

發展印度洋風暴潮速報系統

曾博森¹、吳祚任¹、林君蔚¹、莊淑君¹、許家鈞¹、莊美惠¹

國立中央大學水文與海洋科學研究所¹

摘 要

印度洋北方之孟加拉地區經常遭受熱帶氣旋侵襲。由於當地沿海人口密度高且多為河流及泥沼地，熱帶氣旋所引致之風暴潮往往對當地造成嚴重破壞。如發生於孟加拉灣之1970孟加拉風暴潮，造成近50萬人死亡，為人類史上死亡人數最高之天災。2020年之Amphan氣旋與風暴潮事件，亦造成近13億美元之損失及128人死亡。本研究旨在以台灣COMCOT風暴潮預報系統為基礎，發展適用於印度洋之風暴潮速算系統。於印度洋所發展之熱帶氣旋，其結構與強度有別於太平洋之颱風與大西洋之颶風，因此適用於太平洋與大西洋之風暴潮模式是否適用於求解印度洋之熱帶氣旋型風暴潮為本研究之分析重點。本文以2020 Amphan氣旋為研究案例，分析4種不同參數化風場於風暴潮生成之適用性。分析結果發現，Carr & Elsberry之氣象場於風速剖面、風暴潮溢淹範圍、及時序潮位高程上與觀測資料有最佳之匹配。本研究採用之COMCOT風暴潮預報系統求解球座標非線性淺水波方程式，搭配巢狀網格系統與移動邊界法，可於沿岸求解高解析度之風暴潮溢淹範圍。同時可結合TPXO全球天文潮模式，以掌握高低潮位對溢淹範圍之影響。本研究建立適用於孟加拉灣氣旋之COMCOT風暴潮速算系統，期待未來對於孟加拉灣地區風暴潮速報及災情掌控有實際之助益。

關鍵字：孟加拉灣氣旋、風暴潮、COMCOT模式、溢淹、參數化風場

一、 前言

在全球受到極端氣候之影響下，各國對於天災之防範也更加重視。風暴潮（Storm Surge）於近岸地區造成之溢淹（Inundation）為現今水動力學研究與災害防治之重點。北印度洋盆地之孟加拉灣為熱帶氣旋之好發地區（Li et al., 2013）。對於孟加拉灣附近之國家而言，氣旋夾帶之豪雨、強風和氣旋引起之洪水對其國家基礎建設及國民構成高度威脅，並導致生命和財產重大損失（Islam et al., 2009）。在歷史氣旋記錄中，十大致命之氣旋中有七個形成於孟加拉灣（Das et al., 2016）。例如發生於1970年11月之Bhola氣旋所引致之孟加拉風暴潮，在孟加拉灣周遭國家造成近50萬人死亡，為歷史上有紀錄以來最嚴重之熱帶氣旋（Frank et al., 1971）。發生於2013年10月之Phailin氣旋，是SSHWS（Saffir - Simpson hurricane wind scale）之5級風暴，在當時為孟加拉灣有史以來最強之氣旋，其風速高達250 km/h（IMD, 2013）。

目前國際間風暴潮預報系統，有使用於美國之SLOSH模式（Jelenianski et al., 1992）、法國之

IFREMER模式（Salomon et al., 1990）、比利時之MUMM模式（Ozer et al., 1990）、荷蘭之KNMI模式（Verboom et al., 1990）、英國之CS3模式（Flather et al., 1983）以及希臘之UA/AUT模式（Lascaratos et al., 1991）等。美國國家海洋暨大氣總署（National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA）之SLOSH模式（Sea, Lake, and Overland Surge from Hurricanes），可於卡式座標及極座標下進行風暴潮模擬及預警，同時以移動邊界法（Moving Boundary Scheme）推算風暴潮溢淹範圍。英國氣候辦公局（Meteorological Office）以POL研究室（Proudman Oceanographic Laboratory）自1978年起發展之CS3風暴潮模式，進行未來36小時之預報，其範圍包含整個歐洲西北區域，解析度約為12公里，一天進行兩次模擬。其中SLOSH用於大西洋與太平洋颶風型風暴潮預報，其氣象場採Jelenianski於1992年發展之參數化風場。CS3用於大西洋颶風型風暴潮預報，其使用MES大氣模式。

本文旨在以現行於台灣之COMCOT風暴潮預報系統為基礎，發展適用於印度洋之風暴潮速算系統，並以參數化風場為驅動力。參數化風場有其高速、價

廉與穩定之特色，適合風暴潮之預報以及風暴潮系集分析。Jelenianski發展之參數化風場，適用於研究美國地區之風暴潮案例；Rankin vortex model參數化風場，多用於研究模擬颶風與龍捲風之風場。然而上述之參數化風場以結構較對稱之颱風或颶風為模式化藍本，是否適用於對印度洋熱帶氣旋為本文探討之重點。

本文引入4種不同之參數化風場，對2020 Amphan氣旋造成之風暴潮進行分析，並與印度氣象局（India Meteorological Department, IMD）所提供之觀測資料進行比對，以討論各參數化風場之適用性，並重建當時之暴潮情境。

Amphan氣旋發生於在2020年5月15日，為美國辛普森颶風分類（Saffir - Simpson scale）第五級氣旋，亦為印度氣象局（IMD）氣旋分類之超級氣旋風暴（Sridhar et al., 2020）。對孟加拉灣沿海地區之印度東部和孟加拉國地區帶來嚴重之損失。Amphan氣旋對當地造成超過130億美元之損失和有紀錄人數128人死亡，受影響人數超過一千萬人，是北印度洋有史以來經濟損失最嚴重之氣旋（Soham, 2020）。本文選擇該氣旋為研究案例，主要為其有現代觀測數據，且具有類似1970波拉超級氣旋之型態，並對印度東部及孟加拉國地區產生重大之影響。

二、 分析方法

本研究所使用之暴潮模式為中央氣象局現有採用之COMCOT暴潮模式，而COMCOT暴潮模式之前身為康乃爾大學所發展之國際知名海嘯模式COMCOT（Cornell Mutli-grid Coupled Tsunami Model）。透過導入颶風氣象力（壓力梯度力及風剪力），使模式具備於球座標系統下，計算非線性淺水波方程式之能力。COMCOT風暴潮預報系統適用於模擬風暴潮生成、傳播以及近岸潮上之完整歷程。透過求解線性與非線性之淺水波方程式，可分別對深海地區及近岸地區進行粗細不同網格之數值模擬。其中深海地區可採用線性淺水波方程式；在近岸地區則可採用非線性淺水波方程式。COMCOT模式中具有巢狀網格系統，可同時計算遠洋尺度之風暴潮與近岸尺度之風暴潮潮上。至於處理風暴潮潮上時之乾溼邊界

問題，COMCOT模式使用移動邊界法（Moving Boundary Scheme）處理，並以非線性淺水波方程式同時計算溢淹範圍（Inundation Area）。

COMCOT模式在潮汐方面與奧瑞岡州立大學（Oregon State University, OSU）所開發之TPXO全球潮汐模式進行即時耦合。TPXO模式包含八個主要分潮位（M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1）、兩個長週期分潮位（Mf, Mm）和3個非線性分潮位（M4, MS4, MN4），以0.25弧分之解析度進行運算（Dushaw et al., 1997）。

參數化風場主要分為壓力場和風速場兩部分。在壓力場部分，本研究採用Holland（1980）提出之壓力模式：

$$P_a = P_c + (P_n - P_c) \exp \left[-\left(\frac{R_{max}}{r} \right)^B \right]$$

式中， P_c 為颶風中心之大氣壓力、 R_{max} 為最大暴風半徑、 B 為峰值參數（peakness parameter）和 P_n 為環境大氣壓力（ambient pressure）。

在風速場部分，本文導入下述4種風速場模式：

1. Holland模式：Holland（1980）提出之理想颶風風場。
2. Jelenianski模式：現行於SLOSH模式中之Jelenianski（1992）理想颶風風場。
3. CWB模式：現行於中央氣象局中之CWB颶風風場。
4. Carr & Elsberry模式：本研究中加入之Carr & Elsberry之理想風場。

Holland（1980）所提出之理想颶風風速場為：

$$V_w = \sqrt{\frac{B(P_n - P_c)}{\rho_a} \left(\frac{R_{max}}{r} \right)^B \exp \left[-\left(\frac{R_{max}}{r} \right)^B \right] + \frac{r^2 f^2}{4} - \frac{rf}{2}}$$

式中， P_c 為颶風中心之大氣壓力、 R_{max} 為最大暴風半徑、 B 為峰值參數（peakness parameter）、 P_n 為環境大氣壓力（ambient pressure）、 f 為柯氏力、 ρ_a 為空氣密度和 r 為距暴風中心半徑。

Harper and Holland（1999）建議峰值參數 B 值之經驗關係如下：

$$B = 2 - \frac{P_c - 900}{160}$$

$$\varepsilon = \frac{c^4}{1 + c^4}, c = \frac{r}{0.9R_0}$$

Jelesnianski(1966)所提出之理想颶風風速場為：

$$V_w = \frac{2 \cdot V_{max} \cdot R_{max} \cdot r}{(R_{max}^2 + r^2)}$$

式中， V_{max} 為近中心最大風速、 R_{max} 為最大暴風半徑和 r 為距暴風中心半徑。

由中央氣象局（CWB）提供之颶風風速場為：

$$V_w = \frac{2 \times V_{max} \times R_{max} \times r}{(R_{max}^2 + r^2)}$$

其中， R_{max} 則依據颶風中心壓力而有相對應之值，如下：

$$R_{max} = \begin{cases} 42.6 - 0.86 \cdot (P_c - 990) & P_c \geq 990 \\ 51.0 - 0.84 \cdot (P_c - 980) & 980 \leq P_c < 990 \\ 58.4 - 0.74 \cdot (P_c - 970) & 970 \leq P_c < 980 \\ 63.0 - 0.46 \cdot (P_c - 960) & 960 \leq P_c < 970 \\ 70.0 - 0.234 \cdot (P_c - 930) & 930 \leq P_c < 960 \\ 80.0 - 0.167 \cdot (P_c - 870) & 870 \leq P_c < 930 \\ 80.0 & P_c < 870 \end{cases}$$

Carr & Elsberry (1997) 所提出之理想風速場為：

$$v_c(r) = \frac{f_0}{2} \left[R_0 \left(\frac{R_0}{r} \right)^X - r \right] \frac{\alpha^4}{1 + \alpha^4}$$

$$u_c(r) = \tan(\gamma) v_c(r)$$

其中 γ 為風之流入角， $\alpha = r/R_m$ (縮放係數)， $X = \text{constant} < 1$ ，並取 $X = 0.4$ 。

式中， v_c 為氣旋風速之切向分量、 u_c 為氣旋風速之徑向分量、 R_0 為氣旋之半徑、 R_m 為最大暴風半徑、 r 為距暴風中心半徑、 f_0 為柯氏力參數。

本研究在Carr & Elsberry (1997) 所提出之理想風場部分加入Chu (2000) 所提出之修正公式，如下：

$$V = (1 - \varepsilon)(v_c + v_t) + \varepsilon V_{bg}$$

其中， V_{bg} 為背景風場， v_t 為風暴平移速度， ε 之計算公式為：

三、 結果與討論

本研究針對孟加拉灣地區之風速場與風暴潮進行重建，以COMCOT模式為基礎，討論以4種不同之風速場模式對觀測風速與觀測風暴潮溢淹範圍之準確性，並進一步探討風暴潮及其造成之溢淹災害，以建立適用於孟加拉灣之風暴潮速報系統。

圖 1 為Holland model之參數化壓力場。其中心最低氣壓為 920 mb，影響半徑約5-10km。

圖 2 為4種參數化風場模式之風速分布圖。從圖中可以觀察到，若將Holland、Jelesnianski及CWB風場模式與Carr & Elsberry風場模式相比，CWB風速最大值較其他三者為小，Holland與Jelesnianski之最大風速值類似，而Carr & Elsberry則有最大之最大風速值。在風速剖面方面，Holland、Jelesnianski及CWB風場模式在過最大暴風半徑5公里後之風速遞減趨勢較Carr & Elsberry為劇烈，而Carr & Elsberry風場模式在之衰減趨勢較為緩和，因此Carr & Elsberry風場之風場在風速動量方面較其他三者為高。

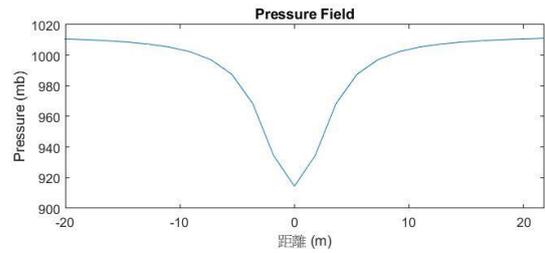


圖 1 Holland 壓力場之分布圖。

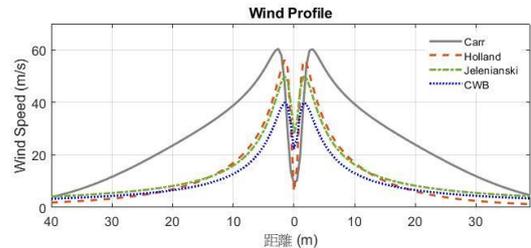


圖 2 4種參數化風場模式之風速分布圖。

比較參數化風場於描述印度洋熱帶氣旋之優劣，本研究採BOB08測站之實測資料進行比對。BOB08測站 (18.06°N 89.8°E) 位於孟加拉灣中間位置，為印度氣象局 (IMD) 所屬之海上浮標測站。圖 3 為觀測風速值與參數化風場風速之比較。由圖可見，Holland、Jelenianski與CWB之風場模式之風速值與觀測值相比有較大之差異，而Carr & Elsberry之風場則有較佳之匹配。

圖 4 為4種風速場模式之風速分布。可以從圖中觀察到4種參數化風場所提供之風速峰值大小不同，影響範圍亦不同。Carr & Elsberry之風場模式為本研究之4種風場模式中最適合用於孟加拉灣之氣旋風場。

圖 5 為以4種參數化風場作為氣象力所得之風暴潮最大高程與溢淹範圍。由圖可見，Carr&Elsberry之參數化風場所引起之溢淹範圍最大，此結果亦呼應圖 3 之風速比較。

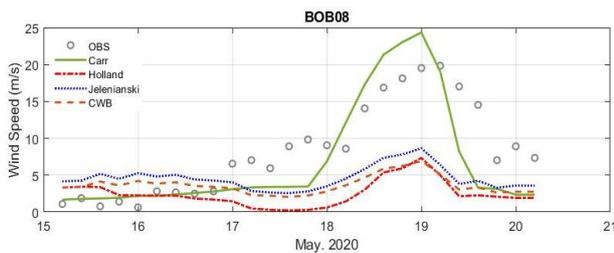


圖 3 BOB08 測站 (IMD) 之觀測風速與 4 種參數化風場模式之風速比較圖。

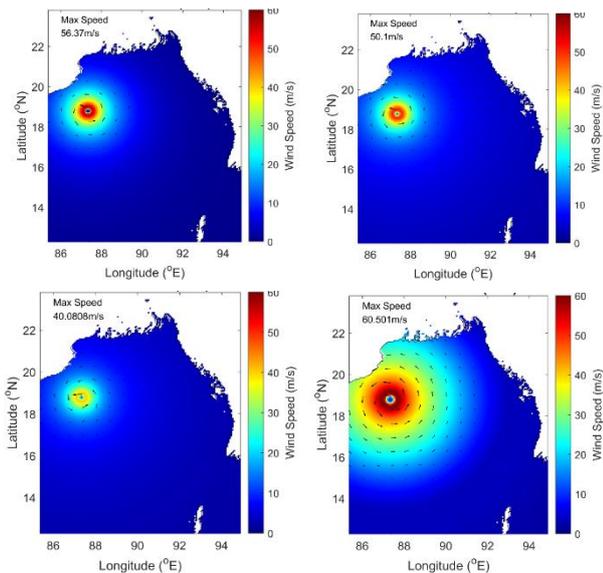


圖 4 4 種參數化風場模式之風速場。左上為 Holland 風場模式；右上為 Jelenianski 風場模式；左下為 CWB 風場模式；右下為 Carr & Elsberry 風場模式。

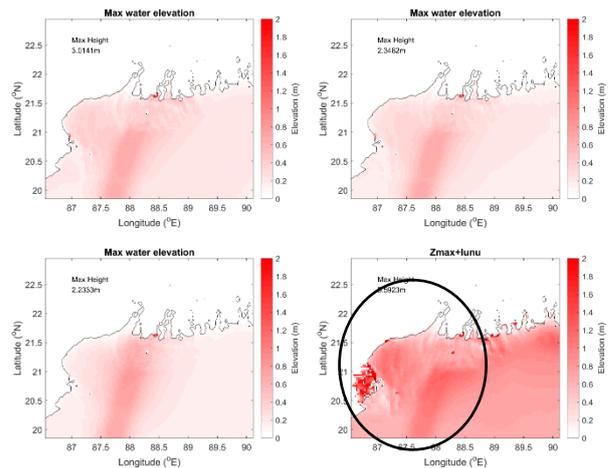


圖 5 4 種參數化風場所模擬之風暴潮最大潮高圖。左上為 Holland 風場模式；右上為 Jelenianski 風場模式；左下為 CWB 風場模式；右下為 Carr & Elsberry 風場模式。

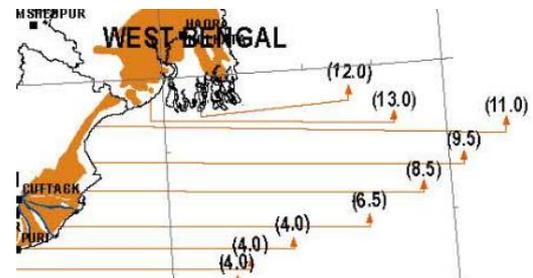


圖 6 本研究之溢淹範圍為塗色區域，並於圖 5 右下做標示。

圖 6 為 Building Materials & Technology Promotion Council (BMTPC, Ministry of Housing & Urban Affairs, Government of India) 提供之洪水災害圖。圖中顯示WEST BENGAL 標示一帶，其雖有溢淹範圍，然而其溢淹範圍未與海岸線接臨，因此其溢淹主要受降雨及地表逕流影響。而其西南方 CUTTACK一帶，因其溢淹範圍接臨海岸線，因此該溢淹可為海水倒灌。根據印度氣象局 (IMD) 之報告指出，Amphan氣旋在登陸期間造成之暴潮高達4至5公尺，因此該區域之溢淹主要受風暴潮所影響。在溢淹範圍之驗證部分，本區域之溢淹是否正確預測為評斷之重點。將圖 5與圖 6比較，可明顯得知，Carr & Elsberry之參數化風場所引致之風暴潮溢淹範圍與圖 6之觀測溢淹範圍有最佳之吻合。

圖 7 為潮位站分布圖，中間紅線為Amphan氣旋之路徑，潮位站資料主要來源為印度氣象局 (IMD) 及Sea Level Station Monitoring Facility所收集之實際觀測資料。

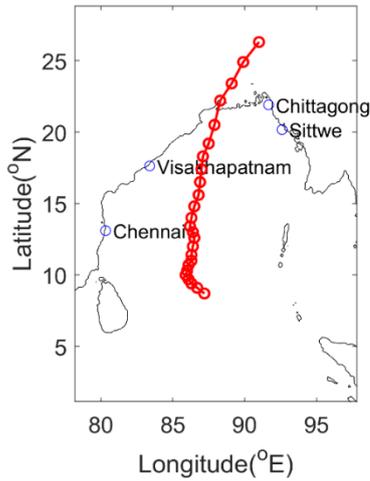


圖 7 潮位站分布圖。

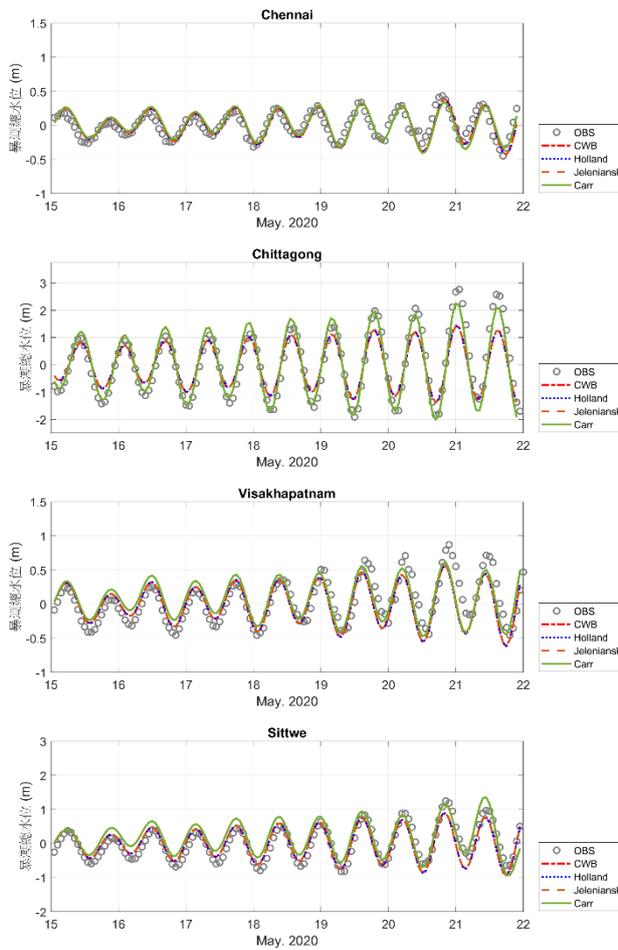


圖 8 測站時序比較 (潮位站分別位於印度之 Visakhapatnam、Chennai，孟加拉國之 Chittagong，緬甸之 Sittwe)

圖 8 為以 4 種不同參數化風場為氣象力所得之測站時序水位比較圖。圖中可見在離氣旋影響範圍較遠之測站如 Chennai，4 種風場模式所得之暴潮總水位皆與觀測資料相近，其潮位變化主要來自天文潮。而在較靠近氣旋影響範圍之測站如 Chittagong，除 Carr &

Elsberry 外之風場模式模擬之暴潮總水位皆小於觀測值，而在 Chittagong 下方之 Sittwe 測站，4 種模式之暴潮總水位與觀測值相當。在氣旋影響最大時 (20 和 21 日) Carr & Elsberry 之風場模式模擬之暴潮總水位稍大於觀測值。而在印度之 Visakhapatnam 測站，4 種風場模式模擬之暴潮總水位在氣旋影響最大時 (20 和 21 日) 其水位高度均小於觀測值，此表示 4 種風場模式之風速強度仍不足以滿足實際情況，此亦與圖 3 之風速比較結果吻合。綜合上述所示，本研究之結果顯示，在本研究選用之 4 主種參數化風場模式中，於近岸部分較適合採用 Carr & Elsberry 之風場模式。

依照圖 8 所得之時序潮位可進行相關係數校驗。利用統計參數分析模式模擬結果與印度氣象局 (IMD) 及 Sea Level Station Monitoring Facility 所收集之觀測資料以檢視數值模式之準確性。

圖 9 與圖 10 為風暴潮之發展過程及最大潮高 (含溢淹) 圖。由圖可見，風暴潮主要由印度西孟加拉邦靠近孟加拉國 Sundarbans 紅樹林之海岸登陸，並往孟加拉國方向移動。模式模擬之溢淹情形主要影響區域為印度西孟加拉邦之帕拉迪普區域，與實際情況符合。風暴潮於孟加拉沿岸產生最大之潮高約 4 公尺。而溢淹範圍主要涵蓋西孟加拉邦地區。其溢淹高程達 5.5 公尺。

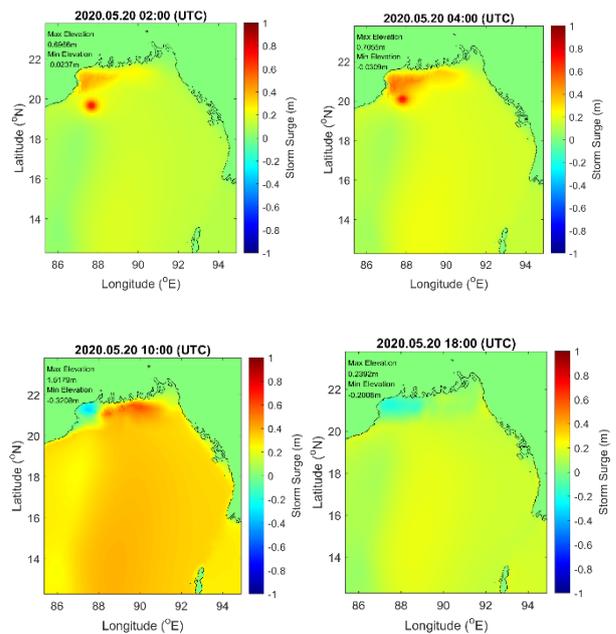


圖 9 COMCOT 模式結合 Carr & Elsberry 之風場公式模擬輸出之風暴潮傳遞圖。

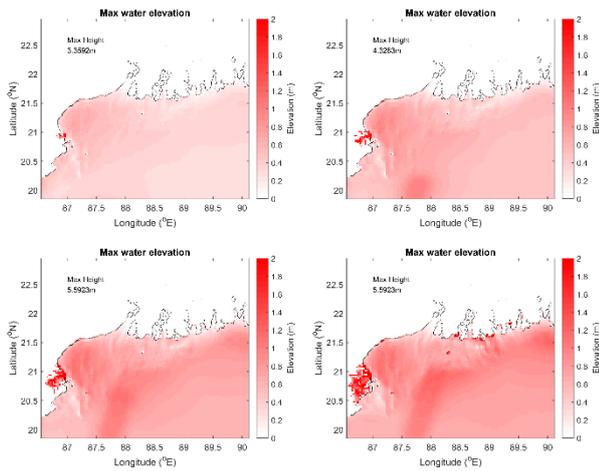


圖 10 COMCOT 模式結合 Carr & Elsberry 之風場公式模擬輸出之溢淹傳遞圖。

四、 結論

本研究以現行於台灣之COMCOT風暴潮預報系統為基礎，探討適用於印度洋熱帶氣旋之參數化風場。所比較之參數化風場包括Holland、Jelesnianski、CWB與Carr & Elsberry。透過實測風速比對、溢淹範圍比對、以及潮位站時序潮高比對，探討各參數化風場對印度洋風暴潮之適用性，並以2020年5月在孟加拉灣登陸之Amphan氣旋所引起之風暴潮為研究案例進行分析。

分析結果在風速比較方面，Holland、Jelesnianski及CWB之風場模式對於孟加拉灣地區之風速還原未達理想，較不適用於描述印度洋熱帶氣旋。而Carr & Elsberry之參數化風場模式則適用於此地區。

在溢淹範圍之比較可以發現，Carr & Elsberry之參數化風場模式可適切模擬出WEST BENGAL西南方CUTTACK一帶之溢淹情況。

此外，在潮位站比對方面，Carr & Elsberry相較其他三種更為接近實際潮位站之觀測資料。透過風速比對、風暴潮溢淹範圍比對與潮位站記錄比對，本文歸結於4種參數化風場模式中，以Carr & Elsberry之風速場模式最能還原2020 Amphan 氣旋發生期間之實際風暴潮情形。而本研究所發展之COMCOT風暴潮速報系統，在導入Carr & Elsberry參數化風場後，可適切求解印度洋之風暴潮。文末期許本研究之結果對於未來孟加拉灣地區風暴潮速報及災情掌控有實際之助益。

五、 參考文獻

- [1]. Balasubramanian, S., and Chalamalla, V. K., 2020: " Super cyclone amphan: A dynamical case study. " arXiv preprint arXiv:2007.02982.
- [2]. Carr, L. E., and Elsberry R. L., 1997: "Models of Tropical Cyclone Wind Distribution and Beta-Effect Propagation for Application to Tropical Cyclone Track Forecasting." *Mon. Wea. Rev.*, 125, 3190–3209
- [3]. Chu, P. C., Veneziano, J. M., Fan, C., Carron, M. J., and Liu, W. T. , 2000:"Response of the South China Sea to tropical cyclone Ernie 1996." *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 105(C6), 13991-14009.
- [4]. Dushaw, B. D., Egbert, G. D., Worcester, P. F., Cornuelle, B. D., Howe, B. M., and Metzger, K., 1997: " A TOPEX/POSEIDON global tidal model (TPXO. 2) and barotropic tidal currents determined from long-range acoustic transmissions." *Progress in Oceanography*, 40(1-4), 337-367.
- [5]. Das, Y., Mohanty, U. C., and Jain, I., 2016: " Development of tropical cyclone wind field for simulation of storm surge/sea surface height using numerical ocean model. " *Modeling Earth Systems and Environment*, 2(1), 13.
- [6]. Frank, N. L., and Husain, S. A., 1971: "The deadliest tropical cyclone in history?" *Bulletin of the American Meteorological Society*, 52(6), 438-445.
- [7]. Flather, R. A., and Proctor, R., 1983: "Prediction of North Sea storm surges using numerical models: Recent developments in UK." In *North Sea Dynamics* (pp. 299-317). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [8]. Holland, G. J., 1980: "An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes." *Monthly weather review*, 108(8), 1212-1218.

- [9]. Islam, T., and Peterson, R. E., 2009: "Climatology of landfalling tropical cyclones in Bangladesh 1877–2003." *Natural Hazards*, 48(1), 115-135.
- [10]. India Meteorological Department, 2013: Very Severe Cyclonic Storm (VSCS) PHAILIN over the Bay of Bengal. Report.
- [11]. Jelesnianski, C. P., 1992: SLOSH: Sea, lake, and overland surges from hurricanes (Vol. 48). US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service.
- [12]. Laskaratos, A., Krestenitis, Y., and Nittis, K., 1991: "Experimental and numerical studies of storm surges In The Aegean Sea, Research Project: Temporal and spatial variability of major floods around European Coasts, EEC DG XII. " EEC DG XII, EV4C-0026-GR (TT), Final Report.
- [13]. Li, Z., Yu, W., Li, T., Murty, V. S. N., and Tangang, F., 2013: "Bimodal character of cyclone climatology in the Bay of Bengal modulated by monsoon seasonal cycle." *Journal of Climate*, 26(3), 1033-1046..
- [14]. Ozer, J., Deleersnijder, E., and Jamart, B., 1990: Model intercomparison: description of a semi-implicit numerical model for the shallow-water wave equations. MUMM's contribution to MAST-0050-C (SMA) (Vol. 1). Technical Report.
- [15]. Poddar, S., Mondal, M., and Ghosh, S., 2020: " A Survey on Disaster: Understanding the After-effects of Super-cyclone Amphan and Helping Hand of Social Media. " arXiv preprint arXiv:2007.14910.
- [16]. Salomon, J. C., and Breton, M., 1990: "Modele general du plateau continental Nord Europeen. "
- [17]. Verboom, G. K., De Ronde, J. G., and Van Dijk, R. P., 1992: " A fine grid tidal flow and storm surge model of the North Sea. " *Continental Shelf Research*, 12(2-3), 213-233.