

# 飛機積冰之預報方法 鮑學禮 (譯)

## The Forecasting Methods of Aircraft Icing

### 壹、概述

飛機積冰為航行上重大危害之一，因飛機遭遇積冰後，改變了原流線體之外形，不但使上舉力減少，更使阻力、重量、失速均增加。又積冰發生於飛機操縱系統外部可活動部分之表面，更能引起操縱系統失靈之危險，在過去，積冰主要之危險，是由於維持飛機高度之困難，今日雖然大部分之飛機有足夠之後備動力，來擔負由積冰而增加之重量，但由於積冰使耗油量增加及航程之減少，故積冰仍為今日航行上之一嚴重問題，再者引擎系統之積冰可能隨時存在，亦可導致動力之減低而危害飛行之安全。

一、飛機積冰之基本條件——飛機表面溫度必須低於 $0^{\circ}\text{C}$ ，及大氣中存在有過冷卻水滴。在自由大氣中水之結凍溫度並非 $0^{\circ}\text{C}$ ，其結凍溫度變化之範圍，由其上限鄰近 $-10^{\circ}\text{C}$ 至下限鄰近 $-40^{\circ}\text{C}$ ，水滴愈小及水質愈淨，其結凍點愈低，當過冷卻水滴撞一物體（如飛機之表面），因碰撞作用破壞了其內部之穩定而升高其結凍溫度。通常當飛機穿過過冷卻水組成之雲層或低於結凍溫度之液體降水區，必有積冰之可能。其他如在晴朗而潮濕之空氣中飛行時，且二者均高於結凍度（低於 $0^{\circ}\text{C}$ ），亦常有霜之形成。

在精確預報飛機積冰之前，必須利用降水之型別；雲之形態、位置、高度、厚度及雲量；及雲之溫度等資料之精確預報。

二、積冰之類型——飛機所遭遇之積冰，共分為三類，即霧凇，明冰及霜，有時明冰及霧凇常混合出現。

(一)霧凇 (Rime) ——為不透明冰，由於微小而過冷卻雲滴在撞擊機身表面時，瞬即凝固而仍保持球狀之外形，故冰中夾雜空氣，因之呈不透明之外貌且易破碎。

(二)明冰 (Clear ice) ——亦稱堅冰，其形成係由較大過冷卻雲滴，緩慢凝固而成，在未完全結凍之前，已與飛機表面密合，故能將其中大部分之空

氣排除，故結凍後堅實而不易破碎。

(三)霜 (Frost) ——為輻射冷卻作用使停在地面之飛機機翼上部積霜，其成因與地面之積霜相同。航行中之飛機自 $0^{\circ}\text{C}$ 以下溫度層下降至暖濕空氣層中時，霜亦能產生，多生成於飛機急降時，若飛行員事前注意，則可避免其危害。

三、積冰之強度——在航空上雖尚無一般積冰強度之標準，依照美空軍氣象勤務部 (AWS) 所頒之強度標準共分為四類，其定義如下：

(一)輕度積冰 (Light icing) ——肉眼可見，但其增大之速率與昇華之速率相平衡，除非經過一很長之時間，否則不致形成危險，故不需應用除冰設備。

(二)中度積冰 (Moderate icing) ——如持續航行在此種積冰區域內，其積冰之增長率可形成危險，但可不必立刻轉變行動，偶而使用除冰設備即可。

(三)嚴重積冰 (Severe icing) ——增長率甚為快速，雖經甚短之航程，仍可形成嚴重之危害，須立刻轉變方向，或使用除冰設備。

(四)極嚴重積冰 (Extreme icing) ——除冰設備已無法使其減少，故已失却效用，已無法控制其危害。

四、除冰及防水方法——在過去除專供訓練使用之飛機外，大多數軍用飛機裝配有除冰設備，但現較新型之機種，特別是飛行高度甚高之噴射機，因其活動高度較少有積冰之現象，故無是項設備，下列三種方法是通常用來防止或消除飛機之積冰。

(一)除冰罩——機翼及機尾之前緣，蒙以具有飛機同形之橡皮，當飛機積冰至適當厚度時，將空氣壓入橡皮除冰罩內，使罩之外形改變，使冰破碎隨氣流而脫落。

(二)防水液——對於旋轉面如螺旋槳等，使用防水液至為有效，該旋轉面藉離心力作用，能使防水液平均流佈於表面之全部，是類液體能防止冰塊黏着於旋轉面上，並藉離心力將水拋離，此外在風擋及氣化器等處亦可有效。

(三)加熱除冰法——機翼及機尾表面之前緣，利用引擎周圍之熱空氣或電流加溫以防止積冰，即所謂「熱翼」(Hot Wing)及電阻絲之利用。

以上所述之除冰及防水方法，雖均有顯著之功效，但在設計上均有條件之限制，故若過嚴重之積冰，可於數分鐘內能積冰達二至三吋厚者，則無法防止，故必須依賴氣象預報以避其危險。

### 貳、影響積冰之物理因素

一、因飛機積冰之發生僅在由過冷卻水滴組成之雲中及降水區域內，其積冰之速率及其積冰量之大小須以某些氣象因素及空氣動力因素而定，如飛機航路上之溫度，液體水含量，收集效率及空氣動力增溫之大小等等。而收集效率受飛機有關之組件，空速及水滴大小之影響。

二、溫度——當水滴撞擊飛機瞬間即凍結時，其溫度對水之部分有直接之效應，當大小滴撞擊在飛機上而溫度僅低於結凍溫度時，則僅有一部分水滴可能凍結，其餘水滴為氣流攜帶而去，而在較小水滴情況時，或大水滴在稍較低之溫度時，則全部水滴可能在飛機表面上凍結，其溫度對液體水含量之關係如下所述。

三、液體水含量——在積冰情況下，雲中液體水含量可能是決定積冰速率之最重要參數，通常當雲底高度較低而溫度較暖時，則雲內所含液體水之量較高，在雲內平均液體水含量隨高度而增加至一最大值，其後再漸降低，其最大集中區在層狀雲內比積狀雲內常出現在較低高度上，且層狀雲中之平均液體水含量常較積狀雲中者為少，預報積冰強度之明膠板上之明冰及霧凇之強度估計，均分別基於層狀雲及積狀雲內之液體水含量（參閱肆）。

四、水滴之大小——水滴之大小影響收集效率及積冰強度，雲內水滴大小之分佈與雲之型別、厚度、及其生成時間之久暫，上升氣流之強度，氣團之濕度及其他因素均有關係，一般言之，液體水含量及水滴之大小在積狀雲內者較其他雲型內者為大，故積狀雲特易導致飛機之積冰。雖然尚有其他可變之因素，如飛機之速率、形狀、及其組件之大小，可能更較氣象因素之影響為大，如對某型之飛機僅能產生輕度之積冰，而對他型飛機可能形成中度或嚴重之積冰。

五、收集效率 (Collection efficiency) ——

飛機有關之組件對飛機積冰之速率及收集效率，有很大程度之相關，收集效率（由飛機收集之液體水部分）與水滴之大小及飛機之速率成正比（與收集面之大小及形狀成反比，飛機組件之大小可以飛機前緣之曲率半徑表示之，因曲率半徑愈大收集之水滴愈少，但水滴愈小及曲率半徑愈小則使氣流變形愈少，故可有較多之水滴被捕獲，當一次積冰形成後，其收集面之形狀即改變，使曲率半徑減小而收集效率增加，一般言之，戰鬥機由於其速率快而且較薄之機翼，故其收集效率較運輸機者為大，水滴之大小對收集效率之關係，如表一所示（由圓柱形收集體之曲率半徑為15cm及真空速為175Knots計算而得）。

表一 收集效率與水滴直徑之關係

水滴直徑 $\mu$ ( $10^{-3}\text{m}$ )	收集效率
20	0.1—0.2
40	0.4
60	0.6

### 參、大氣中積冰之分佈

飛機積冰區域在大氣中之分佈，主要為溫度及雲之結構之函數，換言之，這些因素隨高度、天氣情勢、地形、地理位置及季節之不同而變。

一、高度及溫度——飛機能產生積冰之大氣溫度範圍甚大，自 $0^{\circ}\text{C}$ — $-40^{\circ}\text{C}$ ，偶而亦發生於積雨雲及其他雲之上部而溫度低於 $-40^{\circ}\text{C}$ 之雲內。一般而言，積冰之頻率隨溫度下降而急速減少，低於 $-30^{\circ}\text{C}$ 時積冰甚少出現，以通常之大氣垂直向溫度之分佈，積冰常被限於對流層下部30,000呎之內，同樣積冰之種類更隨溫度而變，明冰常發生於溫度剛低於 $0^{\circ}\text{C}$ ，而霧凇可預期發生於較低之溫度，根據美空軍氣象勤務部之偵察報告（在500mb及700mb面上），以積冰之種類劃分其相對出現之頻率，明冰10%，明水霧凇混合型17%，霧凇72%及霜（在飛行中者）僅1%。

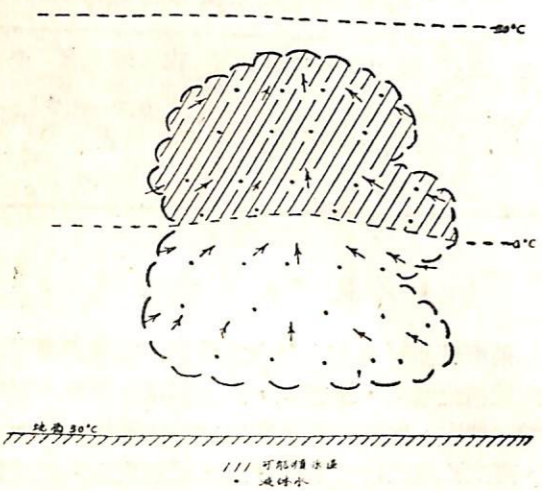
二、雲——飛機積冰可發生在層狀雲及積狀雲內。

(一)層狀雲——積冰之發生僅限於中低高度之層狀雲內，平均而言，其厚度為3,000—4,000呎，積冰強度自輕度至中度，最大值發生在雲之中上部，霧凇及混合型積冰均可出現於層狀雲中，因層狀雲

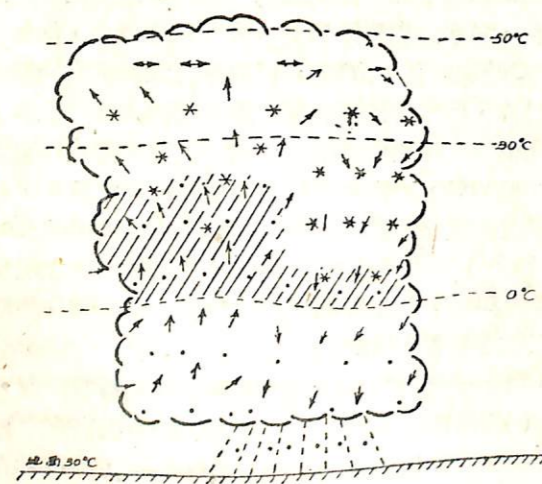


之水平向伸展甚廣，故構成其主要之危害。高度高之層狀雲內因大部均由冰晶所組成，故積冰甚少發生。

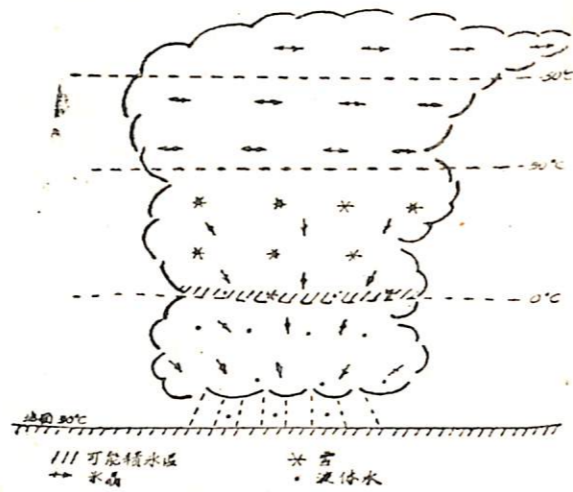
①積狀雲——在積狀雲中，積冰可能發生之區域較層狀雲在水平向為小而垂直範圍為大，且在積狀雲內積冰有更多之變化，由於個別雲之發展階段之情況不同，其強度範圍可自含有少量過冷却水之積雲內之輕度積冰，至濃積雲及積雨雲內之中度或嚴重積冰，其最嚴重之積冰發生於濃積雲剛欲轉變成積雨雲之時，雖然在積雲生成階段位於結冰層以上之各層內均可發生，如圖一所示，但其最強烈之積冰位於雲之上半部；又積冰常限于成熟階段積雨雲中之上升氣流區域，如圖二所示；在消散階段之



圖一 積雲生成階段之積冰區域



圖二 積雨雲成熟階段之積冰區域



圖三 積雨雲消散階段之積冰區域

積雨雲中，僅鄰近結冰高度(0°C)之薄層內，才有積冰之發生，如圖三所示。在積狀雲中其積冰型類常為明冰或混合型。

②其他——飛機之積冰現象甚少發生於卷雲類之高雲中，因此類雲中之水滴甚少，但亦會發現在積雨雲頂之雲砧內，出現有中度之積冰，因該處雖溫度甚低，但上升氣流仍挾持有相當之水滴。

三、鋒面雲系——一般鋒面上之雲系較其他者有更高之積冰可能率，據估計有85%之積冰發生在鋒面附近，通常積冰之最大水平向伸展區與暖鋒相借，而最強之積冰區與冷鋒相隨。

①暖鋒區積冰——積冰可能發生在鋒面上或鋒面下，嚴重或極嚴重之明冰發生於鋒面下冷空氣內之有凍雨或凍毛毛雨之區域內，此種情況最常出現於鋒面逆溫之上方其氣溫高於0°C，而鋒面下方之氣溫低於0°C之時。暖鋒面區上方之雲層溫度低於0°C，其積冰厚度常限小於3000呎之一層內，在地面暖鋒前100哩或200哩以內，一定有嚴重之積冰存在，其類型為明冰或混合型，此種情況對移動快速之活躍暖鋒更應特別注意，中度強度之霧凇產生於高層雲內自地面暖鋒起直至鋒前300哩之位置，如圖四所示。

②冷鋒區積冰——其常與冷鋒相借之不穩定雲層中，明冰較霧凇更為盛行。嚴重之明冰常被限於地面冷鋒後方之100哩內之含有過冷却水之積狀雲內，其最強之積冰位於鋒面區之上方，中度積冰常發生於冷面後方並延展至由過冷却水組成之層積雲

內，在擴展甚廣之冷面雲層區之層狀雲中，其積冰情況與暖鋒區者相類似，冷鋒區之積冰情況如圖五所示。

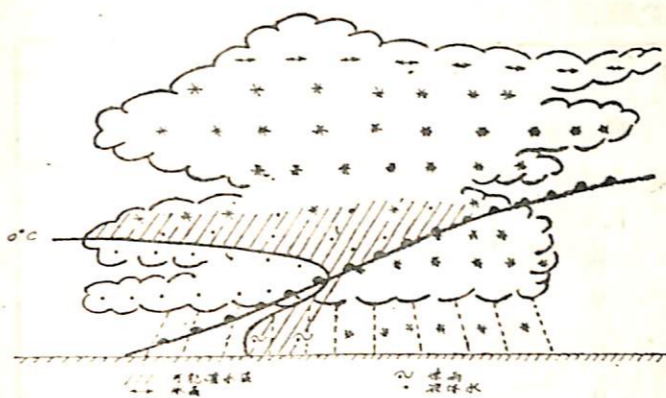
③其他——包圍鋒及靜止鋒面之積冰情況，依其型態而定，如為冷鋒型者，則與冷鋒相似，又嚴重之積冰常與深而寒冷之低壓區相借。

四、氣團——海洋性氣團較大陸性氣團內積冰更為盛行，在不穩定之區域其危險性更大。

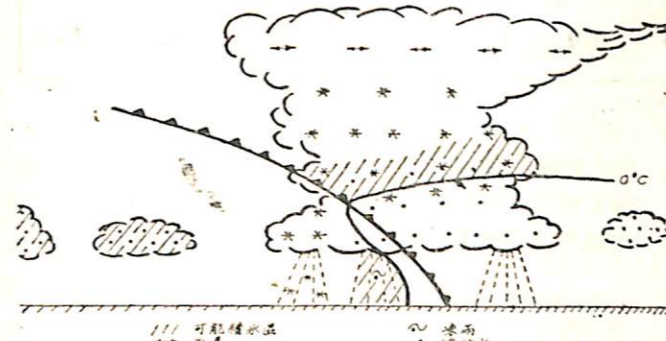
五、氣溫露點差——以各種不同來源之資料之統計，獲知不論其由無線電探空所測得或其他分析或預報所得之航行高度上之氣溫露點差，可用來作為飛機積冰現象之指示，由表二所示，為其積冰發生之可能率。

①自表內可看出僅考慮氣溫露點差時，當其差值大於3°C時，其無積冰之可能率為84%；但其差值小於3°C時，則有80%之可能率產生積冰現象。

②在暖平流區當航行高度上之氣溫露點差等於或小於3°C時，其不積冰之可能率有67%，而輕度積冰之可能率20%，中度積冰之可能率13%，而無嚴重之積冰出現。相反地在冷鋒區域(常



圖四 暖鋒區之積冰情況



圖五 冷鋒區之積冰情況

表二 氣溫露點差(探空)與積冰強度之發生可能率

航行高度之情況	氣 溫 露 點 差						
	≤ 3°C					> 3°C	
	無	輕 度	中 度	嚴 重	極嚴重	無	輕 度
冷 鋒 區 域	0	18	45	35	2	67	33
冷 氣 平 流	10	33	44	13	0	54	46
中 性 平 流	22	46	29	3	0	100	0
暖 氣 平 流	67	20	13	0	0	100	0
積 雲 生 成 區	0	6	70	24	0	—	—
總 計	20.5	30.5	35.5	13.0	0.5	84.0	16.0

為強冷氣平流區)之相同情況下，其積冰可能率達100%，同樣在積雲生成區，當氣溫露點差等於或小於3°C時，其積冰可能率亦約達100%。在冷平流區當氣溫露點差大於3°C時，其輕度積冰之可能

率為46%，而在中性平流及暖氣平流區，差不多100%可能率無積冰現象。

六、降水——雲內有無降水現象，其與積冰強度之關係如表三所示。



表三 積冰強度與降水之關係 (可能百分率)

飛行高度之情況	氣溫露點差 $\leq 3^{\circ}\text{C}$ (探空紀錄)									
	無降水					有降水				
	無	輕度	中度	嚴重	極嚴重	無	輕度	中度	嚴重	極嚴重
冷鋒區域*	0	32	55	13	0	0	5	35	56	4
冷氣平流	15	18	52	15	0	3	50	37	10	0
中性平流	41	38	21	0	0	9	52	34	5	0
暖氣平流	75	13	12	0	0	11	67	22	0	0
積雲生成區	0	0	77	23	0	0	25	50	25	0
總計	32.5	22.5	37.0	8.0	0.0	5.5	40.5	34.5	18.5	1.0

\* 最強之冷氣平流發生於冷鋒區域

七、地形之影響——在相同之情況下，高或陡之地形（特別是山區）較低而平之地區發生較強之積冰現象，又山脊區較山谷區其強度較強，又向風面較背風面為強，由經驗獲知，嚴重之積冰（常為明冰）在山區之對流雲中出現，在冬季向風面之山區海岸，是發生極嚴重積冰之地區。

### 肆、利用探空紀錄預報積冰之方法

一、液體水含量——液體水含量 (LWC) 不論在觀測上及理論上，對飛機積冰言，均為一重要之參考因素。

(-)積狀雲——估計積狀雲中之液體水含量，可由下列公式求之

$$LWC = \frac{1}{2.87} (W_0 - W_1) \frac{P}{T} \quad (\text{式一})$$

式中 LWC 之單位為每立方公尺內含液體水之克數

$W_0$  為雲底之飽和水汽混合比，單位為克/仟克

$W_1$  為飛行高度之飽和水汽混合比，單位為克/仟克

P 為飛行高度之氣壓，單位為 mb

T 為飛行高度雲之溫度，單位為絕對溫度 °K

2.87 為平衡方程式內各單位之常數

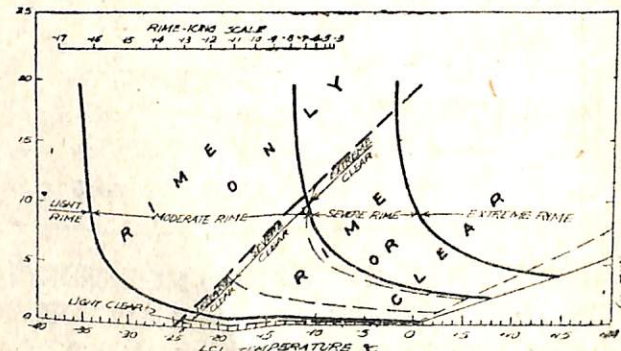
(-)層狀雲——層狀雲中之液體水含量，平均約為式一中算出之半數。因在層狀雲中之平均有效水

滴之體積常較積狀雲中者為小，故其液體水含量與積冰強度之關係亦不相同，如表四所示，此種不同在圖六中有明冰與霧凇兩組不同之曲線

表四 液體水含量與積冰強度之關係

積狀雲內液體水含量* (g/m <sup>3</sup> )	積冰強度	層狀雲液體水含量** (g/m <sup>3</sup> )
$\leq 0.07$	輕度	$\leq 0.11$
0.08—0.49	中度	0.12—0.68
0.50—1.00	嚴重	0.69—1.33
$> 1.00$	極嚴重	$> 1.33$

\* 假定水滴直徑  $17\mu (10^{-6}\text{m})$  \*\* 假定水滴直徑  $14\mu (10^{-6}\text{m})$



圖六 預報積冰之明膠板

### 二、以液體水含量作積冰之預報

圖六是基于液體水含量而繪製之積冰強度曲線，用透明膠板製成，其比例與使用之斜溫圖相同，以便兩者重疊配合應用，以作積冰之預報，其使用步驟如下：

(-)選擇航線上經過之氣團內有代表性之探空曲線——此可能為上游之探空紀錄或預報之探空曲線。

(-)利用地面溫度及露點求出舉升凝結層 (LCL)，並自 LCL 作一垂直線延長至飛行高度，為節省時間起見，亦可直接自雲底高度代替 LCL。

(-)將透明膠板 (預報積冰用) 重疊於斜溫圖上，以便決定可能積冰之類型。

(-)倘飛行高度上之探空曲線是絕對穩定 ( $\gamma < \gamma_m$ )，則霧凇之出現有更多之可能。

(-)倘飛行高度上之探空曲線是條件性不穩定 ( $\gamma_d > \gamma > \gamma_m$ )，則最可能出現者為明冰。

(-)決定積冰層頂之方法

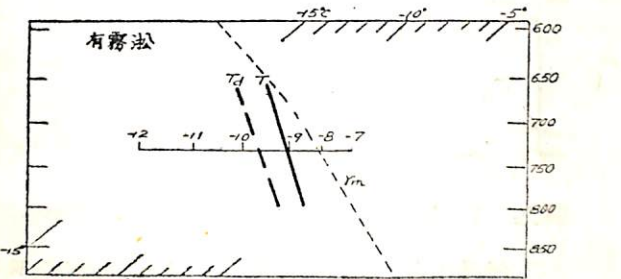
(-)倘預報指示為明冰，則其積冰層之頂，可假定氣溫為  $-25^{\circ}\text{C}$  之高度。

(-)倘預報指示為霧凇，則尚須更進一步來決定其出現與否，其方法先將位於透明膠板左上方之霧凇標尺 (Rime icing scale) 放置於航行高度上，並使尺上之溫度標記與探空曲線之溫度 (即航行高度之大氣溫度) 相重合。

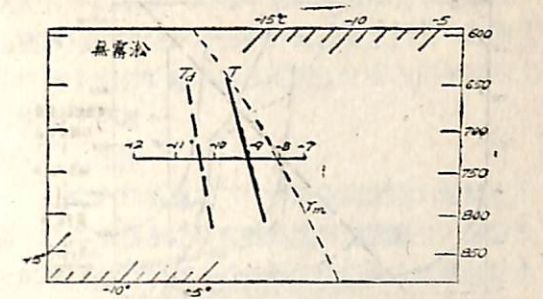
1. 如露點曲線落入一個溫度標記 (Temperature mark) 範圍內 (即 T-1)，則位於中層及低層之層狀雲之內，預報有霧凇之形成較為適合，如圖七-A 所示，圖中 Td 曲線位於 -9 與 -10 之標記中間，故預報有霧凇之生成。

2. 如 Td 曲線超過一個溫度標記範圍，則預報無霧形成，如圖七-B 所示。

(-)將明膠板底邊上 LCL 之溫度刻度，重疊在



圖七-A 以溫度標記決定霧凇之圖例——有霧凇



圖七-B 以溫度標記決定霧凇之圖例——無霧凇

(-)以下列方法決定積冰強度

(-)倘探空曲線無鋒面逆溫現象，則由經 LCL 之垂直線與航行氣壓面之交點，坐落在明膠板上之位置來決定其強度，實線表示霧凇之強度界線，虛線表示明冰之強度界線。

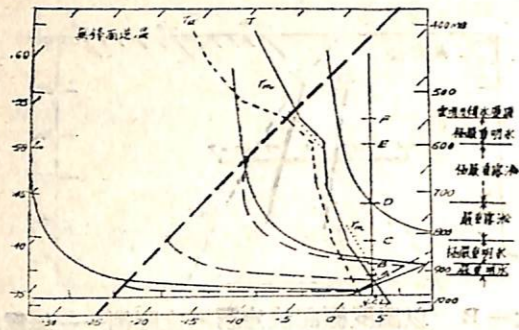
(-)倘探空曲線有鋒面逆溫現象，其積冰強度僅以探空曲線與明膠板上之強度線之相交點以決定之。

(-)舉例：

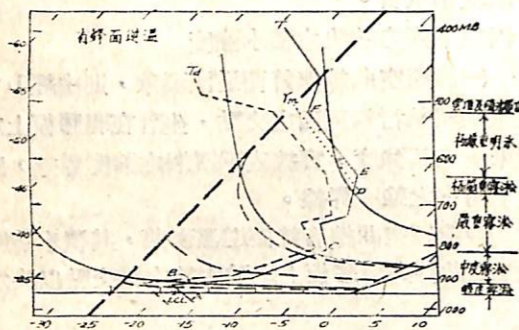
(-)圖八-A 例示無鋒面逆溫時之情況，其舉升凝結層 LCL 為 970mb，溫度  $2^{\circ}\text{C}$ ，垂直線自 LCL 上延伸，由探空曲線與  $0^{\circ}\text{C}$  等溫線相交於 920mb，氣層 A-C 及 E-F 為條件性不穩定空氣，故預測有明冰出現，而氣層 C-E 空氣屬穩定，故預測生成霧凇、雲頂及積冰層頂位於 F 點，約為 545mb 及溫度  $-23.5^{\circ}\text{C}$ ，再將圖六之明膠板重疊在探空曲線之 LCL 面上，以其垂直線與膠板上之強度線之交點決定其積冰強度如下：A-B 為嚴重明冰；B-C 為極嚴重明冰；C-D 為嚴重霧凇；D-E 為極嚴重霧凇；E-F 為極嚴重明冰。此例須注意者，探空曲線無鋒面逆溫，故其積冰強度之區分僅沿經過 LCL 之垂直線與強度線交點而定。

(-)圖八-B 例示冷鋒逆溫於測站上空之積冰情況，凝結層約在 940mb 及溫度  $-18.5^{\circ}\text{C}$ ，但因有鋒面逆溫，故不須繪製垂直線，檢視整個探空曲線，僅 E-F 層屬條件性不穩定，故該層可預期發生明冰，其他氣層則預期有霧凇，雲頂及積冰層頂約在 515mb 及  $-23.5^{\circ}\text{C}$ ，再將圖六之明膠板重疊於探空曲線上，決定其積冰強度如下：A-B 為輕度霧凇；B-C 為中度霧凇；C-D 為嚴重霧凇；D-E 為極嚴重霧凇；及 E-F 為極嚴重之明冰。





圖八—A 無鋒面逆溫之積水預報示例



圖八—B 有鋒面逆溫之積水預報示例

### 三、雲相 (Cloud phase)

(一)理論上過冷却水滴之存在，尤其是在層狀雲中，可由氣溫及霜點溫度之關係估計而得，但霜點溫度在探空報告中無是項數值，故須利用露點溫度求之，其關係  $T_f = 0.9 T_d$ ，在雲內除非有足夠之垂直上升氣流來支持過冷却水連續形成，否則雲將隨時間而變其相位，先自液體水雲轉至水及冰之混合型，最後成一完全為水晶組成之水雲。

雲 相	相 對 濕 度 (RH)	參 數
液體水滴	100%對水 = RH > 100%對水	$T_d = T > T_f$
混 合 體	100%對水 > RH > 100%對水	$T_d < T < T_f$
水 晶	100%對水 > RH = 100%對水	$T_d < T = T_f$

表五 雲相與相對溫度之關係

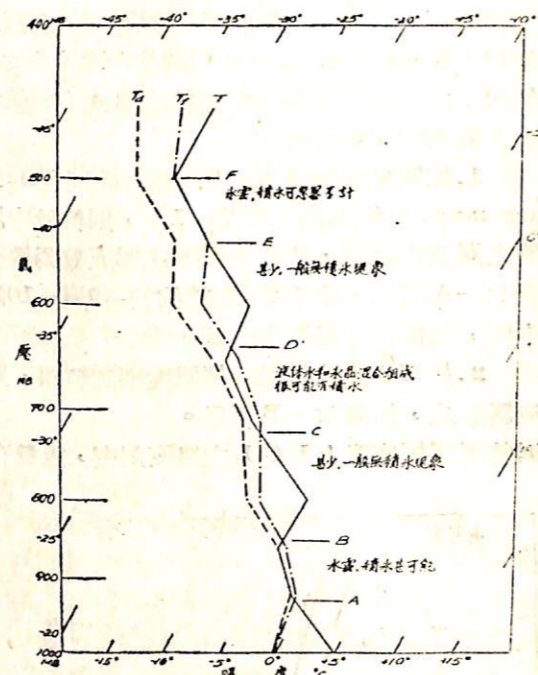
- T—雲內之溫度
- RH—雲內之相對濕度
- T<sub>d</sub>—露點溫度
- T<sub>f</sub>—霜點溫度

(二)如使用之探空儀性能良好，則雲相與其相對濕度及相關之露點霜點之關係，如表五所示。又同溫度下對水面及冰面之相對濕度之關係，如表六所示。

表六 水面—冰面—相對溫度之關係 (同溫度下)

倘對水面飽和則對水面之RH為	溫度 (°C)	倘對冰面飽和則對水面之RH為
100	0	100
105	-5	95
110	-10	91
116	-15	86
122	-20	82
128	-25	78
134	-30	75
141	-35	71
147	-40	68

在結凍溫度 (0°C) 下之層狀雲內之雲相，可由填繪於斜溫圖上之氣溫露點及霜點三溫度曲線之關係決定之，如圖九所示。



圖九 V1.T.T<sub>d</sub>.T<sub>f</sub>三曲線決定雲相示例

在圖九中之A—B層內，其對水面之RH = 100%，故此層內之雲均由液體水組成，積水形

成之可能性甚大。

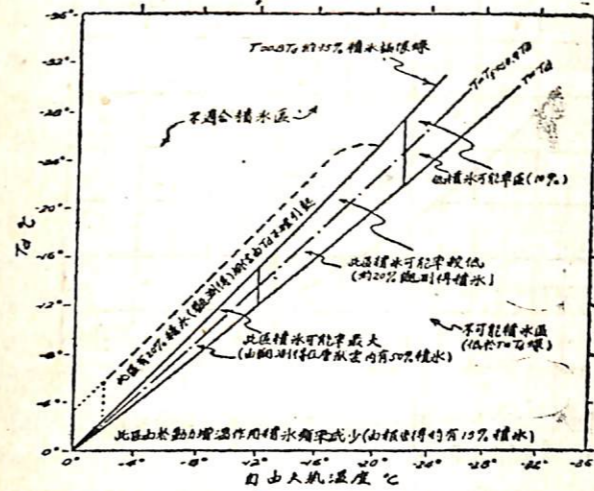
在C—D層內，其RH對水面言 < 100%，而對冰面言 < 100%，溫度曲線介于T<sub>d</sub>與T<sub>f</sub>之間，所以在此層內之雲，應由水點及冰晶混合而成，可能有輕度之積水。

在E—F層內，其RH對水面言為100% (T與T<sub>f</sub>相重合)，故此層內之雲全部由冰晶所組成，無積水現象。

在B—C及D—E層內，因T<sub>f</sub>曲線位於T曲線之左方甚遠，積水不可能存在 (因大氣中之RH對冰面尚未飽和)。

在實際應用時，發現由無線電探空之濕度片在雲中測出之濕度嫌太低，即T<sub>f</sub>曲線差不多常偏在溫度曲線之左方，故利用T，T<sub>d</sub>，T<sub>f</sub>三曲線決定層狀雲之雲相時，必須要加以適當之修正，常發現在雲中有積水現象時，而RH之值對水面言僅80%。

一簡便而快捷之方法為利用T<sub>f</sub>來求層狀雲中之雲相，可用圖十求之。



圖十 利用T<sub>f</sub>預報層狀雲中積水之簡捷方法

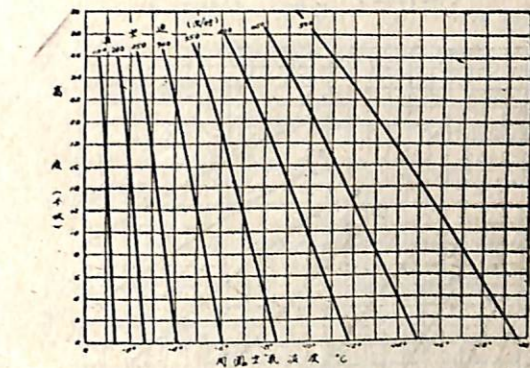
在圖十中，若干產生積水之近似可能百分率是基於飛機偵察報告而得，在T = 0.8T<sub>d</sub>線與平行於此線之虛線範圍內，由觀測所得有20%積水率，故被認為由於露點測量之不足所引起之誤差。

在積狀雲中，一般均認為自生成至消散，其雲相之改變甚快，在時間及空間上變化亦甚大，但在此種積雲之發展階段，在例行天氣偵察觀測中，未有是項記錄，即探空報告中亦未有報導儀器升

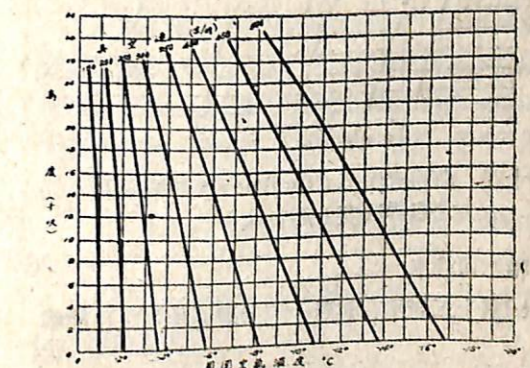
空時會穿越積雲，故圖十雖基於層狀雲中之情況，而積狀雲中之積水可能率亦為溫度之函數，故吾人相信圖十亦必能應用於任何型別之雲內產生積水之可能率之參考。

### 四、動力增溫

一定之飛機速率下，由於空氣之動力增溫之效應，在防止積水之程度隨高度增加而減少，這由於空氣密度隨高度減少之關係，所以最大之增溫發生在速率快而飛行高度低之情況下，在機翼之前緣其溫度增加最大，其後部增加最小，在若干情況下，動力增溫效應僅能防止機翼上積水之堆積，而不能防止在機翼後部由於穿越雲層時流經翼面水滴所形成之積水，其積水之臨界溫度與真空速及飛行高度之關係，如圖十一、圖十二、圖十三、圖十四所示。由經驗得知，當飛機在空中已形成積水現象後，以動力增溫來消除積水，其效應較使用除冰器者為小甚多。

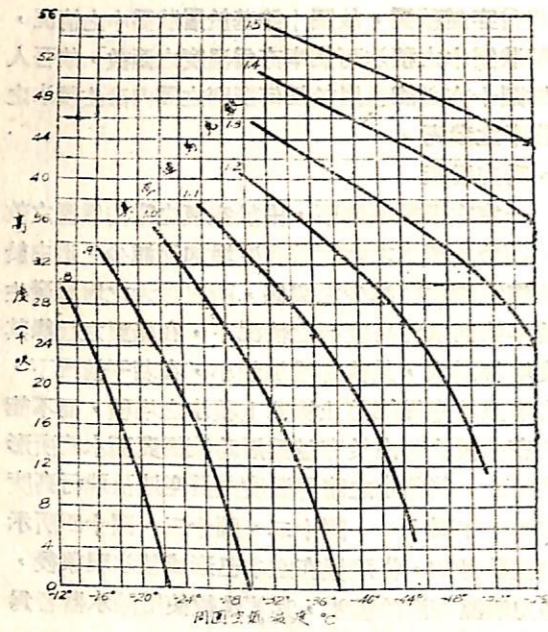


圖十一 機翼前緣產生積水現象之臨界溫度 (次音速)

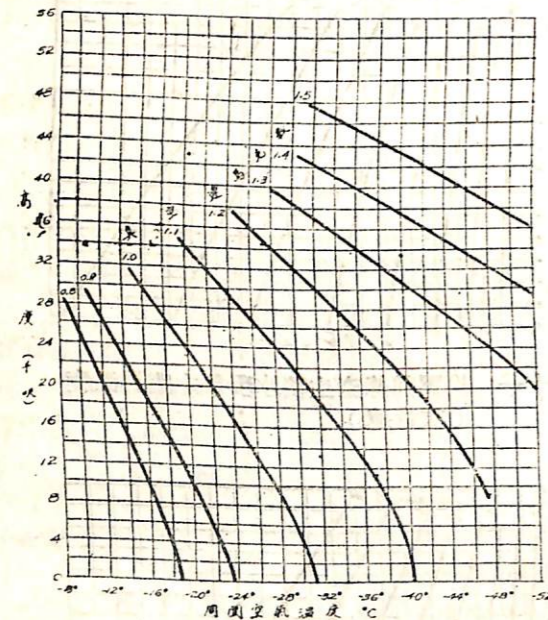


圖十二 由回流作用 (Runback) 飛機積水之臨界溫度 (次音速)





圖十三 機翼前緣產生積冰現象之臨界溫度 (超音速)



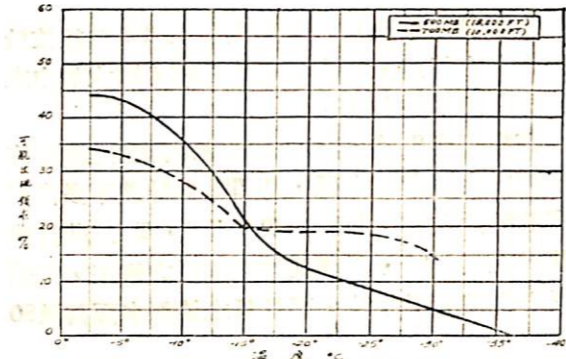
圖十四 由回流作用 (Runback) 飛機積冰之臨界溫度 (超音速)

五、積冰可能率

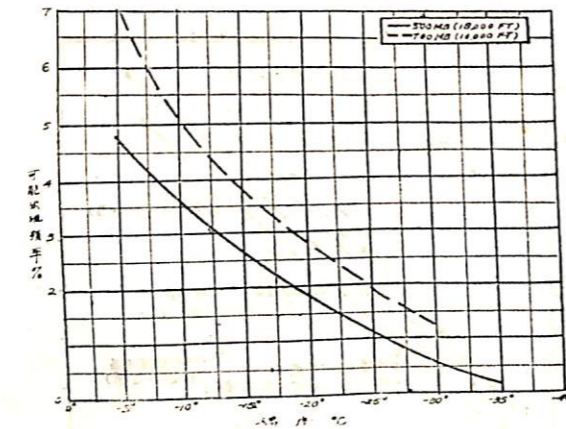
(一)圖十五表示在雲層中飛機遭遇積冰之可能率。

(二)圖十六表示在未考慮有無雲層時飛機遭遇積冰之可能率。

圖七表示飛機積冰僅為高度函數時之可能率——當缺乏資料來預測航路上之溫度及雲層時，又無其他輔助資料可資利用時，則利用表七推算之。例如某一秋季有一2500哩航程，其高度為500mb (20000呎)之飛行計劃，航路上之溫度及雲層均無資料，則利用表七求得在整個航程中有70哩可能遭遇積冰現象



圖十五 在雲層中飛機遭遇積冰可能率



圖十六 在未考慮有無雲層時飛機遭遇積冰之可能率

表七 飛機積冰僅為高度函數之可能率

季節	可能出現頻率百分數	
	700 mb	500 mb
春	2.3	1.3
夏	2.7	2.0
秋	2.8	2.8
冬	2.8	2.1

五、預報飛機積冰之步驟綱要

一、步驟一 (準備)

預報飛機積冰之第一步——準備步驟，包括下列各因素，因為不論使用任何方法預報，這些因素均甚為重要。

(一)雲——決定預計航路上雲之是否存在，及預測其未來之分佈、型別、及其垂直向之伸展，可用地面觀測、探空資料、飛行員報告、地面圖及高空圖、天氣模式、雲之物理性質及以往之經驗來作其分析及預報，同時不可忽略地形所生之影響。

(二)溫度——決定預計航路上雲層中溫度低於0°C度之區域，可自結冰高度圖、等壓圖、探空紀錄、天氣偵察、飛機觀測或自地面溫度之外延求得一合理之凝結高度。

(三)降水——沿預計之航路上檢查地面觀測報告及地面圖有關降水之資料，並預測在航行中其降水之性質及型別，更須考慮其結凍降水之可能率。

二、步驟二——基本積冰預報

在此步驟中，預報員依據其可利用之資料，及研判之時間來決定下列三種方法之一，方法一需要較多之時間，尤其須繪製各預測探空紀錄曲線，使用半客觀性之預報方法，將層狀雲及積狀雲內積冰強度之預報均為有效。方法二所需之時間較方法一為少，但僅能對層狀雲內積冰之預報有效，且無法預測其強度。方法三為利用預報規則之客觀方法，不須加繪及分析其他圖表或資料，僅利用一般測站之經常資料。預報員可聯合應用二種之方法，例如使用方法一預測航路上某些特殊區域，而其他地區則用方法三來預測，但須注意者，任何方法及預報規則，均假定兩個基本情况之存在，即飛機表面溫度必須低於0°C，且航路上之雲內及降水必須存在有過冷卻之液體水。

(一)方法一——繪製預報探空曲線，或選擇上游之探空曲線，使其在航行時間內沿航路上有代表性，以航行高度上所指示出之溫度遞減率來決定其大氣之穩定度，利用圖六 (透明膠板)，預測溫度低於0°C之雲區內最大之積冰強度及其型別。

(二)方法二——此種方法僅限於層狀雲內，由於資料之缺乏及時間之匆促，或其他理由無法應用方法一時使用，以霜點溫度來決定航路上層狀雲內之雲相情況，其步驟先由探空資料、天氣偵察報告、

飛行員報告或等壓圖中求出飛行高度上之溫度及露點，再填入圖十中，由圖可直接讀出積冰與否，此方法無法求其積冰強度，但由氣候統計資料中，其強度出現可能之頻率，輕度87%，中度12%，嚴重僅1%而已。

(三)方法三——倘資料缺乏，時間匆促或其他理由，不能應用上述之二種方法時，下列之經驗預報規則可供應用，但各種圖表及報告，均須經詳細研判及分析。

(一)由高空資料預報積冰之強度——自高空圖、飛行員報告、飛機偵察報告、探空報告等資料求其航行高度上之溫度露點差，並檢查沿航路上之溫度平流之型式

規則一：

1. 溫度自0°C—7°C度，氣溫露點差大於2°C，則預報無積冰現象 (在此情況下，有80%可能率無積冰)。

2. 溫度自-8°C—15°C，氣溫露點差大於3°C，則預報無積冰現象 (在此情況下，有80%可能率無積冰)。

3. 溫度自-16°C—22°C，氣溫露點差大於1°C，則預報無積冰現象 (在此情況下，有90%可能率無積冰)。

規則二：如氣溫露點差等於或小於2°C，而氣溫自0°C—7°C，或氣溫露點差等於或小於3°C，而氣溫自-8°C—15°C時。

1. 在中性平流或弱冷氣平流區域，則預報輕度積冰 (其可能率75%)。

2. 在強烈冷氣平流區域，則預報有中度積冰 (可能率90%)。

(二)由地面圖資料預報積冰強度——如無高空資料及圖表可供應用時，則必須以地面圖用作預報積冰之依據，但此圖不若高空圖之可靠，應用時先檢查地面圖上沿航路上之雲盾、鋒面、低壓中心之位置及降水之區域。

規則三：非鋒面區域或地形抬升所生之雲內

1. 在穩定而非結凍降水區域，則預報有少量或無積冰現象。

2. 在不穩定而非結凍降水區域，特別在積狀雲區域，則預報有中度積冰。

(下接第11頁)