

湧浪源頭追蹤方法之研究

夏兆威¹

林芳如²

董東璟³

陳琬婷⁴

國立成功大學
水利及海洋工程系

中央氣象局
海象測報中心

國立成功大學
水利及海洋工程系

中央氣象局
海象測報中心

摘要

波浪經常是由風浪及湧浪混合而組成，其中湧浪能保持一定的能量而可傳遞至遠處，低消散性的湧浪傳至近岸時，其巨大能量容易破壞海岸結構物及危及岸邊人員活動的安全。本文研究湧浪源頭追蹤，包含四個步驟：(1)風湧浪分離；(2)湧浪分群；(3)湧浪源頭參數；(4)湧浪定位，分析結果最終可得湧浪生成時間和湧浪源頭。本文分析 2015 年在高雄永安興達電廠卸煤碼頭監測到之顯著湧浪案例，分析結果顯示本文湧浪追蹤方法所得合理，但後續仍需修正因颱風移動造成湧浪追跡之誤差。

關鍵詞：風浪、湧浪、湧浪追蹤

一、前言

波浪經常以風浪(wind wave)及湧浪(swell)共存的混合形式存在。當海面受風場造成的壓力變化及摩擦力作用下產生的波浪即為風浪；而風浪持續受到風的作用累積能量，使得波高逐漸變大，波長與週期也隨之增加，當經歷一段時間後脫離當地風場而形成的長浪稱為湧浪。普遍觀念認為湧浪週期在 10 秒以上，然而，若從時序列上發現有一波浪週期穩定的存在，另外波向與風向間彼此無顯著影響且波高相對於其他時刻有明顯的增加，則可將此波浪視為湧浪。此外普遍觀念上亦會認為湧浪是由颱風所生成的。然而生成湧浪的條件不僅僅是發生在颱風情況下，在海面上處於穩定的風場，並需要足夠的吹風延時，使得風浪在累積能量後才可以成長到達完全發展風浪，當脫離當地風場後以穩定之形式傳遞至其他區域時稱作湧浪。

由於湧浪對海岸結構物的侵襲力較風浪大，對於航行中的船隻而言，湧浪的衝擊亦是不可忽視的，因此需特別注意湧浪的到來；岸邊的港口，卸煤、卸氣碼頭也須留意長周期的湧浪是否傳入港區，避免發生共振效應，以確保港口作業的安全，以上皆說明湧浪訊息的重要性。

有關於湧浪追蹤的先前研究並不多。Munk(1963)與 Snodgrass(1966)在時頻圖上將能量峰值以直線連接起，透過波浪線性的消散特性得知湧浪傳遞距離及湧浪生成時間，此方法稱為脊線法(ridge-line method)；Mettlach et al. (1994)則研究了颱風期間的湧浪傳遞情況，透過浮標實測資料，他們用脊線法結合兩頻率法(Earle et al. 1984)的能譜找出湧浪源頭，並以無方向波譜、方向波譜、脊線法及波浪模型分析研究案例，結果是以方向波譜分析與實際情況最為符合。Hanson and Phillips (2001)認為先前的脊線法需要透過人工判斷才能連接線段，而兩頻率法則受限於資料的解析度；此外以往分析是將頻率在 0.08Hz 以下的波浪皆視為湧浪，但實際上是必須將湧浪更進一步的分析，透過頻率將湧浪分離，以精確湧浪來源。綜合以上的問題，Hanson and Phillips (2001)發展了波浪識別及湧浪追蹤的自動演算方法，此法改善了先前的不足，使得湧浪追蹤更為快速、準確。

在夏季時，台灣受西南季風與颱風的影響下常會有難以預期的湧浪出現，在缺乏預測海象資訊下，湧浪會影響貨輪及煤輪靠泊運作的安全及增加作業上之困難。以位於高雄市永安區的興達發電廠卸煤碼頭為例，此碼頭位於興達發電廠離岸約 1 哩處，可供大型

運煤輪靠泊卸煤，本文選用該處兩個案例進行分析，分別為 2015 年 9 月中旬及同年 10 月初期間，興達電廠卸煤碼頭於作業時受湧浪影響，使煤輪有巨大的晃動危及當時卸煤的運作，因此擬採用鄰近的小琉球浮標測站資料，從方向波譜分析湧浪特性並定位出湧浪源頭。

二、研究方法

目前國外對於湧浪追蹤的研究較廣泛使用為 Hanson and Phillips (2001)所提的方法，此方法包含以下步驟：(1)輸入方向波譜並分離風湧浪；(2)湧浪分群；(3)計算分群湧浪統計參數；(4)找出湧浪來源。

2-1 風湧浪分離

在波浪追蹤分析中，主要探討對象為湧浪成分，因此需先將波浪進行風湧浪分離，Hanson and Phillips (2001)提出的波浪識別法考慮了風速及風向與波向之間的關係，並考慮深水情況下波速 $c = g/4\pi f$ ，可得識別條件式(1)：

$$f_p \geq \frac{g}{2\pi} [(1.5)U_{10} \cos \delta]^{-1} \quad (1)$$

其中 f_p 為波浪之尖峰頻率， U_{10} 為 10 公尺高之風速， δ 為風向與波向之間的角度差。此關係式於波譜中為一拋物線區域，如圖 1 所示。在拋物線內之波峰定義為風浪，反之在拋物線外之波峰則定義為湧浪。

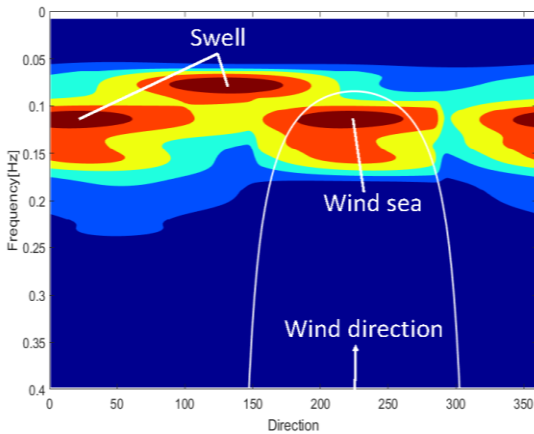


圖 1 風湧浪識別法拋物線

2-2 湧浪歸類

在前步驟中是在某時刻上的進行風湧浪分離，但為了追蹤湧浪源頭，必須分析一段時間來了解湧浪的行為。在這一段時間內，各單點時刻的湧浪成分數、

方向、頻率可能都有所不同，因此透過時序列上湧浪的分布，從前後時刻的湧浪數中，將相似特性的湧浪歸類成來源相同的湧浪群，藉由此步驟，可以得到在時序列上顯示不同來源的湧浪群分布。

為了進行上述的歸類湧浪成分，本研究參考 Hanson and Phillips (2001)的建議，採用一個權重指數 D ，此權重指數為湧浪數與已存在的湧浪群之特性比較，根據權重指數設定的門檻值進行分群，而門檻值為經驗常數，根據資料不同而有所調整。

$$D = \sqrt{\left(\frac{a_{rms,peak} - a_{rms,group}}{3a_{rms,group}}\right)^2 + \left(\frac{\theta_m - \theta_{group}}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{\log f_m - \log f_{group}}{\frac{1}{3}}\right)^2} \quad (2)$$

式(2)中，權重指數 D 與湧浪振幅 a_{rms} 、湧浪平均波向 θ_m 以及湧浪平均頻率 f_m 有關，上式的計算是將欲分析時刻的湧浪與分析時刻前已存在的湧浪群進行特性比較。若 D 值在門檻值內則歸類進入同一群；反之，則視為新的湧浪群。上式中下標 $group$ 為湧浪群，Hanson and Phillips (2001)建議在與湧浪群比較時，將計算時間起始點前連續 5 筆的湧浪群數據加總後平均，用來代表湧浪群的特性；若分析的湧浪群時序列未包含超過連續的 5 筆湧浪，則使用全部的群內湧浪數據加總後平均，與下一筆的湧浪比較。下標 rms 與 m 皆表下一筆湧浪資料，其中 a_{rms} 、 θ_m 及 f_m 可用式(3)-(7)計算：

$$a_{rms} = 1.414\sqrt{e}, e \text{ 為總能量} \quad (3)$$

$$\theta_m = \tan^{-1}\left(\frac{\overline{\sin\theta}}{\overline{\cos\theta}}\right) \quad (4)$$

其中

$$\overline{\sin\theta} = \frac{\iint S(f,\theta)\sin\theta \partial\theta \partial f}{e} \quad (5)$$

$$\overline{\cos\theta} = \frac{\iint S(f,\theta)\cos\theta \partial\theta \partial f}{e} \quad (6)$$

$$f_m = \frac{e}{\iint \frac{S(f,\theta)}{f} \partial\theta \partial f} \quad (7)$$

根據上述說明，完成此步驟後，可得湧浪群時序列分布，如圖 2 例所示，該案例是 2015 年 10 月初在東沙浮標測得之湧浪，每兩小時有一筆觀測數據，該段時間內，各時刻大多為 1 個湧浪成分，應用本節分群方法後可知該時段內有 4 群湧浪，第一群時間為 2 日 0

時至 2 時，方向來自於東方；第二群時間為 3 日 4 時至 4 日整天，方向來自於南方；第三群時間為 3 日 20

時至 22 時，方向來自於北方，而第四群時間為 4 日 12 至 14 時，方向為東北方。

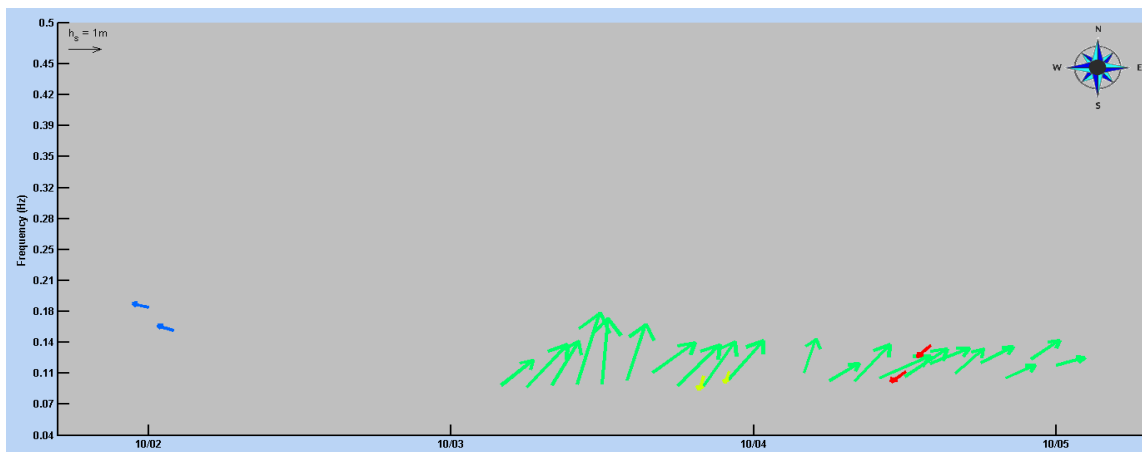


圖 2 湧浪群時列分布案例 (2015 年 10 月 2 日至 4 日於東沙浮標觀測)

2-3 計算湧浪源頭參數

透過上述步驟將湧浪成分根據彼此間的特性歸類完後，可進一步分析各組湧浪群源頭參數。本文參考 Munk et al.(1963)提出的脊線法，此法基於波浪消散理論，在時頻圖上找出能代表各湧浪群的迴歸線，進而推得知各組湧浪源頭參數。

從深水波分散關係式 $f^2 = gk/(2\pi)^2$ 可得群波速度 C_g 為：

$$C_g = \frac{g}{4\pi f} \quad (8)$$

且

$$C_g = \frac{d_{is}}{(t-t_0)} \quad (9)$$

將式(8)及式(9)整理後可得式(10)：

$$\frac{df}{dt} = m_{ft} = \frac{g}{4\pi d_{is}} \quad (10)$$

其中 f 為波浪頻率， d_{is} 為波浪傳遞距離， t_0 為波浪生成時間， m_{ft} 為頻率-時間迴歸線的斜率。從迴歸線斜率可藉由式(10)，即能獲得波浪傳遞距離 d_{is} ，而迴歸線與時間軸(即 $f=0$)交會點之截距為湧浪生成時間 t_0 。

2-4 湧浪源頭定位

考慮地球表面為球面，因此波浪在海面上傳遞時所行走之路徑為圓弧狀，故前述所得波浪傳遞距離 d_{is} 為地球表面上一弧長，若將 d_{is} 視為直線距離，在推得湧浪源頭時則會與實際情況有些許誤差。為了要準確地將湧浪源頭描繪在球面上，故本文使用球面上經緯

度座標進行定位，如圖 3 所示。

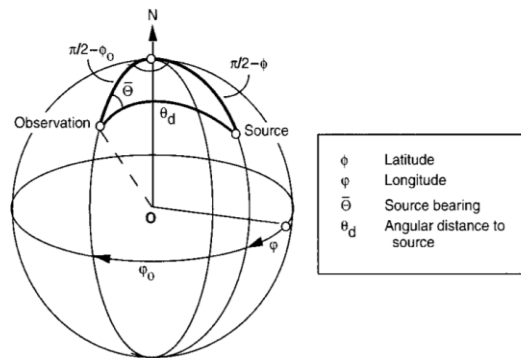


圖 3 湧浪源頭計算示意圖 (Hanson and Phillips, 2001)

從球面餘弦及正弦定理推得球面上源頭的經緯度座標公式(Bartsch, 1974)：

$$\phi = \sin^{-1}(\sin\phi_0 \cos\theta_d + \cos\phi_0 \sin\theta_d \cos\bar{\theta}) \quad (11)$$

$$\varphi = \varphi_0 - \sin^{-1}\left(\frac{\sin\theta_d \sin\bar{\theta}}{\cos\phi}\right), \quad (12)$$

其中 ϕ_0 為觀測點緯度， φ_0 為觀測點經度， θ_d 為圓心角 ($\theta_d = d_{is}/R_E$, R_E 為地球半徑)， $\bar{\theta}$ 為群平均湧浪群波向。從前述說明可知，當知道波浪源頭經緯度座標 (ϕ, φ) 、群波速度 C_g 及波浪生成時間 t_0 ，即可預測波浪隨著時間傳遞的過程。

三、分析案例

本研究分析 2015 年 9 月中旬及 10 月初兩個時段，在高雄永安興達電廠受湧浪侵襲的案例。本文使用的

波浪資料取自小琉球浮標站資料，該處水深為 78 米，距離興達電廠約 62 公里，其相對位置如圖 4 所示。由於 2015 年 9 月中旬台灣周遭海況並無颱風系統影響，而 10 月初在台灣西南海面則有彩虹(Mujigae)颱風，因此兩案例可區分為是一個單純湧浪(非颱風產生)案例以及一個因颱風引起之湧浪案例。彩虹颱風為一中度颱風，其路徑如圖 5 所示。由於此颱風行徑路線與台灣距離較遠，故中央氣象局未發布警報。

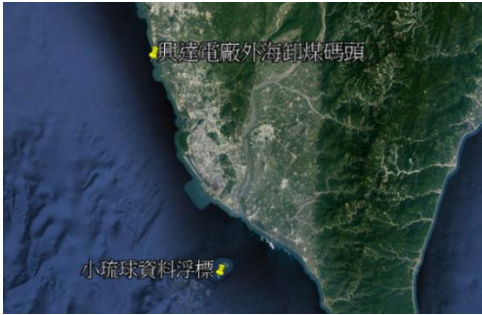


圖 4 興達電廠外海卸煤碼頭與小琉球浮標之位置圖

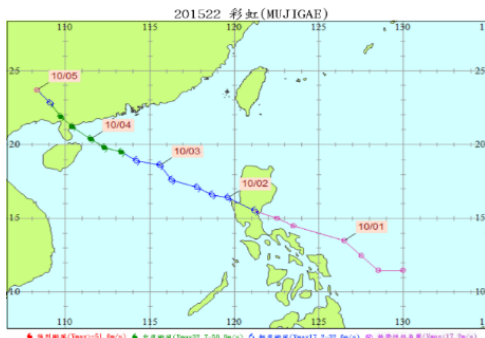


圖 5 彩虹(Mujigae)颱風路徑與時間位置

四、分析結果

本研究利用小琉球浮標所測之資料分別繪製 2015 年 9 月及同年 10 月兩個時段的時序列圖，每小時有一筆觀測數據，如圖 6 及圖 7 所示，包含示性波高、平均週期、尖峰週期、順時風速、平均風速、波向及風向資料。由圖 6 之示性波高圖可知，與其他時刻相比，在 9/16 13:00 及 9/17 17:00 有顯著的大波高，且在 9/16、17 兩日的尖峰週期大致都在 8 秒以上而平均風速在 5m/s 以下，故此波浪受風的影響不大。在圖 7 之示性波高圖中，波高於 10/3 08:00 開始變大至 18:00 達最大值 2.85 米，而尖峰週期在 10/3 08:00 之後維持在 10 秒以上，雖然這期間的平均風速高達 10m/s，但

從風向與波向兩者角度差可知彼此影響程度小。因此兩案例之波浪受風速的影響小，本文進一步分析其波浪成分，將案例分析時間從 9 月中旬縮小從 9/16 12:00 至 9/18 12:00 共 48 小時，當中包含了兩個示性波高極大值；而另一案例分析時間縮小從 10/2 至 10/4 共 72 小時。以下分別說明兩個案例的分析結果：

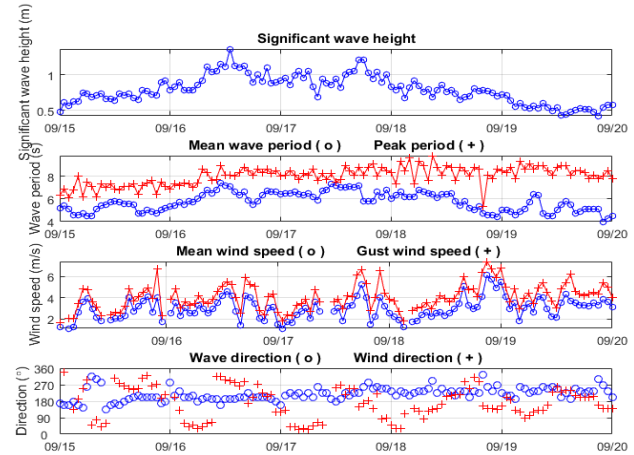


圖 6 2015 年 9 月中旬小琉球浮標觀測時序列

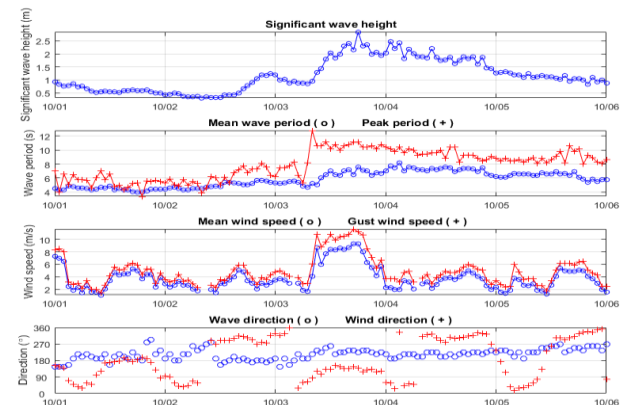


圖 7 2015 年 10 月初小琉球浮標觀測時序列

案例 1 (2015/9/16 12:00 ~ 9/18 12:00)

案例 1 在完成湧浪歸類後，可分成 8 群湧浪，如圖 8 所示。從圖上能明顯地指出在分析的期間大多同時存在 2-3 群湧浪，且大部分的湧浪群分布趨勢符合波浪消散理論中頻率隨著時間而增加。另外在圖上以 0.15Hz 作為一分界線，在 0.11-0.13Hz 頻帶上存在一群連續的湧浪(標示為紫色)，橫跨整個分析時間，方向大致從南至西南邊傳遞至測站；而在 0.15Hz 以上共有 6 群湧浪，這些湧浪群分布則較為分散。

圖 9 是從 8 群湧浪當中找出的 4 個湧浪事件，而每個湧浪事件的迴歸線透過式(11)和式(12)計算並結合

湧浪事件的平均波向，即可得知各事件的湧浪生成時間及源頭，這 4 個湧浪成分的參數列在表 1。將這 4 個湧浪成分源頭及其傳遞路徑繪製在 Google Earth 上，如圖 12 所示，其中第 1 個湧浪成分的源頭定位並不合理，其原因可能在設定迴歸線斜率時並事件中的資料點與迴歸線之間的誤差較大導致，其他湧浪成分源頭則順利定位獲得。

表 1 案例 1 湧浪源頭計算參數

湧浪編號	平均波向	生成時間 t_0	傳遞距離 $d_{is}(km)$	緯度 ϕ	經度 φ
1	257	2015/09/15 18:00	1182.3	19.6	109.4
2	189	2015/09/14 06:00	1523.4	8.7	118.2
3	199	2015/09/16 15:00	165.1	20.9	119.8
4	258	2015/09/16 07:30	198.9	21.9	118.5

案例 2 (2015/10/02 0:00 ~10/04 23:00)

案例 2 在完成湧浪歸類後，可分為 11 群湧浪，如圖 10 所示。分析時間內各時刻大多為 2-3 群湧浪。由於觀測海域在此案例期間受颱風影響，在 10 月 2 日晚間至 3 日凌晨其間存在著傳遞方向相反的兩群湧浪，涵蓋頻率範圍約在 0.11-0.16Hz，推測此期間湧浪群分布較為複雜。另外從 10 月 3 日 9 時至 4 日在 0.09-

0.11Hz 的頻帶上存在一群連續的湧浪(標示為綠色)，方向大致從西南至南邊傳遞至測站。

圖 11 從 11 群湧浪中找出的 5 個湧浪事件，湧浪事件的源頭算法與前一案例相同。表 2 為案例 2 中 5 個湧浪事件計算後的參數資料。亦將此事件的湧浪源頭及在大圓上之傳遞路徑繪製在 Google Earth 上，如圖 13 所示。由於此案例是發生在颱風影響期間，與圖 5 颱風路徑比較，結果顯示湧浪來源大致上與颱風位置相近，但也發現到成分 2、成分 3 及成分 4 在時間與位置上沒有那個精準，造成此誤差的原因為本研究使用的方法是假設湧浪源頭為點波源，然而在分析快速移動的天氣系統時，若依舊將此視為點波源，則可預期的容易產生誤差。

表 2 案例 2 湧浪源頭計算參數

湧浪編號	平均波向	生成時間 t_0	傳遞距離 $d_{is}(km)$	緯度 ϕ	經度 φ
1	191	2015/10/02 10:00	369.3	19	119.7
2	223	2015/10/02 02:30	1705.3	10.8	109.7
3	210	2015/10/02 10:00	1225.8	12.6	114.8
4	247	2015/10/03 00:30	529.8	20.4	115.7
5	218	2015/10/04 03:00	241.9	20.6	118.9

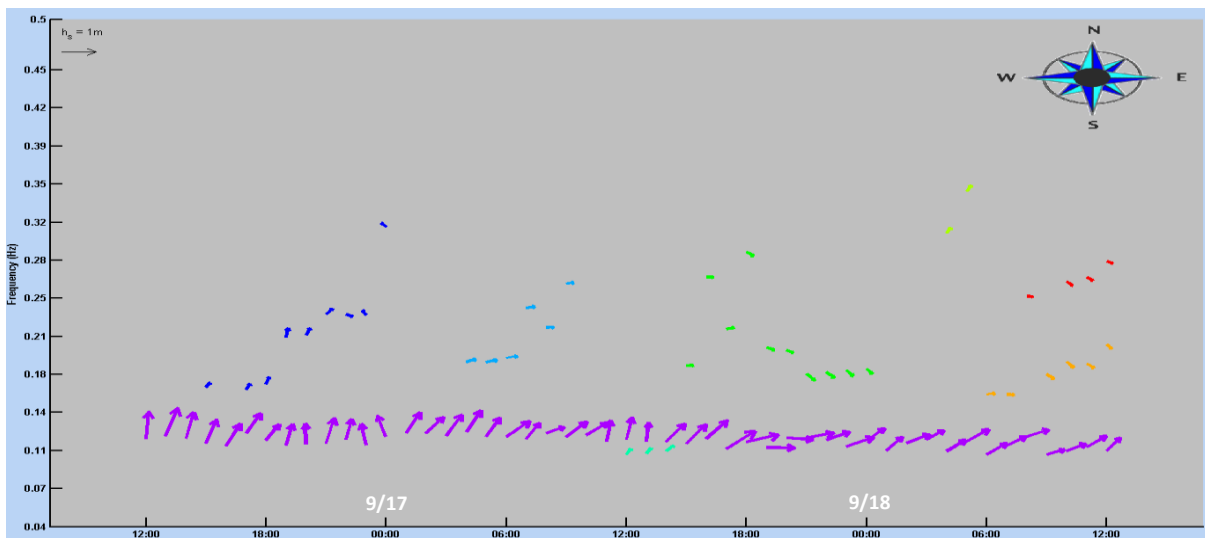


圖 8 案例 1 在時頻圖上以向量表示湧浪群中的頻率、示性波高及傳遞方向

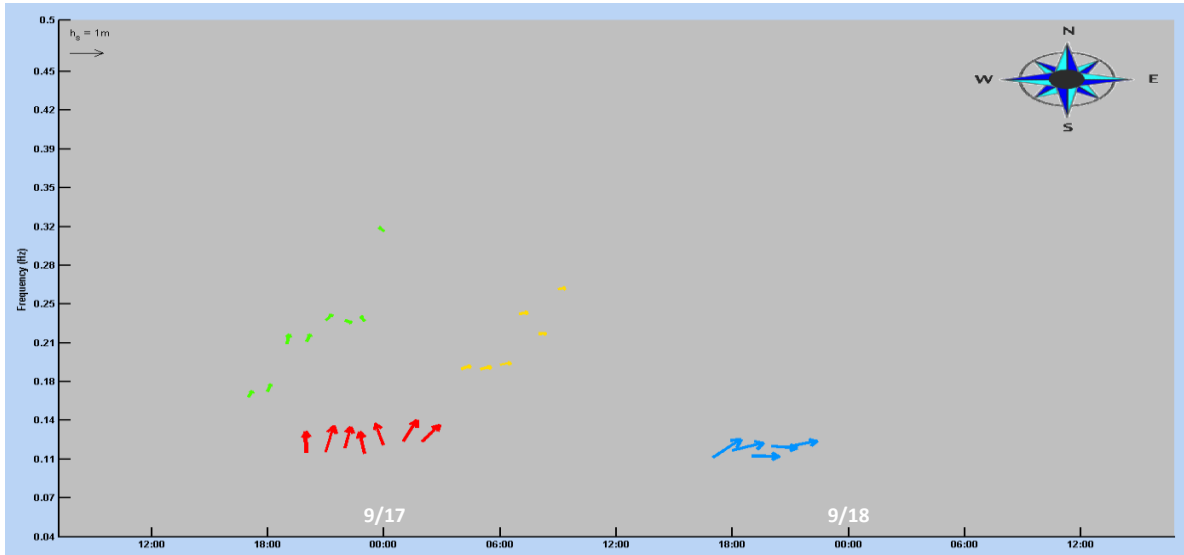


圖 9 案例 1 之中湧浪事件在時頻圖上的分布

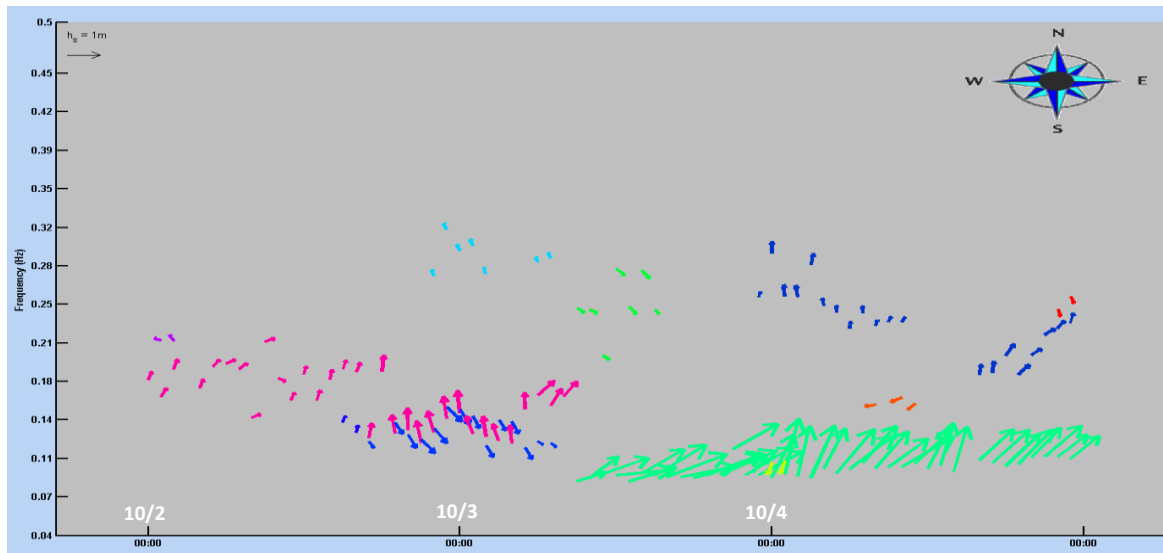


圖 10 案例 2 在時頻圖上以向量表示湧浪群中的頻率、示性波高及傳遞方向

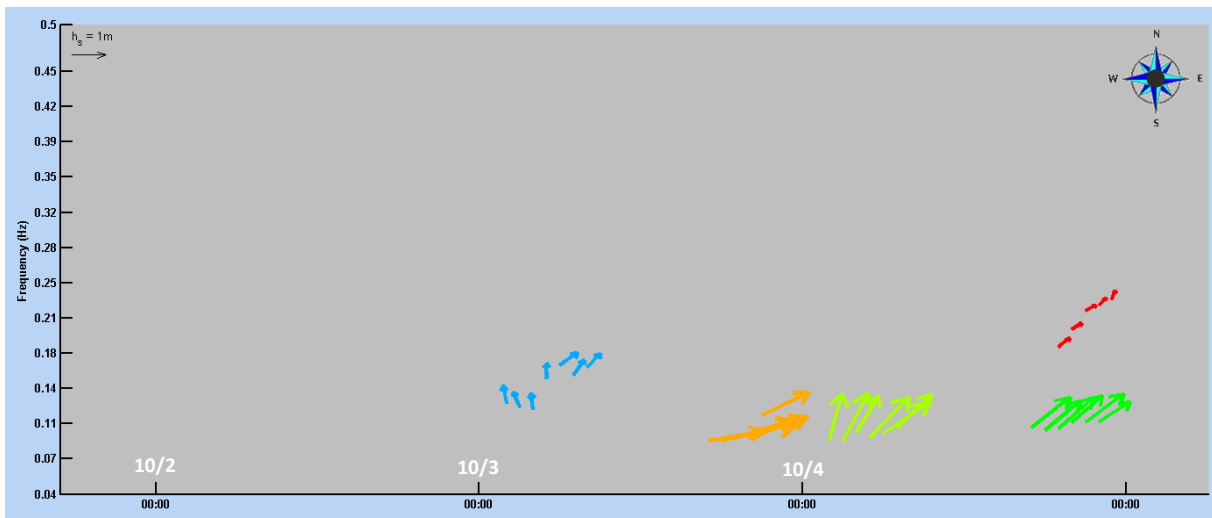


圖 11 案例 2 之中湧浪事件在時頻圖上的分布

參考文獻

1. Earle, M. D., K. A. Bush, and G. D. Hamilton, 1984: High-height long-period waves generated by a severe storm in the northeast Pacific Ocean during February 1983. *J. Phys. Oceanogr.*, 14, 1286–1299
2. Hanson, J.L. and Phillips, O.M. (2001) “Automated analysis of ocean surface directional wave spectra,” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 18, pp. 277-293
3. Mettlach, T., D. Wang, and P. Wittmann, 1994: Analysis and prediction of ocean swell using instrumented buoys. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 11, 506–524.
4. Munk, W. H., G. R. Miller, F. E. Snodgrass, and N. F. Barber (1963) “Directional recording of swell from distant storms.” *Philos. Trans. Roy. Soc. London*, A255, 505–584.
5. Snodgrass, F. E., G. W. Groves, K. F. Hasselmann, G. R. Miller, W. H. Munk, and W. H. Powers, 1966: Propagation of ocean swell across the Pacific. *Philos. Trans. Roy. Soc. London*, 259A, 431– 497.

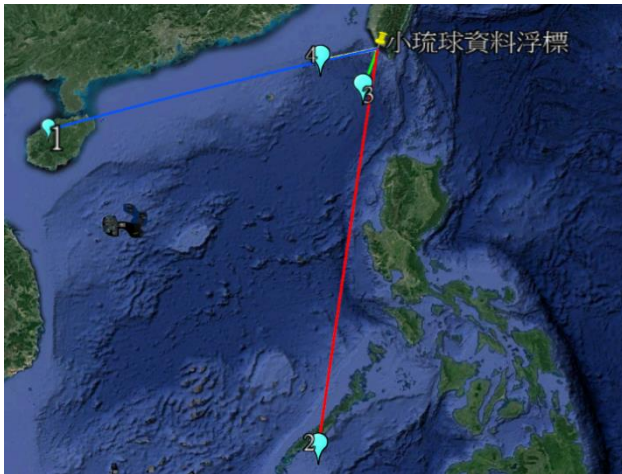


圖 12 案例 1 的湧浪事件在大圓上之路徑及源頭位置



圖 13 案例 2 的湧浪事件在大圓上之路徑及源頭位置

五、結論

本文研究湧浪源頭之追蹤，除介紹相關理論外，並以實際案例進行測試研究，分析結果顯示：在非因颱風產生之湧浪條件下，除了有一個湧浪成分因受迴歸線的與資料之間的誤差導致湧浪源頭定位不甚合理外，其餘湧浪成分均能成功分析，該案例之湧浪源來自西南方，與台灣夏季受西南季風影響之氣候狀態符合。本文分析另一個因颱風引起之湧浪案例，湧浪源頭定位結果與颱風位置接近，但由於本文假設湧浪源頭為點波源，在颱風快速移動的情況下，會產生部分誤差，未來可持續研究改善使定位更加精準並能適合於各式氣象條件。