

# 利用單都卜勒雷達偵測多雲天氣下之低空風切初步研究

張泉湧 楊健生 董耀光 周鴻祺

民用航空局飛航服務總台氣象中心

## 摘要

1991年2月25日，台灣北部低層上空受高壓迴流與中層西風脊線之影響下，無地面降水現象，但為層狀積雲之多雲天氣，雲幕高約為4500呎，午後2點至8點之間多架國際航機在中正國際機場降落時在5000呎以下遭遇輕至強烈不等之低空亂流(或低空風切)，本研究主要以中正機場單都卜勒雷達資料分析低空風切之現象，研究發現使用單都卜勒雷達在非強烈降水情況之多雲天氣下，可用垂直方向上之VAD(Velocity Azimuth Display)隨高度分布變化，以估計垂直風切強度，而使用固定3°低仰角之PPI掃瞄風場回波圖則可以測出起降航道上之風場變化，更可測出噴流之存在，故PPI風場回波亦可用來偵測低空風切(Low Altitude Wind Shear以下簡稱LAWS)，而計算徑向方向上之風速變化值，對於決定風切線發生位置亦有很大幫助，由這些亂流參數之估計值可發現與飛機亂流報告情形相符，如能建立線上即時作業計算VAD、PPI和風切值等都卜勒雷達資料，對於發佈多雲天氣時之低空亂流警報很有助益。

## 一、前言

一般所謂LAWS是指迎風分量突然改變致使飛機中飛機所受浮力明顯改變者，除小型飛機外，大型噴射機對於LAWS也很重視，主要因為噴射機引擎對於LAWS的反應較為遲鈍(約需6~8秒)有關。LAWS對飛機構成災害的高度約為1500呎以下，這是因為飛機在低航時空速較小，例如一般飛機飛行高度在700呎時之低空下，其空速約為80m/s，由於飛機所受浮力與空速(迎風分量與飛機對地速度之向量和)的平方成正比，如遭遇風速變化達8m/s時，浮力變化可達20%，風變若達10m/s就有25%的浮力變化，造成飛機不穩，尤於飛機離地面太近若遇失速為免墜地擬拉回，卻可能因高度不足而無法成功，且LAWS偵測不易，危險性高，因此LAWS對飛機起降常隱藏著威脅，偶亦造成不幸事件，各先進國家已不斷地尋求改良偵測與預警方法，最近都卜勒雷達發展迅速，因使用方便，極可能成為此一目的的最有效工具之一，我國民航局中正機場率先國內使用近4年以來，對於雷雨、鋒面、颱風等劇烈天氣的偵測已發揮過無數次的功勞，因而證實其實用性，但對於尺度極小的天氣現象如晴天或多雲天氣之LAWS，它是否也有能力擔當偵測與預警功能，乃是大家極欲了解的課題。

日本雖自製並使用多年都卜勒氣象雷達，但時至1989年才著手研究適合機場使用的都卜勒氣象雷達，其中一項研究是利用位於筑波市的氣象研究所研究用的5cm單都卜勒氣象雷達偵測晴天LAWS能力評估(大野等，1990；鈴木等，1990)，尤於該所設有固定之213m觀測鐵塔而氣象廳擁有全國緊密的逐時地面雨量與風場自動觀測系統(AMeDas)，因此能夠仔細的互相印証。1989年9月有2個很成功的例

子，一個發生在9月20日太平洋地區1989年第22號颱風過後之晴天下形成風切線並通過筑波雷達(圖1)及9月28日低壓暖區內的晴天LAWS線通過同一雷達(圖2)。圖1a和圖2a為地面(10m)自動逐時觀測之風場分布，可以發現風切線的位置(粗實線)及通過筑波的時間，圖1b與圖2b為單都卜勒雷達使用低仰角(0.7°)所測到的晴天都卜勒雷達回波分布及同時地面自動觀測之風場，圖中濃密斑點形成線狀處與地面風場觀測之風切線位置相吻合，細實線為都卜勒風切線(Dopplerwind shear line)前緣。以上2個風切線與鐵塔風速記錄變化亦相一致，顯示都卜勒雷達已能成功地偵測出晴天LAWS線。

根據同上之相關研究指出筑波觀測鐵塔1年資料(1989年2月~1990年1月)中LAWS發生可分為：(1)冬季西北季風內(4例)，(2)冷面通過後之西北風內(5例)，(3)低壓暖區西南風內(4例)，(4)雷雨(6例)，(5)海風(2例)，和(6)其它混合型(4例)等6類，其中伴隨雷雨之地面風變最明顯，由地面資料即可明確判讀，而西北風所造成的風變地面觀測也許不明顯，但200m高度則變化很大，因此以觀測鐵塔、低空剖風儀(wind profiler)或都卜勒氣象雷達等監視LAWS較為有效(菲澤等，1990)。

中正機場除裝設單都卜勒雷達外，最近未來擬再增設低空剖風儀系統以偵測LAWS，目前僅有地面測風儀5具，其中4具位2條平行跑道之兩端，其

餘1 具位一條跑道中央，因此都卜勒雷達觀測結果較難獲得有力印證，但除地面資料外還可採用飛行員的低空亂流報告作為佐證。本文首先敘LAWS發生時之天氣概觀情勢，然後於第3節歸納所收集之LAWS飛機報告，第4節說明以都卜勒雷達資料計算亂流參數值與輔助圖，最後根據初步結果作結論與建議。

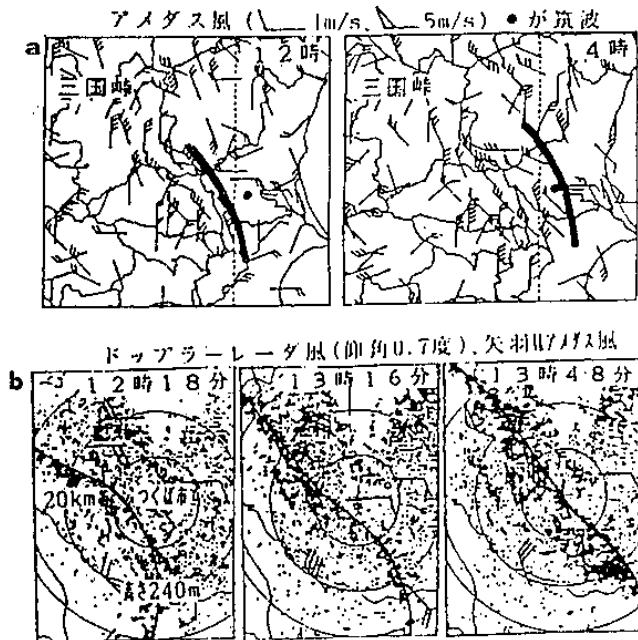


圖1: (a)1989年9月20日12及14時，筑波(標大黑點處)附近逐時地面自動觀測之風場，粗實線表風切線位置，三角形風標示桿代表5m/s，細線表1m/s。  
(b)1989年9月20日筑波雷達風速回波圖，雷達仰角0.7度，風標示桿為地面自動觀測風場(標示法同上)，細實線為都卜勒風場變化最大之前緣(Doppler shear line)。

## 二. 天氣形勢概述

冬末春初的季節裡，2月23日大陸微弱冷鋒通過本島，所伴隨之大陸高壓於2月24日1800Z自渤海出口，2月25日00Z南移至黃海(如圖3a)，中心約在北緯35°N, 125°E，此出海高壓在850hPa仍極明顯，高壓中心位於台灣東北部外海之宮古島附近，本島北部淺低層此後因而造成吹東風至東南風之高壓迴流風系，地面風系則仍以東北季風為主；相反的，25日00Z時700~500hPa之中對流層在華南出現短波槽(如圖3b, 3c)，此短波槽迅速東移，並於25日12Z時追及日本列島東方海面之深槽，12Z之700hPa高空圖之脊線正位於北部上空，00Z至12Z期間北部中對流層風系乃由西南盛行風系轉為以西至西北風系，在這種縱觀環境場之配置下，因而造成中下對流層風場明顯之差異。

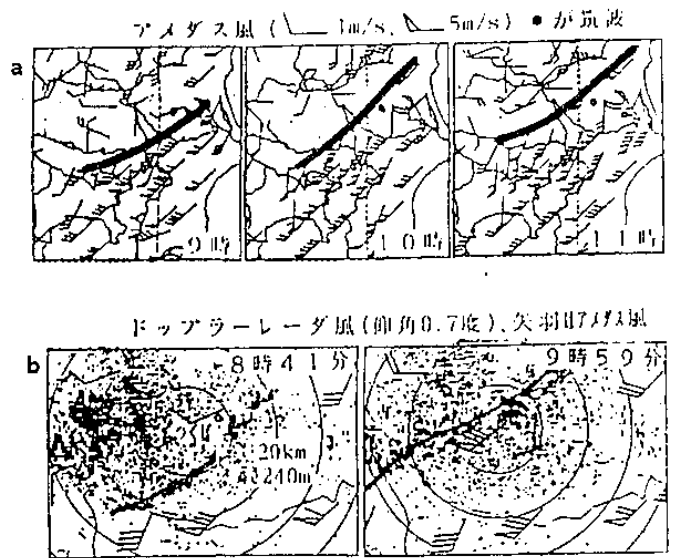


圖2: (a)同圖1(a)，但時間為1989年9月28日9~11時。  
(b)同圖1(b)，但時間為1989年9月28日8時41分及9時59分。

另一方面，由板橋探空報告(如圖4)及中正機場地面觀測記錄可知北部地區上空自00Z及12Z在3000呎~5000呎有風向急轉的轉變層，當日並無地面降水，主要為層狀積雲之多雲天氣，雲幕高約為4500呎，中正機場05R跑道(面對跑道所指示之方位角為50°)地面平均風約為東北風15kts，陣風最強達34kts，午後稍減，顯示地面東北季風受高壓迴流及日射增溫之影響逐漸減弱。25日午後中正地面氣壓記錄扣除日變化後，有略微下降趨勢，更證明低層東南風帶來暖氣團並逐漸移進本省北部。然而雷達降水回波訊號非常微弱，雖由上述分析可知中低對流層間有發生低空風切的潛能，然而由單都卜勒雷達之CAPPI風場分布仍難據以判斷低層風切之存在。因此仍需進一步藉由都卜勒雷達資料以計算VAD、風切值與FPI等參數值以進一步作為是否發佈LAWS警告時判斷之依據。

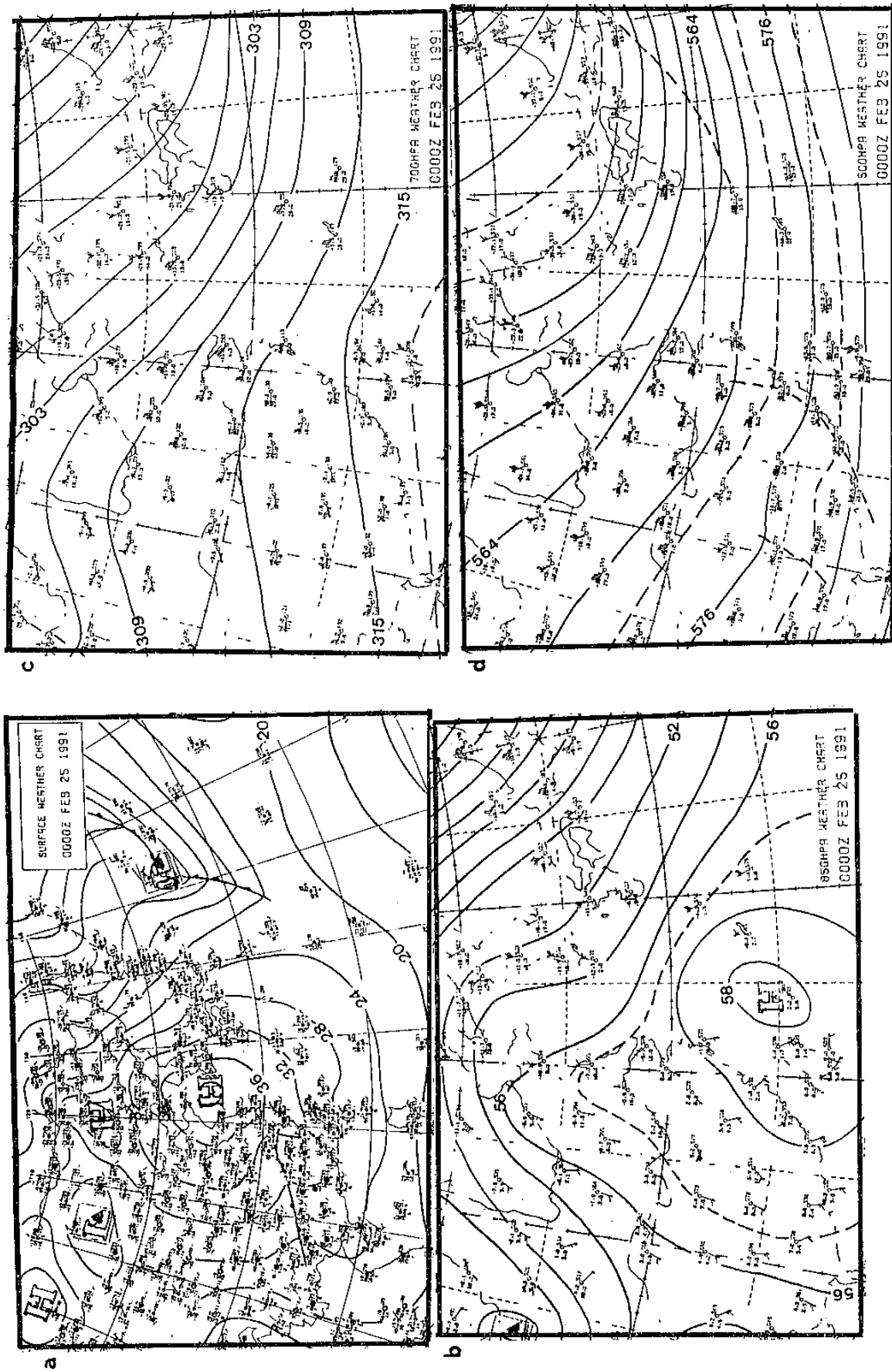


圖3: 1991年2月25日0000Z天氣圖 (a)地面天氣圖  
(b)850hPa (c)700hPa(d)500hPa

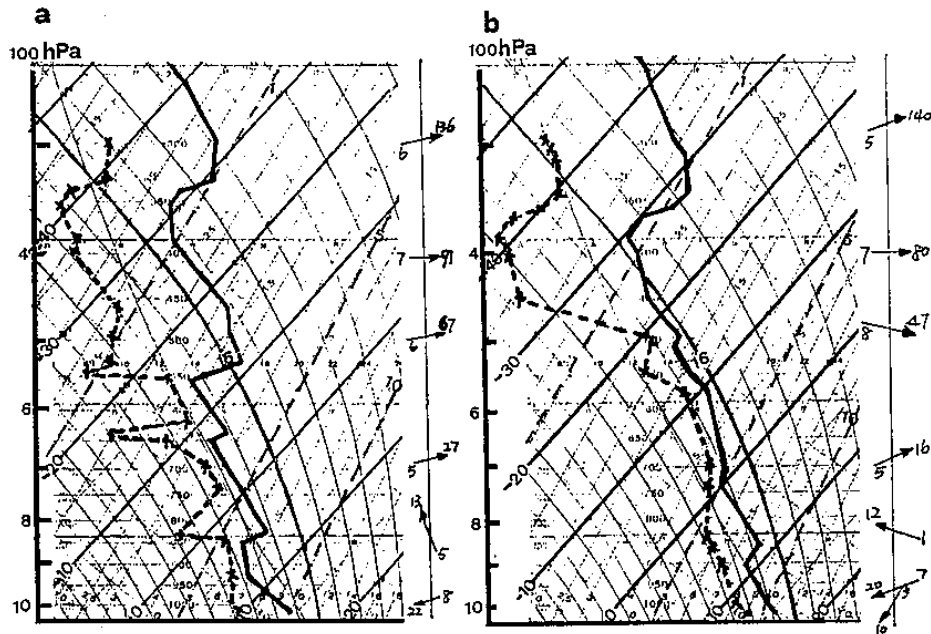


圖4: 1991年2月25日Skew T Log P圖 (a)0000Z  
(b)1200Z

### 三. 飛機亂流報告

由飛行員向航管及諮詢人員之亂流報告中可以歸納2月25日飛機亂流報告如下:

1. 1405L 國泰三星客機於05R跑道降落至200ft時遭遇亂流。
2. 1615L 馬航A300客機於下降途中飛機由5邊4000ft下降至1000ft間遭遇輕至中等之亂流報告, 飛行員稱中層遇到順風但低層則轉為逆風。
3. 1630L 一架A300客機在300~500f間遭遇強烈風切。
4. 2030L後再無飛機亂流報告。

由以上概知飛機遭遇LAWS分上(約5000呎~3000呎)與下(約3000呎~0呎)兩層不同之亂流, 造成兩段亂流現象的原因為何? 下節將試著尋找亂流參數, 以獲得了解。其實飛行員之亂流報告不只以上幾架客機而已, 但因部份報告資料不完整, 故僅計其中關鍵時刻之資料。

### 四. LAWS參數分析

中正機場卑都卜勒氣象雷達觀測之資料, 除降水回波之強度分佈外, 最珍貴的是它能隨時提供12層定高度CAPPI及20層定仰角PPI水平徑向風場分佈資料, 對於研究雲內風場分佈很有助益。自Browning & Wexler (1968) 開使以都卜勒氣象雷達研究MCS(Mesoscale Convective System) 的風場結構, Brown & Wood(1982)並以雷達上方連續的VAD 計算垂直向風場剖面分佈, 自此後此技術即成為雷達作業中最重要的應用工具之一, 中正機場都卜勒雷達啓用不久後, 祝等(1990)即引進此法, 並應用於劇烈天氣之解析(如楊與魏1990), 本文首先應用 VAD 及輻散場之垂直變化、3° 仰角之PPI風場分佈及風切值分佈來探討LAWS之性質。

17時35分時飛機亂流幾近最強, 故選用來仔細探討, 圖5 為根據中正機場都卜勒雷達掃描策略所作之VAD 風向風速及輻散場之垂直向分佈圖, 圖中最明顯的兩大特色為:

- a. 1000呎附近有一噴流中心, 及
- b. 4000呎~6000呎之間為風向轉換帶。

自地面至5000呎間主要吹東北至東南風, 最低層吹東北東風, 風速為7m/s與中正機場之地面觀測相符

，隨高度逐漸轉為東南東風，至1000呎附近風速達最強，然後風速逐漸減弱，風向又轉回東北再轉至西北，約2 KM高度處風速最弱，到2.5KM 以上則穩定風吹西風，風速並逐漸往上加強，1 KM以下主要以輻合為主，1 KM至2 KM為微弱輻散，縱觀而言輻合層太淺且弱，且由圖3c探空可知大氣太穩定，因而無法促成劇烈對流發生，但也因此才能維持長時間的LAWs。

圖7 為VAD隨時間連續分佈圖，上述二個特色，即風向轉換帶與低層噴流自17時35分後高度逐漸上升，厚度變窄，強度逐漸衰減，與飛機亂流趨勢一致，圖6為23時35分之VAD與輻散場，風向轉換帶僅

在2.2KM與2.5KM之間，且變化很緩慢，1.5KM以下且無噴流層存在，風速幾乎一致，17時35分之二大特色已大致不存在。圖5 中20時05分之VAD 與台北20時(12Z)之探空時地(圖4)皆很近因此可以相互印證，然因低層受局部影響太大，故僅以兩者之850及700hPa之風場作比較，VAD1500呎之風場為 $100^{\circ} 15m/s$ ，探空(850hPa)則為 $110^{\circ} 12m/s$ ，VAD 3200呎之風場為 $100^{\circ} 15m/s$ ，探空(700hPa)則幾乎相等，因此VAD可信度相當高，這與當時無強烈回波有關，因為實際風場較符合求VAD 時假設大氣環境風場水平分佈是均質及垂直速度分佈對水平上而言亦是均勻分佈。

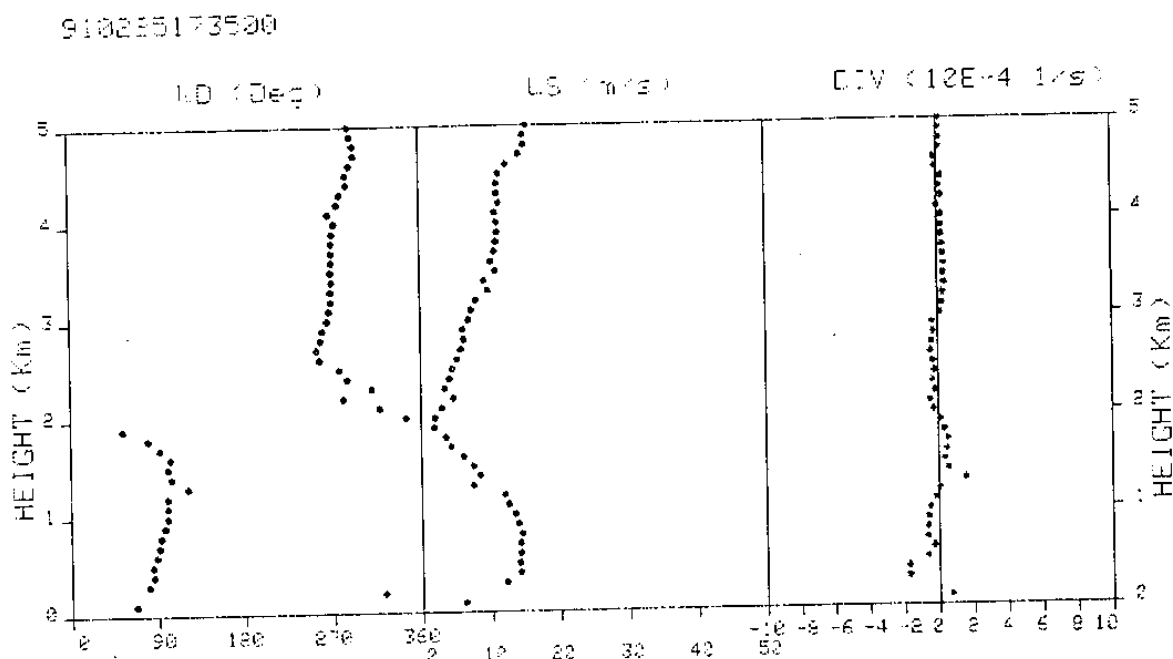


圖5：1991年2月25日17時35分，中正單都卜勒雷達回波之VAD分析結果垂直分佈。風向(WD)以度表示，風速(WS)以每秒米(M/S)表示。實心點代表雷達實際觀測資料。

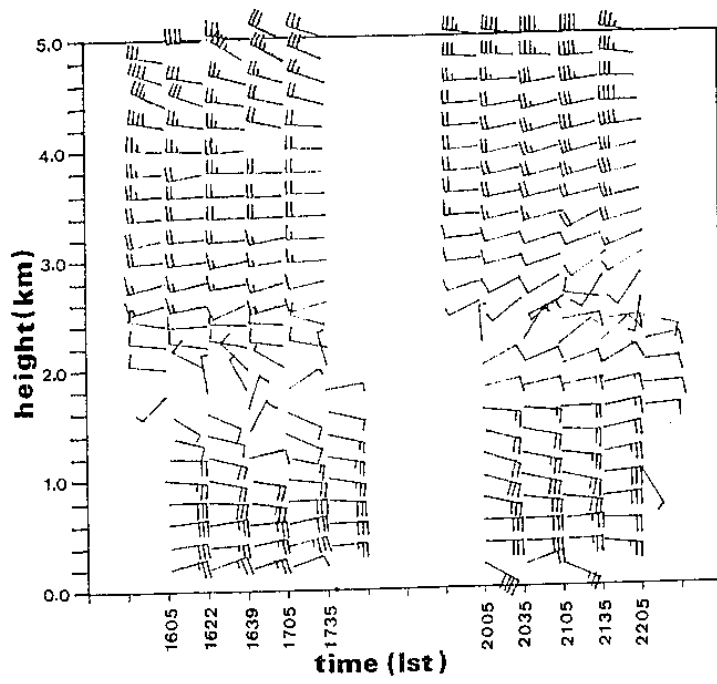


圖6: 1991年2月25日1605L~2205L間VAD垂直剖面  
水平風場之時間序列, 部分資料缺。

910225273500

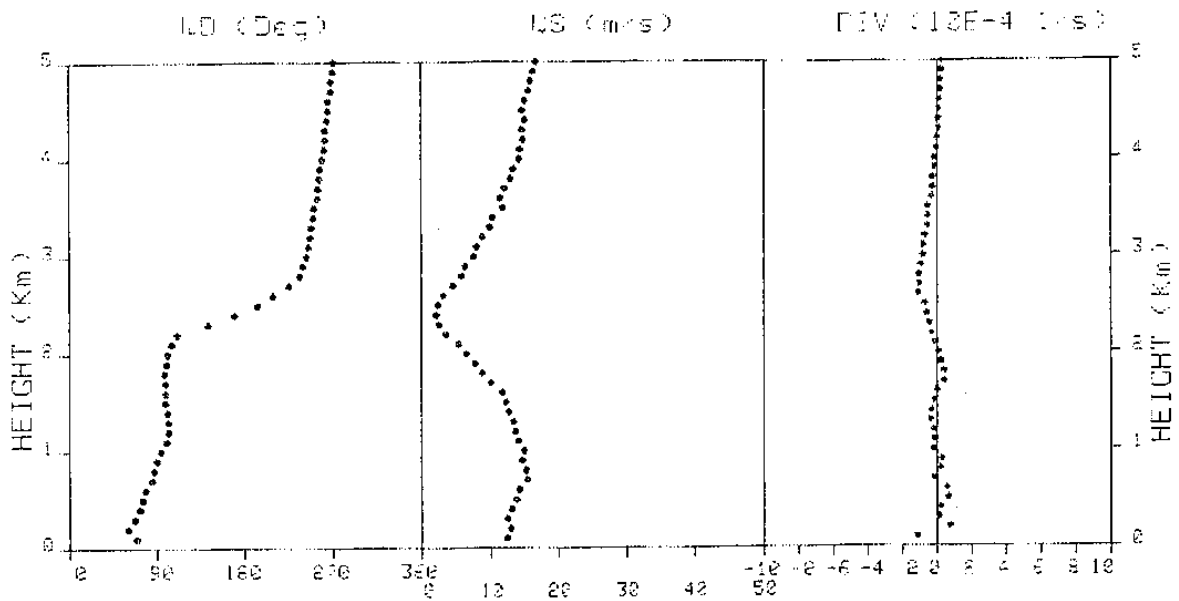


圖7: 同圖4 但時間為2月25日2335L。

圖8 為飛機由北線航路飛臨中正機場05R 跑道下降時所遭遇之航道風場示意圖，飛機自6000呎滑降至4000呎期間由順風轉為逆風，故浮力激烈變化而有亂流之感覺。但自3000呎至降落地面間，則遭遇強風軸，故在很短距離內，風速有極大之變化，亦引起很大的浮力變化，也產生亂流現象。

圖9 為17時35分仰角3°之PPI圖，此仰角上之徑向風場分佈適為飛機起降所遭遇之風場，圖中約略可發現30KM 處風場零值線成一圓圈，此即相當於圖5 中之風向轉換帶，此帶以內之風場代表其下層之風場主要為東風系，此層上方以西風為主，在靠近機場附近亦即近地面有強烈之東北風噴流存在，與圖6 所示之VAD 圖相符，雖這些現象大致都可由VAD圖獲得，但PPI圖更能顯示出噴流軸之方位與距離。

航空氣象上的風切是指航路上風的變化，與一般氣象學有些不同，故PPI 風場資料較CAPPI適合，由天線仰角為3度之PPI風場回波資料求得徑向上每間隔1 點資料之風速差可視為飛機飛經該區所遭遇之風切值，17時35分時之風切圖分佈如圖10所示，風切值最大區位西北方向上，即位飛機下降路徑之上，此種最大風切區恰有兩處，一處較遠與PPI 圖上之高層轉變區相一致，另一處風切線與低層噴流軸相當。

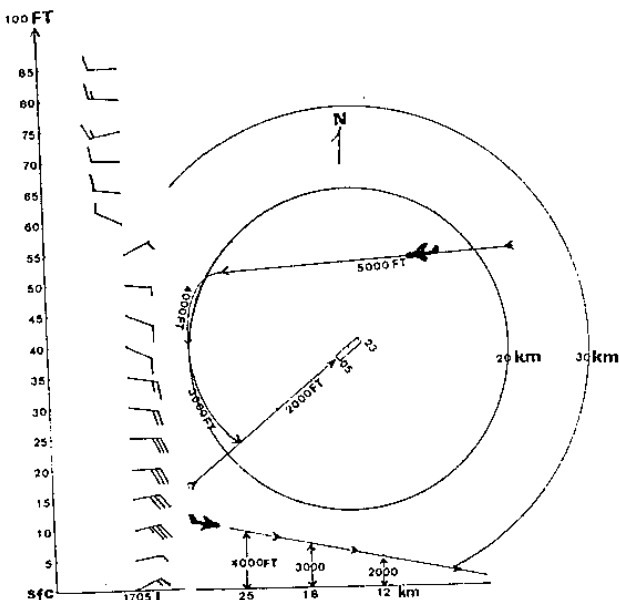


圖8：飛機在05R跑道下降時沿路所遭遇之風場示意圖，高度單位為呎，圖右為1705L之VAD 垂直剖面風場，圖示20與30KM 半徑之範圍，下方標示飛機高度與跑道頭距離之關係。

## 五. 結論

由本研究可以發現冬末春初，多雲天氣下，北部上空很淺的低層因大陸高壓移入東海不久後，轉為盛行東至東南風，對流中層則仍吹西南至西北風，二者間轉換帶深厚並涵蓋及飛機下滑路徑時可能由順風突轉為逆風(如圖5 中飛機由南線或北線從6000呎下降至4000呎階段)，因此即有可能導致LAWS，另一方面近地層風雖微弱但緊接其上方出現有強低層噴流，則飛機穿過該層時風速突減故可能發生LAWS現象，如圖5 中飛機由3000呎下降至地面情形，1991年2 月25日午後2 點至8 點之間，北部上空因兩種情況都有，故多架飛機遭遇兩階段輕至強烈不等之亂流報告。

本個案因無強烈地面降水現象發生，且地面觀測風場資料無明顯變化可資辨識故容易被忽略，但因有低雲層出現則可藉都卜勒氣象雷達資料計算垂直方向上之VAD 變化圖，由此圖上之風向風速變化高度、厚度及強度值，即可估計垂直風切值並判斷LAWS強度。由於飛機飛近機場時之下滑線與地面水平線約成3°角，故以3°仰角所測得之PPI風場與飛機實際下滑路徑上遭遇之風場相同，故所計算之結果最值得作為發佈LAWS 警報之參考。同樣的以3°仰角所測得之PPI 風場徑向上相隔1 點之徑向風差值視為風切值，若出現強烈風切線處即知必存有強烈之LAWS。

由VAD垂直向剖面時間連續圖(圖6)，可以發現2 月25日約在14~20時間存在風向風速轉換帶位4000~6000呎之間，低層噴流約位15 km之1000 呎附近，此兩現象出現高度有隨時間往上抬升高度並減弱之趨勢。以3°仰角所測得之PPI風場，在飛機亂流報告期間顯示不連續風場位40 km處之5000 呎高度大約形成一個圓圈，低層東風噴流位15 km處之1000呎高度，圖13之風切值計算結果發現西南方 15 km處之1000呎高度及西南至北方30 km3000呎~35000呎最強，由以上三種參數計算和以上之推論可知此三種參數值與飛機亂流報告極相吻合。2 月25日午後之飛機亂流報告雖可藉由以上之分析成功地分析出LAWS形成原因及其現象，然因目前中正機場都卜勒雷達之週邊設備不足，除PPI外，VAD、及風切值之計算尚未即時作業無法適時提供作業參考及發佈LAWS，因此極需趕緊擴充設備以利即時作業並適時發布此類之LAWS警報。

如前言中所述日本氣象研究所大野等(1990)和鈴木等(1990) 研究指出，實際上使用解析度為250 m之單都卜勒雷達亦能偵測晴天LAWS之存在及位移，

然而目前中正都卜勒雷達之解析度為1 KM, 依目前評估結果此類極微弱且尺度很小之小擾動效果不佳, 宜即早改善以提升偵測更小尺度之LAWS能力確保飛安。

其次, 根據前東京成田氣象台台長中山章及渡邊文雄(1987)使用 DFDR (Digital Flight Data Recorder) 分析1981年5月12日羽田機場所發生之LAWS, 對於了解LAWS之風場結構很有助益, 而且可以用來和VAD 比較, 建議以後加強此一方面研究, 但因DFDR資料受管制, 且會被重複使用, 如事後取用原資料恐易被消毀, 取得甚為不易, 應請有關單位重視此一研究LAWS甚為寶貴之資料, 而都卜勒雷達觀測因有詳細風場資料, 對於亂流理論之研究甚有助益 (Lee, 1990), 故值得進一步研究。對於近地層何以形成噴流, 本文尚未加以探討, 宜使用邊界層模式或中尺度模式深入探討。

#### 致謝

本文研究期間, 承蒙中正氣象台李金萬台長及蔡永智主任預報員熱心討論並提供許多寶貴意見, 預報員魏運寶與陳炳全先生在資料處理技術的協助, 觀測員周立人先生與談琬華小姐熱心提供地面資料與飛機亂流資訊, 塔台諸位管制員及諮詢台林益世台長及陳三思主任航詢員提供詳細飛機亂流報告, 使本文能順利完成, 特此一併申謝。

#### 參考文獻

- Brown, R. & T. Wood, 1982: Single Doppler Velocity Signatures as Indicators of Storm Severity, Processings of the NEXRAD Doppler Radar Symposium/Workshop, 164-183
- Browning, K. A. & R. Wexler, 1968: The determination of Kinematic properties of a wind field using Doppler radar, J. Appl. Meteor. 7, 105-113
- Lee, Y., 1990: Detection of Atmospheric Turbulence by Doppler Weather Radar. Proceedings Conf. on Weather Radar and Flight Safety, Taipei, 69-75
- 大野久雄, 鈴木修, 青柳二郎, 1990: 利用單都卜勒雷達偵測與追蹤晴天低空風切, 1990年日本氣象學會春季大會演講稿集, 57, A206
- 中山章, 渡邊文雄, 1987: 1981年5月12日東京羽田機場發生LAWS之分析, 天氣, 34, 10, 15-24
- 鈴木修, 大野久雄, 青柳二郎, 1990: 西南風突然增強在筑波市形成風切, 1990年日本氣象學會春季大會演講稿集, 57, A207
- 莊澤浩, 大野久雄, 鈴木修, 1990: 影響飛機起降之低空風突變 地面與200m 間風的研究, 1990年日本氣象學會春季大會演講稿集, 57, A208
- 祝鴻鵬, 李金萬, 蔡永智和林清榮, 1990: 都卜勒雷達掃描策略模式化與VAD 方法解析天氣系統結構之研究, 氣象雷達與飛航安全研討會論文集, P1-14
- 楊健生和魏運寶, 1990: 鋒面之即時觀測 以VAD 技術探討與分析, 氣象雷達與飛航安全研討會論文集, P41-50

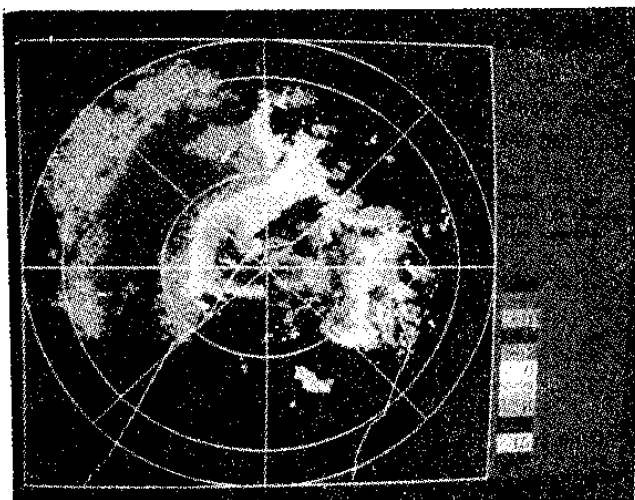


圖9: 中正機場都卜勒雷達在2月25日17時35分以固定天線仰角3度所測得之PPI風場分佈圖。

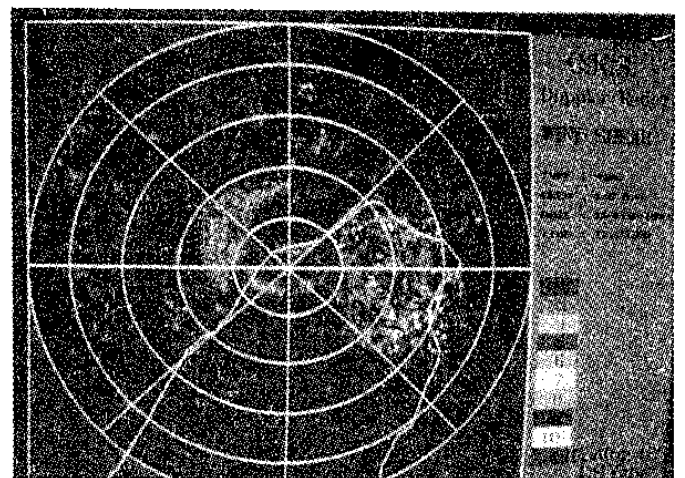


圖10: 中正機場都卜勒雷達在2月25日17時35分以固定天線仰角3度所測得之徑向風切風場分佈圖。



# A Case Study of Low Altitude Wind Shear in Cloudy Sky by Using a Single Doppler Radar

Chang C. Y., Yang C. S., Tung Y. K. Chou H. C.

Taipei Meteorological Center,  
Air Navigation and Weather Services, C.A.A

## Abstract

On Feb. 25, 1991, Northern part of Taiwan, under the influence of return air back from the splitted Polar High airmass which moved to the Eastern China Sea in the lower-troposphere, and the westerly ridge in the mid-troposphere, is a cloudy sky with ceiling 4500ft. In Taipei International Airport, there is no severe weather or precipitation between 2 to 8 O'clock in this afternoon. However, light to severe low altitude turbulence were reported by many pilots when they approaching to landing.

The Doppler radar data are used mainly in this study. It concludes that in cloudy sky the vertical distribution of VAD (Velocity Azimuth Display) can be used for estimating the strength of the vertical wind shear. The PPI wind reflectivity echo chart in 3 degree elevation angle is similar to the wind in the approaching path of the airplane, it can detect the location of the jet if have. It is useful in detecting the LAWS. Beside, the wind shear which calculate from the radial wind velocity are useful for deciding the wind shear line location. The data analyzed above are comprehensive to the turbulent reports. Therefore, if these data are analyzed in realtime, then, suitable warning system of this kind LAWS can be obtained.

