

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

蒲金標^{1,2} 徐茂林¹ 游志遠¹

¹誠開股份有限公司研發部

²國立臺北教育大學自然科學教育學系

(中華民國一〇三年五月二日收稿；中華民國一〇三年十二月二十三日定稿)

摘 要

本文利用 2013 年 7 月 12~13 日蘇力(Soulík)颱風侵襲期間，根據地面自動測報系統(AWOS)測報資料，就松山機場跑道兩頭(R10 和 R28)之風速、氣壓和氣壓梯度等跳動情形，與機場低空風切警告系統(LLWAS)發出的風切警告加以分析。

研究結果顯示颱風暴風圈接近、籠罩和遠離台灣北部地區之際，松山機場最大風速、最大風速差和風速等最大跳動幅度分別 $> 17KT$ 、 $> 11KT$ 和 $> +6 / < -6 kt$ ，飛行員在起降時就有可能遭遇風切的危險；分別 $> 32KT$ 、 $> 29KT$ 和 $> +12 / < -12KT$ ，機場就可能有多且強的風切現象發生。當風速越大，其風速、氣壓和氣壓梯度等跳動幅度越大；反之，則越小。尤其在最大風速發生之前 1~5 分鐘，氣壓和氣壓梯度等跳動幅度都有很強。

機場跑道(R10 與 R28)風速、氣壓和氣壓梯度等跳動幅度超過一個標準差(1σ)之時段和頻率，與機場低空風切警告系統發出風切警告者有相當的一致性，跳動幅度超過 1σ 之頻率越多，引發風切警告次數越多且越強。因此，利用機場跑道風速、氣壓和氣壓梯度等跳動幅度超過 1σ 之頻率和時段，就可偵測到低空風切的發生，或許也可以彌補機場低空風切警告系統還有 10% 以下的風切警告失敗率。本研究成果可提供研發機場低空風切簡易警告系統參考。

關鍵字：標準差、蘇力颱風、低空風切、跳動幅度

一、前言

大氣偶而會發生惡劣天氣，嚴重影響飛行安全，降低營運效率。這些天氣的變化有時可以準確地預報，但是有時天氣發生突然的變化，卻造成了飛機的誤點，最嚴重還會釀成空難事件，造成旅客生命和財產的損失。其中以低空風切(Low-level Wind Shear)或微爆氣流(Microburst)是對飛安構成最嚴重威脅之一種。由於低空風切發生在最低層—500m (1,600 ft)以下，風向或風速之突然變化，對飛機起降階段而言，則特別重要。當飛機在爬升離場和降落進場階段，飛機速度和高度都接近臨界值，因此，飛機容易遭受風切的危害。

風切乃指大氣中單位距離內，風速或風向或兩者同時發生之突然大變化，如以數學式表示，則

$$\text{風切} = \Delta \vec{v} / \Delta s$$

$\Delta \vec{v}$ 及 Δs 分別代表風向量變化及產生變化之距離。其風切可分為水平風切或垂直風切。

風切是個非常複雜和很難預測的小尺度氣象現象，它所造成的風場變化可能是緩慢的，也可能是快速和突然的。強烈的順風和逆風可以在瞬間變弱或變強，引發低空風切的發生。飛機在起飛和降落過程，要經過逆風、順風和下降氣流的風場。目前還沒有一個成熟的科學依據，可對低空風切做精確的預報，因此，及時監測風切現象的發生，提供給飛行員注意，就特別重要。

美國聯邦航空總署(FAA)開發了第三代低空風切警告系統(Phase-III LLWAS)，該系統在跑道兩旁離中心線 1 海哩和跑道兩端向外延伸 3 海哩範圍內建置數十個測風塔。當數十個測風儀中的一個觀測到風場和所有測風儀的平均風場有每小

時 15 海哩的差值時，就有可能有風切現象，系統即時發出風切警告。另一個情況就是資料處理的結果，發現有輻散(divergence)的風場，也會發出風切的警報。其原理是以任三具測風儀為頂點，兩兩連線形成一個三角形的區域，將測風儀量測到的風速與風向經由電腦做內差與平滑化處理，形成該區域的向量風場。對該區域的向量風場取輻散度(divergence)，其物理意義為描述該區域內部氣流對區域邊界之假想平面向外或向內流動的通量趨勢，即氣象領域對某區域風場「輻合」與「輻散」現象的定量化描述。其物理公式如式(1)。

$$\Delta = \text{div}(u,v,w) = \partial u / \partial x + \partial v / \partial y + \partial w / \partial z \quad (1)$$

國際民航組織(ICAO, 2005)指出 LLWAS-III 系統監測低空風切的準確率可達 90%，但仍有 10%的誤報率。陳與袁(2014)使用診斷數學模式和測風儀，來克服 LLWAS 無法監測的「盲區」。我國民用航空局於 2001 年 9 月 1 日於松山和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(Phase-III LLWAS)，原本要在高雄國際機場建置同樣規格的低空風切警告系統，後因該機場 06 跑道靠海，腹地不足，無法建置而放棄。

國際民航組織文件低空風切手冊(Doc 9817-AN1449)提到氣壓感應(微型氣壓計)裝設在機場週遭來偵測陣風鋒面冷空氣等所引起的氣壓跳升(pressure jump)，在某些情況下，可偵測到陣風鋒面的時間比地面測風所測到的時間，提早三分鐘。這種地面風場和氣壓的組合曾經測試過，但是尚未應用到 LLWAS 系統。

Wakimoto (1982)認為陣風鋒面(GUST FRONT)經過測站，常帶來氣壓上升和氣溫下降、風向突變以及風速突增的現象，這種現象是造成低空風

切主要現象之一種。Viana, et al. (2007)曾以小尺度和短時間之地面氣壓跳動(pressure fluctuations)來研究大氣邊界層(atmospheric boundary layer)之特性，將地面氣壓跳動光譜特性與亂流加以比較。蒲(2003)認為松山機場雷雨陣風、颱風強風、鋒面過境風場改變大以及強烈東北季風都是引發低空風切之主因。何等(2005)研究顯示松山機場無論在強盛西南風盛行或結構完整的鋒面影響時期，其低空風切皆集中於風向 $280^{\circ}\sim 290^{\circ}$ 間發生。蒲等(2014)顯示當大氣發生劇烈變化時，其風速、氣壓、氣壓梯度、氣溫和濕度等觀測值，會產生大幅度的跳動現象，而其大幅度跳動現象，可能與低空風切發生有其關聯性。在雷雨陣風鋒面來臨和大雷雨引發氣壓跳升現象發生時，透過風速和氣壓梯度超過 2 個標準差(standard deviation)，以及氣壓、氣溫和露點溫度跳動一樣超過 2 個標準差時，能偵測到低空風切現象的發生。通常雷雨愈強，愈會有氣壓突降或跳升現象，升降幅度越大，低空風切越強。

本文嘗試以 2013 年 7 月 12~13 日蘇力颱風侵襲期間，分析風速、氣壓和氣壓梯度等每秒或每分鐘跳動超過 1 個標準差之時段與頻率，與現有松山機場低空風切警告系統發出風切警告加以分析比對，或許可以找出以風速、氣壓和氣壓梯度等跳動來替代風塔觀測風場之計算風切方式。

二、資料來源和研究方法

本文資料採用民用航空局松山機場低空風切警告系統(LLWAS) 2013 年 7 月 12~13 日風切警告資料(每 10 秒擷取風塔資料)、松山機場地面觀測報告(801C)(定時和特別觀測)和地面自動化測報系統(Automatic Weather Observation System; AWOS)(每秒一筆資料)以及中央氣象

局歷史颱風 2013 年蘇力颱風資料，其中低空風切警告系統係以每 10 秒計算是否有風切現象，換言之，每 10 秒發布 1 次是否有風切警告。而機場 AWOS 系統之風速和氣壓雖然都是每秒紀錄，但風速是每秒觀測變動，氣壓是每分鐘觀測變動，略有不同。為便於分析機場風切現象，本文以機場低空風切系統每 10 秒時間尺度為主。

機場在穩定大氣之下，一般氣象要素如氣壓等觀測，其每秒前後觀測數值跳動幅度，通常是在一定範圍內，若跳動範圍是近似於常態分佈的機率分佈，約 68%或 95%數值分佈在 1 個或 2 個標準差之內。在不穩定大氣之下，該等氣象要素跳動大，可能會超出 1 個或 2 個標準差。本文嘗試就松山機場風速、氣壓和氣壓梯度每秒或每分鐘前後觀測跳動超出 1 個標準差之頻率與機場低空風切發生頻率加以比較。

$$X_i = Y_i - Y_{i-1}$$

Y_i 代表這一秒或這分鐘氣象要素之觀測值。

Y_{i-1} 代表前一秒或這分鐘氣象要素之觀測值。

X_i 代表這一秒或這分鐘與前一秒或前一分鐘氣象要素之觀測差值(跳動值)

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

平均值接近 0 時，則分成正和負值兩部分，分開計算標準差 σ 。

例如，氣壓每分鐘跳動值平均接近 0，則其每秒跳動分成正與負值兩部分，分別計算標準差 σ 。

標準差 σ ：

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

三、颱風路徑

2013年7月12日0600UTC中度颱風蘇力，中心氣壓935hPa，近中心最大風速95G115KT，位在宜蘭東南東方海面，暴風圈進入台灣東部陸地(圖1a)，此時松山機場地面觀測報告(801C)風向風速350°09G15KT，到了0946UTC機場氣壓降至999.3hPa，風向風速030°09G24KT。機場在颱風暴風圈接近期間(12日0600-1100UTC)，就有持續性風切現象發生，其中風切系統於12日0600UTC首次發出風切警告，當時風向不定，風速15KT。於0900-1100UTC，持續發出風切警告，這段時間吹北北東風，最大風速20-24KT。

12日1200UTC颱風略為減弱(90G110KT)，中心位在宜蘭東南東方約230公里海面上，暴風圈進入台灣中部以北和東半部陸地(圖1b)，颱風接近的影響，機場氣壓再降至997.6hPa，風力也增強，吹03012G30KT。12日1800UTC日颱風強度不變，中心位在宜蘭東方約60公里海面上(圖1c)，此時，暴風圈已籠罩了台灣，機場氣壓更降為977.7hPa，風力更強，吹34021G45KT。於1900UTC颱風在新北市及宜蘭縣交界處登陸，機場於1926UTC氣壓降至最低，達958.0hPa，2000UTC風速達到最強，吹08033G60KT。機場R10和R28自動測報系統，測到機場最低氣壓分別為958.0hPa(R10，1926UTC)和956.7hPa(R28，1923UTC)，跑道兩端測到最低氣壓相差1.3hPa，機場測到最大風速分別為66KT(R10，1948UTC)和71KT(R28，2000UTC)。機場在暴風圈侵襲期間(12日1200-2400UTC)，強烈風切現象發生頻繁。

13日0000UTC颱風中心位在新竹西南西方約10公里海面上，暴風圈仍籠罩台灣(圖1d)，

機場氣壓回升至975.6hPa，風速仍強，吹11027G40KT。颱風逐漸遠離，於0112UTC之後，機場氣壓回升至981.0hPa，風速減弱至20KT以下。暴風圈遠離機場以後，風切警告大幅減少。機場在颱風暴風圈遠離期間(13日0100-0600UTC)，風切系統不再發出警告，唯機場地面觀測報告(801C)資料，根據飛行員仍有風切紀錄。

根據機場地面觀測報告(801C)資料分析，蘇力颱風暴風圈接近台灣北部地區，松山機場風速增強，最大陣風達15KT以上時，開始有低空風切現象發生。暴風圈籠罩台灣北部地區，機場氣壓下降至最低之際，最大陣風達到最強時，引發低空風切更密集。暴風圈遠離，機場最大陣風減弱至15KT以下，風切現象就停止發生，顯示受颱風暴風圈的影響，機場最大陣風達15KT以上，松山機場就能有低空風切現象發生。

四、低空風切分析

颱風暴風圈接近期間(12日0600-1100UTC)，機場風切警告系統前3小時就有零星風切警告發出，地面觀測資料(801C)於0700UTC天氣報告也有中度低空風切紀錄。隨後，在0800-1100UTC期間，風切警告系統發出警告次數增加，每小時各發出3次、13次、70次和180次，如圖2。

暴風圈侵襲期間(12日1200-2400UTC)，最大陣風逐漸增強，風切警告次數大幅增多，風切次數每小時達218次以上，其中於2000UTC高達391次之多；嚴重風切每小時也達37次以上，其中於1900UTC高達220次，如圖2。

暴風圈遠離期間(13日0100-0600UTC)，機場於13日0100UTC暴風圈遠離之後，最大風速迅速降為20KT以下，風速減弱，低空風切警告

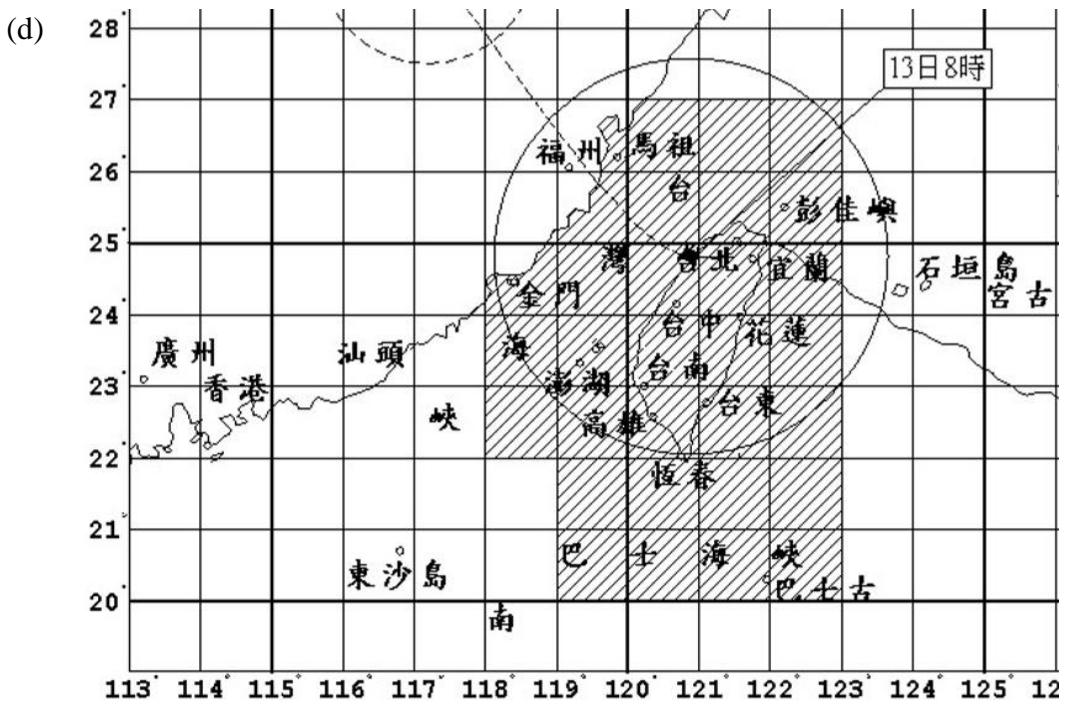
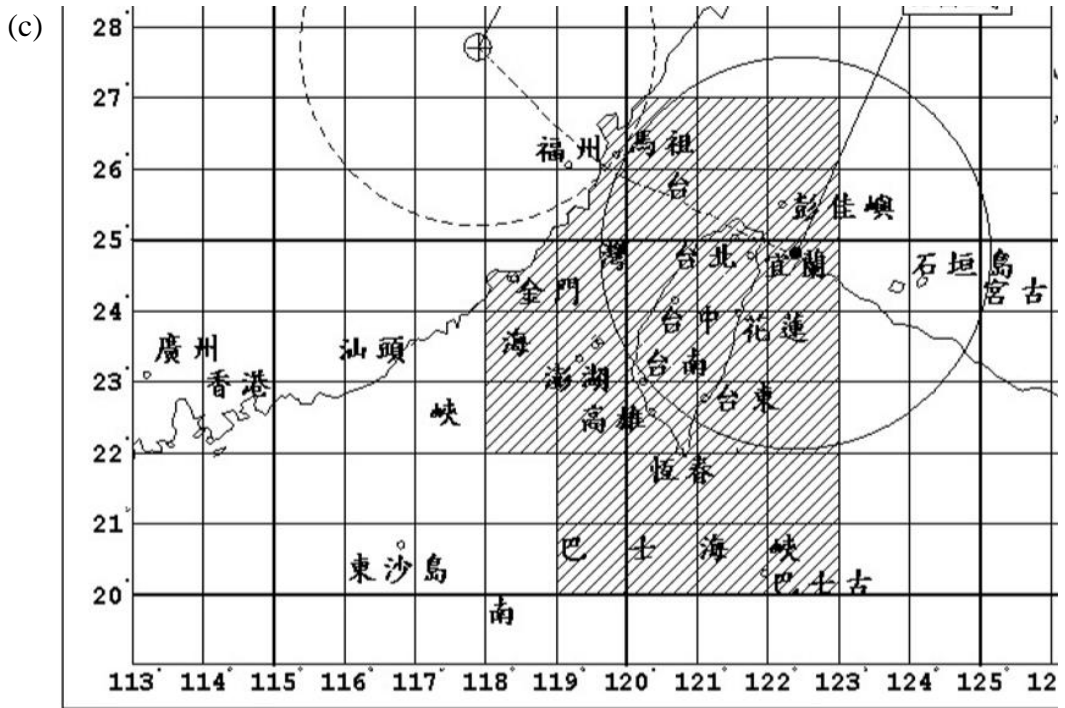


圖1 (續) (c) 12日 1800UTC (d) 13日 0000UTC

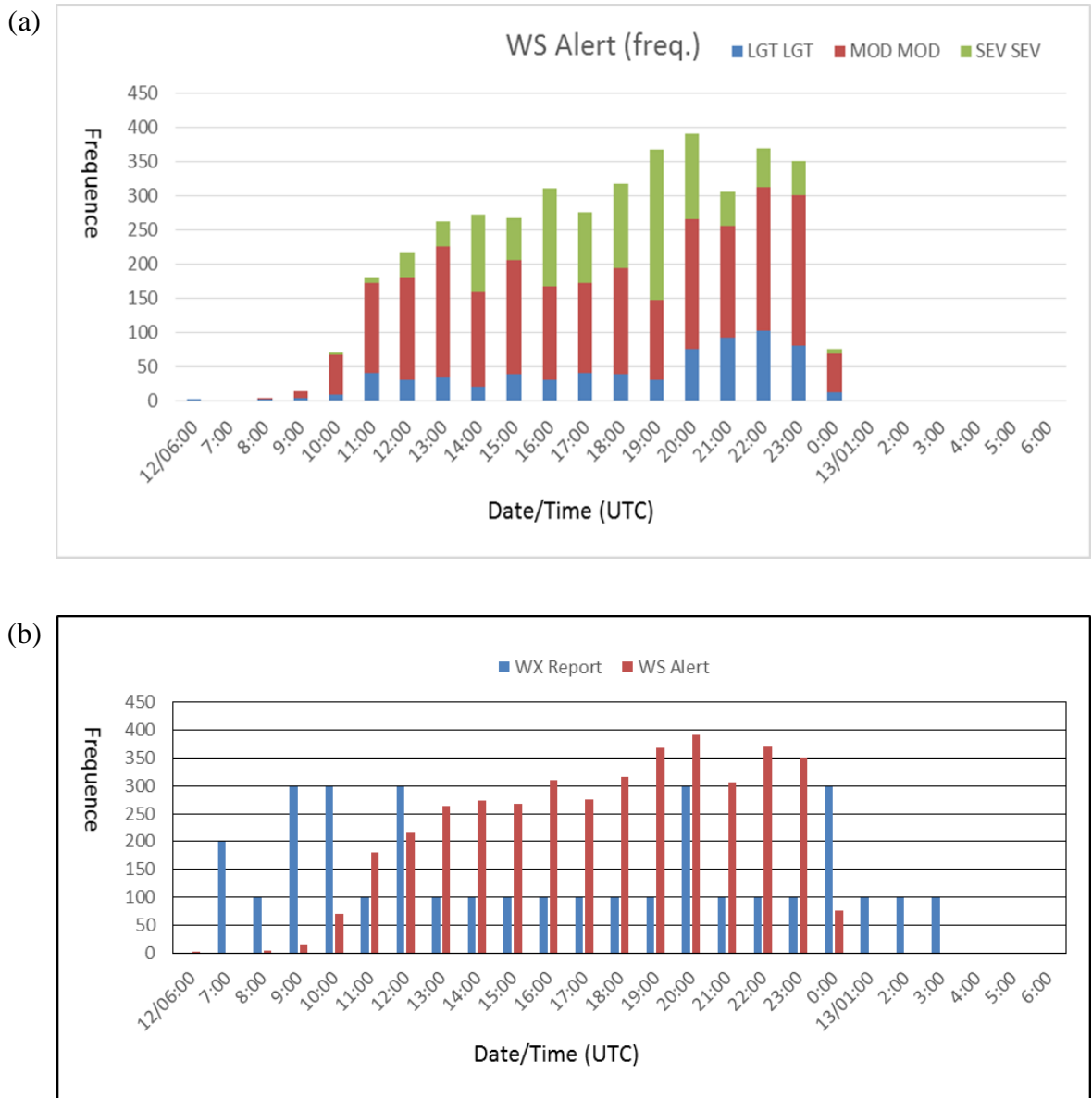


圖 2 2013 年 7 月 12~13 日松山機場低空風切警告系統發布風切次數和氣象台風切報告 (a)風切系統輕度風切 (藍色)、中度風切 (紅色) 和強烈風切 (綠色) (b)風切系統風切警告逐時次數 (紅色) 與氣象台風切報告 (藍色)，頻率 99 表示輕度風切，199 表示中度風切，299 表示強烈風切之時段與頻率分布。

系統不再發出風切警告，如圖 2。唯 13 日 0100-0300UTC 氣象台根據飛行員報告，天氣報告繼續發布風切紀錄。

顯示在蘇力颱風暴風接近期間，松山機場低空風切警告系統就有零星風切警告；在暴風圈侵襲間，引發松山機場低空風切警告次數多且嚴重；在暴風圈遠離之後，則大幅減少。

五、機場地面自動測報資料

根據機場地面自動測報系統(AWOS)，以跑道兩頭 (R10 和 R28) 地面自動測報每秒資料，嘗試以 2013 年 7 月 12~13 日颱風侵襲松山機場期間跑道兩頭之風速、氣壓和氣壓梯度 (距離 2500 公尺之氣壓差) 之跳動(fluctuation)情形，三者與機場低空風切警告系統發出風切警告頻率和發生時段加以分析。

7 月 12~13 日松山機場地面自動測報兩頭跑道風速、氣壓和氣壓梯度等跳動幅度之平均、跳動幅度眾數(mode)和標準差以及跳動幅度超過一個標準差(1σ)值等等數據，詳如表 1。

(一) 風速大小與風速跳動幅度

7 月 12~13 日颱風暴風圈接近階段 (12 日

0600-1100UTC)，機場風切警告系統前 3 小時 (0600-0800UTC)就有零星風切警告發出，地面觀測資料(801C)天氣報告也有輕度至中度低空風切紀錄，這段時間 R10 (R28)每小時風速和風速差最大值分別為 18-21KT (15-21KT)和 13-14KT；風速跳動最大值(+10/-6KT；+6/-5KT)都超過 1σ ，這是風切系統最初發出風切警告時，其相關的風速、風速差和風速跳動的門閥值。後 3 小時(0900-1100UTC)風切警告系統發出警告次數增加，每小時分別有 13~180 次，而其每小時風速和風速差最大值也增加，分別為 18-26KT (21-30KT)和 16-23KT；風速最大跳動幅度也增大，達+13/-7KT (+11/-10KT)，詳如表 2、圖 3 和圖 4。

侵襲階段 (12 日 1200-2400UTC)，機場風速達輕度至中度颱風強度，風切警告次數大幅增加，次數最高 1 小時達 391 次(2000UTC)；其中強烈風切次數最高 1 小時也達 220 次(1900UTC)之多。這段時間機場每小時最大風速和風速差也大幅增強，分別為 32-66KT (29-49KT)；風速跳動幅度也大幅增加，其最大跳動幅度於 1739UTC/1936UTC 達+27/-20KT (於 1928UTC/1938UTC 達+26/-23 KT)，詳如表 2、圖 3 和圖 4。顯示風切次數頻繁和強烈風切發生時段，機場最大風速、風速差和風速最大跳動幅度也相當大。

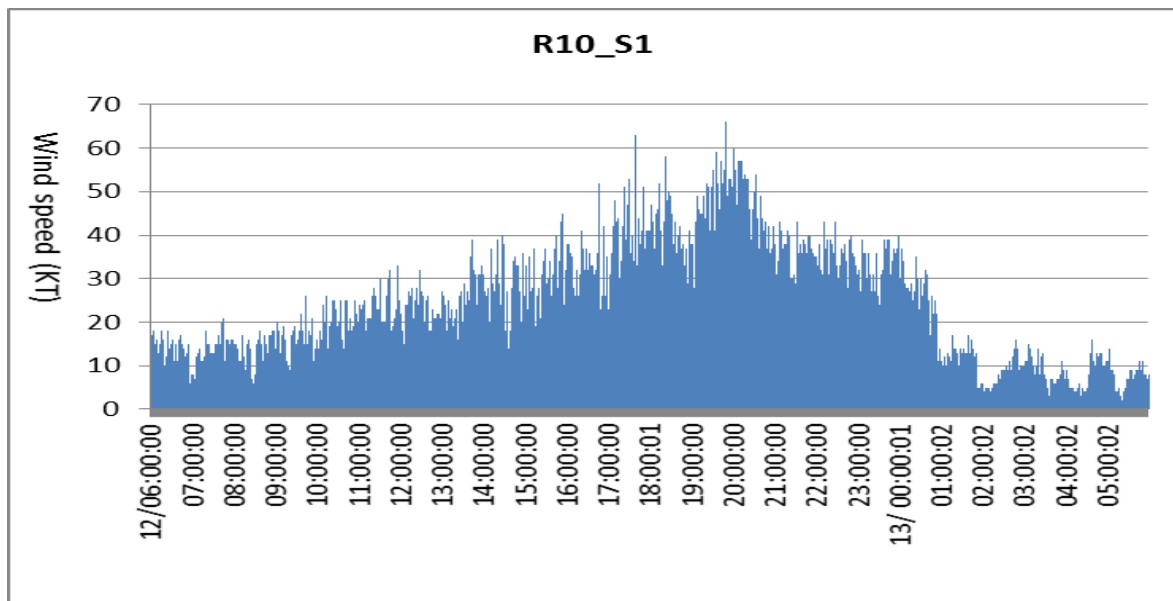
表 1 2013 年 7 月 12~13 日松山機場 R10 和 R28 間風速、氣壓和氣壓梯度跳動數據分析

	R10S1_fluct. (KT)	R28S1_fluct. (KT)	R10P_fluct. (hPa)	R28P_fluct. (hPa)	PG_fluct. (hPa)
Average	+2.43/-2.23	+2.28/-2.11	+0.16/-0.19	+0.16/-0.2	+0.19/-0.18
Mode	+1.00/-1.00	+1.00/-1.00	+0.10/-0.10	+0.10/-0.10	+0.10/-0.10
Stdev	2.41/1.99	2.27/1.95	0.15/0.17	0.14/0.17	0.22/0.19
Fluct. ($>1\sigma$ / $<1\sigma$)	$>+4.8$ / <-4.2	$>+4.5$ / <-4.0	$>+0.31$ / <-0.36	$>+0.30$ / <-0.37	$>+0.41$ / <-0.37

表 2 2013 年 7 月 12~13 日松山機場逐時風切次數、最大風速、最大風速差以及風速、氣壓和氣壓梯度等最大跳動幅度數據

Day/ Time (UTC)	WX Report	WS Alert (freq.)	R10(R28) S1_Max	R10/R28 S1_dif. (KT)	R10(R28) S1-Fluct. (KT)	R10(R28)P _fluct. (hPa)	Pg_ fluct. (hPa)
12/ 06:00		1	18 (15)	13	+10/-6 (4/-4)	+0.1/-0.1 (0.1/-0.1)	+0.1/-0.2
7:00	MOD WS	0	18 (18)	14	+7/-6 (+6/-5)	+0.2/-0.1 (+0.1/-0.2)	+0.3/-0.2
8:00	LGT WS	3	21 (21)	14	+8/-5 (+6/-5)	+0.1/-0.2 (+0.1/-0.2)	+0.2/-0.2
9:00	MOD WS	13	18 (21)	16	+7/-9 (6/-5)	+0.2/-0.1 (0.1/-0.2)	+0.3/-0.2
10:00	MOD WS	70	26 (27)	17	+9/-7 (+9/-6)	0.2/-0.1 (0.2/-0.2)	+0.2/-0.2
11:00	LGT WS	180	26 (30)	23	+13/-7 (+11/-10)	0.2/-0.2 (0.2/-0.2)	+0.2/-0.3
12:00	SEV WS	218	33 (38)	32	+13/-12 (+13/-11)	0.3/-0.5 (0.2/-0.4)	+0.3/-0.7
13:00	LGT WS	263	32 (38)	29	+12/-12 (+17/-12)	0.4/-0.4 (0.4/-0.5)	+0.4/-0.6
14:00	LGT WS	273	39 (39)	32	+16/-12 (+19/-14)	+0.4/-0.4 (+0.3/-0.4)	+0.6/-0.5
15:00	LGT WS	268	40 (39)	29	+22/-11 (+14/-12)	+0.5/-0.5 (+0.4/-0.5)	+0.9/-0.8
16:00	LGT WS	311	45 (51)	39	+17/-14 (+25/-19)	+0.9/-0.6 (+0.1/-0.8)	+1.1/-0.9
17:00	LGT WS	276	52 (50)	42	+11/-15 (+17/-14)	+0.5/-0.6 (+0.6/-0.8)	+0.8/-1.1
18:00	LGT WS	317	63 (57)	42	+27/-18 (+25/-22)	+0.8/-0.8 (+0.7/-1.5)	+1.7/-1.0
19:00	LGT WS	368	58 (67)	45	+20/-19 (+23/-21)	+0.8/-1.2 (+1.2/-1.3)	+1.7/-1.7
20:00	SEV WS	391	66 (66)	48	+25/-20 (+26/-23)	+1.2/-1.2 (+1.3/-1.1)	+1.7/-1.4
21:00	LGT WS	306	60 (71)	49	+19/-16 (+20/-18)	+2.6/-0.2 (+1.2/-0.7)	+2.7/-1.1
22:00	LGT WS	370	43 (56)	28	13/-11 (+16/-14)	+0.5/-0.2 (+0.6/-0.7)	+0.8/-0.6
23:00	LGT WS	351	43 (47)	29	+13/-12 (+15/-10)	+0.1/-0.2 (+0.3/-0.4)	+0.4/-0.3
0:00	SEV WS	76	40 (51)	27	+16/-10 (+13/-8)	+0.4/-0.4 (+0.4/-0.3)	+0.5/-0.6
13/ 01:00	LGT WS	0	37 (38)	26	+9/-10 (+9/-8)	+0.3/-0.3 (+0.5/-0.4)	+0.5/-0.5
2:00	LGT WS	0	17 (26)	17	+6/-6 (+6/-6)	+0.3/-0.1 (+0.3/-0.1)	+0.2/-0.1
3:00	LGT WS	0	16 (16)	11	+3/-3 (+3/-3)	+0.2/-0.1 (+0.2/-0.1)	+0.2/-0.2
4:00		0	15 (15)	9	+4/-3 (+4/-2)	+0.2/-0.1 (+0.3/-0.1)	+0.2/-0.2
5:00		0	16 (16)	10	+4/-4 (+3/-2)	+0.1/-0.1 (+0.2/-0.1)	+0.2/-0.2
06:00		0	14 (13)	7	+3/-2 (+3/-3)	+0.1/-0.1 (+0.1/-0.1)	+0.1/-0.1

(a)



(b)

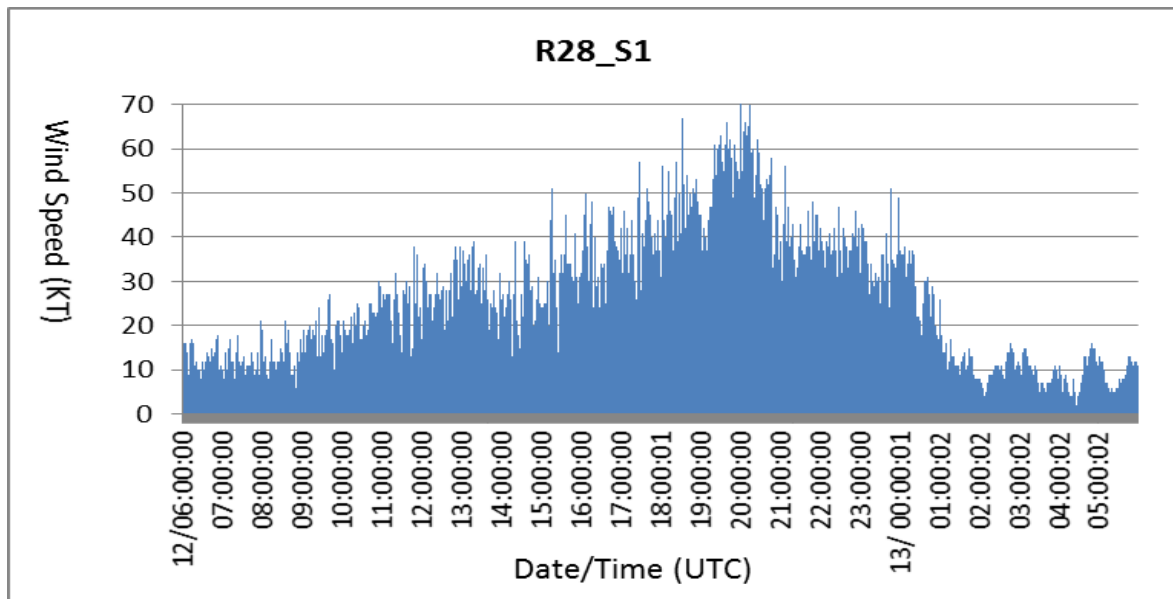
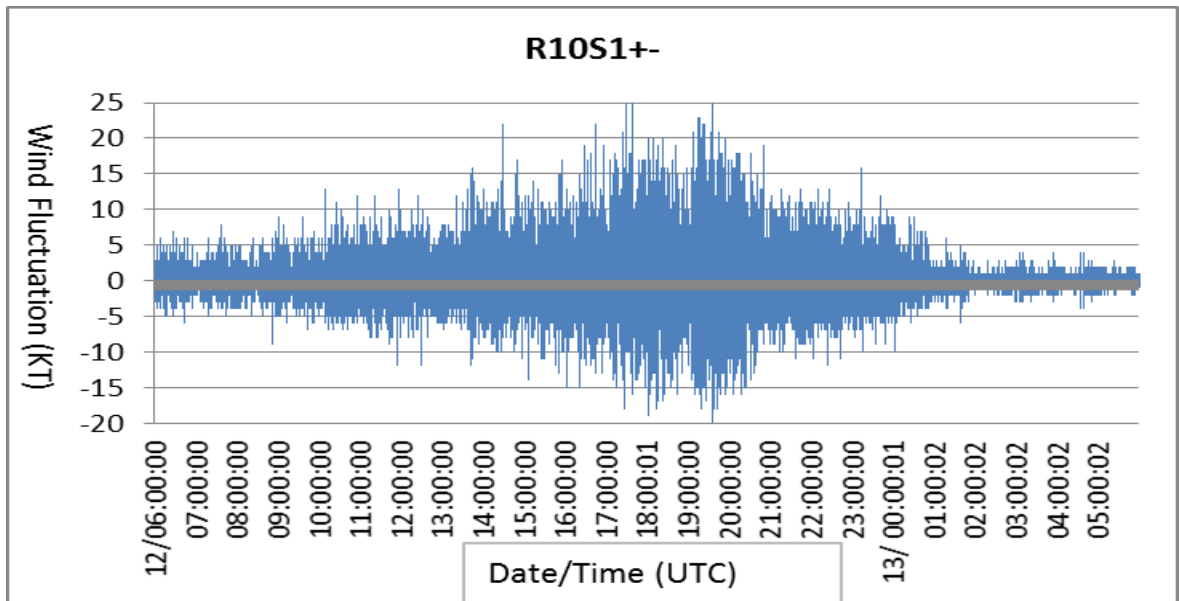


圖 3 2013 年 7 月 12~13 日松山機場地面自動測報跑道 R10 和 R28 風速(KT)之時間分布 (a) R10 (b) R28。

(a)



(b)

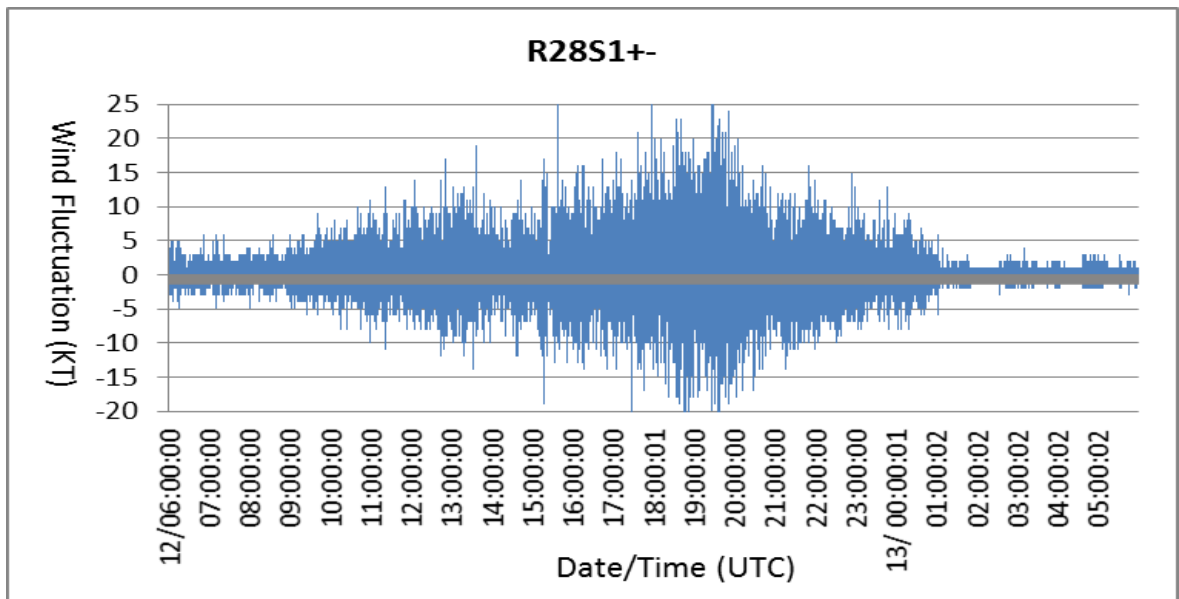


圖 4 2013 年 7 月 12~13 日松山機場地面自動測報跑道 R10 和 R28 風速(KT)每秒跳動之時間分布 (a) R10 (b) R28。

遠離階段(13日0100-0600UTC),低空風切警告系統不再發出風切警告,機場最大風速(14-37;13-38KT)、最大風速差(7-26KT)以及風速跳動幅度(+3/-2~9/-10KT; +3/-2~+9/-8KT)都大幅減小。唯13日0100-0300UTC天氣報告仍有輕度風切紀錄,按除了0300UTC之外,機場每小時最大風速和風速差分別仍有17-37KT(26-38KT)和17-26KT,風速跳動幅度+6/-6~+9/-10KT(+6/-6~+9/-8KT)也還超過 1σ ,詳如表2、圖3和圖4。換言之,颱風雖然遠離,此三要素(最大風速、風速差和風速跳動幅度)分別等於或大於17KT、11KT和+6/-6KT時,機場仍可能有風切現象發生。

以上分析顯示暴風圈接近、侵襲和遠離階段,只要機場最大風速、最大風速差和風速最大跳動幅度分別等於或大於18KT、13KT和+6/-6KT,低空風切警告系統就有可能發出風切警告;此三要素分別等於或大於32KT、29KT和+12/-12KT,低空風切警告系統每小時就有可能頻繁發出風切警告(200次以上)。而此三要素分別等於或大於17KT、11KT和+6/-6KT,飛行員在起降時仍可能遭遇風切的危險。

(二) 氣壓和氣壓梯度跳動幅度

7月12~13日颱風暴風圈接近階段,機場風切現象開始發生時,機場氣壓和氣壓梯度跳動幅度都小於 1σ ,如圖5、圖6和表2,換言之,在颱風暴風圈接近階段,氣壓和氣壓梯度未能及時反應風切現象之發生。

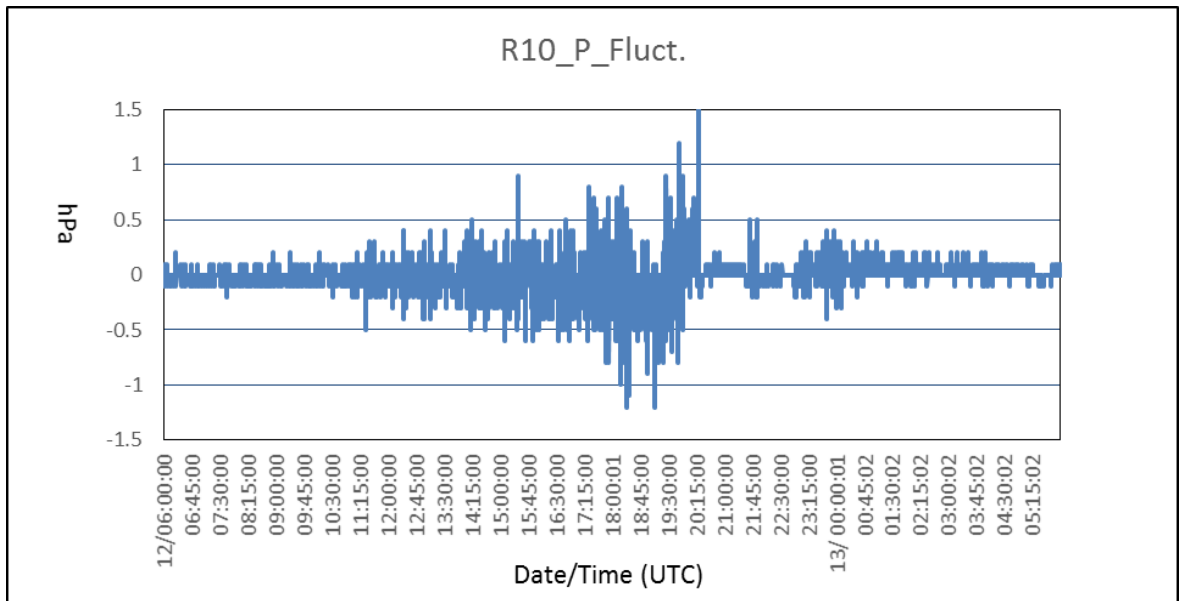
颱風暴風圈侵襲階段,風切警告次數大幅增加和強度增強之時,機場每小時最大氣壓和氣壓梯度跳動幅度都非常大($> 0.4\text{hPa}$ / $< -0.4\text{hPa}$)。其中,R10氣壓跳動最大幅度出現+2.6hPa

(2019UTC)和-1.2hPa(1823UTC);R28出現+1.3hPa(1957UTC)和-1.5hPa(1718UTC),詳如表2和圖5。同時R10和R28間氣壓梯度跳動幅度也非常大($> 0.4\text{hPa}$ / $< -0.4\text{hPa}$),其中跳動最大幅度出現+2.7hPa(2019UTC)和-1.7hPa(1835UTC),如表2和圖6。尤其是在1730-2030UTC機場風切警告頻繁發出風切警告(317~391次)和風速最強(52-71KT)之際,氣壓和氣壓梯度等跳動幅度更大。其中機場低空風切發出次數最多391次(2000UTC)和R10觀測到最大風速66KT(1948UTC)時,氣壓跳動最大幅度達+1.2hPa(1947UTC)和-0.8hPa(1946UTC),氣壓梯度跳動最大幅度達+0.8hPa/-0.8hPa(1943UTC/1940UTC)。同樣地,機場低空風切發出次數最多391次(2000UTC)和R28發生最大風速71KT(2000UTC)時,氣壓跳動最大幅度達+1.3hPa(1957UTC)和-1.1hPa(1956UTC),氣壓梯度跳動幅度達+1.7hPa(1956UTC)和-1.4hPa(1957UTC)。顯示暴風圈侵襲下,在機場低空風切發出次數最多和最大風速發生之前1~5分鐘,氣壓和氣壓梯度跳動幅度都非常大(+1.2/-0.8hPa; +1.3hPa/-1.1hPa)和(+0.8/-0.8hPa; +1.7hPa/-1.4hPa)。

暴風圈遠離階段,低空風切警告系統不再發出風切警告,機場氣壓和氣壓梯度於0200UTC之後,其跳動幅度也都降至 1σ 以下,唯13日0100-0300UTC天氣報告仍有輕度風切紀錄,按R28於0100UTC氣壓跳動幅度(+0.5/-0.4hPa)和氣壓梯度跳動幅度(+0.5/-0.5hPa)仍有超過 1σ ,詳如圖5、圖6和表2。換言之,颱風雖然遠離,氣壓和氣壓梯度跳動幅度超過 1σ 時,機場仍可能有風切現象發生。

以上分析顯示,在颱風暴風圈接近階段時,氣壓和氣壓梯度未能及時反應風切現象之發生。

(a)



(b)

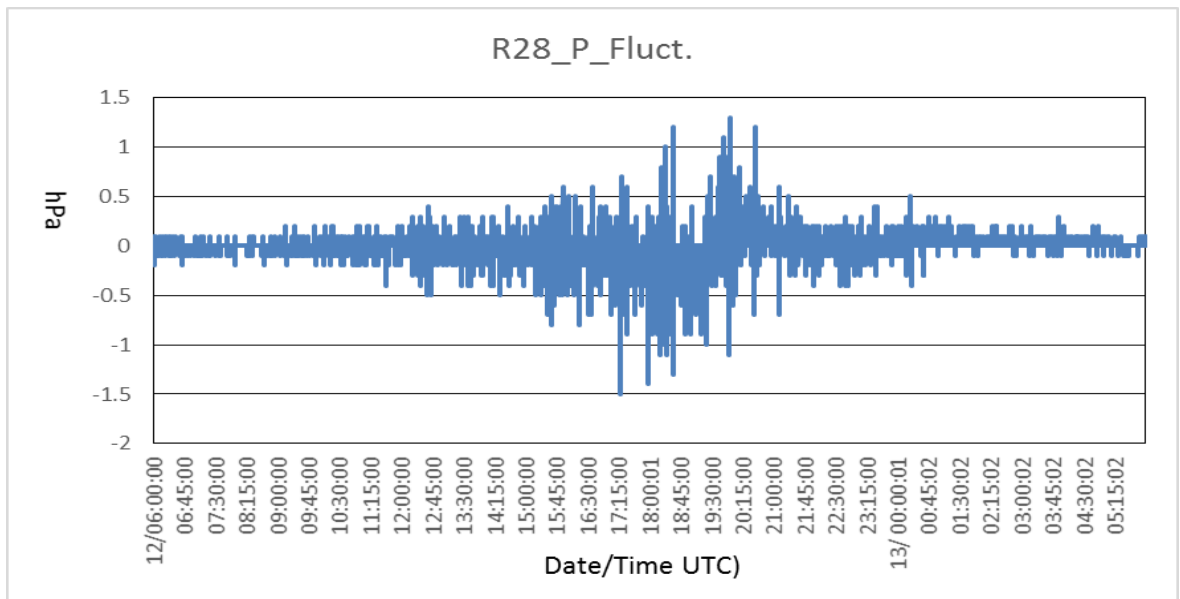


圖 5 2013 年 7 月 12~13 日松山機場地面自動測報跑道 R10 和 R28 每分鐘氣壓跳動之時間分布 (a) R10 (b) R28。

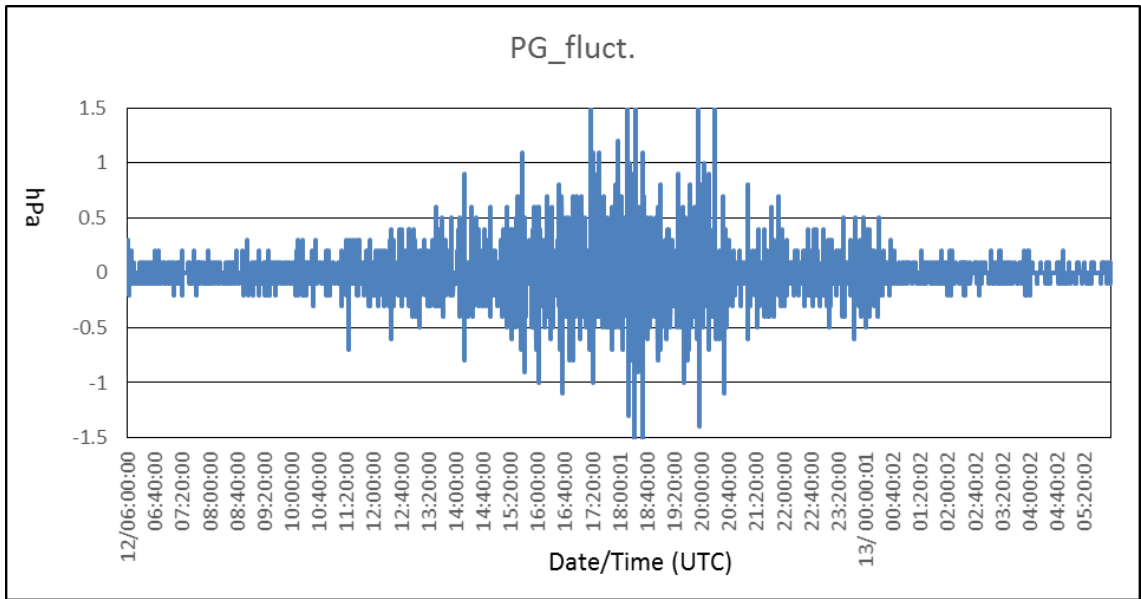


圖 6 2013 年 7 月 12~13 日松山機場地面自動測報跑道 R10 和 R28 間每分鐘氣壓梯度跳動之時間分布。

當暴風圈侵襲階段機場風切警告頻繁和強度增強之時，機場每小時最大氣壓和氣壓梯度跳動幅度都非常大，尤其在機場低空風切發出次數最多和最大風速發生之前 3~5 分鐘，氣壓和氣壓梯度跳動幅度都非常大。當颱風遠離，氣壓和氣壓梯度跳動幅度超過 1σ 時，機場仍可能有風切現象發生。

(三) 跳動時段與頻率

本節嘗試以暴風圈接近、籠罩和遠離台灣北部地區之際，松山機場 R10 與 R28 兩者風速、氣壓和氣壓梯度跳動幅度超過 1σ 之時段和頻率，來比對松山機場低空風切警告系統發出的風切。

1. 風速

暴風圈接近期間機場風切警告系統斷斷續續發出的警告和天氣報告有風切紀錄時，R10 和 R28 風速跳動幅度開始出現大於 1σ ($> 4.8 / < -4.2$; $> 4.5 / < -4.0$ KT) 之頻率 (圖 7)，顯示風速跳動正

可反應機場風切現象的發生。例如，0600-1100UTC 風速跳動幅度超過 1σ 之次數，每小時有 1-12 次，風切系統每小時發出 1~180 次，氣象台根據風切警告系統和飛行員報告，也發布輕度或中度或強烈風切報告，尤其於 1100UTC 風速跳動超過幅度之頻率有 12 次，風切警告也有 180 次，詳如圖 7，也即風速跳動可及時偵測機場風切現象的發生。

暴風圈侵襲期間，風速跳動更可充分反應風切現象的發生，也就是風速愈大，其跳動愈大，超過幅度之頻率愈多，風切警告愈多和愈強，彼此發生時段和頻率有相當的一致性。例如，1200-1400UTC 風速超過 30KT，風速跳動超過幅度之次數，每小時有 15~39 次，而風切系統每小時發出 218~273 次。再如，1600-1700UTC 風速超過 50KT，其跳動超過幅度之次數增加，每小時有 39~58 次，而風切系統每小時發出 276~311 次。又如，1800-2000UTC 風速超過 60KT，其跳動超

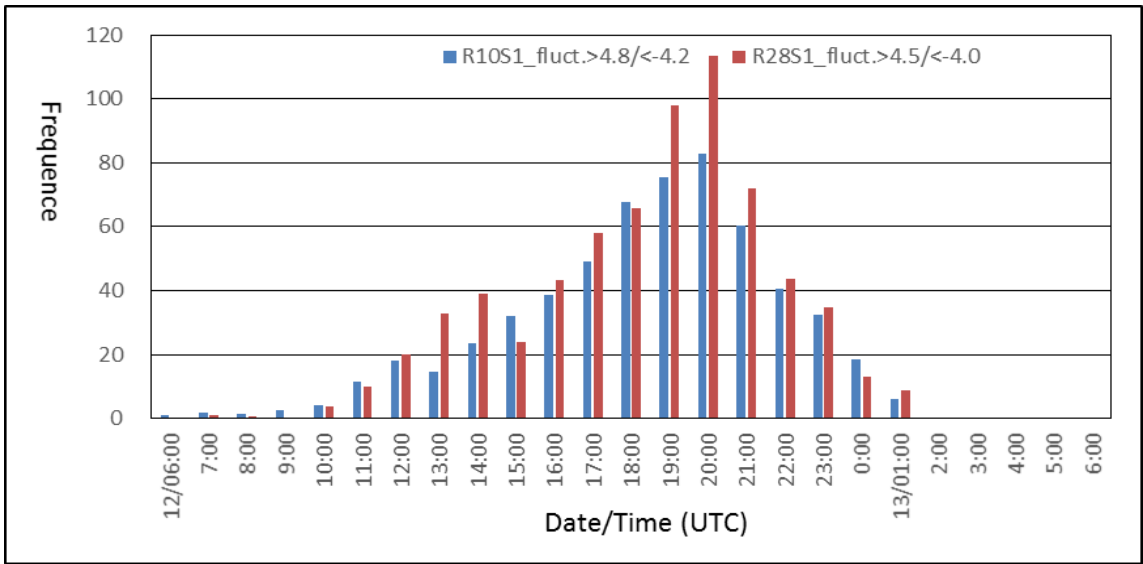


圖 7 2013 年 7 月 12~13 日地面自動測報跑道 R10 和 R28 風速跳動幅度大於 1σ ，其出現時段和頻率之分布。藍色表示 R10，紅色表示 R28。（註：頻率以換算為每 10 秒 1 次）

過幅度之次數更增加，每小時 68~113 次，而風切系統警告也更頻繁，每小時達 317~391 次，氣象台天氣更有強烈風切紀錄，詳如圖 7。顯示暴風圈在 1200-2400UTC 侵襲期間，風速每秒跳動幅度大於 1σ 和低空風切警告系統發出警告，兩者發生時段與頻率相當一致。

暴風圈遠離階段，風切警告系統不再發出警告，但是於 13 日 0100UTC 風速跳動超過幅度之次數，仍有 6~9 次，如圖 7，它反應了氣象台天氣風切紀錄。顯示暴風圈遠離階段，風速跳動超過幅度時，機場仍有風切現象發生。

以上分析顯示，機場在暴風圈接近和侵襲期間，風速每秒跳動幅度大於 1σ ，就可能發生低空風切，而且其幅度愈大，風切頻率越多，風切強度也愈大。

2. 氣壓和氣壓梯度

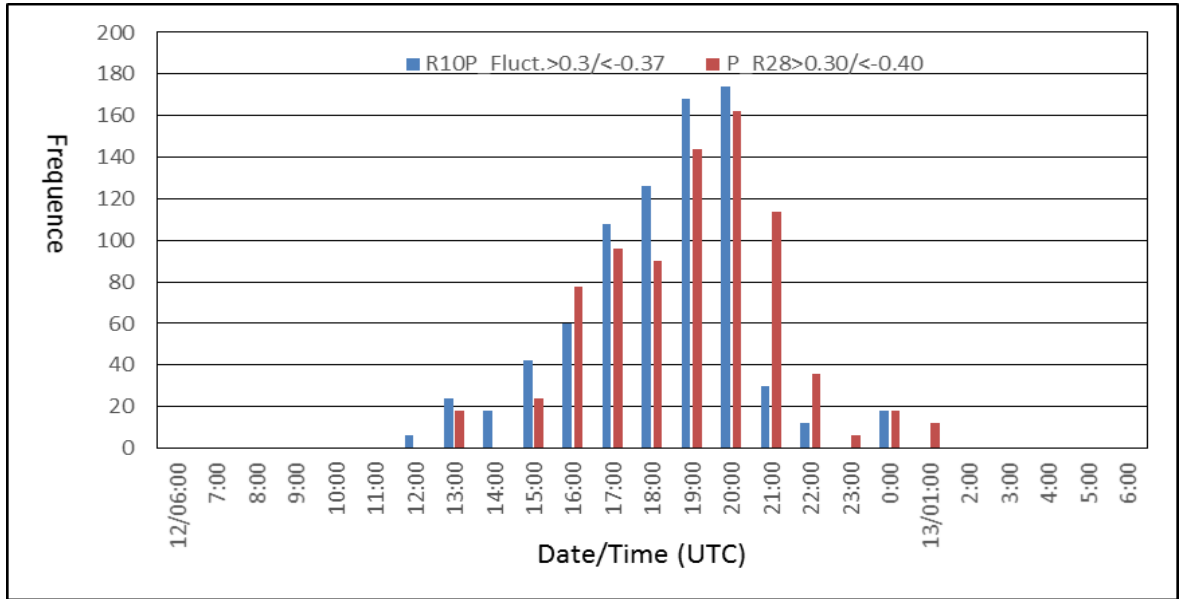
機場地面自動測報跑道 R10 和 R28 氣壓和氣壓梯度跳動幅度等超過 1σ 之時段和頻率之分布，

如圖 8。其中氣壓跳動幅度超過 1σ 之範圍為大於 0.3hPa 或小於 -0.3hPa（大於 0.3hPa 或小於 -0.4 hPa）。氣壓梯度跳動幅度超過 1σ 之範圍為（大於 0.4hPa 或小於 -0.3hPa）。

暴風圈接近期間，機場風切警告系統斷斷續續發出的警告和天氣報告有風切紀錄時，R10 和 R28 氣壓和氣壓跳幅度未出現大於 1σ 之頻率，如圖 8，換言之，如前節所述，在颱風暴風圈接近階段，氣壓和氣壓梯度未能及時反應風切現象之發生。

暴風圈侵襲階段，風切警告次數大幅增加和強度增強之時，機場每小時氣壓和氣壓梯度跳動超過幅度之次數都非常多（6~174 次和 6~204 次）。尤其氣壓跳動超過幅度之頻率，於 1700-2100UTC 每小時達 100 次以上時，風切警告系統每小時也發出 276~391 次，尤其於 2000UTC 氣壓跳動超過幅度之頻率每小時達 174 次，風切警告發出 391 次之多。相似地，氣壓梯度跳動超過

(a)



(b)

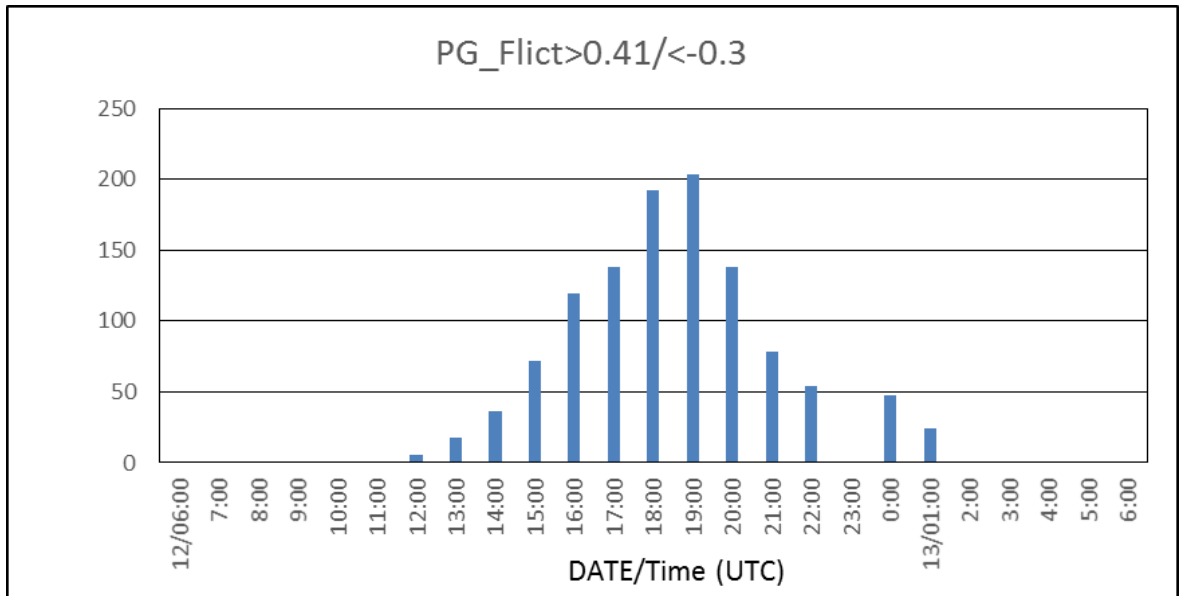


圖 8~2013 年 7 月 12~13 日松山機場地面自動測報跑道 R10 和 R28 間氣壓和氣壓梯度跳動幅度超過 1σ 時，其出現時段和頻率之分布圖中 (a)氣壓跳動（藍色為 R10、紅色為 R28）(b)氣壓梯度跳動（藍色）（註：頻率以換算為每 10 秒 1 次）

幅度之頻率，於 1600-2000UTC 每小時達 100 次以上時，風切警告系統每小時也發出 276~391 次，尤其於 1900UTC 氣壓梯度跳動超過幅度之頻率每小時達 204 次，風切警告發出 368 次之多，詳如圖 8。顯示氣壓和氣壓梯度跳動超過幅度之次數，可充分反應風切現象的發生，氣壓和氣壓梯度跳動超過幅度之次數愈多，風切警告也愈頻繁，彼此出現時段和頻率相當符合。

暴風圈遠離之後，雖然風切警告系統不再發出風切警告，但是氣壓和氣壓梯度跳動仍有超過幅度之次數，它反映了氣象台天氣報告仍有風切紀錄。概 13 日 0100UTC 氣壓和氣壓梯度跳動超過幅度之頻率，分別有 12 次和 24 次，詳如圖 8。

以上分析顯示，颱風暴風圈接近、籠罩和遠離台灣北部地區之際，機場氣壓和氣壓梯度跳動超過幅度之時段和頻率，來比對機場低空風切警告系統發出的風切警告，雖然暴風圈接近階段氣壓和氣壓梯度跳動幅度未能及時反映風切現象的發生，除此之外，三者有相當好的一致性，尤其是暴風侵襲之下，機場氣壓和氣壓梯度跳動超過幅度之頻率越多，引發風切警告次數越多且越強。另外，暴風圈剛剛遠離時，氣壓和氣壓梯度跳動超過幅度時，飛行員起降時仍然可能遭遇風切的危險。

六、討論

Bedard (1977) 研究顯示氣壓跳升 (pressure jump) 為每分鐘氣壓上升高過 0.169hPa，這種氣壓跳升現象，通常在雷雨陣風鋒面可以觀測到的現象。氣壓跳升的時間和幅度，可以偵測到的是 3 分鐘內氣壓突然上升 0.5hPa。Shreffler and Binkowski (1981) 觀測到一個雷暴雨外流引發氣

壓上升 1.5hPa。另外，Wakimoto (1982) 認為氣壓變化由降而升，再由升而趨正常，整個過程所需時間約為 15 分鐘，雷雨發生期間，短時間氣壓會有 5-7hPa 之變化。本文分析顯示松山機場氣壓 (氣壓梯度) 每分鐘跳動幅度大於 0.4hPa 或小於 -0.4hPa (大於 0.5hPa 或小於 -0.4hPa)，就可能發生低空風切。颱風暴風圈籠罩下，在最大風速發生之前 1~5 分鐘，氣壓和氣壓梯度等跳動幅度都非常大 (+1.2~+1.3hPa/-0.8~-1.1hPa) 和 (+0.8~+1.7hPa/-0.8~-1.4hPa)。而颱風侵襲期間，氣壓大幅跳動幅度至趨於正常，其持續時間可持續數小時之久。

Viana, et al. (2007) 分析標準差 (σ_{P70}) 與亂流之相關，認為風切是控制了氣壓的跳動。本文以氣壓和氣壓梯度跳動範圍超過 1 個標準差，其發生時段和頻率與現有低空風切警告系統觀測到的低空風切相當符合。認為以氣壓和氣壓梯度之跳動來偵測低空風切的發生，確實是可行的方法。

陳與袁 (2014) 使用診斷數學模式和測風儀，來克服 FAA/LLWAS 無法監測的「盲區」。他們以相鄰兩個測風儀所測得風速訊號相減值，代表跑道上的風速變化，其變化量 (7.7m/s; 15KT) 作為低空風切警報之發布標準。本文分析顯示松山機場風速大於 15KT 或者風速每秒跳動幅度大於 4.8KT 或小於 -4.2KT，就可能發生低空風切。

Viana, et al. (2007) 曾以小尺度和短時間之地面氣壓跳動 (pressure fluctuations) 來研究大氣邊界層 (atmospheric boundary layer) 之特性。蒲等 (2014) 透過風速和氣壓梯度超過 2 個標準差，以及氣壓、氣溫和露點溫度跳動一樣超過 2 個標準差時，都能偵測到大部分低空風切現象的發生；此個案資料經再分析，改以風速、氣壓和氣壓梯度等跳動

超過 1 個標準差，則能偵測到機場低空風切未能偵測到飛行員有風切報告部分（這可許是 FAA/LLWAS 系統還有 10% 以下的風切警告失敗率）。本文以風速、氣壓和氣壓梯度每秒或每分鐘跳動超過 1σ 之時段和頻率，都能監測更大部分低空風切現象（包含飛行員有風切報告）之發生。若改以跳動超過 2σ ，則未能完全偵測到飛行員有風切報告部分，顯見以超過 1σ 為標準來偵測低空風切為佳。另外，本文在颱風暴風圈接近階段，氣壓和氣壓梯度未能及時反應風切現象之發生。蓋 AWOS 系統氣壓觀測資料係每 1 分鐘變動一次，其氣壓跳動幅度自然比風速每秒跳動和 LLWAS 系統每 10 秒計算風速差和風場輻散度為小，也許從氣壓和氣壓梯度改以每秒跳動，就有可能在颱風暴風圈接近階段及時反應風切現象之發生。

美國 FAA/LLWAS-III 系統以數十個測風儀中的一個觀測到風場與所有測風儀的平均風場有 15 KT 的差值時，就有可能有風切現象，系統即時發出風切警告。本文顯示松山機場最大風速、跑道兩頭最大風速差和風速最大跳動幅度分別等於或大於 17KT、11KT 和 +6/-6KT，飛行員在起降時就有可能遭遇風切的危險；等於或大於 32KT、29KT 和 +12/-12KT，機場就可能有多且強的風切現象發生。更進一步，認為機場風速、氣壓和氣壓梯度跳動超過 1σ 範圍，可作為監測低空風切現象的發生依據，其跳動超過幅度之頻率越多，引發風切次數越多且越強。由此觀之，似乎以機場範圍內現有自動觀測系統(AWOS)觀測到的風速和氣壓資料，來建立新一代低空風切警告系統，就可取代美國 FAA/LLWAS 系統，更可彌補 FAA/LLWAS 系統還有 10% 以下的風切警告失敗率，甚至可以解決機場找不到腹地來裝置風

塔的問題以及系統建置和維修之困難。FAA/LLWAS 系統計算區域風場輻合與輻散量，作為風切警告之頂風或順風的大小，如果在機場內風塔加裝三維測風儀亦可達到這種功能。

本文分析颱風暴風圈侵襲期間機場低空風切警告系統發出風切警告之時段和頻率，與風速、氣壓和氣壓梯度等跳動超過 1σ ，彼此相當一致性，三者發生頻率越多，風切頻率則越多，風切強度也愈大。因此，以風速、氣壓和氣壓梯度每秒或每分鐘跳動超過 1σ 之時段和頻率，可監測低空風切現象之發生。本研究成果可提供研發新一代機場低空風切警告系統參考。

七、結論

本文利用 2013 年 7 月 12~13 日蘇力颱風期間，根據地面自動測報系統測報資料，就機場跑道兩頭 R10 和 R28 之風速、氣壓和氣壓梯度等跳動情形，來分析松山機場低空風切警告系統發出的風切警告，獲得下列成果：

- (一) 颱風暴風圈接近、籠罩和遠離台灣北部地區之際，松山機場最大風速、最大風速差和風速最大跳動幅度分別等於或大於 17KT、11KT 和 +6/-6KT，飛行員在起降時就有可能遭遇風切的危險；等於或大於 32KT、29KT 和 +12/-12KT，機場就可能有多且強的風切現象發生。
- (二) 當風速越大，其風速、氣壓和氣壓梯度等跳動幅度越大；反之，則越小。尤其在最大風速發生之前 1~5 分鐘，氣壓和氣壓梯度等跳動幅度都很大(+1.2/-0.8hPa；+1.3hPa/-1.1hPa)和(+0.8/-0.8hPa；+1.7hPa/-1.4hPa)。
- (三) 機場跑道 R10 與 R28 風速、氣壓和氣壓梯度

跳動幅度超過 1σ 之時段和頻率，與低空風切警告系統發出風切警告有相當的一致性，跳動超過 1σ 範圍之頻率越多，引發風切警告次數越多且越強。

(四) 機場利用跑道風速、氣壓和氣壓梯度等跳動幅度超過 1σ 之頻率和時段，就可偵測到風切現象的發生，或許也可以彌補機場低空風切警告系統還有 10% 以下的風切警告失敗率。

致 謝

本文在經濟部業界開發產業技術計畫「機場低空風切警告系統研發設計(NextG/LLWAS)」專案補助下完成。感謝民用航空局飛航服務總台台北氣象中心提供松山機場觀測和風切警告資料，感謝總台飛航業務室主任管制員劉珍雲、台北氣象中心主任童茂祥、副主任陳海根、莊清堯和黃禹璵等先生的協助和誠開公司黃芷薰小姐協助資料處理。

參考文獻

何台華、涂明聖、蒲金標及魏志憲，2005：2002年梅雨季桃園與松山機場低風切之個案研究，大氣科學，33，119-142。

陳介中與袁曉峰，2014：低空風切警報系統的改進，航空安全及管理季刊，1，85-102。

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，31，181-198。

蒲金標、徐茂林、游志遠和劉珍雲 2014：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，1，227-243。

Bedard, A. J., H. B. Meade, 1977: The Design and Use of Sensitive Pressure-Jump Sensors to Detect Thunderstorm Gust Fronts. Part I : Pressure- Jump Detector Design. J. Appl. Meteor., 16, 1049-1055.

ICAO, 2005: Manual on Low-Level Wind Shear, 1st, International Civil Aviation Organization.

Shreffler, Jack H., Francis S. Binkowski, 1981: Observations of Pressure Jump Lines in the Midwest, Mon. Wea. Rev., 10-12.

S. Viana, C. Yagiie, G. Maqueda and G. Morales (2007): Study of the surface pressure fluctuations generated by waves and turbulence in the nocturnal boundary layer during SABLES2006 field campaign. Física de la Tierra, 19, 55-71. Ed.Univ. Compl. Madrid.

Wakimoto, Roger M., 1982: The Life Cycle of Thunderstorm Gust Fronts as Viewed with Doppler Radar and Rawinsonde Data. Mon. Wea. Rev., 110, 1060-1082.

A Study of “Soulik” Typhoon and Low-Level Wind Shear Statistics at Sung-Shan Airport during 12-13 July, 2013

Chin-Piao Pu^{1,2} Hsumaolin¹ Frank Yu¹

¹ Research Dep., ProAction Technology Inc.

² Department of Science Education, National Taipei University

(manuscript received 20 May 2014 ; in final form 23 December 2015)

ABSTRACT

In this study, we focus on the estimation and identification of low level wind shear phenomena. We based on the existing Sung-Shan airport Automatic weather observation(AWOS), every second storage data, adopting the ground weather parameters, wind speed (on 10 meter Tower), pressure and pressure gradient fluctuation at both runway threshold, i.e. R10 & R28. analyzing the time variation of these parameters and their correlation with the wind shear alert that issued by the existing low level wind shear system(LLWAS), hereafter.

The result shows when the typhoon storm circle is close to, or on the northern Taiwan, or leaving Taiwan, the Song-San airport wind speed exceeds 20 kt frequently, and then the low level wind shear is prone to occur. The wind speed is stronger, the greater the fluctuation amplitude of its wind, barometric pressure and pressure gradient. When the max wind speed ≥ 17 kt or the max wind speed variation ≥ 11 kt or the wind speed fluctuation $\geq +6 / -6$ kt , the airplane will probably encounter the wind shear phenomena, and if the max wind speed ≥ 32 kt or the max wind speed variation ≥ 29 kt or the wind speed fluctuation $\geq +12 / -12$ kt , The airplane will encounter with serious wind burst , especially within 1~5 minutes before the occurrence of the maximum wind speed, the wind speed, barometric pressure and air pressure, such as these three parameters have a greater fluctuation amplitude. The Fluctuation amplitude of wind speed, pressure and pressure gradient which exceeds one statistics sigma (standard deviation, 1σ) that the time span and frequencies are very close to the existing LLWAS system alerts in the Song-San airport.

With the aid of this research, we believe the wind shear false alarm rate will be reduced and be able to compensate the 10% false alarm prediction to some extent.

Key Words: Standard Deviation, Soulik Typhoon, Low Level Wind Shear, the Fluctuation of the Wind Speed, Pressure and Pressure Gradient