台灣桃園國際機場低空風切之初步分析研究

蒲　金　標
台北市濱江街 362 號

摘　要

本文使用 2002 年民航局台灣桃園國際機場低空風切警告系統(Low Level Windshear Alert System；LLWAS)之觀測資料，分析與探討其低空風切之發生。初步研究結果發現，台灣桃園國際機場發生低空風切，輕度和中度各約佔四成和四成五，強烈者較少，約佔一成五。雖然發生強烈低空風切較少，但它對飛機起降之危害甚大，應給予重視。

5~6 月梅雨季，受鋒面和西南氣流； 7~8 月夏季受颱風和強烈西南氣流；9~10 月初秋受颱風、東北季風和鋒面過境；11~4 月深秋、冬季和春季受東北季風和鋒面過境等影響，機場都會有低空風切現象，其中以颱風引發最多且最強烈的低空風切。

台灣桃園機場發生低空風切，以上午 10 時至下午 16 時與晚上 22 時至清晨 3 時等兩個時段發生次數最多，而強烈低空風切非常集中在半夜前後發生。台灣桃園機場在中午前後時段，太陽輻射受熱最強，大氣下層變成不穩定層，產生熱對流而形成亂流，低空風切的發生與溫度高和風速強是有相當大的關係。而在半夜前後時分氣溫和風速皆較低較弱，卻集中發生強烈低空風切，其發生之原因係受颱風接近之影響所致。

台灣桃園機場發生中度以上低空風切之天氣類型，以颱風環流型和東北季風型為最多，鋒面過境型次之，西南季風型甚少。而發生強烈低空風切之天氣類型幾乎都在颱風環流型所發生。

台灣桃園機場近海邊，與海相距 3~4 公里，周圍地勢低平，平均海拔高度 33 公尺，對天氣系統無明顯阻擋作用，因此，颱風暴風圈接近機場，機場風場變化大；東北季風，陣風強烈；不連續且不穩定的鋒面會帶來風變和中小尺度對流，容易激發較大風切；以及夏季強勁西南季風，引發陣雨或雷雨，雨勢大，都是造成台灣桃園機場發生中度至強烈低空風切之主因。

關鍵詞：低空風切警告系統、低空風切、鋒面過境型、東北季風型、颱風環流型、西南季風型。

一、前言

飛機在起飛及降落階段通常飛行速度較小，距離地面高度較低，對於風速驟然的改變，飛行員之應變能力相對較差。飛機在起降階段遭遇低空風切(low-level windshear)，若應變不及或處理不當，輕者造成飛機重落地或衝出跑道，重者則可能釀成機毀人亡的慘劇，在國內外飛機失事中，已有相當多案例，證實是因低空風切所造成。

低空風切對飛機起降安全有重大的威脅，根據 1964~1985 年美國地區飛機失事統計，因為風切發生飛機失事有 26 件，意外有 3 件，造成約 600 人死亡，200 人受傷。另外，波音公司 Taylor(1993)的統計，1979~1989 年間美國地區風切因素發生飛安事故有 13 起，死亡人數達 455 人。其中以下列三個案例最令人印象深刻，1975 年東方航空 66 班機於紐約市甘迺迪國際機場降落失敗，造成 112 人死亡和 12 人受傷；1982 年泛美航空 759 班機在路易斯安那州紐奧爾良市起飛不成功而失事，飛機上 152 人死亡；1985 年達爾它航空 191 班機在德克薩斯州達

拉斯市降落不成功，134 人不幸遇難。1999 年美國航空 1420 班機在阿肯色州小岩城降落失事，也跟風切脫不了關係，使得 11 人死亡，89 人受傷。

第一代低空風切警告系統(phase-1 LLWAS)最初在 1970 年代由美國聯邦航空總署(Federal Aviation Administration；FAA)發展出來偵測大尺度的天氣系統，包括海風鋒面(sea breeze fornts)、陣風鋒面(gust fronts)、冷鋒(cold fronts)以及暖鋒(warm fronts)。這是因應 1975 年東方航空 66 班機於紐約市甘迺迪國際機場降落時失事而開始研發，當時飛機遇到海風和雷雨外流(thunderstorm outflow)交互作用產生的風變(wind shift)。Phase-1 LLWAS 系統偵測風切的原理是很簡單，僅將跑道中段測風台風場資料與在機場四周裝設五個測風台者加以比較，當風的向量差達 15 海浬/小時(knots; kts)以上時，塔台管制員就將每一測風台的風場觀測資料，直接告訴起降的飛機，飛行員收到各測風台風場資料後，自行計算頂風(headwind)或順風(tailwind)分量。

Phase-1 LLWAS 系統由於測風台間距離太大，無法偵測到較小尺度的風切，因此，1983 年 FAA 要求美國國家大氣研究中心(National Center for Atmospheric Research；NCAR)另外再發展一套 LLWAS 更新系統，期望系統可以偵測小尺度的微爆氣流(microbursts)，於是 NCAR 在 1983~1988 年間發展出一套加強型系統(phase-II LLWAS)，系統透過頂風或順風強度，來偵測位在跑道或跑道兩端離到場 1~3 海浬的低空風切或小尺度微爆氣流，Phase-II LLWAS 可以偵測到 90%以上的風切，但還有 10%以下的風切警告失敗率。系統再不斷改良，現在所用的系統稱之為第三代低空風切警告系統(Phase-III LLWAS)，Phase-3 LLWAS 系統在跑道兩端向外延伸三海浬範圍內有足夠的測風台，通常有 12-16 個測風台之多。LLWAS-III 系統能提供跑道向外延伸 3 浬離到場走廊 1000 呎(300 公尺)以下的風切偵測能力(UCAR,1992)。

交通部民用航空局有鑒於低空風切對飛機起降的威脅，於 2001 年 9 月 1 日於松山和台灣桃園國際機場各建置一套符合美國 FAA 第三代機場低空風切警告系統。台灣桃園國際機場 LLWAS 在測試期間，選擇 2001 年 6 月 17 日、20 日、22 日發生低空風切個案，經由美國大氣研究中心(NCAR)科學家和工程師和台灣民航局氣象專家和航電人員共同做個案以 15 個遠端測風台 24 小時風場加以分析，並與飛機風切報告加以比對，驗證結果台灣桃園國際機場 LLWAS 系統為可用的系統。本文分析資料已去除極少數線路故障所造成假警報。

本文採用台灣桃園國際機場 LLWAS 系統於 2002 年 1 月至 12 月期間所觀測到的資料，來分析台灣桃園國際機場附近低空風切發生之時間特性，包括每天二十四小時低空風切發生之日變化和每月低空風切發生之季節變化，並以中度和強烈低空風切發生時，所出現的綜觀天氣類型加以分類，計分為颱風環流、東北季風、鋒面過境和西南季風等四種類型，並就每一類型各選擇一個個案加以診斷分析。以期了解台灣桃園國際機場低空風切在那一時段最常發生？ 每季發生概況？那些綜觀天氣類型最有利低空風切的發生？

二、資料來源與研究方法

LLWAS 系統是由測風儀及處理器所組成的，它用以偵測並確認危害性低空風切，並將此即時(real-time)資訊提供給飛航管制塔台管制員和機場氣象台觀測員，以便提供危害性低空風切，包括微爆氣流，警訊給機場正在降落或起飛的航機。測風儀測量風向的精確度為±3.0 度，測風儀可自動進行磁北校準。測風儀對介於 0 到 99 kts 之風速的測量精確度為±2kts 或實際風速之±5 % (取較大值)，系統觀測週期為 10 秒。系統將風場資料轉換成一個風速的向量(u，v)，指

向風流動的方向(即風的去向)，提供危害風切偵測分析演繹法則(Hazardous Windshear Detection Analysis Algorithm)使用(UCAR,1992)。測量的單位以公尺/秒來表達，正 v 值表示磁北方向，而正 u 值表示磁東方向。

LLWAS 系統可支援的最大量演繹法則之邊(edge)數為 200 個；可支援的最大量演繹法則之三角形數為 250 個。機場真正的邊和三角形的數目定義於所提供的機場建構檔，微爆氣流是指一個被偵測到的輻散順風(減速)(單位為 kts)超過或相等於預定參數值(典型為 30 kts)。系統利用任意三點測風儀資料，算出此三角形內的輻合輻散場，再與其他三角形遞迴運算，得出起降區低空風切警示資訊。而此任意三點需符合三角形夾角不得小於 25 度和任二點距離需介於 1~5 公里之間(UCAR,1992)。由飛機因環境風場造成的增（減）速程度來決定，當飛機順風(減速)從 15kts 至 29kts 或頂風(增速)大於 15kts 時稱為風切，減速大於 29kts 時稱為微爆氣流。若有兩個風切/微爆氣流同時出現，則系統會以最嚴重者的強度和最接近飛機之起降位置編發警訊。當測風網內被偵測到跑道方向順風(減速)(runway-oriented loss)或頂風(增速)值(runway-oriented gain)超過預定參數值(單位為 kts)之風切情況時，系統則發佈風切警告(蒲，2003)。

台灣桃園國際機場低空風切系統在沿著機場跑道向外延伸 3 海浬和跑道中段共設有 15 個遠端測風台，系統會將每一測風台所觀測的風場資料換算為跑道方向(050°~230°)之分量，計算跑道兩端進場或離場航道方向之頂風(增風)或順風(減風)強度，來偵測位在跑道或跑道兩端離到場 1~3 海浬的低空風切或小尺度微爆氣流情形。台灣桃園國際機場低空風切之強度從跑道及跑道兩端各向外延伸 3 海浬等區域方向之頂風(正值)或順風(負值)強度來決定，根據 FAA 風切強度為標準，當頂風(增風)或順風(減風)數值介於 15 ~19kts 時，表示有輕度低空風切；介於 20~29kts 者稱之為中度風切；大於 29kts 者稱之為強烈風切，其中順風(減風) 大於 29kts 者稱為微爆氣流。

機場風場觀測係以十分鐘平均數，提供給機場以外的國內外單位使用，另外以風場兩分鐘平均數僅提供給航管塔台和飛機起降使用。台灣桃園國際機場 LLWAS 系統 15 個遠端測風台係以 15 個遠端測風台風場 10 秒鐘平均數用來計算機場是否有低空風切的發生，即低空風切發出警告一次代表十秒鐘，警告時間是次數x10 秒，可以時間長短來呈現，比較有具體的概念。台灣桃園國際機場 LLWAS 系統係以每 10 秒的週期，即時更新風場資料，遇有低空風切發生時，系統會發出警告一次，所以本文低空風切次數乘以 10 秒就是低空風切發生之時間長度。

三、台灣桃園國際機場地理位置與氣候概況

(一) 地理位置

台灣桃園國際機場位於台灣西北部桃園縣大園鄉境內，周圍地勢低平，海拔高度約 100 呎，西北鄰接海邊，距海岸約在三至四公里，附近海岸線成東北與西南走向，剛好位於台灣海峽北向喇叭口上。機場東和東南方有林口台地及觀音山丘陵，林口台地海拔高度約 200~250 公尺，觀音山高 612 公尺，較為突出。南距桃園中壢台地約十餘公里，西南盡是沿海平原，可延伸至新竹地區，西和西北緊接台灣海峽。台灣桃園國際機場位於 25°04’ 35’’N，121°13’ 26’’，跑道方向為東北~西南走向，分別為西南邊的 05 號和 06 號跑道及東北邊 23 號和 24 號跑道，北跑道長 3660 公尺，寬 60 公尺，南跑道長 3350 公尺，寬 60 公尺，標高平均海拔 33 公尺。

(二) 氣候概況

台灣桃園國際機場位於亞洲副熱帶季風氣候區內，冬半年受變性大陸冷氣團和鋒面系統南下等影響，盛行東北季風，風力持續且強勁。夏季受副熱帶海洋氣團或赤道海洋氣團影響，平均風力雖較微弱，但五月～十月間，台灣桃園機場常遭到西太平洋和南中國海的颱風侵襲，帶來狂風暴雨，迫使機場關閉，影響飛機起降。

四、台灣桃園國際機場低空風切警告系統

目前我們台灣台灣桃園機場安裝有一套低空風切警告系統，系統是由一個主機台控制器(master station controller)、遠端測風台(測風儀設備組)及顯示給使用者看的顯示器；顯示器通常安裝於飛航管制塔台及氣象台。主機台控制器利用風切偵測演繹法則處理由遠端測風台傳來的資料，以提供特定跑道之風速、風向及風切的種類與強度等資訊給航管使用。除了機場中央風速、風向及陣風(gust)資訊外，所有發佈的風切警訊均是針對單一特定跑道。

台灣桃園國際機場的主機台控制器及主機台無線電設備建置於台灣桃園管制塔台七樓，系統共有三部文數字警告顯示器，其中兩部設在管制塔台供管制人員使用，另一部設於氣象台供氣象人員使用。系統監控設備(System console)則與主機台控制器置放在同一地點。

台灣桃園國際機場 LLWAS 系統功能計有蒐集機場地區風場資料、提供危害性低空風切的自動偵測、提供危害性風切(包括微爆氣流)強度及發生位置的偵測、測量中央風場並提供陣風風速資訊、與現有跑道頭的測風儀相關設備互相銜接之介面、提供飛航管制員明確清楚的風切危害資訊(風切類別、位置及強度)、跑道頭風場測量資料，以利其傳送給(無線電語音)飛行員、提供有關系統維護、風切事件重建及飛航顯示等重要資訊的儲存設備以及提供查看和分析存檔資料之工具等等。

台灣桃園國際機場 LLWAS 系統在沿著機場跑道向外延伸 3 海浬設有 14 個遠端測風台，另外在跑道中央間附近即台灣桃園機場入境停車場靠近塔台區入口北側附近設有中央測風台，台灣桃園國際機場 LLLWAS 測風台依各台地勢高低不同，離地面高度為 20-30 公尺，系統能探測到的低空風切的高度約在 300 公尺以下，所以這套系統可提供 300 公尺以下的風切偵測能力。台灣桃園國際機場低空風切警告系統遠端測風台場址和實際離地高度等資料如表 1。

表 1 台灣桃園機場低空風切預警系統遠端測風台場址資料表

場址編號	場　址　地　點	經緯度位置	實際離地高度(m)
CF	台灣桃園機場入境停車場靠近塔台區入口北側附近	N25°04.881 E121°30.006	30
1	桃園縣私立大興高級工商職業學校勤學樓西側樓梯間屋頂（桃園縣大園鄉大興路 62 號）	N25°03.745 E121°11.513	30
2	台灣桃園機場 05 跑道頭圍牆角落環場路邊	N25°04.465 E121°12.668	20
3	台灣桃園機場 05-23 跑道中段近排水溝小路邊	N25°05.167 E121°13.594	20
4	台灣桃園機場 23 跑道頭排水溝邊	N25°05.964 E121°14.502	20
5	桃園縣南坎舊港廢棄檢查哨	N25°07.070	20

		E121°15.021	
6	桃園縣大園鄉農會橫峰倉庫(桃園縣大園鄉中山南路一段 546 號內)	N25°03.24 E121°12.306	20
7	台灣桃園機場國內站蓄水塔側邊空地	N25°04.087 E121°13.009	20
8	台灣桃園機場 23 檢查哨對面馬路排水溝內側空地	N25°05.432 E121°15.000	20
9	桃園縣海湖國小 B 棟屋頂 (桃園縣蘆竹鄉海湖村 1 鄰 57 號)	N25°06.165 E121°16.018	30
10	桃園縣大園鄉橫山大埤水源路側堤防與池塘間台地（台電電線桿編號尖山分線 56、57 間）	N25°02.266 E121°12.495	25
11	桃園縣埔心國小勤學樓屋頂 （桃園縣大園鄉埔心村 16 村 25 鄰 56 號）	N25°02.956 E121°13.505	30
12	空軍桃園基地莊敬樓屋頂 （桃園縣大園郵政 90319 號信箱）	N25°03.624 E121°14.272	30
13	桃園縣果林國小左側樓屋頂（桃園縣大園鄉果林村 12 鄰 41 號）	N25°04.675 E121°15.398	30
14	桃園縣山腳國中圖書館屋頂（桃園縣蘆竹鄉海山路 319 號）	N25°05.232 E121°16.734	30

台灣桃園國際機場 LLWAS 系統在機場管制塔台設置有文數字警告顯示器(Alpha-numeric Alarm Display；AAD) ，如圖 1 左上角，可顯示到場跑道頭及離場跑道末端之二分鐘平均風向風速。系統也可顯示中央風場(Center-field)之二分鐘平均風向風速，並可顯示陣風。LLWAS 系統在台灣桃園國際機場跑道與 10 跑道和 28 跑道向向外各延伸 3 浬之帶狀區域內，偵測到低空風切或微爆氣流時，AAD 顯示器會自動鳴叫（alarm），航管人員立即根據 AAD 顯示器上的文數字警告警告資料向飛行員提出警訊。系統在松山航空氣象台設置有圖形警告顯示器(Graphical Alarm Display；GAD)，如圖 1 下方，當 GAD 顯示器發出警告鳴叫時，航空氣象台值班觀測人員需將該低空風切警告資訊，附註在航空天氣觀測報告(METAR/SPECI)之補充資料欄內。

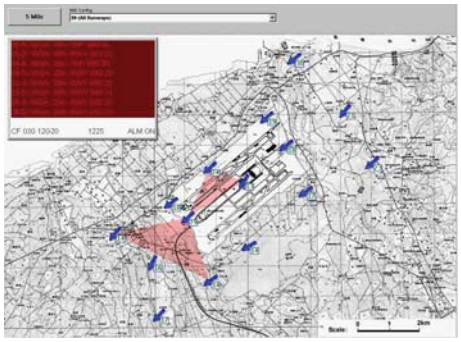

圖 1 台灣桃園國際機場圖形警告顯示(GAD)和文數字警告顯示(AAD)(左上角)圖，圖中

箭頭代表遠端測風台之風向，箭頭旁數字代風速(kt)，三角形陰影表示低空風切警示區。

五、研究結果

(一) 低空風切之月變化

2002 年 1 月至 12 月台灣桃園國際機場發生輕度、中度和強烈低空風切之次數計有 9592 次，總共發生時間有 95,920 秒(或有 1,598.67 分鐘；或有 26.65 小時)，其中輕度低空風切有 3,758 次佔 39.2%；中度者有 4,348 次佔 45.3%；強烈者有 1486 次。其中發生強烈風切之時間有 14860 秒(或有 247.67 分鐘；或有 4.13 小時)佔 15.5%。顯示台灣桃園國際機場發生低空風切，輕度和中度者分別約佔四成和四成五，發生強烈者較少，約佔一成五，雖較少，但發生強烈低空風切對飛機起降之危害甚大，應給予重視。

台灣桃園國際機場發生低空風切，按月分析，以 2002 年 7 月為最多，佔 29.0%；1 月和 12 月次之，1 月佔 12.9%，12 月佔 15.4%；3 月、4 月、9 月和 11 月再次之，各佔 9.0%、7.8%、6.8%和 6.7%。2 月、5 月、6 月、8 月和 10 月為最少，各佔 1.6%、3.6%、2.3%、2.1%和 3.0%，如圖 2。

就台灣桃園國際機場低空風切發生時的綜觀天氣屬性加以分析，2002 年 7 月受到強勁西南氣流引發雷陣雨與雷馬遜(Rammasun)和娜克莉(Nakri) 兩個颱風等影響，台灣桃園國際機場發生低空風切的次數最多，同時發生強烈低空風切達 1395 次之多。1 月和 12 月受東北季風和鋒面過境等影響，造成台灣桃園國際機場低空風切次多之原因。3 月、4 月和 11 月受到東北季風和鋒面過境等影響，9 月受東北季風、熱帶低壓和辛樂克(Sinlaku)颱風之影響，有次次多的低空風切發生。雖然 2 月受到東北季風、5 月受到鋒面過境、6 月受到鋒面過境、西南氣流和諾古力(Noguri)颱風接近、8 月受到西南氣流和熱帶低壓以及 10 月受到東北季風和鋒面過境等影響，但是發生低空風切的次數最少。唯 5 月發生強烈低空風切也有 31 次。

以上分析顯示台灣桃園國際機場 7~8 月夏季受颱風和西南氣流， 9~10 月初秋受颱風、東北季風和鋒面過境， 11~5 月深秋、冬季和春季受東北季風和鋒面過境，5~6 月梅雨季受鋒面和西南氣流等影響，機場都會有低空風切現象，其中以颱風引發最多且最強烈的低空風切。

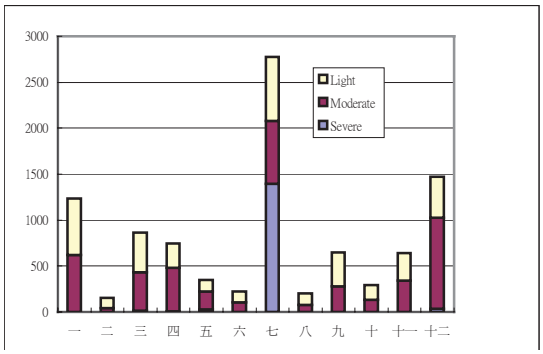

圖 2　2002 年 1 月至 12 月台灣桃園國際機場低空風切強度與次數之月變化
橫座標為月份，縱座標為低空風切發生次數。

(二) 低空風切之日變化

台灣桃園國際機場發生低空風切，按日變化分析，以上午 10 時至下午 16

時和晚上 22 時至翌日清晨 3 時等兩個時段，平均每小時發生低空風切之次數有 425 次以上，頻率佔 4.4%以上，其中以中午 12 時至下午 15 時之時段，每小時發生次數高達 646~825 次之間，頻率佔 6.7~8.6%為最高；強烈低空風切非常集中在晚上 22 時至翌日清晨 3 時發生，分別為 108 次(7.3%)、312 次(21.0%)、70 次(4.7%)、243 次(16.4%)、363 次(24.4%)和 272 次(18.3%)，在這個時段發生強烈低空風切佔整日的 92.1%，顯示台灣桃園機場強烈低空風切集中在半夜前後發生。而每天上午 4~9 時和下午 17~21 時等時段，每小時發生低空風切之次數在 325 次以下，頻率小於 3.4%，如圖 3。

2002 年台灣桃園機場平均風速和氣溫之日變化，如圖 4，顯示台灣桃園國際機場上午 9 時至下午 18 時平均風速大於日平均風速 8.8kts，尤其在上午 10 時至下午 17 時平均風速高達 10kts。下午 19 時至翌日上午 8 時平均風速小於日平均值，尤其在清晨 2~6 時平均風速小於 7kts。台灣桃園國際機場上午 8 時至下午 18 時平均氣溫大於日平均氣溫 22.6℃，尤其在上午 10 時至下午 16 時平均氣溫高達 24.0℃。下午 19 時至翌日上午 7 時平均氣溫小於日平均值，尤其在清晨 2~6 時平均氣溫小於 21.0℃。

比較台灣桃園際機場低空風切發生與其氣溫和風速之日變化，分析結果顯示上午 10 時至下午 16 時低空風切常發生時段，與該時段平均氣溫和平均風速之最高值相當一致。顯示台灣桃園國際機場在中午前後時段，太陽輻射受熱最強，大氣下層變成不穩定層，產生熱對流而形成亂流，低空風切的發生與溫度高和風速大是有相當大的關係。而在半夜前後時分氣溫和風速皆較低較弱，卻集中發生強烈低空風切，其發生之原因係受颱風接近之影響所致。

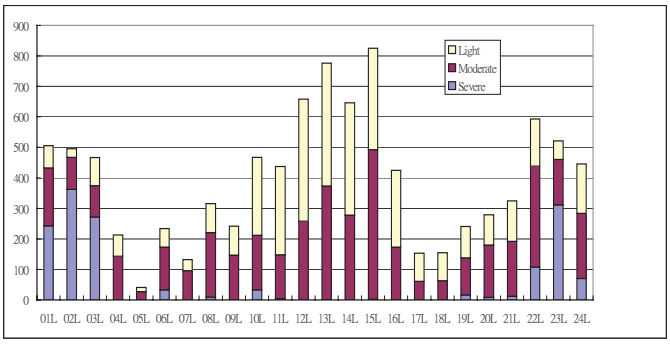

圖 3　2002 年 1 月至 12 月台灣桃園國際機場低空風切強度與次數之日變化橫座標為台灣地方時，縱座標為低空風切發生次數。

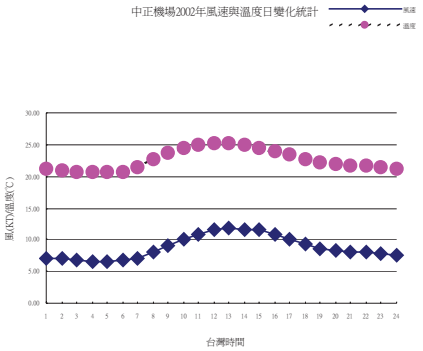

圖 4　西元 2002 年台灣桃園國際機場平均風速和氣溫之日變化，橫座標為台灣時間，縱座標為平均風速(kts)和氣溫(℃)。

3. 低空風切之天氣類型

本文就中度以上低空風切發生時，所出現的綜觀天氣類型加以分類，計分為颱風環流、東北季風、鋒面過境和西南季風等四種類型。

2002 年 1 月至 12 月台灣桃園國際機場發生中度以上低空風切之天氣類型，可分為颱風環流、東北季風、鋒面過境和西南季風等四種類型，各佔 38.3%(2230 次)、36.4%(2121 次)、24.8%(1447 次)和 0.4%(26 次)，如圖 5。其中颱風環流型、東北季風型和鋒面過境型等發生強烈低空風切則分別佔 93.9%(1396 次)、4.0%(59 次) 和 2.1%(31 次)，而西南季風型尚無強烈風切發生，顯示松山機場發生中度以上低空風切之天氣類型，以颱風環流型和東北季風類型為最多，鋒面過境型次之，西南季風型甚少。而強烈低空風切之天氣類型幾乎都在颱風環流型所發生。

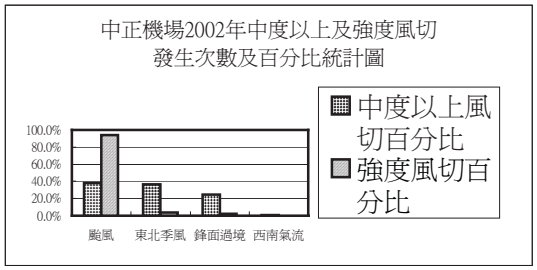

圖 5　2002 年 1~12 月台灣桃園國際機場發生
中度以上低空風切之天氣類型頻率

強烈低空風切發生之日期計有颱風環流型於 2002 年 7 月 3 和 4 日(雷馬遜颱風，Rammasun)、9 和 10 日(娜克莉颱風，Nakri)、31 日(熱帶低壓)和 8 月 2 日(熱帶低壓)；東北季風型於 2002 年 2 月 10 日、3 月 18 日、4 月 9 日、9 月 17 日以及 12 月 25、26 和 27 日；鋒面過境型於 5 月 23 日等日期發生。

(1) 颱風環流型個案

選擇 2002 年 7 月 9~10 日輕度颱風娜克莉(Nakri)侵襲桃園國際機場而發生強烈低空風切之個案加以分析。7 月 9 日 1100L 輕度颱風娜克莉中心(990 hPa)位於 23.6°N，119.5°E，即在澎湖附近，平均風速為 35kts，最大陣風為 45kts，34kts 之暴風半徑為 50 浬，以每小時 9 浬之速度向東北東方移動，澎湖和台灣西部機場風雨逐漸加強。9 日 1400L 颱風中心位在 23.7°N，120.0°E，颱風接近濁水溪口登陸。1700L 和 2000L 颱風中心皆位在 24.0°N，120.2°E，台灣西南部機場風雨逐漸加強。10 日 0800L 颱風中心位在 24.6°N，120.0°E。10 日 1100L 颱風中心位在 23.8°N，121.4°E，颱風暴風圈更逼近台灣桃園機場。

根據 2002 年 7 月 9 日 0100~2400L 台灣桃園機場地面自動氣象觀測系統(Automated Weather Observing System；AWOS)連續 12 小時觀測結果顯示，如圖 6，台灣桃園機場受此颱風接近的影響，9 日 1000L~1300L，吹東北東風，風速增強，平均風速為 20~24kts，最大陣風最強達 38kts，溫度高達 31.0℃，露點 26.0℃，溫度露點差較大，相對濕度降為 74%，無雨。由 9 日 0300-0400L，溫度 25.0℃，相對濕度 100%，至 9 日 1100-1200L，溫度驟升，相對濕度降為 74%，顯示 9 日上午期間受較強東北東風越過中央山脈之影響，有焚風的現象。此期間受強風影響，台灣桃園機場 LLWAS 發出輕度低空風切警告 85 次，中度低空風切警告 36 次。9 日 1900-2100L，吹東北風或東北東風，風力迅速減弱，但機場下陣雨，雨勢甚強，三小時雨量 12.75mm。這段時間風力雖減弱，但受颱風接近和大陣雨的影響，LLWAS 發出輕度低空風切警告 21 次，中度低空風切警告 85 次，

強烈低空風切警告高達 31 次之多，如圖 7。此段時間 9 日 1000~1300L 松山機場吹東北東風平均風速 14~18kts，陣風 24~38kts，松山機場 LLWAS 發出輕度低空風切警告 10 次，中度者 51 次；1900-2100L 松山機場沒有發出低空風切警告。顯然這段時間颱風接近，但松山機場低空風切警告較少，較弱。

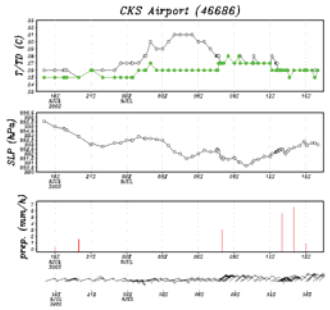

圖 6　2002 年 7 月 8 日 1600UTC 至 9 日 1500UTC 台灣桃園機場
溫度、露點、氣壓、雨量、風向及風速之時間序列變化圖

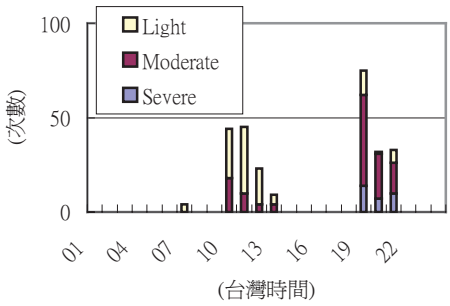

圖 7　2002 年 7 月 9 日 0100~2400L 台灣桃園機場低空
風切警告系統低空風切之時間序列分布圖

10 日 0900 - 1100L，風向大幅轉變，由西南風、西北風、北風轉為東北風和東北東風，風力也由微弱轉強，最強平均風達 21kts，最大陣風達 34kts，機場下陣雨和雷雨，雨勢甚強，六小時(0700-1200)雨量 71.75mm，如圖 8。這段時間機場受颱風暴風之侵襲，風向變化大，風力由減弱轉強，且下雷雨，LLWAS 發出輕度低空風切警告 73 次，中度低空風切警告 125 次，強烈低空風切警告高達 33 次之多，如圖 9。這段時間 10 日 0900~1100L 松山機場吹西南風，平均風速 7~9kts，最大陣風 10~18kts，松山機場沒有發出低空風切警告。

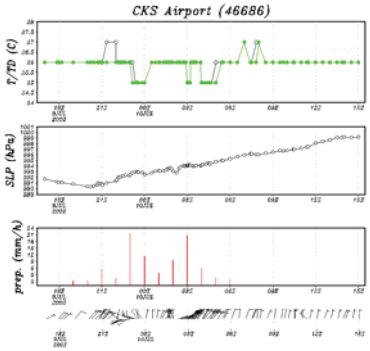

圖 8　2002 年 7 月 9 日 1600UTC 至 10 日 1500UTC 台灣桃園機場
溫度、露點、氣壓、雨量、風向及風速之時間序列變化圖

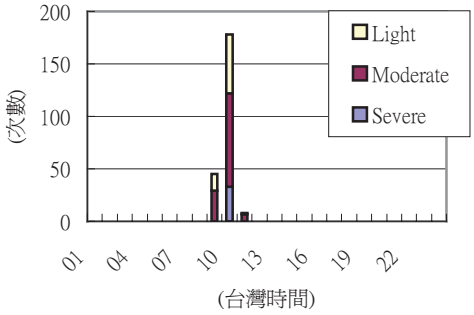

圖 9　2002 年 7 月 10 日 0100~2400L 台灣桃園機場
低空風切警告系統低空風切之時間序列分布圖

顯示颱風暴風圈接近台灣桃園國際機場時，機場吹西北風轉北風至東北東風，風場變化大，陣風強，雨勢大，為造成台灣桃園國際機場中度至強烈低空風切發生之主因。

(2)　東北季風型個案

選擇 2002 年 4 月 9 日 0400~1500L 東北季風引發台灣桃園國際機場強烈低空風切之個案加以分析。9 日 0400~1500L，鋒面遠離台灣，台灣東部和中部以北盛行東北季風，這段時間台灣桃園機場吹東北東風，最大平均風速達 22kts，最大陣風高達 32kts，如圖 10。機場 LLWAS 發出低空風切警告，輕度、中度及嚴重風切分別有 208 次、395 次及 9 次，如圖 11。這段時間松山機場吹東北東風，最大平均風速達 15kts，最大陣風高達 21kts，松山機場 LLWAS 發出低空風切警告，輕度、中度及嚴重風切分別有 249 次、54 次及 1 次，顯然在強烈東北季風盛行之下，松山機場風力較弱，低空風切警告比較少。

由東北季風型個案分析顯示，強烈東北季風會引發台灣桃園國際機場中度以上之低空風切現象。

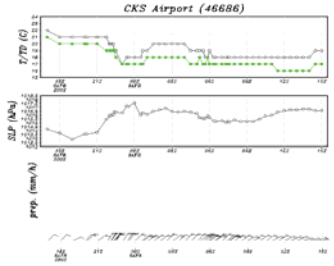

圖 10　2002 年 4 月 8 日 1600UTC 至 9 日 1500UTC 台灣桃園
機場溫度、露點、氣壓、雨量、風向及風速之時間序列變化圖

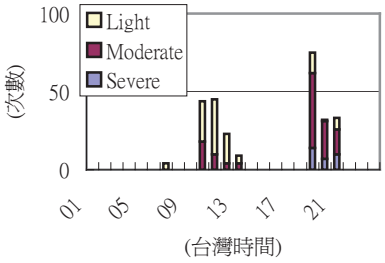

圖 11　2002 年 4 月 9 日 0100~2400L 台灣桃園機場
低空風切警告系統低空風切之時間序列分布圖

(3) 鋒面過境型個案

選擇 2002 年 5 月 23 日 0400~0700L 鋒面過境引發台灣桃園國際機場強烈低空風切之個案加以分析。2002 年 5 月 22 日 0000UTC，梅雨鋒面位於中國華南上空及台灣北部海面，以每小時 10-15 公里之速度巷向東南方向前進，逐漸接近台灣北部陸地，台灣桃園機場吹南南西風，從可見光衛星雲圖可以發現鋒面帶上及台灣中南部陸地出現甚強的對流系統，台灣西部從南到北都有降水現象，可見鋒前西南氣流帶來充沛水汽和雲雨。22 日 1800UTC，鋒面已到達台灣北部陸地，鋒面前端有中尺度高壓，應由鋒前西南氣流遇到中央山脈阻擋的質量累積所造成，但勢力沒有鋒後強，台灣桃園機場在鋒前，吹偏南風，三小時後，鋒面已通過台灣桃園機場到達新竹地區，台灣桃園機場改吹北北東風，鋒前中尺度高壓消失，鋒面受台灣地形影響開始斷裂，東段移速比西段快。

根據 2002 年 5 月 23 日 0100~1200L 台灣桃園機場地面自動氣象觀測系統(Automated Weather Observing System；AWOS)連續 12 小時觀測結果顯示，如圖 12，此鋒面約在 23 日 0434L(22 日 2000 UTC)抵達台灣桃園機場，此時溫度 24.0℃，露點 24.0℃，溫度露點差等於零，相對濕度為 100%，水汽達飽和，風向由 0400L 260°/05kts 轉為 0434L 330°/09G19kts，並開始下雨，之後順轉成北北東風或東北風，風速逐漸增強，最強風在 0600L 達 040°/17G27kts，降雨從 5 月 23 日 0434L 開始，至 1000L 止，6 小時累積雨量達 8.0mm。

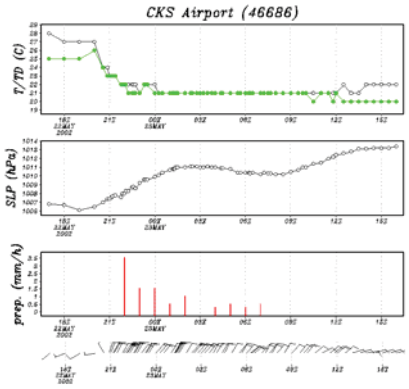

圖 12　2002 年 5 月 22 日 1800UTC 至 23 日 1500UTC 台灣桃園機場
溫度、露點、氣壓、雨量、風向及風速之時間序列變化圖

根據 2002 年 5 月 23 日 0100~2400L 台灣桃園機場低空風切警告系統低空風切
之時間序列分布圖(如圖 13)顯示，當鋒面於 23 日 0434L(22 日 2000 UTC)抵達台灣桃園機場之後 3 小時期間，風向急速由偏南風轉偏北風再轉東北風，最大陣風劇增至 27kts，受此鋒面影響，風切警報次數與強度劇增，於清晨 0400L~0700L 台灣桃園機場輕度低空風切發生 35 次，中度 129 次，強烈 31 次。顯示台灣桃園機場近海邊，與海相距 3~4 公里，周圍地勢低平，平均海拔高度 33 公尺，對天氣系統無明顯阻擋作用，因此，當海上移入的鋒面系統進入台灣桃園機場時，不連續且不穩定的鋒面會帶來風變和中小尺度對流，容易激發較大風切。但是比較鋒面於 23 日 0500L 抵達松山機場時，風力由微弱轉強，東風增強為 12kts，最大陣風達 17kts，下雨，氣溫急速下降，氣壓快速上升，松山機場 LLWAS 於 23 日 0500L 鋒面抵達時僅發出輕度低空風切警告 1 次，中度 4 次。兩者比較，顯然鋒面造成台灣桃園機場低空風切比松山機場為強。

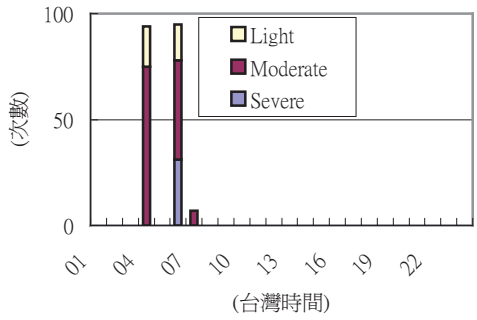

圖 13　2002 年 5 月 23 日 0100~2400L 台灣桃園機場
低空風切警告系統低空風切之時間序列分布圖

(4) 西南季風型個案

選擇 2002 年 7 月 17 日 1300~1500L 西南季風引發台灣桃園國際機場台灣桃園低空風切之個案加以分析。17 日 0600UTC 地面天氣圖滯留鋒位在長江流域，太平洋高壓脊向西南伸展至菲律賓東方海面，台灣位在滯留鋒和太平洋高壓脊之間，西南季風盛行，台灣桃園國際機場上午 1000L 至下午 1500L 吹強勁的西南風，最大平均風風速達 30 kts，最大陣風高達 42 kts。1500L 機場下陣雨，如圖 14。機場 LLWAS 警告系統在這段時間發出輕度和中度風切分別有 26 次和 18 次，如圖 15。這段時間松山機場於 1008L，西風才增強，平均風速為 7kts，最大陣風 15kts，隨後西風繼續增強，於 1430L，平均風速達 20kts，最大陣風 30kts，沒有下雨，也沒有低空風切警告。

透過西南季風型個案之分析顯示，台灣在夏季吹強勁西南季風，常促使台灣桃園國際機場有中度低空風切現象。

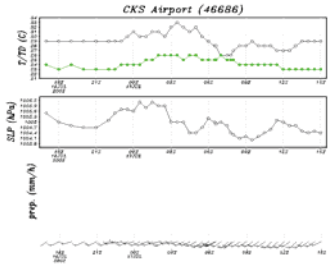

圖 14　2002 年 7 月 16 日 1800UTC 至 17 日 1500UTC 台灣桃園
機場溫度、露點、氣壓、雨量、風向及風速之時間序列變化圖

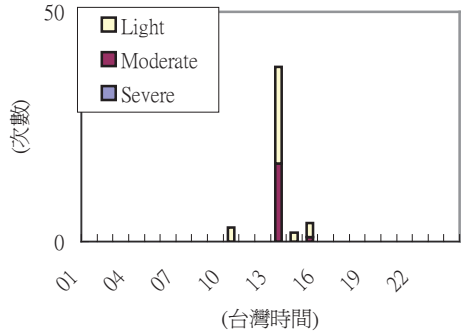

圖 15　2002 年 7 月 17 日 0100~2400L 台灣桃園機場
低空風切警告系統低空風切之時間序列分布圖

六、討論

本文經初步研究，結果顯示台灣桃園國際機場發生低空風切，輕度和中度各約佔四成和四成五，強烈者較少，約佔一成五。強烈風切大部分在颱風侵襲下所造成，發生強烈低空風切雖然較少，但它對飛機起降之危害甚大，應給予重視。比較松山機場發生低空風切，輕度和中度各約佔半數，強烈者甚少(蒲，2003)。另外，同一時期比較，2002 年 1~12 月松山機場發生輕度、中度和強烈低空風切之次數計有 12740 次，其中輕度低空風切有 5964 次佔 46.8%；中度者有 6143 次佔 48.2%；強烈者有 633 次，佔 5.0%。台灣桃園機場發生低空風切總數雖然比松山機場為少，但台灣桃園機場發生強烈低空風切則較多。概松山機場位在台北盆地，四周台地和高山對氣流和天氣系統的影響有重要關係(何、蒲、涂與魏，2003)。

台灣桃園機場 7~8 月夏季受颱風和西南氣流， 9~10 月初秋受颱風、東北季風和鋒面過境， 11~5 月深秋、冬季和春季受東北季風和鋒面過境，5~6 月梅雨季受鋒面和西南氣流等影響，機場都會有低空風切現象，其中以颱風引發最多且最強烈的低空風切。松山機場則以西南氣流發生午後雷陣雨引發最多且最強烈的低空風切(蒲，2003)，概松山機場位在台北盆地，夏季西南氣流經常發生午後雷陣雨，台灣桃園機場西南氣流引發午後雷陣雨較少。

台灣桃園機場發生低空風切，以晚上 22 時至清晨 3 時與上午 10 時至下午 16 時等兩個時段發生次數最多，而強烈低空風切非常集中在半夜前後發生。台灣桃園機場在中午前後時段，太陽輻射受熱最強，大氣下層變成不穩定層，產生熱對流而形成亂流，低空風切的發生與溫度高和風速強是有相當大的關係。此結果與松山機場低空風切之日變化相同(蒲，2003)；江等(1998)認為松山機場輻合型風切及太陽加熱有密切相關；蒲(2001)與 Arya(2001)研究顯示邊界層風速日夜變化的特性，近地面風速於太陽升起後，風速快速增加，中午過後風速達到最大值，日落後風速快速減弱。而在半夜前後時分氣溫和風速皆較低較弱，卻集中發生強烈低空風切，其發生之原因係受颱風接近之影響所致。

台灣桃園機場發生中度以上低空風切之天氣類型，以颱風環流型和東北季風型為最多，鋒面過境型次之，西南季風型甚少。而發生強烈低空風切之天氣類型幾乎都在颱風環流型所發生。台灣桃園機場近海邊，與海相距 3~4 公里，周圍地勢低平，平均海拔高度 33 公尺，對天氣系統無明顯阻擋作用，因此，颱風暴風圈接近機場，機場風場變化大；東北季風，陣風強烈；不連續且不穩定的鋒面會帶來風變和中小尺度對流，容易激發較大風切；以及夏季強勁西南季風，引發陣雨或雷雨，雨勢大，都是造成台灣桃園機場發生中度至強烈低空風切之主因。此結果與松山機場略有不同，松山機場發生低空風切之天氣類型，以東北季風型之天數為最多，西南季風型次之，颱風環流型再次之，鋒面過境型較少。其中發生強烈低空風切之天氣類型卻以西南季風型之次數為最多、颱風環流型次之、東北季風型和鋒面過境型再次，(蒲，2003)。

微爆氣流與低空風切對飛航安全的危害甚大，對於其產生原因及各種動力相關過程的瞭解，進而找出有效預報方法，就是相當迫切且必要的工作。然而，由於微爆氣流發生的時間及空間尺度一般來說都相當的小，時間尺度上通常一個個案從發生到結束只有數分鐘到數十分鐘，而空間尺度也只有數公里而已(Mahoney，1994)，因此，在現階段使用數值模式來預報的困難度較大。目前較可行的方式是加強觀測系統，從觀測資料的分析中，研判機場附近是否會有微爆氣流或低空風切的發生，以便及早提出警告，供相關人員採取因應措施。未來將進一步從強烈風切或微爆氣流的個案中，選取幾個案比較具有代表性的，來進行

個案的中尺度大氣條件的探討，把個案時間發生前、發生時和發生後探討其探空特性、穩定特性、都卜勒雷達風場特性，機場低空風切時風場變化與都卜勒雷達風場加以比對，並進行數值模擬的工作，以便對低空風切或微爆氣流的細部結構以及發展過程的細部時間變化有所瞭解，進而可以對形成低空風切或微爆氣流的機制、下降運動加強的原因等動力過程上的探討有所瞭解與掌握。最後，以期能找出一些對預報人員有實質幫助的預報技術，例如，低空風切或微爆氣流發生時偏好的環境參數、指數預報法等，這部分的工作挑戰性與困難度都相當的高，因為低空風切或微爆氣流的時間及空間尺度都相當小，預報相當困難。

過去我們台灣國內並無機場低空風切偵測系統，相關研究甚少，本文研究成果可供國內學術界參考，為未來關於此領域之研究奠定基礎。近幾年來，飛安的問題已引起全民的重視，LLWAS 是機場重要的基礎建設之一，對航空氣象相當重要，經本文分析研究，可使 LLWAS 發揮更大的附加效用，期能進一步提升飛安，並加強國家的競爭力。本研究透過對台灣桃園國際機場低空風切發生時間之特性與天氣類型的了解，可使機場觀測及預報人員對低空風切有更進一步的了解，對低空風切的診斷、預報將有所幫助。

七、結論

本研究主要是將台灣桃園機場低空風切警告系統所觀測的資料，針對其發生之月變化、日變化以及天氣類型和個案等加以分析和探討，初步研究成果如下：

(一)、台灣桃園國際機場發生低空風切，輕度和中度各約佔四成和四成五，強烈者較少，約佔一成五。雖然較少，但發生強烈低空風切對飛機起降之危害甚大，應給予重視。

(二)、台灣桃園機場 5~6 月梅雨季，受鋒面和西南氣流； 7~8 月夏季受颱風和強烈西南氣流； 9~10 月初秋受颱風、東北季風和鋒面過境；11~4 月深秋、冬季和春季受東北季風和鋒面過境等影響，機場都會有低空風切現象，其中以颱風引發最多且最強烈的低空風切。

(三)、台灣桃園機場發生低空風切，以上午 10 時至下午 16 時與晚上 22 時至清晨 3 時等兩個時段發生次數最多，而強烈低空風切非常集中在半夜前後發生。台灣桃園機場在中午前後時段，太陽輻射受熱最強，大氣下層變成不穩定層，產生熱對流而形成亂流，低空風切的發生與溫度高和風速強是有相當大的關係。而在半夜前後時分氣溫和風速皆較低較弱，卻集中發生強烈低空風切，其發生之原因係受颱風接近之影響所致。

(四)、台灣桃園機場發生中度以上低空風切之天氣類型，以颱風環流型和東北季風型為最多，鋒面過境型次之，西南季風型甚少。而發生強烈低空風切之天氣類型幾乎都在颱風環流型所發生。

(五)、台灣桃園機場近海邊，與海相距 3~4 公里，周圍地勢低平，平均海拔高度 33 公尺，對天氣系統無明顯阻擋作用，因此，颱風暴風圈接近機場，機場風場變化大；東北季風，陣風強烈；不連續且不穩定的鋒面會帶來風變和中小尺度對流，容易激發較大風切；以及夏季強勁西南季風，引發陣雨或雷雨，雨勢大，都是造成台灣桃園機場發生中度至強烈低空風切之主因。

八、致謝

本文在國科會專題研究計畫(NSC90-2111-M-117-001)支援下完成，特此申謝。作者並感謝交通部民用航空局飛航服務總台提供台灣桃園國際機場低空風切警告系統觀測資料，飛航服務總台台北航空氣象中心主任氣象員林清榮、預報員陳海根、張翠分、黃光遠、台北航空氣象台台長童茂祥和台灣桃園航空氣象台台長簡慶芳等同仁協助處理資

料。

參考文獻

江天錚、汪庭安、蒲金標和楊正治，1998：松山機場低空風切類型及產生機制之研究。交通部民用航空局專題研究報告，pp93。

何台華、蒲金標、涂明聖與魏志憲，2003，9：台灣桃園與松山機場低空風切預警系統對飛行安全的維護。中華技術學院「中華民國九十二年航空安全研討會論文集，89-106。

蒲金標，2001：台灣北部和南部氣壓日變化之分析研究。「大氣科學」第二十九期第三號，191~202。

蒲金標，2003：台灣松山機場低空風切警告系統與低空風切診斷分析。大氣科學，第三十一期，第二號，181~198。

Arya,S.P.,2001：Introduction to Micrometeorology，Second Edition，Academic Press，420pp.

Fujita, T. T., 1985: The downburst, microburst and macroburst. SMRP Research Paper 210, University of Chicago, 122 pp.

Mahoney, W. P. III, 1994: The 1993 demonstration and evaluation of an integrated windshear and gust front detection system (TDWR) with an operational Low-Level Windshear Alert System (LLWAS) at Stapleton International Airport, FAA summary project report, 15 Jan, 1994, 92pp.

Proctor, F. H., 1988: Numerical simulation of an isolated microburst. Part I: Dynamics and structure. J. Atmos. Sci., 45, 3137-3160.

Proctor, F. H., 1988: Numerical simulation of an isolated microburst. Part II: Sensitivity experiments.. J. Atmos. Sci., 46, 2143-2165.

Roberts, R. D., and J. W. Wilson, 1986: Nowcasting microburst events using single Doppler radar data. Preprints, 23rd Radar Meteor. Conf., Snowmass, Amer. Meteor. Soc., R14-R17.

Taylor, R. W., 1993: Technology of the airplane and its contribution to safety. The Boeing Company. 48pp.

UCAR,1992：Appendix A&B，Network Expansion LLWAS (Phase III)，Algorithm Specification，University Corporation for Atmospheric Research，pp51.

Wilson, J. W., R. D. Roberts, C. Kessinger, and J. McCarthy, 1984: Microburst wind structure and evaluation of Doppler radar for airport wind shear detection. J. appl. Meteor., 23, 898-915.