

衛星遙測風場資料同化對颱風模擬之影響

李精進¹ 汪建良¹ 陳萬金²

國防大學理工學院環境資訊及工程學系¹ 大華技術學院電子工程系²

摘要

本研究利用WRF (Weather Research and Forecasting)模式的三維變分方法(3DVAR, Three-Dimensional Variational method), 研究同化QuikSCAT衛星反演近海面10 m風場資料, 對於模式颱風模擬結果的影響。選取2007年聖帕(Sepat)颱風、2008年鳳凰(Fung-Wong)颱風及2009年芭瑪(Parma)颱風等個案進行模擬。在模擬中, 同化QuikSCAT (Quick Scatterometer)風場, 藉以分析同化與未同化風場資料, 對個案颱風之路徑、強度、海平面水氣及可感熱通量、雷達回波等模擬的影響效果。其中, 芭瑪颱風個案中, 亦同化ASCAT (Advanced Scatterometer)風場資料, 以進一步分析同化兩種衛星風場資料對模式模擬之影響。結果顯示, 選取的個案中, 同化QuikSCAT風場後, 在改善路徑模擬方面, 以聖帕颱風最為明顯; 在第一次加入同化資料後的72小時期間內, 其路徑平均誤差有效降低約75 km。而鳳凰颱風模擬中, 雖同化風場資料對模式颱風的路徑誤差修正有限, 但在颱風中心風速、水氣及可感熱通量的模擬, 皆有明顯增強的效果; 而對於後續模擬雷達回波強度也有所改善, 與實際觀測值較為接近。此外, QuikSCAT衛星已於2009年11月因機械問題停止觀測, 所以本研究針對芭瑪颱風個案, 分別同化QuikSCAT、ASCAT風場資料, 其模擬結果顯示, 雖然同化QuikSCAT風場使得颱風中心低層風場較強, 但在路徑誤差、水氣、可感熱通量及雷達回波等比較上, 同化不同風場資料並沒有明顯之差異。未來仍有待進行更多個案進行模擬, 來延續同化衛星風場資料之相關研究與應用。

關鍵字：颱風路徑、颱風強度、WRF模式、衛星遙測資料、資料同化。

一、前言

台灣位於西北太平洋颱風主要的移動路徑上, 根據統計, 平均每年約3~4個颱風侵襲台灣地區。每年因颱風所挾帶的強風、豪雨, 往往造成不幸的人員傷亡與巨額的經濟損失。

由於傳統探空觀測資料網大多數集中在陸地上, 廣大的洋面和偏遠高山地區缺乏完整的氣象觀測資料; 對於全球模式所提供的解析度仍嫌不足, 很顯然地無法提供模式最接近真實大氣狀態的初始場條件, 進而影響到數值模式模擬的結果。尤其, 對於半徑約500 km的颱風系統而言, 以目前常用於區域數值模式初始場之 $1^\circ \times 1^\circ$ 全球模式資料, 是不足以解析颱風結構與強度。因此, 需要更多的觀測資料來源, 例如: 衛星、雷達和投落送等觀測資料, 且利用適切的資料同化方法, 將觀測資料導入模式, 達到調整初始場之目的, 使其更接近實際大氣狀態, 來提升預報的準確度。

Xiao et al. (2007) [1]以2002年露莎(Rusa)颱風為研究個案, 使用都卜勒地基雷達觀測資料, 每3小時同化雷達回波強度與徑向風場的觀測資料, 進行6、12小時的模擬; 其結果顯示, 颱風中心預報位置分別減少5.3 km和3.7 km的誤差。Wu et al. (2007) [2]分別針對2004年4個個案颱風個案進行模擬, 同化投落送DOTSTAR (Dropwindsonde Observations for Typhoon

Surveillance near the Taiwan Region)資料, 並使用不同的模式進行測試; 發現WRF模式搭配使用GFS (Global Forecast System)分析場資料, 在模擬72小時後的平均路徑有效減少14%誤差。Chen (2007) [3]模擬Isidore (2002)颱風分別同化SSM/I (Special Sensor Microwave Imager)和QuikSCAT風場資料, 在此個案的模擬結果顯示, 路徑和中心強度皆獲得改善。綜合上述研究成果, 同化不同的觀測資料, 對於數值模式模擬結果, 都有正面改善之效果。

二、研究方法

(一) 模式與同化資料來源

本研究是利用WRF模式(The Weather Research and Forecasting Model)的三維變分資料同化方法3DVAR(Three-Dimensional Variational method), 加入衛星反演近海面10 m風場資料進行模擬。所同化之資料包含Quick Scatterometer (簡稱QuikSCAT)及Advanced Scatterometer (簡稱ASCAT)之風場資料, 兩者之資料特性分述如下。

(1) QuikSCAT 風場資料

1999年6月由美國太空總署發射升空, 位於地表高度約800 km, 其掃描刈幅約1800 km, 每天可掃描地球將近90%面積。利用搭載在QuikSCAT衛星上的

SeaWinds 散射計發射微波，測量近海面風速、風向，藉由微波被海面波浪散射，再利用所接收到的回波大小和方位角來反演二維近海面風向、風速資訊，選用解析度 25 公里產品。本研究使用之資料下載自 PO.DACC (Physical Oceanography Distributed Active Archive Center)網站[4]。

Chen (2007) [3]針對 QuikSCAT 衛星風場與投落送的觀測值進行校驗，其結果顯示 QuikSCAT 的風速比投落送觀測值大 0.3 m s^{-1} 且風向的平均誤差在 20° 以內，顯示 QuikSCAT 衛星可提供良好的風場資料品質，故本研究不再進行資料校驗。

(2) ASCAT 風場資料

2006 年 10 月由歐洲太空總署發射升空，搭載在 MetOp (Meteorological Operation) 衛星上，是一顆運用在氣象上的繞極軌道衛星，與 QuikSCAT 衛星相同，可提供海面近 10 m 的風向、風速產品，但其單一掃描刈幅範圍僅約 550 km。本文為延續同化衛星風場資料之研究與應用，特別針對 2009 年 9 月芭瑪颱風進行模擬，使用產品解析度仍為 25 km。更多詳細 ASCAT 資料格式說明與介紹及下載方式，可參考 Verhoef, A. and Stoffelen, A. (2010) [5]使用手冊。

(二) 實驗設計

本研究使用 WRF 模式 3.1.1 版，在 WRF 模式設定上，採用雙重巢狀網格(Nested Grid)架構(D01 及 D02)，以 two-way nesting 方式進行模擬；其兩層水平網格解析度分別為 45 km、15 km，網格點數分別為 100×80 及 100×82 ，垂直座標均為 45 層。D01 及 D02 網格涵蓋範圍分別為以西北太平洋及台灣東部海域為主(圖 1)。參數化法設定，邊界層使用 Yonsei University (YSU) scheme；微物理參數化使用 Goddard GCE scheme；積雲參數化使用 Grell-Devenyi ensemble scheme。模式所使用的初始場資料，以美國國家環境預報中心(NCEP, National Centers for Environmental Prediction)每 6 小時的全球分析場資料($1^\circ \times 1^\circ$ 解析度)，作為 WRF 模擬的初始場及邊界條件。

本文使用 WRF 3DVAR 進行資料同化模擬，是先以 NCEP 的分析場導入 WRF 模式，積分至同化的時間點，將模擬結果取出作為同化組的背景場，加入同化觀測資料後，再將新的分析場當作同化組的初始場，進行後續的模擬。詳細之模式同化介紹請參考 Wang et al. (2009) [6]。本文將未同化衛星資料之組別設為控制組(Control run，簡稱 CNTL 組)，而有加入風場資料之組別設定為同化組(Data assimilation，簡稱 DA 組)。在鳳凰颱風實驗組別中，分別進行兩次時間點的同化，以同化時間先後順序，依序設定為 DA1 組與 DA2 組。而芭瑪颱風個案分別同化 QuikSCAT 及 ASCAT 風場資料，實驗組別代號分別設定為 Q-DA 組與 A-DA 組。同化時間的窗區設定，是以進行同化的初始時間前、後一小時內，衛星所反演的風場資料皆當作初始時間進行同化，各 CNTL 組及 DA 組的模擬時間如圖 2，各同化組的衛星反演風場資料如圖 3 所示。

三、模擬結果與分析

(一) 路徑誤差分析

模擬颱風中心的定位方式，是由 D01 範圍取海平面最低中心氣壓值的位置所訂定。為配合 CWB、JMA 每 6 小時之實際觀測資料比對，本研究僅針對模擬之 0000、0600、1200 及 1800 UTC 時，訂定颱風中心位置乙次，各組颱風 CWB 與 JMA 觀測路徑與模擬路徑如圖 4 所示。本研究選用 CWB 官方資料為依據，計算各實驗組每 6 小時的路徑誤差，統計如表 1。其中，鳳凰颱風 DA2 組在同化 QuikSCAT 衛星風場資料後隨即登陸，為避免受地形因素造成颱風中心位置計算上的誤差，故不列入統計。

在颱風中心位置分析中，以聖帕颱風 DA1 組模擬結果為最佳。此組之模擬，是在 CNTL 組模擬第 33 小時後，配合 QuikSCAT 衛星觀測時間，於 2007 年 8 月 14 日 0900 UTC 時同化風場資料。同化後，72 小時模擬期間內的路徑誤差，根據表 1 統計結果顯示，減少約 75 km。

在聖帕颱風之模擬，未進行資料同化前，CNTL 組所模擬的颱風中心位置，雖然落後 CWB 所訂定中心位置，但其路徑移動的趨勢仍屬一致，尚未完全偏離；然而，後續之路徑之所以出現明顯之誤差，由圖 4(a)可以看出，主要是因為模擬颱風較實際颱風提前轉向。在進行風場同化後，DA1 組模擬颱風之移動路徑，明顯地較 CNTL 組在 2007 年 8 月 14 至 16 日之間持續向西前進後，方才轉向西北方向前進；雖然後續與實際登陸位置仍有約 195 km 誤差，但對於路徑修正有明顯改善的效果。

由 2007 年 8 月 14 日至 15 日之間的 500 hPa 高空圖(圖 5)可以看出，太平洋高壓勢力明顯向西延伸，是聖帕颱風在此一期間持續向西南西方前進的原因。由圖 6 比較 CNTL 組及 DA1 組之 2007 年 8 月 14 日三個時間點的 500 hPa 等高線分佈，可以明顯地看出 DA1 組之 5880 GPM 等值線較 CNTL 組，更向西南方伸展。而到了 2007 年 8 月 15 日之後，相對而言，CNTL 組之 5880 GPM 等值線較 DA1 組更為東退(圖略)。這可用來說明，同化衛星風場對於改進聖帕颱風路徑模擬，原因在於改善對於颱風所處環境場之模擬。而由圖 3(a)可以看出，QuikSCAT 風場之涵蓋範圍包含颱風本身，以及其東北方向之廣大洋面，有助於模式有效掌握颱風所處之環境場，也就是颱風之駛流場，進而改善颱風之路徑模擬。

鳳凰颱風的路徑模擬結果如圖 4(b)，CNTL 組與 DA 組的模擬路徑相近，原因在於加入同化資料時，CNTL 組與 CWB 公佈的路徑差異不大，即使加入 QuikSCAT 衛星風場資料後，其修正颱風中心位置的效果有限。在芭瑪颱風 Q-DA 組與 A-DA 組的模擬結果[圖 4(c)、(d)]，亦有相同的情形。

(二) 風速增益量及颱風海平面中心氣壓分析

在風速增益量之分析，因 CNTL 組與 DA 組隨著模擬時間增長而造成兩組模擬結果的颱風中心位置逐漸偏移，導致風速進行相減時，容易出現正、負偶極的現象，故後續分析，取各實驗組模擬颱風中心半徑 100 km 及 250 km 範圍內，在加入同化資料後 12 小時

的期間內，取該區域內網格點上的平均風速，來分析風速的增益量。其中，因聖帕及鳳凰颱風 DA2 組在同化風場資料後 12 小時內，颱風中心隨即登陸，不列入統計外，其餘模擬個案統計結果如表 2。結果顯示，同化 QuikSCAT 風場的組別，在模擬颱風中心 100 km 範圍內，風速均有所增加，三個模擬颱風個案中，增加百分比以鳳凰颱風為最大，增加 1.1 m s^{-1} 的平均風速，增益量約 17%。以芭瑪颱風而言，同化 QuikSCAT 風場之增益量約為 15%，但同化 ASCAT 風場則幾乎沒有改變，造成此差異可能與同化時間點已接近陸地，且 ASCAT 風場涵蓋範圍較小有關。

若將風速增益量計算範圍擴大至颱風半徑 250 km 之內時，可以看出增益量明顯降低，聖帕颱風個案甚至出現負值，這顯示同化衛星近海面風場，對於增加颱風內部環流較有幫助，而較外圍之環流則助益較小。如圖 3(f)所示，由於芭瑪颱風半徑 250 km 之內，已包含許多陸地，在可資料同化之衛星反演風場減少的情況下，其風速增益量由 15%驟降至 0.3%。

在海平面中心氣壓分析，除了鳳凰颱風的模擬結果 CNTL 組、DA 組的模擬結果與 CWB 公佈之中心氣壓值數據(圖 7)較為接近外；聖帕颱風和芭瑪颱風海平面中心氣壓值模擬結果(圖略)，雖趨勢變化能有效掌握，但其颱風的強度仍嫌不足，顯示在加入衛星風場資料之後，並無法有效改善颱風中心氣壓值，此模擬結果和黃與王(2008) [7]同化 QuikSCAT 衛星風場的研究結果相同。

(三) 水氣通量及可感熱通量分析

由 Emanuel et al (1994) [8]所提出的 WISHE (Wind Induced Surface Heat Exchange)理論，在颱風形成或發展的期間，海氣交互作用常扮演著重要的因素，因大氣中的潛熱釋放是藉由地表水氣蒸發作用所引起，而水氣蒸發作用的速度往往取決於風速的大小。由風速增益量分析結果討論得知，在同化 QuikSCAT 風場後，以鳳凰颱風個案增益量最為明顯，故進一步分析實驗組的地表向上水氣、可感熱通量之增益量，以探討有利於增強颱風環流結構的因素。而芭瑪颱風的分析，則用以比較同化 QuikSCAT 及 ASCAT 風場的異同。

在鳳凰颱風模擬中，由表 3可以看出，颱風中心半徑 100 km 內，網格點之平均水氣及可感熱通量，DA1 組較 CNTL 組分別增益 11.1%及 65.0%；但延伸計算範圍至半徑 250 km 後，則發現 DA1 組反較 CNTL 組減少。這與之前比較風速增益量時之特性相符，也就是在 100 至 250 km 間，風速在同化後是減少的，因而造成兩者通量均減少。這或許可說明為何同化近海面風場，無法達到增強颱風之原因。另外，由同化風場資料 63 小時後水氣通量及可感熱通量之分佈(圖 8)顯示，在颱風中心周圍水氣通量大於 0.4 g m^{-2} 、可感熱通量大於 200 W m^{-2} 的範圍，DA1 組均比 CNTL 組為大。顯示對於水氣及可感熱通量之增益，效應可延伸至後續之模擬。

芭瑪颱風 CNTL 組、Q-DA 組、A-DA 組的水氣通量與可感熱通量模擬結果相似(圖略)。雖然由風速增量分析得知，Q-DA 組的風速比 CNTL 組增加約 15

%，但可能如同一節中所討論，由於颱風已接近菲律賓陸地，使得同化效果有所限制，進而影響地表水氣及可感熱通量之增強效果。

(四) 雷達回波強度分析

在鳳凰颱風個案中，由 7 月 28 日 0000 UTC 雷達回波及垂直速度剖面(圖 9)，可以發現 DA1 組具有較強之回波及較大的垂直速度場。綜合上述結果分析，雖然同化 QuikSCAT 資料只有包含近海面 10 m 的風場資訊，但隨著模式對時間的積分，在模擬鳳凰颱風個案中，因水平風速的增強，使得同化組具有較大的水氣通量及垂直速度，進而增強降水回波，較為接近觀測結果。

2009 年芭瑪颱風 10 月 2 日 1400 ~ 1700 UTC 模擬結果，在 10 月 2 日 1300 UTC 加入 ASCAT 風場資料後 1 ~ 4 小時，CNTL 組、Q-DA 組和 A-DA 組的模擬結果相互比較後，發現三組之間的模擬結果相似(圖略)，其原因與水氣通量及可感熱通量分析相同，在此不再贅述。

四、結論

綜合研判在模擬颱風個案中，比較 CNTL 組與 DA 組之間的路徑誤差，除聖帕颱風個案的路徑模擬，受惠於同化衛星風場對颱風環境駛流場模擬的修正，而有效地降低約 75 km 的路徑誤差外，其餘個案皆未有明顯的改善。鳳凰颱風、芭瑪颱風個案路徑模擬未能改善的原因，為加入同化資料時，原本 CNTL 組的模擬結果與 CWB 路徑就相當接近，即使在加入同化資料後，DA 組的模擬結果改善有限。但由分析結果得知，同化衛星近海面風場資料對於模擬路徑的改善，雖未必能達到強烈之正面貢獻，但也不至於使路徑模擬的結果產生太大的負面影響。因此，同化衛星風場仍值得未來繼續發展之方向。

在聖帕颱風模擬個案中，颱風的風速增益量於中心半徑 100 km 內均為正值，而 250 km 之內則增益量減少，甚至出現負值。這顯示，同化衛星反演低層風場有助增強颱風內部環流，而外圍之環流則助益較小。在鳳凰颱風個案模擬因半徑 100 km 內風速增量增加，進一步分析地表水氣及可感熱通量分析，可得知底層風速的增強，造成兩者明顯增加；並進一步使得雷達回波的模擬表現，更接近實際狀況。但在半徑 250 km 內計算水氣及可感熱通量，則有減少的現象，這有待進一步的研究分析。

2009 年芭瑪颱風的模擬結果中，雖然看到同化 QuikSCAT 與 ASCAT 風場在風速增益量的差異，但可能由於颱風已逐漸接近陸地，使得可供同化之海面風場資料有限，導致兩者之路徑誤差、海平面垂直水氣、可感熱通量及雷達回波等，與 CNTL 組沒有明顯之差異。若要得到對於同化這兩種衛星風場的差異，仍有待更多個案平行模擬的比較。

致謝

本文感謝中央氣象局洪景山博士在模式執行及分析上，以及中央大學莊嘉欣小姐在資料同化技術上

的協助。本研究在國科會NSC 98-2625-M-233-002-專案計畫經費支援下完成。

參考文獻

- [1] Xiao, Q., and Sun, J., "Multiple-Radar Data Assimilation and Short-Range Quantitative Precipitation Forecasting of a Squall Line Observed during IHOP_2002," *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 135, Issue 10, pp. 3381-3404, 2007.
- [2] Wu, C. C., Chou, K. H., Lin, P.-H., Aberson, S. D., Peng, M. S., and Nakazawa, T., "The Impact of Dropwindsonde Data on Typhoon Track Forecasts in DOTSTAR," *Wea. Forecasting*, Vol. 22, Issue 6, pp. 1157-1176, 2007.
- [3] Chen, S. H., "The Impact of Assimilation SSM/I and QuikSCAT Satellite Winds on Hurricane Isidore Simulations," *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 135, Issue 2, pp. 549-566, 2007.
- [4] ftp://podaac.jpl.nasa.gov/pub/ocean_wind/quikscat/
- [5] Verhoef, A., and Stoffelen, A., ASCAT Wind Product User Manual, Ocean and Sea Ice SAF Technical Note SAF/OSI/CDOP/KNMI/TEC/MA/126, Ver. 1.8, pp. 1-23, Jan, 2010.
- [6] Wang, W., Bruyere, C., Duda, M., Dudhia, J., Gill, D., Lin, H. C., Michalakes, J., and Rizvi, S., and Zhang, X., User's Guide for Advanced Research WRF (ARW) Modeling System Version 3, NCAR TECHNICAL NOTE, 2009.
- [7] 黃清勇、王潔如, "衛星遙測資料三維變分同化對於颱風模擬的影響", 大氣科學, 第 36 期, 第 4 號, 第 249-274 頁, 2008。
- [8] Emanuel, K. A., Neelin, J. D., and Bretherton, C. S., "On Large-Scale Circulation in Convecting Atmospheres," *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol. 120, Issue 591, pp. 1111-1143, 1994.

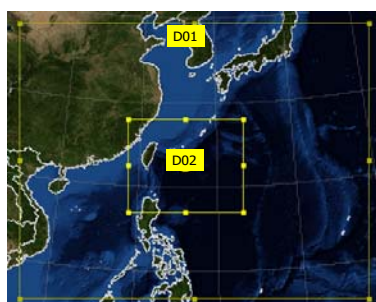


圖1 巢狀網格範圍示意圖。

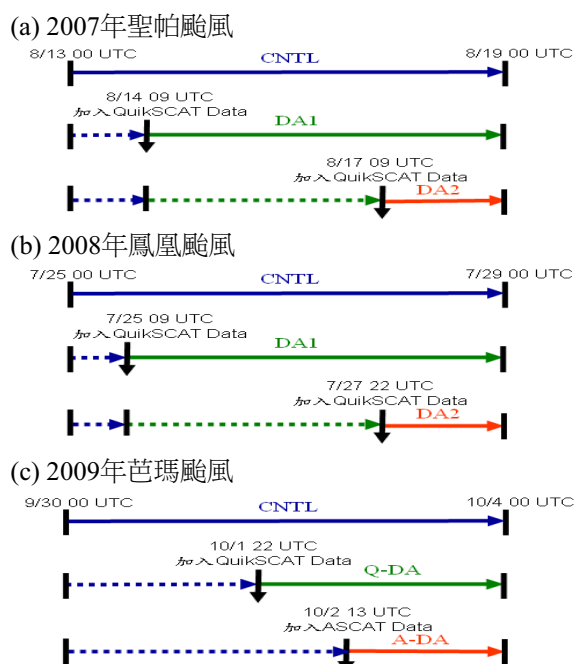


圖2 各颱風模擬時間序列圖。

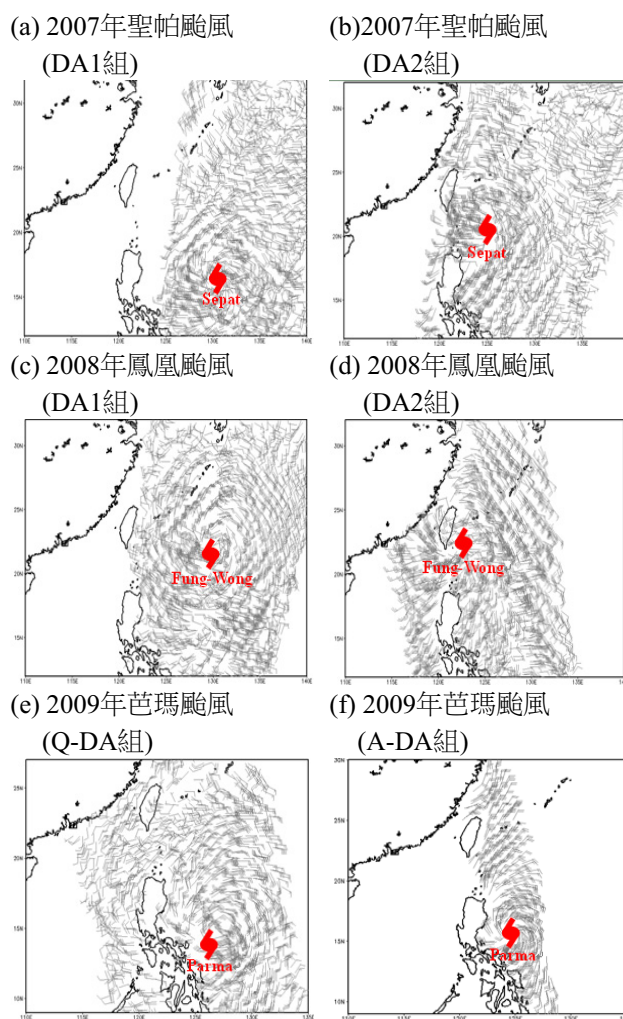


圖3 (a)~(e)分別為各模擬颱風同化組之QuikSCAT衛星反演風場資料示意圖；(f)為ASCAT反演風場。風速單位： ms^{-1} ，風羽長桿表示 5 ms^{-1} 。

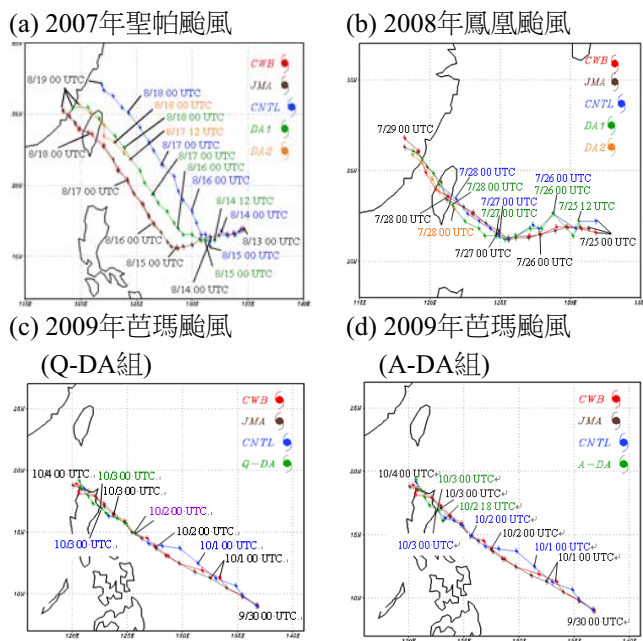


圖4 各實驗組模擬颱風之路徑圖。

表1 各實驗組模擬平均路徑誤差。

個案	組別	平均誤差 (km)
2007 年聖帕颱風	CNTL	273.5
	DA1	198.6
	DA2	194.1
2008 年鳳凰颱風	CNTL	48.2
	DA1	56.3
2009 年芭瑪颱風	CNTL	74.3
	Q-DA	86.9
	A-DA	126.8

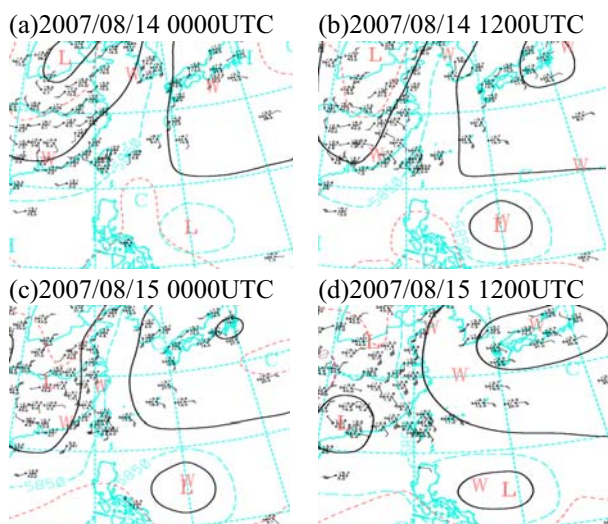


圖5 2007年8月14日0000、1200 UTC及15日0000、1200 UTC 500 hPa高空圖。圖中，菲律賓東方海面之低壓即為聖帕颱風。(資料來源：中央氣象局。)

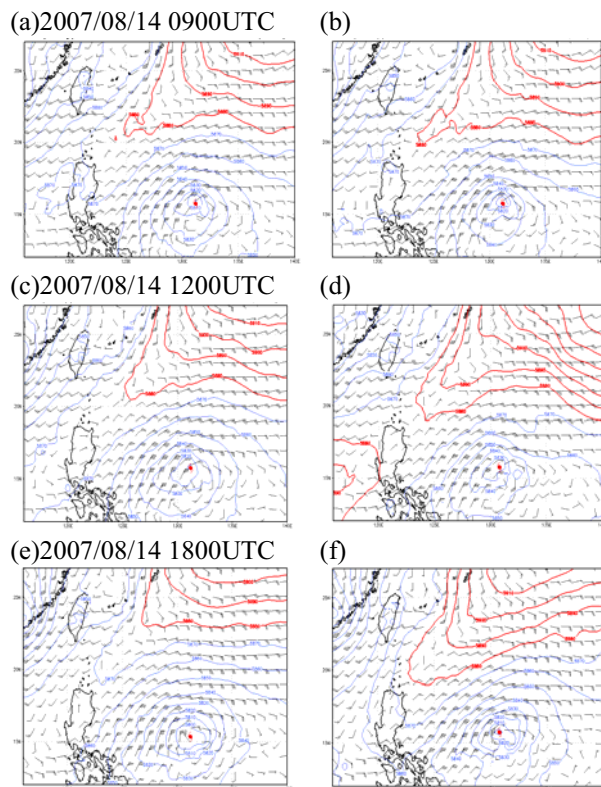


圖6 (a)、(c)及(e)分別為模擬2007年聖帕颱風8月14日0900、1200及1800 UTC 500 hPa高空圖CNTL組模擬結果；(b)、(d)及(f)時間相同，但為DA1組。等值線單位：GPM；風速單位： m s^{-1} ，風羽長桿表示 5 m s^{-1} 。

表2 各組組別在颱風中心半徑100、250 km內，網格點之平均近海面10 m風速，以同化資料時間點後0至12小時，每1小時資料累積計算平均。

個案	組別	半徑 100 km		半徑 250 km	
		風速 (m s^{-1})	增益量 (%)	風速 (m s^{-1})	增益量 (%)
聖帕颱風	CNTL	15.14	5.7	15.56	-7.7
	DA1	16.00		14.36	
鳳凰颱風	CNTL	7.08	17.1	10.89	1.5
	DA1	8.29		11.06	
芭瑪颱風	CNTL	21.05	15.2	20.83	0.3
	Q-DA	24.25		20.89	
	CNTL	20.77	< 0.01	18.85	-0.1
	A-DA	20.77		18.83	

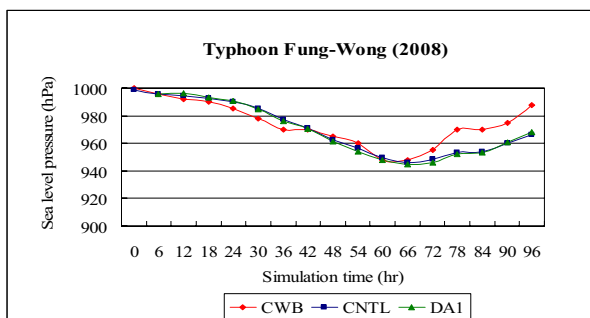


圖7 模擬2008年鳳凰颱風CNTL組、DA1組海平面中心氣壓時序圖。

表3 鳳凰颱風中心半徑100、250 km內，網格點之平均水氣及可感熱通量，以同化資料時間點後0至12小時，每1小時資料累積計算平均。

通量	組別	半徑 100 km	半徑 250 km
水氣通量 (g m^{-2})	CNTL	0.9	1.4
	DA1	1.0	1.2
	增益量 (%)	11.1	-14.3
可感熱通量 (W m^{-2})	CNTL	135.2	280.0
	DA1	223.1	246.2
	增益量 (%)	65.0	-12.1

(a) 2008/07/28 0000 UTC

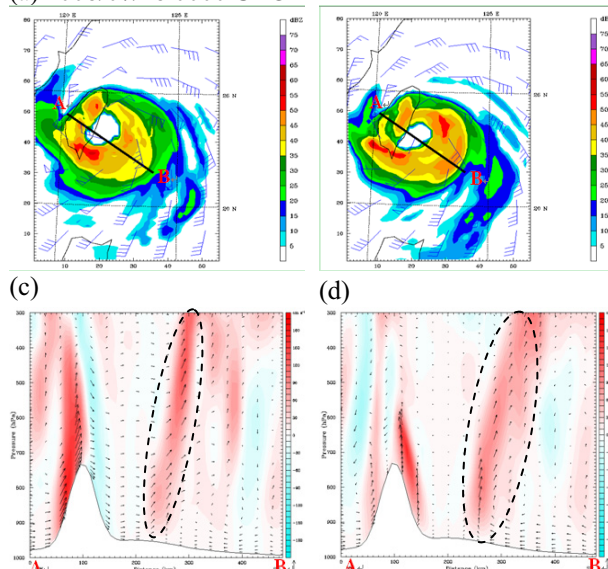
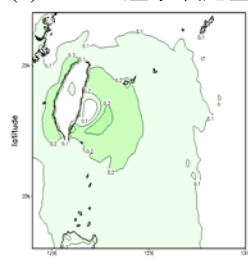
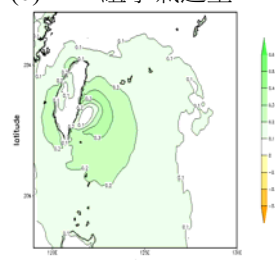


圖9 (a)、(b)分別為2008年鳳凰颱風CNTL組、DA1組模擬7月28日0000 UTC雷達回波圖，黑色A-B切線之剖面圖分別如(c)、(d)所示。(c)、(d)圖中，色階代表垂直速度場，單位： cm s^{-1} ，向量部分為風場方向及大小。縱座標為氣壓，單位：hPa；橫座標為距離，單位：km。

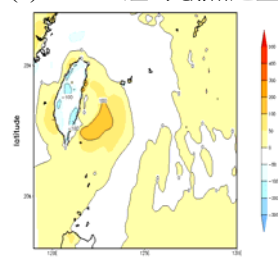
(a) CNTL 組水氣通量



(b) DA1組水氣通量



(c) CNTL 組可感熱通量



(d) DA1組可感熱通量

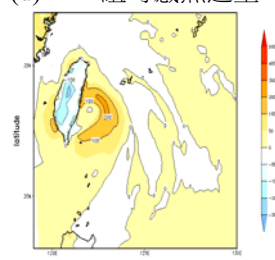


圖8 (a)、(c)分別為模擬2008年鳳凰颱風7月28日0000 UTC CNTL組地表向上水氣通量(單位： g m^{-2})及可感熱通量(單位： W m^{-2})；(b)及(d)分別與(a)、(c)相同，但為DA1組。

(b)