

# 利用飛機實測資料分析TAMEX IOP10 對流雲帶的動力場和動量傳送

何台華 張茂興

中正理工學院應用物理系

周仲島

國立台灣大學大氣科學系

## 摘 要

民國76.(1987年)6月16日23時(中原標準時)有一南北排列的帶狀對流雲系伴隨著熱帶渦旋發生在台灣東南外海,第一次到遠東地區出任務的NOAA P-3氣象飛機對此雲帶做5層共10次的橫向穿越。本研究是利用偏北穿越雲帶的飛機實測資料組合 $u$ 、 $v$ 、 $w$ 、 $p'$ 、 $\theta_e$ (相當位溫)和 $q_L$ (液態水含量)的垂直剖面以及計算雲中動量和熱量的垂直輸送,以進行診斷分析和探討此雲帶內的氣流走向和動力、熱力結構,並建立適當的概念模式。

研究結果發現:此中尺度對流雲帶的外圍有低層東南風帶來充沛的溫濕空氣,而高空則有乾燥的西風吹來,構成對流發生的有利環境,而且對流雲帶前導線(Leading Edge)後的強烈上升氣流區和中尺度低壓、液態水集中區和暖心的位置均相當配合,約在前導線直接後方,高度介於2~3公里間的雲帶中,顯示潛熱釋放和氣壓梯度力是此雲帶持續發展的重要機制,同時高度2公里以上有向上的動量傳送( $\overline{u'w'}$ 和 $\overline{v'w'}$ 均為正值),也說明動量傳送對中尺度對流雲系有相當程度的影響。以上結果與LeMone(1988)的研究結果大致相同(利用同一天但偏南穿越同一雲帶的飛機實測資料)。

## 一、前言

熱帶地區帶狀對流系統常伴隨著豐沛降水,但也經常導致嚴重災害。為了使對流參數能有效且準確的運用於大、中尺度模式之中,必須對深對流雲帶之熱力與動力結構做更進一層之了解,所以雷達、衛星與飛機的直接觀測就顯得相當重要了。對於熱帶地區帶狀系發展和內部結構的研究是透過1974年全球大西洋熱帶大氣研究實驗(GATE),利用衛星、雷達與飛機觀測西非熱帶槽上方之雲系而獲致初步的瞭解。

目前已了解積雨雲在大尺度型態之組織結構,

通常成線狀排列(Houze and Betts, 1981),所以很自然的將動量分為平行( $V$ )與垂直( $U$ )對流線之兩分量。Barnes and Sieckman(1984)利用GATE之飛機資料,證實輻線與緩慢移動之帶狀雲系(移動速度小於 $3\text{ m/S}$ ),在結構上有多處相同點,但在前導線(leading edge)垂直方向,相對於移動雲帶之風速在數值上有些差距。LeMone(1983)利用五架次飛行不同高度的飛機資料作中尺度合成,分析1974年9月14日GATE之對流帶狀雲系,發現橫向於雲帶之動量通量傳送與

混合長度理論 (Mixing length theory) 預測的結果正好相反。又發現動量通量是在雲帶活躍成長區向上傳送，公里尺度之浮力為形成對流上升加速之主因，而向帶狀雲後水平加速之機制為中尺度低壓。對阿拉伯海上方熱帶雲系結構之研究，首先由 Bunker and Chaffee(1969) 利用飛機資料分析 1963 年西南季風產生之對流帶狀雲系，內部結構，而 1979 年夏季季風實驗計劃 (SMONEX) 之完成提供更詳盡的觀測資料，可供研究使用。Grossman and Durran(1984) 以印度半島西方之 Ghat 山脈為機制，探討其與西南季風在東阿拉伯海上空引發深對流的關係。Hor(1988) 利用 NCAR Electra 飛機資料，研究 1979 年 6 月 24 日發生在東阿拉伯海上之帶狀對流雲系，結果發現不論在中緯度或熱帶地區之雲帶結構具相似性，即在雲帶之前導線部份為成長上升區，而於成長區後方為下沉氣流區。

1987 年台灣地區中尺度實驗計畫 (TAMEX) 的主要任務之一為觀測中尺度對流系統 (MCS)，藉由首次到遠東地區出任務之 NOAA P-3 氣象飛機，在 TAMEX 期間執行一些特殊之飛行型態 (flight patterns)，經過直接之原位量測 (in-situ measurements) 傳統氣象因子與使用都卜勒雷達觀測，蒐集到可供對流系統運動特性研究之資料。根據飛機上 C 段 (波長 5.59 cm) 雷達觀測，於中原標準時間 1987 年 6 月 16 日 22 時 40 分至 6 月 17 日 01 時在台灣東南方海岸外有南北向排列之中尺度帶狀對流雲系，長和寬各約 100km 和 25 km，雲帶以小於 5 m/S 之速度向東移動，雲帶北方為一層狀雨區。在此段時間內，P-3 飛機以五次不同的高度 (高度由 380 m 至 5500 m，參閱表一) 穿越此對流雲帶。本文研究的目的是利用偏北穿越雲帶的飛機實測資料，如  $u$ 、 $v$ 、 $w$ 、 $T_s$  (海面溫度)、 $P_s$  (靜壓) 和  $q_L$  (液態水含量) 等，組合  $u$ 、 $v$ 、 $w$  和  $p'$  的中尺度垂直剖面圖及計算動量的垂直傳送，以詳細瞭解此雲帶內部的氣流走向和動力、熱力結構以及探討其生長的主要機制。

level #	Mean Flight Altitude(km)	Time Duration (UTC)	Flight-Leg Length(km)	Updraft Core Diameter(km)
5	5.48	163700-164221	45	1.73
4	2.95	155649-160201	42	8.66
3	1.49	151242-151819	45	3.97
2	0.77	173501-174140	53	0
1	0.38	172507-173146	53	0

表 1. 1987 年 6 月 16 日 (TAMEX IOP 10) 對流雲帶合成時之飛行高度、時間、飛行航程及升流核心大小。

## 二、資料處理

NOAA P-3 飛機水平飛行速率為 8km/min，每秒鐘可量取一組的觀測資料。為便於計算  $u$ 、 $v$ 、 $w$  與  $p'$  之剖面結構，定 X 軸與雲帶垂直，且指向東方，Y 方向指向正北，Z 軸則向上。處理資料時，首先將同一飛行高度所量度之資料取平均值，然後將超過 3 個標準差 (Standard deviation) 之資料去除。由 Jorgensen(1984) 的描述知道平均水平風場、垂直風場和靜壓之精確度各為 1.0 m/S、0.5 m/S 和 0.2mb。

為了解釋中尺度雲帶的運動特性和內部結構，必須將中尺度機制突顯出來。Jorgensen and LeMone(1989) 發現 TAMEX 期間中尺度雲帶升流核心 (updraft core) 的涵蓋區 (coverage) 皆小於 6 km。為了使問題單純化，設定 6 月 24 日個案的升流核心大小為 6 km，因飛行速率大約為 133.3 m/S，所以利用 45 秒之資料作滑動平均 (running mean)，以顯示出 6 km 尺度的氣象因子。

在此我們將運動分為平均項 ( $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 、 $\bar{w}$ ) 與擾動項 ( $u'$ 、 $v'$ 、 $w'$ )，如  $u$  動量之垂直通量由下列式子計算之：

$$\overline{u'w'} = \frac{1}{n} \sum u' w'$$

其中  $n$  是飛行長度中可用資料 (good data) 之數目，在計算過程中少量較差資料會被去除，但並不

影響整體之精確度 ( LeMone, 1983 )。此外，在計算垂直速度的均值時可能會出現極少數偏高之誤差，但這是次要的問題，因其可藉由規格化 ( normalization ) 淡化之 ( Zipser and LeMone, 1980 )。如此就可以相對於前導線將資料作中尺度合成，但是必須先做前導線定位的工作，根據 LeMone ( 1983 ) 對前導線特徵的定義：前導線上有紊流發生，其強度  $u'w'$ 、 $w'^2$  和  $w'^3$  突然增加且持續 2 至 3 km 以上。此外，前導線之斜率在中尺度合成中亦相當重要，可藉由 P-3 飛機載負之二氧化碳輻射儀所觀測之海面溫度估其斜率，本個案之雲帶前導線斜率約為 54 度。

### 三、結果的分析與討論

#### (一) 直接觀測之雲帶結構

圖 1 為 1987 年 6 月 16 日個案原位量測獲得的沿 X 軸方向之  $u$ 、 $v$ 、 $w$ 、 $p'$  (擾濕氣壓)、 $q_L$  及  $\theta_e$  (相當位溫) 中尺度 ( 6 km ) 剖面圖，結果發現此對流雲帶的外圍低層為東南風，帶來充沛的

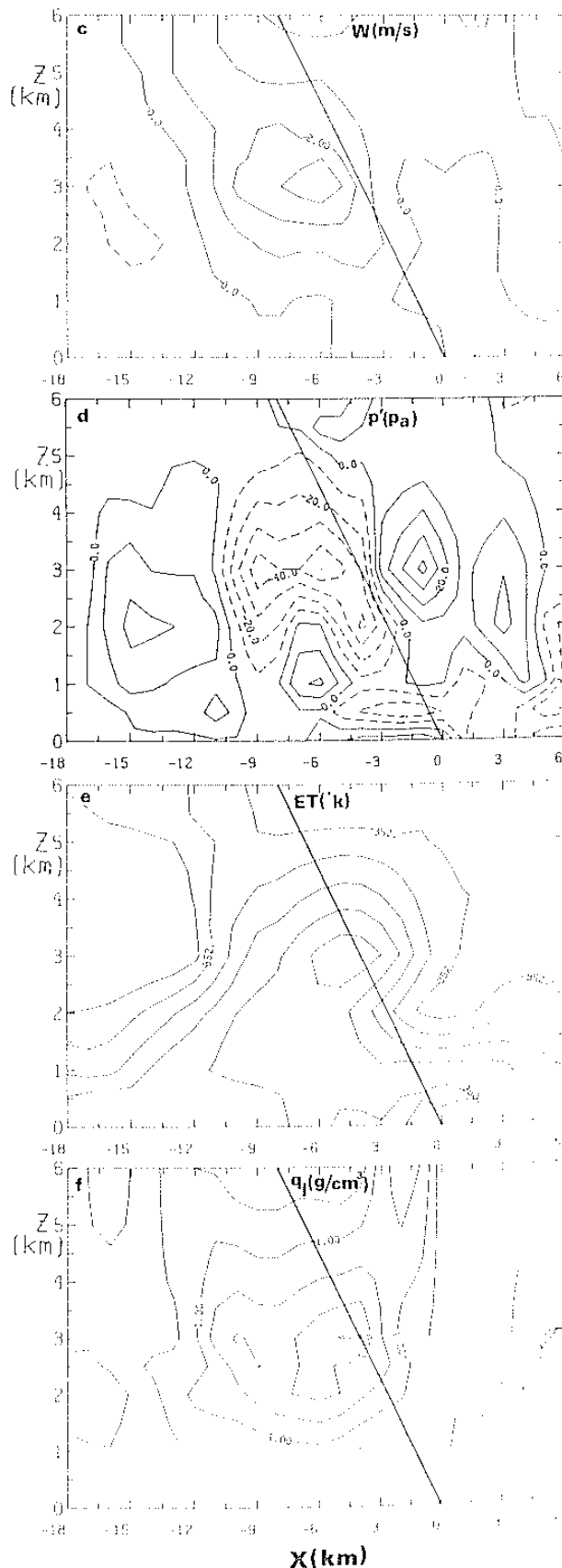
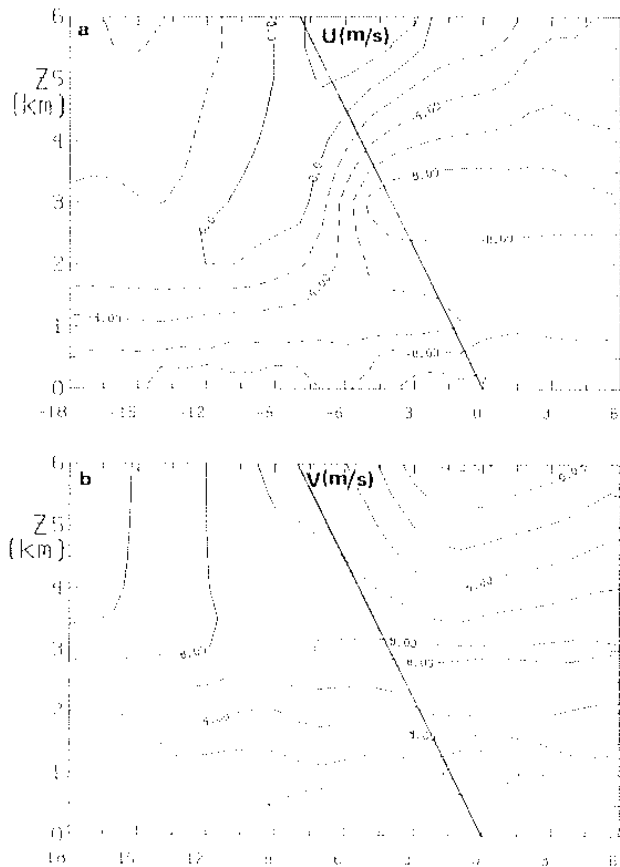


圖 1. 利用原位量測資料 ( in-situ measurement data ) 合成的 X 方向  $u$ 、 $v$ 、 $w$ 、 $p'$ 、 $q_L$  及  $\theta_e$  之中尺度剖面圖。

濕濕空氣，而高空則有乾燥的西風，構成對流發生有利環境。對流雲帶前導線至線後 12km 為強烈升流區，在升流區雲帶後為微弱降流區，其中較強的下沈區大都在 3km 下方且氣流朝後方流動。對照  $p'$ 、 $q_L$  及  $\theta_e$  圖可見強烈升流區和中尺度低壓、液態水集中區和暖心的位置均相當配合，約在前導線的後方、高度介於 2~3 km 間的雲帶中，其中顯示潛熱釋放和氣壓梯度力是此中尺度對流系統持續發展的重要機制。

(二)計算之雲帶結構

為了與飛機直接觀測所獲得之雲帶結構相比較，利用二維彈性連續方程式與有限差分法計算垂直速度 ( $W$ )，此時取垂直網格間距為 500m，水平網格間距為 3000 m。而擾盪壓力 ( $P'$ ) 可由每個網格點之慣性高度與壓力高度之差值計算之，此差值俗稱 D 值，慣性高度由 P-3 飛機上的雷達測高儀直接量測，而壓力高度根據 LeMone and

Tarleton(1986) 的公式計算而得：

$$Z = Z_0 + \frac{T_{v0}}{\tau_a} \left[ 1 - \left( \frac{P_a}{P_0} \right)^{\tau_a R/g} \right]$$

此式是假設在參考高度  $Z_0$  處，由探空儀測知環境的等遞減率  $\tau_a$ ，再利用流體靜力方程積分獲得。式中  $P_0$ 、 $T_{v0}$  為高度  $Z_0$  處之壓力與虛溫， $P_a$  是飛機直接量測之靜壓， $R$  為乾空氣之氣體常數。

圖 2a 為計算的中尺度垂直速度剖面圖，與直接觀測之  $w$  剖面圖 (圖 1c) 比較，發現整體的型態相近似，但強烈升流與降流區的數值皆遠大於觀測值，且高度有偏高的態勢。圖 2b 為由 D 值求得之擾盪壓力剖面圖，於前導線後也出現一中尺度低壓，強度與觀測值近似，但低壓中心高度約在 2km 處。圖 2c 之相當位溫剖面圖乃根據 Merceret and Davis(1981) 之方程式計算而得。

$$EW = 6.1078 \exp \left( 17.6498 * TA / ( 243.17 + TA ) \right),$$

$$RH = [ 100 * EE(PS - EW) ] / [ EW(PS - EE) ],$$

$$A = \frac{EE \ln(RH/100)}{(PS - EE)} ( 1.03185 TN - 1730.33 ) + ( 2H130.51 + 11.087TN ),$$

$$B = ( 184.952 - 0.779402TN ) \ln(RH/100) + 14.6777 * TN,$$

$$PT = TN * \left( \frac{1000}{PS} \right)^{0.285714},$$

$$ET = PT \exp ( A / B ).$$

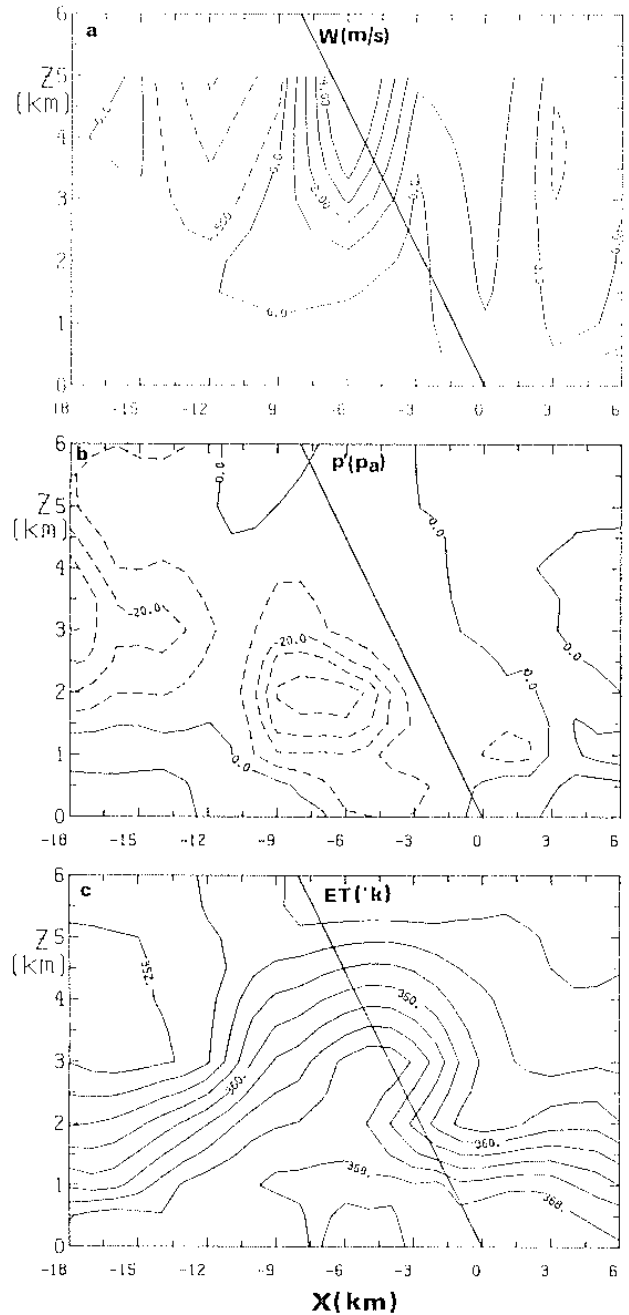


圖 2. 計算之  $W$ 、 $P'$  和  $\theta_e$  中尺度剖面圖。

式中  $T_A$  是由鉑絲溫度計量測之空氣溫度， $R_H$  為相對濕度， $E$  是水汽壓， $E_w$  為飽和水汽壓， $T_N = 273.16 + T_A$ ， $P_T$  為位溫， $E_T$  即相當位溫。圖 1F 是利用斜溫圖與天氣學上的傳統公式計算之相當位溫剖面圖，與圖 2c 比較發現型態也十分相似，祇不過數值上略有差異。綜合比較後可以看出計算的動力結構在強烈升流，中尺度低壓和暖心的位置也均相當配合。

### (三) 動量的垂直傳送

在垂直動量傳送中我們通常期望使用正的渦流黏度係數（即  $k > 0$ ），其方程式為：

$$\overline{u_i' w'} = -k \frac{\partial \overline{U_i}}{\partial Z}$$

其中  $U_1 = u$ 、 $U_2 = v$ ，

圖 3 顯示此雲帶的平均水平和垂直風場（ $\overline{u}$ 、 $\overline{v}$  和  $\overline{w}$ ）以及全部航程的動量通量（ $\overline{u'w'}$  和  $\overline{v'w'}$ ）。在此個案中，3 km 以上  $U$  方向的動量通量呈反梯度性（countergradient），即  $K$  為負值，而  $V$  方向的動量不論在任何高度均是順梯度的（along-gradient），其  $k$  值皆大於 0。圖 4 則分別表示雲前環境，雲帶前區、雲帶後區之平均動量垂直傳送圖，在雲帶前區內的通量十分強烈，且其垂直傳遞型式與全程通量（見圖 3c）極為相似。

在大氣濕對流中，雲貌通常呈現二維帶狀，而且其橫向動量通量呈反梯度性（LeMone, 1983）。本個案的帶狀雲系有低層東南風，帶來充沛的濕濕空氣，可稱為濕對流，而且其橫向動量傳送亦顯現反梯度性，符合 LeMone 所描述的二維濕對流特性。

## 四、結論

(一) 此對流雲帶的結構與中緯度及熱帶地區所見者非常相似，對流成長及活躍區在前導線的後方，不活躍區為砧狀雲，且伴隨著層狀降水，強烈升流區與微弱降水區皆具傾斜性，動量傳送主要在升流核心區。

(二) 平行於對流雲軸之垂直動量傳送（ $\overline{v'w'}$ ）在

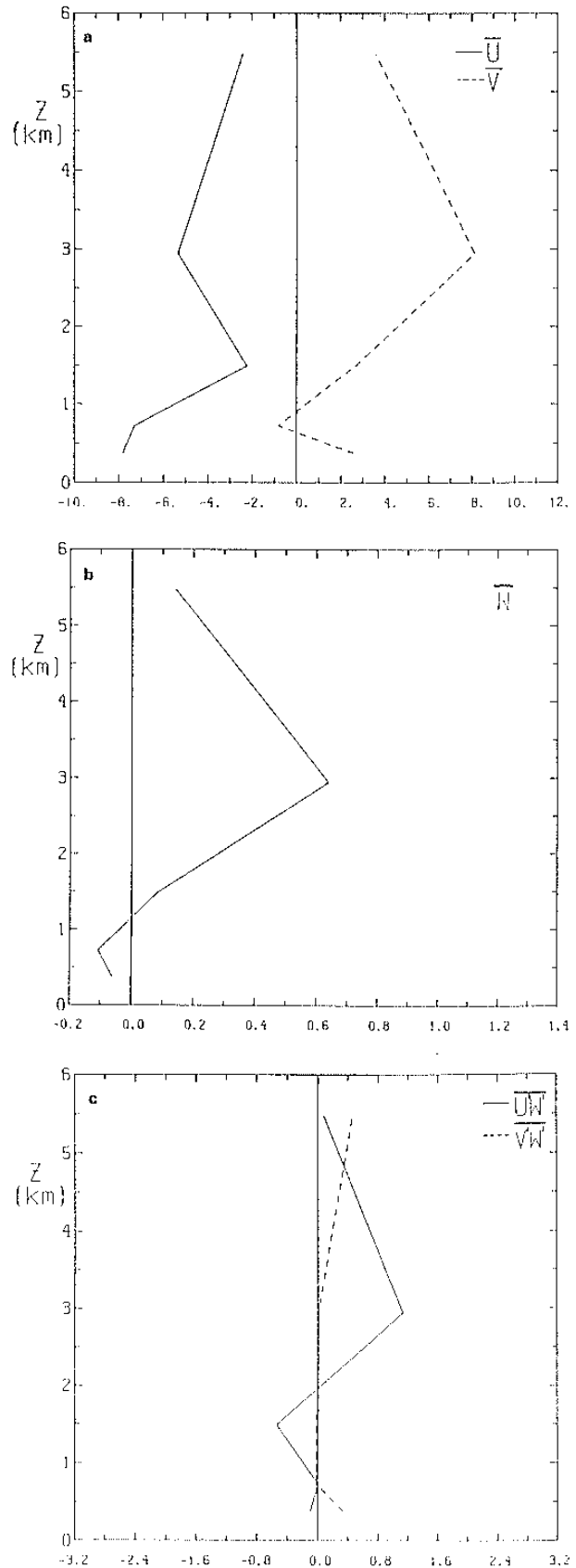


圖 3. 全部航程平均的水平風場（ $\overline{u}$ 、 $\overline{v}$  和  $\overline{w}$ ）以及垂直分佈之動量通量圖。

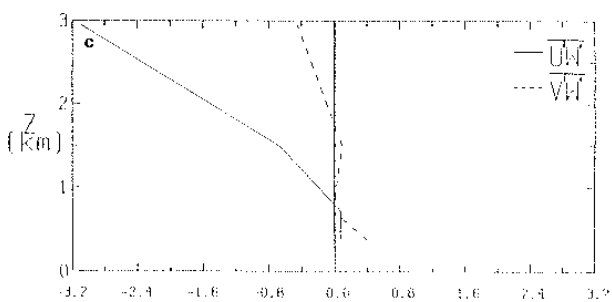
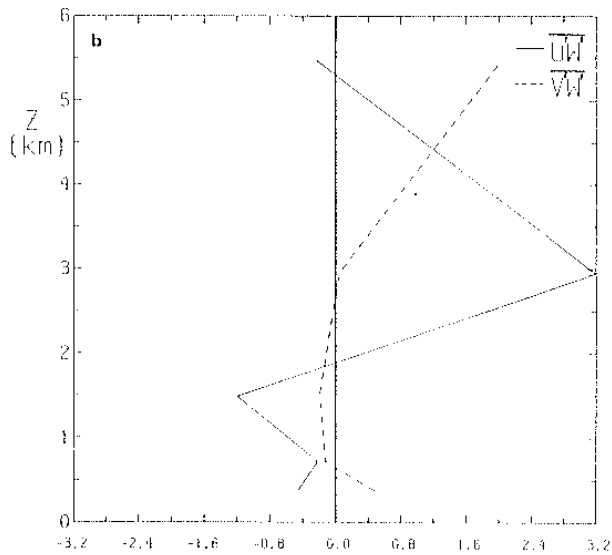
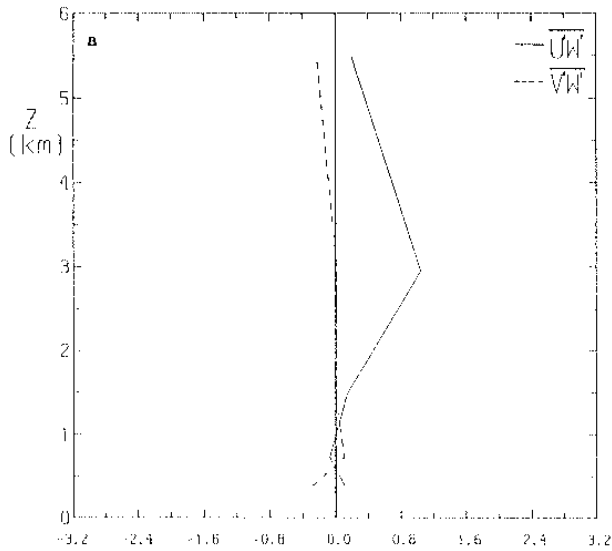


圖 4. 雲前環境、雲帶前區及雲帶後區之平均動量垂直傳送圖。

垂直梯度上是滿足混合長度理論的，而垂直於軸線方向的動量傳送 ( $\overline{u'w'}$ ) 則具有反梯度性，可能是由於 V 方向的垂直切變減弱，而 U 方向之垂直切變增強的結果。u 方向的動量通量是由於垂直風切與紊流垂直運動所產生的，此時紊流之間以及其與環境氣流之間的交互作用是不容忽視的。

## 五、參考文獻

- Barnes, G. M., and K. Sieckman, 1984: The environment of fast-and slow-moving tropical mesoscale convective cloud lines. *Mon. Wea. Rev.*, 112, 1782-1794.
- Bunker, A. F., and M. Chaffee, 1969: Tropical Indian Ocean Clouds. East-West Center Press. Honolulu, 193pp.
- Grossman, R. L., and D. R. Durran, 1984: Interaction of low-level flow with the Western Ghat Mountains and offshore convection in the summer monsoon. *Mon. Wea. Rev.*, 112, 652-672
- Hor, T. H., 1988: Momentum transport in monsoon convective bands ..... observed and simulated. Ph. D. dissertation.
- Houze, R. A., and A. K. Betts, 1981: Convection in the GATE. *Rev. Geophys.*, 19, 541-576.
- Jorgensen, D. P., 1984: Mesoscale and convective scale characteristics of mature hurricanes. Part I: General observations by research aircraft. *J. Atmos. Sci.*, 41, 1268-1285.
- Jorgensen, D. P., and M. A. LeMone, 1989: Vertical velocity characteristics of oceanic convection. *J. Atmos. Sci.*, 46.

- LeMone, M. A., 1983 : Momentum transport by a line of cumulonimbus. J. Atmos. Sci., 40, 1815-1834.
- LeMone, M. A., and L.F. Tarleton, 1986 : The use of inertial altitude in the in the determination of the convective-scale pressure field over land. J. Atmos. and Oceanic Technol., 3, 650-661.
- Merceret, F. J., and H. W. Davis, 1981 : The determination of navigational and meteorological variables measured by NOAA/RFC WP3D aircraft. NOAA Technical Memorandum ERL RFC-7, 21pp.
- Zipser, E. J., and M. A. LeMone, 1980 : Cumulonimbus vertical velocity events in GATE. Part II : Synthesis and model core Structure. J. Atmos. Sci, 37, 2458-2469.

# Composite Mesoscale Dynamic Fields and Momentum Transport in the TAMEX Convective Cloud Band of 16 June 1987

Tai-Hwa Hor and Mou-Hsiang Chang

Department of Applied Physics  
Chung Cheng Institute of Technology

Ben Jong-Dao Jou

Department of Atmospheric Sciences  
National Taiwan University

## ABSTRACT

As the purpose of the TAMEX (Taiwan Area Mesoscale Experiment) was principally to investigate mesoscale convective systems (MCSs), special flight patterns were designed to study the characters of the convective motions in the Taiwan area through direct in-situ measurements and the use of the conventional and Doppler radars in the NOAA P-3 aircraft. In this proposal, the valuable P-3 aircraft-measured data  $u$ ,  $v$ ,  $w$ ,  $T$ ,  $T_d$ ,  $T_s$  (sea surface temperature) and  $P_s$  (static pressure), crossing a convective cloud band off the southeast coast of Taiwan on 16 June 1987, can be used to composite the  $u$ ,  $v$ ,  $w$  and  $p'$  fields along the  $x$ -axis, investigate the kinematic, dynamic and thermodynamic structures within the band. Also, vertical distribution of momentum fluxes  $\overline{u'w'}$  and  $\overline{v'w'}$  will be computed in this convective band in order to study which mechanisms are responsible for the generation of momentum fluxes.