

地表微振動與海洋波浪之相關性研究

林立青¹

梁茂昌²

戚務正³

中央研究院環境變遷研究中心¹ 中央研究院環境變遷研究中心²
中央研究院地球科學研究所³

摘要

小於0.5Hz之地球背景振動已認為是受到海洋波動的影響，其起因於非線性作用之波浪能量傳遞並偶合於地表。雖然其可從寬頻(Broadband)地震儀之能譜看出相對應之關聯性，但是短週期地震儀之訊號特性與海洋波動間之關係仍未被充分的研究。因此，本文應用該種地震儀資料，以分析東北季風與颱風期間之時頻特性與海洋波動相關性。由結果得知，地表微振動(Microseisms)於0.2-0.5Hz間之能量與近岸波高具有0.94之相關性，說明短週期之訊號亦能如寬頻儀器之資料反應波浪的時空變動。藉由這種關係，未來可重建近岸波浪並以此作為資料的校正與驗證或分析氣候變遷對台灣海域之影響。

關鍵字：示性波高、地表微振動、短週期地震訊號

一、前言

地球背景之振動 (seismic noise) 與海洋的波動有密切的關連，其中可包含低頻地球的自然振盪 (Earth's hum, 2-7mHz) 及地表微振動 (Microseisms, 0.05-0.5Hz)，如圖1所示。(參見 *Longuet-Higgins, 1950; Toksoz and Lacoss, 1968; Haubrich and McCamy, 1969; Webb and Cox, 1986; Friedrich et al., 1998; Rhie and Romanowicz, 2004; Bromirski et al., 2005; Tanimoto, 2007a, 2007b; Gerstoft and Tanimoto, 2007; Webb, 2007*)。地表微振動則包含單頻(single-frequency)或倍頻(double-frequency) 的能量。其中單頻(SF)僅發生在淺水區域，目前並無確切的理論予以描述，其可能由海洋波浪直接作用於地球表面，波壓以非線性作用於坡度之海床或是以碎波衝擊近岸等方式，產生SF的能量 (*Hasselmann, 1963*)。

另外，地表微振動發生在兩倍海洋波動之頻率(DF)上，主要因為傳遞方向相反之波浪的非線性交互作用(波浪之入射與反射作用)或是大氣之低壓系統，使得水體波壓的改變將其能量傳遞至海床，再引發地表波動(*Longuet-Higgins, 1950*)。*Zhang et al. (2009)*提出P-wave(頻率在0.6-2Hz)的能量，其可能直接受到離岸風作用於地表的影響。或是*Tsai et al. (2004)*提出因"morning glory"現象所產生的海平面壓力之低頻擾動，進而影響地表水平之振盪。其壓力變化0.8至1.3mbar、壓力之移動速度約為5-25m/s。因此，地表微振動的顯著來源可能為海洋波浪、離岸風或具有傳遞速度之低頻氣壓之大氣-海洋-地表偶合作用。

然而，地球的自然振盪則是由不同的機制所產生，主要的來源為亞重力波(infra-gravity)。入射湧浪(swell)之非線性作用沿著淺水海域之岸線傳遞而產生亞重力波(*Herbers et al., 1995a, 1995b*)。*Bromirski*

*et al. (2009)*提出風浪因衝擊海岸產生的亞重力波，使地表波動產生週期在120-400秒之振盪，且提出淺水岸區為hum的主要發生區域。

目前台灣地震測站的量測儀器包含窄頻(又稱短週期, short period)及寬頻(Broadband)兩種地震儀。短週期之訊號主要反應區域之地震及P-wave。對遠域地震之長週期訊號或區域地震的高頻訊號之偵測，寬頻地震儀則較靈敏。雖然寬頻地震儀可用於分析地表微振動，但是*Strollo et al. (2008)*在寬頻及短週期兩種地震儀的試驗中，0.2-20Hz頻段的能量兩者都可被辨識。因此，本研究將以短週期地震儀之訊號進行分析。

綜合往昔的研究可得知，不管是Earth's hum或是Microseisms皆與海洋上之波浪或氣候有關。地表微振動的訊號可以反應波浪的變動特性，因此本研究將分析地震訊號與波浪變化之相關性，說明地震訊號可實際反應海洋波浪的變化特性，並可藉此重建過去波浪特性或是校正及驗證波浪資料的正確性。

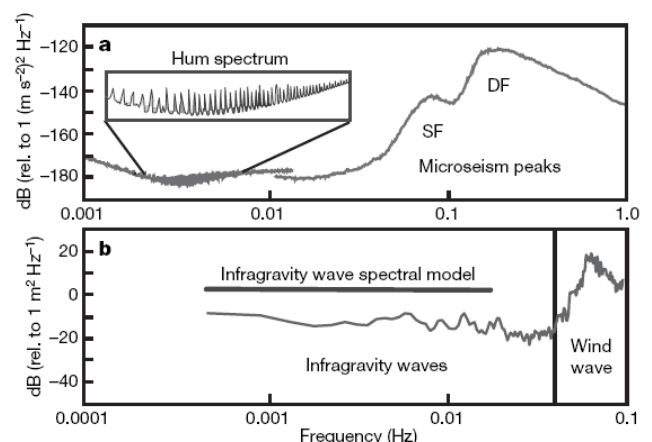


圖 1 地球背景之振動與海洋波動之關係(參見Webb, 2007)

二、資料處理與方法

本研究將分析海面波浪及陸地之地動資料，並分析其相關性，並選取氣象局之花蓮與蘇澳浮標之波高及短週期地震儀 (S13, Portable Short-period Seismometer)於花蓮及宜蘭之資料，其相關位置示如圖2及圖3。浮標之觀測為每小時取樣10分鐘，取樣頻率為2Hz，並經由頻率譜轉換再計算其示性波高(H_s ，波群中波高較大的前1/3部分之平均值)。地震儀為短週期之三向量（垂直、南北和東西向）速度量測，取樣頻率為100Hz的地動訊號，主要頻率響應則在1-100Hz間，低於1Hz之頻率響應為70%之臨界阻尼(critical damping)，示如圖4。由於東北季風及颱風為主要引起台灣海域波浪產生的大氣來源。因此，本文選取2008/10-2009/4之東北季風及2007/7/1-10之柯羅莎(KROSA)颱風時期，分析受不同大氣影響下之波浪特性與相對應地動變化之關係。

若短週期地動訊號含偶發之強烈能量，其來源可能來自地殼相互間之活動(如地震)，本研究將分離此類訊號以避免非海洋波動的來源，而影響相關性之分析。為了降低地震的影響，每小時地動訊號之振幅若超過每日無地震活動之0.5倍標準差(Bromirski et al., 2009)，該時序列則予以去除，以保留其環境之訊噪(ambient noise)。

本文以FFT方法獲得短週期之地動之能量譜，另外浮標之波浪能譜之頻寬及頻率分布相關計算則可參考NDBC(National Data Buoy Center)之波浪量測與分析(<http://www.ndbc.noaa.gov/wavecalc.shtml>)，且為轉化能譜的變化性以dB(decibel,分貝)突顯其能量值。

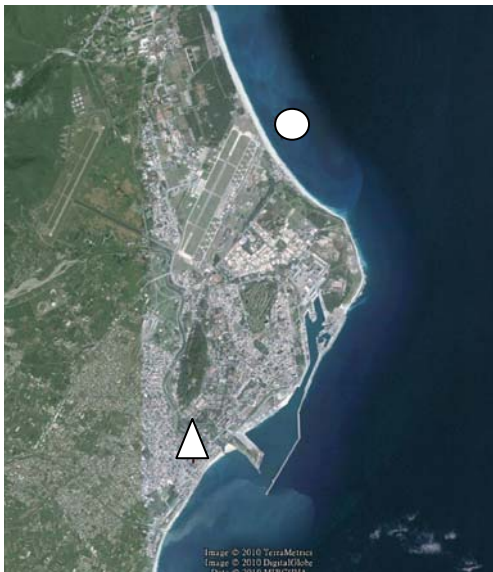


圖 2 花蓮浮標站(圓點)及短週期地震測站(三角形)

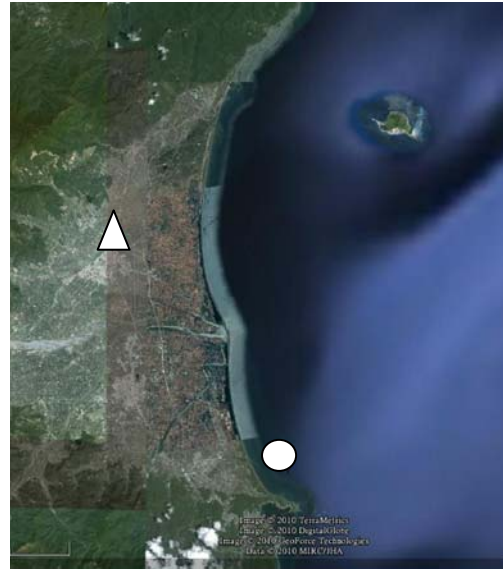


圖 3 蘇澳浮標站(圓點)及宜蘭短週期地震測站(三角形)

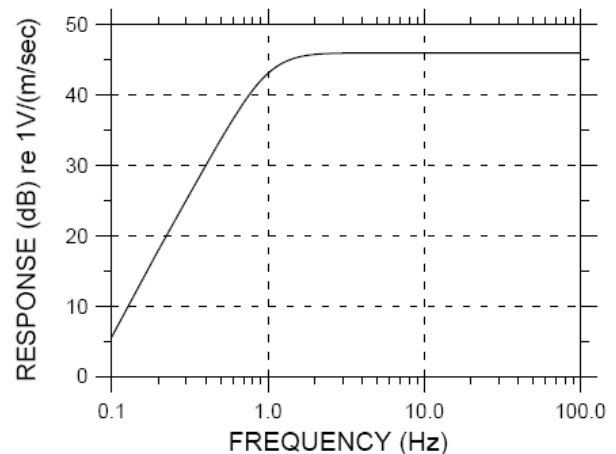


圖 4 花蓮浮標站(圓點)及短週期地震測站(三角形)

三、波浪與地動能譜之相關性分析

本文以2008/10/1-10之花蓮波浪及地動之能譜分析其相關性，示如圖5。圖5(a)中顯示大部份的波浪能量分布在0.1-0.25Hz的範圍，其中可看出由低頻至高頻變化之帶狀能量發生於1-3日，而這種能量隨著時間由低頻增加至高頻的情形類似於Munk et al. (1963) 和 Snodgrass et al. (1966)所觀測到湧浪能譜圖。兩者之研究提出湧浪(swell)可跨越太平洋由北至南傳遞，且波群傳遞至深海，因波速增加而降低其頻率，即如本研究之觀測結果，其可能之來源為北太平洋的冬季風暴(winter storm)。關於由遠域傳遞而來的湧浪特性研究，將另作於其他分析。另一波浪特性則為區域之風速所產生，發生於6-7日，其能量主要在

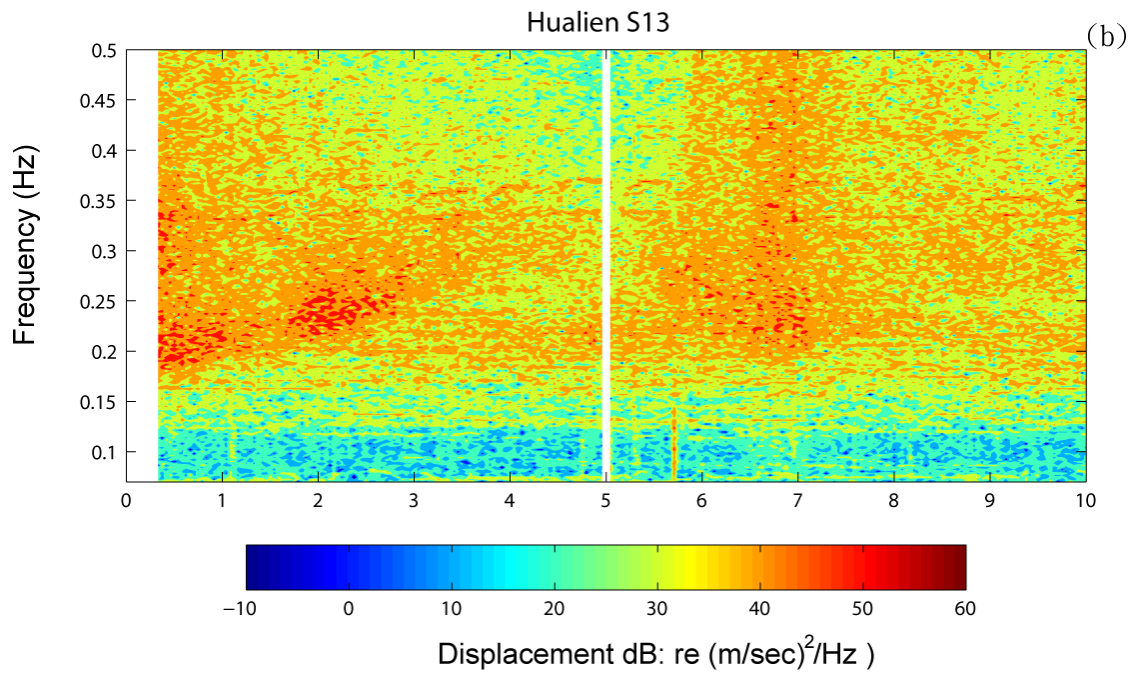
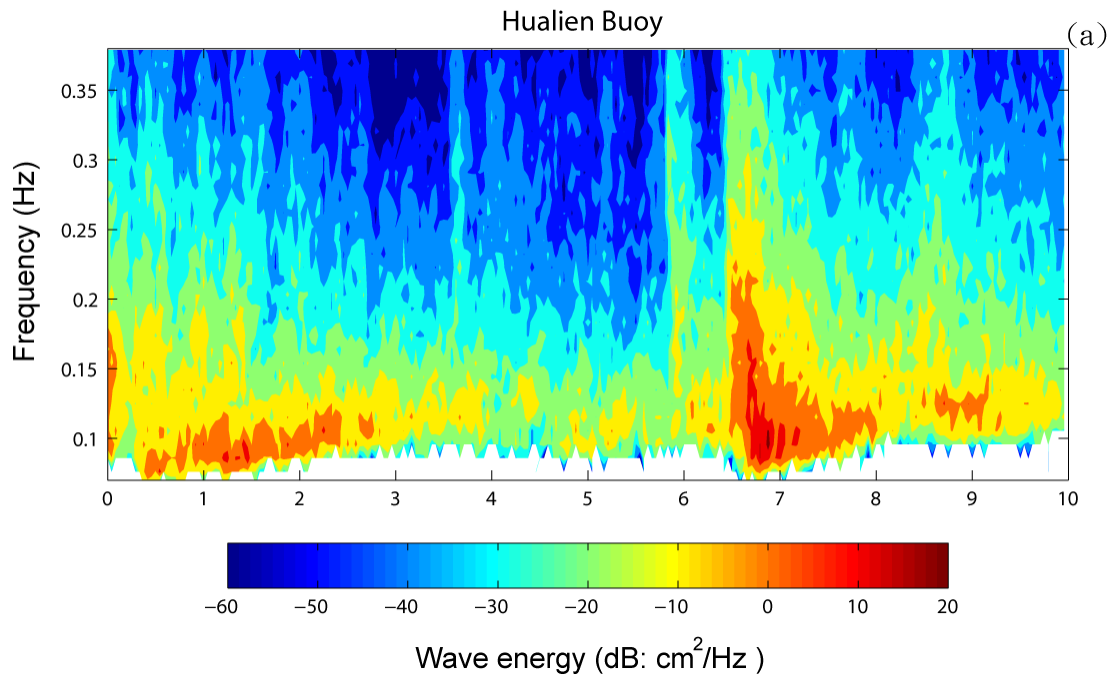


圖 5 2008/10/1-10之花蓮(a)浮標之波浪能譜及(b)短週期地動能譜

0.07-0.18Hz。風浪之能量則由高頻傳遞至低頻，由此可看出，風浪之成長特性。相對於地動能量則主要分佈在0.17-0.5 Hz。於東北季風作用期間遠域及區域性之波浪特性亦可反應於短週期的地動能譜，示如圖5(b)。其中，地動能譜之變化則分佈在0.2-0.5Hz的範圍。因此可看出，地動能譜受海洋波浪之影響，其DF頻率約為波浪頻率的2倍。兩者能譜隨時間之變化性則約為一致。地動能譜除了可反應較大之波浪能量外，在波浪能量降低時(發生於4-6日)，地動能量亦隨之降低。且波浪之低頻部份(0.07-0.15Hz)仍可對應地動能量於0.2-0.35Hz之頻率區間。

本研究另分析柯羅莎(KROSA)颱風行經蘇澳及宜蘭海岸之波浪及地動訊號，兩者之能譜示如圖6。蘇澳測站之颱風波浪能量主要分佈在0.05-0.1Hz(圖6a)，且宜蘭測站之地動能譜則反應受颱風波浪作用下的能量變化，其分佈在0.2-0.5Hz(圖6b)。並由最大能量的發生時間，約可看出地動能量的時間延遲特性。

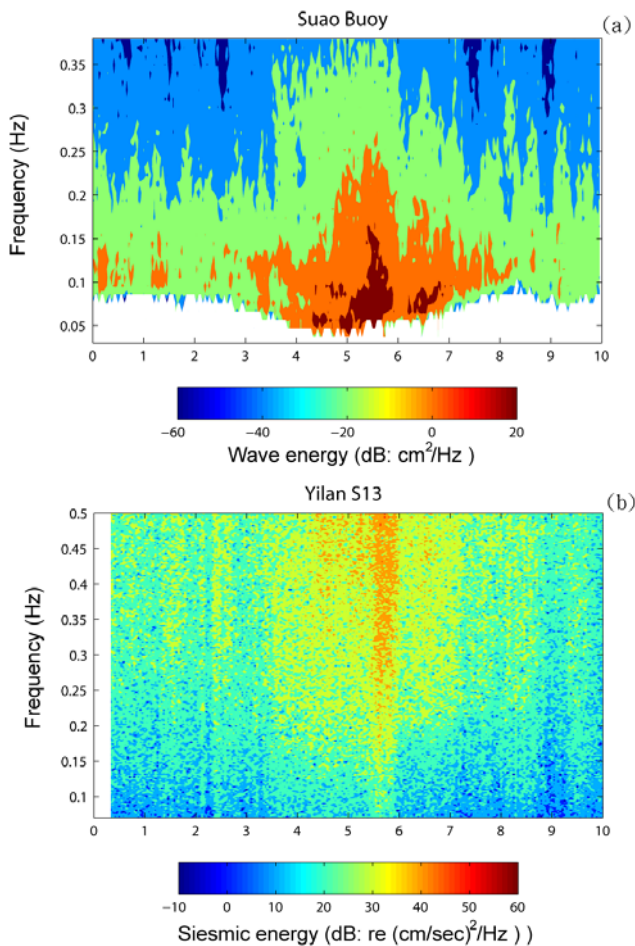


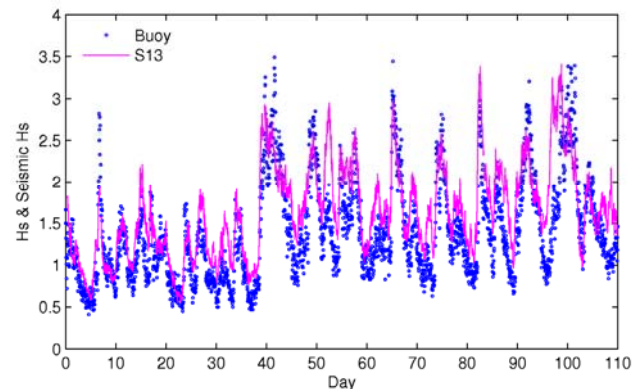
圖 6 2007/10/1-10之(a)蘇澳浮標之波浪能譜變化(b)宜蘭短週期地動能譜變化

四、地動能量與波高

本文經由地動及波浪能量之分析，地動能量受波浪作用下，能譜變化性之一致性不管在東北季風或是颱風影響期間，兩者都具有較高的相關性。因此，本文將對地動能譜之DF頻段(0.2-0.5Hz)範圍進行積分，以求得對應波浪作用下之地動能量。圖7為花蓮示性波高與相對DF頻段之地動能量，由圖中可看出波高與相應地動能量之隨時間變化的一致性，其相關性(corss-correlation)約為0.94。於自2008/10/1之後95-100日，出現地動能量時序領先於波高之情形。除此之外，地動能量時序之時間延遲約在1小內，顯示波浪先作用於近岸區域後，再影響地表之微振動。此現象說明與先前研究之一致性，近岸海洋的波動確為地表微振動之來源。

另外，圖8為颱風波浪與地動能量之時間分布。圖中可明顯看出兩者具有較高的相關性，最大地動能量之時間接近最大示性波高之發生時間。示性波高之最大值發生前後，地動能量亦能反應因颱風接近海岸區域之波浪增強或因颱風遠離之波浪遞減作用，且兩者亦隨颱風於花蓮北部海域滯留，其穩定之能量持續約6小時。此外，示性波高與地動能量之平均時間延遲約為4小時，示如圖9。颱風波浪先於4小時前作用於近海區域，而後地表微振動始受其影響。由此可知，宜蘭之地表微振動可能較遠離主要颱風波浪發生的區域。時間延遲之原因亦可能為短週期地震測站所在之地質環境之不同，而影響其地動能量之傳遞，於此本研究仍需後續相關分析以釐清不同作用時間之特性。

另外，地動能量於花蓮與宜蘭測站之計算值約差一個階量，顯示地動訊號之強弱與地質環境或距海岸區域之遠近有密切相關，但是從示性波高與地動能量之比較，兩者變化之高相關性，使波浪作用下之地動能量可明確的反應其變化趨勢。



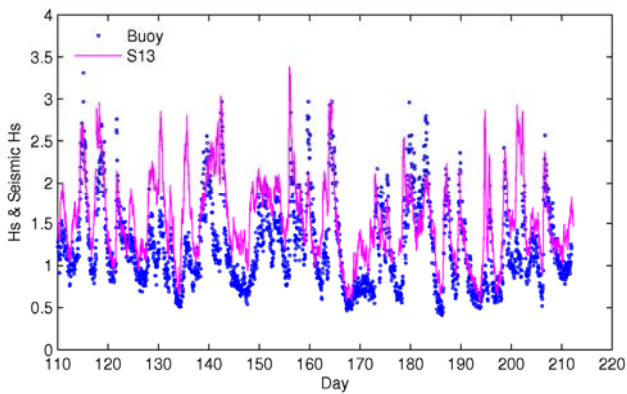


圖 7 東北季風期間之花蓮示性波高(圓點)與縮尺之微振動能量(實線)

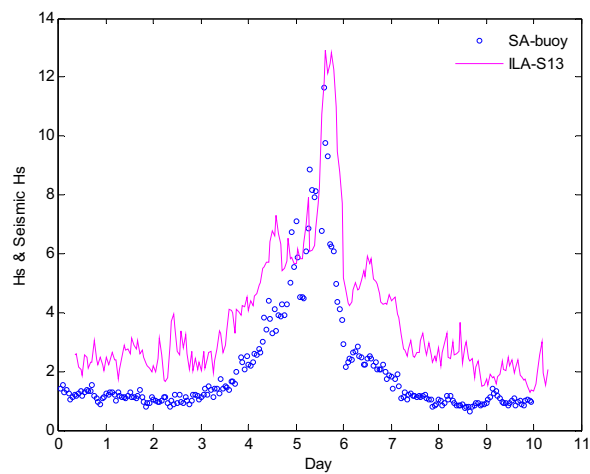


圖 8 柯羅莎颱風期間之蘇澳示性波高(圓點)與宜蘭縮尺之微振動能量(實線)

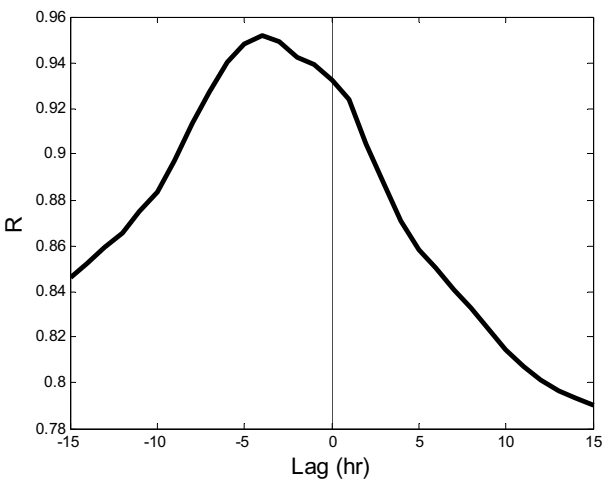


圖 9 以cross-coefficient function 計算颱風期間蘇澳示性波高與宜蘭地動能量之時間延遲

五、結論

本文以波浪與地表微振動之能譜相關性分析，說明地動能量於DF频段之來源為近岸區域之海洋波動。並由推算之地動能量與示性波高之比較，獲得高相關性(0.94)的結果，顯示未來經由地動訊號可重建近岸波浪之特性，並以此作為波浪資料的校正與驗證。除此之外，對於短週期地震儀已設置約20-30年，且全台分佈約74個測站。因此，長時間之地動資料亦可做為推算過去波候或分析氣候變遷對台灣海域波浪特性之影響。另外對於湧浪之分析，地動能譜亦如波浪能譜之反應，未來將可分析遠域或區域之湧浪特性，以提供海洋工程較準確的設計波高，或提升湧浪預報之精度，或研究遠域波浪之大尺度傳遞特性。

謝誌

本研究相關數據由中央氣象局地震測報中心與海象測報中心提供，使本研究得以順利完成，謹誌謝忱。

參考文獻

- Bromirski, P. D., F. K. Duennebieber, and R. A. Stephen (2005), Mid-ocean microseisms, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 6, doi:10.1029/2004GC000768.
- Bromirski, P. D. and P. Gerstoft (2009), Dominant source regions of the Earth's "hum" are coastal, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L13303, doi:10.1029/2009GL038903.
- Friedrich, A., F. Kruger, and K. Klinge (1998), Ocean-generated microseismic noise located with the Grafenberg array, *J. Seismol.*, 2, 47–64.
- Gerstoft, P., and T. Tanimoto (2007), A year of microseisms in southern California, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L20304.
- Hasselmann, K., A statistical analysis of the generation of microseisms, *Rev. Geophys.*, 1, 177–210, 1963.
- Haubrich, R.A., and K. McCamy (1969), Microseisms: costal and pelagic sources, *Rev. Geophys.*, 7, 539–571.
- Herbers, T. H. C., S. Elgar, and R. T. Guza (1995a), Generation and propagation of infragravity waves, *J. Geophys. Res.*, 100, 24,863–24,872.
- Herbers, T. H. C., S. Elgar, R. T. Guza, and W. C. O'Reilly (1995b), Infragravity-frequency (0.005 –0.05 Hz) motions on the shelf. Part II: Free waves, *J. Phys. Oceanogr.*, 25, 1063 – 1079.

- Longuet-Higgins, M. S. (1950), A theory of origin of microseisms, *Philos. Trans. R. Soc. 243 London A.*, 243, 1–35.
- Rhie, J., and B. Romanowicz (2004), Excitation of Earth's continuous free oscillations by atmosphere-ocean-seafloor, *Nature*, 431, 552–556.
- Strollo, A., D. Bindi, S. Parolai, and K. H. Jäckel (2008a), On the suitability of 1 s geophone for ambient noise measurements in the 0.1–20 Hz frequency range: experimental outcomes. *Bull. Earthq. Eng.*, 6, 141–147.
- Tanimoto, T. (2007a), Excitation of microseisms, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L05308.
- Tanimoto, T. (2007b), Excitation of normal modes by nonlinear interaction of ocean waves, *Geophys. J. Int.*, 168, 571–582.
- Toksoz, M. N., and R. T. Lacoss (1968), Microseisms: Mode structure and sources, *Science*, 159, 872–873.
- Tsai, V. C., H. Kanamori, and J. Artru (2004), The morning glory wave of southern California, *J. Geophys. Res.-Solid Earth*, 109 (B2), B02307, doi:10.1029/2003JB002596.
- Webb, S. C., and C. S. Cox (1986), Observations and modeling of seafloor microseisms, *J. Geophys. Res.*, 91, 7343–7358.
- Webb, S. C. (2007), The Earth's 'hum' is driven by ocean waves over the continental shelves, *Nature*, 445, 754–756.
- Zhang, J., P. Gerstoft, and P. M. Shearer (2009), High-frequency P- wave seismic noise driven by ocean winds, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L09302, doi:10.1029/2009GL037761.