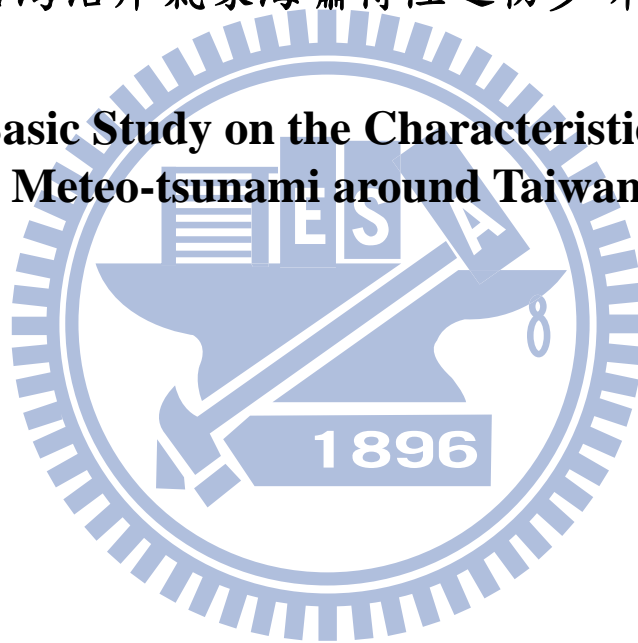


國立交通大學土木工程研究所
Institute of Civil Engineering National Chiao Tung University

碩士論文

台灣沿岸氣象海嘯特性之初步研究

**A Basic Study on the Characteristics of
Meteo-tsunami around Taiwan**



指導教授：張憲國博士

研究生：郭力豪

中華民國九十八年七月

台灣沿岸氣象海嘯特性之初步研究

研究生：郭力豪

指導教授：張憲國 博士

國立交通大學土木工程研究所

中文摘要

本文利用所收集台灣沿岸12測站，自2008年1月至2009年7月間之潮位資料，以FFT、Wavelet與EEMD分析氣象海嘯現象發生之時段。且探討氣象海嘯發生之時間與空間分布特性、週期分布特性，及海嘯週期與港灣共振週期之關係。本研究結果發現台灣氣候海嘯發生之時間集中在1-3月間，發生地點以北台灣為主，發生之最大振幅達到1.0-1.5公尺，相對年平均潮差之比值約有0.4-0.6。在週期分布特性上，除了海嘯週期(10-60分鐘)區間外，相同的外力因素也會附帶1-10分鐘週期之訊號。本研究發現各港灣內大部份氣象海嘯現象並無受到港池共振之影響，因此觀測到氣象海嘯現象之水位變化多低於1公尺。最後本研究分析壓力變化與氣象海嘯之相關性時發現，必須使用高取樣頻率之訊號，方能分析出氣象海嘯之變化特性；而使用方均根分析氣象海嘯特性的平均時間建議以30-40分鐘為佳。另外本研究發現在季節風影響下，陣風風速大幅度跳動也是影響氣象海嘯振幅的因子之一。

A Basic Study on the Characteristics of Meteo-tsunami around Taiwan

Author : Li-Hao Kuo

Advisor : Dr. Hsien-Kuo Chang

Institute of Civil Engineering National Chiao Tung University

ABSTRACT

This paper investigates meteo-tsunami around Taiwan through FFT, Wavelet and EEMD methods based on collected tide data during Jan, 2008 to July, 2009 at 12 tide stations. The temporal and spatial distributions, and the dominant periods of meteo-tsunami around Taiwan was discussed and related to harbor resonance. Meteo-tsunami more occasionally happens in the period of from January to March and at the north waters of Taiwan than the other months and waters due to northeastern monsoons. The maximum amplitude of meteo-tsunami can reach 1.0-1.5 m, whose relative amplitude to mean tidal range is about 0.4-0.6 m. Meteo-tsunami with periods less than 10 minute was newly found together with possibly existing components, which were identified by the previous researchers, with periods ranged from 10-60 minute. Most dominant periods of meteo-tsunami are off from the modes of harbor resonance so that meteo-tsunamis are not amplified in the harbors and are less than 1m. The relationship between pressure variation and meteo-tsunami was confirmed from data at high sampling rate. The characteristics of meteo-tsunami can be clarified by taking root mean square on data at a mean of about 30-40 minute. An interesting speculation is that large jump of the gust during monsoon is a possible factor generating meteo-tsunami.

致謝

日子眨眼而過，也到了換我寫致謝的時候了。兩年一晃而過，想當初備取最後一名還差點錯過，報到截止前一晚才收到通知，隔天一早風塵僕僕從台南趕到新竹報到。接著開始了兩年充滿歡笑的研究生活。

這篇論文得以順利完成，必須感謝恩師 張憲國老師兩年來的悉心教導與栽培，並且不厭其煩的教導我做研究與做事該有的態度與方法，「在研究中發現問題並且在解決問題的過程中得到成就感與樂趣」，這種愉快的研究精神我絕對會謹記在心。在論文的研究過程中，特別感謝立青學長在工作之餘，仍然給我專業與技術的指導。也感謝口試委員何良勝科長撥冗審閱，並在口試期間給予指導與建議，在此致上最誠摯的感謝。

另外要感謝研究室的勁成學長，將研究之外的社會經驗與我分享。在應用工具軟體有問題的時候，蔚瑋學長總是很有耐心的給我建議與方向。

陪伴我研究生時期的其他成員：對研究室戀戀不捨畢業後還是天天來打卡的明璋學長、遽聞 nike 球鞋堆成山的景鉅學長、話不多但句句實在且號稱近幾屆最猛的彥廷學長、平常很愛喇賽但需要幫忙時義不容辭的玫豪學長、打電動很激動但是其實是個好人的振傑學長、長的超級霹靂無敵像石志偉卻悶騷愛搞神秘的嘉裕學長、對網拍與合購特別熱衷的永欣學姊、愛看日劇且做事實在打球又猛的彥德學長、超會嘴砲但是電動超強的娘砲伯賢學長、講話誠懇做事實在剛毅木訥又認真執著的信譽同學、為了朋友兩肋插刀的陽光猛男老杜同學、總是默默做事超受系辦姐姐們歡迎號稱系辦之草的小嘉同學(一定要特別感謝小嘉常在我 miss 掉小事的時候提醒我以及幫助我，讓我免去很多會釀成大麻煩的問題)、不出聲則已一出聲就嚇死人而且是我雜事上的萬能小幫手

的振傑學弟、常被欺負卻從無怨言的一對活寶嘴砲俊儒以及小黑仔奐辰學弟(他們快要變成海綿寶寶與派大星了)，以及暑假剛進來就常被我使喚來使喚去的賢銘、pork、偉恩、老王、明勳與姿宏，隔壁研究室 418 與 419 眾學長學弟們，因為有你們我這兩年變得多彩多姿。

還要感謝以前成大的同學與學長們：吐司、凱俊、承翰、木蘭、牛雞、蠟螈、柏嫩、灌強、金貝、炫奇、GB、俞旭、佳賢、阿明、小倩、威霖、黑胖、政翰、士傑、虹汎等等，謝謝你們在遙遠的台灣各地，還是不時捎來溫暖的關心。這半年多答應你們要回去相聚，卻總是放你們鴿子，我一定會回去找你們的！

最後，要感謝我的父母做為我的後盾，讓我能無後顧之憂的完成我的學業，還要感謝女朋友在我寫論文這段期間，總是忍受我陰晴不定的情緒。還要感謝親愛的 OPEN，這兩年總是默默在房間等我，每每回到小房間看到總是上來跟我撒嬌，陪我度過每個夜晚，這兩年沒能好好照顧妳，希望妳在天上可以遇到更好的主人。

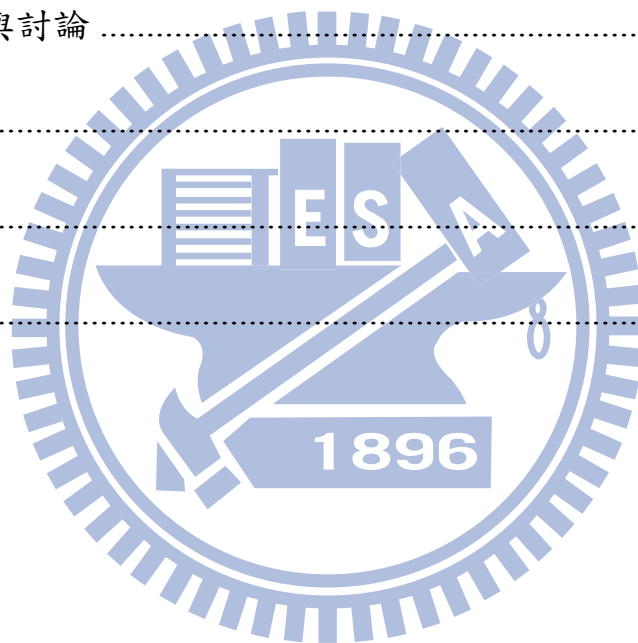
真的由衷的感謝所有幫助過我的、支持過我的每一個人，因為有你們，我才能順利度過人生中這種要的階段，謝謝你們。

小豪 九十八年八月 于竹塹

目錄

中文摘要.....	iii
ABSTRACT.....	iv
致謝.....	v
目錄.....	vii
圖目錄.....	ix
表目錄.....	xiii
符號說明.....	xiv
第一章 緒論.....	1
1-1 研究動機與目的.....	1
1-2 文獻回顧.....	2
1-3 文章架構.....	4
第二章 研究方法.....	7
2-1 資料來源.....	7
2-2 快速傅立葉轉換(FFT)與 Red noise 信賴水準.....	9
2-3 小波頻譜分析(Wavelet).....	11
2-4 經驗模態分解法(EMD)與希伯特－黃轉換(HHT).....	12
第三章 研究步驟與結果.....	17
3-1 決定發生氣象海嘯的時間.....	17

3-2 週期分佈特性	34
3-3 港池共振週期之影響	36
第四章 氣候因子與海嘯週期水位變化之關係	38
4-1 壓力、溫度與風速特性	38
4-2 壓力訊號與水位訊號之關係	44
4-3 陣風對氣象海嘯之影響	50
第五章 結論與討論	52
5-1 結論	52
5-2 討論	53
參考文獻	54



圖目錄

圖 1-1 (a)、(b)、(c)與(d)依序為 2006 年 6 月 15 日西班牙 Ciutadella 港 所發生氣象海嘯之照片記錄	1
圖 1-2 (a)為海嘯所產生之海水位振盪;(b)為氣象海嘯所產生之海水位 振盪(Monserrat et al.,(2006)).....	3
圖 1-3 1979 年 3 月 31 日觀測到之氣象海嘯現象.....	4
圖 2-1 中央氣象局潮位測站位置圖.....	7
圖 2-2 中央氣象局壓力測站位置圖.....	8
圖 2-3 海洋中水面波作用之頻譜 (見 http://preview.salemstate.edu/~lhanson/gls214/gls214_waves.html)..	9
圖 2-4 竹圍測站 2008 年 1 月 29 日原始水位(左)與濾除潮汐後(右)之 水位、FFT 與 Wavelet 頻譜.....	11
圖 2-5 竹圍測站 2008 年 1 月 29 日 EEMD 結果之白噪音測試	15
圖 2-6 由 EEMD 分解出竹圍測站 2008 年 1 月 29 日 之 IMF3-5 與對 應之 HH 頻譜.....	15
圖 3-1 各測站每月氣象海嘯的最大振幅區間.....	19
圖 3-1 (續).....	20
圖 3-2 台灣沿岸氣象海嘯振幅之時空分布.....	21
圖 3-3 台灣沿岸氣象海嘯發生次數之時空分布.....	21

圖 3-4 2008 年 1 月 17-19 日氣象海嘯的週期時序列	24
圖 3-5 2008 年 1 月 29-30 日氣象海嘯的週期時序列	25
圖 3-6 2009 年 3 月 5-6 日氣象海嘯的週期時序列.....	26
圖 3-7 2008 年 7 月 27-29 日氣象海嘯的週期時序列	27
圖 3-8 2008 年 1 月 17-18 日的小波頻譜.....	28
圖 3-9 2008 年 1 月 29-30 日的小波頻譜.....	29
圖 3-10 2009 年 3 月 5-6 日的小波頻譜.....	30
圖 3-11 2008 年 7 月 27-29 日的小波頻譜.....	31
圖 3-12 季風產生之氣象海嘯在東部測站之相位差.....	32
圖 3-13 (a)冷鋒在新竹(HS)、台北(TP)、基隆(KL)、蘇澳(SA)與花蓮(HL) 之壓力時序列；(b)冷鋒所產生之氣象海嘯在竹圍港(JU)、台北港 (TP)、基隆港(KL)、蘇澳港(SA)與花蓮港(HL)之海水位振幅時序 列；(c)冷鋒壓力之相位移動速度(實線)與產生之氣象海嘯相位移 動速度(虛線).....	33
圖 3-14 竹圍、台北、麟山鼻與基隆測站 在四個時段內氣象海嘯的週 期分布.....	35
圖 3-15 龍洞、烏石、蘇澳與花蓮測站 在四個時段內氣象海嘯的週期 分布.....	35
圖 3-16 成功、後壁湖、小琉球與東港測站 在四個時段內氣象海嘯的	

週期分布	36
圖 3-17 港灣共振週期(T_r)與氣象海嘯主要週期(T_m)之散佈圖	37
圖 3-18 週期比(T_m/T_0)與最大水位變化($\text{Max Var.}\eta$)之散佈圖	37
圖 4-1 四現象區間(a) 2008/1/17-18、(b) 2008/1/29、(c) 2009/3/5-6 與(d) 2008/7/28-29 各測站之壓力逐分時序列	39
圖 4-2 四現象區間(a) 2008/1/17-18、(b) 2008/1/29、(c) 2009/3/5-6 與(d) 2008/7/28-29 各測站之 FFT 頻譜	40
圖 4-3 四現象區間(a) 2008/1/17-18、(b) 2008/1/29 與(c) 2009/3/5-6 各 測站扣除 2 小時趨勢之壓力逐分時序列	41
圖 4-4 四現象區間(a) 2008/1/17-18、(b) 2008/1/29、(c) 2009/3/5-6 與(d) 2008/7/28-29 各測站之溫度逐分時序列	42
圖 4-5 四現象區間(a) 2008/1/17-18、(b) 2008/1/29、(c) 2009/3/5-6 與(d) 2008/7/28-29 各測站之風速逐時時序列	43
圖 4-6 (a)竹圍測站	45
圖 4-6 (b)台北測站	45
圖 4-6 (c)基隆測站	46
圖 4-6 (d)蘇澳測站	46
圖 4-6 (e)花蓮測站	47
圖 4-6 (f)成功測站	47

圖 4-6 (g)後壁湖測站	48
圖 4-6 (h)東港測站	48
圖 4-7 各測站每小時平均壓力與水位變化之散佈圖與相關係數.....	49
圖 4-8 蘇澳(SA)、花蓮(HL)與成功(CG)氣象站在(a) 2008/1/17-18、(b) 2008/1/29 與(c) 2009/3/5-6 三現象區間之陣風時序列	51



表目錄

表 1-1 世界各地觀測到之氣象海嘯之波浪週期與最大振幅	2
表 3-1 FFT 與 Red noise 篩選出之現象點	17
表 3-2 海嘯水位大小分級	22
表 3-3 小波頻譜各測站氣象海嘯主要週期	23



符號說明

- CWT : 連續小波轉換
- IMF : 本質模態函數
- HHT : 希伯特－黃轉換
- $\Delta\eta$: 振幅
- T_r : 港池共振週期
- T_m : 氣象海嘯現象主要週期
- T_0 : 港池共振第一共振模態
- l : 港灣特徵長度
- RMS : 均方根
- R^2 : 相關係數平方



第一章 緒論

1-1 研究動機與目的

海中地震活動，火山爆炸，海底滑坡或隕石撞擊海面所產生之週期波浪稱為海嘯(Tsunami)。海嘯在海洋的傳播速度大約每小時五百到一千公里，而相鄰兩個浪頭的距離也可能遠達 500 到 650 公里，且當海嘯波進入大陸棚後，由於深度變淺，波高突然增大，因此會對沿海地區的結構物造成破壞，並可能造成的生命財產的損失。而當氣象因子變動，其所產生之週期與振幅與海嘯類似之週期波則被稱之為氣象海嘯(Meteo-tsunami)，其所造成之影響也與海嘯類似。

氣象海嘯所造成之破壞性，並不亞於地震海嘯。Monserrat et al. (2006)指出 2006 年 6 月 15 日西班牙 Ciutadella 港所觀測到之氣象海嘯記錄示如圖 1-1，由圖 1-1 可知氣象海嘯對沿海的破壞力極為可怕且無預警，當次現象造成 Ciutadella 港內船隻損壞超過 40 艘，經濟損失數百萬歐元，在現象發生當時並無任何地震發生報告，為氣壓跳動所造成之氣象海嘯。



圖1-1 (a)、(b)、(c)與(d)依序為2006年6月15日西班牙Ciutadella港所發生氣象海嘯之照片記錄

台灣為一海島型國家。地質位置位於板塊的交界上。其中東南方有菲律賓海板塊，西北方則是歐亞板塊。這兩個板塊的邊界從北方的琉球海溝劃過臺灣，向南延伸到馬尼拉海溝。正因此特殊地質條件，臺灣每年有近千次的有感地震，5 級以上的地震年年發生。

另外台灣位於太平洋與歐亞大陸之交界，因此冬天時期常有大陸冷氣團與太平洋暖氣團，二者之界面稱為鋒面(Front)。在鋒面處之溫度、陣風與壓力有明顯變化，因此產生對台灣周圍海象之影響。台灣同時具備了海嘯與氣候海嘯之形成因素，因此在台灣沿海之海水位訊號中，就時常包含有海嘯週期長波。其中氣候因素所引起之氣象海嘯就是本研究的重要課題。

1-2 文獻回顧

Monserrat et al. (2006)整理分析海嘯週期長波時，發現了另一種與海嘯類似之海水位振盪，其週期、波長與振幅皆與一般海嘯相似，示如圖1-1。這些破壞性海浪與任何地震活動，火山爆炸，海底滑坡或隕石的影響無關，但與大氣外力（大氣重力波，壓力跳動，鋒面通過，陣風等）有關，往昔學者指出相關之結果，如 Defant (1961), Hibiya and Kajiura (1982), Rabinovich and Monserrat (1996,1998)。

因氣象所產生有長週期海嘯波，在世界各地都被觀測到，不同地區有不同名稱，在巴利阿裏群島稱為“rissaga”（見Fontseré (1934), Ramis and Jansá (1983), Tintoré et al. (1988), Monserrat et al. (1991)），在西西里島稱為“marubbio”（見Colucci and Michelato (1976), Candela et al. (1999)）；在馬爾他稱為“milghuba”（見Airy (1878), Drago (1999)）；在日本長崎灣稱為“abiki”（見Honda et al. (1908), Akamatsu (1982), Hibiya and Kajiura (1982)），以及波羅地海稱為“Seebär”（見Defant (1961), Metzner et al. (2000)）。往昔曾經觀測有記錄之結果如表1-1之統計。在學術上建議將上述現象稱為氣象海嘯(meteotsunami)，如 Nomitsu (1935), Defant (1961), Rabinovich and Monserrat (1996,1998), Bryant (2001), Vilibić,(2005), González et al. (2001)。

表1-1 世界各地觀測到之氣象海嘯之波浪週期與最大振幅

City	Country	Max. η (m)	Typical period
Nagasaki Bay	Japan	4.8	35 min
Pohang Harbour	Korea	> 0.8	25 min
Ciutadella Harbour	Spain	> 4	10.5 min
West Sicily	Italy	1.5	14.6 min
Malta	Malta	1	~ 20 min

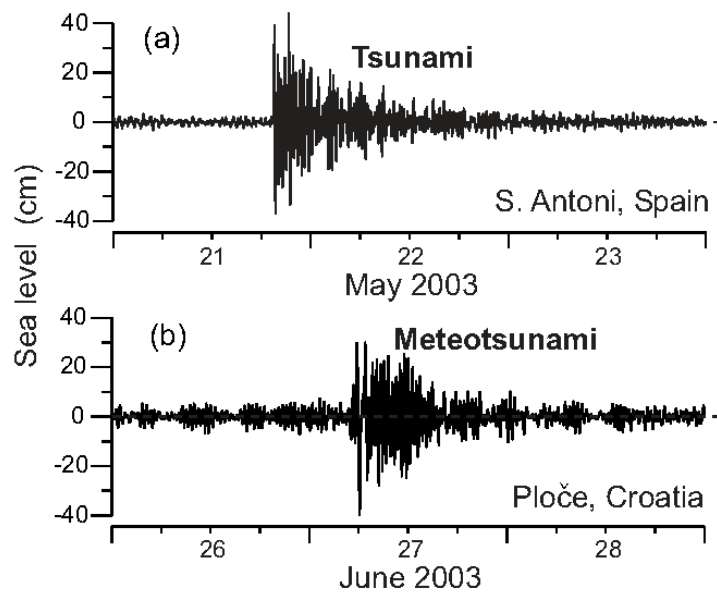


圖1-2 (a)為海嘯所產生之海水位振盪；(b)為氣象海嘯所產生之海水位振盪(Monserrat et al.,(2006))

圖1-2(a)為Monserrat et al. (2006)在西班牙所量測到之海嘯訊號與圖1-2(b)為在克羅地亞量測到之氣象海嘯訊號，二者比較發現這兩種海嘯訊號有相似的週期、波長與振幅。表1-1為世界各地所觀測到較明顯之氣象海嘯現象，觀測到氣象海嘯現象之振幅為1-4公尺，海水位訊號主要週期為10-35分鐘，詳細氣象海嘯事件之統計見Monserrat et al. (2006)。

Honda et al. (1908)與Nakano和Unoki(1962)調查日本沿岸超過100海灣和港口發現大的水位振盪(seiche)只發生在少數地區；而較重大的現象通常發生之地形條件為細長、入口淺窄或者為海灣，此與Miles和Munk(1961)之理論相符合。Hibiya與Kajiur(1982)觀察了長崎灣強烈的水位振盪，並以1979年3月31日現象說明氣象海嘯之生成機制，如圖1-3所示。當原始壓力差異變化僅為3百帕(hPa)，由靜水壓計算可產生振幅為3公分之長波($\Delta h = \Delta P/\rho g$)，在傳遞過程中首先經由普勞德曼共振(Proudman resonant effect)，即波速與風速接近時產生共振效應，可將波浪振幅放大約5倍至16公分，當波浪進入大陸棚時，則因淺化效應波浪振幅再放大約3倍，達到45公分，若此長波傳入港內，再因港灣共振放大至478公分。

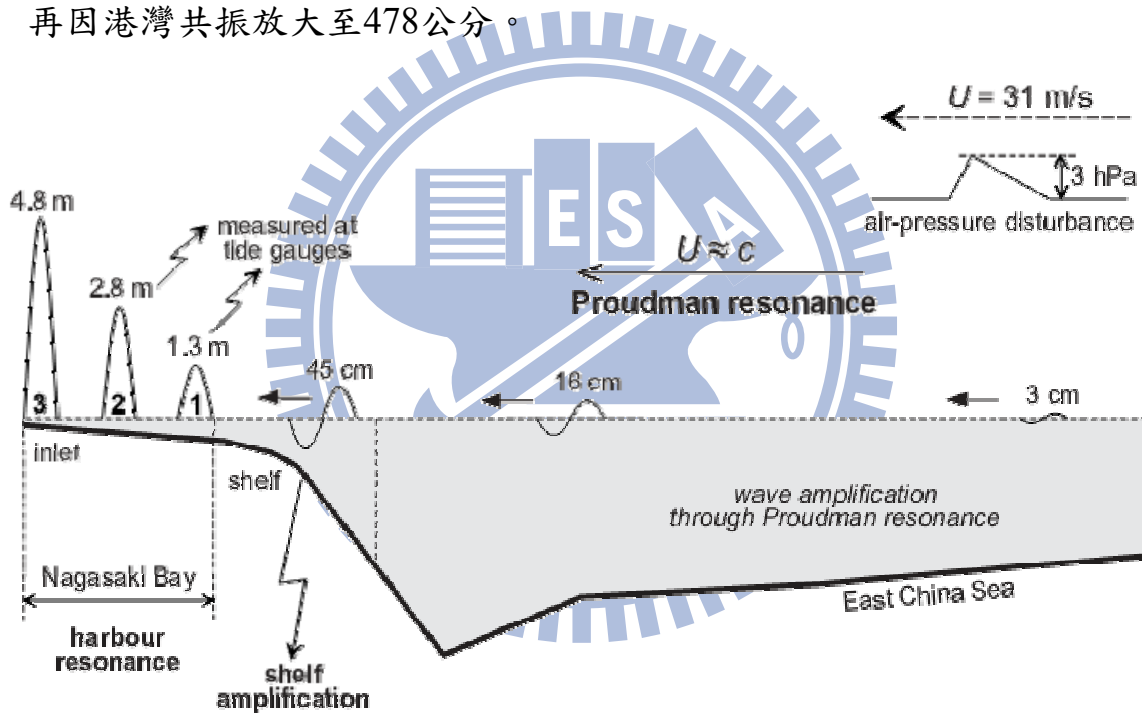


圖1-3 1979年3月31日觀測到之氣象海嘯現象

1-3 文章架構

本文分析台灣沿岸海水位變化，找出屬於海嘯週期長波之現象點及現象發生時之水位變化量。並分析氣象因素所產生之氣象海嘯與誘發外力之關係。以下分章節說明本文分析氣象海嘯對台灣沿海水位變化之影響之過程，與文章架構示意圖。

第一章：

說明研究氣候因素影響台灣周圍海岸海嘯週期長波之起源與目的。其中前人研究提到關於氣候因素影響海嘯週期長波之文獻回顧及說明。

第二章 研究方法：

本章首先說明資料來源與資料特性，以及台灣周圍海象特性。以及對於潮位資料處理步驟。接著引用訊號分析上常用之方法分析潮位訊號之週期特性。本研究使用之訊號分析方法如下：(1)首先使用訊號分析上最常使用之FFT以及Rednoise信賴水準分析；(2)接著以Wavelet觀察訊號之”能量－頻率－時間”頻譜；(3)最後以可適用於分析非線性及非周期性訊號之EEMD分析之。進而比較以上三中方法分析訊號之結果。

第三章 研究步驟與結果：

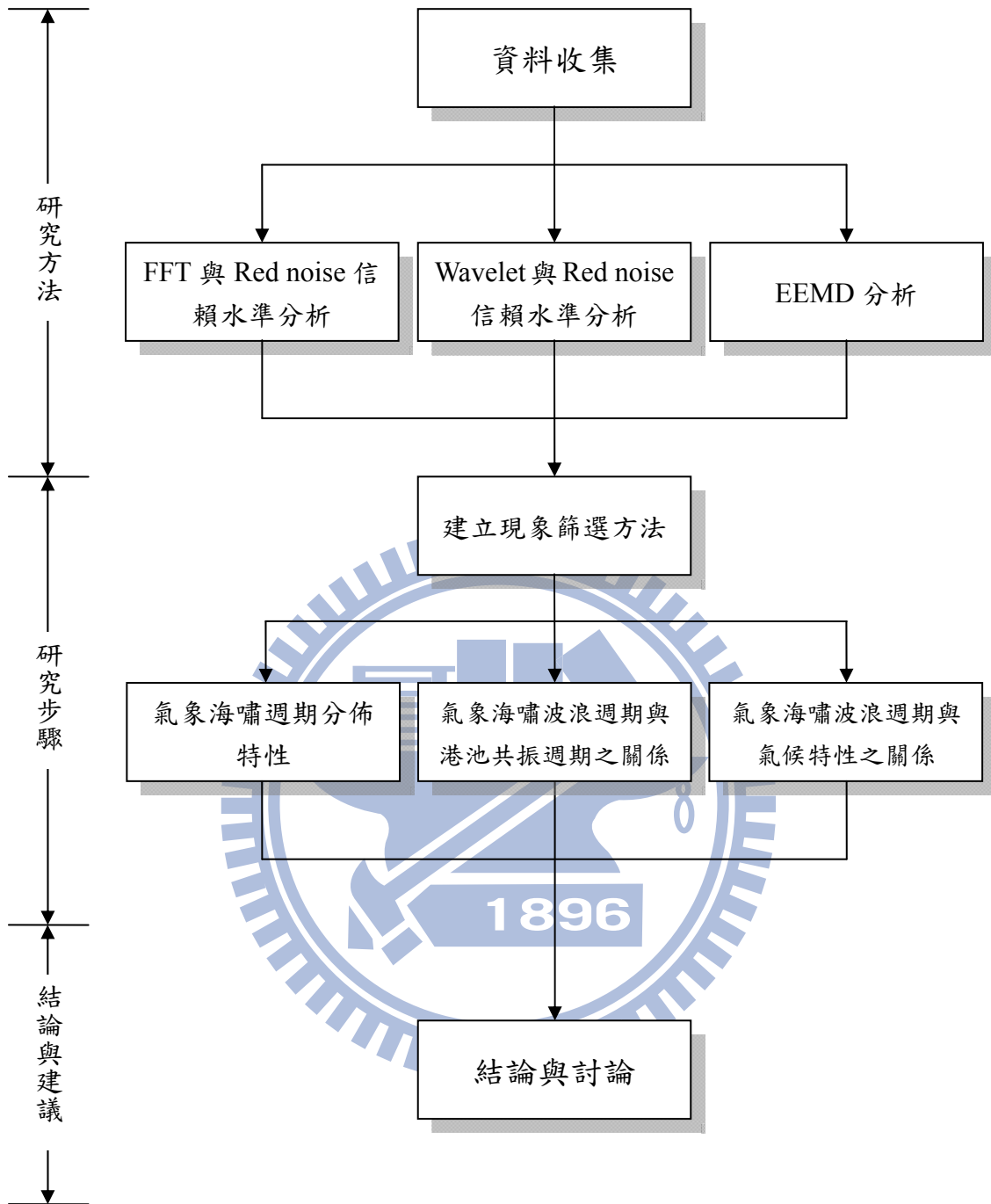
本章節引用第二章之結果首先建現象篩選之標準，對於篩選出之現象分析其現象之強弱與造成之水位變化大小，以及現象發生之時間與空間分布特性。接著挑出現像強烈之現象點分析以下兩點：(1)氣象海嘯之週期分佈特性。(2)氣象海嘯波浪週期與港池共振週期之關係。

第四章 氣候因子與海嘯週期水位變化之關係：

本章收集各項氣候因子壓力、溫度與風速，並分析氣象海嘯現象發生時之氣候因子之變化。進而分析壓力變化與氣象海嘯水位變化之關係。

第五章 結論與討論：

最後一章則簡述說明本研究之結論。



第二章 研究方法

2-1 資料來源

本研究收集台灣周邊 12 個測站的潮位資料，由西北部起依順時鐘為竹圍(JU)、台北(TP)、麟山鼻(LS)、基隆(KL)、龍洞(LD)、烏石(WU)、蘇澳(SA)、花蓮(HL)、成功(CG)、後壁湖(HO)、東港(DO)及小琉球(SL)，其中括號為英文地點之縮寫，其位置示如圖 2-1。圖 2-1 可看出海底地形，東部海域近岸水深超過 2000 公尺，東北部有沖繩海槽及琉球海弧，台灣南部則有恆春海脊；而台灣西南海岸恆春一帶水深由 1000 公尺逐漸變淺至安平一帶水深小於 200 公尺；而西部海岸由安平至基隆附近海域海底深度皆未達 200 公尺。整體來說，台灣東部最深，西北部最淺，西南及東北部之地形由深變淺。

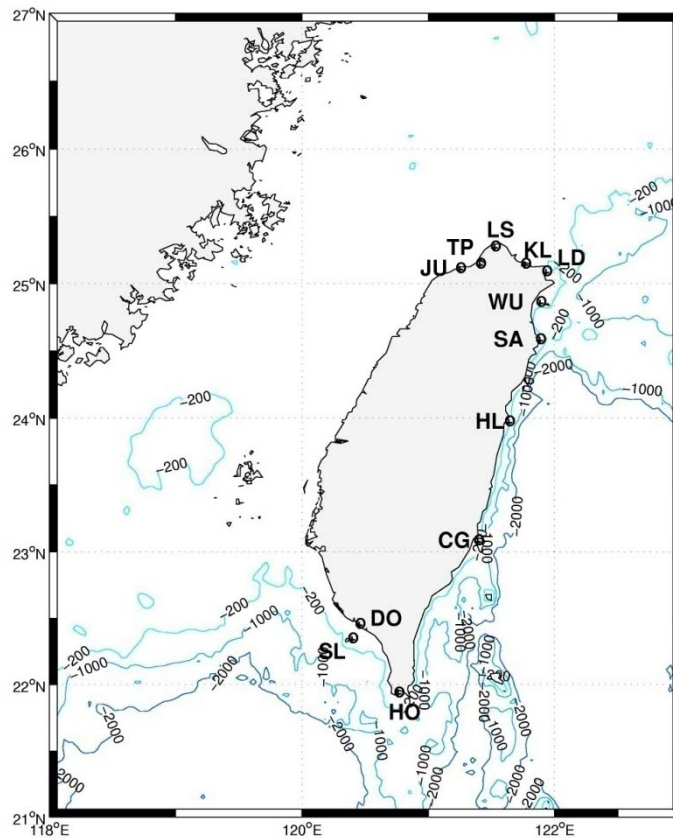


圖2-1 中央氣象局潮位測站位置圖

潮位資料長度為 2008 年 1 至 9 月及 12 月、2009 年 1 至 6 月共計 15 個月之資料。原始資料取樣頻率為每秒一筆，為了提高量測訊號之信噪比，對原始資料取 15 秒平均以減少高頻信號，因此每天共

取 5760 筆資料。潮汐水位資料來源為中央氣象局潮位站。

依照中央氣象局颱風統計資料，2008 年影響台灣之颱風共計 4 個，依序為卡玫基(Kalmaegi)、鳳凰(Fung-Wong)、辛樂克(Sinlaku)與薔蜜(Jangmi)。但因除了鳳凰颱風以外，另外三個颱風影響其間之各站潮位資料皆有嚴重缺漏，固本研究只取鳳凰颱風期間觀測颱風對長週期水位變化之影響。鳳凰颱風之路徑與影響時間示如圖 2-1。

除潮位資料外，為驗證大氣因素對本研究海水位變化之影響，另收集中央氣象局地面壓力測站資料共八個，由西北部起依順時鐘新竹(HS)、台北(TP)、基隆(KL)、蘇澳(SA)、花蓮(HL)、成功(CG)、後壁湖(HO)與高雄(KH)等 8 個測站，示如圖 2-2。取樣密度為每分鐘一筆。

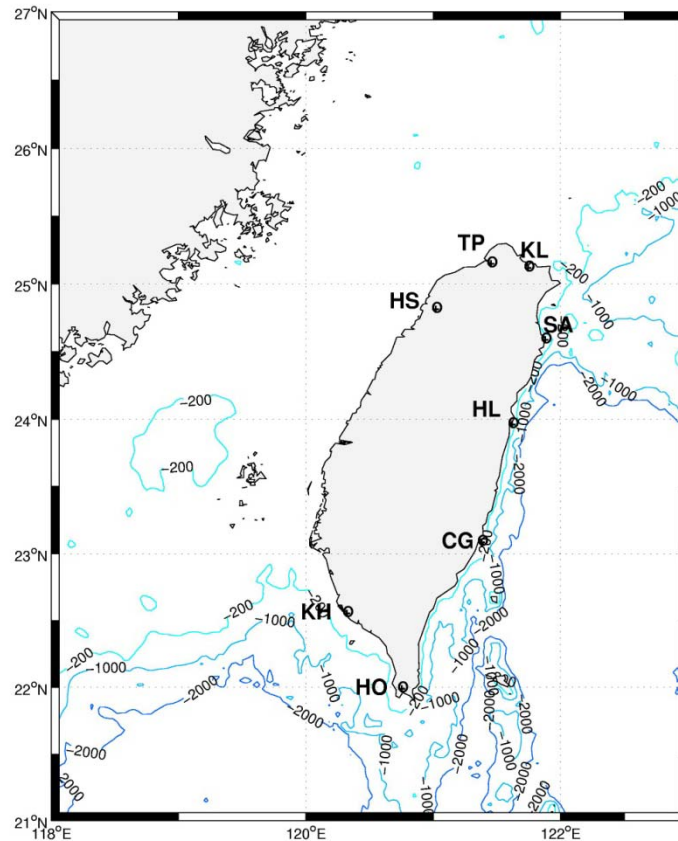


圖2-2 中央氣象局壓力測站位置圖

2-2 快速傅立葉轉換(FFT)與 Red noise 信賴水準

由於海洋中的水面波含有不同週期成分的波浪，各種週期之波浪特性與產生波浪之外力因素有所差別，其中最常週期之波浪為潮汐，示如圖 2-3。一般半日潮週期約為 12 小時 25 分鐘，而全日潮約為 24 小時 50 分鐘。因此在分析海嘯週期之海水位的變化特性時，首要工作就是過濾潮汐週期之波浪，為了能較準確的分析觀測之波浪訊號的週期分佈，本文選用一般最常被使用的快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT)。FFT 可以簡單的且快速的求得觀測信號之“能量—頻譜”如圖 2-4 所示。圖 2-4(a)之黑色粗線為原始水位扣除一階線性趨勢之 FFT 頻譜；由圖 2-4(a)可發現，竹圍站之海水位有兩個明顯的週期波，一為 10 至 60 分鐘週期波，另一為 200 分鐘以上週期之天文潮。由此將圖 2-4(c)之水位資料濾除三小時以上週期之水位變化可得到扣除潮汐影響之水位訊號如圖 2-4(d)。接著將扣除潮汐影響之水位經由 FFT 可得到其頻譜圖 2-4(b)；由圖 2-4(b) 可明顯看到扣除後僅剩下 10 至 60 分鐘週期之海水位訊號。

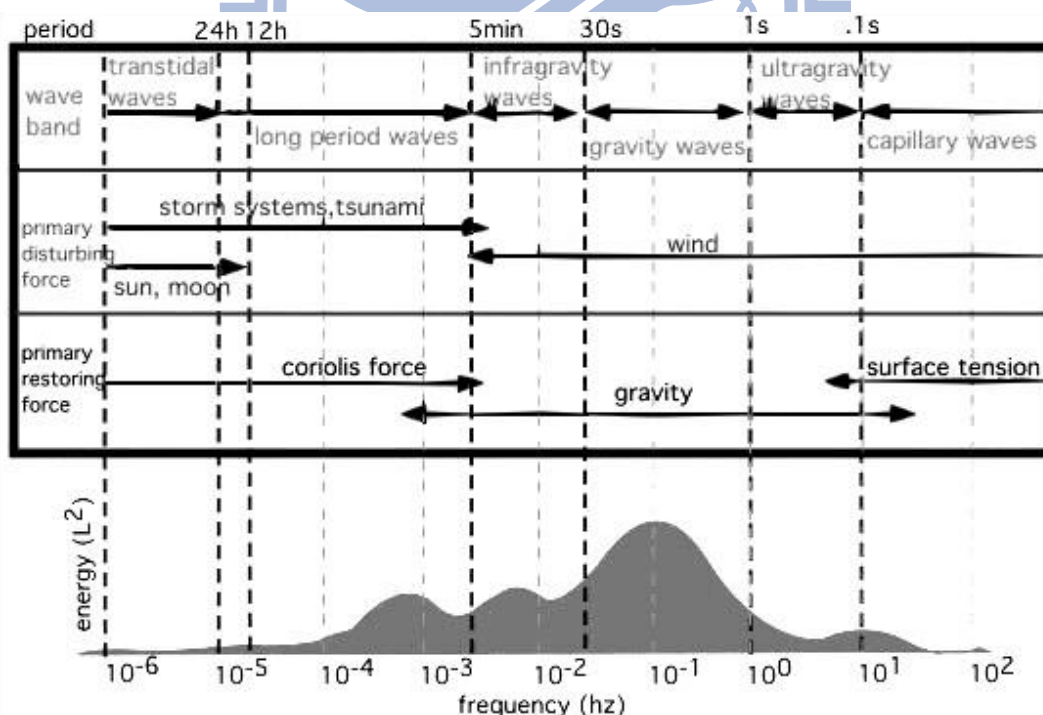


圖2-3 海洋中水面波作用之頻譜

(見http://preview.salemstate.edu/~lhanson/gls214/gls214_waves.html)

圖2-4(a)(b)之傅立葉能量頻譜(Fourier Spectral)雖然可以明顯看出2008年1月29日竹圍測站在10至60分鐘與200分鐘以上之週期有明顯大的能量，但卻無法有一個標準來判斷能量大小的準則，Gilman et al.(1963)首先在頻譜中引入Red noise，對多數地球物理訊號而言，適當之背景頻譜不是white noise就是red noise (Christopher和Gilbert (1998))。white noise是指能量平均分佈在各個頻域上，而red noise是指能量與週期成反比的訊號。Hasselmann (1976)證明一階自回歸過程 [First order Autoregressive process, AR(1)]可代表氣候上之Red noise。因此Christopher和Gilbert(1998)引入一階自回歸過程建立能量頻譜之信賴水準。此原理是模擬出背景頻譜，再以原始訊號之頻譜與此背景頻譜做比較。而AR(1)就是一個簡單模擬red noise的方法，其方程式如式(2-1)與(2-2)所示：

$$r(t_i) = \rho_i r(t_{i-1}) + \varepsilon(t_i) \quad (2-1)$$

$$\rho_i = \exp(-(t_i - t_{i-1})/\tau) \quad (2-2)$$

其中定義 τ 為AR(1)的特徵時間尺度， ρ 為平均自相關係數， ε 為white noise。符合式(2-1)時域之頻譜為(Percival 和 Walden, (1993))：

$$G_{rr} = G_0 \frac{1-\rho^2}{1-2\rho \cos(\pi f_j/f_{Nyq})+\rho^2} \quad (2-3)$$

其中 f_{Nyq} 表示 Nyquist 頻率， f_j 為一近似於 f_{Nyq} 之離散頻率， G_0 為平均頻譜振福。

圖 2-4 (a)(b)中虛線、折線、點線分別為 AR(1)所模擬背景頻譜之 99%、95%、90%信賴水準。經由此信賴水準，就可以明顯區隔不同週期所對應之能量相對於其背景頻譜而言是否顯著。由圖 2-4 (a)可看出，天文潮與 10-60 分鐘週期之水位變化皆明顯高過 99%信賴水準(虛線)。

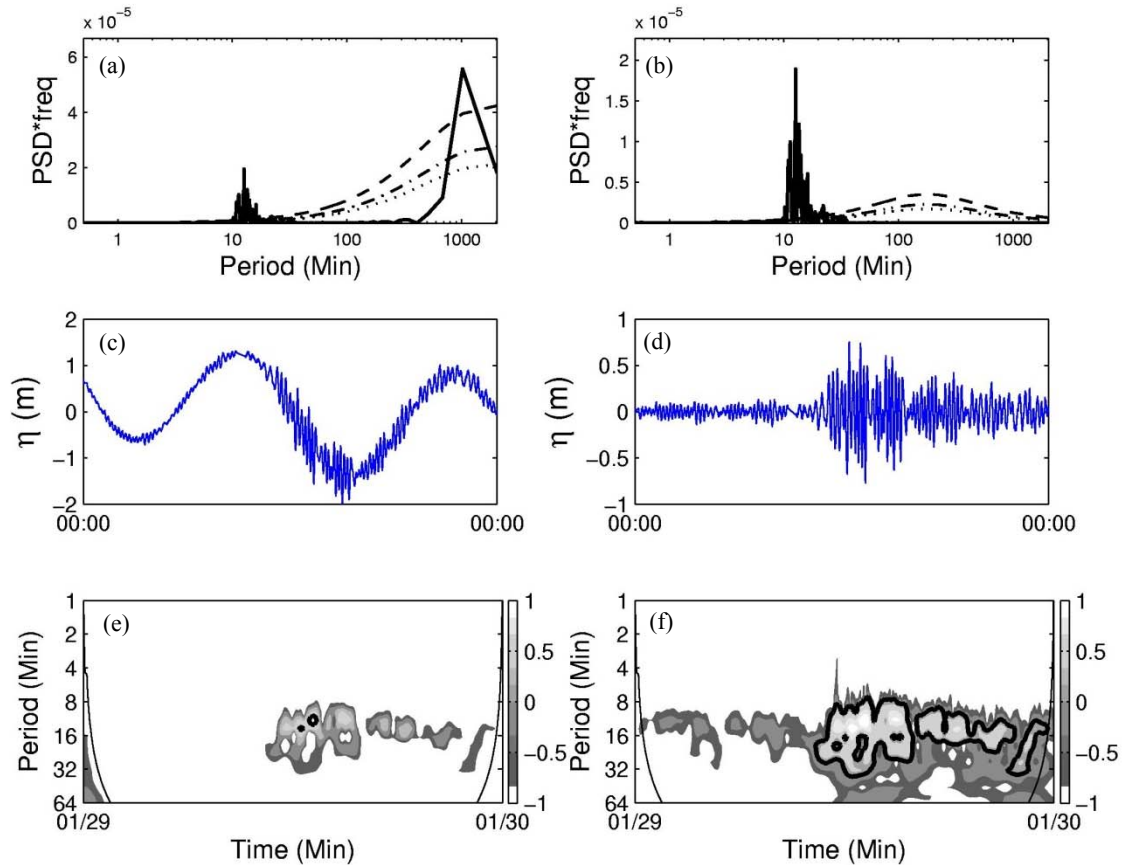


圖2-4 竹圍測站2008年1月29日原始水位(左)與濾除潮汐後(右)之水位、FFT與Wavelet頻譜

2-3 小波頻譜分析(Wavelet)

傅立葉頻譜雖然可以簡單又快速的找出海水位訊號之週期分佈特性，但它還是有些限制條件，如系統必須是線性的、資料必須是週期性(periodic)與定常性(stationary)。且其僅能展現能量與頻率之對應關係，而無法同時展現能量與頻率之時變性；因此本文使用連續小波轉換(Continuous Wavelet Transform, CWT)來表示能量與頻率之時變性。

在數學定義上，一個有時間性質且可積分的函數 $x(t)$ 可以用積分式(2-3)來表示：

$$X_{(a,b)} = \frac{1}{\sqrt{|(b)|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-a}{b}\right) dt \quad (2-3)$$

其中， $\Psi(t)$ 為小波母函數(Mother Wavelet)，指在時域與頻域皆連續之函數； a 為平移位置而 b 為縮放因子。小波母函數的用途在於提供

一個可以產生子波(Daughter Wavelet)的根源函數，而子波是小波母函數平移過或縮放過的版本。而時序列 $x(t)$ 與小波 ψ 之連續小波轉換(CWT)則定義為：

$$W_{x,\psi}(s, t) = x(t) * \psi_s(t) \quad (2-4)$$

其中， t 為時間； s 為小波週期特性之線性關係； ψ_s 為尺度 s 之小波。則小波之能量為 $|W_{x,\psi}|^2$ 。連續小波轉換(CWT)可將時序列 $x(t)$ 分解成”能量—頻率—時間”頻譜，可以同時看出變異的主要週期區間以其週期區間隨時間變化之特性。圖 2-4(e)(f)分別為扣除一階線性趨勢與扣除天文潮之海水位訊號時序列經由 CWT 所得之頻譜，橫軸為時間序列軸；縱軸為時間軸對應訊號之週期；色塊表示標準化後之能量大小。圖中黑色粗線所框出能量大於背景訊號 95% 信賴水準之範圍。

2-4 經驗模態分解法(EMD)與希伯特—黃轉換(HHT)

雖然小波分析較傅立葉轉換可以看出更多資料所含之特性，然而小波分析法仍由傅立葉頻譜分析法的一些假設基礎上推論而來，仍具有原方法的限制，系統必須是線性，且資料必須是週期性(periodic)或是定常性(stationary)的。

為了突破傅立葉分析法之限制，Huang et al. (1998)發表了一個新的資料處理法：經驗模態分解法(Empirical Mode Decomposition, EMD)。EMD 能直接擷取出原始訊號中不同時間尺度的能量，將資料以一組本質模態函數(Intrinsic Mode Function, IMF)來表達，此方法可以看作將原始訊號展開成各 IMFs，將 IMF 經由希伯特轉換得到區域能量及即時頻率後，就能求得整個訊號的”能量—頻率—時間”分佈稱為希伯特頻譜(Hilbert Spectrum)，而將資料經過 EMD 分解成 IMFs 再轉換成希伯特頻譜的方法稱為希伯特—黃轉換(Hilbert—Huang Transform method, HHT)。Huang et al. (1998)首先定義了 IMF 必須滿足下列條件：(1)在整份資料中極值得總數必須與跨越零點(zero-crossing)的數目相等或是最多只能差一個。(2)在資料的任一點上，極大值得包絡線(maxima envelope)及極小值包絡線(minima envelope)的平均包絡線(mean envelope)必須為零。

將本研究之原始訊號由以下的篩選過程(Sifting Process)來分解出各 IMF。首先找出水位訊號中局部極大值並利用內差法(Cubic Spline)求得上包絡線，再找出局部極小值且利用內差法求得下包絡線，所有的水位訊號應該都在上下包絡線之間，而上下包絡線的平均稱為 $m_1(t)$ ，原始信號 $X(t)$ 與 $m_1(t)$ 的差為第一個成分 $h_1(t)$ 如式(2-5)：

$$X(t) - m_1(t) = h_1(t) \quad (2-5)$$

此時如果 $h_1(t)$ 未能符合 IMF 的基本條件，則必須再以 $h_1(t)$ 繼續 Sifting Process，計算如下式(2-6)：

$$h_1 - m_{11} = h_{11} \quad (2-6)$$

並重複計算直到第 k 次式滿足 IMF 條件式(2-8)：

$$h_{1(k-1)}(t) - m_{1k}(t) = h_{1k}(t) \quad (2-7)$$

$$SD = \sum_{k=0}^T \frac{|h_{1k} - h_{1(k-1)}|^2}{h_{(k-1)}^2} \quad (2-8)$$

不斷重複 Sifting Process 直到 $h_i(t)$ 符合 IMF 之基本條件，根據 Huang(1998)建議 SD 值的範圍約在 0.2-0.3 間，當 SD 滿足 0.2-0.3 時，則令 IMF 的第一個分量 C_1 即等於 h_{1k} 。整體來說， C_1 是原始訊號中波長最小且週期最短的訊號，接著將原始訊號 $X(t)$ 減去 C_1 得到餘數(residue) $r_1(t)$ 。因為此時之 $r_1(t)$ 仍包含了許多不同週期之訊號，因此持續上述的篩選過程以得到各個 IMF。持續不斷使用篩選過程去分解原始資料直到餘數 $r_n(t)$ 成為一個常數、單調函數(monotonic function) 或單一週期函數為止，此時之餘數 $r_n(t)$ 可以當作原始水位訊號之均值趨勢。且如果將每一個 IMF 相加並加上最後的餘數 $r_n(t)$ 便可以得到原始水位訊號：

$$X(t) = \sum_{i=1}^n C_i + r_n(t) \quad (2-9)$$

EMD 之方法雖好，但根據 Wu 和 Huang (2004) 提出基於訊號的分解，EMD 所解出的各模態會有模態混合(mode mixing)情況，模態混合是指在一個 IMF 裡有不同尺度的訊號混雜，或是同一尺度的訊號出現在不同的 IMF 裡。模態混合的發生，主要原因是因為某些系

統訊號的發生非連續分佈。而模態混合的現象會使訊號的 time-frequency 分佈造成偏差(aliasing)，使得分解出之 IMF 失去物理意義。為了避免模態混合的發生，Wu 和 Huang (2005)利用白噪音(white noise)的特性，對 EMD 進行修正，發展出 Ensemble EMD(簡稱 EEMD)的方法。EEMD 的原理是將原始訊號加上白噪音後再做 EMD，白噪音經由傅立葉轉換後會發現其能量是均勻分布在頻域上，將白噪音加入原始訊號後，由於其訊號會均勻分布在每個 component 上，就像背景(background)一般，原始訊號就會被分解到適當頻率的 component 中。重複此步驟，把原始訊號分別加上不同的白噪音，並且經由 EMD 產生許多組的 IMFs。再將對應的 IMF 分別平均，由於白噪音在統計上之特性，當數量夠多時白噪音會和自己本身平均使用的 noise 值變小，noise 的衰減幅度可以下列公式推估：

$$\varepsilon_n = \frac{\varepsilon}{\sqrt{N}} \quad (2-10)$$

N 為 Ensemble number， ε 為所加入 noise 之振幅， ε_n 為平均後之 standard deviation of error，由此可知當 N 足夠大時，noise 值會變很小，留下的訊號可以是為原始訊號。根據 EEMD 方法，定義真值是當 N 為無窮大時之平均值。EEMD 方法分解訊號無需主觀上尺度的選擇，即可將訊號分解具有自然振盪的尺度(Wu 和 Huang, (2005,2008))。

為確認由 EEMD 所分解的各分量是否具有特徵性，本研究依據 Wu 和 Huang (2004)所提的白噪音(white noise)特徵性測試，來檢驗被分解的 IMF 時序是否通過信賴度水準而具有特徵性。以竹圍測站 2008 年 1 月 29 日之水位訊號進行白噪音特徵性檢驗，示如圖 2-5。圖 2-5 中星點為各 IMF 的平均週期及平均能量的分佈圖，圖中兩線段分別為 99%及 95%的信賴水準；黑圈所標出之 IMF3-5 皆通過 99%之信賴水準。由此顯示經由 EEMD 所分解出的時序列具有特徵性。

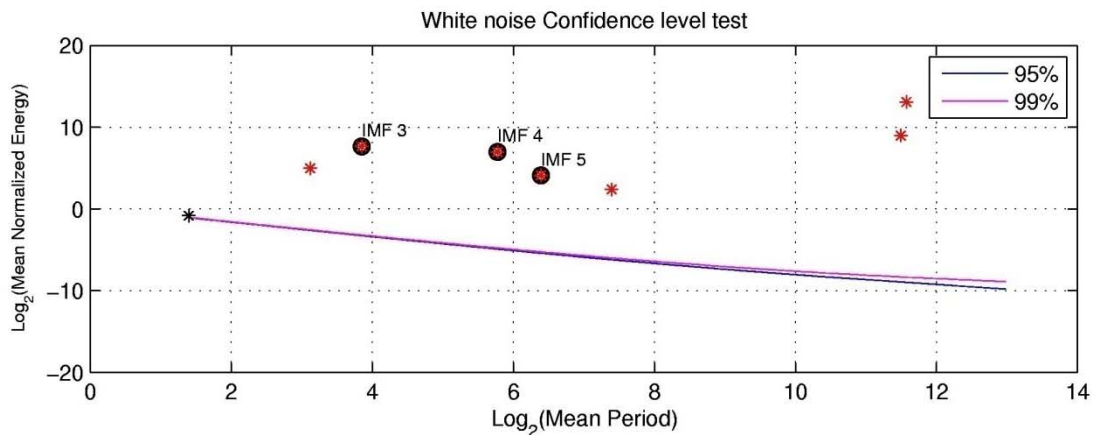


圖2-5 竹圍測站2008年1月29日EEMD結果之白噪音測試

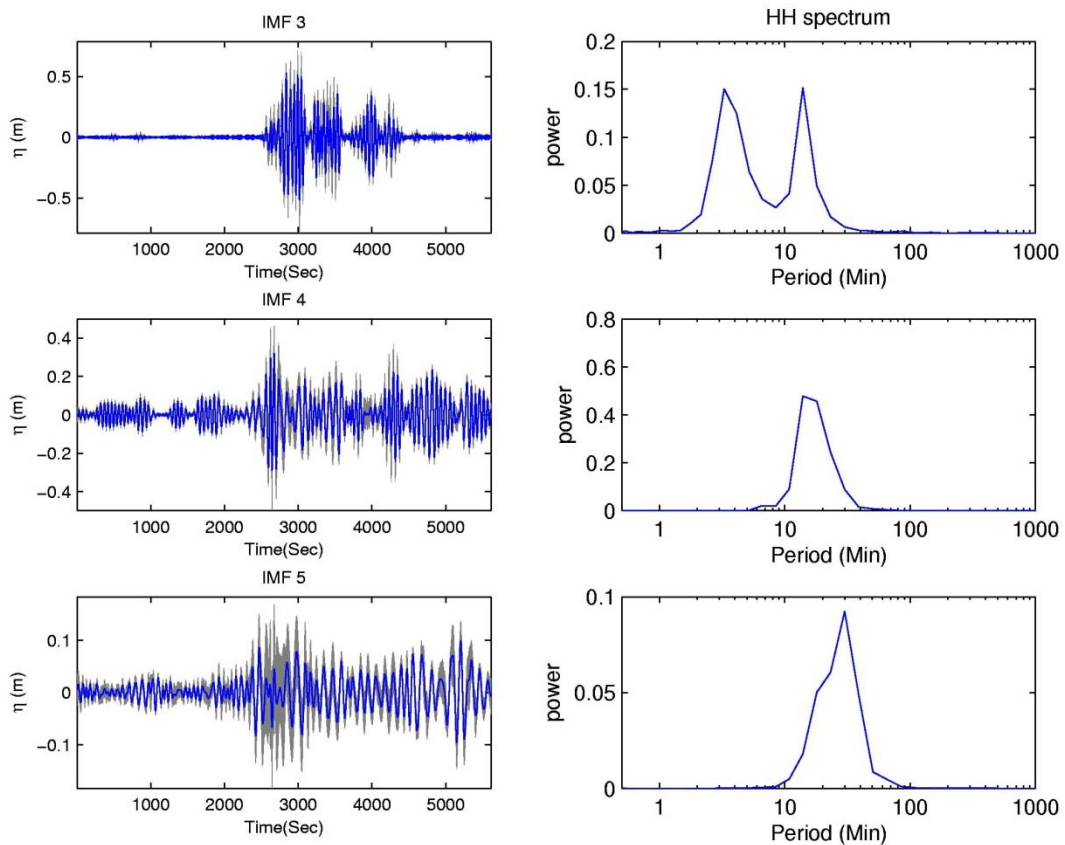


圖2-6 由EEMD分解出竹圍測站2008年1月29日
之IMF3-5與對應之HH頻譜

圖 2-6 為竹圍測站 2008 年 1 月 29 日經由 EEMD 分解之結果。左為分解出之 IMF3-5，右為與之對應之 HH 頻譜。由 HH 頻譜可發現，IMF3-5 之訊號週期主要落在 10-60 分鐘之區間，且由圖 2-5 之白噪音信賴水準分析上可看出，IMF3-5 皆高於 99%信賴水準，為真實

存在之訊號，而非受 white noise 影響而產生之訊號。

2-5 FFT、Wavelet 與 EEMD 結果之比較

比較圖 2-4 (d)與(f)可發現 CWT 頻譜中，能量大於背景訊號 95% 信賴水準之時間區段，在海水位時序列圖 2-3(d)也有明顯的海水位振盪。由此可知，CWT 可同時看出”能量—頻率”與其在時間序列上之變化，較傅立葉頻譜利於觀察”能量—頻率”在時序列之變化特性。比較 FFT 與 CWT 之結果可發現，FFT 頻譜之優點在於便於區分出整筆信號不同週期對應能量之強弱；而 CWT 雖然較難區分整筆信號不同週期對應能量之強弱，但其優點在於便於看出能量之時序列變化，可以找出能量強烈之時間點。

且從圖 2-6 (左)之 IMF 訊號圖可看出，訊號週期分佈在 10-60 分鐘之 IMF3-5，其發生大幅度水位變化之時間點約在中午，此一結果與 Wavelet 頻譜上能量尖峰值之時間點相同；而由 IMF3-5 所對應之 HH 頻譜其所涵蓋之頻域也與 FFT 之結果相同為 10-60 分鐘。可知在本研究結果分析上，FFT 與 Wavelet 可以達到與 EEMD 相同之效果。

第三章 研究步驟與結果

3-1 決定發生氣象海嘯的時間

由第二章 FFT、Wavelet 和 EEMD 三種方法分析海水位訊號，首先確定研究的資料時段內產生之氣象海嘯現象時間點。本研究所收集台灣沿岸 12 測站的 16 個月之水位資料，分成逐日之潮位時序列，再將所有資料濾除 3 小時移動平均所代表之潮汐成分後，將濾除潮位成分後之海水位訊號由 FFT 及 Red noise 信賴水準分析篩選。逐日海水位訊號之 FFT 頻譜，若在海嘯週期區間(1-60 分鐘)之能量強度超過 99%信賴水準者，本研究定義為發生氣象海嘯現象的時間。

本文依上述方法將發生氣象確定海嘯現象之時間整理如表 3-1 之第一行，並收集中央氣象局氣象月報在相對應時間之氣象條件，如第二行，且國際海嘯資訊中心(International Tsunami Information Centre)在這些現象點發生之時，太平洋並無海嘯之現象。由表 3-1 所示外力因素可知，本文分析之海嘯為氣候因素所產生之氣象海嘯。

表3-1 由FFT與Red noise篩選出發生氣象海嘯現象點的時間及相對應
氣象因子

日期	外力因素	日期	外力因素
2008/1/16-17	東北季風	2008/7/16-18	颱風-卡玫基
2008/1/29-2/4	東北季風	2008/7/27-29	颱風-鳳凰
2008/2/23-24	鋒面	2008/9/12-15	颱風-辛樂克
2008/2/29-3/2	東北季風	2008/9/27-29	颱風-薔蜜
2008/3/17-18	鋒面	2008/12/28-30	鋒面及冷氣團
2008/4/2-3	鋒面	2009/1/17-26	鋒面及冷氣團
2008/4/11-15	鋒面	2009/3/5-7	鋒面
2008/4/27-5/1	鋒面	2009/3/17-24	鋒面及東北季風
2008/5/26-30	鋒面	2009/4/15-22	鋒面
2008/6/11-13	鋒面	2009/5/17-20	鋒面

將確定各站所有發生氣象海嘯現象之海水位訊號，經由帶通濾波(Band pass)在 10-60 分鐘週期內，即得到氣象海嘯週期長波之海水位訊號。圖 3-1 長條圖區間為氣象海嘯現象發生之時段內，每日水位振幅最大之區間，縱軸為海嘯週期水位變化量，橫軸為本文所收集之 16 個月時間。比較圖 3-1 各測站之時間軸可發現，除東部蘇澳、花蓮與成功測站七、八月有明顯受颱風影響外，氣象海嘯現象所產生較大海水位變化之時間大多在 1-3 月間。

接著將各測站由竹圍起順時針依序排列至東港為橫軸，每月為縱軸，每月之最大水位變化由色軸表示，如圖 3-2 所示。由圖 3-2 可看出與圖 3-1 相同時間分布結果，1-3 月較其他月份有明顯水位變化。且在圖 3-2 上，比較橫軸與色軸可發現，同時期北部之竹圍、台北、麟山鼻與基隆測站之水位變化，明顯大於東部蘇澳、花蓮與成功測站。這是因為產生氣象海嘯之外力因素為鋒面與冷氣團，而此二外力因素來源多為台灣北邊與西北邊，故導致台灣北邊與西北邊之測站有較大之海水位變化，此一結果也可由各測站發生氣象海嘯現象之次數圖 3-3 看出。圖 3-3 之色軸為每月各測站發生氣象海嘯之次數。除烏石港與後壁湖外，北部由竹圍起至基隆，在 1-3 月間發生海嘯之次數多在 10 次以上，而東部之蘇澳、花蓮與成功測站皆在 5 次以下。

表 3-1 已列出氣象海嘯現象時間，若將所有時間各測站之氣象海嘯之最大水位振幅除以各測站年平均潮差，即可得到相對海水位振幅，由相對海水位振幅之分級區分氣象海嘯現象強弱：當相對水位振幅大於 0.5 時，令其強度等級為 3；介於 0.3-0.5 之間時，等級令為 2；當相對水位振幅在 0.1-0.3 之間等級為 1；若相對水位振幅小於 0.1 時，等級為 0。各測點主要產生氣象海嘯之等級示如表 3-2。由表 3-2 可看出，海嘯現象出現等級 2-3 以上之時間點分別為 2008 年 1 月 17 日、2008 年 1 月 29-31 日以及 2009 年 3 月 6-7 日。

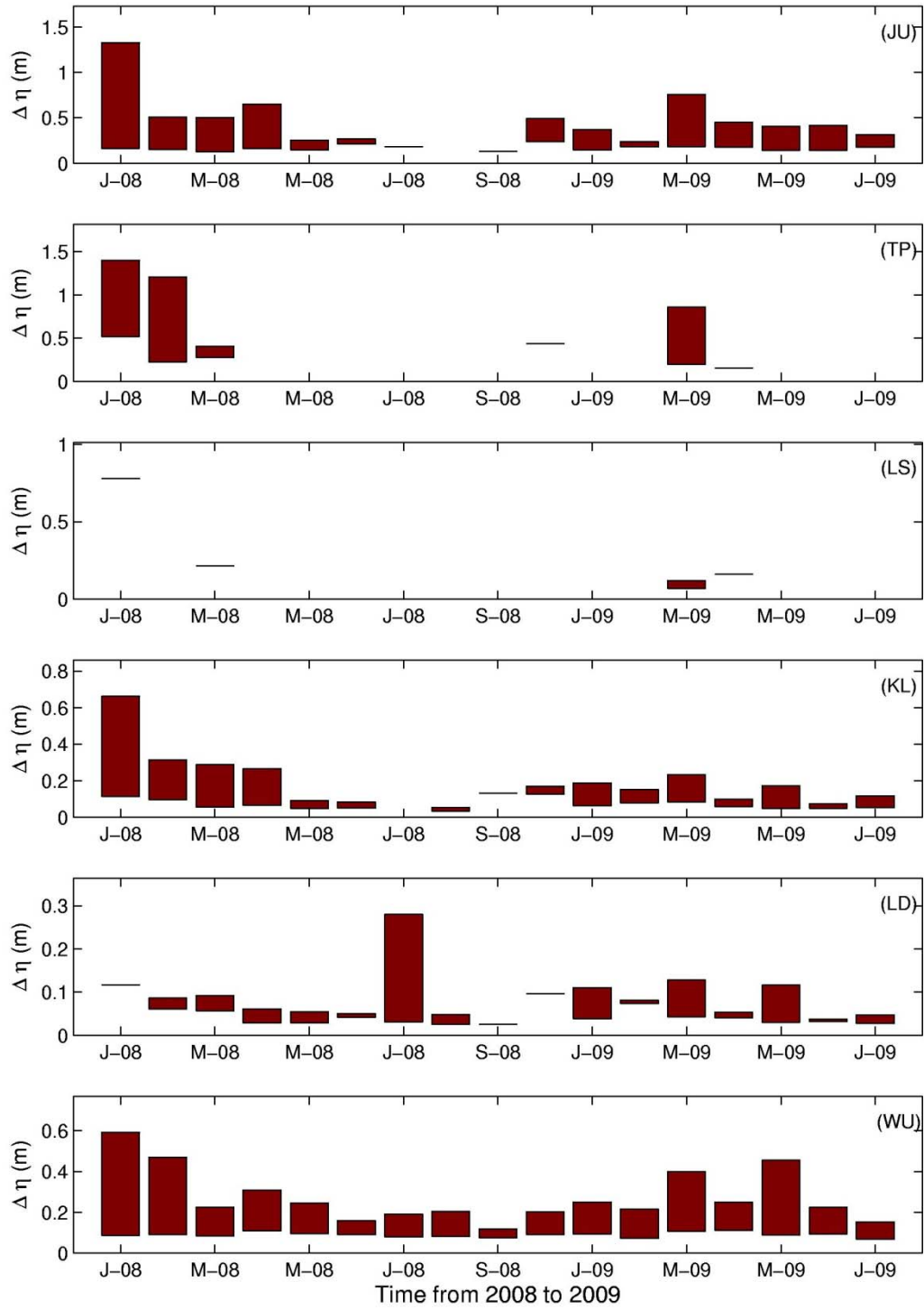


圖3-1 各測站每月氣象海嘯的最大振幅區間

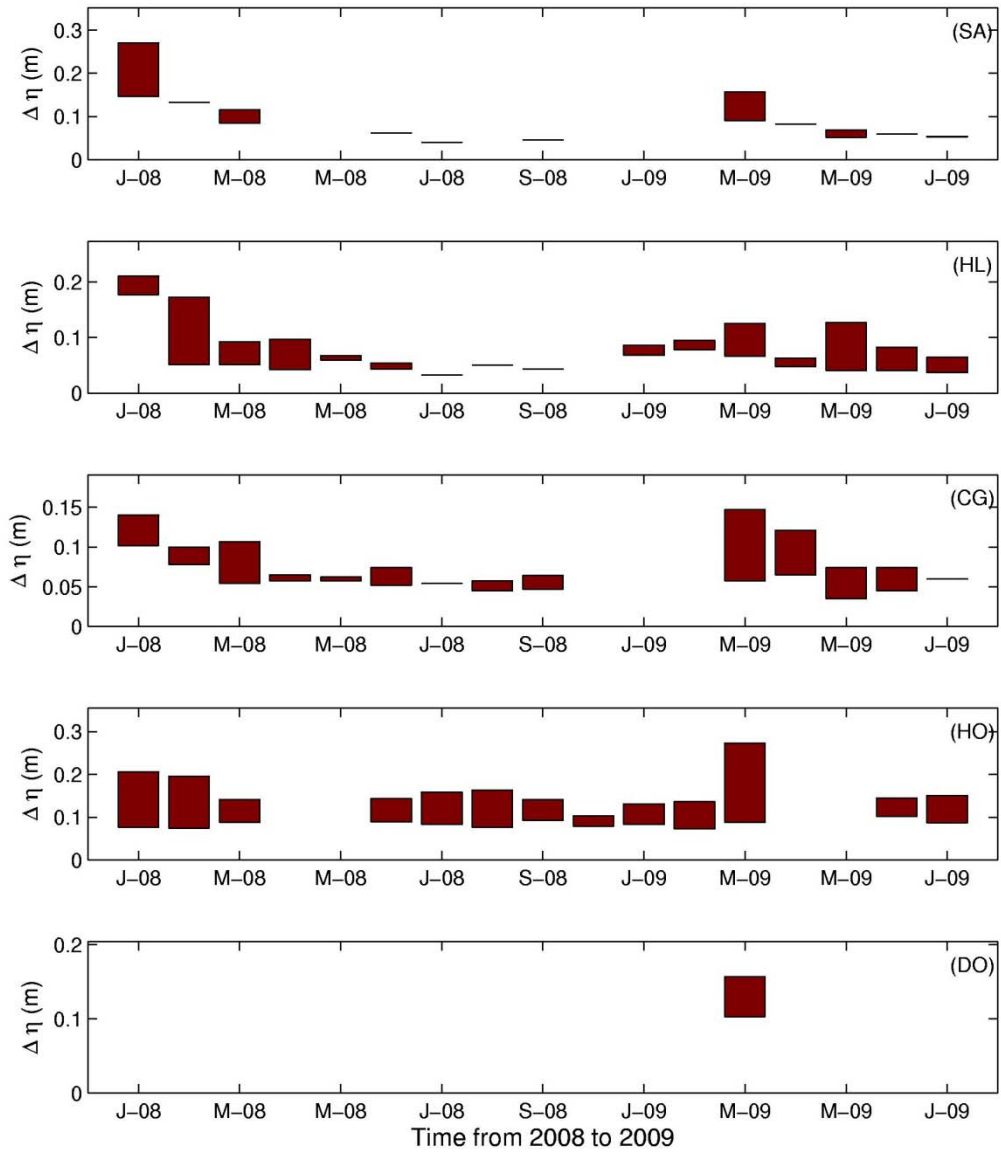


圖3-1 (續)

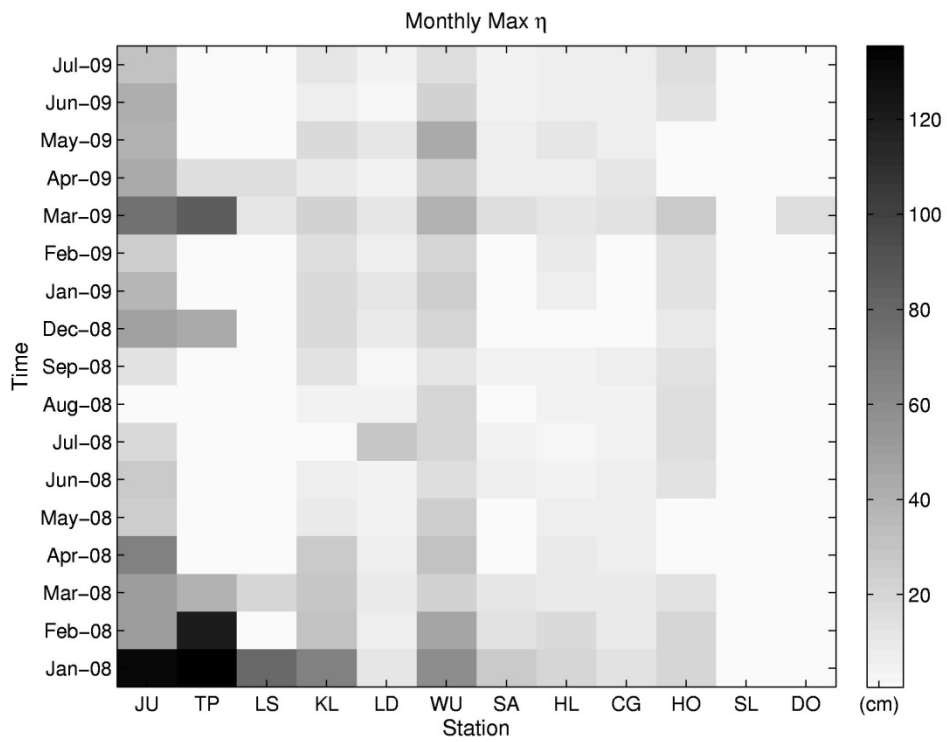


圖3-2 台灣沿岸氣象海嘯振幅之時空分布

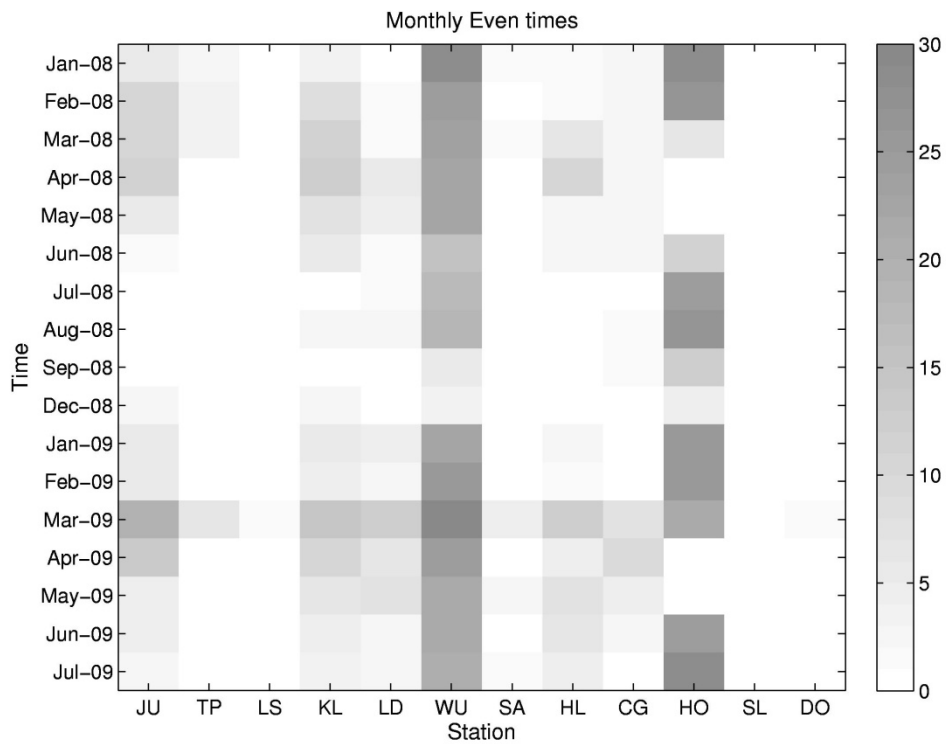


圖3-3 台灣沿岸氣象海嘯發生次數之時空分布

表3-2 各測點發生氣象海嘯的分級(--表資料缺漏)

發生時段	JU	TP	LS	KL	LD	WU	SA	HL	CG	HO	SL	DO
2008/1/17	1	1	0	1	--	1	1	0	0	1	0	0
2008/1/29	3	3	3	3	--	3	1	1	1	1	0	1
2008/1/30	2	3	1	3	--	2	1	1	1	1	0	0
2008/1/31	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	0	0
2009/3/6	1	2	1	2	1	1	1	1	1	2	1	1
2009/3/7	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	0	1

由表 3-2 所選出三個時段，其各測站海嘯週期水位訊號分別示如圖 3-4、圖 3-5 及圖 3-6；而小波頻譜分別為圖 3-8、圖 3-9 與圖 3-10。另外由 2008 年 4 個侵台颱風中，選擇各測站海水位資料最完整之鳳凰颱風做為颱風為外力因素影響之現象點，分析其海嘯週期訊號與小波頻譜如圖 3-7 與 3-11 所示。

比較圖 3-4、圖 3-5 及圖 3-6 之海嘯週期水位訊號可發現，當氣象海嘯發生時，在相鄰測站也會有氣象海嘯之現象，且可明顯看出在時間軸上有延遲之效應產生。以圖 3-5 為例，2008 年 1 月 29 日 12 時，在竹圍測站首先出現氣象海嘯之週期波，接著台北、麟山鼻、基隆到龍洞都依序出現氣象海嘯，當此一現象傳遞至烏石港時時間約為 14 時。此一傳遞現象在圖 3-6 也可明顯觀察出，由竹圍 3 月 6 日 22 時開始，依順時針順序傳遞至蘇澳測站約為 23 時。此一結果可證明所量測到之海嘯週期水位變化具有傳遞效應，且符合大氣所引發之水位變化特性，為一大空間尺度之現象。

由圖 3-8、圖 3-9 與圖 3-10 之小波頻譜可看出，各測站在氣象海嘯發生時間 1-60 分鐘內主要週期如下表 3-3 所示。由表 3-3 可明顯發現，各測站不同現象點所產生之波浪主要週期相近；反之同一時段在各測站所觀測到之週期並不相同，部分測站如麟山鼻、烏石、蘇澳、花蓮、成功、後壁湖與小琉球，在 2008 年 1 月 17-18 日與 2008 年 7 月 27-29 日，觀測到氣象海嘯小於 10 分鐘之週期訊號。此現象異於往昔學者所提出之週期範圍，在此特別討論此四個時段在各測站之氣象海嘯的週期分布特性。

表3-3 由小波頻譜分析各測站氣象海嘯之主要週期(--表資料缺漏)

	JU	TP	LS	KL	LD	WU
2008/1/17-18	14	32	3	24	28	1.5、12
2008/1/29-30	14	32	12	12	15	12
2009/3/5-6	16	32	9	24	24	12
2008/7/27-29	16	32	3	24	24	4、12
	SA	HL	CG	HO	SL	DO
2008/1/17-18	1、28	2、12	3、16	12、28	2、6	40
2008/1/29-30	8、28	12	16	14	5、48	16、36
2009/3/5-6	8、24	12	12	6	6、48	16、36
2008/7/27-29	6、24	1-3	3、12	3、12	1-3、6	--

本研究接著估算在氣候條件影響下所引發各地氣象海嘯發生之時間，進而估算各測站間氣象海嘯現象發生之延時(Time Lag)。為了方便估算延時與距離之關係，選取台灣東部沿岸測站由烏石港起依序往南的蘇澳、花蓮與成功港等四測站，此四個測站之空間分布約在直線上。若以烏石港為起始點，推估其至蘇澳、花蓮、成功之距離分別為 30.6、98.6 與 198.1 公里。選取烏石港發生氣象海嘯現象的時間為起始點，且記錄同時段在蘇澳、花蓮與成功發生氣象海嘯的時間點，二者之時間差即為氣象海嘯發生之延時。季風影響下之各測站與烏石港之延時及測站與烏石港距離之關係如圖 3-12 所示。由圖 3-12 可以明顯看出，同為季風產生之氣象海嘯現象，其像位差有相同之趨勢。若將圖 3-12 線性迴歸可得到其相位速度(Phase speed)，其約為 14.38 m/s，此值相約為蒲福風 6-7 級，與東北季風之平均風速相似。

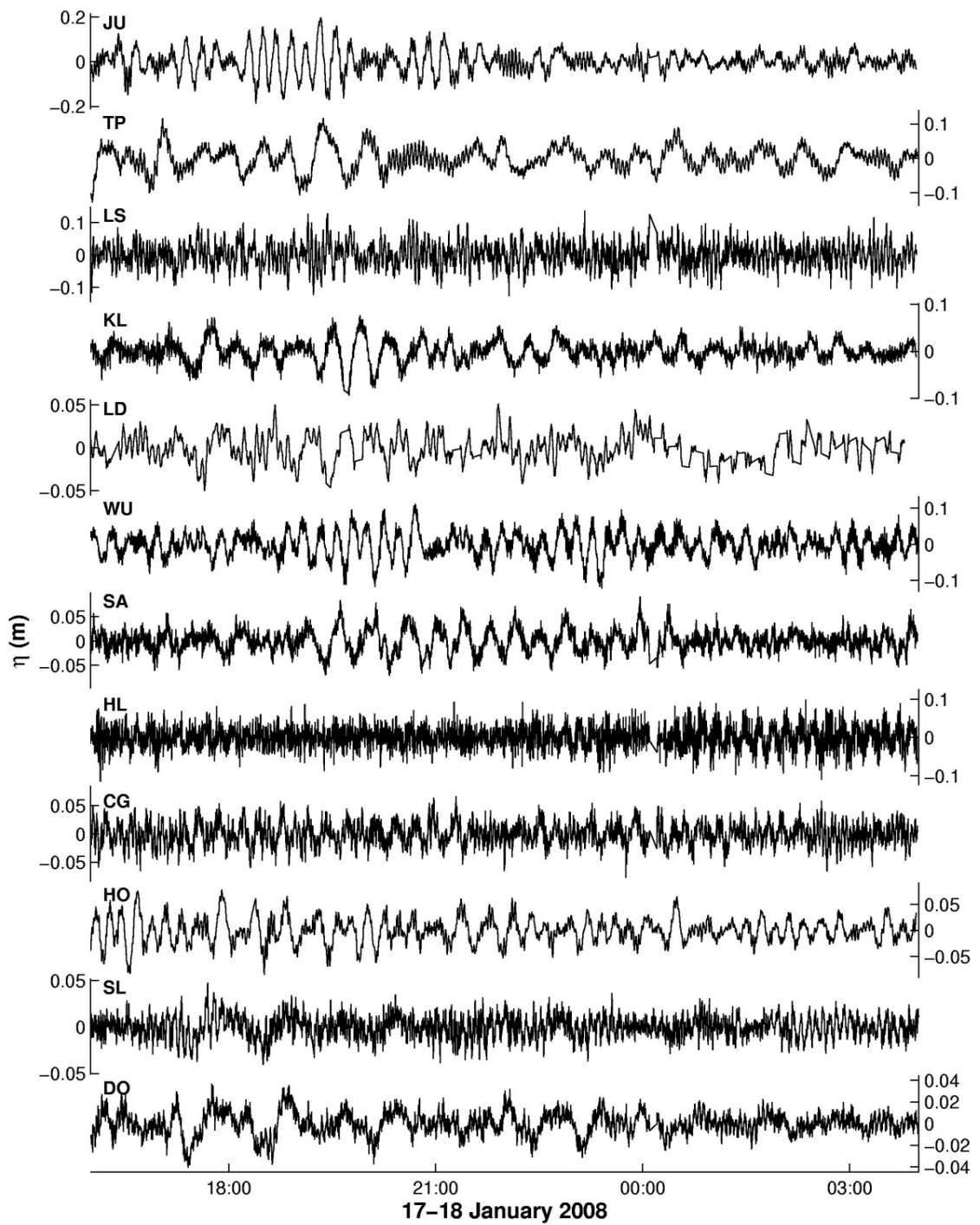


圖3-4 2008年1月17-19日氣象海嘯的週期時序列

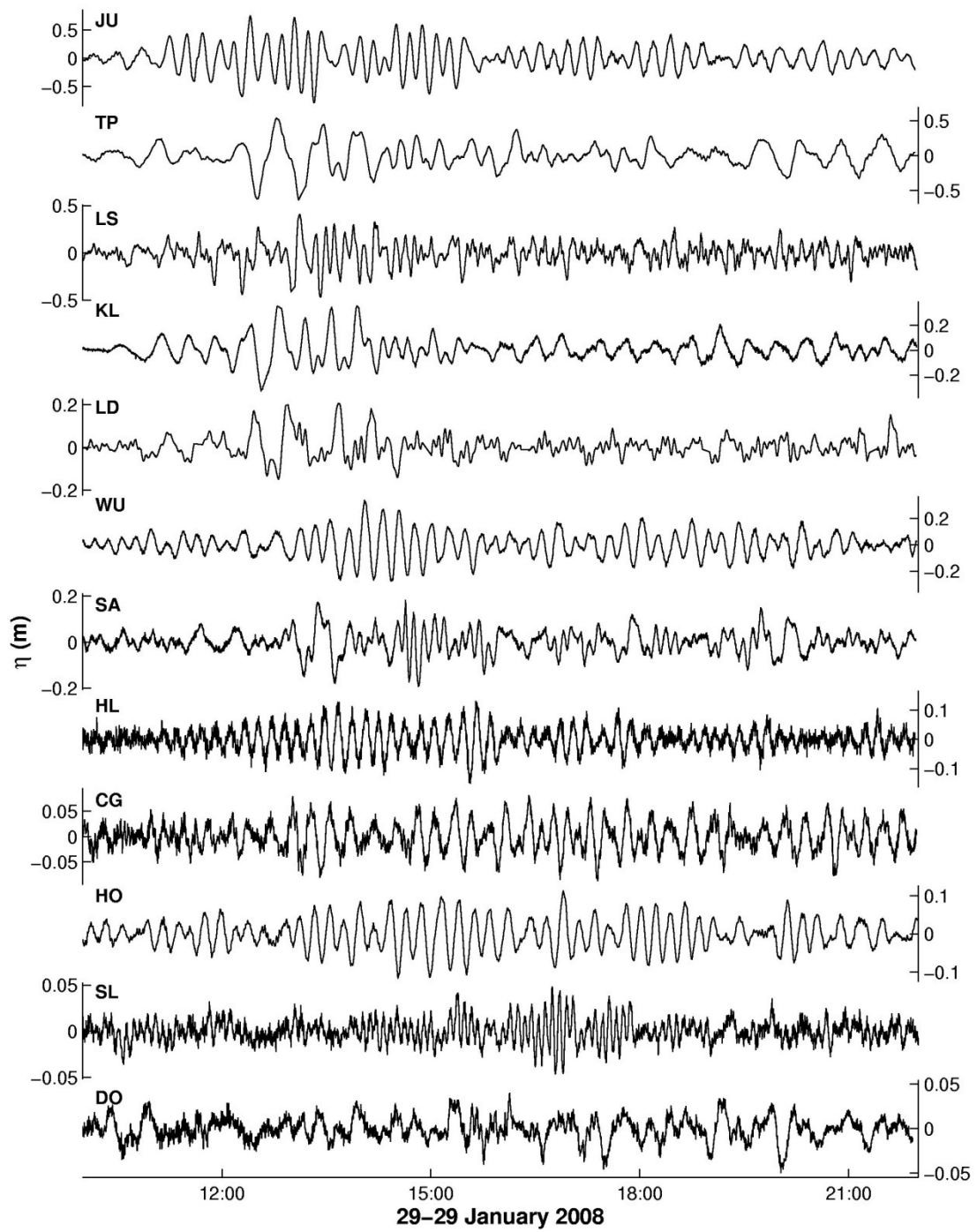


圖3-5 2008年1月29-30日氣象海嘯的週期時序列

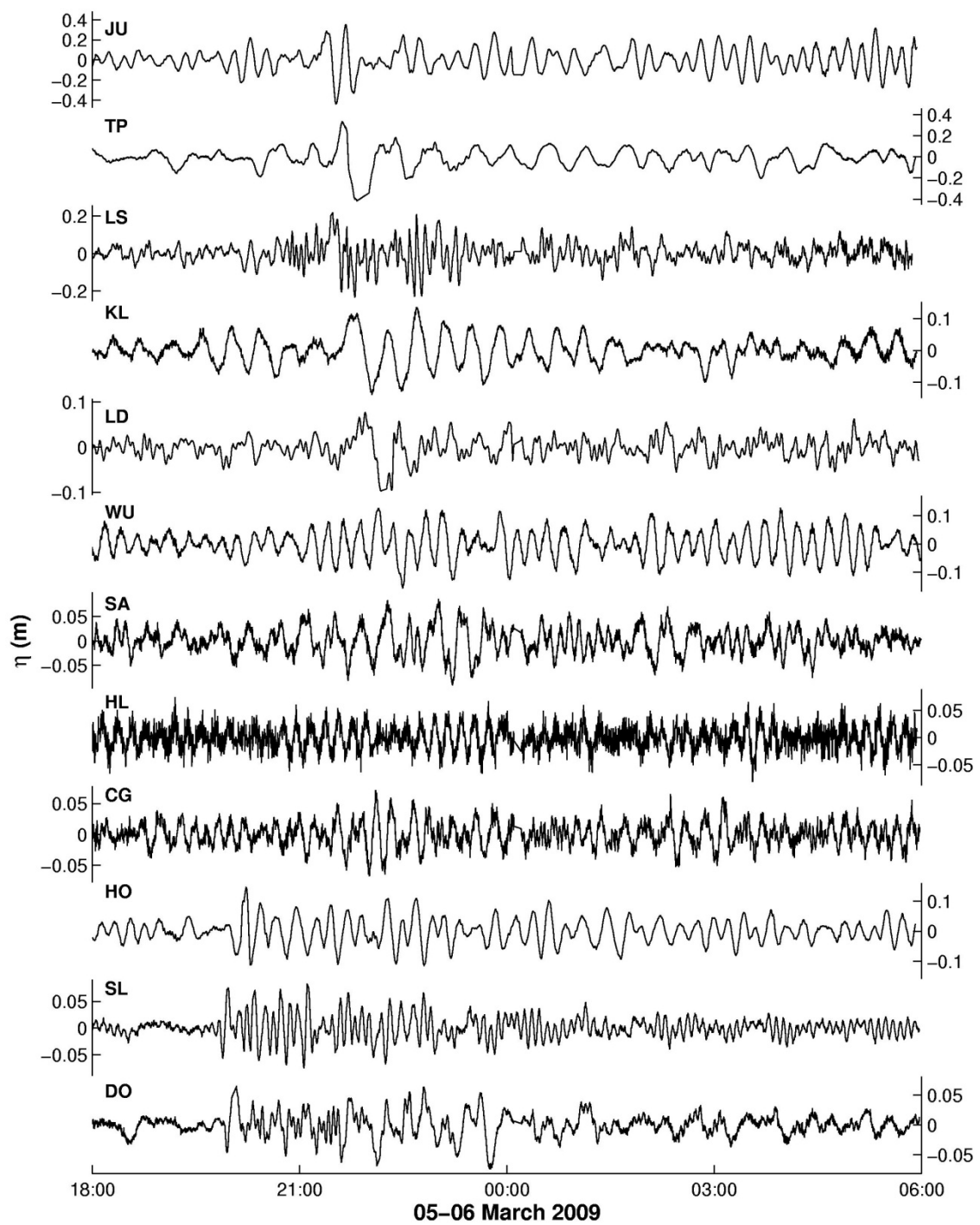


圖3-6 2009年3月5-6日氣象海嘯的週期時序列

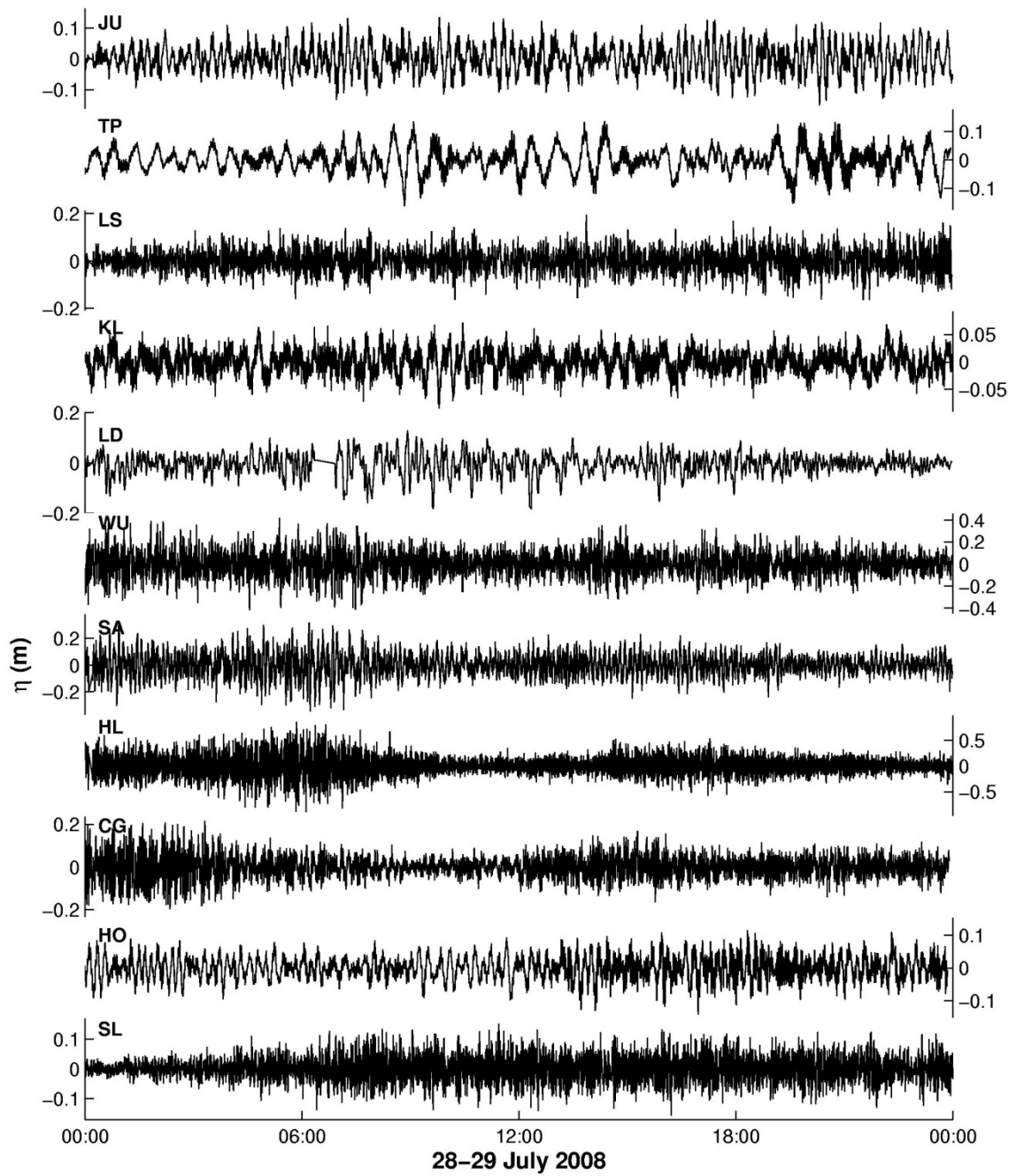


圖3-7 2008年7月27-29日氣象海嘯的週期時序列

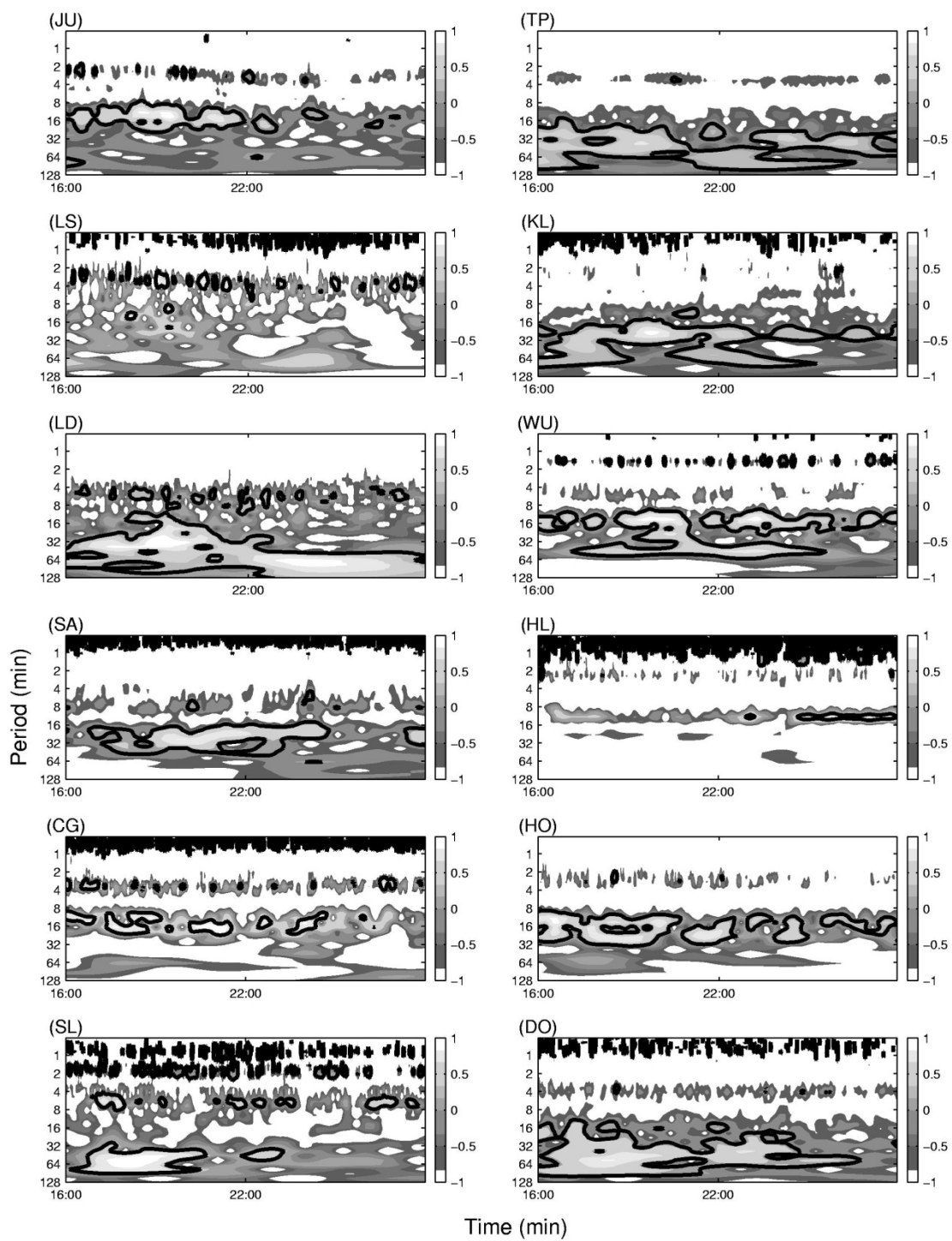


圖3-8 2008年1月17-18日的小波頻譜

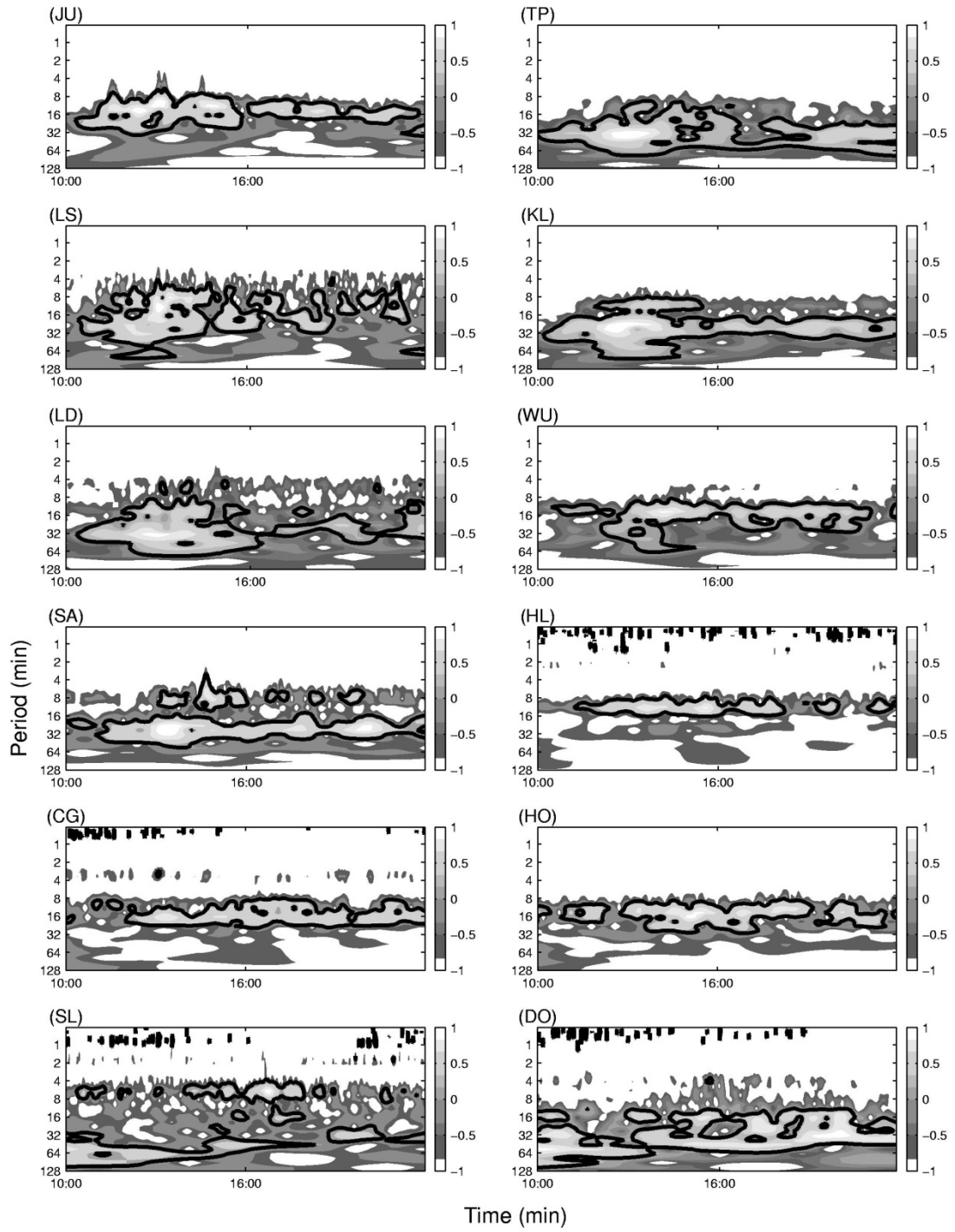


圖3-9 2008年1月29-30日的小波頻譜

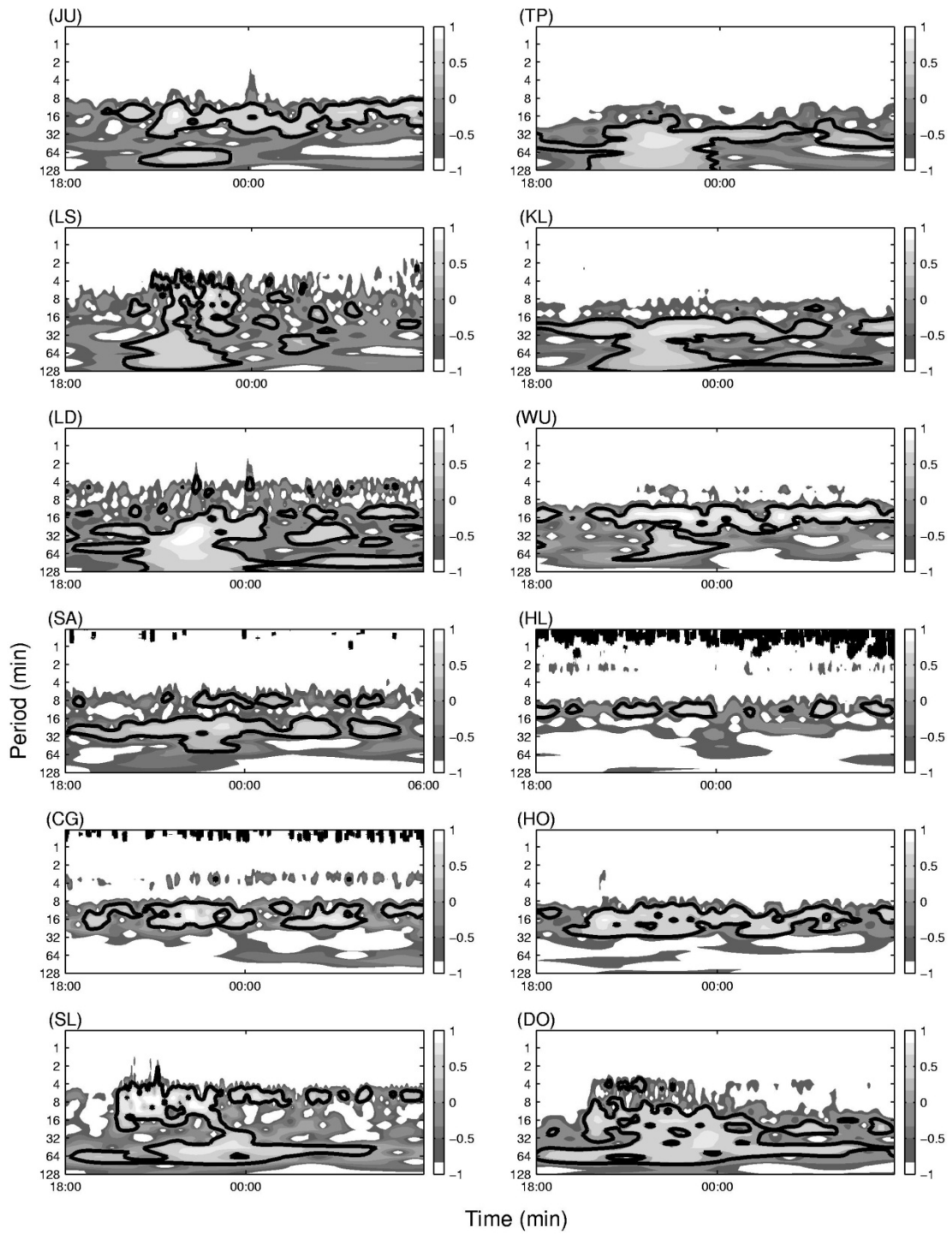


圖3-10 2009年3月5-6日的小波頻譜

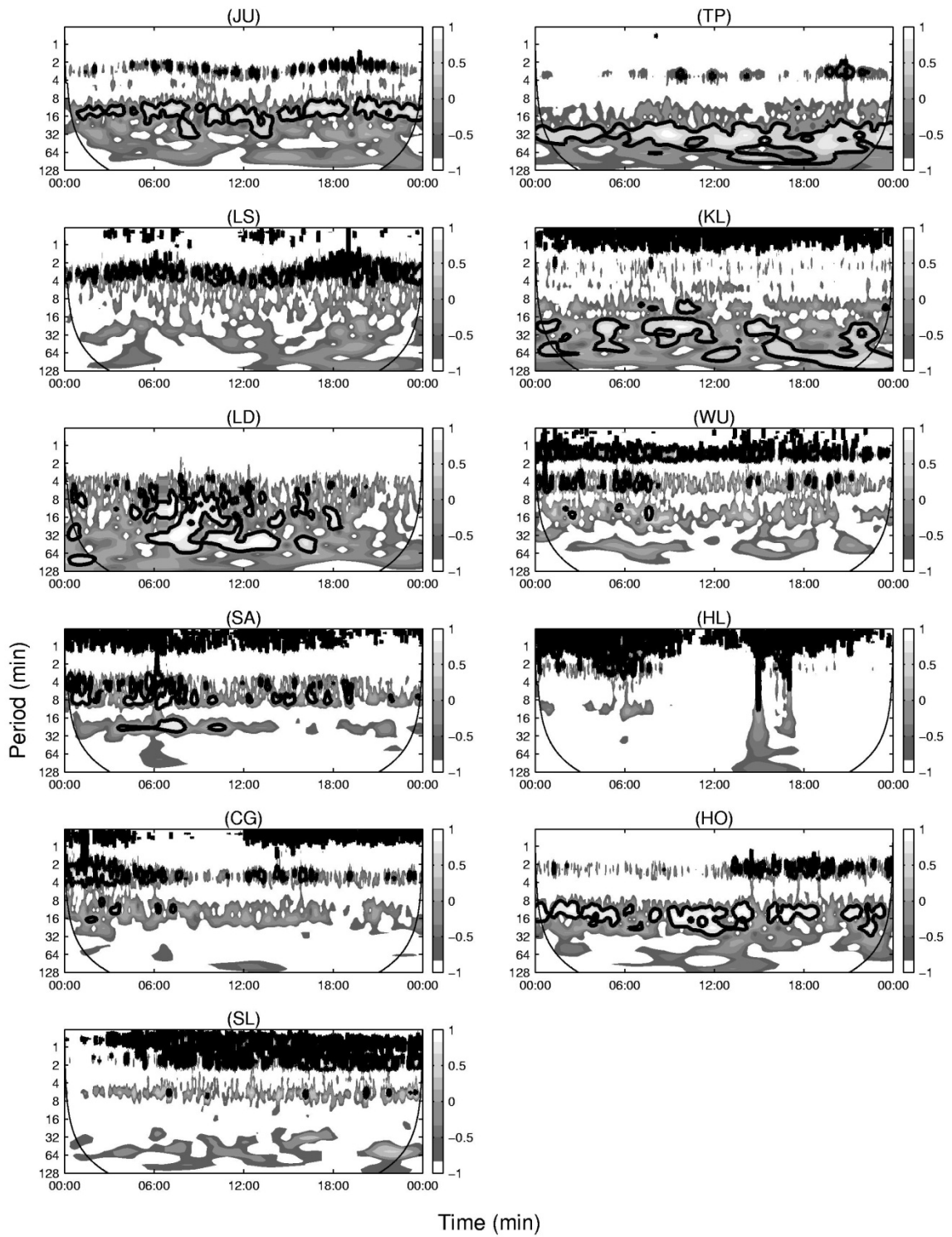


圖3-11 2008年7月27-29日的小波頻譜

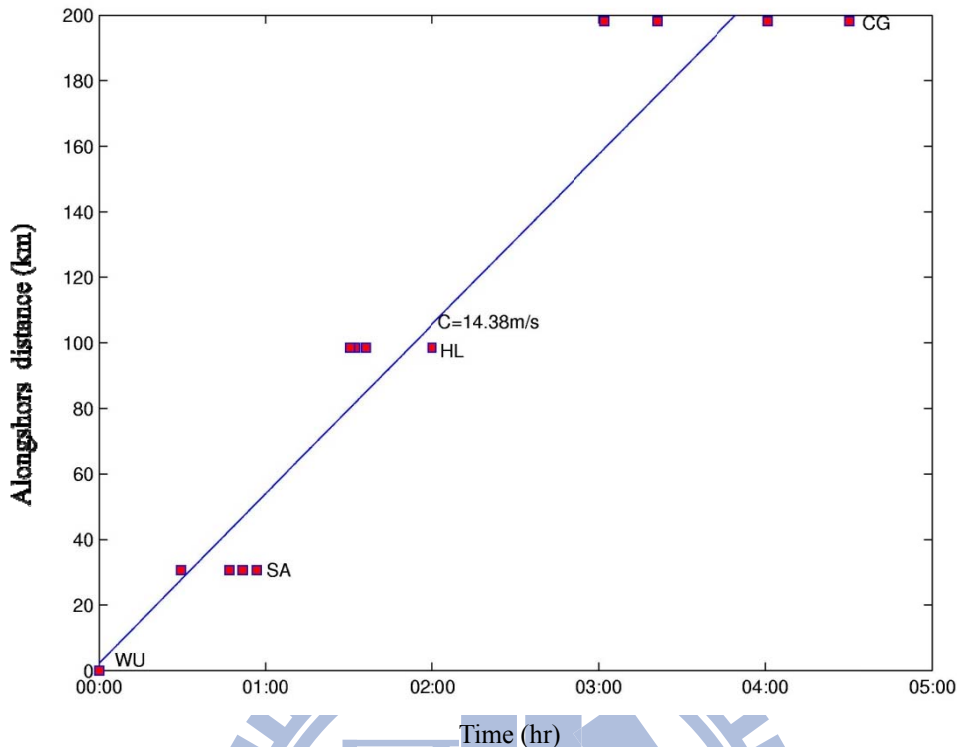


圖3-12 季風產生之氣象海嘯在東部測站之相位差

鋒面對海水位影響以壓力變化為主，本研究收集西北部新竹、台北、基隆、蘇澳與花蓮壓力測站資料，將鋒面影響之2009年3月5-6日之逐分壓力時序列示如圖3-13(a)。由圖3-13(a)所示之壓力峰值時間分別為：新竹20:08、台北20:33、基隆20:50、蘇澳21:18與花蓮22:07，可明顯發現鋒面之壓力時序列有明顯的傳遞效應。將此五測站之距離分別除以壓力峰值發生之時間間距，可估算出此鋒面壓力在測站間之相位移動速度如圖3-13(c)實線所示。此鋒面所產生之氣象海嘯如圖3-13(b)所示，由圖3-13(b)上可看出水位振盪峰值所對應之時間點分別為竹圍21:34、台北21:37、基隆22:02、蘇澳22:41與花蓮23:12。將此五測站之距離分別除以時間間距估算出各測站間之氣象海嘯相位移動速度如圖3-13(c)虛線所示。比較圖3-13(c)實線與虛線所示之測站間相位移動速度，可以發現在西北部台北到基隆間，氣象海嘯與外力因素—鋒面之相位移動速度相近，而竹圍與台北因地理位置極為接近(僅相距16.7公里)之因素，其氣象海嘯水位振盪可能受外海同一壓力變化所產生。由此一結果可發現，各測站氣象海嘯現象之相位差，受其外力因素影響，故產生近似傳遞之現象。另外，比較圖3-13(a)與圖3-13(b)中鋒面之壓力差發生時間與氣

象海嘯現象引發之海水位振盪時間，可明顯看出外力開始作用至氣象海嘯現象開始發生期間，約有 25-35 分鐘之延時(Time Lag)。

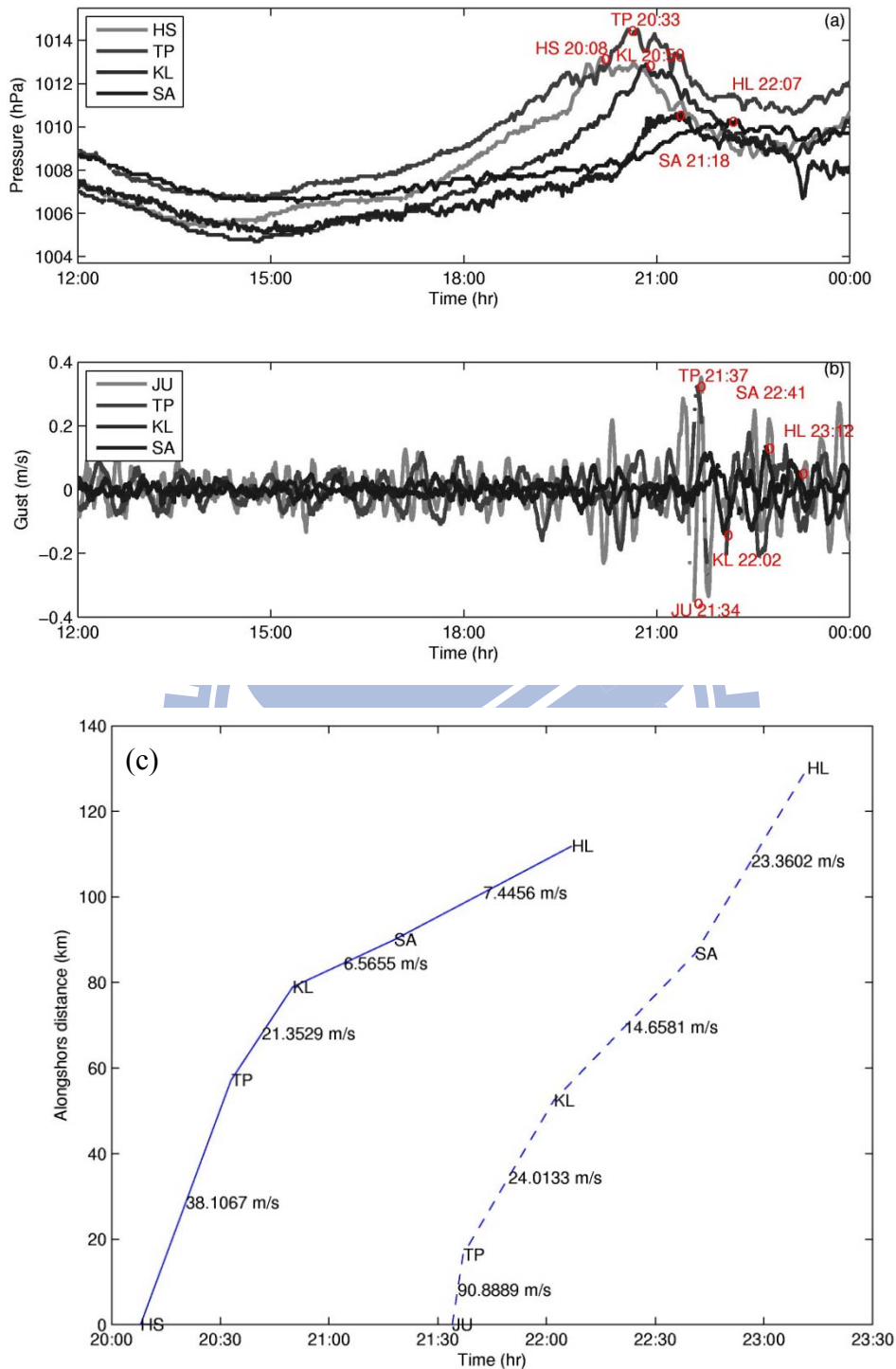


圖3-13 (a)冷鋒在新竹(HS)、台北(TP)、基隆(KL)、蘇澳(SA)與花蓮(HL)之壓力時序列；(b)冷鋒所產生之氣象海嘯在竹圍港(JU)、台北港(TP)、基隆港(KL)、蘇澳港(SA)與花蓮港(HL)之海水位振幅時序列；(c)冷鋒壓力之相位移動速度(實線)與產生之氣象海嘯相位移動速度(虛線)

3-2 週期分佈特性

將 3-1 節所選出之四個時段扣除潮汐之水位訊號，經由 FFT 頻譜分析各站在此似現象點之週期分佈特性如圖 3-14、圖 3-15 與圖 3-16 所示。各圖中(a)為 2008 年 1 月 16-17 日；(b)為 2008 年 1 月 29-30 日；(c)為 2009 年 3 月 5-6 日；(d)為 2008 年 7 月 27-29 日。

由表 3-1 可知，此四時段之外力因素不盡相同，(a)與(b)為季風影響；(c)為鋒面影響；(d)為颱風影響。但是各測站在不同外力影響下，所測得之氣象海嘯週期波，有相同的週期分布特性。以圖 3-14 竹圍為例，在不同外力條件所引發之海嘯週期波浪，其頻譜之週期分部主要在兩個週期區間，一為 2 分鐘週期另一為 12 分鐘週期，雖然在竹圍(a)與(c)兩外力因素下，2 分鐘週期之能量較弱，但仍可明顯看出較能量其他週期大，此一現象在其餘個測站亦同。

接著比較相同外力條件時，在不同測站之週期分布可以發現，雖然外力條件相同，但在各測站所量測到海嘯週期波之頻譜分部大不相同。以各測站第一個時段為例，外力因素同為季風影響，在竹圍測站之週期分布為 2 分鐘與 12 分鐘；在台北港則為 3 分鐘與 30 分鐘；甚至在龍洞為 5、14 與 30 分鐘。

上述討論可知，在氣象海嘯之週期分布特性上：(1)不同外力作用下，同一港灣產生之氣象海嘯週期波，會有相同的週期分布特性，此一結果與 Omori (1902)之結果相符合。(2)氣象海嘯之週期分布，除 10-60 分鐘外，有時會附帶 1-10 分鐘週期之訊號，此一結果與國外學者所觀測到皆為 10-60 分鐘不同。

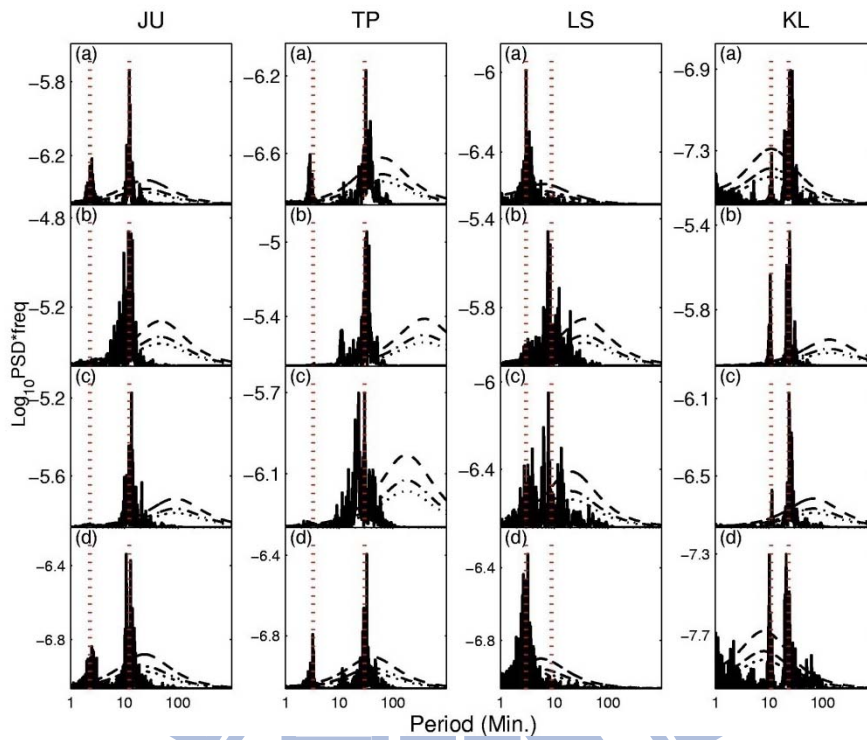


圖3-14 竹圍、台北、麟山鼻與基隆測站
在四個時段內氣象海嘯的週期分布

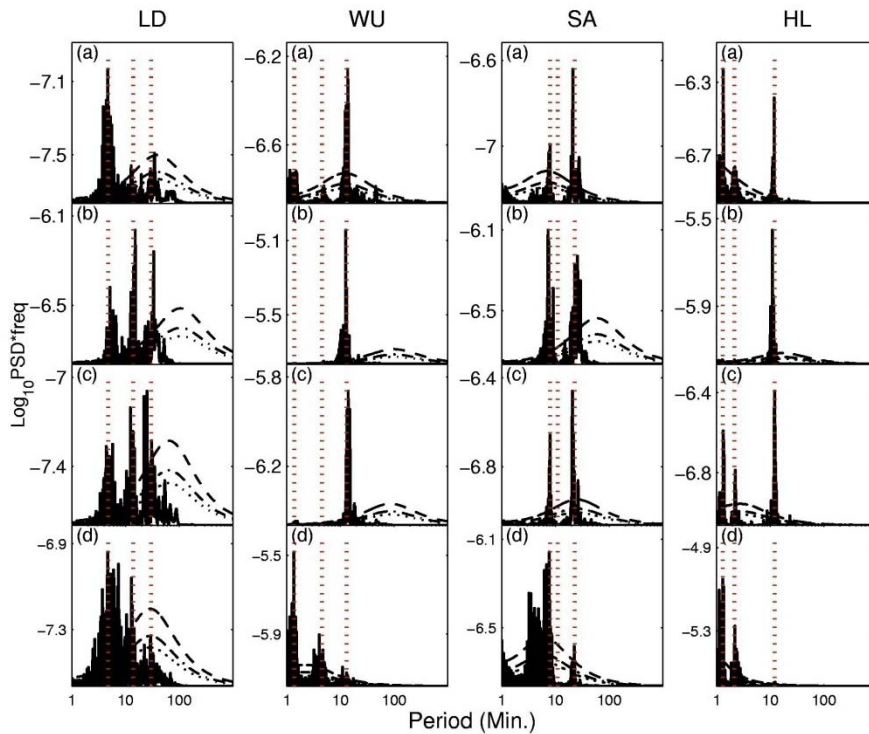


圖3-15 龍洞、烏石、蘇澳與花蓮測站
在四個時段內氣象海嘯的週期分布

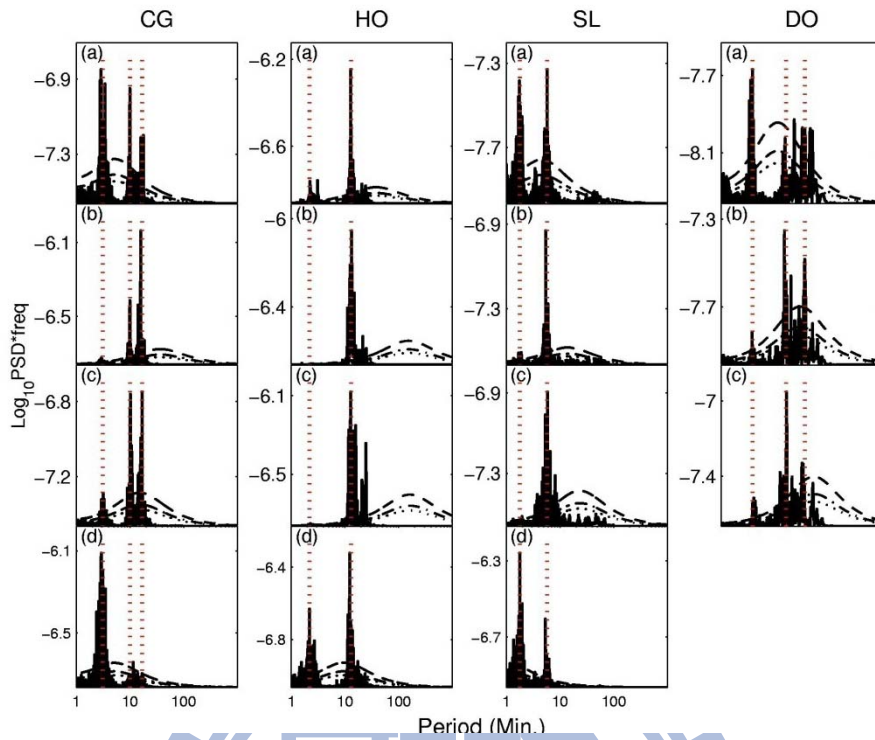


圖3-16 成功、後壁湖、小琉球與東港測站
在四個時段內氣象海嘯的週期分布

3-3 港池共振週期之影響

本文收集之資料大多在港內測得之資料，此資料顯示之氣象海嘯是否為經過港池共振放大的結果。首先估算12測站之港灣共振週期，本研究採用 Merian 公式：

$$T_r = \frac{4l}{(2m+1)\sqrt{gh}}, (m=0,1,2,\dots) \quad (3-1)$$

其中 T_r 為共振週期， l 為港灣特徵長度。本研究以港灣入口至港灣內之縱深為特徵長度，估算出各港灣之共振週期。接著將 3-1 節所選出之四現象點期間，以 FFT 頻譜求出各測站氣象海嘯期間之主要海水位訊號週期，以港灣共振週期為橫軸，各測站主要週期為縱軸畫出之散佈圖如圖 3-17 所示。圖中正方形為第一週期；菱形為第二之週期；三角形為第三週期。黑色實線、虛線、折線與點線分別代表第一共振模態至第四共振模態。由圖 3-17 可知，除部分測站之十分鐘以下週期接近外，多數測站在此四現象點所分析之氣象海嘯主要週期皆不等於共振模態，因此所量測到之海水位變化量，並無被港灣共振放大。

圖 3-18 以氣象海嘯主要週期(T_m)與第一港灣共振週期(T_r)比(T_m/T_0)為縱軸，其對應之氣象海嘯所造成之最大水位振幅為橫軸。由圖 3-17 可看出，當週期比(T_m/T_0)接近共振週期(1/1、1/3、1/5、1/7)時，所對應之最大水位振幅較大。可明顯看出當氣象海嘯主要週期與港灣共振週期相近時，所觀測到之海水位變化也因港灣共振影響而增大。

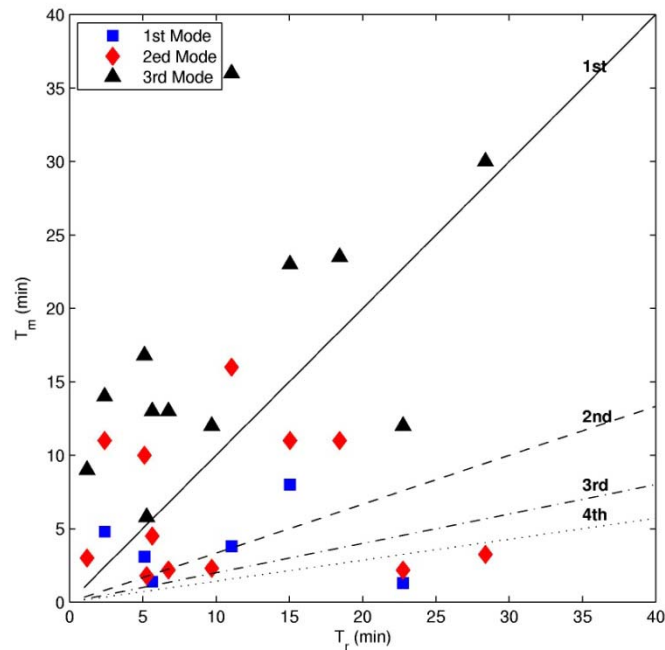


圖3-17 港灣共振週期(T_r)與氣象海嘯主要週期(T_m)之散佈圖

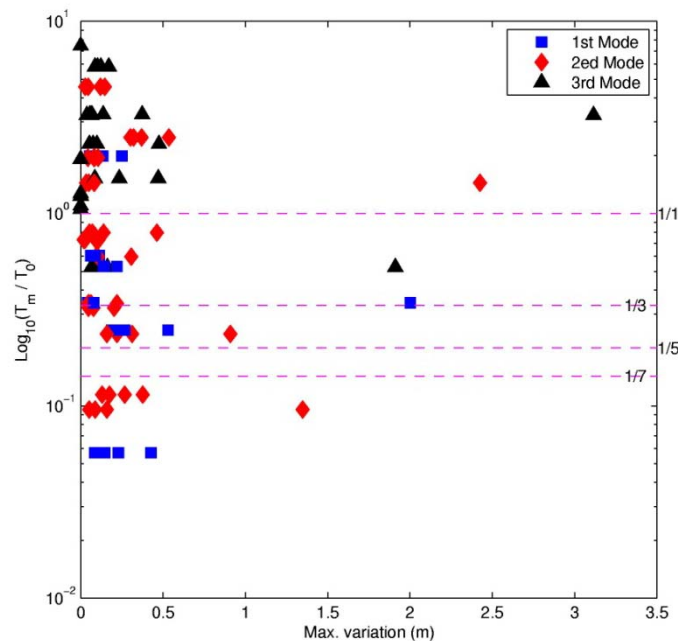


圖3-18 週期比(T_m/T_0)與最大水位變化(Max Var. η)之散佈圖

第四章 氣候因子與海嘯週期水位變化之關係

為了找出10~60分鐘水位變化與氣候因子之關係，取本研究所分析出之四個水位變化強烈之現象區間，其為2008/1/15~18、2008/1/29~31、2009/3/5~8與2008/7/27~29。本研究蒐集逐分平均的溫度與壓力資料，而陣風風速為逐時之平均風速。

4-1 壓力、溫度與風速特性

本研究收集之壓力資料測站有新竹、淡水、基隆、蘇澳、花蓮、成功、屏東與高雄等八個，此測站均與潮位測站接近。選擇四個氣象海嘯現象的區間，在各測站之壓力逐分時序列如圖 4-1 所示。由圖 4-1 可以明顯看出，各測站在此四時段的壓力都含有數小時之長週期趨勢。

為了將長週期趨勢去除，首先採用 FFT 頻譜分析四現象區間各測站壓力訊號之頻譜，如圖 4-2 所示。在圖 4-2(a)、(b)、(c)與(d)可以發現，壓力訊號之週期分佈特性，以 100-200 分鐘為分界，200 分鐘以上週期明顯大於 100-200 以下之週期。此結果說明壓力訊號明顯有 2 小時(120 分鐘)之長週期趨勢，若再將壓力訊號扣除長週期之趨勢後所得逐分時序列示如圖 4-3，在圖 4-3 上就明顯只剩下短週期之壓力訊號，下一章節則利用此只含短週期之壓力訊號與氣象海嘯造成之海水位訊號估算相關性。溫度與風速之時序列式於圖 4-4 與 4-5，由溫度與風速之時序列圖 4-4 與 4-5 上，同一時間區間內，各測站並無相同之長週期趨勢。

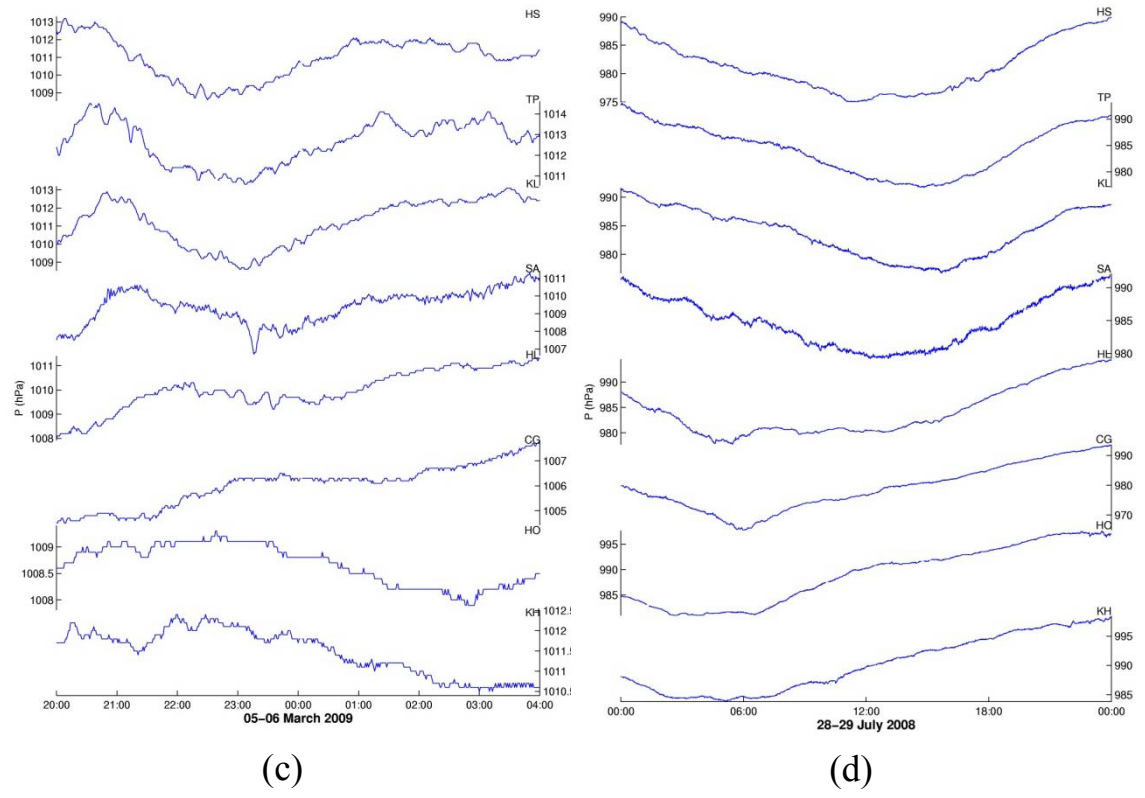
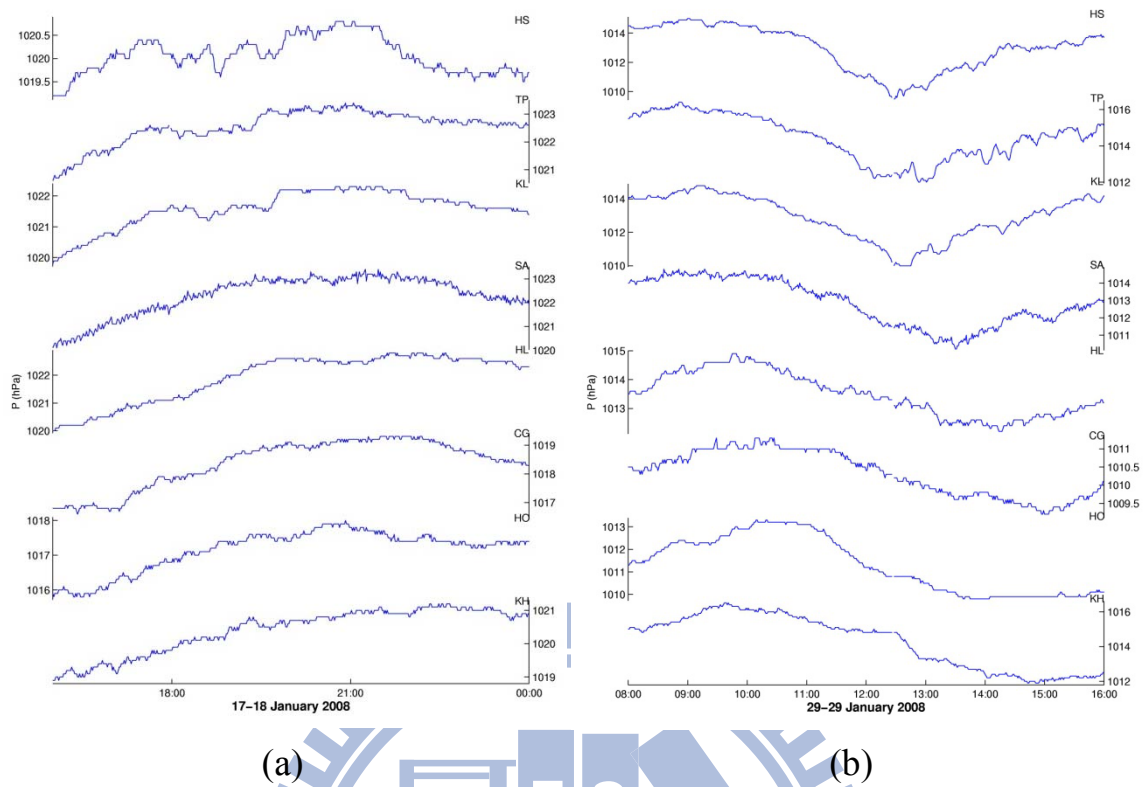
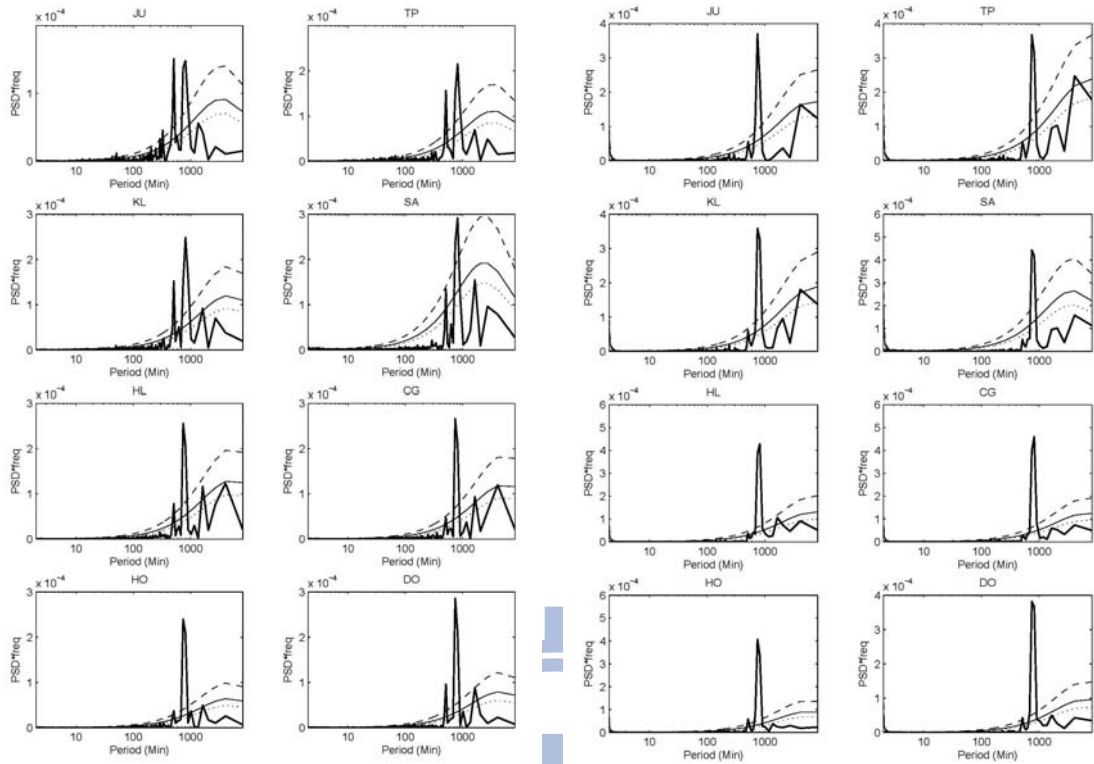
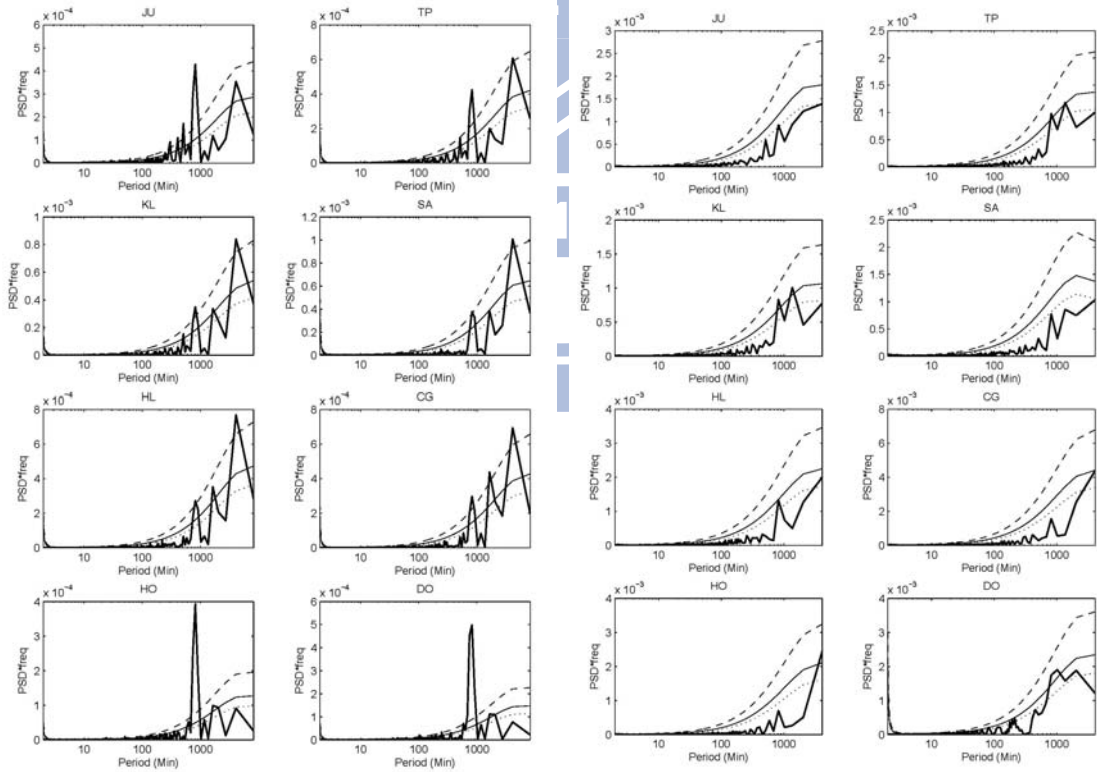


圖4-1 四現象區間(a) 2008/1/17-18、(b) 2008/1/29、(c) 2009/3/5-6與(d) 2008/7/28-29各測站之壓力逐分時序列

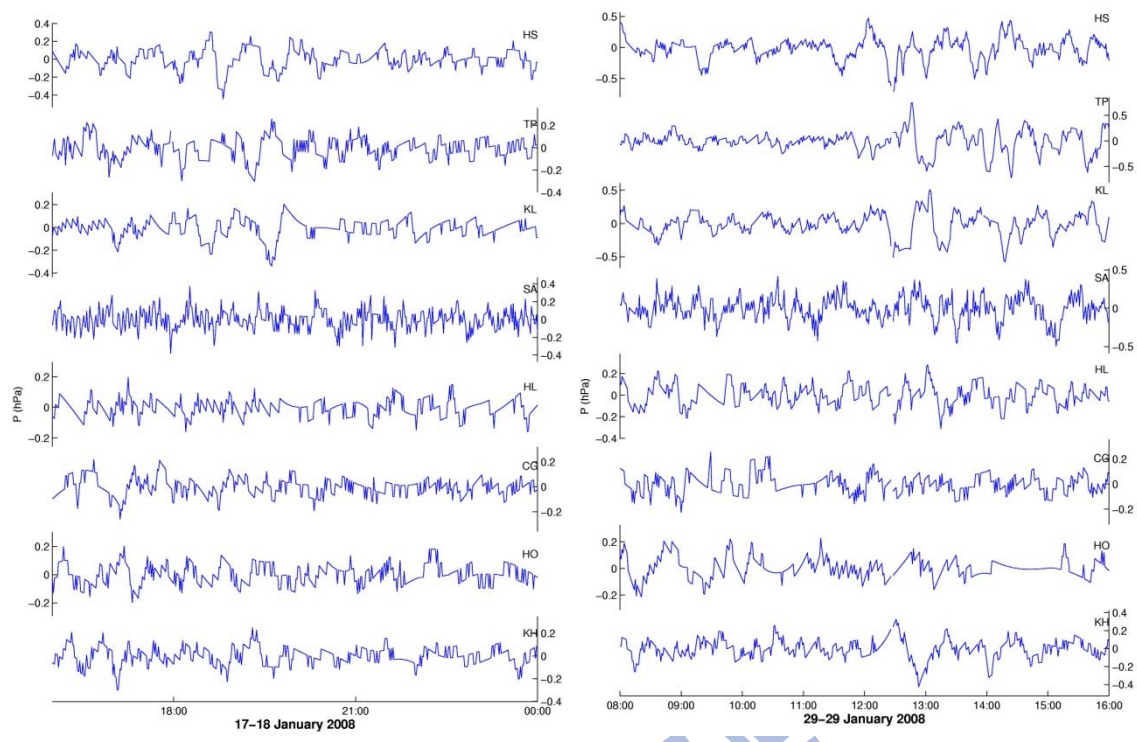


(a) (b)

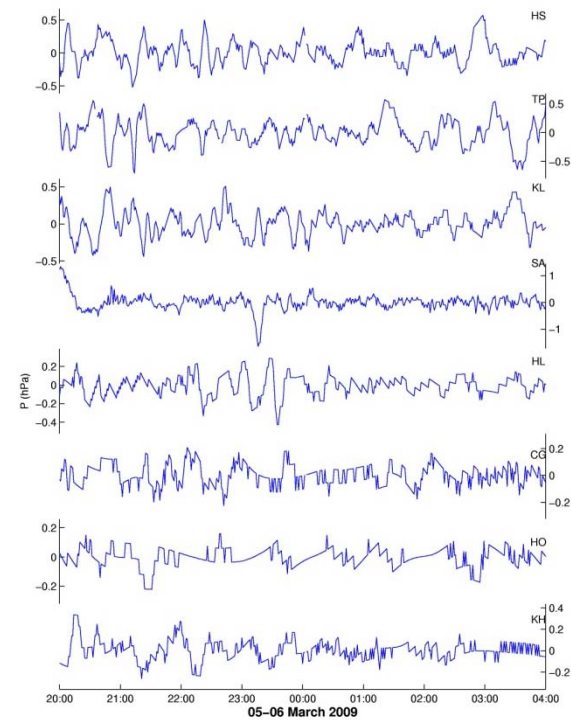


(c) (d)

圖4-2 四現象區間(a) 2008/1/17-18、(b) 2008/1/29、(c) 2009/3/5-6與(d) 2008/7/28-29各測站之FFT頻譜



(a) (b)



(c)

圖4-3 四現象區間(a) 2008/1/17-18、(b) 2008/1/29與(c) 2009/3/5-6各測站扣除2小時趨勢之壓力逐分時序列

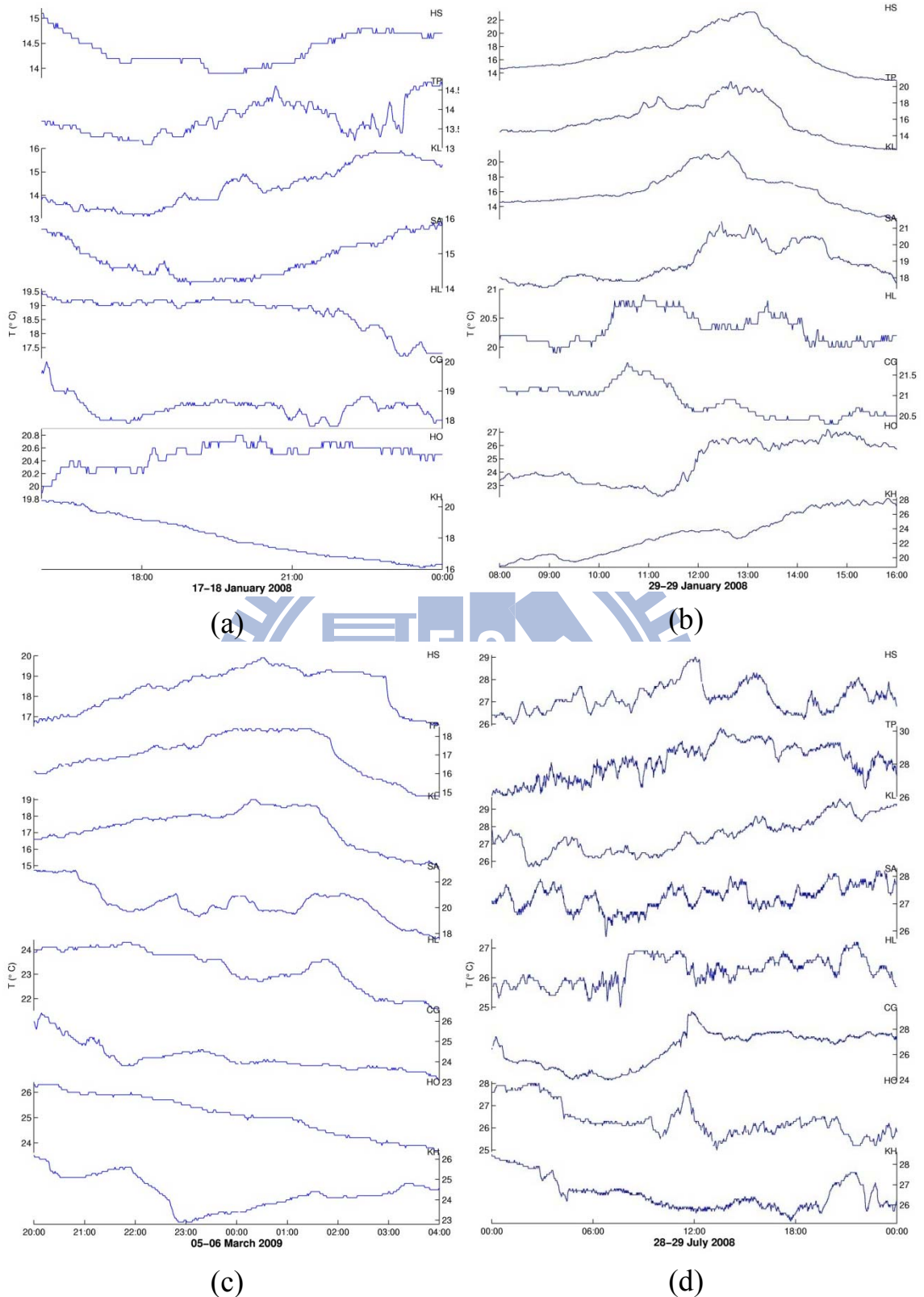
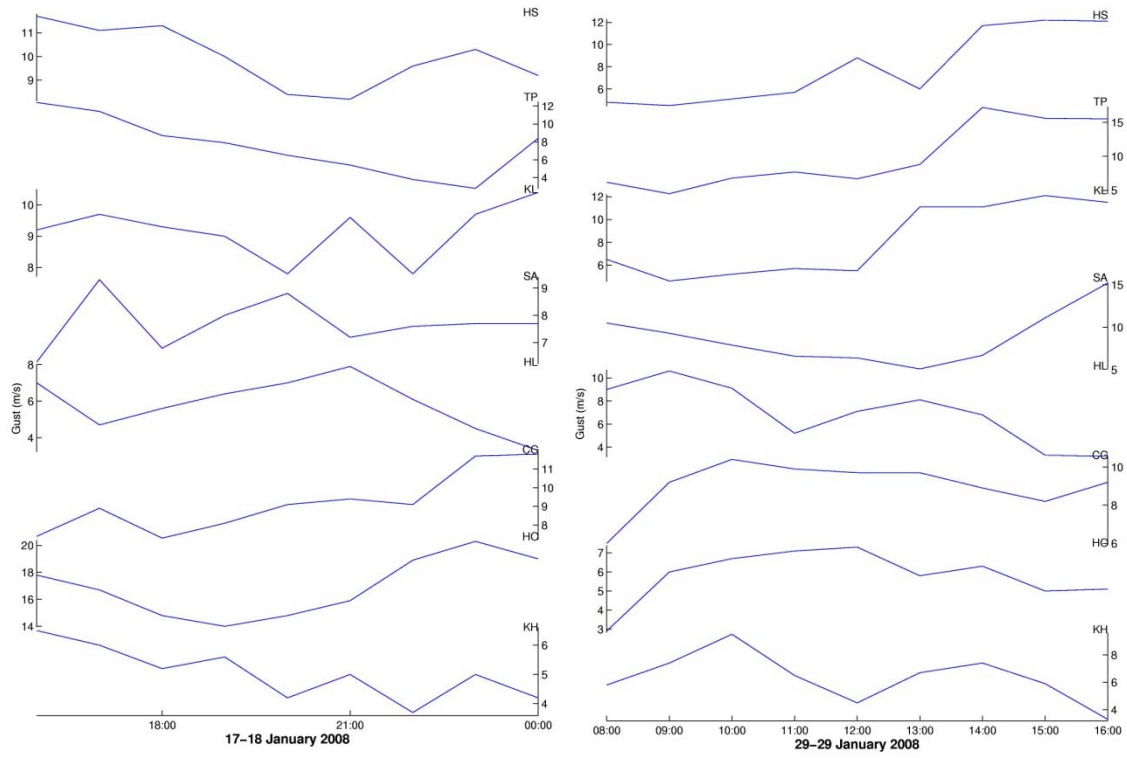
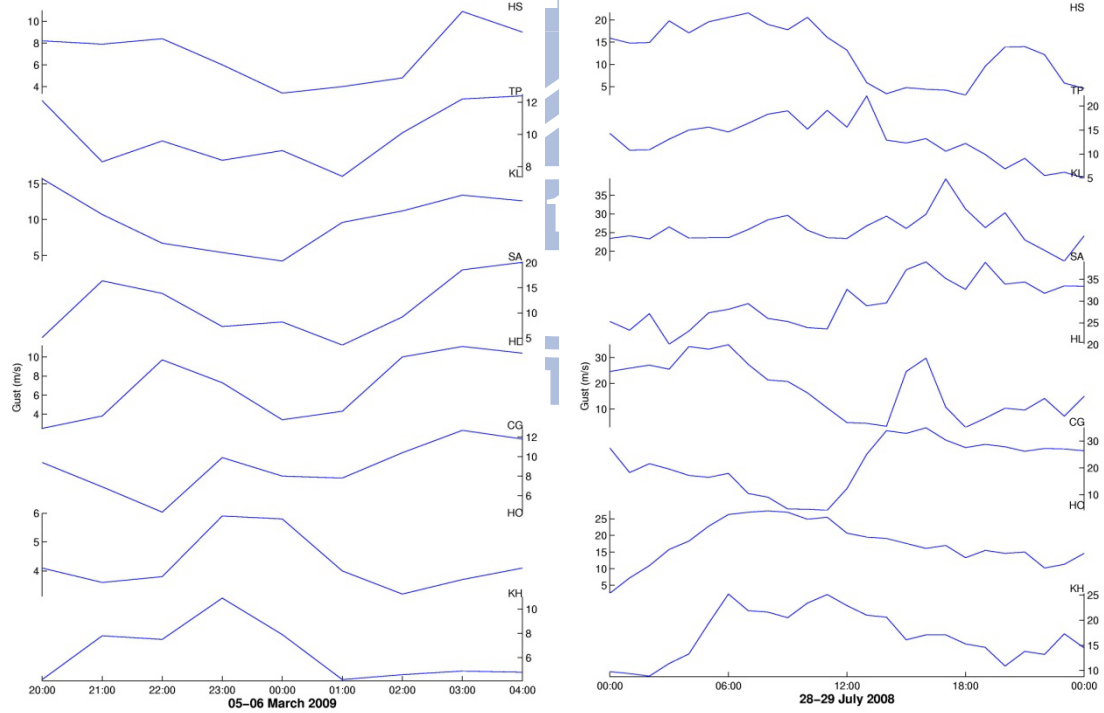


圖4-4 四現象區間(a) 2008/1/17-18、(b) 2008/1/29、(c) 2009/3/5-6與(d) 2008/7/28-29各測站之溫度逐分時序列



(a) (b)



(c) (d)

圖4-5 四現象區間(a) 2008/1/17-18、(b) 2008/1/29、(c) 2009/3/5-6與(d) 2008/7/28-29各測站之風速逐時時序列

4-2 壓力訊號與水位訊號之關係

為了找出 10-60 分鐘水位變化與壓力之關係，取本研究所分析出之三個水位變化較為強烈振盪之區間，其為 2008/1/15~18、2008/1/29~31 及 2009/3/5~8。因考慮 2008/7/27~29 的鳳凰颱風的外力特性與其他三個現象區間較不相同，故未納入此分析。

因水位資料之時距為 15 秒而壓力資料為 1 分鐘，為了使二者資料有相同時間距，需將水位資料取每分鐘平均。將逐分之水位與壓力訊號經過帶通濾波取出 10-60 分鐘週期訊號，再計算出 10 分鐘之訊號均方根(RMS, root mean square)，均方根之定義為式(4-1)。水位及壓力之均方根 S_{rms10} 及 P_{rms10} ，分別代表之水位與壓力 10 分鐘內之變化強度。

$$RMS = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4-1)$$

其中 \bar{X} 為樣本平均值。將三個現象區間內所有 S_{rms10} 與對應之 P_{rms10} 分別畫成散佈圖，並計算其相關係數、 R^2 與趨勢線。仿照以上做法另外畫出 20-60 分鐘之 S_{rms} 與 P_{rms} 散佈圖如圖 4-6 所示。

由圖 4-6 標記各測站水位訊號與壓力訊號 10-60 分鐘之均方根，及在各測站水位與壓力之相關係數(Correlation Coefficient)與 R^2 之結果。10 分鐘之均方根相關係數約在 0.7 以下，即 R^2 約在 0.5 以下。若計算均方根的時間範圍擴大到 20 分鐘時，所得相關係數略為提升，僅達到 0.7-0.75，即 R^2 為 0.5-0.55 間。當計算 \bar{X} 的時間範圍擴大到 40 分鐘時，所得相關係數達到 0.8-0.85，而 R^2 則達到 0.65-0.7 以上。當 \bar{X} 的範圍超過 40 分鐘後，相關係數為 0.8-0.9， R^2 為 0.65-0.8，此結果與 40 分鐘相比變動不大。因此對訊號做均方根分析特定時間區間內之氣象海嘯變化特性時，建議時間區間以 30-40 分鐘為佳。

圖 4-7 則為各測站三氣象海嘯現象發生時段內，每小時壓力平均與每小時氣象海嘯週期 10-60 分鐘海水位平均散佈圖及相關係數。比較圖 4-6 與圖 4-7 之相關係數結果可發現，以每分鐘平均資料做均方根分析其壓力與氣象海嘯造成海水位變化之相關係數，較每小時平均

資料做均方根分析壓力與氣象海嘯造成海水位變化之相關係數佳，由此可知要分析氣象海嘯所產生之水位變化與氣候因素關係，必須使用較高取樣頻率之資料，且因氣象海嘯產生之水位訊號為 10-60 分鐘週期，故在大於 1 小時平均之氣候與水位訊號中，氣象海嘯所產生之變化特性會被平滑而消失其原有氣象海嘯的週期特性。

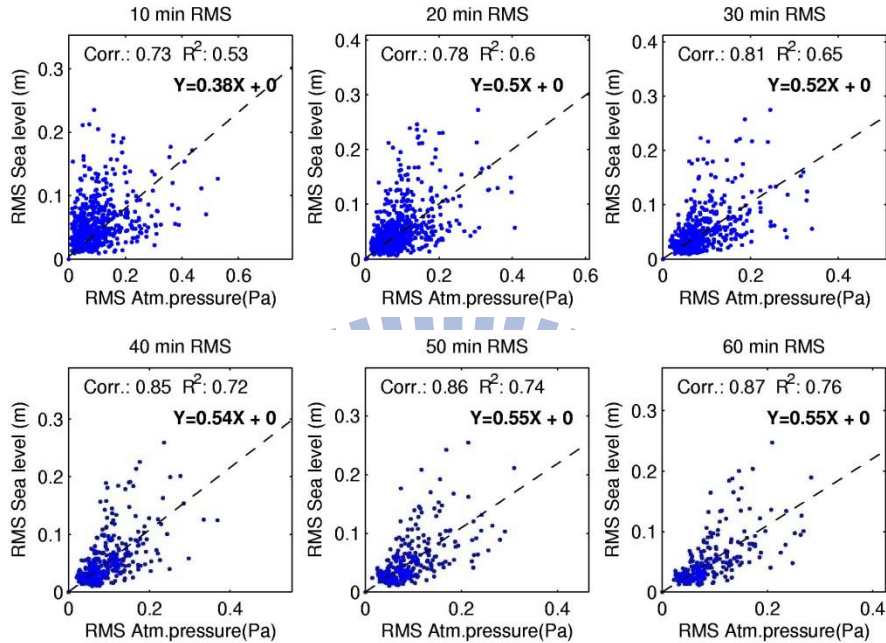


圖4-6 (a)竹圍測站

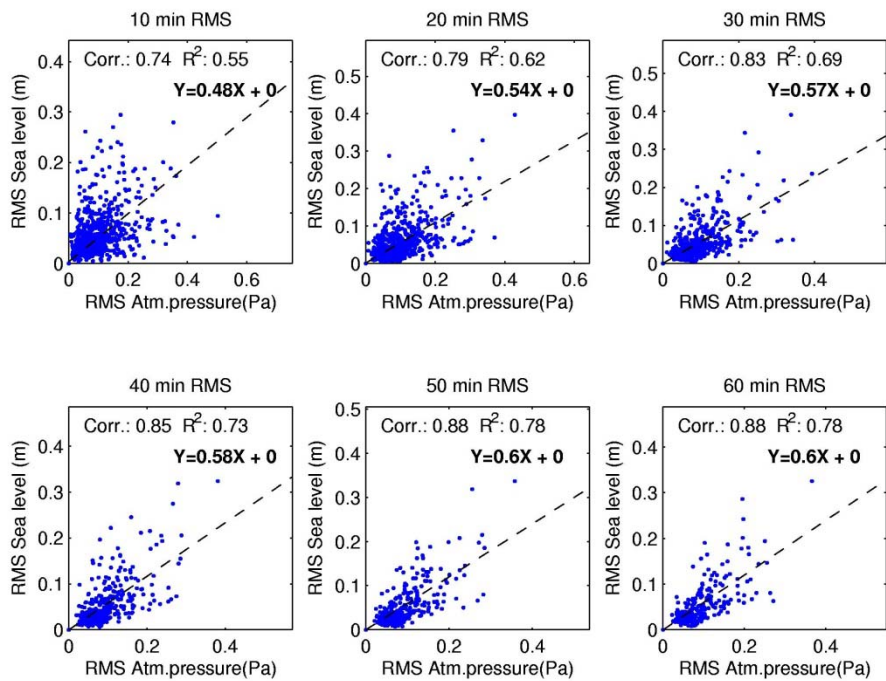


圖4-6 (b)台北測站

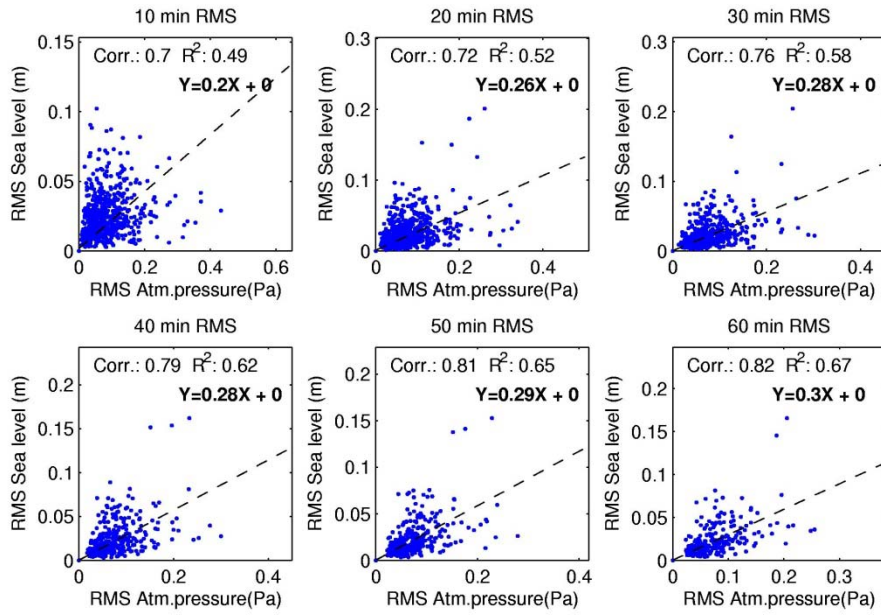


圖4-6 (c)基隆測站

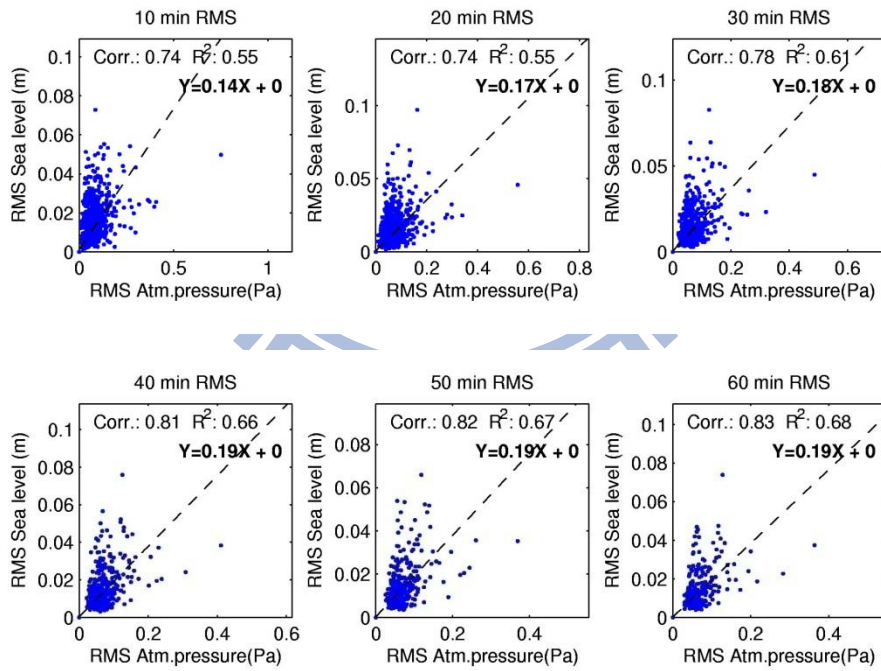


圖4-6 (d)蘇澳測站

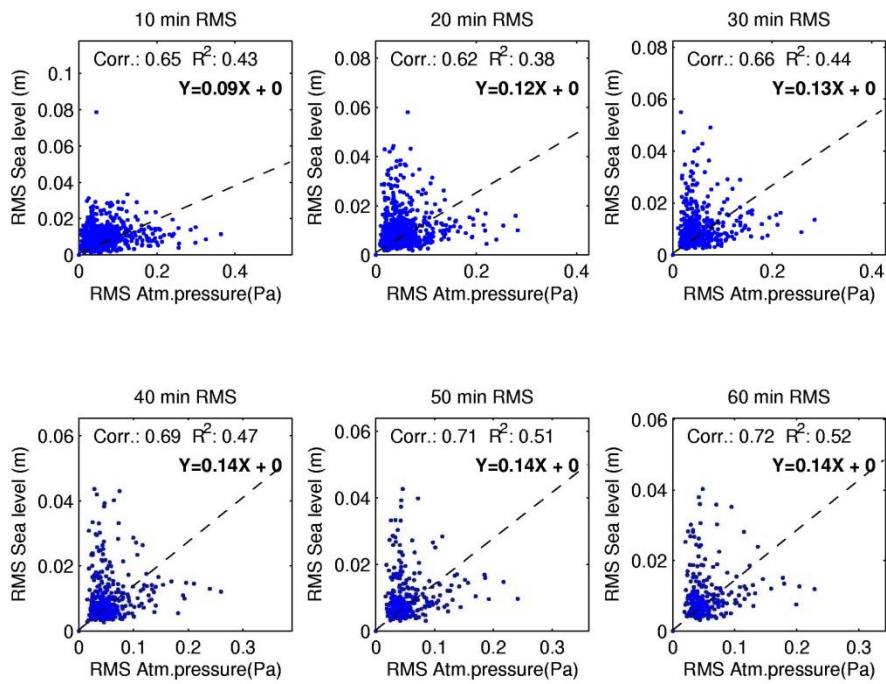


圖4-6 (e)花蓮測站

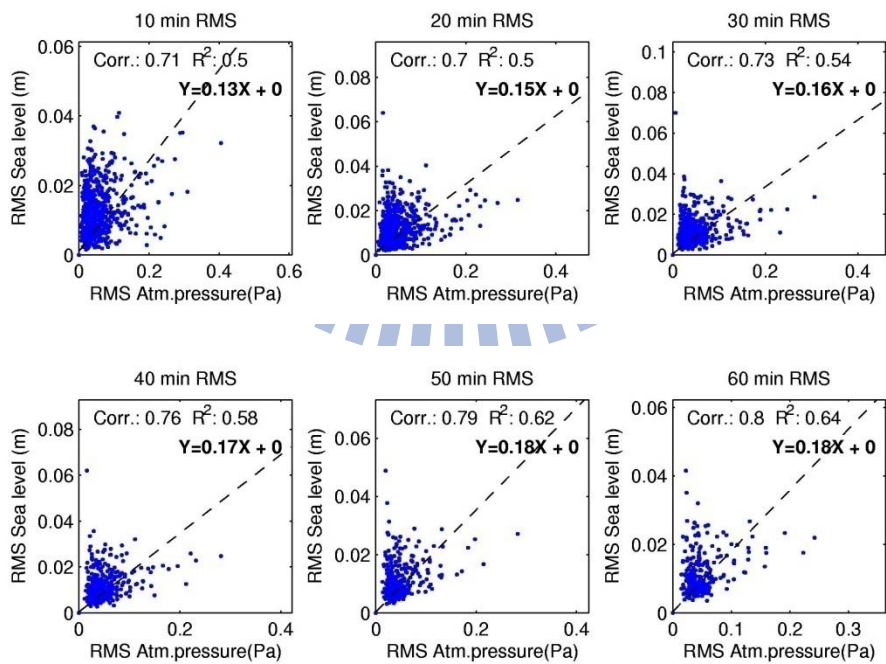


圖4-6 (f)成功測站

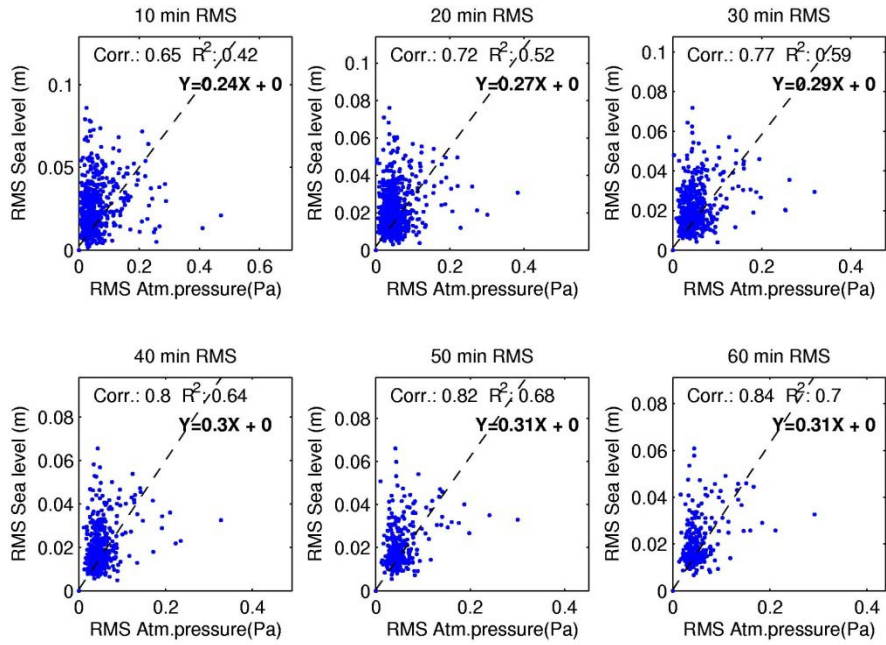


圖4-6 (g)後壁湖測站

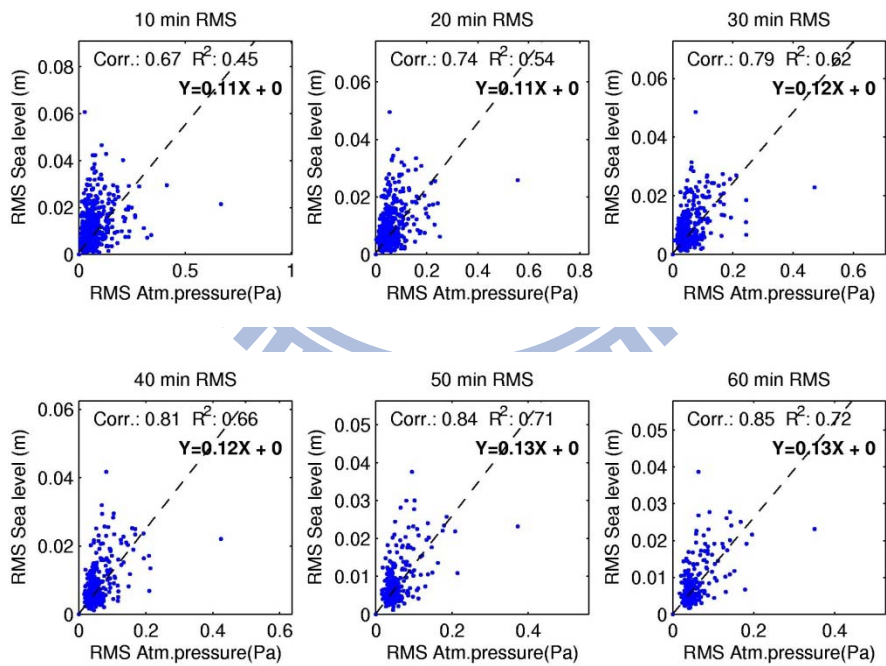
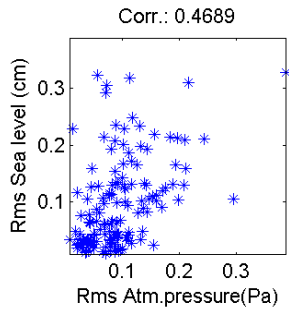
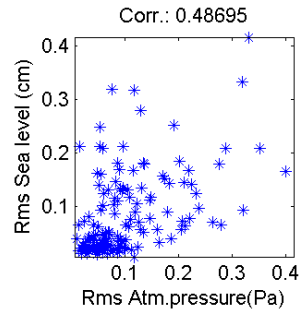


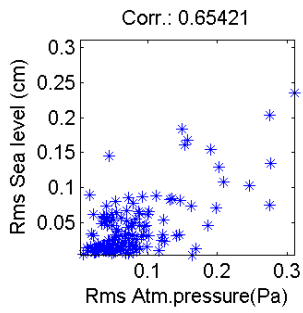
圖4-6 (h)東港測站



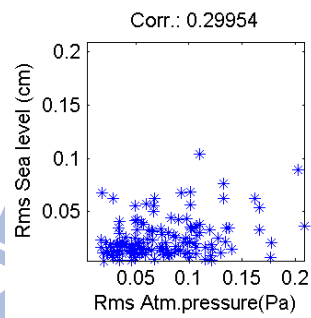
竹圍



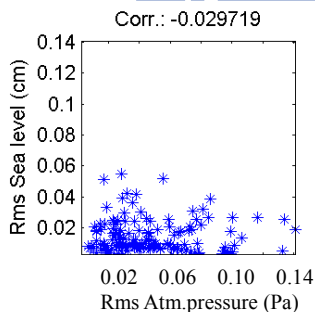
台北



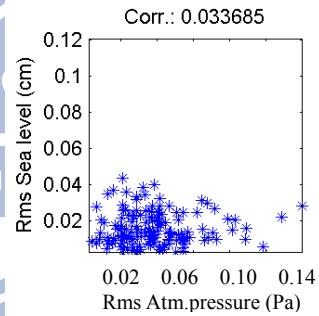
基隆



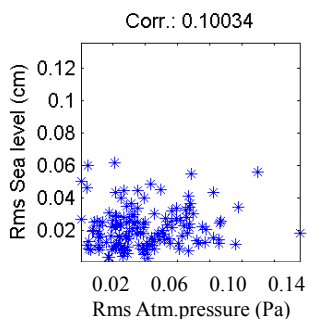
蘇澳



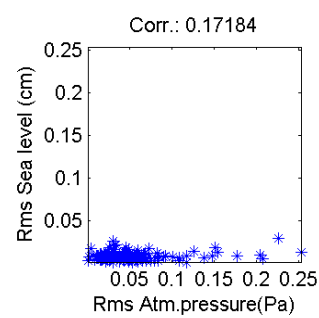
花蓮



成功



後壁湖



東港

圖4-7 各測站每小時平均壓力與水位變化之散佈圖與相關係數

4-3 陣風對氣象海嘯之影響

影響氣象海嘯之氣候因子中，除了壓力以外，陣風也是另外一個影響之因子。本研究收集中央氣象局氣象站東部蘇澳(SA)、花蓮(HL)與成功(CG)三個陸上測站之逐分平均陣風資料，將此三測站在三個主要氣候海嘯現象發生時間點(a) 2008/1/17-18、(b) 2008/1/29與(c) 2009/3/5-6之時序列圖繪如圖4-8所示。圖4-8之細線為原始逐分之陣風時序列，而粗線為一小時平滑曲線之陣風時序列。

由氣象海嘯水位振幅時序列圖3-5可發現，蘇澳港氣象海嘯發生之時間約為13時，而在圖4-8 (b)中，蘇澳測站在氣象海嘯現象發生前(12-13時)之平均陣風風速有大幅度跳動，約從每秒40公尺降至每秒20公尺再升回每秒40公尺，而在圖4-8(a)中也可發現到平均陣風有大幅度跳動，且對應圖3-5中的蘇澳也有明顯之水位振盪，故推測陣風之跳動可能為造成氣象海嘯之成因之一。

為了進一步探究陣風之吹送與氣象海嘯之生成與傳遞是否有關係，本研究假設圖4-8(a)蘇澳測站13時之平均陣風風速跳動產生了水位波動，而蘇澳測站在陣風風速跳動後之平均陣風風速約為每秒40公尺，若此風速持續向南吹送所產生之水位波動，吹送至距離蘇澳港約68公里之花蓮港所需時間約為28分鐘，而從蘇澳港發生氣象海嘯之時間與花蓮港發生氣象海嘯之時間差約為30分鐘，由此可知陣風之吹送速度與氣象海嘯波之前進速度約略相等，此一結果顯示，由蘇澳往花蓮吹送之陣風風速與氣象海嘯波速之關係符合普勞德曼共振效應(Proudman resonant effect)之條件。然而，當此陣風吹至花蓮後，其平均陣風風速陡降後並無回升，因此花蓮港之氣象海嘯振幅並不如蘇澳港。因此本研究推估，除了陣風風速與傳遞波速相近時所產生之普勞德曼共振效應外，陣風風速大幅度跳動也是影響氣象海嘯振幅的因子之一。

而圖4-8(c)所對應的時間主要受冷鋒影響，與季節風影響之圖4-8(a)與圖4-8(b)不同，因此在圖上並無觀察出明顯受陣風風速影響之結果。

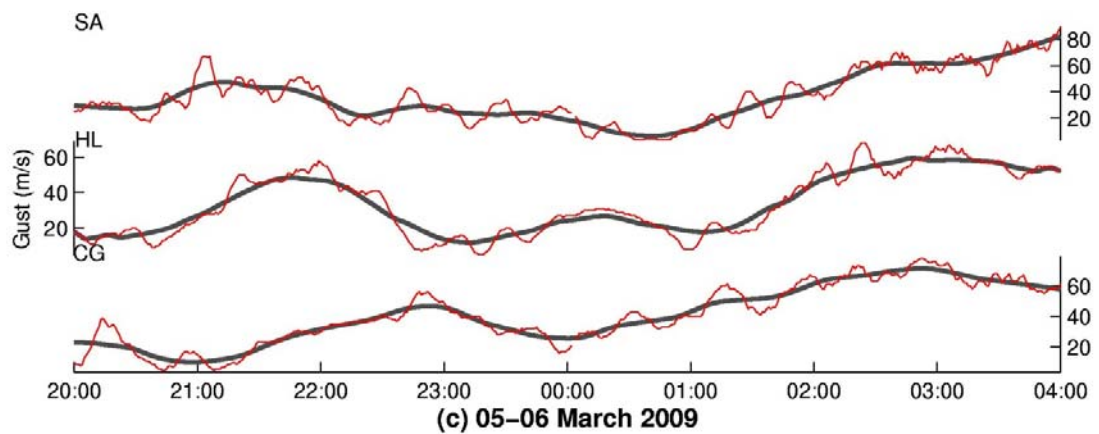
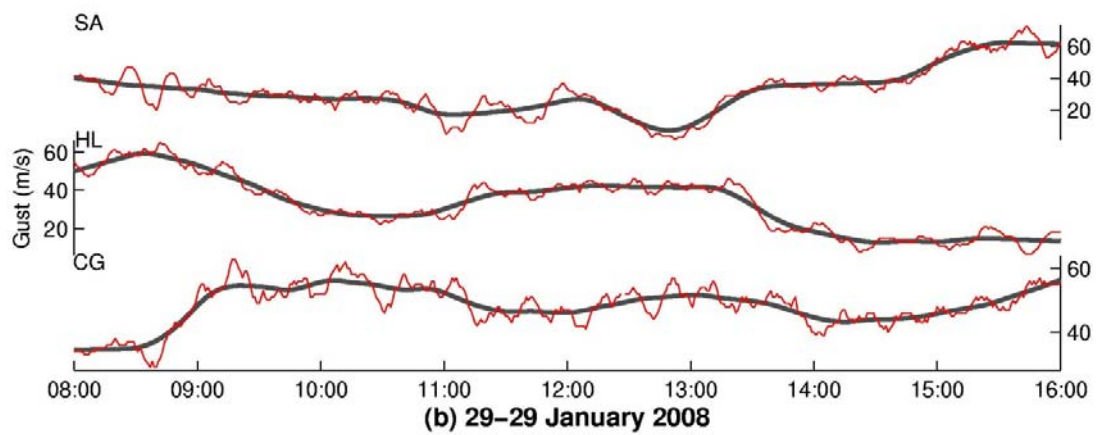
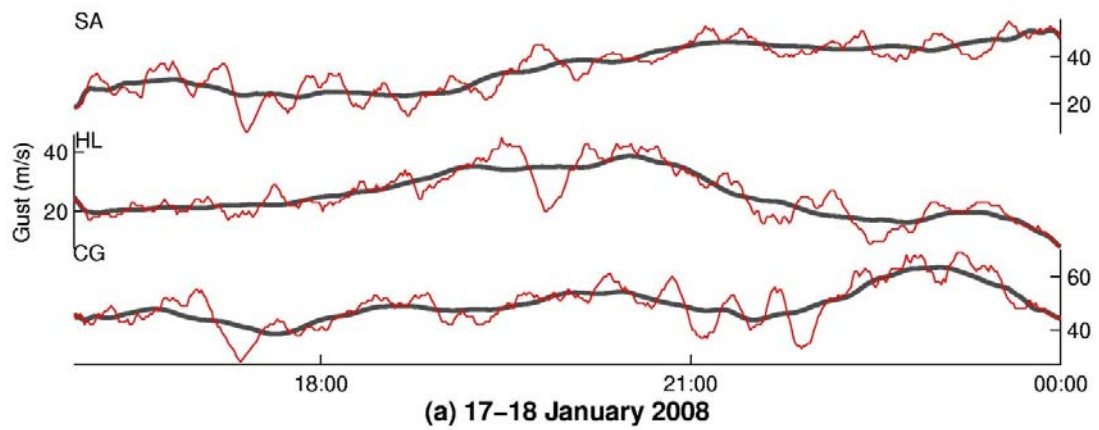


圖4-8 蘇澳(SA)、花蓮(HL)與成功(CG)氣象站在(a) 2008/1/17-18、(b) 2008/1/29與(c) 2009/3/5-6三現象區間之陣風時序列

第五章 結論與討論

5-1 結論

本文利用傅立葉頻譜與小波頻譜發現，台灣沿岸港灣內之海水位變化可觀測到波浪週期屬於海嘯(10-60分鐘週期)之海水位變化，現象顯著之港灣如竹圍、台北、基隆，觀測到之海水位振幅達到1-1.5公尺。且氣象海嘯之時間分布為1-3月為主，空間分布為台灣北部與東北部。

本文研究台灣沿岸在2008年1月至2009年6月間之氣象海嘯，確定氣象海嘯發生之外力因素以大陸冷氣團與冷鋒面為主。由於台灣周圍之大陸冷氣團與冷鋒面多來自台灣北側與西北側，故較大水位振幅多發生在台灣北部與西北部之港口。

比較各測站四個主要現象點之傅立葉頻譜可發現，氣象海嘯現象發生期間除了具有10-60分鐘週期外，有時會附帶更短之週期(10分鐘以下週期)之海水位變化。相同港灣在不同外力因素影響下，所產生之海水位振盪會有相同的週期分布；相同外力作用時，在不同港灣所產生之氣象海嘯週期分布並不相同。

氣象海嘯現象發生時期，有部分港灣受到港池共振之影響有明顯之海水位振盪，但是各港灣大部份之現象點皆無受到港池共振之影響，此可以解釋為何台灣觀測到氣象海嘯之水位變化約只有1公尺上下，而遠小於國外部份現象觀測達2公尺以上。

在分析壓力變化與氣象海嘯之相關性時發現，因氣象海嘯之週期約為10-60分鐘，分析訊號之取樣頻率以1分鐘以下之平均較佳，大於60分鐘平均之訊號，其氣象海嘯之變化特性已被平均值取代，而無法分析氣象海嘯之變化特性。對高取樣頻率訊號做均方根分析特定時間區間內之氣象海嘯變化特性時，建議時間區間以30-40分鐘為佳。且比較鋒面影響時之壓力與氣象海嘯振幅時序列後，發現了各測站氣象海嘯現象之相位差，受其壓力因素影響，故產生近似傳遞之現象。

本研究分析發現在季節風影響下，除了陣風風速與傳遞波速相近

時所產生之普勞德曼共振效應外，陣風風速大幅度跳動也是影響氣象海嘯振幅的因子之一。

5-2 討論

本文初步探討台灣沿岸受氣候因素影響之海嘯週期(1-60分鐘)長波現象，雖分析出結果與國外學者之結論相符合，但仍有更進一步探討之空間：

1. 氣象海嘯定義為氣象因子所產生之海嘯週期長波，本文雖已找出對應氣象海嘯之大氣因子，但由大氣因子發展成氣象海嘯現象之過程中，外海氣候因子所造成之影響，以及向近岸發展過程間海底地形因子之影響，仍有值得深入研究之空間。
2. 對於港灣共振部分，本研究初步檢驗出竹圍、烏石與後壁湖因波浪週期與港灣共振週期相近，水位受到港灣共振放大之可能性極高，建議後續研究可就港灣共振部分深入探討。
3. 另外，烏石與後壁湖在海嘯週期(10~60分鐘週期)之海水位訊號，可能受到港灣共振或其他外力因素之影響，常有較大之水位變化，建議可細部探究其發生之原因。

參考文獻

1. 郭一羽(2001)，「海岸工程學」，文山書局。
2. 林立青、莊文傑、張憲國(2008)，「應用EEMD法於花蓮港颱風期間水位振盪型態之辨識」，第三十屆海洋工程研討會論文集，新竹，第319-324頁。
3. Airy, G. B.: On the tides on Malta, *Philos. Trans. Roy. Soc. London*, 169, 123–138, 1878.
4. Bryant, E.: *Tsunami: The Underrated Hazard*, Cambridge University Press, *Cambridge*, 350, 2001.
5. Colucci, P. and Michelato, A.: An approach to study of the ‘Marubbio’ phenomenon, *Boll. Geofis. Theor. Appl.*, 13(69), 3–10, 1976.
6. Candela, J., Mazzola, S., Sammari, C., Limeburner, R., Lozano, C. J., Patti, B., and Bonnano, A.: The “Mad Sea” phenomenon in the Strait of Sicily, *J. Phys. Oceanogr.*, 29, 2210–2231, 1999.
7. Defant, A.: *Physical Oceanography, Vol.2*, Pergamon Press, Oxford, 1961.
8. Drago, A. F.: A study on the sea level variations and the ‘Milghuba’ phenomenon in the coastal waters of the Maltese Islands, Ph.D. thesis, *University of Southampton*, 1999.
9. Fontser´e, E.: Les ‘seixes de la costa catalana. Servei Meteorol`ogic de Catalunya, *Notes d’Estudi*, 58, 1934.
10. Gonz´alez, J. I., Fareras, S. F., and Ochoa, J.: Seismic and meteorological tsunami contributions in the Manzanillo and Cabo San Lukas seiches, *Marine Geodesy*, 24, 219–227, 2001.
11. Gilman, D.L., Fuglister, F.J. and Mitchel Jr., J.M. : On the power spectrum of red noise. *Journal of the Atmospheric Sciences* 202, 182–184, 1963.

12. Honda, K., Terada, T., Yoshida, Y., and Isitani, D.: An investigation on the secondary undulations of oceanic tides, *J. College Sci., Imper. Univ. Tokyo*, 108, 1908.
13. Hibiya, T. and Kajiura, K.: Origin of ‘Abiki’ phenomenon (kind of seiches) in Nagasaki Bay, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 38, 172–182, 1982.
14. Huang, et al.: The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proc. Roy. Soc. Lond.*, 454, 903-993, 1998.
15. Miles, J. and Munk, W.: Harbor paradox, *J. Waterways Harbor Division, ASCE*, 87, 111–130, 1961.
16. Monserrat, S., Ibberson, A., and Thorpe, A. J.: Atmospheric gravity waves and the “rissaga” phenomenon, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 117, 553–570, 1991.
17. Metzner, M., Gade, M., Hennings, I., and Rabinovich, A. B.: The observation of seiches in the Baltic Sea using a multi data set of water levels, *J. Mar. Syst.*, 24, 67–84, 2000.
18. Monserrat, S., Vilibić, I. and A. B. Rabinovich : Meteorologically induced destructive ocean waves in the tsunami frequency band, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 6, 1035–1051, 2006.
19. Rabinovich, A. B. and Monserrat, S.: Meteorological tsunamis near the Balearic and Kuril Islands: Descriptive and statistical analysis, *Nat. Hazards*, 13(1), 55–90, 1996.
20. Rabinovich, A. B. and Monserrat, S.: Generation of meteorological tsunamis (large amplitude seiches) near the Balearic and Kuril Islands, *Nat. Hazards*, 18(1), 27–55, 1998.
21. Nomitsu, T.: A theory of tsunamis and seiches produced by wind and

- barometric gradient, *Mem. Coll. Sci. Imp. Univ. Kyoto, A* 18(4), 201–214, 1935.
22. Nakano, M. and Unoki, S.: On the seiches (secondary undulations of tides) along the coast of Japan, *Records Oceanogr. Works Japan, Spec. No. 6*, 169–214, 1962.
 23. Percival, D.B., Walden, A.T. : *Spectral Analysis for Physical Applications. Cambridge University Press, Cambridge*, 583, 1993.
 24. Ramis, C. and Jansà, A.: Condiciones meteorológicas simultáneas a la aparición de oscilaciones del nivel del mar de amplitud extraordinaria en el Mediterr, 1983
 25. Rabinovich, A. B. and Monserrat, S.: Meteorological tsunamis near the Balearic and Kuril Islands: Descriptive and statistical analysis, *Nat. Hazards*, 13(1), 55–90, 1996.
 26. Tintor'e, J., Gomis, D., Alonso, S., and Wang, D. P.: A theoretical study of large sea level oscillations in the Western Mediterranean, *J. Geophys. Res.*, 93, 10 797–10 803, 1988.
 27. Torrence, C., and G. P. Compo, A practical guide to wavelet analysis, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79, 61–78, 1998.
 28. Vilibi'c, I.: Numerical study of the Middle Adriatic coastal waters sensitivity to the various air pressure travelling disturbances, *Ann. Geophys.*, 23, 3569–3578, 2005.
 29. Wu, Z. and Huang, N.E : A Study of the Characteristics of white noise using the Empirical Mode Decomposition Method, *Proc. Roy. Soc. London*, 460Q, 1597-1611, 2004.
 30. Wu, Z. and Huang, N.E : Ensemble Empirical Mode Decomposition: a Noise-Assisted Data Analysis Mothed, *COLA Technical Report* 193, 2004.