

國立臺灣大學理學院大氣科學研究所

碩士論文

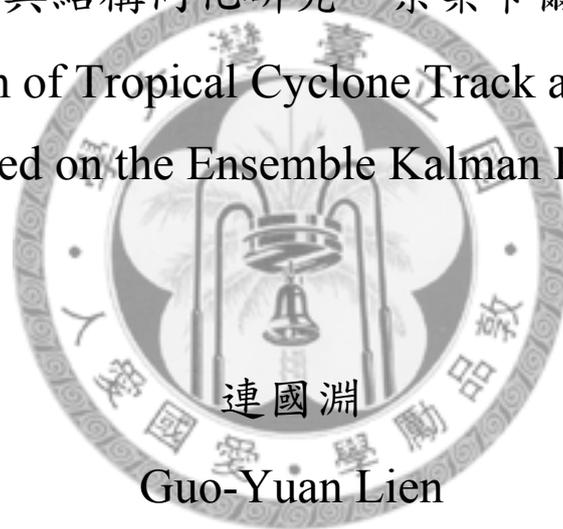
Department of Atmospheric Sciences

College of Science

National Taiwan University

Master Thesis

颱風路徑與結構同化研究—系集卡爾曼濾波器
Assimilation of Tropical Cyclone Track and Structure
Based on the Ensemble Kalman Filter



Guo-Yuan Lien

指導教授： 吳俊傑 博士

Advisor: Chun-Chieh Wu, Ph.D.

中華民國 98 年 6 月

June, 2009

國立臺灣大學碩士學位論文 口試委員會審定書

本論文係 連國淵 君 (學號 R96229010) 在國立臺灣大學大氣科學學系、所完成之碩士學位論文，於民國 98 年 6 月 17 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

吳俊傑

(簽名)

(指導教授)

林沛緯

鄭明典

曾忠一

林+子雄

楊舒芝

系主任、所長

吳俊傑

(簽名)

摘要

近 30 年來，颱風的路徑預報有穩定的進展，但要在模式中建構出具有正確中心位置、移速、以及合理渦旋結構的颱風初始場，一直是颱風數值模擬的一大挑戰，渦旋植入、虛擬渦旋資料同化、或是渦旋重新移位等方法皆設計用以改善颱風的初始化。隨著 EnKF 的發展，以 EnKF 直接同化渦旋位置的方法亦被提出，透過一計算渦旋中心位置的觀測算符，可使模式中的渦旋保持在觀測路徑上。

在本研究中，我們進一步定義更多與颱風路徑和結構相關的觀測算符，包括中心位置、渦旋移速與海表面軸對稱風速等。前二者的觀測量可使用作業單位依據衛星資料所做的颱風定位，軸對稱風速剖面則可由經驗公式擬合衛星與如 DOTSTAR 或 T-PARC 的飛機觀測資料而來。

我們在配置 EnKF 資料同化系統的 WRF 模式中進行了颱風渦旋初始化和快速更新週期同化分析等兩類實驗。在初始化實驗中僅同化颱風特殊觀測量，未採用任何現有的渦旋植入方案。颱風的路徑與軸對稱平均風速剖面可在初始化時段末期與給定的觀測資料相符，並且在僅同化最低層風速剖面的狀況下，整個垂直結構可被完善建立。本方法最大的優點在於 EnKF 得到之分析場平衡性佳且相容於使用的模式，因此後續預報的颱風強度得以穩定維持，不會在預報初期有劇烈調整的狀況。而在快速更新週期同化分析實驗中，除了同化颱風特殊觀測量外，常態性探空儀與投落送資料也被一併同化，以進行數天的長時段模擬分析。海表面軸對稱風速結構主要由 2008 年 T-PARC 實驗中 C-130 飛機連續 4 次穿越颱風中心偵察任務的資料而來，此資料對颱風軸對稱風速同化有相當大的助益。實驗結果顯示，包括眼牆置換的過程在內，颱風的路徑與結構的演變可被完善掌握。

由此實驗結果，我們認為這個新概念與技術提供了一個颱風初始化的有效方法，並有潛力用以設計探討颱風結構的高解析度實驗，以及改善作業颱風模式的路徑與強度預報。本研究已成功運用此方法，有效同化 2008 年 T-PARC 四架飛機所聯合觀測之寶貴颱風資料，可為颱風動力探討帶來新的突破契機。

關鍵詞：颱風初始化、資料同化、系集卡爾曼濾波器、T-PARC

Abstract

Over the past 30 years, track forecasts of tropical cyclones (TC) have been in steady progress, but initializing a realistic vortex in the correct location and with the correct storm motion and structure remains a challenging task. Some techniques, including vortex bogusing, bogus data assimilation, and relocation, have been designed to improve the TC initialization. With the progress of ensemble Kalman filter (EnKF), assimilating vortex position based on the EnKF given an “observation operator” that computes the vortex position has also demonstrated capability in keeping a vortex along the observed track.

In this study, some new and effective observation operators related to the TC track and structure are proposed, including center position, velocity of storm motion, and sea surface axisymmetric wind structure. The observational quantities of first two parameters can be available from operational centers mainly based on the satellite analysis, and the radial wind profile can be evaluated through curve fitting using empirical formula, along with the aircraft surveillance data such as from DOTSTAR and T-PARC.

By assimilating these parameters based on the EnKF, we carry out two types of experiments in high-resolution WRF model: one for TC initialization, and the other for update cycle analysis. In initialization experiments, only special parameters for TCs are assimilated in a 24-hour period, without any extant bogus scheme. The TC track and axisymmetric wind profile well follow the specified observation data at final time of the initialization period. The overall vertical structure can be suitably constructed by assimilating only one-level wind profile. Moreover, one important benefit of this method is that almost no subsequent adjustment follows, indicating that the initial condition for forecast simulation after initialization period is dynamically balanced, as well as model-compatible. In update cycle experiments, both special parameters for TCs and conventional radiosonde and dropwindsonde data available from GTS are continuously assimilated, in order to perform an update cycle analysis of several days. The sea surface axisymmetric wind structure is determined from 4 continuous reconnaissance flights by C-130 aircraft during T-PARC in 2008. The result shows that the track and structure evolution of TCs, including the eyewall replacement cycle, can be captured in this simulation, indicating the usefulness of observations from reconnaissance missions in this method.

Our results suggest that this new technique provides an effective means of improving TC initialization and has good potential to help conducting some high-resolution numerical experiments to better understand the dynamics of TC structure, and to improve the operational TC model forecast.

Key words: tropical cyclone initialization, data assimilation, ensemble Kalman filter, T-PARC

目 錄

致謝.....	i
摘要.....	ii
Abstract.....	iii
目錄.....	iv
圖表目錄.....	vii
第一章 前言.....	1
1.1 颱風初始化方法回顧.....	1
1.1.1 渦旋植入與重新移位.....	2
1.1.2 虛擬渦旋資料同化.....	2
1.1.3 同化渦旋中心位置.....	3
1.2 研究動機與目的.....	4
第二章 研究工具與方法.....	6
2.1 動力模式簡介.....	6
2.2 系集卡爾曼濾波器.....	6
2.2.1 卡爾曼濾波器與擴張卡爾曼濾波器.....	7
2.2.2 系集與樣本協方差矩陣.....	9
2.2.3 分析與預報方程.....	10
2.2.4 系集平方根濾波器.....	10
2.2.5 協方差擴張.....	11
2.2.6 協方差局地化.....	12
2.2.7 應用於中尺度區域模式.....	13
2.2.7.1 狀態變數.....	13
2.2.7.2 初始系集產生方式.....	13
2.2.7.3 擾動側邊界條件.....	14
2.2.7.4 巢狀網格.....	14
2.3 描述颱風渦旋的特殊觀測量.....	14
2.3.1 中心位置.....	15
2.3.2 移動速度.....	16

2.3.3 海表面軸對稱風速結構.....	17
2.3.3.1 颱風軸對稱風速結構經驗公式.....	17
2.3.3.2 觀測資料使用方式.....	20
第三章 颱風渦旋初始化實驗.....	22
3.1 模式設定.....	22
3.2 觀測資料與實驗設計.....	23
3.3 初始化時段.....	24
3.3.1 同化路徑與軸對稱風速結構的結果 (TK-MS)	24
3.3.2 不同化任何資料的結果 (NONE)	26
3.3.3 僅同化路徑的結果 (TK)	26
3.3.4 颱風垂直結構的建立.....	27
3.4 預報表現.....	27
3.5 敏感度測試.....	28
3.5.1 模式解析度.....	28
3.5.2 系集規模.....	29
3.5.3 協方差擴張.....	30
3.6 討論.....	31
第四章 快速更新週期同化分析實驗.....	34
4.1 模式設定.....	34
4.2 觀測資料與實驗設計.....	35
4.2.1 例行性無線電探空儀.....	35
4.2.2 投落送.....	35
4.2.3 颱風路徑與軸對稱風速結構.....	36
4.2.4 實驗設計.....	37
4.3 同化分析時段.....	38
4.4 各組實驗的預報表現.....	39
4.4.1 TK-MS-TP-ALL 實驗的颱風路徑與結構預報.....	39
4.4.2 額外飛機觀測資料對同化路徑與軸對稱風速結構實驗的影響.....	40
4.4.3 額外飛機觀測資料對僅同化路徑實驗的影響.....	41

4.5 討論.....	41
第五章 總結.....	43
5.1 結論.....	43
5.2 未來展望.....	44
附錄 A 本研究的 EnKF 執行步驟.....	46
附錄 B 模式的垂直層設定與海表面風求取方式.....	47
參考文獻.....	48
附表.....	52
附圖.....	55



圖表目錄

表 1	應用 WRF 模式上的 EnKF 資料同化系統之狀態變數列表。.....	52
表 2	本研究定義之三種描述颱風渦旋的特殊觀測量。.....	52
表 3	鳳凰颱風初始化實驗的各組實驗設計。.....	53
表 4	以同化颱風特殊觀測量做颱風渦旋初始化與傳統渦旋植入方案的比較。.....	53
表 5	辛樂克颱風同化分析時段內可用的觀測資料數目。C-130 的內核資料指距離 颱風中心 80 公里內的投落送資料，其他資料指 80 公里外的投落送資料。...53	
表 6	辛樂克颱風同化分析時段內的 9 架次飛行觀測任務概況。.....	54
表 7	辛樂克颱風快速更新週期同化分析實驗的各組實驗設計。.....	54
圖 1	資料同化更新週期流程示意圖。.....	55
圖 2	Willoughby 片段連續剖面公式的示意圖以及觀測資料擬合範例。(a) 上圖粗 線 V_i 為內部風速曲線 (最大風速半徑以內)， V_o 為外部風速曲線 (最大 風速半徑以外)，兩區域交接處以下圖之權重函數 w 平滑化，最後所得風速 剖面為上圖著色區。(b) 著色區為 Diana 颶風在 1984 年 9 月 11 日的觀測風速 剖面，粗線為公式擬合結果，其中外部風速曲線採雙指數遞減疊合。(取自 Willoughby et al. 2006, Fig. 1、Fig. 2)	55
圖 3	鳳凰颱風初始化實驗的模式範圍設定。總共 2 層網格，其中最內層網格會追 隨颱風渦旋中心移動，圖中顯示了起始時間 (7 月 25 日 21 時) 和結束時間 (7 月 26 日 12 時) 的位置。.....	56
圖 4	鳳凰颱風初始化實驗的時間流程。.....	56
圖 5	鳳凰颱風在 2008 年 7 月 26 日 12 時由觀測資料決定出來的海表面軸對稱風速 曲線。圖中綠色倒三角型標記為 DOTSTAR 任務之投落送測得的海表面風速， 橘色正方形標記為 JTWC 的 8、10 級風暴風半徑估計，淺紫色正方形標記為 JTWC 的近中心最大風速估計，紅色粗線為 Willoughby 片段連續剖面公式， 即為實際同化至模式中的風速曲線。.....	57

- 圖 6 在 2008 年 7 月 26 日 12 時執行的 DOTSTAR 偵察觀測任務飛行路線與，疊加上當時的低軌道衛星影像。黑色實心圓圈為投落送投擲地點，風標為投落送測得的 925 hPa 高度風（單位：knots）。.....57
- 圖 7 鳳凰颱風 TK-MS 實驗的系集路徑。灰色粗線為觀測颱風路徑，路徑上時間標記的前 2 位數字為日期，後 2 位數字為小時。彩色粗線為系集平均路徑，細線為每個系集成員的路徑，依颱風中心最低海平面氣壓以不同顏色顯示（如圖例）。.....58
- 圖 8 鳳凰颱風 TK-MS 實驗中海表面風場與軸對稱平均風速結構的變化。上、中、下圖各為 7 月 25 日 15 時、26 日 0 時、26 日 12 時。(a) 皆為系集平均。色階為海表面風速量值（單位：m/s），等值線為海平面氣壓（單位：hPa），黑色粗線為初始化時段起始時間至當時的觀測路徑（同化至模式中的資料），藍色粗線為同一時段的模式颱風路徑。(b) 黑色粗線為觀測的颱風海表面軸對稱風速剖面（同化至模式的資料），紅色粗線為模式系集平均的海表面軸對稱風速剖面，灰色細線為個別系集成員的風速剖面（單位：m/s）。.....59
- 圖 9 鳳凰颱風 TK-MS 實驗中海表面軸對稱風速和中心最低海平面氣壓隨時間的演變。(a) 色階為系集平均的海表面環狀平均切向風速（單位：m/s）。(b) 紅色粗線為系集平均颱風中心海平面氣壓，灰色細線為個別系集成員的中心氣壓（單位：hPa）。.....60
- 圖 10 鳳凰颱風 TK-MS 實驗 (a) 颱風中心位置（單位：km）與 (b) 軸對稱風速徑向剖面（單位：m/s）的平均誤差與系集散布隨時間的演變。細線為系集平均和同化觀測資料的差值，粗線為系集成員間的標準差，其中實線表示預報系集的結果，虛線表示分析系集的結果。粗點線為觀測誤差。（詳細定義請參考內文中 (a) (39)、(40) 式與 (b) (41)、(42) 式。）.....60
- 圖 11 Chen et al. (2007) 在二維正壓模式中同化渦旋中心位置的表現。細線為颱風中心位置的平均誤差，粗線為系集散布（單位：km）。其中虛線表示預報系集的結果，實線表示分析系集的結果（實線、虛線意義與圖 10 相反）。（取自 Chen et al. 2007, Fig. 10(b)）.....61
- 圖 12 同圖 7，但為鳳凰颱風 NONE 實驗。.....61
- 圖 13 同圖 8，但為鳳凰颱風 NONE 實驗。.....62

圖 14	同圖 9，但為鳳凰颱風 NONE 實驗。.....	63
圖 15	同圖 10，但為鳳凰颱風 NONE 實驗，並少了預報系集（原圖虛線）的結果。	63
圖 16	同圖 8，但為鳳凰颱風 TK 實驗。.....	64
圖 17	同圖 9，但為鳳凰颱風 TK 實驗。.....	65
圖 18	同圖 10，但為鳳凰颱風 TK 實驗。.....	65
圖 19	鳳凰颱風 (a) TK-MS、(b) TK、(c) NONE 實驗初始化時段結束時（2008 年 7 月 26 日 12 時）通過颱風中心的東西方向垂直剖面結構。色階為水平風速（單位：m/s），等值線綠色實線為位渦（單位：PVU），藍色虛線為位溫（單位：K），黑色箭頭為垂直環流向量。.....	66
圖 20	鳳凰颱風 TK-MS 實驗的系集路徑預報。灰色粗線為觀測颱風路徑，路徑上時間標記的前 2 位數字為日期，後 2 位數字為小時。彩色粗線為系集平均路徑，細線為每個系集成員的路徑，依颱風中心最低海平面氣壓以不同顏色顯示（如圖例）。紅色叉號為預報起始時間的系集平均颱風中心位置。.....	67
圖 21	鳳凰颱風 TK-MS 實驗的系集強度預報。(a) 颱風中心最低海平面氣壓。綠線為模式預報結果，紅線為中央氣象局給定的觀測值。(b) 颱風近中心最大風速。綠色實線為模式中出現的最大風速，綠色虛線為最大軸對稱平均切向風速，皆取模式最低層（海表面）資料，紅線為中央氣象局給定的觀測值。..	67
圖 22	同圖 8，但為鳳凰颱風 LOW 實驗。.....	68
圖 23	同圖 10，但為鳳凰颱風 LOW 實驗。.....	68
圖 24	同圖 8，但為鳳凰颱風 HIGH 實驗。.....	69
圖 25	同圖 10，但為鳳凰颱風 HIGH 實驗。.....	69
圖 26	同圖 8，但為鳳凰颱風 SMALL 實驗。.....	70
圖 27	同圖 10，但為鳳凰颱風 SMALL 實驗。.....	70
圖 28	同圖 8，但為鳳凰颱風 BIG 實驗。.....	71

圖 29	同圖 10，但為鳳凰颱風 BIG 實驗。.....	71
圖 30	同圖 8，但為鳳凰颱風 INFLA-0.5 實驗。.....	72
圖 31	同圖 10，但為鳳凰颱風 INFLA-0.5 實驗。.....	72
圖 32	同圖 8，但為鳳凰颱風 INFLA-0.95 實驗。.....	73
圖 33	同圖 10，但為鳳凰颱風 INFLA-0.95 實驗。.....	73
圖 34	辛樂克颱風同化分析實驗的模式範圍設定。總共 3 層網格，其中最內層網格會追隨颱風渦旋中心移動，圖中顯示了起始時間（9 月 9 日 3 時）和結束時間（9 月 13 日 3 時）的位置。.....	74
圖 35	辛樂克颱風同化分析實驗的時間流程。.....	74
圖 36	辛樂克颱風同化分析時段內常態性探空與投落送資料的空間分布。紅色圓圈為常態性探空儀觀測位置，帶有底色的標記是投落送觀測位置。各飛機的代表色見圖例，其中 C130 飛機投擲的投落送分為兩種：「C130 outer」代表位於颱風中心 80 公里外的投落送，「C130 inner」代表位於颱風中心 80 公里內的投落送。同一種底色不同標記代表不同的飛行架次。.....	75
圖 37	由美軍 C-130 飛機穿越偵察與 DOTSTAR 之投落送決定出來的辛樂克颱風海表面軸對稱風速結構。左欄 (a)、(c)、(e)、(g) 為 C-130 連續 4 天偵察任務測得的風速剖面，黃色細線為飛行高度（700 hPa）風速，橘色細線為機載 SFMR 測得的海表面風速，紅色粗線為同化至模式中的風速曲線，綠色倒三角型標記為 DOTSTAR 任務之投落送測得的海表面風速，橘色正方形標記為 JTWC 的 8、10、12 級風暴風半徑估計，淺紫色正方形標記為 JTWC 的近中心最大風速估計。右欄 (b)、(d)、(f)、(h) 為最接近 C-130 觀測時間的低軌道衛星影像，疊加上 C-130 與 DOTSTAR 偵察任務的飛行路線，黑色實心圓圈為 DOTSTAR 的投落送投擲地點，風標為投落送測得的 925 hPa 高度風（單位：knots）。.....	76
圖 38	辛樂克颱風 TK-MS-TP-ALL 實驗的系集路徑。灰色粗線為觀測颱風路徑，路徑上時間標記的前 2 位數字為日期，後 2 位數字為小時。彩色粗線為系集平均路徑，細線為每個系集成員的路徑，依颱風中心最低海平面氣壓以不同顏色顯示（如圖例）。.....	77

- 圖 39 辛樂克颱風 TK-MS-TP-ALL 實驗中海表面風速與海平面氣壓的演變，各小圖的時間如左上角所示。色階為海表面風速量值（單位：m/s），等值線為海平面氣壓（單位：hPa）。.....78
- 圖 40 同圖 39，但為前 30 分鐘累積降雨量（單位：mm）。.....79
- 圖 41 辛樂克颱風 TK-MS-TP-ALL 實驗中 9 月 11 日 5 時的 (a) 模式最大回波值（單位：dBZ）與 (b) 同一時間低軌道衛星影像的比較。.....80
- 圖 42 辛樂克颱風 TK-MS-TP-ALL 實驗中海表面軸對稱風速、軸對稱 30 分鐘降雨量和中心最低海平面氣壓隨時間的演變。(a) 色階為系集平均的海表面環狀平均切向風速（單位：m/s）。(b) 色階為系集平均的環狀平均 30 分鐘降雨量（單位：mm）。(c) 紅色粗線為系集平均颱風中心海平面氣壓，灰色細線為個別系集成員的中心氣壓（單位：hPa）。.....80
- 圖 43 辛樂克颱風 TK-MS、TK-MS-TP-OUT 與 TK-MS-TP-ALL 實驗 (a) 颱風中心位置（單位：km）與 (b) 軸對稱風速徑向剖面（單位：m/s）的平均誤差與系集散布隨時間的演變。紅色線為 TK-MS 實驗，藍色線為 TK-MS-TP-OUT 實驗，綠色線為 TK-MS-TP-ALL 實驗。細線為系集平均和同化觀測資料的差值，粗線為系集成員間的標準差，皆取預報系集的結果。粗點線為同化入模式中的觀測資料。（詳細定義請參考內文中 (a) (39)、(40) 式與 (b) (41)、(42) 式。）.....81
- 圖 44 辛樂克颱風 TK-MS-TP-ALL 實驗以 9 月 10 日 3 時為預報起始時間的預報 (TK-MS-TP-ALL_1003)。紅色橫向分隔線代表預報起始時間，在此以前皆顯示分析實驗結果，以後皆顯示預報實驗結果（但亦繪出海平面氣壓的分析結果以供比較）。(a) 色階為系集平均的海表面環狀平均切向風速（單位：m/s）。(b) 色階為系集平均的環狀平均 30 分鐘降雨量（單位：mm）。(c) 黑色與紅色粗線各為分析實驗與預報實驗的系集平均颱風中心海平面氣壓，灰色細線為個別系集成員的中心氣壓（單位：hPa）。.....82
- 圖 45 同圖 44，但為 9 月 11 日 3 時的預報 (TK-MS-TP-ALL_1103)。.....83
- 圖 46 同圖 44，但為 9 月 12 日 3 時的預報 (TK-MS-TP-ALL_1203)。.....83

圖 47	辛樂克颱風 TK-MS、TK-MS-DOT、TK-MS-TP-OUT、TK-MS-TP-ALL 四組實驗以 9 月 10 日 3 時為預報起始時間的系集路徑預報比較。灰色粗線為觀測颱風路徑，路徑上時間標記的前 2 位數字為日期，後 2 位數字為小時。彩色粗線為系集平均路徑，依颱風中心最低海平面氣壓以不同顏色顯示（如圖例），淺色的細線為個別系集成員的路徑。紅色叉號為預報起始時間的颱風中心位置，在此以前為分析實驗結果，以後為預報實驗的結果，各組預報實驗以不同顏色顯示（系集平均路徑以底色區分，系集成員路徑則直接以線條顏色區分），見圖上標示。.....	84
圖 48	同圖 47，但為 9 月 11 日 3 時的預報比較。.....	85
圖 49	同圖 47，但為 9 月 12 日 3 時的預報比較。.....	85
圖 50	同圖 47，但為辛樂克颱風 TK、TK-DOT 兩組實驗 9 月 10 日 3 時的預報比較。.....	86
圖 51	同圖 47，但為辛樂克颱風 TK、TK-DOT 兩組實驗 9 月 11 日 3 時的預報比較。.....	86
圖 52	本研究採用的模式垂直層設定與分佈。圖中的數字為 WRF 模式的垂直座標 η 。.....	87



第一章 前言

1.1 颱風初始化方法回顧

近年來由於數值模式與資料同化方法的持續精進，數值模式產品已在天氣預報中扮演相當重要的角色，在熱帶氣旋（tropical cyclones；TCs；後文皆統稱為颱風）的預報方面也不例外，模式預報是重要的參考項目。但和一般天氣系統不同的是，颱風渦旋的尺度較一般的綜觀天氣系統小且結構較為複雜（尤其是在眼牆附近），並且多生存在缺乏觀測資料的海面上，使得現今作業上以測站、探空氣球、飛機與衛星觀測資料為主的資料同化方式，在颱風渦旋的初始化上效果有限，常常無法僅用這些傳統資料捕捉到颱風渦旋的真正位置與強度。這不但導致路徑預報的準確度降低，更使得以動力模式進行颱風強度預報困難重重，一直無法獲得顯著的改善。

要解決這個問題，已有很多專為颱風渦旋設計的初始化方案被提出，如渦旋植入（vortex bogusing）與重新移位（relocation）、虛擬渦旋資料同化（bogus data assimilation；BDA）等。這些方案的主要精神是利用颱風高度旋轉與軸對稱的特性，設法將我們認知上「合理」的渦旋結構放入模式初始場中的正確位置。但隨意改變初始場經常會導致模式本身的不平衡，使得模擬初期會遭遇一段調整過程，整個模擬的品質因而降低。又當我們植入軸對稱的渦旋結構時，非軸對稱結構與駛流的資訊不易保留，亦會導致路徑預報變差。現今有相當多複雜的設計用來減少上述問題，但尚未完全克服颱風渦旋初始化的問題。

也由於颱風高度旋轉與軸對稱的特性，傳統的颱風觀測通常以中心位置、移動速度、中心氣壓、近中心最大風速、暴風半徑等資訊來表達，這些資料主要是藉由衛星觀測推演而得，可大致描述一個颱風渦旋的狀態，在主觀預報上佔有相當重要的角色。可惜模式通常無法直接使用這些資訊，僅能在渦旋初始化的過程中間接採用，對模式預報的幫助有限。

以下對目前常用的幾種資料同化方式進行簡要的回顧，並且也介紹 Chen and Snyder（2007）所提出的以系集卡爾曼濾波器（ensemble Kalman filter；EnKF）同化渦旋中心位置的新方法。本研究即以此方法為基礎，做進一步深入探討與更詳細的檢驗。

1.1.1 渦旋植入與重新移位

Kurihara 等人 (Kurihara et al. 1993、1995、1998；Bender et al. 1993) 研發「地球物理流體動力實驗室」(Geophysical Fluid Dynamics Laboratory；GFDL) 颱風預報模式中的颱風渦旋初始化方案，對渦旋植入有深入的研究與探討。他們的主要概念是透過颱風模式積分來產生軸對稱風場，並設法與非軸對稱流場結合，可得到一平衡且具有非軸對稱流場特徵的颱風結構，實際用於預報時，濾除原先分析場中較差的颱風結構，以前述高解析度虛擬資料取代之。他們的研究結果顯示，透過這一系列方法可以有效重建初始場中的颱風結構，進而減少 GFDL 颱風模式的路徑與強度預報誤差。

另一方面，若不做複雜的颱風初始化，我們可只將初始場中位於錯誤位置的颱風結構移位至正確位置上，也可以使模式的颱風預報有部份改善。例如美國國家環境預報中心 (National Centers for Environmental Prediction；NCEP) 的全球模式就有採用此渦旋重新移位方案 (Liu et al. 2002)。

現今透過這類颱風初始化方案已能獲得不錯的颱風模擬與預報，但即使經過許多複雜的處理，模擬初期模式不平衡的問題仍然存在。並且，這些人為主觀決定的程序也留存著很大的不確定性，包括如何適當地重建颱風的風場結構，如何給定溫度、壓力、水汽等其他相關氣象變數，以及如何有效地同化使用額外觀測資料，如飛機觀測等，不同的選擇可能會導致截然不同的路徑模擬結果，值得加以探討 (Wu et al. 2000；Chou and Wu 2008)。

1.1.2 虛擬渦旋資料同化

為解決渦旋植入方案可能造成模式不平衡的問題，也有人不做直接資料取代的動作，改以變分資料同化 (variational data assimilation) 的技術將若干筆虛擬渦旋資料同化至模式中，稱為虛擬渦旋資料同化。其中 Zou and Xiao (2000) 首先提出以四維變分資料同化將數小時時間窗口 (time window) 中的虛擬海平面氣壓資料同化至模式中，藉著模式動力方程對其他相應氣象變數的限制，可以得到一較符合模式動力的初始場。隨後 Xiao et al. (2000) 亦提出同化虛擬三維風場資訊的方案，而 Wu 等人 (周昆炫 2003；Wu et al. 2006) 則對多種虛擬渦旋資料同化的方式有詳盡的比較，並

以渦旋尺度的地轉調整 (geostrophic adjustment) 的概念強調了風場資訊對於颱風初始化的重要性。

雖然以虛擬渦旋資料同化得到的初始場較無平衡性的問題，但四維變分資料同化的計算相當耗費電腦時間，虛擬渦旋資料的建立也包含著諸多不確定性，缺乏簡單一致的方法。

1.1.3 同化渦旋中心位置

Chen and Snyder (2007) 提出衛星觀測得到的渦旋位置可視為一種特殊的觀測量 (observable, 意為「可觀測量」, 指在資料同化中可以被直接觀測的變數, 後文皆簡稱為觀測量), 直接以資料同化的技術將其同化至模式中, 就像同化由都卜勒雷達觀測得到的徑向風速或是衛星觀測得到的亮度溫度一般。以資料同化的語言來說, 就是要定義一用以求取渦旋中心位置的觀測算符 (observation operator), 再藉此將觀測得到的實際渦旋位置同化入模式中。這類特殊觀測量的觀測算符相當複雜, 並且是非線性的, 例如要計算渦旋中心位置, 通常需要先尋得氣壓極小值或渦度極大值的網格點, 再計算此點附近特定範圍內的某種權重平均位置。傳統的變分資料同化方式對此處理不易, 尤其是在四維變分資料同化中, 更難以加入如此複雜的觀測算符; 而在 EnKF 的資料同化系統上, 則易於同化帶有複雜觀測算符的觀測量, 並容許非線性的觀測算符。

Chen 等人在二維模式上檢驗此方法的可行性。他們發現當初始猜測場的渦旋位置誤差較渦旋本身空間尺度來得小時, EnKF 可使渦旋平順地移位至更接近觀測位置的地方, 而得到一個相當不錯的分析場, 效果與傳統渦旋重新移位的方法類似。但若初始猜測場的渦旋位置誤差與渦旋本身空間尺度相當甚至是更大時, 由於物理空間上誤差的特性會偏離高斯分布 (Gaussian distribution), 不符合 EnKF 的假設, 因此分析結果會不盡理想。但他們也指出, 只要給予密集且精確的渦旋位置觀測資訊, 進行週期性 (cycling) 同化, 模式中渦旋位置就不會產生太大的偏差, 而這些密集、精確的渦旋位置正是我們由衛星觀測資料中所能獲得的。因此, 以 EnKF 同化渦旋中心位置來使模式中渦旋保持在觀測路徑上依然是一個相當可行的方法。

他們並且發現連續同化渦旋中心位置的過程中，除了系集平均的渦旋中心位置保持在觀測路徑上外，系集成員間的位置與結構差異亦可控制在一定的範圍內，即背景場的不確定性可維持在較小的狀態。而且若進一步定義描述渦旋強度與形狀的觀測算符，在同化渦旋位置的同時亦同化渦旋強度與形狀等資訊，可增加此方法的可用性。他們並在連續同化這些渦旋參數的時段後再進行預報實驗，預報準確度比起未進行此同化的對照組有所改善。

值得一提的是，此方法的效用雖然與過去渦旋植入與重新移位、虛擬渦旋資料同化等方法類似，但由於 EnKF 與所搭配的模式動力相容的特性，得到的分析場的平衡性相當好，可望改善過去隨意改變初始場導致模擬初期會遭遇一段調整過程的問題，此方法的可行性與效用值得大家更進一步探討檢驗。

1.2 研究動機與目的

如上述，Chen 等人已在二維模式上顯示 EnKF 應用在渦旋初始化之成效，而在他們的相關工作（Chen and Snyder 2006）中，亦使用天氣研究與預報模式（Weather Research and Forecasting model；WRF model）結合資料同化研究測試平台（Data Assimilation Research Testbed；DART）對 2003 年至 2005 年間的 5 個颱風進行同化中心位置與最低海平面氣壓的測試，證實在複雜的三維模式中此方法依然可行。但他們使用的解析度最高只有 36 公里，無法解析眼牆附近的結構，並且未對各種參數的敏感度進行較詳細的試驗。

另一方面，傳統的颱風報告上常有幾項描述颱風渦旋的特殊觀測量，除了中心位置和最低海平面氣壓之外，尚有颱風移動速度、近中心最大風速與各風速值對應的暴風半徑等。以往，這些我們熟知的參數幾乎僅能用於主觀預報上，對於模式模擬及預報的用處有限，但若仿照上述同化渦旋中心位置的方法，將和這些參數相關的觀測算符都建立在 EnKF 資料同化系統中，就可直接同化這些資料，或許對模式模擬及預報可產生若干助益。

因此，本研究將使用配置有 EnKF 資料同化系統的 WRF 模式進行高解析度的模擬，重新檢驗在高解析度、包含完整物理過程（full-physics）的區域模式上同化颱風

中心位置與其他特殊觀測量的效用，並檢驗各項敏感度。後文內容概述如下：第二章介紹研究工具與方法，包括 WRF 模式簡介與 EnKF 的基本原理和執行方式，以及本研究欲同化的描述颱風渦旋的特殊觀測量。第三章為本研究的第一部份實驗，將以此方法進行短時段之颱風初始化，藉此在個案研究上可代替傳統渦旋植入與重新移位的方案，成為颱風渦旋初始化的另一項選擇。第四章則為第二部份實驗，試著在學術環境有限的資源中進行涵蓋一颱風生命週期的更長時間模擬，探索將此方法應用於作業預報上的潛力，並探討 T-PARC (the Observation System Research and Predictability Experiment - Pacific-Asian Regional Campaign ; THORPEX-PARC ; Elsberry and Harr 2008) 計畫期間額外飛機觀測資料與本方法結合的效益。第五章為結論，並提出值得後續進行的延伸研究方向。



第二章 研究工具與方法

本研究所使用的動力模式是 Advanced Research WRF (ARW) 模式 2.2.1 版 (Skamarock et al. 2005)，搭配上 EnKF 資料同化系統。此資料同化模組的最初是由 Zhang 等人 (Zhang et al. 2006；Meng et al. 2007) 所發展，採用 Whitaker and Hamill (2002) 的方法，屬於系集平方根濾波器 (ensemble square root filter；EnSRF) 的一種。為了進行本研究的實驗，我們修改了部份程式，最主要的差異是多加入了實驗中將用到的描述颱風渦旋的特殊觀測算符，以及加入處理巢狀網格 (nesting grid) 架構的能力，並可使內層網格的位置追隨颱風渦旋中心移動，提昇數值計算的效率。

2.1 動力模式簡介

Advanced Research WRF (ARW) 模式主要由美國國家大氣研究中心 (National Center for Atmospheric Research；NCAR) 的中小尺度氣象部門 (Mesoscale and Microscale Meteorology division；MMM) 發展與維護，用以作為一有彈性的、先進的大氣模擬系統，廣泛適用於數公尺到數千公里的尺度，並可運作於各種電腦平台以及支援高速平行運算。其主要的應用包括教學、理想模擬、參數化研究、資料同化研究、預報研究、即時天氣預報與耦合模式 (coupled model) 應用等。詳細資訊請見 ARW 的使用者網頁：<http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/>。

2.2 系集卡爾曼濾波器

系集卡爾曼濾波器 (ensemble Kalman filter；EnKF；Evensen 1994、2003；Zhang et al. 2007；曾忠一 2006) 最初由 Evensen 在 1994 年所提出，用以解決傳統卡爾曼濾波器應用於非線性模式上的限制，以及過份龐大而不可及的儲存量與計算量。由於 EnKF 的核心概念簡單易懂，又不需要如四維變分資料同化中切線性算符 (tangent linear operator)、伴隨方程 (adjoint equation) 與反向積分等的複雜處理，計算上相對容易，因此很快就在大氣與海洋方面獲得廣泛的應用。EnKF 以完全相同的模式用於分析與預報，因此分析場的平衡性相當好，而且相容於該模式的動力性質。EnKF

也可說是傳統的系集預報（ensemble forecast）與資料同化兩者的巧妙結合，使系集預報的成員更具代表性。後文將從傳統的卡爾曼濾波器談起，介紹本研究所使用的 EnKF 資料同化系統的理论基礎與實作方式，而逐步的執行流程則詳列於附錄 A。

2.2.1 卡爾曼濾波器與擴張卡爾曼濾波器

卡爾曼濾波器（Kalman filter；Kalman 1960）是一種序列資料同化（sequential data assimilation）的方法，在模式持續向前積分的過程中，只要有新的觀測資料加入，就綜合當時的預報場和這些觀測資料做極小方差估計（minimum variance estimate），得到新的分析場。為了極小方差估計的需要，我們除了要處理模式場在時間上的推演外，也需要知道誤差的統計特性，以誤差協方差（error covariance）來表示，並同時對誤差協方差也進行分析和預報。

若以向量與矩陣的形式來表達，模式場中的預報變數（prognostic variables）構成的向量稱為狀態向量（state vector），以 \mathbf{x}^f 和 \mathbf{x}^a 表示，其中上標 f 和 a 分別代表預報場和分析場。而狀態向量中任兩個元素的誤差協方差即構成誤差協方差矩陣（error covariance matrix），以 \mathbf{P}^f 和 \mathbf{P}^a 表示，上標的意義與前面一致。由於 \mathbf{P}^f 代表的是加入觀測資料更新前的背景狀態，又或可稱之為背景誤差協方差矩陣（background-error covariance matrix）。

序列資料同化的執行流程如圖 1 所示。在一個更新週期中，包含有分析步驟和預報步驟，分析步驟以上一次分析的短時段預報結果作為初始猜測值，加入觀測資料得到新的分析場，此分析場也就是當次預報的初始場；而預報步驟則由模式將此分析場向前積分直到下一個要同化觀測資料的時間，完成一次資料同化更新週期。一般大氣模式的更新週期常為 6 小時或 12 小時（但本研究為 30 分鐘）。

分析步驟的方程式如下：

$$\mathbf{K} = \mathbf{P}^f \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}^f \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (1)$$

$$\mathbf{x}^a = \mathbf{x}^f + \mathbf{K} (\mathbf{y}^o - \mathbf{H} \mathbf{x}^f) \quad (2)$$

$$\mathbf{P}^a = (\mathbf{I} - \mathbf{K} \mathbf{H}) \mathbf{P}^f \quad (3)$$

在這裡 \mathbf{H} 稱為觀測算符，用以將模式的狀態向量轉換成觀測量； \mathbf{R} 為觀測誤差的協方差矩陣，常為對角矩陣（diagonal matrix），即不同觀測間的誤差無相關性；由 (1) 式求得的 \mathbf{K} 稱為卡爾曼增益矩陣（Kalman gain matrix），代表的是模式預報和觀測資料之間的權重關係，用以在 (2) 式與 (3) 式中分別更新狀態向量與誤差協方差矩陣。 \mathbf{y}^o 是觀測量構成的向量， \mathbf{I} 是單位矩陣（identity matrix）。

而預報步驟包括模式場和誤差統計特性的預報，模式狀態向量的預報如下：

$$\mathbf{x}_{n+1}^f = \mathbf{M} \mathbf{x}_n^a \quad (4)$$

誤差協方差矩陣的預報則為：

$$\mathbf{P}_{n+1}^f = \mathbf{M} \mathbf{P}_n^a \mathbf{M}^T + \mathbf{Q} \quad (5)$$

其中下標 n 為時間指標（本文在與時間不相關的其他方程式中省略此指標）， \mathbf{M} 為所使用的線性模式， \mathbf{Q} 為模式誤差的協方差矩陣，亦即由於模式本身不完美所造成的預報誤差。

值得注意的是，在卡爾曼濾波器中，觀測算符 \mathbf{H} 和所使用的模式 \mathbf{M} 都是線性的，因為只有線性的模式在運算時能保持狀態向量誤差的高斯分布特性，而高斯分布是卡爾曼濾波器的一個重要假設。對於輕微非線性的模式和觀測算符，我們仍能以類似卡爾曼濾波器的方程式來處理，稱之為擴張卡爾曼濾波器（extended Kalman filter；EKF），其分析和預報方程分別為：

$$\mathbf{K} = \mathbf{P}^f \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}^f \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (6)$$

$$\mathbf{x}^a = \mathbf{x}^f + \mathbf{K} [\mathbf{y}^o - \mathbf{h}(\mathbf{x}^f)] \quad (7)$$

$$\mathbf{P}^a = (\mathbf{I} - \mathbf{K} \mathbf{H}) \mathbf{P}^f \quad (8)$$

$$\mathbf{x}_{n+1}^f = \mathbf{m}(\mathbf{x}_n^a) \quad (9)$$

$$\mathbf{P}_{n+1}^f = \mathbf{M} \mathbf{P}_n^a \mathbf{M}^T + \mathbf{Q} \quad (10)$$

與卡爾曼濾波器的差異之處有： \mathbf{m} 為所使用的非線性模式， \mathbf{h} 為非線性觀測算符，而原先的 \mathbf{M} 和 \mathbf{H} 在這裡分別為 \mathbf{m} 和 \mathbf{h} 的切線性算符，也稱為 Jacobi 矩陣（Jacobian）。但對於非線性程度較大的模式而言，擴張卡爾曼濾波器的適用性並不

一定良好，在某些非線性模式中會導致協方差演變的不穩定。

另外，在複雜的大氣模式上要執行擴張卡爾曼濾波器，除了面對非線性模式的問題外，更大的困難是 \mathbf{P}^f 和 \mathbf{P}^a 的大小遠超出現今電腦可以處理的範圍。通常大氣模式的維度可達 10^8 ，因此誤差協方差矩陣的維度將達到 10^{16} ，光是儲存就有很大的問題，更不可能對其進行分析與預報。直到 EnKF 的提出，大大節省了卡爾曼濾波器的計算量，才讓上述的資料同化流程有機會直接用在複雜的大氣模式上。

2.2.2 系集與樣本協方差矩陣

EnKF 必須建構於系集 (ensemble) 模式上，也就是說要同時模擬很多份有著小差異的模式場，稱之為系集成員 (ensemble members)。系集成員的平均稱為系集平均 (ensemble mean)，其意義相當於傳統確定性預報中的單一模式場；而系集成員散布的情形則可代表模式場的機率密度 (probability density) 分布，亦即以有限的隨機樣本來估計實際連續的誤差分布。

有了作為樣本的系集，EnKF 直接以預報樣本 $\mathbf{x}_{(k)}^f$ 的協方差來求取 \mathbf{P}^f ，亦即：

$$\mathbf{P}^f = \text{cov}[\mathbf{x}^f, \mathbf{x}^f] = \frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K [\mathbf{x}_{(k)}^f - \bar{\mathbf{x}}^f][\mathbf{x}_{(k)}^f - \bar{\mathbf{x}}^f]^T \quad (11)$$

$$\bar{\mathbf{x}}^f = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{x}_{(k)}^f \quad (12)$$

其中下標 (k) 為系集編號的指標， K 為系集成員的總個數，頂線表示系集平均。分析誤差協方差矩陣 \mathbf{P}^a 與分析樣本 $\mathbf{x}_{(a)}^f$ 的關係亦同。

通常觀測資料的數量都比模式狀態向量的維度還要小很多，我們亦可將 (1) 式中的 $\mathbf{P}^f \mathbf{H}^T$ 與 $\mathbf{H} \mathbf{P}^f \mathbf{H}^T$ 由狀態空間與觀測空間中預報誤差的互協方差直接計算：

$$\mathbf{P}^f \mathbf{H}^T = \text{cov}[\mathbf{x}^f, \mathbf{h}(\mathbf{x}^f)] = \frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K [\mathbf{x}_{(k)}^f - \bar{\mathbf{x}}^f][\mathbf{h}(\mathbf{x}_{(k)}^f) - \overline{\mathbf{h}(\mathbf{x}^f)}]^T \quad (13)$$

$$\mathbf{H} \mathbf{P}^f \mathbf{H}^T = \text{cov}[\mathbf{h}(\mathbf{x}^f), \mathbf{h}(\mathbf{x}^f)] = \frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K [\mathbf{h}(\mathbf{x}_{(k)}^f) - \overline{\mathbf{h}(\mathbf{x}^f)}][\mathbf{h}(\mathbf{x}_{(k)}^f) - \overline{\mathbf{h}(\mathbf{x}^f)}]^T \quad (14)$$

而不用直接求取龐大的 \mathbf{P}^f ，可大幅減少計算時間，並使用非線性的觀測算符 \mathbf{h} 。

2.2.3 分析與預報方程

傳統 EnKF 的分析步驟與一般卡爾曼濾波器類似，即以先前介紹過的分析方程分別更新每一個系集成員：

$$\mathbf{K} = \mathbf{P}^f \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}^f \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (15)$$

$$\mathbf{x}_{(k)}^a = \mathbf{x}_{(k)}^f + \mathbf{K} [\mathbf{y}_{(k)}^o - \mathbf{h}(\mathbf{x}_{(k)}^f)] \quad (16)$$

但經 Burgers et al. (1998) 證明，這裡用於不同系集成員的觀測量 $\mathbf{y}_{(k)}^o$ 須由原先的觀測量加入協方差為 \mathbf{R} 並呈高斯分布的隨機誤差而得：

$$\mathbf{y}_{(k)}^o = \mathbf{y}^o + \boldsymbol{\epsilon}_{(k)}, \quad \text{cov}[\mathbf{y}^o, \mathbf{y}^o] = \frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K \boldsymbol{\epsilon}_{(k)} \boldsymbol{\epsilon}_{(k)}^T = \mathbf{R} \quad (17)$$

才能使更新後的分析樣本具有正確的誤差統計特性。值得一提的是，(16) 式對每一個系集成員的運算也將同時使系集平均如同一般卡爾曼濾波器般更新。

而 EnKF 的預報步驟，在完美模式（無模式誤差）的假設下，則完全等同於一般的系集預報，也就是直接對各個系集成員做預報，以未經修改的非線性模式在有限樣本上做誤差的推演。與擴張卡爾曼濾波器相比，不但計算量縮小至可以負荷的程度，也免除了切線性模式未能如原始非線性模式正確傳遞誤差分布的疑慮。

為了使樣本具有足夠的代表性，系集成員的數量不可以太少（至少需要數十個以上），否則很可能會低估實際上的誤差，甚至得到錯誤的資訊，稱為取樣誤差（sampling error）。要減少取樣誤差的影響，除了盡量增加系集成員的數量（但這也代表了計算負擔的增加）外，一些人為的處理方式也經常被使用，如協方差擴張（covariance inflation）或協方差局地化（covariance localization）等，這些處理方式將於後文中介紹。

2.2.4 系集平方根濾波器

實際執行 EnKF 的分析步驟時，由於諸多好處，我們常不直接處理系集成員本身，而是以各系集成員與其平均之間的偏差（ensemble perturbation）替代之：

$$\mathbf{x}'_{(k)}{}^f = \mathbf{x}_{(k)}^f - \bar{\mathbf{x}}^f, \quad \mathbf{x}'_{(k)}{}^a = \mathbf{x}_{(k)}^a - \bar{\mathbf{x}}^a \quad (18)$$

並可免除對觀測資料加入隨機誤差的必要，得到確定性的分析方程。由於這一類的分析方案都涉及誤差協方差矩陣的平方根，因此通稱為系集平方根濾波器（ensemble square root filter；EnSRF）。

本研究所使用之 EnKF 系統的分析方案如下（Whitaker and Hamill 2002）：

$$\bar{\mathbf{x}}^a = \bar{\mathbf{x}}^f + \mathbf{K}[\mathbf{y}^o - \mathbf{h}(\bar{\mathbf{x}}^f)] \quad (19)$$

$$\mathbf{x}'_{(k)}{}^a = \mathbf{x}'_{(k)}{}^f - \tilde{\mathbf{K}} \mathbf{h}'(\mathbf{x}_{(k)}^f), \quad \mathbf{h}'(\mathbf{x}_{(k)}^f) = \mathbf{h}(\mathbf{x}_{(k)}^f) - \overline{\mathbf{h}(\mathbf{x}^f)} \quad (20)$$

$$\tilde{\mathbf{K}} = \mathbf{P}^f \mathbf{H}^T \mathbf{Z}_d^{T-1} (\mathbf{Z}_d + \mathbf{Z}_r)^{-1} \quad (21)$$

其中 \mathbf{Z}_d 和 \mathbf{Z}_r 分別是 $\mathbf{H}\mathbf{P}^f\mathbf{H}^T + \mathbf{R}$ 與 \mathbf{R} 的平方根：

$$\mathbf{H}\mathbf{P}^f\mathbf{H}^T + \mathbf{R} = \mathbf{Z}_d \mathbf{Z}_d^T \quad (22)$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{Z}_r \mathbf{Z}_r^T \quad (23)$$

它們都是 $L \times L$ 矩陣（ L 表示要一起同化的觀測量之個數），並且有非唯一解，可透過 Cholesky 分解（Cholesky factorization）或奇異值分解（singular value decomposition）等方法求得。此分析方案不需對觀測資料加入隨機誤差，在更新系集平均時所使用的 \mathbf{K} 與 (15) 式同，但以 (20) 式更新每一個系集成員的偏差時則需採用由 (21) 式計算而得的 $\tilde{\mathbf{K}}$ 。

若採序列處理法，即一次僅同化一個觀測量，則 $\mathbf{H}\mathbf{P}^f\mathbf{H}^T$ 與 \mathbf{R} 皆變成純量， $\tilde{\mathbf{K}}$ 的表示式可進一步化簡為：

$$\tilde{\mathbf{K}} = \gamma \mathbf{K}, \quad \gamma = \left(1 + \sqrt{\frac{\mathbf{R}}{\mathbf{H}\mathbf{P}^f\mathbf{H}^T + \mathbf{R}}} \right)^{-1} \quad (24)$$

2.2.5 協方差擴張

由前面的介紹可知，觀測量在 EnKF 的分析步驟中有兩方面的功能：其一是更新模式預報的系集平均，使其接近於實際觀測結果，如 (19) 式；其二是更新每個系集

成員，使系集成員間的散布程度降低（縮減誤差協方差），亦即得到更加可靠（誤差分布更小）的分析場，如 (20) 式。但以上的分析方程都是在無限系集大小與完美模式假設下推導而來，使用較少的系集成員、較差的初始猜測，以及忽略模式誤差的結果，都會導致 EnKF 的分析低估了應有的不確定性，進而使系集成員越來越相似，最終可能喪失 EnKF 的可用度（Burgers et al. 1998）。強迫增加 EnKF 分析所得到的誤差協方差可改善上述問題，稱為協方差擴張（covariance inflation）。

本研究做協方差擴張的方法為（Zhang et al. 2004）：

$$\mathbf{x}'_{(k)_{new}} = (1 - \alpha)\mathbf{x}'_{(k)} + \alpha \mathbf{x}'_{(k)}^f \quad (25)$$

其中 α 為介於 0~1 之間的未定參數，若取 0 代表無協方差擴張，選擇的數值越大則會使分析的系集偏差越接近原先預報的系集偏差（較大），亦即越強烈的協方差擴張。此方法的優點為誤差協方差的人為調整只會在有觀測資料加入時才發生，並且可以對不同的觀測資料類型設定各自的協方差擴張程度（選取不同的 α 值）。

2.2.6 協方差局地化

原始的 EnKF 分析方案會同時更新模式範圍內所有的狀態變數，更新的依據就是每個狀態變數之間的誤差協方差。在一般的認知中，物理空間中相距過遠的兩個狀態變數之間的相關性應該是微小，但在小系集的情況下，卻很容易得到錯誤的估計，將使距離觀測位置遙遠的狀態變數有不合理的更新。為避免此問題，我們可人為定義一觀測資料的影響範圍，在此範圍中使由有限樣本估計而得的誤差協方差隨距離遞減，過遠的誤差協方差即設為零（不更新此狀態變數），稱為協方差局地化（covariance localization）。

本研究使用 Gaspari et al. (1999) 的五階函數做協方差局地化，誤差協方差依據狀態變數在物理空間中與觀測位置的距離 r 乘上一係數 C ：

$$C(r) = \begin{cases} -\frac{1}{4}\left(\frac{r}{r_0}\right)^5 + \frac{1}{2}\left(\frac{r}{r_0}\right)^4 + \frac{5}{8}\left(\frac{r}{r_0}\right)^3 - \frac{5}{3}\left(\frac{r}{r_0}\right)^2 + 1, & 0 \leq r \leq r_0 \\ \frac{1}{12}\left(\frac{r}{r_0}\right)^5 - \frac{1}{2}\left(\frac{r}{r_0}\right)^4 + \frac{5}{8}\left(\frac{r}{r_0}\right)^3 + \frac{5}{3}\left(\frac{r}{r_0}\right)^2 - 5\left(\frac{r}{r_0}\right) + 4 - \frac{2}{3}\left(\frac{r}{r_0}\right)^{-1}, & r > r_0 \end{cases} \quad (26)$$

由此式可知在 $r = r_0$ 時誤差協方差就減少為原估計的 0.208 倍，而在 $r \approx 1.8r_0$ 以外就幾乎等於 0。

在這邊要特別強調，協方差擴張和協方差局地化都是在有限計算資源下很人為化的處理方式，雖然對 EnKF 的效用有立即的改善，但仍需仔細檢驗其是否帶來預期之外的影響。本文將在 3.5 節中對此兩者做敏感度測試。

2.2.7 應用於中尺度區域模式

2.2.7.1 狀態變數

ARW 的預報變數包括網格點座標（經地圖投影後的正交座標，與經緯度座標在方向上和比例上皆不完全一樣）上的水平風速分量 u 、 v 、垂直速度 w 、擾動位溫（perturbation potential temperature） θ' 、擾動重力位（perturbation geopotential） ϕ' 、擾動乾空氣柱質量（perturbation dry air mass in column） μ'_d ，以及水象相關成份的混和比，其中水象粒子種類的多寡會與所選定的雲微物理過程（cloud microphysics）有關（Skamarock et al. 2005）。本研究選取的雲微物理過程為 WSM 6-class graupel scheme，預報的水象相關成份有以下 6 種：水汽（water vapor； q_v ）、雲水（cloud water； q_c ）、雲冰（cloud ice； q_i ）、雨（rain； q_r ）、雪（snow； q_s ）、霰（graupel； q_g ）。以上這些預報變數就是我們在 EnKF 更新中會處理的狀態變數，詳列於表 1。

2.2.7.2 初始系集產生方式

要進行 EnKF 資料同化，首先一定需要具備初始系集。初始系集可以很簡單地透過在背景分析場加入隨機擾動而得到，擾動的大小要接近合理的背景誤差，以期能正確代表誤差的統計分布。實作上加入隨機擾動的方式可以有非常多種，可擾動部份或全部的變數，結果有可能產生平衡的場，也有可能產生不平衡的場。研究顯示通常不理想的擾動所造成的不良影響不會持續太久，模式經過一段時間的積分後會漸趨平衡，不同變數之間的相關性也會逐漸確立，配合上一定數量的觀測資料同化進入模式中後，EnKF 即可正常表現（Evensen 2003）。

本研究透過 WRF 的三維變分資料同化系統 (3D variational data assimilation tools for the WRF model; WRF-Var) 來產生初始系集 (僅採用部份程式, 不需實做任何變分資料同化), 得到的初始系集將具有和 WRF-Var 中相同的背景誤差協方差 (Zhang et al. 2006)。擾動是加入在 WRF-Var 的變換流函數場中 (transformed streamfunction field; Barker et al. 2003), 再反演回水平風、溫度與氣壓場, 因此初始系集在大尺度上是平衡的。其他的預報變數, 包括垂直運動場和水汽場等, 並未加以擾動。

2.2.7.3 擾動側邊界條件

由於 WRF 是區域模式, 運作時需要事先給定側邊界條件 (lateral boundary condition), 若我們直接給予每一個系集成員完全相同的側邊界條件, 會導致接近邊界處的不確定性在模式積分中被不當移除, 對後續的 EnKF 資料同化有不良影響。因此, 本系統在每一次的預報步驟中, 會對每個系集成員的側邊界條件給予適當的隨機擾動, 有助於維持 EnKF 的穩定性。

2.2.7.4 巢狀網格

WRF 模式允許使用巢狀網格 (nested grids), 其中雙向回饋 (two-way feedback) 的設計可使內、外層網格保有一致性, 亦即各層網格間對應網格點的資料永遠是近似相同的。依此特性我們可將 EnKF 的分析步驟同時作用於每一層網格上, 對應的網格點將有一模一樣的更新, 便可達成巢狀網格模式中的資料同化。

由於本研究關注於颱風的高解析度模擬, 因此還需要採用追隨渦旋移動的巢狀網格 (vortex-following nested grids), 將有限的計算資源做最有效的利用。此項特殊設計包含一自動尋找颱風中心的演算法, 會持續將內層網格移動至對齊颱風中心的位置, 維持眼牆附近有最高的解析度。我們將此項能力建構至這套 EnKF 系統中, 使其相容於資料同化的流程。

2.3 描述颱風渦旋的特殊觀測量

本研究欲同化的颱風參數包括中心位置、移動速度、以及海表面軸對稱風速等,

皆為一般描述颱風渦旋常用的參數，但要從模式變數求取的運算較為複雜且具高度非線性，因此鮮少看到有人將其直接應用於資料同化上。我們先將這三種颱風特殊觀測量的幾項屬性列於表 2，後文將仔細說明相應觀測算符的詳細定義方式和觀測資料來源及使用流程。

之所以選擇這三種參數，主要是想涵蓋過去各種颱風渦旋初始化方案的共同理念，期能以同化這些參數來達成類似颱風渦旋初始化的效果，成為它們的替代方案。中心位置和移動速度兩者共同代表的就是颱風的路徑，與渦旋植入或是重新移位至正確位置的意義相仿；而在颱風結構方面，過去有許多方法嘗試決定出詳盡的三維渦旋結構，但實際上由觀測所能獲得的資訊卻極為不足，使得結構的重建相當困難，不確定性非常大，因此在本研究中我們僅選取近海表（即 10 米高度）的軸對稱風速結構來同化，這算是實務上最容易取得，且具代表性的颱風結構資訊。在我們後面的實驗中會證明（參見 3.3.4 颱風垂直結構的建立），由於 EnKF 的更新是架構在完整的模式動力之上，藉著同化這樣的一維資料（單層軸對稱風速剖面）就有能力產生出合理的三維颱風渦旋結構。

2.3.1 中心位置

颱風中心位置的決定是以低層氣壓中心為主，因為低層氣壓中心較容易定出穩定且平順的颱風路徑，有利於我們以資料同化的方式來修正颱風路徑。實際上颱風中心位置要以兩個觀測量來表示，即東西向與南北向的網格點座標值，計算方式是先找到 700~900 hPa 氣壓面上垂直平均重力位高度（geopotential height）極小值的網格點，計算此網格點附近一定區域內重力位高度的平均值，再以「該地重力位高度低於此區域平均值的量值」對鄰近網格點做權重平均（僅採計此量值為正值的網格點），得到精確且路徑較為穩定的颱風中心位置：

$$w_n = \begin{cases} \overline{\langle \Phi \rangle} - \langle \Phi_n \rangle, & \langle \Phi_n \rangle < \overline{\langle \Phi \rangle} \\ 0 & \langle \Phi_n \rangle \geq \overline{\langle \Phi \rangle} \end{cases} \quad (27)$$

$$i_{TC} = \frac{\sum_{n=1}^N w_n i_n}{\sum_{n=1}^N w_n}, \quad j_{TC} = \frac{\sum_{n=1}^N w_n j_n}{\sum_{n=1}^N w_n} \quad (28)$$

其中 Φ 為重力位高度，下標 n 作為此區域內各網格點的指標，角括號 $\langle \rangle$ 表示低層垂直平均，頂線表示區域平均， i 、 j 各為東西向與南北向的網格點座標，得到的 i_{TC} 和 j_{TC} 就是颱風中心位置的網格點座標，也就是我們要同化入模式中的觀測量。以上的計算流程雖然有不少可任意選取的變數，但實際上當颱風有一定強度的時候，各種選擇所得到的颱風中心位置不會有太大的差異。

颱風中心位置的觀測值可直接取自各作業單位提供的中心定位資料，這些定位主要是依據多種衛星觀測而得。可取得的定位資料時間解析度通常為 3 小時或 6 小時，我們視實際需要可把這些定位資料做 cubic spline 內插到 EnKF 同化的更新週期上。

在觀測誤差的設定方面，考量作業上合理的定位誤差 (Edson et al. 2003)，並觀察實際進行多次 EnKF 同化測試的效用，本實驗中颱風中心位置的觀測誤差在單一方向座標 (東西向與南北向) 上的值 $R_{i,TC} = R_{j,TC}$ 設定為 10~20 公里，因此合成的中心位置觀測誤差值相當於：

$$R_{pos} = \sqrt{R_{i,TC}^2 + R_{j,TC}^2} = \sqrt{2} R_{i,TC} \quad (29)$$

約在 14~28 公里之間。

2.3.2 移動速度

定義了颱風中心位置的計算方式後，移動速度的計算相對簡單，就只是由目前颱風位置與一段時間前颱風位置的差異來求得，代表過去這段時間內的平均移速，與颱風中心位置的同化相仿，移動速度的觀測量也要用網格點座標上東西向與南北向的分量共同表示：

$$i'_{TC} = \frac{i_{TC} - i_{TC,prev}}{\Delta t}, \quad j'_{TC} = \frac{j_{TC} - j_{TC,prev}}{\Delta t} \quad (30)$$

這段時間間隔 Δt 不宜太短，因為短時間內微小的路徑擺動可能會算出劇烈變化的颱風移速，會導致同化過程中劇烈且不合理的更新，對結果有不良影響；但也不宜太長，以免忽略掉有意義的路徑轉折，合理的時間間隔可取在約 2~6 小時之間，本研究皆取 3 小時，即計算過去 3 小時的平均移速。此運算雖然簡單，但實際上代表的卻是牽涉到模式動力 (介於這段時間內的模式積分) 的相當複雜的觀測算符。

颱風移動速度的觀測值一樣可由各作業單位提供的中心定位時間序列計算而得，計算方式同 (30) 式，只是將式中模式的颱風位置改成觀測的颱風位置。而颱風移速的觀測誤差，經反覆測試，在單一方向分量上的值 $R_{i',TC} = R_{j',TC}$ ，較合適的設定約在 1.0 ~ 1.5 m/s (3.6 ~ 5.4 km/h) 之間。

2.3.3 海表面軸對稱風速結構

海表面軸對稱風指的是海表面以颱風中心為圓心的環狀平均切向 (tangential) 風速，是一個一維的剖面，每個半徑對應到一個風速值。由於環狀平均的動作，此數值與颱風的移動和非軸對稱結構無關，因此同化此資料只是調整模式中颱風的軸對稱平均結構，並不會使原先非軸對稱的資訊喪失，亦不會有影響駛流強度的顧慮。

實際同化這條風速剖面時，颱風中心位置依然由前述方法求得，但為了系集成員間的一致性，對所有的系集成員皆採用系集平均的中心位置為原點。表面風速的定義取標準的 10 米高風速，在海洋上大約相當於 WRF 模式中跟隨地形 (terrain-following) 的垂直座標 $\eta = 0.9988$ 的地方，因此我們特別將垂直方向上最底層 (含水平風速的) 網格直接設定在這個高度，也就是以最底層網格點的風速作為海表面風 (詳見附錄 B)。半徑 0 ~ 400 公里間的風速剖面會選取數十個點同時同化入模式中，最外圍大約每隔 20 公里取一點，越靠近中心處取點的密度則逐漸加大。

此項資料的「觀測值」要從何而來是個有趣且複雜的問題。對大部分的颱風來講，這種觀測是不存在的，但我們還是可以由若干間接的觀測得到部份資訊，再以某些被檢驗過的參數化公式擬合之，建立整個剖面的軸對稱風速曲線。下面將分別說明幾種颱風軸對稱風速結構的經驗公式，以及由觀測資料決定出經驗公式中各項參數的方法。

2.3.3.1 颱風軸對稱風速結構經驗公式

一般的理想實驗常使用 Rankine 渦旋 (Rankin vortex) 或是修正 Rankine 渦旋 (modified Rankine vortex) 結構來建立理想颱風渦旋，部份渦旋植入方案也使用類似的理想結構來做颱風渦旋的初始化：

$$V(r) = \begin{cases} V_{max} \left(\frac{r}{R_{max}} \right) & , r \leq R_{max} \\ V_{max} \left(\frac{r}{R_{max}} \right)^{-\alpha} & , r > R_{max} \end{cases} \quad (31)$$

其中 V_{max} 為最大平均切向風速， R_{max} 為最大風速所在半徑， α 為衡量 R_{max} 以外風速遞減率的參數。 $\alpha = 1$ 時為經典的 Rankine 渦旋，而實際觀測結果 (Franklin et al. 1993; Mallen et al. 2005; Lin et al. 2008) 和理論研究 (Pearce 1993) 皆顯示，真實颱風的 α 值約落在 0.3 ~ 0.7 之間。

雖然上述修正 Rankine 渦旋結構公式相當簡單明瞭，但和真實颱風結構其實有一段不小的差距，最主要是在 R_{max} 附近的風速剖面不會如 Rankine 渦旋般尖銳陡峭，而是會有一段平滑的過渡帶 (Mallen et al. 2005)，因此我們不預期修正 Rankine 渦旋適合用於本研究的海表面軸對稱風速結構同化中。實際上的實驗結果也是如此，強迫同化修正 Rankine 渦旋結構的結果 (圖未示)，不論 α 取任何值，都沒有辦法使模式中的颱風軸對稱風速剖面逼近給定的曲線，此種過度理想化的風速剖面不容易為 WRF 此全物理複雜模式完整融合與維持。

另一個常用的颱風軸對稱結構為 Holland (1980) 所提出的經驗公式，其基本的假設是颱風的氣壓剖面可用下式的雙曲線族近似：

$$r^B \ln \left(\frac{p_n - p_c}{p - p_c} \right) = A \quad (32)$$

其中 p 為半徑 r 處的氣壓， p_n 為環境氣壓， p_c 為中心氣壓， A 和 B 各為常數。以梯度風平衡關係可計算出此時的軸對稱風速剖面：

$$V(r) = \left[\frac{AB}{\rho r^B} (p_n - p_c) \exp \left(-\frac{A}{r^B} \right) + \frac{r^2 f^2}{4} \right]^{1/2} - \frac{r f}{2} \quad (33)$$

其中 ρ 為空氣密度， f 為當地的科氏參數。Holland 的公式為一經驗式，比 Rankine 渦旋更能精準地描述真實颱風渦旋結構，因此常被用於颱風渦旋初始化中。我們使用 Holland 公式做海表面軸對稱風速結構同化的結果的確比較好，但模式中颱風在 R_{max} 以內的風速曲線仍無法和給定的風速剖面良好地吻合 (圖未示)，推測是因為 (32)

式的假設依然過份理想化，以這個曲線族來近似真實颱風結構仍有不足之處。

最後我們決定捨棄上述這些過去常用的理想公式，尋求更能精確描述颱風軸對稱風速結構的經驗式，代價便是可能需要加入更多未定的參數。Willoughby et al. (2004、2006) 正好在這個理念上有相當完整的工作，他們分析統計將近 500 筆飛機穿越觀測的資料，針對實測資料的特性制定出片段連續剖面 (sectionally continuous profile) 結構公式，將整條風速曲線依最大風速半徑劃分為內外兩區，各以截然不同的公式描述之，再將銜接處特定範圍內 ($R_1 < r < R_2$) 予以平滑化：

$$V(r) = \begin{cases} V_i = V_{max} \left(\frac{r}{R_{max}} \right)^n & , r \leq R_1 \\ V_i (1-w) + V_o w & , R_1 < r < R_2 \\ V_o = V_{max} \left[(1-A) \exp\left(-\frac{r-R_{max}}{X_1}\right) + A \exp\left(-\frac{r-R_{max}}{X_2}\right) \right] & , r \geq R_2 \end{cases} \quad (34)$$

$$w(\xi) = 126\xi^5 - 420\xi^6 + 540\xi^7 - 315\xi^8 + 70\xi^9, \quad \xi = \frac{r-R_1}{R_2-R_1}, \quad R_1 < r < R_2 \quad (35)$$

$$w(\xi) \Big|_{r=R_{max}} = \frac{n[(1-A)X_1 + AX_2]}{n[(1-A)X_1 + AX_2] + R_{max}} \quad (36)$$

此公式中 V_i 為內部風速曲線 (最大風速半徑以內)， V_o 為外部風速曲線 (最大風速半徑以外)，各參數的意義 V_{max} 與 R_{max} 和一般定義相同 (最大平均切向風速與最大風速所在半徑)， n 為內部風速曲線以指數遞增的次方值， X_1 、 X_2 為外部風速曲線以兩個指數遞減疊合時分別的特性距離， A 為第二個指數遞減所佔的比例。在半徑由 R_1 至 R_2 的區間中需對內外兩區風速曲線予以平滑化，以 (35) 式的權重函數 $w(\xi)$ 來完成，此函數值由 R_1 處的 0 平滑變化至 R_2 處的 1，並且需調整 R_1 與 R_2 的相對位置使滿足 (36) 式的條件，方能確保整條風速剖面在 R_{max} 處的一階導數為 0 (R_{max} 處有風速最大值)。圖 2 為 Willoughby 片段連續剖面公式的示意圖 (取自 Willoughby et al. 2006, Fig. 1、Fig. 2)。

此公式中待定的參數包括 V_{max} 、 R_{max} 、 n 、 X_1 、 X_2 、 A 以及平滑化區間的寬度 ($R_2 - R_1$) (或是 R_1 與 R_2 其中之一)，但要描述一個颱風的風速結構，這些參數並不是每個都具有決定性的意義。在本實驗中，依循 Willoughby et al. (2006)

的建議， X_2 固定設定為 40 公里， R_1 設定為 $0.3 R_{max}$ ，而 n 採用他們文中以最大風速和颱風所在緯度做多變數回歸統計得到的公式（原文 (10b) 式）：

$$n = 0.4067 + 0.0144 V_{max} - 0.0038 \varphi \quad (37)$$

其中 φ 為颱風所在緯度，以度為單位。

2.3.3.2 觀測資料使用方式

一旦選定了軸對稱風速結構的經驗公式後，真正要由觀測決定的值就只剩下該公式中的幾個未定參數，在這裡可用的觀測資料主要分為常態性的衛星觀測和非常態性的飛機觀測等。我們透過這些資料決定出經驗公式中的未定參數值後，接下來就單純只看此公式計算出來的風速曲線，然後在曲線上取幾十個採樣點來同化，不再使用任何直接的觀測資訊。必須採用如此間接的計算，一方面是因為通常沒有足夠好的資料可以直接決定出連續且精確的颱風軸對稱風速剖面，另一方面是由經驗公式所計算出來的風速曲線較為平滑，較接近環狀平均後的風速特性，也比較不會在同化過程中產生不必要的劇烈調整與震盪。

衛星觀測包含同步衛星和低軌道衛星，同步衛星可獲得時間連續性極佳的衛星影像，但解析度較低，所觀測的輻射參數很難反演成風速資訊，對於比較弱的颱風眼牆結構也常不易識別；低軌道衛星觀測的時間連續性較差，但卻擁有較高的解析度及主動式（active）觀測的能力，測得多樣化的輻射參數可用於各項氣象參數的反演，包括海表面風場（如 QuikSCAT）和降水回波（如 TRMM）等。作業單位（如 JTWC）參考這些衛星觀測產品會發佈近中心最大風速、最大風速所在半徑（不一定有這項資料）和各風速對應的暴風半徑等參數，是最方便利用的資訊。

非常態性的資料方面，針對部份颱風有進行飛機觀測，包括穿越偵察（reconnaissance）和環境偵察（surveillance）等。穿越偵察任務可直接測得數筆連續的飛行高度風剖面，並可人為估計或以步進頻率微波輻射計（Stepped Frequency Microwave Radiometer；SFMR；Uhlhorn et al. 2007）量測海表面風速值，對於決定颱風的軸對稱風速結構有相當大的助益；環境偵察任務雖然沒有深入颱風中心，但透過在颱風周圍數百公里內所投擲的 GPS 投落送（dropwindsonde），亦可有效掌握颱風

外圍的風速結構，特別是其遞減趨勢。

上述衛星與飛機觀測的資訊的時間點總是離散且不規則的，我們由這些資訊決定出經驗公式中的未定參數，也只能建構出對應到幾個特定觀測時間的風速剖面。實際進行 EnKF 同化時，我們想要在每次 EnKF 同化的更新週期中都進行颱風軸對稱風剖面的同化，也就是需要隨時間連續變化的風速剖面資料，因此和颱風中心位置的內插一樣，我們同樣也會對颱風風速剖面做時間上的內插。這項內插是在經驗公式的未定參數上進行，即對 V_{max} 、 R_{max} 、 n 、 X_1 、 X_2 、 A 等數值做內插，再代入 Willoughby 片段連續剖面公式還原出在時間上平滑變化的颱風軸對稱風速結構。

本研究中軸對稱平均切向風速的觀測誤差以下式決定：

$$R_V(r) = \sqrt{0.5^2 + [0.4V(r)^{0.7}]^2} \quad (38)$$

其中 $V(r)$ 是以 m/s 為單位的軸對稱平均切向風速的量值（由 Willoughby 片段連續剖面公式計算）， $R_V(r)$ 為該半徑上給定的風速觀測誤差。此公式的意義是軸對稱平均切向風速的觀測誤差大致與風速觀測值的 0.7 次方成正比，但在風速很小時會有一個起碼值 0.5 m/s。



第三章 颱風渦旋初始化實驗

3.1 模式設定

第一部份的實驗為 2008 年鳳凰 (Fung-wong) 颱風的初始化，模式範圍設定如圖 3，以水平解析度 24、8 公里的兩層巢狀網格來模擬，外層網格範圍 2304×1872 公里，內層網格範圍 456×456 公里，內層網格的位置會追隨颱風渦旋移動，使颱風中心附近保有最高的解析度。垂直層數有 35 層，其中第一層代表的就是我們要同化入模式中的 10 米高風速。初始場與邊界條件皆採用 NCEP final analysis (FNL) 水平解析度 $1^\circ \times 1^\circ$ 的資料，並在海溫的部份採用以 TMI 與 AMSR-E 衛星資料處理而來的 Optimally interpolated microwave SST (OISST) 資料。

配合 EnKF 狀態變數的設計 (參見 2.2.7.1 狀態變數)，模式的雲微物理過程採用 WSM 6-class graupel scheme。長波輻射參數化為 RRTM scheme。短波輻射參數化為 Dudhia scheme。近地層參數化 (surface layer) 為 Monin-Obukhov scheme。地表模式 (land surface model) 為 thermal diffusion scheme。邊界層參數化為 YSU scheme。外層網格的積雲參數化使用 Grell-Devenyi ensemble scheme。內層網格不使用積雲參數化。

圖 4 為本實驗的時間流程。我們選定世界時 2008 年 7 月 26 日 12 時為初始化時段的結束時間 (因為這時候有追風計畫觀測，利於決定颱風軸對稱風速結構，詳見下節)，此時要完成颱風初始化，進入預報階段。初始化的執行方式是在 24 小時前 (7 月 25 日 12 時) 先切取 NCEP FNL 資料，加入隨機擾動產生 28 個成員的初始系集 (初始系集產生方式請詳見 2.2.7.2 初始系集產生方式)，接著預跑 3 小時，這段時間不做任何 EnKF 同化，並且此階段僅用外層網格模擬，尚未加入內層巢狀網格。接下來的 21 小時中以 30 分鐘為 EnKF 同化更新週期，每個週期皆同化入本研究定義的三種颱風特殊觀測量，使颱風路徑和結構逐漸與觀測一致。內層巢狀網格自初始化時段的第 9 個小時 (7 月 25 日 21 時) 起加入模式的颱風中心附近，往後追隨颱風渦旋移動。經過這段時間的初始化後，自 7 月 26 日 12 時起進行預報實驗，也就是不再同化任何資料的模擬。

3.2 觀測資料與實驗設計

本實驗欲同化的颱風特殊觀測量，包括颱風中心位置、移動速度和海表面軸對稱風速結構等，必須先準備好這些資料，以進行同化。本實驗的颱風中心位置和移動速度由中央氣象局提供的 3 小時颱風定位資料做 cubic spline 內插處理而來（處理方式詳見 2.3.1 中心位置與 2.3.2 移動速度），而決定軸對稱風速結構主要參考的觀測資料包括在初始化時段末期（7 月 26 日 12 時）執行的 DOTSTAR（Dropwindsonde Observations for Typhoon Surveillance near the TAIwan Region；Wu et al. 2005、2007）投落送資料，以及美軍聯合颱風警報中心（Joint Typhoon Warning Center；JTWC）估計的近中心最大風速與各風速對應的暴風半徑，並以 Willoughby 片段連續剖面公式擬合，重建出整條海表面軸對稱風速剖面（詳見 2.3.3 海表面軸對稱風速結構）。

圖 5 為我們決定出的鳳凰颱風在初始化時段結束時的風速曲線，也就是要同化入模式中海表面軸對稱風速結構。此時 JTWC 給定的颱風近中心最大風速為每小時 65 海哩（knot），相當於 33.4 m/s，但 JTWC 是以最大 1 分鐘平均風為計量基準，模式中網格點的風速值再做環狀平均後並不會如此之強，因此我們取 $V_{max} = 28 \text{ m/s}$ ，而 R_{max} 由衛星圖片估計約 45 公里（參見圖 6）。其他參數方面，依據 Willoughby et al. (2006)， X_2 設定為 40 公里， R_1 設定為 13.5 公里，而 n 由 (37) 式計算為 0.729。最後用來決定外圍風速曲線遞減趨勢的 X_1 和 A 則依據圖 5 中 DOTSTAR 在距颱風中心 170~600 公里處取得的投落送海表面風速資料來調整，為使此風速曲線與投落送觀測吻合，我們令 $X_1 = 480 \text{ km}$ 、 $A = 0.1$ 。此次 DOTSTAR 偵察觀測的飛行路徑如圖 6，投落送施放的地點廣泛覆蓋了颱風各象限的區域，適合用來估計環狀平均風速。決定出 7 月 26 日 12 時的風速曲線後，我們再往前決定出初始化時段中隨時間連續變化的風速曲線，令鳳凰颱風的結構在這段時間中逐漸增強。

為檢驗同化這些颱風特殊觀測量的效用，我們設計了三組實驗，實驗設計如表 3 的前三列，分別是不同的同化任何資料（NONE）、只同化與颱風路徑有關的中心位置與移動速度（TK），和同化路徑與海表面軸對稱風速結構（TK-MS）。除了同化颱風特殊觀測量的差異外，這三組實驗的模式設定完全相同（見 3.1 模式設定），系集成員的個數皆為 28 個，協方差擴張參數 α （詳見 2.2.5 協方差擴張）都設定為 0.8，並在同化颱風特殊觀測量時都以颱風中心為原點在水平方向做協方差局地化，特性半徑

r_0 (詳見 2.2.6 協方差局地化) 為 500 公里，垂直方向上不做協方差局地化。如此設定的主要原因是同化這三種颱風特殊觀測量主要應在颱風中心附近產生最大的修正量，並且應對整層垂直大氣都有影響。

3.3 初始化時段

3.3.1 同化路徑與軸對稱風速結構的結果 (TK-MS)

同化颱風特殊觀測量的 21 小時初始化時段內，TK-MS 實驗的颱風路徑如圖 7，系集平均的路徑一開始相較於觀測路徑有向北偏移的現象，但經過數個小時同化颱風中心位置與移速的結果，平均路徑被修正到與觀測路徑相當一致。圖 8 顯示了初始化時段中包括起始時間和結束時間共 3 個時間點的颱風海表面風場與軸對稱平均風速結構，由圖上可以看到颱風的低層環流在此過程中逐漸增強，最大風速半徑內縮，同時系集平均的海表面軸對稱風速曲線也逐漸趨近給定的觀測值，在最後一個時間點與給定的觀測資料 (Willoughby 片段連續剖面公式所得) 相當吻合。圖 9 則為系集平均海表面風速剖面和中心最低海平面氣壓隨時間的演變，一樣可以看出整體結構逐漸增強、內核逐漸鞏固的情形。中心最低海平面氣壓在這段時間中由 995 hPa 降至 970 hPa 以下。

若查看每個系集成員的演變，我們由圖 7 與圖 8(b) 可看出，系集成員之間無論在路徑上或是軸對稱結構上的差異性並未隨著時間擴大，這是因為 EnKF 更新的計算有使分析誤差協方差縮小的趨勢，也就是說透過這樣的同化過程，模式已順利接受了颱風路徑與軸對稱風速等特殊觀測量，並反應在系集的不確定性上，使系集散布維持在一定的小範圍內。雖然圖 9(b) 的颱風中心最低氣壓散布似乎隨時間越來越大，但這主要是因為颱風中心氣壓相對於颱風強度並不是線性變化的，颱風整體強度的差異若以風速來看就沒有這麼大的差別。

我們可以進一步定量檢驗上述分析誤差和系集變異度的變化情形。圖 10(a) 顯示了颱風中心位置的統計，細線為系集平均中心位置與觀測中心位置的距離 d_{pos} ，原意是要度量模式與真實狀況的分析誤差，但我們不知道真實颱風位置在哪，只能用帶有觀測誤差的觀測量代替之；粗線為系集成員間中心位置的標準差 σ_{pos} ，代表的是

系集散布的程度，也代表模式的不確定性。這兩者在預報系集中的計算方式如下：

$$d_{\text{pos}}^f = \sqrt{(i_{\text{TC}}^o - \bar{i}_{\text{TC}}^f)^2 + (j_{\text{TC}}^o - \bar{j}_{\text{TC}}^f)^2} \quad (39)$$

$$\sigma_{\text{pos}}^f = \left[\frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K [(i_{\text{TC}}^k - \bar{i}_{\text{TC}}^f)^2 + (j_{\text{TC}}^k - \bar{j}_{\text{TC}}^f)^2] \right]^{\frac{1}{2}} \quad (40)$$

其中 i_{TC} 與 j_{TC} 為颱風中心位置的網格點座標，即為 (28) 式定義的特殊觀測算符，頂線表示如 (12) 式的系集平均，上標 o 代表同化至模式中的觀測量，上標 f 代表預報系集，也就是每次 EnKF 更新做為初始猜測值的上一同化週期之短時間（本實驗為 30 分鐘）預報，在圖中 d_{pos}^f 與 σ_{pos}^f 兩者皆以實線表示；而分析系集的結果則相當於把 (39) 式與 (40) 式的上標 f 全部替換成上標 a ，也就是取加入當次觀測資料後的分析結果，在圖中 d_{pos}^a 與 σ_{pos}^a 兩者皆以虛線表示。另外，颱風中心位置的觀測誤差設定 ((29) 式) 在圖中以粗點線表示。

就颱風海表面軸對稱風速結構的部份，我們一樣計算類似的兩個量 d_{wind} 和 σ_{wind} ，顯示於圖 10(b)。這裡的定義稍微複雜些，因為軸對稱風剖是一個一維的曲線，但它們的意義和中心位置的部份是一樣的。我們將預報系集中的軸對稱風速的系集平均誤差以及系集成員散布程度皆沿著徑向於 0~400 公里內（有同化軸對稱風速的範圍）做一積分平均：

$$d_{\text{wind}}^f = \frac{1}{400} \int_0^{400} d_V^f(r) dr = \frac{1}{400} \int_0^{400} |V^o(r) - \overline{V^f(r)}| dr \quad (41)$$

$$\sigma_{\text{wind}}^f = \frac{1}{400} \int_0^{400} \sigma_V^f(r) dr = \frac{1}{400} \int_0^{400} \left[\frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K [V^k(r) - \overline{V^f(r)}]^2 \right]^{\frac{1}{2}} dr \quad (42)$$

代表整條軸對稱風速剖面的平均誤差與系集散布。分析系集的結果一樣是把此二式的上標 f 全部替換成上標 a 。

由圖 10(a)、(b) 可以共同看到，不論是系集平均誤差或是系集成員的散布程度在同化時段開始不久後就被控制在一定的範圍之內，並有持續減小或維持的趨勢。到了初始化時段的最後 6 個小時，颱風中心位置的系集平均誤差保持在 20 公里以內，系集散布穩定維持在 12 公里左右；而軸對稱風速結構的系集平均誤差保持在每秒 1.5 公尺以內，系集散布穩定維持在每秒 0.5 公尺左右。這些量值的尺度都相當於同化資料

的觀測誤差。在大部分 EnKF 更新的時間點上，分析系集（虛線）的誤差值和不確定性都比預報系集（實線）還要小，也與卡爾曼濾波器的理論相符。以上種種結果都顯示這段 EnKF 同化的分析效果是良好的，模式順利接受了颱風中心位置與軸對稱風速結構的觀測。圖 10(a) 也可與圖 11 Chen et al. (2007) 的結果相互對照（取自 Chen et al. 2007, Fig. 10(b)，注意他們圖中實線與虛線的意義和我們的圖相反），兩者有相似的結果，也就是說我們在高解析度的三維全物理模式中驗證二維正壓模式中所得的結論。

3.3.2 不同化任何資料的結果 (NONE)

在 NONE 實驗中，我們不同化任何資料，對應的結果顯示在圖 12 至圖 15。系集路徑的分布由於我們未同化任何觀測資料而顯得凌亂分散（圖 12）。模式中的颱風雖有緩慢增強，但結構卻始終鬆散，最大風速半徑未明顯內縮，整條軸對稱風速曲線呈現較平坦的狀況（圖 13），且直到初始化時段的最後一個時間點，模式中的颱風強度仍與實際颱風的強度有一段明顯的差距，系集平均的中心氣壓僅降至 987 hPa 左右（圖 14）。在圖 15 中我們更可清楚看到，由於沒有任何資料加入，不管在中心位置上還是軸對稱風速結構上，模式的系集平均與實際觀測的差異居高不下，系集散布的程度也在預報的過程中逐漸增加。（與圖 10 相比，這張圖少了兩條虛線，這是因為此段過程實際上並沒有任何 EnKF 更新，因此沒有所謂的分析系集。）

這個實驗的結果可以印證在 TK-MS 實驗中颱風路徑與結構的變化與我們同化進去的颱風特殊觀測量關係密切。在我們設計的初始化時段中，由於初始場是直接取自解析度和物理過程皆較粗糙的全球模式，如果沒有這些描述颱風渦旋的特殊觀測加入，僅藉著 WRF 模式的動力，模式中的颱風渦旋並不會增強如此之快，到了初始化時段末期模式中的颱風結構仍與合理颱風結構相去甚遠。但若透過本研究的方法，同化三種颱風特殊觀測量後，我們就可以在初始化時段結束時獲得一良好的分析。

3.3.3 僅同化路徑的結果 (TK)

除了同時同化三種颱風特殊觀測量和不同化任何資料的實驗外，在 TK 實驗中，我們僅同化與颱風路徑有關的颱風中心位置與移動速度，對應的結果顯示在圖 16 至

圖 18。由圖中我們可以發現本實驗在路徑上的特性與 TK-MS 實驗相似，在同化的過程中系集平均的路徑持續跟隨著觀測路徑，最後 6 小時的路徑誤差皆小於 20 公里，系集散布程度較 TK-MS 實驗大些，但仍有一定範圍內，未隨時間擴大（圖 18(a)）。在颱風結構上的特性則與 NONE 相似，模式中的颱風結構始終鬆散，軸對稱風速曲線扁平，颱風強度在初始化時段末期僅增強至 985 hPa 左右（圖 16、17），模式的平均軸對稱風速結構與實際觀測的差異持續偏高（圖 18(b)）。

本實驗與 Chen et al. (2007) 最初的工作最為接近，也一樣得到類似的結果。值得注意的是，在圖 18(b) 中分析系集和預報系集的軸對稱結構統計特性幾乎沒有差異，也就是說僅同化颱風路徑對渦旋結構未能造成顯著的影響。這代表在同化颱風特殊觀測的過程中，颱風渦旋的路徑和結構似乎已被盡量拆解成兩個獨立的分量，可以分別控制，將有利於颱風動力研究的實驗設計。

3.3.4 颱風垂直結構的建立

最後我們來看一下模式中颱風渦旋的垂直結構。圖 19 為各實驗在初始化時段結束時（7 月 26 日 12 時）通過颱風中心的東西方向垂直剖面。在 TK-MS 實驗中（圖 19(a)），颱風的眼牆結構清晰可見，中心處有位渦最大值，中高層存在最大暖心，垂直環流自近海表層流入中心附近後，在眼牆處集中上升，並傾斜向外。這些特徵都符合我們認知中典型的颱風垂直結構，也就是說雖然我們在本研究中只有同化海表面單一一層的軸對稱風速剖面，但透過 EnKF 的同化方式，我們有能力建構出合理的三維颱風渦旋結構，而不必為了完成颱風初始化，嘗試以極為不足的觀測資料決定出詳盡的三維渦旋結構。

TK 與 NONE 實驗皆沒有同化颱風軸對稱風剖，由前面的介紹已知颱風結構較為鬆散，在垂直剖面的圖上更可清楚觀察出此二實驗（圖 19(b)、(c)）颱風中心的位置極值和暖心程度皆與 TK-MS 實驗有相當大的差距，垂直環流的型態也不對稱，不像已達颱風強度的熱帶氣旋應有的結構。

3.4 預報表現

經過 24 小時的初始化後，我們以初始化結果進行後續 2 天（7 月 26 日 12 時至 28 日 12 時）的預報。圖 20 為 TK-MS 實驗的系集路徑預報，系集平均路徑和實際觀測路徑的差異不大，成員間則在預報階段逐漸分歧，表現出系集的變異度，可作為颱風路徑機率預報的參考。一般直接做資料取代的渦旋植入方案常有駛流資訊保存不易的問題，而本研究同化的颱風特殊觀測量中，軸對稱風速由於其定義方式的關係，不會對颱風渦旋的移動造成影響，而颱風移動速度向量的同化則可視為將大尺度駛流資訊提供給模式，對路徑預報應該有一定的幫助。本實驗在後期的預報路徑掌握較好，而在預報初期的路徑有突然向北偏轉的現象，有可能是因為在初始化時段中以同化颱風中心位置與移速的方法去強迫控制路徑，到了預報階段不再同化路徑資料所致，但我們進行其他颱風案例的初始化實驗中（圖未示）卻不一定會出現這種現象，詳細原因仍有待進一步探討。

在強度預報方面，圖 21 為預報期間颱風中心最低海平面氣壓和海表面最大風速的演變。模式中颱風的強度在預報初期維持得相當平穩，並接近於觀測的發展趨勢，顯示 EnKF 同化所得的初始場本身平衡性佳，且符合所使用模式的動力。一般渦旋植入方案得到的初始場中颱風結構可能是不平衡的，模擬的前幾個小時會強迫產生很多不自然的重力波進行調整，造成颱風中心氣壓或最大風速有大幅震盪的情形（周昆炫 2003；Wu et al. 2006），這會使模式颱風強度預報的可用性降低不少，也會增加颱風動力模擬研究的困難。本方法可降低這方面的顧慮，是相當重要的優勢。

3.5 敏感度測試

很多因子會影響 EnKF 同化的效用，包括模式解析度、系集成員數量、協方差擴張的程度等（Zhang et al. 2006），這些參數的最佳設定值沒有固定的答案，要視不同的模式和不同的同化需求而定。本研究中颱風特殊觀測量的同化是一個創新的嘗試，我們也必須仔細檢驗這幾種不同的設定在同化過程中造成的影響，因此我們以 TK-MS 實驗為基礎，進行了幾組額外的敏感度測試實驗，實驗設計如表 3 的後六列。

3.5.1 模式解析度

模式解析度的測試以改變模式巢狀網格層數的方式來進行。最外層水平解析度 24 公里的網格在所有實驗中皆固定不變，因此每個實驗的模擬範圍完全相同，但在降低模式解析度的實驗（LOW）中，我們將內層水平解析度 8 公里、追隨颱風渦旋移動的網格拿掉；而在提高模式解析度的實驗（HIGH）中，將水平解析度 8 公里網格覆蓋的範圍擴大至包含整個颱風經過的區域，固定位置不再追隨颱風渦旋移動，其中再進一步增加第三層水平解析度 2.67 公里的高解析度網格，範圍 288×288 公里，這一層才跟隨颱風中心移動。

在 LOW 實驗中，圖 22 可以看出軸對稱風速曲線較 TK-MS 實驗來得平坦，颱風內核的強度也稍弱，圖 23 顯示不論在中心位置或是軸對稱風速結構上，系集散布程度的表現和 TK-MS 實驗相似，但系集平均和觀測的差異卻比 TK-MS 實驗大很多，而且隨時間的震盪相當劇烈。以上差異主要的來源就是解析度的限制，當網格點的水平解析度只有 24 公里的時候，本來就難以表示出 45 公里的最大風速半徑，甚至是寬度只有 10 公里左右的眼牆，而且在颱風中心位置的定位上也較不精準，無法準確地同化到正確位置上。因此 LOW 實驗表現較差的原因，與 EnKF 同化過程沒有直接的關係，而是要在模式的模擬中掌握颱風的內核結構，內核附近 8 公里的解析度算是起碼的要求。

HIGH 實驗的表現則正好完全相反。模式中颱風的軸對稱風速曲線可以調整至與同化的資料更為吻合，颱風結構更為理想（圖 24），系集平均和觀測的差異比 TK-MS 實驗還要小且隨時間平滑變化（圖 25）。也就是說我們 TK-MS 實驗選取 8 公里為最高模式解析度其實還是不太夠的，若能進一步提昇模式解析度還可以再使初始化做得更好，但這也意味著需要耗費更多的電腦資源，因此須在這兩者之間有所取捨。由此初步的檢驗，我們建議以同化颱風軸對稱風速剖面來做颱風初始化或是結構分析時，颱風中心附近的水平網格間距要達到 4~5 公里左右的水準。

3.5.2 系集規模

系集成員的個數，我們稱之為系集規模（ensemble size）。在 SMALL 實驗中我

們只使用 10 個系集成員，可以發現同化分析的效果比使用 28 個成員的 TK-MS 實驗降低很多，模式的颱風軸對稱風速曲線自始至終都和觀測資料有一段差距，內核部份無法調整到應有的強度（圖 26），軸對稱風速結構的系集平均誤差比 TK-MS 實驗大很多（圖 27(b)）。模式的颱風中心位置較不穩定，一直存在較大的位置誤差，直到初始化時段末期才勉強接近觀測的中心位置（圖 27(a)）。

在 BIG 實驗中我們將系集成員數增加一倍，達到 56 個。如果直接看初始化時段末期，同化分析的效果不論在路徑上還是在軸對稱風速結構上皆與 TK-MS 實驗相仿，皆能以同化颱風特殊觀測量的方法完成颱風的初始化（圖 28、29）。但 BIG 實驗在初始化時段的過程中調整較為快速且平順，尤其是在軸對稱風速結構方面，只花了不到 6 小時就可將颱風軸對稱風速曲線同化至接近給定的觀測資料（圖 29(b)），原本 TK-MS 實驗則需 12 小時以上的調整。

EnKF 是將實際物理空間中連續的誤差分布由有限樣本的系集近似，並且直接以模式的系集預報做誤差的推演。理論上系集成員的數量越多，就越能保證此近似的合理性，如果樣本數太少，很容易造成誤差分布狀態的錯誤估計，使 EnKF 同化的可用度降低。但系集規模的大小同樣代表著耗費電腦資源的數量，我們必須決定一適當的成員數來有效率地進行 EnKF 同化。過去的研究指出，若要良好發揮 EnKF 的效用，大約 40 ~ 100 個左右的系集成員是必須的（Houtekamer et al. 1998；Mitchell et al. 2002；Whitaker et al. 2002），我們在 TK-MS 實驗中使用的成員數是 28 個，相較於一般的建議值來說有點少，但由實驗的結果可知，以此系集規模，配合上適當的協方差擴張和協方差局地化的設定，就可以達成預期的颱風初始化的效果，當然如果有更多的系集成員（如 BIG 實驗），可以讓同化的過程更加完善。而在 SMALL 實驗，僅僅 10 個的系集成員很明顯是不足的，無法發揮同化颱風特殊參數的效用。

3.5.3 協方差擴張

在 INFLA-0.5 和 INFLA-0.95 實驗中我們將 TK-MS 實驗中的協方差擴張參數 α 從 0.8 調整為 0.5 和 0.95。協方差擴張是很人為的處理方法，用意是要強迫增加系集的誤差協方差，以彌補 EnKF 在有限樣本的分析過程中對誤差協方差的低估（詳見 2.2.5 協方差擴張）。TK-MS 實驗選取的 $\alpha = 0.8$ ，是在本實驗的模式設定下進行多

次實驗後選定的較為恰當的值，可獲得較佳的初始化效果。而 INFLA-0.5 實驗在颱風結構方面無法將颱風軸對稱風速曲線調整至接近觀測值（圖 30、31(b)），這是因為當 α 值太小時，未能完全抵消對誤差協方差的低估，會使得系集成員間的差異性越來越低（圖 31），但實際的觀測值卻可能遠落在系集的散布之外，讓往後的 EnKF 更新難以將模式的颱風路徑或軸對稱風速結構修正到觀測值上，此系集的用處將逐漸喪失。

相反地，在 INFLA-0.95 實驗中，雖然沒有如前述系集成員間差異性減小導致系集逐漸無用的問題，但過大的 α 值將使同化的觀測資料對系集散布沒有什麼影響力，系集成員間的差異性會逐漸增大，與合理的誤差分布範圍不符，也使得 EnKF 同化的過程中較容易產生過於劇烈的更新，很容易造成模式場的不平衡，隨時間劇烈震盪（圖 32、33）。

3.6 討論

由本章的實驗可證實，藉由同化本研究中定義的三種颱風特殊觀測量，可以在如 WRF 模式的高解析度三維全物理模式中完成颱風渦旋初始化，效用與 Chen et al. (2006、2007) 在二維正壓模式以及較低解析度的 WRF 模式中做的實驗類似。並且我們發現颱風的三維結構可以在僅同化海表面單一層軸對稱風速剖面的情況下被完善建立，這不僅是因為 EnKF 可以在同化過程中獲得不錯的分析場，更是因為 WRF 模式本身的動力過程所致。藉著模式的向前積分，可以在模式中發展出與自身動力相容的三維颱風渦旋結構，而持續且頻繁的 EnKF 更新會使系集中較接近觀測特性（中心位置以及海表面軸對稱風速結構）的成員獲得較大的重視程度，使模式的整體特性都往給定的觀測量調整，建構出我們想要的三維颱風渦旋。

影響 EnKF 效用的幾項關鍵因子的敏感度已在 3.5 節中被初步檢驗，就本實驗的目標和模式設定而言，颱風中心附近網格解析度可能提昇至 4~5 公里左右會得到更好的結果，系集成員數量 28 個還算堪用，而協方差擴張參數 α 的最佳設定約在 0.8 左右。在我們對其他幾個不同颱風案例做的初始化實驗中（圖未示），也觀察到類似的現象。

另一方面，由 2.3.3 節（海表面軸對稱風速結構）略顯繁瑣的步驟可知，在本研究中同化海表面軸對稱風速結構的流程也有相當大的不確定性，包括軸對稱風速剖面的決定和觀測誤差的給定等。這些不確定性的意義其實就類似於過去渦旋植入、虛擬渦旋資料同化中很多的不確定性因子，例如以修正 Rankine 渦旋結構來做渦旋植入時一樣需要決定 V_{max} 、 R_{max} 與 α 的值。因此不管用什麼颱風初始化方法，要降低這些不確定性同樣尚須更多的測試或是更好的觀測資料。其實就研究的角度而言，這些參數反而提供給我們更多彈性選擇的空間。本方法可以在模式中建構出具有各種低層軸對稱平均風場的颱風渦旋，並且在一定程度內它們是平衡且相容於模式動力的，有利於我們設計出各種颱風模擬實驗，探討不同颱風結構的影響以及其動力特性。

由於前述 EnKF 的特性，如果我們改同化其他高度單一層的軸對稱風速曲線，應該也可以獲得類似的效果。只是此層的高度不宜太高，因為颱風越高層的結構越不對稱，除了一般由低層風場決定出來的經驗公式將不適用外，整層風場中的軸對稱分量也會降低許多，失去了同化軸對稱風速的意義。實務上海表面風速的觀測稍微容易取得，QuikSCAT 衛星資料（Chou et al. 2009）與地面測站資料皆有參考價值，但卻未必是最適合的高度，因為邊界層內的風速垂直變化率相當大，如果模式對邊界層的參數化處理有系統性偏差，給出了錯誤的 10 米高風速，同化得到的颱風渦旋強度就很容易有偏差（模式中過高的 10 米高風速會導致整體颱風強度偏弱時此層風速就達到給定的觀測值，因此同化所得的颱風會比預期的弱，反之亦同），如果我們選取邊界層以上的高度來同化軸對稱風速，就可以避免這個問題。另外，飛機穿越偵察的飛行高度常為 700 hPa（參見後文 4.2 節對 T-PARC 實驗中美軍 C-130 飛機穿越偵察任務的描述），如果我們選取這層高度，也就可以直接使用飛機實測的風剖。因此海表面 10 米高度並非同化高度的唯一選擇，在其他高度做軸對稱平均風速的同化也應被加以檢驗測試。

本方法相較於傳統渦旋植入方案各有優缺點，簡單列於表 4。過去渦旋植入方案常被提出的問題包括：不易產生在模式中平衡的初始場、以虛假渦旋取代後的資料不易保存駛流資訊等（周昆炫 2003；Wu et al. 2006），在本方法中皆有改善。EnKF 的結果在單次更新不要太劇烈（即線性假設依然適用）的情況下，所得到的新的分析場本身就是平衡且符合該模式動力的，又由於有同化颱風移速的動作，初始化時段內對

颱風移動也能有一定程度的掌握。在技術問題方面，渦旋植入方案只適用於寬廣洋面上，若有大陸或島嶼地形的干擾，貿然進行資料取代是不合適的，而本方法則較無此限制，即使在大陸或島嶼附近亦能適用。

本方法的缺點有二，第一點是單次 EnKF 更新如果太過劇烈的話，會有不良的效果 (Chen et al. 2007)，因此當初始系集的渦旋位置或結構已經與實際大氣相差太遠時，本方法較難在短時間內使渦旋調整至給定的位置與結構，若強迫調整甚至會產生不少副作用。第二點是本方法的初始化時段大約需要 12~36 小時，即如圖 4 所示要提早一段時間就開始模擬，未如渦旋植入方案可在較短時間內就產生新的分析場。

本方法其實比較適合做長時段的模擬，尤其是對於比較強的颱風，最好自颱風生成初期就開始進行同化分析，而不要在颱風已經很強時才切取強度相差甚遠的全球模式分析作為初始場，如此一來模式中的颱風由就可以一直維持在相當接近觀測位置與結構的狀態，每次 EnKF 更新的增量不會太大，有助於模式產生更穩定的分析與預報。但以本章初始化實驗的執行方式，我們僅同化颱風特殊觀測量，未同化一般常態性觀測資料，也就是說除了颱風的路徑和軸對稱結構外，沒有任何觀測資訊進入模式中，這樣純粹預報的結果可能導致模式中的環境場和實際大氣的差異逐漸增大，也就是說初始化的過程雖然使得颱風結構越來越接近實際狀態，但周圍的環境卻已不是最新的分析場，這可能會使後續預報的表現變差。如果初始化時段的長度僅約一天，這樣的顧慮或許不是很重要，但若我們想從較早的時間點開始模擬，我們勢必要同化其他常態性觀測資料，類似作業模式的跑法，以維持環境場的資訊。這正是我們想要執行第二部份實驗的主要動機，在下一章的實驗中，我們將以同一套 EnKF 系統同時同化颱風特殊觀測量與一般觀測資料，進行涵蓋一颱風生命週期的長時間模擬分析。

第四章 快速更新週期同化分析實驗

在上一章的討論中（3.6 節）我們已經說明了設計第二部份實驗的原因。在本章中，我們將以類似作業模式的跑法，用同一套 EnKF 系統同時同化颱風特殊觀測量與一般觀測資料，維持環境場資訊與實際觀測的一致性，進行涵蓋一颱風生命週期的長時間模擬分析。

作業模式中一般會同化的觀測資料主要包括例行性的無線電探空儀（radiosonde）、地面測站資料、各式的衛星資料與飛機、船舶的例行性天氣報告等，從飛機上施放的投落送（dropwindsonde）資料也會和探空儀資料一樣同化入模式中。本研究由於所使用的模式和電腦資源未如作業單位中健全，在一般觀測資料的部份，我們僅選取最具代表性的無線電探空儀和投落送觀測資料來同化。同化這些資料的時間點與同化颱風特殊觀測量的時間相同，也就是每 30 分鐘同化一次，屬於快速更新週期（Rapid Update Cycle；RUC）的同化方式，每一筆觀測資料將依照觀測時間分配至最接近的時間點予以同化。

我們將最內層網格的解析度提昇至 5 公里，並且選取 2008 年 T-PARC 實驗期間擁有大量額外飛機觀測資料的辛樂克（Sinlaku）颱風作為個案，期能發揮本方法的最大效益，並且也可以初步探討 T-PARC 實驗資料在本方法中的影響程度。以下將分別詳細介紹所使用的觀測資料、實驗設計、以及各組實驗的分析與預報結果。

4.1 模式設定

本實驗的模式範圍設定如圖 34，為提昇颱風中心附近的解析度，採三層巢狀網格來模擬，水平解析度依次為 45、15、5 公里。圖 35 為本實驗的時間流程，初始系集產生自世界時 2008 年 9 月 8 日 12 時的 NCEP FNL 分析場（初始系集產生方式詳見 2.2.7.2 初始系集產生方式），系集成員有 28 個，預跑 5 小時後，同化分析的時段為 9 月 8 日 17 時至 9 月 13 日 3 時，時間長度超過 4 天，涵蓋辛樂克颱風生成至發展出雙眼牆的生命過程。最內層的巢狀網格自 9 月 9 日 3 時起才加入模式的颱風中心附近，往後追隨颱風渦旋移動。其他的設定和第一部份颱風初始化實驗完全一樣（積雲參數化只套用在水平解析度 45 公里與 15 公里的網格上）。

4.2 觀測資料與實驗設計

4.2.1 例行性無線電探空儀

我們透過中央氣象局取得全球傳遞系統（Global Telecommunication System；GTS）上的一般例行性探空儀資料，其中在模式外層網格範圍內的資料都會被同化至模式中，以維持模式環境場與真實大氣的一致性。同化的參數包括標準層（standard level）和特性層（significant level）上的水平風向量、溫度、相對濕度和重力位高度等，觀測誤差的設定與 WRF-Var 中預設的觀測誤差相同。同化此項資料的協方差擴張參數 α （詳見 2.2.5 協方差擴張）設定為 0.5，與 Zhang et al.（2006）的設定相同，協方差局地化的特性半徑 r_0 （詳見 2.2.6 協方差局地化）設定為水平方向 400 公里與模式垂直層數 15 層，也就是在三維方向上皆有作用。

同化分析時段內總共有 623 筆可用的無線電探空儀資料，空間分布如圖 36 中的紅色圓圈所示，在陸地上較密集，並約略呈均勻分布，在洋面上則只有零星島嶼設有探空測站；而時間分布則大量集中在綜觀時間（synoptic time）世界時 0 時與 12 時的前後 1 小時內。

4.2.2 投落送

T-PARC 實驗中的 4 架飛機對辛樂克颱風有密集的觀測，分別是台灣 DOTSTAR 計畫的 ASTRA 飛機、美國海軍的 C-130 飛機、美國海軍實驗室（Naval Research Laboratory；NRL）的 P-3 飛機與德國航太中心（German Aerospace Center；DLR）的 Falcon 飛機。這 4 架飛機的觀測策略各有不同，但皆有投擲投落送量測垂直大氣剖面。DOTSTAR 和 Falcon 以環境偵察為主，飛行路線通常在距颱風中心 200 公里以外，並且飛行在高對流層（約 200 ~ 170 hPa），其投落送資料幾乎涵蓋整層對流層大氣；C-130 進行的是穿越颱風中心偵察，P-3 則對專門科學議題（如邊界層及對流區之 Eldora 雷達觀測）有較特殊的飛行路線，兩者的飛行高度皆在 700 hPa 左右，因此投落送資料僅涵蓋 700 hPa 至海面的區域。

C-130 的穿越偵察任務常在眼牆區域投擲投落送，這些投落送資料將測得眼牆極

端風速區的垂直大氣結構，是相當寶貴的資料，但用於一般的資料同化上問題卻相當多。首先，若模式的解析度不足，模式中的颱風不可能具有真實颱風眼牆內的風速，因此同化這樣的資料是不恰當的。再者，即使模式解析度夠，模式中颱風位置的微小誤差就會造成觀測地點的風向有相當大的改變，甚至投落送在由投擲點下降至地面的過程中可能會有 180 度以上的旋轉，所測得的風速也將有 180 度的改變，但一般同化垂直大氣剖面的方式卻是將所有高度的資料都視為水平上同一個點，同化這樣風向變異度大的資料很容易造成模式的劇烈不平衡，使模式的預報表現變差（Aberson 2008）。基於以上因素，本研究特別將距離颱風中心 80 公里內的投落送資料（皆由 C-130 所投擲）獨立成一組，設計同化與不同化此部份資料的實驗，檢驗同化內核資料造成的影響。

本研究同化投落送資料的方式與同化無線電探空儀資料的方式相同，包括觀測誤差、協方差擴張和協方差局地化的設定。在同化分析時段內這 4 架飛機總共對辛樂克颱風進行了 9 個架次的觀測，可用的投落送資料總計有 159 筆，詳細數目見於表 5 與表 6，表 6 亦列出了這 9 架次任務的投落送觀測始末時間。各架次任務投擲的投落送位置分布見圖 36，其中 4 架飛機分別以不同底色顯示，標記符號的形狀則用以區隔不同飛行架次。

4.2.3 颱風路徑與軸對稱風速結構

在颱風路徑與軸對稱風速結構的同化方面，颱風中心位置和移動速度我們由日本氣象廳（Japan Meteorological Agency；JMA）提供的 3 小時颱風定位資料處理而來（詳見 2.3.1 中心位置與 2.3.2 移動速度），而海表面軸對稱風速則主要由 T-PARC 計畫中 4 次 C-130 穿越颱風中心飛行實測的風剖，輔以 2 次 DOTSTAR 觀測任務在外圍投擲的投落送資料決定出來（詳見 2.3.3 海表面軸對稱風速結構），與第一部份實驗相比，我們多了穿越偵察實地量測的資料可用，決定出來的軸對稱風速結構的可信度相當高。針對颱風特殊觀測量的協方差擴張和協方差局地化設定皆與第一部份初始化實驗的設計相同，也就是協方差擴張參數 $\alpha = 0.8$ ，協方差局地化在水平方向上的特性半徑 $r_0 = 500 \text{ km}$ ，垂直方向上不做協方差局地化，與前述一般觀測資料的處理是各自獨立的。

前面已經提過，美軍 C-130 飛機執行的是穿越中心的偵察任務，此任務除了投擲投落送外，最重要的就是可以直接量測颱風的徑向剖面結構。他們典型的飛行路線之一為「Alpha 型態」（Alpha pattern），如圖 37(d) 所示，可在一次飛行中測得 4 組風速的徑向剖面，由這些不同角度的剖面即可得知軸對稱平均的風速結構。此項穿越偵察任務通常的飛行高度為 700 hPa，風速的量測除了飛行高度風之外還有朝向海表面的 SFMR 觀測，可反演出海表面風速值，這對我們決定出海表面軸對稱風速結構有相當大的幫助。

圖 37 的左欄顯示這 4 次穿越偵察任務測得的風速資料與決定出來的海表面軸對稱風速結構，其中具兩個極大值的風速剖面是由線性疊加兩條不同的 Willoughby 片段連續剖面公式而得；右欄為最接近 C-130 觀測時間的低軌道衛星影像，疊加上 C-130 與 DOTSTAR 偵察任務的飛行路線。由這一系列的圖我們可大致了解辛樂克颱風在這段時間中的結構演變，9 月 9 日為剛生成的階段，結構較為鬆散，最大風速半徑約 50 公里；經過了一天的發展，強度快速增強，在 9 月 10 日已經接近生涯最大強度，海表面的近中心最大風速達到每秒約 40 公尺，最大風速半徑則內縮至 20 公里左右，此時軸對稱風速的曲線還算是標準的颱風結構，未有明顯的第二個極值出現，但由衛星影像可以看出外圍雨帶的強度已經逐漸增強；再經過一天後，9 月 11 日的風速曲線和衛星影像皆已呈現很明顯的雙眼牆結構，外眼牆出現在半徑 100 公里左右，風速已經比內眼牆還強，也就是說辛樂克颱風在 10 日至 11 日間經歷了一次典型的眼牆置換週期；最後在 9 月 12 日內眼牆接近消散，外眼牆半徑內縮至 50 公里左右，颱風強度有稍微減弱的趨勢，但仍維持一定水準。此案例複雜的結構變化正好是我們檢驗本方法（同化颱風海表面軸對稱結構）之適用性的好機會，我們將同化入具有雙眼牆結構的風速剖面，期望模式中之颱風能順利接受這項資料，得到長時間對颱風內核結構演變掌握良好的分析場。

4.2.4 實驗設計

在本研究定義的三種颱風特殊觀測量與 T-PARC 實驗獲得的大量投落送資料中，我們設計了多組快速更新週期同化分析實驗，列於表 7，每組實驗的模式設定完全相同（見 4.1 模式設定），但同化的資料集合各有不同。以這些同化分析實驗的結果為

預報初始場，我們也為每組實驗選取數個時間點進行系集預報（參見圖 35 實驗流程），用以檢驗同化不同種類資料對颱風分析與預報的影響。預報實驗取名為「分析實驗名稱_預報起始時間」，如「TK-MS_1103」表示以 TK-MS 實驗之 9 月 11 日 3 時分析場為初始場的預報。這些實驗皆起始自世界時 3 時，主要的用意是因為 0 時前後數小時內有最大量的觀測，對一般作業模式來說這些資料都將放在 0 時一起同化，而在我們的快速更新週期同化系統中，以 3 時為起始的預報才能保證已經使用到所有的資料。

4.3 同化分析時段

在整個同化分析時段中，我們最主要看的是以 TK-MS 開頭的實驗之結果，因為在這些實驗中有同化颱風路徑與軸對稱平均風速結構，我們希望這些實驗也能和第一部份的短時段初始化實驗一樣，得到颱風路徑與結構都與觀測相符的模式分析場。觀察 TK-MS、TM-MS-DOT、TM-MS-TP-OUT 與 TK-MS-TP-ALL 四組實驗的同化分析結果，颱風渦旋的主要特徵是類似的，因為頻繁的路徑與軸對稱平均風速的同化對模式中颱風的發展有相當大的約束力，颱風環流內額外投落送資料的同化不致於大幅改變颱風的主要結構（但對預報路徑仍會產生不小的影響，將於下一節中探討），因此我們主要以 TK-MS-TP-ALL 實驗為例，看一下模式中的颱風路徑與結構變化。

圖 38 為 TK-MS-TP-ALL 實驗同化分析時段中的颱風路徑，和我們預期的結果一樣，系集平均路徑與觀測路徑相當接近，系集成員間的變異度也被控制在一定範圍內。在結構方面，圖 39 與圖 40 顯示了這段期間海表面風速、海平面氣壓與 30 分鐘降雨率的演變情形。由圖中可以看到模式的初始場中幾乎看不出颱風結構，接著在 48 小時左右的時間中風速逐漸增強，最大風速半徑內縮，眼牆更加強化。自 11 日 0 時起外圍雨帶逐漸環繞一周形成外眼牆，內外眼間的對流被抑制，內眼牆的結構漸趨模糊，最終崩潰消失。這整段颱風結構演變的過程與我們在觀測（參見 4.2.3 颱風路徑與軸對稱風速結構）上看到的相當類似。我們也特別畫出具明顯雙眼牆結構時的模擬最大回波值與同一時間的低軌道衛星影像並列對照（圖 41），兩者無論在眼牆半徑或是螺旋雨帶位置上的相似度皆相當高。

進一步計算颱風的軸對稱結構，圖 42(a)、(b) 為軸對稱化後的海表面風速與 30 分鐘降雨率徑向剖面隨時間的變化，同樣可清楚看到典型眼牆置換過程的結構變化特徵。其中海表面風速的部份是我們以特殊觀測算符同化觀測資料強迫調整的，而降雨率則是藉著模式動力產生相應且合理的結果。圖 42(c) 則是颱風中心氣壓隨時間的變化，可見颱風發展的情形，這個參數也不是我們在同化過程中特別控制的量，但對照美軍 C-130 飛機 8 次穿越颱風中心的最低海平面氣壓報告（圖中黑色圓圈），也可發現模式中同化軸對稱風速所得的颱風強度和觀測頗為接近。可見藉著颱風軸對稱風速的同化，我們的確在模式中獲得了颱風結構與觀測相當符合的分析場，再一次顯示了本方法的可能效用。

最後仿照第一部份實驗定量檢驗 EnKF 的效果，即計算颱風中心位置與軸對稱風速的平均誤差與系集散布（詳見 3.3.1 節的 (39)~(42) 式），得到的結果如圖 43。在這邊我們只看預報系集（分析系集的數據與預報系集類似，但大約會小一些），並且同時畫上了 TK-MS、TK-MS-TP-OUT 與 TK-MS-TP-ALL 三組實驗的結果，以不同顏色顯示。和第一部份實驗所見相同，這兩個量的平均誤差一開始很大，但經過約 18 小時就縮小到接近觀測誤差的尺度，並在整個同化分析時段中持續維持較小的值，而系集散布也持續保持在一定的小範圍內。不過在這張圖中有兩點值得注意的地方，第一是系集平均的中心位置誤差在 9 月 12 日以後增大不少，雖然在後面的時間有拉回，但最後一天的分析結果確實較差，造成此點的原因不明，但我們猜測可能和此系集已經用了 3 天多或是颱風太過靠近陸地有關。第二點是這三組實驗的差異就是同化的一般觀測資料的多寡（TK-MS-TP-ALL 實驗同化了 T-PARC 實驗中所有的投落送資料，TK-MS-TP-OUT 實驗剔除了少數颱風內核的資料，TK-MS 實驗則完全沒有使用投落送資料，參見表 7 和表 5），這也反應在系集的散布程度上，因為 EnKF 分析方程的特性，自然會使加入越多觀測資料的實驗有越小的誤差協方差。但在系集平均誤差上的表現卻不一定，因為投落送資料和颱風中心位置或軸對稱結構的相關性不明，同化越多一般觀測資料不一定會讓颱風中心位置的分析越準確。

4.4 各組實驗的預報表現

4.4.1 TK-MS-TP-ALL 實驗的颱風路徑與結構預報

以分析實驗的結果做為初始場，不再同化任何一般觀測資料與颱風特殊觀測量，可進行多組預報模擬。首先關注 TK-MS-TP-ALL 實驗的預報部份，圖 44、45、46 分別顯示以 9 月 10 日 3 時、11 日 3 時、12 日 3 時為預報起始時間的預報之颱風渦旋結構演變，繪出的變量與圖 42 相同，唯圖中橫向分隔線為預報起始時間，在此以後的內容為的預報實驗結果。這三組實驗的預報路徑則請參見圖 47 至圖 49 中的淺綠色部份。

觀察這三個時間點的預報，可發現 10 日的預報表現不佳，在路徑上相較於觀測向東偏差頗大，颱風強度預報偏弱，結構上也未能掌握 11 日發生的眼牆置換過程；而 11 日和 12 日的預報表現就好很多，不但預報的颱風路徑與觀測較符合，就連在強度與結構上都有掌握到後續變化的主要特徵（可與圖 42 的分析實驗結果互相比較），並且如 3.4 節所述，在預報初期強度得以穩定維持，無重力波造成的劇烈震盪。其中 11 日的預報是我們最感興趣的部份，由軸對稱平均風與 30 分鐘降雨率的剖面可看出，在預報起始時間 11 日 3 時以前颱風雙眼牆的結構還不明顯，但在此之後模式預報的颱風軸對稱結構與分析實驗所得如出一轍，可以說模式預報出雙眼牆的形成，以及整個眼牆置換週期的結構變化。在 WRF 模式中是什麼要素控制颱風是否將產生雙眼牆？為何此時可以預報出雙眼牆結構但在前一天的預報就沒有辦法掌握？是值得我們探討的問題。

4.4.2 額外飛機觀測資料對同化路徑與軸對稱風速結構實驗的影響

接下來我們來看一下同化額外飛機觀測資料對路徑預報的影響。針對有同化路徑與軸對稱風速結構等颱風特殊觀測量的組別（TK-MS、TK-MS-DOT、TK-MS-TP-OUT、TK-MS-TP-ALL），圖 47、48、49 分別為 9 月 10 日 3 時、11 日 3 時、12 日 3 時開始的預報，並在一張圖中呈現了多組實驗的預報路徑，以不同顏色區分，各實驗的顏色見圖上標示。整體來說，僅多同化兩次 DOTSTAR 投落送資料的 TK-MS-DOT

實驗和同化除了颱風內核資料外所有 T-PARC 投落送資料的 TK-MS-TP-OUT 實驗，在路徑預報上的表現是較好的，而多同化入 C-130 在颱風內核區域施放的投落送資料的 TK-MS-TP-ALL 實驗之預報表現反而較差，可見此區域的投落送資料用於同化上的確有不少問題，和 Aberson (2008) 提出的觀點相符，因此使用上要特別小心。

4.4.3 額外飛機觀測資料對僅同化路徑實驗的影響

在僅同化颱風特殊觀測量中路徑部份（中心位置與移動速度）的組別（TK、TK-DOT），圖 50、51 分別為 9 月 10 日 3 時、11 日 3 時開始的預報。由圖中可見兩者 10 日的預報差異並不明顯，在路徑上相較於觀測都有較大的向東偏差，但多同化 DOTSTAR 資料的實驗（TK-DOT）在 11 日的預報有明顯的改善，系集平均的颱風路徑不論在方向還是移速上都相當接近觀測路徑。仔細觀察可發現 TK-DOT 的結果與有同化颱風軸對稱風速結構的 TK-MS-DOT 和 TK-MS-TP-OUT 實驗相似，我們初步推測這是因為藉由 DOTSTAR 投落送對颱風周圍數百公里處環境場的觀測，在已同化颱風路徑的基礎下，也能進一步掌握颱風周圍環境場的變化，得到較佳的路徑預報。

4.5 討論

辛樂克颱風算是在 2008 年 T-PARC 實驗中最徹底被觀測的颱風個案，颱風本身的強度達一定水準，生命期長，並有豐富的結構的演變過程。本實驗主要關注在辛樂克颱風登陸台灣前 4 天多的結構變化，在這段時間中強度達到巔峰，並經歷了完整的眼牆置換週期。延續第一部分的實驗設定和方法，我們以 EnKF 同化三種颱風特殊觀測量，外加上一般探空儀與投落送資料，在模式中得到颱風路徑與結構都相當合理的分析場，在水平解析度 5 公里的最內層網格下，連細緻的雙眼牆結構都能相當程度地呈現，支持其在模擬分析上的可能效用。

在辛樂克颱風的同化分析實驗中決定海表面軸對稱風速剖面的觀測量主要參考的是 T-PARC 實驗中美軍 C-130 飛機穿越偵察任務的資料，這項實地量測的資料可信度相當高，而且在意義上很接近我們想要同化的觀測量，可說是有了這項資料，就比較不需再考慮其他間接的觀測資料。本實驗中 C-130 飛機資料的使用方式與前面缺乏這項資料的實驗一樣，仍然是以經驗公式擬合，最後只看經驗公式得到平滑曲線。但仔

細想想，由於穿越偵察任務可以測得徑向連續性相當好的風速剖面，我們或許可以直接使用，而不必透過經驗公式擬合多此一舉。為了消除原始風速剖面資料由於局部強陣風造成的風速劇烈震盪，我們可以先將四個象限的資料平均後，再做徑向上的滑動平均，接著就直接同化這條忠於原始資料的軸對稱平均風速曲線。我們更可以直接同化為準確的飛行高度的風速，而不需使用到以 SFMR 反演估計而得的海表面風速資料。這算是賦予了飛機穿越偵察資料全新的使用方式，以往雖然累積了很多這種資料，但多用於主觀預報或是統計分析上，缺乏直接應用至動力模式中的方法，本方法則可有效且直接的將這種資料同化入模式中，可望發揮這項資料在颱風動力模擬上的效益。

我們也做了一系列同化不同組別資料的實驗，包括 TK、TK-DOT、TK-MS、TK-MS-DOT、TK-MS-TP-OUT、TK-MS-TP-ALL 等，以初步探討額外飛機觀測資料對模式分析與預報表現的影響。為有效利用這些颱風附近觀測資料，具有正確颱風中心位置與良好渦旋結構的初始場是必須的，如果初始猜測場中颱風渦旋位置錯誤或是結構太差，可能會得到錯誤的同化結果，失去同化額外觀測資料的意義。本研究中同化颱風特殊觀測量的方法正可使初始猜測場中的颱風中心位置較準確且有較合理的軸對稱渦旋結構，有利於與其他投落送資料共同使用。

比較各組實驗可發現在此個案中有同化投落送資料的實驗之預報表現大致上是比較好的，但多同化 C-130 在颱風內核區域施放的投落送資料卻反而會使路徑預報的表現變差，符合 Aberson (2008) 的討論，對往後飛機觀測資料的使用策略可提供有用的參考。但各項資料影響程度的實驗並非本研究的主軸，在這方面還有待更詳盡的後續分析。

第五章 總結

5.1 結論

由於數值模式的不斷進步，現今以高解析度的模式已能模擬出颱風的許多面向，包括強度與結構的演變。但初始場的建立仍然是一大問題，一方面是因為海面上的觀測資料不足，另一方面是因為現有的資料同化方式用在颱風渦旋上成效不佳，幾種常用的初始化方案也仍有許多待解決的問題，缺乏直接把颱風結構資訊放入模式中的有效方法。因此要改善模式對颱風的模擬和預報，颱風渦旋初始化的研究是一項相當重要課題。

有別於過去同化傳統的觀測資料、虛擬渦旋資料，或是直接做資料取代的颱風初始化方案，本研究以 Chen et al. (2007) 在正壓模式上同化渦旋中心位置的研究為基礎，針對颱風渦旋設計了幾項特殊觀測算符，包括颱風中心位置、渦旋移速與海表面軸對稱風速等，直接以 EnKF 的技術同化這些特殊觀測量，也就等同於直接將颱風的路徑與軸對稱平均結構同化至模式中。我們的實驗結果支持這項方法的可用性，可在高解析度的三維全物理模式中獲得與觀測接近並具備合理颱風渦旋結構的分析場，以此為初始場做預報模擬時在路徑與結構上也皆有不錯的表現。

颱風中心位置與移動速度這兩項參數共同代表颱風的路徑，這兩項觀測資料的來源很單純，最主要就是各作業單位參考衛星資料做出來的颱風定位。而海表面軸對稱風速是颱風結構的一項重要因子，可有效地約束颱風的結構特徵，又不會影響到颱風的移動以及非軸對稱結構，但這方面通常沒有直接的觀測資料可用，本研究採經驗公式擬合飛機或其他觀測資料的方式來建構颱風軸對稱風速剖面，將 Willoughby 片段連續剖面公式作為觀測資料同化至模式中。前文詳細交代了本實驗中同化颱風軸對稱風速的流程和方法，但也可發現其中仍有很大的不確定性，有待未來更多實驗的測試加以改善。

由於 EnKF 的分析結果在偏離線性假設不遠的情況下是相容於所搭配的模式，因此同化結果將不會有不平衡的問題，這相對於渦旋植入方案容易導致模式不平衡是一大優勢。而且藉著模式本身的動力，我們可以在僅同化海表面單一層軸對稱風速

剖面的情況下建立出合理的颱風三維結構，使我們不必花費許多不必要的努力去「猜測」什麼樣的三維結構是這個模式可以接受的，而是讓模式自己調整出符合當時環境與颱風強度的結構。

颱風路徑與軸對稱平均結構的同化在本研究中有兩個面向的功用。第一個是短時間的同化和過去颱風模擬研究中初始化步驟的效用類似，在短時間內改善原先不良的初始場（可能是來自較低解析度的全球模式分析），以獲得較好的預報模擬結果。第三章鳳凰颱風的實驗顯示了以此方式做颱風初始化是可行的，獲得的預報初始場平衡性佳，對駛流的掌握也良好。我們也對模式解析度、系集規模與協方差擴張參數做了敏感度測試，可提供未來以此方法進行颱風渦旋初始化時的參考。

另一方面的功用則是長時段的同化可獲得一段時間的分析場，但為了維持環境場與實際觀測的一致性，我們必須在同化颱風特殊觀測的同時盡可能地同化所有可用的觀測資料。第四章的部份正是對此應用的基本測試，藉此方法我們模擬出辛樂克颱風在數天內複雜的結構演變，包括一次典型的眼牆置換週期。本方法主要的價值在於能夠完善地重新建構出符合觀測颱風路徑與結構的分析場，有機會深入探討颱風整體演變的動力過程。另外，本方法也有改善作業模式預報的潛力，在一套使用 EnKF 資料同化系統的作業模式中，我們可在原本的資料同化流程中頻繁地同化入這些額外的颱風特殊觀測，保持颱風的路徑和軸對稱結構和最新的觀測相符，改善預報初始場。

我們也發現 T-PARC 實驗期間穿越颱風中心的飛機觀測資料對颱風軸對稱風速同化有相當大的助益，這項實地量測的資料具較高之可信度，而且意義近似於我們想要同化的軸對稱平均風速。以往要將穿越偵察資料直接應用於動力模式中是較困難的，本研究創新提供有效使用這項資料的方式，直接將這種資料同化入模式中，可望發揮這項資料在颱風動力模擬上的特別效益。

5.2 未來展望

對於這樣一套嶄新的方法，我們已成功建置初步的同化模型。本研究提供了一套可行的流程，可用來進行短時段的颱風初始化或是長時段的同化分析，並檢驗其成

效，以作為未來在中尺度區域模式中同化颱風特殊觀測量的參考。但這方面的研究仍有很多可改進的空間及待解決的問題，包括颱風軸對稱風速之觀測值決定過程的不確定性，同化單層風剖的高度的選取（參見 3.6 討論），以及各種颱風特殊觀測量的觀測誤差給定等，這些技術性的問題雖不至於影響整套方法的基本意涵，卻可能會對實驗結果的好壞產生影響。因此更多同化颱風特殊觀測量的實驗仍有待進行，以規劃出更好的流程，釐清各種不確定性的影響程度與本方法使用上的限制。

一旦有了可有效控制颱風結構的初始化方式，除了能做真實個案的模擬外，也可用來設計一些探討颱風動力的實驗，特別是針對颱風內核結構方面的研究（Wu et al. 2009）。例如在探討颱風渦旋和地形的交互作用時，我們可設計一系列的實驗，每個實驗中颱風的初始路徑相同，但在軸對稱結構上有差異，觀察其後續模擬的路徑變化、降雨分布等。以往以渦旋植入方案設計這種實驗時，颱風渦旋的結構在模擬初期必須經歷調整過程，因此實驗設計困難，本方法則直接給定各式颱風渦旋的低層軸對稱平均風速結構，並且在一定程度內是與模式動力平衡的，相當有利於此方面的實驗設計。

此方法也有應用在作業模式預報上的潛力。現今已有許多以 EnKF 做資料同化的作業模式，它們原本就持續同化許多常態性觀測資料，並可能做例行性的系集預報，要在這些模式中加入颱風路徑與軸對稱結構等特殊觀測量的同化並不難，甚至若是原先的模式就已經採用如 1.1 節所介紹的幾種颱風初始化方法來改善對颱風的掌握度，就可以直接用同化颱風特殊觀測量的方法取代。這套技術長久下來對作業颱風預報是否能產生改善，值得後續觀察與檢驗。

最後我們要強調以飛機進行颱風觀測的特殊重要性。由於有 2008 年 T-PARC 實驗四架飛機聯合觀測的寶貴資料，我們有機會在辛樂克颱風的個案中做許多有用的同化分析。透過颱風路徑和結構的同化，本研究已可有效使用這些資料，這些掌握颱風結構的高解析度分析模擬正可用來仔細檢驗額外飛機觀測資料的影響程度，探討颱風可預報度的議題，並可為颱風動力研究帶來新的突破。

附錄 A 本研究的 EnKF 執行步驟

1. 已知 $\mathbf{x}_{(k)}^f$

2. $\bar{\mathbf{x}}^f = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{x}_{(k)}^f$, $\mathbf{x}'_{(k)}^f = \mathbf{x}_{(k)}^f - \bar{\mathbf{x}}^f$... (12)、(18) 式

3. 對每組要一起同化的觀測資料重複以下迴圈：

(1) $\mathbf{P}^f \mathbf{H}^T = \frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K [\mathbf{x}_{(k)}^f - \bar{\mathbf{x}}^f][\mathbf{h}(\mathbf{x}_{(k)}^f) - \overline{\mathbf{h}(\mathbf{x}^f)}]^T$... (13) 式

$\mathbf{H} \mathbf{P}^f \mathbf{H}^T = \frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K [\mathbf{h}(\mathbf{x}_{(k)}^f) - \overline{\mathbf{h}(\mathbf{x}^f)}][\mathbf{h}(\mathbf{x}_{(k)}^f) - \overline{\mathbf{h}(\mathbf{x}^f)}]^T$... (14) 式

(2) 以 Cholesky factorization 求解矩陣平方根，矩陣維度為一起同化的觀測量數目。

$\mathbf{H} \mathbf{P}^f \mathbf{H}^T + \mathbf{R} = \mathbf{Z}_d \mathbf{Z}_d^T$, $\mathbf{R} = \mathbf{Z}_r \mathbf{Z}_r^T$... (22)、(23) 式

(3) 分別計算用於系集平均與系集偏差的卡爾曼增益矩陣。

$\mathbf{K} = \mathbf{P}^f \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}^f \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}$... (15) 式

$\tilde{\mathbf{K}} = \mathbf{P}^f \mathbf{H}^T \mathbf{Z}_d^T (\mathbf{Z}_d + \mathbf{Z}_r)^{-1}$... (21) 式

(4) 對卡爾曼增益矩陣施以協方差局地化， $C(r)$ 由 (26) 式計算。

$\mathbf{K} = C(r) \mathbf{K}$

$\tilde{\mathbf{K}} = C(r) \tilde{\mathbf{K}}$

(5) 以不同方程式對系集平均與系集偏差做觀測更新。

$\bar{\mathbf{x}}^a = \bar{\mathbf{x}}^f + \mathbf{K}[\mathbf{y}^o - \mathbf{h}(\bar{\mathbf{x}}^f)]$... (19) 式

$\mathbf{x}'_{(k)}^a = \mathbf{x}'_{(k)}^f - \tilde{\mathbf{K}} \mathbf{h}'(\mathbf{x}_{(k)}^f)$, $\mathbf{h}'(\mathbf{x}_{(k)}^f) = \mathbf{h}(\mathbf{x}_{(k)}^f) - \overline{\mathbf{h}(\mathbf{x}^f)}$... (20) 式

4. 在原先的預報系集偏差和最後的分析系集偏差間以 α 為權重做協方差擴張。

$\mathbf{x}'_{(k)}^a{}_{new} = (1 - \alpha) \mathbf{x}'_{(k)}^a + \alpha \mathbf{x}'_{(k)}^f$... (25) 式

5. $\mathbf{x}_{(k)}^a = \bar{\mathbf{x}}^a + \mathbf{x}'_{(k)}^a$... (18) 式

6. 以 WRF 模式進行預報。

$\mathbf{x}_{n+1(k)}^f = \mathbf{m}(\mathbf{x}_{n(k)}^a)$... (9) 式

附錄 B 模式的垂直層設定與海表面風求取方式

WRF 模式採用隨地形變化的垂直座標 η ，下邊界為地表或海表，座標值為 1；上邊界預設為 50 hPa 氣壓面，座標值為 0，之間依照氣壓線性變化：

$$\eta = \frac{p - p_t}{\mu}, \quad \mu = p_s - p_t \quad (43)$$

其中 p_t 為上邊界氣壓（常數）， p_s 為下邊界（地表）氣壓。

本研究中模式的垂直層數皆設定為 35 層，分佈如圖 52，在接近上、下邊界處的解析度較高，而在中層大氣的解析度較低，這與一般模擬常用的設定類似。但為了同化過程中求取海表面 10 米高度風的方便，我們特別設計下邊界附近的垂直層分佈，使 u 、 v 的最底層網格點大約落在 10 米高度上，直接以這一層的值來代表海表面風。由壓高公式估計 10 米高度的 η 值：

$$z = \frac{R\bar{T}}{g_0} \ln\left(\frac{p_s}{p}\right) \quad (44)$$

帶入 $z = 10 \text{ m}$ 、 $R = 287 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 、 $\bar{T} \approx 300 \text{ K}$ 、 $g_0 = 9.81 \text{ m/s}^2$ 、 $p_s \approx 1000 \text{ hPa}$ ，求得 $p \approx 998.8613 \text{ hPa}$ ，因此 $\eta \approx (998.8613 - 50) / (1000 - 50) = 0.9988$ 。值得注意的是，WRF 模式大部份的變數都落在半層的位置，包括垂直座標上的水平風速 u 、 v ，因此 η 座標的第一層和第二層要設定為 1 和 0.9976（如圖），才能使 u 、 v 的最底層網格點落在 $\eta = 0.9988$ 的位置。

參考文獻

- 周昆炫，2003：颱風渦旋初始化之觀測系統模擬實驗研究。國立台灣大學大氣科學研究所博士論文，121 頁。
- 曾忠一，2006：大氣科學中的反問題（上）、（下）。國立編譯館，1288 頁。
- Aberson S. D., 2008: Large forecast degradations due to synoptic surveillance during the 2004 and 2005 hurricane seasons. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 3138–3150.
- Barker, D. M., W. Huang, Y.-R. Guo, and A. J. Bourgeois, 2003: A three-dimensional variational (3DVAR) data assimilation system for use with MM5. NCAR Tech. Note NCAR/TN453+STR, 68 pp.
- Bender, M. A., R. J. Ross, R. E. Tuleya, and Y. Kurihara, 1993: Improvements in tropical cyclone track and intensity forecasts using the GFDL initialization system. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 2046–2061.
- Burgers, G., P. J. van Leeuwen, and G. Evensen, 1998: Analysis scheme in the ensemble Kalman filter. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 1719–1724.
- Chen, Y., and C. Snyder, 2006: Initializing a hurricane vortex with an ensemble Kalman filter. The 7th WRF users' workshop, NCAR, Session 3.3.
- _____, _____, 2007: Assimilating vortex position with an ensemble Kalman filter. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 1828–1845.
- Chou, K.-H., and C.-C. Wu, 2008: Typhoon initialization in a mesoscale model - Combination of the bogus vortex and the dropwindsonde data in DOTSTAR. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 865–879.
- _____, C.-C. Wu, P.-H. Lin, and S. Majumdar, 2009: Validation of QuikSCAT wind vectors by dropwindsonde data from DOTSTAR. Submitted to *J. Geophys. Res.*.
- Edson R. T., and M. A. Lander, 2003: A method for integrated satellite reconnaissance fix accuracy. 12th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography, Amer. Meteor. Soc., Poster Session 2.19.
- Elsberry R. L. and P. A. Harr, 2008: Tropical Cyclone Structure (TCS08) Field Experiment Science Basis, Observational Platforms, and Strategy. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, **44**, 3, 209–231.

- Evensen, G., 1994: Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. *J. Geophys. Res.*, **99**, 10 143–10 162.
- _____, 2003: The ensemble Kalman filter: Theoretical formulation and practical implementation. *Ocean Dyn.*, **53**, 343–367.
- Franklin, J. L., S. J. Lord, S. E. Feuer, and F. D. Marks Jr., 1993: The kinematic structure of Hurricane Gloria (1985) determined from nested analyses of dropwindsonde and Doppler radar data. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 2433–2451.
- Gaspari, G., and S. E. Cohn, 1999: Construction of correlation functions in two and three dimensions. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **125**, 723–757.
- Holland G. J., 1980: An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes. *Mon. Wea. Rev.*, **108**, 1212–1218.
- Houtekamer, P. L., and H. L. Mitchell, 1998: Data assimilation using an ensemble Kalman filter technique. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 796–811.
- Kalman, R. E., 1960: A new approach to linear filtering and prediction problems. *Trans. ASME, Series D, J. Basic Eng.*, **82**, 35–45.
- Kurihara, Y., M. A. Bender, and R. J. Ross, 1993: An initialization scheme of hurricane models by vortex specification. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 2030–2045.
- _____, _____, R. E. Tuleya, and R. J. Ross, 1995: Improvements in the GFDL hurricane prediction system. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 2791–2801.
- _____, R.E. Tuleya, and M.A. Bender, 1998: The GFDL hurricane prediction system and its performance in the 1995 hurricane season. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 1306–1322.
- Lin, P.H., and C.S. Lee, 2008: The eyewall-penetration reconnaissance observation of typhoon Longwang (2005) with unmanned aerial vehicle, aerosonde. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **25**, 15–25.
- Liu, Q., T. Marchok, H.-L. Pan, M. Bender, and S. Lord, 2002: Improvements in hurricane initialization and forecasting at NCEP with global and regional (GFDL) models. Tech. Procedures Bull. 472, NCEP/EMC Tech. Rep., 7 pp.

- Mallen, K. J., M. T. Montgomery, and B. Wang, 2005: Reexamining the near-core radial structure of the tropical cyclone primary circulation: Implications for vortex resiliency. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 408–425.
- Meng Z., and F. Zhang, 2007: Tests of an ensemble Kalman filter for mesoscale and regional-scale data assimilation. Part II: Imperfect model experiments. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 1403–1423.
- Mitchell, H. L., P. L. Houtekamer, and G. Pellerin, 2002: Ensemble size, balance, and model-error representation in an ensemble Kalman filter. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 2791–2808.
- Pearce, R. P., 1993: A critical review of progress in tropical cyclone physics including experimentation with numerical models. Proc. ICSU/WMO Int. Symp. on Tropical Disasters, Beijing, China, ICSU/WMO, 45–59.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, J. G. Powers, 2005: A description of the Advanced Research WRF version 2. NCAR Tech. Note, NCAR/TN-468+STR, 88 pp.
- Uhlhorn, E. W., P. G. Black, J. L. Franklin, M. Goodberlet, J. Carswell, and A. S. Goldstein, 2007: Hurricane surface wind measurements from an operational stepped frequency microwave radiometer. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 3070–3085.
- Whitaker J. S., and T. M. Hamill, 2002: Ensemble Data Assimilation without Perturbed Observations. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 1913–1924.
- Willoughby H. E., and M. E. Rahn, 2004: Parametric representation of the primary hurricane vortex. Part I: Observations and evaluation of the Holland (1980) model. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 3033–3048.
- _____, R. W. R. Darling, and M. E. Rahn, 2006: Parametric representation of the primary hurricane vortex. Part II: A new family of sectionally continuous profiles. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1102–1120.
- Wu, C.-C., T.-S. Huang, K.-N. Huang, and T.-C. Yeh, 2000: PV diagnostics of the impact of model initialization on the performance of a typhoon prediction system. Preprints, 24th Conf. On Hurricanes and Tropical Meteorology, Fort Lauderdale, FL, Amer. Meteor. Soc., 423–424.

- _____, and Coauthors, 2005: Dropwindsonde Observations for Typhoon Surveillance near the Taiwan Region (DOTSTAR): An overview. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **86**, 787–790.
- _____, K.-H. Chou, Y. Wang and Y.-H. Kuo, 2006: Tropical cyclone initialization and prediction based on four-dimensional variational data assimilation. *J. Atmos. Sci.*, **63**, 2383–2395.
- _____, K.-H. Chou, P.-H. Lin, S. D. Aberson, M. S. Peng, and T. Nakazawa, 2007: The impact of dropwindsonde data on typhoon track forecasts in DOTSTAR. *Wea. Forecasting*, **22**, 1157–1176.
- _____, H.-J. Cheng, Y. Wang, and K.-H. Chou, 2009: A numerical investigation of the eyewall evolution in a landfalling typhoon. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 21–40.
- Xiao, Q., X. Zou, and B. Wang, 2000: Initialization and simulation of a landfalling hurricane using a variational bogus data assimilation scheme. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 2252–2269.
- Zhang, F., C. Snyder, and J. Sun, 2004: Impacts of initial estimate and observation availability on convective-scale data assimilation with an ensemble Kalman filter. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 1238–1253.
- _____, Z. Meng, and A. Aksoy, 2006: Tests of an ensemble Kalman filter for mesoscale and regional-scale data assimilation. Part I: Perfect model experiments. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 722–736.
- _____, and C. Snyder, 2007: Ensemble-based data assimilation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **88**, 565–568.
- Zou, X., and Q. Xiao, 2000: Studies on the initialization and simulation of a mature hurricane using a variational bogus data assimilation scheme. *J. Atmos. Sci.*, **57**, 836–860.

附表

表 1 應用 WRF 模式上的 EnKF 資料同化系統之狀態變數列表。

變數	單位	維度
u 水平風速在東西向網格點座標之分量	m/s	3
v 水平風速在南北向網格點座標之分量	m/s	3
w 垂直運動速度	m/s	3
θ' 擾動位溫 (perturbation potential temperature)	K	3
ϕ' 擾動重力位 (perturbation geopotential)	m^2/s^2	3
μ'_d 擾動乾空氣柱質量 (perturbation dry air mass in column)	Pa	2
q_v 水汽 (water vapor) 混合比	kg/kg	3
q_c 雲水 (cloud water) 混合比	kg/kg	3
q_i 雲冰 (cloud ice) 混合比	kg/kg	3
q_r 雨 (rain) 混合比	kg/kg	3
q_s 雪 (snow) 混合比	kg/kg	3
q_g 霰 (graupel) 混合比	kg/kg	3

表 2 本研究定義之三種描述颱風渦旋的特殊觀測量。

	中心位置	移動速度	海表面軸對稱風速結構
同化量	i_{TC} 、 j_{TC} (網格點座標)	i'_{TC} 、 j'_{TC}	$V(r)$ (半徑 0~400 公里間 取數十個點)
觀測資料	作業單位提供的 颱風中心定位資料	作業單位提供的 颱風中心定位資料	以颱風軸對稱風速經驗 公式擬合有限的觀測資料
觀測誤差	10~20 km	1~1.5 m/s	隨風速觀測值增加， 但不小於 0.5 m/s

表 3 鳳凰颱風初始化實驗的各組實驗設計。

實驗名稱	同化颱風特殊觀測量		模式各層 網格解析度 (公里)	系集規模 (成員 個數)	協方差擴張 參數 α
	颱風路徑 (中心位置與 移動速度)	颱風 軸對稱 平均結構			
NONE			24 / 8	28	0.8
TK	○		24 / 8	28	0.8
TK-MS	○	○	24 / 8	28	0.8
LOW	○	○	24	28	0.8
HIGH	○	○	24 / 8 / 2.67	28	0.8
SMALL	○	○	24 / 8	10	0.8
BIG	○	○	24 / 8	56	0.8
INFLA-0.5	○	○	24 / 8	28	0.5
INFLA-0.95	○	○	24 / 8	28	0.95

表 4 以同化颱風特殊觀測量做颱風渦旋初始化與傳統渦旋植入方案的比較。

	同化颱風特殊觀測資料	渦旋植入方案
所得分析場的平衡性	佳	需考慮特定平衡方程， 且對於不同模式狀況不一。
駛流掌握	佳	通常不佳
是否可適用於地形附近	可	較不適用
是否可做大幅度位移	不適用	可
預先模擬時間	長 (約 12 ~ 36 小時)	短 (約 0 ~ 12 小時)

表 5 辛樂克颱風同化分析時段內可用的觀測資料數目。C-130 的內核資料指距離颱風中心 80 公里內的投落送資料，其他資料指 80 公里外的投落送資料。

常態性 探空儀	投落送					
	DOTSTAR ASTRA	DLR Falcon	NRL P-3	USAF C-130		
				內核資料	其他資料	
可用資料 數目	623	36 (2 架次)	34 (2 架次)	12 (1 架次)	20 (4 架次)	57

表 6 辛樂克颱風同化分析時段內的 9 架次飛行觀測任務概況。

觀測單位 / 飛機型號	投落送觀測始末時間 (UTC)	可用投落送數目	起飛地點	降落地點
USAF C130	09/09 04 時 ~ 09/09 08 時	18	關島	關島
DOTSTAR ASTRA	09/09 21 時 ~ 09/10 02 時	17	台灣台中	台灣台中
USAF C130	09/10 05 時 ~ 09/10 09 時	20	關島	關島
DOTSTAR ASTRA	09/10 21 時 ~ 09/11 02 時	19	台灣台中	台灣台中
NRL P3	09/10 23 時 ~ 09/11 03 時	12	關島	關島
DLR Falcon	09/11 04 時 ~ 09/11 08 時	19	日本神奈川	琉球那霸
DLR Falcon	09/11 09 時 ~ 09/11 12 時	15	琉球那霸	日本神奈川
USAF C130	09/11 11 時 ~ 09/11 16 時	21	關島	關島
USAF C130	09/12 16 時 ~ 09/12 20 時	18	關島	關島

表 7 辛樂克颱風快速更新週期同化分析實驗的各組實驗設計。

實驗名稱	颱風特殊觀測量			T-PARC 投落送資料		
	常態性探空儀	颱風路徑 (中心位置與移動速度) (TK)	颱風軸對稱平均結構 (MS)	僅含 DOTSTAR 投落送 (DOT)	濾除颱風內核資料之 T-PARC 投落送 (TP-OUT)	所有 T-PARC 投落送 (包含颱風內核資料) (TP-ALL)
TK	○	○				
TK-DOT	○	○		○		
TK-MS	○	○	○			
TK-MS-DOT	○	○	○	○		
TK-MS-TP-OUT	○	○	○	○	○	
TK-MS-TP-ALL	○	○	○	○		○

附圖

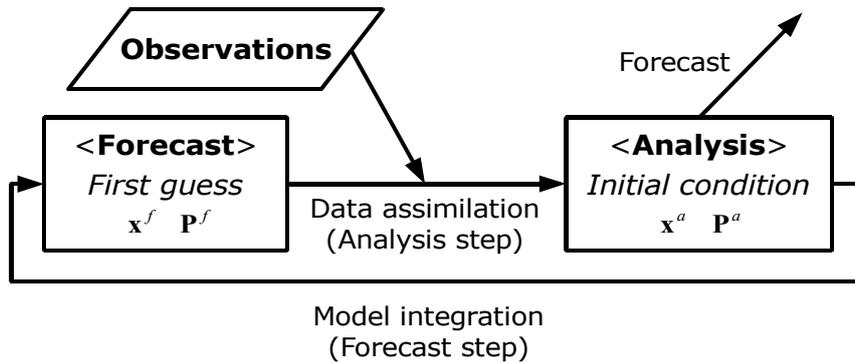


圖 1 資料同化更新週期流程示意圖。

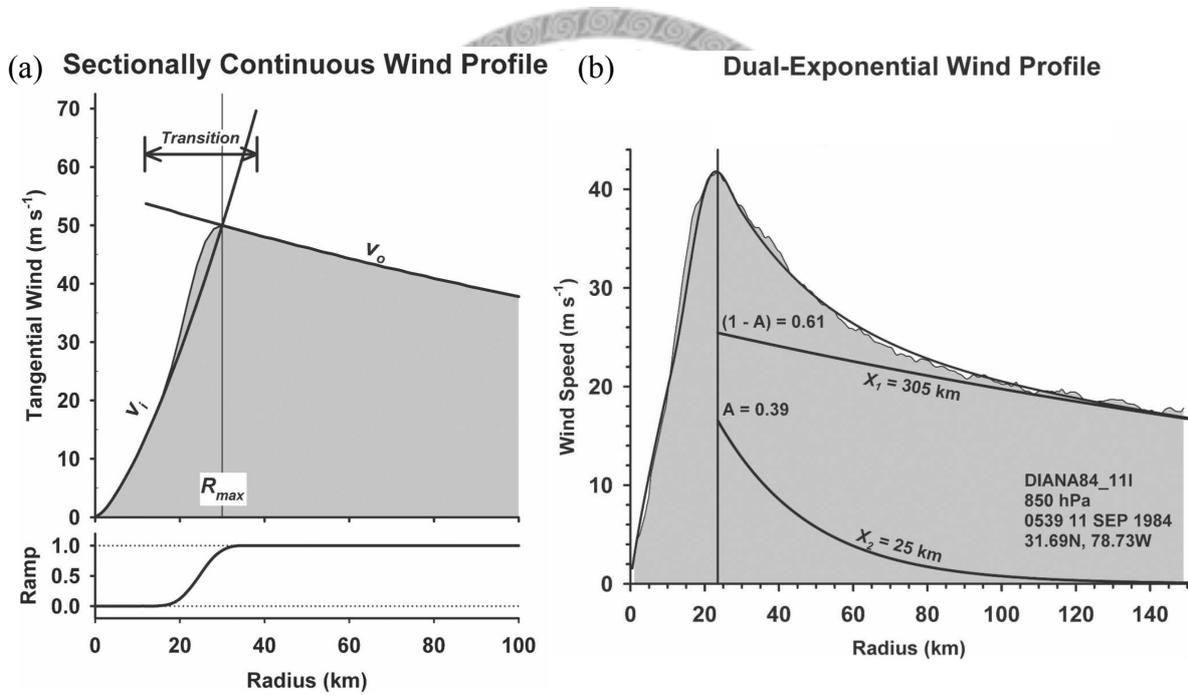


圖 2 Willoughby 片段連續剖面公式的示意圖以及觀測資料擬合範例。(a) 上圖粗線 V_i 為內部風速曲線（最大風速半徑以內）， V_o 為外部風速曲線（最大風速半徑以外），兩區域交接處以下圖之權重函數 w 平滑化，最後所得風速剖面為上圖著色區。(b) 著色區為 Diana 颶風在 1984 年 9 月 11 日的觀測風速剖面，粗線為公式擬合結果，其中外部風速曲線採雙指數遞減疊合。（取自 Willoughby et al. 2006, Fig. 1、Fig. 2）

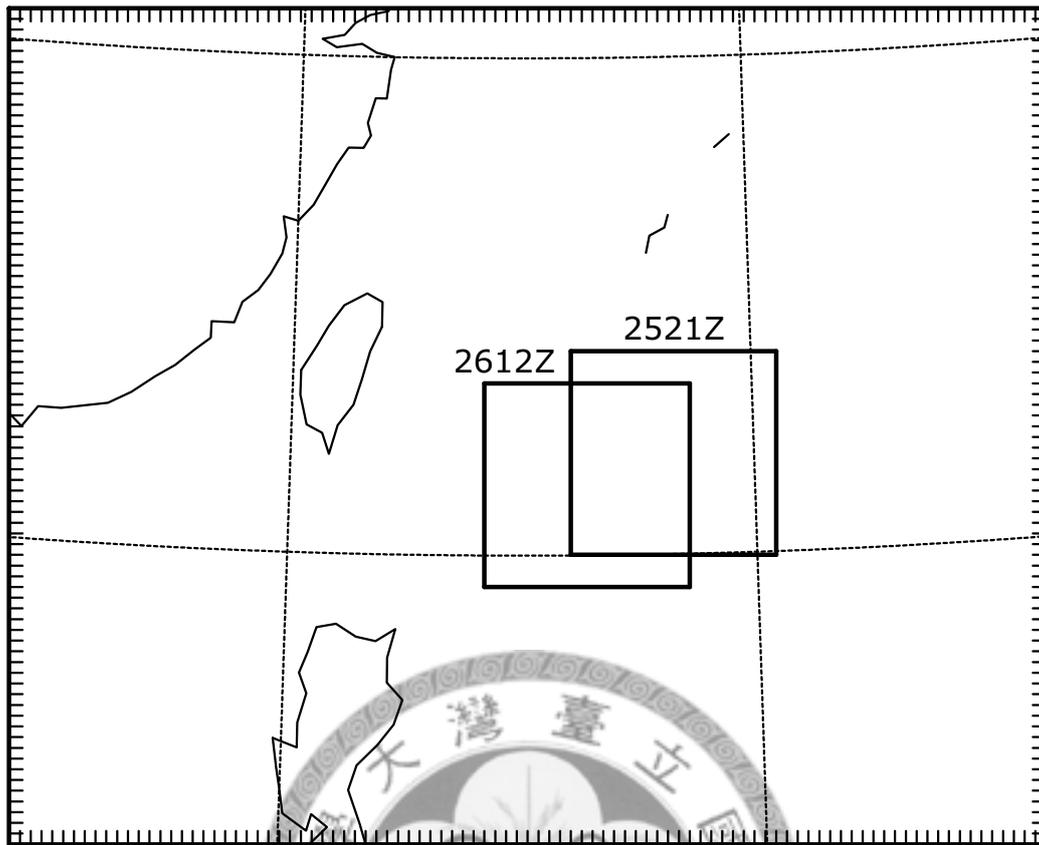


圖 3 鳳凰颱風初始化實驗的模式範圍設定。總共 2 層網格，其中最內層網格會追隨颱風渦旋中心移動，圖中顯示了起始時間（7 月 25 日 21 時）和結束時間（7 月 26 日 12 時）的位置。

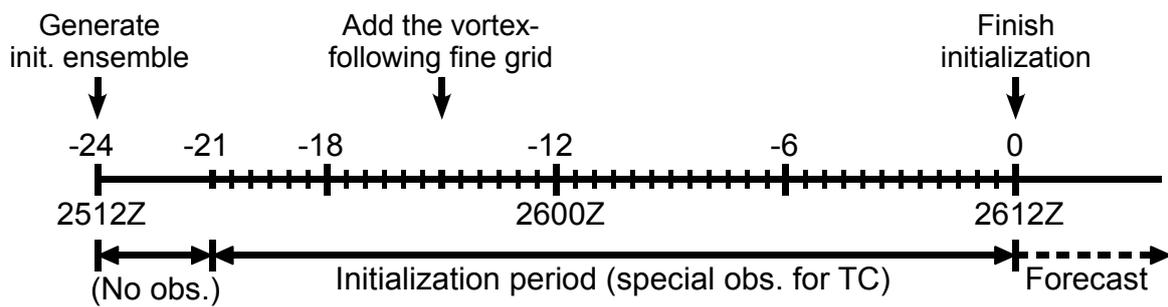


圖 4 鳳凰颱風初始化實驗的時間流程。

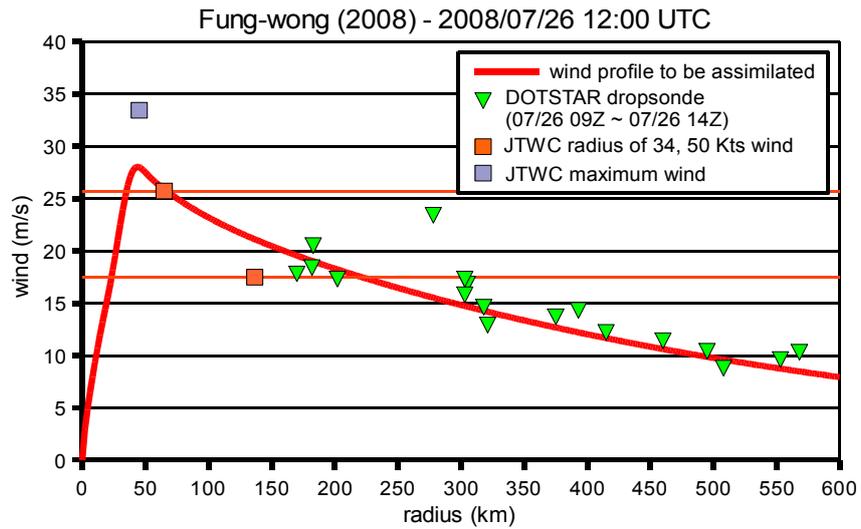


圖 5 鳳凰颱風在 2008 年 7 月 26 日 12 時由觀測資料決定出來的海表面軸對稱風速曲線。圖中綠色倒三角型標記為 DOTSTAR 任務之投落送測得的海表面風速，橘色正方形標記為 JTWC 的 8、10 級風暴風半徑估計，淺紫色正方形標記為 JTWC 的近中心最大風速估計，紅色粗線為 Willoughby 片段連續剖面公式，即為實際同化至模式中的風速曲線，公式的各參數值為：

$$V_{max} = 28 \text{ m/s}, \quad R_{max} = 45 \text{ km}$$

$$n = 0.729, \quad X_1 = 480 \text{ km}, \quad X_2 = 40 \text{ km}, \quad A = 0.1$$

$$R_1 = 13.5 \text{ km}, \quad R_2 = 59.8 \text{ km}$$

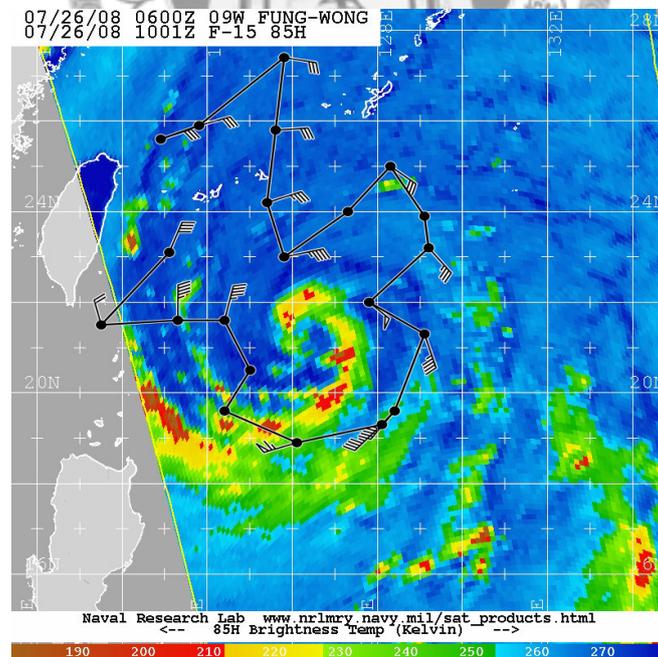


圖 6 在 2008 年 7 月 26 日 12 時執行的 DOTSTAR 偵察觀測任務飛行路線與，疊加上當時的低軌道衛星影像。黑色實心圓圈為投落送投擲地點，風標為投落送測得的 925 hPa 高度風（單位：knots）。

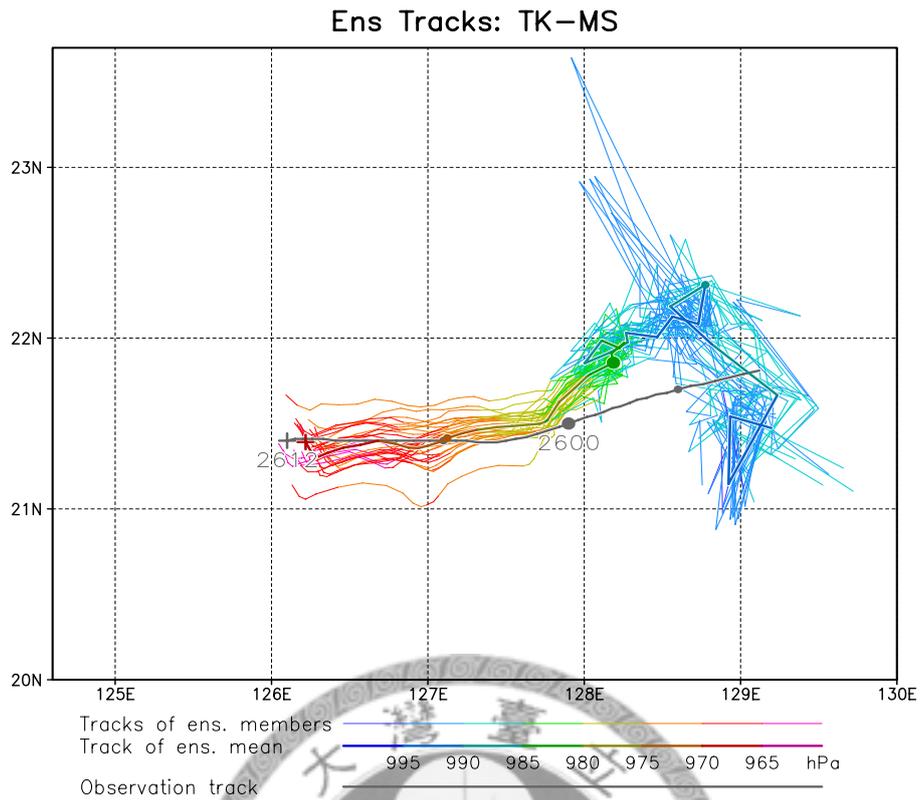


圖 7 鳳凰颱風 TK-MS 實驗的系集路徑。灰色粗線為觀測颱風路徑，路徑上時間標記的前 2 位數字為日期，後 2 位數字為小時。彩色粗線為系集平均路徑，細線為每個系集成員的路徑，依颱風中心最低海平面氣壓以不同顏色顯示（如圖例）。

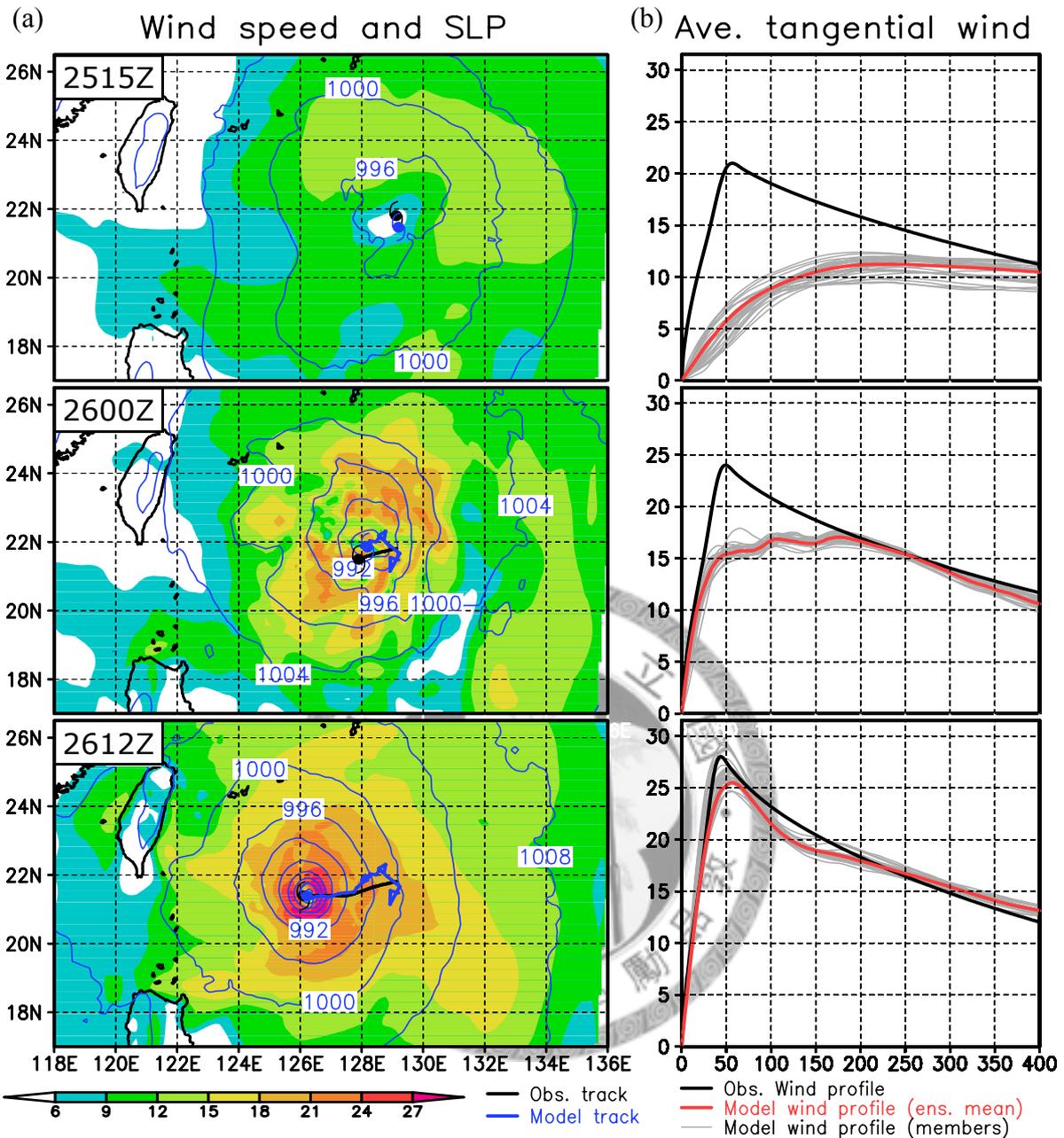


圖 8 鳳凰颱風 TK-MS 實驗中海表面風場與軸對稱平均風速結構的變化。上、中、下圖各為 7 月 25 日 15 時、26 日 0 時、26 日 12 時。(a) 皆為系集平均。色階為海表面風速量值 (單位: m/s), 等值線為海平面氣壓 (單位: hPa), 黑色粗線為初始化時段起始時間至當時的觀測路徑 (同化至模式中的資料), 藍色粗線為同一時段的模式颱風路徑。(b) 黑色粗線為觀測的颱風海表面軸對稱風速剖面 (同化至模式的資料), 紅色粗線為模式系集平均的海表面軸對稱風速剖面, 灰色細線為個別系集成員的風速剖面 (單位: m/s)。

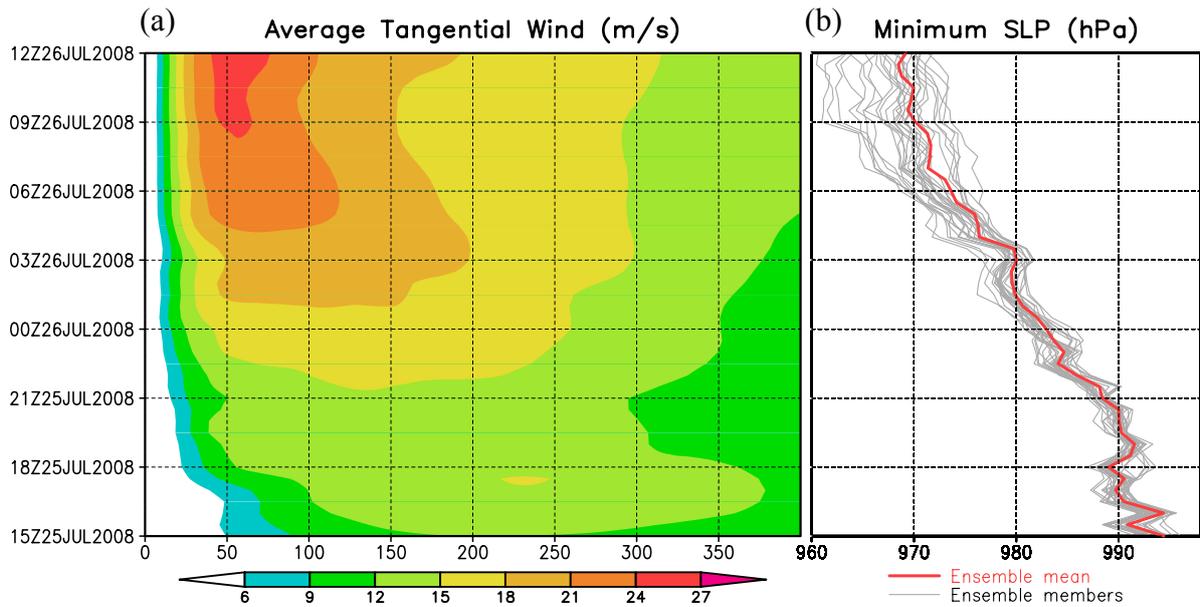


圖 9 鳳凰颱風 TK-MS 實驗中海表面軸對稱風速和中心最低海平面氣壓隨時間的演變。(a) 色階為系集平均的海表面環狀平均切向風速 (單位: m/s)。(b) 紅色粗線為系集平均颱風中心海平面氣壓, 灰色細線為個別系集成員的中心氣壓 (單位: hPa)。

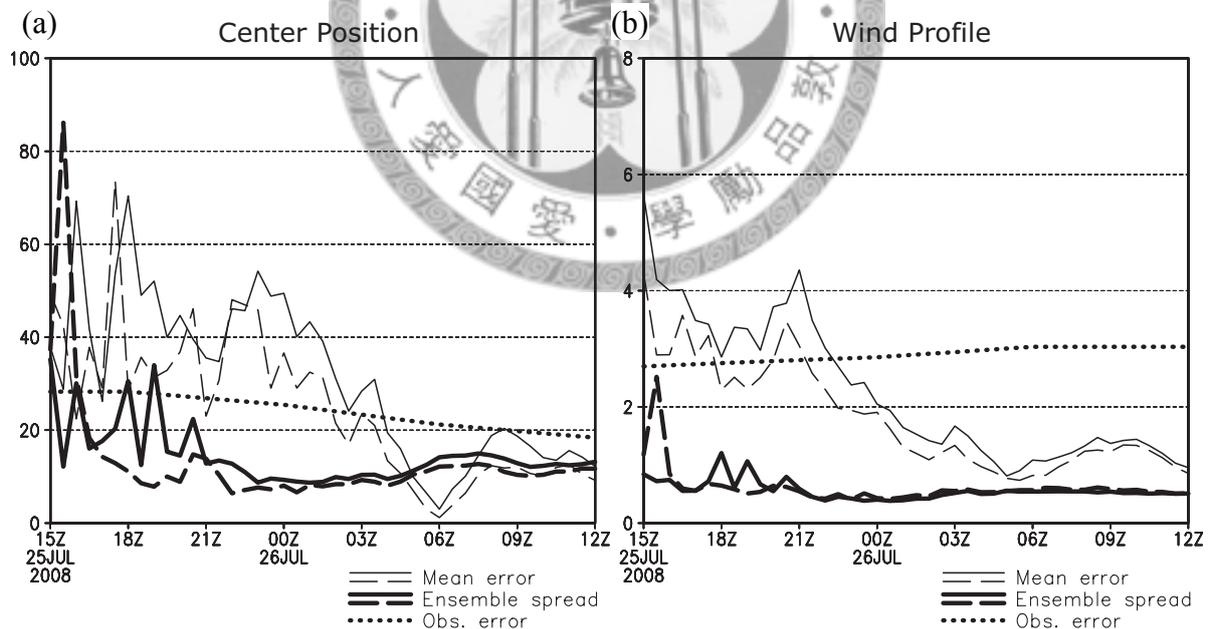


圖 10 鳳凰颱風 TK-MS 實驗 (a) 颱風中心位置 (單位: km) 與 (b) 軸對稱風速徑向剖面 (單位: m/s) 的平均誤差與系集散布隨時間的演變。細線為系集平均和同化觀測資料的差值, 粗線為系集成員間的標準差, 其中實線表示預報系集的結果, 虛線表示分析系集的結果。粗點線為觀測誤差。(詳細定義請參考內文中 (a) (39)、(40) 式與 (b) (41)、(42) 式。)

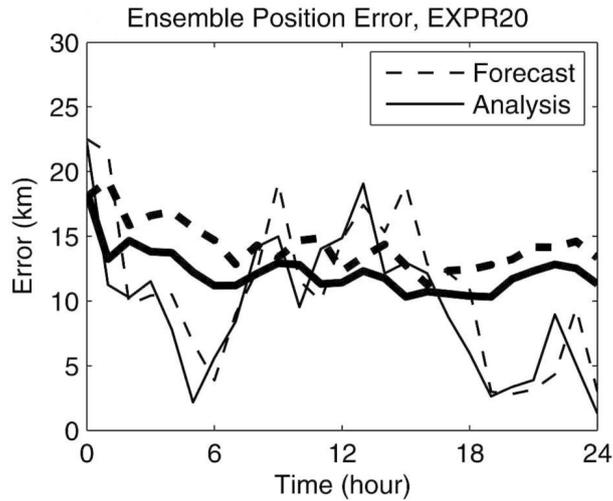


圖 11 Chen et al. (2007) 在二維正壓模式中同化渦旋中心位置的表現。細線為颱風中心位置的平均誤差，粗線為系集散布（單位：km）。其中虛線表示預報系集的結果，實線表示分析系集的結果（實線、虛線意義與圖 10 相反）。（取自 Chen et al. 2007, Fig. 10(b)）

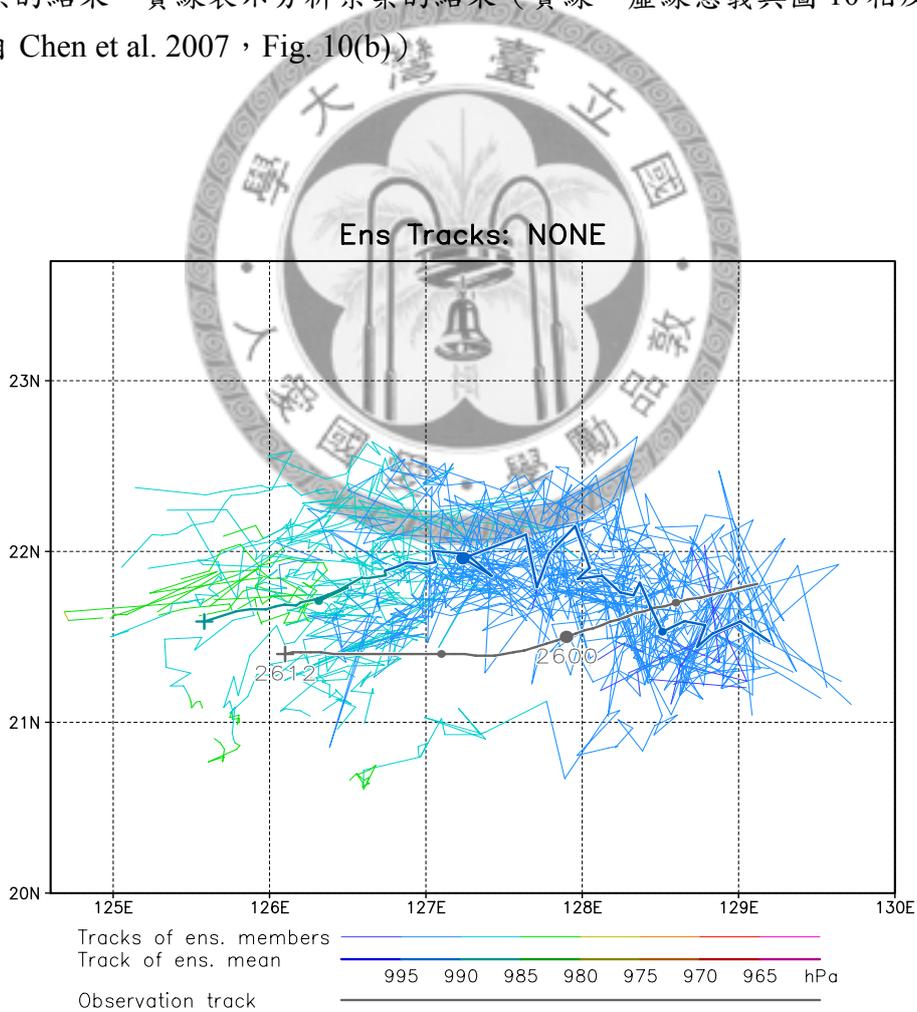


圖 12 同圖 7，但為鳳凰颱風 NONE 實驗。

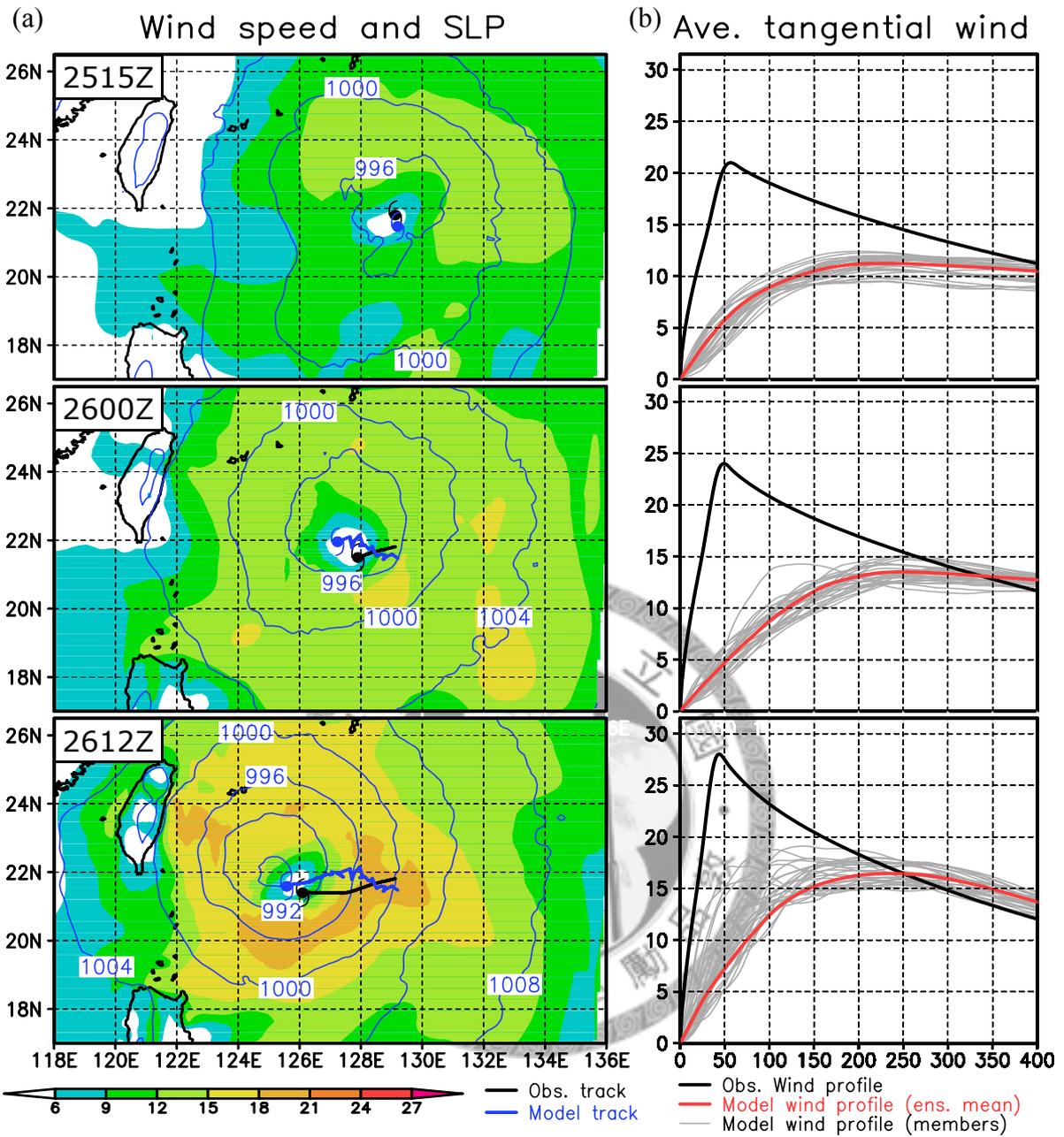


圖 13 同圖 8，但為鳳凰颱風 NONG 實驗。

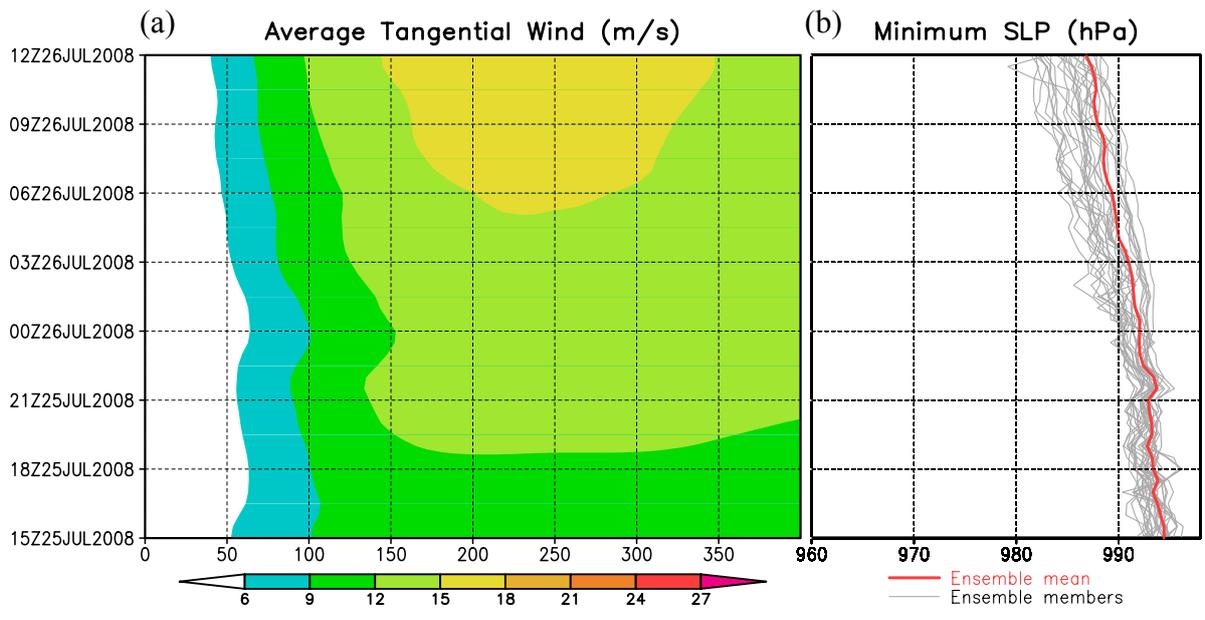


圖 14 同圖 9，但為鳳凰颱風 NONG 實驗。

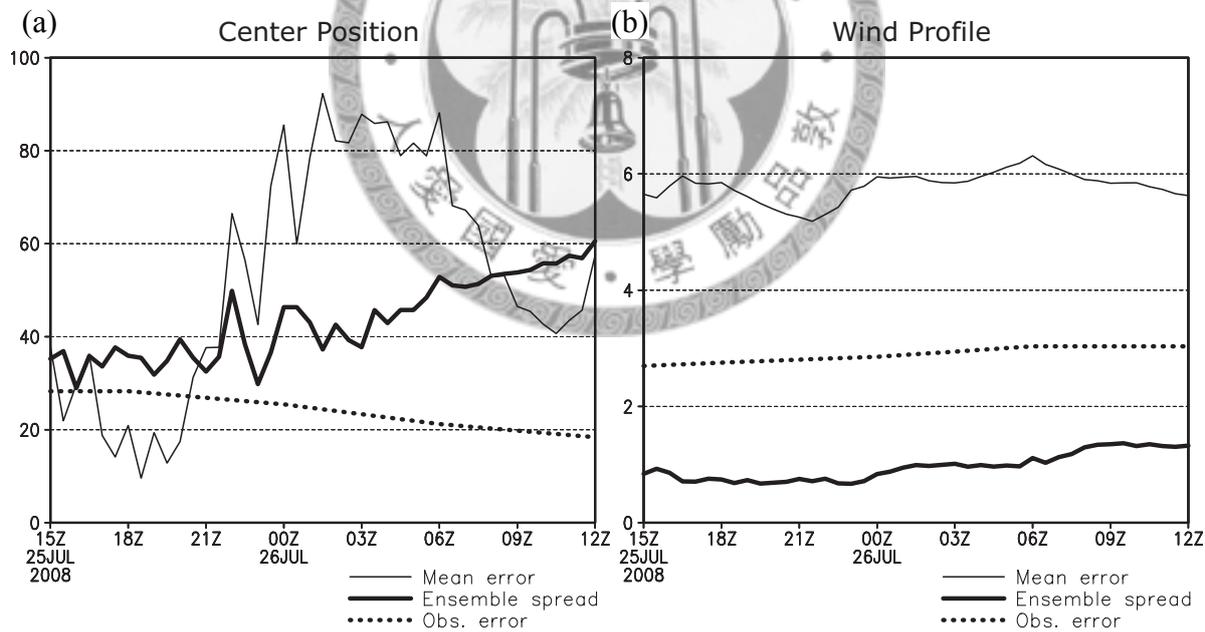


圖 15 同圖 10，但為鳳凰颱風 NONG 實驗，並少了預報系集（原圖虛線）的結果。

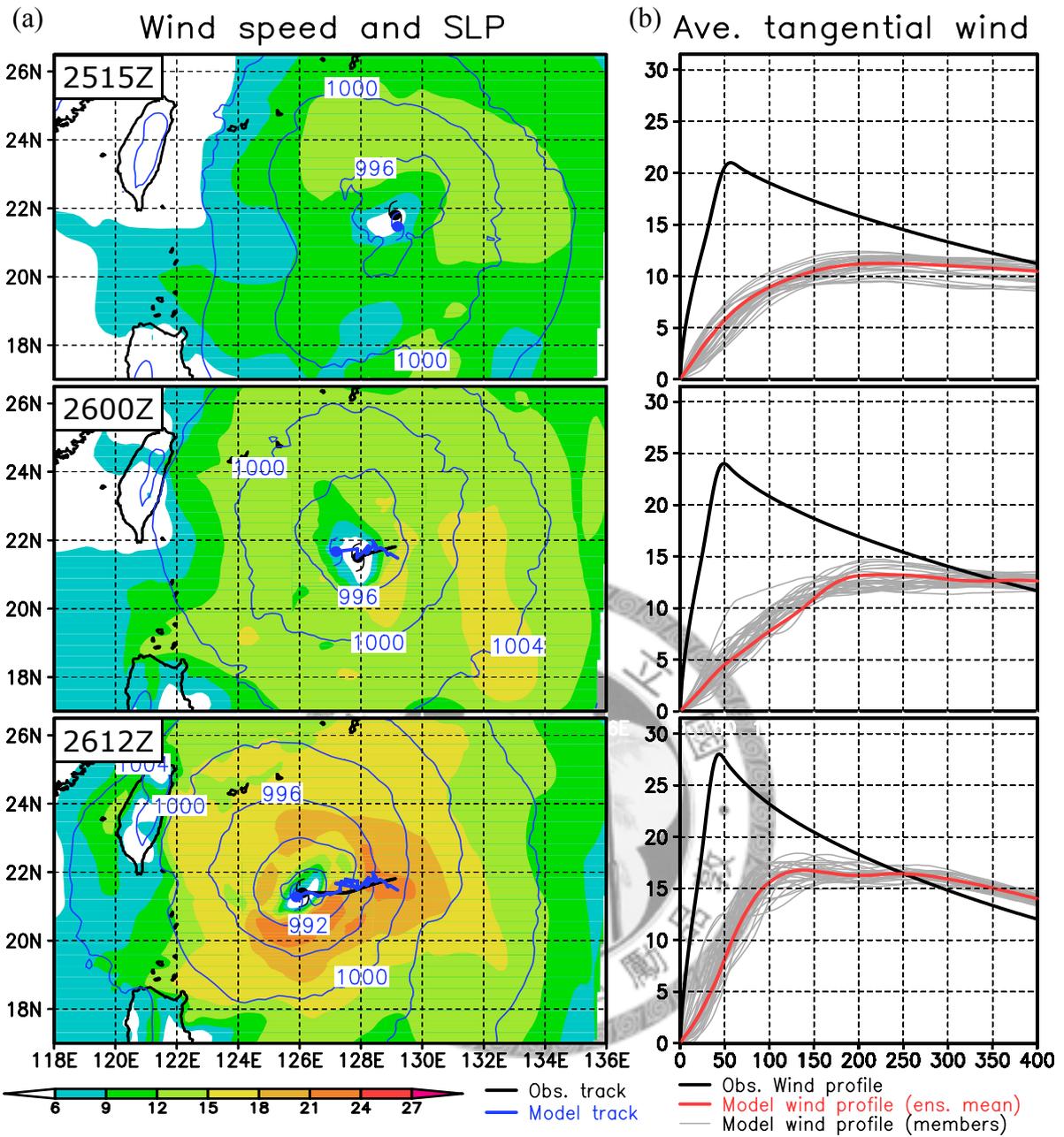


圖 16 同圖 8，但為鳳凰颱風 TK 實驗。

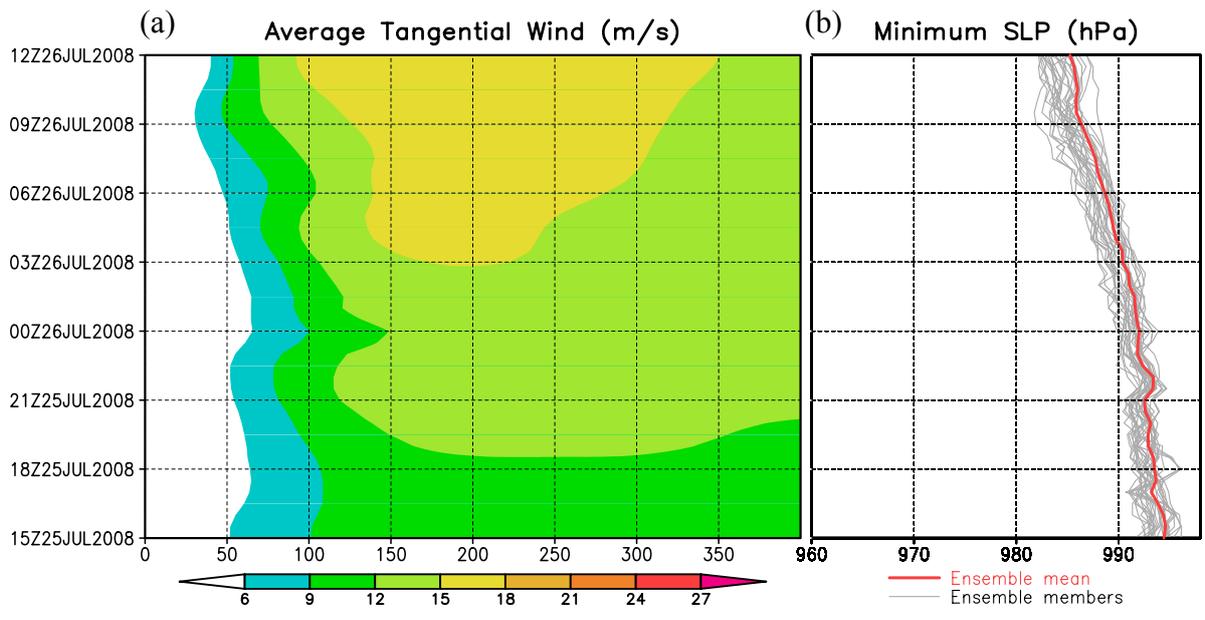


圖 17 同圖 9，但為鳳凰颱風 TK 實驗。

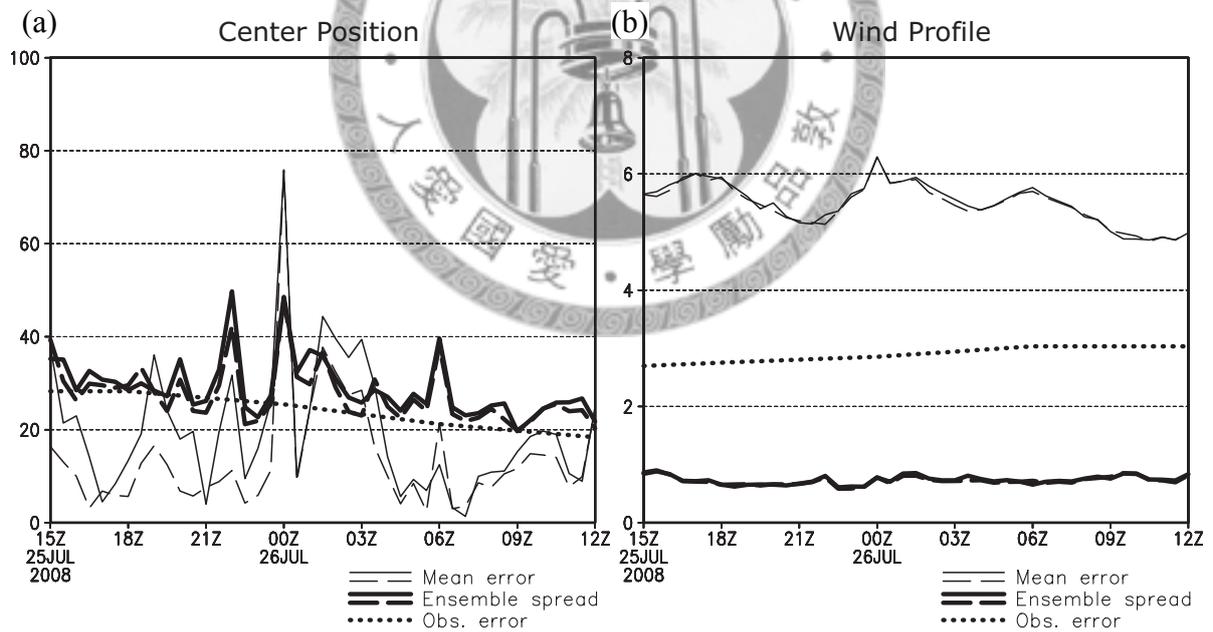


圖 18 同圖 10，但為鳳凰颱風 TK 實驗。

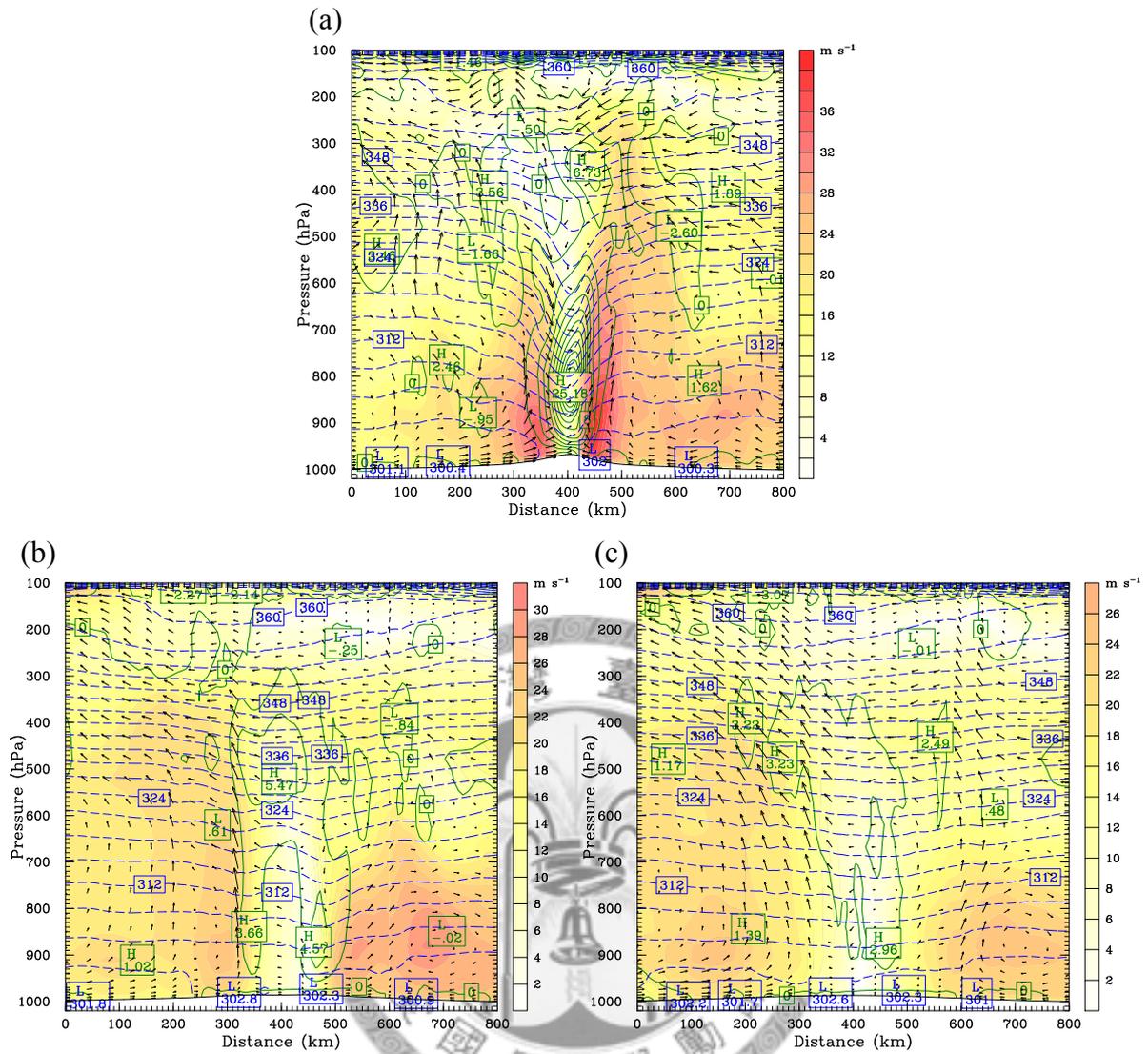


圖 19 鳳凰颱風 (a) TK-MS、(b) TK、(c) NONE 實驗初始化時段結束時 (2008 年 7 月 26 日 12 時) 通過颱風中心的東西方向垂直剖面結構。色階為水平風速 (單位: m/s)，等值線綠色實線為位渦 (單位: PVU)，藍色虛線為位溫 (單位: K)，黑色箭頭為垂直環流向量。

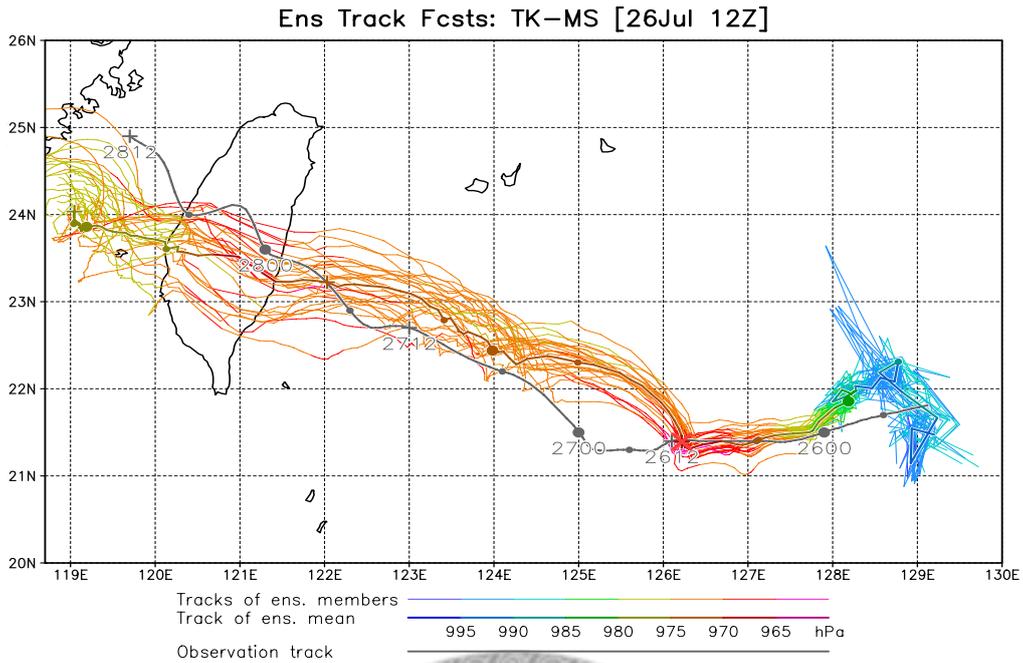


圖 20 鳳凰颱風 TK-MS 實驗的系集路徑預報。灰色粗線為觀測颱風路徑，路徑上時間標記的前 2 位數字為日期，後 2 位數字為小時。彩色粗線為系集平均路徑，細線為每個系集成員的路徑，依颱風中心最低海平面氣壓以不同顏色顯示（如圖例）。紅色叉號為預報起始時間的系集平均颱風中心位置。

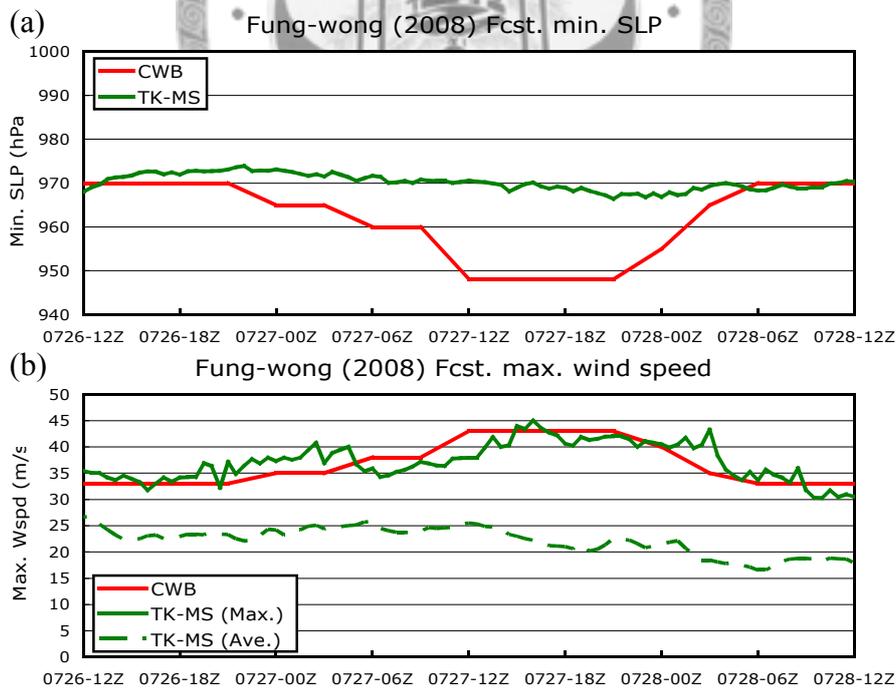


圖 21 鳳凰颱風 TK-MS 實驗的系集強度預報。(a) 颱風中心最低海平面氣壓。綠線為模式預報結果，紅線為中央氣象局給定的觀測值。(b) 颱風近中心最大風速。綠色實線為模式中出現的最大風速，綠色虛線為最大軸對稱平均切向風速，皆取模式最低層（海表面）資料，紅線為中央氣象局給定的觀測值。

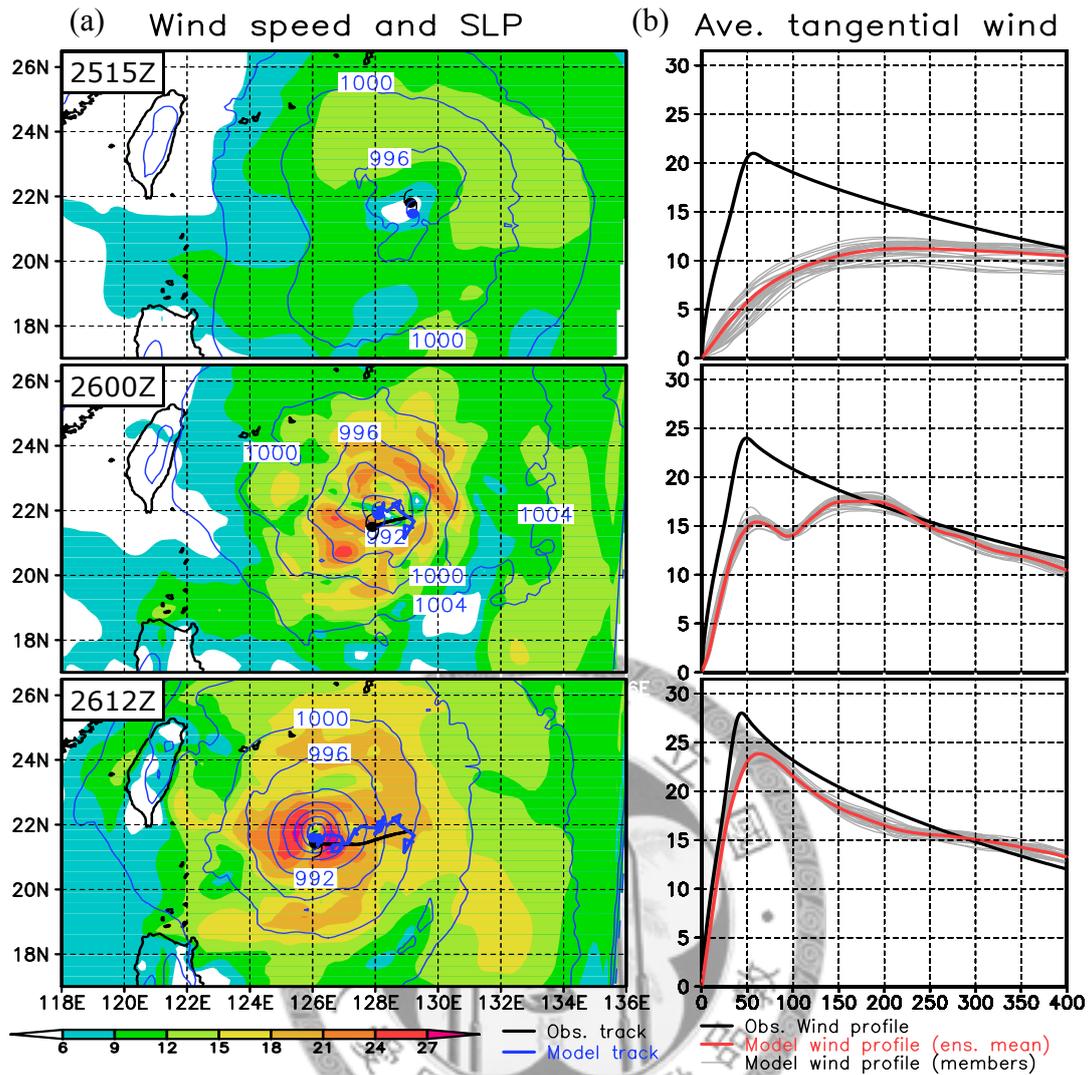


圖 22 同圖 8，但為鳳凰颱風 LOW 實驗。

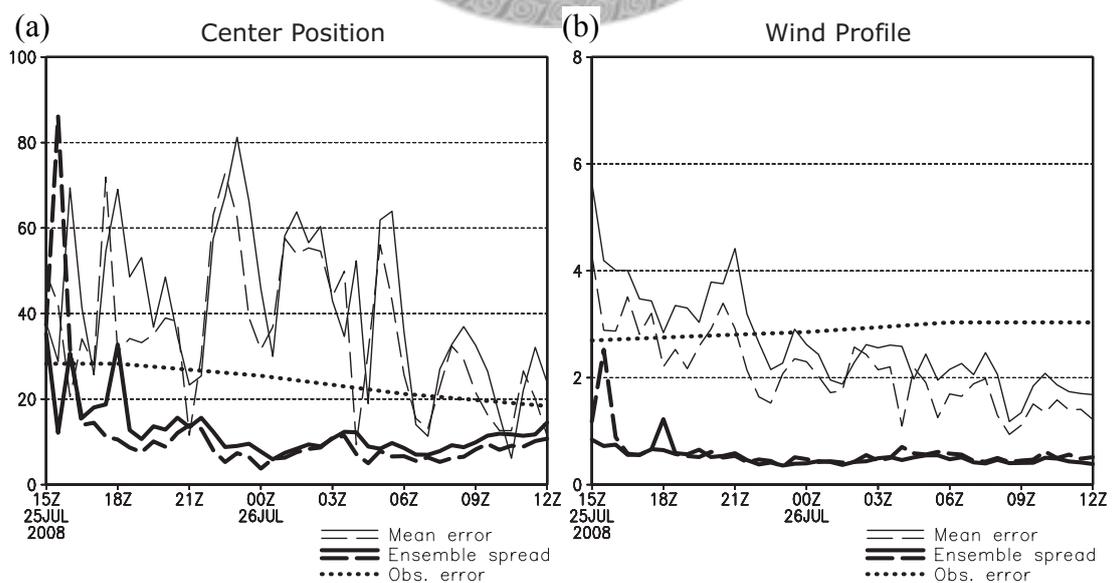


圖 23 同圖 10，但為鳳凰颱風 LOW 實驗。

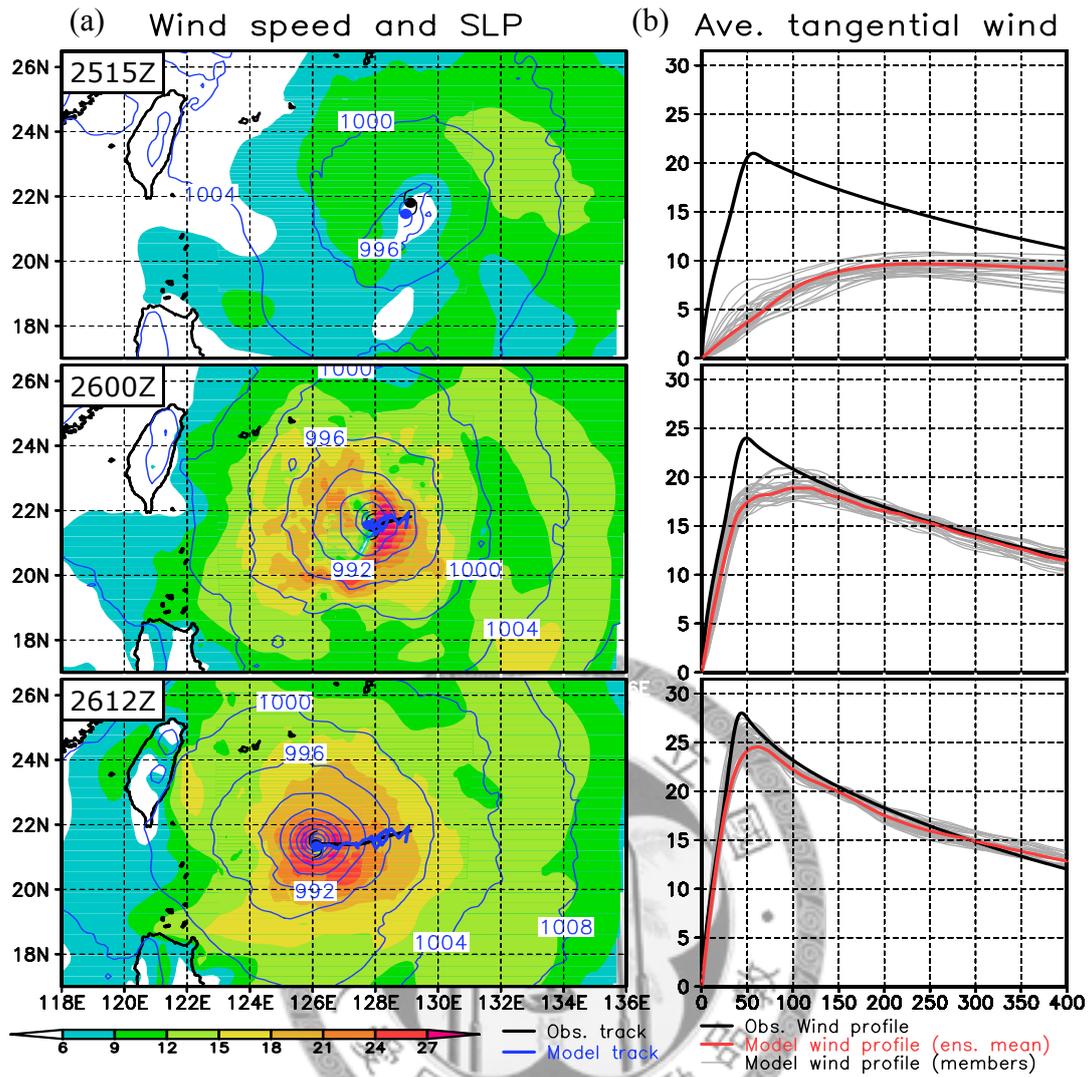


圖 24 同圖 8，但為鳳凰颱風 HIGH 實驗。

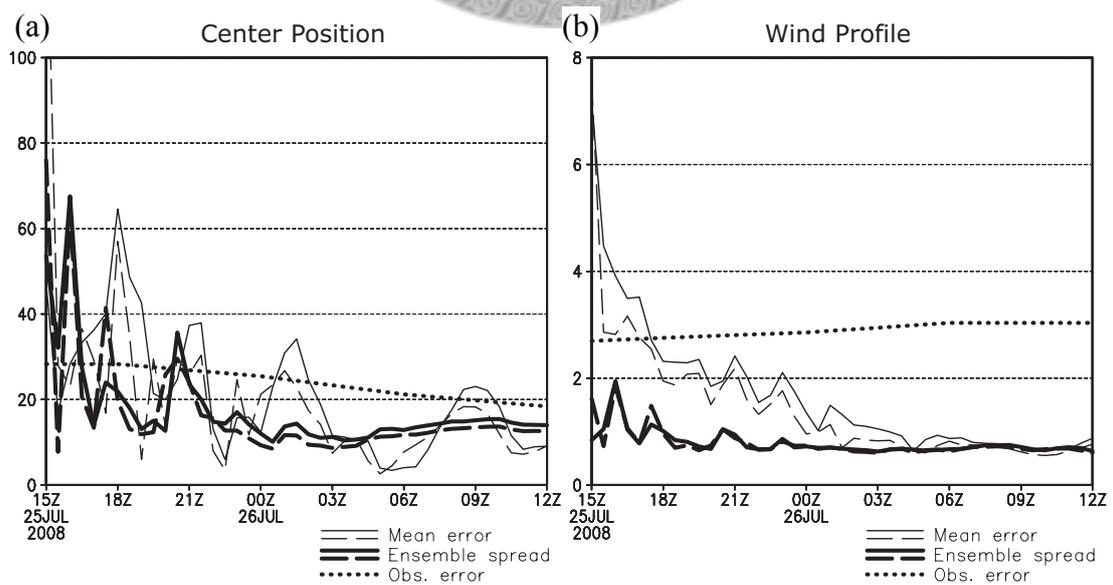


圖 25 同圖 10，但為鳳凰颱風 HIGH 實驗。

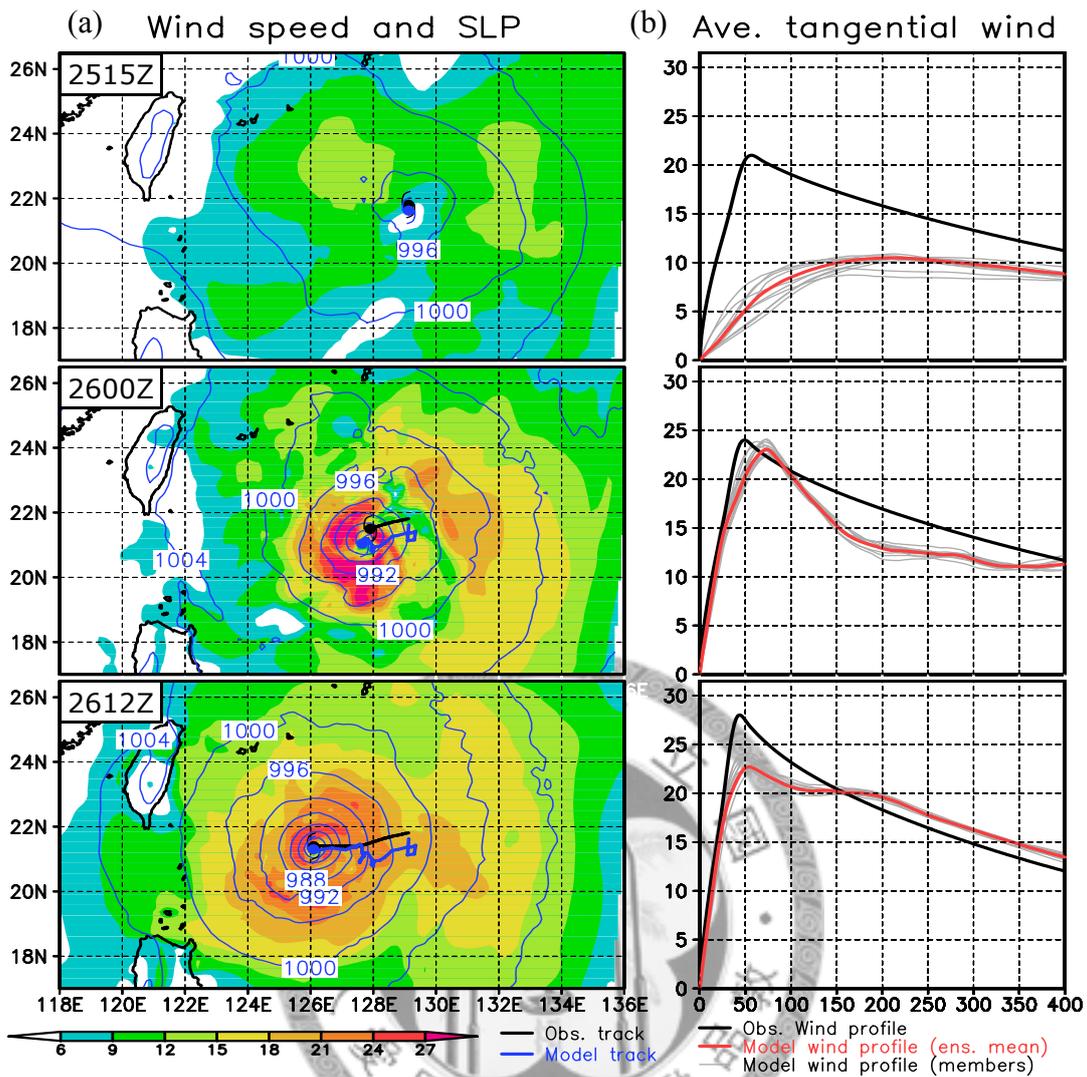


圖 26 同圖 8，但為鳳凰颱風 SMALL 實驗。

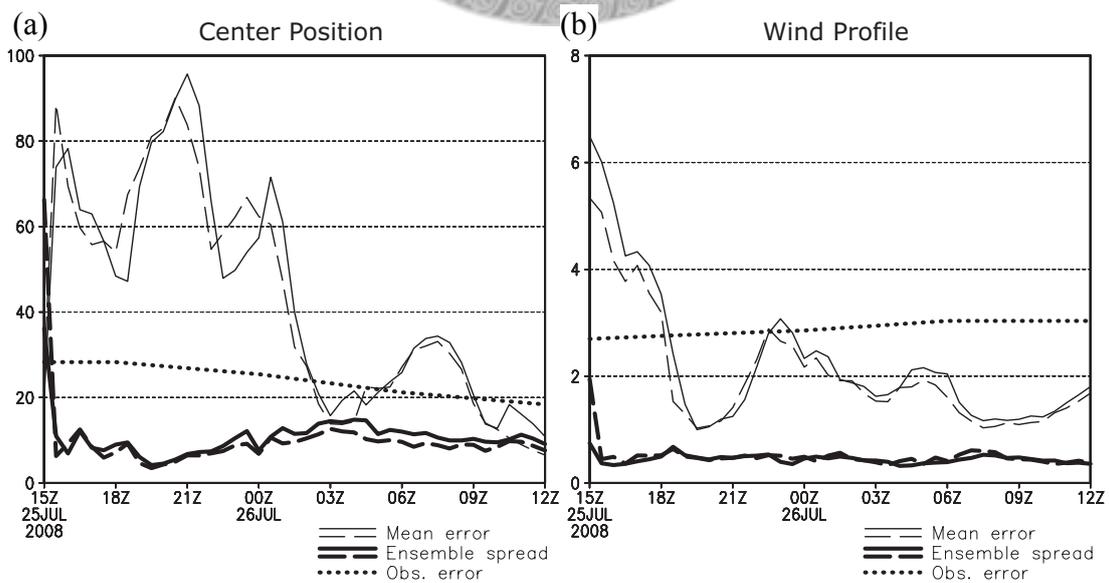


圖 27 同圖 10，但為鳳凰颱風 SMALL 實驗。

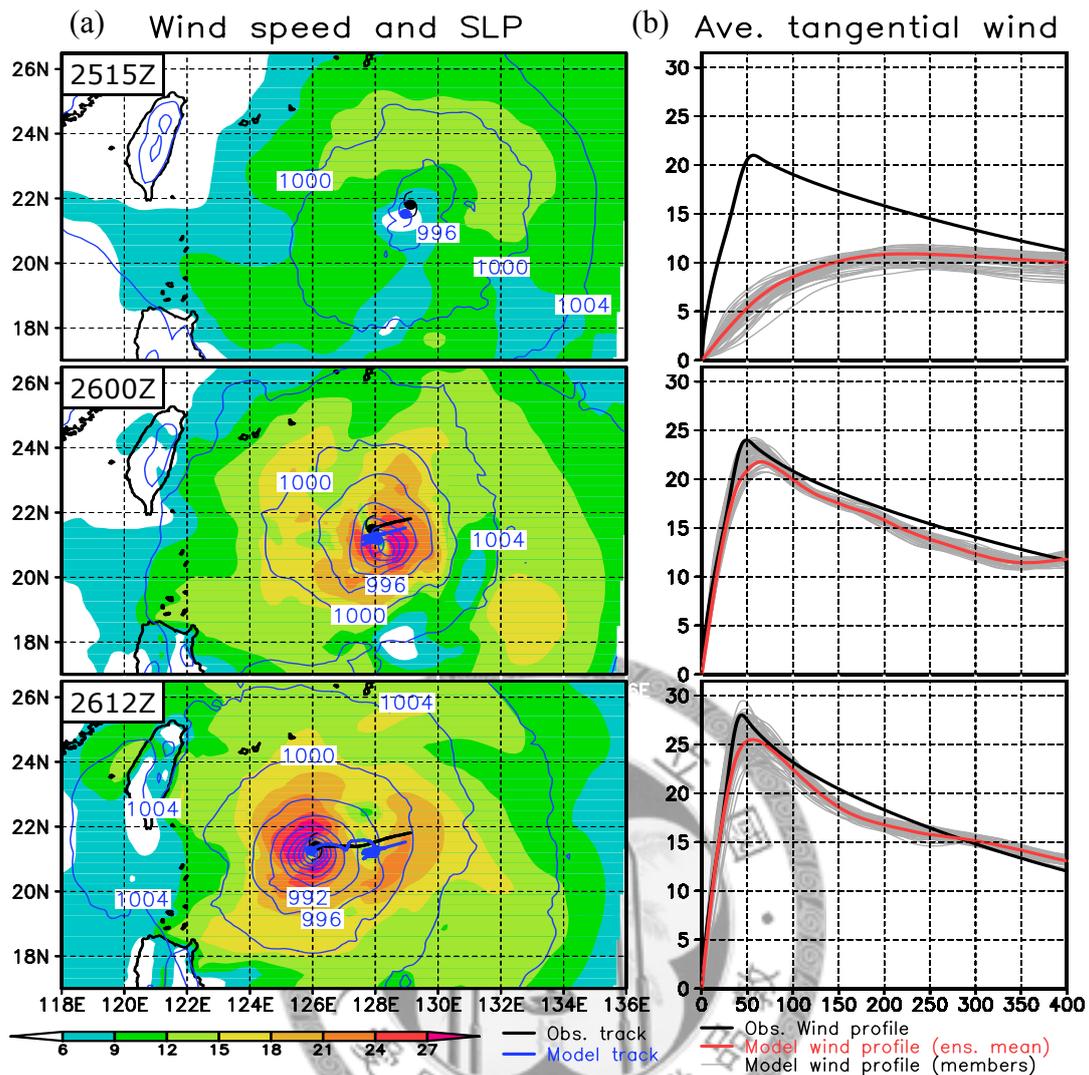


圖 28 同圖 8，但為鳳凰颱風 BIG 實驗。

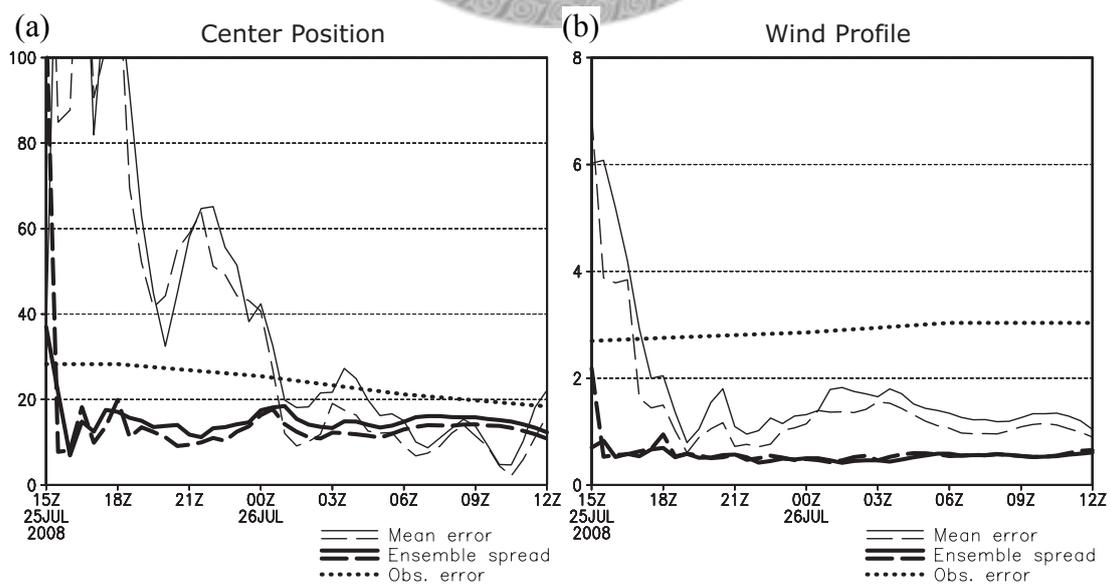


圖 29 同圖 10，但為鳳凰颱風 BIG 實驗。

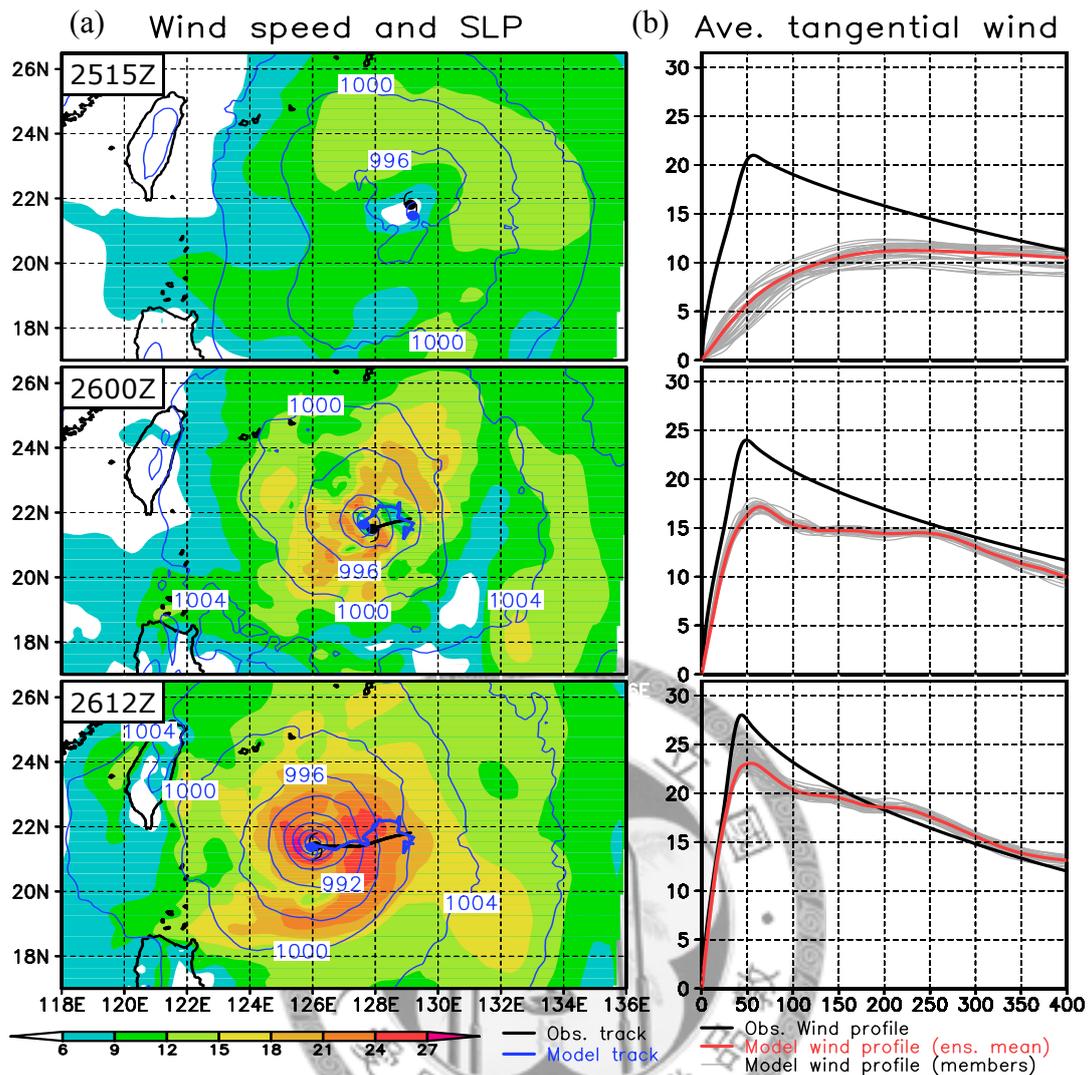


圖 30 同圖 8，但為鳳凰颱風 INFLA-0.5 實驗。

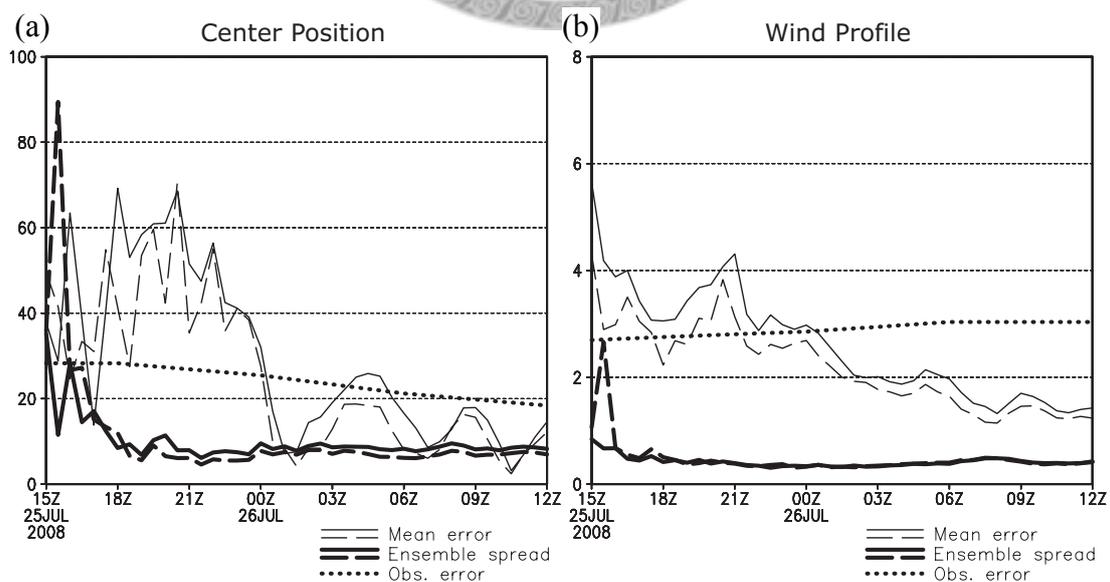


圖 31 同圖 10，但為鳳凰颱風 INFLA-0.5 實驗。

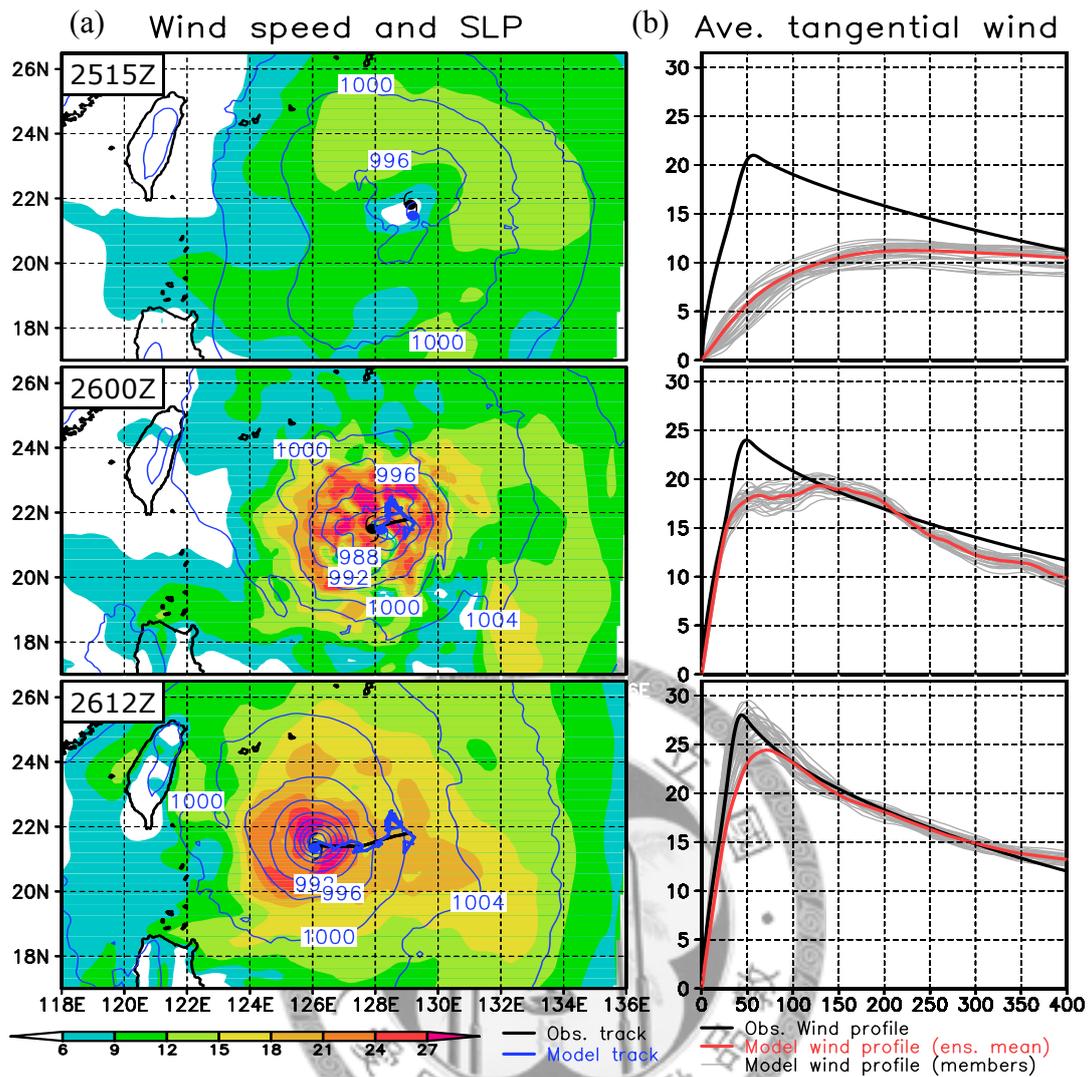


圖 32 同圖 8，但為鳳凰颱風 INFLA-0.95 實驗。

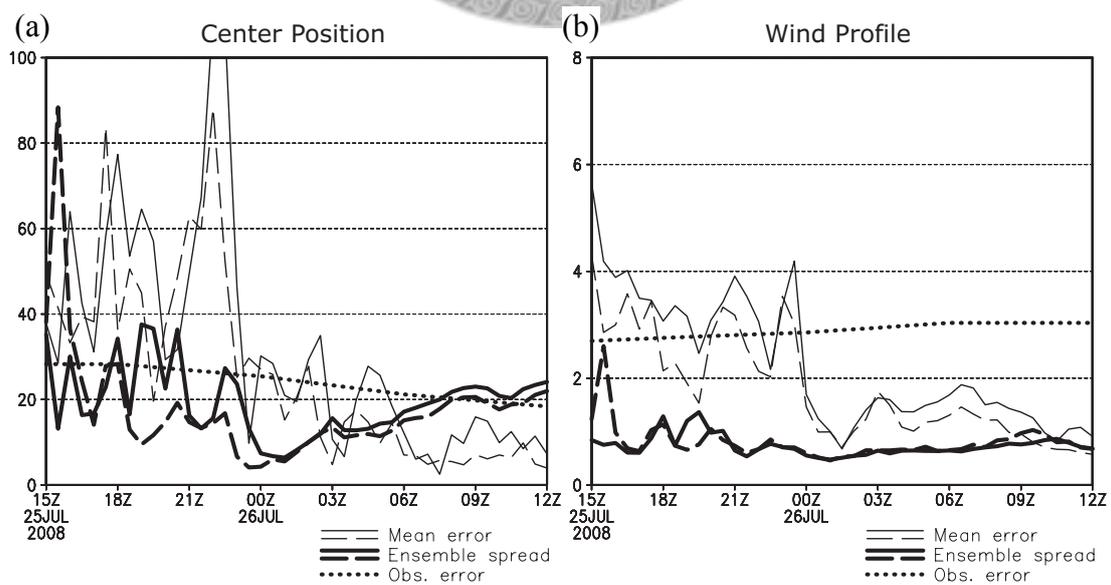


圖 33 同圖 10，但為鳳凰颱風 INFLA-0.95 實驗。

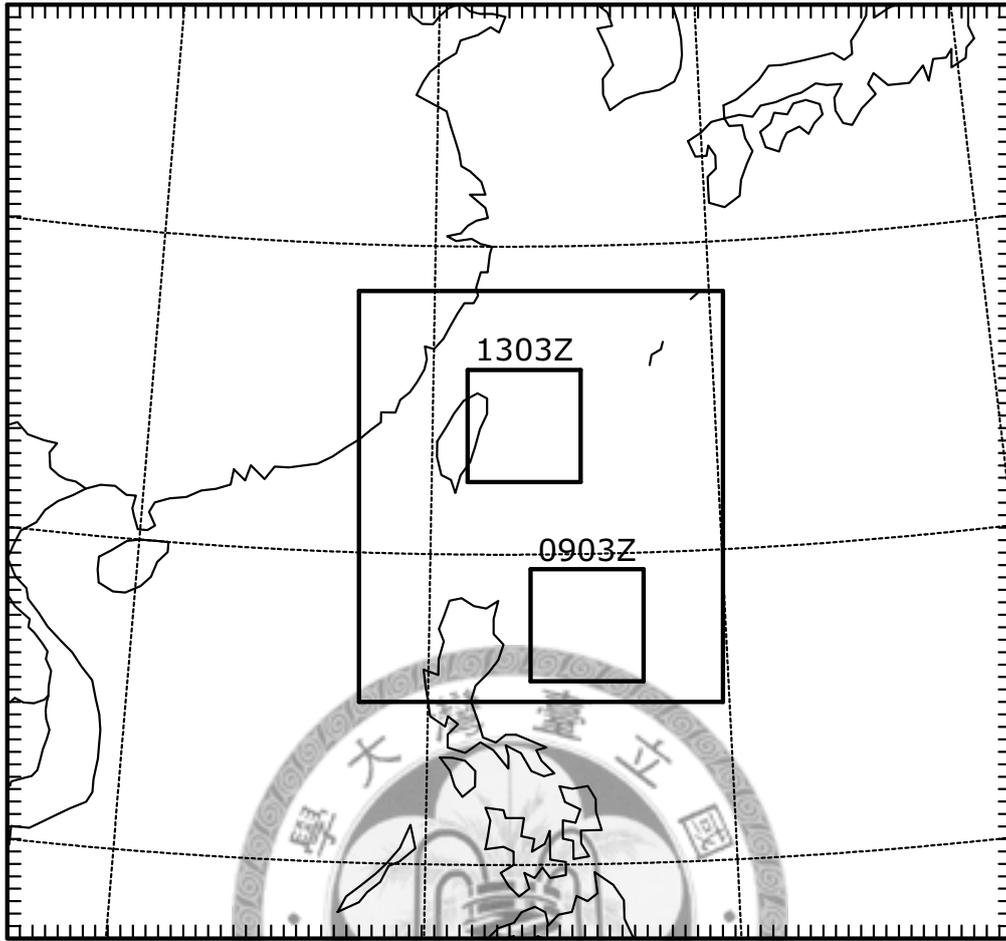


圖 34 辛樂克颱風同化分析實驗的模式範圍設定。總共 3 層網格，其中最內層網格會追隨颱風渦旋中心移動，圖中顯示了起始時間（9 月 9 日 3 時）和結束時間（9 月 13 日 3 時）的位置。

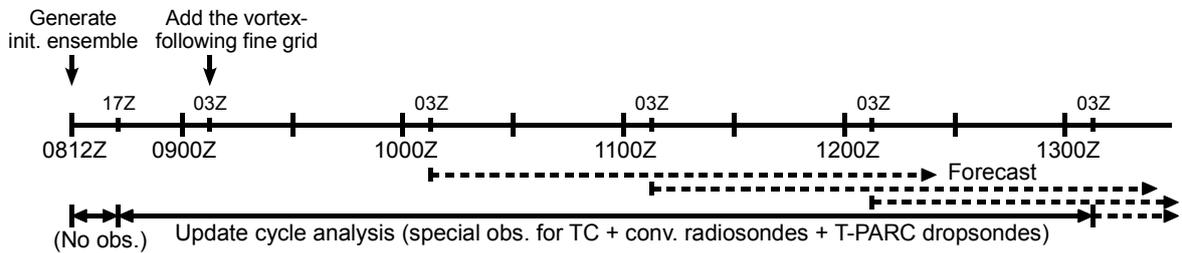


圖 35 辛樂克颱風同化分析實驗的時間流程。

Spatial Distribution of Observations

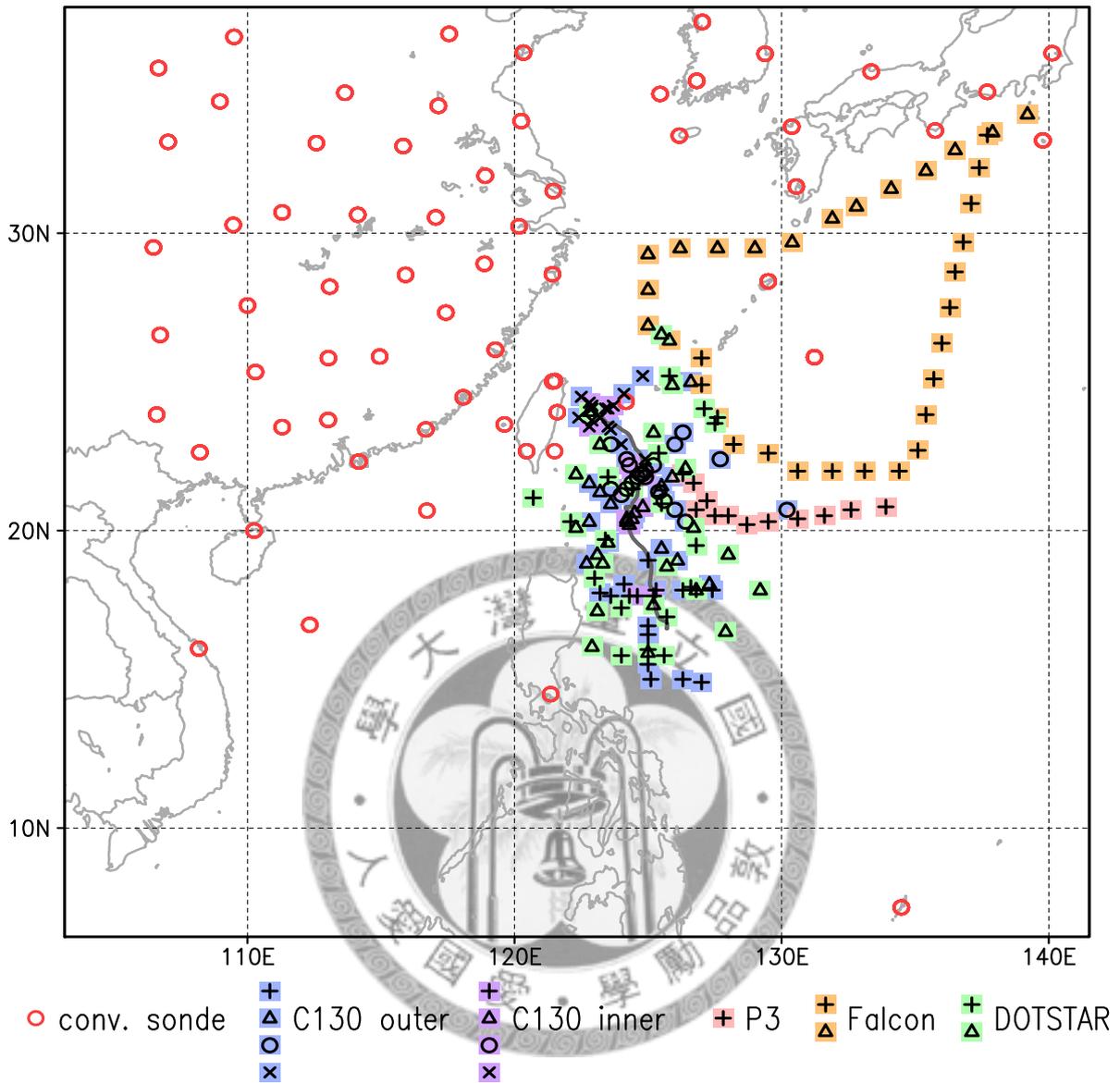


圖 36 辛樂克颱風同化分析時段內常態性探空與投落送資料的空間分布。紅色圓圈為常態性探空儀觀測位置，帶有底色的標記是投落送觀測位置。各飛機的代表色見圖例，其中 C130 飛機投擲的投落送分為兩種：「C130 outer」代表位於颱風中心 80 公里外的投落送，「C130 inner」代表位於颱風中心 80 公里內的投落送。同一種底色不同標記代表不同的飛行架次。

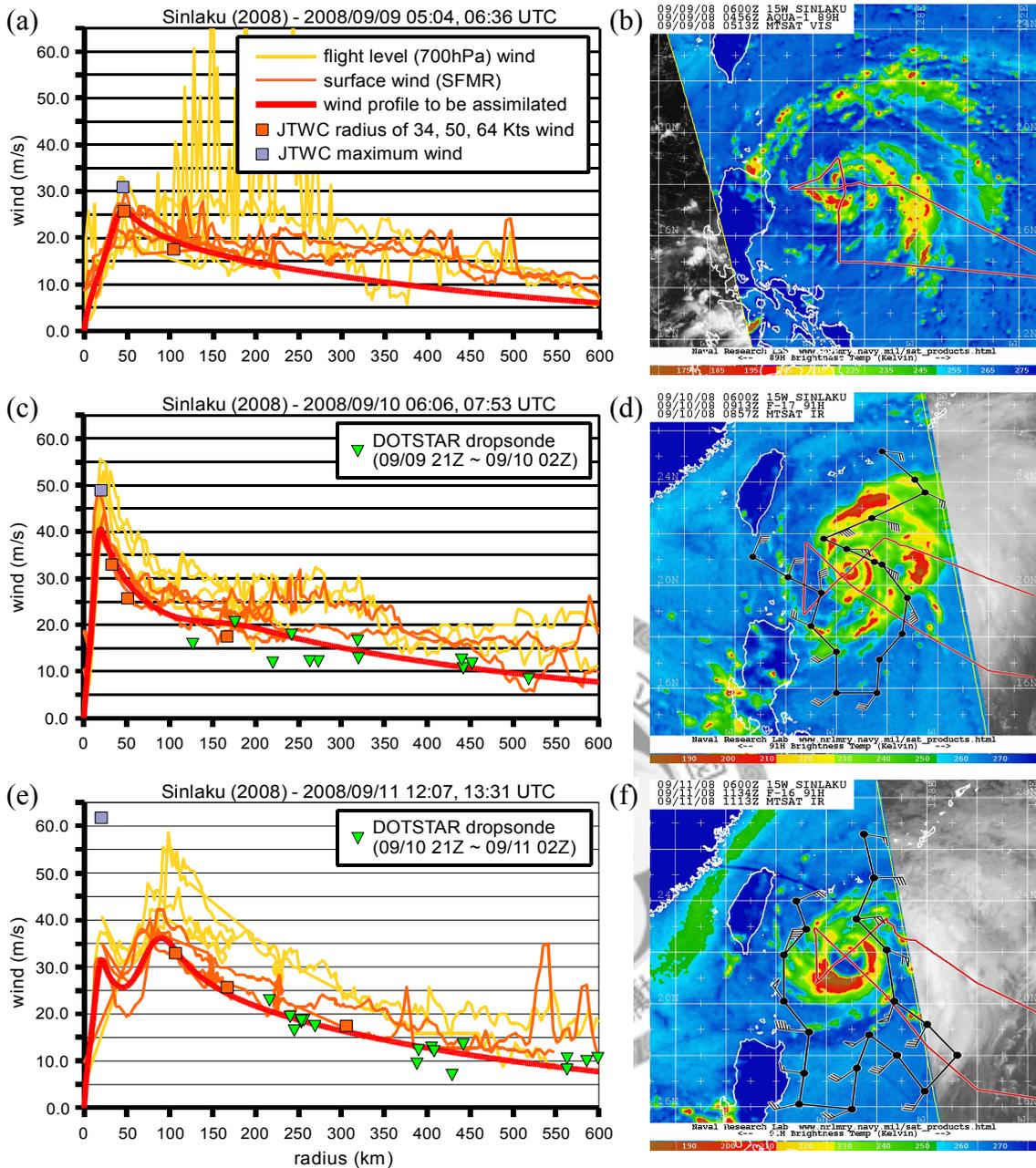
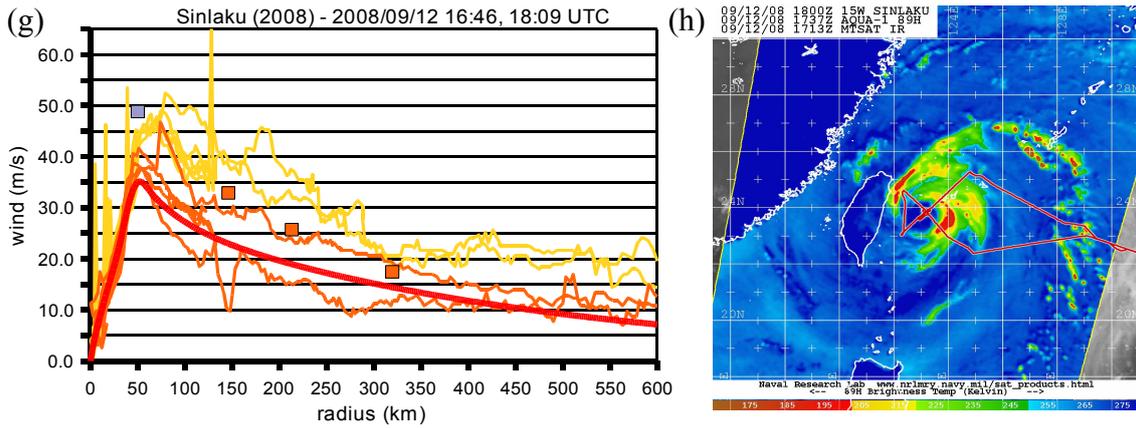


圖 37 由美軍 C-130 飛機穿越偵察與 DOTSTAR 之投落送決定出來的辛樂克颱風海表面軸對稱風速結構。左欄 (a)、(c)、(e)、(g) (見下頁續圖) 為 C-130 連續 4 天偵察任務測得的風速剖面，黃色細線為飛行高度 (700 hPa) 風速，橘色細線為機載 SFMR 測得的海表面風速，紅色粗線為同化至模式中的風速曲線，綠色倒三角型標記為 DOTSTAR 任務之投落送測得的海表面風速，橘色正方形標記為 JTWC 的 8、10、12 級風暴風半徑估計，淺紫色正方形標記為 JTWC 的近中心最大風速估計。右欄 (b)、(d)、(f)、(h) (見下頁續圖) 為最接近 C-130 觀測時間的低軌道衛星影像，疊加上 C-130 與 DOTSTAR 偵察任務的飛行路線，黑色實心圓圈為 DOTSTAR 的投落送投擲地點，風標為投落送測得的 925 hPa 高度風 (單位：knots)。



續圖 37

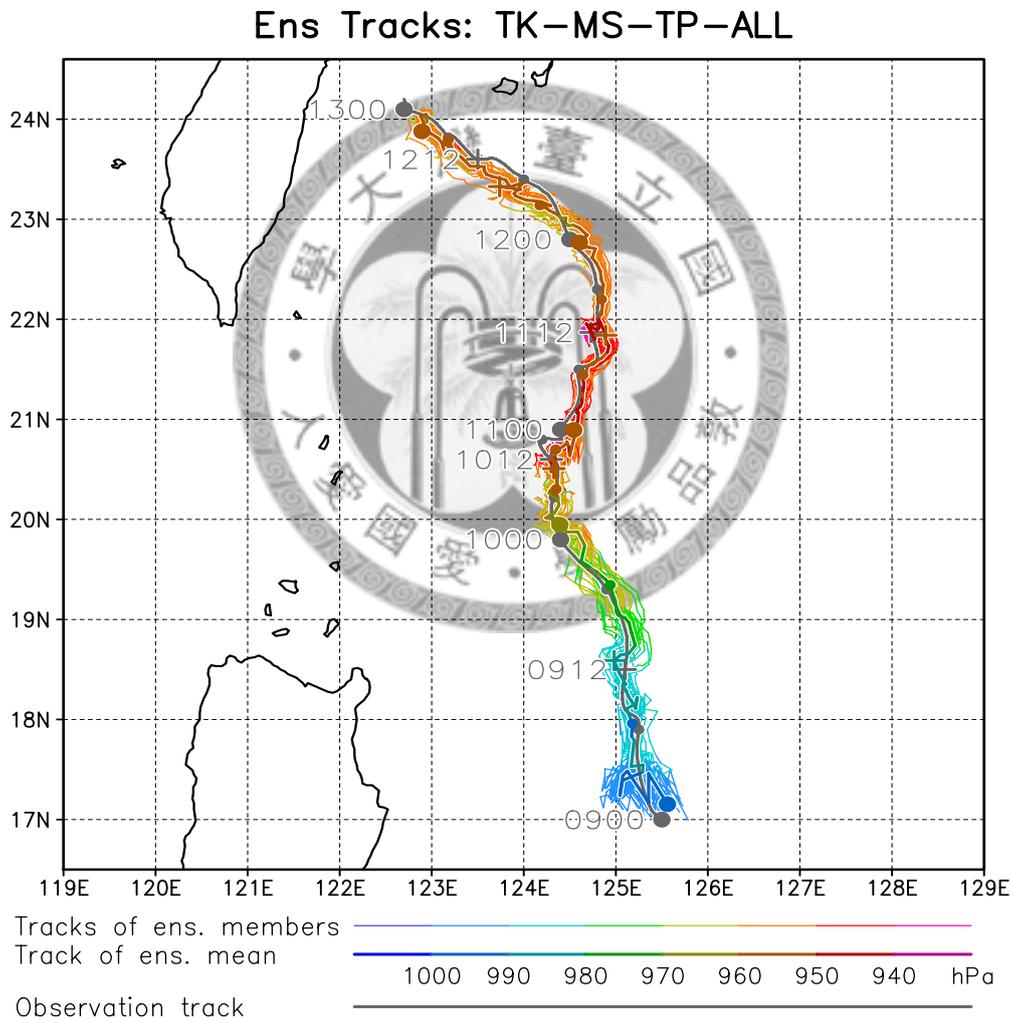


圖 38 辛樂克颱風 TK-MS-TP-ALL 實驗的系集路徑。灰色粗線為觀測颱風路徑，路徑上時間標記的前 2 位數字為日期，後 2 位數字為小時。彩色粗線為系集平均路徑，細線為每個系集成員的路徑，依颱風中心最低海平面氣壓以不同顏色顯示（如圖例）。

Wind speed (m/s) and SLP (hPa)

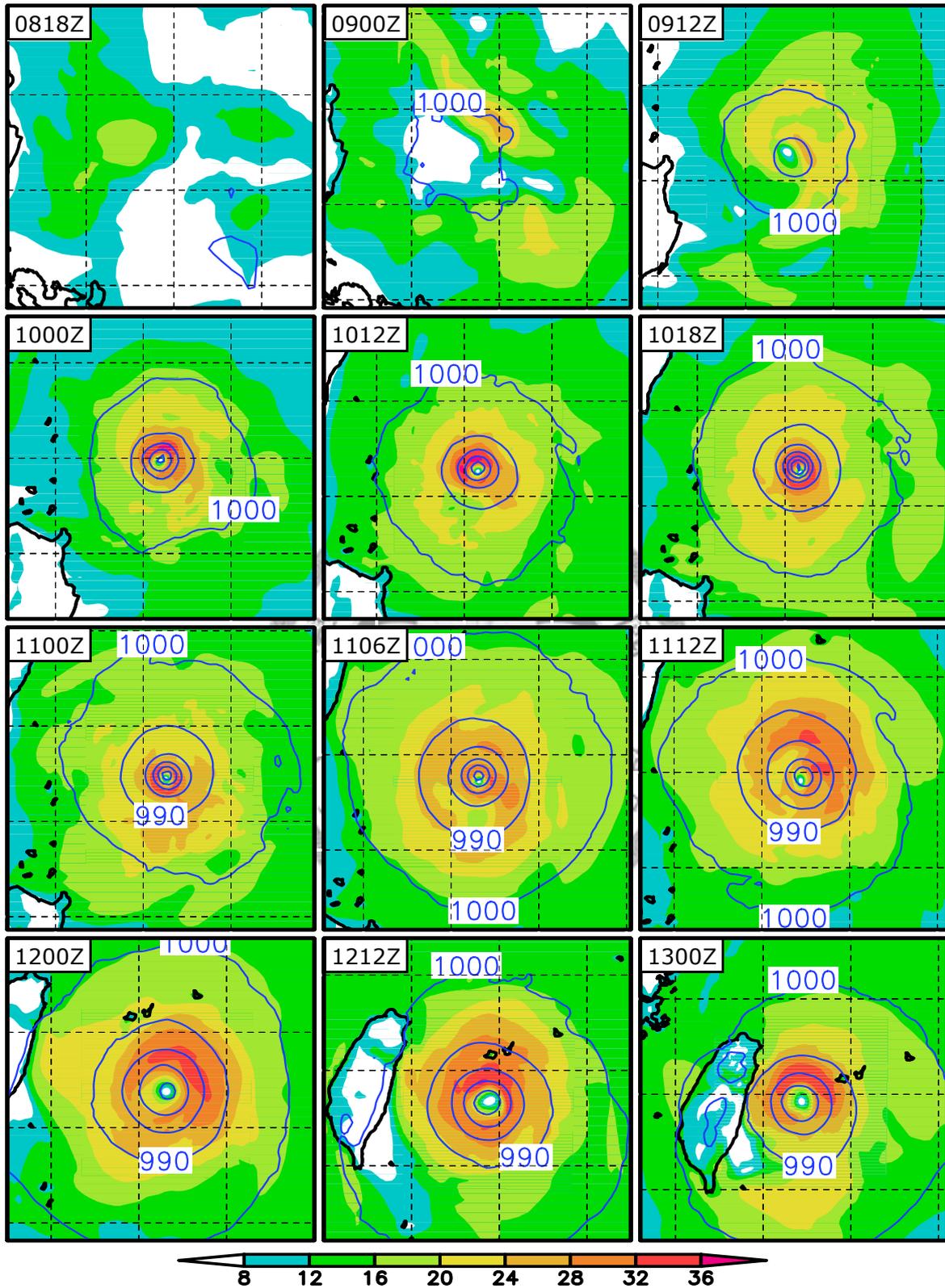


圖 39 辛樂克颱風 TK-MS-TP-ALL 實驗中海表面風速與海平面氣壓的演變，各小圖的時間如左上角所示。色階為海表面風速量值（單位：m/s），等值線為海平面氣壓（單位：hPa）。

30 min. Precip. (mm)

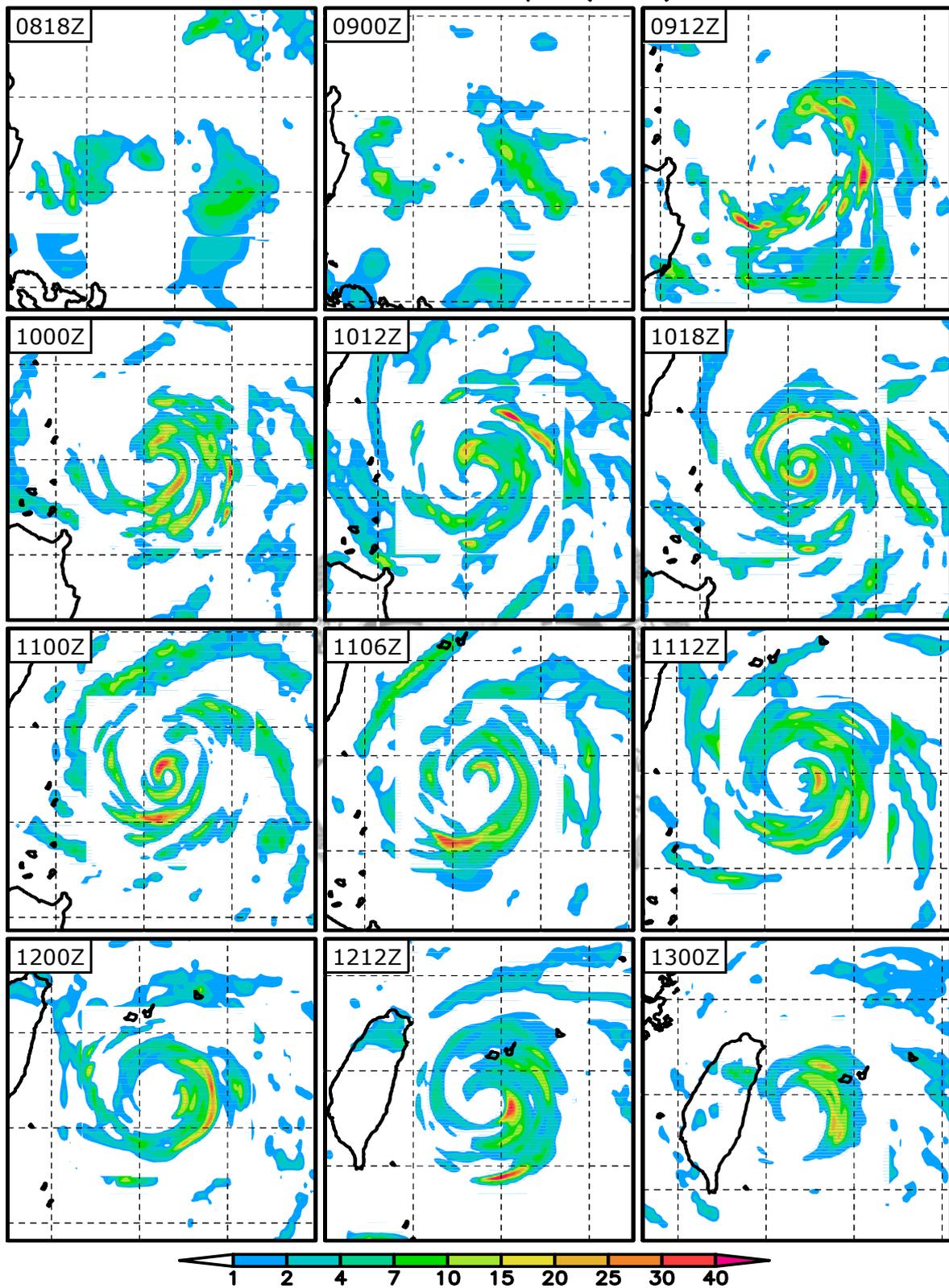


圖 40 同圖 39，但為前 30 分鐘累積降雨量（單位：mm）。

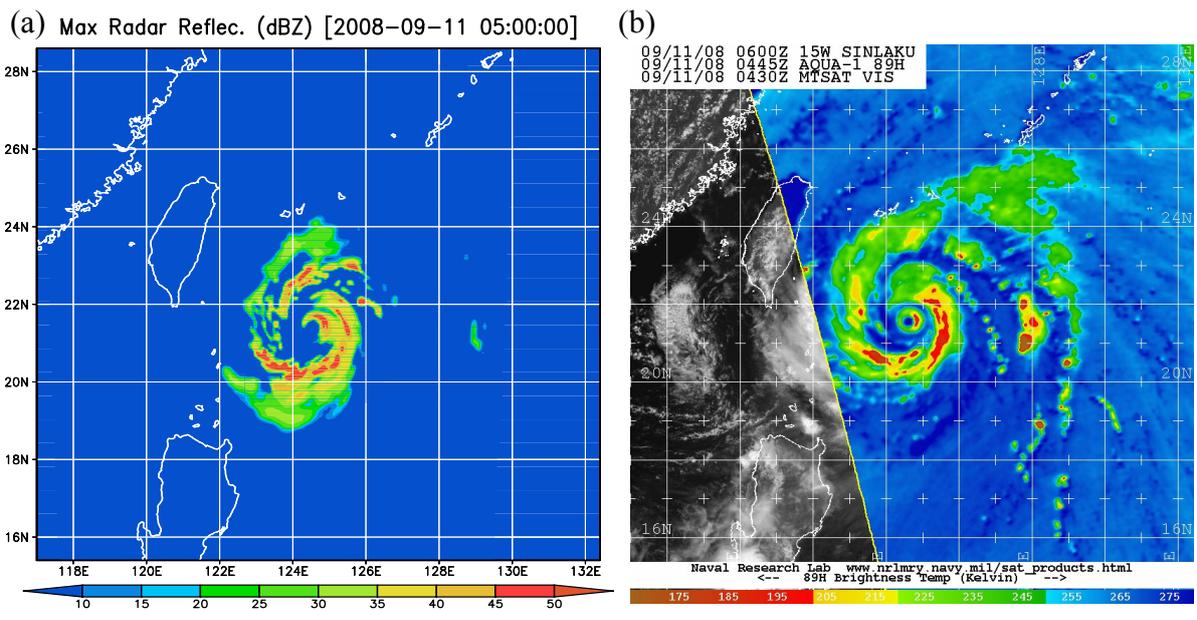


圖 41 辛樂克颱風 TK-MS-TP-ALL 實驗中 9 月 11 日 5 時的 (a) 模式最大回波值 (單位: dBZ) 與 (b) 同一時間低軌道衛星影像的比較。

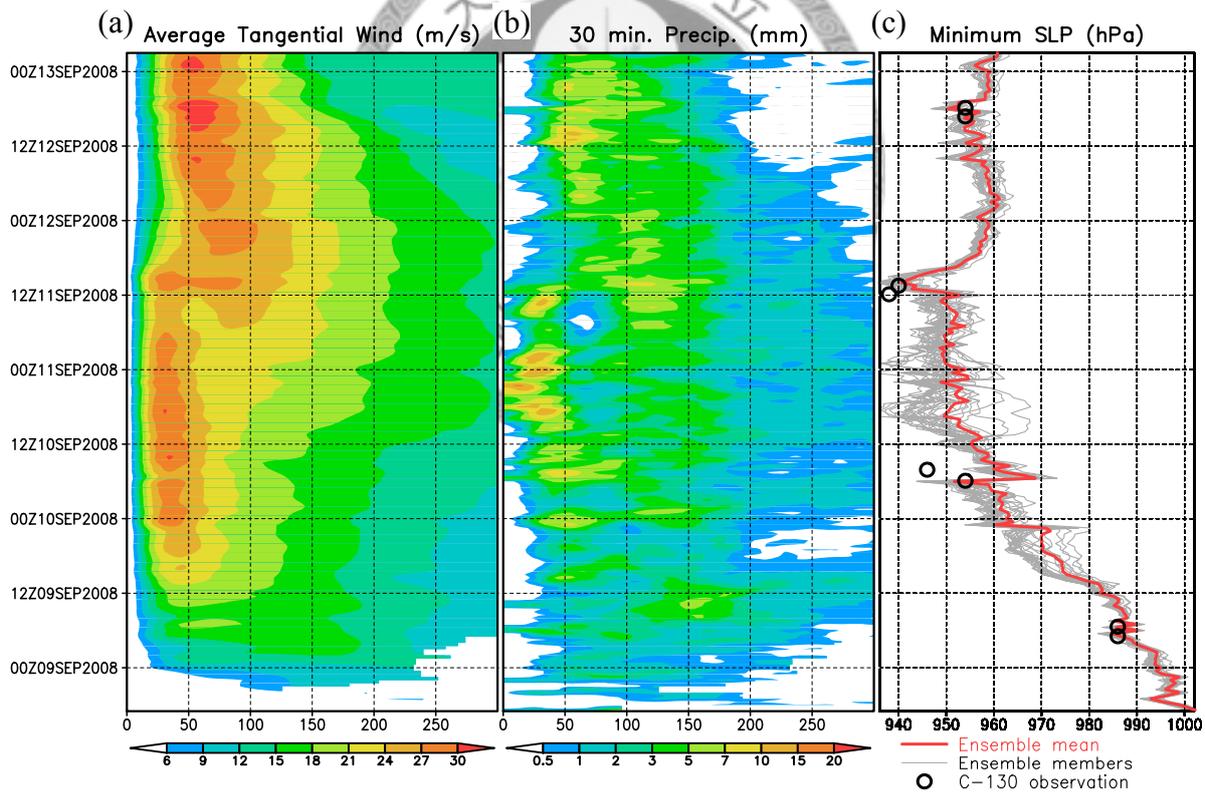


圖 42 辛樂克颱風 TK-MS-TP-ALL 實驗中海表面軸對稱風速、軸對稱 30 分鐘降雨量和中心最低海平面氣壓隨時間的演變。(a) 色階為系集平均的海表面環狀平均切向風速 (單位: m/s)。(b) 色階為系集平均的環狀平均 30 分鐘降雨量 (單位: mm)。(c) 紅色粗線為系集平均颱風中心海平面氣壓, 灰色細線為個別系集成員的中心氣壓 (單位: hPa)。

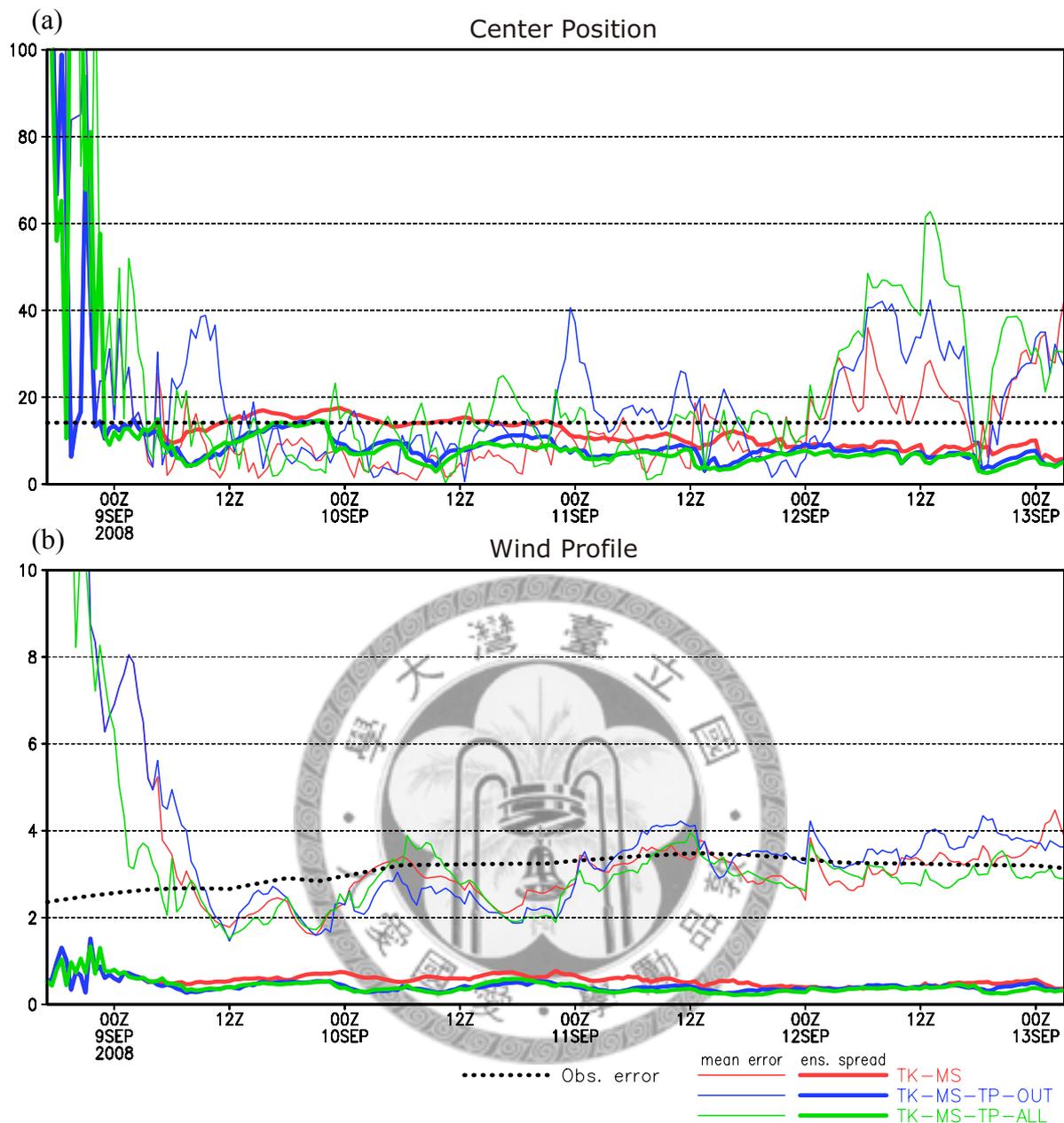


圖 43 辛樂克颱風 TK-MS、TK-MS-TP-OUT 與 TK-MS-TP-ALL 實驗 (a) 颱風中心位置 (單位: km) 與 (b) 軸對稱風速徑向剖面 (單位: m/s) 的平均誤差與系集散布隨時間的演變。紅色線為 TK-MS 實驗, 藍色線為 TK-MS-TP-OUT 實驗, 綠色線為 TK-MS-TP-ALL 實驗。細線為系集平均和同化觀測資料的差值, 粗線為系集成員間的標準差, 皆取預報系集的結果。粗點線為同化入模式中的觀測資料。(詳細定義請參考內文中 (a) (39)、(40) 式與 (b) (41)、(42) 式。)

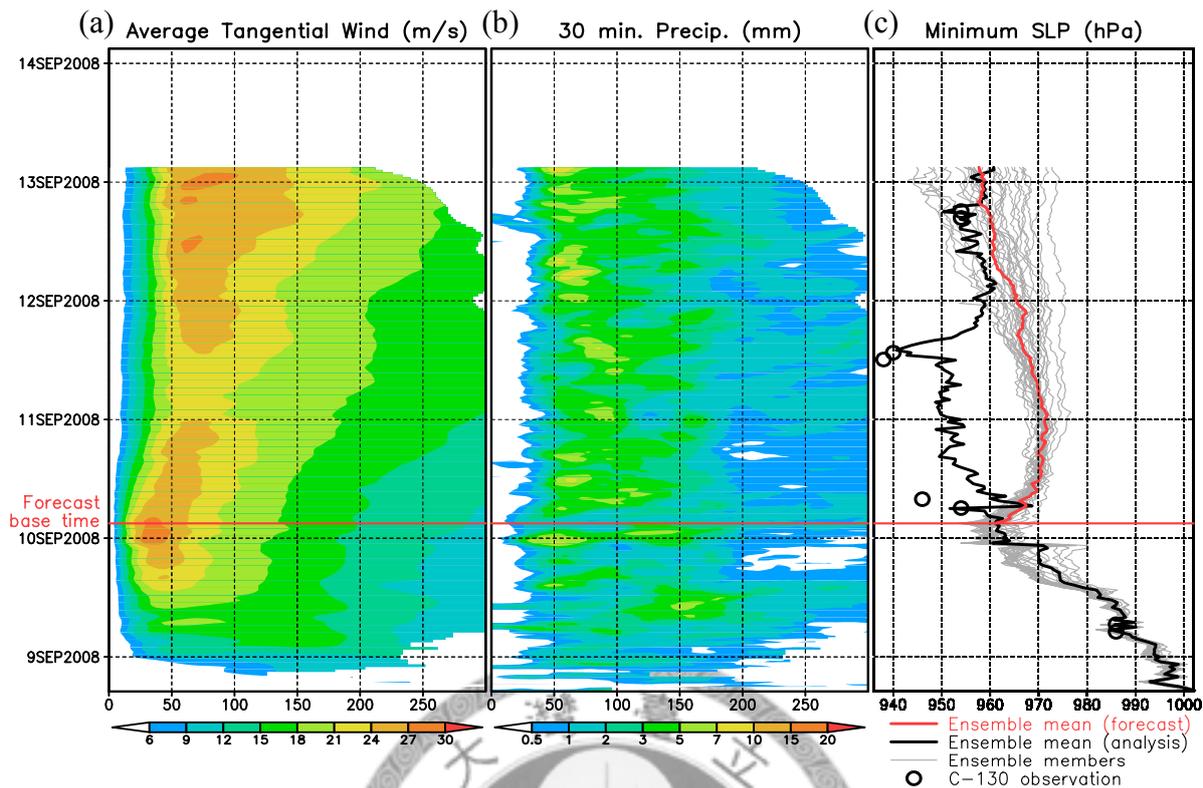


圖 44 辛樂克颱風 TK-MS-TP-ALL 實驗以 9 月 10 日 3 時為預報起始時間的預報 (TK-MS-TP-ALL_1003)。紅色橫向分隔線代表預報起始時間，在此以前皆顯示分析實驗結果，以後皆顯示預報實驗結果 (但亦繪出海平面氣壓的分析結果以供比較)。(a) 色階為系集平均的海表面環狀平均切向風速 (單位: m/s)。(b) 色階為系集平均的環狀平均 30 分鐘降雨量 (單位: mm)。(c) 黑色與紅色粗線各為分析實驗與預報實驗的系集平均颱風中心海平面氣壓，灰色細線為個別系集成員的中心氣壓 (單位: hPa)。

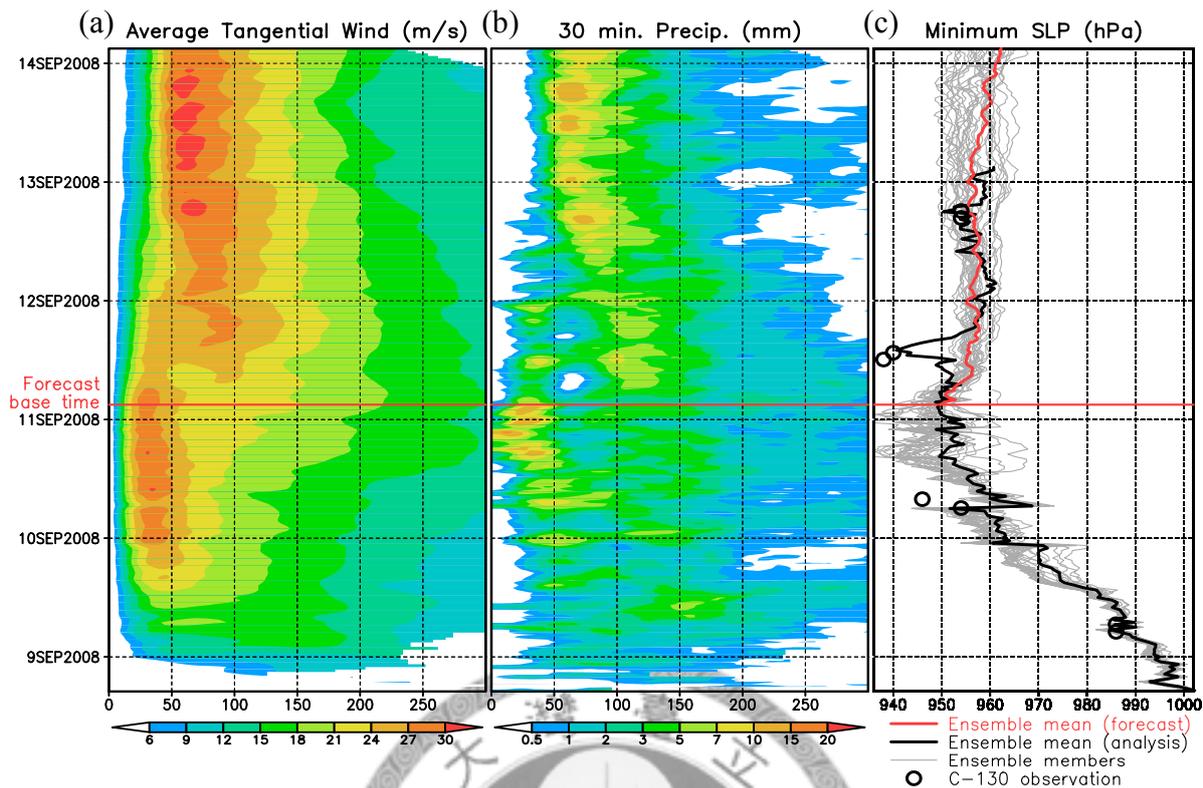


圖 45 同圖 44，但為 9 月 11 日 3 時的預報 (TK-MS-TP-ALL_1103)。

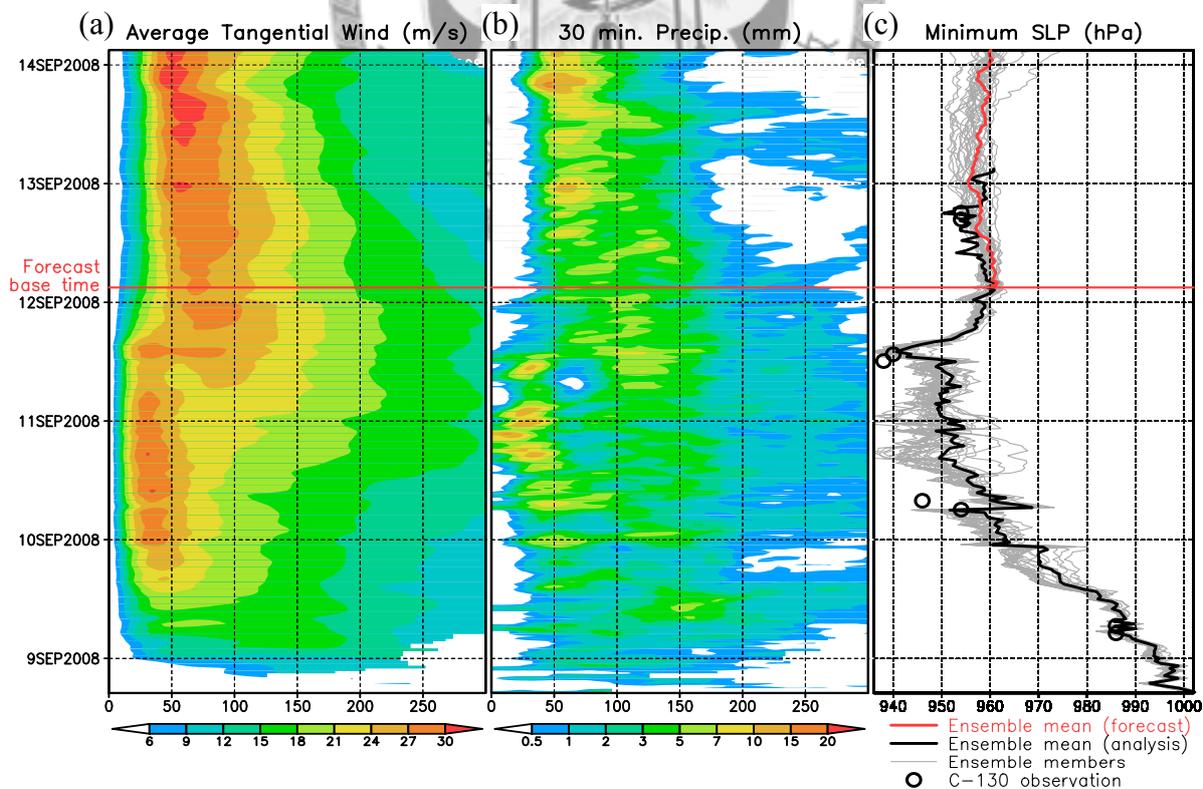


圖 46 同圖 44，但為 9 月 12 日 3 時的預報 (TK-MS-TP-ALL_1203)。

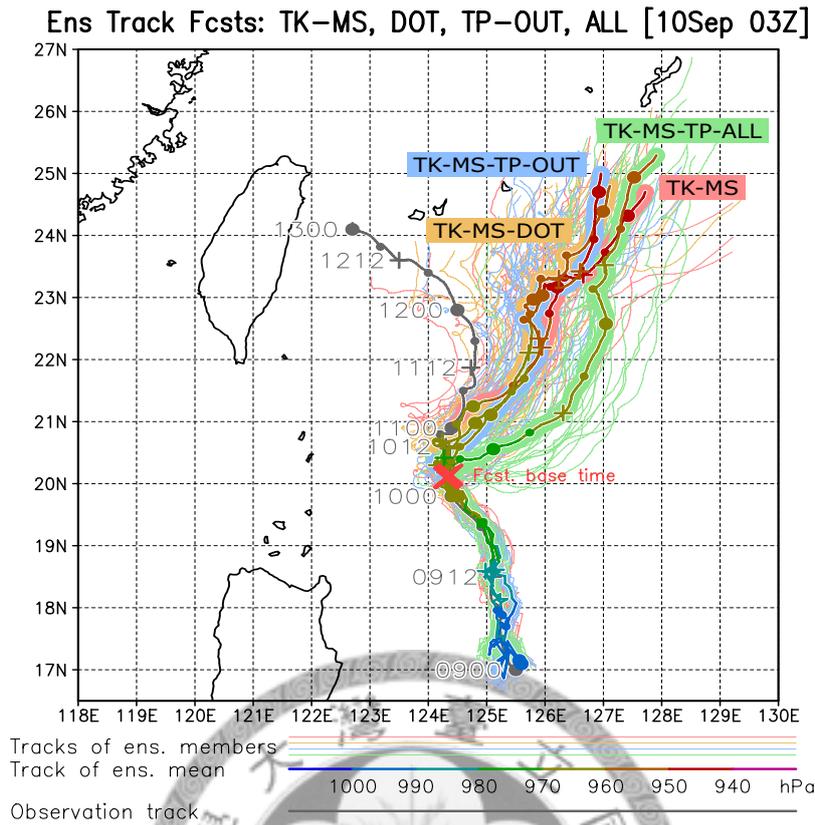


圖 47 辛樂克颱風 TK-MS、TK-MS-DOT、TK-MS-TP-OUT、TK-MS-TP-ALL 四組實驗以 9 月 10 日 3 時為預報起始時間的系集路徑預報比較。灰色粗線為觀測颱風路徑，路徑上時間標記的前 2 位數字為日期，後 2 位數字為小時。彩色粗線為系集平均路徑，依颱風中心最低海平面氣壓以不同顏色顯示（如圖例），淺色的細線為個別系集成員的路徑。紅色叉號為預報起始時間的颱風中心位置，在此以前為分析實驗結果，以後為預報實驗的結果，各組預報實驗以不同顏色顯示（系集平均路徑以底色區分，系集成員路徑則直接以線條顏色區分），見圖上標示。

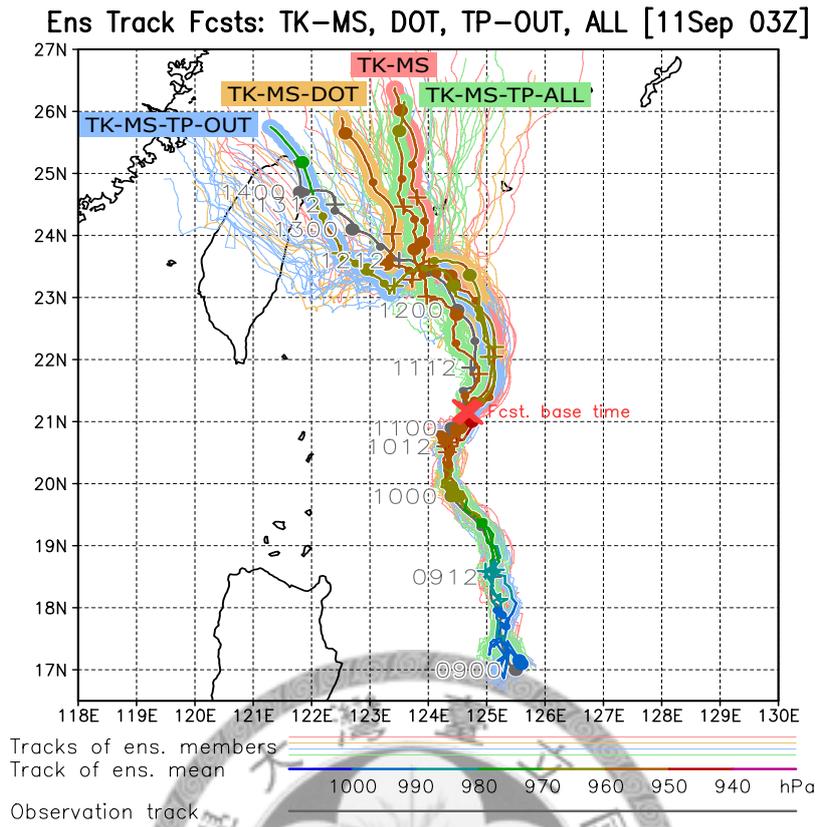


圖 48 同圖 47，但為 9 月 11 日 3 時的預報比較。

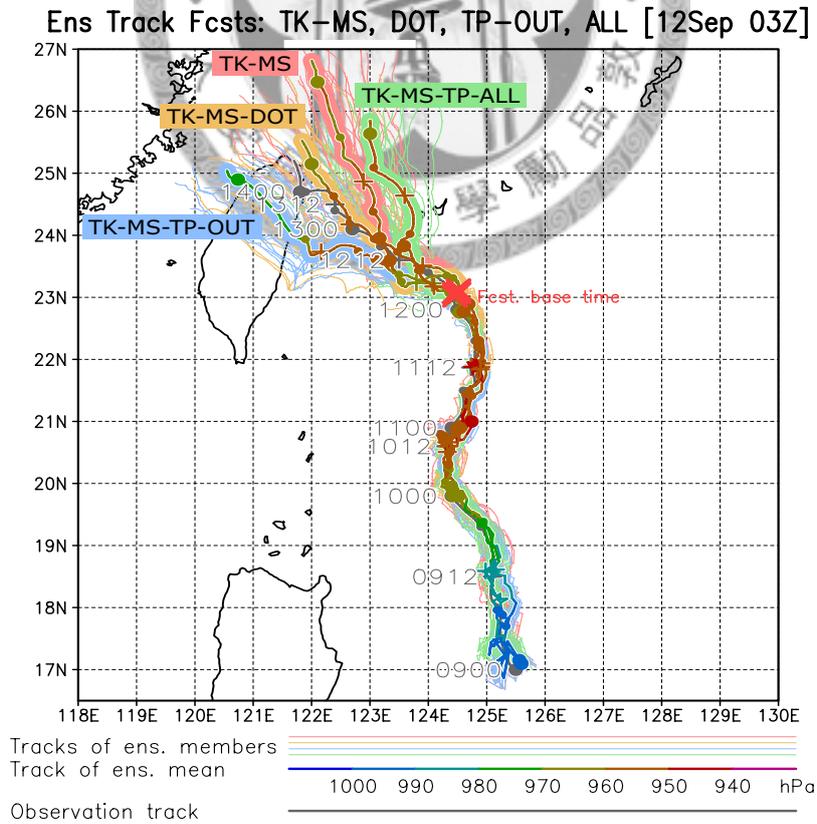


圖 49 同圖 47，但為 9 月 12 日 3 時的預報比較。

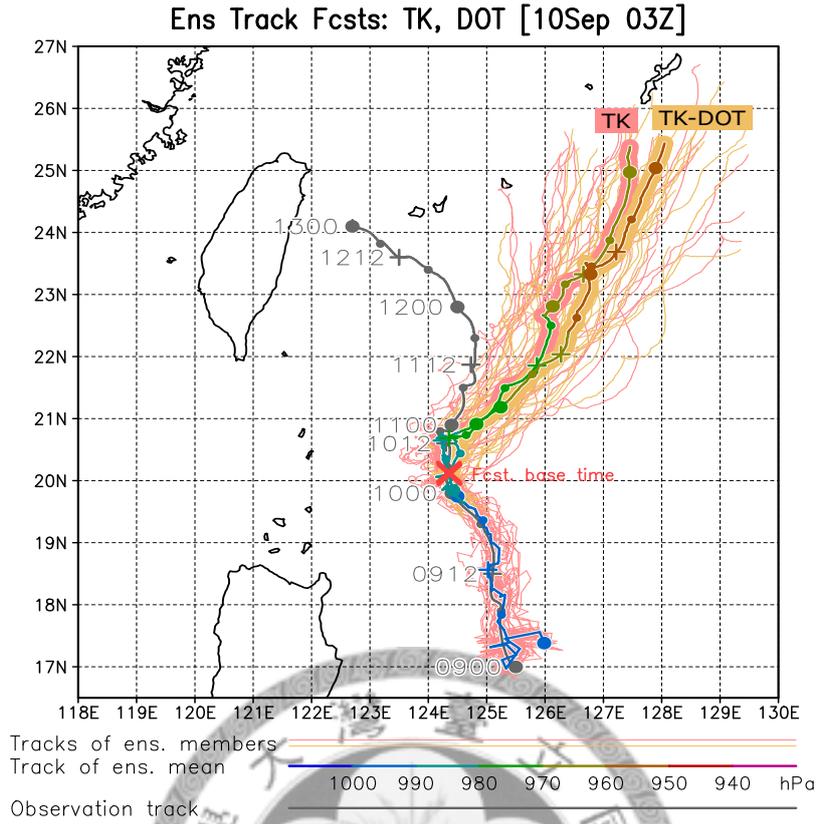


圖 50 同圖 47，但為辛樂克颱風 TK、TK-DOT 兩組實驗 9 月 10 日 3 時的預報比較。

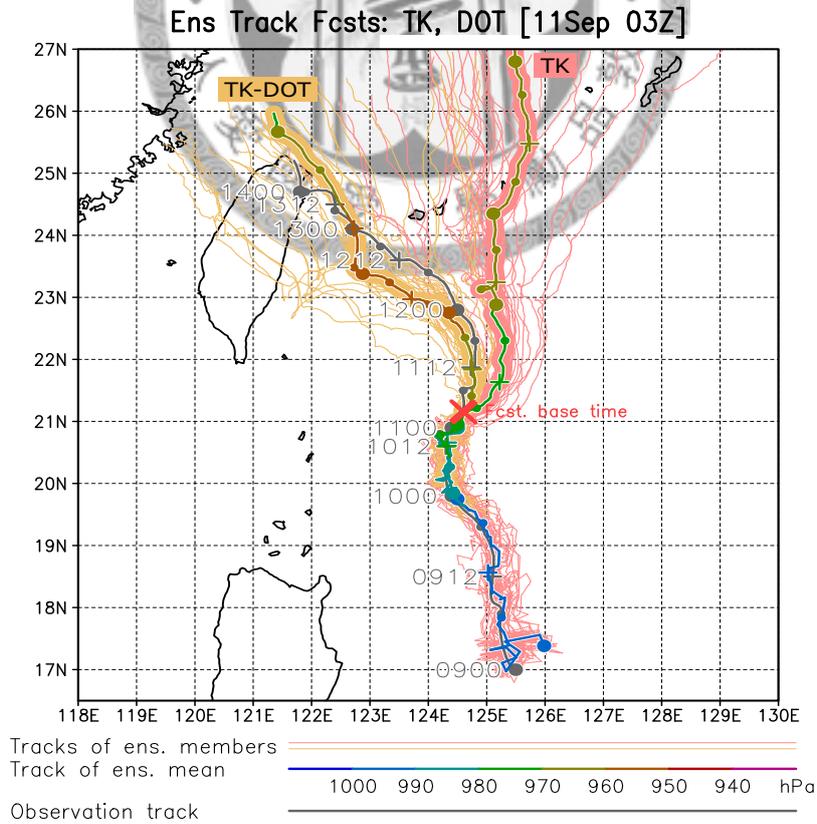


圖 51 同圖 47，但為辛樂克颱風 TK、TK-DOT 兩組實驗 9 月 11 日 3 時的預報比較。

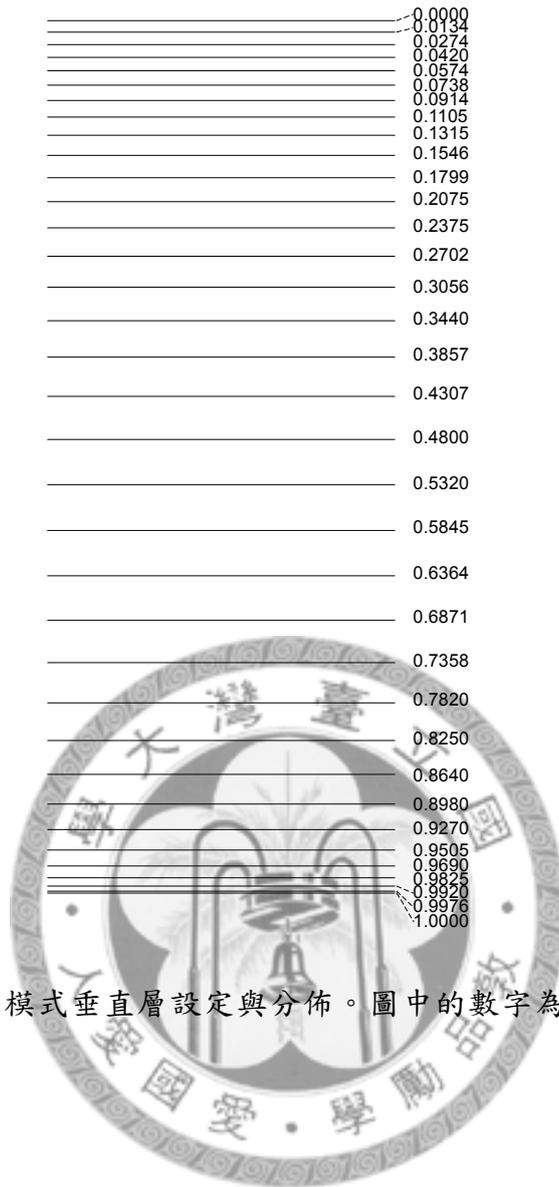


圖 52 本研究採用的模式垂直層設定與分佈。圖中的數字為 WRF 模式的垂直座標 η 。