

交通部中央氣象局
委託研究計畫期末成果報告

系集颱風路徑預報應用技術發展(2/2)

計畫類別：☒氣象 ☐海象 ☐地震

計畫編號：MOTC-CWB-106-M-01

執行期間：106 年 3 月 17 日至 106 年 12 月 31 日

計畫主持人：蕭玲鳳

執行機構：財團法人國家實驗研究院台灣颱風洪水研究中心

本成果報告包括以下應繳交之附件(或附錄)：

☐赴國外出差或研習心得報告 1 份

☐赴大陸地區出差或研習心得報告 1 份

☐出席國際學術會議心得報告及發表之論文各 1 份

中華民國 106 年 12 月 25 日

政府研究計畫(期末)報告摘要資料表

計畫中文名稱	系集颱風路徑預報應用技術發展(2/2)		
計畫編號	MOTC-CWB-106-M-01		
主管機關	交通部中央氣象局		
執行機構	財團法人國家實驗研究院台灣颱風洪水研究中心		
年度	106 年	執行期間	106 年 3 月 17 日至 106 年 12 月 31 日
本期經費 (單位：千元)	新臺幣 1,030 千元		
執行進度	預定 (%)	實際 (%)	比較 (%)
	100%	100%	0%
經費支用	預定(千元)	實際 (千元)	支用率 (%)
	1,030 千元	1,030 千元	100%
研究人員	計畫主持人	協同主持人	研究助理
	蕭玲鳳	陳熾竹	林宜霖
			謝銘恩
			江宙君
			劉嘉騏
報告頁數	121	使用語言	中文
中英文關鍵詞	中文：系集預報、颱風路徑、颱風強度 英文：ensemble forecast, typhoon track, typhoon intensity		
研究目的	本兩年期計畫全程計畫目的係配合氣象局颱風預報作業需要，以現有颱風路徑系集預報產品，發展相應之診斷分析與應用技術。本年度（第二年）除評估已開發之系集颱風路徑預報技術於前一年度颱風個案之表現外，亦將優化此技術之預報能力，同時初步評估系集模式針對颱風強度預報之可應用性。		
研究成果	本年度計畫執行重點可分為兩個部分。一為颱風路徑系集預報應用技術：建基於上一年度的系集颱風路徑預報技術（已將 SUMMER 版本技術轉移至中央氣象局預報中心 TAFIS 系統），分析其預報技術特性，並以不同預報時間考量不同成員數目之策略進行技術優化；二是系集模式之颱風強度預報應用技術：包含分析各國系集模式的颱風強度預報特性，並嘗試發展系集颱風強度預報之技術。 系集颱風路徑預報方面，首先為了解 SUMMER 颱風路徑預報技術於不同強度颱風的表現，本研究以 2014-2016 年颱風個案為		

例，依據歷史颱風個案在預報第 0-12 小時之颱風強度做分類，結果顯示對於第 12 小時颱風強度在中度以上之個案，使用 SUMMER 路徑預報技術有更高的準確性。若考量警報期間之個案，則 SUMMER 在 102 小時內表現較系集平均更好。此外，警報期間雖然颱風路徑預報更難掌握，但更應該使用 SUMMER 做路徑預報(特別在預報時間第 78 小時時，全部個案使用 SUMMER 的路徑誤差改進 1.57 公里，警報期間個案使用 SUMMER 技術則可改進 32.69 公里)。透過許多測試結果，本計畫選取以「不同預報時間考量不同成員數目」作為優化 SUMMER 路徑預報技術之策略，研究結果顯示，預報 78 小時內採用 SUMMER 技術選取 29 個成員數進行平均，78 小時後則使用系集平均能得到最佳之颱風路徑預報 (SUMMER_29 實驗)。

另一方面為系集颱風強度預報，首先分析各國系集模式對西北太平洋颱風強度的預報特性，對於強度較高的颱風(例如最大風速大於 55m/s，或最低氣壓小於 920hPa)，系集模式成員幾乎低估其強度，顯示較無預報能力。

本研究參考 SUMMER 颱風路徑預報技術，發展系集颱風強度預報技術，並以均質化個案做颱風強度預報校驗。研究顯示當成員數為 1 時 SUMMER 強度預報較系集平均改善最多。特別是對中度和強烈颱風，SUMMER 成員數為 1 時能提高偵測率並降低誤報率，相較於系集平均，大幅提高了系集颱風強度之預報能力。為了彌補模式成員對強颱預報能力不足之議題，本計畫也在使用 SUMMER 預報技術前，對各成員分別以第 0 或第 6 小時強度預報誤差平移預先調校，結果顯示當「成員數為 5，加上第 6 小時為調校基準時」有更好的表現，但要特別留意此改進只能維持在前 36 小時內，36 小時後仍是未經調校的強度預報更佳。本計畫亦嘗試將颱風路徑與強度預報進行綜合討論，利用 SUMMER 技術有「系集颱風路徑預報之強度校驗」與「系集颱風強度預報之路徑校驗」。最後本計畫建議以後者配合 SUMMER 成員數為 5 時，意即若欲同時考慮颱風路徑與強度預報時，先以系集颱風強度挑選成員，再進行路徑預報有較佳的表現；進一步與 SUMMER_29 比較其路徑預報結果，則在 12~72 小時內 SUMMER_29 表現稍佳，但兩者路徑誤差之差異平均僅約 10 公里，亦顯示兩種方法的路徑預報能力是相當的。是故以系集颱風強度挑選成員(成員數 5)，再進行路徑預報為本計畫建議之可行策略。

建議事項	無
具體落實應用情形	承上一年度之系集颱風路徑預報技術，今年度對路徑預報技術進行優化，即針對不同預報時間採取不同的預報策略，計畫研究成果建議加入氣象局上線作業預報。此外，系集模式颱風強度預報技術亦有初步之研究結果，除了考量不同的系集成員數外，亦加入颱風強度誤差平移調校等考量，待未來技術成熟後再建議上線使用。
計畫變更說明	無
落後原因	無
變更或落後檢討與因應對策	無

中英文摘要

一、 中文計畫摘要：

系集預報技術之發展除需改進前端模式與提升資料同化技術之外，系集預報產品亦須有相應之診斷分析、加值應用及校驗技術。透過完整的分析，不僅可供模式改進與系集成員設計策略規畫之參考，另一方面透過分析方法完整描述預報產品亦可幫助氣象局能更有效、合理地利用系集預報產品。本兩年期計畫之目的在於依據氣象局颱風預報需要，發展系集颱風路徑預報應用技術。本年度（第二年）除評估已開發之系集颱風路徑預報技術於前一年度颱風個案之表現，更將優化此技術之預報能力；此外，計畫亦分析各國系集模式的颱風強度預報特性，並嘗試發展系集颱風強度預報之技術。

關鍵字：系集預報、颱風路徑、颱風強度

二、英文計畫摘要 Abstract：

Besides the improvements of data assimilation technologies and front-end models, relevant diagnostic analyses, value-added applications and verifications are all vital factors for the developments of ensemble forecasting. These progresses not only improve weather models but also play the roles in the references when setting ensemble member strategies. Furthermore, to meet the requirements of Central Weather Bureau(CWB), we need a comprehensive description of forecasting products.

The purposes of this 2-year project are to support CWB's typhoon forecasts during warning periods and to develop the technology of ensemble typhoon track forecasting. In this year(second year), historical typhoon cases in 2016 are applied to verify the developed ensemble typhoon track forecasting technology(SUMMER, SUper Multi-Model Ensemble Realignment for typhoon forecast), then to optimize SUMMER typhoon track forecasting. At the same time, the applicability of ensemble typhoon intensity forecasting technology is preliminarily evaluated.

Keywords: ensemble forecast, typhoon track, typhoon intensity

目錄

中英文摘要.....	1
目錄.....	3
表目錄.....	5
圖目錄.....	7
第一章 計畫概述.....	13
1.1 計畫背景與目的.....	13
1.1.1 計畫背景.....	13
1.1.2 計畫目的.....	14
1.2 國內外與本計畫相關研究情況.....	14
1.2.1 颱風路徑系集預報.....	14
1.2.2 權重系集預報.....	15
1.2.3 颱風強度預報.....	17
1.3 計畫工作項目.....	18
第二章 歷史颱風路徑之系集預報應用技術結果分析.....	21
2.1 2016 年歷史颱風個案實驗.....	21
2.2 與 2014-2015 年實驗結果之比較.....	22
2.3 2014-2016 年 SUMMER 之颱風路徑預報校驗.....	23
2.3.1 全部個案.....	23
2.3.2 0-12 小時不同強度個案.....	23
2.3.3 警報期間個案.....	24
第三章、颱風路徑系集預報應用技術優化.....	43
3.1 系集成員排名基準.....	43
3.1.1 實驗一：離散度高於誤差.....	43
3.1.2 實驗二：離散度接近誤差.....	44
3.2 各預報時間之選取成員數量.....	45
3.3 優化策略：改變 SUMMER(M=28)成員數.....	46
3.3.1 實驗一：SUMMER_28.....	46
3.3.2 實驗二：SUMMER_min.....	47
3.3.3 實驗三：SUMMER_29.....	47
第四章、颱風強度系集預報應用技術發展.....	75
4.1 2014-2016 年各國系集模式颱風強度之系統性分析.....	75
4.1.1 各國系集預報與颱風強度資訊.....	75
4.1.2 系集模式之颱風強度校驗分析.....	75
4.2 系集颱風強度預報技術.....	77
4.2.1 方法簡介.....	77
4.2.2 以颱風近中心最大風速定義颱風強度之分析.....	78
4.2.3 以颱風中心最低氣壓定義颱風強度之分析.....	79

4.2.4 SUMMER 技術對於不同颱風強度之偵測率與誤報率分析	79
4.2.5 綜合討論.....	80
4.2.5.1 應用颱風路徑 SUMMER 預報技術之強度校驗	80
4.2.5.2 應用颱風強度 SUMMER 預報技術之路徑校驗	81
4.2.6 考量颱風強度之調校(Calibration)方法	82
第五章、結論與建議.....	113
附錄一	115
附錄二.....	116
參考文獻.....	119

表目錄

表 1	一分鐘平均風速與十分鐘平均風速對照表，單位 KTS。.....	19
表 2	2016 年颱風路徑系集預報應用技術優化之實驗名稱及優化策略。.....	49
表 3	計畫使用之各國系集模式颱風路徑資料中，颱風強度單位。.....	83
表 4	各國颱風 best track 中颱風強度資料單位與時間間隔。本研究以 CWB-working track 資料作為校驗基準。.....	83
表 5	颱風強度 CI 數、中心最低氣壓與最大風速（10 分鐘平均）對照表。（木場等，1990）.....	84
表 6	圖 75 中風速與氣壓分別列在前 10 名的成員名，相同次數的成員被列在同一名次。.....	84

圖目錄

圖 1	系集颱風路徑預報應用技術作業化流程。.....	25
圖 2	針對西北太平洋颱風個案，統計(a) 2016 年 ECMWF 及 NCEP 系集平均與 Super-OBEST、(b) 2016 年全球及區域系集平均、(c) 2014-2015 年全球及區域系集平均與 SUMMER 之路徑預報誤差。左縱軸與長條代表路徑誤差，右縱軸與曲線上百分比代表選取成員平均相對於系集平均之誤差改進比例，上橫軸數字代表各預報時間統計個案數，+ 代表「MEAN 與 OBEST 存在差距」統計上滿足 95%信心水準。.....	26
圖 3	針對 2016 年西北太平洋颱風個案，統計 Super-OBEST 與 SUMMER 之路徑預報誤差。左縱軸與長條代表路徑誤差，右縱軸與曲線上百分比代表選取成員平均相對於系集平均之誤差改進比例。.....	27
圖 4	統計 2016 年西北太平洋颱風個案，全球及區域系集平均與 SUMMER 之路徑預報誤差與系集離散度。藍色系代表路徑誤差，黃色系代表離散度；淺色系代表系集平均，深色系代表 SUMMER。.....	28
圖 5	針對 2016 年西北太平洋颱風個案，系集平均（藍）與 SUMMER（橘）於各預報時間使用之成員數量。.....	28
圖 6	統計 2016 年西北太平洋颱風個案，全球及區域系集平均與 SUMMER 之路徑預報誤差標準差。.....	29
圖 7	同圖 2 (b)，但為 0600/1800 UTC 之結果。.....	29
圖 8	同圖 4，但為 0600/1800 UTC 之結果。.....	30
圖 9	同圖 4，但為 2014-2015 年所有颱風個案之結果。.....	30
圖 10	2014、2015、2016 年西北太平洋颱風個案之 (a) 系集平均與 (b) SUMMER 路徑預報誤差。.....	31
圖 11	針對(a) 2014 至 2015 年、(b) 2016 年西北太平洋颱風所有個案，SUMMER 於各預報時間使用之成員數量。橫軸、縱軸分別為各預報初始時刻、預報時間，由紫、藍、綠分別代表成員數 0-10、11-20、21-40。.....	32
圖 12	2016 年西北太平洋颱風個案（灰線）與排除 Lionrock 颱風後（黃線）之系集平均路徑預報誤差。.....	33
圖 13	針對 2016 年西北太平洋颱風所有個案，SUMMER 於預報時間 78 至 138 小時之路徑誤差。橫軸、縱軸分別為各預報初始時刻、預報時間，綠色、紅色分別代表誤差小於與大於 2016 年 SUMMER 平均路徑誤差加上一個誤差標準差之個案誤差。.....	33
圖 14	圖 12 加上同時排除 Conson、Lionrock 颱風（綠線）之系集平均路徑預報誤差。.....	34
圖 15	同圖 10 (a)，但 2016 年為同時排除 Conson、Lionrock 颱風個案之結果。.....	34
圖 16	中央氣象局 2016 年獅子山 (Lionrock) 颱風路徑圖。.....	35
圖 17	中央氣象局 2016 年康森 (Conson) 颱風路徑圖。.....	35
圖 18	Conson 颱風初始時刻為 (a) 080900、(b) 080912、(c) 081012 之三個預報個案。.....	

藍、綠、紫、黃色線分別代表 ECMWF、NCEP、WEPS、TAPEX 之系集成員路徑，各系集路徑中較粗者代表選取用以計算 SUMMER 之成員路徑，紅、粉紅色線分別代表 SUMMER、系集平均之路徑。.....	36
圖 19 所有系集成員做 SUMMER 實驗與 All mean 路徑預報校驗結果比較。圖中橫軸為預報時間 0 至 120 小時，圖中最上排數字為個案數目；長條圖分別為 SUMMER 實驗與 all（系集全部成員平均）之路徑誤差（公里），紫色線為 SUMMER 實驗相對於 all 的路徑誤差改進率(%)。.....	38
圖 20 2014-2016 年西北太平洋颱風個案，依預報時間 0-12 小時強度變化分類（共十一類），不同強度分類在不同 tau 時個案數目統計。其中第六類和第十一類因為個案數較少故沒有繪製。.....	38
圖 21 2014-2016 年西北太平洋颱風個案，依預報時間 0-12 小時強度變化分類（共十一類），不同強度分類在不同 tau 時 SUMMER 技術預報颱風路徑之誤差（公里）。第六類和第十一類因為個案數較少故沒有繪製。.....	39
圖 22 同圖 21，但僅繪出 0-12 小時強度維持不變（包含第一類:輕度->輕度、第二類:中度->中度、第三類:強烈->強烈）的颱風個案。.....	39
圖 23 2014-2016 年西北太平洋颱風挑選氣象局警報期間之個案，以 SUMMER 技術預報路徑（綠色柱狀）與系集平均（橘色柱狀）之比較結果。圖說同圖 19。.....	40
圖 24 2014-2016 年西北太平洋颱風全部個案與氣象局警報期間個案之路徑預報誤差。橫軸表示預報時間 0-120 小時，縱軸為路徑預報誤差（公里），紅色、橘色實線分別表示全部個案與警報期間個案 SUMMER 路徑預報之誤差，黑色、灰色虛點線則為全部個案與警報期間個案之系集平均路徑預報誤差。橘色和灰色曲線分別為圖 23 中 SUMMER 技術預報路徑（綠色柱狀）與系集平均（橘色柱狀）。..	40
圖 25 2014-2016 年西北太平洋颱風全部個案與氣象局警報期間個案之路徑預報誤差，橫軸表示預報時間 0-120 小時，縱軸為路徑預報誤差（公里）三條曲線為不同個案使用 SUMMER 之路徑預報誤差。黑色虛線、橘色實線及藍色實線分別代表全部個案、警報期間個案及非警報期間個案。.....	41
圖 26 2016 年西北太平洋颱風個案，以 ECMWF、NCEP、TAPEX 和 WEPS 所有系集成員做 SUMMER 實驗與 All mean 路徑預報校驗結果比較。圖中橫軸為預報時間 0 至 120 小時，括號內的數字為個案數目；長條圖分別為 SUMMER 實驗與 All mean 之路徑誤差（公里），紫色線為 SUMMER 實驗相對於 All mean 的路徑誤差改進率。.....	50
圖 27 同圖 4，但為同時排除 Conson、Lionrock 颱風個案之結果。.....	50
圖 28 2016 年西北太平洋颱風所有個案以及滿足 3-1 式個案之 SUMMER 路徑預報誤差。.....	51
圖 29 同圖 5，但加上應用 3-1 式之方法（灰線）。.....	51
圖 30 統計 2016 年中之西北太平洋颱風全部個案，其路徑誤差與系集離散度。.....	52
圖 31 統計 2016 年中，應用 3-1 式方法挑選之西北太平洋颱風個案，其路徑誤差與系集離散度。.....	52
圖 32 統計 2016 年西北太平洋颱風個案，全球及區域系集平均、SUMMER 及應用	

3-1 式方法之路徑預報誤差。.....	53
圖 33 同圖 32，但為預報時間(a) 0-36 小時、(b) 36-72 小時、(c) 72-120 小時。.....	53
圖 34 2016 年西北太平洋颱風所有個案以及滿足 3-2 式個案之 SUMMER 路徑預報誤差。.....	55
圖 35 針對 2014-2015 年西北太平洋颱風個案，以 ECMWF、NCEP、WEPS 及 TAPEX 系集成員計算其 12 小時颱風路徑預報誤差與選取排名成員數的關係。不同顏色線條代表不同預報時間，而各線上三角形代表此預報時間之誤差最小的系集排名成員數。圖中虛線標示成員數為 10 與標準化誤差為 1 時。.....	55
圖 36 針對 2016 年西北太平洋颱風個案，SUMMER（藍）與應用 3-2 式之方法（橘）於各預報時間使用之成員數量。.....	56
圖 37 統計 2016 年西北太平洋颱風個案，(a) SUMMER 與應用 3-2 式方法之系集離散度；(b) 應用 3-2 式方法之路徑誤差與系集離散度。.....	57
圖 38 2016 年西北太平洋颱風所有個案，(a) SUMMER 與(b)應用 3-2 式之方法於各預報時間使用之成員數量。橫軸、縱軸分別為各預報初始時刻、預報時間，由紫、藍、綠、黃、橘、紅分別代表成員數 0-10、11-20、21-40、41-60、61-80、81 以上。.....	58
圖 39 2016 年 Chaba 颱風初始時間 09/30 00Z 之(a) SUMMER 與(b)應用 3-2 式方法之各系集成員、平均及優化路徑。黑、粉紅、紅色線分別代表 best track、系集平均、SUMMER 路徑；藍、綠、紫、黃色線分別代表 ECMWF、NCEP、WEPS、TAPEX 成員路徑，粗線代表被選取之成員。黃色圈代表預報時間為 0、24、48、72、96 小時。.....	59
圖 40 同圖 39 但為 2016 年 Sarika 颱風初始時間 10/15 12Z。黃色圈代表預報時間為 0、24、48、72 小時。.....	60
圖 41 統計 2016 年西北太平洋颱風個案，全球及區域系集平均、SUMMER 及應用 3-2 式方法之路徑預報誤差。.....	61
圖 42 同圖 41，但為預報時間(a) 0-36 小時、(b) 36-72 小時、(c) 72-120 小時。.....	61
圖 43 2016 年(a) Chaba 颱風初始時間 09/30 00Z、(b) Sarika 颱風初始時間 10/15 12Z 於各預報時間之使用成員數與路徑誤差。藍、綠色長條分別代表 SUMMER 及應用 3-2 式方法之使用成員數；黃、紅色線分別代表 SUMMER 及應用 3-2 式方法之路徑預報誤差。.....	63
圖 44 針對 2016 年西北太平洋颱風個案，系集平均（藍）、SUMMER（橘）及補足法（灰）於各預報時間使用之成員數量。.....	64
圖 45 統計 2016 年西北太平洋颱風個案，全球及區域系集平均、SUMMER 及補足法之系集離散度。.....	64
圖 46 統計 2016 年西北太平洋颱風個案，全球及區域系集平均與補足法之路徑預報誤差與系集離散度。藍色系代表路徑誤差，黃色系代表離散度；淺色系代表系集平均，深色系代表補足法。.....	65
圖 47 統計 2016 年西北太平洋颱風個案，全球及區域系集平均、SUMMER 及補足法之 (a) 0-72 小時、(b) 72-120 小時、(c) 120-240 小時路徑預報誤差。.....	65

圖 48	針對 2016 年西北太平洋颱風個案，SUMMER（藍）、補足法（橘）以及 3-2 補足法（灰）於各預報時間使用之成員數量。.....	67
圖 49	統計 2016 年西北太平洋颱風個案，全球及區域系集平均、補足法及 3-2 補足法之系集離散度。.....	67
圖 50	統計 2016 年西北太平洋颱風個案，補足法與 3-2 補足法之路徑預報誤差與系集離散度。藍色系代表路徑誤差，黃色系代表離散度；淺色系代表補足法，深色系代表 3-2 補足法。.....	68
圖 51	統計 2016 年西北太平洋颱風個案，全球及區域系集平均、SUMMER、補足法以及 3-2 補足法之 (a) 0-72 小時、(b) 72-120 小時、(c) 120-240 小時路徑預報誤差。.....	68
圖 52	本研究中優化 SUMMER 颱風路徑預報之實驗成員數在不同預報時間之變化（詳情見表 2）。圖中橫軸為預報時間 12 至 120 小時，縱軸為成員數(M)。橘色線表示 All mean，淺藍色為 SUMMER，黃色為 SUMMER_28，綠色為 SUMMER_min，紅色為 SUMMER_29。.....	70
圖 53	同圖 19，但為 SUMMER_28 與 SUMMER 實驗路徑預報校驗結果比較。.....	70
圖 54	2016 年西北太平洋颱風個案，以 ECMWF、NCEP、TAPEX 和 WEPS 所有系集成員計算其 12 小時路徑預報誤差與選取成員數的關係。圖中不同顏色曲線表示不同預報時間選取某成員數的路徑誤差並以全系集成員平均之路徑誤差標準化結果，三角形對應的橫軸座標則表示該預報時間出現路徑誤差最小時選取的成員數。.....	71
圖 55	同圖 19，但為 SUMMER_min 與 SUMMER 實驗路徑預報校驗結果比較。....	71
圖 56	使用 SUMMER 技術在不同成員數與不同預報時間對 SUMMER(M=28)實驗之路徑誤差標準化分析。.....	72
圖 57	同圖 19，但為 SUMMER_29 與 SUMMER 實驗路徑預報校驗結果比較。.....	72
圖 58	各系集成員之颱風路徑分佈，黑色線為 Best track，紅色線為 SUMMER 預報結果，紫色箭號標示的是預報時間 78 小時的路徑位置。圖為 2016 年尼伯特颱風。.....	73
圖 59	同圖 58，但為 2016 年莫蘭蒂颱風。.....	74
圖 60	由表 5 颱風中心最低氣壓與最大風速數據得之四次迴歸方程式。.....	85
圖 61	2014-2016 年歷史颱風個案 ECMWF、NCEP、TAPEX 及 WEPS 系集模式各成員之中心最低氣壓(hpa)與最大風速(m/s)之散佈圖。圖中 ECMWF、NCEP 最大風速為模式輸出結果，TAPEX、WEPS 則由中心最低氣壓(hpa)與圖 60 中四次迴歸方程式而得。.....	85
圖 62	2014-2016 年歷史颱風個案 ECMWF、NCEP、TAPEX 及 WEPS 系集模式，不同預報時間(tau)最大風速(m/s)預報之(a)各成員誤差與(b)系集平均誤差散佈圖。.....	86
圖 63	2014-2016 年歷史颱風個案 ECMWF、NCEP、TAPEX 及 WEPS 系集模式，不同預報時間(tau)中心最低氣壓(hPa)預報之(a)各成員誤差與(b)系集平均誤差散佈圖。.....	87
圖 64	2014-2016 年歷史颱風觀測與不同模式各成員誤差之散佈圖。圖(a)為最大風速	

(m/s)，圖(b)為中心最低氣壓(hPa)。	88
圖 65 2014-2016 年歷史颱風個案 ECMWF、NCEP、TAPEX 及 WEPS 系集模式均質化後，不同預報時間(τ)時最大風速(m/s)(a)誤差平均和(b)誤差絕對值平均。	89
圖 66 2014-2016 年歷史颱風個案 ECMWF、NCEP、TAPEX 及 WEPS 系集模式均質化後，不同預報時間(τ)時中心最低氣壓(hPa)(a)誤差平均和(b)誤差絕對值平均。	90
圖 67 2016 年梅姬颱風不同初始場下模式各成員之中心最低氣壓(hPa)變化，黑色粗實線為系集平均，紅色粗實線為觀測值。圖(a)初始場為 2016 年 9 月 23 日 12Z，圖(b)初始場為 2016 年 9 月 26 日 00Z，圖(c)為 2016 年 9 月 23 日 00Z 至 2016 年 9 月 28 日 06Z 間所有模擬結果。	91
圖 68 2014-2016 年各模式於均質化前後之個案數比較。括號中紅字表示該模式或者經均質化後的總個案數，百分比數字則表示該模式於該年經均質化後能保留的個案數比例。	92
圖 69 2014-2016 年之颱風個案，「四模式成員（取均質化後個案）以 12 小時最大風速預報誤差排名選取不同的成員數之平均最大風速誤差」經「四模式系集平均之最大風速預報誤差」標準化之結果圖。橫軸表示選取的成員個數，縱軸表示最大風速之標準化誤差，不同顏色表示不同的預報時間，三角形則表示該時間選取的成員數有最小誤差。	92
圖 70 同圖 69，但改以 12 小時颱風最低氣壓誤差排名選取不同的成員數並預報颱風的最低氣壓。	93
圖 71 SUMMER 以 12 小時最大風速誤差做排序，選取誤差最低的前 5 名成員，以成員數 1 到 5 預報颱風最大風速後取風速誤差平均。不同顏色的長條圖表示不同的成員數，紅色長條圖則是系集平均之誤差(Ensemble mean)，紫紅色曲線及數值表示選取成員 1 相對於系集平均誤差的改進比例，黑色十字符號則表示「Ensemble mean 與 SUMMER(M=1)存在差距」統計上滿足 95%信心水準。圖(a) ECMWF、NCEP、TAPEX 與 WEPS 四個模式均質化的資料的個案數與所有成員。圖(b)僅用 ECMWF 和 NCEP 兩個全球模式的成員作 Super-OBEST，且個案數與圖(a)相同。圖(c)與圖(b)相同但改為 TAPEX 與 WEPS 區域模式成員。圖(d)為使用 ECMWF、NCEP、TAPEX 與 WEPS 四個模式「未均質化」資料。	94
圖 72 同圖 71 但為 SUMMER 以 12 小時最低氣壓誤差做排序，並預報颱風最低氣壓之誤差。	96
圖 73 取自圖 71 中固定成員數時，僅考慮 2 個全球模式成員 (Global, 綠色)、僅考慮 2 個區域模式成員 (Regional, 黃色) 及同時考慮全球和區域模式成員 (SUMMER, 棕色) 之最大風速誤差(m/s)比較。圖(a)至圖(f)表示成員數為 1 到 5 和系集平均，橫軸為預報時間 0 到 72 小時。	98
圖 74 取自圖 72，縱座標改為最低氣壓誤差(hPa)，圖說同圖 73。	100
圖 75 2014-2016 年 337 個案中以 SUMMER 選擇（共 120 個成員）的次數統計。藍色與 紅色長條圖分別表示 SUMMER 以預報時間 12 小時之最低氣壓和最大風速誤差排名時，各成員在前五名內被挑選的總次數。	102

圖 76	SUMMER (成員數為 1) 與系集平均對不同強度颱風 (以氣象局對輕度颱風 17.2 m/s、中度颱風 32.7 m/s 與強烈颱風 51 m/s 之最大風速下標定義) 的偵測率 (POD) 和誤報率 (FAR) 散佈圖。顏色表示不同預報時間, 圓形為系集平均, 三角形為 SUMMER 之結果。圖中數字表示 SUMMER 相對於系集平均的改善率, 紅色數字表示 SUMMER 改善, 藍色數字則表示 SUMMER 未改善。.....	102
圖 77	同圖 76 但成員數為 3。.....	103
圖 78	同圖 76 但成員數為 5。.....	103
圖 79	2014-2016 年西北太平洋颱風個案, 不同系集模式路徑誤差與最大風速誤差之散佈圖。紅色點為 ECMWF 模式、綠色點為 NCEP 模式、水藍色點為 TAPEX 模式、紫色點為 WEPS 模式。.....	104
圖 80	2014-2016 年西北太平洋颱風個案, 不同系集模式路徑誤差與最低氣壓誤差之散佈圖。紅色點為 ECMWF 模式、綠色點為 NCEP 模式、水藍色點為 TAPEX 模式、紫色點為 WEPS 模式。.....	104
圖 81	同圖 69, 但改以 12 小時颱風路徑誤差排名選取不同的成員數並預報颱風的最低氣壓。.....	105
圖 82	2014-2016 年颱風個案以 12 小時之颱風路徑誤差選取成員 (M=29) 並預報颱風中心最低氣壓。紅色長條圖為系集平均誤差 (Ensemble mean), 黃色長條圖為 SUMMER (成員數 29) 之平均最低氣壓。紫紅色曲線及數值表示選取成員數 29 相對於系集平均誤差之改進比例, 黑色十字符號則表示「Ensemble mean 與 SUMMER (M=29) 存在差距」統計上滿足 95% 信心水準。.....	105
圖 83	2014-2016 年西北太平洋颱風個案 (非均質化), 事後分析系集成員路徑預報誤差 Top N (Top N, N=1, 10, 20, 30, 40, 50), 與僅考量最大風速誤差之 SUMMER (M=1) 和系集平均 (Mean) 之風速誤差 (取絕對值) 隨預報時間 (tau) 之時序變化。.....	106
圖 84	2014-2016 年西北太平洋颱風個案, SUMMER 以 12 小時最大風速誤差選取成員 (M=1-5) 預報颱風路徑誤差之結果。紫紅色實線 SUMMER 為 M=1 相對於系集平均路徑誤差之平均改進率, 紫色實線則為 M=5 時 SUMMER 相對於系集平均之改進率。.....	106
圖 85	同圖 84 但改為以 12 小時最低氣壓預報誤差挑選 SUMMER 成員。.....	107
圖 86	以 2016 年西北太平洋歷史颱風個案為例, 比較 4.2.5.2 中颱風強度 SUMMER 預報技術之路徑校驗 (藍色長條圖) 與 3.3.3 節 SUMMER_29 實驗 (橘色長條圖) 之路徑誤差隨預報時間之關係圖。.....	107
圖 87	考量颱風強度 (最大風速, m/s) Calibration 之颱風強度校驗結果。Calibration 00 和 Calibration 06 為各成員直接對模式預報, 分別以預報時間第 0 及第 6 小時強度誤差平移調整, 之後再做 SUMMER M=1-5 強度預報之校驗結果。No calibration 同圖 71(a), 未經 Calibration 結果。圖中實線分別為 Calibration 00、與 Calibration 06 相對於 No calibration 之誤差改進率。圖(a)到圖(f)分別為成員數 1 到 5 及系集平均。.....	108
圖 88	同圖 87 但為最低氣壓 (hPa), No calibration 同圖 72(a)。.....	110

第一章 計畫概述

1.1 計畫背景與目的

1.1.1 計畫背景

台灣位於太平洋季風合流區，同時又座落於菲律賓海板塊與歐亞板塊交界，因此常面臨颱風、梅雨、地震等天然災害。世界銀行 2005 年公布的「災害高風險區評估報告」指出，台灣是全球水災、旱災及地震複合型災害發生頻率最高的地區，平均有 90% 以上的人口面臨 2 種天然災害（颱風、洪水、乾旱、地震）的威脅，有 73% 的人口面臨 3 種天然災害的威脅。美國東部及南部亦常因颶風侵襲而導致災情（如 2005 年的卡崔娜颶風），其災害規模常和颶風強度密切相關，故美國的颶風研究非常重視強度的變化和預報。台灣位於西北太平洋地區颱風路徑要衝，為全世界受颱風影響最顯著的國家之一。對台灣而言，大部分的颱風災害（淹水、土石流、崩塌及斷橋），係因持續性豪大雨所導致，故台灣的颱風減災研究重點與美國有顯著差異；再者，台灣的複雜地形除提高問題困難度外，亦使台灣的颱風災害研究具相當高的特殊性。

在過去學研界和作業單位的努力下，台灣的颱風預報與颱風災害之預警應變能力已達國際一流水準，並實際發揮成效。然而由於台灣人口密度高、地形複雜、地質不佳、河流短促且坡陡流急，加上降雨過程複雜且具隨機特性，故局部地區突發性豪雨的預測難度相當高，也增加了洪水與坡地災害預警資訊的不確定性。此外，國內颱風研究社群人力有限，颱風、豪雨研發能量仍有相當多提升空間；因此台灣的颱風研究除須與國際接軌、引進國外先進技術之外，須針對國內獨特需求，針對高災害潛勢區建構研究所需的大氣水文密集觀測能量，並強化高時空解析之定量降雨預報技術與災害潛勢預警能力。而台灣的颱風災害大都因持續性的豪大雨所導致（如淹水、土石流），故為提升颱風災害之預警應變作業效能，具備可操作之定量降雨預報技術為其重要關鍵；若想要達成良好之颱風定量降雨預報，颱風路徑預報之改進為最重要的要素之一。

自 1963 年 Lorenz 提出混沌理論後，眾人理解到由於整個大氣系統先天上的限制、初始場不精確、計算存在誤差等因素，使得兩週以上之決定性預報不可能被實現；Epstein (1969) 提出一隨機動力模式(stochastic dynamic model)，此模式可提供大氣狀態的平均及變異度，它與蒙地卡羅(Monte Carlo)方法於文中幾個預報個案均顯示較決定性預報為佳的表現；Leith (1974) 則以理論推導及理想測試，說明蒙地卡羅法中之平均過程能夠過濾掉長時間預報後毫無精確度的小尺度結構，且能維持可預報度較高之大尺度擾動，相較於 Epstein (1969) 之隨機動力模式更具有預報能力。然而，直到 1992 年世界各預報中心才開始著手進行系集(ensemble)預報之作業化，如今系集預報已成為全球作業單位廣泛使用之重要預報工具。

1.1.2 計畫目的

雖然近 20 年來各作業預報中心之颱風路徑預報能力已有長足的進步，但基於決定性預報無可避免地具有不確定性，各國均致力於研發系集預報技術，特別針對颱風此類對於環境條件非常敏感的系統更需要考慮其不確定性。故本兩年期計畫之全程計畫目的係配合氣象局颱風作業預報需要，針對現有颱風路徑系集預報產品，發展相應之診斷分析與應用技術。本計畫於首年已完成現有系集系統颱風路徑預報之系統性分析與校驗，並開發系集颱風路徑預報資訊加值應用技術，提供可操作之預報指引。本年度（第二年）除將評估已開發之系集颱風路徑預報技術於前一年度颱風個案之表現，亦將優化此技術之預報能力，同時初步評析系集模式針對颱風強度預報之可應用性。特別是下半年計畫測試在不同預報時間選用不同成員數之路徑校驗分析，或依颱風強度與侵台颱風個案分析 SUMMER 之路徑預報能力，並且發展 SUMMER 颱風強度預報技術。計畫之研究成果可提供模式改進與系集成員設計策略規劃作為參考，同時透過預報產品之分析亦能幫助氣象局更有效、合理地運用系集預報產品。

1.2 國內外與本計畫相關研究情況

1.2.1 颱風路徑系集預報

隨著大氣科學研究累積及計算機運算能力提升，自 1980 年代起各國開始進行颱風路徑作業預報，且預報能力逐年提升。隨著各種數值模式陸續問世，學者與預報單位便著手思考如何善用這些模式預報資訊以改進颱風預報。其實早在 1973 年 Sanders 便已提出一致性(consensus)預報的概念，藉由結合不同來源預報而成的一組預報雖然不見得總是優於個別預報，然而以長期觀點來看通常為表現最佳者。以 Leith(1974)之理論衍生出的系集預報方法則使用單一模式，但使用各種擾動方式產生系集成員。Thompson(1977)以理論推導證明，基於「兩組預報對於真值均無偏差(unbiased)」且「彼此並無完全相關(not perfectly correlated)」之前提下，使用相等權重之線性組合，能得到誤差預期較個別預報為小之預報。

此後陸續有許多學者進行系集應用之相關研究，例如 Leslie and Fraedrich (1990)結合澳洲熱帶模式與 CLIPER (climatology-persistence, 氣候持續法) 模式、Goerss (2000) 以全球及區域作業模式分別進行一致性預報，相較於氣候法或個別模式均得到相當不錯的結果。Weber (2003)則統計各模式過去之誤差特性以決定系集成員權重，其預報表現與一致性預報類似。Poroseva et al. (2010)提出幾個基於 Dempster-Shafer 理論，以多模式進行颱風路徑預報的方法，並討論多模式法預報能力與模式數量之間的關聯，他們考慮的模式包括 NOGAPS (Navy Operational Global Atmospheric Prediction System)、ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)、NCEP (National Centers for Environmental Prediction)的 MRF (medium range forecast)及 AVN (Aviation Run of the

MRF)，並以 2000 年太平洋與南印度洋之颱風個案評估其預報能力，結果顯示僅兩個模式即可提供合理的多模式預報，而增加模式數量可增進多模式預報的品質，不過在某些個案仍可能所有預報方法均失敗。Froude et al. (2007)甚至以 ECMWF 及 NCEP 系集預報系統探討溫帶氣旋之路徑及強度預報，除歸納出與颱風預報類似的結論之外，亦指出似乎挑選部分較佳成員可得到更好的預報。故不論多模式或單一模式之系集預報在颱風路徑與強度預報上均扮演重要的角色，尤其在於提供準確度更高之預報指引及預報不確定性方面更是如此。

Elsberry et al. (2014)探討 2012 年 ECMWF 對大西洋颱風之預報表現，研究發現 ECMWF 系集模式在大西洋之颱風預報能力不如西北太平洋。Evans et al. (2014)針對引發強降水之 2008 年 Fay 颱風個案，並以 16 組高解析度 WRF 模式之系集預報為例，探討預報員如何使用系集預報指引(forecast guidance)。參與的預報員感想為：高解析度系集指引雖然不見得能實質上降低預報不確定性，但對他們的預報有加值作用且能加強其信心度。在準備預報過程中如考慮系集指引，平均而言對於所有降雨門檻值均可提升預報技術。這些研究均說明採用系集預報方式確實對颱風預報有相當大的助益。

1.2.2 權重系集預報

等權重系集預報在各預報中心已長期進行作業化應用 (WMO (2007))，然而僅將所有成員之颱風路徑直接平均，似乎無法完全展現系集預報之優勢，故亦有許多研究針對此議題進行探討。Elsberry and Carr (2000)除了與 Goerss (2000)一致認為系集路徑預報具有良好預報誤差特性之外，亦指出預報員可藉由去除誤差可能較大之部分成員，使用剩餘成員之系集平均能夠對預報員有加值的效果。Lee and Wong (2002)應用 ECMWF、JMA (Japan Meteorological Agency)、UKMO (U.K. Met Office)之系集預報產品，比較等權重、以颱風初始位置 (即 0 小時預報) 誤差、以 12 小時預報誤差為權重之系集路徑預報表現，發現以 12 小時預報誤差為權重者之 24 及 48 小時預報誤差均優於前二者，而 72 小時預報表現則三者類似。Kumar et al. (2003)則使用 ECMWF、NCEP AVN、NOGAPS、UKMO、JMA 等系集模式經過一段時間訓練後，針對各預報時間個別統計各模式系統性偏差以決定其權重。校驗結果亦顯示優於各模式及系集平均之表現，特別於三天以上之預報更為顯著。Elsberry et al. (2008)提出以 60 至 72 小時各成員與一致性預報之差異作為權重，研究使用「直接調整 72 小時後之預報中心位置」與「藉由調整 72 小時後之預報移速向量來改進中心位置」兩種方案。結果顯示此兩種方法於 2006 年西北太平洋颱風個案之路徑預報均較系集平均為佳，而後者之改進幅度較大。Tien et al. (2012)則考慮各系集成員於過去個案之表現，以多變量線性迴歸得到隨預報時間而異之權重矩陣，他們使用 5 組非靜力模式產生系集預報，並比較使用全體系集平均、群集平均、去除與系集平均差距最大之成員、多變量權重平均等四類方法於 2004-2008 年 52 個颱風個案之預報表現。分析其表現，多變量權重平均法於 72 小時內預報與路徑平滑度均優於其他方法。

Qi et al. (2014) 提出一基於 EPS (ensemble prediction system, 系集預報系統) 成員短期 (12 小時) 路徑預報誤差之選擇性系集平均法。CMA (China Meteorological

Administration)應用 ECMWF、NCEP 之 EPS 產品針對 2010-2011 年共 35 個颱風預報利用 JMA 最佳路徑進行校驗，結果顯示挑選之系集成員直接平均表現優於權重平均。Brill et al. (2015)以一維傅立葉變換之 divisive clustering algorithm 針對 NCEP GEFS 20 組成員與 ECMWF 50 組成員進行群集分類，統計校驗顯示使用較多成員未必優於僅用 ECMWF 者，但某些個案在多模式系集中選出的群集似乎較能維持路徑連續性。

Dong and Zhang (2016)參考 Qi et al. (2014)之研究，提出 OBEST (Observation-Based Ensemble Subsetting Technique)方法；先以 JMA 颱風路徑進行各系集成員之 12 小時預報誤差校驗、依其誤差由小至大排序，選取其前 M 名成員直接算數平均後得到最佳預報路徑。該研究利用 2010-2011 年西北太平洋颱風個案，統計「排名後用以平均之成員數 (M)」與「以整體系集平均之預報誤差標準化之路徑誤差」之關係，ECMWF 系集(OBEST)與 ECMWF 加上 NCEP 系集(Super-OBEST) 最佳排名之成員數分別為 $M = 20$ 與 $M = 28$ 。此外，以 2010-2011 年後報與 2012-2013 年作業預報之颱風個案進行統計，OBEST 路徑預報大致上均優於系集平均，其中 2010-2011 年 12 至 36 小時與 2012-2013 年 12 至 24 小時預報之改進具統計顯著性。比較 2012-2013 年颱風個案之 Super-OBEST 與系集平均預報誤差，發現 Super-OBEST 能再進一步改進颱風路徑預報，統計顯著性亦可維持到 36 小時。

本計畫第一年採用 Dong and Zhang (2016)所提出之 OBEST 方法：先以氣象局提供之 2014-2015 年觀測颱風路徑進行各系集成員之 12 小時預報誤差校驗、選取誤差排名前 28 名成員，平均後得到最佳預報路徑。

由於 ECMWF 每日僅有 0000 及 1200 UTC (0012run) 兩次預報，故針對 0600 與 1800 UTC 之 Super-OBEST 須特別設計，以達最佳預報表現。第一年測試 ECMWF 與 NCEP 資料之兩種組合方案：以 1800 UTC 為例，可使用之系集預報資料包括初始時間為 0000 UTC 之 ECMWF 系集與初始時間為 0000、0600 UTC 之 NCEP 系集，故可用以計算 OBEST 或 Super-OBEST 的兩種方案為：

方案一：兩者均採用初始時間 0000 UTC 之預報，以 18 小時預報誤差排名；

方案二：NCEP 採用初始時間為 0600 UTC 之預報，ECMWF 採用初始時間為 0000 UTC 之預報但去除前 6 小時，使其預報時間能對應於 NCEP 系集。同時根據 0600 UTC 之颱風觀測位置，將 ECMWF 之 0000 UTC 第 6 小時預報資料修正為觀測位置，並將第 7 小時至第 240 小時的預報資料同步進行修正，最後以 12 小時預報誤差排名。

將兩種方案分別應用於 OBEST 及 Super-OBEST 之校驗，方案一之整體表現較方案二為佳，故於 2016 年 6 月 2 日工作會議中建議氣象局使用 Super-OBEST 方案，於 0600/1800 UTC (0618run) 則採用方案一，提供颱風季進行上線作業運用。為使預報員便於使用，且與 Dong and Zhang (2016)提出之 OBEST 法有所區隔，經與氣象局討論後決定將此技術命名為 SUMMER (Super Multi-Model Ensemble Realignment for typhoon forecast)。

本計畫除了運用全球模式系集預報資料，建置仿照 OBEST 方法之颱風路徑預報技術之外，亦加入區域模式系集預報資料，以改進其於西北太平洋地區之預報能力。以 2014-2015 年西北太平洋颱風之 ECMWF、NCEP、WEPS 及 TAPEX 系集模式統計「排名後用以平均之成員數」與「以整體系集平均預報誤差標準化之路徑誤差」之關係，整體而言 72 小時前最佳選取成員數為 30 以下，72 小時以後則為 60 以上。然而因 24-48 小時預報最佳選取成員數約為 28，故以其為本技術及後續測試之選取成員數。加入區域系集模式路徑測試，SUMMER 於 78 小時前之預報優於系集平均，此改進之統計顯著性較僅使用全球系集模式之結果稍高，可維持至 72 小時。加入區域系集模式之改進，於 72 小時預報前應用 SUMMER 可略微降低路徑誤差，72 小時後之誤差增加則與 SUMMER 之 28 個選取成員中全球系集模式所占之比例降低有關。

1.2.3 颱風強度預報

颱風之強度判定受限於海面觀測資料不足，主要依賴遙測資料分析，應用 Dvorak(1982)的技術方法得到 T 數與 CI 數，並依 CI 數與最大風速的關係得到颱風強度。當最低氣壓為已知時，氣象局亦採用經驗式 $V_m = 6.7 \times (1010 - P_c)^{0.644}$ 判定颱風強度，其中 V_m 為一分鐘平均最大風速、單位為 kts， P_c 為最低海平面氣壓、單位為 hPa。此外，氣象局根據世界氣象組織規定，採用十分鐘平均值，故須使用與日本氣象廳相同之方式，將一分鐘平均風速換算成十分鐘平均風速，換算值見表 1。

分析討論不同模式對颱風強度的預報能力是本計畫下半年的重點工作項目之一，由於颱風強度的誤差特性不同於路徑誤差，前者有正、負值，後者則皆為正值，故在分析強度誤差時有更多的方式選擇：2012 年 ECMWF 的 Prates 在針對熱帶氣旋的中程預報報告中，針對 2011-2012 年熱帶氣旋強度的決定性預報，計算其平均絕對強度誤差(MAE)及偏差值(Bias)分析，其中 MAE 具有隨預報時間變長而增加的特性，由偏差值可知模式 72 小時內傾向低估熱帶氣旋的強度，72-120 小時則傾向高估。若改以 2005-2011 年間高解析模式之年平均強度誤差分析，則預報時間 120 小時內模式幾乎低估颱風強度(包含氣壓及風速)。Cangialosi 等人在 2016 年的 NHC 校驗報告中，以均質化的資料比較數個模式對於颱風強度預報的特性，報告中以強度誤差的絕對值隨預報時間變化的時序圖，配合誤差值相對於 CLIPER5、Decay-SHIFOR5 等的技術得分(Skill)討論。本計畫亦將參考前人的方法，分析 ECMWF、NCEP、WEPS 和 TAPEX 四個系集模式的颱風強度預報特性(4.1 節)。

關於颱風強度預報，過去多以分析觀測資料、考慮環境條件發展及經驗法則等方式推估其變化趨勢；近年來隨著數值天氣預報能力之提升，數值模式之強度預報亦逐漸受到重視。美國國家颶風中心以 1990-2015 年大西洋海域颱風強度預報誤差趨勢，分析颱風強度預報能力，強度預報能力雖然逐年進步中，但不如路徑預報顯著。DeMaria et al. (2014) 分析近 20 年來美國國家颶風中心與聯合颱風警報中心 (Joint Typhoon Warning Center, JTWC) 官方與各預報指引之颱風強度預報表現，指出預報指引之改進主要來自於所採用模式之演變，由最初簡單的氣候外延法、動力統計法、動力模式法，直至使用多模式法。統計亦顯示官方與預報指引均有具統計顯著性之逐年改進趨勢，且預報指引

之改進幅度較官方預報者為大。Emanuel and Zhang (2016) 針對 2009-2015 年北大西洋颱風個案，嘗試以系集模式找出颱風強度預報誤差之來源，歸納出強度誤差於前幾日主要來自初始強度誤差，而之後則主要受路徑及大尺度環境誤差影響。本計畫則以 SUMMER 類型技術做為基礎發展強度預報技術，亦即以預報初期強度誤差絕對值選取之系集成員估計未來強度演變，分析結果將於第四章詳細討論。

1.3 計畫工作項目

本年度（第二年）計畫工作共有三個部分，「歷史颱風之系集預報應用技術結果分析」、「颱風路徑系集預報應用技術之優化」以及「發展系集颱風強度預報作業化應用技術」。以下分別說明第二年（本年）計畫之主要工作項目與內容：

1. 歷史颱風之系集預報應用技術結果分析

本項工作將延續第一年之研究工作，應用第一年建議預報中心上線之作業化 SUMMER 技術（同時使用全球模式與區域模式之版本，以下未特別敘明時均表示使用此版本），進行 2016 年歷史颱風之個案分析；並與第一年已完成之 2014-2015 年颱風個案之統計結果進行綜合分析，包括誤差分析、SUMMER 技術表現比較、統計特性等。

2. 颱風路徑系集預報應用技術之優化

基於第一年發展之作業化 SUMMER 技術與上述工作之分析結果，本年度將利用歷史資料嘗試下列優化方法，期望能改進颱風路徑系集預報能力，初步規劃將測試：

- a) 第一年 SUMMER 應用各系集成員之排名基準為預報第 12 小時之路徑預報誤差，本期計畫將考慮以其他預報表現因子作為基準，如離散度、離散度標準差、誤差之標準差等。
- b) 第一年 SUMMER 於所有預報時間均採用固定數量系集成員，以得到最佳化颱風路徑，本期計畫將進一步深入測試於不同預報時段使用不同數量成員之效益及作業化方式。
- c) 第一年 SUMMER 僅考慮各系集成員之 12 小時預報表現，本期計畫將納入 12 小時前之預報表現，嘗試應用更多可用之校驗資訊，以改進 SUMMER 技術。

3. 發展系集颱風強度預報作業化應用技術

颱風強度預報長久以來均為颱風模式預報的挑戰之一，由於颱風強度預報與模式解析度有很高的相關性，過去經驗顯示系集模式對於強度之掌握尚不如決定性預報模式，且個別模式對於颱風強度掌握亦有所差異。因此，本計畫預計進行之工作規劃如下：

- a) 系統性分析、校驗現有全球與區域系集模式之強度預報能力；因各系集模式颱風路徑預報資料均包括中心最低氣壓，但未必有近中心最大風速，故本計畫將

先以中心氣壓為校驗標的，並輔以氣壓-風力轉換表進行參照。由於強度校驗有正負的問題，此部分工作亦會測試不同強度校驗方法與呈現方式。此外，為排除路徑誤差所造成之強度預報差異，亦考慮使用 best track 資料、配合系集模式結果進行颱風強度事後分析，瞭解現有模式之強度預報極限。

- b) 仿照第一年研發之 SUMMER 路徑預報技術，以各系集成員第 12 小時之中心氣壓預報誤差為基準選取成員，以這些成員各預報時間之中心最低氣壓平均值進行預報，並進行初步校驗與可應用性之分析。
- c) 以上述工作項目 2 得到優化後 SUMMER 颱風路徑系集預報方法，根據其方法所挑選之成員預報颱風強度，並與前項工作由強度誤差所發展之技術進行比較與評估。

表 1 一分鐘平均風速與十分鐘平均風速對照表，單位 KTS。

一分鐘平均風速	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
十分鐘平均風速	70	70	80	90	90	100	110	110	120	130	130	140	150	150

第二章 歷史颱風路徑之系集預報應用技術結果分析

2.1 2016 年歷史颱風個案實驗

針對作業化系集颱風路徑預報應用技術之建置工作，本研究參考 Dong and Zhang (2016)提出之 OBEST 方法。本計畫於第一年已於颱風中心計算主機進行資料下載、匯入資料庫、格式處理、處理流程自動化、運算程式撰寫、測試與勘誤等步驟之建立，其簡要流程見圖 1。根據第一年針對 0012run 及 0618run 兩個時段之實驗分析，由於 0618run 實際上使用之系集資料與 6 小時前之 0012run 使用的完全相同，過去分析結果亦顯示 0618run 之誤差特性與 0012run 相近。故為便於分析（不需要特別為 0618run 平移預報時間定義），如無特別說明則代表為 0012run 之結果。於 2016 年所有西北太平洋颱風個案，我們進行僅使用全球系集(Super-OBEST)及使用全球與區域系集(SUMMER)之作業化颱風路徑預報及平均誤差統計。圖 2(a)為分別使用 Super-OBEST、SUMMER 與相應系集平均之路徑誤差比較，兩者路徑預報誤差較相應系集平均者為低之狀況可以持續至預報第 78 小時；Super-OBEST 於 54 小時前之路徑預報改進具統計顯著性，而 SUMMER 則於 66 小時前具統計顯著性。直接比較 Super-OBEST 與 SUMMER 之路徑誤差（圖 3）可知，除了預報第 48 小時外，SUMMER 表現均較 Super-OBEST 為佳。

比較 SUMMER 與其相應系集平均之預報誤差、系集離散度（圖 4），由於 SUMMER 為選取部分系集成員之結果，故所有預報時間之系集離散度均較使用全體系集為低，而 SUMMER 路徑誤差則於預報 84 小時後高於系集平均誤差。Leutbecher and Palmer (2008)之推導結果指出對於一完美的系集系統，當成員數 M 與統計個案數 N 均趨近於無限大時，統計得到之（平方）平均系集離散度會趨近於（平方）平均預報誤差：

$$\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left(\epsilon_j^2 - \frac{M+1}{M-1} s_j^2 \right) \rightarrow 0, \quad \text{for } M \rightarrow \infty$$

由此式亦可看出，若使用有限系集成員數，預報誤差會略大於離散度。故一系集系統如欲涵括預報之不確定性，其離散度應較預報誤差稍大或者接近。圖 4 中 SUMMER、系集平均之離散度開始低於誤差之預報時間分別為 132、210 小時，於 132 小時內 SUMMER 所用成員較少故其離散度如同預期低於全體系集；而其離散度較為接近預報誤差，代表 5 天內 SUMMER 選取之成員之統計特性較接近理想系集系統。另一方面，比較兩者之使用成員數（圖 5），由於各系集成員之颱風生命期長短不一、資料是否缺漏等因素，其使用成員數隨預報時間增加而逐漸減少；同時因區域模式僅提供資料至 72 小時，故兩者之成員數於預報時間 72 至 78 小時均劇烈減少，以上原因都造成於 5 天後 SUMMER 使用成員數遠少於系集平均，由路徑誤差標準差（圖 6）亦能觀察到自預報時間 84 小時起 SUMMER 誤差變異度較系集平均為大之狀況（除 192 至 216 小時外）。

由 2016 年 0618run 之路徑誤差統計（圖 7），SUMMER 之預報誤差較相應系集平均者為低之狀況可持續至預報第 90 小時，且於 78 小時前具統計顯著性。其統計特性維持時段較 0012run 延長 6 小時以上，與第一年統計 2014-2015 年使用 Super-OBEST 的結果

類似（第一年 0618run 測試僅有 Super-OBEST 之結果），惟其統計顯著性不如僅使用全球模式之 Super-OBEST 維持至將近 5 天左右。而路徑誤差與系集離散度之比較（圖 8），其分布型態類似於 0012run 之結果。其中可觀察到，由於預報時間均定義為由模式初始時刻起算，故 0012run 與 0618run 之系集平均於預報 72 小時之後完全相同（因方案一亦使用 0012run 之全球模式，而 72 小時之後成員僅有全球模式）。

2.2 與 2014-2015 年實驗結果之比較

為進一步評估 SUMMER 於不同年度個案表現之穩定性，比較 2016 年所有個案（圖 2(b)）與 2014-2015 年所有個案之路徑誤差（圖 2(c)），於 2016 年 SUMMER 相對於系集平均之改進比例較 2014-2015 年者稍高，而兩者均能改進直到預報第 78 小時；統計顯著性之維持時間則 2016 年（66 小時）稍低於 2014-2015 年（72 小時）。於系集離散度之比較（圖 4、圖 9），除同樣於 72 小時後由於僅剩全球系集成員造成之離散度驟降之外，2014-2015 年個案數較 2016 年多，故其離散度變化較為平緩。同時，可觀察到平均而言於 2014-2015 年所有預報時間之離散度均較路徑誤差為高，即系集成員離散程度大致上能包括預報之不確定性，SUMMER 之離散度整體而言較為接近誤差，但並未因此於所有預報時間均優於系集平均。

圖 10 為 2014-2016 年逐年之系集平均與 SUMMER 之路徑誤差比較，可知兩者於 2016 年顯然均大於 2014、2015 年。比較 2014-2015 年與 2016 年 SUMMER 之使用成員數（圖 11），2016 年於預報時間 180 小時以後使用 10 個以上成員之個案非常少。分析 2016 年誤差分布則發現預報時間 180-240 小時之資料完全由 Lionrock 颱風貢獻，其餘「180 小時以後使用 10 個以上成員」之個案因模式預報颱風生命期大於實際颱風故無路徑誤差資料，若將此颱風個案排除後（圖 12）其長期預報誤差即可大幅降低。

進一步檢視 2016 年 SUMMER 預報 78-138 小時之誤差分布（圖 13），於本預報時段誤差特別明顯之個案為 Conson 颱風。若再排除 Conson 颱風（圖 14），預報時間 78-138 小時之誤差可再降低，此時 2016 年整體平均誤差與 2014、2015 年相去不遠（圖 15）。Lionrock 颱風因路徑異常（圖 16）導致預報難度相當高；Conson 颱風（圖 17）主要較大誤差來源來自初始時刻為 08/09 00Z、08/09 12Z、08/10 12Z 之三個預報個案。由圖 18 中之系集成員分布，整體系集有相對於 best track 行進方向偏左之偏差。總體而言，排除較難掌握之 Lionrock 颱風及 Conson 颱風後，SUMMER 於 2014 年至 2016 年之預報表現相當穩定。

2.3 2014-2016 年 SUMMER 之颱風路徑預報校驗

2.3.1 全部個案

期中報告時既以 2014~2015 年及 2016 年歷史颱風個案分別校驗 SUMMER 之路徑預報能力，在本計畫期末報告中，將綜合討論 2014-2016 三年之颱風個案使用 SUMMER 技術之路徑預報結果。圖 19 中 SUMMER 考量 ECMWF、NCEP、TAPEX 及 WEPS 四模式成員，以 12 小時颱風路徑預報誤差排名，挑選前 28 名成員之路徑預報，與系集平均之颱風路徑預報結果比較。整體而言，SUMMER 的路徑預報在預報時間 72 小時內皆優於系集平均，改進率在 12 小時最高(53.2%)，到 72 小時仍有 1.4%的改進率。

2017 年 7 月 20 日計畫期中審查會議中，感謝委員建議，接下來的章節中將新增依颱風強度分類之個案，亦特別針對警報期間颱風個案討論，並評估 SUMMER 對不同個案之颱風路徑預報能力。

2.3.2 0-12 小時不同強度個案

為了校驗 SUMMER 技術對不同強度颱風之路徑預報能力，研究依照預報時間第 0-12 小時觀測颱風強度的變化，將所有個案分為強度維持、強度增強及強度減弱三大群集(共 11 類)。強度維持包含第一類: 輕度->輕度、第二類: 中度->中度、第三類: 強烈->強烈；強度增強包含第四類: 輕度->中度、第五類: 中度->強烈、第六類: 輕度->強烈；強度減弱包含第七類: 輕度->熱帶低壓、第八類: 中度->輕度、第九類: 中度->熱帶低壓、第十類: 強烈->中度和第十一類: 強烈->輕度。其中第六類: 輕度->強烈與第十一類: 強烈->輕度由於個案數稀少在此並不討論。

圖 20 為 2014-2016 年西北太平洋颱風依預報時間 0-12 小時颱風強度分類，並統計不同預報時間各分類之個案數目，橫軸表示預報時間 0-240 小時，縱軸為個案數目。由圖中可以看到，不同強度分類之個案數隨著預報時間增加逐漸減少，且個案數目最多前幾名依序是第一類:輕度->輕度，第二類:中度->中度，第三類:強烈->強烈，第四類:輕度->中度...，以 12 小時內維持強度的三類個案最多。

比較不同強度分類之所有預報個案路徑誤差結果(圖 21)，可得第二類(中度->中度)、第三類(強烈->強烈)、第四類(輕度->中度)(除了第 90 小時外)、第五類(中度->強烈)、第十類(強烈->中度)在預報時間 120 小時內皆較全個案平均為佳；相反地，第一類(輕度->輕度)第七類(輕度->熱帶低壓)(72 小時內)、第八類(中度->輕度)(除了第 66 小時)和第九類(中度->熱帶低壓)則是 SUMMER 表現較全部個案平均差。從圖 21 可知不同強度分類之個案路徑預報誤差在不同預報時間與全部個案平均路徑誤差的關係時刻在變化，但若是討論個案數目最多的分類，即預報時間 0-12 小時颱風強度維持的第一類(輕度->輕度)、第二類(中度->中度)和第三類(強烈->強烈)個案(圖 22)，

則可以清楚看到在預報時間 120 小時內 SUMMER 對第一類(輕度->輕度)颱風個案之路徑預報較全部個案平均結果差，而第二類(中度->中度)和第三類(強烈->強烈)個案在 120 小時內皆比全部個案平均結果佳。綜合圖 21 和圖 22 討論的結果，SUMMER 之颱風路徑預報對於預報時間第 12 小時，颱風個案的強度不論增強、減弱或維持，當颱風強度在中度以上時(包含中度、強烈颱風)更為可信。

2.3.3 警報期間個案

以 2014-2016 年警報期間颱風個案進行討論，比較 SUMMER 與系集平均颱風路徑預報(圖 23)。由圖可知在預報時間 12-102 小時內 SUMMER 的路徑預報誤差較系集平均小，改進率在 54.6%到 3.5%之間不等，顯示在 102 小時內，SUMMER 對警報颱風個案之路徑預報較系集平均為佳。

試比較 SUMMER 對全部個案與警報期間個案之颱風路徑預報結果(圖 24)，SUMMER 路徑預報誤差隨預報時間的變化趨勢與相同個案之系集平均類似，因此在 36-96 小時內 SUMMER 對警報期間個案之路徑預報能力較全部個案略差一些，推測是因為在警報期間，系集成員的颱風路徑可能因為地形(登陸與否或由何處登陸)而有較大的差異，故此時若以系集平均預報路徑可能產生較大的路徑誤差所致。但若仔細比較全部個案以及警報期間個案：以全部個案而言，SUMMER 在 78 小時內較系集平均有更好的路徑預報能力；以警報期間颱風個案而言，SUMMER 較系集平均表現更佳的時期更長(如圖近 108 小時)，路徑誤差也降低更多(預報時間 78 小時，全部個案使用 SUMMER 的路徑誤差改進 1.57 公里，警報期間個案使用 SUMMER 技術則可改進 32.69 公里)，顯示警報期間使用 SUMMER 技術的重要性。

圖 25 區分不同個案(包含全部個案、警報期間個案、非警報期間個案)使用 SUMMER 之路徑預報誤差時序圖。在預報時間 30 小時內警報颱風個案較全部個案為佳，但在 30 小時至 90 小時間警報颱風個案預報結果較全部個案結果差，兩者之路徑誤差最高可達 40 公里。非警報颱風個案與全部個案的變化趨勢相近，顯示警報期間颱風個案佔全部颱風個案之比例仍低。

因此我們可以說，SUMMER 對警報颱風的路徑預報雖然較全部個案略差，但此現象是建基於模式本身對於警報期間颱風路徑的預報能力也降低所致。由圖 24、圖 25 也說明在警報颱風期間更應該使用 SUMMER 技術。

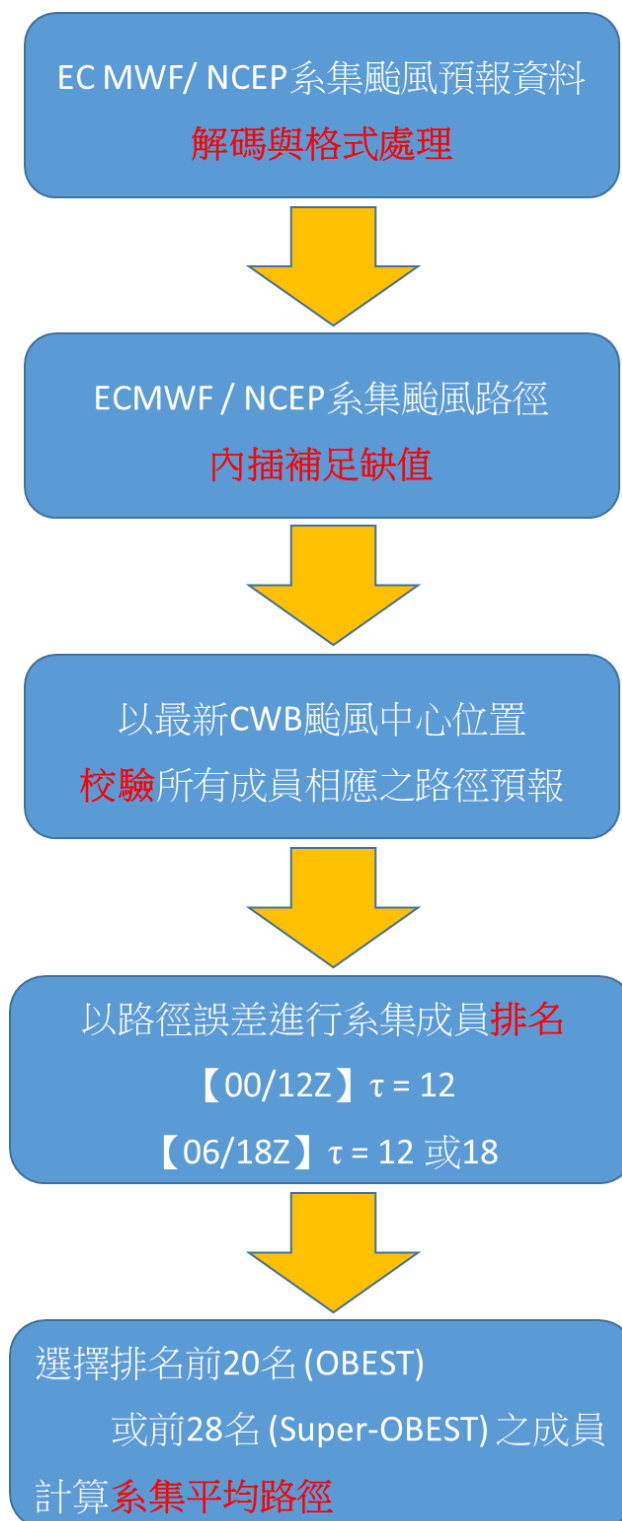
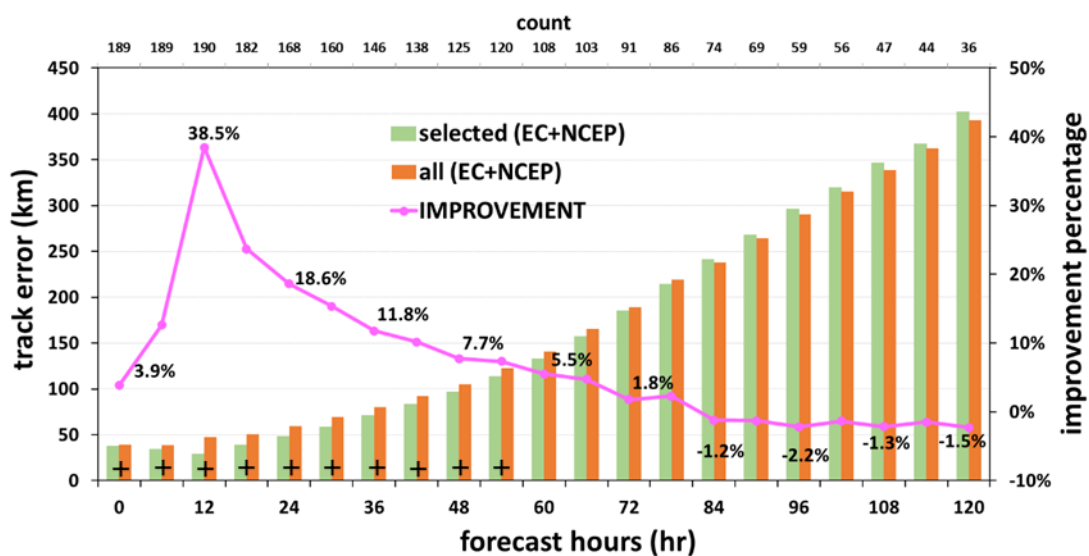


圖 1 系集颱風路徑預報應用技術作業化流程。

(a)



(b)

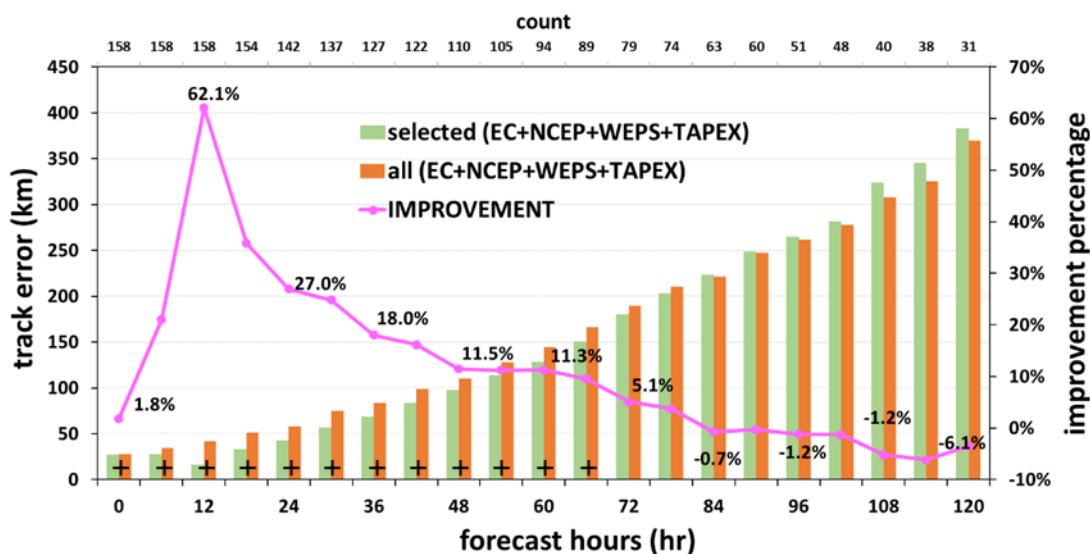


圖 2 針對西北太平洋颱風個案，統計(a) 2016 年 ECMWF 及 NCEP 系集平均與 Super-OBEST、(b) 2016 年全球及區域系集平均、(c) 2014-2015 年全球及區域系集平均與 SUMMER 之路徑預報誤差。左縱軸與長條代表路徑誤差，右縱軸與曲線上百分比代表選取成員平均相對於系集平均之誤差改進比例，上橫軸數字代表各預報時間統計個案數，+代表「MEAN 與 OBEST 存在差距」統計上滿足 95%信心水準。

(c)

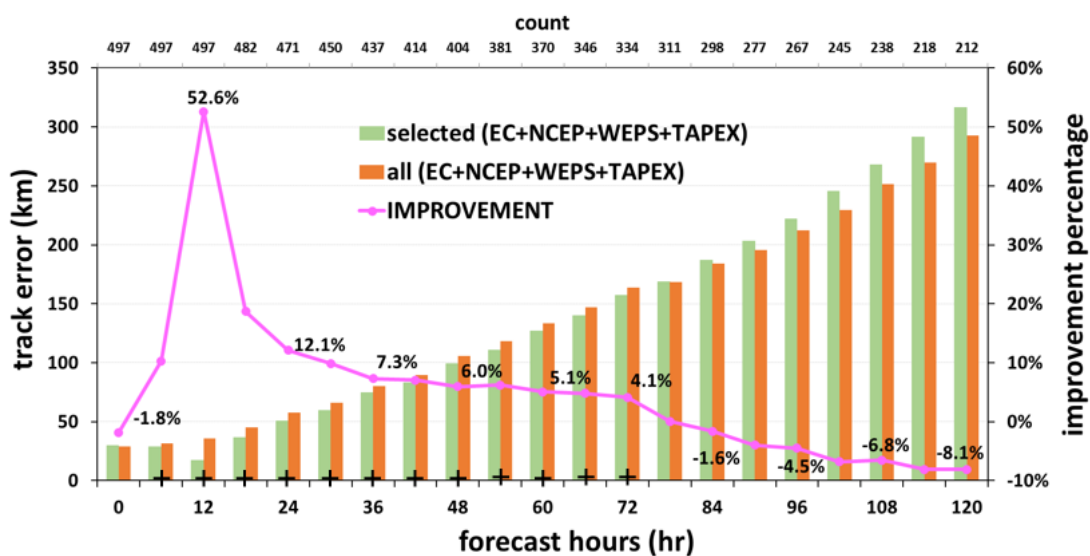


圖 2 針對西北太平洋颱風個案，統計(a) 2016 年 ECMWF 及 NCEP 系集平均與 Super-OBEST、(b) 2016 年全球及區域系集平均、(c) 2014-2015 年全球及區域系集平均與 SUMMER 之路徑預報誤差。左縱軸與長條代表路徑誤差，右縱軸與曲線上百分比代表選取成員平均相對於系集平均之誤差改進比例，上橫軸數字代表各預報時間統計個案數，+ 代表「MEAN 與 OBEST 存在差距」統計上滿足 95%信心水準。

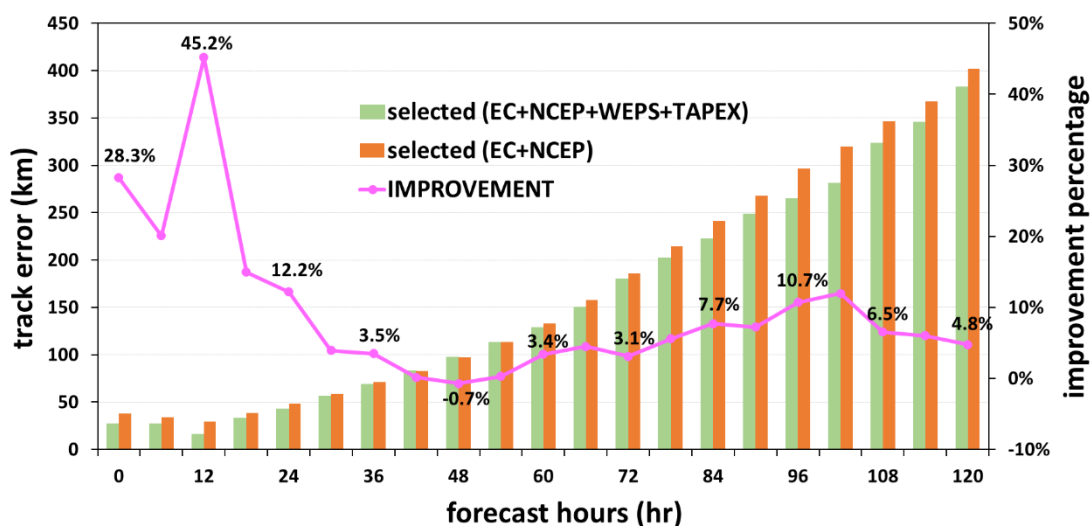


圖 3 針對 2016 年西北太平洋颱風個案，統計 Super-OBEST 與 SUMMER 之路徑預報誤差。左縱軸與長條代表路徑誤差，右縱軸與曲線上百分比代表選取成員平均相對於系集平均之誤差改進比例。

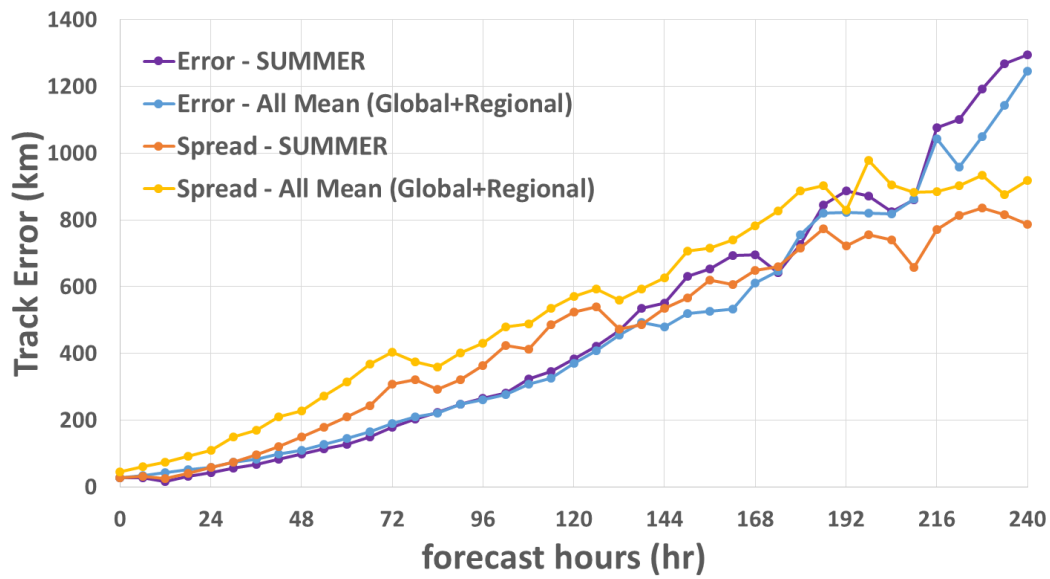


圖 4 統計 2016 年西北太平洋颱風個案，全球及區域系集平均與 SUMMER 之路徑預報誤差與系集離散度。藍色系代表路徑誤差，黃色系代表離散度；淺色系代表系集平均，深色系代表 SUMMER。

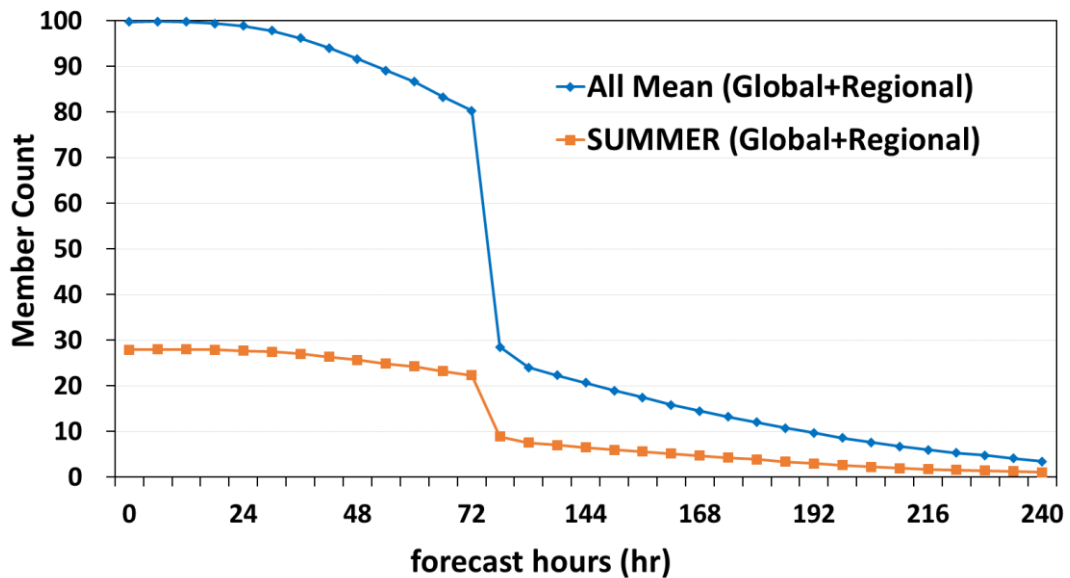


圖 5 針對 2016 年西北太平洋颱風個案，系集平均（藍）與 SUMMER（橘）於各預報時間使用之成員數量。

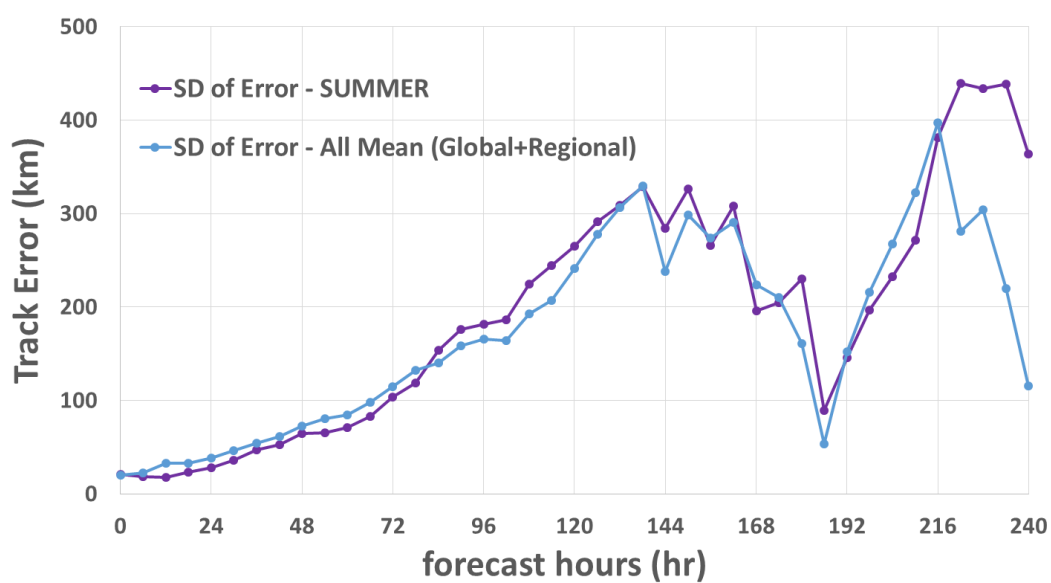


圖 6 統計 2016 年西北太平洋颱風個案，全球及區域系集平均與 SUMMER 之路徑預報誤差標準差。

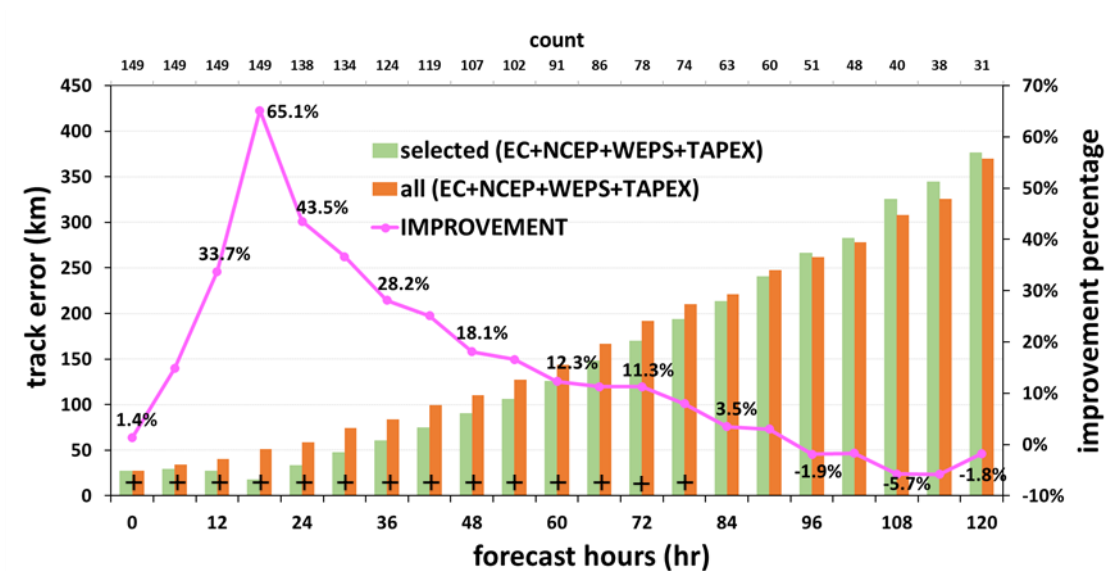


圖 7 同圖 2 (b)，但為 0600/1800 UTC 之結果。

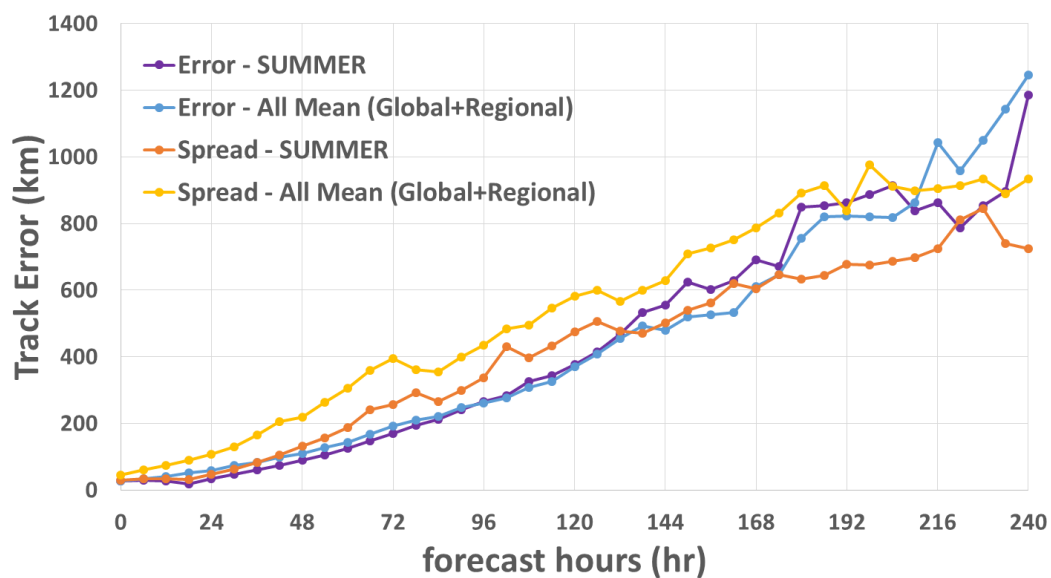


圖 8 同圖 4，但為 0600/1800 UTC 之結果。

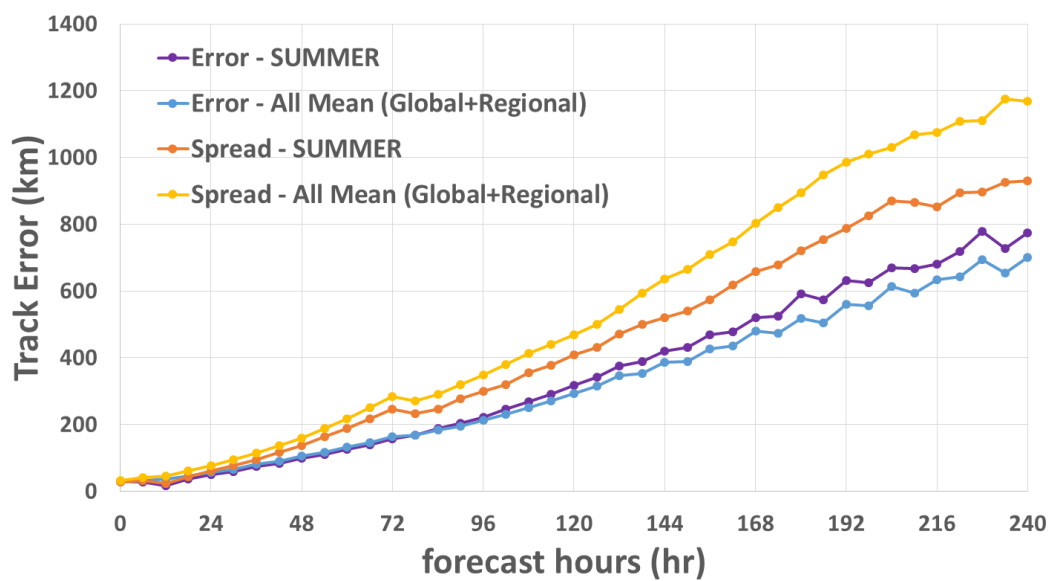
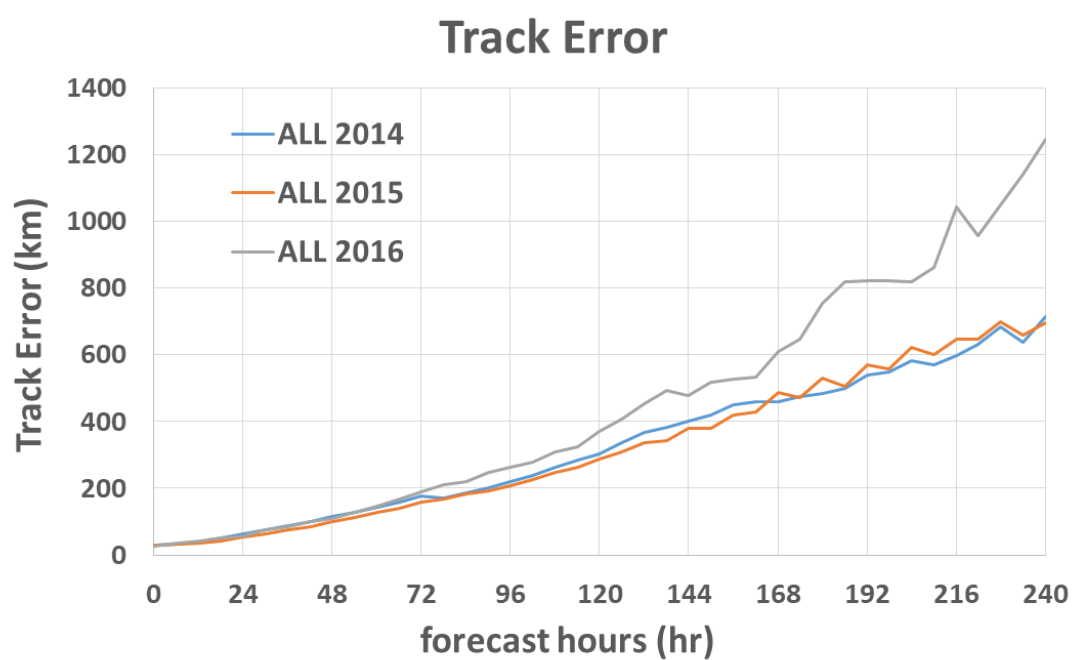


圖 9 同圖 4，但為 2014-2015 年所有颱風個案之結果。

(a)



(b)

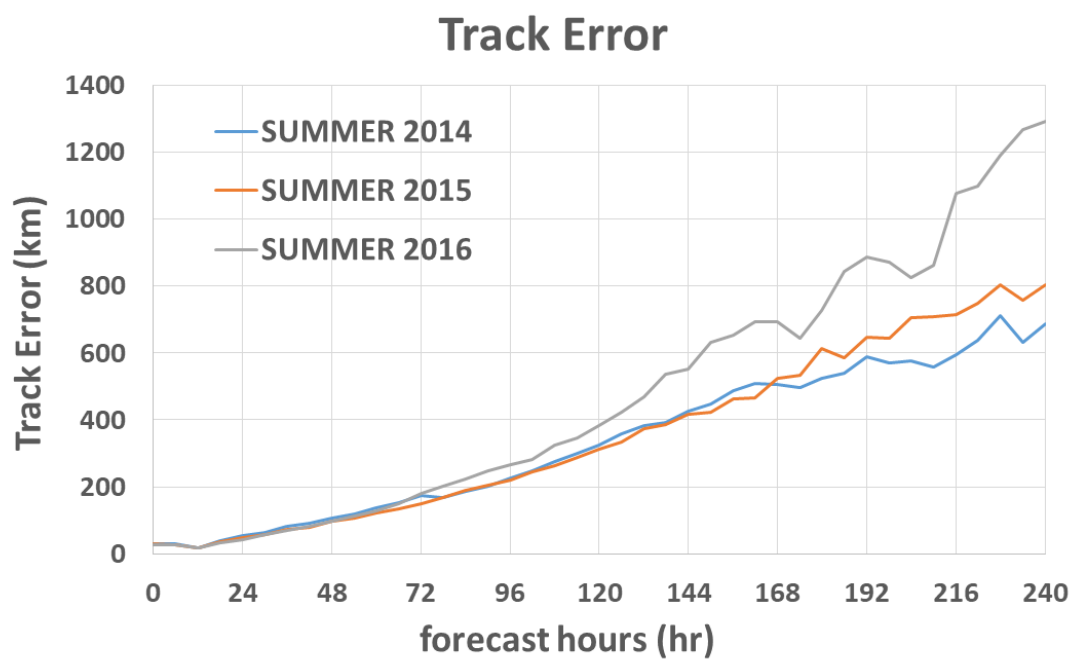
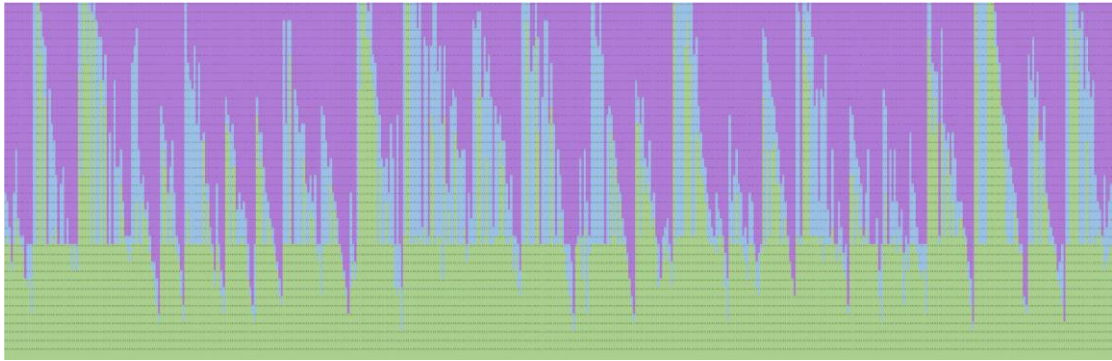


圖 10 2014、2015、2016 年西北太平洋颱風個案之 (a) 系集平均與 (b) SUMMER 路徑預報誤差。

(a)



(b)

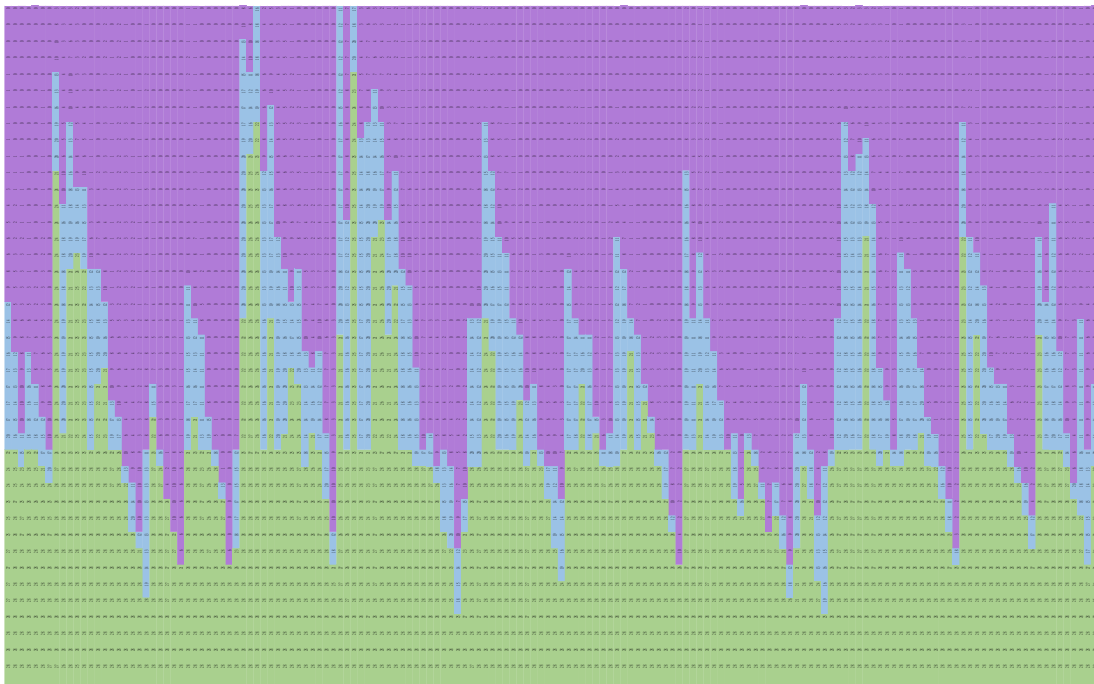


圖 11 針對(a) 2014 至 2015 年、(b) 2016 年西北太平洋颱風所有個案，SUMMER 於各預報時間使用之成員數量。橫軸、縱軸分別為各預報初始時刻、預報時間，由紫、藍、綠分別代表成員數 0-10、11-20、21-40。

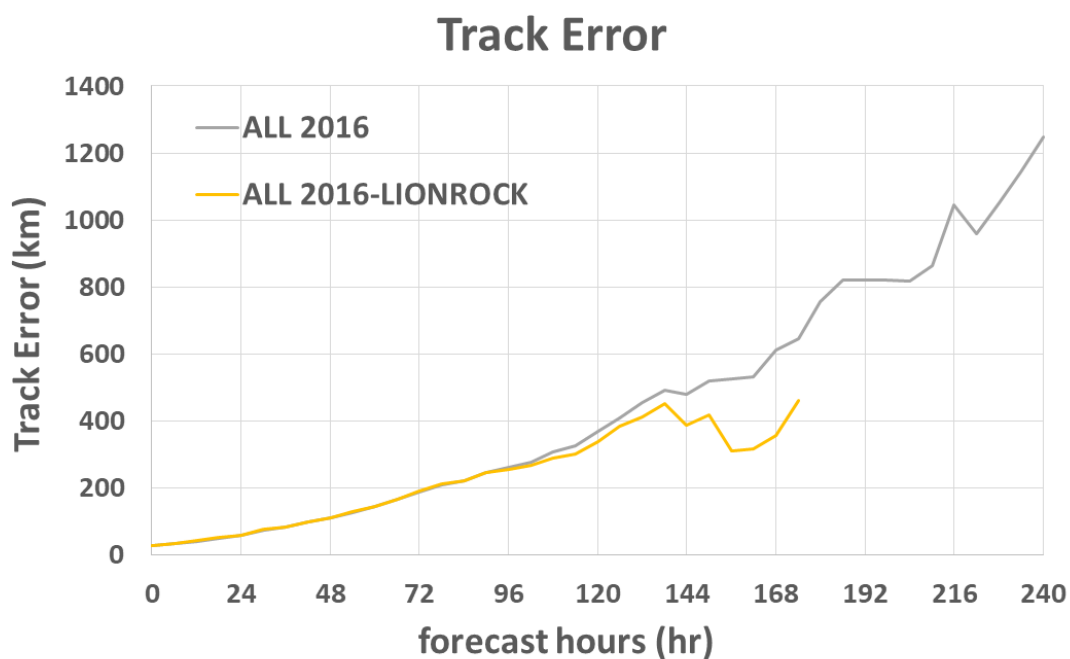


圖 12 2016 年西北太平洋颱風個案（灰線）與排除 Lionrock 颱風後（黃線）之系集平均路徑預報誤差。

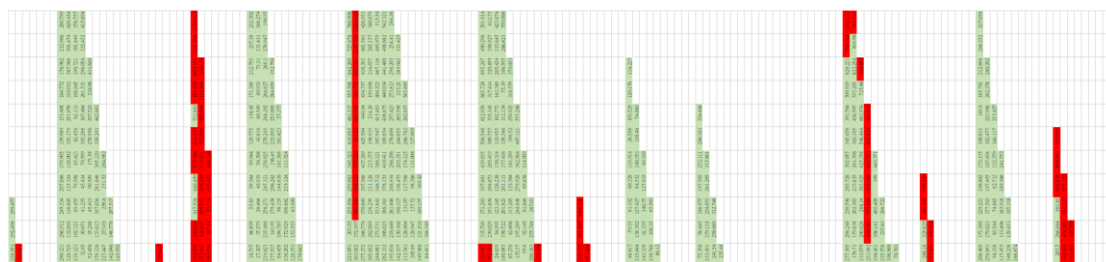


圖 13 針對 2016 年西北太平洋颱風所有個案，SUMMER 於預報時間 78 至 138 小時之路徑誤差。橫軸、縱軸分別為各預報初始時刻、預報時間，綠色、紅色分別代表誤差小於與大於 2016 年 SUMMER 平均路徑誤差加上一個誤差標準差之個案誤差。

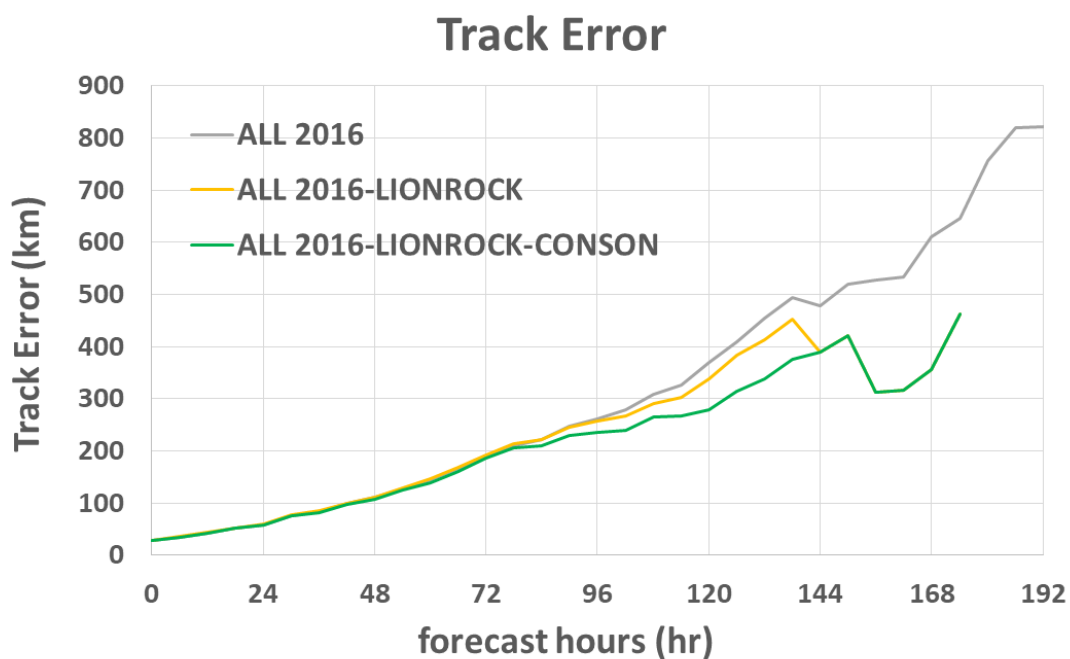


圖 14 圖 12 加上同時排除 Conson、Lionrock 颱風（綠線）之系集平均路徑預報誤差。

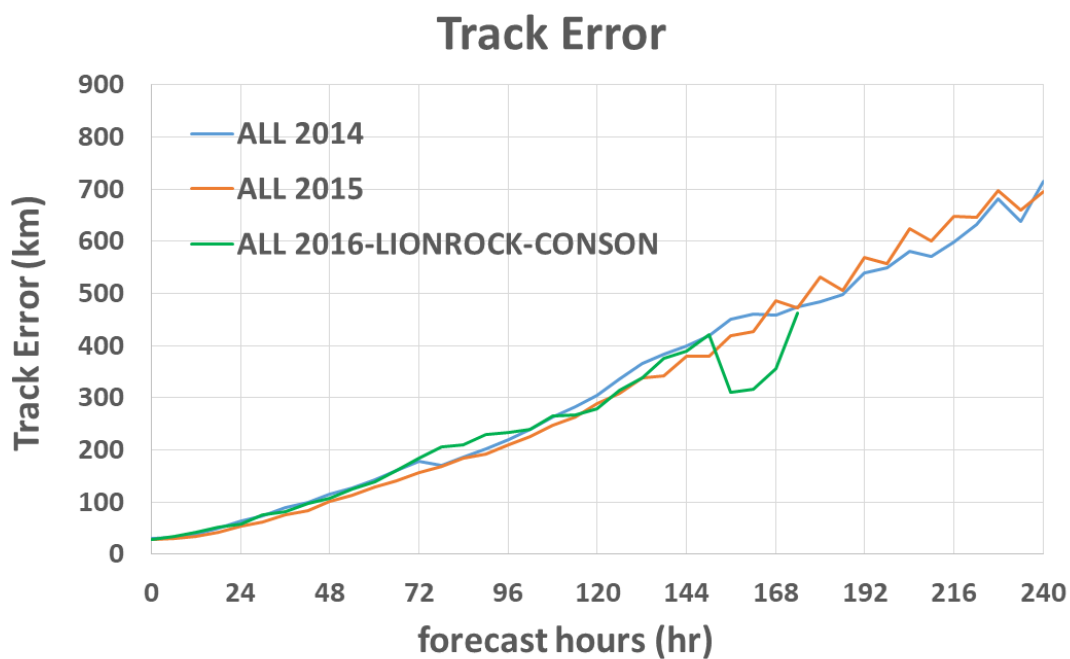


圖 15 同圖 10 (a)，但 2016 年為同時排除 Conson、Lionrock 颱風個案之結果。

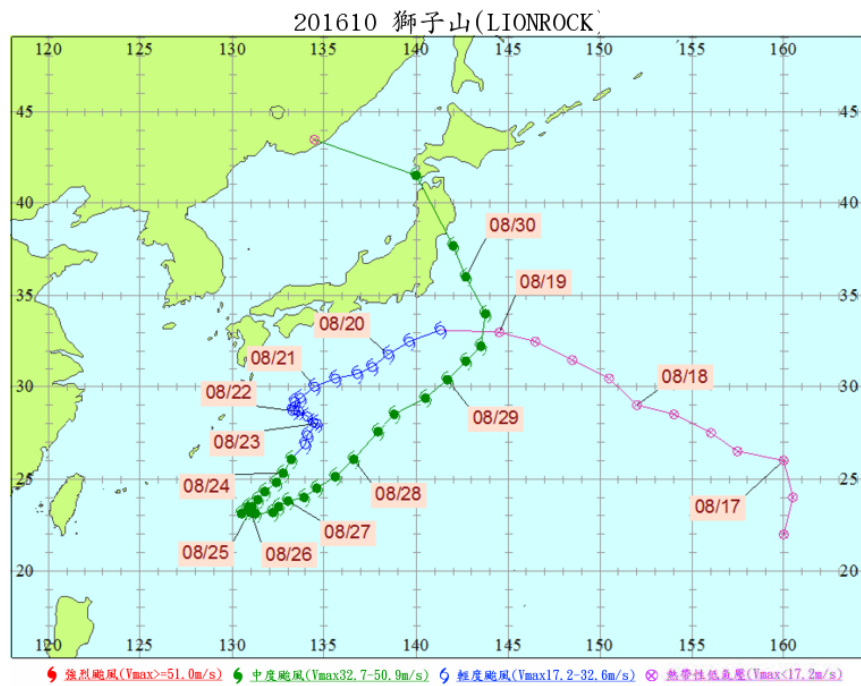


圖 16 中央氣象局 2016 年獅子山 (Lionrock) 颱風路徑圖。

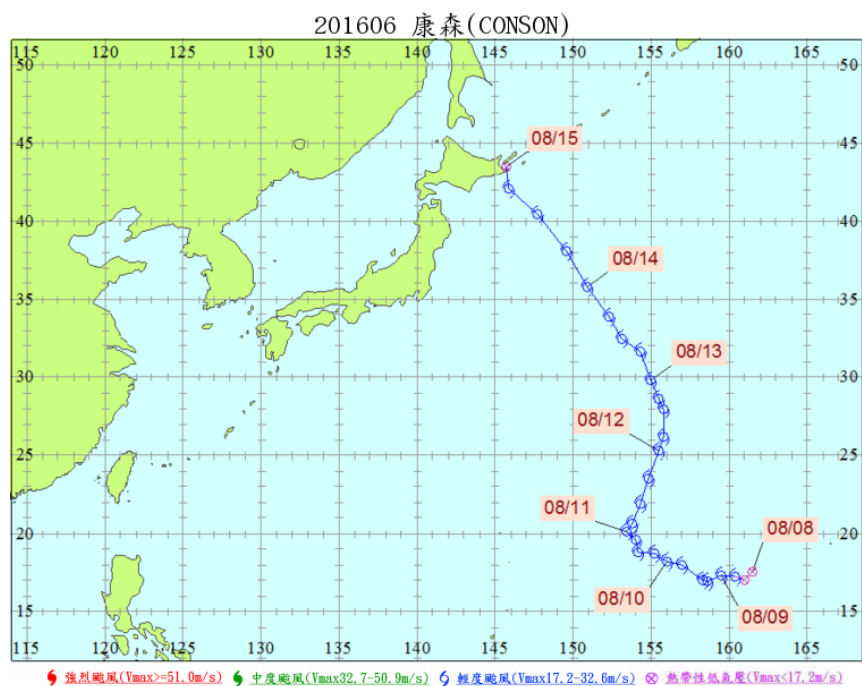
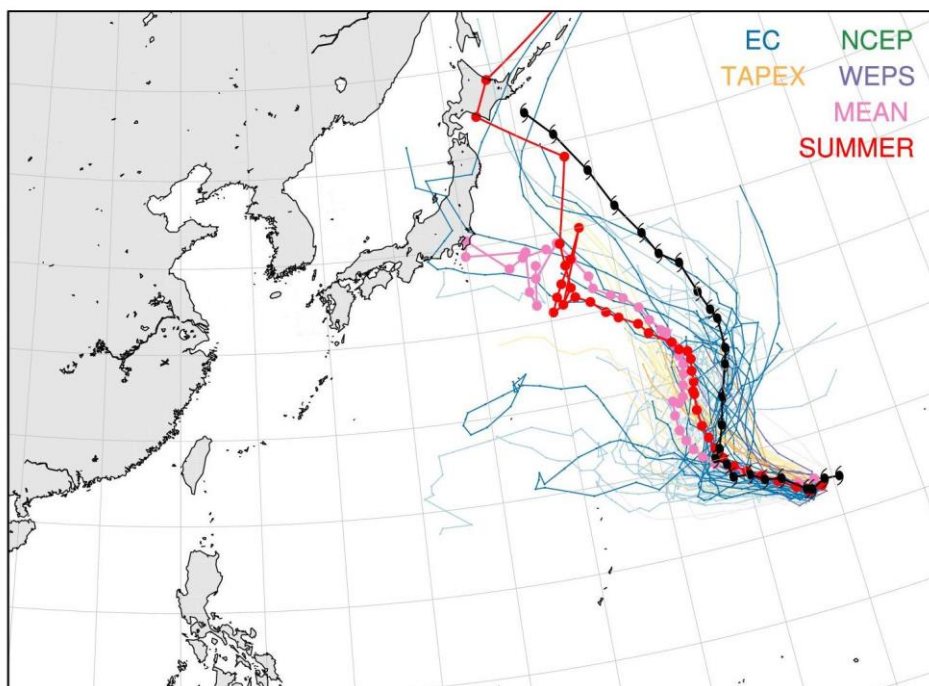


圖 17 中央氣象局 2016 年康森 (Conson) 颱風路徑圖。

(a)

2016CONSON : 2016080900 (m)



(b)

2016CONSON : 2016080912 (m)

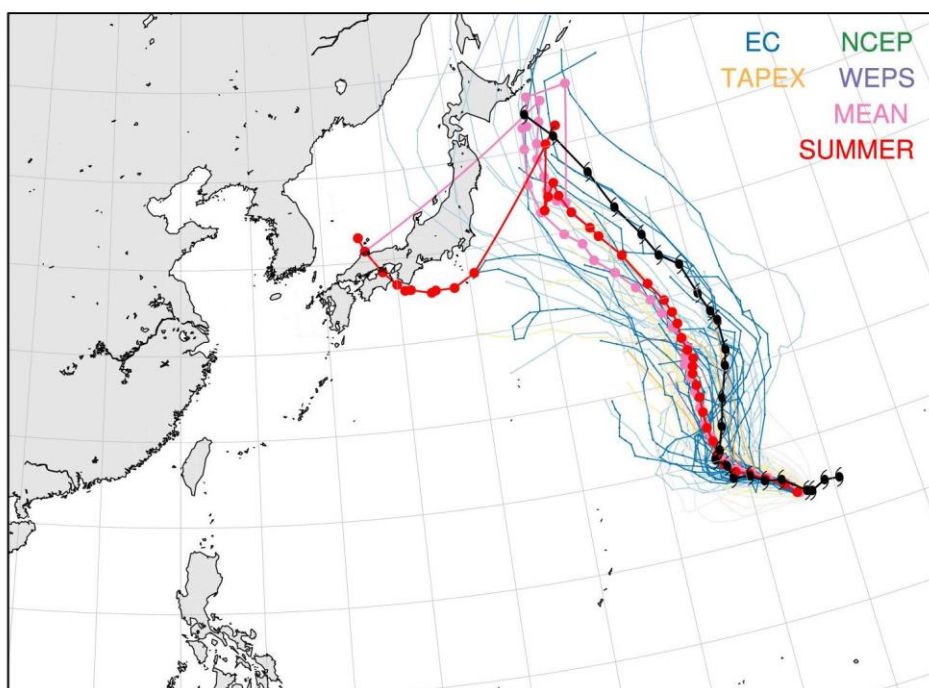


圖 18 Conson 颱風初始時刻為 (a) 080900、(b) 080912、(c) 081012 之三個預報個案。藍、綠、紫、黃色線分別代表 ECMWF、NCEP、WEPS、TAPEX 之系集成員路徑，各系集路徑中較粗者代表選取用以計算 SUMMER 之成員路徑，紅、粉紅色線分別代表 SUMMER、系集平均之路徑。

(c)

2016CONSON : 2016081012 (m)

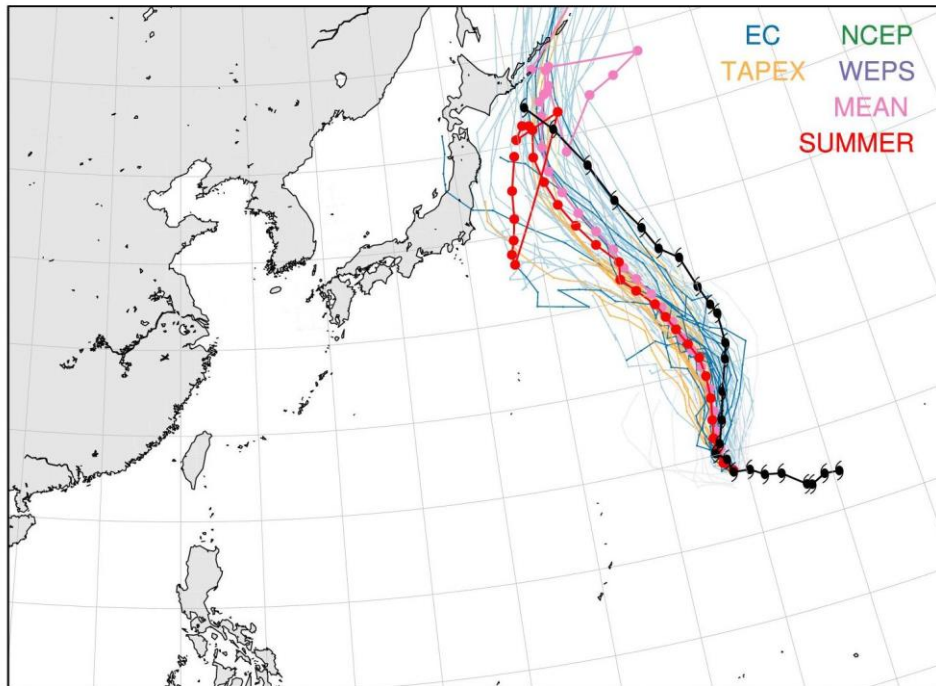


圖 18 Conson 颱風初始時刻為 (a) 080900、(b) 080912、(c) 081012 之三個預報個案。藍、綠、紫、黃色線分別代表 ECMWF、NCEP、WEPS、TAPEX 之系集成員路徑，各系集路徑中較粗者代表選取用以計算 SUMMER 之成員路徑，紅、粉紅色線分別代表 SUMMER、系集平均之路徑。

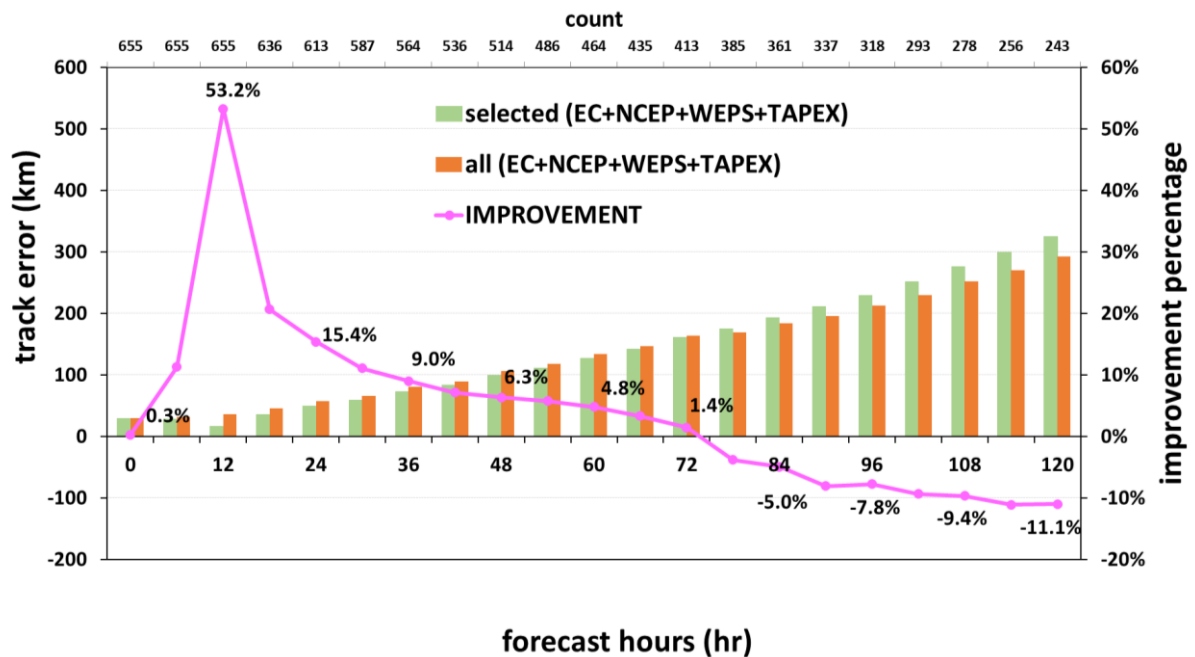


圖 19 所有系集成員做 SUMMER 實驗與 All mean 路徑預報校驗結果比較。圖中橫軸為預報時間 0 至 120 小時，圖中最上排數字為個案數目；長條圖分別為 SUMMER 實驗與 all（系集全部成員平均）之路徑誤差（公里），紫色線為 SUMMER 實驗相對於 all 的路徑誤差改進率(%)。

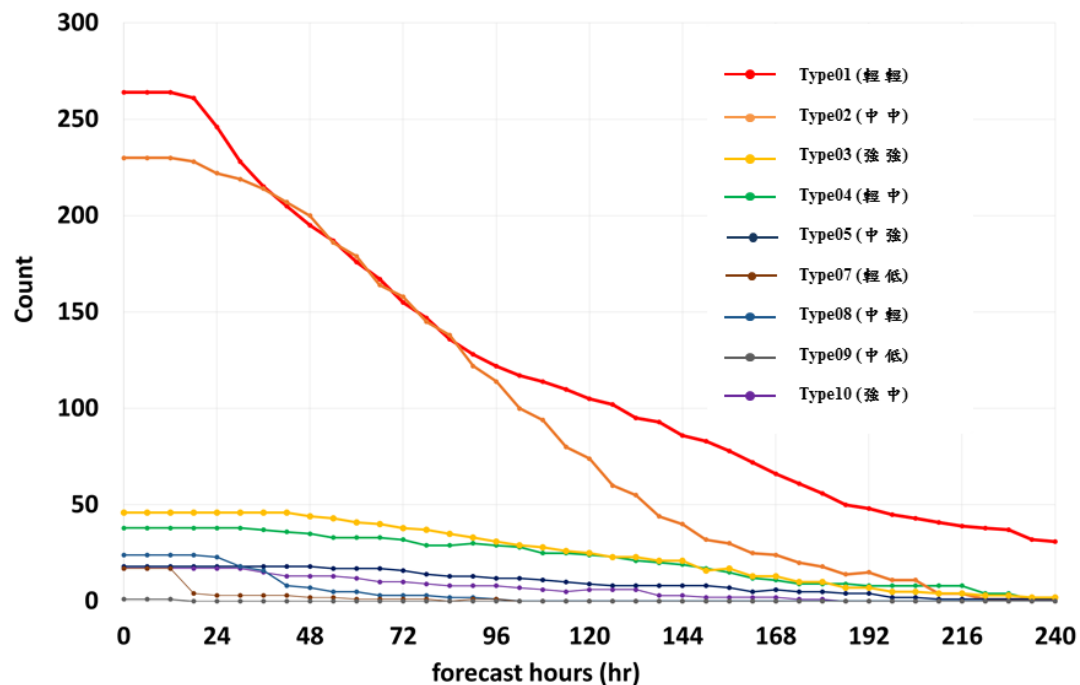


圖 20 2014-2016 年西北太平洋颱風個案，依預報時間 0-12 小時強度變化分類（共十一類），不同強度分類在不同 tau 時個案數目統計。其中第六類和第十一類因為個案數較少故沒有繪製。

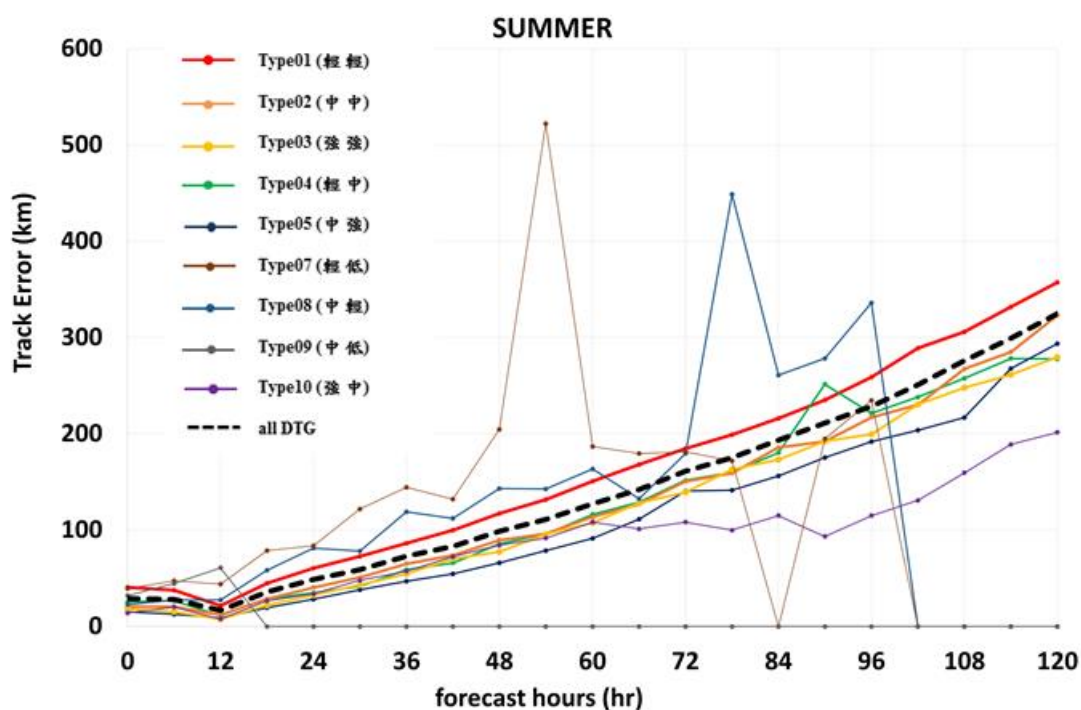


圖 21 2014-2016 年西北太平洋颱風個案，依預報時間 0-12 小時強度變化分類（共十一類），不同強度分類在不同 tau 時 SUMMER 技術預報颱風路徑之誤差（公里）。第六類和第十一類因為個案數較少故沒有繪製。

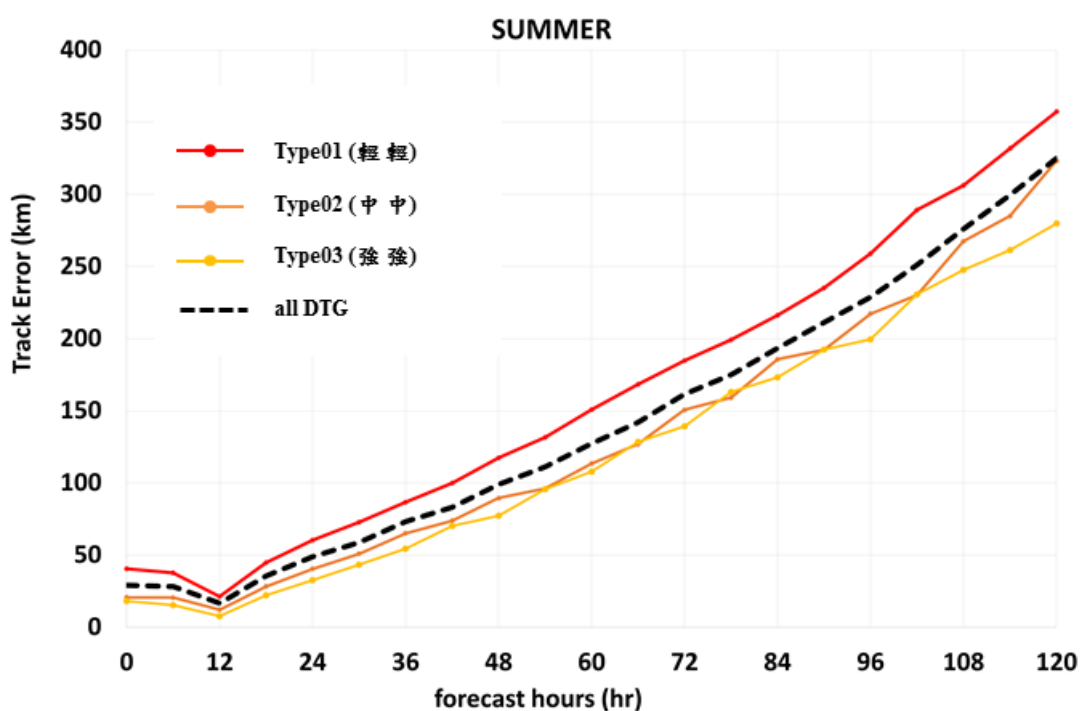


圖 22 同圖 21，但僅繪出 0-12 小時強度維持不變（包含第一類:輕度->輕度、第二類:中度->中度、第三類:強烈->強烈）的颱風個案。

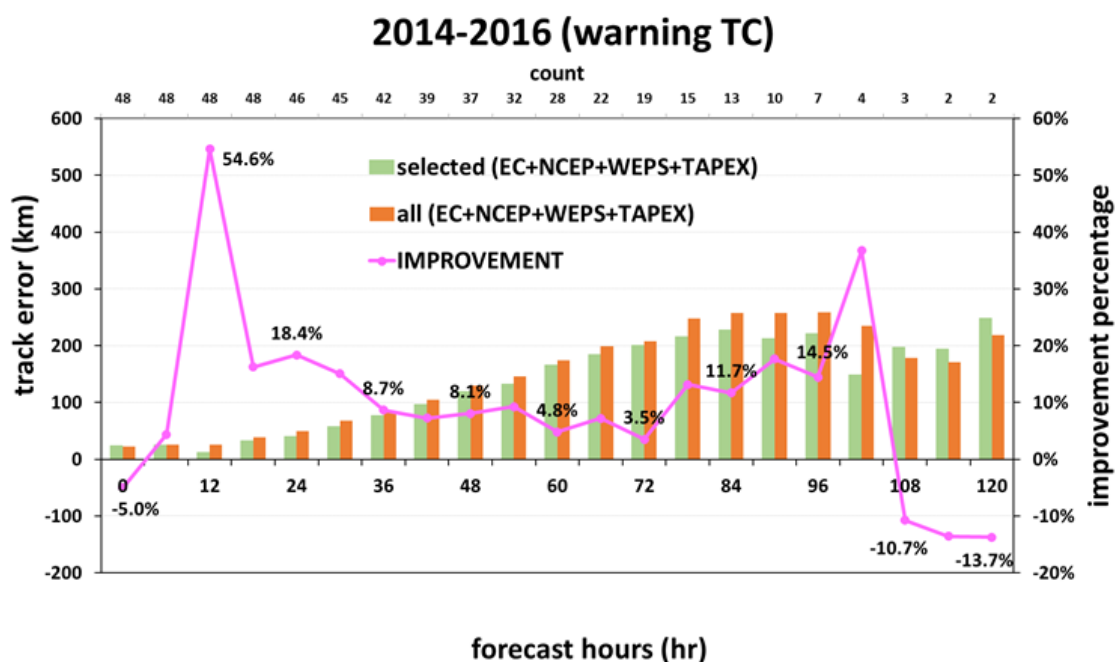


圖 23 2014-2016 年西北太平洋颱風挑選氣象局警報期間之個案，以 SUMMER 技術預報路徑（綠色柱狀）與系集平均（橘色柱狀）之比較結果。圖說同圖 19。

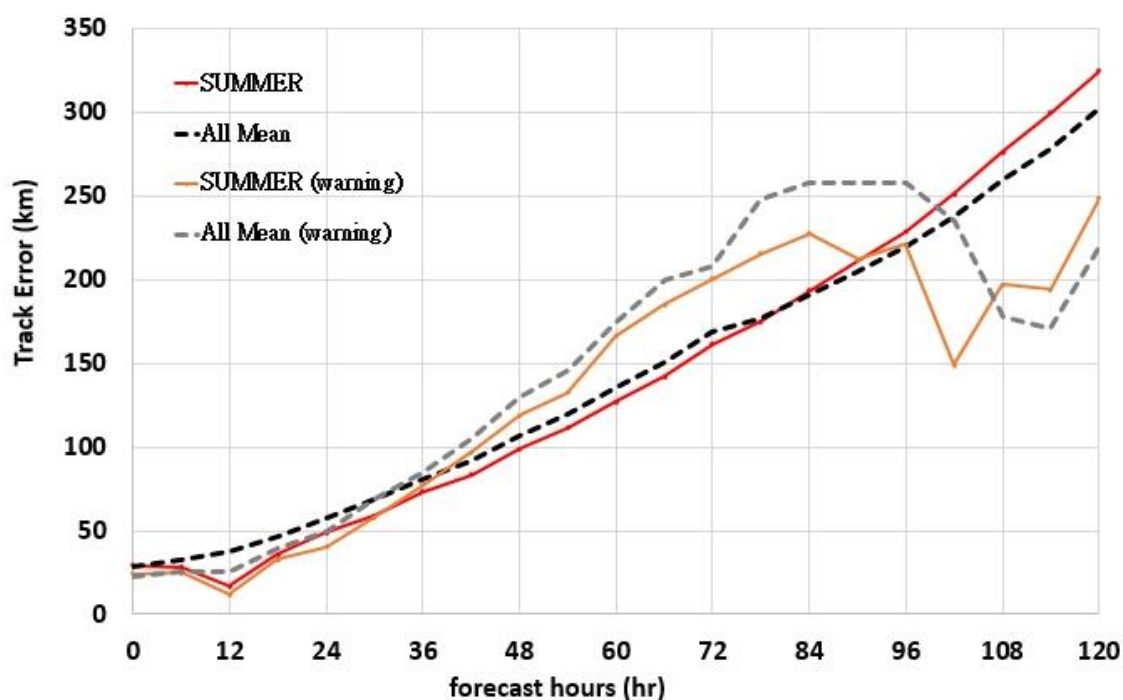


圖 24 2014-2016 年西北太平洋颱風全部個案與氣象局警報期間個案之路徑預報誤差。橫軸表示預報時間 0-120 小時，縱軸為路徑預報誤差（公里），紅色、橘色實線分別表示全部個案與警報期間個案 SUMMER 路徑預報之誤差，黑色、灰色虛點線則為全部個案與警報期間個案之系集平均路徑預報誤差。橘色和灰色曲線分別為圖 23 中 SUMMER 技術預報路徑（綠色柱狀）與系集平均（橘色柱狀）。

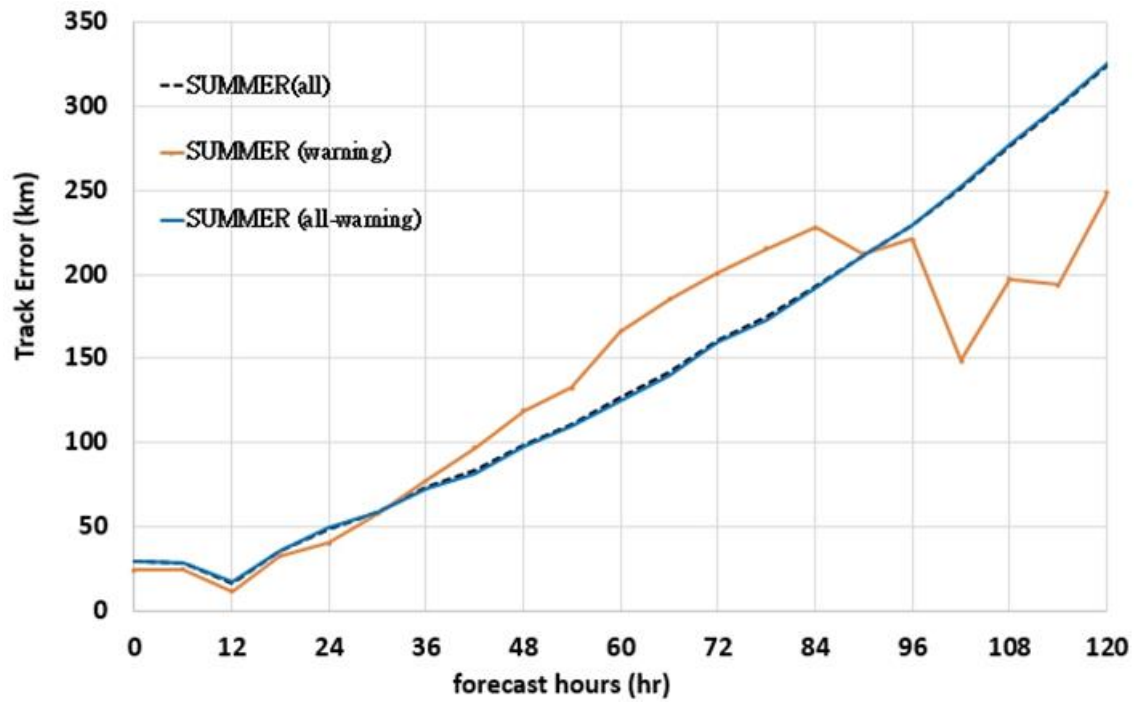


圖 25 2014-2016 年西北太平洋颱風全部個案與氣象局警報期間個案之路徑預報誤差，橫軸表示預報時間 0-120 小時，縱軸為路徑預報誤差（公里）三條曲線為不同個案使用 SUMMER 之路徑預報誤差。黑色虛線、橘色實線及藍色實線分別代表全部個案、警報期間個案及非警報期間個案。

第三章、颱風路徑系集預報應用技術優化

由於 ECMWF(NCEP)全球系集預報系統自 2016 年 3 月 (2015 年 12 月) 起提高模式的水平網格解析度，水平網格間距 ECMWF 由原本 0-10 天預報 T639(~32km)，11-15 天 T319(~64km)，升級為 0-15 天預報 O640(~18km)，15-46 天 O320(~36km)；NCEP 由原本 0-8 天 T254(~52km)，9-16 天 T190(~70km)，提升為 0-8 天 TL574(~34km)，9-16 天 TL382(~52km)，垂直層數亦由 42 層提高為 64 層。這樣大幅度的提高網格間距，合理推測 2016 年全球模式的預報能力與前兩年應有所不同，考量到未來幾年內全球模式的解析度可能維持現狀或再提高，故本章節僅使用 2016 年之西北太平洋颱風個案進行 SUMMER 技術優化討論，而不是 2014-2016 年。

圖 26 為 2016 年西北太平洋颱風個案，以 ECMWF、NCEP、TAPEX 和 WEPS 四個系集預報系統之系集平均與 Summer (成員數 $M=28$) 颱風路徑預報誤差比較。圖中路徑誤差以預報時間 12 小時改進最多(57%)，之後隨預報時間增加，Summer 較系集平均之改進率則減少，但在 78 小時內改善率均為正值，84 至 120 小時則由 0%降至 -7%。

基於第一年發展之作業化 SUMMER 技術與分析結果，本年度之重點工作為利用歷史資料將之優化，以改進颱風路徑之系集預報能力，上半年首先初步測試藉由「調整系集成員排名基準」、「針對各預報時間調整選取成員數量」兩種方式進行優化，其統計校驗與分析結果茲分述如下：

3.1 系集成員排名基準

3.1.1 實驗一：離散度高於誤差

由系集預報之設計理念，一個好的系集系統應能涵括實際發生之不確定性，即具有一定大小之離散度；另一方面，其離散度亦不應過大以免各成員過度發散。由 2014-2015 年之統計結果 (圖 9)，大致可看出不論系集平均或 SUMMER 之離散度於所有預報時間均大於平均誤差，而 2016 年之結果 (圖 4) 則顯示於 132 小時後之離散度逐漸低於平均誤差。如排除 Conson 及 Lionrock 颱風個案 (圖 27)，則大致上仍有系集離散度大於平均誤差之趨勢。因此對於 2014-2016 年所有個案，預報時間 120 小時內之離散度減去路徑誤差平均而言為正值。根據此結論，挑選 2016 年所有個案中預報第 12 小時「離散度 - 誤差」($\sigma - \varepsilon$) 滿足以下條件之個案進行分析：

$$0 < \sigma - \varepsilon < C \quad (3-1)$$

其中 C 為以 2014-2015 年所有個案平均得到之系集平均第 12 小時誤差標準差，可代表前 12 小時誤差之變異度，3-1 式可視為離散度不應超過「將選取成員平均後中心之誤差」條件之量化。圖 28 為以上述條件選取個案與全部個案之 SUMMER 路徑誤差統計結果，選取個案平均而言於預報時間 96 小時前均有些許改善，其實際應用於選取成員數 M 之步驟為：

1. 將系集成員依其 12 小時誤差進行排序。
2. 由 $M = 2$ 開始計算使用前 M 名成員之平均路徑。若其 $(\sigma - \varepsilon)$ 滿足 3-1 式，其中 C 為給定常數（測試設定為 30 km，2014-2015 年所有個案平均得到之系集平均第 12 小時誤差標準差約 30.03 km），則選取各 M 值中，平均路徑 12 小時誤差最低者。
3. 如無滿足上述條件之組合存在，則使用原始 SUMMER 設定（ $M = 28$ ）。

然而必須注意，由於成員已用 12 小時路徑誤差進行排序，故此最低者勢必為滿足上述條件之所有 M 值中最小者。因本節方法並未對得到之 M 值範圍設限，故於某些極端個案中可能會得到較極端之 M 值。應用於 2016 年所有颱風個案，比較本節方法及原始 SUMMER 之選取成員數（圖 30、圖 31），於所有預報時間本節方法之成員數均大於原始 SUMMER（圖 29）。由圖 31，相較於原始 SUMMER 於預報 132 小時後系集離散度較為不足（低於路徑誤差）的狀況，本節方法得到之離散度於 186 小時後始低於路徑誤差；而預報時間 96 小時後之路徑誤差較原始 SUMMER 為佳（圖 32），180 小時後則略遜於系集平均。進一步比較三者 120 小時內之表現（圖 33），36 小時內仍以 SUMMER 較佳，36 至 72 小時 SUMMER 與本節方法之差異不大，而 72 至 120 小時則本節方法較 SUMMER 為佳且趨近於系集平均之表現。

3.1.2 實驗二：離散度接近誤差

上述 3.1.1 節之方法可改進 SUMMER 後期預報表現，卻造成短期預報變差，似乎不應限制平均路徑之 12 小時誤差為最小值；此外，限制 12 小時「離散度 - 誤差」須為正值似乎略顯嚴格，可能會排除部分位於臨界值附近之成員組合。據此挑選 2016 年所有個案中預報第 12 小時「離散度 - 誤差」 $(\sigma - \varepsilon)$ 滿足以下條件個案之平均表現：

$$|\sigma - \varepsilon| < C \quad (3-2)$$

其中 C 為以 2014-2015 年所有個案平均得到之 SUMMER 第 12 小時誤差標準差。圖 34 為上述條件選取個案與全部個案之 SUMMER 誤差統計結果，於預報時間 108 小時之前均有改善，且改進幅度均較使用 3-1 式者為大。據此設計決定選取成員數 M 之策略為：

1. 將系集成員依其 12 小時誤差進行排序。
2. 取消「平均誤差為（滿足設定條件者中）最小」之限制，改為「平均誤差與某參考誤差值差距不能過大」。由於各颱風之模式掌握能力不一，故此參考值預計採用當次系集預報某組誤差值；而差距之上限則採用過去個案統計 12 小時路徑誤差之標準差。
3. 同時，為得到較佳之 12 小時「離散度 - 誤差」關係，故搜尋滿足上述條件且「離散度與誤差之差距最小」之 M 值。
4. 根據過去統計結果設定一起始成員數目，以避免選取成員數過少造成整體誤差過大之可能性增加。

由 2014 至 2015 年成員數與相較於系集平均相對誤差比例之關係（圖 35），72 小時前所有預報時間之標準化誤差均小於 1 之成員數約為 8 至 9 左右，因此上述策略中使用

稍大之起始成員數，以確保其誤差（平均而言）低於系集平均。實際應用於選取成員數 M 之步驟為：

1. 計算各選取成員數（由 10 至全選）之「12 小時離散度」與「12 小時選取成員平均中心之誤差」兩者差值之絕對值。
2. 「12 小時選取成員平均中心之誤差」與參考誤差值（第 10 名成員誤差）之差距必須小於 20 km（以 2014-2015 年所有個案平均得到之 SUMMER 第 12 小時誤差標準差約 19.18 km）。
3. 搜尋符合上述條件且差值絕對值為最小值之成員數 M ，以此成員數 M 進行 SUMMER 計算。
4. 如無滿足上述條件之組合存在，則使用原始 SUMMER 設定（ $M = 28$ ）。

應用本節方法於 2016 年所有颱風個案，並與原始 SUMMER 比較選取成員數（圖 36），本節方法之成員數平均而言略低於原始 SUMMER；而本節方法之離散度於 72 小時後均較原始 SUMMER 為低（圖 37(a)）；然而比較原始 SUMMER（圖 30）與本節方法（圖 37(b)）之離散度、誤差關係，兩者之離散度於預報 132 小時後均較誤差為低，然而本節方法於 132 小時前之離散度較為接近誤差。如分別檢視各個案成員使用數量（圖 38），可發現依據不同個案之誤差與離散度，本節方法於部分個案會使用與原始 SUMMER 使用數量 28 差距較大之成員數。為檢視使用數目差距較大是否產生異常路徑結果，挑選兩個使用數目差距非常大之個案：Chaba 颱風初始時間 09/30 00Z (16093000)（圖 39）及 Sarika 颱風初始時間 10/15 12Z (16101512)（圖 40）。16093000 個案中 SUMMER 與本節方法選取成員數分別為 28、10，由中兩者路徑之比較，使用較少成員並未造成路徑異常；而 16101512 個案中 SUMMER 與本節方法選取成員數分別為 28、83，圖 40 中亦無路徑異常現象發生。由圖 41，幾乎所有預報時間之路徑誤差均較原始 SUMMER 略微降低。進一步比較三者 120 小時內之表現（圖 42），可看出改進略大之預報時間為 12 小時左右、84 小時左右及 96 小時之後。比較前述兩個成員數差距較大個案之路徑誤差（圖 43），不論選取成員數多寡，本節方法均可代表原始 SUMMER 選取成員之誤差特性，且平均而言略微改進路徑誤差。

綜合比較 3.1 節針對系集成員排名基準實驗之路徑誤差，預報時間 72 小時以內最佳者為使用 3-2 式之方法；72-120 小時則以使用 3-1 式之方法最佳；至於 120 小時後，使用 3-1 式、3-2 式之方法及系集平均三者互有領先。

3.2 各預報時間之選取成員數量

本計畫於第一年參考 Dong and Zhang (2016) 提出之 OBEST 方法，開發運用全球與區域系集預報路徑之 SUMMER 技術，選取 12 小時路徑誤差排名前 28 名之成員進行平均。然而這些成員未必於所有預報時間均存在颱風中心資訊，故於預報時間 12 小時之後實際使用之成員數通常小於 28 且隨預報時間遞減（圖 5）。為善用整體系集系統提供之預報資訊，本計畫初步嘗試針對各預報時間調整選取成員數量。

首先測試「盡量維持每個預報時間使用成員數為事先給定數量（28 個）」，即：針對各預報時間，如（12 小時排名選取之）28 個成員中於此時刻不足 28 個，則由排名 29 名起之成員（如存在）遞補至滿 28 個或者全部成員均已使用為止（簡稱補足法）。由補足法使用數量與系集平均、原始 SUMMER 之比較（圖 44），可知於預報時間 78 小時前之使用成員數均在 27 以上，隨預報時間增加使用數量逐漸趨近於系集平均；而受限於總成員數（圖 5 中之系集平均），78 小時後 SUMMER 與補足法之成員使用數量均不滿 25。由圖 45 亦能看出成員數增加有助於提升 SUMMER 離散度，尤其是 132 小時之後，由圖 46 則可知補足法其離散度與誤差隨預報時間之變化情況與系集平均非常相似。比較三者路徑誤差（圖 47），本方法於 72 小時前與 SUMMER 之差距非常微小，但其實補足法之使用成員數於 72 小時前已較原始 SUMMER 為多，可知原始 SUMMER 選取之成員於 3 日內之代表性已相當好，意即使用較少成員可達到使用較多成員之誤差水準；而於 78-102 小時、192-228 小時則補足法之誤差為三者最佳。

由於 3.1 節中測試之兩種方法中，預報時間 72 小時以內最佳者為使用 3-2 式之方法，故進一步測試綜合兩節中之方法（簡稱為 3-2 補足法）：使用 3-2 式決定選取數目以及於所有預報時間補足至此選取成員數。由圖 48，使用 3-2 補足法之成員數量亦較原始 SUMMER 高，而略低於補足法，此與 3.1 節中原始 SUMMER 與 3-2 式方法兩者數量比較之結果一致；3-2 補足法之離散度與補足法接近，而於 120 小時後逐漸低於系集平均（圖 49）；由圖 50 則可知兩種補足法之離散度與誤差隨預報時間之變化情況相似。然而於路徑誤差比較（圖 51），0-72 小時之 3-2 補足法誤差略低於補足法，但 72-102 小時則不如補足法，與 3.1 節中比較使用固定成員數（28）與 3-2 式決定成員數之結論不同；120-240 小時誤差無明確優劣之分。

3.3 優化策略：改變 SUMMER(M=28)成員數

表 2（和圖 52）是本計畫下半年為討論颱風系集預報技術優化所設計之實驗，以下將在各節起始介紹不同實驗之優化策略，表 2 中 All mean 表示每個預報時間以系集平均結果做預報；SUMMER 實驗即為本計畫第一年之 SUMMER 技術，係以預報時間第 12 小時之路徑預報誤差排序，選取誤差最小的前 28 名成員，之後每個預報時間之颱風路徑預報皆以這 28 個成員之結果分別取經、緯度平均而得。

3.3.1 實驗一：SUMMER_28

承先前所示，SUMMER 在預報時間 84 小時後預報能力較系集平均差（圖 26）。因此，研究在 84 小時之後改以系集平均結果預報，即表 2（和圖 52）中的 SUMMER_28 實驗。SUMMER_28 係指在預報的前 78 小時內與 SUMMER(M=28)相同，在 84 至 120 小時則以系集平均代替 SUMMER(M=28)之預報結果（圖 53）。由圖比較 SUMMER_28 相對於 SUMMER 在 84 小時後之改進率隨預報時間遞增，最高改進率發生在預報時間第 114 小時(9%)，並且在 120 小時改進率仍有 8%，顯示此方法能夠彌補 SUMMER 對預報後期颱風路徑掌握度不足的問題。

3.3.2 實驗二：SUMMER_min

圖 54 為使用 2016 年西北太平洋颱風個案，經事後分析可得在不同預報時間採不同成員數相對於系集平均之颱風路徑誤差標準化結果。由圖可知在前 72 小時內選取不同預報時間路徑誤差最小的成員數，可以得到路徑預報最佳的結果；當預報時間在 84 小時之後，選取不同的成員數並不會明顯改進系集平均之路徑預報結果。綜合以上討論，SUMMER_min 實驗係指在預報時間前 78 小時內，依照圖 54 的分析結果分別在不同時間選取使路徑誤差最小成員數，84 小時之後則以系集平均預報颱風路徑。由圖 52 可知，SUMMER_min 在 12 到 78 小時（間隔 6 小時）的成員數依序為 2、10、23、23、29、36、35、23、29、23、23 及 23。

討論 SUMMER_min 相較於 SUMMER 之路徑預報結果（圖 55），在前 78 小時內 SUMMER_min 相較於 SUMMER（和 SUMMER_28），改進率約在 0%至 2%之間，顯示 78 小時內隨預報時間改變成員數，雖然相較於 SUMMER（成員數為 28）略有改進，但改進的幅度並不顯著。

3.3.3 實驗三：SUMMER_29

雖然 3.3.2. 中 SUMMER_min 似乎是較 SUMMER 最為優化的結果，不過在實務預報上我們無法提前得知使颱風路徑誤差最小的成員數為何，故我們還是必須預先決定一個成員數使得颱風路徑預報有最優化的結果。

圖 56 為固定成員數（成員數在 20 到 40 之間），比較在不同預報時間以 SUMMER 技術預報颱風路徑誤差，並以 SUMMER(M=28)的路徑誤差取各成員數之路徑誤差標準化之結果。當成員數目小於 28（大於 28）時，其標準化路徑誤差隨預報時間的變化大都呈 M(W)字型分佈，即成員數僅在特定預報時間內表現才優於 SUMMER。唯成員數為 29 時，預報時間 78 小時內路徑誤差皆較 SUMMER 為優。為此，研究設計 SUMMER_29 實驗，係在 78 小時內為固定成員數 29，84 小時後則以系集平均進行預報。比較 SUMMER_29 和 SUMMER 前 78 小時之路徑預報結果（圖 57），SUMMER_29 的改進率約在 0%到 1%之間，顯示 SUMMER_29 較 SUMMER 亦僅有些微的改進。

因此，根據 2016 年西北太平洋歷史颱風個案資料，併以本章節的實驗設計與討論，對於 SUMMER 颱風路徑預報的優化方案，本計畫建議以 SUMMER_29 的策略為實務預報的參考，即預報時間 78 小時內以「12 小時路徑預報誤差最小的前 29 名成員平均」為預報，78 小時後則改用「系集平均」作颱風路徑預報。不過，由於預報時間 78 小時前後使用不同的系集優化方法，有些個案路徑上可能有不連續的情形發生。以下以圖 58、圖 59 兩個案為例：圖 58 為尼伯特颱風(2016)初始場在 2016 年 7 月 3 日 12Z 的預報，78 小時前後路徑沒有明顯的不連續；圖 59 為莫蘭蒂颱風(2016)初始場為 2016 年 9 月 12 日 00Z 之預報，78 小時前後路徑有明顯向西平移發生。因此，研究提醒使用 SUMMER_29 預報颱風路徑時，定位過程中必須仰賴預報人員修正這樣路徑不

連續的情形。

表 2 2016 年颱風路徑系集預報應用技術優化之實驗名稱及優化策略。

Experiment	Description
All mean	Mean (12h-120h)
SUMMER	M=28 (12h-120h)
SUMMER_28	M=28(12h-78h) + mean (84h-120h)
SUMMER_min	M=min(12h-78h) + mean (84h-120h)
SUMMER_29	M=29(12h-78h) + mean (84h-120h)

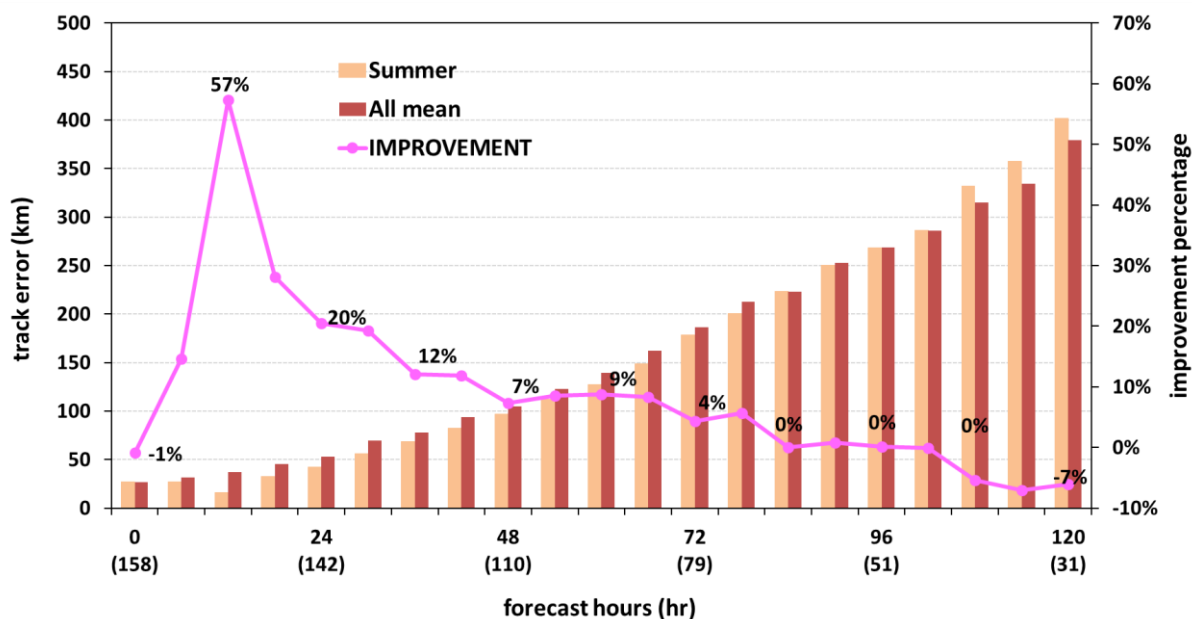


圖 26 2016 年西北太平洋颱風個案，以 ECMWF、NCEP、TAPEX 和 WEPS 所有系集成員做 SUMMER 實驗與 All mean 路徑預報校驗結果比較。圖中橫軸為預報時間 0 至 120 小時，括號內的數字為個案數目；長條圖分別為 SUMMER 實驗與 All mean 之路徑誤差（公里），紫色線為 SUMMER 實驗相對於 All mean 的路徑誤差改進率。

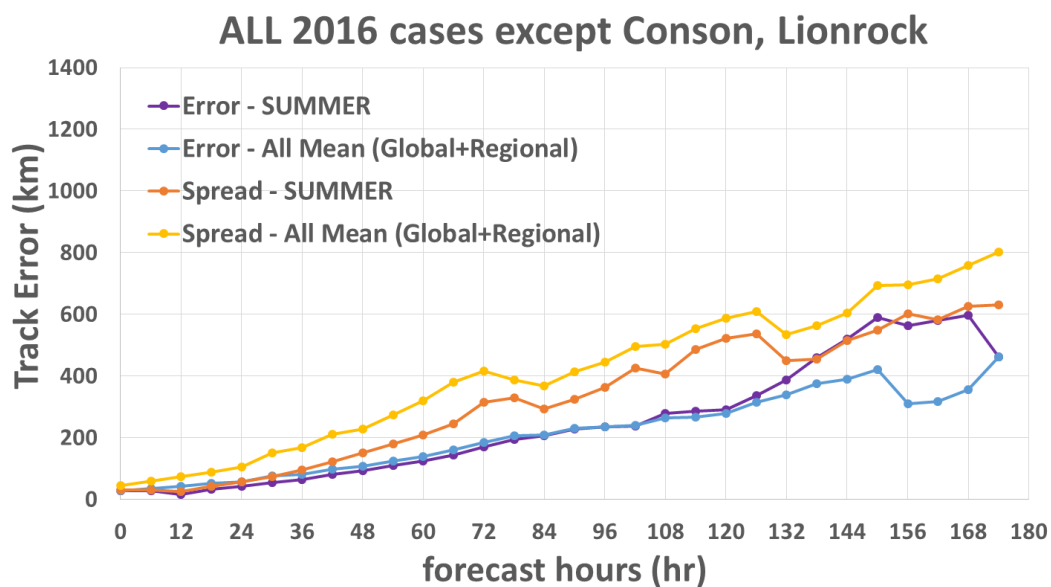


圖 27 同圖 4，但為同時排除 Conson、Lionrock 颱風個案之結果。

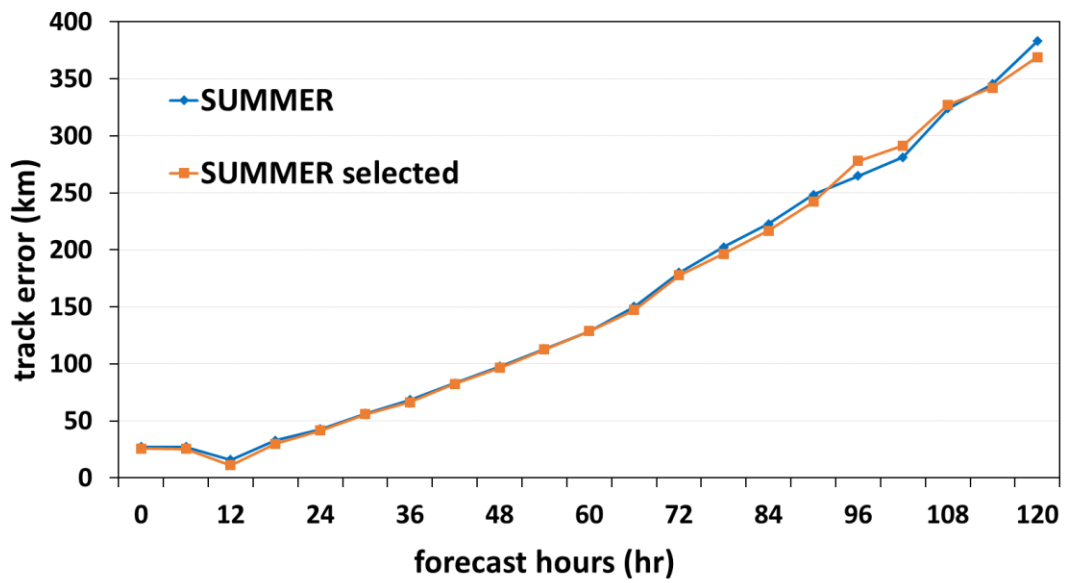


圖 28 2016 年西北太平洋颱風所有個案以及滿足 3-1 式個案之 SUMMER 路徑預報誤差。

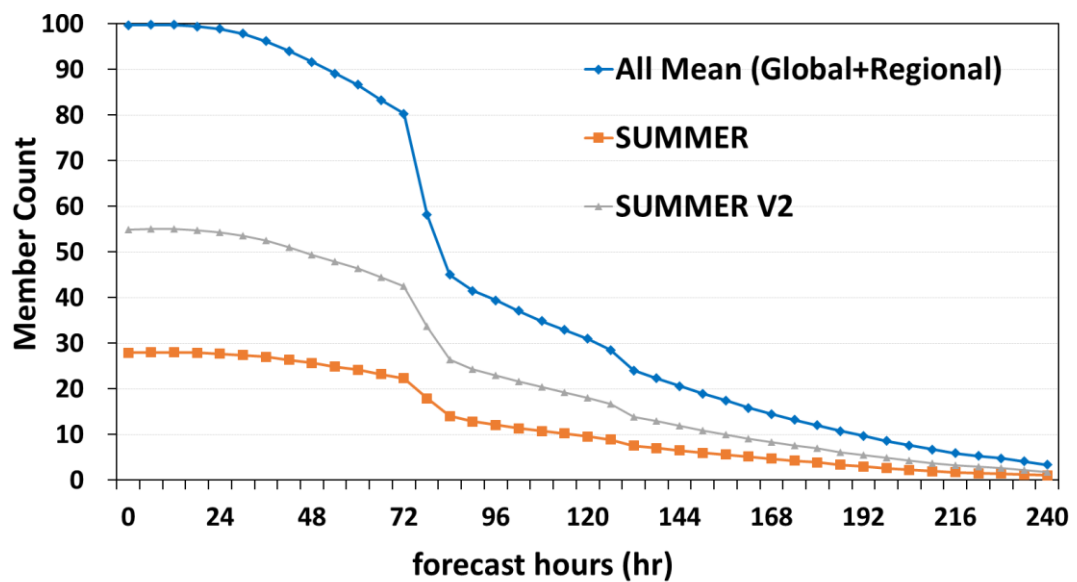


圖 29 同圖 5，但加上應用 3-1 式之方法（灰線）。

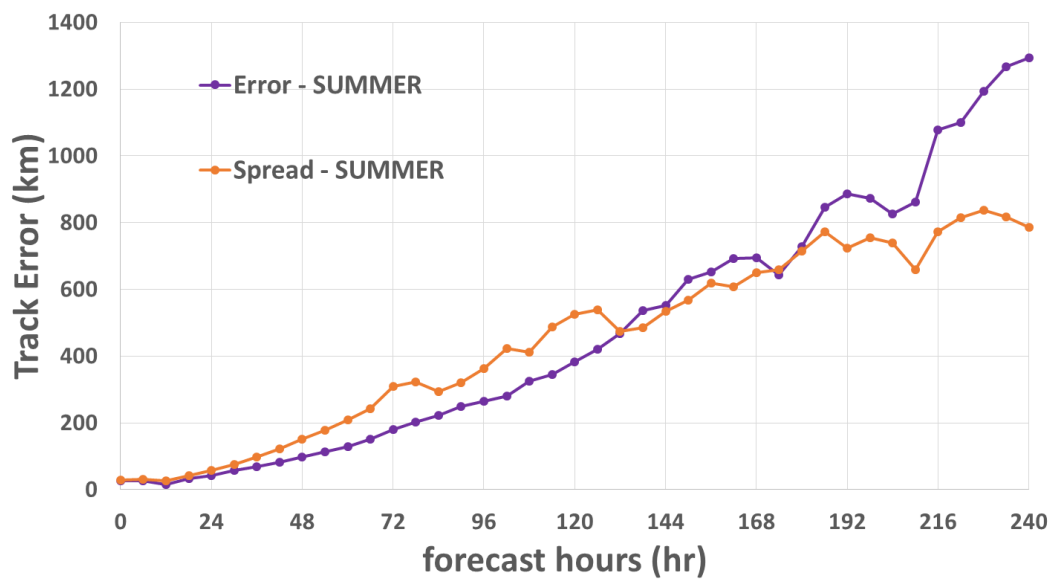


圖 30 統計 2016 年中之西北太平洋颱風全部個案，其路徑誤差與系集離散度。

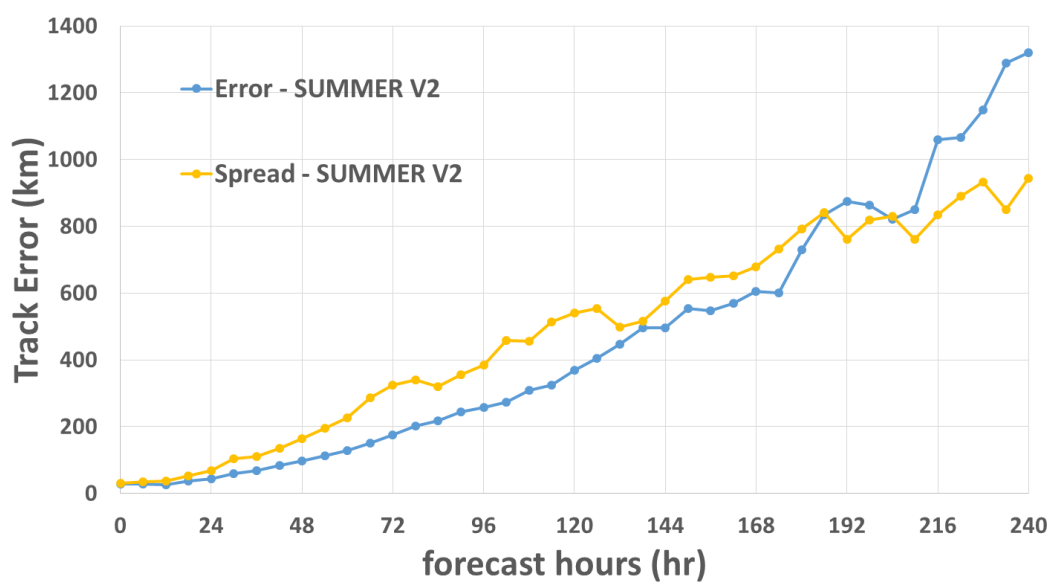


圖 31 統計 2016 年中，應用 3-1 式方法挑選之西北太平洋颱風個案，其路徑誤差與系集離散度。

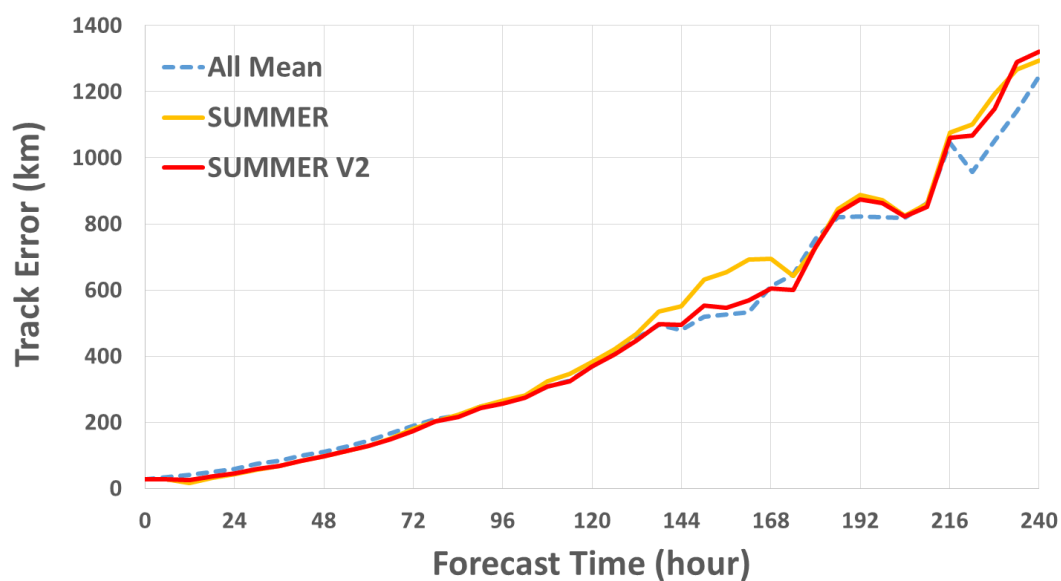


圖 32 統計 2016 年西北太平洋颱風個案，全球及區域系集平均、SUMMER 及應用 3-1 式方法之路徑預報誤差。

(a)

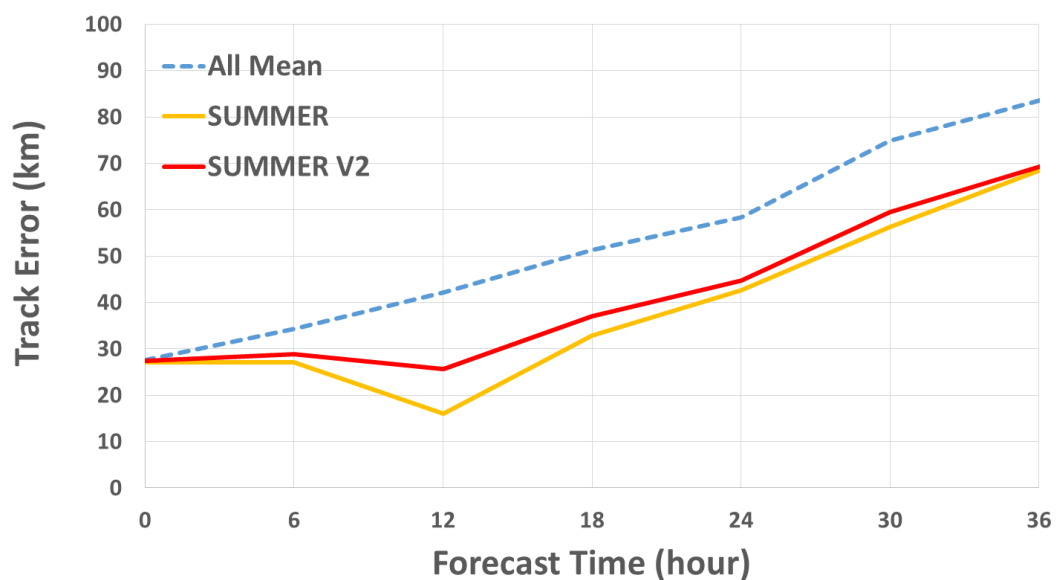
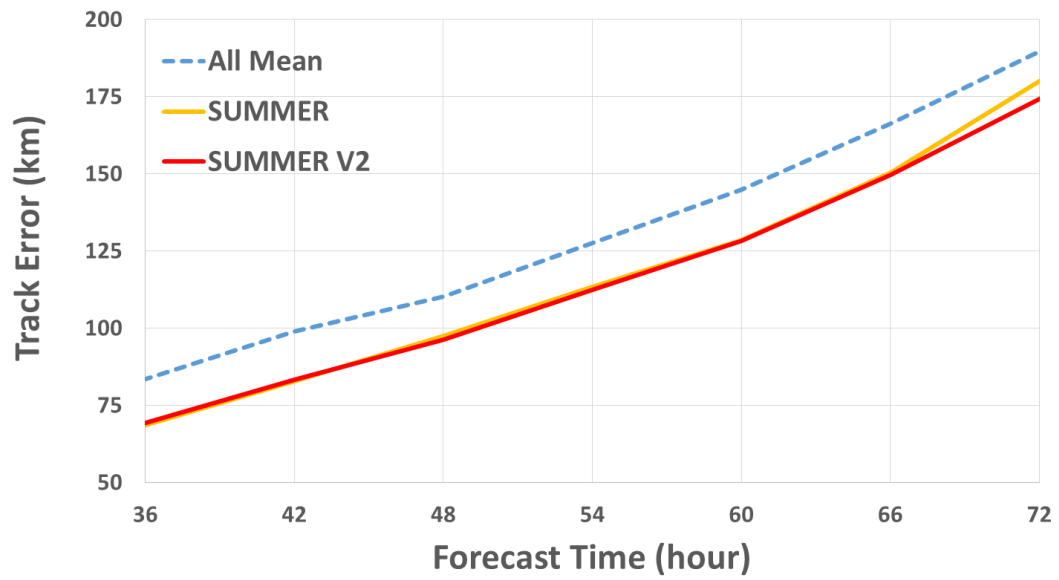


圖 33 同圖 32，但為預報時間(a) 0-36 小時、(b) 36-72 小時、(c) 72-120 小時。

(b)



(c)

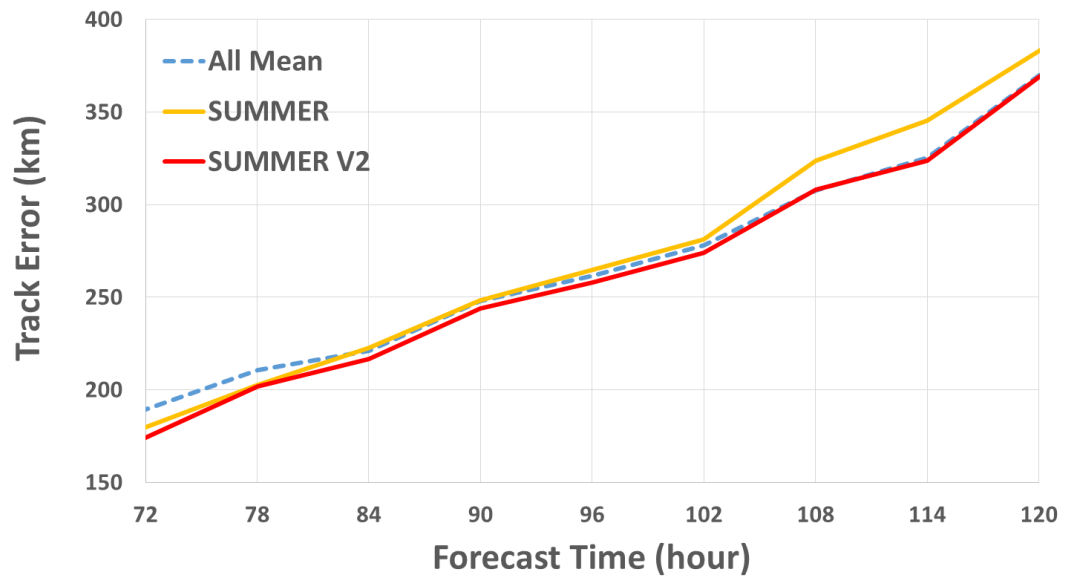


圖 33 同圖 32，但為預報時間(a) 0-36 小時、(b) 36-72 小時、(c) 72-120 小時。

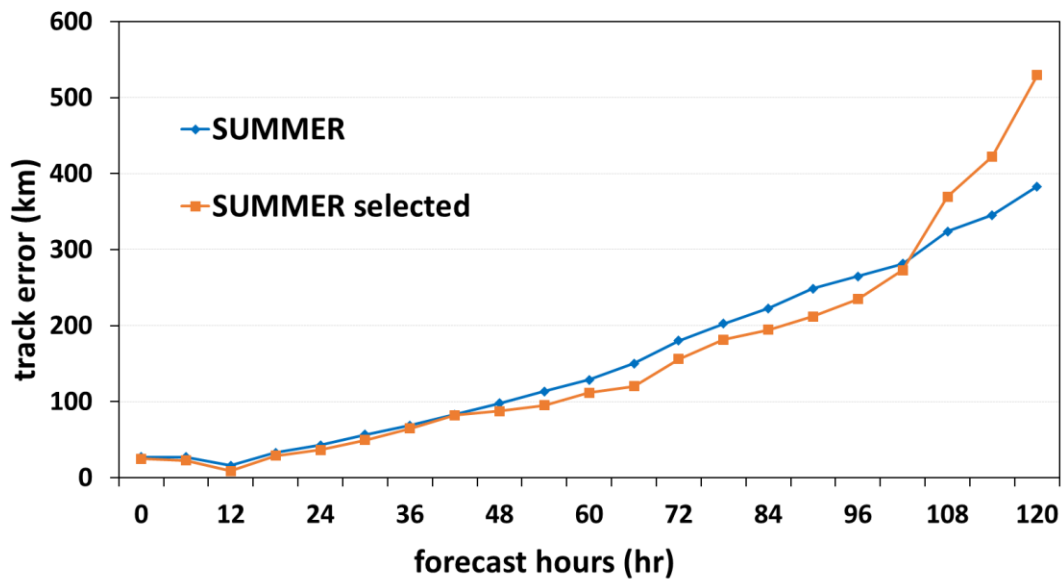


圖 34 2016 年西北太平洋颱風所有個案以及滿足 3-2 式個案之 SUMMER 路徑預報誤差。

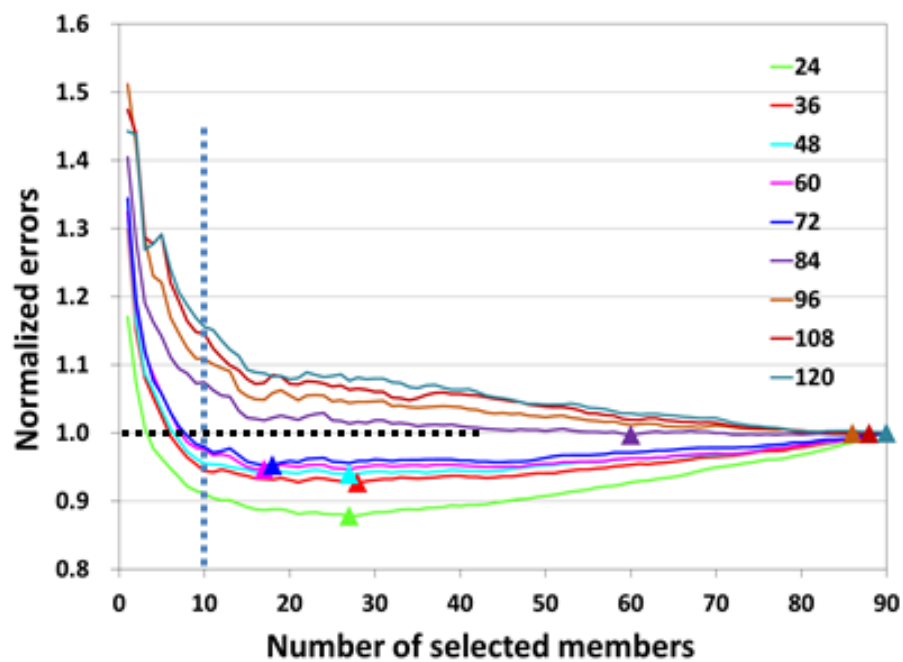


圖 35 針對 2014-2015 年西北太平洋颱風個案，以 ECMWF、NCEP、WEPS 及 TAPEX 系集成員計算其 12 小時颱風路徑預報誤差與選取排名成員數的關係。不同顏色線條代表不同預報時間，而各線上三角形代表此預報時間之誤差最小的系集排名成員數。圖中虛線標示成員數為 10 與標準化誤差為 1 時。

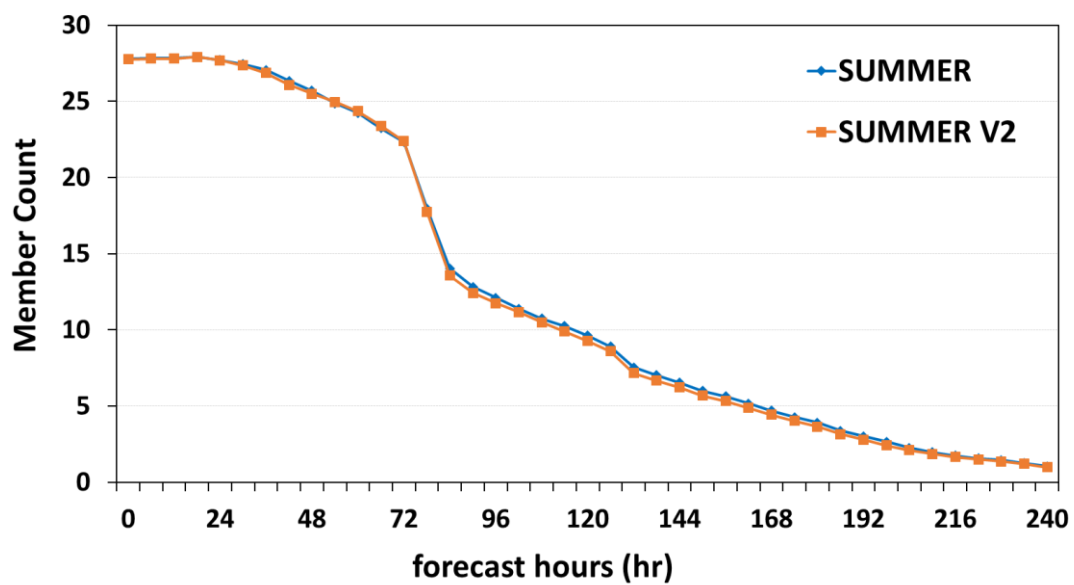
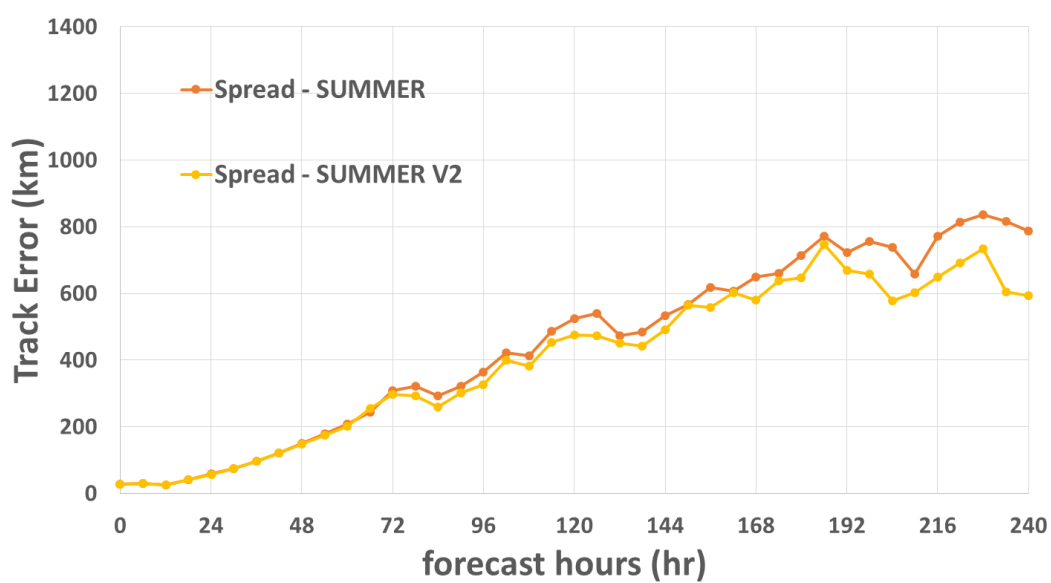


圖 36 針對 2016 年西北太平洋颱風個案，SUMMER（藍）與應用 3-2 式之方法（橘）於各預報時間使用之成員數量。

(a)



(b)

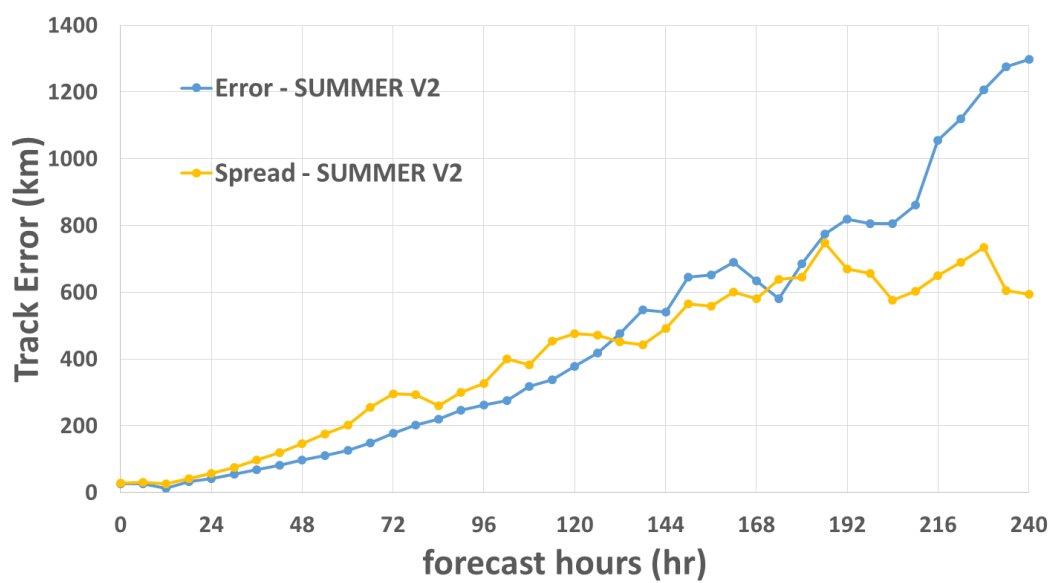
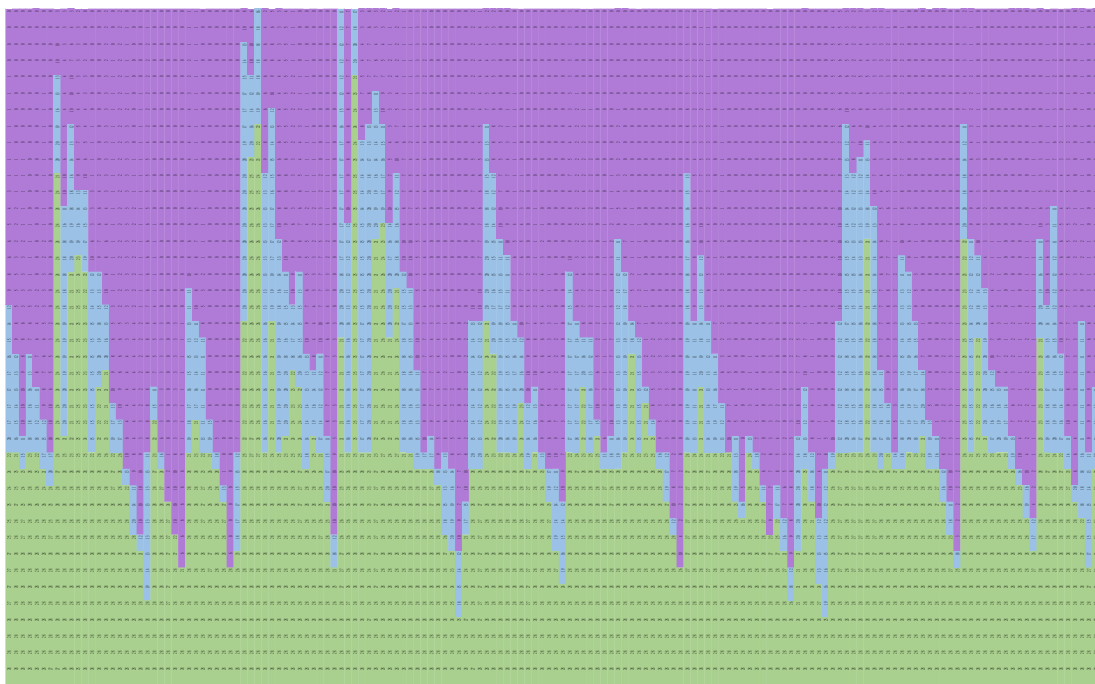


圖 37 統計 2016 年西北太平洋颱風個案，(a) SUMMER 與應用 3-2 式方法之系集離散度；(b) 應用 3-2 式方法之路徑誤差與系集離散度。

(a)

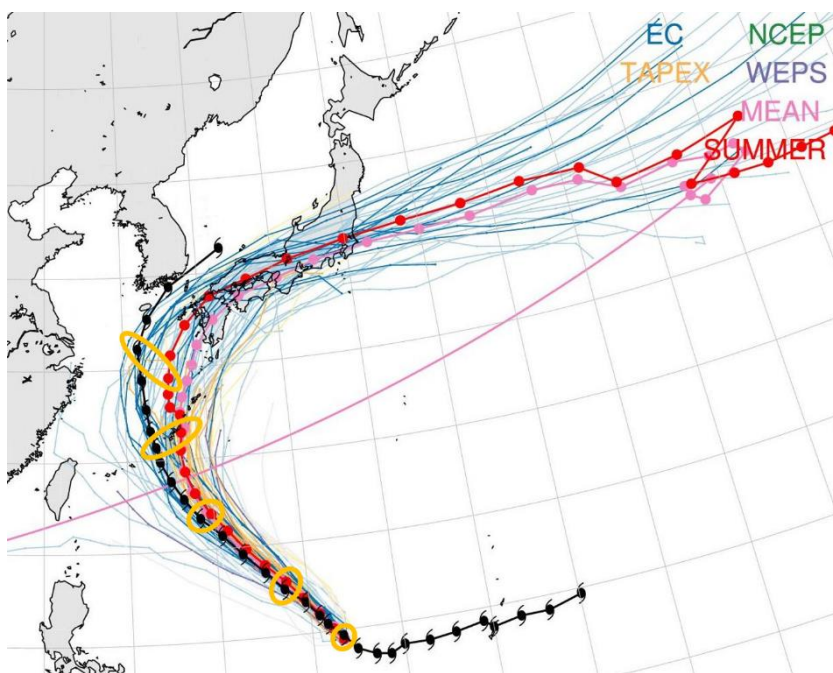


(b)



圖 38 2016 年西北太平洋颱風所有個案，(a) SUMMER 與(b)應用 3-2 式之方法於各預報時間使用之成員數量。橫軸、縱軸分別為各預報初始時刻、預報時間，由紫、藍、綠、黃、橘、紅分別代表成員數 0-10、11-20、21-40、41-60、61-80、81 以上。

(a)



(b)

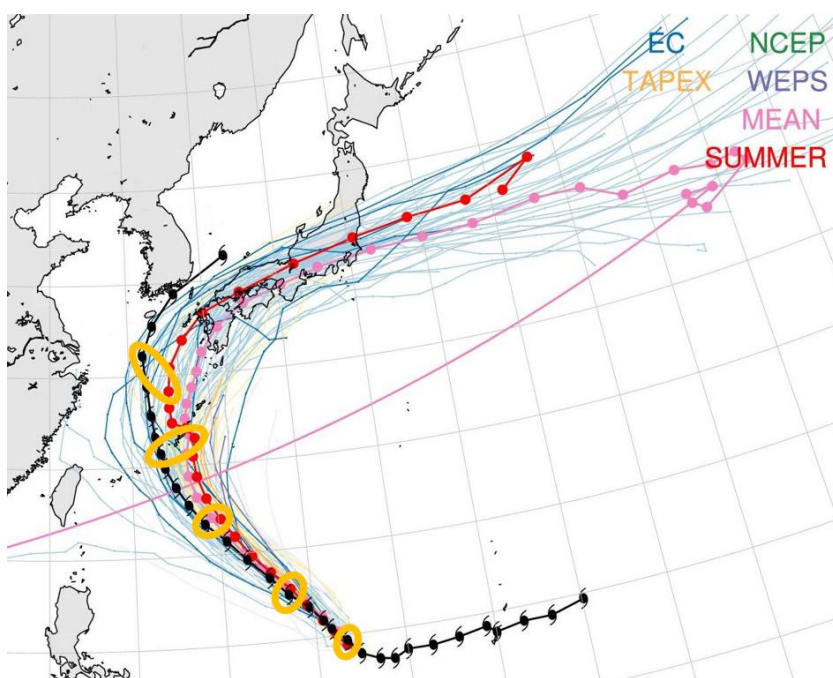
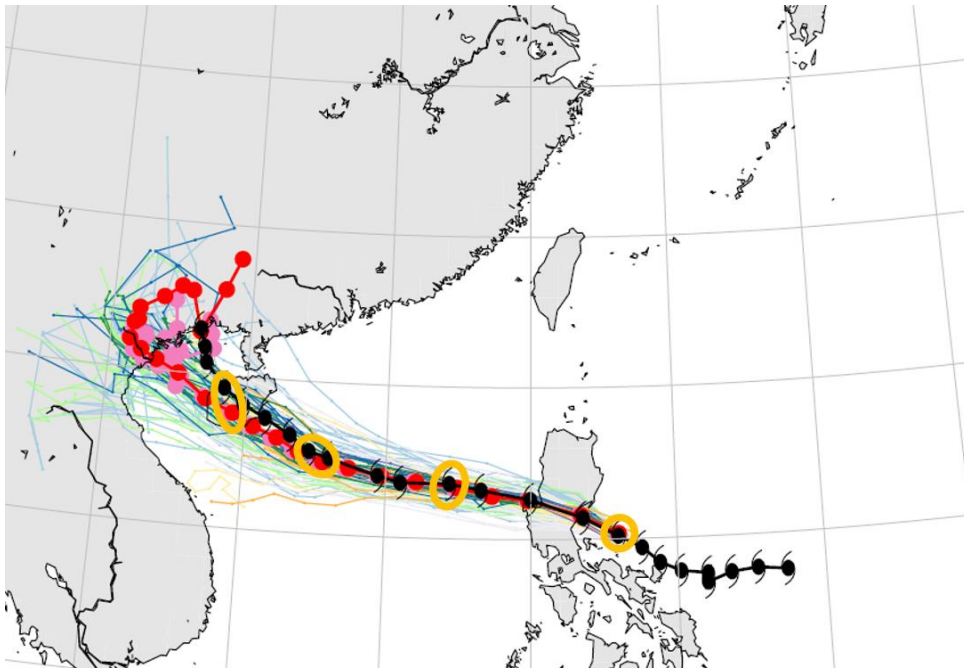


圖 39 2016 年 Chaba 颱風初始時間 09/30 00Z 之(a) SUMMER 與(b)應用 3-2 式方法之各系集成員、平均及優化路徑。黑、粉紅、紅色線分別代表 best track、系集平均、SUMMER 路徑；藍、綠、紫、黃色線分別代表 ECMWF、NCEP、WEPS、TAPEX 成員路徑，粗線代表被選取之成員。黃色圈代表預報時間為 0、24、48、72、96 小時。

(a)



(b)

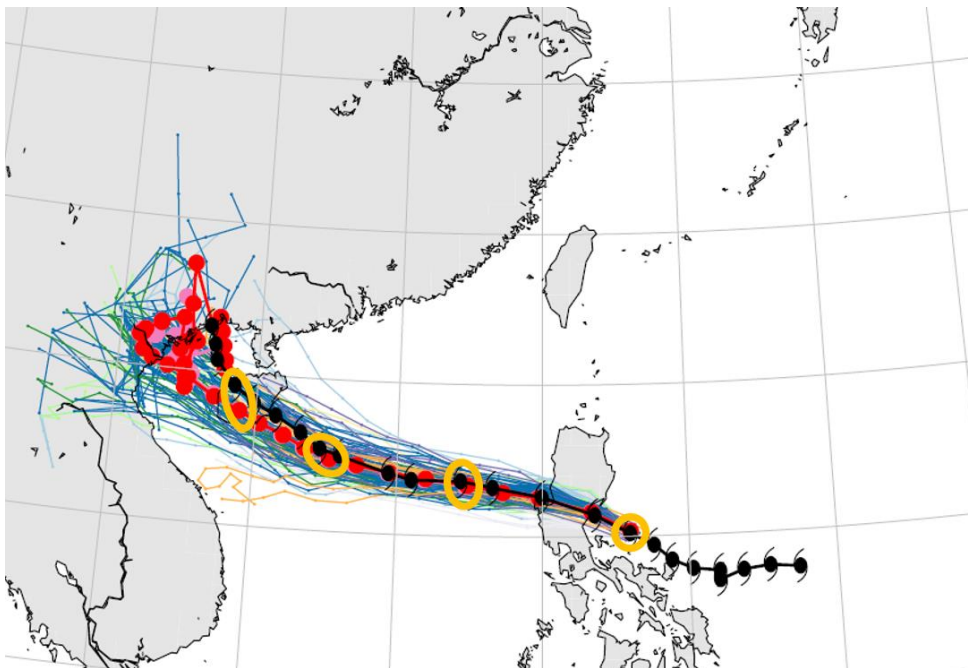


圖 40 同圖 39 但為 2016 年 Sarika 颱風初始時間 10/15 12Z。黃色圈代表預報時間為 0、24、48、72 小時。

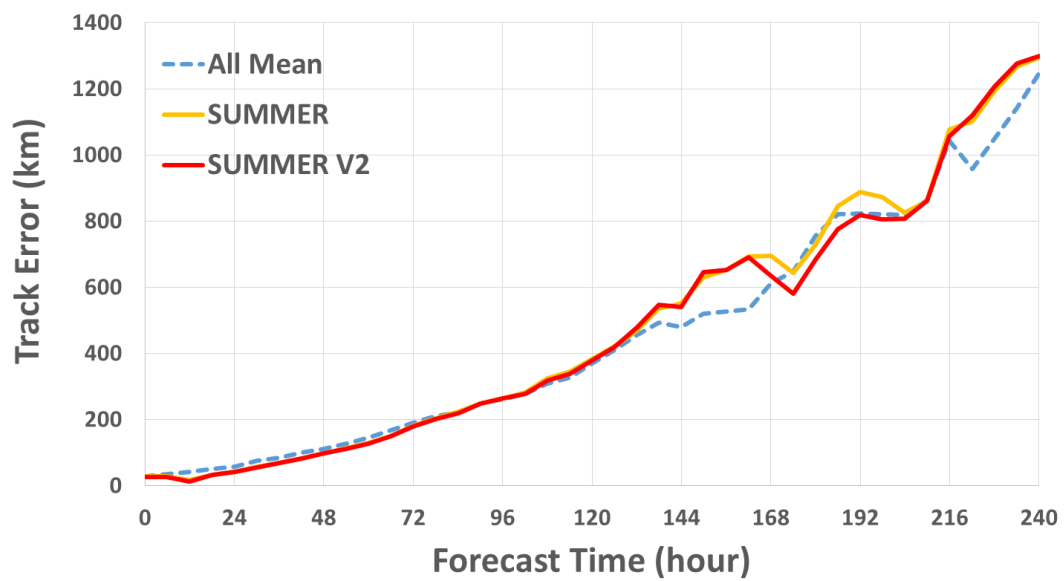


圖 41 統計 2016 年西北太平洋颱風個案，全球及區域系集平均、SUMMER 及應用 3-2 式方法之路徑預報誤差。

(a)

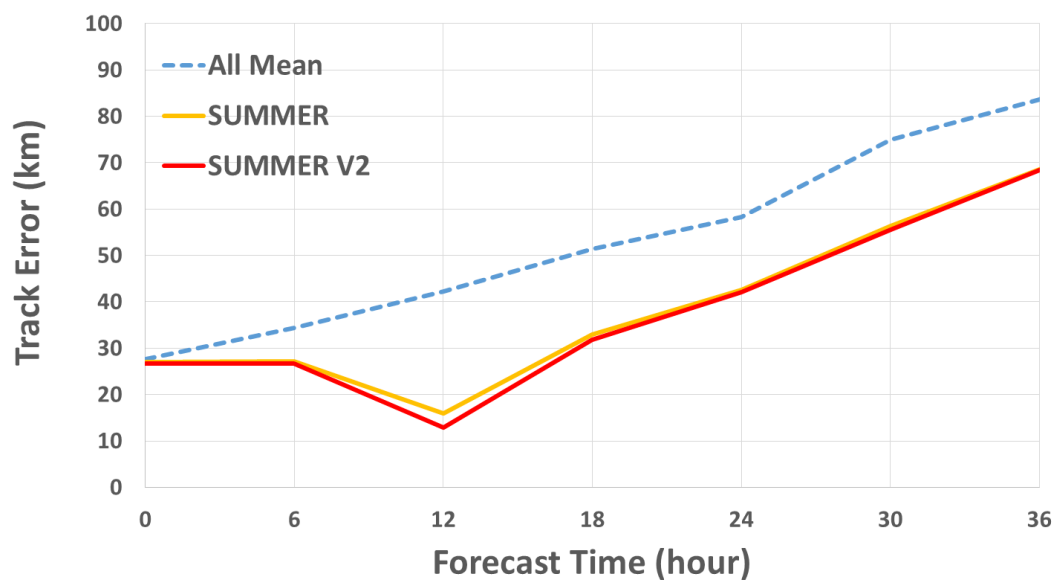
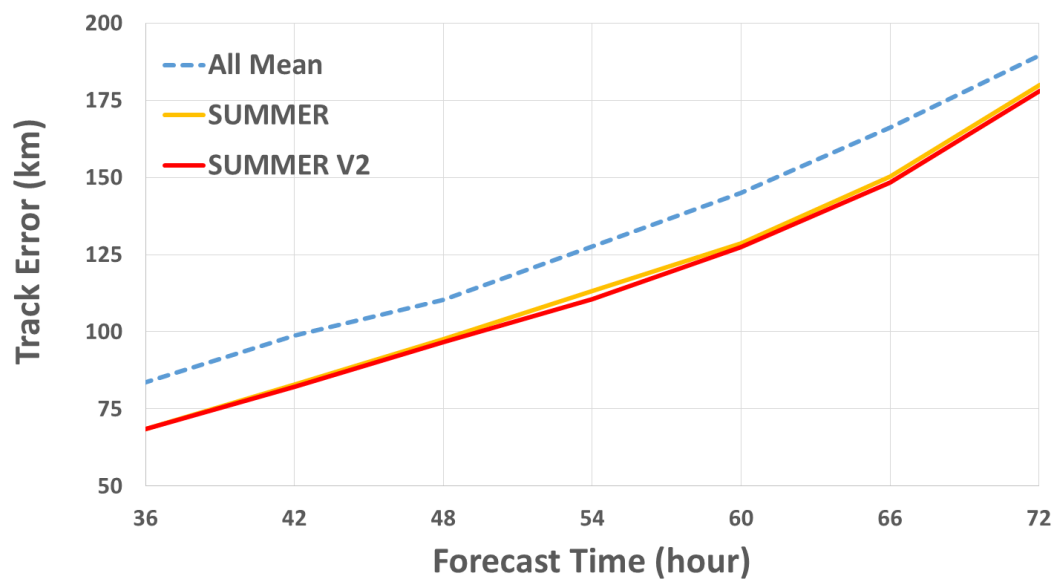


圖 42 同圖 41，但為預報時間(a) 0-36 小時、(b) 36-72 小時、(c) 72-120 小時。

(b)



(c)

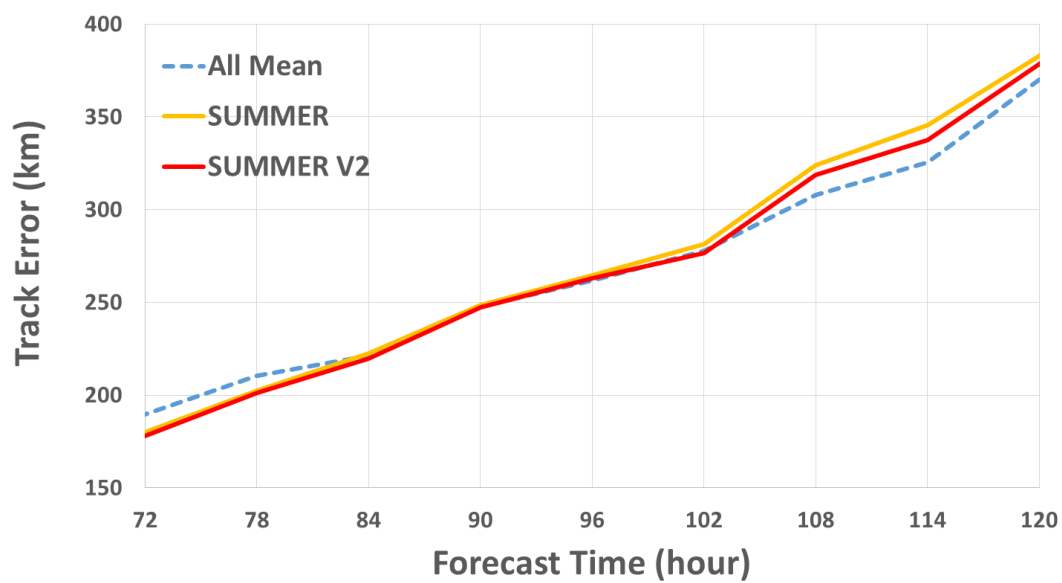
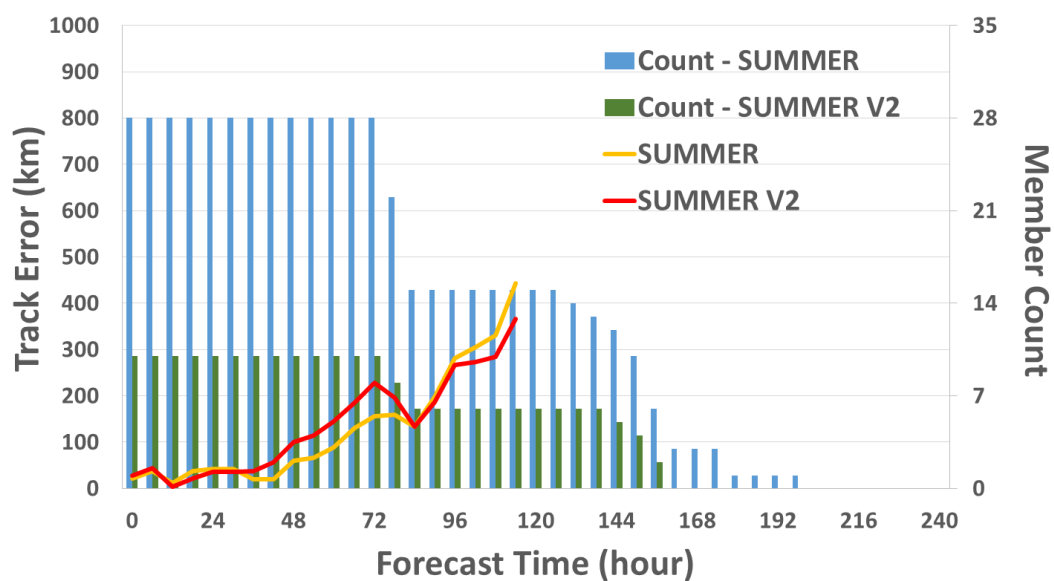


圖 42 同圖 41，但為預報時間(a) 0-36 小時、(b) 36-72 小時、(c) 72-120 小時。

(a)



(b)

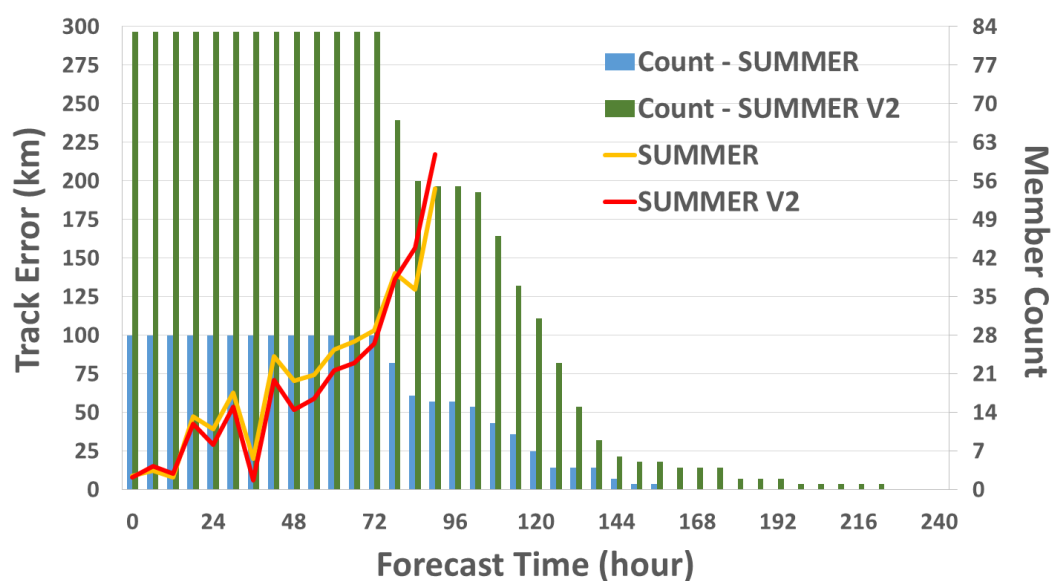


圖 43 2016 年(a) Chaba 颱風初始時間 09/30 00Z、(b) Sarika 颱風初始時間 10/15 12Z 於各預報時間之使用成員數與路徑誤差。藍、綠色長條分別代表 SUMMER 及應用 3-2 式方法之使用成員數；黃、紅色線分別代表 SUMMER 及應用 3-2 式方法之路徑預報誤差。

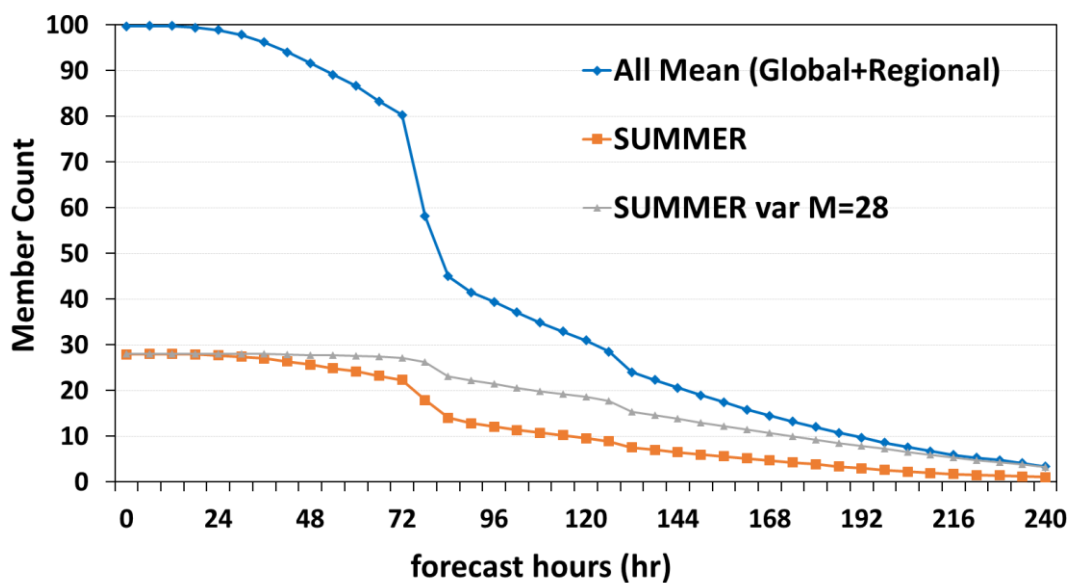


圖 44 針對 2016 年西北太平洋颱風個案，系集平均（藍）、SUMMER（橘）及補足法（灰）於各預報時間使用之成員數量。

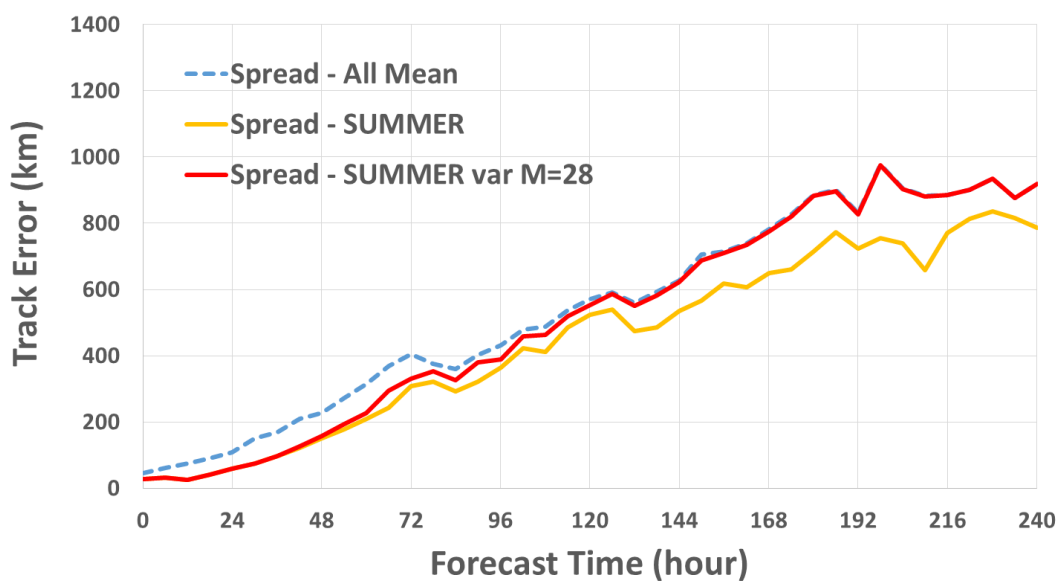


圖 45 統計 2016 年西北太平洋颱風個案，全球及區域系集平均、SUMMER 及補足法之系集離散度。

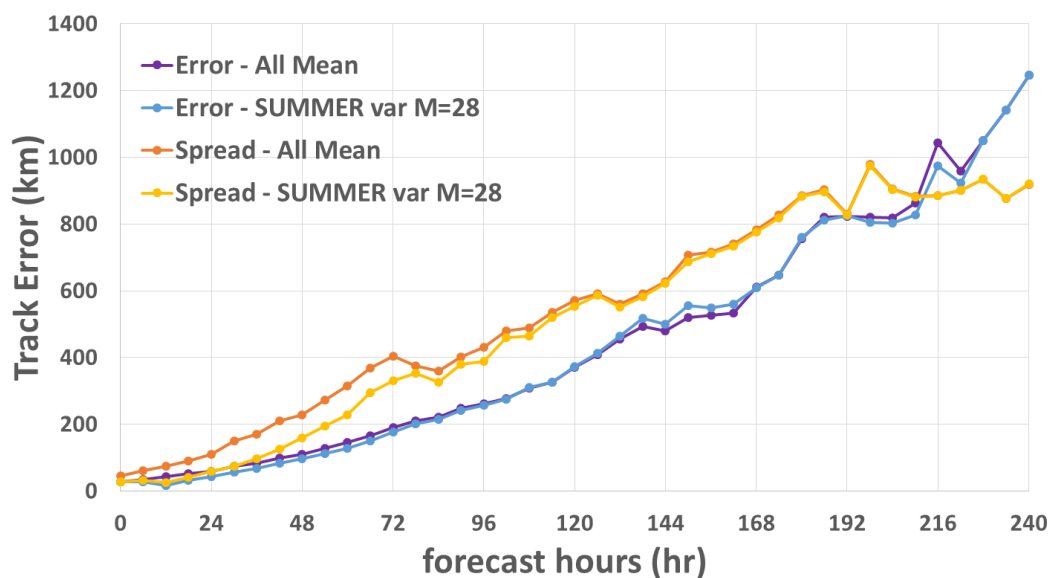


圖 46 統計 2016 年西北太平洋颱風個案，全球及區域系集平均與補足法之路徑預報誤差與系集離散度。藍色系代表路徑誤差，黃色系代表離散度；淺色系代表系集平均，深色系代表補足法。

(a)

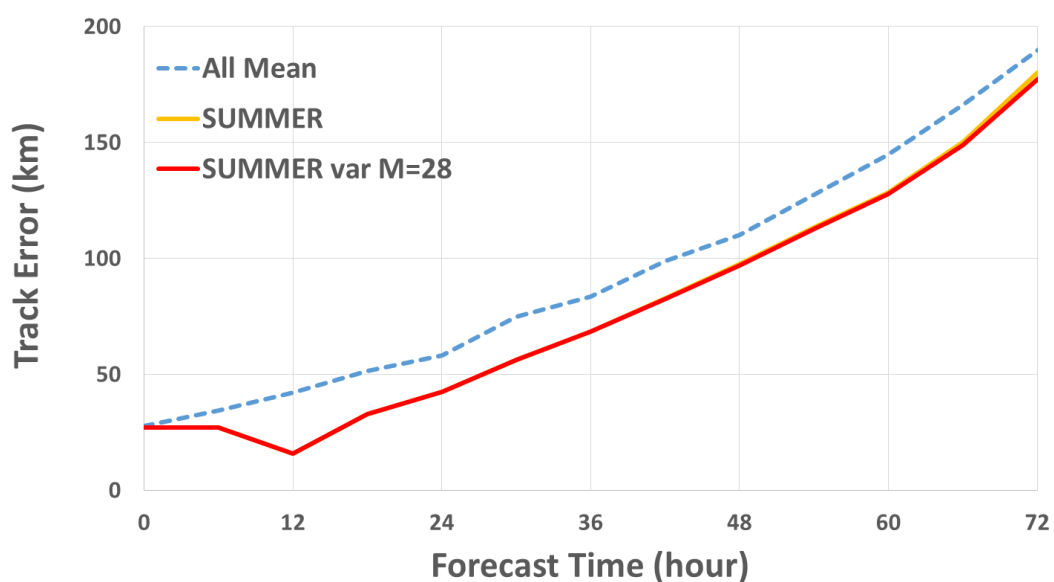
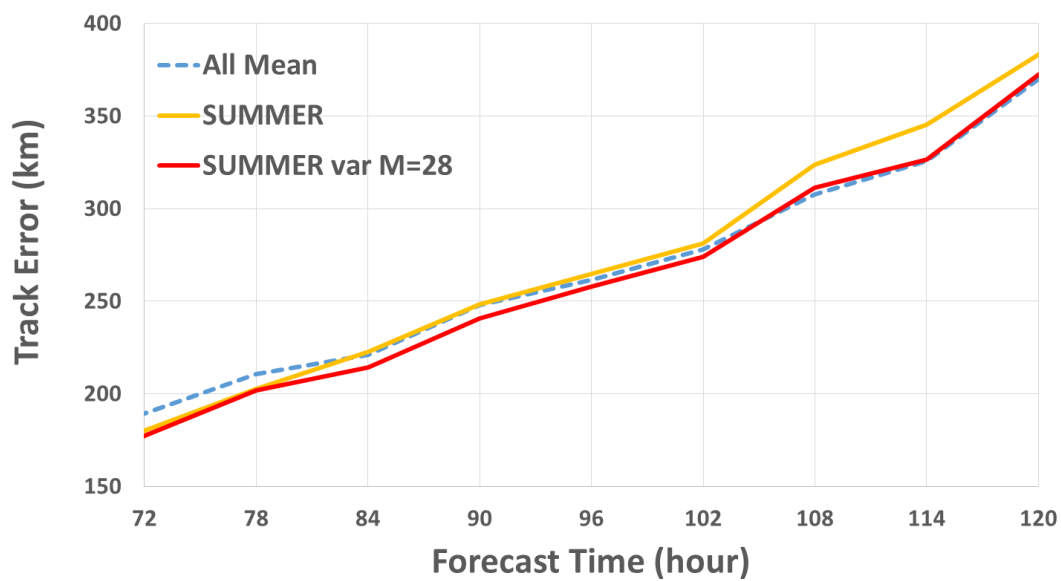


圖 47 統計 2016 年西北太平洋颱風個案，全球及區域系集平均、SUMMER 及補足法之 (a) 0-72 小時、(b) 72-120 小時、(c) 120-240 小時路徑預報誤差。

(b)



(c)

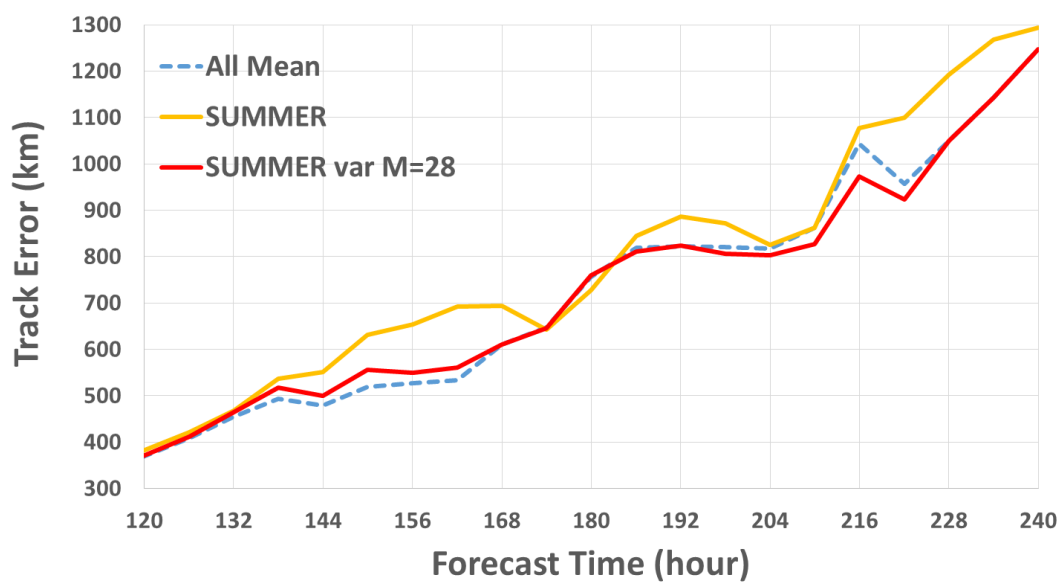


圖 47 統計 2016 年西北太平洋颱風個案，全球及區域系集平均、SUMMER 及補足法之 (a) 0-72 小時、(b) 72-120 小時、(c) 120-240 小時路徑預報誤差。

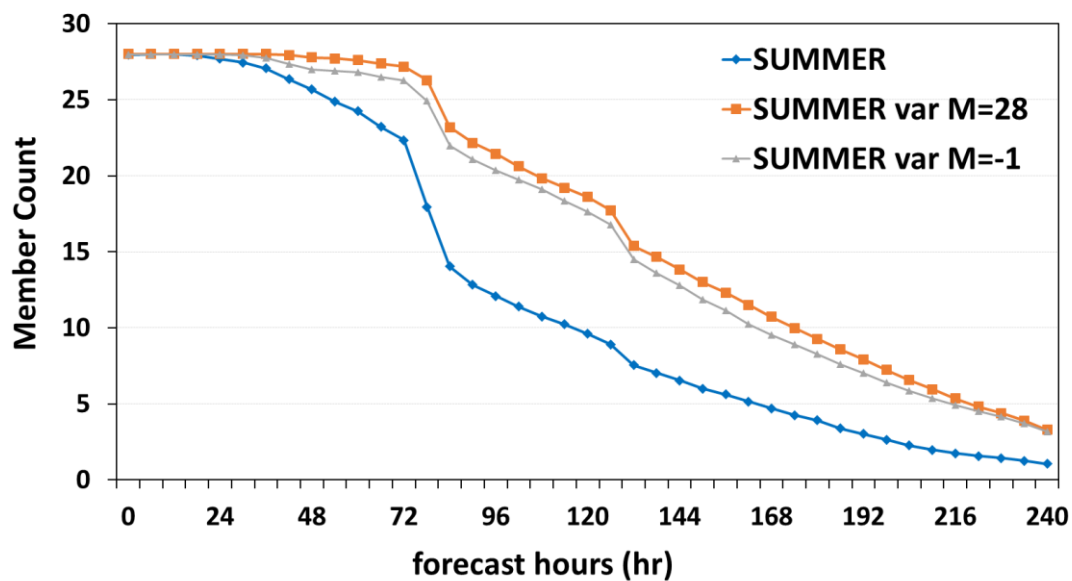


圖 48 針對 2016 年西北太平洋颱風個案，SUMMER（藍）、補足法（橘）以及 3-2 補足法（灰）於各預報時間使用之成員數量。

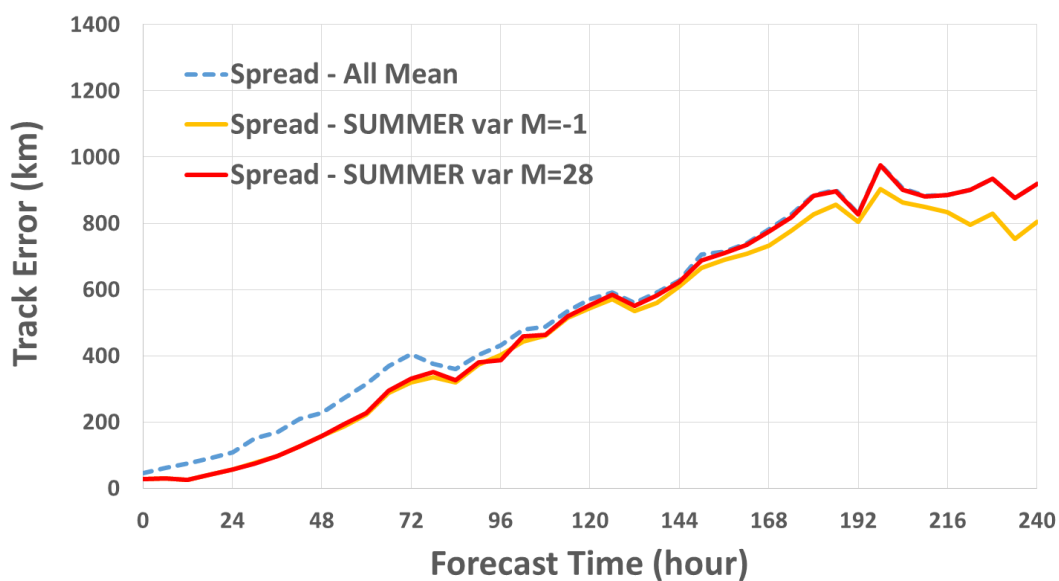


圖 49 統計 2016 年西北太平洋颱風個案，全球及區域系集平均、補足法及 3-2 補足法之系集離散度。

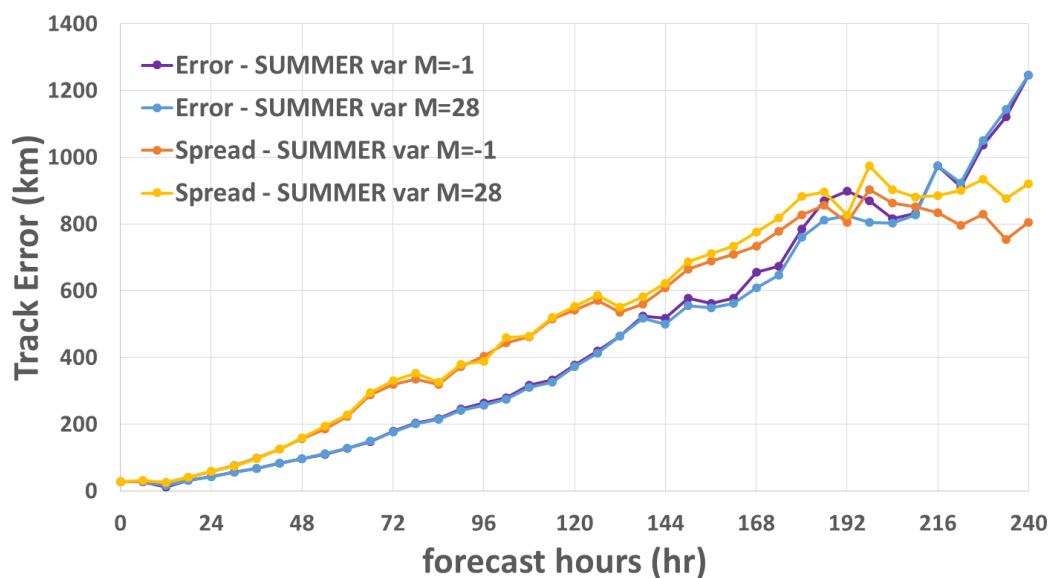


圖 50 統計 2016 年西北太平洋颱風個案，補足法與 3-2 補足法之路徑預報誤差與系集離散度。藍色系代表路徑誤差，黃色系代表離散度；淺色系代表補足法，深色系代表 3-2 補足法。

(a)

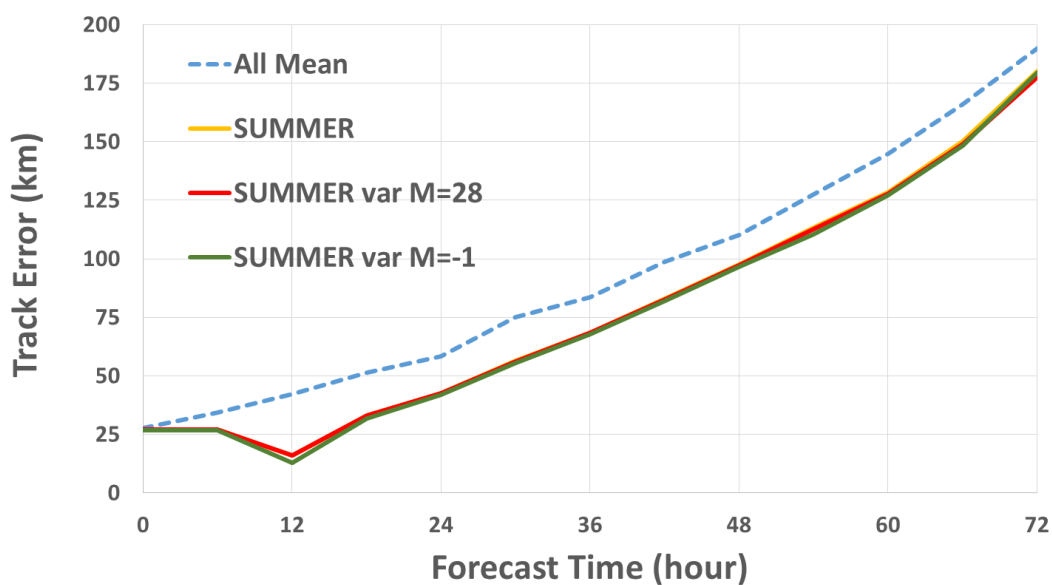
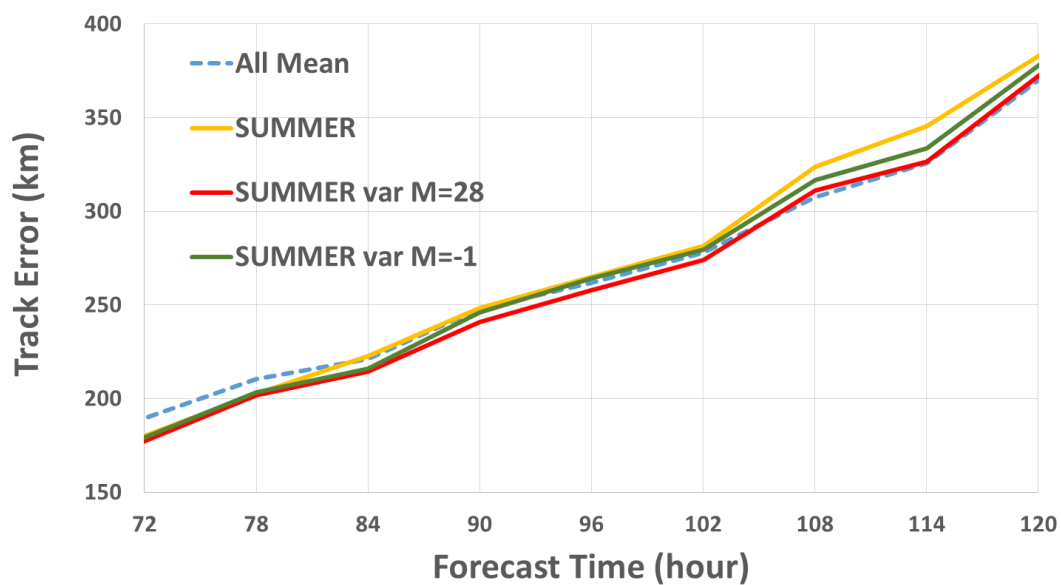


圖 51 統計 2016 年西北太平洋颱風個案，全球及區域系集平均、SUMMER、補足法以及 3-2 補足法之 (a) 0-72 小時、(b) 72-120 小時、(c) 120-240 小時路徑預報誤差。

(b)



(c)

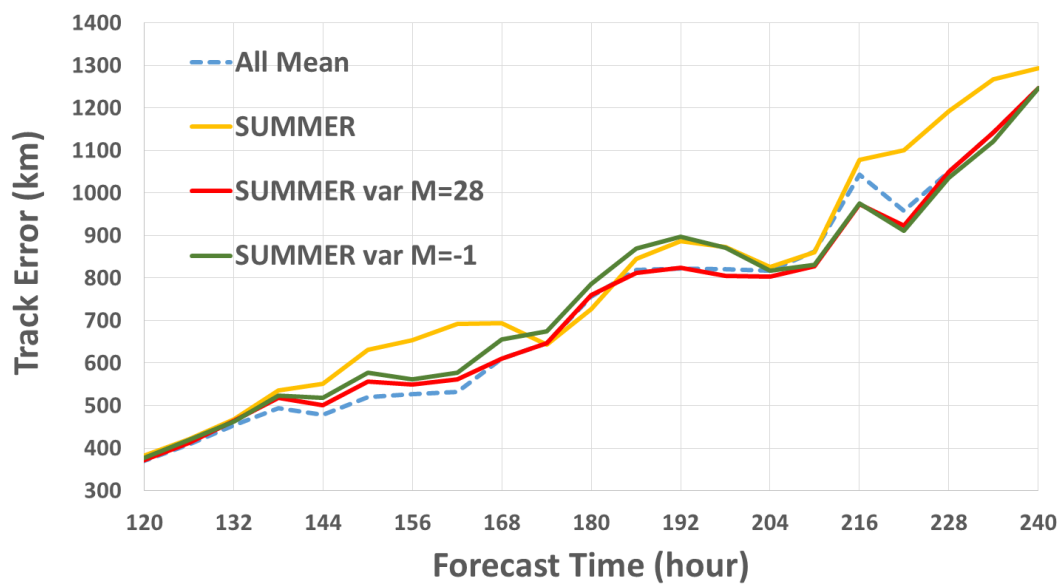


圖 51 統計 2016 年西北太平洋颱風個案，全球及區域系集平均、SUMMER、補足法以及 3-2 補足法之 (a) 0-72 小時、(b) 72-120 小時、(c) 120-240 小時路徑預報誤差。

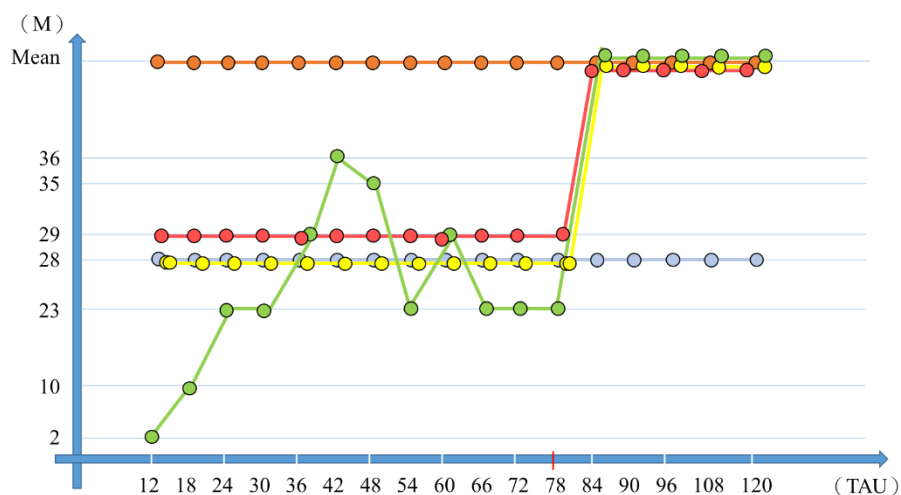


圖 52 本研究中優化 SUMMER 颱風路徑預報之實驗成員數在不同預報時間之變化（詳情見表 2）。圖中橫軸為預報時間 12 至 120 小時，縱軸為成員數(M)。橘色線表示 All mean，淺藍色為 SUMMER，黃色為 SUMMER_28，綠色為 SUMMER_min，紅色為 SUMMER_29。

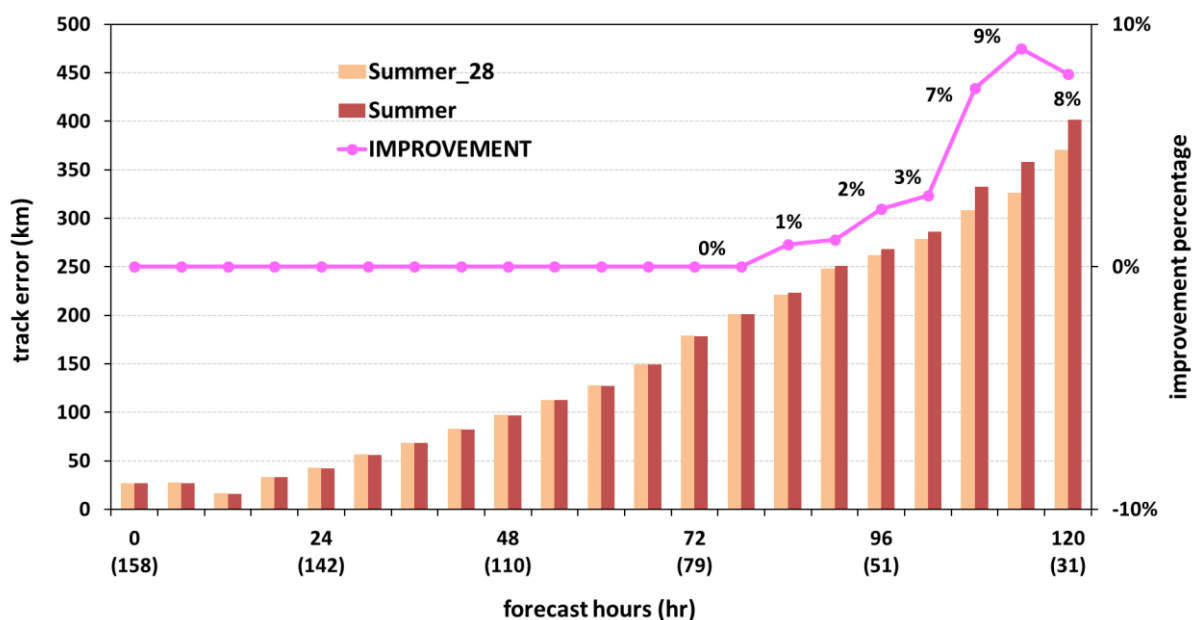


圖 53 同圖 19，但為 SUMMER_28 與 SUMMER 實驗路徑預報校驗結果比較。

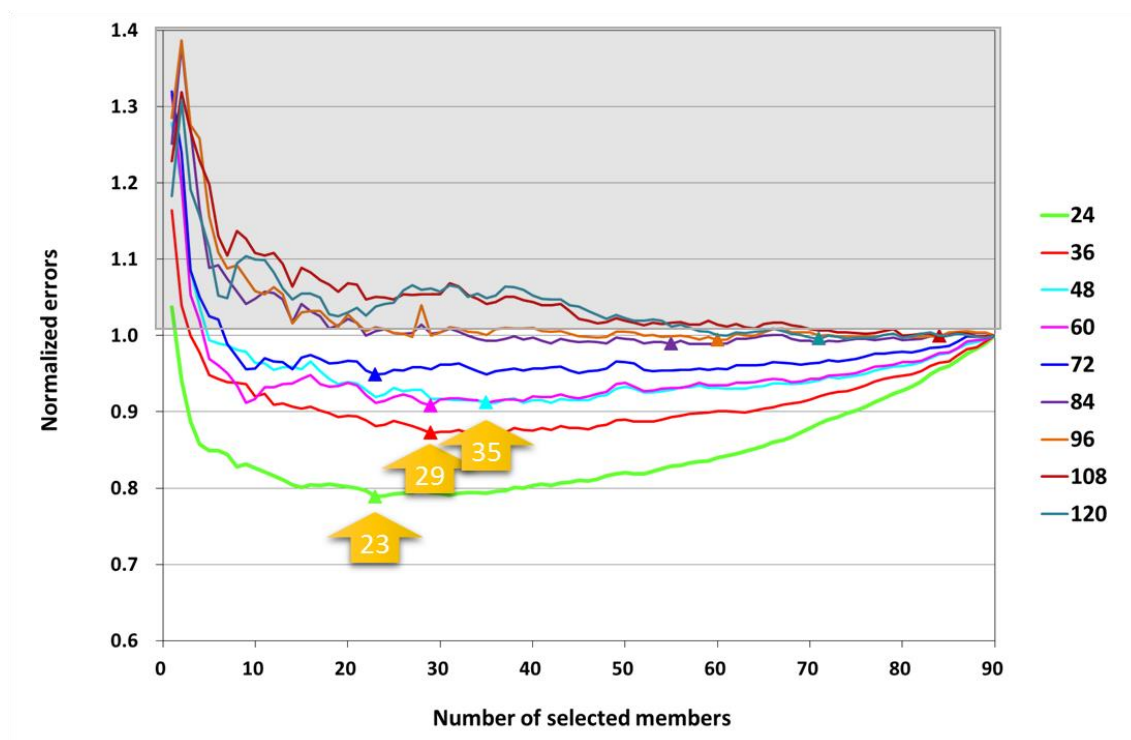


圖 54 2016 年西北太平洋颱風個案，以 ECMWF、NCEP、TAPEX 和 WEPS 所有系集成員計算其 12 小時路徑預報誤差與選取成員數的關係。圖中不同顏色曲線表示不同預報時間選取某成員數的路徑誤差並以全系集成員平均之路徑誤差標準化結果，三角形對應的橫軸座標則表示該預報時間出現路徑誤差最小時選取的成員數。

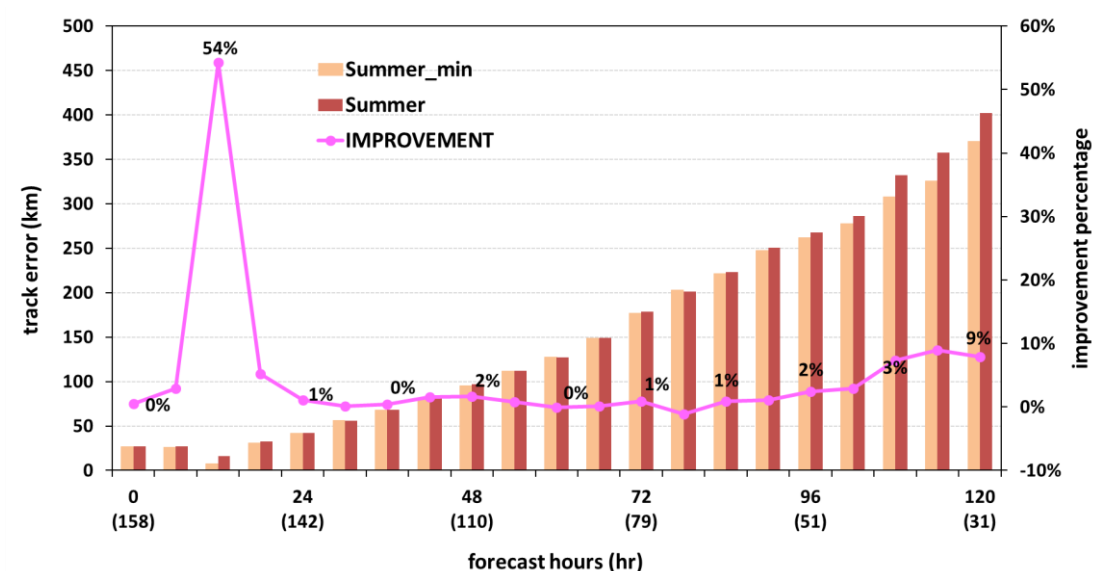


圖 55 同圖 19，但為 SUMMER_min 與 SUMMER 實驗路徑預報校驗結果比較。

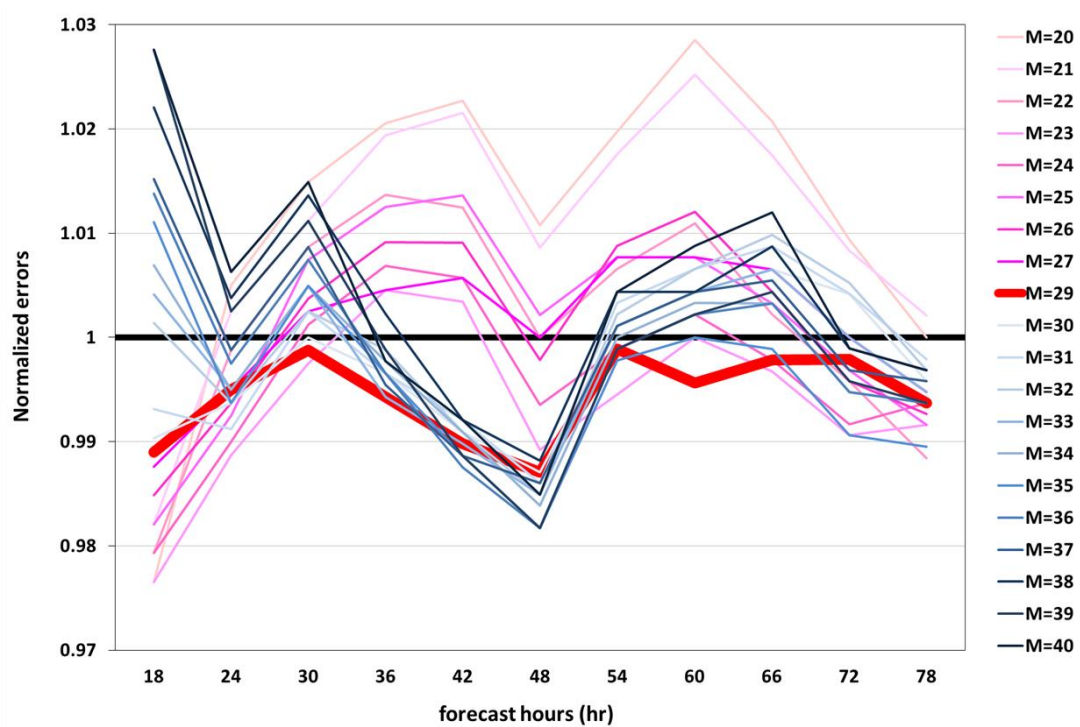


圖 56 使用 SUMMER 技術在不同成員數與不同預報時間對 SUMMER(M=28)實驗之路徑誤差標準化分析。

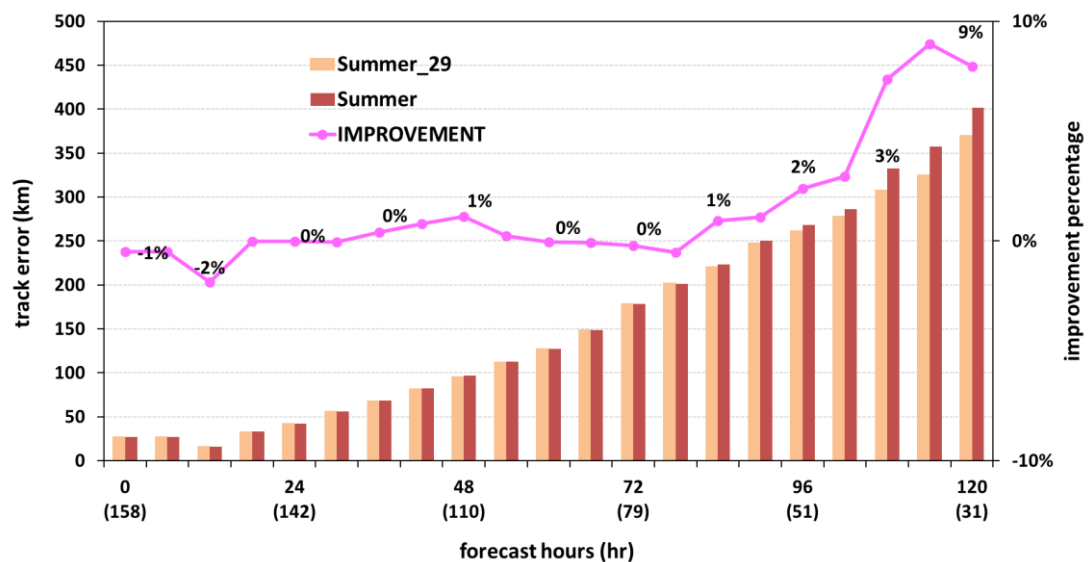


圖 57 同圖 19，但為 SUMMER_29 與 SUMMER 實驗路徑預報校驗結果比較。

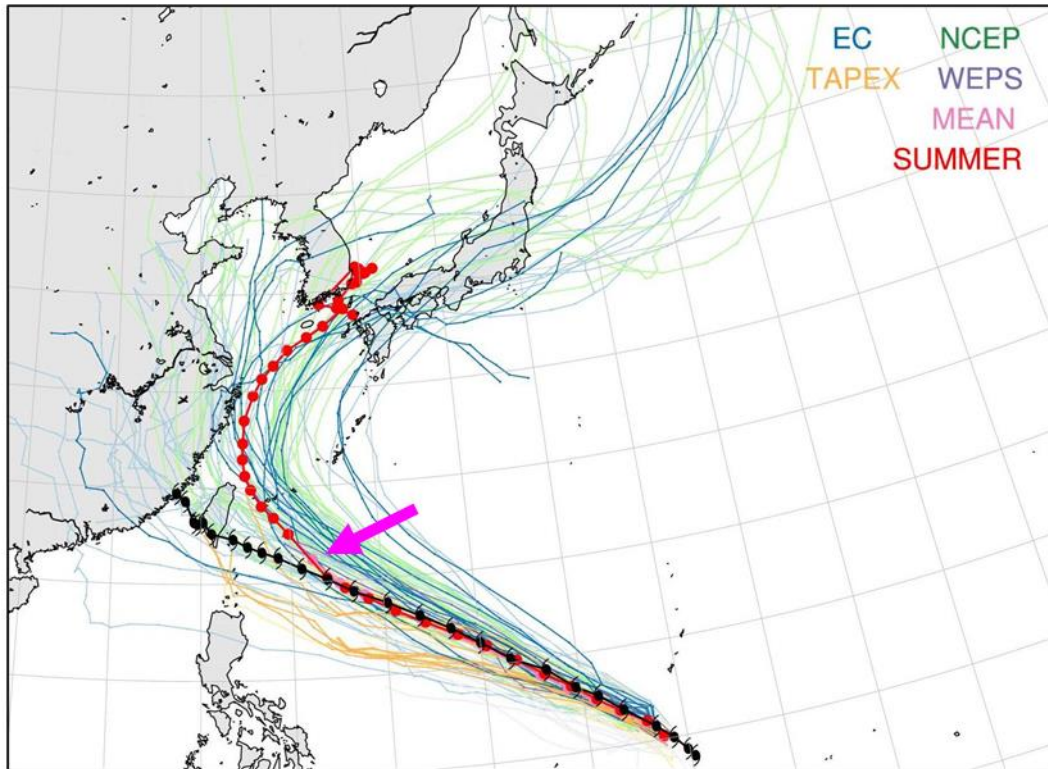


圖 58 各系集成員之颱風路徑分佈，黑色線為 Best track，紅色線為 SUMMER 預報結果，紫色箭號標示的是預報時間 78 小時的路徑位置。圖為 2016 年尼伯特颱風。

2016MERANTI : 2016091200 (m)

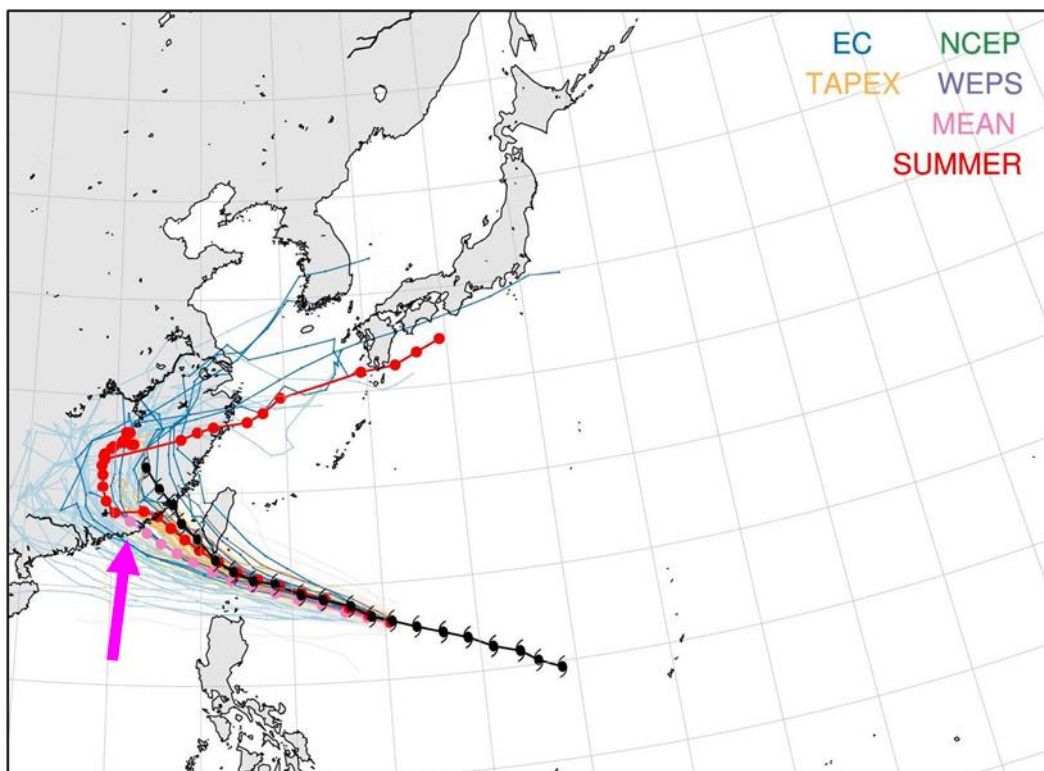


圖 59 同圖 58，但為 2016 年莫蘭蒂颱風。

第四章、颱風強度系集預報應用技術發展

4.1 2014-2016 年各國系集模式颱風強度之系統性分析

4.1.1 各國系集預報與颱風強度資訊

本年度計畫使用的系集模式與供強度校驗的颱風強度資料與上半年度計畫相同，系集模式包括全球模式 ECMWF、NCEP 與國內區域模式 WEPS 和 TAPEX，並以氣象局 working track 資料做為校驗基準，模式與校驗資料特性如表 3、表 4 所示。

各國系集模式之颱風路徑資訊皆包含中心氣壓資料，其中區域模式的中心氣壓值取自第二層網域（網格間距 15 公里），若颱風未進入第二層網域則改取第一層網域（網格間距 45 公里）之氣壓值。而在最大風速資料部分，各國系集模式特性差異較大，唯 ECMWF 和 NCEP 的颱風路徑資料包含颱風的最大風速值（ECMWF 單位為 m/s，NCEP 為 kt），WEPS 和 TAPEX 則未有最大風速資料。因此本研究透過颱風強度 CI 數、中心最低氣壓與最大風速（10 分鐘平均）對照表（表 5，木場等，1990），先以四次方迴歸取得一颱風中心氣壓與中心最大風速之相關式（圖 60，(4-1) 式），(4-1) 式中 x 可視為颱風中心氣壓值， y 則為最大風速。因此，研究中區域模式的最大風速資料皆由(4-1) 式而得：

$$y = -8E - 07x^4 + 0.0029x^3 - 4.0104x^2 + 2495.9x - 582121 \quad (4-1)$$

為了校驗區域模式使用 (4-1) 式而得之最大風速值與全球模式颱風路徑資料的最大風速值是否會有系統性的差異，圖 61 比較四個系集模式之最低氣壓與最大風速之散佈圖。由圖可知區域模式中心氣壓與最大風速之關係，與全球模式結果類似，即區域模式（由(4-1) 式迴歸而得）與全球模式（取自颱風路徑資料）之最大風速結果是可以互相比較的，故本研究使用的最大風速值，區域模式為由(4-1) 式及中心氣壓推估之值，全球模式則逕取自颱風路徑資料。

4.1.2 系集模式之颱風強度校驗分析

本章節除了比較各國系集模式之颱風強度預報特性外，同時欲探討分析強度誤差的不同方法。由於先前的路徑誤差結果均為正值，故討論時取絕對值或平均並不會明顯改變誤差的特性，但風速的誤差（研究中定義為模式的風速值減掉觀測的風速值）有正值亦有負值，在平均的過程中會有正負抵銷而使成員的極值平滑化，因此在討論時必須多加留意。圖 62(a)為不同系集模式於不同個案不同預報時間(τ)時各成員之最大風速誤差，在不同預報時間取個案的系集平均誤差即可得圖 62(b)。圖中四個系集模式的風速誤差大多為負值，顯示四個模式普遍低估颱風強度，此外，圖 62(b)系集平均誤差亦使各成員強度的極值平滑化，垂直方向分佈較圖 62(a)更窄（圖 63(a)、圖 63(b)中最低氣壓結果亦相同）。

比較四個系集模式對不同中心最大風速觀測值之預報誤差（圖 64(a)），這樣的圖能分析模式對於不同大小風速值的預報能力，若誤差大於 0 則表示模式高估颱風強度，誤差小於 0 則表示模式低估颱風強度，理想的系集模式成員必須同時有正、負預報誤差，表示真值被包含在系集模式的散佈中。ECMWF 的風速誤差常有最大的正值，顯示 ECMWF 系集成員對於不同強度之颱風皆有機會預報。此外，四個模式普遍高估較弱的颱風強度，但普遍低估較強的颱風強度。但是對於弱颱風而言，模式成員的風速散佈仍可以將觀測值包含在內，表示系集成員有能力預報到強度較弱的颱風；另一方面模式對於強颱風則不是如此：當觀測颱風最大風速值大於 55m/s，或最低氣壓小於 920 hPa（圖 64(b)）時，僅剩 ECMWF 和 TAPEX 成員的風速散佈有機會包含觀測風速值，即目前系集系統對於 55m/s 強颱風之模擬仍有改善空間。

為了更嚴謹地比較各國系集模式對於風速預報之系統性差異，研究取四個模式經均質化個案（均質化方法見第 4.2.1 節）之最大風速誤差（圖 65）。圖 65(a)為四個模式分別在不同預報時間(τ)時風速誤差的平均，在預報時間 72 小時內四個模式的風速誤差平均皆為負值（約在 0 到 -10m/s 以內），意即模式預報較觀測偏弱，其中 12 小時後區域模式之誤差平均皆較全球模式小；若將風速誤差先取絕對值再平均（圖 65(b)），則亦可看到 12 小時後區域模式之誤差絕對值又小於全球模式，此結果也顯示了區域模式對颱風強度的預報能力優於全球模式的特性（更多討論將在 4.2 節中）。進一步分析最低氣壓之預報，圖 66(a)中四個模式的氣壓誤差均為正值（約在 10 到 25 hPa 之間），亦顯示模式普遍低估颱風強度，且在 30 小時後區域模式之氣壓誤差平均較全球模式小，圖 66(b)中亦在 30 小時後區域模式皆比全球模式預報更佳。

從圖 65、圖 66 中，不難發現颱風強度的誤差並沒有如同路徑誤差一樣隨著預報時間增加，一部份可能是因為颱風在整個生命期中強度變化通常包含增強和減弱兩個過程，強度本身並不會隨著時間增加，另一部份則與分析方法有關。為了解釋這點，在此以圖 67(a)-圖 67(c)為例（梅姬颱風(2016)，事實上每一個颱風應該都適用這個情況）。為了方便說明，從觀測的最低氣壓值時序變化，研究先主觀地定義颱風的生命期，分別為 2016 年 9 月 24 日 00Z（增強期前）、2016 年 9 月 25 日 00Z（增強期）、2016 年 9 月 27 日 00Z（最強期）、2016 年 9 月 27 日 12Z（減弱期）及 2016 年 9 月 28 日 00Z（消散期）。圖 67(a)中初始場為 2016 年 9 月 23 日 12Z，此時的颱風在增強期前，可以看到模式各成員定量上雖然無法準確預報颱風中心氣壓極值，但是定性上大部分的成員在預報時間 12、36、84、96 及 108 小時可以預報到颱風的增強期前、增強期、最強期、減弱期及消散期五個過程。又圖 67(b)中初始場為 2016 年 9 月 26 日 00Z，此時模式在 24、36、48 小時預報的颱風分別是在最強期末期、減弱期與消散期間。又由圖 67(c)中包含初始場在 2016 年 9 月 23 日 00Z 到 2016 年 9 月 28 日 06Z 間的所有預報，可以看到特別是在每一次預報初期模式會需要一段時間 spin up 使動力與熱力場達到平衡（圖中初始場在 2016 年 9 月 27 日 00Z 到 2016 年 9 月 28 日 00Z 之間特別明顯），使得模式中颱風的強度會有一段不連續變化的時期。綜合以上原因，對於颱風強度的預報特性，若僅依照預報時間分析，等同將颱風不同生命期的資訊及模式初期調整中的訊息混合在一起。

雖然針對模式在颱風不同生命期之預報能力更為客觀，不過不同的颱風生命期或長或短，加上有些颱風有二次增強的過程，因此不論是依特定時間或依特定強度來定義颱風的生命期，過程中勢必會加入分析者主觀的判斷，也就是說，依颱風的生命期討論模式對颱風強度的預報特性並不容易，故研究目前仍以預報時間為討論強度預報的基準。

4.2 系集颱風強度預報技術

4.2.1 方法簡介

強度預報技術發展與路徑預報技術相同，亦即使用 Dong and Zhang (2016)參考 Qi et al. (2014)所提出之 OBEST (Observation-Based Ensemble Subsetting Technique)方法。又由前一年計畫中 SUMMER(Super Multi-Model Ensemble Realignment for typhoon forecast)對於颱風路徑預報結果可知，加入區域模式的 SUMMER 技術相較於未加入區域模式的 SUMMER 技術，能夠改善 72 小時內系集模式對颱風路徑的預報能力，研究推測「區域模式更高的水平網格解析度與參數化法等模擬策略，有助於改進 SUMMER 的路徑預報技術」，這樣的特性吾人推論應該對颱風強度影響更為顯著。因此，本計畫沿用前一年計畫使用之 SUMMER（包含 ECMWF、NCEP、WEPS 和 TAPEX 四個模式）方法，但改以預報第 12 小時各成員之颱風強度（包括最大風速及最低氣壓）誤差絕對值作為排序標準，選擇特定前 M 個表現較好的成員，對後續的時間繼續預報並取得 M 個成員之平均，最後以系集平均誤差絕對值為標準進行校驗，藉此分析使用 SUMMER 方法預報颱風強度的優化情形。研究取誤差的絕對值的考量是為避免在計算 SUMMER 或全成員誤差取平均時會讓各成員誤差的正負值相抵銷，故 4.2 節中除了 4.2.4 節討論 SUMMER 的 POD 與 FAR 時外，其餘的討論皆將誤差定義為誤差的絕對值。

本章節校驗內容包含 2014 至 2016 年之西北太平洋颱風個案，模式資料取自 ECMWF、NCEP、WEPS 和 TAPEX 四個系集模式，並以氣象局 working track 作為強度校驗真值。為使 SUMMER 能嚴謹地比較挑選四個模式中較好的成員，本計畫皆使用經均質化（相同初始時間、預報時間(tau)及颱風名稱）資料。圖 68 為各模式在 2014-2016 年間的個案數，以及在均質化後得到的個案數目比較。均質化後可校驗的個案數共有 337 個，其中 ECMWF 因為每天僅有 2 次預報（不同於其他模式每天有 4 次預報），故在均質化後保留的個案數比例較其他模式高，特別是 2016 年有 53.2%個案得以保留，其餘的模式則約有 20%的資料被保留使用。

圖 69 為「四模式成員（取均質化後個案）以 12 小時最大風速預報誤差排名選取不同的成員數之平均最大風速誤差」經「四模式系集平均之最大風速預報誤差」標準化之結果。與路徑誤差之標準化圖不同，最大風速誤差在 SUMMER 挑選成員數為 1 到 90 時幾乎比系集平均小，最小誤差出現在成員數為 1 到 10 之間。最低氣壓（圖 70）亦和最大風速結果類似，在 SUMMER 挑選成員之後，72 小時內不論成員數在 1 到 90

之間皆較系集平均更佳，誤差最小的成員數約在 1 到 7 之間。

由圖 69、圖 70，針對 SUMMER 預報颱風強度，因為在預報的 72 小時內，最小誤差發生在成員數由 1 到 10 之間，甚或有數個時間點最小誤差發生在成員數為 1 時，故下一章節的風速與壓力校驗，研究將針對 SUMMER 成員數目 1 到 5 討論。

4.2.2 以颱風近中心最大風速定義颱風強度之分析

圖 71 為不同個案數或成員時，SUMMER 選取成員個數 1 到 5 的最大風速預報校驗。圖 71(a)-(c)各模式有相同的個案數，但分別代表不同的系集預報模式。當考慮全球模式加上區域模式成員(ECMWF+NCEP+ WEPS + TAPEX)時(圖 71(a))，預報時間 72 小時內選取 1 至 5 個成員比起系集平均皆有較小的誤差，特別在 12 小時成員數 1 有 72%的改善率為最高。此外，預報時間 12 到 30 小時間，選取成員越多時，SUMMER 最大風速預報誤差也會增加；30 小時之後，最大風速誤差和成員數的變化較無關係。

另外，為了討論全球模式與區域模式預報颱風強度（以最大風速定義）之能力，研究將全球模式（圖 71(b)）與區域模式的成員（圖 71(c)）分開討論：僅考慮全球模式成員時，最大風速改進比例最高僅有 24%，72 小時後改善率小於 0；若僅考慮區域模式成員，則其改善率最高有 58%，且 72 小時內每次校驗區域模式的改善率皆高於全球模式。研究亦校驗了四個系集模式未經均質化的個案（圖 71(d)），則改善率至 144 小時仍為正值，表示以 SUMMER 技術預報颱風強度時，相較系集平均而言更接近觀測。

由於改善率是建基於不同模式組合的系集平均，比較時單用改善率不夠客觀。因此，研究進一步比較 SUMMER 考慮不同的模式成員時（包含 4 個模式、2 個全球模式及 2 個區域模式），不同成員個數與預報時間的強度誤差關係。圖 73 為取自圖 71 中，「僅考慮全球模式成員」、「僅考慮區域模式成員」及「同時考慮全球與區域模式成員」之風速誤差比較。不論成員數為 1-5 或系集平均（圖 73(a)-(f)），預報時間 12-72 小時「僅考慮區域模式成員」之風速誤差都會是最小的，其次為「同時考慮區域及全球模式成員」，最後為「僅考慮全球模式成員」。不過「僅考慮區域模式成員」與「同時考慮全球及區域模式成員」兩者結果差異並不大（48 小時內皆小於 1m/s），「僅考慮全球模式成員」的風速誤差則是明顯大於前兩者。

統計「SUMMER 同時考慮全球及區域模式成員」時，每一個案挑選之前 5 名成員，各成員被挑選的總次數（圖 75，另有表 6 為最大風速與最低氣壓統計次數最高的前 10 名成員列表）。如圖 75 所示區預模式成員出現較多次數，而全球模式與區域模式成員被選入前 5 名的比例，整體而言約為 4：6（全球模式 40.2%，區域模式 59.8%）。推測應與區域模式解析度較高，且部分成員有進行渦旋植入等動作，使颱風強度之模擬更接近觀測值有關。回顧去年度計畫，預報颱風路徑時成員被選擇的比例全球模式：區域模式約為 7：3。透過上述的分析顯示，以 12 小時颱風路徑或強度預報（以最大風速定義）誤差為比較基準，路徑預報為全球模式較區域模式佳，颱風強度預報則

以區域模式更佳。

4.2.3 以颱風中心最低氣壓定義颱風強度之分析

中心氣壓的校驗結果與最大風速相似。當全球與區域模式成員皆納入考量時（圖 72(a)），不論成員數目為 1 到 5，誤差皆比系集平均小，12 小時到 72 小時之間，成員數 1 的改善率由 63%遞減至 15%，並且在 30 小時之後，不同成員數目對最低氣壓誤差的改善差異已不顯著。若是只考慮全球模式成員（圖 72(b)）或區域模式（圖 72(c)），前者的改善率由 12 小時的 21%遞減至 72 小時的 6%；後者的改善率則由 12 小時 52%遞減至 72 小時 8%。整體而言，區域模式成員相對於系集平均的改善率稍高一些。討論非均質化個案資料（圖 72(d)）亦顯示 SUMMER 在 144 小時內皆較系集平均表現更佳，其改善率以 12 小時 15%最高，並且在 48 小時之後改善率變化並不明顯，大約在 5%以下。此外，72 小時之內 SUMMER 成員數的變化對氣壓誤差的改進具有影響，在 24 小時內誤差隨成員數增加而成長，24 到 72 小時間則以成員數為 3 時誤差最大，部分預報時間甚至與系集平均誤差相近。

預報最低氣壓時，SUMMER 僅考量 2 個區域模式成員時，72 小時內對颱風強度皆有最好的預報（圖 74）。當選取最佳成員數為 5 時，全球模式成員入選比率約佔 45.3%，區域模式成員則為 54.7%，相較於前一節最大風速定義颱風強度之分析而言，全球模式入選的比例有略為增加（圖 75 及表 6）。

4.2.4 SUMMER 技術對於不同颱風強度之偵測率與誤報率分析

前面的討論皆以誤差的絕對值為變數，為了確實量化 SUMMER（以成員數為 1、3、5 為例）對不同強度颱風的預報能力，在本節的誤差分析並不取絕對值（保留正、負號），並以氣象局實務預報使用之颱風強度（依最大風速）定義，校驗當觀測颱風為輕度、中度或強烈颱風時，於不同的預報時間計算 SUMMER 與系集平均之偵測率 (Probability of Detection, POD)和誤報率(False Alarm Rate, FAR)，同時計算 SUMMER 相對於系集平均之改善率（圖 76、圖 77 及圖 78），如果 SUMMER 比起系集平均有更好的表現，期待應該能提高偵測率並且降低誤報率。

當成員數 1（圖 76），校驗門檻為輕度颱風時，SUMMER 和系集平均的偵測率皆接近 1，誤報率也接近 0，此時 SUMMER 的偵測率改進百分比呈中性但略為退步(-0.56%)，誤報率也有稍微改進(-9.5%)；當提高校驗門檻為中度颱風時，SUMMER 和系集平均的表現開始有鑑別度，在散佈圖上略分開為上下兩個區間，平均而言 SUMMER 不僅提高了偵測率(11.81%)，亦改善誤報率(-41.74%)；當校驗門檻為強烈颱風時，SUMMER 的偵測率（特別是前 12 小時，未附數值）和誤報率皆有明顯的改善（偵測率 579.58%，誤報率-47.26%），其中 66 至 72 小時，原先系集平均之 FAR 無法定義（因為命中(Hits)+錯誤預報(False Alarm)為 0），採用 SUMMER 後則能定義 FAR；此外，在預報 18 小時內，系集平均的偵測率低於 25%，但 SUMMER（成員數為 1）的

偵測率可大於 50%，以上的兩個現象可呼應 4.1.2，推論與模式本身對於強烈颱風的預報能力不足有關。

成員數為 3（圖 77）與成員數為 5 時（圖 78），不同強度的偵測率和誤報率分佈與成員數為 1 時類似，唯強烈颱風時，SUMMER 的偵測率皆在 50% 以下。由圖 71(a) 亦可說明這點，在 SUMMER 成員數為 1 時，預報時間 72 小時內的誤差最小，隨著成員數提高到 5，最大風速的誤差也逐漸增加。

整體而言，使用 SUMMER 優化系集模式對颱風最大風速的預報，較系集平均能有效提高系集模式對中度、強烈颱風的偵測率，同時亦可降低誤報率。

4.2.5 綜合討論

在前面的章節中，研究將颱風的路徑預報及強度預報特性分開討論，或以系集颱風之路徑預報校驗路徑誤差，或以系集颱風之強度預報校驗強度誤差。儘管由 4.1.節的分析可知，模式對於颱風路徑和強度預報特性有很大的不同，不過研究仍希望找到路徑與強度預報之間的關係，而不是把颱風的路徑和強度預報視為兩個獨立事件。理想上我們期望路徑預報佳的成員，其強度預報能力應當也要不錯，反之，強度預報佳的成員其路徑預報也不應有太大的誤差。也因此，下述分析目的為確認 SUMMER 僅由 12 小時路徑誤差（或強度誤差）挑選之成員，對於颱風強度（或路徑）預報的能力為何？儘管目前的討論中 SUMMER 個別對颱風路徑和強度的預報能力較系集平均皆有所改善，但是將路徑和強度交叉同時考慮的討論較少。以下將分節進行討論：4.2.5.1 為討論颱風路徑預報之強度校驗，4.2.5.2 則為颱風強度預報之路徑校驗。

4.2.5.1 應用颱風路徑 SUMMER 預報技術之強度校驗

圖 79、圖 80 為不同系集模式成員路徑誤差與颱風強度（分別以近中心最大風速、中心最低氣壓定義）誤差之散佈圖，由圖中很難找到路徑預報誤差與強度預報誤差之間有正（反）比的關係，即在不同的路徑誤差時，強度預報都有不同的高估、低估情形。若是單看圖中強度預報誤差，則在高估颱風強度（最低氣壓誤差為負，最大風速誤差為正）的區域，較多區域模式之成員，再次驗證區域模式的水平解析度較高與參數化法改進等原因，使得區域模式有機會預報較強的颱風。

為評估排除路徑預報誤差後對颱風強度預報的能力，研究先以 SUMMER 技術做系集颱風路徑預報之強度（中心最低氣壓）校驗，呈現不同預報時間(τ)與不同成員數(M)的誤差相對於系集平均誤差之標準化結果（圖 81）。除了 60 小時預報且成員數小於 5 時 SUMMER 之強度預報優於系集平均，其他不同預報時間與不同成員數時，SUMMER 的強度預報結果皆較系集平均差，特別是對 24 小時預報而言，選取的成員數目增加對於最低氣壓預報誤差並沒有明顯改進。又承 3.3.3.中，研究建議 78 小時內 SUMMER 路徑預報可挑選成員數 29 有最佳結果，故本章節中也嘗試以 SUMMER M=29 之路徑預報做強度校驗（圖 82）。與圖 81 之結論相同，SUMMER M=29 雖然能

得到比較好的路徑預報，但這些成員的颱風預報反而較系集平均為差，其改進率皆為負值。綜合以上的結果，本研究不建議以 SUMMER 技術進行之颱風路徑預報所選取之成員再用以進行颱風強度預報。

進一步利用 2014-2016 年非均質化颱風個案中，進行事後分析以不同預報時間(τ)之路徑預報誤差為成員排序，再計算該成員之最大風速誤差(Top N 系列)，或逕由 SUMMER 技術風速預報（挑選排名為第 1 之成員， $M=1$ ），或逕取強度預報之系集平均(MEAN)得到不同預報時間之風速誤差變化（圖 83）。Top1 之分析係嘗試探討排除路徑誤差後之強度預報結果。比較事後分析的結果（Top N 系列），可以看到 Top 1 的強度預報誤差在前 216 小時內幾乎是最高的，其餘的 Top N 在前 72 小時的強度誤差結果極為類似，72 小時到 240 小時之間 Top 50、Top 40 之強度誤差相對於 Top 10、Top 20 和 Top 30 稍高。值得注意的是，事後分析對於系集平均雖然略有改進（僅 1m/s 以內），且當成員數目越多風速誤差也越接近系集平均的表現。由事後分析的結果亦指出，若是要以颱風路徑預報較好的成員再預報颱風強度，即便選擇的成員數由 10 增加至 50，對於強度預報的改進並不明顯。即便由事後分析得到路徑預報之強度校驗，相較於 SUMMER 強度預報之強度校驗，後者對於颱風風速預報的表現仍然是更好的。

4.2.5.2 應用颱風強度 SUMMER 預報技術之路徑校驗

由 SUMMER 強度（最大風速）預報選出之成員數 1-5 之路徑誤差（圖 84），可以看到路徑誤差隨預報時間拉長而增加的特性。若比較不同成員數和系集平均路徑誤差，則 72 小時內成員數為 1 並不會是最佳的結果，甚至比系集平均結果為差。相反地，在前 54 小時內成員數由 1 增加為 5 時路徑的誤差也逐漸下降，當成員數為 5 時在前 72 小時內路徑誤差皆為最小的。此外，圖中亦計算 SUMMER（成員數為 1 到 5 和成員數為 5）相對於系集平均之路徑預報改進率，當成員數為 1 到 5 之路徑誤差平均，24 小時內的改進率為負值；當成員數為 5 時，72 小時內 SUMMER 的改進率在 3%~14%。

若改以中心最低氣壓定義颱風強度可得到類似的結論（圖 85），但此時成員數 1 到 5 平均之改進率在 72 小時內皆為正值，不同成員數對最低氣壓預報時，成員數在 2 到 5 之間的誤差差異小，且和成員數為 1 的結果有很大差距，故此時建議以成員數為 5 的結果做預報。進一步與 3.3.3 節中 SUMMER_29 實驗比較其路徑預報結果（圖 86）：則在 12~72 小時內 SUMMER_29 表現稍佳，但兩者路徑誤差之差異平均僅約 10 公里，亦顯示兩種方法的路徑預報能力是相當的。是故以系集颱風強度挑選成員(成員數 5)，再進行路徑預報為本計畫建議之可行策略。

綜合以上兩小節討論，若是要同時考慮 SUMMER 的颱風路徑和強度預報，本研究建議可從強度預報中挑選表現較佳的成員（例如：成員數為 5）再做路徑預報，可有較合理且相對優於系集平均之結果。

4.2.6 考量颱風強度之調校(Calibration)方法

4.1.2.節中提到，系集模式對於強颱風的預報能力較不足，即系集成員的強度預報散佈顯示模式尚無法涵括較強颱風，故研究將以不同的修正法，嘗試彌補這個問題，以期優化 SUMMER 的強度預報能力。研究使用的調校法如下：對預報時間第 t 小時以後的每次強度預報修正（線性平移），修正的基準為第 t 小時與觀測的強度誤差，每一個成員的修正量為獨立，最後再做 SUMMER 強度預報，由於 SUMMER 是以第 12 小時強度預報誤差為成員排序，故研究僅取 $t = 0$ 小時(Calibration00)及 $t = 6$ 小時(Calibration06)測試結果。

以最大風速為例（圖 87，最低氣壓（圖 88）的結果亦與最大風速相似），當 Calibration00 和 Calibration06 考量不同的成員數時，其結果類似，兩種調校方法在預報時間第 36 小時內皆比 No calibration 有所改善，並且改進率隨成員數增加有稍微提高，改進幅度最大的是系集平均。此外，經過調校的兩組強度誤差，皆有隨著預報時間增加而提高的趨勢，也因此 12-36 小時內，Calibration06 的結果幾乎會優於 Calibration00 和 No calibration，但在 36-72 小時間，No calibration 反而有最好的預報。

是故研究建議當預先以第 6 小時的強度預報誤差進行調校，的確能解決系集模式對強度預報能力不足的問題，並將有助於前期（約 36 小時內）的颱風強度預報，對於 36-72 小時的結果則必須有所保留，或者參考未經調校的強度預報結果。

表 3 計畫使用之各國系集模式颱風路徑資料中，颱風強度單位。

各國系集模式	氣壓	最大風速
ECMWF	hPa	m/s
NCEP	hPa	kt
WEPS	hPa	-
TAPEX	hPa	-

表 4 各國颱風 best track 中颱風強度資料單位與時間間隔。本研究以 CWB-working track 資料作為校驗基準。

各國 best track	氣壓	最大風速	備註
CWB-working track	hPa	m/s	10min
JTWC-best track	hPa	kt	1 min
JMA-RSMC best track	hPa	kt	10min

表 5 颱風強度 CI 數、中心最低氣壓與最大風速（10 分鐘平均）對照表。（木場等，1990）

CI num	MSLP(hPa)	MWS(Kt)
1.0	1005	22
1.5	1002	29
2.0	998	36
2.5	993	43
3.0	987	50
3.5	981	57
4.0	973	64
4.5	965	71
5.0	956	78
5.5	947	85
6.0	937	93
6.5	926	100
7.0	914	107
7.5	901	115
8.0	888	122

表 6 圖 75 中風速與氣壓分別列在前 10 名的成員名，相同次數的成員被列在同一名次。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Wind	TA20	TA19	TA8	TA4	TA2	TA22	TA26	TA13	TA15	TA12
Pressure	TA20	TA19	TA26	TA8	TA22	NC20	TA2	TA15	TA6 TA12	TA18

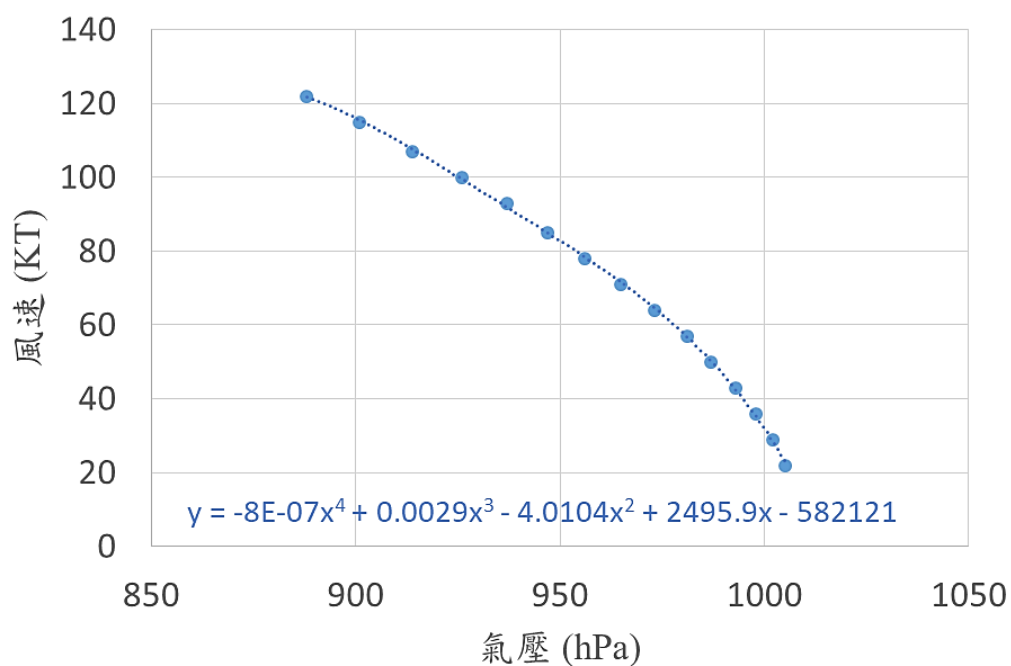


圖 60 由表 5 颱風中心最低氣壓與最大風速數據得之四次迴歸方程式。

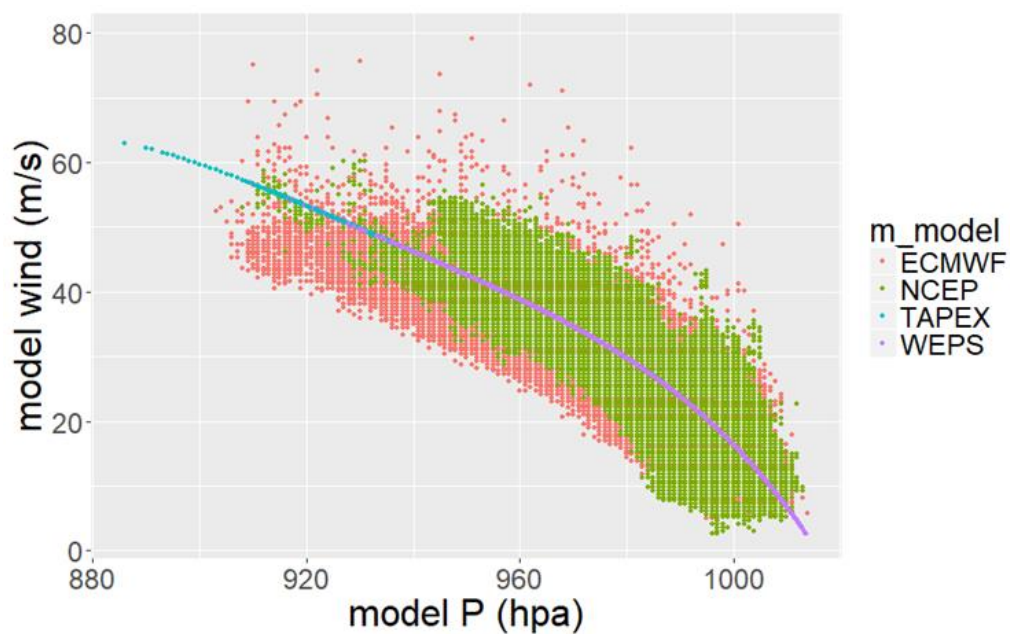


圖 61 2014-2016 年歷史颱風個案 ECMWF、NCEP、TAPEX 及 WEPS 系集模式各成員之中心最低氣壓(hpa)與最大風速(m/s)之散佈圖。圖中 ECMWF、NCEP 最大風速為模式輸出結果，TAPEX、WEPS 則由中心最低氣壓(hpa)與圖 60 中四次迴歸方程式而得。

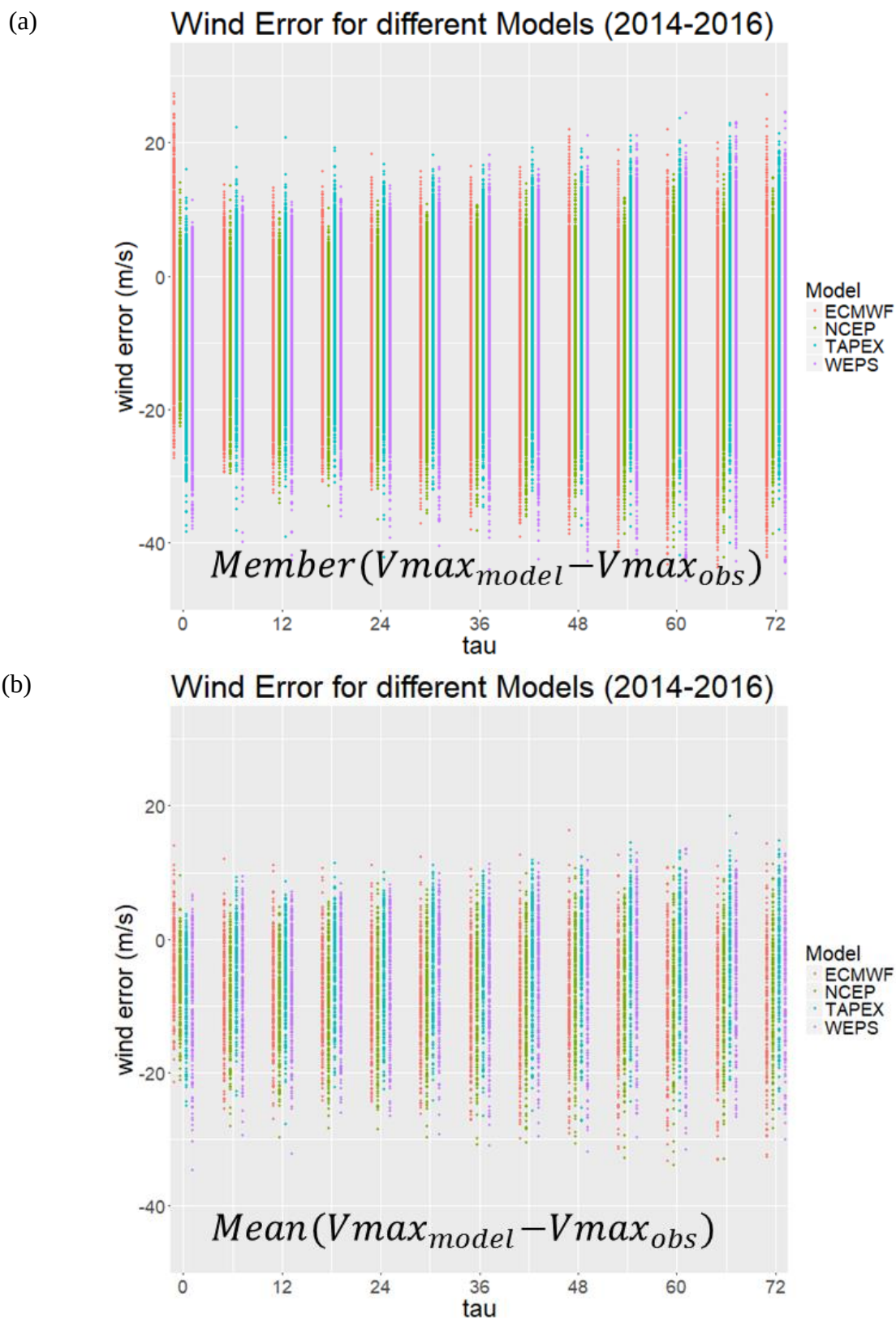


圖 62 2014-2016 年歷史颱風個案 ECMWF、NCEP、TAPEX 及 WEPS 系集模式，不同預報時間(τ)最大風速(m/s)預報之(a)各成員誤差與(b)系集平均誤差散佈圖。

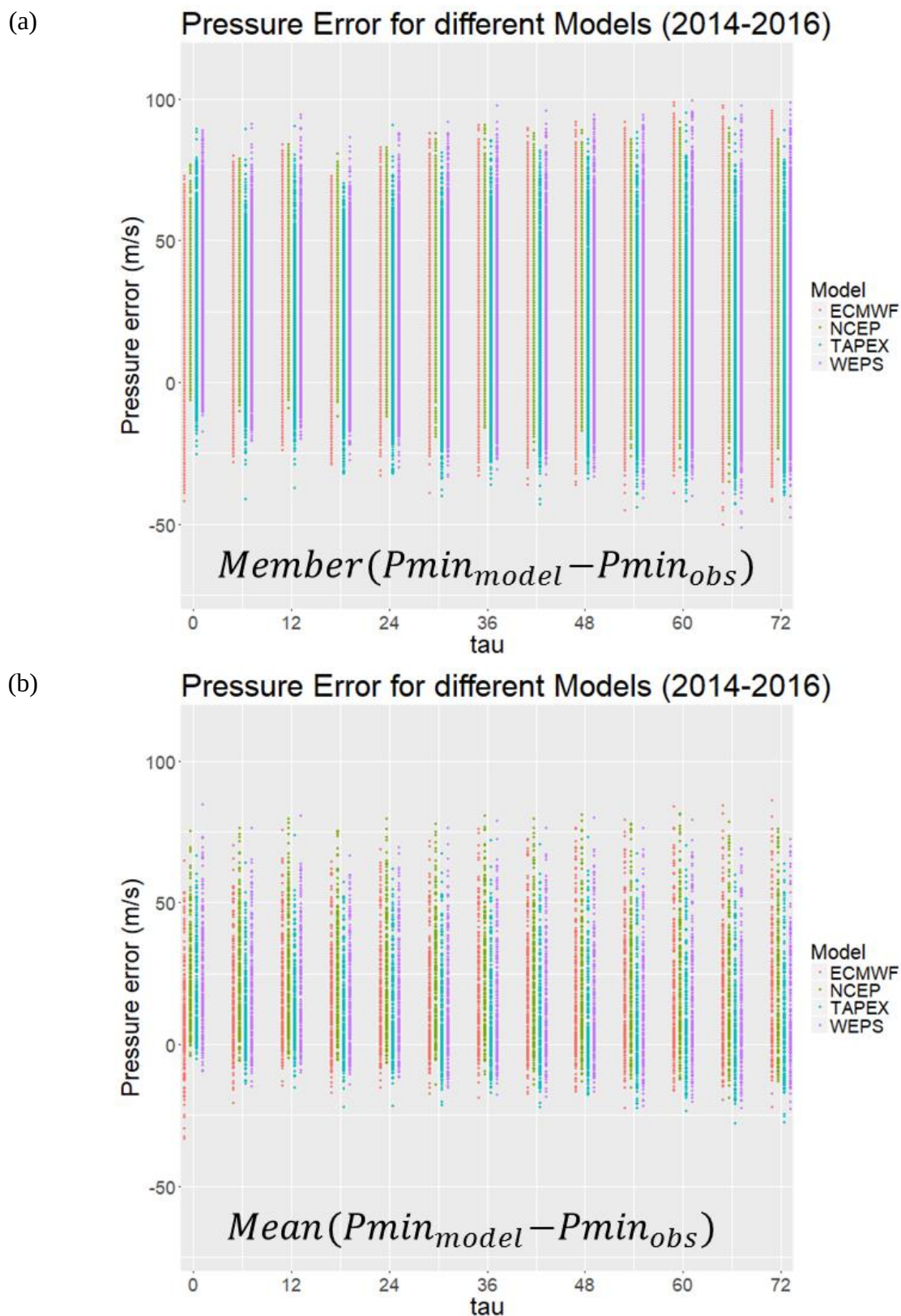


圖 63 2014-2016 年歷史颱風個案 ECMWF、NCEP、TAPEX 及 WEPS 系集模式，不同預報時間(tau)中心最低氣壓(hPa)預報之(a)各成員誤差與(b)系集平均誤差散佈圖。

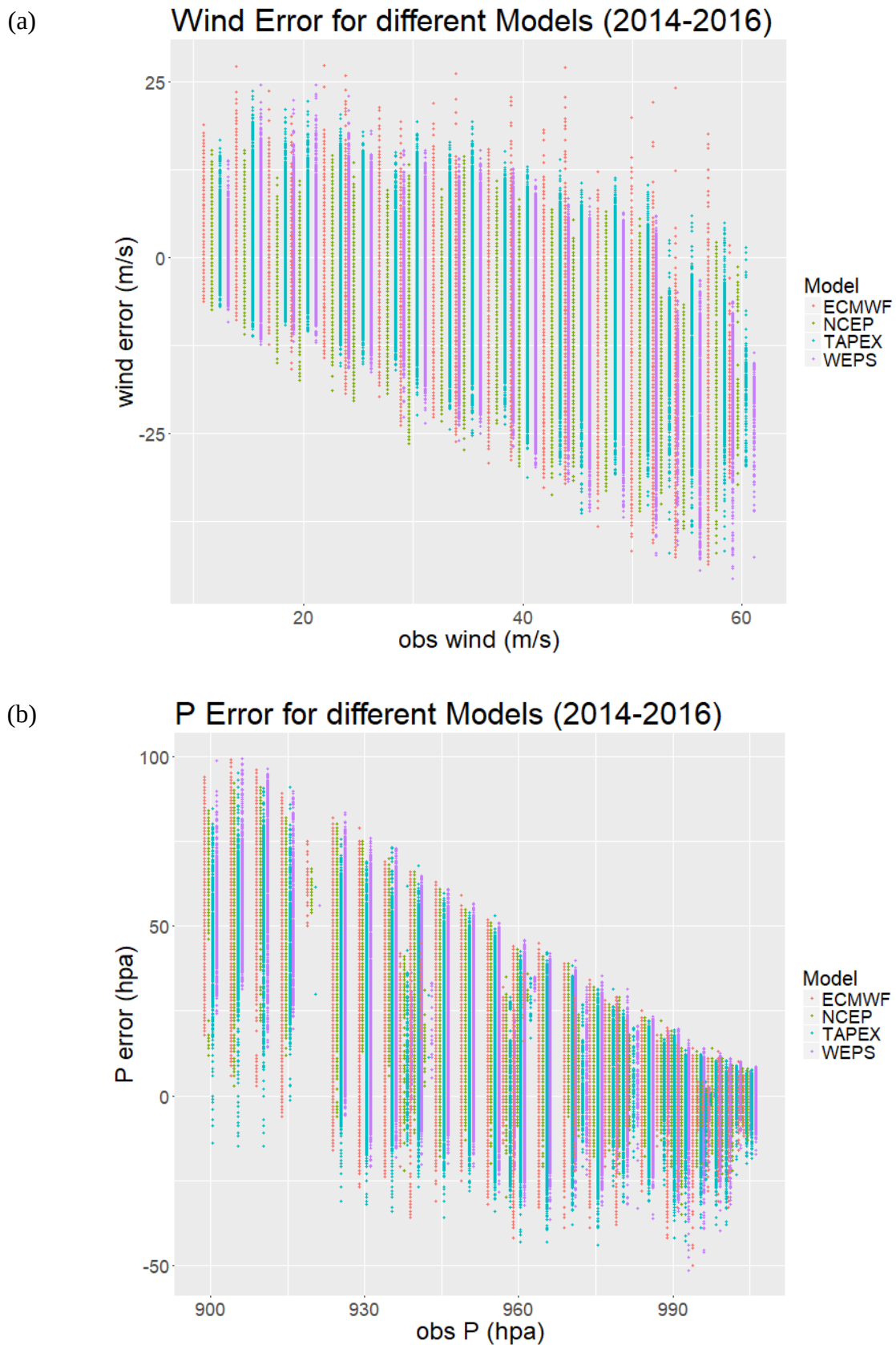


圖 64 2014-2016 年歷史颱風觀測與不同模式各成員誤差之散佈圖。圖(a)為最大風速 (m/s)，圖(b)為中心最低氣壓(hPa)。

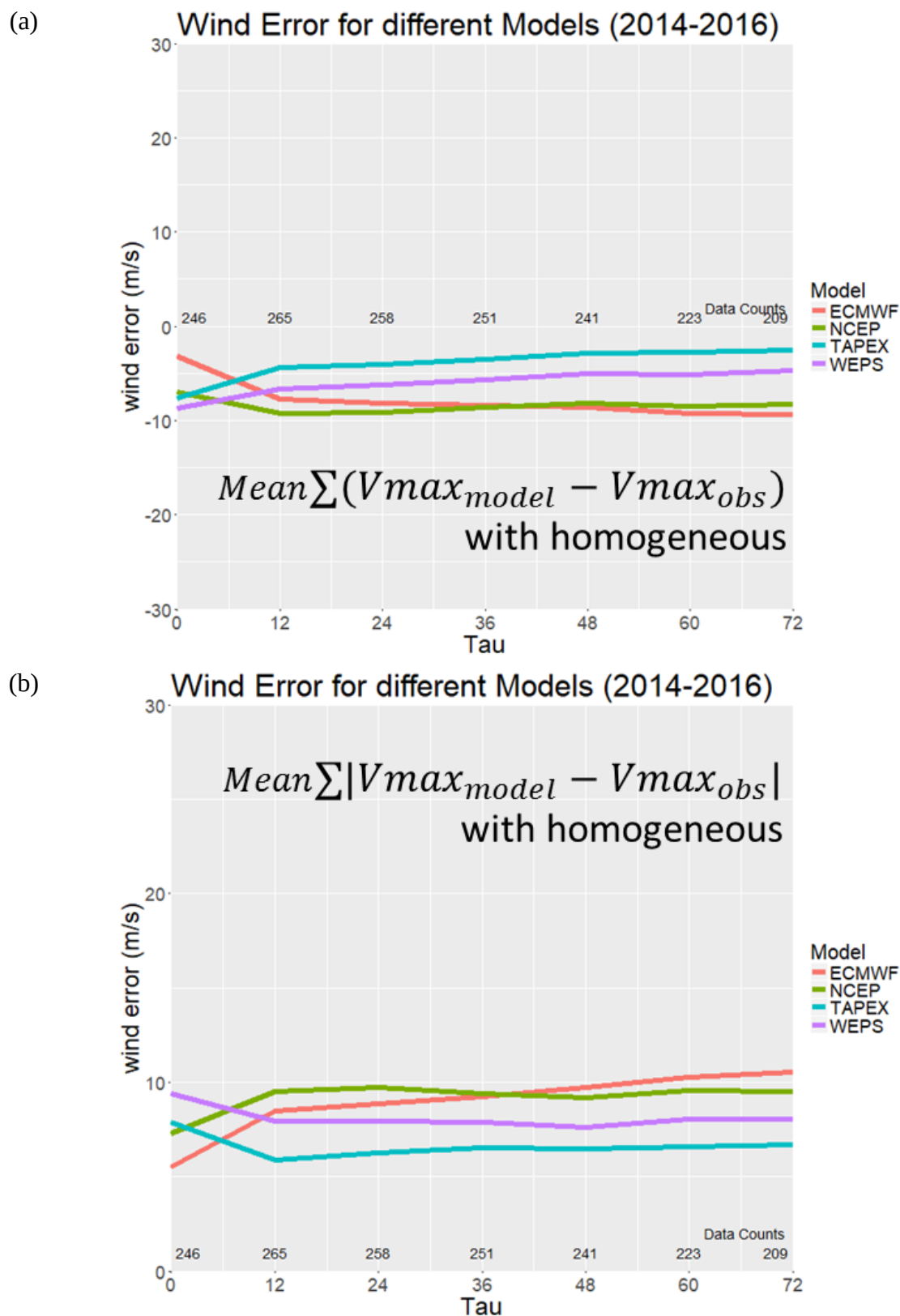


圖 65 2014-2016 年歷史颱風個案 ECMWF、NCEP、TAPEX 及 WEPS 系集模式均質化後，不同預報時間(tau)時最大風速(m/s)(a)誤差平均和(b)誤差絕對值平均。

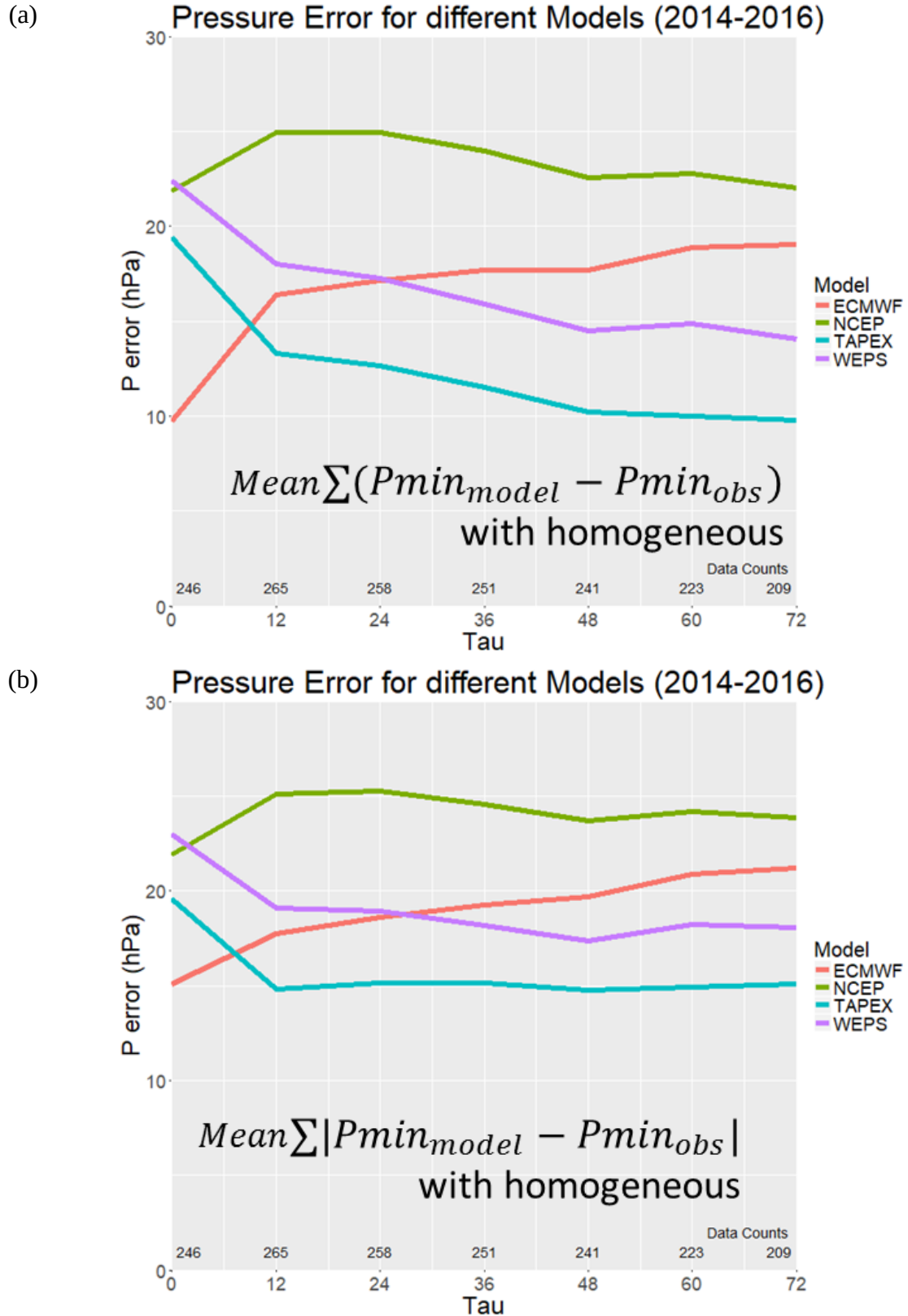
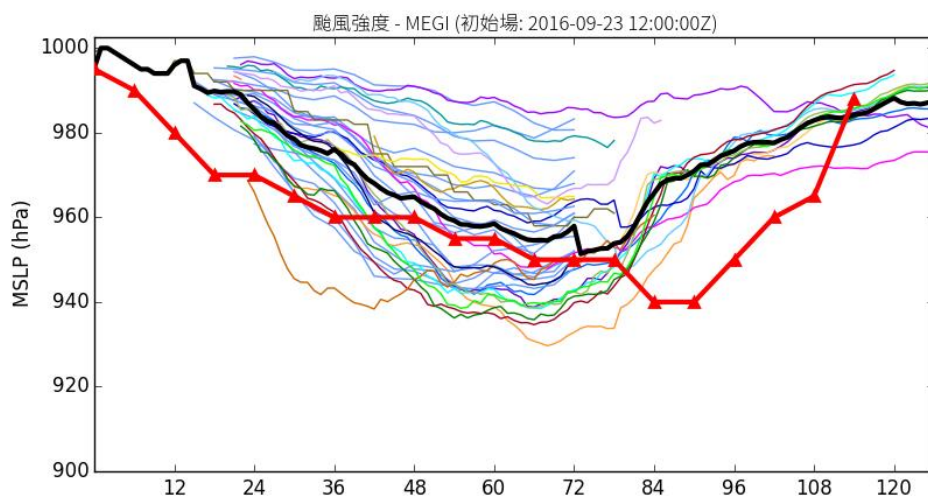
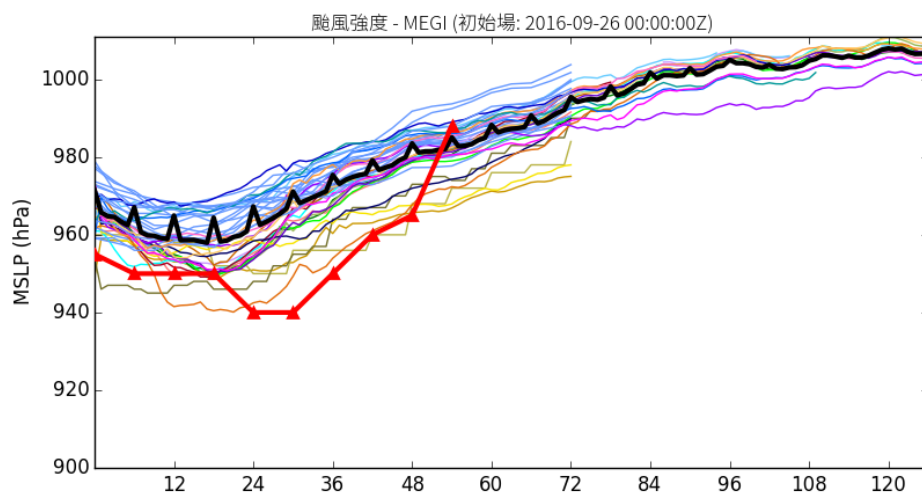


圖 66 2014-2016 年歷史颱風個案 ECMWF、NCEP、TAPEX 及 WEPS 系集模式均質化後，不同預報時間(tau)時中心最低氣壓(hPa)(a)誤差平均和(b)誤差絕對值平均。

(a)



(b)



(c)

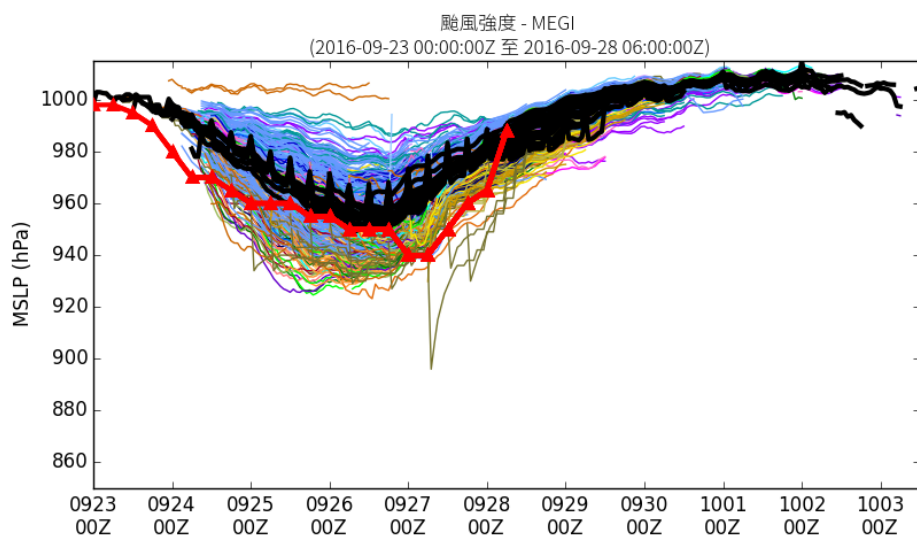


圖 67 2016 年梅姬颱風不同初始場下模式各成員之中心最低氣壓(hPa)變化，黑色粗實線為系集平均，紅色粗實線為觀測值。圖(a)初始場為 2016 年 9 月 23 日 12Z，圖(b)初始場為 2016 年 9 月 26 日 00Z，圖(c)為 2016 年 9 月 23 日 00Z 至 2016 年 9 月 28 日 06Z 間所有模擬結果。

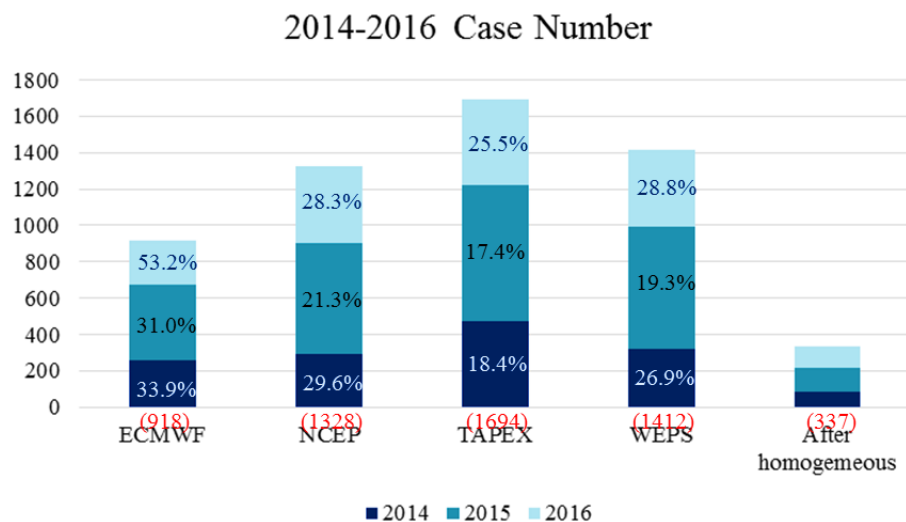


圖 68 2014-2016 年各模式於均質化前後之個案數比較。括號中紅字表示該模式或者經均質化後的總個案數，百分比數字則表示該模式於該年經均質化後能保留的個案數比例。

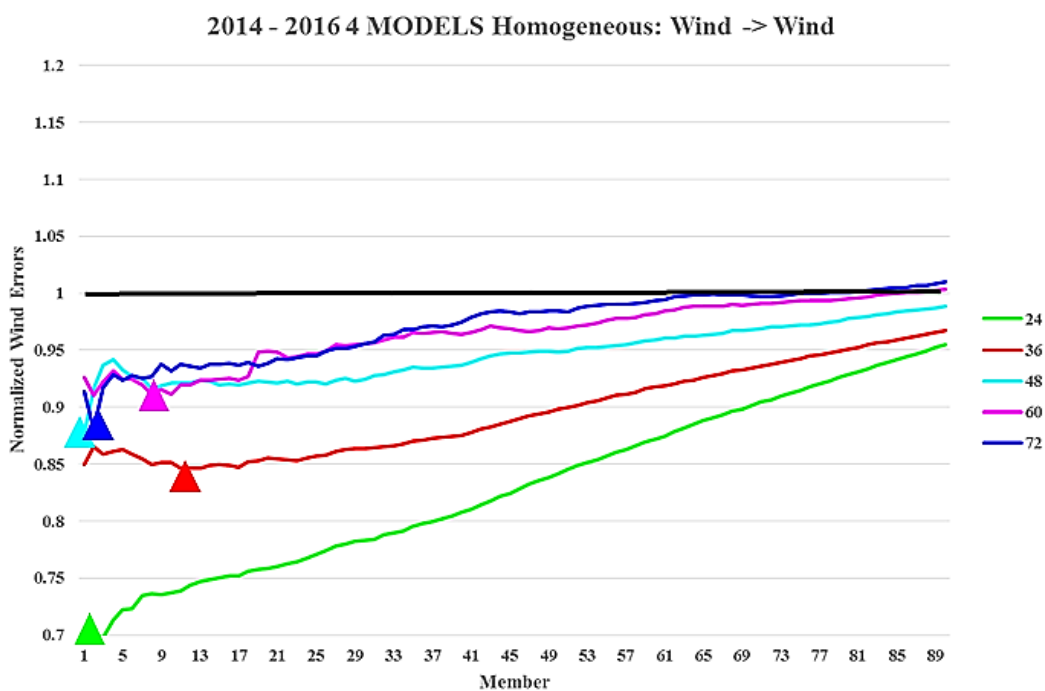


圖 69 2014-2016 年之颱風個案，「四模式成員（取均質化後個案）以 12 小時最大風速預報誤差排名選取不同的成員數之平均最大風速誤差」經「四模式系集平均之最大風速預報誤差」標準化之結果圖。橫軸表示選取的成員個數，縱軸表示最大風速之標準化誤差，不同顏色表示不同的預報時間，三角形則表示該時間選取的成員數有最小誤差。

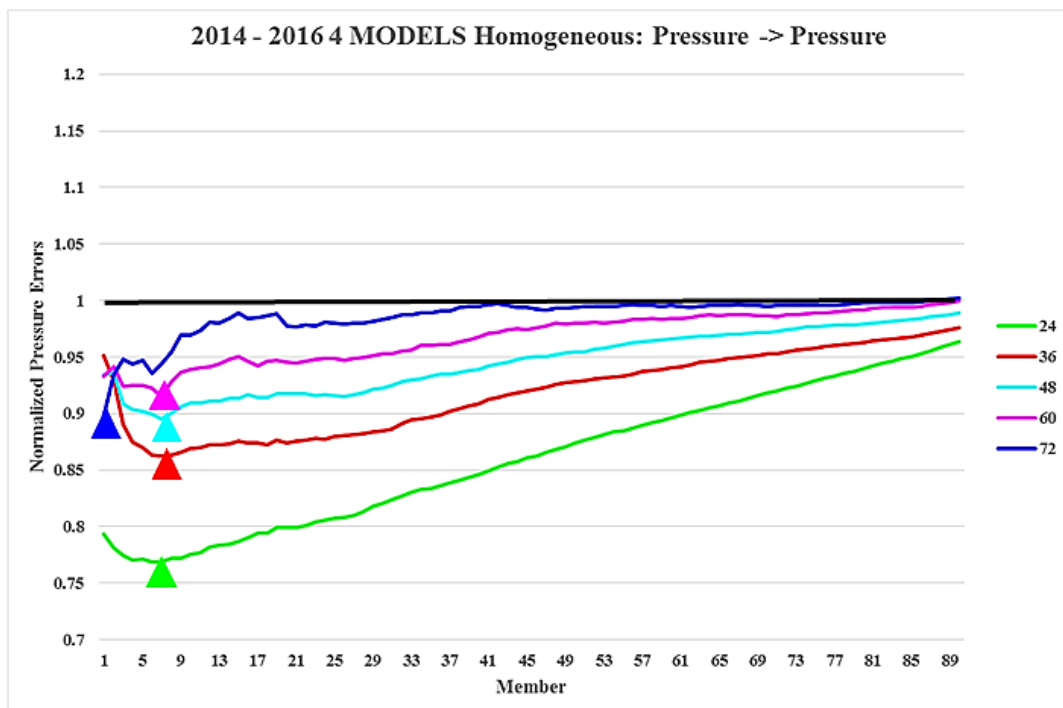


圖 70 同圖 69，但改以 12 小時颱風最低氣壓誤差排名選取不同的成員數並預報颱風的最低氣壓。

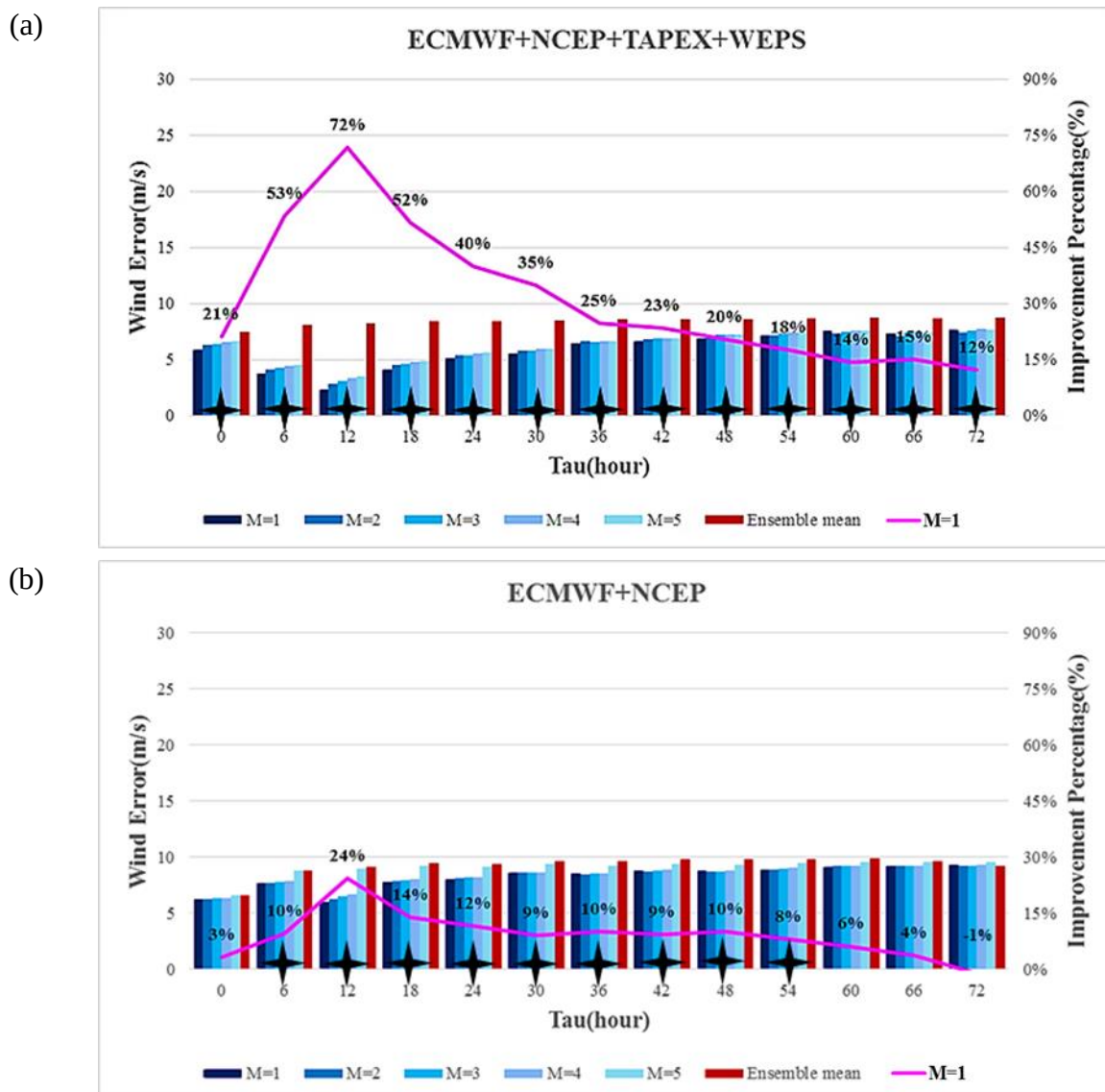
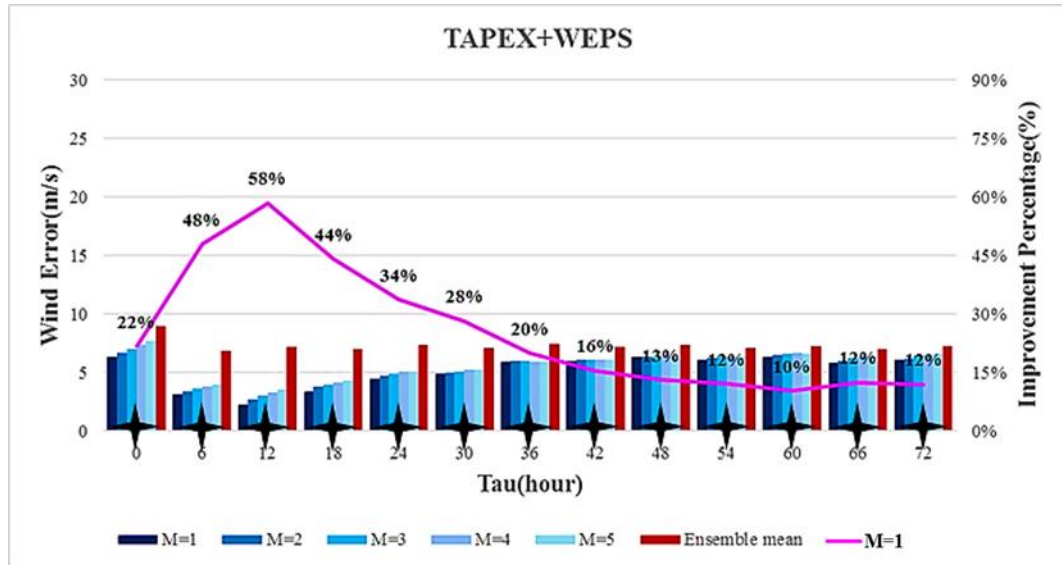


圖 71 SUMMER 以 12 小時最大風速誤差做排序，選取誤差最低的前 5 名成員，以成員數 1 到 5 預報颱風最大風速後取風速誤差平均。不同顏色的長條圖表示不同的成員數，紅色長條圖則是系集平均之誤差(Ensemble mean)，紫紅色曲線及數值表示選取成員 1 相對於系集平均誤差的改進比例，黑色十字符號則表示「Ensemble mean 與 SUMMER(M=1)存在差距」統計上滿足 95%信心水準。圖(a) ECMWF、NCEP、TAPEX 與 WEPS 四個模式均質化的資料的個案數與所有成員。圖(b)僅用 ECMWF 和 NCEP 兩個全球模式的成員作 Super-OBEST，且個案數與圖(a)相同。圖(c)與圖(b)相同但改為 TAPEX 與 WEPS 區域模式成員。圖(d)為使用 ECMWF、NCEP、TAPEX 與 WEPS 四個模式「未均質化」資料。

(c)



(d)

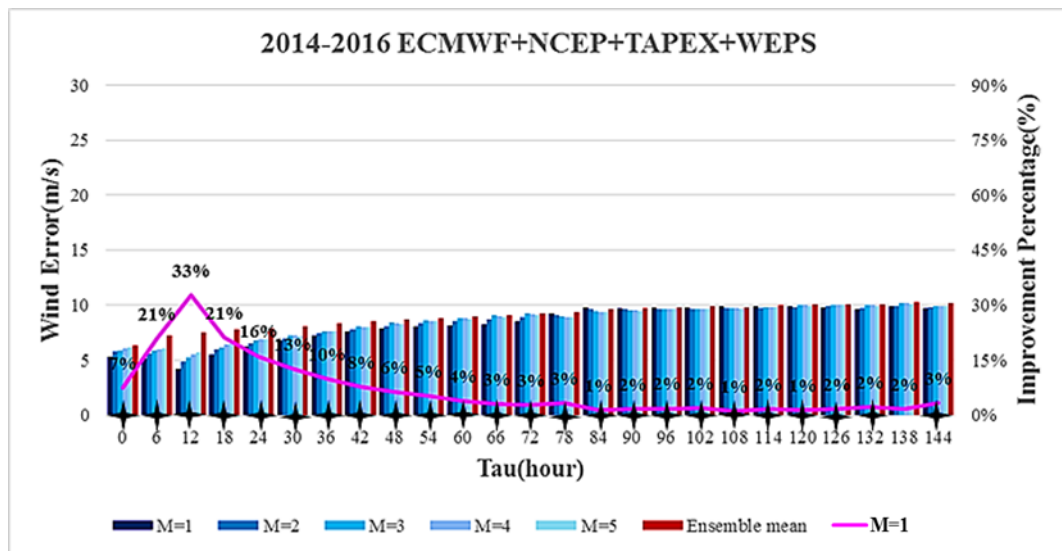
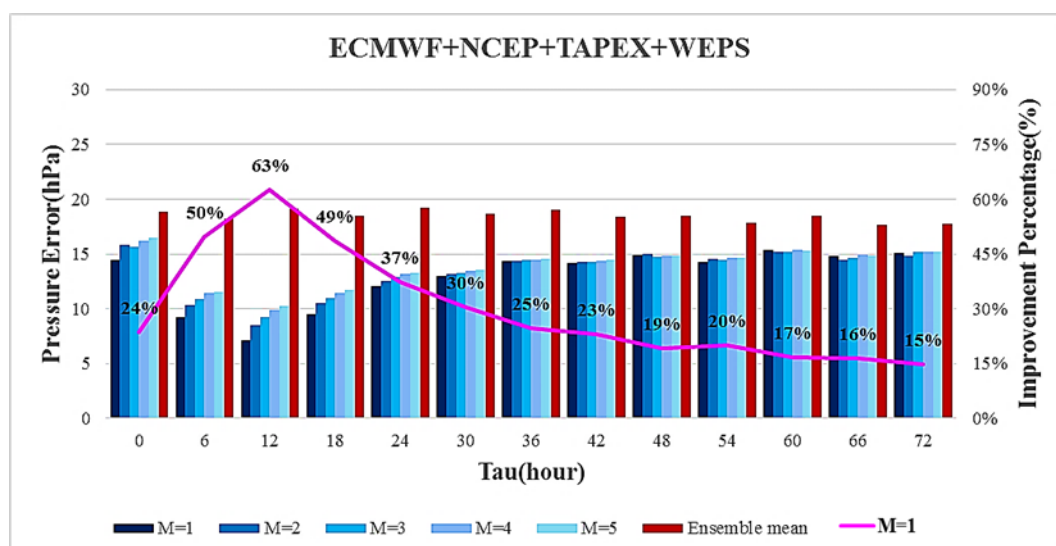


圖 71 SUMMER 以 12 小時最大風速誤差做排序，選取誤差最低的前 5 名成員，以成員數 1 到 5 預報颱風最大風速後取風速誤差平均。不同顏色的長條圖表示不同的成員數，紅色長條圖則是系集平均之誤差(Ensemble mean)，紫紅色曲線及數值表示選取成員 1 相對於系集平均誤差的改進比例，黑色十字符號則表示「Ensemble mean 與 SUMMER(M=1)存在差距」統計上滿足 95%信心水準。圖(a) ECMWF、NCEP、TAPEX 與 WEPS 四個模式均質化的資料的個案數與所有成員。圖(b)僅用 ECMWF 和 NCEP 兩個全球模式的成員作 Super-OBEST，且個案數與圖(a)相同。圖(c)與圖(b)相同但改為 TAPEX 與 WEPS 區域模式成員。圖(d)為使用 ECMWF、NCEP、TAPEX 與 WEPS 四個模式「未均質化」資料。

(a)



(b)

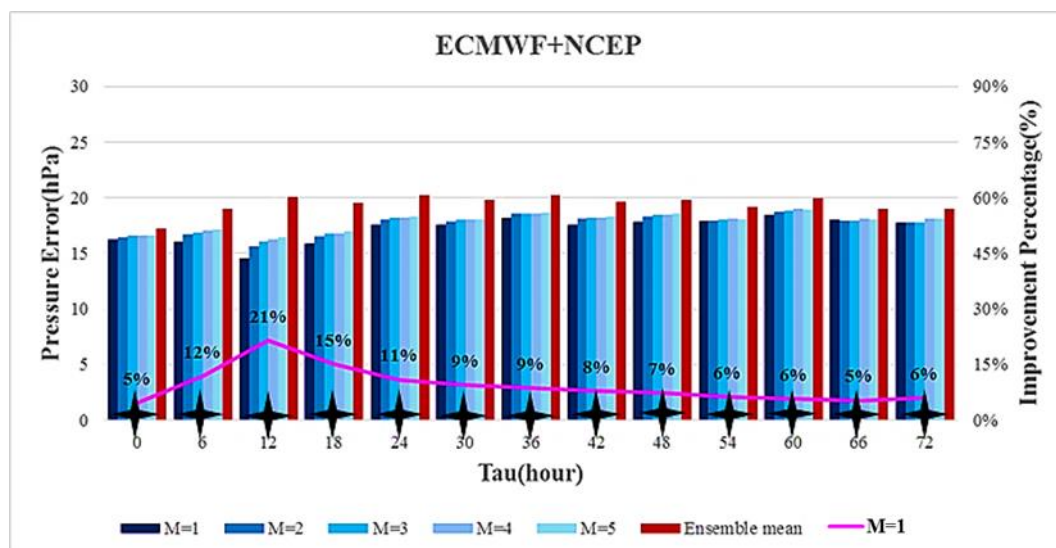
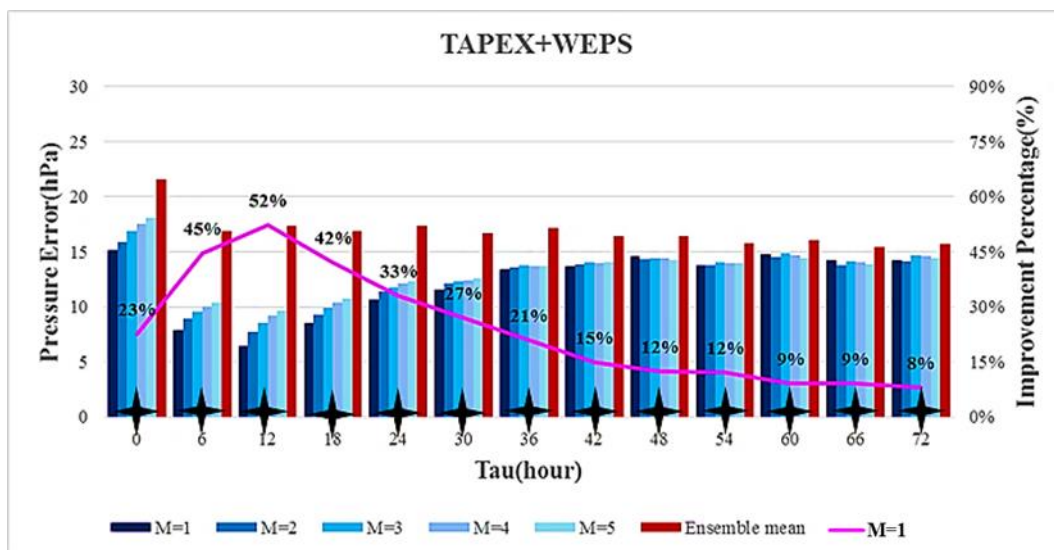


圖 72 同圖 71 但為 SUMMER 以 12 小時最低氣壓誤差做排序，並預報颱風最低氣壓之誤差。

(c)



(d)

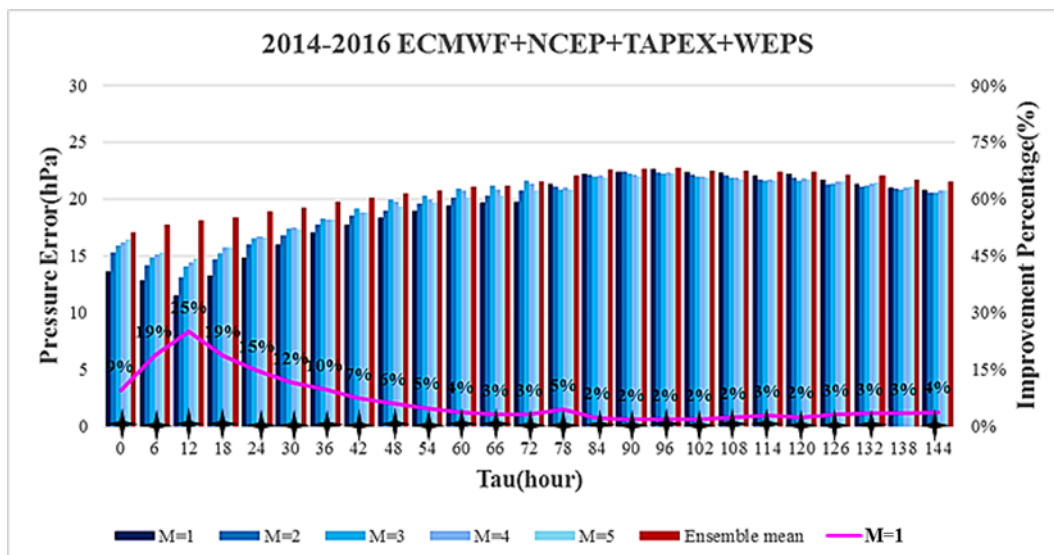
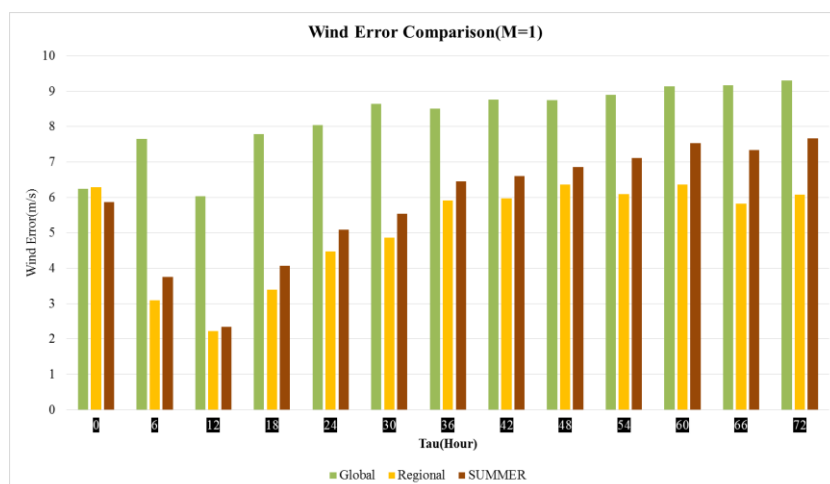
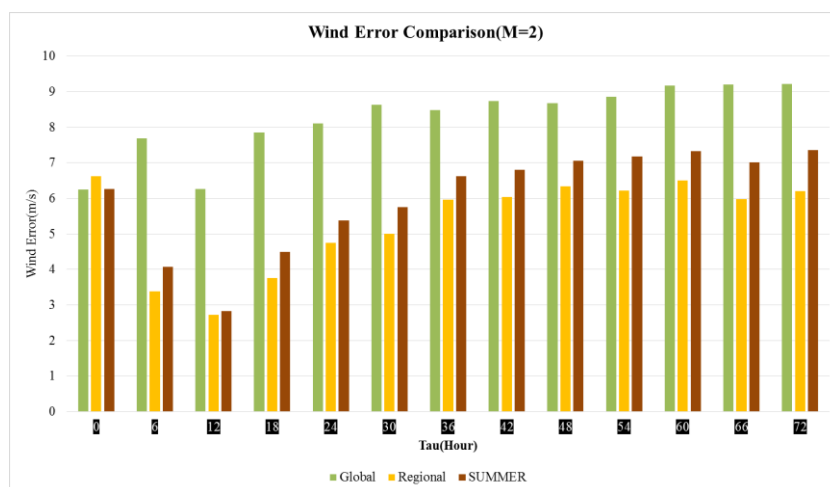


圖 72 同圖 71 但為 SUMMER 以 12 小時最低氣壓誤差做排序，並預報颱風最低氣壓之誤差。

(a)



(b)



(c)

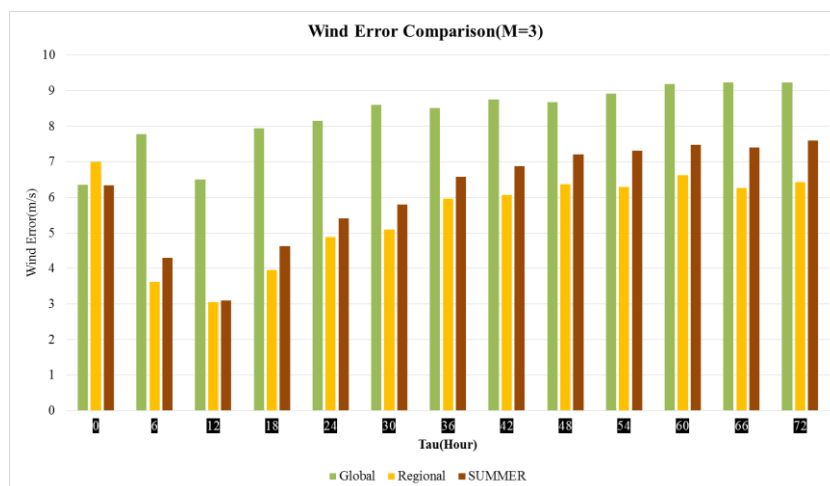
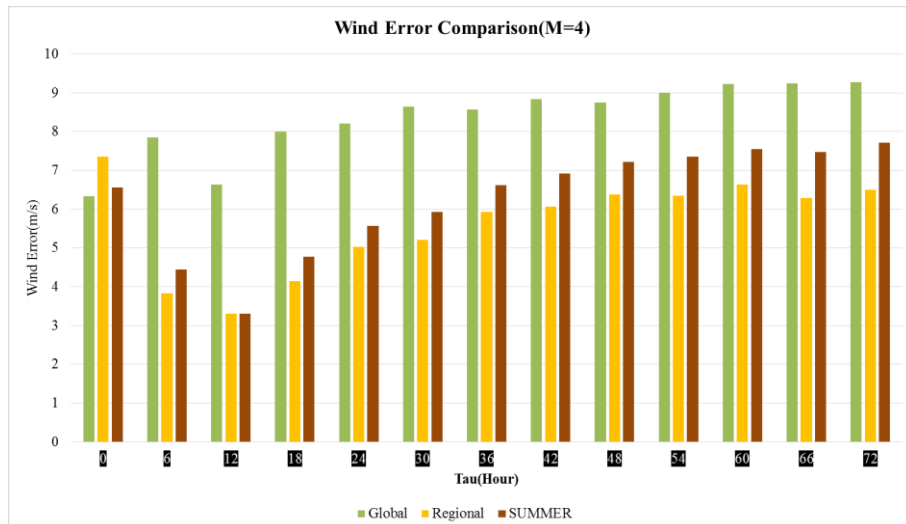
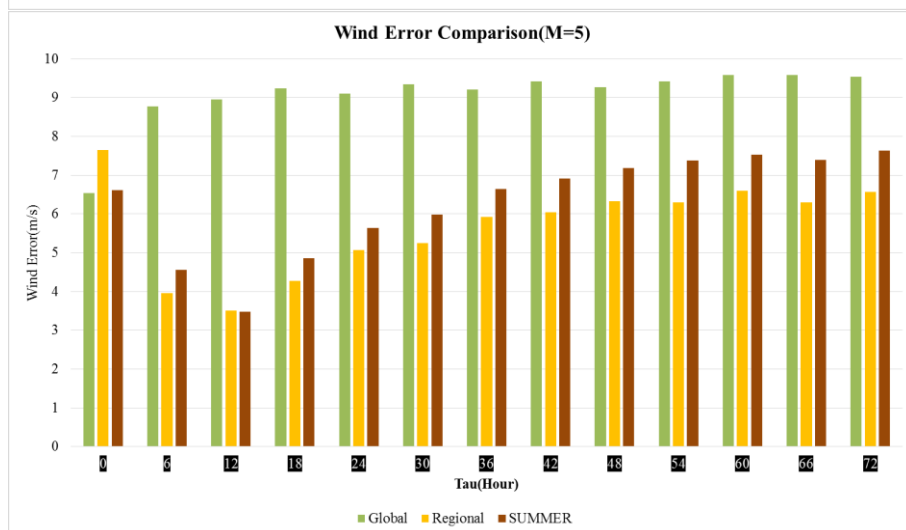


圖 73 取自圖 71 中固定成員數時，僅考慮 2 個全球模式成員 (Global, 綠色)、僅考慮 2 個區域模式成員 (Regional, 黃色) 及同時考慮全球和區域模式成員 (SUMMER, 棕色) 之最大風速誤差(m/s)比較。圖(a)至圖(f)表示成員數為 1 到 5 和系集平均，橫軸為預報時間 0 到 72 小時。

(d)



(e)



(f)

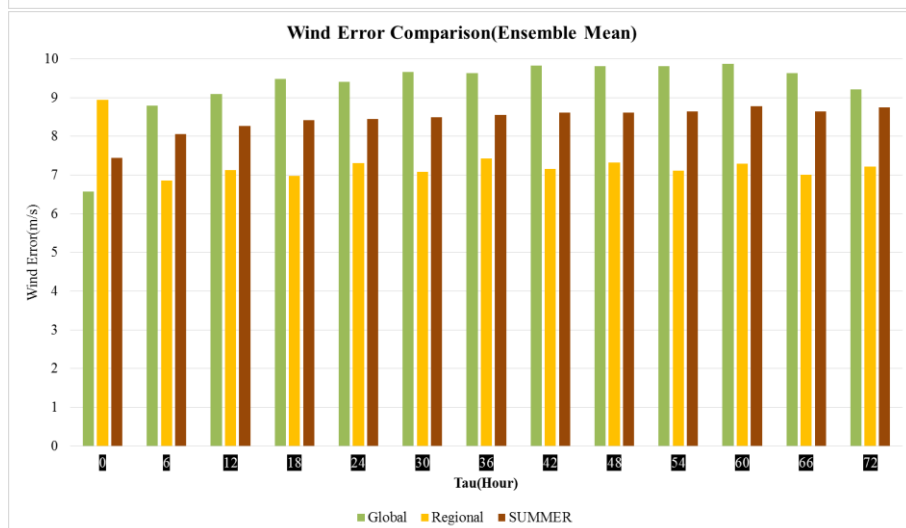
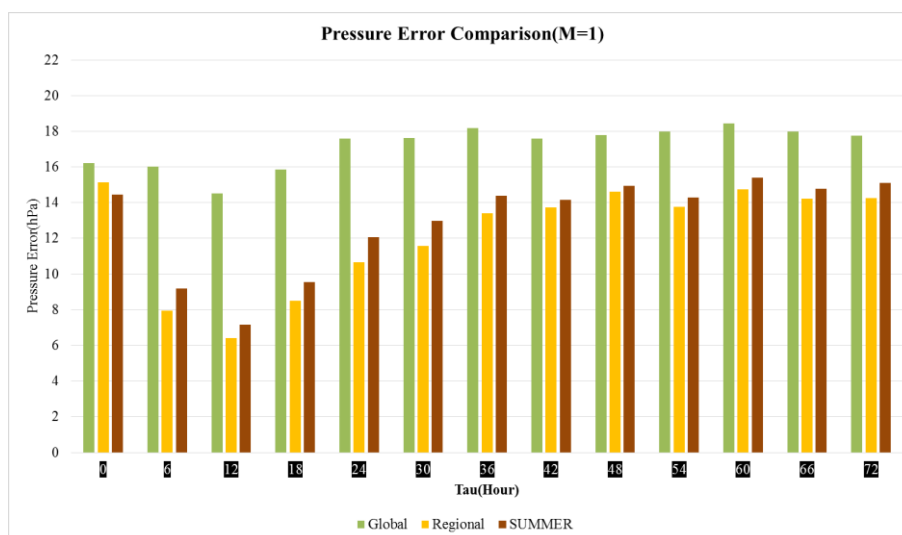
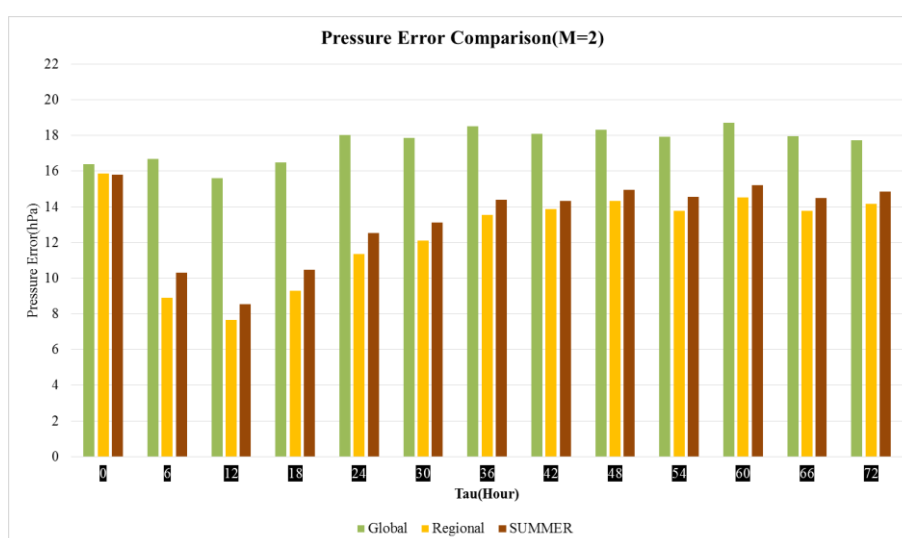


圖 73 取自圖 71 中固定成員數時，僅考慮 2 個全球模式成員 (Global, 綠色)、僅考慮 2 個區域模式成員 (Regional, 黃色) 及同時考慮全球和區域模式成員 (SUMMER, 棕色) 之最大風速誤差(m/s)比較。圖(a)至圖(f)表示成員數為 1 到 5 和系集平均，橫軸為預報時間 0 到 72 小時。

(a)



(b)



(c)

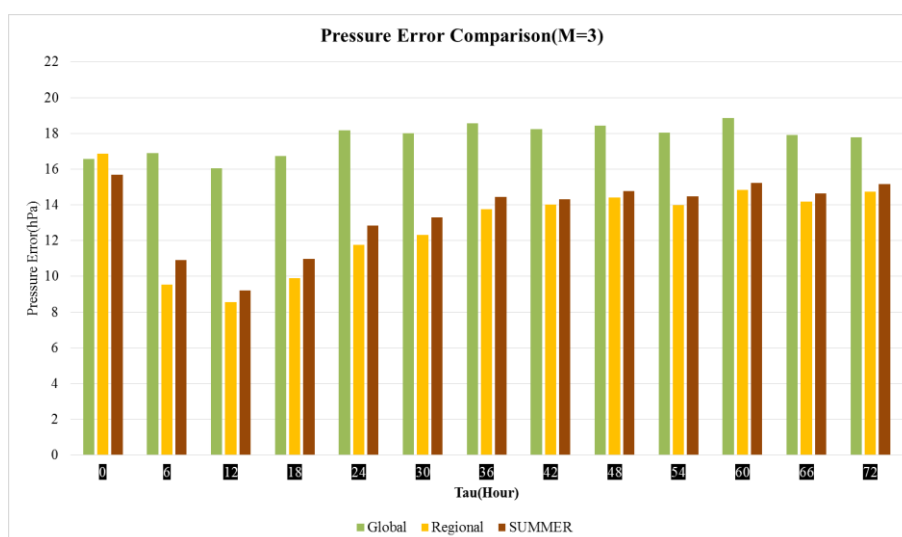
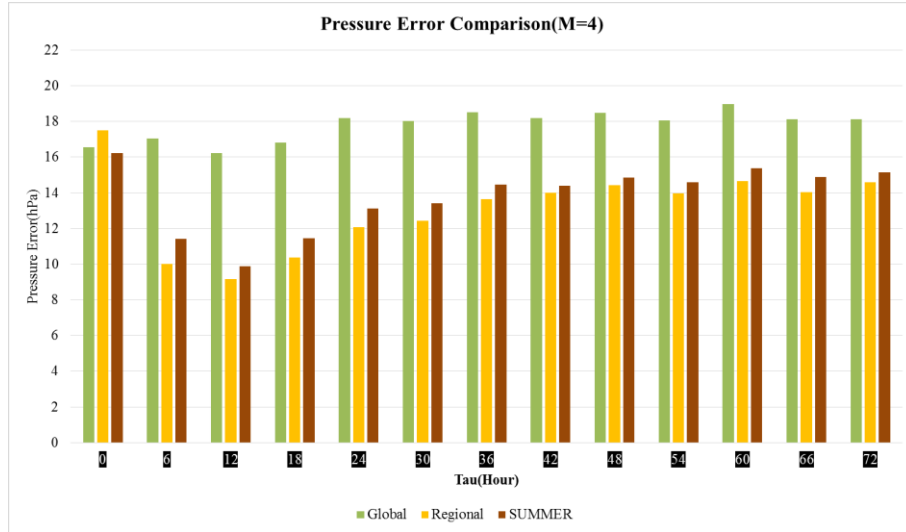
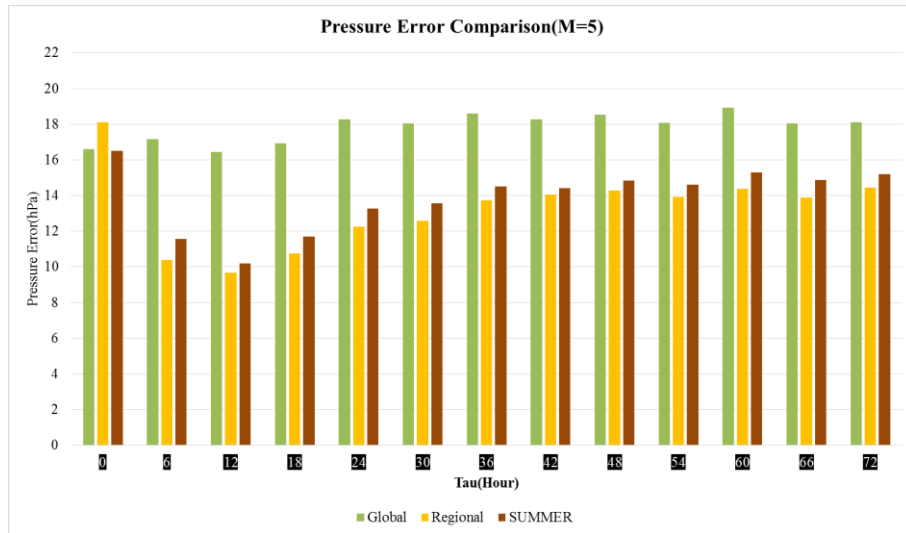


圖 74 取自圖 72，縱座標改為最低氣壓誤差(hPa)，圖說同圖 73。

(d)



(e)



(f)

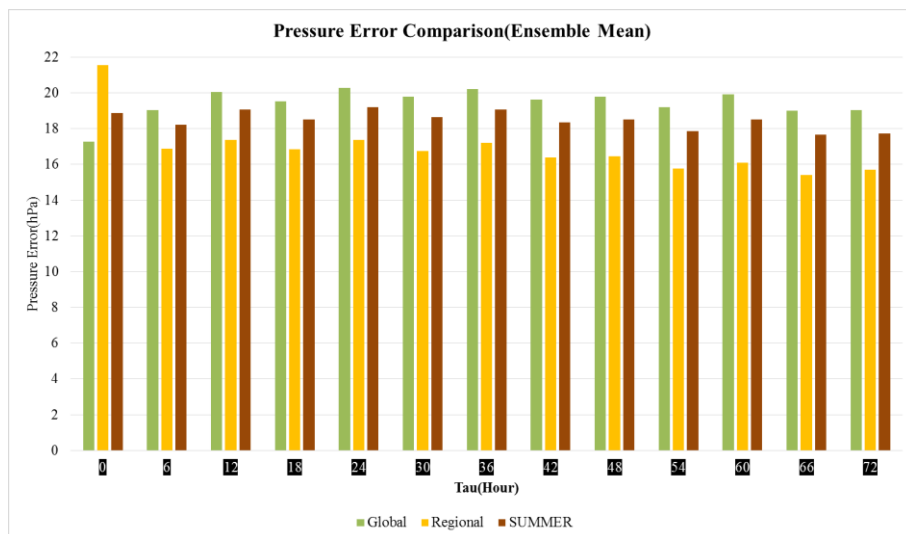


圖 74 取自圖 72，縱座標改為最低氣壓誤差(hPa)，圖說同圖 73。

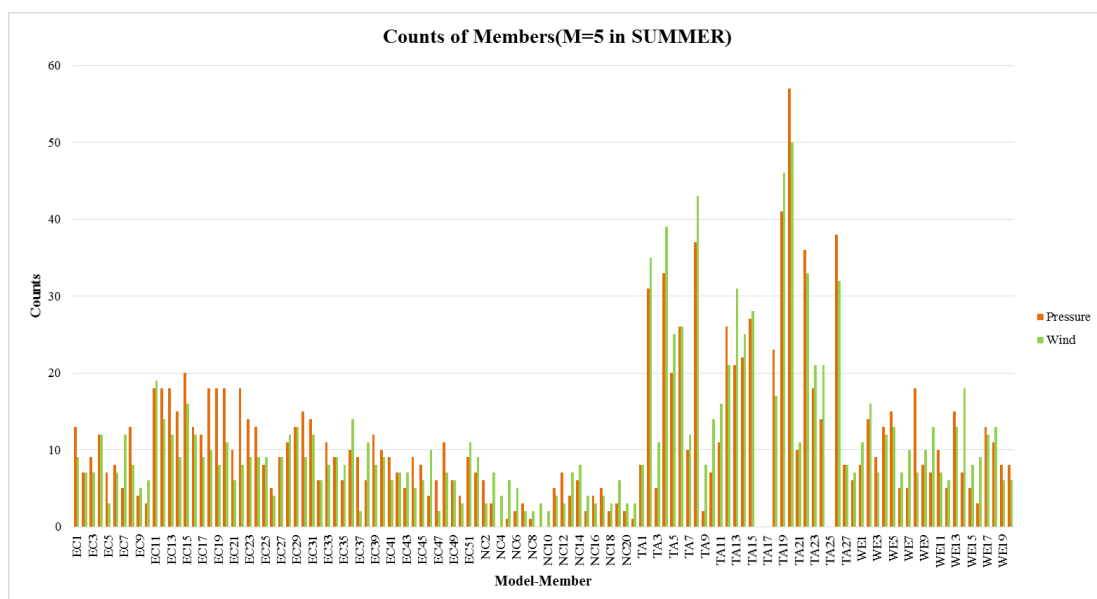


圖 75 2014-2016 年 337 個案中以 SUMMER 選擇（共 120 個成員）的次數統計。藍色與紅色長條圖分別表示 SUMMER 以預報時間 12 小時之最低氣壓和最大風速誤差排名時，各成員在前五名內被挑選的總次數。

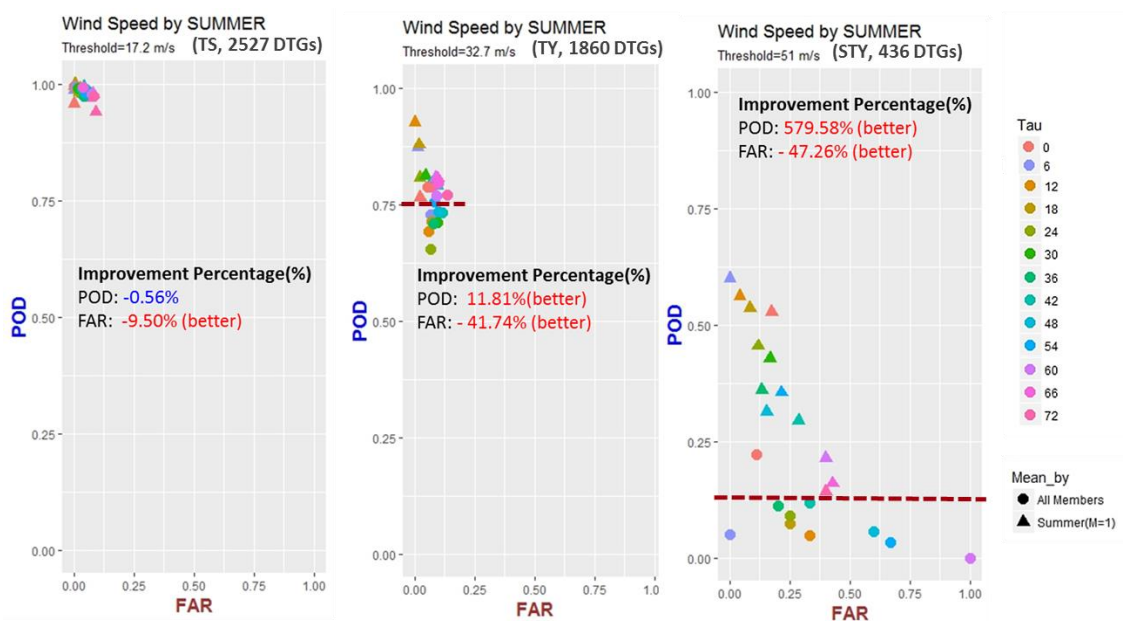


圖 76 SUMMER（成員數為 1）與系集平均對不同強度颱風（以氣象局對輕度颱風 17.2 m/s、中度颱風 32.7 m/s 與強烈颱風 51 m/s 之最大風速下標定義）的偵測率 (POD)和誤報率(FAR)散佈圖。顏色表示不同預報時間，圓形為系集平均，三角形為 SUMMER 之結果。圖中數字表示 SUMMER 相對於系集平均的改善率，紅色數字表示 SUMMER 改善，藍色數字則表示 SUMMER 未改善。

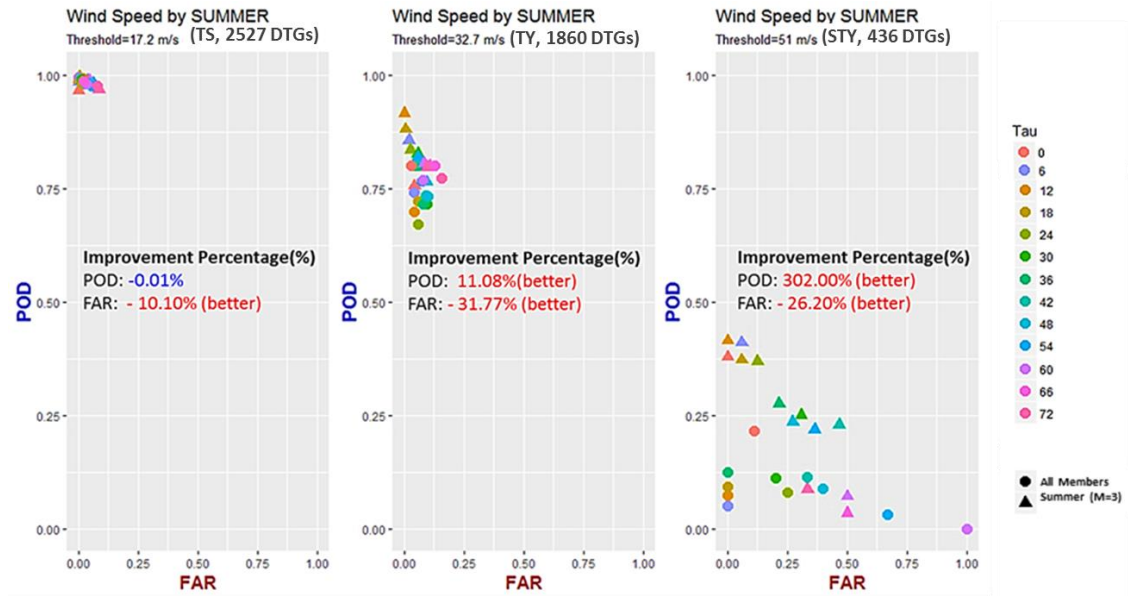


圖 77 同圖 76 但成員數為 3。

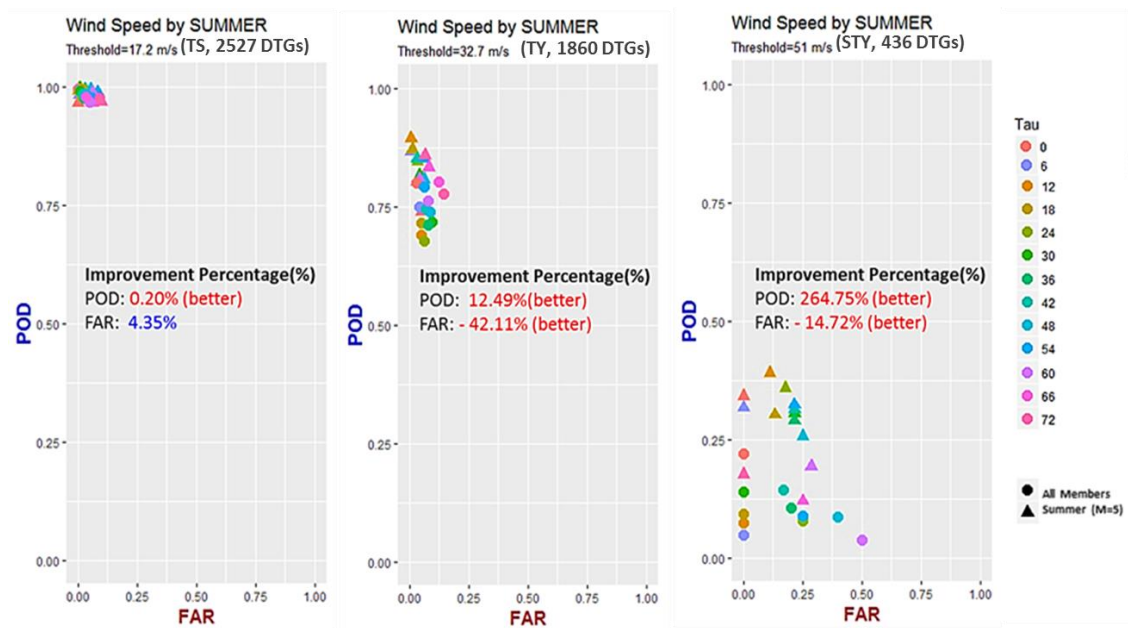


圖 78 同圖 76 但成員數為 5。

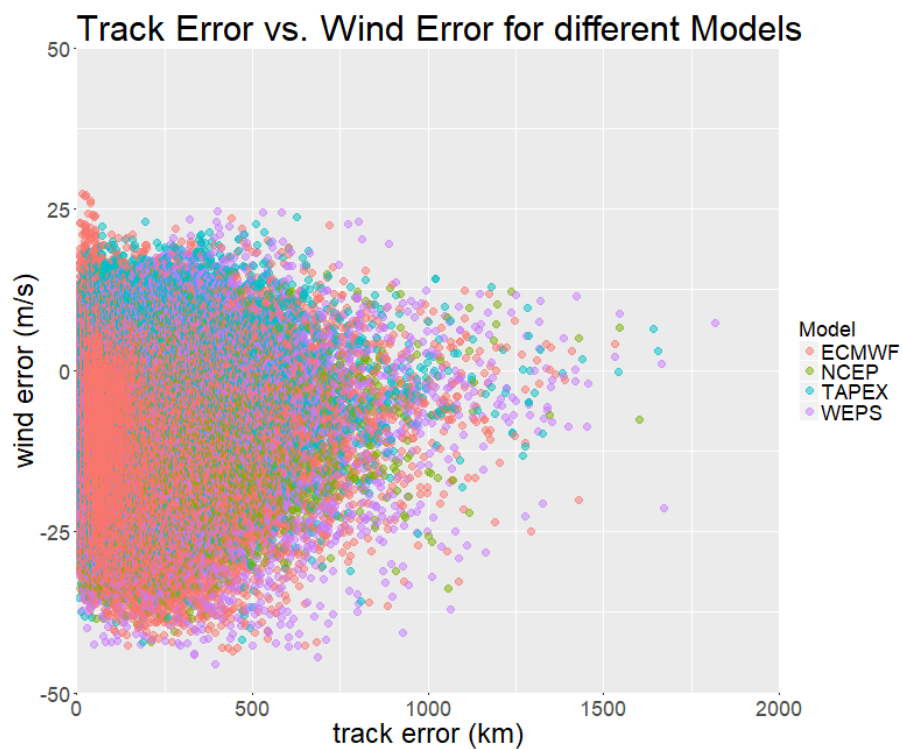


圖 79 2014-2016 年西北太平洋颱風個案，不同系集模式路徑誤差與最大風速誤差之散佈圖。紅色點為 ECMWF 模式、綠色點為 NCEP 模式、水藍色點為 TAPEX 模式、紫色點為 WEPS 模式。

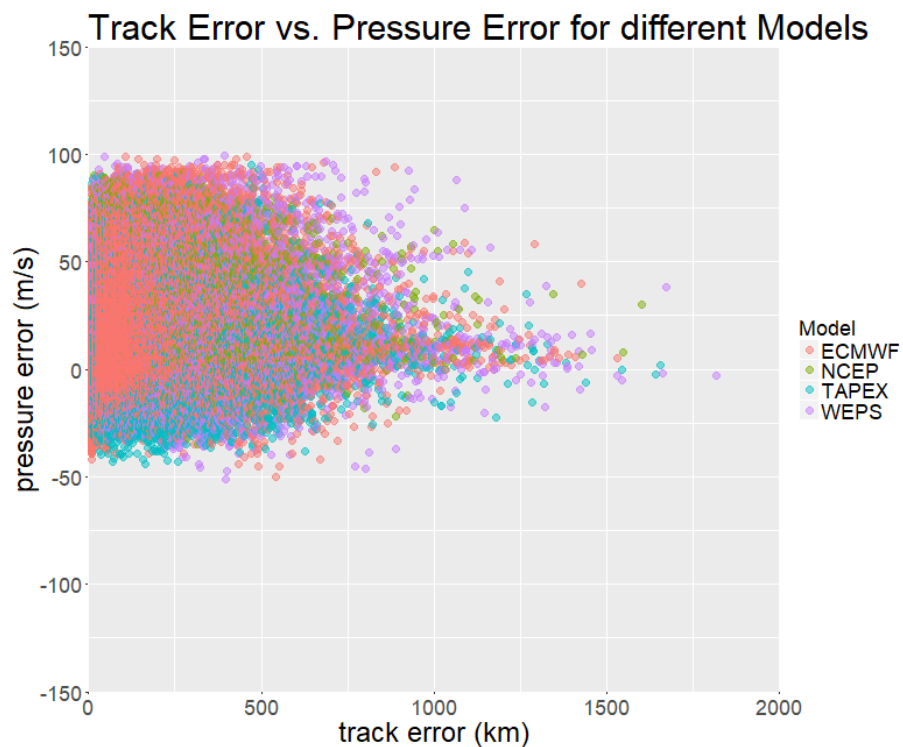


圖 80 2014-2016 年西北太平洋颱風個案，不同系集模式路徑誤差與最低氣壓誤差之散佈圖。紅色點為 ECMWF 模式、綠色點為 NCEP 模式、水藍色點為 TAPEX 模式、紫色點為 WEPS 模式。

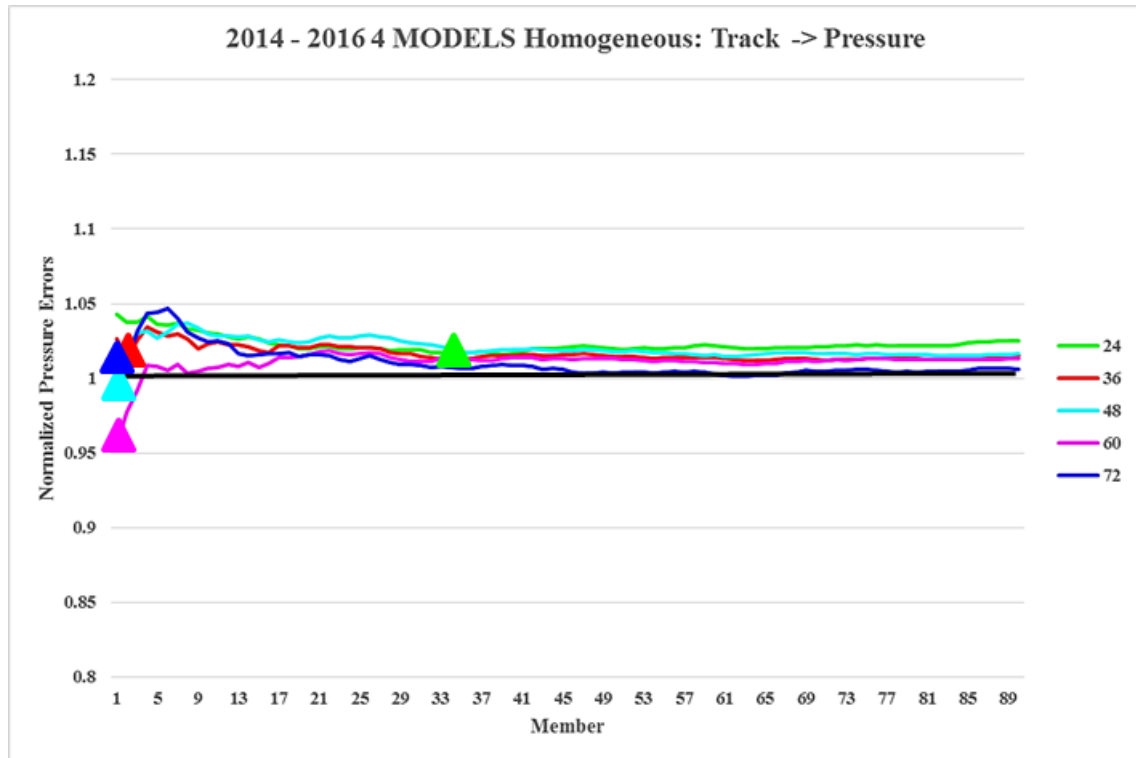


圖 81 同圖 69，但改以 12 小時颱風路徑誤差排名選取不同的成員數並預報颱風的最低氣壓。

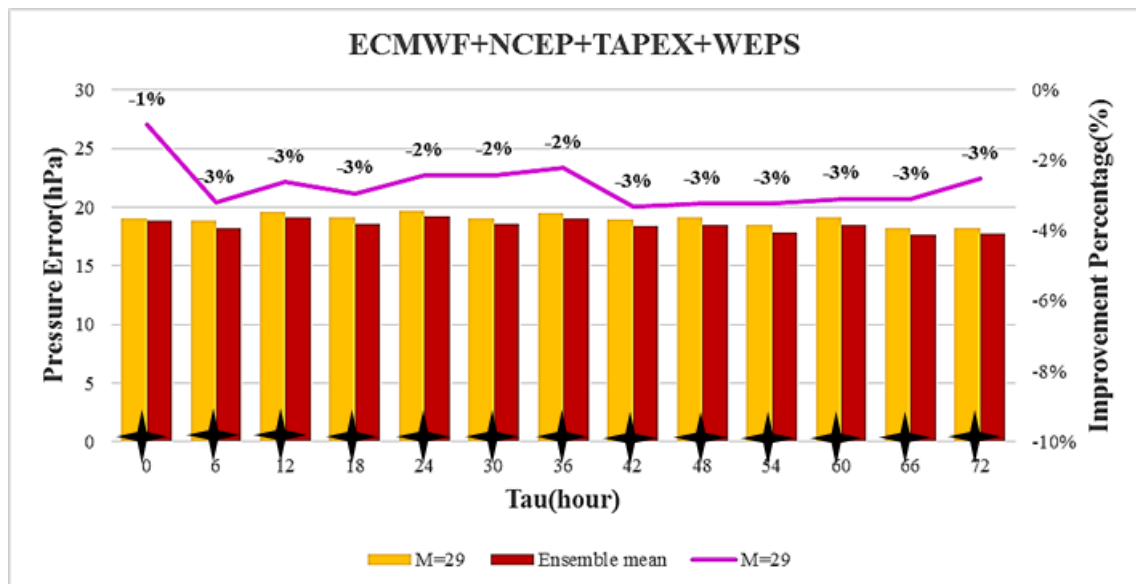


圖 82 2014-2016 年颱風個案以 12 小時之颱風路徑誤差選取成員(M=29)並預報颱風中心最低氣壓。紅色長條圖為系集平均誤差(Ensemble mean)，黃色長條圖為 SUMMER（成員數 29）之平均最低氣壓。紫紅色曲線及數值表示選取成員數 29 相對於系集平均誤差之改進比例，黑色十字符號則表示「Ensemble mean 與 UMMER(M=29)存在差距」統計上滿足 95%信心水準。

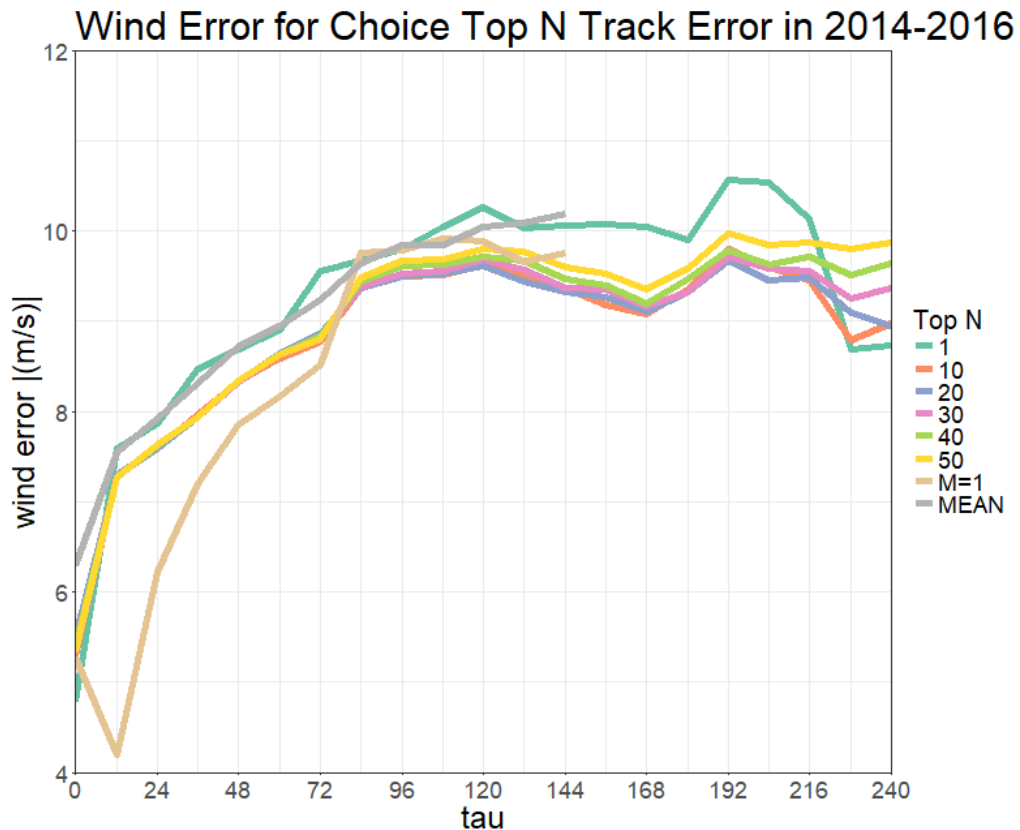


圖 83 2014-2016 年西北太平洋颱風個案（非均質化），事後分析系集成員路徑預報誤差 Top N (Top N, N=1, 10, 20, 30, 40, 50)，與僅考量最大風速誤差之 SUMMER(M=1)和系集平均(Mean)之風速誤差（取絕對值）隨預報時間(tau)之時序變化。

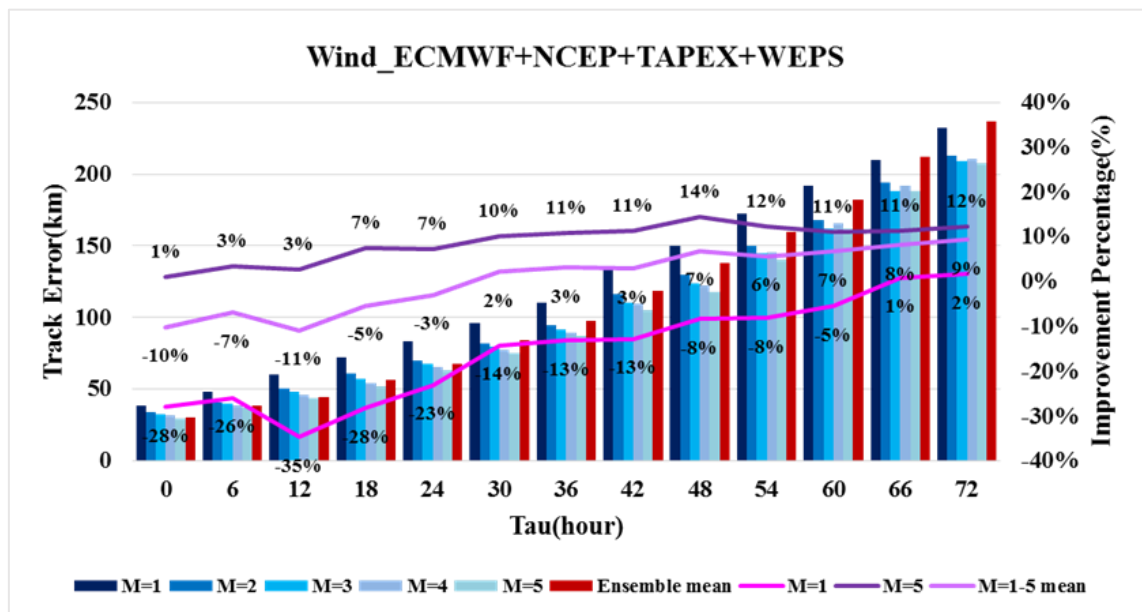


圖 84 2014-2016 年西北太平洋颱風個案，SUMMER 以 12 小時最大風速誤差選取成員(M=1-5)預報颱風路徑誤差之結果。紫紅色實線 SUMMER 為 M=1 相對於系集平均路徑誤差之平均改進率，紫色實線則為 M=5 時 SUMMER 相對於系集平均之改進率。

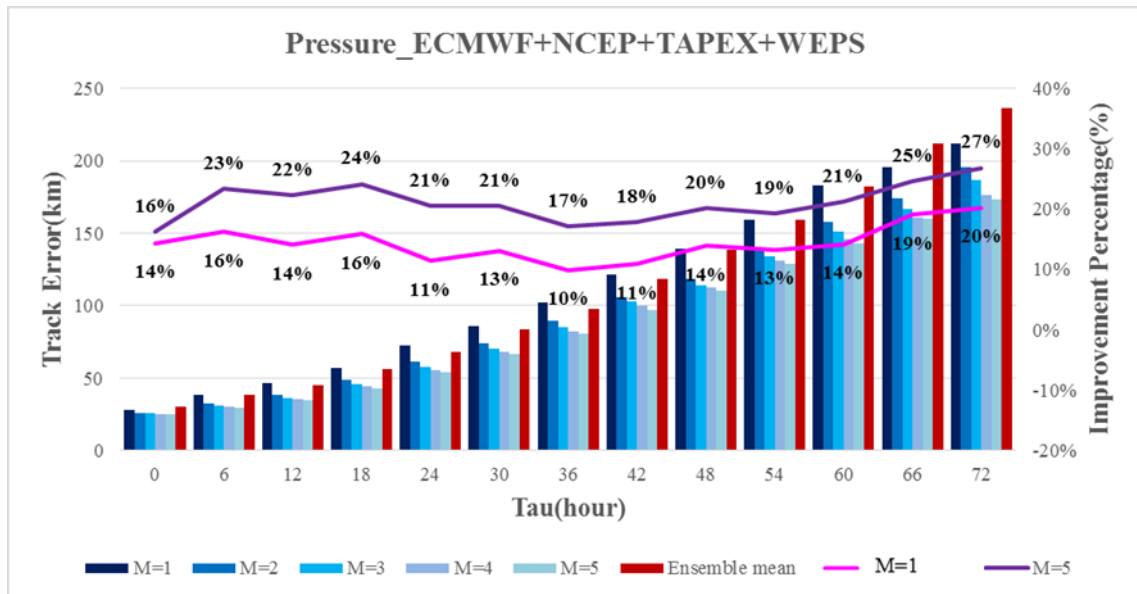


圖 85 同圖 84 但改為以 12 小時最低氣壓預報誤差挑選 SUMMER 成員。

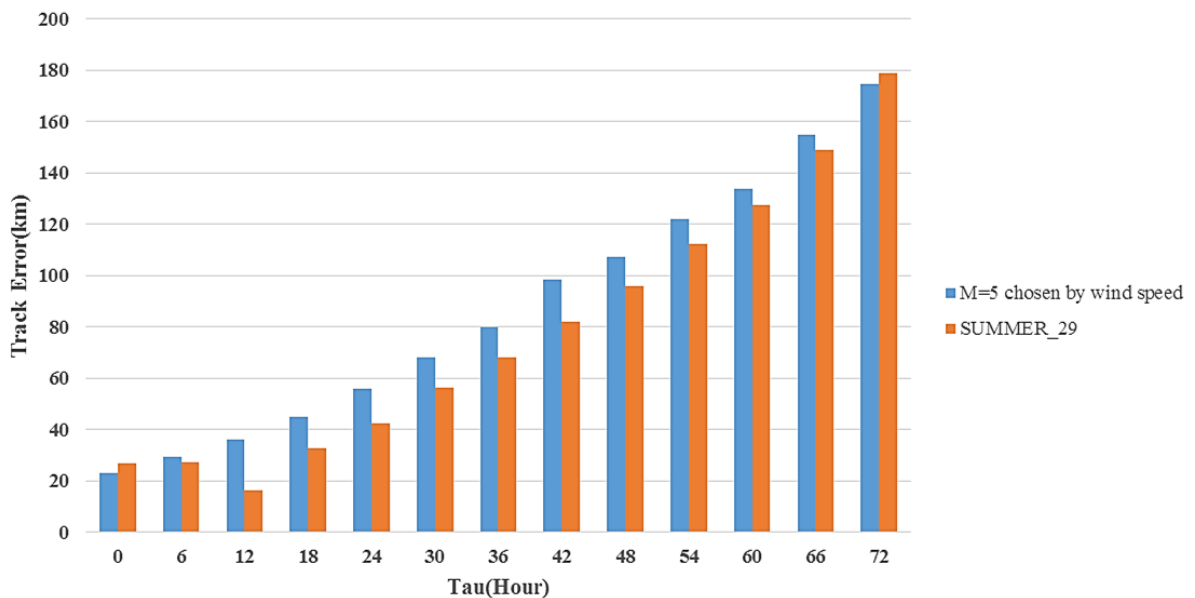
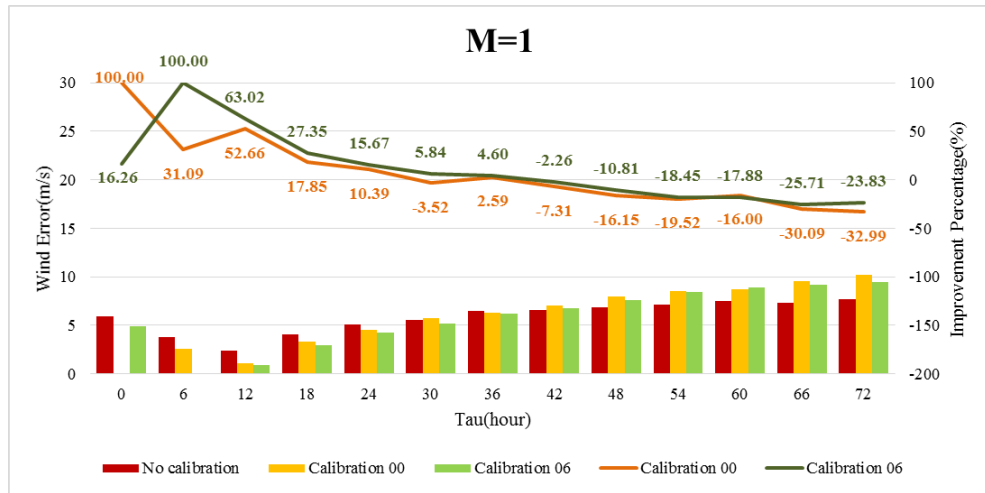
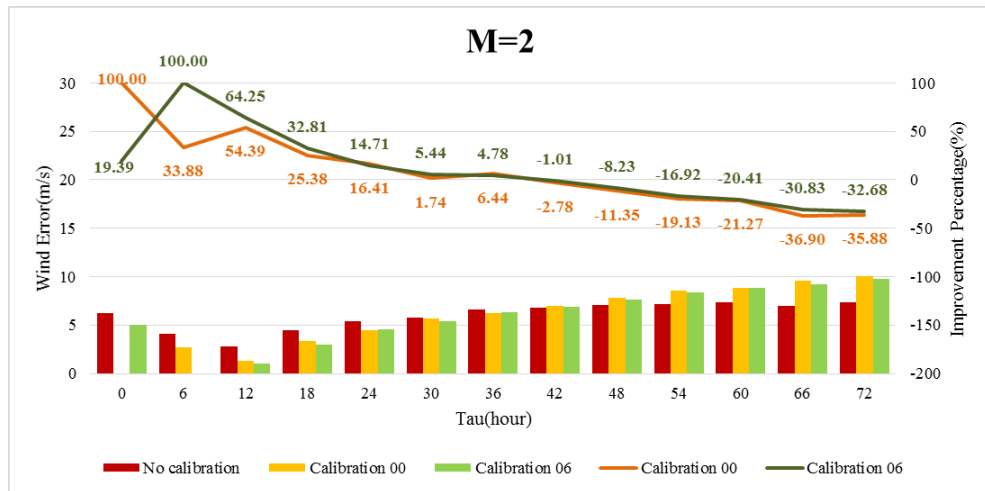


圖 86 以 2016 年西北太平洋歷史颱風個案為例，比較 4.2.5.2 中颱風強度 SUMMER 預報技術之路徑校驗（藍色長條圖）與 3.3.3 節 SUMMER_29 實驗（橘色長條圖）之路徑誤差隨預報時間之關係圖。

(a)



(b)



(c)

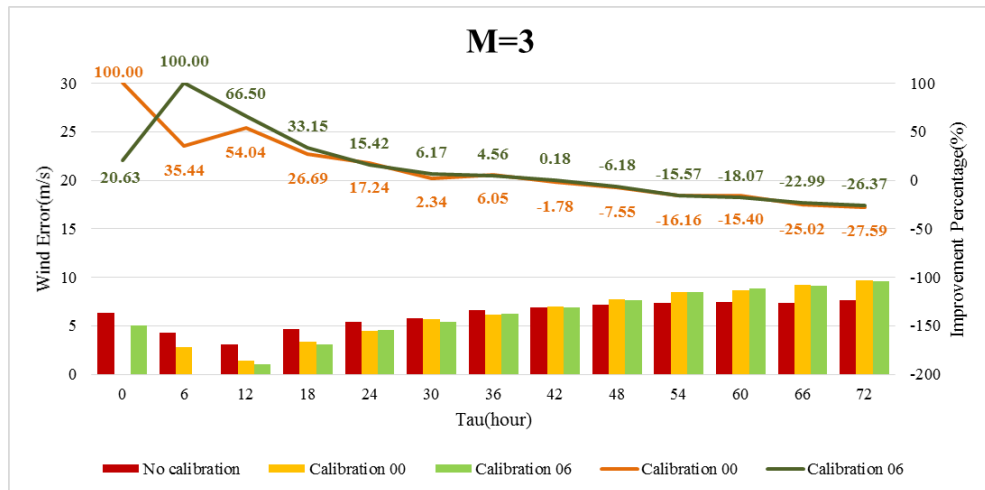
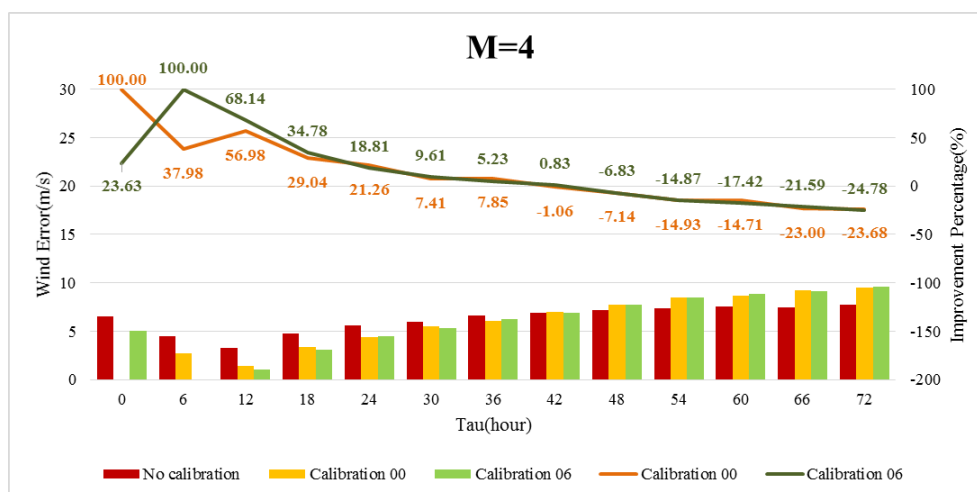
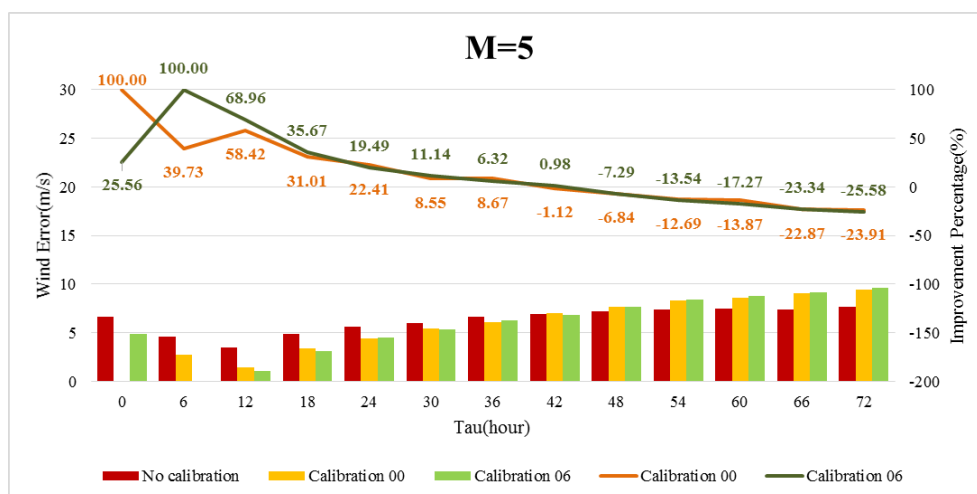


圖 87 考量颱風強度（最大風速，m/s）Calibration 之颱風強度校驗結果。Calibration 00 和 Calibration 06 為各成員直接對模式預報，分別以預報時間第 0 及第 6 小時強度誤差平移調整，之後再做 SUMMER M=1-5 強度預報之校驗結果。No calibration 同圖 71(a)，未經 Calibration 結果。圖中實線分別為 Calibration 00、與 Calibration 06 相對於 No calibration 之誤差改進率。圖 (a)到圖(f)分別為成員數 1 到 5 及系集平均。

(d)



(e)



(f)

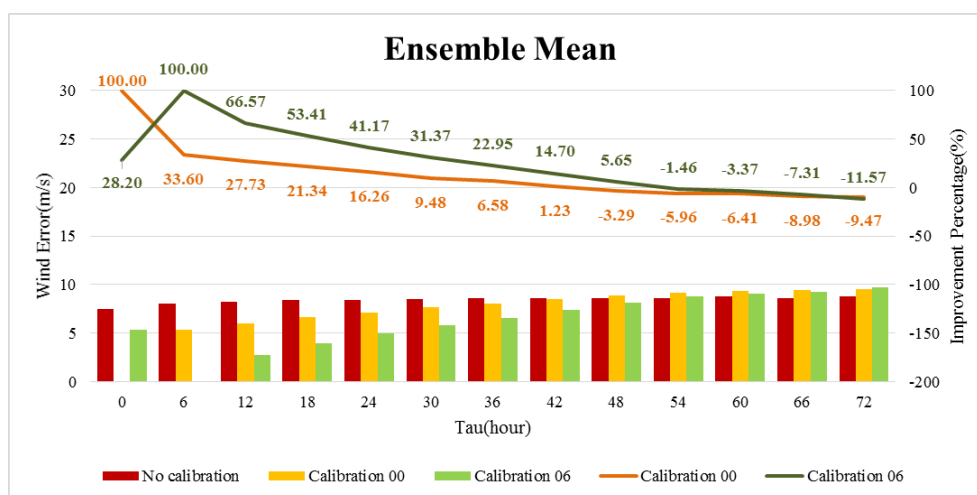
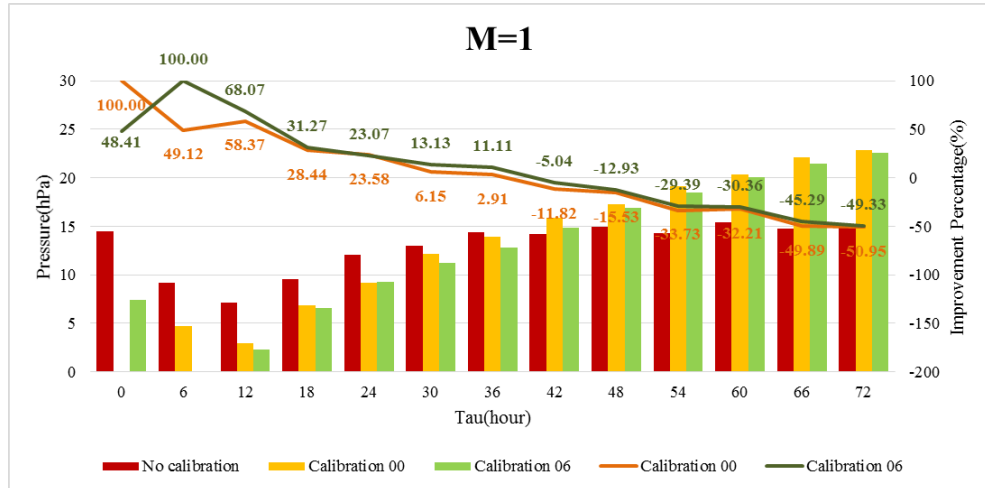
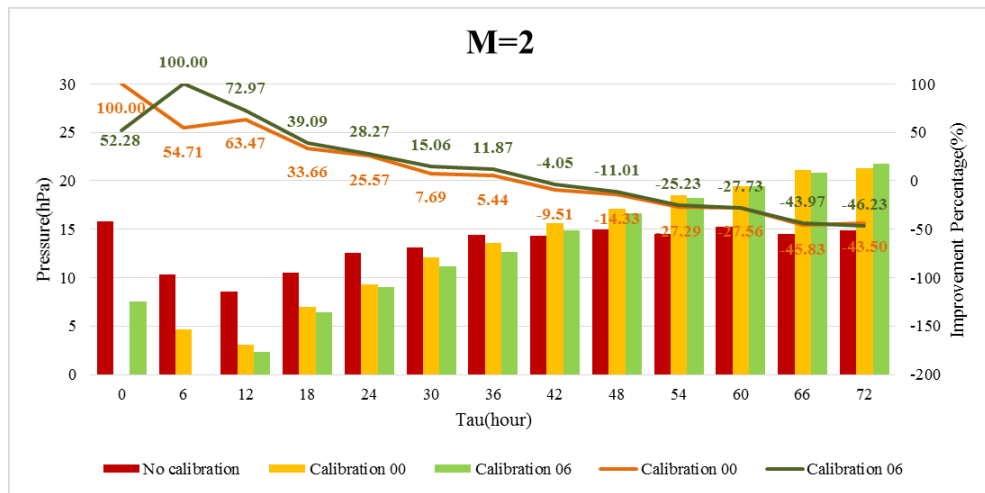


圖 87 考量颱風強度（最大風速，m/s）Calibration 之颱風強度校驗結果。Calibration 00 和 Calibration 06 為各成員直接對模式預報，分別以預報時間第 0 及第 6 小時強度誤差平移調整，之後再做 SUMMER M=1-5 強度預報之校驗結果。No calibration 同圖 71(a)，未經 Calibration 結果。圖中實線分別為 Calibration 00、與 Calibration 06 相對於 No calibration 之誤差改進率。圖(a)到圖(f)分別為成員數 1 到 5 及系集平均。

(a)



(b)



(c)

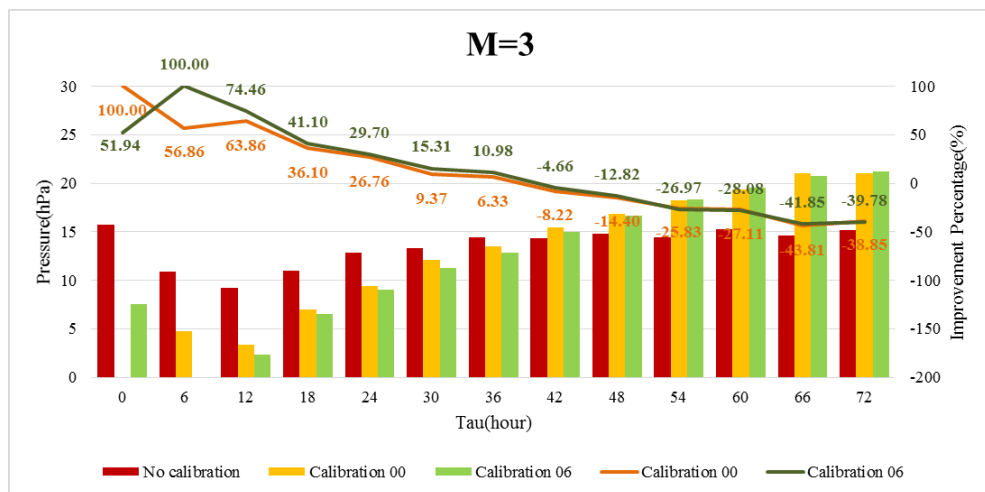
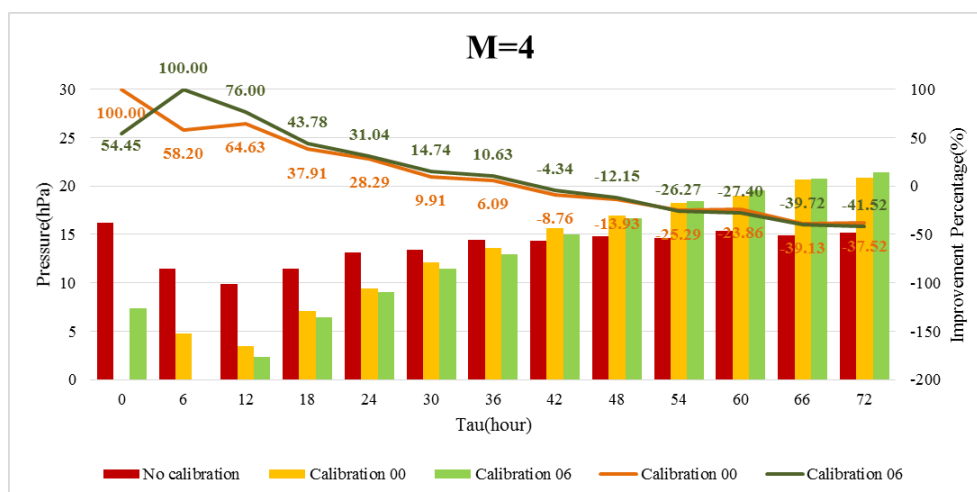
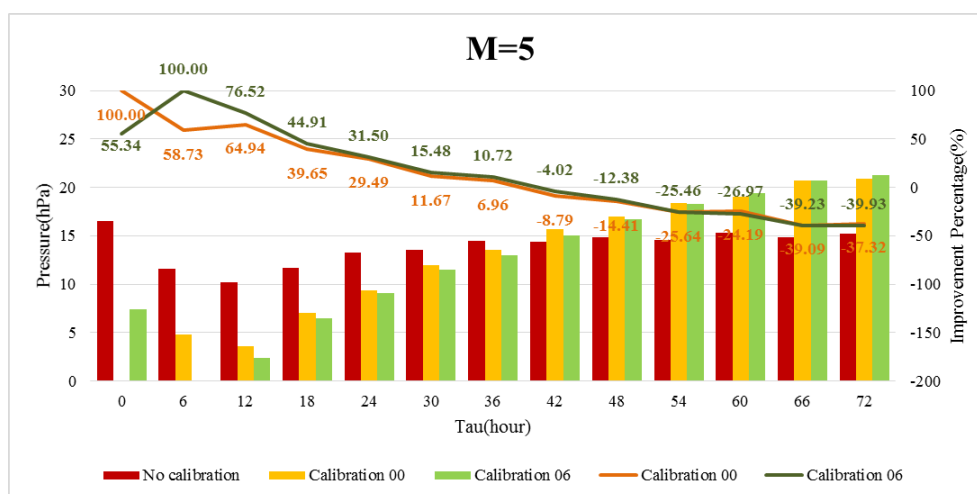


圖 88 同圖 87 但為最低氣壓(hPa) ，No calibration 同圖 72(a) 。

(d)



(e)



(f)

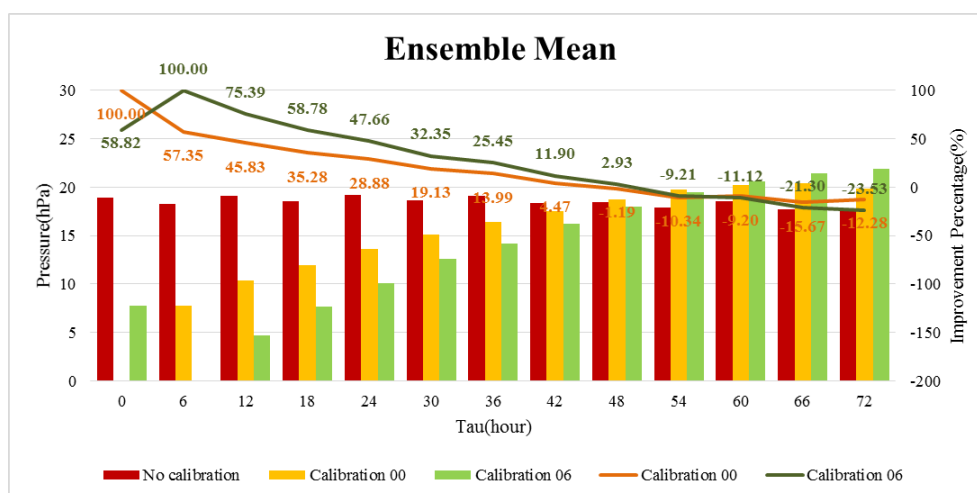


圖 88 同圖 87 但為最低氣壓(hPa) ，No calibration 同圖 72(a) 。

第五章、結論與建議

一、颱風路徑 SUMMER 預報技術：

承期中報告時委員建議，研究首先取 2014-2016 年西北太平洋颱風個案，依預報時間 0-12 小時之颱風強度變化將個案分類，分析 SUMMER 對不同強度颱風之預報能力。經分類後以 0-12 小時強度維持的颱風個案數最多，又可將強度維持颱風細分為輕度、中度及強烈颱風三類。在不同颱風強度下，SUMMER 對於路徑預報能力有顯著差異，即 12 小時強度維持為中度以上之颱風，使用 SUMMER 技術之結果相較所有颱風而言有較佳之預報能力（圖 22）。

考慮侵台警報期間之颱風個案，SUMMER 在 102 小時內較系集平均更佳。另一方面，系集模式原本對於侵台警報期間之颱風個案路徑預報誤差較所有個案大，SUMMER 的路徑預報誤差也因此較所有個案大。試比較全部個案與警報期間個案，SUMMER 相較於系集平均之路徑預報誤差改進值，則在預報時間 78 小時，全部個案使用 SUMMER 的路徑誤差改進 1.57 公里，警報期間個案使用 SUMMER 技術則可改進 32.69 公里，表示在颱風警報發布期間更應該使用 SUMMER 以改善系集模式之颱風路徑預報（圖 24）。

二、颱風路徑 SUMMER 預報技術優化：

以 2016 年歷史颱風個案為例，由期中報告之 SUMMER 路徑預報策略為基礎（SUMMER 實驗），經初步分析後可知，SUMMER 路徑預報在 78 小時後預報誤差會大於系集平均，是故研究擬定路徑預報需要有分段策略，因而設計了 SUMMER_28、SUMMER_min 和 SUMMER_29 三組實驗。這些時間主要的差異在於 78 小時內分別使用不同的成員個數，但在 78 小時後，三組實驗皆以系集平均做路徑預報。

各組實驗與 SUMMER 比較後，排除必須仰賴事後分析的 SUMMER_min 實驗，可得 SUMMER_29(78 小時內以挑選成員數為 29 個進行平均，78 小時後改以系集平均做路徑預報) 為目前 SUMMER 路徑預報最優化之設計，建議以此作為實務路徑預報策略。

三、各國系集模式對颱風強度預報之特性：

比較 ECMWF、NCEP、WEPS 及 TAPEX 四個系集模式對 2014-2016 年西北太平洋歷史颱風的強度預報特性，四個模式普遍低估強度較高的颱風，模式成員對較強的颱風（近中心最大風速大於 55m/s，或中心氣壓低於 920hPa）幾乎低估其強度，此時較無預報能力。

四、發展颱風強度 SUMMER 預報技術：

強度預報技術主要參考前一年計畫使用之 SUMMER 路徑預報技術，以 12 小時之強度預報（考慮近中心最大風速或中心最低氣壓）誤差絕對值排序，經誤差標準化分析後，研究先討論挑選成員數為 1 到 5 時強度預報結果。由強度校驗結果可知，模式對颱風強度的預報表現與路徑有很大不同，從 SUMMER 選取的成員數目可以看出來，路徑預報中建議選擇成員數 29 個做預報，強度預報時選擇更多的成員數並不會有更多的修正，對預報的前 72 小時而言，選擇成員數為 1 幾乎會是最好的預報。針對不同颱風強度之偵測率(POD)、誤報率(FAR)分析，以挑選成員數為 1 為例，SUMMER 技術在中度、強烈颱風時相較於與系集平均的表現更有鑑別力，並且能大幅提高颱風強度預報的偵測率，同時降低誤報率。這個結論亦可呼應結論一之討論，顯示 SUMMER 對於中度、強烈颱風的路徑和強度預報更有可信度。

比較不同系集模式成員組合對於颱風強度預報能力之高低。12-72 小時內強度預報表現由較佳者排序依次為：「僅考慮區域模式成員」、「同時考慮區域及全球模式成員」，最後為「僅考慮全球模式成員」（圖 71、圖 72）。

若同時考量颱風路徑和強度預報，綜合近兩年之計畫結果，若 SUMMER 由 12 小時路徑預報誤差挑選成員做強度校驗，其表現在 72 小時內均不如系集平均（圖 81）；若反過來 SUMMER 由 12 小時颱風強度預報誤差挑選成員做路徑校驗，則成員數為 5 之預報結果最佳（圖 84、圖 85）；進一步與 SUMMER_29 比較其路徑預報結果，則在 12~72 小時內 SUMMER_29 表現稍佳，但兩者路徑誤差之差異平均僅約 10 公里，亦顯示兩種方法的路徑預報能力是相當的（圖 86）。

利用強度調校的方法能夠改善模式對颱風強度預報能力不足的問題（圖 87、圖 88），其中又以第 6 小時強度誤差調校改善更多，但是調校的作用僅限於前期（約 36 小時內），36 小時後則是未經調校的強度預報表現最佳。

最後，根據 12 月 22 日審查會議，感謝委員建議，明年度計畫擬調整颱風強度之分析方法。由 4.1.2 節颱風強度分析可知，各國系集颱風強度預報普遍存在偏差（低估颱風強度），這些偏差本身亦具有差異，並進而影響本計畫討論之各國系集颱風強度特性，以及 SUMMER 強度預報技術（例如目前計畫對 SUMMER 強度預報建議選取成員數 1），故應先去除各模式的偏差值再分析與校驗。此外，未來擬排除個案數較少的情況，並加入 TWRP 或 ECMWF 之決定性預報結果作基準，進一步討論 SUMMER 颱風強度預報技術之優劣。

附錄一

「系集颱風路徑預報應用技術發展(2/2)」計畫

第一次工作會議記錄

時間：106 年 6 月 6 日（星期二）14：00—15：30

地點：中央氣象局預報中心 4 樓討論室

主席：張課長博雄

記錄：謝副研究員銘恩

出席人員（職稱敬略）：

中央氣象局：顧欣怡、賈愛玫

颱洪中心：蕭玲鳳、陳嫻竹、劉嘉騏、江宙君

會議結論：

1. 分析通過台灣附近個案之 SUMMER 表現，或者 SUMMER 於特殊情況的信心度。
2. 期中完成一套包括「初步測試不同 tau 用不同成員數」的技術（交付項目）。
3. 技術優化之重點放在「不同 tau 用不同成員數」，「使用 0、6 小時資訊」之改進方式則降低其比重或不進行。

附錄二

「系集颱風路徑預報技術發展(2/2)」計畫

第二次工作會議記錄

時間: 106 年 9 月 25 日 (星期一) 15:00 – 17:00

地點: 中央氣象局預報中心 4 樓討論室

記錄: 林宜霖

出席人員 (職稱敬略):

中央氣象局: 呂國臣主任、陳怡良副主任、林秉煜課長、黃椿喜課長、
顧欣怡、賈愛玫、謝旻耕、陳新淦
颱洪中心: 蕭玲鳳、陳嫻竹、劉嘉騏、江宙君

會議結論:

1. 中央氣象局:

- 1) 颱風強度校驗建議將個案依「生命期 (ex: 成熟期 前/後)」及「侵台警報」分類討論。
- 2) 「SUMMER 颱風路徑預報全球模式成員表現較佳」與「SUMMER 颱風強度預報區域模式成員表現較佳，路徑預報亦比系集平均佳」兩結論看似矛盾，建議詳加討論。
- 3) 建議試以 SUMMER 颱風路徑預報(M=29)成員中取區域模式成員做颱風強度預報。
- 4) 建議透過 bias correction 等方法，先修正系集模式之強度預報使 spread 能預報較強的颱風後再做 SUMMER。
- 5) 全球模式與區域模式本身差異大，建議分開討論。
- 6) 暴風半徑計畫主題，建議先比較不同單位估算之暴風半徑系統性差異，短期目標為預報四個象限之暴風半徑 (中長期目標為八個方向)。此外，亦可考慮計畫在 TAHOPE 實驗計畫(美方為 PRECIP 2020)執行前有无其他優先目標。

2. 颱洪中心:

- 1) 前年度計畫重點結果回顧。
- 2) 今年度計畫成果暨執行困難。
 - a. SUMMER 技術優化:
 - 以 2016 年歷史颱風個案事後檢驗，建議預報 78 小時內用 SUMMER M29，78 小時後用系集平均。
 - 檢視 SUMMER 對不同強度颱風個案的路徑預報特性，SUMMER 對中度、強烈颱風個案預報之平均路徑誤差，120 小時內較全部個案路徑預報

平均為佳；輕度颱風則較差，顯示 SUMMER 對中度、強烈颱風路徑預報更有可信度。

b. 系集預報強度特性分析:

- 颱風強度與路徑預報特性存在差異，即強度誤差並不會隨預報時間增加而升高。因為這一點，若依照預報時間(τ)之強度預報結果取平均會使颱風不同生命期之資訊平滑。
- ECMWF、NCEP、WEPS 及 TAPEX 四個系集模式之颱風強度預報皆系統性偏低，特別是對於強度高的颱風（最大風速大於 55 m/s 或最低氣壓小於 920 hPa）系集模式 spread 可能無法預報。

c. 發展系集颱風強度預報技術（2014-2016 歷史颱風個案）:

- 以 SUMMER M29 挑選之 12 小時颱風路徑預報較佳成員預報颱風強度，在 72 小時內與系集成員平均比較，改進率皆為負值。
- 仿照 SUMMER 颱風路徑預報技術做 SUMMER 颱風強度預報(M=1-5)，並比較三種情況下颱風強度預報結果，結論為「單考慮兩個區域模式」優於「同時考慮全球模式和區域模式」優於「單考慮兩個全球模式」。又去年度計畫 SUMMER M=28 颱風路徑預報中，全球模式(約 70%)成員多於區域模式（約 30%）；今年度 SUMMER M=5 颱風強度（最大風速）預報統計結果，則區域模式(59.82%)成員略大於全球模式(40.18%)。
- SUMMER 強度預報技術對於中度、強烈颱風較系集平均更能有效提高 POD。
- 討論路徑誤差與強度誤差之關係(1/2): 排除路徑預報誤差之 SUMMER 強度預報，SUMMER M1 在 72 小時內誤差最小，系集平均則與 TOP1 誤差值相近。
- 討論路徑誤差與強度誤差之關係(2/2): 以 12 小時強度誤差 M=1-5 挑選成員做路徑預報，SUMMER 路徑誤差值與系集平均差異不大，又 M=1 的路徑預報誤差大於系集平均，若要同時考慮強度與路徑預報，建議取 SUMMER M=5 或 M=1-5 平均。

d. 2018-2019 年計畫重點討論:

- 各國各單位定義之颱風半徑差異大，不易比較。
- 衛星、模式資料議題尚待釐清。

參考文獻

颱風預報作業手冊，1997，中央氣象局編印。

李志昕、洪景山，2011：區域系集預報系統研究：物理參數化擾動。《大氣科學》，**39**，95 - 116。

李志昕、洪景山，2014：區域系集預報系統研究：系集成員產生方式之評估。《大氣科學》，**42**，135 - 179。

木場博之、萩原武士、小佐野慎悟、明石修平、1990：台風の CI 数と中心気圧及び最大風速の關係。《氣象庁研究時報》、42、59-67。

Brill, K. F., A. R. Fracasso, and C. M. Bailey, 2015: Applying a Divisive Clustering Algorithm to a Large Ensemble for Medium-Range Forecasting at the Weather Prediction Center. *Wea. Forecasting*, **30**, 873–891.

Cangialosi, J. P., and J. F. Franklon, 2017: 2016 National Hurricane Center Forecast Verification Report. National Hurricane Center, NHC, 72pp.

DeMaria, M., C. R. Sampson, J. A. Knaff, and K. D. Musgrave, 2014: Is tropical cyclone intensity guidance improving? *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **95**, 387–398.

Dong, L. and F. Zhang, 2016: OBEST: An Observation-based ensemble subsetting technique for tropical cyclone track prediction. *Wea. Forecasting*, **31**, 57-70.

Elsberry, R. L., and L. E. Carr III, 2000: Consensus of dynamical tropical cyclone track forecasts—Errors versus spread. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 4131–4138.

———, J. R. Hughes, and M. A. Boothe, 2008: Weighted position and motion vector consensus of tropical cyclone track prediction in the western North Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 2478-2487.

———, H.-C. Tsai, and M. S. Jordan, 2014: Extended-range forecasts of Atlantic tropical cyclone events during 2012 using the ECMWF 32-day ensemble predictions. *Wea. Forecasting*, **29**, 271–288.

Emanuel, K. and F. Zhang, 2016: On the predictability and error sources of tropical cyclone intensity forecasts. *J. Atmos. Sci.*, **73**, 3739-3747.

Epstein, E. S., 1969: Stochastic dynamic prediction. *Tellus*, **21**, 739–759.

Evans, C., D. F. Van Dyke, and T. Lericos, 2014: How do forecasters utilize output from a convection-permitting ensemble forecast system? Case study of a high-impact precipitation event. *Wea. Forecasting*, **29**, 466–486.

Froude, L. S. R., L. Bengtsson, and K. I. Hodges, 2007: The prediction of extratropical storm tracks by the ECMWF and NCEP ensemble prediction systems. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 2545–2567.

- Goerss, J. S., 2000: Tropical cyclone track forecasts using an ensemble of dynamical models. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 1187-1193.
- Grimit, E. P., and C. F. Mass, 2007: Measuring the ensemble spread–error relationship with a probabilistic approach: Stochastic ensemble results. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 203–221.
- Hsiao, L.-F., M.-J. Yang, C.-S. Lee, H.-C. Kuo, D.-S. Shih, C.-C. Tsai, C.-J. Wang, L.-Y. Chang, D. Y.-C. Chen, L. Feng, J.-S. Hong, C.-T. Fong, D.-S. Chen, T.-C. Yeh, C.-Y. Huang, W.-D. Guo, and G.-F. Lin, 2013: Ensemble forecasting of typhoon rainfall and floods over a mountainous watershed in Taiwan. *J. Hydrol.* **506**, 55-68.
- Kumar, T. S. V., T. N. Krishnamurti, M. Fiorino, and M. Nagata, 2003: Multimodel superensemble forecasting of tropical cyclones in the Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 574–583.
- Lee, T. C., and M. S. Wong, 2002: The use of multiple-model ensemble techniques for tropical cyclone track forecast at the Hong Kong Observatory. WMO Commission for Basic Systems, Technical Conference on Data Processing and Forecasting Systems, Cairns, Australia, 2-3 Dec. 2002.
- Leith, C. E., 1974: Theoretical skill of Monte Carlo forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, **102**, 409–418.
- Leslie, L. M., and K. Fraedrich, 1990: Reduction of tropical cyclone position errors using an optimal combination of independent forecasts. *Wea. Forecasting*, **5**, 158–161.
- Leutbecher, M., and T. N. Palmer, 2008: Ensemble forecasting. *J. Comput. Phys.*, **227**, 3515–3539.
- Lorenz, E. N., 1963: Deterministic nonperiodic flow. *J. Atmos. Sci.*, **20**, 130–141.
- Poroseva, S. V., N. Lay, and M. Y. Hussaini, 2010: Multimodel approach based on evidence theory for forecasting tropical cyclone tracks. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 405–420.
- Prates F, 2012: *Forecasting Tropical Cyclones in the Medium Range*, ECMWF, 43pp.
- Qi, L., H. Yu, and P. Chen, 2014: Selective ensemble-mean technique for tropical cyclone track forecast by using ensemble prediction systems. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **140**, 805-813.
- Sanders, F., 1973: Skill in forecasting daily temperature and precipitation: Some experimental results. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **54**, 1171–1179.
- Thompson, P. D., 1977: How to improve accuracy by combining independent forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, **105**, 228–229.
- Tien, T. T., C. Thanh, H. T. Van, and C. Q. Kieu, 2012: Two-dimensional retrieval of typhoon tracks from an ensemble of multimodel outputs. *Wea. Forecasting*, **27**, 451–461.
- Weber, H. C., 2003: Hurricane track prediction using a statistical ensemble of numerical models. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 749– 770.
- Whitaker, J. S., and A. F. Lough, 1998: The relationship between ensemble spread and

ensemble mean skill. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 3292–3302.

WMO, 2007: *Sixth WMO International Workshop on Tropical Cyclone (IWTC-VI)*. WMO, 92pp.