

桃園及宜蘭地區大氣亂流特徵參數量測特性統計

簡民斯¹、蔡世樵²、林永慶²

¹空軍氣象中心、²國防大學理工學院環境資訊及工程學系

摘要

藉由蒐集桃園及宜蘭地區之大氣參數，計算獲取大氣折射指數結構常數(C_n^2)，並將相關數據除錯整理後，以逐月統計分析方式建立其月分布模型；同時，比較過去各種量測 Kolmogorov 之 C_n^2 的方法，並分析不同季節、亂流強度下其值之差異；此外，亦利用無線電探空儀、溫溼度輻射儀等獲取之高時間解析度大氣參數剖面資料，計算 C_n^2 垂直剖面分布，並與理論模型進行比對驗證，以進一步用來建立亂流發生可能性與 C_n^2 垂直剖面變化之相關性，期能增進對大氣亂流垂直結構的瞭解。

本研究利用四套分別架設於桃園及宜蘭地區之超音波風向風速計與溫濕度計，蒐集逐秒風向風速、溫溼度、氣壓等大氣參數，以雙點溫度結構函數法及雙點大氣折射指數擾動法計算 C_n^2 ，比較不同方法之一致性或差異性；此外，亦配合於雙點位置架設閃爍儀，藉由量測雙點路徑上之 C_n^2 ，並將量測結果與雙點大氣數據計算之 C_n^2 進行比對驗證，結果顯示兩者數量級一致，且數值變化區間相當接近。統計結果顯示， C_n^2 呈現冬季較低、夏季較高之季節性分布，且日間的值相對較高，夜間的值相對較低，而兩種方法計算之 C_n^2 則呈現高度正相關，顯示計算結果有一定之可信度。此外，本研究亦挑選 C_n^2 數值出現顯著日變化之個案進行分析，探討其數值之變化趨勢與天氣系統之關聯性，發現溫度隨時間的擾動量與 C_n^2 呈現高度相關，顯示溫度時序分布是判斷大氣亂流物理量的重要條件。

關鍵字：邊界層、大氣折射指數結構常數、晴空亂流、超音波風向風速計、溫溼度輻射儀

1. 前言

時至今日有能力研發雷射武器的先進國家，都是以光學技術為基礎，而影響雷射效能的因素為大氣亂流所造成折射率的擾動及空間分布上之不連續，進而導致光線散射、偏折、粒子吸收及功率衰弱等，將引發閃爍、光熱暈及光束擴展等效應，進而對雷射武器系統造成一定程度之影響，故研究大氣亂流亦屬發展先進雷射武器之範疇之一。由 Narcisse (2003) 針對大氣折射指數結構常數 (C_n^2) 研究可知，在雷射武器操作前需量測大氣亂流所造成的光學偏折程度，藉以修正高能雷射的發射功率大小及角度，方能在經過大氣亂流時，使雷射光束不致偏離目標，強

度亦不致大幅減弱，以對遠距離目標實施精準射擊或用於防禦飛彈、擊落無人機等攻防作為。

而如何有效描述亂流的性質及特徵，至今仍然是大氣科學中的一個重大難題，特別是定義其強弱之物理量，目前國內研究少有著墨。一般來說，亂流生成至消散之物理機制，為能量從大尺度傳遞到小尺度期間，系統受到擾動進而產生耗散(流體的黏度可以有效地將動能消散為內能)的過程。在光學領域中，學者普遍認為亂流是造成大氣中折射率的擾動之主要原因，而大氣的折射指數結構常數(C_n^2)是描述亂流強度的物理量(單位為 $m^{-2/3}$)，並且取決於風速、溫度、溼度及氣

壓等氣象參數的時間及空間分布。

本研究藉由氣象觀測儀器長時間的量測與蒐集大氣參數，計算大氣折射指數結構常數(C_n^2)，並將相關數據除錯整理後，以逐月統計分析方式建立其月分布氣候模型，有助於瞭解特定觀測地區之亂流結構特性及差異性；此外，亦利用超音波風向風速計、溫溼度輻射儀、小型無人機掛載微型氣象儀等獲取之高時間解析度大氣參數剖面資料，以及中央氣象署之例行氣象探空資料，計算 C_n^2 垂直剖面分布，並與 C_n^2 垂直剖面理論模型進行比對驗證，以進一步用來建立亂流發生可能性(Richardson number)與 C_n^2 垂直剖面變化之相關性，期能增進對大氣亂流垂直結構的瞭解，有助於天文探索、雷達掃描、人造衛星觀測、電磁波通訊及飛航安全，對於雷射傳輸通訊及光學成像等應用領域具有十分重要的意義。

2. 資料收集與研究方法

2.1 儀器簡介

本研究利用位於桃園地區國防大學理工學院之高時間解析度大氣資料觀測裝備(圖1)，如超音波風向風速計(圖2)、溫溼度計(圖3)等，長期蒐集地面風向風速、溫溼度等大氣參數，並利用上述參數透過各種不同計算方式獲取大氣折射指數結構常數(C_n^2)，且將相關數據除錯整理後，以逐月統計分析方式呈現，建立 C_n^2 之月分布氣候模型。桃園地區 C_n^2 垂直剖面模型之建立則利用位於國防大學理工學院與國立中央大學之溫溼度輻射儀等儀器(圖4)，蒐集地面至對流層頂高度(約10公里)之風向風速、溫溼度等反演大氣參數，獲取同時間及空間解析度下之桃園地區雙點高空大氣參數來計算 C_n^2 高空垂直剖面輪廓，並使用中央氣象署板橋探空站之例行探空資料計算 C_n^2 垂直剖面。宜蘭地區藉由大孔徑閃爍儀(圖5)直接量測路徑上之 C_n^2 ，其垂直剖面模型則運用小型無人機結合微型氣象儀(Storm

tracker)蒐集地面至離地100公尺處之氣象數據，由以上方式獲取之資料再透過各種不同計算方式獲取 C_n^2 垂直剖面，同時將計算結果與現有之 C_n^2 垂直剖面理論模型進行比對驗證，期望找出契合臺灣地區之 C_n^2 垂直剖面理論模型。

2.2 研究方法

為確保觀測資料之品質，本案觀測資料使用前均有經過資料品質控管程序，同時，國防大學理工學院之儀器觀測數據，亦有與鄰近之中央氣象署大溪及龍潭自動氣象觀測站進行比對驗證，以進一步確認大氣數據之驗證性及準確度。完成上述之程序後，方將每20分鐘之逐秒觀測資料，帶入各種方法計算獲取溫度結構常數(C_T^2)及大氣折射指數結構常數(C_n^2)。觀測資料因儀器故障、天災、通訊、電力供應等不可抗力因素，可能造成部分資料中斷，若20分鐘內觀測缺失資料在5分鐘以內，則以線性內插方式補足；若20分鐘內觀測缺失資料超過5分鐘，則該20分鐘資料直接捨棄，不列入計算 C_T^2 及 C_n^2 。此外，若20分鐘內觀測資料筆數不足1200筆(經內插後)，則直接捨棄該20分鐘資料不用來計算 C_T^2 及 C_n^2 。 C_T^2 計算結果若大於0.4，則該筆資料亦直接捨棄不用。大氣數據部分則是設定門檻值為氣壓大於900 hPa、溫度介於5~40°C之間、相對濕度介於25~100 %之間、風速介於0~40 m/s，門檻值以外的數據視為不合理並予以捨棄不用。

2.2.1 單點溫度結構函數法(One Point Temperature, OPT)

本研究所採用之超音波風向風速計，其觀測原理是利用都卜勒效應以及聲速是溫度和濕度的函數關係，通過測量三個非正交軸上一定距離的超音波脈衝傳輸時間，通過座標轉換，得到風速的三個分量以及氣溫。由於超音波風速計測量的是空間單點超聲氣溫起伏時間序列數據，因此需要在泰勒假定下

，結合風速將空間一點測量的氣溫時間序列數據轉變成空間兩點溫差，再進行慣性區內兩點溫差的平方平均得到 C_T^2 ，這一方法稱為單點溫度結構函數法，其計算方式可表示如下(吳等，2014)：

$$C_T^2 = \langle [T(t) - T(t - \tau)]^2 \rangle (\bar{V}\tau)^{2/3}$$

式中 τ 為時間間隔。通常取空間長度為1公尺， τ 的大小由實測的平均風速來決定。獲得 C_T^2 後，便可帶入式進一步計算得到 C_n^2 。

2.2.2 單點溫度頻譜法(One Point Spectrum, OPS)

利用溫濕度計測量空間單點溫度起伏，在泰勒假定下，將時間譜作傅立葉轉換得到頻率譜，再根據頻率與波數的關係轉換成空間譜， C_T^2 可以通過亂流慣性區內一維溫度空間譜來確定。這一方法稱為單點溫度頻譜法，其計算方式可表示如下(Li et al., 2015)：

$$\Psi_T(k) = 0.125 C_T^2 k^{-5/3}$$

$$C_n^2 = \left(79 \times 10^{-6} \frac{P}{T^2} \right)^2 C_T^2$$

其中 k 為波數(wave number)。獲得 C_T^2 後，便可帶入式進一步計算得到 C_n^2 。以上兩種量測方法的前提是假設亂流符合Kolmogorov理論。

2.2.3 雙點溫度結構函數法(Two Point Temperature, TPT)

對於可見光和近紅外光波段，大氣折射率的變化主要是由溫度變化所造成的，由上式透過量測慣性區內空間兩點溫差的平方，將其平均可得到 C_T^2 ，再由上式可計算得到 C_n^2 ，此一方法稱為雙點溫度結構函數法。

2.2.4 雙點大氣折射指數擾動法(Dual Point Refractive, DPR)

Kolmogorov理論之 C_n^2 計算方法除了由上式計算之雙點溫度結構函數法外，本研究亦利用大氣折射指數具有在時間及空間上變化之特性，將觀測之大氣參數(溫度、水氣壓、氣壓)使用Smith et al., (1953)的經驗式，以

計算折射指數變化，計算方式可表示如下：

$$n = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{e}{T^2}$$

其中 P 為大氣壓力，單位是百帕(hPa)， e 為大氣中的水汽壓，單位亦為百帕(hPa)， T 為絕對溫度，單位是K。實際計算數值中，大氣折射指數是一個非常接近於1的數值，其變動範圍主要在1.000100至1.000400之間。對於可見光和近紅外光波段而言，濕度的影響可忽略不計，透過上式計算得到慣性區內空間兩點之大氣折射指數後，帶入下式計算得到 C_n^2 ，此一方法稱為雙點大氣折射指數擾動法：

$$C_n^2 = \langle [n(\vec{x}) - n(\vec{x} + \vec{r})]^2 \rangle r^{-2/3}$$

本研究目前使用之 C_n^2 計算方式共四種(單點溫度結構函數法、單點溫度頻譜法、雙點溫度結構函數法及雙點大氣折射指數擾動法)，其各方法所需之大氣參數有溫度、濕度、氣壓及風速等，不同方法有其獨特及優劣處，當氣象觀測站數量有限(不足2處)時，單點溫度結構函數法及單點溫度頻譜法能夠以單一測站之溫度及濕度計算 C_n^2 ；當氣象觀測站數量達2處且資料解析度相同時，可運用雙點大氣折射指數擾動法及雙點溫度結構函數法計算 C_n^2 ，故不同之環境及設備情況下，可使用之方法亦因上述條件而異。

而真實大氣狀態非Kolmogorov理論般具均值性與全向性，以Kolmogorov理論為背景所計算之 C_n^2 ，可能與實際大氣亂流能譜出現誤差；而以非Kolmogorov理論為背景所計算之 C_n^2 ，可能較符合實際大氣亂流能譜變化情形，且採用雙點之方法所計算之 C_n^2 ，在數量級上與國外相關研究 C_n^2 數值較為接近，目前統計範圍約在 10^{-13} 至 $10^{-18}(m^{-2/3})$ 之間。因使用單點來計算 C_n^2 之方法是以平均風速($\bar{V}$)來決定時間間隔(τ)，此種方法為泰勒假定之前提下將空間單點測量氣溫轉換成空間兩點溫差，其可適用性有待驗證，而直接使用雙點同步觀測之資料計算 C_n^2 ，較能夠真實反映

空間中溫度及折射指數因亂流所造成之擾動變化，對於光學領域之作業或研究更具有參考價值，亦成為本研究後續主要計算 C_n^2 之方法，如圖6，圖說由上而下依序為國防大學理工學院測站2之St1觀測資料運用單點溫度結構函數法計算之 C_n^2 、St2觀測資料運用單點溫度結構函數法計算之 C_n^2 、St1及St2觀測資料運用雙點溫度結構函數法計算之 C_n^2 、St1及St2觀測資料運用雙點大氣折射指數擾動法計算之 C_n^2 。

針對 C_n^2 不同日變化輪廓個案，本研究利用 C_n^2 及氣象數據的表徵關聯性(圖7)，經過長時間的觀測與計算，透過分析及歸類後，以驗證各類不同尺度天氣系統影響下， C_n^2 所對應之變化曲線，方能供應後續光學領域研究所需之重要參考依據。

2.2.5 C_n^2 垂直剖面理論模型

國外學者於 C_n^2 垂直剖面相關研究中，Shao et al., (2021)施放可同時觀測兩點溫度的探空儀(相距1公尺之金屬箔片)進行 C_n^2 的剖面計算，本研究係利用中央氣象署探空資料及自行施放之探空氣球獲取之大氣參數，並以Tatarski (1971)之物理公式計算剖面 C_n^2 數據(圖8)來估計亂流強度，其方程式可表示如下：

$$C_n^2 = aL_0^{4/3} M^2$$

$$M = -\frac{79 \times 10^{-6} \partial \theta}{T^2 \partial h}$$

其中 a 為常數 2.8， L_0 為大氣亂流的外尺度， M 為位折射指數垂直梯度 (Vertical Gradient of the Potential Refractive Index)。因 C_n^2 數值取決於當地的氣象條件，如：溫度、氣壓、風速、日照、季節變化、一天中的時間、離地高度、地形等，故經過比較國外文獻之 C_n^2 計算方程，本研究選擇了考慮風切變之Dewan模式及考慮垂直溫度擾動之HMNSP99模式，來計算對流層內之 C_n^2 剖面，評估外尺度亂流變化趨勢。

2.2.5.1 Dewan模式

Dewan et al., (2007)透過觀察大量實驗數據而得到Dewan外尺度模式，它的主要特點是在表達式中包含了風切變，其搭配高空氣象觀測數據可得到 C_n^2 剖面，其方程式可表示如下：

$$L_0^{4/3} = \begin{cases} 0.1^{4/3} \times 10^{1.64+42S}, & \text{troposphere} \\ 0.1^{4/3} \times 10^{0.506+50S}, & \text{stratosphere} \end{cases}$$

其中 S 為垂直風切： $\left(\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2\right)^{1/2}$

特別的是Dewan模式需要應用探空資料解析度為300m的氣象觀測資料，本研究於調整中央氣象署探空資料內插尺度時亦發現此一特點。

2.2.5.2 HMNSP99模式

Ruggiero et al., (2002)使用自美國新墨西哥州霍洛曼空軍基地施放的探空氣球所獲得之數據推斷出外尺度風切變和溫度梯度之間的關係，該模式與 Dewan 模式相似，不同之處在於溫度梯度被添加到表達式中，其方程式可表示如下：

$$L_0^{4/3} = \begin{cases} 0.1^{4/3} \times 10^{0.362+16.728S-192.347\frac{dT}{dz}}, & \text{troposphere} \\ 0.1^{4/3} \times 10^{0.757+13.819S-57.784\frac{dT}{dz}}, & \text{stratosphere} \end{cases}$$

其中 $\frac{dT}{dz}$ 為垂直溫度梯度。

2.2.5.3 Hufnagel-Valley模式

Valley(1980)所提出之Hufnagel-Valley (H/V)模式廣泛應用於計算 C_n^2 剖面，H/V模式其研究目的為滿足美國空軍對於先進光學武器設計，該系統必須能夠在任何條件下運行，故須瞭解之大氣剖面之亂流強度變化情形，Valley透過長時間的大氣垂直剖面溫度及光學量測得到符合該實驗區域之 C_n^2 剖面輪廓，其方程式可表示如下：

$$C_n^2(h) = 0.00594(v/27)^2(10^{-5}h)^{10}e^{\frac{-h}{1000}}$$

$$+ 2.7 \times 10^{-16} e^{\frac{-h}{1500}} + 2.7 e^{\frac{-h}{100}}$$

其中 h 為海拔高度(單位: m), 故在已知高度的情況下, 可運用此經驗公式獲得相對應的 C_n^2 數值, 以繪製 C_n^2 剖面輪廓。

2.2.5.4 SCS 模式

由於 C_n^2 剖面受不同區域之特殊環境及天氣影響, 各地區都具有與其相匹配之 C_n^2 剖面特性, 故 Xu et al. (2022) 以 Hufnagel-Valley 模式為基礎, 運用歐洲中期天氣預報中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 之第五代再分析資料 (ERA5 data), 經過長時間的大氣剖面數值模擬, 開發出能夠代表南中國海之 SCS 模式, 透過與探空資料比對, 其模式數值與實際高空量測之 C_n^2 數值相當接近, 其方程式可表示如下:

$$C_n^2(h) = 3.978 \times 10^{-29.99} \times (14.32/27)^2 \times h^{19.54} \exp(-h/0.7) + 2.48 \times 10^{-15} \exp(-h/0.02) + 1.5 \times 10^{-16.7} \exp(-h/14)$$

3. 大氣量測參數比對驗證

3.1 雙點觀測數據之比對驗證

本研究利用架設於國防大學理工學院測站 2 之 Young model 81000 超音波風向風速計與 Metone 溫濕度計(共兩套觀測設備, 編號: St1 及 St2), 蒐集兩地點之逐秒風向風速、溫溼度、氣壓等大氣參數, 使用以上述三種計算方法(單點溫度結構函數法、雙點大氣折射指數擾動法及雙點溫度結構函數法)獲取之 C_n^2 進行計算, 以確定計算結果之合理性。(圖 9, 藍色: 考慮濕度項之雙點大氣折射指數擾動法、紫色: 不考慮濕度項之雙點大氣折射指數擾動法、綠色: St2 之單點溫度結構函數法、棕色: St1 之單點溫度結構函數法、紅色: 雙點溫度結構函數法)。

不論以何種方法計算之 C_n^2 , 於國防大學理工學院測站 1 及測站 2 兩地均呈現冬季較低, 夏季較高之季節性分布, 且白天的值相對

較高, 夜晚的值相對較低, 此結果與 Tunick et al., (2005) 研究一致, 且單點及雙點均能反映出受天氣系統影響的溫度擾動。

雙點方式所計算出來之 C_n^2 較容易於數值曲線中判斷日夜變化, 但雙點方式亦較容易受到架設環境、高度差異所影響, 而導致 C_n^2 出現明顯擾動。

此外, 本研究亦挑選 C_n^2 出現顯著數值驟升及驟降之個案進行分析:

202 年 3 月 30 日桃園地區溫度曲線及 C_n^2 數值(圖 10)均非一般之日夜變化(日間平均數值高於夜晚), 與長時間觀測之每日最大值時間出現在中午前後不同, 此個案 C_n^2 最大值時間出現在 1200 UTC 左右, 經查詢桃園地區各氣象站皆記錄到受天氣系統影響而造成之溫度擾動, 在數值模式中亦可發現 0600 UTC 至 1200 UTC 有暖平流通過(圖 11), 模擬資料符合實際溫度變化, 並與 C_n^2 呈現高度相關, 顯示溫度時序分布是判斷大氣亂流物理量的重要條件。

3.2 宜蘭地區 C_n^2 及閃爍儀觀測資料分析

本研究將原架設於國防大學理工學院測站 2 之兩套氣象觀測設備移機至宜蘭縣壯圍鄉(圖 12)之兩棟相距 361 公尺之建物頂樓(DSt1 及 DSt2), 長時間蒐集大氣參數, 並以逐秒方式儲存觀測資料, 經資料品質控管程序(QC)後, 將每 20 分鐘之逐秒觀測資料帶入五種不同方法來計算 C_n^2 (DSt1 單點溫度結構函數法、DSt2 單點溫度結構函數法、考慮濕度項之雙點大氣折射指數擾動法、不考慮濕度項之雙點大氣折射指數擾動法及雙點溫度結構函數法), 將上述方法之計算結果繪製 C_n^2 數值曲線圖(圖 13), 找出合適的方法來計算該地區之 C_n^2 。

不同方法估算之數值量級由大到小依序為: 考慮濕度項之雙點大氣折射指數擾動法(10^{-11})、不考慮濕度項之雙點大氣折射指數擾動法及雙點溫度結構函數法(10^{-14})、DSt1

及 DSt2 單點溫度結構函數法(10^{-15} 至 10^{-17})，由於考慮濕度項之雙點大氣折射指數擾動法之數量級與理論值數量級(10^{-13} 至 10^{-17})差異甚大，雙點方式亦較能代表兩測站間的小尺度慣性區 C_n^2 數值，故後續研究以雙點溫度結構函數法計算為主(圖 14)，其計算結果與不考慮濕度項之雙點大氣折射指數擾動法相當接近。

分析宜蘭地區 2022 年 9 月 18 日至 2022 年 10 月 23 日(合計 35 日)之 C_n^2 日變化曲線，將不同類型之曲線分類及歸納，如圖 15，紅框為可見具日夜變化；藍框為無日夜變化；綠框為特殊曲線；黃框為持續上升或下降，可見日夜變化(數值起伏明顯)之日數達 25 日(佔 71%)；無日夜變化(數值起伏不明顯)之日數為 8 日(佔 23%)；出現特殊曲線(數值非日變化起伏)及持續上升或下降(數值線性起伏)之日數各為 1 日(佔 6%)，其中 2022 年 10 月 20 日 C_n^2 數值出現持續緩慢上升情形(圖 16)，可能為雙站溫差增加所致。

此期間觀測數據所計算之 C_n^2 以閃爍儀(Scintillometer)實際量測之觀測數據加以比對，驗證雙點方式計算之可行性，並將氣象觀測站調整至適當間距，增加 C_n^2 數值的準確率。

德國 Scintec 公司所生產之大口徑閃爍儀(型號:BLS900)，如圖 5，可測量路徑長度在 100 公尺至 6,000 公尺之間的大氣亂流，可直接獲取發射端與接收端之間的折射率結構常數(C_n^2)，將其發射端及接收端各安裝在宜蘭壯圍兩測站旁(DSt1 及 DSt2)，量測雙點間之 LED 光學擾動變化，以瞭解宜蘭地區的 C_n^2 變動與溫度結構常數(C_T^2)的差異。

本研究閃爍儀架設期間，於兩套氣象觀測設備旁的 1 公尺處，各額外新增 1 套同型號之氣象觀測設備(DSt1 旁新增 DSt3，DSt2 旁新增 DSt4)，以交叉比對方式校正蒐集到之大氣參數，且在四套同型號之氣象觀測設備情況下

，可同時針對單點及雙點計算方式各別運算，獲取不同位置及間距的 C_n^2 數值，驗證理論方法的可行性與真實量測數據的準確性。

結果顯示，雙站方式(DSt1 配合 DSt2；DSt3 配合 DSt4)計算的 C_n^2 比較接近閃爍儀(BLS900)測量數值，如圖 17(圖標由上而下依序為：閃爍儀、DSt1 單點、DSt1_DSt2 雙點、DSt1_DSt3 雙點、DSt2 單點、DSt2_DSt4 雙點、DSt3 單點、DSt3_DSt4 雙點、DSt4 單點)，其中 DSt1_DSt2 雙點曲線之數量級最接近閃爍儀數值；DSt3_DSt4 雙點曲線變化趨勢與閃爍儀曲線最相似，另將 DSt2 配合 DSt3 所計算之 C_n^2 (圖 18)與閃爍儀(BLS900)測量數值比較後發現，其數量級一致，且變化趨勢相當接近，證明使用雙點溫度結構函數法能夠掌握兩測站間大氣亂流變化，在沒有閃爍儀量測實際數值的情況下，可以運用該方法估算 C_n^2 ，而其結果具有相當的準確性及參考價值。

3.3 C_n^2 垂直剖面之計算

為本研究以多種模式建立 C_n^2 剖面模型，並以不同的時間及空間解析度取樣(圖 19)，比較出最符合整體 C_n^2 垂直剖面輪廓之計算方式，實驗結果為：以控制時間解析度在逐 60 秒輸出資料及控制空間解析度在逐 300 公尺輸出資料時，所繪製之 C_n^2 剖面模型相關性最高，且 C_n^2 數值隨高度變化趨勢可控制在合理的範圍內。

桃園地區高空觀測部分，本研究以兩套溫溼度輻射儀(圖 20)進行觀測，在輻射儀所建立之剖面模型(圖 22)可發現 C_n^2 數值具有日夜變化特性，於觀測地區受天氣系統影響時， C_n^2 剖面曲線亦同步發生改變，此結果證明本實驗具有相當之參考價值。

因宜蘭地區無高空氣象觀測設備，故本研究以設計小型無人機懸掛相距一公尺之兩套微型氣象觀測儀器(圖 22)，在離地 100 公尺高度範圍內(符合飛航法規)，以 20 公尺為空層間距(合計 5 個空層)，每一空層觀測 2 分鐘之飛

行策略進行觀測，來蒐集大氣垂直剖面參數，如圖23，圖中(a)及(b)觀測時間為2022年11月14日0700 UTC；(c)及(d)觀測時間為2022年11月15日0700 UTC；(e)及(f)觀測時間為2022年11月14日1300 UTC。此觀測方式優點為：不受定點或儀器基座影響，可任意移動至欲研究之區域，符合法規之無人機飛行場域都可進行觀測，且獲取之大氣數值為實際量測之參數，增加 C_n^2 數值的準確性。然而，礙於無人機受到電力限制及零件耗損等問題，該方法無法進行長時間之連續性觀測(無人機單次飛行觀測時間約為20分鐘)，且易受天候影響導致無法順利飛行，而使用無人機觀測最大之困難點在於合法空域之使用申請。

實驗結果顯示， C_n^2 的數量級大小符合理論數值與相關研究，近地表之間距20公尺空層內即具有 C_n^2 變化，且白天與夜晚觀測之 C_n^2 數值可藉由剖面輪廓區分(白天之 C_n^2 數值變化較夜晚明顯)。

3.4 大氣亂流與 C_n^2 垂直剖面相關性分析

大氣的不穩定會產生亂流，而不穩定可分成熱力或是動力條件所造成，其中熱力不穩定與位溫梯度有關，而動力梯度的不穩定可利用Richardson number(Ri)來識別，當 $1/Ri$ 小於4時，大氣是穩定的；當 $1/Ri$ 大於4時，大氣是不穩定的，有發生亂流的可能性，本研究將2022年10月1日0000 UTC至2022年10月10日1200 UTC之板橋探空 C_n^2 剖面與 $1/Ri$ 垂直剖面比對，如圖24所示(圖中左至右依序為： C_n^2 模式垂直剖面、 $1/Ri$ 垂直剖面、垂直風切剖面及位溫梯度剖面)，發現部分 C_n^2 產生明顯變化之高度與 $1/Ri$ 產生明顯變化之高度相當接近，另將兩數值進行相關係數校驗後呈現高度正相關，雖然 $1/Ri$ 無法完全對應 C_n^2 劇烈變化之幅度，但仍具有高度之參考價值。

本研究亦發現Dewan model(僅考慮垂直風切)與HMNSP99 model(考慮垂直風切及溫度梯度)在垂直 C_n^2 剖面曲線變化之指標性特

性，如Dewan model數值大於 $10^{-16}(m^{-2/3})$ 且上述兩種mode均為增加之情況下，對應高度之 $1/Ri$ 隨著 C_n^2 數值增加， $1/Ri$ 大於4的案例相當多，應為垂直風切明顯且大氣處於不穩定狀態，且Dewan model與HMNSP99 model其公式內均有垂直風切項，使 C_n^2 數值上升並達到一定量級時，可用於評估發生亂流之可能，反之，如Dewan model數值為上升狀態；HMNSP99 model為下降狀態時，其HMNSP99 model公式中的垂直溫度梯度項為垂直風切之反指標，對於 C_n^2 數值變化有抑制之效果，故於圖25可以發現該高度的 $1/Ri$ 未隨著Dewan model數值上升的案例。

另一方面可拓展氣象探空資料之應用領域，對該地區之大氣特性有更深刻的瞭解。

為呈現區域性特色之 C_n^2 剖面統計資料，本研究將2022年度中央氣象署板橋探空站之0000 UTC及1200 UTC資料所繪製成逐月 C_n^2 剖面，如圖26所示，各月份不同高度之 C_n^2 數值以選取中位數方式，得出以垂直高度每300公尺間距之代表性之數值，進行日間及夜間剖面曲線比較，研究結果發現，整體 C_n^2 數量級大小為 10^{-15} 至 10^{-17} 之間(趨勢隨高度減小)，日間的近地表 C_n^2 數值於大於夜間，且夏季 C_n^2 數值減小之轉折高度較冬季高，代表日間近地表處及夏季期間邊界層內的溫度擾動所造成的折射結構變化相當顯著，與國外於南中國海之相關研究實驗數據相似，但由於臺灣地區易受到大陸及季風型態之天氣系統影響，使各月份的 C_n^2 剖面輪廓都各具特色，垂直剖面之變化相當明顯。

4. 結論

為力求研究所需資料之正確性，本研究於建置觀測儀器之實驗初期即校驗各氣象參數是否準確，以單點方式(單點溫度結構函數法及單點溫度頻譜法)計算桃園地區之 C_n^2 數值，直到本實驗獲得兩組同規格之高時間解析度觀測儀器後，以雙點方式(雙點溫度結構

函數法及雙點大氣折射指數擾動法)計算桃園地區 C_n^2 數值，亦將觀測儀器移機至宜蘭地區執行雙點觀測，並以閃爍儀量測 C_n^2 數值做為實際大氣亂流變動之真實數值，將其比較上述不同 C_n^2 之計算方法，而本研究在地面量測階段獲得之重要結果為：使用雙點溫度結構函數法所計算之 C_n^2 數值曲線最為接近實際大氣亂流結構變化情形。

在確定計算 C_n^2 方法之可行性及正確性後，本研究將實驗觀測範圍由地面推展至高空，使用中央氣象署之探空資料建立 C_n^2 垂直剖面，另運用溫溼度輻射儀，以雙點溫度結構函數法建立桃園地區之 C_n^2 垂直剖面，於儀器連續觀測之10日間發現 C_n^2 垂直剖面變化情形： C_n^2 垂直剖面除具有明顯之日夜變化外，亦會因天氣系統影響而變動，此與地面觀測資料所計算之 C_n^2 結果相同，而在宜蘭地區運用小型無人機實施低空觀測所得到之 C_n^2 垂直剖面，也發現其數值日間之數量級變化較夜晚更為明顯。本研究藉由以上實驗流程，獲得桃園及宜蘭地區地面及高空大氣亂流特徵參數。

研究成果以條列方式敘述：

- 1、國防大學理工學院測站 1 及測站 2 兩地之 C_n^2 呈現冬季較低，夏季較高之季節性分布，且白天(8 時至 17 時)的值相對較高；下午至凌晨(18 時至 7 時)的值相對較低。
- 2、統計結果顯示，以單點溫度結構函數法計算之 C_n^2 數值與 C_t^2 (溫度擾動)與 W_s 風速呈現顯著的正相關， C_n^2 數值與 P (壓力)為正相關，與 T_e (溫度)相關性較小。
- 3、國防大學理工學院測站 1 受限於儀器溫度觀測靈敏度限制，其所計算出的 C_n^2 會偏小，但其變化趨勢還是能反映出受天氣系統影響的溫度擾動。
- 4、單點溫度頻譜法用來驗證單點溫度結構函數法的結果顯示，兩者計算之 C_n^2 差異極小且有一致之變化趨勢，說明了單點溫度

結構函數法的結果有一定之可信度，且單點溫度結構函數法計算之 C_n^2 受天氣系統影響較大。

- 5、雙點溫度結構函數法之 C_n^2 與雙點大氣折射指數擾動法之 C_n^2 呈現高度正相關，無論有無考慮濕度項(水氣壓)，相關係數均在 0.78 以上，而在忽略濕度項(水氣壓)之影響下，兩者之 C_n^2 之相關係數為最高，可達 0.86。
- 6、因溫溼度輻射儀屬於數值反演資料，且不同儀器之反演方式不同，如利用兩套溫溼度輻射儀來建立高空 C_n^2 數值剖面時，應以相同反演方式之儀器進行之，並於實驗前完成儀器校正，以達資料正確性。
- 7、亂流具有隨機性和不確定性，受環境、季節、經緯度、海拔高度的影響甚大，如果將研究結果直接推廣到其地區會有一定的誤差，存在適用性及獨特性，故每個地區的 C_n^2 數值都具有其代表性。
- 8、由於本研究使用之雙點溫度結構函數法與閃爍儀所量測之 C_n^2 數值相當接近，驗證該方法所計算之 C_n^2 數值真實性及準確度高，可持續進行後續之相關研究工作。

研究亂流為促進飛航安全之一環，藉由施放探空氣球所獲得之大氣參數因時間及空間解析度上之不足，無法及時提供相關單位預警情資，將來可整合國防理工學院之溫溼度輻射儀及剖風儀(Lidar)，以單點方式計算 C_n^2 剖面，因高空的 C_n^2 數值剖面需要高靈敏度及可長時間密集觀測之氣象設備來進行資料蒐集，施放可同時觀測固定兩點位置之探空儀器來獲取高空大氣參數，或運用兩套溫溼度輻射儀建立桃園地區之長期觀測資料，提供相關領域應用及分析，如經過飛行過程驗證亂流程程度後，有助於飛航單位掌握亂流變化趨勢。目前常見之氣象再分析數據可進行 C_n^2 剖面之模擬統計，補足傳統探空在空間解析度上之不足，未來可使用數值模式衍生 C_n^2

預報能量，期能增進對大氣亂流垂直結構的瞭解，有助於天文、晴空雷達觀測、人造衛星觀測、電磁波通訊及飛航安全。為了因應現代戰場上光學武器對於 C_n^2 數值之迫切瞭解，使用多架具備量測雙點溫度儀器之無人機進行機動觀測，是建立 C_n^2 垂直剖面的合適方法，其提供 C_n^2 即時性變化情形，並監測大氣環境中亂流對 C_n^2 產生之影響，以上可做為後續研究之方向。

5. 參考文獻

- Narcisse, L. C., 2003, Comparison of the Refractive Index Structure Constant Derived from Numerical Weather Prediction (NWP) Models and Thermosonde Data. Air Force Inst of Tech Wright-Patterson AFB OH School of Engineering and Management.
- Cherubini, T., & Businger, S., 2013, Another look at the refractive index structure function. Journal of applied meteorology and climatology, 52-2, 498-506.
- Kolmogorov, A. N., 1991, The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers. Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences, 434(1890), 9-13.
- Beland, R. R., 1993, Propagation through atmospheric optical turbulence. Atmospheric Propagation of Radiation, 2, 157-232.
- Balsley, B. B., & Gage, K. S., 1980, The MST radar technique: Potential for middle atmospheric studies. Pure and Applied Geophysics, 118, 452-493.
- Tatarski, V. I., 1961, Wave Propagation in a Turbulent Medium. New York, 285.
- Tatarski, V. I., 1971, The effects of the turbulent atmosphere on wave propagation. National Technical Information Service, Springfield, VA. 74-76.
- Tunick, A., Tikhonov, N., Vorontsov, M., & Carhart, G., 2005, Characterization of optical turbulence (C_n^2) data measured at the ARL A_LOT facility. US Army Research Laboratory Adelphi United States.
- Gang, S., Ning-Quan, W., Li-Ming, X., & Yi, W., 2012, Profile and character of atmospheric structure constant of refractive index C_n^2 . Atmospheric and Oceanic Science Letters, 5-3, 270-272.
- Wu, S., Wu, X., Su, C., Yang, Q., Xu, J., Luo, T., ... & Qing, C., 2021, Reliable model to estimate the profile of the refractive index structure parameter (C_n^2) and integrated astroclimatic parameters in the atmosphere. Optics Express, 29-8, 12454-12470.
- Jicha, O., Pechac, P., Zvanovec, S., Grabner, M., & Kvicera, V., 2012, Long-term measurements of refractive index structure constant in atmospheric boundary layer. In Optics in Atmospheric Propagation and Adaptive Systems XV, 8535, 41-48.
- Otoniel Canuet, L. F., 2015, Atmospheric turbulence profile modeling for satellite-ground laser communication. Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Shao, S., Qin, F., Xu, M., Liu, Q., Han, Y., & Xu, Z., 2021, Temporal and spatial variation of refractive index structure coefficient over South China sea. Results in Engineering, 9, 100191.
- Rafalimanana, A., Giordano, C., Ziad, A., & Aristidi, E., 2022, Optimal prediction of

- atmospheric turbulence by means of the weather research and forecasting model. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 134-1035, 055002.
- Xu, M., Shao, S., Weng, N., & Liu, Q., 2022, Analysis of Optical Turbulence over the South China Sea Using Balloon-Borne Microthermal Data and ERA5 Data. Remote Sensing, 14-17, 4398.
- Li, Y., Zhu, W., Wu, X., & Rao, R., 2015, Equivalent refractive-index structure constant of non-Kolmogorov turbulence. Optics express, 23-18, 23004-23012.
- Smith, E. K., & Weintraub, S., 1953, The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies. Proceedings of the IRE, 41-8, 1035-1037.
- Dewan, E. M., & Grossbard, N., 2007, The inertial range “outer scale” and optical turbulence. Environmental Fluid Mechanics, 7-5, 383-396.
- Ruggiero, F. H., & DeBenedictis, D. A., 2002, Forecasting optical turbulence from mesoscale numerical weather prediction models. In DoD High Performance Modernization Program Users Group Conference, 10-14.
- Valley, G. C., 1980, Isoplanatic degradation of tilt correction and short-term imaging systems. Applied Optics, 19-4, 574-577.
- 林松錦，郭富雄，李啟昌，1988，大氣亂流的垂直觀測。大氣科學，16 卷 1 期，1-13 頁。
- 吳曉慶，黃印博，梅海平，邵士勇，黃宏華，錢仙妹，崔朝龍，2014，近地面層大氣非 Kolmogorov 亂流特徵參數測量。光學學報，第 6 卷，1-6 頁。

6. 圖表附錄

 圖片來源：Vaisala 原廠技術手冊	儀器廠牌/型號	Vaisala WXT536 多參數天氣感應器
	溫度感測範圍 /靈敏度	-52~60 ° C /0.1 ° C
	濕度感測範圍 /靈敏度	0~100% RH /0.1% RH
	氣壓感測範圍 /靈敏度	500~1100 hPa /0.1 hPa
	風速感測範圍 /靈敏度	0~60 m/s /0.1 m/s
架設地點：國防大學理工學院測站 1（桃園大溪）海拔 215m		

圖 1 Vaisala WXT536 多參數天氣感應器。

 圖片來源：R.M. YOUNG 原廠技術手冊	儀器廠牌/型號	Young model 81000 超音波風向風速計
	風向感測範圍 /靈敏度	0.0~359.9 degrees /0.1 degrees
	風速感測範圍 /靈敏度	0~40 m/s /0.01 m/s
架設地點：國防大學理工學院測站 2（桃園龍潭）/ 海拔 297m、 宜蘭縣壯圍鄉 / 海拔 34m		

圖 2 Young model 81000 超音波風向風速計。

	儀器廠牌/型號	Metone 085A 溫濕度計
	溫度感測範圍 /靈敏度	-30~50 ° C / 0.15 ° C
	濕度感測範圍 /靈敏度	0~100%RH / 0.15%RH
圖片來源：Met One Instruments 原廠技術手冊 架設地點：國防大學理工學院測站 2（桃園龍潭）/ 海拔 297m、 宜蘭縣壯圍鄉 / 海拔 34m		

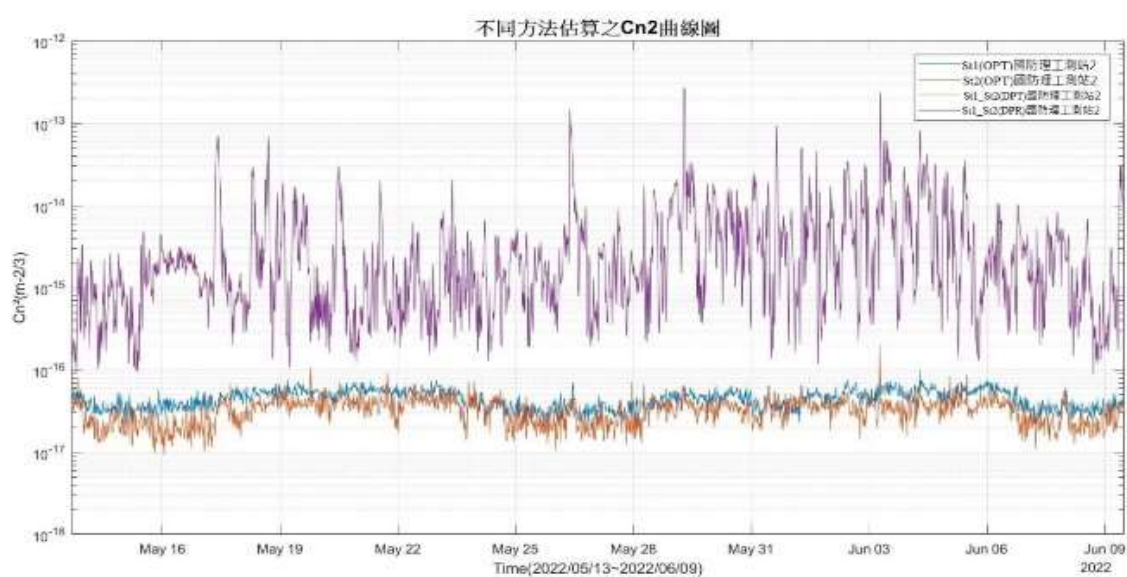
圖 3 Metone 溫濕度計。

	儀器廠牌/型號	RPG-HATPRO-G5 溫溼度輻射儀
	溫度垂直解析度 /靈敏度	200 m (0-2000 m) 400 m (2000-5000 m) 800 m (5000-10000 m) / 0.0001 K
	濕度垂直解析度 /靈敏度	30 m (0-1200 m) 200 m (1200-5000 m) 400 m (5000-10000 m) / 0.0001% RH
圖片來源：RPG-Radiometer Physics 原廠技術手冊 架設地點：國防大學理工學院測站 1（桃園大溪）海拔 215m		

圖 4 RPG-HATPRO-G5 溫溼度輻射儀。



圖 5 BLS900 大孔徑閃爍儀。

圖 6 不同方法估算之 C_n^2 曲線圖(國防大學理工學院測站 2 觀測資料)。

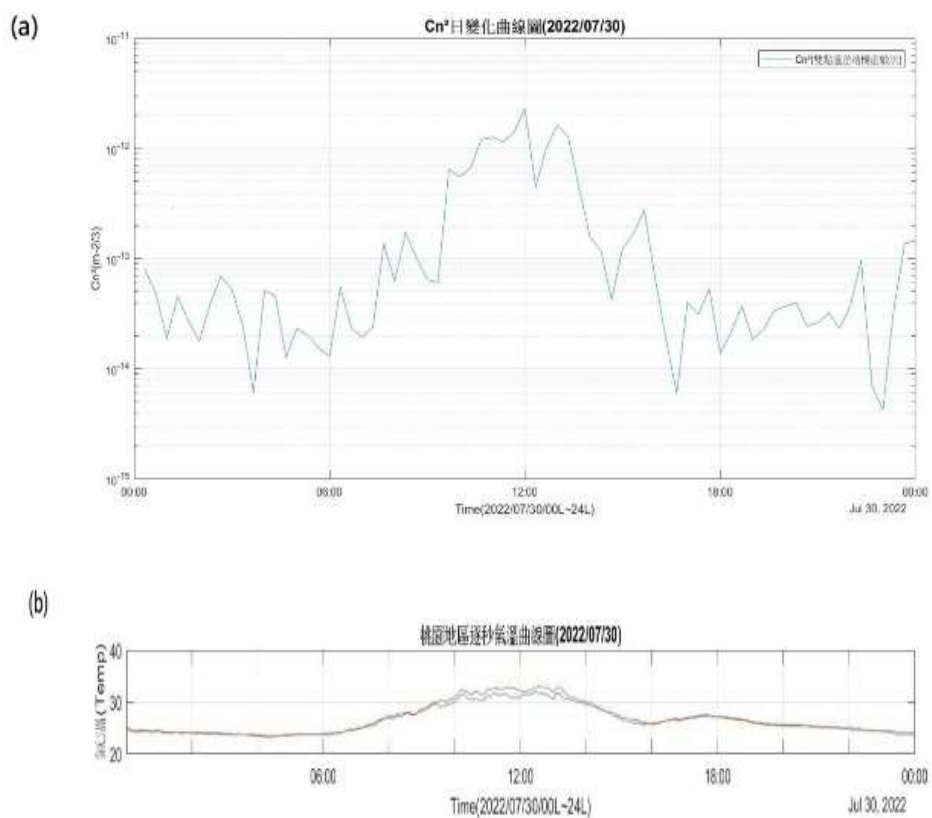


圖7 C_n^2 及氣象數據的表徵關聯性與氣溫曲線圖(2022年7月30日)，(a)為 C_n^2 日變化曲線圖，(b)為氣溫曲線圖。

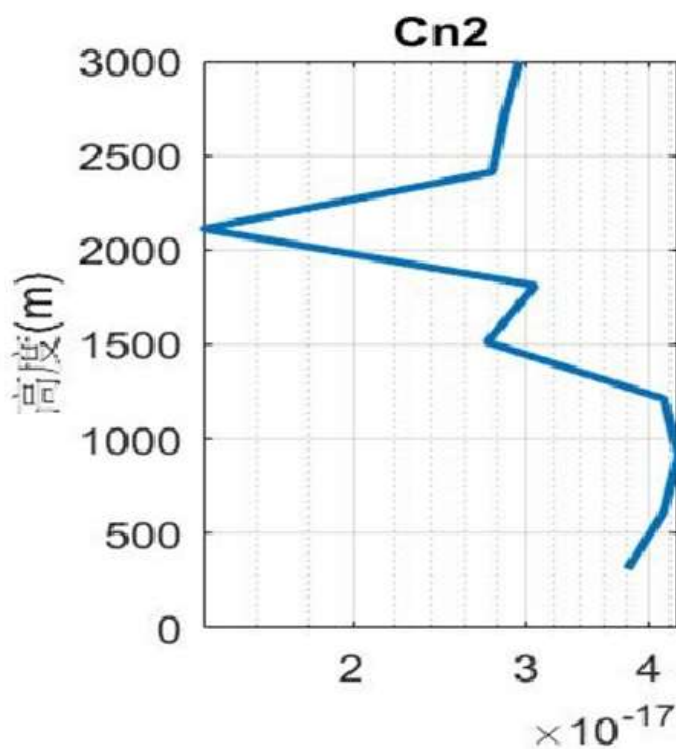


圖8 利用中央氣象署探空資料建立之高空 C_n^2 剖面圖。

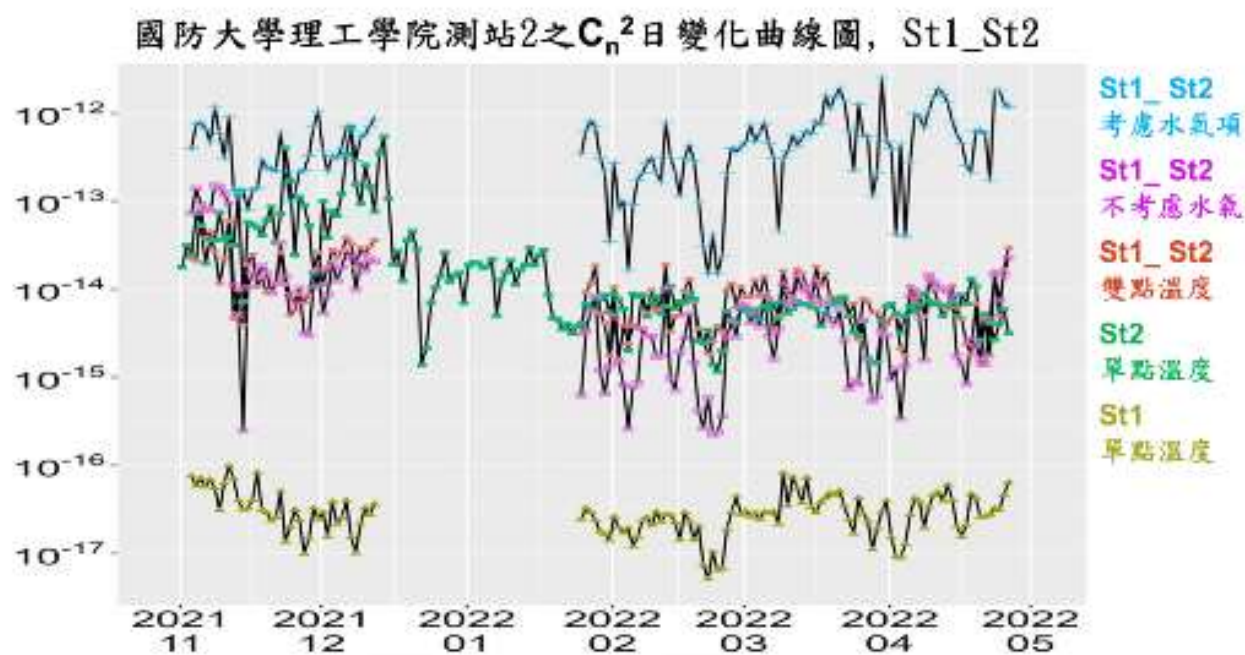


圖9 國防大學理工學院測站2運用不同方法計算之 C_n^2 日變化曲線圖。

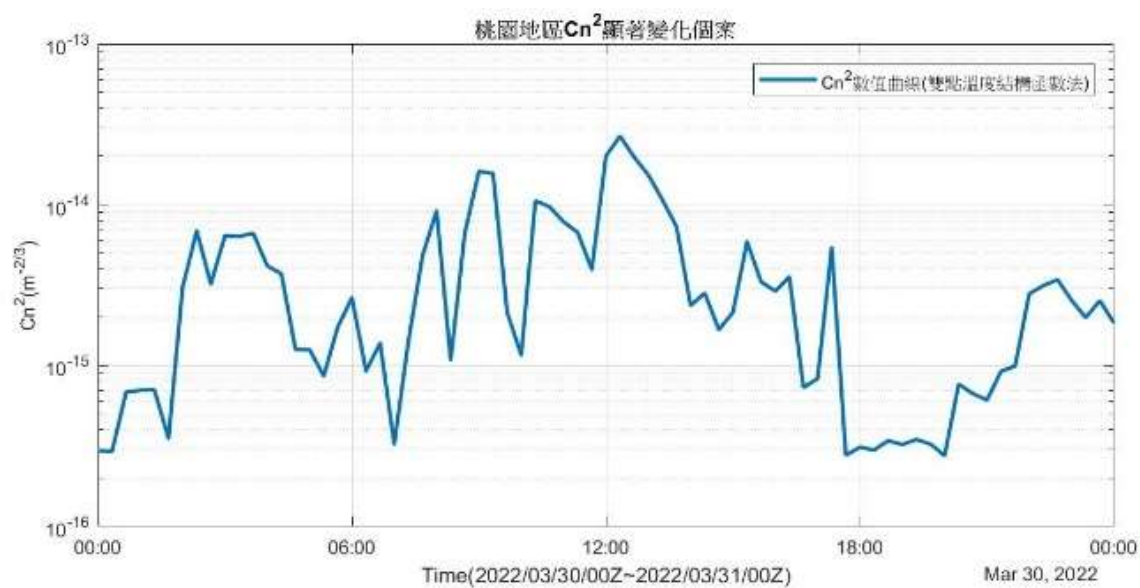


圖10 出現顯著 C_n^2 數值驟升及驟降個案。

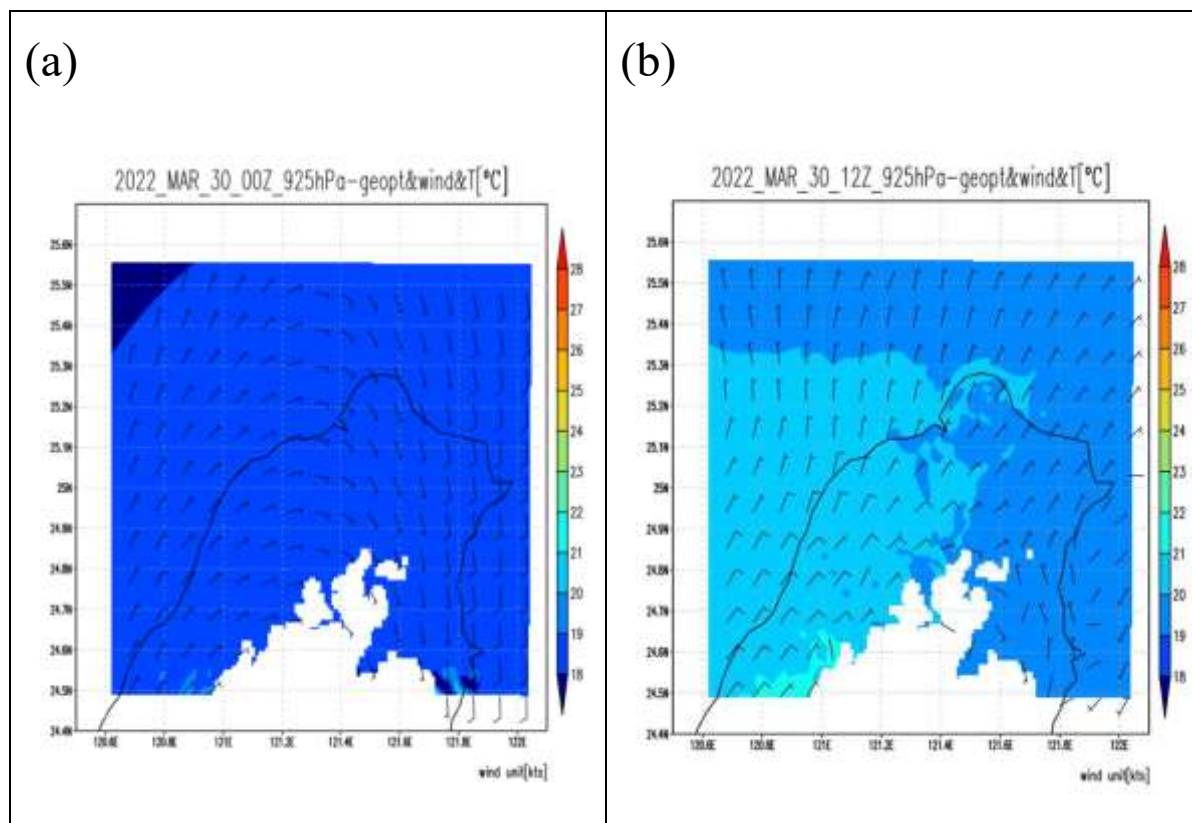


圖11 數值模式(WRF)模擬桃園地區925hPa之溫度變化，(a)為2022年3月30日0000 UTC，(b)為2022年3月30日1200 UTC。



圖12 宜蘭縣壯圍鄉位置圖(橘框處)。

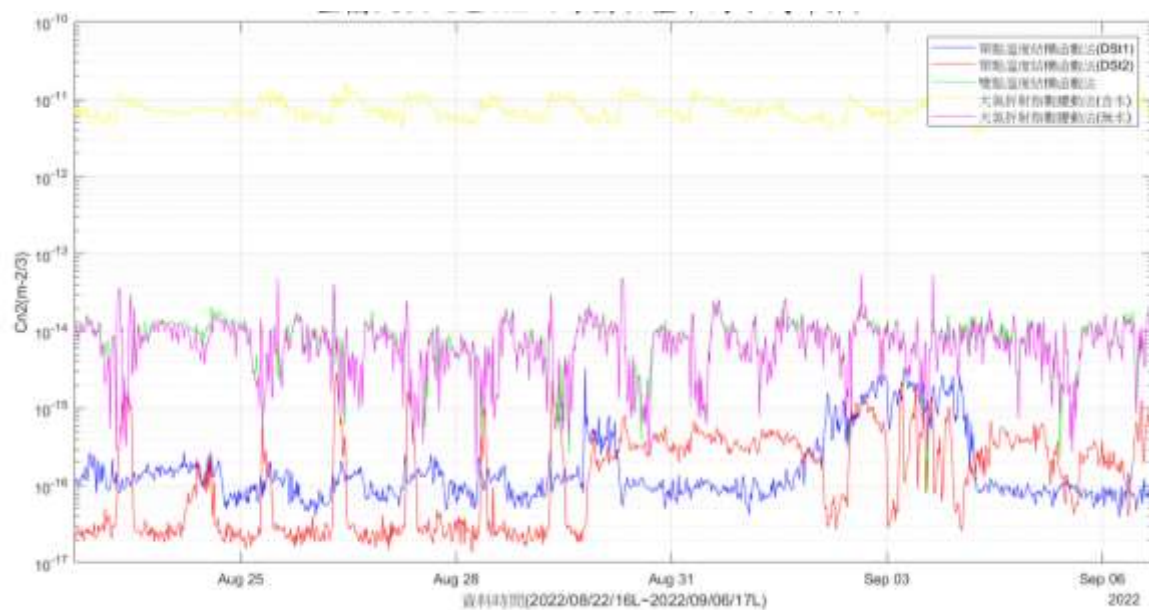


圖13 宜蘭地區 C_n^2 數值曲線圖(5種不同方式計算)。

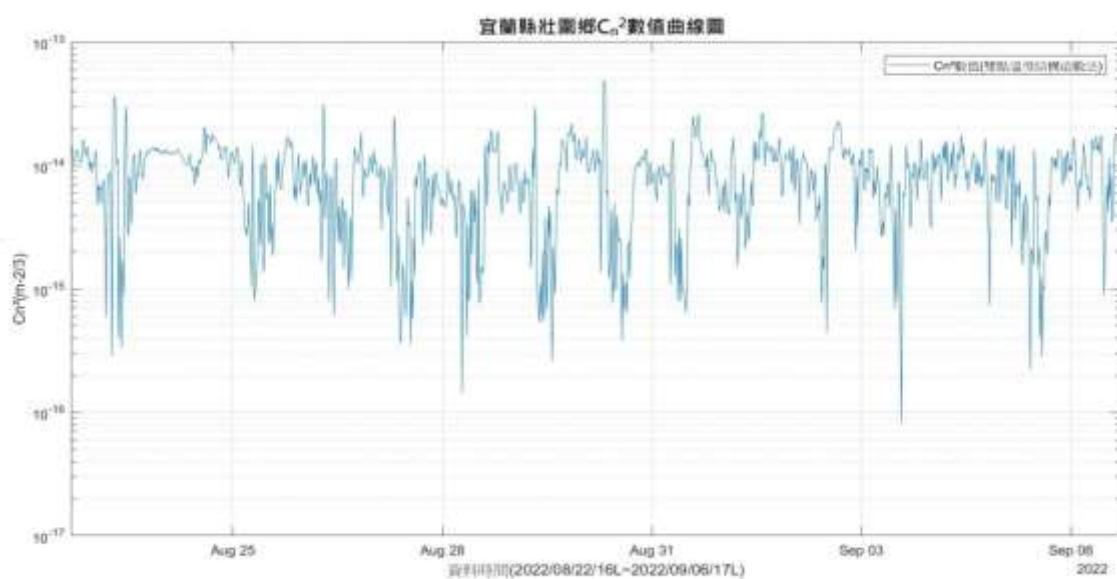


圖14 宜蘭地區 C_n^2 數值曲線圖(雙點溫度結構函數法)。

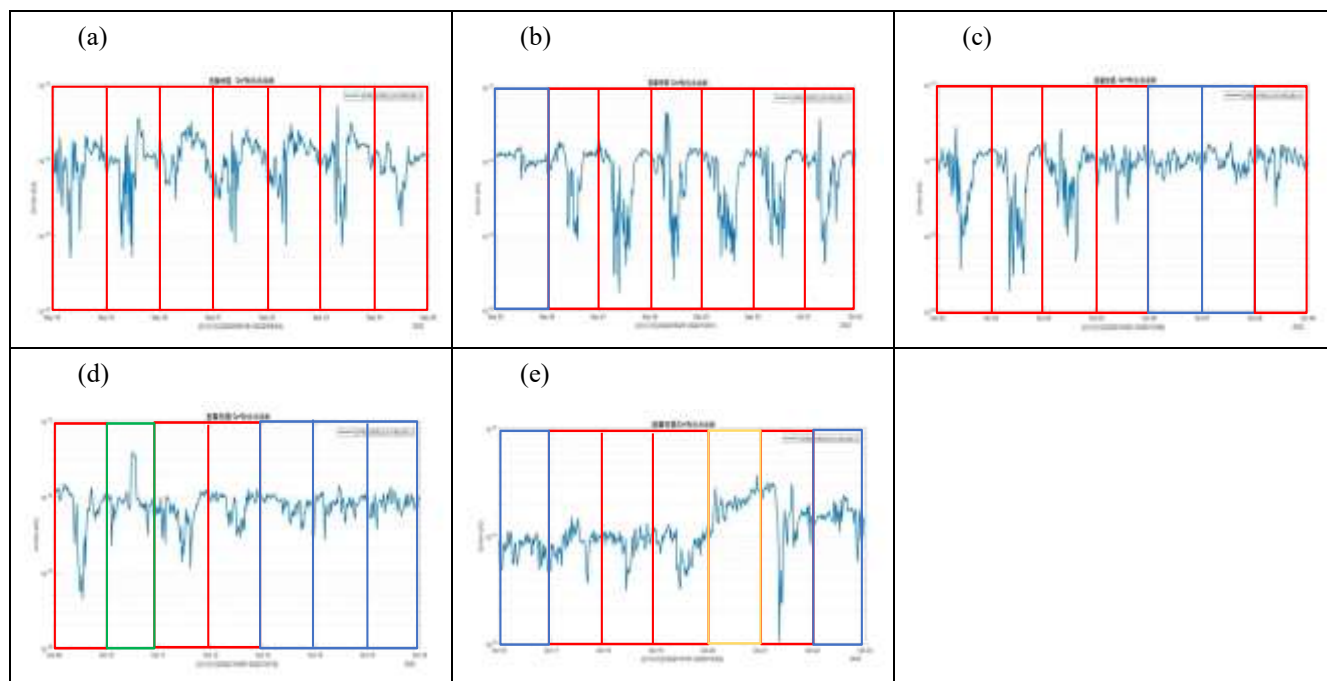


圖15 宜蘭地區 C_n^2 數值曲線圖，(a)為2022年9月18日至2022年9月25日，(b)為2022年9月25日至2022年10月2日，(c)為2022年10月2日至2022年10月9日，(d)為2022年10月9日至2022年10月16日，(e)為2022年10月16日至2022年10月23日。

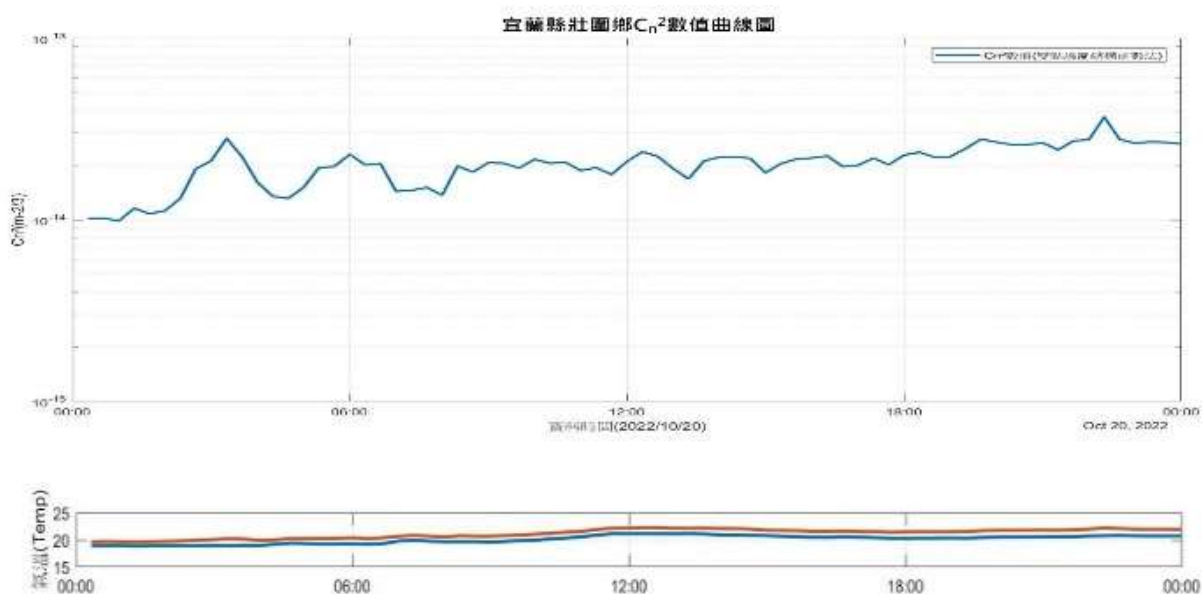


圖16 2022年10月20日 C_n^2 數值出現持續緩慢上升情形。

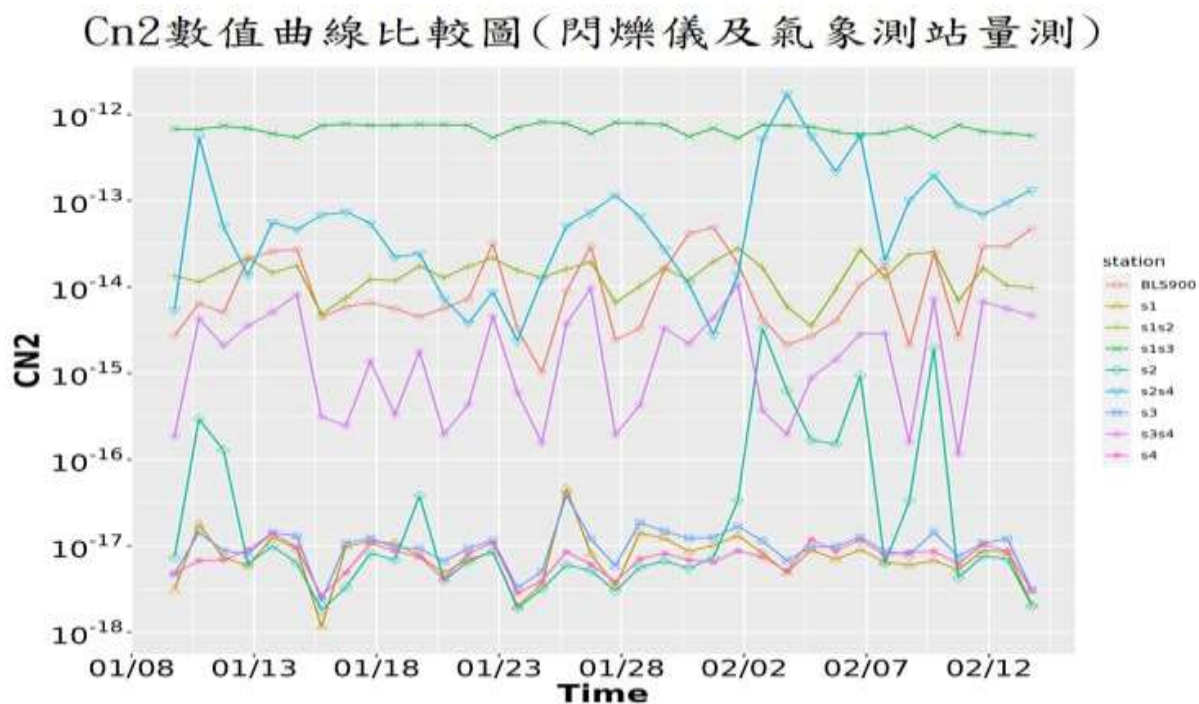


圖17 宜蘭地區 C_n^2 數值曲線比較圖(DSt1_DSt2及DSt3_DSt4與閃爍儀數值最為接近)。

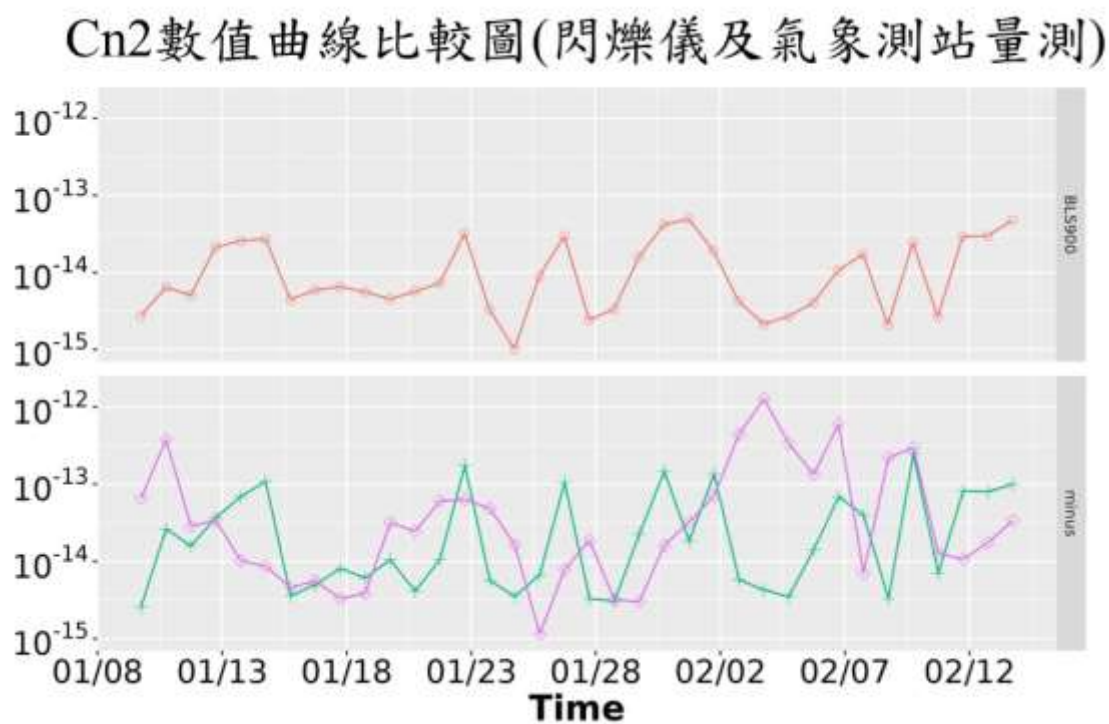


圖18 宜蘭地區 C_n^2 數值曲線比較圖(DSt2_DSt3綠、DSt1_DSt4紫)。

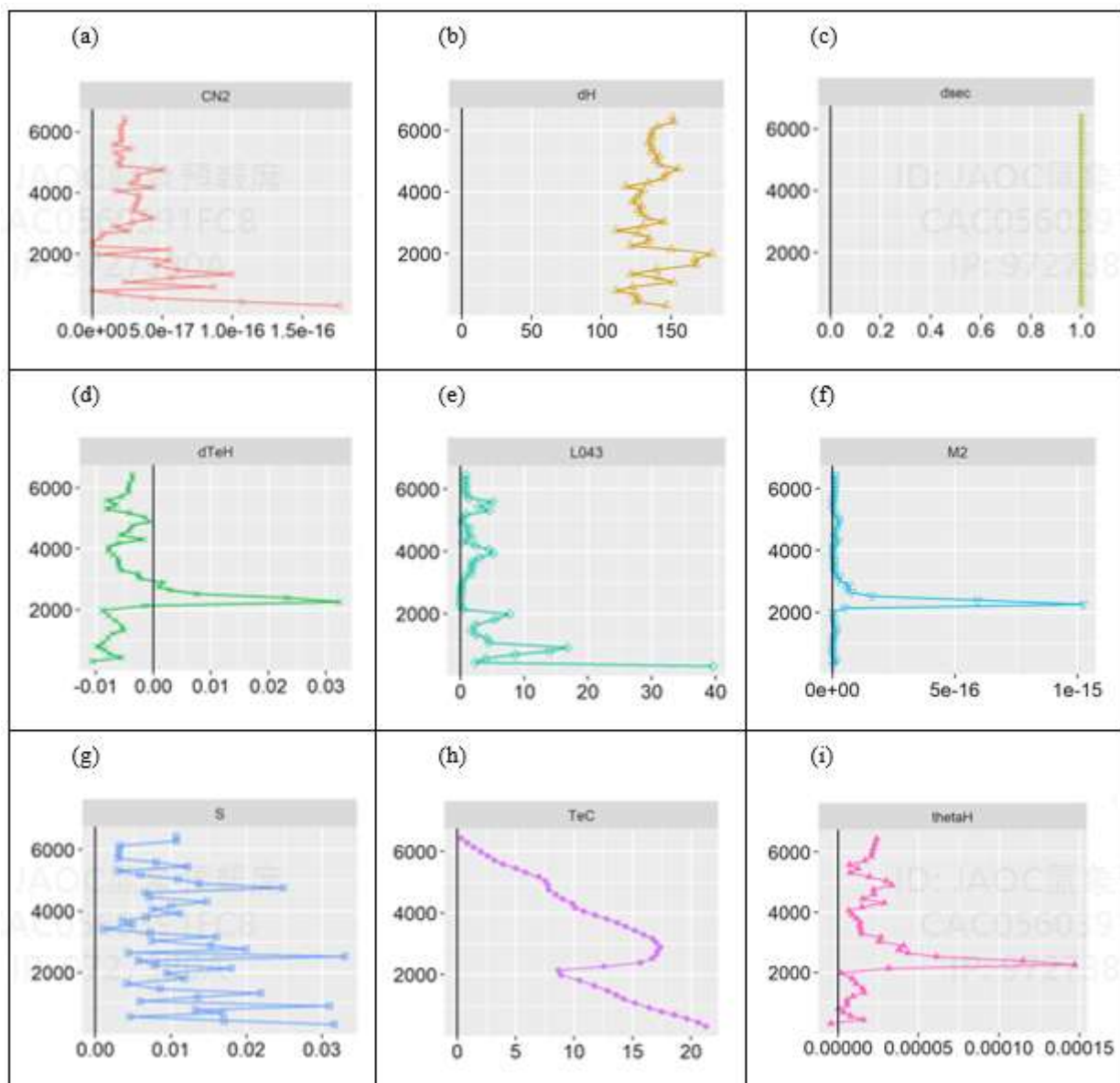


圖19 將探空資料時間尺度內插至逐秒1筆時的各參數變化情形，(a)至(i)分別為 C_n^2 、高度差、時間差、溫度梯度、亂流外尺度、位折射指數梯度平方、垂直風切及位溫梯度。

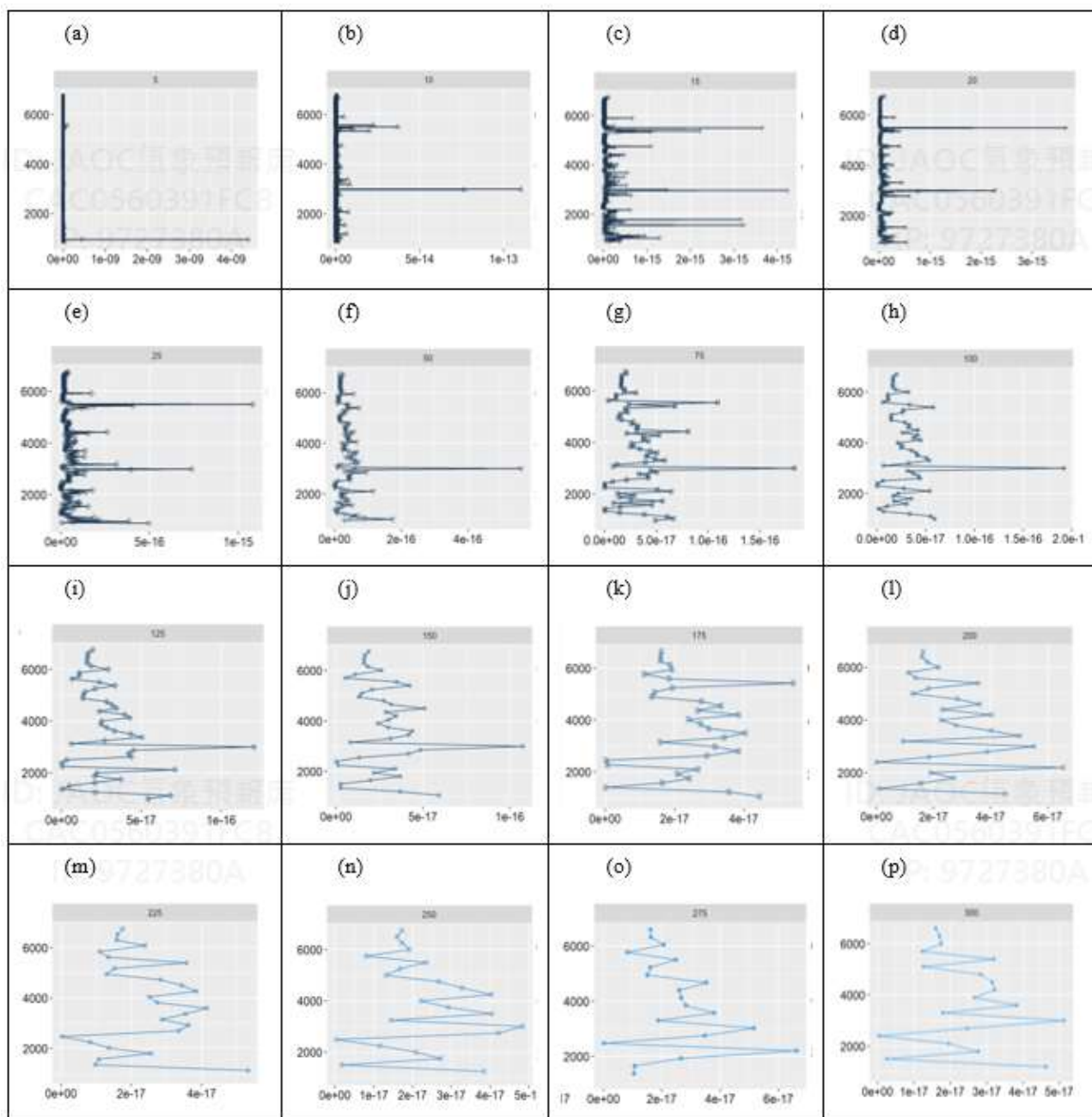


圖20 將探空資料空間尺度以不同高度內插時， C_n^2 數值的變化情形，(a)至(p)分別為高度間距5至300公尺。



圖21 本實驗所使用之兩套溫溼度輻射儀。(a)為國防大學理工學院之溫溼度輻射儀；(b)為國立中央大學之溫溼度輻射儀。

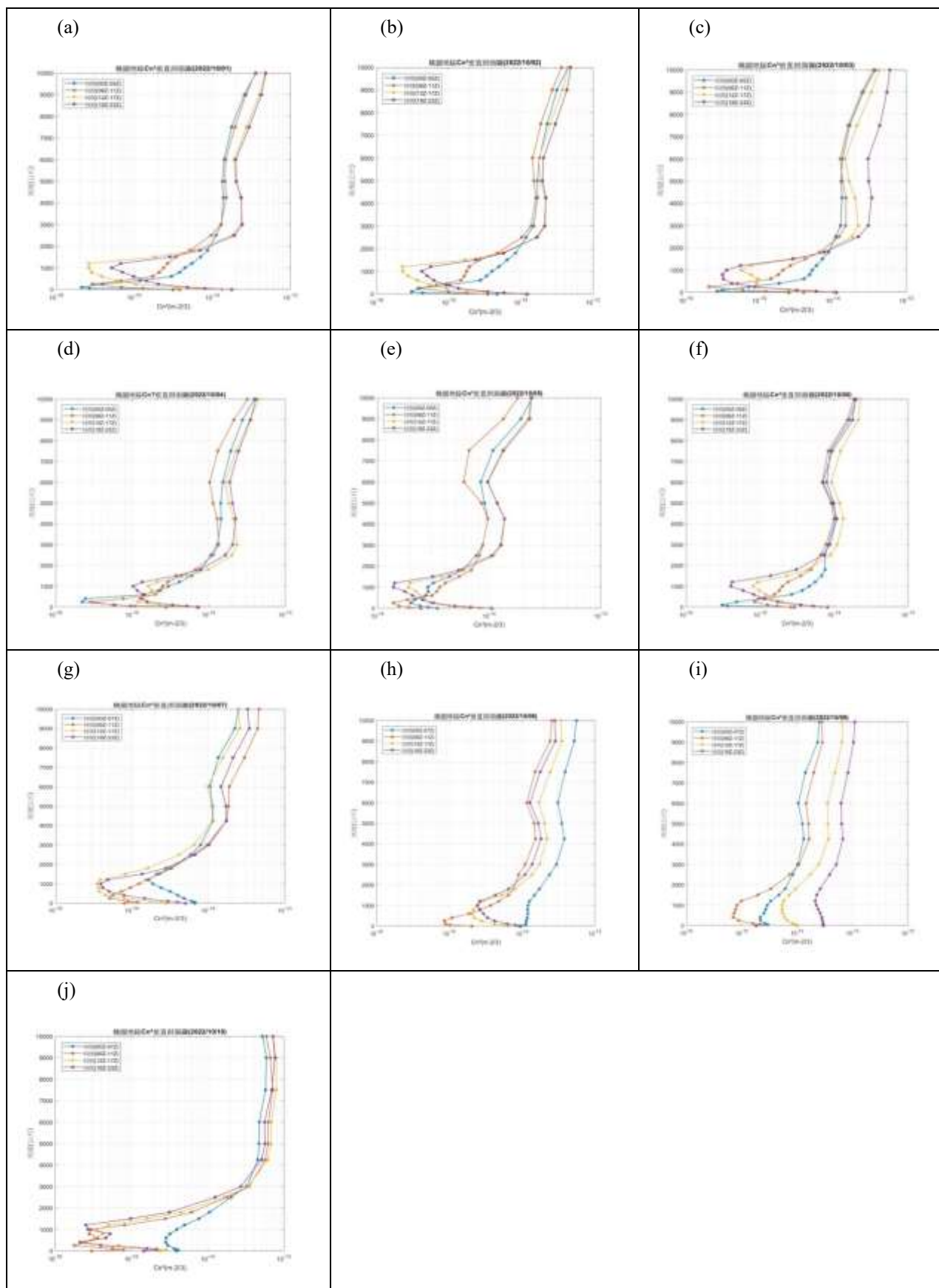


圖22 運用國防大學理工學院及國立中央大學之溫溼度輻射儀建立之高空 C_n^2 垂直剖面圖，(a)至(j)依序為2022年10月1日至2022年10月10日。



圖23 運用小型無人機加掛微型氣象站蒐集大氣參數(觀測地點:宜蘭縣三星鄉)。

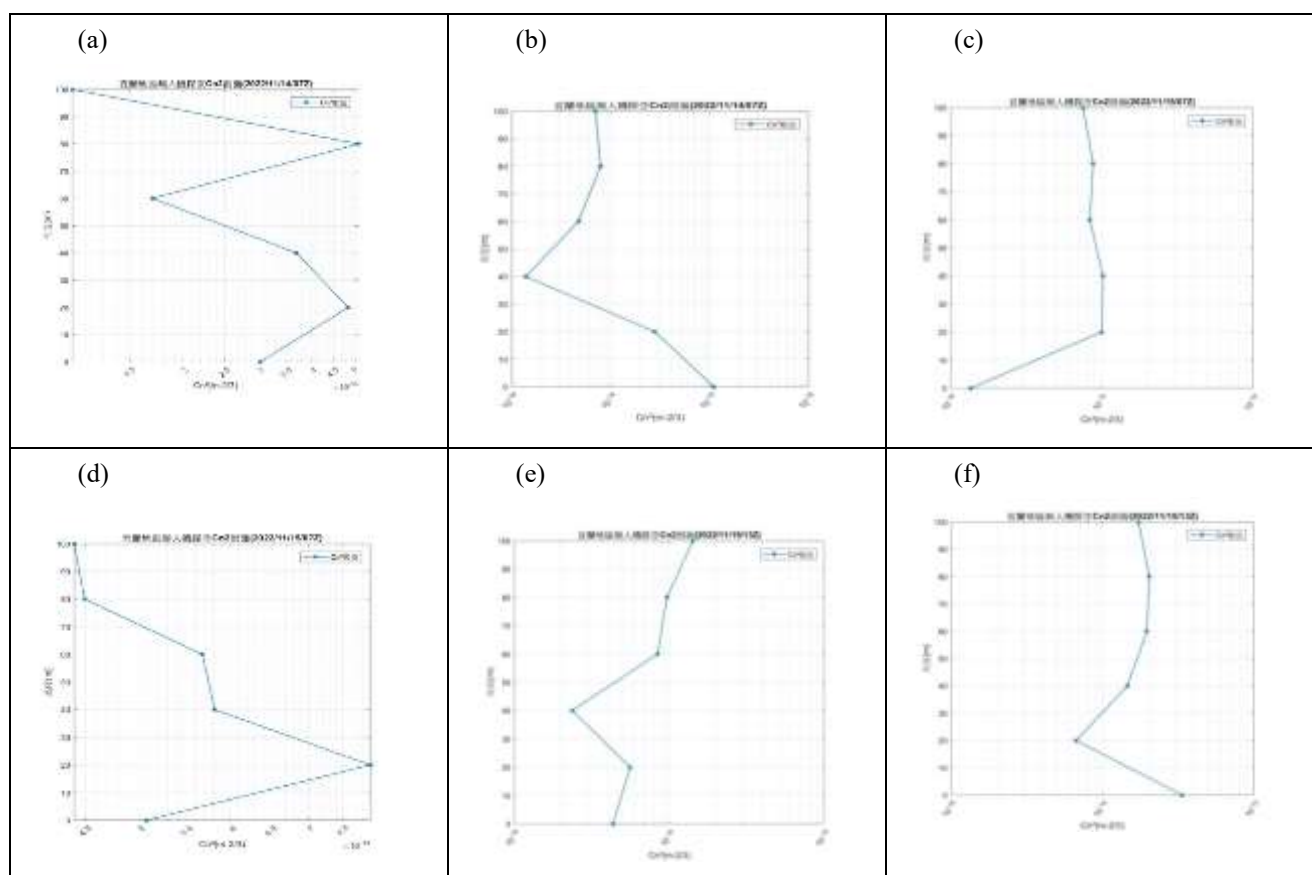


圖24 運用小型無人機加掛微型氣象站獲取之低空 C_n^2 剖面圖。

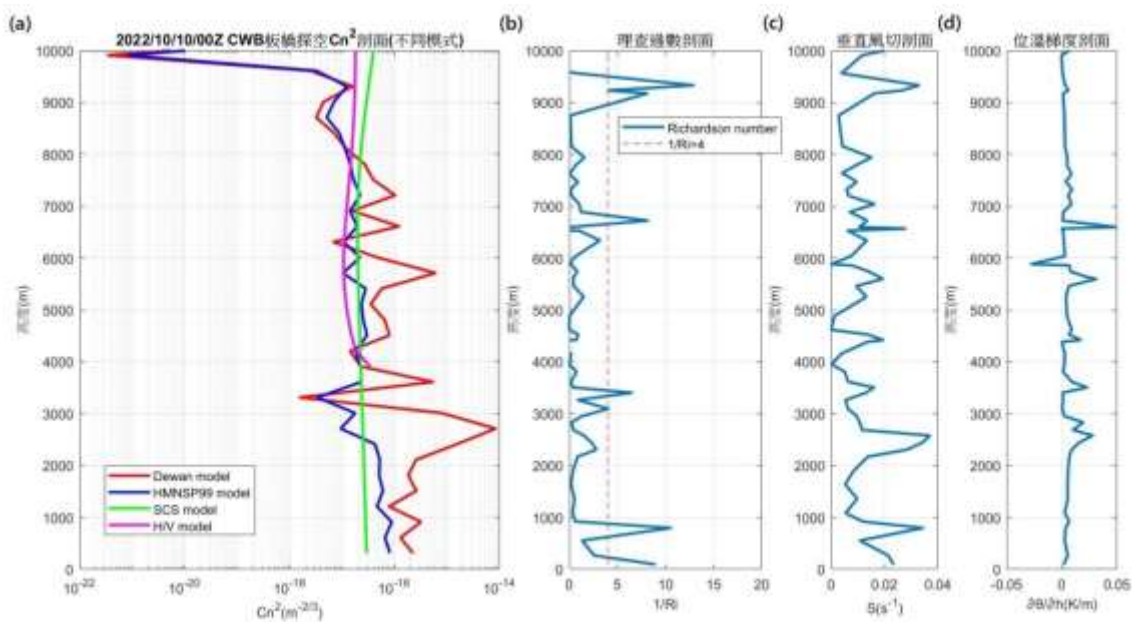


圖25 2022年10月10日0000 UTC板橋探空資料剖面，(a)至(d)分別為 C_n^2 垂直剖面、 $1/Ri$ 垂直剖面、垂直風切剖面及位溫梯度剖面。

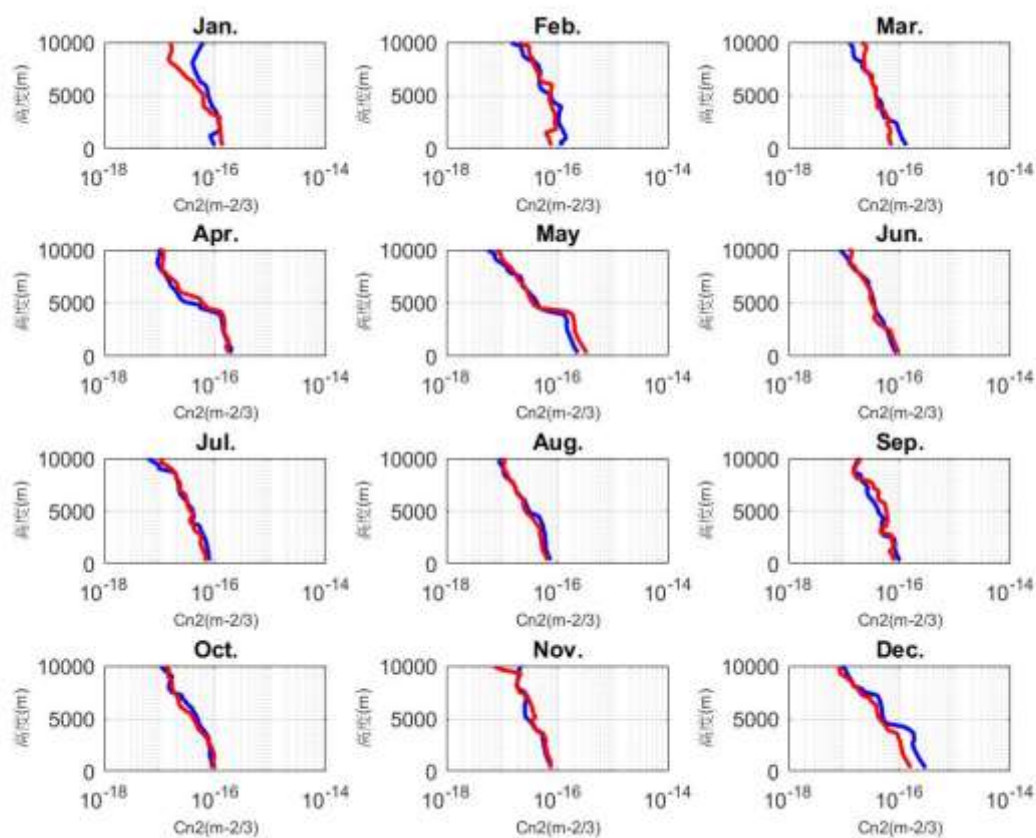


圖26 2022年逐月板橋探空 C_n^2 剖面日間(藍線)及夜間(紅線)變化比較圖。

Measurement of Characteristic Parameters of Atmospheric Turbulence in Taoyuan and Yilan Area

Min-Szu Chien¹, Shih-Chiao Tsai² and Yung-Ching Lin²

¹The Weather Center, R.O.C.A.F.,

² Department of Environmental Information and Engineering,
Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University.

Abstract

Based on the collection of atmospheric parameters in Taoyuan and Yilan, the structural constant of the atmospheric refractive index (C_n^2) was calculated, and the relevant data was corrected and sorted out, and its monthly distribution model was established by monthly statistical analysis; at the same time, the comparison of various quantities in the past The method of measuring Kolmogorov's C_n^2 , and analyzing the difference of its value under different seasons and turbulence intensity; in addition, using the high time resolution atmospheric parameter profile data obtained by radiosondes, temperature and humidity radiometers, etc., to calculate the vertical profile of C_n^2 The distribution is compared with the theoretical model to further establish the correlation between the possibility of turbulence occurrence and the change of C_n^2 vertical profile, which is expected to enhance the understanding of the vertical structure of atmospheric turbulence.

In this study, four sets of ultrasonic wind anemometers and thermohygrometers were installed in Taoyuan and Yilan to collect atmospheric parameters such as wind direction, wind speed, temperature, humidity, and air pressure every second, and use the two-point temperature structure function method and the two-point atmospheric refraction index Calculation of C_n^2 by perturbation method to compare the consistency or difference of different methods; in addition, a scintillation meter is also set up at the double-point position, by measuring the C_n^2 on the double-point path, and combining the measurement results with the double-point atmospheric data calculation C_n^2 is compared and verified, and the results show that the magnitudes of the two are the same, and the range of numerical changes is quite close. The statistical results show that C_n^2 shows a seasonal distribution of lower in winter and higher in summer, and the value in the day is relatively high; A certain degree of credibility. In addition, this study also selects the case where the C_n^2 value has significant diurnal variation for analysis, and explores the relationship between the change trend of the value and the weather system. Important conditions for turbulent flow physical quantities.

Keywords: Boundary Layer, Atmospheric Refractive Index Structure Constant, Clear Air Turbulence, Ultrasonic Wind Anemometer, Temperature and Humidity Radiometer.