

GPSRO 資料對中央氣象局全球模式之颱風路徑預報的影響

沈彥志¹ 陳御群¹ 楊明仁³ 馮欽賜² 陳雯美¹

中央氣象局氣象科技研究中心¹ 中央氣象局氣象資訊中心² 國立中央大學大氣科學系³

摘要

由福衛三號所提供的 GPSRO 觀測資料對於天氣預報、電離層現象以及氣候研究均有重大的貢獻。GPSRO 觀測資料可提供不分海陸且均勻分布於全球的觀測，其觀測有非常細的垂直解析度，對於收集溫度、水氣等資訊有非常大的助益。目前，美國國家環境預報中心與中央氣象局均使用 GSI 同化系統同化 GPSRO 資料，對於全球模式與區域模式預報結果亦均有良好的結果。本次研究以中央氣象局之全球預報模式與 GSI 資料同化系統為研究方向及改進目標，根據計畫書所提，首先發現 GPSRO 對於颱風路徑預報有正向影響，尤其當颱風在轉彎期間時有明顯改進。

由 2008 年至 2010 年共 11 個颱風個案顯示，GPSRO 對於 5 個颱風有正向影響(包含 2008 年薔蜜、2009 年莫拉克、2010 年梅姬)、3 個颱風較無影響、3 個颱風則有負面影響。結果顯示，當颱風面臨轉彎時期，GPSRO 的影響較為顯著，推測可能是因為 GPSRO 改善了大尺度環境場，如：副熱帶高壓西伸東退，或高緯度槽線預報較準確，故使模式預報駛流較正確，從而颱風路徑預報誤差降低。

此外，對於部分加入 GPSRO 觀測後預報較差的情況，可能是因為有 GPSRO 觀測過於靠近颱風中心。原因是因為目前 GSI 所使用的 GPSRO 觀測算子為一維折射率(1D refractivity)，此觀測算子以球對稱假設為前提來同化 GPSRO 觀測資料。但在颱風中心附近有很強的溫度、水氣、壓力梯度，故不符合球對稱假設，在這種情況下必須移除靠近颱風中心的 GPSRO 觀測，實驗結果顯示移除後路徑預報誤差有所改進。

關鍵字：GPSRO、折射率、資料同化、颱風

一、前言

格點統計內插(Grid Statistics Interpolation, GSI)系統為目前 NCEP 所使用之作業資料同化系統，分別應用於其全球數值預報模式(NCEP GFS)與區域數值預報模式中。此資料同化系統亦為目前中央氣象局作業資料同化系統，取代日前的波譜統計內插(Spectral Statistical Interpolation, SSI)系統。本次研究即是藉由此系統來同化評估 GPSRO 觀測的影響。

中央氣象局已從 2009 年開始，針對全球預報模式方面測試 GSI 系統(吳等人, 2009; 陳等人, 2009)，並在 2010 年提出以 GSI 系統同化 GPSRO 資料的效應評估(沈等人, 2010)。因此，本計畫目的在於改善 GSI 系統中同化 GPSRO 的能力，以符合中央氣象局的作業需求，並為了其餘 GPSRO 觀測資料的使用做準備，此一項目將在下半年進行研究。

NCEP 之 GPSRO 資料同化技術在 2009 年初有重大改進(Cucurull 2010)，並於 2009 年 12 月納入 NCEP 作業程序。這一次的改進包含：更新觀測算子與改進品質控管(Quality Control)。一般折射率所用的觀測算子兩項式，如下：

$$N = 77.6\left(\frac{P}{T}\right) + 3.73 \times 10^6 \left(\frac{P_w}{T^2}\right) \quad (1.1)$$

(1.1) 式為目前大多數作業中心所使用。新的觀測算子則改進為三項，為：

$$N = k_1\left(\frac{P_w}{T}\right) + k_2\left(\frac{P_w}{T}\right) + k_3\left(\frac{P_w}{T^2}\right) \quad (1.2)$$

(1.2) 式則為新的觀測算子 (Bevis et al. 2004)。其中可發現 (1.1) 第一項之壓力已經分出乾空氣與濕空氣壓力。而這些觀測算子中，最重要的就是決定其係數。由 NCEP 全球模式實驗結果，在獲得最好的一組係數組是 Bevis et al.(2004)所提出的，分別為 $k_1=77.60[\text{Kmb}^{-1}]$; $k_2=70.4[\text{Kmb}^{-1}]$; $k_3=3.739[10^6 \text{ K}^2\text{mb}^{-1}]$ 。(Cucurull 2010)

品質控管(Quality Control)方面，除了舊有技術以地區及高度來判別是否通過品質控管外，新技術更進一步加入溫度的參數。若是觀測與模式計算得出的折射率差異百分比超過門檻值(threshold)的 3 倍，則此一觀測會被濾除不予使用。門檻值則根據模式與觀測差異一段時間的統計得來。此一改進將大幅提升中低層的同化率，尤以熱帶為最。(Cucurull 2010)

此次研究即以此 NCEP GSI 版本，同時亦為中央氣象局目前之作業版本，探討 GPSRO 觀測資料對於颱風路徑預報的影響。

二、颱風個案與統計結果

首先由四個颱風個案來探討 GPSRO 觀測資料對於路徑預報的影響。選取四個颱風，分別為 2008 年薔蜜、2009 年莫拉克、2010 年梅姬、凡那比，設計兩組實驗，為控制組(CNTL)與實驗組(GPS)，兩實驗完全一樣，唯 GPS 實驗多加入了 GPSRO 觀測資料。圖 1 為兩組實驗的颱風路徑預報誤差。

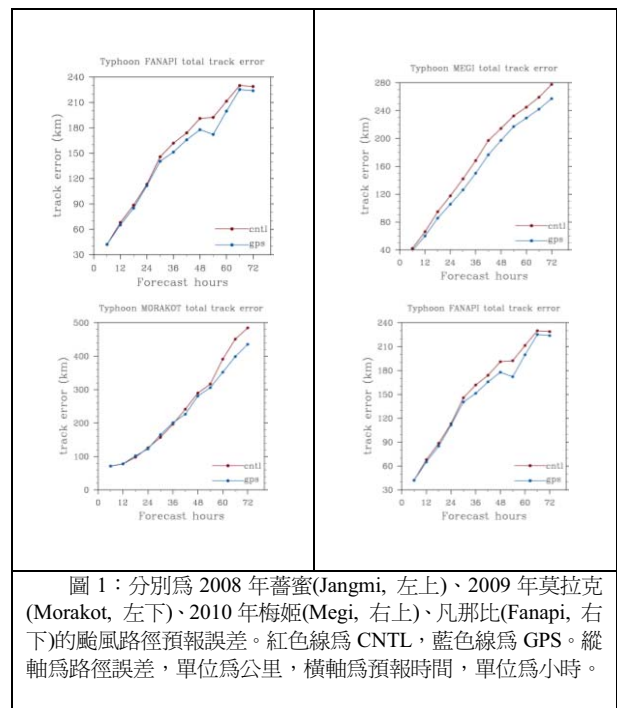


圖 1：分別為 2008 年薔蜜(Jangmi, 左上)、2009 年莫拉克(Morakot, 左下)、2010 年梅姬(Megi, 右上)、凡那比(Fanapi, 右下)的颱風路徑預報誤差。紅色線為 CNTL，藍色線為 GPS。縱軸為路徑誤差，單位為公里，橫軸為預報時間，單位為小時。

由上圖四個案知，加入 GPSRO 資料後，對於路徑預報有正向影響，至遲至 36 小時可看出差異。但對於部份個案則有不良影響(圖未示)，如 2008 年卡玫基及 2009 年芭瑪颱風，加入 GPSRO 資料後則使預報變差。而對於 2008 至 2010 年共 11 個颱風個案(如表 1)的統計來說，藍色代表 RO 資料對於颱風路徑預報有不良的影響，紅色則代表有正向影響，黃色代表影響不大。統計結果顯示 GPSRO 資料對於颱風路徑資料並無顯著影響。兩實驗組的路徑預報誤差平均而言近乎一致。但仔細研究表 1，當颱風移動方向為轉彎類型時，GPSRO 資料的影響則偏向正向(共 7 個轉彎個案，其中 1 個為不良，2 個為近乎不變，4 個為正向影響)。因此，可針對其中轉彎個案來研究其綜觀天氣系統與颱風的配置，

颱風	強度	移動方向	RO 資料影響
卡玫基(Kalmaegi)	中度	北行	Negative
鳳凰(Fung-Won)	中度	轉彎	Neutral
如麗(Nuri)	中度	西行	Neutral
辛樂克(Sinlaku)	強烈	轉彎	Negative

哈格比(Hagupit)	中度	西行	Positive
薔蜜(Jangmi)	強烈	轉彎	Positive
莫拉克(Morakot)	中度	轉彎	Positive
芭瑪(Parma)	中度	西行	Negative
米勒(Melor)	強烈	轉彎	Neutral
凡那比(Fanapi)	中度	轉彎	Positive
梅姬(Megi)	中度	轉彎	Positive

若是進一步將路徑預報誤差分為 along 與 cross 誤差，along 誤差可代表颱風路徑速度預報誤差，cross 誤差則代表颱風路徑方向預報誤差，則可瞭解綜觀尺度情形之環境駛流場如何影響颱風預報誤差。

由以上個案中，挑選梅姬颱風作為分析案例，圖 2 為梅姬颱風的 along、cross 路徑誤差。對照梅姬全路徑誤差(圖 1 右上)，此颱風個案顯示 GPSRO 資料對於颱風路徑預報誤差有所改進，進一步將路徑誤差分為 along 與 cross 時，如圖 2 顯示，可知 GPSRO 資料在此個案中，主要貢獻在降低 cross 誤差。此原因可能為 GPSRO 觀測資料改善了分析場的綜觀天氣系統配置，進而使模式模擬其移動較為準確。

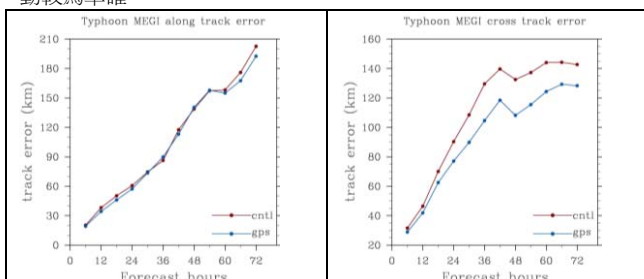


圖 2: 分別為 2010 年梅姬(Megi)的 along(左)與 cross(右)颱風路徑預報誤差。紅色線為 CNTL，藍色線為 GPS。縱軸為路徑誤差，單位為公里，橫軸為預報時間，單位為小時。

以梅姬颱風期間，2010 年 10 月 18 日 00 時為例，如圖 3。圖中顯示，CNTL 實驗模擬的副高較 GPS 實驗西伸，此外，在華南一帶的相對高壓，CNTL 實驗也較 GPS 實驗來得強。在這樣的綜觀環境下，會導致 CNTL 實驗所模擬的颱風路徑會比較偏西，且較慢轉彎。而 GPS 實驗的颱風則較趨近於實際路徑。

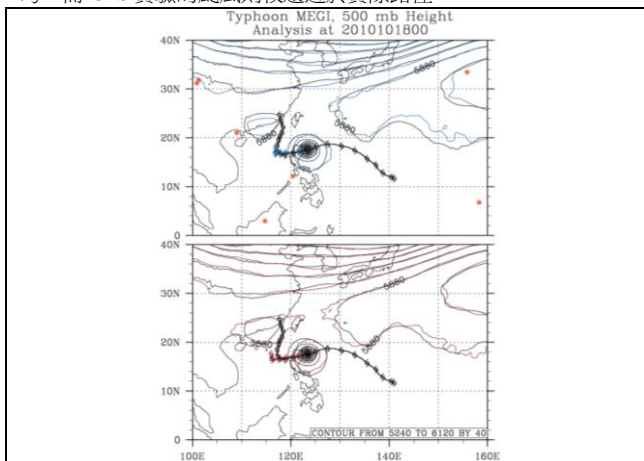


圖 3: 兩實驗組模擬 2010 年 10 月 18 日 00 時梅姬颱風之 500 百帕高度場。藍色線為 GPS 實驗，紅色線為 CNTL 實驗，黑色線為 NCEP 分析場，橘色點為 GPSRO 觀測資料(profile)位置。每個颱風標記相隔為 12 小時，黑色颱風標記代表颱風之 Best Track，藍色與紅色颱風標記分別為 GPS 與 CNTL 實驗預報之颱風位置。上為 GPS 實驗與 NCEP 分析場比較，下為 CNTL 實驗與 NCEP 分析場比較。

因此由上述可知，GPSRO 觀測資料可以改善分析場的綜觀天氣系統配置，尤其是颱風進入轉彎期間時更可看出影響。但若看一

個颱風全期間的平均路徑預報誤差，可能會因為有時好有時壞的情形而平均後接近不變。是故，若進一步將颱風預報誤差的時間序列繪出來討論，則可更明顯地區分出 GPSRO 觀測資料的貢獻。

圖 4 上為梅姬颱風與薔蜜颱風三天路徑預報誤差隨時間的演變。由圖可知，梅姬颱風在 2010102000 至 2010102212 有較佳的預報表現，尤其是 cross 誤差，而適逢此期間為梅姬颱風的轉彎期。除了平均表現較佳的颱風之外，對於平均表現較差的颱風，亦可看出 GPSRO 資料對於颱風轉彎期間的幫助，圖 4 下為辛樂克颱風的三天路徑預報與實際路徑圖。辛樂克颱風整在加入 GPSRO 資料後，平均而言的表現偏差。但若是以時間序列來表示各個預報時間的表現，則可看出在颱風接近台灣的轉彎期，加入 GPSRO 資料有效地降低颱風的路徑預報誤差，尤其以 cross 預報誤差為佳。由以上個案與此個案顯示，GPSRO 資料對於模式綜觀天氣系統的分析有所助益，因而改善了大尺度系統的模式預報，從而影響颱風路徑。

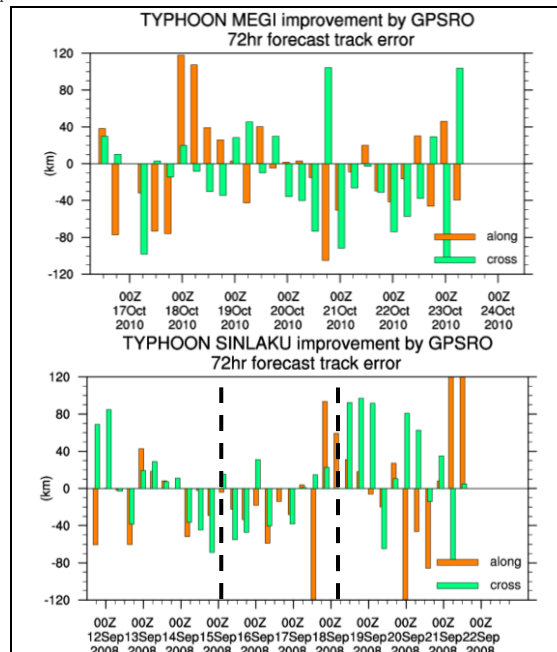


圖 4: 梅姬(上)與辛樂克(下)颱風三天路徑預報誤差隨時間的演變。圖中長條為 GPS 實驗誤差減去 CNTL 實驗誤差，因此負值代表有正向影響。橘色長條為 along 誤差，綠色長條為 cross 誤差。縱軸為誤差相差，單位為公里，橫軸為預報時間，每一刻度代表 6 小時。圖中黑色虛線所涵蓋的範圍為颱風接近台灣陸地的轉彎期。

然而對於加入 GPSRO 資料後表現變差的個案來說，可能是因為 GSI 所使用的 GPSRO 同化方式為一維折射率(1D refractivity)。利用這種方法同化 GPSRO 資料時，是預設在觀測點附近的大氣環境為球對稱假設，但若有一個觀測資料位於颱風中心附近，且射線方向穿越颱風中心時，其觀測點附近的大氣環境就不為球對稱假設，在這種情況下，同化此觀測反而會使分析變差，從而影響預報結果。關於以上假設的進一步實驗將在後面闡述。

三、影響路徑預報原因分析

(一)、對於颱風駛流的改變

從前述的實驗結果，我們確認同化 GPSRO 折射率觀測會改變對颱風路徑的預報，由於颱風的移動又受到駛流的影響，因此，同化 GPSRO 應當同樣會對颱風駛流造成影響。本文中駛流的定義為自 925hPa 至 250hPa 每層颱風內部環流非對稱平均風向量的垂直平均。

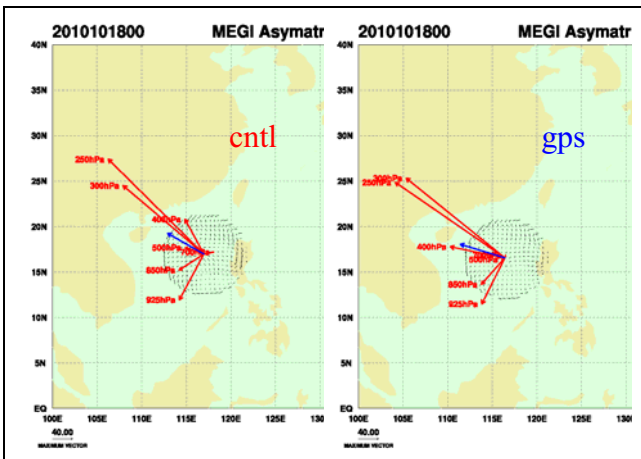


圖 5: 梅姬颱風 2010 年 10 月 20 日 00UTC 的 48 小時預報非對稱平均風向量與駛流。圖左為實驗控制組 (CNTL) 之結果, 圖右為實驗組 (GPS) 之結果, 圖中紅色箭頭為各層非對稱平均風向量, 藍色箭頭即為各垂直層非對稱平均風向量平均後所得的駛流, 駛流箭頭長短與各層非對稱平均風向量箭頭長度無關, 不代表駛流速度, 僅指示駛流方向。

圖 5 為駛流計算的實例, 此例為 2010 年梅姬颱風 (Megi), 圖所示為 10 月 20 日 00UTC 的 48 小時預報結果, 此時也正是梅姬颱風的路徑由穩定向西移動轉換成向北移動前的方向轉換時期。圖中可見, 將 GPSRO 折射率觀測納入同化後對於颱風駛流 (藍色箭頭) 的影響與控制組 (CNTL 實驗) 在速度與方向上均有明顯的差異, 同化了 GPSRO 觀測使得梅姬颱風的駛流方向較控制組增強了向北的分量, 同時也減弱了向東的分量。而且, 對於某些垂直層上的非對稱平均風向量更有著極為顯著的差異。圖中低層 925hPa 的非對稱平均風向量兩實驗差異不大, 自 850hPa 向上至 250hPa, 每層的非對稱平均風向量的差異就十分明顯, 尤其是 400hPa 的非對稱平均風向量, 在控制組實驗中為向西北西的方向, 而在 GPS 實驗卻是朝向北北西的方向。

這結果顯示, 在同化了 GPSRO 觀測後對於颱風預報的駛流方向產生了差異, 這是由於預報初始場—亦即分析場—的差異所引起。而且由於各層的非對稱平均風向量有顯著的差異, 這勢必顯著影響到颱風本身內部的風場結構, 也將會影響到接下來預報颱風的移動。

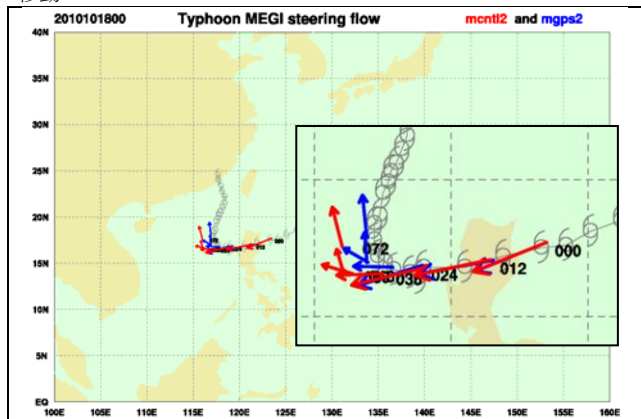


圖 6: 分析時間 2010 年 10 月 18 日 00UTC 及後續 72 小時預報的駛流。圖中灰色颱風福號為觀測颱風路徑, 紅色箭頭為控制組實驗的颱風駛流, 藍色箭頭為 GPS 實驗的颱風駛流, 每個箭頭間隔 12 小時, 圖中右邊小圖為局部的放大圖。

整體的來看同化 GPSRO 在梅姬颱風路徑轉變期間的影響, 圖 6 為分析時間 2010 年 10 月 18 日 00UTC 及後續 72 小時預報的駛流。在預報初始時 (即分析場) 的駛流, 兩實驗僅有極不顯著的差異, 方向幾乎完全相同。預報至 12 小時, 即可發現 GPS 實驗的駛流速度已較 CNTL 實驗的駛流慢, 預報 24 小時 GPS 實驗駛流速度減慢更明顯, 不僅如此, 還增強了向南的分量, 這樣的移動方向, 較 CNTL 實驗結果更接近觀測路徑。到了預報 36 小時, 由於之前 GPS 實驗的駛流速度持續比 CNTL 減慢, 此時颱風中心位置已有顯

著的差異。預報 24 至 36 小時的觀測颱風中心位置先向南迅速偏移後又向西北偏轉, 使得 GPS 實驗的 36 小時預報中心位置顯得較觀測偏西, 但是 CNTL 實驗的中心位置則更是比觀測偏西南, 且如上面所提, 預報 24 小時的 GPS 實驗駛流有較 CNTL 實驗駛流更強的向南分量, 這樣的路徑移動模擬更是比 CNTL 實驗更接近觀測。預報 48 至 60 小時, 兩實驗同時顯現出颱風中心位置的滯留且方向向北偏轉, 然而 GPS 實驗的颱風中心位置同樣的較接近觀測中心位置, 且駛流方向的轉變也比 CNTL 實驗有更強的向北與向東的分量, 此時 CNTL 實驗的颱風中心位置已完全偏離觀測。到了預報 72 小時 GPS 實驗的駛流較 CNTL 實驗更偏北, 且中心位置也非常明顯的比 CNTL 實驗更接近於觀測颱風中心位置。

由上述結果可知, 在將 GPSRO 觀測納入同化之後, 在預報颱風路徑轉變時, 不僅使的颱風移動的速度更接近於觀測, 也使得颱風移動時方向的改變更接近於觀測, 因而對於颱風駛流的預報有更好的掌握, 並且進而提升了颱風在轉變時的路徑預報準確度。

(二)、對於綜觀尺度系統的修正

以梅姬颱風分析時間 2010 年 10 月 18 日 00UTC 為個案, 探討同化 GPSRO 影響綜觀系統, 進而影響對颱風路徑的預報, 此分析時刻正好有第 37、50、53 號 GPSRO 探空觀測恰好坐落於中緯度槽後以及西南季風區, 如圖 7。因此, 以同化所有 GPSRO 觀測為控制組 (GPS 實驗), 另外以剔除 37、50、53 號 GPSRO 探空為實驗組 (EXP 實驗), 來探討這三個 GPSRO 探空對颱風路徑預報的影響。

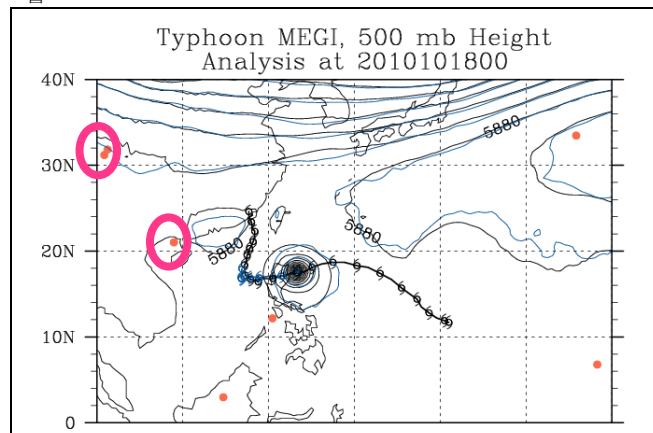
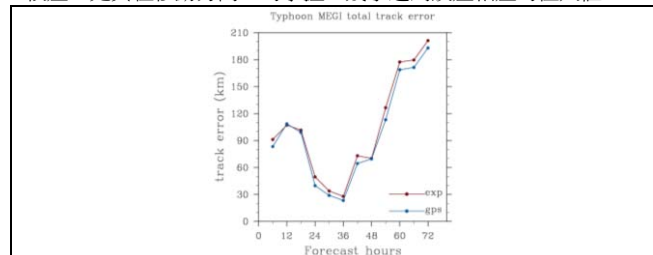


圖 7: 梅姬颱風分析時間 2010 年 10 月 18 日 00UTC 的東亞地區 GPSRO 觀測臨邊探空分佈圖。紅色圓圈所標示之三個探空為實驗組 (EXP) 所剔除之觀測。

實驗結果的颱風預報路徑誤差如圖 8, 由圖中的 total track error 結果可看出剔除掉第 37、50、53 號 GPSRO 探空觀測使得總體路徑預報誤差變大了; 在 along track error 同樣的也全面的變大; 而在 cross track error 方面, 除了第 12 小時與第 30 小時之預報外, 其餘預報的路徑誤差也都變大。這樣的結果顯示, 若在綜觀尺度系統的區域缺少了 GPSRO 觀測來改進分析場的話, 對於影響颱風路徑的綜觀尺度系統的預報就無法有更好的掌握, 連帶的影響了颱風路徑預報的準確度。兩實驗的同化觀測資料只相差了 3 個 GPSRO 臨邊探空, 然而, 卻會導致總體路徑誤差最大相差了近 10km。其中, 在颱風移動速度的掌握上全面的變差, 而在颱風移動方向的掌握上也大部分變差, 值得注意的是, 在影響梅姬颱風路徑由向西轉換為向北的關鍵預報時刻—分析時間 2010 年 10 月 18 日 00UTC 的第 36 至第 60 小時預報—無論是在移動速度或是移動方向上的掌握均都較差, 尤其在移動方向上的掌握, 幾乎達到誤差相差的極大值。



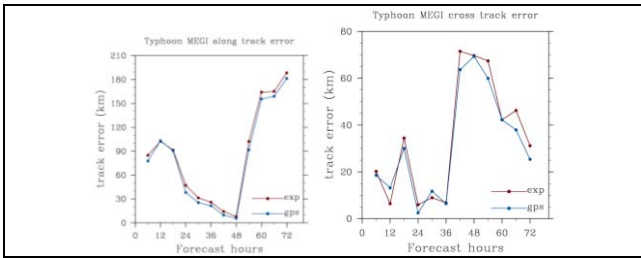


圖 8：梅姬颱風分析時間 2010 年 10 月 18 日 00UTC 同化所有 GPSRO 觀測與剔除第 37、50、53 號 GPSRO 探空觀測同化對於颱風路徑預報誤差的比較圖。左圖為 total track error，中圖為 along track error，右圖為 cross track error，藍色曲線為 GPS 實驗的結果，紅色曲線為 EXP 實驗的結果。

此外，在納入了 GPSRO 觀測同化之後，對於西北太平洋副熱帶高壓重力位高度場的 AC score 均有改善，無論是在整個颱風生命期內或者是路徑偏轉期內。然而，對於西北太平洋副熱帶高壓場的預報表現，納入了 GPSRO 觀測同化顯然的並沒有太大的助益。

(三)、對於颱風內部結構的改變

對於部分加入 GPSRO 觀測後預報較差的情況，可能是因為有 GPSRO 觀測過於靠近颱風中心。原因是因為目前 GSI 所使用的 GPSRO 觀測算子為一維折射率(1D refractivity)，此觀測算子以球對稱假設為前提來同化 GPSRO 觀測資料。但在颱風中心附近有強烈的溫度、水氣、壓力梯度，故不符合球對稱假設，在這種情況下必須移除靠近颱風中心的 GPSRO 觀測。

其一代表性個案為於米勒颱風期間，分析時間為 2009 年 10 月 03 日 00UTC 時，在圖 9 的臨邊探空分佈圖可以看出，有兩個臨邊探空位在颱風內部環流內。然而偏颱風中心東方未標有平均位置（橘色圓點）的探空在資料上游處理時，已由觀測資料品質控管程序予以剔除，並不是可用觀測，故 GPS 實驗及 EXP 實驗均未曾將之納入同化。另外位在颱風中心偏南的颱風內部環流內有一可用觀測，此觀測的射線方向近似於垂直，在颱風中心附近穿過重力位高度場等值線，在此種情況下，射線行經之處的大氣狀態具有強烈的水平向梯度，因此此觀測嚴重違反了局部球對稱的基本假設，觀測本身之誤差較大。

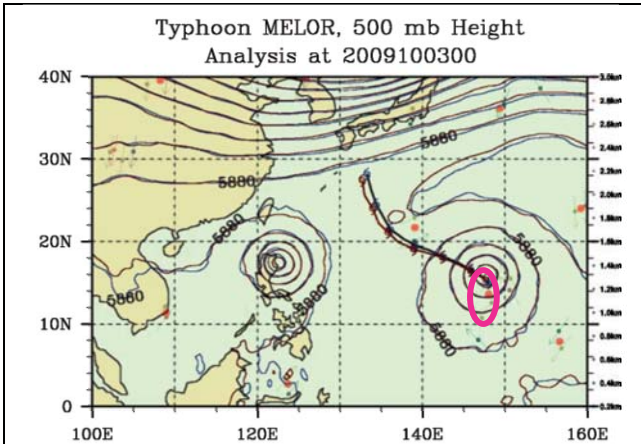


圖 9：觀測颱風路徑與 GPSRO 臨邊探空觀測所在位置，分析時間為 2009 年 10 月 03 日 00UTC。橘色圓點為臨邊探空所在的平均位置，平均位置兩旁的圓點代表該臨邊探空最上層觀測與最底層觀測的所在位置，其上的箭頭則標示出掩星射線的方向。

實驗結果顯示了此個案控制組與實驗組兩實驗的颱風預報路徑誤差之差異，如圖 10。在總路徑誤差的比較上，剔除掉颱風內部環流內的臨邊探空觀測不納入同化後，僅在第 6 小時預報的總路徑誤差有些許的表現變差外，往後第 12 至第 72 小時預報的總路徑誤差均十分顯著的改善！且表現最佳時總路徑誤差比控制組減小了將近 50km。在預報颱風移動速度的表現上，自第 30 小時預報以後均有顯著的正面影響；在預報颱風移動方向的表現上，第 18 小時以後之預報有非常優秀的表現。由此可知，GPSRO 折射率觀測的同化對於颱風路徑預報的表現上，僅只要將一個不適用的觀測臨邊探空觀測納入同化，即會對路徑預報的表產稱極大的負面影響。

四、結論

簡單總結同化 GPSRO 折射率觀測對於颱風路徑預報的影響，實驗結果顯示，將 GPSRO 折射率觀測納入同化會對於路徑偏轉型颱風的路徑預報有正面的影響，尤其是當颱風正處在路徑轉彎的期間，正面影響更易被突顯出來。這主要是由於因為同化 GPSRO 觀測改善了對綜觀尺度系統的掌握而間接改進了對路徑的預報，另外，在同化 GPSRO 觀測對於颱風內部環流的直接影響上，若同化納入了不適用的（即不滿足局地球對稱假設，掩星射線穿越大氣狀態具有較大水平梯度的地區）GPSRO 折射率觀測，將會對颱風路徑預報有嚴重的負面影響。

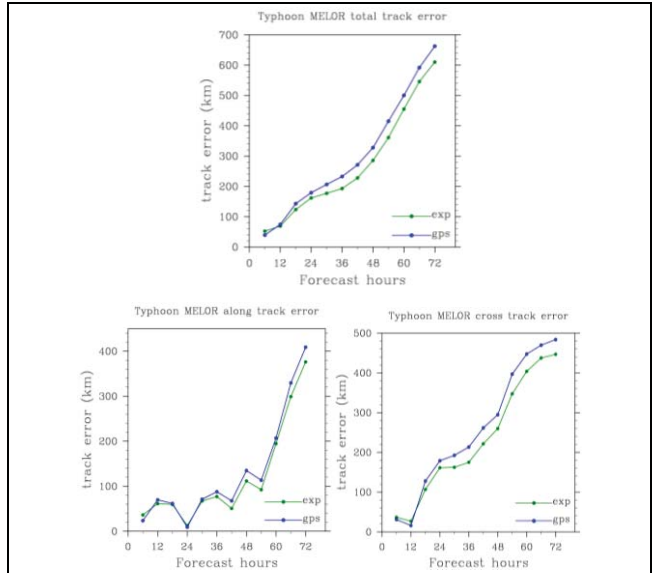


圖 11：定義同圖 8，唯移除觀測的實驗為綠色曲線，分析時間為 2009 年 10 月 03 日 00UTC 時。

參考資料

吳家苓, 陳雯美, 沈彥志, 吳婉淑, 2009: “GSI 應用於中央氣象局全球數值預報系統之初步研究”, 2009 天氣分析研討會。
 陳雯美, 吳家苓, 沈彥志, 吳婉淑, 2009: “GSI 中 TLNMC 對中央氣象局全球數值預報系統之影響”, 2009 天氣分析研討會。
 沈彥志, 馮欽賜, 陳雯美, 曹伶伶, 陳御群, 楊明仁, 2010: “以 GSI 同化 GPS-RO 資料對中央氣象局全球預報系統之影響”, 2010 天氣分析研討會。
 Cucurull, L., 2010: “Improvement in the use of an operational constellation of GPS Radio-Occultation receivers in weather forecasting”, *Weather and Forecasting*, 25:2, 749-767