飛行亂流預報介紹

王 崑 洲

台北市松山區濱江街 362 號

摘要

航空器每次遭遇飛行亂流致發生飛航事故後，輕者會增加飛行時間、延遲抵達目的地，及增加航空公司許多額外檢查和維護成本；重者造成人員受傷及機毀人亡之重大損失。根據美國民用航空總署（FAA）的調查資料，飛行亂流是造成航空公司最大傷害的天氣因素（74.2% ），每年至少增加 1 億美元的營運損失。為增加民航從業人員對飛行亂流之狀況警覺及降低它對航空器之危害，本文僅就飛行亂流的特性、分類與強度、飛行亂流經驗預報，以及目前臺北航空氣象中心航空氣象現代化作業系統（AOAWS）中模式預報亂流的法則做一扼要介紹，以增進本區飛航組員、航管人員及航務簽派員對飛行亂流預報資訊之應用。

一、 前言

飛行亂流是商用航空器最常遭遇到的顯著危害天氣現象之一，由於它存在於不同天氣情況中，甚至無雲時亦會發生，其存在區域或大或小、或高或低，會嚴重影響航空器巡航及起降安全。對現今大多數航空器而言，會影響其飛行操作的亂流尺度大約在 50 至 8000 呎之間，出現高度則高可達 40000 呎的高空，低則接近跑道。根據美國國家運輸安全部（NTSB） 調查 1994 至 2003 年全美 19562 件航空器失事（accidents）資料，其中因天氣因素造成之事件有 4159 件，佔總失事案件 21.3% 。這些事件中，有 116 件是發生在商用航空器身上，約佔 2.8% ，而造成這些航空器失事的主要天氣因素以亂流佔 74.2% 為最高，其次為風佔 8.9% ，至於其他天氣因素所佔比率如圖一所示。相對於這十年台籍航空公司也發生了 5 次失事案件，其中和天氣因素有關的就有 3 件，其中雖無亂流因素造成，但 2005 年 2 月 7 日華航 CI150D 班機及 3 月 28 日長榮 BR2196 班機分別於日本硫黃島上空及東京外海遭遇強烈晴空亂流（CAT），這兩架航空器雖都幸運逃過一劫，但卻也造成多位旅客及客艙組員的受傷事件，可見飛行亂流對國際商用航空器的危害是相當顯著的。雖然，目前在航空器的尺度亂流預報上，仍有極大困難，但利用大尺度的環境觀測資料及一些有效的亂流量測，還是可以預知飛行亂流發生的潛在區域。為增加民航從業人員對飛行亂流之狀況警覺及降低它對航空器之危害，本文將就飛行亂流的特性、分類與強度、飛行亂流經驗預報，以及目前臺北航空氣象中心航空氣象現代化作業系統（AOAWS）中模式預報亂流的法則做一扼要介紹，以增進本區飛航組員及航務簽派員對飛行亂流預報資訊之應用。

二、飛行亂流的特性

亂流可被定義成許多渦流（eddies）所產生的瞬時、不規則運動。而大氣亂流則可視為風場不規則擾動所造成。任何真實風場與分析後的氣流線場或

等風速場的差異都被稱作亂流。對飛行中航空器來說，當大氣中不規則的渦流影響到航空器的運動，導致一系列突然的顛頗或機師感覺到搖晃（bumpiness）都稱之為「飛行亂流」。雖然，大氣中存在著各種尺度的亂流，但可以使航空器產生搖晃的大致上與機身大小的尺度相近，所以飛行亂流的強度不但與大氣不規則運動的強度有關，而且與航空器本身的特性，如空速、重力穩定及大小有關。

（一）風切與晴空亂流(CAT)

水平或垂直方向相對較強的風場梯度會導致亂流的發生。風速或風向的變化越大，則亂流越嚴重，因此飛行亂流常發生於水平及垂直風切都很大的噴流附近。因為這類的亂流的發生沒有任何視覺上的表徵，因此稱為晴空亂流(CAT)。”晴空亂流”這個名詞常讓人誤以為所有的高空亂流都發生在晴朗的天氣，雖然大部分這類亂流(70%)都發生在沒有雲的大氣環境下。當然 CAT 並不是只限於在噴流的附近，也可能發生在大氣的獨立區域。大部分時候，CAT 的發生與噴流及山岳波有關，當然也可能發生在高空低壓、高空槽或是卷雲盾附近。當飛機爬升或下降通過逆溫層時，有時也會遇到風切亂流，同樣也可能在經過飛機尾流時遇到中度亂流。各種 CAT 亂流的規則歸納如下：

1、山岳波 CAT

大於等於 25 knots 風垂直通過地表障礙物，障礙物旁有明顯氣壓變化。

2、高層封閉低壓 CAT

當氣流有合流或分流的狀況發生時，可能發生輕度或中度亂流。高層封閉低壓的東北方，也可能有顯著的 CAT 發生。扮隨噴流的 CAT 強度常與風切的大小有關。

3、風切 CAT

風速超過 60 knots，水平與垂直風切存在的區域，如表一。上述任何一種情況都有可能產生中度到強烈亂流。然而當兩個或以上的條件同時存在時，就有可能產生嚴重（extreme）亂流。噴流也會與山岳波結合或伴隨出現。

表一：風切 CAT 強度表

水平風切(Knots/Miles)	垂直風切(每 1000FT)	CAT 強度
25K/90	9-12K	中度
25K/90	12-15K	中度到強度
25K/90	大於 15K	強度

（二）背風面亂流

當強風垂直吹過山，導致的亂流可能非常強烈。過山氣流引發的上升下降區域，可能延伸至 2-20 倍的山脈高度。當氣流穩定時，在背風面形成波動，且沿下風處延伸 150 哩到 300 哩，這種波動被稱為「山岳波」。有些機師在飛行經過此區域時，沒有遭遇任何亂流。有些則會報告遭遇嚴重亂流。

垂直山脈的風產生主要的波動，並逐漸減低強度，再產生另外的波動傳遞下去。有些可以利用雲的特性或特徵來判定亂流的區域。而機師最在意的是這些主波，因為他們的強度較強且發生較高的山。當山頂的風速超過 50 knots，強烈的亂流常在下風處 150~300 哩地方被發現。當風速低於 50 knots 時，則有較少的亂流。

山岳波比較危險的地方出現在背風面滾軸狀雲或其下方的亂流區、以及山頂

後方的下沉氣流。

當航機飛越山岳波可能存在的山時,機師最好遵守下列五項原則。

1、當形成山岳波的條件存在時，應盡可能繞過這些區域，如果無法繞過這些區域，飛行高度至少應高於山的高度 50% 。

2、盡量避開有強烈滾軸狀雲的區域。

3、盡可能避開背風面的強烈下降氣流區。

4、盡可能避開高空莢狀雲（lenticular clouds），尤其是邊緣有破裂（edges ragged）的區域。

5、靠近山頂時，飛機上之氣壓高度表讀數可能會劇降達 1000 ft。

（三）雷雨亂流

雷雨雲內和附近的亂流通常會出現在發展中的對流雲內、雷雨雲頂及移動前方、雲底下爆氣流（downburst）及陣風鋒面（gust fronts）等幾個地方。大多數的強烈或嚴重亂流案例會發生在地表上方 8000 ft 至 15000 ft 的雲內，以及下爆氣流和陣風鋒面附近，少數出現在雷雨雲頂，至於雷雨雲移動前方則較少出現，一般只為輕到中度亂流。

三、飛行亂流分類與強度

本節包含亂流報告之標準如表二,表內針對每一個亂流分類描述其氣象上的特性。

表二：亂流報告準則已經被採用為標準。

亂流強度類別	飛機反應	飛機內部反應
輕度（Light）	飛機發生短暫輕微不定之高度和姿態改變或規律晃動不會感受高度和姿態有改變，報告為輕亂流或 Chop。	乘客可能對座位或背帶稍微有拉緊之感覺，未固定之物品，稍微移動，送食服務可以執行，走路很少或沒有困難。
中度（Moderate）	與輕度 Chop 類似但較強,會發生高度和姿態改變.但仍可控制,指示空速有變動.搖晃不會感受高度和姿態有改變，報告為中度 Chop。	乘客對座帶或背帶有明顯拉緊之感覺，未固定之物品會移位，送食物之服務及走路都感困難。
強烈（Severe）	亂流使飛機高度或姿態發生強烈而突然改變，常使指示空速發生大變動，飛機可能短時間不能控制者，報告為強烈亂流。	乘客隨座帶或背帶猛烈摔動，未固定物品被拋出並反覆打滾，送食及走路均不可能，飛機有時無法控制。
嚴重（Extreme）	亂流使飛機被猛烈拋擲，實已無法控制，飛機結構損壞者，報告嚴重亂流。	同類似強烈亂流

（一）嚴重亂流

通常發生於強對流，強風切的地方。

1、當垂直山脈的風超過 50 knots，在背風面滾軸狀雲附近的山岳波。

2、伴隨大冰雹的強烈雷雨胞，尤其是颮線。

（二）強烈亂流

1、當垂直山脈的風超過 50 knots，於背山面延伸 150 浬，向上延伸約 5000ft，最高可能到對流層頂。當垂直山脈的風約 25-50 knots，背山面延伸 50 浬，向上延伸數千呎；

2、下降氣流區雲底和雲頂附近分別有約 30 knots 及 50~60 knots 風速的成熟積雨雲內和附近地區，偶爾發生於塔狀積雲；

3、水平風切大於 40 knots/150 浬，垂直風切超過 6 knots/1000 ft 的噴流附近。通常這種條件發生時，噴流軸上下附近及其冷面 50-100 miles 地方最有可能發生。

4、噴流核心冷邊 50~100 浬內；

（三）中度亂流

1、 當垂直山脈的風超過 50 knots，背風面約 150 浬範圍；

2、 上升氣流區的雲底和雲頂附近分別有約 10 knots 及 40~50 knots 風速的塔狀和積雨雲內；

3、 垂直風切超過 6 knots/1000 ft，或水平風切超過 10 knots/浬的噴流、高空槽、冷低壓、高空鋒裡；

4、 噴流核心（core）冷邊 100 浬內；

5、 近地層(通常低於 5000 ft)，當地面風超過 25 knots，大氣因強震盪、冷平流而不穩定時。

（四）輕度亂流

1、微風過高大山脈的山區；

2、積狀雲內及附近；

3、近對流層；

4、風速小於 15 knots，空氣溫度小於地面溫度的低層大氣；

5、風速超過 15 knots 的風吹過低高度粗糙地形。

四、飛行亂流經驗預報

（一）近地面亂流預報

除非強風吹過較為粗糙的地表，夜晚的陸地通常有少部分的亂流發生於近地表的地方，這類的亂流隨高度而遞減。在白天近地亂流則視輻射強度、溫度遞減率與風速而定。其亂流強度隨高度增加，並穿過地表上方之不穩定層和中性層，一直到第一個逆溫層或穩定層。

垂直陣風隨高度增加大過水平陣風。近地強烈亂流通常發生在冷鋒通過的短時間，其他如白天的沙漠地區或雷雨發生時也會有近地強烈亂流發生。

（二）對流雲中亂流預報

在缺乏任何劇烈改變垂直溫度及溼度分佈的動力條件下，可以用雷文送（rawinsonde）資料來估計未來 24 小時對流雲或雷雨中亂流的潛在性。以下是預報這類亂流的經驗方法。

1、天氣圖預報法

a) 中低層高濕：850hPa（T－Td）≤ 1℃；700hPa（T－Td）≤3℃；500hPa（T－Td）≤ 5℃；

b) 850hPa 等溫線密集區；

2、斜溫圖預報法

a) 首先決定對流凝結層（CCL）；

b) 從 CCL 沿濕絕熱線到 400hpa，這曲線稱為上升曲線；

c) 比較上升曲線與自由大氣溫度線，正值區表示上升曲線的溫度比自由大氣溫度高，利用此方法取得的最大正值區為ΔT。由ΔT 的大小可決定亂流強度，如表三。

表三：ΔT 決定亂流強度表

△T（℃）	亂　流
0-3	輕度（Light）
4-6	中度（Moderate）
7-9	強烈（Severe）
ABOVE 9	嚴重（Extreme）

（三）晴空亂流的預報

晴空亂流是飛機在高空中常見的災害之一，並非所有高空亂流都發生在晴空的天氣下，然而在沒有任何視覺表徵的情況下，飛機可能遭遇到一些亂流所導致的癲頗。這類的亂流可能嚴重到使飛機受到損害，甚至災難的發生。

大部分的高空晴空亂流的發生都與噴射氣流有關，尤其是噴流附近強烈的風切。因此晴空亂流的發生經常是在冬季噴流特別強的時候。

近年來，對於晴空亂流與綜觀天氣的關聯有較充分的了解，下面是一般 CAT 比較有可能發生的區域。

1.300hPa 噴流軸左右兩邊 4 個緯度內，上下高度 3000 ft 內，如圖二。

2.噴流最大風速（≧110 knots）附近，尤其在氣旋邊最明顯，如圖三。

3.噴流下方，位於噴流核心南側，靠近 35000ft 冷區深槽的地方。

4.風速直減率為 7 knots /1000 ft，300~400hPa 間溫度變化 15℃以上及 200~350hPa 間溫度變化 10℃以上，會有中度至強烈 CAT。

五、AOAWS 模式預報亂流法則

目前臺北航空氣象中心 AOAWS 所使用的亂流預報法則（Integrated Turbulence Forecasting Algorithm； ITFA）是美國國家大氣科學研究中心（NCAR）所研發的成果，其系統預報流程如圖四所示。系統對亂流發生機率預報係利用中尺度預報模式（MM5）預報資料演算出來的，由於預報技術限制，其預報範圍侷限於 FL200 至 FL400 間之晴空亂流以及與噴流和鋒面有關之亂流，對於對流和山岳波引起的亂流則仍無明確的診斷能力。根據統計 10 至 20,000 呎間，因對流產生亂流的機率約佔 90%, 而 CAT 則只佔 10%，所以目前仍缺乏 FL200 以下之亂流預報資料。NCAR 研究人員已經從模式預報資料獲得預報亂流發生機率的各種指數，AOAWS 的 ITFA 計算出其中的 25 種指數，然後結合這些指數，利用一種模糊邏輯（fuzzy logic）技術：ITFA = $W_1D^*_1 + W_2D_2^* + W_3D_3^* + \ldots$

（D*i = diagnostic, Wi = weight），產生一個可以解釋中至強度亂流發生機率的單一數值。任一指定網格點上亂流指數的組合進行如下：

1、每種指數有自己的權重值 (weight：0~1.8)；

2、每種指數有一個選取範圍(active range)；

3、每種指數有其指定的最低與最高飛航空層（FL200~FL400）；

4、網格點上的指數值如果界於選取範圍，且其高度介於最低與最高飛航空層之間，則其權重會被加在模糊邏輯總和(fuzzy sum)上形成該網格點的權重總值；

5、每個網格點上的權重總值再除以最高可能總值，以常態化成介於 0 與 1 之機率指數值；

6、中至強度亂流預報機率指數代表意義如下：

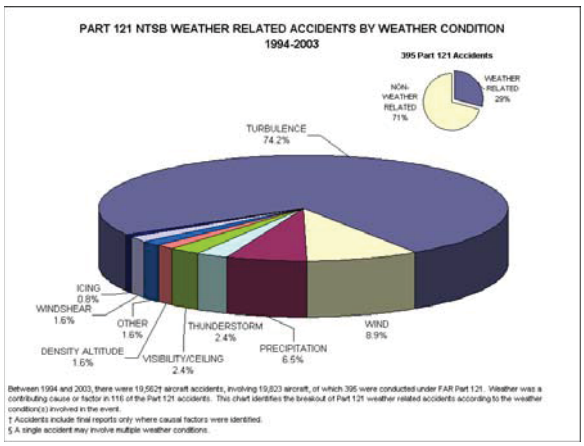
≦ 0.25	發生中至強度亂流機率：小（色階：灰）
> 0.25 且 ≦0.5	發生中至強度亂流機率：中（色階：藍）
> 0.5 且 ≦0.75	發生中至強度亂流機率：大（色階：淡藍）
> 0.75	發生中至強度亂流機率：非常大（色階：紅）

由以上說明，可見 AOAWS 中的亂流預報圖（如圖五）是預報「中至強度亂流」機率出現的大小程度，並非預報亂流強度是輕度、中度、強烈或嚴重，所以在參考該項預報資料之使用者應了解其預報涵義，以免和顯著天氣圖（SIGWX Chart）上亂流強度預報混淆。

六、結語

航空器每次發生飛行亂流之飛航事故後，輕者會增加飛行時間、延遲抵達目的地，及增加航空公司許多額外檢查和維護費用；重者造成人員受傷及機毀人亡之重大損失。根據美國民用航空總署（FAA）的調查資料，飛行亂流是造成航空公司最大傷害的天氣因素，每年至少增加 1 億美元的營運損失。為預防飛行亂流之天氣事件，FAA 目前正在執行一項飛航安全計畫（AvSP），計畫目標是建立一套好的數據鏈及亂流偵測警告系統，以便及時將資料傳送給機師、航管人員及航務簽派員使用。此一計畫除了要改進雷達遙測技術、增加商用航空器的亂流觀測密度外，改進中尺度數值預報模式、增加亂流預報模式 ITFA 的觀測資料、以及增加飛行亂流的實驗和個案研究等都是計畫的主要內容。計畫完成後，預計 2007~2017 的未來十年，因亂流所造成的天氣事件會比目前減少 80% ，以強化飛航安全和減少民航損失。

由於航空器尺度的亂流預報以目前的氣象預報模式發展仍存有相當大的困難，未來或許會有極大的進展，但模式預報及亂流偵測警告系統還未大幅改進前，飛行亂流的特性與經驗預報還是相當的重要有效，所以建議機師、航管人員及航務簽派員應多增進這方面的知識，至於氣象預報員則更應責無旁貸的充實飛行亂流的預報技術，以提供航空器準確的飛行亂流預報服務。



圖一：1994~2003 航空器失事與天氣有關之統計。摘自*美國 NTSB 飛安報告*

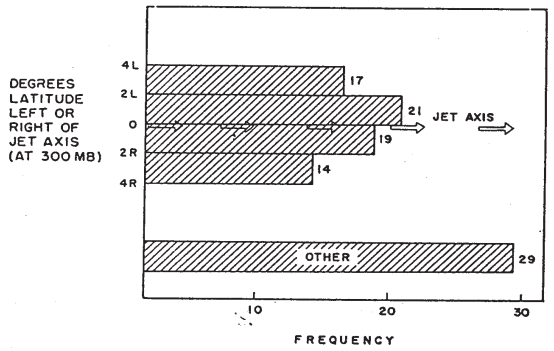


FIG. 2. The distribution of CAT with respect to the jet axis at 300 mb, derived from 470 cases of severe or moderate CAT. Frequency is in per cent and distances in degrees latitude.

圖二：300hPa 噴流軸附近 CAT 分佈圖

摘自 *G. Kroncbach 1964*

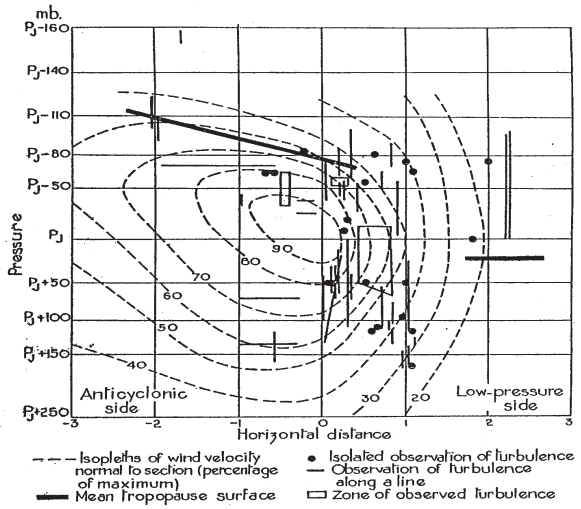
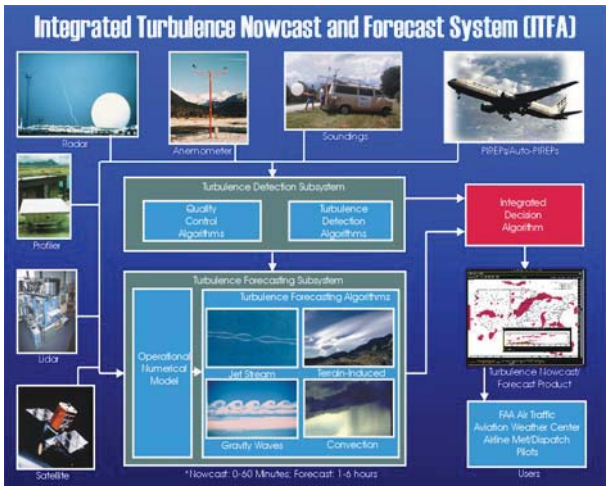


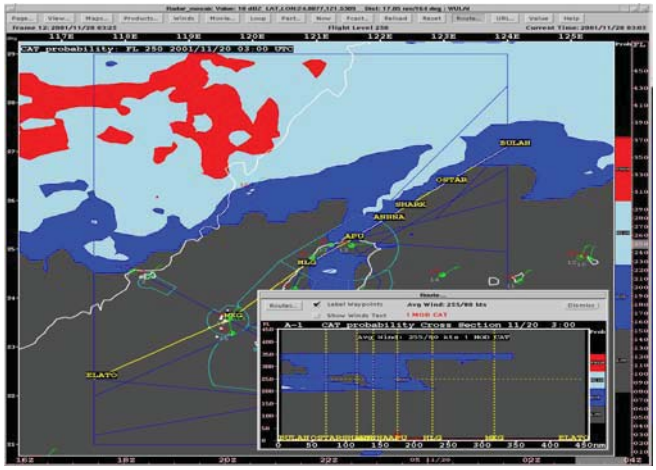
FIG. 1—POSITIONS OF OCCURRENCES OF SEVERE TURBULENCE RELATIVE TO A JET-STREAM AXIS

圖三：噴流軸附近 CAT 徑向剖面分佈圖

摘自 *J.K.Bannon,1952*



圖四：ITFA 系統預報流程



圖五：AOAWS 亂流預報圖