

臺東海岸公路浪襲預警系統精進與維運

陳冠宇 國立中山大學海洋科學系教授
陳鈞彥 交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員
林欣妮 國立中山大學海洋科學系兼任研究助理

摘要

台灣東部海岸長年因異常浪侵襲，影響公路交通，危害用路人安全。本研究旨在預測海浪侵襲狀況，並觀測可能受害之路段以提早進行封路措施，對台灣東部用路安全具重大價值。經觀測發現，於颱風期間的台東海岸，易受浪襲的區段主要為多良站以及南興站，故於此兩站建立浪襲預警系統。系統的資料同化方式參考了歐等人使用的最佳內插法。本研究對溯上模式所需的示性波高輸入來源(SWAN 模式預報值)進行修正，以提高警報燈號的正確性。讓公路單位面對海況不佳的情況時，對於道路通行安全的評估有較佳的參考資料

一、前言

臺灣東部海岸地區與海岸公路可能受到颱風引起的波浪或異常浪等長浪侵襲，而造成危及生命安全的災害。例如 2015 年蘇迪勒颱風威力強大，除了造成台 11 線花東海岸公路路基流失致使道路阻斷，並於台 9 線南興段出現長浪襲擊致使駕駛車輛擋風玻璃破裂的事件。因此在交通部運輸研究所 106 年的「海岸公路異常波浪特性及防災應用技術之研究」計畫中，考量颱風期間在臺東海岸公路較容易受到海浪襲擊的區段，建立了多良段與南興段的浪襲預警系統。系統根據近岸的海況資訊產生不同危險程度的燈號，並以網頁形式呈現，可提供公路單位作為道路通行安全的評估和道路暫時封閉的參考。為了提高系統的

準確度，可利用即時的觀測資料對系統的預報值進行修正，以提高評估危險程度的正確性。

二、海岸公路浪襲預警系統的預報修正

2.1 研究方法

本研究的資料同化方式是參考歐等人(2004)使用的最佳內插法是基於 Gandin (1963)為處理氣象資料所發展的分析方法，其目的是建立觀測資料的統計架構，並決定最佳的權重，再利用各測站的觀測值對數值模式中的各個座標位置進行模式值的同化。最佳內插法的公式如下：

$$H_i^A = H_i^P + \sum_{j=1}^{N_{obs}} W_{ij} (H_j^O - H_j^P) \dots\dots (1)$$

其中 N_{obs} 為觀測站的數量， H_j^O 為觀測波高值， H_j^P 為模式波高值， H_i^A 為模式值經資料同化後的波高值， W_{ij} 為各個測站相對模式各個網格位置的權重，下標 i 和 j 表示第 j 個測站位置對應於第 i 個模式位置的權重。由於實測波高值 H^O 、模式的起始猜測值 H^P 及分析值 H^A 與真值 H^T 之間含有誤差 ε 的存在，如下表示：

$$\varepsilon^O = H^O - H^T \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\varepsilon^P = H^P - H^T \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\varepsilon^A = H^A - H^T \dots\dots\dots (2.3)$$

其中 ε^O 、 ε^P 及 ε^A 分別為實測波高值、模式的起始猜測值及分析值與真

值之間的偏差量，將第(2)式代入第(1)式，可得下式：

$$\varepsilon^A = \varepsilon^P + \sum_{j=1}^{N_{obs}} W_{ij}(\varepsilon_j^o - \varepsilon_j^P) \dots \dots \dots (3)$$

為求得最小化的分析誤差，故以分析誤差之均方誤差 (mean square error) 決定最佳化的權重 W_{ij} ，並定義 $P_{kj} = \langle \varepsilon_k^P \varepsilon_j^P \rangle$ 為起始猜測值的均方誤差矩陣， $O_{kj} = \langle \varepsilon_k^o \varepsilon_j^o \rangle$ 為實測值的均方誤差矩陣。為求最小化，故令其微分結果為零，可得下式：

$$\sum_{j=1}^{N_{obs}} W_{ij}(P_{kj} + O_{kj}) = P_{ik}, \quad k = 1, 2, 3 \dots N_{obs} \dots \dots \dots (4)$$

定義 $M_{kj} = P_{kj} + O_{kj}$ ，進一步將第(4)式展開為聯立方程組，如下：

$$\begin{bmatrix} M_{11} & \dots & M_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{k1} & \dots & M_{kj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{1i} \\ \vdots \\ W_{ji} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{1i} \\ \vdots \\ P_{ki} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (5)$$

由第(5)式可知，要計算各測站分配於計算格點的最佳權重，則必須求解 N_{obs} 組的聯立方程。如果觀測站的數量不多，則可使用靠高斯消去法求解出最佳權重。

當真值為已知的條件下，可順利求得觀測值與模式值的均方誤差，但在實際應用上，並無法得知海面上的真實波高，所以在此引用 Lionello(1992)定義的 P_{kj} 和 O_{kj} 計算方式，其表示如下：

$$P_{kj} = \exp\left(-\frac{\gamma_{kj}}{L_{max}}\right) \dots \dots \dots (6.1)$$

$$O_{kj} = \delta_{kj} \left(\frac{\varepsilon_k^o}{\varepsilon_k^P}\right)^2 = \delta_{kj} R_k \dots \dots \dots (6.2)$$

其中 γ_{kj} 為 k, j 二測站的距離， L_{max} 為校正長度(correlation length)，即把 P_{kj} 視為水平距離的空間函數。而 R 為實測值與起始猜測值的均方誤差比。在此假設實測值與起始猜值有相同的均方誤差，即 $R_1, R_2 \dots R_k$ 的值皆為 1，則可將第(5)式改寫如下：

$$\begin{bmatrix} P_{11} + 1 & \dots & M_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{k1} & \dots & P_{kj} + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{1i} \\ \vdots \\ W_{ji} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{1i} \\ \vdots \\ P_{ki} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (7)$$

由於即時同化只能修正當下的模式預報值，為了修正未來幾小時的預報值，在此使用第(8)式作預報修正，可得預報修正值 H_k^{Pc} 如下：

$$H_k^{Pc} = \frac{H_{now}^A}{H_{now}^P} * H_k^P \dots \dots \dots (8)$$

其中 $\frac{H_{now}^A}{H_{now}^P}$ 為修正係數，即當下的同化值與預報值的比例， H_k^P 為未來第 k 小時的預報值。

2.2 資料同化與預報修正流程

2017 年交通部運輸研究所港灣技術研究中心(以下簡稱港研中心)建立的海岸公路浪襲預警系統輸出警戒資訊的大致流程如圖 1。為提高系統預報的準確性，本研究加入對模式港研中心每日風浪模式(以下簡稱 SWAN)預報作修正的步驟，其大致的流程更改為圖 2。



圖 1 海岸公路浪襲預警系統預警資訊未修正之前的流程



圖 2 海岸公路浪襲預警系統預警資訊修正後的流程

南興站預報修正的細部流程如下：

1. 抓取港研中心每天提供的 SWAN 模式在南興、臺東、蘭嶼和鵝鑾鼻四個近岸站的示性波高預報值。
2. 抓取交通部中央氣象局(以下簡稱氣象局)網頁提供的臺東(圖 2.3)、蘭嶼和鵝鑾鼻三站浮標的即時示性波高，搭配三站的模式值可對該小時的南興站預報值作同化。
3. 南興站同化後的示性波高除以該小時的預報值可得到一個修正係數。
4. 南興站對該小時起的 6 小時預報值(依欲修正的時數而定)皆乘上修正係數作為預報修正值。
5. 上述流程 1 的 SWAN 模式四個站經緯度和位置圖如表 1 和圖 3 所示，而流程 2 提到氣象局臺東、蘭嶼和鵝鑾鼻等三站的經緯度與 SWAN 模式的臺東、蘭嶼和鵝鑾鼻相同。如果氣象局三站中，只有其中有兩站有即時資料，則僅使用兩站作同化與預報修正，以此類推。若三站皆無資料則不作修正。

表 1 SWAN 模式的預報點和氣象局波浪浮標的經緯度

站名	經度	緯度
臺東浮標	121.1450	22.7240
蘭嶼浮標	121.5758	22.0719
鵝鑾鼻浮標	120.8314	21.9006
南興	120.9010	22.3170

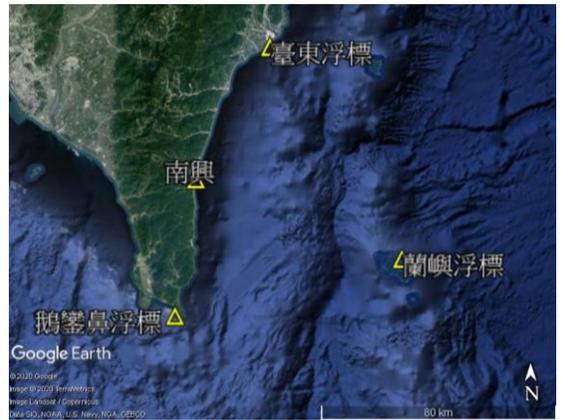


圖 3 SWAN 模式的預報點和氣象局波浪浮標的位置圖

2.3 資料同化與預報修正流程

由於南興站沒有波浪的觀測資料，無法判斷模式值經修正後的預報能否符合實際的情況。故先以有觀測資料的臺東浮標站來評估歐等人(2004)的方法是否適用。使用的資料從 2019 年的 5 月 1 日到 8 月 10 日為期三個多月，包括臺東、蘭嶼和鵝鑾鼻等 3 個浮標的示性波高以及同時期 SWAN 模式在這三個位置的示性波高。

先以當時段蘭嶼站和鵝鑾鼻站的觀測值和模式值對臺東站的模式值作即時同化，由於同化只能修正該時段的值，而無法對預報值，再對臺東站後續幾小時的模式值作預報修正。最後計算臺東站模式值與觀測值的均方根誤差(RMSE)，比較在修正前、後是否有減少的趨勢，藉以判斷此修正方式是否能提高 SWAN 預報的準確度。

臺東站預報值的同化與修正流程如下：

1. 抓取港研中心 SWAN 模式預報的臺東、蘭嶼和鵝鑾鼻等外海 3 個站的示性波高預報值。
2. 抓取氣象局網頁提供的蘭嶼和鵝鑾鼻浮標 2 站的即時示性波高，搭配對應位置的模式值對該小時的臺東站預報值作同化。

3. 臺東站同化後的示性波高除以該小時的預報值可得到一個修正係數。
4. 臺東站對該小時開始 6 小時內的預報值皆乘上修正係數作調整。

流程 2 利用蘭嶼和鵝鑾鼻 2 個站修正臺東站，故可將第(7)式改寫如下：

$$\begin{bmatrix} P_{11} + 1 & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{11} \\ W_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} \\ P_{21} \end{bmatrix} \dots (9)$$

在此假設實測值與起始猜值有相同的均方誤差，即 R_1 、 R_2 的值皆為 1。而 P_{11} 和 P_{21} 各為蘭嶼站和鵝鑾鼻站的空間函數。由於第(6)式的校正長度 L_{max} 為自訂值，為瞭解哪個值有助於較能降低誤差，在此測試當 L_{max} 值在 40 到 340 km 區間時，且臺東站每小時皆作示性波高的同化情況下去計算同化與觀測值的 RMSE，結果如圖 4。圖 4 顯示 R 值等於 1 時，當 L_{max} 值從 40km 增加到 120km，RMSE 從 0.341 降到 0.325 左右。而當 L_{max} 超過在 120km 後的 RMSE 變化不大。圖 4 另外畫出 R 值等於 0 的值作為參考。

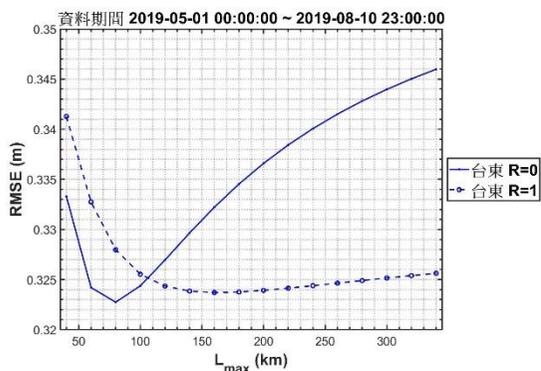


圖 4 臺東站兩種 R 值的每小時同化 RMSE 隨 L_{max} 變化圖

在此選擇 180km 作為校正長度，則蘭嶼站和鵝鑾鼻站的權重 W_{11} 和 W_{21} 可由第(9)式計算而得，其值各為 0.243 和

0.217。由(1)式可知示性波高在臺東浮標點的同化計算如下式：

$$H_{臺東}^A = H_{臺東}^P + 0.243 \left(H_{蘭嶼}^O - H_{蘭嶼}^P \right) + 0.217 \left(H_{鵝鑾鼻}^O - H_{鵝鑾鼻}^P \right) \dots (10)$$

$H_{臺東}^A$: 臺東示性波高同化值

$H_{臺東}^P$: 臺東示性波高模式值

$H_{蘭嶼}^O$: 蘭嶼示性波高觀測值

$H_{蘭嶼}^P$: 蘭嶼示性波高模式值

$H_{鵝鑾鼻}^O$: 鵝鑾鼻示性波高觀測值

$H_{鵝鑾鼻}^P$: 鵝鑾鼻示性波高模式值

圖 5 的單日預報以 2019 年 7 月 4 日為例，修正前的預報值與觀測值 RMSE 為 0.457。對每 6 小時作預報修正後可降至 0.392。每小時作即時同化的 RMSE 與每 6 小時的預報修正相似，圖內 RMSE 為與觀測值作計算結果。對三個多月(2019 年 5 月 1 日至 8 月 10 日)的示性波高資料作同樣的處理得到結果如圖 6 所示，原本的模式值與觀測值 RMSE 為 0.353。而每小時的即時同化與每 6 小時預報修正的 RMSE 各為 0.324 和 0.315，約比修正前 RMSE 下降了 8.2 和 10.7%。圖 7 展示每 3、6、12 與 24 小時所作的預報修正值，其 RMSE 各為 0.319、0.315、0.309 和 0.326，皆低於修正前的 0.353，代表對預報值作同化可降低部分偏差。

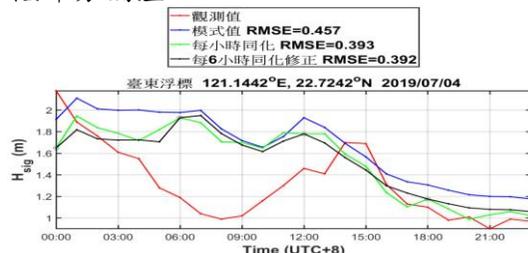


圖 5 臺東站單日示性波高的觀測、預報及同化預報修正

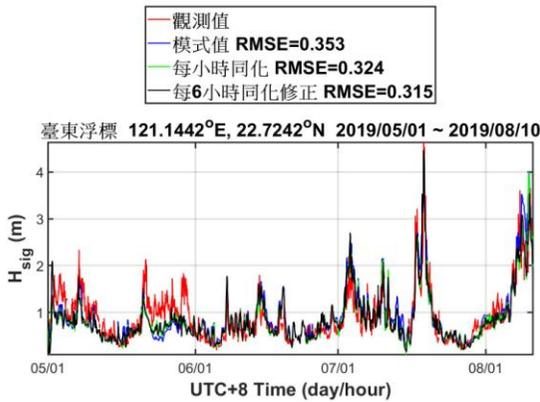


圖 6 臺東站 3 個多月示性波高的觀測、預報、同化預報修正歷線圖

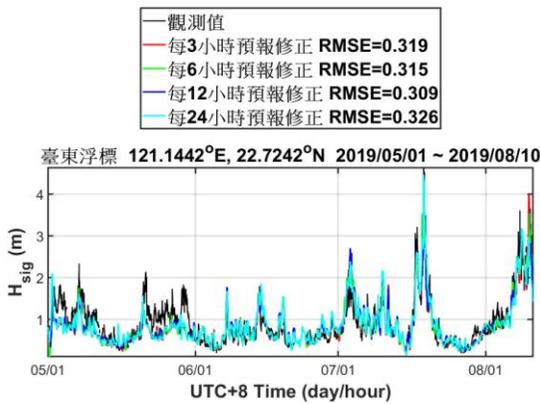
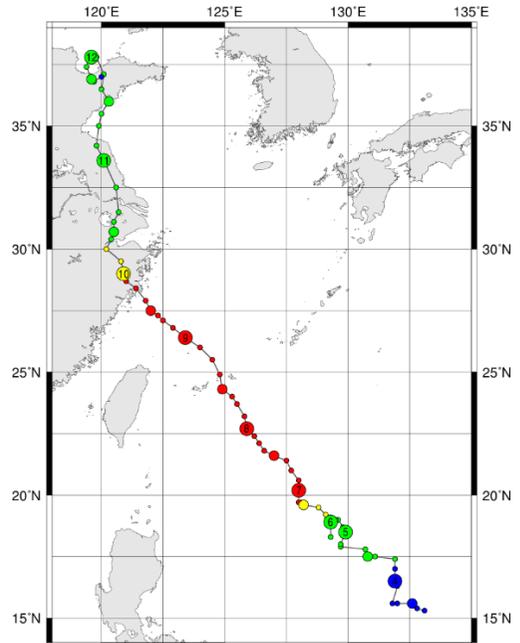


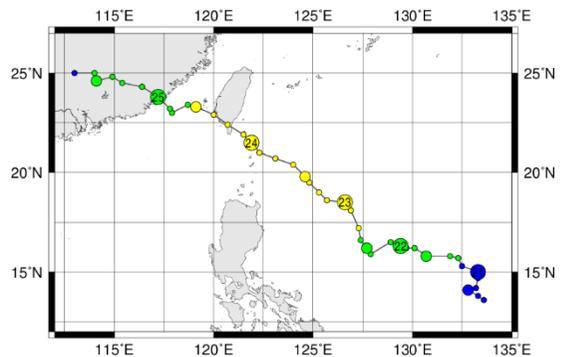
圖 7 臺東站 3 個多月示性波高的觀測及預報修正歷線圖

本研究取 2019 年強颱風利奇馬、輕颱白鹿以及中颱米塔等三個颱風為例，針對颱風期間的模式值作同化修正，並計算 RMSE 來評估修正的影響。根據日本 NII(National Institute of Informatics)網站 <http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/> 的資料，其颱風路徑如圖 8、9 以及 10 所示。



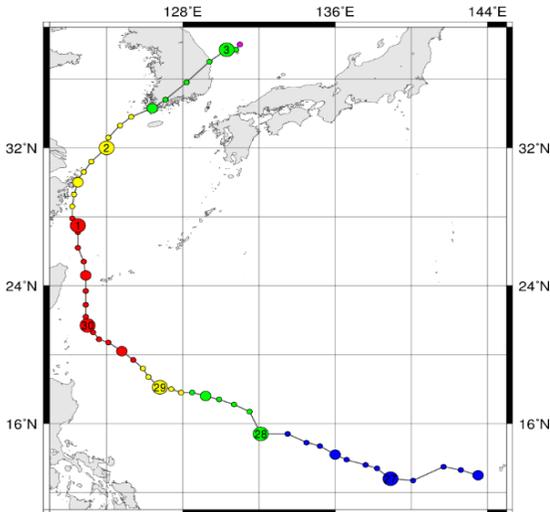
註：2019.08.03 06:00 至 08.10 18:00(UTC+0)

圖 8 日本 NII 強颱風利奇馬路徑圖



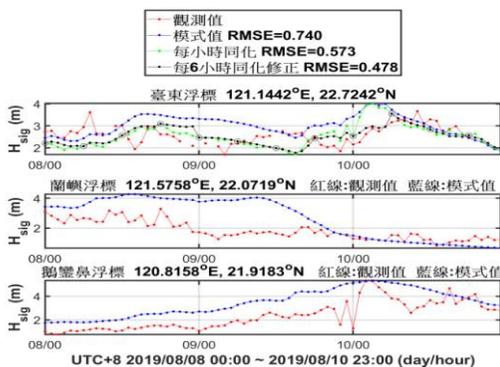
註：2019.08.20 6:00 至 08.25 18:00(UTC+0)

圖 9 日本 NII 輕颱白鹿路徑圖



註：2019.9.26 12:00 至 10.3 6:00(UTC+0)
圖 10 日本 NII 中颱米塔路徑圖

取強颱利奇馬於 2019 年 8 月 8 日到 10 日三天期間的資料作修正，示性波高預報修正的結果如圖 11。未修正的模式值與觀測值 RMSE 為 0.74，而每小時的即時同化與每 6 小時預報修正的 RMSE 各為 0.573 和 0.478，約比修正前 RMSE 下降了 22.5% 和 35.4%。圖 12 展示每 3、6、12 小時所作的預報修正值，其 RMSE 各為 0.555、0.478 和 0.494，皆低於修正前的 0.74，表示此期間的同化修正能讓模式預報獲得部分的改善。



註：中、下圖各為蘭嶼和鵝鑾鼻浮標的模式和觀測值
圖 11 利奇馬颱風期間臺東站示性波高的觀測、預報及同化預報修正歷線圖。

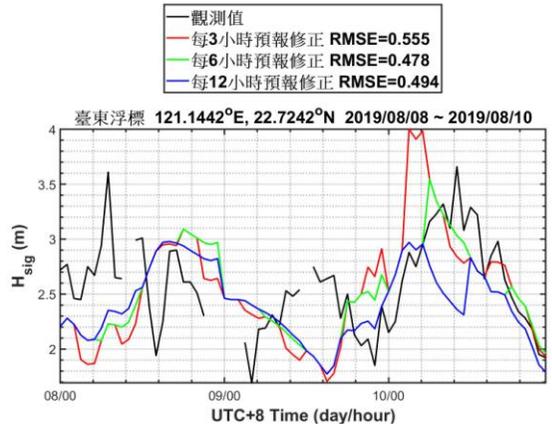
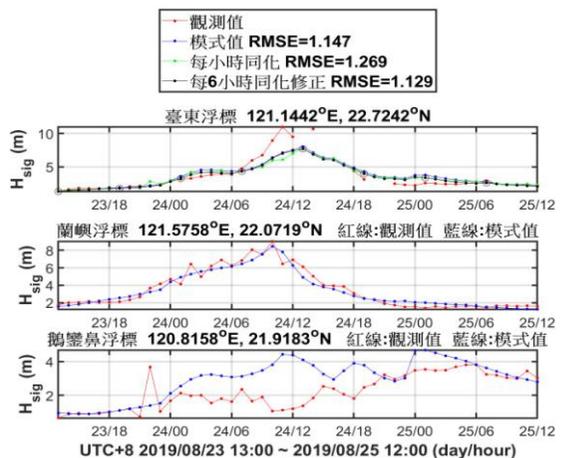


圖 12 利奇馬颱風期間臺東站示性波高的觀測及預報修正歷線圖

輕颱白鹿取 2019 年 8 月 23 日到 8 月 25 日期間的資料作修正，示性波高預報修正的結果如圖 13。未修正的模式值與觀測值 RMSE 為 1.147，而每小時的即時同化與每 6 小時預報修正的 RMSE 各為 1.269 和 1.129，與修正前的 RMSE 差異不大。圖 14 展示每 3、6 與 12 小時所作的預報修正值，其 RMSE 各為 1.231、1.129 和 1.247，同樣與修正前的 RMSE 值相差不大。表示該期間的同化修正無法改善模式預報。



註：中、下圖各為蘭嶼和鵝鑾鼻浮標的模式和觀測值
圖 13 白鹿颱風期間臺東站示性波高的觀測、預報及同化預報修正歷線圖

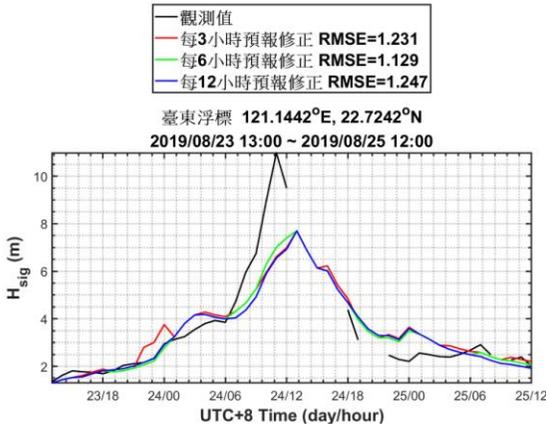


圖 14 白鹿颱風期間臺東站示性波高的觀測及預報修正歷線圖

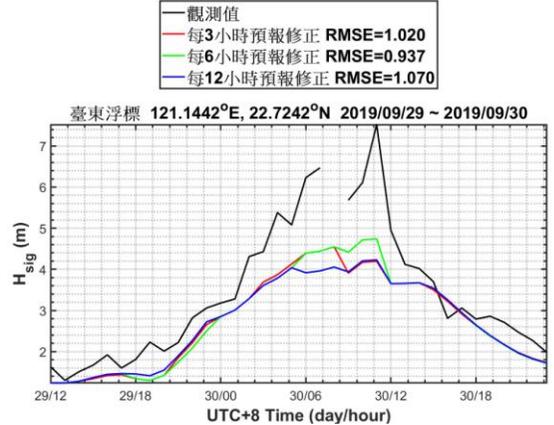
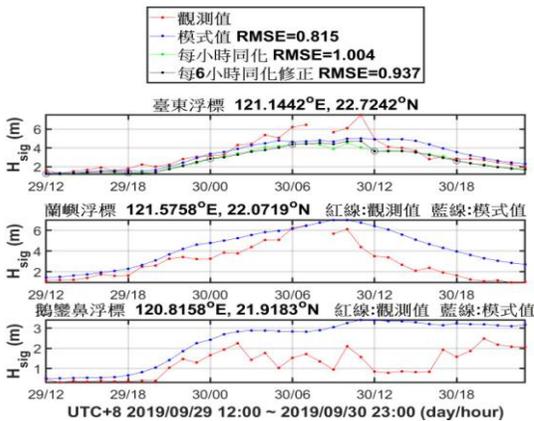


圖 16 米塔颱風期間臺東站示性波高的觀測及預報修正歷線圖

最後取中颱風米塔於 2019 年 9 月 29 日到 30 日期間的資料作修正，示性波高預報修正的結果如圖 15。未修正的模式值與觀測值 RMSE 為 0.815，而每小時的即時同化與每 6 小時預報修正的 RMSE 各為 1.004 和 0.937，約比修正前 RMSE 上昇 23.2% 和 15%。圖 16 展示每 3、6 與 12 小時所作的預報修正值，其 RMSE 各為 1.02、0.937 和 1.07，皆高於修正前的值，表示此颱風期間的預報值經同化修正後，反而加大與觀測值之間的差距。

由(10)式可知當蘭嶼或鵝鑾鼻的觀測值高於模式值時，會讓臺東同化值增加，亦即使臺東模式值上修。在此情況下，如果臺東觀測值低於模式值，由於上修的關係，反而讓同化值與觀測值的差距加大(RMSE 增加)。此情形可從圖 17 的米塔颱風在 29 日 12 時到 30 日 12 時得知跟觀測的差距比起來，同化值比模式值更大。針對此誤差加大的改善方法，除了未來持續改善颱風期間的模式本身準確度之外，增加更多附近的觀測站來加入同化計算亦有助於降低誤差。



註：中、下圖各為蘭嶼和鵝鑾鼻浮標的模式和觀測值。

圖 15 2 米塔颱風期間臺東站示性波高的觀測、預報及同化預報修正歷線圖

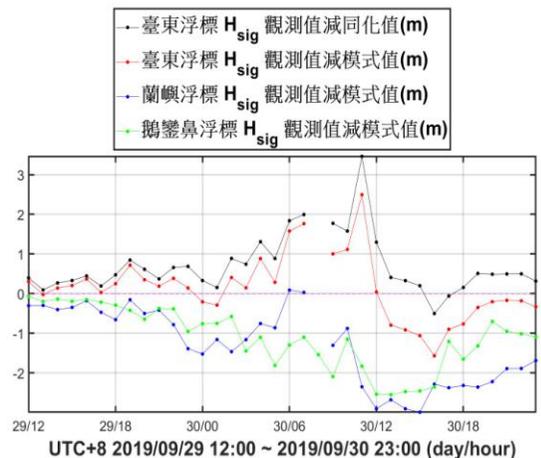


圖 17 米塔颱風期間臺東、蘭嶼和鵝鑾鼻三站示性波高觀測值減預報值以及臺東站的示性波高觀測值減同化值歷線圖

2.4 南興站資料同化與預報修正

從臺東站例子可知，預報修正可此降低模式與觀測值之間的部分誤差。故本研究對臺東站附近的南興站進行同樣的預報修正處理。同樣使用的 2019 年 5 月 1 日到 8 月 10 日的資料，除了原本氣象局的臺東、蘭嶼和鵝鑾鼻等 3 個浮標的示性波高以及 SWAN 模式在這三個浮標位置的示性波高外，SWAN 模式再增一個南興外海的點位(圖 3)。

以當時段臺東、蘭嶼、鵝鑾鼻三站的觀測值和模式值對南興站作即時同化來修正該時段的模式值，再對南興站後續幾小時的模式值作預報修正，其細部流程參照 1.2 節。流程 2 中利用臺東、蘭嶼和鵝鑾鼻等 3 個站修正南興站，故可將第(7)式改寫如下：

$$\begin{bmatrix} P_{11} + R_1 & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} + R_2 & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} + R_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{11} \\ W_{21} \\ W_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} \\ P_{21} \\ P_{31} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (11)$$

在此假設實測值與起始猜值有相同的均方誤差，即 R_1 、 R_2 、 R_3 的值皆為 1。而 P_{11} 、 P_{21} 和 P_{31} 各為臺東站、蘭嶼站和鵝鑾鼻站的空間函數。校正長度 L_{max} 選擇和臺東站例子相同，其值為 180km。臺東站、蘭嶼站和鵝鑾鼻站的權重 W_{11} 、 W_{21} 和 W_{31} 可由第(11)式計算而得，其值各為 0.245、0.17 和 0.263。由(1)式可知示性波高在南興外海的同化計算如下式：

$$H_{南興}^A = H_{南興}^P + 0.245 \left(H_{臺東}^O - H_{臺東}^P \right) + 0.17 \left(H_{蘭嶼}^O - H_{蘭嶼}^P \right) + 0.263 \left(H_{鵝鑾鼻}^O - H_{鵝鑾鼻}^P \right) \dots\dots\dots (12)$$

$H_{南興}^A$ ：南興示性波高同化值

$H_{南興}^A$ ：南興示性波高模式值

$H_{南興}^A$ ：蘭嶼示性波高觀測值

$H_{南興}^A$ ：蘭嶼示性波高模式值

$H_{南興}^A$ ：蘭嶼示性波高觀測值

$H_{南興}^A$ ：蘭嶼示性波高模式值

$H_{南興}^A$ ：鵝鑾鼻示性波高觀測值

$H_{南興}^A$ ：鵝鑾鼻示性波高模式值

2019 年 7 月 4 日的南興站示性波高的模式值、模式值經每小時同化修正以及每 6 小時的預報修正如圖 18。每六小時的預報修正將當天的 SWAN 預報值下修約 0.2m 左右。而圖 19 為 2019 年 5 月 1 日到 8 月 10 日的模式值、每小時同化修正和每 6 小時的預報修正。

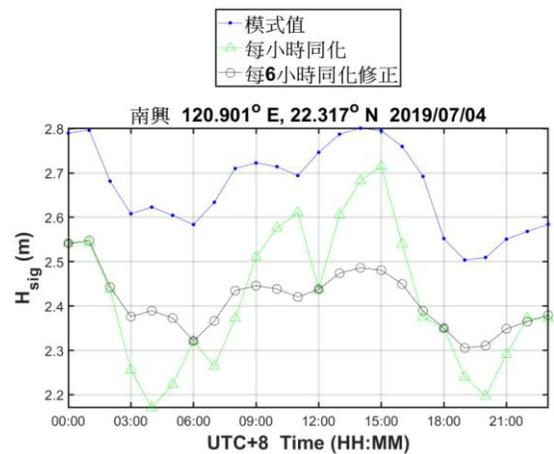


圖 18 南興站單日示性波高的模式預報及同化預報修正歷線圖

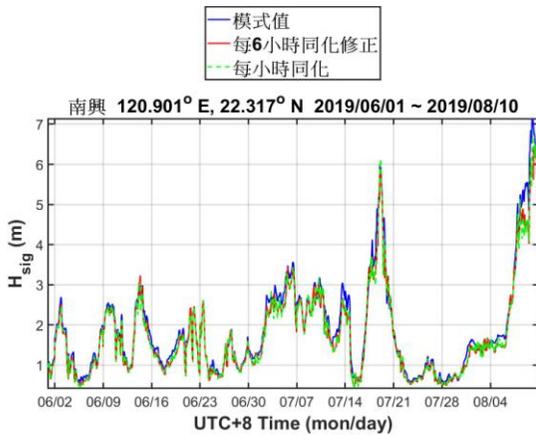


圖 19 南興站 2 個多月示性波高的預報及同化預報修正歷線圖

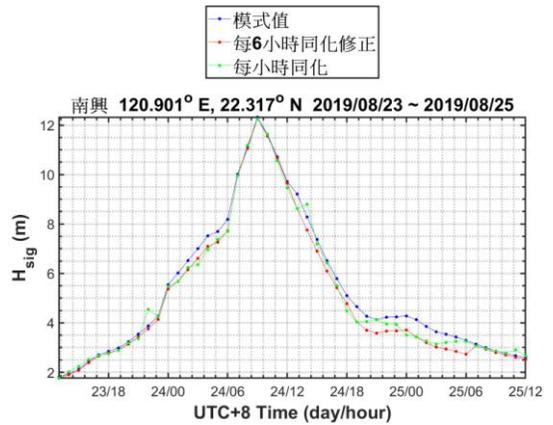


圖 21 白鹿颱風南興站的示性波高預報及同化預報修正歷線圖

同樣的修正也應用到 2019 年的強颱風利奇馬、輕颱白鹿以及中颱米塔三個颱風的預報。利奇馬颱風 8 月 8 日到 10 日的預報值經每 6 小時的修正後，大部分都呈現下修的情況，最大下修值約 1.4m，如圖 20。2019 年 8 月 23 日 12 時到 25 日時輕颱白鹿每 6 小時的預報修正同樣呈現下修的情況，最大下修值約 0.7m，如圖 21。而米塔颱風 2019 年 9 月 29 日 12 時到 30 日 23 時期間的每 6 小時的預報修正亦大致將預報值下修，最大下修約 1.1m，如圖 22。

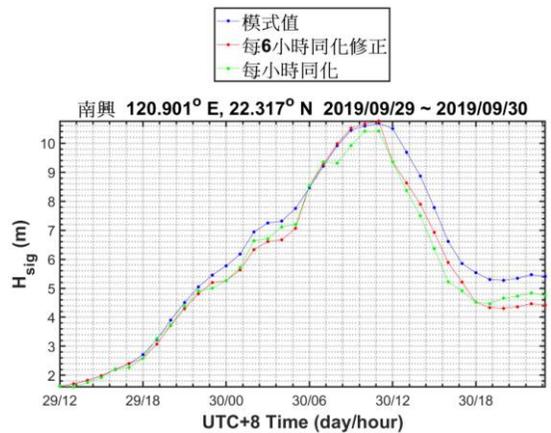


圖 22 米塔颱風南興站的示性波高預報及同化預報修正歷線圖

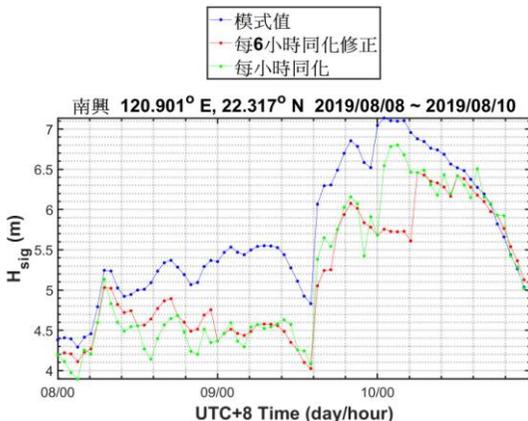


圖 20 利奇馬颱風南興站的示性波高預報及同化預報修正歷線圖

三、結論與建議

3.1 結論與成果

1. 本研究透過中央氣象局蘭嶼和鵝鑾鼻浮標站在 2019 年為期三個多月的示性波高觀測值對臺東浮標站的 SWAN 預報值進行同化並作每六小時修正。修正值與臺東浮標站觀測值比較的結果，可讓預報值的 RMSE 下降約 10%，表示本研究的修正方法可小幅改善預報誤差。至於颱風期間每 6 小時預報修正與未修正前相比，雖

然強颱利奇馬三天期間的 RMSE 下降 35%，但在中颱米塔期間的 RMSE 上升了 15%，表示目前的修正在颱風期間仍存在不穩定性。

2. 南興站的 SWAN 模式所預報的示性波高值在利奇馬颱風三天期間作每 6 小時的修正後，波高皆下修約 0.1 到 1m 左右。

3.2 建議

1. 由於目前氣象局觀測站在台灣東南海域靠近台九線南興段的波浪觀測站僅有臺東、蘭嶼和鵝鑾鼻等三個浮標站。而在南興段外海尚無觀測資料，所以無法利用南興附近的觀測值與預報修正作驗證，僅能透過地理條件鄰近的臺東站來作間接的驗證。如果未來能於颱風發生較頻繁的時期，在南興段外海佈放波浪計進行數個月的實際觀測，將有助於直接驗證預報修正的結果。
2. 歐等人(2004)提到對他們的風浪模式作資料同化時，觀測站的數量增加能讓降低模式與觀測值的相對誤差，直到超過七站時，相對誤差達到穩定。由於南興站的預報值目前僅有附近的三個浮標觀測站可作同化。考慮臺東站的例子，其米塔和白鹿颱風期間的預報值經過同化修正後，無法降低與觀測值之間的誤差，在未來如有新的觀測站加入同化計算，將有助於改善同化的結果。

參考文獻

1. 中央氣象局臺東外海浮標即時觀測資料網站，https://www.cwb.gov.tw/V8/C/M/OBS_Marine_30day.html?MID=WRA007。
2. 日本 NII (National Institute of Informatics)網站 2019 年強颱利奇馬的路

徑，<http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typphoon/summary/wnp/1/201909.html.en>。

3. 日本 NII (National Institute of Informatics)網站 2019 年輕颱白鹿的路徑，<http://agora.ex.nii.ac.jp/digitaltyphoon/summary/wnp/1/201911.html.en>。
4. 日本 NII (National Institute of Informatics)網站 2019 年中颱米塔的路徑，<http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typphoon/summary/wnp/1/201918.html.en>。
5. 陳冠宇、邱永芳、蘇青和、李俊穎、陳鈞彥，民國 106 年，海岸公路異常波浪特性及防災應用技術之研究，交通部運輸研究所合作研究計畫成果報告。
6. 歐善惠、許泰文、廖建明、陳亞嵐、徐立昌，近岸波浪推算資料同化之研究，海洋工程研討會，第二十六屆海洋工程研討會論文集，民國 93 年，第 206-213 頁。
7. Lionello, P., H. Günther and P.A.E. M. Janssen. (1992) Assimilation of Altimeter Data in a Global Third Generation Wave Model, *J. Geophys. Res.*, 97, pp. 14253-14474.