

對流層上部「晴空亂流」之研究

魏元恒

Clear-Air Turbulence at the Troposphere

Abstract

Y. H. Wei

Strong Clear-Air turbulence was generally associated with the appearance of jet-stream in the high levels of atmosphere. The jet-stream was stronger at higher latitudes than the lower and the clear-air turbulence was to be found in the same case. Both intensity and scale of such turbulence had a close relation to the topographic features. Clear-air turbulence often gave much trouble to the aircraft. Its shape showed in a strip-form and extended to its extremity in windward directions.

Some stronger turbulences happened most in winter at an altitude about 25,000 ft. and its high frequency was found to northern and right lower portion of the centre of maximum velocity in a jet-stream. These turbulences appeared in the trough line of a cold low at high level. The frequency of appearance of clear-air turbulence in the SE part of China showed higher and its intensity was often stronger than the southern part of United States. The clear-air turbulences induced by cold lows or in troughs at high levels, mainly were to be found at those stations to the north of Yangtze.

氣象學在研究方面，迫切需要三度空間觀測。第二次世界大戰後，由於普遍採用無線電探空，因之對於氣象學的立體研究，即大有進步，至少對於太氣對流層而言，誠屬如此。但氣象學在應用方面，由於噴射飛機進步甚速，經常多飛行於對流層上部或平流層內。吾人對此種高度之知識及所獲之報告，殊嫌不足。例如高空天氣圖，吾人經常繪製者，僅能達 100mb（約五萬五千呎），無線電探空觀測，一般能達 50mb（約七萬呎）高度者，尚不及觀測數之半。據科學家估計，乘人飛機在最近兩年內可能飛達九十五萬呎高空，則為平流層上部之飛行矣。屆時吾人今日之天氣圖，對此種高度，將毫無用處。因此可知，由於時代之進步，氣象學之立體研究，在縱深方面，無論觀測與認識，均極待發展與急起直追。

當地面平靜無風，天空晴朗無雲，在昔日螺旋槳飛機時代，確為適於飛行之良好天氣；但在今日噴射飛機時代，雖然天朗氣晴，並非完全適合於飛行，此種事實均由經驗與研究中予以證實，蓋高空中有晴空亂流（Clear-Air Turbulence）存在。

大氣亂流在低空（25,000 呎以下）常致飛機不能作穩定飛行，此為習知之事；惟吾人現有之知識對此種現象之發生尚不能作正確之預測。所幸者在低空亂流中之垂直氣流可產生有形之雲，以為識別之助。飛行人員可藉雲形以判斷氣流之惡劣與否，如遇積雲狀之雲或山嶺之波動雲，彼可改變航線以避開惡流，或當飛機進入雲中時可減低飛機速度以減少亂流顛播。低空有充分水汽，在亂流中造成雲形，可容識別，並可警告飛行人員以補救天氣預報之缺失，但高空亂流則無此方便矣。

噴射飛機經常係在雲層以上，即在 25,000 呎對流層上部飛行，但在此種高空仍多亂流，且因水汽太少，不足成雲以為識別之助。以此在噴射機經常航行之高度，亂流常出現於晴空中，而無雲形之警號。亂流足使飛機發生震動，其震動強弱又視飛機速度而異，故晴空亂流在噴射機飛行計劃時，最應注意考慮。（自然晴空亂流有時亦出現於 25,000 呎以下之低空；但亂流出現於高空之頻率，較低空雲層亂流特多）。

一、過去關於「晴空亂流」之研究

過去有關高空晴空亂流之研究，發現甚多可疑之處。英國科學家對此問題研究最早，得知晴空亂流確係出現於高空，惟對此亂流之出現如何預測，則無法解決。過去數年在美國，有人認為英人之發現無何種代表性，亦無甚多重要性，因之此問題在一般觀感中，認為無關宏旨。近年美國因高空飛行人員所遭遇之困難問題甚多，必須

重新檢討此高空晴空亂流之一事實，並曾製作若干計劃，搜集資料，以及利用噴射飛機作實際直接觀測等，更研究有關此方面之理論問題。

惜上述搜集高空資料之計劃，因受種種限制，對於強或極強之亂流所作觀測甚少。且亂流觀測僅限於兩個既定高度內（即 30,000 至 39,000 呎），所測範圍甚小；在觀測中顯示，出現於此兩固定高度屬於極強亂流者為數更少。此外美空軍另有一高空噴射氣流觀測計劃，亦因受航行範圍之限制，僅能在少雲區域內觀察高空亂流，並且見此一噴射氣流之研究多限於美國東南部，即北緯 25° 至 35° 間；在此低緯度之噴射氣流一般均較北方高緯度為弱，隨其出現之高空亂流，自亦不太強。

鑑於過去對高空資料搜集中所發生之缺點，故對所得資料在應用時必費斟酌方能用以求取其他地區高空亂流出現之頻率及強度。

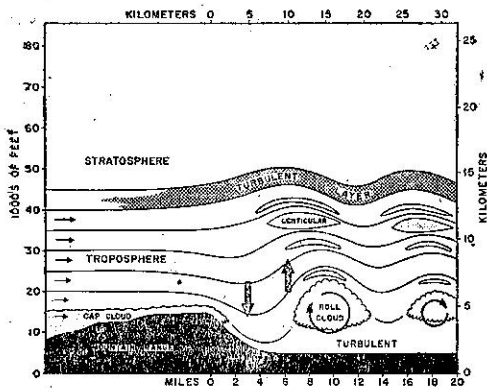
茲欲說明者，即對於高空亂流須作一新計劃以從事觀測，並將全美國作一整個三度空間之研究，以確定高空亂流分佈狀態。此一新計劃，即本文所述美國「雲尾計劃」(USAF Project Cloud Trail) 之實施，以完成上項需求。

二、全美晴空亂流之探測

美空軍近年成立組織，利用噴射飛機探測高空亂流，其目的欲根據所獲得之大量探測資料，尋求噴射飛機經常飛行高度內亂流出現之預測方法。此一探測始自 1954 年 12 月至 1955 年 12 月止，計有一年之時間。在此期間噴射飛機飛行員在美國每一無線電探空測站之上空附近飛行。飛行員要特別注意配合無線電探空施放之時間 (1530Z)，並自 25,000 呎向上作向量性爬高，至噴射機所能達到的最大高度為止；其飛行範圍應在以地面探空站為中心 30 哩半徑內。飛機在爬高時，飛行員要報告是否遇到亂流；若遇到亂流，應估計其強度若何並報出此亂流頂及底之高度。

三、山地波動亂流

本文資料對於高空亂流與山地波動之關係，及其與天氣圖上形勢之關係未作顯著分開之研究；但所選之高空



圖一：山嶺波動亂流垂直縱剖面圖

測站則盡可能避開山地之影響。吾人習知因山地波動所引起之亂流常能伸至甚大高度並造成甚強亂流。亂流分佈之情形與山地波動之關係，示如圖一：此圖係根據 Jenkins 及 Kuettner 兩氏之學說所繪製者。

四、高空亂流之性質

空氣垂直運動在高空亂流中其厚度不大，遠遜於低空因對流作用導致氣流上下升降所發生者。飛機在高空亂流中飛行所得反應，猶如汽船在波濤水面上迅速移行相似。在高空輕微亂流中此種現象仍予飛行員及飛機一重大困擾及妨礙。亂流出現之形態狀如長帶，且厚度甚薄（約 500 至 2000 呎厚）寬度甚狹（10 至 40 哩寬），順風向延展甚長（長約數倍於其寬）。在一大範圍亂

流中，此種長帶形亂流出現之頻率，與其間無亂流空隙區域出現頻率之比，約為一比一至十比一。亂流在縱的方面呈現甚多層次，兩層間比較穩定之空隙，約有數千呎之距離。

五、亂流探測所受限制

研究高空晴空亂流，在觀測中會遭遇多種限制。首為飛行員對亂流所作之估量，係純由主觀決定者，所用飛機又為固定翼式戰鬥攔擊機。其次飛機在觀測時當爬高通過亂流區，可能感受不到亂流影響，因其所通過者，或為大亂流區內，比較穩定部分（因為有此種情形，故在預測高空亂流時，似應採用亂流可能出之百分率表示之）。再次為飛機不專為觀測亂流而飛行，故當天氣甚壞時，觀測即告停止。因此亂流觀測所得之資料，比較偏於天氣良好之一方。強亂流測得之頻率，很顯著可能受有影響。因地面上壞天氣常與上空噴射氣流相關連（在下文將

述及強亂流時常追隨噴射氣流出現)。

六、全美國亂流觀測之結果

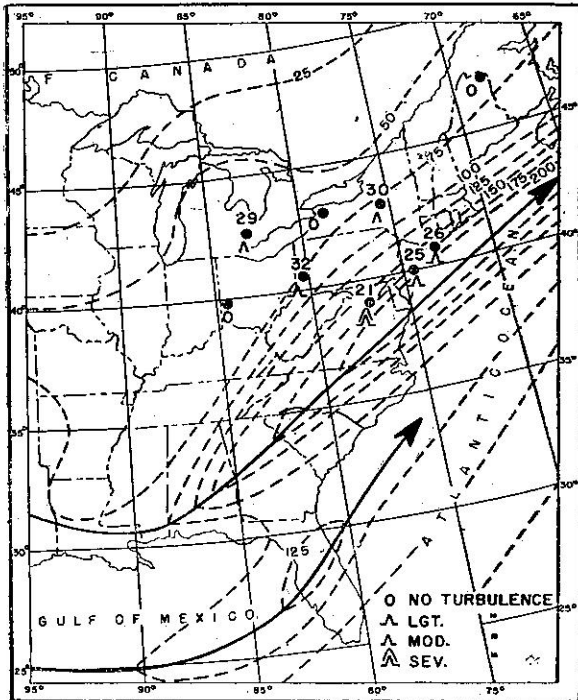
已往研究會發現強亂流甚多發生在冬季月份。鑑於此一事實，本文在分析全美觀測結果，首先將冬季四個月份之觀測，加以統計，示如表一。由統計顯示，亂流發現在 25,000 呎高空者約佔 $\frac{1}{3}$ (由 1954 年 12 月至翌年 3 月，共 1200 次觀測)，但隨時間及地區不同而有甚大之變化。觀測中有高空亂流報導者，約有 $\frac{1}{3}$ 之亂流係不止一層的；但報有三層者亦不多見。最強之亂流，多發生在有兩層亂流時，但單層者多較厚。由觀測紀錄中得知弱亂流出現次數較強亂流為多，約為 10 比 1。

表一 全美高空亂流觀測統計 (1955)

	觀測次數	有亂流次數	百分比	最強亂流			亂流層次	
				弱	中	強	單層	雙層
十二月	292	131	45%	87	39	5	84	47
一月	325	113	35%	58	45	10	73	40
二月	274	80	29%	50	28	2	64	16
三月	309	73	24%	38	30	5	55	18
總計	1200	397	33%	233 (19%)	142 (12%)	22 (2%)	276 (23%)	121 (10%)

七、亂流出現與天氣圖形勢

為欲求出所測亂流區域與其可計量之氣象因素間之關係，在冬季月份每次飛機觀測報告中即首先研究當時風



圖二：高空亂流與噴射氣流之關係圖 (1500Z, 24 January, 1955)

註：點線示 300mb 高空圖上等風速線 (以 Knots 表之) 實線示噴射氣流主軸，圖上每測站上方之數字示強亂流出現之高度 (以千呎為單位)，亂流強度如圖右下角之說明。

及氣溫與其沿定壓面分佈之垂直情形。此種研究得有良好結果，至堪注意。

雖然弱亂流發生次數較強亂流為多；但其與各種天氣圖形式之關係頗不明顯。弱亂流可在多種天氣情況下產生，並可由源地傳播至他處。此種傳播可由臨界面 (如對流頂) 發生反射作用所造成者；結果亂流雖其發生力已消失，而仍能存在。此種情形當強亂流正在其消失階段時，自然亦出現。鑑於弱亂流甚多特性。故對弱亂流與天氣圖各種形勢之關係，未作研究嘗試；但對強亂流與各種氣象因素間之關連，實有加以追尋之必要。

在飛機觀測中報有中度或強亂流時，高空天氣圖上 (300mb 及 200mb 圖) 通常即有一噴射氣流，在觀測站之上空或在其上空略南處。並且有一最大風速中心 (Isotach max)。順噴射氣流移向於測站附近。例如圖二所示。

圖二顯示在噴射氣流最大風速中心正下方及北方或氣旋形之一方，強亂流出現之頻率較高。若根據上述所得天氣圖情況，進一步就各高空測站之資料詳加檢查，自可得更詳盡之結果。當最大風速中心移近測站時，高空風速將增強，此可從連續探空報告中看出。不過經常探測之高空風，可能有不正確者，致不能依據繪製風速縱剖面圖；惟此時尚有高空溫度報告可用，預報員可依據亂流常出現在顯著逆溫層，如在對流頂或其下方之一事實，以推測判斷之。

圖三所示，為依據圖二沿噴射氣流風速最大中心附近，其所產生亂流在垂直及水平方向分佈之正常情形。噴射氣流軸心特質及對流頂之變異，均表示於圖上。

表二 高空亂流出現之時間百分比
(在飛機上升於25,000至45,000呎間)

	美西北部	美西南部	美東北部
冬	28%	33%	44%
春	24%	19%	32%
夏	23%	14%	28%
秋	22%	16%	27%
全美年平均：24%			

昔日高空風報告甚感缺乏，有者曾試用高空風及溫度兩者詳細報告，發展為晴空亂流之預報方法。在本文研究中，亦發現垂直風割甚強，氣溫直減率甚大等現象，與高空亂流之生成，具有相當關連。

經研究，顯著亂流與下列三種天氣圖形勢係密切關連；即噴射氣流、高空槽線及高空冷低壓三者附近。並且除受地形影響，強亂流甚少出現。綜上觀之，欲使飛行員免受意外遭遇高空顯著亂流，惟一可靠方法，則為根據上述天氣圖形勢，在有關區域內，預測亂流出現之可能性，方為最妥善。

八、高空亂流氣候學之分析

應用氣候學統計方法，將此次亂流觀測資料加以統計，藉以從顯著高空亂流出現頻率紛亂之情況下，得出一線光明。因為觀測資料僅有一年之時間，故須將測站分為三區以作研究。此三區為：①美國西北部(此區測站多屬山地)②美國西南部，及③美國東北。其統計結果如表二：

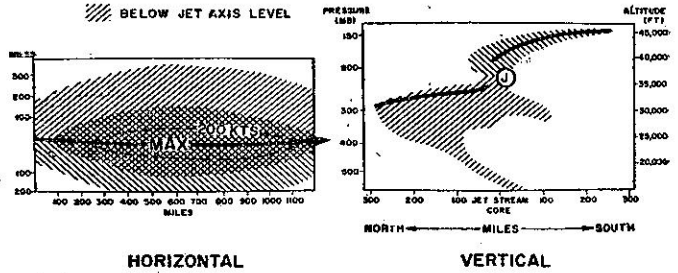
美國西北部季節變化較小(冬28%，秋22%)；美國西南部季節變化，冬季最大為33%，夏季最小為14%；美國東北部季節變化亦甚顯著。就全美言，在25,000呎至45,000呎間，飛行遭遇高空亂流之可能性，全年平均為24%。此種結果，與英人及加拿大人所研究者，甚相一致。

就上述美國三個區域內之觀測資料，再進一步求其每季自25,000呎至45,000呎間每1,000呎高度亂流出現之百分數，其結果示如圖四。

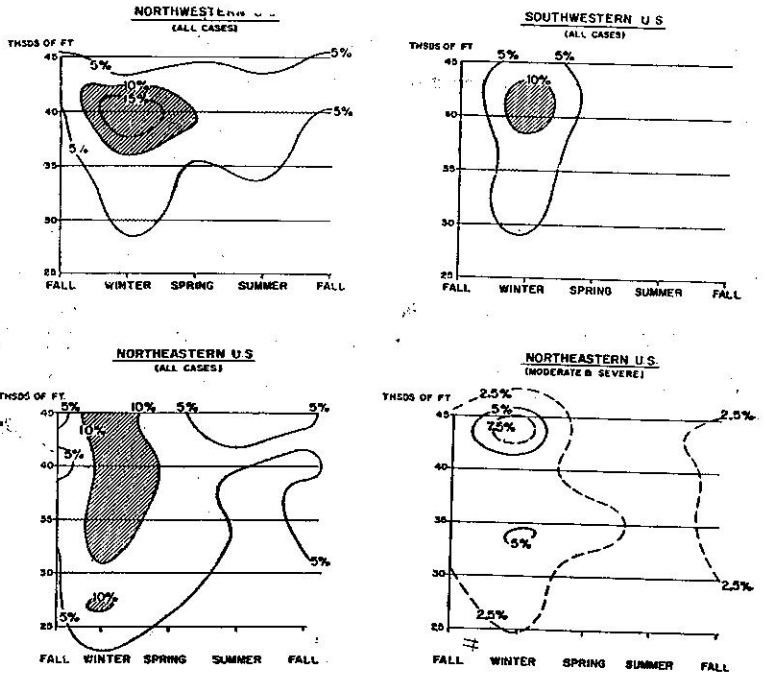
各季中間月份300mb月平均高空圖及噴射氣流軸心平均位置示如圖五。此圖更易瞭解噴射氣流與高空亂流出現百分率相互關連之顯著性。

LEGEND:

▨ ABOVE JET AXIS LEVEL
▩ BELOW JET AXIS LEVEL



圖三：高空亂流垂直與水平標準分佈圖(沿1500Z, 24 January, 1955 噴射氣流最大風速核心)



圖四：各季高空亂流出現頻率圖(由25,000至45,000呎間，每1,000呎資料得之)

九、結 論

由美軍所作高空亂流觀測，證實晴空亂流與天氣圖形勢確屬相互關連；並因季節及地域的不同而有系統性之變化。此種發現足使詭譎莫測之亂流藉天氣上某種形式預測其出現之可能性，使飛航者得以避開。(下接封裡)