

晴空亂流之觀測及預報

劉廣英

The Observations and Forecasting of C.A.T Kung-Ying Liu

A general discussion of clear air turbulence is presented, these include its formation and forecasting possibilities. Some observational results, in order to show the possibilities really exist, are also given.

一、前言

所謂晴空亂流，美國「晴空亂流委員會」於1966年年會中定義為：「自由大氣中，不在對流活動區域或其附近之太空及航空操作地帶之一切亂流，此中包括發現於卷雲之太空及航空操作地帶之一切亂流，此中包括發現於卷雲中非對流區或其附近之亂流」。由此定義可知，晴空亂流幾可涵蓋所有對流因素以外，影響飛行之大氣不穩定現象。本文中將討論此現象之成因，觀測及其可能預報方法，在討論中，將以文字為主，以簡化內容並提高可讀性，至於必要之數學式，則將直接引用而不加推導，先進、讀者如有興趣，可查閱參考資料，以明其詳。

二、導至晴空亂流之原因

在海洋潮濕氣層上如有乾暖氣層，則在交界面上由於密度梯度特大，可產生內重力波 (internal gravity wave)，此種波動在無上限 (如大氣) 之流體中，除水平傳播外，亦可垂直傳播 [5]，但由於其垂直波長一般極短，此種垂直波動僅波長較長之凱爾文 (Kelvin) 波及羅士培重力波二種可在探空報告中分析出來。凱爾文波在短時天氣預報而言並無作用，但在不穩定狀態下，波峯上所生之渦動，久被認為係晴空亂流的源泉 [6]，此點可由觀測波狀 (billow) 雲及高效能雷達回波獲得證明。

如 T 為時間常數，不穩定凱爾文波之放大率初為 e^t/T ，即其波幅隨時間 t 成指數增加，但當此不穩定性加大後，勢必影響所在環境之動力穩定度，亦即產生異常放大，進而形成渦動。哈地 (Hardy) 等 [4] 認為，自由大氣中如欲發生此種渦動，亦即所謂的晴空亂流，至少須具備以下三個條件：

(一) 因 T 為李察遜 (Richardson) 數之函數，

大氣之垂直風切應大至足以克服其穩定度，亦即垂直風切力須超過穩定空氣之負浮力。(二) 大氣運動須產生某種不規則，以使大範圍平均運動之動能轉變為局部亂流所需之能量。(三) 在晴空亂流發生區，大氣垂直溫度分佈應呈穩定狀態，而且是穩定狀態愈明顯愈好，因垂直風切之可允許程度，與穩定度成正比，而亂流強度又與風切強度成正比。

三、晴空亂流之偵測與預報

根據前述理論及必須具備之條件，至少亦可列舉出四種晴空亂流偵測及預報方法，即：

(一) 利用雷達回波偵測及預報晴空亂流：

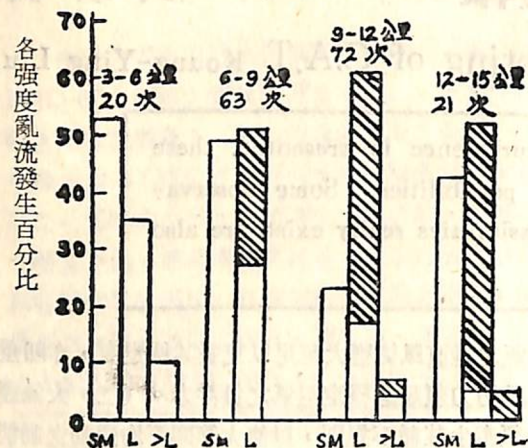
設吾人有一套靈敏之雷達設備，其發射波長為 L ，脈波體積為 V ，發射功率為 P ，接收機天線之接收面積 (apertual area) 為 A ，則由相距 R 處一堆目標收到之反射功率平均為 [1]

$$\overline{P} = \frac{PA}{9\pi L^2 R^4} \left(\frac{V}{2} \right) S \dots \dots \dots (1)$$

式中 S 為目標中可同時產生回波各反射體之總反射截面積，白頓 (Batten) [1] 稱之為雷達反射係數 (Radar reflectivity)。就晴空亂流觀測而言，理論可證 [7] 雷達反射係數為李察遜數，均為、垂直風切，垂直溫度梯度，及亂流所消耗能量之函數，同時，由觀測知，此係數於凱爾文波產生渦動時會顯然增大，因而在適當條件下，在雷達幕上應可看出晴空亂流是否存在。

為了證明上述理論正確，葛勞佛等 (Glover et al) [3] 曾分析 176 次雷達與飛機聯合觀測所得資料，其結果 (參閱圖一) 顯示，在高度 9 公里以下大部份飛機測到之晴空亂流在雷達幕上均有不同程度的顯示，9 公里以上者或因雷達能量限制効力略差。

上述結果不但證明靈敏雷達確可用以觀測晴空亂流，經長期觀測分析，應可根據回波狀況，預期



(晴空亂流強度)

SM: 小於輕度之亂流; L: 輕度亂流

圖一、各高度不同強度晴空亂流雷達觀測結果

(斜線部份表有亂流而雷達無回波者)

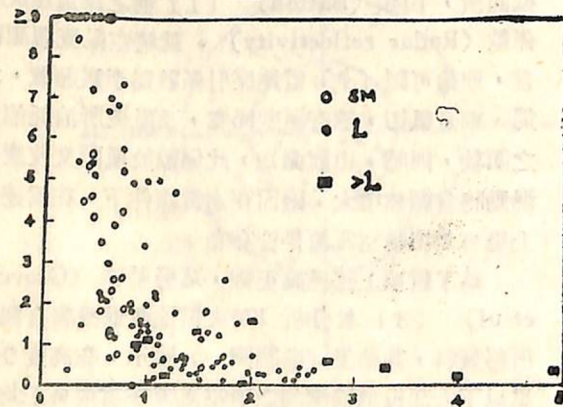
定出晴空亂流可能發生之空域，如進而用以提醒飛行人員注意，則對飛安貢獻必大。

(二) 利用李察遜數判斷及預測晴空亂流：

前已提及李察遜數為發生晴空亂流必要條件之一。如 θ 為位溫， g 為重力加速度，則李察遜數 Ri 可寫成：

$$Ri = \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta / \partial Z}{(\partial U / \partial Z)^2} \dots\dots\dots (2)$$

又知此數大時代表空氣穩定，小時則亂流或將發生。葛勞佛等亦曾就此原則，分析實例 117 次，其結果（參閱圖二）雖無法由 Ri 之大小判斷亂流強度，但 $Ri \approx 0.5$ 可視為發生亂流之臨界值。



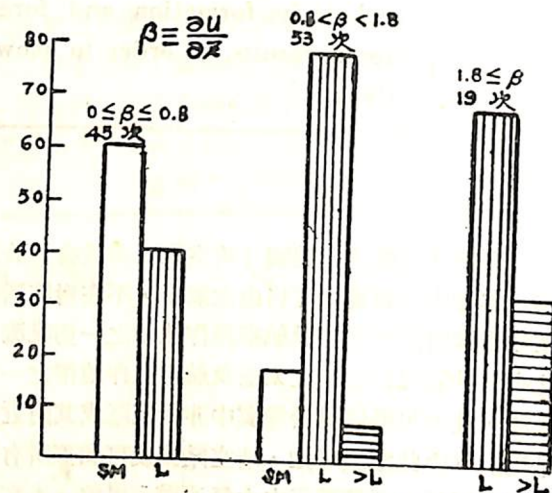
垂直風切 ($\times 10^{-1}/\text{秒}$)

SM: 小於輕度之亂流; L: 輕度亂流

圖二 李察遜數與晴空亂流之關係

(三) 利用垂直風切判斷及預測晴空亂流：

由式 (2) 可知，垂直風切亦可用以判斷晴空亂流是否可能存在，或預測其可能發生之空域。在分析 117 次實例中，葛勞佛等亦曾分析垂直風切與晴空亂流之關係，其結果如圖三所示。



晴空亂流強度

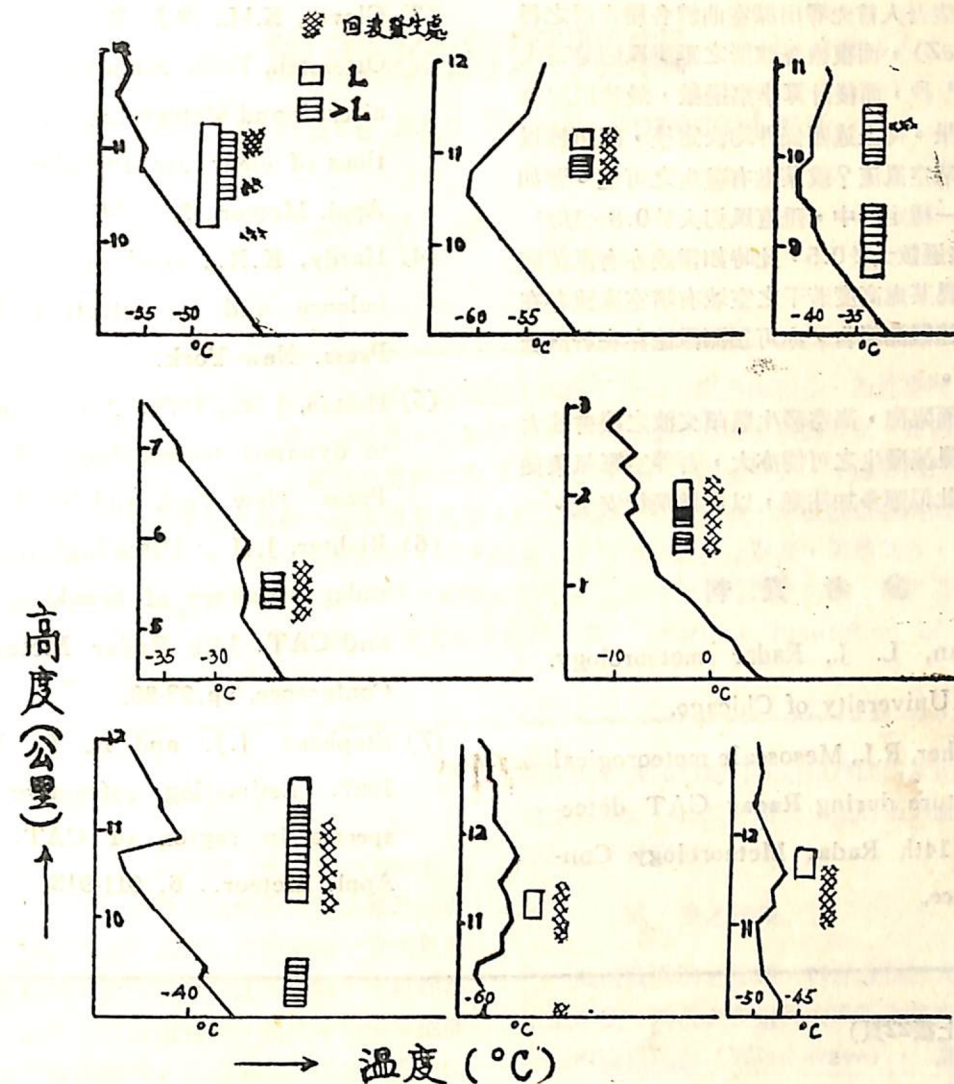
SM: 小於輕度之亂流; L: 輕度亂流

圖三：垂直風切與晴空亂流之關係

由上圖所示可知，晴空亂流之強度與風切量成正比，同時吾人發現垂直風切導至晴空亂流之臨界值約為 $0.8 \times 10^{-2}/\text{秒}$ ——垂直風切量小於此值時，即使有亂流發生，最大亦不至超過輕度亂流的程度；而當風切量大於上述臨界值時，所有經分析過之 117 次實例，均顯示有亂流的存在。

(四) 大氣穩定度與晴空亂流之關係：

李察遜數包括大氣垂直風切及穩定度兩種因素，則垂直風切可單獨做為判斷晴空亂流之標準，穩定度似亦可單獨使用，事實上並不盡然，蓋因高穩定度只是產生強垂直風切，進而導至晴空亂流之條件，而並非高穩定度空域必伴有強垂直風切，故吾人無法僅由此一因素判斷晴空亂流是否存在或可能發生。布捷 (Boucher) [2] 曾根據飛機、雷達、及無線電探空三者同時觀測所得資料中，挑選八次晴空亂流狀況最佳者詳加分析，其結果（參閱圖四）顯示八次實例中，晴空亂流發生處大氣均呈穩定狀態，但各次之穩定特性均不相同，即無一定之臨界條件，此一結果正與前述分析相同。



圖四 垂直穩定度與晴空亂流之關係

在以上四種晴空亂流偵測及預報方法中，除第一項需藉高性能雷達進行外，後三者均可由分析無線電探空資料而完成，可謂相當方便。

四、結 論

晴空亂流雖非常見，為害亦多不劇烈，但因其

在廣大空域中處處可在，且因其無天氣現象相伴，不易為飛行人員發現，往往能在不知不覺中入其陷阱，造成危險事件，氣象從業人員似應加以注意。就前述偵測及預報手段而言，吾人均有能力完成，為便於實際工作時參考應用，以下謹根據前文討論所及，試擬一「晴空亂流檢查表」：

檢 果 項 目	檢 查 結 果	結 論	備 考
垂 直 穩 定 度			
垂 直 風 切			
李 察 遜 數			
雷 達 觀 測			

根據此表吾人首先尋出探空曲線各穩定層之穩定度 ($\partial\theta/\partial Z$)，而復檢查該層之垂直風切是否大於 0.8×10^{-2} /秒，而後計算李察遜數，最後則記錄雷達觀察結果。待上述四條件均決定後，即可據以決定是否有晴空亂流？或某處有發生之可能。譬如吾人發現某一穩定層中，垂直風切大於 0.8×10^{-2} /秒，李察遜數大於 0.5，此時如雷達亦有亂流顯示，則結論為某處高度若干之空域有晴空亂流存在，既使無雷達觀測報告，亦可預測亂流存在於該處或可能發生。

本省四面臨海，高空發生凱爾文波之機會甚大，亦即晴空亂流發生之可能亦大，吾等空軍氣象從業人員，對此似應多加注意，以促進飛行安全。

參 考 資 料

- (1) Battan, L. J., Radar meteorology. The University of Chicago.
- (2) Boucher, R.J., Mesoscale meteorological structure during Radar CAT detection, 14th Radar Meteorology Conference,

- (3) Glover, K.M., R.J. Boucher and H. Ottersten, 1969: Simultaneous radar, aircraft and Meteorological investigations of clear air turbulence. J. of Appl. Meteor., 8, 634-640.
- (4) Hardy, K.R., et al.: Clear air turbulence and its detection. Plenum Press. New York.
- (5) Holton, J.R., 1972: An introduction to dynamic meteorology. Academic Press. New York and London.
- (6) Richter, J.H.,: Ultra-high resolution radar structure of breaking waves and CAT. 14th Radar Meteorology Conference, pp.83-88,
- (7) Stephens, J.J. and E. R. Reiter, 1967: Estimating refractive index spectra in region of CAT. J. of Appl. Meteor., 6, 911-913.

(上接22頁)

即予更新一次，意即在此。又如地域劃分對預報準確率有顯著增進之事實曾由荒川氏等在其實驗中證明。

但另有一種劃分屬於颱風移動速度之快慢者，亦經美 NHC 在 NHC-67 方法中首次加以試驗，證實其確可增加準確率不少。此項針對行徑奇特，速度逾常之颱風路徑預報在本研究中因係初步試驗，未敢投入過多人力、經費而未經包括在內。

本方法各方程與 NHC-67 方法之原始方程（不作速度快慢之劃分者）組比較，在統計量言頗為接近，在失誤值言尚優於後者。但與 NHC-67 方法

細分快慢速度後之方程組相較即見遜色。蓋因細分後之方程組對上述海倫之例可以改進其預報誤差頗多之故。又、本方法當初決定候選預報因子 169 個之前已主觀地摒棄若干可能有用之因子如 1000—700mb 厚度，各定壓面上之旋率等等，亦因限於人力及電子計算機記憶容量之故。近數年來國內計算機之發展頗速，記憶容量應不再構成問題。

總之，本方法尚有改進之寬裕餘地，預料將上述兩點加以充實後，所獲新方程組之預報效果必能更勝一籌而接近實用程度。

(下轉14頁)