

Reprint 1171

對開發熱帶氣旋強度預報統計模型的初探

梁恩瑜、馬浩然*、江如秋 & 陳傲軒

第二十九屆粵港澳氣象科技研討會

澳門，2015年1月20-22日

* 香港中文大學

對開發熱帶氣旋強度預報統計模型的初探

梁恩瑜¹

馬浩然²

江如秋¹

陳傲軒¹

¹ 香港天文台

² 香港中文大學

摘要

現時當有熱帶氣旋在南海和西北太平洋的範圍內，香港天文台便會發出熱帶氣旋信息，內容包括其預測路徑和強度變化。預報員會根據數值天氣預報模式的直接輸出以及評估各種環境條件來作出熱帶氣旋預測。雖然近年熱帶氣旋的路徑預報有顯著改進，但其強度預測還有進步空間。本文將會探討一套正在開發的熱帶氣旋強度預報統計模型，利用統計方法綜合各類觀測因子、數值天氣預報模式的分析與氣候數據，從而得出較數值預報模式直接輸出準確的後處理強度預報。

這套熱帶氣旋強度預報統計模型的主要架構包含「多元回歸統計模型」及「過往熱帶氣旋強度的氣候數據庫」兩個部分。本文會研究包括相關係數、逐步回歸、交叉驗證和預測變量 p 值的大小等方法，去篩選多元回歸中的預測變量，並討論其利弊。從 2013 年的驗證結果顯示，這套統計模型的誤差度比各數值天氣預報模式的直接輸出普遍減少百分之三十，而其優勢於 12-36 小時的短期預測上更為顯著，幫助提升預測熱帶氣旋強度的能力。

1. 引言

每當有熱帶氣旋進入在南海和西北太平洋的責任範圍內，香港天文台會發出熱帶氣旋信息，內容包括其預測路徑和強度變化〔即中心最低氣壓和附近最高持續風速〕。現時預報員會參考各數值天氣預報模式的輸出以及評估各種環境條件去作出熱帶氣旋預報。雖然數值天氣預報模式在過往十年於路徑預報有顯著的進步，但是在熱帶氣旋的強度預測，例如最低氣壓或最高持續風速，仍然受數值天氣預報模式的分辨率、物理過程參數化的不確定性以及相對少量的海上觀測數據所限。除了以上的預測，香港天文台在業務上並沒有一個能夠綜合各環境條件及氣候資料而得出強度預測的工具。因此，香港天文台希望能夠用一些適切的統計方法去結合觀測、數值天氣預報模式及氣候資料去開發新的熱帶氣旋強度預報統計模型，作為一個新工具，希望能夠得出一個較準確的強度預測。

本文將探討一套正在發展的熱帶氣旋強度預報統計模型，這個模型主要分為兩部分。第一部分利用多元回歸統計模型把數值天氣預報模式的大氣參數和實測的海洋參數結合，作出一個從海到海(sea to sea)路徑的氣旋強度預報。第二部分考慮到熱帶氣旋經過陸地時會受地形影響，從而降低了與大氣、海洋參數的關係，所以當熱帶氣旋經過陸地時則會利用過往熱帶氣旋強度的氣候數據作出預測。文章會研究和討論模型的表現以及可行性。

下文將會討論熱帶氣旋強度預報統計模型的架構和所用的數據，以及篩選多元回歸中的預測變量的各個方法和如何利用熱帶氣旋強度氣候數據作出預測。而最後亦會驗證這套強度預測模型的初步表現。

2. 數據

2.1 熱帶氣旋最佳路徑

統計模型的訓練數據集採用了2009-2012年香港天文台的熱帶氣旋最佳路徑資料，包括每六小時氣旋中心定位，中心最低氣壓和接近風暴中心之最高10分鐘平均風力。表1列出香港天文台對熱帶氣旋的分類方法。

模型的驗證數據集則有兩組，第一組為 2013 年香港天文台的熱帶氣旋最佳路徑資料，第二組為 2013 年日本氣象廳的熱帶氣旋最佳路徑資料，分別有 7 和 27 個熱帶氣旋的資料。

2.2 預測變量的數據

各個大氣參數（見下文 3.1 節）和海面溫度數據均取自歐洲中期天氣預報中心的再分析資料(ERA Interim Reanalysis)，空間分辨率為 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。每個大氣參數均取氣旋中心半徑 3 度內（約 340 公里）的平均值，以覆蓋氣旋面積及抵銷其環流對數值的影響。因為海面參數的空間變化較大氣參數為小，所以海面溫度則取自最接近氣旋中心的分析數據。

熱帶氣旋潛熱(tropical cyclone heat potential, 簡稱 TCHP) 和 26 度以上海水層深度的數據則取自美國國家海洋暨大氣總署的衛星數據。數據覆蓋全球，空間分辨率則為 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ，並且每天更新一次。TCHP 和海水層深度的參數都是取自時間和空間上最接近氣旋中心的分析數據。

2.3 海洋陸地資料

統計模型的覆蓋範圍是北緯 $10^\circ - 30^\circ$ ，東經 $100^\circ - 170^\circ$ ，使用 10 公里分辨率的格點陸地-海洋比例資料以區別各點的海洋或陸地屬性，該資料取自於天文台 10 公里分辨率中尺度非流體靜力模式[1]。如該點的比例少於 0.5，則定義為海洋，高於 0.5 則為陸地。雖然這個陸地-海洋比例信息的範圍並不完全涵蓋模型的全部範圍，其提供的最東經度為 146.6° E ，但考慮到在東經 $146.6^\circ - 170^\circ$ ，北緯 $10^\circ - 30^\circ$ 中並無大型陸地存在，故該範圍的所有點均被視作海洋。

2.4 熱帶氣旋強度氣候數據

熱帶氣旋強度氣候數據的覆蓋範圍是北緯 $10^\circ - 25^\circ$ ，東經 $105^\circ - 140^\circ$ ，空間分辨率為 $1^\circ \times 1^\circ$ 。氣候資料綜合了 1973-2012 年五月至十月香港天文台的熱帶氣旋最佳路徑資料，得出氣旋在每點平均十二小時與二十四小時後的強度變化。氣候數據並沒有包括熱帶低氣壓，以區分氣旋生成與氣旋增強和減弱的強度變化，而是按表 1 的類別分為兩大類，(I)：

熱帶風暴和強烈熱帶風暴;(II):颱風、強颱風和超強颱風。

3. 研究方法

3.1 預測變量

在建立多元回歸統計模型時，需要利用一些不同的參數作預測變量去仿真大氣對熱帶氣旋強度的影響。綜合了熱帶氣旋生成的條件[2, 3]、美國國家海洋暨大氣總署的統計颶風強度預測方案(SHIPS)[4]以及一些氣旋數據，得出以下幾類預測變量：

- 1) 氣旋位置：緯度、經度
- 2) 季節：日數
- 3) 氣旋現況：初始風力(T+00h)、12 小時前的風力轉變($V_{T+00} - V_{T-12}$)
- 4) 大氣動力：850 百帕渦度、200 百帕散度
- 5) 濕氣：850-700 百帕平均濕度、500-300 百帕平均濕度
- 6) 高層熱能：200 百帕溫度
- 7) 風切變：850-200 百帕緯向風切變、850-200 百帕垂直風切變
- 8) 海洋熱含量：海面溫度、熱帶氣旋潛熱、26 度以上海水層深度

現時有 15 個預測變量。由於訓練數據集只有四年，為避免出現過分擬合(over-fitting)的情況而引致預測的可信度下降，需要利用多個方法去篩選預測變量。這些預測變量建立的多元回歸統計模型會用來預測 T+12h、T+24h、T+36h、T+48h、T+72h 預報時數的熱帶氣旋強度變化。

3.2 篩選預測變量的方法

3.2.1 相關係數

相關係數 ρ_{XY} 反映兩個變量之間的相互關係，定義為兩個變量之間的共變異數除以兩個變量的標準偏差。在進行多元回歸統計模型方法之前要先瞭解預測變量之間存在的關係，挑選相關係數較小的預測變量，避免出現多共線性行為(multiple collinearity)。

$$\rho_{XY} = \frac{cov(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y}$$

3.2.2 逐步回歸

逐步回歸是根據每一個預測變量預測力的大小去決定刪去或留在模式中，利用 AIC (Akaike Information Criterion) 去評估模型的優良性[5]，AIC 值愈小就代表模型擬合性愈好。逐步回歸可分為前進選擇法和後退淘汰法。前進選擇法的機制為先以一個沒有任何預測變量作起始，然後在可供選擇的預測變量中，選出一個能夠減低模型最多 AIC 值的預測變量加入，如此類推，不斷加入合標準的預測變量，直至 AIC 值不能再被減少，最後的模型就是結果。後退淘汰法為上述之相反，先用全部可供選擇的預測變量，再逐一剔除。我們分別研究上述兩種的逐步回歸方法，發現得出的預測變量沒有很大的分歧，而文章會按照前進選擇法得出的結果作討論。

3.2.3 交叉驗證

交叉驗證的作用機制為先抽取模型訓練集中，其中一個熱帶氣旋的資料作為驗證集，其餘的則留作交叉驗證的訓練集。然後給予一個指定模型格式，讓訓練集依照該格式生成模型係數，最後運用模型於驗證集上運作。每個熱帶氣旋均重複以上步驟，最後得出該模型格式的交叉驗證均方根誤差。

模型格式參照逐步回歸篩選預測變量次序的結果，第一個測試的模型包含逐步回歸選出的第一個預測變量，第二個測試的模型包含逐步回歸選出的首兩個預測變量，如此類推，最後一個測試模型將包括所有的預測變量。

理論上，當預測變量的數目比較少時候，增加預測變量可以減少交叉驗證均方根誤差，因為能夠作更多方面的模擬，故結果會較準確。但當預測變量已足夠多的時候，再增加變量並不會提高模型的預測能力，交叉驗證均方根誤差會反而上升。因此，達致最低均方根誤差的模型格式便是交叉驗證篩選出最好的預測變量。

3.2.4 預測變量p值的大小

根據逐步回歸的結果，運用假定檢測去檢視各入選預測變量與被預測的變量之間的零假說能否被否定。如 p 值少於 0.01，代表很大程度上零假設不能成立，證明預測變量與被預測的變量有顯著關係。那該預測變量便會保留於模型中。

3.3 處理熱帶氣旋經過陸地的方法

當處理熱帶氣旋經過陸地時，會利用氣候數據作預測。根據熱帶氣旋當時的位置和強度，選出熱帶氣旋強度氣候數據中位置最近的點的強度變化作出預測。不過因氣候數據只有 T+12h 和 T+24h 的強度變化作參考，其他長時效的預報模型要作另外的處理。例如當熱帶氣旋在 T+00h 至 T+48h 期間在海上，在 T+72h 的位置處於陸上，我們會先拿多元回歸統計模型得出的結果，預測 T+48h 時熱帶氣旋的強度，加上預測 T+48h 時熱帶氣旋的位置，利用氣候數據，預測其後 24 小時的強度變化，結合兩者而得出 T+72h 的強度預報。

4. 研究結果

4.1 相關係數高的預測變量

表 2 顯示了在模型訓練集中，不同預測變量的相關係數，相關係數大於 0.5 為需要探討的情況，並以黃色底色標示。圖表中顯示，緯度與各海洋參數、850 百帕渦度與 200 百帕溫度、850 百帕渦度與初始風力以及垂直風切變與緯向風切變之間的相互關係較大。

緯度與太陽日照有直接關係，而太陽正正是令海洋溫度有變化的其中一個源頭。但是緯度是用於表達氣旋的位置特性，而海洋參數卻代表海洋能夠供給氣旋的熱能，因表達與氣旋不同的關係，兩個參數都會保留。而 850 百帕渦度與初始風力，一個是表達氣旋現況，而另一個則表達氣旋大氣動力的來源，而且相關係數亦只是僅僅過 0.5，所以兩個參數也予以保留。在 850 百帕渦度與 200 百帕溫度之間，因低層漩渦的強度比高層熱能更與氣旋演化有直接關係，所以保留了 850 百帕渦度。而挑選從各海洋參

數之間、垂直風切變與緯向風切變之間會在以下兩部分闡述。

4.2 海洋參數的篩選

因各海洋參數之間的相互關係較大，需要選擇一個較具代表性的參數放進多元回歸統計模型內。我們嘗試分開三組模型來測試它們的表現。第一組的預測變量僅包含熱帶氣旋潛熱作為海洋參數，第二組的預測變量僅包含海面溫度作為海洋參數，而第三組的預測變量則不包含任何海洋參數。三組預測變量的組合均使用逐步回歸的方法建構各預測時數的模型，第一組所得出之模型稱作-【熱帶氣旋潛熱模型】，第二組所得出之模型稱作-【海面溫度模型】，第三組所得出之模型稱作-【無海洋參數模型】。

三組模型都以 2013 年日本氣象廳的颱風最佳路徑信息來測試它們在多元回歸統計模型的預測的均方根誤差，結果顯示於圖 1。在短預測時數上(T+12h)，各模式的誤差相若，但在長預測時數上(T+48h、T+72h)，【熱帶氣旋潛熱模型】的表現較優。而且，熱帶氣旋潛熱的計算綜合了由海面至 26 度以上海水層深度的垂直溫度，比起海面溫度更能夠代表海水能夠供給熱帶氣旋的熱能[6]。故此次研究挑選了熱帶氣旋潛熱作為海洋參數。

4.3 風切變參數的篩選

從表 2 可見緯向風切變與垂直風切變之間的相互關係較大，亦要作出篩選。風切變會影響熱帶氣旋的生成、增強和消散，如果風切變過強，便會阻礙氣旋的對流發展，破壞它的反饋系統，從而令風暴減弱。雖然垂直風切變是常見用來評估氣旋強度的因子，但當嘗試將垂直風切變放進逐步回歸中，卻不會被挑選或處於較後的次序。然而用緯向風切變卻能夠成功被選擇，而且對於模型的表現亦有較大的改善。故此次研究挑選了緯向風切變作為風切變參數。

4.4 統計模型

經過以上的篩選，預測變量由 15 個減少到 11 個。在這 11 個預測變量的基礎上，再分別以逐步回歸(3.2.2)，交叉驗證(3.2.3)和預測變量的 p 值(3.2.4)選出適合的預測變量去構成模型。這次研究比較以上三個方法在

不同預報時數所挑選的預測變量，再去瞭解這三個方法的利弊。

表 3 列出各個方法所得出在各預測時數下模型的預測變量。

首先，應用逐步回歸的方法後，會保留大部分的預測變量，大概有 8 至 10 個。當仔細研究每個逐步回歸的步驟就會發現，最後加進回歸的幾個預測變量只能令模型減少了很小的 AIC，即對模型只有些微改善。例如，在 T+36h 的模型，加第一個變數，AIC 減少了 270；加第二個變數，AIC 減少了 283；但加最後二個變數時，AIC 只分別減少了 1.3 和 1.8。其實，預測變量加進回歸模型的次序亦能帶出各個預測變量的相對重要性。表 4 列出逐步回歸方法所得出在各預測時數下模型加預測變量的次序。上述證明了有些變量的影響比較少，如果要防止過擬合，便要作出變數的取捨。而單單用逐步回歸的方法並不能立即得出最理想的預測變量數目。

第二，應用交叉驗證的方法後，會留下比較少的預測變量，大概 4 至 6 個，而且特別是長預報時效的模型。例如，圖 2 列出在 T+48h 交叉驗證模型每個預測變量加進後模型的均方根誤差，可以見到最少的均方根誤差是在加進日數之後，再加額外的預測變量亦不能減低模型的誤差。但是，在 T+48h 模型被剔除的預測變量包括風切變、渦度、散度等等一些預測因子，而留下的只包括經度、熱帶氣旋潛熱、12 小時前風力轉變這些氣候或觀測因子。因此，這個交叉驗證的方法或許亦需要一些微調。

最後，應用預測變量的 p 值後，會留下大概 6 至 7 個的預測變量數目，而且亦平均地包含了大氣，統計和季節等重要因素。

綜觀以上三個方法，預測變量的 p 值是較為可取。在這個初探，我們會採用這個模型，並嘗試去驗證它的表現。

要去理解這個模型的建構，可以從預測變量的歸一化模型(normalised model)的係數得知。預測變量的歸一化模型是將預測變量的值從不同的範圍（例如渦度的量級為 10^{-5} ，而經度是 10^3 ）歸一化，而再進行一次多元回歸，得出的係數會同各預測變量的相對重要性有關。表 5 列出各預測時數在初步模型中各預測變量的歸一化模型的係數，得出以下幾項觀察：

1) 〈12小時前風力轉變〉由 T+12h 模型的 0.4 係數跌至 T+72h 模型的 0.1。

可見在短預報時數，氣旋的強度變化會跟過往的變化有相當大的關係，但當預報時數越長，這個關係會減少。

- 2) 〈經度〉由T+12h 模型的0.06係數升至 T+72h模型的0.26。這個上升意味著經度在越長的預報時數下對氣旋的強度轉變有更大的影響，亦表示了不同的經度有著本身增強或減弱熱帶氣旋的氣候特點。
- 3) 〈熱帶氣旋潛熱〉的係數在各預報時數沒有大轉變，維持在0.3左右，表示海洋熱含量對熱帶氣旋的強度轉變有一定的預測作用，主要模擬氣旋能夠從海洋得到多少能量，而這亦是氣旋重要的燃料庫。

5. 驗證結果

5.1 模型的表現

用 2013 年的天兔(1319)為例子，圖 3 顯示在觀測與各預報時數的預測。除了在開首的增強過程外，T+12h 的預測與觀測頗接近，而 T+24h 也不錯。而其他預報時數亦能於後期追上，顯示了多元回歸統計模型的可用性。

而 2013 年的尤特(1311)則能夠體現「熱帶氣旋強度氣候資料」的功用，圖 4 顯示在 T+12h 與 T+24h 的預測與觀測，淺色的直條代表了用氣候資料作出預測。可見氣候數據的預測能夠模擬出登陸後和經過菲律賓時熱帶氣旋減弱的過程，雖然減弱速度比實際觀察為小，但由於現時分辨海陸的區別只是用點對點的方法，當經過菲律賓時，會出現陸地在兩點之間的情況，但仍繼續用多元回歸統計模型，而不用上氣候資料作出預測。因此，我們建議將來可根據路徑來區分海陸，更加切合實際情況。

5.2 與數值天氣模型的比較

為確保統計模型能為業務帶來較好的預報指引，就要與數值天氣預報模式的直接輸出作比較。本文比對了八個不同的數值天氣預報模式，包括全球模式、集合預報系統、香港天文台的非流體靜力模式等等。表 6 列出參與比較的數值天氣預報模式。從驗證各模型在 2013 年香港天文台的熱帶氣旋最佳路徑和 2013 年日本氣象廳的熱帶氣旋最佳路徑的預測表現(只比較對世界協調時間 00, 12 小時作出的預測)，去瞭解這套新開發的統計模

型的初步業務應用表現。

圖 5 及圖 6 分別顯示各模型在兩組核查數據集上的平均絕對誤差與其驗證的樣本量。比較結果顯示，在兩組核查數據集上，統計模型的誤差度比各數值天氣預報模式的輸出普遍為低百分之三十，而優勢於 12-36 小時的短預測時數上更加顯著，在 48-72 小時的預測的誤差亦比以上各數值天氣預報模式為低。

6. 總結與討論

本文討論了開發一個結合了數值天氣預報模式的大氣係數、氣候和觀察數據的新熱帶氣旋強度預報統計模型的架構。文中亦研究了篩選多元回歸中的預測變量的各個方法，並討論了它們的利弊。最後得出一個模型，討論了它的物理基礎，驗證始果亦顯示統計模型的預報誤差比各數值天氣預報模式的直接輸出普遍為低百分之三十，能幫助熱帶氣旋強度預測和業務運作應用。

雖然對驗證結果都感到鼓舞，但這只是一個初步模型，還有進一步的工作去改善這個統計模型。首先，要瞭解為何風切變因子對熱帶氣旋統計模型的影響比較少，其中一個方向是先移除熱帶氣旋的環流，從而得到背景風場來計算垂直風切變，重新調整預測變量。另外，用於分辨海陸的區別亦可由點對點改為根據路徑，以更加切合實際情況。因現時採用了最佳路徑和再分析數據作預測和驗證，要更瞭解模型的業務表現，便要用數值天氣預報模式的預報數據取代再分析數據作為預測變量，再作出驗證。而且利用數值天氣預報模式的預報數據亦可以有助延長預報時數至 120 小時，進一步加強熱帶氣旋強度預報的信息。

鳴謝

本文作者衷心感謝李子祥、黃偉健、蔡振榮先生的支持及意見，同時亦感謝陳敏儀小姐幫忙處理 2013 年各數值天氣預報模式對於熱帶氣旋強度的輸出的相關數據以及胡文志先生提供熱帶氣旋強度氣候數據。本文所用的熱帶氣旋潛熱的資料由美國國家海洋暨大氣總署提供而再分析資料則由歐洲中期天氣預報中心網頁下載，特此鳴謝。

参考文献

- [1] Wong, W.K., 2010: Development of operational rapid update non-hydrostatic NWP and data assimilation systems in the Hong Kong Observatory. *The 3rd International Workshop on Prevention and Mitigation of Meteorological Disasters in Southeast Asia*, 1-4 March 2010, Beppu, Japan.
- [2] Gray, W. M., 1968: Global view of the origin of tropical disturbances and storms. *Monthly Weather Review*, 96, 669–700.
- [3] Gray, W. M., 1998: The formation of tropical cyclones. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 67, 37–69.
- [4] Mark DeMaria and John Kaplan, 1994: A Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme (SHIPS) for the Atlantic Basin. *Weather and Forecasting*, 9, 209–220.
- [5] Akaike H., 1974: A new look at the statistical model identification, *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. AC-19, pp. 716–723.
- [6] Wada, A., and N. Usui, 2007: Importance of tropical cyclone heat potential for tropical cyclone intensity and intensification in the Western North Pacific. *Journal of Oceanography*, 63, 427–447.

表 1 香港天文台對熱帶氣旋之分類

熱帶氣旋類別	接近風暴中心之最高 10 分鐘平均風力	氣候數據類別
熱帶低氣壓	每小時 62 公里或以下	---
熱帶風暴	每小時 63 至 87 公里	I
強烈熱帶風暴	每小時 88 至 117 公里	I
颱風	每小時 118 至 149 公里	II
強颱風	每小時 150 至 184 公里	II
超強颱風	每小時 185 公里或以上	II

表 2 預測變量之間的相關係數

緯度	經度	海面溫度	熱帶氣旋 潛熱	26度以上 海水層深度	850百帕 渦度	200百帕 散度	200百帕 溫度	850-700百帕 平均濕度	500-300百帕 平均濕度	850-200百帕 垂直風切變	日數	850-200百帕 緯向風切變	12小時前 風力轉變	初始風力	
NA	0.141	-0.425	-0.659	-0.622	0.369	-0.191	0.516	0.048	-0.279	-0.007	-0.043	-0.031	-0.267	0.072	緯度
	NA	-0.101	0.142	0.198	-0.062	0.043	-0.275	-0.292	-0.142	-0.079	0.087	-0.041	0.108	0.027	經度
		NA	0.593	0.458	-0.025	0.020	-0.049	-0.008	0.355	-0.206	-0.013	-0.107	0.425	-0.006	海面溫度
			NA	0.917	-0.220	0.178	-0.324	-0.058	0.360	-0.171	-0.021	-0.093	0.426	-0.003	熱帶氣旋 潛熱
				NA	-0.209	0.175	-0.350	-0.062	0.273	-0.164	0.045	-0.085	0.367	0.037	26度以上 海水層深度
					NA	0.067	0.683	0.425	0.298	-0.228	0.120	-0.232	-0.069	0.526	850百帕渦度
						NA	-0.046	0.246	0.453	-0.106	0.039	-0.074	0.059	0.224	200百帕散度
							NA	0.433	0.223	-0.099	-0.106	-0.095	-0.156	0.316	200百帕溫度
								NA	0.476	0.011	-0.041	0.016	-0.048	0.171	850-700百帕 平均濕度
									NA	-0.296	-0.076	-0.232	0.263	0.296	500-300百帕 平均濕度
										NA	-0.042	0.832	-0.242	-0.153	850-200百帕 垂直風切變
											NA	-0.099	-0.056	0.180	日數
												NA	-0.227	-0.174	850-200百帕 緯向風切變
													NA	0.064	12小時前 風力轉變
														NA	初始風力

表 3 各個方法所得出在各預測時數下模型的預測變量

預測時數	逐步回歸					交叉驗證					預測變量的 p 值				
	12	24	36	48	72	12	24	36	48	72	12	24	36	48	72
12 小時前 風力轉變	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
初始風力	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
緯度					✓										
經度	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
日數		✓	✓	✓	✓				✓	✓				✓	✓
200 百帕散度			✓	✓	✓										✓
850 百帕渦度	✓	✓	✓	✓	✓	✓					✓	✓	✓		
500-300 百帕 平均濕度	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓
850-700 百帕 平均濕度	✓	✓	✓	✓	✓	✓									
850-200 百帕 緯向風切變	✓	✓	✓			✓	✓				✓	✓			
熱帶氣旋 潛熱	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
預測變量 數目	8	9	10	9	10	8	4	5	6	5	7	7	6	6	7

表 4 逐步回歸方法所得出在各預測時數下模型加預測變量的次序

	T+12h	T+24h	T+36h	T+48h	T+72h
緯度	7	6	4	3	3
經度					
初始風力	2	2	1	1	1
熱帶氣旋 潛熱	3	3	2	2	2
26 度以上 海水層深度				8	9
850 百帕渦度	5	5	6	9	
200 百帕散度	9	10	9	7	7
200 百帕溫度	8			10	8
850-700 百帕 平均濕度		8	8		
500-300 百帕 平均濕度	6	7	5	5	6
850-200 百帕 垂直風切變		11	11		
日數		9	7	6	5
850-200 百帕 緯向風切變	4	4	10		
12 小時前 風力轉變	1				

表 5 各預測時數在初步模型中各預測變量的歸一化模型的係數

	T+12	T+24	T+36	T+48	T+72
12 小時前 風力轉變	0.406	0.290	0.182	0.153	0.113
初始風力	-0.366	-0.512	-0.592	-0.619	-0.619
緯度	0.0599	0.108	0.153	0.185	0.256
日數				0.0864	0.0924
200 百帕散度					-0.107
850 百帕渦度	0.0776	0.0918	0.0998		
500-300 百帕 平均濕度	0.0810	0.104	0.133	0.150	0.137
850-200 百帕 緯向風切變	-0.121	-0.106			
熱帶氣旋 潛熱	0.259	0.320	0.342	0.299	0.299

表 6 納入比較的數值天氣模型

代號	全稱
EDET	ECMWF deterministic
EEM0	ECMWF EPS mean
JEM0	JMA EPS mean
RJGM	JMA RSMC Global Model Guidance
TEP0	JMA TEPS mean
NCZZ	NCEP
NH10	Operational MesoNHM (10km)
NHJM	MesoNHM (JM boundary)

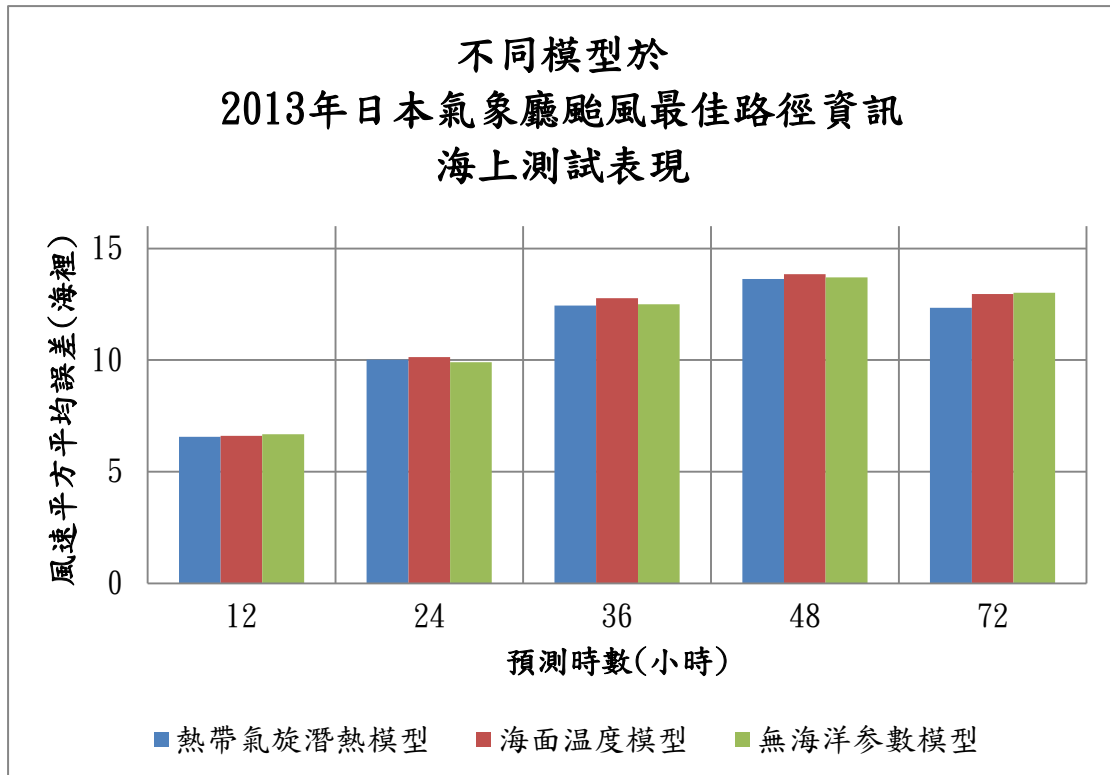


圖 1 不同海洋系數之模型於 2013 年日本氣象廳颱風最佳路徑信息的測試結果

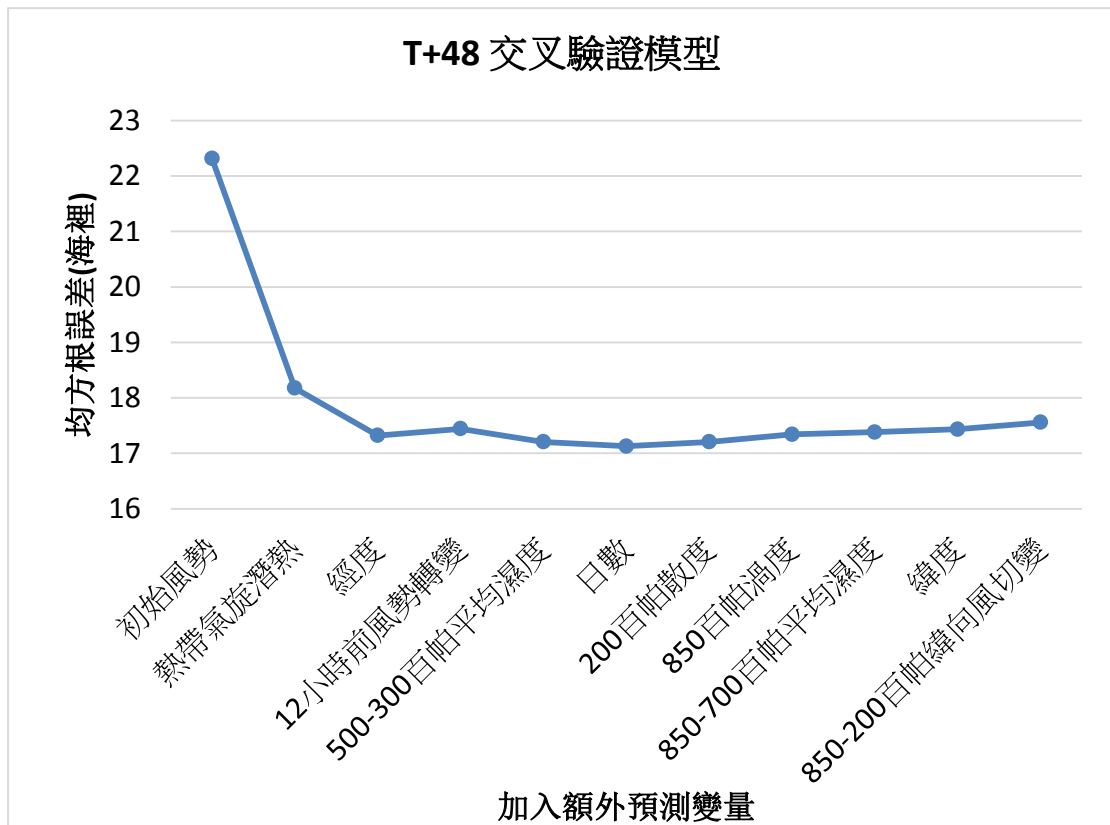


圖 2 T+48 交叉驗證模型的結果

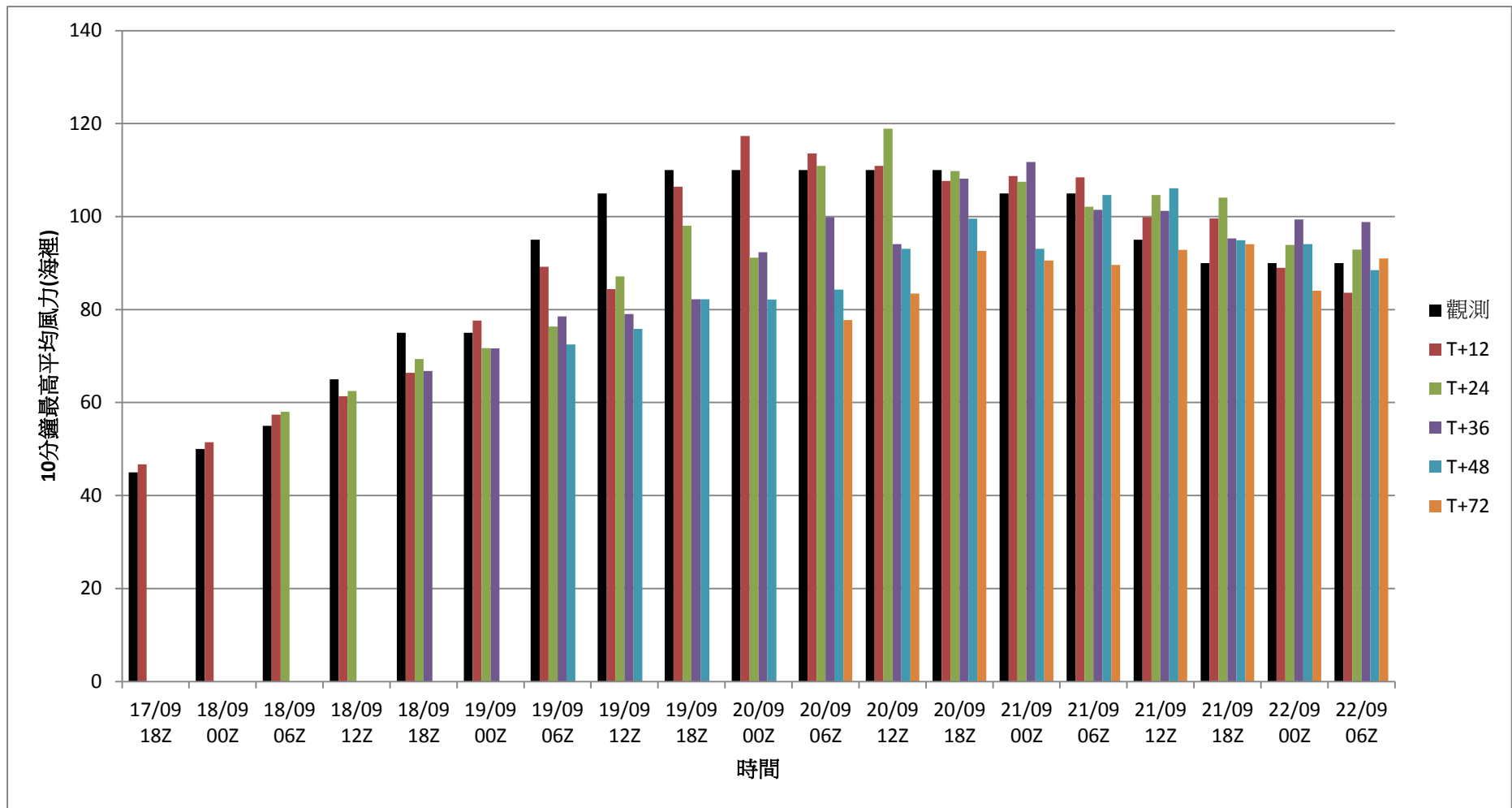


圖 3 2013 年天兔的強度觀察與各預報時數的預測

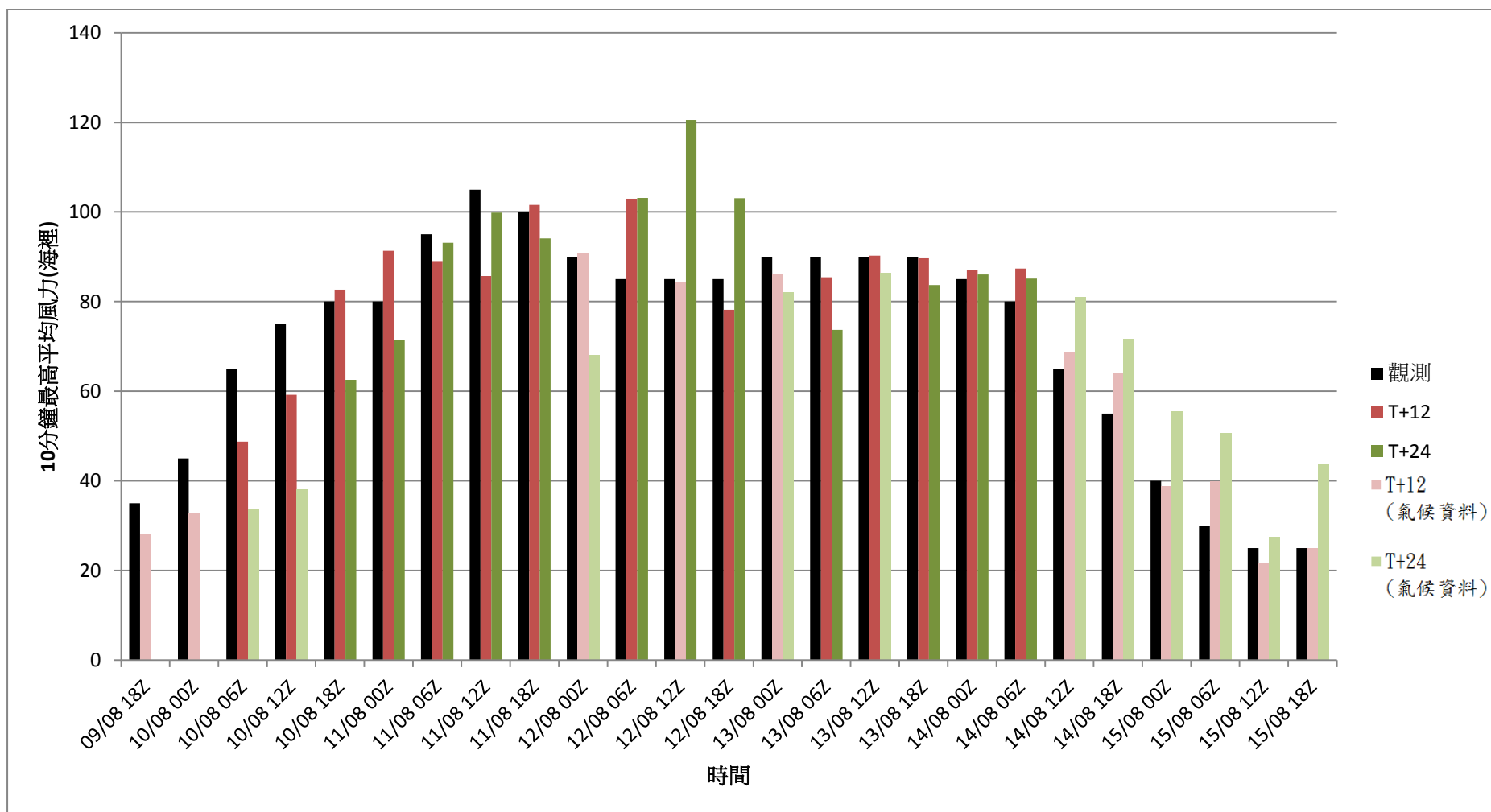


圖 4 2013 年尤特的強度觀察與 T+12h 及 T+24h 的預測 (淺色的條代表了用氣候資料作出預測)

於2013年香港天文台颱風最佳路徑信息 不同模型的表現比較

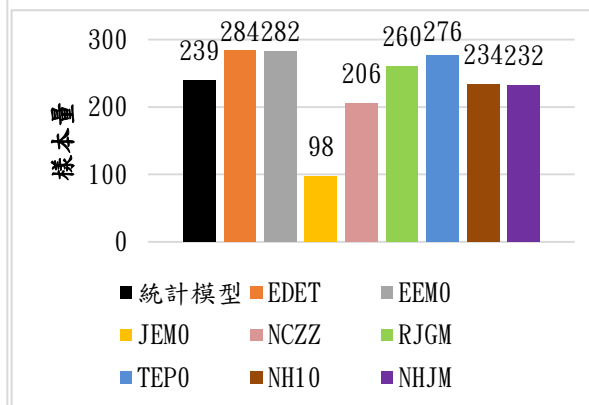
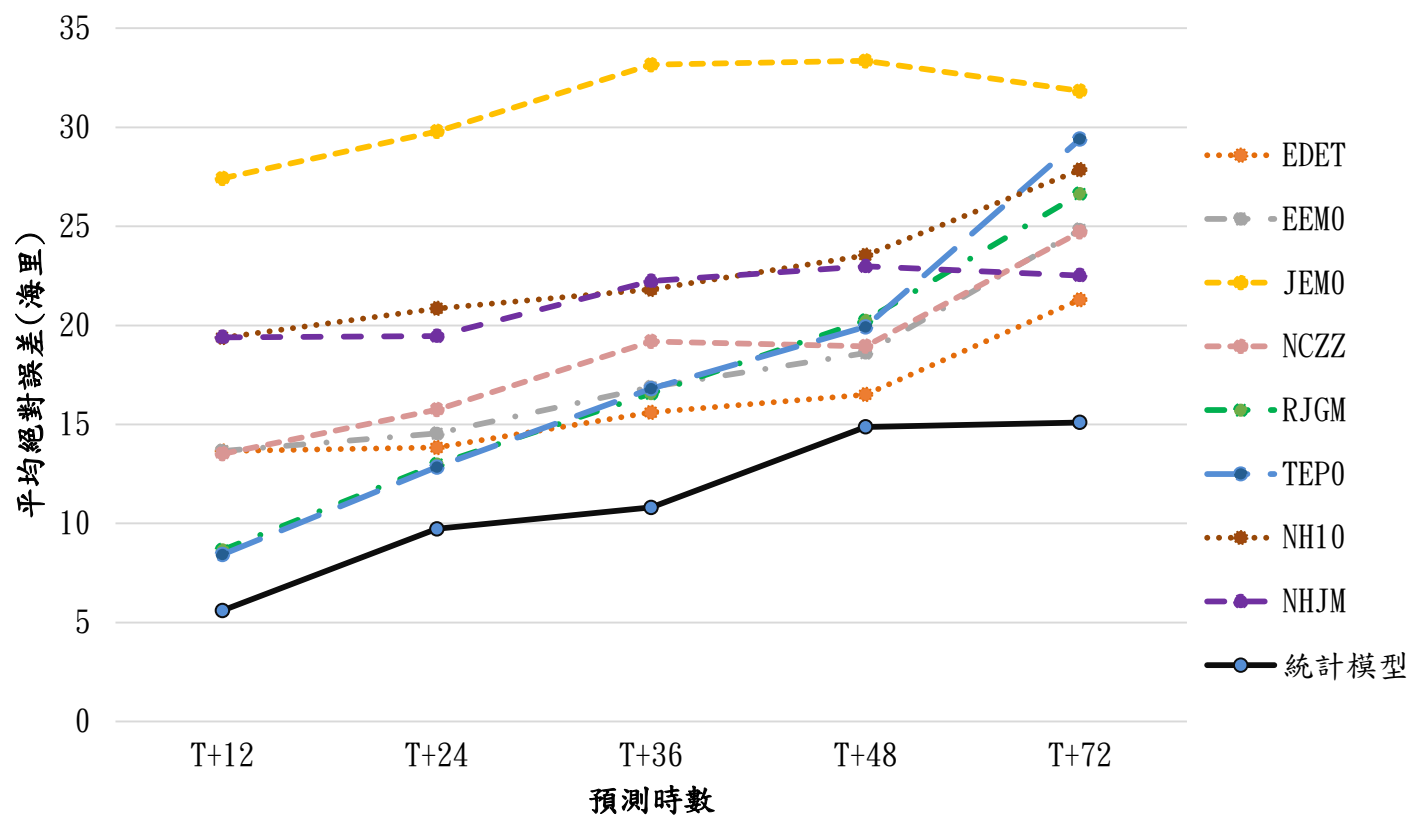


圖 5 於 2013 年香港天文台的颱風最佳路徑信息不同模型的表現比較 (右下角為樣本量)

於2013年日本氣象廳颱風最佳路徑信息
不同模型的表現比較

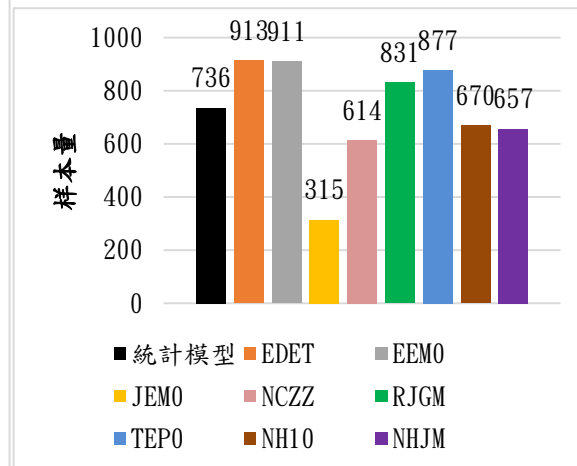
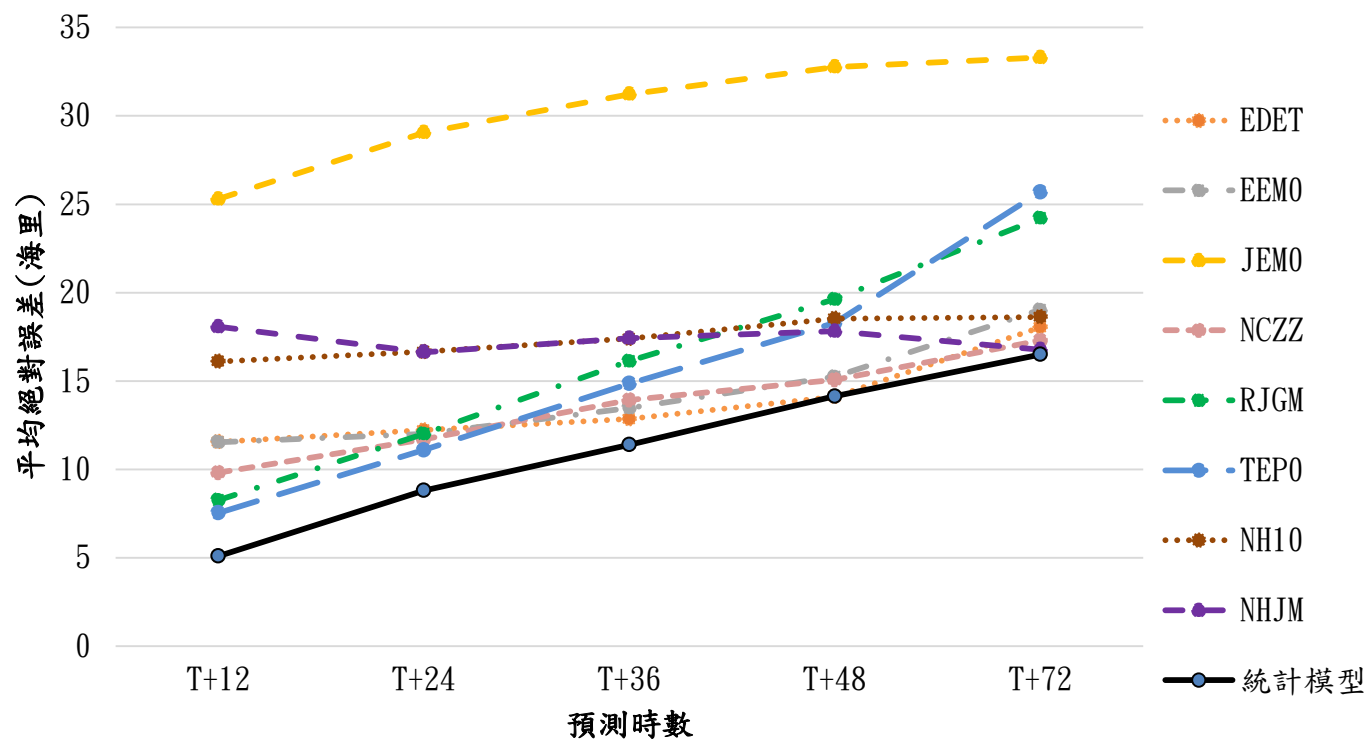


圖 6 於 2013 年日本氣象廳的颱風最佳路徑信息不同模型的表現比較 (右下角為樣本量)