

# 運用多模式集成技術預測熱帶氣旋路徑

胡宏俊 林麗泗蓮

香港天文台

## 摘要

香港天文台從 2002 年開始在業務上運用多模式集成技術來預測熱帶氣旋路徑。本文檢視該技術自運作以來的表現及評定其成效，當中亦就該技術應用於 2006 年颱風珍珠及颱風派比安兩個個案中的成果及限制進行了討論。

## **Application of the Multi-Model Ensemble technique on Forecast of Tropical Cyclone Tracks**

W.C. Woo and Hilda Lam

Hong Kong Observatory

## Abstract

Since 2002, the Hong Kong Observatory utilizes the multi-model ensemble technique in operational tropical cyclone track forecasting. This study reviews the performance of the technique since its introduction, evaluates the effectiveness of the method and discusses the success and limitation of the method as applied to the cases of Typhoon Chanchu and Typhoon Prapiroon in 2006.

# 運用多模式集成技術預測熱帶氣旋路徑

胡宏俊 林麗泗蓮

香港天文台

## 1. 前言

現時，利用集成預報技巧預測熱帶氣旋路徑已成為主流方法。香港天文台自 2002 年開始運用多模式集成預報，至今已有五年時間。本文旨在探討使用集成預報的成效，以及討論有關方法的限制。

## 2. 多模式集成預報

在業務運作上，香港天文台使用的集成預報(Ensemble, 以下簡稱 ENS)主要由日本氣象廳(JMA)、歐洲中期預報中心(ECMWF)、英國氣象局(UKMO)及美國國家環境預報中心(NCEP)的全球數值預報模式所組成，而當熱帶氣旋在東經 120 度以東時，日本氣象廳的颱風模式亦會包含在內。另外，若個別模式的預報路徑與集成預報路徑出現頗大差別，其角色會被剔除。

在運算集成預報位置時，天文台沿用相同權數 (Equal Weighting) 計算各數值預報模式的平均經緯度。此方法的優點是操作簡單，而有關的運算法亦已融入在天文台開發的「熱帶氣旋資訊處理系統」中。

李子祥及黃美成(Lee & Wong, 2002)曾驗證採用不同權數的集成預報方法，發現對提高 24 小時預測的準確度有一定作用，但對 48 小時及 72 小時的影響則不大。由於有關運算較為複雜，現時天文台並未在業務運作上採用。

## 3. 預測位置誤差的計算

當有熱帶氣旋位於北緯 10 至 30 度，東經 105 至 125 之間，香港天文台便會發布「為船舶提供的熱帶氣旋警告」。本文採用警告中的熱帶氣旋預測位置作為香港天文台的熱帶氣旋預報位置(HKO)。

香港天文台透過 GTS 收集來自 JMA 及 UKMO 的熱帶氣旋警告，並從 ECMWF 及 NCEP 提供的水平面氣壓預報圖讀取熱帶氣旋的預測位置，目前 ECMWF 模式的解象度為 2.5 度，而 NCEP 模式的則為 1 緯度乘 2 經度。

本文以香港天文台基於事後分析的最佳路徑為準進行驗證。為能作出有意義的比較以及預視在業務運作中的表現，在驗證數值模式的誤差時，使用了預報員能在業務運作中可使用的模式結果，即基準時間為發出警報時間 12 小時前預報模式的 36 小時、60 小時及 84 小時預測（為簡化說明，以下所指的 24 小時、48 小時、72 小時預測，均相對發出警告的時間而言，即為 12 小時前預報模式的 36 小時、60 小時及 84 小時預測。）由於 ECMWF 模式現時只提供每 24 小時的預報圖，其中間時間的預報位置以線性內插值代替。同時，為公平起見，本研究採用相同樣本比較，即僅當所有相關預報模式及香港天文台均有提供預報位置時方取樣驗證。

#### 4. 熱帶氣旋預測位置的驗證結果

2002-2005 年香港天文台的主觀預報、各數值預報模式及集成預報的平均誤差列於表 1-4 及圖 1-4，另外，集成預報的統計數字載於表 5。

從圖 1 的驗證結果可見，在各數值預報模式中，NCEP 的預報最為理想，無論 24 小時、48 小時及 72 小時的平均誤差均小於所有其他模式。而 ECMWF 的 24 小時預報較差，但其 48 小時及 72 小時的預報誤差則與 JMA 及 UKMO 相若，這可能與該模式並沒人為加入熱帶氣旋分析位置(bogusing)，以及其水平面預報圖解像度較低有關。

總的來說，使用集成預報方法比使用個別預報模式優勝，天文台的 24 小時、48 小時及 72 小時預報的表現與集成預報相若（誤差相距小於 10 公里），這是因為自 2002 年起天文台已使用集成預報作為預測熱帶氣旋路徑的主要工具。

從表 5 的統計數字可見，集成預報有時亦會產生頗大的誤差，其 24 小時、48 小時及 72 小時的誤差最大值分別為 510 公里、973 公里及 1232 公里，遠高於有關的平均誤差。

## 5. 個案分析 1 - 珍珠(2006)

珍珠(2006)年在五月九日於雅蒲島附近發展成一熱帶低氣壓後，大致向西北偏西方向移動，十二日橫過菲律賓，十三日進入南海並增強為颱風。珍珠進入南海後初時向西推進，於十五日轉北趨向華南沿岸，十七日開始採取東北偏北路徑移動，翌日在汕頭附近登陸並逐漸減弱。(見圖 5)

是次颱風路徑預報中，所有預報模式均成功預測珍珠會在南海中部以接近九十度右轉，而按此計算出來的集成預報亦有此特徵(圖 6-7)。天文台參考集成預報而製訂的路徑預測，其 24 小時、48 小時及 72 小時的平均預報誤差僅為 86 公里、158 公里及 256 公里，而在轉向前(即十三日 00UTC 至十五日 00UTC 的 5 次預報驗證時刻)的 24 小時、48 小時及 72 小時平均預報誤差更只有 72 公里、91 公里及 114 公里，遠優於平均值。

從轉向前後的 500 百帕流線分析圖可見，在十三日 12UTC 珍珠未轉向前(圖 8)，副熱帶高壓脊普遍覆蓋華南沿岸地區，仔細分析可見該高壓脊由兩個反氣旋組成，東面反氣旋的中心位置在台灣以東即東經 124 度附近，而西面的反氣旋則在越南北部。在高壓脊南方偏西氣流的引導下，珍珠採取正西路徑移動。至十四日 12UTC(圖 9)，華中西風帶中的槽線加深，東面反氣旋略為減弱並向東撤退，中心位置已移至東經 127 度附近，同時，西面反氣旋西撤至泰國西部，兩個反氣旋中間明顯出現一個弱點。十五日 12UTC(圖 10)，西風槽進一步加深，並由黃海一直伸延至孟加拉灣，受該西風槽的影響，東面反氣旋的中心位置已撤至東經 135 度附近，而西面反氣旋則完全消散，此時珍珠已從弱點突破北轉，並在其後數天一直受西風槽的牽引，繼續向先北後東北偏北方向移動，逐漸減弱並轉化為溫帶氣旋。

高壓脊及西風槽皆屬尺度較大的天氣系統。是次所有全球數值預報模式均有預報西風槽加深及高壓脊減退的趨勢，亦因此成功預測珍珠的轉向。由此可見，在大氣變化明顯的情勢下，即使熱帶氣旋出現大幅度轉向，預報模式仍有可能作出相當準確的預報。

## 6. 個案分析 2 - 派比安(2006)

派比安(2006)在七月三十一日下午於菲律賓附近發展成一個熱帶低氣壓，並向西移動橫過呂宋，八月一日進入南海，轉向西北偏西方向移動，翌日增強為一颱風，逐漸趨向廣東西部海岸，三日晚上於湛江以東登陸。(見圖 10)

香港天文台由七月三十一日 00UTC 至八月四日 00UTC 就派比安發出熱帶氣旋警告，其間共有九次可供驗證的數值預報模式結果，集成預報的 24 小時、48 小時及 72 小時的平均預報誤差為 150 公里、203 公里及 260 公里。

在派比安進入香港八百公里範圍後，集成預報的表現初時不錯，八月一日 12UTC 時的集成預報 24 小時誤差只有 86 公里，然而八月二日 00UTC 的誤差卻增加至 118 公里，12UTC 的 24 小時誤差更進一步增至 171 公里。細心分析派比安的移動路徑可見，在八月二日 12UTC 前派比安向偏西方向移動，在 15UTC 時雖然仍向西移，但速度稍為減慢，到 18UTC 開始突然採取偏北方向移動，同時速度加快，隨後 12 小時雖有短期西向的跡像，卻仍大致向西北方向移動，直至該晚在湛江以東登陸。

從八月二日 12UTC 至三日 12UTC 的 24 小時期間，派比安的移動路徑時而向西、時而向北，行踪飄忽，甚難觸摸，而各數值預報模式的表現亦未如理想。根據圖 12-13 顯示，在八月二日 00UTC 和 12UTC 時 UKMO 甚至預測派比安會向正西移動，趨向海南島，由於其路徑與其他模式相距甚遠，預報員在計算集成預報路徑時已將其剔除在外，但由於其餘三個模式仍有偏左的傾向，致使最後的集成預報位置出現較大誤差。

另一方面，數值預報模式運作需時，亦限制了其可用性。例如，在八月三日清晨，天文台仍未收到部分預報模式以二日 12UTC 為基準的結果，結果在二日 21UTC 前只能繼續沿用二日 00UTC 為基準的結果製作預報路徑。換句話說，八月二日 18UTC 發出的派比安 24 小時預測位置(即三日 18UTC 的位置)，實際上已是數值預報模式中的 42 小時預測位置，其準確性亦無可避免受到影響。

另外，我們亦參考歐洲中期預報中心及日本氣象廳各自的集成預報。從圖 14 及 15 可見，八月二日 00UTC 及 12UTC 歐洲中期預報中

心的集成平均路徑，比多模式集成預報路徑更貼近事後分析的最佳路徑。然而，圖 16 及 17 則顯示，日本氣象廳的集成預報的表現與多模式集成預報相若或較差。

## 7. 運用多模式集成預報的限制

綜觀過去數年經驗，預報員發現使用集成預報有以下的限制：

1. 不同數值預報模式的預測不時存在著很大差別，亦往往分成不同叢集(cluster)，盲目使用平均經緯度作預報可能會導致不合理的預報路徑。現時，預報員會根據各預報模式的主流意見及天氣情況(synoptic situation)，主觀判斷是否需要剔除個別模式，至於能否建立客觀標準，以提昇集成預報的準確度，仍有待進一步研究。
2. 數值預報模式不一定能提供熱帶氣旋的預報位置，這在熱帶氣旋初生成時更常出現。在 2002-2005 年間，天文台總共有 287 次需要在 00UTC 或 12UTC 發出熱帶氣旋警告，但同期有至少一個模式提供 24 小時、48 小時及 72 小時位置的僅分別有 249 次(87%)、220 次(77%)、及 177 次(62%)，即預報員往往需要在完全沒有預報模式指引的情況下提供警告。現時，天文台的預報員通常會參考  $1/2(P+C)$  及引導氣流等傳統方法作短期預報，以及使用外推方法推演較長時限的預報位置。
3. 由於集成預報由個別預報平均而成，當大部分預報模式出現向同一方向的錯誤傾向時，集成預報位置亦難免出現較大誤差，就如在預報颱風派比安移動路徑時出現的情況一樣。
4. 由於預報模式往往未能準確捕捉熱帶氣旋的初始位置，同時運行數值模式需時，到結果可供使用時又過了一段時間，致使預報員分析的實況位置與模式的短期預報位置會有所出入。這個問題在沒人為加入熱帶氣旋位置的 ECMWF 尤其顯著。
5. 在業務運作上，往往有一個或多個模式未能提供所有 24 小時、48 小時及 72 小時的預測位置，在此情況下，使用經緯度平均值可能會導致不合理的移動路徑。如圖 18 所示，由於在 2005 年 10 月 31 日 12UTC 時 ECMWF 並沒有為啟德(2005)提供 72 小時的預報位置，若僅以 JMA 及 UKMO 的位置平均計算 72 小時集成預

報位置，則啟德會在 48 小時至 72 小時期間轉為較為極向 (poleward) 的路徑 (紅色直線)，然而，此移動方向並未為任何一個模式所預報。

## **8. 集成預報方法的改進**

為解決上述第四及第五點問題，以下檢視了兩種改進集成預報位置的計算方法。

### **8.1 初始位置修正法 (Initial Position Correction)**

初始位置修正法是使用發出警報時的分析位置與模式基準時間 12 小時前的 12 小時預測位置的差距，修正 24 小時、48 小時及 72 小時的預報位置。

表 6 至表 9 顯示不作修正及使用初始位置修正法的相同樣本驗證結果。以 2002-2005 四年整體結果檢視，有進行初始位置修正的集成預報比不作修正的準確，其效果在短期預報特別顯著。初始位置修正法可將 24 小時、48 小時及 72 小時平均誤差分別減少 25 公里、16 公里和 7 公里。

### **8.2 向量移動集成法 (Vector Motion Consensus)**

澳洲氣象局在 2005-06 年引進使用向量移動平均值計算集成預報 (Burton, 2006)，以使移動路徑較為合理。此方法把預報模式每 24 小時熱帶氣旋的移動方向及距離視作一個向量，計算集成預報位置時先將各預報模式的 24 小時預測向量平均，然後加上實況分析位置以成為 24 小時預測位置，再將其後 24 小時間的平均向量加在 24 小時預測位置上，成為 48 小時預測位置，如此類推。

理論上，當所有模式同時提供 24 小時、48 小時或 72 小時全部預報位置時，向量移動集成法與初始位置修正法的結果應該完全相同。為特別檢視兩種方法的分別，以下抽取了兩者有分別的樣本進行驗證。

根據表 10-13 顯示，使用向量移動集成法與初始位置修正法的 24 小時誤差相若，在 48 小時及 72 小時誤差則分別低 6 公里及 22 公里，由此可見，向量移動集成法在預報時限較長的情況下會有幫助。

總的來說，採用 2002-2005 年相同樣本驗證，對比完全不作修正的集成預報來說，向量移動集成法可把 24 小時、48 小時及 72 小時的誤差分別降低 25 公里、17 公里及 16 公里。

除了提高預測的準確度外，向量移動集成法亦有助消除因個別模式未能提供預報位置而造成的不合理轉向。以圖 18 為例，使用向量移動集成法的預測路徑（藍色直線），比起不作修訂的預測路徑（紅色直線）較為順暢及合理，同時亦較為接近實際的路徑（黑色虛線）。

## 9. 結論及展望

本文驗證了在 2002-2005 年間各預報模式、集成預報及香港天文台的 24 小時、48 小時及 72 小時預測位置誤差，並檢視了在颱風珍珠(2006)及颱風派比安(2006)時的運作情況。

本文亦討論了使用集成預報的可測性。在大尺度形勢出現變化時（例如颱風珍珠(2006)在南海中部轉向時），熱帶氣旋的轉向較為可測。

我們亦提出了兩個改進集成預報的方法，使用向量移動集成法不但有助提供預報的準確度，亦可減少因個別預報模式未能提供預測時出現的不合理轉向。香港天文台會考慮在未來業務運作中採用。

從驗證的結果可見，統計上集成預報仍是最佳的熱帶氣旋路徑預報工具，然而，集成預報有時亦會出現相當大的誤差，此外，集成預報模式的結果每天只更新兩次，又由於模式運作需時，到預報員真正可以使用時資料可能已經過時，有關模式未能考慮到的最新資料最長可達 21 小時，這亦限制了集成預報的應用。

在最具關鍵性的短期預報上，混合使用集成預報及傳統方法如  $1/2(P+C)$  及引導氣流等，或能進一步提高預報的準確度，至於中期預報方面，現時並沒經驗證的客觀方法，以決定應否剔除個別模式或各模式的權重，雖然預報員有時亦會自行就剔除個別模式作出主觀判

斷，但大體來說仍得依靠計算所有模式均權平均值的集成預報結果。為了進一步提高預報的準確性，研究其他客觀的集成預報法，例如 Kumar 等(2002)提出的不同權數集成法，亦是值得研究的方向。

## **10. 鳴謝**

作者多謝馬志輝提供已整理的熱帶氣旋預報位置數據，特致謝意。

## 11. 參考文獻

1. Lee, T.C. & Wong, M.S. (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 December 2002*
2. Andrew Burton (2006), Sharing experiences in operational consensus forecasting, *Sixth International Workshop on Tropical Cyclones*
3. T.S.V. Vijaya Kumar *et al* (2002) Multimodel Superensemble Forecasting of Tropical Cyclones in the Pacific, *Monthly Weather Review, Volume 131, 574*

表 1：2002-2005 年各數值預報模式、集成預報及香港天文台的平均  
誤差(公里)

	取樣次數	UKMO	ECMF	JMA	NCEP	ENS	HKO
24 小時預測	146	162	202	166	139	126	119
48 小時預測	73	269	286	292	234	211	220
72 小時預測	28	411	383	413	294	313	321

表 2：2002-2005 年各數值預報模式、集成預報及香港天文台各年 24  
小時預測的平均誤差(公里)

	取樣次數	UKMO	ECMF	JMA	NCEP	ENS	HKO
2002	24	127	147	102	114	93	124
2003	46	189	238	207	165	152	135
2004	44	175	229	205	160	146	129
2005	32	134	154	101	93	84	79
總數/平均誤差	146	162	202	166	139	126	119

表 3：2002-2005 年各數值預報模式、集成預報及香港天文台各年 48  
小時預測的平均誤差(公里)

	取樣次數	UKMO	ECMF	JMA	NCEP	ENS	HKO
2002	10	192	239	210	199	175	205
2003	22	272	372	316	244	243	221
2004	26	337	299	379	302	247	282
2005	15	197	169	161	123	123	122
總數/平均誤差	73	269	286	292	234	211	220

表 4：2002-2005 年各數值預報模式、集成預報及香港天文台各年 72  
小時預測的平均誤差(公里)

	取樣次數	UKMO	ECMF	JMA	NCEP	ENS	HKO
2003	6	435	441	370	360	346	327
2004	15	428	452	476	331	351	383
2005	7	353	186	314	159	204	184
總數/平均誤差	28	411	383	413	294	313	321

表 5：2002-2005 年集成預報誤差（公里）的統計數字

	最小值	最大值	平均值	標準差
24 小時預測	8	510	125	97
48 小時預測	27	973	211	174
72 小時預測	109	1232	313	229

表 6. 2002-2005 年各集成預報方法及香港天文台的預測誤差(公里)

	取樣次數	不作修正	初始位置 修正法	向量移動 集成法	香港天文台
24 小時預測	198	135	110	110	127
48 小時預測	123	224	208	207	220
72 小時預測	61	362	355	346	343

表 7. 2002-2005 年各年不同集成預報方法及香港天文台的 24 小時誤差(公里)

	取樣次 數	不作修正	初始位置 修正法	向量移動 集成法	香港天文台
2002	35	119	98	97	126
2003	62	156	119	121	147
2004	58	149	124	120	135
2005	43	97	87	90	89
總數/平均誤差	198	135	110	110	127

表 8. 2002-2005 年各年不同集成預報方法及香港天文台的 48 小時誤差(公里)

	取樣次 數	不作修正	初始位置 修正法	向量移動 集成法	香港天文台
2002	21	210	194	192	203
2003	37	258	220	220	233
2004	40	258	252	252	274
2005	25	129	131	126	129
總數/平均誤差	123	224	208	207	220

表 9. 2002-2005 年各年不同集成預報方法及香港天文台的 72 小時誤差(公里)

	取樣次數	不作修正	初始位置 修正法	向量移動 集成法	香港天文台
2003	17	312	292	285	303
2004	30	462	460	435	441
2005	14	210	209	230	179
總數/平均誤差	61	362	355	346	343

表 10. 在 2002-2005 年初始位置修正法及向量移動集成法計算結果會有差別的相同樣本中，以兩種方法計算出來的誤差（公里）

	取樣次數	初始位置 修正法	向量移動 集成法
24 小時預測	39	125	125
48 小時預測	32	201	195
72 小時預測	22	411	389

表 11. 在上述樣本中，各年據不同方法計算的 24 小時誤差(公里)

	取樣次數	初始位置 修正法	向量移動 集成法
2002	4	96	90
2003	8	127	142
2004	16	145	131
2005	11	105	116
總數/平均誤差	39	125	125

表 12. 在上述樣本中，各年根據不同方法計算的 48 小時誤差(公里)

	取樣次數	初始位置 修正法	向量移動 集成法
2002	7	170	168
2003	9	237	230
2004	7	235	244
2005	9	161	144
總數/平均誤差	32	201	195

表 13. 在上述樣本中，各年根據不同方法計算的 72 小時誤差(公里)

	取樣次數	初始位置 修正法	向量移動 集成法
2003	9	170	168
2004	8	237	230
2005	5	235	244
總數/平均誤差	22	161	144

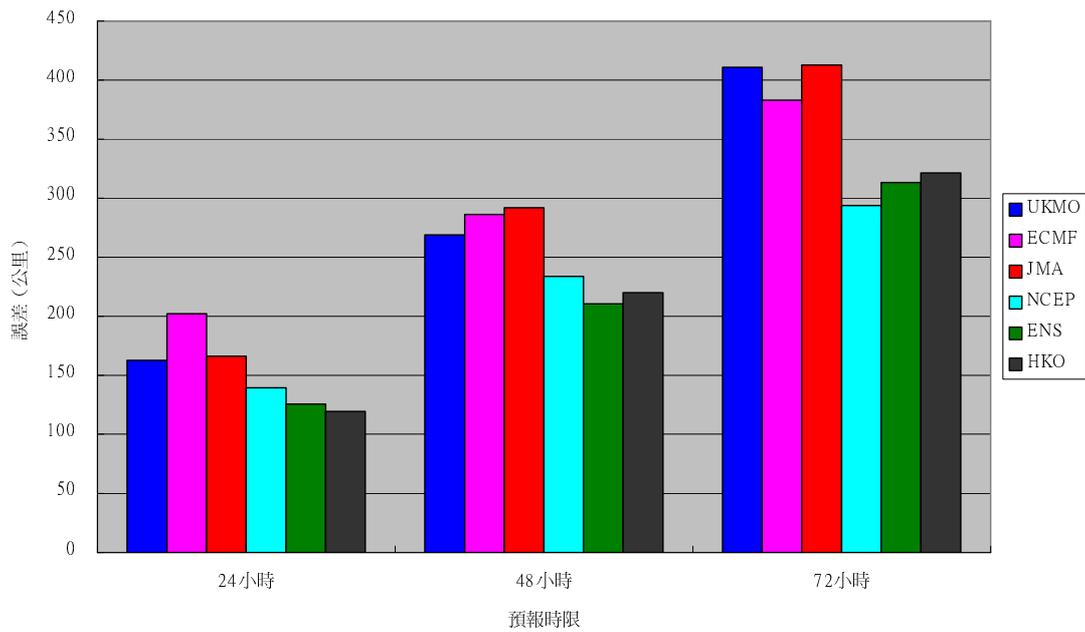


圖 1. 數值預報模式、集成預報及香港天文台的熱帶氣旋位置預報誤差

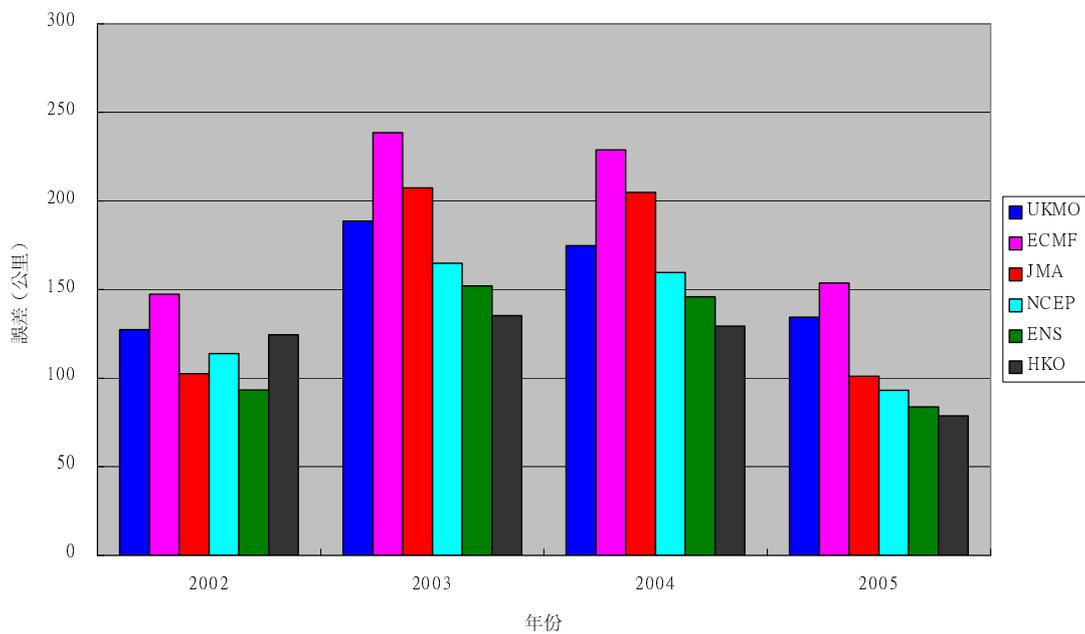


圖 2. 數值預報模式、集成預報及香港天文台的 24 小時熱帶氣旋位置預報誤差

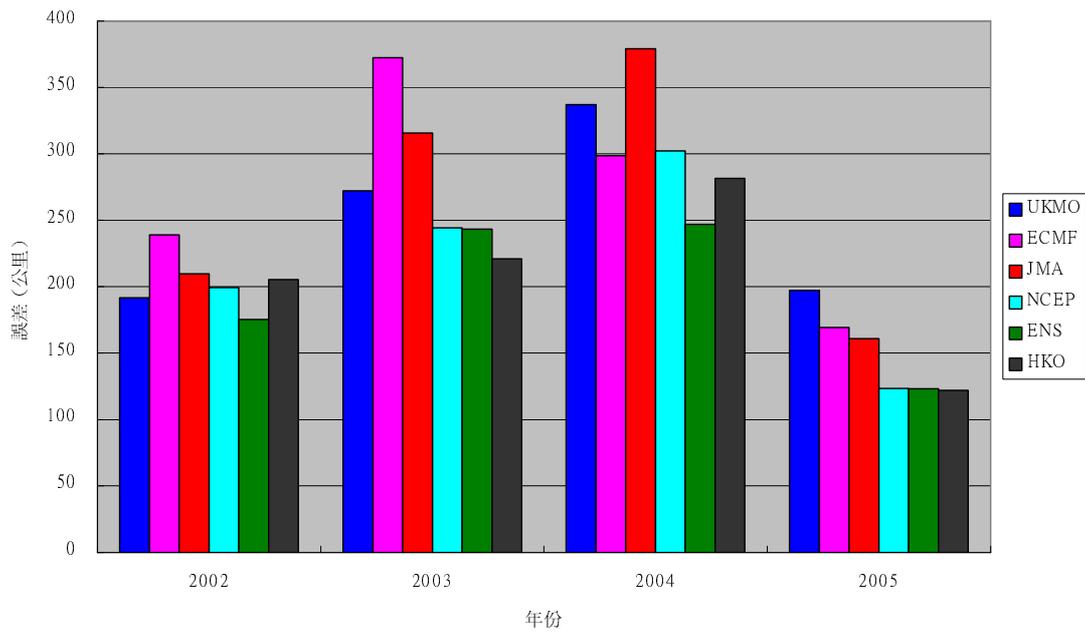
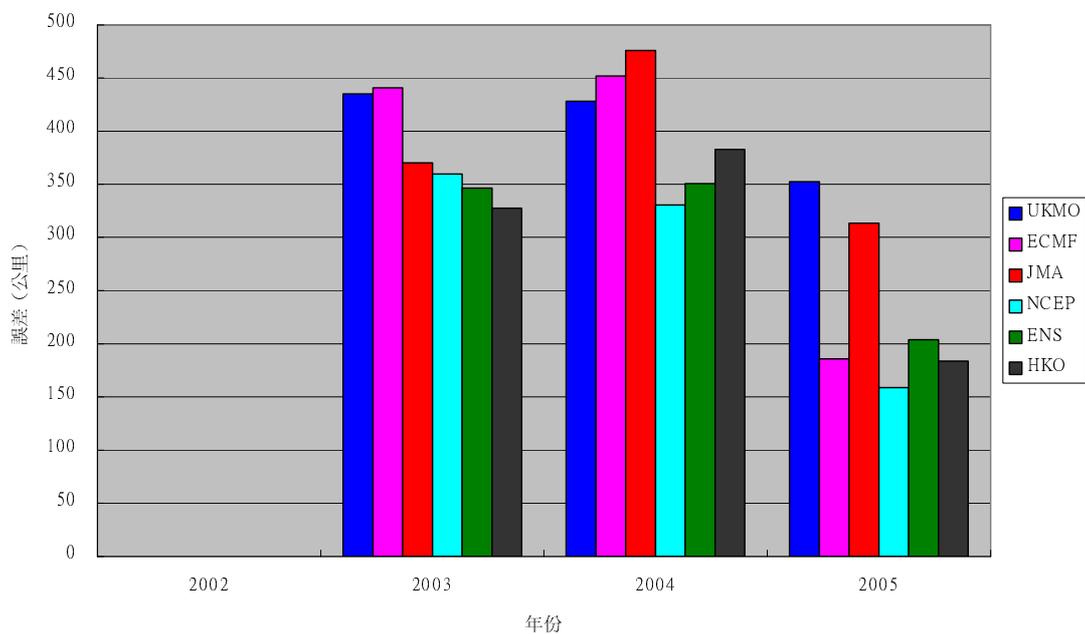


圖 3. 數值預報模式、集成預報及香港天文台的 48 小時熱帶氣旋位置預報誤差



註：香港天文台由 2003 年開始發出 72 小時預測位置，故 2002 年並未能進行同樣本驗證。

圖 4. 數值預報模式、集成預報及香港天文台的 72 小時熱帶氣旋位置預報誤差

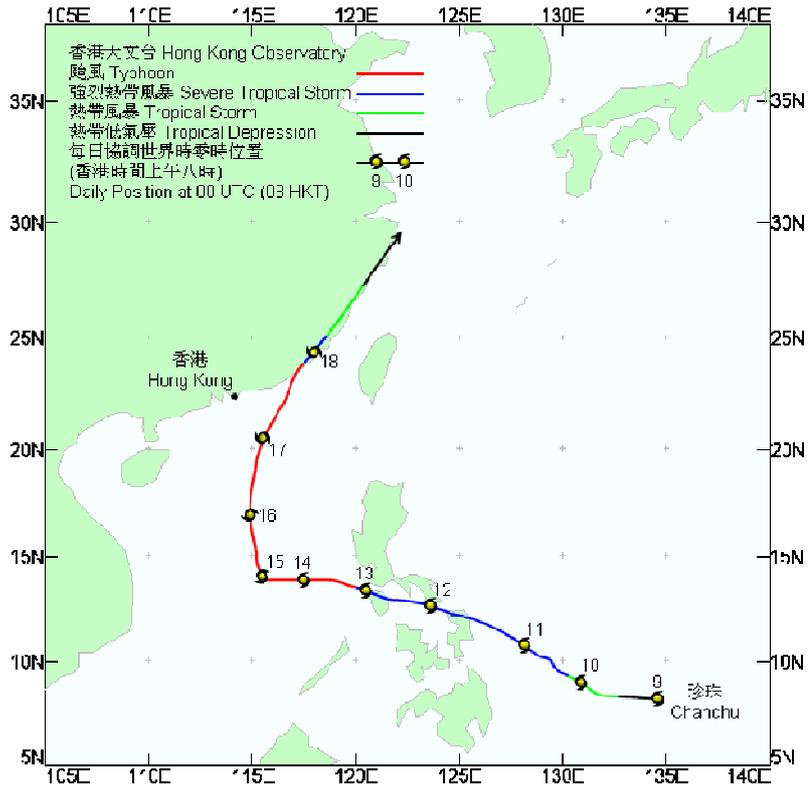


圖 5. 颱風珍珠(2006)的移動路徑

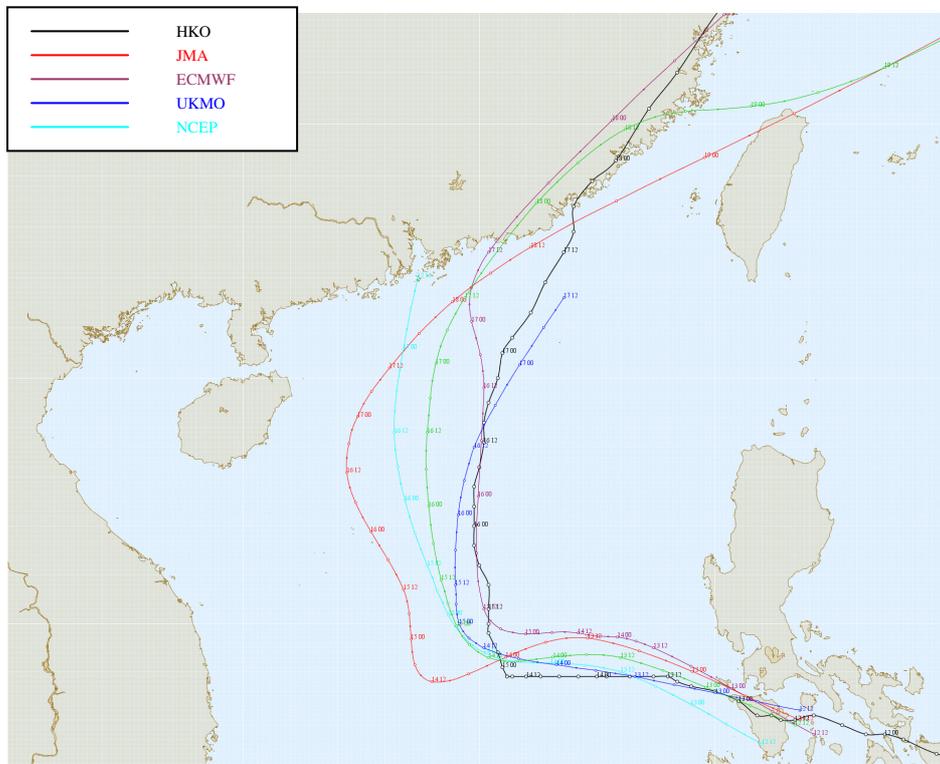


圖 6. 2006 年 5 月 12 日 12UTC 為基準的數值預報路徑圖

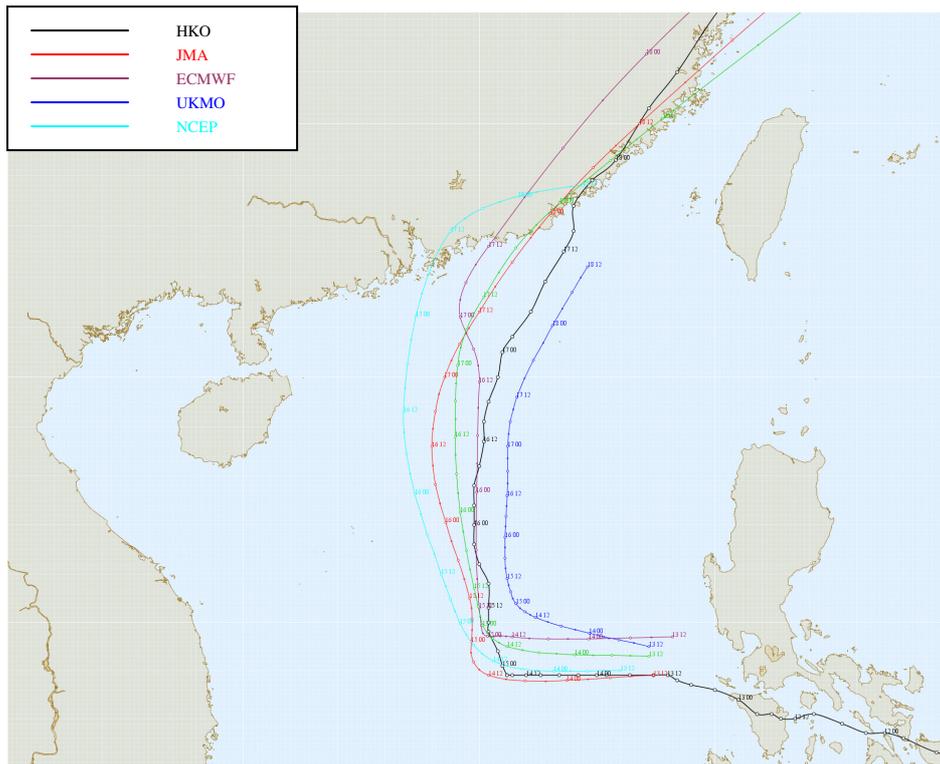


圖 7. 2006 年 5 月 13 日 12UTC 為基準的數值預報路徑圖

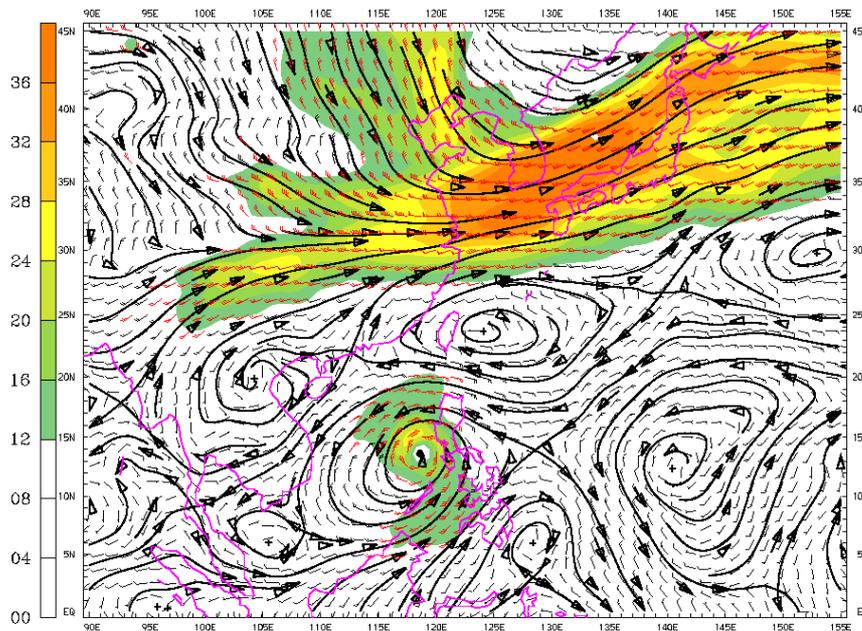


圖 8. 2006 年 5 月 13 日 12UTC 的 500 百帕流場分析圖

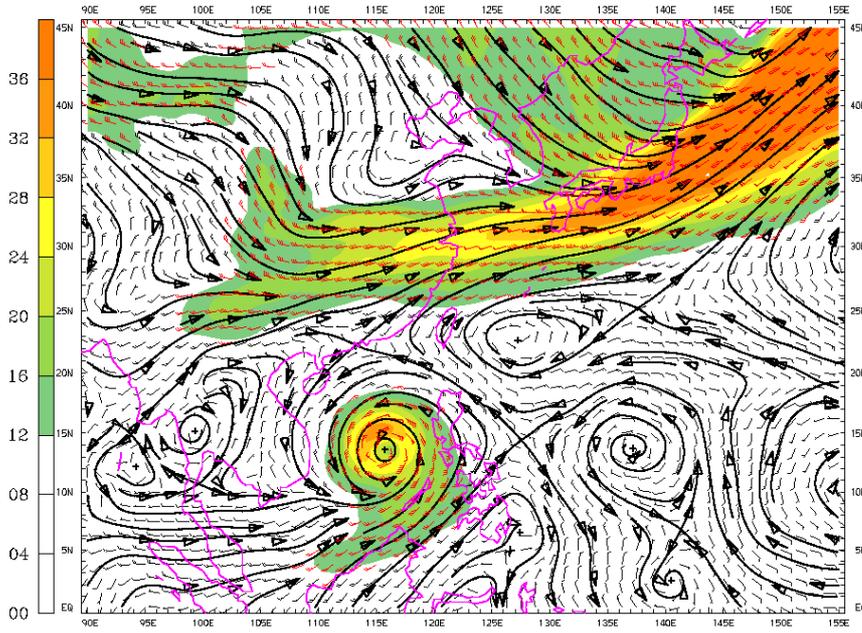


圖 9. 2006 年 5 月 14 日 12UTC 的 500 百帕流場分析圖

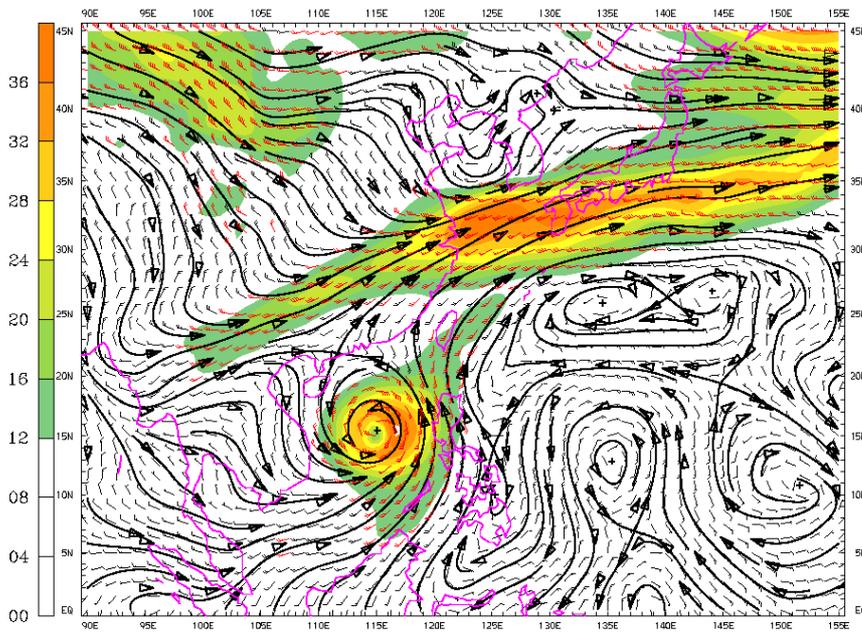


圖 10. 2006 年 5 月 15 日 12UTC 的 500 百帕流場分析圖

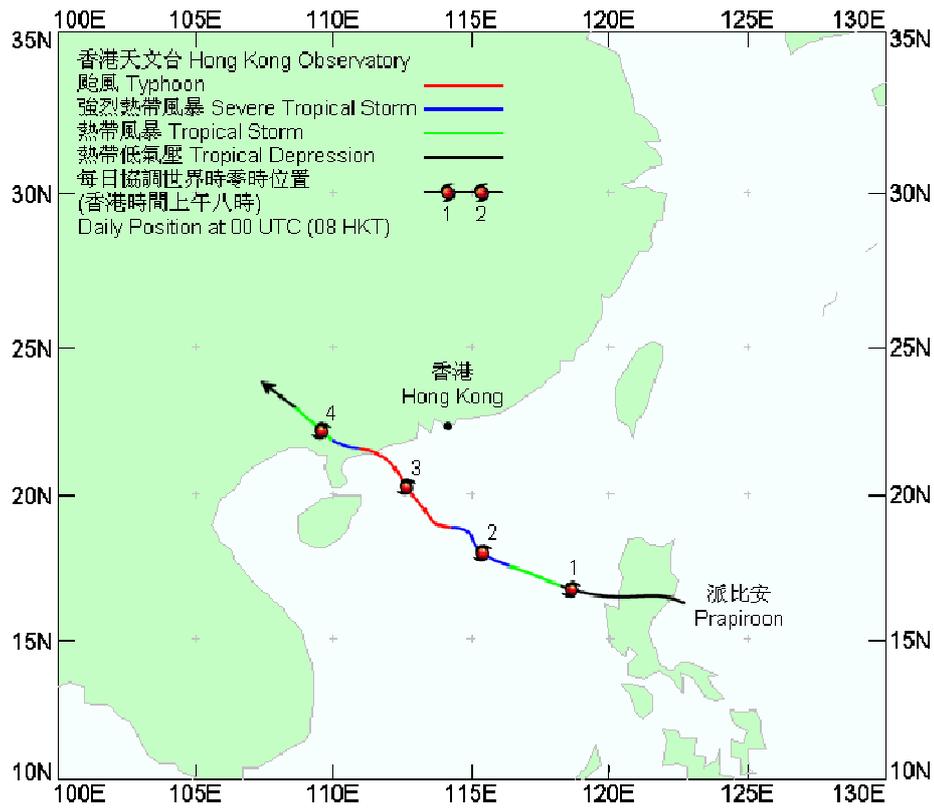


圖 11. 颱風派比安(2006)的移動路徑

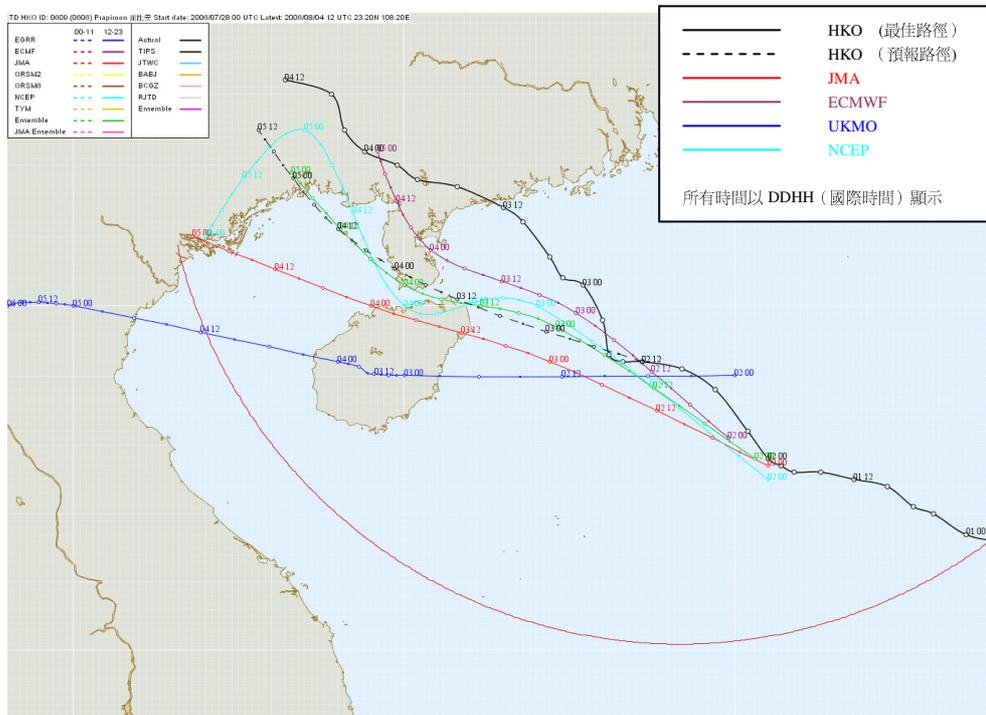


圖 12. 以 2006 年 8 月 2 日 00UTC 為基準時間的數值預報模式預測

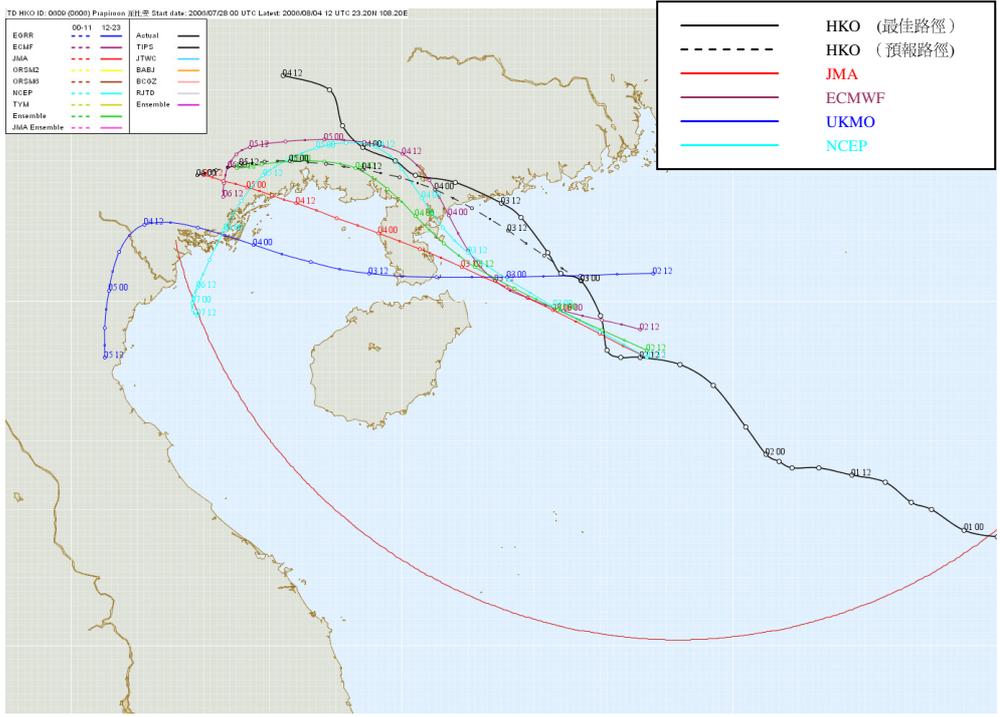


圖 13. 以 2006 年 8 月 2 日 12UTC 為基準時間的數值預報模式預測

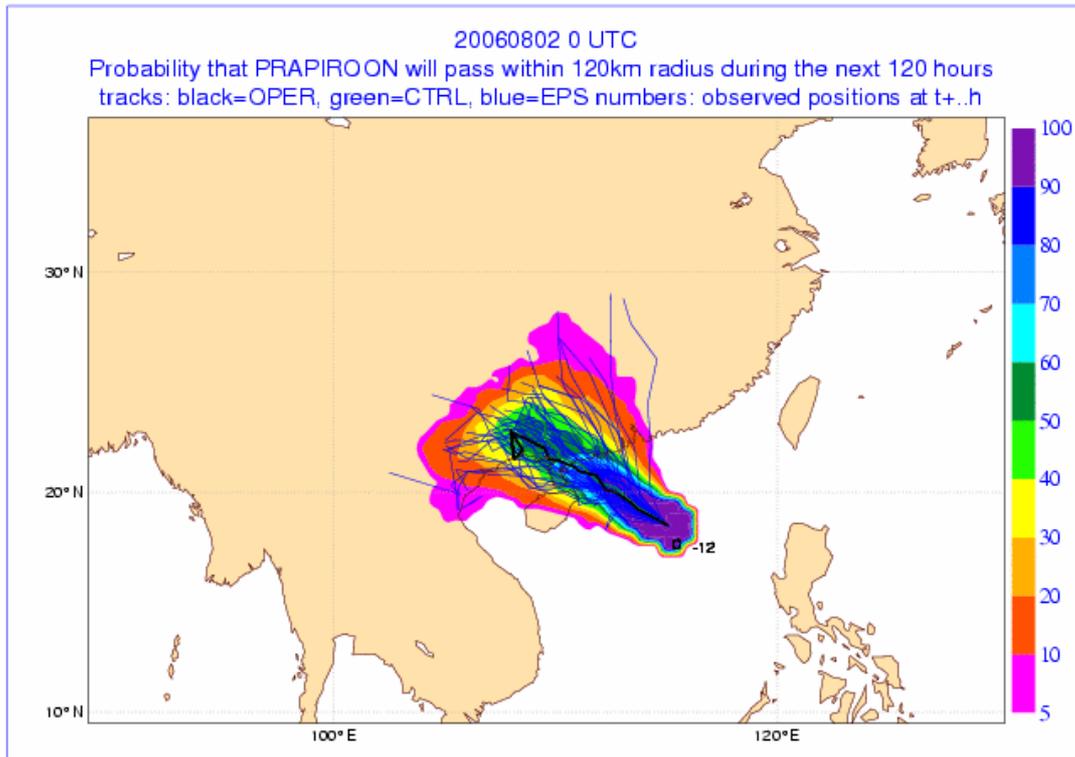


圖 14. 歐洲中期預報中心於八月二日 00UTC 的集成預報路徑圖

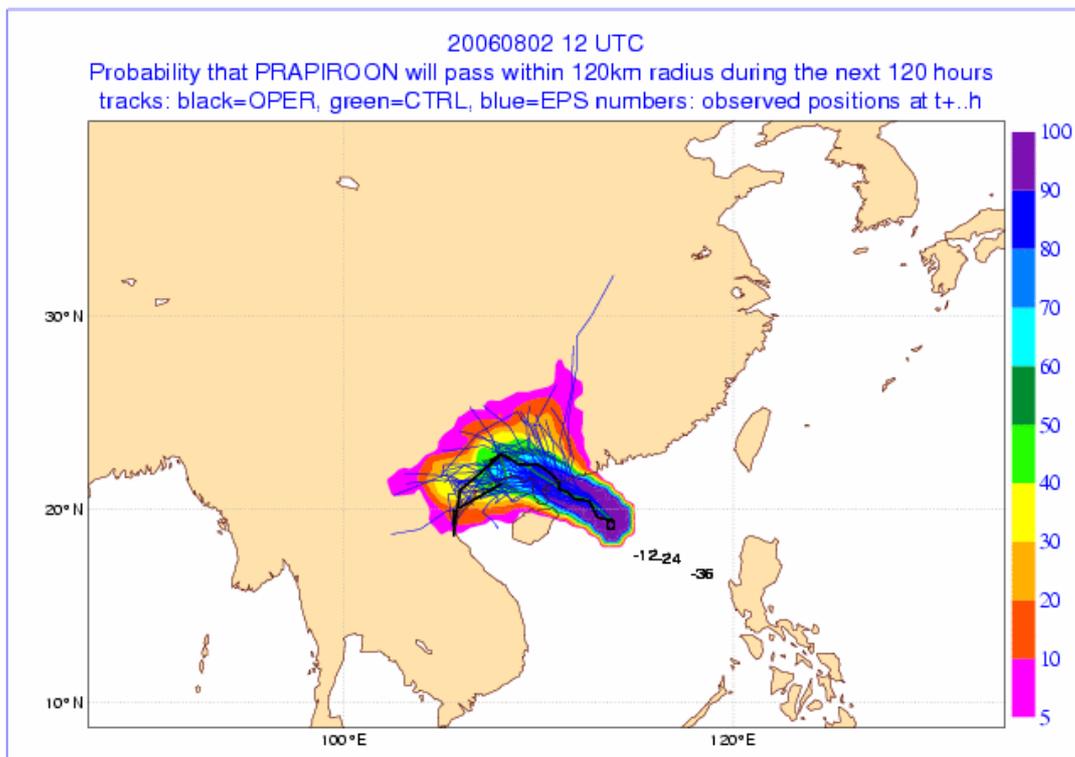


圖 15. 歐洲中期預報中心於八月二日 12UTC 的集成預報路徑圖

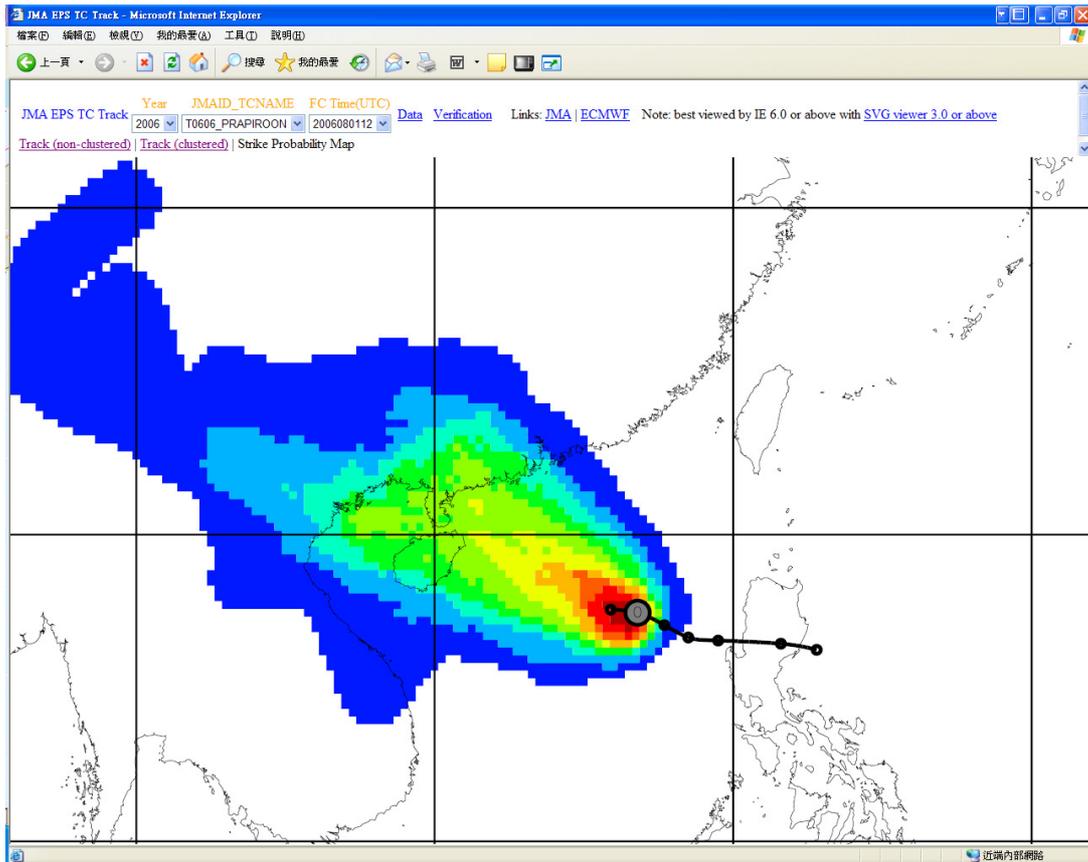


圖 16. 日本氣象廳於八月二日 00UTC 的集成預報點擊概率圖

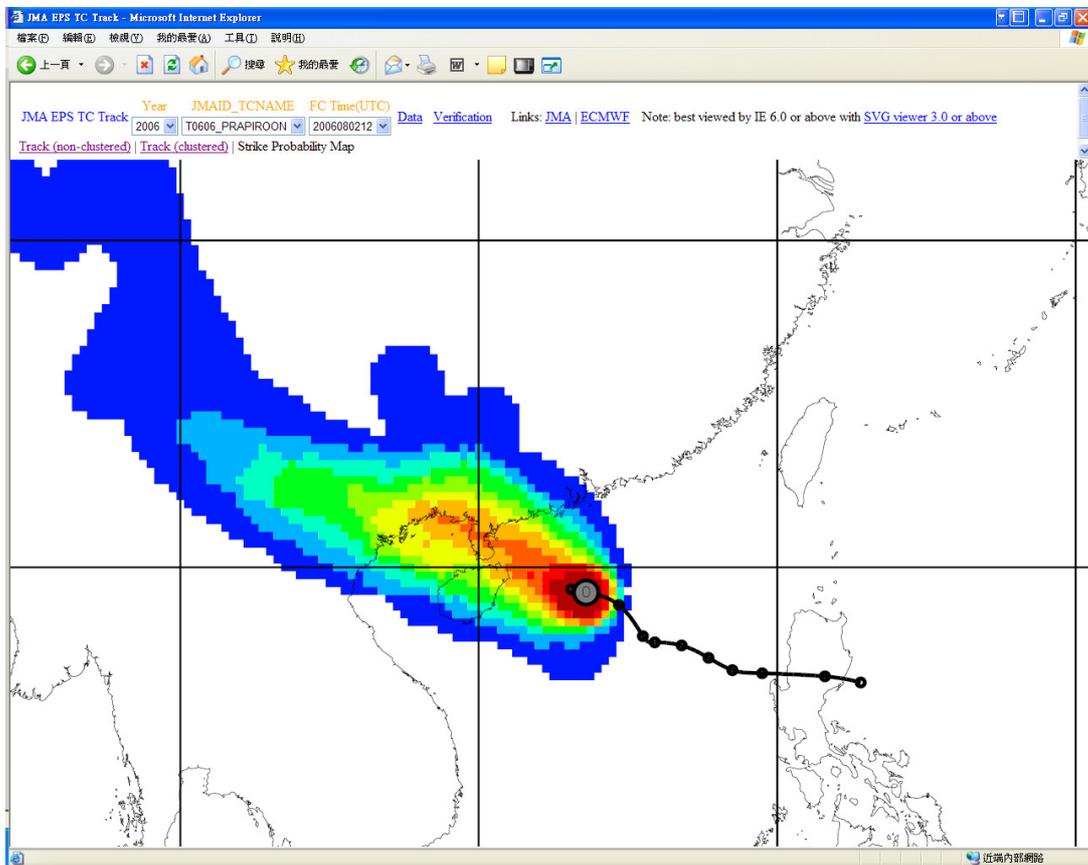


圖 17. 日本氣象廳於八月二日 12UTC 的集成預報點擊概率圖

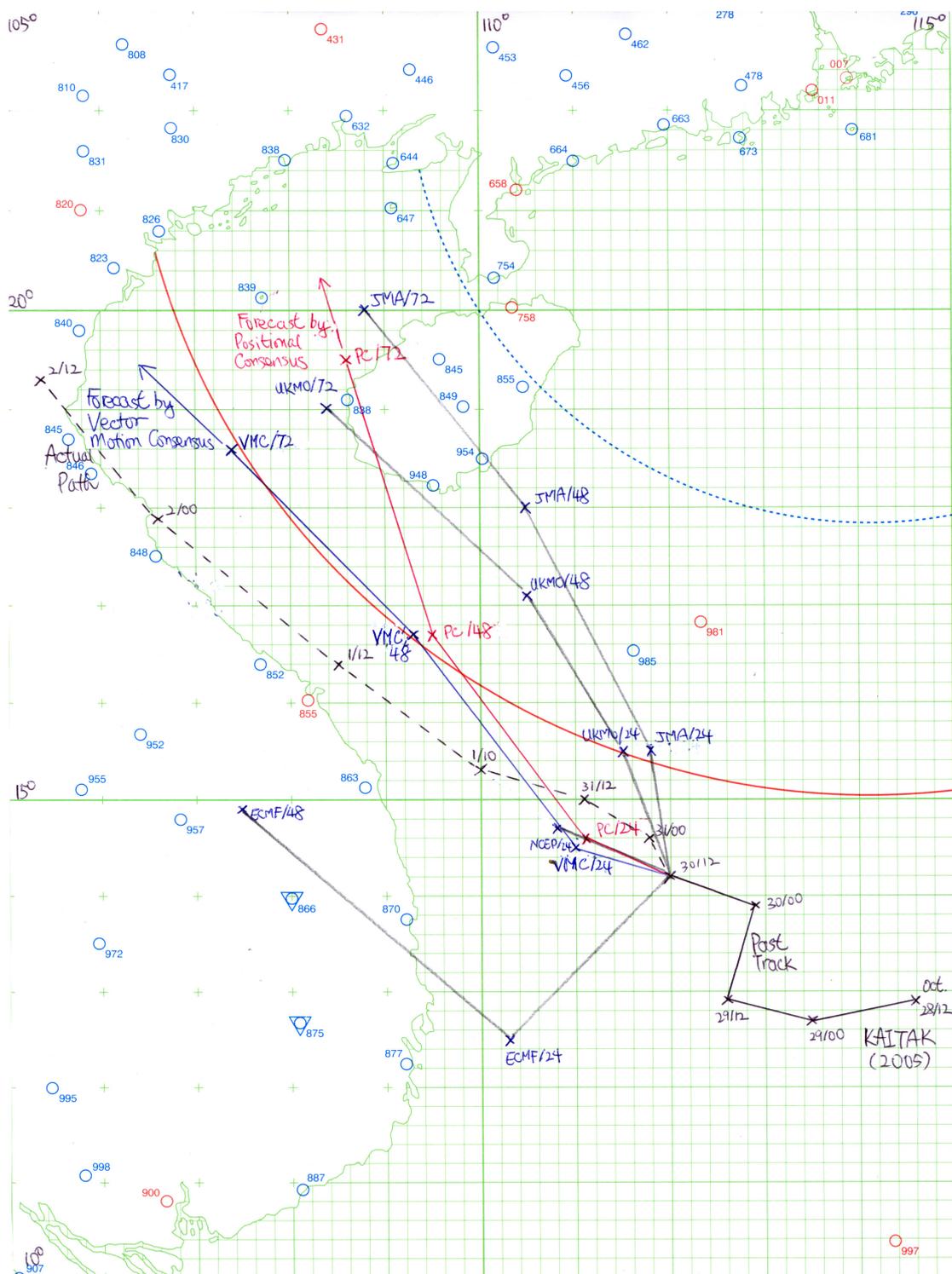


圖 18. 假設在 2005 年 10 月 31 日 12UTC 時，利用不作修訂的集成預報及向量移動集成法預報啟德的移動路徑比較