

對流上限之分析與預報

郭文鑑

Tropopause Analysis and Forecasting

W. S. Kuo

Abstract

Introduction of jet aircraft in the civil aviation has necessitated making aviation forecasting for practically the upper troposphere and lower stratosphere. For meteorological servicing of high altitude flight, we are required to analyse the tropopause chart, jet stream and vertical wind shear. The topic of tropopause analysis and forecasting is introduced in this paper.

Firstly, analysing the tropopause charts with different examples existing in U. S. A. and U. S. S. R. then discussing the height variation of tropopause over pressure system. From the characteristic structure of temperature field during various stage in the development of cyclones and anticyclones, some peculiarities in the distribution of tropopause height are singled out. Finally, besides the summarized qualitative rules, based on consideration of thermal properties of air mass, the evolution of pressure system and the passage of frontal discontinuities, a statistical relationship between the meteorological elements at surface and upper levels and an empirical relationship between the 500mb and the tropopause height derived by A. B. Kalinovski are introduced.

一、導言

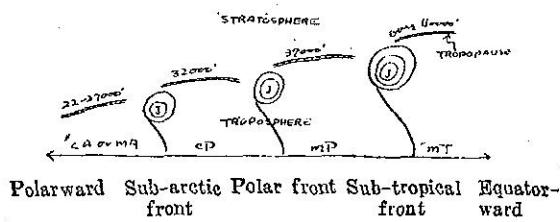
機場氣象台之航空天氣預告咸集中注意力於對流層下部各種天氣變化，對於對流層上部現象，因超越飛行高度，甚少討論及之。今則因噴射時代之來臨而情勢改變，飛行高度向上延伸至40,000呎，達對流層頂及平流層下部，勢須作高高度(High Altitude)的分析與預告。例如昔日高雲類雲層對於航路無關重要，今據噴射飛機報告，8-10公里高度的卷雲或卷層雲常導致能見度低劣，亂流或飛機積冰等現象影響飛行。再如噴射氣流之軸心位置與強度以及晴空亂流之分佈均為高高度飛行不可缺少之重要資料。至於對流上限亦然，雖立論甚早，詳見各教科書，惟對流上限圖(Tropopause chart)之應用尚推廣。去秋在加拿大Montreal舉行之航空氣象會議，曾強調航路天氣預報應增列對流上限、噴射氣流及垂直風切(Vertical wind shear)三項資料之重要性，並建議世界氣象組織於技術規章增列是項圖例。無疑的，對流上限在航空氣象中將佔一席要地。

二、對流上限之確定

大氣中對流上限頗似一阻塞層(Blocking

layer)為各種雲層發展的最高界限，聚積於此一界限之下之水汽，常成霧霾，因此對流層的能見度遠較平流層為低劣。水汽分子能對日光中的藍光波呈散射作用(Scattering)，故對流上限之下天空呈淡藍色，而它的上面則無此作用，天空色澤近乎黑色的深藍，這種顯著的區別常為高空飛行人員確定對流上限之指標。對流上限係介於對流層與平流層之間的界層(Boundary layer)，其高度視其下面之氣團而定，冰洋氣團(A)之上約22-27,000呎，極地大陸氣團(CP)約32,000呎，極地海洋氣團(mP)約37,000呎，熱帶海洋氣團(mT)約40,000呎以上，自此向南逐步升高，相鄰氣團之間的破裂處即為噴射氣流之所在，其剖面及平面圖如下列圖1及圖2。

圖1：對流上限大氣垂直剖面圖

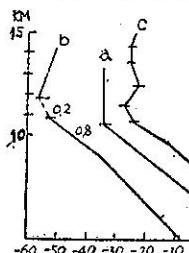


確定對流上限之底 界(Lower boundary)

，尤其頂界(Upper boundary)之精確標準尚待研究，若干學者會建議探空曲線上的最

低溫度定為對流上限之底界。事實上，逆溫層常即為對流上限層，而逆溫層常同時出現數個，重疊於第一個逆溫層之上的次一逆溫層，其最低溫度有時較第一個的更低，顯不能盡為適用。現時多用溫度遞減率(Lapse rate)之變化為準繩。探空曲線上溫度遞減率 $\leq 0.2^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ，或為等溫，或自負值突變為正值均係對流上限之軌範(Criteria)。通常對流上限層的厚度不過5公里，惟其範圍不規則而多變。如沿探空曲線，對流層之上即達平流層，則上流對流層是一層介於對流層與平流層之間的不連續面，實則對流上限常為數百公尺至數公里之過渡層(Transitional layer)，具有不規則的溫度構造。探空曲線上最具代表性之對流上限約可分為下列三種型式：(見圖3)

圖3：對流上限之典型



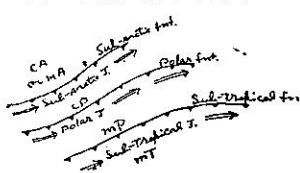
b 線，對流層氣溫隨高度而遞減，到達平流層轉為等溫。

c 線為複層對流上限(Multiple tropopause)，具有深厚的垂直範圍，有時達數公里，溫度遞減率的變化極不規則。

a、b 兩型在寒冷季節最易出現於中緯度上空，而c型在暖熱季節常出現於低緯度上空，當時天氣形勢多為熱帶氣團平流於對流層頂部。在大氣剖面圖上，平流層底部之等熵面(Isentropic surface)與對流上限相位相同(In phase)，而在對流層，此二者之關係變異：在高度大的對流上限下面，等熵面成谷狀，而高度小的對流上限下面，等熵面成峯形分佈。

現時對流上限圖之繪製，美蘇稍有不同，美國採等高線(單位為mb)、位置溫度及氣溫三項，亦即

圖2：對流上限水平剖面圖



吾人現時所熟習方法，等值線(間隔為50mb)為對流上限與各等壓面所成之交線，可在相當的等壓面圖上表示出來。蘇俄採等高線(單位為公尺)、氣溫及附近之風向風速三項，等值線(間隔為0.5或1公里)之走向與風向風速相符合。

三、對流上限下面天氣分析

分析對流上限必須考慮對流層內之溫度變化、氣壓及鋒面系統等要素。如比較對流上限圖與500/1,000mb厚度圖，頗為有趣，前者等高線低的區域必位於後者的冷區，同樣，前者等高線高的區域位於後者的暖區，偶有例外情形須查究其原因，蓋500/1,000mb厚度圖僅能代表對流層下半部之溫度構造，而對流上限圖足以代表對流層之全部，彼等之未能完全一致自屬可能，尤其噴射氣流區域。由於對流上限圖與厚度圖同具有等溫線的性質，故分析厚度圖的法則同樣可適用對流上限圖。例如500mb圖上等高線梯度陡峻之區必與500/1,000mb厚度圖等高線密集帶相一致，同樣的對流上限圖亦然。若與氣壓及鋒面系統相比較，沿高空鋒面，對流上限等高線之梯度最强，距離鋒面漸遠而漸減，有如等溫線之幅合區(Zone of Max. concentration of temperature)。至於地面鋒系情況亦相同。對流上限高度及整個對流層之變化受地面氣旋與反氣旋發展影響極大，如細察氣旋反氣旋發展過程中溫度場之變化，可以發現對流上限高度變化的特徵。設以 H_{tr} ， L_{tr} 分別表示對流上限等高線高低中心， H ， L 分別表示地面氣壓高低中心，就氣旋與反氣旋兩種情形分別討論如後：

(A) 關於氣旋情形

(a) 氣旋波初期(見圖4A)——對流上限等高線最高區位於氣旋波的暖區(Warm sector)，其最低區位於冷氣團範圍，但與地面氣旋中心有相當距離。對流上限密集帶則沿地面冷鋒平行分佈，該項密集的等高線漸成槽狀灣曲，而在暖區的等高線則成脊狀灣曲，二者相反。

(b) 氣旋充分發展階段(見圖4B)

——當氣旋逐漸發展過程中，對流上限等高線之波狀益顯，脊線與其後方之槽線均

圖4A：對流上限之關係實線為等壓線，虛線為對流等高線(單位公尺)

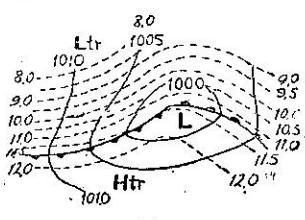


圖4B：

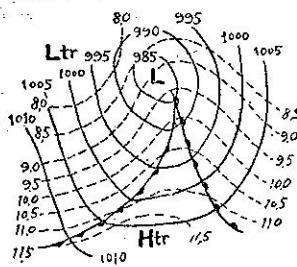
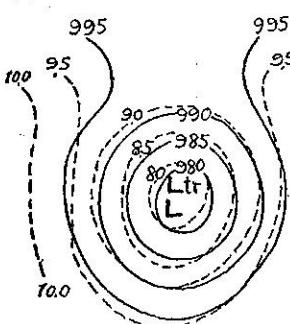


圖4：C



變加深，由於垂直上升運動，氣溫降低，氣旋中心上空之對流上限穩定下降，同時高空 L 與地面 L 之距離縮短。

(c) 因鋸階段

(見圖 4 C) — 氣旋發展至最後階段時，地面上已告填塞 (Fill up)，但在高空中仍繼續存在若干時，當冷氣團全部佔領氣旋中心位置時， L_{tr} 與 L 逐漸接近，合而為一，對流上限亦呈圓型。

(B) 反氣旋情形

(a) 發展階段 (圖 5 A) — 初發展的反氣旋，對流上限的等高線幾乎平行於反氣旋中心之南的冷鋒，高空 L_{tr} 遠在地面 H 之北，與冷潭中心 (Center of cold air package) 相符合，自 L 向南成一槽線，換言之，地面反氣旋中心之上，對流上限等高線相對的低。在反氣旋發展過程中，對流層下部空氣下沉，加以對流層上部有暖氣平流，致氣溫升高，對流上限等高線得以穩定上升。

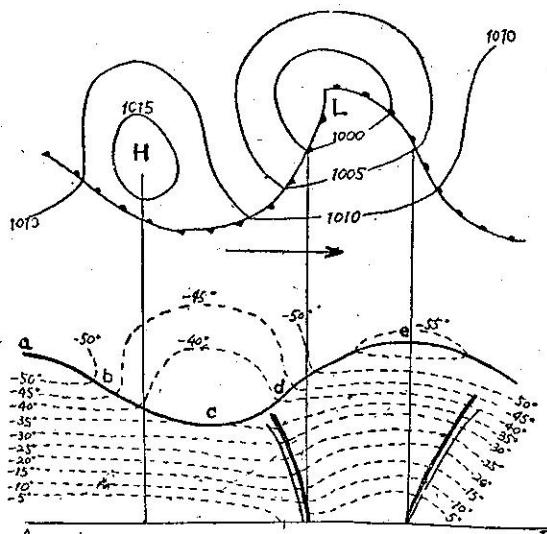
(b) 衰退階段 (見圖 5) — 此階段中反氣旋在地面與高空中已充分發展，兩者中心 H_{tr} 與 H 至於接近，幾乎重合。地面反氣旋上空，氣溫增高結果。逐漸形成暖潭 (Warm air package) 漸與高空 H_{tr} 相符合。

總之，就氣旋而言，在發展過程中，對流上限等高線穩定降低，而反氣旋情形適相反，為穩定升高，隨反氣旋之發展而上升至最大值，於是再漸告衰退。據世界氣

象組織發表之「高空分析預報」小冊中，蘇俄統計：氣旋每加深一毫巴 (mb)，其上空之對流上限降低 60–70 公尺，而反氣旋每加強一毫巴 (mb)，其上空之對流上限亦升高同樣數值。

氣壓系統影響對流上限如此之深，前前者如有移動必使後者形成對流上限波 (Tropopause wave)，其對稱的形狀如圖 6，係綜合上述氣旋反氣旋與其上

圖6：氣旋及反氣旋與對流上限波



空對流上限之關係。對流上限波之高峯位於氣旋之上，與對流層上部高壓相吻合，對流上限波之低谷位於冷氣團之上，與高空低壓相吻合，反氣旋之西部較暖，對流上限又漸增高。通常總是對流上限上升段位於對流層暖氣平流區域之上，而下降段位於冷氣平流區域上空。注意氣壓系統移動方向，可以辨識對流上限何處為上升段，何處為下降段，以預報其高度變化。自圖 6 可以清楚的看出 abc 為下降段，cde 為上升段。

四、預報對流上限法則

由上述各節，根據溫度構造，氣壓系統及鋒面移動情形，可綜合為定性的預報法則如下：

- (1) 對流上限之低壓區位於 500/1000mb 厚度圖之冷區，高壓區位於 500/1000mb 厚度圖之暖區。
- (2) 在氣旋發展過程中，其中心上空之對流上限穩定下降，屆填塞階段，繼又緩慢上升。
- (3) 在反氣旋發展過程中，其中心上空之對流上限穩定上升，屆衰退階段則又緩慢下降。
- (4) 槽線上空，對流上限的高度較低，脊線上空

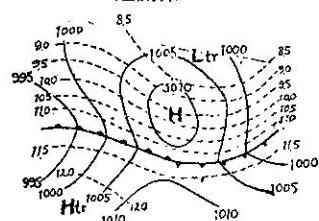
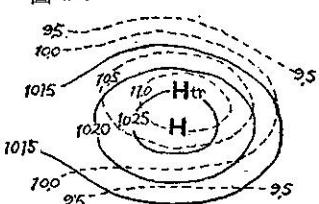
圖5A：反氣旋發展過程
中與上空對流上限
之關係

圖5B：



的較高。

(5) 暖鋒接近，導致某一地點之對流上限升高，其上升最大時發生於暖鋒通過之後。

(6) 冷鋒接近，導致某一地點之對流上限降低，其下降最大時發生於冷鋒通過之後。

對流上限之變化並不全視水平方向之冷氣或暖氣平流而定，同時亦受輻射熱垂直運動的影響，應用上述法則時，必須注意及之，例如暖氣團平流之際，同時有強烈的上升運動發生，則前者的溫度上升可能被後者因素所抵觸，甚至使某一地區之對流上限反而下降。此類情形在暖鋒接近之前常能產生。

現時吾人供給飛行人員之航路天氣預報，多係根據最近的航路上無線電探空紀錄，估計天氣情況可能的演變，而加以適當的修正。假使航路上紀錄稀少，不敷應用，可利用統計方法以謀補救。A. B.

Kalinovskii 氏根據 1930-1936 年探空資料，就某一地之海面氣壓及其氣溫垂直分佈與對流上限高度之關係，統計如圖 7，此圖可適用於中緯度，僅限於暖季。根據海面氣壓求對流上限平均高度，例如海面氣壓 990-1000mb，對流約 9.6 公里，若在冷季約為 9 公里；海面氣壓 1020-1030mb，對流上限高為 11.2 公里，若在冷季約為 10 公里。

同時 Kalinovskii 研究 500mb 等壓面高度與對流上限高度之關係，得結果如下表一，自 500mb 等壓面的高度以推測對流上限的高度。

表 一

500mb 等壓面高度 (m)	對流上限高度 (m)
5,200-5,300	8,000-9,000
5,300-5,400	9,000-10,000
5,400-5,500	10,000-11,000
5,500-5,600	11,000-12,000
5,600-5,700	12,000-13,000
5,700-5,800	13,000-15,000

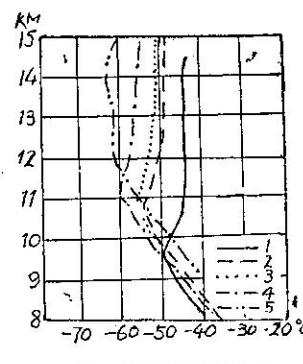


圖 7：暖季之對流上限溫度垂直分佈

- (1) 990.1-1000mb
- (2) 1000.1-1010mb
- (3) 1020.1-1030mb
- (4) 1030mb 以上

至於精確的對流上限高度，可自下列之 Kalinovskii 經驗式求得

$$H_{tr} = 6.435H_{500} - 24160$$

H_{tr} = 為對流上限高度 (公尺)

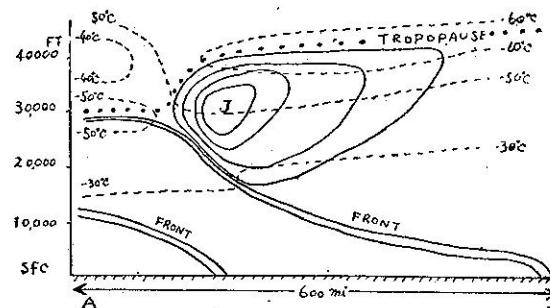
H_{500} 為 500mb 等壓面高度 (公尺)

五、對流上限之溫度場

氣溫對飛行經濟影響頗大，尤其噴射飛機長途飛行。例如 2,400m 的飛行高度，如溫度有 7°C 的變化，即相當於增加 (溫度升高) 或減少 (溫度降低) 7km/hr 之逆風速率，故噴射作業要項會議 (Jet Operation Requirement Panel) 曾要求提高溫度預報準確率，航路溫度應準至 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ，跑道溫度應準至 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，雖後項未獲協議，可見溫度項目之重要性。高空溫度的水平變化，無疑的，由於緯度因素，南北向之變化最大，而東西向變化主要由於對流上限波之影響，可分下列兩方面：

(1) 週期性——對流上限層溫度之年變化與地面氣溫年變化相平行，冬季對流上限之溫度低於夏季，夏季對流上限高度增加，對流上限的溫度亦隨同增高，冬季對流上限高度降低，其溫度亦減。中緯度之對流上限溫度，冬季常在 -55°C 至 -60°C 之間。關於對流上限，噴射氣流及高空鋒之溫度構造，據泛美航空公司氣象機構研究如圖 8 所示。

圖 8：對流上限，噴射氣流與高空鋒面之溫度構造
垂直剖面圖



(2) 非週期性——非週期的變化，係由於氣旋反氣旋而產生，與前項週期性變化相較，通常有相反的傾向。對流上限波上升段溫度低，而下降段溫度較高 (參看圖 6)。設沿巡航高度飛行，與對流上限波相交，則可遇見顯著的溫度差異，如自對流層飛入平流層則氣溫驟增，反之氣溫驟低，一如穿過鋒面所遭遇顯著的溫度差異。自圖 6 的剖面圖上，如以冷暖鋒表示對流上限波之性質，則低空鋒面與高空對流上限波

之性質恰為相反之重疊，頗為有趣，低空冷鋒之上的對流上限波具有暖鋒性質，而低空暖鋒之上的對流上限波具有冷鋒性質。

六、對流上限與高雲

高雲類雲影響噴射飛行，前節已稍提及，是類高雲除夏季積雨雲及塔狀積雲之峯巔能發展達於對流層上部之外，主要為集中於對流上限層下面的卷雲與卷雲層足使能見度低劣及飛機積冰，飛機遇之仍宜繞避之，故航空天氣預報中，高雲項目亦具重要，惜由於觀測不足，尤其中低雲雲量達裂雲(Broken)以上時，致使雲的預報不易。大規模高雲之形成除由於鋒面因素外，上述「高空分析預報」文中，根據飛機報告研究結果獲下列重要結論：

卷雲與卷層之發展咸在對流上限之下，隨對流上限波部分不同而異，波形曲線上升段，可能性達92.4%，下降段僅32.2%，前者雲量為5-10/10，寬約400-600公里，雲頂抵達對流上限；後者雲量4/10，寬約100-200公里，雲頂較對流上限稍下。此項高雲分佈的特點對於雲的預報至有價值，惟並非一概而論，必須注意對流上限下面暖氣平流或冷氣平流之天氣形勢。設反氣旋上空之對流上限波形如圖9，上升段在反氣旋暖

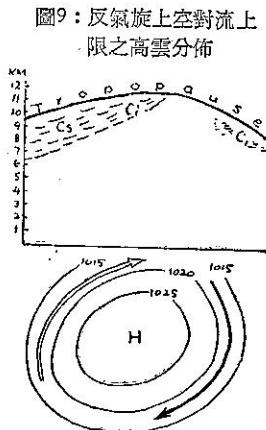
氣平流部分，下降段在冷氣平流部分，則大量的高雲層在上升段之下，而較小量在右邊下降段下面，同樣情形可見於各個鋒面，鋒前盛行暖氣平流，高雲叢生。設一迅速移動之氣旋，活躍於暖鋒之上，自然是高雲發達之區，惟對流上限之下降段，因氣旋之迅速移動，暖氣平流的結果，此對流上限之下降段勢必迅速升高，故是類高雲雖在對流上限之下降段亦為興旺。

七、尾語

對流上限圖之繪製，自然首要確定各地之對流上限高度，是項準備工作頗為費時，世界氣象組織最近修正電碼，規定 Temp. code增列對流上限之高度、氣溫、氣壓等項，如能一致推行，自將方便得多，目前東亞我國及香港、琉球已實行新規定，惜其他地區尚未普遍。願能早日一致推行，以配合今夏噴射民航機起落臺北的需要。(完)

參考書籍

1. WMO : Techniques for high level analysis and forecasting 1958
2. PAA WX Division : Jet weather
3. Walter J. Saucier : Principles of meteorological analysis p.147
4. Information Bulletin : Meteorological servicing of jet aircraft 1956



氣象學報訂購辦法

- 一、本學報係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、本學報本期暫收成本費新臺幣壹拾元，郵票十足通用。

氣象學報徵稿啟事

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。