

應用FDDA技術同化TWRF預報風場以改善模式颱風預報之研究

徐驊、陳得松、謝佳宏、鄭浚騰、蕭玲鳳、洪景山

中央氣象局

一、前言

颱風強度和路徑是多重尺度交互作用的結果，和對流過程有密切的關係，因此模式解析度及物理過程皆會影響颱風預報的結果。另外，搭配模式解析度，給定合理的模式颱風初始結構與正確的中心位置，不僅可以減少起轉 (spin-up) 的時間，亦可能進而改善颱風預報能力。

中央氣象局颱風數值預報系統 (Typhoon WRF; TWRF) 的颱風預報能力近年已明顯提升 (Hsiao et al. 2020)，2016~2018 年 TWRF(3-km)、ECMWF(9-km)、NCEP(13-km) 颱風中心初始位置平均誤差分別為 37、37、28 km，24/48/72 小時預報路徑平均誤差分別為 63/112/178、57/113/174、62/122/210 km，顯示 TWRF 颱風中心初始位置和路徑預報能力表現與 EC 相當，且路徑預報能力優於 NCEP。TWRF、ECMWF、NCEP 颱風初始強度平均誤差皆為 7 hPa，24/48/72 小時預報颱風強度平均誤差分別為 4/2/0、6/7/7、3/0/-5 hPa，顯示 TWRF 颱風強度誤差隨預報時間減少，而其初始場之颱風強度有偏弱的系統性偏差，2019、2020 年亦呈現類似的預報表現，顯示 TWRF 初始場之颱風強度仍有改進空間。

現行 TWRF 之資料同化策略採取 partial

cycle 架構：在初始場前 12 小時使用 NCEP GFS 全球分析場冷啟動並進行混合式三維變分 (Hybrid 3D-EnVAR) 以減低區域模式因循環更新 (full cycle) 所累積的誤差，冷啟動後進行連續 2 次之循環更新資料同化以改善模式的起轉問題。此外每一次資料同化均使用分析場擬合 (analysis blending) 技術 (Hsiao et al. 2015) 以降低大尺度環流的誤差。冷啟動階段全球模式分析場解析度較低，因此颱風強度有比較高的機率會被低估，雖然經過 2 次循環更新，但 TWRF 仍可能因為 blending 與資料同化過程導致初始場的颱風強度有平均低於觀測 7 hPa 的系統性誤差，颱風中心初始位置平均誤差亦達 37 km，從而可能影響後續模式颱風路徑與強度的預報表現。

為改善初始場的颱風強度與位置誤差，我們使用美國 NCAR 發展之 WRF FDDA (Four-Dimensional Data Assimilation; FDDA) 四維資料同化技術 (Liu et al. 2008a; 2008b; Pan et al. 2015)，主要運用納進 (nudging) 數值方法，隨每個模式預報時步 (time step) 將觀測資料同化於模式場中，其特性為簡單快速且使用計算資源少，可直接調整模式趨勢朝向觀測，改進模式初始場及預報結果。

二、方法

由於海上缺乏密集的觀測資料，數值模式因此常無法掌握洋面上的颱風結構。過去

許多研究利用 WRF 模式探討颱風發展過程的結構變化，顯示 WRF 模式對於颱風結構有一

定的預報能力，而 TWRP 對於颱風的預報已有不錯的表現 (Hsiao et al. 2020)。因此本研究嘗試攫取 TWRP 颱風中心附近預報風場，並參考中央氣象局估計之颱風位置與強度加以修正，以做為進行 FDDA 資料同化所使用之目標觀測資料，使得模式初始場能夠產生趨近於氣象局估計之颱風位置與強度。以下針對目標觀測資料與 TWRP 搭配 FDDA 之模式實驗設計做詳細說明。

1) Target Observation Wind

我們使用 TWRP 在 partial cycle 架構下，選擇 major run 前 12 小時的 lead time 1~15 小時的 3 km 解析度預報，作為三維目標觀測風場基礎資料。Control run 取颱風中心 100 公里內逐時預報風場，沿用 Chen et al. (2021) 之設定，降低資料解析度至 12 km 做為目標觀測風場。為使目標觀測風場更實際，我們將氣象局主觀判定之颱風位置與陣風（後稱為觀測颱風位置與陣風）內差成小時資料，並以此資料來調整目標觀測風場，1) 風場強度調整：比較 lead time 1 小時的目標觀測風場最強風速與觀測陣風，得到一個風速調整倍數，以此倍數調整 15 小時三維風場。2) 風場

位置調整：以目標觀測資料中心相對觀測颱風位置為平移方向與距離，將整組目標觀測資料做平移。經過調整後得到更合理的目標觀測風場，在 TWRP partial cycle 架構下進行 FDDA 資料同化。由於目標觀測風場範圍、解析度等設定，為沿用 Chen et al. (2021) 之設定，本篇研究針對時間解析度、選取資料半徑、資料解析度、及強度調整變化，共 4 項參數進行初步敏感度測試 (表 1)。其中時間解析度之測試，主要考量為氣象局提供之主觀颱風位置與強度資訊，在遠洋面上為 6 小時一筆資料，當颱風接近台灣，才會進一步提供 3 小時一筆，甚至每小時一筆的颱風資訊。因此搭配每小時的目標觀測風場使用時，觀測資料為線性內插之結果，使用在不管是目標觀測風場位置或強度之調整，與實際颱風資訊間可能存在誤差，因此測試降低目標觀測時間解析度，對於預報結果是否造成顯著差異。而強度調整變化部分，則是將強度變化做得更細緻，根據逐時觀測強度，提供目標觀測風場逐時的調整倍率，使強度調整更為合理，同時加入模式初始時間之目標觀測資料，加強模式前期 FDDA 對於模式的修正。

Table 1. 敏感度測試之目標觀測資料設定

| # | Experiment | Factor | Radius (km) | Spatial Resolution (km) | Temporal Resolution (h) | Time Window (min) | 是否加入初始資料 |
|---|--|--------|-------------|-------------------------|-------------------------|-------------------|----------|
| 1 | CTL-Y1p3 | 1.3 | 100 | 12 | 1 | 40 | N |
| 2 | Y1p3FDDA3hRS_Twindow120min | 1.3 | 100 | 12 | 3 | 120 | N |
| 3 | Y1p3FDDA3hRS_Twindow120min_r200km | 1.3 | 200 | 12 | 3 | 120 | N |
| 4 | Y1p3FDDA3hRS_Twindow120min_r200km_1G8km | 1.3 | 200 | 18 | 3 | 120 | N |
| 5 | Y1p3FDDA3hRS_Twindow120min_r200km_1G8km_vary | vary | 200 | 18 | 3 | 120 | Y |

2) TWRF 搭配 FDDA 之模式設計

FDDA 為一種四維資料同化，使用名為納進(nudging)的數值方法，將觀測資料加入模式當中，其特性為概念簡單與使用計算資源少，不需計算如3DVAR的Error covariance。由於其方便性，FDDA可作為一種即時的 (real time) 四維資料同化，意即在實際的觀測時間，隨每個模式積分時間步階將觀測資料加進模式當中，增加同化的頻率而又不曾過度使用電腦資源。此外因FDDA為透過計算，使模式逐漸朝觀測逼近，因此模式在每個積分步階不斷修正平衡預報場，可有效減少後續spin up問題。

Nudging 方法一共分為兩種(Anthes 1974; Hoke and Anthes 1976; Stauffer and

上式左邊為 nudging 趨勢項， q 為要被 nudging 的變數， μ 為乾的靜水壓力， F_q 為 q 的模式物理的趨勢項， G_q 為 nudging strength 項， N 為觀測的總數， W_q 為時間及空間上的權重函數，是基於觀測與模式點的時間空間距離而得， q_o 為該變數的觀測值， q_m 為該變數在模式中位於觀測點位置之內插值， $q_o - q_m$ 為 innovation，innovation 值會隨時間改變而更新，nudging 趨勢項也會隨靠近觀測愈來愈小。(WRF Observation Nudging Guide, 2016) (WRF Observation Nudging Guide, 2016)

利用 WRF 內建的 FDDA 系統，本研究設定觀測點影響半徑為 20 km、觀測資料的時間影響

Seaman 1990; 1994; Liu et al. 2006)，一種為網格點 nudging，另一種為觀測點 nudging，前者將網格點資料 nudged 進模式，後者將觀測點資料 nudged 進模式。WRF FDDA 能夠使用兩種 nudging 方式，nudging 基本上使用於模式預報初始化的階段，約 6~12 小時。

Nudging 能使用於風、溫度或是水氣壓，在本文的實驗中，我們只使用模式預報風場作為 FDDA 的觀測，進行觀測資料點 nudged 進模式。

FDDA 所使用的公式為：

$$\frac{\partial q}{\partial t}(x, y, z, t) = F_q(x, y, z, t) + \mu G_q \frac{\sum_{i=1}^N W_q^2(i, x, y, z, t) [q_o(i) - q_m(x, y, z, t)]}{\sum_{i=1}^N W_q(i, x, y, z, t)}$$

窗區，設定為目標觀測風場資料解析度的 2/3，即目標觀測風場若為 60 分鐘解析度，則時間影響窗區設定為 40 分鐘、每 6 個積分時間步階更新一次 nudging 項。

以 4/2 00Z 的預報做舉例，本實驗使用 TWRF，4/1 00Z 使用 NCEP FV3 全球分析場冷啟動進行混合式三維變分資料同化與分析場擬合，接著每 6 小時進行一次循環更新共兩次，產生 4/1 13Z~4/2 03Z (lead time 1~15 小時) 預報做為 4/2 00Z 之目標觀測風場，自 4/1 12Z 的冷啟動開始加入 FDDA，測試此略對於 4/2 00Z 預報的影響。

三、測試結果

本研究以 2021 年舒力基颱風 (SURIGAE) 強度最強期間進行個案測試，4/21 06Z 觀測颱風強度為 935 hPa，TWRF 作業模式初始場颱風強度為 959 hPa，較觀測弱 24 hPa，顯示模式颱風初始強度出現很大的誤差，很適合作為本實驗的測試個案，因此我們選擇此個案時間

進行 FDDA 資料同化，以評斷此方法對於預報能力的改進為何。

初步結果顯示加入 FDDA 可明顯改善颱風初始強度 (18~25 hPa)，進而改進後續預報表現 (圖 1b)。目標觀測風場時間解析度高，模式預報隨時間的改進越平滑 (圖 1b、1c 淺

藍色線前 6 小時預報較其他結果平滑)。目標觀測資料解析度 3 小時解時，加入初始資料可改善模式預報前期，颱風傾向減弱的結果 (圖 1b 紅色線顯示模式前期颱風持續增強，橘色、綠色、及紫色線皆顯示預報初期颱風有減弱趨勢)。選取颱風半徑 200 km 做為目標觀測風場之預報強度較只選取半徑 100 km 風場預報強度為強 (圖 1b 綠色和紫色線較橘色線更接近觀測)，推測因為半徑 200 km 可更完整的涵蓋颱風眼牆的風場，使得結果更接近觀測，但在 3~6 小時的預報則有颱風過強的狀況。目標觀測風場解析度選擇 12 km 與 18 km 對於強度

預報結果並無顯著影響 (圖 1b 紫色和綠色線幾乎重合)。由於作業模式對於舒力基路徑預報表現不錯，因此使用 FDDA 在此個案的路徑改進上沒有顯著成效 (圖 1a)，但整體而言使用 FDDA 之路徑誤差在預報 60 小時後成果較好 (圖 1d)。

根據舒力基 2021/4/21 00Z 測試結果，使用 FDDA 對於 24 小時強度預報有很顯著的改進，但 24 小時後所有測試結果強度都趨於一致，這也顯示了作業模式對於此個案可能的預報限制，FDDA 只能短期協助預報更為準確。

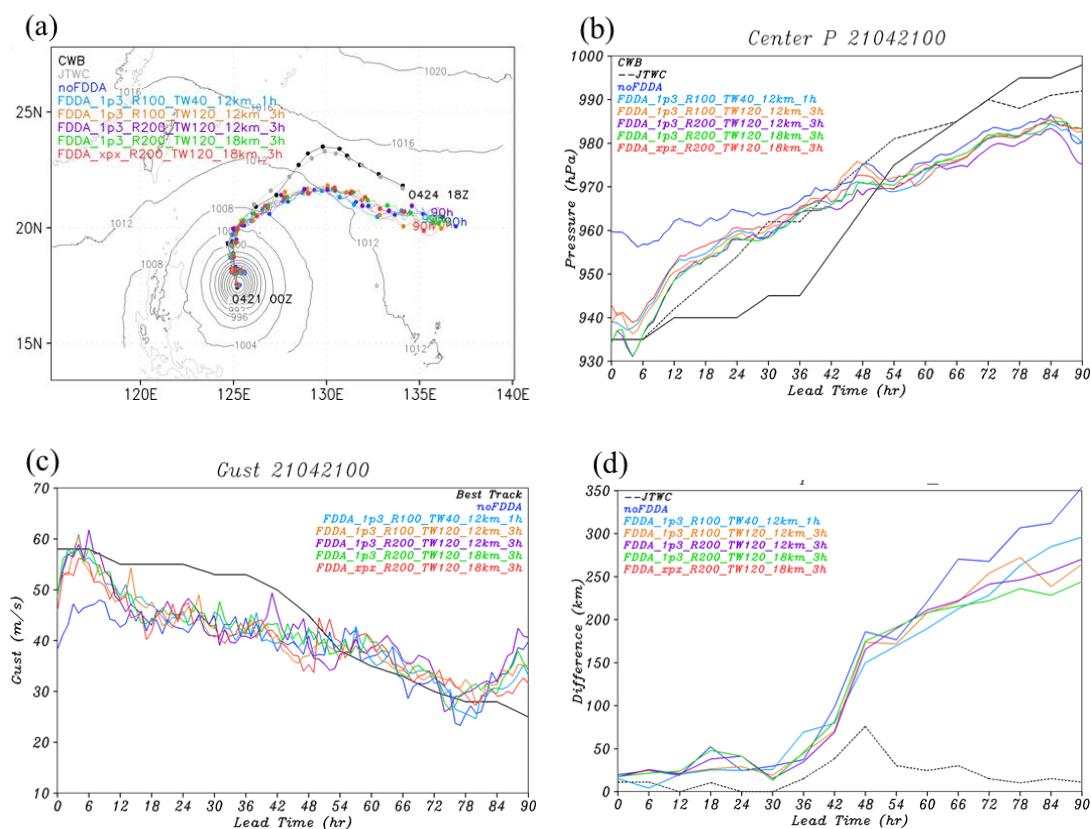


Fig 1. (a) 颱風路徑 (b) 中心氣壓隨時間的變化 (c) 陣風隨時間的變化 (d) 路徑相對CWB主觀估計位置之差距隨時間的變化，初始時間為21/4/21 00Z。黑色實線、虛線分別為為CWB、JTWC之主觀估計，深藍色線為未使用FDDA之TWRP預報結果，淺藍色線為使用FDDA control run之TWRP預報結果，其餘顏色線為敏感度測試，各實驗名稱搭配之設定請參考表 1。

四、結論與未來工作

本實驗目的在於測試及了解 WRF FDDA 對於 TWRP 的改進能力，最終目標是希望能夠藉由在預報前期利用 FDDA 得到更好的初始場，增加預報的準確度。使用舒力基 2021/4/21 00Z 做個案測試，結果顯示 FDDA 可有效改善模式颱風初始強度，進而改進後續 24 小時預報結果。FDDA 資料設定的敏感度顯示，相對於未使用 FDDA 模式的預報改進，預報結果對於改變目標觀測風場的設定較不敏感，但更準確地涵蓋颱風眼牆範圍風場，可

以加強改善模式預報的結果，而雖然目前 12 和 18 km 目標觀測風場解析度對結果並無太大影響，但 18 km 可減少計算時間。3 小時時間解析度之目標觀測風場搭配初始時間資料，亦可反應每小時解析度資料改進的趨勢，因此未來將使用表 1 中，第 5 個實驗設計來做後續各案測試。舒力基個案為作業預報強度偏弱之個案，未來亦將加入路徑誤差較大之個案測試，評估 FDDA 之功效。