



晴空亂流對飛行之影響及其預報作業概況

樊滌兮譯

Cleac-air Turbulence (CAT) effects on Aviation and associated forecasting situation

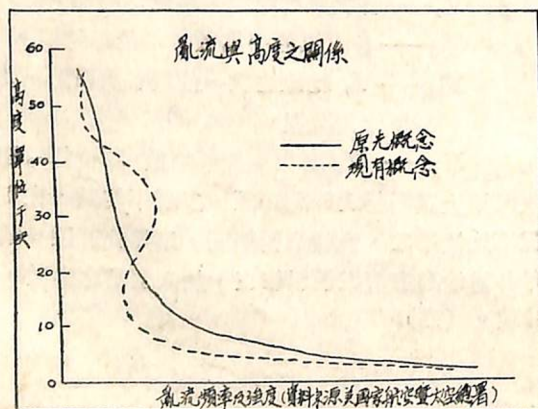
一、引言

航空事業隨氣象新知日趨進步，而氣象條件所加於航空系統之影響亦日趨複雜。

二十五年前，航空員與氣象學家彷彿一致相信20,000呎以上之高空，已無真正的天氣存在。然而，當吾人之高空轟炸機於一九五四年在日本上空執行任務時却遭遇強烈亂流。至此，吾人始知高空尚有強風存在。數年後，當吾人之噴射戰鬥機開始在30,000上下作例行飛行時，我們更進一步認識這些強烈的高空風特性。向西飛時，飛行員將遭遇可怕的逆風使其在目的地進場（高度）太低。向東飛，有強烈的順風則將使估計到達時間（ETA）縮短。這些強風就現在已知者，如噴射氣流，似可為高層風型之一般現象。

二、亂流與高度之關係（參見圖一）

一般似乎認為亂流強度與頻率有隨高度遞減之趨勢和關係。然而由於高性能機之作業高度增加，吾人已在30,000呎高度發現亂流之強度及頻率較其以上及以下更為顯著。此一現有概念說不定會由於未來的另一最大亂流層出現於更大高度而趨改觀。此說並非臆



圖一：亂流與高度之關係

斷乃因 U-2 機即曾報告在 60,000 呎以上發現亂流，而 X-15 的飛行員其所報告的亂流高度更高達 80,000 呎及以上。在 250,000 呎處有一對流層頂，被稱為「中大氣層頂」（mesopause），乃因位「中間大氣層」（mesosphere）之頂故名。中間大氣層位平流層以上，係從 150,000 呎處向上伸展。此區之溫度變化狀況因與對流層同為隨高度遞減，故吾人可發現此層之亂流亦如在對流層然。今天，吾人正關懷 30,000 呎附近（一般為從 15,000 呎以上）所出現之最大亂流。至其與對流活動（低層熱力與雷雨型）相結合之亂流如何，今姑勿論因彼不屬於本文列論範圍。此一特殊亂流目前已有數種名稱，然而却無一形容得體可道其詳。一般均知其為「晴空亂流」（CAT）此乃因 75% 的此種亂流並非借雲出現也。

吾人於正式討論晴空亂流前，先需複習亂流之一般現象及特性。亂流分類有數種方式：有人根據和天氣現象同時出現之型態，把亂流分為對流性或雷雨型亂流，山波亂流及風切亂流，後二者實已涉及晴空亂流之雛形。

亂流並非什麼奇特之物，不過是一般正常氣流中所發現的小規模不規則現象而已。這些不規則的「小渦流」（Eddy）之存在及運動，係取水平及垂直方式進行。其不規則情形正與河川、溪流以及水龍頭注入靜水中之水流情形相同。

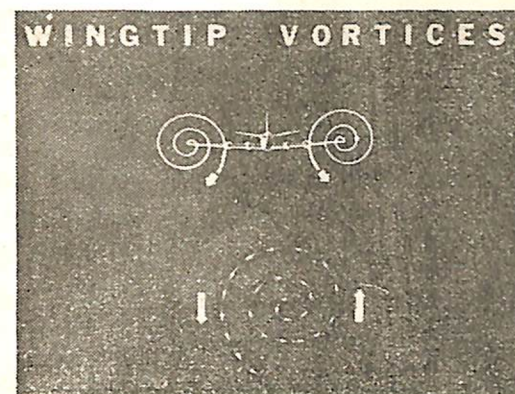
三、由飛機翼尖渦流說明晴空亂流對飛機及人員之影響

一、翼光渦流(wingtip vortices)（參見圖二）

飛行人員當熟知「翼光渦流」這一術語。這些極小的渦流如與大氣中的小渦流比，誠屬小巫大巫。

這些不規則性渦流，在氣流中其形體大小之改變，乃因飛機對其之反應而各異。例如：飛機重量、體積，翼型、面積、空速及其他類似因子，均對飛機所感受之顛波有關。如 T-33 及 U-3A 機對同一渦流

所受之影響不同及對不同規模之渦流其反應亦各不同。



圖二：翼尖渦流

二、晴空亂流對飛機及人員之影響

晴空亂流之影響從微不足道到造成猝然大禍的結果者各有不同。

對飛機之影響者，諸如引起結構失效、操縱失靈、壓縮器失速及熄火；其中後二者對噴射機之關係尤為密切。例如一九六〇年三月在印第安納州泰爾城（Tell city）附近所失事之客機，即歸因於嚴重晴空亂流所造成結構失效之結果。此外，在一九六一年一月於猶他州東南地區所失事的一架 B-52 機，其操縱失靈和最後的結構失效，亦均屬此範疇。

對人員而言，亂流可引起乘客及隨機人員之不適與疲勞，亦可招致傷損，尤當未採取防範措施時。在最近一次的一九六一年五月一架客機在俄亥俄州東北遭受中度至嚴重程度之晴空亂流，結果有七位乘客及二名空中小姐負傷住院。

由於以上之意外事件，對晴空亂流之警惕產生甚多益處，且說明為何其為一影響今天高空機作業最傷腦筋的氣象特殊現象。約二年前，晴空亂流在「空運年度聯席會議」及其他有關會議中，均曾為熱烈討論的主題。最近，於一九六二年九月十日至十四日由美國氣象學會在佛吉尼亞州漢普頓路（Hampton road）所主辦召集的第四次氣象應用會議。在五日三夜的會議節目安排計劃中，對晴空亂流之討論時間曾超過其他論題一倍有餘。其中包括飛彈射程氣象及超音速航空問題。其數篇重要論文已散見於各種刊物中，如「軍事空運動務部」所主編的「飛行員」（flyer）及「太空飛安」（aerospace safety）等雜誌。

四、美空軍氣象勤務部晴空亂流預報作業對策

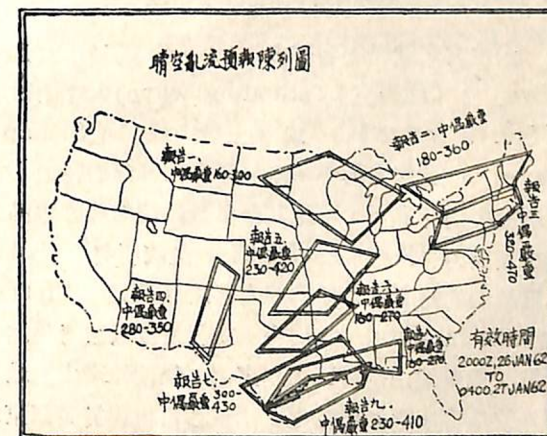
「美空軍氣象勤務部」（AWS）對晴空亂流預報作業問題已在採取正確對策中，一九六一年八月該部已創立第一個此種作業機構，其主要職掌即為研究與預報晴空亂流。此單位之建立係見諸同年五月底六月初本部會議後之行動。該次會議之與會代表計有各航空公司、私人研究機構、美氣象局、空軍劍橋研究中心、該部各首腦部門及所屬聯隊、大隊及分隊。

密蘇里州坎薩斯城的氣象分隊晴空亂流預報組為該分隊主要部門。此外，該分隊業務復包括終點預報設施，為美國中部從德州至加拿大區三十個空軍基地供給終點預報。這種特業預報單位和氣象局「嚴重當地雷雨預報」單位共同分享其設施。

正與任何新成立的一切單位同，晴空亂流預報組亦需一試驗時期，這一個一九六一年所成立的新單位已習於準備及有限的試驗工作。晴空亂流預報組的人員們已參觀過形形色色的航空公司及氣象部門並吸收其技術而利應用。每一所被觀光的部門均為特定航線或美國局部地區而預報各種氣象要素。但結果仍不能為晴空亂流帶來特殊意義引人側目。然此却正為空軍所需求，如吾人所預期，欲使現有單位應用所有建議方法以從事其預報，實不太可能，但却能從各種方法中結合其部份觀念以發展其本身技術。（有關此類技術容後討論）

一九六一年十一月一日，首次晴空亂流預報，已經由空軍氣象印字電報網予以廣播。此項前哨預報之種類分為16及24小時階段者兩種。在該年十一月及十二月期間，其廣播時間為每日 0800Z 一次。從一九六二年一月一日始，又將此公告之廣播增為每日兩次，所增加者之廣播時間為每日 2000Z。

此資料於廣播後，每一後方區空軍氣象站即利用一張包括全美的輪廓圖以陳列晴空亂流預報（參見圖三）。有亂流預報之區域即以紫色圈定，再將各亂流



圖三：晴空亂流預報陳列圖

之強度、高度在各該區域註明。然後標註該圖之有效時間。這些陳列圖之製備係由專人負責於收到廣播後完成填繪工作。

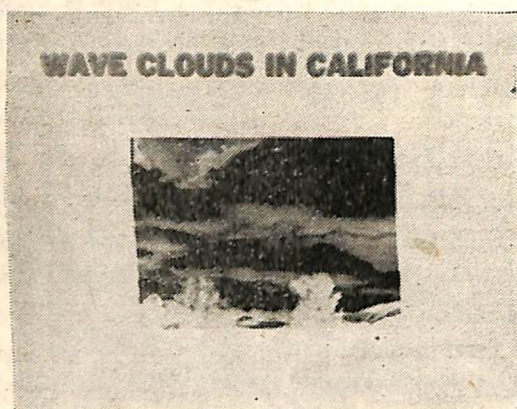
無疑，讀者將可注意到圖中尚未包括輕度亂流在內，此因多數亂流之出現被報告為輕度，而輕度亂流祇對飛行具輕微影響。且吾人實不能以任何程度之亂流，即動輒決定其天氣預報。

五、伴隨特殊氣流型態之晴空亂流

如前所述所謂「晴空亂流」一語，彷彿略嫌含混。因並非所有高層亂流均如晴空亂流般多出現於晴空中。祇大多數（75%）的晴空亂流係發現於無雲的大氣中。晴空亂流常伴隨各種風型出現。最常見的是山波和噴射氣流同在之亂流。此外，亦有和高空封閉低壓，高空斷裂低壓，深濬的高空槽及「先行卷雲盾」(advancing cirrus shield) 同時出現。

一、山波亂流式晴空亂流：

(1) 山波雲圖（參見圖四）：山波亂流正如其名，不言可喻係出現於山區且一般係隨過山風所造成之波而存在的一種亂流。



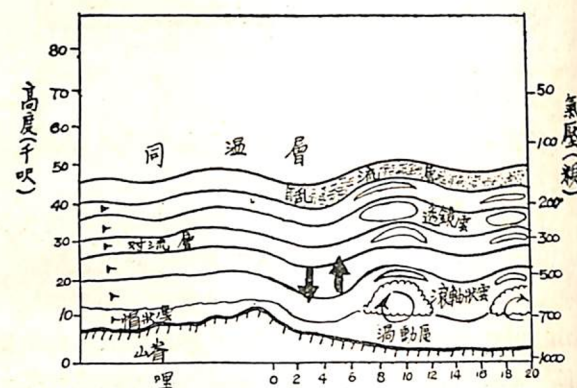
圖四：山波雲圖

山波之名就已知者甚多，如「背風波」(Lee wave)，「駐留波」(standing wave)，「山波」(Sierra wave)，或「主教山波」(Bishop wave)。這些名稱每一祇能形容出其部份特徵。它出現於山的背風面，不像其他多數系統然能够移動；其出現與消失皆在同一山脈間。美國所見之山波多出現於山的西面且普通均係內華達山群巒 (Sierra Nevada mountains) 出現，尤以近主教嶺者為然。

(註：內華達山位美國加州東部，為懷特奈山之最高峯高達 14501 呎) 但總之，山波亦可出現於美國東部及其他山丘地形區。

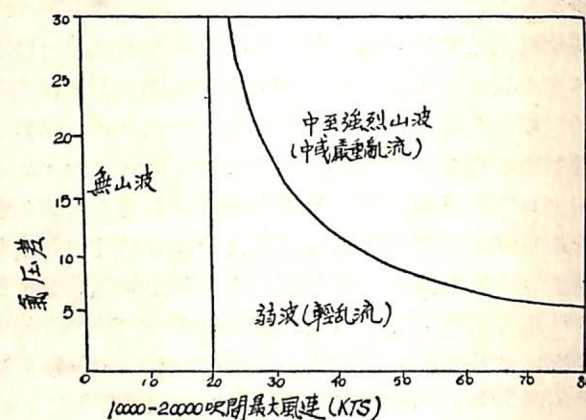
山波處所出現之風有一對山脊線合成的垂直度，脊線之風愈強，山嶺間下降氣流之垂直發展則愈大，而亂流之強度亦愈強。山波亂流之顯著特性係鏡頭狀雲（兩面凸）稱為「透鏡雲」(Lenticular clouds) 之伴隨出現，位於亂流層之下方。

(2) 山波亂流圖（參見圖五）：一般而言，伴隨亂流層之山波計有二型：低層亂流與轉子雲或滾軸狀雲在背風面聯合出現。這種雲未被認為為晴空亂流。然而其高層之亂流却為晴空亂流之家。其平均厚度約達 5,000 呎，且一般位於透鏡雲之上。此種亂流之水平發展可從山脊至下風向延伸 300 哩。



圖五：山波亂流圖

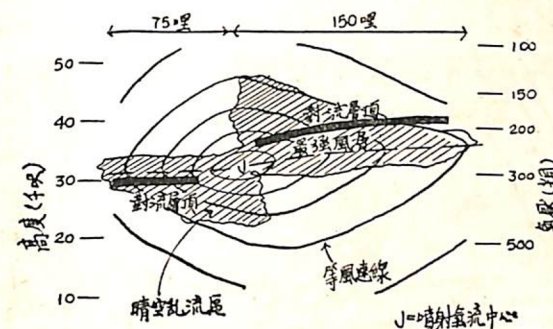
(3) 山波亂流預報（參見圖六）：預報山波及伴隨亂流出現之方法，在數年前已由空軍劍橋研究中心利用所收集之資料於研究主教波時有所發展。其方法係以山嶺兩側二站間之氣壓差及山嶺高度上之風速報告，以預報山波晴空亂流之存在及強度。由分解圖 (Nomogram) 指出亂流強度可為氣壓差及風速之函數。就此原理可預報美國各主要山嶺之晴空亂流。



圖六：山波亂流預報分解圖

二、噴射氣流式晴空亂流：（參見圖七及圖八）

伴隨噴射氣流的晴空亂流不像伴隨山波者那樣有雲摻雜其間。這樣對飛行人員在雲中摸索進退維谷之處境將大有裨益，使其於遭遇前即可清楚得悉晴空亂流。風切亂流是亂流由噴射氣流伴隨的另一命名。強風切—水平或垂直—係盛行於接近圖七中所示之強風區（噴射氣流中心）。圖七中從左至右最強的風切及最強的亂空亂流，乃先見之於噴射氣流中心之左下方，後見於其右上方。



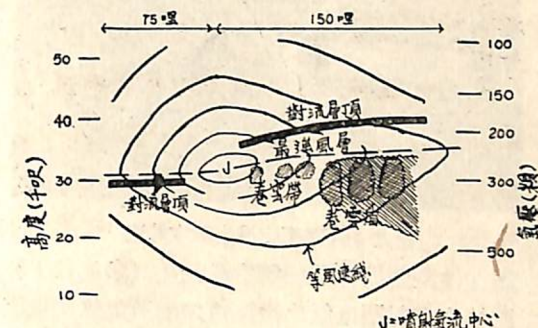
圖七：噴射氣流式晴空亂流

亂流強度亦非恒沿噴射氣流的全路徑而存在，其情形正如旋渦之不常隨河流之移動一致。所以雖普通預報堪輿出晴空亂流及其強度，然晴空亂流之特殊位置與強度預報需有實際之風資料予以佐證，而不根據圖七中所示之理想大氣模式，誠信矣哉！故常有噴射氣流橫越來臨而未見有若何亂流也。

所謂「噴射氣流」者實無何魔術意義可言，它不過是被用以設計求出最強氣流（風速）在大氣中之所在位置而已。有的最大風速區既窄且銳—即示當另一邊甚為寬廣時—此邊之風速改變甚為迅速—他邊則甚為緩慢也。最強氣流並非一鼓作氣持續不斷進行，勿寧為分段累進積漸為雄之概。有時亦呈合久必分，分久必合，數支合而為一，又一支化為數支之狀。在不確定之某日有多個強風區會不謀而合出現於同一高層大氣中，唯有時不克見諸吾人所繪之天氣圖中也。

(1) 噴射氣流式晴空亂流與卷雲之關係：（參見圖八）如欲問為何晴空亂流常存在於無雲的碧空中？有關此一問題之答案至為簡單：普通在此高度用以成雲之濕氣已至感不足，甚且，晴空亂流一般呈小規模垂直運動。然相反，為生雲正常之舉升凝結作用需達到大規模垂直運動並需有對流所產生之山嶽雲始可。然而此所謂晴空亂流亦偶見於卷雲內或其附近，特別在先行卷雲盾內。空軍劍橋研究中心的研究者們具有噴

射氣流與卷雲盾結合一起之觀念。故此有足夠濕氣用以產生卷雲的噴射氣流晴空亂流實為僅有之特殊例證。距離卷雲盾甚近且接近噴射氣流中心之卷雲呈固定孤立雲帶狀。如圖示卷雲可發現於晴空亂流區底而位於噴射氣流之右上方。



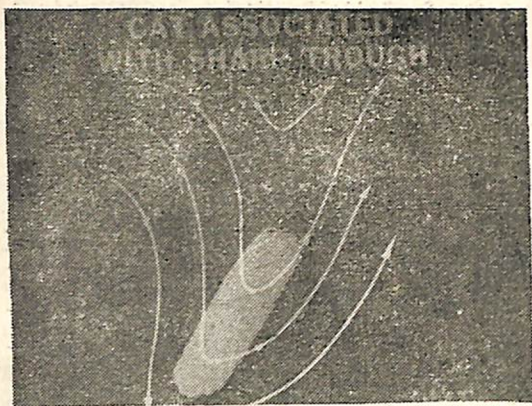
圖八：噴射氣流式晴空亂流與卷雲之關係

(2) 晴空亂流之強度及風切：噴射氣流式晴空亂流既以風切亂流為其另一命名，則即說明所呈現於噴射氣流中之風切現象為最強。亂流之強度直接有關風切的力量，如所知，風切之定義是風速隨距離之改變—水平或垂直。強的水平風切結合強的垂直風切，可產生更強的晴空亂流。晴空亂流預報組即利用每 90 海哩 (nautical miles=1852m) 的 25 哩 (Konts=1852m) 風速為臨界水平風切值求晴空亂流。關於垂直者，中度晴空亂流之區域及其高度的預報，係利用每千呎高度上垂直風切需達每時 9~12 哩的風速為滿足。中度至偶嚴重度者為每千呎 12~15 哩，嚴重度者則需大於 15 哩。每 90 海哩的 25 哩水平風切區可由一張圖指明，表示出各高空風站之最大風。垂直風切之決定，係由填繪與分析全美 16,000 呎以上超過時速 50 哩風速的每一探空報告之剖面圖而成。一旦當有效之風切區被取決之後，其運動與形態之改變，強度與高度等之預報，即可藉最強風區及其他高空預報圖而完成之。如此即可想像其分析程序是如何沉悶乏味和耗時費力。有關這方面的未來計劃容後討論。

三、伴隨高空深槽的晴空亂流：（參見圖九）

雖多數晴空亂流主要係隨山波及噴射氣流存在，然亦有常結合其他產生風切所需風型現象。一深濬的高空槽，尤其大於二十哩風速之移行系統，可有晴空亂流存在於槽線內或其近旁趨勢。較之噴射氣流，其風速容或甚小，然槽線之另一邊其風向之改變却甚可觀，每可達 90 度或以上程度，但却無顯見的

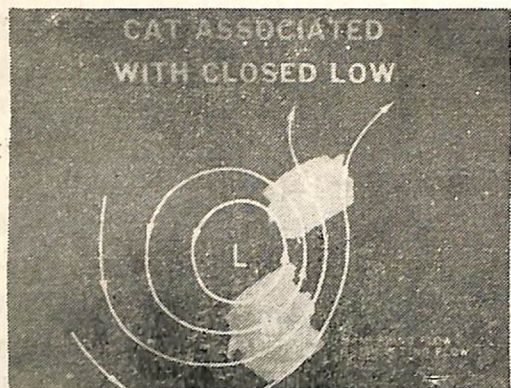
風切。



圖九：伴隨高空槽之晴空亂流

四、伴隨封閉低壓之晴空亂流：（參見圖十）

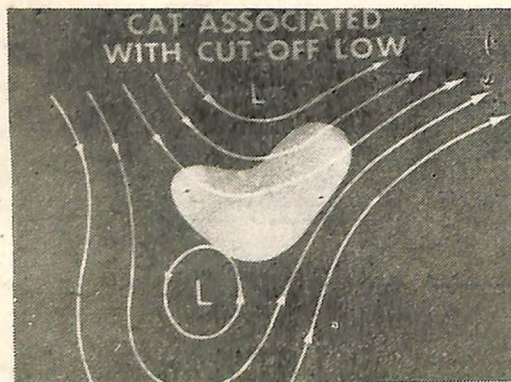
圍繞高空封閉低壓之環流可伴隨所需風切以產生晴空亂流。若氣流如圖中之M與S區，呈「併入」及「分離」型者，則中或嚴重亂流可望形成。



圖十：伴隨低壓之晴空亂流

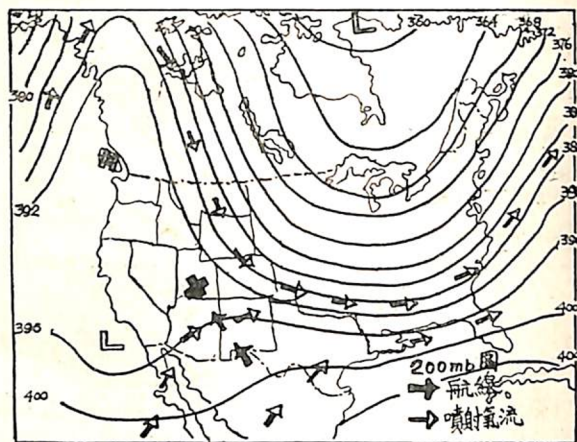
五、伴隨斷裂低壓之晴空亂流：（參見圖十一）

同樣，對圖中東北區之高空斷裂低壓，亦可有嚴重亂流形成，正如有噴射氣流伴隨的晴空亂流然，此亂流之強度係關係風切之力量如何而定。



圖十一：伴隨斷裂低壓之晴空亂流

成就晴空亂流之天氣圖模式，（參見圖十二）上列任何情況之一，即可產生中至嚴重程度之晴空亂流。可是任何二者或以上情況之結合更可產生嚴重至極強程度之晴空亂流。圖示噴射氣流與山波或併入與分離形氣流之結合圖。資料時間為一九六一年一月二十日0000Z的200mb圖，適為B-52機在猶他州東南墜毀前一小時之情形。圖示無疑在該區有二噴射氣流伴隨山波且有併入作用的氣流存在，而這種由諸條件兼備而合成嚴重至極強程度晴空亂流之結果，正好為這架B-52帶來了厄運。



圖十二：成就晴空亂流之天氣圖模式
（注意圖中箭頭流動方向）

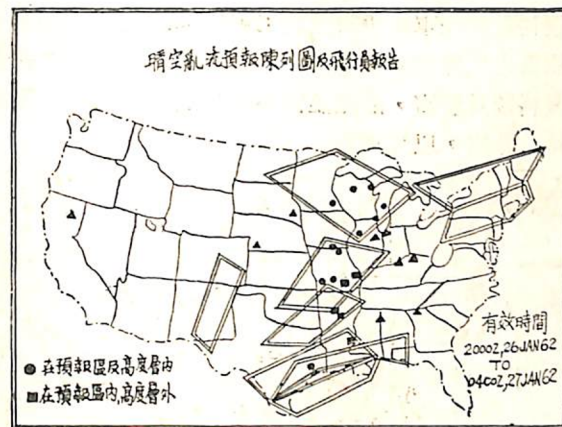
六、晴空亂流預報組預報技術之說明

一、預報得分校驗：至此，或許有人懷疑晴空亂流預報組其人員之預報技術究若何？對於這種問題吾人實樂於稱道其技術十分正確。當施以每種新式努力試驗時，此技術於開始期成績甚低，但一經改良即可接納使用。如一九六一年十一月一日至一九六二年四月三十日階段，全期共收到中至嚴重度晴空亂流8533次，出現高度介於16,000~56,000呎間。這些報告的26%落於預報區，而介於此高度之「空域」（Airspace）祇有5%。其意義為遭遇中至嚴重度晴空亂流之或然率為6.5倍，預報區內大於預報區外。亦即，在預報區內所遭遇晴空亂流之或然率大於其他區5.1倍。然而，總賬中的赤字項下亂流報告中為吾人所期望的其餘四分之三尚未完全出現仍需努力。

二、晴空亂流預報陳列圖與實際出現之比較校驗：（參見圖十三）

本圖說明從一九六二年一月二十六日2000Z至翌日0400Z的「晴空亂流報告」與圖三「晴空亂流預報

陳列圖」之比較情形。其間8小時中共收到飛行員報告27次。內中有12（44%）次落於預報區內，包括16,000~56,000呎的美國空域8%在內。就此比值知在預報區內遭遇晴空亂流之或然率為在預報區外遭遇之9.3倍。亦即預報區內之機會大於其他區6倍。此即說明其技術代表何種意義。



圖十三：晴空亂流預報陳列圖與實際出現報告之比較圖

此為美空軍氣象勤務部為晴空亂流所作之工作，茲再期其未來工作如何。

三、晴空亂流預報今後之努力方向：

（1）電子計算機制度：前曾述及耗時費力計算水平與垂直風切的分析程序問題。吾人希望將來更能利用電子計算機計算風切。目前已行檢討為計算風切欲成立二個不同機構從事之。一旦當我們能經常以電子計算機計算風切，則擔任晴空亂流預報的工作人員即可抽暇從事研究工作，以改進技術。

（2）飛機偵察計劃：當計劃者與工作者因飛機旅經晴空亂流預報區外所獲預報之利日多時，在預報區內出現之報告必日少，而在預報校驗效果上之困難亦必多。目前吾人正計劃利用有特殊儀器裝備的JB-57偵察機隊穿插晴空亂流預報區，擔任特種飛行作業以減少不利結果。在校驗統計方面當吾人不能經常從飛行員獲得「否定報告」（negative report）（指「無」晴空亂流）之利時，吾人即將僅根據晴空亂流之「肯定報告」（positive report）計算之。為獲得更多之管制樣品，我們計劃以飛機去測量此特定區之亂流。麥克利蘭空軍基地（McClellan, AFB.）駐場的JB-57機，將就晴空亂流之強度及每次遭遇所見伴隨現象等資料，供給晴空亂流預報組。

（3）新技術之預期：在此一新的主題「晴空亂流」上，吾人雖已有長足進步，然對預報問題之全部解決

仍為期尚遠。目前所使用的技術和方法，亦非晴空亂流預報之最後定論。我們所知大氣之秉性及晴空亂流之知識愈多，新的方法和技術之發明期望亦愈大。計算機化或計算機制度將可從事與晴空亂流相結合的其他參數之研究，如計算機制度在其他氣象預報方面獲得之相似成就同。我們瞭解此一課題之範圍，但亦樂觀於將來。

空勤人員常樂於瞭解如何認識晴空亂流，當他們進入晴空亂流區一旦遭遇時究該何所事是如何辦理？我願坦率回答此為一甚難答覆之問題，因當其進入晴空亂流區時，所需者是警告而非預報，且當其進入後彼等對此區域之界線及其本身所處之相對位置均不易確定。目前，尚無已知之感覺器堪察出即將遭遇之晴空亂流，雖此問題已有可觀成就。此實與伴隨積狀雲之對流性雲，其可由雷達偵得之例證不得同日而語。

七、晴空亂流與飛行

一、晴空亂流之航行指示：吾人在高空飛行雖無上述晴空亂流識別器，然根據適當特殊指示亦不難窺得晴空亂流之端倪。飛行高度，特別在20,000呎以上的風速與溫度改變，是飛機接近晴空亂流之重要指標。最近一架DC-8客機當其經過中度晴空亂流後報告，溫度之改變在15哩間約達8°C之鉅！

二、航行高度之選擇：當預期或進入晴空亂流時，按令之規定建議為：「必先收油門使達穿越亂流空速」。此外，由於上升下降的決定及或左或右的前進，均需賴飛機之精確位置，故無一定的動作建議。前述已遭厄運的B-52飛行員曾選擇高度從36,000呎爬至40,000呎。然一經如此處理立即引起飛機失速卒至進入演成結構失效的極強晴空亂流中。事後分析說明如飛行員當時能降低高度右轉巡航，則飛機所遭遇之晴空亂流或即可能較弱而迅速脫離亂流區。

三、亂流強度的決定：數年來，強度不同的各式亂流——輕、中、嚴重、極強——多已由空勤人員根據其自己的感覺予以主觀的判斷和取決，而亂流強度亦被其形容為有實在投擲和振蕩力量的實體——佔有物或支配物。這種描述性的解釋，實不足為空軍所接納應用，特別因實體常含有確定可靠的性質和意義。不過目前為預報晴空亂流吾人已有一更為科學且較適合的指針——「空速增減」（Airspeed Fluctuation）。飛行員於飛行時常會注意其空速，如此則任何增減即可立知。「航空氣象國際合作委員會」對解釋亂流強度之空速增減會釐定其定義為：5~15哩為輕亂流，（下接第10頁）