

# 波浪預報偏差修正之研究

張恆文<sup>1</sup> 陳怡儒<sup>2</sup> 顏厥正<sup>3</sup> 施景峯<sup>2</sup> 林芳如<sup>2</sup> 朱啟豪<sup>2</sup>  
社團法人台灣地球觀測學會<sup>1</sup> 中央氣象局<sup>2</sup> 工業技術研究院<sup>3</sup>

## 摘要

波浪模式模擬與其他領域的模擬類似常會產生計算偏差(BIAS)，相關的偏差修正法已應用在其他領域甚久，因此可作為波浪模擬偏差修正(BIAS Correction, BC)的參考。本研究使用馬祖及新竹站之觀測波高，利用Decaying average法及QM(Quantile Mapping)法偏差修正NWW3波浪模式之預報波高，結果顯示，Decaying average法的部分，每個測站的最佳權重均會不同，而使用的觀測資料，最短可以僅使用分析當下前6小時的觀測資料，節省儲存的空間。QM法利用同年的觀測資料進行修正可以得到較佳的結果，唯需要比Decaying average更長時間的觀測資料及模式資料來組成累積機率分布(CDF)及求反CDF，此外，前述方法除了可修正系統偏差外，還可改善模式精度提高預測能力。

關鍵字：波浪預報、偏差修正

## 一、前言

在氣候、水文模式的領域中，常因為受限的空間尺度、簡化的物理及熱動力機制、數值方法、並未完全了解的氣候變化過程等，非常容易導致系統偏差的出現，偏差的定義如式(1)所述，其中 $P_i$ 為模式計算值， $O_i$ 為觀測值， $N$ 資料個數；因此偏差修正常使用在原始模式的輸出上，經由整合觀測資料進行修正，使其更加適合在後續的應用上，例如農業模式等，故完整的BC法在氣候、水文模式的領域已經發展的相當成熟，但鮮少應用在波浪模式的應用上。同樣的在波浪模擬也會產生系統性的誤差，例如模式裡固有的簡化、不完全了解的物理機制、解析度不夠、數值方法、邊界外力條件、缺乏足夠適當的驗證數據等。

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum (P_i - O_i) \quad (1)$$

BC的修正可以從模式方面著手或直接針對模式的輸出，在模式方面，可以藉由調整模式參數或資料同化著手，MOS(model output statistics)亦常在大氣領域之數值天氣預測中，用來消除系統性誤差，就波浪模擬而言，風場為很重要的輸入參數，使用無偏差(unbiased)的風場或已偏差修正的風場，至少消除主要的模擬偏差，但仍然會有系統偏差出現，原因在於波浪模式本身也會有產生系統偏差的因素，如前所述的因子；而單純從模式輸出方面則只針對模式的輸出進行偏差修正，此亦為本研究擬深入探討的地方。

概念上而言，BC法基本上是定義一個轉換函數將原有的模式數據轉換成另一組數據，而此轉換函

數必須涵蓋統計的偏差，故從簡單的加減(shift)平均值到複雜的去修正統計分布。前者如線性迴歸、常數因子，線性迴歸是假設模式輸出與實況有一定的線性關係；常數因子修正是假設模式輸出與實況之間存在一個常數因子(馬學文、李細明, 2010)；後者如分位映設法(QM)，其假設模式輸出的累積機率分佈(CDF)與實況的累積機率分佈存在簡單的分位數對應，且BIAS在過去及未來的時段是保持固定的(圖1)；近年來BC的發展已經由單變量(univariate)擴展到多變量(multivariate)，前者如推進法(nudging)(Hawkins et al., 2013)、Change Factor (CF)(Tabor & Williams, 2010)、Decaying average及QM法等；後者同時考慮到變數之間的相依性，例如裝箱法(bin method)、改組方法(shuffling method)(Parker and Hill, 2017)等，而波浪的產出變數(例如波高、週期、波向等)是十分相依的，或可考慮多變量的方法修正之。

偏差修正的時機可概分為對過去資料的偏差修正、即時預報的偏差修正及對未來預測的偏差修正，其中即時預報的偏差修正會有時效性的問題，因其需用到即時的觀測資料，而對未來預測的偏差修正，例如欲考慮2040-2050之波高變化，則在未來時間並無觀測資料可供參考，必須基於某些假設條件。單變量或多變量的修正，取決於相關變數是否有相關，例如降雨與地表溫度。而單點及面(field)的修正亦與觀測資料的取得有關，例如地表溫度，通常氣象單位都會產生面的ground truth來當作真值，故觀測資料即可取得，否則只能作單點的修正。

本研究利用Decaying average法及QM法以馬祖及新竹測站之波高觀測資料，偏差修正NWW3波浪模式之預報結果。

## 二、研究方法

### (一) Decaying average法

Decaying average是一個簡單的數學方法(陳及洪, 2017), 用來計算模式系統性偏差修正的後處理方法, 由NWS開發, 使用decaying average方法計算模式系統性偏差時, 越靠近分析時間的模式預報誤差權重越大, 反之越遠則權重越小, 此一權重的分佈可經由一個參數調整, 此外decaying average只需讀取一個系統性偏差值, 即可涵蓋過去一段時間的模式預報誤差資訊, 可以有效節省資料儲存空間及運算效能。此法於2006年在NCEP全球系集預報系統及加拿大氣象中心(Canadian Meteorological Centre, CMC)之全球系集預報系統中正式上線使用, 並將偏差修正後的NCEP及CMC之系集預報組合成為北美系集預報系統。

decaying average修正的步驟如下:

- A. 計算預報誤差 $b_n^t$ : 模式預報場 $f_n^t$ 減去對應的分析場或真值 $a^t$

$$b_n^t = f_n^t - a^t \quad (2)$$

其中 $n=0,1,2\cdots 72$ , 表示第0小時預報、第1小時預報至第72小時預報等。

- B. 計算系統性偏差 $B_n^t$ : 以權重係數 $\omega$ 控制前一個時間所算得的系統性偏差 $B_n^{t-1}$ 和預報誤差 $b_n^t$ 所占的比重

$$B_n^t = (1 - \omega)B_n^{t-1} + \omega b_n^t \quad (3)$$

- C. 偏差修正: 當下的模式預報場 $f_n^t$ 減去算出的系統性偏差 $B_n^t$ , 得到新的預報場 $F_n^t$

$$F_n^t = f_n^t - B_n^t \quad (4)$$

由式(4)可知在進行模式的預報偏差修正, 需先知道當下的系統性偏差 $B_n^t$ , 而計算系統性偏差需知道上次預報的系統性偏差 $B_n^{t-1}$ 及預報誤差 $b_n^{t-1}$ , 將式(3)展開之

$$B_n^t = (1 - \omega)^2 B_n^{t-2} + \omega(1 - \omega) b_n^{t-1} + \omega b_n^t \quad (5)$$

可推導至離現在 $k$ 個預報時段之預報誤差的相關性如下式:

$$B_n^t = \omega(1 - \omega)^k b_n^{t-k} \dots + \omega(1 - \omega) b_n^{t-1} + \omega b_n^t \quad (6)$$

由式(6)可知當下的系統性偏差與過去的預報誤差的關係, 也可知道各個時間之預報誤差所占的

比例, 即 $\omega(1 - \omega)^k \dots \omega(1 - \omega)^2$ 、 $\omega(1 - \omega)$ 、 $\omega$ 等, 由此可知過去的預報誤差的權重並不一致, 且隨著權重 $\omega$ 不同而改變, 此與前述Nudging或FC的平均誤差的作法不同, 最接近與較遠離分析時間的預報誤差具有一樣的權重, 這是使用平均誤差不足之處。

然而式(3)在計算系統性偏差時, 預報誤差 $b_n^t$ 必須為已知, 但對於作業化之即時修正而言, 分析場或真值 $a^t$ 必然未知, 因此將式(3)改為式(7), 使用前一預報時間之預報誤差 $b_n^{t-1}$

$$B_n^t = (1 - \omega)B_n^{t-1} + \omega b_n^{t-1} \quad (7)$$

### (二)QM法

QM法主要將預報時序列所產生的CDF映射到觀測的CDF, 先求得預報值於CDF的位數, 映射到觀測值相同的位數, 再透過反CDF(inverse of the CDF)求得對應的觀測值, 如圖2所示。若擬修正另一時段例如2040-2050年, 則假設相同位數之觀測與模式的差距, 等於2040-2050年在同樣位數之差距, 因此可以修正2040-2050年之系統偏差, 如圖1所示。

QM法之重點在於有足夠的數據形成其累積機率分布, 若數據不夠容易產生不連續的現象及誤差, 此外當某些數據形成的CDF無法涵蓋所有的波浪條件時, 容易產生極值的問題, 勢必要用外插的方式處理, 然而若為了涵蓋所有波浪條件而累積過多的數據, 則易產生過多樣本的問題。

在反CDF的部分, 為了反推CDF求得對應的值, 一般會有二種方式, 一是採用原始夠多數據所形成的CDF曲線, 另一是使用經驗式, 後者乃利用原始數據先去迴歸出適當的分布, 例如Rayleigh、Weibull等, 則從不同分布即可知其CDF的分布。前者若採用原始數據可能會有前述不連續或散亂的現象出現, 亦可用kernel smoothing function作處理, 此方法是將離散分佈之每個點代入核函數中, 再疊加每個點的核函數計算結果, 以達到平滑之目地, 在概念上與作統計直方圖類似, 如圖3所示。

就使用時機而言, QM法在過去資料與未來資料的處理, 只要足夠的資料即大致不會產生問題, 但若應用在即時預報上, 即需基於其與現在累積的CDF一致的假設條件上。

### (三)模式預報及觀測資料

模式預報資料為氣象局藍色公路作業化預報系統NWW3之測站預報, 而觀測資料為氣象局之馬祖、新竹浮標。

### (四)校驗指標

本研究另使用均方根誤差(RMSE)來評估誤差的變化:

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum (P_i - O_i)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

### 三、計算結果分析

本研究以馬祖、新竹測站為例，利用Decaying average及QM法針對波高進行偏差分析。蒐集2019/1~9月的72小時預報資料進行分析。圖4為馬祖、新竹測站之模式及觀測月平均比較圖，圖中顯示6月之平均波高最小，12月平均波高最大，各月呈現遞減及遞增的情形，除了11月份，其顯然較10月及12月份低；模式部分，新竹測站呈現全部偏小的趨勢，而馬祖測站模式在6-9月偏大、在1-5月偏小。

Decaying average法的權重 $\omega$ 大小會決定預報誤差的比率及其影響的時間，需進行敏感度分析，選取權重分別為0.01、0.05、0.1、0.2、0.3，計算系統偏差使用前24小時的0至23小時預報、前48小時的24-47小時預報、前72小時的48-72小時預報，故觀測數據只要分析資料當下的前24小時資料。QM法需要將足夠的時序數據轉成CDF，不足的數據會造成反CDF時的偏差，圖5為新竹模式預報0小時、預報24小時、預報48小時、預報72小時、預報96小時及所有計算值之CDF比較圖，顯示差異並不顯著，但單一預報時數的數據較少，造成鋸齒的情形會稍微明顯。故在模式部分，因為無顯著差異，故採用所有包括預報值來形成CDF進行分析。圖6顯示馬祖及新竹測站模式及觀測值之CDF比較圖，其中觀測部分包括單獨2019/1~9月及2016~2019/9月，圖中顯示馬祖在高累積機率分布之波高偏小，小累積機率時之波高偏大，新竹則均偏小，與前述之月平均的比較趨勢一致；但累積較長觀測資料的CDF分布及與單獨2019年觀測資料的分佈有明顯差距，顯然會造成反CDF的結果不同。

以偏差及RMSE來檢視BC後的結果，圖7為馬祖測站之比較結果，圖中橫軸為預報時間0至72小時，結果顯示原模式在預報時數較短時為負偏差，即模式偏小，而後面的預報時段為正偏差，顯示模式偏大，Decaying average法不同權重的分析結果顯示，幾乎全為正偏差且較未修正前佳，並隨著權重數增加而趨於一致，QM法部分，單獨使用2019年觀測資料的結果顯示類似將原偏差平移，使得預報時數較短時有較大負偏差，而後面的預報時段有較小的正偏差，將所有預報時數的偏差平均，由原偏差0.019減少至0.006，而Decaying average則減少至0.007。若使用較長觀測值，顯示結果變差，顯示在使用QM時，過長的觀測資料會造成更大的誤差。當偏差修正後是否會對RMSE造成影響，將所有預報小時之RMSE平均得到如圖8所示，結果顯示權重在0.2以下會同步修正模式的誤差，而QM法使用相同時段的觀測值修正亦可改善誤差，綜合分析顯示在馬祖測站權重等於0.05可以得到較佳的結果。

在新竹測站，圖9為偏差的修正結果、圖10為RMSE的比較結果，圖中顯示，未修正前之計算結果均偏小，預報結果之平均偏差約在-0.3m，Decaying average法不同權重均顯著改善偏差，而在權重等於0.2以後約保持一致；QM法部分，單獨使用2019年觀測資料的結果甚佳，而使用較長時間觀測資料的CDF則造成較大正偏差。而是否同步修正模式結果，所有結果均顯示有改善，而權重在0.2已可以得到不錯的結果，QM法部分，使用相同時段的觀測資料一如馬祖站可以得到較佳結果。

### 四、結論與建議

本研究使用Decaying average法及QM法進行NWW3模式偏差修正(馬祖、新竹測站)，為求可以作業化執行偏差修正，在計算系統性偏差時，改採前一預報時間之預報誤差。

綜合結果顯示，使用Decaying average法及QM法除了可以修正系統偏差外，還可以改善模式精度提高預測能力。

Decaying average法為一簡單的數學方法，不同測站最佳的權重會有不同(馬祖測站權重0.05、新竹測站權重為0.2)，應與測站的特性有關，需要事先檢視。而使用的觀測資料長度部分，本研究使用過去24小時的觀測資料，最短可以僅使用分析當下前6小時的觀測資料，以節省資料儲存的空間。此外，Decaying average法原始開發是用來進行NCEP及CMC系集預報系統之偏差修正，因此氣象局之波浪系集預報系統之點輸出部分，應可以考慮用即時後處理的方式，將系集平均先進行修正。而藍色公路預報亦是同樣情形。

QM法利用同年的觀測資料進行修正可以得到較佳的結果，唯需要比Decay average更長時間的觀測資料及模式資料來組成CDF及求反CDF。

### 謝誌

本論文係中央氣象局研究計畫「發展波浪資料同化技術及強化波浪系集預報系統(4/4)」(編號MOTC-CWB-108-0-01)之研究成果，承蒙中央氣象局經費之補助使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

### 參考文獻

- 1.交通部中央氣象局，2019: "發展波浪資料同化技術及強化波浪系集預報系統(4/4)"，財團法人台灣地球觀測學會，中華民國108年十二月。
- 2.陳怡儒、洪景山，2017: "應用decaying average方法進行地面溫度預報偏差修正之研究"，大氣科學第四十五期第一號，p25-41。

3.馬學文、李細明，2010: ”比較統計降尺度方法與偏差修正方法在月預報的應用，第二十四屆粵港澳氣象科技研討會，深圳，1月20-22日。

4.Hawkins, E., Osborne, T. M., Ho, C. K., & Challinor, A. J. (2013). Calibration and bias correction of climate projections for crop modelling: An idealised case study over Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 170(0), 19–31.

<http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.04.007>

5.Parker K. and D.F. Hill, 2017. Evaluation of bias correction methods for wave modeling output, *Ocean Modelling*, 10, 52-65.

6.Tabor, K., & Williams, J. W. (2010). Globally downscaled climate projections for assessing the conservation impacts of climate change. *Ecological Applications*, 20(2), 554–565. Retrieved from

<http://ccr.aos.wisc.edu/publications/pdfs/globaldownscale.pdf>.

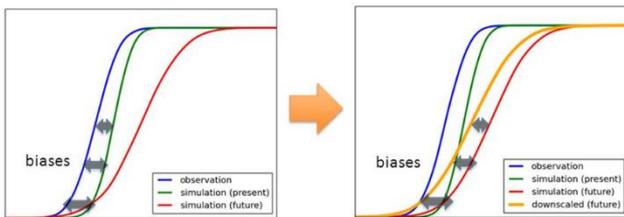


圖 1、分位映設法示意圖

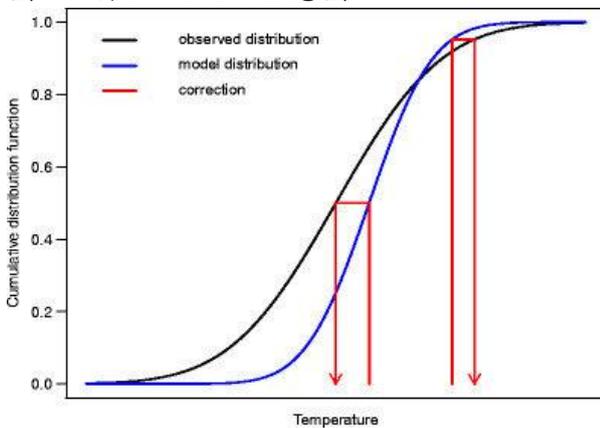


圖2、CDF位數及反CDF示意圖

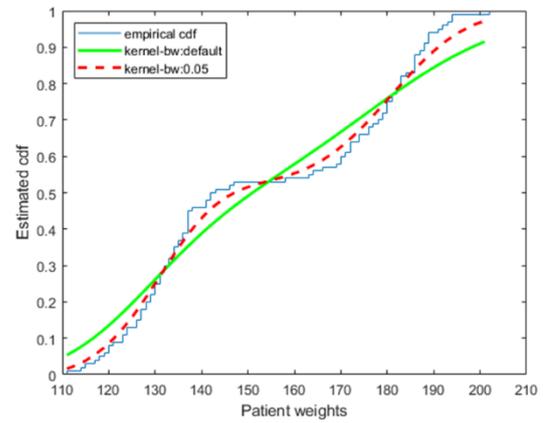


圖3、kernel smoothing function計算數列的累積機率密度函數(CDF)

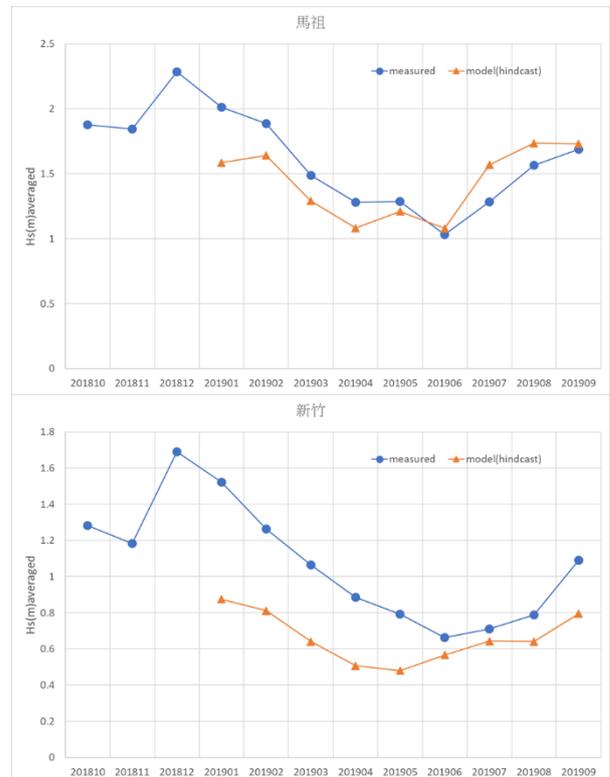


圖 4、模式及觀測月平均波高比較圖(上圖為馬祖測站、下圖為新竹測站)，模式不包含預報值

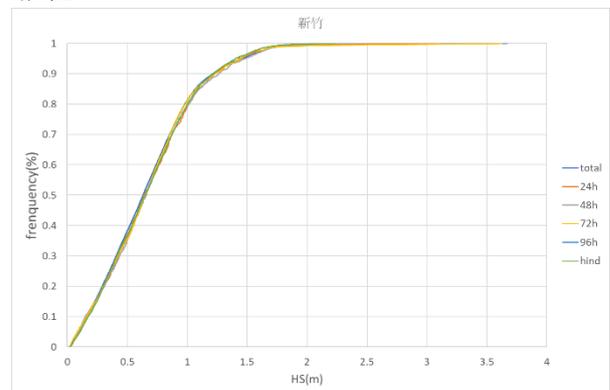


圖 5、模式預報 0 小時(hind)、預報 24 小時

(24h)、預報 48 小時(48h)、預報 72 小時(72h)、預報 96 小時(96h)及所有計算值(total)之 CDF 比較圖

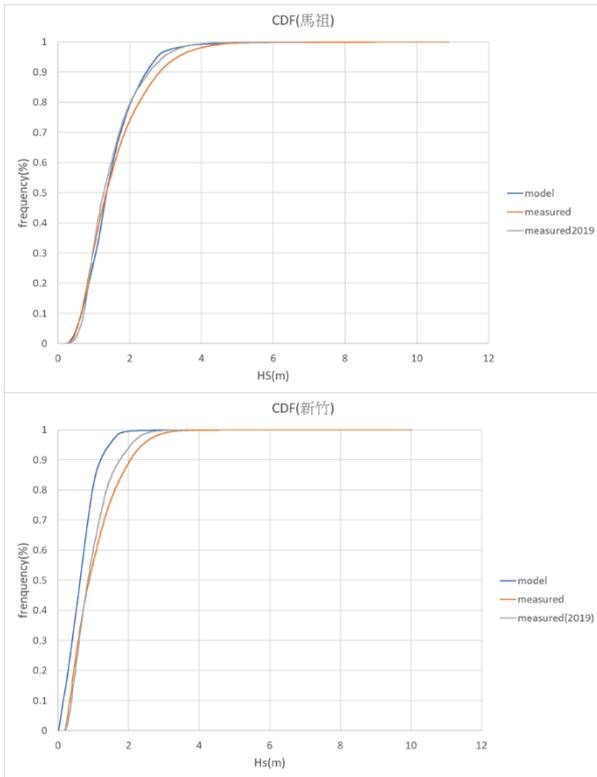


圖 6、模式及觀測值之 CDF 比較圖(上圖為馬祖測站、下圖為新竹測站)，觀測部分包括單獨 2019/1~9 月及 2016~2019/9 月

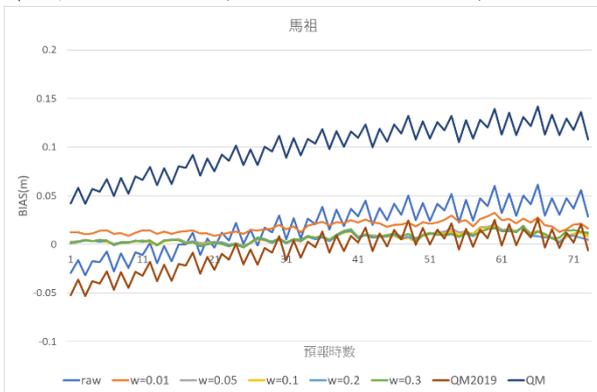


圖 7、馬祖測站之波高預報場、不同權重及使用 QM 法之偏差修正結果，圖中橫軸為預報時間 0 至 72 小時

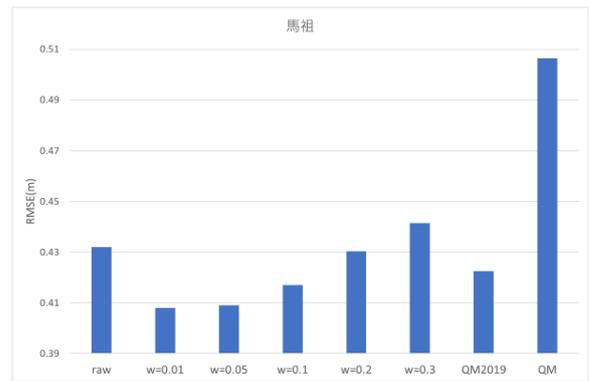


圖 8、馬祖測站之波高預報場、不同權重及使用 QM 法之偏差修正後，平均 RMSE 的分布圖

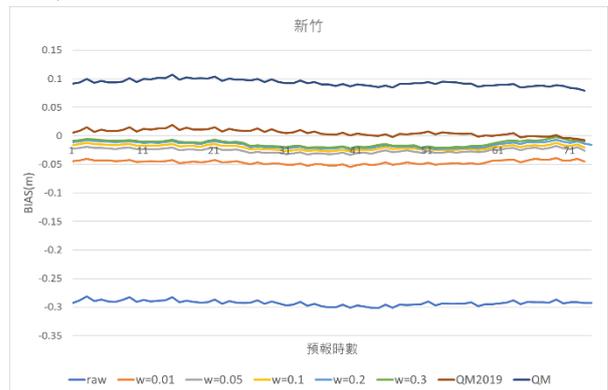


圖 9、新竹測站之波高預報場、不同權重及使用 QM 法之偏差修正結果，圖中橫軸為預報時間 0 至 72 小時

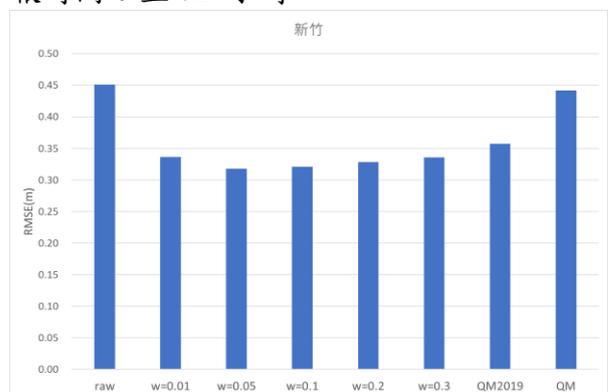


圖 10、新竹測站之波高預報場、不同權重及使用 QM 法之偏差修正後，平均 RMSE 的分布圖

## Research on Bias Correction of Wave Forecast

Heng-Wen Chang<sup>1</sup> Yi-Ru Chen<sup>2</sup> Chieh-Cheng Yen<sup>3</sup> chin-Feng, Shih<sup>2</sup> Fan-Ju, Lin<sup>2</sup> Chi-Hao, Chu<sup>2</sup>  
Taiwan Group on Earth Observations<sup>1</sup> Central Weather Bureau<sup>2</sup> Industrial Technology Research  
Institute<sup>3</sup>

Wave model simulation is similar to simulations in other fields and often results in calculation bias (BIAS). The related bias correction (BC) method has been used in other fields for a long time, so it can be used as a reference for wave simulation BC. This study uses the observed wave heights at Matsu and Hsinchu stations, and uses the Decaying average method and the QM (Quantile Mapping) method to correct the predicted wave heights of the NWW3 wave model. The results show that, in the Decaying average method, the optimum weight of each station will be different, and the shortest observation data required for analysis can only be the first 6 hours observation data, in order to save the storage space. The QM method uses the observation data of the same year to get better results. It only requires observation data and model data longer than the Decaying average to compose the Cumulative Distribution Function (CDF) and inverse CDF. In addition, the aforementioned method can modify the system deviation, the accuracy of the model can also be improved to increase the forecast ability.