

## 利用向日葵衛星反演雲物理參數

陳御群、朱容練、于宜強

國家災害防救科技中心 氣象組

---

---

### 摘要

氣象衛星觀測到的地球輻射量，是受到大氣中雲微物理與雲光學變因所影響後的結果；為獲知上述變因，則必須利用反演技術將衛星觀測輻射量回推雲物理參數。本文介紹國家災害防救科技中心落實與中研院合作開發的「先進向日葵成像儀雲科學資料反演套件」技術，利用自氣象署接收的日本向日葵衛星觀測可見光與紅外光輻射資料，自動即時反演成雲光學和雲微物理等 10 種參數。災防科技中心進一步利用這 10 種即時反演的雲物理參數，開發了雲屬分布和飛航積冰風險等增值產品。雲物理反演的相關開發過程與結果，將於本文中進行闡述。此外，本文所述的反演雲參數和其增值產品已經在天氣與氣候監測網（WATCH）系統上進行即時測試和展示。

### 一、前言

在氣象研究中，雲的特性有著非常重要的角色，對於了解大氣

狀態以及預測，它都提供了重要的信息。雲是由大氣中的水氣凝結而成，這種凝結過程通常伴隨著大氣的上升運動。因此，雲的出現也標示著該地區具有某程度的大氣不穩定。例如，從雲層的高度、形狀來判斷時，層狀結構的雲隱含著該地區雲層上方的大氣具有逆溫的結構；垂直向上發展的雲，當雲頂發展得越來越高時，就表示有旺盛的垂直運動，大氣狀態較不穩定，可能即將降雨。另外，雲的特性也會影響對光的散射和吸收，而反應在雲的亮度和顏色上，例如不透明且顏色較暗灰的雲，表示雲中的雲滴（droplet）較大、數量較多，可能即將發生持續性的降雨。

總體而言，大氣狀態是「因」，雲則是「果」，透過對雲的觀測和分析，有助於我們對當下看不見的大氣狀態有更多的了解，進而利用雲發展的動態，推測天氣即將可能的發展。因此，雲的觀測在氣象研究中具有重要的地位，對分析和預測提供了資訊來源。除了地面氣象測站利用人工或雲幕儀進行小區域觀測之外，雲的觀測主要是透過雷達和衛星遙測來進行更廣域的觀測。然而雷達會受到地形起伏的遮蔽而影響觀測結果，相對之下，衛星遙測由於是從太空中對地球觀測，因此不受地形影響且觀測範圍更廣闊。衛星遙測對於監控氣象系統的動態變化至關重要，地球同步衛星可對於大氣定時定

點進行高時間頻率的觀測，其觀測波長通常為地球所反射的太陽可見光波段，以及地球本身向宇宙放射的紅外光波段。例如太陽可見光輻射會被雲反射，愈濃厚的雲反射愈多陽光，衛星雲圖中則會以偏白色調表現；而地球自身放射的紅外光輻射因有部份會被雲吸收，使得衛星探測到雲區的輻射量會比晴空無雲處低，紅外光雲圖會以偏白色調表示輻射量較低之處。所以地球同步衛星的可見光與紅外光衛星雲圖，都能明顯看出雲的分布。

衛星觀測到的地球可見光與紅外光輻射，是受到大氣中雲微物理與雲光學變因經過複雜的物理機制所影響後的總合結果。利用反演方法，可以將氣象衛星所觀測到的多重波段輻射量，推估出雲微物理、雲光學性質等物理參數，以做為氣象參考資訊，進而用於災防守視與監測上。因此「國家災害防救科技中心」（以下簡稱災防科技中心）以日本向日葵地球同步氣象衛星先進向日葵成像儀（Advanced Himawari Imager, AHI）高時空解析度與多頻道的輻射觀測，利用與中央科學研究院（簡稱中研院）合作開發的「先進向日葵成像儀雲科學資料反演套件（AHI Cloud Science Data Retrieval Package, AHICSDRP）」來反演出過去無法得到的高時空解析雲物理參數。

## 二、 觀測資料與反演方法

## (一) 向日葵衛星觀測

向日葵 (Himawari) 衛星為日本氣象廳用於氣象觀察的地球同步衛星的統稱，此系列衛星主要任務是對包括東亞至太平洋等周邊地區進行氣象觀測。近期服役作業的是此系列的第 8 與第 9 號衛星 (Himawari-8, 9)，兩衛星屬於同型號衛星，先後於 2014 年 10 月 7 日以及 2016 年 11 月 2 日發射升空。2015 年 7 月 7 日，8 號衛星測試完成並正式投入運作，自 2022 年 12 月 13 日開始，9 號衛星替代 8 號進行正式觀測作業，8 號則轉為備用衛星。

向日葵 8、9 號均運行在地球同步軌道，衛星同步位於東經 140.7 度的赤道上方，高度距平均海平面 35,782 公里，可觀測到地球的範圍達到 162.6 度地心角 (Bessho et al., 2016)，幾乎涵蓋了半邊地球。其配備的主要任務酬載 (mission payload) 為「先進向日葵成像儀」，用來觀測可見光、近紅外光、紅外光的地球輻射，其可觀測的 16 個頻帶 (band) 如表 1 所示 (JMA, 2017)。

表 1 AHI 各頻帶波長及解析度

波長	編號	中心波長(μm)	赤道帶水平解析度 (km)
可見光	1	0.47063	1
	2	0.51000	1
	3	0.63914	0.5
近紅外光	4	0.85670	1
	5	1.6101	2

	6	2.2568	2
紅外光	7	3.8853	2
	8	6.2429	2
	9	6.9410	2
	10	7.3467	2
	11	8.5926	2
	12	9.6372	2
	13	10.4073	2
	14	11.2395	2
	15	12.3806	2
	16	13.2807	2

向日葵 8 號、9 號衛星的最大觀測區域為整個半球全圓盤 (full disk) 觀測，由於掃描解析度不同，「向日葵標準資料」(Himawari Standard Data, HSD) 在三種像素解析度下，全圓盤的影像像素大小分別是：解析度 500 公尺的影像像素大小為 22,000×22,000，解析度 1 公里的影像像素大小為 11,000×11,000，解析度 2 公里的影像像素大小為 5,500×5,500 (JMA, 2017)。

災防科技中心自 2021 年 4 月起，即自中央氣象署即時自動接收向日葵衛星觀測資料。不同於原始向日葵衛星 full disk 資料，氣象署所提供者為其特別針對顯示東亞地區觀測的再處理資料。此觀測資料為透過蘭伯特正圓錐投影 (Lambert conformal conic) 將原始 full disk 資料內差至東亞及西太平洋地區的等距 (約 2 公里) 網格。資料格點數為 2,750×2,750。資料內容已由輻射強度轉換為：反照度 (第 1 至 6 頻帶) 與亮溫 (第 7 至 16 頻帶)。圖 1 為氣象署向日葵號衛

星資料東亞區域（左圖）與原始向日葵 8 號 full disk 觀測區域（右圖）的比較，其中淺綠色覆蓋區域即為氣象署資料所涵蓋範圍，本文所使用的即是氣象署東亞地區向日葵衛星資料。

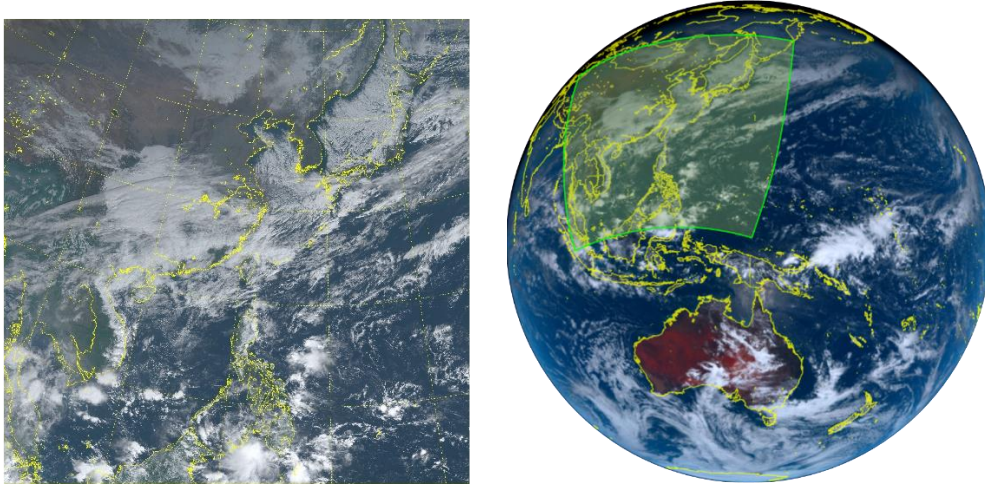


圖 1、左圖為氣象署向日葵號衛星資料東亞區域，右圖為向日葵 8 號 full disk 觀測區域，其中淺綠色覆蓋區域即為氣象署資料所涵蓋範圍。

## (二) 雲物理參數反演

災防科技中心引進由中研院所開發的「先進向日葵成像儀雲科學資料反演套件」，其前身為 GOES-R (Geostationary Operational Environmental Satellite-R) 雲演算法工作團隊 (Algorithm Working Group, AWG) 與美國威斯康辛大學麥迪遜校區 (University of Wisconsin-Madison) 的聯合氣象衛星研究合作學院 (Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies, CIMSS)，針對美國 GOES-

16 氣象同步衛星的先進基線成像儀 (Advanced Base-line Imager, ABI) (Schmit et al., 2017) 觀測所發展的「地球同步衛星社群衛星處理套件 (Community Satellite Processing Package for geostationary satellite, CSPP-GEO)」, 將 ABI 觀測的反射率及亮溫進行雲參數的反演。

由於向日葵衛星 AHI 的頻譜特性與 ABI 相似, 故中研院團隊以 CSPP-GEO 的「地球同步衛星之雲演算平台 (GEOstationary Cloud Algorithm Test-bed, GEOCAT)」為基礎, 針對向日葵衛星 AHI 觀測以及東亞地區的大氣熱力狀態進行優化, 並以此為基準建立專屬的查算表 (look-up table), 建置成「先進向日葵成像儀雲科學資料反演套件」。該套件可將向日葵標準資料 (Himawari Standard Data, HSD) 的 16 個頻段 full-disk 格式觀測, 透過反演技術獲得真實及穩定的各式雲科學參數, 包含雲遮罩 (cloud mask) (Heidinger et al., 2020)、雲態 (cloud phase)、雲類型 (cloud type) (Pavolonis et al., 2020)、雲頂溫度 (cloud-top temperature)、雲頂氣壓 (cloud-top pressure) (Menzel et al., 2008)、雲頂高度 (cloud-top height)、雲光學深度 (cloud optical depth) (Roeckner et al., 1987)、雲滴有效粒徑 (cloud droplet effective radius)、雲液態水路徑 (cloud liquid water path)、雲冰路徑 (cloud iced water path)。相關的雲物理參數反演流程, 如

圖 2 所示。

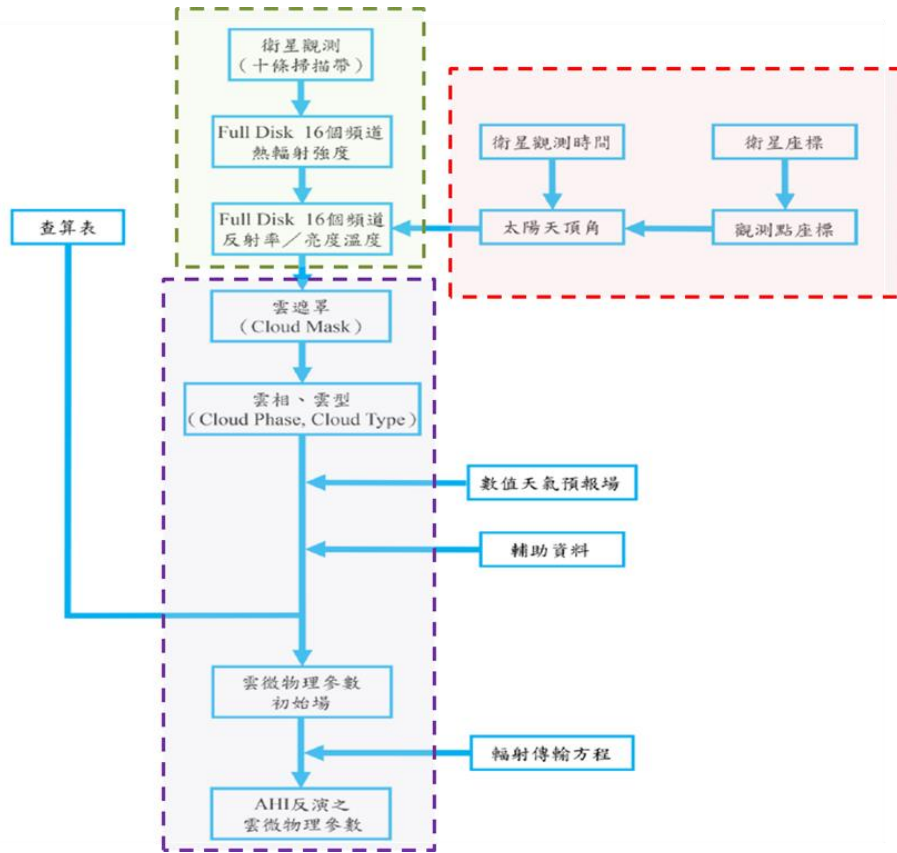


圖 2、AHICSDRP 雲物理參數反演完整運作流程。

首先最早被反演出來的是雲遮罩，隨後再針對被雲遮罩判定成有雲的每個觀測像素點 (pixel) 逐一估算出其他的雲反演參數。其中雲態可分辨出水態、過冷水態、混合態、冰態的雲。雲類型可分類出水態雲、過冷水雲、混合態雲、冰態雲、卷雲、重疊類雲 (多層不同型態的雲)、過衝雲頂 (overshooting type)。另外，雲光學深度是一個無因次的光學物理量，可表示雲對可見光紅光波段 (0.64 $\mu\text{m}$ ) 的透光程度。雲滴有效粒徑，是假設將觀測方向上的液態水含量平均分



配到此方向上所有的正圓球形雲滴時，那麼這樣的正圓球雲滴的半徑即稱之為雲滴有效粒徑。一般來說，假設水氣含量相等，雲滴數量越多則雲滴平均半徑越小，散射截面積越大；反之雲滴有效半徑越大，雲滴的散射截面積較小，反照率越低。(液態/冰態)水路徑(water path)是用來計算大氣中兩點之間存在的(液態/冰態)水含量，水路徑值越高，代表雲內的(液態/冰態)總含水量越高。

### 三、 雲物理參數化反演結果

災防科技中心即時接收的，是經由中央氣象署所提供再處理後的向日葵衛星東亞地區觀測資料(見圖 1)，並非原始 HSD 的 full disk 資料。由於這兩種觀測資料的格式相當不同，為使 AHICSDRP 能夠落實於災防科技中心作業應用，必須改寫整個反演程序。雲物理反演的另一個重要的輸入資料為數值天氣預報模式，原版 AHICSDRP 所使用的是美國國家環境預報中心(National Center for Environmental Prediction, NCEP)全球預報的 gdas(Global Data Assimilation System, 全球資料同化系統)產品。為即時作業考量，災防科技中心亦將 AHICSDRP 改寫成能以 gfs(Global Forecast System, 全球預報系統)預報場作為輸入的天氣預報模式資料。

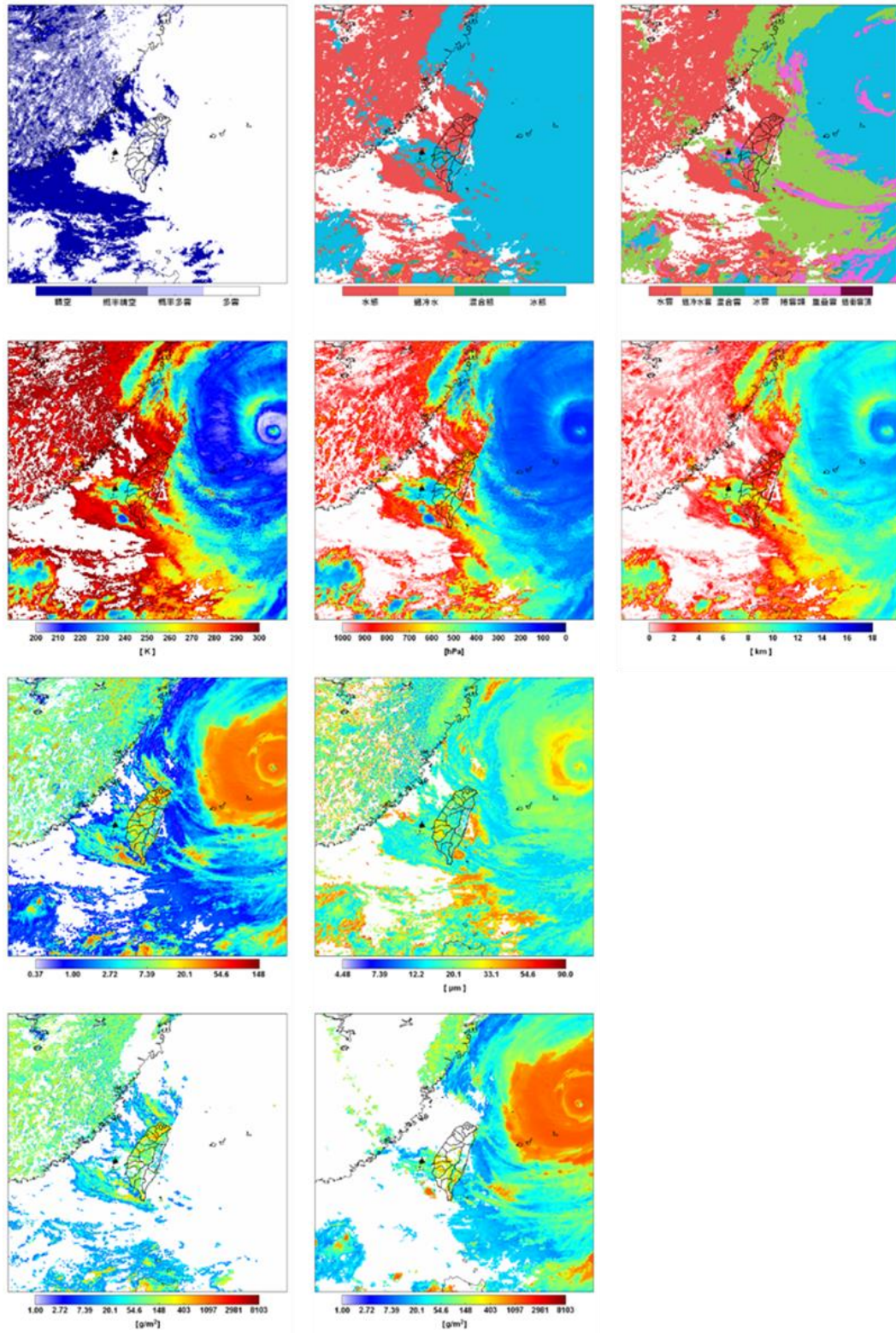


圖 3、台灣地區 AHICSDRP 雲物理參數圖檔一例，由上至下、由左至右分別為：雲遮罩、雲態、雲類型、雲頂溫度、雲頂氣壓、雲頂高

度、雲光學深度、雲滴有效半徑、雲液態水路徑、雲冰路徑。

圖 3 為 AHICSDRP 最終反演出的各種雲物理產品圖資，此例為 2023 年 8 月 2 日 11:00 時卡努颱風個案。為更清楚放大顯示台灣地區局部狀況，所有雲物理反演產品的圖資均內插到 0.0125 度等經緯格點。

雲物理反演參數，在日常作業中可以用來作為即時天氣監控，多種特殊天氣狀態都能透過雲物理參數進行判識。如圖 4 顯示的個案是發生在 2023 年 12 月 6 日清晨 02:50 分，此時台灣北方有一道鋒面，在鋒面後方的是達到寒流等級的強烈大陸冷高壓。隨著鋒面南下，寒流即將影響台灣。從圖中透過 AHICSDRP 反演雲頂高度場可以看到，位在中國大陸福建沿海的雲具有較高的雲頂高度，那是位於鋒面上的雲，被鋒面抬升到較高的高度，這一區域的雲也明確的標示出觀測當下鋒面所在的位置。而在鋒面南方延伸到台灣北部，有一大片雲頂高度較低的雲，是由強烈冷高壓溢流出鋒面的冷空氣所形成的低雲。由此可知，雖然鋒面尚未通過台灣，但是冷高壓帶來的冷空氣卻已經開始影響到台灣了。

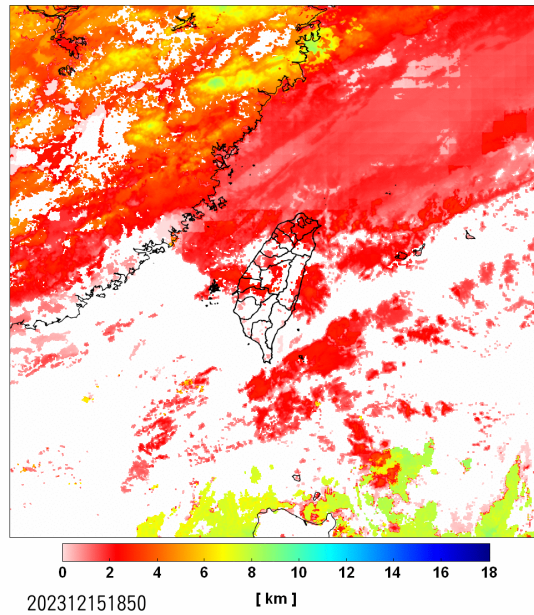


圖 4、2023 年 12 月 6 日 02:50 時的衛星反演雲頂高度

圖 5 為發生在 2022 年 6 月 24 日強對流發展的個案。當日早晨 8:00，台灣中部以北各地大多晴朗無雲；上午 10:00 各地已開始陸續有因太陽加熱地表激發熱對流而生成的雲。上午 11:30，當雷達回波觀測尚未偵測到有明顯降雨信號時，從反演的雲頂資訊就已經可看出全台各地因熱對流而生成的積雲迅速發展。由於白天山區受熱較平地大，中央山脈地區雲頂高度已經高約 5km。在新北、桃園及台中已有局部地區的雲頂溫度已降至冰點，雲頂為冰雲，顯示該地區大氣對流發展旺盛。12:00、12:30 時新竹苗栗地區的雷達回波開始偵測出一些零星的強對流，此時從反演雲頂溫度在新竹苗栗交界處已經可以發現有較大結構的對流發展，強烈的上升氣流使得雲頂高度

達到 9 公里以上，雲頂溫度持續降至約 $-25^{\circ}\text{C}$ ，顯示強對流已持續發展成積雨雲，預計午後即將有大雷雨發生；同時在台南也已觀測到有一極強對流雲也正在迅速發展中。有此個案可知，利用 AHICSDRP 將衛星觀測輻射量反演成雲物理參數，可實際監控對比每個觀測時刻強對流雲的發展狀況，並且進一步預判強降雨即將發生的區域。整體來說，衛星反演雲物理參數的資訊可比雷達回波觀測提早近 30 分鐘探知強對流發展的狀況。

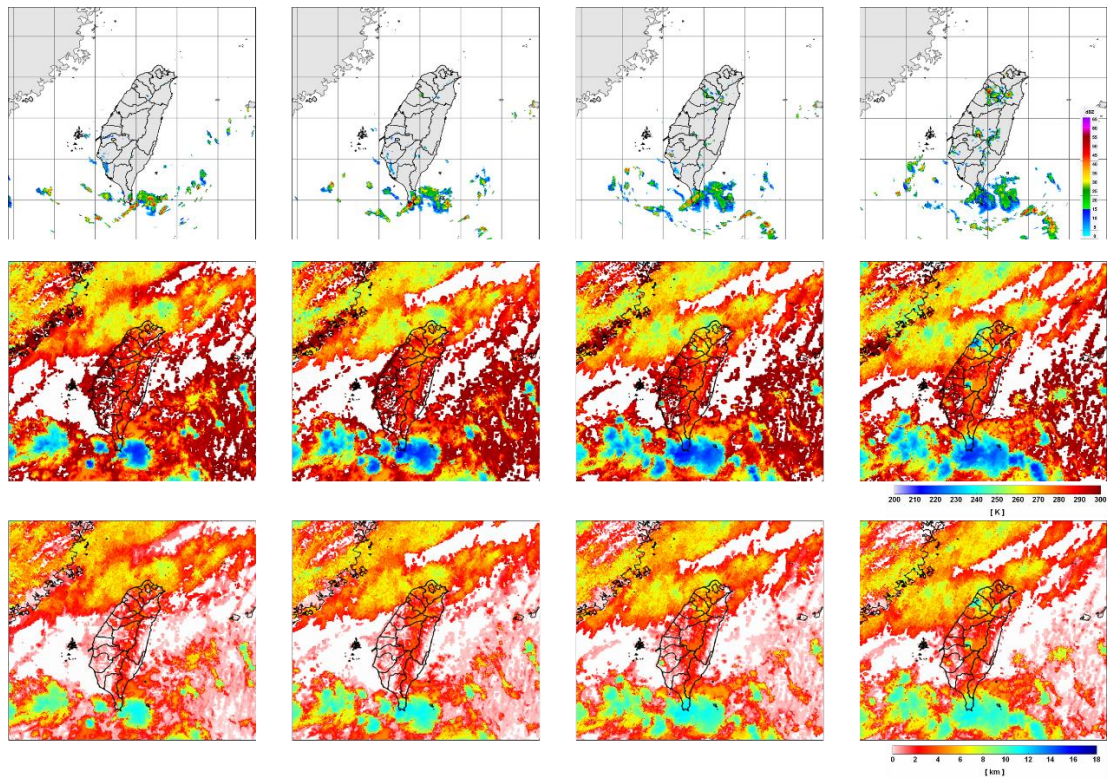


圖 5、2022 年 6 月 24 日個案，由左至右為 11:30、12:00、12:30、13:00 時；由上至下為最大雷達回波、反演雲頂溫度、反演雲頂高度。

反演的雲物理參數產品已於災防科技中心天氣與氣候監測網

(WATCH) 同步測試與展示。WATCH 提供了一個相當方便的平台來即時展示向日葵衛星相關產品，此平台整合了衛星觀測與 AHICSDRP 反演雲物理重要參數產品於一專頁(見圖 6)，可於 WATCH 首頁(網址 <https://watch.ncdr.nat.gov.tw/>)中的「向日葵衛星」頁籤進入此專頁。各產品分頁除了即時展示最新圖資之外，也可以讓使用者自行變更時間日期以顯示過去歷史圖資，並提供動畫撥放功能用以將指定時間前三個小時內所有觀測時刻的圖資進行動態展示，可幫助使用者更容易掌握變化趨勢。



圖 6、(上) WATCH 首頁提供向日葵衛星專頁頁籤，(下) 專頁中各種應用相關產品分頁。

#### 四、 應用與展望

災防科技中心將 AHICSDRP 落實於即時作業後，每 10 分鐘便可將最新接收到的向日葵衛星輻射量觀測，即時反演成更貼近實際天氣狀態的雲物理參數。雲物理參數反演的應用，除了可做為即時天氣狀況監控的參考資料外，為擴大氣象衛星觀測資料的應用面向，本文更參考國際科學文獻研究結果，開發出以雲物理參數估算而成的雲屬 (cloud classification) 分布與飛航積冰風險 (flight icing thread, FIT) (Smith et al., 2012) 參數。

雲屬分布是參考國際衛星雲氣候學專案 (International Satellite Cloud Climatology Project, ISCCP) 所提出，可利用衛星像素資料的雲頂氣壓與雲光學深度之間的關係大致分辨出九大雲屬。透過雲屬分布的產品，可以將全域 (東亞地區) 的雲屬更直觀的連結到各地的即時天氣狀態，例如某地區分布的雲屬為深對流雲 (積雨雲) 時，則表示該地天候惡劣，正在或即將發生強降雨；若某地區籠罩兩層雲時，則表示該地區水氣旺盛，容易發生持續降雨。

飛行器發生積冰狀況時，有可能會影響飛安。若能探知大氣中具有發生積冰風險的區域，可藉以規劃飛行器航線來迴避積冰區域，或提前啟動飛行器的除積冰裝置。積冰風險參考 Smith 等 (2012) 提出的方法，可提供積冰可能發生區域；頂部和底部的高度範圍、發生機

率、強度等資訊，估算成飛行積冰威脅（Flight Icing Threat, FIT）指數，以利飛航實際操作。

更多利用衛星反演雲物理參數加值估算的產品，如衛星反演全域的地面全天空日射量（Global Horizontal Irradiation）、以及衛星反演估計降雨等，目前也正在積極開發中，以期能將氣象衛星觀測資訊更廣泛的應用在災防科技上。

## 致謝

本研究衷心感謝中央氣象署（<https://www.cwa.gov.tw/>）提供日本向日葵衛星東亞地區觀測資料。

## 參考文獻

1. Bessho, K., et al. (2016). An introduction to Himawari-8/9—Japan's new-generation geostationary meteorological satellites, *J. Meteor. Soc. Jpn.*, 94(2), doi:10.2151/jmsj.2016-009.
2. JMA (2017). Himawari-8/9 Himawari Standard Data User's Guide Version 1.3, Tokyo, Japan.
3. Schmit, T. J., P. Griffith, M. M. Gunshor, J. M. Daniels, S. J. Goodman, and W. J. Lebar (2017). A Closer Look at the ABI on the GOES-R Series. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 98, 681-698.
4. Heidinger, H. (2020). NOAA NESDIS CENTER for Satellite Applications and Research Enterprise Algorithm Theoretical Basis Document for Enterprise Cloud Mask. Silver Spring, Maryland.



5. Pavolonis, M. (2020). NOAA NESDIS CENTER for Satellite Applications and Research Enterprise Algorithm Theoretical Basis Document for Cloud Type and Cloud Phase. Silver Spring, Maryland.
6. Menzel, W. P., R. A. Fray, H. Zhang, D. P. Wylie, C. C. Moeller, R. E. Holz, B. Maddux, B. A. Baum, K. I. Strabala, & L. E. Gumley (2008). MODIS Global Cloud-Top Pressure and Amount Estimation: Algorithm Description and Results, *J. Appl. Meteor. & Clim.* 47, pp. 1175-1198.
7. Roeckner, E., U. Schlese, J. Biercamp, P. Loewe (1987). Cloud optical depth feedbacks and climate modelling, *Nature*, 329, pp. 138–140.
8. Smith, W. L., P. Minnis, C. Fleegeer, D. Spangenberg, R. Palikonda, & L. Nguyen (2012). Determining the Flight Icing Threat to Aircraft with Single-Layer Cloud Parameters Derived from Operational Satellite Data. *J. Appl. Meteor. & Clim.*, 51, pp. 1794-1810.