

湧浪源頭追蹤方法之研究

夏兆威¹ 陳盈智¹ 董東璟¹ 滕春池² 陳琬婷²

國立成功大學 水利及海洋工程學系¹ 交通部中央氣象局 海象測報中心²

摘要

海面紛紜波浪是由風浪及湧浪混合而成，湧浪之低耗散的特性可傳遞很長距離，對海岸結構物的衝擊程度大，與近岸結構物交互作用激起之浪花，也威脅岸邊人員活動安全。本研究旨在分析台灣週遭海域湧浪特性並追蹤湧浪源頭，從浮標分析結果顯示，在台灣北部與東部海域冬季期間湧浪較高，平均達 1.6 公尺以上；台灣西南海域湧浪夏季期間湧浪較高，平均達 1.15 公尺以上，顯示各海域湧浪來源主要來自季風。颱風期間湧浪分析結果顯示，湧浪波高但影響時間短，平均約 80 小時；而季風系統引起的湧浪則高度小但影響時間長，最長可達一週以上。本研究使用迴歸線法(Hanson and Philips, 2001)追蹤湧浪源頭，並以地面天氣圖與模式風場資料進行佐證，結果顯示此方法可以合理掌握湧浪來源。從颱風期間之湧浪案例發現，湧浪多生成於颱風第一象限，生成位置距離颱風中心約 0.4-2.4 倍之七級暴風半徑。研究發現部分湧浪追蹤結果不合理的案例因為天氣系統移動過快(如颱風移動速度達 18 公里/小時以上)所致，也顯示湧浪源頭追蹤方法之使用限制。

關鍵詞：風湧浪分離、颱風湧浪、湧浪源頭追蹤

一、前言

大氣氣壓差異引起的風吹拂海面，由漣漪逐漸生成海面波動，隨著風吹拂時間越久波浪逐漸成長，波浪週期也隨之增加，在重力波的部分，以往學者依照波浪成長的成熟與否分為風浪(wind wave)及湧浪(swell)。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。通常認為湧浪的週期較長，中央氣象局在長週期湧浪出現時會發布「長浪即時訊息」，定義長浪的平均週期門檻為 8 秒，然而，若從時序列上發現有一波浪週期穩定的存在，且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，此波浪亦可能為湧浪。湧浪無時無刻都存在，且生成湧浪的條件不僅僅是發生在颱風時期，當海面上存在穩定的風場時，

波浪受風持續作用，在足夠的吹風歷時後，使風浪成長到達完全發展波浪，脫離當地風場後以穩定之形式傳遞至其他區域時即為湧浪。

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，因此研究湧浪特性對於湧浪生成、波浪數值模擬和預報具有重要價值。

有關於湧浪追蹤的先前研究並不多。Munk et al. (1963)與 Snodgrass et al. (1966)基於湧浪傳播的分散關係，透過儀器的布置，從資料分析中提出了脊線法(ridge-line method)，且應用此方法追蹤湧浪系統，為波浪研究歷史最著名的現場觀測案例之一；Hanson and Phillips (2001) 則發展了由方向波譜分離風湧浪的自動演算方法，以波齡及風向波向差作為識別風湧浪之重要因子，即當波速大於風速或是波浪角度與風

向差異太大時，該波浪系統即被判別為湧浪，此方法可以能精確地描述整個區域的波浪場特性及海浪狀態。而該方法已被廣泛使用風湧浪分離的研究上，包含現行波浪模式 Wave Watch III (WWIII)即使用他們所提出的演算法。

台灣四面環海，位處於西北太平洋，於夏秋兩季，平均每年有 2-5 颱風侵襲台灣，另外在台灣沿岸時則常受季風的影響。在這些天氣系統的影響下，台灣週遭海域常會有難以預期的湧浪出現，如 2015 年 10 月在高雄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。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。因此為了獲得更多的湧浪資訊，如湧浪波高、湧浪週期等，本研究分析了台灣週遭海域的湧浪特性，並探討在不同天氣系統下產生的湧浪之影響；另外應用前人提出的湧浪追蹤方法，對於台灣海域在颱風時期與季風時期的湧浪進行源頭追蹤，並探討其分析結果。

二、研究方法

本文參考 Hanson and Phillips (2001)的建議建立湧浪源頭追蹤方法，此法主要步驟是進行尖峰頻率和時間的迴歸，因此稱為迴歸線法。此追蹤方法包含四個步驟：(1)風湧浪分離；(2)湧浪歸類；(3)湧浪源頭方位計算；(4)定位湧浪源頭。

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，李 (2017)提出的有限吹風延時法此方法是基於風浪成長理論所提出，可得識別條件式(1)：

$$f_s = \beta_a t^{a\omega t} (U \cos(\delta + \Delta\theta))^{-(1+a\omega t)} \quad (1)$$

其中 f_s 為波浪之尖峰頻率， t 為吹風延時， U 為風速， δ 為風向與波向之間的角度差。在方向波譜上為拋物線形式，在風速固定的情況下，吹風延時增加，拋物線下面積亦會增大，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。

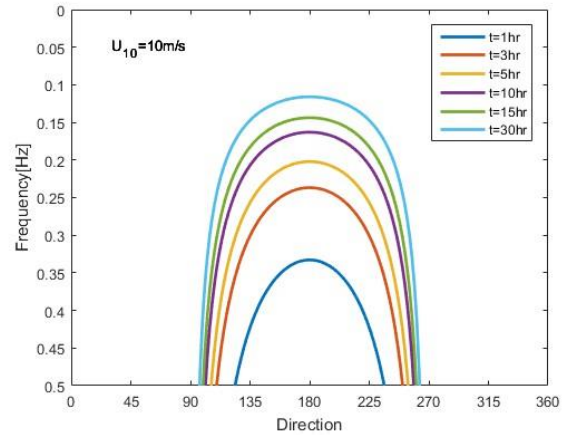


圖 1 方向波譜上有限吹風延時風湧浪分離法示意圖 (李, 2017)

2-2 湧浪歸類

對於湧浪成分而言，在一段時間內，各單點時刻的湧浪成分數、方向、頻率可能都有所不同，因此將可能來自於同一個源頭生成位置的湧浪分在一起。此做法基於具有相似或緩慢變化的湧浪特性採取初步的分組，可以尋找代表源自於不同區域天氣事件的特定湧浪群隨著波浪從遠處傳來，且這些特性預計會因波浪分散和風暴源頭的演變而變化。為了確定新的湧浪成份是否屬於先前識別的初始湧浪群，在此參考 Hanson and Phillips (2001)的建議採用一個權重指數(D)進行判別。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=

$$\sqrt{\left(\frac{H_{m0s} - H_{m0s,group}}{3H_{m0s,group}}\right)^2 + \left(\frac{\theta_p - \theta_{p,group}}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{\log f_p - \log f_{p,group}}{\frac{1}{3}}\right)^2} \quad (2)$$

式(2)中，權重指數 D 與湧浪波高 H_{m0s} 、湧浪平均波向 θ_p 以及湧浪尖峰頻率 f_p 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。

2-3 湧浪源頭方位計算

根據 Munk et al.(1963)脊線法指出，波浪頻率隨著時間的推移與傳遞距離成反比的速率線性增加，因此本研究從前述湧浪群中找出符合此線性特性的湧浪事件進行分析，參考 Hanson and Phillips(2001)從湧浪群中找出湧浪事件，當頻率與時間兩變數之間的關聯性高，即表示兩者間的相關係數大，具有線性關係，則湧浪成份能以迴歸方程式描述，識別為一湧浪事件。

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

$$C_g = \frac{g}{4\pi f} \quad (3)$$

且

$$C_g = \frac{d_{is}}{(t-t_0)} \quad (4)$$

將式(3)及式(4)整理後可得式(5)：

$$\frac{df}{dt} = m_{ft} = \frac{g}{4\pi d_{is}} \quad (5)$$

從迴歸線斜率可藉由式(5)，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，波浪在海面上傳遞時所行進之路徑為圓弧狀，波浪傳遞距離(d_{is})在地表面上則為一弧長，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，故本研究使用球面上經緯度座標進行定位，如圖 3 所示，波浪觀測站、北極點和湧浪生成位置在地球表面形成一個球形三角形。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：

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

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

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)， $\bar{\theta}$ 為湧浪事件的平均波向。從前述說明可知，當得知波浪源頭位置及波浪生成時間，即可對應於天氣圖上。

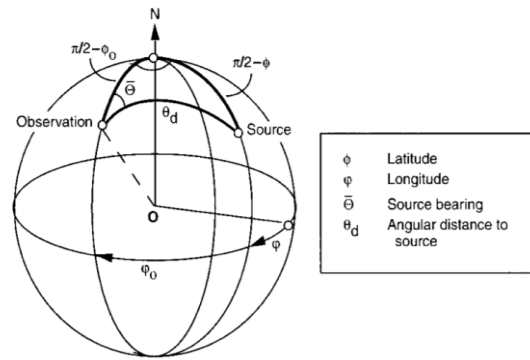


圖 3 湧浪源頭計算示意圖 (Hanson and Phillips, 2001)

三、分析資料

資料浮標(data buoy)可用來做長期的資料量測和即時與定時的海洋氣象資料傳送，是目前常用來做觀測的儀器設備。為蒐集完整的海氣象資料，每個資料浮標觀測系統配備包括兩組風速風向計、一組波浪儀、一組氣壓計、一組全球衛星定位系統、一組氣溫計及兩組水溫計。資料浮標風速觀測為整點前 10 分鐘記錄 1 次，取樣頻率為 2Hz。由三維空間運動經過分析可獲得浮標加速度譜，再從浮標加速度譜減去雜訊修正函數後計算一維水位譜，最後利用一維譜及方向分布函數之乘積求得方向波譜。

本研究為了充分表示台灣週遭海域的湧浪特性，因此選用中央氣象局於台灣四周海域布放的近岸浮標以及東部外海的深海浮標，分別為北部海域龍洞浮標、西部海域新竹浮標、南部海域小琉球浮標、東部海域花蓮浮標和台灣東部外海的台東外洋浮標，共五個測站做為分析對象資料期間為 2010-2015 年，共 191014 筆資料。浮標位置參考圖 4。

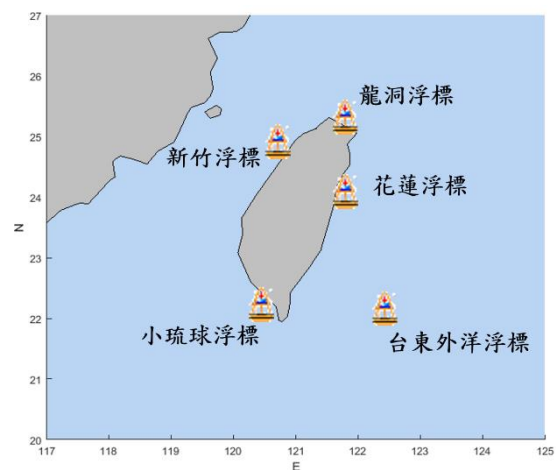


圖 4 浮標位置圖

四、結果與討論

4-1 台灣海域湧浪特性分析

本研究利用浮標所測之方向波譜的資料透過有限風吹延時法分離出湧浪成份，湧浪特性分析中包含湧浪波高、湧浪週期平均值在各月份的變化以及極值的分佈。對於台灣週遭海域而言，年平均湧浪波高約為 1.1 公尺，平均湧浪尖峰週期為 7.8 秒，最大波高為 16.97 公尺，發生在 2012 年杰拉華(JELAWAT)颱風期間，當時湧浪尖峰週期為 13.9 秒。由各浮標平均湧浪波高值檢視可發現台東外洋波高最大，年平均波高為 1.8 公尺；龍洞次之，年平均波高為 1.2 公尺，而小琉球最小，年平均波高為 0.53 公尺，如圖 5 所示。

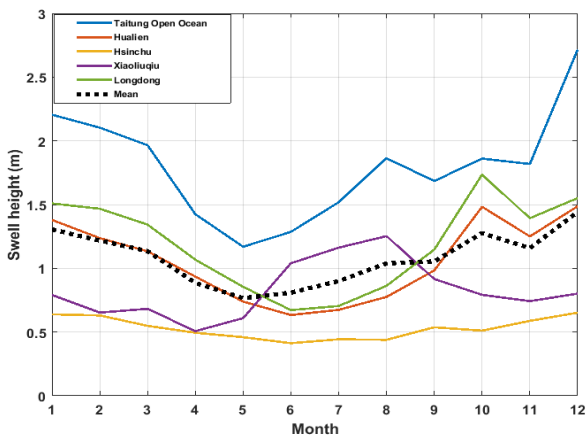


圖 5 湧浪平均波高逐月變化圖

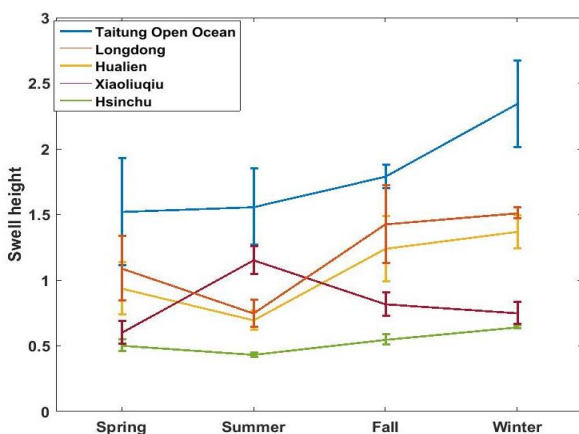


圖 6 湧浪平均波高四季變化圖

此外在各海域常受到不同天氣系統影響，平均湧浪波高具有季節性變化，台灣北部(新竹、龍洞)、東部(花蓮)與東部外海(台東外洋)海域，冬季平均湧浪波高較其他季節大，平均波高分別為 1.08、1.37 和 2.34 m；位於台灣西南海域之小琉球浮標，夏季平均湧浪波高最大，平均波高為 1.15 m，如圖 6 所示。從平均湧浪尖峰週期值檢視可看出，各浮標在整年的趨勢大略一致，最低值發生在 4-6 月份，如圖 7 所示。由各月份的最大湧浪波高值顯示各測站的最大波高多發生於 8,9 月份，如圖 8 所示。

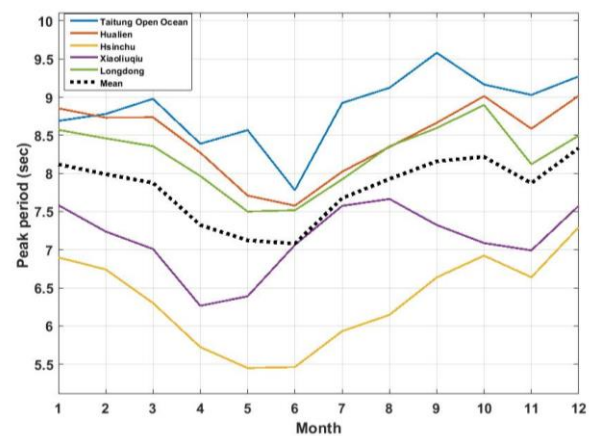


圖 7 湧浪平均尖峰週期逐月變化圖

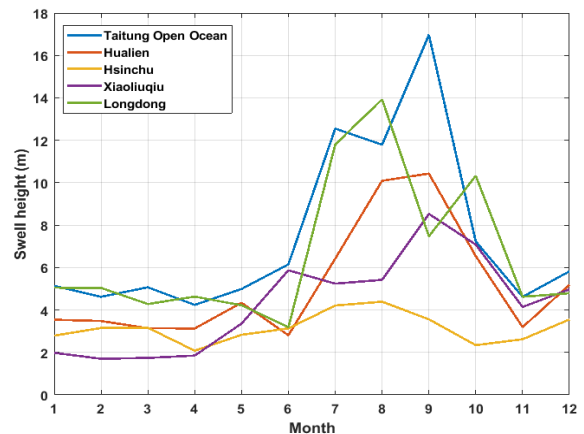


圖 8 湧浪最大波高逐月變化圖

另外在工程上對於波高較大的情況亦是感興趣的，因此本研究分析各月份湧浪波高大於 1 公尺的資料數佔每個月份的比例如圖 9。從圖中大致上能分成台灣北邊的龍洞、花蓮浮標以及台灣南邊的小琉球、台東外洋浮標兩部分。對於北邊的海域分析結果顯示在冬季時期的湧浪較為顯著，比例上高達 0.8，然而夏季時期的顯著湧浪比例是偏低的，僅剩 0.1；而在南邊的海域分析結果恰相反，在夏秋時期的湧浪較為顯著，比例上平均在 0.6，然而冬季時期的顯著湧浪所佔的比例較低；兩者結果表示台灣北邊海域的顯著湧浪主要受東北季風的影響，比例上在冬季時期較高；而南邊海域的顯著湧浪則是受到西南季風及颱風影響，比例上則在夏秋之際較高。另外在台灣海峽北邊海域整年的湧浪波高皆不顯著。

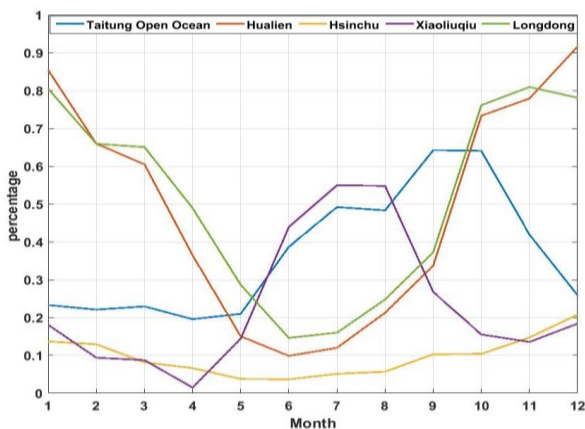


圖 9 顯著湧浪比例逐月變化圖

在上述的分析結果上，對湧浪特性易產生影響的時間當中包含颱風時期，因此針對颱風期間所造成的湧浪變化進行分析，當中分為兩部分，一為颱風顯著湧浪影響歷時；另一個則是顯著湧浪增大時之颱風距離分析，其結果如表 1。從表中可知颱風顯著湧浪歷時與颱風之強度規模、移動路徑及移動型態有關，且根據浮標測站的不同，整體上在深海的台東外洋浮標的顯著湧浪歷時比近岸的花蓮浮標的湧浪歷時來的長。除此之外，由於波浪傳遞速度一般比颱風移動速度快，當颱風未達浮標測站前，其量測波高已經開始增大，因此以顯著湧浪波高增大起始時刻的颱風中心位置與浮標測站位置兩點之間經緯度值，求算波高增大起始距離，結果顯示台東外洋浮標受颱風顯著湧浪影響的時間與歷時皆比花蓮浮標來的早且長。

表 1 颱風資料與初步統計結果

颱風路徑	颱風名稱(年份)	颱風強度	顯著湧浪歷時(hr)		颱風距離 (R ₇)	
			花蓮	台東外洋	花蓮	台東外洋
路徑一	杜鵑(2015)	強	74	128	2.9	4.9
	蘇迪勒(2015)	中	68	129	1.6	2.9
	麥德姆(2014)	中	48	98	1.3	4.2
	蘇拉(2012)	中	116	160	2.6	2.3
	南瑪都(2011)	中	79	144	3.3	3.4
	凡那比(2010)	中	85	168	3.5	2.6
路徑二	天鵝(2015)	中	123	175	3.6	3.4
	紅霞(2015)	中	68	81	3.8	4.2
	浣熊(2014)	強	62	126	3.3	4.6
	杰拉華(2012)	強	144	187	3.4	3.7
	米雷(2011)	輕	50	116	2.9	4.9

此外在湧浪的分析結果上，台灣南部海域夏季平均湧浪波高較大，且在此時期主要受西南季風及颱風影響。因此從小琉球浮標實測資料進行分析，以湧浪波高 1 公尺，湧浪尖峰週期 8 秒為篩選條件，從中挑選出湧浪波高與湧浪尖峰週期有顯著變化的時期。從表中可得知在颱風時期平均顯著湧浪歷時約 86 小時，平均湧浪波高約 2.17 公尺，平均尖峰週期為 9.8 秒。當中有些案例除了受颱風影響外，其外圍環流與西南季風並行，引進強烈的西南氣流，會使湧浪增大，顯著湧浪歷時增長。在季風期間平均顯著湧浪歷時約 87 小時，平均湧浪波高約 1.74 公尺，平均尖峰週期為 8.4 秒。從表 2 可知，由颱風引起的湧浪波高比較大，而在影響歷時上則是季風時期影響較長。

表 2 颱風資料與初步統計結果

天氣系統	平均湧浪影響歷時(hr)	平均湧浪波高(m)	平均尖峰週期(s)
颱風	86	2.17	9.8
季風	93	1.72	8.4

4-2 湧浪追蹤驗證

自資料中挑出顯著湧浪案例進行湧浪追蹤，共有 20 筆，資料數據是來自花蓮、台東外洋及小琉球浮標資料，當中涵蓋了颱風和季風等主要天氣條件。表 3 為湧浪案例的追蹤結果，當中包含了湧浪生成時間(t_0)，湧浪事件平均波向($\bar{\theta}$)，湧浪傳遞距離(d_{is})以及湧浪源頭經緯度座標(ϕ, φ)。從表 3 中的湧浪案例追蹤結果中，能得知湧浪源頭的生成時間及坐標位置，而透過檢視天氣圖及模式風場圖，判斷湧浪源頭位置來自於的何種天氣系統，以推斷追蹤結果的合理性。

湧浪事件#3 的源頭生成時間為 2005/07/16/07，座標為北緯 23.9 度，東經 126.5 度，此位置顯示在距離花蓮浮標測站的東北方約 500 公里處，從圖 10 的地面天氣圖可發現在那時刻有海棠(HAITANG)颱風在台灣東邊海域上，而預測的湧浪源頭位置落在颱風中心西北方上，此源頭位置位於颱風的第一象限上；另外將湧浪源頭位置繪製在模式風場圖，可得知源頭位於颱風風場的範圍且由風向量可知生成位置的風向為東北向並指向觀測點，因此認為此案例追蹤結果良好，湧浪是由海棠颱風所生成的。另外以湧浪事件#18 為例，其預測的湧浪生成時間為 2015/09/28/12，源頭生成座標位置為北緯 21.2 度，東經 128.1 度。圖 11 的地面天氣圖中，預測的湧浪生成位置在颱風中心東南方，源頭位置位於颱風的第三象限上，透過模式風場圖看出此源頭位置在風場之外，且風向量在此位置指出風向為北向並無指向觀測點，因此對於此案例而言，追蹤結果並無法直接確認湧浪是由杜鵑颱風生成。

根據上述的驗證標準，對於本研究追蹤的 20 個案例結果中，有 11 個追蹤良好，能找出各湧浪源頭及源自於不同的天氣系統；而另外 9 個案例在追蹤結果上，並無法直接判斷湧浪是由鄰近的天氣系統所生成。當中對於追蹤良好的颱風案例分析結果中，湧浪源頭多來自於颱風的第一象限且湧浪生成位置距離在颱風中心約 0.4-2.4 倍的最大七級暴風半徑之處。此外本研究假定湧浪源頭位置可能是與相對應的颱風移動速度有關，因此將兩者繪製在圖 12 中，圖上藍點為追蹤結

果良好之案例，紅叉為源頭追蹤不合理之案例；橫軸為源頭位置與颱風中心之距離，以最大七級暴風半徑(R_7)表示，縱軸為颱風移動速度。從圖中可看出，當颱風速度超過 18 公里/小時的時候，不論生成位置距離颱風中心遠近，其追蹤結果皆無法找出合理的湧浪生成位置。因此本研究認為當考慮的天氣系統移動速度較快時，如颱風案例，湧浪的尖峰頻率與時間的關係並非為線性，因此追蹤結果無法準確定位，未來能改以多次多項式進行分析。另外在湧浪追蹤時使用的迴歸線法中，是基於資料的連續從中觀察時間與尖峰頻率之間的相關性，並從連續資料中求取迴歸方程式進而推算湧浪源頭位置。但從實測資料中，會因觀測儀器出現異常，使得觀測資料遺漏，造成在辨識資料時容易產生誤差，使得案例在追蹤上產生不合理的源頭位置。

表 3 湧浪案例追蹤源頭之參數

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	94	2003/09/01/03	1199	22.8	133.3
#2	65	2004/09/25/17	486	25.8	126.0
#3	91	2005/07/16/07	501	23.9	126.5
#4	77	2005/08/31/07	585	25.1	127.3
#5	97	2006/07/07/16	367	23.6	125.2
#6	84	2007/07/12/15	585	24.5	127.4
#7	104	2007/09/18/03	887	24.0	124.4
#8	77	2008/09/27/11	751	25.4	128.9
#9	119	2009/07/17/13	656	21.1	127.1
#10	124	2010/09/19/05	342	22.3	124.4
#11	40	2012/09/27/18	562	27.9	125.3
#12	214	2013/07/25/15	560	18.1	117.4
#13	103	2014/09/20/20	683	22.5	128.1
#14	74	2015/03/12/11	494	25.2	126.4
#15	98	2015/04/02/23	1541	21.4	136.4
#16	228	2015/07/19/22	301	20.2	120.6
#17	97	2015/08/21/22	318	23.6	124.7
#18	114	2015/09/28/12	733	21.2	128.1
#19	81	2016/07/07/11	443	24.6	126.0
#20	55	2016/08/28/00	626	27.2	126.8

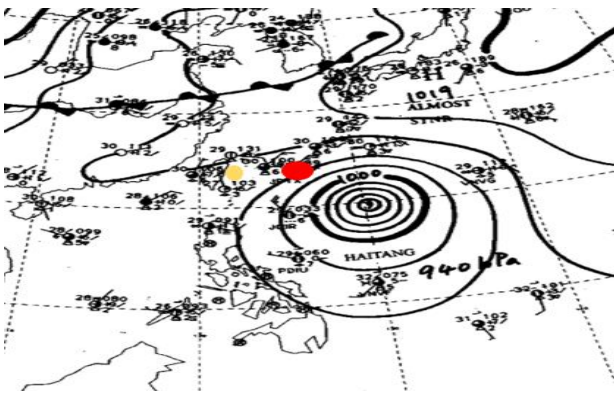


圖 10 湧浪案例 #3 之地面天氣圖與模式風場圖

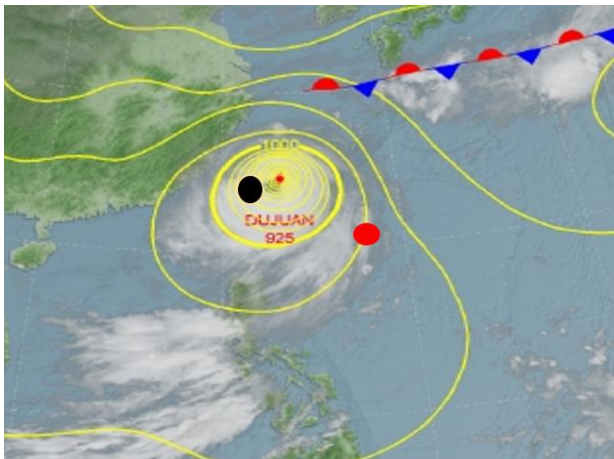


圖 11 湧浪案例 #18 之地面天氣圖與模式風場圖

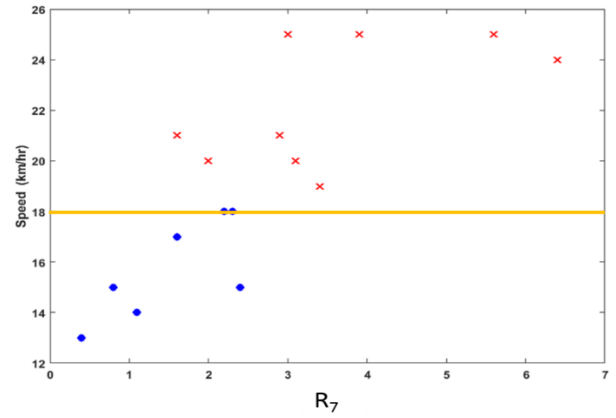


圖 12 湧浪源頭位置與颱風中心之距離(R_7)跟颱風移動速度之間的關係

五、結論

本研究使用五個浮標實測資料進行湧浪分析與統計，結果顯示較大之湧浪主要發生於颱風期間，但季風帶來的湧浪亦不可忽略，而在台灣北部與東部海域出現之湧浪主要受東北季風影響，冬季期間湧浪較高；台灣西南海域湧浪主要受西南季風與颱風影響，夏季期間湧浪較高。颱風期間引起的湧浪波高大但影響時間短；而季風系統引起的湧浪則高度小但影響時間長。另外本研究使用迴歸線法追蹤湧浪源頭，並以地面天氣圖與模式風場資料進行佐證，結果顯示此方法可以合理掌握湧浪來源。針對颱風期間之湧浪案例，本文發現湧浪多生成於颱風第一象限。研究發現部分湧浪追蹤結果不合理的案例因為天氣系統移動過快(如颱風移動速度達 18 公里/小時以上)所致，未來需進一步探討修正。

參考文獻

1. 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
2. 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.
3. 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.