

使用 WRF 模式探討垂直解析度對於莫拉克颱風(2009)模擬之影響

林宜霖¹ 楊明仁¹ 黃小玲¹

國立臺灣大學大氣科學系¹

摘要

本文以 2009 年莫拉克颱風為研究個案，藉由改變 WRF 模式中的垂直解析度，討論所模擬之莫拉克颱風次環流結構與強度差異。為了簡化討論，研究特別針對莫拉克颱風尚未明顯受到台灣地形影響時之結果進行分析。此外，研究中除了高解析度模擬實驗使用三層巢狀網格(網格間距 9:3:1km)，其餘所有實驗皆使用兩層巢狀網格，網格間距依序為 9km、3km。

本研究選擇 PAR55 實驗做為控制組(CNTL run)，即垂直層 eta 差值的分佈為拋物線型，接著設計兩組對照實驗進行比較。第一組對照實驗為不同垂直層數但是 eta 分佈同為拋物線型(PAR35、PAR45 和 PAR55)，第二組對照實驗則在垂直同為 55 層時針對模式底層($\text{eta}=1\sim0.85$)及模式對流層中層至頂層($\text{eta}=0.27\sim0.07, z=6\sim12\text{km}$)分別做特別加密(PAR55、LW55、TROPP55 和 LW-TROPP55)。由第一組實驗得知，颱風強度與模式垂直層數間並非線性關係，三組模擬實驗中以 PAR45 實驗的颱風低層入流、切向風與垂直速度為最強。由第二組實驗得知，增加模式低層大氣的解析度可以得到較強的颱風，其低層入流也較強；若只增加模式之對流層中層至頂層解析度，則能有效增強颱風次環流結構中的出流，同樣能得到較強的颱風。再與更高空間解析度之模擬(網格間距 1km)比較，可以看到 LW-TROPP55 實驗與其有最相似的颱風垂直結構，顯示 LW-TROPP55 實驗在「模式底層與模式對流層中層至頂層加密」可以有效地提升數值模式對於莫拉克颱風結構的解析能力。

關鍵字: 莫拉克颱風(2009)、垂直解析度(Vertical Grid Resolution；VGR)

一、前言

雖然電腦運算速度不斷增加，但是對於預報作業來說總有時間限制，故如何在有限時間內得到較有效率且較合理的模擬結果，對於數值天氣預報而言是很重要的事。理論上提高模式的水平與垂直解析度，能夠解析天氣系統中更小尺度的結構變化；不過真實大氣並沒有明顯分層，礙於電腦資源與計算穩定度考量，垂直層數也不能無限制的增加。因此一般使用底層加密的垂直分層，提高底層的垂直解析度，是為了能更清楚解析模式中來自底層(特別是邊界層內)大氣與地面之間的交互作用；特別對於颱風系統而言，海面熱通量是提供颱風發展的來源之一。

前人研究曾討論不同垂直分層對於颱風結構的影響，他們對模式底層加密有相同的結論，即加密模式底層能增強底層的入流。不過，前人研究對於加密模式頂層的結果有不同結論，推測是因為各研究對於颱風高層加密的方式各不相同所致。Zhang and Wang(2003)模擬颶風 Andrew(1992) 登陸前的強度與結構，以融解層(melting level, $\text{eta}=0.44$)為分界，分別加密上下兩

部分大氣。結果加密上半部大氣的模擬傾向得到較弱的颶風，反之加密下半部大氣則得到較強的模擬颶風。

Kimball and Dougherty(2006)選用理想渦旋，設計包含模式底層、邊界層、模式中層與對流層高層至模式頂層的加密，研究將 eta 值大於 0.95 定義為低層，eta 值小於 0.25 定義為高層(對流層頂約在 $\text{eta}=0.15$)。研究將各組模擬的高低層層數相減，歸納出當高層層數越多，模式傾向得到更強的渦旋，與 Zhang and Wang(2003)相反的結論。

Zhang et al.(2015)以一個理想的 hurricane-like 海上渦旋進行討論，當垂直總層數由 21 層增加至 43 層時，渦旋的強度增強，但當垂直總層數增加到 64 層時，渦旋的強度反而下降，說明垂直總層數與渦旋的強度之間並不是線性的關係。研究又將垂直總層數改為 64 層，設計 HUP64(加密 $\text{eta}=0.3\sim0$)與 HLW64(加密 $\text{eta}=1\sim0.7$)兩組實驗，結果與 Zhang and Wang(2003)相同，加密高層能得到較弱的渦旋，加密低層同樣得到較強的渦旋。

本篇文章以 2009 年莫拉克颱風為研究個案，藉由改變 WRF 模式中垂直分層，透過數組模擬實驗比對高解析的模擬結果，希望能歸納出較適合莫拉克颱風的垂直分層之模擬方法，進而應用到不同的颱風個案。特別增加「對流層中層至頂層」加密模擬，重新設計適合颱風的高層加密實驗。本文第二節為研究方法介紹，第三節詳述了各組模擬的垂直層設計，第四節逐個實驗進行討論，最後第五節為結論。

二、研究方法

本研究以 2009 年莫拉克颱風為例，使用 WRF 模式 V3.4 版本進行模擬，WRF 模式中垂直座標為 eta 座標，eta 的定義如(1)式所示。(1)式中 P_{ht} 和 P_{hs} 分別表示模式頂層和底層大氣壓力， P_h 則表示滿足靜力平衡條件下，某層大氣的壓力，本篇研究即是透過調整 WRF 模式中的 eta 值改變模擬的垂直層分佈。

$$\eta = (P_h - P_{ht}) / (P_{hs} - P_{ht}) \quad (1)$$

為了簡化討論，選擇莫拉克颱風環流皆在海上，且颱風結構尚未受到地形破壞時的模擬結果進行討論。此外，為了討論模式垂直解析度對颱風垂直結構的影響，研究在各組模擬時間第 19 至 22 時之間，選擇颱風中心大小、結構較為相似時進行分析比較。

為了提高垂直剖面的代表性，研究中以每 5 分鐘輸出一筆模式資料做時間平均，以寬 60km 空間平均。討論項目包含颱風中心最低氣壓、10m 最大風速、颱風路徑、次環流結構包含雷達回波、垂直速度、徑向風和切向風等(部分圖未示)。

研究設計兩組實驗，第一組實驗垂直層 eta 值差異同為拋物線型，不過垂直層數分別為 35 層、45 層及 55 層。第二組實驗則是在同為 55 層時對不同高度進行加密，並與兩組高解析度模擬比較。各組模擬的垂直解析度設計於下一節詳細說明。

三、實驗設計

研究模擬時間為莫拉克颱風環流結構尚未接觸到台灣地形時，自 2009 年 8 月 6 日 00 時至 8 月 8 日 00 時，共計 48 小時，模式初始化使用 ECMWF $1.125^\circ \times 1.125^\circ$ 資料，模式頂層為 30 百帕。各項物理參數化方法如下，長波輻射參數化法為 RRTM 方案 (Mlawer et al., 1997)，短波輻射參數化法為 Dudhia 方案 (Dudhia, 1989)，邊界層參數化法為 YSU scheme (Hong and Pan, 1996)，微物理參數化法為 WDM6 方案，並不使用積雲參數化法。

圖 1 為研究使用的 two-way interactive 巢狀網格，三層網格水平網格間距分別為 9km、3km、1km。網域 d01 包含西北太平洋；網域 d02 為莫拉克颱風從模擬開始期間自海上接近台灣，登陸後又遠離台灣期間路

徑經過的範圍，本篇研究的路徑圖皆是由網域 d02 的最低海平面氣壓定位；網域 d03 是莫拉克颱風登陸前，位於台灣陸地東方海上移速趨緩的範圍，增加網域 d03 是為了提供颱風結構更高解析度的模擬結果。

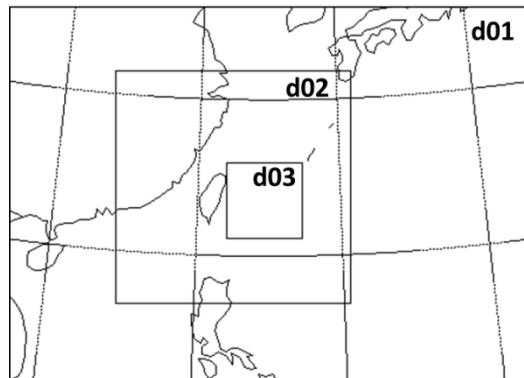


圖 1 研究使用三層 two-way 巢狀網格配置圖。由外到內分別為第三層網格(水平網格間距 9km)、第二層網格(水平網格間距 3km)、第三層網格(水平網格間距 1km)。研究中僅 d3_e75、d3_PAR55 實驗使用第三層網格。

圖 2a 為本研究共 7 種垂直網格設計(8 組模擬實驗)之垂直 eta 層分佈，圖 2b 為 7 種設計各層 eta 值的差值，橫(x)軸表示 eta 由 1 到 0 的分佈，由圖 2b 可以清楚呈現各實驗之間垂直層分佈的差異。考量研究結果的實用價值與現實 NWP 作業的限制，本篇研究將實驗的垂直層數定為 55 層。研究選擇 PAR55 為控制組，PAR55 之 eta 差值的垂直分佈類似拋物線，特別加密模式下層與上層，模式中層則相對較疏，由於大氣的密度(氣壓)分佈越到高層越疏，因此 PAR55 在上下層並不是對稱的，而是底層 eta 差值(最底層~0.0067)稍微小於頂層 eta 差值(最頂層~0.0069)。

研究設計兩組實驗討論垂直分層對於颱風結構之影響。第一組實驗為討論相同垂直層分佈類型但不同層數，包含 PAR55、PAR35、PAR45 實驗，三組模擬 eta 差值皆為拋物線型的分佈，但垂直總層數分別為 55、35 和 45 層。第二組實驗討論同為 55 層，但對不同 eta 層加密，研究將 eta 介於 1 與 0.85 之間定義為模式低層，颱風底層入流亦包含在此層內；eta 介於 0.15 與 0 之間定義為模式高層；eta 值介於 0.27 至 0.07 之間定義為對流層中層至對流層頂(100 至 300 百帕)，由於從模擬中見莫拉克颱風於對流層中層至頂層(約高度 6 至 12km 處)有特別強的出流(如圖 5)，又前人定義的模式高層往往已是平流層的高度，此並不適用於莫拉克颱風研究，故本研究增加定義「中對流層至頂層」高度。

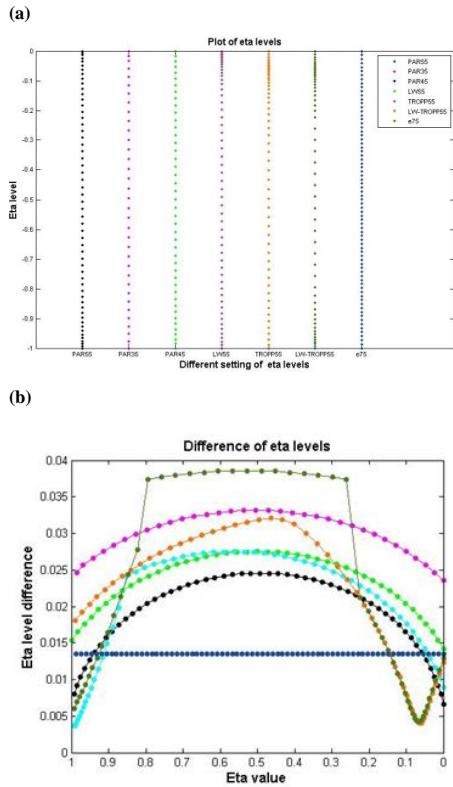


圖 2 研究使用共 7 種垂直網格設計(8 組模擬)。圖 2(a)表示各組模擬之垂直 eta 層分佈，圖 2(b)為 7 種設計各層 eta 值的差值，橫(x)軸表示 eta 由 1(模式底層)到 0(模式頂層)。

如圖 2，各組模擬使用的垂直層分佈如下:LW55 表示對模式低層加密；TROPP55 表示對流層中層至頂層都加密；LW-TROPP55 則是對模式低層和對流層中層至頂層加密，希望討論藉著提高模式對颱風次環流結構(包含低層入流與對流層中高層出流)的解析度，實驗其對颱風強度、結構的影響。以上的各組模擬僅使用第一、二層網格，另有高解析模擬 d3_PAR55、d3_e75 使用三層網格，水平的網格間距提高至 1km。

d3_PAR55 垂直解析度與 PAR55 相同，唯提高水平的網格間距；d3_e75 垂直方向上 eta 為平均的 75 層分佈，相對於控制組實驗 PAR55 而言，水平及垂直方向上模式的解析度皆提高。由於本篇研究主要目的是討論模式垂直網格配置對於颱風真實案例的影響，所以使用水平更高解析度(1km)，理論上對於颱風能有更好的解析能力，也能看到更細微的颱風內部結構。利用三層網格高解析度的模擬結果與其他僅使用兩層網格的結果，可以討論該組垂直分層設定對颱風模擬的能力是否更有效率。

四、結果分析

第一組實驗包括 PAR55、PAR35 和 PAR45 三組模擬，為討論模式使用相同類型垂直層分布(eta 差值拋物線型)但模式總層數不同的情形，三組模擬皆可看作模式底層與頂層皆有垂直層加密。

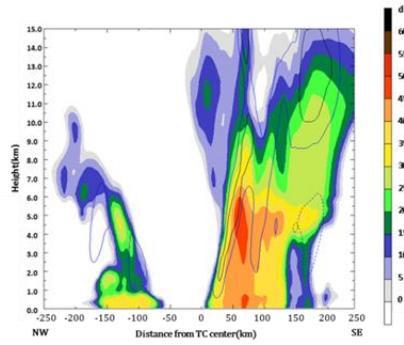
比較三組模擬的颱風中心最低氣壓(圖未示)，自 8

月 6 日 12Z 之後，PAR45 實驗的最低氣壓比 PAR55 實驗還低，PAR35 則是從 8 月 6 日 18Z 之後有最高的中心氣壓，顯示相同類型的垂直層分佈，增加垂直層數與颱風的強度並沒有線性關係，這項結果與 Zhang et al.(2015)使用理想渦旋模擬的結果類似。第二組實驗中，LW55、TROPP55 和 LW-TROPP55 實驗模擬的颱風在 8 月 6 日 12Z 之後，皆比 PAR55 實驗要強，其中 LW-TROPP55 又比 TROPP55 強一些，顯示加密模式底層可以加強模式對於底層水氣通量與對流發展的解析能力，使得颱風強度上升。從雷達最大回波圖(圖未示)看，TROPP55 和 LW-TROPP55 兩組模擬雖然其強對流發展的並不旺盛，但是加密中層大氣對於颱風出流的解析能力，在本研究中也同樣能夠提升颱風強度。

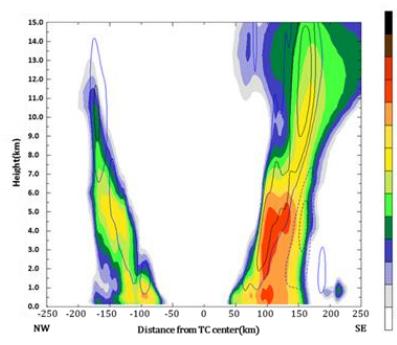
圖 3 為雷達回波與垂直速度的垂直剖面，使用拋物線(PAR)分佈的好處在於，eta 值變化在垂直面上較平滑，由圖 3(a)、(b)、(c)可以看到垂直速度分佈在垂直方向上由底層至高層呈連續分佈，其中以 PAR45 有最大的垂直速度(大於 4m/s)。圖 3(d)LW55 在 5km 以下的垂直速度較強，與雷達回波大於 45dBZ 區幾乎重合，5km 以上則垂直速度較小。圖 3(e)TROPP55 與 (f)LW-TROPP55 則是 5km 以上有較強的垂直速度，最大值高於 5 m/s。圖 3(d)LW55、(e)TROPP55 與 (f)LW-TROPP55 三組模擬在垂直剖面上雷達回波都呈東西不對稱，不過與控制組模擬圖 3(a)PAR55 比較可以看到，三組模擬中眼牆都比 PAR55 更為筆直，顯示此時颱風發展較強。由此可以知道，在相同為垂直 55 層的模擬中，將底層與對流層中層適當加密，可以對颱風特定層(底層及中對流層)有更好的解析，使得質量場、熱力場在垂直上的傳遞更有效率，模式也可能因此得到較強的颱風。高解析實驗中，特別是圖 3(h)d3_e75 實驗由於水平與垂直的解析度都提高，使得眼牆的垂直速度(8 m/s)在全部模擬中為最大。綜合比較可知，圖 3(e)TROPP55 與(f)LW-TROPP55 兩組模擬與高解析模擬結果較相似，垂直速度極值都在高度 12~13km 之間，且垂直速度皆在 5km 高以上發展。

圖 4 為各組模擬的徑向風速垂直剖面圖。圖 4(a)、4(b)、4(c)三組模擬的颱風在該剖面上均為對稱，惟圖 4(a)PAR55 實驗因為垂直層數多，對於颱風垂直結構有較好的解析能力，除了颱風底層的入流區之外，PAR55 實驗也模擬颱風在中對流層內的強出流結構。比較底層入流的強度，和先前相同以 PAR45 實驗模擬中眼牆東南側的底層入流最強，再一次說明拋物線(PAR)類型的加密，其模擬颱風強度與垂直層數並不是線性關係。圖 4(d)LW55 底層入流強度雖然與控制組

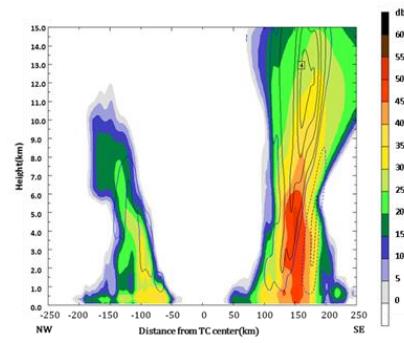
(a) WDM6_PAR55 2009/08/06 22Z (t=22h) (b) WDM6_PAR35 2009/08/06 21Z(t=21h)



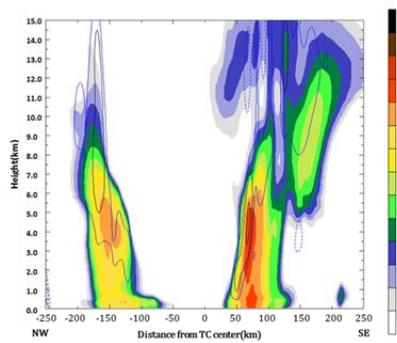
(b) WDM6_PAR35 2009/08/06 21Z(t=21h)



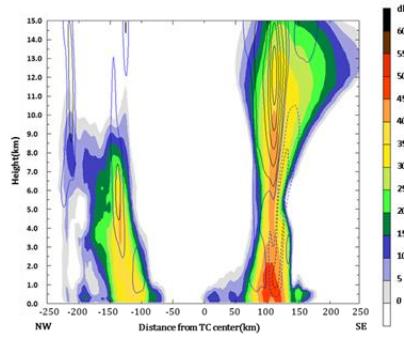
(c) WDM6_PAR45 2009/08/06 19Z (t=19h)



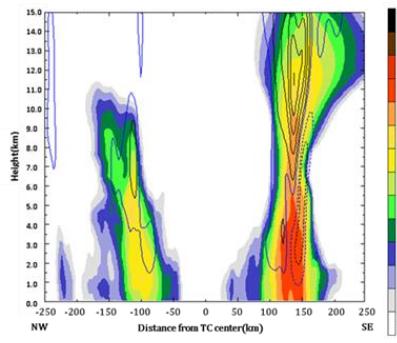
(d) WDM6_LW55 2009/08/06 20Z(t=20h)



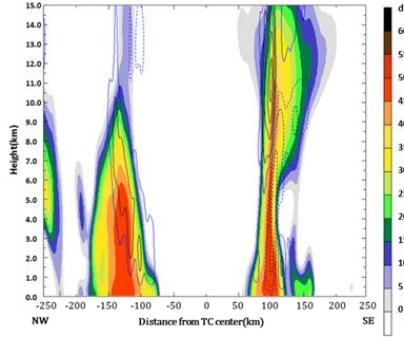
(e) WDM6_TROPP55 2009/08/06 20Z (t=20h)



(f) WDM6_LW-TROPP55 2009/08/06 20Z(t=20h)



(g) WDM6_d3_PAR55 2009/08/06 18Z (t=18h)



(h) WDM6_d3_e75 2009/08/06 21Z(t=21h)

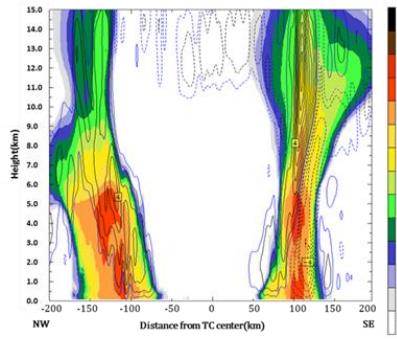
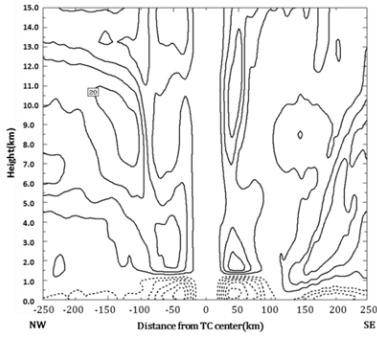
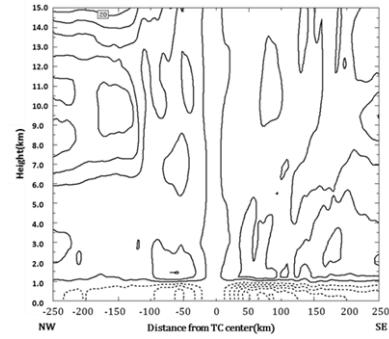


圖 3 為各組模擬垂直剖面圖，顏色表示雷達回波(dBZ)，黑色、藍色線表示垂直速度，實線為上升速度，虛線為下降速度。黑色線區間為 1m/s，藍色線區間為 0.5m/s，水平表示距離風中心的距離(km)，垂直軸表示高度(km)。

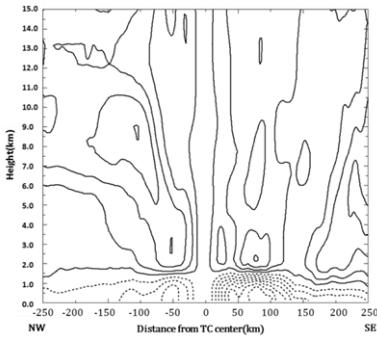
(a) WDM6_PAR55 2009/08/06 22Z (t=22h)



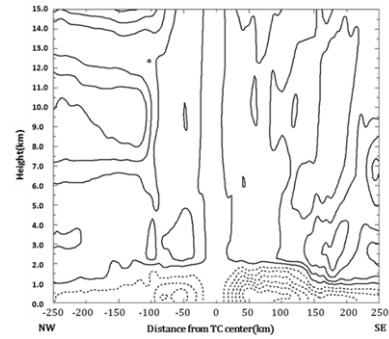
(b) WDM6_PAR35 2009/08/06 21Z(t=21h)



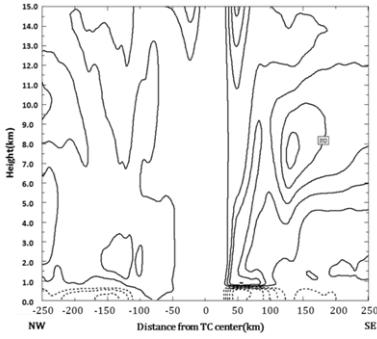
(c) WDM6_PAR45 2009/08/06 19Z (t=19h)



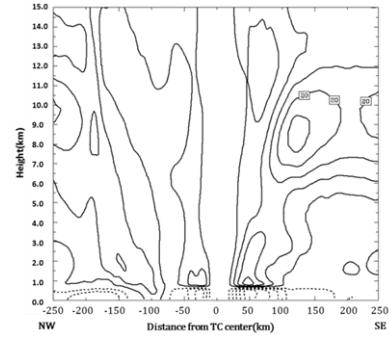
(d) WDM6_LW55 2009/08/06 20Z(t=20h)



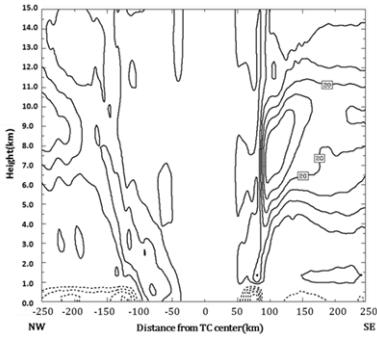
(e) WDM6_TROPP55 2009/08/06 20Z (t=20h)



(f) WDM6_LW-TROPP55 2009/08/06 20Z(t=20h)



(g) WDM6_d3_PAR55 2009/08/06 18Z (t=18h)



(h) WDM6_d3_e75 2009/08/06 21Z(t=21h)

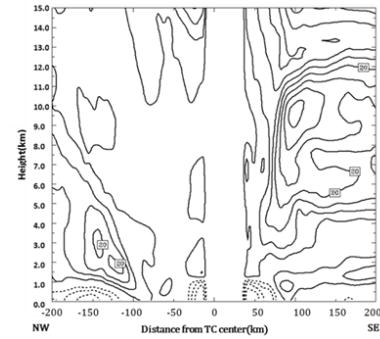
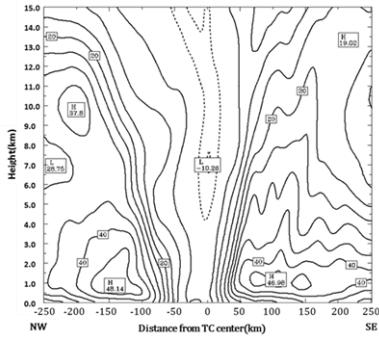
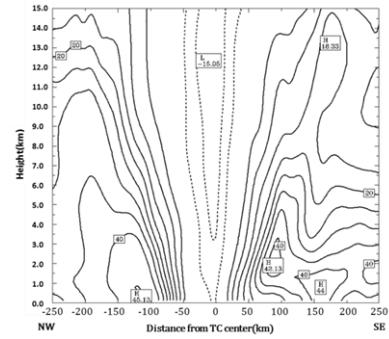


圖 4 同圖 3。黑色曲線表示颱風的徑向風，區間為 5m/s，水平表示距離颱風中心的距離(km)，垂直軸表示高度(km)。

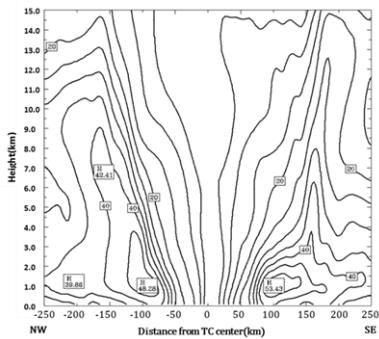
(a) WDM6_PAR55 2009/08/06 22Z (t=22h)



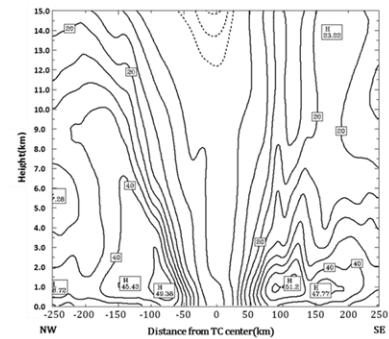
(b) WDM6_PAR35 2009/08/06 21Z(t=21h)



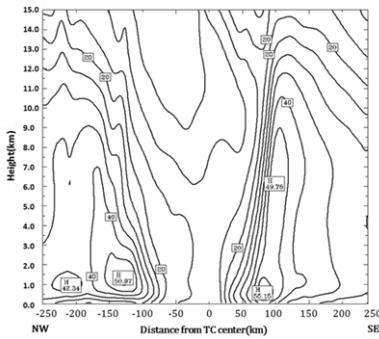
(c) WDM6_PAR45 2009/08/06 19Z (t=19h)



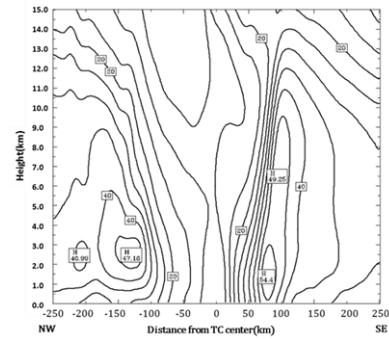
(d) WDM6_LW55 2009/08/06 20Z(t=20h)



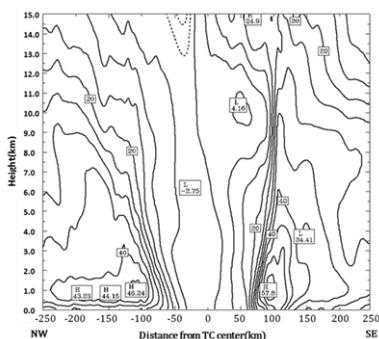
(e) WDM6_TROPP55 2009/08/06 20Z (t=20h)



(f) WDM6_LW-TROPP55 2009/08/06 20Z(t=20h)



(g) WDM6_d3_PAR55 2009/08/06 18Z (t=18h)



(h) WDM6_d3_e75 2009/08/06 21Z(t=21h)

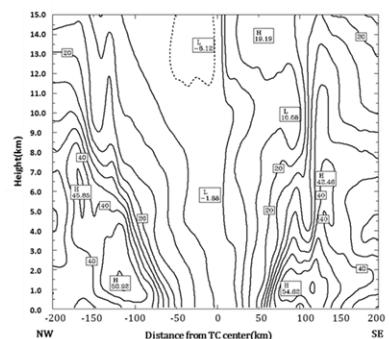


圖 5 同圖 3。黑色曲線表示颱風的切向風，區間為 5m/s，水平表示距離颱風中心的距離(km)，垂直軸表示高度(km)。

實驗(a)PAR55 相近($>30\text{m/s}$)，不過 LW55 所模擬的颱風出流區並沒有明顯的出流結構，顯示加密模式底層雖然能夠有效地使模擬颱風強度增強，不過單單加密底層所得到的颱風結構並不一定接近真實情況。圖 4(e)TROPP55 與圖 4(f)LW-TROPP55 兩組模擬中，底層入流的強度雖沒有 LW55 與 PAR55 實驗強，入流的高度也比較低，不過兩組模擬在高度 6 到 12km 有颱風較強的出流區，這點在高解析模擬圖 4(g)d3_PAR55 與圖 4(h)d3_e75 中也可以看到。

圖 5 颱風切向風垂直剖面中，第一組實驗以圖 4(b)PAR45 的切向風速最強。圖 4(d)LW55 比起圖 4(a)PAR55，底層入流因為底層加密而稍有增強，但兩模擬的眼牆傾斜度類似且較為對稱。圖 4(e)TROPP55 與圖 4(f)LW-TROPP55 同樣是有類似的結果，切向風在眼牆的最大值皆比圖 4(a)PAR55 為強，也更接近高解析模擬(圖 4(g) d3_PAR55 及圖 4(h)d3_e75)。此外，圖 4(e)TROPP55 與圖 4(f)LW-TROPP55 因為在模式對流層中層至頂層加密，剖面中颱風眼牆兩側並不是對稱的，特別是東南邊的眼牆有很強的水平梯度；此特徵在高解析模擬相似，也是圖 4(e)TROPP55 與圖 4(f)LW-TROPP55 與其餘模擬最大不同之處，顯示對於莫拉克颱風這樣非軸對稱的結構，其中層對流區的模式垂直層加密是特別重要且為必須的。

五、結論

本研究以 2009 年莫拉克颱風為個案，比較調整模式的垂直層分佈，以了解其對於颱風強度、垂直結構模擬的影響。研究設計兩組實驗，第一組實驗為同樣垂直層分佈類型但垂直總層數不同的三組模擬，包括 PAR35、PAR45 和 PAR55 實驗。第二組實驗為垂直層數相同(55 層)但不同垂直層分佈的四組實驗，有 PAR55、LW55、TROPP55、LW-TROPP55 實驗。另外研究也做了 d3_PAR55 與 d3_e75 兩組高解析模擬，將高解析模擬作為對颱風結構較有解析能力的對照組，與四組模擬比較，以討論對於莫拉克颱風而言，哪些垂直層分佈的模擬會更有效率與得到較為合理的結果。

在第一組實驗中，PAR45 模擬的颱風強度、徑向風入流與切向風速皆為三組模擬中最高的，對於理想颶風渦旋而言，垂直層數與颱風強度間並不一定是線性關係[Zhang et al.(2015)]，本研究中得到類似的結論。另外 PAR45 雖然得到最強的颱風，不過由於其模式中層比起 PAR55 層數更少，從徑向風剖面可以看到 PAR45 實驗對於颱風中層出流的結構沒有適當的模擬結果。不過總體而言，使用拋物線型垂直結構可以完整的解析颱風眼牆中由底層發展至高層的垂直對流。

在第二組實驗中，以 LW55、TROPP55 及 LW-TROPP55 實驗皆得到比控制組模擬(PAR55)更強的颱風，不論是颱風中心氣壓、切向風速皆有明顯地增強。不過與高解析模擬比較，TROPP55 及 LW-TROPP55 兩組模擬能合理描述颱風底層入流與中層大氣出流的結構。另外在強度與結構方面(特別是東西眼牆不對稱)，TROPP55 及 LW-TROPP55 與高解析模擬更為接近。此顯示出對於莫拉克颱風而言，中對流層至頂層的加密比起模式頂層的加密更為重要。TROPP55 及 LW-TROPP55 的模擬結果雖然差異不大，不過從颱風發展的理論而言，模式底層的加密仍然是不可或缺。TROPP55 及 LW-TROPP55 兩組模擬，未來可以應用在不同結構的颱風上，特別是軸對稱型颱風，藉此可以辨析底層加密加上中對流層的加密對於颱風模擬的效率與合理性。

最後，目前討論垂直解析度的研究都只限於海上颱風的討論，對於登陸後的颱風強度與模式垂直解析度的變化雖然更加複雜，但是颱風往往都是在接近陸地的過程中致災，因此對於接近地形的颱風與模式垂直層分佈的討論也是相當重要，未來將針對登陸颱風於地形上的結構變化，討論模式垂直分層對於模擬結果的影響。

六、參考文獻

1. Zhang, D.-L., and X. Wang, 2003: Dependence of hurricane intensity and structures on vertical resolution and time-step size. *Adv. Atmos. Sci.*, 20, 711-725.
2. Kimball, S. K., and F. C. Dougherty, 2006: The Sensitivity of idealized hurricane structure and development to the distribution of vertical levels in MM5. *Mon. Wea. Rev.*, 134, 1987–2008.
3. Zhang, D.-L., L. Zhu, X. Zhang, and V. Tallapragada, 2015: Sensitivity of Idealized Hurricane Intensity and Structures under Varying Background Flows and Initial Vortex Intensities to Different Vertical Resolutions in HWRF. *Mon. Wea. Rev.*, 143, 914–932.
4. Aligo, E. A., W. A. Gallus Jr., and M. Segal, 2009: On the Impact of WRF Model Vertical Grid Resolution on Midwest Summer Rainfall Forecasts. *Wea. Forecasting*, 24, 575–594.