

# 噴射機凝結尾預報之經驗修正

Herbert S. Appleman 著  
徐 應 璟 譯

## 一、緒 言

AWSM 105~100 訂正版第二章，自理論觀點求出「凝結尾生成必需之溫度和相對濕度關係曲線」，為目前預報噴射機所排廢氣凝結尾生成之依據。若需預測在某氣壓高度航行噴射機之凝結尾能否生成，祇需預測或假定該高度上溫度與相對濕度數值，即能發佈凝結尾能否決定性生成之預報。但不幸除去天氣預測本身之區域性與時間性不準確以外，預報凝結尾究竟能否生成高度之溫度與相對濕度數值之時，尚另有特殊困難。

由於儀表限制，溫度下降至  $-40^{\circ}\text{C}$  以下，相對濕度通常即難以測量。第一圖指明全部凝結尾之理論生成區域中的溫度數值幾乎均在  $-40^{\circ}\text{C}$  以下。因之，在決定凝結尾究竟能否生成，以及預報若干時間以後能否生成之際，不得不藉重以往一段工作期間證明有效之某種假定數值。AWSM 105~100 訂正版中，建議當高雲出現於對流上限附近之時，採用70%做為相對濕度數值，其他各種情形時則採用40%做為相對濕度數值。

雷達觀測中之溫度數值，亦非完全具有代表性質，首先，溫度感應片約有  $1^{\circ}\text{C}$  左右之標準誤差，其次由於特性層選取之限制，誤差又有增加，兩者併合，其值約達  $1^{\circ}$  至  $1\frac{1}{2}^{\circ}\text{C}$ 。此外，高空中偶然也能存在強烈水平溫度梯度，根據實測，其值有時能高達  $11^{\circ}\text{C}/60$  哩，及可能之梯度  $13^{\circ}\text{C}/30$  哩，因此在利用第一圖時，必須記清此項溫度不穩定情形，對實際預報目的言，凝結尾生成之「絕對有」及「絕對無」區域均逐漸縮小，而可能生成之區域則逐漸增廣。第一圖中各相對濕度曲線之間隔，指明在生成可能區域之左緣，對於溫度誤差之敏感性極高，而右緣則比較遲鈍，例如  $1^{\circ}\text{C}$  之溫度誤差在相對濕度曲線左方，相當於 22 % 之相對濕度誤差；而在右方，則僅相當於 1.5 % 之相對濕度誤差。敏感性之比率約為 15 : 1，由是可知，曲線之左側，最能遭受溫度不確定之影響。

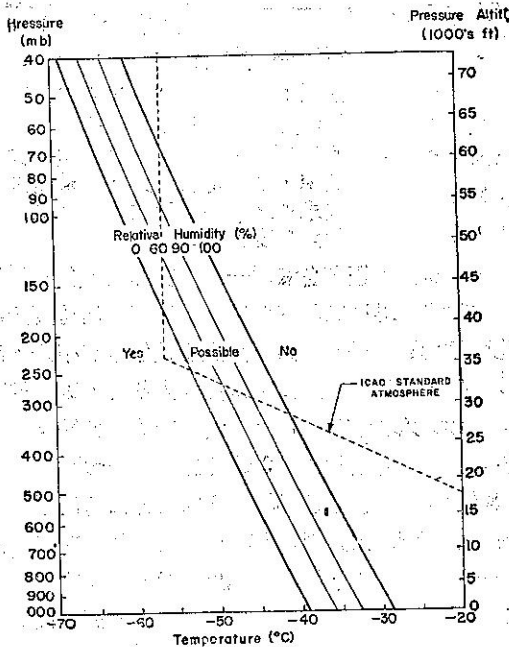
為減除目前難以避免之溫度及相對濕度誤差，收集充份資料，將凝結尾出現頻率視為氣壓及溫度之函數從事經驗之研究實屬必需。在此方法中，每一氣壓——溫度點上之溫度不確定及實際之平均相對濕度，均能為頻率曲線吸收。此方法並非凝結尾生成之「是」或「否」之預報，但能求得任何指定氣壓及溫度數值下凝結尾生成之相對頻率。

## 二、程 序

凝結尾研究計劃，係由空軍防禦司令部配合氣象勤務處所設立，其目的，在收集由噴射機所獲得之充份天氣資料，做為對凝結尾、卷雲、霾及亂流等預報法則改進之基礎。本文僅討論該計劃中之凝結尾部份。是項研究計劃之觀測期間係自1954年12月1日至1955年12月15日。在此時期中，位於美國境內36個噴射機攔截機中隊，擔任23處高層氣象觀測站上空資料收集之任務。工作之程序如下：

1. 每日自 1530GMT 之前約一小時至以後約二小時中，派遣噴射機兩架，飛行於高空觀測站上空 25,000呎高度，然後再往上爬升至能夠到達之最大高度，航行範圍須不離開測候站 30哩。

2. 僚機觀測長機之廢氣凝結尾已否生成。凝結尾係連續



第一圖：以環境中之氣壓及溫度做為噴射機凝結尾生成函數所必需之相對濕度曲線。

出現抑或間歇出現，清晰抑或模糊，以及凝結尾出現層之頂及底之高度。

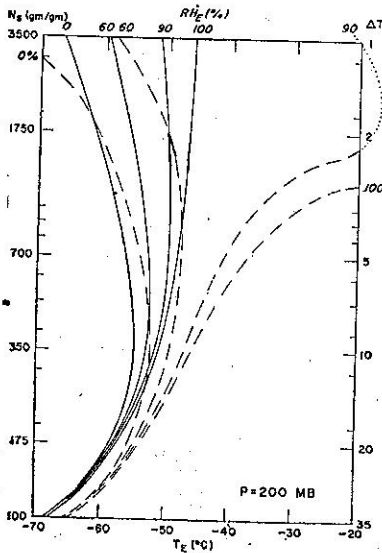
3. 收集其他必需資料。

AWS 司令部收到是項記錄卡片後，立即從逐日高空觀測報告中，檢出相應之高空觀測記錄填於卡片上，然後將凝結尾之出現高度，註明於探空曲線之上，並從探空記錄中尋出以下六個選擇高度：350mb，300mb，250mb，200mb，175mb，及 150mb 之凝結尾出現與不出現之次數以及相應之溫度。根據凝結尾有無之次數，以及各氣壓層各個溫度出現之總次數製成一表，以決定凝結尾出現情況之百分比，再用凝結尾出現頻率及溫度為縱橫座標繪製各氣壓面之頻率曲線圖，然後再將全年中自各測候站所得之全部記錄綜合之以求得最後之凝結尾出現頻率函數曲線，為第二圖中之實線。

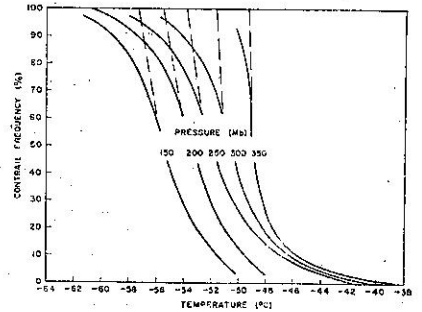
從各圖中尋出凝結尾出現頻率為 5%，10%，25%，50%，75%，90%，及 95% 時之溫度數值，依照溫度及氣壓之座標將所選擇之頻率填入，視凝結尾或然率為溫度與氣壓之函數，繪成平滑曲線（第三圖中之實線），為便於對比起見，圖中並將理論推求而得之凝結尾生成曲線，繪如虛線。兩組曲線間之若干差異將於以下討論。

三、理論曲線與經驗曲線之比較

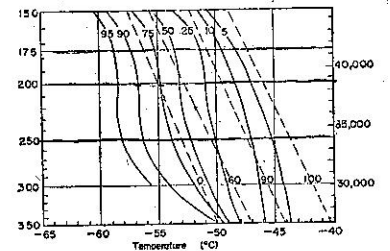
假若理論推求之曲線確實，完善記錄應該能得到或然率 0% 曲線與相對濕度 100% 曲線，及或然率 100% 曲線與相對濕度 0% 曲線完全符合之結果。假定每氣壓——溫度點上，所有相對濕度出現之機會相等，則相對濕度 90% 及 60% 曲線，亦必能與或然率 10% 及 40% 兩曲線分別重合。但是，平均相對濕度之分佈，不能夠如預期隨高度變化保持常數，於是只好選擇邊界曲線做為試驗。第三圖指明在圖之右側經驗曲線和理論曲線雖然符合，然在圖之左側，則有 5° 至 6°C 之差異。為澈底明白是項誤差，讓我們在掉回頭研究各個高度之凝結尾或然率曲線（第二圖）



第四圖：噴射機尾流飽和所需要之 N 數值 (N 為自外部進入噴氣機排出廢氣尾流中之空氣與該廢氣之比率)，實線為對於水之飽和曲線，虛線為對 0.01 gm/m<sup>3</sup> 冰和冰晶之飽和曲線。



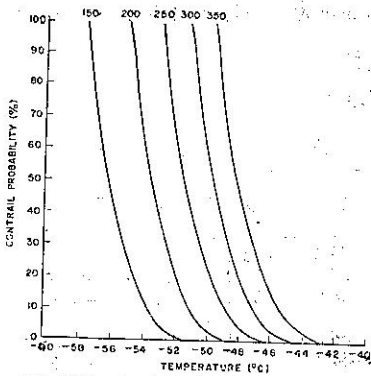
第二圖：凝結尾頻率之溫度及氣壓函數曲線  
地點：美國  
時間：自 1954 年 12 月至 1955 年 11 月



第三圖：噴射機凝結尾生成之氣壓及溫度函數或然率。  
實線為根據經驗求得之凝結尾或然率，數值為百分比。虛線為理論求得之凝結尾生成所需之最低相對濕度百分比。

從第四圖之曲線分佈研究，可知相對濕度 0% 鄰近區域，少量之溫度誤差，相當於相對濕度之重大改變，而相對濕度 100% 鄰近區域，則有與上述相反之事實。假若各氣壓——溫度點上，各種相對濕度出現之機會相等，所求得之凝結尾或然率曲線，其坡度開始時應比較平坦，然後愈往上端愈趨陡峻(第五圖)。假若相對濕度數值分配平均，而且從 0% 處向上截掉極少部份，從 100% 處向下截掉極大部份，則曲線下部之平坦程度即形減低。例如第六圖中為 250mb 高度所繪之曲線。(注意：0 ≤ RH ≤ 100% 曲線與第五圖中所繪之 250mb 曲線完全一致)。第七圖指明，在相對濕度平均數值為 50%，標準差為 20% 之常態分佈情況下，凝結尾或然率所遭受之影響為 0，在此種分佈狀況下，68% 之個例出現於相對濕度數值 30% 及 70% 曲線間，而 95% 之個例，則出現於相對濕度數值為 10% 及 90% 兩條曲線之間，由是我們可以看出，在任何合理之相對濕度分佈下，凝結尾或然率曲線坡度應具有自下端之平坦往上端漸趨陡峻之結果。

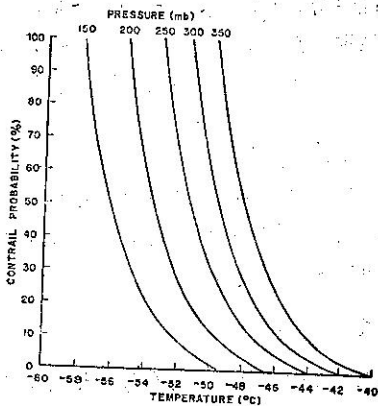
第二圖中凝結尾或然率函數曲線，下端坡度之平坦適符預料，然而其上端坡度之漸趨陡峻，僅到達頻率數值為 60% 至 80%，過此往上，曲線又



第五圖：假定每氣壓點上自 0% 至 100% 相對濕度之分佈相等所求得之理論凝結尾或然率函數曲線。

之過高過低機會相若，溫度誤差乃具自行抵償之傾向，惟此項抵償遭受 0% 及 100% 頻率邊界曲線以及頻率曲線之非直線性特徵之相反作用。因此，理論推究所得之凝結尾或然率曲線，乃比較實際觀測所得（經驗的）的數值略呈陡峻。邊界曲線之求得，係由於理論推求凝結尾頻率曲線下端之數值過大以及上端之數值過小，或曲線兩端之同時變平作用溫度誤差凝結尾出現之「是」及「否」區域中，確有影響，其影響循單一方向。錯誤報告之落入可能生成區域中，應出現頻率曲線兩端坡度平坦之結果。但如本文所述曲線下端坡度已呈平坦。此外，本文第一節中已經指出凝結尾生成曲線左緣，對於溫度誤差之敏感性，比較曲線右方強大十五倍，因此頻率曲線上段對於溫度誤差作用之反應，亦較其中段或下段為強烈。

因此，凝結尾頻率曲線上段之折曲，顯然係起因於雷達先測得及以後又為究研用飛機所遭遇之溫度間之差異，由於此一折曲，乃造成凝結尾頻率較高數值（60% 以上）之移往低溫方向之結果，因此，第三圖中 75%、90%、及 95% 凝結尾或然率曲線亦向較低溫度方向移動，而無法預期其與理論曲線互相重合。

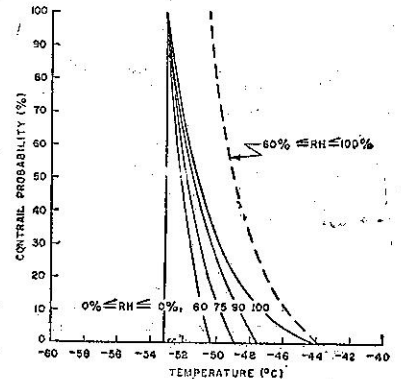


第七圖：假定平均值 50% 及標準差為 20% 相對濕度數值，在常態分佈下所求得之理論凝結尾或然率函數曲線。

偏往左方。折向發生之區域，鄰近第三圖中之「可能性生成區域」之左緣。因此不應歸究於相對濕度之分佈，而必須認為係基於溫度變數之影響。

第一節中已叙明雷達報告中，溫度標準誤差約為 1°C。另外高空中偶然存在之巨大水平溫度梯度則最為重要。由於研究計劃之需要，飛機起飛之時間，被允准自雷達汽球釋放前一小時至後二小時。由於氣球自地面上昇到達 30,000 呎高度，須用 30 分鐘時間，因之飛機到達同一位置之時間，可能與之相差前後各 1 ½ 小時，空間及時間之差異由是均皆存在。假若 30,000 呎高度氣流強盛，（例如若為每時 60 哩），全部空間之位移乃相當於 50 哩以上。惟在通常情況下，差異程度可能遠小於此。但若遇極端情況出現，差異之巨甚至可超此兩倍。因此，雷達測量之溫度數值，有時與飛機測得者，相差偶可高達 11°C。

在第一圖凝結尾生成曲線之可能生成區域中，由於報告數值



第六圖：假定 0% 及五個所造最大數值（實線）中任一數值，以及 100% 與所造最小數值（虛線）間相對濕度數值相等分佈，所求得之理論凝結尾或然率函數曲線。

假若捨棄此折曲不顧，將頻率函數曲線向上方平滑外延，所求得之凝結尾頻率曲線，應該能與自完美記錄所求得者相同，亦即為第二圖中所繪之虛線，在此方法下所求得之 100% 凝結尾或然率曲線，和理論推斷而得之 0% 相對濕度曲線間溫度之差別，全部小於 1°C。

預報員利用第三圖中凝結尾或然率曲線製作預報之時，必須熟記雷達儀器本身具有之誤差以及偶然存在之強烈水平溫度梯度所引起之無代表性質。因此，在製作凝結尾預報之時，他應該利用自實際頻率（經驗的）曲線所決定之凝結尾或然率數值，而不能依賴僅適用於完善記錄之理論曲線。

#### 四、季節對凝結尾或然率之影響

與第三圖相似之凝結尾或然率曲線會依照每一季節分別繪製，第一表列舉全年及各季中，各相應曲線中氣壓——溫度數值之比較，諸曲線之中，全年及各季之數值差異均甚微小。因為所出現之差異，缺乏一致性傾向

，僅好似起因於各季節所造有限個例記錄之限制，對預報目的言，真正之季節性影響似屬輕微而不足重視。

第一表 凝結尾或然率之季節性及全年性之比較

95%或然率						90%或然率					
氣 壓 (mb)	溫 度 (°C)					氣 壓 (mb)	溫 度 (°C)				
	冬	春	夏	秋	全 年		冬	春	夏	秋	全 年
150	-61.2	-60.6	-59.2	-60.1	-60.6	150	-60.0	-59.5	-58.3	-59.2	-59.3
175	-58.9	-59.0	-58.0	-58.9	-58.8	175	-58.0	-57.7	-57.0	-53.0	-57.4
200	-58.3	-56.5	-58.0	-59.2	-58.5	200	-56.7	-56.0	-57.5	-58.0	-56.6
250	-57.0	-57.8	-55.7	-	-58.1	250	-55.0	-56.0	-55.4	-	-56.4
300	-53.9	-	-	-	-55.6	300	-53.6	-54.7	-	-	-51.2
350	-	-	-	-	-	350	-51.7	-	-	-	-49.9

75%或然率						50%或然率					
氣 壓 (mb)	溫 度 (°C)					氣 壓 (mb)	溫 度 (°C)				
	冬	春	夏	秋	全 年		冬	春	夏	秋	全 年
150	-57.5	-56.6	-56.7	-57.8	-57.2	150	-56.5	-53.5	-55.2	-56.2	-55.5
175	-55.5	-55.5	-55.3	-56.3	-55.2	175	-53.7	-53.5	-54.0	-54.3	-53.4
200	-54.2	-54.0	-55.5	-55.9	-54.8	200	-52.4	-53.0	-53.5	-53.5	-53.2
250	-52.5	-54.1	-54.3	-54.6	-53.5	250	-51.2	-53.0	-52.8	-52.5	-52.1
300	-51.3	-53.0	-	-	-52.0	300	-50.3	-51.0	-	-	-50.5
350	-49.5	-51.0	-	-	-49.4	350	-48.7	-50.3	-	-	-49.0

25%或然率					
氣 壓 (mb)	溫 度 (°C)				
	冬	春	夏	秋	全 年
150	-55.4	-51.5	-54.3	-54.5	-53.6
175	-49.5	-50.5	-52.0	-52.2	-51.4
200	-50.1	-50.0	-51.0	-51.2	-50.8
250	-48.8	-49.5	-50.5	-50.6	-49.8
300	-48.4	-49.0	-	-49.3	-48.8
350	-47.5	-49.0	-	-	-48.0

10%或然率					
氣 壓 (mb)	溫 度 (°C)				
	冬	春	夏	秋	全 年
150	-54.5	-50.0	-52.3	-	-51.5
175	-50.6	-48.3	-50.5	-50.8	-49.6
200	-48.3	-47.3	-48.8	-49.2	-48.5
250	-46.5	-47.0	-47.4	-47.7	-47.0
300	-45.8	-46.7	-46.7	-46.5	-46.4
350	-45.5	-46.5	-	-	-45.8

5%或然率					
氣 壓 (mb)	溫 度 (°C)				
	冬	春	夏	秋	全 年
150	-54.3	-	-51.9	-	-50.6
175	-49.6	-	-49.6	-49.8	-48.5
200	-48.0	-47.0	-47.7	-48.2	-47.1
250	-46.0	-46.2	-45.2	-46.2	-45.1
300	-44.0	-45.3	-	-45.1	-44.3
350	-43.0	-44.3	-	-43.2	-43.7

五、地理位置對凝結尾或然率之影響

為決定凝結尾或然率曲線隨同地理位置變化之程度是否顯著，曾對美國南部和北部，分別繪製與第三圖相似之曲線。南北之分界線為北緯 39°，採做試驗之南部測候台數目較少，南方低空中出現之凝結尾亦忽略不計，第二表列舉南北兩部根據全年紀錄，與凝結尾或然率相應之氣壓—溫度數值之比較。兩組曲線中各點之平均差別為 0.7°C，南方比較北方稍冷，平均差別為 0.2°C。

各高度中兩組曲線差異均微小，在 250mb 及 300mb 高度，南北兩部之曲線幾乎完全相同，至於其他各層中之凝結尾或然率，當溫度高於 -57°C 時，北方曲線具較高之傾向；而在低溫情況，則南方曲線或然率較高，兩組曲線中之最大溫度差異，從無大於 1.3°C 者，各點間之平均差別為 0.7°C，北方曲線較為溫暖，其值約為 0.2°C。

對預報之目的言，南北兩部曲線間差異微小不足重視。因此，第三圖中之曲線，可看做能應用於各地。至於歐洲及日本之資料對於凝結尾或然率之影響程度，則計劃於將來再加以研究。

六、對流上限對於凝結尾或然率之影響

有關平流層及對流層中濕度之比較研究，已有許多專文發表。惟因對流上限鄰近之實測記錄有限，至今未能求得可靠之結論，因為平均相對濕度能影響凝結尾或然率，為此乃對該兩層之凝結尾分開研究。

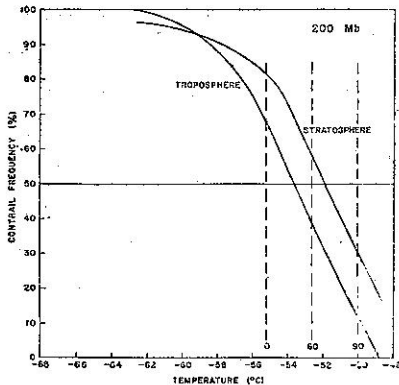
為孤立對流上限之影響，比較兩層中相同氣壓—溫度數值中之頻率實屬必要。200mb 層位於對流上限上下之機會最為平均，乃選擇之做為分別研究平流層及對流層凝結尾頻率函數曲線之高度（第八圖）。對定值之氣壓及溫度而言，圖中曲線之較大部份，凝結尾頻率出現於平流層中者，較出現於對流層中者為大。

茲以虛線將從理論求得之凝結尾生成之臨界相對濕度曲線繪於圖中。50%凝結尾頻率曲線，指明約為對流層中40%及平流層中70%相對濕度之中數。此一量度特別應用於200mb 必須牢記，在此層上，極大多數平流層個例應屬極地平流層之下部；極大多數對流層個例應為熱帶對流層之上部。

緊鄰於對流上限之上及下，相對濕度增加之傾向，可自第七圖看出。一般言來，在185mb高度以下，或然率曲線之坡度，比較相對濕度線坡度為大，經此之後，前者坡度反較平坦，此點指明自 350mb 至 185mb 中間，相對濕度之先增加然後減少。由於本研究，對流上限之高度為210mb，因此平均極大相對濕度數值位於對流上限以上3000呎高度。

七、結 論

第三圖所繪之凝結尾或然率曲線，係根據溫度及氣壓兩變數所繪製，曲線所依據之資料為全美國一年中之實際觀測記錄。在此問題中預報人員所遭遇之記錄



第八圖：200mb高度對流層及平流層凝結尾頻率函數曲線之比較。  
地域：美國  
時期：1954年12月至1955年11月  
虛線為從理論方面以200mb溫度做為凝結尾生成函數所得之最低相對濕度數值。

第二表 美國南部及北部凝結尾或然率之比較  
溫度 (°C)

或然率百分比	區 域	氣 壓 (mb)				
		150	175	200	250	300
95	N	-61.3	-59.2	-59.0	-	-
	S	-60.0	-58.6	- 8.2	-	-
90	N	-60.1	-57.8	-57.6	-56.9	-
	S	-58.9	-57.5	-57.1	-56.3	-
75	N	-57.8	-55.2	-55.1	-53.6	-
	S	-57.3	-55.8	-55.1	-54.0	-
50	N	-55.3	-53.2	-53.0	-51.9	-50.4
	S	-56.2	-54.2	-53.0	-52.0	-51.3
25	N	-	-51.6	-50.4	- 9.7	-48.7
	S	-	-52.1	-50.4	-50.0	-49.8
10	N	-	-49.6	-48.3	-46.6	-46.2
	S	-	-50.3	-47.6	- 7.5	-47.5
5	N	-	-	-	-41.8	-44.0
	S	-	-	-	-46.0	-45.4

誤差問題，業已為該曲線所吸收。其中最重要之問題，厥為各氣壓——溫度點上平均相對濕度和雷達報告之溫度缺乏代表性質。濕度問題之引起，係由於凝結尾出現高度，缺乏濕度之實際測量；溫度問題則部份由於報告內之微小標準誤差（約為1°C）而主要者則由於高空中偶然存在之強烈水平方向之溫度梯度。

應用第7圖時，預報員僅需儘可能準確地預測所需時間、地點、高度上之溫度數值，然後，以之填入曲線圖中即可求得凝結尾生成之或然率。所不幸者，該項曲線之應用範圍僅限於350mb至150mb高度。350mb以下之溫度數值，幾乎永為太暖，不宜於凝結尾生成；150mb以上之觀測記錄太少，無從求得可靠之曲線。因此在 350~150mb 範圍之外，預報員必須仍應用第一圖中之凝結尾生成曲線。（完）

原文題目：Derivation of Jet-Aircraft Contrail-formation Curves.  
(Section II: Empirical Derivation.)

原文刊載：Aws TR 105-145 Jan. 1957

氣象學報訂購辦法

- 一、本學報係限閱性質，以贈送各有關氣象單位團體，促進氣象學術之研究為目的。
- 二、個人如欲訂購，可報請服務之單位，備文證明，連同價款，逕寄本社，當按址寄送所需之學報。
- 三、本學報每期暫收成本費新臺幣伍元，郵票十足通用。

氣象學報徵稿啓事

本學報長期徵收稿件，歡迎各方踴躍惠稿，惟為配合出版時期起見，惠稿最好於二、五、八、十一等月月中以前寄達，以便及時刊載，而免積壓，敬請惠稿諸先生注意。