

即時機場低空風切偵測之分析與警訊系統探討

1阮婕如 1林清一 2、3蒲金標
1國立成功大學航空太空研究所
2國立台北教育大學自然教育學系
3財團法人中華氣象環境研究發展中心

摘要

低空風切對航機飛行構成嚴重的威脅，尤其在離到場階段，突然遭遇風向量的變化，改變飛行姿態，若飛行員未即時修正，可能對生命及財產造成嚴重的影響。而目前由FAA所發展的第三代低空風切警告系統，可偵測機場跑道兩端向外延伸3海浬範圍的低空風切現象，但系統造價昂貴，設備維護不易，且測風台對於建置腹地取得及周遭環境有諸多限制。本文根據松山機場低空風切系統及中央氣象局颱風資料庫，分析地面天氣情況，並使用機場自動化氣象觀測系統(AWOS)風速、風向及氣壓觀測資料，計算其跳動值及標準差，並分析每小時超過一個標準差的次數及跳動幅度，探討其與低空風切警告系統(LLWAS)發布風切警報的相關性，並將分析所得之結果，用於高雄地區小型機場低空風切現象實例探討。希望藉由研究分析之結果，於機場跑道及離到場走廊裝設微型氣壓感測器，並透過氣壓跳動現象之分析，作為小型機場建置MEMS低空風切偵測系統之參考。

關鍵字：低空風切、低空風切警告系統、氣壓跳動、風速跳動、飛航安全

一、前言

大氣中偶爾會發生突然的天氣變化，其中又以低空風切對航機飛行構成最嚴重的威脅。風的形成有時是快速的，有時是緩慢的，當風向突然的改變或是風速在短時間內增加或減少，都會使風場產生變化而造成風切的發生，依據國際民航組織(International Civil Aviation Organization: ICAO)「低空風切及亂流手冊」(Doc 9817)定義，低空風切是指發生在地面至500m(1,600ft)以下高度間的風切現象[1]。當飛機遭遇風向量的變化，使得飛行姿態改變，輕則造成飛行班次的延誤或機上人員身體不適，嚴重的情況使飛機發生衝出跑道或墜毀的意外，導致航空器及人員生命的損害。尤其當飛機在離到場階段，此時航空器的空速及距地面高度都接近安全的臨界值，依據BOEING statistical summary 2014年安全報告[2]，全球航空安全統計，分析近十年間飛安意外事件，13%發生在飛機起飛離場時，48%在近場落地階段，當航機於離到場時突然遭遇風向量的變化，飛行員應變的時間相對較短，可能造成處理不當或無法即時修正飛行姿態，嚴重影響航機飛行安全。

風切是屬於小尺度的天氣變化，不容易偵測。目前我國台北松山國際機場所使用的低空風切警告系統是由美國聯邦航空總署(Federal Aviation Administration, FAA)與美國國家大氣研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)所研發的第三代低空風切警告系統(LLWAS-III)，系統

於跑道中段及跑道兩端向外延伸3海浬設置12至16座測風台，可偵測頂風或順風、風速強度及風切發生之位置，包含跑道及跑道兩端延伸1至3海浬的範圍，利用樣本網路分析將資料過濾並計算平均值及標準差，若資料出現與平均值有明顯差異時，則將其除去，以避免混淆觀測數據，並以任3座測風台所構成的三角形為一組進行分析，再與其他三角形進行遞迴運算，以偵測低空風切及微爆氣流的發生，風場輻散現象與微爆氣流風速增量及減量值[3]。根據FAA定義，低空風切警告表示測風台偵測風速增量(頂風)超過15kts以上或風速減量(順風)15至29kts，微爆氣流警告為測風台偵測風速減量(順風)超過30kts以上。當系統偵測到風切現象發生時，會發出聲音警告，飛航管制人員及航空氣象觀測員根據文字警報顯示(Alphanumeric Alarm Display, AAD)及圖形警告顯示(Graphic Alarm Display, GAD)，對準備進行離到場之航機提出風切警告[4]。

第三代低空風切警告系統提供之風切偵測及警告資訊，準確率可到達90%以上，但仍有10%以下的誤報率，此外，系統建置在機場周遭之測風台可能受地形、地貌及建築物改變的影響，造成風場資訊偵測誤差，降低風切偵測之準確度，且測風台之用地取得及維護不易，受限於地理環境，無法建置低空風切警告系統[4]。

氣壓、溫度及風的形成相互影響，兩地區因氣壓值不同而形成氣壓梯度，氣壓梯度的大小影響風速的快慢，氣壓梯度越大所形成的風就越強。國際民航組織於低空風切手冊中提出，微型氣壓計裝設

於機場周遭，用來偵測陣風鋒面之冷空氣所引發的氣壓跳升現象，在某些情況，微型氣壓計可比地面風速儀提前三分鐘偵測到陣風鋒面，而第三代低空風切警告系統仍有10%以下的誤報率，因此可結合地面風速及氣壓感測器之應用，以精進低空風切警告系統之準確度[1]。

氣壓跳動的特性包括氣壓上升的幅度及時間，Bedard研究氣壓感測器的設計及應用[5]，依據氣壓資料統計，推論在3分鐘內氣壓變動0.5hPa可有效偵測氣壓增加的現象，以用於觀測雷雨、陣風及鋒面等危險天氣，並提出警告資訊。Wakimoto[6]在雷雨生成週期的研究顯示，當陣風鋒面經過地面測站時會引發氣壓上升、風向改變、風速突增、氣溫下降及降雨，這些都與低空風切現象有關，並利用演算法的設定與驗證，以預測陣風鋒面之活動。Bedard於華盛頓特區的Dulles機場周遭排列式裝設氣壓感測器[7]，以偵測及監視陣風鋒面的發生，避免危害航空器操作安全，並提出雷雨的下衝氣流是造成強烈風切的主要因素，範圍在幾公里或甚至更小，其發生為局部性範圍的特點，對於飛行安全更是一大危害。蒲金標等[8]於低壓鋒面與松山機場低空風切之個案研究，機場受低壓鋒面影響，帶來強勁西風、陣雨及大雷雨，依據數據分析之結果，以氣壓、氣壓梯度、氣溫、露點溫度等跳動範圍超過2個標準差時，可以偵測低空風切的發生。

本研究以松山機場地面自動化測報系統(Automatic Weather Observation System, AWOS)之風向量及氣壓跳動變化，與第三代低空風切警告系統偵測之風切警告，分析其發生之關聯性，並將分析之結果提供高雄地區小型機場作為風切偵測之初步探討，希望藉由風向量及氣壓跳動變化，提供小型機場即時風切資訊，以提升機場航機執行離到場之飛行安全。

二、研究方法和資料來源

常態曲線及分配是一種理論模式，其中標準差(standard deviation)用以表示資料之離散程度，配合平均數及標準差對實證研究所得之資料分配，可做相當精確之描述及推論。在常態曲線下，平均數與標準差之間所占的面積比例有一定的關係，如圖1所示，依比例約68.26%的樣本會分佈在一個標準差的範圍內[9]。

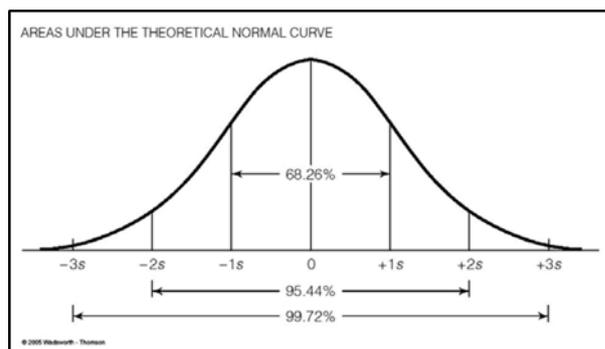


圖1：常態曲線[9]

將常態曲線理論應用於氣象變化的觀測，在穩定大氣下，氣象要素如溫度、氣壓等觀測值，其跳動幅度依常態曲線分配比例，約68.26%的跳動值應分佈在一個標準差內。而當大氣在不穩定之情況，氣象要素之跳動值可能超出一個標準差。

本研究使用蒲金標[10]之分析方法，以機場地面自動化測報系統之風速及氣壓觀測資料，計算風速、風向和氣壓跳動值，擷取超過一個標準差的資料，分析其發生之時段，並與低空風切警告系統發出之風切警告加以比較。高雄地區小型機場未裝設LLWAS，本研究利用機場AWOS氣象觀測資料分析，並參照松山機場AWOS風速及氣壓觀測值與低空風切警告系統發布警告之分析結果，作為機場偵測低空風切現象之初步探討。

三、機場天氣情況分析

(一)松山機場

依據中央氣象局氣象資料庫[11]，2013年9月20日1700UTC強烈颱風天兔(USAGI)，中心約在鵝鑾鼻東南方260公里之海面上，近中心最大風速107kts，瞬間最大陣風132kts，台北松山機場在1700-2000UTC間平均風速15-17kts、最大陣風達24-31kts，其中於1800UTC時段有超過30kts以上之陣風。

21日0900UTC中度颱風天兔[11]，中心約在鵝鑾鼻西南方120公里之海面上，近中心最大風速93kts，瞬間最大陣風107kts。台北松山機場自20日2100UTC起風速開始增強，20日2100UTC至21日2200UTC間平均風速15-26kts、最大陣風達30-41kts，其中在0446UTC及1910UTC最強陣風達41kts。

22日0300UTC中度颱風天兔[11]，中心約在金門南南西方280公里之海面上，近中心最大風速84kts，瞬間最大陣風103kts。台北松山機場自22日0100UTC起風速開始減弱，但0300-1000UTC間仍有超過20kts之最大陣風，於1100UTC起最大陣風降低至15kts以下。

(二)高雄地區小型機場

依據中央氣象局氣象資料庫[11]，2015年8月8日0600UTC中度颱風蘇迪勒(SOUDELOR)，中心約在澎湖北北東方40公里海面上，近中心最大風速74kts，瞬間最大陣風93kts。高雄地區小型機場於8日0600UTC至1000UTC期間，受蘇迪勒颱風影響，機場能見度低，風雨持續，平均風速為16-41kts，於0600-0700UTC最大陣風達40-50kts。

8日1500UTC中度颱風蘇迪勒[11]，中心約在馬祖西南西方140公里處，近中心最大風速68kts，瞬間最大陣風87kts。高雄地區小型機場於8日1100UTC至1500UTC期間，逐漸脫離颱風暴風圈影響，機場偶爾有短暫陣雨，風雨情況逐漸減弱，平均風速為2-20kts，於1900-2000UTC最大陣風達25-29kts。

四、低空風切警告

低空風切之強度以兩個測風台間量測之風向量差分為三種強度，依風速大小分成輕度風切(15-19kts)、中度風切(20-29kts)和強烈風切(≥30kts)[3]。2013年9月20日1700-2000UTC為天兔颱風暴風圈籠罩前，機場平均風速15-17kts、最大陣風達24-31kts，低空風切警告系統每小時分別發出18、12、6和7次風切警告，其中輕度(中度)風切警告分別發出2、4、4和2次(6、3、2和4次)警告，1700UTC還發出10次強烈風切警告。松山氣象台根據風切警告系統及飛行員報告，於1700-2000UTC發布R10跑道風切報告。

20日2100UTC至21日2200UTC為颱風暴風圈籠罩期間，機場平均風速15-26kts、最大陣風達30-41kts，低空風切警告系統每小時發出20至310次風切警告，其中21日0200-1000UTC、1300-1500UTC及1800-2000UTC間發出超過200次以上之風切警告，於0500UTC、0800UTC、1000UTC及1500UTC更發出20次以上強烈風切警告。松山氣象台根據風切警告系統及飛行員報告，於20日2100UTC至21日2200UTC發布R10跑道風切警報。

21日2300UTC至22日1600UTC為颱風暴風圈遠離期間，機場風速從22日0100UTC起開始減弱，但0300-1000UTC間還有超過20kts之最大陣風，低空風切警告系統於0400-0500UTC發出超過10次以上之風切警告，最後僅於0800UTC發佈3次輕度風切警告。氣象台於0200-0800UTC在陣風為17-28kts之下，仍持續發布R10跑道風切報告。

由機場低空風切警告發佈之風切警告，分析天兔颱風於接近、籠罩及遠離期間，最大陣風達18kts以上，會引發松山機場低空風切之現象，其中於暴風圈籠罩期間，最大陣風達31kts以上時，更引發21-26次強烈風切警告(如圖2)。

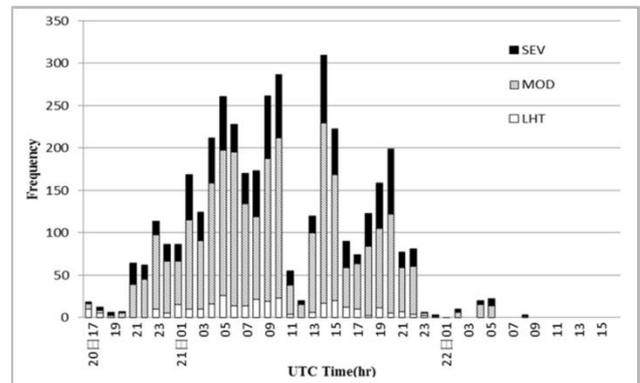


圖2：2013年9月20日至22日松山機場低空風切警告系統逐時發布風切次數圖。(白色線條顯示輕度風切，條文線條顯示中度風切、黑色線條顯示強烈風切)

五、機場風向量跳動分析

依據機場地面自動化測報系統之風速、風向觀測資料，計算風向量跳動值，擷取超過一個標準差的資料，分析其發生之時段，並與低空風切警告系統發出之風切警告加以比較。

風向量跳動值計算方式如下：

$$W_x = -\sin(\theta) * W \quad (5-1)$$

$$W_y = -\cos(\theta) * W \quad (5-2)$$

$$\Delta W_x = W_{xi} - W_{xi-1} \quad (5-3)$$

$$\Delta W_y = W_{yi} - W_{yi-1} \quad (5-4)$$

$$\Delta W = \sqrt{\Delta W_{xi}^2 + \Delta W_{yi}^2} \quad (5-5)$$

W表示風速值。

θ表示風向的角度。

W_x表示x方向的風速值。

W_y表示y方向的風速值。

ΔW_x表示x方向的風速跳動值。

ΔW_y表示y方向的風速跳動值。

ΔW表示風向量的跳動值。

(一)松山機場

2013年9月20日1700-2000UTC為颱風暴風圈籠罩前，機場R10(R28)跑道風向量跳動超過1σ的部分，每小時分別有40、33、51及31次(36、35、43及32次)，而相對應機場低空風切警告系統部分，每小時發出之風切警告為18、12、6及7次，顯示颱風暴風圈籠罩前，風向量跳動值每小時超過1σ之次數較LLWAS偵測之風切警告多(如圖3-4)。

20日2100UTC至21日2200UTC為颱風暴風圈籠罩期間，機場跑道風速持續增強，低空風切警告系統於21日0200-1000UTC、1300-1500UTC及

1800-2000UTC期間，發出120-310次風切警告，此時機場R10(R28)跑道風向量跳動值超過 1σ ，每小時出現20-84次(39-80次)。其中於21日0400-0500UTC、0800-1000UTC及1400-1500UTC期間，系統發出16-26次強烈風切警告，此時R10(R28)跑道風向量跳動值出現12-25kts(11-25kts)，超過2個標準差，每小時有3-11次(5-8次)，顯示颱風暴風圈籠罩期間引發機場強烈風切現象，且風向量跳動值大於 2σ 與強烈風切發生之時段相當接近(如圖3-4)。

21日2300UTC至22日1600UTC為颱風暴風圈遠離期間，機場低空風切系統於22日0200UTC、0400-0500UTC發出10-22次風切警告，此時段機場R10(R28)跑道風向量跳動值超過 1σ ，每小時有16-28次(24-25次)，1000UTC起風速大幅減弱，機場R10(R28)跑道風向量跳動值超過 1σ ，每小時僅有0-3次(1-8次)，且系統風切警告與風向量跳動減弱之情況相符合(如圖3-4)。

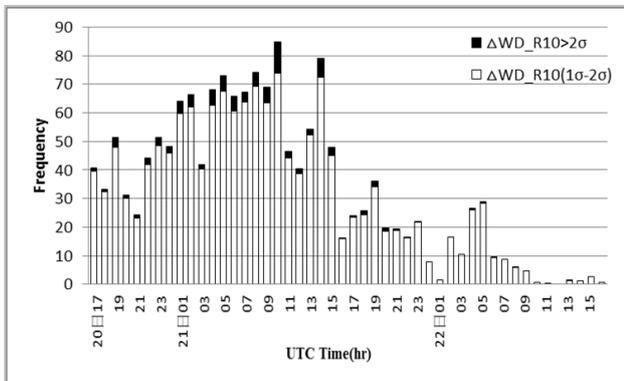


圖3：2013年9月20日至22日松山機場R10跑道風向量跳動值超過 1σ 之頻率分布圖。

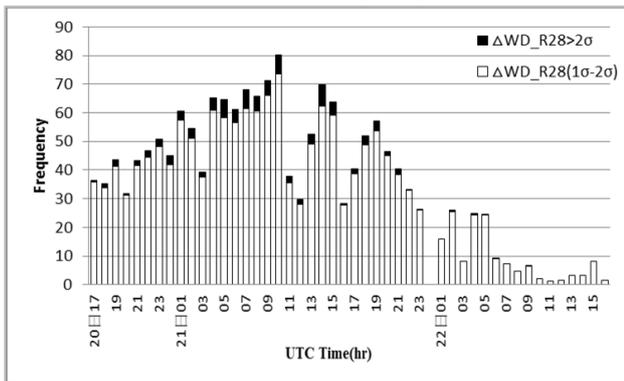


圖4：2013年9月20日至22日松山機場R28跑道風向量跳動超過 1σ 之頻率分布圖。

(二)高雄地區小型機場

2015年8月8日0600UTC至1000UTC為颱風暴風圈籠罩期間，R36(R18)跑道風速大且次數頻繁。參照松山機場之分析結果，當風向量跳動值超過 1σ ，就可能引發低空風切之現象，尤其在風向量跳動值超過 2σ 之時段與強烈風切發生的時段相當一致。高雄地區小型機場R36(R18)跑道於0600-0700UTC風向

量跳動值超過 2σ ，每小時出現30次(18及12次)，其中R36(R18)跑道風向量跳動值分別於0637UTC及0733UTC(0606UTC)出現超過20kts以上，0800-1000UTC跑道風向量跳動值超過 1σ (7.0kts;6.8kts)，每小時出現102-162次(84-150次)，顯示機場於此時段之風向量跳動幅度大且次數多。由風向量跳動值之分析，可推論機場於0600-1000UTC將出現頻繁的風切現象，其中於0600-0700UTC為風向量跳動值超過 2σ 之時段，可能引發強烈風切(如圖5-6)。

8日1100UTC至1500UTC為颱風暴風圈遠離期間，跑道風速明顯減弱。參照松山機場之分析結果，於颱風暴風圈遠離期間，風速大幅減弱，系統僅發出10-22次風切警告，系統發出風切警告之時段與風速減弱情況相符合。高雄地區小型機場R36(R18)跑道於颱風暴風圈遠離期間，風向量跳動值超過 1σ ，每小時有0-24次(0-24次)，跳動幅度及次數明顯減少，且都沒有超過 2σ 以上之跳動值。因此，由風速跳動值之分析，推論機場於此時段之風切現象減弱且次數大幅減少(如圖5-6)。

8日1600UTC至9日0900UTC台灣本島脫離颱風暴風圈，機場可能受颱風外圍環流及溫度日變化影響，R36(R18)跑道於8日1700-2000UTC及9日0100-0800UTC，風向量跳動值超過 1σ ，每小時出現12-114次(18-114次)，其中於8日1700UTC及9日0600UTC，R36及R18跑道風速跳動值超過 2σ ，每小時分別出現6次及12次，由風向量跳動值之分析，推論機場於此時段將出現低空風切，其中於風向量跳動值超過 2σ 之時段，可能引發較強烈之風切現象(如圖5-6)。

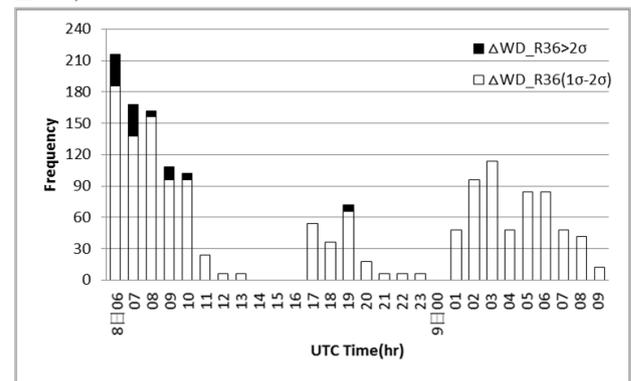


圖5：2015年8月8日至9日高雄地區小型機場R36跑道風向量跳動值超過 1σ 之頻率分布圖。

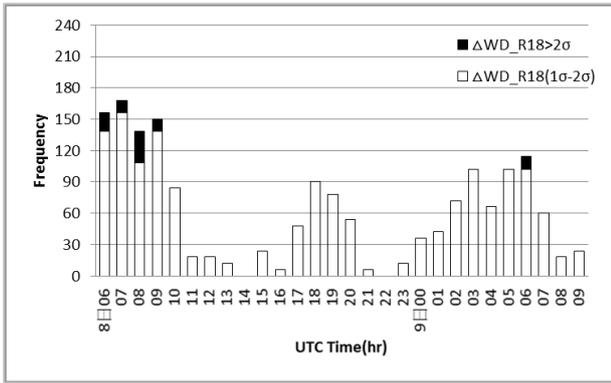


圖6：2015年8月8日至9日高雄地區小型機場R18跑道風向量跳動值超過 1σ 之頻率分布圖。

六、機場氣壓跳動分析

依據機場地面自動化測報系統之氣壓觀測資料，計算風向量跳動值，擷取超過一個標準差的資料，分析其發生之時段，並與低空風切警告系統發出之風切警告加以比較。

(一)松山機場

2013年9月20日1700-2000UTC為颱風暴風圈籠罩前，機場風速增強，跑道風向量跳動超過 1σ 的部分，每小時分別有40、33、51及31次(36、35、43及32次)，而氣壓跳動值超過 1σ 的部分，每小時分別有42、42、36及24次(36、30、12及0次)，相對應機場低空風切警告系統部分，每小時發出之風切警告分別為18、12、6及7次，顯示颱風暴風圈籠罩前，氣壓跳動值比風向量更接近系統偵測風切警告之分布(如圖7)。

20日2100UTC至21日2200UTC為颱風暴風圈籠罩期間，機場氣壓跳動的頻率增強，在機場低空風切警告系統發出風切警告的時刻，機場R10(R28)跑道氣壓跳動值超過 1σ (0.17 hPa; 0.17 hPa)，每小時出現24-84次(12-96次)，其分布情況與風向量跳動值之頻率相當接近，氣象台於此時段也依據系統之風切警告及飛行員提報發布風切報告。其中系統於21日0200-1000UTC、1300-1500UTC及1800-2000UTC發出警告時段，機場R10(R28)跑道氣壓跳動值超過 1σ ，每小時出現24-84次(24-96次)，尤其在系統發出強烈風切時段(21日0400-0500UTC、0800-1000UTC及1400-1500UTC)，此時R10(R28)跑道氣壓跳動值最大出現0.4-0.5hPa(超過2個標準差)，每小時有2-8次(4-10次)，顯示颱風暴風圈籠罩期間引發機場強烈風切現象，且氣壓跳動值大於 1σ 與風切發生之時段相當接近(如圖7)。

21日2300UTC至22日1600UTC為颱風暴風圈遠離期間，機場氣壓跳動頻率減弱，低空風切系統於22日0200UTC、0400-0500UTC發出10-22次風切警告，此時段機場R10(R28)跑道氣壓跳動值超過 1σ 之頻率也減少，每小時出現6-18次(0-6次)。氣象台於22

日0300UTC、0600-0700UTC依飛行員提報發布風切警報，機場R10(R28)跑道氣壓跳動值超過 1σ ，每小時有6-18次(0-6次)，顯示跑道氣壓跳動值超過 1σ 與飛行員提報風切現象是一致的，唯低空風切警告系統於此時段沒有發出風切警告。由以上分析之結果，可知氣象台有風切報告、LLWAS發布低空風切警告與氣壓跳動值超過 1σ 之時段相當接近(如圖7)。

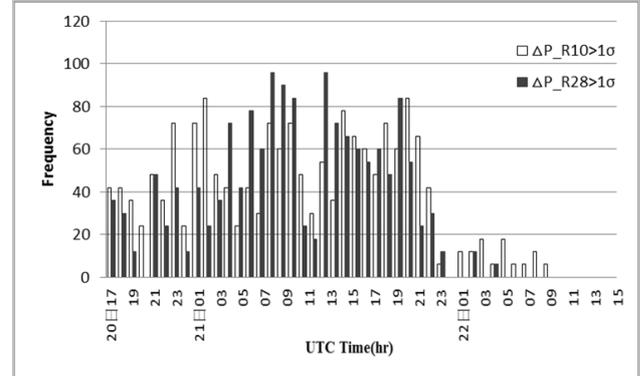


圖7：2013年9月20日至22日松山機場R10及R28跑道氣壓跳動值超過 1σ 之頻率分布圖。

(二)高雄地區小型機場

2015年8月8日0600UTC至1000UTC為颱風暴風圈籠罩期間，機場跑道風速大，氣壓跳動幅度及頻率增強。參照松山機場之分析結果，當氣壓跳動值超過 1σ ，就可能引發低空風切之現象。高雄地區小型機場R36(R18)跑道於0600-0700UTC氣壓跳動值超過 1σ (0.08hPa; 0.073hPa)，每小時分別出現168及156次(48及78次)，其中R36及R18跑道分別於0730UTC及0717UTC出現0.28hPa及0.23hPa之跳動幅度，0800-1000UTC跑道氣壓跳動值超過 1σ ，每小時出現18-84次(18-78次)，於0912UTC氣壓跳動高達0.84hPa(0.47hPa)，顯示機場於此時段之氣壓跳動幅度大且次數多。由氣壓跳動值之分析，可推論機場R36及R18跑道於0600-1000UTC將出現頻繁的風切現象，其中於0600-0900UTC氣壓跳動值超過0.2hPa之時段，可能引發強烈風切(如圖8)。

8日1100UTC至1500UTC為颱風暴風圈遠離期間，R36(R18)跑道風速明顯減弱。參照松山機場之分析結果，於颱風暴風圈遠離期間，氣壓跳動幅度及頻率減弱，LLWAS發出風切警告之時段與氣壓減弱情況相符合，而在氣象台依飛行員提報發布風切警報之時段，松山機場跑道風速跳動值超過 1σ 與飛行員提報風切現象是一致的，唯低空風切警告系統沒有發出風切警告。高雄地區小型機場R36(R18)跑道於颱風暴風圈遠離期間，氣壓跳動值超過 1σ ，每小時有0-36次(0-60次)，跳動幅度及次數明顯減少，僅於1144UTC機場R36跑道氣壓跳動值出現0.23hPa，其餘都沒有超過0.2hPa以上之跳動幅度。因此，由氣

壓跳動值之分析，推論機場於此時段可能有少數風切現象發生(如圖8)。

8日1600UTC至9日0900UTC台灣本島脫離颱風暴風圈，R36(R18)跑道於8日1600-2000UTC氣壓跳動值超過 1σ ，每小時出現24-180次(12-144次)，其中於1700UTC出現大於0.2hPa之氣壓跳動值，顯示機場跑道可能仍受颱風外圍環流影響，引發氣壓跳升現象。由氣壓跳動值之分析，當跳動值超過 1σ 之時段，推論機場可能有低空風切發生，其中在跳動值超過0.2hPa之時段，更可能引發較強烈之風切現象(如圖8)。

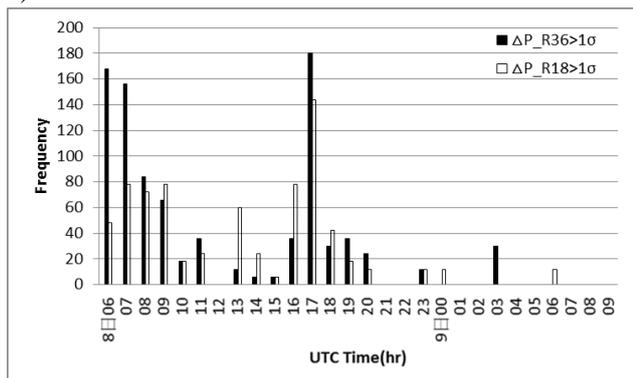


圖8：2015年8月8日至9日高雄地區小型機場R36及R18跑道氣壓跳動值超過 1σ 之頻率分布圖。

七、結論

本文主旨在探討機場低空風切之偵測與警告，利用機場AWOS風速及氣壓觀測資料，並參考蒲金標[10]之方法計算氣象觀測值的標準差及跳動值，分析低空風切警告系統之警告發布與風速及氣壓跳動值，將其發生的頻率及時段比對，研究分析之結果分述如下：

(一)機場陣風大於18kts之時段，低空風切警告系統就會發出風切警告，機場風速越大，風向量及氣壓之跳動幅度和頻率也隨之增加，而當機場跑道風向量跳動值大於 2σ ，且氣壓有超過0.2hPa跳動幅度之時段，就可能有較強烈之風切現象發生。

(二)機場風向量跳動值超過 1σ 與LLWAS及氣象台風切報告發布警告之時段大致接近，尤其在暴風圈侵襲階段，風向量跳動值幅度大，且每小時超過 1σ 的次數密集。

(三)颱風暴風圈侵襲前、籠罩及遠離期間，依氣壓跳動值超過 1σ 之時段與風切警告之發布加以分析，依數據分析結果顯示，氣壓跳動值比風向量跳動值更接近LLWAS偵測風切警告之分布。

(四)依本文研究之分析結果，沿機場離到場走廊裝設氣壓感測器，建置MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)氣壓偵測系統，將即時感測之氣壓變化，轉換為風切警訊，此外，氣壓感測器的建置及維護經費相對較低，且較不受周遭地理環境限

制，於小型機場亦可安裝此套系統，提供飛行員有效的風切警訊，提前應變處置，進而提升機場整體飛行安全。

八、致謝

本文摘自成功大學航空太空研究所碩士論文。本文感謝翁篤行教官的協助。

九、參考文獻

- [1]International Civil Aviation Organization(ICAO)，2005: DOC 9817-Manual on Low-level Wind Shear and Turbulence.
- [2]BOEING statistical summary 2014 - Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents.
- [3]Appendix A&B, Network Expansion LLWAS (Phase III), Algorithm Specification, University Corporation for Atmosphere (UCAR), 1992.
- [4]余曉鵬、童茂祥，臺灣桃園及松山機場低空風切警告系統(LLWAS)介紹，飛行安全秋季刊，2011年，頁64-66。
- [5]A. J. Bedard, H. B. Meade, “The Design and Use of Sensitive Pressure-Jump Sensors to Detect Thunderstorm Gust Fronts. Part I: Pressure- Jump Detector Design”, Journal of Applied Meteorology, Vol. 16, July 1977, pp. 1049–1055.
- [6]Roger M. Wakimoto, “The Life Cycle of Thunderstorm Gust Fronts as Viewed with Doppler Radar and Rawinsonde Data”, Monthly Weather Review, Vol. 110, January 1982, pp. 1060–1082.
- [7]A. J. Bedard, Jr. W. H. Hooke, “The Dulles Airport Pressure Jump Detector Array for Gust Front Detection”, Bulletin America Meteorological Society, Vol. 58, No.9, September 1977, pp. 920–964.
- [8]蒲金標、徐茂林、游志遠、劉珍雲，台灣低壓鋒面與松山機場低空風切個案研究，航空安全及管理季刊，第1卷，第3期，2014年5月，頁227-243。
- [9]常態曲線，www3.nccu.edu.tw/~soci1005/CH5.pdf，資料擷取時間2016年5月。
- [10]蒲金標、徐茂林、游志遠，2013年7月12~13日蘇力颱風侵襲期間松山機場低空風切分析研究，大氣科學，第四十三期，第一號，2005年3月，頁27-46。
- [11]中央氣象局颱風資料庫，http://rdc28.cwb.gov.tw/TDB/ntdb/pageControl/ty_warning，資料擷取時間2016年5月。

