

全天空照相儀用於測站觀 測總雲量之可行性評估

王建勛、楊時賢

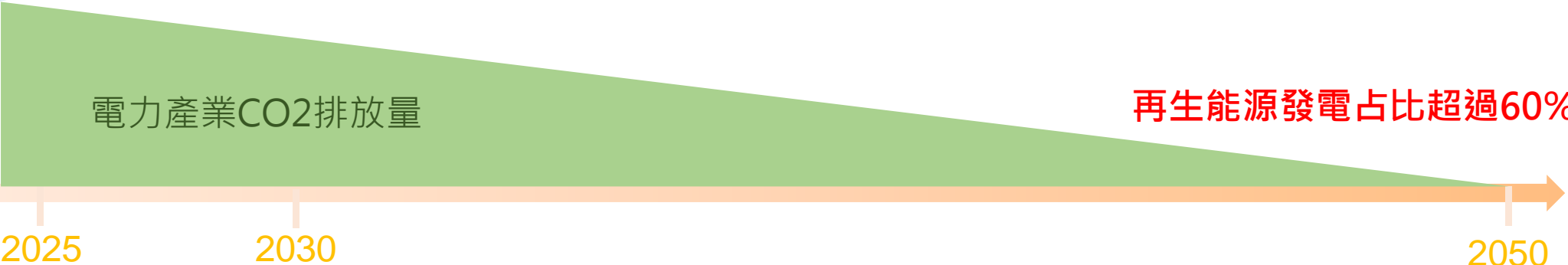
中央氣象署、長榮大學環境資訊研究中心

大綱

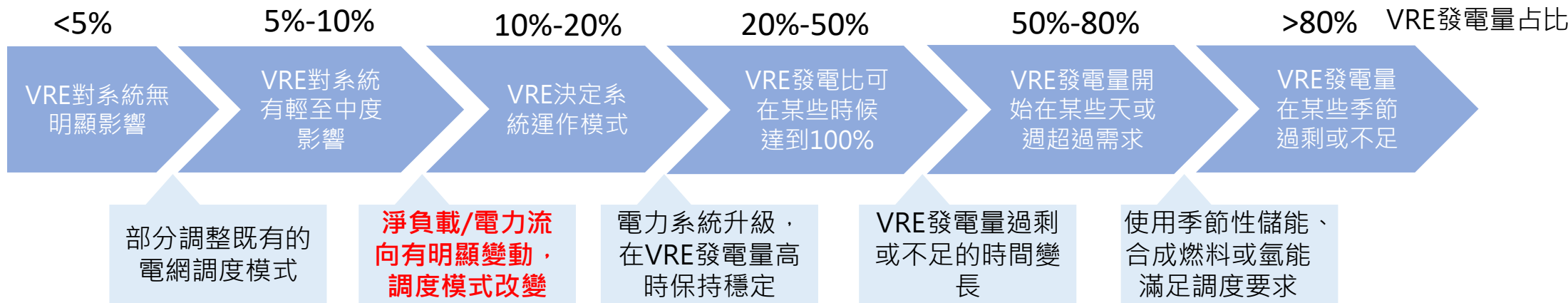
- 全天空照相儀發展緣由
- 全天空照相儀-雲量估計
 - 全天空照相儀機器種類
 - ASI方法估計雲參數(CD01~CD11)的可行性
 - 雲厚度辨識
 - 雲厚度辨識雲量、原廠FCT軟體雲量、人工觀測雲量交叉比對
 - 全天空影像與人工觀測雲量誤差分析
- 小結與未來規劃

全天空照相儀發展緣由-政策面

國發會 > 臺灣
2050淨零排放
路徑



間歇性再生能
源(Variable
renewable
energy, VRE)
併網不同階段
對電力系統的
轉變與挑戰



參考IEA與<https://vocus.cc/article/61103356fd8978000144f2eb>

國發會2050
淨零轉型12
項關鍵戰略行
動計畫



#4「電力系統與儲能」(經濟部112年核定本)

核心策略#2	提升系統各項資源調控能力以增加供電系統彈性
推動措施#2	掌握再生能源發電
行動方案	提升再生能源預測精準度
相關執行單位	台電公司

全天空照相儀發展緣由-再生能源發電量預測的應用面與方法

再生能源預測通用方法

預測時間	時間範圍	預測方法
極短期	5-60mins	Largely statistical, driven by recent measurements
短期	1-6 hours ahead	Blend of statistical, NWP models
中期	Day-ahead to 1 week ahead	Mainly NWP with corrections for systematic biases
長期	1 week to 1 year, Seasonal	Based largely on analysis of cyclical patterns

再生能源預測常用的方法

- Persistence models
- Statistical methods (ARIMAX, Grey,...)
- AI technology based on ANNs, Fuzzy logic, RNN,...
- Hybrid approaches
- NWP methods
- Probabilistic forecasts

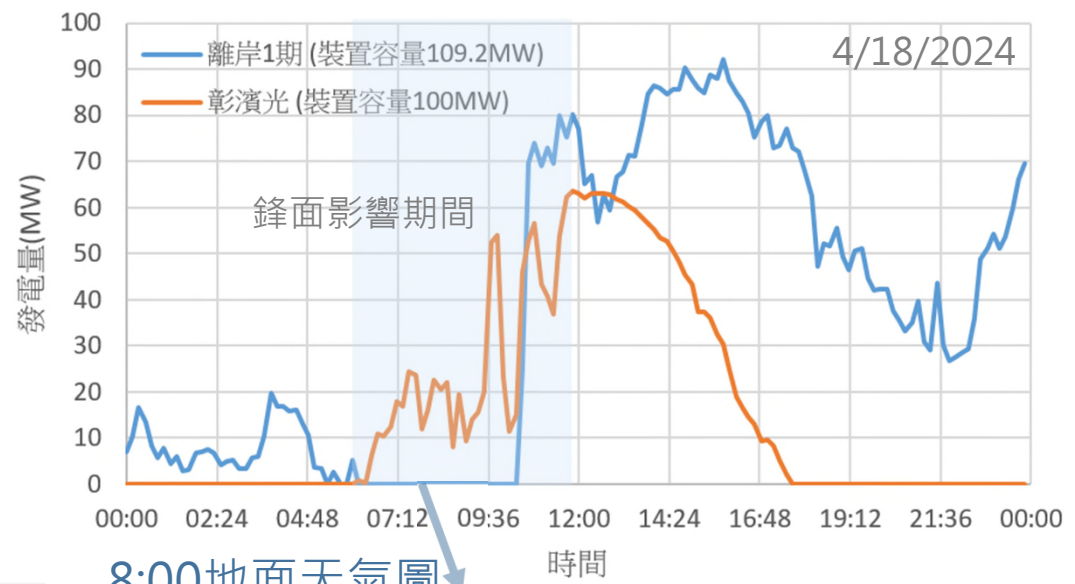
再生能源預測在電力產業的應用

預測的時間範圍	應用領域	利害關係人
極短期(0-6小時)	日內能源市場交易 負市價控制限電 正確啟動調節電源 (二級和三級儲備)	電力交易員
	再生能源對市場價格的影響	一般投資者
	電力供需平衡(調頻服務) 發電機組重新調度(負載追隨) 發電廠限電	電網營運商、負載調度中心、獨立系統營運商
短期(6-48小時)	日前能源市場交易 參與輔助服務市場 再生能源對市場價格的影響	電力交易員
	發電機組派遣(日前機組排程) 負載流計算 日前擁堵預測	電網營運商、負載調度中心、獨立系統營運商
中期(2-10天)	長期市場交易	電力交易員
	提前兩天擁堵預報 提前一周規劃	電網營運商、負載調度中心、獨立系統營運商
	中期維修計劃	再生能源營運商

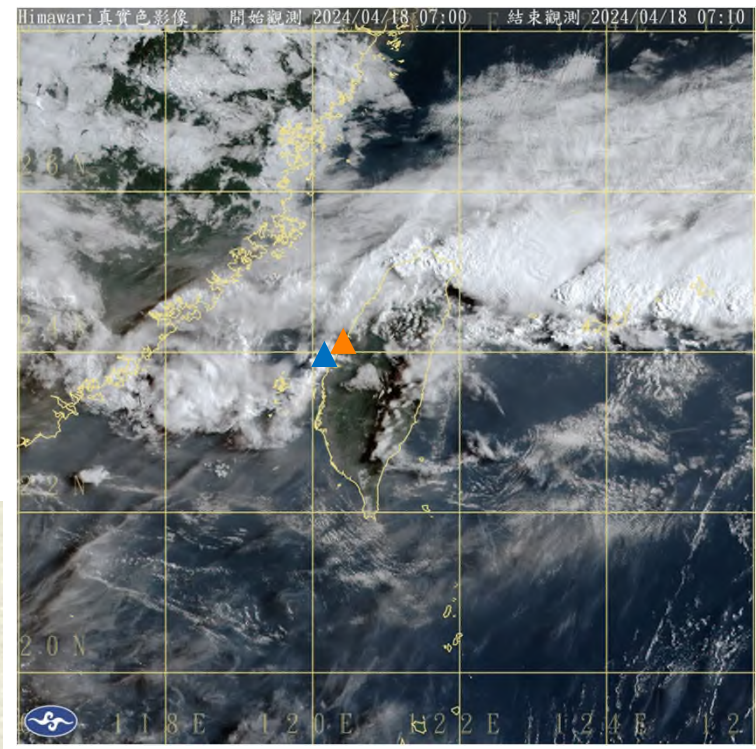
全天空照相儀發展緣由 – 再生能源發電量的變化性來自氣象

風能&太陽能發電的變化性(variability) [NREL, 2016]: 發電產出取決於當下能接收的風能&太陽能狀態

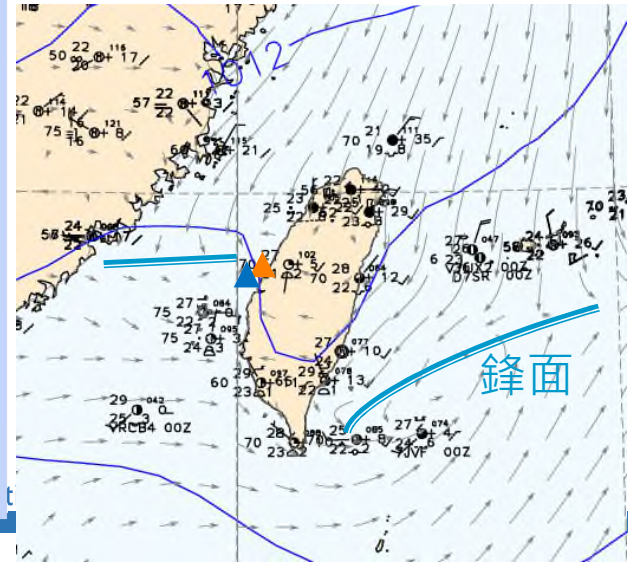
- 2024年4月18日當天上午鋒面來襲，中北部有大雨，約在中午鋒面通過臺灣後放晴
- 風能&太陽能發電廠在上午時段發電量有急遽變化



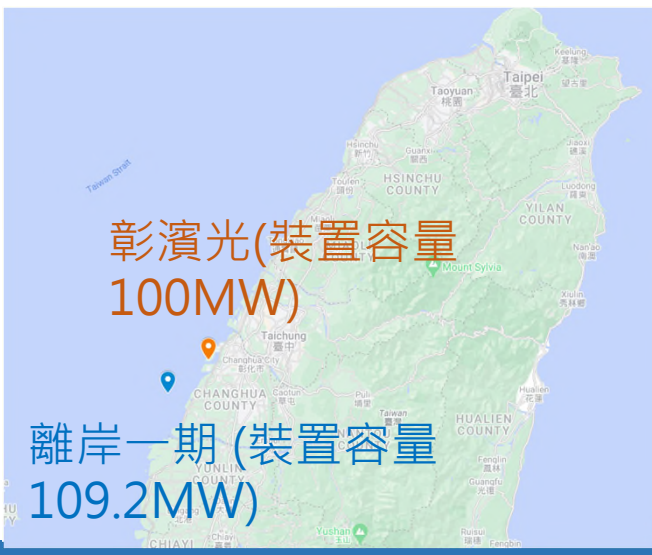
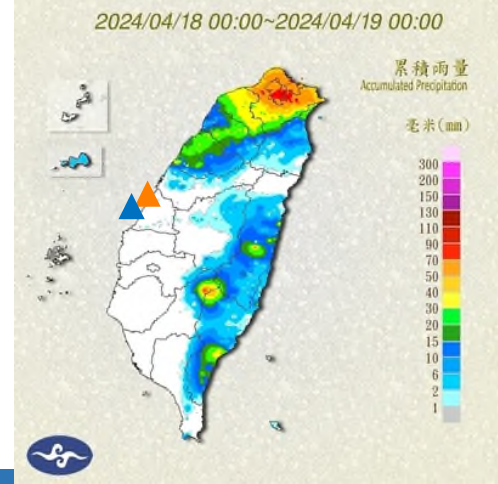
7:00~12:00衛星雲圖



8:00地面天氣圖



全日累積雨量圖



全天空照相儀發展緣由 – 目標

- 依據國發會臺灣2050淨零排放路徑，2050年我國的**再生能源占比將增加至60到70%(其中太陽光電占40%左右)**。而隨著再生能源占比的增加，尤其是大型光電案廠的開發建置，因**雲移入移出**造成的極短期發電量劇烈變化，**對電網的調度造成極大的衝擊與風險**。而極短期的太陽光電發電量預測唯有賴高時空解析度的監測方能解決。
- 目標：利用全天空照相儀**即時、高時空解析度**的特性，補足現有衛星觀測與數值天氣預報在極短期預報上之不足，以**先研發、再示範、後推廣**的方式，逐步建立太陽光電案場極短期發電量預測技術。
- 隨著WMO規範，各國測站觀測持續改為自動化觀測，**本署亦預計在今年底結束所有測站對雲量的人工觀測，改為由衛星提供總雲量估計**。而全天空照相儀亦可提供相關雲資訊的估計，惟仍處於研究開發階段，未被納入WMO正式規範中。

雲觀測紀錄歷程



二、三等氣象站：24小時觀測；四等氣象站：05~21時

- 雲量觀測：02、05、08、09、11、14、17、20、21、23，08~17逐時填報總雲量

105年1月1日，停止夜間觀測(除南區、板橋、花蓮、台中及台東外)

- 雲量觀測：~~02~~、05、08、09、11、14、17、20、21、~~23~~，08~17逐時填報總雲量

106年1月1日，基隆、梧棲及蘇澳，調整觀測班務為07:30~18:30

- 雲量觀測：~~02~~、05、08、09、11、14、17、20、21、~~23~~，08~17逐時填報總雲量

108年11月1日，天氣圖示產製作業正式上線，同步停止非3小時之逐時人工觀測作業

110年6月22日，高雄搬遷至臨時辦公室，調整觀測班務為07:30~18:30

110年10月1日，板橋、新竹、嘉義及宜蘭，調整觀測班務為07:30~18:30

南區、花蓮、台中及台東維持24小時觀測外，其餘測站取消05時觀測作業

- 雲量觀測：~~02~~、~~05~~、08、09、11、14、17、20、21、~~23~~

111年1月1日，觀測作業型態分成11小時作業及16小時作業，人工觀測時間調整為08~17

- 雲量觀測：~~02~~、~~05~~、08、09、11、14、17、~~20~~、~~21~~、~~23~~

112年

113年

114年

*to be continued

逐步停止人工觀測作業

112年4月1日，蘇澳站

113年6月12日，後龍站自建站起實施自動化觀測作業(無人工觀測作業)

113年9月13日，大武站

113年9月26日，古坑站自建站起實施自動化觀測作業(無人工觀測作業)

114年1月1日，新北、花蓮、南區、台北、基隆、高雄、新竹及田中

114年3月1日，宜蘭、金門、澎湖、嘉義、台中及台東

114年3月17日，日月潭

- 維持人工觀測作業(10站)：鞍部、竹子湖、新屋、東吉島、阿里山、玉山、恆春、蘭嶼、彭佳嶼及馬祖

114年7月1日，竹子湖

115年1月1日，全面停止人工觀測作業

全天空照相儀機器種類及觀測原理

- **典型可見光 ASI (Visible Spectrum ASIs) (30萬/台) :**
 - 典型可見光 ASI 系統使用數位攝影機 (CCD 或 CMOS 感測器) 搭配魚眼鏡頭或反射式光學元件 (如球面鏡) 來捕捉整個天空穹頂的影像。
 - 這些系統通常利用光譜濾鏡 (例如紅、綠、藍或中性密度濾鏡) 來區分雲和晴空。其原理基於大氣散射特性：晴空因瑞利散射 (Rayleigh scattering) 而呈現藍色，而雲滴或冰晶主要進行米氏散射 (Mie scattering)，呈現白色或灰色。透過分析不同顏色通道的強度比例 (如紅藍比)，可以區分雲像素和晴空像素。部分系統具備多光譜能力，可獲取更多光譜資訊以增強辨識能力。
- **高動態範圍 (High Dynamic Range, HDR)可見光 ASI (150萬/台) :**
 - 為了處理天空中亮度差異極大的情況 (尤其是在太陽附近區域)，高動態範圍 (High Dynamic Range, HDR) 成像技術被廣泛應用。HDR 透過拍攝多張不同曝光度的影像並將其融合，可以避免感測器飽和，保留亮區 (如雲) 和暗區 (如藍天) 的細節。
- **熱紅外 ASI (Thermal Infrared, TIR ASIs) (300萬/台) :**
 - TIR ASI 系統使用微測輻射熱計 (microbolometer) 陣列感測器，搭配特殊光學元件 (如可透紅外光的鍍透鏡或反射球面鏡)，在 8-14 μm 的大氣窗口波段進行觀測。
 - 其運作原理是偵測雲與晴空之間的熱輻射差異。雲通常位於較高、較冷的大氣層，且發射率接近 1，因此其紅外輻射亮度溫度較低；而晴空 (大氣氣體) 溫度較高，發射率較低。透過測量天空的紅外輻射亮度溫度分佈，可以辨識出溫度較低的雲區。
 - TIR ASI 的關鍵優勢在於其全天候 (白天和夜晚) 的觀測能力，因為紅外輻射不受太陽光影響。

全天空照相儀-雲量估計

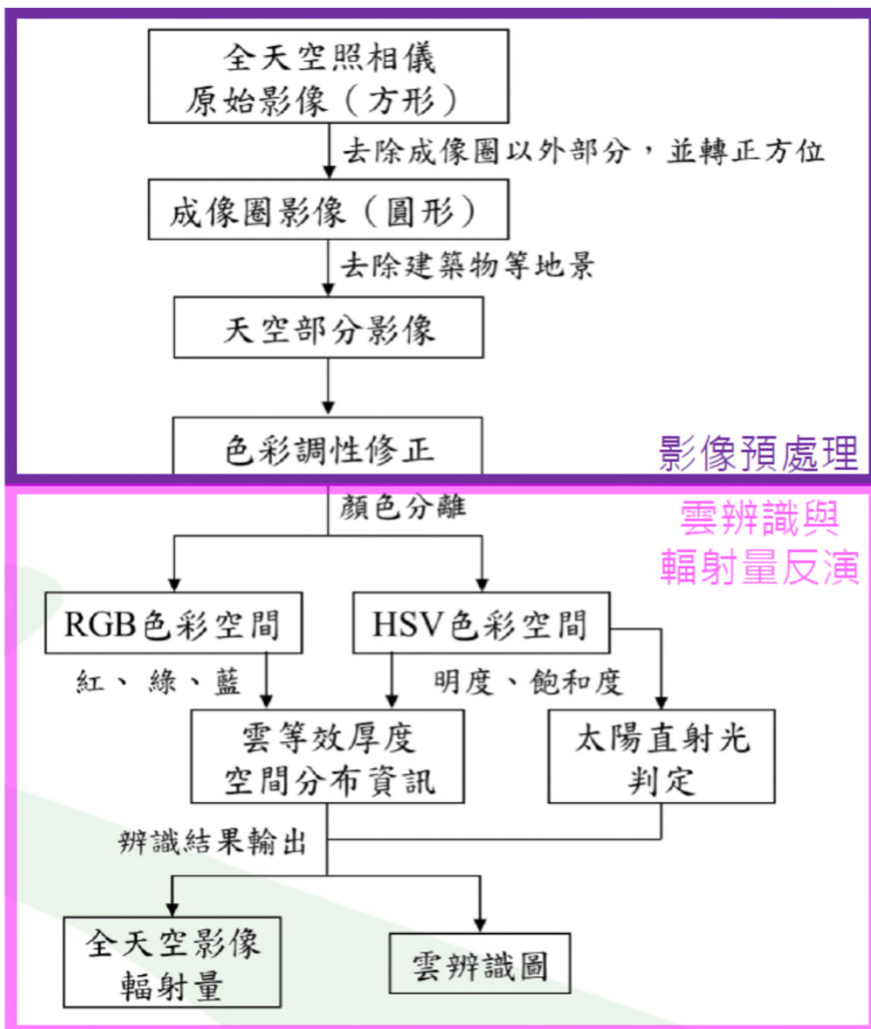
ASI方法估計雲參數(CD01~CD11)的可行性

觀測參數 (代碼)	主要 ASI 方法	核心技術/原理	評估可行性	主要限制/挑戰
總雲量 (CD11)	可見光/TIR 閾值、CSL、ML/DL (分類/分割)	光譜差異 (紅藍比)、影像分割、機器學習模式識別	高/成熟	薄雲偵測、太陽周圍/地平線問題、日出/日落、氣膠影響
分層雲量 (CD04, 05, 06)	(單一 ASI 無直接方法) 需結合高度資訊	需外部高度資訊或假設 (缺乏直接 3D 資訊)	低/具挑戰性	缺乏直接高度資訊、多層雲遮蔽、難以將雲像素準確歸因於高/中/低層
雲幕高 (CD10)	立體 ASI (2台以上組成)	立體視覺 (視差)、三角測量法、幾何標定	中/研究階段 (趨於成熟)	準確度隨高度下降、無特徵雲匹配困難、標定/同步要求高、空間 vs. 點測量差異
分層雲高 (CD01, 02, 03)	立體 ASI (2台以上組成)	同上 (立體視覺、三角測量)	低/具挑戰性	難以同時準確測量多個獨立雲層的雲底高、遮蔽問題、演算法複雜性
分層雲狀 (CD07, 08, 09)	ML/DL (特徵提取+分類器 / 端到端 CNN/Transformer)	紋理/顏色/結構分析、深度學習特徵提取、影像分類與分割	低/具挑戰性	缺乏高度資訊、類內變異/類間相似、多層/混合雲、標註數據主觀性/缺乏、分類方案簡化

日射量反演-雲厚度辨識法

雲厚度辨識流程與方法

◆ 全天空影像處理與分析流程



◆ 雲等效厚度辨識門檻值

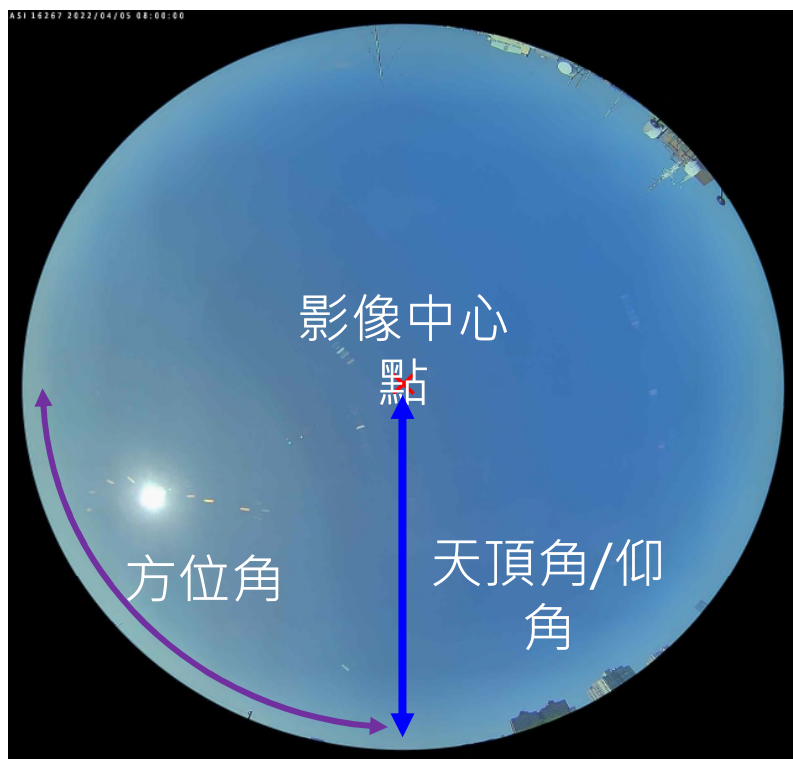
雲厚度	門檻值 1	門檻值 2	門檻值 3
輻射量情境	門檻值： $600 \leq (R+G+B)$ 直射光範圍內有10%以上像素達門檻為高輻射量情境 未滿10%為低輻射量情境		
太陽直射光	$240 \leq V$ 且 $S < 20$		
強光區	$240 \leq V$ 且 $20 \leq S < 50$	$220 \leq V < 240$ 且 $S < 50$	$600 \leq (R+G+B)$
晴空	$160 \leq V$ 且 $100 \leq S$	$R < 100$ 且 $100 \leq S$	
厚度 1	$160 \leq V$ 且 $80 \leq S < 110$ 且為高輻射量情境	$160 \leq V$ 且 $S < 135$ 且 ($140 \leq G$ 或 $120 \leq R$)	$110 \leq V < 150$ 且 $40 \leq (B-R)$
厚度 2	$160 \leq V$ 且 $55 \leq S < 80$		
厚度 3	$160 \leq V$ 且 $45 \leq S < 55$	$160 \leq V$ 且 $125 \leq R < 145$	
厚度 4	$160 \leq V$ 且 $S < 45$	$160 \leq V$ 且 $S < 60$ 且 $120 \leq R$	$160 \leq V$ 且 $80 \leq S < 110$ 且為低輻射量情境
厚度 5	$145 \leq V < 160$ 且 $35 \leq S < 45$	$160 \leq V$ 且 $S < 70$ 且 $120 \leq R$	
厚度 6	$145 \leq V < 160$ 且 $25 \leq S < 35$	$160 \leq V$ 且 $S < 80$ 且 $105 \leq R$	
厚度 7	$145 \leq V < 160$ 且 $S < 25$		
厚度 8	$145 \leq V < 160$ 且 $45 \leq S$	$145 \leq V < 160$ 且 $G < 140$	
厚度 9	$140 \leq V < 145$		
厚度 10	$V < 140$		

日射量反演-雲厚度辨識法

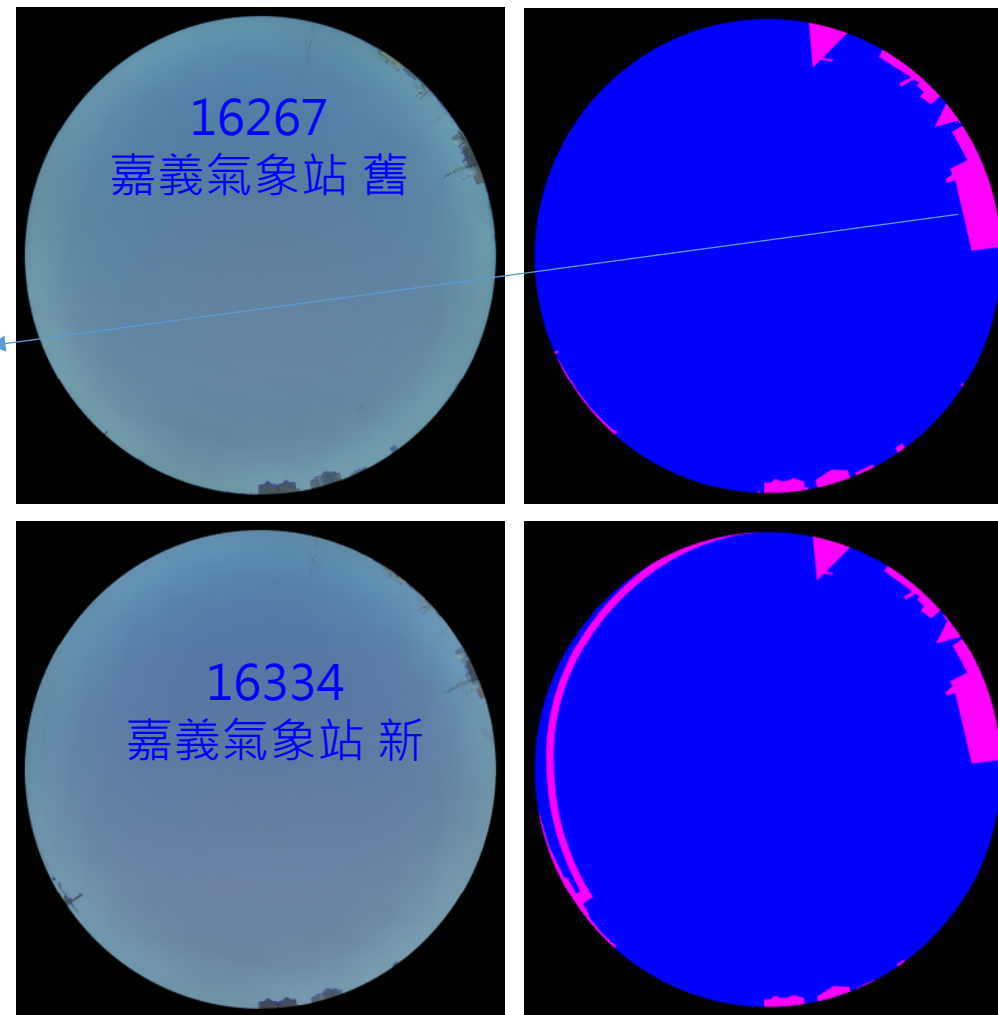
➤ 影像預處理-影像網格定位與校正

2022-04-05 08:00 LT

16267 嘉義氣象站



➤ 影像預處理-移除地景



● 移除的地景

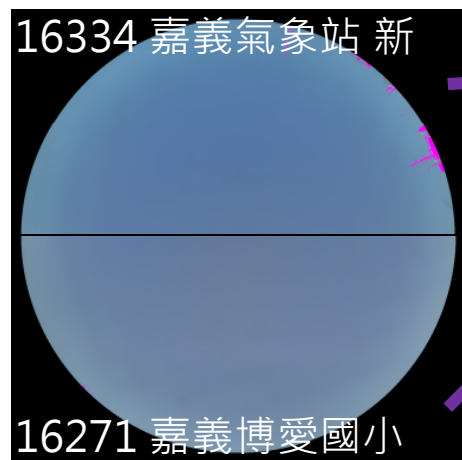
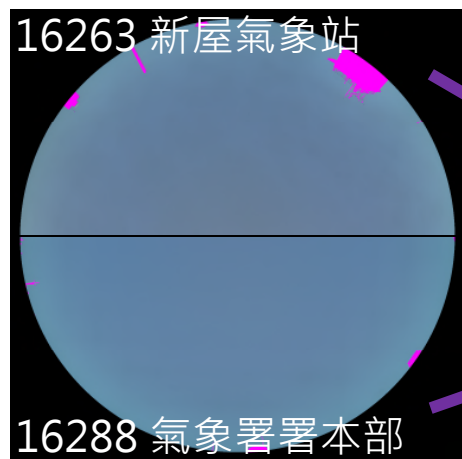
- 全天空照相儀安裝時，位置及姿態難以達到完全準確
- 透過影像網格定位與校正，提供準確方位角及仰角，後續應用於
 - 計算太陽在影像中的位置
 - 雙相機、單相機測雲高
 - 雲資訊二維網格化

日射量反演-雲厚度辨識法

➤ 影像預處理-各測站色彩調性修正數值

2024a版以後適用 (2024-07-10更新)

數值訂定依據：(1) 平均色彩特性 (2) 暴力搜尋法測試修正效果



區域	全天空照相儀測站	平均色彩特性			色彩調性修正值		
		紅	綠	藍	紅	綠	藍
北部	16264 台大大氣系館	103	124	156	0	0	0
	16265 大安森林公園	100	125	155	0	0	0
	16266 新屋氣象站	103	124	153	0	0	0
	16288 氣象署本部	94	126	163	+10	0	-10
	16325 新竹氣象站	88	127	160	+15	0	-7
中部	16272 後龍氣象站	90	128	153	0	0	0
	16270 田中氣象站	99	122	156	0	0	0
	16267 嘉義氣象站 舊	93	127	157	+5	-7	0
	16334 嘉義氣象站 新	95	122	160	+4	0	-4
	16271 嘉義博愛國小	99	121	157	0	0	0
南部	16263 南區氣象中心	87	124	160	0	0	0
	16314 高雄氣象站	93	121	163	0	0	0
	16268 恆春氣象站	94	124	160	0	0	0
東部	16318 宜蘭氣象站	99	124	158	+5	0	-5
	16319 台東氣象站 舊	93	123	163	+8	0	-3
外島	16320 澎湖氣象站	94	128	160	+5	0	-5
	16321 金門氣象站	86	129	159	+8	0	-5
	16322 馬祖氣象站	94	128	157	+5	0	-5

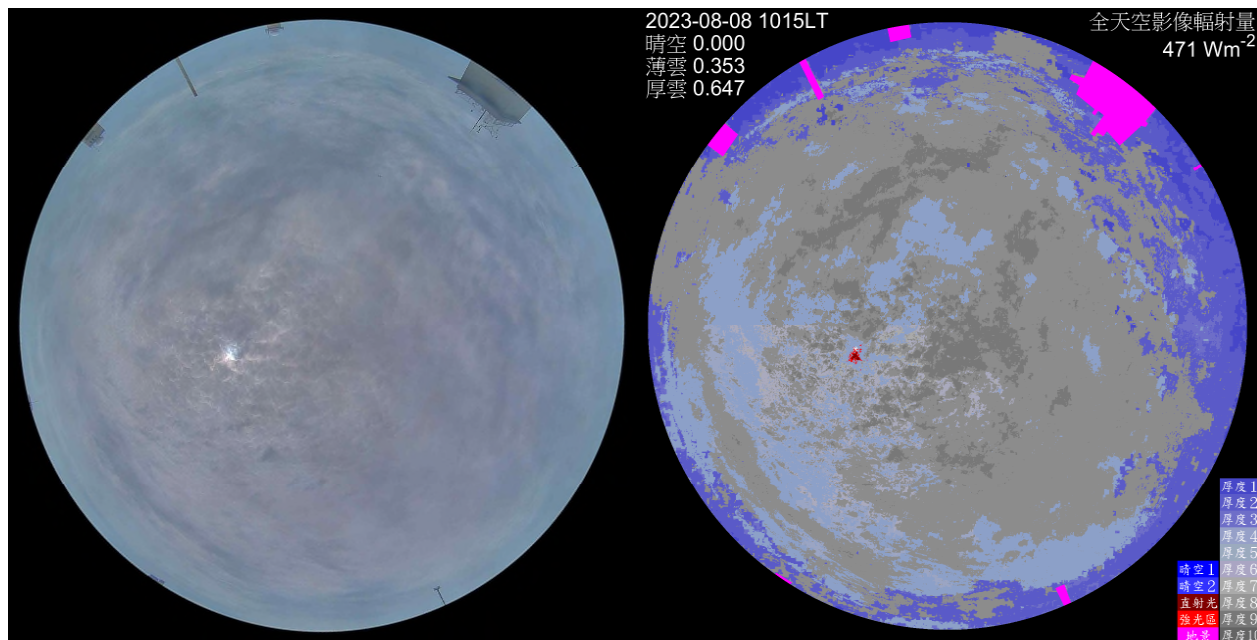
日射量反演-雲厚度辨識

◆ 10層雲厚度示意圖

新屋氣象站 2023-08-08 10:15

原始全天空影像

10個厚度分級



以雲厚度辨識結果計算
全天空影像輻射量

$$E = S * \sin(\theta_{sun}) * R * \left(1 - \frac{T_C}{N}\right)$$

S : 太陽常數
 θ_{sun} : 太陽仰角
 R : 地表太陽輻射到達率
 T_C : 雲等效厚度 (平均值)
 N : 雲等效厚度分級級數 (10)

◆ 雲厚度反演日射量校驗結果

	全天空照相儀	相關係數
		2024a版
北	16266 新屋氣象站	0.943
	16288 氣象署本部	0.906
	16325 新竹氣象站	0.939
中	16270 田中氣象站	0.919
	16267 嘉義氣象站 舊	0.921
	16334 嘉義氣象站 新	0.925
南	16263 南區氣象中心	0.902
	16314 高雄氣象站	0.901
	16268 恆春氣象站	0.908
東	16318 宜蘭氣象站	0.919
	16319 台東氣象站 舊	0.939
	16320 澎湖氣象站	0.907
外島	16321 金門氣象站	0.902
	16322 馬祖氣象站	0.901

- 統計期間：各站設站(2021~)後至2023年12月
- 全部測站相關係數皆為0.9以上
- 16267 嘉義氣象站(舊)及16319 台東氣象站(舊)僅統計至故障前

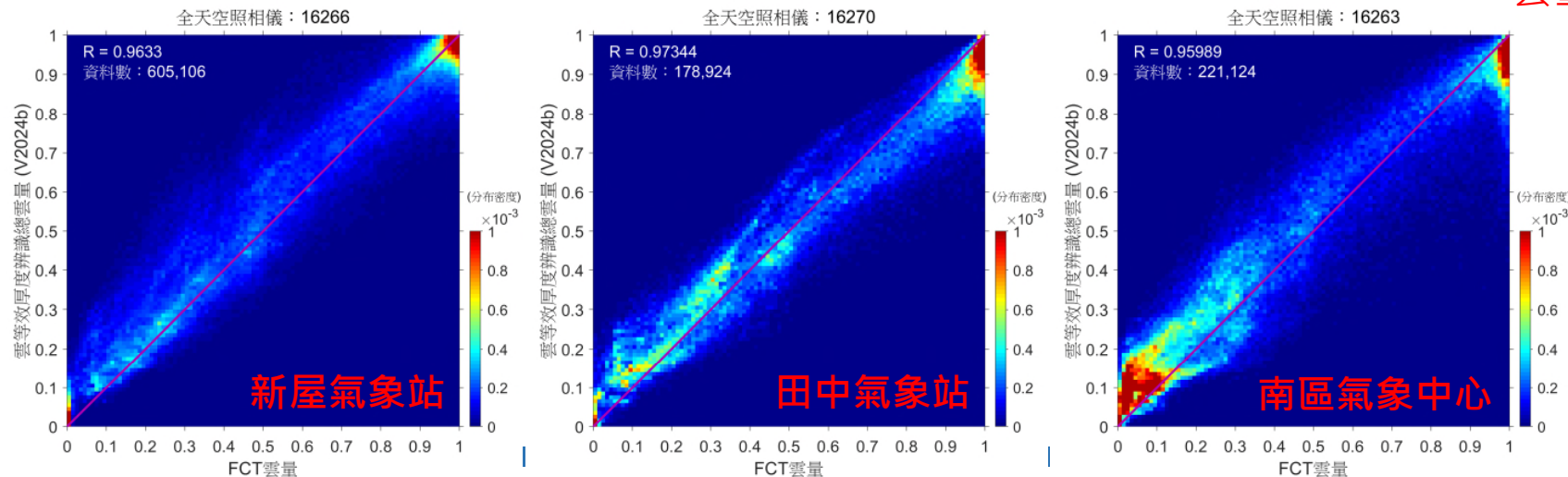
雲厚度辨識雲量、原廠FCT軟體雲量、人工觀測雲量交叉比對

- 交叉比對之相關係數
- 觀測時間約202109~202311，每日五筆觀測資料：8、9、11、14、17

相關係數(R)	新屋氣象站	田中氣象站	南區氣象中心	署本部
雲厚度雲量(仰角20度) vs.人工觀測	0.718	0.810	0.775	0.755
原廠FCT雲量(仰角25度) vs.人工觀測	0.728	0.810	0.793	0.772
雲厚度雲量 vs. 原廠FCT雲量	0.963	0.973	0.960	0.910

- 雲厚度雲量與FCT雲量兩者相近
- 一般情況下，FCT雲量效能略優於雲厚度雲量，但兩者差異不大
- 對於需要進行色彩調性修正的全天空測站而言（如：署本部），雲厚度雲量方法比現較好，FCT有較多將雲誤判為晴空的情形
- 目前雲厚度辨識方法是針對輻射量反演需求設計，雲量略有偏高。對雲量還有精進空間

- 雲厚度雲量(仰角20度) vs.原廠FCT雲量(仰角25度)

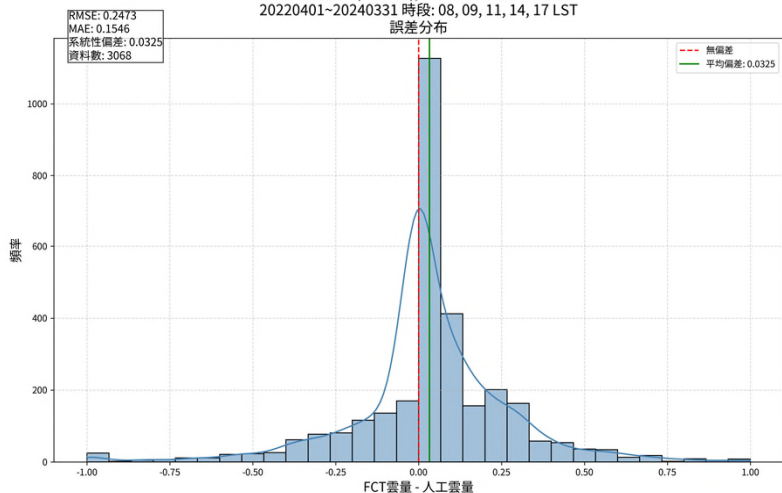


- ◆ 雲厚度雲量估計與FCT原廠雲量估計兩者相關性高 (R>0.95)
- ◆ 雲厚度雲量估計與FCT原廠雲量估計：低雲量高報、高雲量低報

原廠FCT軟體雲量、人工觀測雲量交叉比對

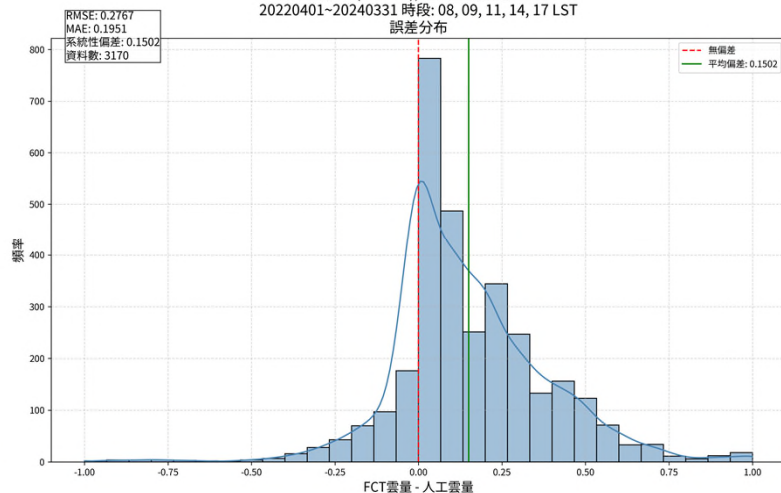
新屋氣象站

新屋氣象站 (467050), 全天空照相機: 16266
20220401~20240331 時段: 08, 09, 11, 14, 17 LST
誤差分布



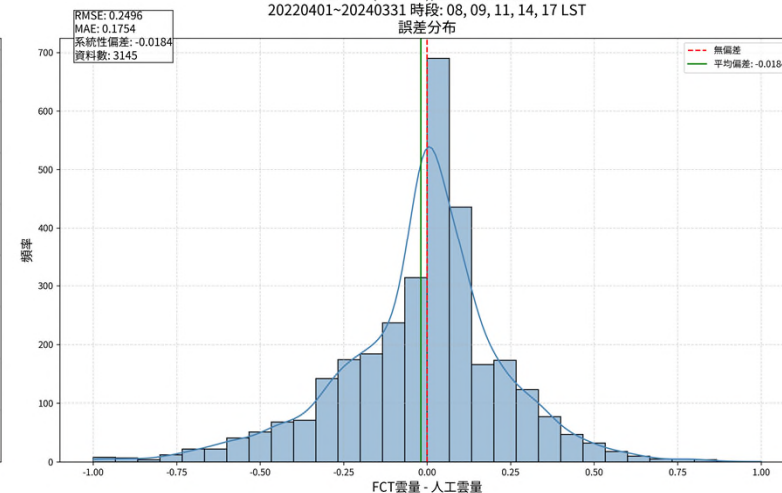
田中氣象站

田中氣象站 (467270), 全天空照相機: 16270
20220401~20240331 時段: 08, 09, 11, 14, 17 LST
誤差分布



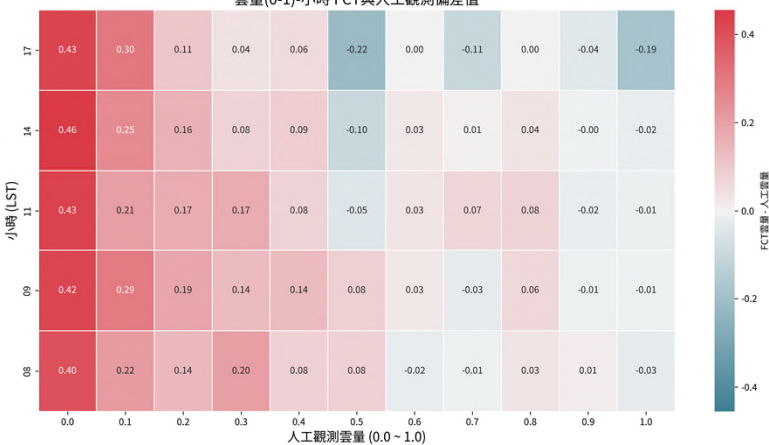
南區氣象中心

南區氣象中心 (467410), 全天空照相機: 16263
20220401~20240331 時段: 08, 09, 11, 14, 17 LST
誤差分布



新屋氣象站 (467050), 全天空照相機: 16266
20220401~20240331

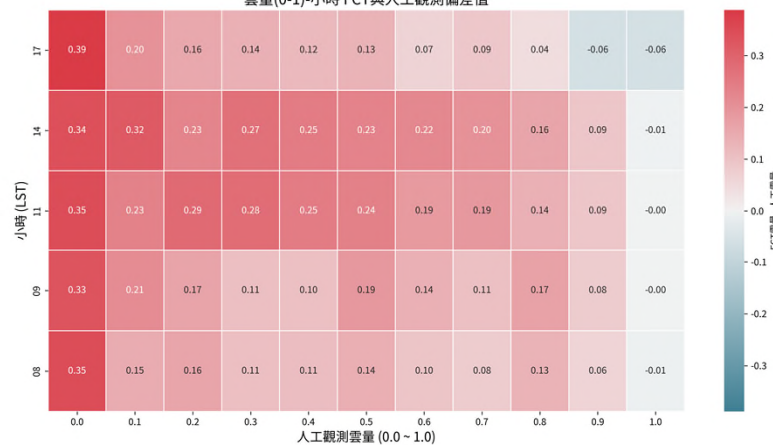
雲量(0-1)-小時 FCT與人工觀測偏差值



總資料數: 3068筆

田中氣象站 (467270), 全天空照相機: 16270
20220401~20240331

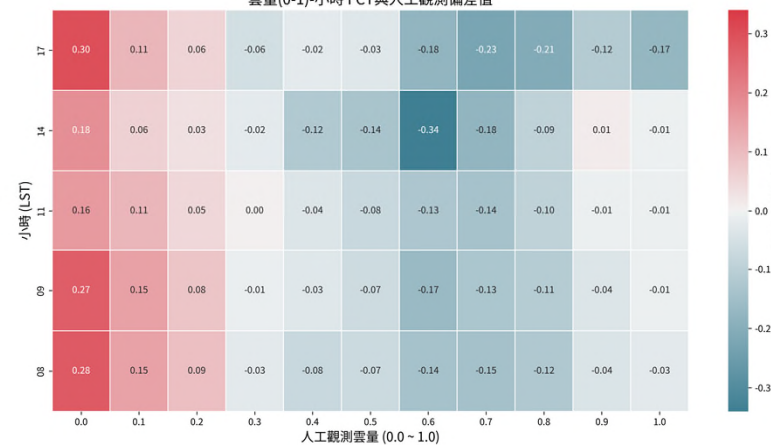
雲量(0-1)-小時 FCT與人工觀測偏差值



總資料數: 3170筆

南區氣象中心 (467410), 全天空照相機: 16263
20220401~20240331

雲量(0-1)-小時 FCT與人工觀測偏差值

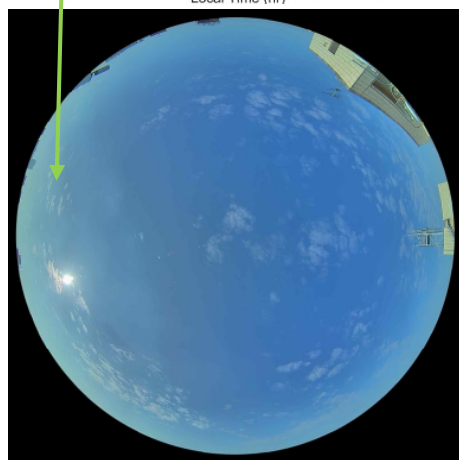
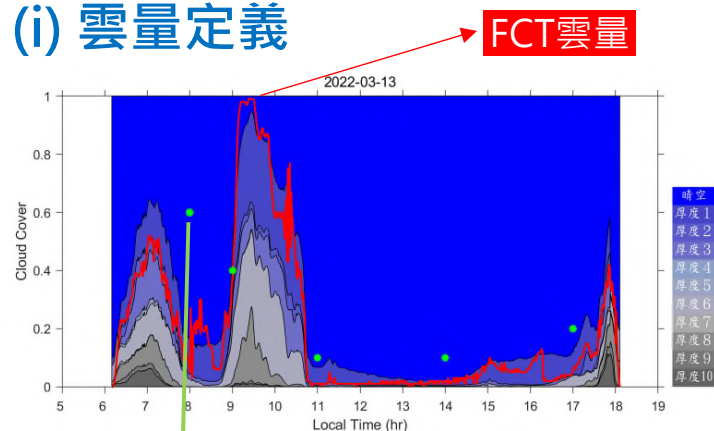


總資料數: 3145筆

- 人工觀測雲量較低時，FCT軟體推估普遍存在高估現象(紅色)
- 人工觀測雲量較高時，FCT軟體推估普遍存在低估現象(藍色)
- 各測站間仍有不同的差異，初步推估與儀器安裝環境或校準參數有關

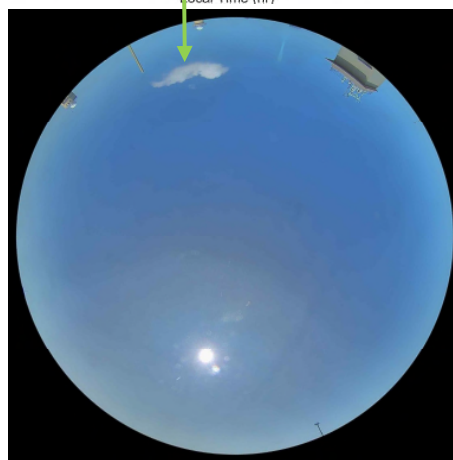
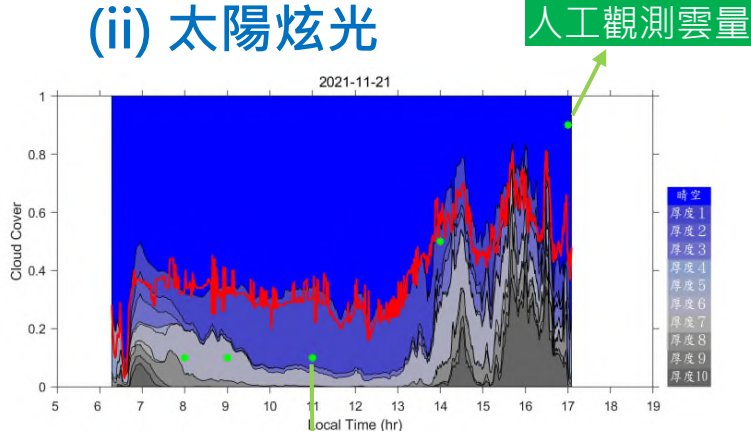
全天空影像與人工觀測雲量誤差分析-雲量顯著差異原因探討

(i) 雲量定義



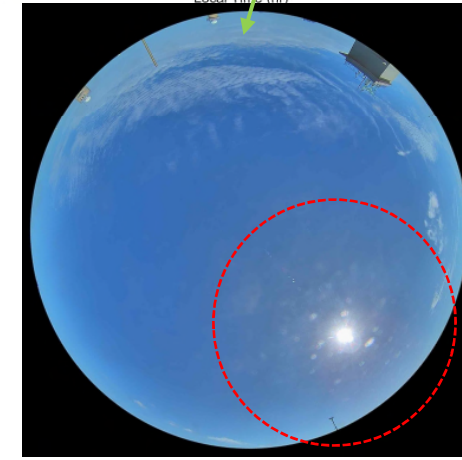
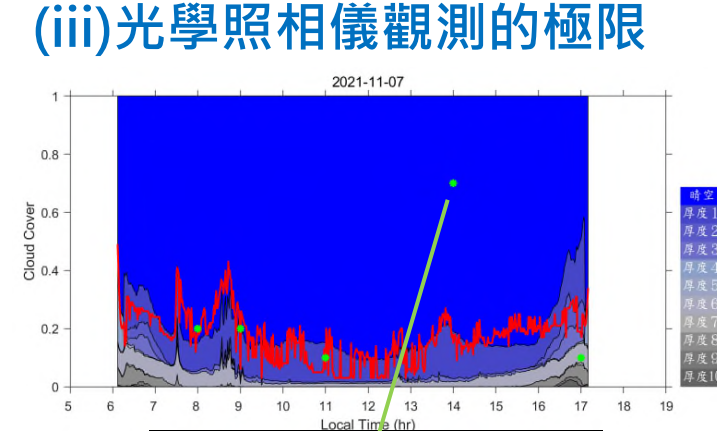
16263 南區氣象中心 2022-03-13 08:00
 雲等效厚度雲量：0.1721
 FCT雲量：0.05
 人工觀測雲量：6

(ii) 太陽炫光



16266 新屋氣象站 2021-11-21 11:00
 雲等效厚度雲量：0.3420
 FCT雲量：0.31
 人工觀測雲量：1

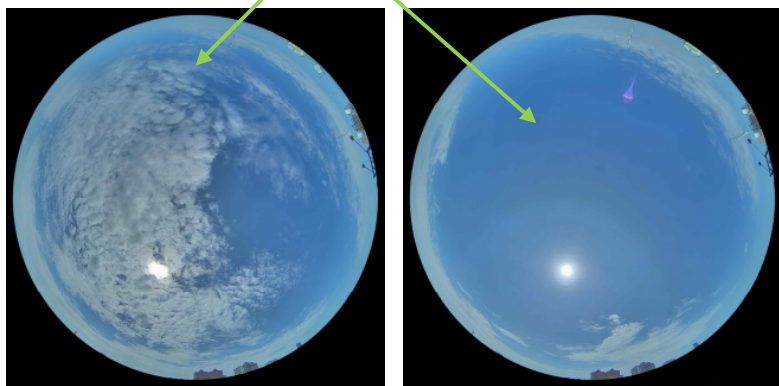
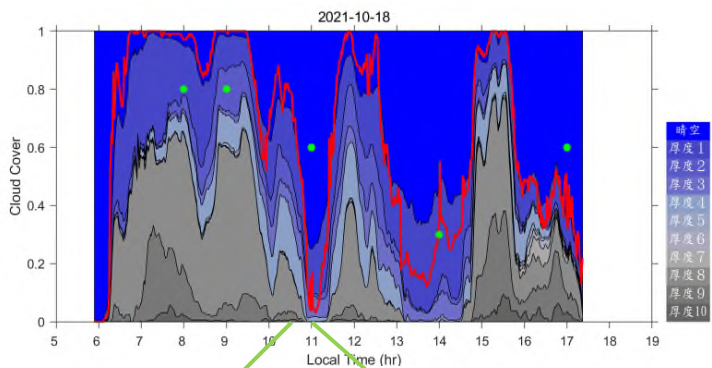
(iii) 光學照相儀觀測的極限



16266 新屋氣象站 2021-11-07 14:00
 雲等效厚度雲量：0.1935
 FCT雲量：0.15
 人工觀測雲量：7

全天空影像與人工觀測雲量誤差分析-雲量顯著差異原因探討

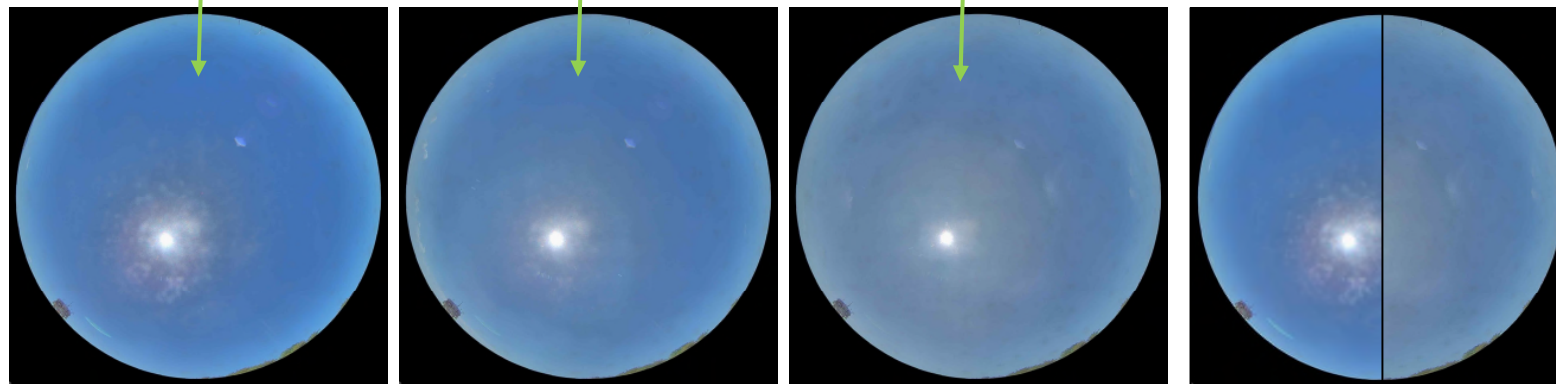
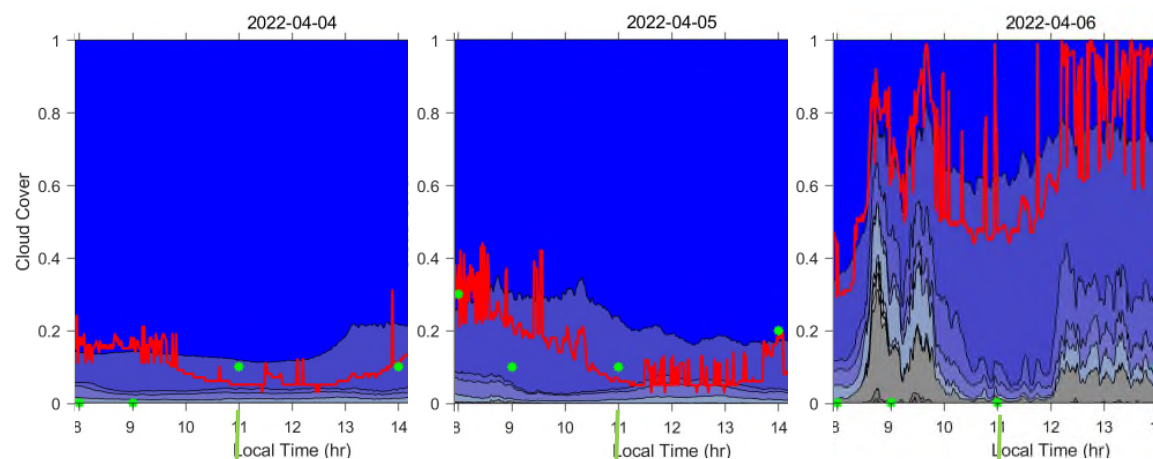
(iv) 雲量快速變化



16267 嘉義氣象站 2021-10-18
10:40 11:00

雲等效厚度雲量 : 0.5979 雲等效厚度雲量 : 0.2503
FCT雲量 : 0.60 FCT雲量 : 0.04
人工觀測雲量 : 6

(v) 空氣污染物



(左) 04日 (右) 06日

等效厚度雲量 : 0.1169 等效厚度雲量 : 0.2408 等效厚度雲量 : 0.6154
FCT雲量 : 0.05 FCT雲量 : 0.06 FCT雲量 : 0.47
人工觀測雲量 : 1 人工觀測雲量 : 1 人工觀測雲量 : 0

資料時間：2023~2024年

測站ID	測站名稱	全天空照相儀 ID	全天空照相儀 仰角20度_相關 係數R	全天空照相儀 仰角20度_有效 資料數	全天空照相儀 _仰角20度_排 除17LST_相關 係數R	全天空照相儀 _仰角20度_排 除17_有效資料 數
466920	局本部	16288	0.78	3204	0.89	2570
466940	基隆氣象站	16324	0.61	1885	0.74	1498
466990	花蓮氣象站	16393	0.67	177	0.85	142
467050	新屋氣象站	16266	0.73	3302	0.8	2650
467080	宜蘭氣象站	16318	0.78	3278	0.92	2627
467110	金門氣象站	16321	0.84	3330	0.89	2665
467270	田中氣象站	16270	0.8	3385	0.83	2715
467300	東吉島氣象站	16396	0.74	2129	0.81	1703
467350	澎湖氣象站	16320	0.8	3291	0.87	2638
467410	南區氣象中心	16263	0.76	3343	0.8	2687
467441	高雄氣象站	16314	0.73	3390	0.77	2718
467480	嘉義氣象站	16334	0.77	3379	0.8	2707
467490	台中氣象站	16395	0.82	1981	0.86	1585
467571	新竹氣象站	16325	0.77	2801	0.83	2254
467590	恆春氣象站	16268	0.82	3389	0.85	2718
467620	蘭嶼氣象站	16394	0.64	2137	0.75	1711
467660	臺東氣象站	16323	0.72	1885	0.87	1514
467990	馬祖氣象站	16322	0.8	3311	0.88	2652

小結與未來規劃

- 本署將於115年1月1日，全面停止測站雲相關人工觀測作業。總雲量(CD11)採用衛星反演取代。
- **總雲量 (CD11)**：ASI (特別是結合機器學習/深度學習演算法) 在估計總雲量方面展現出高可行性與成熟度。可見光 ASI 提供高解析度白天數據，而熱紅外 (TIR) ASI 則能實現全天候客觀觀測。**雲底高/雲霧高 (CD10, 最低 CD03)**：立體 ASI (2台以上組成) 在測量雲底高方面發展迅速，能夠提供有價值的空間分佈資訊，可作為雲霧儀的補充，尤其在特定應用 (如太陽能即時預報) 中具有潛力。
- 以雲厚度方法辨識的總雲量(CD11)其相關性(R)在0.6~0.8之間，若只計算8、9、11、14LST，不計算17LST，則相關性會明顯提升。
- 未來規劃對總雲量 (CD11) 的自動化觀測，將比較2023~2024年衛星和全天空照相儀推估之總雲量(CD11)相關性。而針對ASI方法估計雲參數 (CD01~CD10)的可行性，並持續關注WMO和世界上相關技術的發展。

謝謝聆聽～