

日本新一代同步衛星Himawari-8對霧與低雲之反演

陳冠儒

中央氣象局氣象衛星中心

摘 要

能見度觀測對於海上航行與空中交通的安全息息相關，可說是直接影響民眾生命財產安全的天氣指標之一。「霧」是最容易影響水平能見度的天氣現象，台灣春季每當濃霧發生時，往往造成公路交通、船隻航行及飛機起降的安全疑慮。

傳統氣象站雖然可提供能見度之報告，但觀測方式受限於人力需求，在廣大洋面及沙漠地區等人煙稀少的區域觀測資料十分缺乏，難以掌控大範圍的大氣資訊。氣象同步衛星不受限於區域，並能提供24小時連續時間高密度的觀測資料，對天氣的監測及預警十分有利。

利用日本新一代氣象衛星 Himawari-8 高解析度之紅外線、近紅外線、可見光等多頻道觀測，搭配NCEP全球模式的預報場，與輻射傳遞方程估算之晴空大氣輻射等輔助資料，根據衛星各頻道觀測日夜間霧區特性的差異，採用不同的物理判斷式進行計算，於衛星觀測範圍中，研判出現「霧或低雲特徵」的區域，可作為天氣預報、飛航交通、海上航線安全之重要依據。

關鍵字：同步衛星、霧與低雲

一、前言

大氣能見度與民眾之交通安全習習相關，不論是飛機起降或是船隻航行時，能見度都是重要的安全依據，也是傳統地面氣象站主要的觀測項目之一。許多天氣現象能影響能見度，如霾、沙塵暴等等，而台灣地區春季時常出現海霧，不但離島飛機起降時常因此延誤，也威脅到海上航路的安全。

中央氣象局與民用航空局針對霧進行觀測，主要以水平能見度小於1公里、相對濕度高於75%為判斷依據。但是以傳統人為判斷的方式相當耗費人力，且觀測資料受限於觀測站的位置，僅能提供「單點」資料，無法測量人煙稀少及海洋的區域。

氣象同步衛星用來偵測霧區已行之有年，主要方法是利用IR4與IR1頻道輻射特性的差異，偵測低雲頂的特徵，藉此找出可能為霧的區域，不但可以解省人力，還可以得到空間連續性很高的資訊，但由於IR4會受到太陽短波的影響，該偵測方法僅能使用於夜間區域，並不適用於日間，若要以可見光雲圖來研判日間霧區，還是需要依賴氣象人員進行主觀辨識。

今年來氣象同步衛星的技術持續進步，2015年7月初正式運作的日本新一代氣象同步衛星Himawari-8，其搭載儀器的觀測能力比起上一代同步衛星MTSAT-2 (Multifunctional Transport Satellite 2) 精進許多，不只時空解析度均有2倍以上的提昇，更多的觀測頻道及更高的輻射敏感度也大大地增加資料品質。2016年美國也預計發射另一顆新一代同步衛星：GOES-R (The Geostationary Operational Environmental Satellite-R)，為此美國國家海洋暨大氣總署 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 發展了許多GOES-R的反演式，其中包含了「霧與低雲」的反演方法。

本反演式以「GOES-R霧與低雲反演式」的反演方式為基礎，進一步將其反演方法修改為適合東亞地區的偵測閾值，並改進其「日夜交替的不連續性」、「太陽反輝影響」等問題，增加反演產品的實用性。

二、使用資料

本反演式使用日本新一代氣象同步衛星Himawari-8的觀測資料中的紅光(B03)、近紅

外線 (B07) 以及紅外線 (B13) 等三個頻道，其頻道解析度比起上一代同步衛星都有顯著增加，紅外線星下點解析度可達2公里，有利於捕捉更細微的大氣及地表資訊。

除了衛星資料之外，也會使用數值模式作為參考資料，在此選擇NCEP全球模式解析度0.25度的預報場資料，用來計算雲頂及地表的溫差，其大氣及地表狀態亦將提供輻射傳遞方程 (Community Radiative Transfer Model, CRTM)，作為晴空向上大氣輻射之運算所需。

地表發射率資料來自Claver-X所內建之地表發射率資料庫。

$$ratio(3.9\mu m) = \frac{ems(3.9\mu m)}{\epsilon_{3.9\mu m}}$$

低雲3.9 μm 的放射率較低，因此「3.9 μm 偽發射率」數值偏低時基本上可以視為低雲區，但不同的地表材質會有不同的發射率，如沙漠中3.9 μm 發射率偏低，往往將晴空誤判為低雲，因此將3.9 μm 偽發射率的數值除以地表發射率，以考量不同地表特性。 $\epsilon_{3.9\mu m}$ 為地表發射率。

2. 輻射地表溫差

衛星觀測資料可以反映出地表溫度的特性，若有雲覆蓋的情況下，則表示的是雲頂的溫度。霧與低雲的另一個特性是雲頂溫度與地表溫度十分接近，若有高雲覆蓋時，兩者之間的溫度差距會很大，比較衛星反演的表面溫度及數值模式輸出的地表溫度後，其數值的差異愈小，表示覆蓋在地表上空的雲愈高；若兩者數值很接近，表示該區域不存在雲，或是雲頂很低，此時便符合霧或低雲的特性。

衛星反演表面溫度時，需使用模式資料配合輻射傳遞方程CRTM取得大氣透射率、大氣向上輻射貢獻等資訊，以得到較為精準的表面溫度，增加產品的精確性。

輻射地表溫差的計算方法如下：

$$R_{sfc}(11\mu m) = \frac{R_{obs}(11\mu m) - R_{atm}(11\mu m)}{t_{atm}(11\mu m)}$$

$$T_{bias} = T_{sfc}(11\mu m) - T_{sfc}(NWP)$$

$$T_{sfc}(11\mu m) = \frac{B^{-1}(11\mu m, R_{sfc}(11\mu m))}{\epsilon_{sfc}(11\mu m)}$$

其中 R_{obs} 為觀測之輻射量， R_{atm} 為晴空大氣貢獻， t_{atm} 為晴空大氣透射率， ϵ_{sfc} 是地表發射率， B^{-1} 為普朗克函數的倒數， $T_{sfc}(11\mu m)$ 為衛星所反演之地表溫度， $T_{sfc}(NWP)$ 則是數值模式中輸出的地表溫度。

3. 可見光反照率

由於日間受到太陽短波的影響，近紅外線IR4的使用受到限制，若希望在白天也能得到霧區的資訊，在日間網格就必須利用霧的其他特性進行偵測。

霧之所以會嚴重影響能見度，是由於霧中的小水滴對於可見光有強烈的散射作用，由可見光雲圖上來看，可以發現因為強散射出現的明顯白色區域，而一般晴空海洋呈現深色，陸

三、反演方法

完整的反演流程如圖一所示。

(一) 霧區特性的研判因子

「霧與低雲」反演式使用五種不同的研判因子，對日夜間網格的霧區特性進行評估。其評估因子分述如下：

1. 3.9 μm 偽發射率之比值

紅外線第一頻道中心波段約為11 μm ，俗稱「IR1」，而近紅外線頻道中心波段為3.9 μm ，俗稱「IR4」，過去衛星偵測霧與低雲的方式主要以上述這兩個頻道的亮溫差值進行研判，以大氣輻射特性來說，由於IR4在低雲的發射率較低，容易與IR1的高亮溫產生顯著差異，使得雲頂高度相對較低的霧或低雲在「IR4-IR1」呈現出負值，藉此診斷霧或低雲的存在。其優點是方法簡單，但最大的缺點是IR4受到太陽短波影響，日出之後亮溫值上升，變得不適用。

3.9 μm 偽發射率的定義如下：

$$ems(3.9\mu m) = \frac{R_{obs}(3.9\mu m)}{B(3.9\mu m, BT(11\mu m))}$$

3.9 μm 偽發射率的物理意義與「IR4-IR1」接近，均能在夜間反映出兩個頻道之間的輻射強度差異。由於對於雲來說IR1幾乎可以視為黑體，表示其亮溫基本上可以代表雲頂的真實溫度，將該溫度代入普朗克函數中計算IR4波段的黑體輻射 B 。將輻射能量除以黑體輻射的物理意義為「發射率」，因此衛星觀測之IR4能量除以 B 後可以得到「3.9 μm 偽發射率」。

地則視地表類型呈現各種灰色。因此，透過可見光的反照率，我們能夠分辨出晴空區域與雲霧覆蓋區的差別。

4. 可見光反照率均勻度

僅僅使用反照率判斷還不足以完整描述霧的特徵，深對流雲同樣會形成高反照率，但與霧的現象截然不同，為了區別對流系統與霧，就必須使用「表面均勻度」的特性差異。

一般而言在霧頂會呈現非常均勻的特性，因此由可見光反照率的均勻程度，可以分辨出一般的積雲與霧的不同。計算方法為該網格點為中心，向外延伸至3x3矩陣資料的標準差。

5. 紅外線亮溫均勻度

同理，紅外線能反映出雲頂的發射特性，與雲的高度有關，也能反映出一定程度的霧頂特性，紅外線還有一個優點，就是不論日間或夜間都可以使用。計算方法與可見光反照率均勻度相同。

（二）日夜間反演的差異

日夜間使用的反演方法略有不同，夜間網格的偵測方式以 $3.9\ \mu\text{m}$ 偽發射率為主，利用霧與低雲在 $3.9\ \mu\text{m}$ 發射特性的物理特性，也是傳統偵測霧區的主要方法；而日間區域則使用可見光雲頂的反照率及均勻度特性，辨別均勻度高的霧，及其他的天氣現象。兩者都會將「輻射地表溫差」及「紅外線均勻度」的因子納入，以增加產品的可信度。

由於反演式在日夜區域分別追蹤兩種不同的物理特性，日夜交替之處勢必會有不連續的狀況發生，為減緩該現象，設定太陽仰角1度至5度為過渡區域，將同時進行日夜因子的研判，只要任何一組判斷因子達到條件，即視為「霧或低雲」存在的網格。

（三）研判因子的閾值

尋找霧與低雲時分為兩個階段：第一階段以網格點為單位，找出具有霧區特性的資料點，並且將相鄰的網格視為同一個目標物。第二階段針對每個目標物進行統計特性分析，挑選出整體上含有明顯霧區特徵的目標。

定義五種研判因子閾值的依據，是透過連續衛星雲圖以人為主觀判別霧區或非霧區，如圖二所示。一般而言，顏色接近黑色的區域為晴空區，白色且會隨著時間移動消長的是雲；若呈現白色但隨時間僅在邊緣有緩慢消長的

區域，則判斷為「霧」。資料選取自2015年12月28日至2016年2月29日期間，東亞地區有霧發生的時段，於同一時間取得相同網格數目之「晴空」、「雲」以及「霧」，並將挑選出的網格資料以不同顏色打點後繪製成散佈圖，如圖三所示。

可以發現三種不同的網格資料各自分佈在特定區域，由分佈狀況就可以很容易定義出可見光、紅外線以及輻射地表溫差等四個因子的合理閾值。

第一階段中，使用「涵蓋95%霧區網格的閾值」為標準。此外，清晨與黃昏區域的可見光反照率數值會因為太陽仰角呈現偏低的數值，若以一致的標準定義反照率閾值，在這些區域的偵測能力會下降。為此，在處理可見光相關的研判因子時，會針對太陽仰角25度以下的網格，以線性方式進行閾值調整，使反演式能考慮清晨與黃昏的特性。

由於夜間沒有可見光雲圖，紅外線雲圖又無法有效研判出霧區所在位置，因此定義夜間因子「 $3.9\ \mu\text{m}$ 偽發射率比值」的閾值時，先以日間可見光雲圖判斷霧區的位置後，仰賴「連續的衛星雲圖」與「霧區有長時間滯留的特性」，反推夜間霧的位置，並且在其霧區中心向外取30個資料點。

根據霧區的物理特性，「 $3.9\ \mu\text{m}$ 偽發射率的比值」會比非霧區還小，因此這30點之中霧區網格點的數值較低，而非霧區的網格數值會比較高，從排列之後的序列圖可以發現，在約0.9的附近有明顯的斷層，顯示了霧及非霧在特性上的差異，即為合理的閾值區間，如圖四所示。

第二階段僅選擇「輻射地表溫差」、「紅外線均勻度」、「可見光均勻度」三項指標，以「涵蓋85%霧區網格的閾值」為標準，對每個目標物進行統計分析，若滿足閾值的網格數目占總數的50%以上，則定義該目標物為「霧或低雲」。

日夜間五個研判因子於兩個研判階段的閾值及其變化如表一及表二所示。

四、討論

本產品針對2016年初東亞地區的霧區偵測，比較人為主觀判斷後發現有不錯的結果，可以在日間提供有效的偵測方法，取代人力判別雲圖；夜間的反演亦能取代目前氣象衛星僅能研判夜間霧區的傳統方法，得到相近的結果。產品樣式如圖五所示。

圖五為2016年4月10日上午於金門馬祖發布濃霧特報時的霧區反演結果，不但可以掌握濃霧的範圍，還可以藉由Himawari每10分鐘一

次的觀測，監測霧的消長情形，推估濃霧消散的時間。

圖六為4月6日上午8點之霧區反演結果。當天上午基隆港發生濃霧，兩度封港，管制時間長達4小時，直到上午11時30分才解除。由衛星亦可清楚地掌握濃霧發生的區域，對於海上航行的安全具有相當的參考價值。

以同步衛星資料為基礎進行天氣資訊之反演時，會受到衛星資料本身的限制。根據定義，水平能見度小於1公里且濕度高於75%時稱之為霧，而本產品雖然以「霧」為主要偵測對象，但其方法並非直接偵測近地表能見度與濕度，故其反演出的產品並不代表地面真實的能見度或濕度資訊，僅能代表在該處雲頂「具有霧的特徵」，高度較低的層雲也有類似的物理特性，故本反演式所求得的資訊屬於「霧或低雲」的分佈狀況。

技術上由於受限於「紅外線與可見光僅能偵雲霧表面資訊」的限制，在高雲覆蓋時將使其無法對近地面進行有效偵測，故即使霧區產品上沒有顯示出霧區的特性，還是必須考慮到「高雲覆蓋於霧區上空」的狀況。

如圖五中的金門地區，雖然產品並沒有標示霧區特徵，但是由於雲圖可以發現金門上空有雲覆蓋，因此雲底下還是有可能出現霧的現象，因此使用本產品時建議搭配衛星雲圖進行研判。

五、未來展望

「霧與低雲」的分佈情況直接影響到海上及空中交通的安全，霧區產品能不分晝夜監測霧區出現的潛在位置，提供大範圍可能影響到能見度之天氣資訊，縮短天氣人員由雲圖判讀霧區的時間，不論是氣象監測或是交通安全均有應用價值。

氣象預報發展至今，不論是氣象人員或是一般民眾，對於氣象資訊的需求愈來愈高，而除了「霧」或「非霧」的資訊之外，未來將進一步嘗試提供霧區的潛勢指數，辨別「明顯霧區特性」及「不明顯霧區特性」的差異性，提高產品的應用價值。

參考文獻

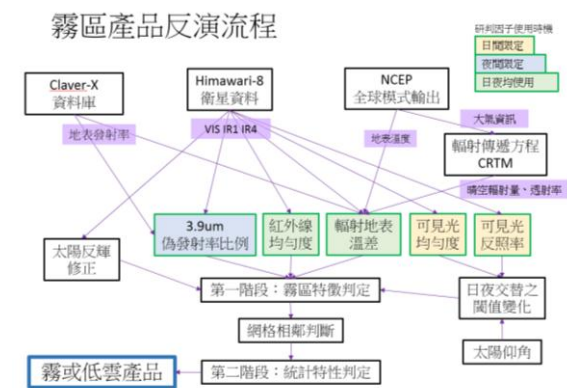
- Calvert C. and M. Pavolonis, 2010: GOES-R Advanced Baseline Imager(ABI) Algorithm Theoretical Basis Document For Low Cloud and Fog. Version 1.0
- Cermak J., Eastman R.M., Bendix J., and Warren S.G., 2009: European climatology of

fog and low stratus based on geostationary satellite observations, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **135**, 2125-2130.

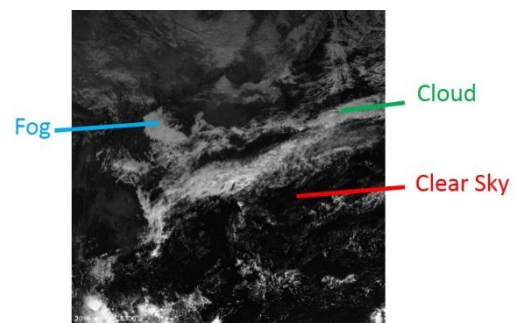
Ellrod, G. P., 1995: Advances in the detection and analysis of fog at night using GOES multispectral infrared imagery. *Wea. Forecasting*, **10**, 606-619.

Gultepe I., M. Pagowski, J. Reid, 2007: A Satellite-Based Fog Detection Scheme Using Screen Air Temperature. *Wea. Forecasting.*, **22**, 444-456.

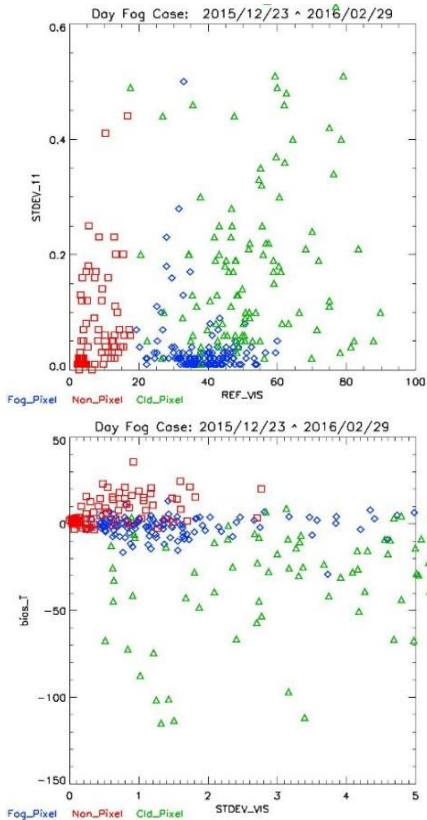
附圖



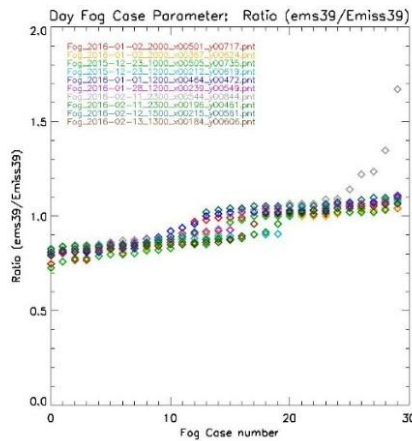
圖一、「霧與低雲」反演流程圖。



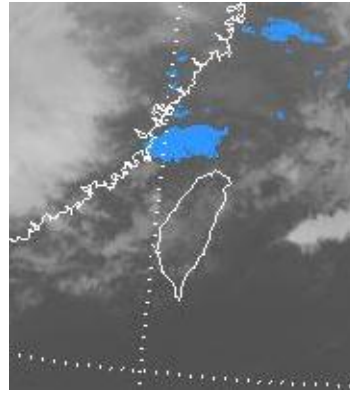
圖二、以可見光雲圖進行人為主觀之雲霧分類。一般而言顏色較深的為晴空區，白色且會隨著時間移動的是雲；若呈現白色但隨時間僅有緩慢消長的區域，則判斷為「霧」。



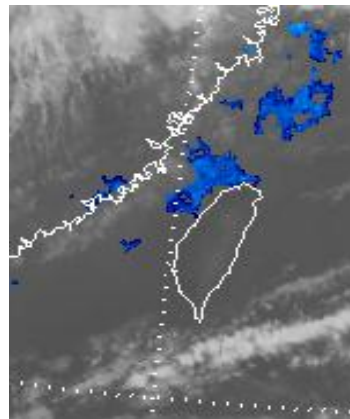
圖三、上圖橫軸為可見光反射率，縱軸為可見光均勻度（3x3標準差）；下圖橫軸為可見光均勻度，縱軸則為輻射地表溫差。散佈圖的點藍色為霧區、紅色為晴空、綠色為有雲的區域。



圖四、橫軸為取樣點，縱軸為「 $3.9\ \mu\text{m}$ 偽發射率的比值」。散佈圖不同的顏色表示不同的霧區個案，將資料點由小至大排列之後，可以清楚地發現霧區與非霧區的特徵差異，約在0.9左右的位置。



圖五、為台灣時間2016年4月10日上午7時整，Himawari-8霧與低雲產品疊加紅外線衛星雲圖。藍色部份為反演式求得之具有「霧與低雲」特徵的區域。中央氣象局當天上午7時15分發布濃霧特報，金門及馬祖南北干機場皆為暫停飛機起降的狀態。



圖六、與圖四相同，但為台灣時間2016年4月6日上午8時整。當天上午基隆港因濃霧影響能見度，數度封港，影響船隻進出口。

第一階段 研判因子	數值範圍	太陽仰角3度時 的數值
$3.9\ \mu\text{m}$ 偽發射率之比值	< 0.92	無遞減
輻射地表溫差	-12k ~ 15k	無遞減
可見光反射率	20%	1.5
可見光均勻度	< 3.84	0.35
紅外線均勻度	< 0.07	無遞減

表一、第一階段各研判因子的閾值。當太陽仰角小於25度時，與可見光相關的因子閾值將會線性遞減，右邊欄位表示當太陽仰角為3度時該因子閾值遞減後的數值。

第二階段 研判因子	數值範圍
輻射地表溫差	> -10k
可見光均勻度	< 2.15
紅外線均勻度	< 0.04

表二、第二階段各研判因子的閾值，能涵蓋霧區網格85%的資料。