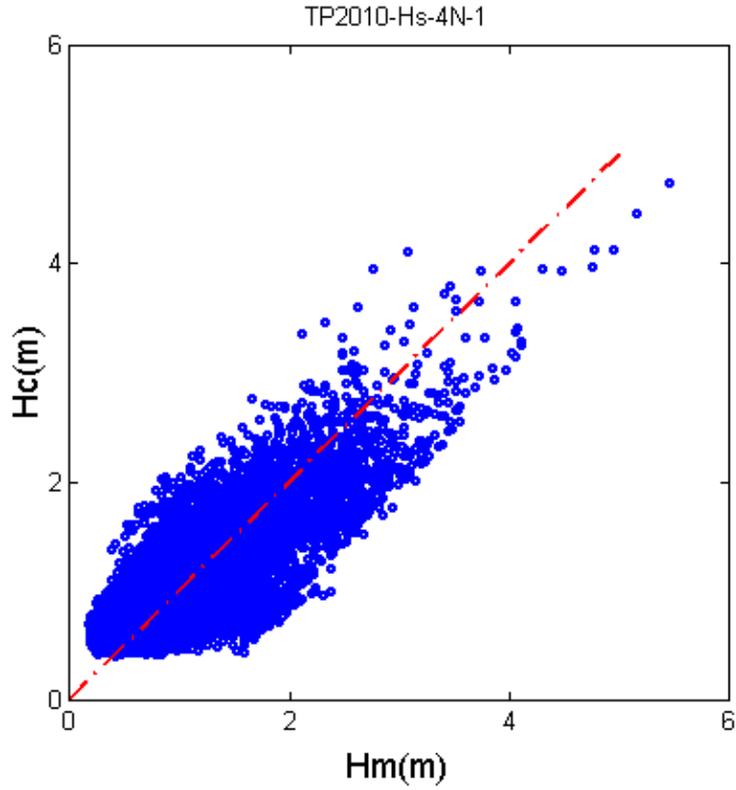


圖 4.2-5 合併第一種分區 2010 年的推估波高與實測值之散布圖

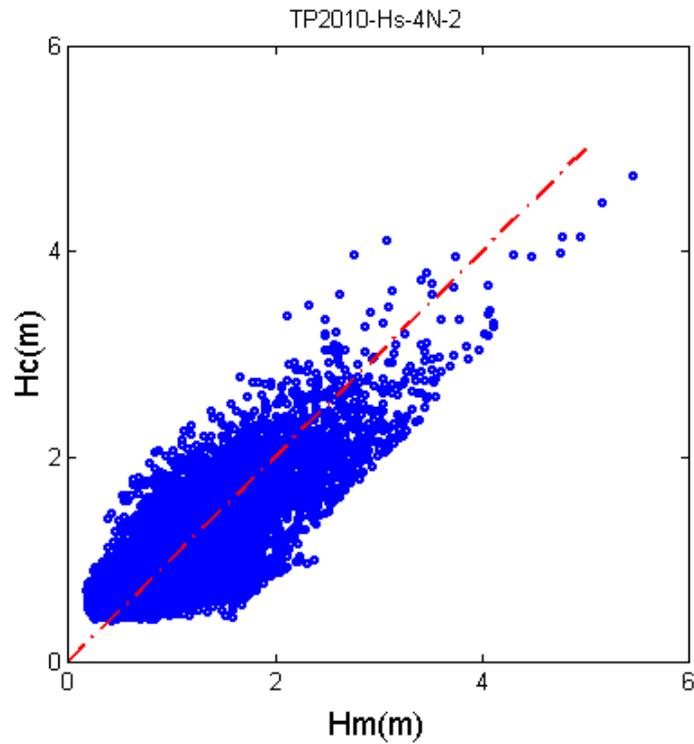


圖 4.2-6 合併第二種分區 2010 年的推估波高與實測值之散布圖

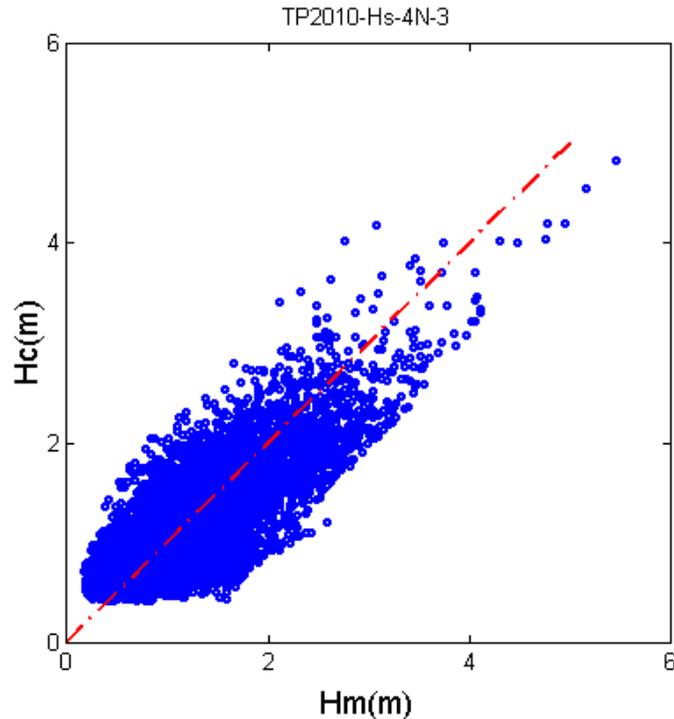


圖 4.2-7 合併第三種分區 2010 年的推估波高與實測值之散布圖

若比較圖 4.2-5 及圖 4.2-7 的合併推算直與實測波高的散布圖，很難看出三者的差異，但從其散布圖在 45 度斜線上來看，以二次多項式來迴歸各區波高與風速關係是可行的

以 3 種風向分區 2010 年波浪，迴歸各區資料所得的二次多項式的迴歸係數、 $R^2$  及 RMSE，分別如表 4.2-2 至表 4.2-4 所示。此二表可比較 3 種風向分區的優劣。2010 年波浪的正常樣本有 8520 個，風向分區有最多樣本為東北風，為 3228 或 3684 個，而最少的樣本數為西南風，約 1000 個。

從表 4.2-2 至表 4.2-4 的 4 分區的檢定指標來看，以東北風區的  $R^2$  及 RMSE 為最高， $R^2$  可達 0.63-0.65。此結果顯示東北季風兩分區的風速與波高的相關性高，但因此兩區的風速及波高值較其他區大，但因波高平均值亦其他區大，所以 RMSE 最高。在西南風區的波高與風速的關係在 4 種分區中的  $R^2$  為次高， $R^2$  約為 0.5，此說明西南風區的波浪亦與風速的關係強。陸風區的  $R^2$  及 RMSE 最低， $R^2$  約只有 0.16-0.22，此證實陸風與近岸波浪方向相反而具有弱的關係。三種分區的海風區的  $R^2$  除第 1 種達 0.4767 外，其他兩種都很低，此原因可

能如第二章所述為每日吹襲海風與陸風有晝夜轉向，波浪尚未達到成熟狀態，又因風向轉向而成長速率改變，波高與風速難有固定的關係。

探討合併 4 區所得全年的推算波高與實測值的  $R^2$  及 RMSE 在表 4.2-2 至表 4.2-4 最後一列，並整理成表 4.2-5。

**表 4.2-2 第一種分區 2010 年的樣本個數、迴歸係數及檢定指標**

樣本	樣本個數	二次多項式的係數			檢定指標	
		$a_0$	$a_1$	$a_2$	$R^2$	RMSE
全年	8520	0.6103	-0.0230	0.0105	0.6286	0.4151
海風	1695	0.7051	-0.0591	0.0125	0.4767	0.3959
陸風	2779	0.3856	0.0998	-0.0038	0.1648	0.3673
西南風	818	0.5459	0.0251	0.0044	0.4861	0.2962
東北風	3228	0.7017	-0.0230	0.0104	0.6289	0.4457
合併分區	8520	-	-	-	0.6576	0.3985

**表 4.2-3 第二種分區 2010 年的樣本個數、迴歸係數及檢定指標**

樣本	樣本個數	二次多項式的係數			檢定指標	
		$a_0$	$a_1$	$a_2$	$R^2$	RMSE
全年	8520	0.6103	-0.0230	0.0105	0.6286	0.4151
海風	964	0.5868	0.0112	0.0035	0.1550	0.3417
陸風	2779	0.3856	0.0998	-0.0038	0.1648	0.3673
西南風	1093	0.6044	-0.0016	0.0063	0.5065	0.3009
東北風	3684	0.6555	-0.0134	0.0100	0.6486	0.4455
合併分區	8520	-	-	-	0.6667	0.3932

表 4.2-4 第三種分區 2010 年的樣本個數、迴歸係數及檢定指標

樣本	樣本個數	二次多項式的係數			檢定指標	
		a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	R <sup>2</sup>	RMSE
全年	8520	0.6103	-0.0230	0.0105	0.6286	0.4151
海風	815	0.5796	0.0033	0.0083	0.2296	0.3814
陸風	3340	0.3954	0.0925	-0.0019	0.2218	0.3761
西南風	1016	0.6857	-0.0407	0.0084	0.4978	0.2939
東北風	3349	0.6593	-0.0207	0.0106	0.6563	0.4467
合併分區	8520	-	-	-	0.6592	0.3976

若探討 3 種風向分區對各區波浪的迴歸的影響，由表 4.2-5 顯示第 1 及第 2 種分區在陸域範圍是一樣，所以二者的檢定值標是一樣的；但在海風卻有明顯的不同，在西南風及東北風上第 2 種分區的檢定指標均顯示優於其他 2 種分區方式。此顯示第 2 種分區可以把海陸風與波浪關係弱而季節風與波浪關係強區分特性比第 1 種更合宜。至於第 3 種分區雖然海陸風的 R<sup>2</sup> 相近，東北風的 R<sup>2</sup> 比第 2 種分區佳，但西南風較差。

表 4.2-5 三種風向分區 2010 年資料的檢定值標

風向的區分	第一種分區		第二種分區		第三種分區	
	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE
海風	0.4767	0.3960	0.1550	0.3417	0.2296	0.3814
陸風	0.1648	0.3673	0.1648	0.3673	0.2218	0.3761
西南風	0.4861	0.2962	0.5065	0.3009	0.4978	0.2939
東北風	0.6289	0.4457	0.6485	0.4455	0.6563	0.4467
全年	0.6576	0.3985	0.6667	0.3932	0.6592	0.3976

表 4.2-5 顯示 3 種分區方式後合併推算波高與實測值的 R<sup>2</sup> 及 RMSE 分別為(0.6576、0.6667 及 0.6592)及(0.3985、0.3932 及 0.3976)，此結果都優於不考慮分區的 R<sup>2</sup>=0.6286 及 RMSE =0.4151)。在三種分

區方式中，第二種風向分區具有最高的  $R^2$  及最低的 RMSE。以第 2 種風向分區是較合適的劃分方式。至於 2012 年分析的結論是否與 2010 年資料的分析結果相同，則於下一節詳述。

### 4.3 風向分區 2012 年波高與風速的迴歸分析

仿上述步驟，2012 年波浪以 3 種風向分區方式所得各區推算波高及實測與風速的關係，示如圖 4.3-1 至圖 4.3-3，而其合併推算值與實測波高的散布圖，分別示如圖 4.3-4 至圖 4.3-6。圖 4.3-1 至圖 4.3-6 如同 2010 年的結果有相似特性，但是其數據分布都比 2010 年散亂。

2012 年波浪與風速的二次多項式迴歸分析所得 3 種風向分區的迴歸係數、 $R^2$  及 RMSE 分別如表 4.3-1 至表 4.3-3。從表 4.3-1 至表 4.3-3 的 4 分區的檢定指標來看，還是以東北風區的  $R^2$  及 RMSE 為最高， $R^2$  可達 0.53-0.56，但此值比 2010 年低。在西南風區的波高與風速的關係在 4 種分區中的  $R^2$  為次高，約為 0.48，稍小於 2010 年。陸風區的  $R^2$  最低， $R^2$  約只有 0.1-0.16。三種分區的海風區  $R^2$  除第 1 種達 0.4767 外，其他兩種都很低。

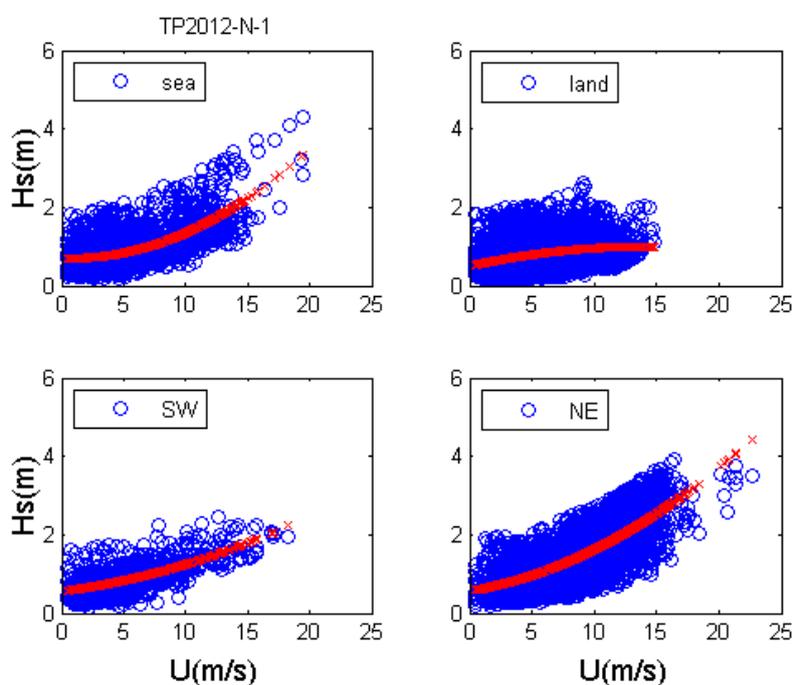


圖 4.3-1 第一種分區 2012 年的實測及推算的波高與風速之關係

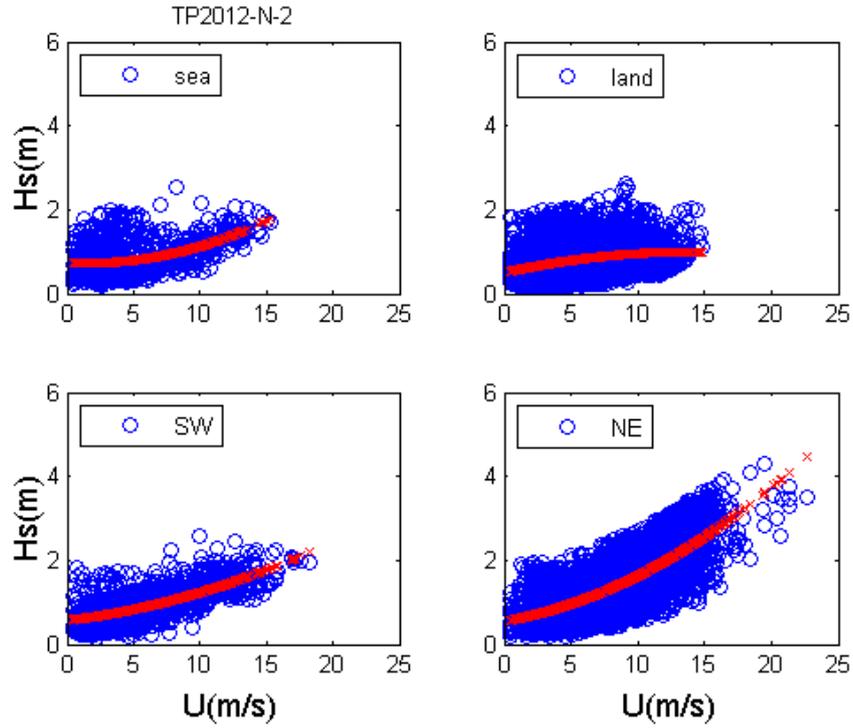


圖 4.3-2 第二種分區 2012 年的實測及推算的波高與風速之關係

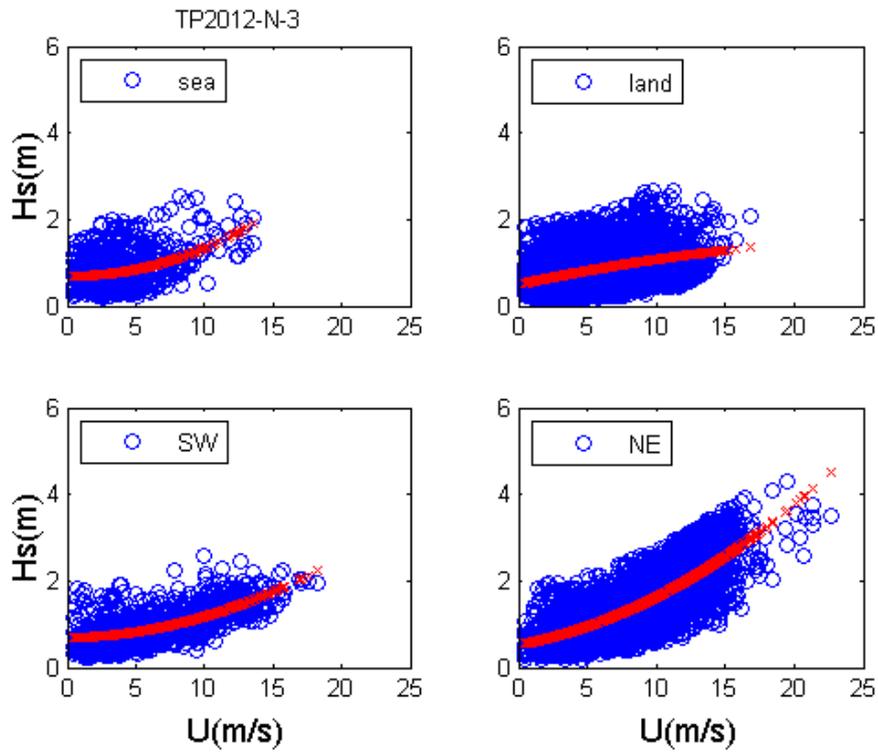


圖 4.3.3 第三種分區 2012 年的實測及推算的波高與風速之關係

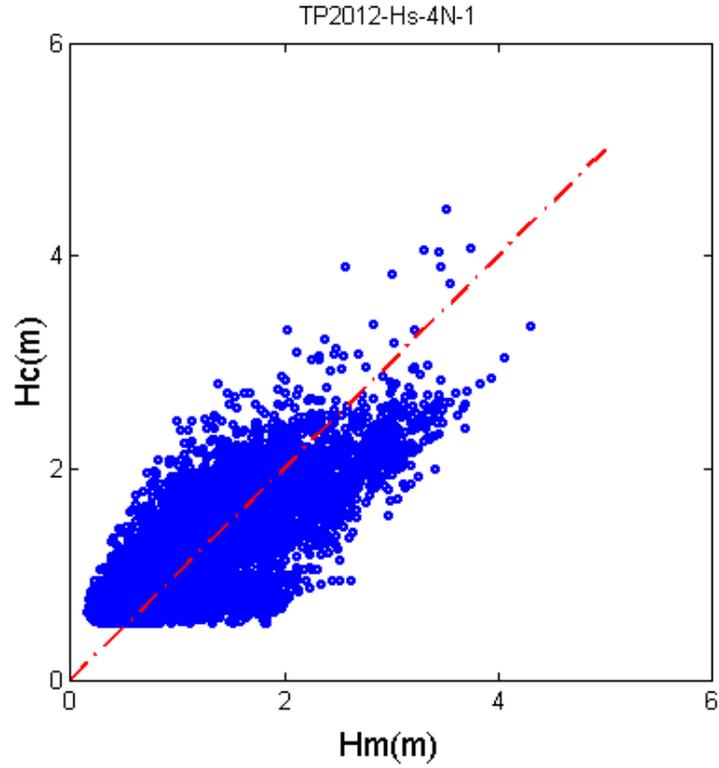


圖 4.3-4 合併第一種分區 2012 年的推估波高與實測值之散布圖

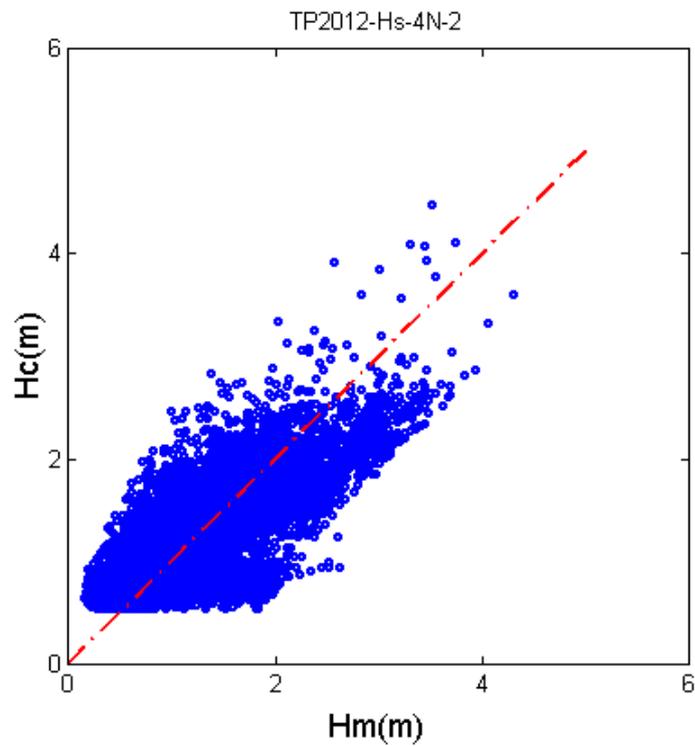


圖 4.3-5 合併第二種分區 2012 年的推估波高與實測值之散布圖

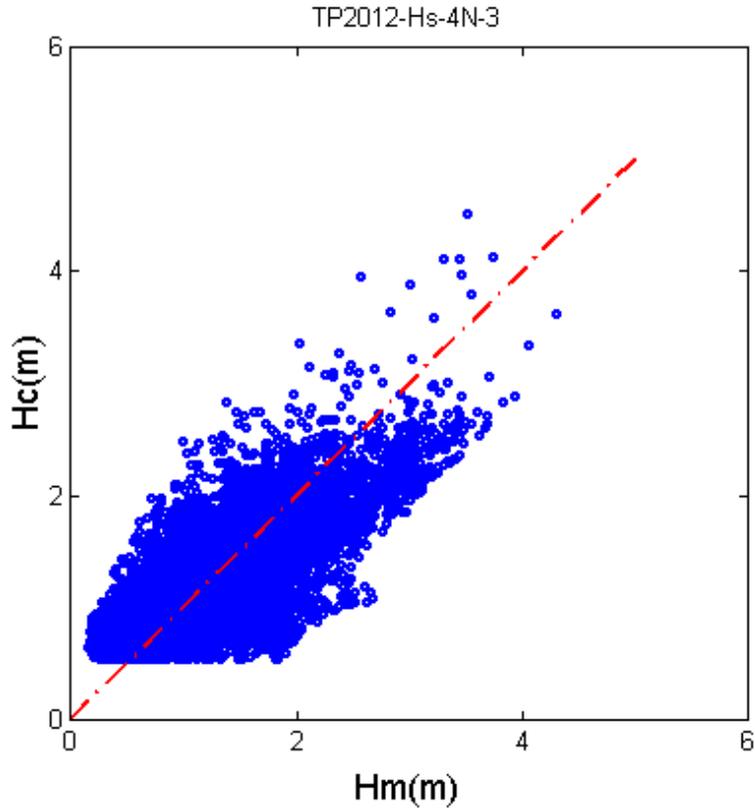


圖 4.3-6 合併第三種分區 2012 年的推估波高與實測值之散布圖

表 4.3-1 第一種區分 2012 年的樣本個數、迴歸係數及檢定指標

樣本	樣本 個數	二次多項式的係數			檢定指標	
		$a_0$	$a_1$	$a_2$	$R^2$	RMSE
全年	8568	0.6023	0.0132	0.0071	0.5172	0.4741
海風	1581	0.7023	-0.0101	0.0075	0.4429	0.4246
陸風	2882	0.5001	0.0711	-0.0025	0.0999	0.3981
西南風	648	0.5562	0.0419	0.0027	0.4586	0.3264
東北風	3457	0.5632	0.0551	0.0051	0.5329	0.4791
合併分區	8568	-	-	-	0.5980	0.4327

表 4.3-2 第二種區分 2012 年的樣本個數、迴歸係數及檢定指標

樣本	樣本個數	二次多項式的係數			檢定指標	
		a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	R <sup>2</sup>	RMSE
海風	878	0.7376	-0.0153	0.0055	0.2250	0.3671
陸風	2882	0.5001	0.0711	-0.0025	0.0999	0.3981
西南風	920	0.5546	0.0400	0.0027	0.4876	0.3189
東北風	3888	0.5461	0.0580	0.0051	0.5630	0.4763
合併分區	8568	-	-	-	0.6187	0.4254

整理合併 4 區所得全年的推算波高與實測值的 R<sup>2</sup> 及 RMSE 於表 4.3-4。表 4.3-4 顯示 3 種分區後合併推算波高與實測值的 R<sup>2</sup> (0.5980、0.6187 及 0.5945) 及 RMSE (0.4327、0.4254 及 0.4345) 都優於不考慮分區的全年樣本結果 (R<sup>2</sup>=0.5172 及 RMSE =0.4741)，在三種分區方式中，第二種風向分區具有最高的 R<sup>2</sup> 及最低的 RMSE。第 2 種風向分區是較合適方式來迴歸臺北港 2010 年的波浪與風速的關係。

表 4.3-3 第三種區分 2012 年的樣本個數、迴歸係數及檢定指標

樣本	樣本個數	二次多項式的係數			檢定指標	
		a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	R <sup>2</sup>	RMSE
海風	736	0.6979	-0.0057	0.0070	0.1777	0.3989
陸風	3421	0.4973	0.0693	-0.0011	0.1566	0.4220
西南風	902	0.6845	0.0059	0.0044	0.4498	0.3177
東北風	3500	0.5272	0.0592	0.0052	0.5667	0.4778
合併分區	8568	-	-	-	0.5945	0.4345

由上節及本節以風向分區方式所得 2010 年及 2012 年的波浪與風

速的關係結果。以第 2 種風向分區最合適迴歸臺北港的波浪與風速的關係。因此，在後續的研究則以 2 種風向分區，即風向的分界方位角為  $0^\circ$ 、 $70^\circ$ 、 $205^\circ$ 、 $270^\circ$ ，當為未來資料分區的標準。

表 4.3-4 三種風向分區 2012 年資料的檢定值標的統計

風向 分區	第一種分區		第二種分區		第三種分區	
	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE
海風	0.4429	0.4246	0.2250	0.3671	0.1777	0.3989
陸風	0.0999	0.3981	0.0999	0.3981	0.1566	0.4220
西南風	0.4586	0.3264	0.4876	0.3189	0.4498	0.3177
東北風	0.5329	0.4791	0.5630	0.4763	0.5667	0.4778
全年	0.5980	0.4327	0.6187	0.4254	0.5945	0.4345

#### 4.4 風向與波向的差異分析

本研的方向分區是根據風向而不直接使用波向分區，主要因為本研究原本目的是建立風速與波高間的關係後，在爾後工程應用上，只要由風速資料直接代入風向與波向的差異分析迴歸公式即可得到波高。此節主要說明風向及波向的差異，分析方法主要將相對應逐時的實測風向與波向的方位角相減，再取絕對值，即是計算風向與波向的夾角，另外，再分析此夾角發生機率的連續性的直方圖(Ksdensity function)。2010 年的風向與波向的夾角時序圖及直方圖，如圖 4.4-1 及圖 4.4-2 所示，而 2012 年的結果分別示如圖 4.4-3 及圖 4.4-4。

由圖 4.4-1 可知全年的風向與波向夾角似乎並非幾乎為零，而各角度的夾角都有，只是在季節性上比較集中於某些夾角上，如 10 月至隔年 3 月的冬季東北風向為主的夾角以約  $30 \pm 15^\circ$  為主。7 月至 9 月的夾角除在  $45^\circ$  外，還有  $120^\circ$ ，此原因可能來自海陸風的轉向及西南風向。另外，當波浪脫離風域會如圖 1.3-1 以傘狀分散傳播開來，因

此波浪與風向角度就會有所差異。因東北季風方向與臺北港垂直方向約相差  $45-90^\circ$ ，因此風向與波向的角度差則為  $45^\circ$ 。

從圖 4.4-2 可知全年的風向與波向夾角並非集中，在約  $40^\circ$  最多，其發生機率是其他夾角的 2.5 倍。如前段的說明外，在臺北港冬天除局部風所造成的成份外，尚有從淡水外海折射所傳入的波浪，即使風向是東北風，但是波向還是由北方向的外海傳入，在夏天的西南風造成的波浪傳到臺北港也會產生折射，因此也有所差異。

至於 2012 年的風向與波向夾角的時序圖 4.4-3，可知在  $180^\circ$  內都可能發生，而有季節性上的差異。若與圖 4.4-1 比較發現在相同月份上，夾角的分布也並不一致。圖 4.4-4 的風向與波向夾角的機率分布圖幾乎與 2010 年相同，具有相同的機率分布特性。

在台灣海峽北端的臺北港，因地理因素，風向與波向並不會一致。所以，如何同時考慮風向與波向在迴歸分析上，也是值得探討的課題。

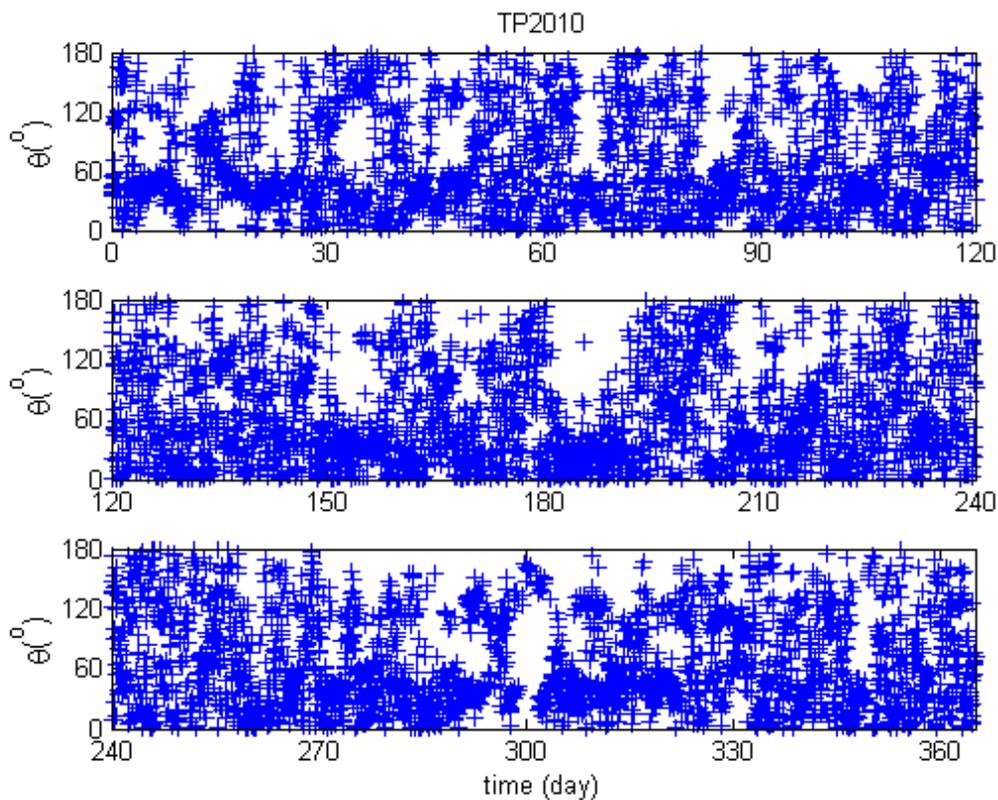


圖 4.4-1 2010 年風向與波向的夾角時序圖

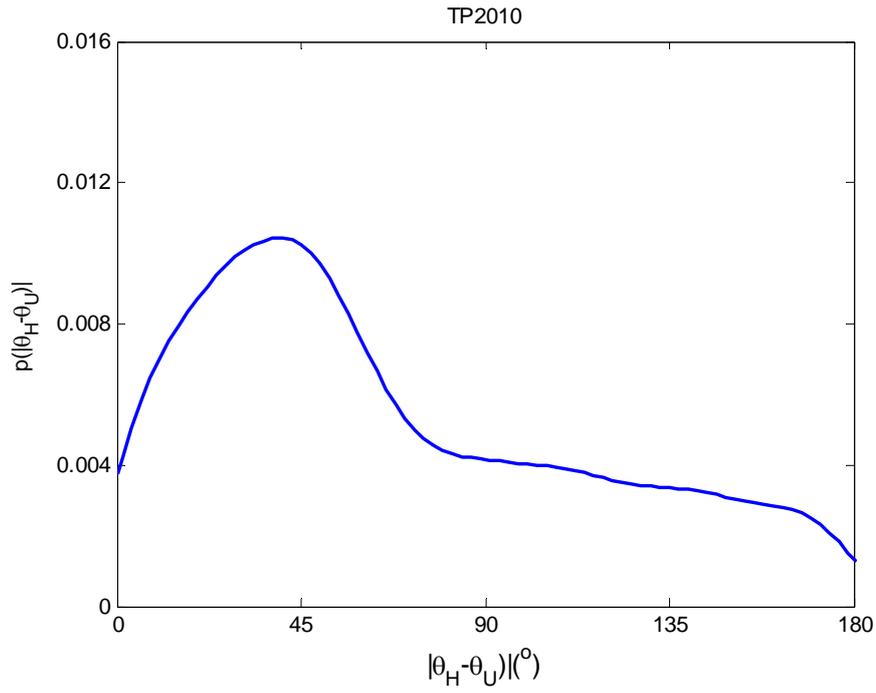


圖 4.4-2 2010 年風向與波向的夾角連續直方圖

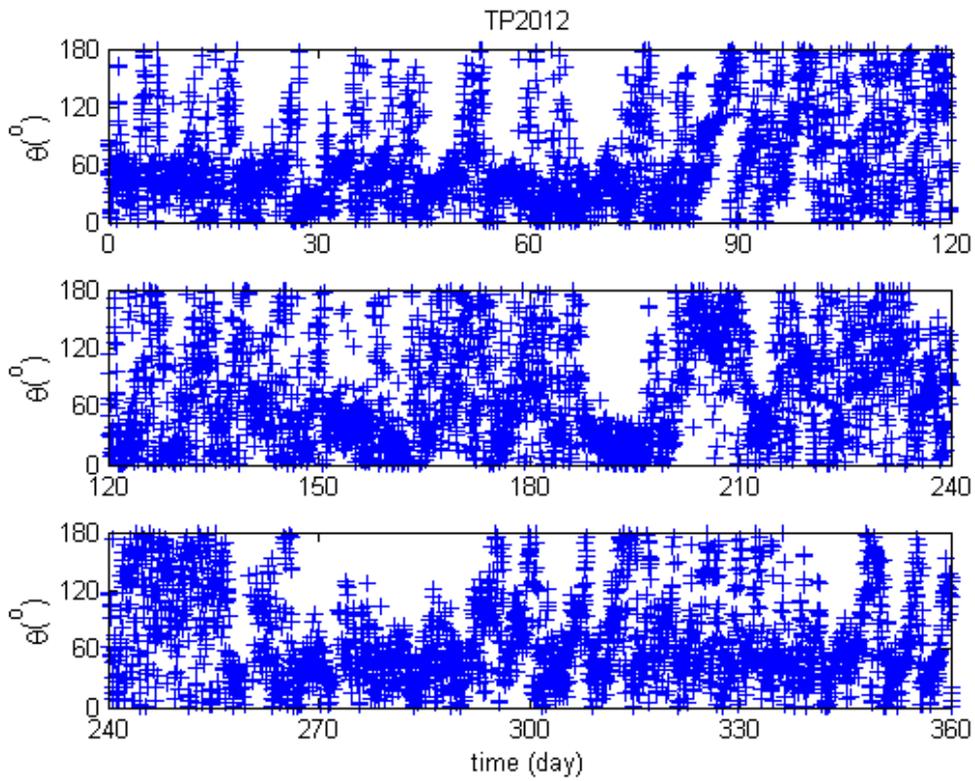


圖 4.4-3 2012 年風向與波向的夾角時序圖

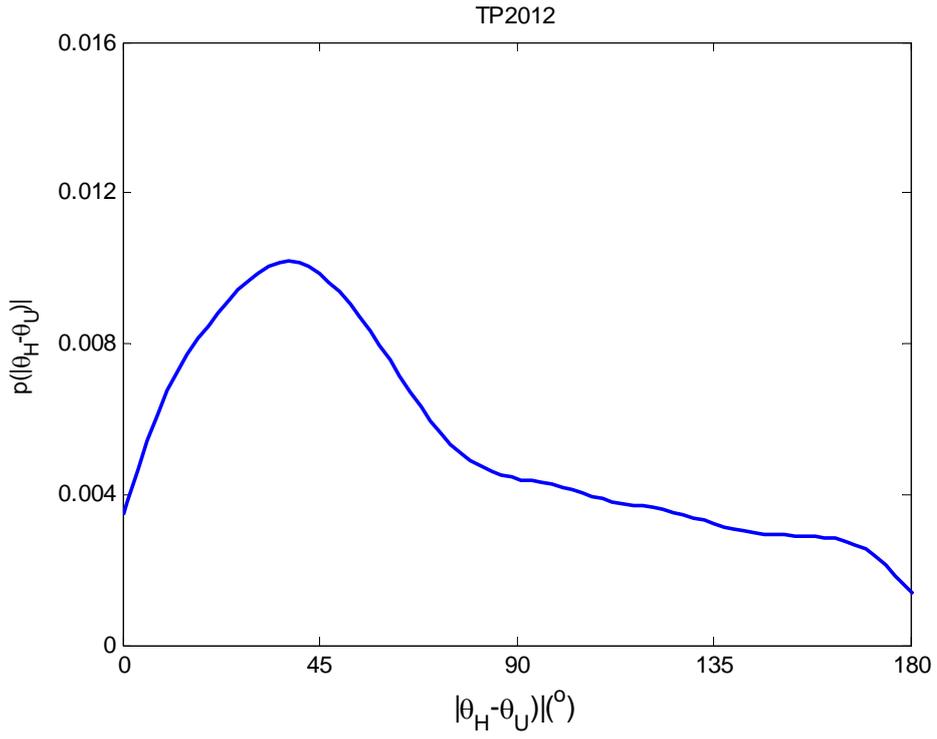


圖 4.4-4 2012 年風向與波向的夾角連續直方圖

## 第五章 適應性類神經模式與多點推算波浪的模式

由前兩章可知波浪分類及風向分區都可建立更好的波高與風速的迴歸關係。在本章同時考慮波浪分類及風向分區，再利用二次多項式來建立各組資料的波高與風速的迴歸關係，瞭解此與各別的分區與分類的差異。另外，使用適應性類神經模式取代二次多項式的迴歸分析進行來模擬上述資料，並與迴歸結果比較。

### 5.1 波浪分類及風向分區的波高與風速的迴歸分析

本研究以第三章的波浪分類方法將 2010 年波浪分成波浪分類成長風浪、成熟風浪及湧浪後，每類波浪再依第四章第二種風向分區將細分成 4 區，各類波浪的正常樣本的個數及迴歸係數如表 5.1-1，各區各類的波高與風速迴歸的  $R^2$  及 RMSE 如表 5.1-2。

從表 5.1-1 的分區及分類波浪的個數及二次式迴歸的係數來看，湧浪在 4 分區的個數以陸風最多、東北風次之，而海風及西南風湧浪的個數相近。4 分區的二次式迴歸的常數項  $a_0$  在 0.4899 至 0.7150 間，此說明在低局部風速時，湧浪波高還約有 0.5m，湧浪的能量有部份是從外圍而來，而局部風速造成能量占湧浪的一部分。一次項的迴歸係數及二次項係數的符號恰好相反，此結果說明局部風速並不會同時造成波浪的線性及二次方的成長速率，因二者彼此抵消部分能量，局部風速所增加的總能量的速率就會低，這樣分類湧浪的結果符合由外圍波浪傳入而非由局部風速所主導的力學機制。

從表 5.1-1 的成熟風浪的各區個數及二次式迴歸的係數來看，東北風的波浪最有機會產生成熟風浪。由前期的研究結果發現臺北港在 10 月至隔年的 4 月有較定向的東北強風，因此，比其他方向東北的成熟風浪比較多的是合理的。4 分區的二次式迴歸的常數項  $a_0$ ，除西南向的成熟風浪為 -0.4558 外，其他在 -0.11 至 0.21 間， $a_0$  的絕對值比湧浪的  $a_0$  值低，此說明成熟風浪的波高增加主要是在長期局部風速的吹襲所造成，而鮮由外圍波浪的傳入。除海風外；一次項及二次項的

迴歸係數是同號，此說明局部風速同時造成熟波浪的線性及二次方的成長速率，波高的增加是二者加乘的效應。

表 5.1-1 2010 年資料的風向分區及波浪分類個數及二次迴歸的係數

分類	分區	樣本 個數	二次多項式的係數		
			$a_0$	$a_1$	$a_2$
湧浪	海風	621	0.6547	-0.0883	0.0307
	陸風	1980	0.4899	-0.0178	0.0240
	西南風	634	0.7150	-0.1045	0.0276
	東北風	1039	0.5566	-0.003	0.0188
成熟 波浪	海風	25	0.2100	-0.0584	0.0299
	陸風	30	-0.0732	0.0559	0.0191
	西南風	40	-0.4558	0.1987	0.0077
	東北風	125	-0.1055	0.0925	0.0153
成長 波浪	海風	318	-0.1667	0.1136	0.0006
	陸風	769	-0.1720	0.1221	-0.0012
	西南風	419	-0.5022	0.2086	-0.0033
	東北風	2520	-0.3233	0.1146	0.0060

從表 5.1-1 的成長風浪的各區個數及二次式迴歸的係數來看，東北風的成長風浪是最多的，陸風的成長風浪次之，其他的海風及西南風的成長風浪有差不多的個數。因為臺北港有東北風的長時期，因此，有東北的成長風浪也是合理的。4 分區的二次式迴歸的常數項  $a_0$ ，均為負值，自 -0.5022 至 -0.1667 之間。一次項的迴歸係數明顯高出二次項的係數有二個階量(order)至三個階量，此說明成長風浪的波高成長

是有局部風速的線性成長速率所主導，當風速在 2m/s 以上，即可抵消負值的常數項。本研究成果成長風浪的迴歸的係數也可以說明波浪成長的力學機制。

表 5.1-2 顯示 2010 年湧浪在 4 分區的  $R^2=0.2790、0.4815、0.1506、0.6228$  及  $RMSE=0.3116、0.2971、0.2914、0.3144$ 。如 2010 年的情況，除東北風向外，其他 3 分區的湧浪波高與風速關係  $R^2$  均低，海風及西南風的湧浪與風速關係極微弱。合併 4 個分區的湧浪所得  $R^2=0.5222$  高於在 3.3 節僅分類湧浪的迴歸所得  $R^2=0.5123$ ；而其  $RMSE=0.3026m$  卻低於不分區湧浪分類的  $RMSE=0.3057 m$ 。湧浪發生時，主要的波高是外圍湧浪的傳入，故與當地局部風速關係不大，即使在東北風情況，局部風速小而當地波高大的特性的確為發生湧浪的一個重要指標。

表 5.1-2 迴歸 2010 年波浪分類及風向分區資料的檢定指標

風向 分區	湧浪		成熟風浪		成長風浪	
	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE
海風	0.2790	0.3116	0.9658	0.1028	0.5907	0.2302
陸風	0.4815	0.2971	0.9113	0.1534	0.3820	0.2763
西南風	0.1506	0.2914	0.8483	0.1537	0.7214	0.2549
東北風	0.6228	0.3144	0.9425	0.1451	0.6866	0.4247
合併分區	0.5222	0.3026	0.9488	0.1429	0.7688	0.3720
不分區	0.5123	0.3057	0.9473	0.1451	0.7223	0.4077

圖 5.1-1 為 2010 年在各分區湧浪與風速之關係。由圖 5.1-1 可知湧浪與風速相當散亂，其最大風速也僅約 10 m/s。海風與西南風的湧浪發生的風速都低於 7 m/s，當風速低於 3m/s，湧浪與風速呈現水平關係，顯示二者幾乎無關，但風速大於 3m/s 時，波高隨風速增加而有增加的趨勢。陸風與東北風的湧浪發生的風速在 10 m/s 以下，湧浪波高隨風速增加有明顯增加的趨勢。

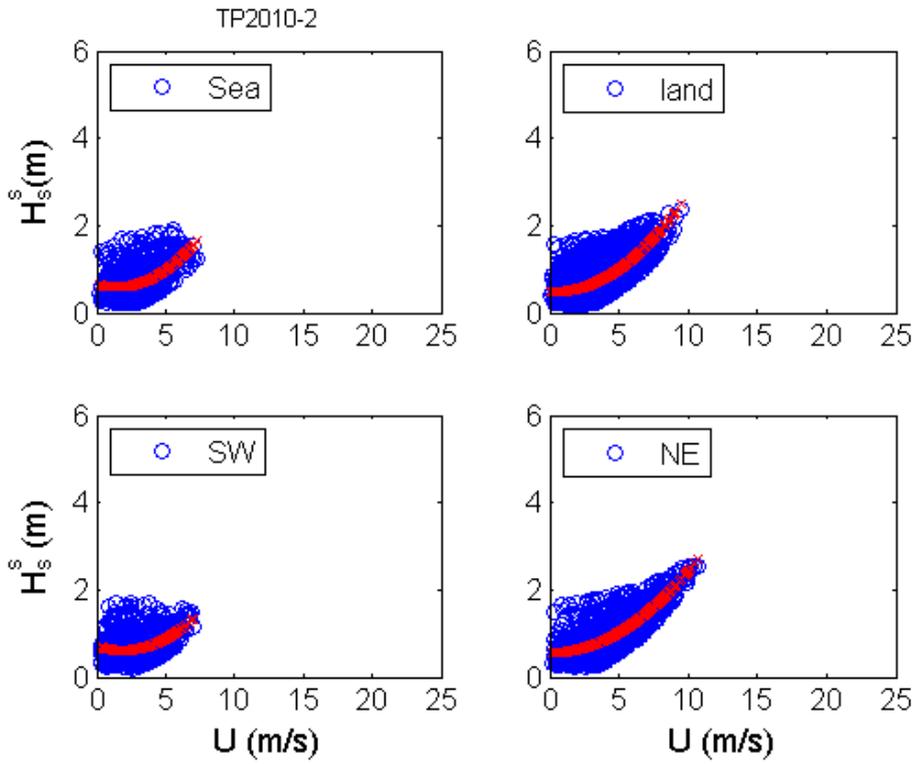


圖 5.1-1 以風向分區 2010 年的湧浪與風速之關係

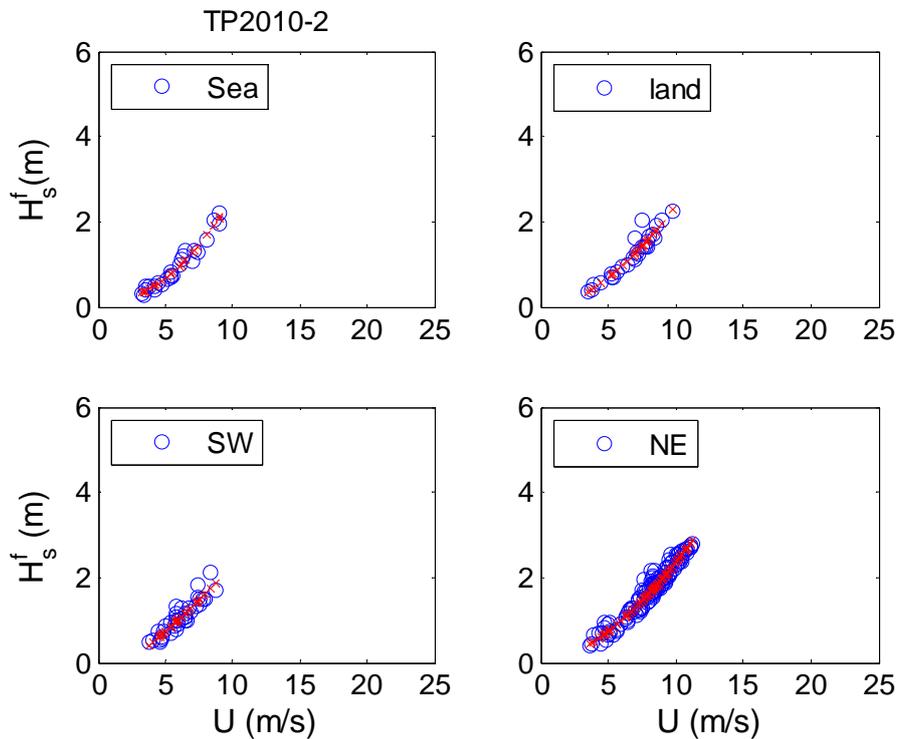


圖 5.1-2 以風向分區 2010 年的成熟風浪與風速之關係

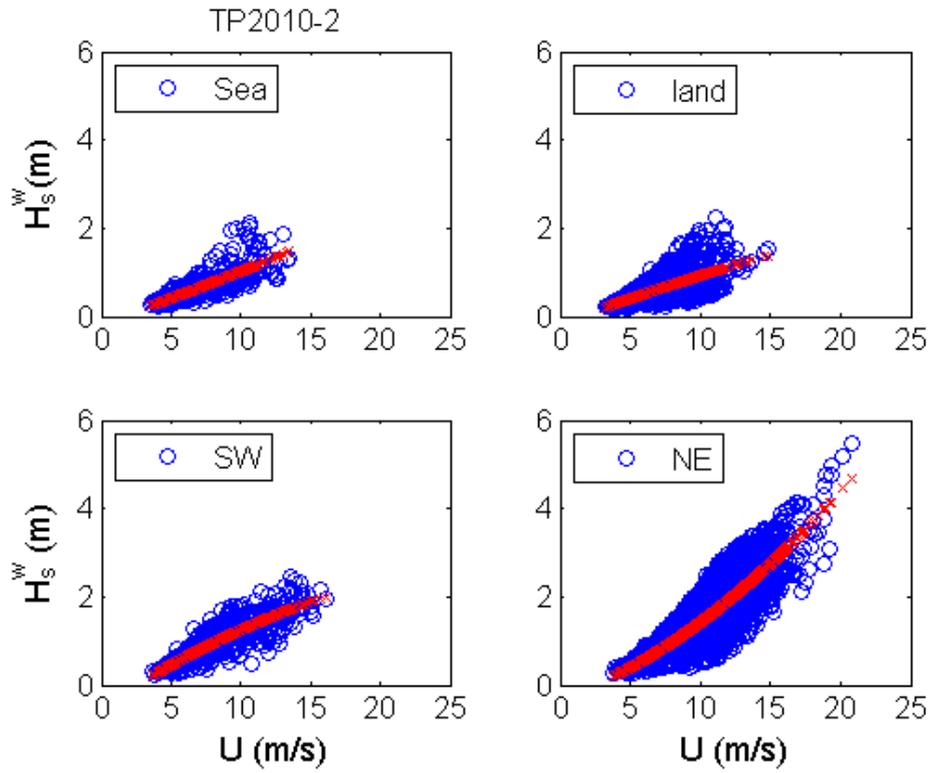


圖 5.1-3 以風向分區 2010 年的成長風浪與風速之關係

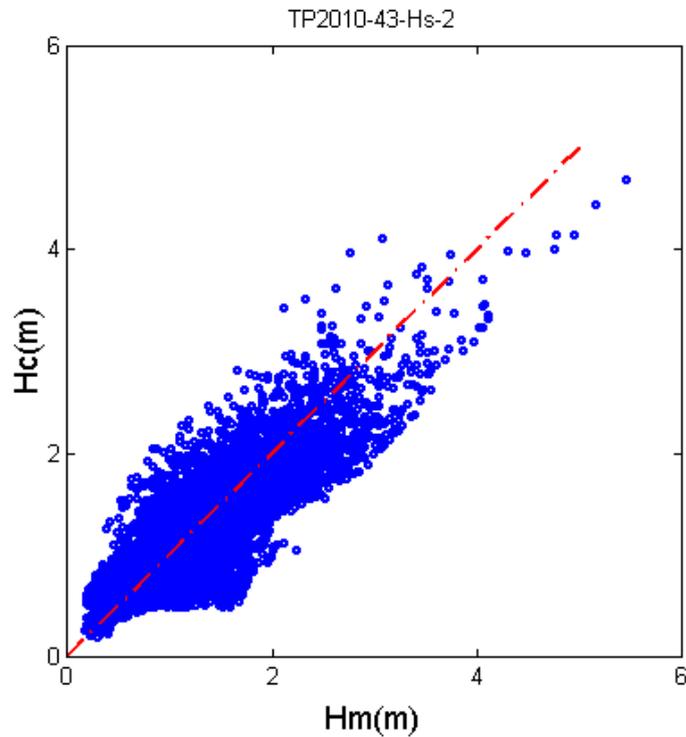


圖 5.1-4 合併 2010 年分區及分類的推算波高與實測值的散布圖

由圖 5.1-2 的成熟風浪在 4 個分區與風速的關係可知，4 區成熟風浪隨風速成線性增加。雖然樣本較少，但分布極為集中。表 5.1-1 顯示 4 分區成熟風浪的檢定指標為  $R^2=0.9658、0.9113、0.8483、0.9425$  及  $RMSE = 0.1028、0.1534、0.1537、0.1451$  m，此結果顯示西南風的成熟波與風速的關係較其他三區弱，此結論可對應於圖 5.1-2 的西南風成熟波與風速的散布程度是較寬於其他三者。

圖 5.1-3 為 4 分區的成長風浪與風速之關係，成長風浪與風速間的分布較為散亂，海風及陸風的成長風浪與風速關係弱。由上述的迴歸二次項係數極小可知，成長風浪與風速呈現線性的關係。表 5.1-2 顯示成長風浪在 4 分區的檢定指標為  $R^2=0.5907、0.3820、0.7214$  及  $0.6866$ ，而  $RMSE = 0.2302、0.2763、0.2549、0.4247$  m。

合併各類波浪的風向 4 區的迴歸結果，其  $R^2$  及  $RMSE$  如表 5.1-2 的最後二列。表 5.1-2 最後一列節錄表 3.3-1 最後兩行，乃不分風向的各類波浪的檢定標準。由 5.1-2 最後二行可知當波浪分類又考慮風向分區的迴歸比僅考慮波浪分類而不考慮風向分區為佳。尤其成長波浪情況，二者的檢定標準的差異比湧浪及成熟波大。

由合併各區及各類的推算波高與實測值的圖 5.1-4 散布圖來看，推算波高與實測波高均勻的分布在通過座標原點 45 度的斜線上。若與單獨波浪分類或風向分區的結果比較，即圖 3.3-1 及圖 4.2-6，可知圖 5.1-4 的散布程度較其他兩圖窄。合併各區及各類的推算波高與實測波高的  $R^2=0.7589$  及  $RMSE=0.3344$  m，而單獨波浪分類或風向分區的  $R^2$  及  $RMSE$  分別為  $0.7285、0.6667$  及  $0.3549、0.3932$ 。此結果顯示以合理的波浪分類及風向分區，把風速及波浪適當分成有統計特性一致的組別，再進行二次多項式迴歸，可建立波高與風速更佳關係。

仿上述分析方法及分析步驟，探討 2012 年資料的結果如下：各類波浪的正常樣本的個數及迴歸係數如表 5.1-3，各區各類的波高與風速迴歸的  $R^2$  及  $RMSE$  如表 5.1-4。各區各類的波高與風速的關係分別如圖 5.1-5 至圖 5.1-7 所示，合併各區各類的推算波高與實測波高的散布圖示如圖 5.1-8。

表 5.1-3 分區及分類 2012 年波浪的個數及二次式迴歸的係數

分類	分區	樣本 個數	二次多項式的係數		
			$a_0$	$a_1$	$a_2$
湧浪	海風	583	0.7506	-0.0684	0.0244
	陸風	1792	0.5529	-0.0141	0.0218
	西南風	464	0.7782	-0.1236	0.0308
	東北風	1146	0.6881	-0.0264	0.0204
成熟 波浪	海風	8	-0.9163	0.3778	-0.0115
	陸風	32	0.8814	-0.2779	0.0471
	西南風	50	0.4592	-0.0750	0.0265
	東北風	153	-0.3320	0.1548	0.0117
成長 波浪	海風	287	-0.3529	0.1693	-0.0021
	陸風	1058	-0.4023	0.1885	-0.0058
	西南風	406	-0.7000	0.2629	-0.0068
	東北風	2589	-1.1197	0.3026	-0.0037

從表 5.1-3 的分區及分類波浪的個數及二次式迴歸的係數來看，湧浪在 4 分區的個數以陸風最多、東北風次之，而西南風湧浪的個數最少。湧浪在 4 分區的二次式迴歸的  $a_0$  在 0.5529 至 0.7782 間，一次項及二次項的迴歸係數的反號。圖 5.1-5 為可知 2012 年湧浪與風速相當散亂。由圖 5.1-3，其最大風速也僅約 10 m/s。在風速於 3m/s 的低速度，湧浪與風速呈現水平關係，但風速大於 3m/s 時，波高隨風速增加而有增加的趨勢。此特性與 2010 年相似，說明此分類分區方式可適用於同一地點但不同年份的年波浪與風速特性。

從表 5.1-3 成熟波的 4 區常數項  $a_0$ ，有正有負，而其絕對值在 0.33 至 0.92 之間，此已相近於湧浪的  $a_0$ ，在同區的  $a_0$  正負號恰與  $a_1$  相反。主要是因為迴歸時為滿足大於某風速的吹襲下，波高值均為正的要求。除東北風外，一次項及二次項的迴歸係數是異號，此特性與 2010 年稍有不同。另外，成熟風浪的各區個數相當少，全部才只有 243 個，東北風的波浪最多生成成熟風浪。圖 5.1-6 顯示 4 區成熟風浪隨風速成線性增加，二者分布集中。由表 5.1-4 顯示 4 分區成熟風浪的  $R^2=0.8183$ 、 $0.9198$ 、 $0.8116$ 、 $0.9338$  及  $RMSE=0.1366$ 、 $0.1378$ 、 $0.1294$ 、 $0.1515$  m，西南風的成熟波與風速的關係較其他三區弱。

從表 5.1-3 顯示東北風的成長風浪是最多的，海風最少。另外，4 分區的常數項  $a_0$ ，均為負值，一次項及二次項的迴歸係數是異號。圖 5.1-7 顯示 4 分區的成長風浪與風速之關係散亂，陸風及東北風的關係較弱。

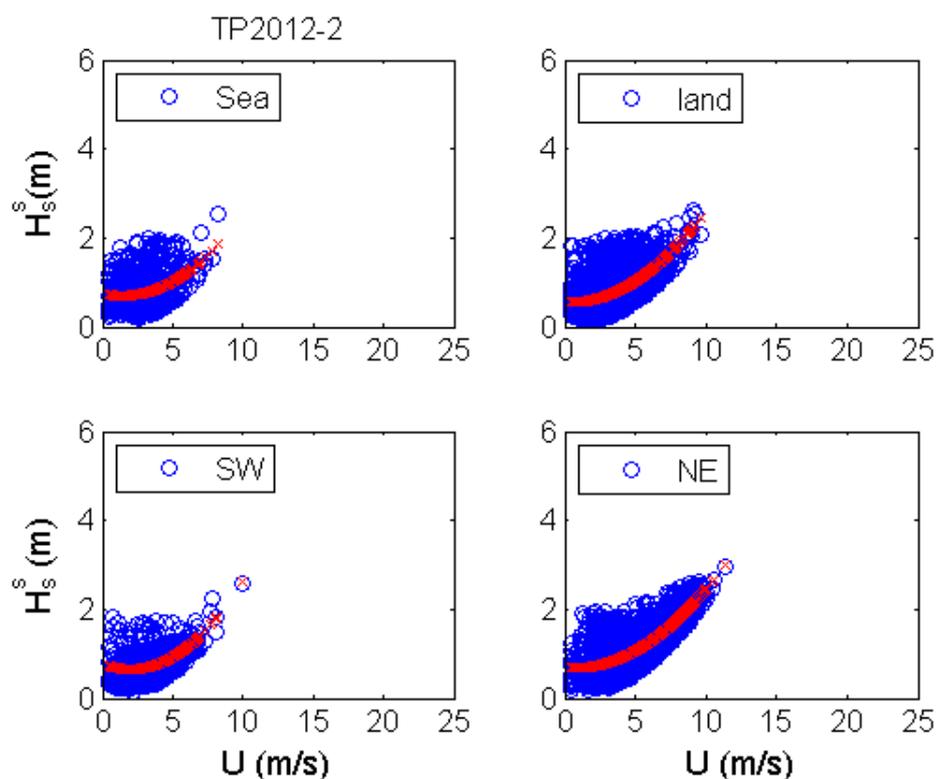


圖 5.1-5 風向分區 2012 年的風速與湧浪之關係

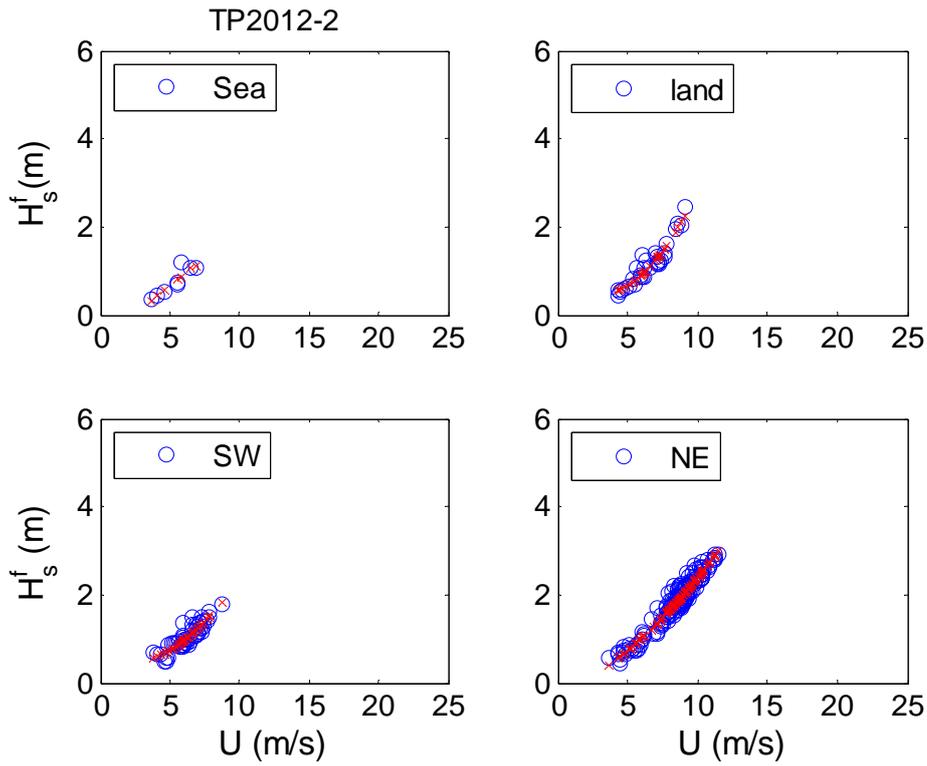


圖 5.1-6 風向分區 2012 年的風速與成熟風浪之關係

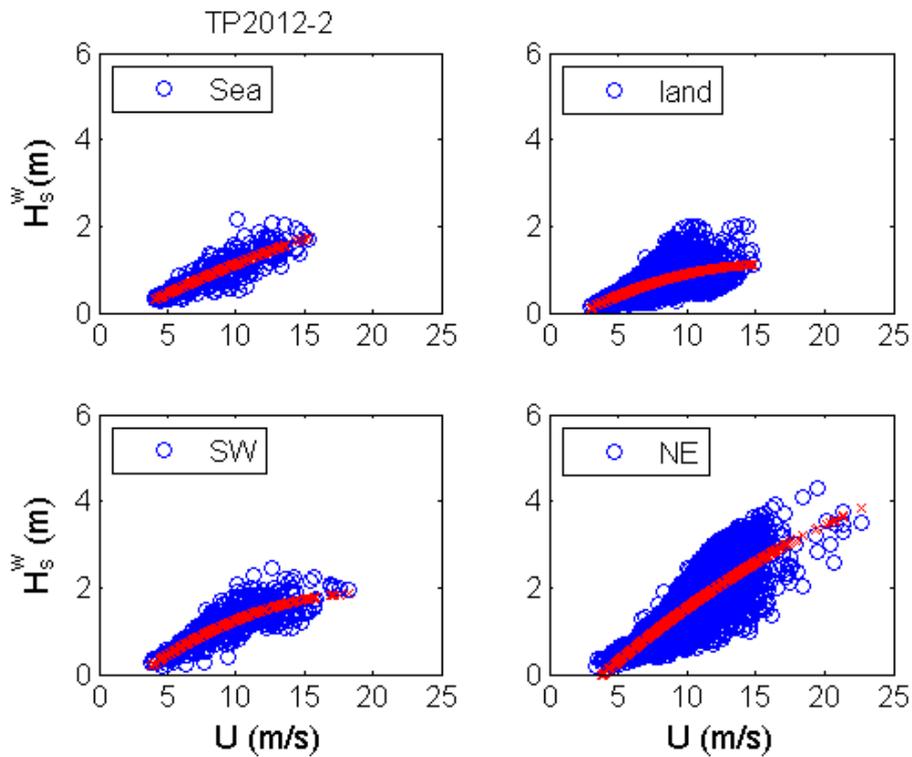


圖 5.1-7 風向分區 2012 年的風速與成長風浪之關係

合併各區及各類的推算波高與實測波高的圖 5.1-8 的散布圖來看，推算波高與實測波高均勻的分布在通過座標原點 45 度的斜線上。若比較其與單獨波浪分類或風向分區的結果，即圖 3.3-2 及圖 4.3-5，可知圖 5.1-8 的散布程度較其他兩圖窄。

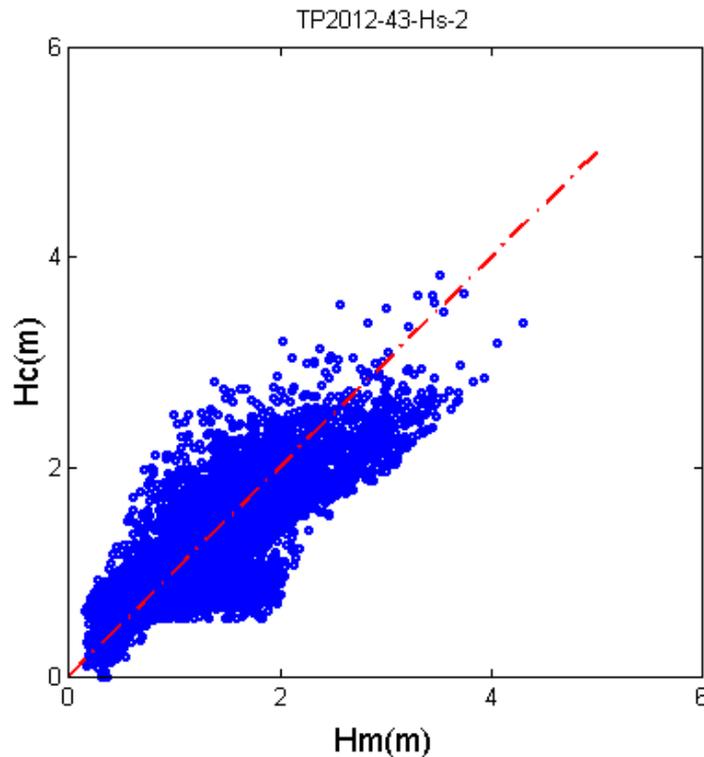


圖 5.1-8 合併 2012 年分區及分類的推算波高與實測值的散布圖

如 2010 年合併各類波浪的風向 4 區的迴歸結果，其  $R^2$  及 RMSE 如表 5.1-4 的最後二列。表 5.1-4 顯示 2012 年的湧浪在 4 分區的檢定指標  $R^2=0.1324、0.3942、0.3060、0.6070$  及  $RMSE =0.3839、0.3425、0.3134、0.3526m$ 。由此可知，除東北風向外，在 4 個分區的湧浪的波高與風速關係  $R^2$  均低，海風及西南風的湧浪與風速關係極微弱。合併 4 個分區的湧浪所得  $R^2=0.4963$  及  $RMSE =0.3485m$ 。

至於成熟波部分，其 4 區的檢驗標準  $R^2=0.8183、0.9198、0.8116、0.9338$  及  $RMSE =0.1366、0.1378、0.1294、0.1515m$ 。陸風的成熟波還是維持頗佳的迴歸分析，此可能因為成熟波條件須要風速維持在定速及定向一段時間下，波高與風速關係較比風向強。成熟波有極高的  $R^2$  及極低的 RMSE，此與第三章所得成熟波比其他兩類有波高與風速

有高相關的結論相同。

成長波部分的 4 區的檢驗標準  $R^2=0.7306、0.3304、0.6964、0.65924$  及  $RMSE=0.2142、0.3043、0.2505、0.4528$ 。陸風的成長波有弱的波高與風速的關係，但海風及東北風的成長波還有相當的。波高與風速的關係。

表 5.1-4 最後一列乃節錄不分風向的各類波浪的檢定標準，即表 3.3-2 最後兩行。由 5.1-4 最後二行可知當波浪分類又考慮風向分區的迴歸比僅考率波浪分類而不考慮風向分區為佳。尤其成長波浪情況，二者的檢定標準差異比其他兩者大。

表 5.1-4 分類及風向分區 2012 年資料的迴歸檢定指標

風向 分區	湧浪		成熟風浪		成長風浪	
	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE
海風	0.1324	0.3839	0.8183	0.1366	0.7306	0.2142
陸風	0.3942	0.3425	0.9198	0.1378	0.3304	0.3043
西南風	0.3060	0.3134	0.8116	0.1294	0.6964	0.2505
東北風	0.6070	0.3526	0.9338	0.1515	0.5924	0.4528
合併分區	0.4963	0.3485	0.9501	0.1442	0.7208	0.3921
不分區	0.4873	0.3516	0.9463	0.1505	0.5941	0.4726

再整理前期全年資料的正常值的迴歸結果與第四章僅風向分區的迴歸結果，各種資料型態迴歸的  $R^2$  及 RMSE 如表 5.1-5。由表 5.1-5 顯示 2010 年各種方法所得的  $R^2$  都比對應的 2012 年高，而且 2010 年的 RMSE 都比對應的 2012 的 RMSE 低，尤其在波浪的分類上二者的差異是最大的。若比較不同分組樣本的結果，不分區及分類的  $R^2$  及 RMSE 是最差的，而同時分區及分類所得的  $R^2$  及 RMSE 最佳。單獨分類所得的  $R^2$  及 RMSE 優於僅風向分區所得的  $R^2$  及 RMSE。此結果說明本研究所提分組方法是可以把較高統計特性的樣本分成一組，而可以獲得較佳的迴歸，此乃符合於樣本統計的原理。

表 5.1-5 比較風向分區或波浪分類的迴歸檢定指標

樣本	2010 年		2012 年	
	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE
不分區及分類	0.6286	0.4151	0.5172	0.4741
風向分區	0.6576	0.3985	0.6114	0.4254
波浪分類	0.7285	0.3549	0.6325	0.4137
分區及分類	0.7589	0.3344	0.7091	0.3680

## 5.2 以單點風速推算波浪的適應性類神經模式

上述方法都以多項式來迴歸風速與波高的關係，然而，多項式迴歸乃以人為主觀的設定函數，風速與波高的關係是否一定是多項式關係也是個問題，而且風速為向量物理量，除了速率外還有風向，如何把風向因素考慮在二者關係，也是個值得研究的課題。

常用的類神經網路主要有倒傳遞類神經及適應性類神經兩種。前者的原理，當目標函數(target)不滿足要求精度下時，以最小二乘法疊代網路架構的轉換函數的權重(weighting)及閾值(bias)，因此輸入參數多時，權重及閾值則較多，類神經網路學習就易於獲得合宜的結果，因此，倒傳遞類神經比較適合於多輸入參數的情況。本研究只有風速的輸入參數較不適合此種。

適應性類神經模式(ANFIS) 以人工智慧(Artificial intelligence)的技巧，避免人為指定物理量間的函數關係，因此被選為進行分析風向及風速與波高的關係。適應性類神經模式的原理介紹，放於附錄 B，以利於閱讀。在本小節則說明如何建立適應性類神經架構來模擬波浪與風速的關係。

因為適應性類神經模式幾乎可以模擬與輸出值完全相同，即為過度學習(over-learning)。為避免有過度學習的問題，建立適應性類神經模式的架構須要先透過一些樣本的學習及一些樣本的驗證來證實

其適用性。學習樣本與驗證樣本的個數占母體的百分比並無學術上的要求，一般常使用 2/3 的樣本來學習，另外的 1/3 樣本來驗證，當二者的評估指標 RMSE 在可接受的誤差範圍內，說明適應性類神經模式的架構是適合此母體。本節的學習樣本及驗證樣本的選擇，以前述波浪分類或風向分類下的各組樣本，依時間排序後，每隔三個的前二個當為學習樣本，第三個為驗證樣本。

首先，先測試適應性類神經的輸入只有相對應波高時間的風的速率(U)，來比較適應性類神經模式與前兩章的迴歸分析結果，稱為 ANFIS-U 模式。另外，以風速的(E, N)兩個分量(u, v)當為輸入參數，建構另外一個模式，稱為 ANFIS-(u,v)模式，此架構即考慮風速的方向性。為正確比較不同方法的優劣，各種方法所使用的樣本必須是一樣的。因此本節的迴歸分析的樣本，乃與適應性類神經模式一樣，此與前兩章的迴歸樣本是不同的。

本文以分類及分區樣本數較多的湧浪及東北風兩種波浪，首先來測試模式適合的學習次數(epoch)。圖 5.2-1 及圖 5.2-2 分別為 ANFIS-U 模式在不同學習次數計算的波高與實測值的  $R^2$  及 RMSE。兩圖的左邊座標是湧浪的結果，而右邊座標是東北風波浪的結果。

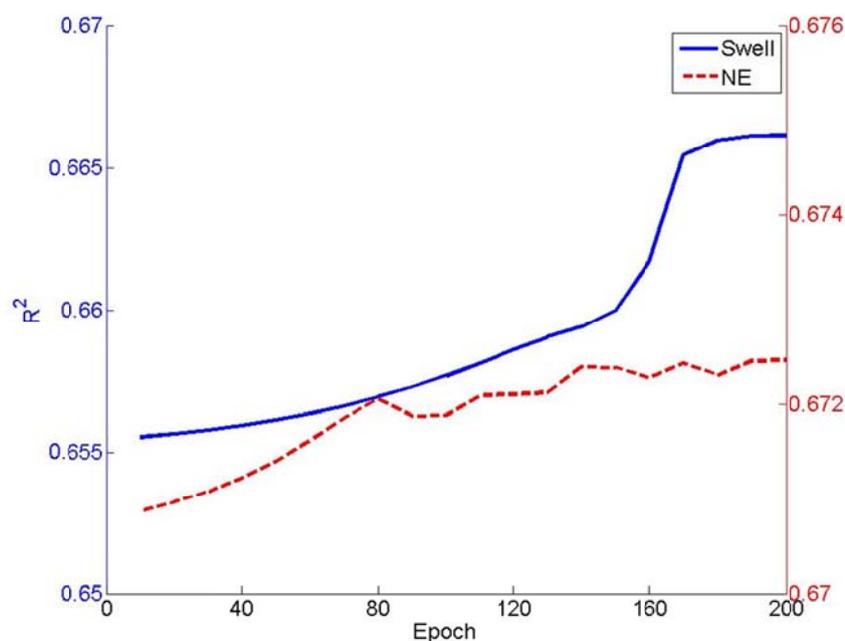


圖 5.2-1 模式計算波高與實測值的  $R^2$  與學習次數的關係

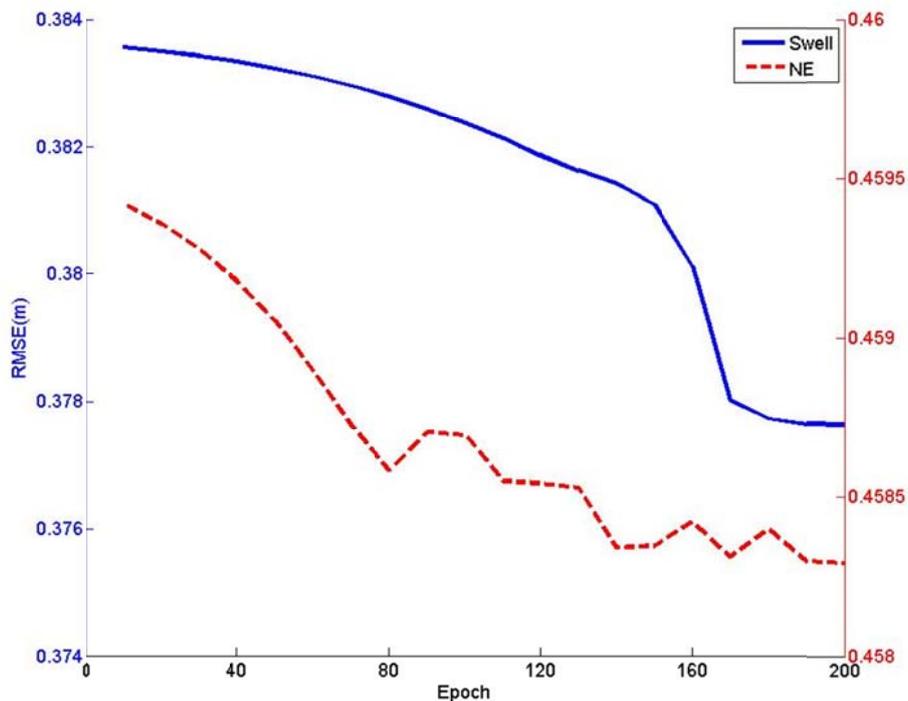


圖 5.2-2 模式計算波高與實測值的 RMSE 與學習次數的關係

由圖 5.2-1 及圖 5.2-2 可知湧浪及東北風波浪樣本的  $R^2$  隨學習次數增加而增加，RMSE 隨學習次數增加而減少。湧浪的  $R^2$  及 RMSE 在學習次數 160 至 170 間有明顯的變化，直至學習次數 180 以上後，變動量就相當穩定。因此本研究遂以 190 次學習當為模式架構的停止次數。

各區資料計算出學習組、驗證組及全年的  $R^2$  及 RMSE，分別示如表 5.2-1 及表 5.2-6。從表 5.2-1 的各模式推算 2010 年分類波浪學習組的檢定指標可知，以風的速率為輸入變數的適應性類神經模式 (ANFIS-U)，在各分類學習組及合併全部的檢定指標都稍優於以迴歸分析的結果，且以風速的分量為輸入變數的適應性類神經模式 (ANFIS-(u,v)) 的各檢定指標明顯優於以迴歸分析的結果。此比較結果可以說明，ANFIS-(u,v) 適應性類神經模式輸入風速分量有助於建立合理的輸入參數與波高的關係，及風速分量比單純速率能提供波高更多且有關的資訊，當為輸入參數而可建立與波高更佳的关系。

比較這兩種模式與前述迴歸分析，以 2010 年波浪的分類及風向

分表 5.2-2 的各模式推算 2010 年分類波浪驗證組的檢定指標可知，三種模式模擬各類波浪的能力以 ANFIS-(u,v)模式為最優，而迴歸方法為最差。從合併結果來看，迴歸分析的  $R^2=0.7251$  及  $RMSE=0.3557$  m，ANFIS-(u,v)模式提升至  $R^2=0.7785$  及  $RMSE=0.3193$  m。若比較表 5.2-1 及表 5.2-2 的結果可發現，三種模式建立風速與波高的關係，模擬學習組及驗證組的能力是相近的。一般而言，驗證組的  $R^2$  一般會比學習組差，但本研究確相反，此可能是 2010 年數據有特殊的分布，此原因尚須探討。

**表 5.2-1 各模式推算 2010 年分類波浪學習組的檢定指標**

樣本	迴歸分析		ANFIS-U		ANFIS(u,v)	
	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE
湧浪	0.5075	0.3064	0.5126	0.3048	0.5311	0.2990
成熟波浪	0.9424	0.1502	0.9445	0.1473	0.9537	0.1345
成長波浪	0.7174	0.4086	0.7216	0.4055	0.7970	0.3462
分類合併	0.7251	0.3557	0.7288	0.3533	0.7785	0.3193

**表 5.2-2 各模式推算 2010 年分類波浪驗證組的檢定指標**

樣本	迴歸分析		ANFIS-U		ANFIS(u,v)	
	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE
湧浪	0.5217	0.3042	0.5262	0.3028	0.5369	0.2994
成熟波浪	0.9572	0.1338	0.9546	0.1380	0.9443	0.1543
成長波浪	0.7316	0.4060	0.7275	0.4091	0.7941	0.3557
分類合併	0.7351	0.3532	0.7334	0.3543	0.7764	0.3246

若合併學習組及驗證組的計算值再與實測值比較，由表 5.2-3 的檢定指標可知，三類波浪的模擬以 ANFIS-(u,v)模式為最優而迴歸分析的結果最差。此結果說明本研究建立的 ANFIS-(u,v)模式是合宜的模式。合併迴歸分析的  $R^2=0.7285$  及  $RMSE=0.3549$  m，ANFIS-(u,v)模式提升至  $R^2=0.7778$  及  $RMSE=0.3210$ m。

表 5.2-4 為各模式推算 2012 年分區波浪學習組的檢定指標。由此表可知 在各分區學習組及合併全部的檢定指標，ANFIS-U 適應性類神經模式與迴歸分析的結果相近，但前者稍優於後者。

表 5.2-5 為各模式推算 2012 年分區波浪驗證組的檢定指標。此表可知 ANFIS-(u,v)模式在三種模式中為最優的，而迴歸分析為最差，但與 ANFIS-U 模式相近。若比較表 5.2-3 及表 5.2-4 的結果可發現，三種模式建立風速與波高的關係，模擬學習組的能力都優於驗證組。此說明本研究建立的 ANFIS-U 模式及 ANFIS-(u,v)模式是合宜去模擬分區的風速與波高的關係。

至於合併學習組及驗證組的推算結果所得的檢定指標，由表 5.2-6 可知，還是以 ANFIS-(u,v)模式為三種中最優，而迴歸分析的結果最差。由原本迴歸計算的  $R^2=0.6285$  及  $RMSE=0.4151$  m，ANFIS-(u,v)模式提升至  $R^2=0.7147$  及  $RMSE=0.3638$  m。

**表 5.2-3 各模式推算 2010 年分類波浪全部資料的檢定指標**

樣本	迴歸分析		ANFIS-U		ANFIS(u,v)	
	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE
湧浪	0.5123	0.3057	0.5172	0.3042	0.5330	0.2991
成熟波浪	0.9472	0.1451	0.9477	0.1443	0.9500	0.1414
成長波浪	0.7223	0.4077	0.7236	0.4067	0.7960	0.3494
分類合併	0.7285	0.3549	0.7303	0.3536	0.7778	0.3210

表 5.2-4 各模式推算 2012 年風向分區學習組的檢定指標

樣本	迴歸分析		ANFIS-U		ANFIS(u,v)	
	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE
海風	0.2530	0.3826	0.2585	0.3812	0.3923	0.3451
陸風	0.2365	0.3734	0.2398	0.3726	0.4439	0.3187
西南風	0.4852	0.2931	0.4878	0.2923	0.5423	0.2764
東北風	0.6676	0.4463	0.6679	0.4460	0.7037	0.4213
合併分區	0.6345	0.4148	0.6680	0.3958	0.7244	0.3607

表 5.2-5 各模式推算 2012 年風向分區驗證組的檢定指標

樣本	迴歸分析		ANFIS-U		ANFIS(u,v)	
	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE
海風	0.1837	0.3791	0.1127	0.3987	0.2683	0.3588
陸風	0.1913	0.3819	0.1915	0.3819	0.4151	0.3245
西南風	0.5206	0.2952	0.5168	0.2963	0.5537	0.2846
東北風	0.6318	0.4476	0.6320	0.4475	0.6572	0.4329
合併分區	0.6164	0.4158	0.6392	0.4020	0.6948	0.3701

所以，用二次多項式所建立的迴歸分析，在人為主觀給定函數去配套(fitting)實測物理量並無法精準地建立有微觀變化的因果關係，而適應性類神經模式可以避免此限制，只要給定合理的邏輯及輸入參數，適應性類神經模式可以建立輸入與輸出值的適合關係。另外，ANFIS-(u,v)模式有最佳模擬波高的能力可知，在臺北港的波浪除與風速率有明顯的關係外，亦與風向有很大的關係。

表 5.2-6 各模式推算 2012 年風向分區全部資料的檢定指標

樣本	迴歸分析		ANFIS-U		ANFIS(u,v)	
	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE
海風	0.2295	0.3814	0.2080	0.3871	0.3523	0.3497
陸風	0.2212	0.3762	0.2234	0.3757	0.4343	0.3206
西南風	0.4977	0.2938	0.4981	0.2937	0.5465	0.2791
東北風	0.6563	0.4467	0.6567	0.4465	0.6888	0.4252
合併分區	0.6285	0.4151	0.6587	0.3979	0.7147	0.3638

### 5.3 以多點風速推算波浪的適應性類神經模式

由上述單點分類波浪及風向分區的迴歸結果的 R<sup>2</sup> 低於 0.5 者，即湧浪、海風、陸風及西南風等四組有弱的觀測樁的風速與波高關係。從波浪傳遞的機制來看，湧浪、海風及陸風情況主要波浪大多從外海傳入，其成份較當地風速能量產生的波多。尤其陸風情況，陸風的強弱應不是主導觀測樁的波浪大小，因此其 R<sup>2</sup> 低於 0.23。本節將表 5.2-3 及表 5.2-6 的湧浪、海風、陸風及西南風等四組，再考慮外圍風速來二者風速與波高的關係，以提高模擬能力。

本文透過陳(2012)建立的 Advanced Research WRF 的 2km 風場，計算 2010 全年臺北港海域格網點上的風速，內插至以觀測樁為圓心 25km 及 50km 為半徑的八大方位的風速。本研究以正北編號 1，45 度的區間順時至西北方向依序編號至 8。

表 5.3-1 為 2010 年 25km 及 50km 半徑上八個方位上的風速與波高的相關係數，及此 8 個方位上的計算風速以二次多項式迴歸波高的 R<sup>2</sup>。從表 5.3-1 第一及二行的相關係數可知，以 W 至 N 方向的風速與波高的相關係數高於其他方向，第三及四行的 R<sup>2</sup> 亦有同樣的結果，尤其 E 順時至 S 方向的相關係數較低，此顯示陸上風向的速度

與波高關係弱。在相同方位上 25km 處的風速與波高關係相近於在 50km 處的風速與波高的關係。因此，本研究以臺北港樁的局部風速及距觀測樁外 W 及 NW 風速建立多點模式與波高的關係。

若將上述概念表示觀測樁的波高與觀測樁的實測風速， $U_{TP}$ ，及外圍的計算風速， $U_{out}$ ，的二次多項式如下：

$$H_s = a_2 U_{TP}^2 + a_1 U_{TP} + a_0 + b_2 U_{out}^2 + b_1 U_{out} \quad (5.3-1)$$

式(5.3-1)不為單一變數的多項式。

表 5.3-1 外圍各方位的風速與波高的相關係數及其二次迴歸的  $R^2$

方位編號	相關係數		檢定指標 R2	
	25km	50km	25km	50km
1 (N)	0.5189	0.4894	0.5126	0.5237
2 (NE)	0.4730	0.4098	0.4301	0.4774
3 (E)	0.3215	0.2324	0.3610	0.3503
4 (SE)	0.4089	0.2529	0.3324	0.2227
5 (S)	0.4881	0.3727	0.3145	0.2663
6 (SW)	0.5007	0.5252	0.4199	0.4843
7 (W)	0.5490	0.5308	0.5305	0.5455
8 (NW)	0.5330	0.5147	0.5340	0.5450

仿上節的取樣方式，以 2010 年的分類及及分區各組樣本的 2/3 當學習組，而另外其他 1/3 樣本來驗證模式的有效性。三種模式所得波浪模擬結果分別如示表 5.3-2 及表 5.3-3。因為成熟波浪的個數相當少，當輸入變數增加，ANFIS-U 及 ANFIS-(u,v)模式無法由少數樣本學習到極佳的架構，因此成熟波直接引用表 5.2-3 之結果。

由表 5.3-2 可知增加 W 風速的多點迴歸分析所得湧浪的  $R^2$  已從表 5.2-3 的 0.5123 提高至 0.5509，且 RMSE 從 0.3057 m 降至 0.2934

m。合併全年的資料的  $R^2$  也從 0.7285 增加至 0.7428，但 RMSE 從 0.3549m，卻只降至 0.3544，相當微小的改善。由此可見多點迴歸只改善趨勢而已，並無助於偏差量的改善。至於 ANFIS-U 多點模式，合併資料的  $R^2$  提高至 0.7453，而 RMSE 降至 0.3464 m。最佳多點模式是 ANFIS(u,v)，其合併的  $R^2$  提高至 0.8072，但 RMSE 降至 0.3014 m。ANFIS(u,v) 模式改善 RMSE 為  $(0.3210-0.3014)/0.3210=6.1\%$ ，改善幅度最多。

表 5.3-2 增加 W 風速的多點模式推算 2010 年分類波浪的檢定指標

樣本	迴歸分析		ANFIS-U		ANFIS(u,v)	
	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE
湧浪	0.5509	0.2934	0.5512	0.2949	0.5936	0.2807
成熟波浪	0.9474	0.1451	0.9477	0.1443	0.9500	0.1414
成長波浪	0.7327	0.4000	0.7387	0.4006	0.8253	0.3276
分類合併	0.7428	0.3544	0.7453	0.3464	0.8072	0.3014

註: ANFIS-U 及 ANFIS(u,v) 的結果直接引用表 5.2-3 之結果。

表 5.3-3 為增加 NW 風速的多點模式的模擬結果。若與表 5.3-2 比較，增加 NW 風速的三種多點模式所得的  $R^2$  及 RMSE 都比相對應的增加 W 風速的多點模式佳。最佳的 ANFIS(u,v) 多點模式的  $R^2$  提高至 0.8177，且 RMSE 降至 0.2931 m。此結果可能因為臺北港的海岸線的方位角約右傾  $45^\circ$ ，若波浪逐漸進入海岸波浪會折射 (refraction) 而逐漸垂直於海岸，也就是波向逐漸變成為 NW 方向。

至於風向分區的多點模式方面，表 5.3-4 及表 5.3-5 分別為增加 W 及 NW 風速的模擬結果。因東北風區的單點模擬已相當不錯，因此 ANFIS-U 及 ANFIS-(u,v) 模式就直接使用單點結果，即表 5.2-6。由表 5.3-4 來看，多點迴歸分析海風並無法改善原本的模擬，但陸風及西南風區的模擬略有改善，所得整體的  $R^2$  從表 5.2-6 的 0.6285 提高至 0.6999，且 RMSE 從 0.4151 m 降至 0.3731 m，改善幅度約有

$(0.4151-0.3731)/0.4151=10.1\%$ 。至於 ANFIS-U 的多點模式，因輸入值為風速與迴歸分析相同，因此改善的結果與前述相似，但稍優於迴歸分析，RMSE 的改善百分比為 $(0.3979-0.3551)/0.3979=10.8\%$ 。ANFIS(u,v) 多點模式在三種模式中是最佳的，在海風、陸風及西南風都有明顯地改善，尤其在西南風區， $R^2$  從 0.5465 提高至 0.9060。合併全年的資料的  $R^2$  也從 0.7147 增加至 0.8027，且 RMSE 從 0.3638 m 降至 0.3252m，RMSE 有 $(0.3638-0.3252)/0.3638=11.9\%$ 的改善幅度。

表 5.3-3 增加 NW 風速的多點模式推算 2010 年分類波浪的檢定指標

樣本	迴歸分析		ANFIS-U		ANFIS(u,v)	
	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE
湧浪	0.5514	0.2932	0.5562	0.2932	0.5915	0.2814
成熟波浪	0.9475	0.1449	0.9477	0.1443	0.9500	0.1414
成長波浪	0.7365	0.3972	0.7437	0.3968	0.8429	0.3106
分類合併	0.7453	0.3537	0.7495	0.3435	0.8177	0.2931

表 5.3-4 增加 W 風速的多點模式推算 2010 年風向分區的檢定指標

樣本	迴歸分析		ANFIS-U		ANFIS(u,v)	
	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE
海風	0.1551	0.3417	0.1434	0.3132	0.4807	0.2438
陸風	0.3624	0.3209	0.3426	0.3066	0.5525	0.2531
西南風	0.5530	0.2864	0.9012	0.1957	0.9060	0.1905
東北風	0.6647	0.4352	0.6567	0.4465	0.6888	0.4252
合併分區	0.6999	0.3731	0.7648	0.3551	0.8027	0.3252

註: ANFIS-U 及 ANFIS(u,v)的結果直接引用表 5.2-6 之結果。

表 5.3-5 為增加 NW 風速的多點模式的模擬結果。若與表 5.3-4 比較，增加 NW 風速的三種多點模式所得的  $R^2$  及 RMSE 都比相對應的增加 W 風速的多點模式稍佳。最佳的 ANFIS(u,v) 多點模式的  $R^2$  提高至 0.8044，RMSE 降至 0.3238 m。

表 5.3-5 增加 NW 風速的多點模式推算 2010 年風向分區的檢定指標

樣本	迴歸分析		ANFIS-U		ANFIS(u,v)	
	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE
海風	0.1664	0.3395	0.1238	0.3177	0.5271	0.2330
陸風	0.3298	0.3290	0.3172	0.3125	0.5541	0.2528
西南風	0.5651	0.2825	0.9014	0.1950	0.9120	0.1846
東北風	0.6832	0.4467	0.6567	0.4465	0.6888	0.4252
合併分區	0.7069	0.3687	0.7620	0.3571	0.8044	0.3238

表 5.3-6 不同模式推算 2010 年全部正常資料樣本的檢定指標

樣本	模式	迴歸分析		ANFIS-U		ANFIS(u,v)	
		$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE
原始全部	單點	0.6286	0.4151	-	-	-	-
分類	單點	0.7285	0.3549	0.7303	0.3536	0.7778	0.3210
	多點	0.7453	0.3537	0.7495	0.3435	0.8177	0.2931
分區	單點	0.6667	0.3932	0.6587	0.3979	0.7147	0.3638
	多點	0.7069	0.3687	0.7620	0.3571	0.8044	0.3238
分類及分區	單點	0.7589	0.3344	-	-	-	-

若整理前期單純的迴歸模式至目前增加 NW 風速多點模式，表 5.3-6 為各模式所模擬 2010 年全部正常資料的檢定指標。比較表

5.3-6 的三種多點模式模擬結果與單點模式的  $R^2$  及 RMSE，明顯可以得知下列的結論：(1)對各種樣本而言，ANFIS(u,v) 多點模式是三種模式中最佳的；(2)增加合適的外圍風速的多點模式比單點模式佳；(3)波浪分類的模擬改善優於風向分區。以臺北港為例，ANFIS-(u,v) 多點模式的確可以增加模擬波高的結果，而增加 25km 的外圍 NW 風速是所有測試模式中最合適的。

## 第六章 結論與建議

### 6.1 結論

由本計畫的研究結果及分析可獲得下列幾點結論：

1. 本研究利用 Pierson & Moskowitz (1964) 波譜理論適用於成熟波譜的情況及其表示性波高及尖峰週期與風速的公式，在假設風速分布為冪次方形式，且其指數為  $1/7$  下，轉換 PM 波譜公式中 19.5m 風速成現有資料的 10m 風速。並以計算的成熟波浪的示性波高及週期，當為的分類臺北港波浪成湧浪、成熟波及成長波三種的條件，由分類波浪樣本可以提升建立經驗公式來描述波高及風速關係的能力。本方法可以合適地分類波浪為湧浪、成熟波及成長波三種。至於風速冪次方分布的指數不同對轉換 19.5m 風速成 10m 風速而影響迴歸波高及風速關係的經驗公式並不明顯大。
2. 由 2010 及 2012 年的波浪及風速資料迴歸結果說明，2012 年的資料比 2010 年較散亂，但二者的統計特性差不多，遂可由 2010 年資料所得的迴歸係數來推算 2012 年的波浪。
3. 本研究的以 PM 波譜分類出三類波浪有相似統計，而可迴歸頗佳的波浪與風速的關係。以 2010 年資料的模式檢驗指標為例， $R^2$  從不分類的 0.6286 增加至 0.7285，RMSE 從不分類的 0.4151m 降至 0.3549m。
4. 以風向方位角區分波浪成海風、陸風、西南風及東北風等四組，經三種分區風向方位角測試後，以 Steyn and Faulkner (1986) 提出的向岸風應發生在日出後兩小時至日落後兩小時間，且應至少持續兩小時的原則為最合適。本研究建議臺北港的分區風向方位角為  $0^\circ$ 、 $70^\circ$ 、 $205^\circ$ 、 $275^\circ$ 。迴歸 2010 年風向分區的資料，獲得全年波高與實測值的模式檢驗指標  $R^2=0.6667$  及  $RMSE=0.3932m$ ，此模式檢驗指標優於不考慮分區的結果。風向分區的迴歸分析比波浪分類的模擬差。

5. 全年樣本同時分類波浪三種及分區風向四種，所建立 12 組的波高與風速的迴歸經驗公式能合適地表示各組波高與風速關係，因此結合各組的模式計算值所得評估結果明顯優於單獨考慮波浪分類或風向分區的結果。
6. 以風速分量為輸入參數的適應性類神經模式 ANFIS(u,v)，比迴歸模式及單純輸入風速的適應性類神經模式 ANFIS-U 更適合建立波高與風速的關係。
7. 增加合適的外圍風速的多點模式比只以觀測樁的單點模式適合建立波高與風速的關係。

本三年的研究已發表國內研討會論文 5 篇，目前已整理一篇論文投稿海洋工程學刊，未來會陸續將研究結果投稿論文於國內外研討會及期刊。同時在計畫執行期間讓一位碩士生參與計畫研究，訓練其撰寫程式及分析資料等研究能力，並以此完成其碩士論文。詳細的研究績效如附錄的績效指標 KPI(Key Performance Indicator)。

## 6.2 建議

經過今年的研究，雖然利用波浪分類可以建立更好的迴歸經驗公式來表示各組波高與風速關係，但此結果只能分析已觀測結果，做波浪資料補遺，而無法進行波浪的預測。而風向分區方法只考慮風速資料，沒使用波浪資料，雖然其迴歸經驗公式描述波高與風速關係的吻合度比波浪分類的結果差，但此方法可以由觀測的風速資料，即可預報波浪。若以港研中心所負責的任務工作，建議未來可進行後續的研究，有助於港研中心在資料處理的完整性及波浪預報的能力。

1. 本研究將全年數據當為樣本母體，探討全年的波浪與風速的關係。然而，颱風的旋轉風場結構與季節風長期定方向的結構不同。因此，兩種不同風場機制造成的波浪特性應是不同，未來研究可以將颱風期間的資料分離出一組樣本，再來分析波浪與風速的關係。

2. 由本研究發現給定臺北港觀測樁外圍的風速可以增加迴歸波浪與風速關係的能力，因此考慮不同的情境下，使用風場數值計算結果，加入更多的資訊在迴歸波浪與風速關係上，可以精進本模式的模擬能力。
3. 為方便港研中心執行波浪預報，可以介紹港研中心人員本研究的方法並訓練操作程式。若能建立視窗化的操作軟體，更能讓使用者方便使用本波浪預報模式。

## 參考文獻

1. 林文宗、梁乃匡 (1999)「颱風湧浪逆風之探討」, 第 21 屆海洋工程研討會論文集, 第 109-114 頁。
2. 高治平、梁乃匡(1980)「蓋灣北部海城冬季波候研究」, 第 4 屆海洋工程研討會論文集, 第 245-258 頁。
3. 梁乃匡(1982)「颱風湧浪的預報方法」, 第 6 屆海洋工程研討會論文集, 第 5.1-5.19 頁。
4. 梁乃匡(1989)「修訂的颱風湧浪預報法」, 港灣技術, 第 4 期, 第 1-10 頁。
5. 梁乃匡(2010)「颱風湧浪預報經驗法的探討」, 海洋工程學刊 第 10 卷 第 2 期 第 87-120 頁
6. 梁乃匡、李汴軍 (1978)「台灣海峽冬季季風波浪現場調查初步研究」, 第 2 屆海洋工程研討會論文集, 第 1-21 頁。
7. 梁乃匡、林文宗(1995)「八十三年侵台颱風波浪推算研究」, 第 17 屆海洋工程研討會論文集, 第 425-442 頁。
8. 蔡昫達(2005)「應用類神經模糊系統於季節風波浪之推算」, 國立交通大學土木工程研究所碩士論文。
9. 蔡獲光(2006)「應用 ANFIS 模式於台灣東部海域之季節風波浪推算」, 國立交通大學土木工程研究所碩士論文。
10. 衛紀淮、張憲國、劉勁成、陳蔚瑋、何良勝 (2014)「103 年臺北港風與波浪關連性之統計特性研究」, 交通部運輸研究所港研中心報告, 編號 MOTB-IOT-104-H2EB001f。
11. 陳昭銘(2012)「臺北港區風場數值預報系統之建置研究」, 交通部運輸研究所港研中心報告, 編號 MOTC-IOT-101-H2EB001e。
12. Altunkaynak, A. and Özger, M. (2004) Temporal significant wave height estimation from wind speed by perceptron Kalman filtering, *Ocean Engineering*, 31(10), 1245-1257.
13. Andreas, E.L. and Wang, S. (2007) Predicting significant wave height off the northeast coast of the United States, *Ocean Engineering*, 34, 1328-1335.

14. Carter, D.J.T. (1982) Prediction of wave height and period for a constant wind velocity using the JONSWAP results, *Ocean Engineering* 9, 17-33.
15. Chang, T.P. (2011) Estimation of wind energy potential using different probability density function, *Applied Energy*, 88, 1848-56.
16. Defant, F. (1951) Local winds, in *compendium of meteorology*, Boston, Amer. Meteor. Soc., 655-672.
17. Doong, D. J., and Kao, C. C. (2007) Typhoon induced swell, *Proceedings of East Asian Workshop for Marine Environments*.
18. Glejin et al. (2013) Observational evidence of summer Shamal swells along the west coast of India, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, vol.30; 2013; 379-388
19. Glejin, J., Sanil Kumar, V., Balakrishnan Nair, T. M., Singh, J., Mehra, P. (2013) Observational evidence of summer Shamal swells along the west coast of India, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 30, 379-388.
20. Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselmann, D.E., Kruseman, P., Meerburg, A., Müller, P., Olbers, D.J., Richter, K., Sell, W., Walden, H. (1973) Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), *Dtsch. Hydrogr. Z., Suppl. A*, 8, 1-95.
21. Haurwitz, B. (1947) Comments On the Sea Breeze Circulation, *J.Meteor.*, 4, 1-8.
22. Janssen, P. (1994) Numerical modelling of wave evolution in dynamics and modeling of ocean waves, *Cambridge Univ. Press*, 205-257.
23. Janssen, P. (2004) *The Interaction of Ocean Waves and Wind*, Cambridge University Press, 308pp.
24. Kelvin, L. (1869) On vortex motion, *Trans. R. Soc. Edinburgh*, 25, 217-260.
25. Kinsman, B. (1965) *Wind Waves: Their generation and propagation on the Ocean Surface*, Prentice-Hall, 676 pp.
26. Knaff, J. A., Sampson, C. R., DeMaria, M., Marchok, T. P., Gross, J. M, McAdie, C. J. (2007) Statistical tropical cyclone wind radii

- prediction using climatology and persistence, *Wea. Forecasting*, 22 (4), 781-791.
27. Knaff, J.A., C. R. Sampson, M. DeMaria, T. P. Marchok, J. M. Gross, and C. J. McAdie (2007) Statistical Tropical Cyclone Wind Radii Prediction Using Climatology and Persistence, *Weather Forecasting*, 22:4, 781–791.
  28. Komen, G. J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S., Janssen, P. (1994). Dynamics and modelling of ocean waves, Cambridge University Press, 532pp.
  29. Komen, G. J., Hasselmann, S., Hasselmann, K. (1984) On the existence of a fully developed wind-sea spectrum, *J. Phys. Oceanogr.*, 14(8), 1271-1285.
  30. Li, S. Q., Zhao, D. L. (2012) Comparison of spectral partitioning techniques for wind wave and swell, Physical Oceanography Laboratory, Ocean University of China.
  31. Liang, N.K. (1990) A study on typhoon swell height prediction, *Acta Oceanographic, Taiwanica* 25, 77-86.
  32. Liang, N.K. (2003) The typhoon swell Doppler effect, *Acta Ocean Engineering* 30, 1107-1115.
  33. Liang, N.K. (2012) The freak wave potential of typhoon swell, *Journal of Marine Science and Technology*, 20 (4), 467-471.
  34. Miles, J. (1957) On the generation of surface waves by shear flows, *J. Fluid Mech.*, 3, 185-204.
  35. Morgan, E.C., Lackner, M., Vogel, R.M., Baise, L. G. (2011) Probability distributions for offshore wind speeds. *Energy Conversion and Management*;52:15-26.
  36. Phillips, O. (1985) Spectral and statistical properties of the equilibrium range in the wind-generated gravity waves, *J. Fluid Mech.*, 156, 505-531.
  37. Pierson W. J. (1950) The effects of eddy viscosity, Coriolis deflection, and temperature fluctuation on the sea breeze as a function of time and height, New York University. College of Engineering. *Meteorological Papers*1, (2), 29pp.
  38. Pierson, W. J., Moskowitz, L. (1964) A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A.

- Kitaigorodski, J. *Geophys. Res.*, 69(24), 5181-5190.
39. Pierson, W., Garcia, A. (2008) On the wind-induced growth of slow water waves of finite steepness, *J. Fluid Mech.*, 608, 243-274.
  40. Portilla, J., Ocampo-Torres, F. J., Monbaliu, J. (2009) Spectral partitioning and identification of wind sea and swell, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 26(1), 107-122.
  41. Rashmi, R., Aboobacker, V. M., Vethamony, P., John, M. P. (2013) Co-existence of wind seas and swells along the west coast of India during non-monsoon season, *Ocean Sci.*, 9, 281-292.
  42. Samiksha, S. V., Vethamony, S. V., Aboobacker, V. M., Rashmi, R. (2012) Propagation of Atlantic Ocean swells in the north Indian Ocean: a case study, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 3605-3615.
  43. Sanil Kumar, K., Ashok Kumar, K., Anand, N. M. (2000) Characteristics of waves off Goa, west coast of India, *J. Coast. Res.*, 16 (2), 782-789.
  44. Semedo, A., Sušelj, K., Rutgersson, A., Sterl, A. (2010) A global view on the wind sea and swell climate and variability from ERA-40, *J. Climate*, 24(5), 1461-1479.
  45. Steyn, D. G., Faulkner, D. A. (1986) The climatology of sea-breeze in the Lower Fraser Valley, *Climatological Bulletin* 20(3), 21-39.
  46. Sverdrup, H. U., Munk, W. H. (1947) Wind, sea and swell, theory of relation for forecasting, U. S. Navy Hydrographic Office, Pub. 601, 44pp.
  47. Tian, Z., Perlin, M., Choi, W. (2010) Energy dissipation in two-dimensional unsteady plunging breakers and an eddy viscosity model, *J. Fluid Mech.*, 655, 217-257.
  48. Toffoli, A., Lefevre, J. M., Bitner-Gregersen, E., Monbaliu, J. (2005) Towards the identification of warning criteria: analysis of a ship accident database, *Applied Ocean Research*, 27(6), 281-291.
  49. Tucker, M.J. and Pitt, E.G. (2001) *Waves in Ocean Engineering*, Elsevier.
  50. Vethamony, P., Rashmi, R., Samiksha, S. V., Aboobacker, V. M. (2014) Recent studies on wind seas and swells in the Indian Ocean: a review, *Int. J. Ocean Climate. Syst.* 4, 65-75.
  51. Wang, D. W., Hwang P. A. (2001) An operational method for

separating wind sea and swell from ocean wave spectra, J. Atmos. Oceanic Technol., 18(12), 2052-2062.

52. Wilson, B. W. (1955) Graphical approach to the forecasting of waves in moving fetch, Beach erosion board, US Army Corps of Engineers Tech. Memo., No. 73, 31.
53. Wilson, B. W. (1983) Deep water generation by moving wind systems, Trans. Am, Soc. Civil. Eng. 128, Paper No. 3416.
54. Young, I. (1999) Wind generated ocean waves, Elsevier, 288pp.
55. 合田良實 (1987) “数値シミュレーションによる波浪の標準スペクトルと統計的性質”, 日本第 34 回海岸工学講演会論文集, , pp.131-135。

## 附錄 A 最適多項式回歸及模式評估指標

多項式迴歸(polynomial regression)是一種常用於迴歸的函數。若當獨立變數僅有一個,但應變數 $y$ 與獨立變數 $x$ 之間的關係為非線性,而是二次或二次以上各項時,則稱為一元多項式迴歸,模式為

$$y_i = a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2 + \dots + a_k x_i^k + \varepsilon \quad (\text{A-1})$$

其中 $\varepsilon$ 為誤差。以 $n$ 個數據滿足上述式子,用向量表示之

$$\mathbf{y}_{n \times 1} = \mathbf{x}_{n \times k} \mathbf{a}_{k \times 1} + \boldsymbol{\varepsilon}_{k \times 1} \quad (\text{A-2})$$

上式的粗體字代表變數的向量。利用最小二乘法(least-squared method)可推算待定係數,即為

$$\hat{\mathbf{a}} = (\mathbf{x}^T \mathbf{x})^{-1} \mathbf{x}^T \mathbf{y} \quad (\text{3-3})$$

本文使用一般常用的離群值偵測法,為統計學上的箱型圖(box plot)理論進行資料之篩分。箱型圖架構如圖 A-1 所示。圖 A-1 顯示 1/4 及 3/4 位數構成箱型範圍,稱為分位數間隔(inter-quartile range, IQR)。其中 1/4 及 3/4 位數(first and third quartile)之定義為從小至大排序的資料的第 25%與 75%位置處的資料值,用以描述資料之離群程度;中位數為排序第 50%處的資料值。並將 1/4 及 3/4 位數間定為箱型主體(IQR)後,再依此向外延伸 1.5 倍 IQR 外為離群值,3 倍 IQR 外則為極端離群值。

本章採用均方根誤差(mean root square error, RMSE),決定係數(coefficient of determination) $R^2$ 及 K-S 法等檢定指標進行評估。其定義分別如下:

1. 均方根誤差(RMSE):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Hm_i - Hc_i)^2}{N}} \quad (\text{A-4})$$

其中下標  $m$  及  $c$  代表實測值及計算值。

2. 決定係數  $R^2$  :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Hm_i - Hc_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Hm_i - \bar{Hm})^2} \quad (\text{A-5})$$

其中符號“-”代表平均值。 $R^2$  值在 0 至 1 之間，當  $R^2$  值越接近 1，表示所計算出的迴歸模式的適配度(goodness-of-fit)越好。

3. Kolmogorov-Smirnovs (K-S)法:

統計測試法為實測資料與配套分布的最大差異值，其定義如公式 (A-6)所示，其中  $T(U)$  為理論累積機率曲線， $Q(U)$  為實測風速的機率分布值，當 K-S 值越小則表示偏差量小。

$$Er_{\max} = \max|T(U) - Q(U)| \quad (\text{A-6})$$

本研究使用 F 檢定檢驗不同多項式的風速與波高迴歸模型，其結果如表 3-1。表 A-1 為 2010 年在不同多項式迴歸資料所得的係數及 F 值，由此可知此多項式迴歸需達四次式才能滿足 F 檢定。圖 A-2 及圖 A-3 分別為 2010 年風速與波高的二次多項式迴歸及四次式迴歸。圖 A-2 及圖 A-3 顯示在風速小於 20m/s 時大致相同，但在大風速時有較大的差別。由圖 A-2 及圖 A-3 可知在大波高時(>4m)，由二次式迴歸曲線計算的波高反而與實測波高較為吻合，但在整體上四次多項式模式的推估能力優於二次多項式模式，而改善的效果相當有限，可見如圖 A-4，而且在計算上使用四次多項式比二次多項式繁雜。因此，本研究僅以二次多項式迴歸臺北港風速與波高間的關係。

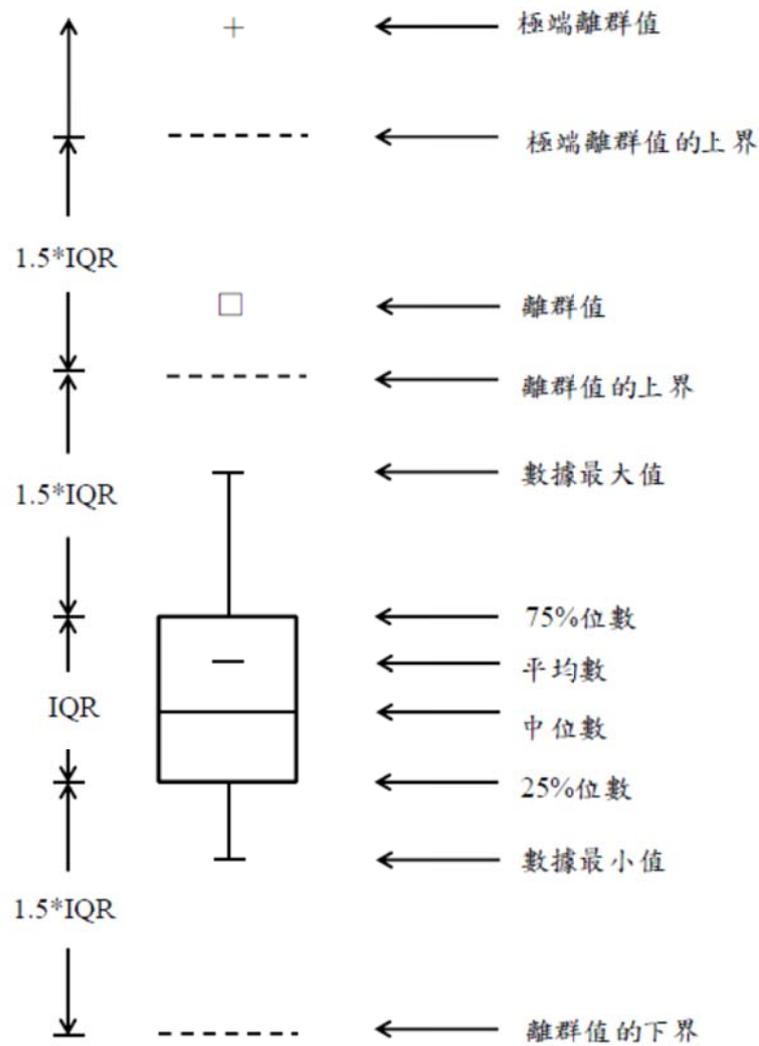


圖 A-1 箱型圖架構檢查離群值的示意圖

表 A-1 以不同多項式迴歸 2010 年資料所得的係數及 F 值

階數	多項式的係數					檢定指標	
	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$F$	$F_{0.95}$
2	0.6103	-0.0230	0.0105	-	-	30.13	3.84
3	0.5305	0.0277	0.0029	0.0003	-	11.77	3.84
4	0.4638	0.0880	-0.0118	0.0016	-0.0001	1.30	3.84

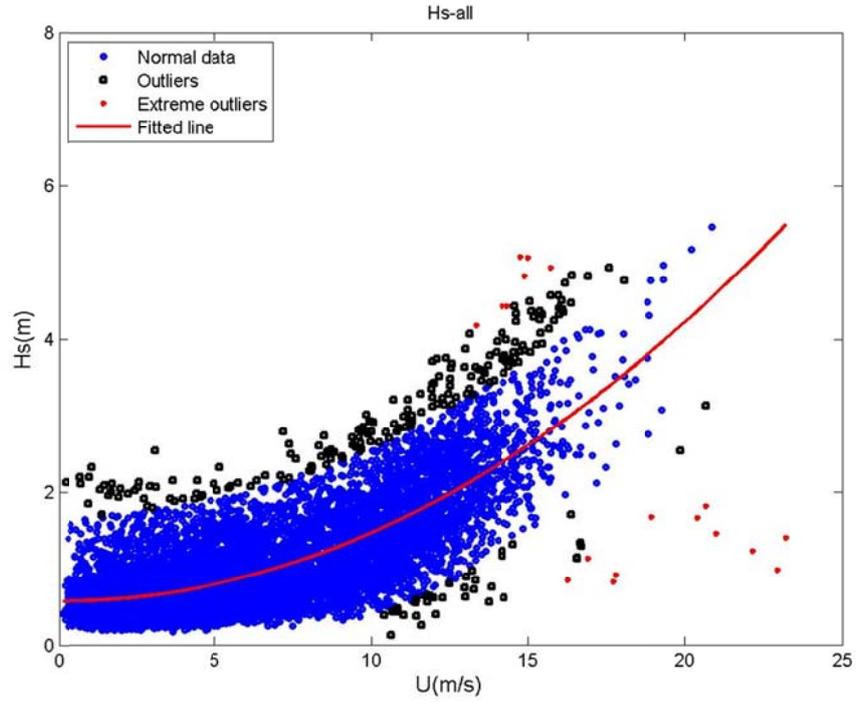


圖 A-2 2010 年的波高與風速的散布圖及二次式迴歸曲線

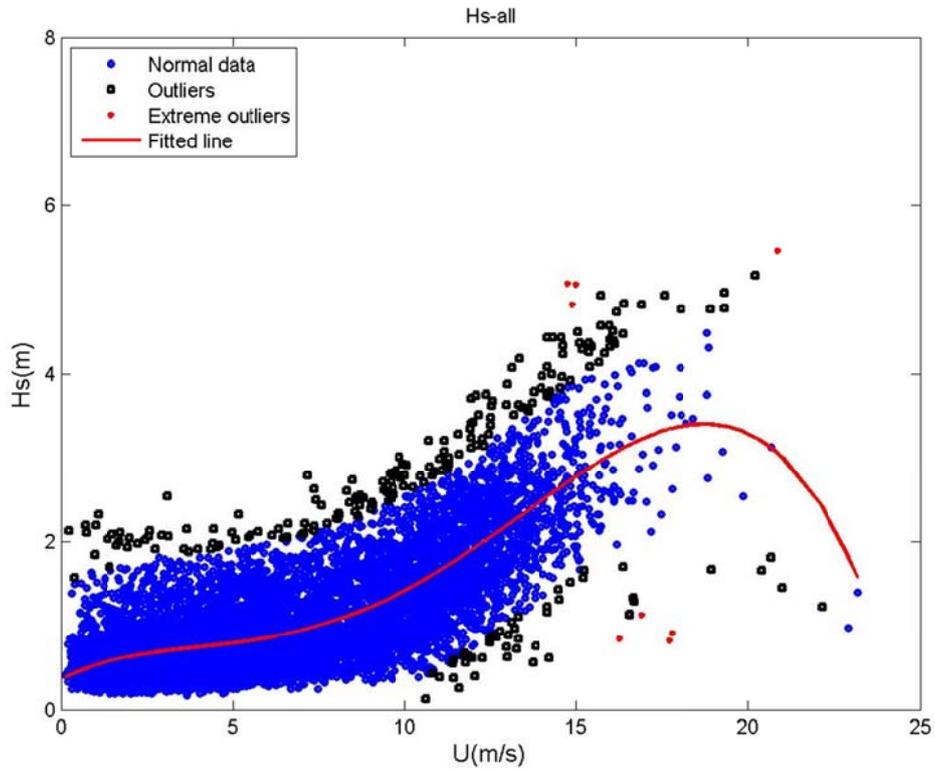


圖 A-3 2010 年的波高與風速的散布圖及四次式迴歸曲線

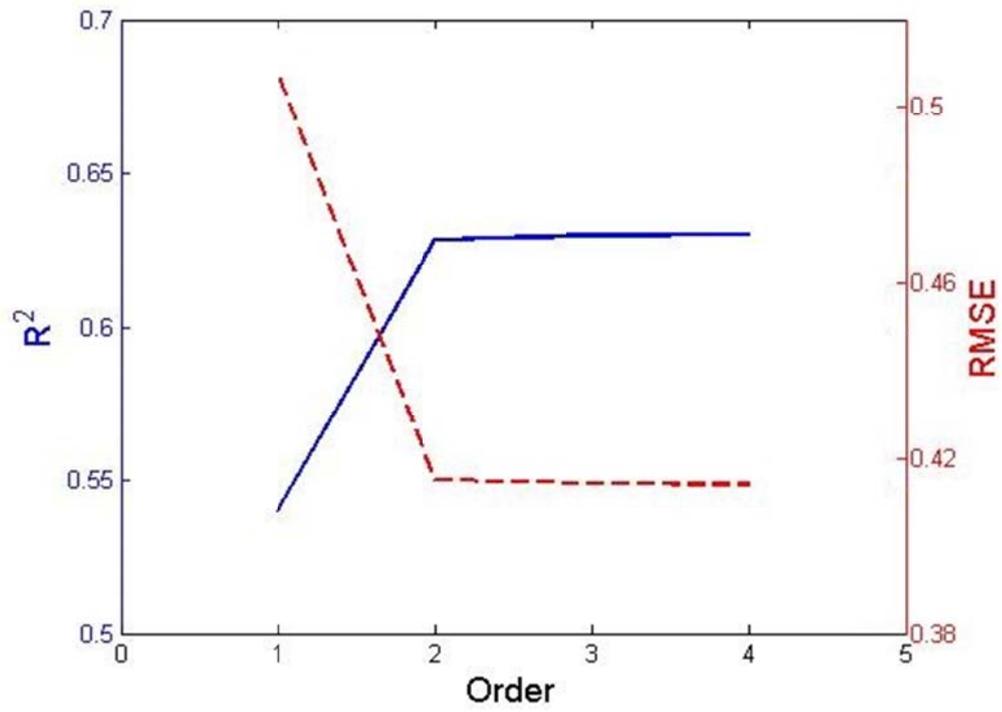


圖 A-4 以不同多項式推估 2010 年波高與實測值之  $R^2$  及 RMSE

## 附錄 B 模糊類神經網路的介紹

由於模糊類神經網路模式除具有一般類神經網路的性質與優點外，又由於使用模糊推算的運行機制，使得處理單元的計算變成較簡便，且亦加快計算的速度，並使系統容錯的能力大為增加。此外，ANFIS 尚具有以下優點：

4. 1. ANFIS 可完成複雜非線性系統的輸入及輸出間映射關係，因此在重現非線性時間連續系統上，優於一般線性方法。
5. 2. ANFIS 所調整參數之數目較一般倒傳遞類神經網路為少。
6. 3. ANFIS 模式結合了建構模式較有彈性的模糊推論系統與具有自我學習能力的類神經網路，使得模式充分發揮對於系統不確定性與不精確性的處理能力，以及絕佳的學習能力與歸納推理功能。
7. 4. ANFIS 控制器具備模糊控制的精神，所以可控制非線性系統或是建模有誤差的受控系統，又因具備類神經網路的功能，故可避免調整歸屬函數的困難。

適應性網路模糊推論系統之架構包含兩個輸入值  $x_1, x_2$  及一個輸出值  $Z$ ，並將函數式模糊規則(Sugeno 模糊規則)，以一組輸入/輸出資料中，建立起此種型態的模糊規則，示如圖 B-1，其相對應之 ANFIS 架構則示圖 B-2。由圖 B-1 的模糊推論中可知：

規則 1：

$$\text{If } x_1 \text{ is } A_1 \text{ and } x_2 \text{ is } B_1 \text{ then } Z = f_1 = P_1 \cdot x_1 + q_1 \cdot x_2 + r_1 \quad (\text{B-1})$$

規則 2：

$$\text{If } x_1 \text{ is } A_2 \text{ and } x_2 \text{ is } B_2 \text{ then } Z = f_2 = P_2 \cdot x_1 + q_2 \cdot x_2 + r_2 \quad (\text{B-2})$$

將模糊推論之歸屬函數應用於 ANFIS 架構之中，在同一層中所有節點之歸屬或轉換函數均需相同，其內部構造，共分為五層分別為

輸入層、規則層、正規化層、結論推論層及輸出層，示如圖 3-2。其推算之流程為先將輸入數據進行模糊化，並選擇輸入歸屬函數，經由模糊推理得到輸出的模糊評價結果，最後由位於輸出層之類神經元執行去模糊化的運算，以便提供明確的輸出值。

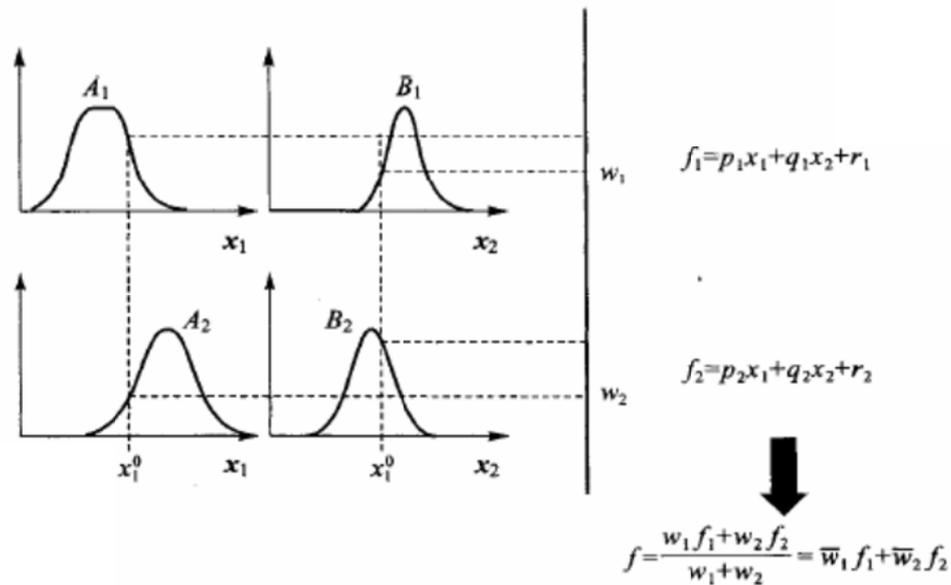


圖 B-1 模糊邏輯推論示意圖(摘自 ANFIS, 1993)

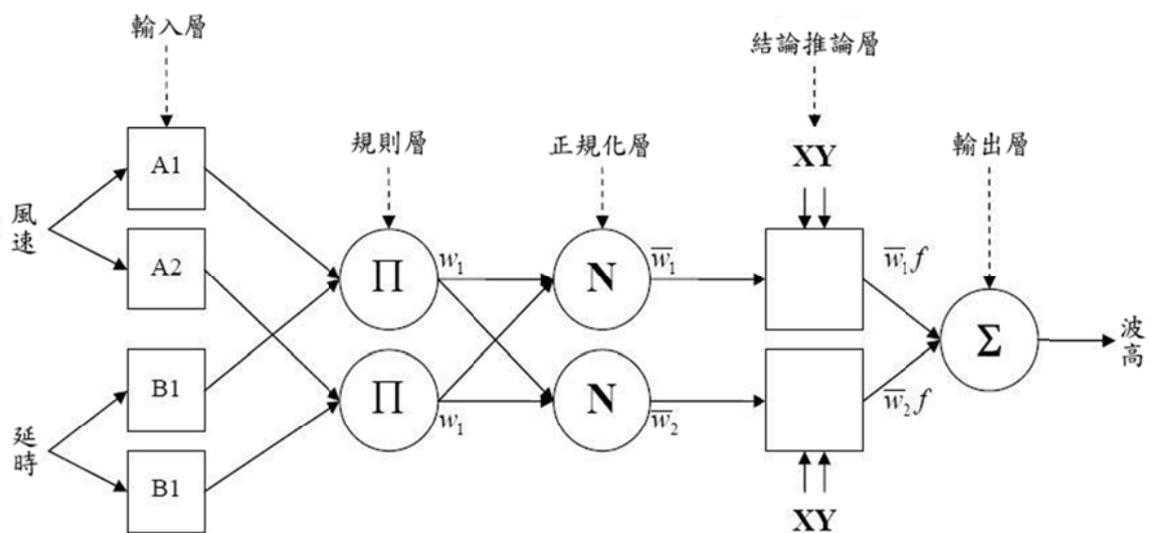


圖 B-2 適應性網路架構模糊推論系統架構示意圖(摘自 ANFIS, 1993)

由圖 B-2 之模糊規則的推論過程，其相對應的架構分別說明如下。

1. 輸入層(layer 1)

第一層是將輸入變數映射到模糊集合中，進行模糊化處理，處理單元為圖 3-2 中的方塊神經元，如圖 3-2 設定每個輸入值具有兩個歸屬函數。該層節點之輸出函數為經模糊化之歸屬函數，示如式(B-3)，其中歸屬函數可選用鐘形(generalized bell)、S 形(sigmoidal)或三角形(triangular)等歸屬函數， $\mu_{A_i}(x)$ 為鐘形函數，示如式(3-4)，其最大值為 1，最小值為 0。

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x) \quad (\text{B-3})$$

$$\mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c_i}{a_i} \right|^{2b_i}} \quad (\text{B-4})$$

其中， $i$  為歸屬函數的數量， $x$  為輸入值， $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  是鐘形歸屬函數的參數，而這些參數稱為前項參數(premise parameters)。

## 2. 規則層(layer 2)

第二層為則執行模糊規則的「啟動強度」之計算是由第一層之輸出之歸屬函數，進行相互的矩陣乘積，並經由模糊交集(T-norm)，進行模糊邏輯之交集(AND)運算求得其結果，其輸出值示如式(B-5)，處理單元則為圖 3-2 中圓形神經元，就是該類神經元所代表之模糊規則之啟動強度(Firing strength)，其中以符號  $\Pi$  表示，而規則數量可由第一層之歸屬函數數量的輸入變數數量之冪次方，因此本層之輸出值有四個規則，即( $2^2=4$ )。

$$Q_i^2 = w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(x) \quad i=1,2 \quad (\text{B-5})$$

## 3. 正規化層(layer 3)

第三層為規則層之輸出值，進行每一個規則之正規化處理，示如式(B-6)，其處理單元為圖 3-2 中圓形神經元，並以符號  $N$  表示，使其輸出值介於 0 到 1 之間。為了簡化起見，通常將第三層累神經元的輸出值稱之為「正規化之啟動強度」。

$$O_i^3 = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad i = 1, 2 \quad (\text{B-6})$$

#### 4. 結論推論層(layer 4)

第四層則為將正規化層之結果與函數式模糊規則(Sugeno 模糊規則)相乘，示如式(B-7)其處理單元為圖 3-2 中方形神經元。

$$O_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad (\text{B-7})$$

其中， $p_i$ 、 $q_i$ 及 $r_i$ 為後置參數(consequent parameters)。

#### 5. 輸出層(layer 5)

第五層中只有一個處理單元，該單元為圓形神經元，並以  $\Sigma$  符號標示為計算第四層之輸出總和，此值作為網路之輸出值，其表示式如式(B-8)。

$$O_i^5 = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (\text{B-8})$$

各層各參數則經由類神經網路的監督式學習，使得模糊推論系統可獲得最佳化的調整，以修正模糊系統的隸屬函數之各項參數值，提高演算效率及效能以達輸出精度的要求。由於 ANFIS 不但可將原規則逐一轉換為模糊規則，亦可藉由資料的模糊聚類(fuzzy clustering)或其他聚類分析，將龐大的資料轉換為數量較少的模糊規則庫，以減少參數計算的負擔與資料儲存空間的浪費，同時也可將專家的經驗與知識轉換成推論規則，以彌補資料對系統描述的不足。

## 附錄 C 本研究的績效指標

本研究三年的研究已發表國內研討會論文 5 篇，論文的出版示如下：

1. 張憲國、張高瑋、衛紀懷、何良勝(2015)，「考慮風向分區與波浪分類下風速與波浪的迴歸分析」，第三十七屆海洋工程研討會論文集，台中，第 581-586 頁。
2. 張憲國、何良勝、張高瑋、衛紀懷(2014)，「臺北港海陸風的轉向特性及風速與波浪的關係探討」，第三十六屆海洋工程研討會論文集，新竹，第 673-678 頁。
3. 蔡瑞舫、張憲國、何良勝、劉勁成、黃茂信、衛紀懷(2014)，「臺北港、臺中港與安平港風能分析與探討」，第三十六屆海洋工程研討會論文集，新竹，第 727-732 頁。
4. 王順寬、何良勝、張憲國、劉勁成、徐如娟(2013)，「臺北港風速與風向的聯合分布特性的探討」，第三十五屆海洋工程研討會論文集，高雄，第 119-124 頁。
5. 蔡瑞舫、張憲國、劉勁成、曾相茂(2013)，「臺灣離岸與陸岸風速分布特性之探討」，第三十五屆海洋工程研討會論文集，高雄，第 821-826 頁。

目前已整理一篇論文投稿於海洋工程學刊，其作者及題目為張憲國、張家義、劉勁成、陳志弘(2016) 「輸入多點風速的適應性類神經波浪推算模式」。

一位碩士生參與本計畫，研究期間負責撰寫程式及分析資料，完成其碩士論文。題目為「考慮海陸風及湧浪特性的波高與風速之迴歸分析」，國立交通大學，碩士論文。

## 附錄 D 期中報告審查意見處理情形表

### 交通部運輸研究所合作研究計畫

#### ■期中 □期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：104 年臺北港風與波浪關連性之統計特性研究

執行單位：國立交通大學

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形
<p>李兆芳委員：</p> <p>一、有概念想法的作法，結果合理。</p> <p>二、觀測位置的波浪和風場位置有某種關聯性，也和當地風場有關，當中的關係建立有很大的後續思考空間。</p>	<p>一、感謝委員肯定。</p> <p>二、在期末報告第 5.3 節建立觀測樁風速及外圍 25km 的風速的多點模式，改善湧浪及陸風影響下的風速與波高的關係。</p>
<p>楊瑞源委員：</p> <p>一、期中研究成果相當豐碩，研究團隊之努力值得肯定。</p> <p>二、風速剖面冪次方 <math>\alpha</math> 的改變，對分析可能之影響，建議亦可再加以探討。</p>	<p>一、感謝委員肯定。</p> <p>二、增加 3.4 節說明三種風速邊界層的冪次方(1/5,1/6 及 1/7)對轉換不同高度的風速影響。</p>
<p>蕭松山委員：</p> <p>一、期中報告成果已符計畫進度要求。</p> <p>二、湧浪係遠域而來，與近岸量測到之風速關連性應較差，又陸風對波高影響亦應相關性差，建議未來針對此問題進一</p>	<p>一、感謝委員肯定。</p> <p>二、在期末報告第 5.3 節建立觀測樁風速及外圍 25km 的風速的多點模式，改善湧浪及陸風影響下的風速與波高的關係。</p>

<p>步探討。</p> <p>三、將波浪、風資料分類後迴歸公式推求，已改善前期研究成果。建議能於期末報告提供實務應用可使用之波浪推算公式。</p>	<p>三、在期末報告內文已敘述各種樣本的最合適迴歸的二次多項式係數，以提供未來工程操作的使用。</p>
<p>梁乃匡委員：</p> <p>一、因為湧浪和風浪是大部份混在一起，如果不用波譜，只能知道是否有湧浪的成份，因此只要看週期是否大於由當地風速求出的週期。</p>	<p>一、本研究以波浪統計資料週期來分類波浪，考慮除主要週期特性外，尚參考波高。若僅用週期指標無法精準分類出大週期的波浪是強風造成還是外圍湧浪傳遞造成。</p>
<p>何良勝委員：</p> <p>一、內文修正之處：</p> <p>1.P.14，“周期”修正為“週期”。</p> <p>2.P.37 圖號有誤，另 Fig3.2-3 補充“成長波、成熟波、湧浪”等之對應說明。</p> <p>3.P.41 圖號修正。</p> <p>4.P.12，Fig1.3-4，圖中請補充角度說明。</p> <p>二、P.40、4.2 節中，建議補充說明，為何以三種風向分區來分析，其效用為何？</p>	<p>一、遵照辦理。</p> <p>二、在 4.2 節說明三種風向分區的原則，並在 4.2 節比較三種分區方式的分析結果。</p>
<p>蔡立宏委員：</p> <p>一、檢定指標今年度用 RMSE，而去年用 MSE 有何用意。</p>	<p>一、一般統計常用 mse 來說明模式的優劣，但在工程上 rmse 則接近於實測值的偏差量，易於理解。</p>

<p>二、風向分區建議增加示意圖，是否考慮將每一區範圍角度縮小去分析。</p> <p>三、第五章標題可再簡化，第一段建議移至 5.1 內。</p>	<p>二、若是分區太細會造成未來應用上的困擾，本研究考慮波浪成長的條件，分成 3 類及風向分成 4 區，符合學理及工程應用。</p> <p>三、標題已修改。</p>
<p>蘇青和委員：</p> <p>一、風與波浪關聯性建立時，波向因子是否可納入考量？建議或可增加風向與波向相關圖做一說明。</p> <p>二、陸風與波浪關連性不具物理意義，區分後再合併，此部分應可不納入！</p> <p>三、成熟風浪、成長風浪及湧浪，所占成分百分比可做簡略說明。</p> <p>四、可考慮季節區分，包括東北季風、西南季風及颱風期間等，關連特性差異。</p> <p>五、報告撰寫內容請依本所規定，期末報告增加納入中英摘要。</p> <p>六、報告之結論，期末報告建議改為”結論與建議”，結論應顯示各項具體成果。</p>	<p>一、波向因子已在含在風向分區，而波向與風向的關係在 4.4 節說明。</p> <p>二、因為在夏天有明顯陸風的情況，數據也不少，本研究已用多點模式及適應性類神經模式來提高二者的關係。</p> <p>三、各種分類及分區的樣本數量已列在表中。</p> <p>四、在風向分區中東北風及西南風即是考慮季節風的影響因素，但颱風條件下波高與風速關係，因數量尚少而未考慮在本研究中。</p> <p>五、遵照辦理。</p> <p>六、遵照辦理。</p>

## 附錄 E 期末報告審查意見處理情形表

### 交通部運輸研究所合作研究計畫

#### 期中 期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：104 年臺北港風與波浪關連性之統計特性研究

執行單位：國立交通大學

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形
<p>李兆芳委員：</p> <p>一、計畫作法和成果值得肯定。</p> <p>二、報告內容的建議上主要仍在編輯和寫法上。</p> <p>1. p1-3 Hs 和 p1-5(1.2-15)要一致。</p> <p>2. 結論中指數 1/7 請加上風速分佈較可了解。</p> <p>3. Steyn and Faulkner(1986)的作法，在物理現象上與臺北港的一致上可以思考。</p> <p>4. 結論第 5 點敘述可加入考慮較可了解。</p>	<p>一、感謝委員肯定。</p> <p>二、</p> <p>1. 前者為考慮吹風距離及吹風延時，後者為成熟波條件與吹風距離及吹風延時無關。</p> <p>2. 已修改敘述。</p> <p>3. 本研究只用此概念去區分風向分區，而不是探討發生海陸風的時間，讓風向延時在比較符合此理論時間間距。</p> <p>4. 已更改敘述。</p>
<p>楊瑞源委員：</p> <p>一、研究成果具體詳盡，研究團隊之努力值得肯定。</p> <p>二、期末報告初稿第六章“結論”建議修改為“結論與建議”。</p> <p>三、建議增補三年研究成果之各</p>	<p>一、感謝委員肯定。</p> <p>二、已增加建立一節。</p> <p>三、已增加附錄說明。</p>

<p>項 KPI 指標於附錄之中。</p> <p>四、2010 年與 2012 年兩年合併統計分析，其與目前 2010 年及 2012 年分別分析，其結果差異如何？</p> <p>五、建議未來可增加颱風事件相關風與波浪關連性之特性分析。</p>	<p>四、在 4.1 節已說明 2010 年及 2012 年數據特性的差異，若合併增加附錄說明。</p> <p>五、在 6.2 節建議未來增加此研究項目。</p>
<p>蕭松山委員：</p> <p>一、已完成研究工作項目，提出合適迴歸系數，可提供工程實務操作使用。</p>	<p>一、感謝委員肯定。</p>
<p>梁乃匡委員：</p> <p>一、報告內容豐富分析精闢，有參考價值。臺北港的波向與風向大部份差 45°的原因是在東北風吹拂下，臺北港的吹風域在其西面，因為風吹海面所造成的波浪會依主風向左右分散只是在主風向的波高比較大，建議「波浪還由外海繞射至近岸」改為「波浪分散」而造成。</p>	<p>一、感謝委員肯定，此部內文遵照委員意見修改。</p>
<p>何良勝委員：</p> <p>一、內文修正之處：</p> <p>1.p.2-4 之表 2.2-1、表 2.2-2 表名，增列“2012 年”。</p> <p>2.p.2-7、p.2-12，第一年、第二年後增加年份 2013 年、2014 年，較為清楚。</p> <p>二、補充說明結論第 1 點，有關</p>	<p>一、遵照辦理。</p> <p>二、已修改轉換 PM 波譜公式的敘</p>

<p>「19.5m 風速轉為 10m 風速」的關係。</p>	<p>述。</p>
<p>蔡立宏委員：</p> <p>一、第六章 結論前請增加研究目的，結論後請再增加建議與成果效益及後續應用情形。</p> <p>二、只以 2010 以及 2012 年資料作海風、陸風以季節風的波浪分類，其代表性如何？</p> <p>三、圖 3.2-1 解析度建議增加。</p> <p>四、Hm 與 Hc 請說明定義。</p>	<p>一、已增加建議及成果效益。</p> <p>二、在 4.1 節已說明以 2012 年數據迴歸後預測當年的結果，及以 2010 年迴歸公式來預測 2012 年的結果相似，說明以一年數據樣本足以表示風速與波浪的關係。</p> <p>三、已改善。</p> <p>四、內文已說明實測示性波高及計算值。</p>
<p>基隆港務分公司何秉均委員：</p> <p>一、臺北港外海觀測樁的實測資料有將近 20 年，現僅取 2010 及 2012 年的資料，原因為何？</p> <p>二、波浪會因為某些因素無法得到實際的觀測值，風速資料似較為完整，遺失資料部份如何處置？</p> <p>三、類神經網路研究法有許多種，利用研究中所述方法之理由？</p>	<p>一、在報告 2.1 節已說明港研中心實測風速及波浪數據的良率比其他年份高。</p> <p>二、風速資料的良率為 100%，而波高資料約為 90-99%，因此波高遺失的資料先以前期研究所得的經驗公式先由實測風速來推算波高補足。因補遺數據比例低，鮮會影響本結論。此部份說明加於 2-5 頁。</p> <p>三、常用的類神經網路主要有倒傳遞及適應性兩種。前者較適用於多輸入參數。本研究只有</p>

<p>四、未來建議研究長期 20 年的統計特性。</p>	<p>風速的輸入參數較不適合。 四、本研究主要探討季節風波浪的推算模式，對於長期的統計特性則須要進行極值分析，港研中心已另案進行。</p>
------------------------------	---

## 附錄 F 期中簡報

交通部運輸研究所港灣技術研究中心

### 104年臺北港風與波浪關連性之統計 特性研究

#### 期中報告

簡報人：張憲國

日期：2015.7

 國立交通大學土木工程系所



#### 一 研究動機

- 波浪模式所用的風速為海面上10m之風速，此風速值在台灣少有實測資料。
- 港灣技術研究中心在台北港外海設置一個觀測樁，同時測量波浪與風速，在觀測樁之海面上10m處有自記式之風速儀。
- 本計畫主要探討同時觀測風速及波浪資料的統計特性，並建立兩者間之關係。

2



## 二 本年度的工作項目

- 建立風波與湧浪的分類指標。
- 建立海風、陸風及季節風波浪的分類指標。
- 建立單點不同風速統計特性與波浪的波高及週期的迴歸分析。
- 建立多點不同風速統計特性與波浪的波高及週期的迴歸分析。
- 建立單點不同風速統計特性與波浪的波高及週期的類神經模式。
- 建立多點不同風速統計特性與波浪的波高及週期的類神經模式。



2010及2012年資料

3



## 三 預定進度甘特圖

工作項目	第1月	第2月	第3月	第4月	第5月	第6月	第7月	第8月	第9月	第10月	第11月	第12月	備註
1.風波與湧浪的分類指標	--	--	--	--									
2.海風、陸風及季節風波浪的分類指標	--	--	--	--									
3.單點風速的波高及週期的迴歸模式	--	--	--	--									
4.多點風速的波高及週期的迴歸模式					--	--	--	--	--				
5.單點風速的波高及週期的類神經模式					--	--	--	--	--				
6.多點風速的波高及週期的類神經模式													
7.報告撰述				*					*	*			
工作進度估計百分比(累積數)	10	20	35	50	60	70	80	90	100				
預定查核點	第1季: 探討風速與方向特性 第2季: 探討風速與波浪之相關性												
說明(1)工作項目請視計畫性質及需要或依研究計畫綱要說明訂定。預定進度以粗線表示其起迄日期。 (2)「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定：①工作天數②經費之分配③工作量之比重④擬達成目標之具體數字。 (3)每季之「預定查核點」，請在條形圖上標明※號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作事項。													

4



## 一 報告章節

第一章 前言

第二章 資料與研究背景

第三章 風浪與湧浪的分類

第四章 海風、陸風及季節風的波浪分類

第五章 以單點風速推算波浪的迴歸模式與適應性類神經模式

第六章 結論

附錄A 最適多項式迴歸及模式評估指標

附錄B 各風向分區的波高與風速的迴歸結果3

附錄C 模糊類神經網路的介紹

5

## 二 資料與研究背景



海上觀測塔:本觀測塔塔體為鋼鐵材料,直徑2.0m,上置觀測平台,水下可佈雷聲,安置觀測儀器,結合GPS無線傳輸方式,傳送觀測資料。目前,本所海風技術研究中心於臺北港外海水深-20m處,及安平港外海水深-15m處各設置海上觀測塔乙座



2010及2012年資料

U10: Young Brand風速儀  
Hs: AWAC

6

### 三 湧浪及風浪的分類

往昔劃分湧浪及風浪的方法

1. PM-波譜:  $T_p = 0.729 U_{19.5}$
2. 尖銳度函數

$$A(f) = \frac{8\pi \int_{f_c}^{f_u} f^2 S(f) df}{g \int_{f_c}^{f_u} S(f) df} \quad f_s = 4.112 f_m^{1.746}$$

3. 二維方向波譜:  $1.3 \frac{U_{10}}{c} \cos(\theta - \psi) > 1 \quad |\theta - \psi| < \frac{\pi}{2}$

4. 能量比值:  $\lambda = \frac{S(f_p)}{S_{PM}(f_p)}$

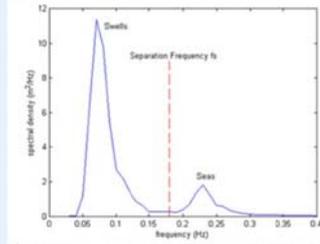


Figure 1. A typical wave spectrum showing the separation frequency and the distribution of swell and wind-seas energy with frequency.

7

### 三 湧浪及風浪的分類

本研究方法: (只有統計數據下如何進行?)

$$\text{PM波譜: } S = 0.0081 (2\pi)^{-4} g^2 f^{-5} \exp\left[-0.24 \left(\frac{g}{2\pi U_{19.5} f}\right)^4\right]$$

$$T_p = 0.729 U_{19.5}$$

$$\text{邊界層理論 } \frac{U}{U_h} = \left(\frac{z}{h}\right)^{\frac{1}{7}}$$

$$T_p = 0.802 U_{10} \quad H_s = 0.0258 U_{10}^2$$

8

### 三

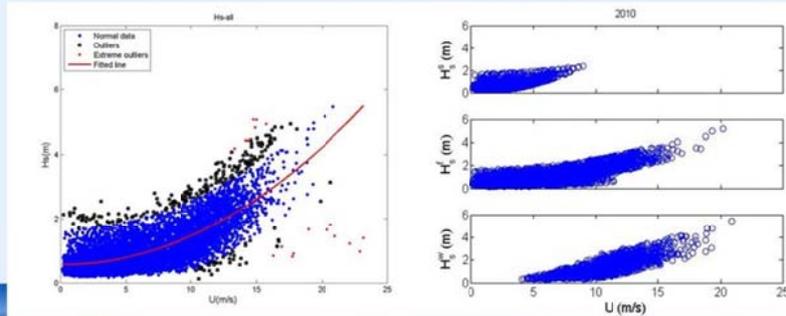
### 單點的波高及風速的回歸模式

2010年波浪分離出湧浪、成熟風浪、成長風浪

$$T_p = 0.802U_{10} \pm 10\% \quad H_s = 0.0258U_{10}^2 \pm 10\% \quad \text{: 成熟風浪}$$

$$T_p > 0.802U_{10} + 10\% \quad H_s > 0.0258U_{10}^2 + 10\% \quad \text{: 湧浪}$$

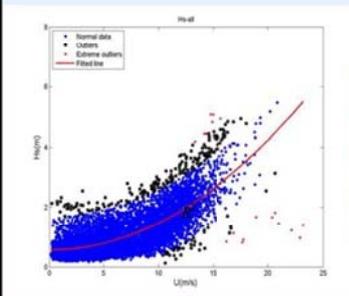
$$T_p < 0.802U_{10} - 10\% \quad H_s > 0.0258U_{10}^2 - 10\% \quad \text{: 成長風浪}$$



9

### 四

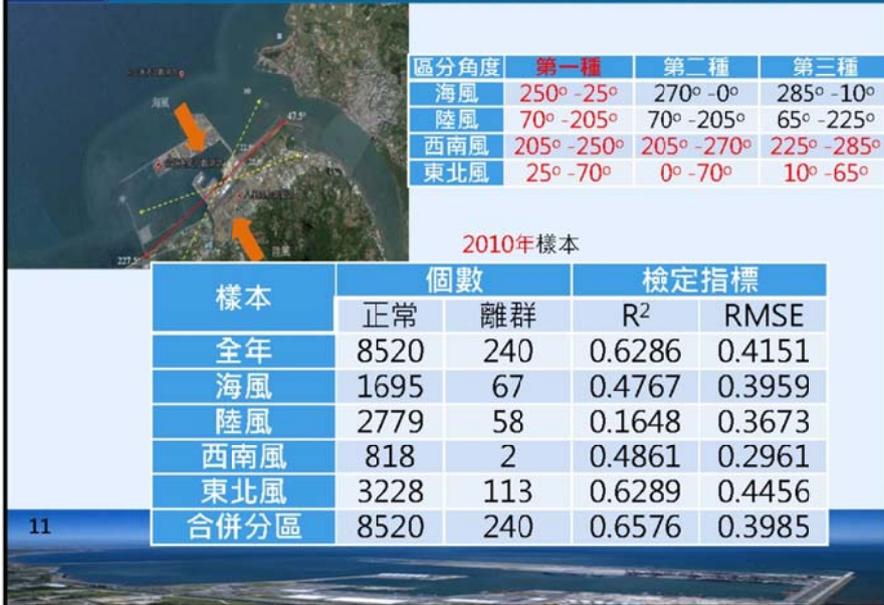
### 建立海風、陸風及季節風波浪的分類



樣本年	推估年	R <sup>2</sup>	RMSE
2010	2010	0.6286	0.4151
2012	2012	0.5193	0.4737
2010	2012	0.4612	0.5430

10

#### 四 建立海風、陸風及季節風波浪的分類



#### 四 建立海風、陸風及季節風波浪的分類



#### 四 建立海風、陸風及季節風波浪的分類

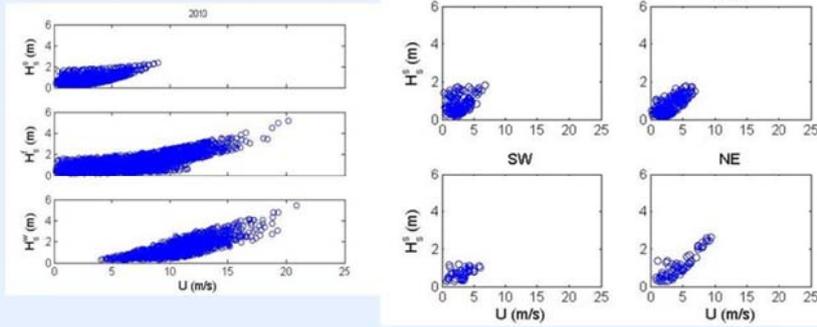
區分角度	第一種	第二種	第三種
海風	250° - 25°	270° - 0°	285° - 10°
陸風	70° - 205°	70° - 205°	65° - 225°
西南風	205° - 250°	205° - 270°	225° - 285°
東北風	25° - 70°	0° - 70°	10° - 65°

風向的區分	第一種		第二種		第三種	
	R <sup>2</sup>	RMSE (m)	R <sup>2</sup>	RMSE (m)	R <sup>2</sup>	RMSE (m)
海風	0.48	0.39	0.27	0.36	0.39	0.39
陸風	0.16	0.37	0.16	0.37	0.12	0.35
西南風	0.49	0.30	0.49	0.29	0.49	0.30
東北風	0.63	0.44	0.65	0.45	0.63	0.44
全年	0.66	0.39	0.66	0.39	0.67	0.39

13

#### 五 波高及單點的風速的迴歸模式

風向分區(4)及波浪分類(3): 12種



14

## 五 波高及單點的風速的迴歸模式

2010年資料

樣本	浪湧		成熟風浪		成長風浪	
	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE
海風	0.24	0.37	0.45	0.36	0.74	0.36
陸風	0.63	0.25	0.16	0.37	0.29	0.29
西南風	0.15	0.26	0.21	0.31	0.71	0.24
東北風	0.74	0.24	0.63	0.41	0.67	0.42

迴歸樣本	R <sup>2</sup>	RMSE (m)
全年	0.6286	0.4151
風向分區	0.6576	0.3985
波浪分類	0.6941	0.3767
分區及分類	0.7085	0.3708

15

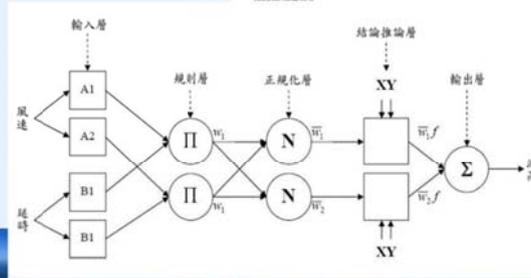
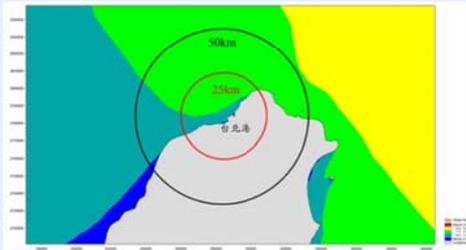
## 五 往昔數模計算的結果(李，2014)

評估指標	月份	臺北港	月份	
平均偏差	1	-0.18	6	0.10
標準偏差		0.41		0.32
最大偏差		-1.26		1.24
平均偏差	2	-0.36	7	0.28
標準偏差		0.59		0.64
最大偏差		-2.15		3.27
平均偏差	3	-0.22	8	0.21
標準偏差		0.46		0.53
最大偏差		-1.75		1.56
平均偏差	4	-0.04	9	-0.07
標準偏差		0.39		0.46
最大偏差		-1.33		-3.00
平均偏差	5	0.09	10	-0.45
標準偏差		0.33		0.80
最大偏差		2.46		-3.34

16

## 五 未來研究面臨的問題

1. 湧浪及陸風的影響參數如何決定?
2. 風速及波浪的關係如何建立?  
ANFIS



17

## 六 結論

1. 以風向方位角區分海風、陸風、西南風及東北風等四組，由分區迴歸公式的計算2010年全年波高的與實測值的 $R^2=0.66$ 及 $RMSE=0.40$ ，較佳於不考慮分區的全年樣本的结果( $R^2=0.63$ 及 $RMSE=0.42$ )，而2012年也從 $R^2=0.52$ 及 $RMSE=0.47$ 提升到 $R^2=0.60$ 及 $RMSE=0.43$ 。此證實以相似統計特性的分區樣本所得迴歸公式，可以獲得更精準的公式。
2. 不同風向的分區未能提高波高與風速的關係，本文建議臺北港分區風向方位角以 $25^\circ$ 、 $70^\circ$ 、 $205^\circ$ 、 $250^\circ$ 分區。
3. 本文以Pierson & Moskowitz (1964)波譜法將波浪分為湧浪、熟風浪及成長風浪三類。若以2010年的波高與風速的資料，將波浪分成三類再以風向分成4區後的12組資料進行迴歸的結果合成全年波高與實測值比較，其 $R^2=0.71$ 及 $RMSE=0.37$ ，證實同時波浪分類及風向分區的波高與風速迴歸明顯優於只考慮風向分區或波浪分類的結果。

18

## 附錄 G 期末簡報

交通部運輸研究所港灣技術研究中心

### 104年臺北港風與波浪關連性之統計特性研究

#### 期末報告

簡報人：張憲國

日期：2015.11.19

 國立交通大學土木工程系所

### 零 期中報告審查意見處理情形表

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形
<p><b>李兆芳委員：</b></p> <p>一. 有概念想法的作法，結果合理。</p> <p>二. 觀測位置的波浪和風場位置有某種關聯性，也和當地風場有關，當中的關係建立有很大的後續思考空間。</p>	<p>一. 感謝委員肯定。</p> <p>二. 在期末報告第5.3節建立觀測樁風速及外圍25km的風速的多點模式，改善湧浪及陸風影響下的風速與波高的關係。</p>
<p><b>楊瑞源委員：</b></p> <p>一. 期中研究成果相當豐碩，研究團隊之努力值得肯定。</p> <p>二. 風速剖面幕次方<math>\alpha</math>的改變，對分析可能之影響建議亦可再加以探討。</p>	<p>一. 感謝委員肯定。</p> <p>二. 增加3.4節說明三種風速邊界層的幕次方(1/5,1/6及1/7)對轉換不同高度的風速影響。</p>
<p><b>蕭松山委員：</b></p> <p>一. 期中報告成果已符計畫進度要求。</p> <p>二. 湧浪係遠域而來，與近岸量測到之風速關連性應較差，又陸風對波高影響亦應相關性差建議未來針對此問題進一步探討。</p> <p>三. 將波浪、風資料分類後迴歸公式推求，已改善前期研究成果。建議能於期末報告提供實務應用可使用之波浪推算公式。</p>	<p>一. 感謝委員肯定。</p> <p>二. 在期末報告第5.3節建立觀測樁風速及外圍25km的風速的多點模式，改善湧浪及陸風影響下的風速與波高的關係。</p> <p>三. 在期末報告內文已敘述各種樣本的最合適迴歸的二次多項式係數，以提供未來工程操作的使用。</p>

零 期中報告審查意見處理情形表	
<p><b>梁乃區委員：</b></p> <p>一、因為湧浪和風浪是大部份混在一起，如果不用波譜，只能知道是否有湧浪的成份因此只要看週期是否大於由當地風速求出</p>	<p>一、本研究以波浪統計資料週期來分類波浪，考慮除主要週期特性外，尚參考波高。若僅用週期指標無法精準分類出大週期的波浪是強風造成還是外圍湧</p>
<p><b>何良勝委員：</b></p> <p>一、內文修正之處：</p> <p>1.P.14，“周期”修正為“週期”。</p> <p>2.P.37圖號有誤，另Fig3.2-3補充“成長波、成熟波、湧浪”等之對應說明。</p> <p>3.P.41圖號修正。</p> <p>4.P.12，Fig1.3-4，圖中請補充角度說明。</p> <p>二、P.40、4.2 節中，建議補充說明，為何以三種風向分區來分析，其效用為何？</p>	<p>一、遵照辦理。</p> <p>二、在4.2節說明三種風向分區的原則，並在4.2節比較三種分區方式的分析結果。</p>
<p><b>蔡立宏委員：</b></p> <p>一、檢定指標今年度用RMSE，而去年用MSE有何用意。</p> <p>二、風向分區建議增加示意圖，是否考慮將每一區範圍角度縮小去分析。</p> <p>三、第五章標題可再簡化，第一段建議移至5.1內。</p>	<p>一、一般統計常用mse來說明模式的優劣，但在工程上rmse則接近於實測值的偏差量，易於理解。</p> <p>二、若是分區太細會造成未來應用上的困擾，本研究考慮波浪成長的條件，分成3類及風向分成4區符合學理及工程應用。</p> <p>三、標題已修改。</p>

零 期中報告審查意見處理情形表	
<p><b>蘇青和委員：</b></p> <p>一、風與波浪關聯性建立時，波向因子是否可納入考量？建議或可增加風向與波向相關圖做一說明。</p> <p>二、陸風與波浪關連性不具物理意義，區分後再合併，此部分應可不納入！</p> <p>三、成熟風浪、成長風浪及湧浪，所占成分百分比可做簡略說明。</p> <p>四、可考慮季節區分，包括東北季風、西南季風及颱風期間等，關連特性差異。</p> <p>五、報告撰寫內容請依本所規定，期末報告增加納入中英摘要。</p> <p>六、報告之結論，期末報告建議改為”結論與建議”，結論應顯示各項具體成果。</p>	<p>一、波向因子已在含在風向分區，而波向與風向的關係在4.4節說明。</p> <p>二、因為在夏天有明顯陸風的情況，數據也不少，本研究已用多點模式及適應性類神經模式來提高二者的關係。</p> <p>三、各種分類及分區的樣本數量已列在表中。</p> <p>四、在風向分區中東北風及西南風即是考慮季節風的影響因素，但颱風條件下波高與風速關係，因數量尚少而未考慮在本研究中。</p> <p>五、遵照辦理。</p> <p>六、遵照辦理。</p>

## 一 研究動機

- 波浪模式所用的風速為海面上10m之風速，此風速值在台灣少有實測資料。
- 港灣技術研究中心在台北港外海設置一個觀測樁，同時測量波浪與風速，在觀測樁之海面上10m處有自記式之風速儀。
- 本計畫主要探討同時觀測風速及波浪資料的統計特性，並建立兩者間之關係。

5



## 一 本年度的工作項目

- 建立風波與湧浪的分類指標。
- 建立海風、陸風及季節風波浪的分類指標。
- 建立單點不同風速統計特性與波浪的波高及週期的迴歸分析。
- 建立多點不同風速統計特性與波浪的波高及週期的迴歸分析。
- 建立單點不同風速統計特性與波浪的波高及週期的類神經模式。
- 建立多點不同風速統計特性與波浪的波高及週期的類神經模式。



2010及2012年資料

6



## 一 報告章節

第一章 前言

第二章 資料與研究背景

第三章 風浪與湧浪的分類

第四章 海風、陸風及季節風的波浪分類

第五章 適應性類神經模式與多點推算波浪的模式

第六章 結論

附錄A 最適多項式迴歸及模式評估指標

附錄B 各風向分區的波高與風速的迴歸結果3

附錄C 模糊類神經網路的介紹

7

## 二 資料與研究背景



2010及2012年資料

U10: Young Brand風速儀

Hs: AWAC

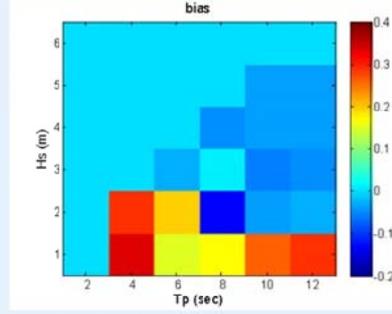
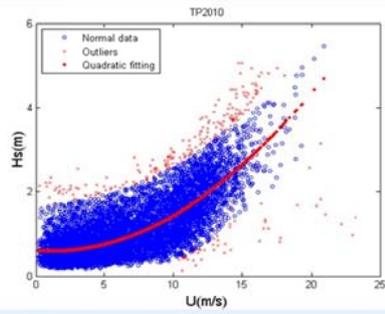
8

### 三

## 湧浪及風浪的分類

模式檢驗(model performance)

$$bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_p - y_m$$



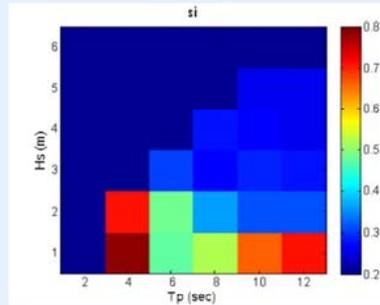
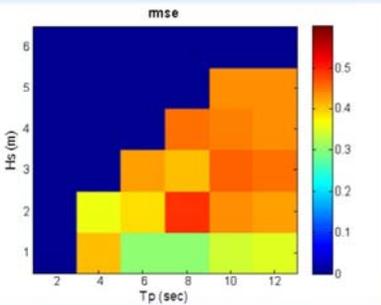
9

### 三

## 湧浪及風浪的分類

$$rmse = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_p - y_m)^2$$

$$si = \frac{\sum_{i=1}^N (y_p - y_m)^2}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_m}$$



10

### 三 湧浪及風浪的分類

往昔劃分湧浪及風浪的方法

1. PM-波譜:  $T_p = 0.729U_{19.5}$
2. 尖銳度函數

$$A(f_s) = \frac{8\pi \int_{f_s}^{\infty} f^2 S(f) df}{g \left[ \int_{f_s}^{\infty} S(f) df \right]^{1/2}} \quad f_s = 4.112 f_m^{1.746}$$

3. 二維方向波譜:  $1.3 \frac{U_{10}}{c} \cos(\theta - \psi) > 1 \quad |\theta - \psi| < \frac{\pi}{2}$

4. 能量比值:  $\lambda = \frac{S(f_p)}{S_{PM}(f_p)}$

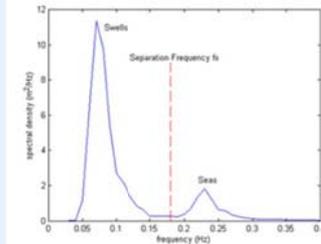


Figure 1. A typical wave spectrum showing the separation frequency and the distribution of swell and seas energy with frequency.

11

### 三 湧浪及風浪的分類

本研究方法: (只有統計數據下如何進行?)

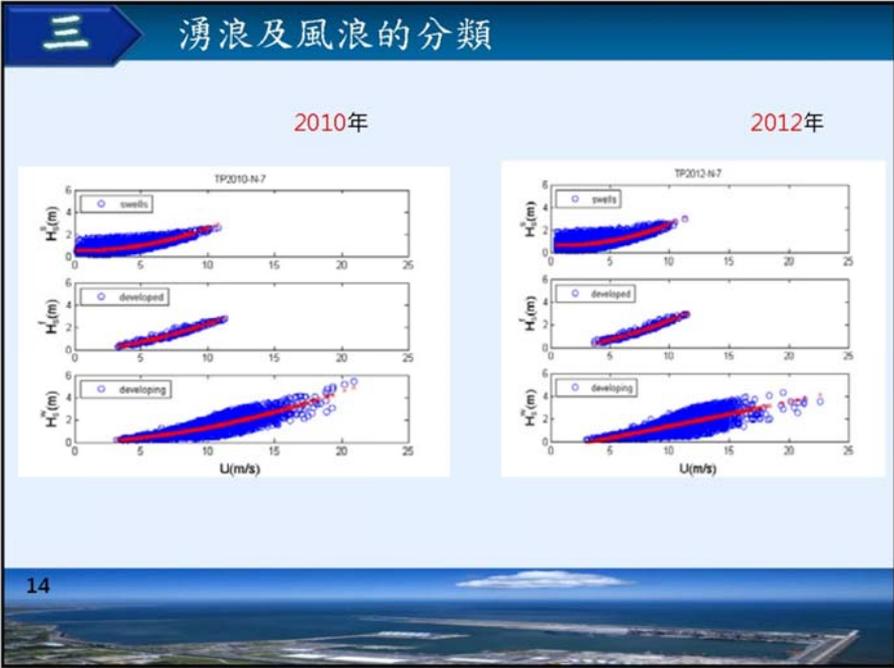
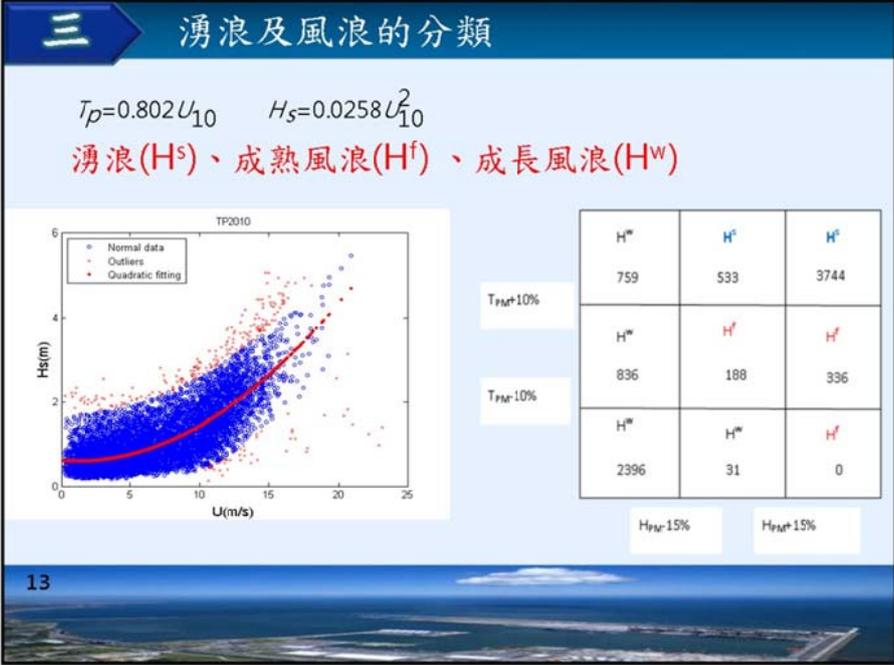
$$\text{PM波譜: } S = 0.0081 (2\pi)^{-4} g^2 f^{-5} \exp\left[-0.24 \left(\frac{g}{2\pi U_{19.5} f}\right)^4\right]$$

$$T_p = 0.729 U_{19.5}$$

$$\text{邊界層理論 } \frac{U}{U_h} = \left(\frac{z}{h}\right)^{1/7}$$

$$T_p = 0.802 U_{10} \quad H_s = 0.0258 U_{10}^2$$

12



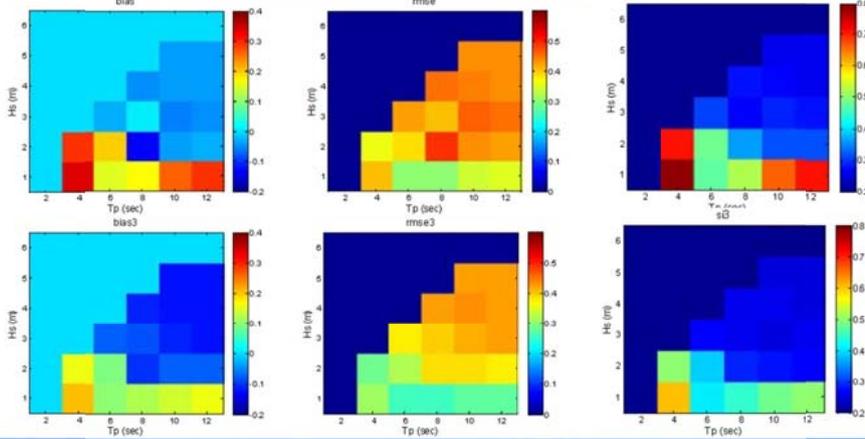
### 三

## 湧浪及風浪的分類

Bias

rmse

si



15

### 三

## 湧浪及風浪的分類

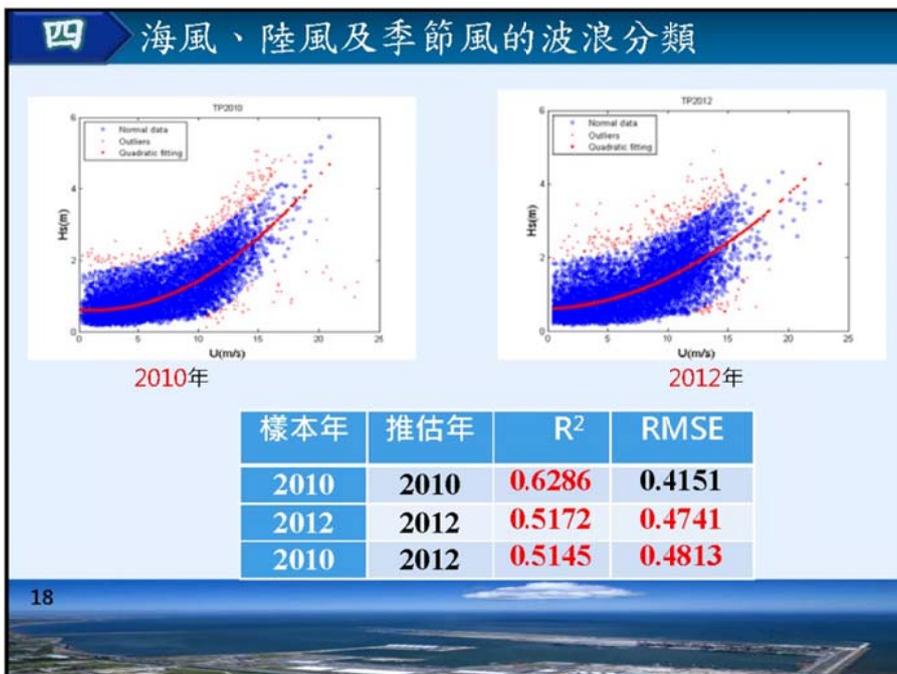
2010年

2012年

樣本	樣本個數	檢定指標	
		R <sup>2</sup>	RMSE
全年*	8760	0.5847	0.4829
全年	8520	0.6286	0.4151
湧浪	4277	0.5123	0.3057
成熟波浪	221	0.9472	0.1151
成長波浪	4022	0.7223	0.4077
合併分類	8520	0.7285	0.3549

樣本	樣本個數	檢定指標	
		R <sup>2</sup>	RMSE
全年*	8784	0.4656	0.5337
全年	8568	0.5193	0.4737
湧浪	3988	0.4873	0.3516
成熟波浪	246	0.9463	0.1505
成長波浪	4334	0.5941	0.4726
合併分類	8568	0.6325	0.4137

16



#### 四 海風、陸風及季節風波浪的分類



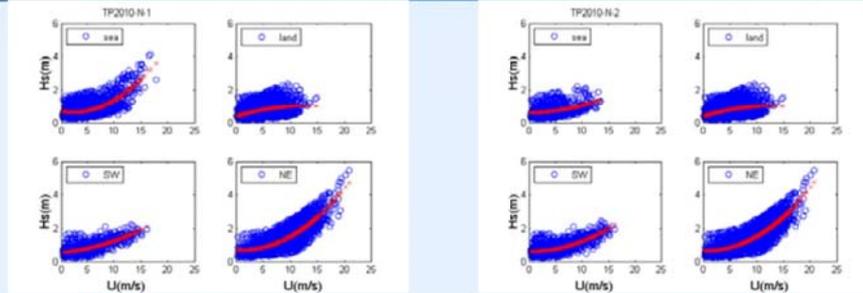
區分角度	第一種	第二種	第三種
海風	250° - 25°	270° - 0°	285° - 10°
陸風	70° - 205°	70° - 205°	65° - 225°
西南風	205° - 250°	205° - 270°	225° - 285°
東北風	25° - 70°	0° - 70°	10° - 65°

1. 海岸線方位
2. Steyn and Faulkner (1986)提出的向岸風應發生在日出後兩小時至日落後兩小時，且應至少持續兩小時的結論。
3. 以在夏季的風向在東北風少，而冬季的風向多在東北向，幾乎無西南風等特性。

19



#### 四 海風、陸風及季節風的波浪分類

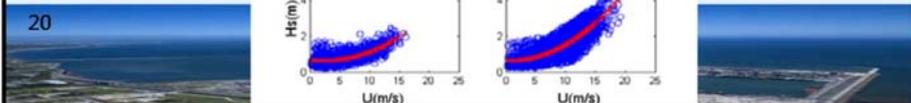


第一種

第二種

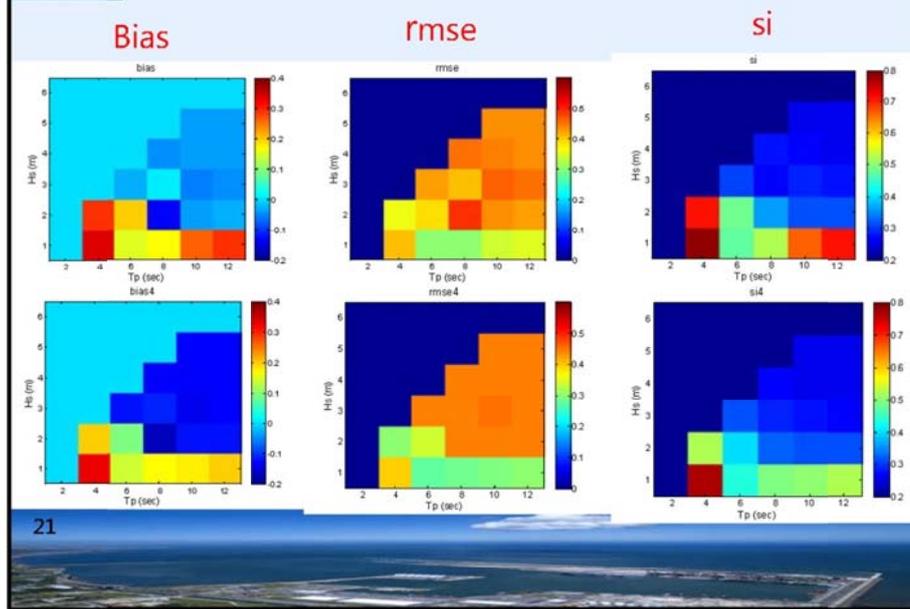
第三種

20



#### 四

### 建立海風、陸風及季節風波浪的分類



21

#### 四

### 海風、陸風及季節風波浪的分類

2010年	樣本	個數		檢定指標	
		正常	離群	R <sup>2</sup>	RMSE
	全年	8520	240	0.6286	0.4151
	海風	1695	67	0.4767	0.3959
	陸風	2779	58	0.1648	0.3673
	西南風	818	2	0.4861	0.2961
	東北風	3228	113	0.6289	0.4456
	合併分區	8520	240	0.6576	0.3985

2012年	樣本	個數		檢定指標	
		正常	離群	R <sup>2</sup>	RMSE
	全年	8568	213	0.5193	0.4737
	海風	1582	42	0.4429	0.4245
	陸風	2882	63	0.0996	0.3978
	西南風	647	2	0.4577	0.3265
	東北風	3457	106	0.5330	0.4792
	合併分區	8568	213	0.5980	0.4327

22

#### 四 建立海風、陸風及季節風波浪的分類

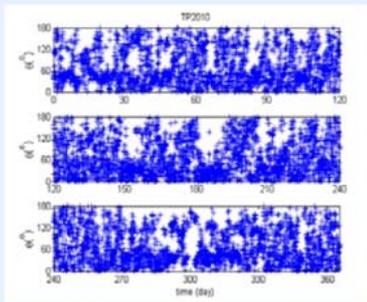
風向的區分	第一種		第二種		第三種	
	R <sup>2</sup>	RMSE (m)	R <sup>2</sup>	RMSE (m)	R <sup>2</sup>	RMSE (m)
海風	0.4767	0.3960	0.1550	0.3417	0.2296	0.3814
陸風	0.1648	0.3673	0.1648	0.3673	0.2218	0.3761
西南風	0.4861	0.2962	0.5065	0.3009	0.4978	0.2939
東北風	0.6289	0.4457	0.6485	0.4455	0.6563	0.4467
全年	0.6576	0.3985	0.6667	0.3932	0.6592	0.3976

風向的區分	第一種		第二種		第三種	
	R <sup>2</sup>	RMSE (m)	R <sup>2</sup>	RMSE (m)	R <sup>2</sup>	RMSE (m)
海風	0.4429	0.4246	0.2250	0.3671	0.1777	0.3989
陸風	0.0999	0.3981	0.0999	0.3981	0.1566	0.4220
西南風	0.4586	0.3264	0.4876	0.3189	0.4498	0.3177
東北風	0.5329	0.4791	0.5630	0.4763	0.5667	0.4778
全年	0.5980	0.4327	0.6187	0.4254	0.5945	0.4345

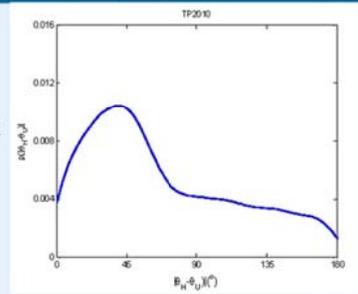
23

#### 四 海風、陸風及季節風波浪的分類

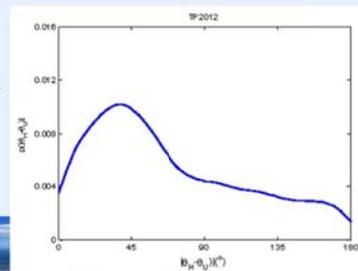
風向與波向的差異分析



2010年



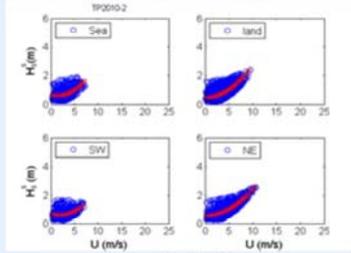
2012年



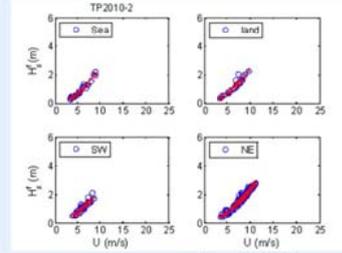
24

## 五 單點的迴歸模式

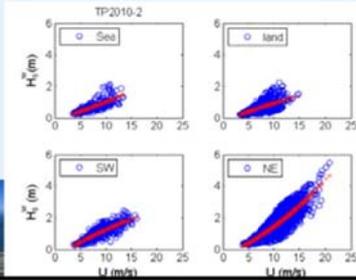
風向分區(4)及波浪分類(3): 12種



2010年-湧浪



2010年-成熟波



2010年-成長波

25

## 五 單點的迴歸模式

2010年	樣本	浪湧		成熟風浪		成長風浪	
		R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE
	海風	0.2790	0.3116	0.9658	0.1028	0.5907	0.2302
	陸風	0.4815	0.2971	0.9113	0.1534	0.3820	0.2763
	西南風	0.1506	0.2914	0.8483	0.1537	0.7214	0.2549
	東北風	0.6228	0.3144	0.9425	0.1451	0.6866	0.4247

2012年	樣本	浪湧		成熟風浪		成長風浪	
		R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE
	海風	0.1324	0.3839	0.8183	0.1366	0.7306	0.2142
	陸風	0.3942	0.3425	0.9198	0.1378	0.3304	0.3043
	西南風	0.3060	0.3134	0.8116	0.1294	0.6964	0.2505
	東北風	0.6070	0.3526	0.9338	0.1515	0.5924	0.4528

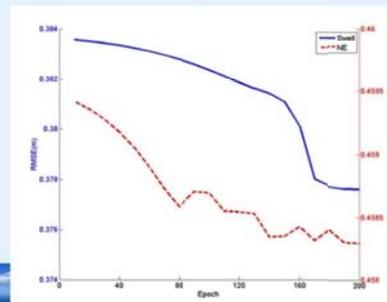
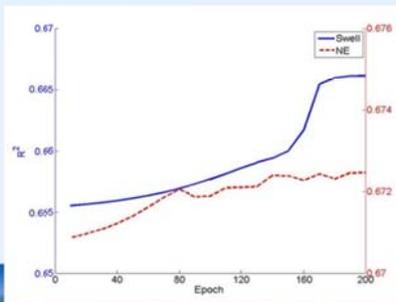
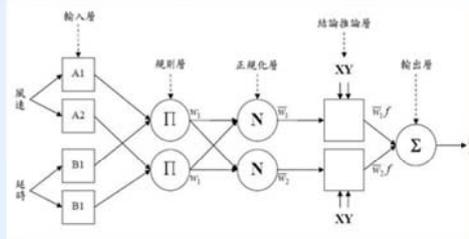
26

## 五 單點的迴歸模式

樣本	2010年		2012年	
	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE
不分區及分類	0.6286	0.4151	0.5172	0.4741
風向分區	0.6576	0.3985	0.6114	0.4254
波浪分類	0.7285	0.3549	0.6325	0.4137
分區及分類	<b>0.7589</b>	<b>0.3344</b>	<b>0.7091</b>	<b>0.3680</b>

27

## 五 單點適應性類神經模式



28

## 五 單點適應性類神經模式

學習樣本(2/3)，驗證樣本(1/3)—U, (u,v)

2010年

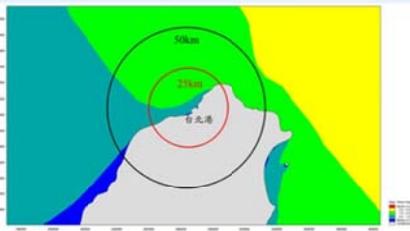
樣本	回歸分析		ANFIS-U		ANFIS(u,v)	
	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE
湧浪	0.5123	0.3057	0.5172	0.3042	0.5330	0.2991
成熟波浪	0.9472	0.1451	0.9477	0.1443	0.9500	0.1414
成長波浪	0.7223	0.4077	0.7236	0.4067	0.7960	0.3494
分類合併	<b>0.7285</b>	0.3549	<b>0.7303</b>	0.3536	<b>0.7778</b>	0.3210

2012年

樣本	回歸分析		ANFIS-U		ANFIS(u,v)	
	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE
湧浪	0.2295	0.3814	0.2080	0.3871	0.3523	0.3497
成熟波浪	0.2212	0.3762	0.2234	0.3757	0.4343	0.3206
成長波浪	0.4977	0.2938	0.4981	0.2937	0.5465	0.2791
分類合併	<b>0.6563</b>	0.4467	<b>0.6567</b>	0.4465	<b>0.6888</b>	0.4252

29

## 五 多點適應性類神經模式



方位編號	相關係數		檢定指標R <sup>2</sup>	
	25km	50km	25km	50km
1 (N)	<b>0.5189</b>	0.4894	<b>0.5126</b>	0.5237
2 (NE)	0.4730	0.4098	0.4301	0.4774
3 (E)	0.3215	0.2324	0.3610	0.3503
4 (SE)	0.4089	0.2529	0.3324	0.2227
5 (S)	0.4881	0.3727	0.3145	0.2663
6 (SW)	0.5007	0.5252	0.4199	0.4843
7 (W)	<b>0.5490</b>	0.5308	<b>0.5305</b>	0.5455
8 (NW)	<b>0.5330</b>	0.5147	<b>0.5340</b>	0.5450

30

## 五 多點適應性類神經模式

2010年	樣本	回歸分析		ANFIS-U		ANFIS(u,v)	
		R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE
W	湧浪	0.5509	0.2934	0.5512	0.2949	0.5936	0.2807
	成熟波浪	0.9474	0.1451	0.9477	0.1443	0.9500	0.1414
	成長波浪	0.7327	0.4000	0.7387	0.4006	0.8253	0.3276
	分類合併	0.7428	0.3544	0.7453	0.3464	<b>0.8072</b>	<b>0.3014</b>

NW	樣本	回歸分析		ANFIS-U		ANFIS(u,v)	
		R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE
NW	湧浪	0.5514	0.2932	0.5562	0.2932	0.5915	0.2814
	成熟波浪	0.9475	0.1449	0.9477	0.1443	0.9500	0.1414
	成長波浪	0.7365	0.3972	0.7437	0.3968	0.8429	0.3106
	分類合併	0.7453	0.3537	0.7495	0.3435	<b>0.8177</b>	<b>0.2931</b>

31

## 五 多點適應性類神經模式

2010年	樣本	回歸分析		ANFIS-U		ANFIS(u,v)	
		R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE
W	海風	0.1551	0.3417	0.1434	0.3132	0.4807	0.2438
	陸風	0.3624	0.3209	0.3426	0.3066	0.5525	0.2531
	西南風	0.5530	0.2864	0.9012	0.1957	0.9060	0.1905
	東北風	0.6647	0.4352	0.6567	0.4465	0.6888	0.4252
	合併分區	<b>0.6999</b>	0.3731	0.7648	0.3551	<b>0.8027</b>	0.3252

NW	樣本	回歸分析		ANFIS-U		ANFIS(u,v)	
		R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE
NW	海風	0.1664	0.3395	0.1238	0.3177	0.5271	0.2330
	陸風	0.3298	0.3290	0.3172	0.3125	0.5541	0.2528
	西南風	0.5651	0.2825	0.9014	0.1950	0.9120	0.1846
	東北風	0.6832	0.4467	0.6567	0.4465	0.6888	0.4252
	合併分區	<b>0.7069</b>	0.3687	0.7620	0.3571	<b>0.8044</b>	0.3238

32

## 五 多點適應性類神經模式

樣本	模式	回歸分析		ANFIS-U		ANFIS(u,v)	
		R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE
原始全部	單點	0.6286	0.4151	-	-	-	-
分類	單點	0.7285	0.3549	0.7303	0.3536	0.7778	0.3210
	多點	0.7453	0.3537	0.7495	0.3435	0.8177	0.2931
分區	單點	0.6667	0.3932	0.6587	0.3979	0.7147	0.3638
	多點	0.7069	0.3687	0.7620	0.3571	0.8044	0.3238
分類及分區	單點	0.7589	0.3344	-	-	-	-

33

## 六 結論

1. 本研究利用以Pierson & Moskowitz (1964)波譜為成熟波譜及其示性波高及尖峰週期與風速的公式，將臺北港觀測樁上的風速及波浪合適地分類成湧浪、成熟波及成長波三種。證實其PM波譜的公式的19.5m的風速轉為10m的風速的風速幕次方的指數1/7是合宜的。
2. 由2010及2012年的波浪及風速資料回歸結果說明，2012年的資料比2010年較散亂，但二者的統計特性差不多，遂可由2010年資料所得的回歸係數來推算2012年的波浪。
3. 本研究的以PM波譜分類出三類波浪有相似統計，而可回歸頗佳的波浪與風速的關係。以2010年資料的模式檢驗指標為例，R<sup>2</sup>從不分類的0.6286增加至0.7285，RMSE從不分類的0.4151m降至0.3549m。

34

## 六

## 結論

4. 以風向方位角區分波浪成海風、陸風、西南風及東北風等四組，經三種分區風向方位角測試後，以Steyn and Faulkner (1986)提出的向岸風應發生在日出後兩小時至日落後兩小時間，且應至少持續兩小時的原則為最合適。本研究建議臺北港的分區風向方位角為  $0^\circ$ 、 $70^\circ$ 、 $205^\circ$ 、 $275^\circ$ 。回歸2010年風向分區的資料，獲得全年波高與實測值的模式檢驗指標 $R^2=0.6667$ 及 $RMSE = 0.3932m$ ，此模式檢驗指標優於不考慮分區的結果。風向分區的回歸分析比波浪分類的模擬差。
5. 同時波浪分類及風向分區的波高與風速回歸明顯優於單只考慮風向分區或波浪分類的結果。
6. 以風速分量為輸入參數的適應性類神經模式ANFIS(u,v)，比回歸模式及單純輸入風速的適應性類神經模式ANFIS-U更適合建立波高與風速的關係。
7. 增加合適的外圍風速的多點模式比只以觀測樁的單點模式適合建立波高與風速的關係。

35

