

非疊代及維度分離半拉格朗日法(NDSL)

於區域波譜模式動力核心之應用

The Application of NDSL on RSM's Dynamic Core

陳映如^{1,3}

莊漢明^{2,3}

陳建河¹

中央氣象局資訊中心¹ 美國國家環境預測中心² 中央大學大氣科學系³

摘要

目前氣象局全球模式 CWBGFS (Central Weather Bureau Global Forecast System)與區域波譜模式 RSM (Regional Spectral Model)已透過 MPMD(Multi-Program Multi-Data)方式完成串接,兩模式可同步積分並分別產出全球及區域動力降尺度的預報產品。為進一步提升 RSM 的積分效率以節省串接 RSM 所需計算資源,我們嘗試將 RSM 的動力核心架構由歐拉法 (Eulerian)改為非疊代及維度分離半拉格朗日法 NDSL (Non-iteration Dimensional-split Semi-Lagrangian),採其模式穩定性不受限於積分時步(time step)的特性,透過放大時步來增進模式積分效率。本文將探討 NDSL 於 RSM 動力核心的應用和初步結果。

關鍵字：非疊代及維度分離半拉格朗日法、區域波譜模式、NDSL、RSM

一、前言

中央氣象局延續過去兩年的規劃,持續發展全球預報系統(Central Weather Bureau Global Forecast System, CWBGFS)與區域模式(Regional Spectral Model, RSM)串接的單一化模式(Unified Model, UM),目前兩模式已完成 MPMD (Multi-Program Multi-Data)串接流程(Chen et al., 2018),兩模式可同步積分,區域模式透過 MPI(Message Passing Interface)接收全球模式提供的初始場與背景場,以提供動力降尺度(dynamic downscaling)預報。

隨著 CWBGFS 由歐拉法(Eulerian Scheme)改為半拉格朗日法(Semi-Lagrangian Scheme),積分效率有顯著的提升(劉等,

2018),RSM 的積分效率將影響 MPMD 架構下兩個模式的計算資源分配。為了後續發展單一化模式以及提升 RSM 的積分效率以增進串接模式的計算資源使用效率,我們亦嘗試將 RSM 由歐拉法改為半拉格朗日法,使模式穩定度不受限於 CFL 條件而能將時步放大數倍,採用與 CWBGFS 相同的非疊代及維度分離半拉格朗日法(Non-iteration Dimensional-split Semi-Lagrangian, NDSL)。

NDSL 方法最早由 Juang (2007, 2008) 提出,與傳統半拉格朗日法不同,NDSL 取中間點在格點上,透過一次內插(interpolation)和一次再映射(remapping)計算出發點與抵達點,比起傳統半拉格朗日法先初猜再疊代求得出發點(departure point)或

抵達點(arrival point)，可避免初猜誤差和節省疊代所需的時間。

第二章將介紹 NDSL 方法以及在 RSM 動力計算上的應用，第三章以 2018 年第 25 號颱風康芮為模擬個案，比較原本 RSM 歐拉法以及使用 NDSL 方法模擬的結果。第四章總結並探討後續改進模式方向與未來規劃。

二、NDSL方法與在RSM的應用

非疊代及維度分離半拉格朗日法(NDSL)由Juang (2007, 2008)提出，透過維度分離使原本三維的平流計算可拆成三個一維的計算，參考Zhang and Juang (2012)考慮質量保守的狀況下，一維連續方程式可寫成

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{u} \frac{\partial \rho}{\partial \mathbf{x}} + \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{x}} = 0, \quad (1)$$

變數 ρ 為密度， \mathbf{u} 為風場，再令 Δ_x 為一個控制體積的長度，則(1)式最後一項輻散項 $\rho \mathbf{u} \cdot \nabla \rho$ 可寫為

$$\frac{\partial \rho}{\partial \mathbf{x}} = \frac{1}{\Delta_x} \left(\frac{d\rho}{dt} \right), \quad (2)$$

將(2)式代入(1)式可得到 Lagrangian 形式的連續方程式

$$\frac{d\rho \Delta_x}{dt} = 0, \quad (3)$$

而局地質量保守可進一步寫為

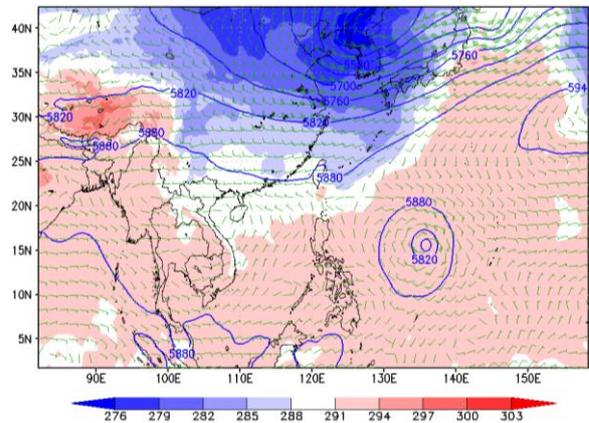
$$(\rho \Delta_x)_D^{n-1} = (\rho \Delta_x)_A^{n+1}, \quad (4)$$

其中底標D表示出發點(Departure)，A表示抵達點(Arrival)。計算時取中間點(時間t)的變數於格點上，並以PLM(piecewise linear method)和單調限制(monotonic limiter)來進行變數在出發點(時間t - Δt)的內插(interpolation)計算以及在抵達點(時間t + Δt)的再映射(remapping)到網格上時的計算。

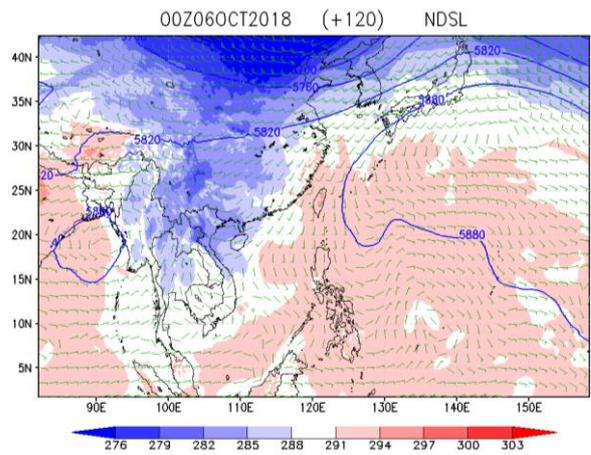
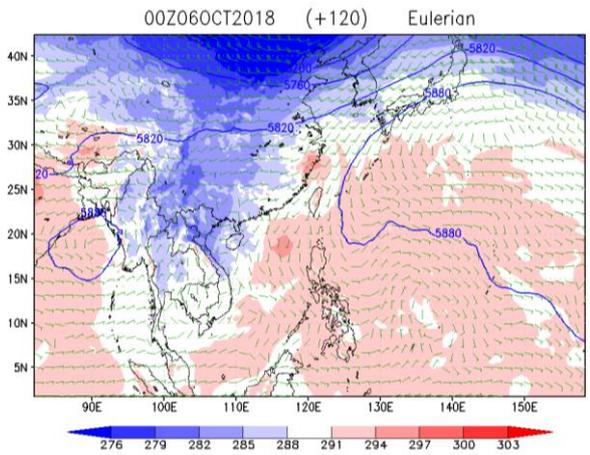
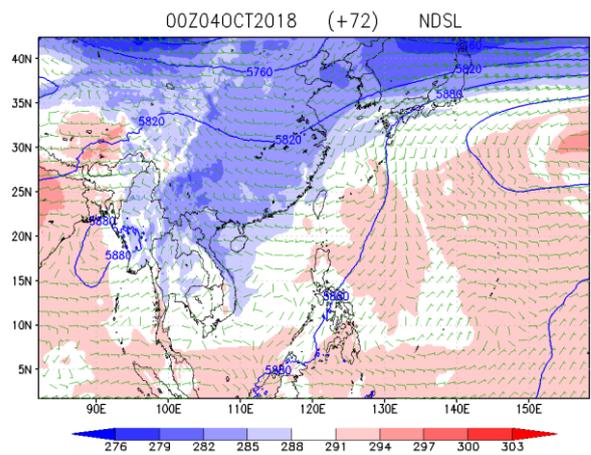
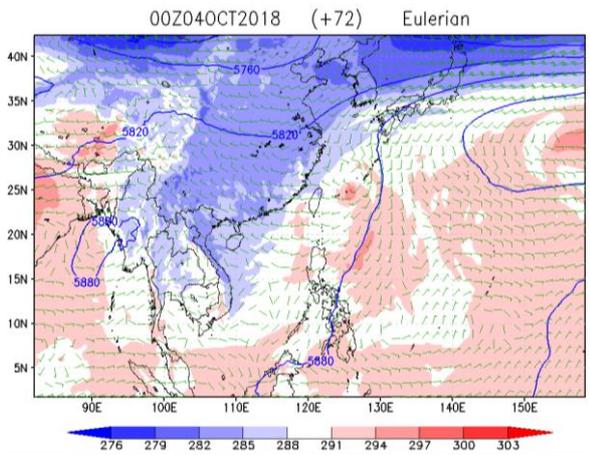
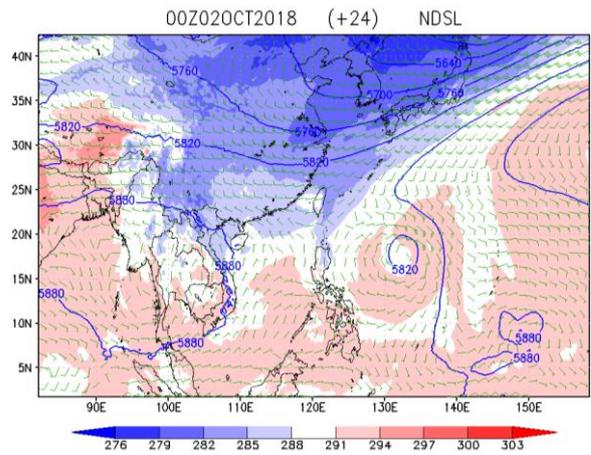
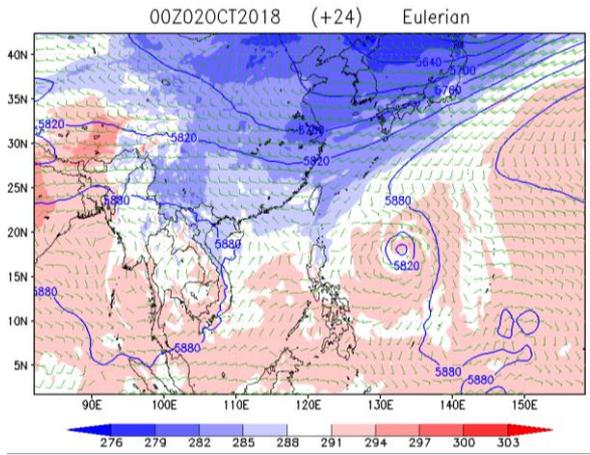
在RSM中，NDSL的應用需處理邊界上可能找不到出發點或抵達點的問題，目前我們透過標記這些點的位置，使會受到影響的整個網格柱資訊由CWBGFS提供，為使讓模式邊界資訊較連續，我們亦調升了CWBGFS對於RSM模擬邊界的貢獻，使RSM模擬邊界涵蓋更多CWBGFS的資訊。另外隨著時步提升至四倍，我們亦調整了耗散項(diffusion)和鬆弛法(relaxation)，使模式能更穩定積分。

三、結果與討論

以2018年10月1日00UTC為初始場，進行五天RSM純動力模擬(關閉所有物理參數化)，比較RSM歐拉法以及NDSL方法的模擬結果，其中歐拉法時步為45秒，NDSL方法時步為180秒。初始場如圖一所示，康芮颱風位於菲律賓東側外海，台灣北邊有一槽線系統。



圖一、CWBGFS提供給RSM的初始場，時間為2018年10月1日00UTC。色塊為850百帕溫度場(K)，等值線為500百帕重力位高度(m)，風標為500百帕風場(knots)。



圖二、RSM使用歐拉法的第一、三、五天動力模擬結果。色塊為850百帕溫度場(K)，等值線為500百帕重力位高度(m)，風標為500百帕風場(knots)。

圖三、RSM使用NDSL方法的第一、三、五天動力模擬結果。色塊為850百帕溫度場(K)，等值線為500百帕重力位高度(m)，風標為500百帕風場(knots)。

在後續第一、三、五天的模擬結果可發現，使用NDSL方法在溫度場以及高度場皆比歐拉法平滑，這個原因除了NDSL方法本身使用PLM的一階內插而較平滑外，也與配合時步放大所加強的耗散項和鬆弛法有關。而從槽線位置以及西太平洋高壓的分布演變看來，綜觀場在兩模擬中並無太大差異。

計算時間方面，同樣在使用441顆CPU的狀況下，完成五天模擬所需的積分時間，歐拉法為1230秒，NDSL方法為838秒，比起歐拉法，NDSL可節省約32%的時間(約快1.4倍)。雖然NDSL方法所使用的時步為歐拉法的四倍，但積分完成的速度卻小於四倍的原因包括在邊界點上的標記判斷流程，和配合RSM二維平行化運算在NDSL計算時需多轉換切割資料形式數次等步驟，需要額外的時間來完成。

四、結論與未來展望

由單一個案初步比較RSM動力架構使用原本歐拉法以及NDSL方法的差異發現，NDSL方法的模擬結果較平滑，而在綜觀尺度的天氣現象，兩個模擬無顯著差異。而相較歐拉法，NDSL方法可成功使用4倍的時步，然而因為多出邊界判斷與平行運算轉換等流程，NDSL比起歐拉法實際積分速度約快1.4倍。

後續規劃在NDSL架構下加入物理參數化的搭配，物理參數化的加入將使短波擾動更多，為使模式更穩定，也將調整半隱式(semi-implicit)的參數，並評估模式積分較耗時的部分是否能再改進以提升效率。

參考資料

劉邦彥、陳建河、莊漢明、林沛練, 2018:

“非疊代及維度分離半拉格朗日法

(Non-iteration Dimensional-split Semi-Lagrangian, NDSL)於中央氣象局全球天氣模式之應用”，天氣分析與預報研討會論文彙編，臺北市，中央氣象局，A3-8。

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., 2007: “Semi-Lagrangian advection without iteration”, *Proc. Conf. on Weather Analysis and Forecasting*, Longtan, Taoyan, Taiwan, Central Weather Bureau, 277.

Juang, H.-M. H., 2008: “Mass conserving and positive semi-Lagrangian tracer advection in NCEP GFS”, *Proc. Conf. on Weather Analysis and Forecasting*, Taipei, Taiwan, Central Weather Bureau, 225–227.

Zhang, Y., and H.-M. H. Juang, 2012: “A mass-conserving non-iteration-dimensional-split semi-Lagrangian advection scheme for limited-area modelling”, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **138**, 2118-2125.