

氣象局全球模式與內嵌區域模式之動能波譜分析

陳映如^{1,3} 莊漢明² 陳建河³
中央大學大氣科學系¹ 美國國家環境預測中心² 中央氣象局資訊中心³

摘要

為了在有限的計算資源限制下得到高解析度的區域預報產品，我們將美國國家環境預測中心區域波譜模式(National Centers for Environmental Prediction Regional Spectral Model, NCEPRSM)以MPMD (Multi-Program Multi-Data)方式內嵌於氣象局全球預報系統(Central Weather Bureau Global Forecast System, CWBGFS)中，並透過分析各別的動能波譜，了解兩模式的特性。

以2017年泰利颱風為個案，測試CWBGFS T511(約25公里)內嵌12公里RSM之效率和表現，MPMD方法比分段執行全球模式與區域模式節省17%以上的時間與66%以上的I/O量，且12公里的RSM颱風路徑和強度預報略優於GFS (Chen et al., 2018)。進一步分析動能波譜圖發現，GFS T511可模擬出 k^{-3} 定律，但無法掌握 $k^{-5/3}$ 定律的部分，12公里RSM則可模擬出 k^{-3} 與 $k^{-5/3}$ 定律，即GFS僅能模擬出大尺度的環流，而解析度較高的RSM可模擬部分大尺度與中小尺度的現象。

關鍵字：內嵌模式、MPMD、動能波譜

一、前言

氣象局全球預報系統(Central Weather Bureau Global Forecast System, CWBGFS, 後簡稱GFS)現行作業為T511(約為25km網格大小)，為運用有限的計算資源來提供臺灣區域附近更高解析度的預報產品，我們以MPMD (Multi-Program Multi-Data)方式，將美國國家環境預測中心區域波譜模式(National Centers for Environmental Prediction Regional Spectral Model, NCEPRSM, 後簡稱RSM)內嵌於GFS中。

此RSM版本具備如Kanamitsu et al. (2005)中的二維平行運算架構，而用MPMD方法可讓GFS透過MPI(Message Passing Interface)點對點傳輸資料到RSM，可節省原本仰賴檔案讀寫傳輸資料的時間與硬碟空間，以GFS T511、垂直60層、時間間隔90秒，和12公里RSM、水平648乘384個格點、垂直42層、時間間格45秒之設定進行5天的模擬，MPMD方法可比檔案讀寫傳輸節省17%以上的時間與66%以上的I/O量(Chen et al., 2018)。在完成此初步串接流程後，我們以2017年泰利颱風為個案檢視兩模式的模擬結果，在12公里的RSM模擬中，颱風強度與路徑都略比GFS接近觀測值。

為進一步了解兩模式特性，我們分析GFS和RSM的動能波譜。在觀測中，高層自由大氣的動能波譜在大尺度環流呈現如二維紊流特性般的 k^{-3} 定律，而過渡到中小尺度呈現 $k^{-5/3}$ 定律(k 為波數)，

Koshyk and Hamilton (2001)整理了在20世紀數十年間關於動能波譜在紊流理論、理想實驗與實際大氣觀測的相關結果，並以全球模式分析大氣之動能波譜與其收支。1999年Chen et al.以全球與區域模式對美國加州地區進行氣候模擬，其中他們分析全球模式(水平網格大小約160公里)與區域模式(水平網格大小約25公里)之動能波譜亦呈現 k^{-3} 定律。本文將對GFS T511與12公里RSM的模擬結果，計算出兩模式的動能波譜，以了解兩模式對於大尺度環流與過渡到中小尺度環流特性的掌握程度。

二、動能波譜計算

(一) GFS動能波譜

氣象局的GFS為全球波譜模式，其預報變數以spherical harmonics展開，使用三角形截斷法(triangular truncation)，在某一模式層上，預報變數可表示為：

$$X(\lambda, \mu, t) = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=|m|}^M X_n^m(t) P_n^m(\mu) e^{im\lambda},$$

其中 X 為預報變數， X_n^m 為波譜係數， λ 為經度， ϕ 為緯度， μ 為 $\sin(\phi)$ ， M 為三角形截斷波數， m 為緯向波數， n 為總波數， $P_n^m(\mu)$ 為associated Legendre polynomials of degree n and order m 。參考Koshyk and Hamilton (2001)公式(3)，單位質量的動能波譜可寫為：

$$E_n^m = \frac{(|u_n^m|^2 + |v_n^m|^2)}{4},$$

為使與RSM的動能波譜比較較為方便，將相同緯向波數的動能 E_n^m 加總，得到GFS每個緯向波的動能。

(二) RSM動能波譜

RSM為一區域波譜模式，由於存在邊界問題，不像GFS使用spherical harmonics，RSM以擾動項為預報變數，邊界上擾動值為零，使用sine和cosine級數展開表示(詳細數值方法可參考Juang and Kanamitsu, 1994與Juang et al., 1997)。RSM中，緯向波數為 m 、經向波數為 n 之擾動動能可表示為

$$E_{m,n} = \frac{u_{m,n}^2 + v_{m,n}^2}{2},$$

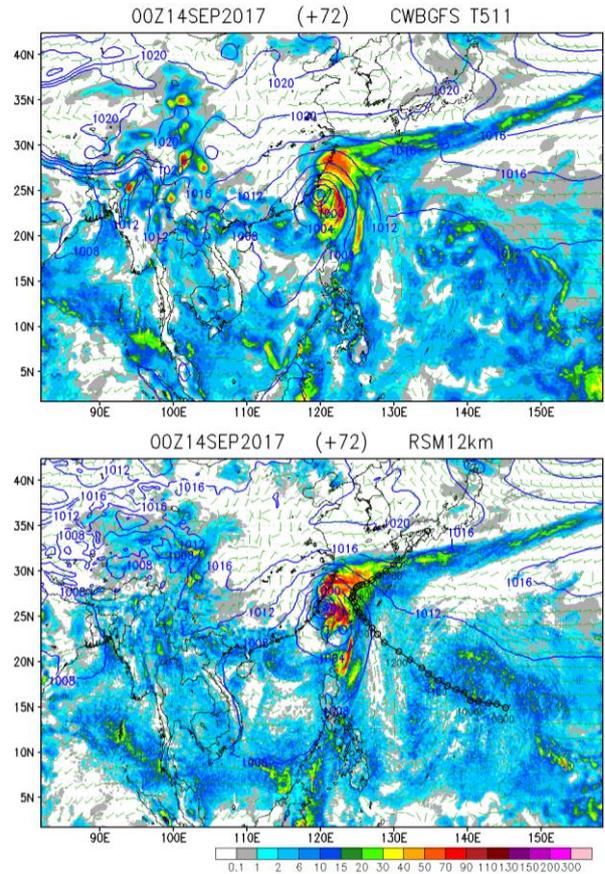
其中 $u_{m,n}$ 與 $v_{m,n}$ 分別表示緯向與經向風場的波譜係數，加總具相同緯向波數的動能 $E_{m,n}$ ，得到RSM每個緯向波的擾動動能，由於區域模式沒有涵蓋完整緯圈，此擾動動能僅代表RSM模擬範圍內可解析波的緯項擾動動能。

為同時比較GFS與RSM的動能波譜，以RSM模擬範圍中心 23.5°N 為代表緯度，計算緯向上，RSM模擬範圍與GFS模擬範圍之比例，將RSM的緯向波數投影至對應的GFS緯向波數，以便於繪製GFS與RSM之動能波譜圖。

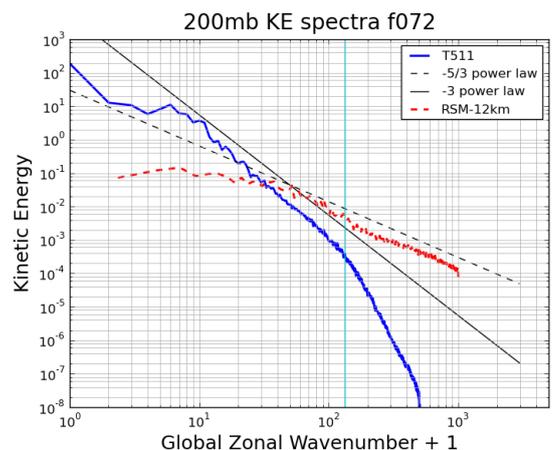
三、結果與討論

以2017年泰利颱風個案為例，初始場為2017年9月11日00 UTC，進行GFS T511和12公里RSM的3天模擬，圖一為RSM模擬範圍的GFS T511與12公里RSM的第三天(2017年9月14日00 UTC)模擬結果，相較於GFS T511，解析度較高的12公里RSM對於颱風強度(颱風最低中心氣壓)與颱風路徑都有較好的掌握。

對此模擬，我們分析兩模式的動能波譜圖，圖二為200百帕GFS T511與12公里RSM的動能波譜圖，紅色虛線為12公里RSM擾動動能，與GFS T511藍色實線相加為總動能波譜，而未和藍色實線重疊的波段為RSM可解析而GFS無法解析的波段。GFS T511在緯向波數100多時(對應波長約為272公里)，與 k^{-3} 定律大致平行，而波數更大的波段動能快速遞減，至波數為511時動能為0，由此可看出GFS T511可以反映出大尺度環流的動能波譜，但無法掌握到中小尺度 $k^{-5/3}$ 定律的動能波譜特性，短波區域的動能大幅減少可能與模式的耗散項較大有關。而12公里RSM的擾動動能在波數約40~100左右，大致與 k^{-3} 定律平行，呈現出大尺度環流的動能波譜，隨波數增加，在波數約400左右過渡到 $k^{-5/3}$ 定律範圍至所能解析到的最短波為止，模擬出了中小尺度的動能波譜特性。



圖一、GFS T511(上圖)與12公里RSM(下圖)之泰利颱風(2017年)第72小時預報場。初始場時間為2017年9月11日00 UTC，色塊為12小時累積雨量(mm)，等值線為海平面氣壓(hPa)，風標為1000百帕風場，黑色實線為JMA Best Track資料，線上每個黑圓圈標示每6小時的颱風位置。在2017年9月14日00 UTC之JMA Best Track颱風中心最低氣壓為925 hPa。



圖二、GFS T511(藍色實線)與12公里RSM(紅色虛線)模擬第72小時的200百帕動能波譜圖。初始場時間為2017年9月11日00 UTC，黑色實線與黑色虛線分別為 k^{-3} 定律與 $k^{-5/3}$ 定律之參考線，藍綠色垂直線對應到276公里的波數。

四、結論與未來工作

在泰利颱風(2017)的單一個案測試下，初步了解氣象局全球預報系統(Central Weather Bureau Global Forecast System, CWBGFS)在T511的解析度設定下，可模擬出大尺度環流系統 k^{-3} 定律的動能波譜，而12公里RSM則可模擬出 k^{-3} 定律以及中小尺度環流 $k^{-5/3}$ 定律。目前的初步結果讓我們對於模式的特性有基礎認知，除了以模式的預報得分來判斷模式之改進與否，分析其動能波譜圖也可幫助判斷模式是否有掌握到高層自由大氣的動能波譜狀態，可輔助檢視模式的模擬結果。但對於模式的各項參數調整，以及模擬的天氣系統類別等因素如何影響模擬結果的動能波譜，尚未有詳細探討，如何應用動能波譜分析來幫助模式改進也有待研究。

參考資料

Chen, S.-C., J. O. Roads, H.-M. H. Juang, and M. Kanamitsu, 1999: "Global to regional simulations of California wintertime precipitation", *J. Geophys. Res.*, **104**, 31517–31532.

Chen, Y.-J., H.-M. H. Juang, and J.-H. Chen, 2018: "High Resolution Weather Forecast of CWB-GFS

Nested with NCEP-RSM", *25th Conf. on Numerical Weather Prediction*, Denver, CO, Amer. Meteor. Soc., JP2.52,
<https://ams.confex.com/ams/29WAF25NWP/webprogram/Paper345437.html>

- Juang, H.-M. H. and M. Kanamitsu, 1994: "The NMC nested regional spectral model", *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 3-26.
- Juang, H.-M. H., S.-Y. Hong, and M. Kanamitsu, 1997: "The NCEP regional spectral model: An update", *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **78**, 2125-2143.
- Kanamitsu, M., H. Kanamaru, T. Cui, and H. Juang, 2005: "Parallel Implementation of the Regional Spectral Atmospheric Model", Scripps Institution of Oceanography, University of California at San Diego, and National Oceanic and Atmospheric Administration for the California Energy Commission, PIER Energy-Related Environmental Research. CEC-500-2005-014.
- Koshyk, J., and K. Hamilton (2001): "The horizontal kinetic energy spectrum and spectral budget simulated by a high-resolution troposphere-stratosphere-mesosphere GCM", *J. Atmos. Sci.*, **58**, 329–348.