

# 對流引發重力波之模擬與晴空亂流個案診斷應用

鄭凱元 林博雄

臺灣大學大氣科學系

## 摘 要

大氣的積雲對流所引發的向上向外傳播之重力波擾動之動力過程，與山岳波擾動相當類似，也是用以詮釋飛機遭遇晴空亂流之可能肇因。本研究透過 WRF 模式提供 WISCDYMM 雲物理動力模式初始剖面，用以探討 2008 年秋天 CI-641 航班在泰國上空 40000 英尺以及 2005 年春天 BR-2196 航班在日本東岸上空 30000 英尺巡航高度的晴空亂流飛安事件。模擬結果發現，對流系統引發之重力波的傳播過程中造成的大氣擾動量，可能是晴空亂流的來源。另外，由 WISCDYMM 所演算的垂直速度場波動傳播的時空特徵，確實能詮釋 CI-641 晴空亂流個案。

關鍵字：晴空亂流，重力波

## 一、 簡介

大氣亂流對航空器具有很大的威脅性，在飛航工業和航空氣象上一直是重要的議題。Sharman 等人(2006)提到，美國的商用機遭遇強烈亂流的頻率約為一年 5000 次，這也導致平均一年有數千萬美金的傷害賠償。根據美國國家運輸安全委員會(NTSB)的統計，除了空難事件以外，遭遇亂流是造成人員損傷最主要的原因，美國平均每年有 45 人因為亂流而受傷。對飛行員而言，大氣亂流之中，又以晴空亂流最具有威脅性。由於晴空亂流不能被機載雷達觀測，飛行員很難事先發現，因此晴空亂流的研究與預報作業是大氣亂流中最困難的議題。

除了 Kelvin-Helmholtz 不穩定波動因素之外，Ellrod 等人(2003)認為晴空亂流可能是重力波之上或是重力波附近的紊流干擾了飛行器所造成的結果。一些觀測和數值實驗也說明了重力波可能是引發晴空亂流的重要原因 (e.g., Lane et al. 2004; Koch et al. 2005)，並且許多觀測發現也證實對流系統是高空重力波的重要來源(e.g., Larsen et al. 1982; Sato et al. 1995)。另外，根據統計大部分的嚴重亂流事件跟深對流系統有很大的關聯性(王，2008)。

雖然一些研究已經說明了重力波可能是引發晴空亂流的重要來源，但由於晴空亂流會對飛行器造成相當巨大的危險，因此很難進行飛機現場密集

觀測以取得大量資料來詮釋重力波與晴空亂流的關係。本研究乃透過高解析度的雲解析模式，模擬發生在本國籍航空器的晴空亂流實際個案(CI-641; BR-2196)，並計算亂流指數  $\epsilon^{1/3}$  來定量估計亂流強度，並探討對流系統引發之內重力波與晴空亂流的關係。

## 二、 模式

本研究採用的雲解析模式為威斯康辛大學所發展的 WISCDYMM (Wisconsin Dynamic-Microphysical Model) 模式(Straka, 1989)。WISCDYMM 是一個非彈性近似、非靜力平衡及準可壓縮系統的三維數值模式。在數值積分方法上，WISCDYMM 採用二階精確度的有限差分法。在雲微物理部分，有 5 種水象粒子(cloud drops, cloud ice, rain drops, snow, graupel&hail)的參數化過程。模式網格設定為水平方向 1000 m 解析度， $56 \times 56$  個網格點；垂直方向是 200 m 解析度，200 個網格點。所以整個模擬範圍為 X 與 Y 方向各是 56 km，Z 方向則是 19.8 km。在邊界條件處理上，上邊界採用 Klemp and Lilly (1978)所提出的 Rayleigh 邊界以吸收波動的能量，減少波動的反射；水平邊界使用輻射邊界條件，可使波動能量傳出水平邊界之外。

WISCDYMM 所使用的初始條件可從中尺度模

式或是氣球無線電探空而來，本研究使用美國氣象界共同投資研發的 Weather Research and Forecasting (WRF), Version 2.2.1。晴空亂流個案模擬以美國 NOAA/NCEP(海洋大氣總署國家環境預報中心)的 Final Analysis(1 經緯度的水平空間解析度與 6 小時時間解析度)做為 WRF 的初始場。WRF 先執行 12 小時以上穩定後，再取晴空亂流個案發生處前 1 小時做為 WISCDYMM 初始場，進行 WISCDYMM 更高時空解析度的模擬。

### 三、 渦流消散速率(eddy dissipation rate)

渦流消散速率(eddy dissipation rate, EDR)簡寫為  $\epsilon$  ( $\text{m}^2\text{s}^{-3}$ )，用以代表擾動動能(TKE)的消散速率。根據國際民航組織(ICAO)2007 年的技術文件， $\text{EDR}^{1/3}$  被用來定義亂流強度，強度分類如表 1 所示。本研究利用 Kolmogorov 在 1941 年提出的相似性假說(similarity hypothesis)。當渦流的空間尺度在 inertial sub-range 範圍時，亂流的統計特性就可以由單一參數  $\epsilon$  來代表，此時擾動量的波譜可用下面方程式來表示：

$$E_u(k) = \alpha_1 \epsilon^{2/3} k^{-5/3}$$

其中  $E_u$  代表擾動量的波譜密度； $\alpha_1$  是常數，跟擾動量的方向有關； $\epsilon$  為渦流消散速率； $k$  是平均風場方向的波數。我們經由 WISCDYMM 模式在某一高度平面的垂直擾動速度場( $\omega$ )分析出  $E_u$ 、 $k$ ，再求得  $\epsilon$  的空間分布。

### 四、 個案討論

#### (一) CI-641 班機

- 時空：2008 年 10 月 2 日 05:28 UTC，泰國曼谷機場東北方空 40000 feet。
- 事件經過：中華航空公司 CI-641 降落前夕發現前方有積雨雲，飛機左轉繞過積雨雲後，不久便遭遇強烈亂流。遭遇亂流前夕氣流平穩，且機載雷達已無回波，積雨雲在飛機右後方。
- 綜觀尺度大氣特徵：中國南海上接近菲律賓群島附近有一地面低壓中心(1003 hPa)，並有零星對流系統在事件發生地點附近發展中(圖 1.1)。

模擬結果顯示 WISCDYMM 之垂直速度場在  $t = 3480 \text{ second}$  (10 月 2 日 05:28UTC，圖 1.2)的 X-Z 剖面分布( $Y=28$ )；顯著的上升運動造成雲滴和冰晶含量的極大值區高度到達 14.5 km (47600 feet)。當

時對流雲系發展較巡航高度為高，飛行員目測雲頂高度超過 40000 feet。對流系統所引發的重力波自對流中心向上下風處(東西方向)傳播，在 11~18 km 有明顯的波動現象，且波動隨著高度向東西方向傾斜。而飛機的飛行高度約為 12.2 km，位於最大振幅的波動傳播之空層。

利用模式輸出的垂直擾動場計算出  $\epsilon^{1/3}$ ，顯示巡航空層最大的亂流強度約 0.063(圖 1.3a)。根據 ICAO 的分類，算是沒有亂流的訊號。但是， $\epsilon^{1/3}$  的分佈圖顯示出波動傳播的特徵(圖 1.3b)。

#### (二) BR-2196 班機

- 時空：2005 年 3 月 28 日 09:03~09:08 UTC，日本成田機場西南方空 33000 feet。
- 事件經過：長榮航空公司 BR-2196 班機準備降落成田機場。下降途中，機載雷達並無回波資訊，突然遭遇強烈亂流，此時飛機約比雲頂高 2 公里。
- 綜觀尺度大氣特徵：300 hPa 高空西風噴射氣流( $>65 \text{ ms}^{-1}$ )通過日本本州上空(圖 2.1a)，500 hPa 高空槽線在日本海左側區域加深，海平面則有低氣壓系統和降水雨帶在事件發生點西南方持續發展(圖 2.1b)。

模擬結果顯示 WISCDYMM 之垂直速度場在  $t = 3800 \text{ second}$  (3 月 28 日 09:03UTC，圖 2.2)的 Y-Z 剖面分布( $X=28$ )；雲高發展至 7.5 km (24600 feet)。飛行員報告證實當時客機在雲上飛行，目測的雲頂高度不超過 30,000 feet。對流系統所引發的重力波自對流中心向上風處(北方向)傳播，下風處波動近乎靜止，在 6~8 km 有明顯的波動現象，並且波動隨著高度向北方傾斜。此時飛機的巡航高度約為 10 km，距離波動的主要能量約有 2 km。

從模式產品計算出  $\epsilon^{1/3}$ ，巡航空層最大的亂流強度約 0.0048(圖 2.3a)，比 CI-641 個案小了一個數量級，同樣算是沒有亂流的訊號，但是  $\epsilon^{1/3}$  的分佈圖跟個案 CI-641 相同，也顯示出波動傳播的特徵(圖 2.3b)。

### 五、 結論與討論

本研究利用高解析度的雲解析模式 WISCDYMM 模擬了 2 個本國籍航空器的晴空亂流個案，檢視對流系統引發重力波之現象以及定量估計對流系統造成之亂流強度。

WISCDYMM 的模擬結果顯示，2 個案雲的發展高度和雲水的分佈結構皆與觀測吻合。在重力波方面，都有波動自對流中心激發，從對流中心向四面八方傳播的特徵。個案 CI-641 最大振幅的波動在 11~18 km 傳播，與飛機巡航空層穩合，而個案

BR-2196 最大能量的波動傳播高度在 4~8 km，較飛機巡航高度低了 2 km 左右。在亂流強度部分，僅管 2 個案的計算出的  $\epsilon^{1/3}$  很小，顯示沒有亂流的訊號，但  $\epsilon^{1/3}$  的分佈皆顯現出重力波傳播的特徵，這可能說明了重力波在傳播過程中，造成的大氣擾動會導致亂流發生的現象。

對於  $\epsilon^{1/3}$  計算結果過小，可能是模式尺度太大無法解析亂流的瞬間變化所造成的結果。一般而言，航空器 EDR 的計算是從飛行記錄器(FDR)而來。從時間尺度來看，FDR 的取樣率為 8 Hz，而 WISCDYMM 的積分時步為 2 秒，等於 0.5 Hz 的取樣率；從空間尺度來看，飛機的大小在  $10^2$  m 的數量級，而 WISCDYMM 的水平解析度為  $10^3$  m。綜合時間、空間尺度來看，這可能是造成 WISCDYMM 無法說明亂流強度的原因。

本研究說明對流系統引發之重力波可能是造成 CI-641 事件的原因。未來將檢查 BR-2196 事件的環境場，比較不同個案間的差異性，嘗試找出 WISCDYMM 不能詮釋個案 BR-2196 的原因。

#### 參考文獻

- Ellrod, G. P., P. F. Lester, and L. J. Ehernberger, 2003: Clear air turbulence. Encyclopedia of Atmospheric Sciences, J. R. Holton, J. Pyle, and J. A. Curry, Eds., Academic Press, 393–403.
- International Civil Aviation Organization (ICAO), 2007: Annex 3 - Meteorological Service for International Air Navigation, Aviotech Publications.
- Kolmogorov, A. , 1941: *Dokl. Akad. Nauk SSSR* **30**, 301-305.
- Koch, S., and Coauthors, 2005: Turbulence and gravity waves within an upper-level front. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 3885–3908.
- Lane, T., J. Doyle, R. Plougonven, M. Shapiro, and R. Sharman, 2004: Observations and numerical simulations of inertia-gravity waves and shearing instabilities in the vicinity of a jet stream. *J. Atmos. Sci.*, **61**, 2692–2706.
- Larsen, M. F., W. E. Swartz, and R. F. Woodman, 1982: Gravity-Wave Generation by Thunderstorms Observed with a Vertically-Pointing 430 Mhz Radar. *Geophys Res Lett*, **9**, 571-574.
- Sato, K., H. Hashiguchi, and S. Fukao, 1995: Gravity-Waves and Turbulence Associated with Cumulus Convection Observed with the Uhf/Vhf Clear-Air Doppler Radars. *J Geophys Res-Atmos*, **100**, 7111-7119.
- Straka, J. M., 1989: Hail growth in a highly glaciated

central High Plains multi-cell  
Ph.D. Diss., Dept. Meteorology  
Wisconsin, Madison, 413 pp.

Wang, P. K., 2008: Storm top cir jumping cirrus as indicators turbulence generated by deep co  
13th Conference on Aviation  
Aerospace Meteorology.

表 1: ICAO(2007)定義之亂流強度。

| Turbulence Intensity | EI  |
|----------------------|-----|
| Severe               |     |
| Moderate             | 0.4 |
| Light                | 0.1 |

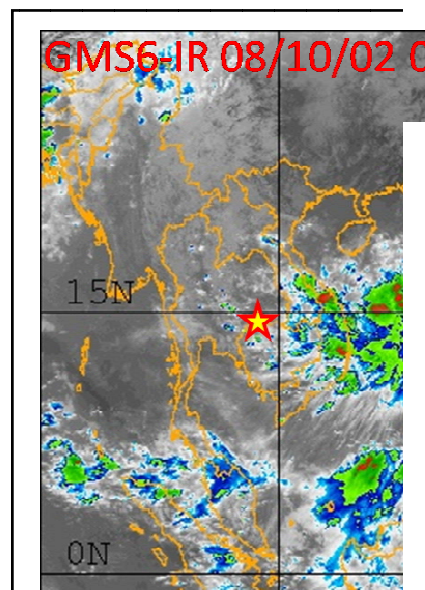


圖 1.1: 2008 年 10 月 2 日 05:30 UT 圖(個案 CI-641)，星點是晴空亂流發

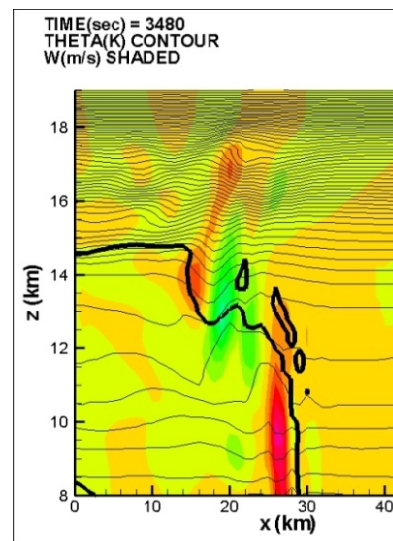


圖 1.2: 個案 CI-641 的 WISCDYMM