冬季北極平流層噴射氣流(1955年至1956年)

R. Lee 及 *W. L. Godson* 著
曲 克 恭 譯

一、引 言

近年來噴射氣流之研究甚爲廣汎，此高速氣流之狹窄中心常發現於海平面上三至四萬呎。因探空技術的進步，使收集到的資料高達平流層之內，漸漸獲得更多的證明，指出冬季在 75°N 附近二十公里以上仍有噴射氣流存在。從溫度場平均南北剖面圖即可判斷北極平流層二十公里附近緯流風隨高度增加，因而獲得初步證明。例如二十年前，普爾曼 (Palmen) 即曾指出冬季 50°N 左近之平流層有一暖袋 (warm pool) 存在，此暖袋之北方並有一最大的南北溫度梯度帶延伸至 70°N。此極强的斜壓帶 (baroclinic zone) 至少垂直伸展至海平面上24公里處，最近普爾曼更研究出沿 80°W 有相似的溫度場。根據溫度場計算地轉風亦證明 60°N 附近的平流層中西風增加之事實。此外許多學者以及美空軍氣象勤務部隊之研究指出高緯度平流層中地轉緯流風 (Geostrophic zonal wind) 有相同的增加，更有數位氣象學者認爲南半球也有相當的現象。本文將特別討論 Kochanski 之 80°W 平均剖面圖。

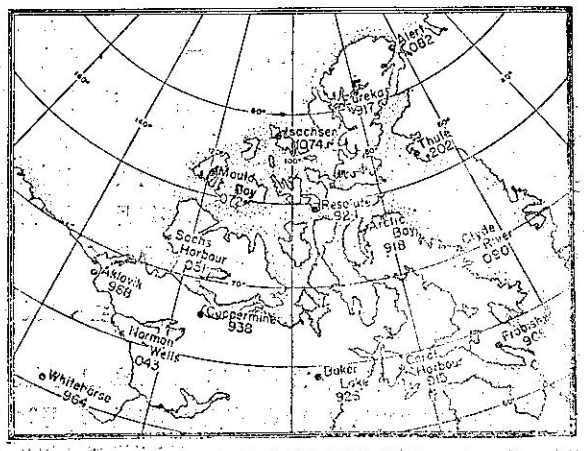
Kochanski 之平均剖面圖指示 70°N 至 80°N 間，20公里層之上有一顯著的噴射氣流。此噴射氣流於七月份被東風所替代。四月份及十月份之平均剖面圖中雖然在北極頂附近有極微弱的平均西風，但是在 70°N 至 80°N 相同高度之上却有東風分力之微風出現。Kochanski 認爲極夜 (polar night) 期間的噴射氣流乃根據靜力計算之結果，並非實際之觀測。他更論及在此區域附近可供實際繪圖分析之平均探空報告中，測風資料於16公里以上即幾乎完全沒有，因此面臨一個問題：高緯度上空平流層噴射氣流是否在每一個別的噴面圖中皆眞實的存在？

從 Kochanski 平均剖面圖可知西風噴射氣流唯有冬季始在平流層環流中出現，當時的熱力結構須要通過極夜界限之高空溫度迅速向北減小。研究平均噴射氣流之緯度及高度使早期許多學者們臆測形成此噴射氣流溫度場最合理的機械動力應爲臭氧層，因臭氧層吸取太陽紫外線輻射而又將它按數種紅外線帶重輻射之故。有二自然結果遵從此假說而且可用高度足够的實測溫度予以證實。因極夜界限初源於極頂附近，然後向南移動止於冬至，冬末又向北退縮。此界限通過任何測站皆可由噴射氣流下方強烈斜壓帶內某一層溫度場之變化而測知。而且斜壓帶初期之發展必隨有通過極夜界限溫度下降之差率。

二、研究資料及方法

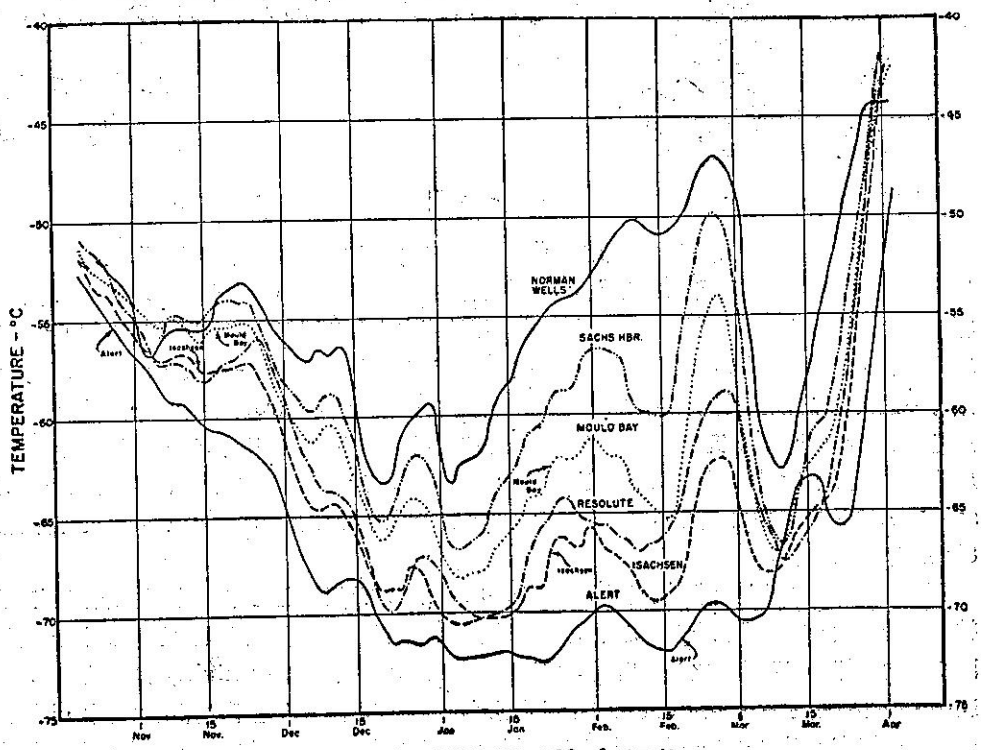
本文所採用的基本資料爲北極與亞北極 (Sub-Arctic) 60°W及140°W 間，高度 40,000 呎以上之實測風及溫度。觀測時間爲1955年10月16日至1956年4月30日。圖一爲加拿大北極區之探空測站圖。

因爲 1955-1956 年冬季整個加拿大北極區溫度資料具有連續性之最高層僅爲 100mb (接近 16 公里) 層，但是發現從 150mb 至 100mb 間之溫度直減率在一相當長的時間內變化極微，而且 100mb 溫度二十日週期之標準偏差 (Standard deviation) 亦低，約爲 1°C 至 2°C (除某些特殊時期於後節詳爲解釋)，因此，使用垂直方向之外延法及空間與時間方面的內插法將北極與亞北極全部十一個探空測站中之九個測站完成其100mb溫度之連續性，甚有合理的依據。不過每一段時間內估計 100mb 溫度之次數每一測站皆不相同。例如：Resolute 測站 0300 及 1500GCT 兩次觀測



圖一：加拿大北極探空測站

，197天中 100mb 溫度缺報 37 天，而 150mb 溫度僅缺報 7 天。再者，Norman Wells 測站，在相同的天數中100mb 資料有 5 天不可用，而150 mb 之溫度僅有兩天缺報。爲消除短時之變化及減少估計值之影響起見，做成十日連續平均圖 (10-day running-means)，圖二爲十月中旬至次年四月初各選定測站之100mb十日連續平均溫度圖。測站間之距離爲 65°N (Norman Wells) 至 83°N (Alert)，該曲線之解釋見第三節。



圖二：十日連續平均 100mb 溫度

噴射氣流平均位置南北方向之移動可由統計分析100mb層基本溫度資料而說明，根據中緯度噴射氣流之推論，可假設北極亦有輻度不同的移動波，此波沿噴射氣流運行，因之，在一短期內產生噴射氣流軸之南北向運動。由於噴射氣流軸附近空氣水平及垂直運動的結果，一測站上空噴射氣流之出現可由高空溫度極大的日變化指出，此種變率資料可補救從連續平均溫度中所獲資料之不足。計算變率大小最方便的方法是採用均方差 (Variance)，即標準偏差之平方。(按標準偏差 $\sigma=\sqrt{\frac{\sum d^2}{n}}$，d 爲偏差。故均方差 $\sigma^2=\frac{\sum d^2}{n}$，見氣候要素分析書籍中一譯者)。關於連續平均溫度之均方差確定以後，長期傾向之影響即不再考慮。二十日被選爲計算平均溫度及確定連續均方差之適宜時期。例如在 Alert，二十日連續平均溫度曲線即將十日平均曲線中之長期變化確實消除。然後噴射氣流平均位置之決定即可根據大的均方差完成。如果測站距噴射氣流軸遠，其均方差亦小，由這種分析所獲的結果將詳述於第四節中。

最後，研究極區平流層噴射氣流是否存在於分析圖中的問題，如直接分析垂直剖面中實測溫度及風時不克竟功，所以爲了選擇有充足測風資料之剖面圖以備直接分析起見，製成每一探空測站1955-1956年冬季 40,000 呎以上之風及溫度完全的時間剖面圖，然後再比較這些剖面圖選出適合繪製恰當剖面圖的資料時間，本文中所繪北極平流層噴射氣流垂直剖面圖大多爲1955年11月份與12月初，以及1956年 2 月終與 3 月份者。圖五、圖六與圖七爲精選的三噴射氣流剖面圖，將於第五節中討論之。

三、100mb 溫度場

1955年10月份（如圖二）連續平均100mb 溫度在加拿大北極區皆在 2°C 範圍之內。當白晝縮短之際，各測站之平均溫度同以約每日 $\frac{1}{8}$°C 之平均率降低。10月28日極夜到臨 Alert 二十公里層以後，Alert 與較南測站間之南北溫度梯度漸漸增加，其原因可能爲沿極夜邊緣不同冷却所致。同時所有測站皆發生半週期性之平均溫度變化。當南北溫度梯度增加時，平均溫度變化之輻度也增加，關於這些變化的可能解釋是在平流層噴射氣流下方

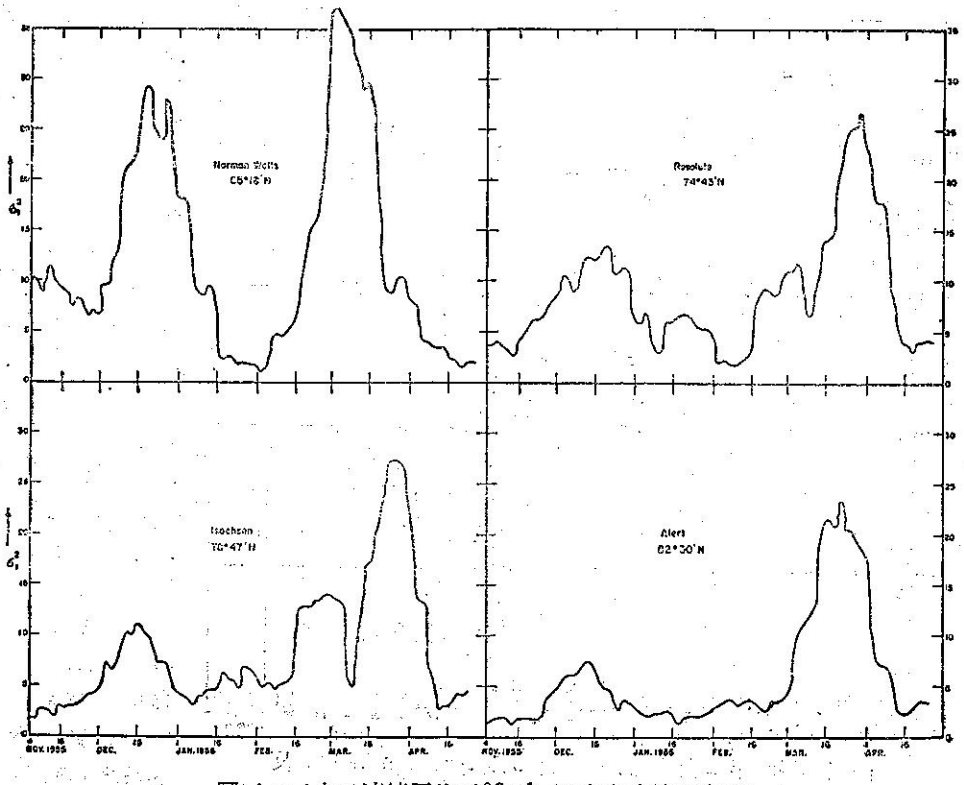
的斜壓帶中有幅度增加的穩定波移動。正如中緯度噴射氣流的下方，對流層中所發生的情況一樣。另外的因子如垂直運動等皆是促成此種變化的重要原因。二月終，南北溫度梯度達到最高峯，接着有不穩定波發生，此波使冷空氣南侵抵大多數測站。從圖二中可以看出1956年2月27日以後除 Alert 外，所有測站皆發生强烈的冷却，此種冷却與最初所測得者完全不同，可推測它定隨有相當穩定的波。在此一時期，所有測站（除 Alert 外）之10日連續平均溫度皆冷却至約-67°C，事實上，每一測站之觀測中，Norman Wells 站3月10日 0300GCT 之溫度竟低至-70°C，這時南北溫度梯度在此區域消失。

3月份最後三個星期內，整個加拿大北極與亞北極區之 100mb 溫度由-70°C 增加至-45°C 左右。其後，在此區域的 100mb 層造成約爲-45°C 之半一致性溫度場，同時在4月初，此區域之强烈西風以及溫度變化的各種跡象皆趨消失。

最北的測站 Alert，從冬至迄1月底止，具有無週期性溫度變化的特性，尤以11月15日至12月20日間最爲顯著。但是此種變化在較南的測站繼續增加其幅度。1月第三週以後，Alert 再度出現此種變化，並繼續增加幅度直至3月21日，然而在較低緯度測站此時顯示有減低的趨勢，如 Isachsen, Resolute 及 Mould Bay 等測站，正值3月終穩定增溫之前。

對圖二平均 100mb 溫度曲線最合理的解釋我們可借助於噴射氣流下方斜壓帶的南北溫度場。沿此斜壓帶可假定有沿噴射氣流被運送的波，此波水平運動通過任何測站，連同垂直運動，將產生日復一日以及長期的溫度場變化，但在强烈斜壓帶之北方及南方受到移動性渦動產生之溫度改變極微。因此 Alert 從1955年12月21日至1956年1月25日保持近於-72°C 之平均溫度幾達35天之久，其原因爲斜壓帶之平均位置遠在 Alert之南方。1月25日之平均溫變仍保持-72°C，以後再度出現週期性的溫度變化，指示噴射氣流下方斜壓帶北方之邊緣已接近 Alert。又且，12月份及冬末此變化最大幅度實測的南北位移完全與噴射氣流假設的運動一致。

根據此溫度曲線和垂直剖面圖系，我們可略知11月份噴射氣流與其強烈的平流層溫度梯度在極北方生成，然後於12月份向南緩慢移動，並增加其强度。由Resolute 1月份10日連續平均溫度極低值之指示可知噴射氣流之平均位置在仲冬位於 Resolute 之南方。此種特徵之初冬概況可在 Bannon 及 Jones (1955)所創的60mb 平均氣流圖中發現。該圖顯示平均最大風速 1月份發生於連接 Sachs Harbour 及 Coral Harbour一線上。此線與通過Resolute 之經度線相交，相交點距 Resolute 西百餘哩。2月及3月份噴射氣流向北移動。近



圖三：二十日連續平均 100mb 溫度之連續均方差

2月底時强度極大。3月份因輻射冷却及加熱的相互作用顚倒，其强度迅速減少。

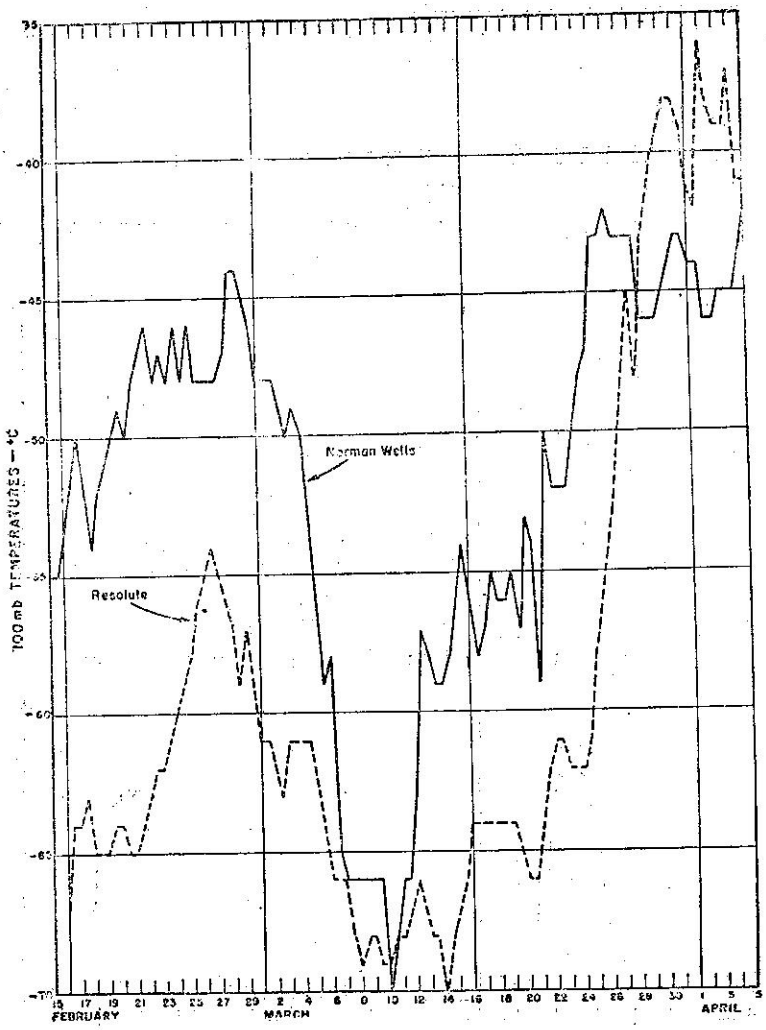
四、100mb溫度二十日連續平均「均方差」

圖三爲 Alert (83°N), Isachsen (79°N), Resolute (74.5°N) 及 Norman Wells (65°N) 等四測站20日連續平均 100mb 溫度之連續均方差 (Variance)。首先研究 Alert之均方差曲線，曲線中有二顯明的最大均方差，約以1955年12月10日及1956年3月23日爲中心。在其餘的時期從1955年11月4日至1956年5月6日，均方差之值在2與4間。因100mb溫度20天之標準偏差爲 2°C，可證明原來對100mb層缺報資料之空間外延與時間內差技術是合理的。

Alert 20日連續均方差首先出現的最高乃由於噴射氣流平均位置向南移動通過該測站之故。但此最高值並不太大，吻合較弱的南北溫度梯度。因此11月份及12月份噴射氣流也較弱。

1955年12月26日至1956年2月28日間，均方差有一寬平的最小值，由於 Alert 位於正壓 (Barotropic) 帶中而形成的自然結果。此時，Alert 遠在噴射氣流平均位置之北方。

第二最高之出現約在3月23日，當爲噴射氣流向北移動正在 Alert之上空。



圖四：1956年2月15日至4月5日 Norman Wells 及 Resolute 實測與估計 100mb 溫度

Isachsen 及 Resolute之連續均方差曲線，12月之前部與 Alert相似，唯一顯著的不同是從 Alert 經 Isachsen 至 Resolute 的最高點出現時間一貫的落後。恰與噴射氣流秋季向南移動之假定吻合。至於 Resolute 均方差之最高值大於 Isachsen，而 Isachsen 大於 Alert者，此可證明10日連續平均溫度曲線指示南北溫度梯度增加之眞實性。相同的騷動沿强烈噴射氣流較沿微弱噴射氣流者要產生較大的均方差。Isachsen 及 Resolute 出現最小均方差之時間較 Alert 要短許多，例如：Alert 之均方差小於5者有74天，而 Resolute 之均方差普遍小於6者僅有44天。

Isachsen 及 Resolute 均方差曲線中重要的一點乃是2月4日以後發生明確的二次最高。此二最高被3月7日左近範圍極明顯的最低分離，就在3月7日左近極大多數的測站之10日連續平均溫度亦爲最低，尤其是沿 65°N 之測站。我們可以認爲 Isachsen 及 Resolute 均方差中最末一次最高乃因平均噴射氣流返回較高緯度之故。提到中間一次最高，我們可以從性質方面獲知2月27日以後，重要的變化發生於半緯流 (guasi-zonal flow) 中，大部份測站實測到冷空氣南侵時，緊跟着發生强烈的增溫，其間輻射無疑問的充任主角，而 Alert 却在增溫方面落後。此時，

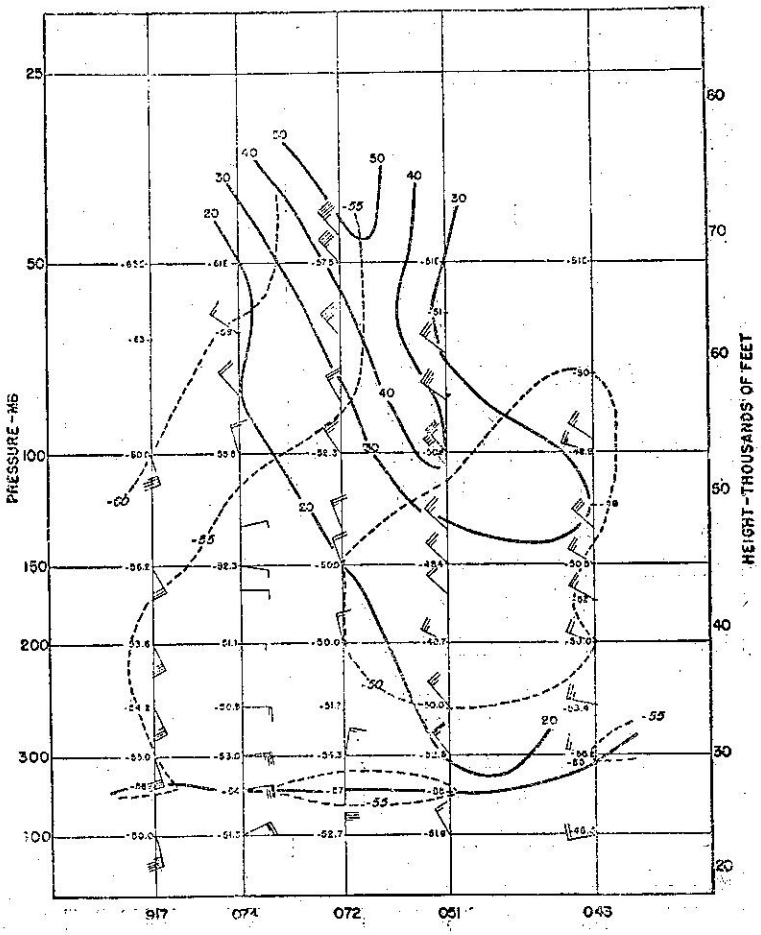
噴射氣流之平均位置可能仍在 Resolute 之南方。但其南北方向的波動影響 Resolute 之溫度。

計算均方差之方法並不適宜於解釋每一物理程序之最高，對2月4日以後二次最高極可能的解釋應該是平均噴射氣流位置在其向北移動的途徑中已經抵達 Resolute，但是加拿大北極噴射氣流層中有一股冷空氣向南爆發，因此噴射氣流又被暫時推向南方。所以我們深信 Isachsen 及 Resolute 均方差曲線中的第二次最高乃由於冷空氣南侵加拿大北極全部測站之故。冷空氣南侵主要爲動力現象，我們可推斷其隨帶產生的南北溫度梯度超過某一極端值 (critical value)。爲何10日平均溫度曲線（圖二）中之最高却未如預期的那樣顯明？極明白的解釋當然是增溫與冷却爲均勻平順的變化 (Smooth change)，並非環流型中特出的變化 (Marked change)。2月4日以後，Alert 之均方差未有二分離的最高，可知不穩定之擾動並未巨大地影響於 83°N，雖然 Alert 之均方差逐漸增加，使我們會聯想到此影響可能已經於3月初發生達一有限的程度。

圖三，Norman Wells 之均方差曲線與其他三測站者在11月份有所不同，Norman Wells 之均方差最初甚大，如果究研 Norman Wells 10月及11月初對流層頂之氣壓即可明瞭此不同之理由。該時，對流層頂常見於低如 220mb 之氣壓層，表示海洋熱帶空氣常在 Norman Wells 之高空發現，對流層頂氣壓按日之變化在300-220mb間，據此，我們可推斷那一個時期極面噴射氣流正在 Norman Wells 之附近，同時11月初該測站產生大的均方差，主要受到影響100mb溫度場至某種程度的極面噴射氣流之控制。我們還須注意白令海在11月份有一持久性的「阻塞」(Block) 發生，並有導引冷空氣向東南移動通過加拿大草原及美國西北部之趨勢。冬季之其他月份，對流層頂達於300mb層，均方差也隨即變小。

Norman Wells 均方差曲線中第一個顯著的最高與冬至吻合，由此假定北極平流噴射氣流約在此時至少在北極西部達到其極南的平均位置。再者，Norman Wells 以及 Resolute 相關的寬平最高乃由於噴射氣流到達及離開二者聯合形成者。最高之後，Norman Wells 之均方差在一月終有一短時期降至與 Alert 相當之二次值。此時，噴射氣流之平均位置定在其北方。由圖20日平均 100mb 溫度約在-55°C 可證明上述噴射氣流在北方是正確的。

Norman Wells 曲線之第二大的最高點發生於2月終及3月初，因此最高與 Isachsen, Resolute 之第二最高差多同時發生，所以我們可知此時緯流之衰退爲促成此種情況之物理



圖五：1955年 11 月 20 日 1500 GCT 方向取近於 NE-SW 之垂直剖面圖，粗實線爲對流層頂，虛線爲等溫線 (C)，平流層實測 NW 風之等風速線爲細實線 (kts)。

原因。緯流之衰退可由 Norman Wells 2 月27日至 3 月10日間極端强烈的平均冷却證明。另一方面，Alert 唯一的最高與 Isachsen 及Resolute 相當的主要最高在時間上是一致相符的。

2月15日至4月 5日間 Resolute 及 Norman Wells 實測及估計的 100mb 溫度如圖四所示，2月15日此二測站之100mb 溫度差爲12°C，直到3月4日仍一直保持相當穩定，但從 3月 4日0300GCT 至 3月 7日0300GCT，Norman Wells 之100mb 溫度却降低16°C，而 Resolute相當的冷却僅有5°C。從3月7日至12日，二測站間之溫度差小至可被忽略。3月10日最低溫度達到-70°C，此後二測站間之溫度差於 3 月12日 又 重回至 12度，但是此溫度差却漸漸減少，直至 3月28日1500 GCT，隨着春分以後日射之緯度輸入(input) 顚倒，100mb 溫度之梯度也同時反轉。

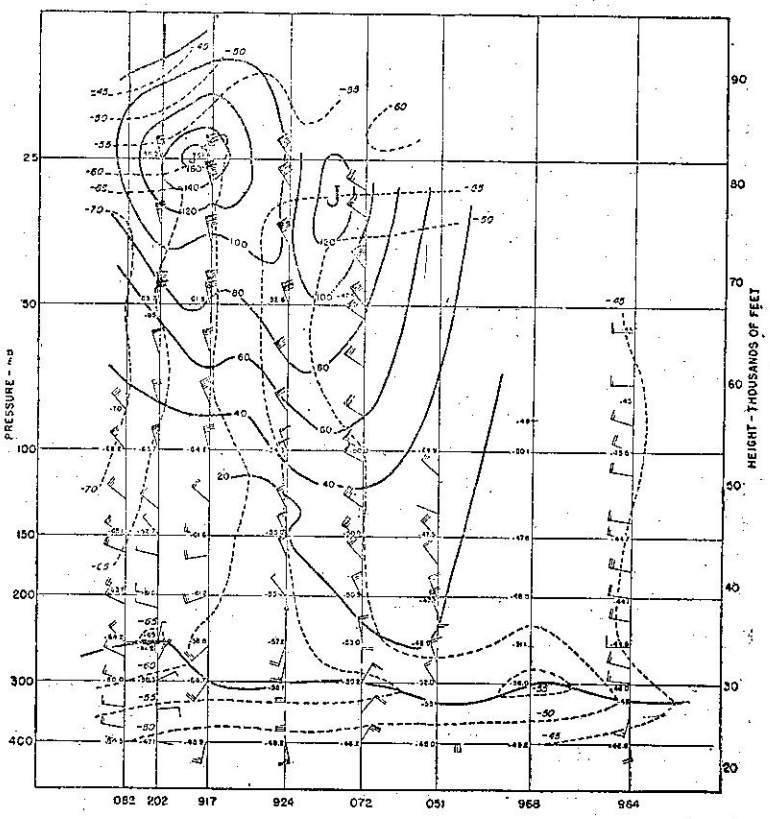
五、北極平流噴射氣流剖面圖

圖五、六、七爲北極平流層噴射氣流垂直剖面圖，完全利用觀測所獲之風分析。

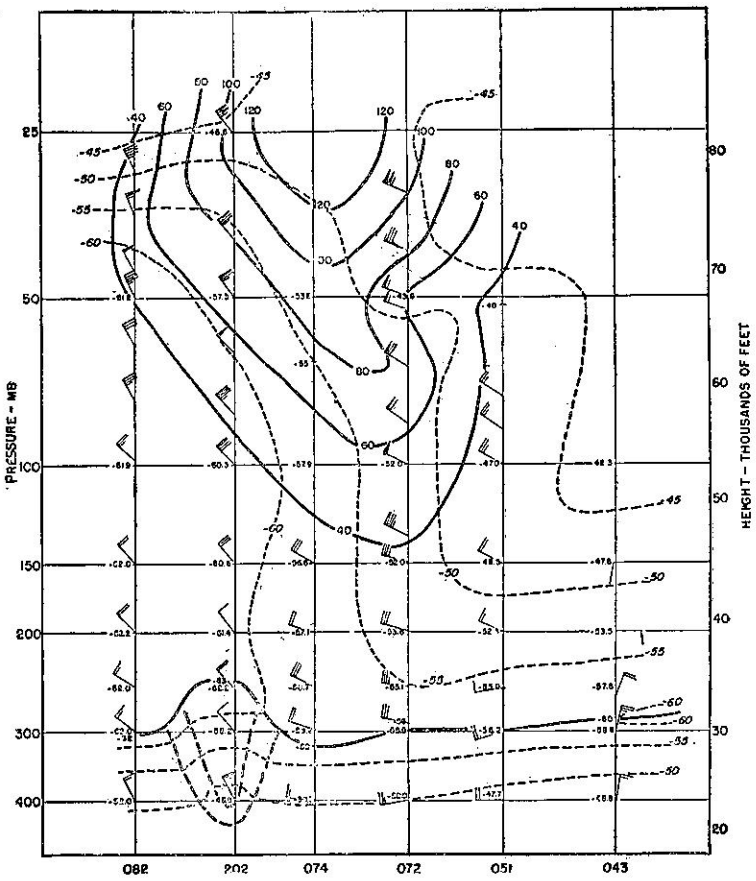
圖五爲 1955年 11月20日 1500GCT 之噴射氣流垂直剖面圖，所選之測站乃 Eureka(917), Isachsen(074), Mould Bay(072), Sechs Harbour(051) 及 Norman Wells (043)。剖面圖之方向爲 NE-SW, 因之 100mb 及其上方之西北風與剖面圖之平面成直角。如前節所述，11月份噴射氣流正値其發展之初期，相當微弱，但在此剖面圖中仍能明顯的定出一最大風速帶。噴射氣流軸向南傾斜爲所有已完成的剖面圖之特色。尤有興味者乃 50m 之溫度場，我們可看出在 Sachs Harbour 及 Isachsen 間等溫線最大的集中，但在更遠的南方，50mb 溫度梯度却頗微弱。

圖六爲1956年 2月26日1800GCT 通過噴射氣流之垂直剖面圖，此時之噴射氣流極强。該圖之方向仍爲NE-SW，平流層中強烈的西北風也與剖面圖之平面近於直角。此圖中實測最強風速爲 Eureka 八萬呎附近的 160 kts，噴射氣流之下有強烈的水平溫度梯度甚爲明顯，溫度在八百哩的距離內從-70°C增加至-50°C，但在平流層內垂直及水平方向皆近於同溫（Resolute之南）。因爲剖面圖所取之方向及其不規則性，使双最高 (double maximum) 之事實不克明確指出。

圖七爲 1956 年 3 月 26日 0300 GCT 之垂直剖面圖，最大風速發生於 Isachsen 上空 25mb 或以上，風速約爲 120kts。同時在 Alert 探空紀錄35mb 處亦有另一最高，指示噴射氣流軸之實際高度此時接近 35mb 層。100mb 之水平溫度梯度在 860 哩之距離爲10°C，當然與（圖六）2 月26日剖面圖比較相差甚多（圖六中最大水平溫度梯度800 哩內爲 20°C）。此水平溫度梯度之減低與圖二之平均溫度曲線吻合。圖七中最高實測風速爲 25mb 層之 100kts，與圖六之 160kts 風速比較相差甚多。正在噴



圖六：1956年 2 月 26 日 1500GCT 方向取近於 NE-SW 之垂直剖面圖，粗實線爲對流層頂，虛線爲等溫線(C)，平流層實測NW風之等風速線爲細實線(kts)。



圖七：1956年3月26日 0300GCT 方向取近於 NE-SW之垂直剖面圖，粗實線爲對流層頂，粗虛線爲界面，細虛線爲等溫線（C），平流層實測 NW 風之等風速線爲細實線（kts）。

射氣流之下，50mb 層溫度最大之降低發生於 Mould Bay與Thule 之間，但在 Mould Bay 之南方，50mb 溫度之變化却僅在-44°C 及-49°C 之間。我們並可看出 Alert 平流層溫度較二月份之剖面圖增高10°C。

三剖面圖之對流層頂皆位於 300 mb 層，僅圖七中測得一微暖之對流層氣團楔入，使對流層頂見於250mb 間。

六、結　　論

我們可以這樣做一個結論，高緯度冬季平流層噴射氣流業已在北美部份根據圖表予以證實。從其整個冬季之平均高度及緯度變化（如 100mb 溫度場統計研究所示者），可知臭氧層不同的太陽加熱可能爲秋季噴射氣流開始及冬季加強之主要物理程序。1955-1956 年冬季之強烈可能導致2月終之斜壓不穩定（baroclinic instability)之形式。至於是否爲正常或特殊的現象，仍有待更進一步的研究。顯著的南北氣流型在此時期的發展，使當地的加熱與冷却作用無效，同時噴射氣流趨向於減弱。約在2月終，各地的熱源減弱，最後且轉變爲相反的方向，結果促成春初噴射氣流之消逝。

1955-1956 年冬季可用的資料並不完全適宜獲得 100mb 層以上風及溫度組織之顯明狀態。25mb（或25公里）層近於臭氧層之中層，亦可能在中層之上。故太陽加熱之主要差別必須找出，至於高度較低（如100mb層）處之效用却爲其次，但仍能促成紅外線輻射流動發散（blux divergence）之結果。在國際地球物理年中，加拿大將每日獲得 25mb 之觀測紀錄，同時在 Alert 及 Resolute 觀測臭氧層，我們希望對高緯度高空的西風噴射氣流之生成、行爲與衰退能有更多的了解。（完）

原文題目：The Arctic stratospheric jet stream during the winter of 1955-1956
原文刊載：1957年4月份 Journal of Meteorology Volume 14, Number 2.

氣象學報重要啓事

軍民聯合氣象預報中心奉國防部（四七）啓可字第三二六號令於本年十二月底撤銷並辦理結束，但本學報改由臺灣省氣象所繼續出版，至盼惠稿　諸君本愛護氣象學術之素衷，陸續將大稿仍寄臺北市公園路六十四號臺灣省氣象所氣象學報收爲禱。