

交通部中央氣象局
委託研究計畫(期末)成果報告

災害性瞬變海象之研究(4/4)

計畫類別：☐氣象☒海象☐地震

計畫編號：MOTC-CWB-104-O-03

執行期間：104 年 01 月 01 日至 104 年 12 月 31 日

計畫主持人：蔡政翰教授

共同主持人：董東璟副教授、蔡仁智副教授

執行機構：國立臺灣海洋大學

本成果報告包括以下應繳交之附件(或附錄)：

☐赴國外出差或研習心得報告 1 份

☐赴大陸地區出差或研習心得報告 1 份

☐出席國際學術會議心得報告及發表之論文各 1 份

中華民國 104 年 12 月 4 日

摘要

惡劣的海象不一定會造成災害，然而，「瞬變」的海象沒有徵兆，常令海上航行這或活動人員難以因應，因而造成船隻翻覆或人員落海等傷亡事件，是具有危害的海況。本計畫所探討之瞬變海況包含了海上的異常波浪、海岸邊發生的瘋狗浪以及急速成長波浪等三種。計畫目標為「建立異常波浪機率估算方法與預警系統雛形、建置瘋狗浪預警系統雛形以及掌握急速成長波浪發生原因」，本計畫為四年期計畫，本報告為計畫第四年報告。

在事件資料蒐集方面：本計畫蒐集發生在台灣鄰近海域或海岸邊的異常波浪與瘋狗浪案件，結果顯示過去 16 年來(2000-2015)在台灣周遭海域發生因為異常波浪或極端波浪造成之船難事件合計有 119 件，共有 712 人落海，發生地點無顯著地域性。而過去 16 年(2000-2015)發生在台灣海岸邊的瘋狗浪事件則有 300 件，共有 456 人落海，發生地點以東北角海岸最多，佔 75%以上。不論是海上異常波浪或岸邊的瘋狗浪事件，發生在颱風期間(距離台灣 2000 公里內)者約佔 15%以內。

在海上異常波浪的研究方面：本研究在傳統異常波浪定義為超過 2 倍示性波高條件下，增加了異常波浪浪高必須超過 2 公尺的條件為“危險異常波浪”。本計畫從台灣周遭海域共 16 個波浪站近 1 億個觀測波浪中，探勘尋得 6883 個危險異常波浪，平均發生機率為 7×10^{-5} ，結果也顯示了颱風期間危險異常波浪發生的機率高於它出現在平時海況的機率。研究也證實了，實測危險異常波浪的型態較多屬於波峰波谷對稱，發生在波群中的約佔 10%，且該群主要係由 5 個波所組織而成。本計畫利用非線性波理論推導出異常波浪發生機率估算式，前期計畫已經實測資料驗證其合理性，本年度考慮了波浪的方向性於計算式中的非線性參數 BFI，亦探討了當湧浪出現時，BFI 會增大為平常海況的 1.4 倍，代表湧浪出現時，異常波浪發生機率也會增加。本計畫將此異常波浪發生機率估算理論與中央氣象局波浪預報模式結合，成為一個異常波浪發生機率預測模式，每日運作 1 次，產出台灣周遭海域未來 24、36 和 48 小時的異常波浪發生機率圖，此系統已於中央氣象局上線測試運作，2015 年短期的測試運作結果顯示，異常波浪發生機率介於 0.15-0.50 間，驗證結果顯示其平均加權誤差在 15%以下。

在海岸瘋狗浪研究方面：海岸邊的瘋狗浪發生需考慮波浪、地形、結構物之間的交互作用，其機制複雜難以用定率手段得知其發生，本計畫因此採用資料探勘技術建置預警系統，以東北角龍洞附近海域為研究範圍。本計畫前期的研究已

證實群集分析方法具有較佳的預測結果。本年度計畫以龍洞浮標實測資料結合中央氣象局 NWWIII 波浪預報資料作為預警模式輸入作為主預警模式，另外，僅以 NWWIII 波浪預報資料作為輸入建置了備援模式。本文利用統計上的反查率作為預警系統評判指標，確認預警模式成效良好。此系統已安裝於中央氣象局進行測試運作，每日 4 次，每次提供未來 6、12、24 小時後東北角海岸會發生瘋狗浪的風險高低。運作結果顯示，當出現瘋狗浪高風險預警時，龍洞海域平均實測波高約 1.4 公尺，與過去經驗相近。經與實際瘋狗案件比較，備援模式對於湧浪引起之瘋狗浪事件預警能力較為不足。

在急速成長波研究部分：本計畫四年來共分析台灣海峽自北至南五個浮標測站資料，探勘獲得 1547 件急速成長波浪事件。統計結果顯示，一件急速成長波浪之發生延時平均約 10 小時、平均波高成長 3.8 倍、平均波高成長率為 0.23m/hr、最大波高成長率為 0.66m/hr。急速成長波浪產生之原因主要是受天氣系統影響所致，台灣海峽北部海域測站(如馬祖、龍洞、新竹浮標)主要受鋒面與冷高壓南下影響而生成急速成長波浪；台灣海峽南部海域測站(如小琉球浮標)主要是受颱風或熱帶性低壓影響而引起急速成長波浪；在天氣系統交錯影響以及海陸風作用顯著影響之下，台灣海峽中部海域測站(如澎湖浮標)有較多的急速成長波浪事件發生，平均每年 81 例。本研究發現，在同一天氣系統影響下，龍洞測站之急速成長波歷時、成長後最大波高、波高成長率等均較其它測站為大，是相對危險之海域。

關鍵字：災害性波浪、異常波浪、瘋狗浪、急速成長波浪、機率預測、預警系統、資料浮標

Abstract

Severe sea state may not cause hazards because of well-prepared, however the rapid change sea states may cause shipwreck or people loss due to less attention and no warning. The Hazardous and Rapid Change Sea States (HRCS) studied in this project contains the Oceanic Freak Waves (OFW), Coastal Dangerous Waves (CDW) and the Rapid Growth Waves (RGW). This is the report for the forth project year. The purposes of this project are to mine the hazardous waves in the field for better understanding on their properties; moreover, to develop warning systems for the occurrence of OFW as well as CDW.

This project collected and conformed to both OFW and CDW events occurred at Taiwanese Waters or coasts. It was investigated 119 shipwrecks induced by OFW or extreme waves accompanying with 712 people fallen into the sea in the past 16 years (2000-2015). The shipwrecks were independent with sea areas. In addition, it was investigated 300 CDW events occurred accompanying with 456 people fallen into the sea in the past 16 years (2000-2015). The CDW events most frequent (more than 75%) occur at NE Taiwanese coasts.

Part I: Researches on the OFW

This project defined the dangerous OFW by adding the height of a freak wave should be larger than 2m on the conventional definition of freak wave. Base on the mining in 100 million recorded waves from 16 wave stations, 6883 freak waves were found. The mean probability of a freak wave occurrence is 7.05×10^{-5} . It was also found the probability is higher in typhoon generated sea than ordinary sea state. The shapes of those freak waves are mainly symmetry. If a freak wave occurs in a wave group, there are always 5 successive waves in the group. The probability of a freak wave occurrence was derived based on non-linear wave theory. BFI (Benjamin-Feir Index) is the key parameter for OFW occurrence. When swell occurs, the BFI value is 1.4 times larger than wind-sea condition, representing it has higher occurrence probability when swell exists. The derived formula of OFW occurrence probability was estimated by inputting the wave spectra on the grid that was provided by CWB. This is to predict the OFW occurrence probabilities which will occur by 24, 36 and 48 hours later. This program has been installed in CWB for operational test run since Aug 2015. It was found the common occurrence probability of OFW at Taiwanese Waters is from 0.15 to 0.5 according to the short-term test-run results. The continuous waves recorded at Dongjiao station were used for performance assessment. It was verified that the weighted error is less than 15% for the prediction of OFW which was satisfied by this project.

Part II: Researches on CDW

CDW's occurrence is related to wave propagation, bathymetry, rock, breakwater and other unknown factors therefore difficult for deterministic prediction. This study used data mining

technique to establish a warning system of CDW. The system is valued for Longdong coast at NE Taiwan. Both of cluster analysis and decision tree methods were used to develop the warning system. The cluster analysis was verified as better performance. This study established two models including one used field wave data and CWB wave model forecast results as the input of warning system but another model used only CWB wave model data. The first model was used as the master program for CDW warning and the second one is the backup program. Risk of CDW occurrence for NE Taiwan coast within next 6, 12 and 24 was proposed by the warning system. The system has been installed in CWB for test run since Aug 2015. It was found the average field wave height is 1.4m for the warned period which is close to the true event condition. In addition, we found the model II (backup model) has limited capability for CDW warning if swell exists.

Part III: Researches on Rapid Growth Wave

This project mined 1547 events of RGW in the field data of 5 buoys. It was found the average duration of a RGW is 10 hours. The wave height grows 3.8 times than its original state in average. The average growing rate is 0.23m/hr and the max. rate is 0.66m/hr. The dominate cause of the occurrence of RGW is due to the weather system. For the stations locate at north of Taiwan Strait (such as Matsu, Longdong and Hsinchu buoys), the generation of RGW is because of the approaching of cold front and cold high pressure air mass. For the stations locate at south of Taiwan Strait (such as Xiaoliuchiou), it is due to the influence of typhoons or tropical low pressure air mass. Because of the interaction of weather systems, frequent RGW events are generated at the station locates at middle of the strait such as Penghu buoy. There were average 81 RGW events in a year observed at Penghu buoy. This study found the duration, growth rate and height are highest at Longdong buoy which locates at the same latitude of north Taiwan Strait mouth.

Keywords: Hazardous waves, Oceanic freak wave, Coastal dangerous wave, Rapid growth wave, Probability forecast, Warning system, Data buoy

目 錄

摘要	i
Abstract	iii
目錄	v
圖目錄	viii
表目錄	xii
符號表	xiv
第一章 前言	1
1-1 背景	1
1-2 計畫目的	5
1-3 前年度計畫成果	6
1-4 本年度工作項目	12
第二章 台灣鄰近海域異常波浪與瘋狗浪案例分析	15
2-1 事件資料來源	15
2-2 外洋異常波浪導致船難事件	15
2-3 海岸瘋狗浪事件	18
第三章 實測外洋異常波浪分析	21
3-1 異常波浪分析與浮標資料品管方法	21
3-2 分析資料	22
3-3 異常波浪探勘與分析	24
3-3-1 異常波浪探勘結果與發生機率	24
3-3-2 異常波浪案例統計分析	50
3-4 異常波浪波形分析	53
3-4-1 異常波浪形態	53
3-4-2 波浪群性分析方法	55
3-4-3 異常波浪形態分析結果	57
第四章 外洋異常波浪發生機率預測系統雛形建置	59
4-1 異常波浪發生機率理論	59

4-1-1 線性波理論.....	59
4-1-2 非線性波理論.....	64
4-2 異常波浪發生機率理論驗證.....	67
4-3 BFI 之計算.....	73
4-4 湧浪出現對異常波浪發生機率之影響.....	77
4-5 異常波浪機率預測作業化運作成果.....	81
4-6 異常波浪發生機率預測之驗證.....	89
第五章 海岸瘋狗浪預警模式雛形建置.....	93
5-1 群集分析演算法與模式評估方法.....	93
5-1-1 群集分析演算法.....	93
5-1-2 模式評估方法.....	94
5-2 預警模式建置概念.....	95
5-2-1 研究區域.....	95
5-2-2 預警模式的建置流程.....	96
5-2-3 可能發生落海事件的條件定義.....	97
5-3 資料前置處理與分析軟體.....	98
5-3-1 現場龍洞測站資料前處理.....	98
5-3-2 波浪數值模式 NWWIII 輸出資料前處理.....	100
5-4 預警模式之建置.....	101
5-4-1 模式 1：採龍洞現場資料與 NWWIII 模式資料為輸入.....	102
5-4-2 模式 2：以波浪數值模式 NWWIII 輸出為預警模式輸入.....	112
5-5 預警模式評估與比較.....	119
5-6 瘋狗浪預警系統上線運作成果.....	121
5-6-1 預警系統規劃與設計.....	122
5-6-2 東北角瘋狗浪預警系統運作結果探討.....	125
5-7 教育訓練.....	128
第六章 急速成長波浪特性分析.....	129
6-1 馬祖浮標站分析資料.....	129
6-2 馬祖浮標站急速成長波浪案例.....	130

6-3 馬祖浮標站分析結果	136
6-3-1 急速成長波浪發生時之天氣狀況	136
6-3-2 馬祖浮標站急速成長波浪案例統計分析	138
6-3-3 馬祖浮標站急速成長波浪與海氣象狀況之關係	143
6-4 台灣西部海域與北海岸急速成長波特性	148
6-4-1 急速成長波浪數量比較	148
6-4-2 急速成長波浪發生時之天氣狀況	148
6-4-3 急速成長波浪案例統計分析	154
6-4-4 急速成長波浪與海氣象狀況之關係	155
6-4-5 急速成長波浪各測站個案分析	160
6-4-6 各測站同一天氣系統下急速成長波浪特性比較	166
第七章 結論與建議	173
7-1 結論	173
7-2 建議	177
參考文獻	178

圖 目 錄

圖 1-1 大洋中船隻遭遇異常波浪的想像圖	2
圖 1-2 基隆海堤前機車騎士遭遇瘋狗浪襲擊落海照片	3
圖 2-1 台灣鄰近海域發生因異常波浪造成船難事件之位置圖	17
圖 2-2 台灣鄰近海域發生因異常波浪造成船難事件之月份分布圖	17
圖 2-3 台灣海岸發生瘋狗浪事件分布位置圖	19
圖 2-4 台灣各縣市海岸地區發生瘋狗浪事件次數統計	20
圖 2-5 台灣海岸地區發生瘋狗浪事件之月份分布圖	20
圖 3-1 本研究分析測站位置圖	24
圖 3-2 花蓮浮標最大 AI 異常波浪案例之水位時序列	34
圖 3-3 新竹浮標最大 AI 異常波浪案例之水位時序列	35
圖 3-4 龍洞浮標最大 AI 異常波浪案例之水位時序列	36
圖 3-5 龜山島浮標最大 AI 異常波浪案例之水位時序列	37
圖 3-6 龜山島浮標最大 AI 異常波浪案例之水位時序列	38
圖 3-7 小琉球浮標最大 AI 異常波浪案例之水位時序列	39
圖 3-8 蘇澳浮標最大 AI 異常波浪案例之水位時序列	40
圖 3-9 鵝鑾鼻浮標最大 AI 異常波浪案例之水位時序列	41
圖 3-10 金門浮標最大 AI 異常波浪案例之水位時序列	42
圖 3-11 基隆浮標最大 AI 異常波浪案例之水位時序列	43
圖 3-12 馬祖浮標最大 AI 異常波浪案例之水位時序列	44
圖 3-13 澎湖浮標最大 AI 異常波浪案例之水位時序列	45
圖 3-14 台東浮標最大 AI 異常波浪案例之水位時序列	46
圖 3-15 台東外洋浮標最大 AI 異常波浪案例之水位時序列	47
圖 3-16 東沙浮標最大 AI 異常波浪案例之水位時序列	48
圖 3-17 東吉島浮標最大 AI 異常波浪案例之水位時序列	49
圖 3-18 本計畫分析之 16 測站的異常波浪浪高分布圖	51
圖 3-19 本計畫分析之 16 測站的異常波浪各月發生機率圖	52
圖 3-20 危險異常波浪發生條件機率	53
圖 3-21 波峰型異常波浪典型案例	54
圖 3-22 波谷型異常波浪典型案例	54
圖 3-23 異常波浪出現在一堆成群的波浪中	56
圖 3-24 群與否判別示意圖	56

圖 3-25 異常波浪分類圖.....	57
圖 4-1 線性理論下異常波浪發生機率與異常波浪指數之關係.....	63
圖 4-2 實測波高機率與雷禮分布比較.....	64
圖 4-3 異常波浪發生機率與波浪數目關係圖.....	69
圖 4-4 非線性與線性波浪理論推求異常波浪發生機率之比值.....	69
圖 4-5 波浪儀設置位置.....	70
圖 4-6 DATA SET III 之水位時序列.....	70
圖 4-7 現場資料與理論驗證結果.....	72
圖 4-8 使用未考慮波浪方向性之 BFI 參數計算結果.....	75
圖 4-9 方向譜寬參數計算結果.....	76
圖 4-10 圖 4-2 中點位 A(圖 A)與點位 B(圖 B)之方向分布函數.....	76
圖 4-11 考慮了波浪方向性之 BFI 參數計算結果.....	77
圖 4-12 實測波浪資料 BFI 值分佈.....	79
圖 4-13 不同 BFI 條件下異常波浪發生機率.....	79
圖 4-14 譜峰強化因子與 BFI 之關係.....	80
圖 4-15 平常與湧浪案例之 BFI 值分佈.....	80
圖 4-16 湧浪發生時颱風中心與 BFI 值的關係.....	81
圖 4-17 外洋異常波浪機率預測作業化規劃.....	83
圖 4-18 異常波浪發生機率風險圖範例.....	84
圖 4-19 台灣沿岸 200 公里內異常波浪發生之累積機率圖.....	84
圖 4-20 2015/9/5 6:00 UTC 異常波浪發機率預測圖.....	85
圖 4-21 2015/9/5 6:00 UTC 地面天氣圖.....	85
圖 4-22 2015/9/20 12:00 UTC 異常波浪發機率預測圖.....	86
圖 4-23 2015/9/20 12:00 UTC 地面天氣圖.....	86
圖 4-24 2015/10/11 0:00 UTC 異常波浪發機率預測圖.....	87
圖 4-25 2015/10/10 18:00 UTC 地面天氣圖.....	87
圖 4-26 2015/10/2 12:00 UTC 異常波浪發機率預測圖.....	88
圖 4-27 2015/10/2 12:00 UTC 地面天氣圖.....	88
圖 4-28 異常波浪機率預測驗證結果.....	90
圖 5-1 群集分析演算示意圖.....	92
圖 5-2 瘋狗浪預警模式建置流程.....	94
圖 5-3 建置可能造成落海事件發生時段流程.....	95
圖 5-4 模式 1 群集 6 小時預警模式各群特性設定.....	105

圖 5-5 模式 1 群集演算 6 小時預警模式群集 1 與群集 2 差異分析.....	106
圖 5-6 模式 1 群集 12 小時預警模式各群特性設定.....	109
圖 5-7 模式 1 群集演算 12 小時預警模式群集 1 與群集 2 差異分析	110
圖 5-8 以模式 1 建置 24 小時預警模式各群特性設定.....	111
圖 5-9 模式 1 群集演算 24 小時預警模式群集 1 與群集 2 差異分析.....	112
圖 5-10 以模式 2 建置 6 小時預警模式各群特性設定.....	114
圖 5-11 模式 2 群集演算 6 小時預警模式群集 1 與群集 2 差異分析.....	114
圖 5-12 以模式 2 建置 12 小時預警模式各群特性設定.....	116
圖 5-13 模式 2 群集演算 12 小時預警模式群集 1 與群集 2 差異分析.....	116
圖 5-14 以模式 2 建置 24 小時預警模式各群特性設定.....	118
圖 5-15 模式 2 群集演算 24 小時預警模式群集 1 與群集 2 差異分析.....	118
圖 5-16 瘋狗浪預警作業時程示意圖	122
圖 5-17 東北角瘋狗浪預警系統正常模式結果.....	123
圖 5-18 東北角瘋狗浪預警系統 NWWIII 資料異常結果	123
圖 5-19 東北角瘋狗浪預警系統龍洞測站資料資料異常結果.....	124
圖 5-20 東北角瘋狗浪預警系統龍洞測站資料與 NWWIII 資料異常結果	125
圖 5-21 A151008 瘋狗浪事件發生時龜山測站海象紀錄情形.....	128
圖 6-1 馬祖海域 2011/5/23 急速成長波浪波高圖	130
圖 6-2 2013 年 3 月 1 日急速成長波案例	131
圖 6-3 2013 年 3 月 1 日 14 時地面天氣圖	131
圖 6-4 2013 年 3 月 1 日 20 時地面天氣圖	132
圖 6-5 2011 年 5 月 23 日 8 時地面天氣圖	132
圖 6-6 2011 年 5 月 24 日 8 時地面天氣圖	133
圖 6-7 2011 年 10 月 24 日急速成長波案例	133
圖 6-8 2011 年 10 月 24 日 8 時地面天氣圖	134
圖 6-9 2011 年 10 月 25 日 8 時地面天氣圖	134
圖 6-10 2013 年 8 月 21 日急速成長波案例	135
圖 6-11 2013 年 8 月 21 日 8 時地面天氣圖	135
圖 6-12 2013 年 3 月 24 日急速成長波案例	136
圖 6-13 2013 年 3 月 24 日 14 時地面天氣圖	136
圖 6-14 2011-2014 馬祖浮標站之急速成長波浪於各月份分佈	138
圖 6-15 馬祖 2011-2014 年急速成長波天氣系統比例圖.....	139
圖 6-16 馬祖海域急速成長波歷時分佈.....	142

圖 6-17 馬祖海域急速成長波起始示性波高分佈.....	141
圖 6-18 馬祖海域急速成長波最大示性波高分佈.....	141
圖 6-19 馬祖海域急速成長波成長量分佈.....	142
圖 6-20 馬祖海域急速成長波成長倍數分佈.....	142
圖 6-21 馬祖海域急速成長波平均成長速率分佈.....	143
圖 6-22 馬祖海域急速成長波最大成長速率分佈.....	143
圖 6-23 馬祖海域急速成長波發生前後 10 小時之海況.....	144
圖 6-24 馬祖海域急速成長波發生前後 10 小時(49 個案)內之平均風速	145
圖 6-25 馬祖海域急速成長波發生前後 10 小時(49 個案)之氣壓	145
圖 6-26 馬祖海域急速成長波浪發生前後 10 小時(49 個案)之週期	146
圖 6-27 馬祖海域急速成長波浪開始前各時距風向玫瑰圖.....	147
圖 6-28 馬祖海域急速成長波浪開始時風向玫瑰圖.....	147
圖 6-29 馬祖海域急速成長波浪開始後各時距風向玫瑰圖.....	148
圖 6-30 台灣西部海域及北海岸浮標站急速成長波隨季節之分佈.....	154
圖 6-31 台灣西部海域及北海岸浮標站急速成長波天氣系統比例圖.....	154
圖 6-32 各測站急速成長波發生前後 8 小時之海況(波高).....	156
圖 6-33 各測站急速成長波發生前後 8 小時之平均風速.....	156
圖 6-34 各測站急速成長波發生前後 8 小時之平均氣壓.....	158
圖 6-35 各測站急速成長波發生前後 8 小時之平均週期.....	159
圖 6-36 各測站急速成長波發生前後 8 小時之平均風向與波向夾角.....	160
圖 6-37 2011 年 2 月 9 至 10 日各測站之急速成長波浪發生當時波高	161
圖 6-38 2011 年 2 月 9 至 10 日地面天氣圖	162
圖 6-39 2012 年 9 月 13 至 14 日各測站之急速成長波浪發生當時波高	162
圖 6-40 2012 年 9 月 13 至 14 日地面天氣圖	163
圖 6-41 2009 年 8 月 6 至 8 日各測站之急速成長波浪發生當時波高	163
圖 6-42 2009 年 8 月 6 至 8 日地面天氣圖	164
圖 6-43 2007 年 4 月 17 至 18 日各測站之急速成長波浪發生當時波高	165
圖 6-44 2007 年 4 月 17 至 18 日地面天氣圖	165
圖 6-45 2008 年 12 月 21 至 22 日各測站之急速成長波浪發生當時波高	166
圖 6-46 2008 年 12 月 21 至 22 日地面天氣圖	166

表 目 錄

表 2-1 台灣海岸瘋狗浪好發區調查結果.....	19
表 3-1 本計畫分析之測站資料統計.....	23
表 3-2 花蓮浮標前十名 AI 與前十名異常波浪波高紀錄	26
表 3-3 新竹浮標前十名 AI 與前十名異常波浪波高紀錄	26
表 3-4 龍洞浮標前十名 AI 與前十名異常波浪波高紀錄	26
表 3-5 龜山島浮標前十名 AI 與前十名異常波浪波高紀錄	27
表 3-6 七股浮標前十名 AI 與前十名異常波浪波高紀錄	27
表 3-7 小琉球浮標前十名 AI 與前十名異常波浪波高紀錄	27
表 3-8 蘇澳浮標前十名 AI 與前十名異常波浪波高紀錄	28
表 3-9 鵝鑾鼻浮標前十名 AI 與前十名異常波浪波高紀錄	28
表 3-10 金門浮標前十名 AI 與前十名異常波浪波高紀錄	28
表 3-11 基隆浮標前十名 AI 與前十名異常波浪波高紀錄	29
表 3-12 馬祖浮標前十名 AI 與前十名異常波浪波高紀錄	29
表 3-13 澎湖浮標前十名 AI 與前十名異常波浪波高紀錄	29
表 3-14 台東浮標前十名 AI 與前十名異常波浪波高紀錄	30
表 3-15 台東外洋浮標前十名 AI 與前十名異常波浪波高紀錄	30
表 3-16 東沙浮標前十名 AI 與前十名異常波浪波高紀錄	30
表 3-17 東吉島波浪站前十名 AI 與前十名異常波浪波高紀錄.....	31
表 3-18 本計畫分析 16 個波浪測站觀測到之危險異常波浪結果統計	32
表 3-19 異常波浪形態分析結果	58
表 4-1 現場連續波浪觀測資料表.....	71
表 4-2 資料驗證之均方根誤差.....	72
表 4-3 本計畫研發之異常波浪發生機率預測結果誤差分析.....	90
表 5-1 瘋狗浪擊落海事件發生之錯差矩陣.....	95
表 5-2 可能造成落海事件發生的海氣象條件.....	98
表 5-3 龍洞測站輸入候選因子及其說明.....	99
表 5-4 NWWIII 輸入候選因子及其說明	100
表 5-5 預警模式之輸入	102
表 5-6 以模式 1 建置 6 小時預警模式針對不同輸入因子之結果比較.....	103
表 5-7 以模式 1 建置 6 小時預警模式之輸入因子範圍說明	107
表 5-8 以模式 1 建置 12 小時預警模式輸入因子範圍說明.....	109
表 5-9 以模式 1 建置 24 小時預警模式輸入因子範圍說明	111

表 5-10 以模式 2 建置 6 小時預警模式輸入因子範圍說明.....	113
表 5-11 以模式 2 建置 12 小時預警模式輸入因子特性說明.....	115
表 5-12 以模式 2 建置 24 小時預警模式輸入因子特性說明.....	117
表 5-13 兩種預警模式結果比較.....	120
表 5-14 兩種預警模式輸入因子比較.....	120
表 5-15 東北角瘋狗浪預警系統 6 小時模式預警結果之因子範圍.....	127
表 5-16 東北角瘋狗浪預警系統 12 小時模式預警結果之因子範圍.....	127
表 5-17 東北角瘋狗浪預警系統 24 小時模式預警結果之因子範圍.....	127
表 6-1 馬祖浮標站各年示性波高資料完整度.....	137
表 6-2 馬祖浮標站 2011 年至 2014 年 95 個急速成長波之伴隨天氣系統	137
表 6-3 馬祖浮標站 95 個急速成長波之統計參數.....	139
表 6-4 各浮標站急速成長波浪數量及年平均表.....	148
表 6-5 馬祖浮標站 2011 年至 2014 年 95 個急速成長波之伴隨天氣系統	151
表 6-6 新竹浮標站 1997 年至 2010 年 174 個急速成長波之伴隨天氣系統	151
表 6-7 澎湖浮標站 2007 年至 2012 年 490 個急速成長波之伴隨天氣系統	152
表 6-8 小琉球浮標站 2004 年至 2012 年 117 個急速成長波之伴隨天氣系統 ...	152
表 6-9 龍洞浮標站 1998 年至 2012 年 671 個急速成長波之伴隨天氣系統	152
表 6-10 馬祖、新竹、澎湖、小琉球及龍洞浮標急速成長波特徵參數平均值..	155
表 6-11 馬祖、澎湖及龍洞海域受同一天氣系統影響下，急速成長波浪統計..	166
表 6-12 馬祖與龍洞海域受同天氣系統影響下急速成長波浪起始時間比較表..	167
表 6-13 馬祖與澎湖海域受同天氣系統影響下急速成長波浪起始時間比較表..	167
表 6-14 龍洞與澎湖海域受同天氣系統影響下急速成長波浪起始時間比較表..	167
表 6-15 馬祖、澎湖及龍洞海域受同天氣系統影響下急速成長波浪特性比較..	168
表 6-16 新竹、澎湖、小琉球及龍洞海域受同一天氣系統影響下，急速成長波浪 統計	170
表 6-17 新竹與澎湖海域受同天氣系統影響下，急速成長波浪起始時間比較..	170
表 6-18 新竹與小琉球海域受同天氣系統影響下急速成長波浪起始時間比較..	170
表 6-19 澎湖與小琉球海域受同天氣系統影響下急速成長波浪起始時間比較..	171
表 6-20 新竹與龍洞海域受同天氣系統影響下急速成長波浪起始時間比較.....	171
表 6-21 新竹與龍洞海域受同天氣系統影響下急速成長波浪起始時間比較.....	171
表 6-22 新竹與龍洞海域受同天氣系統影響下急速成長波浪起始時間比較.....	172
表 6-23 新竹、澎湖、小琉球及龍洞海域受同一天氣系統影響下，急速成長波浪 特性比較表	172

符號說明

a	:	振幅
A	:	無因次化之振幅 (a/η_{rms})
BFI	:	班傑明-費爾參數(Benjamin-Feir Index)
ε	:	波浪尖銳度
σ_ω	:	波譜譜寬參數
σ_θ	:	方向譜寬參數(Directional width)
f	:	頻率
f_p	:	尖峰頻率
$\bar{f}$	:	平均頻率
S	:	波譜能量密度函數
R	:	波包振幅
H	:	波高
H'	:	無因次化波高 (H/η_{rms})
H_n	:	第 n 階的埃爾米特多項式(Hermite polynomial)
H_s	:	由波譜積分求得之示性波高
$H_{1/3}$	:	由零切法求得之示性波高
$\bar{H}$	:	平均波高
H_{rms}	:	均方根波高
H_*	:	參考波高
H_{freak}	:	異常波浪波高
K_{nm}	:	累積量 (accumulate)
k_0	:	主成分波之波數
m_n	:	n 階波譜動差
N	:	波浪數
P	:	累積機率
p	:	機率密度函數 (pdf)
Q_p	:	譜尖參數 (Goda's peakness factor)
ω	:	角頻率
ω_0	:	主成分波之角頻率
ϕ	:	相位角
η	:	水位
η_{rms}	:	水位均方根
μ_4	:	峰度係數 (kurtosis)
Δ	:	相對譜寬

第一章 前言

1-1 背景

隨著科技技術日新月異的進步，極端惡劣的海象都可事前預知，許多海上災害得以避免。然而，造成船隻翻覆等海上危害事件的原因大多是遭受「瞬變」的異常海象，使的海上工作者應變不及，進而造成傷亡，因此若能準確的預報瞬變的異常海象，無異於是海上工作者的一大福音。本計畫所稱的瞬變海象有三種，第一種是外洋中的「**異常波浪**(Oceanic freak wave)」，這是指在廣闊海洋中突然發生且比前後波浪都還要來得大的波浪，此種波浪被認為是造成海洋中航行船隻失事的原因之一，如圖 1-1；第二種是發生於海岸邊，由於波浪與海岸礁岩或防波堤地形交互作用，激起巨大水花，將人車沖刷入海造成傷亡，每年總會有數件意外發生，即是我們所俗稱的「**瘋狗浪**」，如圖 1-2，其未有明確之英譯，Tsai et al. (2011)稱之為 Dangerous Coastal Waves，本文認為與前者對比，也可稱之為 Coastal freak wave。前述的異常波浪與瘋狗浪之發生機制並不相同，最大的差異是異常波浪發生在海上，通常在深水海域，地床效應可不考慮，且波浪本身未與其它物體有交互作用，其發生原因主要係由於波浪間的交互作用所致(如後文所述)；而瘋狗浪是發生在岸邊，其發生機制主要是波浪和堤岸或礁岩交互作用所致，其複雜程度比異常波浪有過之而無不及；本文研究之第三種瞬變海象是所謂的「**急速成長波浪**(Rapid growth wave)」，有時海上在前一時刻風平浪靜，但在短時間內波浪卻快速成長，對於一般較小噸位的漁船或舢板非常難以應付此類情況。上述三種均為沒有徵兆或徵兆不明的瞬變海象，這些現象的發生會造成海上作業與沿岸活動的困難與災害，是本計畫研究探討的對象。

異常波浪是近年來從事波浪相關研究的熱門課題之一。一般而言，異常波浪不一定是大波，只要符合學理上的定義都稱為異常波浪，然而吾人只對較大的異常波浪感興趣，因為大的異常波浪才容易造成傷害。根據往昔學者的研究，異常波浪具有陡且尖的波峰和平坦的波谷，是一種強非線性、不對稱的波浪，它出現和消失的很突然。異常波浪的發生機制至目前為止尚未全部被瞭解，因此很難得知它何時何地會發生，也有人說異常波浪的發生是一個機率問題。異常波浪目前並沒有統一的名稱，除了廣泛使用的 Freak wave 之外，有些文獻也稱之為 Rogue wave (Dysthe et al., 2008)、Abnormal wave (Guedes et al., 2004)等，中文上常把它翻譯成異常波浪、突浪、詭浪或畸形波等，本文統一稱為「異常波浪」。

過去，人們認為異常波浪的發生是相對稀少的，偶爾在海洋中被發現，實際

上世界各大海域均有異常波浪出現，如北海海域、日本海域、墨西哥灣加勒比海以及台灣海峽附近，人們相信異常波浪可能是引起船舶損壞或消失的可能原因，如圖 1-1，關於異常波浪的討論和報導越來越多，如著名的英國散裝貨輪 MV Derbyshire 號，它在 1980 年 9 月於日本附近海域突然消失，造成 44 人死亡，Faulkner(2000)提出的研究報告中指出，“一個異常的大波可能衝擊了該船...”；1982 年 2 月，一座名為 Ocean Ranger 的半潛式平台在加拿大海域傾覆，84 人失蹤；2000 年 9 月，一艘遊輪 Orianac 號從紐約航行至英國南安普敦時，遭遇 40 呎巨浪襲擊，損壞嚴重；2005 年 2 月遊輪 Voyager 從北非突尼西亞航行到巴塞隆納時，遭受巨浪襲擊，船隻浸水喪失動力好幾個小時(Cavaleri and Bertotti, 2008)；2006 年 5 月法國超大遊輪 Pont-Aven 號行駛在法國和西班牙之間海域時，突然遭遇高達 15 米、6 層樓高的怪浪襲擊，水線 15 米以上的船艙全部進水，玻璃悉數被擊碎，該船緊急返回碼頭修理。據 Dysthe et al. (2008)統計，在 1969-1994 近 25 年的時間裡，世界海域內共有 22 艘巨輪被證實因遭遇突然的惡劣海況而失事。2008 年，流體力學年鑒(Annual Review of Fluid Mechanics)發表了一篇 Oceanic Rogue Waves 的專文(Dysthe et al., 2008)，整理了最新的異常波浪研究並談論了其中的關鍵問題。這幾年來還有幾本談論異常波浪的專書出版，如 Extreme Waves in the Ocean (Pelinovsky and Kharif, 2008)、Rogue waves in the ocean (Kharif et al., 2009)。近年來有關異常波浪的論文發表數目日益增多，異常波浪的研究開始受到廣泛重視，這其中可能的原因是科學家的數值模擬能力逐漸增強，加上全球海洋觀測系統增加，也增加了異常波浪被觀察到的機率。



圖 1-1 大洋中船隻遭遇異常波浪的想像圖 (Source: BBC News)

台灣每年平均有數十起民眾在海岸邊活動時，遭遇突然的瘋狗浪襲擊而落海的意外事件發生，如圖 1-2。瘋狗浪除了會造成人們身家性命的損失，也讓海岸上的活動人們因此而畏懼前往，無形中對於海岸休閒事業蒙上一層陰影。如何能有正確的認知並建立預警系統，以減少意外事件的發生，是一個重要且極需解決的問題。在前人的研究中，對瘋狗浪的描述，有了諸多的解釋。如許明光等(1993)指出台灣四周海岸都有發生瘋狗浪的記錄，但其中是以台灣東北角海岸發生的次數最多，在月份上以每年 5 至 7 月及 10 至 2 月發生最多；李賢文 (1998)說明瘋狗浪可能發生的機制，也提出可能發生瘋狗浪事件的地點與季節；蔡政翰等(2001)亦提出瘋狗浪通常與颱風與鋒面接近有關，當事件發生時相鄰波之波高相關係數有提高現象，亦即有群波現象產生。Tsai et al. (2004)指出當海象不佳時，在水深約十米以上且海底坡度大之防波堤或礁石上，且群波現象明顯時，較容易發生瘋狗浪襲擊，且從案例探討中發現，瘋狗浪事件與當週期相當的三個連續波（三連波）發生有關；陳冠宇(2002)則認為瘋狗浪的形成原因是波群的非線性演化；劉俊志(2006)指出窄頻、高非線性及高群聚性的波浪場，其發生突起波浪的機率較高；張與蔡(2005)根據實際落海事件當時的波浪記錄，認為當時有三連波不穩定現象，所謂三連波不穩定現象是根據 Longuet-Higgins and Drazen(2002)在實驗室證明，當規則波的尖銳度足夠大時，在直立壁前有相同週期之入射波，每三個波會有一較大的波峰並有上射水柱，因此造成越波(overtopping)，稱為三連波不穩定現象。莊文傑與曾相茂(2014)則指出當外洋有颱風形成，且測站波高達 1.5 米與最大週期超過 10 秒即達到瘋狗浪預警的時機。



圖 1-2 基隆海堤前機車騎士遭遇瘋狗浪襲擊落海照片

近期科學家的研究以探討外海異常波浪發生機制為主，如 Onorato et al. (2002)、Peterson et al. (2003)、Prevosto and Forristall (2004)、Clausset et al. (2004)、Porubov et al. (2005)、Touboul et al. (2006)、Chalikvo (2009)、Tamura et al. (2009) 等以數值模擬異常波浪發生機制，他們以所觀測的事件或是數值模型，對異常波浪的發生機制提出合理的說明。Kharif and Pelinovsky (2003)歸納異常波浪的產生可能是由一種或幾種因素引起的能量匯聚，這些因素包含有波浪的疊加、波流的相互作用、地形變化、風作用、方向分布以及波浪的不穩定性等。其中因為波浪調制不穩定(Modulational instability)引起能量的非線性自聚作用逐漸被認為是異常波浪生成可能的原因，波浪的調制不穩定是指 stokes 波對頻率與載波(Carrier wave)的基頻稍有差異的波產生的邊帶擾動是不穩定的，最早是由 Benjamin and Feir (1967)提出，在滿足一定條件的微小擾動（伴波）作用下，大波幅波浪（載波）經過與微小擾動的非線性交互作用，初始微小擾動的伴波振幅呈指數增長，大波幅的載波振幅逐漸減小，最終發展為不穩定現象，又稱之為 Benjamin-Feir instability。若調制最激烈時還可能會出現前後伴波交替主導的作用，如果波浪不破碎，隨後伴波波幅會逐漸減小，載波波幅增大，直到初始平穩狀態，這樣一個不穩定迴圈結束，在理想狀態下這樣的調制過程周而復始。為了模擬波浪的不穩定運動發展過程，非線性薛丁格方程(Non Linear Schrödinger equation, NLS)或者其修正形式也常被使用(Dysthe, 1979)，而方程式中的 Breather 類型的孤立子解常被用來作為簡單的異常波浪模擬。Divinsky et al. (2004)、Dyachenko and Zakharov (2005)、Zakharov et al. (2006)等學者都是從波浪不穩定角度去研究異常波浪，他們把異常波視為 Stokes 波不穩定的演化階段，認為外海的異常波浪是一種臨近破碎的大波。近期，Mori (2012)透過分析峰度和 BFI 以及方向分布的關係結果指出，在颱風的東南側也就是第四象限有比較高的異常波浪發生機率。

近岸瘋狗浪發生在岸邊，需考慮近岸複雜的地形與水深變化等因素，其成因相對於外海異常波浪複雜許多，蔡等人(2001)就指出近岸危險波浪與海底坡度有極大的關係。本計畫針對近岸瘋狗浪不以探討其機制為主要目的，而是以建立一個預警系統為目標，希望能提供中央氣象局相關資訊來進行預警。

急速成長波浪較少為人知，2006 年 4 月 5 日一艘基隆籍海釣船「友載一號」，上午搭載釣客前往基隆外海垂釣，下午在返回基隆時，於八斗子外海意外翻覆，造成 3 人死亡、1 人失蹤，當日上午基隆天氣晴朗，但下午氣候驟變，風勢逐漸增強且下起雨來，初步研判該漁船係返港途中，遇突然增大的風浪以致翻覆。中央氣象局當時表示，4 月 4 日鋒面通過前，西南風增強，因此氣象局發佈海上強風特報，預估北部海面最大陣風九級，直到 4 月 5 日傍晚，鋒面南下通過台灣地

區之後，海面的風向轉為東北風，屆時才會從平均風 7 級逐漸轉弱為 5 級。查看交通部運輸研究所港灣技術研究中心的基隆港外波浪站資料發現，4 月 5 日下午波浪突然出現急速成長現象，示性波高 1 小時內從 1 公尺急速成長達 3 公尺，成長達 3 倍之多，這就是發生了本文所謂的急速成長波浪，急速成長波浪的定義是在 6 個小時內，示性波高成長 2 倍以上，且成長後的波高達 1.5 公尺以上的波浪(呂蕙君，2007)，這樣的海況在短期間內波高急速成長，操船人員應變不及，尤其是耐海性比較弱的舢板或小型漁船與娛樂船隻，容易造成船難事件。為了瞭解這些急速成長波浪發生時的天氣背景，本計畫將從中央氣象局資料庫中探勘出此類型急速成長波浪，進一步歸納其天氣系統背景。

1-2 計畫目的

本計畫執行期限為四年，整體計畫之研究目的是從中央氣象局現有的海象資料庫中探勘前述災害性瞬變海象事件，針對外洋異常波浪事件，從事異常波浪發生機率預測；針對近岸異常波浪（瘋狗浪），建立一個近岸落海事件預警系統；至於急速成長波浪，則希望對其發生時之氣象條件能有所掌握。預期完成的工作項目為：

(一) 第一年 (已完成)

1. 蒐集歷史外海異常波浪船難事件與近岸異常波浪(瘋狗浪)落海事件。
2. 建立異常波浪分析方法。
3. 探勘異常波浪事件，進行統計分析，本年度完成三站。
4. 探勘急速成長波浪事件(一站)。
5. 建立落海事件與海象氣象紀錄之關聯分析。

(二) 第二年 (已完成)

1. 分析四站異常波浪案例。
2. 異常波浪發生機率與預測理論推導。
3. 建立近岸危險波浪預警模式雛形。
4. 探勘急速成長波浪事件(二站)。

(三) 第三年 (已完成)

1. 分析四站異常波浪案例。
2. 進行外洋異常波浪機率預測與波浪模式結合。
3. 近岸危險波浪預警模式作業化前置準備。

4. 探勘急速成長波浪事件(二站)。

(四) 第四年

1. 分析五站異常波浪案例。
2. 異常波浪機率預測方法與作業化波浪模式結合。
3. 新增一種探勘數據，並評價近岸危險波浪預警成效。
4. 制定近岸與外海異常波浪預警產品。
5. 探勘急速成長波浪事件(一站)。

1-3 前年度計畫成果

一、第一年度工作成果

本計畫第一年度(2012)從報章媒體、政府報告等來源，蒐集2003-2012年間台灣鄰近海域因突然的浪擊因素而造成之船難事件，統計其發生時間，以冬季期間發生最頻繁，颱風期間約僅佔總發生數目的少部分，並不顯著。蒐集上述船難事件發生時段之鄰近海氣象資料，結果顯示平均危害波高約為1.46m(平時)與2.97m(颱風期間)，參考此結果，本計畫除了使用異常指數(AI)做為是否發生異常波浪之準則外，加入異常波浪浪高超過2m的條件，稱之為「危險異常波浪」。第一年度工作比較了異常指數(AI)、群波異常指數(IFG)、中央波異常指數(IFC)等參數用來探勘實測資料中的異常波浪案例，評估結果顯示仍然以國際間常用的異常指數(AI)是否大於2.0作為評判標準較為合適。

計畫第一年分析了新竹浮標、龍洞浮標與台東外洋浮標等三個測站自設站以來迄2011年的觀測資料，利用異常指數探勘實測異常波浪案例，分析結果顯示，新竹浮標資料中有312個危險異常波浪、龍洞浮標資料中有519個危險異常波浪、而約2年多的台東外洋浮標中則有121個危險異常波浪，危險異常波浪的發生機率分別為 4.32×10^{-5} 、 8.58×10^{-5} 和 12.7×10^{-5} 。從這三個測站探勘所得的異常波浪中，平均危險異常波浪浪高分別為3.04m(新竹)、3.94m(龍洞)與5.99m(台東外洋)，最大異常波浪浪高為23.3公尺，發生在龍洞海域。至於三個測站的平均異常指數AI值均為2.12，最大值為3.04，發生在龍洞浮標。

為了探討異常波浪發生機制，計畫第一年分析實測異常波浪波形，結果顯示異常波浪主要可以分為有高聳水牆的波峰形、有在海中彷彿水洞的波谷形、以及介於兩者之間的對稱形，若加上區分異常波浪是否發生在群波中，則共有六種異常波浪

形態。計畫第一年度檢討以群波因子分析異常波浪發生時該筆記錄之群波特性並不合適，異常波浪的高水位(或低波谷)特性對群波因子之計算太過敏感，提供了一個異常波浪是否發生在群性波浪中的判釋方法。異常波浪波形之分類結果顯示，三個浮標測站以非發生在波群中的對稱形異常波浪最多，總體而言，發生在波群中的異常波浪約只佔 10%-15%比率，其餘都是單獨發生的異常波浪，其形態也並非以一般認知的波峰形為主，而是波高和波谷相近的對稱形為常見的異常波浪。而假使異常波出現在群波中，該群波浪平均由 5.7 個連續波浪所組成。

另外，計畫第一年度蒐集並整理2000-2012年以來的瘋狗浪襲人事件，結果顯示合計有253案件，累計有數百人被浪擊落海。在預警系統建置部分，計畫的研究策略是採用海象與氣象因子做為訂定可能落海事件發生的條件，建立關聯性後，未來只要輸入某海象或氣象條件即可進行瘋狗浪擊落海的預警。在研究初期曾直接採用直接龍洞波浪資料，做為建置模式的主要參考依據，但由於龍洞波浪資料並非水面變化資料且非連續觀測站，常無法驗證落海事件發生時的波浪狀況，經將有限可用的資料整理後，發現並不容易以龍洞海象資料找出與落海事件發生的強關聯性，故計畫第一年度改以碧砂測站的實測波浪訊息為參考依據，該站為連續觀測測站，使用該站資料一方面可明顯找出與落海事件發生的強關聯因子，另一方面發現以碧砂測站所建置的模式，其評估指標都明顯較龍洞測站所建置來的準確。

計畫第一年度針對瘋狗浪預警系統之建置使用碧砂測站的波浪資料與基隆港的風力資料，並調查碧砂測站20公里內的實際落海發生事件，以關聯規則定義出可能造成落海事件發生的條件。研究中將所分段的分析因子，與落海事件作強關聯分析。在強關聯分析中，研究中特別定義支持度與可信度必須大於所有重要性高於5%的分段平均值的1.2倍，以此條件便能順利的找出強關聯的因子，以所有強關聯條件因子的條件再進行關聯分析，依權重設定找出大於權重門檻的條件時段，此一時段即為可能發生落海事件的時段，將此一時段定義為可能發生落海事件的危險時段，再以資料探勘技術分析龍洞海象資料，如此便能了解落海事件與龍洞海象資料間的關係，進而建置瘋狗浪預警系統。分析結果顯示可能造成落海事件的幾項明顯的條件，如3小時平均示性波高超過1 m，最大波高超過2 m，平均示性週期超過7 sec，風向為東北風等條件，這些條件也可讓在海邊活動的人們，做為簡易判斷是否有浪擊落海危險。另外當平均波譜尖峰參數(Q_p) 大於2、平均波高相關係數(γ)大於0.3、4小時內平均三連波發生個數大於6與平均風速大於4 m/s等條件，也和前人研究與觀察所得相近。

急速成長波浪較少有相關研究，但在台灣鄰近海域時常發生，且偶而造成船難

事件，海面波高在短時間內急遽長大，一般小型船隻難以應付，造成危害。計畫第一年度分析新竹浮標 14 年資料，搜尋出所有急速成長波浪的案例，合計有 174 件，平均每年約 12.4 件。研究結果顯示，新竹海域之每件急速成長波浪的歷時約 7 小時，平均的波高成長倍數為 3.6 倍，平均波高成長量為 1.53m，平均波高成長率為 0.23 m/hr。分析結果還顯示了，新竹海域之急速成長波浪在發生前，海面波高有減緩的趨勢，但週期有略微增大的趨勢，同時，急速成長波浪與當時時候的海面風速、風向都有顯著的關係，計畫第一年度同時比對急速成長波浪發生時之天氣圖，結果顯示，急速成長波浪有四成發生在鋒面通過伴隨大陸冷氣團南下之天氣系統時候。

二、第二年度工作成果

延續第一年度的異常波浪與瘋狗浪事件蒐集與整理，台灣鄰近海域因浪擊造成之船難事件2013年新增12件案例，近11年以來(2003-2013)累計有77件，共造成494人落海，平均每年有7件，每件約有7.1人落海，此類事件發生在冬天期間最頻繁。在瘋狗浪襲擊事件部分，2013年新增12件案例，台灣海岸地區在過去14年間(2000-2013)，累計共發生了263件浪擊人員落海事件，平均每年近19件，其中發生在颱風期間的僅33件(佔12.5%)，前述瘋狗浪擊落海事件中，有近七成是發生在北部及東北角(新北-基隆-宜蘭)海岸，共有183件，造成286人落海，超過102人死亡或失蹤，而在東北角海域且在颱風期間發生者僅佔6%，這結果顯示了預警(如颱風期間之颱風警報)必能降低危害風險。

計畫第二年度除補充第一年度分析之新竹浮標、龍洞浮標與台東外洋浮標等三個測站2012年資料外，還增加花蓮浮標、七股浮標、鵝鑾鼻浮標與東沙浮標等四個測站的異常波浪探勘，合計兩年完成七個浮標站探勘。分析結果顯示，13年的鵝鑾鼻浮標資料中有381個危險異常波浪、16年的花蓮浮標資料中有580個危險異常波浪、7年的七股浮標資料中有360個危險異常波浪、而約3年多的東沙浮標中則有137個危險異常波浪。分別計算這四個浮標海域發生危險異常波浪的機率，在花蓮浮標為 8.22×10^{-5} ，在鵝鑾鼻浮標則為 6.52×10^{-5} ，在七股浮標為 9.25×10^{-5} ，在東沙浮標則為 11.8×10^{-5} 。分析結果還顯示了，危險異常波浪在颱風期間出現的機率是非颱風期間的2~7倍，同時，分析結果顯示近海浮標中觀測得危險異常波浪的浪高主要分布在2~4公尺之間(新竹測站約佔80%，龍洞測站約65%，花蓮測站約70%，七股設站約75%，鵝鑾鼻測站約80%)，4公尺以上的危險異常波浪發生次數較少，而東沙與台東外洋兩個外海測站的危險異常波浪浪高分析結果與前五站有顯著的差異，相對較大的危險異常波浪占較大比例，4公尺以上的危險異常波浪佔有45%以上(東沙測站危險異常波浪波高大於4公尺占約45%，台東外洋測站占約60%)。

關於異常波浪形態的分析結果顯示，本年度新增的四個測站的分析結果與第一年度三個測站結果類似，以單獨出現且波高和波谷相近的對稱形為最常見的異常波浪形態，而成群發生的異常波浪只佔約5~10%。異常波浪之發生與颱風之間的關係分析，結果顯示龍洞、新竹、七股等海域發生異常波浪時，颱風均在遠處且與測站之間大都被台灣本島遮蔽，種種跡象顯示，這些測站的異常波浪發生很可能與颱風湧浪有關。

第二年度在異常波浪機率預測部分，彙整了國外近期研究建議，透過非線性波浪理論推導異常波浪發生機率，導出波高分布可得最大波高分布與其超越機率分布，再根據異常波浪發生臨界條件($H_{max}/H_s=2$)推導出異常波浪發生機率。理論推導的結果顯示，異常波浪的發生機率與波浪的數目以及水位變化的峰度有關。數值的結果顯示，以非線性波理論計算所得之異常波浪發生機率可能高達以線性波理論所得機率之4倍以上，非線性波理論計算異常波浪發生機率高於線性波理論。本計畫裡用罕見的連續波浪觀測資料進行驗證，驗證結果發現，峰度在3.0以上時，理論計算結果與實測資料比對的均方根誤差約為18%，但當峰度較小時，與實測值比較結果偏差較大。

在近岸瘋狗浪的部分，應用決策樹理論與群集分析方法來建置即時與6小時前置時間之瘋狗浪預警模式。在即時瘋狗浪預警模式方面，以決策樹演算法所建置的模式其準確性可達89%，反查指標亦可達89%，使用在龍洞測站附近20公里內的47件實際落海案例驗證，模式可準確驗證43件；在群集分析演算法所建置的模式其準確性可達84%，反查指標亦可達96%，使用47件實際落海案例驗證，模式可準確驗證43件。在6小時前瘋狗浪預警模式方面，以決策樹演算法所建置的模式其準確性可達85%，反查指標亦可達81%，使用41件實際落海案例驗證，模式可準確驗證39件；在群集分析演算法所建置的模式其準確性可達78%，反查指標亦可達92%，使用41件實際落海案例驗證，模式可準確驗證全部的41件。無論是即時或是6小時瘋狗浪預警模式，其驗證的準確性都達9成以上，可見以群集分析來從事資料探勘建置瘋狗浪預警系統為較佳。

在急速成長波浪部分，第二年的計畫中完成龍洞與澎湖兩個測站的急速成長波浪探勘，龍洞浮標分析得 671 例急速成長波浪，發生時間集中在冬季期間，龍洞海域之急速成長波浪平均歷時 8 小時，波高成長倍數平均 3.2 倍，波高平均成長 1.83m，波高平均成長率 0.26 m/hr。急速成長波浪發生前，海面波高有減緩的趨勢，且與當時時候的海面風速、風向都有顯著的關係。龍洞海域之急速成長波浪有七成是發生在鋒面通過伴隨大陸冷氣團南下與只受到大陸冷氣團南下之天氣系統時候。而澎湖浮

標資料中則發現有 490 例急速成長波浪，大都發生在秋季期間。澎湖海域之急速成長波浪平均歷時 7 小時，波高成長倍數平均 3.8 倍，波高平均成長 1.67m，波高平均成長率 0.24 m/hr。澎湖海域之急速成長波浪有五成是發生在受到大陸冷氣團南下之天氣系統時候。澎湖海域急速成長波浪個案間的間隔時間較短，間隔一天之內間隔數的比率占 37%澎湖海域急速成長波浪 24 小時內連續發生個案共 264 個，有五成是發生在受到大陸冷氣團南下之天氣系統時候，且發生在秋季比例最高。

三、第三年度工作成果

延續第二年度的異常波浪與瘋狗浪事件蒐集與整理，台灣鄰近海域因浪擊造成之船難事件2014年新增13件案例，近12年以來(2003-2014)累計有90件，共造成523人落海，平均每年有7件，每件約有5.8人落海，經統計得知，此類事件發生在冬天期間最頻繁。在瘋狗浪襲事件部分，2014年新增19件案例，台灣海岸地區在過去14年間(2000-2013)，累計共發生了282件浪擊人員落海事件，平均每年近19件，其中發生在颱風期間的僅33件(佔12.5%)，前述二百多件的瘋狗浪擊落海事件中，有近七成是發生在北部及東北角(新北-基隆-宜蘭)海岸，共有199件，而在東北角海域且在颱風期間發生者僅佔6%，這結果同樣顯示了預警(如颱風期間之颱風警報)必能降低危害風險。

在異常波浪探勘方面，第三年度完成了蘇澳、基隆、馬祖等三個浮標站與東吉島波浪站的異常波浪探勘分析，並補足前兩年完成七個測站2013年的異常波浪探勘結果。分析結果顯示，14年的蘇澳浮標資料中有513個危險異常波浪、2年的基隆浮標資料中有36個危險異常波浪、4年的馬祖浮標資料中有141個危險異常波浪，而約16個月的東吉島波浪站中則有512個危險異常波浪。分別計算這四個浮標海域發生危險異常波浪的機率，在蘇澳浮標為 8.22×10^{-5} ，在基隆浮標則為 3.64×10^{-5} ，馬祖浮標為 12.2×10^{-5} ，在東吉島波浪站則為 6.08×10^{-5} 。分析結果還顯示了，危險異常波浪在颱風期間出現的機率是非颱風期間的2~12倍，同時，分析結果顯示近海浮標中觀測得危險異常波浪的浪高主要分布在2~4公尺之間(新竹測站約佔80%，龍洞測站約65%，花蓮測站約70%，七股設站約75%，鵝鑾鼻測站約80%，蘇澳測站約80%，基隆測站約60%，馬祖測站約50%，東吉島測站約65%)，4公尺以上的危險異常波浪發生次數較少，而東沙與台東外洋兩個外海測站的危險異常波浪浪高分析結果與前9站有顯著的差異，相對較大的危險異常波浪占較大比例，4公尺以上的危險異常波浪佔有45%以上(東沙測站危險異常波浪波高大於4公尺佔約45%，台東外洋測站佔約60%)。本年的工作也從有限的資料中發現，危險異常波浪隨著海況愈惡劣，其發生機率愈高。本年度工作也整理近年來BFI值的相關文獻，並針對龍洞測站資料進行BFI分析，以實測資料探討BFI值計算結果，由於現場實測資料中偶有尖峰頻率偏大以及雙峰的情況產

生，以譜寬參數計算BFI值時會產生數值不合理結果，而以譜尖參數計算則可以解決此問題。在異常波浪機率預測的部分，針對驗證的誤差進行探討，得知波浪數影響異常波浪發生機率有限，並非是造成誤差之主因，而可能是來自 $H_{1/3}$ 與 η_{rms} 的比值不適用於真實海洋中，本年度研究也從實測資料中進行回歸分析，未來在進行區域性的異常波浪機率估算時，可以有效的減少誤差。此外也結合氣象局波浪模式輸出波譜資料進行測試研究，完成西北太平洋的異常波浪發生機率估算，計算的時間約為2分鐘。

過去蒐集之瘋狗浪擊人員落海事件發生時之天氣系統不外乎是受到大陸冷高壓南下、鋒面通過、颱風侵襲或是颱風外圍的影響。由於影響近岸波浪變化的因素眾多，包括地形、海流、潮汐、氣候與海象等因素，都有可能造成瘋狗浪事件的發生，若要能定時定點的預測瘋狗浪事件的發生，幾乎不可能做到。本計畫延續去年建置的方法，從碧砂測站連續測試的波浪資料與當時的氣象觀測資料，藉由關聯分析尋找出可能造成落海事件的條件與時段，以此可能造成落海事件發生的時段做為目標值，再以資料探勘演算法建置出瘋狗浪的預警模式，當模式學習測試完成後，再以實際的落海事件案例來驗證其準確性。本年度已完成12小時與24小時瘋狗浪預警模式，在12小時瘋狗浪預警模式方面，其準確率為77.56%，而反查指標達91.09%，使用在龍洞測站附近20公里內的49件實際落海案例驗證，模式可準確驗證46件；在24小時瘋狗浪預警模式方面，其準確率為73.45%，而反查指標達88.68%，使用在龍洞測站附近20公里內的47件實際落海案例驗證，模式可準確驗證43件。結果可知無論是第二年完成的即時或六小時瘋狗浪預警系統，還是本年度完成之12小時或24小時預警系統，其真實落海事件幾乎都能被預測。此外，計畫第三年度也以NWWIII波浪模式的輸出資料進行6小時瘋狗浪預警系統之建置研究，其實際落海事件的驗證反查率可達86.27%，結果雖較前者偏低，但亦可接受。

另外，計畫第三年度完成了小琉球與鵝鑾鼻兩個測站的急速成長波浪探勘，分析小琉球浮標9年資料，獲得117例急速成長波浪，發生的時間主要集中在夏季颱風期間，平均歷時8小時、平均波高成長倍數2.99倍，平均波高成長1.78m，平均波高成長率0.23 m/hr。急速成長波浪發生前，海面波高有減緩的趨勢，且與當時時候的海面風速、風向都有顯著的關係，且發現小琉球海域之急速成長波浪有五成是發生在受颱風或熱帶低氣壓影響時候。而在鵝鑾鼻浮標13年資料中發現有218例急速成長波浪，大都發生在夏、秋季期間。鵝鑾鼻海域之急速成長波浪平均歷時7小時，波高成長倍數平均2.78倍，波高平均成長1.62m，波高平均成長率0.25 m/hr。鵝鑾鼻海域之急速成長波浪有四成是發生在受到大陸冷氣團南下之天氣系統時候，也約三成半式發生在受颱風或熱帶低壓影響的期間。研究中發現，鵝鑾鼻海域急速成長波浪個案中，

受到大陸冷高壓天氣系統影響而產生的急速成長波浪，其風速較受颱風或熱帶低氣壓影響產生的急速成長波浪還大。

1-4 本年度工作項目

本年度計畫工作分為三個部分，分別是外洋異常波浪分析、近岸瘋狗浪預警系統建置與急速成長波浪特性分析。主要工作項目與其內容說明如下：

(一) 外洋異常波浪分析與機率預測

1. 蒐集外洋異常海象造成船難事件

台灣周圍海域的海上作業興盛，但是海上船難不時的出現在報章雜誌上，通常在極惡劣的海況（如颱風）時，船隻並不會出港，災害大多得以避免，反而難以預防的是突來的大浪，一般船隻遇到這種大浪時常應變不急而發生意外。過去十年(2003-2014)的浪擊船難事件已於前三年收集完畢，第四年度將繼續持續追蹤相關事件，如有報導案例即納入資料庫內；蒐集項目包括事件發生日期、發生地點（海域）、事件描述、傷亡或失蹤人數、以及船難資料來源，同時將連結海象資料（如波高）。

2. 外洋異常波浪探勘

本計畫在第一個工作年度已經建立以異常波浪指數(Abnormal Index, AI)為評斷指標的外洋異常波浪探勘方法，當 AI 超過 2 時視為異常波浪，前三年度已完成新竹浮標、龍洞浮標、台東外洋浮標、花蓮浮標、七股浮標、鵝鑾鼻浮標、東沙浮標、馬祖浮標、基隆浮標、蘇澳浮標等十個浮標與東吉島波浪站等觀測資料中的異常波浪案例探勘工作。本年度將持續進行另外五個資料浮標(金門浮標、龜山島浮標、台東浮標、台東浮標與小琉球浮標)的異常波浪探勘與分析工作，同時也將補充前三年度十個浮標與一個波浪站的分析資料至 2014 年底。

3. 外洋異常波浪分析

本年度計畫將進行前述三個資料浮標與一個波浪站的異常波浪案例統計分析。分析的內容包含有：

- (1) 統計各站異常波浪發生的時間(月份)，繪製異常波浪發生時間分布圖。
- (2) 計算各站的異常波浪發生機率。
- (3) 探討異常波浪發生機率與颱風距離之關連性，比較非颱風期間與颱風期

間之異常波浪發生機率。

(4) 分析異常波浪波高分布，繪製異常波浪波高組體圖。

(5) 分析異常波浪形態，並計算異常波浪發生時之群性。

(6) 異常波浪發生與當時天氣系統(峰面或颱風)之關聯性。

4. 作業化外洋異常波浪機率預測系統之建立

藉由第三年度完成異常波浪發生機率估算程式，轉移到中央氣象局內，同時結合氣象局海象中心 NWW III 波浪預報模式波譜輸出，例行性地產出異常波浪發生機率圖。

(二) 近岸瘋狗浪分析與預警系統雛形之建置

本計畫工作第二部分為近岸瘋狗浪分析與預警系統之建置，本年度工作項目包含有：

1. 近岸瘋狗浪事件蒐集

在前三年度的計畫中，本研究嘗試各種可能蒐集瘋狗浪事件，本年度工作將持續蒐集相關資料，蒐集時間將延伸至 2015 年底時，並將更新瘋狗浪事件發生之時間與空間分布，更新繪製台灣近岸海域瘋狗浪危害分布圖，提供中央氣象局參考與宣導。此一階段除了持續蒐集落海事件相關資料外，並將所蒐集的資料項存入瘋狗浪資料庫中，以方便後續的研究使用。

2. 最佳預警模式之決定

第三年計畫中，改採中央氣象局海象中心 NOAA WAVEWATCH III 波浪預報模式輸出資料，率定預警系統，已完成前置時間六小時預警系統，本年度將繼續完成前置時間 12 與 24 小時預警系統；除此，參考上年度期末會議委員之建議，結合實測資料與模式預測資料來建置瘋狗浪預警模式。本年度期中前將完成預警模式的建置，與第二年計畫建置之以龍洞實測資料與天氣預報資料建置瘋狗浪預警模式進行綜合比較和評估，決定一個最佳的東北角海域瘋狗浪預警系統。

3. 教育訓練與技術轉移

確認最佳瘋狗浪預警系統後，將轉移至海象中心進行作業化運行測試。本計畫規畫於期末審查前完成教育訓練，使中央氣象局人員在執行預警系統遭遇錯誤或困難時，可初步排除，使作業不中斷。

(三) 急速成長波特性分析

1. 急速成長波浪案例探勘

本計畫前三年度已經完成五個浮標測站(新竹、龍洞、澎湖、小琉球與鵝鑾鼻浮標)的急速成長波浪探勘工作。今年度將從持續進行一個浮標資料的探勘，選定為馬祖浮標。下半年度將針對過去幾年所探勘完成的急速成長案例進行綜合性分析，找出影響急速成長波浪之主要因子。

第二章 台灣鄰近海域異常波浪與瘋狗浪案例分析

2-1 事件資料來源

異常波浪和瘋狗浪事件都是自然界的隨機事件，異常波浪發生在海上，主要對海上航行船隻造成危害；瘋狗浪發生在岸邊，主要則是對在海邊活動的民眾(遊客與釣客)造成威脅。目前尚無法有有效的儀器設備或方法可以完全地記錄異常波浪或瘋狗浪，海上觀測儀器僅為單點，且非全程記錄，僅有異常波浪恰好發生在儀器位置以及記錄時間內才有可能被觀測到，遙測儀器受限於再訪時間過長或解析度不足等因素，也僅能記錄到片段的異常波浪；在海岸邊，光學影像可以記錄瘋狗浪事件，但光學影像儀器並非全海岸都有，且晚上亦無法觀測，以上種種都說明著異常波浪與瘋狗浪觀測的困難性。因此，本文僅能從媒體報導或報案記錄中來蒐集異常波浪與瘋狗浪事件的資料，台灣媒體業發達，這類型的災害事件曝光率可以假設相當高，具有足夠事件覆蓋率。但由於僅有造成危害甚至傷亡的事件才會被媒體報告，未有船隻或民眾遭遇的異常波浪或瘋狗浪並不會被報導，因此調查與分析結果相較於真實世界絕對是低估的。

本研究主要從政府官方報告和媒體訊息兩種來源來蒐集異常波浪和瘋狗浪事件資料，政府報告主要來自海巡署、岸總局、洋總局、縣市消防局等報案紀錄，媒體訊息則包含報紙、電視新聞與電子資源等。媒體的報導也有相當高的不確定性存在，因此每個事件都會採嚴格的標準來檢視，必要時去電當地漁會甚至當事人詢問相關事實，務必將媒體報導的不確定性降至最低。本文蒐集資料過程中，因機械故障、人為疏失、不明原因等船難事件，或人體健康原因、步行滑倒等原因造成之民眾落海等事件都不納入本文分析，僅有明確受到波浪衝擊所造成的災害事件始會被納入本文分析案例。

2-2 外洋異常波浪導致船難事件

本文蒐集因遭遇突然大浪而導致竹筏、膠筏、舢舨、漁船及貨輪等各類型船隻之船難事件，譬如某報導如下文：

『 2014 年 01 月 02 日，黃姓船主和 4 名漁工搭乘的「長生 1 號」，在野柳附

近翻覆沉沒，5 人則自行爬上礁岩等待救援。黃姓船主向岸巡人員表示，因為現在正值烏魚季，昨天天氣晴朗，特地出海捕魚。快晚上 6 點時，本來還跟其他漁工在作業，突然一個大浪從後方打來，船筏來不及閃避翻覆，撞上礁岩後沉入海中。。。』

類似上述的事件則會被本文納入異常波浪導致危害事件。縱整 2000 年迄 2015 年為止所蒐集到之類似事件合計有 119 件，所有事件清單詳如附錄光碟。這些事件發生位置遍佈於台灣四周海域，大都在近岸到離岸 6 海浬範圍內，但 12 海浬外以及在棉花嶼、彭佳嶼等外礁均曾有事件發生，詳細位置分布如圖 2-1。統計過去 16 年(2000-2015)來因異常波浪引發之船難事件共造成 712 人落海，平均每年 34 人因異常波浪引發船難落海，平均每事件 5.9 人落海，全部落海人數中，死亡(含失蹤)有 323 人，其餘則是受傷或獲救，傷亡數據相當驚人，各月份發生的比率可見統計圖 2-2，其中十月份 14 件、十一月份 10 件、十二月份 11 件、一月份有 22 件發生次數居高，顯示這類的船難事件與季節因素仍有顯著的關係。而台灣每年夏、秋兩季平均都有三至四個颱風來襲，而颱風所帶來的強風與惡劣的海象也具有很高的威脅性，然而在颱風期間因異常波浪而翻船的事件比例並不高，如圖 2-2 所示，全年平均僅 9%異常波浪造成船難事件發生在颱風期間，可能與颱風前後大部分的海上作業均已有所警惕或已回港躲避有關，因此只要有適當的預警，還是可以有效地降低災難發生。

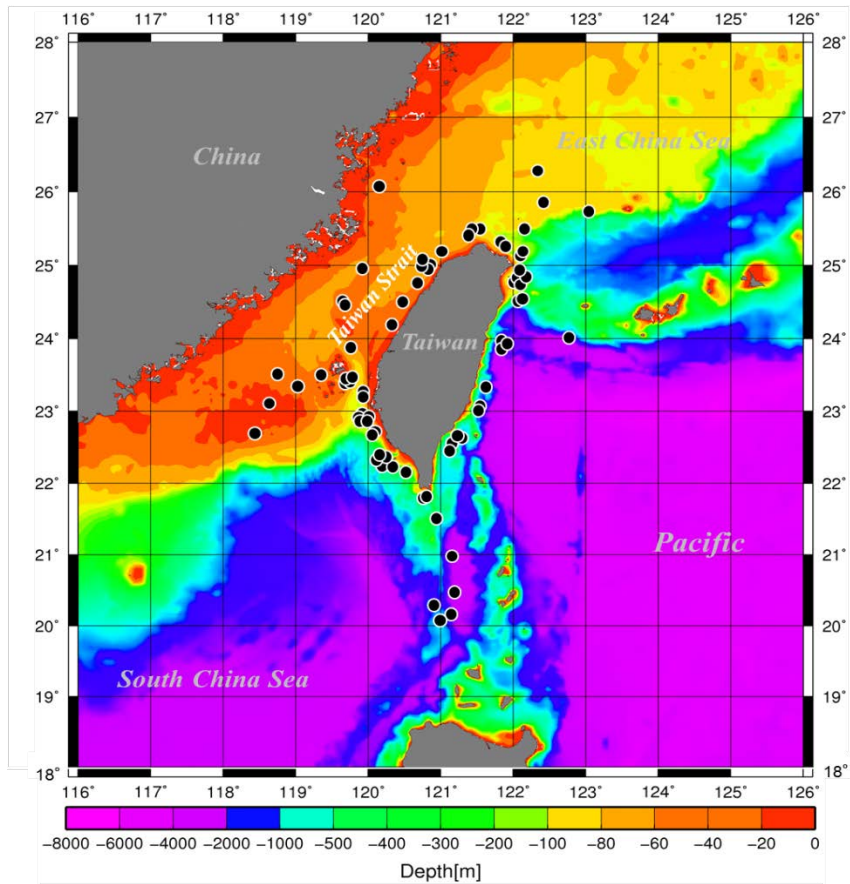


圖 2-1 台灣鄰近海域發生因異常波浪造成船難事件之位置圖
(資料時間：2000 – 2015)

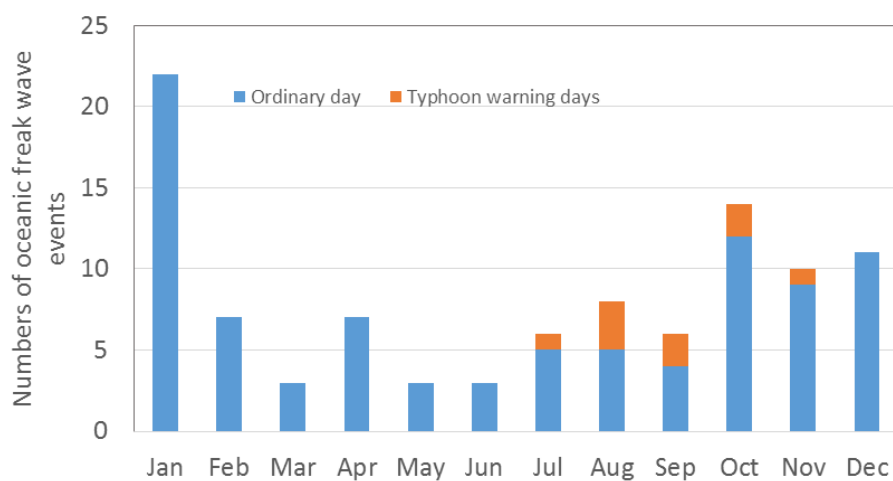


圖 2-2 台灣鄰近海域發生因異常波浪造成船難事件之月份分布圖，其中橘色為發生在颱風警報期間案例。(資料時間：2000 – 2015)

2-3 海岸瘋狗浪事件

本計畫蒐集從 2000 年至 2015 年間發生在台灣海岸地區的瘋狗浪事件，資料蒐集結果顯示過去 16 年來共有 297 件合計 470 人被瘋狗浪擊落海，死亡(含失蹤)有 275 人，其餘則是受傷或獲救，平均每年發生 18 件，平均每年有 29 人受到傷害，平均每件 1.5 人落海。所有瘋狗浪擊落海事件如附錄光碟所示。所蒐集的案例中，有 207 件發生在台灣東北角海岸地區(基隆市到宜蘭縣間)，占全部事件 7 成 5 左右，也因為此區域的案例數為全省之冠，故本計畫選用台灣東北角海域為主要研究範圍。近 16 年(2000-2015)來的瘋狗浪事件發生地點分布如圖 2-3 所示，依縣市來區分，發生瘋狗浪事件較多的縣市依序為：新北市、基隆市、宜蘭縣與花蓮縣，如圖 2-4 所示。圖 2-5 顯示在 9 月至 12 月間發生瘋狗浪擊落海事件最多，最少發生事件的月分則是 5 月與 6 月，圖中也顯示颱風警報期間發生的案例，僅佔全部案例之 15%，與前文異常波浪事件類似，颱風期間因民眾知悉需避難，因此反而減少了瘋狗浪造成之危害事件數目。

表 2-1 列出 2000-2015 年間所有發生瘋狗浪事件中，同一地點發生 5 次以上的事件者，共有 15 處(基隆八斗子和碧砂漁港合併計算)，包含新北市 8 處、基隆市 5 處、宜蘭縣與花蓮縣各 1 處，這些地點過去以來共有 160 件瘋狗浪擊落海事件發生，佔全國事件的 54%，死傷人數共 243 人，佔全國因瘋狗浪死傷人數的 52%，即這些位置發生的瘋狗浪事件佔全國瘋狗浪事故一半以上。在所有瘋狗浪事件中，以新北市龍洞佛祖廟下方的「龍洞 3 支礁岩區」是記錄到瘋狗浪事件發生最多次的地點，資料統計期間發現該處共有 27 次事件發生，共有 41 人次死傷；其次是基隆市的碧砂漁港燈塔和八斗子漁港燈塔，由於該漁港緊鄰為伴，本文將其合併計算，稱為「碧砂/八斗子漁港燈塔」，原本碧砂漁港和八斗子漁港分別有 8 和 9 次的瘋狗浪紀錄，本文將其合併計算，該處過去 16 年來，應共有 17 次落海事件，平均每年一定發生超過 1 件，合計已有 28 人次死傷，為全台第 2 瘋狗浪嚴重危害地點；次數最多的第三順位則是新北市的「野柳風景區」，該處共發生 14 次落海事件，計有 34 人次死傷；接續則是位於新北市瑞芳鎮陰陽海北部濱海公路 82 公里附近的礁岩區，該處記錄到 14 件落海事件發生，共 23 人次死傷；基隆市長潭里防坡堤與和平島濱海公園則分別各有 12 和 10 次的落海事件發生。

表 2-1 台灣海岸瘋狗浪好發區調查結果(資料時間：2000－2015)

排序	縣市	地點	落海件數	死傷人數
1	新北市	龍洞佛祖廟	27	41
2	基隆市	碧砂/八斗子漁港燈塔	17	28
3	新北市	萬里鄉野柳風景區	14	34
4	新北市	瑞芳鎮陰陽海海域	14	23
5	基隆市	長潭里防波堤	12	13
6	基隆市	和平島濱海公園	10	16
7	宜蘭縣	內埤海灘	9	19
8	基隆市	協和發電場旁礁石	9	12
9	花蓮縣	花蓮石梯坪	9	11
10	新北市	瑞芳鎮深澳漁港外礁	9	11
11	新北市	鶯歌石	7	9
12	基隆市	海洋大學小艇碼頭	6	7
13	新北市	貢寮鄉美豔山	6	6
14	新北市	萊萊磯釣場	6	6
15	新北市	貢寮鄉濱海公路 112k(馬崗)	5	7

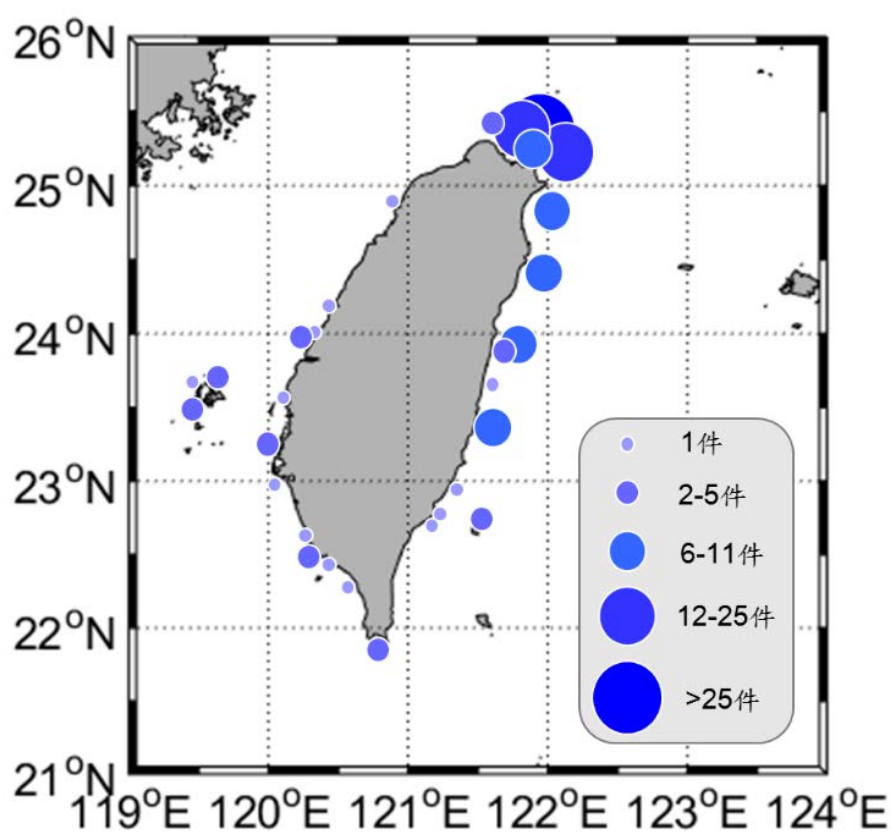


圖 2-3 台灣海岸發生瘋狗浪事件分布位置圖 (資料時間：2000－2015)

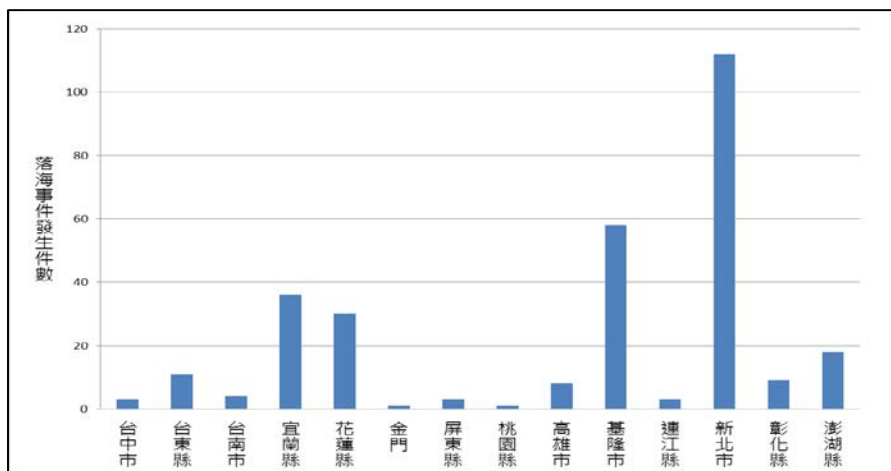


圖 2-4 台灣各縣市海岸地區發生瘋狗浪事件次數統計
(資料時間：2000 – 2015)

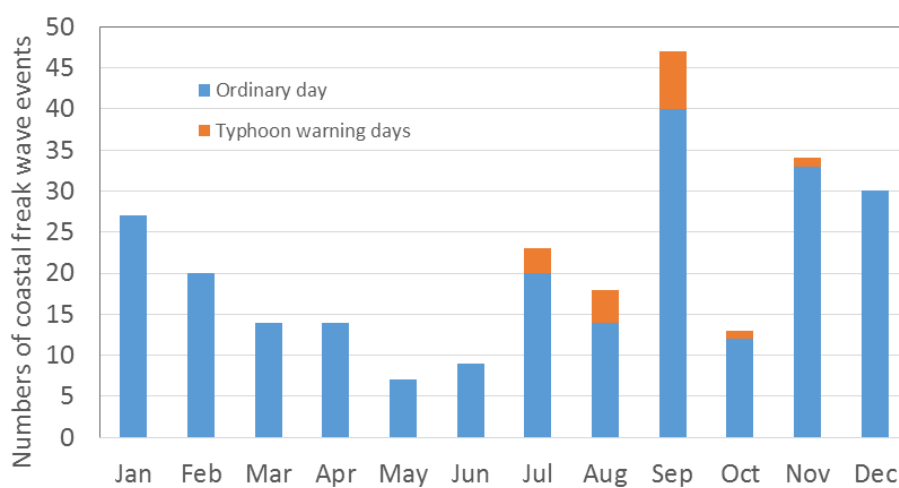


圖 2-5 台灣海岸地區發生瘋狗浪事件之月份分布圖，其中橘色為發生在颱風警報期間案例。(資料時間：2000 – 2015)

第三章 實測外洋異常波浪分析

本研究使用台灣週遭海域波浪實測資料，進行異常波浪探勘並統計其分析結果，預期對實際海洋中發生之異常波浪能有更多的了解。前三年計畫已分別完成 11 個測站的異常波浪探勘，本年度預計針對小琉球、龜山島、金門、澎湖和台東等浮標進行異常波浪探勘，完成後則合計完成了環島 16 測站的實測異常波浪探勘工作，包含了資料浮標站和底碇式超音波波浪站，各站的異常波浪探勘結果如附錄光碟所示。

3-1 異常波浪分析與浮標資料品管方法

本研究分析實測波浪資料，藉此了解台灣周圍海域異常波浪的發生情形，分析方法延續第一年度研究成果，選用目前被廣泛使用的異常指數(Abnormal Index, AI)。Sand et al. (1990) 指出，當某一個波高大於示性波高兩倍以上者，此波即稱為異常波浪，假設在一次觀測中出現一個異常波浪，則該異常波浪必為最大波高。Kharif et al. (2009) 也提出相同的定義，並稱之為異常指數，如式 (3-1)，作為判斷異常波浪之依據，式中 H 表示波浪波高，也就是說 $AI \geq 2$ ，該波浪即為異常波浪。

$$AI \geq 2 \quad \text{where} \quad AI = H / H_s \quad (3-1)$$

式(3-1)也是目前國際上最常使用的異常波浪定義 (Dysthe et al., 2008; Stansell, 2004; Donelan and Magnusson, 2005; Müller and Garrett, 2007)，根據此定義，異常波浪僅是相對於當時海況較大的波浪，這並非說明此異常波浪必定是大波浪，在風平浪靜時，也有可能 50 公分高的波浪就滿足了前述異常波浪的定義，但這類型波高小的異常波浪即使瞬間發生，其威脅性也不大，大部分的海上運行船隻都可以承受，真正會造成危害的異常波浪通常是數公尺以上的大波，在發生的瞬間，即便是大型貨輪或遊輪也可能遭受損壞。根據本計畫前三年蒐集船難事件發生時之海象資料，有 70% 的船難都發生在 1 公尺以上，因此本計畫除採用廣泛的異常波浪條件 $AI \geq 2.0$ 外，再增加示性波高超過 1 公尺(即異常波浪波高超過 2 公尺)之條件，符合這兩條件之異常波浪稱之為危險異常波浪(Dangerous freak wave, DFW)，後文本研究分析所稱之異常波浪均屬危險異常波浪。

本研究分析之水位資料係由資料浮標所記錄之加速度資料轉換而得，資料浮標量測波浪的方法為藉由浮標隨著表面波浪的運動，紀錄浮標體的三軸加速度、

俯仰(Pitch)和翻滾(Roll)等傾角，透過方向波譜(Directional spectrum)理論獲得波浪能譜，再積分求得波高、週期等波浪參數。本研究分析異常波浪的水位變化資料係由前述的加速度資料轉換獲得(Lee et al., 2011; Wu et al., 2010)，得到之水位變化資料可以零切法(zero crossing)得到個別波浪，本計畫於研究第三年期間已證明以零上切法或零下切法進行異常波浪統計分析，對長期的統計結果影響並不大。

浮標加速度資料進行轉換分析前，須進行資料品管，首先針對資料完整度進行篩選，資料浮標每小時量測 10 分鐘加速度資料，取樣頻率為 2Hz，因此每筆完整的資料長度應為 1200 個數據點，若資料點數不足，會導致水位轉換結果異常，因此本文將回傳資料點數未達 1200 點者刪除不予分析。

3-2 分析資料

本研究分析對象為中央氣象局設置於台灣環島海域的資料浮標實測波浪資料，中央氣象局於 1997 年正式開始第一個作業化資料浮標的運作迄今，加上與水利署聯合監測，資料浮標測站遍布台灣四周海域。本計畫前三年分析十個浮標站一個波浪站之異常波浪，分析測站包含了龍洞、新竹、台東外洋、蘇澳、花蓮、鵝鑾鼻、七股、東沙、馬祖和台東浮標以及東吉島波浪站，本年度預計新增五個浮標站的分析，分別為台東、龜山島、金門、澎湖和小琉球等浮標，上述測站位置與背景資料如圖 3-1 與表 3-1 所示，浮標資料選取時間均自設站開始迄 2014 年底為止，新的東吉島波浪站自 2013 年 5 月開始運作，本文分析 2013 年 5 月到 2015 年 2 月份資料，該測站為水底超音波連續觀測的測站，使用的儀器為日本 Sonic 公司生產的 USW-1000 方向波浪觀測儀，觀測項目包含潮位變化、水位變化與海流，運作方式為 24 小時連續觀測。本文假設在不同的水域與地文環境下，異常波浪發生的機制與機率可能不同，因此選擇探勘不同水域測站之波浪資料並統計分析異常波浪發生情形。

表 3-1 本計畫分析之測站資料統計

測站	水深 (公尺)	資料期間	觀測筆數	原始資料 回傳筆數	品管後有效之 資料筆數
龍洞浮標	30	1998-2014	105820	100021	98864
新竹浮標	17	1997-2014	102111	94183	92024
台東外洋浮標	5000	2006, 2008, 2009-2014	31643	22,072	19591
鵝鑾鼻浮標	40	2000-2014	99449	81974	81845
花蓮浮標	21	1997-2014	127889	104657	99640
東沙浮標	3000	2010-2014	35592	24498	23537
七股浮標	18	2006-2014	70291	50668	50658
基隆浮標	40	2012-2014	18812	16688	16675
蘇澳浮標	20	1999-2014	99449	90974	86705
馬祖浮標	58	2010-2014	36127	32318	29660
東吉島波浪站	20	2013/5- 2015/2	42050	42050	41105
澎湖浮標*	26	2006-2014	64887	63950	63945
台東浮標*	30	2010-2014	36127	32318	32318
金門浮標*	25	2000-2014	101178	75204	73818
龜山島浮標*	28	2002-2014	105820	100021	76050
小琉球浮標*	82	2003-2014	95784	85324	85308

*本年新增分析測站

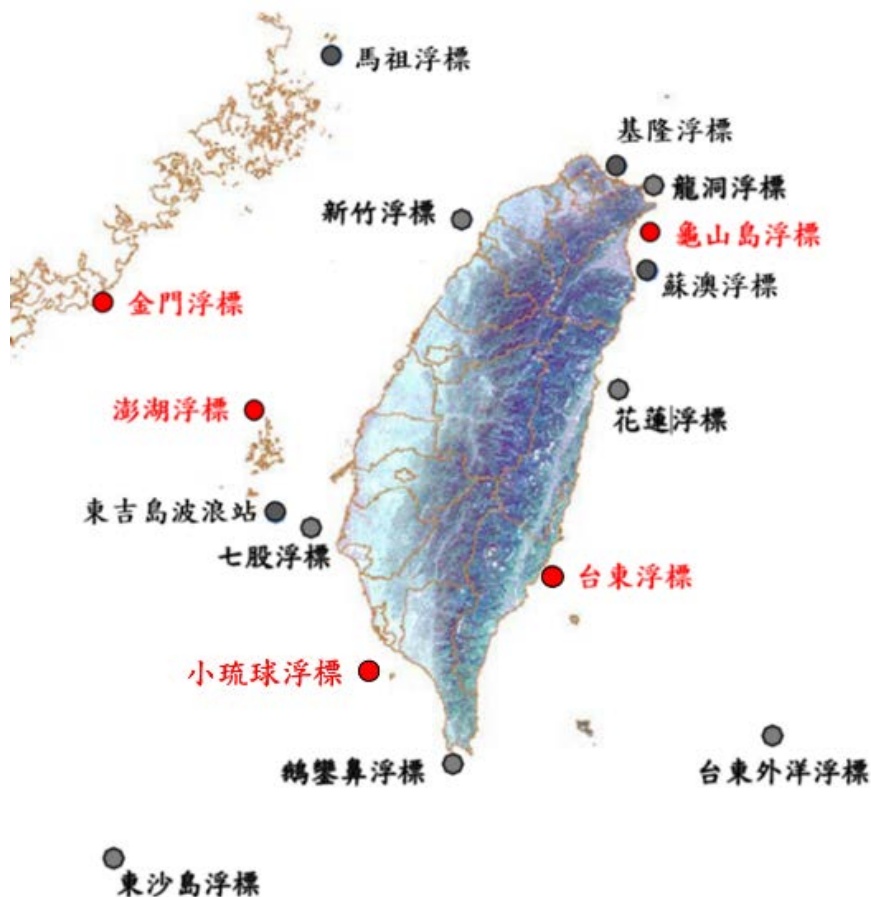


圖 3-1 本研究分析測站位置圖(紅色為本年度新增測站位置)

3-3 異常波浪探勘與分析

危險異常波浪的探勘與分析係以前述的AI指數以及示性波高做為判斷依據，所有測站異常波浪探勘結果詳如附錄光碟，附錄中之異常波浪清單中同時也列出該筆異常波浪水位變化之偏態(skewness)、峰度(kurtosis)，以及異常波浪個別波波形之垂直對稱參數(VMA)、水平對稱參數(HMA)等波浪參數，提供相關研究參考。

3-3-1 異常波浪探勘結果與發生機率

本研究分析 16 個波浪測站實測資料，各測站分析所得之危險異常波浪前十大 AI 案例如表 3-2 至表 3-17 所示，各測站最大 AI 的案例分別繪圖如圖 3-2 至圖 3-17 所示。其中最大 AI 案例發生在澎浮浮標，該案例 AI 值為 4.99，發生時間是 2009/1/2 05:00，當時示性波高 3.45 m，異常波高達 12.82m。

本年度新增的五個浮標測站所觀測到的危險異常波浪分析結果說明如下：澎湖浮標水深位於 26.6 公尺處，9 年觀測期間(2006-2014)合計有 63,945 筆通過品管之波浪資料，其中探勘得危險異常波浪 733 筆，計算其發生機率為 11.4×10^{-5} ；金門浮標水深位於 25 公尺處，15 年觀測期間(2000-2014)合計有 73,818 筆通過品管之波浪資料，探勘得危險異常波浪 486 筆，其發生機率為 6.47×10^{-5} ；台東浮標則位於水深約 30 公尺處，5 年觀測期間(2010-2014)有 32,318 筆通過品管之波浪資料，共探勘得危險異常波浪 234 筆，發生機率為 8.81×10^{-5} ；龜山島浮標位於水深約 39 公尺處，13 年觀測期間(2002-2014)合計有 76,050 筆通過品管之波浪資料，共探勘得危險異常波浪 338 筆，發生機率為 4.83×10^{-5} ；小琉球浮標則位於水深約 82 公尺處，12 年觀測期間(2003-2014)合計有 85,308 筆通過品管之波浪資料，共探勘得危險異常波浪 269 個，計算其發生機率為 3.16×10^{-5} 。

四年來合計 16 個測站的異常波浪探勘結果如表 3-18 所示，16 個測站的觀測時間合計約 181 年，累積 983,270 筆觀測資料，於 97,684,985 個波浪中發現了 6883 個危險異常波浪，分析各站的危險異常波浪發生機率介於 3.16×10^{-5} - 13.4×10^{-5} 之間，平均為 7.05×10^{-5} 。由於測站所處的水域不同，受到海氣象特性、水深、地形等因素，影響了異常波浪的發生機率。分析結果顯示，隨著水深越深、愈外海，危險異常波浪發生的機率越高，如在台東外洋浮標處的危險異常波浪發生機率為 13.4×10^{-5} ，也就是說平均約每 7500 個波就可能出現一個超過 2.0m 高度的危險異常波浪，以平均週期 8 秒來估算，該地點平均每天會出現 1.44 個危險異常波浪。此外，本文特別探討颱風期間的危險異常波浪發生機率，本文定義颱風期間為颱風中心與資料浮標之間的距離小於 1 倍七級暴風半徑的期間，統計颱風期間危險異常波浪發生機率如表 3-18 所示，發現颱風期間發生異常波浪的機率大於非颱風期間者，但未能發現其增加量與測站參數有具體關係，此結果顯示了，在颱風期間，除了惡劣的海象以外，突發性的大浪亦時常發生，對海上的船隻的危害相當地大。

表 3-2 花蓮浮標前十名 AI 紀錄

Rank	AI	Corr. Time
1	3.27	2009/11/17 15:00
2	3.21	2011/8/4 03:00
3	3.07	2011/8/4 10:00
4	3.06	2011/8/4 14:00
5	2.95	2011/8/5 10:00
6	2.85	2005/12/5 06:00
7	2.82	2010/10/28 22:00
8	2.76	2008/9/28 13:00
9	2.73	2007/8/18 03:00
10	2.68	2011/6/24 14:00

表 3-3 新竹浮標前十名 AI 紀錄

Rank	AI	Corr. Time
1	2.82	2011/12/16 17:00
2	2.75	2007/10/6 05:00
3	2.57	2012/2/20 00:00
4	2.56	2008/11/14 16:00
5	2.55	2000/6/11 02:00
6	2.54	2012/12/24 04:00
7	2.52	2014/3/21 10:00
8	2.52	2005/11/15 12:00
9	2.52	2007/1/26 15:00
10	2.51	2014/2/10 01:00

表 3-4 龍洞浮標前十名 AI 紀錄

Rank	AI	Corr. Time
1	2.76	2005/8/31 20:00
2	2.69	2008/2/18 10:00
3	2.67	2001/2/13 20:00
4	2.60	2013/4/22 15:00
5	2.58	2009/12/6 05:00
6	2.56	2004/12/4 11:00
7	2.55	2007/3/10 11:00
8	2.54	2013/12/15 12:00
9	2.52	2007/8/19 14:00
10	2.49	2010/10/17 00:00

表 3-5 龜山島浮標前十名 AI 紀錄

Rank	AI	Corr. Time
1	4.12	2003/9/1 22:00
2	3.13	2008/9/28 17:00
3	3.02	2007/10/6 10:00
4	2.79	2013/7/13 14:00
5	2.72	2007/8/18 07:00
6	2.71	2013/7/13 11:00
7	2.64	2010/9/1 11:00
8	2.55	2013/7/13 00:00
9	2.43	2006/3/4 17:00
10	2.42	2012/10/12 11:00

表 3-6 七股浮標前十名 AI 紀錄

Rank	AI	Corr. Time
1	3.11	2013/3/11 01:00
2	3.03	2008/11/19 17:00
3	2.89	2013/10/16 20:00
4	2.78	2008/11/28 01:00
5	2.69	2006/12/21 12:00
6	2.65	2013/2/19 20:00
7	2.64	2014/12/12 21:00
8	2.60	2009/1/8 05:00
9	2.59	2013/10/25 11:00
10	2.56	2012/1/25 07:00

表 3-7 小琉球浮標前十名 AI 紀錄

Rank	AI	Corr. Time
1	2.59	2010/10/22 21:00
2	2.51	2009/7/26 07:00
3	2.49	2008/9/30 17:00
4	2.48	2010/10/22 23:00
5	2.46	2011/8/31 18:00
6	2.43	2006/12/3 15:00
7	2.41	2013/9/22 12:00
8	2.41	2005/8/16 02:00
9	2.39	2006/7/14 07:00
10	2.38	2010/9/20 22:00

表 3-8 蘇澳浮標前十名 AI 紀錄

Rank	AI	Corr. Time
1	3.63	2003/8/4 05:00
2	3.19	2003/9/2 05:00
3	3.09	2014/11/3 05:00
4	2.81	2011/10/3 13:00
5	2.76	1999/10/3 20:00
6	2.59	2011/1/26 03:00
7	2.55	2008/12/11 23:00
8	2.53	2014/12/19 11:00
9	2.52	2004/9/7 09:00
10	2.51	2000/1/16 22:00

表 3-9 鵝鑾鼻浮標前十名 AI 紀錄

Rank	AI	Corr. Time
1	2.80	2009/8/9 00:00
2	2.75	2013/9/21 22:00
3	2.73	2009/8/4 04:00
4	2.72	2004/11/10 04:00
5	2.68	2010/1/25 23:00
6	2.53	2007/10/3 10:00
7	2.53	2010/7/6 05:00
8	2.52	2009/8/11 05:00
9	2.51	2013/10/20 08:00
10	2.44	2007/11/22 13:00

表 3-10 金門浮標前十名 AI 紀錄

Rank	AI	Corr. Time
1	3.99	2006/3/10 20:00
2	2.89	2010/9/20 08:00
3	2.64	2012/2/18 19:00
4	2.63	2007/8/15 20:00
5	2.63	2011/4/19 06:00
6	2.61	2011/3/16 01:00
7	2.57	2008/2/17 20:00
8	2.56	2007/10/4 17:00
9	2.56	2011/11/2 11:00
10	2.56	2011/3/23 18:00

表 3-11 基隆浮標前十名 AI 紀錄

Rank	AI	Corr. Time
1	2.61	2012/10/3 00:00
2	2.47	2012/9/28 15:00
3	2.45	2015/1/19 20:00
4	2.43	2013/3/25 00:00
5	2.36	2014/10/10 04:00
6	2.36	2012/12/18 16:00
7	2.30	2012/11/27 00:00
8	2.30	2014/2/23 07:00
9	2.29	2014/3/13 17:00
10	2.28	2013/11/11 06:00

表 3-12 馬祖浮標前十名 AI 紀錄

Rank	AI	Corr. Time
1	2.61	2012/9/16 01:00
2	2.58	2014/12/23 06:00
3	2.46	2012/9/17 23:00
4	2.46	2013/10/13 20:00
5	2.46	2014/9/14 22:00
6	2.42	2010/12/15 05:00
7	2.42	2013/12/17 04:00
8	2.41	2013/11/21 20:00
9	2.41	2014/7/12 21:00
10	2.39	2011/1/28 18:00

表 3-13 澎湖浮標前十名 AI 紀錄

Rank	AI	Corr. Time
1	4.99	2009/1/2 05:00
2	3.85	2008/9/28 01:00
3	3.72	2009/4/1 21:00
4	3.67	2011/1/9 19:00
5	3.63	2009/1/1 15:00
6	3.55	2009/11/18 06:00
7	3.45	2008/11/25 01:00
8	3.40	2009/11/3 06:00
9	3.32	2009/11/3 07:00
10	3.31	2009/11/17 21:00

表 3-14 台東浮標前十名 AI 紀錄

Rank	AI	Corr. Time
1	2.68	2010/11/17 03:00
2	2.61	2013/8/28 16:00
3	2.51	2010/11/19 22:00
4	2.50	2010/12/6 13:00
5	2.50	2012/3/16 06:00
6	2.42	2010/11/7 09:00
7	2.42	2014/9/14 11:00
8	2.41	2011/2/2 07:00
9	2.39	2011/10/1 19:00
10	2.35	2013/3/5 14:00

表 3-15 台東外洋浮標前十名 AI 紀錄

Rank	AI	Corr. Time
1	3.11	2009/11/2 10:00
2	2.77	2010/10/27 16:00
3	2.55	2012/1/20 18:00
4	2.47	2012/3/26 10:00
5	2.47	2014/7/22 18:00
6	2.43	2011/11/29 00:00
7	2.43	2011/10/8 23:00
8	2.38	2012/6/11 10:00
9	2.37	2011/10/18 04:00
10	2.36	2012/7/27 19:00

表 3-16 東沙浮標前十名 AI 紀錄

Rank	AI	Corr. Time
1	2.75	2011/7/14 22:00
2	2.58	2013/12/1 19:00
3	2.55	2011/10/12 11:00
4	2.48	2012/9/21 17:00
5	2.47	2013/12/13 04:00
6	2.44	2011/4/23 11:00
7	2.42	2011/11/14 10:00
8	2.40	2011/11/26 01:00
9	2.37	2014/8/4 19:00
10	2.37	2012/11/7 11:00

表 3-17 東吉島波浪站前十名 AI 紀錄

Rank	AI	Corr. Time
1	2.98	2015/1/26 10:10
2	2.95	2015/1/27 11:10
3	2.91	2014/12/28 13:30
4	2.82	2014/12/28 08:50
5	2.77	2014/10/2 23:10
6	2.75	2014/12/28 13:50
7	2.70	2014/10/8 05:10
8	2.67	2013/11/26 00:30
9	2.66	2014/10/10 15:10
10	2.65	2014/3/6 15:30

表 3-18 本計畫分析 16 個波浪測站觀測到之危險異常波浪結果統計

測站名稱		新竹	龍洞	花蓮	鵝鑾鼻	台東外洋	東沙	七股	基隆
資料時間		1997-2014	1998-2014	1997-2014	2000-2014	2006,2008,2009 -2014	2010-2014	2006-2014	2012- 2014
記錄筆數		92024	98864	99640	81845	19591	23537	50658	16675
所有 期 間	總波浪數	9918808	8652012	8408194	7235048	1615599	2050447	5316693	1537786
	危險異常波浪個數	572	604	581	441	218	236	477	93
	危險異常波浪發生機率	5.76×10^{-5}	6.98×10^{-5}	6.90×10^{-5}	6.09×10^{-5}	13.4×10^{-5}	11.5×10^{-5}	8.97×10^{-5}	6.04×10^{-5}
僅 颱 風 期 間	颱風期間總波浪數	103693	83499	103608	84319	20730	19857	41685	20084
	危險異常波浪個數	22	22	11	30	9	4	21	4
	危險異常波浪發生機率	21.2×10^{-5}	26.3×10^{-5}	10.6×10^{-5}	35.5×10^{-5}	43.4×10^{-5}	20.1×10^{-5}	50.3×10^{-5}	19.9×10^{-5}
僅 非 颱 風 期 間	非颱風期間總波浪數	9815115	8568513	8304586	7150729	1594869	2030590	5275008	1517702
	危險異常波浪個數	550	582	570	411	209	232	456	89
	危險異常波浪發生機率	5.61×10^{-5}	6.79×10^{-5}	6.86×10^{-5}	5.74×10^{-5}	13.1×10^{-5}	11.4×10^{-5}	8.64×10^{-5}	5.86×10^{-5}
颱風與非颱風期間危險異常波浪 發生機率比值		3.8	3.9	1.5	6.2	3.3	1.8	5.8	3.4

表 3-18(續) 本計畫分析 16 個波浪測站觀測到之危險異常波浪結果統計

測站名稱		馬祖	蘇澳	東吉島波浪站	台東	金門	龜山島	澎湖	小琉球
資料時間		2010-2014	1999-2014	2013/05-015/02	2010-2014	2000-2014	2002-2014	2006-2014	2003-2014
記錄筆數		29660	86705	41105	32318	73818	76050	63945	85308
所有期間	總波浪數	2873601	7445685	10615170	2655736	7462663	6987262	6419134	8491147
	危險異常波浪個數	308	460	798	234	486	338	733	269
	危險異常波浪發生機率	10.7×10^{-5}	6.17×10^{-5}	7.51×10^{-5}	8.81×10^{-5}	6.51×10^{-5}	4.83×10^{-5}	11.4×10^{-5}	3.16×10^{-5}
僅颱風期間	颱風期間總波浪數	15195	84050	24497	26519	39276	67272	63465	20914
	危險異常波浪個數	9	23	2	8	12	27	15	7
	危險異常波浪發生機率	59.2×10^{-5}	27.3×10^{-5}	8.15×10^{-5}	30.1×10^{-5}	30.5×10^{-5}	40.1×10^{-5}	23.5×10^{-5}	33.4×10^{-5}
僅非颱風期間	非颱風期間總波浪數	2858406	7361635	10590637	2629217	7423387	6919990	6355669	8470233
	危險異常波浪個數	299	437	796	226	474	311	718	262
	危險異常波浪發生機率	10.4×10^{-5}	5.93×10^{-5}	7.51×10^{-5}	8.59×10^{-5}	6.38×10^{-5}	4.49×10^{-5}	11.2×10^{-5}	3.09×10^{-5}
颱風與非颱風期間危險異常波浪發生機率比值		5.7	4.6	1.1	3.5	4.8	8.9	2.1	10.8

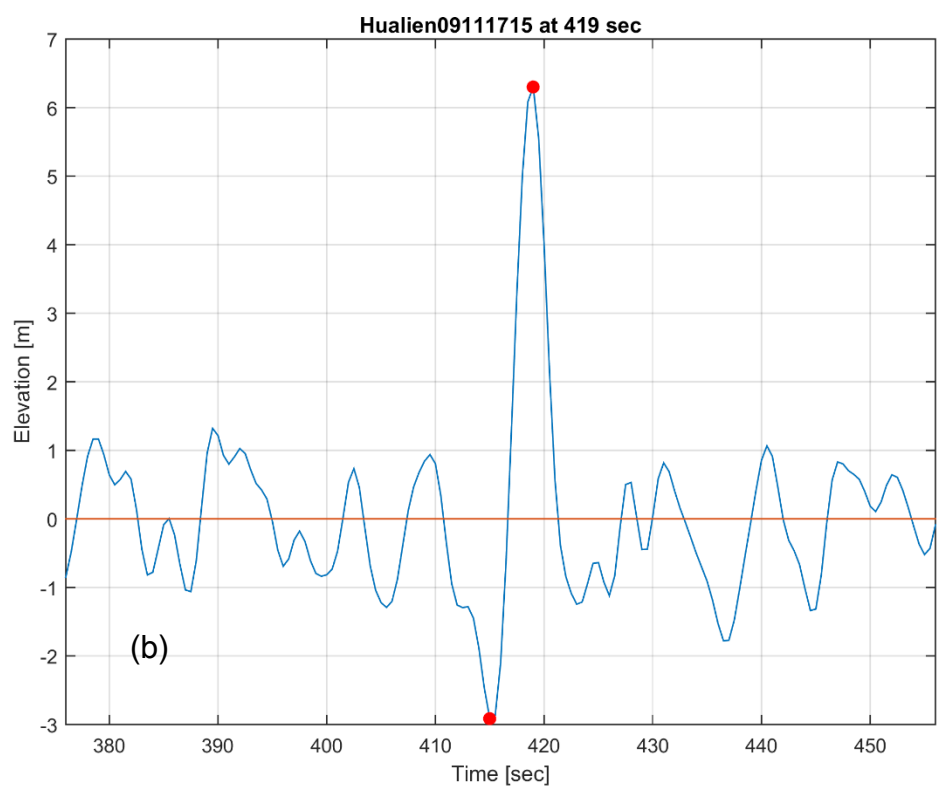
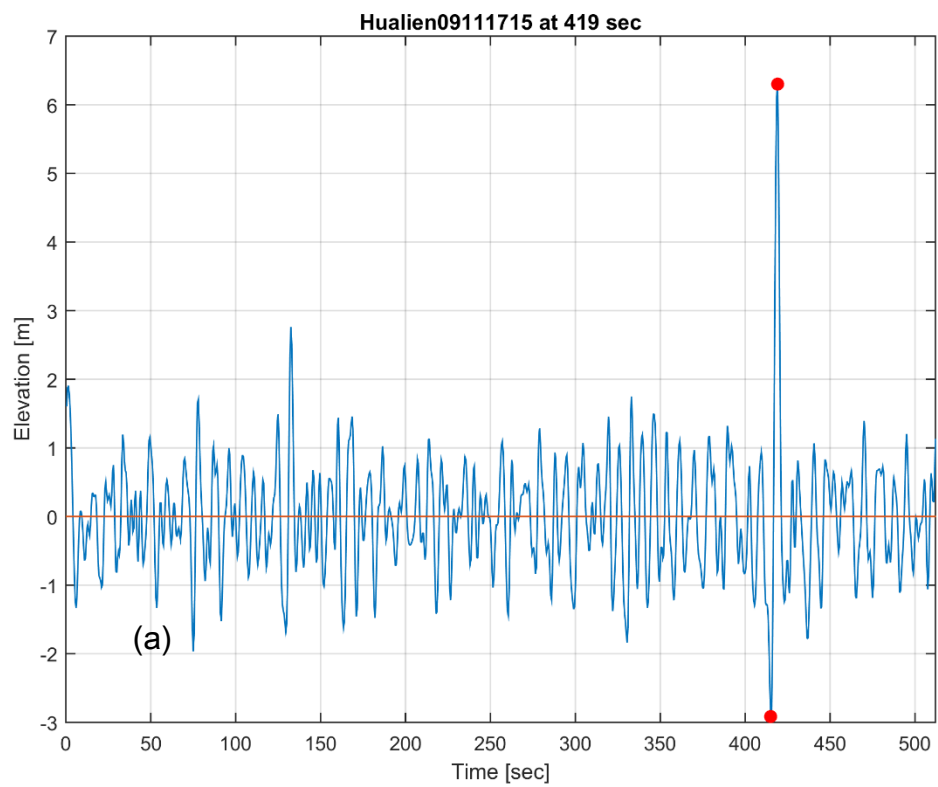


圖 3-2 花蓮浮標最大 AI 異常波浪案例之水位時序列(a)整筆資料 (b)細部圖

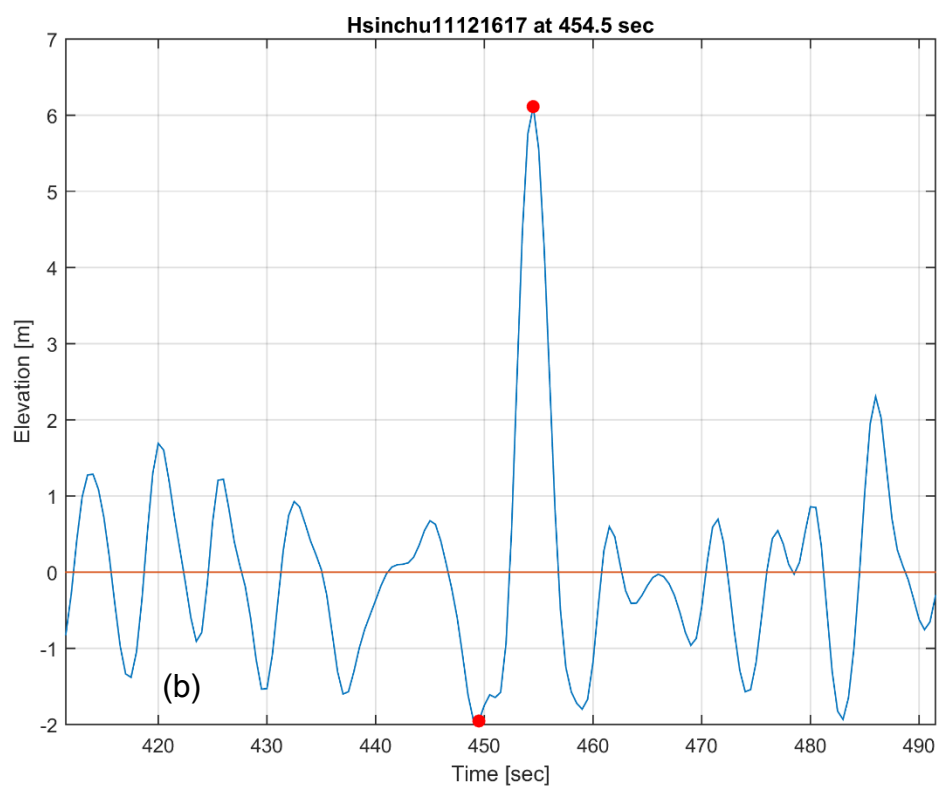
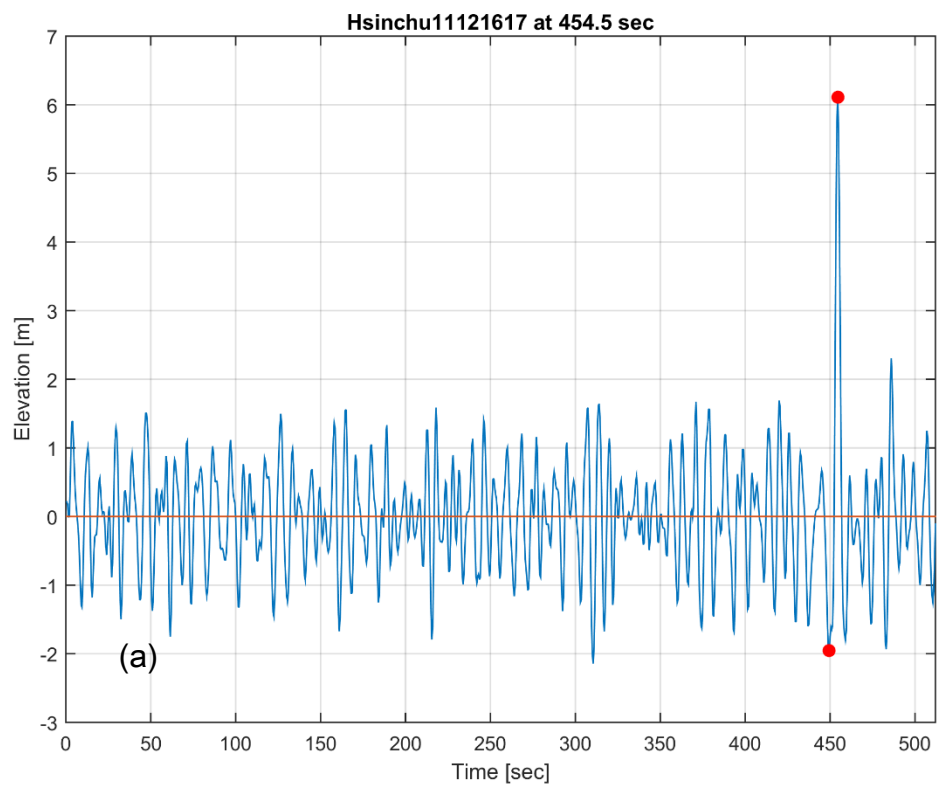


圖 3-3 新竹浮標最大 AI 異常波浪案例之水位時序列(a)整筆資料 (b)細部圖

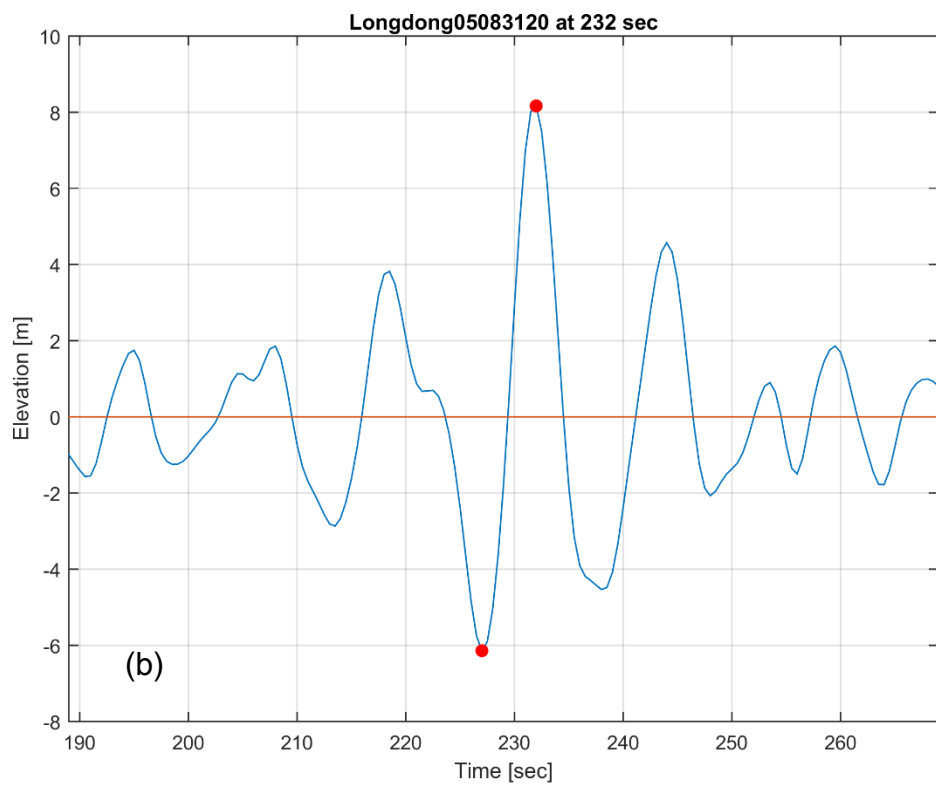
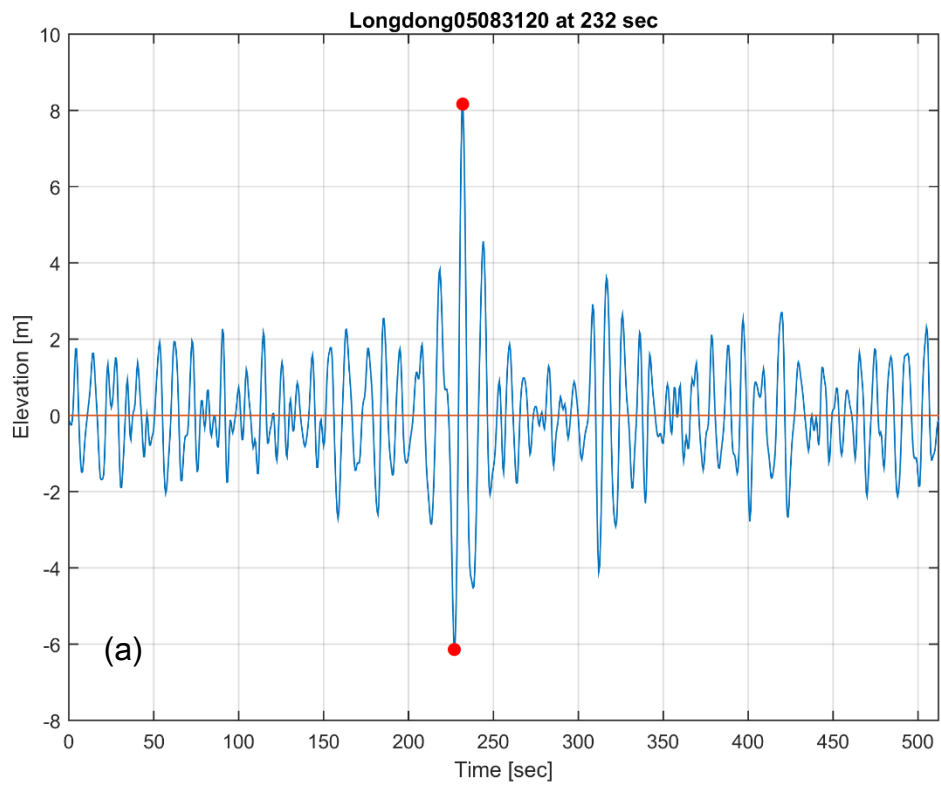


圖 3-4 龍洞浮標最大 AI 異常波浪案例之水位時序列(a)整筆資料 (b)細部圖

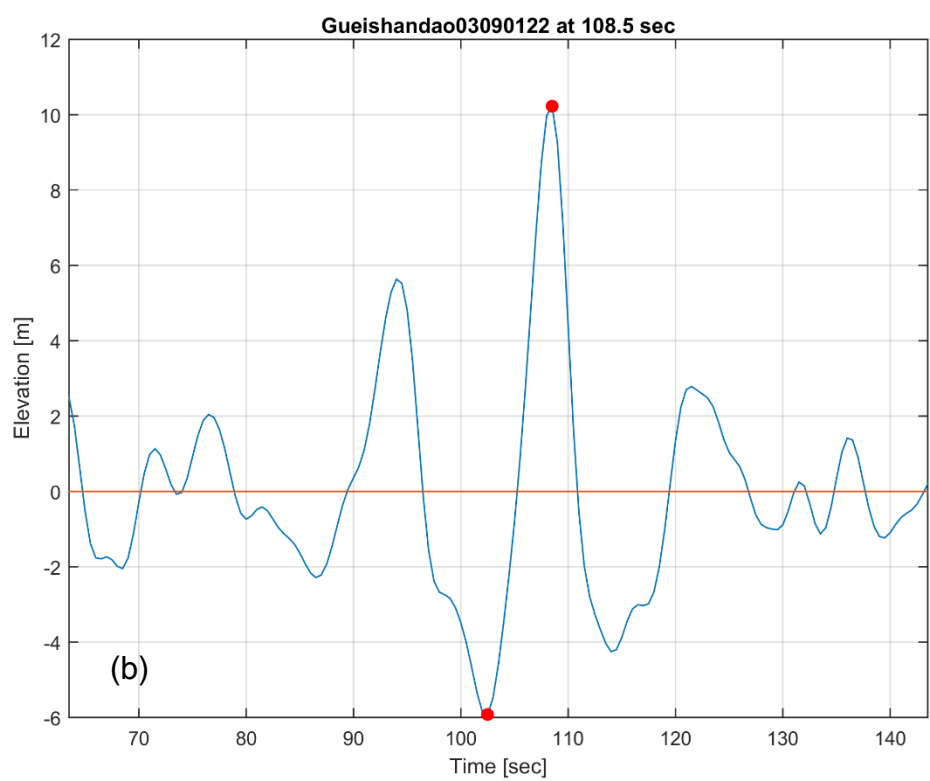
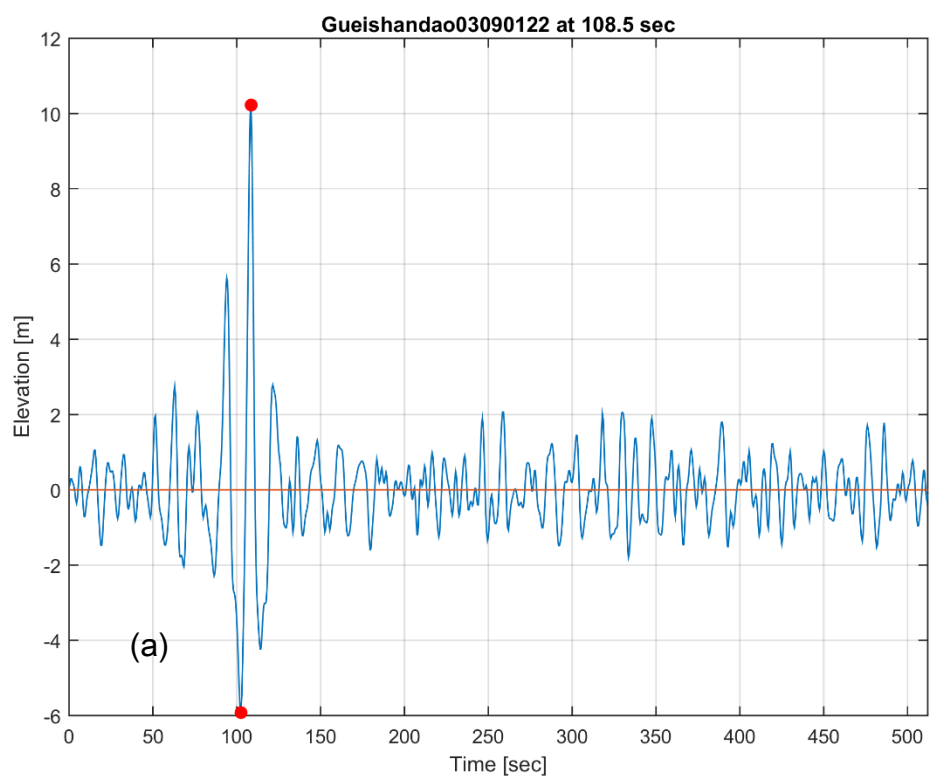


圖 3-5 龜山島浮標最大 AI 異常波浪案例之水位時序列(a)整筆資料 (b)細部圖

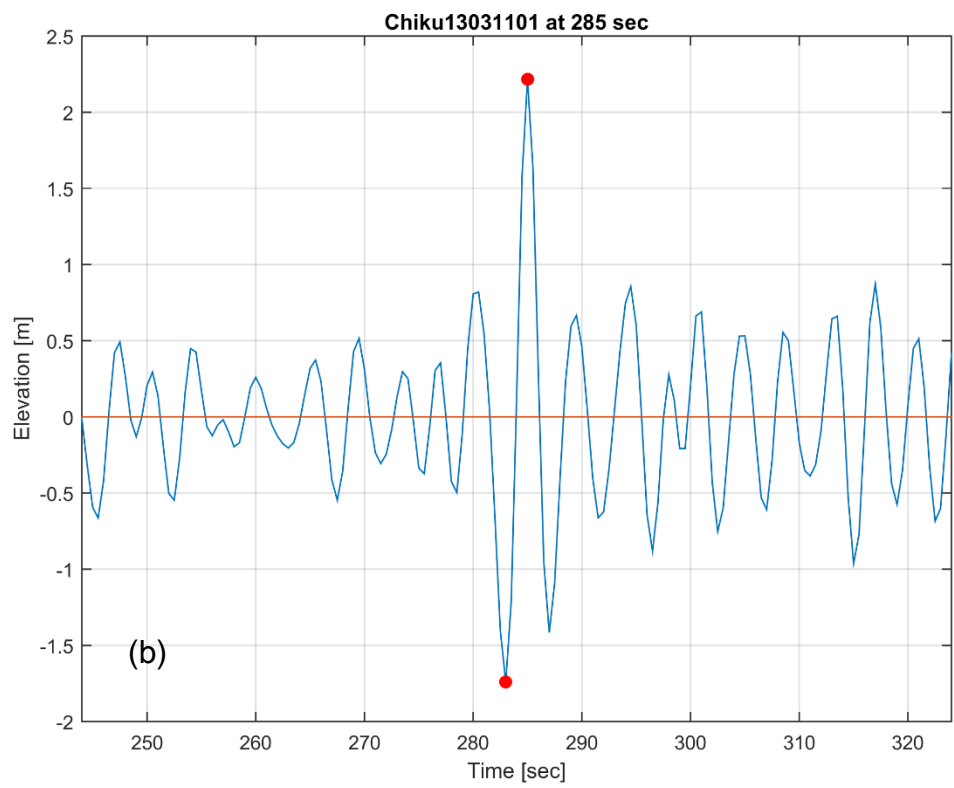
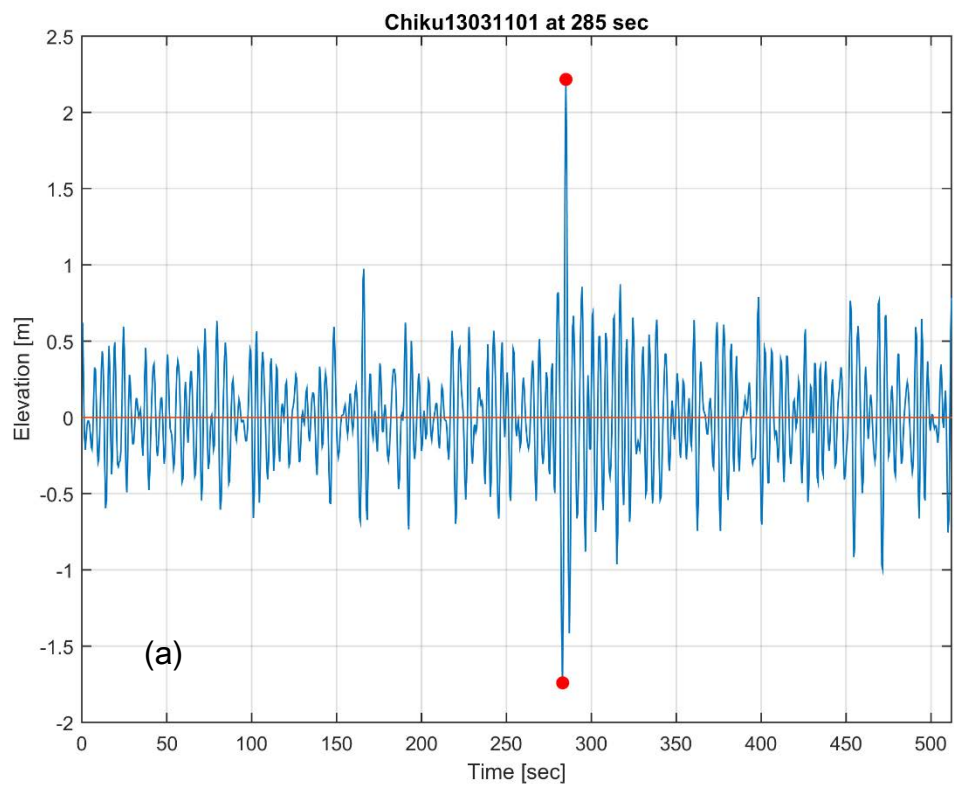


圖 3-6 七股浮標最大 AI 異常波浪案例之水位時序列(a)整筆資料 (b)細部圖

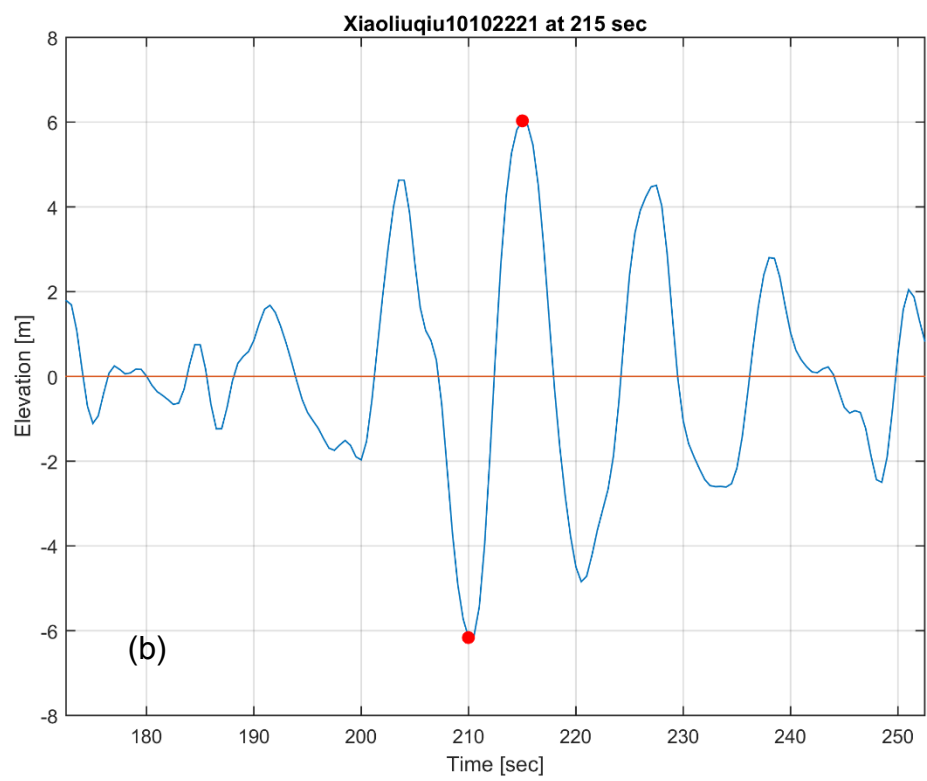
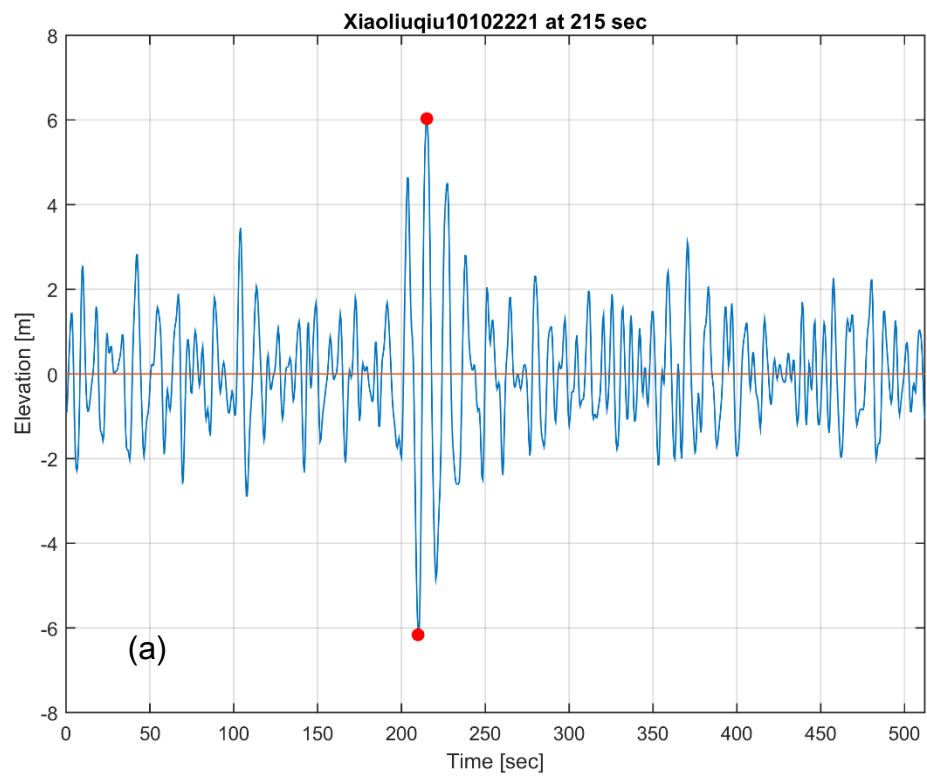


圖 3-7 小琉球浮標最大 AI 異常波浪案例之水位時序列(a)整筆資料 (b)細部圖

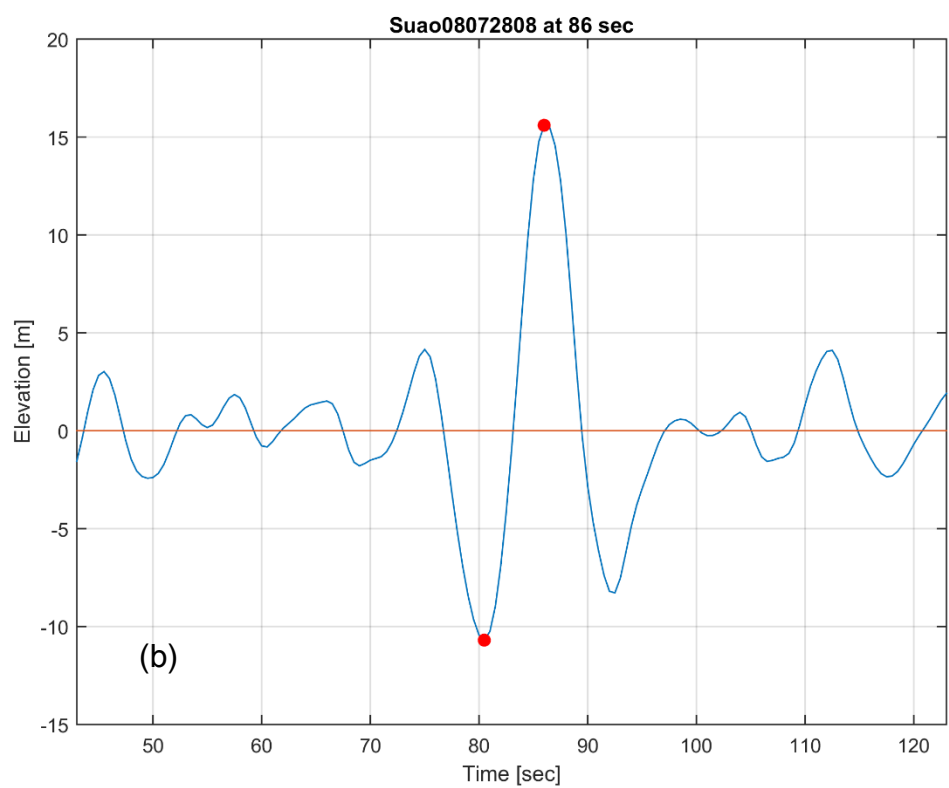
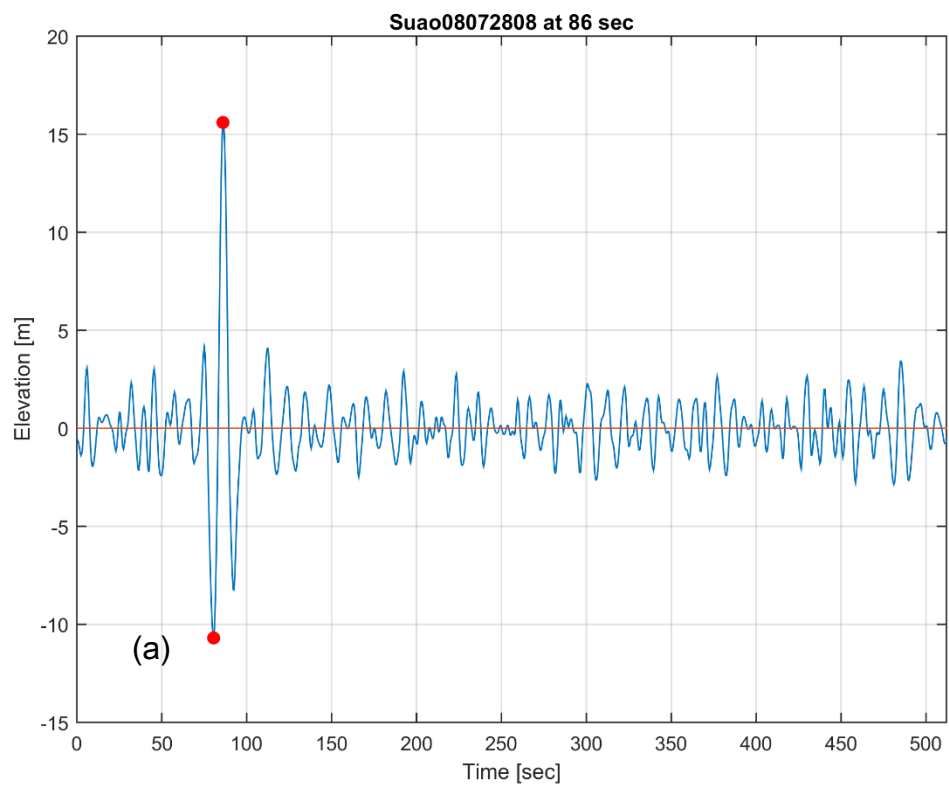


圖 3-8 蘇澳浮標最大 AI 異常波浪案例之水位時序列(a)整筆資料 (b)細部圖

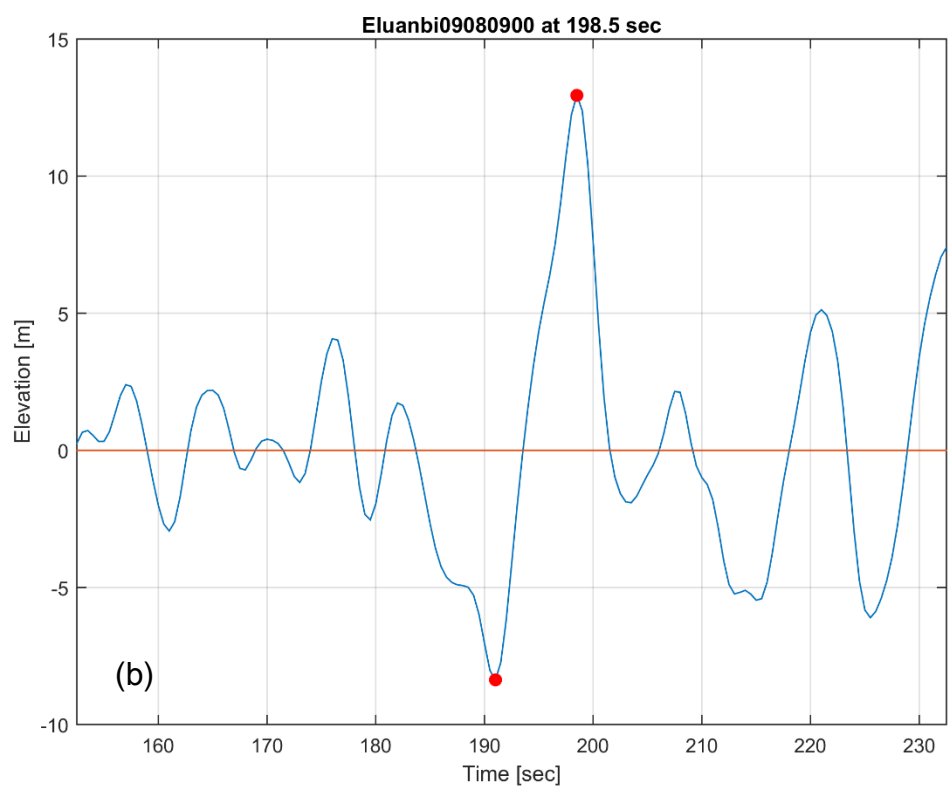
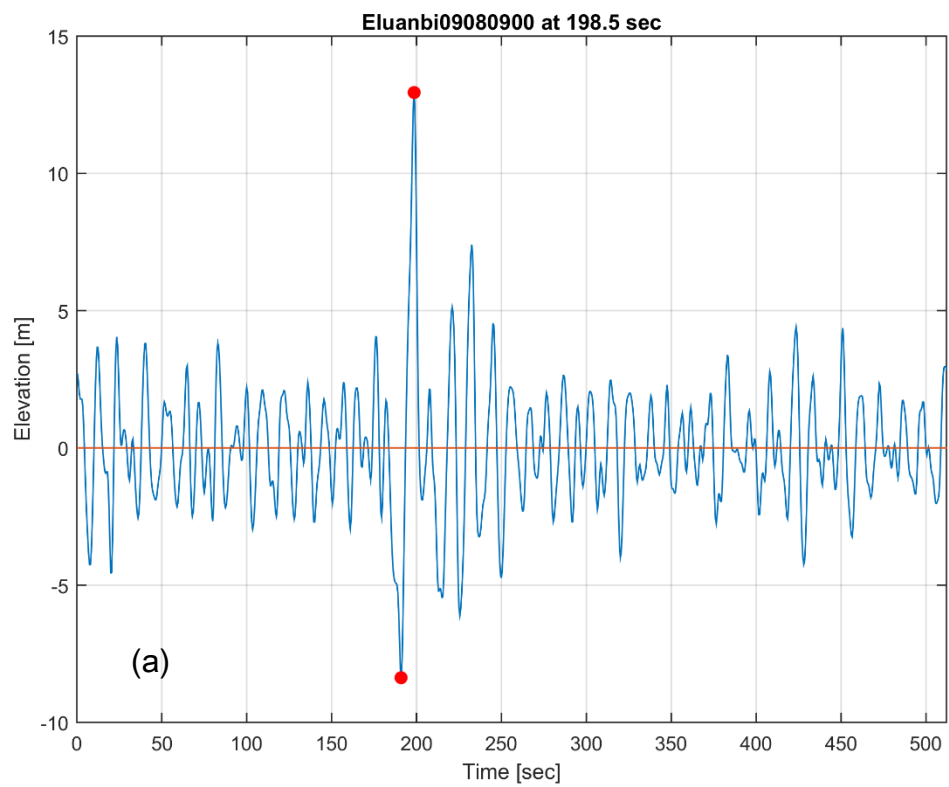


圖 3-9 鵝鑾鼻浮標最大 AI 異常波浪案例之水位時序列(a)整筆資料 (b)細部圖

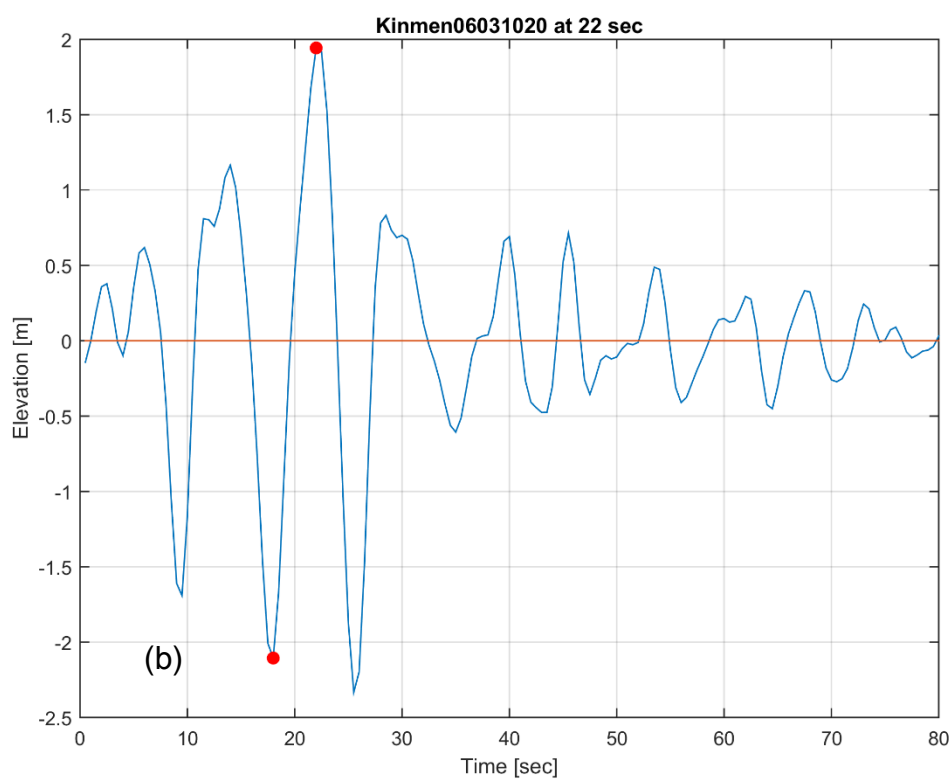
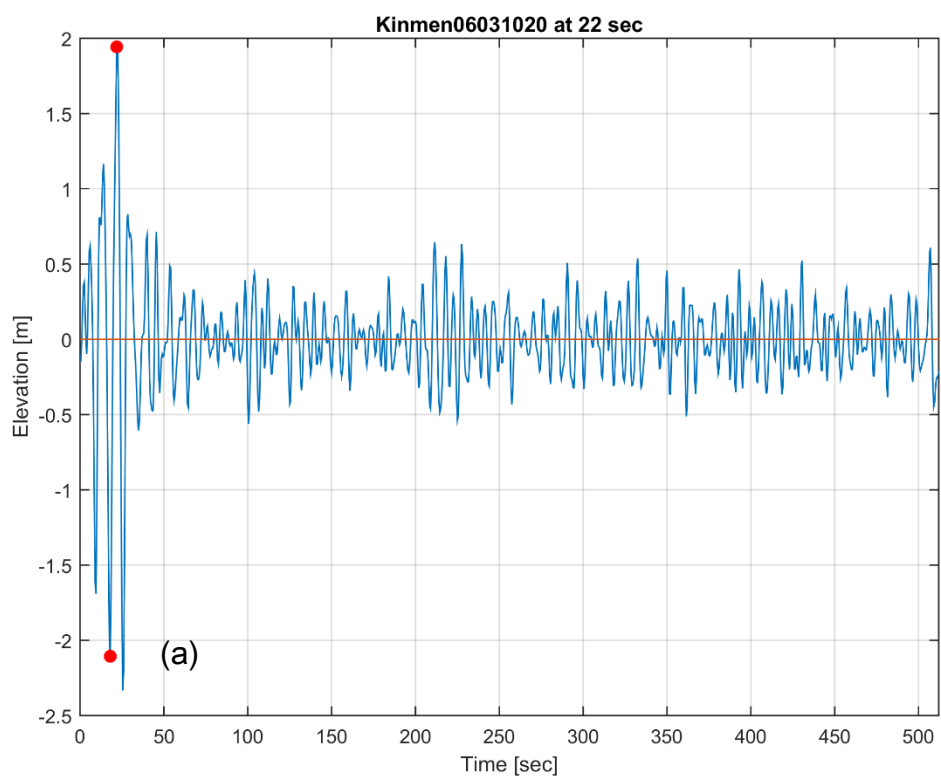


圖 3-10 金門浮標最大 AI 異常波浪案例之水位時序列(a)整筆資料 (b)細部圖

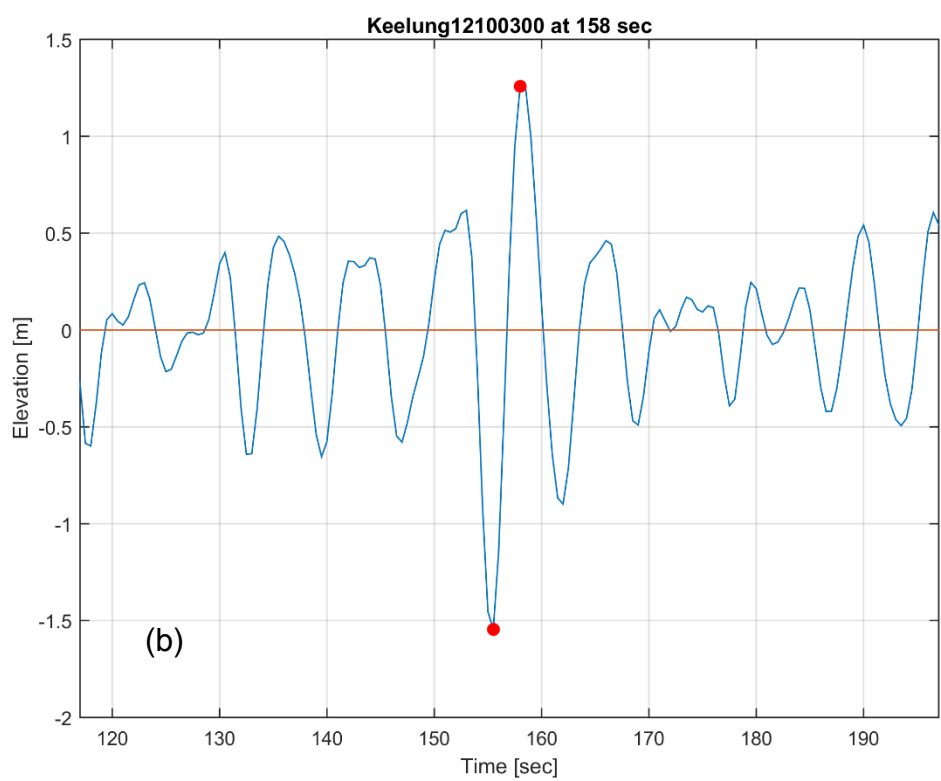
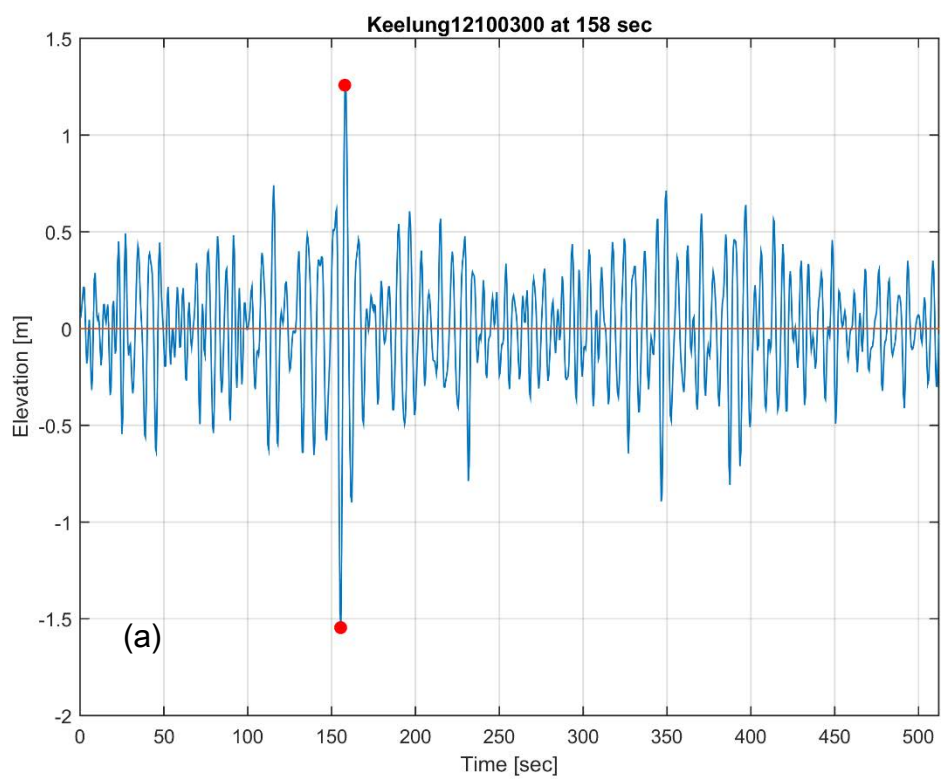


圖 3-11 基隆浮標最大 AI 異常波浪案例之水位時序列(a)整筆資料 (b)細部圖

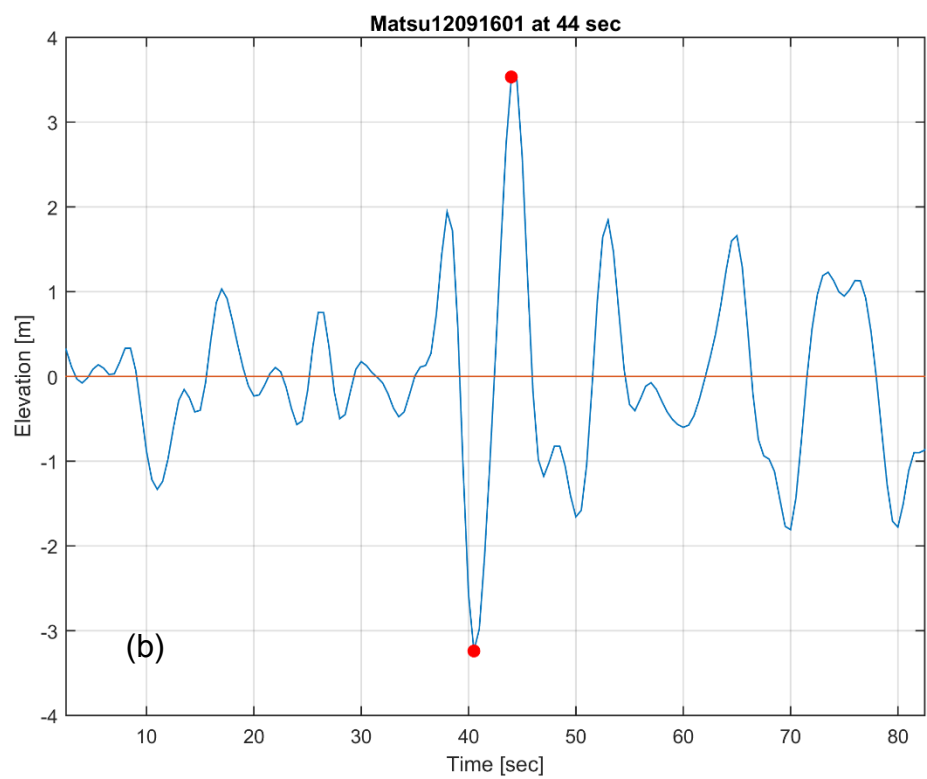
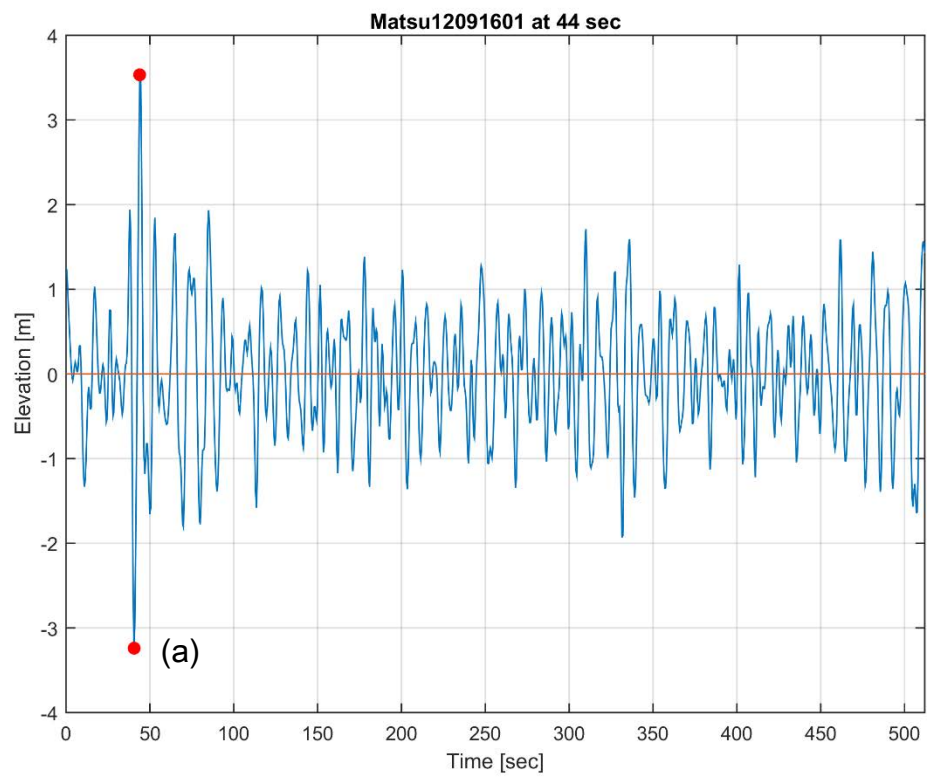


圖 3-12 馬祖浮標最大 AI 異常波浪案例之水位時序列(a)整筆資料 (b)細部圖

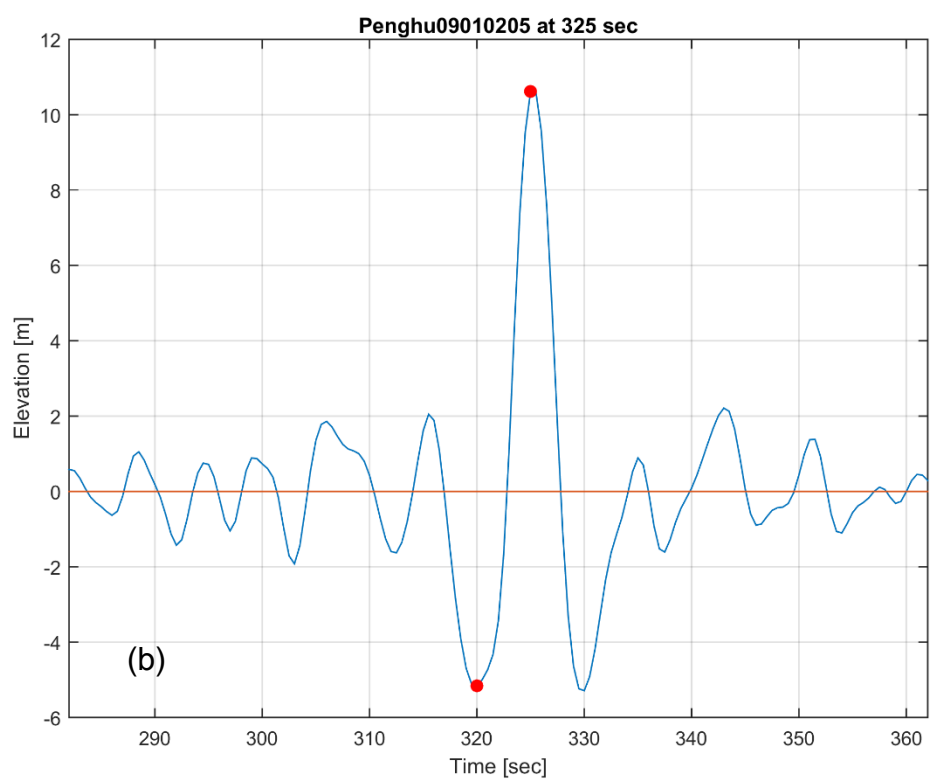
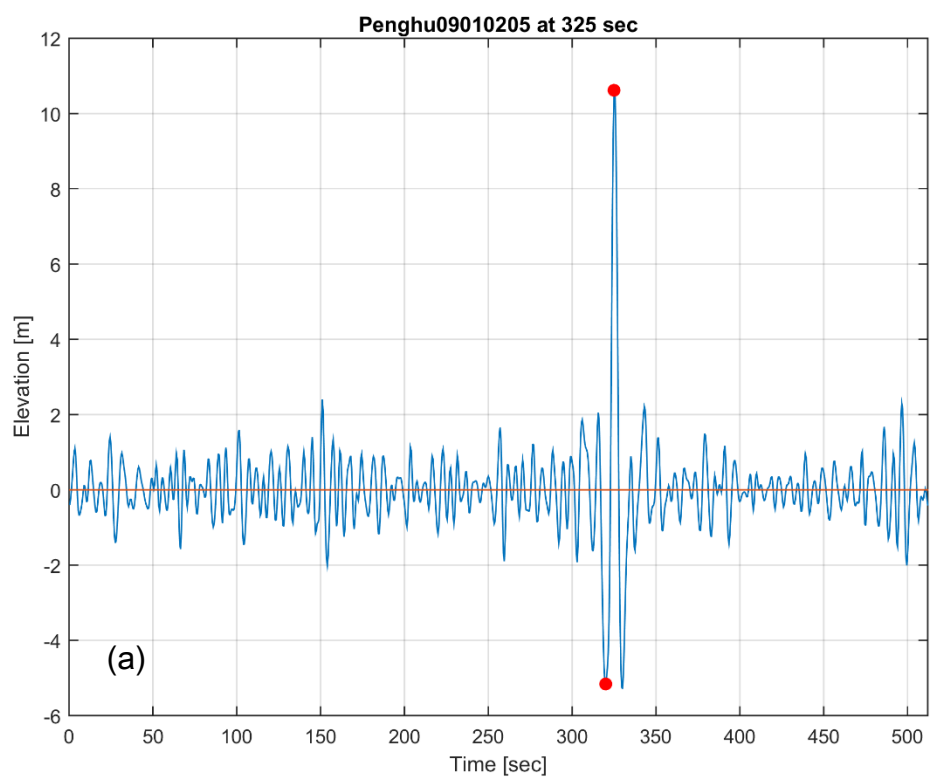


圖 3-13 澎湖浮標最大 AI 異常波浪案例之水位時序列(a)整筆資料 (b)細部圖

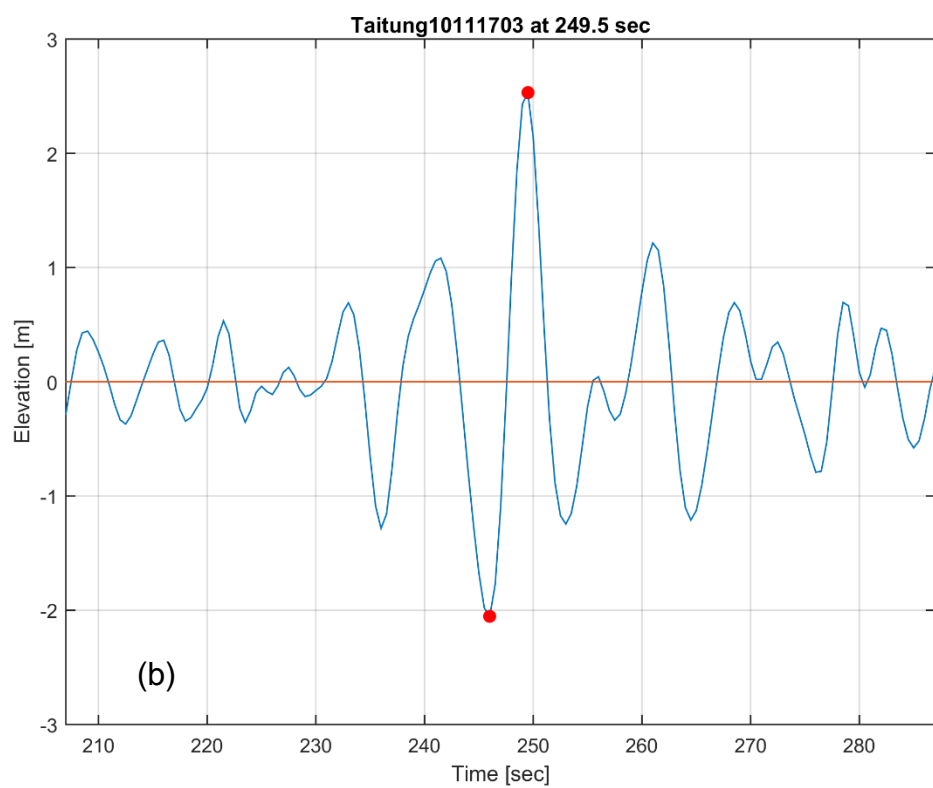
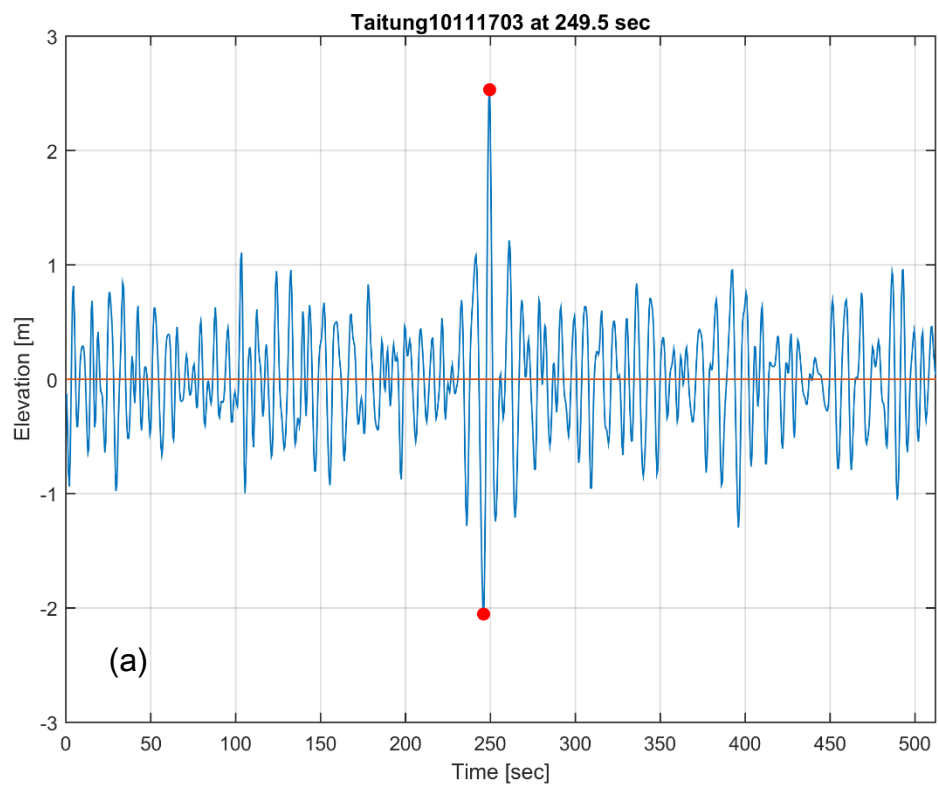


圖 3-14 台東浮標最大 AI 異常波浪案例之水位時序列(a)整筆資料 (b)細部圖

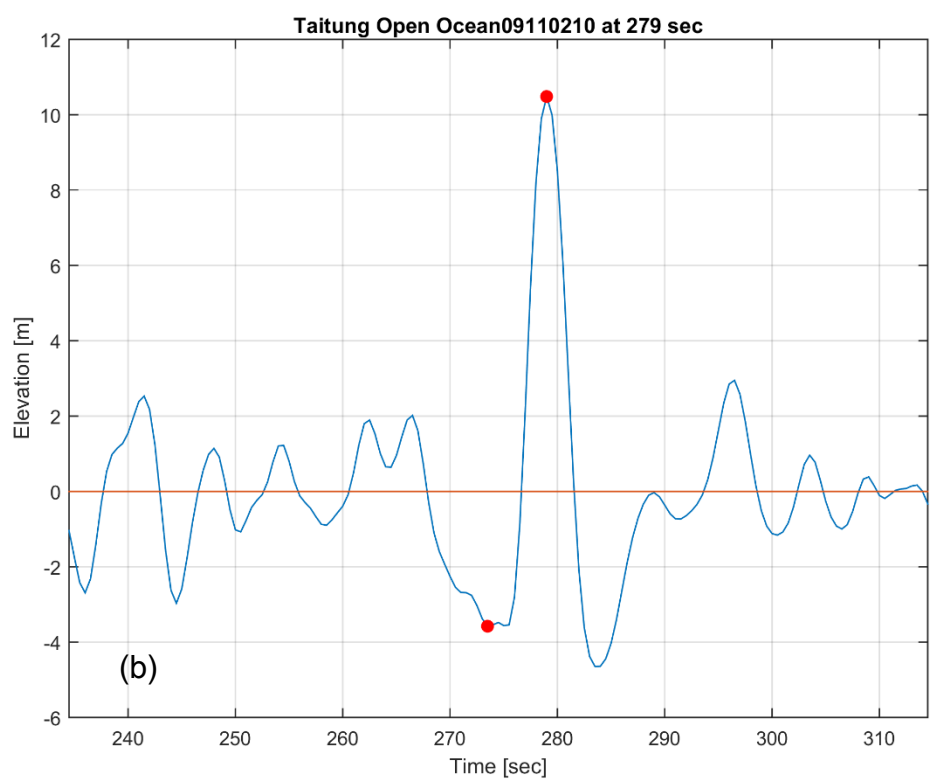
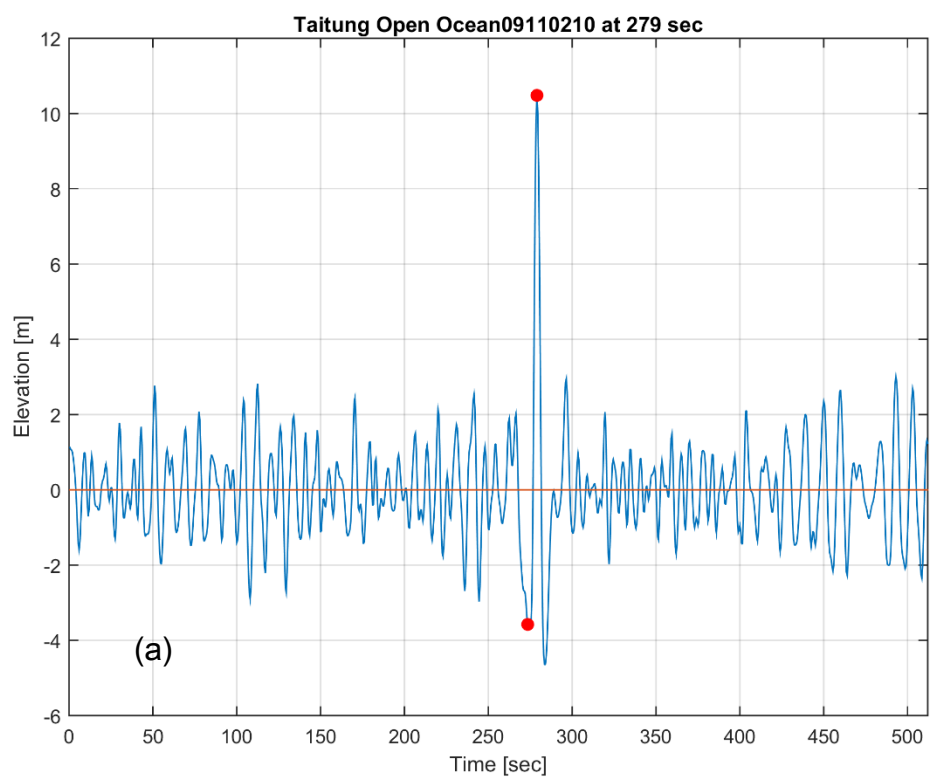


圖 3-15 台東外洋浮標最大 AI 異常波浪案例之水位時序列(a)整筆資料 (b)細部圖

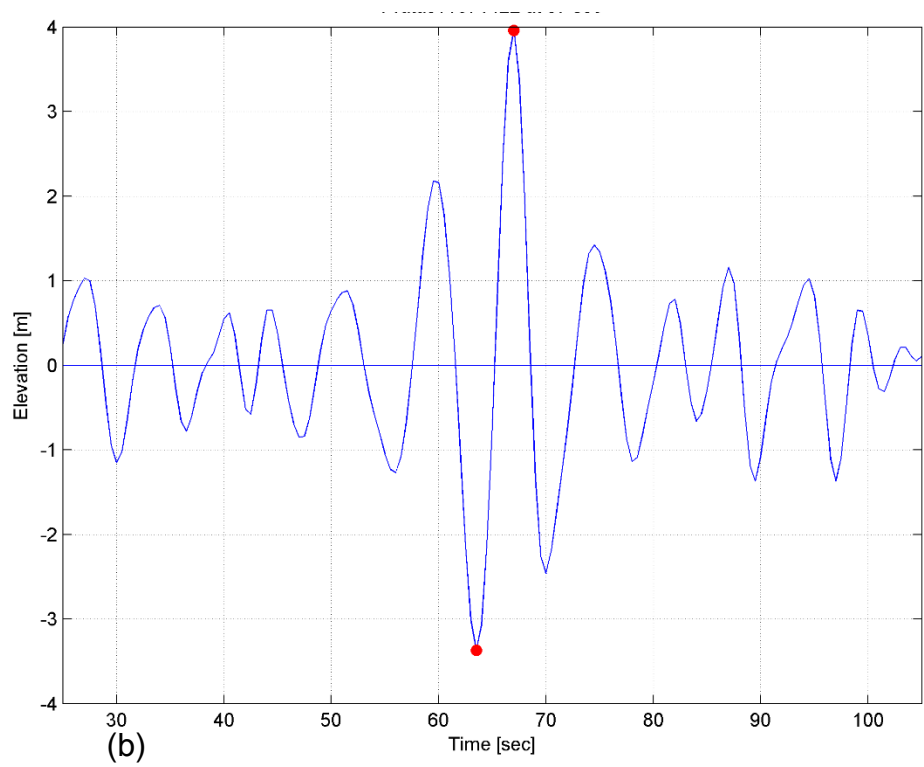
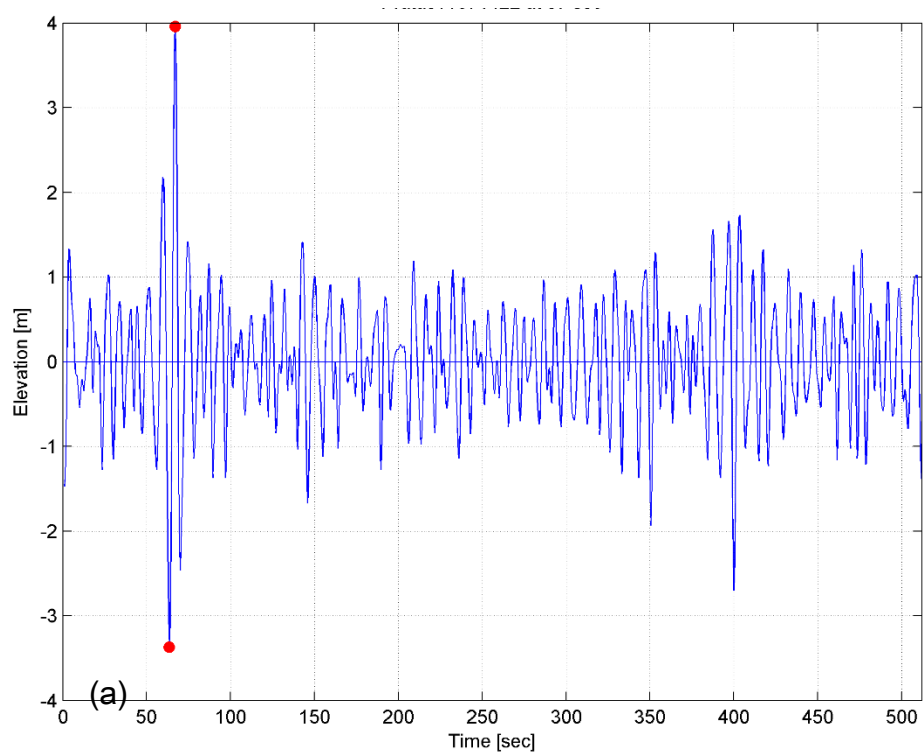


圖 3-16 東沙浮標最大 AI 異常波浪案例之水位時序列(a)整筆資料 (b)細部圖

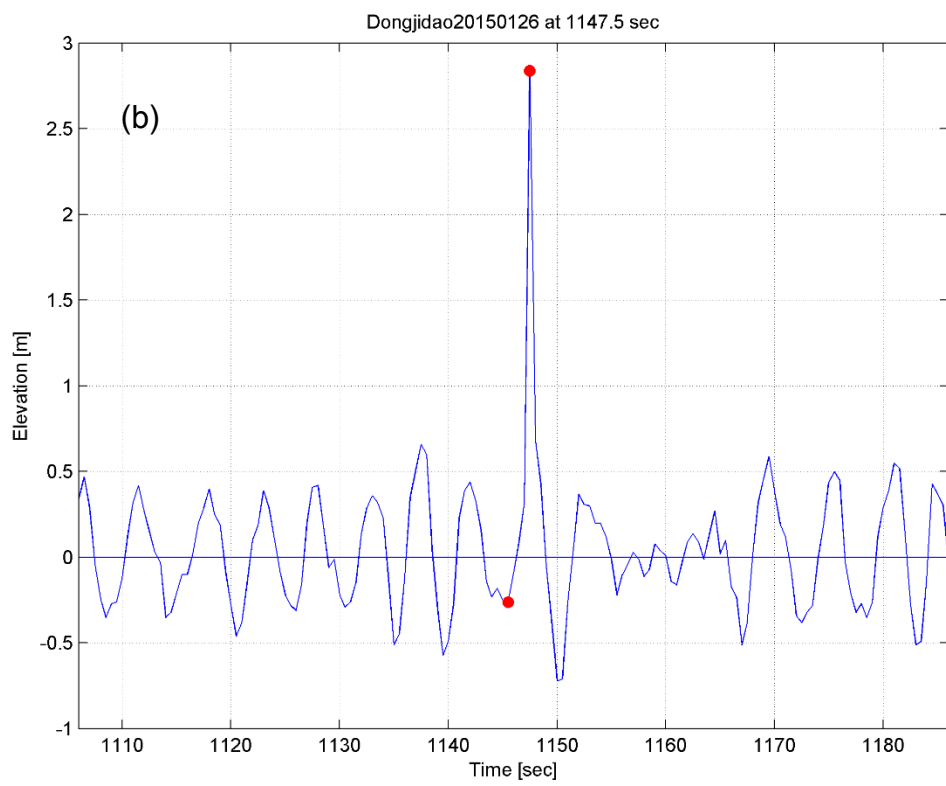
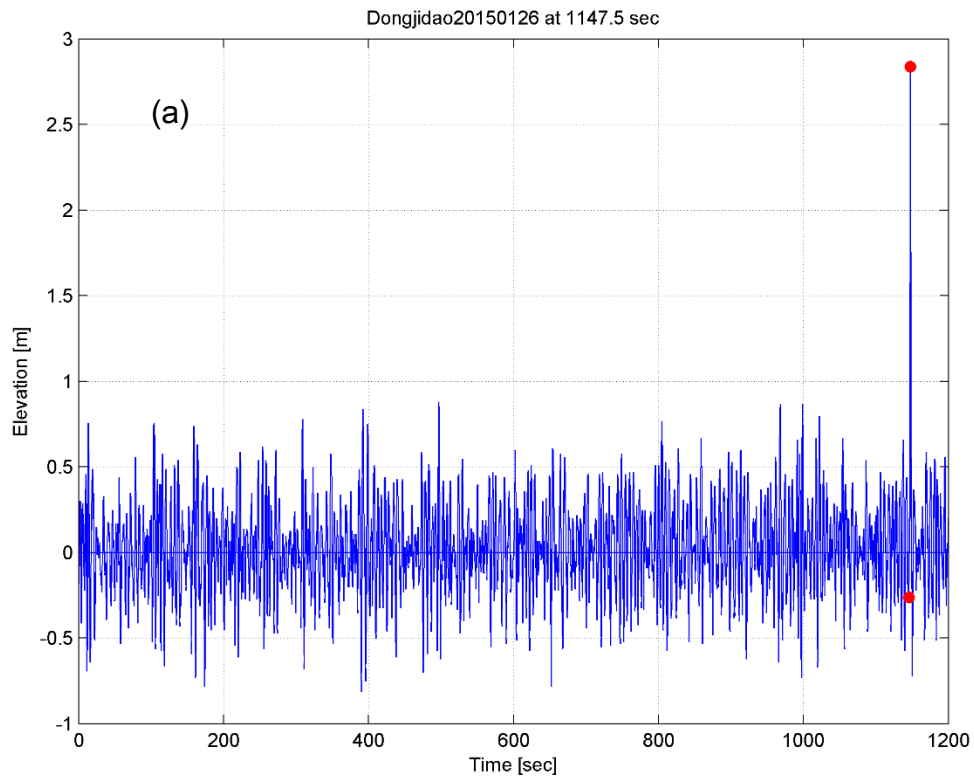


圖 3-17 東吉島浮標最大 AI 異常波浪案例之水位時序列(a)整筆資料 (b)細部圖

3-3-2 異常波浪案例統計分析

將十六個測站探勘所得之危險異常波浪波高資料進行統計分析，如圖 3-18 所示，分析結果顯示，近海浮標中觀測得危險異常波浪的浪高主要分布在 2 ~ 4 公尺之間，約占有 60%-85%不等，4 公尺以上的危險異常波浪發生次數較少，而在外海測站的分析結果中發現，相對較大的危險異常波浪所占比例較大，4 公尺以上的危險異常波浪約佔有一半以上。本年度新增之浮標中，金門、龜山島、台東和小琉球浮標在地理位置上都屬於近海浮標，異常波浪波高分布也與其他近海浮標相近，馬祖浮標所觀測到之異常波浪波高大於 4 公尺以上者約占 50%，馬祖浮標位置較外海無遮蔽，與先前研究結果一致。圖 3-19 顯示危險異常波浪發生月份分布圖，結果顯示大部分測站在 11 月-1 月間發生危險異常波浪的機率超過 40%，但鵝鑾鼻和小琉球測站之危險異常波浪則好發於夏季，冬季較多案例發生可以歸納是受到冬季東北季風影響所致，夏季案例則可能和西南季風有關，整體的分析結果可以初步歸納，劇烈天氣系統(如鋒面、颱風)確實增加了危險異常波浪的發生。

本計畫探討危險異常波浪發生與當時海況之關係，以示性波高做為海況指標，當示性波高越大表示海況越惡劣，以一公尺為組距，部分測站在示性波高大於 4 公尺以上的資料樣本數過低(<100)，其不確定性較高，因此在樣本數不足 100 筆者則不納入分析，將所有資料統計後結果如圖 3-20，分析結果顯示，在海況較惡劣的情況下，危險異常波浪發生的機率確實較高，將所有測站結果進行統計分析，得知在 $H_s \leq 5$ 公尺的條件下，各海下條件下的危險異常波浪發生機率相近(約 2×10^{-4})；但當海上波高超過 5 公尺時，發生機率顯著地隨著波高而增大，由於樣本數尚有限，未來持續增加數據可以增加分析結果的可信度。

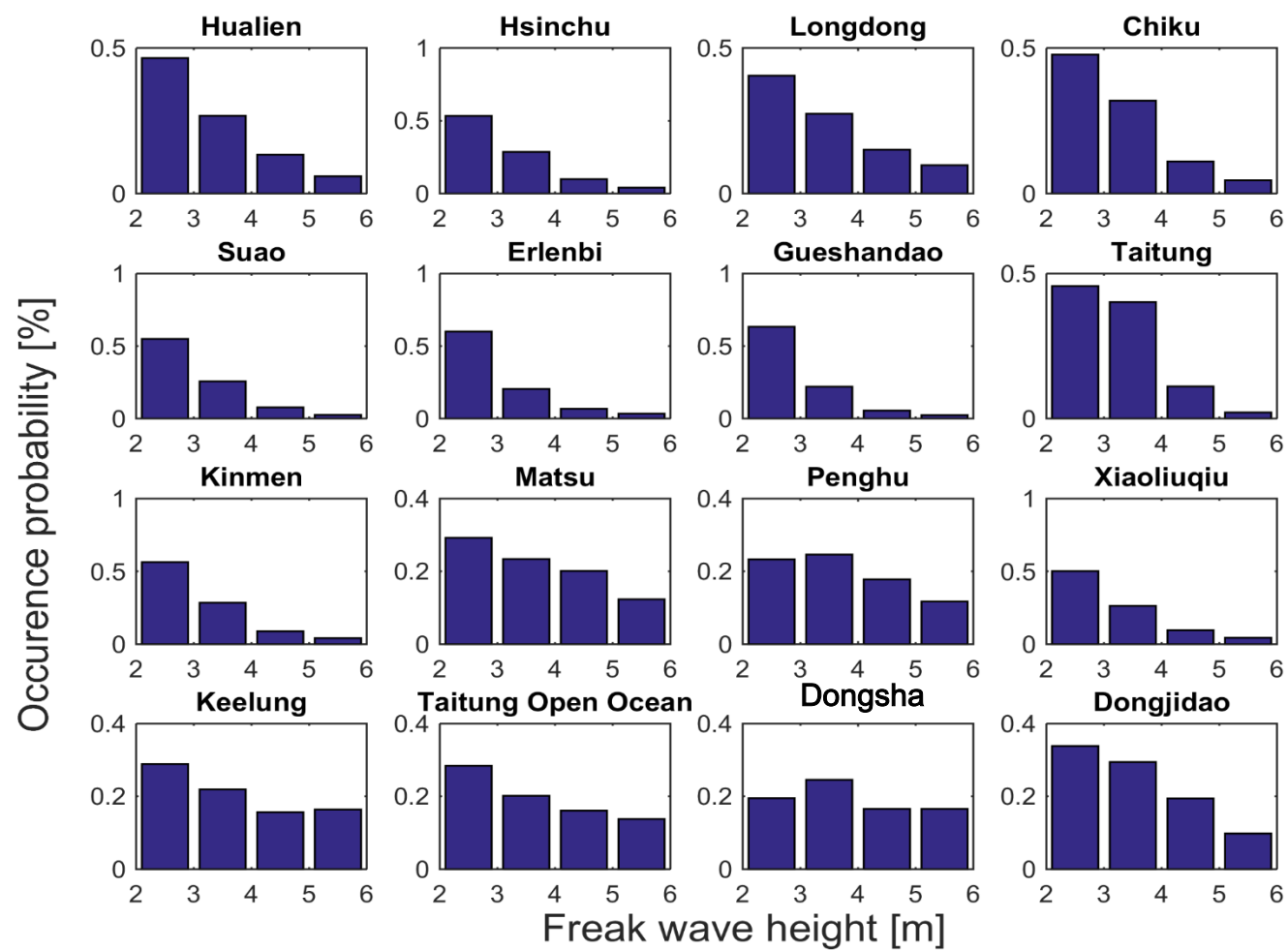


圖 3-18 本計畫分析之 16 測站的異常波浪浪高分布圖

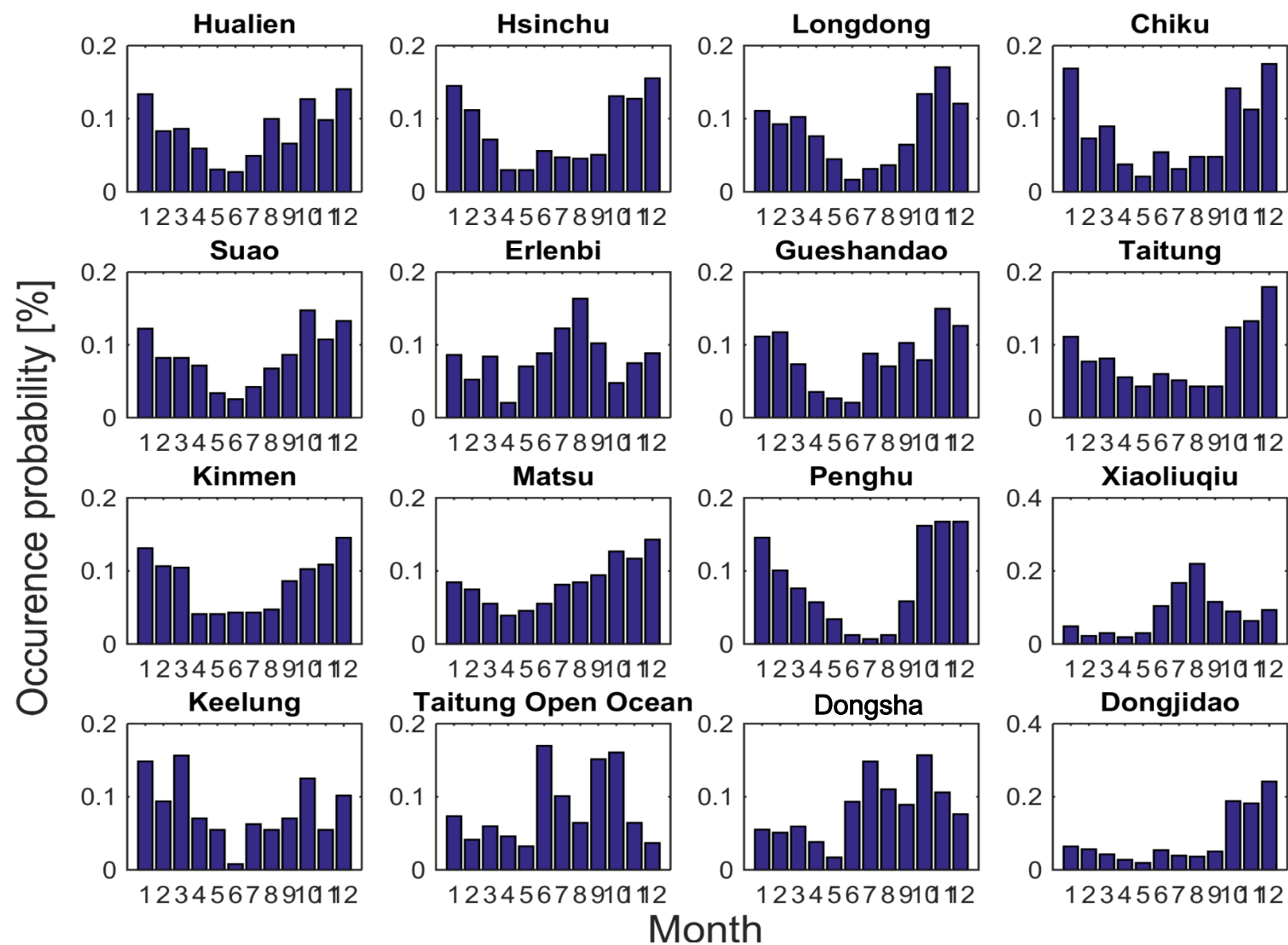


圖 3-19 本計畫分析之 16 測站的異常波浪各月發生機率圖

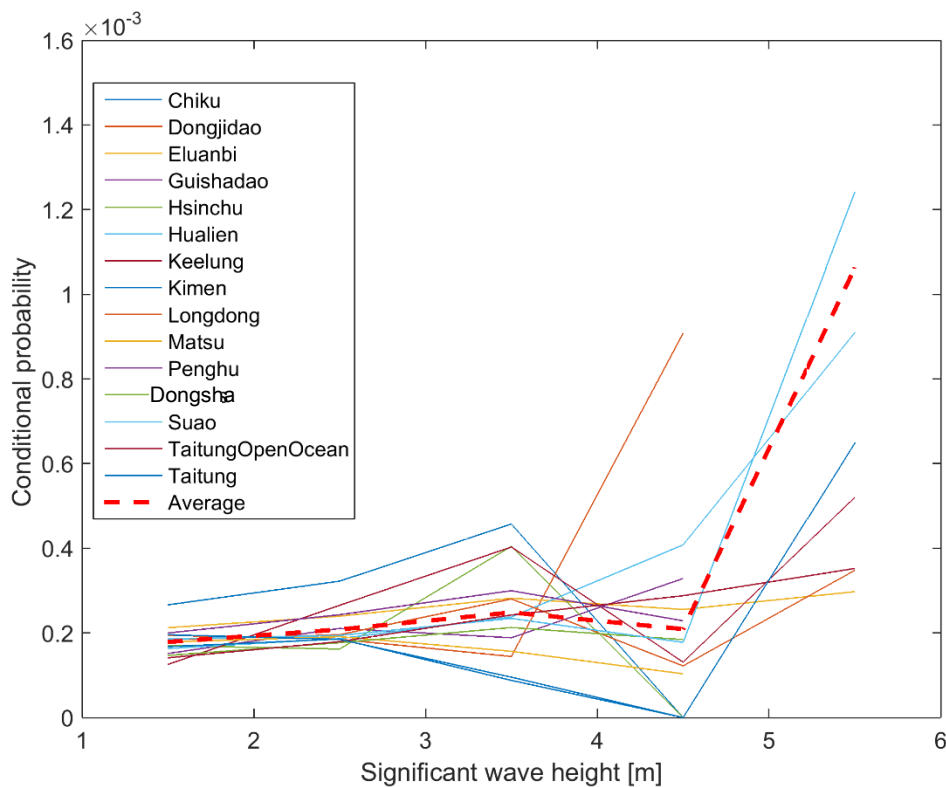


圖 3-20 危險異常波浪發生條件機率

3-4 異常波浪波形分析

3-4-1 異常波浪形態

異常波浪形成的機制有很多種(Dean, 1990; White and Fornberg, 1998; Lavrenov, 1998)，不同機制生成的異常波浪，其波形亦可能不同(Didenkulova and Anderson, 2010)，Yoshimoto and Kato(2002)分析異常波浪之頻譜發現，不同的生成機制，其水位變化也有所不同；Didenkulova and Anderson(2010)分析波羅的海的波浪資料，發現存在於近岸的異常波浪以波谷型為主，而外海的異常波浪以波峰型為主，文中也提出波谷型異常波浪可能為頻散集中(dispersive focusing)所造成。本節分析十五個浮標站的異常波浪波形，以提供未來探討異常波浪生成機制之參考。

常見之異常波浪型態有兩種型態，第一種是異常波浪出現時有一股高聳的水牆，其波形具有陡峭的波峰，像是過去北海 Gorm 平台與 Draupner 平台所觀測到的異常波浪(Sand et al., 1990; Trulsen and Dysthe, 1997)；第二種是異常波浪出現時有深邃的凹谷出現，其波形類似一個洞一樣，1943 年客輪 Queen Elisabeth 號在蘇格蘭所遭遇到的異常波浪(Faulkner and Buckley, 1997)即屬於此類。本研究在各分析測站中

也都發現上述兩種類型的異常波浪，圖 3-21 與圖 3-22 分別是波峰型與波谷型異常波浪的典型案例，除此之外本研究也發現波峰高度與波谷高度相當之異常波浪，本文稱之為對稱型異常波浪。

判定異常波浪的波峰高度與波谷深度，必須對於波浪進行切割，波浪的切割方法，本研究使用零下切法進行波浪切割，首先必須計算出水位的平均水位線，零下切法是沿著水位變化曲線尋找一相交於零水位面的點，如其曲線走向向下，此點可視為一個波的起點即零下切點，隨著水位的起伏，直到水面變化線由正值轉為負值再次穿過零水位面時，可尋得另一個零下切點，該點可定義為一個波的終點，零下切法所切割出來的波，必為先波谷再波峰之型態，波谷深與波峰高之關為本文用來判定異常波浪型態之依據。

本文定義波谷深與波峰高的比值(Ratio of Trough height to Crest height, RTC)為判斷波峰型異常波浪或波谷型異常波浪的依據。Didenkulova and Anderson(2010)建議波谷高度大於波峰高度 1.5 倍以上($RTC > 1.5$)為波谷型異常波浪，而波峰型異常波浪則是波峰高度大於波谷高度的 1.5 倍($RTC < 0.67$)，介於兩者之間為對稱型異常波浪，即波谷高度與波峰高度比值介於 0.67 至 1.5 之間 ($0.67 < RTC < 1.5$)。

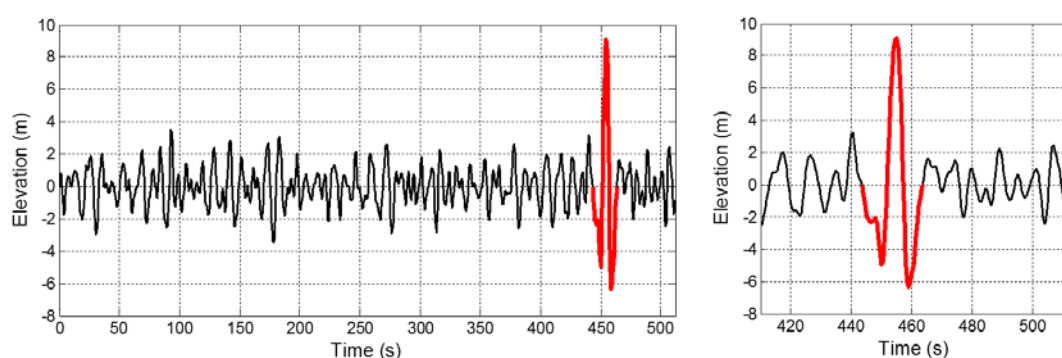


圖 3-21 波峰型異常波浪典型案例

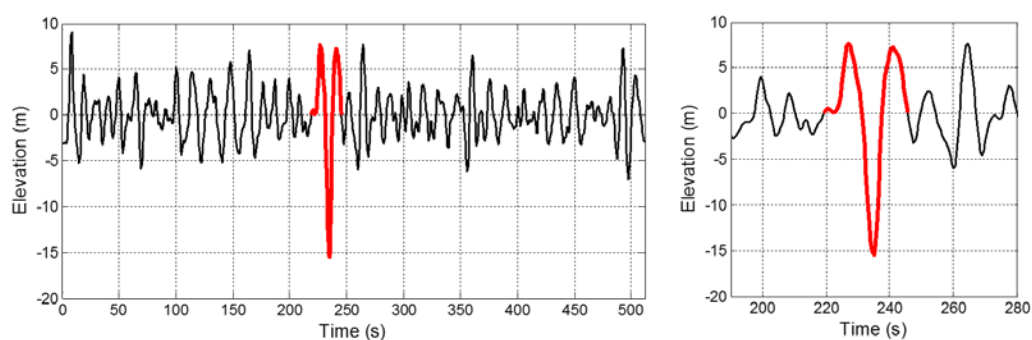


圖 3-22 波谷型異常波浪典型案例

3-4-2 波浪群性分析方法

波浪此外在異常波浪探勘的過程中，時有異常波浪發生之水位時序列有成群波浪出現的情形，例如 2008 年 2 月 17 日 22 時龍洞浮標量測到之水位資料(圖 3-23)，當時發生一 3.82 公尺的異常波浪，從資料可發現在異常波浪發生前數個波的波高是逐漸增長，在其後的數個波的波高也逐漸下降，有如一群波浪。Tsai et al. (2004) 指出岸邊瘋狗浪之發生與群波有關，當週期相近的波浪連續發生時，異常波浪發生的機率會顯著的上升；Magnusson(1999)也指出異常波浪的發生機率在群波現象發生時顯著增加，因此探討異常波浪發生時之波浪群性有其必要性，在分析波浪型態時應將該異常波是否發生在波群中一同納入討論。

探討群波的方法很多，在第一年度也已充分的討論，由於群波因子對異常波浪太過於敏感，因此仍然沿用計畫第一年度提出群性判斷的方法，此方法係基於包絡線原理，以異常波該個別波為基準，在該異常波必為該時段內最大值，若該異常波發生時刻之前一個波(H_p^i , $i=1, 2, 3...$)之波高大於該異常波波高之 50%，則屬於同一個波浪群，依此類推，異常波發生後之個別波浪(H_f^i , $i=1, 2, 3...$)亦以相同準則判別，如示意圖 3-24 所示。此法可以分析出該異常波浪群有幾個前波(N_p)、有幾個後波(N_f)，依本文定義加計異常波本身若超過 5 個波則稱之為成群，反之則稱該異常波並非發生在成群波浪內。圖 3-24(a)中，中央雙箭頭標示部分為異常波，該筆有 3 個前波($N_p=3$)及 1 個後波($N_f=1$)，該群共有 5 個波，為一成群型異常波浪，圖 3-24(b)因在異常波浪前後之個別波皆低於該異常波波高之 50%，故為非成群型異常波浪。

本文以上述判斷異常波浪是否出現在波群中，本計畫曾在第二年度中分析七個浮標站的異常波浪資料，結果顯示當異常波浪若發生於一群波浪中，該群波浪的數目通常是由 5 個波所組成，本文分析五個浮標站的資料顯示了相同的結果。往昔學者通常使用群波因子(或其它參數)分析整筆觀測資料，但該法令具有高群性的時序列仍不能證明該異常波浪是發生在一個波群中，本文以前述簡單的方法判斷異常波浪是否發生在波群中，此結果對於了解異常波浪的特性有所幫助。

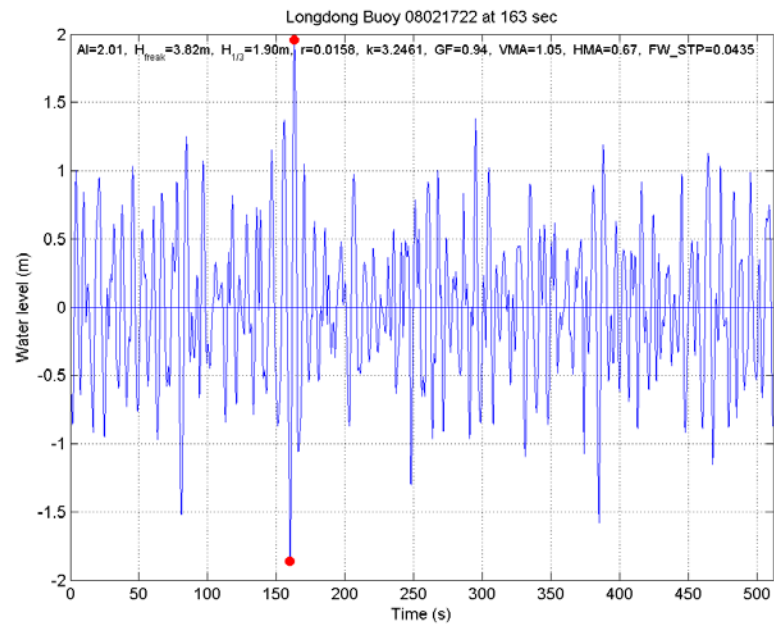


圖 3-23 異常波浪出現在一堆成群的波浪中

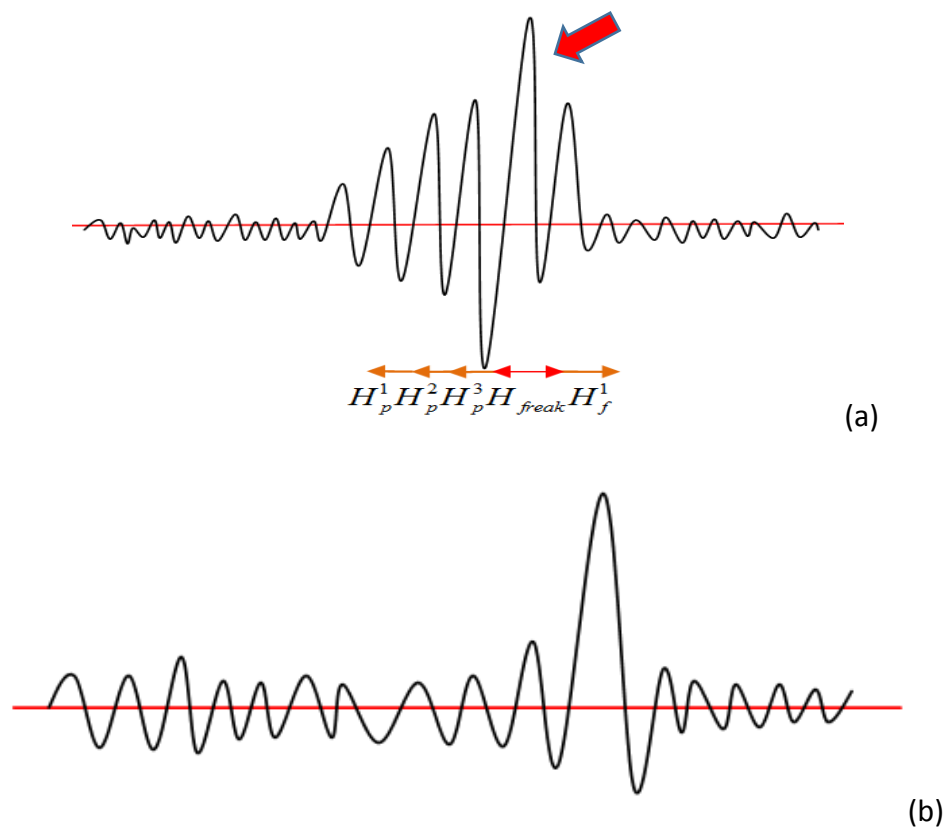


圖 3-24 群與否判別示意圖 (a)成群；(b)非成群

3-4-3 異常波浪形態分析結果

綜合上述以波谷深和波峰高比值來判定波峰型或波谷型波高之方法及異常波浪是否出現在某一波群中之方法，進行台灣海域實測異常波浪之分類，本研究將台灣周遭海域之異常波浪區分為六種型態，分別是成群波峰型(High Crest in a Group, HCG)、成群波谷型(Deep Trough in a Group, DTG)、成群對稱型(Symmetric in a Group, SG)、非成群波峰型(High Crest Singular, HCS)、非成群波谷型(Deep Trough Singular, DTS)以及非成群對稱型(Symmetric and Singular, SS)，如分類圖所示(圖 3-25)，所有浮標測站之分析統計結果如表 3-19 所示，台灣周遭海域之異常波浪以沒有出現在一組群波中之非群性異常波浪佔的比率較高，非群性異常波浪約佔 80%至 90%左右，異常波浪中出現伴隨一組波群者僅佔 10%至 16%，本計畫分析的浮標測站的異常波浪都是以對稱型為主體，均佔成群或非成群波浪案例 90%，波峰型或波谷型異常波浪的比率相近。而東吉島波浪站量測到之異常波浪波形中，波峰形異常波浪占有全部 37%，不同浮標觀測結果主要以對稱形為主。

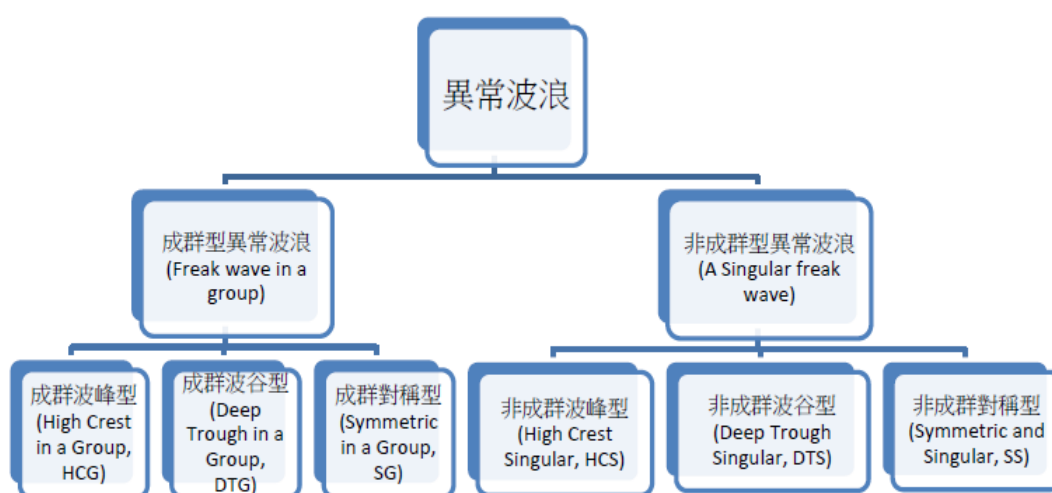


圖 3-25 異常波浪分類圖

表 3-19 異常波浪形態分析結果

測站	總筆數	成群型			非成群型		
		波峰形	波谷形	對稱形	波峰形	波谷形	對稱形
新竹浮標	454	3(0.6%)	3(0.6%)	52(11.4%)	25(5.5%)	18(3.9%)	353(77.7%)
龍洞浮標	715	5(0.7%)	5(0.7%)	100(14.0%)	24(3.3%)	24(3.3%)	557(77.9%)
鵝鑾鼻浮標	447	2(0.4%)	0(0%)	71(15.8%)	11(2.4%)	11(2.4%)	352(78.7%)
七股浮標	443	2(0.4%)	3(0.6%)	52(11.7%)	19(4.2%)	25(5.6%)	342(77.2%)
花蓮浮標	561	3(0.5%)	3(0.5%)	80(14.2%)	23(4.1%)	29(5.1%)	423(75.4%)
龜山島浮標	358	3(0.8%)	3(0.8%)	53(14.8%)	11(3.0%)	13(3.6%)	275(76.8%)
馬祖浮標	322	2(0.6%)	2(0.6%)	45(13.9%)	15(4.6%)	7(2.1%)	251(78.0%)
基隆浮標	64	0(0.0%)	0(0.0%)	13(20.3%)	1(1.5%)	2(3.1%)	48(75.0%)
金門浮標	481	1(0.2%)	1(0.2%)	45(9.3%)	23(4.7%)	25(5.2%)	386(80.2%)
蘇澳浮標	578	1(0.1%)	3(0.5%)	94(16.2%)	18(3.1%)	28(4.8%)	434(75.1%)
澎湖浮標	603	5(0.8%)	4(0.6%)	80(13.2%)	39(6.4%)	35(5.8%)	440(73.0%)
東沙浮標	236	1(0.4%)	1(0.4%)	36(15.2%)	8(3.3%)	4(1.7%)	186(83.0%)
台東外洋浮標	241	0(0.0%)	1(0.4%)	26(10.7%)	14(5.8%)	9(3.7%)	191(79.2%)
台東浮標	285	4(1.4%)	1(0.3%)	30(10.5%)	5(1.7%)	17(6.0%)	228(80.0%)
小琉球浮標	294	2(0.7%)	2(0.7%)	67(22.8%)	3(1.0%)	17(5.8%)	203(69.0%)
東吉島波浪站	798	3(0.3%)	3(0.3%)	126(15.8%)	25(3.1%)	299(37.4%)	342(42.8%)

第四章 外洋異常波浪發生機率預測系統雛形建置

本計畫外洋異常波浪的研究中，最終目標是能對外洋異常波浪發生機率進行預測，第二年度的研究中，從文獻彙整與理論推導已得到外洋異常波浪發生機率估算理論，第三年度也使用中央氣象局波浪模式輸出波譜資料，應用此理論進行異常波浪機率估算。本年度重點則是在令其作業化，與中央氣象局海象測報作業聯合運作，定期提供機率預測結果。

4-1 異常波浪發生機率理論

4-1-1 基於線性波理論之異常波浪發生機率

海洋中波浪的發生是隨機的，可被視為是由多個餘弦波線性疊加而成的，海水位變化[Z(t)]可以下式表示：

$$Z(t) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad (4-1)$$

其中 a_i 為成分波振幅， ω_i 為角頻率， ϕ_i 則為相位角。根據線性波理論，海水位的變動符合高斯分布，而個別波的波高分布符合雷禮分布(Longuet-Higgins, 1952)。為了更清楚表示水位變化序列，式(4-1)改寫如下：

$$Z(t) = \eta(t) \cos(2\pi \bar{f} t) - \zeta(t) \sin(2\pi \bar{f} t) \quad (4-2)$$

式中

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cos(2\pi f_i t - 2\pi \bar{f} t + \phi_i) \quad (4-3)$$

$$\zeta(t) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i \sin(2\pi f_i t - 2\pi \bar{f} t + \phi_i) \quad (4-4)$$

f_i 為頻率， $\bar{f}$ 為平均頻率，相當於一階波譜動差(spectrum moment)與零階波譜動差之比值， $\bar{f} = m_1/m_0$ 。n 階波譜動差的定義如下， $S(f)$ 為能量密度函數。

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n S(f) df \quad (4-5)$$

此外，定義波包振幅 R 及相位角 ϕ 為：

$$R(t) = \sqrt{\eta^2(t) + \zeta^2(t)} \quad (4-6)$$

$$\phi(t) = \tan^{-1}[\zeta(t)/\eta(t)] \quad (4-7)$$

因此式(3-3)即可改寫成

$$\eta(t) = R \cos \phi \quad (4-8)$$

$$\zeta(t) = R \sin \phi \quad (4-9)$$

而水位變化序列便可用 R 及 ϕ 表示成

$$Z(t) = R(t) \cos[2\pi \bar{f}t + \phi(t)] \quad (4-10)$$

從以上推導得知，波包振幅 R 和相位 ϕ 會隨著時間而改變，若波譜分布為窄譜(narrow banded)時，該變化是相當緩慢的可以忽略。

由於水位變化符合高斯分布，根據中心極限理論， $\eta(t)$ 和 $\zeta(t)$ 的變異數均等於一階波譜動差 m_0 。由於 $E[\eta\zeta] = 0$ ，因此兩變數可被視為獨立，而其聯合機率密度函數[式(4-11)]可以利用式(4-8)及 $d\eta d\zeta = R dR d\phi$ 關係式變更為波包振幅與相位之聯合機率密度，如式(4-12)。

$$p(\eta, \zeta) = \frac{1}{2\pi m_0} \exp\left[-\frac{\eta^2 + \zeta^2}{2m_0}\right] \quad (4-11)$$

$$p(R, \phi) = \frac{R}{2\pi m_0} \exp\left(-\frac{R^2}{2m_0}\right) \quad (4-12)$$

由於 R 和 Φ 互相獨立，因此式(4-12)可被視為 $p(R)$ 和 $p(\phi)$ 相乘。式(4-12)中並不含 ϕ 的函數，表示 $p(\phi)$ 在 $[0,2\pi]$ 區間為常數且機率為 $1/2\pi$ 。因此可推得 R 的機率密度函數如下，此式也稱為雷禮分布。

$$p(R) = \frac{R}{m_0} \cdot \exp\left(-\frac{R^2}{2m_0}\right) \quad (4-13)$$

基於窄譜的假設，波浪的最大值發生在波峰以外地方的機率很小，因此波包 R 可被視為是個別波浪的振幅。此外由於線性理論假設波浪是由多個波浪線性疊加而成的，因此波峰與波谷的發生機率幾乎是相等的，波高也因此可以被假設為兩倍的振幅高($H=2R$)，代入式(4-13)可以得出波高的機率密度函數。

$$p(H) = \frac{H}{4m_0} \cdot \exp\left(-\frac{H^2}{8m_0}\right) \quad (4-14)$$

Longuet-Higgins(1952)根據此波高機率密度函數推導出許多波高的特性，包括平均波高及均方根波高等。

$$\bar{H} = \int_0^{\infty} H p(H) dH = (2\pi m_0)^{1/2} \quad (4-15)$$

$$H_{rms}^2 = \overline{H^2} = \int_0^{\infty} H^2 p(H) dH = 8m_0 \quad (4-16)$$

將式(4-14)改寫成無因次化的形式：

$$p(x) = 2c^2 x \cdot \exp(-c^2 x^2) \quad (4-17)$$

式中

$$x = \frac{H}{H_*}, \quad H_* \text{ 為參考波高} \quad (4-18)$$

$$c = \frac{H_*}{(8m_0)^{1/2}} = \begin{cases} \frac{1}{2\sqrt{2}} & \text{when } H_* = m_0^{1/2} = \eta_{rms} \\ \frac{\sqrt{\pi}}{2} & \text{when } H_* = \bar{H} \\ 1 & \text{when } H_* = H_{rms} \\ 1.416 & \text{when } H_* = H_{1/3} \end{cases}$$

而無因次波高 x 的超越機率亦可推得，如下式。

$$P(x) = P[x_* > x] = \int_x^\infty p(x_*) dx_* = \exp[-c^2 x^2] \quad (4-19)$$

前述理論適用於窄譜的不規則波，然而 Longuet-Higgins(1952)推導上述關係式時並未特別指明譜寬。後來 Cartwright and Longuet-Higgins (1956)定義了一個新的參數，稱之為譜寬參數(spectral width parameter)，如(4-20)式，當 σ_ω 接近於0時頻率譜為窄譜，即波浪能量集中於主頻率附近，當 σ_ω 值大時則為寬譜。

$$\sigma_\omega = [1 - m_2^2/(m_0 m_4)]^{1/2} \quad 0 < \sigma_\omega < 1 \quad (4-20)$$

實際海洋的波譜能量於高頻部分正比於 f^{-5} ，因此上式中分母的四階波譜動差會有非常大的值，而導致 ϵ 非常趨近於1。

Tayfun(1983)和 Naess(1985)都討論了波譜寬度對波高分布的影響，認為由於波峰高與波谷深度的不對等，導致波高 H 小於平均波包振幅 R 的兩倍，實際波高分布也較雷禮分布窄。Forristall (1984)也用實測資料於窄譜的條件下驗證了Tayfun(1983)的論述，該論述在較寬的波譜情況下會偏離雷禮分布，並認為波高分布應由韋伯分布(Weibull distribution)表示，如(4-21)式，式中當 $x = H/\eta_{rms}$ 時， $n = 2$ ， $\nu = \sqrt{2}$ ，即等同於雷禮分布。

$$p(x) = \frac{n}{\nu} \left(\frac{x}{\nu}\right)^{n-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\nu}\right)^n\right] \quad (4-21)$$

異常波浪的定義為超過兩倍示性波高的浪，因此異常波浪的發生機率估算可以從波高之超越機率來推估。當式(4-19)中的 $x_* > 2$ 時($x = H/H_*$)便可計算波高大於兩倍示性波高時之超越機率，即線性波理論下之異常波浪發生機率，如式(4-19)所示。

$$P_{\text{freak wave}} = P[x_* > 2] = \exp[-1.416^2 \times 2^2] \cong 3.3 \times 10^{-4} \quad (4-22)$$

由以上的論述可知，在線性波理論的假設下，波高符合雷禮分布，根據雷禮分布之超越機率分布可以推算出異常波浪發生機率，為 3.3×10^{-4} ，相當於約 3000 個波浪中就會出現一個異常波浪。此機率僅與異常波浪的定義有關，圖 4-1 為線性理論下之異常波浪發生機率與異常波浪指數之關係。

根據上述推導，將式(4-18)中之 $\sqrt{\pi}/2$ 帶入式(4-17)即可得知對平均波高進行無因次化之波高機率分布，如圖 4-2 所示，圖中曲線為雷禮分布理論線，圓圈為龍洞浮標之實際觀測資料，分析結果顯示當波高較大時，實測資料之發生機率會大於雷禮分布，此結果亦符合 Forristall (1984) 發現之波高機率分布會偏離雷禮分布之現象。進一步計算其發生機率，由於示性波高約為 1.6 倍平均波高，因此當無因次化波高大於 3.2 時即為異常波浪，實測資料計算之結果為 2.0×10^{-4} ，與雷禮分布之結果不盡相同。其他學者亦曾提出異常波浪之發生機率與雷禮分布估算之結果不符，Kimura and Ohta (1994)曾提出異常波浪之發生機率約為 2.8×10^{-4} ，而許多前人同時也利用了實測資料進行異常波浪發生機率之計算，Stansell (2004) 和 Didenkulova and Anderson (2010)分別於北海和波羅的海進行觀測並計算其結果分別約為 2.9×10^{-4} 以及 2.4×10^{-4} ，而 Baschek and Imai (2011)分析美國東岸之觀測資料並得到平均 1.2×10^{-5} 之結果，明顯小於雷禮分布之機率。Mori et al. (2002)則認為異常波浪之發生機率會大於雷禮分布，因此有必要對於異常波浪進行更進一步之研究，而由於與線性理論之不符合，因此非線性之理論勢必需要被列入考慮。

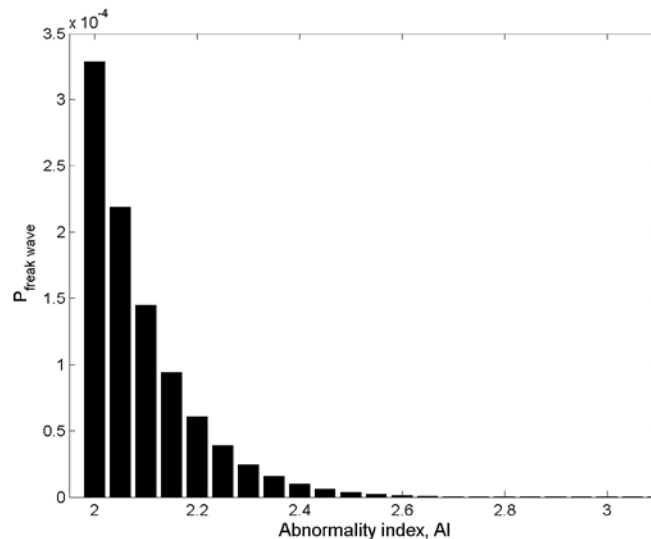


圖 4-1 線性理論下異常波浪發生機率與異常波浪指數之關係

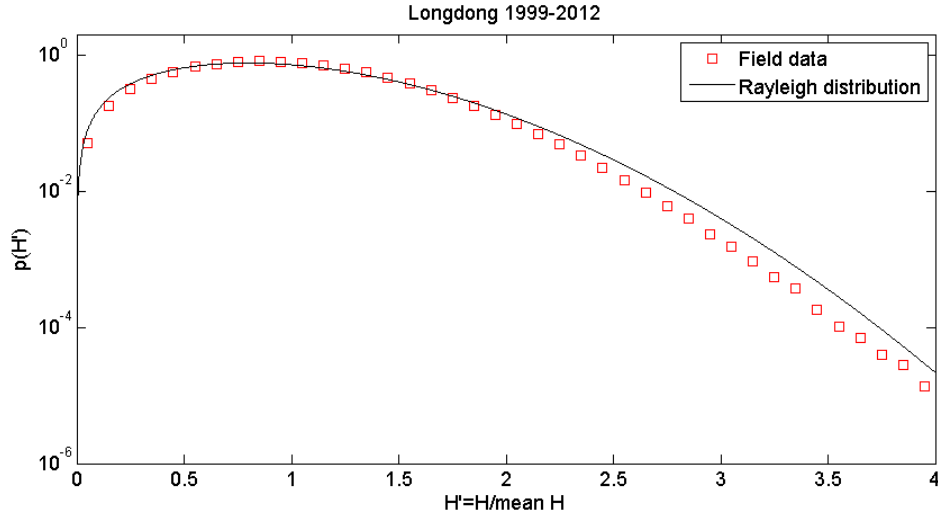


圖 4-2 實測波高機率與雷禮分布比較 (資料：龍洞浮標測站 1999-2012 年)

4-1-2 基於非線性波理論之異常波浪發生機率推導

根據第二年度非線性波理論之推導，當波譜屬於窄譜時，波浪振幅可視同於波包振幅 R ，可以用振幅 R 及相位 ϕ 來表示水位。參考 Longuet-Higgins(1963)提出了兩個非線性變數在弱非線性的條件下其聯合機率密度函數可表示成：

$$p(\eta', \zeta') = \frac{1}{2\pi} \exp\left[-\frac{1}{2}(\eta'^2 + \zeta'^2)\right] \times \left[1 + \frac{1}{3!} \sum_{n=0}^3 \frac{3!}{(3-n)!n!} \kappa_{(3-n)n} H_{3-n}(\eta') H_n(\zeta') \right. \\ \left. + \frac{1}{4!} \sum_{n=0}^4 \frac{4!}{(4-n)!n!} \kappa_{(4-n)n} H_{4-n}(\eta') H_n(\zeta') \right] \quad (4-23)$$

以上各個變數都是對 η_{rms} 的無因次化參數，如(4-24)式所示。其中 H_n 是第 n 階的埃爾米特多項式(Hermite polynomial)，如(4-25)式， K_{nm} 則為累積量(cumulant)，以(4-26)式表示，一個隨機變數的累積量是一個能提供和矩一樣資訊的物理量，累積量和隨機變數的矩密切相關。

$$\eta' = \frac{\eta}{\eta_{rms}} ; \zeta' = \frac{\zeta}{\eta_{rms}} ; \kappa_{nm} = \frac{K_{nm}}{\eta_{rms}^{n+m}} \quad (4-24)$$

$$H_n(x) = (-1)^n e^{\frac{x^2}{2}} \frac{d^n}{dx^n} \exp\left(-\frac{1}{2}x^2\right) \quad (4-25)$$

$$K_{nm} = \begin{cases} E[\eta^n \zeta^m] & \text{for } n+m \leq 3 \\ E[\eta^n \zeta^m] + (n-1)(m-1)(-1)^{\frac{n}{2}} \sigma^{n+m} & \text{for } n+m=4 \end{cases} \quad (4-26)$$

由於水位變化被視為符合常態分佈，即平均為零，變異數為 m_0 ，因此 $K_{00}=K_{10}=K_{01}=K_{11}=0$ ， $K_{20}=K_{02}=1$ 且 $K_{21}=K_{12}=K_{13}=K_{31}=0$ 。其中 K_{30} 等於水位變化的偏態 (skewness, μ_3)，而 K_{40} 則為四階的累積量，等同於水位分布的峰度係數 (kurtosis, μ_4) 減 3。基於弱非線性的假設，我們可以設 $K_{03}=K_{30}$ ， $K_{04}=K_{40}$ 以及 $K_{22}=K_{40}/3$ (Mori and Janssen, 2006)。

為了得知波高的機率分布，可以利用 $p(A, \Phi) = A p(\eta', \zeta')$ 將式(4-22)中的變數轉換成波浪振幅及相位，其中的 A 是無因次化後所得到的振幅 $A = R/\eta_{rms}$ 。此外由於波浪的隨機性，因此振幅和相位可被視為互相獨立，而波浪振幅的機率分布即可藉由對相位的積分而得知，如下式。

$$p(A) = A \cdot \exp\left(-\frac{A^2}{2}\right) \times \left[1 + \frac{1}{3}\kappa_{40}(1 - A^2 + \frac{1}{8}A^4)\right] \quad (4-27)$$

且基於窄譜的假設，波高 H' 可以被視為是兩倍的振幅，而代入式(4-27)中即可得知波高的機率密度函數如下：

$$p(H') = \frac{1}{4} H' e^{-(1/8)H'^2} [1 + \kappa_{40} A_H(H')] \quad (4-28)$$

式中

$$A_H(H') = \frac{1}{384} (H'^4 - 32H'^2 + 128) \quad (4-29)$$

同時，波高的超越機率，即超越某高度的發生機率，可以藉由積分機率密度函數從該高度到無限大而得。

$$P(H') = e^{-(1/8)H'^2} [1 + \kappa_{40} B_H(H')] \quad (4-30)$$

式中

$$B_H(H') = \frac{1}{384} H'^2 (H'^2 - 16) \quad (4-31)$$

值得注意的是在此處的振幅 A 及波高 H' 都是以 η_{rms} 為基底的無因次化參數。

然而雷禮分布並沒有上限邊界，而機率密度會隨著獨立變數增加而以指數遞減，但不會為零，因此最大波高 H_{max} 僅是一種統計上的定義，指從母體中選出之樣本的最大值。Mori and Janssen (2006)認為根據異常波浪的定義，波高超越兩倍示性波高，最大波高的機率分布勢必是需要被列入討論的，而 Longuet-Higgins (1952)也推導出了最大波高之機率密度函數。當我們從資料母體中取 N 個波高，並將最大之波高以 H_{max} 表示，當 N 個波中只有一個波的波高為 H_{max} ，則將有 $(N-1)$ 個波高小於 H_{max} ，因此該最大波高 H_{max} 的機率密度函數為：

$$p(H_{max}) = N[1 - P(H_{max})]^{N-1} p(H_{max}) \quad (4-32)$$

其中 $P(H_{max})$ 為式(4-30)中波高分布之超越機率，表示波高大於 H_{max} 之機率； $p(H_{max})$ 為式(4-28)之機率密度函數，表示當波高為 H_{max} 之機率。利用數學上的近似式[(4-33)式]，當 N 非常大時，最大波高之機率密度函數如式(4-34)所示。

$$\lim_{N \rightarrow \infty} (1 - P(H_{max}))^N \simeq \exp[-NP(H_{max})] \quad (4-33)$$

$$p(H_{max}) = \frac{N}{4} H_{max} e^{-\left(\frac{H_{max}^2}{8}\right)} [1 + \kappa_{40} A_H(H_{max})] \times \exp\left\{-N e^{-\left(\frac{H_{max}^2}{8}\right)} \times [1 + \kappa_{40} B_H(H_{max})]\right\} \quad (4-34)$$

同理，最大波高的超越機率亦可藉由對最大波高的機率密度函數積分而得，如下式

$$P_m(H_{max}) = 1 - \exp\left\{-N e^{-\left(\frac{H_{max}^2}{8}\right)} [1 + \kappa_{40} B_H(H_{max})]\right\} \quad (4-35)$$

最大波高的機率密度函數 $p(H_{max})$ 表示一組有 N 個波的群組中最大之波高為 H_{max} 的發生機率，而超越機率表示發生最大波高大於 H_{max} 的機率。異常波浪為超過兩倍示性波高之大波，一序列中的最大波不一定為異常波浪，但若含有一個異常波浪，則該異常波浪必為最大波，因此得知最大波高之分布有助於進一步推導異常波浪的發生機率。

根據線性理論，示性波高可被視為 4.004 倍的零階波譜動差 m_0 方根，而 m_0 和水位變化的關係式如下：

$$m_0 = \overline{\eta^2} = \lim_{t_0 \rightarrow \infty} \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} \eta^2 dt = \eta_{rms}^2 \quad (4-36)$$

根據異常波浪的臨界條件為兩倍示性波高(如下式)，異常波浪之波高因此可被視為 8 倍的水位變化均方根值

$$H_{freak} = H_{max} = 2H_{1/3} = 8m_0^{1/2} = 8\eta_{rms} \quad (4-37)$$

因此將上式帶入式(4-35)，即無因次化的 $H_{max} = 8$ ，可以得知異常波浪的發生機率為波浪的個數(N)和峰度係數(μ_4)的函數，如下式所示

$$P_{freak} = 1 - \exp[-N \cdot e^{\beta}(1 + 8\kappa_{40})] \quad (4-38)$$

其中 β 為一常數，相當於-8。由此可知，當一群波浪的個數及水位之峰度已知時，便可得知該水位之異常波浪發生機率。根據推導過程，此處所指的異常波浪必為各組之最大波高，而異常波浪的發生機率則為各群組之最大波高為異常波浪之機率。

4-2 數值結果與實測資料驗證

根據前節非線性理論的推導結果(式 4-38)可以得知異常波浪的發生機率和兩個參數相關，一個是波浪的數目，另一個參數為水位變化的峰度。從結果可以得知，當峰度係數(μ_4)越大或波浪個數(N)越大時，異常波浪的發生機率(P_{freak})越大，換句話說，在水位分布較尖聳時，異常波浪發生機率較高；在一個海域停留時間愈久時，遭遇的海浪數目愈多，遇到異常波浪的機率也越高。

圖 4-3 為在各種峰度係數條件下，遭遇不同波浪數目時的異常波浪發生機率，從該圖可以更清楚地發現，隨著波浪數目的增加，異常波浪的發生機率則越高，圖中不同線條分別代表著峰度係數從 3.0(線性波，波高符合雷禮分布)到 3.6，根據不同峰度係數的結果亦可清楚看到異常波浪的發生機率隨著峰度係數的變大所產生的變化，當波浪個數到達 10,000 時，不論峰度係數為多少，異常波浪的發生機率趨近於 1，也就是說在某海域停留夠長時間時，遭遇到異常波浪的機率將接近百分之百，假設該海域之平均波浪週期為 8 秒，10,000 個波相當於 22.2 個小時，若某人或某船隻能在同一海域中停留 22.2 個小時，幾乎必定會遭遇至少一次的異常波

浪，當然，此異常波浪並非會造成危害，此異常波浪也並非是本文前章所述的危險異常波浪，而僅是符合 $AI \geq 2$ 的異常波浪。以上是不論峰度係數為多少時的結果，假使海面水位是呈現高峰度，如圖 4-3 中的峰度係數 3.6 時，只要波浪數目約達 2000 時，其發生機率就會達到百分之百。

考慮峰度係數對於異常波浪發生機率的影響性，圖 4-4 顯示不同峰度係數條件下，以非線性波估算異常波浪發生機率與線性條件下(雷禮分布)發生機率的比值(如 3-39 式)變化，該比值即為非線性波理論計算異常波浪發生機率高於線性波雷禮分布的倍率。

$$R_{freak} = \frac{P_{freak|nonlinear}}{P_{freak|linear}} \quad (4-39)$$

圖 4-4 結果顯示比值均為正值，顯示非線性理論所估算的異常波浪發生機率高於線性理論(雷禮分布)估算所得，且此兩者之機率比值與峰度係數有關。當波浪數目為 100 個(約為 10 分鐘之觀測)時，峰度係數 3.0 時，兩者機率無差別，因此時兩者均為雷禮分布，但當峰度係數超過 3.55 時，非線性波理論所估算之異常波浪發生機率高於線性理論的 4 倍以上。此比值隨著波浪數目愈多而降低，譬如，當波浪數目為 5000 個(約 11 個小時)時，非線性理論的推導結果異常波浪發生機率約提高 20%，當波浪數目愈大時，此發生機率比值受峰度係數影響的程度愈不明顯，由以上分析結果可以得知峰度係數對於異常波浪發生機率的影響是十分顯著的。Goda(2010)指出，峰度係數與波浪非線性程度相關，峰度係數愈大，波浪的非線性愈強，Janssen(2003)推導出峰度係數與非線性指標 BFI (Benjamin-Feir Index)值之間的關係，如 4-40 式，式中 ε 為波浪尖銳度， σ_ω 為波譜寬度。

$$\kappa_{40} = \frac{\pi}{\sqrt{3}} BFI^2 = \frac{\pi}{\sqrt{3}} \left(\frac{\sqrt{2}\varepsilon}{\sigma_\omega} \right)^2 \quad (4-40)$$

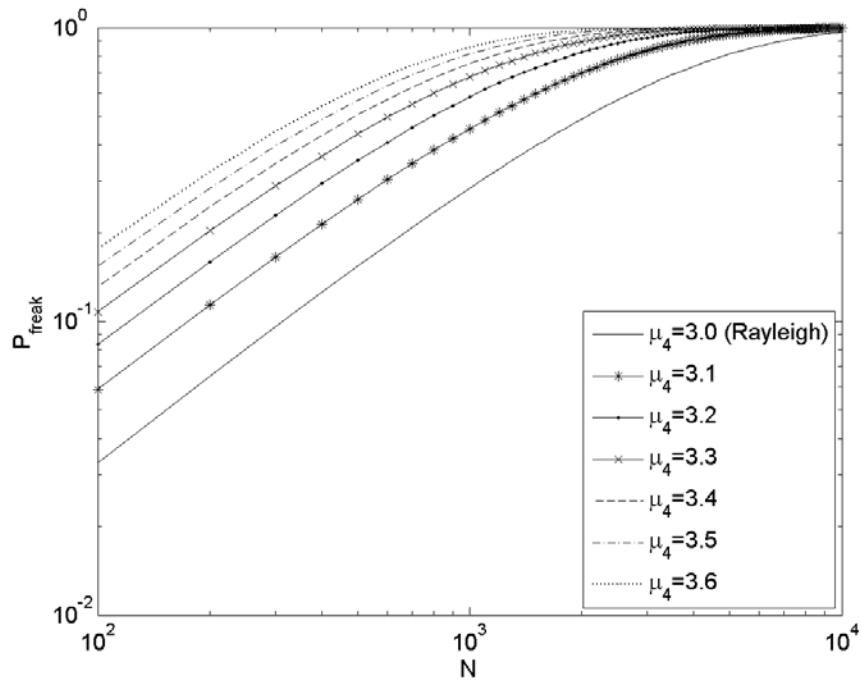


圖 4-3 異常波浪發生機率與波浪數目關係圖

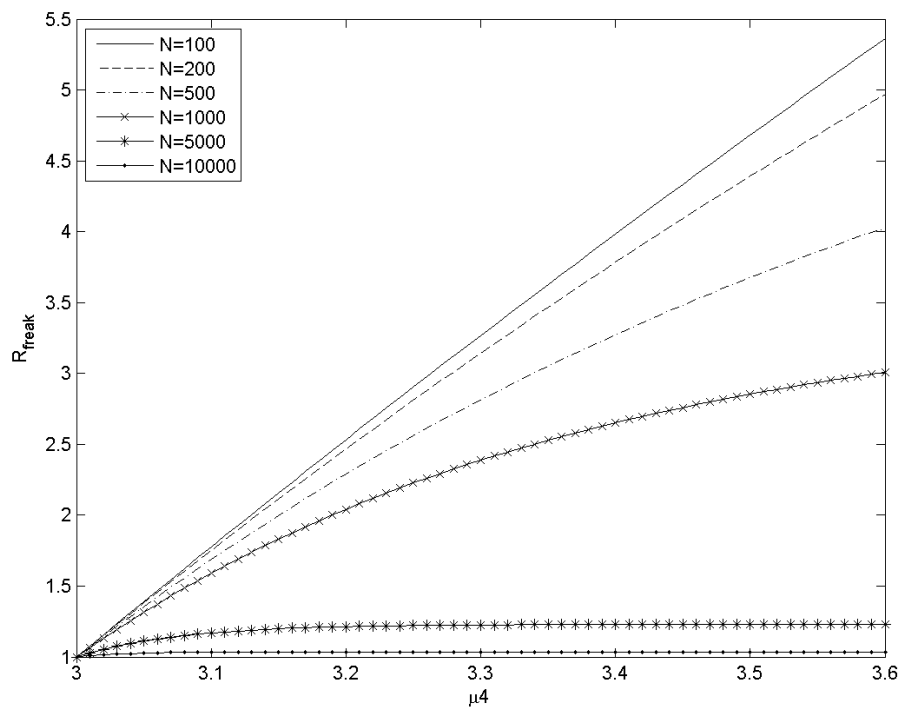


圖 4-4 非線性與線性波浪理論推求異常波浪發生機率之比值

異常波浪的發生機率與波浪個數(N)具有相關性，當波浪個數越多時也就是觀測時間越長時，異常波浪發生機率較高。因此，若欲進行前述推導之確認，只有連

續觀測的資料才能擷取出足夠的波浪個數來進行驗證，因此，本研究借用國立台灣海洋大學海洋環境資訊系蔡政翰教授多年前在基隆碧砂漁港外所設置的波浪連續觀測資料來從事驗證工作。

連續觀測測站位於基隆市碧砂漁港東防波堤外約 150 米處(圖 4-5 中星號處)，該處水深約為 27 米，所採用的觀測儀器為底碇式的 WH-103 超音波波浪儀，該儀器適用之水深為 3 到 55 米，可用來量測流速、水壓、水溫以及方位。超音波波浪儀的觀測原理是利用超音波從底部往上發射，當遇到介質不同時(即海氣交界面)則會反射，並由接收器接收反射回來的訊號，利用水中聲速乘以單程所花費的時間即可得知波高。該資料之取樣頻率為 2Hz，為連續觀測，但由於資料儲存需要，觀測作業進行時，將資料切割為每小時記錄三次，每次記錄 20 分鐘。

本文所採用的觀測資料時間為 1999 年到 2003 年，共七段連續水位變化資料，如表 3-1，資料最長天數達 59 天，最短亦有 34 天，圖 4-6 為其中第三組資料之時序列(59 天)，紅色字體表示有發布警報颱風之名稱。本文藉由所觀測到之水位時序列利用零下切法切割為個別的單獨波浪，進一步計算其波高、週期等資訊。

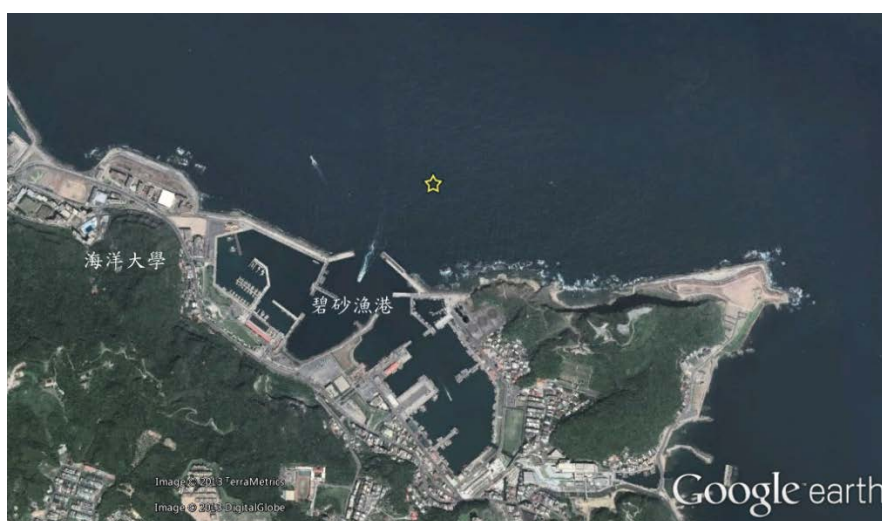


圖 4-5 波浪儀設置位置 (星號處)

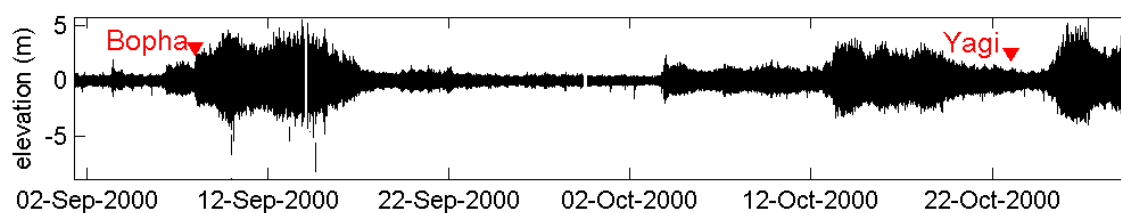


圖 4-6 Data set III 之水位時序列

表 4-1 現場連續波浪觀測資料表

Data set	Data period	Duration (days)	Data validity	Maximum wave height (m)
I	1999/07/16 – 08/27	43	100%	3.19
II	2000/07/18 – 08/30	43	99.6%	6.47
III	2000/09/01 – 10/29	59	98.6%	9.35
IV	2001/06/07 – 07/23	46	99.9%	4.53
V	2002/07/27 – 09/10	45	97.4%	8.56
VI	2002/10/30 – 12/07	38	100%	6.72
VII	2003/06/15 – 07/19	34	99.9%	3.58
all	1999-2003	303	99.7%	9.35

本文採用 1999 年與 2000 年碧砂漁港外的連續波浪觀測資料進行驗證，即表 4-1 中的 data set I、II、III，總觀測時間為 145 天。理論推導得知異常波浪發生機率與波浪的個數還有水位的峰度係數呈正相關。換句話說，當波浪個數及峰度係數越大時，發生異常波浪的機率就越大，而實測資料也證實了有相似的趨勢。由於發生機率不能小於零，因此根據理論式僅能推算出當峰度係數大於 2.875 時之異常波浪發生機率，即四階累積率(K_{40})必須大於 -1/8，因此本文對峰度係數最低僅取至 2.9 進行驗證；同時從現場資料之峰度係數分布得知峰度係數大於 3.6 的資料相對較少，因此驗證時最大峰度係數取到 3.6。

現場資料與理論之驗證結果如圖 4-7，橫軸為波浪的個數，縱軸為異常波浪發生機率，不同顏色代表不同的峰度係數(從 2.9 至 3.6)，符號和實線則分別代表著實測資料以及理論線。從圖中可得知當波浪個數足夠大時(例如 $N=10,000$)，異常波浪的發生機率將接近於 100%，此結果與理論相同。此外除了趨勢相同外，當峰度係數為弱非線性時，實測資料與理論之符合更加良好，尤其是當峰度為 3.1 時，由表 4-2 可得知，當水位變化峰度 $\mu_4 \geq 3.0$ 時，平均的均方根誤差為 18%，但當峰度係數偏小時，理論與實測資料結果差異較大，其原因將進一步討論。

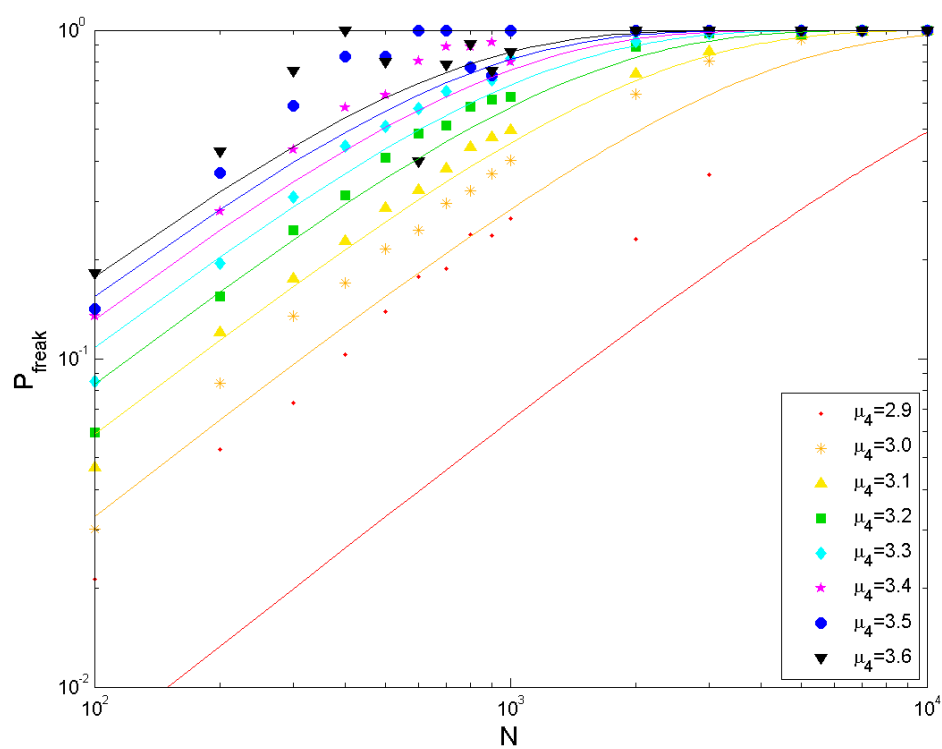


圖 4-7 現場資料與理論驗證結果

表 4-2 資料驗證之均方根誤差

Kurtosis	RMSE [%]
2.9	260.19
3.0	29.09
3.1	9.30
3.2	9.86
3.3	13.23
3.4	18.47
3.5	24.77
3.6	23.67

4-3 BFI 之計算

由前章節可知異常波浪發生的機率和觀測波浪數以及水位峰度有關，只要能得知這兩個參數，即可計算異常波浪發生機率。然而目前常見的波浪模式如 SWAN、NOAA WaveWatch III 等，主要輸出產品為波浪波譜，再從波譜計算波浪參數進行預報，但是要從波浪預報模式中輸出水位峰度值是相當困難的。Janssen (2003) 提出波浪非線性效應演化會產生的調制現象是異常波浪發生的原因，以 BFI 指數(Benjamin-Feir Index, BFI)來描述波浪不穩定狀態，也提出 BFI 與水位峰度值間的關係，而 BFI 指數可由波譜中計算獲得，因此只要有波浪模式輸出之波譜資料，即可估算未來異常波浪發生機率。Janssen(2003)提出之 BFI 定義如下式

$$BFI = \frac{\varepsilon}{\Delta} \sqrt{2} \quad (4-41)$$

其中 ε 為波浪尖銳度， Δ 為相對譜寬，其定義分別為

$$\varepsilon = k_0 \sqrt{m_0} \quad (4-42)$$

$$\Delta = \frac{\sigma_\omega}{\omega_0} \quad (4-43)$$

式中 k_0 為 ω_0 分別為主成分波之波數與角頻率， m_0 為零次矩， σ_ω 為譜寬參數，本研究以下式計算(Longuet-Higgins, 1957)

$$\sigma_\omega = \sqrt{\frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1} \quad (4-44)$$

其中 m_n 為能譜的 n 次矩，定義為

$$m_n = \int f^n S(f) df \quad (4-45)$$

在上一年度 BFI 分析過程中發現，(4-41)式之 BFI 計算對於實測波譜資料過於敏感，且當有雙峰波譜時，時常會獲得不合理之 BFI 值。因此引入 Serio et al. (2005) 的建議，以譜尖參數(Goda's peakness factor, Q_p) 代替譜寬參數來計算 BFI， Q_p 的定義為

$$Q_p = \frac{2}{m_0^2} \int df f S^2(f) \quad (4-46)$$

則式(4-41)變成

$$BFI = k_0 \sqrt{m_0} Q_p \sqrt{2\pi} \quad (4-47)$$

上個年度計畫的結果中，以(4-47)式進行實測一維波譜的 BFI 計算結果相當合理。本文使用中央氣象局波浪模式所輸出的方向波譜資料進行測試，使用的資料時間為 2013 年 11 月 2 日 0 時，當時柯羅莎(Krosa)颱風正位於台灣西南方，計算結果如圖 4-9，圖中在台灣東南海上 BFI 值大約介於 0.8~1 之間，而台灣西南方 BFI 值約 1.4 區域(紅色區域)，大約為科羅莎颱風位置，這個計算結果有許多數值不合理的狀況，通常 BFI 超過 1 即表示波高到達高度不穩定狀態，可能已出現碎波，因此，本文認為上述 BFI 分析結果值得商榷。

Mori et al. (2011)的研究指出，計算 BFI 值時應考慮能量在方向上的分布，未考慮方向分布可能出現不合理結果，本文認為上述結果與此有關，因此採用 Mori et al. (2011)所提方法重新計算 BFI，如下式

$$BFI_{2D}^2 = \frac{BFI_{1D}^2}{1 + \alpha R} \quad (4-48)$$

式中 BFI_{2D} 表示考慮方向分布函數計算所得之 BFI， BFI_{1D} 為以(4-41)式或(4-47)式計算得之 BFI， R 為方向譜寬參數(Directional width, σ_θ)與頻譜寬度(σ_ω)之比值如(4-49)式，而 α 為一常數，Mori et al. (2012)建議使用 7.1，而方向譜寬參數則可以用(4-50)式計算，方向譜寬參數越小表示波向越集中。

$$R = \frac{\sigma_\theta^2}{2\sigma_\omega^2} \quad (4-49)$$

$$\sigma_\theta = \sqrt{\int \theta^2 S(\theta) d\theta} \quad (4-50)$$

本文將考慮了波浪方向性之 BFI 值進行機率計算，並與一維波譜計算所得進行比較，希望能獲得正確合理之 BFI 數值，如此才能求得正確之異常波浪發生機率。我們同樣使用同一筆方向波譜資料做為測試，以式(4-50)計算方向譜寬參數，計算結果如圖 4-10，大部分區域方向譜寬參數約在 0.5 上下，而在颱風中心東邊一帶海域之方向寬度較高，達約 1.5，表示此區域之波浪方向分布較廣而不集中，選取其中一點(A)，該點方向譜寬參數為 1.47 並繪製該點之方向譜，如圖 4-11(a)所示，顯示此處的波向有兩個不同的成份；而在颱風週遭另取一點 B，該處之方向譜寬參數為 0.53，方向譜如圖 4-11(b)，則可發現波向較為集中，且僅有一個主要的方向。將方向譜寬參數代

入式(4-48)計算考慮方向性之BFI指標，計算結果如圖4-12所示，考慮波譜的方向性並對計算方法進行修正後，BFI值大約介於0.05~0.3之間，計算結果也較為合理，往後將以此方法進行BFI值的計算。

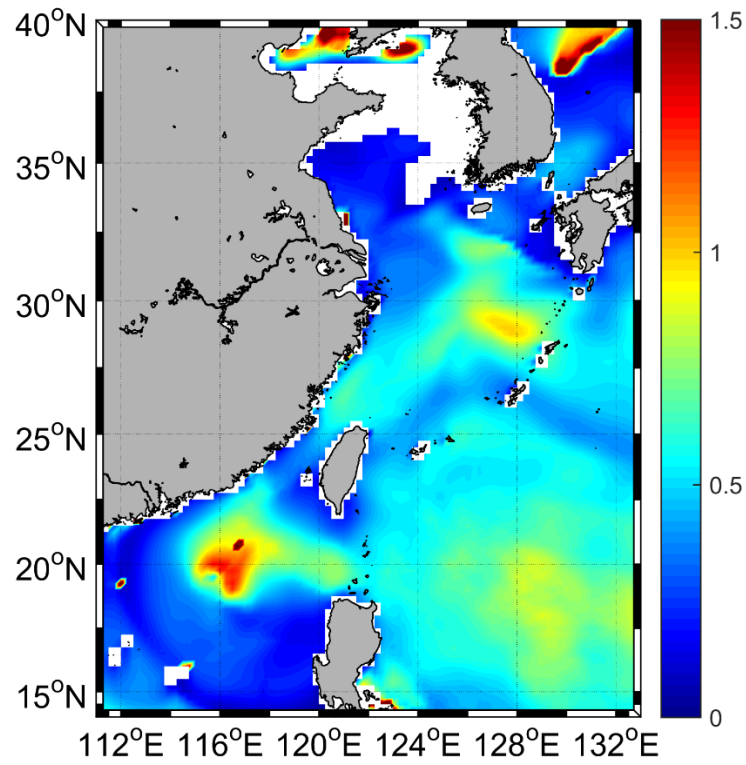


圖 4-8 使用未考慮波浪方向性之 BFI 參數計算結果(2013/11/2 00:00)

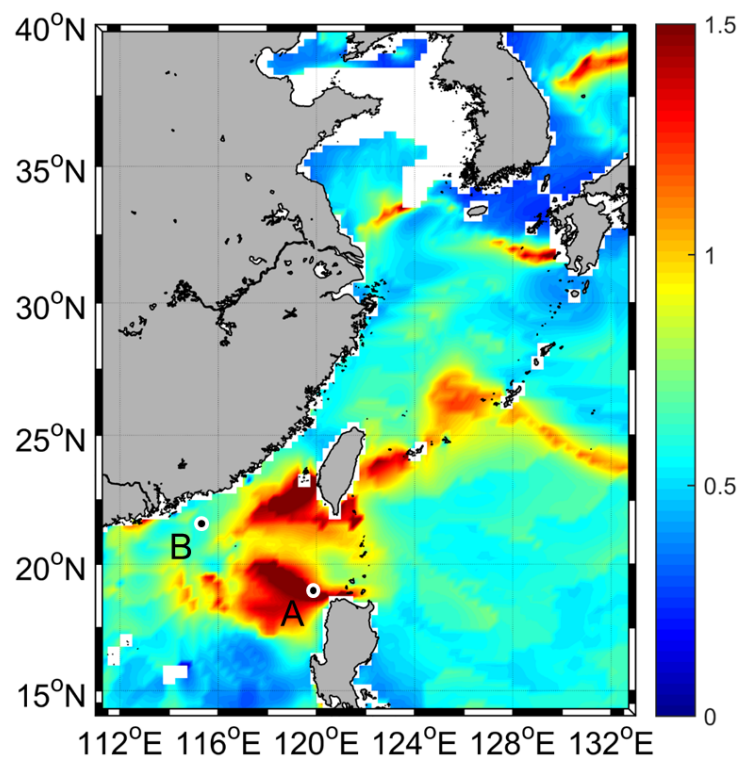


圖 4-9 方向譜寬參數計算結果(2013/11/2 00:00)

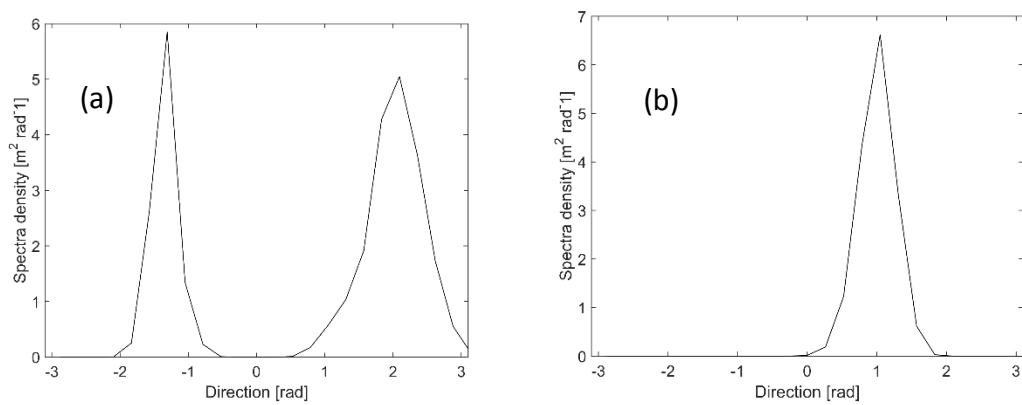


圖 4-10 中點位 A(圖 a)與點位 B(圖 b)之方向分布函數

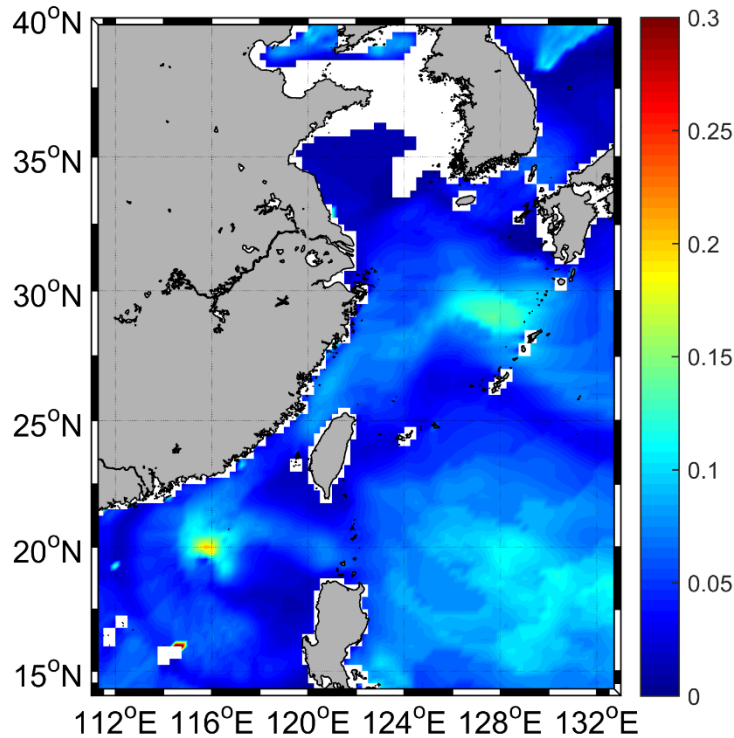


圖 4-11 考慮了波浪方向性之 BFI 參數計算結果(2013/11/2 00:00)

4-4 湧浪出現對異常波浪發生機率之影響

颱風湧浪往往造成許多岸邊人員浪擊落海的意外事件，例如 2013 年 11 月 10 日發生於鼻頭角的瘋狗浪意外，造成 8 人不幸喪命，主因就是位於菲律賓的海燕颱風傳來的湧浪所致；2012 年 11 月梗枋漁港瘋狗浪沖刷人車入海、2014 年 7 月野柳瘋狗浪事件、2014 年 10 月海洋大學前方海堤瘋狗浪事件等都是因為湧浪影響所致。

前文已說明 BFI 指數是描述波浪的非線性情況，也是目前最常被使用來評估異常波浪發生的指標，它與波浪的尖銳度和譜寬有關。BFI 值越大表示調製不穩定的現象越明顯，當 BFI 值大於 1 時，表示水位呈現高度不穩定狀態，是異常波浪好發環境。過去探討非線性波浪的水槽實驗中，多藉由控制 BFI 的條件(例如 $BFI > 1$)，產生非線性的環境，進而製造異常波浪案例(Onorato et al., 2005; Onorato et al., 2006)。然而在真實海洋中，實測波浪資料的 BFI 值通常會小的許多，在很特殊的極端情況下，BFI 值才會接近 1(Slunyaev et al., 2015)；從先前的研究中也顯示，實測波浪資料的 BFI 值大約介於 0-0.5 之間。圖 4-13 為龍洞浮標波浪資料 1998-2013 年間波浪資料的 BFI 值組體圖，最大值為 0.79，有 90% 的資料其 BFI 值小於 0.2。當 BFI 值很大時，不一定會產生異常波浪；異常波浪亦不一定發生在 BFI 值很大的時候，也就是

說異常波浪發生的機制不僅有非線性效應，可由其他的機制所產生。

當 BFI 值越大，非線性效應越強，則發生異常波浪的機率也越大；當觀測的波浪數越多，則發生異常波浪的機會也越大。以浮標作業化觀測時間 10 分鐘，夏季無天氣系統期間波浪平均週期為 6 秒，可觀測約 100 個波，若在颱風期間，平均週期為 10 秒，則可測得 60 個波浪。海上航行的船隻依船型與作業內容不同，小漁船可以 2 節的船速航行進行作業，貨輪航行平均船速可達 20 節，在海上平均週期為 6 秒的條件下，平均航行 1 小時會遇到 600-800 個波。圖 4-14 為不同觀測波浪數 N 時，在各 BFI 值情況的異常波浪發生機率。因此當船隻在 BFI 值達 0.5 時的海況下航行 1 小時，有 40%以上的機會遇到異常波浪。

本研究以 JONSWAP 波譜模型模擬風浪與湧浪之波譜，用以探討湧浪發生時對 BFI 值計算的影響，進而瞭解對發生機率的影響程度。JONSWAP 波譜模型原始型式為

$$S(f) = \alpha \frac{g^2 f^{-5}}{(2\pi)^4} \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-4} \right] \gamma^{\exp \left[\frac{(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2} \right]} \quad (4-51)$$

其中 f_p 為尖峰頻率， α 為 Phillips 參數， σ 為譜型參數， γ 為譜峰強化因子(peak enhancement factor)。Onorato et al. (2006)探討 JONSWAP 波譜模型參數與 BFI 關係，並提到波浪尖銳度是 Phillips 參數(α)與譜峰強化因子(γ)的函數，當任一個參數增加，則尖銳度也會上升，而 BFI 也會隨之上升。而譜寬參數與 γ 為反比關係，譜寬越窄能量越集中， γ 值越大，BFI 值也會越大。圖 4-15 為 γ 與 BFI 值之關係圖，隨著 γ 值越大 BFI 值也會隨之增大。

Goda(2010)發現當湧浪現象明顯的時候，波譜能量較為集中， γ 可達 8-9，同時提出以 JONSWAP 波譜探討湧浪對海岸工程的影響問題時，建議 γ 可考慮設定為 3-10 之間(取決於湧浪傳遞的距離)。從圖 4-15 中，在 α 為 0.008 的條件下，可知當湧浪較顯著時 BFI 可達 0.8 以上($\gamma=8$)，是風浪條件時($\gamma \sim 3.3$)的 2.1 倍以上，由此可知，隨著能量聚集程度的不同，湧浪對 BFI 值的影響程度。

本研究接續採用龍洞浮標 1998-2014 年夏季期間(6-8 月)的波浪資料，共有 26158 筆資料，期間共有 62 個颱風，將颱風期間以外的資料視為平常時間。參考中央氣象局長浪警報的條件做為湧浪的定義，長浪的定義有二，分別為平均週期(T_{m02})>8 秒且示性波高(H_{m0})>1.5m，期間符合定義的資料有 425 筆，湧浪案例與平常時候之 BFI 值分布組體圖如圖 4-16，在平常時候 BFI 值平均為 0.108，而在湧浪

出現時 BFI 值平均值為 0.150，是平常時候的 1.4 倍。分析湧浪發生時的 BFI 值與颱風距離的關係(圖 4-17)，隨著颱風距離越近，BFI 值越大，此結果也反映隨著湧浪傳遞的距離越短，能量越集中。

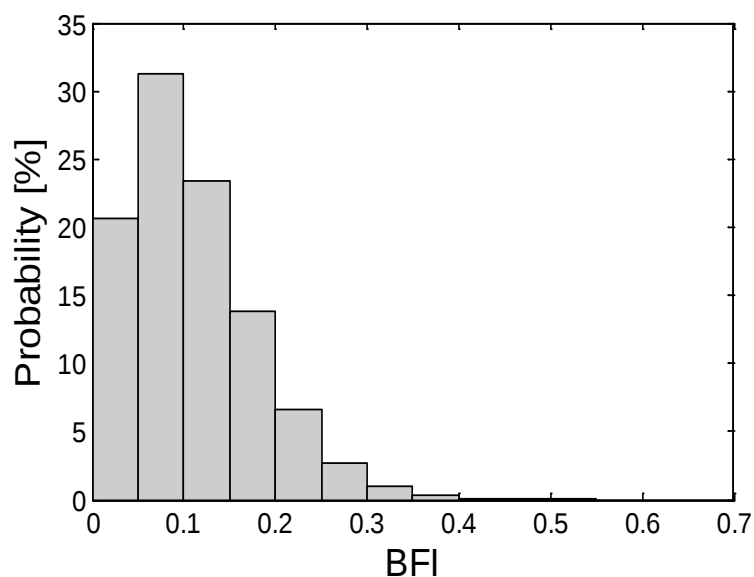


圖 4-12 實測波浪資料 BFI 值分佈(龍洞 1998-2013 年)

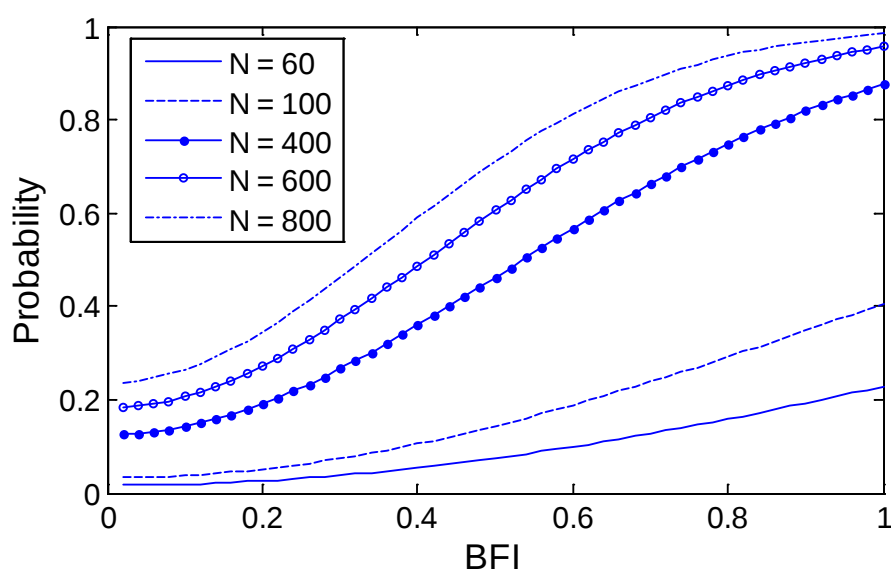


圖 4-13 不同 BFI 條件下異常波浪發生機率

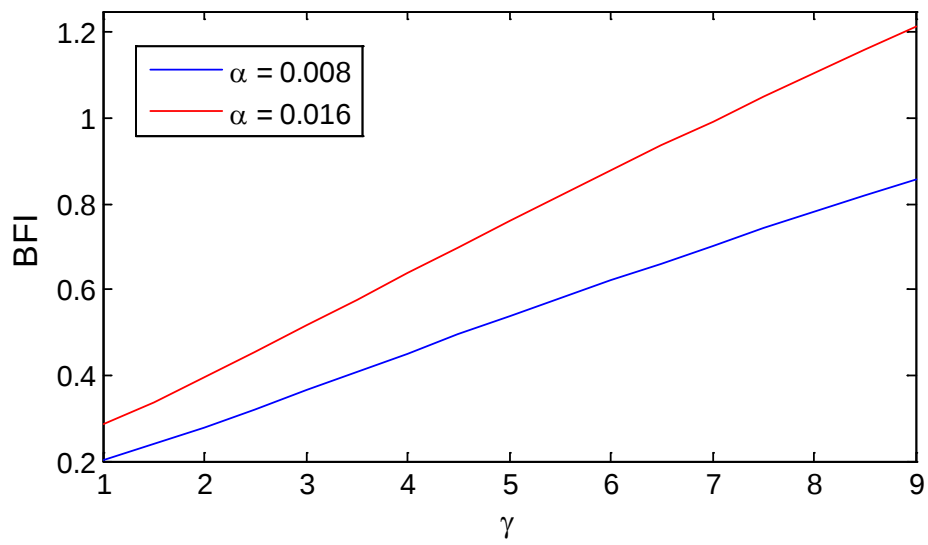


圖 4-14 譜峰強化因子與 BFI 之關係

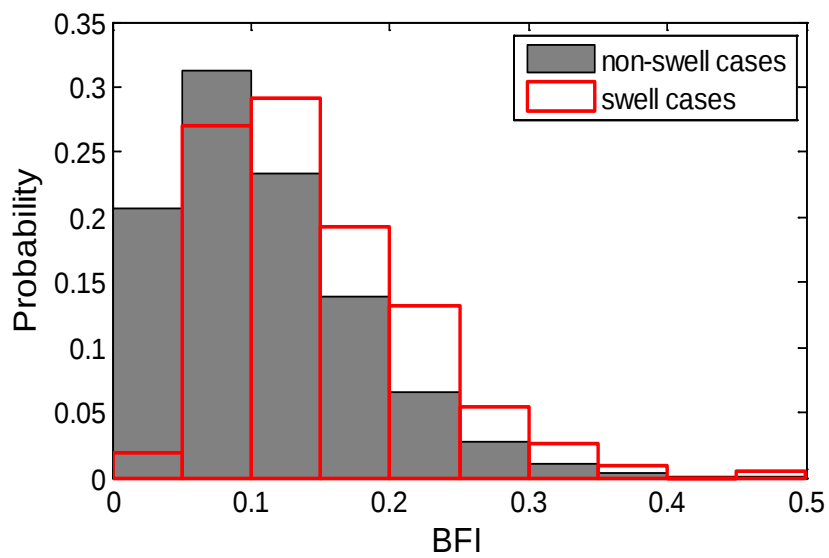


圖 4-15 平常與湧浪案例之 BFI 值分佈

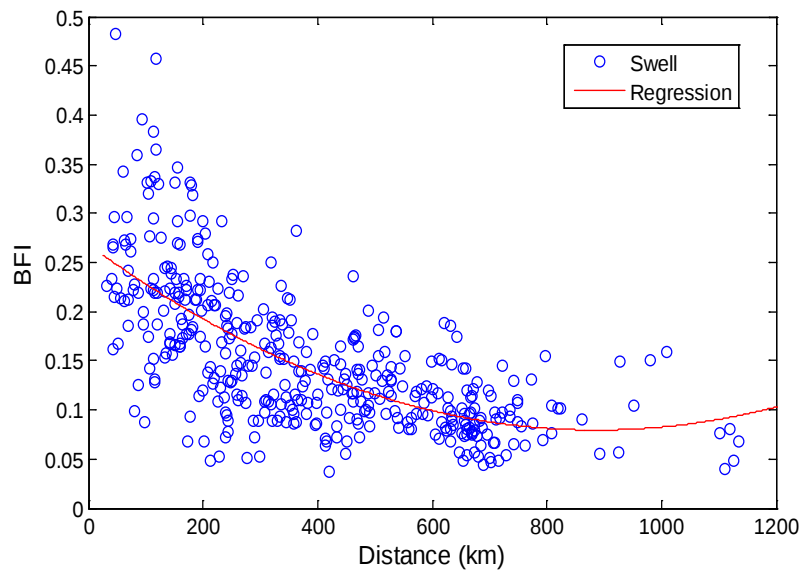


圖 4-16 湧浪發生時颱風中心與 BFI 值的關係

4-5 異常波浪機率預測作業化運作成果

本文採用(4-38)式來估算外洋異常波浪發生機率，該式說明了異常波浪發生機率與波浪非線性參數 BFI 有關，而前節已論述了 BFI 與波譜間之關係，並探討了準確的 BFI 計算方法，本文使用中央氣象局 NOAA WaveWatch III 波浪模式產出所輸出之方向波譜來計算 BFI，進而推估異常波浪發生機率。

配合中央氣象局海象中心波浪模式的運作流程來進行異常波浪機率預測作業。中央氣象局波浪預報模式一天執行四次(流程圖如圖 4-18)，執行時間為每日 04:00、10:00、16:00 和 22:00 (UTC)，每次計算產出未來 72 小時之波浪預測。其中每日 04:00 UTC 的計算結果會進行人工校對，於 08:00 UTC 前產出波浪模式分析場、未來 24 小時、未來 36 小時與未來 48 小時波浪預報圖。本研究利用前節推導整理之異常波浪發生機率估算理論，以 Mathwork 公司開發之 Matlab 程式語言撰寫分析程式，包裝成可執行檔。根據工作會議決議，每日進行異常波浪發生機率預測作業乙次，於每天 04:00 UTC 波浪模式計算結束後，將模式輸出的方向波譜傳輸至異常波浪機率預測作業電腦中，波浪模式的運算與傳輸檔案等預計可以在 05:00 UTC 前完成，並於 05:00 UTC 自動啟動執行異常波浪發生機率計算執行檔，產出未來 24 小

時、36 小時與 48 小時異常波浪發生風險圖。計算範圍包含東經 111-133 度，北緯 14-40 度之間，依照計算得到之發生機率，未來發佈異常波浪風險圖時，可分為高、中和低風險，分別以橘色、黃色和綠色表示，異常波浪發生風險圖如圖 4-19 所示，至於各種風險所對應之發生機率則將視實際運作後之分析結果來討論制定。

異常波浪發生機率預測系統自開始在中央氣象局作業化運行迄 10 月 31 日止共進行了 85 天，本節以此期間資料說明運作結果。本文檢視這兩個多月來異常波浪發生機率的計算結果，絕大部分發生機率介於 0.15-0.5 之間，僅極少數時刻，異常波浪發生機率超過 0.65，此期間在台灣周遭海域的異常波浪發生機率累積圖如圖 4-20 所示。因此，本文將發生機率低於 0.2 者定義為異常波浪發生低風險，機率在 0.5 以上者視為高風險，介於兩者則稱之為中度風險。整個運作期間，共產出了 270 筆異常波浪發生機率圖，根據前述定義，台灣北部 200 公里內海域計有 3 次出現異常波浪可能發生之高風險情形，西部海域有 1 次，東部海域和南部海域則未出現異常波浪發生高風險情形。

從這段時間的運作中，本文發現了，異常波浪發生機率易受到差異的天氣系統影響而有顯著提昇，如圖 4-21 為 2015/9/5 06:00 UTC 之異常波浪發生機率預測結果，台灣南部海域發生機率約為 0.15，但在台灣北部海域則出現一環狀區域，北自山東半島，南至台灣北海岸，環狀區域內異常波浪發生機率達 0.5 (最大 0.57)，是南部海域的 3 倍以上，對比當時的地面天氣圖(如圖 4-22)，有一鋒面接近台灣北部海域，且此異常波浪發生機率較高之環狀帶與地面天氣圖之等高壓線吻合，推測在高壓帶的邊界上，海面受到風吹所堆積的能量，使的波浪的非線性不穩定現象加劇，進而促使了異常波浪發生機率的上升。另一個例子發生在 2015/9/20 12:00 UTC，如圖 4-23，台灣海峽的發生機率較高約介於 0.3-0.35 間，此時台灣其他海域異常波浪發生機率僅 0.15-0.18，檢視當時的地面天氣圖(如圖 4-24)，中國大陸北方有一冷高壓出海，並在華南沿海一帶產生滯留鋒面，推測此鋒面的接近，是造成台灣海峽內異常波浪發生機率上升的主因。圖 4-25 同樣是一個大陸冷高壓東移的造成異常波浪發生機率上升的案例，從地面天氣圖(圖 4-26)可知，在受到冷高壓的影響海域，異常波浪發生機率有顯著偏高的情況，發生機率約介於 0.28-0.37 之間。圖 4-27 則是一個受到熱帶低氣壓影響而影響異常波浪發生機率的案例，當時熱帶低氣壓彩虹(Kujira)位於菲律賓西邊(圖 4-28)，可能是造成該區域海域異常波浪發生機率偏高的原因，而北方有一高壓東移，也影響北方海域，而在兩系統的交界處，產生一異常波浪發生機率較低的陰影區。由以上案例可知，各式天氣系統(如鋒面、大陸冷氣壓和颱風)出現時，異常波浪發生的機率常有顯著的變化，通常均是增高了其發生機率。

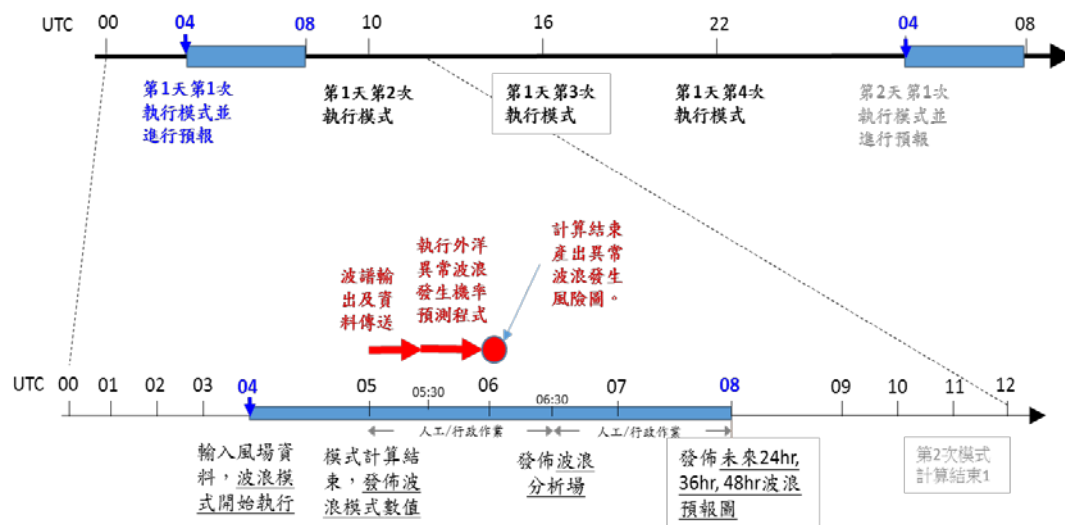


圖 4-17 外洋異常波浪機率預測作業化規劃

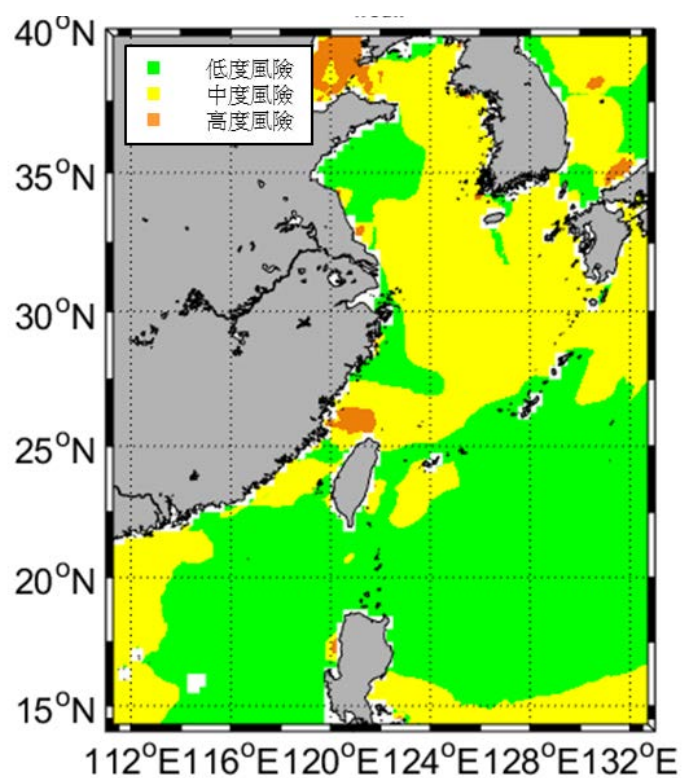


圖 4-18 異常波浪發生機率風險圖範例

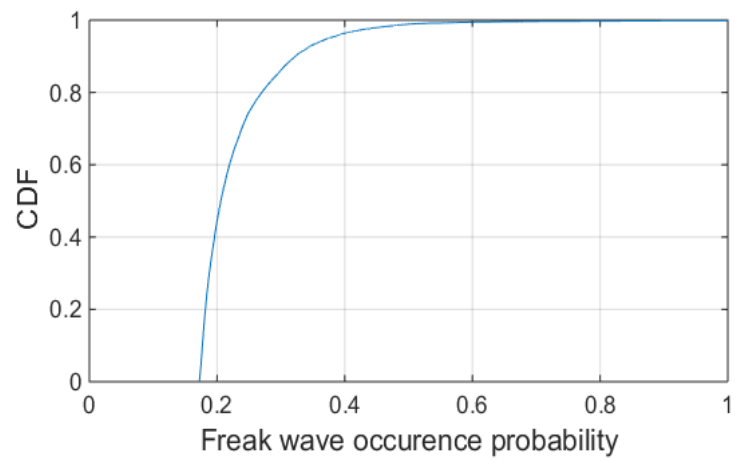


圖 4-19 台灣沿岸 200 公里內異常波浪發生之累積機率圖

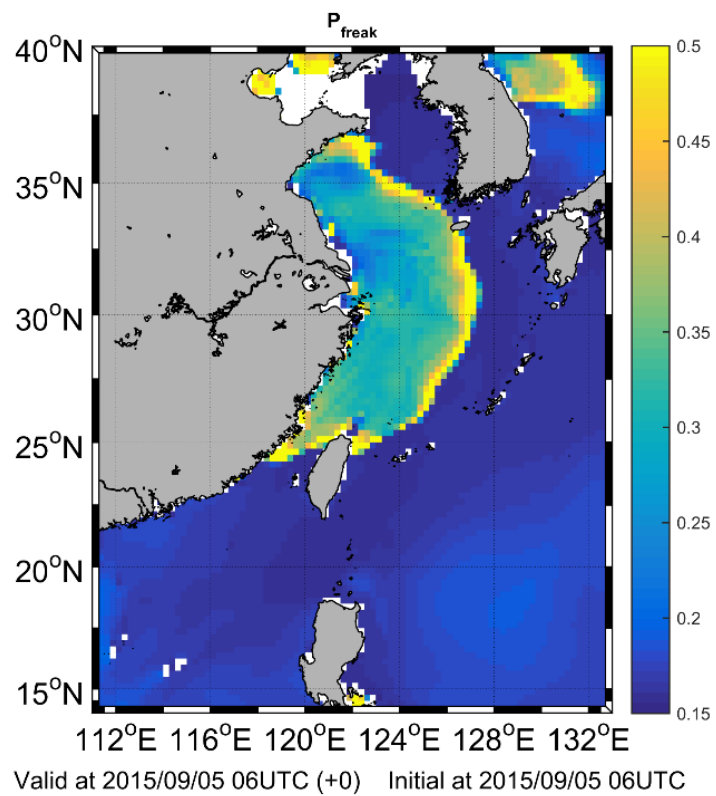


圖 4-20 2015/9/5 6:00 UTC 異常波浪發機率預測圖

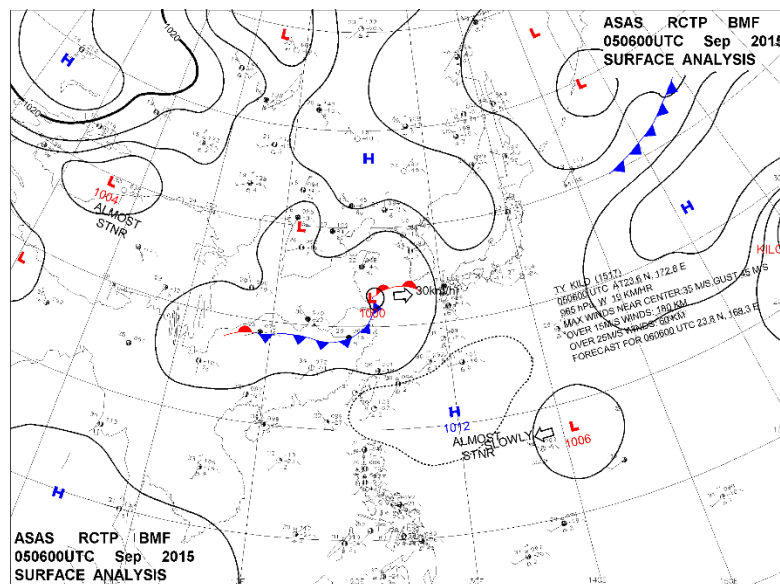


圖 4-21 2015/9/5 6:00 UTC 地面天氣圖

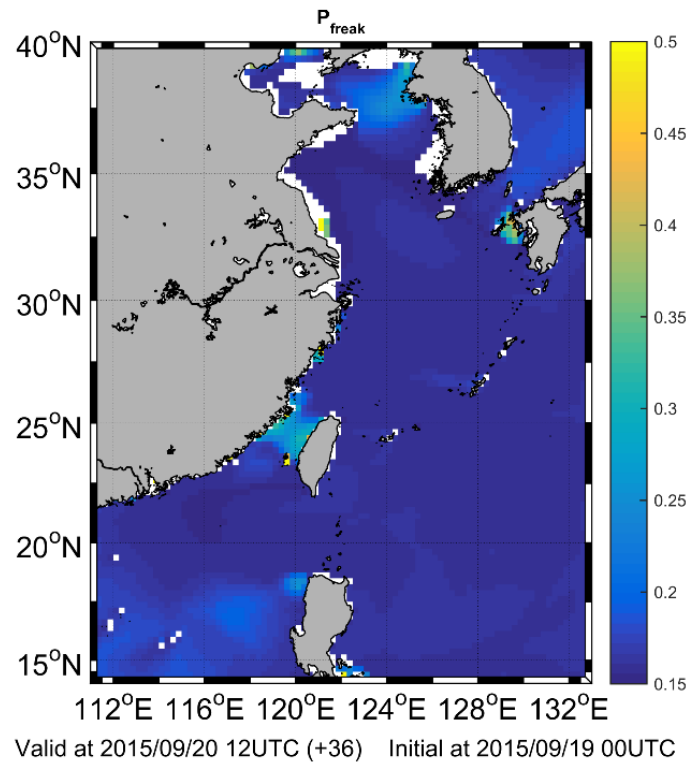


圖 4-22 2015/9/20 12:00 UTC 異常波浪發機率預測圖

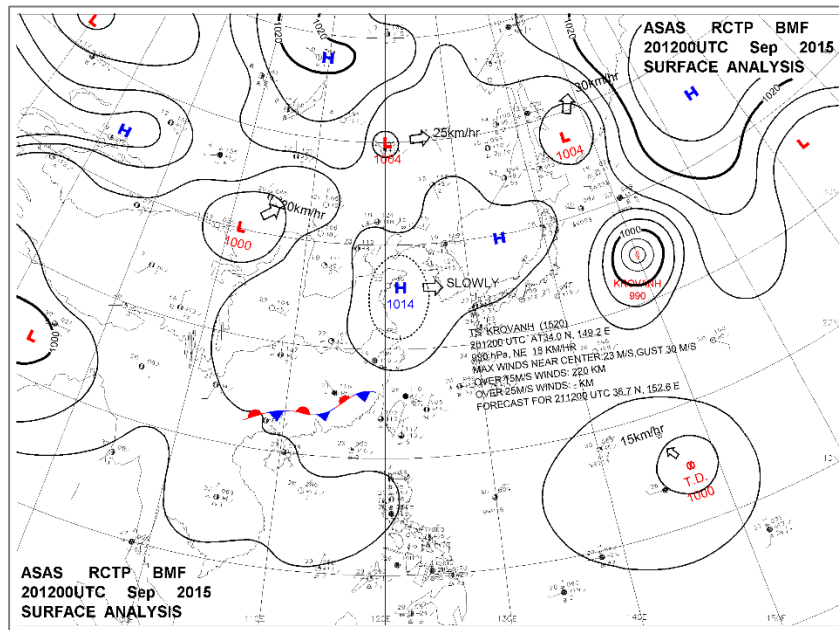


圖 4-23 2015/9/20 12:00 UTC 地面天氣圖

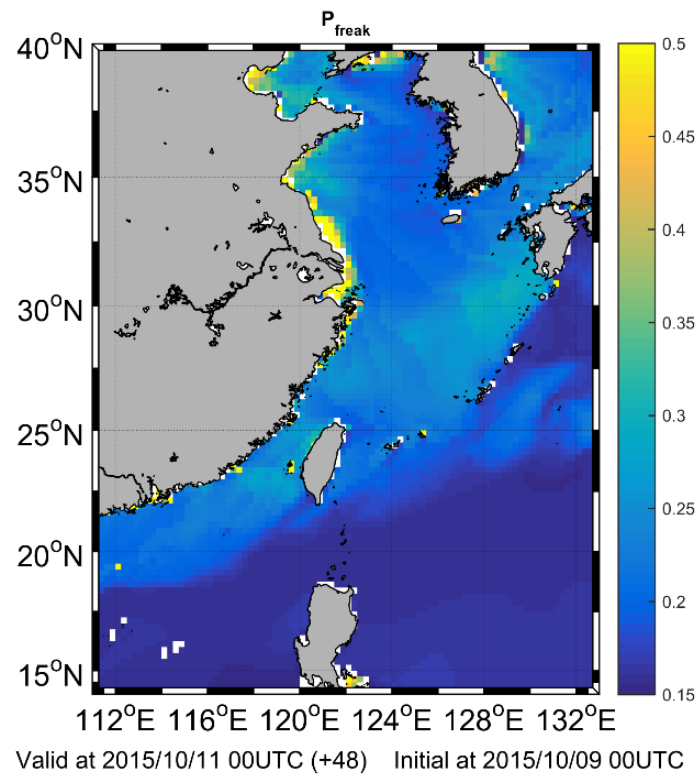


圖 4-24 2015/10/11 0:00 UTC 異常波浪發機率預測圖

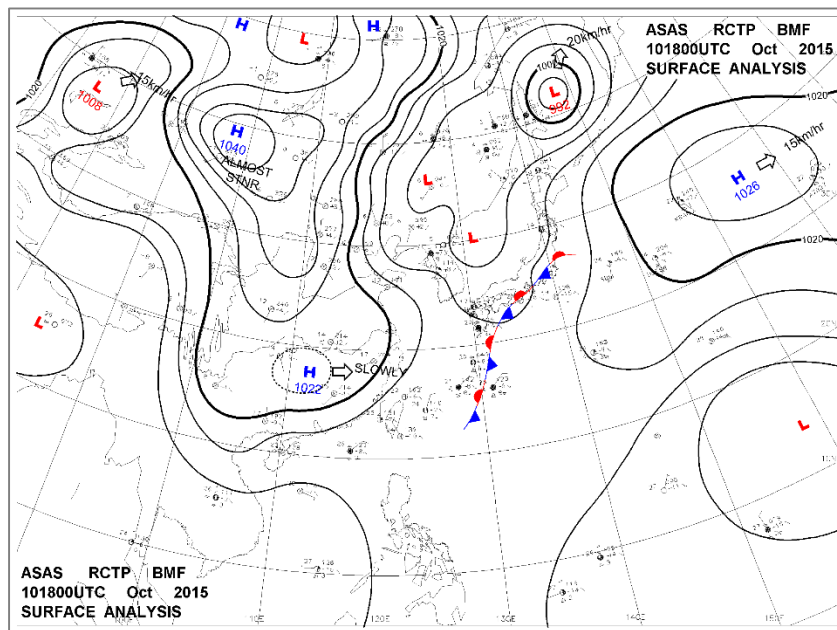


圖 4-25 2015/10/10 18:00 UTC 地面天氣圖

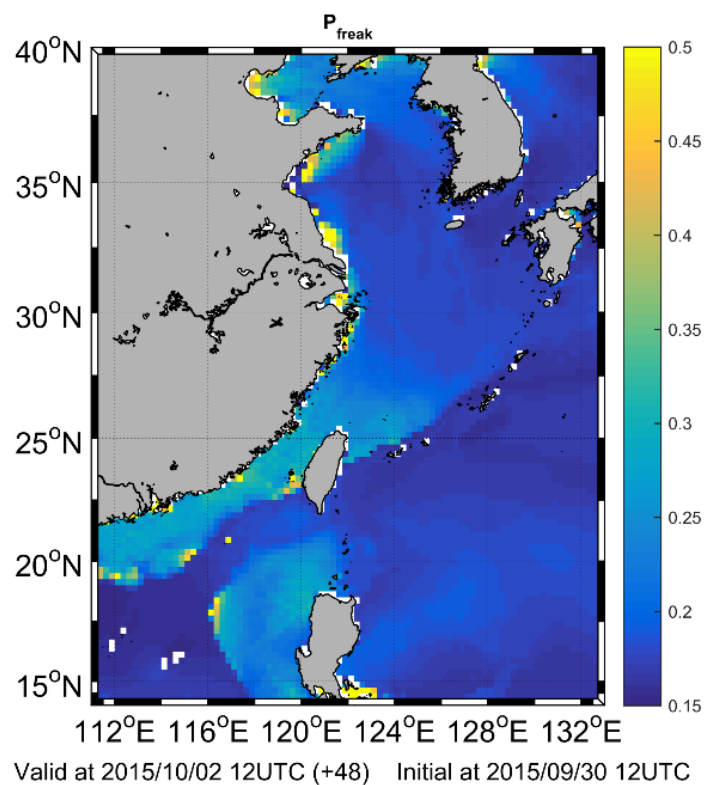


圖 4-26 2015/10/2 12:00 UTC 異常波浪發機率預測圖

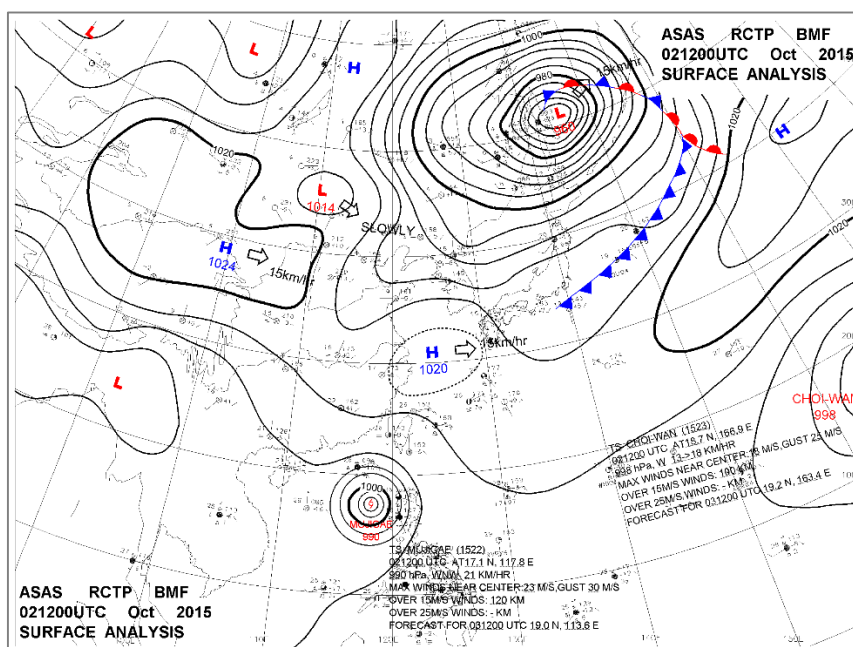


圖 4-27 2015/10/2 12:00 UTC 地面天氣圖

4-6 異常波浪發生機率預測之驗證

在外洋異常波浪的研究中，最終目標就是預測外洋異常波浪發生機率，可提供海上船隻航行安全警戒資訊，減少船難的發生。由第二年與第三年的研究中，已對異常波浪發生機率估算的理論有著相當程度的掌握，本年度也參考近年研究文獻，增加考慮波浪方向性來計算 BFI，進而從方向波譜計算方向譜寬參數去估算異常波浪發生機率。根據(4-38)式，異常波浪的發生機率與波浪數(N)有相關性，當波浪數越多時，觀測時間越長時，異常波浪發生機率也越高。因此，若欲進行驗證，需要具有足夠長之連續觀測波浪資料，才能擷取足夠的波浪個數來進行驗證，因此本研究採用東吉島波浪站的連續波浪觀測資料作為驗證分析對象。

本研究參考中央氣象局降雨機率預報驗證方式來從事異常波浪發生機率估算結果驗證。驗證的方法為從過去的預測中，將相同預測機率的事件進行歸類，並比較在此預測機率下，實際發生的機率為何，若實際發生的機率與預測的發生機率相同，則稱為最佳預測。例如，在預測發生機率為 20% 的事件當中，實際發生的次數有 20%，即為最佳預測。

如前節所述，異常波浪發生機率預測程式於 2015 年 8 月 10 日開始上機測試，至 10 月 30 日為止共累積 85 天運作結果。本研究對於異常波浪發生機率計算時使用的波浪數(N)，是設定某船隻在此海域停留 40 分鐘所會遭遇到的波浪數，在驗證的過程中，則使用東吉島波浪站在 40 分鐘內實際觀測到之波浪數。在一般風浪情況下，波浪之平均週期約為 5~6 秒，40 分鐘內可觀測到之波浪數約為 400-480 個波。異常波浪機率預測作業中包含分析場(預測當時時刻)、未來 24 小時、未來 36 小時與未來 48 小時異常波浪發生機率，本研究也分別驗證不同預測時間之計算結果。驗證結果如圖 4-21 所示，在運作的 85 天內，異常波浪發生機率主要介於 0.15-0.45 間，以 0.05 作為分組間距，分別計算實際發生之機率，結果顯示在低發生機率的預測皆非常接近最佳預測，而針對發生機率較大的部分似乎有較大偏差，但其原因之一是因為樣本數過少所致，本文以樣本數作為加權因子來計算加權平均誤差，如表 4-3 所示，未加權之預測誤差介於 2%-50%之間，但考慮了樣本數之加權平均誤差介於 10% - 15%，此結果初步確認了本計畫所開發的異常波浪發生機率預測系統具有某個程度的準確性。

在完成紀律預測之驗證與上機測試後，最後一部分為外洋異常波浪機率預測程式之操作教育訓練與技術轉移之部分，本研究之共同主持人董東璟教授已於 104 年

10月29日，在中央氣象局海象中心舉辦相關之教育訓練講座，邀請中央氣象局海象中心相關人員參與，除講解外洋異常波浪機率預測程式之建置原理，還包含該程式之操作以及出現錯誤之簡易疑難排除，往後當機率預測程式在執行時，若有錯誤發生，操作人員可簡易判斷錯誤原因，並進行錯誤排解。教育訓練與技術轉移之簽到表與相關教材資料如附錄光碟。

表 4-3 本計畫研發之異常波浪發生機率預測結果誤差分析

預報資料時間點	機率區間						加權平均 誤差
	0.15 - 0.2	0.2 - 0.25	0.25 - 0.3	0.3 - 0.35	0.35 - 0.4	0.4 - 0.45	
分析場	5.2	5.3	30.7	52.7	55.6	17.6	10.0
24 小時	3.3	25.9	11.1	29.0	25.0	--	10.4
36 小時	2.9	11.1	37.3	27.6	46.7	--	10.3
48 小時	9.2	39.1	5.7	2.8	--	--	15.0

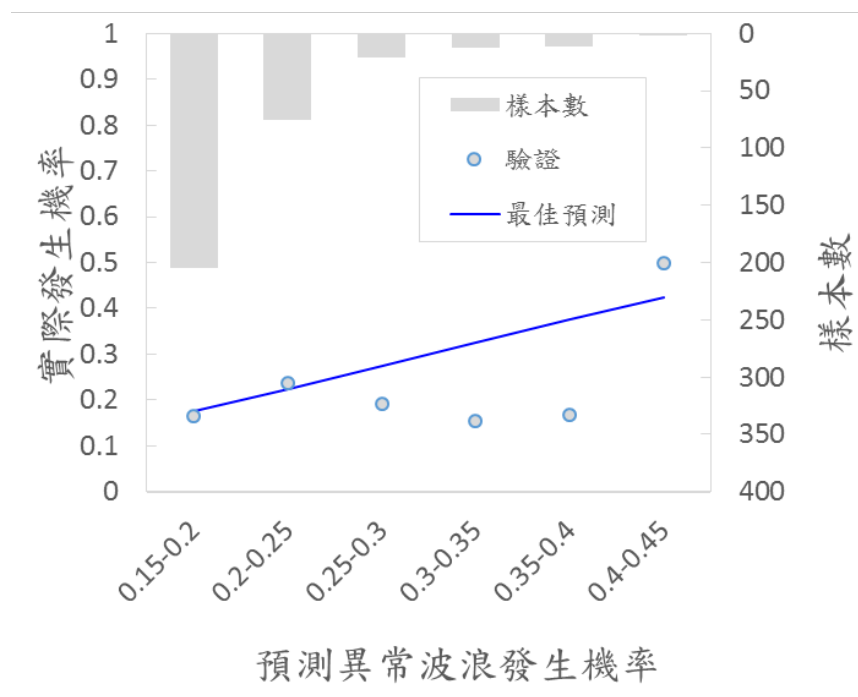


圖 4-28 (a) 異常波浪機率預測驗證結果 - 分析場

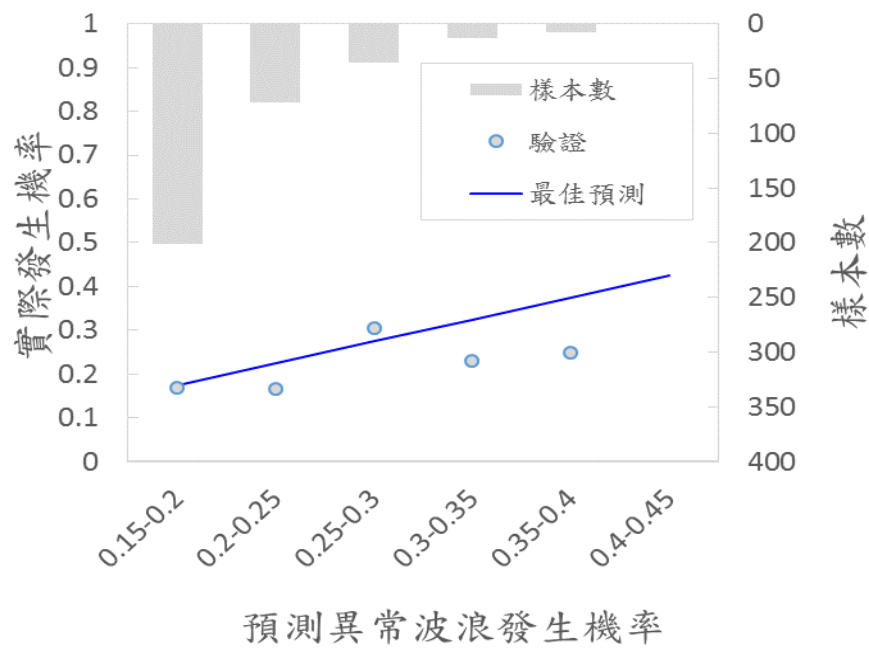


圖 4-28 (b) 異常波浪機率預測驗證結果 - 未來 24 小時預測

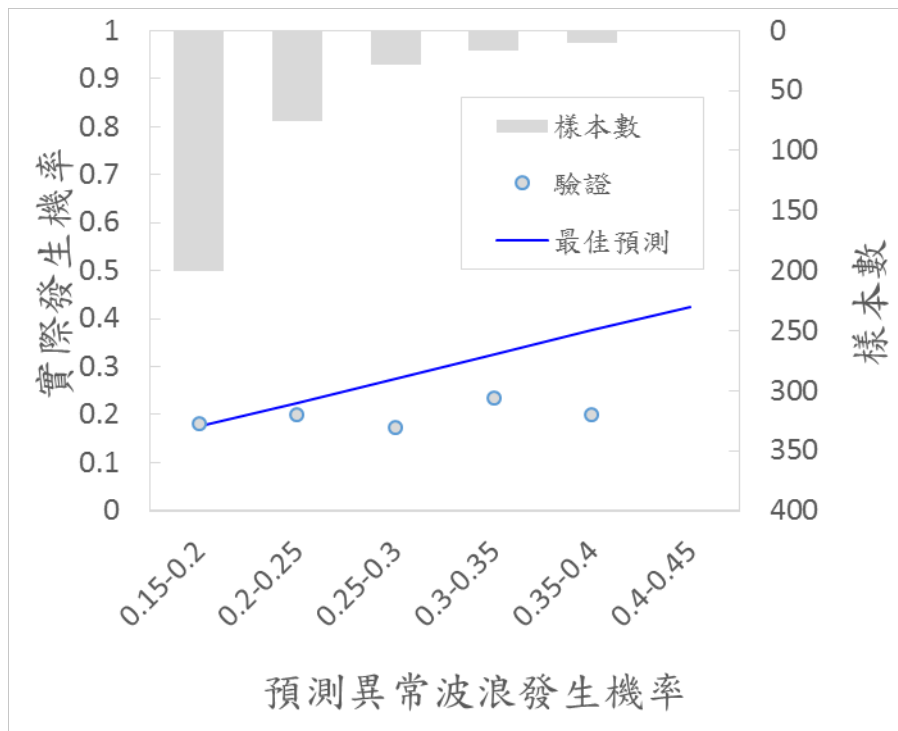


圖 4-28 (c) 異常波浪機率預測驗證結果 - 未來 36 小時預測

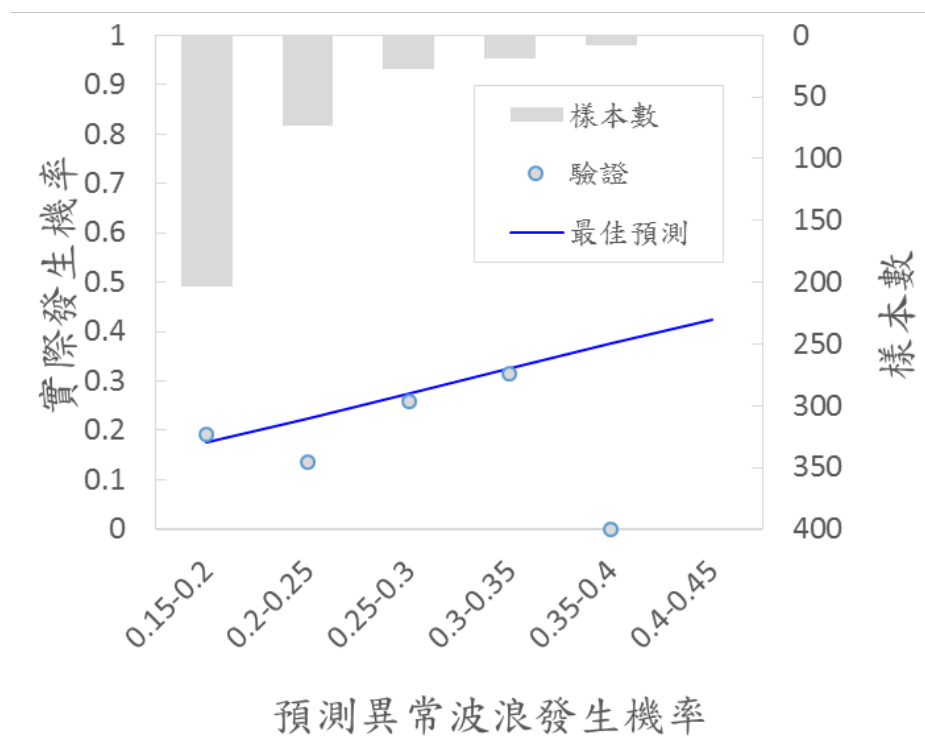


圖 4-28 (d) 異常波浪機率預測驗證結果 - 未來 48 小時預測

第五章 海岸瘋狗浪預警模式雛形建置

台灣民眾在海岸邊從事活動最大的安全威脅之一首推瘋狗浪。所謂瘋狗浪事件是指在岸邊活動的人們，遭受出其不意的大浪襲擊落海，由於浪的行為模式像瘋狗一般襲擊人們，所以被俗稱為瘋狗浪。過去許多學者都曾對瘋狗浪進行了研究探討，並提出瘋狗浪發生的各式機制或模式，但迄今為止，瘋狗浪尚無法預測何時?何地?會發生。前文所提的異常波浪尚不考慮底床或地形效應，即已無法定率預測，更遑論瘋狗浪還係因波浪與礁岩地形作用所產生，其問題更加地複雜，因此，定率的方式尚無法實現，現階段以序率的方法來從事異常波浪或瘋狗浪的預測理應可行。本章說明本計畫建置瘋狗浪預警(warning)模式之過程與結果。

本計畫蒐集過去的瘋狗浪案例，並取得各瘋狗浪事件發生時的海氣象水文資料，作為預警系統的輸入資料，所採用的則是資料探勘(data mining)方法，建立瘋狗浪擊落海事件與有效海氣象因子間的關係來作為後續從事預警分析的基礎。

5-1 群集分析演算法與模式評估方法

本計畫第二年曾比較資料探勘中的決策數理論與群集分析方法，結果證實了群集分析方法普遍優於決策數理論，因此決議採用群集分析作為建置瘋狗浪預警模式之核心方法。

5-1-1 群集分析演算法

群集分析法的核心概念主要是使群集間的相異性增加，如此便可依群體的特性來辨識其行為。此演算法使用反覆的運算技術，將資料集中的資料特性進行分類，藉由此等分類能將相同性質的資料集分成同一類，如此便可藉由各資料群之間的差異性，進而透過各資料群的資料特性及發生機率來進行預測。

本文以碧砂漁港外波浪觀測資料來說明以群集分析從事瘋狗浪擊落海事件預警系統的概念。圖 5-1 為碧砂漁港波浪測站的示性波高與對應的示性週期散佈圖，其中橘色菱形的資料點係指距離碧砂漁港 20 公里內有落海事件發生時在碧沙波浪占測得之數據，藍色圓形資料點則代表沒有落海事件發生，當使用群集分析方法並設定群集個數為 4 時，在各群中比較其特性，便可發現群集 1、2、4 傾向於會發生落海事件，群集 3 則傾向於不會有落海事件發生，如此再去分析各群的資料屬性，便可定義出發生落海事件發生的條件。本研究主要事先蒐集各種不同的資料屬性，

再依過去前人的研究擷取適當的資料屬性或是其衍生屬性，再將所有可能的候選資料因子，藉由群集分析演算法進行探勘分析，以求得是否會有落海事件發生的可能性。過程中為求得最佳的預測結果，會嘗試改變群集的個數，最小支持度及最大的輸入因子等參數，另外，為使模式不要過於複雜，也會限制模式最大輸入因子數目。

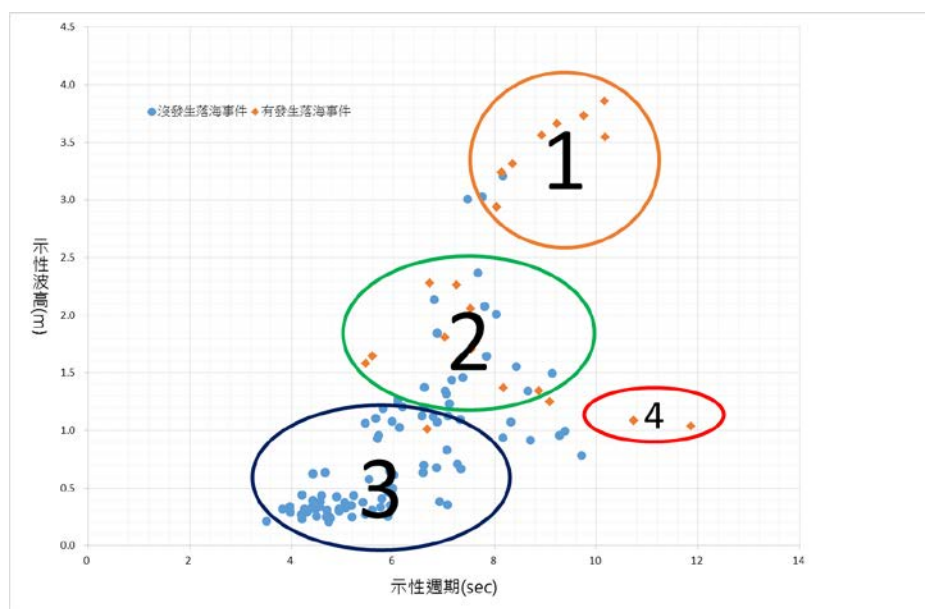


圖 5-1 群集分析演算示意圖

5-1-2 模式評估方法

研究中在模式建置的學習與測試階段，均使用以落海事件的發生與否來驗證模式的準確性，經探勘工具的學習或驗證後可得出預測的錯差矩陣(如表 5-1)。表 5-1 中，A 代表模式預測不會發生落海事件，實際也無落海事件發生的事件個數；B 代表模式預測不會發生落海事件，實際卻有落海事件發生的事件個數；C 代表模式預測會發生落海事件，實際卻無落海事件發生的事件個數；D 代表模式預測會發生落海事件，實際也有落海事件發生的事件個數。

錯差矩陣中可產出二個指標，即回應率(response rate)和反查(recall)。回應率的意義是指在預測為有落海事件發生集合中，多少是屬於真正的落海事件發生，回應率越高代表模式效果越好；反查是指在所有實際有落海事件發生中，有多少比率被模式找出來，其值越高越好。回應率之公式為 $D/(C+D)$ ；反查的公式為 $D/(B+D)$ 。反查指標對本研究特別重要，回應率高不見得模式就好，更重要的是反查要高，因本文認為如何把稀有事件找出來更重要。一般而言，實際落海事件資料屬與稀有事件，假設落海事件佔全部資料的 5%，若有一個模式把所有結果都預測為沒有落海事件

發生，那麼這個模式毫無意義。落海事件的預測分類不同於一般的分類問題，它的精神在於對於落海事件發生的真正掌握率。本研究依據預測的回應率、反查率，來決定輸入因子與所使用的演算法，經反覆的修正模式，若能符合預警的期望，便能達成本研究的目的。

研究中對模式的評估，採兩階段作業，第一階段採未經訓練的樣本作測試，第二階段採實際落海記錄作為驗證使用。當兩項驗證均符合期望，則達成本計畫最終目標。

表 5-1 瘋狗浪擊落海事件發生之錯差矩陣

	實際未發生 落海事件	實際發生 落海事件
預測未發生 落海事件	A	B
預測發生 落海事件	C	D

5-2 預警模式建置概念

從前人的研究和過去發生的瘋狗浪事件中，我們發現瘋狗浪事件的發生並非是無跡可尋的，雖然目前無法針對特定的時間和地點來預測瘋狗浪事件的發生，但是若能將尺度放大至一段時間與區域內的預測，應該是可行的。基於此一概念，本研究以前人的研究為根基，探尋各種造成瘋狗浪件事的可能因子，以及蒐集過去 16 年來所發生過的瘋狗浪事件，依此來建置一瘋狗浪的預警模式。

5-2-1 研究區域

由於全台灣超過 7 成的瘋狗浪擊落海事件發生在台灣東北角海域，在東北海域中以龍洞測站的地理位置，以及附近地區發生落海事件的頻率幾乎均圍繞在龍洞測站附近，相關詳細落海事故資料請參見附錄光碟，所以本研究定義龍洞測站 20 公里內為預警模式的研究範圍，龍洞測站的觀測資料為預警模式的海象資料輸入來源。

5-2-2 預警模式的建置流程

圖 5-2 為本計畫建置瘋狗浪預警模式的流程，第 1 階段為使用碧砂海象資料以、基隆海象資料以及氣象局紙本預報資料來定義可能造成落海事件的發生時段；第 2 階段則開始用龍洞觀測資料以及 NWWIII 資料做為預警模式的輸入資料來建置預警模式；第 3 階段為比較各種不同的預警模式，找出最適當的模式；最後則開始作業化的規劃，建置出一瘋狗浪預警系統。

建置瘋狗浪預警模式首要之事是決定會造成浪擊落海事件發生的時段，若我們將過去發生過的浪擊落海事件該時段設定為目標值，便會落入只有落海事件發生才是危險時段的迷思，殊不知雖無落海事件發生但因海岸邊無人員活動，所以不會有落海事件的發生，故要決定可能會造成落海事件發生的時段，是本計畫的第一要務。

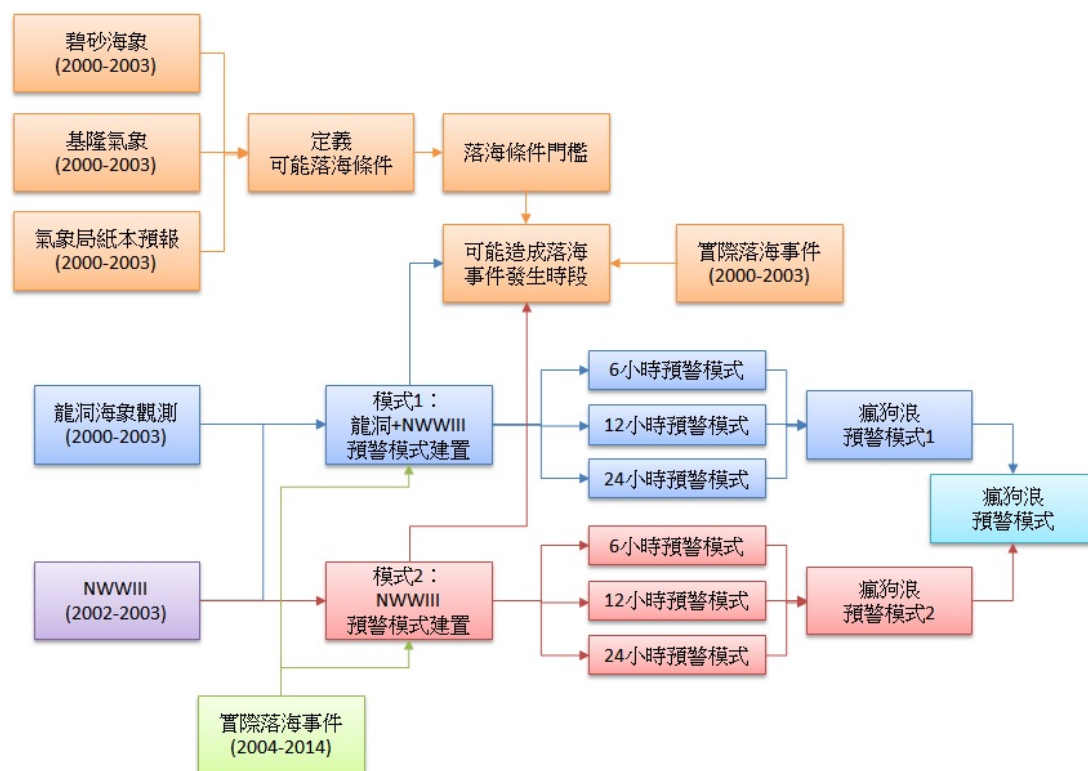


圖 5-2 瘋狗浪預警模式建置流程

5-2-3 可能發生落海事件的條件定義

欲定義那些時段有可能造成落海事件發生，最佳的做法便是能有不間斷的監測資料，若能在監測處架設觀測儀器，隨時記錄是否擁有越波情形並足以將人員掃落海中，如此我們便能確實掌握精確的數據，並依此定義出可能落海事件發生的條件，但是在過去的研究中，均無類似的研究或觀察資料。目前為止，唯一較完整的海象觀測紀錄是海洋大學蔡政翰教授在 1999 年-2003 年間，於碧砂漁港外 150 公尺處所裝置的底錠式測波儀所做的量測記錄。本計畫便是以此碧砂測站的量測紀錄為主要的參考依據，輔以距測站 20 公里內落海事件資料，利用關聯規則分析，找出可能造成落海事件的可能海氣象條件，依此條件再定義出可能造成落海事件發生的可能時段。此一時段便是所謂的危險時段，也是探勘輸出的目標值，相關流程請參見圖 5-3。

研究中從碧砂測站連續波浪測量資料與距測站 20 公里內落海事件資料，經關聯分析後得到可能落海事件發生的 11 項條件(表 5-2)，研究中使用強關聯分析，發現當海氣象條件符合表中的 7 項條件以上時，與落海事件發生有強關聯現象。故研究中定義只要表中的 7 項條件以上的時段，則將該時段設定為可能落海事件發生的時段。經對應當時的海氣象條件，得到在 2000-2003 年間的在台灣東北海域間可能發生落海事件的時段。

使用氣象預報、基隆測站和碧砂測站等觀測資料，確定了可能造成落海事件發生的時段，但是碧砂測站並非常設型的測站，無法持續提供資料作為預警模式所用，故下一階段便是尋求適當的輸入來源，以求得建置有效的預警模式。

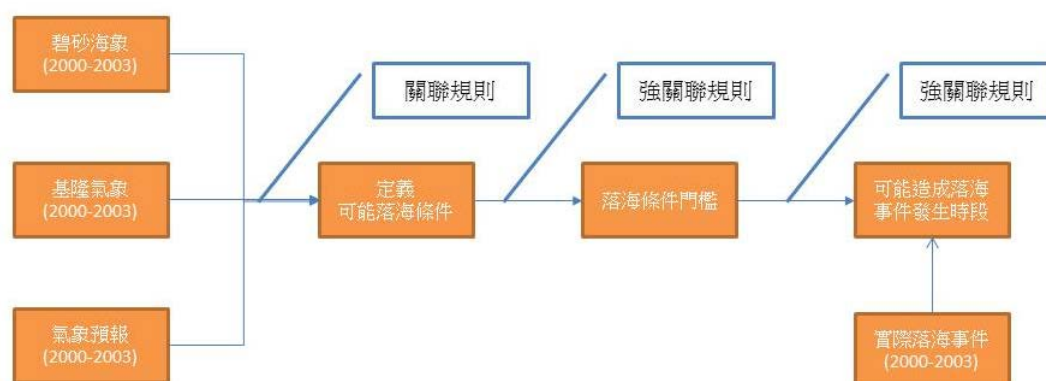


圖 5-3 建置可能造成落海事件發生時段流程

表 5-2 可能造成落海事件發生的海氣象條件

項次	關係因子	關係條件
1	預報點前 6 小時內的平均示性波高(Hs)標準差	大於 0.2
2	預報點當時的最大波高(Hmax)	大於 2m
3	預報點當時的平均示性週期(Ts)	大於 7sec
4	預報點前 3 小時內平均示性波高(Hs)	大於 1m
5	預報點當時的頻譜參數 Qp	大於 2
6	預報點前 6 小時內的平均波高相關係數 γ	大於 0.3
7	預報點當時的平均水溫	介於 20°到 26°間
8	預報點前 4 小時內發生三連波個數	超過 6 以上
9	預報點前 3 小時內最多瞬間風風向	介於 45°與 135°間
10	預報點前 12 小時內的平均風向	0°與 90°間
11	預報點當時的平均風速	大於 4m/sec

5-3 資料前置處理與分析軟體

本研究主要是利用資料探勘方式，來建置 6 小時、12 小時和 24 小時瘋狗浪預警模式，過程中利用氣象局氣象預報資料、基隆港風向資料與碧砂測站連續海象測量資料，已定義出在本研究區域可能造成落海事件發生的時段，此一定義也成為預警模式的輸出目標。但由於碧砂測站非常設測站，本計畫則採用位於研究範圍中間區域的龍洞測站，作為本研究的海象輸入來源。研究中所使用的資料庫是微軟公司 SQL Server 2012，首先將資料準備後的資料匯入資料庫中，再藉由 SQL Server Data Tools 探勘工具尋找出各分時的最佳預測模式，同時也藉由探勘工具分析出可能造成落海事件發生的海氣象條件，進而使用程式語法將模式直接建置完成。

5-3-1 現場龍洞測站資料前處理

研究中分別依其目的需要將資料統整為每 6 小時時段的資料統計項集合，並參考前人的文獻資料與落海事件有關的物理機制選擇適當的候選因子，例如將示性波高因子項整理為每預報點前 6 小時內的平均示性波高、最大示性波高、示性波高標準差與波高最大上升斜率等。當完成所有可能相關因子的資料準備工作後，再將所

產生的全部因子資料集合匯入資料庫中，成為資料探勘輸入的候選因子。表 5-3 為龍洞測站的候選因子。

表 5-3 龍洞測站輸入候選因子及其說明

輸入因子	代號	說明
示性波高平均值	Hs Avg6	預報點前 6 小時內示性波高的平均值
示性波高最大上升率	Hs Max Slope6	預報點前 6 小時內示性波高最大上升率
示性波高最大值	Hs Max6	預報點前 6 小時內示性波高的最大值
示性波高平均上升率	Hs Slope6	預報點前 6 小時內示性波高平均上升率
示性波高標準差	Hs Std6	預報點前 6 小時內示性波高的標準差
示性波高	Hs	預報點前當時示性波高
平均週期平均值	Tavg Avg6	預報點前 6 小時內平均週期的平均值
平均週期最大上升率	Tavg Max Slope6	預報點前 6 小時內平均週期最大上升率
平均週期最大值	Tavg Max6	預報點前 6 小時內平均週期的最大值
平均週期平均上升率	Tavg Slope6	預報點前 6 小時內平均週期最平均上升率
平均週期標準差	Tavg Std6	預報點前 6 小時內平均週期的標準差
尖峰週期平均值	Tp Avg6	預報點前 6 小時內尖峰週期的平均值
尖峰週期最大上升率	Tp Max Slope6	預報點前 6 小時內尖峰週期最大上升率
尖峰週期最大值	Tp Max6	預報點前 6 小時內尖峰週期的最大值
尖峰週期平均上升率	Tp Slope6	預報點前 6 小時內尖峰週期最平均上升率
尖峰週期標準差	Tp Std6	預報點前 6 小時內尖峰週期的標準差
尖峰週期	Tp	預報點當時的尖峰週期
氣壓平均值	P Avg6	預報點前 6 小時內氣壓的平均值
氣壓最大值	P Max6	預報點前 6 小時內氣壓的最大值
氣壓最小值	P Min6	預報點前 6 小時內氣壓的最小值
氣壓標準差	P Std6	預報點前 6 小時內氣壓的標準差
氣壓	P	預報點當時的氣壓
3 秒陣風平均值	w3 Avg6	預報點前 6 小時內 3 秒陣風的平均值
3 秒陣風最大上升率	w3 Max Slope6	預報點前 6 小時內 3 秒陣風最大上升率
3 秒陣風最大值	w3 Max6	預報點前 6 小時內 3 秒陣風的最大值
3 秒陣風平均上升率	w3 Slope6	預報點前 6 小時內 3 秒陣風平均上升率
3 秒陣風標準差	w3 Std6	預報點前 6 小時內 3 秒陣風的標準差
3 秒陣風	w3	預報點當時的 3 秒陣風
氣溫最大值	Tempair_max6	預報點前 6 小時內氣溫最大值
氣溫標準差	Tempair_std6	預報點前 6 小時內氣溫標準差
氣溫平均值	Tempair_avg6	預報點前 6 小時內氣溫平均值
氣溫	Tempair	預報點當時氣溫平均值
風向	Wind D	預報點當時的平均風向

輸入因子	代號	說明
風速平均值	Ws Avg6	預報點前 6 小時內平均風速的平均值
風速最大上升率	Ws Max Slope6	預報點前 6 小時內平均風速最大上升率
風速最大值	Ws Max6	預報點前 6 小時內平均風速的最大值
風速平均上升率	Ws Slope6	預報點前 6 小時內平均風速平均上升率
風速標準差	Ws Std6	預報點前 6 小時內平均風速的標準差
風速	Ws	預報點當時的平均風速

5-3-2 波浪數值模式 NWWIII 輸出資料前處理

在本計畫先前研究中使用龍洞測站資料與氣象局紙本預報資料作為主要預警模式輸入，得到 9 成以上的預測成效，但由於氣象預報資料在實務上操作，並無法自動取得，如此將會增加許多實務作業上的困擾，所以本研究將嘗試以 NOAA WAVEWATCH III (簡稱 NWWIII)波浪模式所提供的資料作為模式輸入。NWWIII 資料中主要與預警系統相關的資料欄位有 10 米高風速(U10)、風向(Dir)及示性波高(Hs)，本研究取得之 NWWIII 模式資料時間為 2002 至 2012 年，每 2 小時一筆紀錄。根據去年研究結果，僅使用 NWWIII 分析場的資料來建置瘋狗浪預警模式。為獲得預警模式的最佳輸入因子，將資料欄位中的因子，經處理與適當轉換後得到如表 5-4 的各項候選因子。建立候選因子集後，分析各項因子與目標輸出間的關係，再決定是否將候選因子放入預警模式的建置訓練中。

表 5-4 NWWIII 輸入候選因子及其說明

輸入因子代號	說明
U10	預報點當時 10 米高風速
U10_avg6	預報點前 6 小時平均風速
U10_avg12	預報點前 12 小時平均風速
U10_std6	預報點前 6 小時風速的標準差
U10_std12	預報點前 12 小時風速的標準差
Dir	預報點當時風向(角度)
Dir_avg6	預報點前 6 小時平均風向
Dir_avg12	預報點前 12 小時平均風向
Dir_Q	預報點當時風向象限代號
Dir_most6	預報點前 6 小時最多風向象限代號
Dir_most12	預報點前 12 小時最多風向象限代號
Hs	預報點當時示性波高
Hs_avg6	預報點前 6 小時平均示性波高
Hs_avg12	預報點前 12 小時平均示性波高

輸入因子代號	說明
Hs_std6	預報點前 6 小時內示性波高的標準差
Hs_std12	預報點前 12 小時內示性波高的標準差
v0	預報點當時在 0 度方向的風速分量
v0_avg6	預報點前 6 小時在 0°方向的平均風速分量
v0_avg12	預報點前 12 小時在 0°方向的平均風速分量
v0_std6	預報點前 6 小時在 0°方向的風速分量標準差
v0_std12	預報點前 12 小時在 0°方向的風速分量標準差
v45	預報點當時在 45 度方向的風速分量
v45_avg6	預報點前 6 小時在 45°方向的平均風速分量
v45_avg12	預報點前 12 小時在 45°方向的平均風速分量
v45_std6	預報點前 6 小時在 45°方向的風速分量標準差
v45_std12	預報點前 12 小時在 45°方向的風速分量標準差
v90	預報點當時在 90 度方向的風速分量
v90_avg6	預報點前 6 小時在 90°方向的平均風速分量
v90_avg12	預報點前 12 小時在 90°方向的平均風速分量
v90_std6	預報點前 6 小時在 90°方向的風速分量標準差
v90_std12	預報點前 12 小時在 90°方向的風速分量標準差
v135	預報點當時在 135 度方向的風速分量
v135_avg6	預報點前 6 小時在 135°方向的平均風速分量
v135_avg12	預報點前 12 小時在 135°方向的平均風速分量
v135_std6	預報點前 6 小時在 135°方向的風速分量標準差
v135_std12	預報點前 12 小時在 135°方向的風速分量標準差

5-4 預警模式之建置

利用碧砂測站的連續觀測資料，使用強關聯方式即得到可能造成落海事件發生的時段，但是碧砂測站並非常設測站，無法以此做為預警模式的輸入來源。況且碧砂測站的條件來源資料是連續性的，與一般海象測站的非連續觀測資料不同，所以無法直接套用上述條件來做為預警模式的門檻。為了解決此一問題，本計畫採用間接的對應方式來尋找出危險的浪擊落海門檻條件。研究中以強關聯規則找出與發生落海事件發生的可能時段後，分別以各種不同的輸入來源，經由探勘演算法來尋找出最佳的預警模式。依不同功能目的的考量，本研究共採用了 2 種不同的輸入組合，如表 5-5 所示。龍洞測站附近每年都有數起的瘋狗浪事件發生，且此測站為一常設型的測站，可穩定的提供資料來源。而 NWWIII 資料為模式的輸出，可提供更

簡便的資料轉換與輸入，希望能從不同的組合中，尋找出最佳且更容易執行的預警模式。

表 5-5 預警模式之輸入

模式	模式輸入
模式 1	龍洞測站海象觀測資料 + NWWIII 模式輸出資料
模式 2	僅 NWWIII 模式輸出資料 (含分析場與預報場)

5-4-1 模式 1：採龍洞現場資料與 NWWIII 模式資料為輸入

模式 1 中使用龍洞測站的觀測資料以及 NWWIII 中的候選因子進行預警模式的建置，由於台灣地區有 7 成以上的落海事件發生在龍洞地區周遭 20 公里的海域內，所以龍洞測站的海象觀測資料顯得異常的重要。由於本研究是希望能建置一有效的預警系統，也就是要利用目前已發生的資料來推算未來，但是海氣象資料瞬息萬變，故本模式加入 NWWIII 模式的輸出資料來輔助。

一、前置時間 6 小時預警模式

本研究使用 2002-2003 年間的 NWWIII 資料作為模式建置訓練所用，共有 77 件可能落海事件。驗證資料部分使用，龍洞浮標資料與 NWWIII 2004 年-2014 年間所有蒐集到的有效紀錄中，由於海氣象資料有缺值，導致有部份資料必須剔除，共有 58 件可能落海事件來做為模式的驗證。

研究中使用表 5-3 和表 5-4 中的全部因子，以 SQL SERVER 2012 探勘工具 DATA TOOLS 中的群集分析演算法，在嘗試設定各種不同群集個數，由系統工具依照群集特性進行分群與模式建置，初步得到最佳模式群集個數為 5，輸入的因子分別為 NWWIII 預報點前 6 小時平均風向(NW3Dir_avg6)，預報點前 6 小時內氣壓的最大值(P_max6)，預報點前 6 小時內氣溫的最大值(Tempair_max6)，預報點前 6 小時內氣溫的平均值(Tempair_avg6)，預報點當時風向(角度)(Dir)，預報點當時的氣溫(Tempair)，預報點前 12 小時在 0° 方向的平均風速分量(v0_avg12)。由表 5-6 中第三項紀錄的模式結果顯示，模式的驗證結果並不理想在 58 件落海事件中僅找出 39 件，且預警模式輸入因子若以氣溫因子來判斷，對於突然發生的瘋狗浪事件預測，並無法有效地預測，從表 5-6 的前三項紀錄中，便可得知若無適當的因子選擇，其預測結果容易偏頗也不理想。

研究中嘗試將部分因子移除後，並分別調整輸入的最大因子數目，以此來進行探勘模式的學習與訓練。當因子被移除且模式無法再被訓練得更好，亦即該因子可能為重要因子，將反覆再與其他因子一起訓練；反之，若移除因子後，模式可得到較佳結果，便暫時先將該因子移除。以上動作反覆執行，直到找到最佳模式，才停止繼續建模。過程中依過去經驗及物理性質判斷，分別移除氣溫相關、氣壓相關、觀測的風速與風向等。經過多次的反覆建模，發現預報點前 6 小時平均示性波高(Hs_avg6), 預報點前 6 小時內示性波高的最大值(Hs_max6), 預報點前 6 小時內尖峰週期的最大值(Tp_max)為 3 個不可或缺的重要因子，其次則為風向與風速因子的組合，經過多次反覆的測試，發現使用風速在 0 度與 45 度上的分量，可得到較佳的建模結果。本研究希望能建置一瘋狗浪預警模式，為了達成此一目標，所建置的模式最好都能準確地預測到每一個瘋狗浪事件的發生，所以反查指標是第一考量的指標，從表 5-6 中結果得到使用群集個數 2，最大因子個數為 6 得到使用預報點前 6 小時內示性波高的平均值(Hs Avg6), 預報點前 6 小時內示性波高的最大值(Hs Max6), 預報點前 6 小時內尖峰週期的最大值(Tp Max6), 預報點前 6 小時內尖峰週期的平均值(Tp Avg6), NWWIII 預報點前 12 小時在 0°方向的平均風速分量(NW3 v0 Avg12), NWWIII 預報點前 12 小時在 45°方向的平均風速分量(NW3 v45 Avg12)等 6 項因子可得到最佳的結果。此項模式在測試時，模式可預測到全部的 77 件可能落海事件，而使用 2004 年-2014 年間所有所蒐集到的有效紀錄中，共有 58 件落海事件，以此模式去驗證，也能準確地預測到所有的瘋狗浪事件。

表 5-6 以模式 1 建置 6 小時預警模式針對不同輸入因子之結果比較

輸入因子	群集/ 因子 數	得出最佳輸入因子	測試				驗證			
			A	B	C	D	A1	B1	C1	D1
全部可能因子	12/5	NW3Dir_avg6,Tempair_avg6,Dir,Tempair	113	19	18	65	24045	27	25023	31
全部可能因子	10/6	NW3Dir_avg6,Tempair_max6,Tempair_avg6,Dir,Tempair	108	15	23	69	24540	27	24528	31
全部可能因子	5/7	NW3Dir_avg6,P_max6,Tempair_max6,Tempair_avg6,Dir,Tempair,v0_avg12	101	10	30	74	18275	19	30793	39
全部可能因子移除 Temp 相關	11/5	Hs Avg6,NW3 Dir Avg6, P Max6,v0 Avg12, Dir	121	10	14	70	30550	14	18518	44
全部可能因子移除 Temp 相關	6/6	Hs Avg6,NW3 Dir Avg6, P Max6,v0 Avg12,,Dir,P	120	14	15	66	27301	9	21767	49
全部可能因子移除 Temp 相關	11/7	Hs Avg6,NW3 Dir Avg6, P Max6,v0 Avg12,v0 Avg6,Dir,P	121	18	14	62	30925	32	18143	26
全部可能因子移除 Temp，觀測風速相關	11/5	NW3 Dir Avg6,P Avg6, P Max6,Dir,P	115	14	20	66	25793	31	23275	27

輸入因子	群集/ 因子 數	得出最佳輸入因子	測試				驗證			
			A	B	C	D	A1	B1	C1	D1
全部可能因子移 除 Temp，觀測風 速相關	11/6	Hs Avg6,NW3 Dir Avg6, P Avg6, P Max6,Dir,P	124	20	11	60	31167	31	17901	27
全部可能因子移 除 Temp，觀測風 速相關	12/7	Hs Avg6,Hs Max6,NW3 Dir Avg6,P Avg6,P Max6,Dir,P	123	21	12	59	29516	14	19552	44
全部可能因子移 除 Temp，觀測風 速、氣壓相關	11/5	Hs Avg6,Hs Max6,NW3 Dir Avg6,Tp Max6,Dir	136	20	3	56	27070	8	21998	50
全部可能因子移 除 Temp，觀測風 速、氣壓相關	5/6	Hs Avg6,Hs Max6,NW3 Dir Avg6,Tp Max6,Dir,NW3 v0 Avg12	139	37	0	39	34615	31	14453	27
全部可能因子移 除 Temp，觀測風 速、氣壓相關	11/7	Hs Avg6,Hs Max6,NW3 Dir Avg6,Tp Max6,Tp Avg6,Dir,NW3 v0 Avg12	133	19	6	57	25986	7	23082	51
全部可能因子移 除 Temp，觀測風 速、氣壓相關	2/5	Hs Avg6,Hs Max6,NW3 Dir Avg6,Tp Max6,Dir	115	3	24	73	22812	4	26256	54
全部可能因子移 除 Temp，觀測風 速、氣壓相關	2/6	Hs Avg6,Hs Max6,NW3 Dir Avg6,Tp Max6,Dir,NW3 v0 Avg12	102	22	37	54	22995	3	26073	55
全部可能因子移 除 Temp，觀測風 速、氣壓相關	2/7	Hs Avg6,Hs Max6,NW3 Dir Avg6,Tp Max6,Tp Avg6,Dir,NW3 v0 Avg12	110	18	29	58	25535	4	23533	54
全部可能因子移 除 Temp，觀測風 速、氣壓相關	3/5	Hs Avg6,Hs Max6,NW3 Dir Avg6,Tp Max6,Dir	126	21	13	56	24229	5	24839	53
全部可能因子移 除 Temp，觀測風 速、氣壓相關	3/6	Hs Avg6,Hs Max6,NW3 Dir Avg6,Tp Max6,Dir,NW3 v0 Avg12	139	37	0	39	36079	32	12989	26
全部可能因子移 除 Temp，觀測風 速、氣壓相關	3/7	Hs Avg6,Hs Max6,NW3 Dir Avg6,Tp Max6,Tp Avg6,Dir,NW3 v0 Avg12	111	24	28	52	21884	2	27184	56
全部可能因子移 除 Temp，觀測風 速、氣壓相關、 觀測風向	2/5	Hs Avg6,Hs Max6,Tp Max6,Dir,NW3 v0 Avg12	124	5	15	71	24625	5	24443	53
全部可能因子移 除 Temp，觀測風 速、氣壓相關、 觀測風向	2/6	Hs Avg6,Hs Max6,Tp Max6,Tp Avg6,Dir,NW3 v0 Avg12	81	1	58	75	18344	1	30724	57
全部可能因子移 除 Temp，觀測風 速、氣壓相關、 觀測風向	2/7	Hs Avg6,Hs Max6,Tp Max6,Tp Avg6,Dir,NW3 v0 Avg12,Tp	99	14	40	62	25554	2	23514	56
海象觀測資料， NWW3 風向、風 速	2/5	Hs Avg6,Hs Max6,Tp Max6, v0 Avg6, v0 Avg12	131	21	7	56	28023	10	21045	48

輸入因子	群集/ 因子 數	得出最佳輸入因子	測試				驗證			
			A	B	C	D	A1	B1	C1	D1
海象觀測資料， NWW3 風向、風速	2/6	Hs Avg6,Hs Max6,Tp Max6, v0 Avg6, v0 Avg12, v45 Avg12	129	23	9	54	27484	12	21584	46
海象觀測資料， NWW3 風向、風速	2/7	Hs Avg6,Hs Max6,Tp Max6, v0 Avg6, v0 Avg12, v45 Avg12, v135 Avg12	127	23	11	54	26159	11	22909	47
海象觀測資料(移 除風速)， NWW3 風向、風速	2/5	Hs Avg6,Hs Max,Tp Max6,Tp Avg6,NW3 v0 Avg12	116	23	22	54	28100	7	20968	51
海象觀測資料(移 除風速)， NWW3 風向、風速	2/6	Hs Avg6,Hs Max6,NW3 v45 Avg12,Tp Max6,Tp Avg6,NW3 v0 Avg12	92	0	46	77	20192	0	28876	58
海象觀測資料(移 除風速)， NWW3 風向、風速	2/7	Hs Avg6,Hs Max6,NW3 v45 Avg12,Tp Max6,Tp Avg6,NW3 v0 Avg12	121	21	17	56	25748	5	23320	53
海象觀測資料(移 除風速)， NWW3 風向、風速	2/4	Hs Avg6,Hs Max,Tp Max6,NW3 v0 Avg12	112	4	26	73	23177	4	25891	54
海象觀測資料(移 除風速)， NWW3 風向、風速	2/3	Hs Avg6,Hs Max,Tp Max6	111	3	27	74	23177	4	25891	54

(A 與 A1 分別代表模式測試與驗證時預測不會有落海事件發生而實際也沒落海事件發生次數；B 與 B1 分別為模式測試與驗證時預測沒落海事件次數，但實際有落海事件發生次數；C 與 C1 分別代表模式測試與驗證時預測有落海事件次數，實際卻沒落海事件發生次數；D 與 D1 分別為模式測試與驗證時預測與實際相同均有落海事件發生的次數。)

分析最佳 6 小時預警模式為使用群集個數為 2，主要使用龍洞觀測資料中的波高和尖峰週期，另有 NWWIII 的 0 度與 45 度的風速分量等因子所建置的模式，查看該模式的其群集特性如圖 5-4 所示。圖中狀態欄的黑色直條表示該群集資料的範圍並顯示最小值至最大值，淺藍色菱形高度即代表該群集資料的平均值±標準差的分佈範圍，其中 NW3_Proinc6 中的紅色 1 代表可能會有落海事件發生，藍色 0 的部分為預測不會有落海事件發生，由該圖查看群集 1 的案例數有 300 筆，其中僅有 60.1%可能會有落海事件發生；群集 2 的案例數有 204 筆，其中僅有 2.7%可能會有落海事件發生，亦即當海氣象紀錄資料集接近於群集 1 時，會被判定可能會有落海事件的發生。

表 5-7 為每個輸入因子在各群之間的特性定量描述。群集 1 的特性偏向會有落海事件發生，群集 2 則偏向於不會有落海事件發生，從表 5-7 可得知每一群的各项因子的資料範圍，但如何界定資料集是屬於哪一群集，似乎無法一目了然，必須將

資料集輸入模式，由模式來判斷是屬於何項群集，才能得知是否會有落海事件的發生。為了快速了解 2 個群集的差異所在，我們使用 SQL Data Tools 間的群集辨識工具來了解各群的因子相異之處，如圖 5-5 模式 1 群集演算 6 小時預警模式群集 1 與群集 2 差異分析。

圖 5-5 中橫條長度代表條件中群集差異的機率分布，機率值越大橫條長度越長，反之機率值越小橫條長度較短，以第 1 項條件說明於群集 2 預報點前 6 小時的平均示性波高在 21.7-85.3 公分間差異機率為 100.0%；相對的在群集 1 中預報點前 6 小時的平均示性波高在 85.3-269.8 公分間的差異機率則為 99.0%。在預報點前 6 小時的最大示性波高差異機率方面，群集 2 預報點前 6 小時的最大示性波高在 23.0-98.3 公分間差異機率為 99.8%，而群集 1 在 98.3-332.0 公分間的機率為 98.5%。在預報點前 6 小時的平均週期差異機率比較上，群集 2 在 4.7-8.8 秒間的機率為 37.0%，而群集 1 在 8.8-15.1 秒間的機率為 37.0%。在預報點前 6 小時的最大週期差異機率比較上，群集 2 在 4.7-9.8 秒間的機率為 24.3%，而群集 1 在 9.8-15.1 秒間的機率為 24.3%。在 NWWIII 預報點前 12 小時在 45 度的平均風量，群集 2 在 -7.1 到 1.6m/sec 間的機率為 17.6%，而群集 1 在 1.6 到 10.9m/sec 間的機率為 17.5%。在 NWWIII 預報點前 12 小時在 0 度的平均風量，群集 2 在 -7.9 到 0.0 m/sec 間的機率為 14.6%，而群集 1 在 0.0 到 10.7 m/sec 間的機率為 14.3%。當資料集偏向群集 1 時，6 小內發生落海事件的機率將提高許多。當預測點的資料集靠近群集 1 時則代表可能在 6 小時後海象狀況不佳，可能會有落海事件發生，反之較為安全沒有警訊產生。

表 5-7 以模式 1 建置 6 小時預警模式之輸入因子範圍說明

因子	群集 1 (有落海事件發生)	群集 2 (無落海事件發生)
預報點前 6 小時內示性波高的平均值(cm)	148.50±56.37	56.29±16.80
預報點前 6 小時內示性波高的最大值(cm)	173.79±68.44	64.33± 19.47
NWWIII 預報點前 12 小時在 0°方向的平均風速分量(m/sec)	1.47±5.03	-1.93±3.08
NWWIII 預報點前 12 小時在 45°方向的平均風速分量(m/sec)	3.49±4.12	0.09±2.78
預報點前 6 小時內尖峰週期的平均值(sec)	10.11±2.09	7.70±1.26
預報點前 6 小時內尖峰週期的最大值(sec)	11.12±2.29	8.84± 1.59

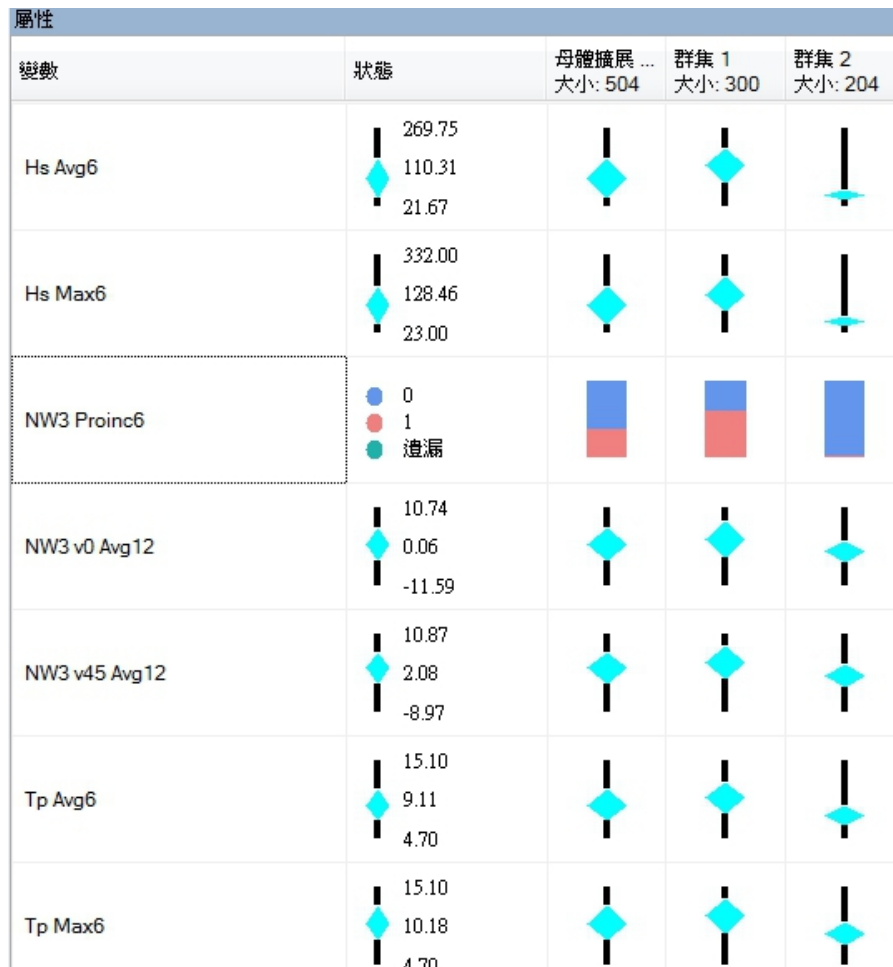


圖 5-4 模式 1 群集 6 小時預警模式各群特性設定



圖 5-5 模式 1 群集演算 6 小時預警模式群集 1 與群集 2 差異分析

二、12 小時預警模式

分析最佳 12 小時預警模式為使用群集個數為 2，主要使用龍洞觀測資料中的波高、尖峰週期、NWWIII 的 0 度與 45 度的風速分量等因子所建置的模式，查看該模式的其群集特性如圖 5-6 所示。由圖中可知，群集 1 的案例數有 255 筆，其中僅有 72.7% 可能會有落海事件發生；群集 2 的案例數有 249 筆，其中僅有 4.6% 可能會有落海事件發生，亦即當海氣象紀錄資料集接近於群集 1 時，會被判定可能會有落海事件的發生。表 5-8 為每一輸入因子在各群之間的特性定量描述。

群集 1 的特性偏向會有落海事件發生，群集 2 則偏向於部會有落海事件發生，從表 5-8 中可得知每一群的各項因子特性。圖 5-7 中以第 1 項條件說明於群集 2 預報點前 6 小時的最大示性波高在 23.0-107.8 公分間差異機率為 100.0%；相對的在群集 1 中預報點前 6 小時的平均示性波高在 107.8-332.0 公分間的差異機率則為 99.7%。在預報點前 6 小時的平均示性波高差異機率方面，群集 2 預報點前 6 小時的最大示性波高在 21.7-93.5 公分間差異機率為 99.8%，而群集 1 在 93.5-278.3 公分間的機率為 99.7%。在 NWWIII 預報點前 12 小時在 45 度的平均風量，群集 2 在 -7.9 到 2.6m/sec 間的機率為 25.7%，而群集 1 在 2.6 到 10.9m/sec 間的機率為 25.7%。在 NWWIII 預報點前 12 小時在 0 度的平均風量，群集 2 在 -8.1 到 1.1 m/sec 間的機率為 21.5%，而群集 1 在 1.1 到 10.7 m/sec 間的機率為 20.7%。在預報點前 6 小時的最大週期差異機率比較上，群集 2 在 4.0-9.3 秒間的機率為 2.3%，而群集 1 在 9.3-15.1 秒間的機率為 2.3%。當資料集偏向群集 1 時，表示 12 小內有可能會有落海事件發生。

表 5-8 以模式 1 建置 12 小時預警模式輸入因子範圍說明

因子	群集 1 (有落海事件發生)	群集 2 (無落海事件發生)
預報點前 6 小時內示性波高的平均值(cm)	155.53 ±50.56	59.83±18.2
預報點前 6 小時內示性波高的最大值(cm)	183.11±62.02	68.23±21.1
NWWIII 預報點前 12 小時在 0°方向的平均風速分量(m/sec)	1.83±5.26	-1.93±2.87
NWWIII 預報點前 12 小時在 45°方向的平均風速分量(m/sec)	4.02±4.19	0.02±2.66
預報點前 6 小時內尖峰週期的最大值(sec)	10.48±2.17	9.53±2.34

屬性		叢集設定檔		
變數	狀態	母體擴展... 大小: 504	群集 1 大小: 255	群集 2 大小: 249
Hs Avg6	 278.25 109.08 21.67			
Hs Max6	 332.00 127.36 23.00			
NW3 Proinc12	 0 1 遺漏			
NW3 v0 Avg12	 10.73 0.01 -11.35			
NW3 v45 Avg12	 10.87 2.08 -8.97			
Tp Max6	 15.10 10.02 4.00			

圖 5-6 模式 1 群集 12 小時預警模式各群特性設定

群集 1 與 群集 2 的辨識率			
變數	值	喜好 群集 1	喜好 群集 2
Hs Max6	23.0 - 107.8		
Hs Avg6	21.7 - 93.5		
Hs Max6	107.8 - 332.0		
Hs Avg6	93.5 - 278.3		
NW3 Proinc12	1		
NW3 Proinc12	0		
NW3 v45 Avg12	-7.9 - 2.6		
NW3 v45 Avg12	2.6 - 10.9		
NW3 v0 Avg12	-8.1 - 1.1		
NW3 v0 Avg12	1.1 - 10.7		
Tp Max6	9.3 - 15.1		
Tp Max6	4.0 - 9.3		

圖 5-7 模式 1 群集演算 12 小時預警模式群集 1 與群集 2 差異分析

三、24 小時預警模式

分析最佳 24 小時預警模式為使用群集個數為 2，主要候選因子為龍洞觀測資料中的波高和尖峰週期，及 NWWIII 的 0 度風速分量等因子所建置的模式，查看該模式的其群集特性如圖 5-8 所示。由圖中可知，群集 1 的案例數有 298 筆，其中僅有 66.7% 可能會有落海事件發生；群集 2 的案例數有 206 筆，其中僅有 10.2% 可能會有落海事件發生。表 5-9 為每一輸入因子在各群之間的特性定量描述。

群集 1 的特性偏向會有落海事件發生，群集 2 則偏向於不會有落海事件發生，從表 5-9 可得知每一群的各项因子特性，使用群集辨識工具來了解各群的因子相異之處，如圖 5-9。

由圖 5-9 中顯示群集 2 預報點前 6 小時的平均示性波高在 21.7-85.9 公分間差異機率為 100.0%；群集 1 中預報點前 6 小時的平均示性波高在 85.9-278.3 公分間的差異機率則為 98.9%。在預報點前 6 小時的最大示性波高差異機率方面，群集 2 預報點前 6 小時的最大示性波高在 23.0-99.4 公分間差異機率為 98.7%，而群集 1 在 99.4-332.0 公分間的機率為 97.5%。在預報點前 6 小時的平均週期差異機率比較上，群集 2 在 4.7-8.6 秒間的機率為 43.4%，而群集 1 在 8.6-15.1 秒間的機率為 43.2%。在預報點前 12 小時在 45 度的平均風量，群集 2 在 -3.3 到 0.8m/sec 間的機率為 33.5%，而群集 1 在 0.8 到 8.7m/sec 間的機率為 26.4%。在預報點前 6 小時的最大週期差異機率比較上，群集 2 在 4.7-9.7 秒間的機率為 27.4%，而群集 1 在 9.7-15.1 秒間的機率為 27.4%。在 NWWIII 預報點前 12 小時在 0 度的平均風量，群集 2 在 -7.2 到 -0.1 m/sec 間的機率為 9.3%，而群集 1 在 -0.1 到 10.7 m/sec 間的機率為 8.7%。當資料集偏向群集 1 時，24 小內發生落海事件的機率偏高，反之較為安全沒有警訊產生。

表 5-9 以模式 1 建置 24 小時預警模式輸入因子範圍說明

因子	群集 1 (有落海事件發)	群集 2 (無落海事件發生)
預報點前 6 小時內示性波高的平均值(cm)	145.83±54.79	57.84±16.39
預報點前 6 小時內示性波高的最大值(cm)	170.27±66.03	66.14±19.48
NWWIII 預報點前 12 小時在 0°方向的平均風速分量(m/sec)	0.93±5.26	-1.85±3.31
預報點前 6 小時內尖峰週期的平均值(sec)	9.96±2.15	7.52±1.12
預報點前 6 小時內尖峰週期的最大值(sec)	10.93±2.31	8.66±1.45
預報點前 12 小時在 45°方向的平均風速分量(m/sec)	1.32±3.97	-0.92±1.44

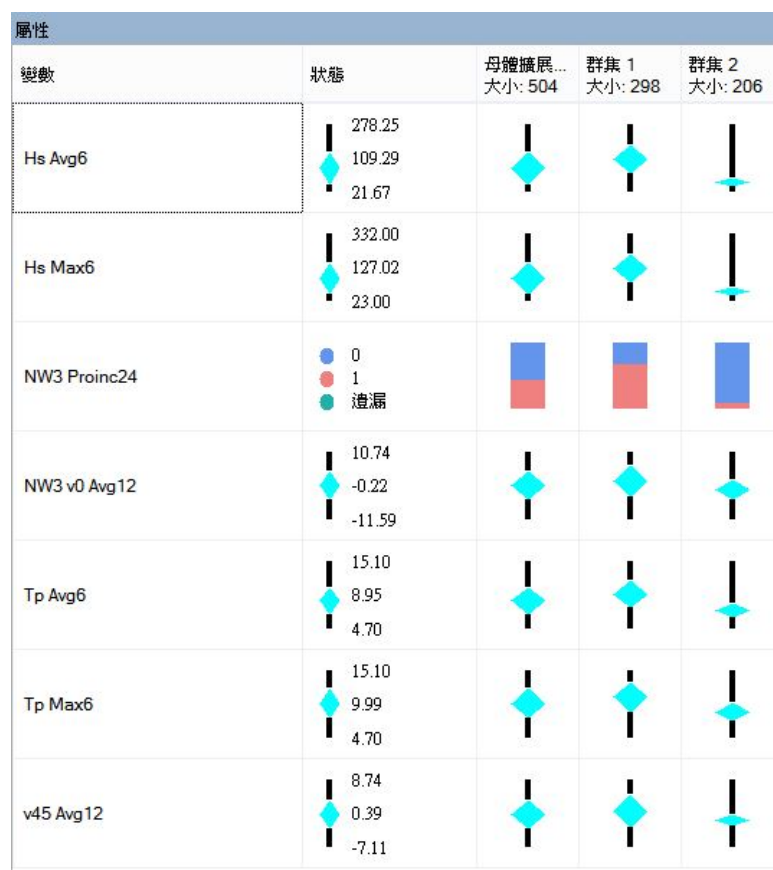


圖 5-8 以模式 1 建置 24 小時預警模式各群特性設定

群集 1 與 群集 2 的辨識率			
變數	值	喜好 群集 1	喜好 群集 2
Hs Avg6	21.7 - 85.9		
Hs Avg6	85.9 - 278.3		
Hs Max6	23.0 - 99.4		
Hs Max6	99.4 - 332.0		
NW3 Proinc24	0		
NW3 Proinc24	1		
Tp Avg6	4.7 - 8.6		
Tp Avg6	8.6 - 15.1		
v45 Avg12	-3.3 - 0.8		
Tp Max6	4.7 - 9.7		
Tp Max6	9.7 - 15.1		
v45 Avg12	0.8 - 8.7		
NW3 v0 Avg12	-7.2 - -0.1		
NW3 v0 Avg12	-0.1 - 10.7		

圖 5-9 模式 1 群集演算 24 小時預警模式群集 1 與群集 2 差異分析

5-4-2 模式 2：以波浪數值模式 NWWIII 輸出為預警模式輸入

模式 2 中僅使用 NWWIII 中的候選因子進行預警模式的建置，由於 NWWIII 模式的輸出資料來源穩定，當龍洞測站資料異常時或完全無法取得資料時，使用 NWWIII 為主要的輸入來源，成為可行的方法之一，所以研究中便嘗試以 NWWIII 資料來源單獨作為預警模式的輸入，希望能與模式 1 一樣達成良好的預警成效。

一、6 小時預警模式

在 6 小時的預警模式建置方面，研究中以 2002-2003 年間的 NWWIII 資料作為模式建置訓練所用，建模完成後再以 2004-2014 年間的資料作為驗證之用。經不斷的訓練與不同因子組合選擇，最後得到最佳 6 小時預警模式為使用群集個數為 2，主要候選因子分別為 NWWIII 資料中的平均風速、0 度與 45 度的風速分量等因子所建置的模式，查看該模式的其群集特性如圖 5-10 所示：

圖中狀態欄的黑色直條表示該群集資料的範圍並顯示最小值至最大值，淺藍色菱形高度即代表該群集資料的平均值±標準差的分佈範圍，其中 Proinc6 中的紅色 1 代表可能會有落海事件發生，藍色 0 的部分為預測不會有落海事件發生，由圖 5-10 中可知，群集 1 的案例數有 474 筆，其中僅有 11%可能會有落海事件發生；群集 2 的案例數有 329 筆，其中僅有 56.6%可能會有落海事件發生，亦即當海氣象紀錄資料集接近於群集 2 時，會被判定可能會有落海事件的發生。

表 5-10 為每一輸入因子在各群之間的特性定量描述。群集 2 的特性偏向會有落海事件發生，群集 1 則偏向於不會有落海事件發生使用使群集辨識工具來了解各群的因子相異之處，如圖 5-11 模式 2 群集演算 6 小時預警模式群集 1 與群集 2 差異分析。

圖 5-11 中橫條長度代表條件中群集差異的機率分布，機率值越大橫條長度越長，反之機率值越小橫條長度較短，圖中顯示群集 2 預報點前 12 小時 0 度的平均風量在-0.4 到 10.7 m/sec 間的機率為 100%，而群集 1 在-11.6 到-0.4 m/sec 間的機率為 100%；群集 2 預報點前 6 小時 0 度的平均風量在-0.5 到 11.4 m/sec 間的機率為 99.2%，而群集 1 在-11.7 到-0.5 m/sec 間的機率為 99.2%；群集 2 預報點前 6 小時 45 度的平均風量在 1.6 到 11.9 m/sec 間的機率為 95%，而群集 1 在-9.1 到 1.6 m/sec 間的機率為 95%。群集 2 預報點前 12 小時 45 度的平均風量在 1.7 到 10.9 m/sec 間的機率為 95%，而群集 1 在-9.0 到 1.7 m/sec 間的機率為 95%。當資料集偏向群集 2 時，代表可能在 6 小時後海象狀況不佳，可能會有落海事件發生，反之較為安全沒有警訊產生。

表 5-10 以模式 2 建置 6 小時預警模式輸入因子範圍說明

因子	群集 1 (無落海事件發生)	群集 2 (有落海事件發生)
預報點前 6 小時平均風速(m/sec)	5.54±2.33	5.95±2.52
預報點前 12 小時在 0°方向的平均風速分量(m/sec)	-4.43±2.46	3.30±3.06
預報點前 6 小時在 0°方向的平均風速分量(m/sec)	-4.56±2.52	3.30±3.12
預報點前 12 小時在 45°方向的平均風速分量(m/sec)	-2.34±2.66	4.96±2.71
預報點前 6 小時在 45°方向的平均風速分量(m/sec)	-2.49±2.74	4.96±2.73



圖 5-10 以模式 2 建置 6 小時預警模式各群特性設定

群集 1 與群集 2 的辨識率			
變數	值	喜好 群集 1	喜好 群集 2
v0 Avg12	-0.4 - 10.7		
v0 Avg12	-11.6 - -0.4		
v0 Avg6	-0.5 - 11.4		
v0 Avg6	-11.7 - -0.5		
v45 Avg6	1.6 - 11.9		
v45 Avg6	-9.1 - 1.6		
v45 Avg12	1.7 - 10.9		
v45 Avg12	-9.0 - 1.7		
Proinc6	1		
Proinc6	0		

圖 5-11 模式 2 群集演算 6 小時預警模式群集 1 與群集 2 差異分析

二、12 小時預警模式

以 NWWIII 預報的資料集合以群集分析演算法來建置 12 小時前的預警模式，所採用的輸入因子與建置 6 小時預警均相同，經不斷的訓練與不同因子組合選擇，得到最佳候選因子組合集分別為為風向、預報點前 12 小時在 0°方向的平均風速分量、預報點前 6 小時在 0°方向的平均風速分量、預報點前 12 小時在 45°方向的平

均風速分量和預報點前 12 小時平均風速，查看該模式的其群集特性如圖 5-12 所示。由圖 5-12 中可知，群集 1 的案例數有 402 筆，其中僅有 54.6% 可能會有落海事件發生；群集 2 的案例數有 401 筆，其中僅有 7.6% 可能會有落海事件發生，亦即當海氣象紀錄資料集接近於群集 1 時，會被判定可能會有落海事件的發生。表 5-11 為每一輸入因子在各群之間的特性定量描述。使用群集辨識工具來了解各群的因子相異之處，如圖 5-13 模式 2 群集演算 12 小時預警模式群集 1 與群集 2 差異分析。

由圖 5-13 中顯示群集 2 預報點前 12 小時 0 度的平均風量在 -11.0 到 -1.9 m/sec 間的機率為 100%，而群集 1 在 -1.9 到 10.7 m/sec 間的機率為 100%；群集 2 預報點前 6 小時 0 度的平均風量在 -11.5 到 -1.9 m/sec 間的機率為 96.4%，而群集 1 在 -1.9 到 13.1 m/sec 間的機率為 96.4%；群集 2 預報點前 12 小時 45 度的平均風量在 -9.0 到 0.4 m/sec 間的機率為 81.6%，而群集 1 在 0.4 到 10.9 m/sec 間的機率為 81.6%。群集 2 預報點當時風向(角度)在 127.3 到 228.2 度間的機率為 51.9%，而群集 1 在 0.7 到 127.3 度間的機率為 47.7%。群集 2 預報點前 12 小時 0 度的平均風量在 4.3 到 8.7 m/sec 間的機率為 3.9%，而群集 1 在 0 到 4.3 m/sec 間的機率為 3.0%。當資料集偏向群集 1 時，12 小內發生落海事件的機率將提高許多，必須提高警覺當心 12 小後海況會不佳。

表 5-11 以模式 2 建置 12 小時預警模式輸入因子特性說明

因子	群集 1 (有落海事件發生)	群集 2 (無落海事件發生)
預報點當時風向(角度)	93.3±82.48	168.54±27.22
預報點前 12 小時平均風速(m/sec)	5.3±2.61	5.92±1.83
預報點前 12 小時在 0°方向的平均風速分量(m/sec)	2.45±3.29	-5.1±1.89
預報點前 6 小時在 0°方向的平均風速分量(m/sec)	2.49±3.44	-5.25±2.04
預報點前 12 小時在 45°方向的平均風速分量(m/sec)	4.01±3.07	-2.89±2.42



圖 5-12 以模式 2 建置 12 小時預警模式各群特性設定

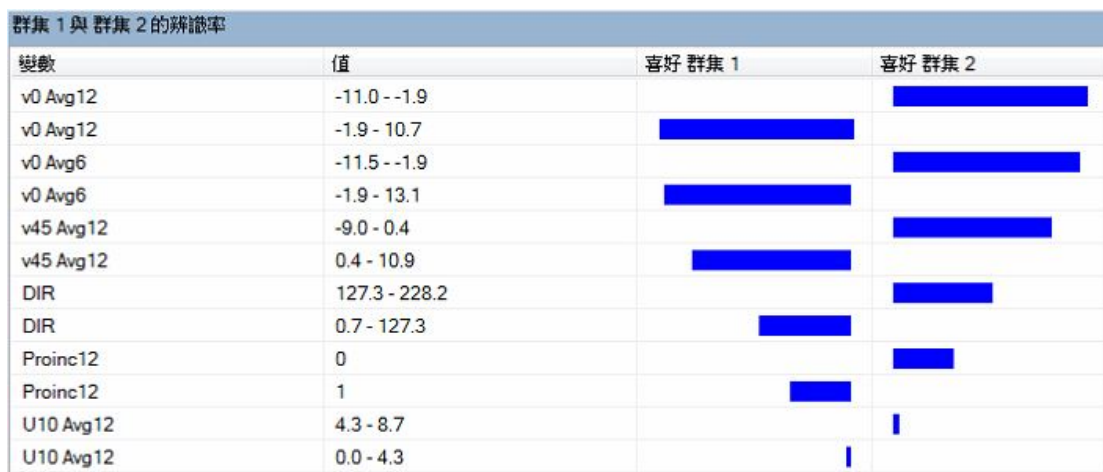


圖 5-13 模式 2 群集演算 12 小時預警模式群集 1 與群集 2 差異分析

三、24 小時預警模式

以 NWWIII 預報的資料集合以群集分析演算法來建置 24 小時前的預警模式，所採用的輸入因子與建置 12 小時預警相同，經學習訓練後，採用不同因子組合選擇，得到以群集個數為 2，主要的影響因子為預報點前 12 小時在 0° 方向的平均風

速分量、預報點前 6 小時在 0°方向的平均風速分量、預報點前 12 小時在 45°方向的平均風速分量、預報點前 6 小時在 45°方向的平均風速分量和風向所建置的模式為最佳。

由圖 5-14 中可知，群集 1 的案例數有 420 筆，其中僅有 8.3%可能會有落海事件發生；群集 2 的案例數有 383 筆，其中僅有 59.9%可能會有落海事件發生，亦即當海氣象紀錄資料集接近於群集 2 時，會被判定可能會有落海事件的發生。表 5-12 為每一輸入因子在各群之間的範圍描述，群集 2 的特性偏向會有落海事件發生，群集 1 則偏向於不會有落海事件發生，從表中我們可得知每一群的各項因子特性，經由群集辨識工具來了解各群的因子相異之處，如圖 5-15 模式 2 群集演算 24 小時預警模式群集 1 與群集 2 差異分析

圖 5-15 中說明於群集 2 預報點前 12 小時 0 度的平均風量在-1.7 到 10.7 m/sec 間的機率為 100%，而群集 1 在-11.4 到-1.7 m/sec 間的機率為 100%；群集 2 預報點前 6 小時 0 度的平均風量在-1.7 到 13.1 m/sec 間的機率為 98.7%，而群集 1 在-11.6 到-1.7 m/sec 間的機率為 98.7%；群集 1 預報點前 12 小時 45 度的平均風量在-8.8 到 0.6 m/sec 間的機率為 88.6%，而群集 2 在 0.6 到 10.9 m/sec 間的機率為 88.6%。群集 2 預報點前 6 小時 45 度的平均風量在 0.6 到 13.8 m/sec 間的機率為 87.2%，而群集 1 在-9.5 到 0.6 m/sec 間的機率為 87.2%；群集 1 預報點當時風向(角度)在 124.5 到 235.9 度間的機率為 51.5%，而群集 2 在 0.7 到 124.5 度間的機率為 47.6%。當資料集偏向群集 2 時，24 小內發生落海事件的機率將增高。

表 5-12 以模式 2 建置 24 小時預警模式輸入因子特性說明

因子	群集 1 (無落海事件發生)	群集 2 (有落海事件發生)
預報點當時風向(角度)	169.89±29.45	93.52±85.37
預報點前 12 小時在 0°方向的平均風速分量 (m/sec)	-4.98±2.03	2.48±3.21
預報點前 6 小時在 0°方向的平均風速分量 (m/sec)	-5.11±2.1	2.59±3.38
預報點前 12 小時在 45°方向的平均風速分量 (m/sec)	-2.87±2.43	4.14±2.91
預報點前 6 小時在 45°方向的平均風速分量 (m/sec)	-2.98±2.53	4.22±3.02

屬性		叢集設定檔		
變數	狀態	母體擴展 ... 大小: 803	群集 1 大小: 420	群集 2 大小: 383
DIR	 354.05 132.81 0.70			
Proinc24	 0 1 遺漏			
v0 Avg12	 10.74 -1.36 -11.35			
v0 Avg6	 12.89 -1.37 -11.60			
v45 Avg12	 10.92 0.54 -8.76			
v45 Avg6	 13.79 0.52 -9.50			

圖 5-14 以模式 2 建置 24 小時預警模式各群特性設定

群集 1 與 群集 2 的辨識率			
變數	值	喜好 群集 1	喜好 群集 2
v0 Avg12	-1.7 - 10.7		
v0 Avg12	-11.4 - -1.7		
v0 Avg6	-1.7 - 13.1		
v0 Avg6	-11.6 - -1.7		
v45 Avg12	-8.8 - 0.6		
v45 Avg12	0.6 - 10.9		
v45 Avg6	0.6 - 13.8		
v45 Avg6	-9.5 - 0.6		
DIR	124.5 - 235.9		
DIR	0.7 - 124.5		
Proinc24	0		
Proinc24	1		

圖 5-15 模式 2 群集演算 24 小時預警模式群集 1 與群集 2 差異分析

5-5 預警模式評估與比較

本研究共完成 2 種不同資料來源的預警模式建置，模式 1 為使用龍洞測站與 NWWIII 資料所組成的預警模式；模式 2 為使用 NWWIII 分析場資料所組成的預警模式。在模式的建置過程中，首先使用 2000-2003 年間的龍洞或 NWWIII 的資料來建模，建模過程分成 3 大階段，第 1 階段為訓練階段，此階段是將全部資料的 3/4 筆數資料進行模式訓練建置；第 2 階段是測試階段是將剩下未經訓練的 1/4 資料，拿來測試模式是否穩定與準確；若模式的測試結果不理想，便會重新調整因子或參數，使得模式達到最佳狀況；當完成模式建置後，便進入第 3 的驗證階段，此階段會以 2004-2015 年間實際發生的瘋狗浪事件來驗證模式是否準確。

表 5-13 為預警模式在測試與驗證兩階段的指標比較，由指標結果比較得知在 6 小時的預警模式中，模式 1 與模式 2 兩種方法在實際落海事件驗證方面(反查)，均能掌握所有的瘋狗浪事件發生；12 小時的預警模式以實際落海事件驗證方面，在模式 1 有 94.8%的反查率，模式 2 則為 90.6%；24 小時的預警模式以實際落海事件驗證方面，在模式 1 的反查率為 100%，模式 2 則為 88.7%。

表 5-14 為模式 1 與模式 2 輸入因子的比較，從表中我們可以看出在模式 1 的模式中，主要作為預警模式的主要影響因子為示性波高的最大值或是其平均值，加上尖峰週期的均值或最大值，再輔以 NWWIII 中在 0 度與 45 度上的風速分量，來決定模式的輸出。可以看出模式 1 在推估是否可能會發生落海事件的發生，會使用到海象與氣象的變化來推估；而模式 2 中所使用的因子，全部都是風力或是風向，結果完全不如模式 1 來得準確。我們認為可能原因是當時模式建置時，僅蒐集到 2002-2003 年間的資料，資料筆數過少，在訓練不足的情況下，真不容易有好的推論；但也有可能是當時 NWWIII 的輸出結果就已經有誤差，導致模式 2 較不準確。比較兩種模式作業上，整體而言模式 1 的預警模式明顯優於模式 2。但模式 2 的預警模式可應用於當龍洞測站的資料無法正常取得的狀況下，仍能有預警的參考訊息。

由於本研究所採取的模式驗證方式是以實際有發生浪擊落海事件，且經有媒體報導或向相關搜救單位查證屬實的紀錄來做驗證，所以樣本數佔整體資料筆數，仍是屬於稀有事件，但是沒有落海事件發生並不代表當時的海象狀況是安全的，所以會造成雖然有預警警告，但實際沒發生落海事件的狀況仍多，此一現象雖然在反查率上都有 9 成以上的準確結果，但也會造成回應率普遍偏低的現象。若要能以更精

準的方式來驗證模式是否有效，則需實際在岸邊裝設觀察儀器，利用儀器或感應裝置來實際記錄在岸邊越波情形，才能真正了解預警模式的準確性。

表 5-13 兩種預警模式結果比較

預警模式		測試		驗證	
		回應率 (Response Rate)	反查 (Recall)	回應率 (Response Rate)	反查 (Recall)
模式 1	6 小時 模式	62.6%	100%	0.20%	100%
	12 小時 模式	75.4%	93.7%	0.19%	94.8%
	24 小時 模式	68.6%	90.9%	0.19%	100%
模式 2	6 小時 模式	56.0%	75.7%	0.16%	86.8%
	12 小時 模式	56.0%	84.4%	0.14%	90.6%
	24 小時 模式	63.2%	83.3%	0.14%	88.7%

表 5-14 兩種預警模式輸入因子比較

預警模式		輸入因子
模式 1	6 小時 模式	預報點前 6 小時內示性波高的平均值
		預報點前 6 小時內示性波高的最大值
		預報點前 6 小時內尖峰週期的平均值
		預報點前 6 小時內尖峰週期的最大值
		NWWIII 預報點前 12 小時在 45°方向的平均風速分量
		NWWIII 預報點前 12 小時在 0°方向的平均風速分量
	12 小時 模式	預報點前 6 小時內示性波高的平均值
		預報點前 6 小時內示性波高的最大值
		NWWIII 預報點前 12 小時在 45°方向的平均風速分量
		NWWIII 預報點前 12 小時在 0°方向的平均風速分量
		預報點前 6 小時內尖峰週期的最大值
	24 小時 模式	預報點前 6 小時內示性波高的平均值
		預報點前 6 小時內示性波高的最大值
		預報點前 6 小時內尖峰週期的最大值
		預報點前 6 小時內尖峰週期的平均值
		NWWIII 預報點前 12 小時在 45°方向的平均風速分量
		預報點前 12 小時在 45°方向的平均風速分量

模式 2	6 小時模式	預報點前 6 小時平均風速
		預報點前 12 小時在 0°方向的平均風速分量
		預報點前 6 小時在 0°方向的平均風速分量
		預報點前 12 小時在 45°方向的平均風速分量
		預報點前 6 小時在 45°方向的平均風速分量
	12 小時模式	預報點當時風向(角度)
		預報點前 12 小時平均風速
		預報點前 12 小時在 0°方向的平均風速分量
		預報點前 6 小時在 0°方向的平均風速分量
		預報點前 12 小時在 45°方向的平均風速分量
	24 小時模式	預報點當時風向(角度)
		預報點前 12 小時在 0°方向的平均風速分量
		預報點前 6 小時在 0°方向的平均風速分量
		預報點前 12 小時在 45°方向的平均風速分量
		預報點前 6 小時在 45°方向的平均風速分量

5-6 瘋狗浪預警系統上線運作成果

在過去模式 1 與模式 2 中，本研究均分別建置即時、6 小時、12 小時與 24 小時各 4 種分時預警模式。由於即時預警模式的建置，其輸入資料部分是取用預報該點前 6 小時或是前 12 小時內的資料，來做為模式的輸入所用。若是要建置即時預警系統，則所有的輸入資料在預報當時均需完全準備好，但是龍洞海象觀測資料與 NWWIII 模式輸出資料，目前仍需以人工進行部分的轉換工作，所以建置即時預警並無法完成，且即時預警發佈警訊時，已立即成為過去式，對於實務上的預警也無重大的助益，所以將捨去即時預警系統的建置，僅將建置 6 小時、12 小時與 24 小時等 3 種分時預警模式。

為了配合實務上的運作，擬建議每日進行 4 次預警模式作業，預警作業時間建議如圖 5-16 所示。考量在實務操作面上，龍洞的海象觀測資料與 NWWIII 預報輸出資料均要部分人工操作，故建議於每天 UTC 04:00 時開始準備預警作業，資料準備完成後便開始進行模式的運算，預計所有的準備工作與模式結果輸出約 1.5 小時，可於 UTC 05:30 做第一次預警結果的發佈，爾後每隔 6 小時進行下一次的預警作業。瘋狗浪預警模式的輸出為 O 與 X，即達到發生瘋狗浪的條件與否，若輸出結果為 X，即表示發生瘋狗浪的風險較低；輸出結果為 O，及表示發生瘋狗浪的風險較高。

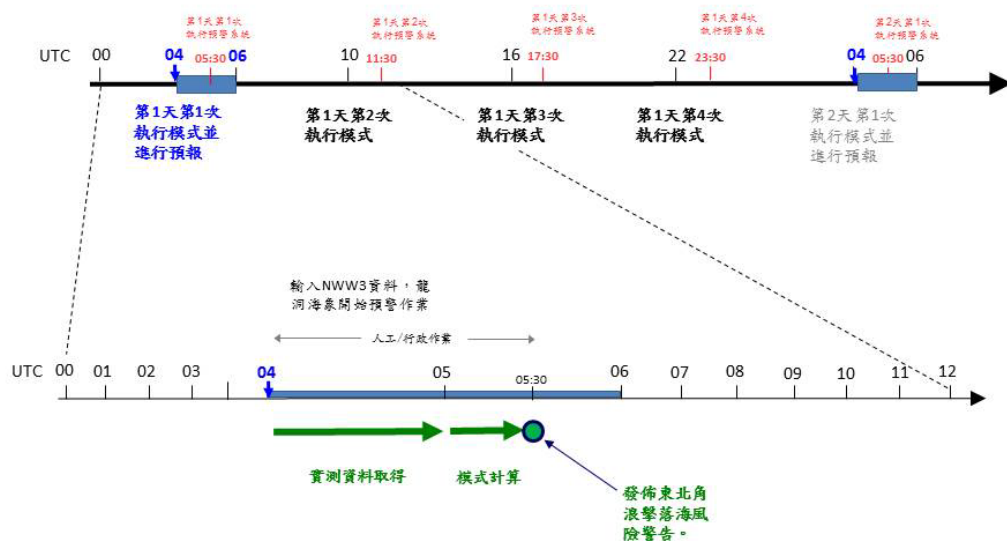


圖 5-16 瘋狗浪預警作業時程示意圖

5-6-1 預警系統規劃與設計

東北角瘋狗浪預警系統(CDW)執行後將顯示預警結果，結果依照龍洞測站資料與 NWWIII 模式資料在系統執行時間是否有異常將產生 4 種狀況，正常模式、無法驗證(NWWIII 異常)、NWWIII 模式(龍洞測站資料異常)及無法驗證(龍洞測站資料與 NWWIII 資料都異常)，詳細部分參考下列驗證模式說明。

1. 正常模式

當點選執行按鈕後，系統將自動判斷資料是否異常，當系統中的龍洞測站資料與 NWWIII 模式資料在系統執行時皆有資料存在且正常，即會顯示正常模式並顯示其結果如圖 5-17 所示，結果將顯示 6 小時候、12 小時候、24 小時候的預警狀況；顯示 O 代表高風險、顯示 X 代表非高風險；系統下方將會顯示下次自動執行的時間點，以及目前模式預警狀況；紅燈號代表高風險、灰燈號代表非高風險。



圖 5-17 東北角瘋狗浪預警系統正常模式結果

2. 無法驗證(NWWIII 資料異常)：

當系統執行時，發現龍洞測站資料在系統執行時間時資料存在且正常，但 NWWIII 模式資料有異常或是不存在的狀況下將導致系統無法驗證，如圖 5-18 所示，結果將顯示無法驗證及錯誤訊息；系統仍會繼續執行；系統下方將會顯示下次自動執行的時間點。

錯誤訊息如下

「※2015/11/24 06:30:00 NWWIII 資料不存在。」



圖 5-18 東北角瘋狗浪預警系統 NWWIII 資料異常結果

3. NWWIII 模式(龍洞測站資料資料異常)：

當系統中的龍洞測站資料在系統執行時間時資料異常(無效值)或是不存在，但 NWWIII 模式資料存在且正常的狀況下系統將自動切換成 NWWIII 模式，如圖 5-19 所示，結果將顯示 6 小時候、12 小時候、24 小時候的預警狀況；顯示 O 代表高風險、顯示 X 代表非高風險；系統下方將會顯示下次自動執行的時間點，以及目前模式預警狀況；紅燈號代表高風險、灰燈號代表非高風險。

錯誤訊息如下

「※2015/10/29 龍洞測站資料資料不存在或資料異常[無效值]。」



圖 5-19 東北角瘋狗浪預警系統龍洞測站資料資料異常結果

4. 無法驗證(龍洞測站資料與 NWWIII 資料都異常)：

當系統中的龍洞測站資料與 NWWIII 模式資料在系統執行時間時資料皆為異常(無效值)或是不存在的狀況下將導致系統無法驗證，如圖 5-20 所示，結果將顯示無法驗證及錯誤訊息；系統仍會繼續執行；系統下方將會顯示下次自動執行的時間點。錯誤訊息如下

「※2015/12/4 龍洞測站資料不存在或資料異常[無效值]

※2015/12/4 00:30:00 NWWIII 資料不存在。」

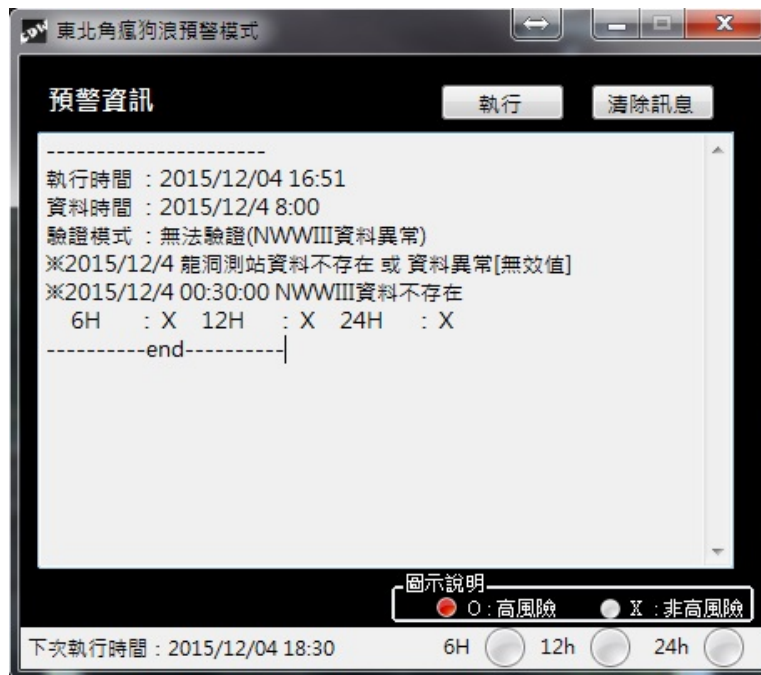


圖 5-20 東北角瘋狗浪預警系統龍洞測站資料與 NWWIII 資料異常結果

5-6-2 東北角瘋狗浪預警系統運作結果探討

本計畫雖於 2015 年 9 月即建置完成，但當時龍洞測站均無量測資料可提供，僅能就模式 2 進行預警推算。直到龍洞測站正常運作後，本計畫使用 10 月、11 月龍洞浮標站資料，篩選出預警模式為模式 1 時，龍洞浮標站當時的波高資料之平均值，來驗證模式 1 預警系統與當時龍洞浮標站波高之關係，分別比較 6 小時模式、12 小時模式與 24 小時模式。6 小時預警模式中當預警系統顯示高風險時，龍洞浮標站波高平均為 1.47m。12 小時預警模式中當預警系統顯示高風險時，龍洞浮標站當時波高平均為 1.53m。24 小時預警模式中當預警系統顯示高風險時，龍洞浮標站當時波高平均為 1.39m。由以上結果顯示，當預警系統中顯示高危險時龍洞浮標預警當時波高較大。

由以上的波高推斷，與過去的研究指出當波高達到 1.5 米上便可能會有落海事件發生的結論相去不遠。可見模式 1 的預警模式在實務性的推算上，具有一定的參考價值。

本計畫將 2015 年 9 月系統建置完後，模式 1 預警模式結果，分別比較 6 小時模式、12 小時模式與 24 小時模式，並統計預警系統顯示高風險時的次數。在系統建置完後的 6 小時預警結果共有 42 次預警高風險，12 小時預警結果共 42 次預警高風險，24 小時預警結果有 40 次預警高風險。整體來說，在預警系統建置後，使用模式 1 進行預警，顯示高風險狀態時佔約 7 成。

研究中將系統建置完後，模式 1 預警模式之結果，將各項因子平均，進而比較有預警高風險及非高風險，分別比較 6 小時模式、12 小時模式與 24 小時模式。

表 5-17 中 6 小時模式條件，有預警高風險時，預報點前 6 小時的平均示性波高為 162.67 公分。在預報點前 6 小時的最大示性波高差異方面，有預警高風險時預報點前 6 小時的最大示性波高為 192.76 公分。在 NWWIII 預報點前 12 小時在 0 度的平均風量，有預警高風險時為 5.21m/sec。在 NWWIII 預報點前 12 小時在 45 度的平均風量，有預警高風險時為 7.95 m/sec。在預報點前 6 小時的平均週期差異比較上，有預警高風險時為 8.14 秒。在預報點前 6 小時的最大週期差異比較上，有預警高風險時為 9.22 秒。當模式顯示為預警高風險時，代表可能在 6 小時後海象狀況不佳，可能會有落海事件發生。

表 5-18 中 12 小時模式條件，有預警高風險時，預報點前 6 小時的平均示性波高為 161.49 公分。在預報點前 6 小時的最大示性波高差異方面，有預警高風險時預報點前 6 小時的最大示性波高為 191.90 公分。在 NWWIII 預報點前 12 小時在 0 度的平均風量，有預警高風險時為 4.97 m/sec。在 NWWIII 預報點前 12 小時在 45 度的平均風量，有預警高風險時為 7.77 m/sec。在預報點前 6 小時的最大週期差異比較上，有預警高風險時為 9.10 秒。

表 5-19 中 24 小時模式條件，有預警高風險時，預報點前 6 小時的平均示性波高為 160.57 公分。在預報點前 6 小時的最大示性波高差異方面，有預警高風險時預報點前 6 小時的最大示性波高為 190.70 公分。在 NWWIII 預報點前 12 小時在 0 度的平均風量，有預警高風險時為 5.09m/sec。在預報點前 6 小時的平均週期差異比較上，有預警高風險時為 7.96 秒。在預報點前 6 小時的最大週期差異比較上，有預警高風險時為 8.94 秒。在預報點前 12 小時在 45 度的平均風量，有預警高風險時為 4.18 m/sec。

表 5-15 東北角瘋狗浪預警系統 6 小時模式預警結果之因子範圍

因子	高風險 (O)	非高風險 (X)
預報點前 6 小時內示性波高的平均值(cm)	162.67	100.51
預報點前 6 小時內示性波高的最大值(cm)	192.76	118.24
NWWIII 預報點前 12 小時在 0°方向的平均風速分量(m/sec)	5.21	-2.76
NWWIII 預報點前 12 小時在 45°方向的平均風速分量(m/sec)	7.95	0.35
預報點前 6 小時內尖峰週期的平均值(sec)	8.14	7.38
預報點前 6 小時內尖峰週期的最大值(sec)	9.22	8.44

表 5-16 東北角瘋狗浪預警系統 12 小時模式預警結果之因子範圍

因子	高風險 (O)	非高風險 (X)
預報點前 6 小時內示性波高的平均值(cm)	161.49	97.06
預報點前 6 小時內示性波高的最大值(cm)	191.90	113.75
NWWIII 預報點前 12 小時在 0°方向的平均風速分量(m/sec)	4.97	-2.75
NWWIII 預報點前 12 小時在 45°方向的平均風速分量(m/sec)	7.77	0.47
預報點前 6 小時內尖峰週期的最大值(sec)	9.10	8.38

表 5-17 東北角瘋狗浪預警系統 24 小時模式預警結果之因子範圍

因子	高風險 (O)	非高風險 (X)
預報點前 6 小時內示性波高的平均值(cm)	160.57	100.51
預報點前 6 小時內示性波高的最大值(cm)	190.70	118.24
NWWIII 預報點前 12 小時在 0°方向的平均風速分量(m/sec)	5.09	-2.76
預報點前 6 小時內尖峰週期的平均值(sec)	7.96	7.38
預報點前 6 小時內尖峰週期的最大值(sec)	8.94	8.44
預報點前 12 小時在 45°方向的平均風速分量(m/sec)	4.18	-1.35

檢視在本計畫預警系統上線運作後，現場發生過 1 件瘋狗浪事件，事件發生於龍洞 2015 年 10 月 8 日晚間 8 點左右，由於發生當時的前 24 小時內均無龍洞測站的量測資料，故無法以模式 1 做預警；若採用模式 2：NWWIII 模式做預警，發現無論在 6 小時、12 小時與 24 小時都未能預測到瘋狗浪事件的發生，檢視當時龜山島測站的波高與週期變化如圖 5-21。

由圖 5-21 中可看出當時的波高狀況並未達到危險程度，但平均週期有接近事件發生當時已接近 8 秒，可見當時有湧浪接近。反觀模式 2 中的輸入因子，全部為風向與風速所構成，故無法針對湧浪型的瘋狗浪事件產生預警效果，後續亦可嘗試增加波高、週期等輸入因子增加模式的準確性。

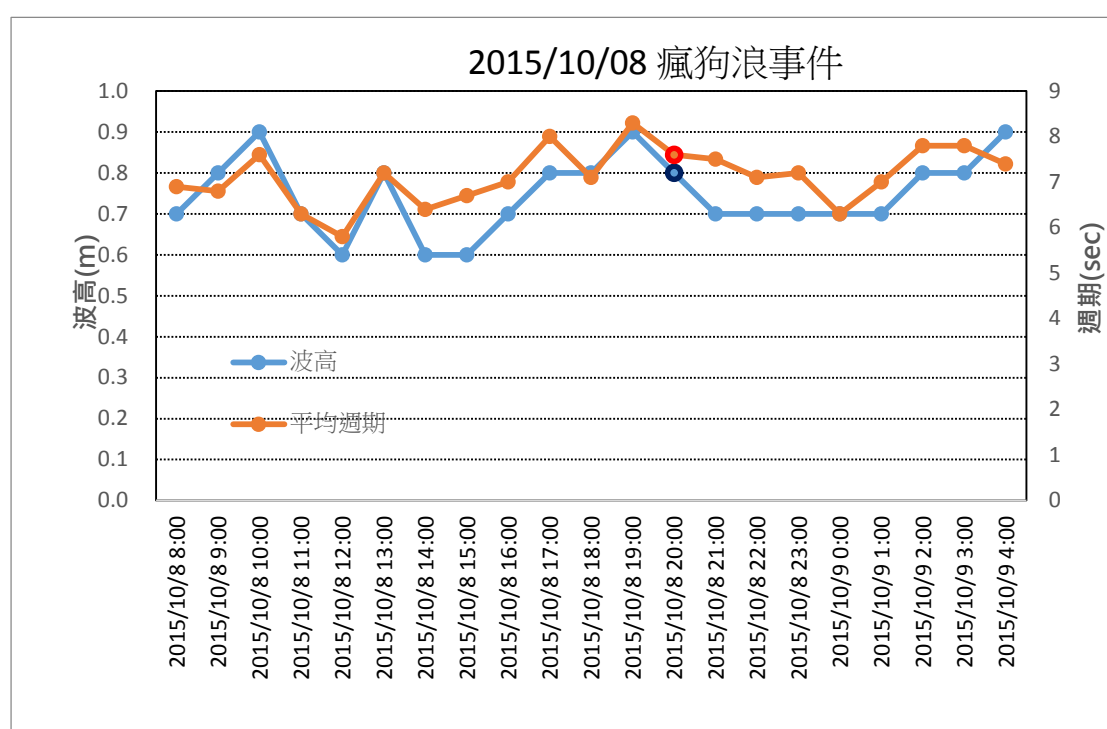


圖 5-21 瘋狗浪事件發生時龜山測站海象紀錄情形(2015/10/08)

5-7 教育訓練與技術轉移

在完成模式建置與上機測試後，本計畫最後一部分為瘋狗浪預警系統之操作教育訓練與技術轉移之部分，本研究之共同主持人蔡仁智教授已於 10 月 29 日下午在中央氣象局海象中心舉辦相關之教育訓練講座，邀請中央氣象局海象中心相關人員參與，除講解瘋狗浪預警系統之建置原理，還包含預警系統之操作以及預警系統出現錯誤之簡易疑難排除，往後當預警系統在執行時，若有錯誤發生，操作人員可簡易判斷錯誤原因，並進行錯誤排解。教育訓練與技術轉移之簽到表與相關教材如附錄光碟。

第六章 急速成長波浪特性分析

海面的波浪變化與天氣息息相關，當天氣急遽變化時，海上的風浪也會急速的變化，這對海上航行的船隻造成嚴重威脅，特別是小噸位的遊艇或魚船。根據蔡與蔡(2007)的研究中發現，當日平均示性波高超過 1.5m 以上時，發生海難的事件有明顯增加的趨勢。參考呂蕙君(2007)、黃玲玲(2010)等研究，本計畫定義急速成長波浪為「在六小時內，示性波高成長 2 倍以上，且成長後達到 1.5 公尺以上者」，小型漁船航速大約是 6 節，六小時為小型漁船從約 36 浬外海回母港所需時間，該距離約等同於澎佳嶼至基隆八斗子漁港之距離。本計畫於 2014 年已探討小琉球與鵝鑾鼻兩浮標資料之急速成長波，此年度則探討馬祖浮標資料之急速成長波。

6-1 馬祖浮標站分析資料

馬祖浮標站於 2010 年設立，現時位置在東經 120.5361 度，北緯 26.3769 度，水深約 58 公尺。馬祖浮標站於 2011 年至 2014 年的觀測資料為每一小時取樣一筆。本計畫分析 2011-2014 年資料，這 4 年間共有波浪資料 31,343 筆。

依據前述急速成長波浪定義，本計畫於 4 年馬祖浮標資料中共尋得 95 件急速成長波浪個案，平均每年約 24 個案，所有馬祖浮標之急速成長波浪案例詳如附錄光碟。圖 6-1 為馬祖海域 2011/5/23 急速成長波的案例，我們可看到波浪由原先 0.8 公尺在 11 小時後成長到 2.95 公尺，成長了 3.4 倍，再下 1 小時稍微下降至 2.68 公尺。我們也計算出這期間內各小時之波高成長率，其最大波高成長率為 0.54 公尺/小時，從開始成長至此事件波高最高點，其平均成長率為 0.19 公尺/小時。

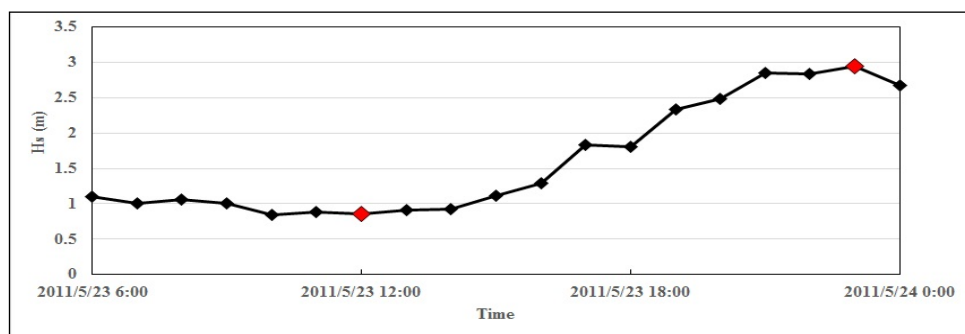


圖 6-1 馬祖海域 2011/5/23 急速成長波浪波高圖，紅點為急速成長起始與結束點

6-2 馬祖浮標站急速成長波浪案例

本研究認為急速成長波浪與天氣存在顯著關係，本節列出數個成長倍數大而且海氣象資料完整的案例，探討其波高的變化並與當時之天氣圖比對。

案例 1：2013 年 3 月 1 日(個案編號 42)

在此案例中，示性波高在 2013 年 3 月 1 日 14 時急速成長了 7.7 倍 (圖 6-2)，從 0.75 公尺成長至 5.78 公尺，波高成長期間，最大每小時波高的成長率為 1.09 公尺/時。由當時的天氣圖 (圖 6-3 及圖 6-4) 可看出，大陸高壓(1042 百帕) 在北緯 44 度，東經 117 度，向東南移動，台灣當時受到鋒面通過且伴隨大陸冷高壓南下影響。

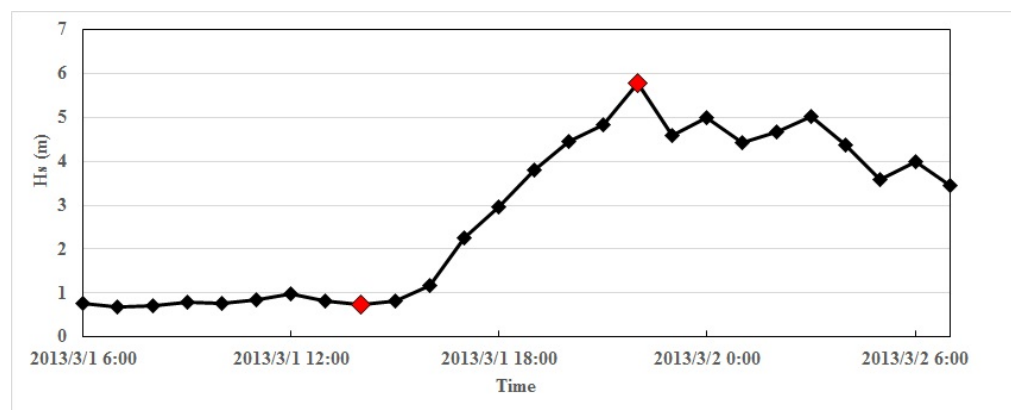


圖 6-2 2013 年 3 月 1 日急速成長波案例，紅點為急速成長起始與結束點

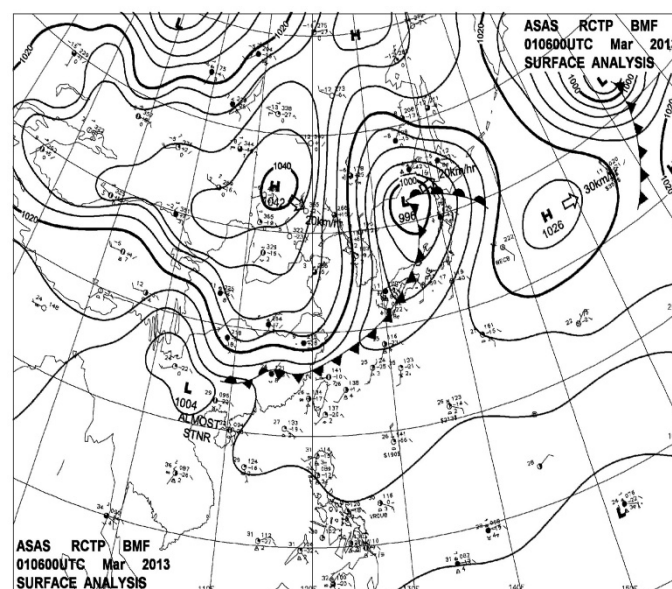


圖 6-3 2013 年 3 月 1 日 14 時地面天氣圖

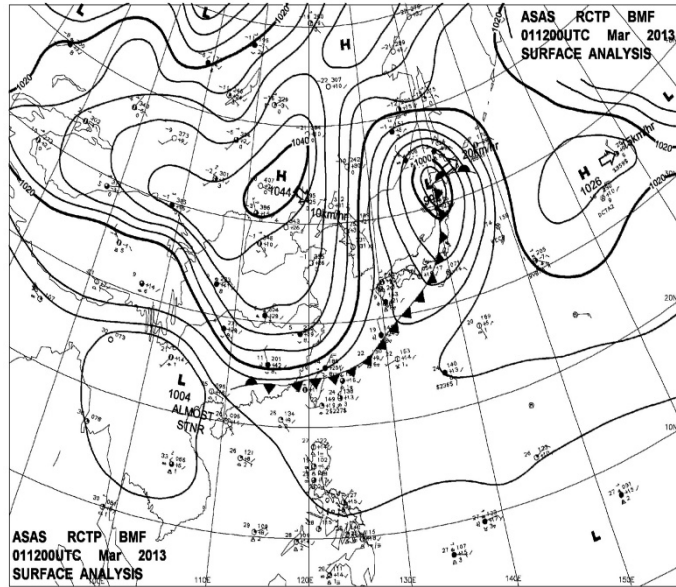


圖 6-4 2013 年 3 月 1 日 20 時地面天氣圖

案例 2：2011 年 5 月 23 日 (個案編號 3)

此案例已於前面描述過，其波高成長圖為圖 6-1。如前所述，波高於 2011 年 5 月 23 日 12 時從 0.86 公尺開始成長，於 23 日 23 時達 2.95 公尺。波高成長期間，平均每小時波高的成長率為 0.19 公尺/時，最大每小時波高的成長率為 0.54 公尺/時。由當時的天氣圖（圖 6-5 及圖 6-6）顯示，台灣當時受到鋒面通過的影響。

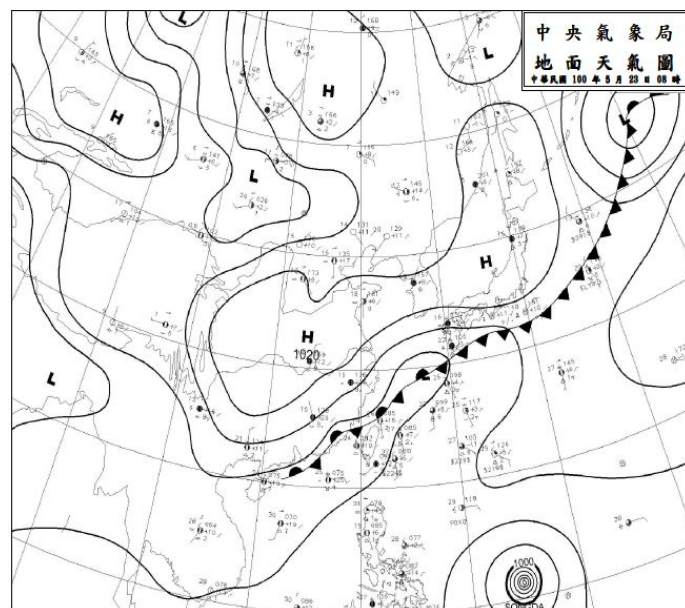


圖 6-5 2011 年 5 月 23 日 8 時地面天氣圖

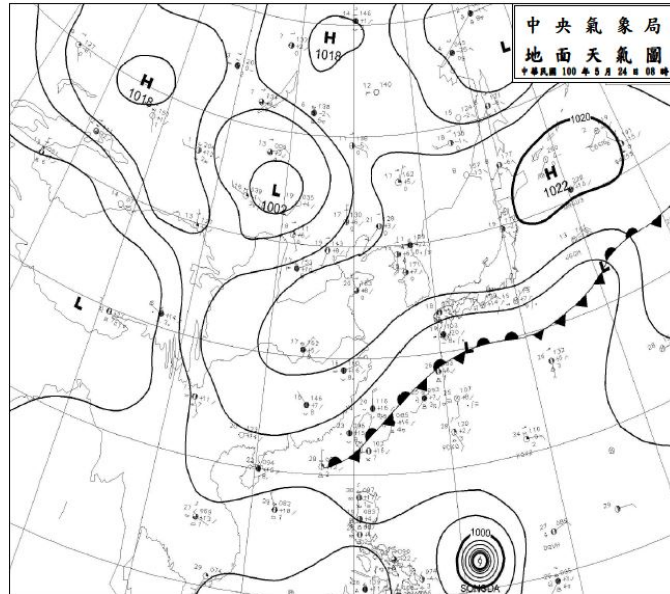


圖 6-6 2011 年 5 月 24 日 8 時地面天氣圖

案例 3：2011 年 10 月 24 日 (個案編號 9)

在此案例中，示性波高在 2011 年 10 月 24 日 17 時急速成長了 6.3 倍 (圖 6-7)，從 0.63 公尺成長至 4.03 公尺，波高成長期間，最大每小時波高變化率則為 0.96 公尺/時。當時的天氣圖 (圖 6-8 及圖 6-9) 顯示，10 月 24 日至 10 月 25 日台灣當時受到鋒面通過且伴隨大陸冷高壓南下影響。

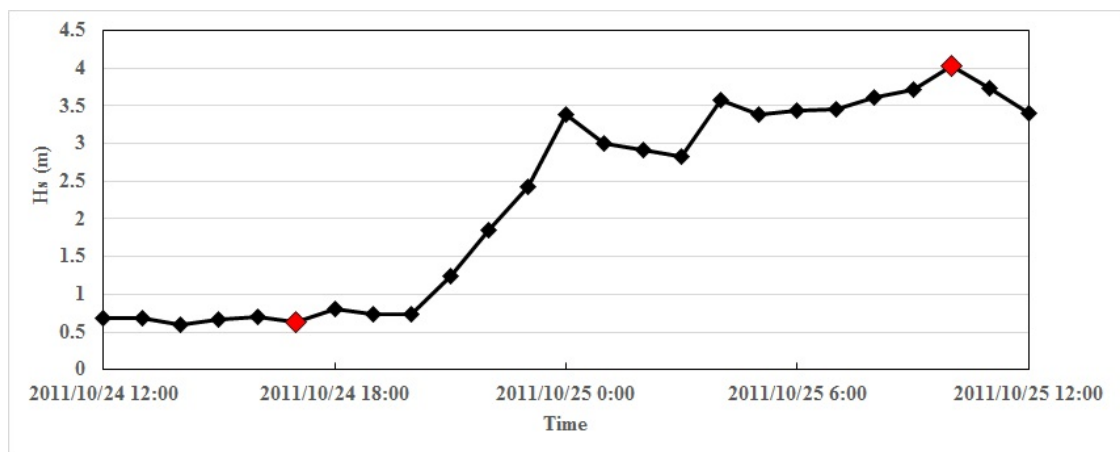


圖 6-7 2011 年 10 月 24 日急速成長波案例，紅點為急速成長起始與結束點

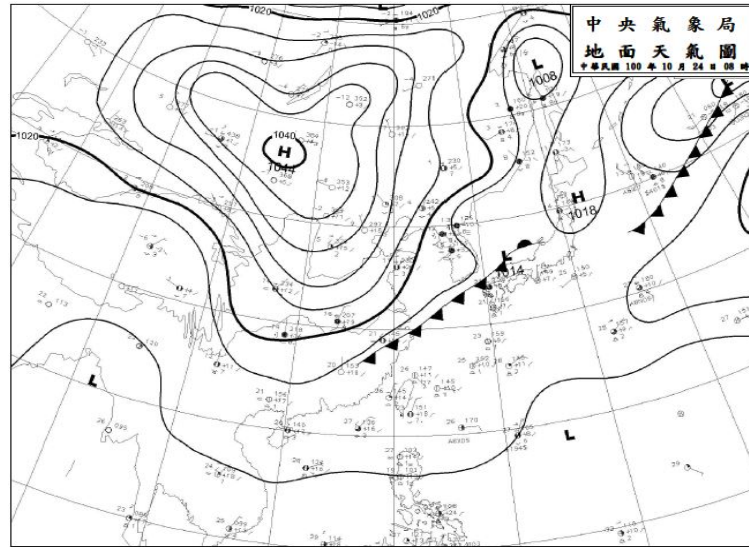


圖 6-8 2011 年 10 月 24 日 8 時地面天氣圖

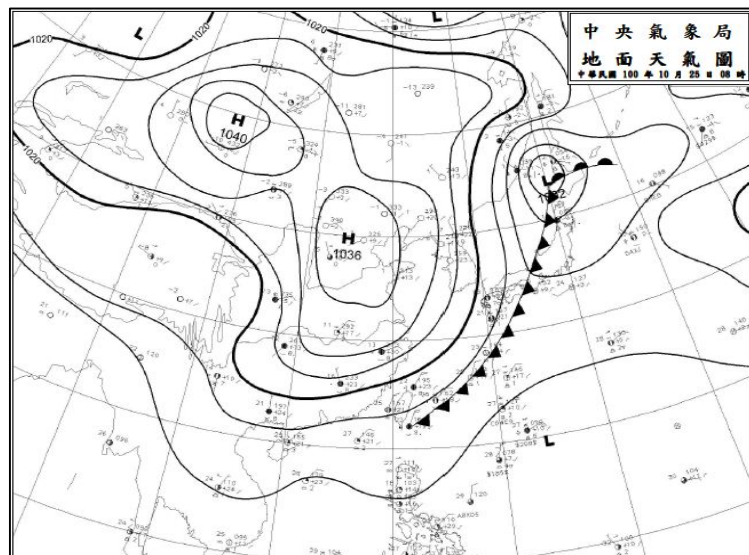


圖 6-9 2011 年 10 月 25 日 8 時地面天氣圖

案例 4：2013 年 8 月 21 日 (個案編號 61)

案例 4 的示性波高在 2013 年 8 月 21 日 15 時急速成長了 2.9 倍 (圖 6-10)，從 4.27 公尺成長至 12.45 公尺，波高成長期間，最大每小時波高成長率則為 4.36 公尺/時。當時的天氣系統 (圖 6-11) 顯示，有一颱風在北緯 18.7 度，東經 171.9 度，向西移動，台灣當時受到皮瓦颱風影響。

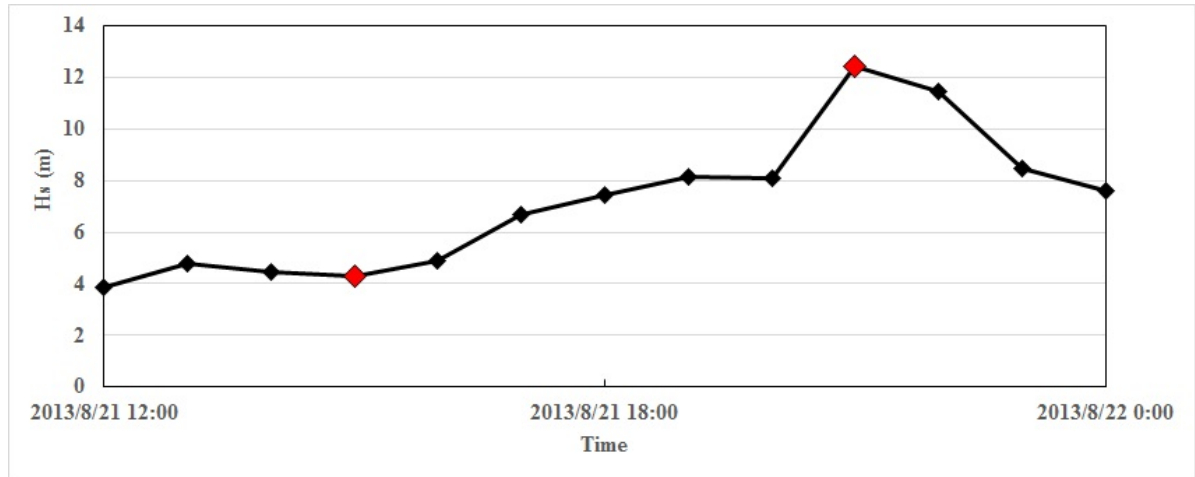


圖 6-10 2013 年 8 月 21 日急速成長波案例，紅點為急速成長起始與結束點

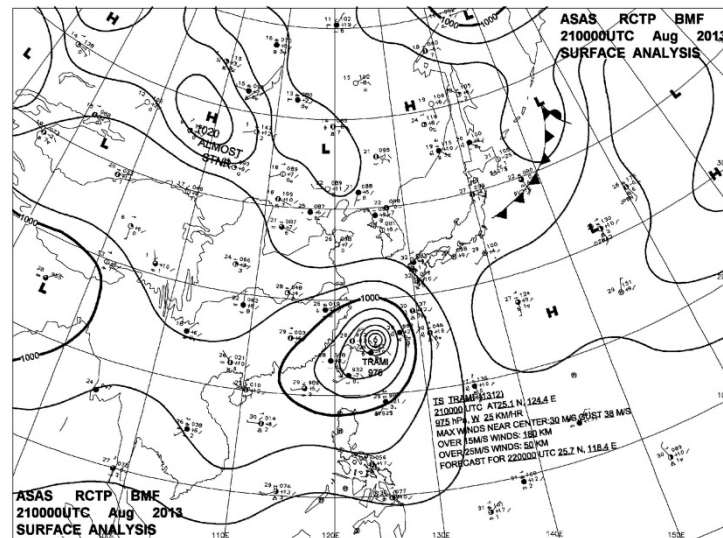


圖 6-11 2013 年 8 月 21 日 8 時地面天氣圖

案例 5：2013 年 3 月 24 日 (個案編號 46)

在此個案中，示性波高在 2013 年 3 月 24 日 14 時急速成長了 6.2 倍，從 0.45 公尺成長至 2.79 公尺(圖 6-12)，波浪由開始成長到波浪最高點共 7 小時，波高最大成長率則為 0.75 公尺/時，發生於 3 月 24 日 14 時至 24 日 21 時之間。當時的天氣系統顯示(圖 6-13)所示，在急速成長波浪發生前，正有一鋒面經過且在北緯 37 度，東經 116 度，有一大陸高壓(1024 百帕)，向東南移動，故台灣當時受到鋒面通過且伴隨大陸冷高壓南下影響。

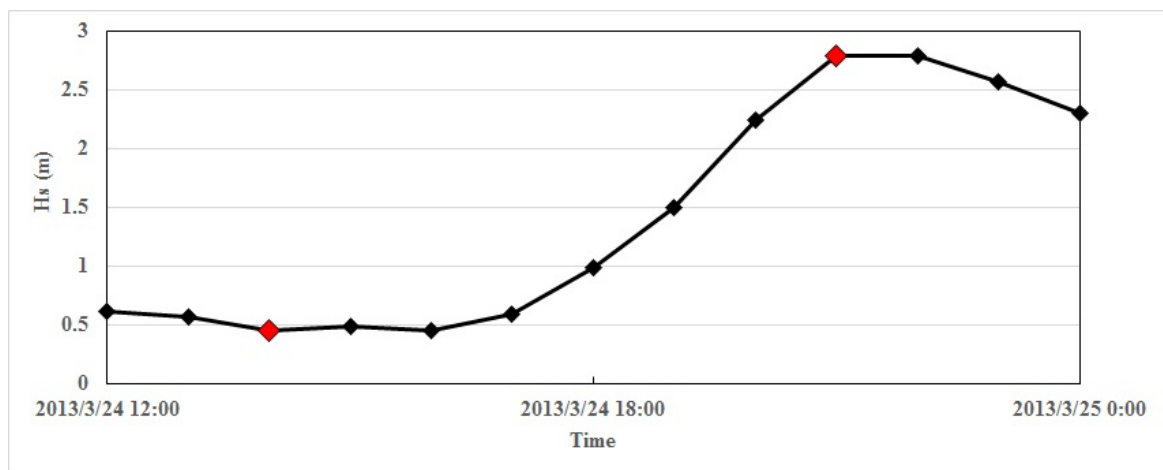


圖 6-12 2013 年 3 月 24 日急速成長波案例，紅點為急速成長起始與結束點

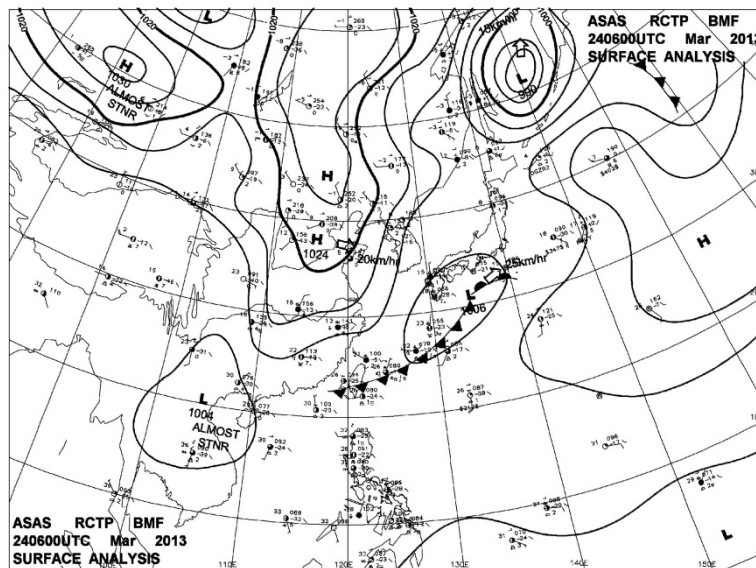


圖 6-13 2013 年 3 月 24 日 14 時地面天氣圖

由以上案例可看出急速成長波浪的確與天氣系統有關，我們經比對 95 急速成長波浪個案發生時中央氣象局所發布天氣圖與天氣概況後，可看出各個案發生時所伴隨天氣系統主要為受到鋒面通過伴隨著大陸冷高壓南下、只有鋒面通過、只有大陸冷高壓南下及東北季風增強等天氣系統所影響。

6-3 馬祖浮標站分析結果

6-3-1 急速成長波浪發生時之天氣狀況

圖 6-14 為馬祖浮標站全部 95 個急速成長波浪個案隨月份之分佈。此圖顯示急速成長波主要發生於春、冬比例最高，這顯示急速成長波與季節很有關係。本文中春季是指三月至五月，夏季為六月至八月，秋季為九月至十一月，冬季為十二月至翌年的二月。由於 95 個案中有不少個案在急速成長波發生期間缺乏氣象資料，若去除欠缺氣象資料的個案則有 49 個資料完整個案。圖 6-14 也繪出該 49 個案之月份分佈，我們可看出其分佈與全部 95 個個案分佈大致相似。

本文整理馬祖浮標站各年示性波高四季資料完整度及年度資料完整度，表 6-1 顯示馬祖浮標站中 2011 年資料完整度為 75%，另外 2012 年、2013 年、2014 年資料完整度分別為 100%、99%、100%。由表 6-1 可看出馬祖浮標站在 2012 年至 2014 年資料完整度較高。

由表 6-2 可知 95 個的急速成長波浪案例中，發生在春季的有 39 個，其中 20 個春季個案當天都有受到鋒面通過且伴隨大陸冷高壓南下影響，故鋒面通過且伴隨大陸冷高壓南下影響是春季發生急速成長波浪的主要原因，其次 15 個春季個案是受到鋒面通過影響有關，有 3 個案是受到大陸冷高壓南下所影響，另有 1 個案受到雷雨所致。案例發生次多的季節為冬季，有 22 個案，其中受到大陸冷高壓南下所影響就占了約 54% (12 件)，因此受到大陸冷高壓南下所影響是冬季波浪急速成長的主要原因，其次則是鋒面通過且伴隨大陸冷高壓南下影響有 10 件；發生在秋季的案例有 17 個，其發生原因主要是因鋒面通過且伴隨大陸冷高壓南下所致(10 件)，受到大陸冷高壓南下影響的天氣系統(4 件)，另有 3 件只有受到鋒面通過影響；夏季發生的急速成長波浪有 17 個案，其 10 個是受到颱風外圍環流或熱低壓影響，另有 5 個案例是受到鋒面通過所致，受到七及暴風半徑內的影響有 1 個案例，另有 1 個案例是受到雷雨所致。以上為 2011 年至 2014 年所發現的急速成長波浪與天氣系統之關係。我們可以由圖 6-15 得知在馬祖浮標站之急速成長波浪發生主要是受到鋒面通過且伴隨大陸冷高壓南下的影響較多，其次為受到鋒面通過影響。

表 6-1 馬祖浮標站各年示性波高資料完整度

年度	春 (%)	夏(%)	秋(%)	冬(%)	全年 (%)
2011年	18	100	100	85	75
2012年	100	100	99	100	100
2013年	99	99	100	98	99
2014年	100	100	100	100	100
合計	79	100	100	95	93

表 6-2 馬祖浮標站 2011 年至 2014 年 95 個急速成長波之伴隨天氣系統

	全部	鋒面通過伴隨 著大陸冷高壓 南下(F+H)	只有鋒 面通過 (F)	只有大陸 冷高壓南 下(H)	颱風外圍 或熱低壓 (TY/TD)	七級暴 風半徑 內(TY7)	雷雨(TH)
春	39	20	15	3	0	0	1
夏	17	0	5	0	10	1	1
秋	17	10	3	4	0	0	0
冬	22	10	0	12	0	0	0
	95	40	23	19	10	1	2

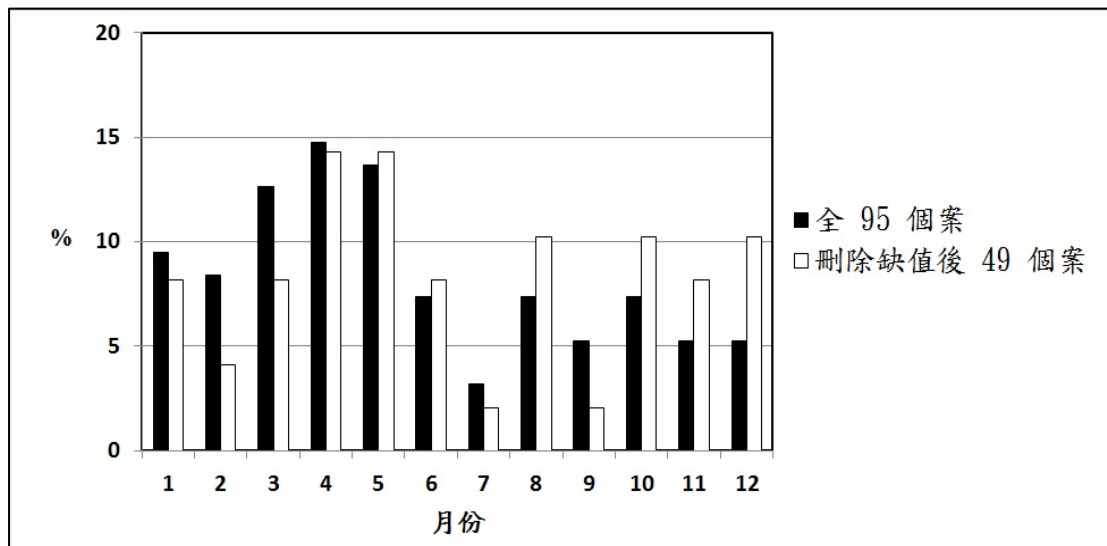


圖 6-14 2011-2014 馬祖浮標站之急速成長波浪於各月份分佈

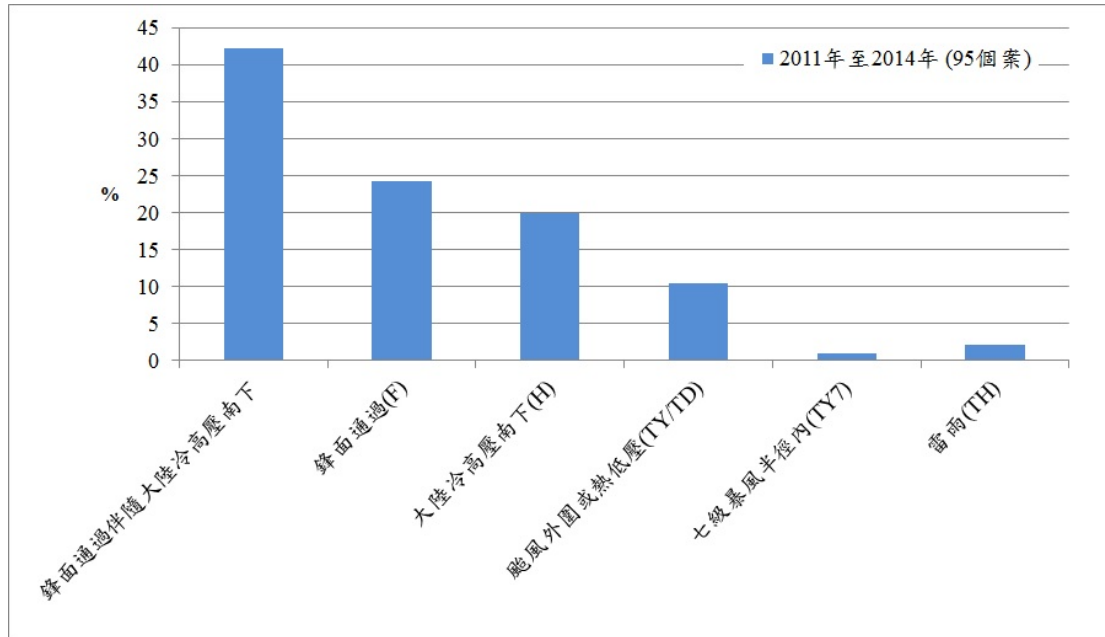


圖 6-15 馬祖 2011-2014 年急速成長波天氣系統比例圖

6-3-2 馬祖浮標站急速成長波浪案例統計分析

本文整理急速成長波發生時，整個事件的波高成長歷時、起始示性波高、成長後最大示性波高、波高成長量、成長倍數、波高平均成長率、波高平均每小時成長率、波高最大成長率等特性參數，詳細數據列於附錄光碟。本節將這些數據的平均值與最大值與最小值列於表 6-3。

分析結果顯示平均急速成長波浪歷時(duration)為 10 小時，最長 19 小時，最短 3 小時；平均起始示性波高為 0.88 公尺，最大 4.27 公尺，最小 0.44 公尺；平均成長後最大示性波高為 3.07 公尺，最大 12.45 公尺，最小 1.5 公尺；平均波高成長量為 2.19 公尺，最大成長 8.18 公尺，最小 0.9 公尺；平均成長倍數為 3.82 倍，最大成長倍數 9 倍，最小成長倍數為 2 倍；平均波高成長率為 0.23 公尺/小時，最大值為 1.36 公尺/小時，最小值為 0.09 公尺/小時；波高最大成長率為 0.66 公尺/小時，最大值為 4.36 公尺/小時，最小值為 0.23 公尺/小時。

圖 6-16 至圖 6-22 顯示上述分析結果，波高成長歷時主要是 6-8 小時(圖 6-16)，佔有 24%的案例，其次是 10-12 小時，佔 22%的案例，8-10 小時，佔 13%的案例，12-14 小時，佔 12.6%的案例；起始示性波高在 0.5-1.0 公尺(圖 6-17)比例最高，有 70%，1.0-1.5 公尺則有 17.9%；至於成長後最大示性波高以 2.0-2.5 公尺(圖 6-18)之 25%最多，2.5-3.0 公尺佔 18%，1.5-2.0 公尺及 3.0-3.5 公尺各佔 13%；波高成長量以 1-1.5 公尺之 27%最常出現(圖 6-19)，其次為 2.0-2.5 公尺與 1.5-2.0 公尺，這兩範圍分別佔 21%與 18%；在成長倍數方面以 2-4 倍最常發生，佔全 95 案例之 68%，

成長倍數越高，百分比越低(圖 6-20)；波高平均成長率以 0.1-0.2 公尺/小時最常出現，約佔 50%(圖 6-21)，至於波高最大每小時成長率有 40%在 0.4-0.6 公尺/小時，其次為 17%在 0.2-0.4 公尺/小時(圖 6-22)。

表 6-3 馬祖浮標站 95 個急速成長波之統計參數

	成長 歷時 (時)	起始示 性波高 (公尺)	最大示 性波高 (公尺)	波高 成長量 (公尺)	成長 倍數	波高平均 成長率 (m/hr)	波高最大 成長率 (m/hr)
平均值	10	0.88	3.07	2.19	3.8	0.23	0.66
最大值	19	4.27	12.45	8.18	9	1.36	4.36
最小值	3	0.44	1.50	0.9	2	0.09	0.23

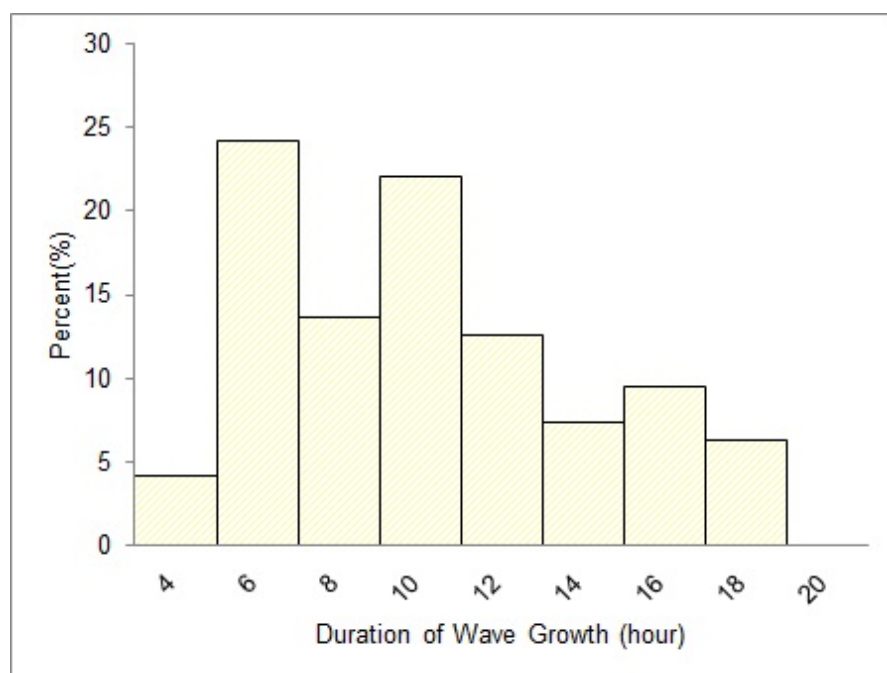


圖 6-16 馬祖海域急速成長波歷時分佈

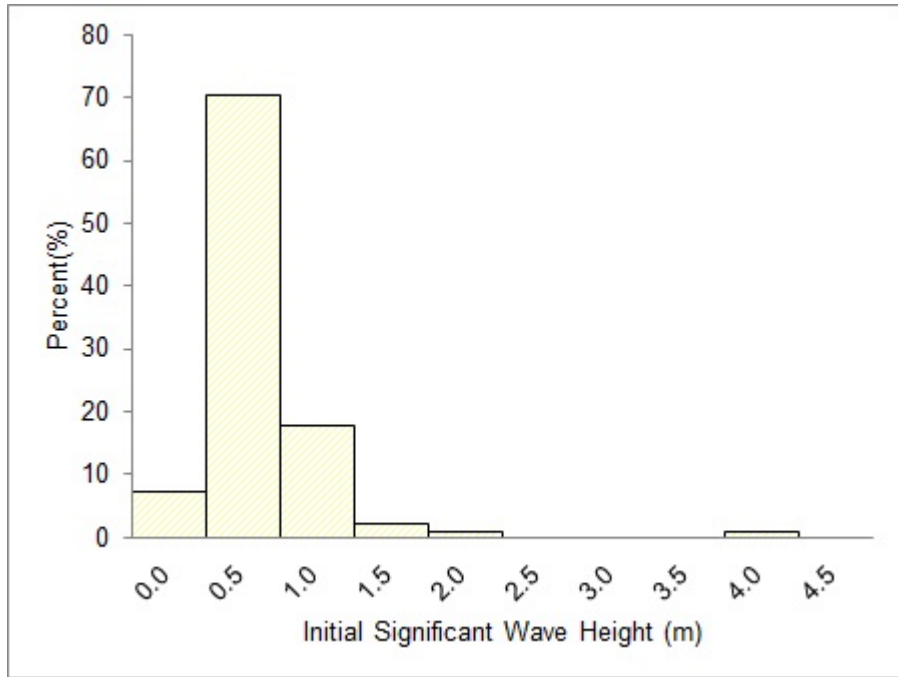


圖 6-17 馬祖海域急速成長波起始示性波高分佈

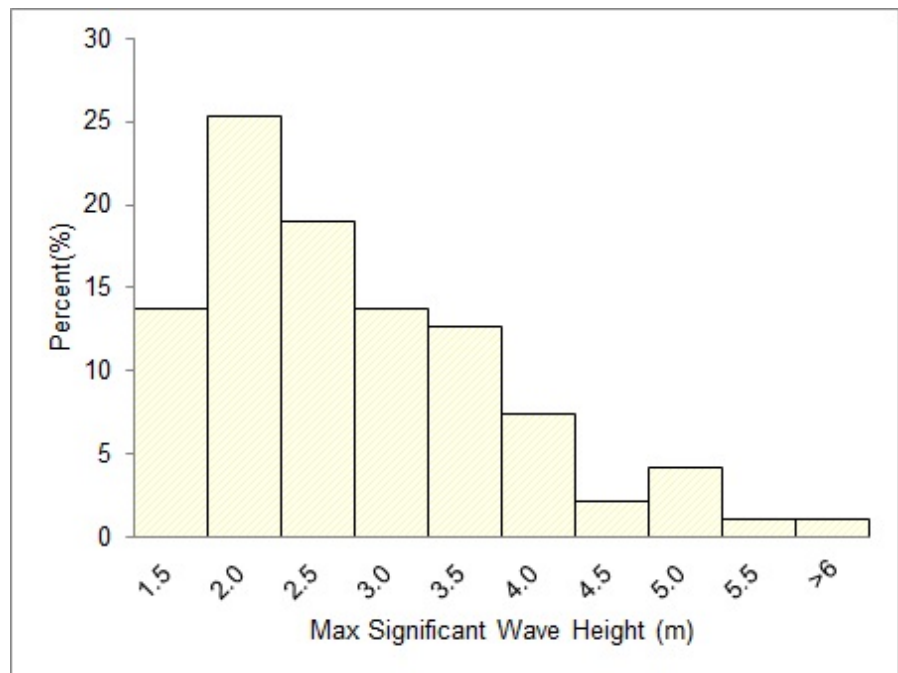


圖 6-18 馬祖海域急速成長波最大示性波高分佈

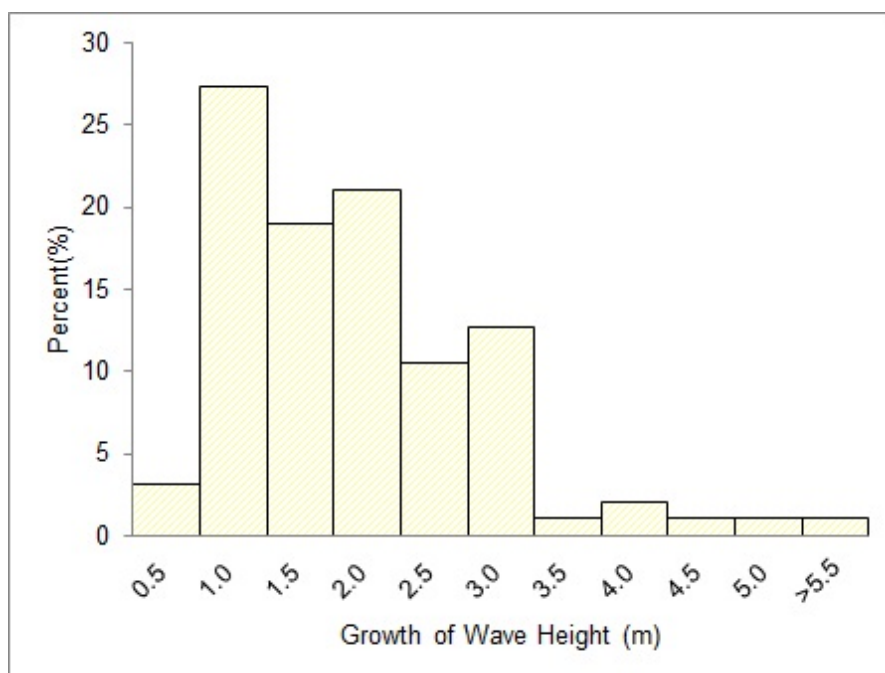


圖 6-19 馬祖海域急速成長波成長量分佈

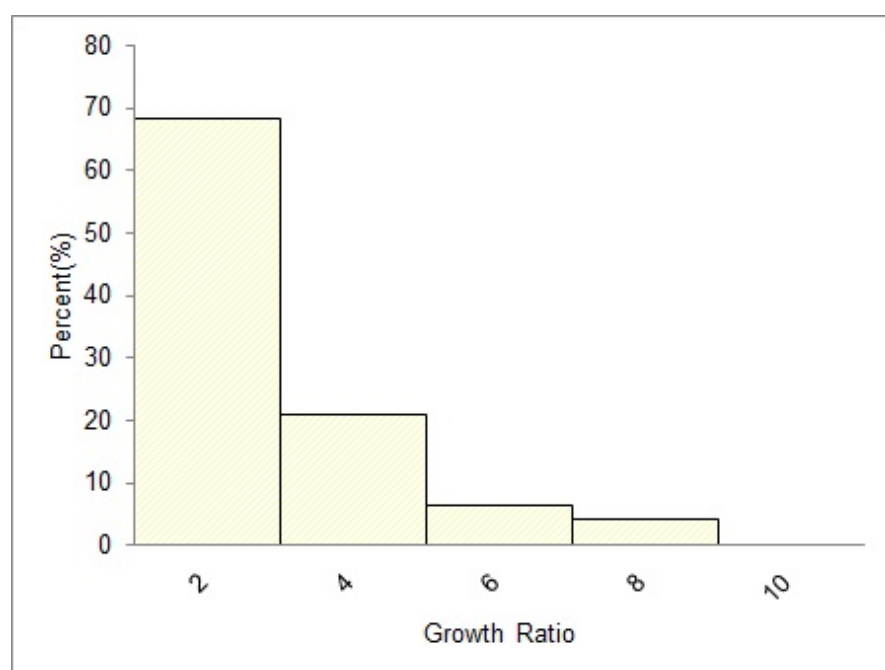


圖 6-20 馬祖海域急速成長波成長倍數分佈

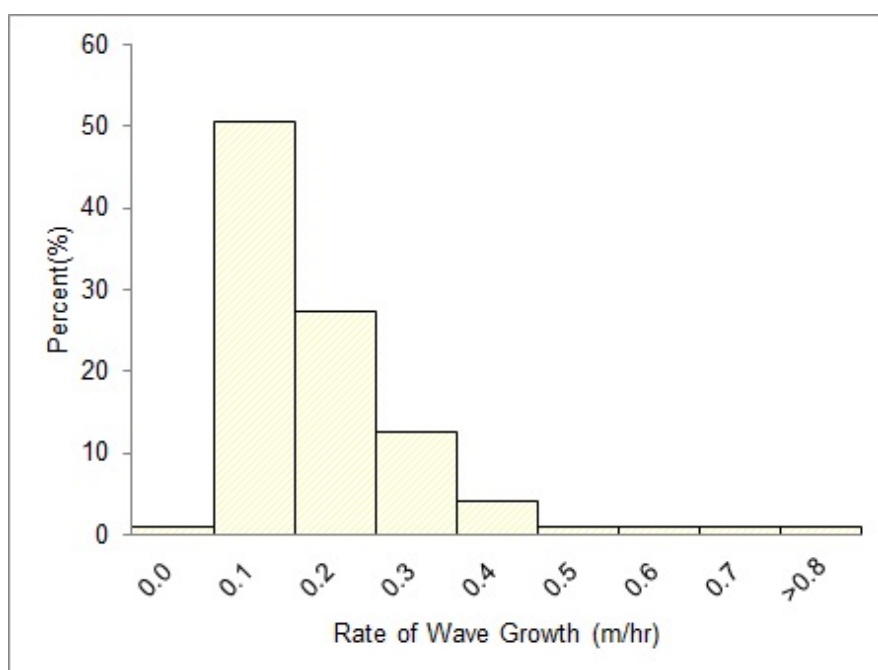


圖 6-21 馬祖海域急速成長波平均成長速率分佈

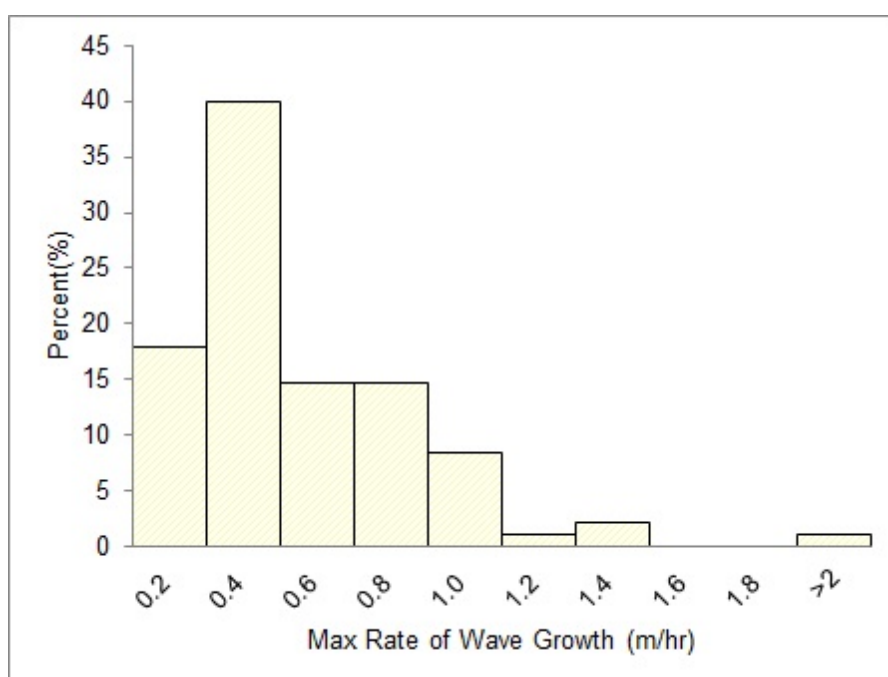


圖 6-22 馬祖海域急速成長波最大成長速率分佈

6-3-3 馬祖浮標站急速成長波浪與海氣象狀況之關係

1. 急速成長波之海況(示性波高)

將馬祖海域 49 筆急速成長波浪之資料，以急速成長波浪開始時間為基準，計算其前後十小時示性波高的平均值與標準差（圖 6-23），我們發現急速成長波浪開始前示性波高平均值有緩慢下降，在急速成長波浪開始後示性波高平均值有急速增加現象，在發生後四小時示性波高平均值達到起始波高兩倍，發生後七小時示性波高平均值已經超過 1.5 公尺達到我們所定義的急速成長波浪之條件。

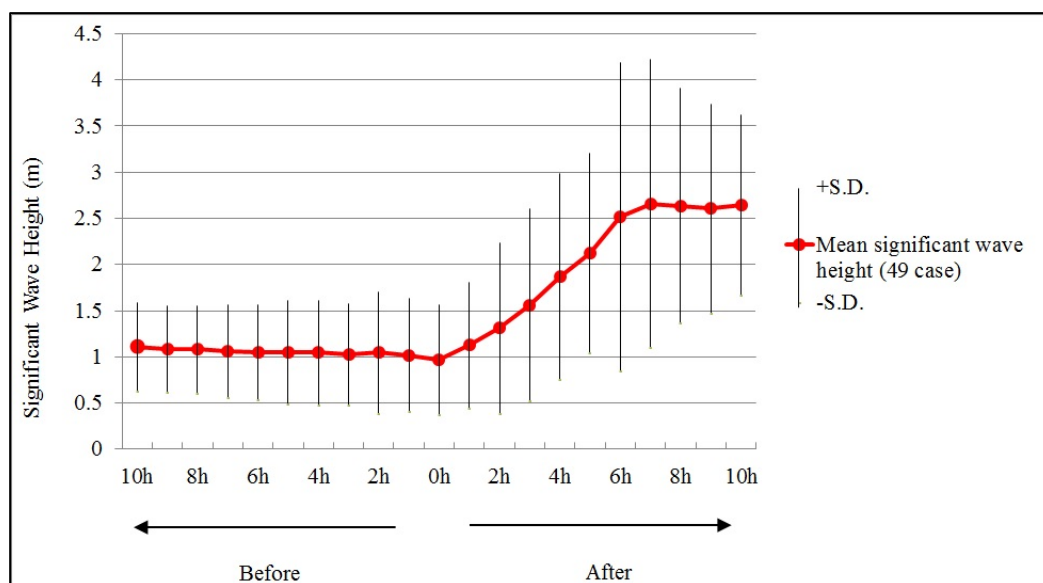


圖 6-23 馬祖海域急速成長波發生前後 10 小時之海況(波高)

2. 急速成長波浪與風速之關係

將波浪急速成長開始前後十小時風速值做平均及標準差計算（圖 6-24），我們發現急速成長波浪開始前平均風速有緩慢上升的趨勢，在急速成長波浪開始後，風速平均值急速增加，在急速成長波浪發生後一小時開始風速變化率最大。

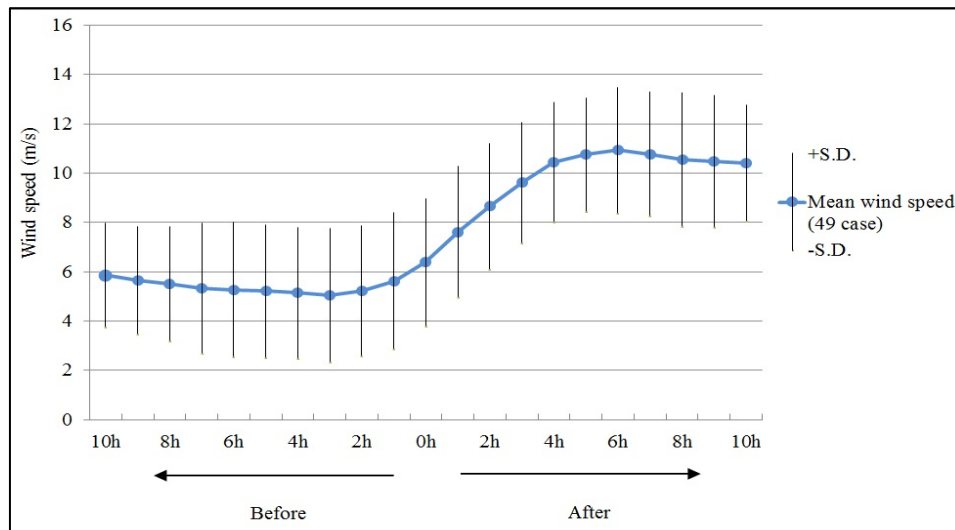


圖 6-24 馬祖海域急速成長波發生前後 10 小時(49 個案)內之平均風速

3. 急速成長波浪與氣壓之關係

以急速成長波浪開始時間為基準，計算前後十小時各時距平均氣壓值與標準差（圖 6-25），結果發現馬祖海域在急速成長波浪開始前十小時至前四小時，其氣壓有稍升的趨勢。然而整體而言，急速成長波浪與當時之氣壓變化並不顯著。

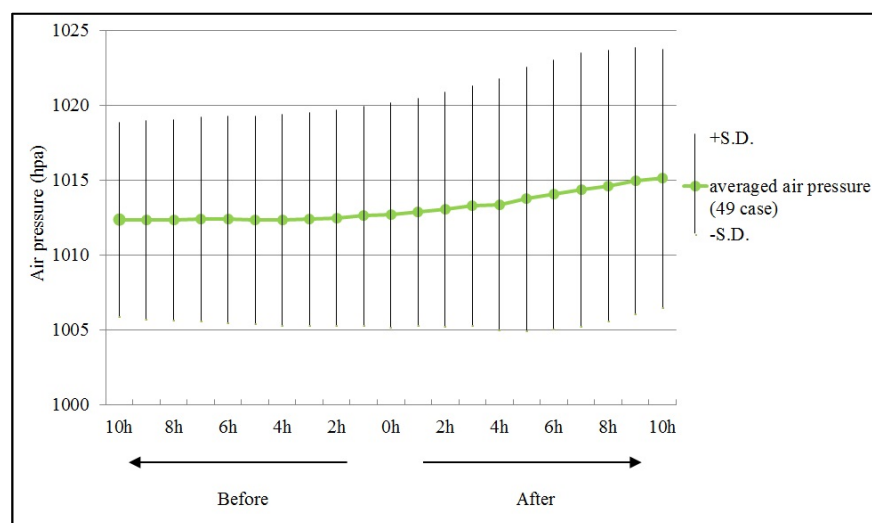


圖 6-25 馬祖海域急速成長波發生前後 10 小時(49 個案)之氣壓

4. 急速成長波浪與週期之關係

圖 6-26 為馬祖海域 49 筆急速成長波浪之資料，以急速成長波浪開始時間為基準，依前後十小時週期值做平均及標準差計算。由圖 6-26 可知，急速成長波浪開始前十小時週期平均值略為下降，至急速成長波浪開始後 2 小時週期平均值最小，等到急速成長波浪開始後 3 小時其週期平均值又逐漸變大，至急速成長波浪開始後 5 小時，其週期單位時間變化率為最大，至急速成長波浪開始後 10 小時，週期平均值亦升高至最高點。

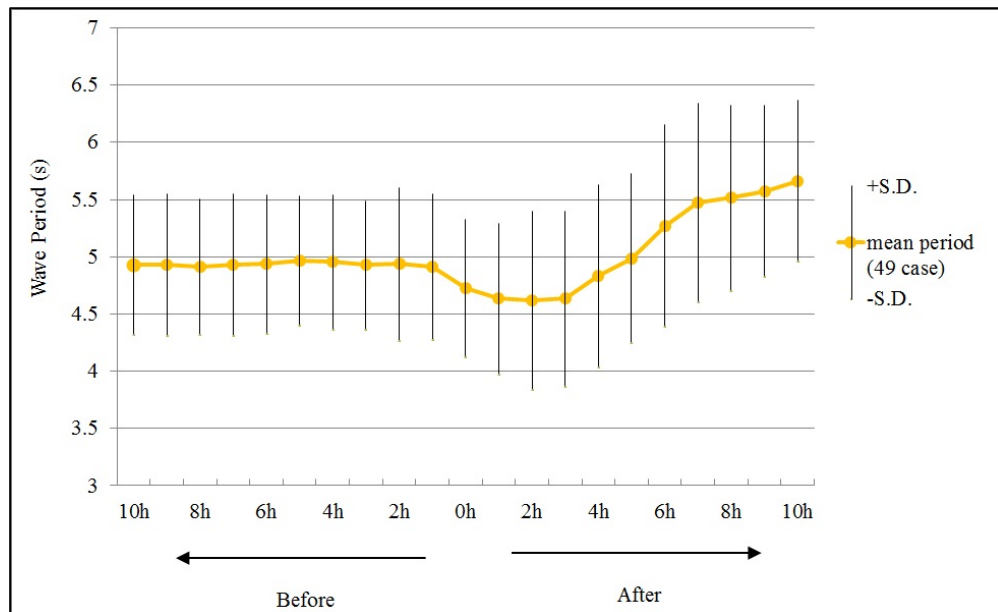
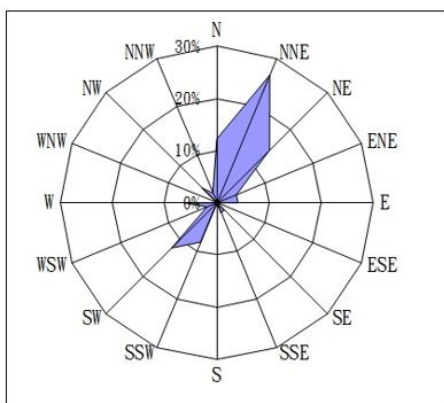


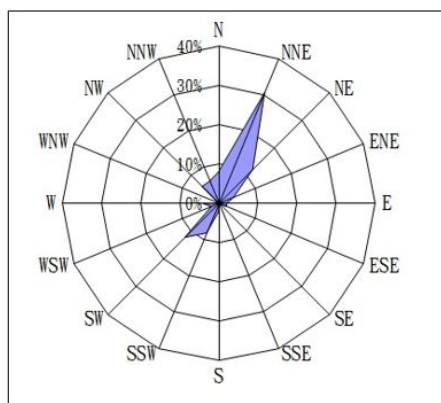
圖 6-26 馬祖海域急速成長波浪發生前後 10 小時(49 個案)之週期

5. 急速成長波浪與風向之關係

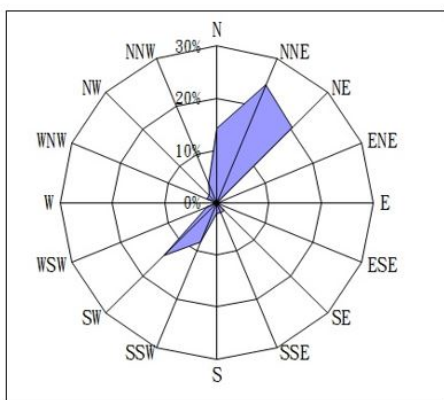
本研究另分析馬祖海域 49 筆急速成長波浪發生前後的風向，並得到馬祖海域急速成長波浪各時距風向分佈（圖 6-27、圖 6-28 及圖 6-29）。圖中顯示在急速成長波浪開始前後八小時期間，風向皆以北風至東北東風為主，以急速成長波浪開始前八小時的風向玫瑰圖為例，北至東北東象限風向約占 55%到 71%之間，其它風向約佔 29%到 45%之間。但在急速成長波浪開始後，北至東北東象限風向則增加至約 88%到 90%之間，而其他風向的比率則在各時距都相對偏低。



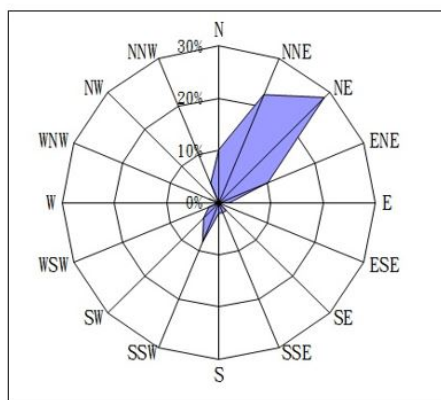
急速成長波浪開始前八小時風向玫瑰圖



急速成長波浪開始前六小時風向玫瑰圖



急速成長波浪開始前四小時風向玫瑰圖



急速成長波浪開始前二小時風向玫瑰圖

圖 6-27 馬祖海域急速成長波浪開始前各時距風向玫瑰圖

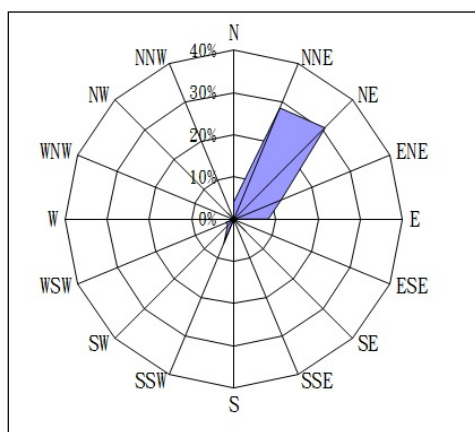
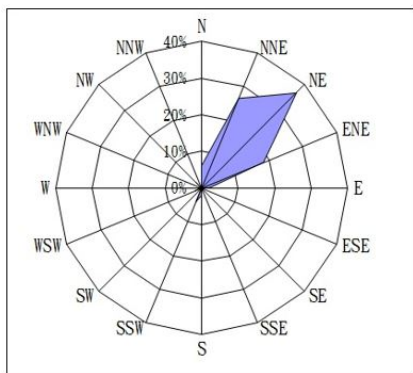
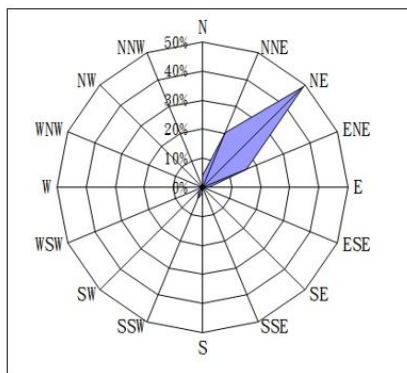


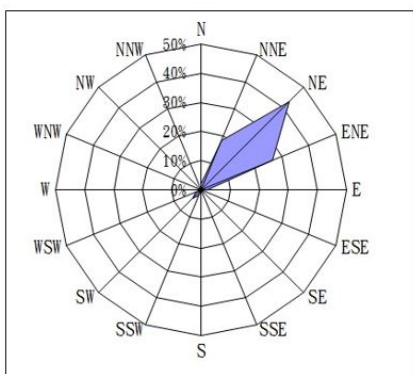
圖 6-28 馬祖海域急速成長波浪開始時風向玫瑰圖



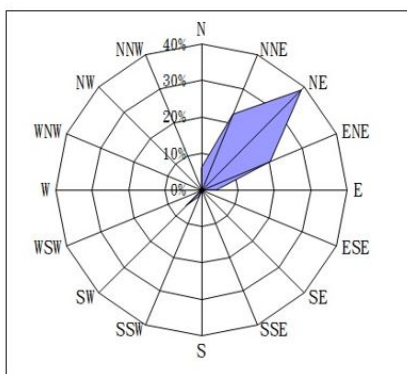
急速成長波浪開始後二小時風向玫瑰圖



急速成長波浪開始後四小時風向玫瑰圖



急速成長波浪開始後六小時風向玫瑰圖



急速成長波浪開始後八小時風向玫瑰圖

圖 6-29 馬祖海域急速成長波浪開始後各時距風向玫瑰圖

6-4 台灣西部海域與北海岸急速成長波特性

6-4-1 急速成長波浪數量比較

本期計畫針對台灣西部海域以及北海岸的急速成長波浪特性進行分析，分別為馬祖、新竹、澎湖、小琉球、龍洞等五個浮標站。本節將各浮標測站的急速成長波浪數量及年平均值列於表 6-4，馬祖測站分析 2011-2014 年資料，在 4 年間共發生 95 件急速成長波浪個案，受到颱風影響的共有 11 個案，平均每年約 24 個案，平均每年受到颱風影響有 3 個案；新竹測站分析 1997-2010 年資料，在 14 年間共發生 174 件急速成長波浪個案，受到颱風影響的共有 40 個案，平均每年約 13 個案，平均每年受到颱風影響有 3 個案；澎湖測站分析 2007-2012 年資料，在 6 年間共尋得 490 件急速成長波浪個案，受到颱風影響共有 70 個案，平均每年約 81 個案，平均每年受到颱風影響有 11 個案；小琉球測站分析 2004-2012 年資料，在 9 年間共尋得 117 件急速成長波浪個案，受到颱風影響共有 63 個案，平均每年約 13 個案，平均每年受到颱風影響有 7 個案；龍洞測站分析 1998 年至 2012 年資料，在 15 年間共尋得 671 件急速成長波浪個案，受到颱風影響共有 99 個案，平均每年約 45 個案，平均每年受到颱風影響有 7 個案。顯然澎湖海域發生急速成長波浪個案比其他海域多很多。

表 6-4 各浮標站急速成長波浪數量及年平均表(颱風期間數量)

測站名稱	期 間	急速成長波浪數量	年平均
馬祖測站	2011 年至 2014 年	95(11)	24(3)
新竹測站	1997 年至 2010 年	174(40)	13(3)
澎湖測站	2007 年至 2012 年	490(70)	81(11)
小琉球測站	2004 年至 2012 年	117(63)	13(7)
龍洞測站	1998 年至 2012 年	671(99)	45(7)

6-4-2 急速成長波浪發生時之天氣狀況

本文整理馬祖、新竹、澎湖、小琉球、龍洞等五個浮標站，急速成長波浪的四季分布以及天氣系統。由表 6-5 可知馬祖浮標站 95 個的急速成長波浪案例中，發生在春季的有 39 個，其中 20 個春季個案當天都有受到鋒面通過且伴隨大陸冷高壓南下影響，故鋒面通過且伴隨大陸冷高壓南下影響是春季發生急速成長波浪的主要原因，其次 15 個春季個案是受到鋒面通過影響有關，有 3 個案是受到大陸冷高壓南下所影響，另有 1 個案受到雷雨所致。案例發生次多的季節為冬季，有 22 個案，其中受到大陸冷高壓南下所影響就占了約 54%(12 件)，因此受到大陸冷高壓南下所影響是冬季波浪急速成長的主要原因，其次則是鋒面通過且伴隨大陸冷高壓南

下影響有 10 件；發生在秋季的案例有 17 個，其發生原因主要是因鋒面通過且伴隨大陸冷高壓南下所致(10 件)，受到大陸冷高壓南下影響的天氣系統(4 件)，另有 3 件只有受到鋒面通過影響；夏季發生的急速成長波浪有 17 個案，其 10 個是受到颱風外圍環流或熱低壓影響，另有 5 個案例是受到鋒面通過所致，受到七及暴風半徑內的影響有 1 個案例，另有 1 個案例是受到雷雨所致。以上為 2011 年至 2014 年所發現的急速成長波浪與天氣系統之關係。我們可以由表 6-5 得知在馬祖浮標站之急速成長波浪發生主要是受到鋒面通過且伴隨大陸冷高壓南下的影響較多，其次為受到鋒面通過影響。

由表 6-6 可知，新竹測站 174 個的急速成長波浪案例中，發生在冬季的有 73 個，其中 44 個冬季個案當天都有受到鋒面通過並伴隨大陸冷高壓南下的影響，故鋒面通過並伴隨大陸冷高壓南下可說是冬季發生急速成長波浪的主要原因，其次 27 個冬季個案與大陸冷高壓南下有關。案例發生次多的季節為春季，有 38 個案，其中受到鋒面通過並伴隨大陸冷高壓南下的影響就占了約 7 成(27 件)，因此鋒面通過並伴隨大陸冷高壓南下是春季波浪急速成長的主要原因，其次則是只有鋒面通過影響有 6 件，有 4 件案件是只有受大陸冷高壓南下影響，另有一個案件有颱風外圍環流；發生在秋季的案例有 48 個，其發生原因主要是因鋒面通過且伴隨大陸冷高壓南下所致(13 件)，其次是大陸冷高壓南下影響的天氣系統(11 件)，秋季的案例中有 14 個個案是因颱風外圍環流或熱帶低氣壓所致，另有 6 個案例是颱風期間測站在七級暴風半徑內；夏季發生急速成長波浪的個案較少，只找到 15 個案例，其 7 個案例有伴隨颱風外圍環流的天氣情形，另有 8 個案例是颱風期間測站在七級暴風半徑內，故颱風外圍環流及颱風可說是夏季發生波浪急速成長的主因。

由表 6-7 可知澎湖浮標站 490 個的急速成長波浪案例中最多發生於秋季(172 個)，其中 98 個個案受到大陸冷高壓南下的影響，故大陸冷高壓南下是秋季發生急速成長波浪的主要原因，其次 36 個秋季個案是受到颱風外圍環流或熱帶低氣壓的影響有關。案例發生次多的季節為春季，有 151 個案，其中受到大陸冷高壓南下的影響就占了共 62 件，因此大陸冷高壓南下是春季波浪急速成長的主要原因，其次則是只有鋒面通過並伴隨大陸冷高壓南下影響有 58 件，有 29 件案件是只有受鋒面影響，另有兩個案件有颱風外圍環流；發生在冬季的案例有 135 個，其發生原因主要是因大陸冷高壓南下所致(87 件)，受到鋒面通過且伴隨大陸冷高壓南下影響的天氣系統(39 件)，另有 9 件只有受到鋒面通過影響；夏季發生急速成長波浪的個案較少，只找到 32 個案例，其 17 個案例有伴隨颱風外圍環流的天氣情形，另有 12 個案例是颱風期間測站在七級暴風半徑內，故颱風外圍環流或颱風是夏季發生波浪急速成長的主因。以上為澎湖測站 2007 年至 2012 年所發現的急速成長波浪與天

氣系統之關係。

由表 6-8 可知小琉球浮標站 117 個的急速成長波浪案例中，發生在秋季的有 38 個，其中 24 個秋季個案當天都有受到颱風外圍或熱低壓的影響，故颱風外圍或熱低壓是秋季發生急速成長波浪的主要原因，其次 12 個秋季個案是受到大陸冷高壓南下的影響有關。案例發生次多的季節為夏季，有 37 個案，其中受到颱風外圍或熱低壓的影響就占了約 80% (29 件)，因此颱風外圍或熱低壓也是夏季波浪急速成長的主要原因，其次則是只有鋒面通過影響有 5 件，有 3 件案件是颱風期間浮標站在七級暴風半徑內；發生在冬季的案例有 24 個，其發生原因主要是因大陸冷高壓南下所致(15 件)，受到鋒面通過且伴隨大陸冷高壓南下影響的天氣系統(4 件)，另有 4 件只有受到鋒面通過影響，另有 1 個個案是因颱風外圍環流或熱帶低氣壓所致；春季發生急速成長波浪的個案較少，只找到 18 個案例，其中 7 個是受到鋒面通過影響，另有 5 個案例是大陸冷高壓南下所致，受到颱風外圍環流或熱低壓影響有 4 個案例，另 2 個案例是受到受到鋒面通過且伴隨大陸冷高壓南下影響，鋒面通過是春季發生波浪急速成長的主因。

由表 6-9 可知龍洞浮標站 671 個的急速成長波浪案例中，發生在冬季的有 247 個，其中 123 個冬季個案當天都有受到大陸冷高壓南下的影響，故大陸冷高壓南下是冬季發生急速成長波浪的主要原因，其次 112 個冬季個案是受到鋒面通過並伴隨大陸冷高壓南下的影響有關。案例發生次多的季節為春季，有 195 個案，其中受到鋒面通過並伴隨大陸冷高壓南下的影響就占了約 50% (95 件)，因此鋒面通過並伴隨大陸冷高壓南下是春季波浪急速成長的主要原因，其次則是只有鋒面通過影響有 51 件，有 47 件案件是只有受大陸冷高壓南下影響，另有兩個案件有颱風外圍環流；發生在秋季的案例有 172 個，其發生原因主要是因大陸冷高壓南下所致(69 件)，受到鋒面通過且伴隨大陸冷高壓南下影響的天氣系統(42 件)，另有 11 件只有受到鋒面通過影響，秋季的案例中有 45 個個案是因颱風外圍環流或熱帶低氣壓所致，有 5 個案例是颱風期間浮標站在七級暴風半徑內；夏季發生急速成長波浪的個案較少，只找到 57 個案例，其 34 個案例有伴隨颱風外圍環流的天氣情形，另有 13 個案例是颱風期間浮標站在七級暴風半徑內，故颱風外圍環流或颱風是夏季發生波浪急速成長的主因。

以上為馬祖、新竹、澎湖、小琉球、龍洞等五個浮標站所發現的急速成長波浪與天氣系統之關係。可由圖 6-30 發現馬祖、新竹、澎湖、小琉球、龍洞等五個浮標站的季節比例中，馬祖浮標站主要為春季發生急速成長波浪，小琉球浮標站主要以夏季發生急速成長波浪為主，新竹、澎湖以及龍洞等浮標站皆以秋冬季節為主。

由圖 6-31 發現馬祖、新竹浮標站急速成長波浪發生主要都是受到鋒面通過伴隨著大陸冷高壓南下的影響，其次為只受到大陸冷高壓南下影響；澎湖浮標站的急速成長波浪主要是只受到大陸冷高壓南下影響較多，其次為只受到大陸冷高壓南下影響；小琉球浮標站的急速成長波浪主要是受到颱風外圍或熱低壓的影響較多，其次為受到大陸冷高壓南下的影響；龍洞浮標站急速成長波浪主要是受到鋒面通過伴隨著大陸冷高壓南下的影響，其次為只受到大陸冷高壓南下影響與馬祖、新竹浮標站大致相同。

表 6-5 馬祖浮標站 2011 年至 2014 年 95 個急速成長波之伴隨天氣系統

	全部	鋒面通過伴隨 著大陸冷高壓 南下(F+H)	只有鋒 面通過 (F)	只有大陸 冷高壓南 下(H)	颱風外圍 或熱低壓 (TY/TD)	七級暴 風半徑 內(TY7)	雷雨(TH)
春	39	20	15	3	0	0	1
夏	17	0	5	0	10	1	1
秋	17	10	3	4	0	0	0
冬	22	10	0	12	0	0	0
	95	40	23	19	10	1	2

表 6-6 新竹浮標站 1997 年至 2010 年 174 個急速成長波之伴隨天氣系統

	全部	鋒面通過伴隨 著大陸冷高壓 南下(F+H)	只有鋒面 通過(F)	只有大陸冷 高壓南下(H)	颱風外圍或 熱低壓 (TY/TD)	七級暴風 半徑內 (TY7)
春	38	27	6	4	1	0
夏	15	0	0	0	7	8
秋	48	13	1	11	17	6
冬	73	44	1	27	1	0
	174	84	8	42	26	14

表 6-7 澎湖浮標站 2007 年至 2012 年 490 個急速成長波之伴隨天氣系統

	全部	鋒面通過伴隨 著大陸冷高壓 南下(F+H)	只有鋒 面通過 (F)	只有大陸冷 高壓南下(H)	颱風外圍或 熱低壓 (TY/TD)	七級暴風 半徑內 (TY7)
春	151	58	29	62	2	0
夏	32	0	3	0	17	12
秋	172	25	10	98	36	3
冬	135	39	9	87	0	0
	490	122	51	247	55	15

表 6-8 小琉球浮標站 2004 年至 2012 年 117 個急速成長波之伴隨天氣系統

	全部	鋒面通過伴隨 著大陸冷高壓 南下(F+H)	只有鋒 面通過 (F)	只有大陸 冷高壓南 下(H)	颱風外圍或 熱低壓 (TY/TD)	七級暴風 半徑內 (TY7)
春	18	2	7	5	4	0
夏	37	0	5	0	29	3
秋	38	0	0	12	24	2
冬	24	4	4	15	1	0
	117	6	16	32	58	5

表 6-9 龍洞浮標站 1998 年至 2012 年 671 個急速成長波之伴隨天氣系統

	全部	鋒面通過伴隨 著大陸冷高壓 南下(F+H)	只有鋒 面通過 (F)	只有大陸冷 高壓南下(H)	颱風外圍或 熱低壓 (TY/TD)	七級暴風 半徑內 (TY7)
春	195	95	51	47	2	0
夏	57	1	7	2	34	13
秋	172	42	11	69	45	5
冬	247	112	12	123	0	0
	671	250	81	241	81	18

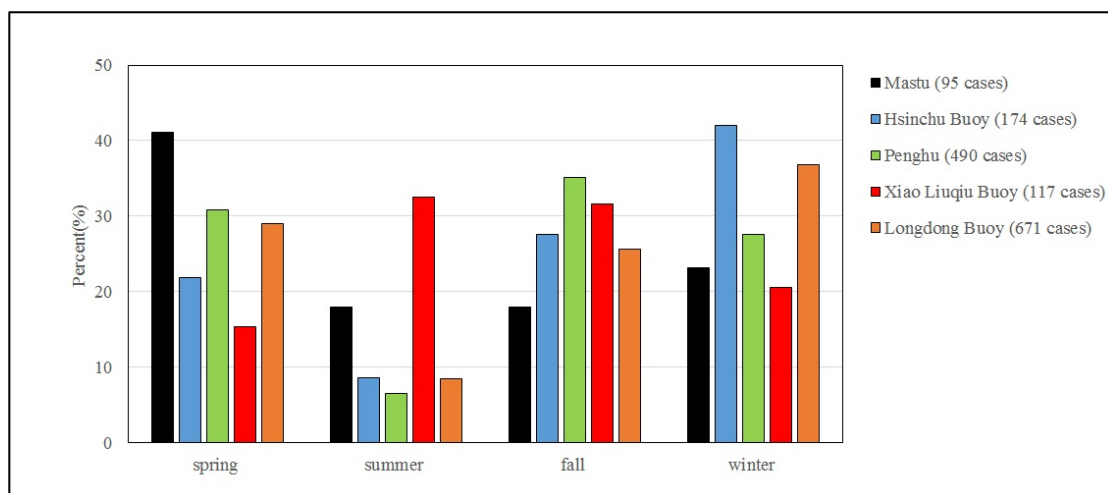


圖 6-30 台灣西部海域及北海岸浮標站急速成長波隨季節之分佈

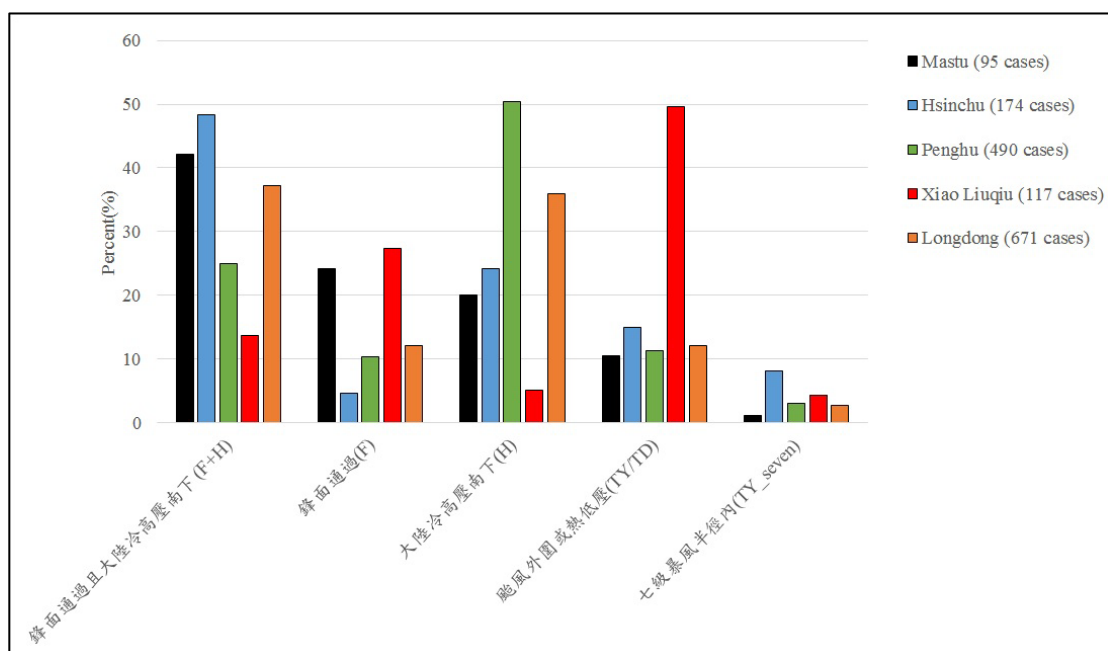


圖 6-31 台灣西部海域及北海岸浮標站急速成長波天氣系統比例圖

6-4-3 急速成長波浪案例統計分析

本文將馬祖、新竹、澎湖、小琉球及龍洞等五個浮標站整理急速成長波發生時，整個事件的波高成長歷時、起始示性波高、成長後最大示性波高、波高成長量、成長倍數、波高平均成長率、波高平均每小時成長率、波高最大成長率等特性參數。本節將各測站數據的平均值列於表 6-10。

由表 6-10 之比較發現，平均急速成長波浪歷時以馬祖浮標站歷時 10 小時較長，其次為澎湖、小琉球以及龍洞浮標站平均急速成長波浪歷時皆為 8 小時，新竹測站平均急速成長波浪歷時 7 小時為較短；平均起始示性波高部分以龍洞浮標站 0.96 公尺為最高，其次為小琉球浮標站平均起始示性波高 0.91 公尺，馬祖浮標站平均起始示性波高 0.88 公尺，小琉球浮標站平均起始示性波高 0.82 公尺，新竹浮標測站平均起始示性波高 0.71 公尺為最低；平均成長後最大示性波高部分以馬祖浮標站 3.07 公尺為最高，其次為龍洞浮標站平均成長後最大示性波高 2.79 公尺，小琉球浮標站平均成長後最大示性波高 2.7 公尺，澎湖浮標站平均成長後最大示性波高 2.49 公尺，新竹浮標站平均成長後最大示性波高 2.24 公尺為最低；平均波高成長量部分馬祖浮標站 2.17 公尺為最高，其次為龍洞浮標站 1.83 公尺，小琉球浮標站平均波高成長量 1.78 公尺，澎湖浮標站平均波高成長量 1.67 公尺，新竹浮標站平均波高成長量 1.53 公尺為最低；成長倍數部分馬祖及澎湖浮標 3.8 倍最高，其次為新竹浮標站 3.6 倍，龍洞浮標站 3.2 倍，小琉球浮標站 2.9 倍最低；平均波高成長率為龍洞浮標站 0.26 公尺/小時最高，其次為澎湖浮標站 0.24 公尺/小時，馬祖、新竹及小琉球浮標站皆為 0.23 公尺/小時；波高最大成長率為龍洞浮標站 0.87 公尺/小時最高，其次為馬祖浮標站 0.66 公尺/小時，小琉球浮標站 0.65 公尺/小時，澎湖浮標站 0.62 公尺/小時，新竹浮標站 0.46 公尺/小時為最低。經上述分析結果亦可得知在台灣西部海域部分以馬祖浮標站的急速成長波浪波高最大成長率最高且急速成長波浪成長後最大示性波高達 3.07 公尺，亦可表示在台灣西部海域中馬祖浮標站所發生的急速成長波浪較為危險，其次為在北海岸的龍洞。

表 6-10 馬祖、新竹、澎湖、小琉球及龍洞浮標站急速成長波之特性參數平均值

	成長 歷時 (時)	起始示 性波高 (公尺)	最大示 性波高 (公尺)	波高 成長量 (公尺)	成長 倍數	波高平 均成長 率(m/hr)	波高最大 成長率 (m/hr)
馬祖浮標站	10	0.88	3.07	2.19	3.8	0.23	0.66
新竹浮標站	7	0.71	2.24	1.53	3.6	0.23	0.46
澎湖浮標站	8	0.82	2.49	1.67	3.8	0.24	0.62
小琉球浮標站	8	0.91	2.70	1.78	2.9	0.23	0.65
龍洞浮標站	8	0.96	2.79	1.83	3.2	0.26	0.87

6-4-4 急速成長波浪與海氣象狀況之關係

1. 急速成長波之海況(示性波高)

本文將馬祖(49 cases)、新竹(59 cases)、澎湖(324 cases)、小琉球(60 cases)及龍洞(377 cases)等五個浮標站站急速成長波浪之資料，以急速成長波浪開始時間為基準，計算其前後八小時示性波高的平均值(圖 6-32)，由圖 6-32 可發現各測站在急速成長波浪發生前示性波高平均值皆有緩慢下降，在急速成長波浪發生後示性波高有急速增加的現象，新竹、澎湖、小琉球以及龍洞測站皆在發生後六小時示性波高平均值達到最高，馬祖測站在發生後八小時示性波高平均值達到最高。

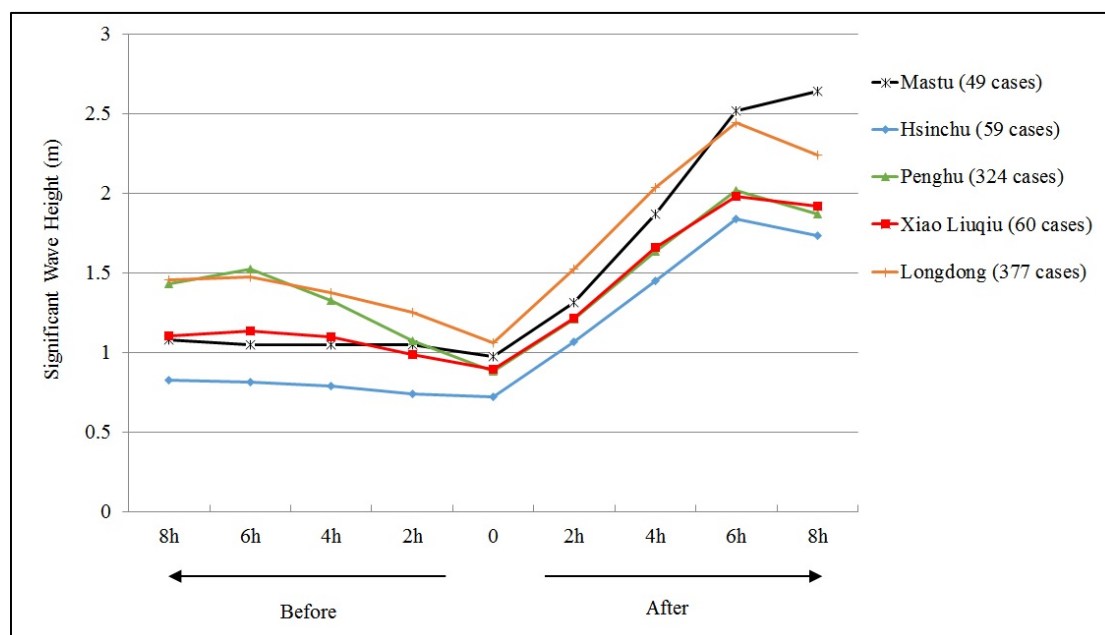


圖 6-32 各測站急速成長波發生前後 8 小時之海況(波高)

2. 急速成長波浪與風速之關係

將各測站波浪急速成長開始前後八小時風速值做平均計算（圖 6-33），由圖 6-33 可以發現急速成長波浪開始前平均風速有緩慢上升的趨勢，在急速成長波浪開始後，風速平均值急速增加，在急速成長波浪發生後二小時開始風速變化率最大。其中以馬祖測站及新竹測站風速變化率最大，其次為澎湖測站、龍洞測站及小琉球測站。亦可說明馬祖測站急速成長波浪受到風影響較大，但新竹之風的變化雖大，其急速成長波成長量卻不很大，這可能與測站很接近岸邊有關。

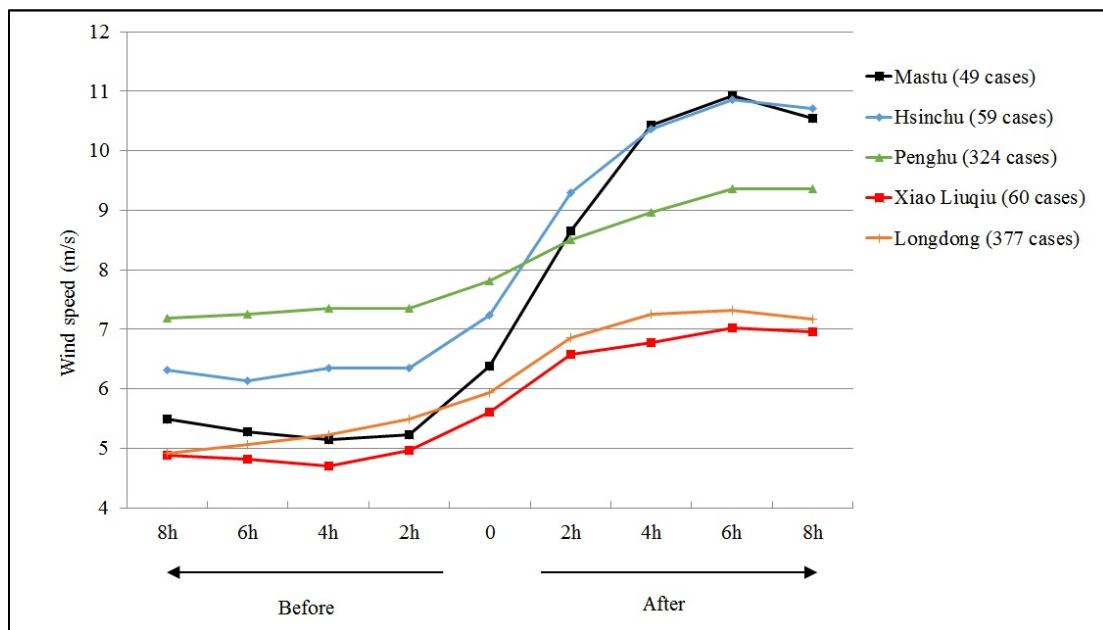


圖 6-33 各測站急速成長波發生前後 8 小時之平均風速

3. 急速成長波浪與氣壓之關係

以急速成長波浪開始時間為基準，計算前後八小時各時距平均氣壓值（圖 6-34），結果發現馬祖、新竹、澎湖、龍洞海域在急速成長波浪發生前八小時至前四小時，其氣壓有稍升的趨勢。在急速成長波浪發生後馬祖、新竹以及龍洞測站，其氣壓平均值有上升的趨勢，而在澎湖測站氣壓平均值有下降的趨勢。小琉球測站因受到颱風外圍或熱低壓的影響較多，故整體氣壓平均值較其他測站低。然而整體而言，急速成長波浪與當時之氣壓變化並不顯著。

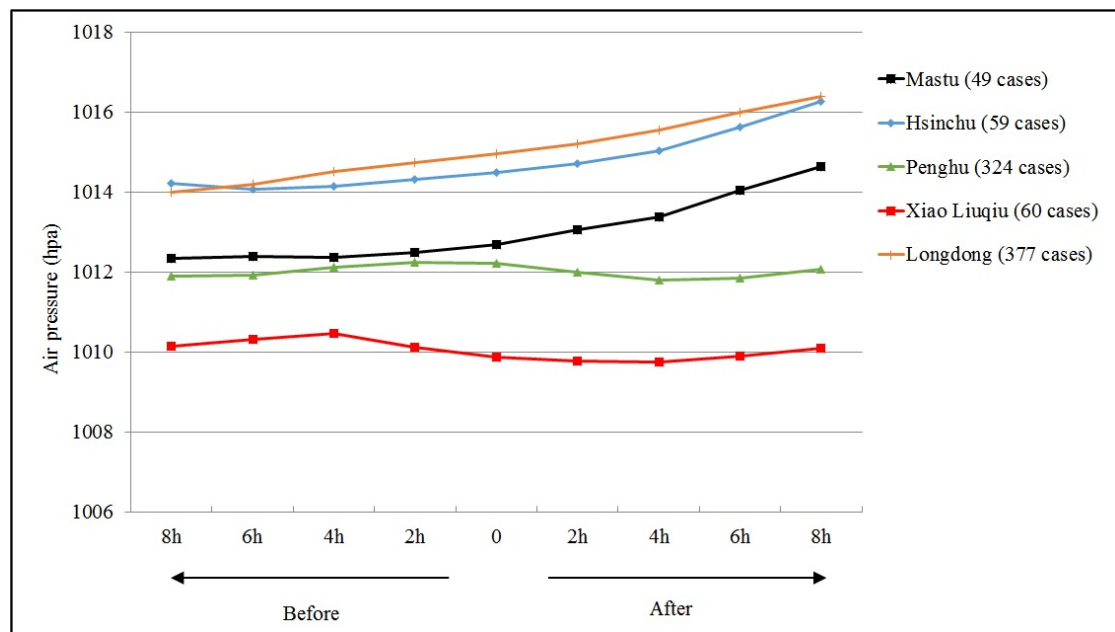


圖 6-34 各測站急速成長波發生前後 8 小時之平均氣壓

4. 急速成長波浪與週期之關係

圖 6-35 為馬祖(49 cases)、新竹(59 cases)、澎湖(324 cases)、小琉球(60 cases)及龍洞(377 cases)等五個浮標站站急速成長波浪之資料，以急速成長波浪開始時間為基準，依前後八小時週期值做平均值計算。由圖 6-35 可知，急速成長波浪發生前八小時週期平均值略為下降，至急速成長波浪發生當時其週期平均值最小，等到急速成長波浪發生後其週期平均值又逐漸變大，至急速成長波浪開始後六小時，其週期單位時間變化率為最大，週期平均值亦升高至最高點。其中以馬祖測站較為特別，馬祖測站急速成長波浪發生前八小時週期平均值緩慢下降至發生後兩小時下降至最小，急速成長波浪發生後兩小時週期平均值才逐漸變大，不同於其他測站。

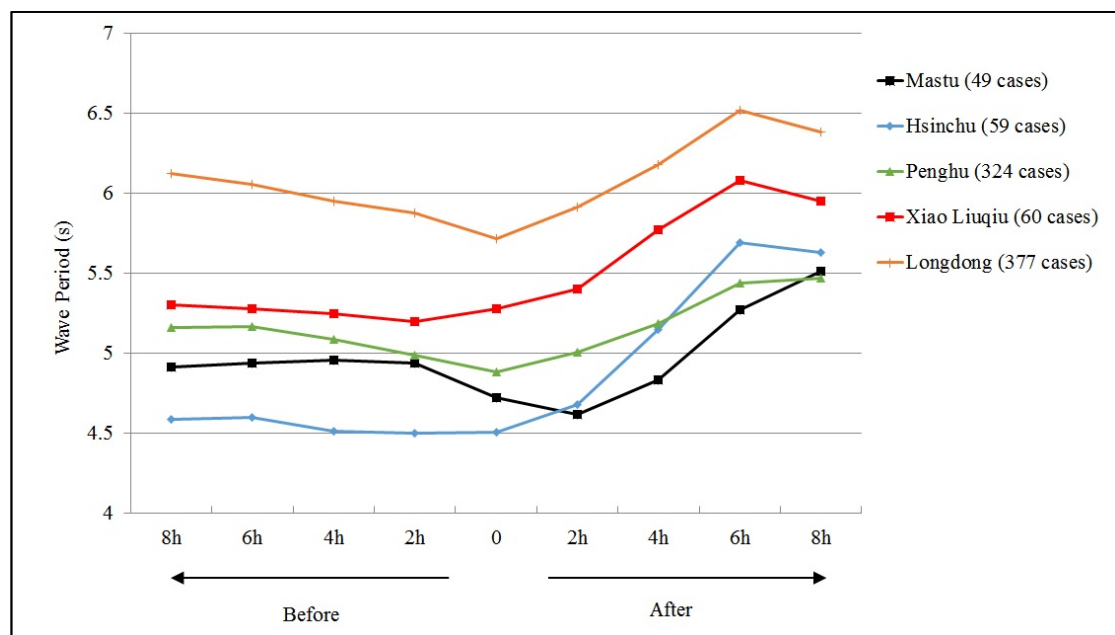


圖 6-35 各測站急速成長波發生前後 8 小時之平均週期

5. 急速成長波浪與風向及波向夾角之關係

圖 6-36 為馬祖、新竹、澎湖、小琉球及龍洞等五個浮標站站急速成長波浪之資料，以急速成長波浪開始時間為基準，計算前後八小時各時距平均風向與平均波向之相差角度（圖 6-36），結果發現澎湖測站急速成長波浪發生前後平均風向與平均波向之相差角度介於 22° 至 36° 之間。龍洞測站在急速成長波浪發生前平均風向與平均波向之相差角度介於 68° 至 75° 之間，在急速成長波浪發生後平均風向與平均波向之相差角度介於 45° 至 54° 之間。馬祖測站部分在急速成長波浪發生前平均風向與平均波向之相差角度介於 80° 至 90° 之間，在急速成長波浪發生後平均風向與平均波向之相差角度介於 31° 至 57° 之間，亦可說明澎湖、馬祖及龍洞測站在急速成長波浪發生後風向與波向角度較為接近，故可推估此測站受到風影響所產生之急速成長波浪較高。小琉球測站在急速成長波浪發生前平均風向與平均波向之相差角度介於 72° 至 83° 之間，在急速成長波浪發生後平均風向與平均波向之相差角度介於 65° 至 75° 之間。新竹測站在急速成長波浪發生前平均風向與平均波向之相差角度介於 71° 至 110° 之間，在急速成長波浪發生後平均風向與平均波向之相差角度介於 91° 至 109° 之間。小琉球以及新竹測站風向與波向較不一致。

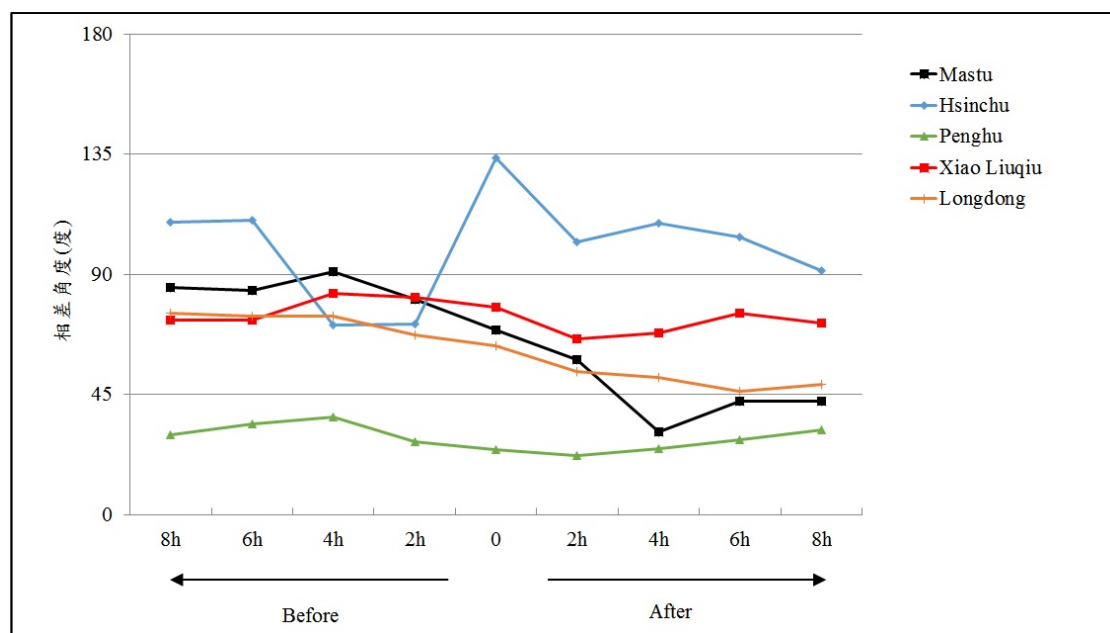


圖 6-36 各測站急速成長波發生前後 8 小時之平均風向與波向夾角

6-4-5 急速成長波浪各測站個案分析

本文將馬祖、新竹、澎湖、小琉球及龍洞等五個測站之急速成長波個案進行分析，主要找出受到同一天氣系統影響所產生的急速成長波浪。由於馬祖測站資料為 2011 至 2014 年與新竹浮標 1997 至 2010 年資料無法一起分析且馬祖測站與小琉球測站在受同一天氣系統影響個案較少，故將個案分析分成兩部分。第一部分為馬祖、澎湖以及龍洞測站，三地受到同一天氣系統影響所以產生的急速成長波浪個案分析。第二部分為新竹、澎湖、小琉球及龍洞等四個測站，受到同一天氣系統影響所產生的急速成長波浪個案分析。

1. 馬祖、澎湖及龍洞測站之急速成長波個案分析

案例 1：2011 年 2 月 9 日

圖 6-37 為 2011 年 2 月 9 日馬祖、澎湖及龍洞測站受同一天氣系統影響發生之急速成長波浪個案，紅線部分為馬祖測站之波高、綠線部分為澎湖測站之波高、橘線為龍洞測站之波高，由圖可看出在馬祖測站急速成長波於 2011 年 2 月 9 日 2 時發生急速成長波浪，龍洞測站以及澎湖測站在 2011 年 2 月 9 日 7 時同時發生急速成長波浪，馬祖、澎湖及龍洞三個測站皆在 2011 年 2 月 9 日 21 時急速成長波浪成長至最高點，由個案可發現馬祖測站先發生急速成長波浪後，澎湖及龍洞測站才接著發生急速成長波。由當時的天氣圖(圖 6-38)可看出，三個測站當時主要受到大陸冷高壓南下的影響。

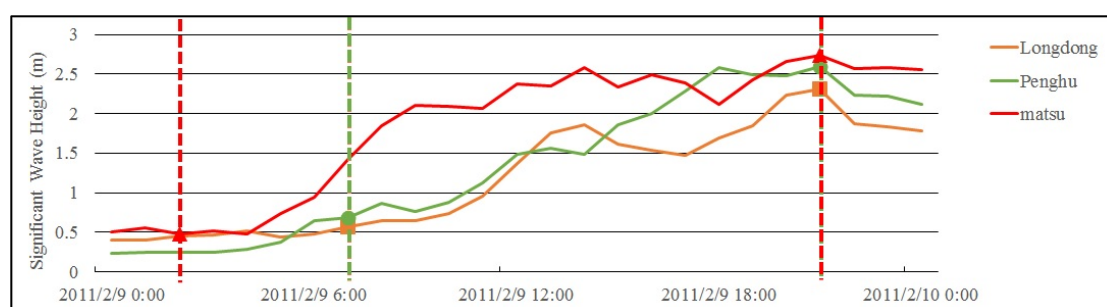


圖 6-37 2011 年 2 月 9 至 10 日各測站之急速成長波浪發生當時波高

(垂直線是急速成長波個案起始時間和結束時間)

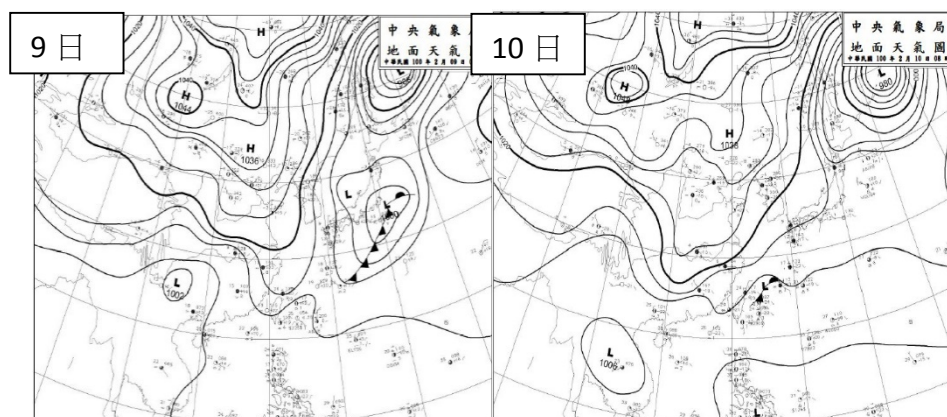


圖 6-38 2011 年 2 月 9 至 10 日地面天氣圖

案例 2：2012 年 9 月 13 日

圖 6-39 為 2012 年 9 月 13 日馬祖、澎湖及龍洞測站受同一天氣系統影響發生之急速成長波浪個案，紅線部分為馬祖測站之波高、綠線部分為澎湖測站之波高、橘線為龍洞測站之波高，由圖 6-39 可看出在馬祖測站急速成長波於 2012 年 9 月 13 日 21 時發生急速成長波浪，成長至 2012 年 9 月 14 日 4 時達到最高點。在馬祖測站急速成長波浪結束後，澎湖測站以及龍洞測站分別在 2012 年 9 月 14 日 5 時及 2012 年 9 月 14 日 6 時發生急速成長波浪，澎湖測站之急速成長波浪成長歷時達 21 小時至 2012 年 9 月 15 日 2 時達到最高點，龍洞測站之急速成長波浪成長歷時達 13 小時至 2012 年 9 月 14 日 17 時達到最高點。此個案可以看出馬祖測站較早發生急速成長波浪，之後澎湖測站及龍洞測站才發生急速成長波。由當時天氣圖(圖 6-40)可看出，三個測站當時受到大陸冷高壓南下及鋒面的影響。

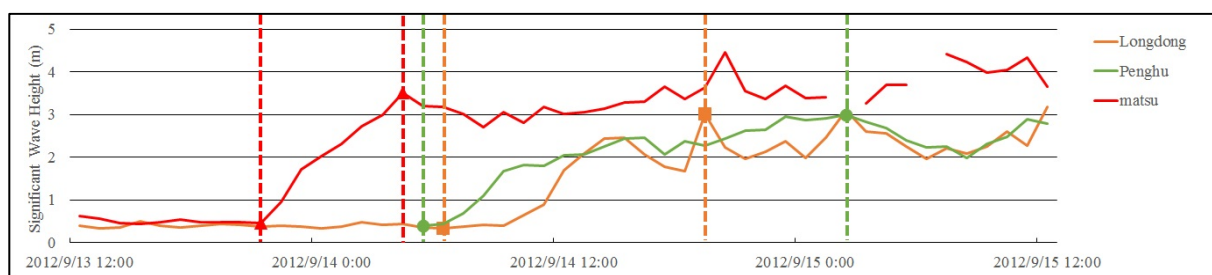


圖 6-39 2012 年 9 月 13 至 14 日各測站之急速成長波浪發生當時波高
(垂直線是急速成長波個案起始時間和結束時間)

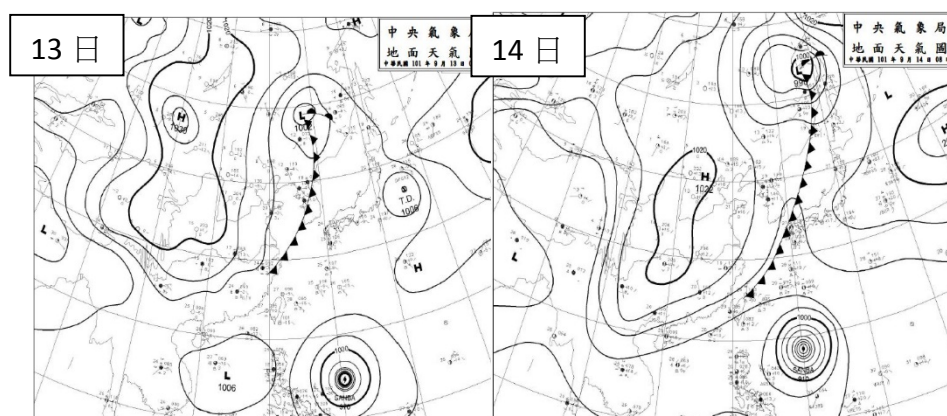


圖 6-40 2012 年 9 月 13 至 14 日地面天氣圖

2. 新竹、澎湖、小琉球及龍洞測站之急速成長波個案分析

案例 1：2009 年 8 月 6 日

圖 6-41 為 2009 年 8 月 6 日新竹、澎湖、小琉球及龍洞測站受同一天氣系統影響發生之急速成長波浪個案，藍線為新竹測站之波高、綠線部分為澎湖測站之波高、紅線部分為小琉球測站之波高、橘線為龍洞測站之波高，由圖 6-41 可看出在龍洞測站急速成長波於 2009 年 8 月 6 日 2 時發生急速成長波浪，成長歷時達 31 小時至 2009 年 8 月 7 日 9 時達到最高點；新竹測站於 2009 年 8 月 6 日 14 時發生急速成長波浪，成長歷時達 18 小時至 2009 年 8 月 7 日 8 時達到最高點；澎湖測站在 2009 年 8 月 6 日 20 點發生急速成長波浪，成長歷時達 6 小時至 2009 年 8 月 7 日 2 時達到最高點；小琉球測站於 2009 年 6 月 7 日 1 時發生急速成長波浪，成長歷時達 30 小時至 2009 年 8 月 8 日 7 時達到最高點。由當時的天氣圖(圖 6-42)可看出，台灣當時受到莫拉克颱風影響，由於莫拉克颱風較接近龍洞測站故龍洞測站最早發生急速成長波浪且成長歷時較長。

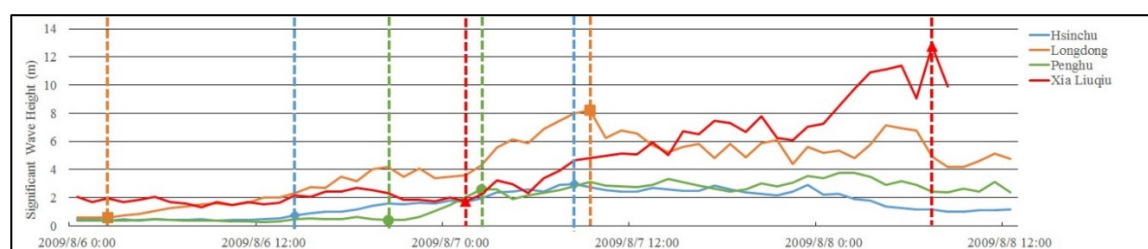


圖 6-41 2009 年 8 月 6 至 8 日各測站之急速成長波浪發生當時波高

(垂直線是急速成長波個案起始時間和結束時間)

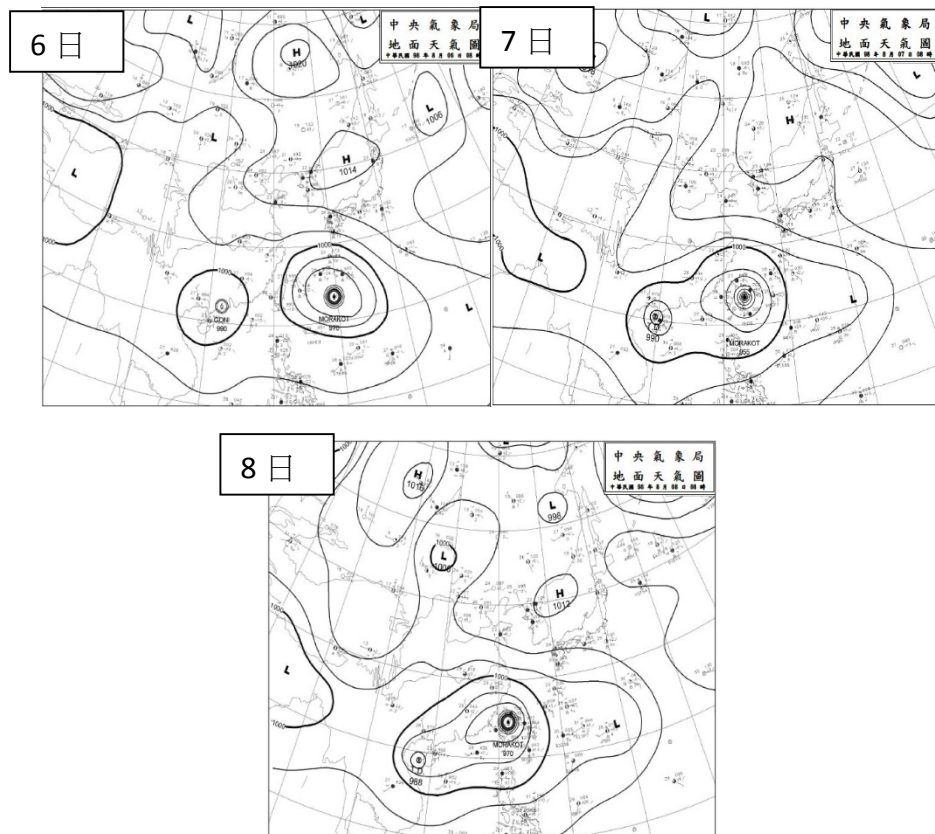


圖 6-42 2009 年 8 月 6 至 8 日地面天氣圖

案例 2：2007 年 4 月 17 日

圖 6-43 為 2007 年 4 月 17 日新竹、澎湖、小琉球及龍洞測站受同一天氣系統影響發生之急速成長波浪個案，藍線為新竹測站之波高、綠線部分為澎湖測站之波高、紅線部分為小琉球測站之波高、橘線為龍洞測站之波高，由圖 6-43 可看出在澎湖測站急速成長波於 2007 年 4 月 17 日 20 時發生急速成長波浪，成長歷時達 18 小時至 2007 年 4 月 18 日 14 時達到最高點；新竹測站於 2007 年 4 月 17 日 23 時發生急速成長波浪，成長歷時達 7 小時至 2007 年 4 月 18 日 6 時達到最高點；龍洞測站在 2007 年 4 月 18 日 1 時發生急速成長波浪，成長歷時達 16 小時至 2007 年 4 月 18 日 7 時達到最高點；小琉球測站於 2007 年 4 月 18 日 3 時發生急速成長波浪，成長歷時達 7 小時至 2007 年 4 月 18 日 10 時達到最高點。由當時的天氣圖(圖 6-44)可看出，受到鋒面通過伴隨著大陸冷高壓南下影響，澎湖測站最早發生急速成長波浪，發生後三小時新竹測站發生急速成長波浪，發生後 5 小時龍洞測站也發生急速成長波浪，小琉球測站於澎湖測站發生後 7 小時發生急速成長波浪。

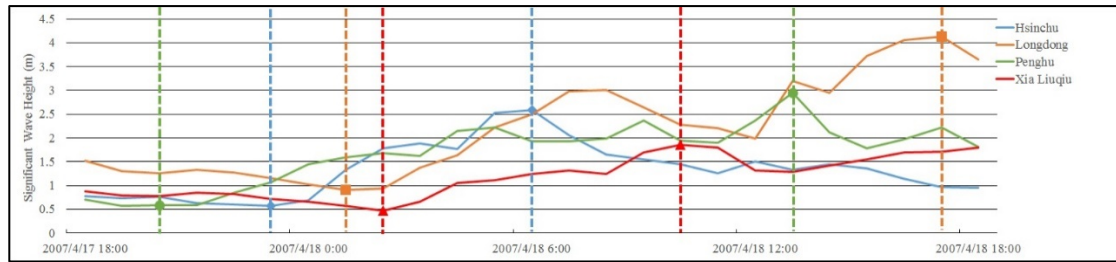


圖 6-43 2007 年 4 月 17 至 18 日各測站之急速成長波浪發生當時波高
(垂直線是急速成長波個案起始時間和結束時間)

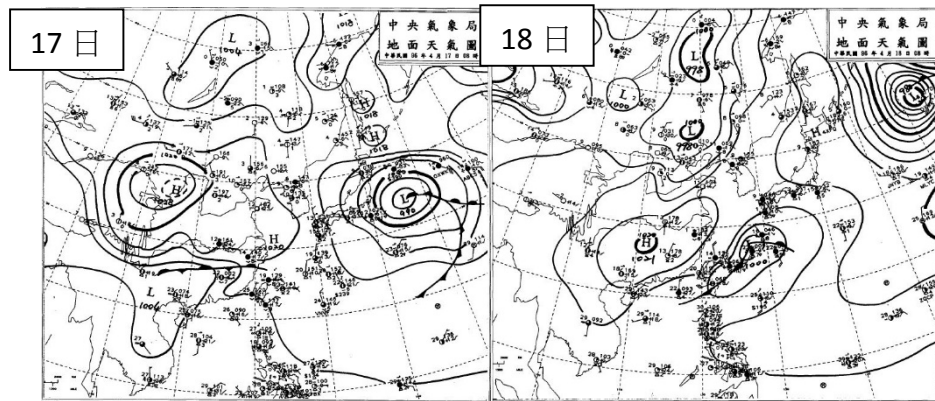


圖 6-44 2007 年 4 月 17 至 18 日地面天氣圖

案例 3：2008 年 12 月 21 日

圖 6-45 為 2008 年 12 月 21 日新竹、澎湖、小琉球及龍洞測站受同一天氣系統影響發生之急速成長波浪個案，藍線為新竹測站之波高、綠線部分為澎湖測站之波高、紅線部分為小琉球測站之波高、橘線為龍洞測站之波高，由圖 6-45 可看出在新竹、澎湖以及龍洞測站於 2008 年 12 月 21 日 18 時同時發生急速成長波浪，新竹測站成長歷時達 9 小時至 2008 年 12 月 22 日 3 時達到最高點；澎湖測站成長歷時達 18 小時至 2008 年 12 月 22 日 12 時波高達到最高點；龍洞測站成長歷時為 16 小時至 2008 年 12 月 22 日 10 時波高達到最高點；小琉球測站於新竹、澎湖以及龍洞測站發生後 14 小時於 2008 年 12 月 22 日 8 時發生急速成長波浪，成長 7 小時後波高達到最高點。由當時天氣圖(圖 6-46)，可看出台灣當時受到鋒面通過伴隨著大陸冷高壓南下影響，此個案新竹、澎湖以及龍洞等測站同時發生急速成長波浪，小琉球測站則晚 14 個小時發生急速成長波浪。

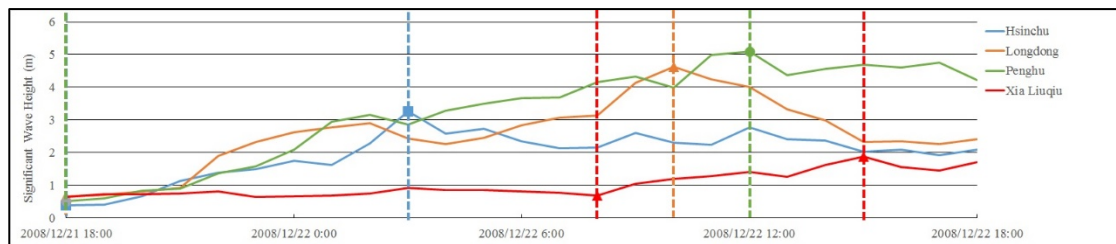


圖 6-45 2008 年 12 月 21 至 22 日各測站之急速成長波浪發生當時波高
(垂直線是急速成長波個案起始時間和結束時間)

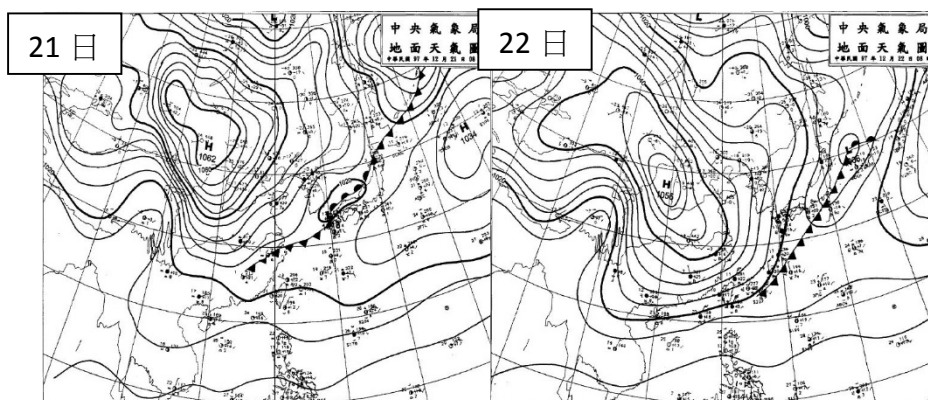


圖 6-46 2008 年 12 月 21 至 22 日地面天氣圖

6-4-6 各測站同一天氣系統下急速成長波浪特性比較

1. 馬祖、澎湖及龍洞海域受同一天氣系統下影響之急速成長波浪統計

將馬祖、澎湖及龍洞海域 2011、2012 年三地受同一天氣系統影響下所產生的急速成長波浪進行分析，發現在 12 個個案中(表 6-11)，在天氣系統分類的數量並不相同，其原因為三地測站距離可能會造成天氣系統分類的不同，但仍屬同一天氣系統影響。在這些個案中，由表 6-12 可以發現馬祖測站比龍洞測站早發生急速成長波浪約佔 75%，而其中有 2 個案龍洞早 1 小時發生，1 個案龍洞早 8 小時發生。由表 6-13 馬祖測站比澎湖測站早發生急速成長波浪約佔 92%，其中只有 1 個案澎湖早 5 小時發生。表 6-14 顯示龍洞測站比澎湖測站早發生急速成長波浪有 6 個案，其中兩測站同時發生共有 2 個案，龍洞較澎湖晚發生共有 4 個案，其原因推估為由於三個測站所受到天氣系統大部分為鋒面伴隨大陸冷高壓南下、大陸冷高壓南下及鋒面影響等，天氣系統主要往東南方向移動，故馬祖測站最早發生急速成長波浪、其次為龍洞測站，澎湖測站最晚發生。

由急速成長波浪特性表 6-15 可發現，平均值部分，波高成長歷時、起始示性波高、最大示性波高、波高成長量以及最大波高成長率馬祖測站都較大，而成長倍數及波高平均成長率部分為澎湖測站最高；最大值方面，波浪成長歷時以澎湖測站較長，起始示性波高、最大示性波高以馬祖測站為最大，波高成長量以、成長倍數以及波高平均成長率以澎湖測站最大，龍洞測站則在波高最大成長率達到 2.64 (m/hr)。最小值方面，馬祖測站波高成長歷時為 7 小時，其次為馬祖測站 5 小時；起始示性波高澎湖測站為 0.46m，其次為龍洞測站 0.33m；最大示性波高部分澎湖為 1.89 m，其次為馬祖測站 1.88 m；波高成長量澎湖測站為 1.23m，其次為馬祖測站 1.13m；成長倍數以澎湖測站 4 倍為最大，其次為馬祖測站 2.5 倍；波高平均成長率澎湖測站及龍洞測站為 0.12m/hr，其次為馬祖測站 0.11m/hr；波高最大成長率為龍洞測站 0.41m/hr，其次為馬祖測站 0.39m/hr。由上述結果可得知在同一天氣系統下，馬祖測站成長歷時較長且起始示性波高、最大示性波高較大。澎湖測站部分因起始波高較小故在波高成長量及波高平均成長率較大。龍洞測站部分波高最大成長率較為顯著。

表 6-11 馬祖、澎湖及龍洞海域受同一天氣系統影響下，急速成長波浪統計

天氣系統	F+H	H	F	TD/TY	總計
馬祖	8	2	2	0	12
澎湖	8	4	0	0	
龍洞	4	5	3	0	

表 6-12 馬祖與龍洞海域受同一天氣系統影響下，急速成長波浪起始時間比較表

相差時間	個案數	比率(%)
馬祖比龍洞早 10 小時以上	3	25
馬祖比龍洞早 7~9 小時	2	17
馬祖比龍洞早 4~6 小時	3	25
馬祖比龍洞早 1~3 小時	1	8
馬祖與龍洞同時	0	0
馬祖比龍洞晚 1~3 小時	2	17
馬祖比龍洞晚 4~6 小時	0	0
馬祖比龍洞晚 7~9 小時	1	8

表 6-13 馬祖與澎湖海域受同一天氣系統影響下，急速成長波浪起始時間比較表

相差時間	個案數	比率(%)
馬祖比澎湖早 10 小時以上	5	42
馬祖比澎湖早 7~9 小時	2	17
馬祖比澎湖早 4~6 小時	3	25
馬祖比澎湖早 1~3 小時	1	8
馬祖與澎湖同時	0	0
馬祖比澎湖晚 1~3 小時	0	0
馬祖比澎湖晚 4~6 小時	1	8
馬祖比澎湖晚 7~9 小時	0	0

表 6-14 龍洞與澎湖海域受同一天氣系統影響下，急速成長波浪起始時間比較表

相差時間	個案數	比率(%)
龍洞比澎湖早 10 小時以上	1	8
龍洞比澎湖早 7~9 小時	1	8
龍洞比澎湖早 4~6 小時	3	25
龍洞比澎湖早 1~3 小時	1	8
龍洞與澎湖同時	2	17
龍洞比澎湖晚 1~3 小時	3	25
龍洞比澎湖晚 4~6 小時	1	8

表 6-15 馬祖、澎湖及龍洞海域受同一天氣系統影響下，急速成長波浪特性比較表

		成長 歷時 (時)	起始示 性波高 (公尺)	最大示 性波高 (公尺)	波高 成長量 (公尺)	成長 倍數	波高平 均成長 率(m/hr)	波高最 大成長 率 (m/hr)
平 均 值	馬祖	12	0.82	3.34	2.53	4.5	0.24	0.67
	澎湖	10	0.47	2.87	2.39	7.7	0.26	0.59
	龍洞	10	0.68	2.78	2.10	4.5	0.22	1.12
最 大 值	馬祖	19	1.72	5.08	4.21	7.6	0.43	1.06
	澎湖	21	0.90	4.99	4.7	17.2	0.58	1.16
	龍洞	16	1.12	4.19	3.35	9.1	0.37	2.64
最 小 值	馬祖	7	0.46	1.88	1.13	2.5	0.11	0.39
	澎湖	4	0.23	1.89	1.25	4	0.12	0.29
	龍洞	5	0.33	1.6	0.84	2.1	0.12	0.41

2. 新竹、澎湖、小琉球及龍洞海域受同一天氣系統下影響之急速成長波浪統計

將新竹、澎湖、小琉球及龍洞海域 2007 至 2010 年四個測站受同一天氣系統影響下所產生的急速成長波浪進行分析，發現在 11 個個案中(表 6-16)，在天氣系統分類的數量並不相同，其原因為四個測站距離可能會造成天氣系統分類的不同，但仍屬同一天氣系統影響。

由表 6-17 新竹測站與澎湖測站急速成長波浪發生時間比較表發現，新竹測站共有 3 個案比澎湖測站早發生，其中有一個案與澎湖測站同時發生，有 7 個案較澎湖測站晚發生急速成長波浪。由表 6-18 新竹測站與小琉球測站急速成長波浪發生時間比較表發現，新竹測站共有 8 個案比小琉球測站早發生急速成長波浪，有 3 個案較小琉球測站晚發生急速成長波浪。由表 6-19 澎湖測站與小琉球測站急速成長波浪發生時間比較表發現，澎湖測站共有 9 個案比小琉球測站早發生急速成長波浪約佔 8 成，有 2 個案較小琉球測站晚發生急速成長波浪。由表 6-20 新竹測站與龍

洞測站急速成長波浪發生時間比較表發現，新竹測站共有 8 個案比龍洞測站晚發生急速成長波浪約佔 7 成，其中有 1 個案與龍洞測站同時發生急速成長波浪，有 2 個案較龍洞測站早發生急速成長波浪。由表 6-21 澎湖測站與龍洞測站急速成長波浪發生時間比較表發現，澎湖測站共有 5 個案比龍洞測站早發生急速成長波浪，其中有 1 個案與龍洞測站同時發生急速成長波浪，另有 5 個案較龍洞測站晚發生急速成長波浪。澎湖測站與龍洞測站發生急速成長波浪時間較為接近。由表 6-22 小琉球測站與龍洞測站急速成長波浪發生時間比較表發現，小琉球測站共有 2 個案比龍洞測站早發生急速成長波浪，另有 9 個案較龍洞測站晚發生急速成長波浪約佔 8 成。

由上述各測站發生時間比較表可以發現，新竹、澎湖、小琉球及龍洞等四個測站，在同一天氣系統影響下龍洞測站會較早發生急速成長波浪，其次為澎湖測站、新竹測站、小琉球測站。

本文整理出新竹、澎湖、小琉球及龍洞海域受同一天氣系統下影響之急速成長波浪特性表 6-23 可發現平均值部分，波高成長歷時以龍洞測站波高成長歷時 13 時為最長，其次為澎湖測站 12 時，小琉球測站 11 時，新竹測站成長歷時較短為 8 時；起始示性波高以龍洞測站 0.99m 最大，其次為小琉球測站 0.84m，澎湖測站 0.77m，新竹測站起始示性波高最小 0.65m；最大示性波高龍洞測站 4.47m，其次為小琉球測站 3.7m，澎湖測站 3.55m，新竹測站最大示性波高最小 2.46m；波高成長量龍洞測站 3.48m，其次為小琉球測站 2.87m，澎湖測站 2.78m，新竹測站 1.81 最低；成長倍數澎湖測站 6.08 倍，其次為龍洞測站 5.82 倍，新竹測站 4.54 倍，小琉球測站成長倍數 4.07 倍最低；波高平均成長率龍洞測站 0.26(m/hr)，其它三測站為 0.25(m/hr)；波高最大成長率龍洞測站 1.35(m/hr)最大，其次為小琉球 0.93(m/hr)，澎湖測站 0.85(m/hr)，新竹測站 0.54(m/hr)最低。最大值部分，成長歷時以小琉球測站 34 時為最長波浪成長歷時；起始示性波高以龍洞測站 2.34m 為最大起始示性波高；最大示性波高為小琉球測站 12.74m；波高成長量以小琉球測站 11.01m 為最大波高成長量；成長倍數以龍洞測站 15.48 倍為最大成長倍數；波高平均成長率以小琉球測站 0.5(m/hr)為最大波高平均成長；波高最大成長率以龍洞測站 3.68(m/hr)為最大的波高最大成長率。最小值部分，波高成長歷時龍洞測站為 5 時，其次為新竹及澎湖測站 4 時，小琉球測站 3 時；起始示性波高龍洞測站 0.4m，其次為澎湖及小琉球測站 0.38m，新竹測站 0.24m；最大示性波高澎湖測站 1.97m，其次為龍洞測站 1.94m，新竹測站 1.61m，小琉球測站 1.53m；波高成長量，龍洞 1.42m，其次為新竹測站 2.1m，小琉球測站 2.01m，澎湖測站 2m；成長倍數部份各測站約為 2 倍大致相同；波高平均成長率龍洞測站 0.21(m/hr)，其次為澎湖、小琉球測站 0.13(m/hr)，新竹測站 0.12(m/hr)；波高最大成長率澎湖測站 0.56(m/hr)，其次為龍

洞測站 0.46(m/hr)，小琉球測站 0.3(m/hr)，新竹測站 0.2(m/hr)最低。由上述結果可得知在同一天氣系統下，龍洞測站成長歷時較長且起始示性波高、成長後最大示性波高與波高最大成長率為最大，成長倍數也較台灣西部海域測站高，故可推論龍洞測站之急速成長波浪較台灣西部海域新竹、澎湖以及小琉球等測站危險。

表 6-16 新竹、澎湖、小琉球及龍洞海域受同一天氣系統影響下，急速成長波浪統計

天氣系統	F+H	H	F	TD/TY	TY7	總計
新竹	3	4	0	2	2	11
澎湖	4	4	0	1	2	
小琉球	0	6	1	3	1	
龍洞	2	5	0	2	2	

表 6-17 新竹與澎湖海域受同一天氣系統影響下，急速成長波浪起始時間比較表

相差時間	個案數	比率(%)
新竹比澎湖早 10 小時以上	1	9
新竹比澎湖早 7~9 小時	0	0
新竹比澎湖早 4~6 小時	1	9
新竹比澎湖早 1~3 小時	1	9
新竹與澎湖同時	1	9
新竹比澎湖晚 1~3 小時	3	27
新竹比澎湖晚 4~6 小時	2	18
新竹比澎湖晚 7~9 小時	2	18

表 6-18 新竹與小琉球海域受同一天氣系統影響下，急速成長波浪起始時間比較表

相差時間	個案數	比率(%)
新竹比小琉球早 10 小時以上	4	36
新竹比小琉球早 7~9 小時	1	9
新竹比小琉球早 4~6 小時	2	18
新竹比小琉球早 1~3 小時	1	9
新竹與小琉球同時	0	0
新竹比小琉球晚 1~3 小時	1	9
新竹比小琉球晚 4~6 小時	0	0
新竹比小琉球晚 10 小時以上	2	18

表 6-19 澎湖與小琉球海域受同天氣系統影響下，急速成長波浪起始時間比較表

相差時間	個案數	比率(%)
澎湖比小琉球早 10 小時以上	5	45
澎湖比小琉球早 7~9 小時	2	18
澎湖比小琉球早 4~6 小時	1	9
澎湖比小琉球早 1~3 小時	1	9
澎湖與小琉球同時	0	0
澎湖比小琉球晚 1~3 小時	0	0
澎湖比小琉球晚 4~6 小時	0	0
澎湖比小琉球晚 7~9 小時	2	18

表 6-20 新竹與龍洞海域受同一天氣系統影響下，急速成長波浪起始時間比較表

相差時間	個案數	比率(%)
新竹比龍洞早 10 小時以上	0	0
新竹比龍洞早 7~9 小時	0	0
新竹比龍洞早 4~6 小時	0	0
新竹比龍洞早 1~3 小時	2	18
新竹與龍洞同時	1	9
新竹比龍洞晚 1~3 小時	2	18
新竹比龍洞晚 4~6 小時	1	9
新竹比龍洞晚 7~9 小時	0	0
新竹比龍洞晚 10 小時以上	5	45

表 6-21 澎湖與龍洞海域受同一天氣系統影響下，急速成長波浪起始時間比較表

相差時間	個案數	比率(%)
澎湖比龍洞早 10 小時以上	1	9
澎湖比龍洞早 7~9 小時	0	0
澎湖比龍洞早 4~6 小時	1	9
澎湖比龍洞早 1~3 小時	3	27
澎湖與龍洞同時	1	9
澎湖比龍洞晚 1~3 小時	2	18
澎湖比龍洞晚 4~6 小時	0	0
澎湖比龍洞晚 7~9 小時	0	0
澎湖比龍洞晚 10 小時以上	3	27

表 6-22 新竹與龍洞海域受同一天氣系統影響下，急速成長波浪起始時間比較表

相差時間	個案數	比率(%)
小琉球比龍洞早 10 小時以上	2	18
小琉球比龍洞早 7~9 小時	0	0
小琉球比龍洞早 4~6 小時	0	0
小琉球比龍洞早 1~3 小時	0	0
小琉球與龍洞同時	0	0
小琉球比龍洞晚 1~3 小時	0	0
小琉球比龍洞晚 4~6 小時	0	0
小琉球比龍洞晚 7~9 小時	1	9
小琉球比龍洞晚 10 小時以上	8	73

表 6-23 新竹、澎湖、小琉球及龍洞海域受同一天氣系統影響下，急速成長波浪特性比較表

		成長 歷時 (時)	起始示 性波高 (公尺)	最大示 性波高 (公尺)	波高 成長量 (公尺)	成長 倍數	波高平均 成長率 (m/hr)	波高最大 成長率 (m/hr)
平均 值	新竹	8	0.65	2.46	1.81	4.54	0.25	0.54
	澎湖	12	0.77	3.55	2.78	6.08	0.25	0.85
	小琉球	11	0.84	3.70	2.87	4.07	0.25	0.93
	龍洞	13	0.99	4.47	3.48	5.82	0.26	1.35
最大 值	新竹	18	1.07	3.41	2.88	10.92	0.46	0.97
	澎湖	25	1.63	5.09	4.57	12.64	0.37	1.18
	小琉球	34	1.73	12.74	11.01	7.36	0.50	3.68
	龍洞	31	2.34	8.18	7.6	15.48	0.37	3.59
最小 值	新竹	4	0.24	1.61	0.98	2.10	0.12	0.2
	澎湖	4	0.38	1.97	1.32	2	0.13	0.56
	小琉球	3	0.38	1.53	0.77	2.01	0.13	0.3
	龍洞	5	0.4	1.94	1.42	2.08	0.21	0.46

第七章 結論與建議

7-1 結論

瞬變海象可能讓人們應變不急，因而遭受傷害。本計畫所研究之瞬變海象包含外洋的異常波浪、海岸邊的瘋狗浪以及急速成長波浪等三種。從事以上三種瞬變海象之研究的最終目標是期望能對這些現象有所掌握，瞭解其特性，以協助達到最後進行預警的目標，以提供中央氣象局發佈相關防災資訊。

一、外洋異常波浪的研究成果

本計畫在外洋異常波浪部分的研究中，持續海上因異常波浪導致之船難事件蒐集，本研究提出可能發生災害的危險異常波浪(dangerous freak wave)，它是符合學理上異常波浪定義，並且波高超過 2 米的浪，已完成 16 個波浪測站之異常波浪探勘，分析並統計異常波浪案例，以了解其特性。在外洋異常波浪機率預測理論之建立，已參考與彙整前人研究，獲得一異常波浪發生機率估算式，並以碧砂測站之連續波浪資料進行驗證。在外洋異常波浪機率預測系統之建置上，結合中央氣象局波浪模式輸出資料與前述整理推導之機率估算理論，完成一套機率預測之系統，本研究也蒐集並評估系統計算機率時所需之非線性參數計算方法，並獲得最適合應用於此系統之計算方法。未來此系統輸出之海上異常波浪發生風險圖可提供氣象局及相關單位參考。

- 本計畫持續從報章媒體、政府報告等來源，蒐集台灣鄰近海域因浪擊因素而造成之船難事件，資料蒐集整理結果顯示，近十六年來(2000-2015)計有 119 件發生在外洋之浪擊船難事件，共造成 712 人落海，平均每年有 7.4 件，每件約有 5.9 人落海，統計得知，在冬天期間發生最為頻繁。
- 在異常波浪探勘方面，本年度完成了澎湖、金門、台東、龜山島和小琉球等五個浮標站的異常波浪探勘分析，分析結果顯示，9 年的澎湖浮標資料中有 733 個危險異常波浪、15 年的金門浮標資料中有 486 個危險異常波浪、5 年的台東浮標資料中有 234 個危險異常波浪、13 年的龜山島浮標資料中有 338 個危險異常波浪、12 年的小琉球浮標資料中有 269 個危險異常波浪。
- 這五個浮標海域發生危險異常波浪的機率，在澎湖浮標為 11.4×10^{-5} (約連續每 9000 個波會出現一次)，在金門浮標則為 6.47×10^{-5} (約連續每 15500 個波會出現一次)，在台東浮標則為 8.81×10^{-5} (約連續每 11300 個波會出現一次)，在龜山島浮標為 4.83×10^{-5} (約連續每 20700 個波會出現一次)，在小琉球浮標則為

3.16×10^{-5} (約連續每 31500 個波會出現一次)。

- 分析結果顯示近海浮標中觀測所得危險異常波浪的浪高主要分布在 2~4 公尺之間，約占有 60%-85%不等，4 公尺以上的危險異常波浪發生次數較少，而外海測站(東沙與台東外洋浮標)的危險異常波浪浪高分析結果與近岸浮標有顯著的差異，相對較大的危險異常波浪占較大比例，4 公尺以上的危險異常波浪佔有 45%以上。本文也從有限的資料中發現，危險異常波浪隨著海況愈顯惡劣之發生機率愈高。
- 而在異常波浪波形分析中，這些危險異常波浪統計結果顯示，大多異常波浪型態皆屬於波峰波谷高度相當之對稱形態，占有 8 成以上；而發生在波群中的異常波浪約只佔 10%比率，其餘皆是單獨發生的異常波浪。假使該異常波浪發生在波群中，該群波浪較多是以 5 個波組織而成
- 在異常波浪機率預測部份，本年度探討在計算發生機率過程中所需要的非線性參數 BFI，參考前人研究，在 BFI 計算中增加波浪方向性，計算之 BFI 計算結果也相當合理，波浪的方向性確實會影響 BFI 之計算，當方向譜寬參數變大時，BFI 值會下降。本研究亦探討了當湧浪出現時，BFI 會增大為平常海象時的 1.4 倍，也意味著當湧浪出現時，異常波浪發生機率也會隨之增加。
- 本計畫將此異常波浪發生機率與中央氣象局波浪預報模式結合，成為一個異常波浪發生機率預測模式，可以產生台灣周遭海域未來 24、36 和 48 小時的異常波浪發生機率，本研究已建立一套作業化流程，已於中央氣象局上線測試運作。
- 異常波浪發生機率預測結果顯示，異常波浪發生機率介於 0.15-0.5 間，當機率超過 0.5 者可視為高風險海象，在運作的近三個月期間內，北部海域出現 3 次、西部海域出現 1 次異常波浪發生之高風險情形。
- 本文以東吉島波浪站的連續波浪觀測資料進行驗證，在發生機率 0.3 以下的驗證結果良好，預測平均加權誤差在 15%以下，整體而言，異常波浪發生機率預測結果相當具有可信度，結果也令人滿意。

二、海岸瘋狗浪預警模式建置的研究成果

本計畫在海岸瘋狗浪預警系統之建置中，持續蒐集岸邊因瘋狗浪襲導致之人員落海事件。在瘋狗浪預警模式之建置，已針對預警模式演算法進行評估，結果顯示群集分析演算法具有較高的準確度，因此選擇群集分析演算法作為後續建置模式

之方法。預警系統分別以龍洞資料浮標觀測資料與中央氣象局 NWW III 波浪模式預測資料或只使用中央氣象局 NWW III 波浪模式預測資料建置預警系統，以群集分析演算法找到那些因子分別為龍洞浮標觀測示性波高、尖峰週期及 NWW III 模式風速等相關因子。以實際瘋狗浪事件進行驗證，接著以此發生條件建置瘋狗浪預警系統，依作業需要，分別建置前置時間 6 小時、12 小時和 24 小時預警系統。未來只要將預報與觀測資料輸入預警模式，即可估算發生落海事件的風險性，此項產品可提供氣象局進行東北角近岸區域進行預警的參考數據。

- 過去 16 年(2000-2015)以來，台灣海岸地區共發生了 300 件浪擊人員落海事件，合計 456 人被瘋狗浪擊落海，平均每年近 18 件，平均每年有 27 人受到傷害，其中有近 7 成 5 是發生在北部及東北角(新北-基隆-宜蘭)海岸，共有 208 件，而在颱風期間發生者僅佔 15%，這結果顯示了預警(如颱風期間之颱風警報)必能降低危害風險。
- 本計畫延續去年建置的方法，從碧砂測站連續測試的波浪資料與當時的氣象觀測資料，藉由關聯分析尋找出可能造成落海事件的條件與時段，以可能造成落海事件發生的時段做為目標值，再以資料探勘演算法建置出瘋狗浪的預警模式，當模式學習測試完成後，再以實際的落海事件案例來驗證其準確性。
- 本年度完成了以龍洞測站海象觀測資料搭配 NWWIII 模式輸出資料建構之預警系統(模式一)與僅 NWWIII 模式輸出資料建構預警系統(模式二)。模式一最佳輸入因子分別為龍洞浮標觀測之預報點前 6 小時內示性波高的平均值、預報點前 6 小時內示性波高的最大值、預報點前 6 小時內尖峰週期的平均值、預報點前 6 小時內尖峰週期的最大值、NWWIII 預報點前 12 小時在 45°方向的平均風速分量、與 NWWIII 預報點前 12 小時在 0°方向的平均風速分量等因子；模式二之最佳輸入因子分別為預報點當時風向(角度)、預報點前 6 小時平均風速、預報點前 12 小時在 0°方向的平均風速分量、預報點前 6 小時在 0°方向的平均風速分量、預報點前 12 小時在 45°方向的平均風速分量和預報點前 6 小時在 45°方向的平均風速分量等因子。
- 以東北角海域瘋狗浪事件對兩模式進行驗證，驗證結果顯示，兩模式反查率皆可達約 9 成以上，預測結果具有相當高之可信度。然而模式一之反查率較模式二為高，因此將模式一作為作業化模式，而模式二作為備援模式。
- 在瘋狗浪預警模式之運作方面，本研究已結合龍洞資料浮標觀測資料與中央氣象局海象中心 NWWIII 波浪模式輸出資料，建立一套瘋狗浪預警模式作業化流程，於中央氣象局上線測試運作中。作業規劃每天執行 4 次預警作業，運作結

果可得到東北角落海事件發生之風險高低。

- 東北角瘋狗浪預警系統運作期間，系統預測顯示高風險期間的海象因子條件為，平均示性波高約為 1.6 公尺、預報點前 6 小時的最大示性波高約為 1.9 公尺；預報點前 6 小時的平均尖峰週期約為 8 秒；預報點前 6 小時最大尖峰週期約為 9 秒。這些條件代表在未來海象條件會逐漸變險惡，而此結果也與過去研究中指出當波高達 1.5 公尺以上便有可能會發生落海事件的結論接近。

三、在急速成長波浪探勘部分

本計畫在急速成長波浪之探勘部分，過去較少有相關之研究，因此本研究將從資料浮標中進行案例之探勘，此四年計畫中已完成五個測站之探勘，分析並統計急速成長波浪之特性。

- 根據第一年探勘新竹測站之急速成長波浪案例，近 14 年資料共尋得 174 案例，平均每年 13 例。統計結果顯示，平均急速長波浪之發生歷時約 7 小時、平均波高成長倍數為 3.6 倍、平均波高成長率為 0.23m/hr、波高最大成長率為 0.46m/hr。
- 根據第二年探勘龍洞測站之急速成長波浪案例，近 15 年資料共尋得 671 案例，平均每年 45 例。統計結果顯示，平均急速長波浪之發生歷時約 8 小時、平均波高成長倍數為 3.2 倍、平均波高成長率為 0.26m/hr、波高最大成長率為 0.87m/hr。
- 根據第三年探勘澎湖測站之急速成長波浪案例，近 6 年資料共尋得 490 案例，平均每年 81 例。統計結果顯示，平均急速長波浪之發生歷時約 8 小時、平均波高成長倍數為 3.8 倍、平均波高成長率為 0.24m/hr、波高最大成長率為 0.62m/hr。
- 根據第三年探勘小琉球測站之急速成長波浪案例，近 9 年資料共尋得 117 案例，平均每年 13 例。統計結果顯示，平均急速長波浪之發生歷時約 8 小時、平均波高成長倍數為 2.9 倍、平均波高成長率為 0.23m/hr、波高最大成長率為 0.62m/hr。
- 本年度新增馬祖浮標站分析結果，近 4 年資料共尋得 95 案例，平均每年 24 例。統計結果顯示，平均急速長波浪之發生歷時約 10 小時、平均波高成長倍數為 3.8 倍、平均波高成長率為 0.23m/hr、波高最大成長率為 0.66m/hr。馬祖浮標探勘所得之案例，其產生原因通常是受天氣系統影響所產生，其中受到鋒面與冷高壓南下所影響者約 65%。

- 本計畫針對台灣西部海域以及北海岸測站的急速成長波浪進行分析，分別為馬祖、新竹、澎湖、小琉球、龍洞等五個浮標站。分析結果顯示澎湖海域發生之急速成長波浪數量比其他海域多，共 490 案例，平均每年 81 例。天氣系統部分，小琉球浮標站的急速成長波浪主要是受到颱風外圍或熱低壓的影響較多，其他測站之急速成長波浪主要是受到鋒面通過伴隨著大陸冷高壓南下的影響。
- 在同一天氣系統下，天氣系統主要由北往南方向移動，馬祖測站較早發生急速成長波浪、其次為龍洞測站。由統計結果顯示，馬祖、澎湖以及龍洞測站在同一天氣系統下，馬祖測站成長歷時約 12 小時、起始示性波高 0.82m、最大示性波高 3.34m，相較於龍洞、澎湖等測站更易發生意外。
- 新竹、澎湖、小琉球以及龍洞測站在同一天氣系統下，龍洞測站成長歷時較長且起始示性波高、成長後最大示性波高與波高最大成長率為最大，成長倍數也較台灣西部海域測站高，故可推論龍洞測站之急速成長波浪較台灣西部海域新竹、澎湖以及小琉球等測站危險。

7-2 建議

本研究提出以下幾點建議供委託單位參考：

- 不論是異常波浪發生機率預測系統或是瘋狗浪預警系統，均已在中央氣象局測試執行約 3 個月，建議持續上述系統之運作，收集運作概況，提供後續系統改良之參考。
- 本研究所使用之瘋狗浪研究案例多來自於媒體報導，但因若未有落海事件則媒體即未予以報導，如此造成所蒐集的瘋狗浪事件較真實世界發生者為少，在模式率定工作上產生了誤差，建議規劃設置瘋狗浪監測系統，以光學或實測的方式，蒐集連續瘋狗浪事件(或資料)，以提昇瘋狗浪預警系統之準確性。
- 本研究僅以東北角海岸發展瘋狗浪預警系統，建議推廣至全台海岸。
- 建議增設類似東吉島波浪站之連續波浪觀測系統於東北角海域，將有助於掌握異常波浪與瘋狗浪特性。

參考文獻

- [1] 呂蕙君，碧砂港外急速成長波浪之探討，國立台灣海洋大學碩士論文，2007。
- [2] 李賢文，「瘋狗浪」之初步研究，中央氣象局天氣分析與預報研討會，台北，第 471-475 頁，1998。
- [3] 許明光、曾俊超、高家俊，臺灣地區「瘋狗浪」之調查及成因初探，第十五屆海洋工程研討會論文集，第513-524頁，1993。
- [4] 陳冠宇，瘋狗浪的可能機制，海洋工程學刊，第二卷，第一期，第93-106頁，2002。
- [5] 黃玲玲，台北港海域之急速成長波浪，國立台灣海洋大學碩士論文，2010。
- [6] 黃雅萍，龍洞、龜山島海域急速成長之波浪，國立台灣海洋大學碩士論文，2008。
- [7] 劉俊志，近岸突浪的分析探討，海洋物理研究所，國立中山大學，碩士論文，2006。
- [8] 蔡仁智、蔡政翰，資料探勘應用於台灣海岸危險波浪發生之研究，第 29 屆海洋工程研討會論文集，第 541-546 頁，2007。
- [9] 蔡仁智、蔡政翰，資料探勘應用於近岸危險波浪預警系統的建置，第 30 屆海洋工程研討會論文集，第 229-234 頁，2008。
- [10] 蔡政翰、林盈成、曾相茂，群波與瘋狗浪，海洋工程學刊，第一卷，第一期，第 71-82 頁，2001。
- [11] Baschek, B., Imai, J., Rogue Wave Observations Off the US West Coast. *Oceanography* 24 (2), 158-165, 2011.
- [12] Benjamin, T.B. and Feir, J.E., The Disintegration of Wave Trains on Deep Water, *J. Fluid Mechanics*, Vol. 27, pp. 417-430, 1967.
- [13] Cartwright, D.E., Longuet-Higgins, M.S., The Statistical Distribution of the Maxima of a Random Function. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 237 (1209), 212-232, 1956.
- [14] Cavaleri, L. and Bertotti, L., The "Voyager" Accident-meteorological and Marine Predictability, *Proceeding of the Rogue Waves 2008*, pp.34-39, Brest, France, Oct. 13-15, 2008.
- [15] Chalikov, D, Freak waves: Their occurrence and probability, *Physics of Fluids*, Vol. 21, No. 7, 076602, 2009.
- [16] Didenkulova, I. and Anderson, C., Freak Waves of Different Types in the Coastal Zone of the Baltic Sea, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, Vol.10, pp. 2021-2029, 2010.
- [17] Divinsky, B.V, Levin, B.V., and Lopatukhin, L.I., A Freak Wave in the Black Sea: Observations and Simulation, *Doklady Earth Sciences*, 395A, pp. 438-443, 2004.
- [18] Donelan, M.A., and A.K. Magnusson. 2005. The role of meteorological focusing in

generating rogue wave conditions. Proceedings of the 14th Aha Huliko'a Winter Workshop 2005 on Rogue Waves, January 25–28, 2005, Honolulu, USA.

- [19] Dyachenko, A.I., and Zakharov, V.E., Modulation Instability of Stokes Wave to Freak Wave, *JETP Letter*, Vol. 81, No. 6, pp. 255-259, 2005.
- [20] Dysthe, K., Krogstad, H.E., and Müller, P., Oceanic Rogue Waves, *Ann. Review of Fluid Mechanics*, Vol. 40, pp. 287-310, 2008.
- [21] Dysthe, K.B., Note on a Modification to the Nonlinear Schrodinger Equation for Application to Deep Water Waves, Proceedings of the Royal Society of London A., Vol. 369, pp. 105-114, 1979.
- [22] Faulkner, D., Rogue Waves – Defining their characteristics for marine design, *Proceedings of Rogue Waves 2000*, IFREMER, Brest, France, Nov. 29-30, 2000.
- [23] Forristall, G. Z., The Distribution of Measured and Simulated Wave Heights as a Function of Spectral Shape, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 89(C6), 10547-10552, 1984.
- [24] Guedes, S.G., Cherneva, Z. and Antao, E.M., Abnormal Waves during Hurricane Camille, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 109, C08008, 2004.
- [25] Gōda, Y., Random seas and design of maritime structures, 3rd ed. World Scientific, New Jersey, 2010.
- [26] Kharif, C. and Pelinovsky, E., Physical Mechanisms of the Rogue Wave Phenomenon, *European Journal of Mechanics B/Fluids*, Vol. 22, pp. 603-634, 2003.
- [27] Kharif, C., Pelinovsky, E., and Slunyaev, A., *Rogue Waves in the Ocean*, Springer. 2009.
- [28] Kimura, A., Ohta, T., 1994. Probability of the freak wave appearance in a 3-dimensional sea condition, 24th Conference on Coastal Engineering, pp. 456-467.
- [29] Lavrenov, I., The Wave Energy Concentration at the Agulhas Current off South Africa, *Natural Hazard*, Vol.17, pp. 117–127, 1998.
- [30] Longuet-Higgins, M.S., On the statistical distribution of the heights of sea waves. *Journal of Marine Research* 11, 245-265, 1952.
- [31] Longuet-Higgins, M.S., The effect of non-linearities on statistical distributions in the theory of sea waves. *Journal of Fluid Mechanics* 17, 459-480, 1963.
- [32] Longuet-Higgins, M., and Drazen, D., On Steep Gravity Waves Meeting a Vertical Wall: a Triple Instability, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 466, pp. 305-318, 2002.
- [33] Longuet-Higgins, M., On the statistical distribution of the heights of sea waves, *Journal of Marine Research*, Vol. 11, pp. 248-265, 1952.
- [34] Magnusson, A. K., Donelan, M. A., and Drennan, W. M., On Estimating Extremes in an Evolving Wave Field, *Coastal Eng.*, Vol.36, pp.147–163, 1999.
- [35] Mori, N., Liu, P.C., Yasuda, T., Analysis of freak wave measurements in the Sea of

Japan. Ocean Engineering 29 (11), 1399-1414, 2002.

- [36] Mori, Nobuhito and Janssen, Peter A. E. M., On Kurtosis and Occurrence Probability of Freak Waves, *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 36, pp. 1471-1483, 2006.
- [37] Mori, N., Onorato, M., Janssen, P. A., On the estimation of the kurtosis in directional sea states for freak wave forecasting, *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 41, No. 8, pp. 1484-1497, 2011.
- [38] Mori, N. Freak waves under typhoon conditions, *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), 117(C11), 2012.
- [39] Müller, P., and C. Garrett. 2007. Rogue waves: An introductory example. *Proceedings of the 15th 'Aha Huliko'a Hawaiian Winter Workshop*, January 23–26, 2007, Honolulu, USA.
- [40] Naess, A., On the Distribution of Crest to Trough Wave Heights. *Ocean Engineering* 12 (3), 221-234, 1985.
- [41] Onorato, M., Osborne, A., and Serio, M., Extreme Wave Events in Directional, Random Oceanic Sea States, *Physics of Fluids*, Vol. 14, L25, 2002.
- [42] Pelinovsky, E. and Kharif, C., *Extreme Ocean Waves*, Springer, 2008.
- [43] Peterson, P., Soomere, T., Engelbrecht, J., and Van Groesen, E., Soliton Interaction as a Possible Model for Extreme Waves in Shallow Water, *Nonlinear processes in geophysics*, Vol. 10, No. 6, pp. 503-510, 2003.
- [44] Prevosto, Marc and Forristall, George Z., Statistics of Wave Crests From Models vs. Measurements, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vol.126, No. 1, pp. 43-50, 2004.
- [45] Sand, S.E., Hansen, N.E.O., Klinting, P., Gudmestad, O.T., and Sterndor, M.J., Freak Wave Kinematics in: *Water Wave Kinematics*, NATO ASI Series E, 178, Kluwer Academic, pp. 535-550, 1990.
- [46] Serio, M., M. Onorato, A. R. Osborne, and P. A. E. M. Janssen, On the Computation of the Benjamin-Feir Index, *A/ A*, 2005.
- [47] Stansell, P., Distributions of Freak Wave Heights Measured in the North Sea, *Applied Ocean Research*, Vol.26, pp. 35-48, 2004.
- [48] Tayfun, M.A., Effects of Spectrum Bandwidth on the Distribution of Wave Heights and Periods. *Ocean Engineering* 10 (2), 107-118, 1983.
- [49] Trulsen, K. and Dysthe, K, Freak waves – a three-dimensional wave simulation, *Proceedings of the 21st Symposium Naval Hydrodynamics*, pp. 550–558, 1997.
- [50] Tamura, H., Waseda, T., and Miyazawa, Y., Freakish Sea State and Swell-windsea Coupling: Numerical Study of the Suwa-Marui Incident, *Geophysical Research Letters*, Vol. 36, No. 1, L01607, 2009.
- [51] Tsai, C.H., Su, M.Y., and Huang, S.J., Observations and Conditions for Occurrence of Dangerous Coastal Waves, *Ocean Engineering*, Vol. 31, pp. 745-760, 2004.
- [52] White, B. and Fornberg, B., On the chance of freak wave at sea, *Journal of Fluid*

Mechanics, Vol.355, pp. 113–138, 1998.

- [53] Zakharov, V.E, Dyachenko, A.I, and Prokofiev, A.O., Freak Waves as Nonlinear Stage of Stokes Wave Modulation Instability, *European Journal of Mechanics B /Fluids*, Vol. 25, pp. 677–692, 2006.