

ICAO Doc 9817 簡介(上)

豐年航空氣象臺

自 1943 年起，全球已有超過 1400 人因遭遇低空風切事故/事件而導致死亡。航空界對低空風切的危機意識與日俱增，使得 ICAO 不得不將此列為航空業的技術性問題之一。直到 1980 年代，由於缺乏適當的作業用遙測設備，加上風切的複雜度、廣大的尺度及不可預測度等等，如果要解決這個問題，勢必得發展出一套針對風切的觀察、報告及預報之國際化的標準及建議措施。

1975 年發生五件因低空風切造成的噴射機事故/事件，其中一件造成重大傷亡。之後在 1975 年 6 月 24 日發生於紐約約翰甘迺迪國際機場(JFK)及 1975 年 8 月 7 日發生於美國科羅拉多州丹佛機場(DEN)的意外，則因為有較完整的風場監測網幸而無人傷亡，成為風切歷史性的轉捩點。後續的研究在 1982 年針對美國科羅拉多州丹佛斯台普頓機場的聯合機場氣象研究(JAWS)計畫達到高峰，大大增加吾人對風切的認識，尤其是雷暴伴隨的風切現象。

1974 年 ICAO 在蒙特婁舉行第八次空中導航會議，建議出版低空風切相關手冊，因此催生了低空風切及亂流研究小組(WISTSG)，1979 年 8 月 31 日在該小組協助下完成首份低空風切及亂流的觀測及報告作業需求聲明書(State letter AN 10/4.6-79/142)。在後續努力的研究下，1983 年 11 月於 Annex3 的第 64 次修訂加入低空風切觀測及報告建議，同時微調前述作業需求聲明書。

1982 年美國調查和監督小組委員會以及眾議院科學技術委員會的運輸、航空及材料相關單位舉辦影響飛航的氣象問題聯合聽證

會，其中包含風切的議題。在此之後，聯邦航空管理局(FAA)與國家科學院簽約”以研究風切告警的了解程度(the state of knowledge)、替代方案以及其後果，以及有關商用及一般航空器於起降間之淨空隔離(clearances)的劇烈天氣條件標準”。為此更成立了研究低空風切及其對飛航危害之特設委員會，此委員會產出相當完整的報告及一系列的結論及建議。

自 1967 年以來，FAA 針對降低低空風切對飛航的危害有詳盡的計畫。在此計畫下，執行了前述委員會以及國家交通安全委員會(NTSB)經過事故調查之後提出的建議。FAA 與許多政府機構合作(如國家航空及太空總署(NASA)、航空業、機師協會及 ICAO)發展一”整合風切計畫”，並於 1987 年 2 月出版風切訓練指南。此計畫目的在未來 5-10 年能發展並精進相關教育、訓練、操作程序、地面及機載風切偵測技術，以及機載指引系統。同時能透過持續不斷的科學研究來解釋風切的危害。1987 年在 WISTSG 協助下，ICAO 出版 Circular 186 on Wind Shear，即 Doc 9817 的前身，其前言已闡明”關於風切的大量資訊，特別是操作方面，仍未成熟到足以成為技術規定”。考量機師對提供風切資訊的需求，相關附錄(Annexes)及空中服務飛航程序(PANS)須不斷修訂，並隨著這個主題日漸成熟，該傳單已被此手冊取代。

過去 20 年的進步主要受兩個面向的貢獻。一是 1987 年以來，無論是地面或機載偵測及警告風切的設備發展顯著，特別是都卜勒雷達及訊號處理技術，使得足以發展出高效率且專用的地面風切偵測/警告系統。類似的進步在於製造出符合作業需求用之前視(forward-looking)風切偵測/警告系統的機載設備。然而在撰寫此文件的同時，這種系統的發展程度遠比一些航空公司預期的要慢許多。

ICAO 相關的規定文件已逐步因這些技術發展而修訂。

在發展風切偵測/警告設備的同時，與風切可能對飛行中的航空器造成的嚴重後果相關的作業人員的訓練也有進步，特別是機師的訓練更是重要。完美的風切訓練指南需包含能夠解釋及辨識風切，以及如何在起降階段進行閃避。機師的飛行訓練亦包含倘若遭遇意料之外的風切時應如何因應。今日機師的模擬訓練應包含風切的辨識、如何閃避及遭遇之後的回復模組。過去十年來因風切造成航空器的事務/事件已大幅降低。然而，風切對航空而言一直都是造成嚴重危害的潛在殺手，因此必須持續不斷對風切保持警戒以及對機師的訓練。

在 Doc 9817 第一章導論中提到風切為”風速及/或風向在空間的改變，包含上升下降運動”，其於大氣中無所不在，但當它發生在 1600 英尺以下時，因為航空器起降時空速與高度都在臨界值上，此時對航空器的危害程度最大，飛航作業相關從業人員必須瞭解風切可能造成航空器操作的困難，特別是在起降階段。風切作用在航空器上所產生的結果相當複雜，取決於機型、飛行階段(phase)、風切發生的尺度相對於航空器的大小(風切尺度遠小於航空器，只會感覺到顛簸，並不影響操作)、遭遇風切的強度及經歷的時間等等。

第二章介紹風切的特性。風為包含速度和方向的三維向量，相對於地球分為南北向、東西向及垂直向，相對於飛行路徑上的航空器，風向量分為頂風/尾風(縱向)、左右側風(橫向)與向上向下氣流(垂直向)。一般平均風向或風速的小幅度變化與盛行風變化有關，而這種短暫的風之改變(如渦流)，與風切有明顯關係。而亂流幾乎與風切有關，就算尺度很小也是一樣，但大規模的風切則不一定與

亂流有關。此外，風切不僅僅是某種形式的亂流，且影響航空器的風切也不一定是亂流造成。計算風切的方法主要是由空間中兩點的風獲得，而這些風的資訊可以從航空器報告、探空氣球或兩不同高度上的風速計等方法得到，然而由於有些風的資料並非為有效值，特定高度層的風已是經由內插求出的平均值，不見得能代表兩高度層之間的平均風切大小，再者計算兩點間的風切乃依據此兩點的風資訊和距離求得，但在一段距離間的風切速率變化並非線性，顯著變化會發生在計算點附近，因此在計算風切時會有其限制性。

第三章介紹造成低空風切的氣象條件及天氣現象，概述如下：

- 一、在低於 2000 英尺的低層大氣主要受摩擦力影響，以其程度可區分為摩擦力主導的地面邊界層(0-330 英尺)及科氏力和氣壓梯度力逐漸明顯的艾克曼層(330-2000 英尺)，風向及風速在沒有「特殊風切天氣」的情形下皆會隨高度而不同，因此在大氣的環境裡始終存在著風切，只是這種風切在正常情況下，不會對飛行員造成問題。
- 二、影響航空器操作的因素之一為障礙物造成盛行風場的改變(圖 3-3)。除了力學效應，大氣中的熱力性質也可以影響障礙物周邊的氣流，造成特殊的風切狀況，以下坡風為例，從小尺度的山谷風到挪威的峽灣風、南法谷地的密斯特拉風和亞得里亞海的布拉風(阿爾卑斯山南面的下坡風)，甚至到大尺度如格陵蘭跟南極的外吹氣流等。當尺度夠大，風速跟穩定度的條件適合，氣流可能被迫翻越一座山，而背風坡下游可能生成一連串的駐波，若背風坡發展得夠明顯，可能會在波峰下產生封閉的滾軸狀旋轉流或渦流，甚至強到足以延伸

至地面，並讓地面上的盛行風因此反轉(圖 3-4)。這種駐波會在高山邊緣形成明顯的下衝風，而在遠離山區一段距離之處還會有稍弱的下衝風，那是下風處的第二或第三駐波。當氣流相當潮濕，在封閉渦流的上部會出現「滾軸雲」(rotor cloud)。在大多數的情況，當過山前氣流夠潮濕，在迎風面成雲降水，過山後空氣會沿著乾絕熱增溫下沉，形成焚風，為機場帶來強陣風，若地面存在強逆溫，焚風會掠過逆溫層的頂部造成風切，其高度約在離地 330 至 1600 英尺處。

另外還有一種大氣波動，雖不是駐波，但會在低層大氣像重力波那樣的形式傳遞，特別是在清晨時，最常在澳洲北部的喀本塔利灣被觀測到，而被稱之為「陣晨風」(morning glory)，這個名字被認為是來自一種特定的滾軸雲，這種雲也會在波動傳遞時出現。圖 3-5 為陣晨風的氣流線剖面圖，根據陣風的紀錄，在陣晨風作用期間很少會有達 20kt 的地面風速，然而會在波動處出現明顯的下衝流，這個波動以大概略高於 20kt 的速度穩定傳遞，而行經之處會有氣壓驟變現象。其成因尚未清楚，但被認為是某種擾動所引起，像是由海陸風的鋒面、陣風鋒面、或是冷鋒經過夜間逆溫所產生於更前端的次冷鋒。此現象確實會對飛機起降運作造成潛在之影響，儘管在實際上是否會造成飛機失事仍待商榷，不過許多研究都認為兩者間有關連性。

三、鋒面為分隔不同氣溫與密度的空氣之過渡區，其交界處的風速不連續，特別在低層大氣，會有風切區域。圖 3-6 為溫帶氣旋的鋒面配置，其行進過程中，前面是一道斜面前傾於鋒面行進方向的暖鋒，其後是一道斜面向後仰的冷鋒，意謂

在鋒面移動通過機場的過程中，鋒面會導致垂直風切：a)在暖鋒前，機場上方會出現風切，而且持續到抵達機場前，最大風切高度會逐漸下降直到地面；b)在冷鋒後，機場地面會出現風切，最大風切高度會隨著冷鋒離去，逐漸抬高於機場。風切影響航空器的因素，取決於鋒面的過渡區寬度以及飛機當時的瞬間狀況，而後者又跟航道的斜率、鋒面、飛機的對地速度有關。

四、日夜變化的海陸風交界面亦為風切發生區。白天時被加熱的陸地加熱空氣，與離岸由水體冷卻的空氣間產生之溫度梯度，此溫度梯度在盛行低層風速微弱和有日照充足的白天與晴朗夜晚時特別明顯。白天時地面風由水體吹向陸地，稱之為海風或湖泊風，經常在早上倏地開始；夜間則倒轉，變成由陸地吹往水體的陸風或離岸風(圖 3-7)。當海風往內陸移動時，風切主要存在於海風前端與陸地空氣的交界面，海風發展最大的時期(如傍晚)，海風鋒面會以一輻合線並伴隨旺盛對流的方式呈現，若條件良好，會發展成陣雨甚至雷暴的帶狀區域。

五、雷暴一詞隱含許多成熟期積雨雲產生的現象，例如雷、閃電、大豪雨、雹、強風與龍捲，這些現象通常對航空器具有危險性。雷暴依其不穩定的來源主要分為兩大類：a)氣團或熱雷暴(有顯著日變化，發生位置較隨機)；b)鋒面雷暴(發生在冷鋒和鋒面低壓帶)。表 3-1 列出前述雷暴類型可能對航空器造成的危害現象。陣風鋒面是雷暴下衝流到達地面並四面八方擴散開來之冷密空氣的前緣，而冷密的下衝流空氣會下切到周圍較暖、密度較低的空氣之下(圖 3-10)，如同一道淺

的冷鋒，只是陣風鋒面的風速、風切和亂流都強的多。陣風鋒面起初會沿地面以相同速率往各方向前進，但如果雷雨胞本身就在移動，如大部分的狀況下，則陣風鋒面會在與雷暴移動相同的方向上移動的最快且最遠，且走在雷雨胞之前(圖 3-11)。雷暴期間亦可能產生小尺度的下爆流，而在下爆流主要外流區內，常有證據顯示有更小、更強的下爆流潛藏其中，藤田(Fujita)將此種小又猛烈的下爆流稱為「微爆流」，定義為「一股下爆流在地面引起具破壞性水平風的突發外流，水平範圍在 0.4 到 4km 之間」。微爆流可單獨或成群出現，雨會伴隨微爆流出現，但也可能沒有降雨。微爆流一般與劇烈雷暴有關，不過任何對流雲都有可能產生。與微爆流(局地高壓系統、其低層風由高壓中心向外輻散)相對的現象就屬在所有天氣現象中有最強地面風的龍捲風。龍捲風是由極度集中的低壓系統造成，此低壓系統的渦旋完全地將周圍的空氣吸入，造成最極端的風切狀況，對航空器的起降極具威脅。不過此危害性因為一些特性而大大的降低：a)龍捲風一般都可被看見，因此可以預期航空器能繞過它們；b)雖然世界各地都曾告報有龍捲風發生，不過龍捲風最常發生在美國中部與東南部，因此在這些地方等於是「已知危害」，但其對航空的危險性仍不可輕忽，因為並非所有龍捲風都是肉眼可見。另一個極端天氣現象為超大胞雷暴(supercell storm，圖 3-20)，其主要特徵為：a)本質上為單胞結構；b)優勢的單一胞在準恆態(quasi-steady state)維持相對長的一段時間；c)胞內有極度旺盛的上衝和下衝流，兩者互相支持，就像是生物的共生關係一樣；d)傾向往平均風右側移

動；e) 衍生的災害性現象可能由雹(hail)造成，在某些地區由龍捲風群和微爆流造成。幸好其發生頻率不高，否則由它而衍生的冰雹、微爆流和龍捲風對航空器起降都有極大的威脅。另外還有高度在空層 350 至 450 間航路上的晴空亂流，通常出現在劇烈雷暴的下風處，其伴隨的風切導致航空器暫時失控而驟降高度。

六、每一架飛行的航空器後面都會產生風切，主要是由於機翼末端後方會產生兩個反旋的圓柱狀渦流管。這樣的渦流通常在大型寬體噴射機後產生的程度都較嚴重。航空器起飛產生的渦流會對緊接在後的航空器造成顯著的危害。雖然機尾渦流算是特殊情況的風切，但可由航管單位進行適當隔離來避免對起降航空器的影響。

七、強降水會使空氣動力耗損使得航空器操控不易，其影響航空器操作的方式至少有以下四種：a) 雨滴打在機身造成向下與向後的分量；b) 機體上雨水造成的薄膜增加機身重量；c) 這層薄膜可能被後續的雨滴打到而增加粗糙度，與乾燥光滑的機翼相比，表面應力會產生舉升力/拖曳力的不利因素；d) 雨滴打在機身的分量因航空器的航向而不均勻。1977 年一架 DC-9 在飛行中失速後緊急降落時墜毀，美國國家運輸安全部(NTSB)歸咎於航空器穿過雷雨胞時直接遭遇大量的雨水及/或雹，結合推桿的動作導致嚴重失速並造成引擎壓縮機受損。

以上內容為 Doc 9817 於 2005 年第一版第 1-3 章的摘錄內容簡介，第 4-6 章在不久的將來會與大家分享。

表 3-1：雷暴分類

	雷暴類型			
	氣團		鋒面	
胞狀結構	組織鬆散	組織性多胞狀	組織性多胞狀	高度組織性的單胞
雷暴強度	中等	中等至嚴重	嚴重	嚴重至非常嚴重
影響航空器起降，與雷暴可有相關的災難性現象	局部(local)強陣風，可能有下暴流但不常見	陣風鋒面、下暴流、龐大水體之上的水龍捲，局部冰雹	陣風鋒面、下暴流、微暴流、龐大水體之上的水龍捲、冰雹、龍捲風	陣風鋒面、下暴流、微暴流、龍捲風群、大範圍冰雹
例子	海或大洋上的隨機氣團發展，或山脈附近的氣團發展	在熱帶地區組織成線狀(飈線)，熱帶氣旋的線狀對流	熱帶以外地區主要為封面雷暴，可組織為線狀排列的中尺度群集	中緯度大陸地區多為鋒面雷暴，如超大胞
移動	大致隨平均流(盛行風)，若為靠近山脈發展者則通常幾近滯留(stationary)	隨平均流，但連續的胞發展可能只發生在雷暴系統某一側，因此有往該側移動的錯覺	隨鋒面雷暴移動，新的胞會在陣風鋒面上發展，尤其在已存在的胞之間	往平均流的右側(偶爾會分裂成兩個雷暴)。偶爾會維持滯留，並帶來局部的重大災害

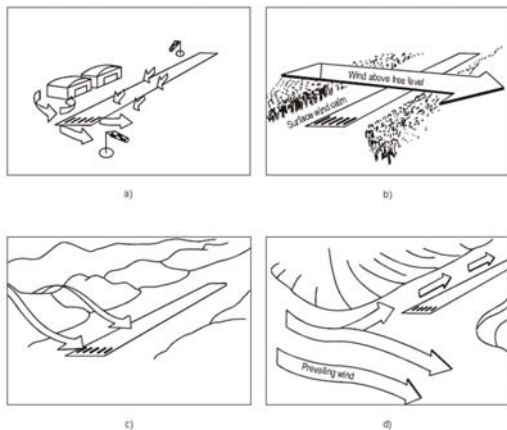


圖 3-3：障礙物影響之氣流

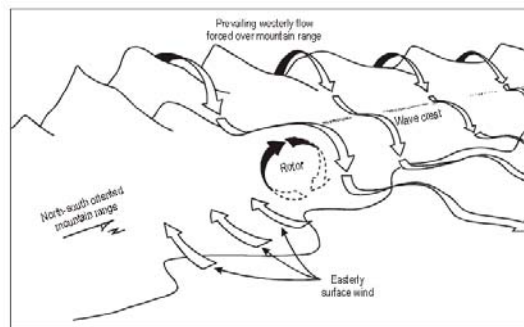


圖 3-4：背風波

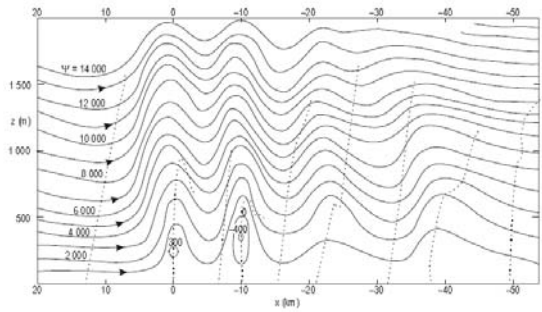
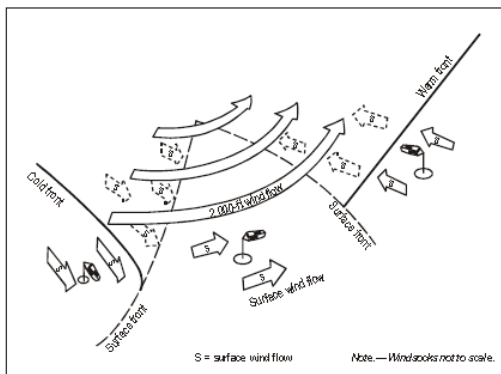
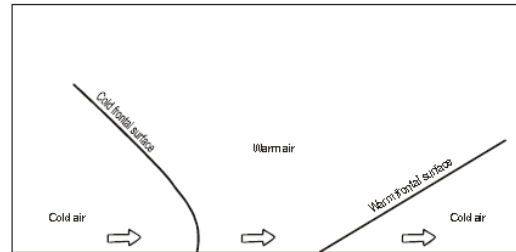


圖 3-5：垂直於軸狀雲的氣流線 (Smith and Goodfield, 1981)



a) 三維視角來看冷/暖鋒切系統與其上 2000ft 的氣流，北半球(誇大垂直尺度)



b) 暖/冷鋒系統交錯的二維圖(誇大垂直尺度)

圖 3.6：鋒面交界面

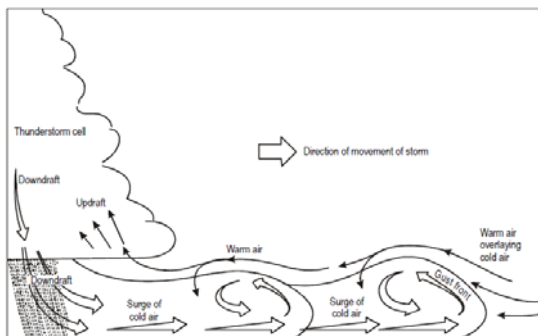


圖 3-10：典型陣風鋒面的剖面圖

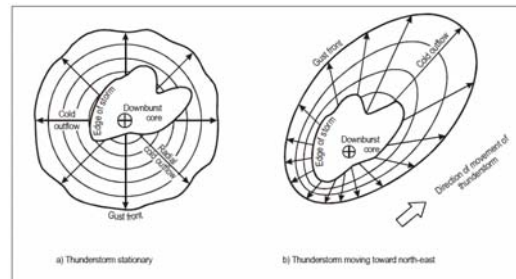


圖 3-11：典型陣風鋒面的平視圖

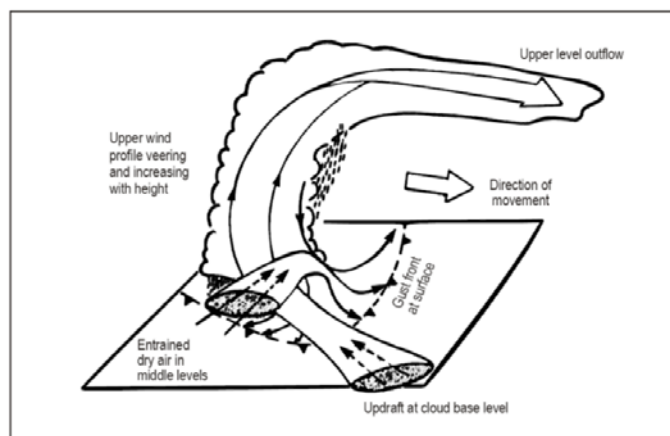


圖 3-20：“超大胞”雷暴的概略結構(after A. J. Thorpe, 1981)