2010～2014 年松山機場低空風切與氣壓大波動之日變化分析研究

蒲金標　林清榮

財團法人中華氣象環境研究發展中心

（中華民國一〇六年十一月七日收稿；中華民國一〇七年一月二十五日定稿）

摘　要

本文分析 2010-2014 年松山機場低空風切(Low-level Wind Shear；LLWS)與氣壓大波動(Large Pressure Fluctuation；LPF；$>\sigma$)發生機率之日變化，研究顯示機場 LLWS 五年發生次數為 LPF 的 2.5 倍，其中，低空風切發生頻率，夏季大於秋季，秋季大於春季，春季大於冬季，夏季、秋季、和春季分別為冬季的 8、7 和 2 倍，夏秋發生頻率是冬春的 4.7 倍。跑道 LPF 四季發生頻率分布相當平均，秋冬發生頻率比春夏略多。LLWS 和 LPF 年平均日變化，兩者出現較高時段約在上午 11 點至下午 4 點、最高時間出現在下午 1～3 點、較低時段約在晚上 6 點至翌日上午 10 點以及最低時間出現在清晨 4～5 點等時段和時間大致相當，唯最高時段 LPF 提早 1 小時開始；LPF 最高時間提早 2 小時出現，最低時間則提早 1 小時出現。四季 LLWS 與 LPF 發生機率平均日變化之主要較高和較低時段也都接近一致，唯四季平均發生機率與年平均日變化相比，提早或落後略有前後之差。四季平均日變化較高時段和最高時間，與年平均日變化最接近；四季平均日變化較低時段和最低時間，除了秋季 LLWS 和 LPF 兩者較低時段起始時間，和冬季兩者最低時間與年平均差異較大之外，四季平均與年平均日變化也都相近。

關鍵字：氣壓大波動、低空風切、日變化

一、前言

機場低空風切(Low-level Wind Shear; LLWS)對起降飛機構成嚴重的威脅，由於低空風切發生在最低層 500m (1,600ft) 以下，風向或風速之突然變化，對飛機起降階段，飛機速度和高度都接近安全的臨界點，飛機遭受風切的影響，可能對生命及財產造成嚴重的威脅。

根據美國聯邦航空總署(Federal Aviation Administration; FAA)定義，低空風切警告表示測風臺偵測風速增量（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臺偵測風速減量（順風）超過 30kts 以上。低空風切之強度以兩個測風臺間量測之向量分速差，其強度分為三種，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)。另外，系統經過資料處理，機場任何區域風場有強烈輻散現象，也會發出風切的警報。

國際民航組織(International Civil Aviation Organization; ICAO, 2005)指出機場低空風切警告系統(Low Level Wind-Shear Alert System; LLWAS-III)監測低空風切的準確率可達 90%，但仍有 10%的誤報率。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 FAA 第三代機場低空風切警告系統，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 9 號跑道靠海，腹地不足，無法建置而放棄。

松山機場跑道方向為東西走向，分別為西邊的 10 號跑道及東邊 28 號跑道，機場 LLWAS 系統在跑道中心線兩邊之外 1.6 公里和沿著機場跑道向外延伸 5 公里，設有 12 個遠端的風向風速觀測塔，另外在機場 10～28 號跑道中間北側設有中央風向風速觀測塔。LLWAS 系統是由測風儀及處理器所組成的系統，以每 10 秒的週期，即時(real time)更新風場資料，同時系統將每一風場資料轉換成一個平行跑道的風向量(u，v)，其中一個觀測塔觀測到風向量，與所有觀測塔的平均風向量有 15 KT 差時，就有可能有風切現象。另外，系統經過資料處理，機場任何區域風場有強烈的輻散現象，也會發出風切的警報。遇有低空風切發生時，系統會發出警告一次，並將此即時資訊提供給飛航管制塔台(ATCT)管制員和機場氣象台觀測員，以便提供危害性低空風切，包括微爆氣流等警訊給機場正在降落或起飛的航機。

松山機場裝設有機場地面自動天氣觀測系統(Auto Weather Observation System; AWOS), AWOS 系統自動遙測跑道兩端天氣資料，及時提供天氣資料給機場航空氣象台，編發每小時或每半小時機場天氣報告(METAR)、或機場特別天氣報告(SPECI)之參考。另外，系統自動建立資料檔，資料包括每秒風向風速、能見度、溫度、露點溫度、相對溫度以及平均海平氣壓，其中海平面氣壓是每分鐘才更新一次。

Bedard (1977)研究顯示氣壓跳升為每分鐘氣壓上升高過 0.169hPa，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。Shreffer and Binkowski (1981)，觀測到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，短時間氣壓會有 5～7hPa 之變化。蒲等(2015)，研究颱風侵襲松山機場氣壓每分鐘有最大波動幅度 2.7hPa 之變化。Viana et al. (2007)以短時間地面氣壓大波動(pressure fluctuations)來研究大氣邊界層(atmospheric boundary layer)之特性。並分析標準差(σP70)與亂流之相關，認為風切控制了氣壓的

波動。

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觀測站所測到的時間，提早三分鐘。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。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 較差時，就有可能有風切現象，系統即時發出風切警告。陳與袁(2014)，以相鄰兩個測風儀所測得風速訊號相減，代表跑道上的風速變化，風速變化量達 15 KT，是輕度低空風切警報之發布標準。

機場在穩定大氣之下，一般氣象要素如氣壓等觀測，其每分鐘前後觀測波動幅度，通常是在一定範圍內，若波動範圍是近似於常態分布，約 68%或 95%數值分布在 1 個或 2 個標準差之內。在不穩定大氣之下，該等氣象要素波動大，可能會超出 1 個或 2 個標準差。蒲等(2014)透過氣壓波動超過 2 個標準差時，能偵測到大部分低空風切現象的發生。蒲等(2015, 2016, 2017)，改以氣壓波動超過 1 個標準差之時段和頻率，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，顯見以氣壓大波動(Large Pressure Fluctuation; LPF)超過 1 個標準差(> σ)為標準，來偵測低空風切更佳。春季東北季風、梅雨季台灣低壓鋒面雷雨和夏秋颱風等個案都顯示氣壓波動超過 1 個標準差為標準，可以偵測低空風切。

二、資料來源和研究方法

本文資料採用 2010～2014 年總共 5 年，每日松山機場地面 AWOS 和 LLWAS 系統發出的風切警告資料，其中 LLWAS 係以每 10 秒計算是否有風切現象。而機場 AWOS 系統之氣壓，雖然都是每秒紀錄，但氣壓是每分鐘觀測變動，略有不同。

機場氣壓波動值之標準差計算方式如下：

$x_i = (/y_i - y_{i-1}/) > 0$

y_i 表示後 10 秒氣壓觀測值，y_{i-1} 表示氣壓在前 10 秒觀測值，x_i 表示氣壓在後 10 秒與前 10 秒波動差之絕對值。

以 x_i 為資料樣本，計算觀測時間內之平均數與標準差：

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_i}{N}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (x_i - \mu)^2}{N-1}}$$

N 表示觀測時間內之 x_i 資料個數。

μ 表示觀測時間內 x_i 資料之平均數。

σ 表示觀測時間內 x_i 資料之標準差。

松山機場 LLWS 係以機場跑道兩旁之外 1.6 公里數個觀測塔觀測到的風場，計算平行跑道風向量差，求取低空風切。多個測風儀中的一個觀測到風場平行跑道風向量與所有測風儀的平均風場平行跑道風向量有 15 KT 較差時，就有可能有風切現象，系統即時發出風切警告。

本文嘗試根據 2010-2014 年松山機場 LLWS 警告與 LPF 資料，5 年 1825 天，每天無論有無風切現象發生，分析機場 LLWS 警告與 LPF 發生頻率和機率之日變化。

三、研究成果

(一) 低空風切與氣壓大波動發生頻率之年平均

2010-2014 年松山機場，5 年機場 LLWS 和跑道 LPF 發生總次數，分別為 73,992 次和 25,205 次，平均每年各發生 14,798 次和 5,041 次，前者發生機率為後者的 2.9 倍，如表 1。LLWS 發生次數比 LPF 為多，概因氣壓和 LLWS 雖然都是每 10 秒一筆資料，但是氣壓每 1 分鐘才更新一次，在 1 分鐘 6 次資料中氣壓數值都是一樣，所以 LPF 則較少。另一方面，低空風切警告系統(LLWAS)係在跑道中心線兩邊之外 1.6 公里和沿著松山機場跑道向外延伸 5 公里，設有多個遠端風向風速觀測塔，來計算平行跑道風向量差，求取低空風切(LLWS)。松山機場 12 個風向風速遠端觀測塔，其中一個觀測塔觀測到風場平行跑道風向量與 12 個風塔的平均風向量有 15 KT 差時，就有可能有風切現象，機場四周範圍廣闊，測站多，所以風切次數比機場跑道兩頭測站 LPF 較多，是屬於合理範圍。

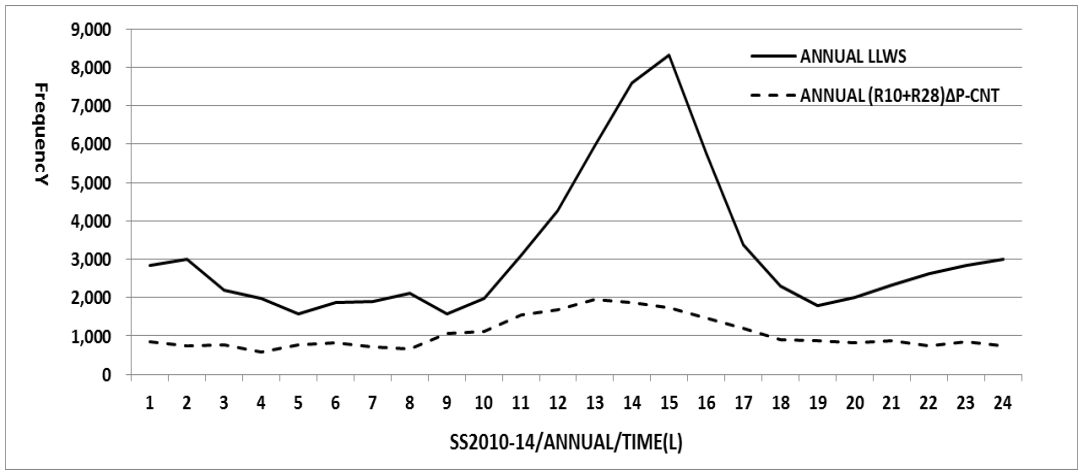
(二) 低空風切與氣壓大波動發生頻率或機率之年平均日變化

低空風切(LLWS)和跑道 LPF 發生頻率或機率之年平均日變化，如圖 1，LLWS 出現較高時段在中午 12 點至下午 4 點（4,256～8,326 次／5.6～10.9%）；LPF 出現較高時段則提早 1 小時於上午 11 點至下午 4 點（1,551～1,961 次／5.7～7.7%）。其中，LLWS 出現最高頻率或機率在下午 3 點（8,326 次／10.9%）；LPF 出現最高頻率或機率則提早 2 小時於下午 1 點（1,961 次／7.7%）。

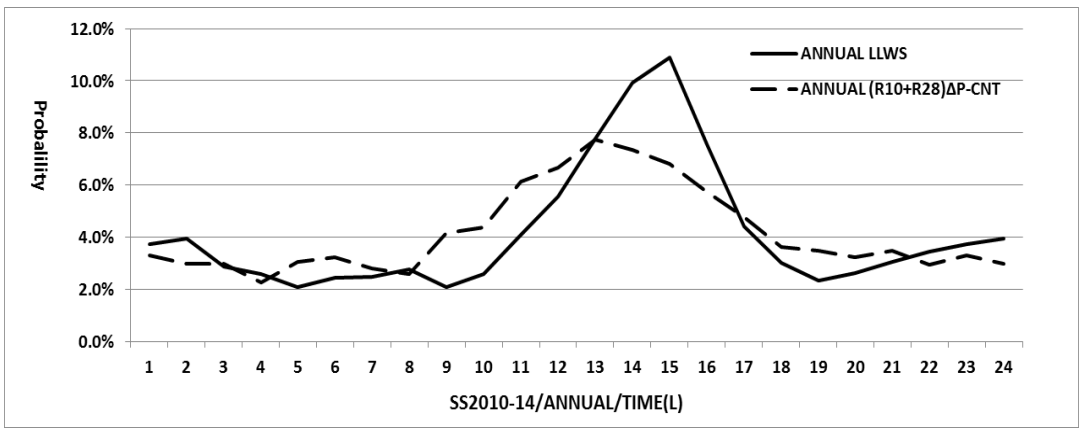
LLWS 出現較低時段在下午 6 點至翌日上午 10 點（1,588～3,010 次／2.1～3.9%），LPF 出現較低時段在下午 6 點至翌日上午 8 點（578～919 次／2.3～4.4%），相同起始時間，但提早 2 小時結束。其中，LLWS 出現最低頻率或機率在上午 5 點（1,588 次／2.1%）；LPF 出現最低頻率或機率則提早 1 小時於上午 4 點（578 次／2.3%）。

表 1　2010～2014 年松山機場低空風切和跑道氣壓大波動發生頻率與機率。

Year	LLWS Alert		LPF	
	Frequency	Probability	Frequency	Probability
2010	14,650	19.8%	4,659	18.5%
2011	14,217	19.2%	4,000	15.9%
2012	12,655	17.1%	6,000	23.8%
2013	18,080	24.4%	5,782	22.9%
2014	14,390	19.4%	4,764	18.9%
Total	73,992	100.0%	25,205	100.0%
Mean	14,798	20.0%	5,041	20.0%



(a)



(b)

圖 1　2010～2014 年松山機場低空風切和氣壓大波動發生頻率或機率之年平均日變化(a)頻率；(b)機率。低空風切為實線，氣壓大波動為虛線。

(三) 低空風切與氣壓大波動發生頻率或機率之季節平均

2010-2014 年松山機場，LLWS 與跑道 LPF 發生頻率和機率之季節平均，如表 2。四季發生頻率或機率，LLWS 夏秋為 33,098 次(44.73%)和 27,910 次(37.72%)，冬春 4,190 次(5.66%)和 8,794 次(11.89%)，夏季大於秋季，秋季大於春季，春季大於冬季，其中，夏季、秋季、和春季分別為冬季的 8、7 和 2 倍，夏秋發生頻率是冬春的 4.7 倍，顯示夏秋兩季為松山機場低空風切的高發生期，冬春季兩季為低發生期，概因 2010～14 年松山機場夏秋兩季常有颱風侵襲，風速強，時段長，風切則多；冬春受東北季風和鋒面影響，雖然東北季風型之天數為最多，但是風速大都在 25KT 以下，引發風切次數或強烈風切次數較少，所以夏秋 LLWS 發生頻繁是颱風和午後雷陣雨（西南季風）影響所致。而跑道 LPF 四季分布則相當平均，秋冬發生次數 6,939 次(27.53%)和 6,540 次(25.95%)比春夏 5,966 次(23.67%)和 5,760 次

表 2　表 22010～2014 年松山機場低空風切與跑道氣壓大波動(> 1σ)發生頻率或機率之季節變化。

2010～14 Season	LLWS Alert		LPF	
	Number	Probability	Number	Probability
Spring (03-05)	8,794	11.89%	5,966	23.67%
Summer (06-08)	33,098	44.73%	5,760	22.85%
Autumn (09-11)	27,910	37.72%	6,939	27.53%
Winter (12-02)	4,190	5.66%	6,540	25.95%
Annual	73,992	100.00%	25,205	100.00%

(22.85%)，只略多些。

顯示，夏秋兩季為松山機場低空風切的高發生期，冬春季兩季為低發生期，LLWS 夏秋發生頻率是冬春的 4.7 倍，而跑道 LPF 四季發生頻率分布則相當平均。

(四) 低空風切與氣壓大波動發生頻率或機率之季節日變化

前述松山機場 LLWS 夏秋比冬春為多，LPF 四季則相當平均，本小節再進一步分析松山機場 LLWS 與跑道 LPF 發生機率之四季日變化，如圖 2。

1. 春季（3～5 月）

春季機場 LLWS 和跑道 LPF 發生機率之日變化，圖 2a，LLWS 發生機率較高時段為中午 12 點至下午 4 點(6.6～15.5%)；LPF 提早 1 小時於上午 11 點開始，至下午 4 點(6.1～9.2%)結束。其中，LLWS 於下午 3 點發生機率最大值(15.5%)，LPF 提早 1 小時於下午 2 點發生機率最高值(9.2%)。

LLWS 和 LPF 發生機率較少時段皆為下午 6 點至翌日上午 10 點(0.2～4.49%；2.0～4.9%)，其中，LLWS 發生機率於上午 7 點達最低值(0.2%)；LPF 發生機率落後 1 小時於上午 8 點達最低值(2.0%)。

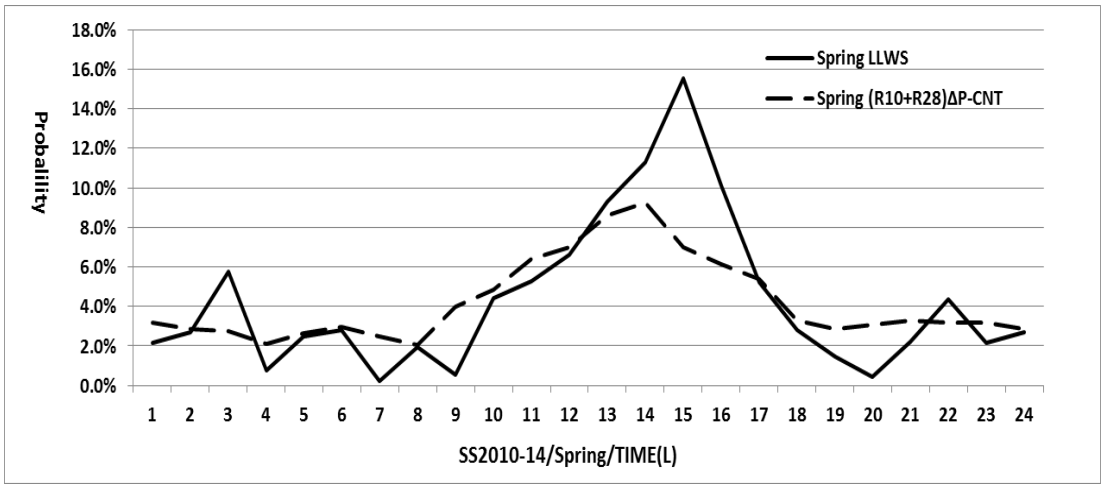
2. 夏季（6～8 月）

夏季機場 LLWS 和跑道 LPF 發生機率之日變化，圖 2b，LLWS 發生機率較高時段為下午 1 點至下午 4 點(7.4～11.45%)，LPF 提早 2 小時在上午 11 點至下午 4 點(6.6～8.5%)發生。其中，LLWS 則於下午 3 點(11.4%)發生機率最高，LPF 提早 2 小時於下午 1 點(8.5%)達最高。

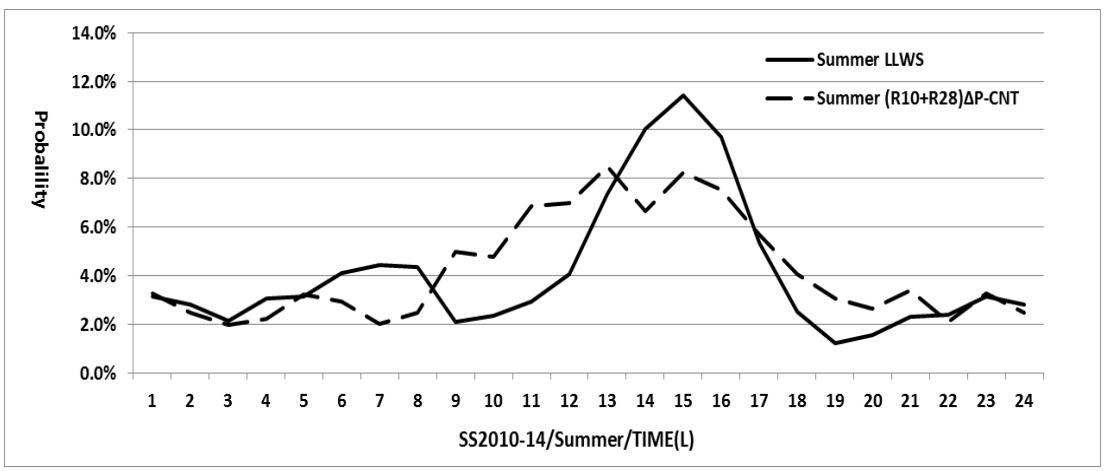
LLWS 發生機率較低時段在下午 6 點至翌日中午 12 點(1.2～4.4%)；LPF 發生機率較低時段在下午 6 點至翌日上午 10 點(2.0～5.0%)，起始時間兩者一樣，但結束時間提早 2 小時。其中，於清晨時分，LLWS 發生次數於清晨 3 點和上午 9 點達最低值(2.1%)；LPF 發生次數於清晨 3 點和上午 7 點點達最低值(2.0%)。

3. 秋季（9～11 月）

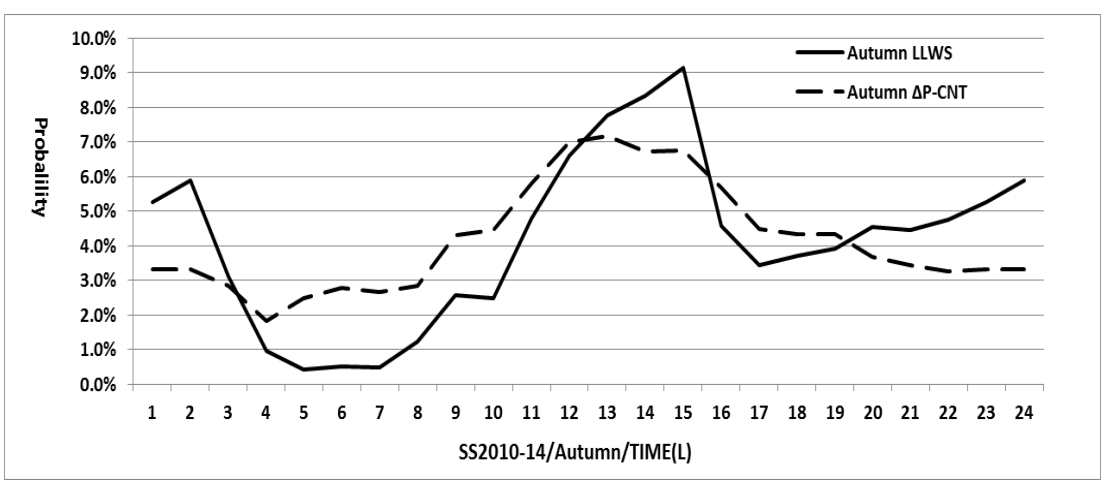
秋季機場 LLWS 和 LPF 發生機率之日變化，如圖 2c，LLWS 機率主要較高時段，於中午 12 點至下午 3 點(6.6～9.1%)發生，LPF 有相同較高機


Spring LLWS
Spring (R10+R28)ΔP-CNT
Probability
SS2010-14/Spring/TIME(L)

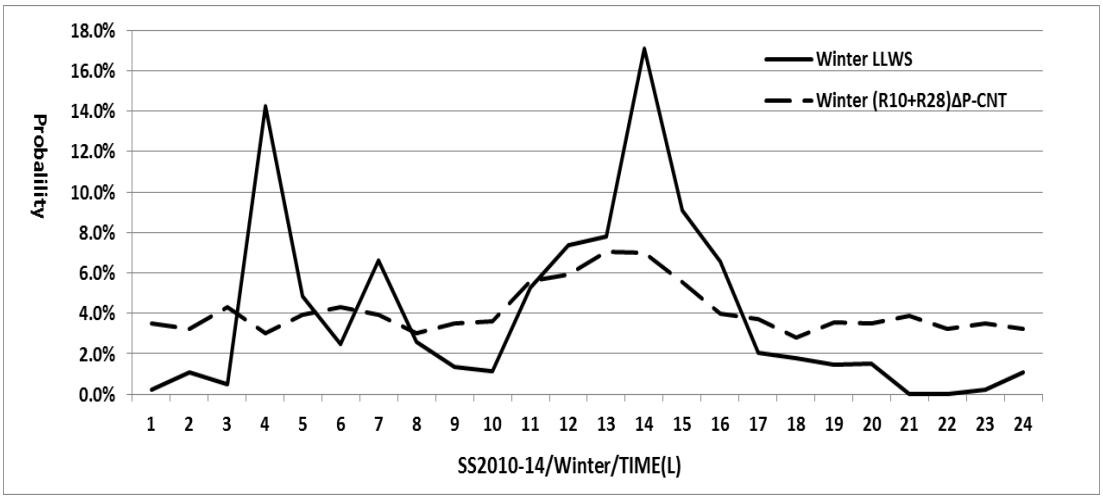
(a)


Summer LLWS
Summer (R10+R28)ΔP-CNT
Probability
SS2010-14/Summer/TIME(L)

(b)


Autumn LLWS
Autumn ΔP-CNT
Probability
SS2010-14/Autumn/TIME(L)

(c)



(d)

圖 2　2010～2014 年松山機場低空風切和氣壓大波動發生機率之季節日變化(a)春季；(b)夏季；(c)秋季；(d)冬季。低空風切為實線，氣壓大波動為虛線。

率時段於中午 12 點至下午 3 點(6.7～7.2%)出現，兩者主要較高時段是一致的。其中，LLWS 發生機率於下午 3 點(9.1%)最高，LPF 則提早 2 小時於下午 1 點(7.2%)出現。

LLWS 發生主要較低機率時段在清晨 3 點至上午 10 點(0.4～3.1%)，LPF 則提早 2 小時開始和也提早 2 小時結束，即於清晨 1 點至 8 點(1.8～4.5%)發生。其中，LLWS 發生機率於上午 5 點(0.4%)達最低，LPF 提早 1 小時於清晨 4 點(1.8%)出現最低值。

4. 冬季（12～2 月）

冬季機場 LLWS 和 LPF 發生機率之日變化，如圖 2d，LLWS 發生機率主要較高時段為中午 12 點至下午 4 點(6.5～17.1%)，另外，零星發生於清晨 4 點(14.3%)和上午 7 點(6.6%)，而 LPF 發生機率主要較高時段提早 1 小時於上午 11 點開始，至結束也提早 1 小時於下午 3 點(5.5～7.0%)結束。其中，兩者發生機率同時於下午 2 點(17.1%：7.0%)出現最高值。

LLWS 發生機率，主要較低時段在下午 5 點至翌日清晨 3 點(0.0～2.0%)，LPF 提早 1 小時於下午 4 點開始，至翌日上午 10 點(2.8～4.3%)落後 7 小時結束。其中，LLWS 於晚上 9 點和 10 點(0.0%)達最低，LPF 提早 3 小時於下午 6 點(2.8%)出現。

綜合以上分析顯示，年平均 LLWS 和 LPF，兩者出現較高時段約在上午 11 點至下午 4 點、最高時間出現在下午 1～3 點、較低時段約在晚上 6 點至翌日上午 10 點以及最低時間出現在清晨 4～5 點等時段和時間大致相當，唯最高時段 LPF 提早 1 小時開始；LPF 最高時間提早 2 小時出現，最低時間則提早 1 小時出現。四季 LLWS 與氣壓大波動發生機率之主要較高和較低時段也都接近一致。唯四季發生機率平均日變化與年平均日變化相比，提早或落後略有前後之差。四季較高時段和最高時間，四季與年平均最接近；四季較低時段和最低時間，除了秋季 LLWS 和 LPF 兩者較低時段起始時間，和冬季兩者最低時間與年平均差異較大之外，四季平均日變化與年平均也都相近。

四、討論

兩地間氣壓梯度越大，風速越大；兩個時間點間氣壓改變，風場也會跟著改變。氣壓波動可反應氣壓梯度和氣壓在時間上的改變。藉著單一測站，前後時間氣壓差，去除多數氣壓差為零，以所剩氣壓值大於零，來計算氣壓差之標準差，再以大於一個標準差與風切加以分析。雖然 AWOS 使用的數位氣壓計精確度為 ±0.1hPa，但是藉著單一測站，本身前後時間氣壓差，可去除氣壓計精確度的問題。蒲等(2014；2015；2016；2017)研究顯示松山、桃園和馬祖南竿機場氣壓差超過一個標準偏差，與機場 LLWS 或跑道逆風（順風）有密切相關，且大於一個標準偏差已經超過氣壓計的精確度。本研究採用 2010-2014 年松山 AWOS 每 10 秒觀測資料，總計 LLWS 和 LPF 次數各為 73,992 次和 25,429 次，進行完整資料分析。

蒲(2003)研究顯示，2001 年 9 月至 2002 年 8 月松山機場夏秋發生 LLWS 次數是冬春的 4.2 倍。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 LLWS 之主因。松山機場發生 LLWS 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 LLWS 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。春季 3～5 月受東北季風、梅雨鋒面和雷雨，夏季 6～8 月受颱風和午後雷陣雨（引發最多且最強烈的 LLWS），秋季 9～11 月受颱風、東北季風和鋒面，冬季 12～2 月受東北季風和鋒面等影響，機場都會有 LLWS 現象，如圖 3。蒲等(2014)研究顯示，2012 年 5 月 2 日松山機場當鋒面前強勁西風和雷雨帶來風向不穩定之強陣風時，會引發 LLWS 的發生。當鋒面通過後，機場吹穩定東風時，LLWS 就形消失。

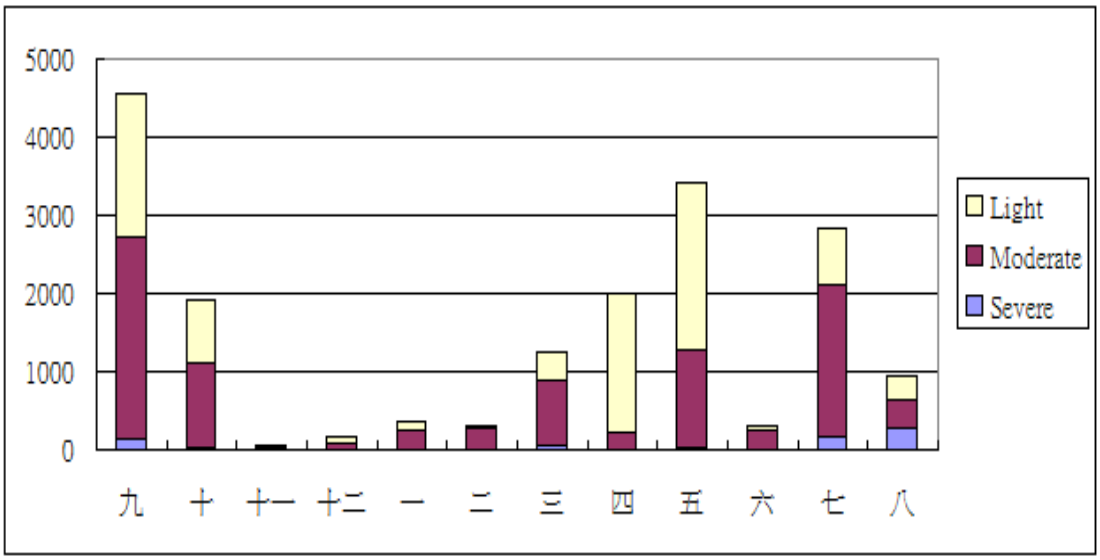


圖 3　2001 年 9 月至 2002 年 8 月松山機場低空風切強度與次數之月變化橫座標為月份，縱座標為低空風切發生次數。

本研究顯示 2010～2014 年松山機場 LLWS，夏季大於秋季，秋季大於春季，春季大於冬季，夏季、秋季、和春季分別為冬季的 8、7 和 2 倍，夏秋發生頻率是冬春的 4.7 倍，本研究與蒲(2003)結論一年資料(2001.9～2002.8)夏秋是冬春的 4.2 倍是接近的。概因松山機場夏秋受雷雨和颱風影響，颱風天數雖然不多，但是風速常有 50KT 以上，甚至可達 100KT，且強風可持續達數小時或幾天之久，所以引發風切次數最多，強度最強。夏秋經常有午後雷陣雨，陣風強，風向和風速多變，甚至有下爆氣流產生。冬春受東北季風和鋒面影響，雖然以東北季風型之天數為最多，但是風速大都在 25KT 以下，且風向和風速比較穩定，引發風切次數或強烈風切次數較少。機場跑道 LPF 四季發生頻率分布相當平均，秋冬發生頻率比春夏略多。概因秋冬常受大陸冷高壓南下影響，氣壓偏高，LPF 略多；春夏常受西南季風影響，氣壓偏低，除颱風和雷雨之外，LPF 略少。

蒲(2003)研究顯示，松山機場 LLWS 一年資料(2001.9～2002.8)夏秋是冬春的 4.2 倍。松山機場夏季 6～8 月受颱風和午後雷陣雨，初秋 9～10 月受颱風、東北季風和鋒面過境，深秋、冬季和春季 11～5 月受東北季風和鋒面過境等影響，機場都會有 LLWS 現象，其中以颱風和午後雷陣雨引發最多且最強烈的 LLWS。本研究 2010～2014 年松山機場 LLWS 發生機率為 LPF 的 2.9 倍，概因氣壓採用每 10 秒一筆作比對，而氣壓則每 1 分鐘才觀測更新記錄一次，所以氣壓每 10 秒變動者少，相對地，低空風切警告系統風塔觀測點都在機場四周外圍，觀測點多，而且，LLWS 每 10 秒有更新資料，所以機場 LLWS 比 LPF 多，是屬合理範圍。

夏秋兩季為松山機場低空風切的高發生期，冬春季兩季為低發生期，LLWS 夏秋發生頻率是冬春的 4.7 倍，而跑道 LPF 四季發生頻率分布則相當平均。雖然，兩者四季發生頻率分布有很大的差距，但是兩者個別 24 小時日變化，年平均 LLWS 和 LPF，兩者出現較高時段約在上午 11 點至下午 4 點、最高時間出現在下午 1-3 點、較低時段約在晚上 6 點至翌日上午 10 點以及最低時間出現在清晨 4～5 點等時段和時間大致相當。四季 LLWS 與氣壓波動發生機率之主要較高和較低時段也都接近一致。顯示機場氣壓大波動可視為監測風切的方法。

蒲(2003)研究顯示 2001 年 9 月至 2002 年 8 月松山機場以每天上午 11 時至下午 3 時發生風切頻率為最高，而每天下午 6 時至翌日上午 7 時發生 LLWS 之頻率最小，如圖 4。本研究分析 2010～2014 年松山機場年平均日變化，LLWS 和 LPF 出現較高時段約在上午 11 點至下午 4 點，概因這段時間，太陽輻射增溫，通常是一天當中，以午後溫度較高，經常有午後雷陣雨，陣風強，風向和風速多變，甚至有下爆氣流產生。風切頻率較低時段約在晚上 6 點至翌日上午 10 點，概因夜間和上午時分是一天當中，溫度較低時段，風速較弱。風切最高時間出現在下午 1～3 點，概因午後經常有雷陣雨發生。風切最低時間出現在清晨 4～5 點，概因一天當中溫度最低、靜風或風速小。LPF 和上述 LLWS 發生時段和時間大致相當，唯最高時段 LPF 提早 1 小時開始；LPF 最高時間提早 2 小時出現，最低時間則提早 1 小時出現。四季平均日變化，LLWS 與 LPF 發生機率之主要較高和較低時段也都接近一致。唯四季發生機率與年平均日變化相比，提早或落後略有前後之差。其中，有關較高時段和最高時間，四季平均日變化與年平均最接近；四季平均日變化較低時段和

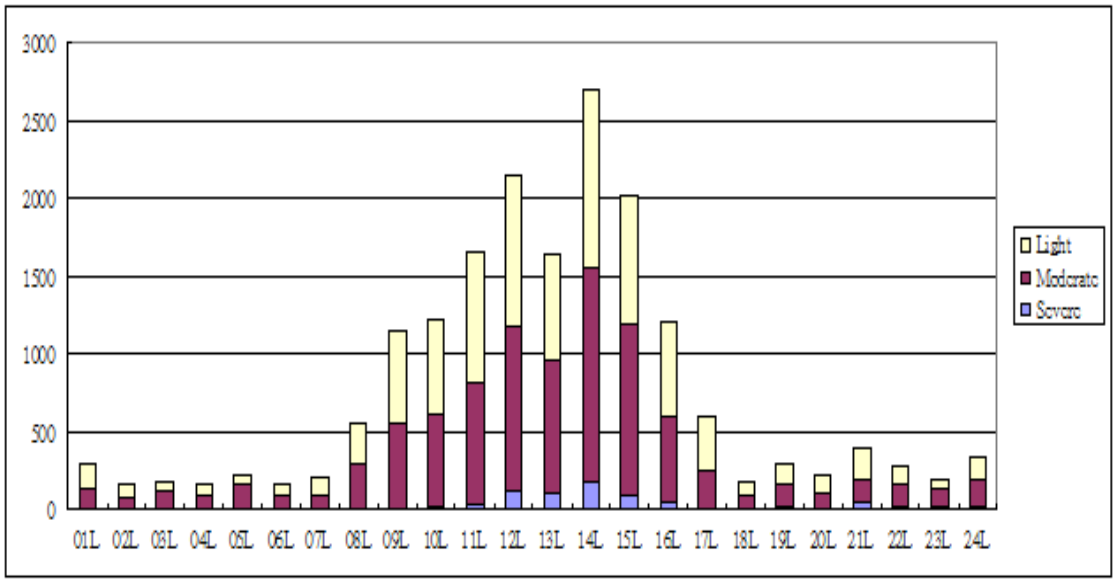
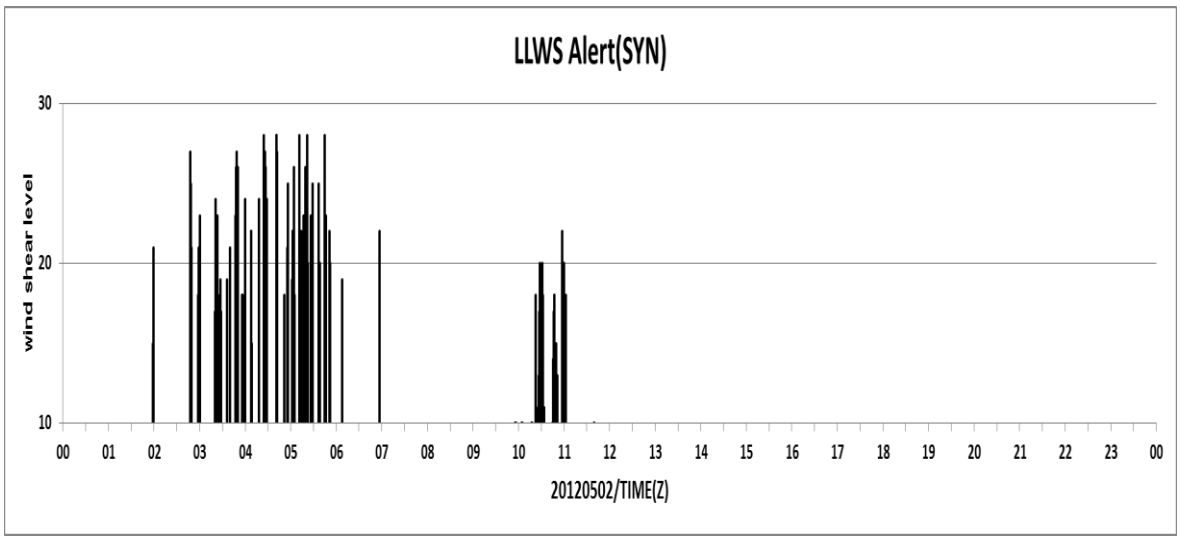


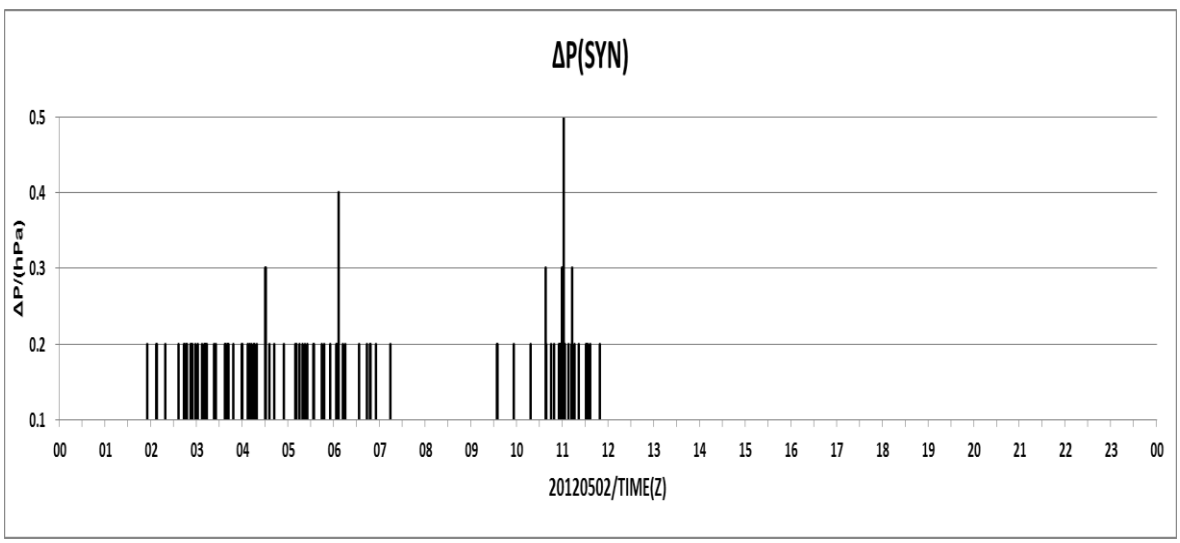
圖 4　2001 年 9 月至 2002 年 8 月松山機場低空風切強度與次數之日變化橫座標為台灣地方時，縱座標為低空風切發生次數。

最低時間，除了秋季 LLWS 和 LPF 兩者較低時段起始時間，和冬季兩者最低時間與年平均差異較大之外，四季平均日變化與年平均也相近。秋季 LLWS 和 LPF 兩者較低時段起始時間與年平均差異較大，概因秋季颱風多，颱風常不分晝夜侵襲，打亂 LLWS 和 LPF 較低時段起始時間。冬季 LLWS 發生最低時間大幅提早至晚上 9 點和 10 點，LPF 更提早至下午 6 點。其原因有待進一步探討。

蒲等(2014；2015；2016；2017)分析 2012 年 5 月 2 日松山機場台灣低壓鋒面雷雨個案(圖 5)、2013 年 7 月 12-13 日蘇力颱風侵襲期間松山機場 LLWS 個案（圖 6）、2013 年 2 月 24 日東北季風影響松山機場 LLWS 之個案觀測個案（圖 7）、2013 年 10 月 5～6 日菲特(FITOW)颱風影響松山機場 LLWS 之觀測個案（圖 8）、2014～2016 年馬祖南竿機場誤失進場風切與 LPF 分析（圖 9）以及 2013 年 7 月蘇力颱風侵襲期間臺灣桃園國際機場 LLWS 與氣壓波動個案等研究（圖 10），同時分析 2010～2014 年松山機場、2013 和 2015～2016 年臺灣桃園國際機場以及 2014～2016 年馬組南竿機場等機場，無論有無風切發生，都有每年每月每日每時每分鐘風切與氣壓大波動分布圖。可說明松山、桃園、馬祖南竿等不同機場以及東北季風、低壓鋒面雷雨、颱風等不同季節和天氣類型，無論 LLWS 和 LPF 發生時段和強度，可以用 LPF 都可以偵測風切的發生。本研究更進一步就 2010～2014 年松山機場每年每月每日每時每分鐘，無論有無 LLWS 發生，都與機場 LPF 加以分析，比對兩者的發生機率與日變化，結果顯示松山機場年平均和季節日變化，LLWS 和 LPF 出現較高時段約在上午 11 點至下午 4 點、最高時間出現在下午 1-3 點、較低時段約在晚上 6 點至翌日上午 10 點以及最低時間出現在清晨 4～5 點等時段和時間大致相當，說明 LPF 似可作為監測 LLWS 現象之依據。從本研究可知，以機場

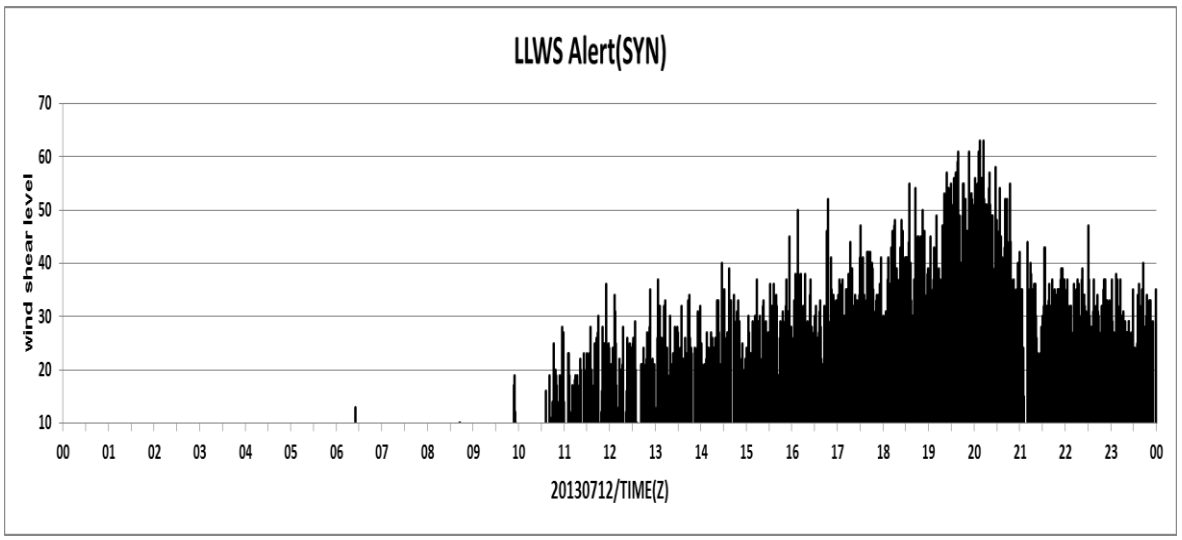


(a)

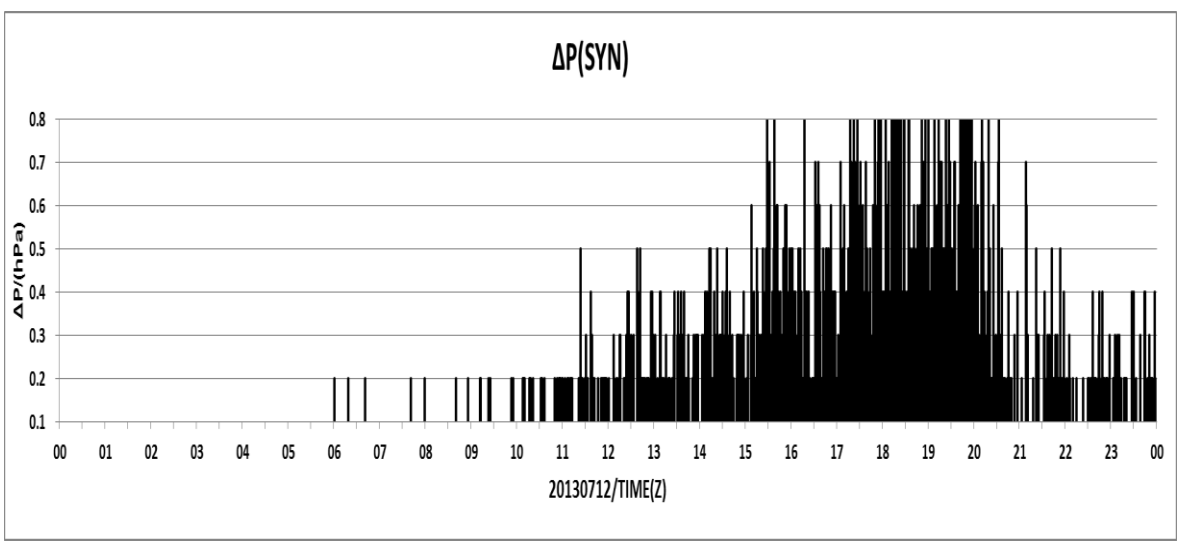


(b)

圖 5　2012 年 5 月 2 日松山機場台灣低壓鋒面雷雨期間每分鐘(a)低空風切與(b)跑道氣壓大波動分布。

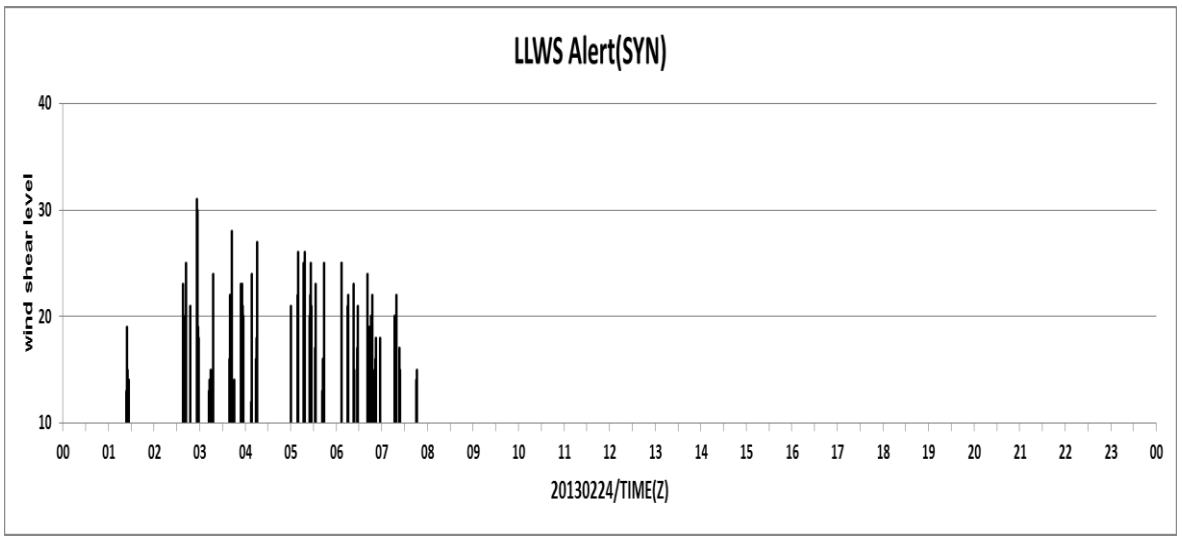


(a)

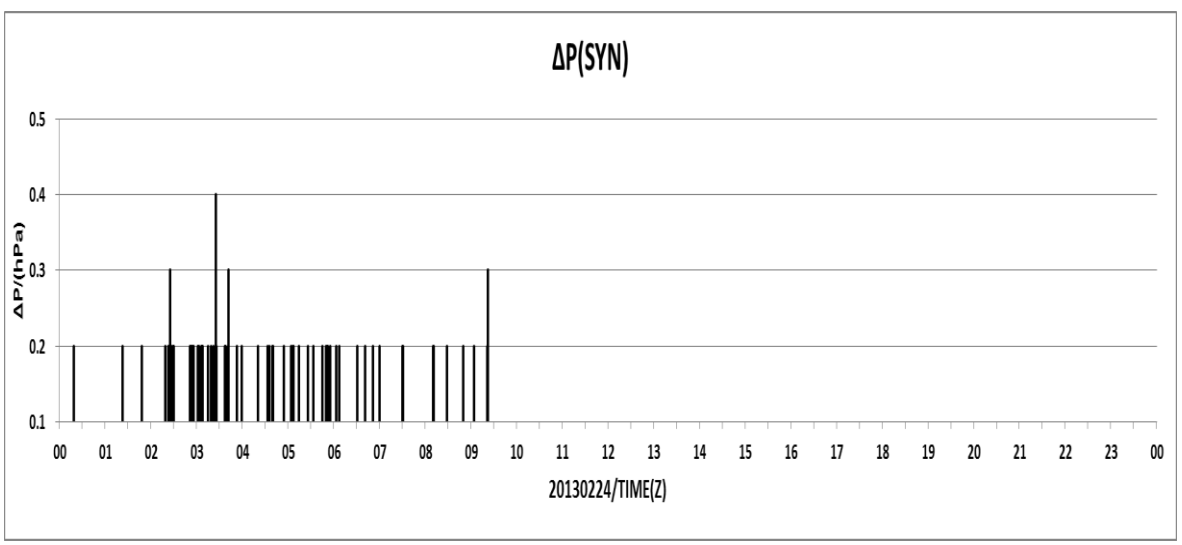


(b)

圖 6　2013 年 7 月 12 日蘇力颱風侵襲期間松山機場每分鐘(a)低空風切與(b)跑道氣壓大波動分布。

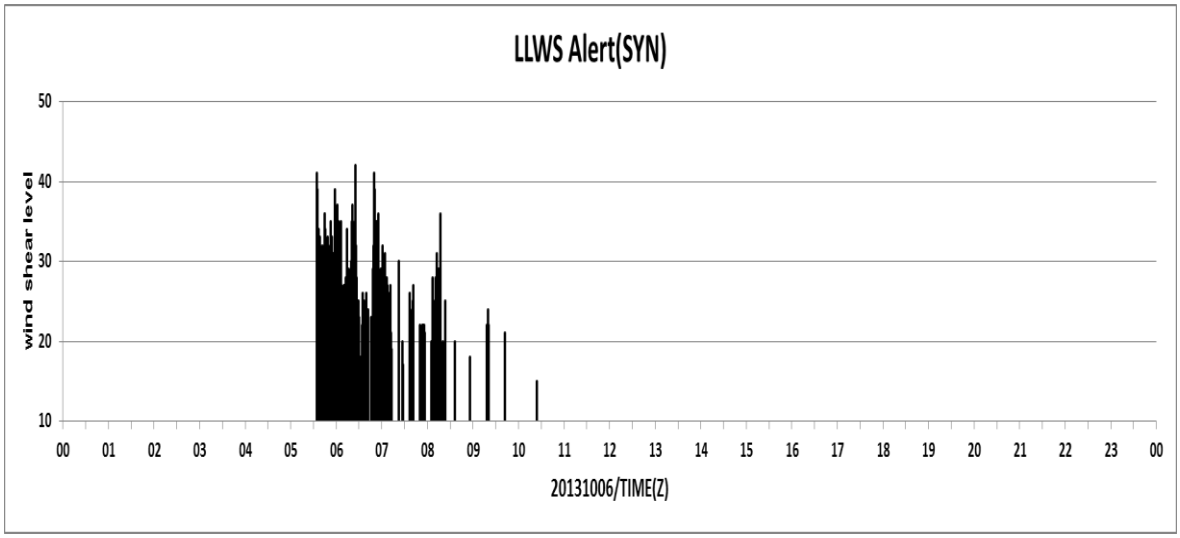


(a)

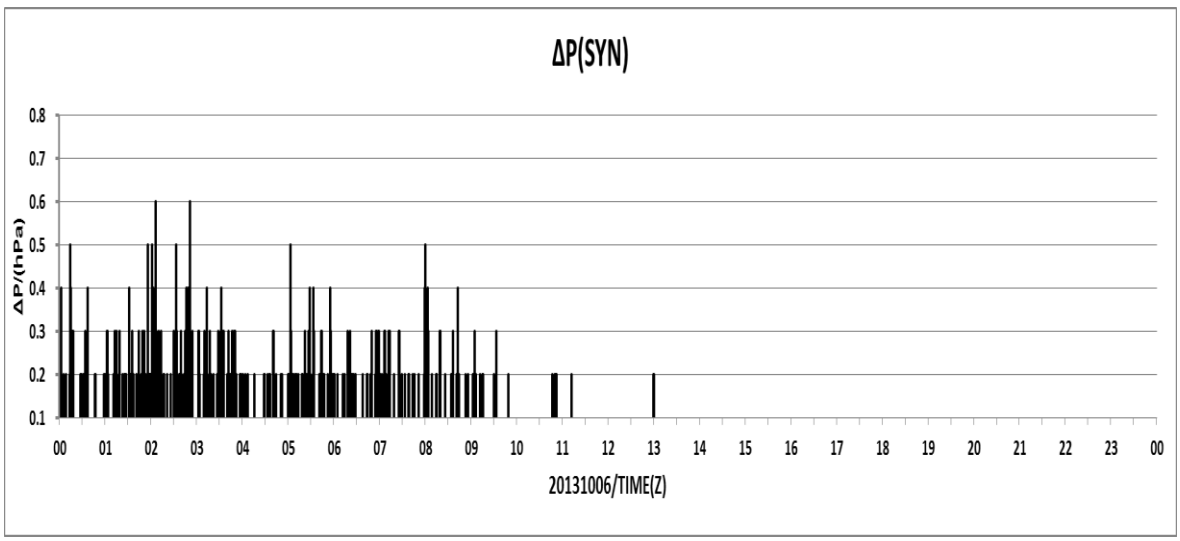


(b)

圖 7　2013 年 2 月 24 日東北季風期間松山機場每分鐘(a)低空風切與(b)跑道氣壓大波動分布。

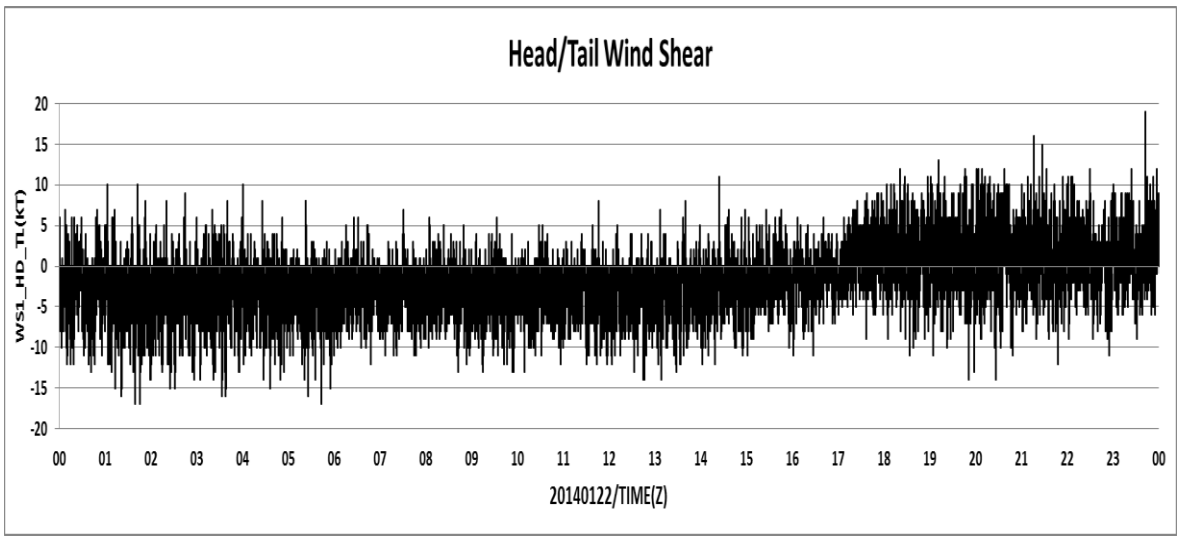


(a)

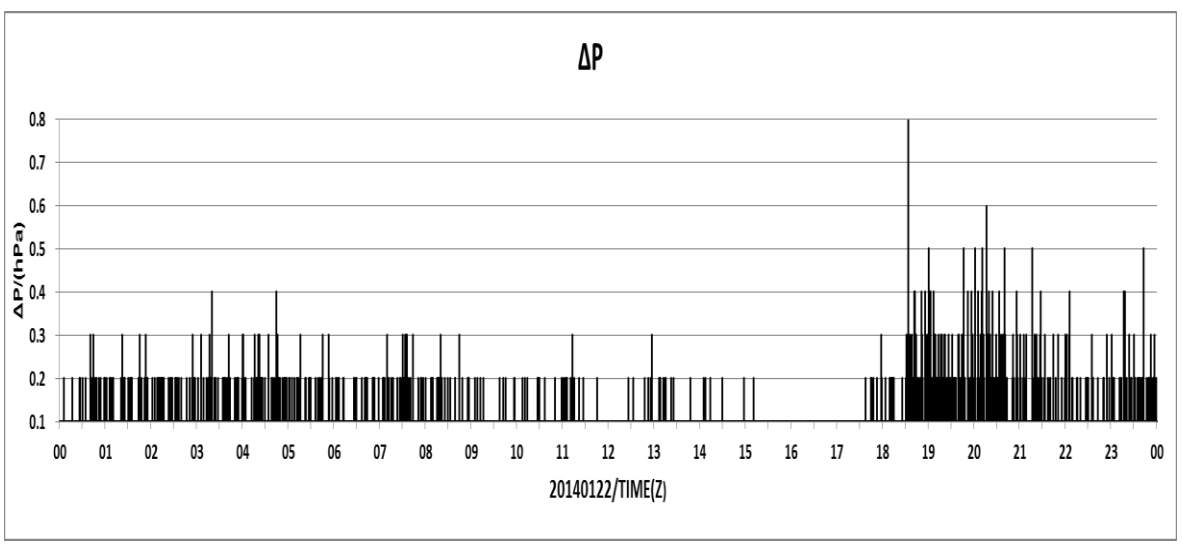


(b)

圖 8　2013 年 10 月 6 日菲特(FITOW)颱風期間松山機場每分鐘(a)低空風切與(b)跑道氣壓大波動分布。
註：10 月 6 日 0000-0530Z 缺風切資料。

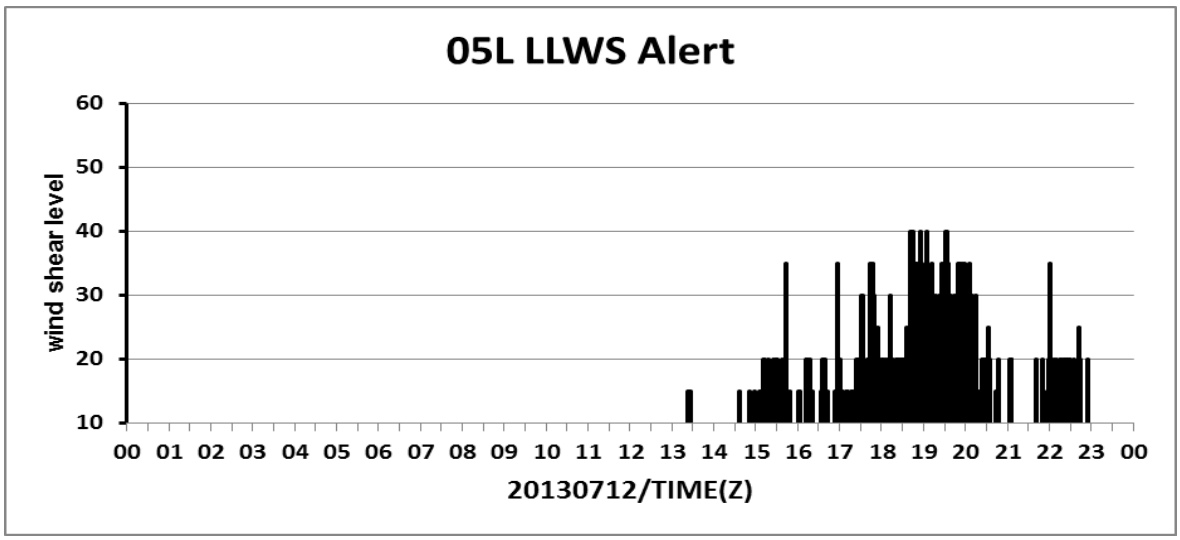


(a)

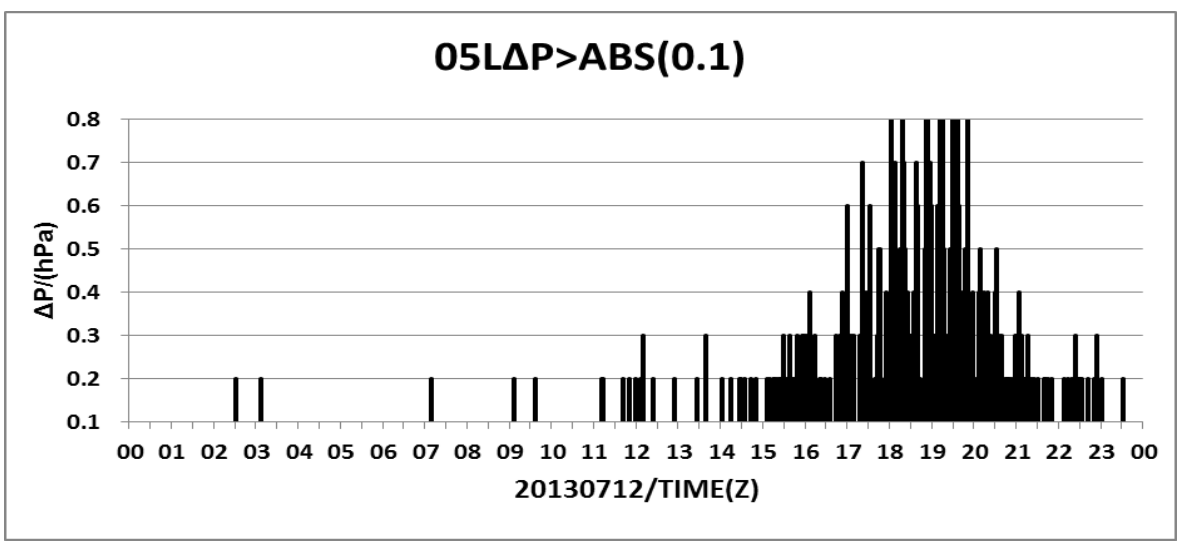


(b)

圖 9　2014 年 1 月 22 日馬祖南竿機場每分鐘(a)跑道逆風順風風切與(b)跑道氣壓大波動分布。



(a)



(b)

圖 10　2013 年 7 月 12 日蘇力颱風侵襲期間臺灣桃園國際機場每分鐘(a)低空風切與(b)跑道氣壓大波動分布。

範圍內現有自動觀測系統觀測到的氣壓資料，可以建立機場低空風切輔助系統，並可解決美國 FAA / LLWAS 系統在機場找不到腹地來裝置觀測塔的問題，以及系統建置和維修之困難。

綜合上述討論，從東北季風個案、台灣低壓鋒面雷雨個案、颱風個案、2014～2016 年馬祖南竿機場跑道風切分析以及本文 2010～2014 年松山機場每年每月每日每時每分鐘，無論有無 LLWS 發生都加以分析，顯示以機場氣壓大波動來監測風切可視為一種可用的方法。本研究方法已獲得經濟部智慧財產局「低空風切警告系統及預測低空風切的方法」發明專利權（發明第 I611198 號）和新式樣「風切亂流偵測及警告系統」專利權（新型第 M533697 號），系統使用單一氣壓測站每分鐘氣壓大波動，就可提早偵測或警告亂流的發生時間和地點，對飛機起降的安全和旅客生命安全，更可確保。目前正積極進行系統商品化，未來系統若能在台灣大小機場裝置，再推廣至全世界機場，對全世界飛航安全的提升可作出貢獻。

未來研究將進一步採用全年觀測資料，來分析氣壓波動幅度與 LLWS 強弱間關係。同時，除了松山、桃園和馬祖南竿等機場風切和氣壓大波動研究，已有初步成果之外，再考慮納入南部高雄小港、台東豐年以及蘭嶼等機場風切與氣壓大波動之間關係，加以研究，力求此研究議題具有全面性與實用性。

五、結論

本研究分析 2010～2014 年松山機場低空風切(LLWS)與氣壓大波動(LPF)發生機率之日變化，獲得下列成果：

(一) 五年機場 LLWS 發生次數為跑道 LPF 的 2.5 倍，其中，LLWS 夏季大於秋季，秋季大於春季，春季大於冬季，夏季、秋季、和春季分別為冬季的 8、7 和 2 倍，夏秋發生頻率是冬春的 4.7 倍。跑道 LPF 四季發生頻率分布相當平均，秋冬發生頻率比春夏略多。

(二) 年平均日變化，LLWS 和 LPF 出現較高時段約在上午 11 點至下午 4 點、最高時間出現在下午 1～3 點、較低時段約在晚上 6 點至翌日上午 10 點以及最低時間出現在清晨 4～5 點等時段和時間大致相當，唯最高時段 LPF 提早 1 小時開始；LPF 最高時間提早 2 小時出現，最低時間則提早 1 小時出現。

(三) 四季平均日變化，LLWS 與氣壓波動發生機率之主要較高和較低時段也都接近一致。唯四季發生機率與年平均日變化相比，提早或落後略有前後之差。四季較高時段和最高時間，四季與年平均最接近；四季較低時段和最低時間，除了秋季 LLWS 和 LPF 兩者較低時段起始時間，和冬季兩者最低時間與年平均差異較大之外，四季平均日變化與年平均也都相近。

致謝

本文在財團法人氣象環境研究中心陳琰亮先生、施蔡國瑛女士等支助下完成。感謝美國威斯康辛大學麥迪遜分校(Wisconsin-Madison)朱寶信博士指導，論文審查委員提供寶貴意見，以及貝氏卡曼科技公司徐茂林先生協助，感謝民用航空局飛航服務總臺提供松山機場地面自動觀測系統資料。

參考文獻

何臺華、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：臺灣松山機場低空風切系統與低空風切診斷分析，*大氣科學*，**31**，181-198，

_____與林清榮，2017：馬祖南竿機場誤失進場風切與氣壓大波動分析，*航空安全及管理季刊*，**4**，65-78。

_____與林清榮，2017：2013 年 7 月蘇力颱風侵襲期間臺灣桃園國際機場低空風切與氣壓波動個案觀測分析研究，氣象學報，審查中。

_____與林清榮，2017：2014-2016 年馬祖南竿機場跑道氣壓大波動與逆風（順）風切分析研究。*航空安全及管理季刊*，審查中。

_____與徐茂林，2016：菲特(FITOW)颱風影響松山機場低空風切之觀測個案分析研究，*飛航天氣期刊*，**25**，30-50。

_____與徐茂林，2016：東北季風影響松山機場低空風切之個案觀測分析，*氣象學報*，**53**，23-38。

_____、徐茂林及游志遠，2015：2013 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*，**43**，27-46。

_____、徐茂林、游志遠及劉珍雲，2014：臺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. and 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.

International Civil Aviation Organization, 2005: Manualon Low-Level Wind Shear, May 3, 2014 — *First* Edition — *2005*. Doc 9817 -AN/449, pp. 213.

Shreffler, Jack H. and Francis S. Binkowski, 1981: Observations of Pressure Jump Lines in the Midwest, 10-12 August 1975.*Mon. Wea. Rev.*, **109**, 1713-1725.

Vianai Samul, Carlos Yaguei, Gregorio Maqueda2 and Gema 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.

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 on the Diurnal Variation of the Low-Level Wind Shear and Runway Pressure Fluctuation in Songshan Airport from 2010 to 2014

Chin-Piao Pu Ching-Jung Lin

China Meteorology and Environment R&D Center

(manuscript received 7 November 2017；in final form 25 January 2018)

ABSTRACT

In this paper, we analyzed the diurnal probability changes of low-Level wind shear (LLWS) alert and large pressure fluctuation (LPF；> σ) in Songshan Airport from 2010 to 2014, where σ stands for one standard deviation. Results show that the annual frequency of airport LLWS alerts are 2.5 times that of LPF. Among them, the LLWS alert frequency in summer and autumn is 4.7 times higher than that in winter and spring. Due to Songshan Airport is affected by the typhoons and thunderstorms. However, the frequency distribution of the LPF in each season is relatively consistent with each other. Only the frequency of the autumn and winter is less than that of spring and summer. For the annual diurnal variation, the higher period of LLWS alert and LPF are at about 11 am to 4 pm, the peak time at 1~3 pm, the lower period at about 6 pm to 10 am the next day, the lowest time at 4~5 am in the morning. The high or low diurnal variation periods of LLWS alert and LPF are quite consistent with each other, only the higher period of the LPF appears early 1 hour, the peak time is 2 hours earlier, the lowest time is 1 hour earlier. For the seasonal diurnal variation, the main higher or lower probability period of LLWS alert and LPF in each season is quite consistent with each other. The only seasons compared with the annual diurnal variation, the difference between the two is slightly earlier or later in the main higher and lower diurnal variation periods. Among them, in the higher diurnal variation period and the highest time, the four seasons and the annual diurnal variation are the closest. In the lower period and the lowest time, the spring and summer and the annual diurnal variation are the closest, while autumn and winter and the annual diurnal variation is larger. From this study, the large pressure fluctuation can be used as a precursor for monitoring the runway wind shear.

Key Words: Large Pressure Fluctuation, Low-Leve Wind Shear, Diurnal Variation.

doi: 10.3966/025400022017094503004