

晴空亂流之預報

鮑學禮

Forecasting of clear Air Turbulence

概述

晴空亂流 (Clear Air Turbulence) 簡稱CAT，其定義根據美空軍氣象勤務手冊 55-8 之規定，凡10,000呎以上不與可見之對流性活動相偕之一切亂流均屬之，包括山波 (Mountain wave) 及受限水平能見度 (霾、卷雲類雲等) 之區域所遭遇之亂流，不包含係由局部性及自地面向上連續性之地形影響而導致之機械性亂流。就物理觀點言，晴空亂流可被認為一種在大氣中生成之渦流或重力波之不穩定現象，這些波動具有一種潛在之勢能，可發展成一種不穩定之機械作用，而導致飛機之渦動，飛行人員能覺察水平向及垂直向之顛簸，其往復頻率為1—2秒，其每一亂流區之平均範圍長約50哩，寬約10—20哩，厚度約1000—2000呎，如以較大之尺度言，個別亂流區或亂流叢，在水平方向及垂直方向，通常差不多相互連接，距離甚為接近。

晴空亂流之種類一可分為二類

一、風切亂流—此種亂流為最常見者，其與強烈之垂直向風切及水平向風切相偕。

二、山波亂流—此種亂流為三類中顛簸最嚴重者，由於波浪破裂而產生，在山波中現今已測得者，其陣風速率可能超過了目前重型多噴射引擎飛機之設計標準，這種亂流由於強風在穩定斜壓區域內越過山脊，所引起垂直向振盪之斷裂漸趨消滅而成。故山波亂流與下列三因數有關，前二因素屬於大氣中者，其他一個因素是屬於地形者。

(一)越過山脊之風。

(二)空氣之靜力穩定。

(三)山脊之傾斜度

三、對流性亂流—按AWS之規定定義，晴空亂流不與可見之對流活動相偕，故此類亂流並非飛越雷雨或塔狀積雲所遭遇者，而是包括晴空或乾對流細胞及在卷雲雲盾內由對流作用所形成者，對流性亂流是由於對流層內之靜力作用及條件性不穩定空氣能量之釋放所形成。

風切亂流之分析

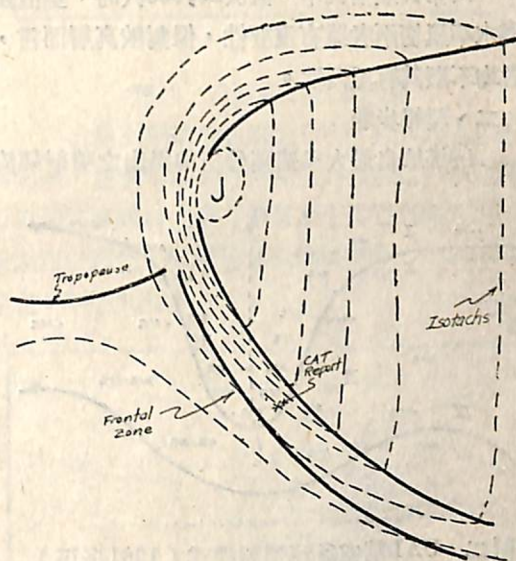
在大氣中；有75%之亂流是屬於此型，其有關天氣情勢，通常與下列三項同時相偕出現。

一、強力而彎曲之噴射氣流。

二、垂直向與水平向之風切。

三、傾斜而穩定之斜壓區域。

因此種亂流與風切相偕，其位置在最大風速軸線之成氣旋之一邊（在對流層屬冷之一方，在平流層是屬暖之一方），而最大風速軸以指水平面上之最大風速，而噴射氣流軸以指水平及垂直兩平面上之最大風速，由於斜壓區域及最大風速軸不是垂直向的，其對垂直向有一傾斜度，故晴空亂流可能在最大風速軸之氣旋型一側，但在噴射氣流軸反氣旋型之一側，如圖一所示。



圖一 風切亂流示例

哈立森 (Harrison) 預報晴空亂流之方法

一、哈立森為美國聯合航空公司 (United Air Line) 之氣象參謀人員，曾將1957—1959年間76個晴空亂流之資料，分佈統計，繪出一張「一覽模式」(Synoptic Model)，以供預報CAT之發生可能率之參考，後於1961年加以修正（因1960年CAT資料增至1213次），如圖二所示。在資料研究中，指出與CAT之發生有兩相關之重要因子，一為由等壓圖分析得出之噴射氣流相隣區；另一為CAT發生與強烈之水平風切有關，並將資料分為五類。

(一)第I類CAT位於噴射氣流核心之左方（

背風而面向下風)。

(1)第II類CAT位於噴射氣流核心之右方。

(2)第III類CAT位於二噴射氣流之間。

(3)第IV類CAT與山波相偕。

(4)第V類CAT與副熱帶噴射氣流相偕(此類於修正時增加)。

各類CAT之出現與噴射氣流核心之關係，如圖三、四、五、及六所示。

二、在CAT預報中，垂直風切在各類情況中所佔之重要性(垂直風切於修正時加入考慮者)

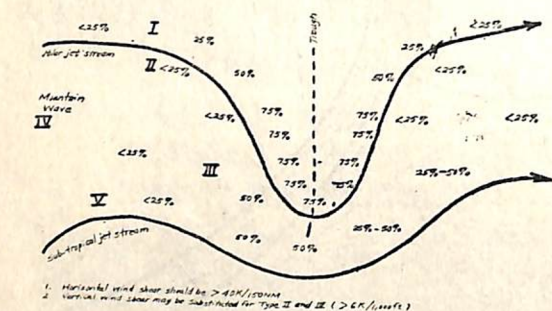
(1)第I類情況中，水平風切較垂直風切更為重要(水平風切之臨界值40Kts/150NM或16K/1緯度)。

(2)第II類情況中，垂直風切較水平風切更為重要(垂直風切最低值6K/1000呎)。

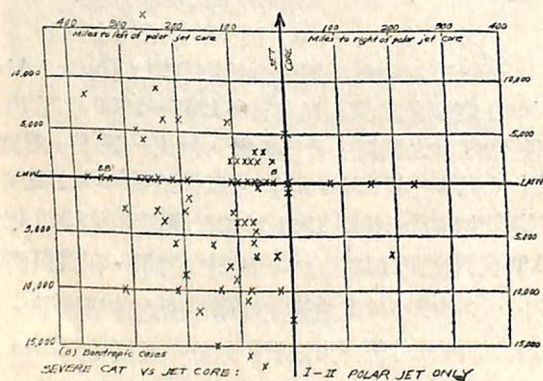
(3)第IV類情況中，低於20,000呎時，垂直風切與水平風切兩者雖有重要性，但對較高層而言，二者均不顯其有重要性。

二、預報步驟

(1)描繪自最大風速圖分析中得出之噴射氣流



圖二 UAL晴空亂流預報模式(1961修正)

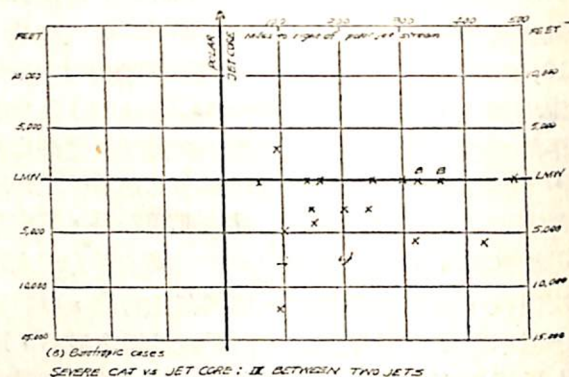


圖三 嚴重CAT與噴射氣流核心之關係(僅第I, II類—極地噴射氣流)

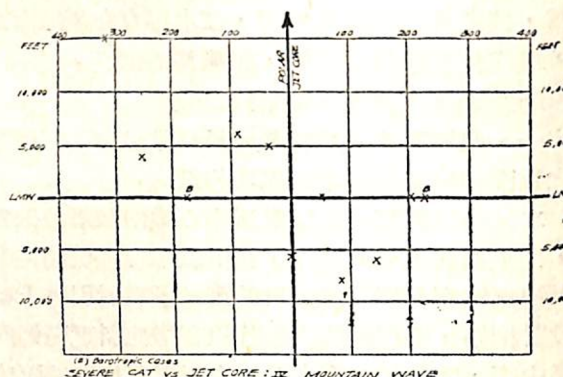
位於另一張圖紙上。

(2)檢查自500mb起之各等壓圖，以確定水平風切超過40K/150NM之區域。最大風速圖(LMW)亦可用於此目的。

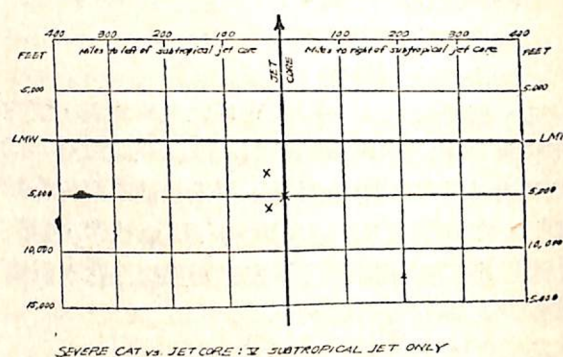
(3)倘欲預報之區域落入第II, III類時，以無線電測風資料(RAWIN)計算風切臨界值至少要



圖四 嚴重CAT與噴射氣流核心之關係(僅第III類—兩噴射氣流之間)



圖五 嚴重CAT與噴射氣流核心之關係(僅第IV類—山波)



圖六 嚴重CAT與噴射氣流核心之關係(僅第V類—副熱帶噴射氣流)

達6K/1000呎。

(4)倘欲預報之區域落入第IV類時，則利用預測山波之方法。

(5)參閱圖二之模式，在預報圖上描出所需要之地區，並記錄其出現可能率之範圍25%—50%—75%及適合情況之高度範圍。

(6)參考各種預報圖表之噴射氣流最新之位置及等風速線之分佈，應用外推法及連續性法，對預報作適時之修正，以獲得良好之結果。

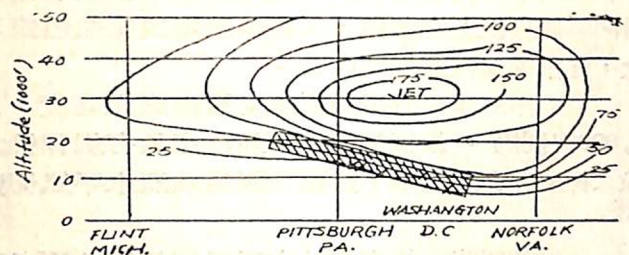
三、預報模式(一覽模式)之校驗

美空軍氣象勤務部曾于1961年1月之24天試驗中，發現在101次CAT發生之情況中，有79次在預報之區域內(僅考慮其強度為中度，嚴重及極嚴重者)

George 預報晴空亂流之方法

一、概述

(1)喬奇認為晴空亂流發生之三有關參數間，有一重要相互之關係，此三參數為垂直風切，水平風切及熱力穩定度。CAT亦與極地噴射氣流關係密切，如圖七所示，更認為ACT幾乎全部均發生於大氣中有強大垂直風切之位置，這些區域與水平向成一傾斜角度，且有重大之水平風切，根據這些觀測，求出一套預報嚴重CAT發生之實用方法。



圖七 1959年11月28日1200Z噴射氣流切面圖

。圖內斜線區表示晴空亂流區域，X表示有CAT報告之位置(右方第二X同時有兩次報告)，曲線表示等風速線。

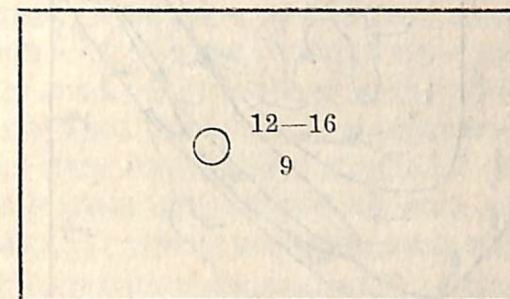
(2)喬奇預報方法須求出最大風速軸線，因為強烈之垂直風切及水平風切，大部常位於噴射氣流核心之下方；強烈垂直風切則位於噴射氣流核心之上方，強烈垂直風切層之高度隨天氣情勢而變化，其方法是定出此層之位置及此層內垂直風切量。

二、參數之測量

(1)垂直風切——直接由印字電報系統高空風紀錄中獲得，其值僅等於或大於6K/1000呎時，才被

考慮，5K/1000呎之垂直風切作為下限之極限，正垂直風切在噴射氣流之下方發現，負風切則位於其上方。

(2)垂直風切之數值填在每一測站圖圈之右方，最上方填垂直風切層之厚度(以底及頂之千呎數表示之)如圖八所示，圖中12表示垂直風切層底之高度12,000呎，16表示其頂之高度16,000呎，9表示其垂直風切之數值9K/1,000呎。



圖八 垂直風切填圖示例

(3)垂直風切等值線之分析，以8K/1,000呎為間隔，當水平風切亦存在時，嚴重之CAT與垂直風切等值線場之中心相偕，凡具有二條封閉等值線之內之區域，被稱為垂直風切中心，並以斜線表示之，如圖九所示。



圖九 1959年11月28日1200Z垂直風切圖

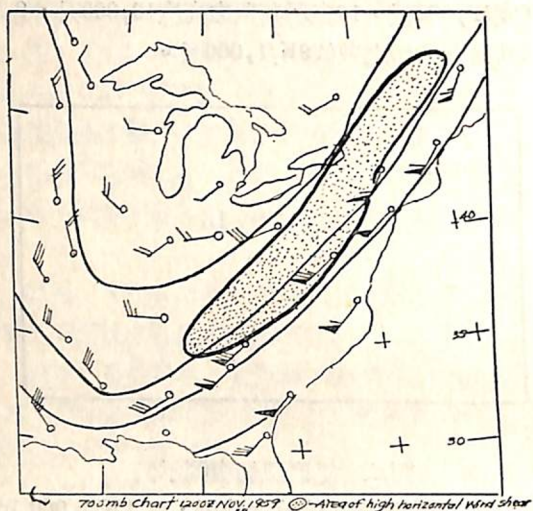
(4)風速值最少須達60哩時(當垂直風切最小值9K/1000呎時，風速最少須60哩/時)。

(5)水平風切——水平風切可用下列兩方法測之量，此兩方法均應利用，因有時兩法可得出不同之結果。

(6)由分析垂直風切層底之等值線，來作水平風切性質上之測量，此等值線間隔為5000呎，此分析乃指出一強烈梯度區與強烈水平風切區之相互重

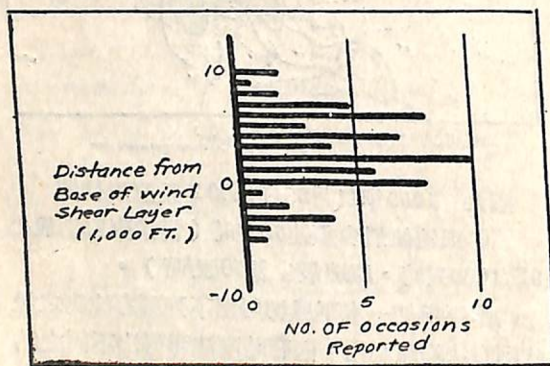
合。

③由檢查高於垂直風切層底之等壓圖，亦可作水平風切性質上之測量，哈氏發現CAT發生於水平風切值等於或大於40K/150NM（或16K/1°Φ）（喬奇亦以此值為臨界值，等於或超過此臨界值之區域以密點表示之，如圖十所示。



圖十 1959年11月28日700mb圖（密點區表示水平風切高值區）

④預測發生CAT氣層之厚度—喬奇發現嚴重CAT發生在強烈水平風切區及垂直風切區相重合之區域，更發現嚴重CAT大多常發生於垂直風切層底之上方0—7,000呎氣層內及該底高度之下方0—8,000呎氣層內，由此預測嚴重CAT之厚度應為10,000呎（自垂直風切底之下方8,000呎至其上方7,000呎為止，如圖十一所示。



圖十一 CAT之分佈與垂直風切層底之關係

⑤垂直風切層之正值與負值之圖表應分別繪製

三、預測嚴重CAT區將現今存在之CAT區，以連續性法外推法及其他方法求之。

四、喬奇方法之試驗—在70個報告中有67%適合此方法之預報要求，24%在其邊緣，大部落在預報區100哩之內，故此法對嚴重晴空亂流在預報區及其附近區之出現率為91%。

五、AWS對喬奇方法之試驗

①AWS試驗此方法時，以垂直風切之下限值5K/1000呎及水平風切值大於50K/150NM，在79次發生CAT情況中有49（62%）落入預報區域內。

②AWS再以經修正後之喬奇方法，在最大風及風切圖上垂直風切超過2K/1000之區域來試驗，99次中有88次落在預報區域。

六、利用喬奇方法之簡捷預報步驟

①預報步驟

①第一步—詳查來自印字電報之高空資料，以求得垂直風切之數值≥6K/1000呎，將其平均值填在測站圖圈之右方，再將此層之底頂高度以1000呎為單位，填在測站之右上方，正負風切（垂直）值圖分別填繪，即預報CAT之發生位置在噴射氣流核心之上方及下方。

②第二步—以垂直風切值6開始，其間隔為3K/1000呎，繪製垂直風切之等值線，在含有兩條封閉等值線以上之區域，以斜線陰影或塗藍色表示之，此區即為垂直風切中心。

③第三步—分析垂直風切層頂底之高度，以5,000呎間隔，繪製等值線，並注意具有規律性之強大梯度存在之區域，此區可視為強烈水平風切區。

④第四步—檢查位於水平風切超過40K/150NM之垂直風切層底之高度以上之等壓圖，在圖上以顏色畫出測站圖圈，以指示此風切之存在。

⑤第五步—圈繪出水平風切40K/150NM之區域，再以紅色鉛筆塗以陰影或斜線。

⑥第六步—注意垂直風切中心與強烈水平風切重合之區域，此等區域預報有嚴重晴空亂流，其亂流層之高度自垂直風切層之底之下方8000呎起至此底之高度高7000呎為止。

⑦註釋

①鄰近而不在重合之區域（垂直風切中心與強烈水平風切區），可有不同程度之亂流強度，在垂直風切層底之高度等值線之最大梯度與垂直風切

之較小值之相交處，可預報為中度至嚴重亂流外。

②適合第三步與第四步而描繪出之區域，能增加預報之信心。

③不同時適合第三步與第四步而描繪出之區域，但由第三步得出之強烈梯度與垂直風切中心相重合之區域，其預報信心必可增加。

郭文（Corwin）及楊格（Young）預報晴空亂流之方法

郭楊二氏描繪CAT發生之區域之方法，是基於200mb上由暖氣平流所支持之垂直上升運動。彼推算垂直速度之方法如式一所示，且係假設小團空氣沿等熵面傾斜度之50%運行，且平流層內為等溫之情況。

$$W = \frac{100Ve(T_1 - T_2)}{6D}$$

式中W——垂直速度（呎/秒）

Ti——200mb上i點之溫度，i=1, 2; (°C.)

D——點1與點2間之距離（哩）

Ve——有效速度，即風速減去氣壓系統之速度（Kts）

由上式計算出之垂直速度，再以下表查出其相當之CAT強度。

亂流強度	垂直速度
輕度	+140 呎/時
中度	+280 呎/時
嚴重	+365 呎/時

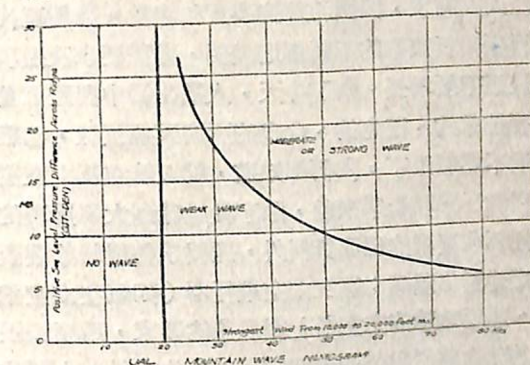
山波亂流之預報方法

一、山波係大氣受地形影響，所引起之亂流，該亂流常出現於山頂上空及山之背風面，有時有滾軸狀雲之出現，其上尚有莢狀雲存在，表面平滑伸展高度甚高，當空氣內水汽不足時，僅能產生一種乾之波動，而無雲之形成，其產生之下降氣流，有時每分鐘可達五千呎，危害飛行安全至巨。

二、山波之產生及其強度

山脈之高度及該地區各層之風向風速及山脈兩側之氣壓差，均能影響其產生及其強度之變化，因兩側之氣壓差能代表大氣壓力之不均衡之程度，風向與山脈成垂直時最易產生山波，風向與山脈平行

時，除非風速很強，則山脈兩側易產生滾軸狀渦動，否則無此可能；至於風速，其速率愈大，則產生之亂流愈嚴重，又山脈高度愈高，其產生亂流區域亦愈大，嚴重性亦增加，故山波產生之預測，如除熱力作用及其他天氣現象影響不論外，僅取決於山脈高度之風向風速與山脈兩側之氣壓差（海面氣壓值）即可。但使用之圖表必須由各地區內有關山脈兩側之所有實際觀測資料（山脈高度之風及兩側氣壓差）及其產生亂流之強度，加以分析統計繪成如圖十二所示，此圖為美UAL所採用者，其地點位於洛磯山中部科羅拉多州之丹佛附近，其山脈兩側測站為GJT及DEN，該圖之縱坐標為GJT與DEN間之氣壓差，橫坐標為離海平面高度10,000—20,000呎氣層間之最強風速值，因洛磯山高度約為16,000呎左右（如台灣中南部中央山脈高為10,000呎左右，故所用高空風亦應為10,000呎左右（5000—10000呎）氣層內之最大風速值），圖內有無亂流之臨界值，各地亦不相同，美UAL產生山波之臨界值為20Knots，美空軍為25—30Knots之間，風向以垂直山脈走向左右45度為限，在此90度範圍內適宜產生亂流。預報時如位於臨界值附近無法決定時，則須參考垂直風切指數，以1K/1000呎為指數1，如指數超過3時，則可預期有亂流發生。



圖十二 山波發生及其強度示例

結論

近代科學突飛猛進，航空事業發展神速，空中航行也日益頻繁，飛行高度亦逐漸增加，大氣中之亂流尤為空中安全之隱憂，由亂流而導致飛機失事，人員傷亡，財產損失，其例屢見不鮮，上述數種預報方法，雖適用於美國，但不見得完全適用於中國，但仍有參用價值。特此譯出，俾利研用。