

# 應用 MTSAT2 衛星資料估算臺灣地表日射量

胥立南

中央氣象局 氣象衛星中心

## 摘要

地表日射量之估算利用 MTSAT2 衛星的可見光(白天)、紅外線 1 與紅外線 2 之頻道資料放入臭氧吸收、Rayleigh 散射、懸浮微粒散射、水汽吸收及晴空與雲量衰減指數(賴彥任,2010)之公式；其中大氣質量係數須考慮地形效應，因此，本研究採用中央研究院製作解析度為 30m 臺灣數位地形模式資料；另外，天文因素之中的太陽常數年際變化修正、太陽赤緯、太陽天頂角亦是影響日射量在地表分佈重要因子，皆將在本研究中進行探討。

關鍵字: MTSAT2

## 一、前言

太陽輻射是地面、大氣與生態系的主要能源，亦會影響植被的分佈與生長，且地表緯度、高度、季節與雲均會影響日射量。而太陽輻射依據量測的位置可區分為大氣層頂日射及近地面之全天空日射量(global solar radiation)兩種，首先大氣層頂日射可依緯度、太陽時角、日地距離三種因子決定，其次近地面量測之太陽輻射受大氣分子、懸浮微粒、雲層影響而降低，尤以雲本身較複雜，其中包括雲厚、雲量、雲高、水汽、水滴與冰晶皆會影響太陽光的直射及散射。

## 二、資料來源與處理

為了要將資料放入反照率，也就是 可見光頻道除以天頂角( $\cos \theta$ )，且水汽吸收率公式亦需使用紅外線頻道；MTSAT2 有紅外線 1 在  $10.3\sim11.3\mu\text{m}$ 、紅外線 2 在  $11.5\sim12.5\mu\text{m}$ 、可見光頻道是  $0.55\sim0.80\mu\text{m}$ ，一般紅外線星下點的解析度是 4km，可見光星下點解析度是 1km；此外 SeaSpace 的 receiver 1 小時內可接收 2 至 3 筆資料，然後將此 1 小時的資料平均，再放入公式估算；另外 SeaSpace 本身可提供一些應用程式，如 Tmaster 可萃取所需區域、Angles 可擷取資料經緯度，故在用公式估算及製影像檔時，可一個經緯度對一個像元(pixel)，如此影像與海岸線較不會錯移，之後再利用 Exbin 之應用程式輸出為二進位格式。

為了估算大氣質量係數需加入地形資料，因此，本研究採用中央研究院人社中心地裡資訊科學研究專題中心製作，臺灣數位地形模式資料解析度為 30m，然

後再利用 QGIS(Quantum Geographic Information System)軟體萃取臺灣區域，須和 SeaSpace 之 Tmaster 應用程式所擷取臺灣範圍相同。

一般利用公式估算的資料，需用另一組資料驗證其值是否合理，因此，本研究採用中央氣象局觀測站全天空日射儀的資料做比對，其所包含的輻射量有入射於水平面直達日射、由全天空全方向入射之散亂光、以及雲等反射之反射光。

## 三、計算方法

### (一)天文因素

#### 1.日地距離太陽常數修正：

太陽常數(solar constant)是日地平均距離( $1.5*10^8\text{km}$ )，在大氣層頂，垂直入射在每單位面積上的太陽輻射強度。採用 Frohlich and Brusa (1981) 研究 8 種觀測資料後的太陽常數(solar constant,  $I_{sc}$ )， $1367\text{Wm}^{-2}$ ；之後再以 Duffie and Beckman(1980)提出的方程式進行因日地距離變動的太陽常數修正。

#### 2.太陽赤緯( $\delta$ )(Cooper, 1969)：

太陽赤緯又稱赤緯角，地球繞太陽公轉的平面(黃道面)與地球自轉的平面並非平行，其間有  $23.45^\circ$  的差異，再加上地球繞太陽公轉的軌道(黃道)是橢圓形而非正圓形，因此會產生為赤緯角(solar declination)。本研究採用 Cooper (1969)：

$$\delta = 23.45^\circ \cdot \sin \left[ \frac{360}{365} (J + 284) \right]$$

J：太陽日(Julian Day)

### 3. 時角( $\omega$ )：

因為地球自轉一周約為 24 小時，所以，太陽每小時大約自東往西移動  $15^\circ$  ( $360^\circ/24$ )，定義正午的時角為  $0^\circ$ 。

$$\omega = 15^\circ (t - 12)$$

$\omega$ ：正午為零度，下午為正；上午為負

$t$ ：當時時刻所決定

### 4. 太陽天頂角 ( $\theta$ ；曾，1988)：

太陽高度角是從觀測者所在地和太陽中心的聯線與地平面所夾的角度。天頂角是高度角的餘角，當太陽的高度角為  $90^\circ$ ，即太陽位於頭頂，因此太陽的天頂角為  $0^\circ$ 。

$$\cos \theta = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega$$

$\theta$ ：太陽天頂角 degree.

$\varphi$ ：地理緯度 degree

$\delta$ ：太陽赤緯 degree

$\omega$ ：時角 degree

### 5. 太陽常數年際變化修正 (Duffie and Beckman, 1980)：

$$(dm/d)^2 = 1 + 0.033 \cos(2\pi J/365)$$

$$I_o = I_{sc} \cdot (dm/d)^2$$

$\pi$ ：3.14159

$J$ ：太陽日(Julian Day)

$d$ ：日地距離 Km

$d_m$ ：平均日地距離 Km

$I_{sc}$ ：太陽常數 (1367)  $\text{Wm}^{-2}$

$I_o$ ：經天文因子修正後之太陽常數  $\text{Wm}^{-2}$

### (二) 大氣效應(賴彥任, 2003)

太陽輻射能量穿越大氣層，一部分到達地面，稱為直接太陽輻射；另一部分受到大氣裡的水汽、臭氧、懸浮微粒、雲與其他氣體分子吸收、散射等作用而減；因此，本研究採用各類之相關公式推估此效應。

#### 1. 直接輻射量：

$$Dir = I_o \cos \theta \tau_o \tau_r \tau_w \tau_a \quad (1)$$

#### 2. 天空光輻射量：

##### (i) Rayleigh 散射輻射量

$$Dir_f = I_o \cos \theta \tau_o 0.5(1 - \tau_r) \tau_a \quad (2)$$

##### (ii) 懸浮微粒散射輻射量

$$Dir_a = I_o \cos \theta \tau_o \tau_r \tau_w F_c \omega_0 (1 - \tau_a) \quad (3)$$

$\tau_o$ ：臭氧透射率

$\tau_r$ ：Rayleigh 散射透射率

$\tau_w$ ：水汽透射率

$\tau_a$ ：懸浮微粒透射率

$\omega_0$ ：單次散射反照率

$F_c$ ：懸浮微粒散射佔全部散射量之比例

.Rayleigh scattering 減光效應的大氣透射率( $\tau_r$ )：

$$\tau_r = \exp [-0.0903 m_a^{0.84} (1.0 + m_a - m_a^{1.01})] \quad (4)$$

大氣質量係數(Kasten, 1966)：

$$m_r = 1 / [\cos \theta + 0.15(93.885 - \theta)]^{-1.253} \quad (5)$$

$m_r$ ：relative air mass

不同海拔高度的大氣質量( $m_a$ )：

$$m_a = m_r (p/p_0) \quad (6)$$

不同海拔(Elev)的大氣壓力與海平面的壓力比(Lunde, 1980)：

$$p/p_0 = \exp(-0.0001184 \cdot \text{Elev}) \quad (7)$$

亦或用：

$$p/p_0 = ((288 - 0.0065 * \text{Elev})/288)^{5.256} \quad (8)$$

(List, 1984、Kreith and Kreider, 1978)

$p$ ：surface air pressure

$p_0$ ：1013.25mb

Elev：不同的海拔高度，是採用中研院製作的數值地形模型(DEM)資料，解析度為 30m。

$$Y = 2.13134 - 0.7920601 \ln(m_a) + 0.024749 [\ln(m_a)]^2 \quad (9)$$

(Davies, 1987)

臭氧層(ozone)吸收效應之大氣透射率( $\tau_o$ )(Lacis, Hanse, 1974)：

$$\tau_0 = 1 - 0.02118 * Lo_3 * m_r / (1 + 0.042 * Lo_3 * m_r + 3.23 * 10^{-4} * (Lo_3 * m_r)^2) - 1.082 * Lo_3 * m_r / (1 + 138.6 * m_r^{0.805}) -$$

$$0.0658 * Lo_3 * m_r / (1 + (103.6 * Lo_3 * m_r)^3) \quad (10)$$

$$Lo_3 = 0.235 + (0.150 + 0.04 * \text{SIN}(x * 2\pi / 365.25) + 0.02 * \text{SIN}((lon + 20) * 3)) * \text{SIN}(1.28 * lat) * 2 \quad (11)$$

(Van Heuklon, 1979)

其中  $Lo_3$  厚度會隨緯度與季節改變，而臺灣因地狹，故也可用定值取代，如  $Lo_3$  等於 0.4cm(Lacia and Hansen,1974)。

$x = jd - 30$

$Lo_3$  : 垂直臭氧層含量(cm)

$jd$  : Julia day

$Lat$  : 緯度

$Lon$  : 經度

$pi$  : 3.14159

懸浮微粒減光效應的大氣透射率( $\tau$

$a$ )(Macher,1983) :

進入大氣中的太陽輻射會受到懸浮微粒吸收與散射，而懸浮微粒存在的高度，氣溫可能升高，其他地區相較則變冷。

$$\tau_a = 0.12445 \alpha - 0.0162 + (1.003 - 0.125 \alpha) * \exp [ \beta / m_r (1.089 \alpha + 0.5123) ] \quad (12)$$

- Angstrom 細濁係數  $\alpha = 1.3$

- Angstrom 細濁係數  $\beta = 0.1$  (11-3 月)

$\beta = 0.2$  (4-10 月)

水汽(water vapour)的大氣透射率( $\tau_w$ )：

水汽(滴)是吸收日射最強的介質，且到處都是吸收帶，主要吸收帶處於可見與紅外光的紅光部分，因水對紅外線有極大的影響。另外由兩個位於大氣窗區的相鄰頻道受大氣水氣影響而衰減(attenuation)的程度不同，故可藉此差異來進行大氣中之水氣訂正

$$\tau_w = 1 - 2.9U_1 \left[ (1.0 + 141.5U_1)^{0.635} + 5.925U_1 \right]^{-1} \quad (13)$$

$U_1 = W_{mr}$  : 水汽的大氣質量

$w$  : 可降水量；陰天為 3.0 (g/cm<sup>2</sup>)，晴天為：

$$w = \frac{1}{0.095} \left[ (\cos \theta_{sat} \cdot \ln \frac{T_1 - T_a}{T_2 - T_a}) - 0.025 \right] \quad (14)$$

(Yoshimi Kawai, Hiroshi Kawamura, 2005)

其中  $\theta_{sat}$  為 Mtsat2 同步衛星天頂角

$T_1$  : mtsat2 第 1 紅外線頻道亮度溫度(°K)

$T_2$  : mtsat2 第 2 紅外線頻道亮度溫度(°K)

$T_a = T_2 - 2.2$ : 地表溫度(°K)

. 單次散射反照率(single scattering albedo)( $\omega_0$ )：

單次散射反照率是計算全球氣候模式的一個重要參數，可表示懸浮微粒在吸收與散射的比例。

本研究採用的單次散射反照率，是利用日光的波長，從 0.0005μm 開始計算至 1000μm，每隔 0.001μm 計算 1 次，之後得至結果，才放入懸浮微粒散射公式。

$$\omega_0 = 0.8569 + 0.0436 * \lambda \quad (15)$$

$\lambda < 2 \mu m$

$$\omega_0 = 0.9441 - 0.08817 * \exp(1 - 3.3815 * \lambda) \quad (16)$$

$\lambda \geq 2 \mu m$

$\lambda : 0.0005 \sim 1000 \mu m$

$\delta : 0.001$

(Christian, 1993)

不同太陽天頂角，懸浮微粒向下散射，佔全部散射量之比例(Fc)；本研究採用下列二種公式，可相互驗證懸浮微粒日射量向下散射比例。

$$Fc = -0.2562 \theta^2 + 0.1409 \theta + 0.9067 \quad (17)$$

(Robinson, 1963)

$\theta$  : 太陽天頂角

. 在 Tanahashi(2000,2001)大氣中有雲與無雲判斷式中，無雲的條件為太陽天頂角小於 50°，且反照率小於 0.15 時，視為晴空條件，反之則有雲；然後晴空與有雲所採用的公式略有不同，尤以有雲時須考量雲的反射與吸收。

- 晴空狀態， Albedo < 0.15,  $\theta < 50$

$$I_{mts} = (Dir + Dif_r + Dif_a) \quad (18)$$

- 反之為有雲狀態

$$I_{\text{mts}} = (\text{Dir} + \text{Dif}_r + \text{Dif}_a) / (1 - a \cdot A) \quad (19)$$

$$\text{Albedo} = R / \cos \theta$$

R : Mtsat2 Visible

a : 當有雲時，日射衰減大氣參數，隨著雲的反照率與TBB(Equivalent Black Body Temperature)值而變動，如表 1。

## 四、結論與討論

當利用各種大氣環境公式，估算 Mtsat 每一像元(pixel)太陽輻射量後，再來就須考慮天氣條件，因為輻射經過大氣層時，會受雲中的水汽、水滴與冰晶的影響，因此，利用中央氣象局氣象觀測站雲量觀測資料，瞭解雲量密疏，故取 10 月 20 日 6 時至 19 時雲量觀測，如圖 1 是臺北、臺中、臺南、花蓮、臺東的雲量，由圖 1 可知當天雲量較稀疏，所以從圖 2 顯示日射量是較高。

通常以公式推算的資料，均會找另外的資料來做比對，故本研究採用中央氣象局觀測站全天空日射儀推算的值做比較。由圖 3 可知在疏雲的情況下，臺北、臺中、臺南、花蓮、臺東相關係數均在 0.9 以上，故估算的值似乎較接近觀測值。然後在比較多雲情況下所推估的日射量，由圖 4 得知，臺北、臺中、臺南、花蓮、臺東實際觀測雲量，尤以臺北雲量較多，其次是臺中、臺東，且從圖 5 顯示日射量較圖 2 太陽輻射量低。因此，從圖 6 的散佈圖可得知，尤其是臺東雲量較多時，相關係數由 0.97 降至 0.77，其次是臺北從 0.95 降至 0.86，其他地區亦均減少。

除了雲量的密疏之外，其實影響日射量較重要的因素為雲屬，因為不同的雲屬，雲的垂直發展、厚度與底部均不同；如圖 7 是利用 Mtsat2 的 ir1、ir2、ir3、ir4 之亮溫差異性，做為條件式，可粗略判別雲類，如圖 7(a)至(d)似乎北部與東北部是屬於中雲及積(雨)雲，中部與東部屬於較淺薄的低雲和中雲；圖 7(e)和(f)臺中、臺南已發展成積(雨)雲，另圖 8 為實際雲量觀測，圖 9 是 MTSAT2 之可見光雲圖，顏色愈白，表示反照率愈大，也就是雲層較厚，如臺北的雲量就較多，所以從圖 10 太陽輻射量散佈圖顯示，臺北相關係數比圖 6 的相關係數較低；臺中、臺南的雲量漸增，似乎有形成積(雨)雲的現象，尤以臺南在下午有較旺盛的對流雲，因此圖 10 相關係數較圖 6 稍低；臺東因

低雲較淺薄及從圖 8 與圖 9 中顯示雲量不夠濃密且雲量也較疏，故相關係數較高；花蓮地區由圖 7 可知屬於較薄的低雲，圖 8 與圖 9 顯示雲量從下午漸增，故相關係數為 0.73。

誌謝

本研究有初步之成果，是因為在 2013 年 7 月 19 日台大大氣系林博雄老師帶其學生賴彥任博士至本中心演講，且將完整內容交予本中心，並回答一些艱澀問題，才使本中心對日輻射略有概念，俾以提供農委會農試所資料。特此感謝。也感激本中心同仁汪琮先生提供雲分類程式，讓此研究更瞭解雲對日射量之影響。

## 參考文獻

- 賴彥任,林博雄,2005；到達地面太陽輻射量之空間分布推估模擬，天氣分析與預報研討會論文。
- Tanahashi, S. H. Kawamura, T. Matsuura, T.Takahashi and H. Yusa, 2000: Improved estimates of hourly insolation from GMS S-VISSR data. *Remote Sens. Environ.*, 74,409-413
- Tanahashi, S. H. Kawamura, T. Matsuura, T. Takahashi and H. Yusa, 2001: A system to distribute satellite incident solar radiation in real-time. *Remote Sens. Environ.*, 75, 412-422.
- Yoshimi Kawai,Hiroshi Kawamura,2005:Validation and Improvement of Satellite-Derived Surface Solar Radiation over the Northwestern Pacific OceanJournal of Oceanography, Vol. 61, pp. 79 to 89,
- Gueymard, C., 1994. Simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine, version 2 (SMARTS2): algorithms description and performance assessment. Florida Solar Energy Report, FSEC-PF-271-94.
- Lai, Y., M. Chou, and P. Lin, 2010 : Parameterization of topographic effect on surface solar radiation, *J. Geophys. Res.*, 115, D01104, doi:10.1029/2009JD012305
- Trieste 1988:fortran programs for computing the clear sky solar direct and diffuse spectral irradiance at the ground, international centre for theoretical physics; course on physical climatology and meteorology for environmental applications
- Christian Piedallu,Jean-Claude Gégout,2007:Multiscale computation of solar radiation for predictive vegetation modelling, *Ann. For. Sci.* 64 899–909; DOI: 10.1051/forest:2007072

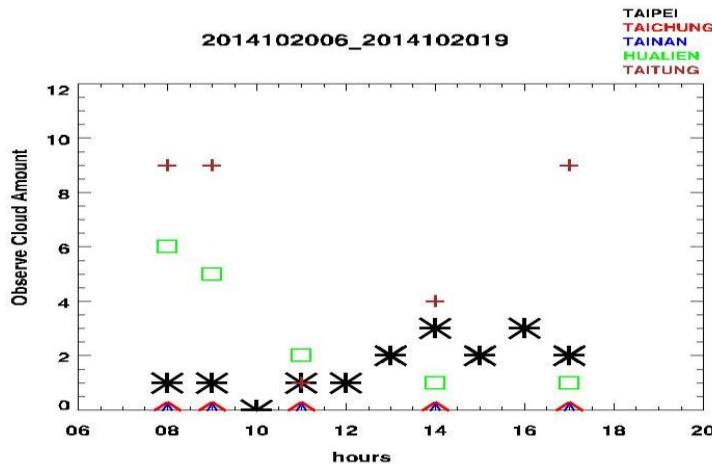


圖1、為10月20日06時CST至19時CST，臺北、臺中、臺南、花蓮、臺東雲量觀測，橫座標是小時，縱座標是觀測雲量

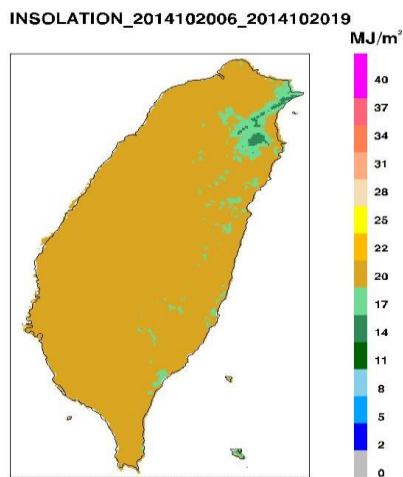
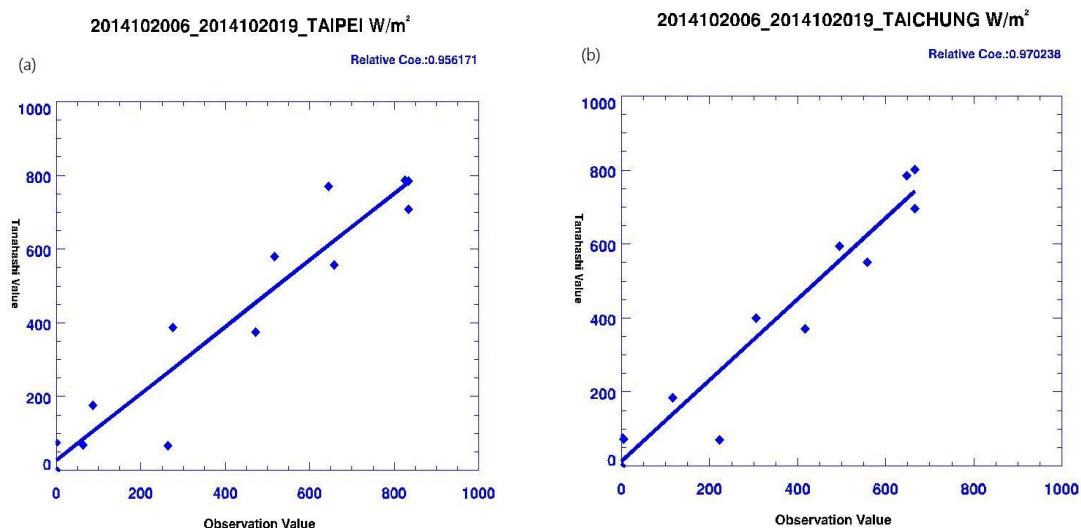


圖2為10月20日06時CST至19時CST累積日射量，單位MJ /m<sup>2</sup>。



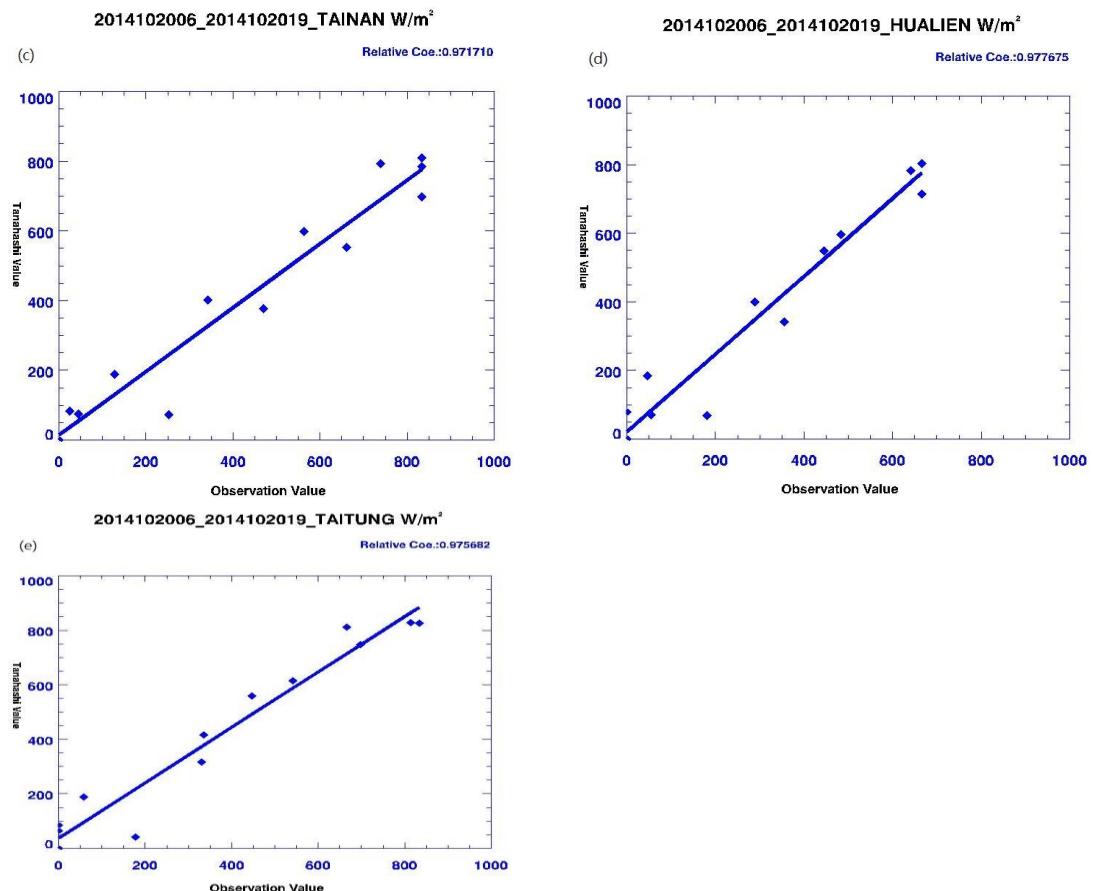


圖 3、(a)至(e)是臺北、臺中、臺南、花蓮、臺東疏雲之散佈圖，橫坐表是觀測值，縱座標是推估值；臺北、臺中、臺南、花蓮、臺東相關係數均為 0.9 以上。

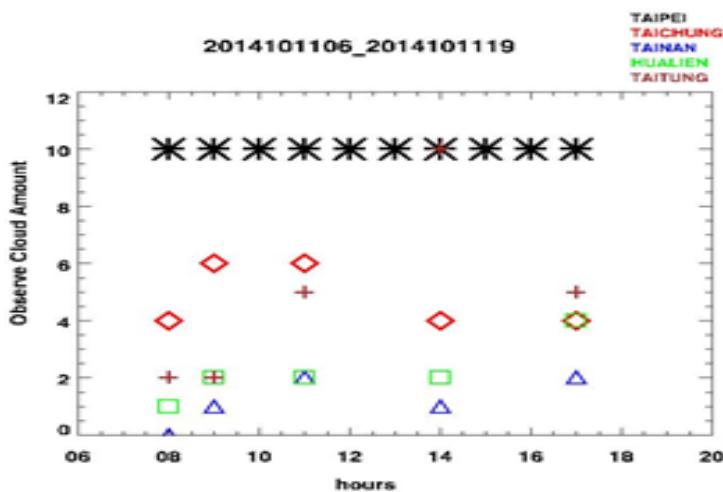


圖 4、為 10 月 11 日 06 時 CST 至 19 時 CST，臺北、臺中、臺南、花蓮、臺東雲量觀測，橫座標是小時，縱座標是觀測雲量。

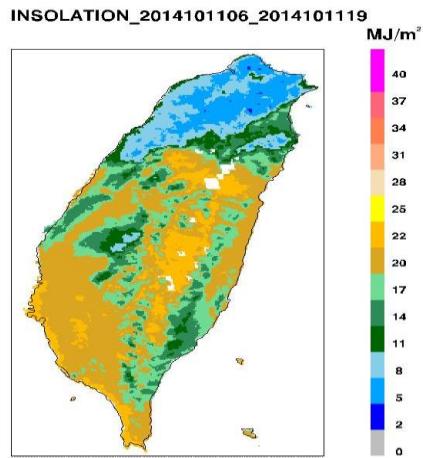
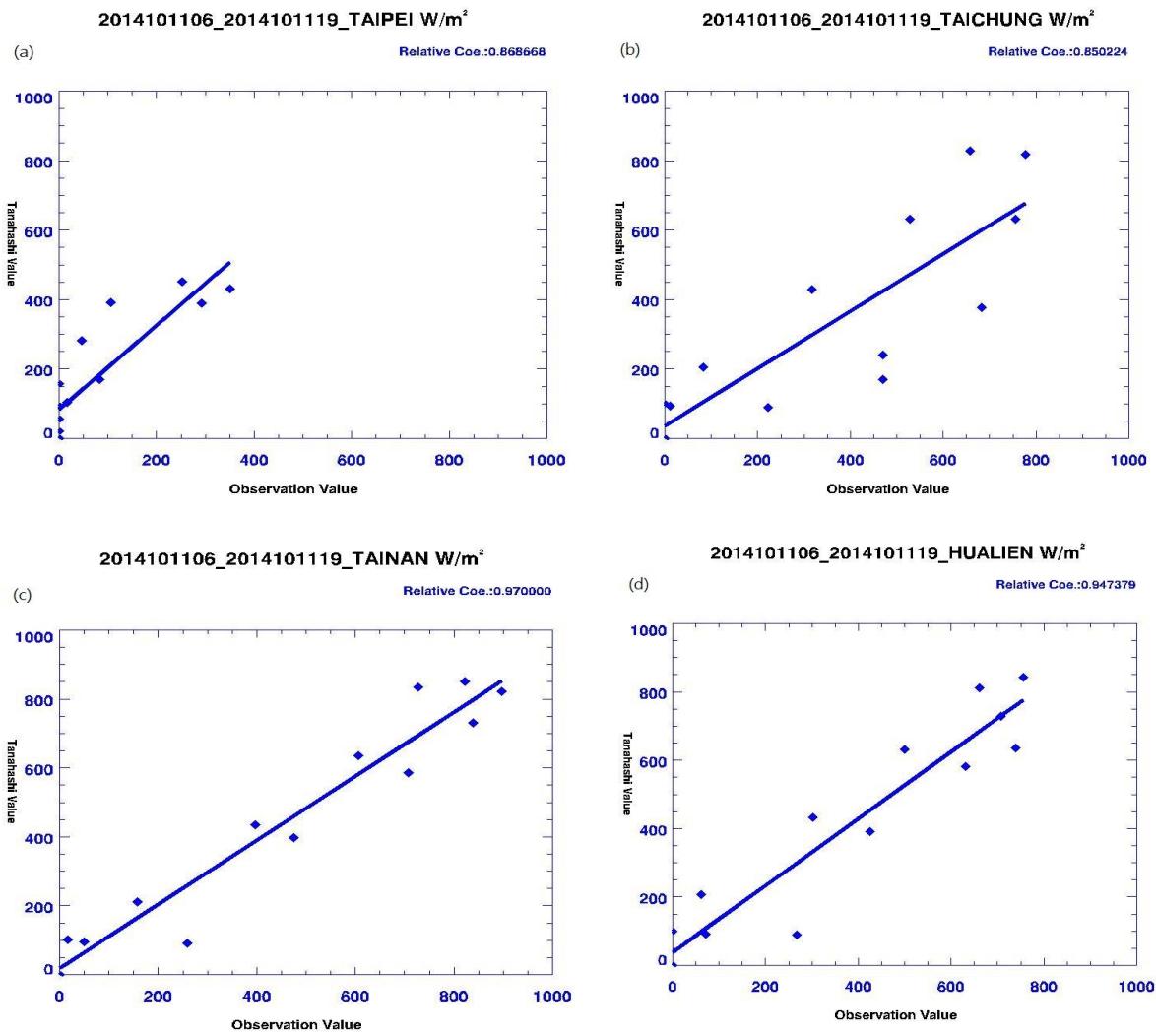


圖 5、為 10 月 11 日 06 時 CST 至 19 時 CST 累積日射量， $\text{MJ}/\text{m}^2$ 。



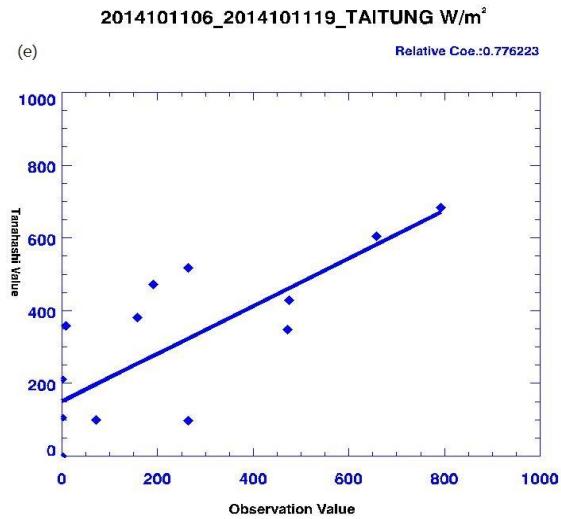


圖 6、(a)至(e)為 2014 年 10 月 11 日 6 時 CST 至 18 時 CST，臺北、臺中、臺南、花蓮、臺東多雲之散佈圖，橫坐表是觀測值，縱座標是推估值。

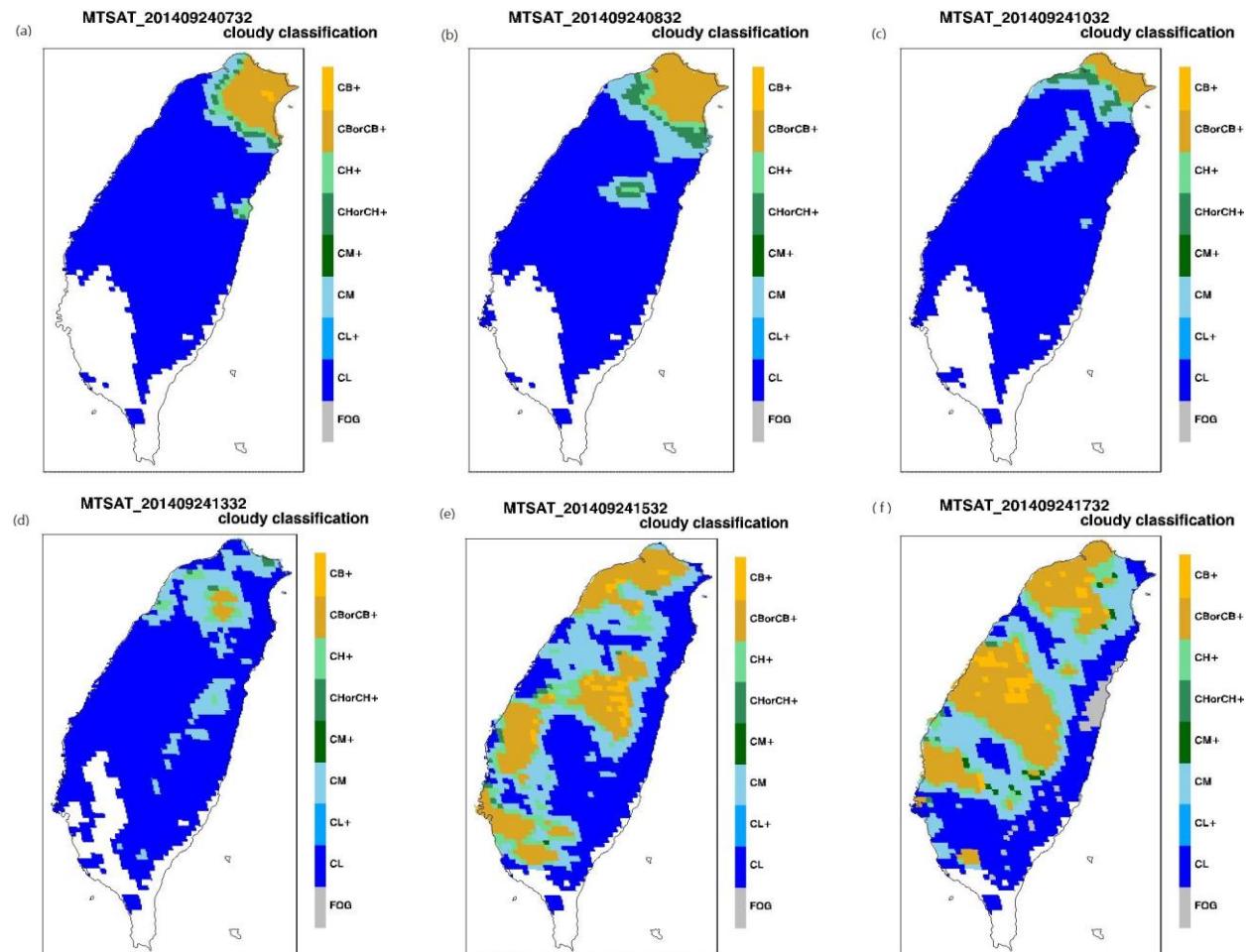


圖 7、(a)至(f) 為 2014 年 9 月 24 日 07 時 32 分 CST 至 17 時 32 分 CST 之雲分類

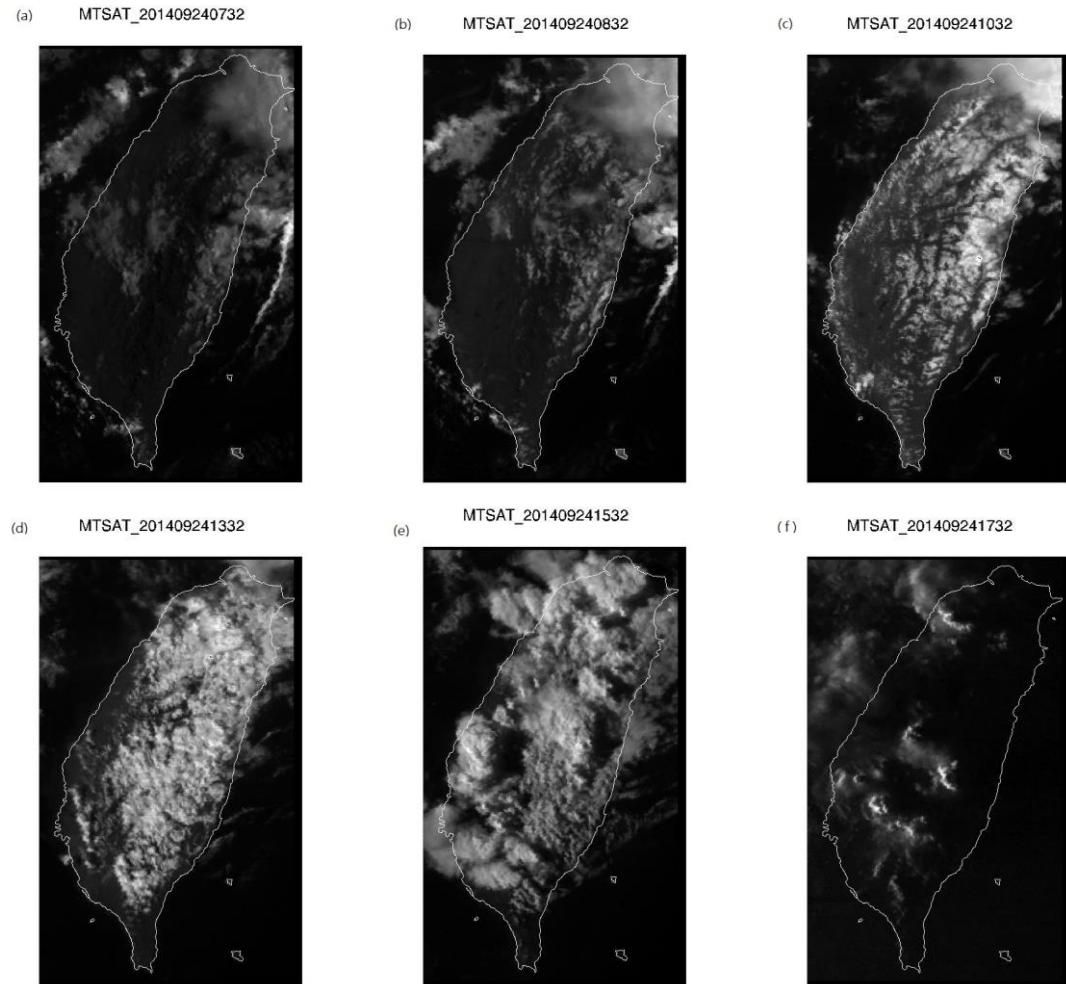


圖 8、(a)至(f)為 2014 年 9 月 24 日 07 時 32 分至 17 時 32 分 CST 之 MTSAT 的可見光。

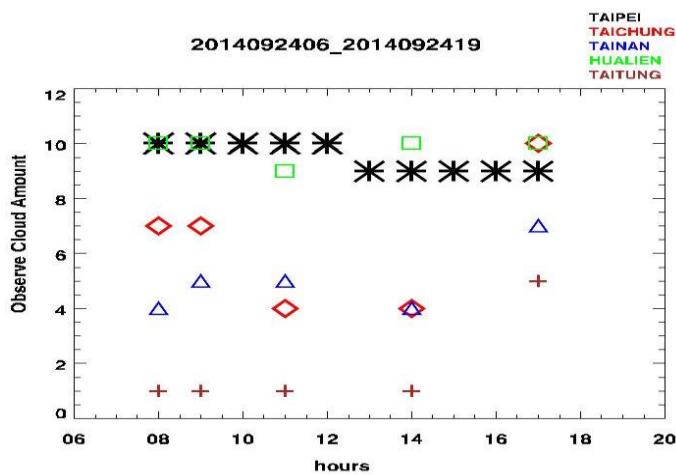


圖 9、為 9 月 24 日 06 時 CST 至 19 時 CST，臺北、臺中、臺南、花蓮、臺東雲量觀測，橫座標是小時，縱座標是觀測雲量。

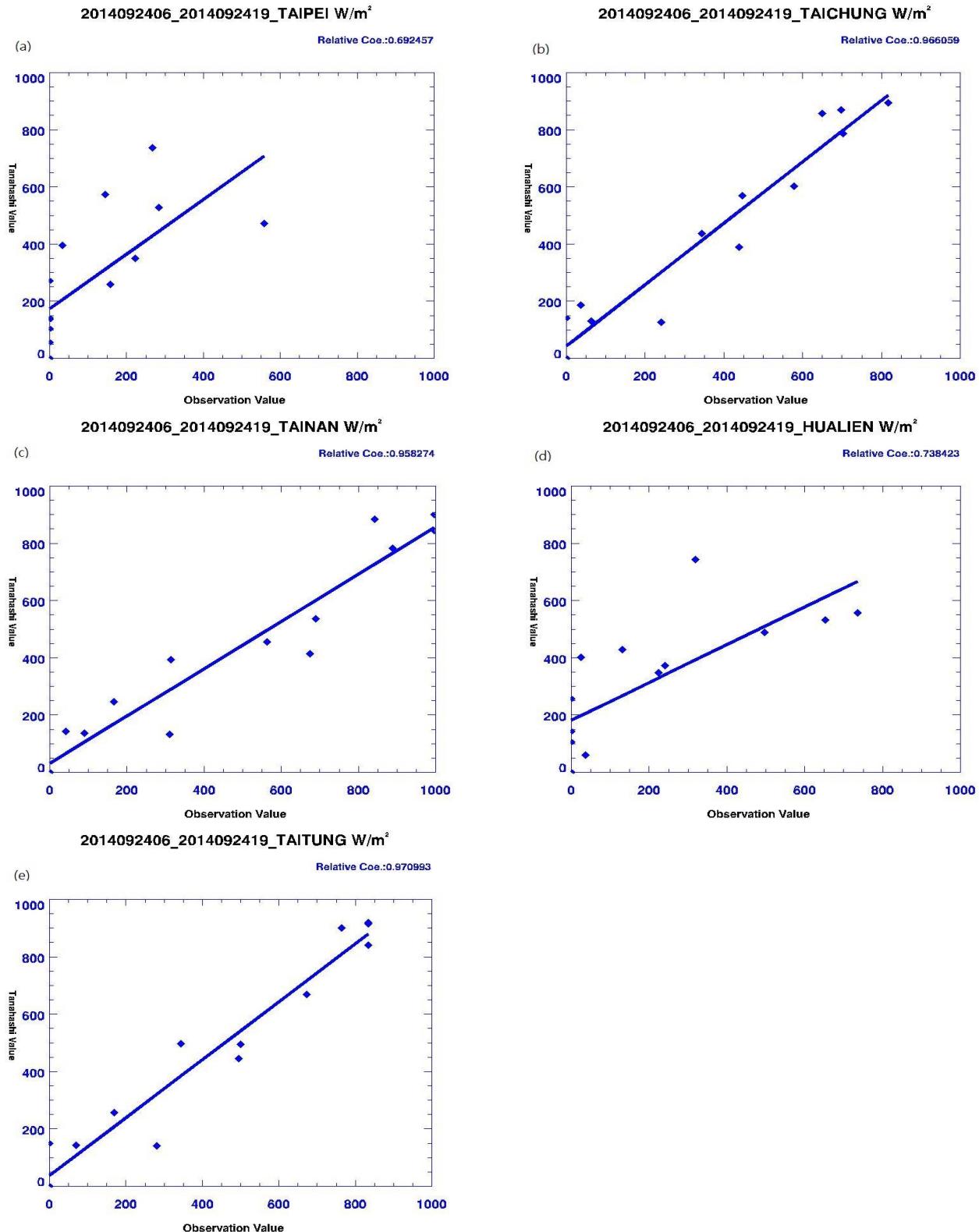


圖 10、(a)至(e)為 2014 年 9 月 24 日 6 時 CST 至 18 時 CST，臺北、臺中、臺南、花蓮、臺東比對散佈圖，橫坐表是觀測值，縱座標是推估值。

表1 Mtsat2 可見光反照率及紅外線 ir1 亮溫對照表，為衰減修正係數(a)

Albedo(%) \ TBB( °K)	10	20	30	40	50	60	70	80
200	1.0	1.1	1.12	1.14	1.16	1.2	1.2	1.2
210	1.0	1.1	1.12	1.14	1.16	1.2	1.2	1.2
220	1.0	1.1	1.12	1.14	1.16	1.2	1.2	1.2
230	1.0	1.1	1.12	1.14	1.16	1.18	1.2	1.2
240	1.0	1.1	1.12	1.14	1.16	1.18	1.2	1.2
250	1.0	1.1	1.12	1.14	1.16	1.18	1.2	1.2
260	0.9	1.1	1.12	1.14	1.16	1.18	1.2	1.2
270	0.9	1.1	1.1	1.14	1.16	1.18	1.2	1.2
280	0.7	0.9	1.06	1.1	1.13	1.16	1.18	1.2
290	0.5	0.7	1.05	1.1	1.13	1.16	1.18	1.2
300	0.3	0.5	0.9	1.1	1.13	1.16	1.18	1.2

TBB : Equivalent Black Body Temperature