

Combination of satellite and radar data analysis of the structure of typhoon rainbands

Yao-Chung Chuang¹ Nan-Ching Yeh²

¹Department of Aviation Communication & Electronics, Air Force Institute of Technology

²Department of Military Meteorology, Air Force Institute of Technology

Abstract

Weather balloons carried with radiosonde through are an important means to keep the atmosphere depends on the vertical structure, but also reverse the perturbation pressure field indispensable information. During Typhoon Morakot invade Taiwan, Makung and Pingtung radiosonde stations because radiosondes supplied out of stock, so the job soundings southern key locations all stop, in order to complement the radiosonde observations. We use satellite retrieval of atmospheric temperature and humidity profile data instead of the shortcomings of traditional sounding data, and use the information to make up combined with radar data, obtained by the perturbation pressure field of typhoon rainband.

Keywords: typhoon rainband

結合衛星與雷達資料分析颱風雨帶之結構

莊耀中¹ 葉南慶²

¹空軍航空技術學院航空通訊電子系

²空軍航空技術學院軍事氣象系

摘要

無線電探空儀透過氣象氣球搭載升空，是守視大氣垂直結構的重要手段，也是反求擾動壓力場不可缺乏的資料。但是在莫拉克颱風侵台期間，馬公和屏東無線電探空站因無線電探空儀耗材已無庫存，因此南部地區關鍵地點的探空觀測作業全部停止，為了補足探空觀測資料，本文利用衛星資料反演大氣溫濕剖面資料代替傳統探空資料不足，並利用補足資料與雷達資料結合，求得颱風雨帶的擾動壓力場。

關鍵字：颱風雨帶

1. 前言

馬公和屏東無線電探空站，因耗材已無庫存，因此在此莫拉克颱風侵台期間，這二處是臺灣海峽與南部地區關鍵地點，探空觀測作業全部停止，顯示當時南部地區沒有探空資料；另外，中央氣象局板橋與花蓮空站並在8月6日06:00UTC 至8月9日12:00UTC 四天期間(氣象局預報中心發佈陸上颱風警報)，按照觀測準則進行一天四次探空加密觀測，增加了06:00UTC 和18:00UTC 兩次探空作業，惟其中8月7日06:00UTC 花蓮探空站施放失敗而闕如。東沙島委託海軍作業探空站，因耗材經費與人力不足問題，僅維持每天00:00UTC

一次的探空觀測，颱風侵襲期間亦然。衛星所搭載的紅外線之輻射強度觀測儀對大氣垂直溫、溼剖面反演技術，將可彌補探空測站的資料量不足，繞極軌道衛星掃描臺灣地區的時間跟探空氣球作業時間接近，因此藉由氣象衛星反演的大氣垂直溫、溼剖面資料將可補足探空氣球在資料量及涵蓋面積的不足。雷達資料發現莫拉克颱風有長生命期的線性雨帶在沿海地區發展，造成南台灣地區大量降雨；在陳等(2010)[1]提到莫拉克颱風侵台時持續不斷的豪雨重創南台灣，可能的原因為西南季風提供源源不絕的水氣和莫拉克颱風環流共伴，在8月6日至10日，於台灣海峽南部產生額外

輻合作用，激發強烈對流系統，在此一強輻合區內，有東西走向強降雨回波不斷生成，主要是因為颱風北風環流與西南氣流輻合作用所產生，對流系統不斷自海上移入台灣西南部陸地，當對流胞通過時即有較強的雨勢發生，造成台南以南地區從沿海至山區的強降雨事件的發生。Wei et al. (2012)[2]利用都卜勒雷達資料分析西南氣流及颱風環流之間相互作用的中尺度特徵，劇烈降雨事件發生原因在於二者相互作用造成。因為侵台期間南部地區缺少探空儀，導致探空資料不足，為了補充南部地區環境場的運動場特徵，本文增加衛星反演溫度剖面資料，並結合雷達資料分析莫拉克颱風雨帶的影響。

2. 資料介紹

本研究利用衛星資料反演大氣溫濕剖面資料代替傳統探空資料不足，Aqua 衛星為繞極軌道衛星，約一到兩天可觀看整個地球一次，掃描寬度為 2330 公里，Aqua 衛星通過台灣時間為 1700 至 1900 UTC 和 0500 至 0700 UTC，與傳統探空資料時間相差不大。AIRS 意為大氣紅外線探測儀，是搭載在 Aqua 衛星上的一個重要感測器，AIRS 所觀測得之資料如全球大氣溫度、濕度和溫室氣體含量可以提高天氣預報和氣候過程的理解。AIRS 包含 2378 個紅外線頻道和 4 個可見光/近紅外線頻道，因為反演頻道比較多可以獲得高度精確的溫度分佈。其中 AIRS 的大氣剖線產品(AIRX2RET)裡面包含了幾個重要參數：大氣溫度、水氣混合比和臭氧含量。不管白天和晚上，AIRX2RET 在陸地和海洋上均可以進行反演，但會受到劇烈降雨影響而無法反演，反演資料的空間解析度為 50 公里，大氣垂直溫度部分之均方根誤差(root-mean-square error, RMSE)可達每公里厚度層 1K 以下，相對溼度之 RMSE 可達每 2 公里厚度層 15 % 以內的高品質反演成效。圖 1 為 2009 年 8 月 8 日 1817 UTC 的 1000 hPa 溫度圖，受到劇烈降雨影響台灣本島沒有資料，但是在海峽北部和南部

有最靠近本島資料，可以補充南部外海資料不足。

利用空軍在馬公 C-波段的雙偏極化氣象雷達和中央氣象局在七股 S-波段的都卜勒氣象雷達資料來分析颱風雨帶，馬公雷達與七股雷達距離 64 公里，其中馬公雷達為空軍氣象聯隊新建置 C-波段的雙偏極化雷達，於 2009 年 4 月 1 日開始啟用，為台灣地區首部作業化之雙偏極化都卜勒氣象雷達(圖 2)，其位置處於 119.63°E 、 23.56°N ，標高 48 公尺，波長 5.309cm，掃描仰角計有 0.5° 、 1.4° 、 2.4° 、 3.4° 、 4.3° 、 6.0° 、 9.9° 、 14.6° 、 19.5° 、 25° 共 10 層，完成一次體積掃描(Volume Scan)時間約需 4 分 33 秒，每七分半鐘執行一次。共計可獲得 ZH (回波)、VR (徑向風)、SW (波譜寬)、ZDR (差異反射率)、 ρHV (相關係數)、KDP (比差異相位差)及 ΦDP (差異相位差) 等參數。利用觀測得到參數來估算或反演獲得水象粒子的大小、形狀、指向以及熱力相態等訊息，可用於改善降雨率的估算、偵測冰雹、資料的品質管制、水象粒子辨識以及進一步分析雲物理特性。七股雷達為中央氣象局所屬之 S-波段都卜勒雷達，其位於 120.08°E 、 23.15°N ，標高 38 公尺，波長 10.578cm。掃描仰角計有 0.5° 、 1.4° 、 2.4° 、 3.4° 、 4.3° 、 6.0° 、 9.9° 、 14.6° 、 19.5° 共 9 層，每七分半鐘執行一次掃描。可獲得之參數為 ZH (回波)、VR (徑向風) 以及 SW (波譜寬)。

3. 研究方法

都卜勒風場合成方法參考 Ray et al. (1978、1979) [3,4]，而垂直運動場則是先積分非彈性連續方程式，再藉由變分法調整而得。首先先使用由 NCAR(National Center for Atmospheric Research)發展的 SOLOII 進行地形和海面雜波去除，並且濾去在觀測時，其風場信號內插到較高解析度時產生的錯誤資料，接下來針對風場去折疊為正確數值，然後使用 REORDER 軟體將資料從雷達座標(r, θ, ϕ)內插到直角座標(x, y, z)，其中網格點資料的設定為水平解析度為

1.5 km，垂直解析度為 0.5 km，自 0.5-15 km 共 30 層，由於颱風雨帶系統移動速度快速，需經過系統平移以獲得更準確的合成風場，平移方法可以在 REORDER 中的"REFERENCE TIME"設定基準時間，並在"ADVECTION"設定颱風雨帶的移動方向與速度後，執行 REORDER 軟體即可完成雷達資料的內插和平移。然後利用 CEDRIC(Custom Editing and Display of Reduced Information in Cartesian space)對資料作平滑和修補，最後將處理好的資料進行合成和應用。

本文有關反求擾動壓力場的方法基本上和 GaL-Chen(1978)[5]及 Roux(1984)[6]的作法相同。運動方程可以寫成如下：

$$\frac{\partial p'}{\partial x} = -\bar{p}\left(\frac{du}{dt} + f_1\right) + D_x + F \quad (1)$$

$$\frac{\partial p'}{\partial y} = -\bar{p}\left(\frac{dv}{dt} + f_2\right) + D_y + G \quad (2)$$

$$\frac{\partial p'}{\partial z} = -\bar{p}\left[\frac{dw}{dt} + f_3 - g\left(\frac{\theta'}{\bar{\theta}} + 0.61q_v - q_l\right)\right] + D_z \quad (3)$$

其中 $f_1 = -2\Omega(v \sin \phi - w \cos \phi)$ ， $f_2 = -2\Omega u \sin \phi$ ， $f_3 = 2\Omega u \cos \phi$ ， Ω 為地球自轉角度， ϕ 則為緯度， $\bar{p}$ 和 $\bar{\theta}$ 為環境的密度和位溫， p' 和 θ' 是擾動壓力場和溫度場， q'_v 為水氣混合比， $q_l = q_c + q_r$ ， q_l 、 q_c 、 q_r 分別為液態水、雲滴和雨滴的混合比。同時可以定義虛雲位溫 θ'_c ，

$$\theta'_c = \theta' + (0.61q'_v - q_c)\bar{\theta} \quad (4)$$

最後， D_x ， D_y ， D_z 分別表示三個方向的湍流擴散項。(1)和(2)式的F，G可以由雷達合成的三維風場求得，可以寫成：

$$\frac{\partial p'}{\partial x} = F \quad (5)$$

$$\frac{\partial p'}{\partial y} = G \quad (6)$$

由偏微分的理論可知(5)和(6) p' 的解存在於當

$$\frac{\partial F}{\partial y} = \frac{\partial G}{\partial x} \quad (7)$$

成立時。但因為觀測上的誤差使得(7)式幾乎不可能成立，因此只好用最小平方方法求解(5)和(6)式：

$$\iint \left[\left(\frac{\partial p'}{\partial x} - F \right)^2 + \left(\frac{\partial p'}{\partial y} - G \right)^2 \right] dx dy = \min \quad (8)$$

再利用變分法可得壓力場的Poisson方程：

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p'}{\partial y^2} = \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} \quad (9)$$

接著處理 θ'_c ，(3)式的垂直運動方程可寫成：

$$\theta'_c = \frac{\bar{\theta}}{g\rho} \frac{\partial p'}{\partial z} + \frac{\bar{\theta}}{g} \left(\frac{dw}{dt} + f_3 + gq_r - \frac{1}{\rho} D_z \right) \quad (10)$$

q_r 可以由回波強度估計，根據 Austin and Geoties(1979)[7]可表示成

$$q_r = \frac{1.15 \times 10^{-6} Z^{0.76}}{\bar{\rho}} \quad (11)$$

將(10)式對x，y微分可得 $\frac{\partial \theta'_c}{\partial x} = F'$ ， $\frac{\partial \theta'_c}{\partial y} = G'$

其中

$$F' = \frac{\bar{\theta}}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{dw}{dt} + q_r g \right) + \frac{\bar{\theta}}{\rho g} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial p'}{\partial x} \right) + \frac{C_v}{C_p} \frac{\bar{\theta}}{\rho} \left(\frac{\partial p'}{\partial x} \right) \quad (12)$$

$$G' = \frac{\bar{\theta}}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{dw}{dt} + q_r g \right) + \frac{\bar{\theta}}{\rho g} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial p'}{\partial y} \right) + \frac{C_v}{C_p} \frac{\bar{\theta}}{\rho} \left(\frac{\partial p'}{\partial y} \right) \quad (13)$$

同樣地 F' ， G' 可以由風場及反演擾動壓力場而得；接著類似 p' 的手法可得到 θ'_c 的Poisson方程：

$$\frac{\partial^2 \theta'_c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta'_c}{\partial y^2} = \frac{\partial F'}{\partial x} + \frac{\partial G'}{\partial y} \quad (14)$$

(9)式和(14)式可由連續弛緩法和 Neumann 邊界條件求得 p' 和 θ'_c 。但是由(9)式計算出來的 p' 並非唯一解，事實上 $p' = p'(x, y, z_0)$ ，而 $p'(x, y, z_0) + c(z_0)$ 也是(9)式的解。除去常數 $c(z_0)$ 的方法如下：定義 $\langle p' \rangle$ 為在計算面積內 p' 的水平平均值，則 $p' - \langle p' \rangle = p' + c - \langle p' + c \rangle$ ，故 $p' - \langle p' \rangle$ 是(9)式不含常數 $c(z_0)$ 的唯一解， p' 和 θ'_c 一樣。然而即使求得(9)式和(14)式不含常數 $c(z_0)$ 的唯一解，但這些解並不代表實際的垂直變化，它只是相對值，相對於水平平均的一個擾動值，除非知道 p' 和 θ'_c 在垂直方向的相關。

4. 個案分析

在雷達觀測資料可以了解主要雨帶 B 和線性雨帶 E 發展狀況，8 日 1800UTC 雷達回波圖（圖 3a）發現颱風逐漸北移，主要雨帶 B 和線性雨帶強度 E 減弱，8 日 2100UTC 雷達回波圖（圖 3b）指出颱風遠離，主要雨帶 B 和線性雨帶 E 結合逐漸北移。為了更進一步分析雨帶的中尺度環境場之特徵，利用墾丁和七股氣象雷達資料進行雙都卜勒風場分析，由 8 月 8 日 1801 UTC 雙都卜勒風場資料（圖 4a）顯示雨帶 B 位於颱風環流的西風氣流和西南氣流合流位置，西南氣流持續向北延伸，2101 UTC 雙都卜勒風場資料（圖 4b）顯示雨帶 B 的對流發展有減弱現象，同時，雨帶 E 開始增強並有完整結構，接下來談論的環境氣流已經扣除颱風環流的影響，因為七股雷達位置在雨帶 E 的徑向內側，所以利用七股雷達求得 VAD 風場，表示為颱風環流第三象限的平均風場，氣流分布（圖 4c）顯示西南氣流的南風分量延伸至雨帶 B 位置，在雨帶 B 附近西南氣流風速有降低現象且形成輻合區，最大輻合（ $\sim -1 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ ，圖中顯示為正值是方便觀看）位置在雨帶內側，在雨帶 B 和 E 之間的氣流是比較弱和混亂，表示是西南氣流和西方向或西北西氣流之颱風環流的過渡區，在 2101 UTC（圖 4d）後，西南氣流向北延伸至

雨帶 E 南側，所以颱風環流和環境氣流的邊界在雨帶 E 位置。

為了瞭解西南氣流在大氣穩定度扮演的腳色，應用 AIRS 反演溫度和水氣場探討大氣穩定度，2009 年 8 月 8 日 1817 UTC（圖 5）在南海北方的相當位溫（ θ_e ）場顯示西南氣流上流位置相當位溫隨著高度遞減，估算的數值大於 $-10\text{k}/1000\text{m}$ ，表示環境是不穩定，同時，在 1000 hPa 的比濕超過 22g kg^{-1} ，和在 925 hPa 的比濕超過 20g kg^{-1} ，二者都超過夏天該區域的平均值（ 15g kg^{-1} ）(Willett et al. 2008) [8]，表示西南氣流上流在低層大氣是非常溫暖和潮濕，西南氣流向東北延伸傳送不穩定空氣至台灣西南部沿海，低層不穩定大氣應是雨帶中對流發展和維持的原因。

了解雨帶附近擾動氣壓是有效分析動力機制方式，圖 6 指出在 2150 UTC 時高度 1.5 km 有一個擾動高壓在 E1 徑向內緣，與在雨帶內側的下沉氣流位置（圖略）一致，擾動高壓和下沉氣流明顯的成對出現在低層，Barnes et al. (1991) [9] 也有分析過，此外，另一個擾動高壓在西南氣流上游，並且 E2 位於 2 個擾動高壓之間有風場轉變特徵，因此西南氣流被扭曲並轉為南風，在到達 E1 之前有減弱現象，導致有弱的氣壓梯度在 E1 和 E2 之間，因此，有輻合在此產生，進一步證明在雨帶附近 2 個擾動高壓分布，可以導引當地西南氣流轉向，並加強輻合機制，像是雨帶上 E1 和 E2 的結合。

5. 結論

莫拉克颱風的影響是台灣歷年颱風的前幾名，結合衛星資料與雷達資料分析颱風雨帶，雖然沒有辦法直接證實颱風雨帶影響程度，但是使用雙都卜勒風場和衛星反演之分析結果顯示雨帶上嵌入對流胞發展的過程，當雨帶近乎靜止，嵌入對流胞伴隨西風氣流向東北以 $25\text{--}28\text{ms}^{-1}$ 移動，西南氣流北方邊界在雨帶上流區減弱，並產生強烈輻合，進而引起新對流胞發展，最大絕對值的輻合其強度為 $1.5 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 向東移動，伴

隨對流胞幫忙持續維持雨帶，並且，嵌在西南氣流的獨立對流胞結合雨帶的對流胞，發生在雨帶附近二個擾動高壓分布明顯證明，加強在雨帶中結合的對流胞之輻合機制。

6. 參考文獻

- [1] 陳台琦，唐玉霜，魏志憲，林沛練，廖宇慶，張偉裕，周鑑本，紀博庭，林忠義，2010:莫拉克颱風雷達觀測中尺度雨帶特徵。《大氣科學》，38，39-62。
- [2] Wei, C. H., Hor, T. H., Chuang, Y. C., W., Chen T. C., and Wang, J. L., "Radar Analysis on the Interaction Between Southwesterly Flow and Circulation Associated with Typhoon Morakot (2009)," Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol. 90, pp. 617-628, 2012.
- [3] Ray, P. S., Wagner, K. K., Johnson, K. W. J., Stephens, J., Bumgarner, W. C., and Mueller, E. A., "Triple-Doppler Observations of a Convective Storm," Journal of Applied Meteorology, Vol. 17, pp. 1201-1212, 1978.
- [4] Ray, P. S., Stephens, J. J., and Johnson, K. W., "Multiple-Doppler Radar Network Design," Journal of Applied Meteorology, Vol. 18, pp. 706-710, 1979.
- [5] Gal-Chen, T., "A Method for the Initialization of the Anelastic Equations: Implications for Matching Models with Observations," Monthly Weather Review, Vol. 106, pp. 587-697, 1978.
- [6] Rotix, F., Testud, J., Payen, M., and Pinty, W., "West African Squall Line Thermodynamics Retrieved from Dual Doppler Radar Observation," Journal of the Atmospheric Sciences, Vol. 41, pp. 3104-3121, 1984.
- [7] Austin, P. M. and Geoties, S. G., "Rain Drops Sizes and Related Parameters for GATE," Journal of Applied Meteorology, Vol. 18, pp. 569-575, 1979.
- [8] Willett, K. M., Jones, P. D., Gillett, N. P., and Thorne, P. W., "Recent changes in surface humidity: Development of the HadCRUH Dataset," Journal of Climate, Vol. 21, pp. 5364-5383, 2008.

- [9] Barnes, G. M., Gamache, J. F., LeMone, M. A., and Stossmeister, G. S., "A Convective Cell in a Hurricane Rainband," Monthly Weather Review, Vol. 119, pp. 776-794, 1991.

7. 圖表彙整

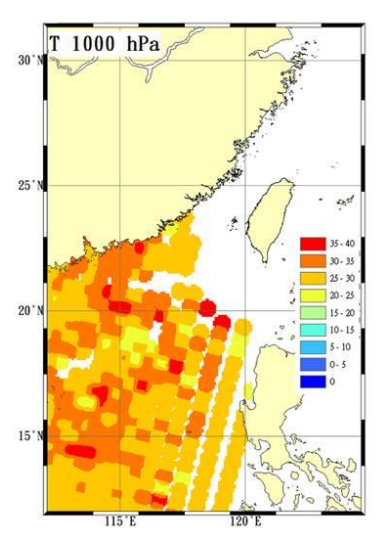


圖1. 2009年8月8日1817 UTC 1000 hPa溫度圖，色階為溫度(°C)。

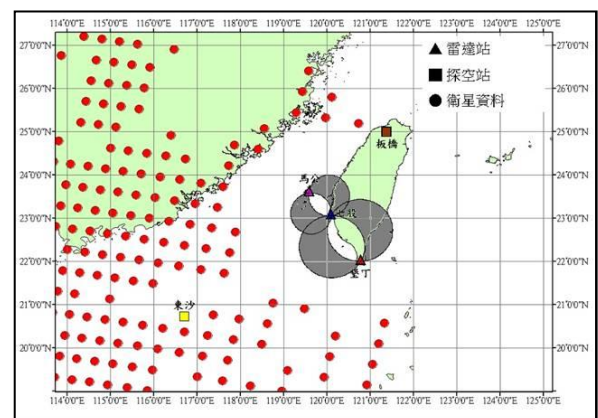


圖2. 本研究資料相對位置圖。三角形為雷達站位置。正方形為探空站位置。圓形為衛星反演溫度資料的位置。陰影區為雙都卜勒風場合成範圍。

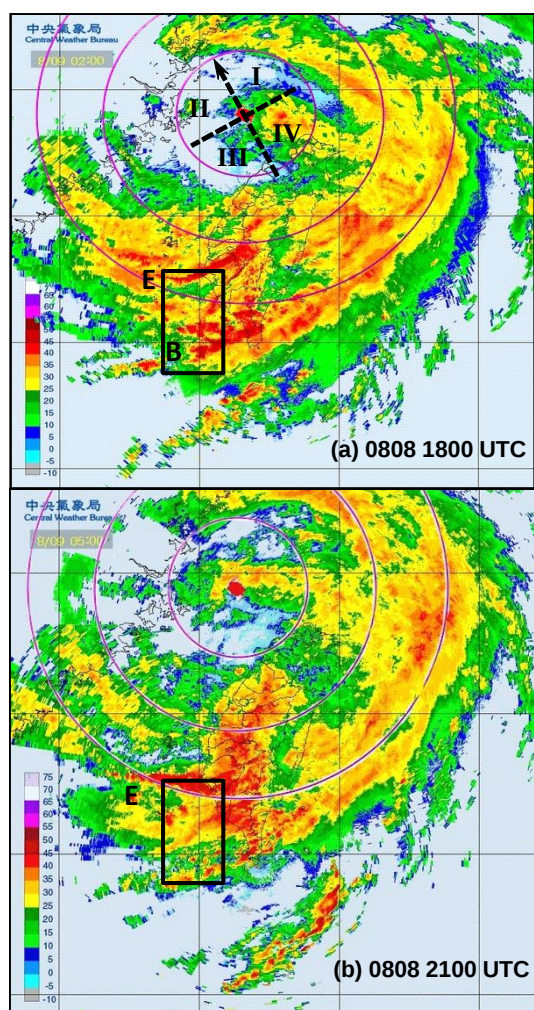


圖3. 中央氣象局雷達回波圖。颱風符號位置為中央氣象局定位颱風中心。紅色圓圈為以徑向距離每100km一圓，黑色方框為研究範圍。(a) 8月8日1800UTC，(b) 8月8日2100UTC。

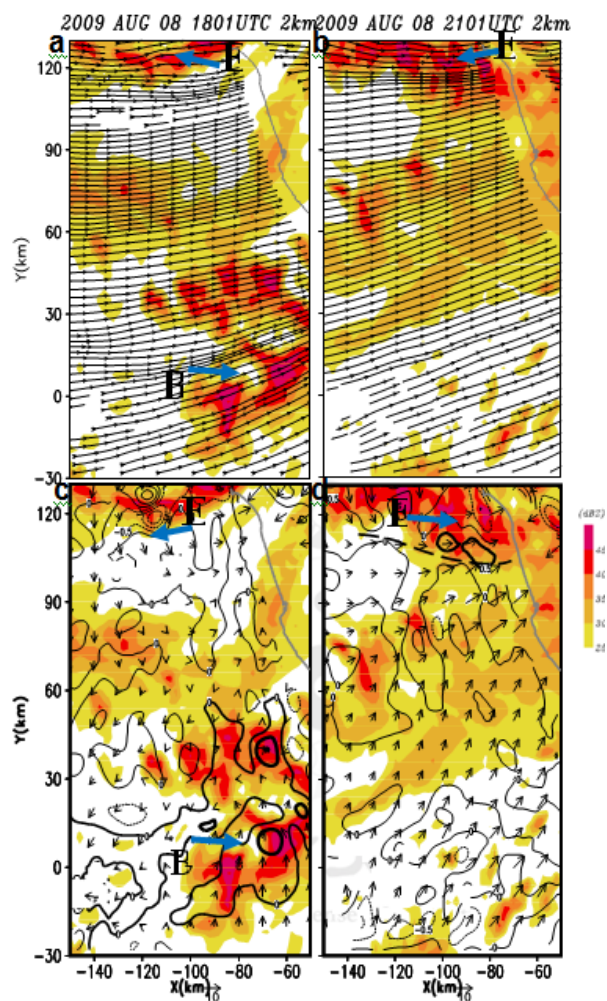
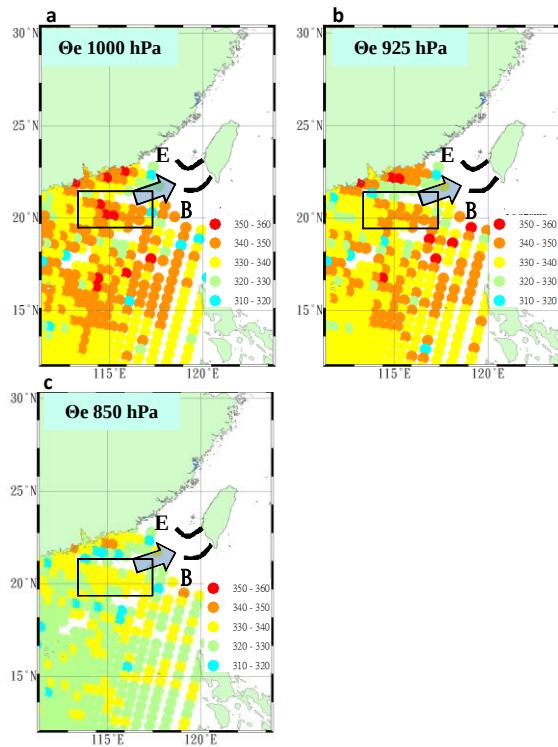


圖4. 2009年8月8日墾丁與七股雷達2 km高度雙都卜勒合成風場圖。(a) 1801 UTC和 (b) 2101 UTC。(c)和 (d)與(a)和(b)相同時間。利用七股雷達估算VAD風場移除颱風環流貢獻。坐標軸中心為墾丁雷達位置。橫座標與縱座標代表與雷達站之距離。填色代表降水回波，箭頭代表風場，黑色等值線代表輻合場，黑色加粗等值線代表輻合場小於 $-0.5 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ ，灰色實線代表海岸線，(d)的虛線代表西南氣流和西風轉換位置。



馬公雷達站之距離。字母“H”為擾動高壓。字母“L”為擾動低壓。

圖5. 2009年8月8日1817 UTC時AIRS資料反演相當位溫 θ_e (K) 分布圖。(a)1000hPa, (b)925hPa 和 (c)850hPa。黑色實線代表與雨帶B和E位置, 箭頭代表西南氣流方向。黑色方框代表西南氣流上游區(400 km $\times$ 200km)。

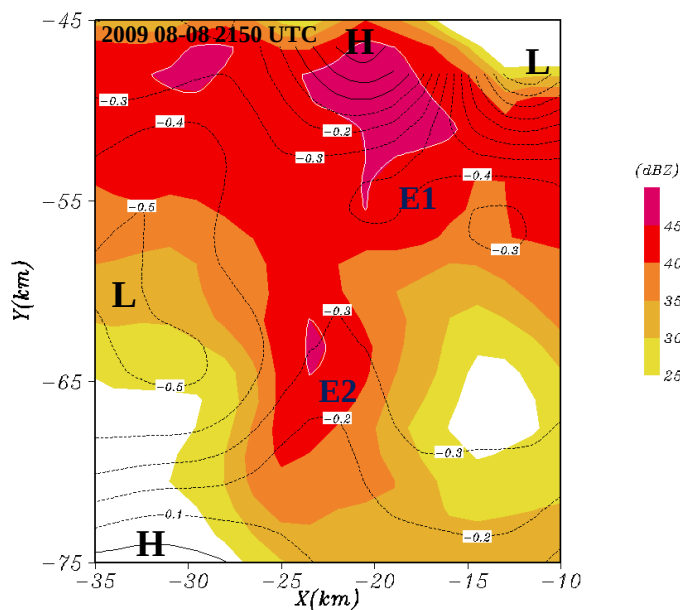


圖6. 2009年8月8日2150 UTC時1.5 km馬公和七股雷達資料反演的擾動壓力(hPa)場圖。填色代表降水回波(dBZ), 等值線為擾動壓力場。橫座標與縱座標代表與

