

FORMOSAT-3/COSMIC 及 Follow-on 掩星觀測對侵台颱風預報的影響：觀測系統模擬實驗

黃清勇 黃振星

國立中央大學大氣物理研究所

摘要

本研究使用四維變分同化(Four-Dimensional Variational Data Assimilation, 4DVAR)方法，將福爾摩沙衛星三號(FORMOSAT-3/COSMIC)的衛星掩星觀測資料同化於中尺度模式，以了解同化衛星掩星資料對於改善數值天氣預報準確度的影響。選取的颱風個案為 2009 年 8 月中度颱風莫拉克(Morakot)，個案分成兩組實驗，一為同化衛星掩星資料，另一組為同時加入衛星掩星資料及虛擬渦旋。期望同化掩星觀測資料能對模式大氣的駛流場有較大的修正。經過同化虛擬渦旋後，可在初始颱風環流中高層得到暖心結構、颱風中心附近亦有水氣輻合，同時能夠有較準確的颱風中心定位，進而改善颱風路徑與強度之模擬。

第一組實驗中同化衛星掩星資料，結果顯示，對於駛流場有較大之修正而降低颱風預報的路徑誤差。第二組實驗則同時同化衛星掩星資料及虛擬渦旋，使得駛流場和颱風本身的結構及強度更接近真實，所以其結果與觀測的颱風路徑、強度及降雨量都有所改善。

另外，本研究使用觀測系統模擬實驗(Observing Systems Simulation Experiments, OSSE)，探討福爾摩沙衛星三號之後續計畫(FORMOSAT-3/COSMIC Follow-on Mission)對侵台颱風預報的影響。研究個案為 2008 年 7 月中度颱風卡玫基(Kalmaegi)，利用四維變分同化方法加入虛擬渦旋，並以 MM5 模式進行模擬，提供真實大氣條件，再藉由二維射線追蹤模式，以假設球對稱情況下，反演出非局地折射率的垂直探空。實驗中觀測點之位置是自行設計的，目的是了解衛星掩星資料之密度及分佈對颱風預報的影響。實驗結果與真實大氣之比較，同化衛星掩星資料，進一步改善模式初始場，使其更接近真實大氣，從而得到較佳的預報結果。

一. 前言

台灣位於亞洲東南部、北太平洋西側的島嶼。主要的水資源是颱風和梅雨鋒面所帶來，平均年降雨量約 2500 毫米。雖然台灣擁有豐沛的水資源，但降雨過多，會造成暴洪災害、農作物損失，甚至人命傷亡。夏季的降雨主要是來自颱風的貢獻，期間常受到西北太平洋及南中國海生成的颱風侵襲。根據台灣中央氣象局 1897 年至 2003 年的統計資料顯示，期間共有 383 次颱風入侵，平均每年約 3 至 4 個，除了伴隨而來具有破壞性的強風，瞬間大量的降雨容易造成豪雨，引

發嚴重的水災和土石流。因此，如何準確地預報颱風的位置、強度及降雨量相當重要，妥善利用降雨資源同時防止災害發生，一直是國內學者們研究的重要議題。

現時提升數值天氣預報的準確度，除了減少數值模式的誤差、提高解析度和改善物理參數化之外，改進模式初始場也是一項重要的研究。颱風的生成與發展通常發生於廣大的洋面上，但由於傳統探空觀測資料網大都集中於陸地上，海洋的觀測資料非常缺乏，因此全球模式所提供的初始場，並沒有足夠的資訊和解析度來詮釋完整颱風的結構和環流，很顯然無法提

供模式最接近真實大氣狀態的初始條件，將會影響數值天氣預報的準確度。目前主要依賴遙測技術(如：衛星)提供廣大洋面上的天氣資料，期望利用資料同化技術結合這些觀測，使模式初始場更接近大氣的實際狀態，進而提高預報準確度。

全球定位系統(Global Positioning System, GPS)之無線電掩星技術(Radio Occultation, RO)提供了一種監測大氣情況的非傳統觀測資料(黃和朱，2004)，其訊號能穿越大氣，具有不受雲雨影響，高垂直解析度，不需校驗，且平均分布於全球等特性(Anthes et al.2000)。若將 GPS 掩星觀測的垂直剖線與傳統探空資料進行分析比較，由 Rocken et al.(1997)、Kuo et al.(2004, 2005)等證實了 GPS RO 資料具有高準確度。在中高層大氣，GPS RO 資料所反演的折射率，不但與傳統探空資料之精度相當，甚至較之更高(Kuo et al.2005)。Kursinski et al.(1995)則指出低緯度地區的 GPS RO 資料，在高度 6 公里以下反演出之水汽剖線誤差約 10%-20%之間，在邊界層中誤差更減小至 5%。Ware et al.(1996)將 11 筆 GPS RO 資料進行反演溫度垂直剖線，與鄰近的無線電探空儀觀測及作業單位的全球分析比較，發現高度從 5 公里到 40 公里的溫度差異在 1°C 之內。Leroy(1997)則發現觀測資料足夠的地方，GPS RO 資料所估計的等壓面重力位高度與歐洲中期天氣預報中心(European Center for Medium-Range Weather Forecast, ECMWF)分析的結果非常接近，均方根誤差在 20 公尺以內。Kuo et al.(1998)的研究結果，顯示在垂直方向具有高密度分佈的 GPS RO 資料，可以完整地解析出美國天氣預報中心(National Center for Environmental Prediction, NCEP)的全球分析所無法看到的中尺度現象。由上述研究，說明了 GPS RO 資料具有高精度、高垂直解析度及不受洋面限制的優點。這種非傳統的觀測資料能有效地彌補資料不足的區域，對改善台灣地區天氣預報的準確度極為重要。為了探討 GPS RO 資料對於改善颱風預報的潛力，本研究將會利用福爾摩沙衛星三號(FORMOSAT-3/COSMIC)所接收到的 GPS RO 資料，應用於資料同化系統中，以了解同化 GPS 掩星觀測資料對於莫拉克颱風模擬之影響。另外，國家科學委員會/國家太空中心(NSC/NSPO)和美國國家海洋暨

大氣總署(NOAA)正在討論合作研發福爾摩沙衛星三號之後續計畫(FORMOSAT-3/COSMIC Follow-on Mission, COSMIC-II)的可能性，所以本研究使用觀測系統模擬實驗(Observing Systems Simulation Experiments, OSSE)，評估 COSMIC-II 對侵台颱風預報的影響。

二. 研究方法

1) GPS 掩星觀測

全球定位系統之無線電掩星技術是指 GPS 衛星發射無線電波，當經過大氣時，受到大氣密度影響，訊號傳播路徑產生偏折，使得傳播速度減慢，藉由低軌道衛星(Low Earth Orbiting satellite, LEO)接收到無線電掩星訊號的時間延遲量，並利用都卜勒頻移求得偏折角。由於每一次掩星事件都包含了多條射線，因此可以得到偏折角隨影響參數的垂直分佈，即 $\alpha(a)$ 。若已知偏折角的垂直分佈，則可以利用 Abel 逆變換計算出折射指數(refractive index, n)的垂直分佈(假設折射指數為球對稱分佈)：

$$\ln(n(x)) = \frac{1}{\pi} \int_x^{\infty} \frac{\alpha(a)}{\sqrt{a^2 - x^2}} da$$

其中 a 為影響參數， x 為 nr 。當求得近地點折射指數的垂直分佈後，再利用 $N = (n - 1) \times 10^6$ 求得折射率(refractivity, N)。根據 Thayer (1974)的局地折射率公式

$$N = 77.6 \times \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^3 \times \frac{P_w}{T^2}$$

為折射率(N)與氣壓(P)、溫度(T)和水汽壓(P_w)之間的關係式。假設乾大氣情況下，可將折射率反演出溫度剖線，或是已知溫度的三維變數場反演溼度剖線。

2) 中尺度模式及資料同化系統

本研究所使用的中尺度模式為 The Fifth-Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model，簡稱為 MM5。此模式是由美國國家大氣科學研究中心和美國賓州州立大學共同發展的第五代中尺度模式。MM5 模式包含非靜力過程，採用 σ 座標為垂直座標，水平格點則採用 Arakawa-Lamb B 交錯網格，並具有多重巢狀網格(nesting)的模擬，讓不同尺度的網格之間互相回饋影響。

資料同化的目的是為了將更多可用的觀測資料加入至模式，調整模式的初始場，使其更接近大氣的真實狀態，進而提高模式預報的準確度。本研究所使用的同化方法為四維變分資料同化(4DVAR)方法，該同化系統是由 MM5 模式與 Zou et al. (1997)發展的伴隨模式(MM5-adjoint)組合而成，具有將隨時間和空間變化的觀測資料同化於模式中的特點。四維變分資料同化方法是利用疊代的方式極小化價值函數(cost function)，而求得模式最佳初始場，價值函數可以分成兩個貢獻項：背景項(J_B)與觀測項(J_O)。

$$J = J_B + J_O = \frac{1}{2} (x_b - x_b^o)^T B^{-1} (x_b - x_b^o) + \frac{1}{2} \sum_{t=1}^n [H(x_t) - y_t]^T O^{-1} [H(x_t) - y_t]$$

其中 B 為背景誤差協方差矩陣， O 為觀測誤差協方差矩陣， x_b 為背景場， y_t 為 t_r 時的觀測場， n 為同化窗區， H 為觀測運算子，能將模式變數轉換，且對應至相同時間與空間上的觀測變數。

三. 模擬結果及分析

1) 個案介紹及實驗設計

莫拉克 (Morakot) 颱風生成於菲律賓東北方海面，近中心最大風速約為 40 公尺/秒，中央氣象局 (CWB) 將其強度歸類為中度颱風。當莫拉克颱風向西移進台灣東部外海時，受到地形影響，使其移速減慢並轉向西北，8 日 00 時左右登陸於花蓮市附近，8 日 14 時左右在桃園附近出海。根據水利署莫拉克颱風水文分析報告，颱風侵襲期間，台灣中南部發生超大豪雨，而嘉義縣阿里山雨量站總累積雨量為 2884 毫米，超越 1996 年賀伯 (Herb) 颱風所創下的降雨紀錄 (1987 毫米) 近 900 毫米之多。根據內政部消防署及行政院農委會資料，受颱風及西南氣流影響，中南部、東部多處地區降下刷新歷史紀錄的雨量，引發嚴重水患，造成臺南、高雄、屏東及臺東等縣重大災情，鐵、公路多處路基流失造成交通中斷，多處地區發生嚴重土石流災害。計有 673 人死亡，26 人失蹤，農損逾 195 億元。莫拉克颱風帶來破紀錄的降雨量，其路徑也不易掌握，因此值得深入研究。

本研究採用的中尺度天氣預報模式為 MM5 3.7 版，其模式初始氣象場是使用 NCEP Global Forecast System (GFS) Model 的預報場，模擬實驗使用三層巢

狀網格的配置，其中心位置選取在北緯 23.5 度；東經 120 度。三層巢狀網格的網格數皆為 151×151，水平解析度分別為 45、15 和 5 公里，垂直層數為 35 層，自 2009 年 8 月 6 日 0000UTC 進行 72 小時預報。

2) 模式模擬結果

本部分共有四組模擬實驗，分別為控制實驗 (None)、同化 080600-03UTC 之 GPS 折射率 (GPS1；共 6 點)、同化 080600-04UTC 之 GPS 折射率 (GPS2；共 11 點) 與同化 080600-05UTC 之 GPS 折射率 (GPS3；共 15 點)。莫拉克颱風之模擬路徑圖 (圖一)，模擬第一天 (0806 00UTC~0807 00UTC) 觀測與模擬的颱風移動方向相似，往西移動接近台灣。由於模式初始場的颱風結構和強度 (中心氣壓為 984hPa) 較觀測的 (中心氣壓為 960hPa) 弱，因此模擬的颱風皆出現中心擺動的現象。模擬第二天 (0807 00UTC~0808 00UTC)，觀測的颱風先是往西移動，登陸花蓮後轉向西北且移速減慢，但模擬的颱風登陸地點稍微南偏，且登陸後繼續向西移動，只有 GPS3 的登陸地點和路徑與觀測較接近。模擬第三天 (0808 00UTC~0809 00UTC)，觀測的颱風繼續向西北移動，並在桃園出海。模擬的颱風路徑與觀測差異大，但同化衛星觀測資料的模擬結果則較早轉往北移動，其路徑誤差比控制實驗小。至於降雨量方面，模擬第一、二天，由於同化 GPS 折射率能對模擬範圍的水汽和溫度作出修正，因此模擬結果較控制實驗接近真實觀測。整體來說，模擬結果的降雨量較小，且降雨位置分佈偏南，原因是其颱風強度較弱和路徑偏南所造成。

另外，由於模式的颱風初始強度弱，所以本部分的實驗將加入虛擬渦旋，共有四組模擬實驗，分別為同化虛擬渦旋 (BDA)、同化虛擬渦旋和 080600-03UTC 之 GPS 折射率 (BDA+GPS1)、同化虛擬渦旋和 080600-04UTC 之 GPS 折射率 (BDA+GPS2) 與同化虛擬渦旋和 080600-05UTC 之 GPS 折射率 (BDA+GPS3)。同化虛擬渦旋使得初始場的颱風結構和強度 (中心氣壓為 954hPa) 較強，其第一天模擬路徑出現北偏的現象。當同化 GPS 折射率對大範圍環流作出修正，則降低其模擬的路徑誤差 (圖二)。由於颱風結構和強度得到改善，同化虛擬渦旋的降雨量和降雨位置分佈較接近真實觀測，最大的三天總降雨量為

2323 毫米，與觀測的 2461 毫米相近。

四. 觀測系統模擬實驗

探討真實的觀測資料對天氣預報模式影響之研究，稱為觀測系統實驗(Observing Systems Experiment, OSE)，前一個部分為此範疇。在此種研究中，真實的大氣狀態無從得知，而影響天氣預報結果的因素眾多，因此無法明確說明加入觀測資料對於天氣預報準確度的影響。至於觀測系統模擬實驗，則是假設模式結果為真實的大氣狀態，再自行設計觀測位置，可適用於無法取得觀測資料的地點(如：高山、海洋和颱風內部等)，並期望在已知的大氣狀態下，探討觀測資料對天氣預報模式的影響。本研究藉以觀測系統模擬實驗，期望能給予福爾摩沙衛星三號之後續計畫適當的評估與建議。

本研究的觀測系統模擬實驗是使用 MM5 模式，採用三層巢狀網格的配置，模擬範圍的中心位置選取在北緯 27.1 度；東經 118.6 度。Domain 1 的網格數為 222×128，其解析度為 45 公里；Domain 2 的網格數為 184×196，其解析度為 15 公里；Domain 3 的網格數為 151×181，其解析度為 5 公里，垂直層數為 28 層。從 2008 年 7 月 15 日 1200UTC 開始，進行 84 小時預報，其模式的初始氣象場為歐洲中期天氣預報中心的分析場(ECMWF Reanalysis TOGA)，並利用 4DVAR 方法加入虛擬渦旋。由於颱風路徑和強度與觀測接近，因此本研究選用此模擬結果，並假設為本個案的真實大氣狀態(Nature Run)，而控制實驗(None)則是從 2008 年 7 月 16 日 0000UTC 開始，進行 72 小時預報，其模式的初始氣象場為美國國家環境預報中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)AVN 分析場。為了得到符合實際觀測的模式折射率，本實驗採用二維射線追蹤模式(ray tracing model) (Chen et al., 2006)，其數值方法與 Zou et al. (1999)相似，透過直接計算射線穿越模式大氣的軌跡，並以幾何方式求得偏折角，再利用 Abel 逆變換，將模式偏折角轉換成非局地的大氣折射率。

為了討論不同分佈密度的 GPS 折射率對模式初始場的影響。本部分利用二維射線追蹤模式和 Nature Run 的 Domain1 結果，每隔 20、30、40 和 50 個網格

點產生 GPS 折射率，其 GPS 掩星點的數量分別共有 60、28、18 和 15 點，並假設為一小時窗區的分佈，再以 4DVAR 方法於預報的 0、60 和 120 分鐘進行同化此種分佈，實驗名稱分別為 OSSE1、OSSE2、OSSE3 和 OSSE4。

比較各實驗與 Nature Run 之均方根誤差(表一)，各同化實驗的折射率均方根誤差皆較控制實驗小，證明同化 GPS 折射率能改善模式初始場，使其更接近 Nature Run。將控制實驗和各實驗同化後的分析場進行 72 小時預報，由於沒有加入虛擬渦旋，颱風的初始強度較弱，各模擬實驗的颱風路徑誤差大，但同化 GPS 折射率能稍稍降低其誤差。

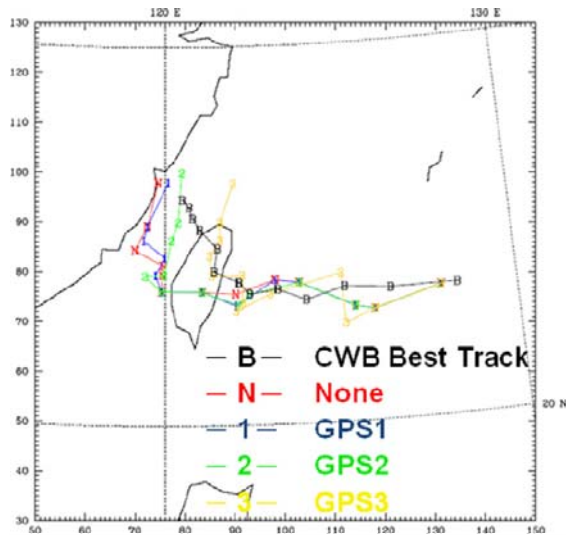
五. 參考文獻

- 黃清勇、朱延祥，2004：FORMOSAT-3 / COSMIC 科學研究簡介。大氣科學，**32**，293-328。
- Anthes, R. A., C. Rocken, and Y.-H. Kuo, 2000: Applications of COSMIC to meteorology and climate. *Terr. Atmos. Oceanic Sci.*, **11**, 115-156.
- Chen, S.-H., F. Vandenberghe, and C.-Y. Huang, 2006: Error characteristics of GPS retrieved refractivity using a simulation study. *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 477-496.
- Kuo, Y.-H., X. Zou, S.-J. Chen, Y.-R. Guo, W. Huang, R. Anthes, D. Hunt, M. Exner, C. Rocken, S. Sokolovskiy, 1998: A GPS/MET sounding through an intense upper-level front, *Bull. Amer. Met. Soc.*, **79**, 617-626.
- Kuo, Y.-H., T.-K. Wee, S. Sokolovskiy, C. Rocken, W. Schreiner, D. Hunt, and R. A. Anthes, 2004: Inversion and error estimation of GPS radio occultation data. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 507-531.
- Kuo, Y.-H., W. S. Schreiner, J. Wang, D. L. Rossiter, Y. Zhang, 2005: Comparison of GPS radio occultation soundings with radiosondes. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L05817, doi:10.1029/2004GL021443.

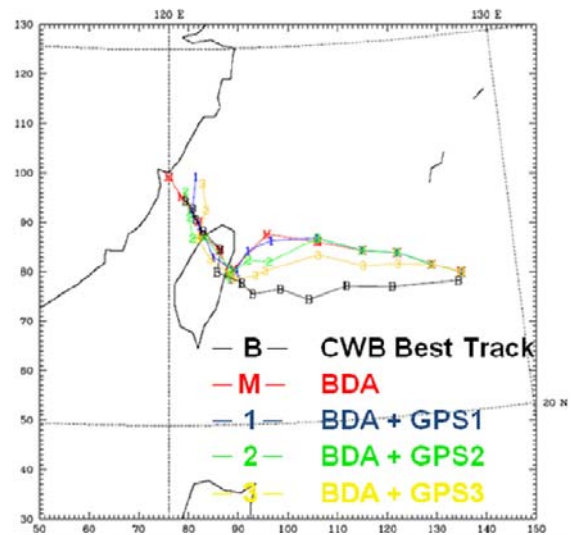
- Kursinki, E. R., G. A. Hajj, K. R. Hardy, L. J. Romans, and J. T. Schofield, 1995 : Observing tropospheric water vapor by radio occultation using the global positioning system, *Geophys. Res. Letter*, **22**, 2365-2368.
- Leroy, S. S., 1997: Measurement of geopotential height by GPS radio occultation, *J. Geophys. Res.*, **102**, 23,429-23,465.
- Rocken, C., R. Anthes, M. Exner, D. Hunt, S. Sokolovskiy, R. Ware, M. Gorbunov, W. Schreiner, D. Feng, B. Herman, Y.-H. Kuo, and X. Zou, 1997: Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere. *J. Geophys. Res.*, **102**, 29849-29866.
- Ware, R. et al., 1996: GPS sounding of the atmosphere from low earth orbit: preliminary results. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 19-40.
- Zou, X., W. Huang and Q. Xiao, 1997: A user's guide to the MM5 adjoint modeling system. NCAR TN-437+IA. MMM division, NCAR, 92pp. [Available from UCAR Communications, P.O. Box 3000, Boulder, CO 80307.]
- Zou, X., F. Vandenberghe, B. Wang, M. E. Gorbunov, Y.-H. Kuo, S. Sokolovskiy, J. C. Chang, J. G. Sela, and R. Anthes, 1999: A raytracing operator and its adjoint for the use of GPS/MET refraction angle measurements. *J. Geophys. Res.*, **104**, 22301-22318.

CASE	U(m/s)	V(m/s)	T(k)	Q(g/kg)	P(hPa)	REF
None	3.022142	2.787241	1.089327	0.9018794	0.8323193	5.254050
OSSE1	3.023534	2.791294	1.088773	0.8968028	0.8322029	5.220981
OSSE2	3.022944	2.788458	1.089191	0.8989035	0.8322901	5.235379
OSSE3	3.022658	2.788548	1.089293	0.8998078	0.8322888	5.242388
OSSE4	3.022428	2.788331	1.089390	0.9008186	0.8323182	5.246998

表一、時間 2008 年 7 月 16 日 0000UTC 之控制實驗及同化實驗與 Nature Run 的均方根誤差。



圖一、同化不同時間窗區的 GPS 折射率之模擬路徑。CWB Best Track 為莫拉克颱風 (2009080600-0900UTC) 之中央氣象局觀測最佳路徑(CWB Best Track)；None 為控制實驗；GPS1 為同化 080600-03UTC 之 GPS 折射率；GPS2 為同化 080600-04UTC 之 GPS 折射率；GPS3 為同化 080600-05UTC 之 GPS 折射率。每 6 小時標示一點。



圖二、同化虛擬渦旋和不同窗區的 GPS 折射率之模擬路徑。CWB Best Track 為莫拉克颱風 (2009080600-0900UTC) 之中央氣象局觀測最佳路徑(CWB Best Track)；BDA 為同化虛擬渦旋；BDA+GPS1 為同化虛擬渦旋和 080600-03UTC 之 GPS 折射率；BDA+GPS2 為同化虛擬渦旋和 080600-04UTC 之 GPS 折射率；BDA+GPS3 為同化虛擬渦旋和 080600-05UTC 之 GPS 折射率。每 6 小時標示一點。