

雲中閃電運用於雷暴守視與飛航天氣預警的初步研究

戴志輝¹ 王尹懋¹ 林裕豐² 林博雄¹

¹國立臺灣大學大氣資源與災害研究中心

²空軍氣象聯隊

摘要

雲中 (Intra-Cloud, IC) 閃電次數的增加, 代表對流系統正逐漸活躍中, 因此雲中閃電次數時間變率的突增 (Jump), 可做為雷暴所伴隨劇烈天氣現象的即時預警參考指標。本文使用台電公司觀測之雲中閃電資料, 並採用較簡單的雲中閃電次數躍升 (IC Jump) 定義方法, 分析2014年7月23日Matmo颱風兩帶內移動性雷暴個案。此個案分析結果顯示, 當IC Jump達到門檻後40分鐘, 地面觀測到10分鐘強瞬時降雨, 而其他類型雷暴個案分析結果亦顯示, IC Jump領先冰雹及強瞬時降雨出現。由於強瞬時降雨可能伴隨影響航空安全的低雲幕、低能見度及風切現象, 此結果說明IC閃電資料應有助於雷暴發展歷程的守視, 以及雷暴環境下飛航天氣的預警。

關鍵詞：IC Jump、強瞬時降雨、飛航天氣預警

一、前言

閃電的出現, 起因於對流內部固態與液態混合的水相環境中, 大小不一的水相粒子, 在垂直運動作用下碰撞、帶電及分離後形成充電區, 最後引起放電現象 (Deierling et al. 2005) 所致。在雷暴發展初期, 雲中閃電 (Intra Cloud, 簡稱IC) 活動最為活躍, 隨著雷暴發展成熟, 當雷暴核心 (Main Core of the Cell) 高度下降, 雲對地 (Cloud to Ground, 簡稱CG) 閃電才逐漸出現, 因此, 在雷暴生命期內, IC次數的峰值通常提前於CG出現 (Lang and Rutledge 2002), 而IC次數的總量通常也遠高於CG (Liao and Wang 2006); 又全閃電率的迅速減少或CG/IC比值的增加, 則多半代表雷暴正在衰減中 (Makowski et al. 2013)。這些特性, 使得追蹤IC數量的變動, 可運用於了解雷暴強度演變, 並即時預警其伴隨的劇烈天氣現象 (Severe Weather) 之出現 (Schultz et al. 2009; Gatlin and Goodman 2010)。

例如, 當多胞雷暴系統中各個對流胞發展階段一致, 或是單一雷暴的上升速度夠強, 皆可能導致冰粒子垂直通量增大, 引起全閃電數量突增 (Deierling et al. 2005); 故全閃電密集分布之處, 即為活躍對流 (Active Convection) 的位置 (Makowski et al. 2013)。閃電次數的躍升 (Lightning Jump, 為閃電次數的時間變率達某一門檻), 表示雷暴正快速發展, 此突增常領先於地面強風、冰雹及龍捲風等劇烈天氣現象的出現, 平均領先時間可達22分鐘 (Gatlin and Goodman 2010)。

CG的氣候分析顯示, 雖然CG多出現於暖季午後 (陳, 1994; 林, 1999), 但臺灣全年皆有受雷暴影響的可能; 在台灣電力公司之全閃電偵測系統 (Total Lightning Detection System, TLDS) 建立後, 也開始有一些IC的分析結果。例如譚 (2006) 分析2003~2005年TLDS資料, 亦認為全年皆有雷暴發生; Wang and Liao (2006) 建議可透過IC追蹤海洋性風暴 (Oceanic Storm) 的移動, 並預測

降雨區 (Rain Field) 的動向；戴等 (2008) 則認為隨著太平洋高壓軸線方向的逐月調整，臺灣附近中低層綜觀氣流風向由西南轉為東南，臺灣北部午後IC的主要分布位置也隨之由東轉西；吳等 (2009) 比對個案的雲模式模擬及全閃電時間序列，發現在中層軟電與高層冰晶的質量百分比同時達最大的12分鐘之後，閃電的數量達到最大值。這些研究均說明，診斷全閃電時間變率之演變，對雷暴之預警有應用價值。

雷暴所伴隨的如閃電、風切、低雲幕、低能見度等天氣現象，對於航空器的操作影響極大，但相對於其他天氣系統，可預報度卻甚低，在面對雷暴的潛在威脅時，預報的作業重心多以即時診斷及預警為主。固然雷達回波時間序列之診斷，對於對流強度及所伴隨天氣現象的判斷，已足以提供可信的參考，但格式簡單、更新頻率快且處理時間短的閃電觀測資料，有利於爭取額外的預警時間，並增加預報決策的信心 (Darden et al. 2010)，有助改善即時決策效率。戴等 (2015) 以個案探討方式，已說明應用IC資料判斷雷暴演變趨勢的可用性，本文引用其中的Matmo (2014) 颱風雨帶個案，來說明在雷暴環境下，IC資料的診斷對飛航天氣預警的幫助。第二節簡單說明分析方法，有關TLDS的資料特性，可參考戴等 (2015)，本文不再贅述，第三章敘述個案的分析結果，第四章為未來展望，第五章為結論與建議。

一、分析方法

Lightning Jump是指相對於過去時間內平均閃電次數的異常突增現象，需被明確定義才能做為判斷指標。但從原始資料過濾出閃電次數的方法、閃電次數及其時間變率的採樣時距、平均的方式、異常的定義等，皆會影響預警命中極大化以及錯誤預警極小化的結果 (Gatlin and Goodman 2010)；基於

TLDS資料尚存定位不確定性，以及系統性能提升所導致的資料定義改變 (戴等, 2015) 等原因，本文暫以「兩相鄰時段的IC次數時間變率均 >0 且增加」這項簡單原則，定義為某固定區域達到IC Jump的門檻標準。例如，當T1~T6等6個連續相鄰時段的IC次數分別為0、3、0、0、3及15次 時間-1，則T2~T6的「IC次數時間變率」分別為3、-3、0、3及12次 時間-2，其中T3~T4 (-3~0) 及T4~T5 (0~3) 皆不被視為IC Jump，僅T5~T6 (3~12) 會被視為IC Jump的出現。至於IC次數，是TLDS所記錄的單一雲中及雲中起點兩種型式之總和。

雖然計算Lightning Jump為目的之一，在無須等待雷達回波去除雜訊、整合資料等前置作業所需之時間滯滯情況下，亦能預警劇烈天氣現象的發生 (Gatlin and Goodman 2010; Makowski et al. 2013)，但為了說明閃電變化與雷暴發展之間的關係，本文仍比對氣象局QPESUMS (Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiple Sensors) 水平解析度 $0.0125^{\circ} \times 0.0125^{\circ}$ 經緯度、時間間隔10分鐘之整合 (Mosaic) 雷達最大回波 (Vertical Maximum Intensity, 或稱Column Vector, 簡稱CV) 資料。配合CV的時間解析度，即使TLDS觀測資料的時間可精確至毫秒，本文計算閃電次數的累計間隔亦為10分鐘，例如：0830 UTC資料代表0820 UTC 00秒起累積至0830 UTC 00秒以前之閃電次數。本文藉由區域內10分鐘的IC次數與CV比對，並參考氣象局觀測之10分鐘累積雨量資料，來呈現雷暴演變過程中IC Jump與天氣現象的先後關係，分析之時間均為國際標準時 (Universal Time Coordinated, UTC)。

二、2014年7月23日Matmo颱風雨帶之個案分析

Matmo颱風於7月23日登陸福建前的0700~1300 UTC期間，於 $23^{\circ} \sim 24^{\circ} \text{N}$ 、 $118^{\circ} \sim 120^{\circ} \text{E}$ 區域內 (圖1、3細黑色框) 閃電集中在颱風雨帶上 (圖1)

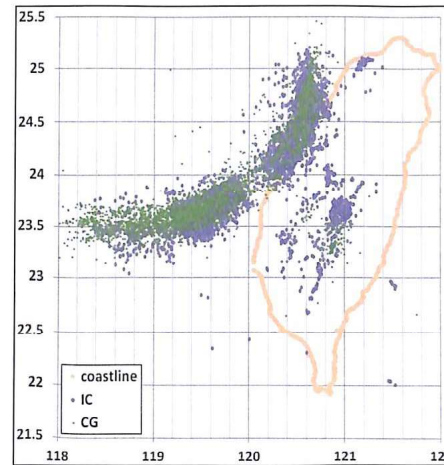


圖1 2014年7月23日0700~1300 UTC之間, Matmo 颱風外圍雨帶的IC (紫色點) 與CG (綠色點) 分布。細黑色框標示閃電頻率與CV分析區域。

本個案最關注雨帶內移動性雷暴對澎湖機場的影響。閃電次數及回波面積 (格點數)，均為圖1、3細黑色框範圍內的計算結果。在此颱風外圍雨帶環境下，IC次數 (圖2淺紫色線) 在0820~0830 UTC起明顯增加，並於0840~0850 UTC增加最快，0920 UTC達到個案討論期間最大的269。隨後0930~1010 UTC之間IC次數下降，並於1010 UTC出現相對較低的99。之後IC次數再增加，至1050 UTC達相對較高的208，之後IC次數呈現震盪減少之趨勢。50 dBZ面積，由0830 UTC起增加，相對最大面積 (圖2紅色線) 分別出現在0910及1100 UTC (圖2紅色x及*)，與IC次數最大值出現時間，前後相距10分鐘。CG次數 (圖2藍色線) 之變動相對於IC並不顯著。

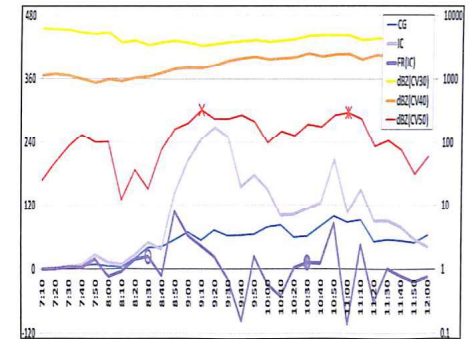


圖2 2014年7月23日0710~1200 UTC期間 Matmo 颱風雨帶閃電及回波時間序列 (橫坐標)。淺紫/藍/紫色線 (代號分別為 IC/CG/FR(IC) 分別為 10 分鐘之 IC 次數/CG 次數/IC 次數之變率 (左縱座標), 紫色實心及空心圓為 IC Jump (預警強降時降雨) 出現時間, 綠色 x 及 * 為澎湖站 10 分鐘相對強降雨出現時間; 黃/棕/紅色線分別為 CV 強度達到 30/40/50 dBZ 的格點總數 (右對數縱座標), 紅色 x 及 * 均為 50 dBZ 相對最大格點數出現時間。

圖3之CV顯示，0740 UTC的C1與C2 (圖3a) 及0810 UTC的C1~C3 (圖3b) 均僅伴隨少量IC與CG；0840 UTC起在C2附近的IC與CG增加 (圖3c)；0850~0900 UTC期間C2與C3合併為C4 (圖3d、e)；0920 UTC時C4的IC次數達到最大值，同時C5出現少量CG (圖3f)；1000 UTC起，隨著C4面積縮小與C5面積增加，IC與CG次數在C4附近減少但在C5附近增加 (圖3g)，此C4附近閃電次數下降而C5附近增加的演變趨勢，持續至1030 UTC (圖3h)；1050 UTC時，IC與CG次數的相對高值，主要是由C5所造成 (圖3i)；1100~1120 UTC (圖3j、k) 期間C5的閃電密集區通過澎湖 (約位於 23.57°N 、 119.55°E)；1140 UTC之後C5的閃電次數及強回波範圍皆減少 (圖3l)。

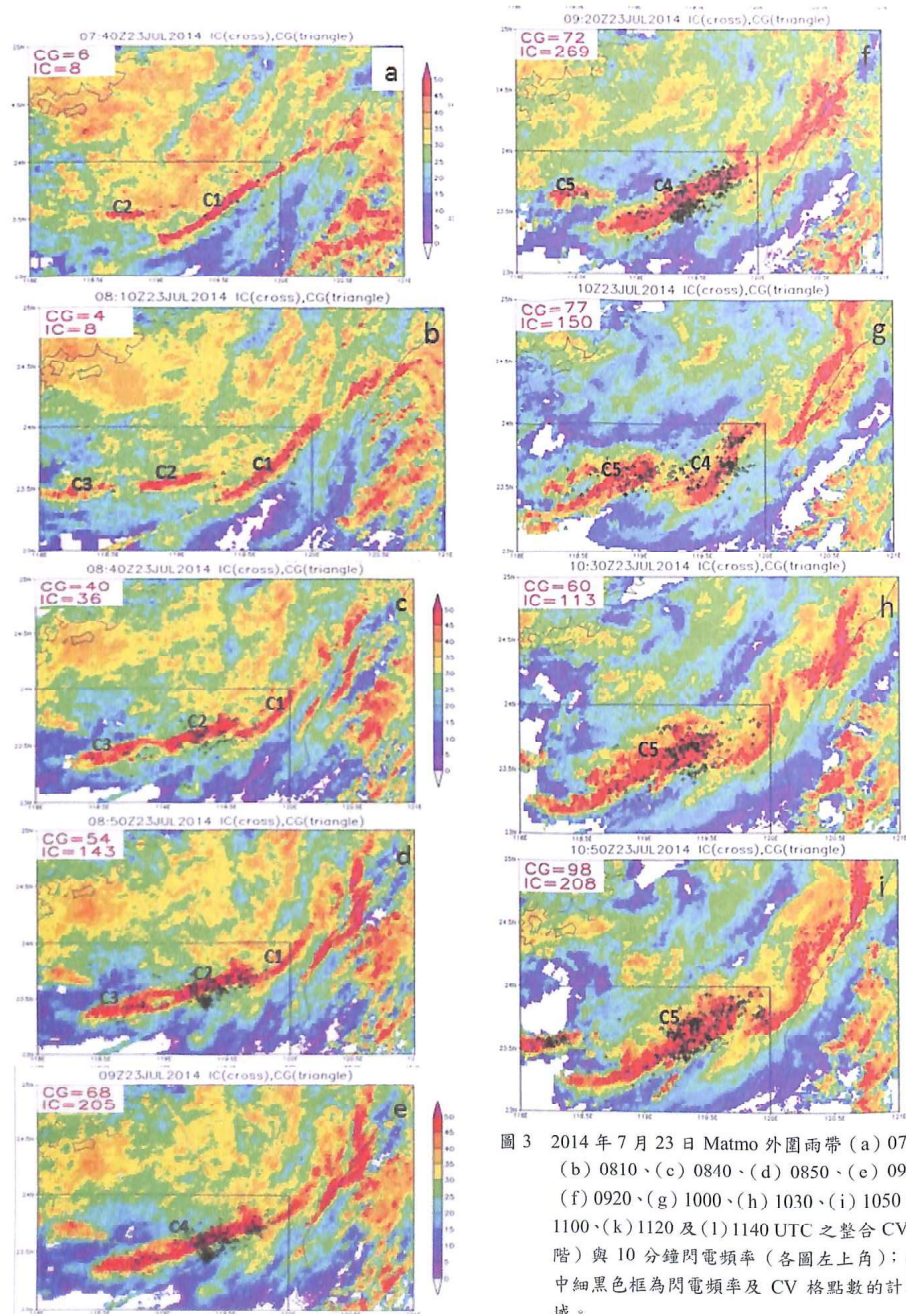
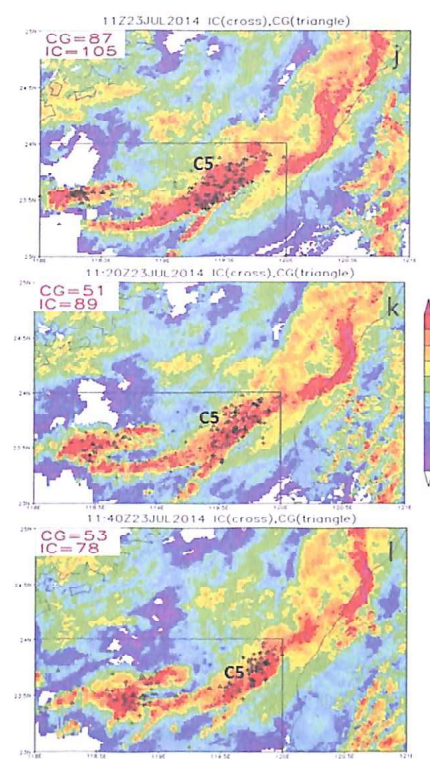


圖3 2014年7月23日 Matmo 外圍雨帶 (a) 0740、(b) 0810、(c) 0840、(d) 0850、(e) 0900、(f) 0920、(g) 1000、(h) 1030、(i) 1050、(j) 1100、(k) 1120 及 (l) 1140 UTC 之整合 CV (色階) 與 10 分鐘閃電頻率 (各圖左上角); 各圖中細黑色框為閃電頻率及 CV 格點數的計算區域。



續圖3 2014年7月23日 Matmo 外圍雨帶(a)0740、(b) 0810、(c) 0840、(d) 0850、(e) 0900、(f) 0920、(g) 1000、(h) 1030、(i) 1050、(j) 1100、(k) 1120 及 (l) 1140 UTC 之整合 CV (色階) 與 10 分鐘閃電頻率 (各圖左上角); 各圖中細黑色框為閃電頻率及 CV 格點數的計算區域。

此個案雨帶雖於0700~1300 UTC期間近似滯留,但該雨帶中之雷暴,則具移動性且對流活躍度與回波強度皆有顯著變化。對澎湖地區而言,由CV的演變趨勢,已足以判斷出雷暴即將通過且天氣將轉為更不穩定的時間(例如:C1在0740~0810時,C4在0920~1000,或C5在1100~1120),然而閃電次數的分析,對於雷暴發展及其所伴隨天氣現象

的判斷,也可提供其他重要資訊:當IC次數於0820 UTC開始增加之後,IC次數雖有起伏但一直維持高值,CG次數也很穩定,顯示雲帶中應包含多個處於生命期不同階段之雷暴,而個案期間共出現兩次IC Jump (IC次數時間變率,在0820~0830 UTC由17增至23,在1020~1030 UTC由2增至12;圖2紫色空心及實心圓),其中當C5在移近澎湖前的1030 UTC出現IC Jump,而密集IC所在的活躍對流又即將直接通過,除劇烈天氣外,也有機會出現強瞬時降雨、CG等現象,從飛航安全預警的角度而言,有特別提高警覺的必要;隨後於1050~1110 UTC之間,相對較高CG次數與最大50 dBZ回波面積,以及40分鐘後澎湖站於1110 UTC出現的18 mm (10min) 強降雨(圖2綠色*),皆與C5直接相關。

此外,個案分析期間所出現的兩次IC Jump,是根據最簡單的定義所評估的結果,若採用Gatlin and Goodman (2010)之IC Jump演算方式,由於0840~0850 UTC期間,IC次數時間變率由-12增至107,而1040~1050 UTC期間,IC次數時間變率由11增至84,則分別出現於0830與1030 UTC的IC Jump,應會被更明顯出現於0850與1050 UTC之IC Jump所取代;既使此更明顯之IC Jump分別稍晚出現,但仍提前於50 dBZ之CV最大範圍與強瞬時(10分鐘累積)降雨出現(除了C5的影響之外,0850 UTC左右與IC Jump較相關之C4遲至0940 UTC始移入澎湖測站,並造成14 mm之10分鐘強降雨,圖2綠色x)。

三、結論與未來展望

分析 2007~2009 年期間 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 經緯度(約 25 km²) 格點內每日 IC 次數達 30 次以上之日數(圖 4) 顯示,臺灣西部及澎湖主要民用或軍民合用機場,受雷暴的影響皆相當頻繁;若考慮到航線,則雷暴對飛航安全的潛在影響更顯著。

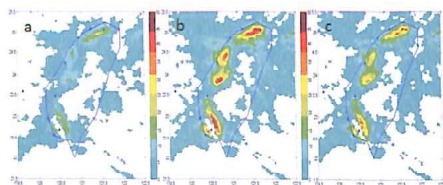


圖4 (a) 2007、(b) 2008、(c) 2009年 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 緯經度格點內每日 IC 累積達30次以上之日數 (色階); 各圖均已標示台灣西部及澎湖主要機場位置 (藍色*)。

Lightning Jump, 原本是透過嚴謹的演算法, 用來預警伴隨成熟雷暴的地面強風、冰雹及龍捲風等劇烈天氣現象, 但本文透過簡單的IC Jump定義, 即「固定區域內, 兩相鄰時段的IC次數時間變率均 >0 且增加」之門檻, 分析台電公司TLDS閃電資料, 顯示在2014年7月23日之Matmo 颱風雨帶內移動性雷暴個案裡, 當達IC Jump達門檻後40分鐘, 也會領先單站10分鐘強瞬時降雨; 而戴等(2015)探討另外兩種型態雷暴個案, IC Jump亦領先冰雹及強瞬時降雨的出現。以上結果顯示判斷IC Jump 出現之時間, 有助於針對伴隨雷暴出現之劇烈天氣及/或強瞬時降雨的預警; 由於強瞬時降雨可能伴隨低雲幕、低能見度及地面風切等天氣現象, 所以IC Jump對於雷暴環境下飛航天氣的預警, 應該也能提供相當重要的訊息。

實務上, 雷達回波趨勢的外延, 是即時預警最常使用的方法; 例如, 在Matmo個案中, 當面對C1的威脅時, 從0740 UTC (圖3a) 之前的回波發展與移動時間序列, 應可評估出天氣條件轉變的時間; 同樣地, 在面對C5的潛在威脅時, 由1050 UTC (圖3j) 以前的時間序列, 並未難得到天氣即將更為惡劣的結論。然而現行臺灣雷達網自觀測開始至雷達圖像產品完成, 常需10~15分鐘左右之資料處理時間, 除了時間滯滯因素之外, 由於CV影像欠缺對水相粒子分布結構的了解

, 因此, 在0740及1050 UTC這兩個時間點, 面對接近中的45~50 dBZ回波, 並不容易區隔出它們對飛航天氣要素的影響程度, 這使得預警決策容易陷入過猶不及的猶豫。此時若考慮IC變化趨勢的資訊, 則0740 UTC以前, 伴隨C1的IC次數, 數量少 (圖2淺紫色線) 且沒有顯著變化 (圖2紫色線), 即C1可能處於穩定的階段; 相對於C1, 1030 UTC前伴隨C5的IC次數不但多且逐漸增加 (圖2淺紫色線), 又出現Jump (圖2紫色線及紫色實心圓), 顯示C5是處於快速發展中的活躍對流 (Deicrling et al. 2005; Makowski et al. 2013), 稍後若受到這種發展階段的雷暴影響, 不但要提防伴隨雷暴成熟之後劇烈天氣現象, 更需注意強瞬時降雨及飛航天氣要素的瞬變。換言之, 對於雷暴環境下的短時天氣預警而言, 分析IC次數的變化以及IC Jump 的發生, 其實就是定性地理解雷暴發展歷程及現況, 由於閃電資料隨時都在更新, 即使是採用較複雜的演算法 (例如: Gatlin and Goodman 2010所建議之方法) 處理TLDS資料, 初估所需時間應僅數分鐘左右, 用來輔助雷達回波, 不但是一項有用的資訊, 也有助於爭取額外的預警時間。

目前的初步結果, 是針對固定區域進行個案分析所得, 未來若陸續完成 (1) 發展適當的演算法追蹤高密度IC分布區域的IC次數及Jump、(2) 結合偏極化雷達觀測來了解本地雷暴的雲物理環境, 及 (3) 透過大量個案分析評估此方法的效果等工作, 則能增加此方法運用的信心, 落實於實際操作。

四、參考文獻

Darden, C. B., D. J. Nadler, B. C. Carcione, R. J. Blakeslee, G. T. Stano, and D. E. Buechler, 2010: Utilizing total lightning information to diagnose convective trends. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91, 167-175.

- DOI:10.1175/2009BAMS2808.1.
- Deierling, W., J. Latham, W. A. Petersen, S. M. Ellis, and H. J. Christian Jr., 2005: On the relationship of thunderstorm ice hydrometeor re-characteristics and total lightning measurements. *Atmos. Res.*, 76, 114-126. DOI:10.1016/j.atmosres.2004.11.023.
- Gatlin, P. N., and S. J. Goodman, 2010: A total lightning trending algorithm to identify severe thunderstorms. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 27, 3-22. DOI:10.1175/2009JTECHA1286.1.
- Lang, T. J., and S. A. Rutledge, 2002: Relationships between convective storm kinematics, precipitation, and lightning. *Mon. Wea. Rev.*, 130, 2492-2506.
- Liao, S. A., and K. Y. Wang, 2006: The applications of lightning-rainfall prediction on transmission lines disaster prevention. The IERE Eastern Asia Forum, Environmental Sustainability and High-Quality Power Systems in the Eastern Asia Region Proceedings papers, Nov. 14-15, 2006 Taipei, Taiwan, PP. FS2-11 to 16.
- Makowski, J. A., D. R. MacGorman, M. I. Biggerstaff, and W. H. Beasley, 2013: Total lightning characteristics relative to radar and satellite observations of Oklahoma meso-scale convective systems. *Mon. Wea. Rev.*, 141, 1593-1611. DOI: 10.1175/MWR-D-11-00268.1.
- Schultz, C. J., W. A. Petersen, and L. D. Carey, 2009: Preliminary development and evaluation of lightning jump algorithms for the real-time detection of severe weather. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 48, 2543-2563. DOI:10.1175/2009JAMC2237.1.
- Wang, K. Y., and S. A. Liao, 2006: Lightning, radar reflectivity, infrared brightness temperature, and surface rainfall during the 2-4 July 2004 severe convective system over Taiwan area. *J. Geophys. Res.*, 111, D05206. DOI:10.1029/2005JD006411
- 吳依璇、林博雄及王寶貫, 2009: 臺灣西南海域總閃電頻率之診斷與模擬。天氣分析與預報研討會, 中央氣象局, 台北。
- 林熹閔, 1999: 雲對地閃電與降水關係之研究。大氣科學, 27, 1, 75-98。
- 陳泰然, 1994: 臺灣地區梅雨季中尺度現象之氣候研究 (一)。國科會研究報告NSC 83-0202-M002-002, 112頁。
- 戴志輝、王尹懋、王安翔及林博雄, 2015: 雲中閃電資料應用於雷暴即時預警之研究。大氣科學, 43, 2, 115-132。
- 戴志輝、林得恩及賴世運, 2008: 臺灣北部午後對流閃電與觀測氣流風向之關係。大氣科學, 36, 3, 179-196。
- 譚振威, 2006: 臺灣地區閃電與降雨的分類及其氣候特徵。國立中央大學大氣物理研究所碩士論文, 120頁。

Preliminary Study for Utilizing IC Information to Monitor and Nowcast the Severe Aviation Weather

Jyh-Huei Tai¹, Mark Yin-Mao Wang¹, Yu-Feng Lin², Po-Hsiung Lin¹

¹ Center for Atmospheric Resource and Disaster Studies, National Taiwan University
² CAF Weather Wing

ABSTRACT

Since the increase of total lightning activity represents that the convective system is active, the intra-cloud (IC) lightning jump, which defined as the rapid growth of the time rate of IC flash in a specific time, is indicative of the following severe weather associated with the thunderstorm. In this study, the IC lightning data offered by Taiwan Power Company were used to assess the utility of the IC jump for thunderstorm nowcasting. With a relatively simple IC jump definition, typhoon Matmo's rainband-embedded moving thunderstorm was investigated. In this case, heavy 10-min rainfall was observed 40 minutes after the IC jump satisfied. In the other two cases, the results also shown that the IC jump can lead the appearance of hail and heavy 10-min rainfall. Because of the serious aviation weather conditions may be accompanied by severe rainfall, this preliminary study suggests that the severe aviation weather associated with thunderstorm could potentially be monitored and diagnosed by analyzing IC jump.

**Key words : IC jump 、 Heavy 10-min accumulated precipitations 、 severe aviation weather
nowcast**