

應用小波轉換探討潮位與颱風暴潮 特性之研究

李汴軍¹ 黃瓊珠^{2*} 莊士賢³ 高家俊⁴

¹ 華梵大學環境與防災設計學系副教授

² 國立成功大學海洋科技與事務研究所研究助理

³ 國立成功大學海洋科技與事務研究所助理教授

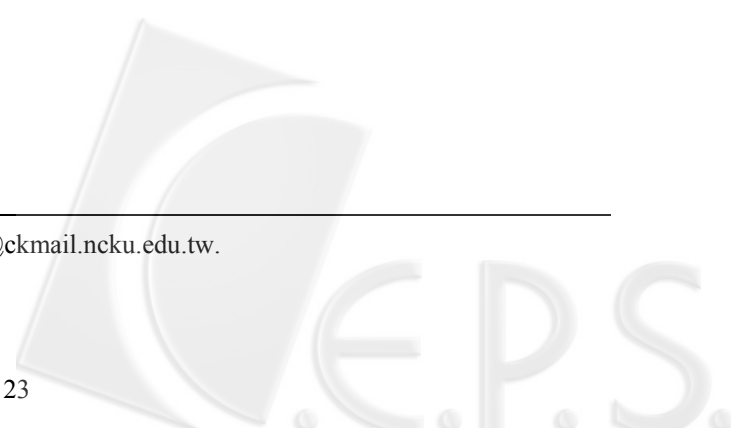
⁴ 國立成功大學水利及海洋工程研究所教授

關鍵詞：小波轉換、分潮、颱風暴潮。

摘要

本文利用小波轉換分析潮位與颱風暴潮資料，探討此二現象在小波能量之時間及頻率上的分佈特性。由潮位之小波能譜在時間上的分佈，可以判斷該觀測地區之最大潮差發生的時間；由平均小波能量在頻率上的分佈，小於頻率 0.5 day^{-1} 以下之低頻部份所佔的能量極少，顯示由氣象因素所引起的水位變化，對於潮位之調和分析的影響極小。在颱風暴潮之小波能量方面，得知頻率在 1 day^{-1} 以下的平均小波能量，其能量曲線與暴潮水位在時間上的分佈相似。因此根據暴潮之小波能量分佈，可以精確的獲得最大暴潮發生的時間；同時由小波能量變動量之變化也可以推算颱風暴潮對岸邊影響的時間。

*通訊作者(corresponding author), E-mail: paopaos@ckmail.ncku.edu.tw.



STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF TIDAL ELEVATION AND STORM SURGE USING THE CONTINUOUS WAVELET TRANSFORM

Beng-Chun Lee¹ **Chiung-Chu Huang**^{2*}

Laurence Zsu-Hsin Chuang³ **Chia-Chuen Kao**⁴

¹ *Associate Professor, Department of Environmental and Hazards-Resistant Design,
Huafan University, Taipei 223, Taiwan, R.O.C.*

² *Research Assistant, Institute of Ocean Technology and Marine Affairs,
National Cheng Kung University, Tainan 701, Taiwan, R.O.C.*

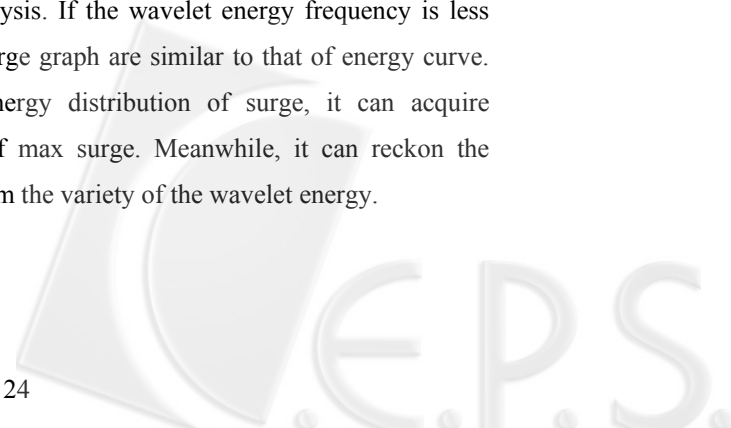
³ *Assistant Professor, Institute of Ocean Technology and Marine Affairs,
National Cheng Kung University, Tainan 701, Taiwan, R.O.C.*

⁴ *Professor, Department of Hydraulic and Ocean Engineering,
National Cheng Kung University, Tainan 701, Taiwan, R.O.C.*

Keywords: wavelet transform, tide component, storm surge.

ABSTRACT

This paper adopts wavelet transform to study the phenomena of tidal elevation and storm surge based on the observed tidal data. The characteristics of space and frequency distributions of these two phenomena can be revealed by the wavelet energy. The wavelet energy of the tidal distribution in the time evolution is able to determine the maximum difference of tide occurring time for the observation location. Due to the energy parts less than 0.5 day^{-1} are very small magnitude from the low frequency, it is demonstrated that the variations of water elevation induced by the meteorological factor can be neglected from the harmonic analysis. If the wavelet energy frequency is less than 1 day^{-1} , the distributions of storm surge graph are similar to that of energy curve. Therefore, according to the wavelet energy distribution of surge, it can acquire accurately the time of the occurrence of max surge. Meanwhile, it can reckon the influence time of storm surge on shore from the variety of the wavelet energy.



一、前言

潮汐(tide)是海洋運動現象中極為重要，且為持續的作用力之一，舉凡涉及海岸工程、海洋工程、港灣工程之研究規劃，潮位資料的收集與分析為基本的背景工作之一，因此必須有固定的觀測設備及連續的紀錄，經由調和分析(harmonic method)、統計分析等方法，求得規劃設計條件。另潮位的資料對於海域流場數值模式邊界條件的提供與檢核亦為必需；或者進行潮位預報，提供航運規劃、工程施工及海上遊憩活動的參考，因此潮汐和人類的活動息息相關(陳與黃，1990)。

潮位之分析及預報方法包括非調和分析法(non-harmonic method)、反應函數法(response method)及調和分析法(harmonic method)等，其中調和分析法需要長期的觀測資料，其分析與推算較為容易，故此分析方法常應用於潮位分析上(張與許，2001)，例如陳與黃(1990)使用調和分析探討台灣附近海域的潮位變化特性。楊等(1996)利用頻譜法及調和分析法，分別分析基隆與高雄的水位資料，探討其分潮的組成及低頻變化，然而測站的平均水位、 M_2 及 K_1 分潮的分潮振幅並不因資料的增長而漸趨穩定，有明顯的 10 年以上的低頻變化，而年變化並非全是由 S_a 天文潮所引起，而是由非天文潮因素所主控，例如黑潮變化。王(2001)利用小波函數作為潮位訊號的濾波器，把訊號中高頻能量的雜訊過濾，再將重建過後乾淨的訊號輸入類神經網路，重新做類神經網路預測及補遺的功能，確實能提升其潮位預測的精確度，但提升能力無法達到最佳，其原因在於潮位主要的能量來自於全日潮與半日潮的低頻能量，而高頻能量的雜訊佔潮位中能量分佈的比例很小，所以對類神經網路而言，潮汐訊號所受到的雜訊干擾不大，換句話說即類神經網路具有一定的雜訊容忍度。

對於某一測站來說，由於颱風來襲時所造成的暴潮波動之變化過程，一般有三個階段：前驅湧(forerunner)、颱風暴潮(storm surge)及餘湧(resurgence)。前驅湧是當颱風中心離測站還有一段距離時，先行的湧浪使測站水位波動緩慢的增加，開始於颱風到達前幾個小時或更長的時間。繼前驅湧之後，颱風中心接近測站，由於大氣擾動急遽發展，氣壓下降，測站水位急速上升，颱風中心通過後，水位又很快的轉為急速下降，這個階段是水位波動全程的主體部份，一般稱為颱風暴潮，颱風暴潮大致發生在颱風中心從該測站經過的時候，持續時間為 2~5 小時或更長的時間，這和相鄰測站水位的升降不一致，表示它主要是局部地區的風和氣壓所引起的作用。餘湧是颱風暴潮過後所殘留的波動，由於隨風暴潮而來的能量受沿岸反射，可以存留於港灣內相當長的時間，這時港灣內長週期副振動仍未衰弱，因此這種週期為幾個小時的殘留波動，可以維持較長的時間，振幅越來越小，水位呈波動性下降，逐漸接近於天

文潮位(方等, 1986)。

Tou *et al.* (1986)利用線性模式分析 Victoria Harbour 的動力特性,以獲得港內水道在風暴潮期間之平均頻譜分析圖,其能譜具有窄頻的特點,各頻率的組分量與各分潮的頻率相當一致,研究結果表示,分析的頻率在整個潮汐能帶的範圍之內,對應於 2.3×10^{-5} Hz 的能譜正好與天文潮之半日潮頻率的一致。Subbotinaa *et al.* (2001)調查太平洋東北部的南加州至 Aleutian 島,於 1982-1983 年及 1997-1998 年間的聖嬰現象,利用頻譜分析海水面的低頻變化,在這兩個主要事件期間,太陽年週期 (S_a)、太陽半年週期 (S_{sa}) 及由海氣象因素所影響的分潮振幅,相較於非聖嬰現象的年份有增加的現象。因此利用潮位的頻譜分析可以比較歷年潮位在低頻的變化,進而推斷水位變動的起始及結束的時間。

由以上之研究可知,調和分析可以反應當地之區域特性,然而潮位資料經過調和分析後所得到的分潮振幅並不因資料的增長而漸趨穩定,有明顯的 10 年以上的低頻變化,此乃由非天文潮因素所影響(楊等, 1996);王(2001)在濾除高頻能量雜訊後,無法將潮位預測的精確度提升至最佳,因此本文在分析颱風暴潮的能量分佈時,著重在低頻部分的分析。

分析潮位資料一般以傅立葉轉換(Fourier transform)最常使用,但其分析結果僅能得到頻率和能量的關係,無法得知能量在時間上的分佈。小波轉換(wavelet transform)可以瞭解在時間域上的能譜密度及各頻率的能量在時間上的分佈,特別是瞬間的物理量變化。近年來小波理論的應用漸廣,如 Jay and Flinchem (1999)、Luettich *et al.* (2002)、Pancheva and Mukhtarov (2000)、Flinchem and Jay (2000)、Chambers *et al.* (2002)、Lim and Lye (2004)、黃(2005),將小波理論應用在潮位資料的分析,使得資訊的判斷上更為容易。

本文利用小波理論分析潮位資料,以探討其能量在時間域及頻率域上的分佈特性,並且討論颱風期間,因暴潮所產生的能量在時間及頻率上的變化現象。

二、小波理論

數學上 $L^2(R)$ 定義為可度量函數 f 在實數軸上所形成之向量空間,存在於 $L^2(R)$ 之任意時序列訊號 $\eta(t)$,其訊號能量為有限值,若對此訊號進行傅立葉轉換,可獲得其頻譜函數,定義如下:

$$\eta(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \eta(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (1)$$

式 (1) 中 t 及 f 分別為時間及頻率。若將頻譜函數之實部與虛部值平方相加,即可獲得該訊號之能量譜。在實際運用上,訊號在時間域上的完整性會影響能譜分析的精確度,且訊號

經傅立葉轉換得到的能譜，表現的是各頻率下的平均能量強度，不能反映局部時間的能譜訊息，若時序列訊號包含一些局部雜訊在內，整個能譜值皆會受其影響，故此工具只對定常性 (stationary) 訊號的分析有意義。

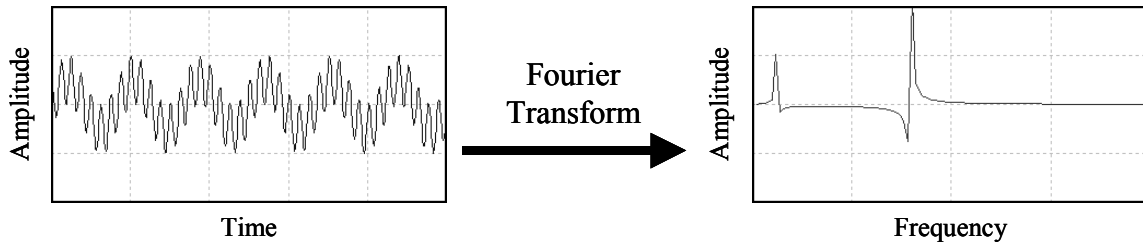


圖 1 經過傅利葉轉換的頻率圖

若訊號不滿足定常性假設，採用傅立葉轉換分析其能譜特性是不適當的作法。Gabor (1946)提出短時傅立葉轉換 (short time Fourier transform, STFT)，即在傅立葉轉換式中加入一視窗函數，利用視窗平移涵蓋全部的時間範圍，萃取每個局部時間上之能量訊息，如圖 2 所示。由於短時傅立葉轉換在每個頻率的時間域視窗寬度均相同，時間與頻率的視窗大小固定，因此不能敏感的反應信號的突變(秦與楊，1995)，故無法完整萃取能譜之頻率域局部訊息。

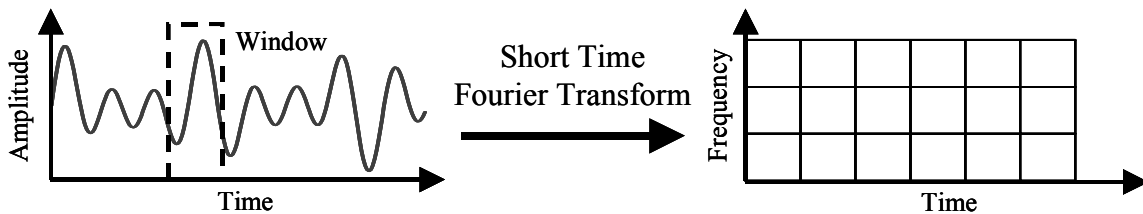


圖 2 經過短時傅立葉轉換的時間-頻率圖

小波分析的方法是一種視窗大小固定，但其時間窗及頻率窗都可改變的時間與頻率局域化分析方法。小波轉換的含義是：將小波母函數 (mother wavelet) $\psi(t)$ 做位移 τ 後，在不同尺度 a 下與待分析的信號 $x(t)$ 作內積：

$$WT_x(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-\tau}{a} \right) dt \quad a > 0 \quad (2)$$

其等效的頻域表示式

$$WT_x(a, \tau) = \frac{\sqrt{a}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) \psi^*(a\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \quad (3)$$

式(3)中 $X(\omega)$ 、 $\psi(\omega)$ 分別為 $x(t)$ 、 $\psi(t)$ 的傅立葉轉換。



小波轉換之時間與頻率的視窗特性與短時傅立葉的時間與頻率視窗不一樣，因為 τ 僅僅影響視窗在時間軸上的位置，而 a 不僅影響視窗在頻率軸上的位置，也影響視窗的形狀。因此小波轉換對不同的頻率在時間域上的取樣步長是可以調整的，會依據頻率域上的分析位置適當的調整時間域及頻率域上的視窗寬度，充分掌握該訊號之時間與頻率的局部特性。

小波母函數之選擇對小波的時間與頻率的分析而言十分重要，由於本文進行小波轉換之目的是為獲取潮位在時間域及頻率域之能量分佈的訊息，故具有複數型態之小波母函數成爲應用上之基本條件，因此本文利用 Morlet 函數作爲潮位資料分析的小波母函數，其時間域函數之形式爲：

$$\psi_k(t) = e^{ikt} \cdot e^{-t^2/2} \quad (4)$$

其頻率域函數是由 $\psi_k(t)$ 經傅立葉轉換爲：

$$\hat{\psi}_k(\omega) = (2\pi)^{-1/2} \cdot e^{-(\omega-k)^2/2} \quad \omega > 0 \quad (5)$$

$$\hat{\psi}_k(\omega) = 0 \quad \omega \leq 0 \quad (6)$$

Morlet 函數之頻率視窗結構，如圖 3 所示，其頻率視窗爲一高斯分佈曲線，是以某一對應頻率爲中心點向兩側呈對稱衰減，即頻率視窗爲一對稱形狀，而頻率包含範圍亦呈對稱，能量集中於中心處，即頻率域上有良好的局部化定位。

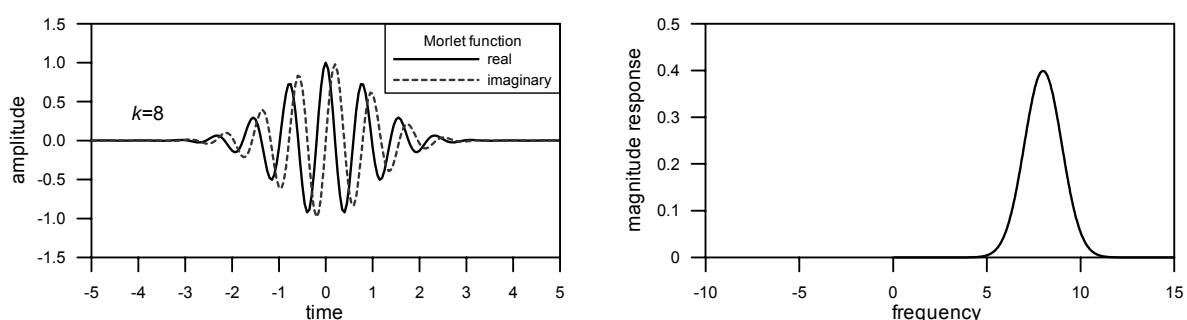


圖 3 Morlet 小波函數在時間域及頻率域上之形狀

三、小波轉換與調和分析之差異

調和分析是以牛頓所提出之平衡學說爲基礎，將潮汐視爲各種分潮的總和，如圖 4 所示。潮汐運動造成對地球表面水粒子之引潮力，而引起水面起伏運動，由於星球間作規則之週期性運動，其造成之引潮力引動地球表面之水粒子運動亦同樣具有週期性，故可以用傅立葉級

數展開：

$$\eta(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos \omega_n t + B_n \sin \omega_n t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} H_n \cos(\omega_n t - \varepsilon_n) \quad (7)$$

式 (7) 中 A_0 為平均海水位； $H_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}$ 為分潮的振幅； ω_n 為分潮的角頻率； $\varepsilon_n = \tan^{-1}(B_n / A_n)$ 為分潮之相位角 (phase angle)。對於某地的潮位記錄，若能推求各分潮的振幅及相位角，即可推算當地的天文潮位，故調和分析為傅立葉轉換的另一種形式。然而潮位因受陸地、島嶼、海底等地形的變化及海水深度、海水黏滯性、海底摩擦及氣候等影響，使得潮位變化發生不規則的現象，故潮位資料為一非定常性的資料，因此將潮位資料經過傅立葉轉換後，只能得到頻率域的訊息，但是喪失了時間的資訊，故由傅立葉的轉換結果是無法得知特殊事件的發生時刻，例如颱風暴潮所發生的時間。

由圖 5 可知 Sine 波不管延伸到多長的時間，都是如此的規律，而小波的波形則是不規則的，其波形振幅的平均值為零。傅立葉轉換是將訊號用不同頻率的 Sine 波來表示，而小波轉換則是將訊號用不規則的小波來表示，如圖 6 所示。如前所述，小波轉換對不同的頻率在時間域上的取樣步長是可以調整的，會依據頻域上的分析位置適當的調整時間域及頻率域上的視窗寬度，充分掌握該訊號之時間與頻率的局部特性，故應用於潮位分析可以精確的獲得颱風暴潮的資訊。

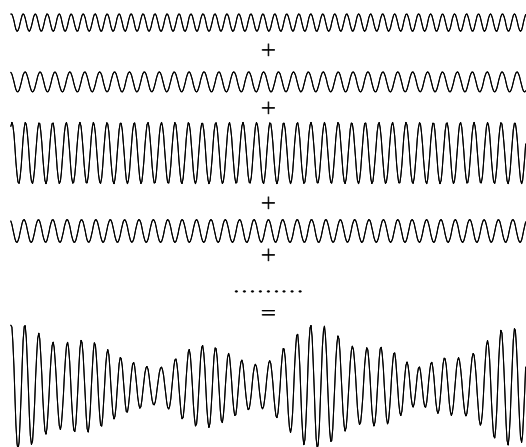


圖 4 分潮之合成示意圖

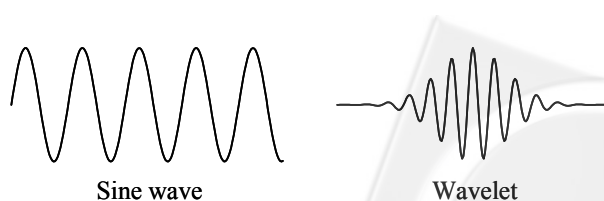
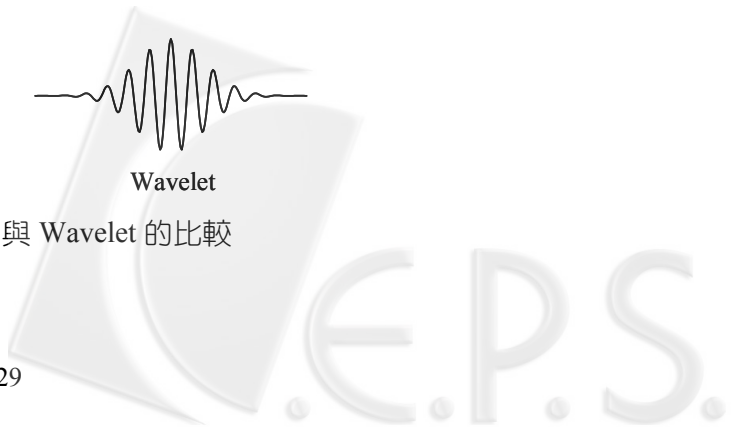


圖 5 Sine Wave 與 Wavelet 的比較



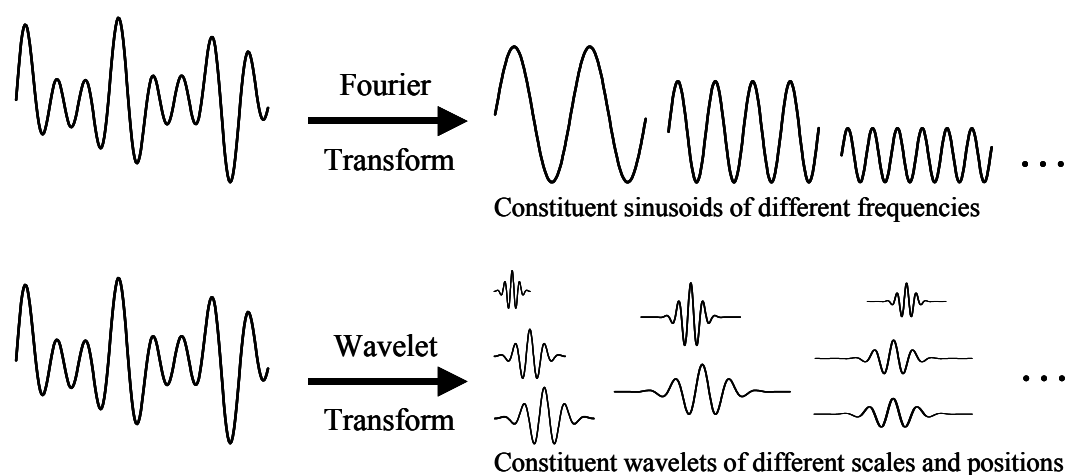


圖 6 經過傅利葉轉換及小波轉換的訊號

四、小波轉換應用於潮位之分析

富岡潮位站 (測站編碼 158) 位於台灣東部，面對開闊的海洋，附近之海底地形陡降，故當地之潮汐現象受海底地形的影響較小，因此利用富岡 1998 年之潮位資料作為小波分析之基本資料，其測站之位置及潮位之調和分析的結果如圖 7 及圖 8 所示，60 個分潮中以 M_2 、 S_2 、 K_1 及 O_1 之分潮振幅最大，相對於其他分潮振幅，其所佔之能量比率比較大，因此本文利用小波分析，探討 M_2 、 S_2 、 K_1 及 O_1 四個分潮之分潮特性。以 Morlet 函數作為小波轉換之小波母函數，其時間域上單位寬度之高斯包絡曲線內的振盪波數設定為 5，頻率之分析間距為 0.1 day^{-1} ，潮位資料之觀測時間間隔為每小時 1 筆紀錄。

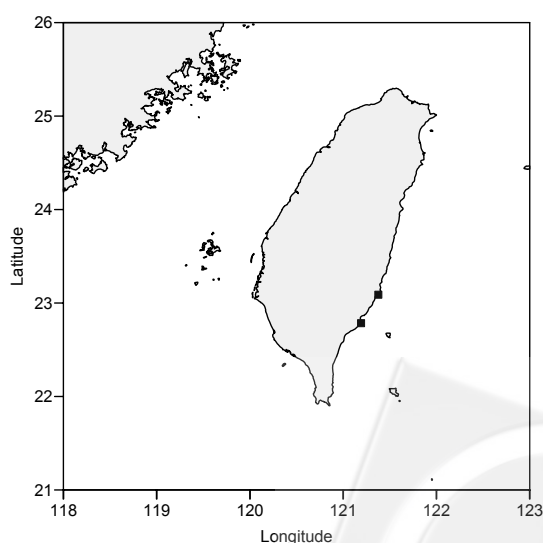


圖 7 富岡潮位站之位置圖

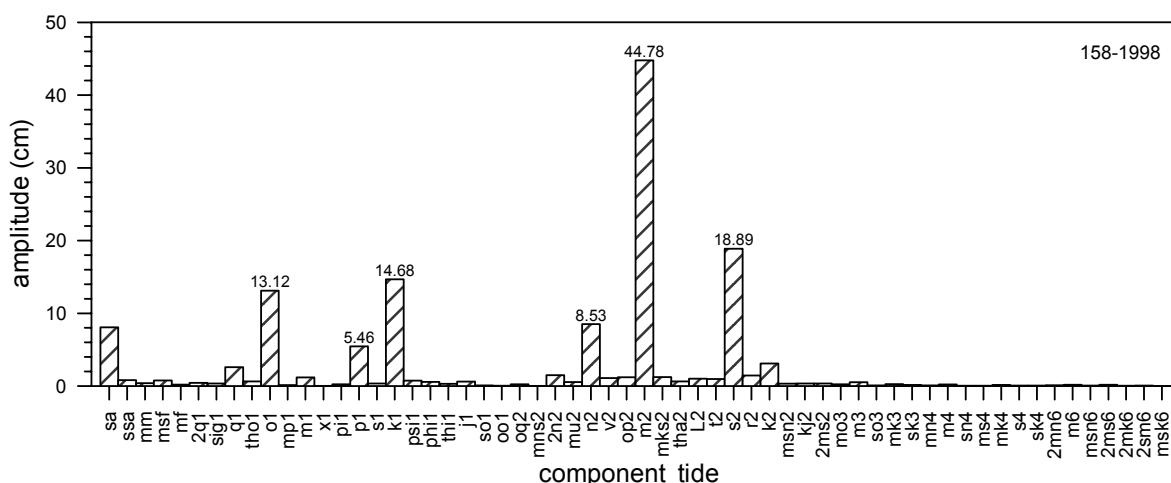


圖 8 富岡潮位站 1998 年之 60 個分潮振幅

4.1 實測潮位及天文潮位之小波分析

利用富岡潮位站 1998 年之潮位時序列資料進行小波轉換，在觀測期間富岡潮位站附近發生三個影響較大的颱風，分別是 8 月的奧托 (Otto) 颱風、9 月的楊妮 (Yanni) 颱風及 10 月的瑞伯 (Zeb) 颱風。圖 9 及圖 10 分別為實測潮位及天文潮位經小波轉換後所得到的能量分佈圖，兩者之能量分佈情形接近，天文潮位之小波能量在小於頻率 0.5 day^{-1} 以下及大於 4 day^{-1} 以上，其能量分佈均勻且在高頻部份極小，圖 9 則是以實測水位作分析，即包含天文潮及氣象潮，以颱風所引起的暴潮為例，其發生的過程約為 3 至 5 日，與颱風的行徑速度有關，其小波能量在小於頻率 0.5 day^{-1} 以下之低頻部份存在一部份能量，因此相較於天文潮位的能量分佈，實測潮位在低頻的能量分佈較不規則。由圖 9 可知，小波能量主要集中在頻率 2 day^{-1} 及頻率 1 day^{-1} ，且頻率 2 day^{-1} 之能量大於頻率 1 day^{-1} ，顯示半日週期之能量大於日週期，由圖 8 中 M_2 及 S_2 之振幅大於 O_1 及 K_1 可以得到驗證。

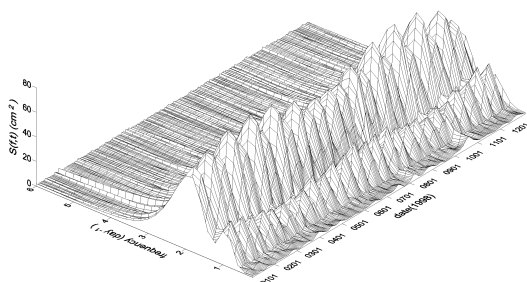


圖 9 實測潮位之小波分析的結果

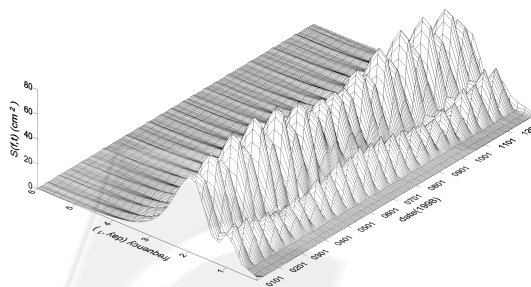


圖 10 天文潮位之小波分析的結果

由圖 9 中，在時間域上分別有頻率 1 day^{-1} 及 2 day^{-1} 之數個能量錐形分佈，且兩者之分佈週期不等，以下藉由四個主要分潮之角頻率，探討在一年的時間長度上其週期的分佈狀況。

在半月週期方面以 M_2 及 S_2 分潮為半月週期，此二者之合成週期為 $360/(30-28.9841042)\text{時}=14.76529$ 平均太陽日，一年以 365.24 日計，其年變化有 24.7 個週期，由圖 9 小波轉換之結果可知，頻率 2 day^{-1} 在一年的時間間距上共有 24 個完整的能量錐形分佈。

在日週期方面以 K_1 及 O_1 為日週期分潮，此二者之合成週期為 13.66079 平均太陽日，故在一年的時間長度中有 26.7 個週期，由圖 9 可知，頻率 1 day^{-1} 在一年的時間間距上共有 26 個完整的能量錐形分佈。

將小波能量對時間積分再除以總延時，可以得到平均小波能量在頻率域上的分佈，如圖 11 所示，圖中的直線代表 60 個分潮的頻率，其平均小波能量曲線有 2 個尖峰值，分別對應到頻率 1 day^{-1} 及頻率 2 day^{-1} ，顯示半月週期所佔的能量最大，日週期的能量次之，而 $1/4$ 日週期、 $1/6$ 日週期及月週期所佔的能量極少，小於頻率 0.5 day^{-1} 以下之低頻部份所佔的能量極少，顯示由其他氣象等因素所引起的水位變化，對於潮位之調和分析的影響極小。

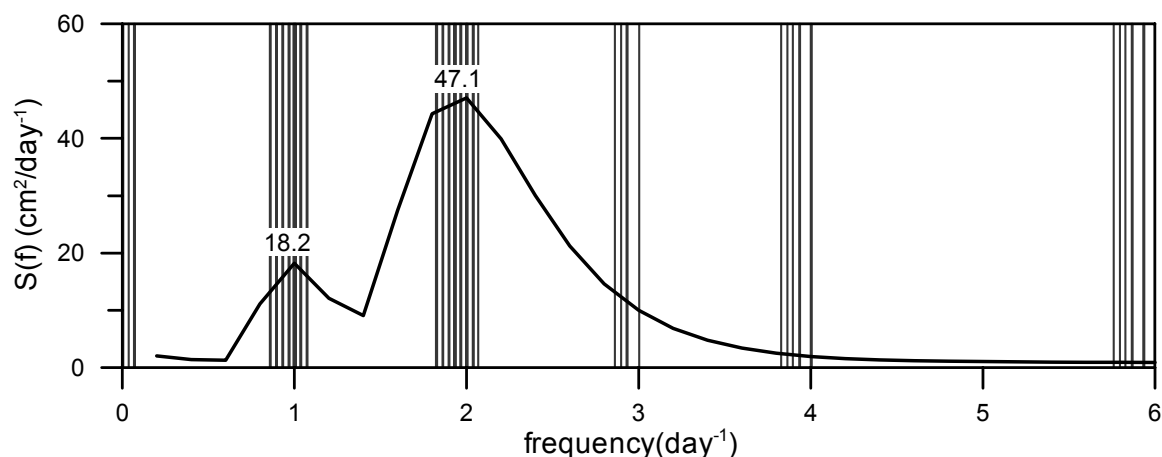


圖 11 平均小波能量在頻率域上的分佈

由時間的分佈來看，分別對圖 9 之頻率 1 day^{-1} 及 2 day^{-1} 沿時間軸切橫剖面，此二個頻率在時間域上的分佈如圖 12 所示，圖中 3 月 27 日 (農曆 2 月 29 日) 及 10 月 6 日 (農曆 8 月 16 日) 之能量較大，此二個時間點之潮位最高，正好是春秋大潮的期間，其中以 10 月 6 日之能量最大，代表秋季大潮之潮差最大。

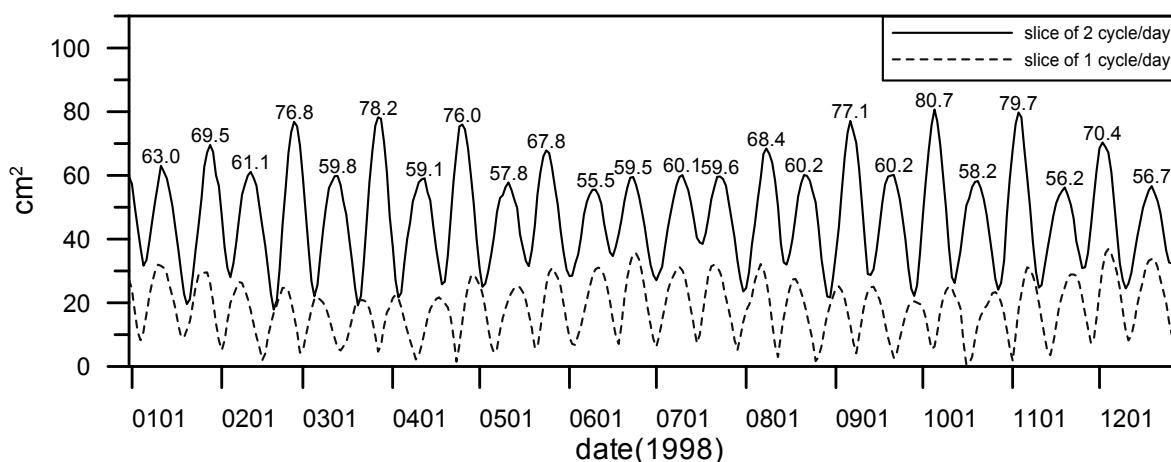


圖 12 小波能量在日週期及半日週期之時間分佈

若將小波能量對頻率積分再除以總頻率，可以得到平均小波能量在時間域上的分佈，如圖 13 所示，圖中實線及虛線分別代表實測潮位及天文潮位之平均小波能量，由圖 13 可知，實測潮位之最大平均小波能量春季發生在 2 月 28 日 (農曆 2 月 2 日)，秋季發生在 11 月 5 日 (農曆 9 月 17 日)；天文潮位之最大平均小波能量春季發生在 2 月 28 日，秋季發生在 11 月 6 日 (農曆 9 月 18 日)，兩者以秋季大潮之潮差最大。

由實測潮位統計資料可知，春季最大潮差發生在 2 月 26 日至 27 日之間；秋季最大潮差發生在 12 月 4 日至 5 日之間，因此由平均小波能量在時間域上的分佈僅能約略得知春秋大潮發生的大概時間。

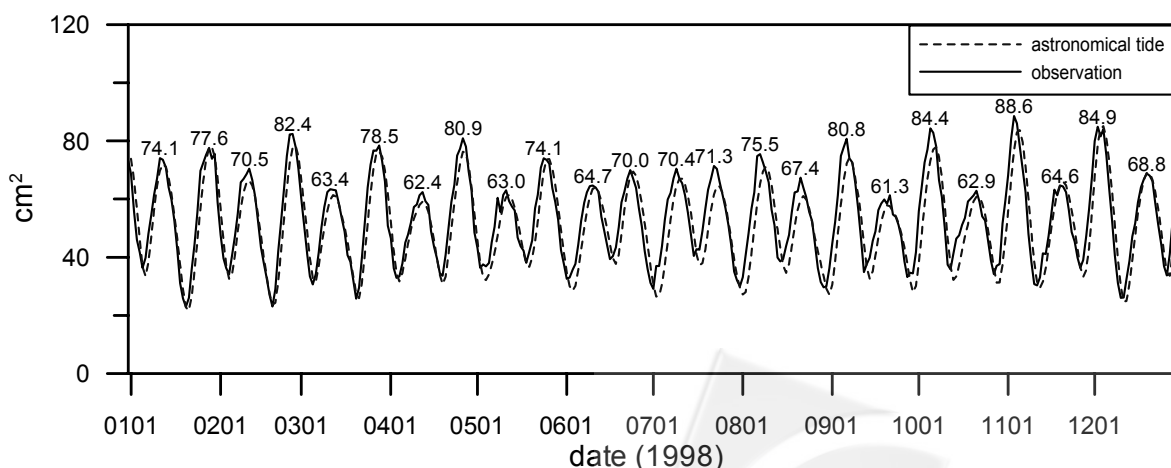


圖 13 平均小波能量在時間域上的分佈

4.2 颱風暴潮之小波分析

本文利用富岡(測站編碼 158)及成功(測站編碼 127)潮位站於 1994、1998、1999、2000 及 2003 年的颱風期間之的潮位觀測資料進行小波分析，分析的颱風有提姆(Tim, 9405)、瑞伯(Zeb, 9810)、瑪姬(Maggie, 9906)、碧利斯(Bilis, 0010)及杜鵑(Dujuan, 0313)，及各颱風路徑如圖 14 所示，各颱風之相關統計資料請參考表 1。

以 1998 年的瑞伯(Zeb, 9810)颱風為例，瑞伯颱風發生於 1998 年 10 月 13 日至 10 月 17 日，其颱風路徑如圖 14 所示。圖 15 為富岡潮位站之實測水位、天文潮位及颱風引起的暴潮水位之時序列圖，圖中最大暴潮發生在 10 月 15 日 23 時。圖 16 為富岡潮位站之實測潮位與天文潮位經小波轉換後，兩者之小波能量的分佈圖，由圖 16(a) 可知，天文潮位在低於頻率 0.6 day^{-1} 時，其能量極小；而圖 16(b) 之實測潮位在低於頻率 0.6 day^{-1} ，仍然有一部份的能量存在，在 10 月 16 日發生瑞伯颱風的時間附近，其低頻部份的能量較附近高出許多，這是由於氣象因素引起的氣象潮所產生的能量，因此將實測潮位與天文潮位兩者之能量相減，可以得到氣象潮之小波能量在時間及頻率上的分佈，如圖 17 所示。

表 1 颱風統計資料

編號	颱風名稱	警報期間	強度	路徑	近中心 最低氣壓 (hPa)	近中心 最大風速 (m/sec)	七級風 暴風半徑 (km)	十級風 暴風半徑 (km)
9405	提姆(Tim)	1994 07/09~07/11	強烈	3	945	53	250	120
9810	瑞伯(Zeb)	1998 10/13~10/17	強烈	6	920	55	350	150
9906	瑪姬 (Maggie)	1999 06/04~06/06	中度	5	965	38	250	100
0010	碧利斯(Bilis)	2000 08/21~08/23	強烈	3	930	53	300	120
0313	杜鵑 (Dujuan)	2003 08/31~09/02	中度	5	950	43	250	100

資料來源：中央氣象局

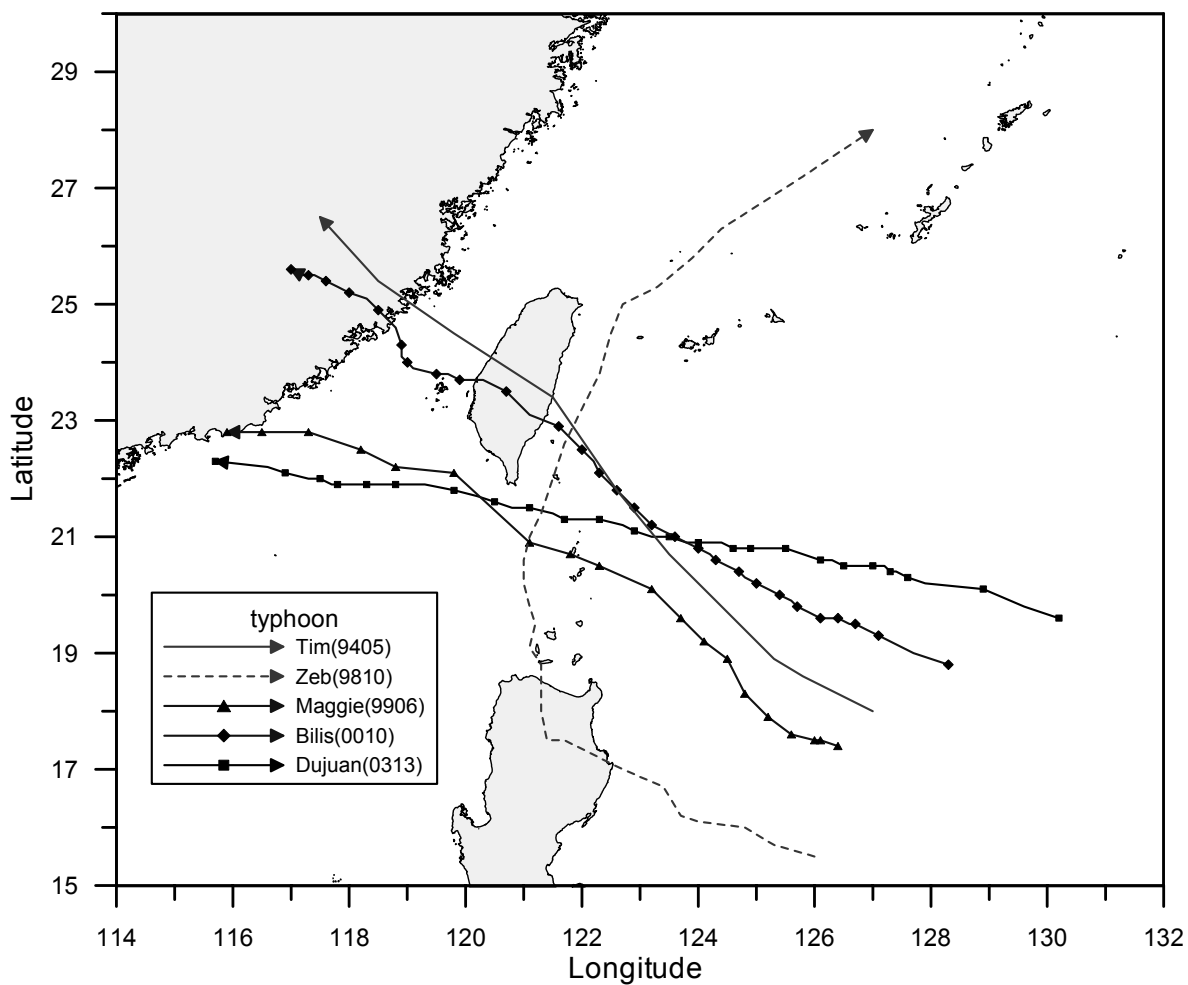


圖 14 颱風路徑圖

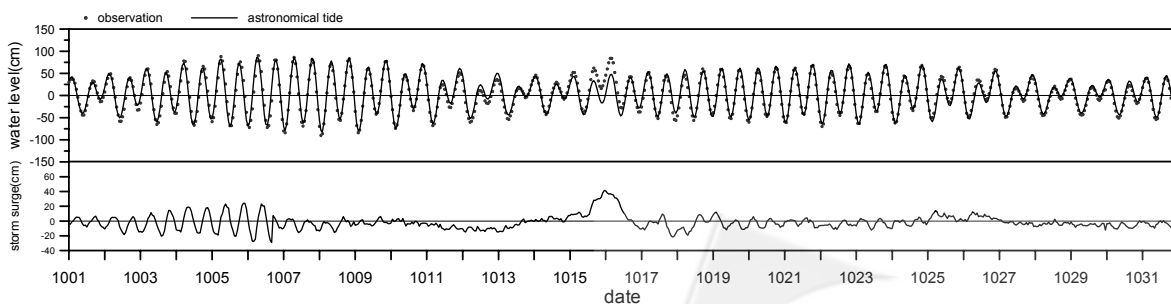
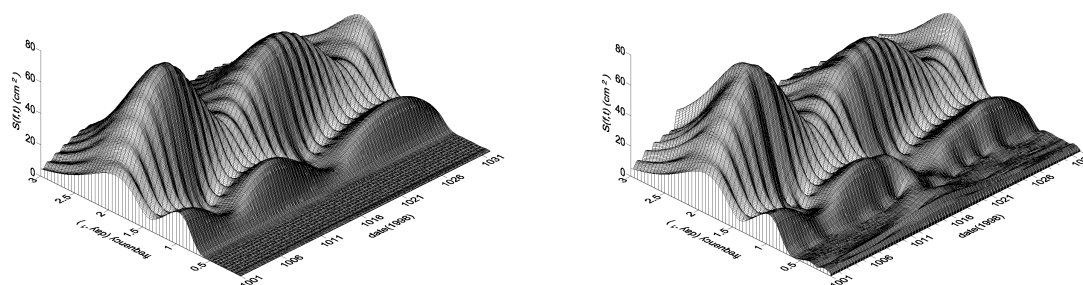


圖 15 富岡潮位站於瑞伯颱風期間之水位圖





(a) 天文潮位之小波能量

(b) 實測潮位之小波能量

圖 16 瑞伯颱風期間實測潮位與天文潮位之小波能量之比較圖

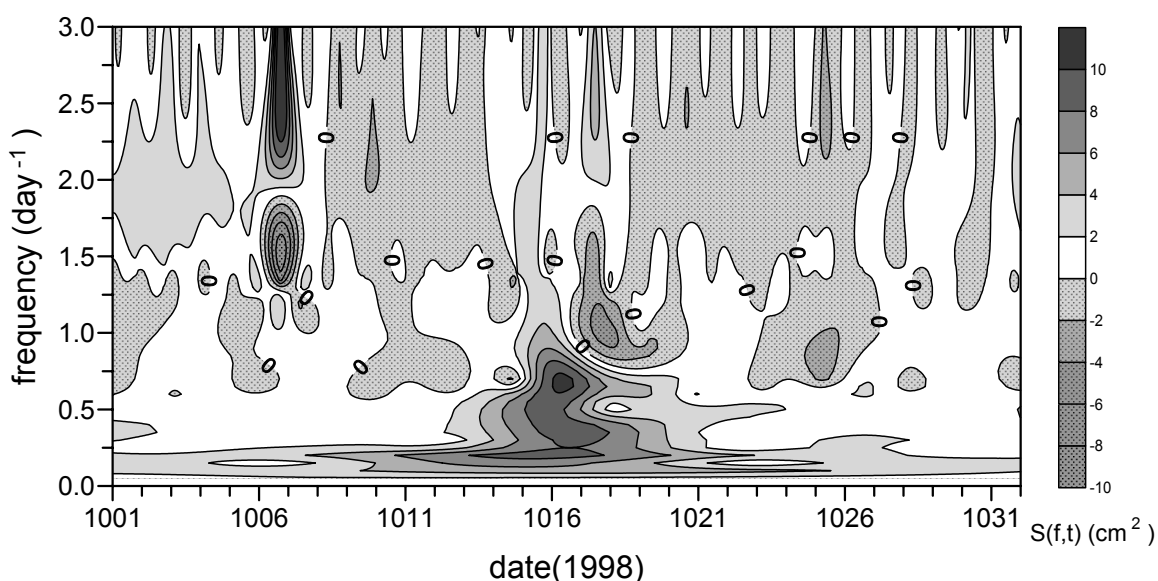


圖 17 瑞伯颱風期間颱風暴潮之小波能量分佈圖

計算圖 17 中頻率 0.1 day^{-1} 至 1 day^{-1} 之間的小波能量對頻率積分，再除以總頻率，可以得到平均小波能量，圖中等能量線包圍黑點圖示區域代表負能量，白色及灰階填滿區域代表正能量，平均小波能量 $S(f,t)$ 之單位為 cm^2 ，本文以圖 17 作為後續分析之基礎。圖 18 之上圖為成功氣象站之觀測氣壓及暴潮偏差之時序列圖，下圖為相同時間之小波能量變動量 (wavelet energy changes) 及平均小波能量。

由圖 18 之下圖可知，在天氣狀況穩定時，小波能量變動量之變化接近於 0，並且上下振幅變化不大。在颱風中心逐漸接近測站時，由於颱風的影響使得測站的氣壓逐漸下降，此時暴潮偏差及平均小波能量逐漸增加；當颱風中心最接近測站時，氣壓降至此觀測期間的最低點，同時暴潮偏差及平均小波能量增至最大值，其相對之小波能量變動量位於反轉點上；當颱風中心逐漸遠離測站時，氣壓逐漸上昇，暴潮偏差及平均小波能量逐漸減小。

比較圖 18 中之暴潮偏差及平均小波能量曲線，兩者在時間軸上的分佈相似，其發展趨勢相當一致，因此由氣象潮之小波能量分佈可以精確的得到最大暴潮發生的時間。由小波能量變動量之變化曲線可知，小波能量變動量開始增加至發生最大暴潮偏差所經過的時間約為 4 日，故由小波能量變動量之變化可以推算颱風暴潮對岸邊的影響時間。

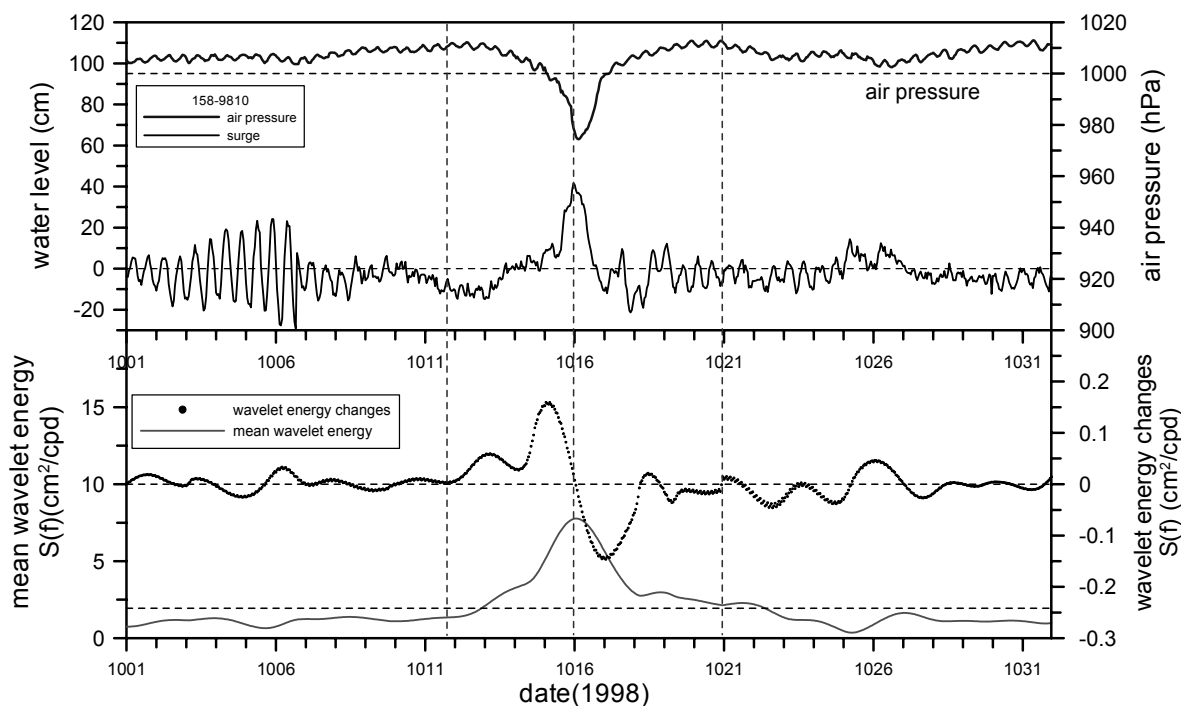


圖 18 富岡潮位站於 1998 年瑞伯颱風期間之氣壓、暴潮偏差、小波能量變動量及暴潮之平均小波能量在時間域上的分佈

利用上述的分析方法，分別探討第三類及第五類颱風路徑下之暴潮平均小波能量，其結果如下：

(1) 第三類颱風路徑

本文分析 1994 年提姆颱風及 2001 年碧利斯颱風期間的潮位資料，此二颱風均為強烈颱風。

提姆颱風颱風期間，成功測站之氣壓、颱風暴潮及暴潮小波轉換之分析結果如圖 19 所示。由分析結果可知，颱風中心的行經路徑通過台灣的中部地區，由於氣壓因素所引起的暴潮量顯著，颱風中心最接近測站時，氣壓降至此觀測期間的最低點為 956.1 百帕，同時暴潮偏差增至最大值，但是平均小波能量最大值卻發生在颱風中心通過後數 13 小時。

碧利斯颱風期間，成功及富岡測站之氣壓、颱風暴潮及暴潮小波轉換之分析結果如圖 20

及圖 21 所示。由分析結果可知，颱風中心由成功及富岡潮位站之間登陸，由於氣壓因素所引起的暴潮量顯著，颱風中心最接近測站時，氣壓降至此觀測期間的最低點為 933.8.1 百帕，同時暴潮偏差增至最大值，但是兩測站之平均小波能量最大值卻發生在颱風中心通過後 23 小時。由本文分析的例子中發現，平均小波能量最大值均發生在颱風中心通過後數小時。

(2) 第五類颱風路徑

第五類颱風路徑是颱風中心的行經路徑通過台灣南部海域，本文分析 1999 年瑪姬颱風及 2003 年杜鵑颱風期間的潮位資料，此二颱風均為中度颱風。

瑪姬颱風期間，成功測站之氣壓、颱風暴潮及暴潮小波轉換之分析結果如圖 22 所示。由圖 22 之分析結果可知，當颱風中心最接近測站時，氣壓降至此觀測期間的最低點為 992.8 百帕，同時暴潮偏差增至最大值，但是平均小波能量最大值卻發生在颱風中心通過後 16 小時。

杜鵑颱風期間，成功測站之分析結果如圖 23 所示。由圖 23 之分析結果可知，當颱風中心最接近測站時，暴潮偏差增至最最大值，但是氣壓卻提前 6 小時降至此觀測期間的最低點為 991.8 百帕，同時平均小波能量最大值亦發生在颱風中心通過前 6 小時。

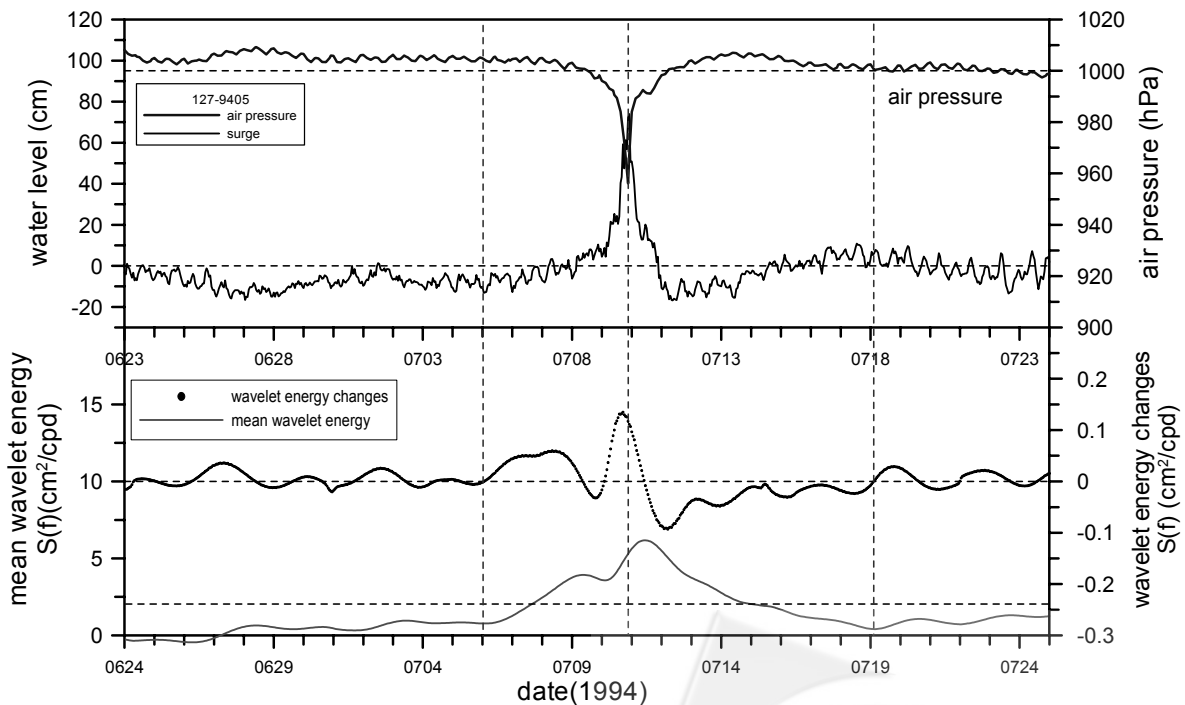


圖 19 成功潮位站於 1994 年提姆颱風期間之氣壓、暴潮偏差、小波能量變動量及暴潮之平均小波能量在時間域上的分佈

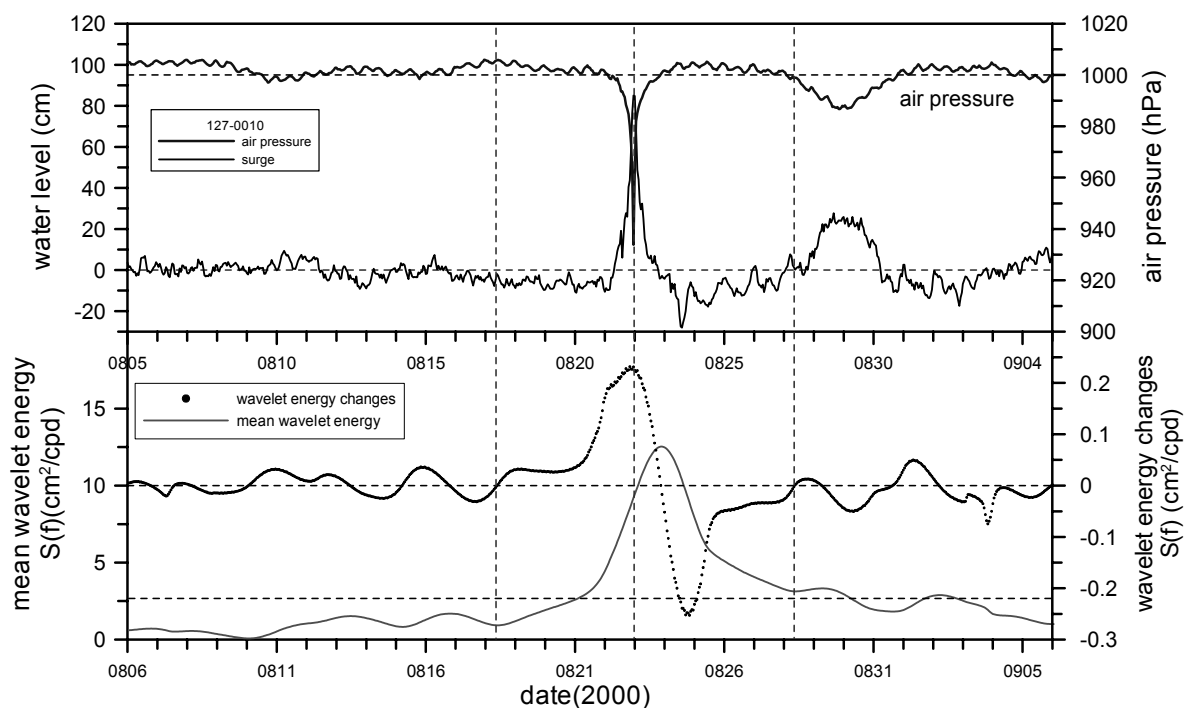


圖 20 成功潮位站於 2000 年碧利斯颱風期間之氣壓、暴潮偏差、小波能量變動量及暴潮之平均小波能量在時間域上的分佈

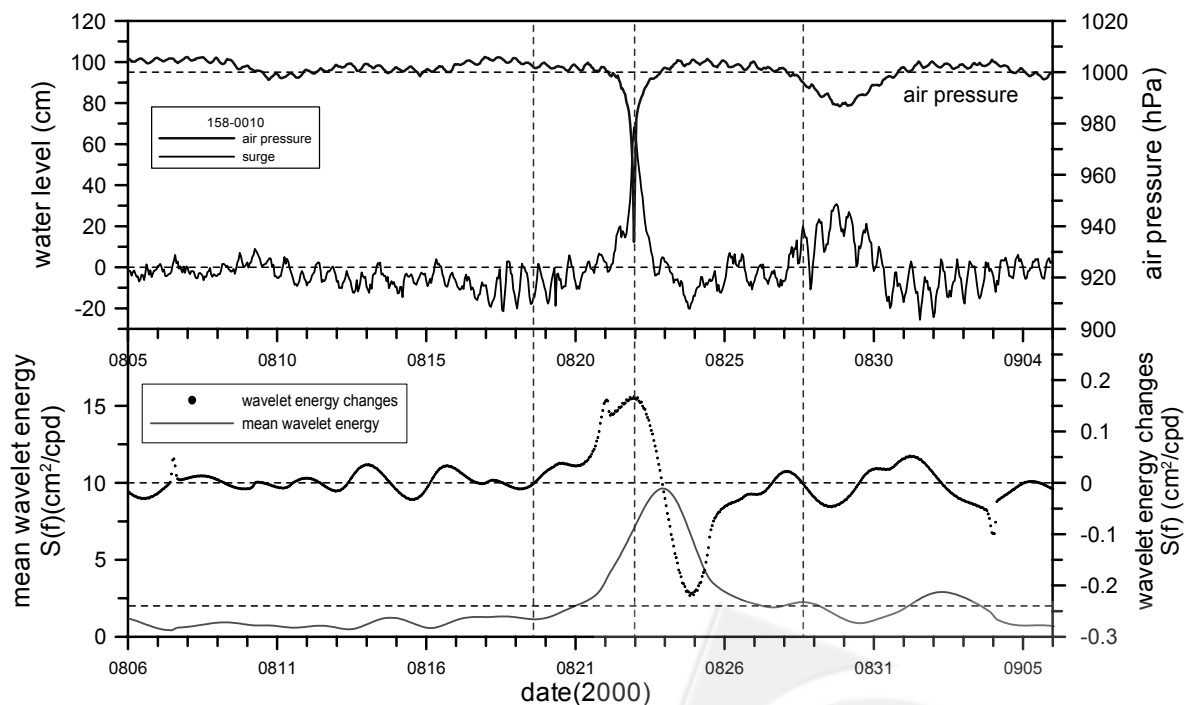


圖 21 富岡潮位站於 2000 年碧利斯颱風期間之氣壓、暴潮偏差、小波能量變動量及暴潮之平均小波能量在時間域上的分佈

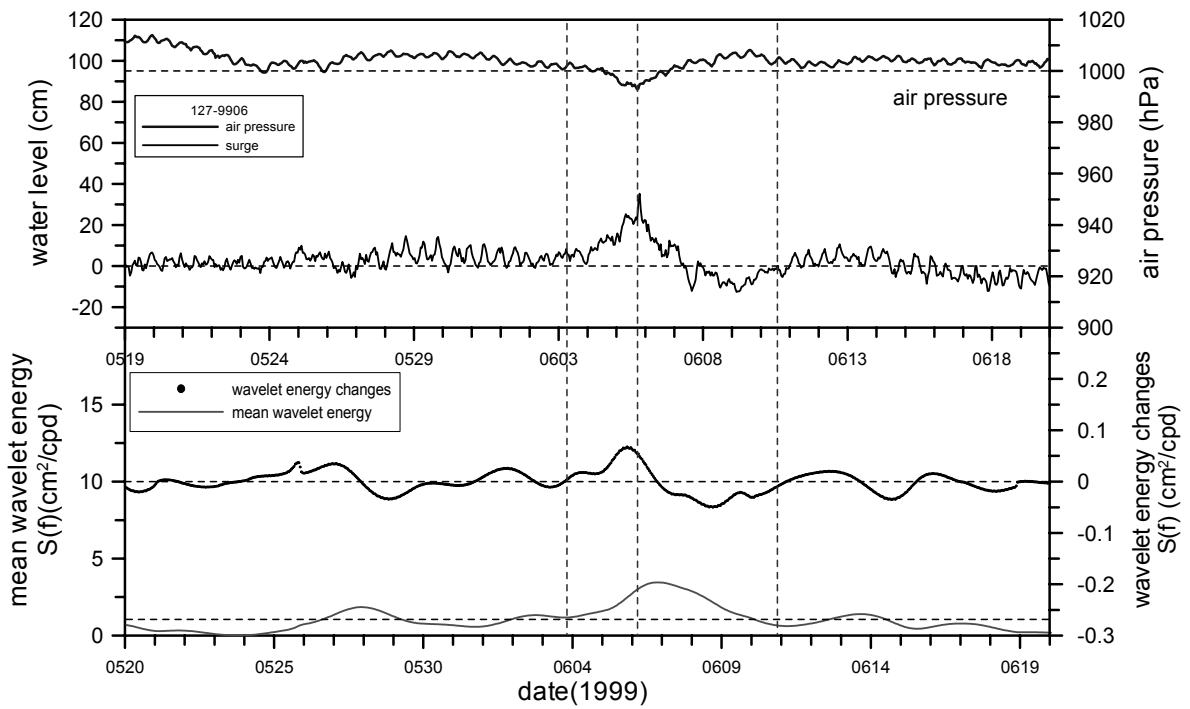


圖 22 成功潮位站於 1999 年瑪姬颱風期間之氣壓、暴潮偏差、小波能量變動量及暴潮之平均小波能量在時間域上的分佈

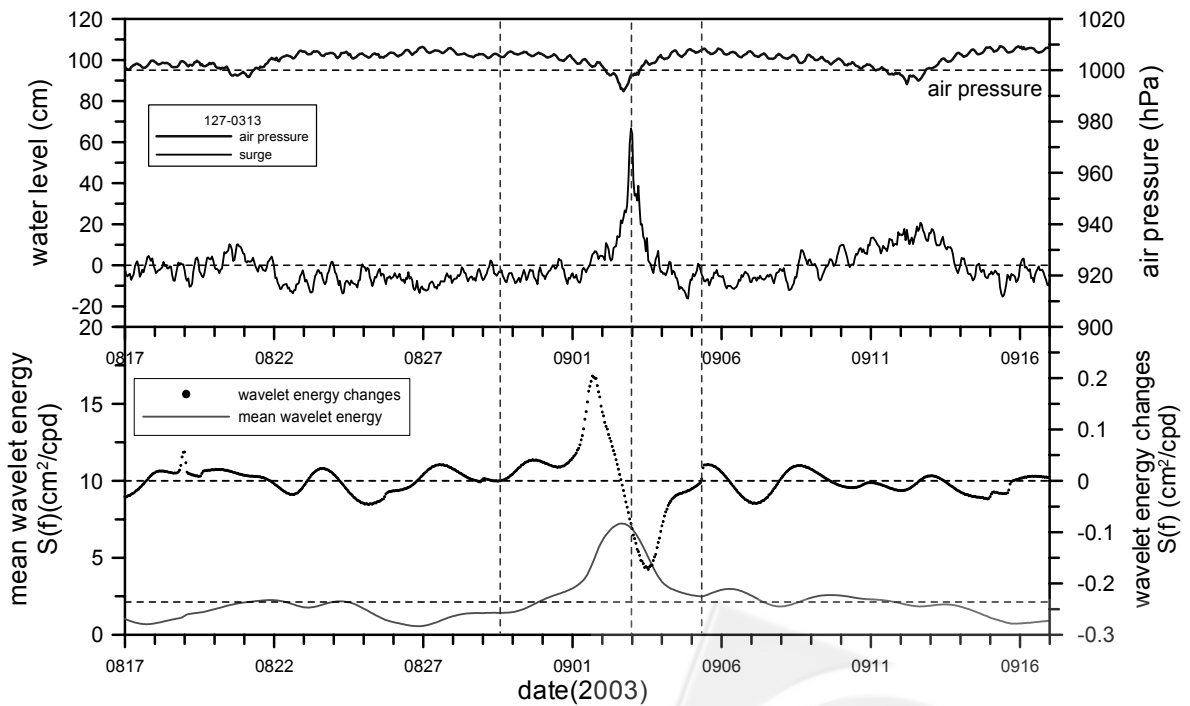


圖 23 成功潮位站於 2003 年杜鵑颱風期間之氣壓、暴潮偏差、小波能量變動量及暴潮之平均小波能量在時間域上的分佈



五、結 論

本文利用小波理論分析實測之潮位資料，可以同時取得小波能量在時間域及頻率域上的分佈，(1) 在頻率上的分佈：小波能量主要集中在頻率 2 day^{-1} 及頻率 1 day^{-1} ，與 M_2 、 S_2 、 K_1 及 O_1 四個分潮之振幅大小有關；(2) 在時間上的分佈：由 M_2 與 S_2 分潮之合成週期及 K_1 與 O_1 分潮之合成週期推算，在一年的時間長度上半日週期及日週期之小波能量分別有 24 個及 26 個完整的能量錐形分佈。由潮位之小波能譜在時間上的分佈，可以判斷該觀測地區之最大潮差發生的時間；由平均小波能量在頻率上的分佈，頻率小於 0.5 day^{-1} 以下之低頻部份所佔的能量極少，顯示由氣象因素所引起的水位變化，對於潮位之調和分析的影響極小。

由颱風暴潮之小波能量可知，頻率 1 day^{-1} 以下的平均小波能量曲線與暴潮水位在時間軸上的分佈相似，因此可由暴潮之小波能量分佈，精確獲得最大暴潮發生的時間，同時亦可由小波能量變動量之變化推算颱風暴潮對岸邊的影響時間。

分析不同颱風路徑的暴潮小波能量，由分析的結果可知，當颱風中心行經台灣東部海域時，在颱風中心最接近測站時，同時間其氣壓降至此觀測期間的最低點，暴潮偏差及平均小波能量增至最大值；當颱風中心從台灣東部登陸時，在颱風中心最接近測站時，同時間其氣壓降至觀測期間的最低點，暴潮偏差增至最大值，但是平均小波能量最大值卻發生在颱風中心通過後數小時；當颱風中心行經台灣南部海域時，最低氣壓、最大暴潮偏差及最大平均小波能量並未在發生在同一時間，反而有提前或延後的現象。

誌 謝

本文得以順利完成，感謝經濟部水利署、中央氣象局提供相關資料，及審查者提供寶貴意見，同時本文也承國科會支助 (編號 95-2221-E-211-025)。

參考文獻

- Gabor, D. (1946) "Theory of communication," *Journal of IEE* (London), Vol. 93, Part III, No. 26, pp. 429-457.
- Pancheva, D. and Mukhtarov, P. (2000) "Wavelet analysis on transient behavior of tidal amplitude fluctuations observed by meteor radar in the lower thermosphere above Bulgaria," *Annales Geophysicae*, Vol. 18, No. 3, pp. 316-331.

- Chambers, D. P., Mehlha, C. A., Urban, T. J. and Nerem, R. S. (2002) "Analysis of interannual and low-frequency variability in global mean sea level from altimetry and tide gauges," *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 27, Issue 32-34, pp. 1407-1411.
- Jay, D. A. and Flinchem, E. P. (1999) "A comparison of methods for analysis of tidal records containing multi-scale non-tidal background energy," *Continental Shelf Research*, Vol. 19, No. 13, pp. 1695-1732.
- Flinchem, E. P. and Jay, D. A. (2000) "An introduction to wavelet transform tidal analysis methods," *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 51, Issue 2, pp. 177-200.
- Subbotinaa, M. M., Thomson, R. E. and Rabinovich, A. B. (2001) "Spectral characteristics of sea level variability along the west coast of North America during the 1982-83 and 1997-98 El Niño events," *Progress in Oceanography*, Vol. 49, No. 1, pp. 353-372(20).
- Luettich Jr., Richard A., Carr, S. D., Reynolds-Fleming, J. V., Fulcher, C. W. and McNinch, J. E. (2002) "Semi-diurnal seiching in a shallow, micro-tidal lagoonal estuary," *Continental Shelf Research*, Vol. 22, No. 11-13, pp. 1669-1681.
- Tou, Stephen K. W. and Arumugam, K. (1986) "Spectral analysis of storm surge in Hong Kong Victoria Harbour," *Advances in Water Resources AWREDI*, Vol. 9, No. 3, pp. 178-183.
- Lim, Y. H. and Lye, L. M. (2004) "Wavelet analysis of tide-affected low streamflows series," *Journal of Data Science*, Vol. 2, No. 2, pp. 149-163.
- 方國洪、鄭文振、陳宗鏞、王驥 (1986) *潮汐和潮流的預報分析*，海洋出版社。
- 陳怡發、黃煌輝 (1990) 「臺灣沿海潮汐資料之整理與分析」，第五屆水利工程研討會論文集，第 1050-1063 頁。
- 秦前清、楊宗凱 (1995) *實用小波分析*，西安電子科技大學。
- 楊穎堅、梁文德、唐存勇 (1996) 「基隆與高雄的水位變化」，第十八屆海洋工程研討會論文集，第 553-560 頁。
- 王瀚德 (2001) *小波理論與類神經網路應用於潮汐之預測與補遺*，國立中山大學海洋環境及工程學系碩士論文。
- 張憲國、許泰文 (2001) 「潮汐、海流與暴潮」，*海岸工程學* (郭一羽主編)，文山書局，台南。
- 黃瓊珠 (2005) *潮位資料補遺及天文潮分潮特性之研究*，國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文。

2007 年 10 月 29 日 收稿

2008 年 4 月 8 日 修改

2008 年 4 月 18 日 接受