

東沙島剖風儀與微波輻射儀在天氣實務上之應用與校驗

林定宜
氣象預報中心
中央氣象局

摘要

剖風儀和微波輻射儀能夠偵測大氣對流層垂直風場、溫度和濕度場結構細微的變化，兩者均具有高時空解析度的特性。本研究使用了東沙島剖風儀與微波輻射儀進行典型天氣個案之監測，所選擇的個案不但都顯著影響東沙島附近之天氣，其後也影響到臺灣地區的天氣。研究中並將剖風儀與微波輻射儀的資料(實驗組)與探空儀(對照組)資料進行校驗比對，校驗方法主要採用垂直資料的均方根誤差(RMSE)，變異數之差異顯著性測驗是選用統計檢定 F-test。

根據統計檢定結果顯示，大多數個案在風向及風速方面，剖風儀和探空儀兩者變異數差異並不顯著，惟在中尺度對流系統個案顯示，剖風儀的風向與探空儀有差異顯著的現象，風向方位角的 RMSE 值可達 13.4 度。而在混合比方面，大多微波輻射儀和探空儀兩者變異數差異亦不顯著，但於個案東北季風南下與天兔颱風(USAGI)中層殘留雲系交互作用時，微波輻射儀(仰角 20 度向北監測方式)與探空儀混合比出現變異數差異顯著的情形。此外，假使微波輻射儀監測時間比無線電探空儀施放時間延遲太久，則兩儀器之混合比的 RMSE 會有擴大之現象。又根據監測分析顯示，微波輻射儀在垂直方面的溫、濕分布樣貌與探空儀中層以上探空曲線存在較明顯的差異，相形之下，在 850hPa 以下則和探空儀資料的一致性相當好。

關鍵字：無線電探空儀(Radiosonde)、剖風儀(Wind profiler)、微波輻射儀(Microwave radiometer)、均方根誤差(Root Mean Square Error, RMSE)

一、緣起：

南海是重要的戰略與資源海域，亦是西南季風與熱帶系統影響臺灣地區天氣的上游熱區，為了提升南海及臺灣地區大氣風場及溫濕場的觀測時空密度品質，增加即時預報災害性天氣監測，乃是當務之急。在數值天氣預報模式中使用剖風儀數據來提高天氣預報精度也是全世界的趨勢。中央氣象局在 2017 年於東沙島建置了 RAPTOR FBS-ST 剖風儀觀測系統(秦, 2017)，是一座頻率(frequency)449MHz 之觀測作業用剖風儀，449 MHz 有最佳的採樣屬性，採用功率可堆疊之固態發射機，尖值功率為 12kw，每個天線使用共 256 組天線元件(長 12m × 寬 12m 256 Yagi 偶極子天線單元之相位陣列天線平台)，屬 VHF 頻段之都普勒雷達；中央氣象局並進一步於 2018 年中建置了微波輻射儀(Microwave radiometer)，是一種易於安裝、操作和維護的被動微波熱力分析儀，可在微波範圍中進行大氣背景輻射測量，根據觀測結果，神經網路將天頂方向亮度溫度映射到垂直方向，

可以建構溫度、濕度、水蒸氣和水液垂直剖面分佈(MP-3000A-Operator-Manual-RevG, 2013)，其資料於 2018 年 9 月中上線。本研究動機是針對南海主要影響臺灣地區的的上游大氣環境進行實務觀測，分析與校驗剖風儀與微波輻射儀監測產品，期能使所建置之設備能夠發揮最大功能，彌補傳統探空網在時間和空間上的解析度之不足，而不致漏掉範圍較小但變化劇烈的天氣系統。

二、研究方法

選擇近年重要天氣個案，應用東沙島剖風儀與微波輻射儀監測資料，結合傳統探空儀與其他輔助資料，探討高密度時空條件下，對天氣系統垂直結構時間序列變化做診斷，研究中使用均方根誤差(Root Mean Square Error, RMSE)進行資料校驗，比較剖風儀風場(實驗組)、微波輻射儀溫濕資料(實驗組)，與傳統探空儀資料(對照組)之誤差程度；另使用 F-test 來檢定剖風儀垂直風場和微波輻射儀溫濕場(實驗組)是否與探空儀風場及溫濕場(對照組)變異數

差異顯著。所選擇之天氣個案均為2017年之後影響或行經東沙島附近之典型天氣系統，包括2017年13號天鴿颱風、2018年22號山竹颱風、2018年26號玉兔颱風、天兔颱風殘留雲系伴隨東北季風、2018年8月底之熱帶大尺度低壓環流氣旋輻合造成臺灣中南部豪雨成災之西南氣流、2019年1月22日之強烈大陸冷氣團、2019年6月11日至14日間南海西南季風期間發生的MCS等個案。

三、資料的產出

(一) 剖風儀監測基礎是大氣中的亂流運動造成大氣折射率的不均勻結構對電磁波的散射作用進行大氣風場探測，使用相控陣電掃描天線(胡，2015)，透過向高空發射不同方向之電磁波束，接收並處理這些電磁波束因大氣垂直結構不均勻而返回的訊息進行高空風向風速監測，採用的是都普勒效應原理，即時提供大氣的3D風場訊息。

有關東沙島RAPTOR FBS-ST產出的相關資料如圖1所示。風場6分鐘可產出一筆資料，本研究各項垂直高度數據資料視不同個案而定，最高可達200hPa。

(二) 「微波輻射儀」是一種被動接收微波波段電磁輻射能量之大氣無源地基微波遙測電子儀器設備，用來接收在天線視場範圍內測量各種物體自身輻射、散射或反射的微波無規則雜訊能量之高靈敏度接收機，透過測量天線接收來自物體發射輻射、散射或反射輻射的微波輻射能量功率，再把它等效轉換被觀測目標的亮度溫度(°K)。而神經網路能將亮度溫度反演建構出高度約10公里的大氣垂直溫度曲線、露點曲線，可探測到雲狀、雲高以及晴空亂流。由輻射計量公司(Radiometrics Corporation)所製的東沙島MP-3000A「微波輻射儀」資料產出方式如圖2。

時間解析度方面，4分鐘可輸出一筆資料。關於大氣中微波與紅外線轉換至氣溫、濕度和水滴輪廓線流程圖請參見圖2。混合比基本上採中層大氣(500hPa)以下垂直層數據資料，計算方式是由溫度、露點及各層氣壓參考採用美國國家氣象局(NWS)之混合比計算器(Mixing Ratio Calculator)轉換為混合比而得，在預報作業上，可透過WINS系統進行監測。

(三) 誤差校驗方法：

採用「均方根誤差」(RMSE)進行資料校驗，大氣垂直採樣數據資料除選擇特徵層外，垂直層每50hPa增加一個校驗點，垂直校驗層由下而上分別為：950hPa、925 hPa、900 hPa、850 hPa、700 hPa、650 hPa、600 hPa、550 hPa、500 hPa、450 hPa、400 hPa、350 hPa、300 hPa以及250 hPa。

本研究之實驗組是剖風儀和微波輻射儀，對照組設為探空儀，校驗實驗組的垂直風場、溫濕場和對

照組所得數據，視其變異數是否差異顯著。所選用的統計檢定法為F-test。

四、研究結果與發現：

經由六例典型個案研究，將主要發現歸納以下要點：

個案(一)：以東沙島剖風儀雷達監測颱風(2017年13號天鴿 HATO；201822 山竹MANGKHUT)綜合發現：

1. 此個案是首次東沙島剖風儀雷達監測颱風垂直風場整層結構，高度可達16公里。

2. 以剖風儀對天鴿與山竹監測，兩個颱風剖風儀切向風垂直最大風速均約在600m至800m之間，與過去投落送平均颱風及颶風觀測研究紀錄相較，剖風儀與投落送的地面觀測風速較NCEP25×25模式垂直風速為大，以NCEP25×25模式為例，垂直最大風速分布在較高層(山竹颱風最強風速模式分布在800hPa至750hPa)處，所獲結果為剖風儀與投落送風速垂直結構較為一致。

3. 本個案垂直速度負值區(降雨範圍)及信號功率(Power)高值區大致是5000m/s以下(圖3、圖4)，大氣水氣梯度邊界可達近10000m(圖4)。

個案(二)：以東沙島剖風儀監測2018年8月下旬西南氣流個案(熱帶大尺度低壓環流之氣旋輻合，亦即季風低壓南側之西南氣流)綜合以下觀點：

1. 能監測到西南氣流發生的時間(圖5)。

2. 西南氣流影響下，因降雨造成之下降速度約分布在5000m以下，風速有顯著間歇增大趨勢，此現象垂直高度可延展至7000m以上(圖6)。

個案(三)：剖風儀及微波輻射儀監測2018年26號玉兔颱風及其校驗得知：

1. 玉兔颱風剖風儀風速與探空儀之校驗於500hPa以下結果顯示兩者差異並不大；但在風向方面則相差較大。研判颱風為劇烈天氣系統，大氣低層風場輻合，垂直向上到了大氣高層則漸轉為輻散風場，風向角度在轉變時方位角改變較大。

2. 由歐洲中期天氣預報中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts；簡稱ECMWF)所產出的網格解析度9km×9km模式(簡寫為EC_P1×P1)輸出分析場之風向及風速與剖風儀垂直風向及風速變化時序圖比較結果差異不大。

3. 500hPa以上大氣層氣溫與露點方面，微波輻射儀天頂方向、20A、45A及70A(A是對角兩個方向平均“Average”之意)與探空儀資料差異相對較大。

4. 由微波輻射儀(天頂方向監測)相對濕度時間序列分布分析，玉兔颱風相對濕度>90%主要分布在700hPa至400hPa之間。

5. 玉兔颱風影響東沙島期間剖風儀(實驗組)風場、微波輻射儀(實驗組)混合比與探空儀(對照組)做校驗，

獲知在 $\alpha=5\%$ 之條件下，「剖風儀風向及風速」與「探空儀風向及風速」兩者變異數差異不顯著；又「微波輻射儀混合比」和「探空儀混合比」兩者變異數差異亦不顯著。

個案(四)：由剖風儀及微波輻射儀監測東北季風南下與原天兔颱風中層殘留雲系交互作用所產生傾斜爬升對流(overrunning)綜合監測與校驗得知：

1. EC_P1×P1_0~1km之風速較剖風儀略小，但風速隨時間變化趨勢則基本一致，EC_P1×P1_0~2km之風速則大致與剖風儀一致，綜合而言EC_P1×P1模式於24小時內垂直風場仍具參考性。

2. 本個案以750hPa風向偏差最大，由於風向屬於向上順轉之「暖空氣在冷空氣上之傾斜爬升對流」(overrunning)轉變過程，750hPa風向正處於由南風轉北風的弱風區，風向較敏感，因而風向偏差較大且風向主要差異是在 \vec{v} 方向。

3. 整體而言，微波輻射儀「南北對角平均(Average)監測」混合比誤差要比南或北單向監測混合比誤差要小。

4. 本個案東北風隨高度順轉成西南風層高約3000至4000公尺(圖7)，為「傾斜爬升對流」(overrunning)活躍區，信號功率值也較大，大氣水氣梯度邊界約在8000公尺(圖8)。

個案(五)：由剖風儀及微波輻射儀(實驗組)監測強烈大陸冷氣團南下(2019年1月22日)與探空儀(對照組)之校驗獲知：

1. 由東沙島剖風儀與探空儀550hPa以下風速RMSE校驗時間序列圖，2019年1月21日23:32UTC風速RMSE降至最小(圖9)，之後隨時間緩升；而風向RMSE在23:52UTC之後有上升趨勢(圖10)。

2. 由東沙島微波輻射儀監測得之溫度、露點及氣壓推演計算而得各仰角混合比之RMSE之時間序列獲知，以天頂角、70A及45A表現在伯仲之間，而20A誤差則較大(圖11)。

3. 由東沙島「剖風儀風速」、「剖風儀風向」、「微波輻射儀溫度」和「微波輻射儀混合比」與探空儀資料做整層RMSE校驗，在 $\alpha=5\%$ 之條件下，檢定結果皆可通過F統計檢定(F-test)，兩者變異數差異不顯著。

3. 綜合一般觀測分析顯示，微波輻射儀各仰角與探空儀中層以上大致存在較明顯之差異，低層(850hPa以下)之溫濕曲線和探空儀一致性較佳，探空儀溫濕垂直曲線通常有較劇烈變動狀況，微波輻射儀垂直剖面溫濕曲線則呈現較平滑的型態。

個案(六)：剖風儀及微波輻射儀監測與校驗南海西南季風及MCS個案分析(2019年6月11日至14日)綜合獲知：

1. 本個案採樣點正位於中尺度對流系統(MCS)影響的範圍內，是首次以剖風儀及微波輻射儀監測MCS。由研究個案顯示，剖風儀的風向與探空儀間有差異

顯著之現象，風向方位角的RMSE值達 13.4° 。而由西南季風影響東沙島的風向時序圖得知，監測到風向有顯著的日、夜變化現象，3000m以下，中低層午後轉西南西風，午夜前後則轉為偏南風(圖12)，研判原因為：白天午後青藏高原東側至華中地區之熱力低壓因熱力因素而加深(青藏高原東側熱力低壓有日夜變化的現象)，而導致華南至東沙島海域的西南風增強；夜間低壓因缺少熱力效應而較弱，太平洋副高也較弱東退，因而導致東沙島海域南風分量增強。

2. 西南季風影響期間監測到信號功率(power：表示水氣梯度變化)和頻譜寬(表示亂流)最大高度可向上伸展至邊界16000m。

3. 0~1km剖風儀垂直風向及風速變化對照EC_P1×P1模式，獲知EC_P1×P1與剖風儀風速變化趨勢基本一致，惟剖風儀風速略大於EC_P1×P1。

4. 由微波輻射儀之與探空儀溫濕剖面比較圖(圖13)獲知，550hPa層以上探空儀混合比有明顯偏乾現象。

五、總結及討論

1. 剖風儀與微波輻射儀是強大的即時天氣預報工具，若能即時獲取劇烈天氣或是風暴出現前環境風場及溫濕場資訊，可提前預知天氣系統之發生與發展，從而做出較精準的即時天氣預報，雖然水氣場的時、空變化非常大，然而這些資料經過處理得出邊界層與中低層的垂直風場和溫濕場結構，對即時天氣現況掌握與預測未來天氣的演變還是會有很大的助益。Fabry和Sun(2010)曾評估模式中對流雲形成和演化中的大氣變量，發現中層水氣是風暴演變中最重要的成分，其次是低層濕度、中低層溫度。因此若能善用微波輻射儀監測這些物理量並將資料應用同化於數值天氣預報模式中，預期能有效提升預測對流發展的技術！

2. 根據本研究大多個案獲知，大部分的剖風儀、微波輻射儀監測資料與探空儀相較，變異數差異並不顯著。「探空儀風向及風速」和「剖風儀風向及風速」在 $\alpha=5\%$ 之條件下，兩者變異數大多差異是不顯著，惟於中尺度對流系統個案顯示，剖風儀與探空儀風向有差異顯著之現象，兩者風向方位角之RMSE值可達 13.4° 。「探空儀混合比」和「微波輻射儀混合比」兩者變異數差異亦多不顯著，多能通過F-test統計檢定，但「東北季風南下與原天兔颱風中層殘留雲系」個案，微波輻射儀仰角 20° 向北監測與探空儀於500hPa以下垂直方向各層混合比之校驗，有呈變異數差異顯著之結果。此外，若微波輻射儀監測時間比無線電探空儀施放時間延遲過久，則兩儀器之混合比的RMSE會有擴大之趨勢。探空儀一般約在整點前約45分鐘施放，所觀測到之大氣溫濕垂直剖面結果，會隨微波輻射儀監測時間延遲而彼此差異增大。

3.本研究大多個案分析顯示，微波輻射儀基本在低層(850hPa以下)之溫度與露點垂直剖面曲線和探空儀一致性不錯，探空儀感測器(sensor)為短間隔時間取樣，故垂直剖面曲線常有曲折現象，而微波輻射儀所得之資料是由地基微波遙測電子儀器，其接收大氣中某些成分在一定頻率上自身輻射、散射或反射微波熱輻射，再透過測量天線接收來自物體發射輻射和反射輻射能量功率，進而把它等效變換成黑體溫度表示出來，從而反演被觀測目標的亮度溫度(°K)，取得各高度傳來的溫度輻射的微波信號，導出大氣溫度與露點垂直剖面曲線大致呈現較平滑的型態。

4.微波輻射儀整層混合比在不同個案中，天頂方向、70A、45A及20A微波輻射儀整層混合比究竟何種仰角之RMSE為最小，須視個案而定。

5.本研究亦關注了中大剖風儀的風場資料，由2020年7、8月多筆資料發現，於每日凌晨起西南風厚度有逐漸變厚、增強之日夜變化現象(圖14)，分析中央大學附近於凌晨常有山風與海風輻合，因而有海陸密度梯度存在，潮濕海風空氣密度較小，乾燥山風密度較大，類似乾線結構(圖15)，從而形成梯度風，初判低層西南風變厚與增強是與密度梯度變化及科氏力有關。此外，冬季時當東北季風、大陸冷氣團或寒流影響時，常可監測到中大上空有清晨低層噴流(垂直高度約300m~1000m)之現象(圖16、圖17)。

五、參考文獻：

胡明寶著，2015年1月：風廓線雷達探測與應用，氣象出版社，北京，pp200。

秦新龍，2017年3月6日：赴剖風儀設備工廠辦理駐廠驗收出國報告，交通部中央氣象局第四組。

Fabry, Frédéric, and Juanzhen Sun, (2010): "For how long should what data be assimilated for the mesoscale forecasting of convection and why? Part I: On the propagation of initial condition errors and their implications for data assimilation." Monthly Weather Review, 138.1, 242-255.

Radiometrics Corporation, Copyright April 2013, MP-3000A-Operator-Manual-RevG.

六、附圖：

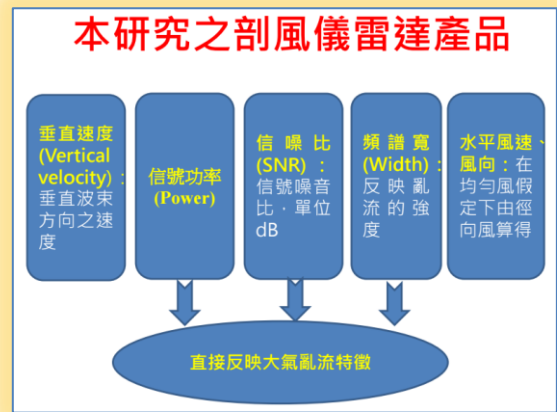


圖1. 本研究剖風儀所涉及之資料產品型態示意圖。

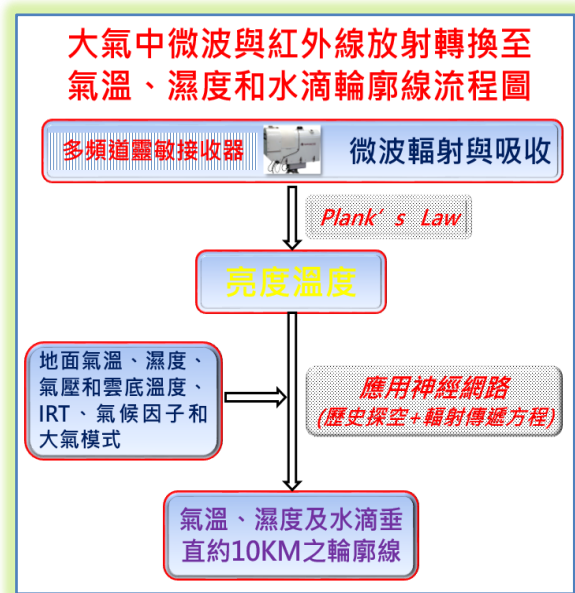


圖2. 大氣之中微波與紅外線轉換至氣溫、濕度和水滴輪廓線流程圖。

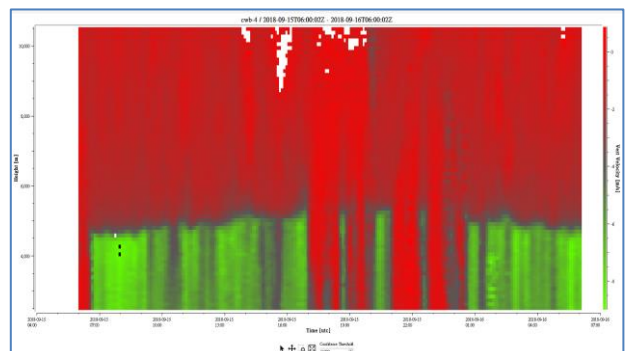


圖3. 2018年9月15日0600UTC至9月16日0600UTC垂直速度(m/s) 時間序列圖，高度範圍2500m至10500m。

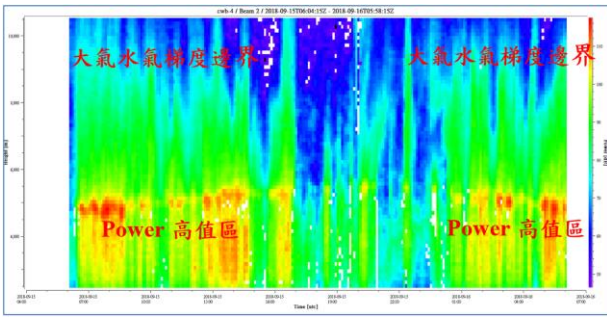


圖4. 2018年9月15日0600UTC至9月16日0600UTC信號功率(Power) 垂直剖面時間序列圖, 高度範圍1500m至10500m。

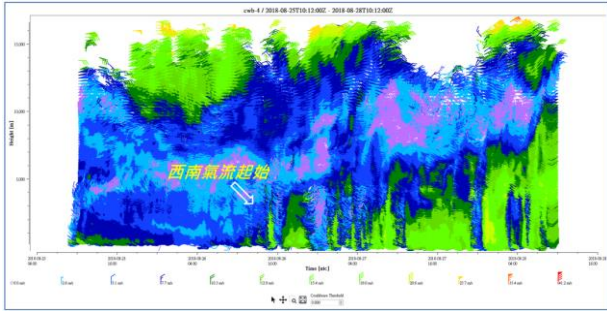


圖5. 2018年8月25日1000UTC至8月28日1000UTC東沙島剖風儀對流層整層垂直風標時間序列圖, 空心箭頭所指處代表監測西南氣流起始時間約在28日1600UTC。

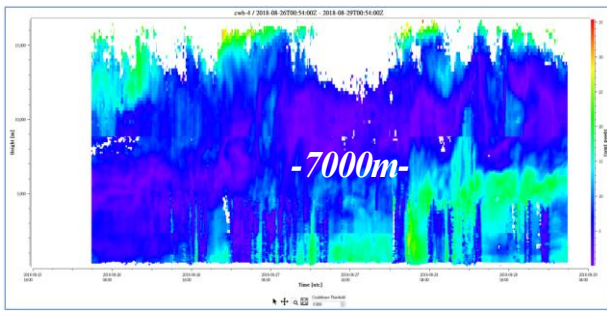


圖6. 西南氣流影響下, 2018年8月26日0100UTC至8月29日0100UTC東沙島剖風儀水平風速(m/s)時間序列圖; 中高層風速有間歇增大趨勢, 此現象可垂直延伸至7000m以上。

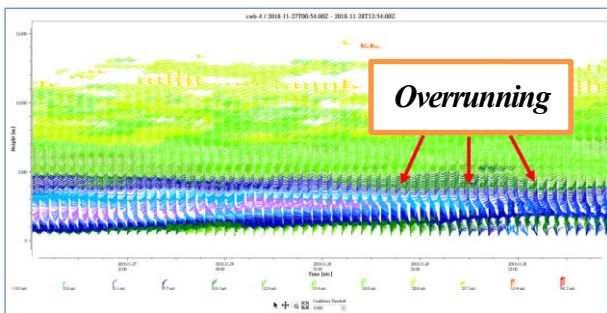


圖7. 東沙島剖風儀於原天兔颱風殘留雲系經過期間(2018年11月27日2200UTC至11月28日0400UTC)垂直風標時間序列圖, 箭頭所指為「傾斜上升對流」(Overrunning)處, 東北風隨高度轉轉成西南風層高約3000至4000公尺。

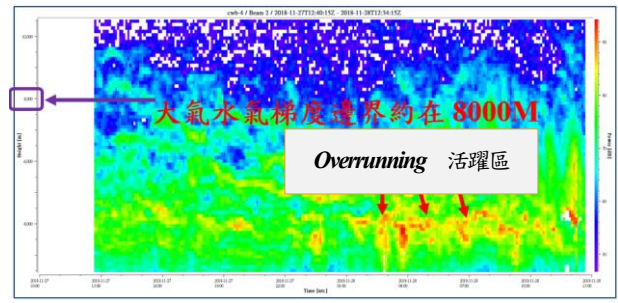


圖8. 東沙島剖風儀2018年11月27日1300UTC至11月28日1300UTC信號功率(Power)時間序列圖, 大氣水氣梯度邊界約在8000M, 暖式上滑傾斜對流約位於4000m, 信號功率值較大。

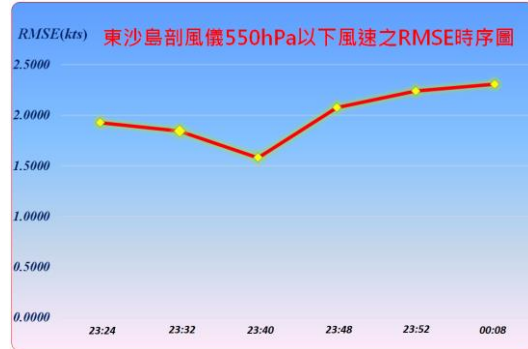


圖9. 強大大陸冷氣團南下個案(2019年1月22日00UTC前後), 東沙島剖風儀之550hPa以下風速RMSE校驗時間序列圖, 對照組基準是用探空儀之資料。

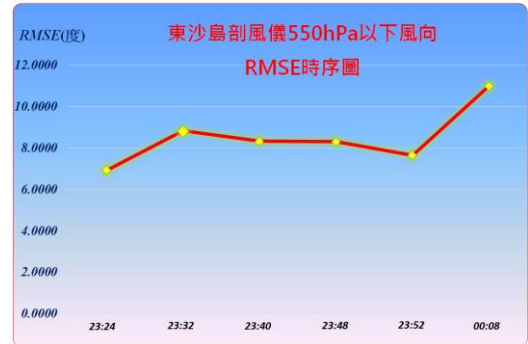


圖10. 強大大陸冷氣團南下個案(2019年1月22日00UTC前後), 東沙島剖風儀之550hPa以下風向RMSE方位角校驗時間序列圖, 對照組為探空儀資料。

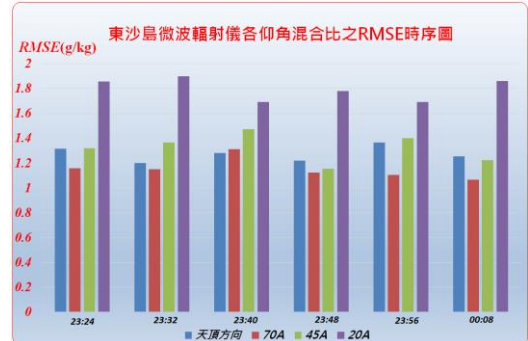


圖11. 強大大陸冷氣團南下個案(2019年1月22日00UTC前後), 以東沙島微波輻射儀監測得之溫度、露點及氣壓推演計算而得各仰角混合比之RMSE。對照組是探空儀資料; 混

合比之數據採用美國國家氣象局(NWS)之計算器運算而得。

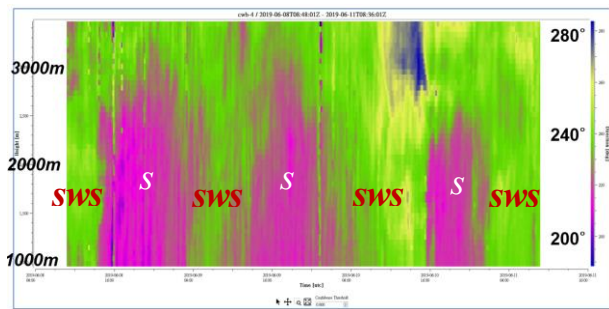


圖12. 2019年6月8日至11日西南季風影響東沙島風向時序圖，風向有明顯的日、夜變化，可發現到3000m以下，午後轉吹西南西風，午夜前後轉為偏南風。初判是白天午後青藏高原東側至華中地區之低壓因熱力加深，導致華南至東沙島海域的西南風增強；而夜間低壓因缺少熱力效應而較弱，太平洋副高也較弱東退，因而導致東沙島海或南風分量增強。

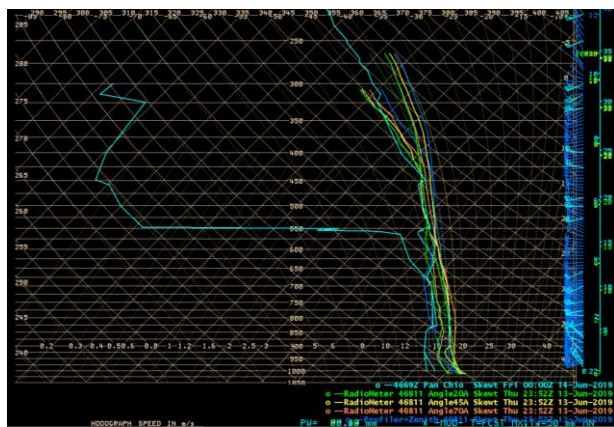


圖13. 西南風之MCS個案2019年6月14日00UTC東沙島探空儀(藍線, 參照組)及2019年6月13日23:52UTC微波輻射儀(實驗組; 天頂方向、70A、45A及20A)混合比之比較圖, 可以觀察到550hPa以上探空儀混合比有明顯偏轉現象, 探空儀在850hPa以下溫度有偏低現象; 而2019年6月13日23:52UTC剖風儀觀測之850hPa以下之低層風主要是西南西風, 但同一時間東沙島探空儀觀測則低層風主要是西北風。

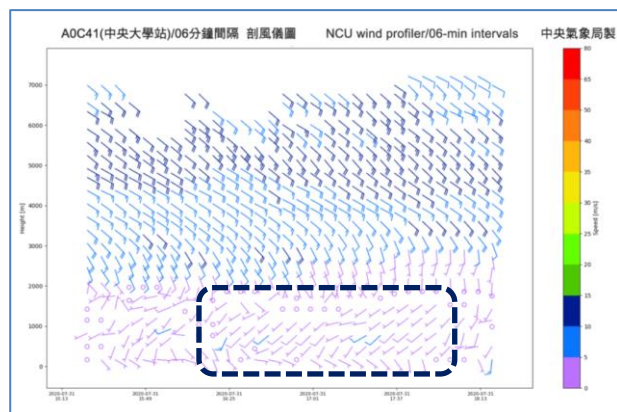


圖14. 中大夏季西南風層增厚與增強之現象

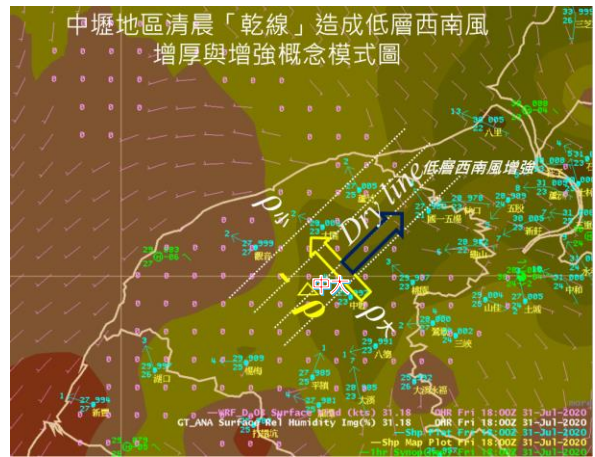


圖15. 中大夏季凌晨常有山風與海風輻合作用, 而有海陸密度梯度存在, 類似庫茲涅茲結構, 從而造成梯度風, 並致使低層西南風增強。

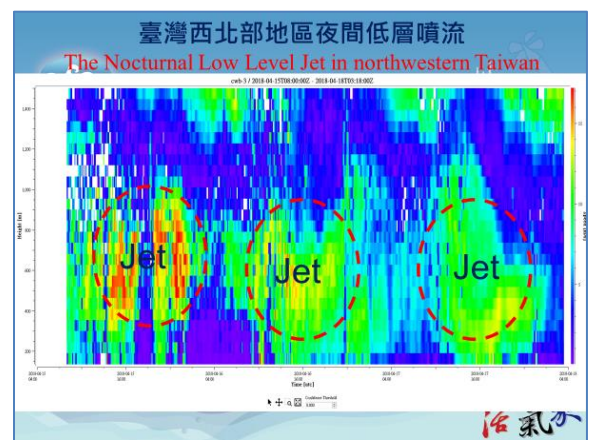


圖16. 由中大剖風儀觀測到中壢地區東北季風影響期間「夜間低層噴流」現象。

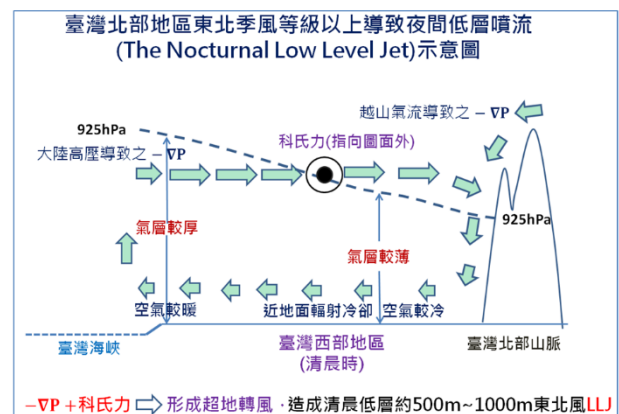


圖17. 臺灣西北部地區東北季風等級以上導致夜間低層噴流現象原理概念示意圖。

Application and Verification of Dongsha Island Wind Profiler and Microwave Radiometer in Weather Practice

Lin, Ting-I

**Meteorological Forecast Center,
Central Weather Bureau**

Abstract

The wind profiler and microwave radiometer can detect subtle changes in the vertical profile of wind field, temperature and humidity field structure of the atmospheric troposphere, both of which have high temporal and spatial resolution characteristics. In this study, the Dongsha Island wind profiler and microwave radiometer were used to monitor typical weather cases. The selected cases not only significantly affected the weather around Dongsha Island, but also were effective on the weather in Taiwan. In this study, the data of the wind profiler and the microwave radiometer (experimental group) and the radiosonde (control group) were verified and compared, respectively. The verification method mainly uses the Root Mean Square Error (RMSE) of the vertical data, and the statistical test F-test is used for the significance test of variance.

The statistical verification results are showed in this study. In most cases, the variance difference of the wind direction and wind speed between the wind profiler and the radiosonde is no significant difference. However, in the case of the mesoscale convective system(MCS), it is shown that there is a significant difference between the wind direction of the wind profiler and the radiosonde, and the RMSE value of the wind direction azimuth angle is up to 13.4 degrees. In terms of mixing ratio, there is also no significant variance difference between the microwave radiometer and the radiosonde, in normal condition. However, in the case, the northeastly wind turns to southward and interacted with the middle-level residual cloud system of typhoon USAGI, the mixing ratio of microwave radiometer off zenith angle 70 degrees(northward monitoring method), and radiosonde has a significant variance difference. In addition, if the monitoring time of the microwave radiometer is much later than the radiosonde balloon release time, the RMSE of the mixing ratio of these two instruments will be increased. By the way, in almost all cases, the vertical temperature and humidity distribution of the microwave radiometer is significantly different from the sounding plot curve above the middle layer of the atmosphere, by contrast, the consistency of the radiosonde data below about 850hPa is very well.

Keywords: Radiosonde, Wind profiler, Microwave radiometer, Root Mean Square Error(RMSE)