

# 噴射氣流雲

Schaefer 原著  
Hubert 一凡 譯

## 引 言

一九五三年，Schaefer 曾為文介紹四種噴射氣流雲，包括伴隨高空強風而生之特種卷雲、卷積雲與高積雲。利用地面觀測之雲狀，以確定強風之位置，雖僅限於低雲未掩蓋天空時，始能應用，但在高空航行之飛機，則可不受此種限制，而能充分利用此種徵象，以指示噴射氣流。某次一架商用飛機，曾沿長約一千五百英里之雲條飛行，該項事實，引起作者對本問題之注意。

噴射氣流雲，似乎並非僅因風速超過某一限度值而形成。吾人熟知，大氣中遇有適量冷卻，即可發生凝結，此與絕熱過程中，需要空氣上升之情形，正相類同。又知移動於西風氣流中之噴射節 (Jetlets)，其移速較風速為弱，每伴有經度環流 (Meridional circulations)。例如在噴射氣流之進入區 (Entrance region)，較暖空氣之一方，常有較大規模之上升運動。

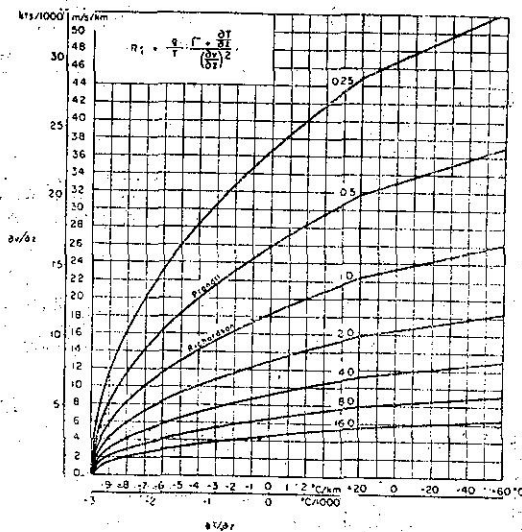
噴射氣流所生之雲，頗為壯觀，天空有時呈混亂狀態。根據飛行員報告，此種小結構，可能係緣於擾動。因之深覺應先研究較為著名之數種大氣穩定標準 (Stability criteria)，以試圖對於噴射氣雲中實測之細微現象，加以解釋。

## 穩定標準

噴射氣流乃係狹窄強風帶，位於比較靜止之週圍大氣中。此種氣流之特點，為其中心與四週，無論垂直與水平，均有強烈之風切 (Wind shear)。在過去三十年內，氣象文獻中，有數種包含風切 (水平或垂直) 之不穩定標準。其中特別值得加以注意者，有討論水平氣旋型風切、水平反氣旋型風切與垂直風切等三種。

Solberg (1939) 曾論及當空氣開始轉變為不穩定時，絕對渦旋 (Absolute vorticity) 消失。在緯流 (Zonal current) 中，垂直絕對渦旋 (參考 Palmen 1948) 如下：

$$\eta = -\frac{\partial u}{\partial y} + 2\omega \sin\phi + \frac{u}{R} \tan\phi \quad (1)$$



第一圖 Richardson 係數 (粗線) 圖，該係數為溫度直減率  $\left(\frac{\partial T}{\partial Z}\right)$ ，垂直風切  $\left(\frac{\partial V}{\partial Z}\right)$  與溫度 (T) 之函數。

式中  $\eta$  為垂直絕對渦旋， $y$  為沿經度座標 (向北為正)， $\phi$  為緯度， $R$  為地球半徑。若相對渦旋與地球渦旋為負，則為動力不穩定，此種情形，在強烈噴射氣流之南方，較易發現。研究噴射氣流雲時，此種可能性，頗屬重要，當於以後詳加討論。

Arakawa (1951) 創導之另一動力擾動標準，適用於最大風速北方反氣旋型風切地區。根據彼之學說，緯流中之氣旋型風切如下：

$$-\frac{\partial u}{\partial y} = \omega \sin\phi + \frac{2u}{R} \tan\phi \quad (2)$$

此一臨界值，在發展完好之噴射氣流北方 (普通為上層界面地帶) 一狹窄地帶內，常可發現。晴空亂流 (Clear-air Turbulence) 事實上亦多自此一強烈渦旋型風切之地區發生。至於此一地區何以僅有晴空亂流，而甚少擾動雲發現，將於以後，加以討論。

Richardson (1920) 曾求出垂直風切與大氣中擾動增減之標準。彼認為渦旋應力 (Eddy stresses) 之能量供應率等於或大於維持擾動所需之功，亦即破壞安定力之功，Richardson 係數為：

$$R_i = \frac{g}{T} \frac{\frac{\partial T}{\partial z} + T}{\left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}_y}{\partial z}\right)^2} \quad (3)$$

式中  $g$  為重力加速度， $T$  為絕對溫度， $\frac{\partial T}{\partial z}$  為實際溫度直減率。垂直風切之分切  $\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial z}$  與  $\frac{\partial \bar{v}_y}{\partial z}$  應自其向量差求出，本文採用下述大約值：

$$\left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}_y}{\partial z}\right)^2 \approx \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 \quad (4)$$

當風隨高度作微弱順轉時，由垂直剖面計算  $R_i$ ，其值不十分可靠。欲確定 Richardson 係數之臨界值，則面臨困難，各研究人員，求出之數值，約自  $1/4$  至  $1$  之間。自圖一可利用垂直剖面資料，迅速計算 Richardson 係數。由溫度直減率及垂直風切二座標，在圖左側可求出  $T=20^\circ\text{C}$  時之  $R_i$  值，然後沿  $R_i$  之等值線至溫度為  $20^\circ\text{C}$  之直線上，再向右水平移動至實際溫度座標，即可求得該溫度下  $R_i$  之數值。由圖中可明顯看出垂直風切之重要性。在噴射氣流附近，應有較小之 Richardson 係數，至於明顯，因真正噴射氣流，絕不能無水平與垂直風切。至於發展良好之噴射氣流與  $R_i$  分佈之關係，將再舉例討論。

應用上述之數種穩定標準，以解釋關於噴射氣流因擾動而致之雲，或可獲得結論。由於上述三種標準，均係根據動力原則，最低限度，亦能提供研究此問題之着手點。

### 擾動與雲之生成

不穩定與其所致之擾動，並非必能成雲，其理至屬顯然，鑑於諸多之晴空亂流報告，即可證實此種論點。此外尚有數種因素，似亦與之頗關重要。Barrett 等 (1949) 採用露點濕度表 (Dew point hygrometer) 之紀錄，以顯示大氣中濕氣分佈之複雜性。由於空氣往往極端乾燥，擾動上升不足以造成空氣中水汽之凝結，而呈晴朗狀態。

Vuorela (1953) 對於西歐噴射氣流週圍之露點差，曾加以研究，由其所求得之諸剖面圖顯示，在一般情形下，噴射氣流氣旋型風切之一側，空氣乾燥，亦即據報晴空亂流最多之地區。其中自亦不乏例外，彼曾發現，狹窄潮濕空氣帶，沿界面暖空氣之一方，延伸入勁強氣旋型風切地帶之實例，該處有噴射氣流雲形成，但此為例外情形。

Schaefer 曾注意，當天空有噴射氣流雲時，其北方多晴朗，能見度亦極良好，此即表示該時噴射氣流之側環流 (Lateral circulation)，熱力上係直線式。Riehl 曾指出，在移動噴射節之進入區，具有此種側面環流。此種雲在地面常能見到，故知上升氣流持續不久，不足以在大氣中造成深厚之凝結層。但若有一層或數層空氣，因大規模上升運動而趨飽和，在擾動波之波峯，亦可發生凝結。

### 噴射氣流之飛行觀測

過去二年中，英國海外航空公司 (British Overseas Air corporation) 之高級飛行員，曾述及極饒興趣之噴射氣流特別觀測。Bernard Frost (1953, 1954) 曾於二篇文章中，描述在 18,000 至 25,000 呎之高度間，彼確定最強噴射氣流地區之方法。第一篇中敘述利用溫度梯度接近噴射氣流之方法：「測定噴射氣流位置之最有效儀器為機外溫度表。……某日，於一定高度，順風飛行，發現溫度與風速，均保持不變。此外更發現計算噴射氣流兩側風速之可靠準則，即於通常高度 (15,000—25,000 呎)，噴射氣流之向極 (冷) 方，溫度每降低攝氏一度，風速減少約每時八哩，噴射氣流之向赤道 (暖) 方，溫度每升高攝氏一度，風速減低約每時十六海里。」Frost 之第一篇論文，並附有各種噴射氣流雲，Schaefer 認為均係典型噴射氣流雲。Frost 於其第二篇論文中，敘述所作進一步之詳細觀測，並特別着重於雲形。彼之觀測與結論以及第二篇論文所補充者，與 Schaefer 之觀測報告，均相符合。

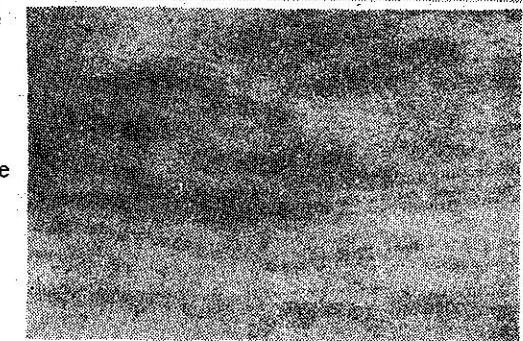
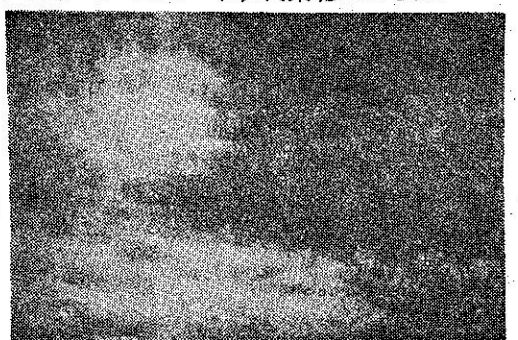
泛美航空公司之飛行員與領航員，經過私人交換意見後，對於 Frost 之論文，提出詳細評論，認為彼等所獲經驗與之亦甚為一致。

### 一九五三年三月一日至三日之實例

一九五三年三月一日清晨，紐約 Schenectady 碧空無雲，能見度無限。類此清新空氣，在紐約年僅出現數



第二圖 1953年3月2日 Schenctady 之雲圖 (a) 向東1230 EST (b) 向東北1300 EST

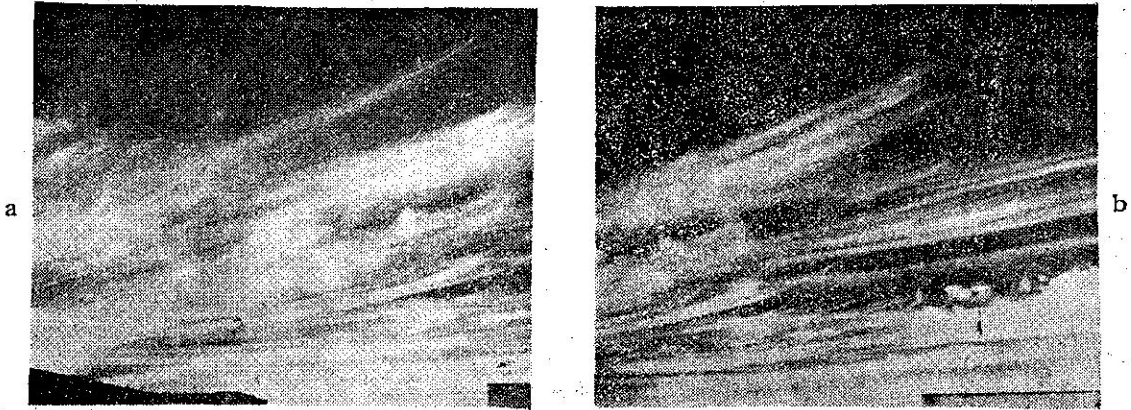


第二圖 (續)

c. 1953年3月2日 1230 EST	卷雲高度之波浪雲
d. 1953年3月2日 1231 EST	卷雲中之波紋
e. 1953年3月2日 1232 EST	卷雲高度之波紋與大波
f. 1953年3月2日 1300 EST	波狀與條狀卷雲
g. 1953年3月2日 1301 EST	條狀卷雲中形成裂洞
h. 1953年3月2日 1302 EST	卷雲中大波峯之邊沿

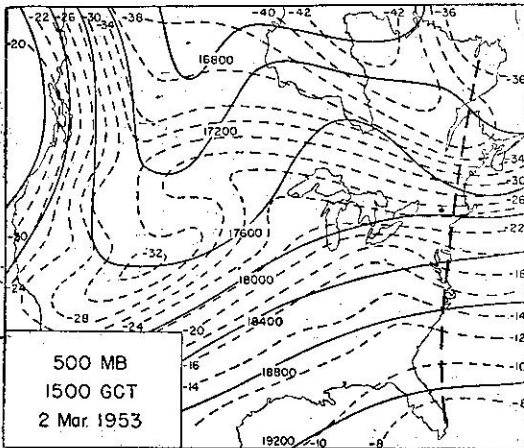
次。利用尖端放電測定器 (Point Discharge Collector) 測得該日之大氣電約為 0.04 uA。傍晚，落日映照之長條高積雲，出現於西方天際。美國東方標準時 (EST) 十六時，紐約 Albany 之最大風速為每時二百二十海里。

一九五三年三月二日，Schenectady 出現壯麗之噴射氣流雲，日間有四大塊卷雲，呈波紋至波浪形，經過該地。Schaefer 之記載如下：「此四雲塊位於移動波之波峯，至為明顯，該波之波長約三百英里。在二波峯經過之中間時期，天空幾無雲。當有高速度之噴射氣流存在時，曾觀測得類似之波多次。」第二圖 a 至 h 係三月二日中午以後所攝得之照片，第三圖 a 及 b 則係該日美國東方標準時十四時四十五分所攝得者。注意早期照片中，向噴射氣流下游之左方，天空無雲。大氣電之數值，亦遠較噴射氣流大氣電之標準為高。



第三圖 1953年3月2日1645 EST Schenectady 之雲圖 (a) 向東 (b) 向西北

第四圖係三月二日世界標準時十五時，北美 500mb 高空圖，由圖中等溫線之集中情形，可確定噴射氣流之位置，係自阿拉斯加灣經過美國西南部深槽之南方，復趨向東北。此外穿過南加拿大，有另一等溫線集中區。直趨新英格蘭州。圖中星號處指示 Schenectady 之位置。



第四圖 1953年3月2日 1500 GCT 500mb 高空圖，實線為等高度線，間隔 400呎，細虛線為間隔 4°C 之等溫線，粗虛線指示剖面之位置，星號指示 Schenectady 之位置。

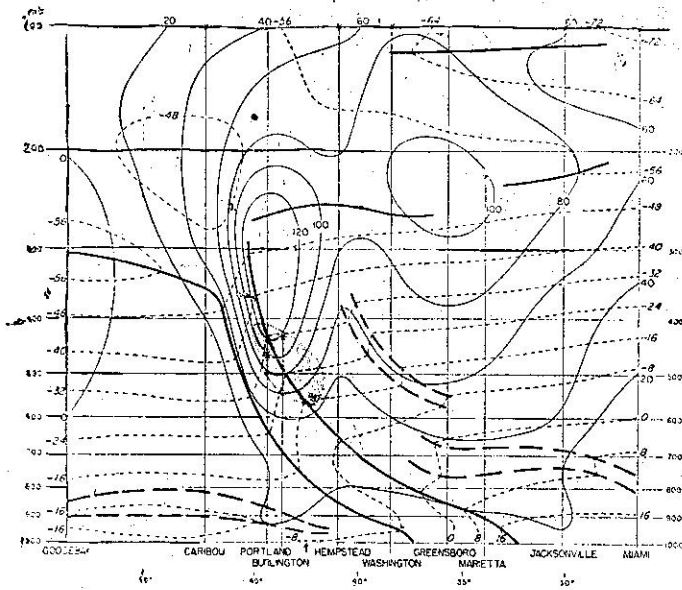
第五圖係沿前圖粗虛線所作之 1500 G C T 剖面圖。其中測站不恰位於該線上者，沿 300mb 氣流線之方向填入。圖中星號表示各測站所測風之最大高度，圖底箭頭則指示 Schenectady 之位置。等風速線分析，大部根據實測風速，惟在極面噴射氣流以上之高層中，曾應用地轉風關係。等風速線指示垂直於剖面之風速，單位為每時海里。由之可看出在大西洋沿岸，有二最大風速區，自地面至 300mb 處，界面極為明顯。Schenectady 出現之雲，可確定係在極面噴射氣流之南方。因之 Arakawa 應用於強烈氣旋型風切之標準，可不必注意。圖中噴射氣流之南方，顯見有強烈水平與垂直風切，後者對於 Richardson 之標準，至關重要。

由第 (3) 式求出之 Richardson 係數小於 1 之區域，在第五圖中以陰影表示之。第六圖為  $R_1$  值小於 1 之同一地區，並繪入極面噴射氣流附近之渦旋值。該值係根據圖五所求出，表示垂直於等壓面之絕對渦旋。所標數值係  $f = 2\omega \sin\phi$  之倍數。注意 Richardson 係數小於 0.5 地區與負絕對渦旋地

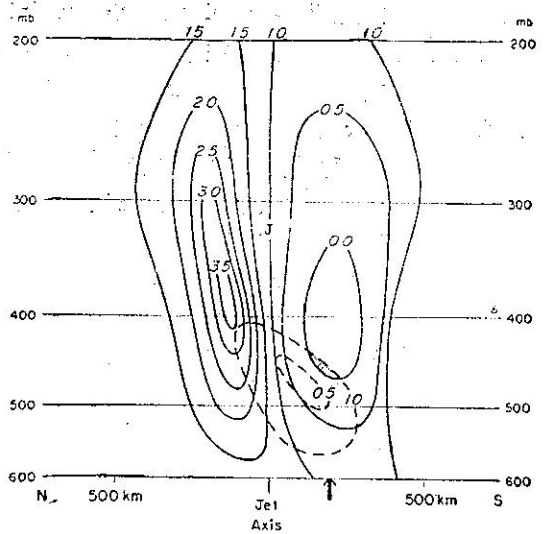
區，均位於噴射氣流之南方，而在 Schenectady (箭頭處) 正上空，負渦旋與  $R_1 < 1$  相重合之事實，尤堪注意。

一九五三年三月三日，日出時天空幾無雲，空氣乾燥清新，太陽為冰晶濃霾所遮掩。美國東方標準時，十八時十五分，細條卷雲在西方出現，繼之以波浪狀高積雲。下層雲高為 8,000 呎，冰晶霾高在 3,000 至 38,000 呎之間，雲行快速。於二十二時至二十三時，Schenectady 降落強霰 (Sleet) 與凍雨。





第五圖 1953年3月2日1500 GCT 沿圖4粗虛線自 Labrador 之 Goose Bay 至 Florida 之 Miami 之垂直剖面圖虛線為溫度線 (°C)，實線為垂直於剖面之風速 (海里/時)，粗線為界面與對流層頂。星號實測風之最大高度，箭頭指示 Schenectady 之位置 Richardson 係數 < 1 區域以蔭影表示。



第六圖 極面噴射氣流附近之渦旋分析，實線係垂直於等壓面之絕對渦旋 (單位為  $f=2\omega\sin\phi$  之倍數) 虛線乃 Richardson 係數為 1.0 與 0.5 之等值線，蔭影區係渦旋 < 0 與  $R_1 < 1$  之重合區，箭頭指示 Schenectady 之位置。

### 結 論

在上述實例中，Schenectady 明顯地位於噴射氣流之進入區，在地面可見噴射氣流雲。噴射氣流進入區內反氣旋風切之一方，因側面環流而形成之上升運動，對於輸送濕氣至大氣上空，似乎至為重要。

對噴射氣流實例，加以研究後，獲知多數伴隨強烈極面而生之最強風速，均有較低之 Richardson 係數，其位置大略與圖五所示者相同。計算出之數值有低 0.15 者。此外由實際經驗知在噴射氣流之右側 (面向下游)，絕對渦旋每為負數。在多數情形下，動力不穩定與低 Richardson 係數重合區，每發現噴射氣流雲，極堪注意。若某一薄層空氣達於或近於飽和時，擾動自能在大形態 (Macrostructure) 中，造成小型現象。

自噴射氣流雲之連續照片 (Lapse-time photograph) 顯示，其中有呈大規模滾動者，Rossby 曾研究與狹窄洋流平行之軸線上，流體繞軸線之運動情形。大氣中之上述現象或可藉連續照相機 (Lapse-time camera) 之助而探悉之。希望在美國西部拍攝之電影，能提供研究噴射氣流詳細結構所需之充分資料。

轉接58頁 50毫巴與25毫巴高度上氣流之研究

### 參 考 文 獻

1. Kochanski, A. and Wasko P. E. "Analysis and Wind Flow at 50mb and 25mb Levels" Air Force Service Technical Report 105-56 Washington D. C., May 1953.
2. Court, A. "Tropopause Disappearance During the Antarctic Winter" Bull. Amer. Met. Soc., Vol. 23 No.5 pp 220-238, May, 1942.
3. "Temperature at 10-mb (101,000feet) Level" Air Weather Service Technical Report 105-108 Washington D. C. May 1953.
4. Richardson, J. M. "Determination of Atmospheric Winds and Temperature in the 30 to 60-km region by Acoustical Means" Quart. Progress Report No.4 Institute of Industrial Research University of Denver. Colorado Oct. 1951.
5. Scherhag, R. Neue Methoden der Wetteranalyse und Wetter prognose Springer-Verlag Berlin 1948.