

## 松山機場雷射式剖風儀風切研究與應用

曾德晉<sup>1</sup> 陳冠儒<sup>2</sup> 楊菁華<sup>2</sup> 劉清煌<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 空軍氣象聯隊

<sup>2</sup> 中國文化大學大氣科學系

### 摘要

目前空軍氣象聯隊已將四具車載雷射式剖風儀分別駐紮於空軍松山機場（北部地區）、空軍清泉崗機場（中部地區）、空軍屏東機場（南部地區）及空軍花蓮機場（東部地區），平時提供機場垂直風場時序演變及任務時期國軍戰（演）訓或防（救）災任務。若能量化中低空層大氣之飛安潛危因子（風切變）並完成定性風險等級判別，將可避免人為主觀判定瑕疵，進一步降低任務風險增加任務功算，因此剖析風切變訊號之研究是迫不容緩的首要課題。

本研究使用雷射式剖風儀（LIDAR）觀測資料、松山機場航空例行天氣報告（METAR）、松山機場低空風切警報系統（LLWAS）以及地面觀測資料（探空），其中透過剖風儀觀測到的垂直風場及垂直速度，並利用訂定門閥值之方法，製作判斷垂直風切之風切指數，再將探空資料透過大氣穩定度之公式，製作出判斷逆溫層高度及強度之逆溫指數，最後再利用這些指數幫助預報員快速判斷垂直風切與亂流發生的可能性。

結果顯示，剖風儀觀測不少出現較強的垂直速度並不一定伴隨較強的垂直風切，且出現較強的風切不一定會出現較強的垂直速度，這代表兩變數在亂流反應上存在獨立性，因此兩變數皆能各自表示垂直方向上亂流的強度。探空資料所計算出的逆溫指數，結果顯示，當有較明顯的逆溫層產生時，發現有較明顯風向轉變，表示逆溫指數與垂直之風切有較好的關聯性。因此透過計算風切指數（WSI）及逆溫指數（ILI）的方法，整合水平風切、垂直風切、垂直速度及逆溫現象，能夠提供亂流及風切預報的參考。

**關鍵字：**車載雷射式剖風儀、低空風切、亂流。

### 1. 前言

空軍氣象聯隊已將四部 LEOSPHERE WINDCUBE 100S 型之車載雷射式剖風儀分別駐紮於空軍松山機場（北部地區）、空軍清泉崗機場（中部地區）、空軍屏東機場（南部地區）及空軍花蓮機場（東部地區），實施週期性的長期觀測。該剖風儀最高空間解析度可達 25m，最高時間解析度為 10 秒，張(2017)針對雷射式剖風儀與傳統高空探空風場資料特徵之進行了比較分析，結果顯示，剖風儀

與探空資料之風場在部分時段風場的相關係數有高達九成以上，但考慮到剖風儀擁有高時間解析度之特性，較容易掌握到垂直風場的變化量，因此本研究為瞭解雷射式剖風儀用來監測低空風切的能力與應用。

目前航空器飛行過程中最危險的兩個時段分別是起飛及降落時，尤其是降落時刻，航空器飛行是利用空氣動力學所產生的浮力，因此氣流及飛機間的相等角度與浮力有很大的關係，穩定的氣流與適當的相對角度

是保持航空器平穩飛行的關鍵。瞬間的風速風向變化（風切）航空器會瞬間失去平穩，若此現象發生在航空器起落時，往往會造成飛安事故，最有名的例子是 1975 年 6 月 24 日紐約機場東方航空公司（Eastern）第 66 航班降落時碰上微暴流而墜機（Fujita, 1985）。因此，後來在大部分機場均架設氣象雷達來監測機場周圍的天氣，但氣象雷達是偵測水滴，依水滴的移動風速當作是風速，若空氣中無水滴例子的存在，則雷達無法測得風速。因此在無雨的情況下，如何偵測風是一個重要的課題。

蒲（2003）及余和童（2011）統計松山機場低空風，發現每個季節的天氣系統皆有可能發生顯著的低空風，但是在夏天和秋天發生的頻率最高，發生時間以日間到傍晚為主。一般而言較容易出現風切的天氣系統可分為：微暴流（microburst）、鋒面颶線（front、squall line）、陣風鋒面（gust front）強烈東北季風、颱風、逆溫層、晴空亂流（clear air turbulence, CAT），這些環境中有些系統是可以事先掌握的，如鋒面、颶線、強烈的東北季風及逆溫層等，這些大環境是可以被守視，透過雷達、衛星或是探空可以掌握。陣風鋒面一般伴隨雷雨的外流（outflow），一部分陣風鋒面也是雷達可以掌握的，因此利用雷達、衛星等資料可以預知即將有劇烈天氣系統發生，事先可以提供預警（warning）。但是微暴流、晴空亂流等所產生的風切很難掌握，因為尺度小且瞬間發生，有時沒有任何天氣徵兆，偵測更加困難。在晴朗天氣時空中出現的風向風速的突變，由於它在空中出現時不常伴有可見的天氣現象，被稱為飛機的「隱形殺手」，飛行員很難事先發現，

因而對飛機安全造成很大威脅。

瞬間的風速風向改變稱為「風切」，風切可以是在水平方向（水平風切）或是垂直方向（垂直風切），這些切變都可使航空器瞬間失去平衡，ICAO（2005）文獻中提到，風切是指兩個觀測點之間風場向量的差值，而風切強度則是將風切除以兩個觀測點之間的距離，也稱之為風切向量，風切向量可以是垂直風切或是水平風切視兩向量之所在位置而定，所用的單位是 kt/100ft。然而風切強度計算出來的資料僅代表測量點的風切強度，例如：若 A、B 兩點都是距地 10m 高的風速風向塔，用這兩點算出來的風切強度指代表 A、B 兩間的水平風切。若 C、D 兩點位在相同位置，但高度不同，例如 C 在 30m 高、D 在 50m 高，用 C、D 兩點算出來的風切強度指代表 C、D 兩間的垂直風切。

目前機場針對偵測風切的方法一般可分為地面觀測儀器的觀測及剖風儀的遙測：

地面監測：在跑道頭的兩端設置風速風向氣壓的儀器，更先進的機場則設置有低空風切偵測系統（LLWAS），LLWAS 系統可以有效掌握低空風切的發生地點，但需要有足夠的地方架設多部的風速風向偵測器，方能準確的計算風切所產生的輻合/輻散場，蒲等（2017）研究當風切發生時的氣壓變動發現瞬間的氣壓變化，氣壓跳動（pressure jump）也可以用來當作監測低空風切的指標。LLWAS 的架設高度僅靠近地面約 30m 高，30m 以上的風切則無法監測得到。

剖風儀監測：剖風儀的種類很多一樣，根據不同的需求而異，針對低空風切而言常用的頻率是 915-1300MHz 探測高度約 3km 左

右，一般只做定點的垂直監測可以有有效的掌握垂直風層的風速風向變化。

機場低空風切一般是指發生在 2000 呎 (600m) 以下出現水平方向 15kts 的風切，且持續 10 秒鐘以上，劉與林 (2016)，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) 15~29kts，微暴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)，蒲與林 (2017)。2018 年 4 月 6 日一道快速移動的鋒面由北向南移動，張等 (2018) 分析鋒面經過松山、清泉岡、花蓮、及屏東機場時，四部雷射剖風儀偵測到垂直風場的變化情形，水平風瞬間轉變，且伴隨極強的垂直風切，但風切的強度未予以討論。Sakagami et al (2014) 使用剖風儀探討風切及風能問題，對近地面的風切及亂流部分有做深入之探討，發現風速的強度與日夜變化有關係，於上午 6 時及 18-19 時風速較強，中午左右風速較弱。另外，大氣穩定度也是個重要的因素，該研究指出在 10-14 時穩定度較高，而 19-01 時大氣較不穩定。

Miguel (2014) 針對 LAP-3000 之剖風儀進行風的垂直剖面與航空氣象上的應用，針對剖風儀觀測之垂直風場，進行垂直風切等探討，並透過聲波雷達探空系統 (Radio acoustic sounding system, RASS) 之進行溫度反演，以得到相對於地面之溫度，其中針對逆溫的強度之定義為該層溫度相對地面溫度增加多少，而上述兩者主要都與直接觀測之

溫度進行逆溫的強度計算，且文中提到當逆溫發生時，能夠發現該高度有較明顯的風向轉變。

本研究為瞭解雷射式剖風儀用來監測低空風切的能力與應用，配合剖風儀、LLWAS 及航空例行天氣報告電碼 (METAR)，篩選有共用觀測時段之資料，且易發生低空風切之東北季風及颱風之個案，透過剖風儀觀測之垂直風場與板橋探空站之探空資料，進行垂直風切之探討。

本文第一章主要回顧低空風切及剖風儀應用之相關研究，從中啟發本研究之研究動機。第二章主要描述個案選取及研究方法，其中風切指數及逆溫層指數之計算也會在本章節一併敘述。第三章主要會進行挑選個案之分析及透過風切指數與逆溫層指數表現之情況。第四章為結果與討論，說明剖風儀用來監測低空風切的能力與應用性。

## 2. 個案選取與研究方法

本研究以 2016 年空軍氣象聯隊在松山機場開始架設雷射式剖風儀進行觀測的觀測資料進行低空風切的環境場分析。松山機場自 2001 年引進建置低空風切警報系統 (LLWAS) 進行低空風切的觀測預警，且機場航空氣象臺有人工觀測 (半小時/1 小時) 發布航空例行天氣報告電碼 (METAR)，並電話通知機場的飛航管制單位及機場管理單位，此兩單位會依據發布的電碼進行作業。

### 2.1 個案選取

為方便挑選有發生低空風切之事件進行研究，於是將各觀測平台有無資料依時間標示出來。圖 1~2 為 2018~2019 年全年該日逐分鐘資料的完整程度之示意圖，圖中方格之

上半部分為 LLWAS 資料狀況，下半部分為剖風儀資料狀況，其方格上半部分之文字為氣象報文歷史資料在該日有風切警報之次數，方格中顏色為該日資料完整度之情況，綠色為有完整資料，黃綠色為該日有 75% 以上的資料完整度，黃色為該日有 50%~75% 的資料完整度，橘色為該日有 25%~50% 的資料完整度，紅色為不到 25% 的資料完整度，白色為完全沒資料。考慮到雷射式剖風儀觀測之特性與資料完整性，因此先挑選兩者皆有完整觀測資料的時間段，並挑選 METAR 中有低空風切事件之個案進行分析。因此從圖 1~2 中顯示，挑選出 2018 年 12 月 28 日與 2019 年 08 月 24 日之個案，其中 2018 年 12 月 28 日為東北季風之天氣型態，2019 年 08 月 24 日為白鹿颱風之個案進行個案分析。

透過剖風儀資料整理後發現，從 2019 年 4 月 24 日以前，顯示剖風儀 METAR、LLWAS 觀測之風場相當一致（如圖 3）。但在 2019 年 6 月 6 日後剖風儀與板橋探空、METAR、及 LLWAS 之風向均有較大的差異，風向差約 90 度（如圖 4）。為進一步瞭解此風向之差異性，由剖風儀現有資料面來看，由於 2019 年 4 月 25 日 02Z 至 2019 年 6 月 6 日 05Z 前間缺乏觀測資料，以此時間為分界。於是進一步討論此差異現象，分別計算其風向資料，得知固定之差值，並嘗試進行風向檢驗，以 2019 年 08 月 23~25 日白鹿颱風為例，選取 2019 年 8 月 24 日整天之剖風儀資料進行風場調整，未調整前整日風場變化如圖 5，從圖中得知風向約有 90 度之差異，經過風向+90°調整之後，發現風向與地面觀測很一致，如圖 6 所示，於是將 2019 年 6 月 6 日 05Z 以後之松山機場剖風儀風向都進行一樣調整後，再

進行 LLWAS、METAR 之觀測資料比對，結果相當一致，剖風儀經過這樣調整之後，可以得到更好之風場資料之外，更可以延伸進行其他分析。

## 2.2 LLWAS 低空風切之計算

LLWAS 是由美國大氣科學研究中心（NCAR）所研發，因此 LLWAS 演算法是由 UCAR 所持有，而何等（2005）在低空風切的個案分析中，使用「三角形遞迴運算法」重新計算 LLWAS 任三個測風臺所圍出來的三角形，並計算該面積內的輻散值來推估低空風切的發生。在該研究比對計算得到的低空風切結果與 LLWAS 的風切警報結果，可以發現兩者所得到低空風切發生時間相當一致，但是透過三角形遞迴計算得到的低空風切警報之頻率比 LLWAS 的風切警報有略高的情況發生，但以低空風切發生時間大致相同的情況下，故使用此種方法來進行低空風切的計算。

LLWAS 重新計算的輻散場，利用輻散場值之大小可以顯示風切的強度，其中當輻散值為正時，表示有輻散作用發生，反之負值為輻合作用。本研究之方法與 LLWAS 提供之風切警示比較，均能掌握到 LLWAS 系統輸出之風切警告，但警告之頻率較 LLWAS 系統輸出值為高。

透過三角形遞迴運算法（如公式 1）重新計算 LLWAS 任三個測風站之輻散值。此公式之基本原理乃計算由個斜邊進入到此三角形風場之通量，再將總通量在除於三角形面積（A）即可求得輻散值，首先將各 LLWAS 之觀測站的風場依循 Power Law 與 Ekman Layer 之特性調整至 300m，然後再利用此公式計算

在 300m 水平風之輻散值。其中  $F$  為水平輻散值，分母  $A$  為三角形面積， $l$  為三點相連的線段， $V_n$  為線段  $l$  的法線方向之分量。

$$F = \frac{\oint V_n dl}{A} \quad (\text{公式 1})$$

### 2.3 風切指數 (Wind Shear Index, WSI) 門閥之計算

亂流是天氣影響飛安的重要因素之一，而亂流常會伴隨強的風切或強的垂直速度發生，強的風切又可分為水平風在水平方向的切變（稱為水平風切）及水平風在垂直風向的切變（稱為垂直風切）。LLWAS 是利用進地面水平多點的觀測網探測水平風的切變，計算輻合、輻散來偵測亂流。而剖風儀是單點的垂直方向的觀測，剖風儀能夠提供垂直方向在不同高度三維的風場，包括水平風及垂直速度。因此可以透過水平風在垂直方向的變化得到垂直風切。為了解垂直風切與垂直速度的關係，然而發現不少出現較強的垂直速度並不一定出現較強的垂直風切，且較出現強的風切不一定會有較強的垂直速度！這表示兩變數在亂流反應上是存在獨立性的，因此兩變數都能各自表示垂直方向上亂流的強度，因此透過兩變數個別之門閥值（如表）制訂出判斷亂流的風切指數 (Wind Shear Index, WSI)。最後再透過兩變數所對應的門閥值做相加並得到該高度之風切指數，當風切指數為 1、2 時表示該層可能有輕度之風切亂流發生，當指數為 3、4 時表示可能有中度風切亂流發生，當指數為 5、6 時表示可能有強度的風切亂流出現。之前 LLWAS 主要透過水平方向上的測風臺來瞭解低空風切的發生，而 METAR 資料主要為地面觀測人員透過風速判斷出是否有風切發生，但並無法呈現

垂直方向上的情形，而剖風儀的觀測資料則可以用來推測垂直不同高度可能出現風切亂流的訊息。

透過垂直速度與垂直風切之門閥值之選取得到「風切指數」，所謂「風切指數」為意旨低空風切發生機率之參考指數，且計算後的指數越高發生低空風切的機會越高，計算流程如流程圖（如圖 7），清楚說明各門閥值的範圍。

### 2.4 探空逆溫層指數 (Inversion Layer Index, ILI) 之計算

針對逆溫的強度之定義，本研究主要透過大氣穩定度的方式進行逆溫層之定義，因此會將觀測資料透過位溫公式計算之位溫（公式 2）。

$$\theta = T \left( \frac{1000}{P} \right)^{0.286} \quad (\text{公式 2})$$

再透過大氣穩定度方程計算出大氣的垂直穩定度，大氣穩定度方程（如公式 3）計算出大氣的垂直穩定度。

$$\frac{d\theta}{dz} \quad (\text{公式 3})$$

從穩定度之定義可得知，當穩定度大於 0 時表示環境大氣是處於穩定的狀態，反之小於則是不穩定的情況，而若穩定度等於 0 時，則表示環境大氣為處於一個中性穩定的狀態。

由於探空資料時間解析度為每秒一筆資料，所以會對資料內插至每 10m，再透過位溫公式計算出位溫，因為資料本身解析度相當高，故容易產生一些雜訊干擾穩定度的計算，因此會針對資料會再進行 Leise 濾波 (Leise 1982)，再透過大氣穩定度方程計算出大氣的垂直穩定度，並定義垂直穩定度強度

必須大於 0.01K/10m，且要達到 50m 以上的厚度，為了方便清楚顯示穩定度的強度，因此將穩定度乘上 100 再取整數，這也表示相當於 1K/1km 的情況，透過這方式以便數據之呈現（如圖 8），並將該數值訂定為逆溫指數（Inversion Layer Index，ILI）。

### 3. 個案分析

#### 3.1 東北季風之天氣型態

2018 年 12 月 28 日之地面天氣圖顯示（如圖 9），臺灣主要受到大陸冷高壓影響，北臺灣主要風向以東北風為主，在這段期間臺灣依然受到該天氣系統影響，臺北皆為東北風的情況。28 日探空圖顯示（如圖 10），在低層（700hPa 以下）大氣整體偏濕，且在 700hPa 以上有一個很強的逆溫層出現。由較詳細的低層探空圖顯示，在 800hPa 以下風向大致為東北東風，風速整體在 25kts 以上，且最大風速達到 35kts，800hPa 以上則有明顯的風向轉變為西風的情況，且風速也明顯比低層大氣來的弱。

剖風儀與風切預警時序圖（如圖 11~14）顯示，從 28 日 00Z 就持續有垂直風切發生，且發生高度多在 400m 以下，並在 1130Z 有較明顯的垂直速度發生，且在該時間 METAR 報告也有發出低空風切之警示，但大多時間上剖風儀雖有觀測到較明顯的垂直速度及垂直風切時，LLWAS 與 METAR 報告並未出現低空風切的預警，因 LLWAS 與 METAR 報告資料是近地表的觀測，無法得到垂直方向上之資訊，故並未發出低空風切之警示。透過參考公式計算出垂直風切之指數，這方法能過快速分析出哪層出現垂直風切之警訊，並能快速做判斷。

透過板橋探空逆溫層指數圖（如圖 15）

顯示，剖風儀所預警之垂直風切位置與探空顯示之高度相當一致。28 日 00Z 時，逆溫層出現在 2400m 附近，且該高度並伴隨著風向的轉變，產生垂直風切，並且之後的探空也都有在 2500m 附近有觀測到逆溫層之出現，並且有發生較明顯的方向改變。整體而言，東北季風來時底層風速較強，而且在高度 1~2km 間會有逆溫層出現，這個個案資料分析結果顯示完全符合，且在低層易有風切亂流出現。

#### 3.2 白鹿颱風之天氣型態

2019 年 08 月 23 日至 25 日主要受到白鹿（BAILU）颱風的影響，23 日 00Z 地面天氣圖（如圖 16）顯示白鹿颱風位置在臺灣東南方，中央氣象局在該日下午 2 時 30 分（LST）發布陸上颱風警報。到了 24 日 00Z 時仍顯示持續向臺灣移動，在下午 1 時（LST）於屏東縣滿州鄉登陸，並且於下午 4 時 10 分（LST）於高雄市楠梓區出海。到 25 日 00Z 白鹿颱風已脫離臺灣本島，氣象局於 25 日上午 8 時 25 分（LST）解除陸上颱風警報。

從探空圖（如圖 17）顯示 23 日 00Z 環境大氣皆以東風分量為主，24 日 00Z 因颱風影響程度增加，風速明顯較前一日增強許多，詳細之低層探空圖可以看到最大風速有達到 60kts。隨著白鹿颱風逐漸遠離臺灣，從 25 日 00Z 受到白鹿颱風的影響明顯減弱，風速相較前一天變弱許多，而在 800hPa 至 300hPa 因仍受到白鹿颱風外圍環流影響，風向大多以南風為主，低層探空圖顯示 800hPa 以下的風場大多以西南風，且風速約在 10kts 左右。

從 24 日剖風儀時序列分析圖（如圖 18~21）顯示，剖風儀所量測之數值已明顯受

到颱風影響，並伴隨較明顯的垂直速度與垂直風切發生，而這個情況持續到 24 日 20Z 才結束，而 METAR 報告也是在這段時間發出低空風切警訊，且 LLWAS 在這段時間也都有發出預警，從剖風儀垂直風場來看，也能發現有相當強的垂直風切發生，並且透過風切指數圖在該時間顯示較多的風切指數的出現，也就表示該時間有明顯的亂流出現。透過板橋氣象站之探空資料（如圖 22）進行比對可以發現，從 23 日 12Z 之探空垂直風速開始有增強的現象，在 24 日 09Z 增強的最顯著，到了 25 日 00Z 顯示風速有明顯減弱且低層則以西風為主，表示該時間颱風已遠離臺灣。因此 23 日與 24 日環境整體因受颱風影響，且在 24 日風速達到最大，到了 25 日因颱風開始遠離臺灣，因此風速相較前兩日有明顯減弱的情況，且風向大多為西風為主。這段時間內剛好有雙北雷暴實驗（TASSE-2019）高時間解析度的探空資料，挑選位於臺北藝術大學施放的探空計算風切指數（如圖 23~25）。結果顯示在高度 1~2km 間都存在有微弱的 ILI，特別值得注意的是低層都有很強的 WSI！

#### 4. 結果與討論

本研究使用雷射式剖風儀（LIDAR）觀測資料、松山機場航空例行天氣報告（METAR）、松山機場低空風切警報系統（LLWAS）以及地面觀測資料（探空），可以知道在低空風切預警之觀測相關性是非常高且相當重要的，並透過各種參數對低空預警指數之門閥製作風切指數。

資料整理時發現 2019 年 4 月 25 日以前之剖風儀低層之風向與 METAR 及 LLWAS 之風向相當一致，但在 2019 年 6 月 6 日以後

則與 METAR 及 LLWAS 之風向約有 90 度之差異，經過多次比對確認後確認剖風儀風向經過+90°調整後之風向與地面觀測相當一致，於是將 2019 年 6 月 6 日以後松山機場剖風儀之風向都進行相同的調整。資料經調整後，可以用於後續深入的分析，以及計算風切指數，以利天氣守視之用。

本研究使用剖風儀垂直風場及垂直速度探討垂直風切及亂流，結果顯示，發現不少出現較強的垂直速度並不一定伴隨較強的垂直風切，且較出現強的風切不一定會出現較強的垂直速度，然而這兩者參數都有可能對飛機起降安全產生影響，因此制訂出垂直風切及垂直速度之門閥值（WSI），建立快速判斷風切指數的計算流程，並期望這指數能夠幫助預報員快速判斷垂直風切與亂流發生的情形。

分析天氣個案顯示，當剖風儀有預警指數時，LLWAS 並不一定會發出低空風切的警報，主要原因可能為儀器與資料特性之不同，LLWAS 測站大多建置高度在 30m，再將 30m 的風場調到 300m，計算 300m 這層的輻散值，再透過輻散值進行水平風切的預警，但其風場的本質仍來自於地面測站所觀測到的風；而剖風儀則是能夠得到垂直方向 50m 至 1600m 等不同高度之風場資訊，進而透過 WSI 之計算判斷垂直風切發生之高度，這差異造成兩者間觀測方法不同進而產生差異，也因此表示兩者資料是能夠相輔相成，進而提升低空風切的掌握能力。

本文利用探空資料計算穩定度，探討逆溫層與垂直風切之關係於國內之應用研究中尚屬首次。本研制訂出門閥值及計算逆溫指數（ILI）之流程，結果顯示逆溫指數與垂直

風切有很好的的一致性。然而，探空資料通常一天只有兩筆數據，因此在時間解析度上較不容易掌握亂流的情況，但是當逆溫層發生時，通常會維持數小時或半天以上的時間，且它相較剖風儀能夠提供更高層的大氣資訊，因此透過 ILI 之計算能夠提供預報員該日逆溫層發生之高度與強度，並判斷出垂直風切大致發生之高度為何。

本文之應用價值在於首次提供計算風切指數 (WSI) 及逆溫指數 (ILI) 的方法，這些指數整合水平風切、垂直風切、垂直速度及逆溫指數，未來能夠提供亂流及風切預報的參考。Miguel (2014) 針對 LAP-3000 之剖風儀研究中，透過 RASS 取得垂直溫度，並得到與地面差異之溫度為何，找出風切較容易發生之位置，未來本軍若能夠提供類似 RASS 的即時觀測資料，以驗證這些指數的適用性。

## 5. 參考文獻

王喬喬，張秀芝，王尚昆，2013：Windcube 激光雷達與測風塔結果比對，氣象科技第 41 期第 1 期，中國氣候中心。

李昌運，林裕豐，吳啟雄，2015：雷射式剖風儀觀測策略與運用，氣象預報與分析第 228 期第 3 季，空軍氣象聯隊氣象中心。

余曉鵬，童茂祥，2011：臺灣桃園及松山機場低空風切警告系統(LLWAS)介紹。飛行安全基金會，2011 年飛行安全秋季刊，64~73。

何台華，涂明聖，蒲金標，魏志憲，2005：2002 年梅雨季中正與松山機場低空風切

之個案研究。大氣科學，31，119~142。

何台華，涂明聖，蒲金標，魏志憲，2005：2002 年梅雨季中正與松山機場低空風切之個案研究。大氣科學，31，119~142。

呂崇華，2006：雙偏極化雷達資料分析梅雨鋒面雨滴粒徑分佈的物理特性。國立中央大學大氣物理研究所碩士論文，100 頁。

吳啟雄、李昌運、林裕豐，2016：雷射式剖風儀觀測策略與運用，105 年天氣分析與預報研討會。

周仲島、鍾吉俊、修榮光，2015：S 波段雙偏極化雷達在梅雨季豪大雨天氣系統定量降雨估計之應用，大氣科學，43，2，91-113。

夏俊榮，王益才，關敏，2011：新型多益勒測風激光雷達 Windcube 的風參數觀。

紀博庭、陳台琦、呂崇華，2008：雙偏極化雷達觀測參數反求雨滴粒徑分佈以及降水估計，大氣科學，36，1，21-42。

紀博庭，2005：利用中央大學雙偏極化雷達資料反求雨滴粒徑分佈及降雨率方法的研究，國立中央大學大氣物理研究所碩士論文。

陳如瑜、張偉裕、陳台琦，2017：北台灣 S 與 C 波段雙偏極化雷達定量降雨估計之比較，大氣科學，45，1，57-80。

郭忠暉，吳拱辰，2006：新型低空風切警告系統 LLWAS-RS 簡介。飛航天氣，5，28~37。

- 張培臣、張文弘、吳啟雄、任亦偉、曾德晉、紀水上、劉清煌，2018：伴隨鋒面索狀雲之分析，2018 氣象分析與預報研討會，中央氣象局。
- 張培臣、任亦偉，呂崇華，曾德晉，2017：雷射式剖風儀與傳統高空探空風場資料特徵之比較分析，2017 氣象分析與預報研討會，中央氣象局。
- 張保亮、丘台光、王碧霞、林品芳，2004：網連雷達雜波統計特性分析，大氣科學，32，1，57-72。
- 測與驗證，氣候與環境研究第 16 卷第 6 期，中國科學院大氣物理研究所中層大氣與全球環境探測動點實驗室。
- 童茂祥，2009：淺談低空風切警示系統，飛行安全冬季刊，63~68。
- 蒲金標、林清榮，2017：2010~2014 年松山機場低空風切與氣壓大波動之日變化分析研究，大氣科學，45，3，261-280。
- 蒲金標，2003：臺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。
- 鳳雷，2002：熱帶降水系統之雙偏振雷達觀測研究，國立臺灣大學大氣科學研究所博士論文。
- 劉沛滕，林博雄，2016：臺北地形效應之低空風切觀測研究，飛航天氣第二十五期。
- Battan, L. J., 1973: Radar observation of the atmosphere. University of Chicago Press, 324.
- Brandes, E. A., G. Zhang, and J. Vivekanandan, 2002: Experiments in rainfall estimation with polarimetric radar in a subtropical environment. *J. Appl. Meteor.*, 41, 674-685.
- CEDRIC (Custom Editing and Display of Reduced Information in Cartesian space. Mohr et al. 1986) .
- Chang, Pao-Liang, Pin-Fang Lin, Ben Jong-Do Jou, Jian Zhang, 2009 : An Application of Reflectivity Climatology in Constructing Radar Hybrid Scans over Complex Terrain. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 26, 1315-1327.
- Chang, W.-Y., T.-C. C. Wang, and P.-L. Lin, 2009 : Characteristics of the raindrop size distribution and drop shape relation in typhoon systems in the western Pacific from the 2D video disdrometer and NCU C-band polarimetric radar. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 26, 1973-1993.
- Chen, C. S., and Y. L. Chen, 2003 : The rainfall characteristics of Taiwan. *Mon. Wea. Rev.*, 131, 1323-1341.
- Cifelli, R., V. Chandrasekar, S. Lim, P. C. Kennedy, Y. Wang, and S. A. Rutledge, 2011: A new dual polarization radar rainfall algorithm: Application in Colorado precipitation events. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 28, 352-364. Richard J. Doviak , Dusan S. Zrníc Doppler Radar and Weather Observations , 2006, Second Edition .
- Doviak and Zrníc, 1993 : Doppler radar and

- weather observations.
- Figueras I Ventura, J., and P. Tabary, 2013: The new French operational polarimetric
- Fujita, 1985 : The downburst: Microburst and macroburst. SMRP Research Paper 210, University of Chicago, 122 pp. [NTISPB85-148880.]
- ICAO, 2005 : Manual on Low-level Wind Shear. 1st, International Civil Aviation Organization, Chapter 2~3. Lester, P. F., 2004: Aviation Weather. 2ed, Jeppesen Sanderson Inc.
- Miguel Angel Pelacho, Dario Cano and Eugenio Ayensa, 2014 : Operational use of a wind profiler for aviation meteorology, WMO CIMO TECO 2014, St Petersburg.
- Radar rainfall rate product. J. Appl. Meteor. Climatol., 52, 1817-1835.
- Pruppacher, H. R., and K. V. Beard ,1970 : A wind tunnel investigation of the internal circulation and shape of water drops falling at terminal velocity in air. Q. J. R. Meteorol. Soc., 96, 247-256.
- Ryzhkov, A. V., S. E. Giangrande, and T. J. Schuur, 2005 : Rainfall Estimation with a Polarimetric Prototype of WSR-88D. J. Appl. Meteor., 44, 502-515.
- Software for radar translation, visualization, editing, and interpolation R. Oye, C. Mueller, S. Smith 27th Conf. on Radar Meteorology, 1995.
- Vulpiani, G., M. Montopoli, L. Delli Passeri, A. Giola, P. Giordano, and F. Marzono, 2012 : On the use of dual-polarized C-band radar for operational rainfall retrieval in mountainous area. J. Appl. Meteor. Climatol. 51, 405-425.
- Wang, Y., J. Zhang, P. -L. Chang, C. Langston, B. Kaney, and L. Tang, 2016 : Operational C-Band dual-Polarization radar QPE for the subtropical complex terrain of Taiwan. Advances in Meteorology, doi: 10.1155/2016/4294271.
- Yoshiaki Sakagami, Pedro A. A. Santos, Reinaldo Haas, Júlio C. Passos, Frederico F. Taves, 2014 : Wind shear assessment using wind LiDAR profiler and sonic 3D anemometer for wind energy applications - Preliminary Results. World Renewable Energy Congress 2014. 3-8 August 2014, London, UK
- \_\_\_\_\_, 1986 : DFW microburst on August 2, 1985. SMRP Research Paper 217, University of Chicago, 154 pp. [NTIS 86-131638.]
- \_\_\_\_\_, 1992 : The mystery of severe storms. WRL Research Paper 239, University of Chicago, 298 pp. [NTIS PB 92-182021.]
- Giangrande and Ryzhkov, 2008: Estimation of rainfall based on the results of polarimetric echo classification. J. Appl. Meteor. Climatol., 47, 2445-2462

### 6. 圖表彙整

表 1 剖風儀垂直風切及垂直速度門閥值

垂直風切門閥值 VWS	代表 顏色	對應之風切 指數
$vws \geq 15 \text{ kts/ft}$	黃色	1
$vws \geq 20 \text{ kts/ft}$	紅色	2
$vws \geq 25 \text{ kts/ft}$	紫色	3
垂直速度門閥值 $ w $		
$ w  \geq 1.5 \text{ m/s}$	黃色	1
$ w  \geq 2.0 \text{ m/s}$	紅色	2
$ w  \geq 2.5 \text{ m/s}$	紫色	3

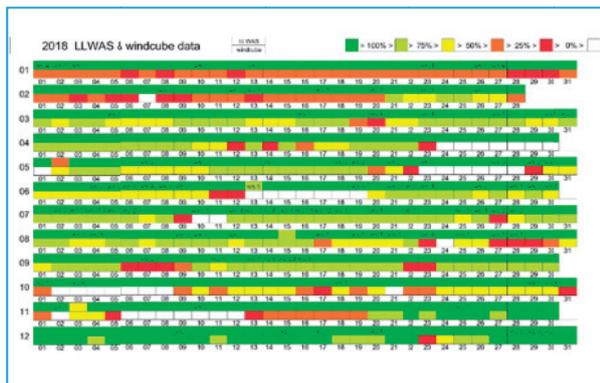


圖 1 2018年LLWAS與雷射式剖風儀在該日逐分鐘資料的完整程度之示意圖。

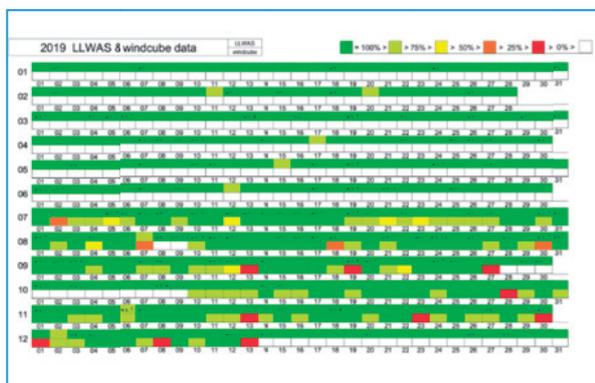


圖 2 2019年LLWAS與雷射式剖風儀在該日逐分鐘資料的完整程度之示意圖。

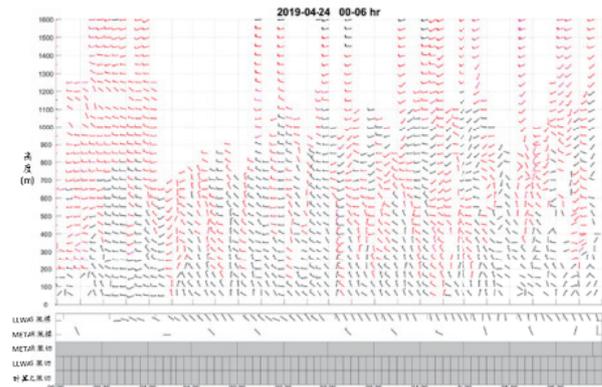


圖 3 2019 年 4 月 24 日 00-06Z 之剖風儀垂直風場、LLWAS 風切警示與 METAR 風切警示時序圖。

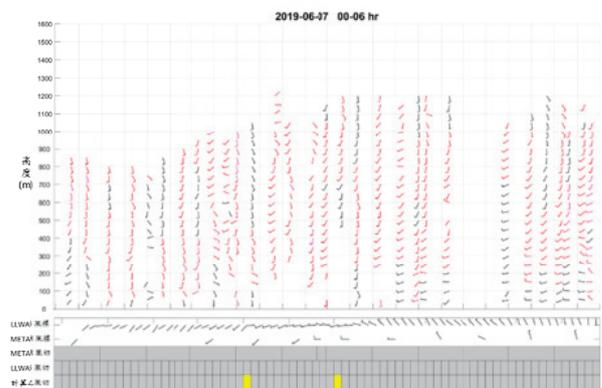


圖 4 2019 年 6 月 7 日 00-06Z 之剖風儀垂直風場、LLWAS 風切警示與 METAR 風切警示時序圖。

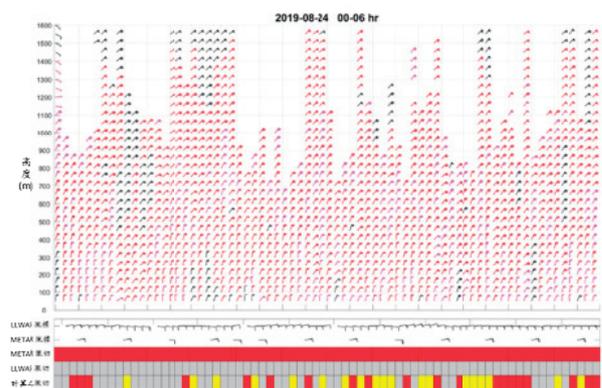


圖 5 2019 年 8 月 24 日 00-06Z 之調整前剖風儀垂直風場、LLWAS 風切警示與 METAR 風切警示時序圖。

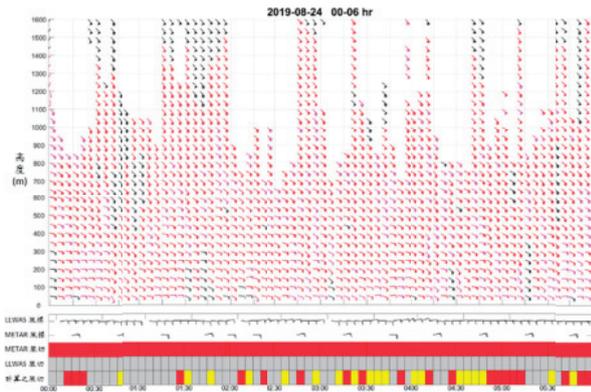


圖 6 2019 年 8 月 24 日 00-06Z 之調整後剖風儀垂直風場、LLWAS 風切警示與 METAR 風切警示時序圖。

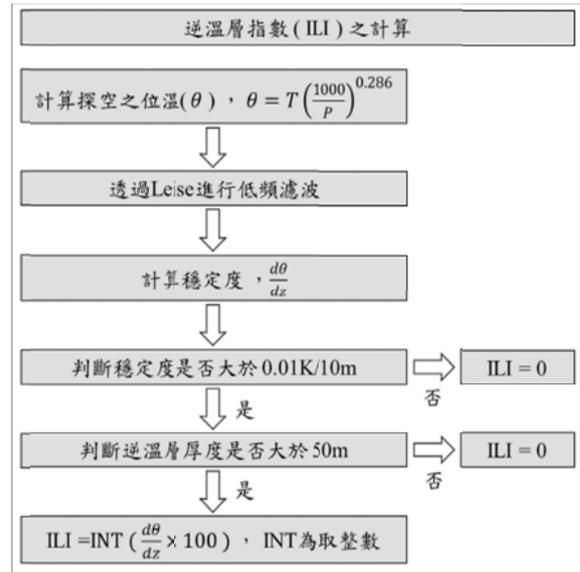


圖 8 探空逆溫層指數 (ILI) 計算之流程圖。

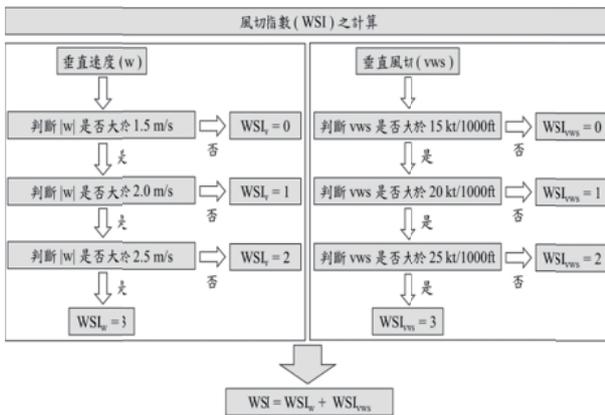


圖 7 風切指數 (WSI) 門閥計算之流程圖

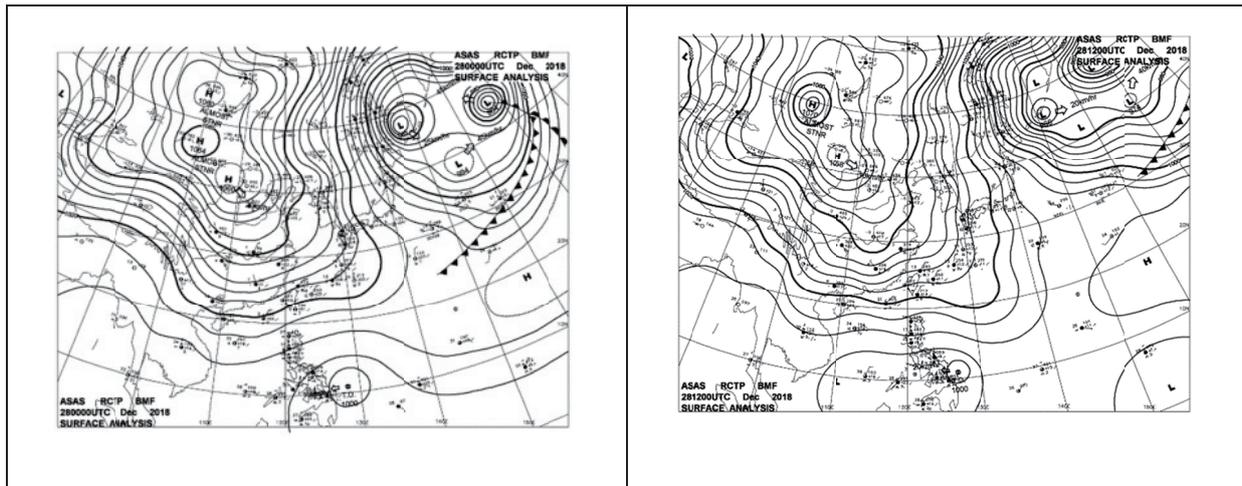


圖 9 2018 年 12 月 28 日 00Z (左圖) 及 12Z (右圖) 之地面天氣。

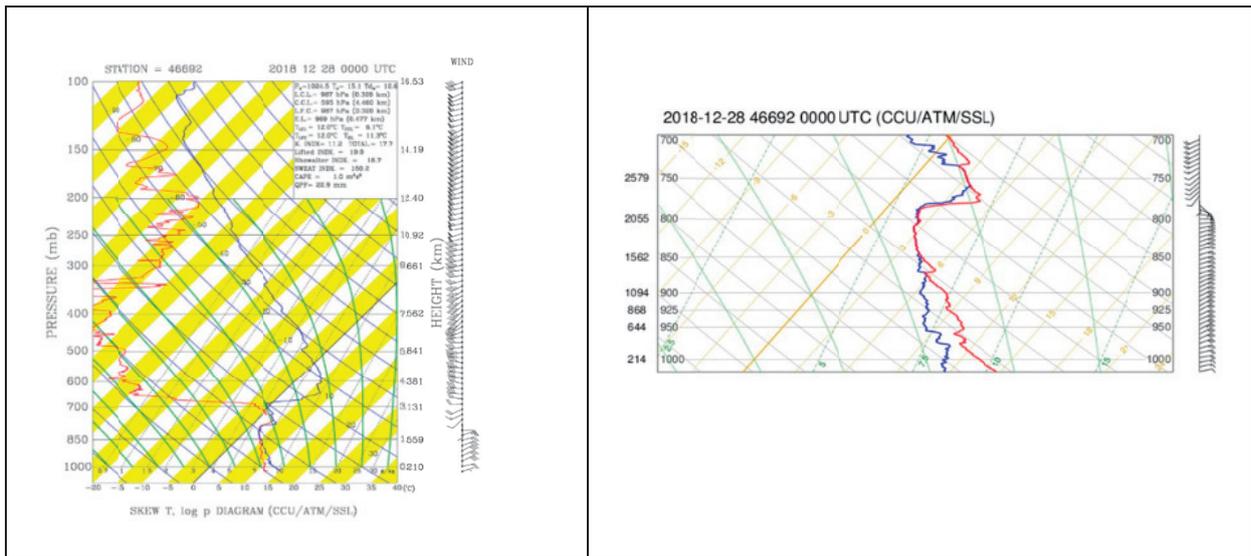


圖 10 2018 年 12 月 30 日 00Z 板橋氣象站探空圖 (左圖) 及 700 hPa 以下之低層探空圖 (右圖)。

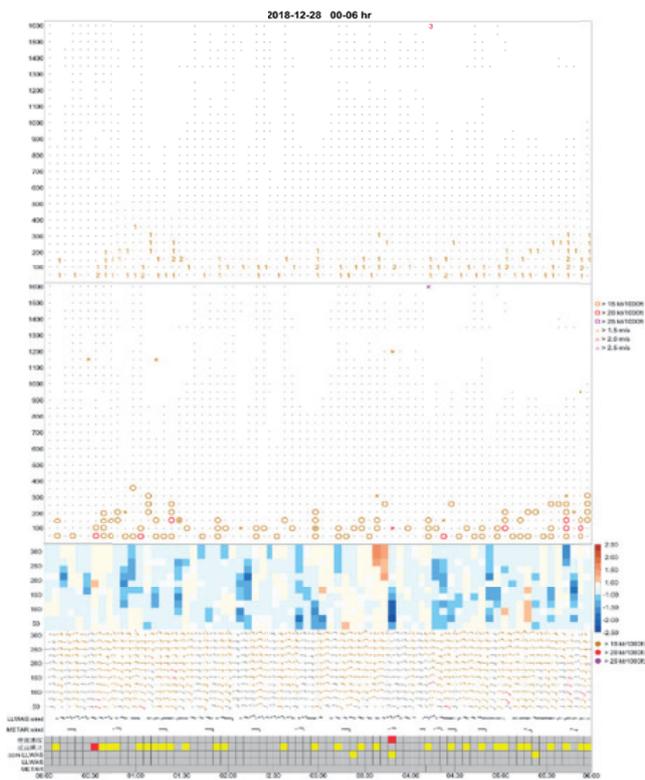


圖 11 2018 年 12 月 28 日 00 ~ 06Z 之時序圖；由上往下依序為：各高度上之風切警報、垂直速度場、剖風儀垂直風場、LLWAS 風切警報與 METAR 風切警報。

1. 風切警報圖：○為透過垂直風切得到的風切警報，×為透過垂直速度得到的風切警報，黃色為各參數達到輕度的門閥，紅色為各參數達到中度門閥，紫色為各參數達到強度之門閥。
2. 垂直速度場圖：暖色系為上升速度，冷色系為下降速度。
3. 剖風儀垂直風場：黃色風標為 15kts~20kts/1000ft 之垂直風切、紅色風標為大於 20kts~25kts/1000ft 之垂直風切、紫色風標為大於 25kts/1000ft 之垂直風切。
4. 綜合警報圖：綜合 LLWAS 之風標、METAR 資料之風標、垂直速度發出垂直風切警報、發生垂直風切警報、METAR 發出低空風切警報時間、LLWAS 發出低空風切警報時間及透過 LLWAS 測風站計算出之風切時間。

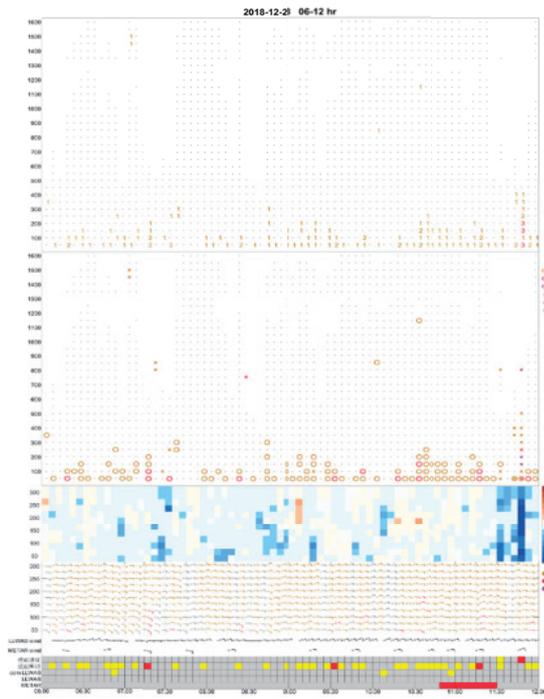


圖 12 如圖 11 之圖說；為 2018 年 12 月 28 日 06 ~ 12Z 之時序圖。

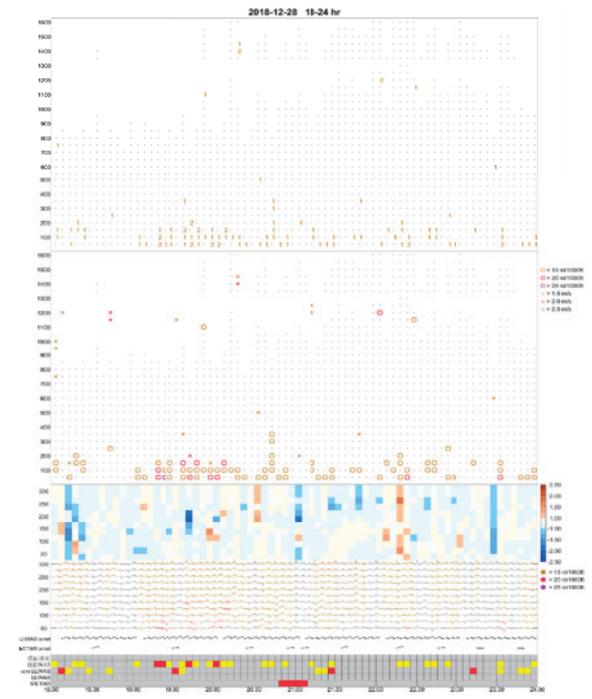


圖 14 如圖 11 之圖說；為 2018 年 12 月 28 日 18 ~ 24Z 之時序圖。

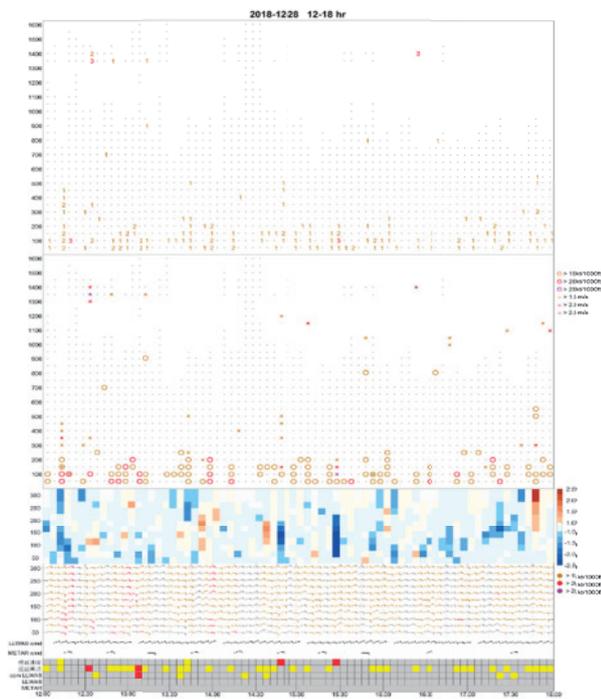


圖 13 如圖 11 之圖說；2018 年 12 月 28 日 12 ~ 18Z 之時序圖。

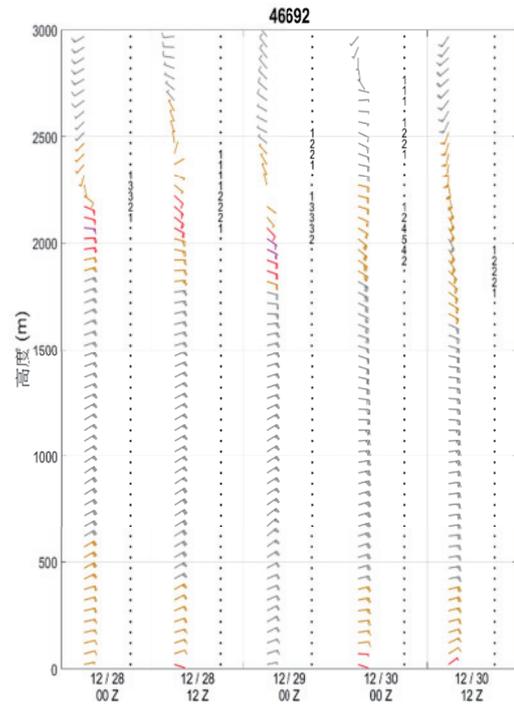


圖 15 2018 年 12 月 28 日至 30 日板橋探空逆溫強度及風場剖面時序圖。

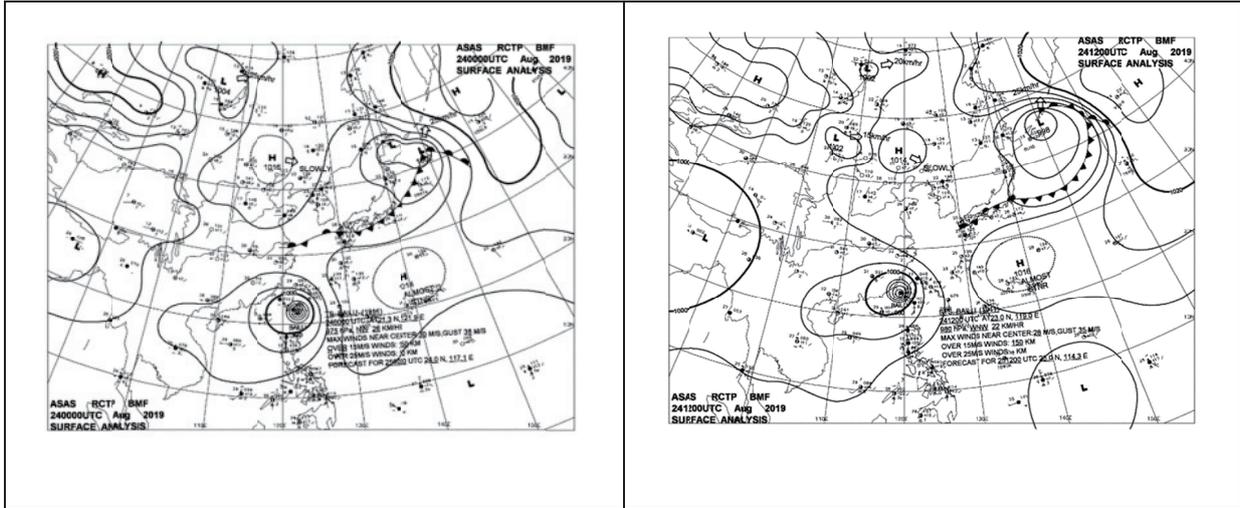


圖 16 2019 年 8 月 23 ~ 25 日 00Z (左圖) 及 12Z (右圖) 之地面天氣圖。

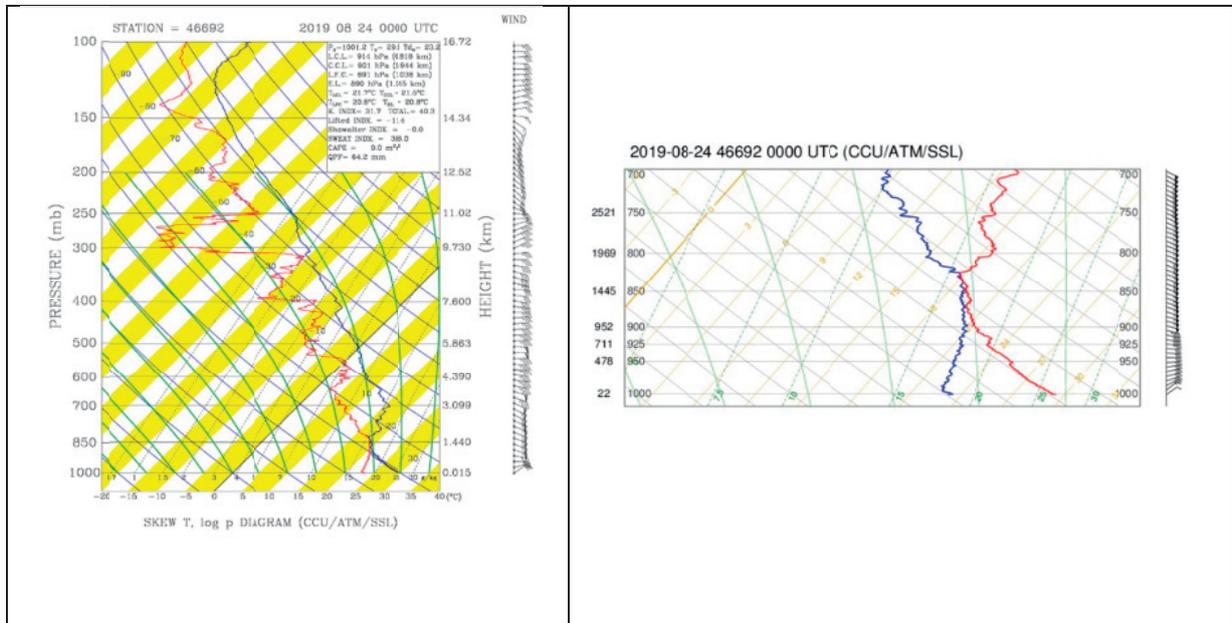


圖 17 2019 年 8 月 24 日 00Z 板橋氣象站探空圖 (左圖) 及 700 hPa 以下之低層探空圖 (右圖)。

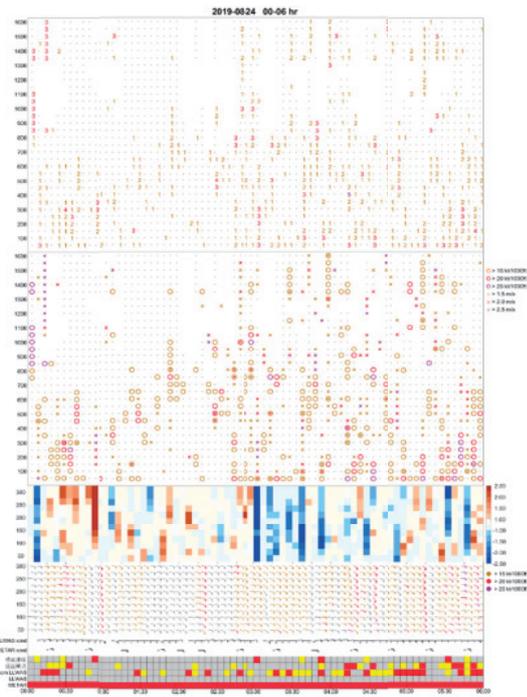


圖 18 如圖 11 之圖說;為 2019 年 8 月 2400~06Z 時序圖。

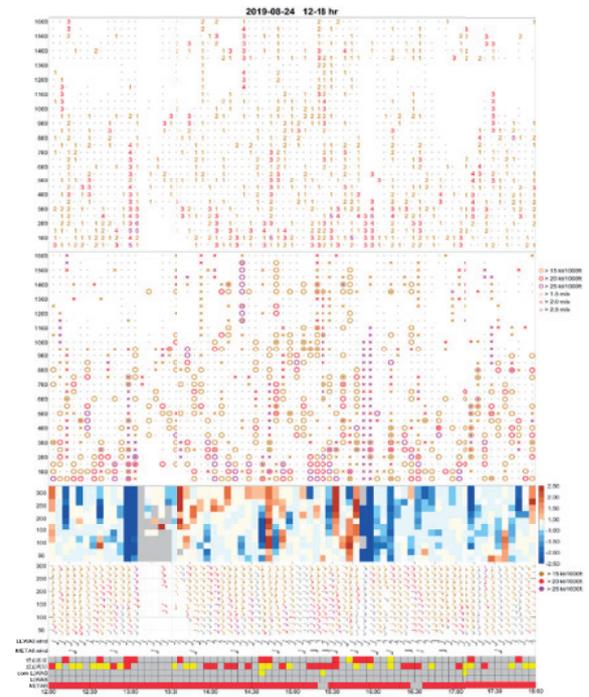


圖 20 如圖 11 之圖說 ; 為 2019 年 8 月 24 日 12~18Z 時序圖。

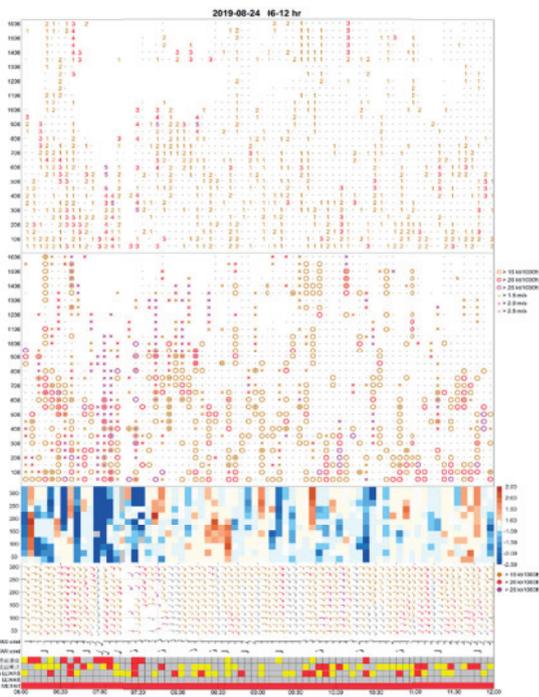


圖 19 如圖 11 之圖說;為 2019 年 8 月 24 日 06~12Z 時序圖。

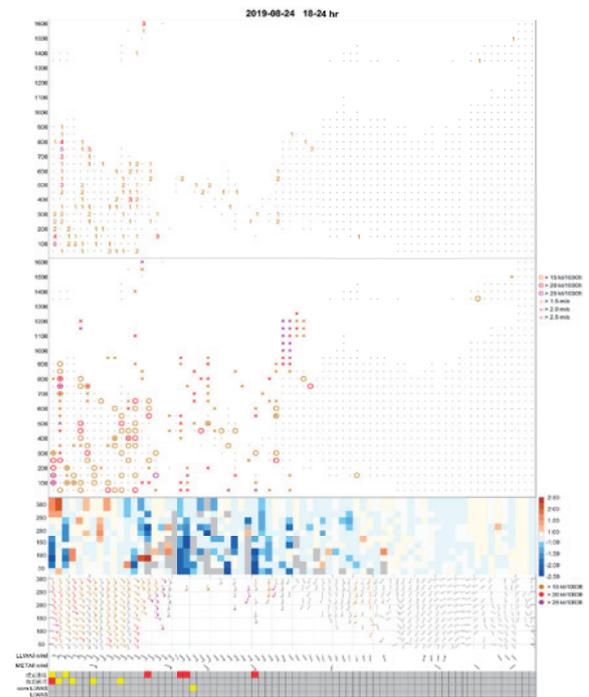


圖 21 如圖 11 之圖說;為 2019 年 8 月 24 日 18~24Z 時序圖。

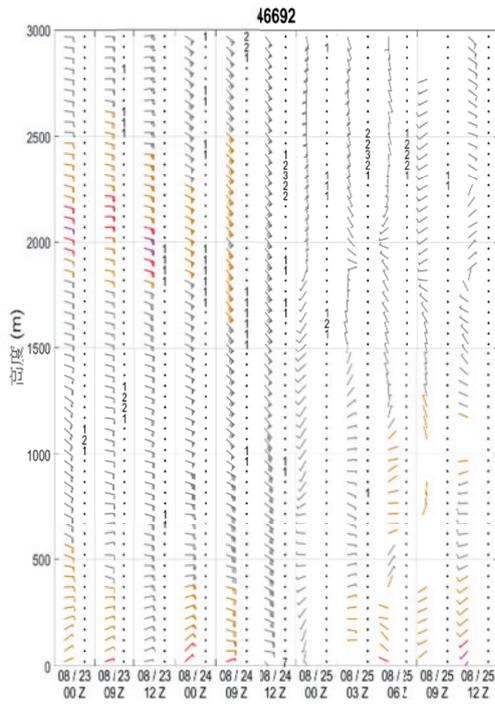


圖 22 2019 年 8 月 23 日至 25 日板橋探空逆溫強度及風場剖面時序圖。

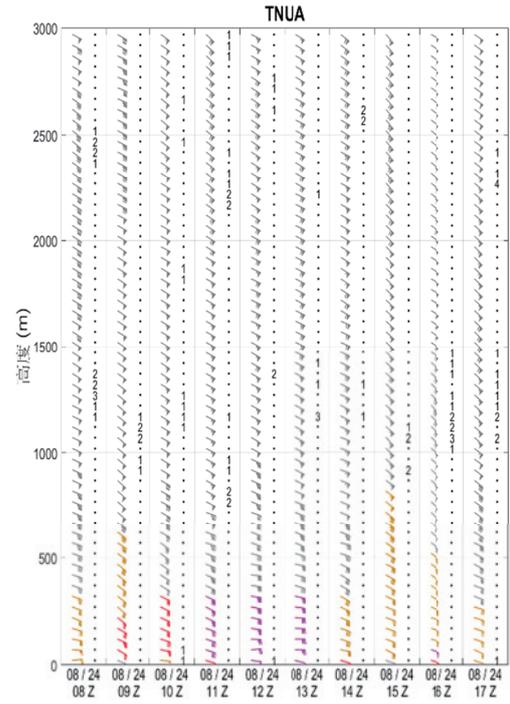


圖 24 2019 年 8 月 24 日北藝大探空(Storm Tracker)逆溫強度及風場剖面時序圖。

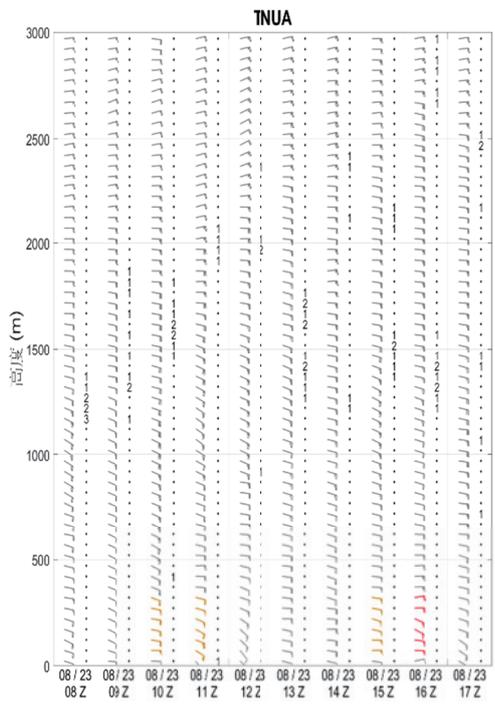


圖 23 2019 年 8 月 23 日北藝大探空(Storm Tracker)逆溫強度及風場剖面時序圖。

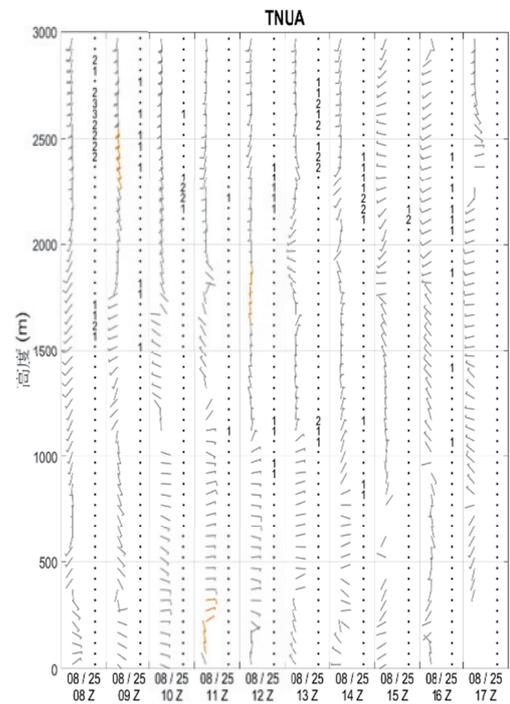


圖 25 2019 年 8 月 25 日北藝大探空(Storm Tracker)逆溫強度及風場剖面時序圖。

## Wind shear assessment using wind lidar profiler in Song-Shan Airport

De-Jin Tzeng<sup>1</sup> Guan-Ru Chen<sup>2</sup> Jing-Hwa Yang<sup>2</sup> Ching-Hwang Liu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Weather Wing R.O.C Air Force

<sup>2</sup>Department of Atmospheric Sciences, Chinese Culture University

### Abstract

Currently, the Weather Wing, Air Force has installed 4 wind lidar profilers at Song-Shan, CCK, Ping-Dong, and Hua-Lien airports. In the meantime, these facilities are observing vertical wind profile operationally and supports the air force flight training and disaster mitigation. In practice, the low level wind shear is potential danger to the aircraft during take-off and landing. Base on the wind lidar measurement, it is important to quantify the vertical wind shear intensity to support the forecaster for issuing wind shear waring. If the potential safety factors (wind shear) of the mid- and low-altitude atmosphere are quantified and the qualitative risk level is judged, it can support the forecaster to issue the warning. Therefore, it is an urgent topic to analyze the wind shear signal.

In this study, the laser profile wind data collected at Song-Shan Airport and the Ban-Chao soundings are the primary data sources to compute wind shear signal. The Meteorological Terminal Aviation Routine Weather Report (METAR) and Low Level Wind Shear Alert System (LLWAS) are used to compare the wind shear signal. Based on the vertical wind profile and vertical velocity, the wind shear index is computed. The sounding data is used to compute the inversion index.

The results show that many strong vertical velocities observed by the wind profiler are not necessarily accompanied by strong vertical wind shears, and strong vertical wind shears may not necessarily lead to strong vertical velocities. This means that the two variables are both important for identifying turbulence. According to the thermal wind relationship, if there is temperature inversion, it must accompany with the vertical wind shear. The temperature inversion index calculated by the sounding data shows that when there is an obvious temperature inversion layer, an obvious change in wind direction is found. Therefore, by calculating the wind shear index (WSI) and the temperature inversion index (ILI) method, integrating horizontal wind shear, vertical wind shear, vertical velocity and temperature inversion phenomena can provide a reference for turbulence and wind shear forecasting.

**Keywords:** LLWAS, Lidar, low level wind shear, turbulence