

# 凝結尾的形成消散及觀測

劉廣英

中國文化大學理學院

## 摘要

凝結尾就是指高空飛機後面可見的卷雲狀雲條。以形成過程而言，可以區分為兩類，即高溫廢氣與低溫環境空氣混合而成的「混和凝結尾」(contrail=condensation trail)與近飽和空氣經過翼尖或槳葉後因突然降溫而形成之「氣動凝結尾」(aerodynamic trail)，後者淡而短，影響很小；前者則是吾人所常見亦是本文所討論的內容。

混和凝結尾(以下簡稱凝結尾)的生成由燃油種類與環境大氣溫度所決定。以JP-4飛行在200百帕(約40000呎)定壓面上而論，如該空域氣溫在攝氏零下47至57度間，就可能會有凝結尾形成。至於凝結尾的持續時間則視環境空氣之相對濕度與擴散條件而定。

觀測到凝結尾是常有的事，但因受到缺乏空中參考座標、觀測方向、大氣折射，以及可能有移動等因素的影響而有所偏差，因而欲僅靠目視而訂出凝結尾與地面的相對位置並不準確。基本上說，大氣折射指數隨大氣各層的氣壓、溫度及濕度而異，而大氣中此三要素隨時都在變，因而即使有一條凝結尾固定在空中，在地面上看到的位置如不經修正亦有誤差。這有些像水中的魚，牠的實際位置與我們岸邊觀看到的位置總有不同。

本文對上述問題均有簡要但深入的分析與介紹。

## 一、前言

二次世界大戰後，由史達林到赫魯雪夫建立了一個堅強有力的鐵幕，那時美國中情局爲了偵測敵情，與洛克希德飛機製造公司簽約並研發成功「實用二型」(Utility 2簡稱U-2)高空偵察機。自1945起，該型機飛翔於鐵幕兩邊如入無人之境，使之一度被稱爲「不能擊落」的刺敵利器。可惜十五年後(1960年)的五月十一日，美中情局飛行員包爾斯(Francis G. Powers)在偵照中失去音訊，後來得知是被蘇聯薩姆飛彈擊中，機毀人被俘，引起美蘇間一場大爭執。據說當時飛機故障，被迫降低

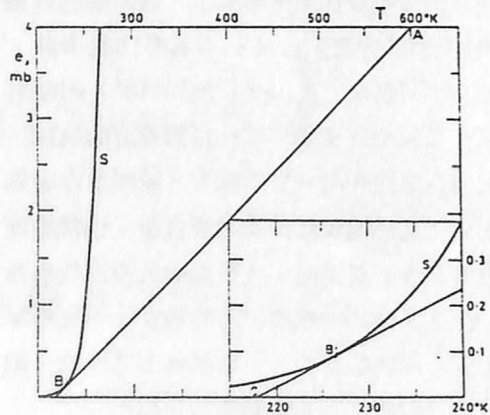
高度，而後因「凝結尾」而現形，終至爲薩姆飛彈追蹤雷達咬住進而被擊落。通常噴射飛機燃燒1克燃油會產生1.35克水氣與1000卡熱，這些水汽可造成 $(0.24 \times 1.35T \times 10^4)$ 的相對濕度，在乾冷的空氣中此一相對濕度的增加，有促使空氣飽和而成雲的能力。這種雲沿廢氣帶而成，且迅速成爲冰晶的集合體，也就是條狀卷雲，亦即凝結尾。在蔚藍的天空上極爲美觀，但卻是使高空飛機現形的禍首，一直是軍方想去之而快的東西。下面就針對其形成、消散、以及觀測三方面做簡要的介紹。

## 二、凝結尾的形成與消散

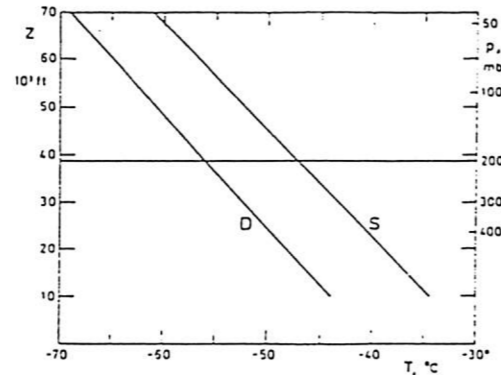
由於在對流層以上，除小範圍超強對流區外，大氣中的水份極少，凝結尾所需之水份幾乎全由飛機油料燃燒中獲得，所以凝結尾的形成與否端視燃油種類與環境氣溫而定。上述關係可利用圖一 (Ludlam, 1980) 說明之。圖之橫軸為絕對溫度 (°K)，縱軸則為水面上的飽和水氣壓 (百帕)。在圖中的線為水面上的飽和水氣壓 (e<sub>s</sub>)，它是絕對溫度的函數，即 (Hess, 1966)

$$\ln \frac{e_s}{b \cdot 11} = \frac{M_v L_v}{R} \left( \frac{1}{273} - \frac{1}{T} \right) \dots (1)$$

式中之ln, M<sub>v</sub>, L<sub>v</sub>, R分別代表自然對數、水氣分子量、蒸發 (凝結) 潛熱、通用氣體常數。由而可知空氣的絕對溫度T愈低，空氣愈容易達到飽和，也就是只要略加一點水份就可以產生凝結，進而形成雲狀物。另圖中右上角A點則代表當飛機在200百帕飛行時，噴氣口附近的溫度 (約600°K) 與飽和水氣壓 (約4百帕)。另B點則是由A繪一直S線切過線之切點 (T=226°K, K=-47°C)。至於另箭入的圖則是B點附近的局部放大，由而可見原圖中AB線之延伸交橫軸於C (T=216°K, K=-57°C)。這也就是說，在氣壓為200百帕條件下，氣溫在-57°C至-47°C間都有形成凝結尾的可能。



圖一 噴射機凝結尾形成圖。圖中S為水面上飽和水氣壓線，A B切過S至600°K



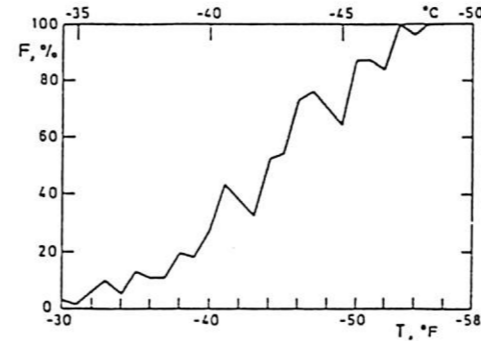
圖二 JP-4燃油凝結尾形成於DS二線間

如果不限定氣壓為200百帕，而使用之燃油為JP-4，則其關係可繪製為圖二。圖中D與S兩條斜線分別代表乾與飽和空氣。由而可見，當P為200百帕時，能發生凝結尾的氣溫約在-57°C至-47°C之間，此兩臨界溫度以外大氣中就不會形成凝結尾。此結果與圖一者相同。

由於大多數的工業與家庭燃油，在燃燒中產生的水氣與熱量與JP-4相近，因而在極區都市的下風面，常常會產生形成過程與凝結尾相同的冰霧。圖三 (Ludlam, 1980) 是美國阿拉斯加州費爾班克 (Fairbanks) 冰霧五年平均發生率與氣溫的關係。由圖可見，當溫度降低到約-48°C時，該城下風面發生冰霧的機率是100%。此項觀測記錄證明由理論推算出來的圖一及圖二與實際狀況相符，亦即在預測是否有凝結尾發生時可參考圖一及圖二。

至於凝結尾何時消失，則視大氣的濕度與擴散率而定。基本上說，由於氣溫極低，除了很靠近噴氣口者外，組成凝結尾的小水珠都會立即變成冰晶，自此以後，水汽即直接在冰面上凝華成冰，而公式(1)中的 (L<sub>v</sub>=597卡/克) 需以昇華潛熱 (L<sub>s</sub>=677卡/克) 代替，因L<sub>s</sub>>L<sub>v</sub>，所以同溫且在0°C以下 (T<273°K) 時冰面上的飽和水汽壓較水面上的飽和水汽壓為小，亦即凝結尾生成後，維持其存在所需

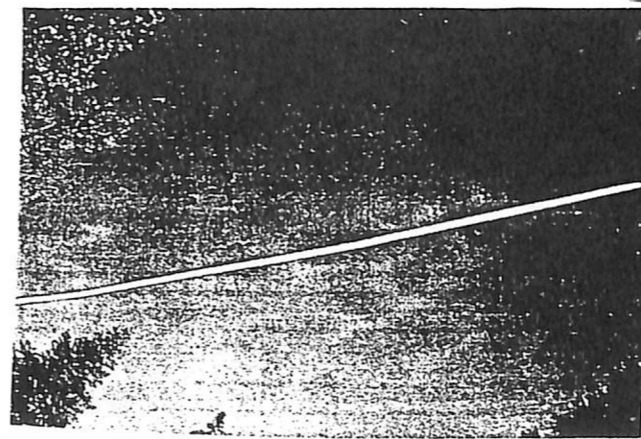
的水汽壓會比較小 (參閱圖三)，因此，凝結尾的消散主要由風吹引起擴散而致。如果風很穩定 (風向風速不變)，大氣濕度接近飽和時



圖三 美阿拉斯加費爾班克市下風面成霧頻率

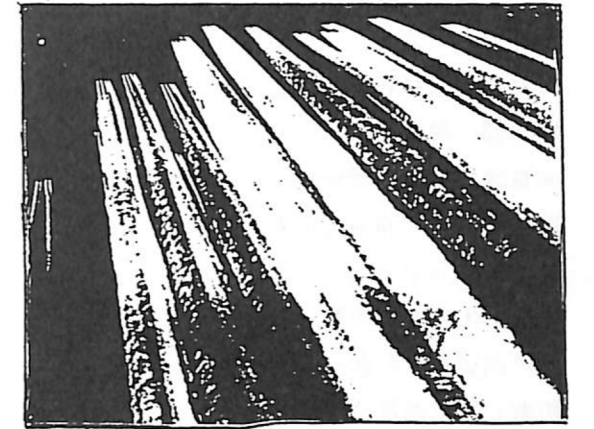
### 三、凝結尾的觀測

圖四與圖五分別為機群與單機所造成的凝結尾。前者各發動機後的凝結尾幾乎連接成片，因而與一般的雲很近似；後者則在蔚藍的天空中留下清晰而美麗的一縷白雲。就大片凝結尾而言，由地面上以目視觀測定位，並不會有什麼誤差，但單條或分散的多條凝結尾，由地面目視定位之誤差就比較大。像圖五中的凝結尾



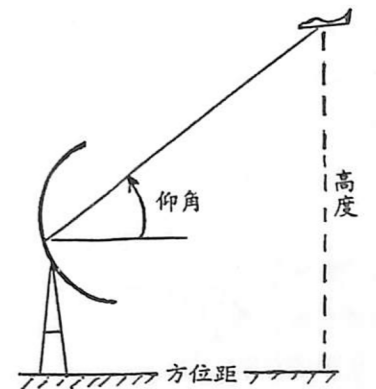
圖五 單機凝結尾

，凝結尾不僅有較長的生命，而且有發展為卷雲的機會。不過上述狀況並不多見，因而通常藍天上的凝結尾能維持的時間約十分鐘左右。



圖四 B-28機群凝結尾

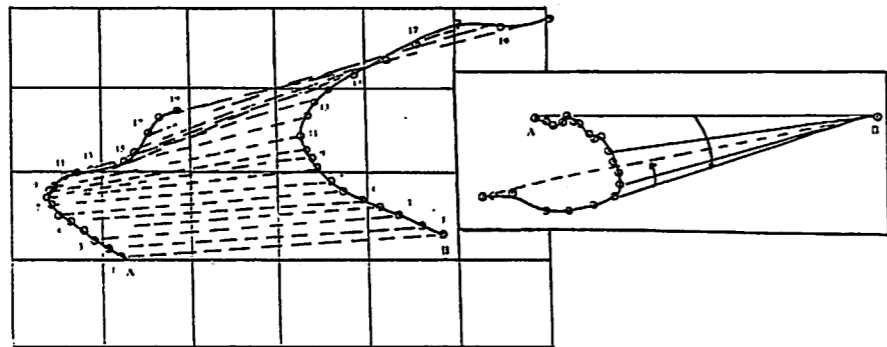
尾僅以目視就很難確定它距離地面上的樹究有多遠。造成位置難確定的原因包括(一)在蒼穹中並沒有參考座標，亦即缺乏對應位置；(二)觀測者不但沒有確切的觀測方向，亦沒有目視仰角是怎樣的實際數據。此二者使得觀測者只能概估目標物的方位、高度以及與觀測者的距離。(三)空中目標與地面觀測者的相對位移亦會造成定位誤差。(四)除以上三者外，觀測誤差亦來自大氣對光的折射。以下分為三項說明之：



圖六 雷達觀測定位示意圖

(一)參考座標與定位

確定任一物體之位置，常用的是 X, Y, Z 代表東西、南北、上下的直角座標。在此系統中，通常把觀測者置於原點，也就是 X = 0, Y = 0, Z = 0 處，而後以不同的 X, Y, Z 值標明所看到的物體位置。然而身處地球上的我們，當目標距離較大時，由於地球有曲率，直線代表的位置顯然並不準，因而需要改用球面座標，亦即以經緯度與 Z 來標明物體的位置，其中的緯度以赤道為 0，經度則以英國格林威治天文臺為起點。緯度南北各分為九十度，經度則東西各有一八〇度。使用球面座標欲說明一物之位置時，只要說它在經緯度若干，以及高度 Z 是多少就行了，相當簡單明瞭。此二座標系統基本上是相似的，而且均以地表為準，因而用以說明地球上，也就是掛在藍天上的東西，就必須另加一個條件才能正確標定，那就是觀測者與該物體間連線在三度空間的位置。我們可以用雷達追蹤飛機的方式來說明之。圖六是某一雷達鎖定一在空機的示意圖。其中雷達的位置為已知，而天線與飛機間的連線則有其距離仰角與方位角，由而不但可以確定飛機相對於雷達的位置，亦可推算出該機是在什麼地方的空中。這也就是說，我們需要知道雷達天線的仰角與方位角，以及藉電波往返所推算出的距離，我們才知道飛機與雷達的相對位置，再加上雷達自己所在的座標位置，我們才能知道在那一個瞬間，那架被鎖定的飛機是



圖七 A B 兩運動者的軌跡圖

在何地的上空飛過。

由以上簡要說明，我們不難瞭解，當我們以目視觀測一架在空飛機或其他漂浮物時，觀測者的位置、方位與仰角（即視線方位以及與水平面的仰視角度）均憑估計，而非完全確定，所以，所認定的飛機在空位置只是依概略狀況而主觀判定者，很難準確，故會誤認且會因人而異。如果而根據目視判定空中飛機是在某一定點上空飛過，就更只能作為參考了。

(二)移動的影響

當我們坐車經過曠野時，有時會望見空中的飛機航線有點怪，甚至看起來很像固定不動，那實際上是一種來自兩者做相對移動所造成的假像。圖七是 A、B 兩運動者在相同時間內的軌跡，基本上兩者均呈拋物線行進，只是速度並不相同而已。圖八則是由 B 觀測 A 所看到 A 的軌跡，此時觀測者 B 會覺得被觀測者 A 是在打轉，實際當然並非如此，而是相對位移下的錯覺。當我們目視凝結尾時，無論兩者中那一個在動或都在動，都會造成類似的錯覺。

其次，像凝結尾這種似雲的物體，在空中會隨風而移動位置，也就是說會向順風方向位移。在大陸沿海，凝結尾所在之高空盛行西風，因而一條南北或平行於海岸線的凝結尾會向偏東方移動，平均而言，每分鐘約可偏離兩公里左右，這也就是說凝結尾會因橫向風而偏離飛機航道。

圖八 由 B 看 A 所見到之 A 的運動軌跡

(三)大氣折射

我們之所以能看見東西，是因為目標物反射光線到達我們眼睛視網膜引起反應所致。而根據斯耐爾 (Snell) 定理可知，光在不同介質中的速度是有差異的，因而只要不是在真空中照射，光進行中都會有些彎曲。這可由我們觀看水中游魚時的現象說明之。圖九是由水面上看水中魚的示意圖。圖中虛線是觀測者主觀認定的視線，實線則是實際的視線，其彎曲是由於光在空氣與水中的速率不同所形成，其彎曲大小可由斯耐爾定理

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

所決定，亦即隨二介質之折射率  $n_1$  與  $n_2$  的比值決定。由此可知，我們由水面上看到魚的位置 A 與其在水中的實際位置 B 並不相同。

就觀測凝結尾而言，觀測者與被觀測者雖均在大氣層內，但因大氣層中的氣壓、氣溫、濕度都隨高度而變，因而大氣的折射率 (Moreland, 1965) 也會變，因為大氣的折射率

$$\begin{aligned}
 N &\equiv (n - 1) \times 10^6 \\
 &= D/T (P + E e/T) \\
 &= 77.6 (P/T) + 3.73 \times 10 (e/T) \\
 &\dots\dots\dots (3)
 \end{aligned}$$

式中  $n$  與  $N$  分別代表大氣之折射率與導出的折射率， $P$ ,  $T$ ,  $D$  以及  $E$  則分別為大氣的氣壓、氣溫、介電常數 (dielectric constant) 以及水氣之雙極矩常數 (water vapor dipole-moment constant)。所以光穿過大氣層時只要上述因子有所改變即會有不同的彎曲現象，因而即使有明確的參考座標，目視甚或經由雷達所觀測到的目標物在空中的位置，如不經折射修正，也會有相當程度的誤差。

在正常狀況下，大氣的氣壓向上遞減，大約每升高 15 公里，氣壓會降成原來的 1/10。在 50 公里以下氣溫的下降則可分為兩大層，一是

地面到 10 至 16 公里這一層，即對流層，層內氣溫約每上升一公里降低 6.5°C。在此層以上的氣層中，氣溫先以約每公里 2-0°C 的速率下降，而後再略為上升，在氣象上，稱此大氣層為平流層。兩的分界則稱為對流層頂。至於大氣濕度的影響，通常可略而不計。如圖十 (Moreland, 1965) 中實線所示，大氣的最大折射發生於對流層頂，而曲折的程度則視與近地面大氣之壓溫分佈而定。圖中實線為各  $N$  值之延伸線，亦即圖中 1, 2, 3, 4 四種不同  $N$  值時，由地面向上直視 (眼光垂直向上)，看到對流層頂以上目標物的位置，與其實際位置是有相當的差異，但並不大。只是對流層內大氣之溫度垂直變化有時並不會如此均勻，而且也會有逆溫層，也就是氣溫隨高度不減反增的現象，這就會使得公式 (3) 中的第一項 ( $P/T$ ) 的垂直分佈發生明顯變化，也就是會使得視線發生明顯彎曲，進而導致目視目標物的位置與實際的位置的偏差加大。圖十中的虛線是根據實際觀測後分析出來的  $N$  值分布，每一個彎折都會造成視覺誤差，合成後就很大了。

以上偏差亦是產生「海市蜃樓」的原因。圖十一 (Ahrens, 1994) 是「上現蜃景」示意圖。在強烈逆溫下，那位牛仔看到一個比實際山頭為高的虛像。反之，當垂直降溫很大時，也會形成「下現蜃景」。在圖十二 (Ahrens, 1994) 中，那位先生對於何以有棵樹會倒立著？頗為納悶。這種假象在酷熱的乾燥或沙漠地區時有發生。有時沙漠旅行者會看到天空雲塊的「下現蜃景」呈現在地面上，並誤以為是水塘，後果有時很嚴重。

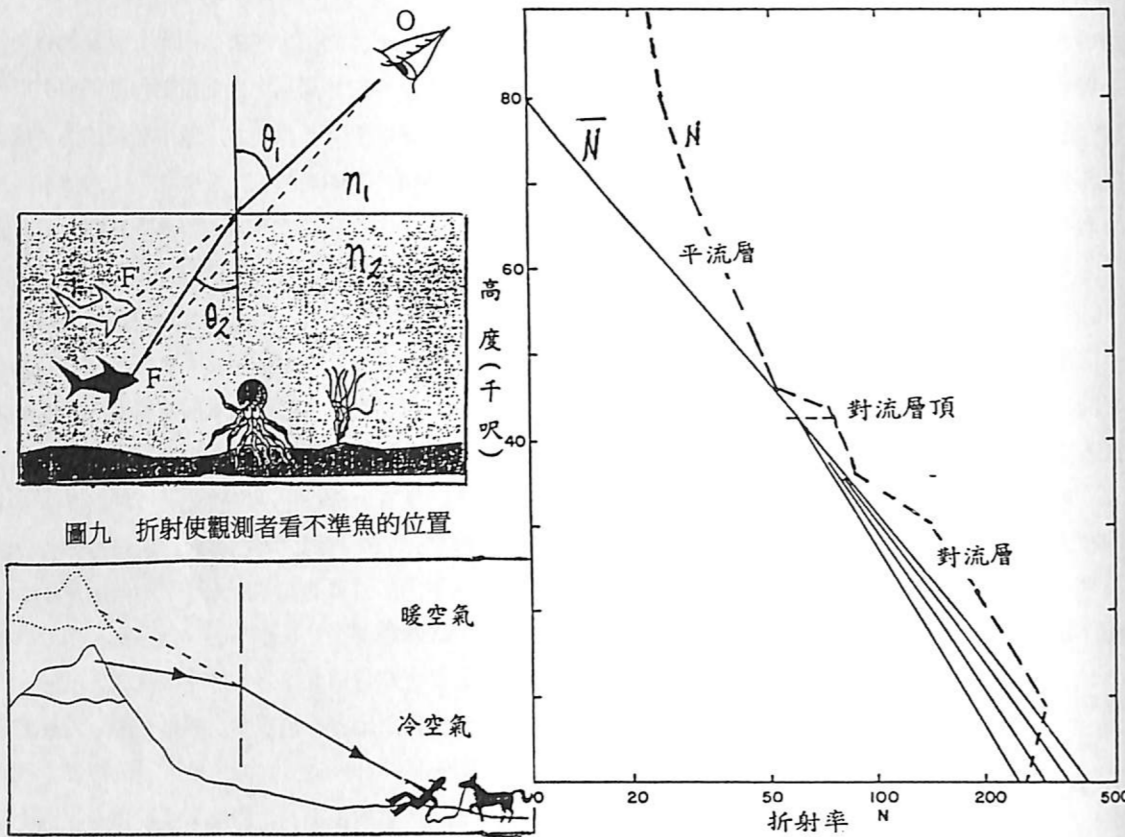
通常我們看空中的物體時，目光都不是垂直向上的，而是以某視角望出去，然而  $N$  在水平與垂直方向的變率都會造成視線的彎曲，所以，在未加修訂前，實在不能把「眼見為真」作為不變的圭臬。基本上說，目視所見空中物體的位置不但很不易標定，而且總會有一些偏



差。如果再有大氣不正常折射甚或蜃景現象，偏差可就大了，不可不慎。

實際上，大氣折射不但會使目視物有假象，也會使雷達定位與追蹤發生偏差，爲了修正

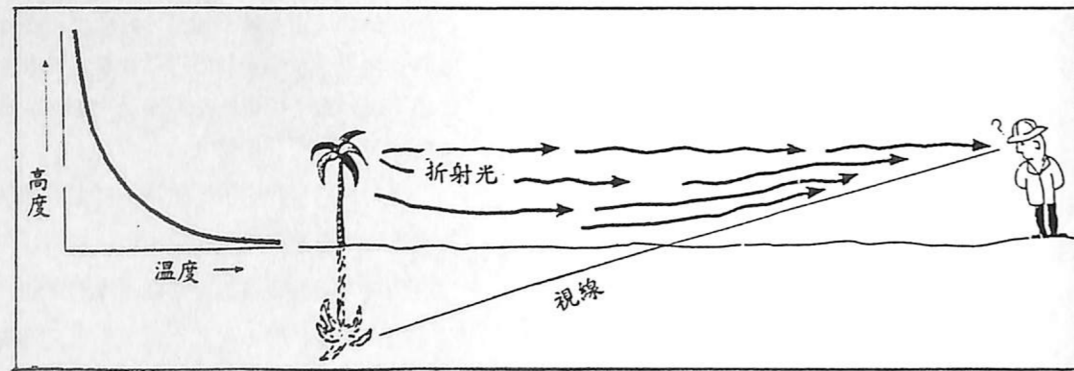
它，空軍氣象單位每天都要依據高空觀測所獲得之大氣壓溫濕三項數據，製作「大氣折射」資料，提供戰航管雷達單位作爲修訂位置與追蹤在空飛機的依據。



圖九 折射使觀測者看不準魚的位置

圖十一 上現蜃景

圖十 平均與單一觀測N值垂直分布圖



圖十二 下現蜃景

### 四、結語

氣象與航空關係密切，因而兩項業務有等長的歷史。通常我們把專門爲航空服務的氣象工作，稱爲航空氣象，它包括觀測、分析與預報三大內容。本文所介紹的凝結尾也是預報要項之一。整體而言，凝結尾形成於攝氏零下47至57度間的高空，氣象人員可利用探空觀測記錄分析並預報可能發生的空域。當凝結尾發生時，在空機可藉由調整飛行高度而避免之。就觀測而言，由於參考座標、相對運動、大氣折射等因素，目視位置必須經過修正才能確定，否則可能有很大的誤差，千萬要注意及之。

### 參考文獻

Arens C, Donald, 1994: Meteorology today. West Publishing Company, New York, U. S. A.

Hess, I. Sevmour, 1966: Introduction to theoretical meteorology. 歐亞書局

Ludlam, H, Frenk, 1980: Clouds and stormes. The Pennsylvanice State University Press. U. S. A.

Moraland, W.B., 1965: Estimating meteorological effects on radar propagation. Air Weather Service, United States Air Force.