



飛航安全的隱形殺手以遭遇機尾亂流為例

備役空軍上校 林得恩 王泰鈞 楊士禾

提 要

過往，我們對於影響飛航安全的隱形殺手—「機尾亂流」的瞭解，仍以在微風或靜風等「穩定」的大氣環境下才易發生為主；飛安事件的原因多來自後機(待命飛機)並無與前機(起飛飛機)保持一定的安全距離，而且多發生在飛機起、降階段的近地面區域。我們的研究發現，個案「機尾亂流」肇生的天氣屬鋒前暖區、高溫高濕、水汽充沛、雲層厚實、雲量偏多、風速遞增、風向驟變、動能增加以及利於對流發展的「不穩定」大氣環境，且均屬相同機種飛機，以並排縱向多架飛行模式，也會有機會遇到「機尾亂流」；因此，在未來國防戰力展演中，尤其是在空中分列式飛行表演的課目最易發生，要特別注意。

關鍵字：機尾亂流、飛安、大氣穩定度

前 言

隨著科技的進步、資訊的飛達，人類對於時間的分配與時效的掌握，就愈形重視且嚴謹。現代航空運輸是快速、省時、高效率的交通工具之一；根據國際民航統計資料，目前國際遠程旅行，有90%以上的人員會選擇搭乘飛機。近10年的研究數據也顯示，世界民航飛行起、落架數，每年成長30%；乘客人數，也以每年50%的數量快速成長。

對於航空運輸的蓬勃發展，「飛航安全」始終是航空公司與搭乘旅客共同關切的重大願望；有句話，「飛行安全是航空運輸的生命線」，說的一點也沒錯(劉，2005)。

表一 1994至2003年飛安事件統計表

WEATHER VS. NON-WEATHER RELATED ACCIDENTS				
YEAR	TOTAL ACCIDENTS	WEATHER RELATED	NON-WEATHER RELATED	PERCENTAGE OF WEATHER RELATED TO NON-WEATHER RELATED ACCIDENTS
1994	2109	387	1722	18.3%
1995	2148	464	1684	21.6%
1996	2032	494	1538	24.3%
1997	1970	445	1525	22.6%
1998	2020	415	1605	20.5%
1999	2027	396	1631	19.5%
2000	1966	431	1535	21.9%
2001	1817	378	1439	20.8%
2002	1771	375	1396	21.2%
2003	1702	374	1328	22.0%
TOTAL	19562	4159	15403	21.3%



但是，由於航空器飛行，有大部分時間是在空中進行的；因此，受制環境大氣因素的影響與干擾程度就相當大且敏感。

美國國家運輸安全部NTSB(2004)的統計資料顯示，在1994-2003年間所發生1萬9,562的飛安事件中，有4,159件與氣象因素有關，平均約佔21.3%的比例(附表一)；其中除1994及1999年和氣象的相關性較低外(約在20%以下)，其餘年份均有相當高的對應關係，又以1996年的相關性最高，高達24.3%，顯見氣象因子與飛安維護之間關係相當密切。

我飛航安全委員會更統計近10年(自2002至2011年)民用航空運輸業所發生的飛安事件資料，進一步分析肇生階段及環境評估，研究發現，在33件的飛安事件個案中，多在落地階段，佔全數的36.4%，共有12件；事故分類最多為偏出跑道，佔全數的27.3%，共有9件；造成人員傷亡最多的則為爬升階段，此一分析結果與全球飛安事故統計結果相似。有趣的是，無論是在落地或爬升階段，在飛安事件中有近7成的個案是因為遭遇到側風；有超過5成是遭遇到尾風(流)；約3成以上是因為不穩定環境條件進場所造成(林，2008)。

氣候變化所導致「爆烈天氣」或「天氣突變」的形成，演繹過程中頻率的加快、範圍的擴大以及強度的增強，不但造成在現象預報能力上的限制，打亂原有班機安排上調度，延宕作業任務執行的掌握，並直接挑戰飛航安全係數的臨界點(林，2006)。林(2008)也指出，這種爆烈天氣的類型、發展與強度正逐漸挑戰飛安維護的極限，舉凡亂流、雷

雨、低能見度、強側風、嚴重積冰等氣象因子所發生的機率與強度也正一波波考驗著飛行器的最高安全係數以及飛行員的臨機應變處置作為。「機尾亂流」就是上述有機會導致飛安事件肇生之亂流形態中的一種，由於它事先並無顯著徵兆或特徵，常會被飛行員所忽視且疏於防範，故我們常稱它為「飛航安全的隱形殺手」。

在2001年11月12日，美國航空587號班機從甘迺迪機場起飛後不久，在紐約市皇后區附近的貝爾港墜毀，爆炸起火燃燒，造成機上251名遊客、9名機組人員及地面上5位居民，總共265人罹難(Callaghan,2005)，為美國境內傷亡第二大的空難。

事後調查結果顯示，這架失事的A300飛機，是緊跟於日本航空波音747起飛後的一分鐘後才起飛，結果未注意警戒，保持安全間距，駛進前一架飛機的「機尾亂流」之中，副機師嘗試控制拉回駕駛方向舵，使飛機保持向上，但因過度用力，令垂直尾翼瞬間承受巨大的壓力；最後脫落，飛機失去控制而墜毀。

所謂的「機尾亂流(Wake Turbulence)」，顧名思義就是一種在飛機尾端所產生的亂流。形成的原因，主要是飛機機翼上下所形成壓力差，產生升力，當機翼下方的高壓氣流流向機翼上方的低壓區時，就容易在機翼尾端產生捲狀的渦流，我們稱為「機尾亂流」。這種亂流，通常會尾隨在飛機的後面，當另一架飛機在前架飛機起飛或降落後，因未保持一定的安全間距，便容易遭遇到因前架飛機起飛或降落所造成的機尾亂

流，肇生重大的傷害與危險。自1982年以來，在17年的飛安統計資料顯示，至少有56件的飛安事故，其歸因來自於機尾亂流。

環境大氣對於航空運輸及機尾亂流有很大的影響，主要影響的關鍵參數，包含環境風場、亂流、風切、熱分層和大氣穩定度等。通常來說，橫向的風會把機尾亂流帶離安全的區域；大氣亂流也會加速機尾亂流的減弱。在大氣不穩定的情況下，會加速機尾亂流的衰變，使得飛機遭遇危險的機率減小(Gerz et. al., 2004)。

可以想見的是，未來航空器遭遇機尾亂流的機率將會與日劇增，原因是由於大型飛機的普遍使用，各大機場必須將飛機起降的間隔時間拉開，以免在大飛機起飛或降落時，受到機尾亂流的影響。但是對於航班越來越密集的機場而言，等於是限制了起降的班機架次，或是必須延長開場的時間，直接影響了飛機起降的班次與班機調度。另一方面，隨著民航市場的加速擴大，大城市附近的機場常因土地難尋，擴充跑道或新建機場的需求，面臨最為棘手又難以克服的發展限制。因此如何縮短兩架飛機起降又兼顧飛航安全，就成為了現階段飛航安全維護的重要課題(陳，2005)。

本研究嘗試從統計過往國內外飛安事件的歷史資料解讀出發，釐清機尾亂流發生的環境條件、結構特徵以及發展過程，作為後續研判診斷的基礎資料背景；隨後，透過2015年7月4日在新竹湖口基地「國防戰力展示」空中分列式的IDF戰機機隊，因當日環境氣流不穩，加上遇到前機機尾亂流，導致梯

隊左側機一度空中搖晃事件做為個案研究，經由氣象量場及綜觀分析，找出可能肇因以及有利環境特徵；最後，由交叉比對、綜合研判與診斷分析等研究手段，瞭解個案事件與過往傳統機尾亂流事件的異同，並提出具體可行的因應策略與建議方案。

機尾亂流特性

對於飛安維護而言，機尾亂流不僅僅是最能夠代表噴射機時代的產物；在一定程度上，也是伴隨著危險渦流的大氣擾動產物(Jr.,1971)，影響我飛安甚鉅。

一、特性

自1970年之來，飛機逐漸演變成為人們依賴的重要交通工具之一；對於航空器在飛行安全的提升與精進，過去做了非常多的努力及突破。對於影響飛安的「機尾亂流」特性，也有一些初步的瞭解與描述：

(一)渦流強度取決於飛機的尺寸重量和速度。

(二)飛機接近地面時，機翼兩旁的渦流會隨之減少。

(三)渦流運動常常會受環境風場的影響。

後來，經過科學的驗證也發現，飛機的重量、翼展和速度確定了渦旋的初始強度；然而環境大氣，諸如：風、穩定性、亂流等，才是最終決定渦流的運動特徵和衰減特性的關鍵因子。

二、產生過程

飛機機翼因為上下壓力差而產生升力，當機翼下方的高壓氣流流向機翼上方低壓區



時，會在機翼翼端產生捲狀的渦流（左翼為順時針，右翼為逆時針，圖一），分別製造了兩個龍捲風，前30秒這渦流的下沉率在每分鐘500呎上下，另外會向外擴張到至兩個翼面寬，渦流的大小也會受到飛機的機翼長度、重量、速度等因素影響，在較大機型的飛機起飛時，速度加速至250節，升空到1,000呎時，會產生最大的亂流，此渦流即為機尾亂流。



圖一 機尾亂流肇生型態示意圖；當飛機起飛或降落階段，機翼因為上下壓力差而產生升力，當機翼下方的高壓氣流流向機翼上方低壓區時，會在機翼翼端產生捲狀的渦流。其中，左翼為順時針捲狀渦流，右翼為逆時針捲狀渦流。

三、伴隨的天氣條件

當環境大氣的低層隸屬平靜或非常小的風力分布下(或是在高層地區，空氣則要比較稀薄)，機尾亂流肇生的機率相對較高。

根據研究，在某些情況下，假如是無風、無亂流的穩定大氣環境，會使得機尾亂流綿延得更長；甚至要比一般的大氣亂流強度還要來得強 (Lang et al.,2010)。

四、消散過程

機尾亂流的消散過程非常複雜，且與大氣環境條件息息相關。以下為可能肇致消散的相關過程：

1.大氣亂流

大氣亂流在渦旋的消散中扮演重要的角色。大氣亂流中有一種黏滯力。這種力會從渦旋中提取能量，所以當大氣亂流越強，渦旋消散的速度也越快。這也表示，在天氣不穩定的情況下，通常機尾亂流是不易持續的。

2.黏性的相互作用

由於空氣流體本身就具有抵抗黏滯的特性，在經過外力強迫作用，進行空間重新調整的情況下，對於之後的環境大氣層，就會產生一個逆轉向上的作用力，這股力量慢慢從渦旋中提取能量，削減原本機尾亂流的強度，使得兩者之間的交互作用更為顯著。

3.浮力

向上的作用力發生在機尾亂流的渦旋上，因為渦旋內部的空氣密度比外面小；這股力量也會慢慢從渦旋中提取能量，削減原本機尾亂流的強度。

4.渦旋的不穩定性

在大氣中少量亂流可以創造給渦旋另外一種對抗抵銷的力量，造成不同型式的不穩定度。當渦旋鏈接偶合，機尾亂流的強度亦將迅速衰減(表二)。

在平靜的大氣條件下，它有可能使渦旋持續，雖然實力弱得多，但超出由美國聯邦航空局FAA規定的機尾亂流飛機間隔距離。在亂流大氣條件下，之後可能持續的機尾亂流間隔距離只有一小部分。

機尾亂流對飛安的影響

當起降過程中遭遇到機尾亂流，對於

表二 機尾亂流肇生的環境條件、結構特徵及發展過程分析表

環境條件	大小受到前一架飛機機翼的長度和配置、重量、速度、體積相對大小、軌跡、貼近地面程度、相對於軌道的風速、環境風速、亂流等因素所影響，當環境大氣的低層隸屬平靜或非常小的風力分布下（或是在高層地區，空氣則要比較稀薄），機尾亂流肇生的機率相對較高。 根據研究，在某些情況下，假如是無風、無亂流的穩定大氣環境，會使得機尾亂流綿延得更長；甚至，要比一般的大氣亂流強度還要來得強。
結構特徵	渦流通常可持續1至3分鐘，渦流的下沉率約在每分鐘500呎上下，機尾亂流延伸的長度可達1,000呎，垂直高度500至900呎(以波音747為例)；根據統計顯示，環境大氣的變異，諸如：風、穩定性、亂流等，才是最終決定渦流的運動特徵和衰減特性的關鍵因子。
發展過程	飛機機翼因為上下壓力差而產生升力，當機翼下方的高壓氣流流向機翼上方低壓區時，會在機翼翼端產生捲狀的渦流（左翼為順時針，右翼為逆時針），分別製造了兩個龍捲風，前30秒這渦流的下沉率在每分鐘500呎上下，另外會向外擴張到至兩個翼面寬，渦流的大小也會受到飛機的機翼長度、重量、速度等因素影響，在較大機型的飛機起飛時，速度加速至250節，升空到1,000呎時，會產生最大的亂流，此渦流即為機尾亂流。

原先的飛行計劃或是事後的起降調度，都是件相當困擾的挑戰。因為每一架飛機的間隔起飛時間，會影響到一天之內可以飛多少航班，進而影響經濟效益。尤其是近年來搭乘飛機的成長率逐年攀升，飛機機型也越做越大，在機場跑道要容納眾多大型飛機，又要兼顧經濟效益與乘客安全，機尾亂流就扮演著非常關鍵的影響因子。

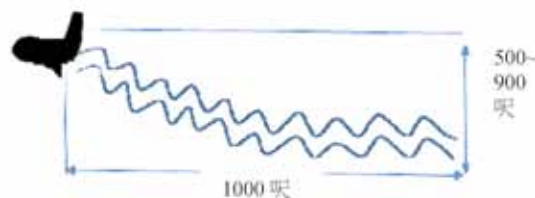
機尾亂流通常是無法在事先就用人眼所觀測到的，當機尾亂流發生時，會有一個高度有組織的循環流動，一個相對穩定對稱的幾何形狀，會持續好一段時間。在亂流的組織階段是最危險的，當飛機遇到機尾亂流時，瞬間會產生極大的上下震動，機師或是飛行員根據慣性反射動作，會做震盪的反方向去操作，假若遇到如波音747的大型空中巴

士，所產生的機尾亂流非常劇烈，一般小型機將會承受不住劇烈機尾亂流所產生的震晃而導致飛安事件。

風險管理的概念，起飛和降落階段是飛機最危險的時刻，以波音747為例，將在起飛後50至100呎處偵測到機尾亂流(圖二)，許多起飛安事件皆是未保持安全的起飛降落距離而導致直接墜毀；但仍有不少事件，是在飛機飛行離地的垂直高度中發生。機尾亂流延伸的長度可達1,000呎，垂直高度500至900呎(圖三)，在空中兩架機也必須保持安全距離，以免發生飛安事件。



圖二 機尾亂流飛機起飛、降落示意圖，以波音747為例，將在起飛後50至100呎處偵測到機尾亂流，降落時亦是如此，在低於這個高度時，亂流會顯得相當微弱。



圖三 機尾亂流垂直示意圖，垂直高度500至900呎，水平長度約1,000呎，在空機也應保持垂直安全間距，避免吃到上機的機尾亂流。

因機尾亂流所肇生的飛安事件

「機尾亂流」－飛航安全的隱形殺手，通常在飛行過程中(包含起飛、降落)，不易



被飛行員察覺，也不易被辨認，更不易被飛行員防範。一旦遭遇機尾亂流，常常無法及時應變，瞬間造成飛機失控，導致重大傷亡，後果非常嚴重。

表三 過去50年，因機尾亂流所肇生的飛安事件統計表

時間	簡述
1966 6月8日	XB-70與 F-104相撞，雖然確切的原因不是很清楚，據實是因為XB-70為增加升力，產生較大的機尾亂流，導致與F-104相撞。
1972 5月30日	DC-9在 Greater Southwest International Airport 墜毀。因為它在 DC-10之後降落。這次的飛安事件使得FAA對於在重型飛機後降落的最短安全距離有了新規定。
1993 12月15日	五個人搭著一臺租用飛機，包括In-N-Out漢堡的總裁Rich Snyder，在John Wayne Airport墜毀。該機緊跟在波音757之後降落，捲進波音757的機尾亂流之中。
1994 9月8日	USAir Flight 427 在鄰近Pittsburgh的地方墜毀。該事故被認為涉及機尾亂流，但主要的原因是方向舵控制組件的操作不當。
1999 9月20日	JAS 39A Gripen 從Airwing F 7 Sätenäs 起飛，在瑞典的 Lake Vänern墜毀，當時正在空戰機動演習。通過其他飛機的機尾亂流後，Gripen 突然改變方向，飛行員Rickard Mattsson收到將撞向地面的預警系統警告，並從飛機上跳出，在湖面上安全降落。
2001 11月12日	Airbus A300從John F.Kennedy International Airport起飛後不久墜入紐約皇后區的百麗港附近。兩機未保持安全距離，A300吃到波音747的機尾亂流，以及飛行員操作失誤，導致駕駛舵故障及垂直尾翼的分離。
2008 7月8日	美國空軍的PC-12教練機墜毀Hurlburt Field, Fla.，因為飛行員試圖降落於緊密的AC-130U武裝直升機，結果夾在武裝直升機的機尾亂流中。空軍規則要求至少要間隔兩分鐘才能降落，但PC-12未依飛航規定約40秒就降落於武裝直升機後。由於PC-12吃到機尾亂流，突然轉向左側，開始上下轉動。教官停止滾動，但在此之前，飛機左翼撞到了地面，停在669呎外的場地。
2008 11月3日	空中巴士A380機尾亂流事件，在澳洲的Sydney Airport。空中巴士A380-800的機尾亂流造成 Saab 340接近平行跑道時，短暫的失去控制。
2008 11月4日	墨西哥政府的Learjet45 XC-VMC，墨西哥內政部部長 Juan Camilo Mourino在飛機上，墜毀於 Mexico City International Airport。飛機起飛時，緊跟在767-300之後和重型直升機之前。飛行員並沒有告知飛機要接近的消息，也沒有降低速度的情形。

2014 3月28日	印度空軍的C-130J-30 KC-3803墜毀於Gwalior附近，機上五人全數罹難。這架飛機正在進行300呎的低水平滲透訓練，由於未保持安全飛行距離，遇到了另一架飛機的機尾亂流，從而導致它的墜毀。
------------	--

由以上過去近50年，因機尾亂流所肇生的飛安事件中來看，這10起飛安事件的共同點：

- 1.前後兩架機均未保持安全飛行距離。
- 2.垂直間距隔離不足。
- 3.跟在重(大)型機種後起飛最易肇生。
- 4.一旦遭遇機尾亂流後，後果都相當嚴重。

個案分析

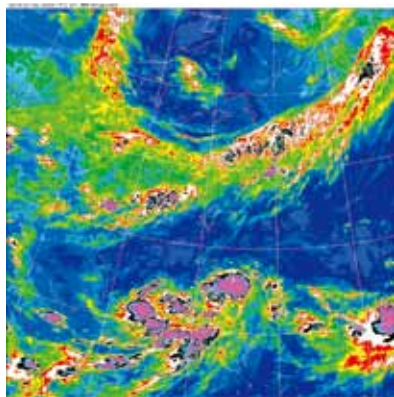
為了慶祝對日抗戰勝利70週年，國防部於2015年7月4日在新竹湖口基地舉行「國防戰力展示」，慶祝活動當然少不了「空中分列式」的表演。但沒想到，參與飛行的IDF戰機機隊在剛開始之際，就因當日環境氣流不穩，導致飛機一度空中搖晃(圖四)；所幸飛行員迅速穩住飛機操作，在短時間內完成改正，並保持大致編隊，通過觀禮臺，仍順利執行完表演科目。事後，國防部統由空軍政戰主任張哲平中將對外發言，他說：「IDF戰機梯隊的3號和4號機行經觀禮臺時因受氣流



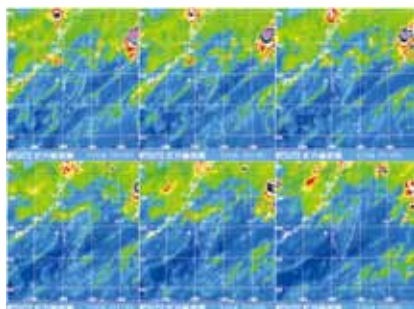
圖四 參與2015年新竹湖口基地「國防戰力展示」空中分列式的IDF戰機機隊，因當日環境氣流不穩，加上遇到前機機尾機尾亂流，導致梯隊左側機一度空中搖晃。

不穩，加上遇到前機機尾機尾亂流；造成梯隊左側機空中左右搖晃，一度機鼻揚起，並且大幅向左傾側，角度偏將90度，整個過程只約3秒鐘。」

由氣象衛星資料顯示(圖五)，從前一日(即7月3日)鋒面就開始接近臺灣，不但導致北部地區雲量增加；鋒前不穩定區所形成不同形式的零星對流或雲帶，也逐漸向臺灣北部移動(圖六)。當日天氣相當不穩定，一早天空布滿陰霾，雲層相當厚實，一度飄起小雨，一波波鋒前零星對流雲雨帶也相當活躍，觀禮來賓多撐傘進行(圖七)。



圖五 2015年7月4日0830時紅外線氣象衛星資料顯示，鋒面逐漸接近臺灣地區。

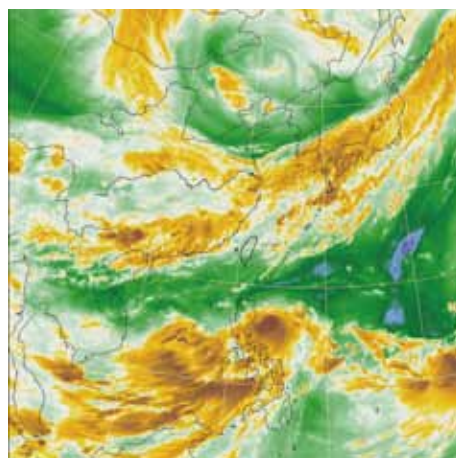


圖六 2015年7月4日0800時起，每半小時一張的紅外線氣象衛星資料(自左至右、自上至下)，顯示鋒前不穩定區所形成不同形式的對流或雲帶，也逐漸向臺灣北部移動。



圖七 當日天氣相當不穩定，雲層相當厚實，一度飄起小雨，觀禮來賓多撐傘進行。

4日，臺灣地區適位於鋒前暖區，加上位於菲律賓東部外海的蓮花颱風及其外圍環流雲雨帶(參見圖五)，臺灣地區的水汽含量是相當充沛的，由7月4日1030時氣象衛星水汽頻道的雲圖(圖八)可以發現，臺灣地區北有鋒面系統，南有颱風系統，提供給臺灣及附近地區充沛的水汽來源；這個現象，也可以從中央氣象局所屬的新竹測站逐時氣象資料得到驗證，新竹地區在4日上午，相對濕度始終都維持在83%或以上。

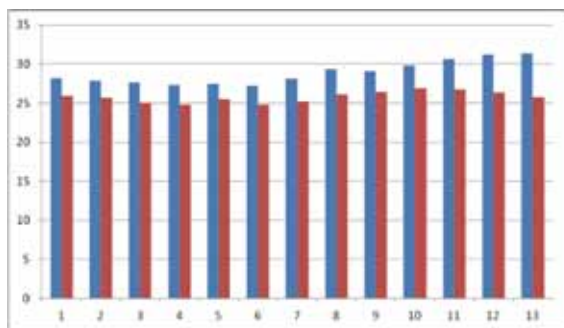


圖八 7月4日1030時氣象衛星水汽頻道的雲圖顯示，臺灣及附近地區水汽量相當充沛(圖中色階愈趨暖色系列，表示該區水汽含量愈高)，尤其是臺灣北部地區更為顯著。



中央氣象局所屬的新竹測站逐時氣象資料也反應出在此時期，溫度與露點的變化趨勢(表四)，6點時的溫度為 27.2°C ，7點就升到 28.1°C ，隨後的太陽輻射加溫效應，到了8點就超過 29°C ，11點到達 30.6°C ；露點在7點之前，仍在 24 及 25°C 之間範圍，到了8點就突破至 26.1°C ，10點更到達 26.9°C ；再從溫度露點差的結果來看，9點前後的溫度露點差只有 2.7°C ，顯見該日鋒前暖區不但溫度逐時遞增，也隸屬高濕的環境大氣。

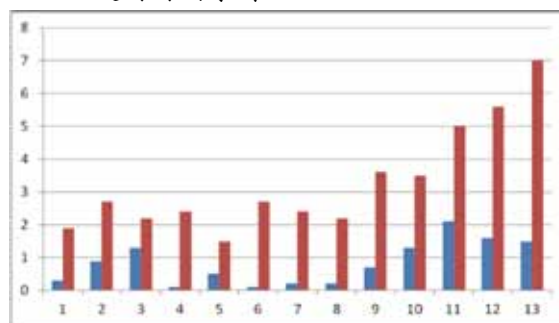
表四 中央氣象局所屬的新竹測站7月4日01時起逐時氣象資料，溫度與露點的變化趨勢。其中，藍色曲線代表溫度，紅色曲線代表露點，單位均為 $^{\circ}\text{C}$ ，橫軸為7月4日逐時時間序列



7月4日風場的變化更為敏感，從中央氣象局所屬的新竹測站逐時氣象資料顯示，當日新竹地區的平均風並不大，都在 1m/s 以下，9點之後開始增強，10點突破至 1.3m/s ，11點可達 2.1m/s ；出現最大陣風的分布，8點以前，在 1.5 及 2.7m/s 之間範圍，隨著鋒前不穩定雲系的移入，9點增強達 3.6m/s ，10點也在 3.5m/s (表五)。對應(表五)逐時的風向分布表，更可看出新竹地區原先多吹東北風到東風，8點之後開始轉為北北東風，10點之後更直接變為西風，不到3個小時，前後竟然相差

了 180 度，瞬間風向轉變及風速遞增均反應出環境條件的顯著差異以及因系統雲系移入所導致的不穩定大氣特徵。

表五 中央氣象局所屬的新竹測站7月4日01時起逐時氣象資料，平均風速與最大陣風的變化圖。其中，藍色曲線代表平均風速，紅色曲線代表最大陣風，單位均為 m/s ，橫軸為7月4日逐時時間序列

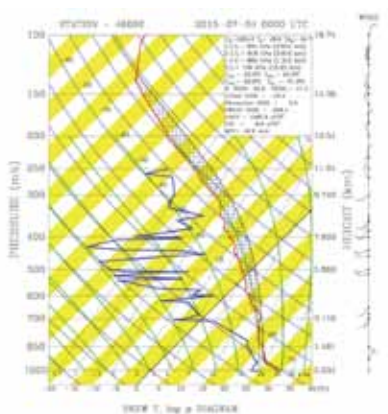


表六 中央氣象局所屬新竹測站7月4日01時起逐時風向變化氣象資料

時間	風向
1	80
2	40
3	60
4	50
5	70
6	60
7	70
8	20
9	10
10	290
11	270
12	270
13	280

透過中央氣象局所屬板橋測站於4日8時所施放的氣象高空探空資料(圖九)顯示，該日北部地區低對流層有暖平流(風向隨高度順轉)， 500hPa 以下最為明顯；LCL(舉升凝結高度)在 934hPa ，顯見北部層狀雲系的底部高度，CCL(對流凝結高度)在 916hPa ，顯見積狀雲系發展的底部高度，雲層可發展至 500hPa

附近，亦即當日雲層不但厚實，而且發展高度相當低；850hPa以下屬潮濕大氣；K index 為22.2，Sweat index為226.4，均不是穩定大氣的特徵形態；CAPE值高達1583.9 m2s-2，加上正能區遠遠大於負能區，空氣塊動能增加，對流利於發展，都是提供對流發展的垂直不穩定結構環境。



圖九 中央氣象局所屬板橋測站於4日的氣象高空探空斜溫圖。

為能反應事件前後的大氣環境差異，我們選取中央氣象局所屬板橋測站於2至4日早上08時所施放的氣象高空探空資料進行分析(表七)，發現4日無論是LCL或是CCL的發展高度都是最低，且發展雲系的厚度均為最厚，顯見當日雲厚且低；850hPa以下大氣從

表七 個案研究結果與過往傳統「機尾亂流」的肇生環境及飛行模式比較表

比較	過往傳統認知	研究個案特徵
肇生時的大氣環境	穩定的大氣環境	不穩定的大氣環境
肇生地點	多在起降階段的近地面	空中航路上
肇生時的風場	多為靜風或微風	風速大
肇生時的飛行模式	直排飛行	併排飛行
肇生時的飛行模式	橫向飛行	縱向飛行
肇生時的飛行模式	一架接一架飛行	多架同時飛行
肇生時的飛行模式	跟在大型機後	同型機飛行

3日起開始轉為潮濕，4日更為顯著；CAPE值，2日為708 m2s-2，3日為617 m2s-2，4日劇增為1583 m2s-2，顯見，7月4日當天對流可用位能增加快速，有利對流激發生長，垂直大氣環境相當不穩定。

小 結

- 一、7月4日新竹空中分列式表演，IDF戰機梯隊空中遭遇「氣流不穩」以及遇到前機「機尾亂流」，造成梯隊左側機空中左右搖晃，大幅傾側。
- 二、經分析結果發現，當日天氣屬鋒前暖區、高溫高濕、水汽充沛、雲層厚實、雲量偏多、風速遞增、風向驟變、動能增加以及利於對流發展的「不穩定」大氣環境。
- 三、綜上，在空機遭遇「機尾亂流」，是有機會在環境「不穩定」的大氣條件下肇生。

因應策略及建議

由於飛機機翼產生升力，在起飛階段，也因而會產生像是兩筒龍捲風渦旋般的機尾亂流。由於機尾亂流的大小通常與機翼的升力成正比；而機翼升力的大小，又與飛機的最大起飛重量直接相關。因此，要判斷機尾亂流的大小，飛機的機型大小就扮演著關鍵的角色。

在分類上，機尾亂流分成「小型機(Small)」、「大型機(Large)」與「重型機(Heavy)」等三類。通常，小型機指最大起飛重量1萬2,500磅以下的飛機；大型機則是



指12,500磅至30萬磅的飛機；重型機則是指大於30萬磅的飛機。如何避免機尾亂流的發生，確保飛安，一直是我們努力的最大方向與目標。

一、做好隔離分類

由於機尾亂流可能會造成後面尾隨的飛機受損或失事，因此就需要依據不同的機種，可能會產生不同類型的機尾亂流，給予不同等級的隔離分類。

資深航管員對於前後起飛不同飛機，會採取不同的隔離措施，俾防杜不同等級的機尾亂流肇生。經驗法則顯示，就起飛滑行距離而言，至少給予4~6海浬的雷達距離近場隔離；就起飛間隔時間而言，至少給予2~3分鐘的同跑道離場隔離。

二、垂直空域的管制

通常機尾亂流所伴隨的渦流，不只會發生在水平方向，也會在垂直方向滲透；這樣的渦旋以每分鐘500呎的下沉率發展，有時甚至會外擴。所以，常造成尾隨後方的飛機迅速下沉、翻滾、甚至是失控；因此，兩機飛行時，垂直空域上的管制，至少要在1,000呎以上，避免上機機尾亂流所伴隨的渦流下傳，確保飛安。

三、機場容量設計非常關鍵

機場容量與跑道容量息息相關，對一個機場而言，「跑道」就是機場運作的關鍵設施。跑道的多寡、配置的形式、其間距對於安全的影響、助導航設施的好壞等，都是影響機場容量的主要因素。而環境風向又會影響跑道設計，間接影響容量；機場周邊的「盛行風向」就成了機場跑道設計的主要因

素，在運輸工程裡面有所謂的「風玫瑰(Wind Rose)」設計法，先找出機場的盛行風向，據此決定跑道方位的設計。

影響跑道容量的另一個主要原因，就是航機的混合型態，主要是受到飛機的機尾亂流的影響。對於在巡航中的飛機來說，雷達隔離所保持的距離，早就已經大過於機尾亂流的影響範圍，所以並不會造成嚴重的影響；但對於一定要排成一條線的離場與進場航路，機尾亂流就會構成嚴重的影響，尤其在進場落地階段，機尾亂流不僅影響航機進場的穩定性，甚至可能造成安全性的危害！

四、飛機機翼尾端的改良設計

以美國航空587班次為例子，波音747跑道開始滑行起飛，渦流將會在機頭拉起的時候開始成行。A300緊接著在相同的跑道上起飛，升空後遇到了前面飛機留下的機尾亂流，最後587航班失控墜毀在紐約皇后區。

機尾亂流所伴隨的渦流，通常也會影響到飛機翼端的升力，減低飛行效率、間接的增加耗油量；因此，許多飛機設計廠商會在機翼尾端加上小翼(Winglet)，透過外型的流力設計，來減少受限渦流的影響與干擾(圖十)。

結 論

過往，我們對於影響飛航安全的隱形殺手—「機尾亂流」的瞭解，仍以在微風或靜風等「穩定」的大氣環境下才易發生(如前歸納所述)為主；一旦環境改變，甚至於「不穩定」的機制或條件出現，「機尾亂流」的形式就會被破壞掉。



圖十 國外飛機設計廠商會在機翼尾端加上小翼(Winglet)，透過外型的流力設計，來減少受限渦流的影響與干擾

經由我們的研究結果發現，和傳統的「機尾亂流」肇生及形式比較，有以下3種差異，分述如下(如表八)：

一、傳統的「機尾亂流」肇生，多在微風或靜風等「穩定」的大氣環境下才易發生；而且，一旦環境改變，甚至於「不穩定」的機制或條件出現，「機尾亂流」的形式就會被破壞掉。研究個案中，「機尾亂流」肇生的天氣屬鋒前暖區、高溫高濕、水汽充沛、雲層厚實、雲量偏多、風速遞增、風向驟變、動能增加以及利於對流發展的「不穩定」大氣環境。

表八 個案研究結果與過往傳統「機尾亂流」的肇生環境及飛行模式比較表

比較	過往傳統認知	研究個案特徵
肇生時的大氣環境	穩定的大氣環境	不穩定的大氣環境
肇生地點	多在起降階段的近地面	空中航路上
肇生時的風場	多為靜風或微風	風速大
肇生時的飛行模式	直排飛行	併排飛行
肇生時的飛行模式	橫向飛行	縱向飛行
肇生時的飛行模式	一架接一架飛行	多架同時飛行
肇生時的飛行模式	跟在大型機後	同型機飛行

二、傳統的「機尾亂流」肇生，多發生在飛機起、降階段的近地面區域。研究個案中，「機尾亂流」肇生的實例，是發生在空中的飛行航線上；雖然，維持時間非常短。另，過往傳統「機尾亂流」肇生，多發生在飛機尾隨大型機之後進行起降，未保持安全間距；研究個案中卻是相同機種飛機也會遇到「機尾亂流」。

三、過往的「機尾亂流」肇生，原因多來自後機(待命飛機)並無與前機(起飛飛機)保持一定的安全距離。研究個案中，就算是並排縱向多架飛行也有可能發生遇到「機尾亂流」；尤其是在特殊表演(如：空中分列式)的課目中最易肇生，要特別注意。

參考文獻

- 一、林得恩，2006：氣候異變對飛航安全的影響，飛航天氣，6，15-26。
- 二、林得恩，2008：從全球氣候變遷的角度，來看飛航安全的維護，氣象預報與分析，195，15-26。
- 三、林得恩，2008：因應全球氣候變遷，對氣象因子影響我飛航安全維護應有的認識，飛地安全，475，19-29。
- 四、劉昭民，2005：大氣亂流與低空風切，航空氣象學新論，5，41-66。
- 五、<http://myweb.ncku.edu.tw/~chenjh/articles/tipvortex.pdf> (陳政宏，2009: 利用流體中的隱形殺手-翼尖渦及翼尖帆的故事)
- 六、Gerz, T., Frech, M., Hahn, K. U., Holzapfel, F., Kopp, F., Schwarz, C., ... & Tafferner, A., 2004: Atmospheric impact on wake



- vortex development, In European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, ECCOMAS P 24-28.
- 七、Jeffery A. Tittsworth, Steven R. Lang, Edward J. Johnson and Stephen Barnes, 2012: Federal Aviation Administration Wake Turbulence Program - Recent Highlights, the 57th Air Traffic Control Association (ATCA) Annual Conference & Exposition., P1-8.
- 八、O'Callaghan, J. J., 2005: Flight control and wake turbulence effects on American airlines Flight 587, In 2005 AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, AIAA-2005-6110, San Francisco, CA.
- 九、Steven Lang, Jeffrey Tittsworth, Wayne H. Bryant, Paul Wilson, Catalin Lepadatu, Donald P. Delisi, David Y. Lai, George C. Greene, 2010: Progress on an ICAO Wake Turbulence ,Re-Categorization Effort, P1-9.
- 十、<http://www.airpower.maxwell.af.mil/airchronicles/aureview/1971/jul-aug/carten.html> (Andrew S. Carten, Jr., 1971: Aircraft Wake Turbulence)
- 十一、<http://www.aopa.org/News-and-Video/All-News/1998/October/1/Wake-Turbulence-Should-You-Worry> (Bruce Landsberg, 1998, Wake Turbulence: Should You Worry?)
- 十二、https://en.wikipedia.org/wiki/Wake_turbulence
- 十三、<http://www.nts.gov/nts/query.asp> (NTSB Accident Database.)
- 十四、http://www.skybrary.aero/index.php/Wake_Vortex_Turbulence
- 十五、<http://sa.ylib.com/MagCont.aspx?Unit=newscan&id=43> (獵殺機尾殺手)

作者簡介

林得恩先生，臺灣大學大氣科學所博士，曾任空軍氣象聯隊聯隊長(2015.1.15.退役)，現為助理教授。

王泰鈞先生，現就讀國防大學理工學院，環境資訊及工程學系。

楊士禾先生，現就讀國防大學理工學院，環境資訊及工程學系。



AT-3教練機編隊飛行
(照片提供：郭元宏)