

飛機積冰模擬與診斷

王璿璋 林博雄

臺灣大學大氣科學系

摘要

積冰對於飛航安全影響重大，也是雲物理觀測與模擬的一項科學議題。過去研究文獻指出，積冰預測以及民航機的警告系統，大多以綜觀大氣背景環境以及液態水含量的空間分布來診斷積冰潛勢，但因空間過度預報而降低飛行計畫使用的信心。

本文透過美國航空 EAGLE-4184 航班個案(1994 年 10 月 31 日 15:57UTC)以及復興航空 GE-791 航班個案(2002 年 12 月 20 日 17:52UTC)，嘗試透過 WRF 中尺度模式和 WISCDYMM 雲物理動力模式，來模擬診斷這兩次嚴重的 ATR-72 飛機積冰的大氣環境和數值模式預報能力。

WRF 模式模擬結果顯示，綜觀與中尺度天氣條件大致掌握這兩個案飛機的盤旋與巡航高度之液態水含量大於氣候平均值的特徵；WISCDYMM 模式則進一步提供了更高時間空間解析度的環境場，檢視飛機失事前數十分鐘期間的大氣溫度場以及液態水含量分布。整體而言，WISCDYMM 模式已能掌握飛機在航路上的積冰程度，但也未能得出嚴重積冰之潛勢，顯然天氣數值模式在雲物理動力參數化仍有改進之空間。

關鍵詞：積冰，液態水含量，雲模式

一、前言

積冰(Icing)，泛指所有航空機具結冰的現象。通常是指飛機在航行的過程中，機翼或是機身結冰的情況。最主要的影響是在機翼的部分，積冰會使翼身的外型發生異常改變，造成阻力增加、升力下降，失速攻角增加等不利因素。嚴重的積冰會使飛機失去操控性能，造成人員傷亡。一般來說，飛機的除冰(de-ice)裝置可以有效的應付大部份的積冰情況，但是效用是暫時性的，飛機還是必須盡快脫離該空域，避免持續性的結冰現象。

過去發生的積冰事件的統計結果發現，積冰發生的有效環境溫度介於-3~-15°C (Sand et al. 1984; Schultz and Politovich 1992; Cober et al. 1995)，而且很少低於-25°C 以下(Korolev et al. 2003)。從環境溼度的

統計發現，相對溼度必須超過 70%以上才有較高的機率產生積冰(Bernstein et al. 2004)。

過去研究文獻指出，積冰預測以及民航機的警告系統，都直接從溫度與相對溼度兩參數(T-RH algorithm)加以推測，可以直接利用中尺度的模式輸出參數作積冰的估算，是相當快速且便利的(Thompson et al. 1997; Schultz and Politovich 1992; Knapp 1992)。但是，只使用溫度跟相對濕度估算卻經常造成過大的空間預警範圍，對於飛航路徑規劃的實用性不高(Thompson 1997)。

綜合言之，綜觀大氣背景環境以及液態水含量的掌握是判斷積冰潛勢(Icing Potential)的必要條件。目前美國 NOAA/NWS 所提供的美國本土航路的積冰預報有其參考性。同時，NCAR /RAL 也有飛行器積冰的實驗計畫，結合業界及學界，共同開發及改善積冰的

預報及預警的相關產品。然而臺北飛航情報區內的積冰預報技術，目前還是停留在以溫度及相對溼度推算的階段(王，2006)，對於臺灣地區雲物理觀測、模擬與應用仍有探索的必要。

二、模式及研究方法

本研究使用的模式有兩種：

a. WRF Model V3.1

Weather Research and Forecasting Model 是一個由 NCAR 開發的中尺度預報及模擬模式。它具有多重動力核心，三維變分(3DVAR 同化)數據同化系統，是現在相當普及的中尺度模擬及預報的工具。

b. WISCDYMM

The Wisconsin Dynamic and microphysical Model (WISCDYMM)是由王寶賢老師跟其學生在 Wisconsin 研究中所開發設計的熱對流雲模式。滿足隨時間演變、非流體靜力平衡及準可壓縮的原始方程系統。水平邊界上使用的是輻射邊界條件；上層使用海綿層邊界，進行波動及能量的吸收。水平解析度為 1km；垂直解析度為 0.2km。WISCDYMM 包含 38 種微物理過程，主要產生的水象參數為：水氣混合比、雲水混合比、雲冰混合比、雨滴混合比、雪片及軟雹/冰雹混合比。

本研究模擬及診斷流程：

1. 利用 WRF 模擬產生事件發生前後的綜觀環境場。
2. 取出最接近發生時間的模式輸出變數：T、u、v、H、vapor。
3. Matlab 內插並植入 WISCDYMM，利用假想熱胞驅動雲模式，得到高時空解析度的 w、qv、qc、qr、qs、qh、RHw、RHi。
4. 比對雷達回波、衛星雲圖及飛航資料紀錄器 (Flight Data Recorder, FDR)，評估環境模擬的結果。
5. 利用液態水含量估算式(Tafferner 2003)，計算出飛行空層的 LWC。

$$LWC_{i+1} = \frac{P_i}{RT_i} (M_i - M_{i+1})$$

M：水氣混合比

P：壓力；T：溫度

6. 計算並評估積冰潛能(ice potential)及積冰強度(ice intensity)。

三、模擬結果

個案一：EAGLE -4184

a. 事件簡介

Eagle-4184 是美國著名的積冰事件，發生的時間是 1994/10/31 21:12 ~ 21:57 (UTC)。這是一架美國航空公司(AA)的客機，飛機型號是 ATR-72。這架班機預定的路線是從印第安納的國際機場返回芝加哥國際機場。因為當時芝加哥機場的天氣條件不是很好，造成許多航班有延遲進場的情況，於是 Eagle-4184 這架班機聽從領航人員指示，在機場東南方，高度為 10,000 ft 空域進行盤旋等待進場。維持橢圓形航路飛行數圈之後，在接近 21:57 時，飛機突然發生向右側翻的現象，不正常的飛機姿態使得升力下降並開始俯衝，之後飛機失去控制，然後墜毀。

b. 模擬結果

在綜觀環境場的模擬中，WRF 輸出結果跟實際 NWS 所發布的地面天氣圖是相當一致(圖 1)。低壓系統中心約在印第安納州的西部中央，冷鋒從低壓中心向西南方向延伸，而中度強度的滯留鋒從中心東方延伸。飛行高度 10,000ft 的環境溫度-2°C，西南風，風速約為 20m/s。

直接使用 WRF 的輸出參數去計算 LWC(圖 2)。圖中紅色 X 是最後飛機盤旋的空域，從圖中可以發現在飛機盤旋的過程中，WRF 中尺度模式所以算出來的最大 LWC 大約只有 0.1~ 0.2(g/kg)，根據 Tafferner 的強度分級，大約只有輕度程度的積冰。

WISCDYMM 則提供更高時空的解析，從雲模式的輸出參數中，計算 LWC 的結果(圖 3)，雲的高度大約集中在 3~4km 高且持續往北方移動，跟實際雷達所觀測的相符。進一步將飛行空層，進行水平切面分析(圖 4)，圖中的黑線為飛機盤旋的路徑，紅 X 是最後失控的位置。可以發現該空層 LWC 都超過 0.24(g/kg)，而且有局部的區域超過 0.36(g/kg)，屬於輕度到中度強度的積冰。從 WISCDYMM 雲模式的模擬結果判斷，EAGLE-4184 在失控前 10 分鐘，是飛行

在相當潮濕且溫度低於 0°C 的環境，因而遭遇無法預期強度的積冰。

個案二：GE-791

a. 事件簡介

GE -791 是復興航空的貨機，該事件是台灣的著名積冰案例，發生時間是 2002/12/20 17:32~17:52 (UTC)，預定從台北飛往澳門。臺北時間 01:52，於飛行過程中遭遇嚴重積冰後，在馬公西南方約 17 公里處墜海失事，機上駕駛員 2 人皆失蹤。

解讀該機飛行資料紀錄器 (FDR) 紀錄參數，得知該機分別在 01:34 至 01:37，及 01:41 至 01:52 等兩時段，機身除冰系統 (Airframe De-icing) 在啟動狀態，表示飛機分別遭遇了兩次積冰，但是在除冰裝置運作的情況下，卻無法有效的除冰，當時的積冰情況是相當嚴重的。

b. 模擬結果

利用 NCEP reanalysis 過去 60 年冬季 DJF 的溫度及相對濕度的平均場，分析台北飛行情報區冬季的積冰氣候場。飛行空層 18,000ft 的氣候場顯示平均氣溫 -9°C ~ -12°C，是有利發生積冰條件。但是相對濕度卻只有 25 ~ 30%，遠低於發生積冰的門檻 70% 以上 (Bernstein 2004)，整體氣候場並沒有特別有利發生強烈積冰條件。

WRF 模擬結果跟中央氣象局 CWB 91 年 12 月 20 日 1200 UTC 及 1800 UTC 之地面天氣圖是相同的，低氣壓於日本九州附近海域向東移動，滯留鋒由此中心向西南延伸至台灣中部。台灣地區為多雲至陰偶小雨或陰雨的天氣，使用 WRF 的輸出參數去計算 LWC (圖 5)。黃線為飛機飛行路徑，紅 X 是事故發生位置，路徑上 LWC 大約介於 0.05 ~ 0.15 (g/kg)，積冰訊號並不明顯。

根據 FDR 的資料顯示的資料顯示，在飛行路徑中，P4 點 (圖 6) 是飛機遭遇嚴重積冰，因此將使用 WISCDYMM 針對 P4 Domain (紅框)，進行高時空解析度的模擬。相對濕度場顯示飛行高度 5km 左右，相對濕度都高達 100%。另外在溫度場部分，該空層模擬的溫度約為 -8°C，是相當有利發生積冰的環境濕度。

LWC 的計算 (圖 7) 則是可以發現，根據通過的時間點輸出，P1~P4 環境的 LWC 含量有顯著的差異。

通過 P1 中心的時間是 17:30，當時的 LWC 約為 0.13(g/kg)，這是 GE-791 第一次遭遇積冰的時間，因此除冰裝置啟動。通過 P2 的時間點是 17:39，LWC 只有約 0.06(g/kg)，因此在 P1 開啟的除冰裝置才能有效除冰。但是在 17:49 通過 P4 的時候，由模式所模擬出的 LWC 高達 0.2(k/kg)，是相對於前三點，較為有利發生積冰的環境。因此雖然除冰裝置啟動，卻沒有成功除冰，導致飛機失去控制墜毀。

四、結論

在兩個事件的模擬中，嘗試使用中尺度的 WRF 模式及高解析雲尺度的 WISCDYMM 模式，進行積冰環境的反演。

在綜觀系統的模擬上，WRF 模式模擬得相當好，天氣系統的配置都跟實際觀測的相符。但是進入 LWC 的診斷分析，WRF 就無法明確的分析出積冰發生的環境。畢竟在空間尺度上，WRF 的解析度不足，在加上微物理的過程不夠完整，很難診斷出雲尺度的積冰事件。

WISCDYMM 模式在兩事件的模擬中，成功的反演出飛行路徑上，有高液態水含量的訊號。從溫度場及相對濕度場診斷出的積冰量級屬於輕度到中度的積冰，距離實際發生的強烈積冰，還有一段差距。

整體而言，WISCDYMM 模式已能掌握飛機在航路上的積冰程度，但也未能得出嚴重積冰之潛勢，顯然天氣數值模式在雲物理動力參數化仍有改進之空間。

參考文獻

- Bernstein, B. C., F. McDonough, M. K. Politovich, B. G. Brown, T. P. Ratvasky, D. R. Miller, C. A. Wolff & G. Cunnung (2004) Current Icing Potential: Algorithm Description and Comparison with Aircraft Observations. *Journal of Applied Meteorology*, 44, 969-986.
- Schultz, P. & M. K. Politovich (1992) Toward the Improvement of Aircraft-Icing Forecasts for the

Continental United States. *Weather and Forecasting*, 7, 491-500.

Tafferner, A., T. H. a. C. Leifeld & H. L. T. Hafner, and U. Voigt (2003) ADWICE: Advanced Diagnosis and Warning System for Aircraft Icing Environments. *Weather and Forecasting*, 18, 184-203.

Thompson, G., R. T. Brientjes, B. G. Brown & F. Hage (1997) Intercomparison of In-Flight Icing Algorithms. Part I: WISP94 Real-Time Icing Prediction and Evaluation Program. *Weather and Forecasting*, 12, 878-889.

Thompson, G., R. Bullock & T. F. Lee (1997) Using Satellite Data to Reduce Spatial Extent of Diagnosed Icing. *Weather and Forecasting*, 12, 185-190.

王崑洲 (2006), 飛機積冰預報, 民用航空局飛航服務總臺

王寶貴, 1996: 雲物理學, 國立編譯館主編, 渤海堂印行, 382pp.

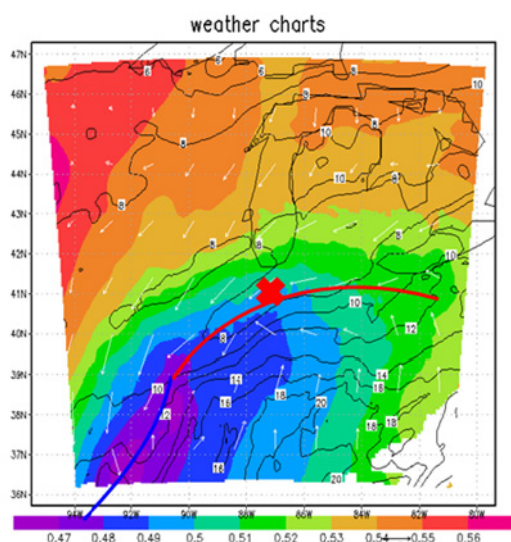


圖 1： WRF 模擬個案 1 的地面天氣圖，紅 X 是飛機盤旋的空域，約在暖鋒前緣數公里上空。

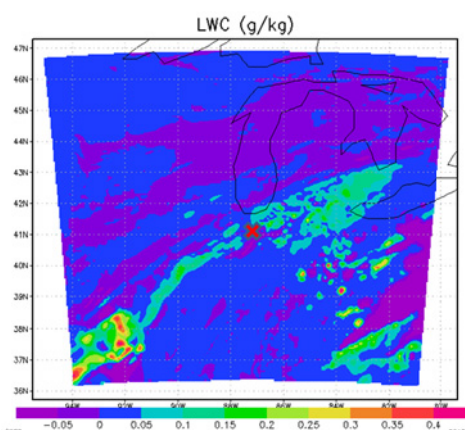


圖 2: WRF 模擬個案 1 飛行空層的 LWC，約 0.1~0.2 g/kg。

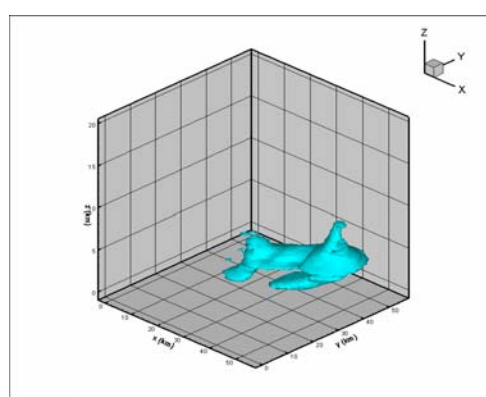


圖 3: WISCYMM 模擬個案 1 的液態水 0.22 (g/kg)等值線，整體雲層發展在 3~4 公里的高度。

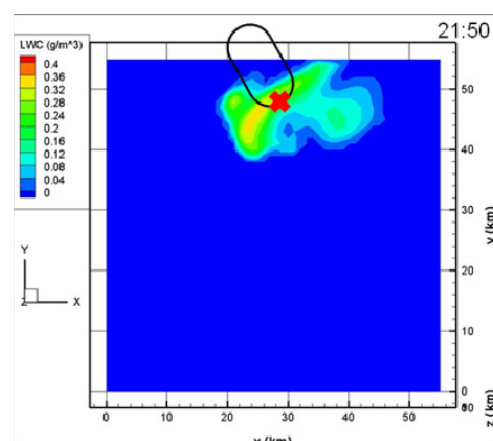


圖 4： WISCYMM 模擬個案 1 21:50UTC 飛行高度 3 公里 LWC 的水平切面。飛機在最後 10 分鐘，所盤旋的路徑(黑線)相當的潮濕。

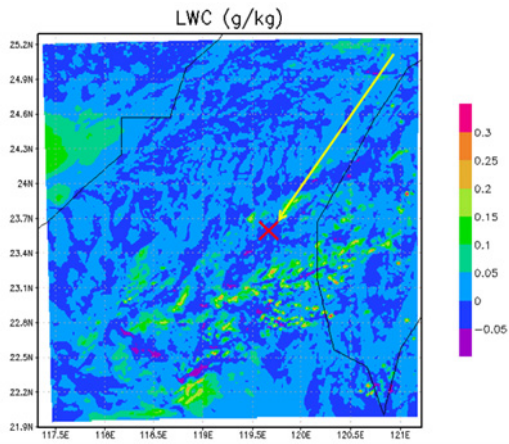


圖 5: WRF 模擬個案 2 飛行空層的 LWC，在路徑上(黃線)的值約為 0.05 ~ 0.15 (g/kg)。

圖 7: 個案 2 通過 P1~P4 時間點 5.4 公里的 LWC 水平切面。WISCDYMM 模擬出 P1 及 P4 的高液態水含量，P4 的強度屬於輕度到中度的積冰。

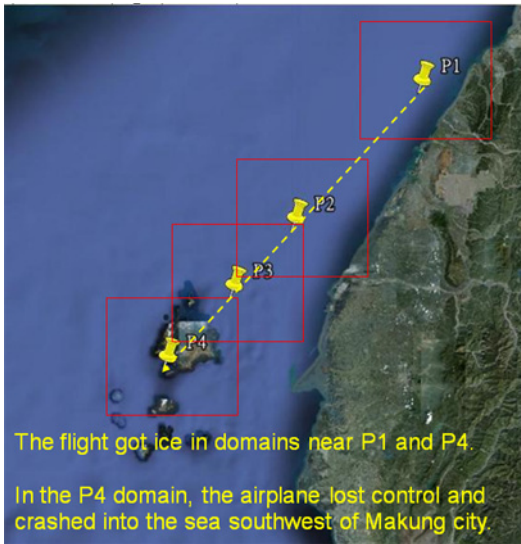


圖 6: 根據個案 2 飛行路徑(黃線)及 FDR 的資訊，訂出 4 個 WISCDYMM 模擬的空間範圍。飛機在 P1 及 P4 地點分別遭遇不同強度的積冰，雖然除冰裝置都有啟動，但在 P4 卻無法有效除冰而墜毀。

