

# 怎樣預報噴射機凝結雲

殷來朝

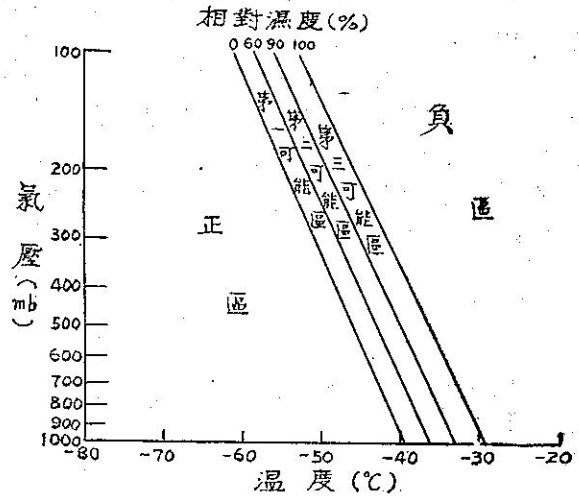
## 一、緒 言

自從飛機由螺旋槳時代進入噴射時代以後，飛行高度增加了許多，因而產生凝結雲（因在飛機尾部發生，故俗稱凝結尾）的機會，也隨之增加了許多，雖然凝結雲的生成，對於飛行並無不良的影響，但在軍用飛機的作戰飛行，確帶來了相當麻煩的問題，因此也連帶的成了預報員的氣象問題。

經過了若干專家的研究，證明飛機的凝結雲，乃是由於飛機的燃料，碳水化合物經燃燒後排出的氣體，加入於附近的空氣中而產生的，這種氣體達到飽和而出現凝結雲的過程中，曾同時被燃燒所生的熱量抵銷一部份，此二種因素相抵後的靜存效驗，可由消耗去之燃料量及其四週的氣壓，溫度和濕度計算出來。其計算的結果，由於水汽變成凝結雲中的冰晶體的各項假定之不同而略有差異。又因為各種溫度對於飽和水汽的含量，顯然不是直線式的變化，所以在某一定氣壓（高度）場合之下，必有一個最低溫度，在這溫度以下時，增加水汽的影響常超過因燃燒排氣所增的熱量，結果在四週的空氣雖是完全乾燥的，也會產生凝結雲。同理，也必有一個最高溫度，在這溫度以上，因燃燒所增之熱量佔優勢，雖然四週的空氣原來是飽和的也不能形成凝結雲。在這兩個溫度界限之內，是否能產生凝結雲，那就要看當時週圍大氣裏面的溫度而定了。本篇目的乃在探討凝結雲的成因及其發生之區域，作為預報人員之參考。

## 二、凝結雲的理論根據

近年來英美各國學者，對於凝結雲的研究甚多，其中最合於實際應用的，要算美國的阿普曼(H. Appleman)的理論，因為他的假定根據最接近實際，那就是：(一)在任何水汽凝結成可以看見的水滴之先，飛機後面的航跡，必須要達到水面上的飽和程度；(二)在水點形成之後，立即變成冰，而在凝結雲中的過剩水汽將更聚結在冰點上，直至其相對濕度降低到冰面上飽和的程度；(三)形成一種不甚清晰的凝結雲冰晶體，每立方公尺內需含水量千分之四公分(0.004gm/m<sup>3</sup>)，而形成清晰的凝結雲的含水量是每立方公尺內要有十分之一公分(0.1gm/m<sup>3</sup>)，阿氏會根據其計算結果，在絕熱圖上作成簡略之圖示範圍，如附圖所示，即美軍現採用作預報凝結雲的基本工具，從1000呎至100呎之間，每隔一百呎之溫度數值，在絕熱圖中繪成四根相對濕度曲線，即100%，90%，60%，0%，即表示形成凝結雲時，周圍空氣所需要的相對濕度（在水面的），是因其周圍的氣壓和溫度而變異的，為了便於研討起見，可將圖內由各相對濕度曲線所分隔之區域，分別予以名稱，在0%線之左方即溫度較冷的區域內，如飛機經過其中，縱使當時四周空氣完全是乾燥的，也能發生凝結雲的現象，這個區域名之為正區；在100%線的右方溫度較暖的一邊，除了極少次數在過飽和空氣（對水面而言）中偶有凝結雲現象發生外，不會遇到凝結雲的，這個區域叫做負區，其餘在各線之間的較狹區域內，是否有凝結雲發生，要看當時四周空氣內的相對濕度而定，由左至右各別名之為第一可能區(P-1)，第二可能區(P-2)及第三可能區(P-3)，因為在這些區域內，溫度普遍都在攝氏零下五十度左右，很少有濕度探測資料可資應用，對於預報還是一個困難的問題，不過照我們所知道的對流層上部與平流層底部的一般相對濕度情況，凝結雲發生在第一可能區的機會最多，因在該區內所需濕度是最小的，在第二可能區的凝結雲發生機會較少，至在第三可能區的機會則更少。



附圖：Appleman所製各種氣壓溫度發生凝結雲所需之相對濕度曲線圖

阿普曼 (Appleman) 曾指出凝結雲的濃度與持久性，需看其四週空氣對冰面上的相對濕度是未飽和或過飽

和的程度而定，其四週的空氣如對水面未能飽和，雖亦可能因燃燒而產生凝結雲，但是濃厚而持久的凝結雲，必須其四周的空氣同時要達到對冰面是過飽和的狀態才行，不過大氣上層的濕度報告太少，不容易應用來作準確的凝結雲測驗。

我們現在預測凝結雲的辦法，只能參考附近地區的探空溫度曲線，來和上述圖中各濕度曲線相對照，如探空溫度曲線在某高度與可能發生凝結雲各濕度線所分隔的區域相交，即可決定其飛行高度產生凝結雲的可能性，其可能性（或稱或然率）之大小，要視飛行高度之溫度所在區域而定，即進入第三可能區就有發生凝結雲的可能，進入第二及第一區內，凝結雲發生之機會更大，隨時應提醒注意。凝結雲發生層的厚度，普通為五六千呎以至一萬呎，一般情況都集中在對流層頂限附近及平流層下底部份，對流層頂限的高度常有變動，須視天氣變化及季節與緯度的不同而異，普通低緯度的對流層頂限高於高緯度，夏季的對流層頂限高於冬季，故凝結雲產生的高度，亦隨天氣之演變及季節與緯度之不同而有差異，在沒有探空溫度報告可利用的時候，只好利用其過去同時期的探空資料月平均數值及其標準偏差來作判斷，這樣也可以明瞭大致的情況。

### 三、凝結雲探測的實驗

美國空軍 B-47 噴射轟炸機隊，在一九五三年一月二十二日至二月二十日之間，作經常訓練飛行時，曾舉行有計劃的氣象觀測，這計劃名叫「黑羊計劃」，(Project Blacksheep) 由 MacDill 空軍基地的彭介德中校 (Lt Col. R. C. Bundgaard) 指揮，在十次訓練任務中所作氣象觀測中，共得有一千次的觀測紀錄，包括有凝結雲發生及無凝結雲發生的資料，每次的飛行都有好幾架飛機沿一條航線，跟蹤飛行；每次飛行所經的路線也有改變，每隔三天飛行一次，觀測高度從二萬七千呎以至四萬呎以上，因為有若干因素可能使這些觀測資料不很確實，即（一）觀測飛機尾部只是飛行人員工作中的一小部份任務，這些資料當然不能代表是全部時間都在繼續不斷集中注意作觀測。（二）飛機在飛行中，空間與時間都有相當間隔，以致飛行員只能從他們自己的飛機來觀測尾後凝結情形，凝結雲的開始與終止的時間，尤其是它的濃度和持久性的判斷，都不如由其他鄰近的飛機觀測來得清切。又因為 B-47 的時速達六百哩，其動力增熱所生之溫度訂正值往往超過三十度（°C）。所以其溫度觀測也不能準確的代表所在區的氣溫，而且飛機觀測也沒有濕度資料，更使實驗受到限制。只能作到凝結雲是否發生之檢查，而不能作到凝結雲的濃度及持久性的實驗觀測。

為了避免觀測上可能的差誤足以影響研究的結果起見，只得選出較少數的富有代表性的資料來，這就是指每一次觀測，都在鄰近地區有無線電探空報告可資利用比較者，此等報告約有一百次，都經過根據幾次報告的比較考慮而得，至少可以代表原始紀錄的半數。

據美空軍鄧寧上尉 (Capt. Hal H. Dunning) 等的分析研究結果，即將全部各次觀測中出現凝結雲的紀錄，分別點在上述附圖中各區域內，與阿普曼之理論作一比較，其發生的百分率有如下表所示：

各區域中凝結雲出現百分比表

正 區	第一可能區	第二可能區	第三可能區	負 區
82%	62%	32%	25%	0

上表中顯示在正區飛行，其發生凝結雲的或然率是極高的，在負區飛行則無凝結雲發生，由第三區至第一區的頻率是逐漸增加的。由此可見阿普曼的理論計算是最適用的。

鄧寧並曾指出：某一區域中是否發生凝結雲，與當地上空的氣壓（高度）和溫度大有關係，在發生凝結雲的高度，正區中所需之低溫條件，與對流層頂限的高度位置關係最為重要，在沒有直接測得濕度的時候，別的天氣因素如溫度垂直遞減率，由對流層頂限之下方以達上方的改變情形，和噴射氣流場的分佈關係，都可作為濕度的間接指示，因而利用作為判斷各區可能發生凝結雲的程度。他應用一張 200mb 的高空圖，繪出噴射氣流的位置（即風速最大的軸線），在北面的叫極方噴射氣流軸線，在南面的一條風速較弱，叫副熱帶噴射氣流軸線。按噴射氣流的產生，乃由於熱帶氣團與極地氣團，在互相對流交換過程中，使對流層頂限發生不連續之折斷及重疊現象，彼此位溫相差懸殊，故發生強風，對流層頂的不連續線或折斷處即與此強風軸線相符合。由北向南橫過極方噴射氣流的轉變是，從北方的低而暖的對流層頂至南方的較高而冷的副熱帶對流層頂，再由此向南橫過副熱帶噴射氣流軸線的轉變是，進入高而冷的熱帶對流層頂，沿噴射氣流軸線的風速和對流層頂的不連續現象之強度，也不

是完全一致的，噴射氣流愈強愈集中，則橫過其軸線的對流層頂的高度差及溫度差也愈大。

因此鄧寧氏會將各次實驗觀測分成三類，第一類在極方噴射氣流以北，第二類在極方噴射氣流與副熱帶噴射氣流之中間區，第三類在副熱帶噴射氣流以南地區，第一類係在極區對流層頂以上，該區飛行大多在西風長波槽中，是屬負區，沒有凝結雲發生，因為即屬於可能發生區，也由於附近之相對濕度太低，而溫度過高不能產生凝結雲現象。第二類係在副熱帶對流層頂限上下附近。這地區有廣大之水平距離和垂直的厚度（約在對流層頂之上下五千呎以內），都屬正區，有凝結雲發生，大多數飛行在可能區內，亦因高濕度而發生凝結雲，不過在西風帶長波的脊線區域內，噴射氣流較弱，很少凝結雲發生，這時候沒有正區，只在對流層頂限的狹而薄的一層內約二千呎之間可能發生凝結雲。此處須說明者，即凝結雲的變化情形與槽脊線無甚大關係，而與對流層頂層內的噴射氣流之強度和集中區以及溫度之分佈，則有密切之關係。此外間接可由旋轉率之移動而獲得之垂直升降速率亦有較顯著之關係。在有卷層雲出現時，此種看法頗為有效，即有卷層雲之地區必有凝結雲出現是也。第三類係在熱帶對流層內，其飛行高度最低之觀測均屬負區，惟向上去溫度繼續低降，可能發生區因以出現，再向上則更有正區存在，但在此區域飛行尚未會有凝結雲報告，畧與理論不符，恐係由於夜間無月光而未看見凝結雲之故，又在正區內，相對濕度（水面）如為零時，雖有凝結雲發生，但在相對濕度低於冰面飽和程度時，與四週空氣相混後，凝出之冰點立即汽化，使凝結雲歸於消散，在夜間觀測尤為不易察覺。

#### 四、結 論

噴射機之產生凝結雲與否，要看當時飛行高度的高空風和氣溫而定，尤其是對於噴射氣流軸線及對流層頂限的關係更為密切，在極方噴射氣流以北的地區對流層頂以上之平流層內飛行，不會有凝結雲發生，因該區溫度較高，屬於負區，即屬於可能區，亦因相對濕度過低而不能產生。在極方噴射氣流以南的副熱帶對流層頂限上下數千呎以內，有廣大的凝結雲地區，發生在正區或可能區內，發生凝結雲的底層高度，是由極方噴射氣流向南逐漸升高，及至越過副熱帶噴射氣流軸線之後，即突然上升，因此在這條噴射氣流以南的熱帶對流層內，下層無凝結雲，而在上層則大多屬於正區。凝結雲除了對風向的正交方向（即與噴射氣流軸線相垂直之南北方向）線上有顯著的變化外，沿着風向的變化亦很顯著，尤其是沿着極方噴射氣流，噴射氣流愈強而愈集中，則在極方平流層中愈不易生成凝結雲，而在副熱帶對流層頂限附近則更易發生凝結雲，在預報時須注意最近之探空報告與各季節中各緯度上空對流層頂限高度的變化及大氣環流現象之趨勢，以及飛行高度的高空圖（如200mb及300mb）中的槽脊線所在位置，與強風帶（即噴射氣流）軸線所在位置及其強度，藉以間接推出高空的濕度情形，然後判斷凝結雲可能產生之地區及高度範圍，發生卷雲及卷層雲的地區上空，更是一個發生凝結雲的間接指示，至于濃厚而持久的凝結雲，需要空氣中原含有較豐富之水汽，故在對流層頂以下發生的凝結雲應較在平流層內發生者為持久而清晰。

#### 參考資料

1. Appleman, H., 1953, "The formation of exhaust Condensation trails by jet aircraft." Bull. Amer. Meteor. Soc., 34, 14-20
2. Capt. Hal H. Dunning, USAF, and N. E. La Seur, 1955: "An Evaluation of Some Condensation Trail Observations" Bull. Amer. Meteor. Soc., 36, 73-79
3. 徐應璠譯：噴射機凝結尾之預報、空軍氣象中心中國天氣分析月報五卷一期。