松山機場強勁東北季風跑道向量風切與氣壓變量之分析研究

蒲金標[1] 林清榮[1]

摘要

本文根據 2013 年 2 月 24 日松山機場地面自動天氣測報系統測報資料(AWOS)，分析機場跑道向量風切、機場氣壓變量與機場低空風切之相關性，研究顯示機場低空風切起訖時間與跑道向量風切有落差，而機場氣壓變量與跑道向量風切發生起訖時間相當接近，且中度至強烈氣壓變量與中度向量風切整個發生時段也很一致。機場跑道向量風切可作為校驗機場低空亂流偵測及警告系統(LLTAS)(發明第 I611198 號）的標準。

一、前言

風切現象是非常複雜且很難預測的小尺度氣象現象，順風和逆風可以在瞬間地轉弱或轉強而發生。機場低空風切對飛行構成嚴重的威脅，尤其飛機在離場或進場階段，速度及距地面高度都接近安全的臨界值，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損失。飛機在起飛或降落過程，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，可提供精確地預報低空風切，因此，即時監測風切現象的發生，須做為飛行員加強注意安全的重要項目之一。

美國聯邦航空總署(Federal Aviation Administration, FAA)和美國大學大氣研究聯盟(University Corporation for Atmospheric Research, UCAR)共同開發了第三代低空風切警告系統(Low-Level Wind-shear Alert System, LLWAS-III (UCAR, 1992)，該系統在跑道中心線兩邊往外 1 海里和從跑道兩端向外延伸 3 海里範圍內建置數十個 20-30 公尺高的風向風速觀測塔。當其中的一個，觀測到風速和所有測風儀

[1]財團法人中華氣象環境研究發展中心

相對於跑道的風向量，有每小時 15 海里的相差值時，就有可能有風切現象，系統即時發出風切警告。另外, 測風儀觀測到的風場, 經計算發現有風場的輻散(divergence)現象，系統也即時發出風切警告。目前由美國 FAA 所發展的機場 LLWAS-III，可偵測機場從跑道兩端向外延伸 3 海里範圍的低空風切現象，但系統造價昂貴，設備維護不易，且建置觀測風向風速的觀測塔，所需的腹地取得以及周遭環境都有諸多限制。

松山機場 LLWAS-III 系統在機場周遭所建置 12 個觀測塔，塔高 20-30 公尺，將每一觀測塔所觀測的風場資料換算為跑道方向(100°~280°)之分量(風向量)，計算跑道兩端進場或離場航道方向之頂風(增速)或順風(減速)強度，偵測位在跑道或跑道兩端進場或離場 1~3 海里的低空風切或微爆氣流(Microburst, MB)情形。松山機場低空風切之強度在跑道和從跑道兩端各向外延伸 3 海里等區域方向之頂風(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(增速)或順風(減速)數值介於 15~19kt 時，表示有輕度低空風切；介於 20~29kt 者稱之為中度風切；大於 29kt 者稱之為強烈風切，其中順風大於 29kt 者稱為 MB。機場天氣報告之中，風場觀測係以十分鐘平均數值，提供給機場以外的國內外相關單位使用，

風場兩分鐘平均數值僅提供給航空管制塔台之管制員和飛機駕駛員起降使用。松山機場 LLWAS-III 系統係以觀測塔之風場，計算 10 秒鐘平均數值，用來計算機場是否有低空風切的發生。松山機場 LLWAS-III 系統係以每 10 秒的週期，即時更新風場資料，遇有低空風切或 MB 發生時，系統會發出警告一次。

國際民航組織(International Civil Aviation Organization, ICAO)指出 LLWAS-III 系統監測低空風切的準確率可達 90%，但仍有 6%的誤報率(ICAO, 2005)。陳與袁(2014)使用診斷數學模式和測風儀，來克服 LLWAS-III 無法監測系統沒有發布警告，而飛機起飛或下降，

卻遇到風切的情況，其誤報率 10%，即所謂的「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 LLWAS-III，原本要在高雄國際機場建置同樣規格的 LLWAS-III，後因該機場靠海，腹地不足，無法在機場西邊跑道頭向外延伸 3 海里，建置遠端觀測塔而放棄。

國際民航組織文件低空風切手冊(Doc9817-AN/449)認為氣壓跳升(Pressure Jump)，可偵測到陣風鋒面的時間比機場地面所測到風切的時間，提早三分鐘(ICAO, 2005)，這種地面風場和氣壓的組合，尚未應用到 LLWAS-III 系統。Wakimoto (1982)認為陣風鋒面經過測站，常帶來氣壓上升、氣溫下降、風向突變以及風速突增的現象，這些現象是造成低空風切主要原因之一。

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，通常雷暴產生的陣風鋒面，可使每分鐘氣壓上升高過 0.169hPa。而最明顯的氣壓跳升則是可於 3 分鐘內上升高過 0.5hPa。Shreffer and Binkowski(1981)觀測到雷暴雨外流可引發氣壓上升 1.5hPa。另外，Wakimoto(1982)研究顯示，在雷雨發生時，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，期間氣壓會有 5-7hPa 之變化。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 15KT 的差值時，就有可能有風切現象，系統即時發出風切警告。

蒲(2003)認為松山機場雷雨陣風、颱風強風、鋒面過境風向風速改變和強烈東北季風都是引發低空風切之主因。Viana et al (2007)以小尺度和短時間地面氣壓變量(pressure fluctuations)來研究大氣邊界層(atmospheric boundary layer)之特性。並分析標準差(σ)與亂流之相關，研究結果顯示氣壓的變差控制了風切現象的發生。蒲等(2014)認為低空風切發生與風速、氣壓和氣壓梯度等變化超過 1 個標準差

(Standard Deviation, 1σ)有關聯性。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」。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，風速變量達 15KT，是輕度低空風切警報之發布標準。

蒲等(2015)顯示颱風暴風圈侵襲期間松山機場氣壓每分鐘最大變差幅度，會有+2.6hPa 或-1.3hPa 之變化，同時伴隨頻繁和強烈低空風切發生。蒲等(2015)以氣壓變量範圍超過 1 個標準差，其發生時段和次數與機場低空風切發生時段相當符合。同時，以風速和氣壓每秒或每分鐘變差超過 1σ之時段和次數，都能監測大部分低空風切現象(包含飛行員有風切報告)之發生，顯見以超過 1σ為標準來偵測低空風切是可行的方法。蒲與徐(2016a)、蒲與林(2018a)都認為颱風暴風圈侵襲和強勁東北季風影響下，產生風切，也都與氣壓變化超過 1σ有關，蒲與林(2017a)和蒲與林(2018b)認為誤失進場風切與氣壓大波動(large pressure fluctuation；LPF)也有關連性。蒲與徐(2016b)認為冬季分裂高壓出海，台灣位在等壓線密集區，氣壓梯度大，東北季風強盛，當松山機場平均風速 和最大陣風分別增強至 15K 和 20KT 以上，就會引起機場低空風切的發生。氣壓變量加大和次數增多時，風切強度則增強且次數也增多，機場氣壓變量可作為機場即將發生低空風切之指標。惟 LLWAS 低空風切發生時段和持續時間與氣壓變量(ΔP>0.1hPa)，兩者發生之時段仍有落差，低空風切發生時段比氣壓變量(1σ)晚約 1 小時，且較早約 1.5 小時結束。

本文分析 2013 年 2 月 24 日松山機場跑道向量風切，並以跑道向量風切與機場氣壓變量(>1σ)和 LLWAS 低空風切作相互比對。

二、資料來源與分析方法

本文資料採用 2013 年 2 月 24 日，松山機場 LLWAS-III 之風切警告資料、地面自動化天氣測報系統(Automatic Weather Observation

System, AWOS)以及機場航空氣象定時地面天氣報告(Meteorological Aviation Routine surface weather report, METAR)等資料，其中，LLWAS-III 機場低空風切在同一時間有多筆風切資料，修正為同一時間(單一時間)僅有一筆資料，以利比對。LLWAS-III 係以每 10 秒觀測一次。而 AWOS 所測報的氣壓則以每秒紀錄氣壓值，為配合 LLWAS-III 每 10 秒發布警告，改以每 10 秒計算氣壓變量之絕對值納入分析。機場地面觀測報告記錄每小時和每半小時 METAR 以及不定時特別天氣報告，以了解風切與亂流發生時的天氣狀況。

機場 LLWAS-III 風切觀測數值，僅以 5 的倍數，記錄 15kt, 20kt, 25kt, 30kt, 35kt 和 MB 等 6 種，其風切強度分為輕度(15kt)、中度(20kt, 25kt)、強烈(30kt, 35kt)以及 MB(順風大於 29kt)等 4 級風切，其中逆風大於 29kt 時，列為強烈風切。本文為簡化分析起見，LLWAS 同一時間風切值(由 12 個觀測塔之風向風換算成跑道方向 100°~280°的風向量)，採最大絕對值作為代表。而機場跑道向量風切係跑道兩頭風向風速換算成跑道方向(100°~280°)的風向量相加，再採用最大絕對值。計算方式如下：

弧度 R10=3.1416/180*(100-風向)，弧度 R28=3.1416/180*(280-風向)，風向量=風速*Cos(弧度)，向量風切=/風向量 R10 + 風向量 R28/，向量風切再採最大絕對值。

例如，R10 0230Z 120/32 風向量為 30kt
R28 0230Z 140/11 風向量為 -8kt
向量風切=/30+(-8kt)/=22kt
R10 2341Z 270/02 風向量為 -2kt
R28 2341Z 240/06 風向量為 5kt
向量風切=/(-2kt)+(5kt)/=3kt

常態曲線理論應用於氣象變化，通常在穩定大氣下，氣象要素如氣壓變量，其幅度依常態曲線分配比例，約 68.26%的變量分布在

1σ內。而當大氣在不穩定時，氣壓變量可能超出1σ。氣壓變量之σ計算方式如下：

計算氣壓變量絕對值>0： $x_i = /y_i - y_{i-1}/$

y_i表示氣壓在這一秒之觀測值。y_{i-1}表示氣壓在前 10 秒之觀測值。x_i表示氣壓這一秒與前 10 秒之波動的絕對變量。

以氣壓變量絕對值>0 為資料樣本，計算觀測時間內之平均數與標準差：

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

N表示觀測時間內氣壓變量絕對值>0 之資料個數。μ表示觀測時間內氣壓變量絕對值>0 資料之平均數。σ表示觀測時間內氣壓變量絕對值>0 資料之標準差。

本文分析 2013 年 2 月 24 日松山機場跑道向量風切，並以跑道向量風切與機場氣壓變量(>1σ)和 LLWAS 低空風切作相互比對。

三、分析成果

2013 年 2 月 24 日 0000Z 地面天氣圖顯示分裂高壓(1032hPa)從中國長江口和山東省間移入黃海，台灣位在此高壓南緣，氣壓梯度大，如圖 1。高壓(1032 hPa)位於黃海接近韓國西南方，並向東南東延伸，台灣位於高壓南南西邊緣，松山機場吹東風。

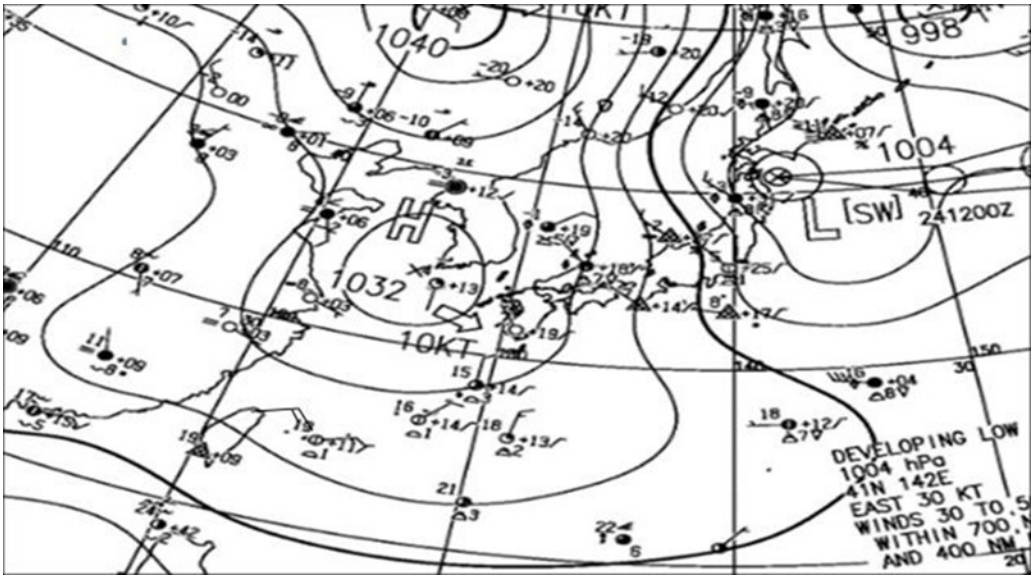

圖 1　2013 年 2 月 24 日 0000Z 地面天氣圖（摘自日本 JMA）

松山機場 2013 年 2 月 24 日 AWOS R10 和 R28 每 10 秒總觀測次數都是 8,640 次，氣壓變量(>0.0 hPa)之次數分別為 687 次和 408 次，占總觀測次數分別為的 4.7%，顯示氣壓絕對變量>0.0hPa 僅占總觀測次數的少數。氣壓絕對變量>0 之平均標準差(1σ)為 0.14hPa，如表 1。

表 1 松山機場 2013 年 2 月 24 日氣壓標準差(>1σ)

跑道編號	ΔP_10sec	(ΔP>0.0 hPa)		標準差(1σ)
	總觀測次數	次數	平均	
R10	8,640	687	0.11	0.14
R28	8,640	408	0.11	0.13
平均	8,640	548	0.11	0.14

(一)跑道向量風切

機場跑道向量風切於 0009Z 有輕度向量風切(17kt)，0207-0510Z 有輕至中度向量風切(15-22kt)，其中於 0221-0327Z 達中度向量風切(20-22kt)。於 0511-0820Z 無向量風切，隨後，於 0821-0930Z 又有輕度向量風切(15-19kt)，其中於 0930Z 達向量風切(19kt)，如圖 2。0009-0930Z 跑道向量風切發生次數總計 99 次，持續時間有 9.4 小時，如表 2。

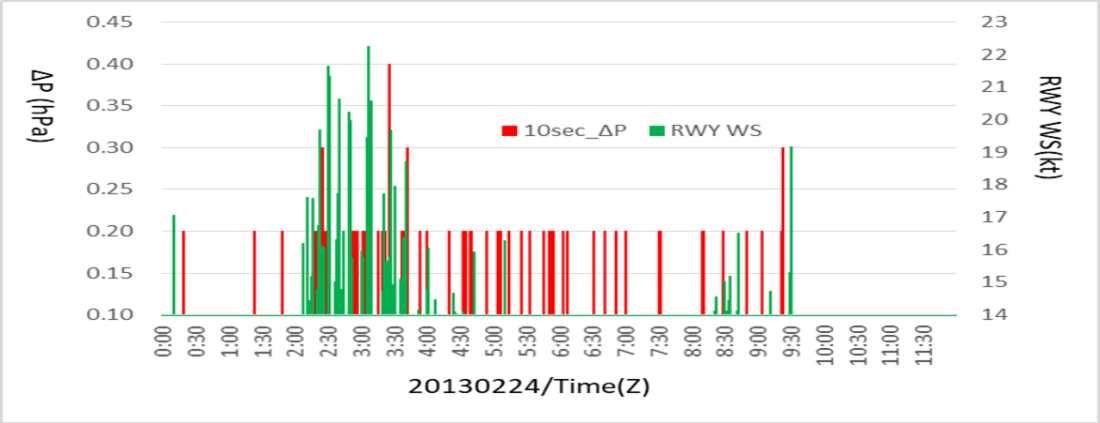

圖 2　2013 年 2 月 24 日松山機場跑道向量風切(綠色)和氣壓變量(紅色)分布

表 2　2013 年 2 月 24 日機場氣壓變量、跑道向量風切和機場低空風切起迄時間

氣壓變量(ΔP>0.1hPa)			跑道向量風切(15-35Kt)			低空風切		
次數	時段	持續時間	次數	時段	持續時間	次數	時段	持續時間
62	0019-0922Z	9.1hr	99	0009-0930Z	9.4hr	224	0123-0746Z	6.4hr

(二)機場氣壓變量

機場氣壓變量於 0019Z 有輕度氣壓變量(0.2hPa)，0123-0922Z 有輕度至中度氣壓變量(0.2-0.4hPa)，其中於 0225-0342Z 有中度至強烈氣壓變量(0.3-0.4hPa)，於 0922Z 有中度氣壓變量(0.3hPa)如圖 2。氣壓變量與跑道向量風切來比對，兩者起訖時段(0019-0922Z 和 0009-0930Z)相當接近，其中氣壓中度變量時段(0225-0342Z 和 0922Z)與中度向量風切時段(0221-0327Z 和 0930Z)更為接近。

機場於 0119-0922Z 氣壓變量>0.2hPa，發生 62 次，持續時間有 9.1 小時，與跑道向量風切於 0009-0930Z 發生 99 次，持續時間有 9.4 小時，兩者發生次數和時段相當接近，如表 2。

(三)機場低空風切

LLWAS 於 0123-0745Z 有輕度至強烈風切警告(15-35kt)次數 145 次，警告約持續 6.5 小時，其中於 0255-0256Z 有微爆氣流(30-35kt)4 次，如圖 3。氣壓變量與低空風切來比對，兩者起訖時段(0019-0922Z 和 0123-0745Z)，LLWAS 於 0019Z 沒有低空風切，但是機場有氣壓輕度變量(0.2hPa)1 次，顯然 LLWAS 低空風切落後前者約 1 小時。LLWAS 於 0124-0745Z 有輕度至微爆氣流警告，0123-0922Z 機場有氣壓輕度至強烈氣壓變量(0.2-0.4hPa)，其中 0225-0342Z 有中度至強烈氣壓變量(0.3-0.4)，與 LLWAS 於 0255-0256Z 微爆氣流發生時間接近。但是 LLWAS 於 0745Z 之後，不再有低空風切發生，而 0746-0922Z 機場仍有氣壓輕度至中度變量(0.2-0.4hPa)，持續時間達約 1.5 小時。LLWAS 於 0124-0745Z 發生輕度至強烈風切警告(15-35kt)次數達 145 次，持續時間 6.4 小時，而機場於 0119-0922Z 發生氣壓變量>0.2hPa 次數達 62 次，低空風切發生次數是氣壓變量>0.2hPa 次數的 2.3 倍，低空風切發生時段比氣壓變量(1σ)晚約 1.1 小時發生，且約提早約 1.5 小時結束。如表 2。

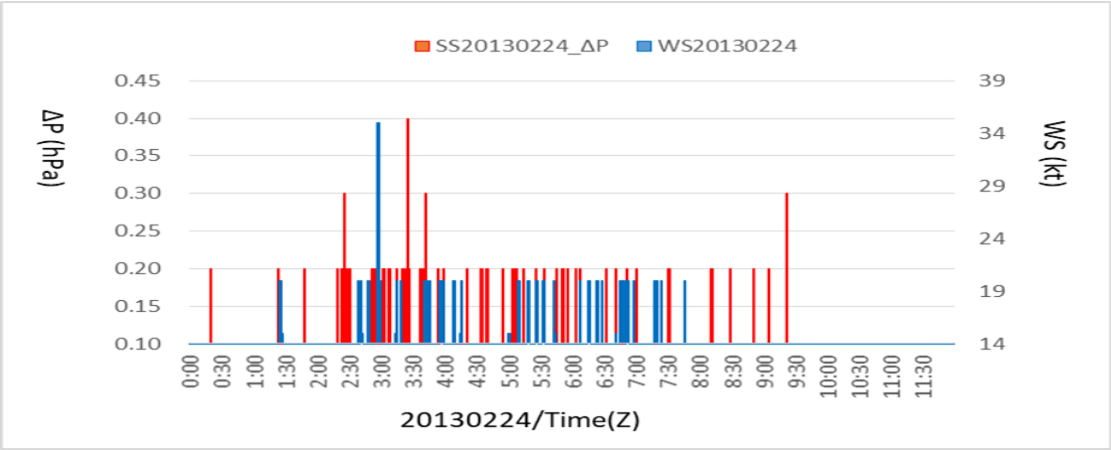

圖 3　2013 年 2 月 24 日松山機場氣壓變量(紅色)和 LLWAS 風切警告(藍色)分布

綜合以上跑道向量風切、機場氣壓變量和 LLWAS 低空風切等三者比較分析，跑道向量風切於 0221-0327Z 有中度向量風切

(20-22kt)，氣壓變量於 0225-0342Z 有中度至強烈氣壓變量(0.3-0.4)，LLWAS 於 0255-0256Z 有微爆氣流，三者發生時段都很接近，尤其氣壓變量更符合中度向量風切整個時段。LLWAS 風切發生時間最晚(0123Z)，而氣壓變量和跑道向量風切發生時間分別為 0019Z 和 0009Z，兩者發生時間相當接近。LLWAS 結束時間最早(0746Z)，而氣壓變量和跑道向量風切結束時間分別為 0922Z 和 0930Z，兩者結束時間也相當接近。

四、討論

蒲與徐(2016b)認為氣壓大變差加大和次數增多時，風切強度則增強且次數也增多，機場氣壓變量可作為機場即將發生低空風切之指標。惟 LLWAS 低空風切發生時段和持續時間與氣壓變量($\Delta P>0.1hPa$)，仍有落差，低空風切發生時段比氣壓變量(1σ)晚約 1 小時，且較早約 1.5 小時結束。

機場跑道向量風切係機場跑道實際風切，可作為校驗機場氣壓變量的標準。氣壓變量與跑道向量風切發生起訖時間相當接近，且中度至強烈氣壓變量與中度向量風切整個發生時段也很一致，而機場低空風切起訖時間與跑道風切有落差。財團法人中華氣象環境研究發展中心於 2019 年 8 月在松山機場架設一套新開發的機場低空亂流警告系統(Low Level Turbulence Alert System, LLTAS)，所採用的氣壓變量，再加上跑道向量風切，更能監測機場低空亂流的發生。

五、結論

本文根據 2013 年 2 月 24 日地面自動天氣測報系統測報資料，分析機場跑道向量風切、機場氣壓變量與機場低空風切之相關性，其研究結果如下：

(一)機場低空風切起訖時間與跑道向量風切有落差。

(二)機場氣壓變量與跑道向量風切發生起訖時間相當接近，且中度至強烈氣壓變量與中度向量風切整個發生時段也很一致。

(三)機場跑道向量風切可作為校驗機場低空亂流偵測及警告系統(LLTAS)(發明第 I611198 號）的標準。

致謝

本文在財團法人氣象環境研究中心施蔡國瑛女士和陳琰亮先生支助下完成。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

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，2017a：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，2018a：2013 年 7 月 12-13 日蘇力颱風侵襲期間臺灣桃園國際機場氣壓大變差與低空風切之相關性分析研究，氣象學報。

_____與林清榮，2018b：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，5，42-55。

_____與徐茂林，2016a：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，2016b：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: Manual on Low-Level wind-Shear, May 3, 2014—First. Edition — 2005. Doc 9817 -AN/449, p. 5-8,

(https://www.skybrary.aero/bookshelf/books/2194.pdf)
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.
UCAR(University Corporation for Atmospheric Research),1992：Low Level Wind-shear Alert System(LLWAS-III), (http://www.ral.ucar.edu/projects/LLWAS-III/).
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, R. M., 1982: The Life Cycle of Thunderstorm Gust Fronts as Viewed with Doppler Radar and Rawinsonde Data. Mon. Wea. Rev., 110, 1060–1082.