

# 近似海嘯週期長波之研究

林立青<sup>1</sup>  
環境變遷研究中心  
中央研究院

梁茂昌<sup>2</sup>  
環境變遷研究中心  
中央研究院

張憲國<sup>3</sup>  
土木工程學系  
國立交通大學

## 摘要

本文分析台灣四周之高解析度潮位計資料(10個測站)，其記錄時間自2008年迄今。經由水位資料之時頻分析，確認10-30分鐘週期的長波訊號，其最大之振幅大小可達1.5-1.0公尺，且發生時間最長約可持續0.5-2天。於台灣北部海域，其振幅相對當地潮差之比值約有0.4-0.6，顯示該長周期波浪的能量與海嘯相似。於觀測資料上長周期波之出現與大氣的擾動有相當的關係，本文亦探討不同氣候(強烈冷氣團、冷鋒及颱風)下之長波空間分佈特性。本研究首次在極短的大陸棚且水深超過1000公尺的水域觀測到近岸長週期的波動。

關鍵字：長波、海嘯、大氣擾動

## 一、前言

由大氣擾動所引致的海嘯長波(Meteo-tsunami)具有近似海嘯之震盪週期及相當的振幅。但其能量仍小於由地震所引致的海嘯。一般地震活動、海底的山崩或火山爆發等等皆可引發海嘯的產生，雖然後兩者的作用力與地震活動無關，但其水位震盪的機制可被認為是海嘯的來源Murty(1977) and Bryant(2001)。

由過去的觀測資料顯示，此種長波好發的位置通常在海灣或河口附近，但是該破壞性的長週期波卻與地震的活動無關，反而與天氣的變化及大氣的擾動有相關，於近岸或港灣的影響甚鉅亦會造成港(灣)區船隻的航行安全或造成海岸溢淹的重大破壞。往昔的大氣觀測資料與長週期水位震盪相關聯的有大氣重力波、氣壓的突降/升、颶線、鋒面的過境等等，圖1可說明天氣型的海嘯與地震引致的海嘯的相似性。

由過去約100年的水位觀測資料分析，天氣型的海嘯長波並非在任意的地方都可被觀測到，僅僅只在少數的水域發生(地中海、黃海、英吉利海峽、五大湖、日本九州沿岸、大西洋及紐西蘭沿岸等等)。根據發生的位置的不同而被給予不同的命名以代表長周的現象，如在巴利阿裏群島(Balearic Islands)稱為“rissaga”(Tintor'e et al.(1988); Monserrat et al. (1991)); 在西西里島稱為“marubbio”(Colucci and Michelato (1976); Candela et al. (1999)); 在馬爾他稱為“milghuba”(Drago(1999)); 在日本長崎灣稱為“abiki”(Honda et al. (1908); Hibiya and Kajiura (1982))。歷史上被記錄的天氣型海嘯，其最大的振幅可達4公尺，該破壞性的事件發生於1979年的長崎灣。並在氣象資料中發現大氣壓力的突升(約2-6hPa)以約31m/s的速度向長崎海域前進，如圖2。另外，於大氣的觀測數據中，可看到壓力的突升/降的傳遞在水位震盪的影響有密不可分的關係，如Jansa(2007)觀測到5-7hPa的大氣壓力突升以25m/s的速度向巴利阿裏群島前進，

並造成嚴重的港灣震盪及船隻的碰撞。Vilibic'(2004)觀測到約8hPa的壓力差沿著義大利中部的亞得里亞海域傳遞，並於多個港灣造成0.2-0.7公尺的水位震盪。

根據逆氣壓效應(inverse barometer effect, IBE)，壓力差與水位的變化約成正比，但是所觀測到的水位變動可達數倍至數十倍的逆氣壓效應所造成的水位震盪。因此線性的IBE效應並無法說明長週期水位振幅增加的機制。根據大氣擾動的傳遞效應及水位震盪的關係，Hibiya and Kajiura (1982)及Vilibic'(2004)提出Proudman共振作為長週期水位震盪的形成機制，並以水動力模式來模擬因孤立波形式的壓力差之傳遞造成長週期水位之變化。

本文於水位觀測資料中發現約1公尺的水位震盪其週期則約為10-30分鐘，但此時並無相當的地震活動報告，因此收集以1sec取樣頻率的潮位計資料予以分析其長週期波動的特性。

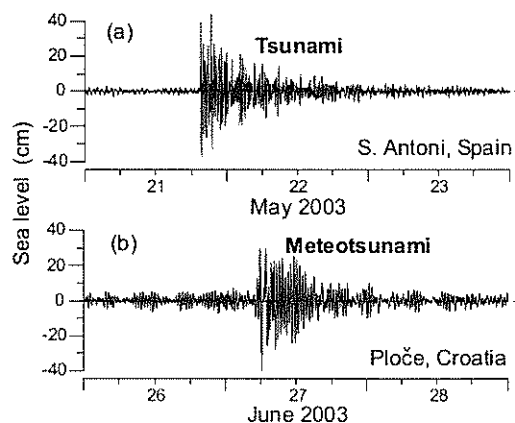


圖 1 (a) 2003年阿爾及利亞地震所引致的海嘯; (b)天氣型海嘯長波記錄於Ploče 港(克羅埃西亞)，兩者的水位紀錄皆以2小時的高頻濾波處理(Monserrat, 2006)

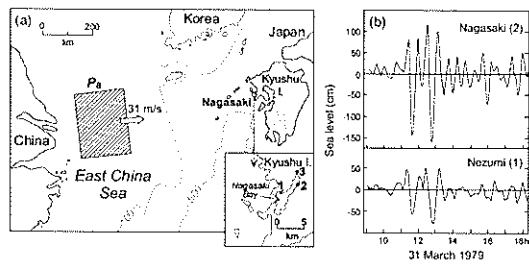


圖 2 1979年3月31日的長崎灣長週期水位震盪事件 (Monserrat, 2006)

## 二、長週期水位震盪之分析

本文以氣象局海象中心提供10個測站(圖3)之水位資料進行時頻分析，其取樣頻率為1sec並以15sec平均以降低訊噪比(SNR)，再以FFT、連續小波(wavelet)及經驗模態分解(EMD)三種時頻方法予以分析長週期水位之存在。以下說明各種分析方法

### 1. 快速傅立葉分析(FFT)

本文以FFT分析原始的水位訊號，並以長波週期與紅噪音(Red-noise)頻譜之特徵性來說明長周波其的信賴度。紅噪音頻譜相較於白噪音(white-noise)的不同在於頻譜能量隨著頻率越高而減小。而這種特性則可強調低頻的特性。而Hasselmann (1976)將一階自回歸過(AR1)程引入水位訊號並說明其紅噪音之特性。根據AR1的模式及虛無假設可說明AR1之訊號保有與原訊號的統計特性Gilman(1963)。因此紅噪音頻譜的在統計上可代表原始頻譜的特徵性，本文則以該特徵性作為信賴水準的判定。紅噪音頻譜可定義如下式：

$$G = G_0 \frac{1 - \rho^2}{1 - 2\rho \cos(\pi f_i) + \rho^2} \quad (1)$$

其中 $\rho$ 為AR1過程之參數， $G_0$ 為原始頻譜能量， $f_i$ 為原始頻譜之頻率。

### 2. 連續小波分析(CWT)

由於FFT僅能就訊號在定常與線性的假設下進行分析，且當兩頻率差小於2倍的取樣頻率時，FFT無法對兩相近頻率進行辨識。FFT在時頻的時變性並無法描述，而小波轉換則可對訊號中非非常的能量在不同的頻率上予以解析 Foufoula-Georgiou and Kumar(1995)，因此以時序列之連續小波轉換(Continuous Wavelet Transform, CWT)為時序列與小波函數的旋積，並可在適合之時間及頻率域上的取樣視窗(window)上解析。CWT之轉換式如下式：

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

其中 $\psi_s(t)$ 為不同尺度下之正交基底函數亦為小波母函數(Mother Wavelet)。而連續小波的能量則定

義為 $|W_{x,w}|^2$ ，因此在時頻上可解析出不同模態(mode)，每個模態的訊號則具有時變性，且本文選擇Morlet函數作為小波轉換的基底函數。Torrence(1998)提出小波頻譜的統計特性為chi-square分布，在此並以蒙地卡羅(Monte Carlo)法及紅噪音來定義信賴度區間。

### 3. 經驗模態分解法(EMD)

經驗模態分解法(Empirical Mode Decomposition method, EMD)是Huang (1998)所提Hilbert Huang Transform (HHT)過程中的一個部份，在進行HHT的過程先以EMD法對非線性(nonlinear)及非常態(non-stationary)的數據進行處理，而求得各模態函數(Intrinsic Mode Functions, IMF)，各分量代表各個不同能量及頻率，各分量的總和則等於原始數據。各IMF個模態訊號須滿足兩個條件：1). IMF訊號的極值數目與跨越零點(zero-crossing)的數目相等或最多相差一個。2). 訊號中極大與極小值得包絡線的平均包絡線須為零。這樣的分解過程可將載波消除及使波形具有對稱性。以下簡述EMD分解的步驟：

首先，求得訊號 $X(t)$ 中各局部極大及極小值，以內插法(Cubic spline)求出上、下包絡線(envelope)，而上下包絡線的平均值為平均包絡線，兩者個差值為第一個分量。根據Huang (1998)建議標準偏差SD值的範圍約在0.2-0.3間，當SD滿足0.2-0.3時，IMF的第一個分量 $C_1$ 即可被分解。因此，訊號可被分解成數個IMF模態，其表示式為式(3)

$$X(t) = \sum_{i=1}^n C_i + r_n \quad (3)$$

其中 $r_n$ 為各個IMF之殘差值，其值成單調趨勢或接近零。

EMD可解出訊號中不同頻率的成分，但是根據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的(Mode mixing)情況，因此提出Ensemble EMD方法，即將欲分解的訊號加入多組的白噪音(white noise)時序，該亂數時序與訊號的關係示如式(4)

$$\varepsilon_n = \frac{\varepsilon}{\sqrt{N}} \quad (4)$$

$N$ 為Ensemble number， $\varepsilon$ 為加入原始訊號的亂數之振幅大小， $\varepsilon_n$ 為則為原始訊號的標準差。藉由上述的關係將訊號加入以 $\varepsilon$ 之振幅的隨機序列，再此訊號進行 $N$ 次之EMD分解後，平均其分解出的各分量後可求得不同頻率的IMF。Ensemble EMD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震盪的尺度。且Wu和Huang (2009)說明各個IMF滿足chi-square分布並以蒙地卡羅法計算其信賴水準。

本研究以2009年1月29日竹圍測站進行三種頻譜特性的分析，示如圖4至圖6，水位資料濾除潮汐後其最大的水位震盪約(peak to peak, PTP)約為1.4公尺，並將台北及竹圍的水位除以平均潮差，其最大的變化量約>60%。由FFT的結果可看出>10分鐘與潮汐之週期都通過信賴區間的檢定，再者CWT的時頻特性說明長週期波自12時持續震盪約10小時並於12-15時有顯著的能量反應。對於EMD將原始水位分解出第3至第5個模態，其震盪的週期約為10-30分鐘，而且三個模態都可以通過95%的信賴檢定，顯示10-30分鐘的震盪具有特徵性。

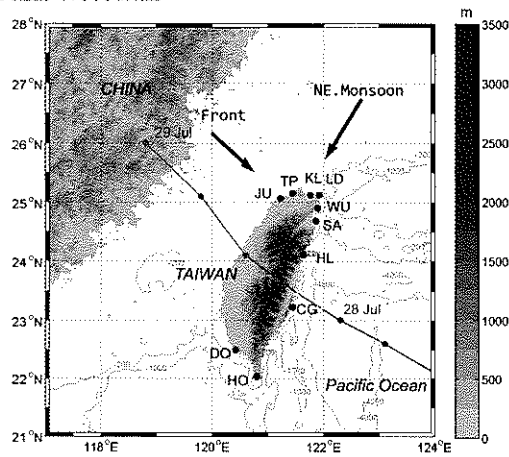


圖 3 潮位計測站及相關聯之大氣擾動事件

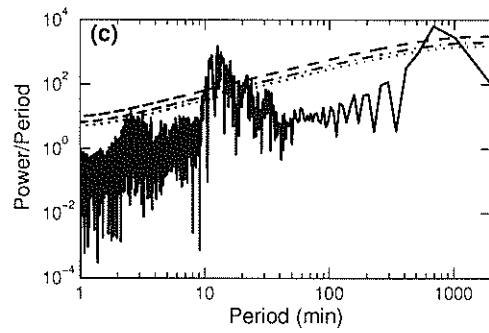
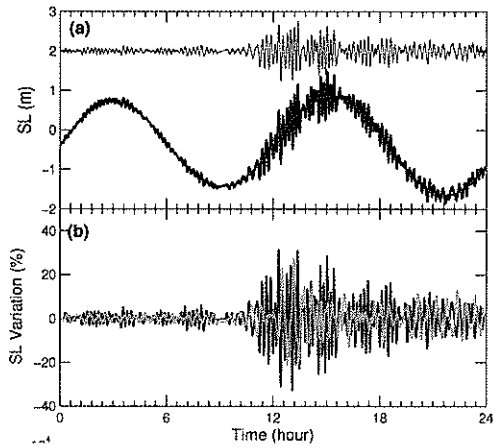


圖 4 竹圍測站2009年1月29日之水位振幅(a)原始水位及潮汐修正後之水位(b)竹圍(紅線)及台北(綠線)測站之長週期水位震盪與平均潮差隨時間之變化量(c)FFT頻普及信賴度區水準(--:99%; -.:95%; ...:90%)

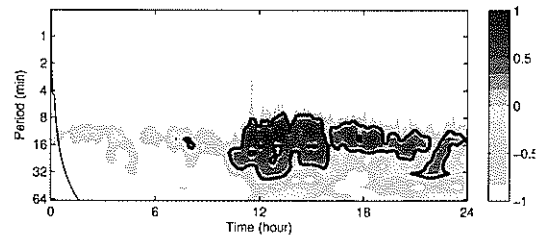


圖 5 連續小波頻譜與95%信賴水準(黑色線)

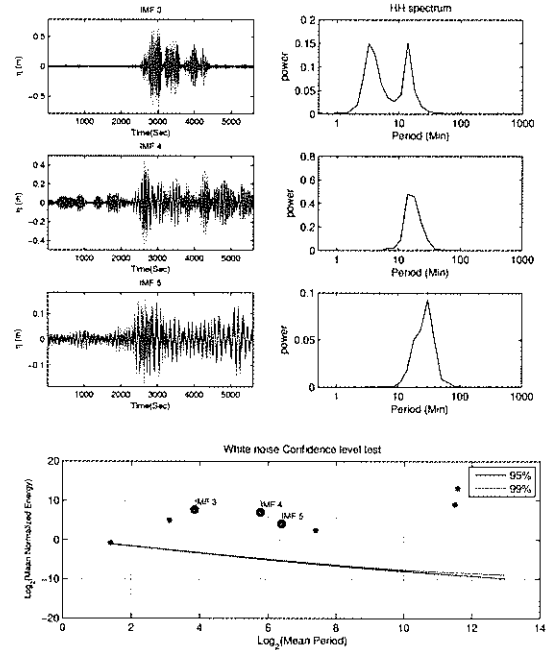


圖 6 EMD分析之第3-5的模態及95%信賴水準

### 三、時頻及空間特性分析

本文以上述三種時頻分析方法所得之水位振盪週期，其頻率上具有一致反應且具有相當的信賴水準，因此，長波的解析由不同的假設下之時頻方法，皆可清楚的辨識出其週期及其能量，所以本文在頻率的判定上應用FFT作為以下分析的基準方法。由圖4台北及竹圍測站約在同時發生長週期波的震盪，於此震盪前水位並無明顯的變化。於氣象的觀測資料中2008年1月29日受到強烈冷氣團南下，此一現象與過去文獻所觀測到的振幅較大且具長週期之波動與天氣的變異有相關的連結。且天氣的變動於文獻觀測結果多屬於中小尺度氣候(mesoclimates, microclimates)的變化，其對水氣間的交互作用貢獻出相當的能量，其影響的時間約為數小時至數天不等。所以本文將分析多個音波式潮位站資料(精度約為 $\pm 3\text{mm}$ )，予以分析空間上的分布特性是否與短時氣候變異有關，其在空間上是否具有相同的特性。

另外，這些高取樣頻率的潮位站其功用為偵測地震發生之海嘯並作為早期預警之防災功用，由於台灣在過去的400年來紀錄了五次的海嘯紀錄(Mak and Chan(2007))，造成沿岸溢淹的破壞等等。由於氣象引致的長波於地中海及日本長崎都有海岸溢淹的紀錄，最近的紀錄為2008年8月15日發生於北亞得里亞海近岸的水域，造成50-80公分的海岸地區的溢淹及港灣震盪的災害。

本文以冷氣團、颱風及冷鋒過境三種大氣擾動發生時水位進行時頻分析，發生的時間為2008年1/29-30、7/28-29及2009年3/5-6日，其對應之氣候分析圖示如7。在這三個大氣擾動所引致長週期波與地震活動並無關聯，該時亦無外部傳遞而來海嘯報告。由圖7可看出這三種大氣的擾動的尺度都可涵蓋整個台灣海域，其中以冷鋒過境則比較偏北部區域的氣候變化。所對應的水位資料經由FFT頻譜之分析，發現在長週期的成分有顯著能量反應，而且在不同的天氣現象中也有能量反映在長週期的能譜上。再將水位資料經過高斯低頻濾波，截斷頻率為8-60分鐘，以獲得長週期波發生之振幅，示如圖8至圖10。從冷氣團及冷鋒過境事件，可以看出北部區域(JU-SA)的反應較大，在冷氣團事件中，JU(竹圍)及TP(台北)港的PTP振幅約為1.4公尺，KL(基隆)及WU(烏石)亦有超過0.5公尺的振幅。在其他的測站則約有0.2-0.5不等的振幅，相較於各測站的平均潮差，基隆測站的水位振幅約略等於其平均潮差，竹圍及台北則超過60%，顯示水位的震盪約可達到海嘯的能量的情況。而且連結到風速的分布，強烈的冷氣團發生在整個台灣的水域，並持續1-2天。

但在冷鋒過境時，水位振幅JU與TP則約為0.7公尺。在鳳凰颱風侵襲台灣東部時，東部附近的水位變

化則約等同冷氣團過境時所造成震盪。另外，其值約與台北及竹圍之 $\sim 0.2$ 公尺的振幅相當。因此，水位振幅的空間分布亦可反映到天氣作用的範圍，由此顯示中尺度範圍的天氣變動確與長週期波有相當的關聯。

於FFT能譜中，不同的氣象事件下其低頻的反應都是類似的，在不同的測站也是具有相同的特徵。但是，除了長週期波外，低於5分鐘的週期亦佔有相當的能量，尤其是在颱風的事件中，相較於10-30分鐘的波動，這種短波之週期或與港灣或其海域的地形自然共振有關，但是10-30分鐘的週期以遠遠超過自然共振周期。

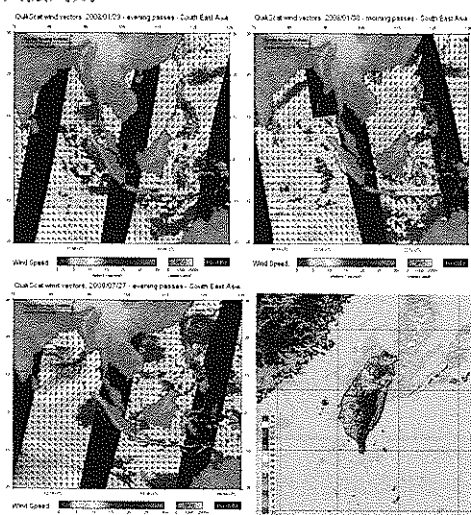


圖 7 大氣擾動之氣候分析圖(左上, 右上為冷氣團及左下為颱風之QuickScat衛星風速圖; 右下為冷鋒過境之雷達回波圖)

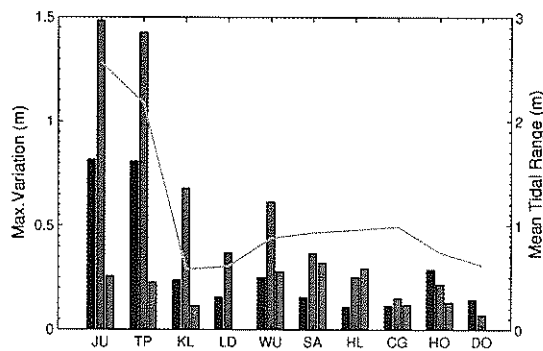


圖 8 不同氣象條件下(紅色:冷氣團;綠色:颱風;黑色:冷鋒)所對應各測站長週期波之最大(PTP)振幅變化量

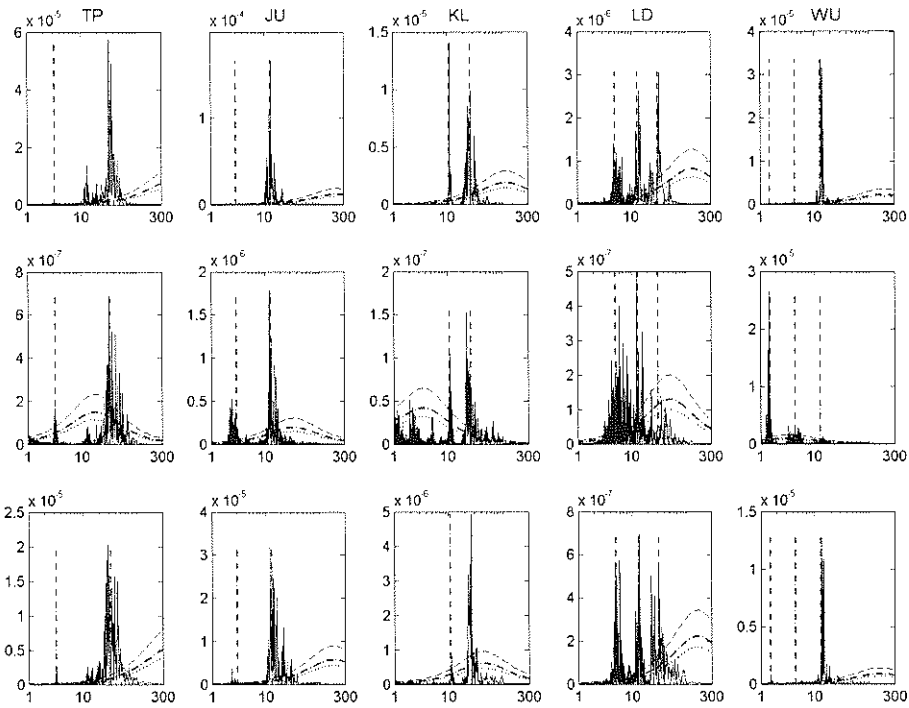


圖 9 各測站之不同氣象條件下(由上依序為普通冷氣團、強烈冷氣團、颱風及冷鋒過境)之時頻圖

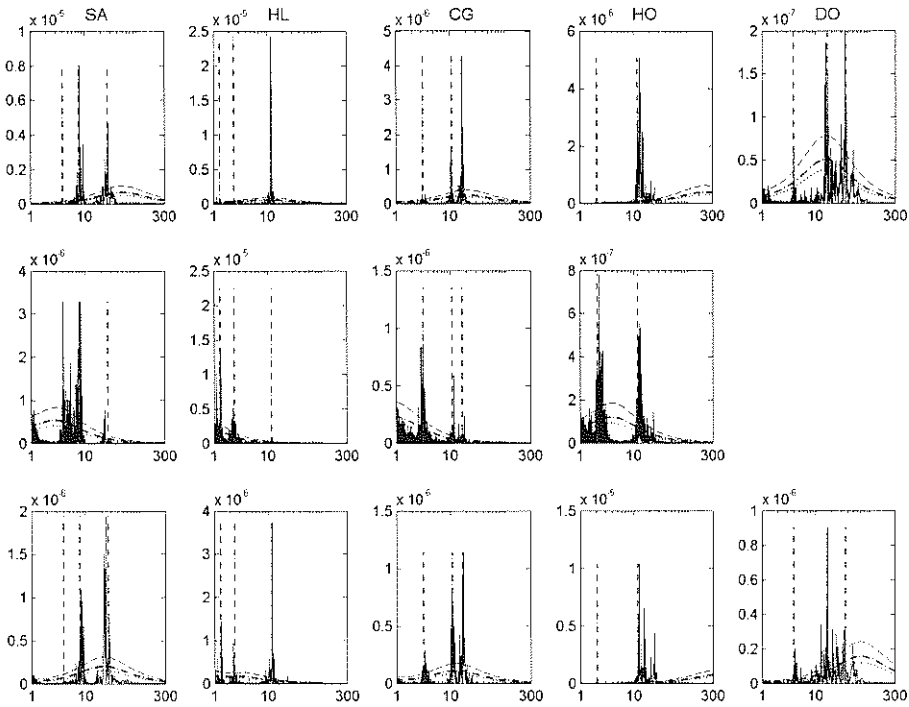


圖10 與圖9相同之各測站時頻圖

## 五、討論

本文所觀測到的長週期水位變化具有大範圍的空間特徵性及存在性，並可將其連結到相關的天氣事件上。又台灣附近的海岸地形除後壁湖(HO)唯一個天然灣澳外，大都為平直的海岸，西部台灣海峽的平均水深約為100-200公尺，東部的海底地形則是變化劇烈(離岸1km其水深可達1000公尺)。本文的長週期波動在不同的水深海域之近岸港灣都被觀測到，而且這是目前首次在約1000公尺分的海域附近，因颱風的影響而有長週期波動的觀測結果。而文獻中長週期波被激發的機制可能為Proudman共振及/或地形或港灣的共振相互作用而成，然而東部的深水觀測結果並不足說明上述機制可激發出長週期的震盪反應，未來有待進一步的研究予以探討其發生的機制。

## 謝誌

本研究水位數據由中央氣象局海象測報中心提供，使本研究得以順利完成，謹誌謝忱。

## 參考文獻

1. Airy, G. B., 1878: "On the tides on Malta," *Philos. Trans. Roy. Soc. London*, 169, 123-138.
2. Candela, J., Mazzola, S., Sammari, C., Limeburner, R., Lozano, C. J., Patti, B., and Bonnanno, A., 1999: "The 'Mad Sea' phenomenon in the Strait of Sicily," *J. Phys. Oceanogr.*, 29, 2210-2231.
3. Colucci, P. and Michelato, A., 1976: "An approach to study of the 'Marubbio' phenomenon," *Boll. Geofis. Theor. Appl.*, 13(69), 3-10.
4. Drago, A. F., 1999: 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.
5. Fofoula-Georgiou, E., and Kumar P., 1995: *Wavelets in Geophysics*, 373 pp., Academic, San Diego, Calif.
6. Gilman, D.L., Fuglister, F.J., Mitchel Jr., J.M., 1963: "On the power spectrum of red noise," *J. Atmos. Sci.*, 20 (2), 182-184.
7. Hasselmann, K., 1976: "Stochastic climate models: Part I. Theory," *Tellus*, 28 (6), 473-485.
8. Hibiya, T. and Kajiura, K., 1982: "Origin of 'Abiki' phenomenon (kind of seiches) in Nagasaki Bay," *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 38, 172-182.
9. Honda, K., Terada, T., Yoshida, Y., and Isitani, D., 1908: "An investigation on the secondary undulations of oceanic tides," *J. College Sci., Imper. Univ. Tokyo*, 108 p.
10. Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shin, H. S., Zheng, Q., Yuen, Y., Tung, C. C. and Liu, H. H., 1998: "The Empirical Mode Decomposition and Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-Stationary Time Series Analysis," *Proc. Roy. Soc. Lond.*, A454, 903-995.
11. JANSÀ, A., MONSERRAT, S., and GOMIS, D., 2007: "The rissaga of 15 June 2006 in Ciutadella (Menorca), ameteorological tsunami," *Advan. Geosci.*, 12, 1-4.
12. Murty, T. S., 1977: "Seismic SeaWaves - Tsunamis," *Bull. Fish. Res. Board Canada*, 198, Ottawa, 337 p, 1977.
13. Monserrat, S., Ibberson, A., and Thorpe, A. J., 1991: "Atmospheric gravity waves and the 'rissaga' phenomenon," *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 117, 553-570.
14. MonserraT, S., vilibic', I., and rabinovich, A.B., 2006: "Meteotsunamis: Atmospherically induced destructive ocean waves in the tsunami frequency band," *Natural Hazards Earth Syst. Sci.* 6, 1035-1051.
15. Tintor'e, J., Gomis, D., Alonso, S., and Wang, D. P., 1988: "A theoretical study of large sea level oscillations in the Western Mediterranean," *J. Geophys. Res.*, 93, 10 797-10 803.
16. Torrence, C., and Compo G.P., 1998: "A practical guide to wavelet analysis," *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79, 61-78, 1998.
17. Vilibic', I., domijan, N., orlic', M., leder, N., and PASARIC', M., 2004: "Resonant coupling of a travelling air pressure disturbance with the east Adriatic coastal waters," *J. Geophys. Res.* 109, C10001.
18. Wu, Z. and Huang, N. E., 2004: "A study of the characteristics of white noise using the Empirical Mode Decomposition method," *Proc. Roy. Soc. Lond.*, A460, 1597-1611.
19. Wu, Z., and Huang, N. E., 2009: "Ensemble Empirical Mode Decomposition: a Noise-Assisted Data Analysis Method," *Advances in Adaptive Data Analysis*, 1(1), 1-41.
20. Mak, S., and Chan L. S., 2007: "Historical tsunamis in south China," *Nat. Hazards*, 43(1), 147-164.