

應用系集模式資料在颱風大小之分析與預報

李繼常¹ 周昆炫^{1,2*}

中國文化大學地學研究所¹ 中國文化大學大氣科學系²

(中華民國 113 年 9 月 26 日收稿；中華民國 114 年 5 月 22 日定稿)

摘要

颱風是極具破壞性的劇烈天氣系統，其大小與災害範圍直接相關，即時掌握並預測風場結構變化至關重要。由於颱風內部實際觀測資料的缺乏，預報和研究人員已考慮使用模式資料來估算颱風大小與結構然而其在這方面的可靠性仍需進一步評估。

本研究透過美國國家環境預報中心全球系集預報系統 (National Centers for Environmental Prediction Global Ensemble Forecast System, GEFS) 與中央氣象署區域系集預報系統 (WEPS) 兩種系集模式資料，定量計算 4 個地理象限中的颱風大小 (R34, radius of 34-knot surface wind)。將系集模式預報系統 (Ensemble Prediction System, EPS) 的 R34 計算結果與 Multiplatform Satellite Surface Wind Analysis (MTCSWA) 進行比較，並使用 JTWC 最佳路徑資料與 Advanced Scatterometer (ASCAT) 等不同資料作為基準，以客觀評估不同系集模式對於颱風大小的掌握能力與誤差特性。

結果顯示，在初始時間下，WEPS 的 R34 誤差不論是以 JTWC 或 ASCAT 為基準均在所有象限中表現最佳，GEFS 與 MTCSWA 的表現相近。在預報場方面，WEPS 在整個預報期間 (f00~f108) 的 R34 誤差均小於 GEFS，兩者在 R-squared 的表現相近。整體而言，WEPS 在 R34 較大時存在輕微高估，GEFS 則是在各個象限中均呈現較顯著的高估特徵。此外，EPS 相較於 MTCSWA 能掌握到更多颱風風場不對稱性的變化，但是通常會較為高估，MTCSWA 則是過於低估。這項研究利用系集模式客觀分析颱風 R34，有助於理解不同模式或分析資料之間的差異與限制，亦可作為未來相關研究與預報的參考依據。

關鍵字：系集模式預報、颱風大小、R34

*通訊作者：周昆炫 (zcx@ulive.pccu.edu.tw)

一、前言

颱風風場結構分析是颱風動力相關研究中非常重要的一環，除了研究人員之外，防災單位與預報人員也對於颱風大小變化相當重視，掌握此資訊有助於防災措施的制定與提供準確的颱風預報。而合理的分析颱風風場結構變化，經常需要即時監測颱風與搭配模式預報資料來進行。JTWC (Joint Typhoon Warning Center, 聯合颱風警報中心) 是位於美國夏威夷的氣象預報單位，其主要擔任西北太平洋、南海及印度洋的熱帶氣旋實時監測任務。然而，其在西元 1987 年之後便停止了颱風飛機觀測的相關工作，由於缺乏颱風內部風場結構的實際觀測數據，因此，後續大部分相關的研究中，主要使用衛星觀測或模式分析、預報資料來進行。

Holland and Merrill (1984) 提出，分析一個颱風的變化時，可以藉由三個重要的參數來表示，(1) 強度 (Intensity) 由中心最大風速 (V_{max}) 與中心最低海平面氣壓 (MSLP) 來表示，(2) 壯度 (Strength) 為自颱風中心向外 300 公里半徑範圍內的平均風速，(3) 大小 (Size) 則是自颱風中心向外到達某一風速值的半徑，而此一風速值經常以 34 knots 為代表，這時的半徑即為 R34 (Radius of 34-knot surface wind)。

颱風風場結構變化經常與其當下的大氣環境條件之間密切相關。Lee et al. (2010) 使用 2000 年至 2005 年期間 QuickSCAT (Quick scatterometer) 衛星觀測資料探討熱帶氣旋初始大小、環境條件與大小在後續發展之間的關聯性，研究結果顯示，在小型熱帶風暴分類中，只有很少部分後續發展成大型熱帶氣旋，此外，沒有任何一個大型熱帶風暴後續發展成小型熱帶氣旋，此一現象代表熱帶氣旋的大小在發展過程中，存在著大者恆大、小者恆小的趨勢，透過分析不同初始大小熱帶風暴的生成環境條件後發現，小型熱帶風暴通常生成於東風波 (easterly wave) 的環境中，大型熱帶風暴則大多發展於季風相關的環境條件。除了初始大小與大氣環境條件之外，熱帶氣旋大小與其生成位置、海洋條件等因素也相關。Chan and Yip (2003) 使用 QuickSCAT 衛星觀測資料分析 1999-2002 年在西北太平洋熱帶氣旋大小差異，熱帶氣旋在聖嬰年 (2002) 的大小較大，因為生成位置通常較為偏東、遠離陸地，較長的生命週期也有更多時間發展；反之，熱帶氣旋在反聖嬰年 (1999、2000) 的大小較小，因其生成位置較為偏西、更靠近陸地，導致發展時間受限。

對於探討熱帶氣旋大小已被證實有其研究上之重要價值，因其相較於強度更能

夠反應出颱風內核以外之風雨影響程度。周等人 (2018) 分析 1980 年至 2016 年間，一共 32 個中心有登陸臺灣之颱風個案，探討颱風大小與壯度對台灣地區受風雨影響程度，結果顯示，台灣地區風雨指標與颱風大小、壯度相關性較好，其次為移速，強度則較差。究其原因發現，颱風強度通常與颱風中心登陸點附近的風雨指標之間有正相關，而遠離登陸點之外的風雨指標，則是以颱風大小及壯度較能夠反應出颱風內核以外之風雨影響程度，相關性分析中也顯示出，颱風大小與壯度具有高度相關性，而兩者均與強度之間相關性較低。

現今，由於颱風風場觀測資料上相對缺乏與技術限制，許多研究人員與預報單位使用模式與系集模式預報資料來估計颱風大小與風場結構，但是仍須進一步評估模式對於颱風大小與風場結構分析與預報上之可靠性。Lu et al. (2022) 分析 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 提供的 DET (Deterministic Forecast，決定性預報) 與 EPS (Ensemble Prediction System，系集預報系統) 對於 2020 年位於西北太平洋與南海的 26 個熱帶氣旋 R34 的預報表現，使用 MODE (Method for Object-Based Diagnostic Evaluation) 進行評估，結果顯示，無論是 DET、EPS-CTL (系集控制組)

與 EPS-MEAN (系集平均) 對於 R34 預報在 72 小時之內均有相當的預報能力。

綜合前人研究成果可得知，對於颱風風場結構分析與預報有其研究上與防災上之重要性，但是受限於觀測資料的缺乏，進而期望是否能夠使用數值模式預報資料估計颱風風場與結構變化，儘管已有相關研究證實模式、系集模式預報對於颱風大小有其預報能力，然而，目前透過不同系集模式資料針對颱風風場結構參數進行統整分析之相關研究仍然相當有限。因此，本研究主要目的是探討不同系集模式預報 (CWA WEPS、NCEP GEFS) 之間對於颱風風場結構之特性，透過定量計算系集模式預報資料中 4 個地理象限 (NE、SE、SW、NW) 中的颱風大小，再與 MTCSWA (Multiplatform Satellite Surface Wind Analysis) 所提供的 R34 進行比較，同時以 JTWC Best Track (最佳路徑資料) 與 ASCAT 衛星風場所分析之 R34 做為不同的比較基準，藉以客觀評估不同系集模式資料對於颱風大小在預報上差異與特徵，並且期望利用系集模式預報可提供不確定性訊息之優勢，發展系集模式在颱風大小侵襲機率預報上的相關應用。本研究第二章將介紹使用資料與相關分析之方法和定義；第三章將透過系集平均的方式逐一探討以 JTWC 最佳路徑資料為基準的 R34 定

量分析之結果，也延伸討論系集模式在颱風大小侵襲機率預報上之相關應用；第四章則是以 ASCAT 為基準的 R34 定量分析結果與個案分析；最後一章為結論與展望。

二、資料與方法

(一) 使用資料與介紹

本研究透過 2 種系集模式資料進行颱風大小及結構分析。首先是美國國家環境預報中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 的全球系集預報系統 (Global Ensemble Forecast System, GEFS)，共 30 組系集成員，此資料提供每天 4 次 (0000、0600、1200、1800 UTC)，長達 384 小時 (16 天) 的預報資料，時間解析度為 3 小時，其水平解析度為 0.25 度。本研究使用 GEFS 未來 120 小時，時間解析度為 6 小時的資料來進行分析。關於 GEFS 的更詳細資訊與資料取得方式可參考 <https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gens/> 網站。此外，美國國家海洋暨大氣總署 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 的地球物理流體動力學實驗室 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, GFDL) 透過 GEFS 進行熱帶氣旋追蹤與分析，以得出熱帶氣旋相關參數，其中包括颱風中心位置、強

度以及大小，而此資料則是由 NCEP EMC (Environmental Modeling Center) 所提供。本研究中使用其提供的熱帶氣旋大小 (R34) 數據納入定量分析比較。

另一種系集模式資料為中央氣象署 (Central Weather Administration, CWA) 的區域系集預報系統，使用 WRF (Weather Research and Forecasting) 區域模式所發展具有高水平解析度的區域系集模式預報系統 (WRF Ensemble Prediction System, WEPS; Li et al. 2020)，透過初始場擾動、側邊界擾動與模式擾動以產生共 20 組系集成員，空間範圍涵蓋南緯 5 度至北緯 43 度、東經 78 度至東經 180 度，包含 2 層巢狀網格，水平解析度分別為 15、3 公里，模式預報時長為 108 小時 (4.5 天)，時間解析度為 3 小時，每天更新 4 次 (0000、0600、1200、1800 UTC)。本研究使用 WEPS 水平解析度 15 公里、時間解析度 6 小時的資料進行分析。

本研究中使用美國 NOAA/RAMMB (Regional and Mesoscale Meteorology Branch) 及 CIRA (Cooperative Institute for Research in the Atmosphere) 所研發的一種客觀颱風風場分析資料以配合系集模式資料進行比較，即 Multiplatform Satellite Surface Wind Analysis (MTCSWA)。MTCSWA 所分析的原始觀測資料包含 5

種，分別為 ASCAT (The Advanced Scatterometer) 及 QuikSCAT 衛星散射儀之海表面風場觀測資料、紅外線影像 (Infrared Flight-Level Analog Winds, IRWD)、先進微波探測裝置 (Advanced Microwave Sounding Unit, AMSU)、水氣波段 (Water Vapor Winds)、中層大氣雲導風 (Cloud Drift Winds, CDFT)，將上述資料進行客觀分析後轉換至近地面風場 (Knaff and DeMaria 2006)。MTCSWA 的時間解析度為每 3 小時一筆，依據地理座標的 4 個基本象限：東北 (NE)、西北 (NW)、西南 (SW)、東南 (SE)，分別提供 34、50 及 64-knot 暴風半徑 (R34, R50, R64)。關於 MTCSWA 相關之詳細資訊可參考其使用者指南 (The Multi-platform Tropical Cyclone Surface Wind Analysis External Users Manual 2021)。

另外，本研究使用 ASCAT 衛星散射儀風場反演資料作為 R34 定量分析中除了 JTWC 之外的另一個比較基準。ASCAT 由繞極軌道衛星 MetOp (Meteorological Operational satellite) 所搭載，於 2006 年 10 月 19 日由 ESA (European Space Agency) 發射升空，使用酬載 C-band 波段微波雷達進行海表面風場觀測工作，觀測時會有兩條掃描帶，寬約 550 公里，間隔約 700 公里，一天當中所有掃描帶約可覆蓋全球

70%之海洋。其風場反演工作由 Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI) 所負責，可提供海表面 10 m 風場資料，資料水平解析度有兩種，分別是 12.5 公里及 25 公里，在本研究中使用解析度為 12.5 公里資料進行分析。

(二) 分析方法

1. 颱風中心追蹤

在網格化的系集模式資料中，參考 Vitart et al. (1997) 提出的客觀方法進行颱風中心追蹤，颱風中心定義為最低海平面氣壓的位置，使用 JTWC 最佳路徑資料中的颱風中心經緯度作為初始猜測位置，在初始猜測位置的 2 度範圍內搜索各個系集成員初始時間下的颱風中心，而往後的預報場中，颱風中心都是根據前一個預報時間的中心位置在 8 度範圍內進行搜索。為了排除已減弱之熱帶風暴，如果強度連續兩個預報時間 (12 hr) 小於 12.4 m/s，則停止追蹤，而颱風強度定義為中心 2 度內的最大 10-m 風速值。此外，亦考慮了熱帶氣旋變性 (Extratropical Transition)，在系集模式資料中，透過製定一系列客觀暖心分析標準以保留熱帶氣旋並且排除溫帶氣旋階段。Vitart et al. (1997) 主要有以下 5 項暖心判定程序：

- 500-200 mb 平均溫度局部最大值位置為暖心，且暖心與颱風中心之間距離不可超過 2 度
- 暖心溫度必須比距離 8 度之各個方向上的溫度至少高出 0.5 度以上
- 1000-200 mb 的厚度最大值為厚度中心，且厚度中心與颱風中心之間距離不可超過 2 度
- 厚度中心必須比距離 8 度之各個方向上的厚度至少高出 50 m 以上
- 以上條件必須同時滿足

2. 四象限 R34 計算與定量分析

由於 JTWC、MTCSSWA 與 EMC 採用相同的颱風大小定義，即風速達 34 knots 所能達到之最遠距離 (R34)，為求不同資料比較上的一致性，本研究採用相同的定義以計算 EPS 與 ASCAT 資料中的颱風大小。在 EPS 中的颱風大小與結構的分析是以海平面 10 m 風場來進行計算，依據地理象限將颱風風場分成 4 個基本象限 (NE, NW, SW, SE) 來分別確定 R34，對於每個象限均是自颱風中心 0.5 度開始計算至 6.5 度為止，以徑向距離間隔每 0.25 度 (GEFS)、15 km (WEPS) 搜索一次最大風速值，最後將此風速剖面統一線性內插至 0.1 度後找出風速值跨越 34 knots 的位置。

在 ASCAT 中，使用與上述相似方式進行 R34 計算，但是由於 ASCAT 為衛星軌

道資料之特性，其掃描帶並不能總是恰好完整涵蓋到颱風中心與環流風場，並且其掃描帶時間通常無法對應於 4 個常規天氣時間 (0000、0600、1200、1800 UTC)，因此，在使用 ASCAT 進行 R34 計算時，額外製定 2 項標準，對於不符合以下任何條件的情況，都會被設定成缺失值。其一，颱風中心必須位於掃描帶範圍之內，而中心位置是由最相鄰的天氣時間下 JTWC 最佳路徑資料的颱風中心位置線性內插至 ASCAT 掃描帶時間。其二，儘管當下 ASCAT 掃描帶已有包含至颱風中心，但受限於掃描帶範圍，可能在某些象限的資料覆蓋率不足，因此還規定在搜索最大風速值時，每個四分之一環型區域的有效資料網格點數量佔總網格點數量的比例必須高於 75%，以確保估計之 R34 具有足夠代表性。而 ASCAT 掃描帶所估算 R34 之時間將被歸類在最鄰近的 4 個常規天氣時間 (0000、0600、1200、1800 UTC)。

在 R34 定量分析的策略中，當一個或多個象限中出現零值暴風半徑時，這可能會使得在驗證的過程中導入額外的複雜性或不確定性 (Sampson et al. 2017)，而零值暴風半徑的出現通常是因為颱風的最大風速接近 35 knots 強度門檻。因此在本研究中，當 R34 為 0 時視為無效資料，此外，只考慮四個象限均計算出 R34 的數據 (由

於 ASCAT 樣本較少，不使用此一方法)。另外，在 EPS 所估計之 R34 數據中，至少系集成員總數的 10% 以上成功計算出 R34 才視為有效資料，以確保在四象限 R34 之驗證上具有足夠統計代表性。

在 R34 定量分析中，首先將 EPS 之 R34 估算結果計算其系集成員平均，每個系集成員均有相同的權重，再與 NCEP EMC、MTCSWA、JTCW 等資料進行齊次化分析，確保在每個分析時間下各資料均有數據可供驗證。研究中使用 JTCW 最佳路徑資料所分析的 R34 作為各資料之比較基準，並且使用 ASCAT 所計算的 R34 以

取得更多驗證結果，以客觀比較不同象限下的颱風大小分布與誤差特徵，透過計算平均絕對誤差 (Mean Absolute Error, MAE)、均方根誤差 (Root-Mean-Square Error, RMSE)、偏差 (Bias) 與決定係數 (R-squared) 以分析各資料之間的統計差異。

三、定量分析結果

本研究選取颱風個案為 Hinnamnor (2022)、Noru (2022)、Malakas (2022)，共 3 個不同路徑特徵的颱風，以北行與西行路徑為主。依據 JTCW 最佳路徑資料詳細的颱風時間與強度、路徑如圖 1 所示。

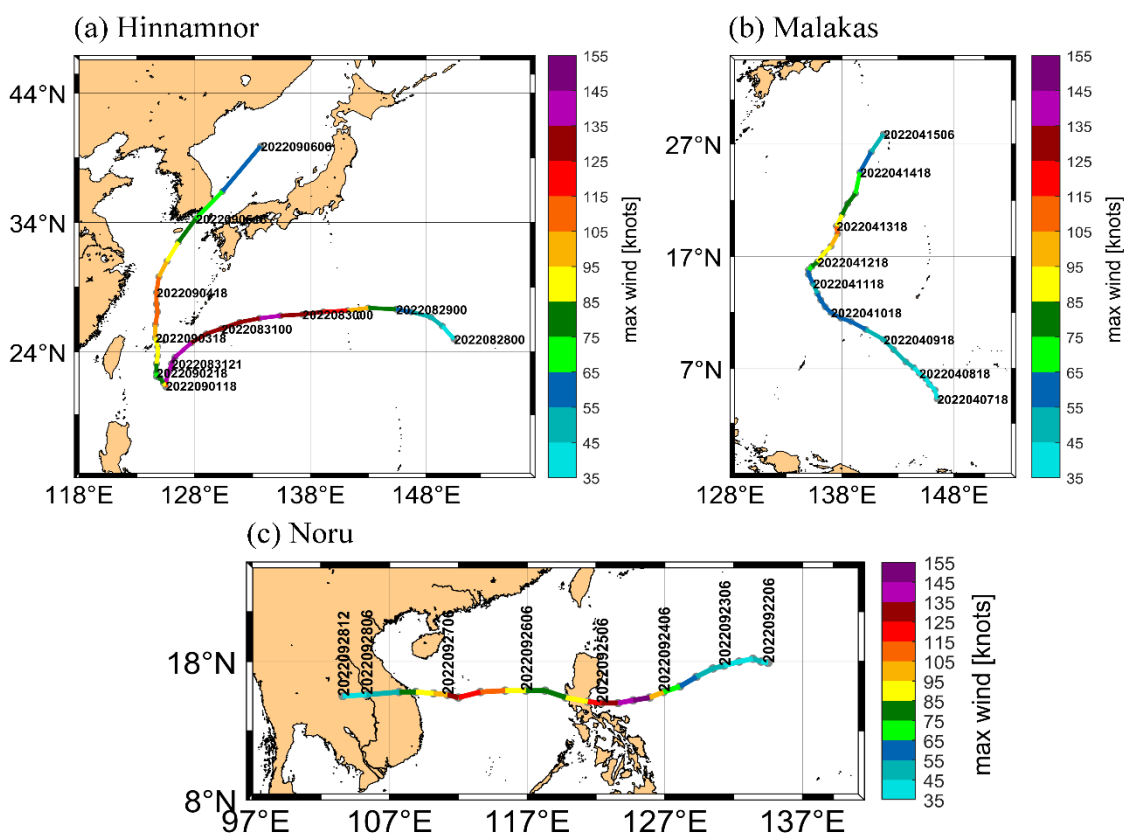


圖 1：所有個案根據 JTCW Best-Track 繪製之颱風路徑及其時間 (UTC)，強度以顏色表示 (單位 knots)。 (a) Hinnamnor (2022)， (b) Malakas (2022)， (c) Noru (2022)。

(一) 初始時間 R34 定量分析

首先比較 JTWC、WEPS、GEFS 與 MTCSWA 在模式初始時間下 4 個地理象限中 R34 分布箱型圖 (圖 2)。假設 JTWC 估計之數值為真，WEPS 在 NW 象限 R34 之中位數與平均數相當接近於 JTWC，但是在 NE 與 SE 象限的 R34 之中位數、平均數與第 75 百分位數皆略高，這說明 WEPS 分析之 R34 分布在東側象限通常略大於 JTWC；與 WEPS 相似，GEFS 在東側象限的 R34 之中位數、平均數與第 25、75 百分位數皆相較於 JTWC 更高，類似的

特徵也出現在西側象限，這代表 GEFS 傾向於在所有象限相較於 JTWC 估計較大 R34；與 EPS 相反，MTCSWA 則是在東側象限存在較小 R34 分布，從中位數與平均值來看皆相較於 JTWC 偏低，而西側象限則是較為接近，此外，MTCSWA R34 之第 25 百分位數較高而第 75 百分位數較低之分布情況，可能表示在 R34 較小時為高估，但是 R34 較大時卻是低估，此一特徵也顯示出，其 R34 之四分位距較小，代表數據變化幅度較小，整體分布較為集中。

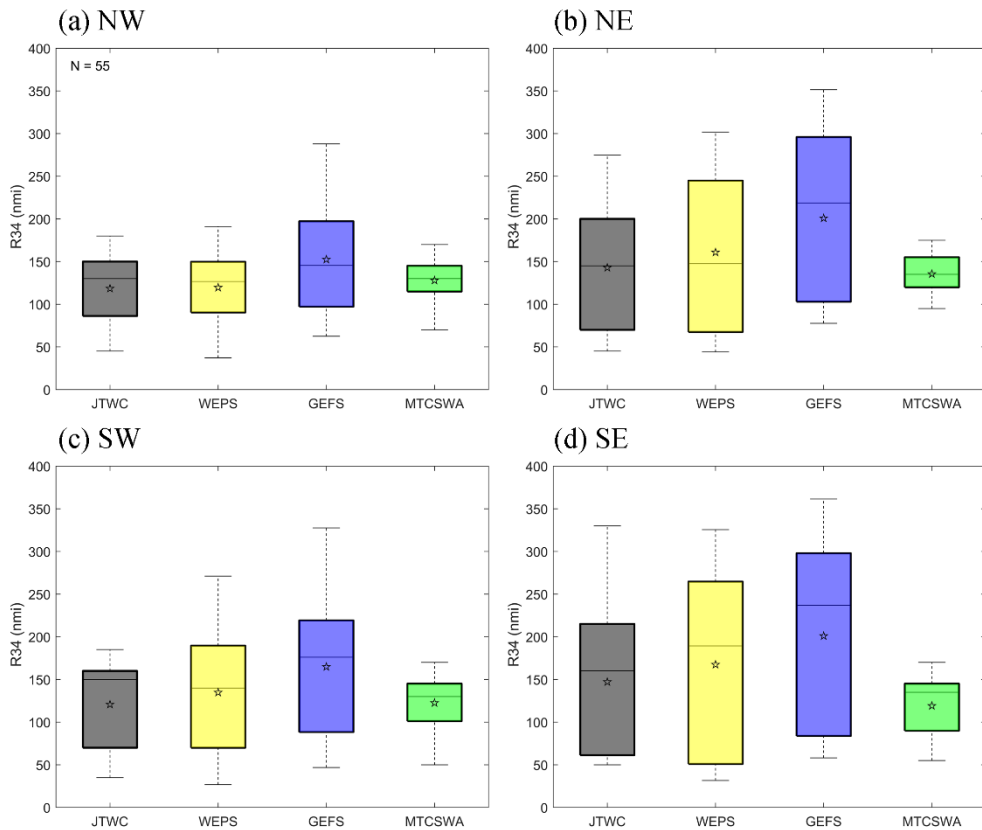


圖 2：模式初始時間，R34 分布箱型圖 (單位 nmi)，箱子底部 (頂部) 代表第 25 (75) 百分位數，四分位距為第 75 百分位數~第 25 百分位數，箱子內的黑線為中位數，星號為平均值，離群值 (未顯示) 為超過 1.5 倍四分位距的值。(a) 西北象限，(b) 東北象限，N 為樣本數，(c) 西南象限，(d) 東南象限。

為了更清楚了解各資料相對於 JTWC 在 R34 方面的差異特徵，分別計算平均絕對誤差、均方根誤差、偏差與 R-squared。模式初始時間下的定量分析結果呈現於圖 3。以四象限綜合結果來看，在 MAE 與 RMSE 方面（圖 3a, b），WEPS 誤差最小，MAE 由小到大依序為 WEPS (26 nmi)、MTCSWA (40 nmi)、EMC (45 nmi)、GEFS (50 nmi)，對於此處 MTCSWA 誤差值與 Sampson et al. (2018) 的結果非常接近。如果以不同象限之結果來看，可以發現 WEPS 仍然在所有象限中均表現最佳，特別是在 NE 象限相較於其餘資料明顯更低的 MAE。此外，雖然 GEFS 與 EMC 在四象限綜合誤差略高於 MTCSWA，但是其在東側象限的表現與 MTCSWA 非常接近，主要差異為 MTCSWA 在西側象限相較於 GEFS 與 EMC 具有較小的誤差，但是仍然大於 WEPS。值得一提的是，發現所有資料均顯示出東側象限之 R34 誤差高於西側象限，其中又以 MTCSWA 更為顯著，造成此一特徵的可能原因是西北太平洋地區的颱風風場通常在東側象限更大，西側象限則較小 (Zhang and Chan, 2022)，在本研究中的圖 2 也能發現相同結果，東側象限更大的 R34 可能導致誤差也較大。

圖 3c 為 Bias 統計結果，以四象限綜合來看，EPS 均為正偏差，其中 WEPS 是略

微正偏差 (13 nmi)，而 GEFS 與 EMC 則是顯著正偏差 (47、42 nmi)，MTCSWA 則是略微負偏差 (-6 nmi)。在不同象限中，WEPS 之正偏差特徵主要表現在除了 NW 以外的其餘象限，並且正偏差特徵並無在某一象限特別顯著，MTCSWA 之負偏差特徵則是表現在東側象限，特別是 SE 象限，GEFS 與 EMC 則是在所有象限均出現較顯著的正偏差。此外，與圖 3a,b 之結果類似，所有資料均發現在東側象限顯示出較高 MAE 與 RMSE 的同時也表現出較大偏差特徵，WEPS、GEFS 與 EMC 在東側象限之正偏差略大於西側，MTCSWA 則是在 SE 象限存在較顯著之負偏差。在這裡的 MTCSWA 之偏差比較結果也與 Knaff et al. (2011) 的研究結果相似，MTCSWA 通常略為低估了東側象限的 R34，但是此特性在西側象限並不明顯。

值得注意的是，在四象限綜合 MAE (Bias) 方面(圖 3a, c)，GEFS 為 50 nmi (47 nmi)，而 EMC 則為 45 nmi (42 nmi)。正如 2.1 小節所述，這裡的 GEFS 與 EMC 均是透過 NCEP GFS/EP5 進行分析，但前者為使用本研究的分析方法 (2.2 小節)，而後者則是 GFDL Vortex Tracker，主要是透過 Barnes analysis 分析多種變量在不同層場的平均位置，這些變量包括：相對渦度、海平面氣壓、重力位高度、10-m 風速。有

關 GFDL Vortex Tracker 更詳細資訊可參考 GFDL Vortex Tracker 使用手冊 (Biswas et al. 2018)。因此，推測本研究中 GEFS 與 EMC 的 R34 MAE 存在微小差異可以簡單歸因於對於系集模式資料中不同的颱風追蹤方法，因為兩者對於 MAE 差異 (約 5 nmi) 明顯小於 GEFS 的網格解析度 (0.25 度)。

除了了解 R34 誤差與偏差之外，還分析了 WEPS、GEFS、MTCSWA 與 JTWC 對於 R34 的可解釋變異百分比。結果顯示 (圖 3d)，以四象限綜合來看，WEPS 略微高於 GEFS，均明顯大於 MTCSWA，這說明 EPS 相較於 MTCSWA 在 R34 方面通常解釋更多的變異性，代表了其通常對於颱風渦旋大小變化具有更高的掌握能力，而 MTCSWA 在這方面表現較差。此一特

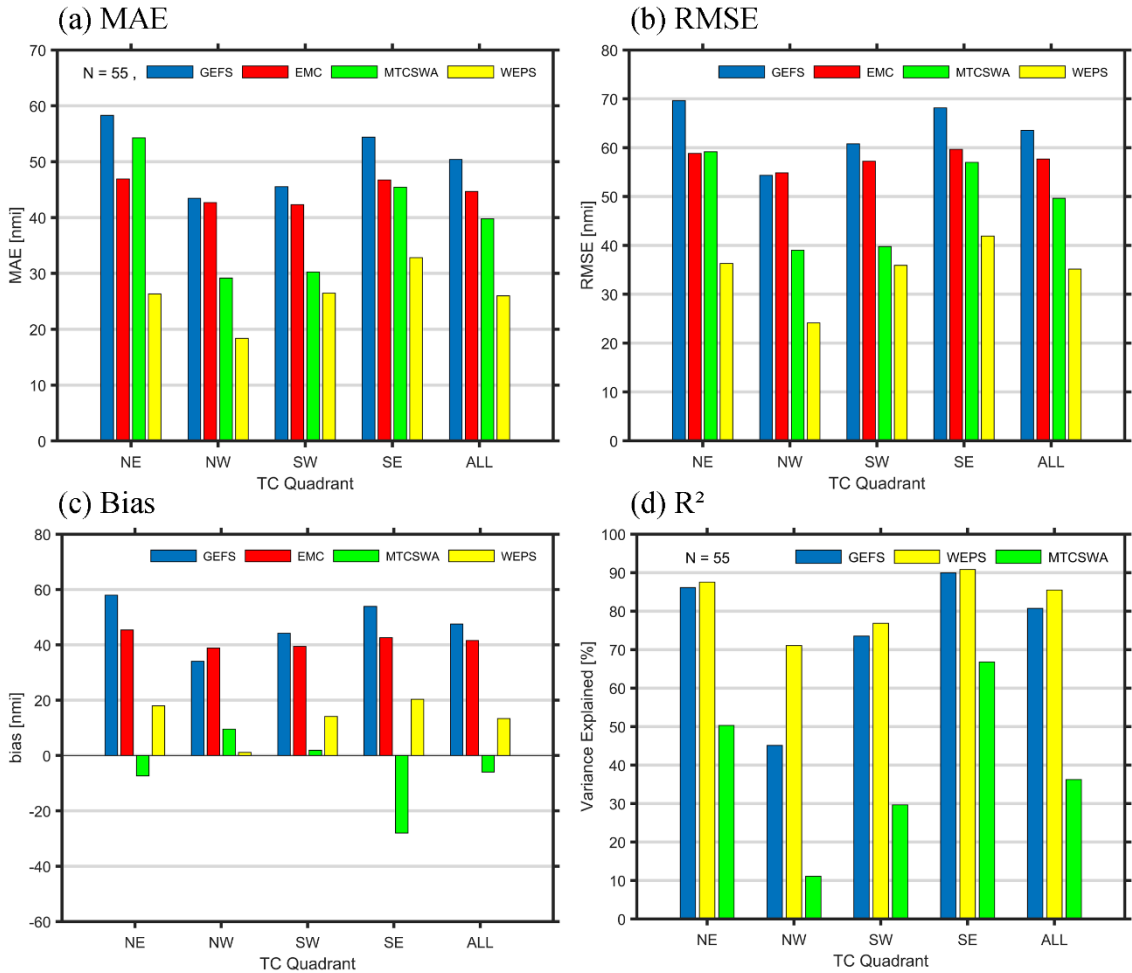


圖 3：模式初始時間，以 JTWC 最佳路徑資料為參考基準之 R34 定量分析比較 (單位 nmi)，橫軸由左至右為地理象限下 4 個象限 (東北 NE、西北 NW、西南 SW、東南 SE) 以及四象限綜合 (ALL)。(a) 平均絕對誤差 (MAE)，N 為樣本數，(b) 均方根誤差 (RMSE)，(c) 偏差 (bias)，(d) 可解釋變異，以百分比表示。

徵也與圖 2 相呼應，MTC SWA 之 R34 分布相較於 JTWC 有過於集中的特性，風場大小之變異性不足可能導致其有時無法產生與 JTWC 類似的渦旋大小變化。

(二) 初始時間下 EPS R34 散布與相關性

本節將重點比較不同 EPS 在初始時間下的 R34 散布與相關性。圖 4 為 WEPS、GEFS 與 JTWC 在 f00 之四象限 R34 散布圖與線性迴歸分析，以紅色和藍色區分 WEPS、GEFS 數據。結果顯示 EPS 在不同

象限下的 R34 相關性特徵相似，兩個 EPS 解釋的變異性均在 NW 象限最低，而 SE 象限最高，NW 象限決定係數分別為 0.7 (WEPS) 與 0.48 (GEFS)，而 SE 象限分別為 0.91 (WEPS) 與 0.89 (GEFS)。此外，在所有象限中，WEPS 與 JTWC 的相關性均高於 GEFS。

根據散布圖之特徵可觀察到 WEPS 在 R34 較小時的分布相當接近於對角線，隨著 R34 的增加會略微傾向於分布在對角線

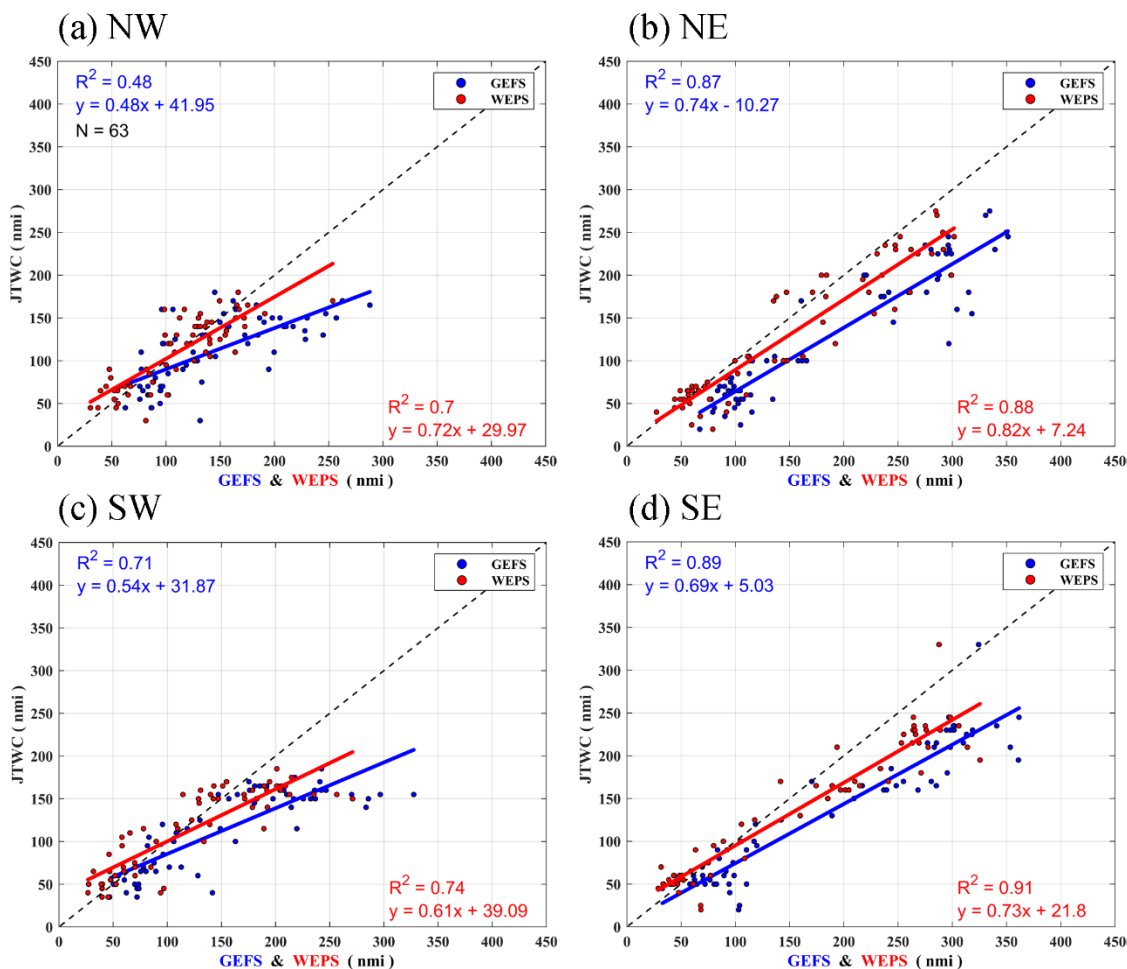


圖 4：模式初始時間，以 JTWC 最佳路徑資料為參考基準之 R34 散布圖與線性迴歸分析（單位 nmi），藍色（紅色）為 GEFS (WEPS)，決定係數與線性迴歸方程列在右下方 (WEPS) 與左上方 (GEFS)。(a) 西北象限，(b) 東北象限，(c) 西南象限，(d) 東南象限。

右側(靠近 WEPS)，表示在 R34 較小時，WEPS 估計值不僅與 JTWC 相當接近並且偏差特性也不明顯，當 R34 較大時，WEPS 則存在輕微的高估。GEFS 同樣顯示出當 R34 較小時與 JTWC 的估計值較為接近，當 R34 較大時，則顯示出相較於 WEPS 更顯著的系統性高估，對於所有象限均大致分布在對角線右側(靠近 GEFS)，並且觀察到數據越遠離座標原點進而更往右偏離對角線，線性迴歸線也反映了此一趨勢，其在所有象限均相較於 WEPS 斜率更偏離 1，代表其高估特性隨著 R34 增大而變得更加明顯。總結來說，WEPS 在所有象限中均相較於 GEFS 捕捉到更多颱風渦旋大小變化的同時，也能具有更接近於 JTWC 的 R34 分布。在偏差方面，EPS 相較於 JTWC 都存在更大的 R34 分布，WEPS 在圖 3c 中表現出的略微正偏差，其主要因素為當 R34 較大時 WEPS 存在輕微高估特性；而 GEFS 呈現出顯著的正偏差則是由所有象限均表現出較顯著的系統性高估特徵所主導。

(三) 初始時間 R34 不對稱性分析

除了颱風大小之外，風場不對稱性是另一個用於描述颱風風場特徵的重要特性，因為颱風風場結構往往是不對稱的。這種不對稱性通常是由多種因素所導致，包括環境垂直風切、 β 效應、不對稱的非

絕熱加熱，以及颱風移動速度和方向等。在這一小節中將討論 EPS、MTCSWA 與 JTWC 之間對於颱風風場結構不對稱性的關係，透過引入不對稱性指數 α 來量化 R34 不對稱性的程度，計算公式如下 (Song and Klotzbach 2016)：

$$\alpha = \frac{1}{2} \sqrt{(R34_{NE} - R34_{SW})^2 + (R34_{SE} - R34_{NW})^2} \quad (1)$$

(1) 式中的 $R34_{NE}$ 、 $R34_{SW}$ 、 $R34_{SE}$ 、 $R34_{NW}$ 分別代表東北、西南、東南、西北象限的 R34。當不對稱性指數 α 為 0 時，表示颱風風場結構完全對稱， α 越大，代表風場結構不對稱性也越大。

圖 5 為 WEPS、GEFS、MTCSWA 與 JTWC 在初始時間下之 R34 不對稱性散布圖與線性迴歸分析。結果顯示，EPS 相較於 MTCSWA 通常解釋更大的變異性，其中 WEPS 與 JTWC 之相關性略高於 GEFS 與 JTWC，R-squared 分別為 0.54 (WEPS) 與 0.43 (GEFS)，而 MTCSWA 與 JTWC 之相關性較差，說明 EPS 一定程度上能呈現與 JTWC 相似的 R34 不對稱性變化趨勢。與圖 3d 的四象限綜合結果相比較，發現不論是 EPS 還是 MTCSWA，其可解釋變異量均顯著減少，這可能意味著 EPS、MTCSWA 與 JTWC 之間在 R34 不對稱性的關係相較於 R34 大小的關係較弱。此外，從散布圖中可觀察到，當 R34 不對稱性較小時，EPS 與 JTWC 差異並不明顯，但隨

著不對稱性的增大，散布點的位置明顯偏向 x 軸 (EPS)，表示當不對稱性越大時，EPS 的高估程度也更為明顯；與 EPS 相反，MTCSWA 除了在中多數情況下傾向於低估 R34 不對稱性，特別是當 JTWC 估計較大的不對稱性時的低估情況更加明顯，也難以表現出相似的不對稱性變化。

為了更清楚比較 JTWC 與 EPS、MTCSWA 在估計 R34 不對稱性大小的差異，進一步使用箱型圖進行呈現。如圖 6 所示。在平均值與標準差的比較結果顯示，

MTCSWA 的數值最小 (平均值 16.7 nmi、標準差 12 nmi)，其次為 JTWC (平均值 31.4 nmi、標準差 23.5 nmi) 和 WEPS (平均值 41.5 nmi、標準差 27.8 nmi) 以及 GEFS (平均值 47.2 nmi、標準差 28.7 nmi)。中位數的比較結果也保持相似的大小順序，僅在 WEPS 與 GEFS 出現改變，MTCSWA 的中位數最小 (12.7 nmi)，其次是 JTWC (26.9 nmi)、GEFS (39.6 nmi) 以及 WEPS (40 nmi)。綜上所述，比較各資料在颱風風場結構呈現之特性可發現，MTCSWA 通

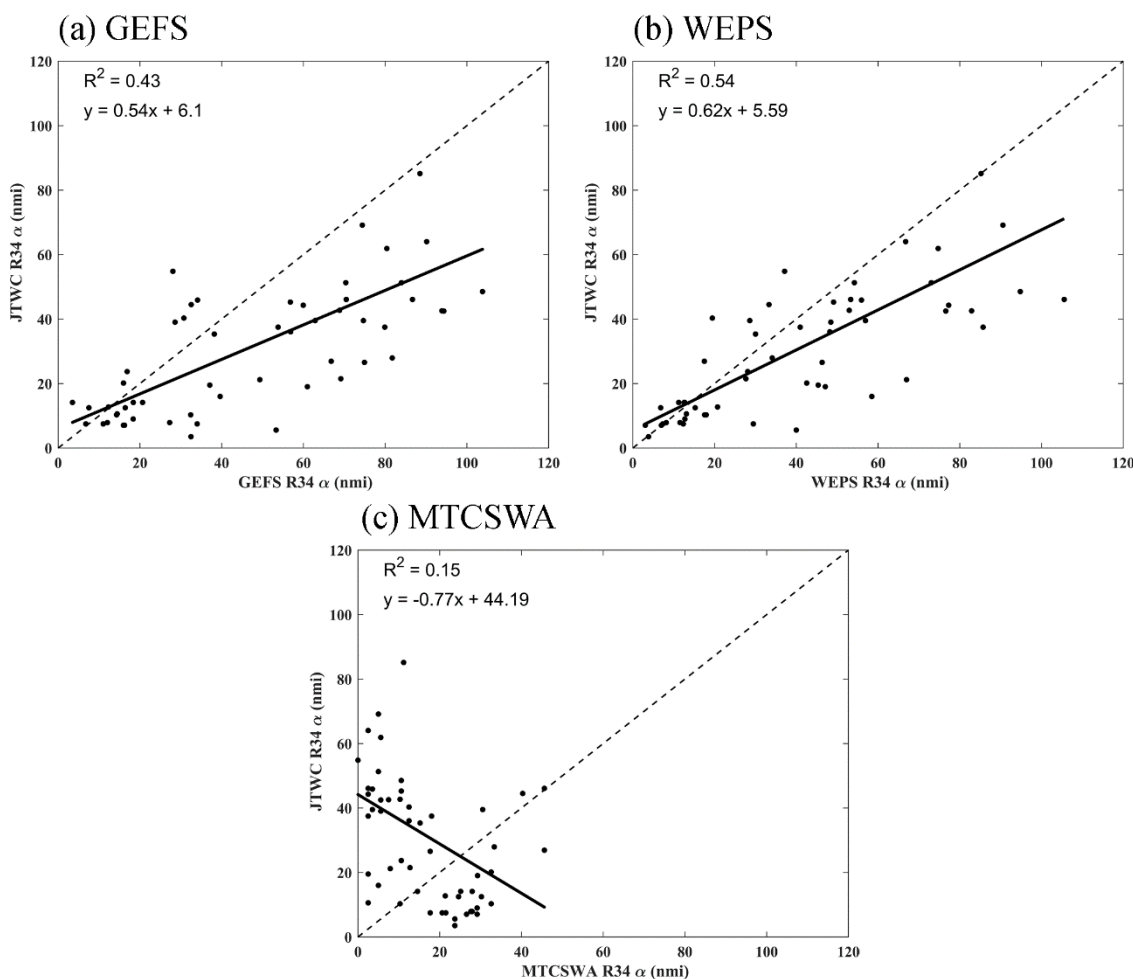


圖 5：模式初始時間，以 JTWC 最佳路徑資料為參考基準之 R34 不對稱性散布圖與線性迴歸分析 (單位 nmi)。(a) GEFS，(b) WEPS，(c) MTCSWA。

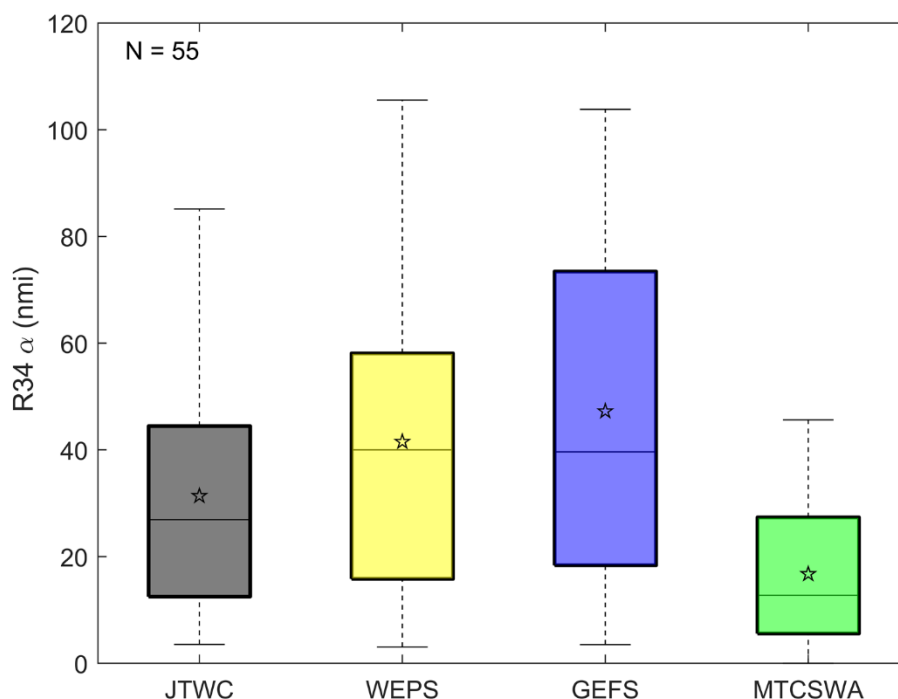


圖 6：模式初始時間，R34 不對稱性分布箱型圖（單位 nmi；N 為樣本數）。

常估計了較對稱的颱風風場結構，EPS 則表現出較高的不對稱性，而 JTWC 則介於 MTCSWA 與 EPS 之間。

(四) 預報時間 R34 定量分析

前面幾節探討了模式初始時間下的 R34 定量分析，這一小節則是接續以 JTWC 為比較基準，以定量評估 EPS 對於 R34 在預報時間 108 小時之內的誤差變化與偏差特徵。先以四象限綜合結果來看(圖 7e)，可發現 EPS 對於 R34 誤差大致上呈現隨著預報時間推進而逐漸上升，而 WEPS 延續著在初始時間下 (f00) 誤差小於 GEFS 之特性，在 f00~f108，WEPS 誤差均小於 GEFS。由圖中還可發現，從初始時間至預報前三天，EPS 保持較大差距，GEFS 的 R34 誤差高於 WEPS 18 nmi 以

上，初始時間至預報 3 天的 R34 誤差在 WEPS (GEFS) 依序約為 26.4 (49.2)、38.5 (57.0)、41.3 (61.2)、38.1 (58.2) nmi，而此差異在預報三天後則逐漸縮小。在不同象限下 R34 的預報誤差變化中(圖 7a-d)，與初始時間的結果相似(圖 3a, b)，WEPS 並沒有在不同象限下出現明顯差異，除了 SE 象限的 f102 之外，在所有象限 f00~f108 WEPS 平均絕對誤差表現均優於 GEFS。

在圖 7 中，不僅比較了 EPS R34 的預報誤差變化，也呈現了 R34 的偏差特徵。在四象限綜合結果中(圖 7e)，f00~f108 之 Bias 結果顯示，整個預報期間內兩個 EPS 均呈現正偏差特性，GEFS 相較於 WEPS 存在更顯著的正偏差。細分成不同象限來

看 (圖 7a-d)，發現兩個 EPS 在大多數預 時間下，WEPS 在東側象限的正偏差特徵 報時間下仍會維持相似的偏差特徵，初始 相較於西側象限明顯，而往後的預報時間

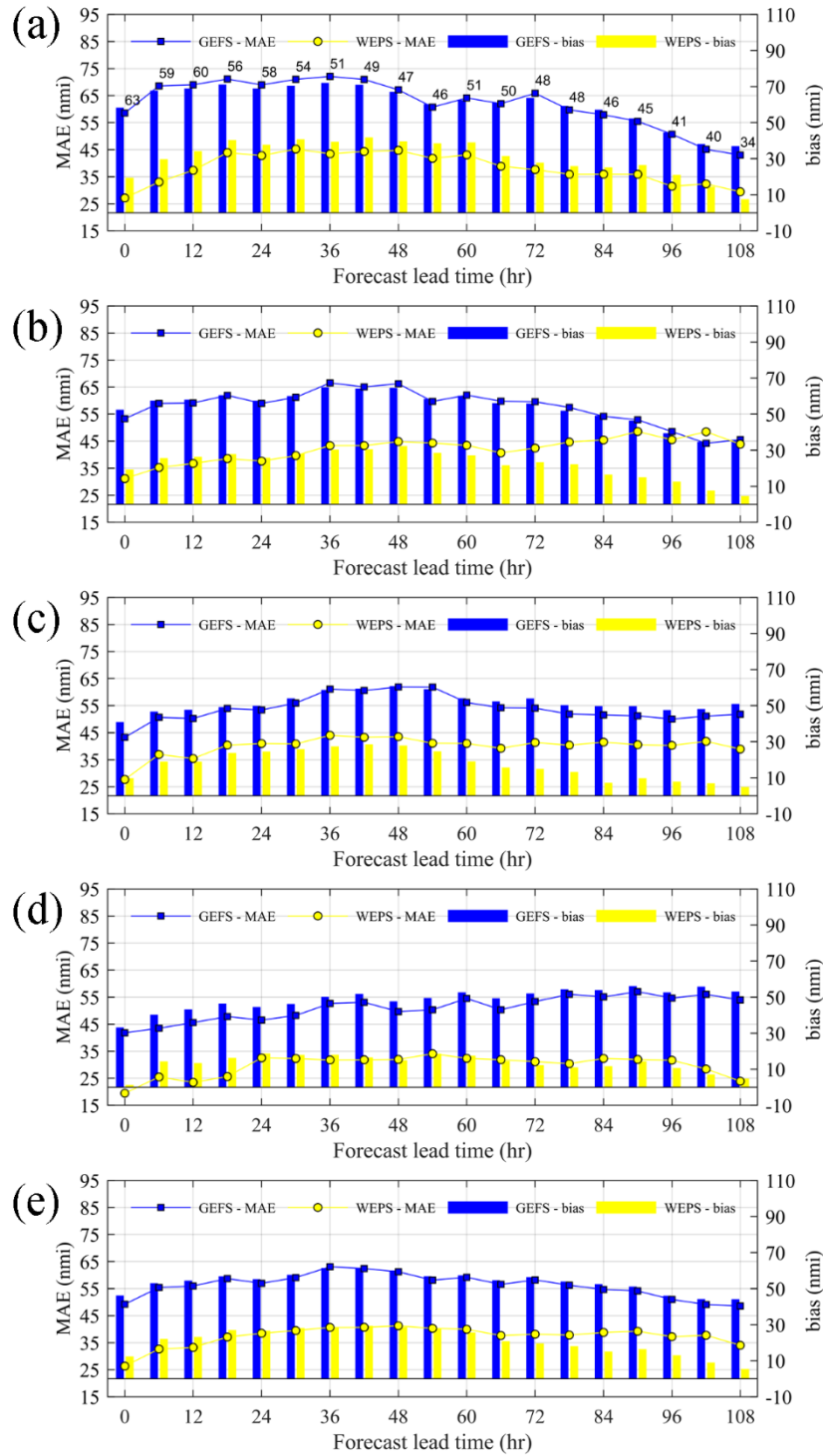


圖 7：模式預報時間 (f00~f108)，以 JTWC 最佳路徑資料為參考基準之 R34 定量分析比較 (單位 nmi)，橫軸為預報時間，黃色 (藍色) 折線為 WEPS (GEFS) 平均絕對誤差 (左側縱軸)，黃色 (藍色) 直方圖為 WEPS (GEFS) 偏差 (右側縱軸)。(a) 東北象限 (數字為樣本數)，(b) 東南象限，(c) 西南象限，(d) 西北象限，(e) 四象限綜合。

中也能觀察到此一趨勢；同樣地，GEFS 在初始時間下的東側象限顯示出比西側更大的正偏差，之後的預報時間 72 小時內也大致呈現相似特徵。綜上所述，在大多數預報時間及任何象限內，EPS 均表現出正偏差，但是 GEFS 對於 R34 高估特徵相較於 WEPS 更顯著，而這些特徵與初始場的表現相似，這可能說明在 R34 方面，模式初始場的偏差會影響後續預報中出現相似的特性。

為進一步了解不同 EPS 對於颱風風場結構變化的預報能力差異，分析 WEPS 與 GEFS 在 f00~f108 期間相對於 JTWC 的 R-squared 變化，並以四象限綜合結果進行評估 EPS 對於掌握整體颱風渦旋大小變化的能力。結果顯示(圖 8)，WEPS 在 f00~f18 的 R34 可解釋變異百分比略微高於 GEFS，兩者表現在 f24~f42 幾乎相當，隨後的 f48~f108 則大致以 GEFS 些微高於 WEPS。

整體預報期間來說，兩個 EPS 的表現均非常接近，WEPS 與 GEFS 在 f00~108 對於 R34 可解釋變異百分比的差距不超過 5%，此一發現也表示兩者在捕捉渦旋大小變化的能力幾乎相當。

(五) 侵襲機率與 R34 侵襲機率

經過前面各種方式探討與分析不同資料之間對於 R34 的差異，試著更進一步了解 EPS 對於颱風外圍風場的誤差特性，這無非是希望能夠將 EPS 實際付諸於颱風相關預報實務應用中。以往在評估颱風未來可能影響的區域時，經常以機率的方式來呈現不同地區受到影響的可能性為高或低，而這一概念即為侵襲機率 (Strike Probability)。目前已有許多研究機構或預報單位使用侵襲機率的方式來提供颱風相關預報資訊給防災單位或是一般民眾參考。例如：ECMWF (歐洲中期天氣預報中心) 透過 ECMWF-EPS 計算出颱風 Strike

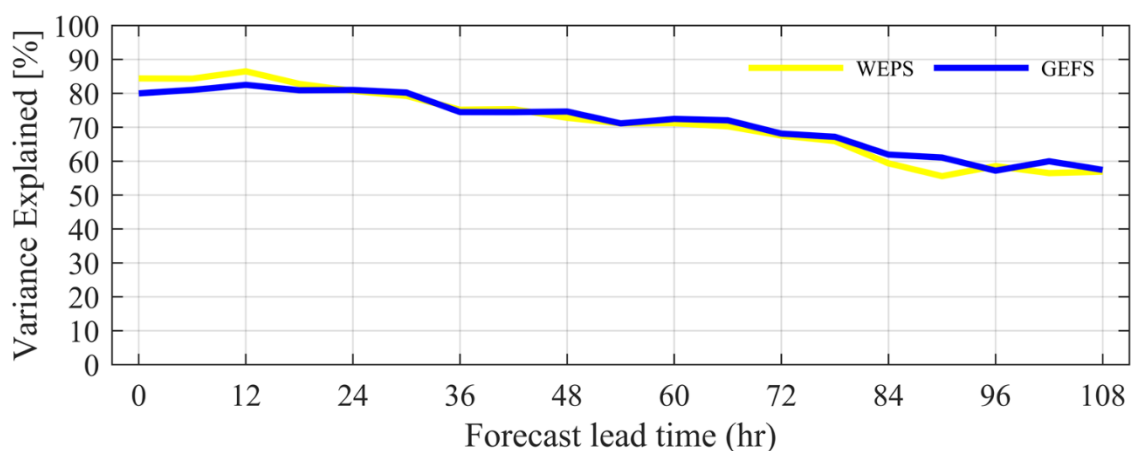


圖 8：模式預報時間 (f00~f108)，四象限綜合 R34 之可解釋變異，以百分比表示，橫軸為預報時間，黃色 (藍色) 折線為 WEPS (GEFS)。

Probability。然而，ECMWF 在提供侵襲機率預報資訊時是以颱風中心 120 km 軸對稱範圍來計算，這不僅容易使一般民眾產生誤解也不利於決策者做出合理的防災措施，因為此一方式可能錯誤的暗示了距離颱風中心 120 km 以外的範圍不會受到颱風影響。

颱風是一個大型的熱帶天氣系統，其大小是隨時在改變的，並不是一個固定不變的範圍，劇烈降雨與強風也很有可能出現在颱風內核以外的區域，因此，以固定不變 120 km 軸對稱範圍並不能足夠客觀地代表颱風影響區域。此外，周等人(2018)的研究顯示，颱風大小與風雨指標之間具有良好的正相關性，顯示出颱風大小可能較能夠反應出大範圍風雨影響程度。因此，本研究提出結合颱風大小與颱風侵襲機率的觀念，透過 EPS 計算出颱風在 4 個地理象限的 R34，搭配 EPS 可提供不確定性之優勢，將其應用在颱風大小侵襲機率預報 (R34 Strike Probability)。圖 9a 為 R34 Strike Probability 的示意圖，以不同顏色代表 EPS 中的任兩個系集成員，箭頭表示颱風移動方向，圓點為颱風中心，4 個扇形區域分別對應 4 個地理象限的 R34，數字表示在網格點上的受侵襲次數累積值，其概念是建立在 Strike Probability 之上，透過 EPS 中不同系集成員的颱風中心向外明確定義

某一個範圍，進入範圍內就表示受到侵襲 1 次，反之，在範圍之外的侵襲次數為 0，如果 2 個系集成員的範圍互相重疊，此一交集區域內的侵襲次數為 2，而此一範圍就是從 120 km 軸對稱區域轉變成本研究使用 4 個象限的 R34，最後再將每一個網格點上的侵襲次數累積值除以系集成員總數，可得出 R34 Strike Probability。以 Hinnamnor (2022) 為例，初始時間為 09/01 0000 UTC，如圖 9b, e 所示。此時 WEPS 與 GEFS 的預報均顯示出 Hinnamnor (2022) 未來將通過台灣東方外海並逐漸向北移動，以 Strike Probability 來看 (圖 9c, f)，由於 GEFS 與 WEPS 的大部分系集成員認為 Hinnamnor (2022) 在通過台灣東部外海時，颱風中心與陸地距離始終保持在 120 km 以上，因此臺灣陸地上的受侵襲機率值非常低；如果以 R34 Strike Probability 來看 (圖 9d, g)，可以發現受侵襲機率值分布範圍相較於圖 9c, f 明顯更廣泛，這是因為此時 Hinnamnor (2022) 在 4 個象限的 R34 大多大於 120 km，也能觀察到台灣陸地上的 R34 侵襲機率值也有顯著提升。以後續實際情況來看，JTWC R34 在 09/03 1800 UTC (圖 9d, g) 與 CWA 官方使用的 R30 暴風半徑也確實有掠過台灣東北角陸地，並且為台灣的北部、東北部陸地帶來相當程度的風雨，如果此時決策者

或一般民眾接收到的颱風預報資訊是圖 9c, f 的 Strike Probability，將可能輕易地認為受 Hinnamnor (2022) 的影響程度大幅

降低，因其概念接近於提供颱風中心可能影響的區域，但是這並不能合理的制定相關防災措施；相對的，在圖 9d, g 中的 R34

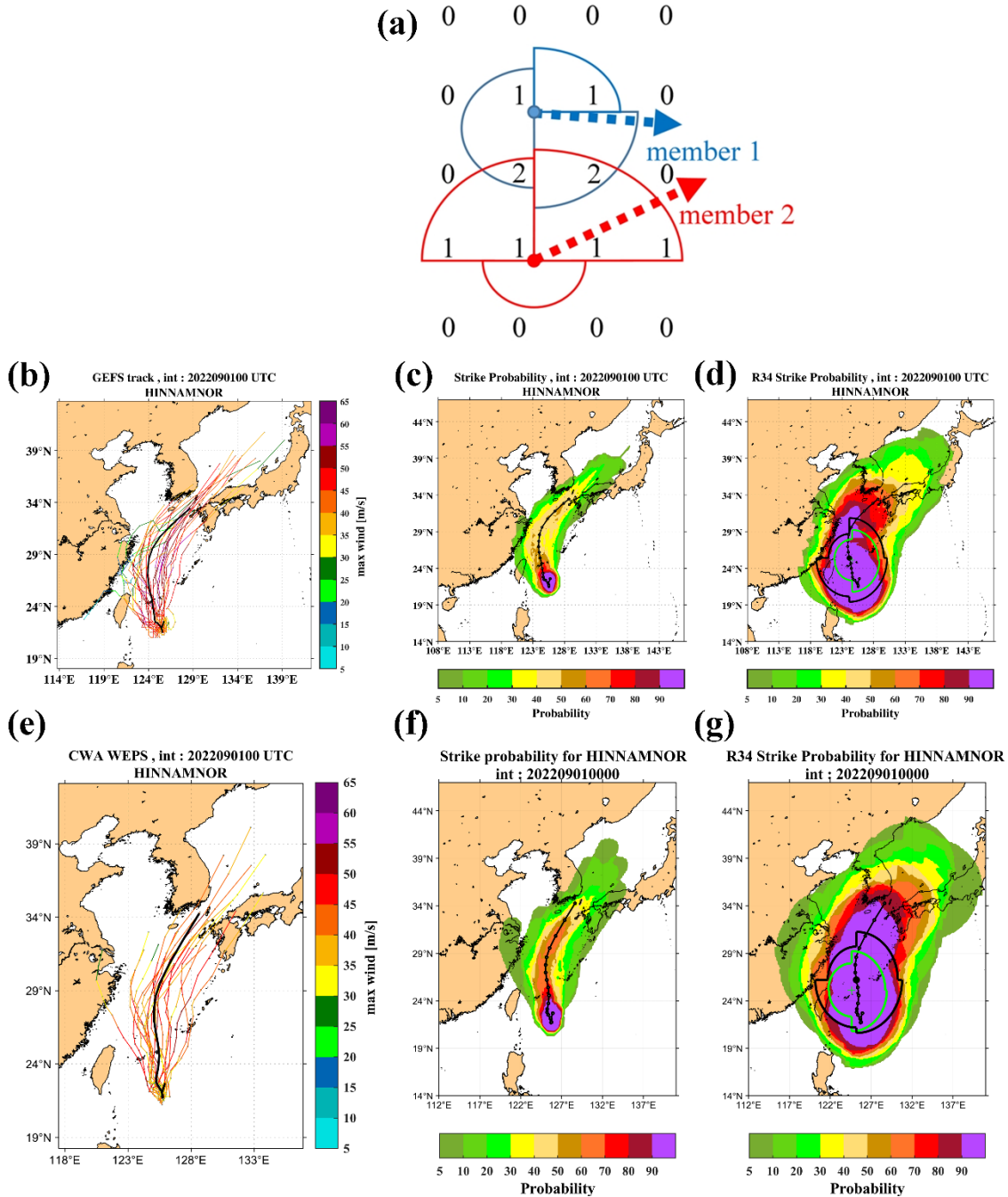


圖 9：Strike Probability 與 R34 Strike Probability，個案為 Hinnamnor (2022)，初始時間為 09/01 0000 UTC。(a) R34 Strike Probability 示意圖。(b)、(c)、(d) 為 GEFS，(e)、(f)、(g) 為 WEPS，(b)、(e) 為系集颱風路徑，黑線為系集成員平均，顏色為強度 (m/s)，(c)、(f) 為 Strike Probability，(d)、(g) 為 R34 Strike Probability，黑線為 EPS 預報 66 小時的 R34，綠線為 JTWC 最佳路徑資料在 09/03 1800UTC 的 R34，色階為侵襲機率值 (%)。

Strike Probability 顯示出較高的威脅性，較能反應颱風的實際影響範圍。綜上所述，R34 Strike Probability 不僅可以反應 EPS 中颱風大小變化時可能影響的區域，也能夠提供更有效的颱風預報資訊。這邊須提出說明，由於目前已無法取得 JTWC 於 2022/09/01 0000 UTC 所預測的 R34 預報數值，因此這邊的分析是使用 JTWC 的最佳路徑資料來進行比較討論。後續 EPS Strike Probability 的呈現上，可疊加官方機構 CWA 或 JTWC 所發布的 5 日預報來進行比較。此外，後續研究亦可比較 EPS 所預報的 R34 與 CWA 或 JTWC 公布的 R34 差異，以進一步評估 EPS 在颱風風圈大小的預報表現。

(六) ASCAT 定量分析結果

正如 2.2 小節中所提及，ASCAT 掃描帶可能無法涵蓋颱風完整環流，因此，在定量分析策略中，容許成功分析出 R34 的任何單一象限即可納入比較，有關 ASCAT 更詳盡的 R34 估算方法可參考 2.2 小節。此外，ASCAT 的掃描時間被歸類在時間差為±3 小時之內的 4 個常規天氣時間

(0000、0600、1200、1800 UTC)，這通常被視為在可接受的範圍之內 (Sampson et al. 2017)。

首先，比較 ASCAT 和 JTWC 在估算 R34 方面的差異，採用 ASCAT 值減去 JTWC 值的方式進行比較，如表 1 所示。MAE 在不同象限下的差異並不大，約為 18~24 nmi，四象限綜合絕對誤差約為 21 nmi。從偏差來看，ASCAT 與 JTWC R34 估計值的偏差不大，約為-9~4.5 nmi，四象限綜合偏差約為-1.5 nmi。綜上所述，發現 ASCAT 估計值與 JTWC 非常接近，也沒有表現出明顯的偏差，代表兩者在 R34 上高度相近，此一結果也與 Sampson et al. (2018) 研究一致。

接下來，以 ASCAT 為基準，比較 EPS、MTCSWA 與 ASCAT 之間在初始時間下的 R34 定量分析結果，如圖 10 所示。從圖 10a 可以發現，無論在任何象限中，平均絕對誤差均以 WEPS 為最小，以四象限綜合來看，GEFS 次之，MTCSWA 最大。這裡 WEPS 的表現與圖 3a 的結果一致，GEFS 與 MTCSWA 發生改變，而實際上這是由

表 1：ASCAT 與 JTWC R34 比較。MAE 平均絕對誤差，Bias 偏差，第一列括號內數字為各象限之樣本數（單位 nmi）。

	NE (26)	NW (20)	SW (14)	SE (19)
MAE	21.6	24.2	20.7	18.6
Bias	-3.6	0.5	-9.0	4.5

於微小的 MAE 差異所導致。以 ASCAT 為基準時，四象限平均絕對誤差由小到大順序為 WEPS (24 nmi)、GEFS (43 nmi) 和 MTCSWA (47 nmi)；以 JTWC 為基準時，四象限平均絕對誤差由小到大順序為 WEPS (26 nmi)、MTCSWA (40 nmi) 和 GEFS (50 nmi)。綜上所述，無論是以 ASCAT 或 JTWC 為基準，WEPS 均在所有象限中表現最佳，儘管 GEFS 與 MTCSWA 的誤差大小順序會因為比較基準的不同而發生改變，但是 MAE 差異並不明顯，僅約 7 nmi。

在圖 10b 中，基於 ASCAT 的四象限綜合偏差結果顯示，WEPS 與 MTCSWA 約為 9 nmi，GEFS 約為 41 nmi，WEPS 為略微正偏差且 GEFS 呈現較顯著正偏差之特徵也與圖 3c 以 JTWC 為基準的表現一致，而 MTCSWA 偏差特徵出現稍微改變，從

JTWC 為基準的些微負偏差 (-6 nmi) 轉變成以 ASCAT 為基準的略微正偏差 (10 nmi)。此外，透過上述特徵結合表 1 的結果可判斷出，在本研究使用到的各種資料中，ASCAT 傾向於估計最小 R34 數值。

(七) 個案分析

在這小節中，從本研究的颱風個案中挑選出幾個 ASCAT 掃描帶可以較為完整涵蓋到颱風環流的時間點，選擇標準為 ASCAT 需至少分析出 4 個地理象限中的任意 3 個 R34 估計值，以進一步探討 EPS 之系集平均與 JTWC、ASCAT 與 MTCSWA 之間對於估算 R34 在空間分布中的差異特徵。其中，很幸運地在 Hinnamnor (2022) 的生命期間，ASCAT 提供較多 R34 估計值來進行比較，因此，除了較為完整地探討 Hinnamnor (2022) 個案的整個分析期間各資料之間 R34 的比較差異，還呈現其

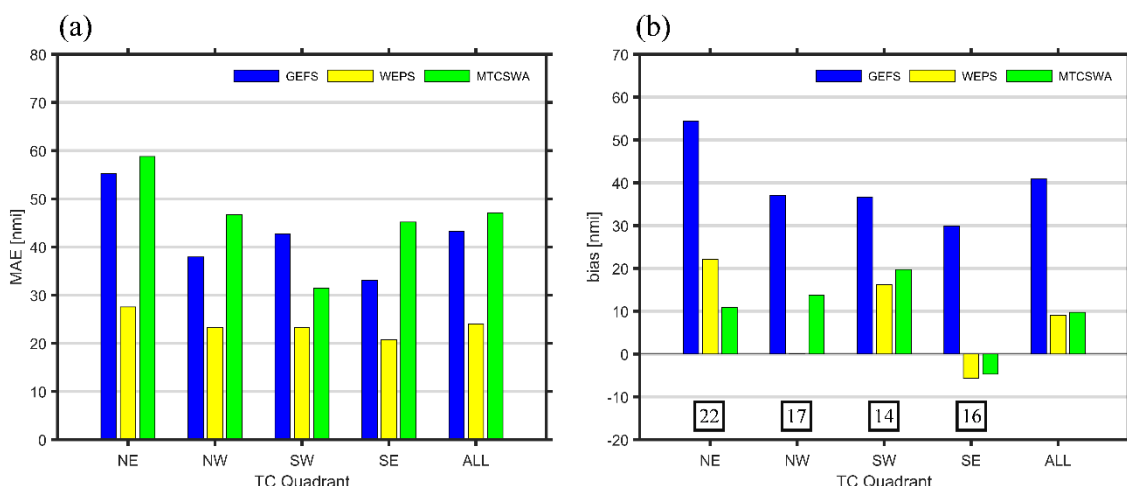


圖 10：模式初始時間下，基於 ASCAT 之 R34 定量分析比較（單位 nmi）。橫軸由左至右為地理象限下 4 個象限（東北 NE、西北 NW、西南 SW、東南 SE）以及四象限綜合（ALL）。

(a) 平均絕對誤差，(b) 偏差，圖中下方數字為各象限下的樣本數量。

R34 不對稱性變化,計算方式可參考 3.3 小節中的式(1)。

Hinnamnor (2022) 依據 JTWC 的 R34 變化趨勢為圖 11 中的黑線,將其大致分成 3 個階段來逐一探討。第一個階段是 R34 緩慢擴大期,時間為 2022/08/28 0000~08/31 1800 UTC。在此階段中,同時包含颱風快速增強階段,即 RI (Rapid Intensification):熱帶氣旋在 24 小時之內,近中心最大風速上升 30 knots 以上,即符合快速增強之標準 (Kaplan and DeMaria 2003)。根據此定義,Hinnamnor (2022) 發生 RI 期間為 2022/08/28 0600~08/30 1200 UTC,對應圖 12a 中的紅框,共歷時 54 小

時,Vmax 從 40 knots 上升至 135 knots。第二個階段是 R34 快速擴大期,時間為 2022/09/01 0000~09/02 0000 UTC。在此階段中,所有象限中的 R34 均呈現明顯快速擴大的特徵,僅經過 24 小時,R34 擴大幅度可達 1~2 倍,甚至在 SE 象限觀察到約 2.5 倍的擴大幅度,從 65 nmi 上升至 165 nmi。此外,在 R34 快速擴大時,Hinnamnor (2022) 已結束 RI 階段,並且進入 RW (Rapid Weakening) 階段:熱帶氣旋在 24 小時之內,近中心最大風速下降 40 knots 及以上 (Ma et al. 2019)。Hinnamnor (2022) 發生 RW 期間為 2022/09/01 0000~09/02 1800 UTC,對應圖 12a 中的藍框,共歷時

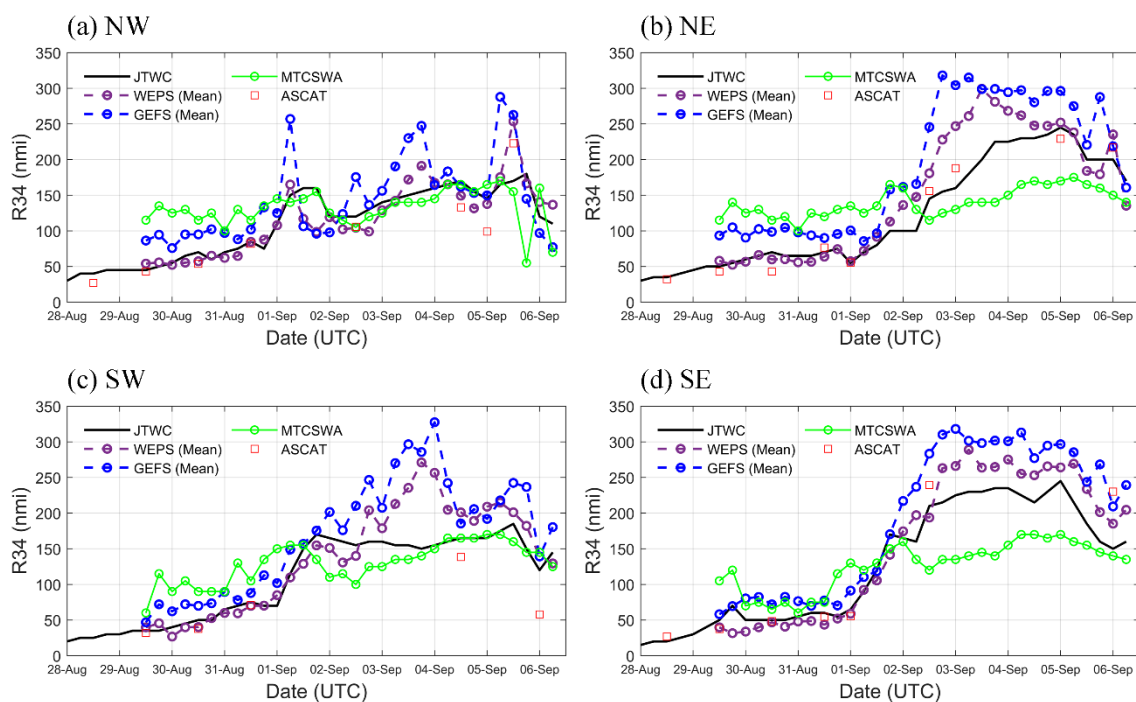


圖 11: Hinnamnor (2022) 四象限 R34 演變之分析與比較。黑色實線、紫色虛線、藍色虛線、綠色實線、紅色方框分別為 JTWC、WEPS、GEFS、MTCSWA、ASCAT 的 R34 估計值。實心(空心)綠色圓點代表 MTCSWA 於該分析時間有(未)包含 ASCAT 資料。(a)、(b)、(c)、(d) 分別為 NW、NE、SW、SE 象限。橫軸為時間 (UTC),縱軸為 R34 (nmi)。

42 小時。第三個階段是 R34 持續擴大期，時間為 2022/09/02 0600~09/08 0600 UTC。雖然此階段中 R34 仍逐漸擴大，但增加幅度相較於第二階段已明顯趨緩。

第一個階段是 R34 緩慢擴大期，時間為 2022/08/28 0000~08/31 1800 UTC，同時包含 RI 階段，此時的路徑特徵是穩定西行到轉為西南方向（圖 1a）。圖 11 顯示，在

此期間，Hinnamnor (2022) 具有較小的 R34 且變化幅度也較小，相較於強度的快速增強，R34 則是在各個象限中均呈現緩慢上升。比較各資料之間的 R34 可以看出，EPS 在所有象限的 R34 估計值均相較於 MTCSWA 更接近 JTWC 與 ASCAT，也都能掌握到 R34 緩慢上升趨勢，其中又以 WEPS 表現明顯更佳，GEFS 呈現略微高

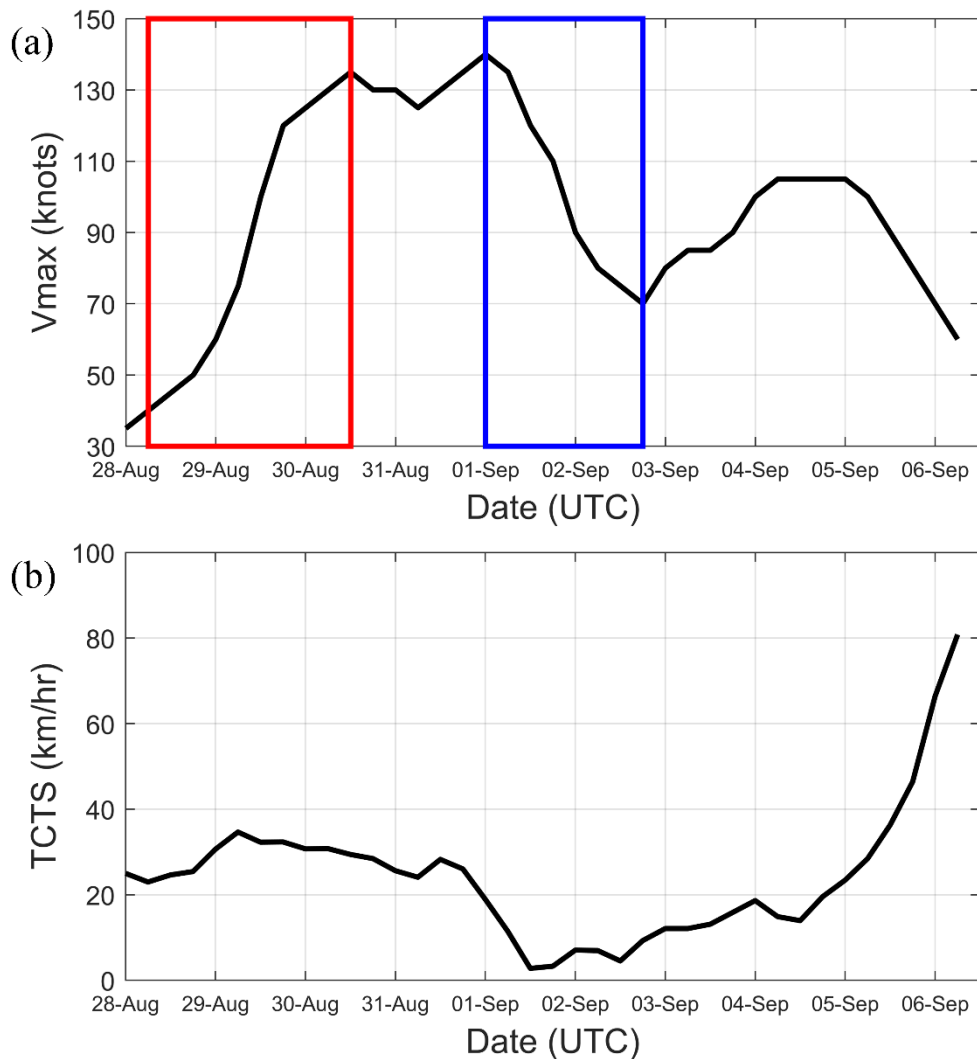


圖 12：Hinnamnor (2022) 強度與移速演變過程。(a) 黑線為 JTWC Best Track 估計的最大風速 (Vmax)，單位為 knots。紅色方形區域為 RI 期間，定義是每 24 小時內的 Vmax 變化 ≥ 30 knots；藍色方形區域為 RW 期間，定義是每 24 小時內的 Vmax 變化 ≤ -40 knots。(b) 黑線為移動速度，單位為 (km/hr)。

估。相較於 EPS, MTCSWA 不僅與 JTWC、ASCAT 之間存在較大差異,在各個象限也均呈現出相當的高估特徵,這一結果也對應 3.1 小節中的推論,即 MTCSWA 似乎在 R34 較小時傾向於估計較大的數值。

第二階段則是進入 R34 快速擴大期,時間為 2022/09/01 0000~09/02 0000 UTC。如前面所述, Hinnamnor (2022) 外圍風場在此階段中表現出顯著地快速擴大,而這一現象可能與 Hinnamnor (2022) 和熱帶性低氣壓 13W 之間的交互過程相關。Wang et al. (2023) 綜合探討 Hinnamnor (2022) 生命期中的演變過程,認為 Hinnamnor (2022) 與 13W 從 8/30 0600 UTC 開始產生交互作用,兩者最終在 09/01 0000 UTC 完成合併的過程。有趣的是,09/01 0000 UTC 正恰好是 Hinnamnor (2022) 進入 R34 快速擴大階段的時間點,此一現象可能與 13W 的合併相關。比較各資料之間 R34 的差異(圖 11)。結果顯示,此期間表現出顯著的 R34 快速變化的同時, EPS 能很好的掌握到 R34 快速上升之變化,特別是在南側象限與 JTWC 幾乎一致,不過在北側象限則與 JTWC 估計值有略微差異; MTCSWA 大致上也呈現出 R34 上升特徵,但仍可發現南側象限的變化與 JTWC 存在差異(相較於 EPS 的表現)。

第三階段為 R34 持續擴大期,時間為 2022/09/02 0600~09/08 0600 UTC。相較於第二階段的快速擴大,此時期的 R34 呈現緩慢且穩定地上升,這與移動路徑逐漸向北往中、高緯度地區移動相關(圖 1a)。圖 11 中可觀察到,隨著 Hinnamnor (2022) 逐漸加速向北移動, R34 在各象限中呈現出不同程度的上升幅度,在西側象限的上升幅度較低,而東側象限則較明顯,這一特徵和熱帶氣旋風場與前進速度的疊加現象相關,即移動方向右半側的風速較大。此外, WEPS 與 GEFS 均很好地呈現東側象限具有更大 R34 之特徵與變化。在東側象限中, WEPS 不僅相較於 GEFS、MTCSWA 能夠與 JTWC 更為相近,並且在幾個時間點也較接近 ASCAT 估計值,相較於 WEPS 的略微正偏差, GEFS 與 MTCSWA 則是過於高估(低估)東側象限的 R34。此外, MTCSWA 表現出 R34 隨時間上升或下降幅度較為平緩,導致其 R34 變化與 JTWC 相差較大,而 EPS 則是存在變化幅度過大的問題。在西側象限中, EPS 與 MTCSWA 大致呈現出與 JTWC 相似的變化,但是仍可發現 EPS 在 SW 象限較為高估,尤其 GEFS 更為明顯;而 MTCSWA 在西側象限的表現較優於東側象限,大部分時間下與 JTWC 頗為接近。

本研究也分析 Hinnamnor (2022) 個案中的不對稱性變化，以比較 EPS、MTCSWA 與 JTWC 之間的差異，如圖 13 所示。不同於大部分剛形成的颱風或是移動速度較快之個案通常會表現出較為不對稱風場特徵，Hinnamnor (2022) 剛形成時的風場即較為對稱，並且移動速度並不慢（圖 12b），約為 22~35 km/hr。此外，Hinnamnor (2022) 在剛形成後 6 小時即經歷一次 RI，歷時長達 54 個小時，這一現象可能與初期具有較為對稱的風場結構有關，Sun et al. (2019) 發現，隨著熱帶氣旋的強度增強，其風場結構也更加對稱。此外，EPS 也很好的掌握到 Hinnamnor (2022) 初期較為對稱風場結構之特徵，EPS 的不對稱指數 α 估計值與 JTWC 相當接近，尤其是 WEPS；而 MTCSWA 則高估了此時

的不對稱性。大約在 09/01 0000 UTC，隨著 Hinnamnor (2022) R34 快速上升與幾乎同時發生的移動速度顯著下降（圖 11, 12b），此時伴隨著不對稱性顯著增加。值得一提的是，EPS 也大致捕捉到此時的不對稱性顯著增加，而 MTCSWA 幾乎沒有掌握到此一特徵。隨著 Hinnamnor (2022) 的移動速度開始加快與逐漸向中、高緯度地區前進，R34 不對稱性也逐漸增加。比較此時各資料的不對稱性指數 α ，雖然 EPS 大致呈現出與 JTWC 相似的不對稱性持續擴大變化，但是多數時候較為高估，其中又以 GEFS 尤為明顯，WEPS 更能接近 JTWC 估計值；相較於 EPS 通常會高估 R34 不對稱性，MTCSWA 則是存在過於低估的問題，並且無法呈現出與 JTWC 相似的變化，此一結果也與 3.3 小節一致。

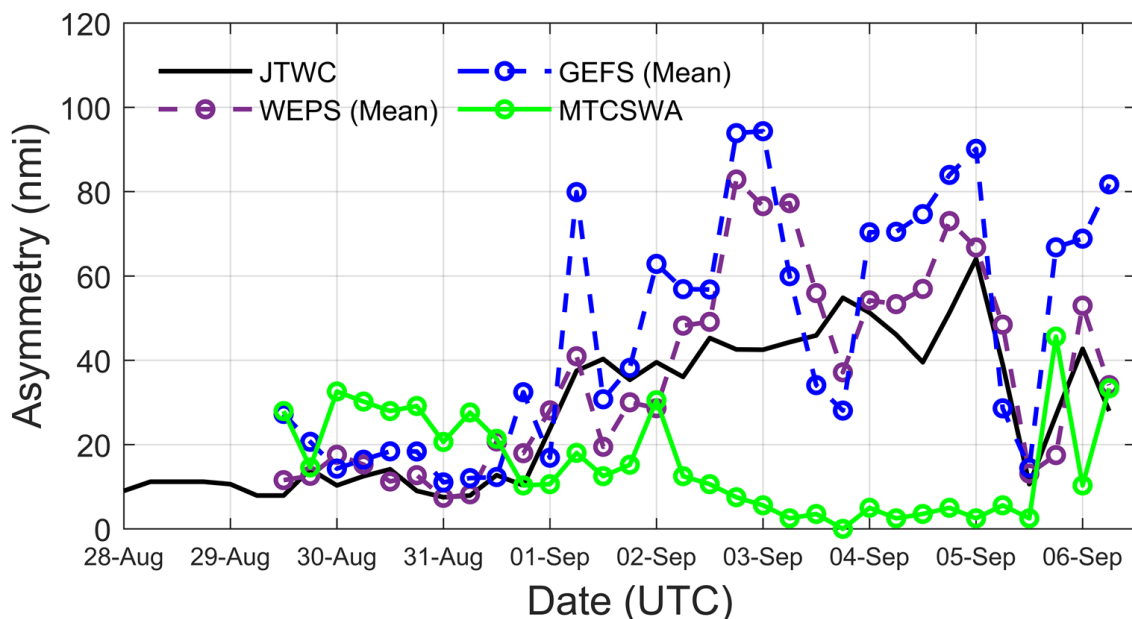


圖 13：Hinnamnor (2022) 的 R34 不對稱性演變之分析與比較。黑色實線、紫色虛線、藍色虛線、綠色實線分別為 JTWC、WEPS、GEFS 和 MTCSWA 的不對稱性指數 α ，單位 nmi。

圖 14 為 Hinnamnor (2022) 個案中，各資料在 4 個時間點的 R34 空間分布，R34 估計值與差異可參考表 2, 3。08/29 1119 與 08/30 1239 UTC (圖 14a, b)，Hinnamnor (2022) 在前者為正處於 RI，後者為恰好結束 RI 的時間點，ASCAT 在這兩個時間點均呈現較為對稱的風場結構，發現 WEPS

估算的 R34 與 ASCAT、JTWC 頗為接近，GEFS 與 MTCSSWA 則是在各個象限均較為高估，其中又以 MTCSSWA 更為明顯。08/31 1218 UTC (圖 14c)，Hinnamnor (2022) 正朝向西南方移動並逐漸接近台灣東部海域，此時 R34 在各個象限均相較於前兩個時間(圖 14a, b)已有略微擴大，

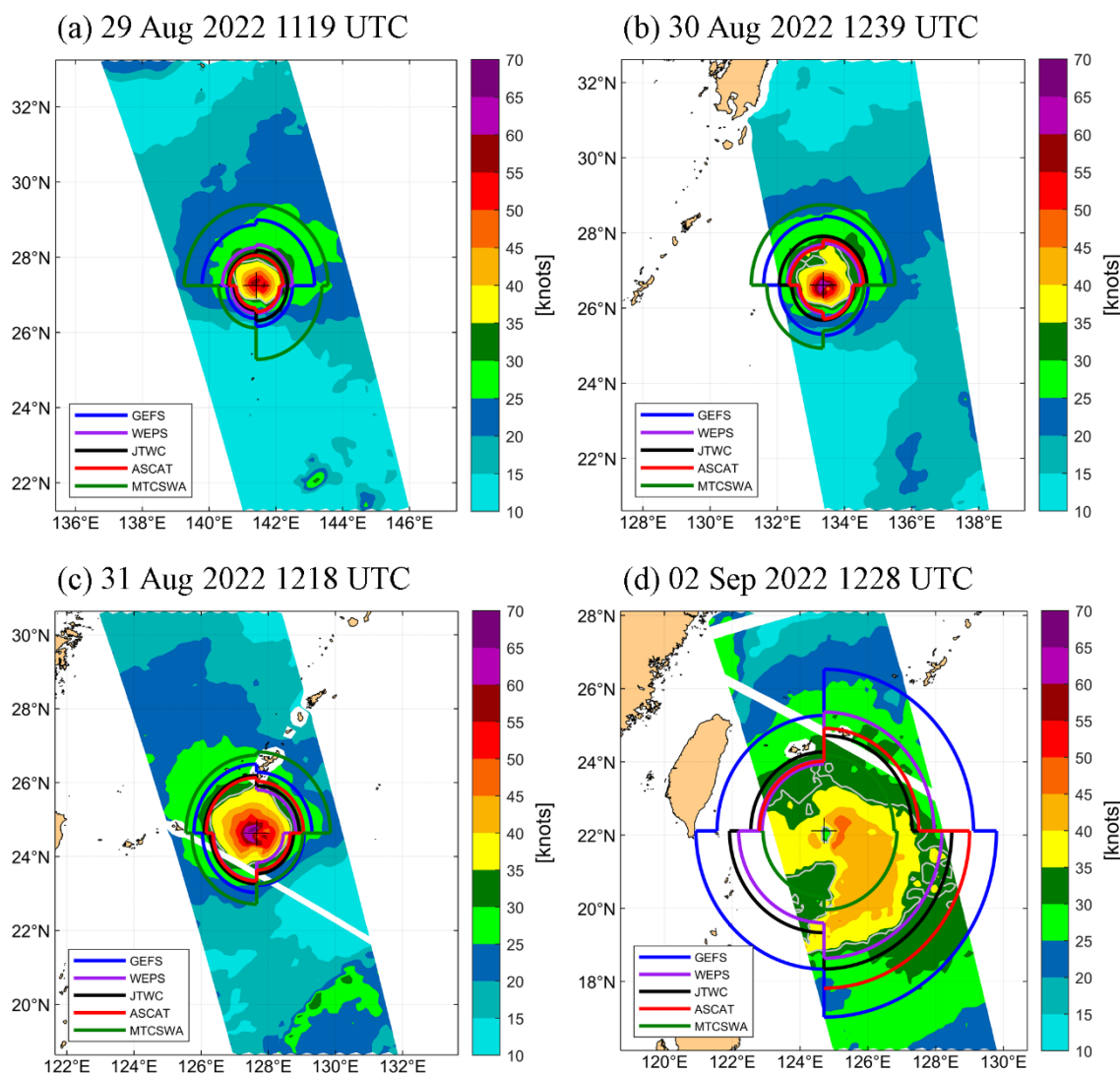


圖 14：Hinnamnor (2022) 個案之 ASCAT 掃描帶風場與 R34 比較。ASCAT R34 (紅線)、GEFS R34 (藍線)、WEPS R34 (紫線)、JTWC R34 (黑線)、MTCSSWA (綠線)，灰線為 34-knot 等值線，色階為風速值 (knots)，+ 為依據 JTWC 線性內插至 ASCAT 掃描時間的颱風中心位置，ASCAT 掃描帶時間位於圖片上方，其餘資料分析時間為 29 Aug 2022 1200 UTC (a)、30 Aug 2022 1200 UTC (b)、31 Aug 2022 1200 UTC (c)、02 Sep 2022 1200 UTC (d)。

表 2：Hinnamnor (2022) 個案之 R34 比較 (單位 nmi)。

Date (UTC)	Data	NE	SE	SW	NW
08/29 1200	JTWC	50	50	35	45
	ASCAT	43	37	32	43
	WEPS	58	40	40	54
	GEFS	93	58	47	86
	MTCSSA	115	105	60	115
08/30 1200	JTWC	70	50	50	70
	ASCAT	64	48	38	54
	WEPS	60	47	40	57
	GEFS	99	72	70	95
	MTCSSA	115	65	90	115
08/31 1200	JTWC	70	60	75	85
	ASCAT	76	55	71	82
	WEPS	64	44	70	85
	GEFS	90	77	88	102
	MTCSSA	120	75	105	115
09/02 1200	JTWC	145	210	155	120
	ASCAT	156	239	-	106
	WEPS	181	194	140	104
	GEFS	246	283	210	175
	MTCSSA	115	120	100	105

表 3：Hinnamnor (2022) 個案四象限平均之 R34 平均絕對誤差與偏差比較 (單位 nmi)。

Date (UTC)	Data	VS. JTWC MAE	VS. JTWC Bias	VS. ASCAT MAE	VS. ASCAT Bias
08/29 1200	WEPS	8	3	9	9
	GEFS	26	26	32	32
	MTCSSA	54	54	55	55
08/30 1200	WEPS	9	-9	3	0
	GEFS	24	24	33	33
	MTCSSA	36	36	45	45
08/31 1200	WEPS	7	-7	7	-5
	GEFS	17	17	18	18
	MTCSSA	31	31	32	32
09/02 1200	WEPS	21	-3	24	-7
	GEFS	71	71	68	68
	MTCSSA	48	-48	54	-54

ASCAT 顯示出移動方向右半側具有更廣泛的風場分布，這也反映在 ASCAT 與 JTWC R34 估計值在西側象限略大於東側，EPS 與 MTCSWA 也大致掌握到此一特徵，而 WEPS 在各個象限均最為接近 ASCAT 與 JTWC，GEFS 與 MTCSWA 仍較為高估。09/02 1228 UTC (圖 14d)，正處於 RW 階段的 Hinnamnor (2022) 位於台灣東部外海並轉為向北移動，ASCAT 掃描帶顯示出較為不對稱的風場結構，移動方向右半側具有更廣泛強風區之特徵也反映在 ASCAT 與 JTWC 在東側象限更大的 R34，EPS 也能大致掌握到相似的不對稱風場結構，但是 GEFS 在各個象限均顯著高估，WEPS 仍更接近 ASCAT 與 JTWC，MTCSWA 則是沒有呈現此時的不對稱性，其較為對稱的風場結構也反映在過於低估了東側象限的 R34，特別是 SE 象限。

四、總結與展望

JTWC 於 1987 年結束西北太平洋地區颱風的飛機觀測任務，且對於颱風的重新分析僅專注於路徑與強度，因此 R34 數據品質存在疑慮。然而，近年來已有研究人員致力於改善 JTWC 最佳路徑資料的 R34 數據。Sampson et al. (2017) 針對西北太平洋的 R34 數據進行了重新分析，將 2014-2015 年的結果與 NHC (National Hurricane Center) 最佳路徑資料進行比較，這是因為

後者對於北大西洋地區之 R34 數據的季後分析已行之有年，並且此區域有較多的飛機直接觀測數據可供使用，因此大多認為後者具有更高品質的 R34 數據。結果顯示經過事後分析的 JTWC 最佳路徑資料在 R34 數據品質與 NHC 最佳路徑資料相當。而本研究使用之資料即是經過質量控制的 2022 年 JTWC 最佳路徑資料中的 R34 數據，可有望提高研究中定量分析結果之比較的可信度。

本研究透過客觀方法使用 WEPS 和 GEFS 對颱風進行追蹤並計算 4 個地理象限中 R34 的大小，除了將 EPS 初始時間下系集平均的計算結果與 MTCSWA 和 NCEP EMC 進行齊次化分析，也比較不同 EPS 在預報時間的差異與特徵。在 R34 的定量分析比較中，以 JTWC 最佳路徑資料作為基準，同時也利用 ASCAT 來進行額外的驗證。

基於 JTWC 的 R34 定量分析顯示，初始時間中 WEPS 的平均絕對誤差最小，WEPS 約為 26 nmi，MTCSWA 次之，約為 40 nmi，GEFS 最大，約為 50 nmi。在偏差方面，WEPS 略微高估，MTCSWA 則是略微低估，而 GEFS 在所有象限均呈現較顯著高估。此外，EPS 在 R-squared 方面優於 MTCSWA，其中又以 WEPS 表現最佳，表示其在具有較小的 R34 誤差的同時也能捕

捉到更多的渦旋大小的變化。EPS 在預報場的比較結果顯示，R34 預報誤差隨預報時間推進而上升，發現預報中的偏差特徵與初始場表現一致，WEPS 在 f00~f108 的誤差均小於 GEFS，大致上在各個象限均顯示出略微正偏差，GEFS 則是顯著正偏差，而兩者在預報中的 R-squared 表現幾乎相當。值得一提的是，雖然 GEFS 在 R34 表現出較顯著的系統性高估，但是其大致上能掌握到颱風渦旋大小變化，未來可以考慮試著透過 Bias Correction 進行修正。除了比較 R34 之外，還計算了各資料的 R34 不對稱性指數，發現 EPS 相較於 MTCSWA 更能掌握颱風風場不對稱結構及其變化，但是通常會高估了不對稱性，而後者則較為低估。

以 ASCAT 衛星散射儀反演風場為基準，在初始時間下進行 R34 定量分析比較，以獲得更多的驗證結果。發現 WEPS 仍具有最小的誤差，平均絕對誤差由小到大依序為 WEPS (24 nmi)、GEFS (43 nmi) 和 MTCSWA (47 nmi)。可以看出，雖然 GEFS 和 MTCSWA 的誤差大小順序與依據 JTWC 為基準時發生改變，但是這是由於微小的 MAE 差異 (7 nmi) 所導致。偏差結果顯示，EPS 仍然表現出與 JTWC 為基準時的一致特徵，即 WEPS 略微高估，GEFS 顯著高估，而 MTCSWA 則是由以

JTWC 為基準的些微負偏差 (-6 nmi) 轉變為依據 ASCAT 的些微正偏差 (10 nmi)。

此外，本研究進一步地將 EPS 計算之 4 個象限 R34 與 Strike Probability 相結合，即 R34 Strike Probability。相對於過去 Strike Probability 使用固定不變之軸對稱範圍，本研究採用 4 個象限 R34 應更能反應不對稱分布的風雨影響區域。雖然目前已初步發現 R34 Strike Probability 能夠實現更有價值的颱風預報資訊，但是未來仍然需要更深入評估此預報資訊的差異與限制。後續研究可比較 EPS 所預報的 R34 與 CWA 或 JTWC 公布的 R34 差異，以進一步評估 EPS 在颱風風圈大小的預報表現。Titley et al. (2020) 研究探討 ECMWF-EPS、NCEP GEFS 以及多模式系集對於熱帶氣旋的預報準確性，透過 Strike Probability 的命中率以進行評估。結果發現，多模式系集在熱帶氣旋軌跡方面的預報能力優於任一單一系集模式。未來可以試著將上述對於 Strike Probability 驗證方法應用在本研究的 R34 Strike Probability，更進一步評估結合多模式的系集在 R34 方面是否也能取得更優於單一系集模式的預報能力。

另外，本研究結果顯示 WEPS 相較於 GEFS 對於颱風大小的掌握程度較佳，我們推測可能原因是系集模式初始場產生流

程差異所造成，因其很大程度會影響模式預報表現，而圖 7 中的 EPS 也同樣呈現此一現象，預報場會延續初始時間而出現相似的較大（小）誤差與偏差特徵。本研究使用的 GEFS 為第 12 版全球系集預報系統 (GEFS v12)，其透過 NCEP GFS 決定性預報與系集卡爾曼濾波 (EnKF) 產生的初始擾動結合以產生 30 組系集成員之初始場；而 WEPS 是使用 CWA 區域決定性預報 (WRFD) 作為初始條件並加入系集調整卡爾曼濾波 (EAKF) 以產生 20 組系集成員，邊界擾動條件則是由 GEFS 提供。

儘管本研究使用 JTWC 和 ASCAT 分別進行 R34 定量分析比較，並且在誤差方面取得相似的結果，從而提高了驗證的可信度。然而，分析中的樣本數仍然相對較少，未來勢必要持續增加資料量，以提高研究的代表性。另外，儘管目前已考慮了 CWA WEPS 和 NCEP GEFS 等 EPS 進行比較，已初步取得不同 EPS 的 R34 比較結果，但是仍然有其他已被廣泛使用的 EPS 尚未納入定量分析比較，例如：ECMWF-EPS、NCDR (National Science and Technology Center for Disaster Reduction) WEPS。更多不同的 EPS 對於颱風風場結構的掌握能力仍有待進一步的評估。除了對不同資料的 R34 數據進行分析與驗證

外，本研究並未深入探討 R34 變化過程中與其他可能因子的關係。了解環境條件與颱風大小變化之間的交互作用也具有相當重要意義，這不僅有助於更全面且合理的掌握颱風風場結構，也能更深入探討颱風動力過程。經由前人的研究得知，與颱風大小變化相關的因子可分為動力與熱力兩方面。動力因子可包含高層輻散以及低層輻合等，而熱力因子通常涉及海表面溫度和海洋熱含量，未來可試著透過計算這些物理量，統整評估綜觀環境條件對於颱風大小變化的影響。

致謝

本研究大部份研究文稿是由李繼常之碩士論文編撰而成，並在國科會計畫 MOST 111-2625-M-034-001 及 NSTC 112-2625-M-034-001 的支持下完成研究。特別感謝中央氣象署連國淵博士及李志昕技士提供 CWA WEPS 模式資料進行研究。

五、參考文獻

- 周昆炫、吳聖宇、林書正，2018：颱風強度與大小對台灣風雨之影響。大氣科學，46，222-246，<https://doi.org/10.3966/025400022018094603001>
- 林書正，2011：ASCAT 衛星散射儀反演風場於熱帶氣旋環境下之誤差特徵。

- 中國文化大學，地學研究所大氣科學組，碩士論文。
- A. Pérez-Alarcón, R. Sorí, J.C. Fernández-Alvarez, R. Nieto, and L. Gimeno, 2021: Comparative climatology of outer tropical cyclone size using radial wind profiles. *Wea. Clim. Extrem.*, **33**, 100366, <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100366>
- Biswas, M. K., D. Stark, and L. Carson, 2018: GFDL Vortex Tracker Users' Guide V3.9a, 35.
- Chan, J. C. L., and C. K. M. Yip, 2003: Interannual variations of tropical cyclone size over the western North Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 2267, <https://doi.org/10.1029/2003GL018522>
- Chou, K.-H., C.-C. Wu, and S.-Z. Lin, 2013: Assessment of the ASCAT wind error characteristics by global dropwindsonde observations. *J. Geophys. Res.*, **118**, 9011–9021, <https://doi.org/10.1002/jgrd.50724>
- Holland, G. J., and R. T. Merrill, 1984: On the dynamics of tropical cyclone structural changes, *Quart. J. R. Met. Soc.*, **110**, 723–745, <https://doi.org/10.1002/qj.497110465>
- Kaplan, J., and M. DeMaria, 2003: Large-scale characteristics of rapidly intensifying tropical cyclones in the North Atlantic basin. *Wea. Forecasting*, **18**, 1093–1108, [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2003\)018<1093:LCORIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2003)018<1093:LCORIT>2.0.CO;2)
- Kim, H. J., I. J. Moon, and I. Oh, 2022: Comparison of Tropical Cyclone Wind Radius Estimates between the KMA, RSMC Tokyo, and JTWC. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **58**, 563–576, <https://doi.org/10.1007/s13143-022-00274-5>
- Knaff, J. A., S. P. Longmore, and D. A. Molenaar, 2014: An objective satellite-based tropical cyclone size climatology. *J. Clim.*, **27**, 455–476, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00096.1>
- Knaff, J. A., and M. DeMaria, 2006: A multiplatform satellite tropical cyclone wind analysis system. *AMS 14th*

- Conference on Satellite Meteorology and Oceanography.*
- Knaff, J. A., M. DeMaria, D. A. Molenaar, C. R. Sampson, and M. G. Seybold, 2011: An Automated, Objective, Multiple-Satellite-Platform Tropical Cyclone Surface Wind Analysis. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **50**, 2149–2166, <https://doi.org/10.1175/2011JAMC2673.1>
- Lee, C.-S., K. K. Cheung, W.-T. Fang, and R. L. Elsberry, 2010: Initial maintenance of tropical cyclone size in the western North Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 3207–3223, <https://doi.org/10.1175/2010MWR3023.1>
- Li, C.-H., Berner, J., Hong, J.-S., Fong, C.-T., & Kuo, Y.-H. (2020). The Taiwan WRF Ensemble Prediction System: Scientific Description, model-error representation and performance results. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, *56*(1), 1–15, <https://doi.org/10.1007/s13143-019-00127-8>
- Lu, X., Wong, W. K., Au-Yeung, K. C., Choy, C. W., and Yu, H., 2022: Verification of tropical cyclones (TC) wind structure forecasts from global NWP models and ensemble prediction systems (EPSs) . *Trop. Cyclone Res. Rev.*, **11**, 88 – 102, <https://doi.org/10.1016/j.tcrr.2022.07.002>
- Ma, Z., Fei, J., and Huang, X., 2019: A Definition of Rapid Weakening for Tropical Cyclones over the Western North Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, **46**, 11471–11478, <https://doi.org/10.1029/2019GL085090>
- Sampson, C. R., E. M. Fukada, J. A. Knaff, B. R. Strahl, M. J. Brennan, and T. Marchok, 2017: Tropical cyclone gale wind radii estimates for the western North Pacific. *Wea. Forecasting*, **32**, 1029–1040, <https://doi.org/10.1175/WAF-D-16-0196.1>
- Sampson, C. R., J. S. Goerss, J. A. Knaff, B. R. Strahl, E. M. Fukada, and E. A. Serra, 2018: Tropical Cyclone Gale Wind Radii Estimates, Forecasts, and

- Error Forecasts for the Western North Pacific. *Wea. Forecasting*, **33**, 1081–1092, <https://doi.org/10.1175/WAF-D-17-0153.1>
- Song, J., and P. J. Klotzbach, 2016: Wind structure discrepancies between two best track datasets for western north Pacific tropical cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 4533–4551, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0163.1>
- Sun, Z., B. Zhang, J. A. Zhang, and W. perrie, 2019: Examination of Surface Wind Asymmetry in Tropical Cyclones over the Northwest Pacific Ocean Using SMAP Observations. *Remote Sens.*, **11**, 2604, <https://doi.org/10.3390/rs11222604>
- Titley, H. A., R. L. Bowyer, and H. L. Cloke, 2020: A global evaluation of multi-model ensemble tropical cyclone track probability forecasts. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **146**, 531–545, <https://doi.org/10.1002/qj.3712>
- Vitart, F., J. L. Anderson, W. F. Stern, 1997: Simulation of interannual variability of tropical storm frequency in an ensemble of GCM integrations. *J. Clim.*, **10**, 745–760, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1997\)010<0745:SOIVOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<0745:SOIVOT>2.0.CO;2)
- Wang, Q., Zhao, D., Duan, Y. et al., 2023: Super Typhoon Hinnamnor (2022) with a Record-Breaking Lifespan over the Western North Pacific. *Adv. Atmos. Sci.*, **40**, 1558 – 1566, <https://doi.org/10.1007/s00376-023-2336-y>
- Zhang, K., and K. T. F. Chan, 2022: An ERA5 global climatology of tropical cyclone size asymmetry. *Int. J. Clim.*, **43**, 950–963, <https://doi.org/10.1002/joc.7846>

Tropical Cyclone Size Analysis and Forecast by Ensemble Forecast System

Chi-Chang Li¹ and Kun-Hsuan Chou^{1,2*}

¹ Graduate Institute of Earth Science, Chinese Culture University, Taipei, Taiwan

² Department of Atmospheric Sciences, Chinese Culture University, Taipei, Taiwan

(manuscript received 26 September 2024; in final form 22 May 2025)

Abstract

Tropical cyclones (TCs) are highly destructive weather systems, and their size is closely related to the extent of the disasters they cause. Therefore, timely monitoring and predicting changes in the TC wind field structure are crucial. Due to the limited availability of observational data around storms, forecasters and researchers have begun using model data to estimate TC size and structure. This study utilizes two ensemble prediction system (EPS) datasets, National Centers for Environmental Prediction Global Ensemble Forecast System (GEFS) and Central Weather Administration mesoscale ensemble prediction system based on the Weather Research and Forecast model (CWA WEPS), to quantitatively calculate the TC size (R34, radius of 34-knot surface wind). The results are compared with Multiplatform Satellite Surface Wind Analysis (MTCSWA), taking into account different data sources such as JTWC Best Track and Advanced Scatterometer (ASCAT) as benchmarks.

The findings show that at the initial time, WEPS demonstrates the slightest R34 error across all quadrants, regardless of whether JTWC or ASCAT is used as the benchmark, outperforming both GEFS and MTCSWA, which show similar performance. Regarding forecast accuracy, WEPS exhibits more minor R34 errors than GEFS throughout the entire forecast period (f00–f108), with both showing comparable performance in R-squared. Overall, WEPS slightly overestimates R34 when it is larger, while GEFS tends to show a more pronounced overestimation across all quadrants. Additionally, compared to MTCSWA, EPS captures more trends in asymmetric wind field structure changes but often overestimates the asymmetry, whereas MTCSWA tends to underestimate it. This study's use of ensemble model data for an

objective analysis of TC size not only aids in understanding the differences between models and data but also serves as a valuable reference for future research and forecasting efforts.

Keywords: ensemble model forecast, TC size, R34. doi: 10.53106/025400022025065301002

*Corresponding author: Kun-Hsuan Chou (E-mail: zcx@ulive.pccu.edu.tw)