

氣象局新一代全球預報模式 FV3GFS 之水平平流方案比較

阮子齊¹ 蕭玲鳳² 陳建河¹ 黃清勇³

¹氣象局資訊中心 ²氣象局科技研究中心 ³中央大學大氣系

中央氣象局

摘要

氣象局於 2018 年開始引進 NCEP 新一代作業預報模式，Finite Volume Cubed-Sphere Dynamical Core (FV3GFS)全球模式，評估未來作業化上線可行方案，目標在於發展具氣象局特色之全球預報系統。經 NCEP 測試後發現新一代全球模式有颶風強度預報偏弱的現象，針對此問題 GFDL 建議調整水平平流方案，原本的設定因有單調約束條件(monotonicity constraint)，以致擴散作用較強。

本論文針對其中的兩種水平平流方案做測試並分別命名為實驗 hord6 和 hord5，前者為原先的設定，擴散作用較強，後者是 GFDL 建議的方案，擴散作用較弱。實驗中進行了北半球夏季與冬季各一個月的模擬，其中包含颱風、西南氣流、東北季風等天氣。颱風強度方面，在調整後則是有明顯改善，路徑則是沒有太大差異。在降雨方面，兩種水平平流方案的降雨型態也略有不同，但這並不在原本的預期之中。整體而言，雖然實驗 hord5 之全球距平相關度(anomaly correlation)稍微落後給 hord6，但風速偏差(bias)方面則是有明顯改善。

關鍵字：FV3GFS、水平平流方案

第一章、前言

氣象局於 107 年開始引進 NCEP 新一代作業預報模式，Finite Volume Cubed-Sphere Dynamical Core (FV3GFS)全球模式，評估未來作業化上線可行方案，目標在於發展具氣象局特色之全球預報系統。然 NCEP 自 108 年 6 月 12 日開始上線新一代全球預報作業模式，使用 GFDL 開發之 FV3 動力架構(Lin and Rood 1996; Lin 1997; Lin and Rood 1997; Lin 2004)，符合作業化預報標準(8.5 分鐘預報 1 天)。模式水平解析度 C768 (約 13 公里)，垂直共 64 層，模式層頂為 0.2 hPa。NCEP 經測試後發現新一代全球模式颶風強度預報偏弱的現象，針對此問題 GFDL 建議調整水平平流方案。原使用水平平流方案包含線性五階方程之片段拋物線法(piecewise-parabolic method; PPM)與單調約束條件(monotonicity constraint)，其中線性方程採用 2dx filter 方法會有較強的擴散(diffusivity)作用。GFDL 認為原設定的擴散作用太強，過於平滑的結果易於造成颶風環流結構鬆散，以致颶風強度預報較弱。此外，由於改進水平平流方案，相關之阻尼(damping)參數亦需調整，以避免數值不穩定的發生。

第二章、實驗設計與參數設定

本實驗使用的模式解析度為 C384T，約為 26 公里，台灣位於六面其中一面的正中心，並且在台灣周圍加上一 two way 巢狀網格，解析度約 4.4 公里(Harris and Lin 2013)，如圖 1。此模式在水平平流的計算上一共分為五個變數，分別為動量通量(hord_mt)、絕對渦度(hord_vt)、位溫以及模式層厚度(hord_tm)和質

量(hord_dp)，另外還有一個 tracers 的平流但不在本次實驗探討的範圍內，故以預設值處理之。跟據 GFDL 提供的 namelist 說明文件，前四個變數的平流方法建議一致，本實驗連同巢狀網格也與全球一致，所以各變數的設定分別為 5,5,5,-5 和 6,6,6,-6 並以 hord5 及 hord6 命名這兩個實驗，其餘參數皆為預設。其中 hord_dp 多一個負號代表 positivity constraint，使質量在平流的過程中不會出現小於 0 的情形。

模式預設是 hord6，擴散較強易導致颶風強度偏弱，hord5 最不易擴散，但也比較容易造成模式的不穩定。本次實驗時間為 2019 年 8 月與 2020 年 1 月，每日 00Z 時預報 5 天，其中 8 月 1, 9, 14, 27 日以原本的時間步階(dt_atmos=225)會造成不穩定，hord5 與 hord6 都有相同情形，解決方法為將時間步階調整至 150，27 日 hord5 的實驗甚至要到 120 才可穩定，1 月則無此情況。

2019 年 8 月在西北太平洋一共有 5 個颶風生成，分別是范斯高(FRANCISCO)、利奇馬(LEKIMA)、柯羅莎(KROSA)、白鹿(BAILU)、楊柳(PODUL)。由於 NCEP 提出這兩個平流方法的主要差異會於颶風模擬

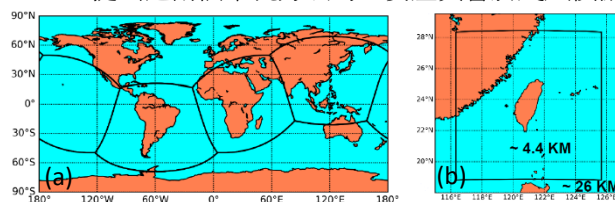


圖 1、(a)C384T 六面網格分布。(b)台灣周圍巢狀網格示意圖及對應解析度。

上較顯著，所以本文第四章會特別針對颱風的強度、結構做討論。

第三章、數值不穩定

關於上一章提到的在 8 月 1, 9, 14, 27 日以原時間步階會出現不穩定的情形，我們將最頂層往下數第三層做分析，可見圖 2a 在該日南美洲南端近模式層頂有出現異常大的垂直運動，極值可達 7.9 與 -10.3，模式錯誤訊息也告知此處計算時發生問題，其他三個會造成不穩定的初始場也都有在此處出現垂直運動極值，對於此問題我們認為主要可能原因是氣流過山產生重力波並且垂直向上傳送所造成。南半球夏季無此問題推論應是夏季低層水平風速較弱，無法激發較強的重力波。近一步由於 NCEP 使用的解析度為 C768，所以能把各種場表示的更細膩，水平與垂直的風速也更強，對於氣象局解析度約只有 NCEP 一半的 C384 是一個較大的梯度，當 damping 無法應付如此大的梯度即會造成數值不穩定。對比氣象局以解析度 C384 同化觀測資料產出的分析場，最大垂直風速僅約 2.9 與 -4.8，對 C384 本身來說並不致於造成數值不穩定，所以我們認為在作業上發生數值不穩定的機率應該是低的。

第四章、Global Verification and Evaluation Research system (GVER) 校驗結果

4.1 score card

圖 3 可見在 2019 年 8 月距平相關度(anomaly correlation)方面，除了高度場無顯著差異之外皆是 hord6 表現較好，風場與溫度場則是都有預報時間越長兩者差異較不顯著的情形。方均根誤差(root mean square error; RMSE)在高度場可見同樣是 hord5 和 hord6 兩者互有優劣，但風向量與溫度方面，則很明顯可見風在任何高度皆為 hord6 表現較佳，只有在低層 hord5 表現贏過 hord6。至於偏差(bias)的部分，則可見 hord5 有較多明顯勝出的區域，且有分高低層的現象，如高度場 200 hPa 以上大致為 hord5 表現較好，500 hPa 以下則為 hord6 表現較好，高度場於熱帶區域則均為 hord5 表現較好。風速也有類似分高低層的情形，但與高度場相反，可見高層為 hord6 表現較好，低層則為 hord5，熱帶風速一樣都是 hord6 表現較好。溫度方面此情形較不明顯，但依然可見在低層(850 hPa 以下)是 hord5 表現較好，中層 500 hPa 以上則兩實驗無顯著差異，僅有在熱帶區域中層以上有 hord6 表現較好的趨勢。

2020 年 1 月與 2019 年 8 月有類似的結果(圖未示)，主要差異為溫度場 hord5 比 hord6 好的部分較多，以及距平相關度 hord6 明顯較佳的區域也有減少，其

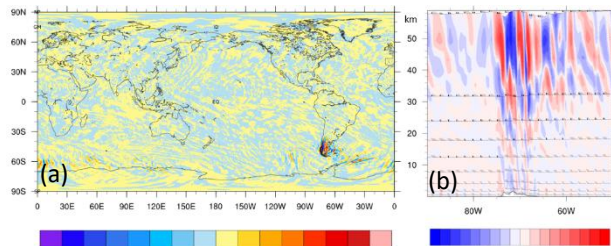


圖 2、(a)2019082700Z NCEP 初始場之第三層垂直速度(m/s)。 (b)南緯 47 度，西經 90 至 50 度垂直速度(m/s)之垂直剖面

		Globe			N. American			N. Hemisphere			S. Hemisphere			Tropics			
		Day 1	Day 3	Day 5	Day 1	Day 3	Day 5	Day 1	Day 3	Day 5	Day 1	Day 3	Day 5	Day 1	Day 3	Day 5	
Anomaly Correlation	Heights	250hPa	▲														
		500hPa							▲								
		700hPa															
	Vector Wind	1000hPa	▼						▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼
		250hPa	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
		500hPa	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
	Temp	850hPa	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
		250hPa	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
		500hPa	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
	RMSE	MSLP	MSL														
10hPa																	
20hPa																	
Heights		50hPa	▼	▼	▼				▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼
		100hPa	▲	▲	▲				▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
		200hPa	▲	▲	▲				▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
Vector Wind		500hPa	▲	▲	▲				▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
		700hPa	▲	▲	▲				▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
		850hPa	▲	▲	▲				▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
Temp		1000hPa	▼						▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼
	10hPa	▲	▲	▲				▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	
	20hPa	▲	▲	▲				▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	
Bias	Wind Speed	50hPa	▲	▲	▲				▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	
		100hPa	▲	▲	▲				▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	
		200hPa	▲	▲	▲				▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	
	Temp	500hPa	▲	▲	▲				▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	
		700hPa	▲	▲	▲				▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	
		850hPa	▲	▲	▲				▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	
	Heights	1000hPa	▼						▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	
		10hPa	▲	▲	▲				▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	
		20hPa	▲	▲	▲				▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	

圖 3、2019 年 8 月 GVER 校驗系統的距平相關度(anomaly correlation)、方均根誤差(root mean square error; RMSE)以及偏差(bias)。綠色代表 hord6 優於 hord5，紅色代表 hord6 劣於 hord5。大三角形代表 99.9%顯著，小三角形代表 99%顯著，色塊代表 95%顯著，灰色塊代表兩者優劣不顯著，藍色代表無資料或無統計相關。

餘部分並無太大差異，因此以下距平相關度以及偏差僅會以 2019 年 8 月做分析。

4.2 距平相關度(anomaly correlation)

整體 hord6 的風向量距平相關度較 hord5 高，僅有在預報 3 天後才有 hord6 較差的狀況，但仍是以 hord6 較好。溫度場也與風向量類似，同樣為 hord6 表現較好，但不如風向量明顯。

4.3 偏差(Bias)

hord5 與 hord6 在前 48 小時高度場 bias 無太大差別，但 48 小時之後 hord6 可見有較少的 bias。最明顯的區域大約是在 200hPa 的高度，這與高度場 RMSE 最大值發生的位置接近。兩者的風速 bias 有明顯差距，hord5 在 300 hPa 以下的負 bias 明顯較 hord6 少，說明 hord5 確實可改善風速過弱的問題，但於 300 hPa 以上 hord5 反而會產生更大的正 bias，最明顯的高度大約為 150 hPa。

第五章、hord5 與 hord6 模擬比較

5.1 夏季與冬季綜觀環境

兩實驗在表現副熱帶高壓並沒有明顯差異，副熱帶高壓的位置與強度幾乎相同，此時風速也幾乎相同，如果以大尺度綜觀環境來看差距並不明顯，但整

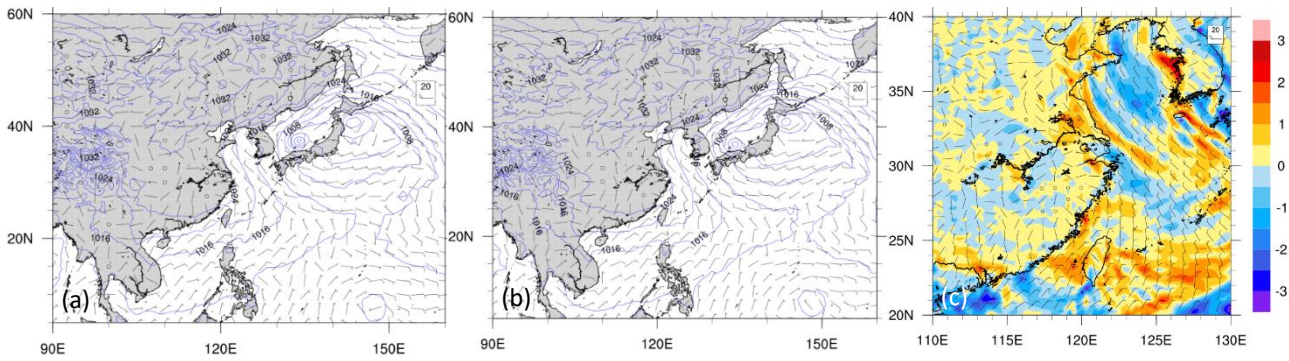


圖 4、(a) 2020012600Z 預報 96 小時 hord5 實驗之海平面氣壓場與風場。(b)同(a)，但為實驗 hord6。(c)同圖(a)，色塊部分為該時間點 hord5 風速減去 hord6 風速。

體校驗結果仍顯示 hord5 風速仍會比 hord6 稍強。圖 4a、4b 可見在冬季大陸冷高壓的表現也是幾乎相同，僅有在日本的低壓強度有明顯差距。圖 4c 也顯示在東北季風南下時，hord5 會有較大的風速，尤其是在海面上時，但整體也不會超過 1.5 m/s。

5.2 夏季與冬季降雨

5.2.1 Fraction Skill Score (FSS)

FSS (Mittermaier and Roberts 2010)是一種與量的校驗方法，可避免降雨位置偏差造成的雙重懲罰(double penalty)使預報能力被低估，以及可應用在不同解析度互相比較。FSS 分數達 0.5 以上可視為一有用的預報(Skok and Roberts 2016)。本報告中 FSS 計算

半徑為 20 公里，使用觀測資料為氣象局 QPESUMS，且僅計算台灣陸地降雨，模式校驗使用巢狀網格之輸出。從圖 5a 至 d FSS 校驗可見夏季時預報前 3 天為 hord5 得分較高，但是差距並不大，且兩實驗包含較大的降雨都在 0.5 分以上，代表 3 天以前的降雨預報是良好的，預報累積 2-3 天的降雨兩實驗的分數差距變小，此時兩者 90 mm 門檻值也都有 0.5 分以上。4-5 天時反而變成 hord6 表現較佳，但此時也幾乎所有門檻得分都在 0.5 以下。圖 5f 至 j 可見冬季部分可見兩者差異並不太大，在 0-24 小時和 48-72 小時某幾個門檻 hord6 似乎表現較好，也可發現冬季得分都在 0.5 分以下，原因是冬季降雨較無大範圍且大量的系統降雨，多半是集中在北部東部沿海小範圍的地形雨，預報降雨位置的偏移會對分數影響較大。另外該月都沒有 24 小時內累積降雨量超過 90 mm，所以 90 mm 門檻以後的得分皆為 0。

5.2.2 降雨分布與個案分析

夏季降雨方面，圖 6a 至 f 可見在預報 24-48 小時 hord6 降雨量比 hord5 來的大，較集中於山區且有高估傾向，hord5 則比較會往海岸線延伸，此現象在台灣西南部尤其明顯，在這段時間整體來說是 hord5 較符合觀測。在 48-72 小時累積降雨反而較 24-48 小時接近觀測，同樣地 hord6 在南部山區一樣有較多的降雨量，南部山區以外的地區則是都有低估的現象，兩實驗的特性與預報 24-48 小時相似。

冬季降雨方面，圖 6g 至 i 可見冬季累積降雨在預報 3 天以內 hord5 與 hord6 並沒有太大差異，與觀測相比則是台灣西南部降雨量偏少，整個東部沿海陸地降雨量偏多，且在東北角產生的地形降雨也有低估的情況，但 hord6 於東北角的雨量較多，較接近觀測。

圖 7a 至 c 是夏季西南季風降雨的個案，在預報前期 48-72 小時有上述相同的趨勢，hord5 強降雨區分布較廣，對比 hord6 則同樣集中在山區和陸地，此時是 hord5 較接近觀測，尤其是在是降雨強度方面，hord6 會有過多的雨產生。另一個個案是弱綜觀的大氣環境(圖 7d 至 f)，hord5 與 hord6 也有顯著差異，圖 7a、7b 可見 hord5 降雨分布較分散，對流胞較多但降雨較小，hord6 則是對流胞較少但降雨強度大，與觀測比較兩者都有高估降雨的情況。

在白鹿颱風侵台期間，在兩實驗的東部、東北部地形降雨都有預報出來，但雨量方面則都為低估，包含中部地區幾乎沒有降雨等情形(圖未示)，原因可能為以該初始場預報的颱風路徑離台灣較觀測偏遠。

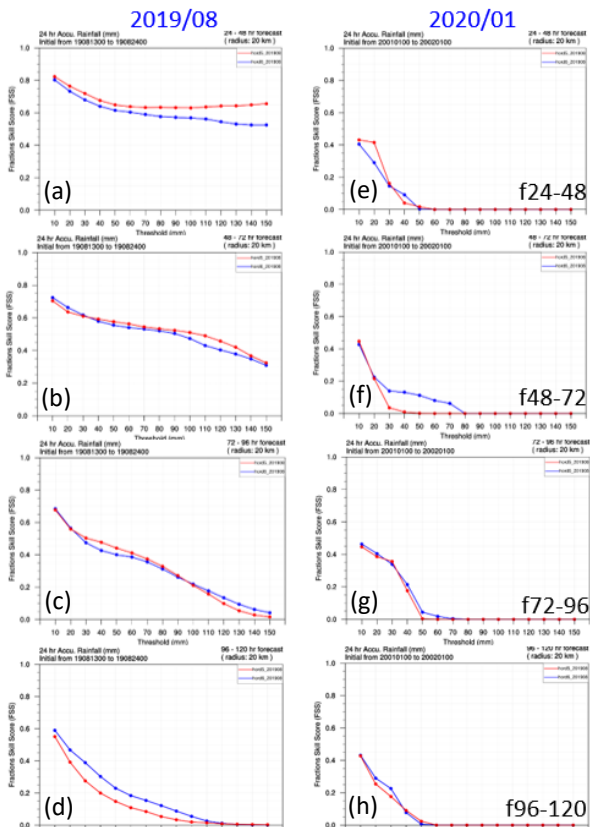


圖 5、(a)至(d)分別為預報 24-48、48-72、72-96 和 96-120 小時，計算期間為 20190813 至 20190824 每日 00Z 之 FSS。紅色為 hord5，藍色為 hord6。圖(e)至(h)同圖(a)至(d)，計算期間為 20200101 至 20200201 每日 00Z。

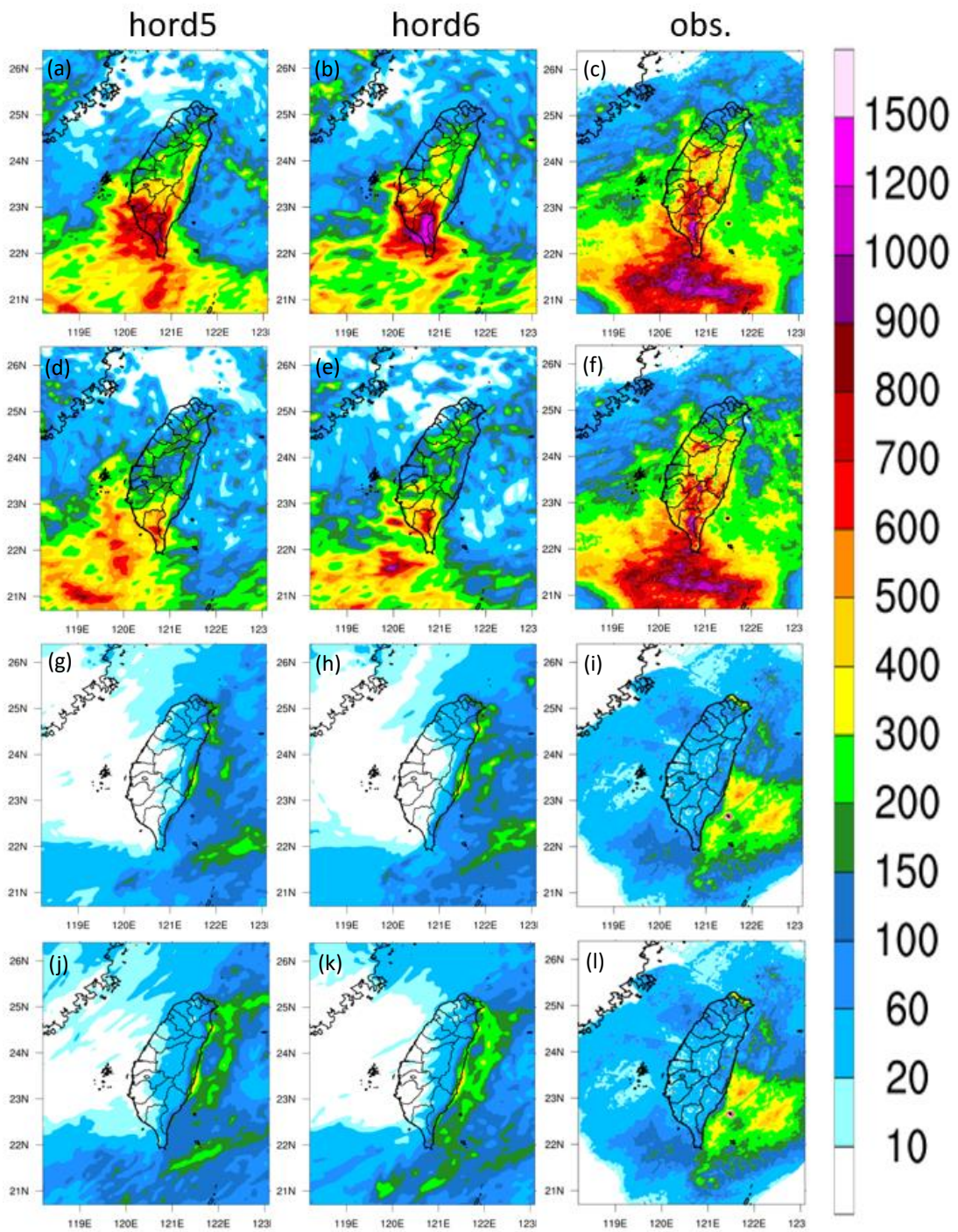


圖 6、20190813 至 20190824 每日 00Z 預報 24-48 小時累積雨量之(a) hord5、(b) hord6 和(c)對應(a)與(b)時間之觀測累積雨量。(d)與(e)同(a)與(b)，但為預報 48-72 小時累積雨量，(f)同(c)，但為對應(d)與(e)時間。(g)-(l)同(a)-(f)，但為 20200101 至 20200113 每日 00Z。

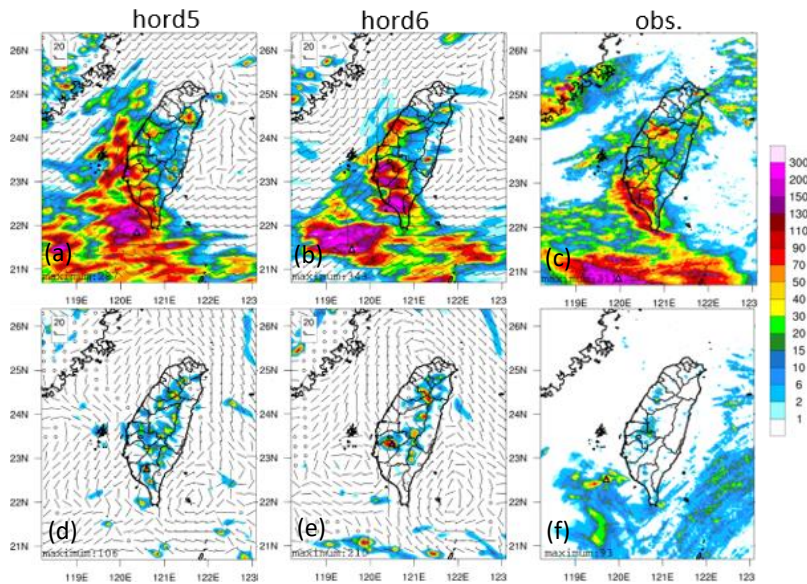


圖 7、(a)hord5 以 2019081500Z 為初始場預報 48-72 小時累積降雨，(b)同(a)但為 hord6。(c)觀測累積降雨。(d)-(f)同(a)-(c)但為 2019082000Z 為初始場預報 48-72 小時累積降雨。

5.3 颱風

圖 8 可見 FV3GFS 在預報颱風路徑上在水準之內，兩個實驗在路徑誤差也沒有明顯差異，差異較大的區域約在 96 小時以後，但也因個案較少以及陸地上颱風定位問題可能較不具代表性。本章節會特別針對中度颱風范斯高和輕度颱風白鹿做路徑、強度與結構上的討論。

5.3.1 范斯高(FRANCISCO)颱風

兩實驗的路徑並無太大差距，路徑誤差方面也無明顯差異，4 天誤差都約 320 公里(圖未示)，強度部分可見氣壓明顯是 hord5 較低，風速也是 hord5 較強，氣壓方面 0200 和 0300 初始場的氣壓 hord5 都可以達到接近觀測之最低氣壓，對比 hord6 之最低氣壓還差約 6 hPa (圖 9a)。風速方面也和氣壓有類似結果，hord5 與 hord6 最大風速相差最大約 10m/s(圖 9b)。而強度誤差部分則是可見在颱風增強時模式傾向低估強度，減弱時傾向高估強度。圖 10a 與 b 於 850 hPa 高

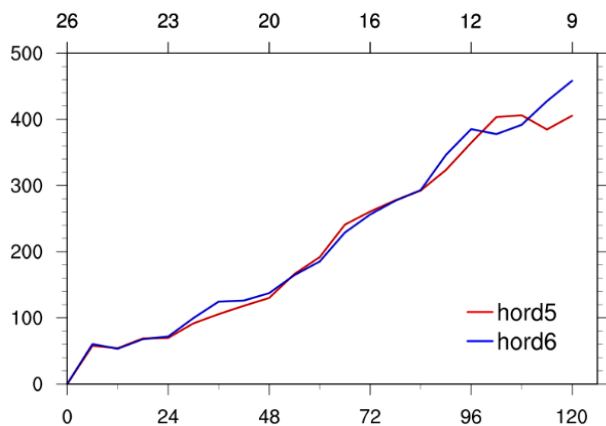


圖 8、為路徑誤差平均，底部橫軸為預報時間，縱軸為距離(公里)，頂部橫軸為個案數。

度水平結構可明顯看到 hord5 風速較強，可達 36m/s，但 hord6 卻僅有 28m/s。至於颱風暴風半徑則是兩者無太大差別。

5.3.1 白鹿(BAILU)颱風

此個案是 hord5 的路徑稍微好一些，預報 36 小時至 72 小時間 hord5 徑誤差都可在 100 公里以下，hord6 也都維持在 100 公里上下(圖未示)。強度部分由於白鹿颱風為輕度颱風，觀測最低氣壓不低於 980 hPa (圖 9c)，風速部分也僅約 26 m/s (圖 9d)。對於較弱的颱風，這兩實驗的預報差異變得不如中強颱風明顯，但還是可看出 hord5 稍微強一些。另外颱風增強期強度低估，消散期高估的現象在此個案也有發現。圖 10c 與 d 於 850 hPa 高度水平結構可見雖然最大風速的量值都一樣在 32-34 m/s 之間，但可見 hord5 的強風區都圍繞在眼牆周圍，但 hord6 的強風區則呈現塊狀、區域也較 hord6 大。與范斯高颱風模擬結果一致，

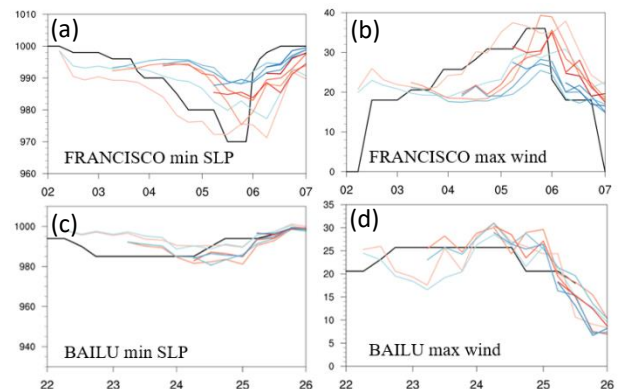


圖 9、范斯高颱風以 0802-0807 00Z 為初始場之(a)預報氣壓(hPa)隨時間變化，(b)10 公尺高風速(m/s)隨時間變化。(c)與(d)同(a)與(b)，但為白鹿颱風以 0822-0826 00Z 為初始場。紅色系表示 hord5，藍色系表示 hord6。

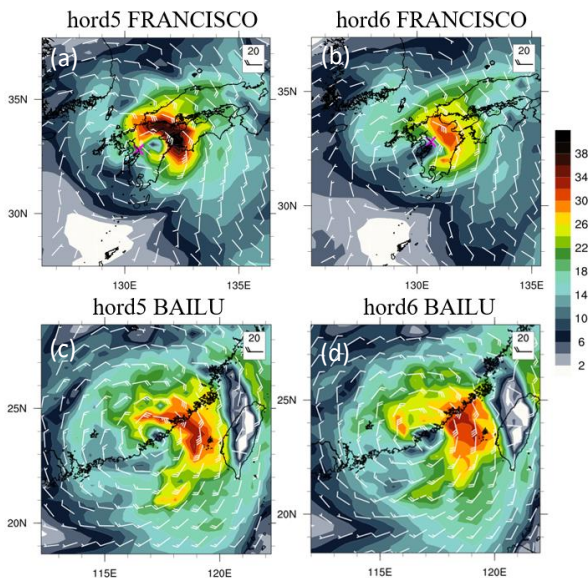


圖 10、(a) hord5 以 080300 為初始時間預報 3 天的 850 hPa 風場(m/s)，(b)同(a)，但為 hord6。(c)與(d)同(a)與(b)，但為白鹿颱風以 082300 為初始時間預報 2 天。

兩實驗颱風暴風半徑並無太大差異。

第六章、結論

本實驗主要目的是針對 FV3GFS 全球模式裡面的兩種水平平流方案進行測試，以改善颱風強度的預報，實驗中使用 C384T 解析度並加上一解析度為 4.4 km 之巢狀網格於台灣附近，來比較 hord5 與 hord6 兩種水平平流方案差異。關於數值不穩定我們認為如果初始場解析度相同則可避免此問題，評估應該是可在作業中解決。

在全球校驗部分，可見兩實驗預報差異顯著，尤其是在風速 bias 部分，hord5 顯著改善 hord6 風速過弱的问题，但風向量的距平相關度與 RMSE 方面則是 hord6 有較好的表現。整體來看 hord6 雖然在距平相關度以及 RMSE 顯著優於 hord5，代表 hord6 是系統性地、穩定地略優於 hord5，但兩者距平相關度量值差距非常小，都僅在小數點後第二位，這僅能透過校驗系統運算得知，至於 hord5 對於颱風風速過弱的修正則是達到可辨識的差距。

在天氣系統的預報表現，對尺度較大的系統，如太平洋副熱帶高壓和大陸冷高壓，其位置、風向等，兩實驗並無太大差異，僅 hord5 風速會稍大。對低壓系統則會有較大的預報差異，包含其氣壓與風速，hord5 都會比較強。初步結論為，hord5 會稍微增加風速，尤其是在風速較大的低壓系統(包含溫帶低壓以及颱風)，而風速較弱的天氣系統如高壓則兩者差異不明顯。氣壓預報方面，低壓增強也是 hord5 較明顯，高壓氣壓則幾乎相同。

降雨方面，hord6 在預報前期約 72 小時之前，較容易有降雨集中的情形，且容易高估降雨量，如西南氣流引起的降雨，集中區域大多位於山區或陸地，較不會往海岸線移動，弱綜觀的午後雷雨也較 hord5 集中且降雨量較大，因此降雨校驗分數 FSS 是 hord5 有較高的得分。對於冬季東北季風南下，北海岸的地形降雨則是 hord6 較能呈現出。96 小時之後則和 72 小時前相反，變成 hord5 降雨較集中，甚至比原先的

hord6 更集中。

颱風路徑預報方面 hord5 與 hord6 幾乎沒有差異，這其實也可間接說明兩實驗對模擬高壓的模擬強度與範圍無明顯差異。強度預報方面，則如同上一段提到的 hord5 確實會增加颱風強度，包含風速與中心氣壓，但颱風的暴風半徑並無太大差異。綜合本研究及目前測試結果，對於較強的颱風，兩實驗的強度差距更明顯，地面風速差異可達 10 m/s，中心氣壓也可差異約 10 hPa。

參考文獻

- GFDL namelist guide, 9-13
- G. Skok and N. Roberts, 2016: Analysis of Fractions Skill Score properties for random precipitation fields and ECMWF forecasts. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 142, 2599-2610.
- Harris, L. M., and S.-J. Lin, 2013: A two-way nested global-regional dynamical core on the cubed-sphere grid. *Mon. Wea. Rev.*, 141, 283-306.
- Lin, S.-J., and R. B. Rood, 1996: Multidimensional flux-form semi-Lagrangian transport schemes. *Mon. Wea. Rev.*, 124, 2046-2070.
- Lin, S. J., 1997: A finite-volume integration method for computing pressure gradient force in general vertical coordinates. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 123, 1749-1762.
- Lin, S. J., and R. B. Rood, 1997: An explicit flux-form semi-Lagrangian shallow-water model on the sphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 123, 2477-2498.
- Lin, S.-J., 2004: A “vertically Lagrangian” finite-volume dynamical core for global models. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 2293-2307.
- M. Mittermaier and N. Roberts, 2010 Intercomparison of Spatial Forecast Verification Methods: Identifying Skillful Spatial Scales Using the Fractions Skill Score. *Wea. Forecasting*, 25, 343-354.