

即時海象資料在海域航行與遊憩之應用

范揚洛¹ 張恆文² 王良生¹ 邱惠絹¹ 高家俊¹ 陳進益³ 滕春慈³
國立成功大學近海水文中心¹ 廣恆綠能顧問有限公司²
中央氣象局海象測報中心³

摘要

根據內政部消防署統計，消防機關執行水域救援人數，從104年的594人，逐年增加至108年的948人，其中水域事故場域發生在海邊與外海的共佔22%。又自91年至108年臺灣附近海域船隻遭受大浪襲擊導致翻覆的事件共有175件。因此，為了確保海上作業、運輸及遊憩活動安全，有必要即時掌握海象變化資訊。本研究結合國內外實測、預測及遙測等巨量且多元海洋氣象資料，發展「航行海象」與「海岸遊憩」作業技術，產製警示資訊提供海洋事務相關機關與民眾多元應用，以提高航行與海域遊憩活動安全。這些作業技術經過科學分析與驗證，活化海象即時觀測與預測的應用價值，並已建置於「臺灣海象災防環境資訊平台」，以友善易懂的環境，方便機關與民眾使用與操作。

關鍵字：臺灣海象災防環境資訊平台、航行海象、船級舒適度、船級作業風險、海岸遊憩

一、海域潛在危險

全球航海發達相對帶動經貿的往來，繼而開啟海上航路的交通需求，因此船隻在海上的航行安全格外重要。由於在大洋中因不同方向波浪成分的組合所造成的複雜浪況，相對船隻也會造成重大影響，日本氣象庁(Japanese Meteorological Agency, JMA)給予交錯波之航行警示標準，利用波浪分量及波向規劃提醒警示的標準，提供船隻航行安全資訊。同時，對於近岸區域容易發生的波流逆向交互作用等危機，因此船隻航行潛在的危險因子僅以示性波高與平均週期為依據仍有不足，有必要再加上交錯波浪與逆流等危險因子，方能降低航行危險。

此外，近年來國人從事海岸、海岸遊憩活動與日俱增，在警示資訊不足下也帶來了危險，例如海灘遊憩民眾在風和日麗的天氣下被浪捲走的事件層出不窮。為提昇從事水域遊憩活動的安全性，掌握區域海岸氣象特性及動態資訊成為必要手段。除了建置海上或岸邊測站以匯集歷史與即時觀測波、潮、流資料，取得預測資料來進行海域遊憩管理亦是相當普遍且有效的方式。本研究結合全球公開的實測、預測及遙測等巨量且多元海洋氣象資料，發展「航行海象」與「海岸遊憩」作業技術，產製警示資訊提供海洋事務相關機關與民眾多元應用，以提高航行與海域遊憩活動安全。

二、航行海象應用發展

航行海象主要提供航行需要的海氣象資訊，服務民眾從事海上交通、作業及遊憩的人，選擇安全回家的路。能提供漁船、遊艇業者及海巡署執業或救難巡防時之安全資訊，提早規劃因應措施，亦可以提升海域航行的安全，減少航行災難的發生。本研究依據不同船隻之尺寸與耐浪級數將示性波高資料轉換為資訊，包括船級舒適度提供交通船、遊艇的舒適、顛簸或劇烈顛簸的警示資訊；船級作業風險提供巡防艇、漁船及動力小船的高風險或低風險的警示資訊。然而，僅以示性波高與平均週期為依據仍有不足，有必要再加上交錯波浪與逆流等危險因子，方能降低航行危險 (Toffoli et al., 2005)。

(一) 交錯波浪警示標準

高野洋雄與山根彩子 (2018)指出大洋中在相同有效波高條件下，存在單一波高和交錯波浪的可能。由於不同方向波浪成分的組合容易造成複雜浪況，也容易產生異常波浪的機率，日本氣象廳提出交錯波浪 (cross wave)之警示標準，並發布在開放海域(即大洋海域)的預報波浪圖 (Open Sea Prognostic Wave Charts, FWPNS)，如圖1，圖中紅色圈選出來黑色斜線部份表示有交錯波浪，此外，圖中還包括產生波高、週期 (數字呈現) 及波向 (箭頭呈現)。此警示標準與異常浪的警示標準不同，且交錯浪況未必一定會產生異常浪，但已會對於航行船隻的安全造成影響。

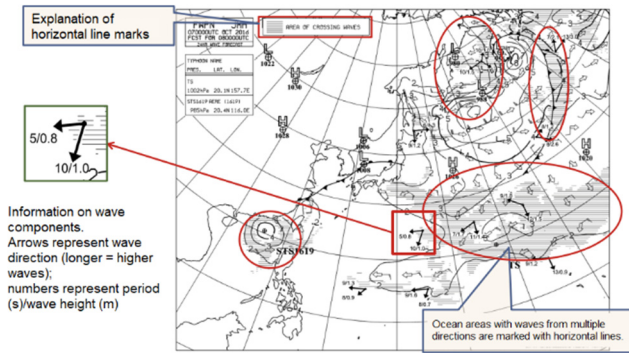


圖1 日本氣象廳之交錯波浪航行警示範圍

考量波浪的特性，將交錯波浪 (cross wave) 的警示標準條件包括波浪的分量 (wave components)、風浪及湧浪，其中湧浪還依據其波高大小分為主湧 (primary swell或稱第一湧浪)、次湧 (secondary swell或稱第二湧浪)、第三湧浪、第四湧浪等。而前項日本氣象廳提出的條件僅包括波浪前三大的分量波高，由大排到小的波高為 $Hw1$ 、 $Hw2$ 、 $Hw3$ ，滿足 $Hw2/Hw1 \geq 0.6$ 或 $Hw3/Hw1 \geq 0.45$ 的條件，且波浪分量之間的角度差異必須大於 30° 。該研究亦指出此臨界條件的數值為試誤產出的，然而相關資訊的使用卻得到許多單位有價值的回饋，包括航運公司，海船相關組織和漁業組織等，顯然該資訊的展現在實際應用上是具有價值的。

(二) 受到逆流的波浪變化的理論

除了交錯波浪議題常存於大洋中，本研究亦考量到當波浪接近岸邊時，波的能量驅動而形成近岸流，而另需注意的因素則為逆流區的潛在威脅。當波浪遇到逆流會產生阻滯作用 (blocking effect)，波高會變高、波長變短，造成波浪尖銳度變大，這會使得船隻劇烈震動，對於中小型船隻 (包括漁船) 的影響較大，而一般中小型船隻的作業範圍都較接近岸邊，故應對於海岸附近的海域提出逆流的警告，目的在提醒小型船隻和漁船提前避開。本研究採用日本氣象廳利用海洋觀測船觀察船隻受到逆流所產生的晃動行為所訂定的指標 (如圖2黑色斜線) 來標定氣象局波浪模擬解析度2.5公里波浪預報計算範圍內之逆流區，較適合小型船隻和漁船使用。

日本土木學會 (2000) 提出波速 c_0 (wave speed, celerity) 或稱位相速度 (phase velocity) 受流作用下之變化如式(1)，其中 h 水深， U 流速， k_0 波數， c 為改變後之波速， k 改變後之波數。當波浪碰到逆流時，波高會變高，波長變短，反之，波高變小而波長變長。波高變化如式(2)，其中 H 變化後波高， H_0 變化前波高， σ 變化後週波率 (angular frequency)， σ_0 變化前週波率， c_{g0} 變化前群波速度 (group velocity)， c_g 變化後群波速度。將分散方程式 (dispersion equation) 與式(1)代入式(2)，得到式(3)，式(3)說明必須有變化

前後之波長才能得到波高的變化，而變化前的波浪條件通常為已知，所以必須知道變化後的波長才能求得波高的變化。

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{2B} \left[1 + \sqrt{1 + 4B \frac{U}{c_0}} \right] \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{H^2}{H_0^2} = \frac{\sigma}{\sigma_0} \frac{c_{g0}}{c_{g+U}} \dots \dots \dots (2)$$

$$\frac{H^2}{H_0^2} = \frac{\sqrt{k \tanh kh}}{\sqrt{k_0 \tanh k_0 h}} \frac{2n_0}{n \left[\frac{1}{B} \left(1 + \left(\frac{1+4BU}{c_0} \right)^{1/2} \right) + \frac{2U}{c_0} \right]} \dots \dots \dots (3)$$

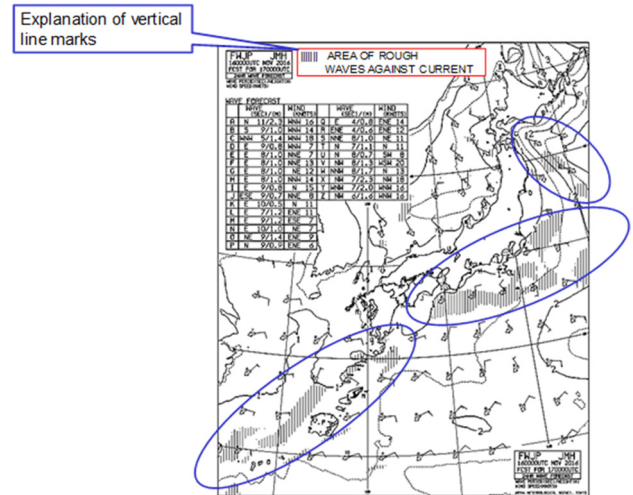


圖2 日本氣象廳 JAM 逆流區之航行警示範圍

(三) 分析與結果

1. 交錯波浪

本研究採用氣象局NWW3波浪模式所產出之示性波高 H_s 、風浪波高及波向、主湧波高及波向、次湧波高及波向。依據前項交錯波浪警示標準分析波浪模式資料，結果如圖3所示，以80 呎遊艇為例，其中垂直虛線的部分即為交錯波浪的發生區域，顯示雖然對於80呎的遊艇而言，波高小於4.8m、大於1m的區域為注意範圍，但仍會有交錯波浪的產生，對於航行安全仍然會有影響。

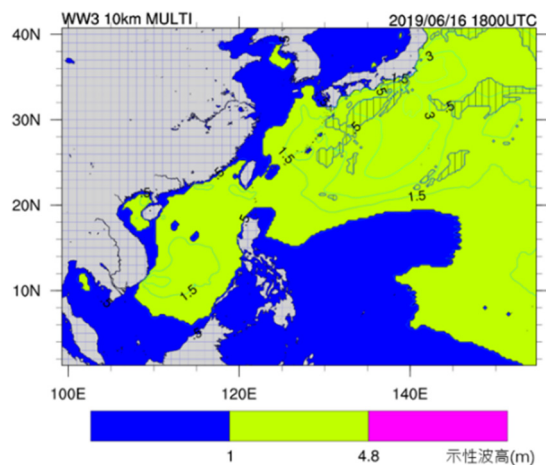


圖3 交錯波之航行警示範圍與航行安全警示標準套疊

2. 逆流影響

為了檢視波高變化與波長變化前後之比較，本研究評估流與推估波高及變化後的波長等因素，因此，利用氣象局NWW3模式模擬逆流條件下之波高變化，並將計算得到的波長代入式(3)進行比較。以NWW3計算條件為水深1000m，3000m網格為例，最小波頻0.04177Hz，波頻增量1.1，波頻數25，在週期較小的波浪時，波頻增量為1.05，波頻數為50使得計算可以適當涵蓋最高頻；入射波高為1m，流速在起始6個網格後的每個網格均設定相同數值，使得模擬可以穩定計算受流作用下之波高變化，如圖4。圖中顯示模式結果略高於式(3)的估算值，但變化趨勢相近，且隨著逆流流速增大，二者之差異愈大；而在3秒週期入射波浪時，當逆流流速超過0.8m/s時，波浪尖銳度已超過碎波標準，模式結果與式(3)之估算值均已不適用。

日本氣象廳提出的逆流區指標包括 $H_s > 1m$ 及受流作用下之波高變化大於5% ($H/H_0 > 1.05$)，簡化式(3)得到波高變化如式(4)，假設條件為波長不變，雖然假設雖不盡合理，但免除了式(3)必須在變化後波長為已知的計算條件所面臨的困境。同樣利用NWW3模式檢視式(4)的變化趨勢，計算結果如圖5所示，圖中顯示使用式(4)的波高變化曲線明顯較使用式(3)的小，與NWW3模式的偏差更大，但對於當作逆流指標使用的警戒指標1.05而言，僅在平均週期約5秒時(5.12s)及流速0.2m/s時，二者會有不同，雖然使用式(4)可能造成波高變化低估，但在此警戒值下，大略都可以顯示出波高已經有變高的趨勢，亦即，使用式(4)及門檻條件已可辨識出逆流區的影響範圍。

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{2}{1 + \frac{4U}{C_0} + \sqrt{1 + \frac{4U}{C_0}}}} \dots\dots\dots(4)$$

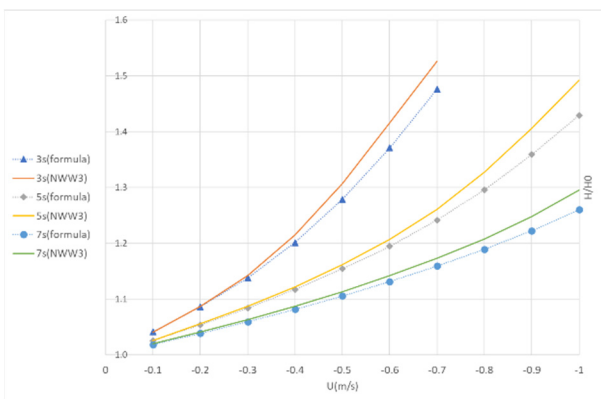


圖4 受流作用之波高變化比較圖 (以式(3)運算求得)

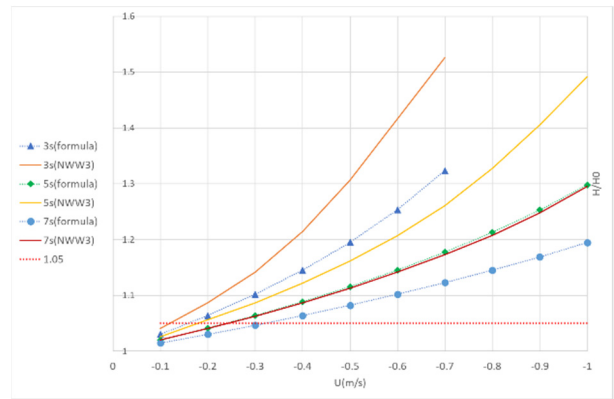


圖5 受流作用之波高變化比較圖 (以式(4)運算求得)

三、海岸遊憩應用發展

海岸遊憩的活動非常多樣，本研究針對長浪警示、自訂警戒值、以及衝浪指數發展對應的門檻值與作業技術。

(一) 長浪警示標準發展

由於長浪傳播距離遠，挾帶的能量較大，傳播速度較快，且長浪往往在岸邊受到地形淺化效應，容易出現2m以上的浪高，容易使近岸地區發生海堤溯升越波、海水倒灌等釀成重大災害。在國際上關於長浪的警戒值目前為止尚未有定論，各國氣象單位並未明確給定一標準，根據其用途及目標不同(如衝浪、航行船隻、岸上遊客等)，所給定之標準亦大不相同。

1. 提出長浪警戒標準

Niclasen et al. (2010)提到，一般認為波高及週期為最主要需考慮的參數，然而光是只有波高和週期並不能夠完整表現出危險海況的特性；Savina et al. (2003)提出，對於尖銳指標(steeptness index, SI)之參數另包括尖銳度、波浪方向分布、風湧浪頻率差、風湧浪角度差等。

為了決定長浪警戒標準，本研究蒐集事件發生時的海況來分析長浪警戒標準，包含過去發生的49筆船難事件，其對應的海況資料採用歐洲中期天氣預報中心(ECMWF)的ERA5重分析資料(ERA5 reanalysis dataset)，透過雙變數常態分佈(Multivariate Normal Distribution)計算其機率，雙變數常態分佈的機率密度函數如式(5)；其中 μ 為平均向量， Σ 為共變異數矩陣，計算60%機率涵蓋的分布綠線範圍如圖6，可得各別參數之上下界。研究結果顯示，當湧浪平均週期大於4.3秒、風湧浪平均週期差小於4.8秒且風湧浪波向差小於77.6°時當作長浪警戒值。

$$y = f(x, \mu, \Sigma) = \frac{1}{\sqrt{|\Sigma|(2\pi)^2}} e^{\frac{1}{2}(x-\mu)\Sigma^{-1}(x-\mu)} \dots\dots\dots(5)$$

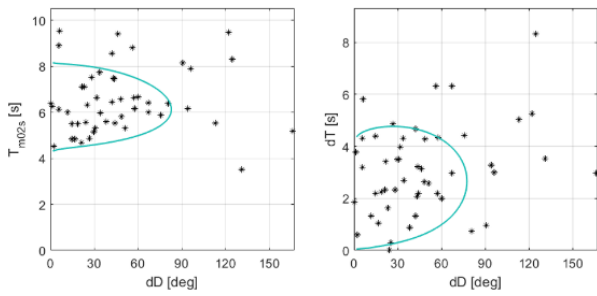


圖 6 船難事件之風湧浪波向差與湧浪尖峰週期(左)、風湧浪週期差(右)散佈圖

2. 長浪警戒驗證

為確認該長浪警戒標準是否合宜，本研究針對前述長浪警戒標準進行驗證工作，在108~109年其中正向驗證的部分，共擇取4件鄰近資料浮標站的船隻翻覆事件，並以實測資料進行檢驗後均通過驗證。在反向驗證的部分，本研究擬選取沒有發生船隻翻覆意外時間的測站資料進行分析，但事實上若非有紀錄的船隻翻覆事件，並無法得知測站附近的海域是否有船隻亦或多少船隻乃至於是否有翻覆事件，故反向驗證不容易辦到。

利用過去無船隻翻覆意外的大型賽事期間測站資料來進行驗證。例如過去幾年交通部觀光局大鵬灣國家風景區管理處均於4月份辦理風帆橫渡小琉球的活動，本研究擇取過去幾年無翻覆意外的賽事期間，並利用氣象局所轄之小琉球資料浮標資料來進行反向驗證工作。經洽詢活動承辦單位108年度的活動情形，確認活動舉辦期間(108年4月21日9~17時)並無船隻翻覆的事件發生。查詢活動舉辦期間小琉球資料浮標的風、湧浪資料如表1，經與長浪警戒標準比對後，結果均不符合(如表2)，故反向驗證成立。

表 1 活動期間小琉球浮標逐時風、湧浪資料

時間	湧浪			風浪		
	波高 cm	週期 sec	波向	波高 cm	週期 sec	波向
9:00	56.4	6.2	259	5.4	4.8	100
10:00	56.7	6.4	248	5.1	4.2	100
11:00	60.5	6.7	270	9.5	5.7	100
12:00	52.8	6.5	248	7.6	6.2	100
13:00	58.1	6.4	214	8.2	4.9	100
14:00	57.8	6.4	248	6.9	5.2	97
15:00	61.1	6.4	225	9.3	3.9	95
16:00	62.5	6.7	259	36	5.7	98
17:00	74.3	6.2	236	10.2	5.3	100

表 2 活動期間風湧浪資料驗證長浪警戒標準

時間	$T_{m02s} > 4.3 \text{ sec}$	$dT < 4.8 \text{ sec}$	$dT \leq 77.6^\circ$	符合
9:00	6.2 (✓)	1.4 (✓)	158 (×)	否
10:00	6.4 (✓)	2.2 (✓)	147 (×)	否
11:00	6.7 (✓)	1.0 (✓)	170 (×)	否
12:00	6.5 (✓)	0.3 (✓)	147 (×)	否
13:00	6.4 (✓)	1.5 (✓)	113 (×)	否
14:00	6.4 (✓)	1.2 (✓)	150 (×)	否
15:00	6.4 (✓)	2.5 (✓)	130 (×)	否
16:00	6.7 (✓)	1.0 (✓)	160 (×)	否
17:00	6.2 (✓)	0.9 (✓)	136 (×)	否

(二) 自訂警戒值功能發展

本研究除發展前述長浪警戒值功能外，考量臺灣各海域的水域遊憩活動標準不完全相同，因此設計「自訂警戒值」功能，此功能使用氣象局每日作業化，風、波浪預報資料，依據不同的海岸機關自訂管轄海岸之適用條件來建立自訂警戒值功能，以提供管理海岸遊憩活動時更即時、更快速的資訊參考。

由於海岸機關轄區內可能不只一處水域遊憩活動點位，故本研究設計管理者可自訂「點位名稱」，並利用輸入及點選「經度、緯度」坐標位址，提供「浪高、週期、風速、流速及海溫」等5種物理量的複選展示功能，呈現每3小時之未來72小時預報資料，如當地海氣象超出自訂的標準，則於該時段展示警戒旗幟，以利岸際海域遊憩安全之管理，如圖7所示。

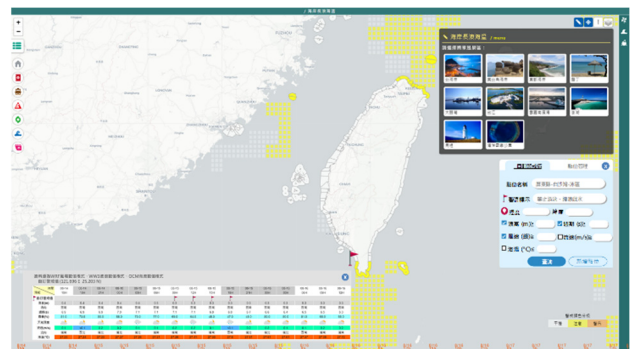


圖 7 海岸遊憩自訂警戒值示意圖

(三) 衝浪指數

近年來國內衝浪運動日漸興盛，國際衝浪比賽也在國內定期舉辦，因此衍生出衝浪資訊，對衝浪提供湧浪預報及警示的資訊服務，例如紐西蘭公司MetOcean旗下的SwellMap便針對海況(風速、湧浪高、湧浪週期等參數)對合適衝浪的海況進行分級，如圖8。

本研究綜合SwellMap網站的資訊，同時實際走訪臺東縣體育會衝浪運動委員會，以及蒐集衝浪者

之意見後，整理出衝浪指數規則表，如表3，此表分為戲水、初學及玩家三類。另外，考量水域遊憩活動安全性，建議於颱風警報期間與長浪警戒時將停止提供衝浪指數資訊。

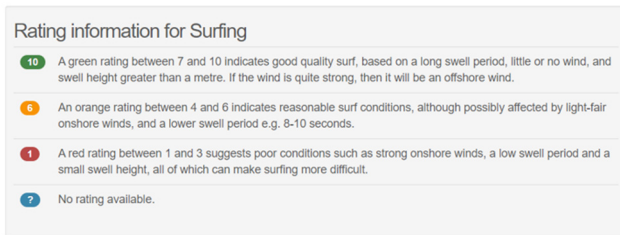


圖 8 SwellMap 網站公布衝浪指標規則定義

表 3 衝浪指數規則

指數	湧浪波高 (m)	湧浪週期 (sec)	風速 (m/sec)	備註
1	<1	<8	≥5.1	戲水
2	<1	<8	<5.1	
3	<1	>8	-	
4	1≤H<1.5	<8		初學
5	1≤H<1.5	≥8	≥5.1	
6	1≤H<1.5	≥8	<5.1	
7	≥1.5	8≤T<10	≥5.1	專家
8	≥1.5	8≤T<10	<5.1	
9	≥1.5	≥10	≥5.1	
10	≥1.5	≥10	<5.1	

四、結論

結合國內外實測、預測及遙測等巨量且多元海洋氣象資料，本研究已發展「航行海象」與「海岸遊憩」技術，產製警示資訊提供海洋事務相關機關與民眾多元應用，以提高航行與海域遊憩活動安全。這些作業技術經過科學分析與驗證，活化海象即時觀測與預測的應用價值，並已建置於「臺灣海象災防環境資訊平台」(<https://ocean.cwb.gov.tw/>)，以友善易懂的環境，方便機關與民眾使用與操作。

航行海象的交錯波浪部分，採用氣象局NWW3波浪模式所產出之示性波高 H_s 、風浪波高及波向、主湧波高及波向、次湧波高及波向做為交錯波浪警示標準的資料來源，分析結果證實即便海況並非危險等級，但部分區域可能出現交錯波浪，對於航行安全仍然會有影響。逆流研究結果顯示日本土木學會的經驗公式遇逆流之增幅均小於NWW3的模擬結果，

且隨者逆流流速愈大差距愈大。然而日本氣象廳提出之經驗式雖然簡化日本土木學會的經驗公式，但克服需知道波浪遇逆流後之波長所產生之困境，且其提出之經驗式及警示門檻，幾乎與NWW3模式及日本土木學會所提出經驗公式符合，即利用日本氣象廳提出之經驗式產生警告時，NWW3模式及日本土木學會亦符合 (除週期5秒、流速0.2m/s時)。

海岸遊憩在長浪警戒標準研究結果顯示，其湧浪平均週期、風浪湧浪頻率差以及風浪湧浪角度差最為相關，亦即當海況符合三項條件時，則可視為容易發生危險之海況，此研究結果經實際資料驗證其合理性。提供長浪觀測及預報資訊；又本研究利用湧浪波高、湧浪週期及風速，再加上專業玩家的訪談，提出戲水、初學及專業等衝浪指數服務。此外，本研究開發自訂警戒值功能，提供海岸管理機關可於遊憩區域自行輸入該機關已公告的警戒標準，做為海象災害預警與應變依據。

參考文獻

1. 土木学会, 2000: 水理公式集·平成11年版, 丸善, 478-479。
2. 高野洋雄、山根彩子(2018): “航行に危険な荒れた海域情報”の波浪予想図への追加, 測候時報, 第 85 卷, p1-12。
3. Nadao Kohno 2017: "New information on crossing waves of JMA" 1st International Workshop on Waves, Storm Surges, and Coastal Hazards, incorporating the 15th International Waves Workshop.
4. Niclasen, B.A., Simonsen, K. and M, A.K., 2010: "Wave forecasts and small-vessel safety: A review of operational warning parameters", Marine Structures, 23(1): 1-21.
5. Savina H, Lefevre JM, Josse P, Dandin P., 2003: "Definition of warning criteria. In: MAXWAVE final meeting. Geneva", Switzerland.
6. Toffolia, A, Lefèvreb, J.M., Bitner-Gregersenc, E., Monbaliu, J., 2005: "Towards the identification of warning criteria: Analysis of a ship accident database". Applied Ocean Research, 27, 6, 281-291.
7. SwellMap網站平台: <http://www.swellmap.com>
8. 日本氣象庁網站: <https://www.jma.go.jp>
9. 內政部消防署網站: <https://www.nfa.gov.tw>
10. 臺灣海象環境資訊平台: <https://ocean.cwb.gov.tw>

Application of real-time meteorological-ocean data in marine recreation

**Yang-Ming Fan¹, Heng-Wen Chang², Liang-Sheng Wang¹, Hui-Chuan Chiu¹, Chia Chuen Kao¹,
Jin-Yi Chen³, Terng, Chuen-Tey³**

Coastal Ocean Monitoring Center, National Cheng Kung University¹

Guang Heng Renewable Energy Consultants Ltd²

Marine Meteorology Center, Central Weather Bureau³

Abstract

According to the statistics of National Fire Agency, Ministry of the Interior, the number of rescuers by the fire department in the waters has increased from 594 in 104 to 948 in 108. Among them, 22% of accidents occurred on the coast and offshore. In addition, the marine near Taiwan ship suffered big waves struck guide event caused overturned a total of 175 from 2002 to 2019 years. Therefore, the objective of this study is supporting safety of life and property at sea, integrated coastal management and the minimization of societal impacts from natural hazards through the provision of meteorological-ocean services. This study integrated domestic and foreign meteorological-ocean data, such as observations, predictions, and remote sensing to develop the technologies of "SAFE SEE" and "Coastal Recreation" which offer real-time warning information to provide marine affairs agencies and the public with multiple applications. These technologies have been scientifically analyzed and verified to activate the application value of real-time marine observation and prediction. These technologies have been built on the "Taiwan maritime disaster prevention and environmental information service platform", and it is convenient for agencies and the public to use and operate with a friendly and easy-to-understand environment.

Key word : Taiwan maritime disaster prevention and environmental information service platform, SAFE SEE, comfort index, risk assessment, Coastal Recreation.