

2015年蘇迪勒颱風位渦收支分析

戴世忠

空軍航空技術學院航空電子工程科

摘要

本研究應用等熵位渦方程式探討平流、非絕熱與摩擦效應在2015年強颱風蘇迪勒發展的進程中所扮演的角色。在個案發展的初期，地面磨擦作用為地面的正位渦趨勢營造了正向的增長條件，同時在中層正位渦平流與非絕熱加热的加乘影響下，促進了蘇迪勒颱風的生成。其後的颱風眼牆置換過程經分析後，發現中層大氣的非絕熱加热現象佔有主導的地位；不僅加速了系統中心周圍的氣旋式環流，且隨著高風速帶的內縮，更重整了近地面層的局部位渦趨勢，進而使得蘇迪勒颱風產生第二次增強的過程。

關鍵字：等熵位渦、颱風、眼牆置換

一、前言

根據中央災害應變中心核定之蘇迪勒颱風災害應變處置最終報告統計，自104年8月7日至11日期間全台農林漁牧業產物及民間設施估計損失總計達22億8290萬4,000元，並造成8人死亡、4人失蹤與437人受傷[1]。蘇迪勒颱風亦打破多項風雨及氣候紀錄，顯見其驚人威力。尤其在其生成與演變的過程中歷經兩次颱風眼牆置換的現象，在歷史上可謂相當罕見。其中所牽涉到的動力機制著實為颱風的研究領域提供了一個甚為關鍵的課題。本文將借助等熵位渦方程式，針對蘇迪勒颱風自發展初期至迅速增強期間之大氣平流、非絕熱與摩擦效應分別進行分析，以探討此三項作用在系統增強過程中的影響。

自Rossby (1937) [2] 及 Namias (1940) [3] 率先以等熵天氣圖系統性地呈現大氣的運動，有效降低了複雜的非絕熱過程在大尺度系統發展過程中的重要性以後，位渦在等熵座標上具備保守特性的優點開始逐漸受到

重視。Platzman (1949) 在高層正壓擾動運動的研究中指出：平流層隱含高位渦值

的空氣，透過準水平平流的作用沿等熵面進入對流層的過程，對於天氣系統的發展可能扮演別具意義的角色[4]。此觀點隨後為 Kleinschmidt 所用，並進一步藉由上對流層的位渦距平來解釋旋生的機制[5]；另一方面，在其後續的研究之中，位渦的可反演特質亦首次被重視 (Hoskins et al., 1985)[5]。

1970年代起，由於電腦科技的蓬勃發展，連帶促進了等熵位渦在大氣運動及模式模擬診斷的探討；然而，直至 Hoskins 於1985年對於等熵位渦重要性的綜整性文章的問世，才算是開啟了將位渦應用於中緯度綜觀尺度天氣系統分析的濫觴[5]。文中提及當忽略非絕熱與紊流混合的過程時，氣塊位渦沿著三維運動軌跡的保守特質，使其成為天氣系統良好的示蹤變量 (tracer)；此外，Hoskins 亦深入闡述了等熵位渦的可反演原理 (invertibility principle) 及其在系統不穩定條件診斷上的應用。透過個案的分析，割離氣

旋 (cutoff cyclones) 與阻塞反氣旋 (blocking anticyclones) 的產生、維持和結構，以及羅士比波 (Rossby wave) 的傳播與不穩定的物理機制也在文中作了深入的探討。奠基於此，中緯度綜觀尺度旋生的各個要素在理論上獲得了完整的解釋。

即使等熵位渦具備上述的優點，過去相關的研究仍較著重於中緯度綜觀天氣系統的分析與應用，是故本文將嘗試針對熱帶的颱風個案進行等熵位渦收支的探討。接下來文章的第二部份將就研究資料的來源以及處理進行簡介；第三部份說明後續分析所依據的理論基礎；個案的分析與討論安排於第四部份；最後提出本研究的初步結論。

二、資料來源與處理

本研究所使用的資料來自於歐洲中期天氣預報中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 所產製的 ERA-interim 分析場。其水平解析度為 $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ ，垂直方向自 1000 hPa 至 100 hPa 共包含 27 層等壓面，另資料時距為 6 小時。納入計算的變量計有相對濕度 ($s-1$)、溫度 (K)、比濕 (kg/kg) 及相對溼度 (%) 等。

衛星資料取自日本高知大學 MTSAT 衛星資料集，資料範圍涵蓋東經 70°E 至西經 150°W 、南緯 70°S 至北緯 70°N ，空間解析度 0.25° ，每小時一筆資料。進行層位渦與衛星紅外線影像統計分析前，衛星影像像素數值透過雙線性內插法 (bilinear interpolation) 內插至模式分析格點上以利比對。

三、研究方法

本研究採用 Holton (2004) 所定義之 Ertel 位渦度 [6]：

$$P \equiv \frac{(\zeta_\theta + f)}{\sigma}$$

其中 P 為 Ertel 位渦度， $\zeta_\theta \equiv \mathbf{k} \cdot \nabla_\theta \times \mathbf{V}$ 為等熵面上之相對渦度， ∇_θ 是在等熵面上的梯度運算符號， f 為科氏參數 (Coriolis parameter)，且 σ 為等熵坐標系的靜力穩定度參數，其定義如下：

$$\sigma \equiv -g^{-1} \frac{\partial p}{\partial \theta}$$

g 為重力加速度， p 、 θ 分別為氣壓及位溫。

由大氣之動量方程式出發，配合以上定義可以導出位渦守恆方程式：

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{D}P}{Dt} &= \frac{\partial P}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla_\theta P \\ &= \frac{P}{\sigma} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sigma \dot{\theta}) + \sigma^{-1} \mathbf{k} \cdot \nabla_\theta \times \left(\mathbf{F}_r - \dot{\theta} \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \theta} \right) \\ \frac{\partial P}{\partial t} &= -\mathbf{V} \cdot \nabla_\theta P + \frac{P}{\sigma} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sigma \dot{\theta}) \\ &\quad + \sigma^{-1} \mathbf{k} \cdot \nabla_\theta \times \left(\mathbf{F}_r - \dot{\theta} \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \theta} \right) \end{aligned}$$

其中 $\frac{\tilde{D}}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla_\theta$ ，等式左側的項代表在等熵面上跟隨空氣塊運動時，位渦隨時間的局部變率；等式右側第一項為平流作用之影響；等式右側第二項為非絕熱加熱對位渦局部變率的貢獻；等式右側第三項則是摩擦力的效應。

資料處理過程中，時間及空間的差分計算使用中央差分格式，邊界之格點計算結果不納入分析。位渦守恆方程式中摩擦效應之估計因資料不夠全面，同時考量其物理過程尚難以完全掌握，故在數值運算誤差遠低於其他作用項之前提假設下，透過位渦局部變率與平流、非絕熱效應之差值代表之。

四、個案分析

蘇迪勒颱風起源自 2015 年 7 月 28 日位於馬紹爾群島東北方洋面上之低壓區 [7]。7 月 30 日的環境配置描述了系統發展初期有助系統增長的適宜大氣條件：熱帶性低氣壓

的中層 (315K 等熵面) 中心位於倒槽所在位置，槽前處於正位渦趨勢，亦位於正位渦平流範圍 (圖 1(b))；地面系統中心附近高層大氣之渦度平流位於正值區，且在 7 月 30 日 06UTC 開始圍繞地面中心分布 (圖略)。

在此同時，地面 (300K 等熵面) 中心西側呈現高值正位渦趨勢 (圖 1(a))，由等熵位渦方程式中其他分項分布研判，地面摩擦項為主要貢獻的因子 (圖 2(c))。另一方面，由圖 1(c) 與圖 2(b) 的分析顯示：地面正位渦平流區及中層非絕熱加熱正值分布開始隨著氣流圍繞系統中心周圍發展。大氣中層系統中心西側出現局部正位渦趨勢與正位渦平流區，符合當時系統西進之路徑；此外，系統中心雖然受到非絕熱加熱正值區的包圍，然由圖形分布觀之，絕大部分被摩擦力效應所抵銷 (圖 2(d))。

蘇迪勒颱風前身的熱帶低壓系統高層雖然受到反氣旋式環流西側的控制，與較低層大氣的氣流形成風切，但此項不利其發展的配置被高層的強烈輻散所削弱 (圖略)。因此，在低層顯著摩擦效應、低至高層均存在有利的平流作用推波助瀾之下，此熱帶低壓即於 30 日晚間 12UTC 升格為輕度颱風蘇迪勒。

8 月 1 日，蘇迪勒颱風進入第二次的增強階段，由當日 06UTC 的位渦收支方程式分析中 (圖 3)，可見中層系統中心西側與東側所分別對應之正位渦趨勢與負位渦趨勢強度顯著增強，呈現偶極 (dipole) 配置。此項變化的主要來源起自於位渦平流與非絕熱效應的共同作用。

地面的系統中心亦為正位渦趨勢所盤據，並與正位渦平流中心重合，其南側的非絕熱效應貢獻顯著。期間，摩擦作用有利於系統發展的正值區域開始在系統中心周圍組織；在衛星雲圖中，「颱風眼」亦於此時形成。

中央氣象局在當日 12UTC 將其升格為中度颱風 [7]。由圖 4 低、中、高層風場分析可以發現高層中心位於倒槽之西側，中低層的流場為一致且強勁的氣旋式環流；是故，此微弱風切的配置為蘇迪勒颱風的進一步增強提供了良好的環境條件。

8 月 2 日 00UTC，地面系統中心的非絕熱增益效應雖然仍強，但摩擦力所產生的負貢獻卻主宰了位渦趨勢的分布 (圖 5)。有利於系統發展的正摩擦效應顯得較為零星且落於距離中心較遠的位置，先前雲圖中可見的眼牆於此時崩塌而不再顯著。

此種不利的配置很快的因為中層氣旋式高風速區的內縮而消失。8 月 2 日 06UTC 開始，地面及中層大氣因摩擦產生的正效應再次組織起來，配合一直伴隨在中心周遭的正位渦平流作用，使得帶狀的正位渦趨勢區隨著流場圍繞著中心重新建立 (圖 6(a))。值得一提的是，在前期發展歷程中於大氣底層為蘇迪勒颱風提供正向貢獻的非絕熱效應，此時卻在中心呈現負值分布 (圖 6(c))。

由衛星雲圖觀察，3 日正值蘇迪勒颱風歷經第一次的眼牆置換過程，並於當日形成一清晰的颱風眼；若考慮當時的綜觀環境的運動場條件觀之，並無激發此項變化之機制，故應可歸咎於系統本身內在結構之調整所致。若著眼於中層大氣的環境演變，發現在進入眼牆置換循環之前，非絕熱效應逐漸在系統中心周圍構成偶極配置 (圖 7)，而此偶極分布的態勢正是加速氣旋式環流的主要機制，顯見颱風為了脫離不利環境條件所發展出來的眼牆更替週期與系統中層的非絕熱加熱作用有相當大的關係。是日，蘇迪勒颱風的強度在 Dvorak 分析中達到「7.0」的評級，此後系統強度仍持續快速增長 [7]。

4 日凌晨 2 時，經聯合颱風警報中心評估，颱風蘇迪勒強度增至 Saffir-Simpson 颶風

等級中「5級颱風」的最高級別，成為2015年直至當時為止，西北太平洋中最強的熱帶風暴[7]。

五、結論

綜合以上的分析可知，在蘇迪勒颱風發展的初期，地面摩擦效應顯著，為地面正位渦趨勢的主要貢獻者，搭配中層位於系統西側之位渦平流正值區及中心周圍的非絕熱加熱作用，使得原來的熱帶性低氣壓獲得進一步的增長。

第二階段的發展過程中，系統中層附近的旺盛位渦平流作用與非絕熱加熱說明了蘇迪勒颱風可觀的對流雲系爆發現象。此階段所出現的第一次眼牆置換特徵始於地面系統中心局部位渦趨勢負值區的出現。由於大氣底層在系統中心附近的非絕熱效應仍然顯著，因此可以推測其主因為摩擦力的作用所致。隨著非絕熱加熱效應轉移至系統中層一帶，蘇迪勒颱風氣旋式環流高速區逐漸向中心推進，近地面大氣的摩擦效應與位渦平流分布再度於中心周圍組織起來，亦完成了眼牆更替的一個週期。藉著上述的過程，蘇迪勒颱風的強度更推向另一層高峰。此外，大氣中層局部位渦趨勢的偶極分布軸線在整個颱風的生命期中清楚標誌著系統行進的方向，可見此項特徵足以為颱風路徑的預報提供一相當有效的指標，亦為未來的相關研究提供了一個可能的方向。

六、參考文獻

[1]中央災害應變中心，蘇迪勒颱風災害應變處置報告第9報（臺灣：中央災害應變中心，2015），頁1~5。
[2] Rossby, C. G., 1937: Isentropic analysis. Bull. Amer. Meteor. Soc, 18, 201-209.
[3] Namias, J., 1940: Air mass and isentropic analysis. American Meteorological Society

Milton, MA.

[4] Platzman, G. W., 1949: The motion of barotropic disturbances in the upper troposphere. Tellus, 1, 53-64.
[5] Hoskins, B., M. McIntyre, and A. W. Robertson, 1985: On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 111, 877-946.
[6] Holton, J. R., 2004: An introduction to dynamic meteorology, Academic Press, International Geophysics Series Volume 88, Fourth Edition, 535 pp.
[7]維基百科，強烈颱風蘇迪勒（2015年）。

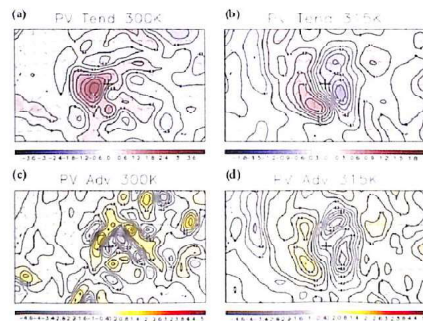


圖 1. 2015年7月30日06UTC等熵位渦方程式收支分布。(a)、(c)分別為300K等熵面上之局部位渦趨勢與位渦平流分布；(b)、(d)分別為315K等熵面上之局部位渦趨勢與位渦平流分布。各國中央“+”號代表颱風中心位置，繪圖範圍以颱風中心為基準，東西橫跨30個經度，南北擴及15個緯度。

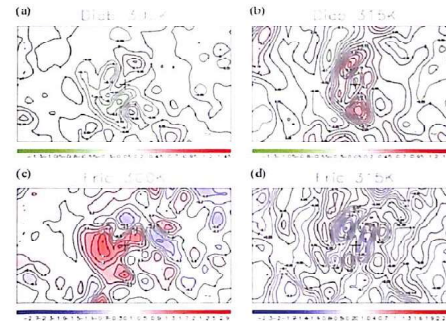


圖 2. 2015年7月30日06UTC等熵位渦方程式收支分布。(a)、(c)分別為300K等熵面上之非絕熱與摩擦效應分布；(b)、(d)分別為315K等熵面上之非絕熱與摩擦效應分布。餘同前圖。

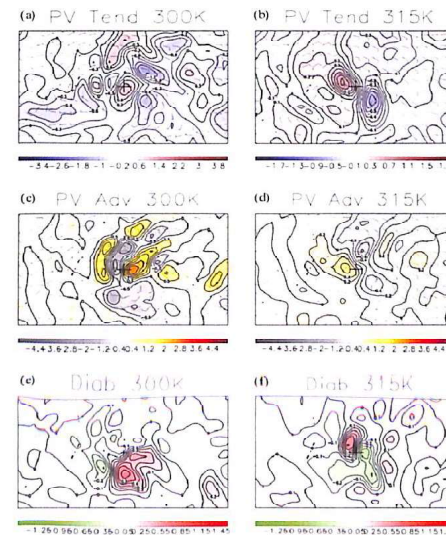


圖 3. 2015年8月1日06UTC等熵位渦方程式收支分布。(a)、(c)、(e)分別為300K等熵面上之位渦趨勢、位渦平流與非絕熱效應分布；(b)、(d)、(f)分別為315K等熵面上之位渦趨勢、位渦平流與非絕熱效應分布。餘同前圖。

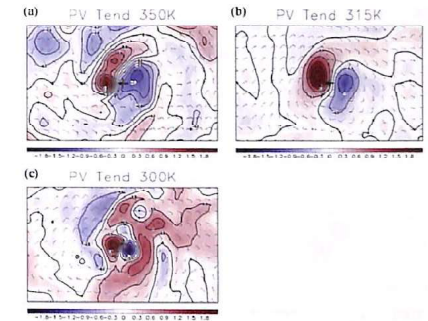


圖 4. 2015年8月1日06UTC等熵位渦方程式收支分布。(a)、(c)、(e)分別為300K等熵面上之位渦趨勢、位渦平流與非絕熱效應分布；(b)、(d)、(f)分別為315K等熵面上之位渦趨勢、位渦平流與非絕熱效應分布。餘同前圖。

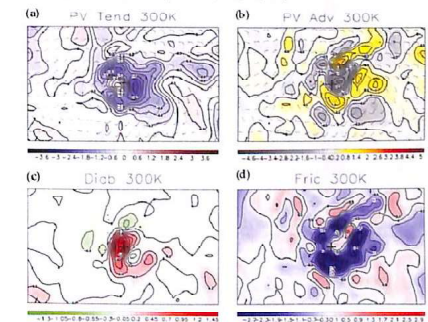


圖 5. 2015年8月2日00UTC 300K等熵位渦方程式收支分布；(a)等熵位渦趨勢；(b)位渦平流效應；(c)非絕熱效應；(d)摩擦效應。餘同前圖。

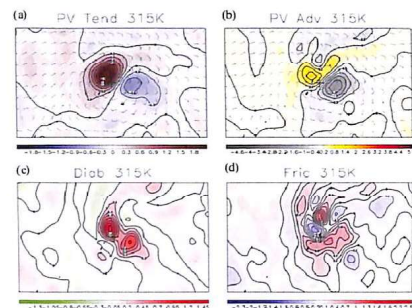


圖 6. 2015 年 8 月 2 日 06UTC 315K 等熵位渦方程式收支分布：(a)等熵位渦趨勢；(b)位渦平流效應；(c)非絕熱效應；(d)摩擦效應。餘同前圖。

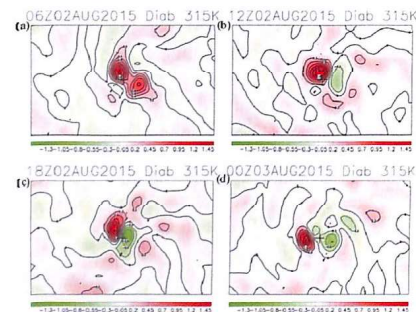


圖 6. (a) 2015 年 8 月 2 日 06UTC、(b) 2015 年 8 月 2 日 12UTC、(c) 2015 年 8 月 2 日 18UTC、(d) 2015 年 8 月 3 日 00UTC 非絕熱效應分布。餘同前圖。

The potential vorticity budget of Typhoon Soudelor (2015)

Shih-Chung Tai

Aero-Electronic Engineering, Air Force Institute of Technology, Taiwan

ABSTRACT

The isentropic potential vorticity equation was applied to investigate the development of Typhoon Soudelor (2015) in the present research. During the nascent stage, the frictional effect near the surface provided dominant contributions to the positive potential vorticity tendency which indicates the enhancements of the tropical depression. Meanwhile, the positive potential vorticity advection and the diabatic heating over mid-level supported the strengthening process as well. On the other hand, the importance of the diabatic effect for the eyewall replacement cycle was revealed. It not only accelerated the cyclonic circulation around the center of Soudelor, but also reorganized the patterns of the local potential vorticity tendency near the surface, which caused the second phase of enhancement of Typhoon Soudelor.

Key words : isentropic potential vorticity, typhoon, eyewall replacement cycle